115-032-7E22
MOTC-IOT-114-H1DB008

研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2) – 設計及施工階段

交通部運輸研究所

中華民國 115 年 4 月

115-032-7E22
MOTC-IOT-114-H1DB008

研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2) – 設計及施工階段

著者：邱建國、蔡立宏、賴瑞應、黃烟宏、
楊仲家、詹穎雯、陳育聖、梁智信、
簡臣佑、羅永霖

交通部運輸研究所

中華民國 115 年 4 月

研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2)—設計及施工階段

交通部運輸研究所

GPN：1011500355

定價 500 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

題名/著者:研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引. (1/2), 設計及施工階段 / 邱建國, 蔡立宏, 賴瑞應, 黃烟宏, 楊仲家, 詹穎雯, 陳育聖, 梁智信, 簡臣佑, 羅永霖著
版本: 初版
出版: 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 115.04
識別碼: ISBN 978-986-531-760-7 (平裝) | CIP 115004363
主題詞: LCSTT: 橋梁工程 | LCSTT: 公路 | LCSTT: 鋼筋混凝土
分類號: 441.8

研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2)-設計及施工階段

著　　者：邱建國、蔡立宏、賴瑞應、黃烟宏、楊仲家、詹穎雯、陳育聖、梁智信、簡臣佑、羅永霖
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：105004 臺北市敦化北路 240 號
網　　址：www.iot.gov.tw (中文版＞數位典藏＞中心出版品)
電　　話：(04)2658-7200
出版年月：中華民國 115 年 4 月
印 刷 者：
版(刷)次冊數：初版一刷 20 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所網站
定　　價：500 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸科技及資訊組•電話：(02)2349-6789
國家書店松江門市:104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話：(02)2518-0207
五南文化廣場：400002 臺中市中山路 6 號•電話：(04)2226-0330

GPN：1011500355　　ISBN：978-986-531-760-7(平裝)
著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)
本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2)–設計及施工階段</td></tr>
<tr><td>國際標準書號(或叢刊號)
ISBN 978-986-531-760-7（平裝）</td><td>政府出版品統一編號
1011500355</td><td>運輸研究所出版品編號
115-032-7E22</td><td>計畫編號
MOTC-IOT-114-H1DB008</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：
運輸技術研究中心
主管：蔡立宏
計畫主持人：蔡立宏
研究人員：賴瑞應、黃烟宏
聯絡電話：(04)2658-7200
傳真號碼：(04)2657-1329</td><td colspan="2">合作研究單位：財團法人臺灣營建研究院
計畫主持人：邱建國
協同主持人：楊仲家、詹穎雯、陳育聖、梁智信
研究人員：何季軒、簡臣佑、梁喬茵、張俊輔、羅永霖
地址：新北市新店區中興路二段 190 號 11 樓
聯絡電話：(02)89195000</td><td>研究期間
自 114 年 4 月

至 115 年 4 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：鐵公路橋梁防蝕設計、混凝土耐久性設計、生命週期</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：
海島型環境之臺灣長年受高溫、高濕與高鹽份影響，導致金屬與混凝土結構物極易發生腐蝕劣化，嚴重縮短公共設施使用壽命，影響安全與維護成本。過往國內缺乏完整大氣腐蝕因子調查與環境分級機制，致使規劃設計階段僅依最低防蝕規範辦理，未能充分考量結構物生命週期成本，造成橋梁與結構物在短期內面臨維修或重建之窘境。隨著行政院公共工程委員會修訂「公共建設工程經費估算編列手冊」明確要求將全生命週期成本納入規劃評估，防蝕策略重要性更形凸顯。
本計畫在此背景下提出，透過案例蒐集、規範檢討與產學合作，建立因應不同腐蝕環境之設計準則與維護指引，期望能有效提升鐵公路橋梁的耐久性與使用效益，並兼顧減碳與永續發展。本計畫工作分為2年期進行，第1年期之工作包含「鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查」、「鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討」、「不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議」、「防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例」，以「研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引」；第2年期之工作包含「鐵公路橋梁防蝕維護管理作業規定探討」、「防蝕維護管理與修護工法作業規定及圖說範例」、「建立橋梁防蝕技術於不同大氣腐蝕環境下之全生命週期成本最佳化評估方法」，以「研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之全生命週期防蝕技術指引」，各年期依其成果辦理成果說明會，並投稿至相關國內外期刊、學術研討會等。
成果效益與應用情形
本計畫預計完成 1 本計畫報告及 1 本技術指引，可提供交通部及部屬機關(構)進行鐵公路橋梁防蝕規劃設計、施工及維護管理之應用。提供行政院公共工程委員會納入相關施工規範或手冊修訂參考及本所後續研究參用。</td></tr>
</table>

出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
115 年 4 月	1058	500	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。

備註：本計畫之結論與建議不代表交通部之意見。

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Development of Corrosion Protection Guidelines for Railway and Highway Bridges (1/2) - Design and Construction Stage

ISBN (OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
978-986-531-760-7 (pbk)	1011500355	115-032-7E22	MOTC-IOT-114- H1DB008

DIVISION:Transportation Technology Center
DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Li-Hung Tsai
PROJECT STAFF: Jui-Ying Lai, Yan-Hong Huang
PHONE: (04)2658-7200
FAX: (04)2657-1329

PROJECT PERIOD

FROM April 2025

TO April 2026

RESEARCH AGENCY: Taiwan Construction Research Institute
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chien-Kuo Chiu
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chung-Chia Yang, Ying-Wen Chan, Yu-Sheng Chen, Chih-Hsin Liang
PROJECT STAFF: Chi-Hsuan Ho, Chen-Yu Chien, Chiao-Yin Liang, Chun-Fu Chang, Yung-Lin Lo
ADDRESS: 11F., No. 190, Sec. 2, Zhongxing Rd., Xindian Dist., New Taipei City, Taiwan (R.O.C.)
PHONE: (02)8919-5000

KEY WORDS: Corrosion Control Design for Railway and Highway Bridges, Durability Design of Concrete Structures, Service Life.

Abstract:

Taiwan's island-type environment, characterized by long-term exposure to high temperature, high humidity, and high salinity, significantly accelerates corrosion and deterioration of metallic and concrete structures. This phenomenon shortens the service life of public infrastructure, adversely affecting structural safety and increasing maintenance costs. In the past, the absence of a comprehensive investigation of atmospheric corrosion factors and an environmental classification system in Taiwan resulted in planning and design practices that relied primarily on minimum corrosion protection requirements, without sufficient consideration of life-cycle cost. Consequently, many bridges and structures have required maintenance or reconstruction within a relatively short period. Following the revision of the Manual for Budget Estimation and Compilation of Public Construction Projects by the Public Construction Commission, Executive Yuan, which mandates the inclusion of life-cycle cost assessment, the significance of corrosion protection strategies has become more pronounced.

In response, this project aims to establish corrosion protection design criteria and maintenance guidelines for railway and highway bridges under different atmospheric corrosion environments through case studies, specification reviews, and industry–academia collaboration. The project is planned as a two-year program. The first year focuses on investigations of current design practices, reviews of durability-related specifications, development of corrosion protection strategies and design recommendations, and preparation of construction quality control procedures and sample drawings, culminating in the Design and Construction Technical Guidelines for Corrosion Protection of Railway and Highway Bridges. The second year addresses maintenance and management practices, repair methods, and the development of an optimized life-cycle cost evaluation methodology, leading to the Life-Cycle Corrosion Protection Technical Guidelines for Railway and Highway Bridges. Project outcomes will be disseminated through technical briefings and submissions to relevant domestic and international journals and conferences.

BENEFITS AND APPLICATIONS:

This study is expected to produce one comprehensive research report and one technical guideline, which can be applied by the Ministry of Transportation and Communications and its subordinate agencies for the planning, design, construction, and maintenance management of corrosion protection for railway and highway bridges. The results will also serve as reference material for revisions to relevant construction specifications or manuals by the Public Construction Commission, Executive Yuan, and for future research conducted by the institute.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE
Apr. 2026	1058	500

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

目錄

目錄 V
圖目錄 VIII
表目錄 XVI
第一章 計畫概述 1-1
1.1 計畫緣起 1-1
1.2 計畫工作內容 1-2
1.3 預期完成之工作項目及具體成果 1-7
第二章 鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查 2-1
2.1 國內橋梁防蝕設計案例 2-1
2.1.1 混凝土橋 2-1
2.1.2 鋼橋 2-49
2.1.3 鐵公路橋梁劣化原因分析 2-84
2.2 其他各類交通設施遭遇之腐蝕問題 2-90
第三章 鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討 3-1
3.1 混凝土橋耐久性設計規範 3-1
3.1.1 國外耐久性設計規範 3-1
3.1.2 國內耐久性設計規範 3-36
3.1.3 混凝土耐久性設計規範探討 3-52
3.2 鋼橋耐久性設計規範 3-59
3.2.1 國內防蝕設計規範與手冊 3-59
3.2.2 國外防蝕設計規範與手冊 3-78
3.2.3 防蝕方法比較 3-86

第四章　不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議.....4-1
4.1 混凝土橋.....4-3
4.1.1 混凝土橋腐蝕機理.....4-3
4.1.2 混凝土橋防蝕設計.....4-18
4.1.3 中性化環境之設計標準建議.....4-29
4.1.4 鹽害環境之設計標準建議.....4-32
4.1.5 硫酸鹽環境之設計標準建議.....4-50
4.1.6 附加保護措施.....4-55
4.2 鋼橋.....4-86
4.2.1 鋼橋腐蝕機理.....4-86
4.2.2 鋼橋防蝕考量與方法.....4-101
4.2.3 塗裝之設計標準建議.....4-119
4.2.4 耐候性鋼材之設計標準建議.....4-129
4.2.5 熱浸鍍鋅之設計標準建議.....4-142
4.2.6 金屬熔射之設計標準建議.....4-149
第五章　防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例.....5-1
5.1 混凝土橋.....5-1
5.1.1 考量防蝕的結構設計.....5-1
5.1.2 耐久性試驗.....5-10
5.1.3 材料.....5-20
5.1.4 施工.....5-25
5.1.5 品質管制.....5-36
5.2 鋼橋.....5-45
5.2.1 塗裝.....5-45

5.2.2 耐候性鋼材.....5-67
5.2.3 熱浸鍍鋅.....5-80
5.2.4 金屬熔射.....5-110
第六章 研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引.....6-1
6.1 混凝土橋篇.....6-1
6.2 鋼橋篇.....6-5
第七章 辦理研究成果說明會(3 場次).....7-1
7.1 鋼橋篇.....7-1
7.2 混凝土橋篇.....7-10
7.3 混凝土橋篇與鋼橋篇.....7-21
第八章 結論與建議.....8-1
8.1 結論.....8-1
8.2 建議.....8-5
參考文獻.....參-1
附錄一 各月工作會議意見回覆表.....附 1-1
附錄二 期中審查意見回覆表.....附 2-1
附錄三 期末審查意見回覆表.....附 3-1
附錄四 期末簡報.....附 4-1

圖目錄

圖 1.1 計畫期程控管圖.....1-8
圖 2.1 案例橋梁全景.....2-2
圖 2.2 上部結構標準斷面圖.....2-2
圖 2.3 橋墩處標準斷面圖.....2-3
圖 2.4 案例橋梁鑽心取樣位置圖.....2-5
圖 2.5 案例橋梁鑽心試體氯離子含量迴歸分析結果圖(P2-1 與 P2-2)2-7
圖 2.6 非臨海地區跨河市區道路橋梁改建後照片.....2-11
圖 2.7 非臨海地區跨河市區道路橋梁示意圖與照片.....2-11
圖 2.8 非臨海地區跨河市區道路橋梁構件劣化照片.....2-13
圖 2.9 臨海公路橋梁案例 PA11 試驗點位置(S11-2、PA11-L-4).....2-18
圖 2.10 臨海公路橋梁案例大梁底面碳纖維貼覆斷面圖及詳圖 2-22
圖 2.11 臨海公路橋梁案例橫隔梁底面碳纖維貼覆斷面圖及詳圖....2-22
圖 2.12 臨海公路橋梁案例墩柱柱身打除示意圖.....2-23
圖 2.13 臨海公路橋梁案例墩柱柱身打除示意圖.....2-23
圖 2.14 臨海公路橋梁橋墩標準斷面圖.....2-24
圖 2.15 臨海公路橋梁混凝土破損鋼筋銹蝕情形.....2-25
圖 2.16 臨海公路橋梁混凝土墩柱包覆平面示意圖.....2-28
圖 2.17 臨海公路橋梁混凝土墩柱包覆平面(斷面 A-A)示意圖.....2-29
圖 2.18 臨海公路橋梁混凝土墩柱包覆側視示意圖.....2-30
圖 2.19 臨海公路橋梁混凝土保護層修復鋼筋除銹示意圖.....2-31
圖 2.20 臨海公路橋梁混凝土保護層修復施工步驟.....2-31
圖 2.21 臨海公路橋梁立面圖.....2-32

圖 2.22 臨海公路橋梁墩柱斷面圖.....2-33
圖 2.23 臨海公路橋梁橋梁劣化照片.....2-34
圖 2.24 混凝土表層修復工序.....2-37
圖 2.25 離島跨海公路橋梁照片.....2-38
圖 2.26 離島跨海公路橋梁僑梁配置圖.....2-39
圖 2.27 離島跨海公路橋梁鍍鋅鋼筋生產及現場施工照片.....2-42
圖 2.28 臨海跨河公路橋梁照片.....2-43
圖 2.29 臨海跨河公路橋梁案例立面圖.....2-43
圖 2.30 基隆臨海鋼箱型拱橋照片.....2-49
圖 2.31 基隆臨海鋼箱型拱橋立面圖.....2-50
圖 2.32 基隆臨海鋼箱型拱橋鋼索圖.....2-50
圖 2.33 基隆臨海鋼箱型拱橋大梁與拱圈劣化照片.....2-51
圖 2.34 基隆臨海鋼箱型拱橋箱梁內劣化照片.....2-51
圖 2.35 基隆臨海鋼箱型拱橋各構件塗裝示意圖.....2-54
圖 2.36 港區聯絡鋼拱橋 C5、C9、C12 鋼索、端錨與錨頭照片 2-59
圖 2.37 桃園漁港聯絡鋼拱橋照片.....2-61
圖 2.38 桃園漁港聯絡鋼拱橋劣化照片.....2-61
圖 2.39 桃園漁港聯絡鋼拱橋螺栓判斷等級照片.....2-65
圖 2.40 縣道公路鋼拱橋劣化照片.....2-67
圖 2.41 關渡橋配置圖.....2-71
圖 2.42 大梁與拱圈版厚配置圖.....2-71
圖 2.43 各鋼索位置與編號.....2-71
圖 2.44 鋼梁外部靠內側接頭螺栓群水漬情形.....2-72
圖 2.45 鋼梁外部靠內側接頭螺栓群水漬情形.....2-73

圖 2.46 U-Rib 螺栓補強照片 2-74
圖 2.47 鋼床板銹蝕破洞補強示意圖(摘自 2010 年日本土木學會鋼床版疲勞).....2-74
圖 2.48 主橋分離段橋面車道配置.....2-75
圖 2.49 中和快速道路高架橋平面位置圖.....2-78
圖 2.50 中和快速道路高架橋平面斷面圖(門架式).....2-79
圖 2.51 中和快速道路高架橋主梁吊裝照片.....2-79
圖 2.52 中和快速道路高架橋膜厚量測照片.....2-80
圖 2.53 中和快速道路高架橋膜厚量測結果.....2-80
圖 2.54 中和快速道路高架橋鋼構件現況照片(第 23 年).....2-81
圖 2.55 鐵路跨河桁架橋案例照片(完工後).....2-82
圖 2.56 隧道滲漏水照片.....2-93
圖 2.57 港灣設施腐蝕劣化照片.....2-95
圖 2.58 捷運高架橋梁段腐蝕照片.....2-96
圖 2.59 捷運地下隧道段段劣化照片.....2-96
圖 2.60 機場設施建物腐蝕劣化照片.....2-97
圖 3.1 橋梁鹽害腐蝕環境分區示意圖.....3-2
圖 3.2 失效機率函數與失效機率(P-S-T)圖.....3-7
圖 3.3 混凝土結構劣化損傷機率模型.....3-8
圖 3.4 SLD 極限狀態.....3-18
圖 3.5 鹽害對策地域區分圖.....3-22
圖 3.6 飛來鹽份採集器布設位置(左)與示意圖(中)及實體照片(右).3-43
圖 3.7 氯鹽量隨離海岸線距離分布曲線圖.....3-44
圖 3.8 各地區臨海點 3 年平均之年均氯鹽量比較圖.....3-45

圖 3.9 既有濱海橋梁鑽心試驗之位置圖.....3-45
圖 3.10 鑽心試體不同深度切片的氯離子濃度分布及迴歸曲線圖 ...3-46
圖 3.11 表面氯離子濃度與氯鹽量之對數(左)及折線(右)關係圖 3-47
圖 3.12 表面氯離子濃度與氯鹽量之折線關係圖.....3-47
圖 3.13 鹽害對策地域區分圖.....3-48
圖 3.14 各國理論公式型耐久性設計規範時間函數比較.....3-57
圖 3.15 大氣腐蝕性分類流程圖.....3-63
圖 3.16 方形管狀桁架構造物圖例.....3-69
圖 3.17 熱浸鍍鋅層橫截面之金相組織圖例.....3-70
圖 3.18 鍍鋅層附著量與 Si 含量之關係圖例 3-70
圖 3.19 鍍鋅層厚度與(Si %+2.5×P %)量之關係圖例 3-71
圖 3.20 防蝕設計流程.....3-79
圖 4.1 鋼筋腐蝕的電化學反應.....4-3
圖 4.2 鐵及其腐蝕產物之相對體積關係.....4-8
圖 4.3 硫酸鹽導致之混凝土開裂行為 (左:120 天、右:240 天).....4-14
圖 4.4 鋼筋腐蝕階段.....4-18
圖 4.5 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖.....4-24
圖 4.6 鹽害環境下作用等級之建議分區及範圍示意圖.....4-33
圖 4.7 28 天齡期 RCM 試驗與養護齡期 90 天貯鹽試驗結果關係圖 4-43
圖 4.8 56 天齡期 RCM 試驗與養護齡期 90 天貯鹽試驗結果關係圖 4-43
圖 4.9 陰極保護設計流程圖.....4-72
圖 4.10 犧牲陽極保護系統示意圖.....4-73
圖 4.11 外加電流陰極保護系統示意圖.....4-73
圖 4.12 鋼材腐蝕的電化學反應.....4-86

圖 4.13 鋼橋典型的腐蝕分類.....4-87
圖 4.14 電氣絕緣示意圖.....4-89
圖 4.15 孔蝕示意圖.....4-89
圖 4.16 間隙腐蝕示意圖.....4-90
圖 4.17 2024 年一年期潤濕時間圖(左)、氯鹽沉積速率圖(右).....4-97
圖 4.18 2024 年二氧化硫沉積速率圖.....4-97
圖 4.19 2024 年碳鋼(左)、鋅(右)年腐蝕速率 ISO 分級圖.....4-98
圖 4.20 2024 年銅(左)、鋁(右)年腐蝕速率 ISO 分級圖.....4-98
圖 4.21 鋼橋防蝕方法.....4-103
圖 4.22 防蝕設計流程圖.....4-109
圖 4.23 塗裝防蝕設計流程圖.....4-120
圖 4.24 角部曲面型式示意圖.....4-126
圖 4.25 耐候性鋼材緻密氧化層的生成機制.....4-129
圖 4.26 日本耐候鋼無需塗裝的適用範圍.....4-134
圖 4.27 JIS 耐候性鋼的腐蝕預測曲線.....4-134
圖 4.28 受融雪劑影響的大梁配置.....4-135
圖 4.29 溝槽式立體交叉橋.....4-135
圖 4.30 基於宏觀和微觀環境的耐候性鋼材使用總體概念.....4-137
圖 4.31 熱浸鍍鋅層的顯微照片.....4-142
圖 4.32 鋅、鐵的腐蝕機制.....4-143
圖 4.33 熱浸鍍鋅的防蝕機制.....4-144
圖 5.1 結構物接角圓弧化示意圖.....5-1
圖 5.2 上承式與下承式斷面受拉應力大小之比較.....5-2
圖 5.3 斷面通風性比較.....5-3

圖 5.4 混凝土箱型梁排水系統示意圖.....5-4
圖 5.5 端錨封頭示意圖.....5-6
圖 5.6 混凝土橋上部結構排水設施示意圖.....5-7
圖 5.7 帽梁頂部排水設計示意圖.....5-8
圖 5.8 混凝土劣化因素示意圖.....5-11
圖 5.9 RCPT 試驗設備.....5-13
圖 5.10 RCM 試驗照片與示意圖.....5-15
圖 5.11 侵入深度量測示意圖.....5-15
圖 5.12 貯鹽試驗示意圖.....5-17
圖 5.13 含混凝土橋面板之鋼橋塗裝示意圖.....5-45
圖 5.14 鋼床板及鋼箱梁塗裝示意圖.....5-46
圖 5.15 螺栓接合部塗裝系統示意圖.....5-47
圖 5.16 角部曲面型式示意圖.....5-47
圖 5.17 腹板連接板範例.....5-69
圖 5.18 I 型梁底部翼板連接板範例.....5-69
圖 5.19 翼板等水平構件應避免的結構示意圖.....5-71
圖 5.20 導水用的排水溝或邊牆應避免的結構示意圖.....5-72
圖 5.21 防止橋面板設置前銹蝕污染的範例.....5-72
圖 5.22 下部結構(橋台)上方塗裝範圍範例.....5-74
圖 5.23 地面接近區域下的局部塗裝範例.....5-74
圖 5.24 撒布融雪劑情況下的局部塗裝範例.....5-74
圖 5.25 箱型梁的分割方法示意圖.....5-82
圖 5.26 箱型梁分割法典型範例.....5-82
圖 5.27 支承處接頭範例.....5-83

圖 5.28 中隔板型式示意圖.....5-86
圖 5.29 隔板開口和扇形孔形狀範例.....5-87
圖 5.30 端部隔板型式範例.....5-87
圖 5.31 端部支撐側構件的浸入方式示意圖.....5-87
圖 5.32 構件端部較寬時的接頭位置範例.....5-88
圖 5.33 中間支撐處隔板型式範例.....5-88
圖 5.34 構件浸入方式和排氣孔示意圖.....5-89
圖 5.35 垂直和斜向構件收窄結構變化範例.....5-89
圖 5.36 隔板開口範例.....5-90
圖 5.37 對接方法詳圖.....5-90
圖 5.38 箱型斷面詳圖.....5-91
圖 5.39 加勁板安裝位置範例.....5-92
圖 5.40 水平向加勁板端部範例.....5-92
圖 5.41 豎向加勁板端部範例.....5-92
圖 5.42 防止膨脹的加勁板範例.....5-93
圖 5.43 防止未鍍區域的細部範例.....5-94
圖 5.44 改善熔融鋅滴落範例.....5-94
圖 5.45 預防不熱浸鍍鋅範例.....5-95
圖 5.46 摩擦接合面處理範圍範例.....5-98
圖 5.47 懸掛吊具和浸沒狀態範例.....5-101
圖 5.48 鋼構件熱浸鍍鋅作業流程.....5-104
圖 5.49 未分割箱梁浸沒方式示意圖.....5-106
圖 5.50 熔射的作業條件示意圖.....5-110
圖 5.51 2R 以上倒角範例.....5-112

圖 5.52 加勁板切口範例.....5-112
圖 5.53 熔射困難部位示意圖.....5-114
圖 5.54 熔射困難部位(狹窄部位)示意圖.....5-114
圖 5.55 熔射困難部位(螺栓部位)示意圖.....5-114
圖 5.56 金屬熔射方法配置及成膜機制示意圖.....5-117
圖 5.57 金屬熔射施工流程圖.....5-118
圖 6.1 混凝土橋篇組成架構.....6-2
圖 6.2 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖.....6-4
圖 6.3 指引組成架構與參考順序.....6-6
圖 6.4 防蝕設計流程圖.....6-7
圖 7.1 第一場成果說明會辦理情形.....7-3
圖 7.2 第二場成果說明會辦理情形.....7-12
圖 7.3 第三場成果說明會辦理情形.....7-22

表目錄

表 2-1 本案彙整之案例橋梁 2-1

表 2-2 案例橋梁鋼筋與預力混凝土相關設計標準 2-4

表 2-3 案例橋梁混凝土中氯離子含量檢測結果 2-6

表 2-4 案例橋梁鑽心試體氯離子含量迴歸分析結果 2-6

表 2-5 臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究總期末報告鹽害環境下作用等級 2-7

表 2-6 日本混凝土標準示方書(2012)混凝土表面氯離子含量 C_0(kg/m^3) 2-7

表 2-7 相關規範鋼筋保護層厚度比較表(設計年限 50 年，單位 cm).2-9

表 2-8 P2 橋墩鋼筋位置之氯離子含量(依據 P2-1 試體).....2-9

表 2-9 SPAN9 橋孔預力混凝土箱型梁鋼筋位置之氯離子含量(依據 P8-6 試體) 2-10

表 2-10 非臨海地區跨河市區道路橋梁基本資料表 2-12

表 2-11 臨海公路橋梁案例材料及鋼筋保護層厚度相關規定 2-15

表 2-12 臨海公路橋梁案例振動單元表 2-16

表 2-13 鹽害環境下作用等級(104 年公路橋梁設計規範).....2-16

表 2-14 鹽害環境下混凝土品質要求(104 年公路橋梁設計規範) 2-16

表 2-15 鹽害環境下主要構件鋼筋最小保護層厚度(104 年公路橋梁設計規範) 2-16

表 2-16 鹽害環境作用等級分區範圍 2-17

表 2-17 鹽害環境作用等級分區之地域劃分 2-17

表 2-18 臨海公路橋梁案例大梁氯離子含量檢測表 2-18

表 2-19 臨海公路橋梁案例橋墩氯離子含量檢測表 2-19

表 2-20 臨海公路橋梁構件混凝土氯離子含量試驗成果表 2-26
表 2-21 臨海公路橋梁構件單元耐震評估分析(以分析單元五、六為例) 2-26
表 2-22 臨海公路橋梁鑽心試體氯離子含量迴歸分析結果 2-36
表 2-23 臨海公路橋梁構件鋼筋位置之氯離子含量 2-36
表 2-24 臨海公路橋梁構件修補材料規格 2-37
表 2-25 離島跨海公路橋梁鋼筋保護層厚度規定 2-41
表 2-26 臨海跨河公路橋梁案例西側上下匝道橋梁結構配置表 2-43
表 2-27 臨海跨河公路橋梁案例東側交流道橋梁結構配置表 2-44
表 2-28 臨海跨河公路橋梁案例考量之海水中環境分區 2-45
表 2-29 臨海跨河公路橋梁案例各構件設計年限 2-45
表 2-30 臨海跨河公路橋梁案例各齡期耐久性設計之混凝土氯離子擴散係數.....2-47
表 2-31 臨海跨河公路橋梁案例最大裂縫寬度 2-47
表 2-32 臨海跨河公路橋梁案例鋼筋保護層厚度規定 2-48
表 2-33 臨海跨河公路橋梁案例附加保護措施及範圍 2-49
表 2-34 基隆臨海鋼箱型拱橋鋼橋油漆內面(維修)(Type A) 2-53
表 2-35 基隆臨海鋼箱型拱橋鋼橋油漆內面(維修)(Type B) 2-53
表 2-36 基隆臨海鋼箱型拱橋鋼橋油漆、鋼構除銹及防蝕塗裝 2-53
表 2-37 港區聯絡鋼拱橋基本資料 2-55
表 2-38 港區聯絡鋼拱橋鋼索與上下端錨損害情況 2-58
表 2-39 桃園漁港聯絡鋼拱橋鋼橋外露面(銹蝕處)塗裝系統.....2-63
表 2-40 港區聯絡鋼拱橋螺栓規格要求 2-64
表 2-41 港區聯絡鋼拱橋螺栓更換判斷標準 2-65

表 2-42 港區聯絡鋼拱橋螺栓更換判斷標準(除去漆身表面).....2-66
表 2-43 縣道公路鋼拱橋原設計防蝕塗裝系統 2-66
表 2-44 縣道公路鋼拱橋修復塗裝系統 2-69
表 2-45 臨海跨河公路橋梁案例主橋上部結構鋼材規格 2-77
表 2-46 臨海跨河公路橋梁案例鋼橋外露表面塗裝系統規格 2-77
表 2-47 臨海跨河公路橋梁案例鋼橋內面塗裝系統規格 2-77
表 2-48 中和快速道路高架橋案例熱浸鍍鋅腐蝕量的量測表 2-80
表 2-49 鋅的大氣腐蝕速率(單位：g/m^2) 2-80
表 2-50 鐵路跨河桁架橋案例桁架橋表面塗裝系統-鋼橋外露表面..2-83
表 2-51 鐵路跨河桁架橋案例桁架橋表面塗裝系統-鋼橋(含鋼拱橋)內面.....2-83
表 2-52 鐵公路橋梁設計規範規定彙整 2-85
表 2-53 碼頭型式及主要檢查項目分類表 2-94
表 2-54 各類交通設施腐蝕問題差異化比較表 2-99
表 3-1 鹽害環境之分區.....3-2
表 3-2 美國橋梁設計規範服務年限 75 年之鋼筋最小混凝土保護層之相關規定.....3-4
表 3-3 ACI 318-19(22)曝露環境類別與分級.....3-5
表 3-4 ACI 318-19 各曝露條件設計參數要求 3-6
表 3-5 Life-365 加州洛杉磯之表面氯離子參數 3-11
表 3-6 EN1992-1-1 環境分類條件 3-12
表 3-7 化學物質侵蝕分類依據 3-13
表 3-8 氯離子侵蝕環境(氯鹽 XD、海水 XS)之最小保護層厚度.....3-13
表 3-9 中性化環境(XC)之最小保護層厚度 3-14

表 3-10 各符號代表之膠結料種類及添加比例 3-15
表 3-11 目標工作年限 100 年之結構物耐久性需求 3-16
表 3-12 SLD 使用的可靠性指數β的建議最小值(用於設計壽命)....3-18
表 3-13 鹽害對策區分.....3-21
表 3-14 最小保護層厚度(mm).....3-22
表 3-15 混凝土表面之鹽化物氯離子濃度(kg/m^3) 3-25
表 3-16 混凝土凍融試驗相對動彈性模數與符合條件之水膠比 3-28
表 3-17 滿足混凝土結構凍害性能凍融試驗相對動彈性模數下限值 .....
.....3-28
表 3-18 確保抗化學侵蝕的最大水膠比 3-29
表 3-19 環境類別與作用等級 3-30
表 3-20 滿足耐久性要求之混凝土最低強度等級 3-30
表 3-21 一般環境的作用等級 3-31
表 3-22 一般環境中混凝土性質與鋼筋的最小保護層厚度(mm) 3-31
表 3-23 凍融環境的作用等級 3-32
表 3-24 凍融環境中混凝土性質與鋼筋的最小保護層厚度(mm) 3-32
表 3-25 混凝土之抗凍耐久性指數 *DF*(%).....3-33
表 3-26 海洋氯化物環境的作用等級 3-34
表 3-27 氯化物環境中混凝土性質與鋼筋的最小保護層厚度(mm) ..3-34
表 3-28 混凝土的抗氯離子侵入性指標 3-34
表 3-29 水、土中硫酸鹽及酸類物質環境作用等級 3-35
表 3-30 乾旱、高寒地區硫酸鹽環境作用等級 3-35
表 3-31 大氣污染環境作用等級 3-35
表 3-32 化學腐蝕環境下混凝土材料與鋼筋的保護層最小厚度(mm) ...

.....3-35
表 3-33 鐵路橋梁設計規範、公路橋梁設計規範中性化環境分類 ...3-36
表 3-34 中性化環境混凝土材料與鋼筋最小保護層厚度 3-37
表 3-35 鹽害環境下作用等級 3-37
表 3-36 鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度 3-38
表 3-37 鹽害環境下主要構件鋼筋最小保護層厚度(cm).....3-38
表 3-38 曝露環境類別與分級 3-40
表 3-39 曝露類別 S 的要求 3-41
表 3-40 建立受到水溶性硫酸鹽的膠結材組合適用性的要求 3-41
表 3-41 曝露類別 W 的要求.....3-42
表 3-42 曝露類別 C 的要求.....3-42
表 3-43 各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度 3-48
表 3-44 鹽害環境作用等級分區之地域劃分 3-48
表 3-45 鹽害環境作用等級分區範圍 3-49
表 3-46 各國耐久性設計規範分區與設計方式總表 3-54
表 3-47 計算模擬用相關參數 3-55
表 3-48 各國模型於鹽害環境下不同保護層厚度服務年限(年) 3-56
表 3-49 104 年與 98 年版公路橋梁設計規範之差異 3-58
表 3-50 大氣腐蝕環境分類(CNS 13401, ISO 9223) 3-62
表 3-51 標準金屬在不同分類之大氣腐蝕性第一年曝露的腐蝕速率 (r_{corr}) 3-62
表 3-52 碳鋼、鋅和銅在大氣中各分類腐蝕性級別的腐蝕速率 3-63
表 3-53 塗裝耐久性等級.....3-64
表 3-54 作業流程項目與手冊內容對照表(1).....3-65

表 3-55 作業流程項目與手冊內容對照表(2).....3-66
表 3-56 作業流程項目與手冊內容對照表(3).....3-67
表 3-57 鋅錠種類及化學成分 3-67
表 3-58 熱浸鍍鋅層檢驗法之分類與對應之 CNS 1247 章節 3-68
表 3-59 檢驗法及記錄項目 3-68
表 3-60 方形管狀桁架構造物開孔面積和占截面積之百分比 3-70
表 3-61 鍍鋅層附著量與硫酸銅試驗次數 3-72
表 3-62 底材應改善之缺陷 3-72
表 3-63 鍍前處理方式.....3-73
表 3-64 NACE、SSPC、ISO 及 BSI 表面處理標準比較 3-75
表 3-65 熔射材料.....3-76
表 3-66 不同環境建議之熔射塗層最小塗層厚度(μm).....3-76
表 3-67 耐候鋼種類及適用厚度 3-77
表 3-68 碳當量規定.....3-77
表 3-69 銲接冷裂敏感指數規定 3-77
表 3-70 品質確保應注意的施工條件示例 3-80
表 3-71 施工計畫書記載事項示例 3-81
表 3-72 ISO 14713-1 耐久性類別.....3-83
表 3-73 選定鍍鋅層系統在不同腐蝕性類別中的首次維護壽命.....3-83
表 3-74 首次維護前使用壽命超過 20 年的建議熔射層厚度值(μm) ....
.....3-84
表 3-75 不同環境下使用 UWS 之建議 3-84
表 3-76 清潔及清洗活動及頻率建議 3-85
表 3-77 鋼橋典型防蝕方法 3-86

表 4-1 鋼筋混凝土腐蝕劣化之機理、要因與指標 4-6
表 4-2 EN1990 設計工作年限之規定 4-20
表 4-3 混凝土結構的設計使用年限 4-21
表 4-4 公路橋涵結構的設計使用年限 4-21
表 4-5 橋梁涵洞分類.....4-21
表 4-6 鐵路橋梁設計規範、公路橋梁設計規範中性化環境分類 4-29
表 4-7 中性化環境混凝土材料與鋼筋最小保護層厚度 4-30
表 4-8 鹽害環境下作用等級之建議分區方式 4-33
表 4-9 離海岸 300 公尺以內(極嚴重與嚴重鹽害區)之村里.....4-33
表 4-10 離海岸 300 公尺至 3 公里以內(中度鹽害區)之村里.....4-36
表 4-11 鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度 4-39
表 4-12 鹽害環境下主要構件鋼筋最小保護層厚度(cm).....4-39
表 4-13 鋼筋最小混凝土保護層厚度 4-40
表 4-14 鐵路橋梁設計規範、公路橋梁設計規範之保護層對應抗氯離子能力要求(擴散係數 $10^{-12}m^2/s$) 4-42
表 4-15 鹽害環境下主要構件保護層厚度建議(cm).....4-43
表 4-16 各齡期之擴散係數與傳輸係數之簡易倍數轉換關係 4-44
表 4-17 考量 10mm 誤差下淡江大橋各構件 D_{RCM} 建議值 4-45
表 4-18 鹽害環境下主要構件混凝土抗氯離子能力建議 4-46
表 4-19 各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度 4-46
表 4-20 硫酸鹽環境之作用環境分級.....4-50
表 4-21 曝露類別 S 的要求 4-51
表 4-22 曝露類別 S 的最大膨脹應變要求 4-51
表 4-23 各種硫酸鹽侵蝕預測式之比較說明表 4-52

表 4-24 彎曲試驗要求.....4-65
表 4-25 CNS 14771 鍍鋅層附著量規定.....4-65
表 4-26 最小彎曲直徑.....4-67
表 4-27 氧化性腐蝕抑制之性能 4-70
表 4-28 常見參考電極與保護判釋標準 4-84
表 4-29 常見純金屬於標準氫電極之還原電位 4-88
表 4-30 常用金屬在海水中的加凡尼序列 4-88
表 4-31 大氣腐蝕性分類(CNS 13401).....4-91
表 4-32 各種標準金屬之大氣腐蝕環境分級表 4-91
表 4-33 2020 至 2024 年臺灣大氣腐蝕環境分類表(腐蝕速率) 4-92
表 4-34 2020 至 2024 年臺灣大氣腐蝕環境分類表(環境因子) 4-95
表 4-35 腐蝕促進因子與地理、地形及結構因素 4-99
表 4-36 鋼橋典型防蝕方法 4-103
表 4-37 鋼橋典型防蝕方法適用環境 4-112
表 4-38 典型防蝕方法施工所需結構條件 4-115
表 4-39 確保品質應注意的施工條件 4-118
表 4-40 不同塗料間之相容性 4-122
表 4-41 熱浸鍍鋅面塗裝系統適用之大氣腐蝕性級別及耐久性等級……
.....4-123
表 4-42 金屬熔射面塗裝系統適用之大氣腐蝕性級別及耐久性等級.....
.....4-124
表 4-43 色彩設計時對景觀與居民的考慮事項 4-125
表 4-44 耐候性鋼材橋梁層狀剝離銹蝕外觀及發生部位與原因 4-131
表 4-45 採用耐候性鋼材做為鋼橋防蝕方法之設計流程 4-132

表 4-46 不同環境下使用耐候性鋼材的建議 4-137
表 4-47 熱浸鍍鋅系統在不同腐蝕性級別中的首次維護壽命 4-145
表 4-48 碳鋼、鋅和銅在大氣中各分類腐蝕性級別的腐蝕速率(r_{av} 與 r_{lin}) 4-145
表 4-49 熱浸鍍鋅附著量.....4-147
表 4-50 熔射金屬的性能.....4-151
表 4-51 金屬熔射層表面生成的化合物種類及溶解度 4-151
表 4-52 金屬熔射材料的特性及腐蝕行為(ISO 2063-1).....4-152
表 4-53 金屬熔射規格.....4-156
表 4-54 金屬熔射材料種類及最小局部厚度(JIS H8300).....4-157
表 4-55 金屬熔射塗層厚度的建議值(單位：μm)(ISO 2063-1).....4-158
表 4-56 連接部位熔射規格 4-158
表 4-57 熔射施工困難部位的防蝕規格 4-159
表 5-1 混凝土耐久性試驗法 5-11
表 5-2 真空處理程序.....5-13
表 5-3 氯離子穿透性之評估分級 5-14
表 5-4 NT Build 492 電流調整表 5-14
表 5-5 長度變化許可全距 (%) 5-19
表 5-6 耐久性防蝕之主要檢查項目 5-36
表 5-7 不同鋼筋保護層厚度的檢測方法 5-38
表 5-8 檢測儀器之精度.....5-38
表 5-9 塗層損傷程度與修補施工方法 5-53
表 5-10 塗裝系統廠內與現場噴塗面漆優、缺點比較表 5-54
表 5-11 鋼材銹蝕等級與表面清潔度對應照片編號表(ISO 8501-1)..5-59

表 5-12 表面粗糙度之檢驗時機與頻率 5-61
表 5-13 塗裝作業中常發生之缺陷及防範與處理方法 5-65
表 5-14 螺栓的最大中心間隔 5-70
表 5-15 臺灣地區具代表性之鍍鋅槽一覽表 5-81
表 5-16 高強度螺栓的機械性質 5-84
表 5-17 熱浸鍍鋅 ASTM A325 螺栓組合.....5-85
表 5-18 熱浸鍍鋅 F8T 螺栓組合.....5-85
表 5-19 鍍鋅後構件之容許誤差 5-108
表 5-20 熱浸鍍鋅構件螺栓孔貫穿率及阻塞率 5-108
表 5-21 鍍鋅層附著量與硫酸銅試驗次數(CNS 10007).....5-109
表 5-22 金屬熔射表面處理的要求 5-119
表 5-23 使用粗面形成劑的表面處理 5-120
表 5-24 未封孔金屬熔射層的拉拔強度典型值(ISO 4624) 5-123
表 6-1 混凝土橋篇章節大綱 6-3
表 6-2 鋼橋篇章節大綱.....6-8
表 7-1 第一場成果說明會議程 7-1
表 7-2 第一場成果說明會出席名單 7-2
表 7-3 鋼橋篇修正建議與辦理情形 7-4
表 7-4 第二場成果說明會議程 7-10
表 7-5 第二場成果說明會出席名單 7-11
表 7-6 混凝土篇修正建議與辦理情形 7-13
表 7-7 第三場成果說明會議程 7-21
表 7-8 第三場成果說明會出席名單 7-23
表 7-9 混凝土篇與鋼橋篇修正建議與辦理情形 7-25

第一章　計畫概述

1.1 計畫緣起

臺灣為一海島，高溫、高濕與高鹽份的環境，造成金屬在大氣中容易腐蝕劣化，工程材料腐蝕對公共設施使用壽齡具嚴重危害性，因此腐蝕防治為我國亟需嚴正面對的重要課題。有鑑於往昔國內沒有長期大氣腐蝕因子現地調查機制，缺乏大氣腐蝕環境分類與分級指標提供防蝕設計使用，爰此，交通部運輸研究所自民國 98 年起依據國際標準組織(ISO)及中華民國國家標準(CNS)規範，進行腐蝕因子調查及金屬材料(碳鋼、鋅、銅、鋁)現地曝露試驗，並建置「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」及發行年報，將相關成果提供產官學研各界查詢應用。

公共工程結構物設計使用年限大都為 50 年(重大橋梁設計使用年限為 100 年)，但一些鹽害嚴重的區域，如沿海地區之鋼筋混凝土橋不到 30 年即面臨改建或局部整建的窘境，如西濱快速道路(觀海大橋、中彰大橋、西湖溪橋、王爺港橋)、台 17 線(鯤鯓橋、五王大橋)等橋梁，一些鋼結構橋往往不到 10 年就已發生腐蝕狀況，嚴重威脅結構物的使用年限與安全。究其原因，主要源於相關單位在可行性評估及規劃設計初期，未充分瞭解臺灣腐蝕環境之嚴苛及完整評估結構物生命週期維護成本，加上可行性評估、規劃設計、工程預算等編列不足及新建與養護分屬不同單位負責，造成規劃設計初期僅以相關規範規定的最低防蝕要求進行設計，導致構造物防蝕性能不足，造成後續維護頻率與費用的增加。

行政院公共工程委員會 112 年 11 月 27 日公布「公共建設工程經費估算編列手冊」修訂版，其總則篇修正對照表項次 5，說明第 1 點「公共工程計畫之經費估算編列階段、計畫階段及預算籌編階段均已有相關規定，請機關應妥善規劃個案計畫之後續維護管理及生命週期成本，爰特此加強提醒全生命週期成本概念。」有鑑於過往對營運階段付出的維修管理費，鮮少被追蹤關注，若各機關能長期追蹤統計累計支出費用，落實手冊修訂後的新思維，重視總體生命週期成本(Life Cycle

Costing, LCC)，就會採用高標準的腐蝕防治對策，使得總體工程生命週期成本會較少，以提升整體工程的效益。

本計畫擬透過與業界或學界合作研究方式，針對鐵公路橋梁防蝕設計現況進行案例蒐集、鐵公路橋梁防蝕耐久性規範與維護管理作業等規定進行探討，研擬不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議、防蝕施工品質作業規定與施工標準圖說範例、防蝕維護管理與修護施工品質作業規定與圖說範例，以期建立全生命週期成本最佳化之技術指引，減少生命週期的維護頻率，甚至無需維護，以提升鐵公路橋梁的品質及壽齡，進而達到減碳及永續發展的目的。

1.2 計畫工作內容

本計畫主要執行 9 項主軸工作：

1. 鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查。
2. 鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討。
3. 鐵公路橋梁防蝕維護管理作業規定探討。
4. 不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議。
5. 防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例。
6. 防蝕維護管理與修護工法作業規定及圖說範例。
7. 建立橋梁防蝕技術於不同大氣腐蝕環境下之全生命週期成本最佳化評估方法。
8. 研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計、施工、維護管理及全生命週期成本評估方法技術指引。
9. 辦理研究成果說明會。全程計畫預計分 2 年期辦理，各年期之工作項目說明如下：

第 1 年期(114 年) – 研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2)-設計及施工階段

1. 鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查

(1) 蒐集相關鐵公路橋梁主體結構(包含附屬組件如路燈、圍欄等)，涵蓋一般性橋梁，如 RC 橋、PC 橋及鋼結構橋；特殊性橋梁，如斜張橋、脊背橋、桁架橋、鋼拱橋等防蝕設計案例(經費與設計年限)與成敗因素探討。

(2)探討其他各類交通設施(如航空、港灣、捷運、隧道等)遭遇之腐蝕問題，提出未來其他權管單位制定防蝕技術指引的建議。

2. 鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討

針對 CNS、公共工程委員會及交通部等相關規範中，對防蝕耐久性設計規定進行蒐整探討，並蒐整相關學(協)會防蝕技術手冊，提出相關精進防蝕規劃設計及施工的建議。

3. 不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議

針對不同大氣腐蝕環境(C1…CX 等 6 級)的橋梁構件(如鋼筋混凝土、鋼構)應採行之防蝕方式，進行通案研析，提供參考列表，如大氣腐蝕環境類別相應之建議防蝕方式，供工程單位參考應用。

4. 防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例

研擬防蝕工法之施工品質作業規定與施工圖說範例及完工測試方法，供工程單位參考應用。

5. 研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引

研訂鐵公路橋梁之防蝕設計及施工技術指引，因指引係屬行政指導位階，其內容架構應包含設計及施工階段之既有法規、規範、工程界常用工法、本計畫成果建議及範例等事項。

6. 辦理研究成果說明會(3 場次)

(1)擬定鐵公路橋梁之防蝕設計及施工技術指引說明會資料。

(2)規劃說明會場次、方式、地點...等並執行。

(3)依據與會人員意見進行指引修訂。

7. 計畫相關配合項目：

(1)配合計畫執行之狀況進行專家訪談或問卷調查，瞭解鐵公路橋梁防蝕工作的需求與建議。

(2)針對計畫重要成果，製作海報或影片電子檔。

(3)研究成果投稿至少 1 篇論文至運輸計畫季刊、國內外期刊、學術研討會。

(4)參考「政府研究資訊系統(GRB) http://www.grb.gov.tw」－研究計畫管理－實際成果(研究計畫績效指標項目)中之「績效」及「佐證資料」，就本計畫成果之特性，填寫合適績效指標項目，並以量化或質化方式，說明本計畫主要研究/計畫成果及重大突破。本計畫績效指標項目至少包括下列項目：

①研究報告：完成 1 本計畫報告及 1 本技術指引。

②其它效益：提升交通部及部屬機關(構)鐵公路橋梁防蝕設計及施工效能，達到減碳及永續發展的目的。

第 2 年期(115 年) – 研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(2/2)-維護管理及全生命週期成本評估方法

1. 鐵公路橋梁防蝕維護管理作業規定探討

針對中央及地方相關單位橋梁防蝕維護管理作業規定進行蒐整探討，並提出相關精進橋梁防蝕維護管理作業方式建議。

2. 防蝕維護管理與修護工法作業規定及圖說範例

研擬防蝕工法維護管理與修護工法作業規定、圖說範例、完工測試方法或檢監測規劃，供工程單位參考應用。

3. 建立橋梁防蝕技術於不同大氣腐蝕環境下之全生命週期成本最佳化評估方法

透過不同大氣腐蝕環境案例蒐集探討，以設計年限與設施重要性為考量，研擬鐵公路橋梁之防蝕耐久性全生命週期成本及碳排量評估方法(含量化效益)，提供鐵公路橋梁可行性評估或規劃階段納入經濟效益的應用。

4. 研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下全生命週期防蝕技術指引

本年度需檢討修訂前 1 年研究成果，提出鐵公路橋梁全生命週期成本之防蝕技術指引，其內容架構應包含可行性評估、規劃設計、施工及維護管理階段之既有法規、規範、工程界常用工法、本計畫成果建議及範例等事項。

5. 辦理研究成果說明會(3 場次)

(1)擬定鐵公路橋梁之防蝕設計、施工、維護管理及全生命週期成本評估方法技術指引說明會資料。

(2)規劃說明會場次、方式、地點…等並執行。

(3)依據與會人員意見進行指引修訂。

6. 本年度工作項目，得視前一年度之成果，酌予調整

7. 計畫相關配合項目：

(1)配合計畫執行之狀況進行專家訪談或問卷調查，瞭解鐵公路橋梁防蝕工作的需求與建議。

(2)針對計畫重要成果，製作海報或影片電子檔。

(3)研究成果投稿至少 1 篇論文至運輸計畫季刊、國內外期刊、學術研討會。

(4)參考「政府研究資訊系統(GRB) http://www.grb.gov.tw」－研究計畫管理－實際成果(研究計畫績效指標項目)中之「績效」及「佐證資料」，就本計畫成果之特性，填寫合適績效指標項目，並以量化或質化方式，說明本計畫主要研究/計畫成果及重大突破。本計畫績效指標項目至少包括下列項目：

①研究報告：完成 1 本計畫報告及 1 本技術指引。

②其它效益：提升交通部及部屬機關(構)鐵公路橋梁防蝕設計、施工及維護管理效能，達到減碳及永續發展的目的。

1.3 預期完成之工作項目及具體成果

1. 預期成果

(1) 本計畫 114 年的預期成果如下：

①完成鐵公路橋梁防蝕設計案例與成敗因素探討、防蝕耐久性規範探討，提出相關精進防蝕規劃設計及施工的建議。

②完成不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與標準建議。

③完成防蝕施工品質作業規定與施工標準圖說範例。

④完成鐵公路橋梁之防蝕設計及施工技術指引。

⑤完成研究成果說明會，將成果提供予部屬機關(構)應用。

(2) 本計畫 115 年的預期成果如下：

①完成鐵公路橋梁防蝕維護管理作業規定探討，提出相關精進設施維護管理作業方式建議。

②完成防蝕維護管理與修護施工品質作業規定與圖說範例。

③建立全生命週期成本最佳化評估方法(含成本及效益)。

④完成考量全生命週期成本之「鐵公路橋梁之防蝕技術指引」。

⑤完成研究成果說明會，將成果提供予部屬機關(構)應用。

2. 預期效益

(1) 提升交通部及部屬機關(構)鐵公路橋梁防蝕規劃設計、施工及維護管理效能，進而提升鐵公路橋梁的品質及壽齡並降低全生命週期成本，達到減碳及永續發展的目的。

(2) 提升鐵公路橋梁品質與安全，進而確保用路人安全。

3. 預期應用

(1) 研究成果可提供交通部及部屬機關(構)進行鐵公路橋梁防蝕規劃設計、施工及維護管理之應用。

(2) 提供行政院公共工程委員會納入相關施工規範或手冊修訂參考及

本所後續研究參用。

4.預定進度

本計畫第一年期履約期限自決標日起算 12 個月，本團隊計畫執行之預定進度如圖 1.1 所示，重要期程與檢核點包括以下 4 項。

(1)工作計畫書：廠商應於得標後 20 日(114 年 5 月 7 日)提出工作計畫書。

(2)期中報告：乙方應於決標日起 150 日(114 年 9 月 13 日)內以前提初稿。

(3)期末報告：乙方應於決標日起 300 日(115 年 2 月 10 日)內以前提送初稿。

(4)期末報告定稿：乙方應於期末審查會議主持人裁示日期以前提送修正定稿。

工作項目	第1月 (114.5)	第2月 (114.6)	第3月 (114.7)	第4月 (114.8)	第5月 (114.9)	第6月 (114.10)	第7月 (114.11)	第8月 (114.12)	第9月 (115.1)	第10月 (115.2)	第11月 (115.3)	第12月 (115.4)
1.鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查												
(1)蒐集相關鐵公路橋梁主體結構等防蝕設計案例與成敗因素探討												
(2)探討其他各類交通設施遭遇之腐蝕問題												
2.鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討												
3.不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議												
4.防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例												
5.研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引												
6.辦理研究成果說明會(3場次)								◎				
7.相關報告繳交					◆					★		★
工作進度估計百分比(累積數)	4	13	22	34	43	49	58	67	78	88	94	100
預定查核點 (決標日為114.4.17)	預定進度 當前進度 尚未完成 ※第1季：工作計畫書提送(得標後20日內，114.5.7)。 ◆第2季：期中報告初稿提送(決標日起150日內，114.9.13.)。 ◎第3季：成果說明會辦理，預計於114.10至114.12辦理。 ★第4季：期末報告初稿提送(決標日起300日內，115.2.10)；期末報告修正定稿提送。											

說明
(1)工作項目請視計畫性質及需要或依研究/計畫綱要說明訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。
(2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定:①工作天數②經費之分配③工作量之比重④擬達成目標之具體數字。
(3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。「預定查核點」除了標明期中/期末/期末修正定稿提送日期外，尚須具體加列其他重要工作項目，例如：工作會議、階段性成果宣導展示、專家座談會或技術移轉教育訓練等。

圖 1.1 計畫期程控管圖

第二章　鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查

2.1 國內橋梁防蝕設計案例

國內橋梁防蝕設計案例將分為混凝土橋與鋼橋進行探討，且包含修復補強與新建之案例，本案彙整之案例橋梁整理如表 2-1 所示。

表 2-1 本案彙整之案例橋梁

種類	修復補強/新建	橋名	養護機關
混凝土橋	修復補強	下三叉河橋	臺鐵公司
		中正橋	臺北市政府
		台 61 線 WH06-1	公路局
		後龍觀海大橋	
	修復補強與改建	玄寶大橋	
	新建	金門大橋	金門縣政府
		淡江大橋	公路局
鋼橋	修復補強	社寮橋	基隆市政府
		南方澳大橋	宜蘭縣政府
		彩虹橋	桃園市政府
		頭份大橋	苗栗縣政府
		關渡橋	公路局
	新建	淡江大橋	公路局
		台 64 線中和交流道(中正路出入口)	
	新建(改建)	小清水溪(東正線)橋	臺鐵公司

2.1.1 混凝土橋

1. 鐵路跨河橋案例 [下三叉河橋]

(1) 案例橋梁基本資料

案例橋梁位於苗栗縣後龍鎮(跨西湖溪)，距離海岸不到 50 m，如圖 2.1 所示，建造經費約 3 億元(79 年完工)。橋長 297 m(15@19.8 m)，上部結構(如圖 2.2 所示)由 4 支長度 19.76 m 預力混凝土箱型梁密接組合而成，每支預力混凝土箱型梁寬度 200 cm，高度 138

cm，梁上再澆置 12 cm 厚之場鑄鋼筋混凝土橋面板；下部結構(如圖 2.3 所示)為單圓柱懸臂式鋼筋混凝土結構，基礎採直徑 5.5 m，長度 20 m 沉箱基礎。案例橋梁之設計規範、混凝土抗壓強度與鋼筋保護層厚度如表 2-2。



圖 2.1 案例橋梁全景[1]

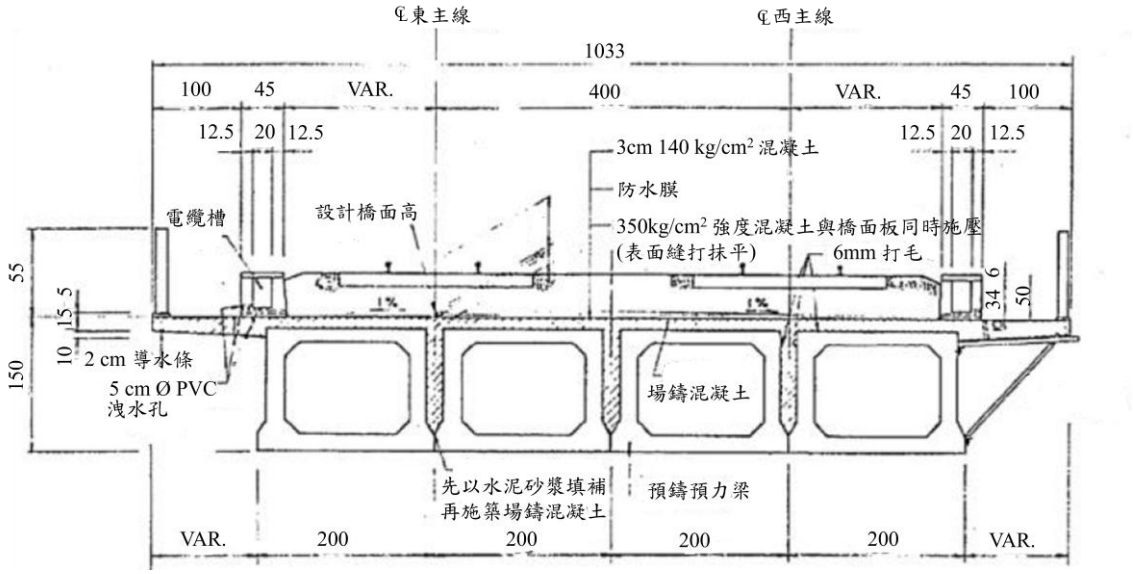


圖 2.2 上部結構標準斷面圖[1]

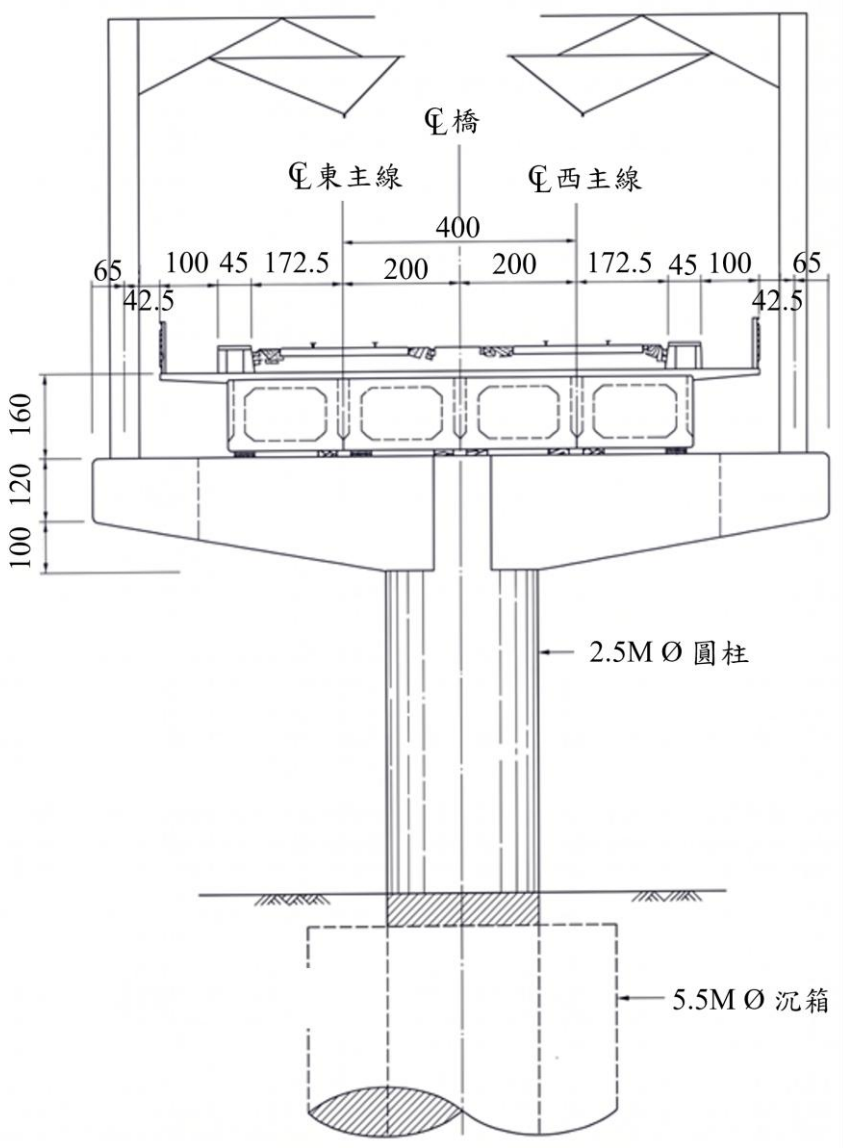


圖 2.3 橋墩處標準斷面圖[1]

表 2-2 案例橋梁鋼筋與預力混凝土相關設計標準[1]

設計規範	混凝土抗壓強度	鋼筋保護層厚度
● 日本國有鐵路構造物設計標準 ● 日本土木學會預力混凝土標準規範 ● ACI 及中國土木水利學會鋼筋混凝土設計規範	● 無筋混凝土 fc' =140 kgf/cm^2 ● 擋碴牆、橋台、橋墩、沉箱及擋土牆 fc'=280 kgf/cm^2 ● 現場澆注橋面及橫隔梁 fc'=350 kgf/cm^2 ● 預力混凝土梁 fc' =350 kgf/cm^2 ● 排水構造物及小於 3*3 之箱涵 fc'=210 kgf/cm^2	● 預力混凝土梁、擋碴牆、欄杆、橫隔梁 2.5 cm ● 橋墩帽梁及橋台、擋土牆等未與土壤直接接觸者 7.5 cm ● 橋墩柱、沉箱及其他與土壤直接接觸部分 10.0 cm ● 水泥 fc'=280 kgf/cm^2 的混凝土採用 TYPE2 水泥

(2) 案例橋梁狀況

案例橋梁於民國 105 年 3 月 14 日，針對部分橋墩及預力混凝土箱型梁進行鑽心取樣，共取得 10 個試體(位置如圖 2.4 所示)，並依據 JIS A1154: 2012 規範來辦理混凝土中氯離子含量檢測，檢測結果如表 2-3 所示。由表 2-3 各試體之不同深度氯離子含量檢測結果可發現，越靠近混凝土表面，氯離子含量越高；透過 Fick 第二擴散定律對表 2-3 各試體之不同深度氯離子含量數據進行迴歸分析，可以得到各試體所在位置之混凝土表面氯離子含量 C_0 (kg/m^3)及氯離子擴散係數(cm^2/sec)，如表 2-4 所示。本橋之混凝土表面氯離子含量與營建研究院「臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究總期末報告」中[2]，鹽害環境下的作用等級(如表 2-5 所示)極嚴重鹽害區(S)之混凝土表面氯離子含量 C_0 相近，較日本混凝土標準示方書(2012)飛沫帶 C_0=13 kg/m^3(如表 2-6)高。

P2-1、P2-2 及 P8-10 試體原設計混凝土抗壓強度為 280 kgf/cm^2，混凝土表面沒有修補及塗層保護，氯離子擴散係數介於 1.1737E-8~2.0125E-8 cm^2/sec，P9-7、P9-8 及 P8-9 之 D 介於 0.0906E-8~0.3962E-8cm^2/sec，顯示混凝土表面保護措施降低了氯離子擴散速度；P8-4、P8-6 預力混凝土箱型梁試體原設計混凝土抗壓強度 fc'=350 kgf/cm^2，擴散係數介於 0.41E-8~0.593E-8cm^2/sec，因塗裝

提供保護，降低了氯離子擴散速度。

美國 Life-365 手冊及日本土木學會(2001)「混凝土標準示方書〔維持管理編〕，對於造成混凝土內鋼筋開始產生腐蝕之臨界氯離子濃度，大多採用 1.2 kg/m^3；案例橋梁橋墩鋼筋保護層厚度 7.5 cm，預力混凝土箱型梁鋼筋保護層厚度 2.5 cm，由試體迴歸曲線可發現，部分試體鋼筋位置之氯離子含量已超過上述臨界氯離子濃度(圖 2.5)，並已產生嚴重腐蝕情形

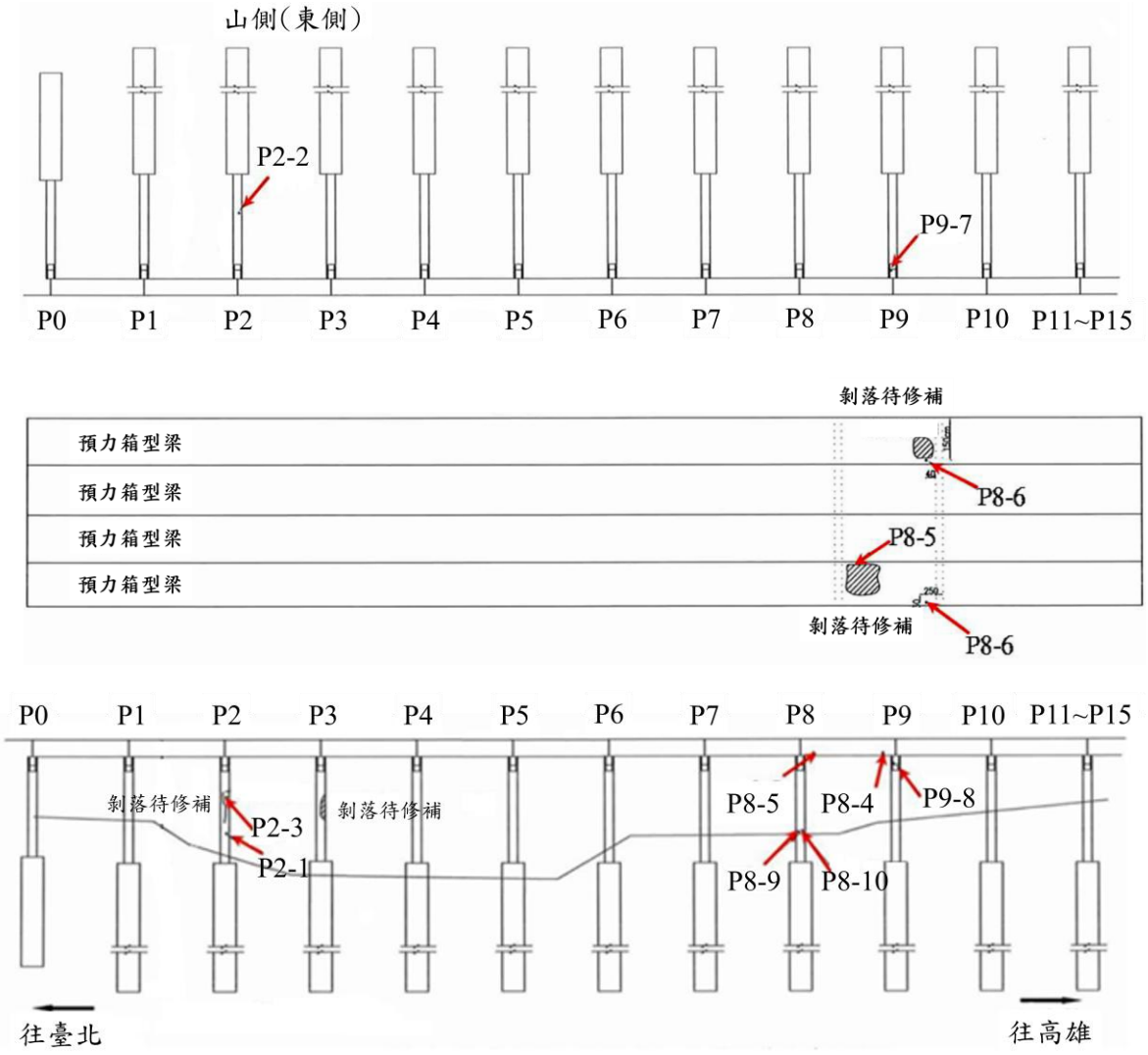


圖 2.4 案例橋梁鑽心取樣位置圖[1]

表 2-3 案例橋梁混凝土中氯離子含量檢測結果[1]

鑽心試體	氯離子含量						
P2-1	距表面深(cm)	0~1.5	1.5~3.0	3.0~4.5			
	氯離子含(kg/m^3)	9.2	7.6	5.1			
P2-2	距表面深(cm)	0~1.5	1.5~3.0	3.0~4.5	4.5~6.0	6.0~7.5	
	氯離子含量(kg/m^3)	5.1	3.9	2.8	1.2	0.5	
P2-3(1)	距表面深(cm)	1.0~2.0	2.0~3.0	5.0~6.0			
	氯離子含量(kg/m^3)	14.0	7.6	6.7			
P8-4	距表面深(cm)	0~1.0	1.0~2.0	>5.0			
	氯離子含量(kg/m^3)	5.5	4.4	0.2			
P8-5	距表面深(cm)	0~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	>5.0	
	氯離子含量(kg/m^3)	3.0	2.3	3.0	2.1	1.2	
P8-6	距表面深(cm)	0~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	
	氯離子含量(kg/m^3)	9.4	7.6	2.8	2.0	1.2	
P9-7	距表面深度(cm)	0~1.5	1.5~3.0	3.0~4.5	4.5~6.0	6.0~7.0	7.0~8.0
	氯離子含量(kg/m^3)	16.7	1.8	1.4	0.7	0.5	0.0
P9-8	距表面深度(cm)	0~1.0	1.0~2.5	2.5~4.0	4.0~5.5	5.5~6.5	6.5~7.5
	氯離子含量(kg/m^3)	18.4	15.4	1.2	1.2	0.9	0.9
P8-9(2)	距表面深度(cm)	0.4~1.9	1.9~3.4	3.4~4.9	4.9~6.4		
	氯離子含量(kg/m^3)	16.6	8.5	4.1	0.7		
P8-10	距表面深度(cm)	0~1.5	1.5~3.0	3.0~4.5	4.5~6.0		
	氯離子含量(kg/m^3)	16.6	8.5	8.5	4.1		

註 1：表面 0~1.0 cm 為樹脂砂漿及 4.0~5.0 cm 樹脂被污染因此移除。

註 2：表面 0~0.4 cm 是樹脂移除。

表 2-4 案例橋梁鑽心試體氯離子含量迴歸分析結果[1]

鑽心試體	表面氯離子含量 C_0(kg/m^3)	氯離子擴散係數($10^{-8}cm^2/sec$)
P2-1	10.47	2.0125
P2-2	6.11	1.2260
P2-3	14.90	2.5274
P8-4	6.54	0.5933
P8-5	3.23	3.3517
P8-6	11.59	0.4101
P9-7	31.36	0.0906
P9-8	23.60	0.3962
P8-9	23.99	0.5267
P8-10	18.10	1.1737

表 2-5 臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究總期末報告鹽害環境下作用等級[2]

作用等級	分區代號	混凝土表面氯離子含量 C_0	
		(kg/m^3)	(%)
極嚴重鹽害區	S	20~30	0.870~1.304
嚴重鹽害區	I	10~20	0.435~0.870
中度鹽害區	II	2.3~10	0.100~0.435

表 2-6 日本混凝土標準示方書(2012)混凝土表面氯離子含量 C_0 (kg/m^3)[3]

地區	飛沫帶	離海岸距離(km)				
		岸線附近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛來鹽份較多地區	13	9	4.5	3.0	2.0	1.5
飛來鹽份較少地區		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

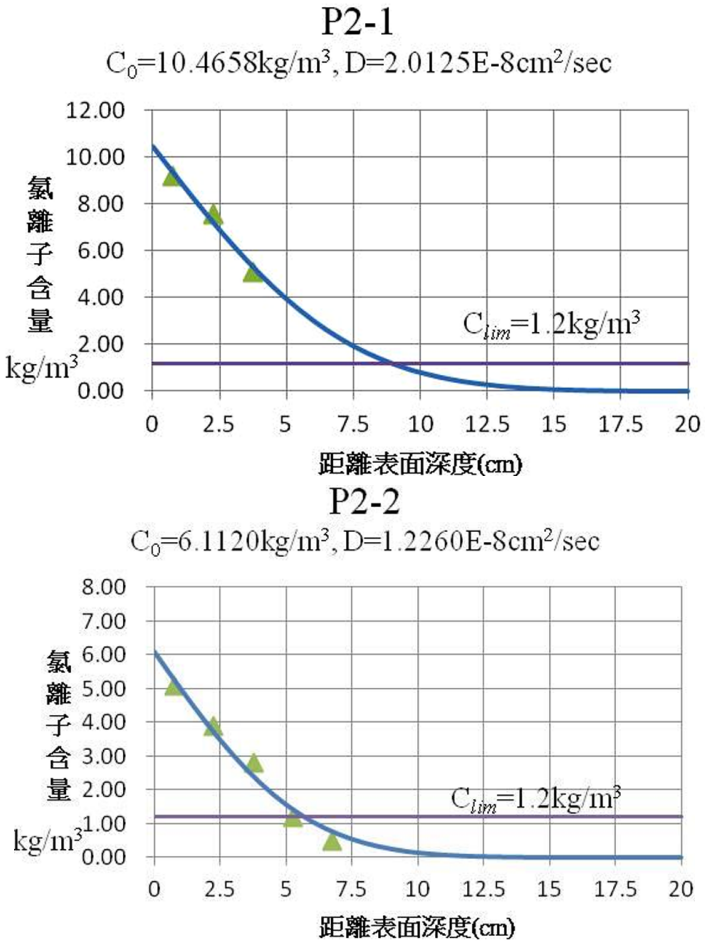


圖 2.5 案例橋梁鑽心試體氯離子含量迴歸分析結果圖(P2-1 與 P2-2)[1]

(3) 案例橋梁設計

由於當年鐵路橋梁並無耐久性相關設計規範，本案例即就與耐久性(服務年限)最相關之混凝土保護層厚度來進行探討。表 2-7 為鐵路改建工程局「工程設計注意事項」、「鐵路橋梁設計規範」[4]與「公路橋梁設計規範」(109 年)[5]等規範有關鋼筋保護層規定之比較。以下即藉由本案例 P2-1 及 P8-6 試體迴歸分析得到之混凝土表面氯離子含量 C_0 及氯離子擴散係數，來檢核前述各規範之保護層規定是否可以滿足 50 年之服務年限要求。

依據不同規範規定之鋼筋保護層厚度，在 50 年服務年限時，P2 橋墩(P2-1 試體)及 SPAN9 橋孔(P8-6 試體)預力混凝土箱型梁鋼筋所處位置之氯離子含量預測結果詳見表 2-8 及表 2-9。由表 2-8 可發現 P2 橋墩依據鐵工局「工程設計注意事項」、「鐵路橋梁設計規範」及 109 年版「公路橋梁設計規範」規定之鋼筋保護層厚度，無法滿足 50 年服務年限要求。由表 2-9 可發現 SPAN9 橋孔預力混凝土箱型梁依據鐵工局「工程設計注意事項」、「鐵路橋梁設計規範」保護層厚度之規定，無法滿足 50 年服務年限要求，109 年版「公路橋梁設計規範」保護層厚度規定可以滿足 50 年服務年限要求。

根據下三叉河橋鑽心取樣之氯離子含量迴歸分析結果，並依 109 年公路橋梁設計規範所規定之鋼筋保護層厚度推估 50 年服務年限，發現橋墩(P2)之保護層厚度仍不足，無法滿足耐久性要求；但預力混凝土箱型梁(SPAN9)依 109 年公路橋梁設計規範保護層厚度可達 50 年要求，顯示該規範在箱梁部位具足夠保護效果，但對鹽害環境下之橋墩仍需採取加強或補強措施。

表 2-7 相關規範鋼筋保護層厚度比較表(設計年限 50 年，單位 cm)[1]

	鐵工局工程設計注意事項	鐵路橋梁設計規範		109 年修訂版「公路橋梁設計規範」		
環境作用等級 / 橋梁部位	一般環境	一般環境	具腐蝕或鹼性環境	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
基樁	10	有套管 5 無套管 7.5	有套管 5 無套管 10	10	10	10
基礎	7.5	7.5	酌予增加	10	7.5	7.5
柱、牆	橋墩 4 橋台 5	主筋 5 箍筋 4	酌予增加	6.5	5	5
橋面板頂層筋	5	5	酌予增加	6.5	4	4
橋面板下層筋	2.5	4	酌予增加	6.5	4	4
箱梁底層筋	—	4	酌予增加	6.5	4	4
「I」「T」梁、箱梁腹版外露面	4	5	酌予增加	6.5	4	4
混凝土面未直接曝露於大氣、未與土壤或水接觸	—	主筋 4 箍筋 2.5	酌予增加	主筋 4 箍筋 2.5	主筋 4 箍筋 2.5	主筋 4 箍筋 2.5

表 2-8 P2 橋墩鋼筋位置之氯離子含量(依據 P2-1 試體)[1]

鋼筋保護層厚度(cm)	現況(25.25 年)(1)	50 年	備註
	氯離子含量(kg/m^3)		
4	5.02(>1.2)(NG)	6.44(>1.2)(NG)	鐵工局「工程設計注意事項」、「鐵路橋梁設計規範」
7.5	1.94(>1.2)(NG)	3.63(>1.2)(NG)	原設計
10	0.81	2.19(>1.2)(NG)	109 年版「公路橋梁設計規範」(設計年限 50 年)

註 1：為自取樣日期 105 年 3 月 14 日起算。

表 2-9 SPAN9 橋孔預力混凝土箱型梁鋼筋位置之氯離子含量(依據 P8-6 試體)[1]

鋼筋保護層厚度 (cm)	現況(25.25 年)(1)	50 年	備註
	氯離子含量(kg/m^3)		
2.5	3.80(>1.2)(NG)	5.64(>1.2)(NG)	原設計
4	1.36(>1.2) (NG)	3.08(>1.2)(NG)	鐵工局「工程設計注意事項」、「鐵路橋梁設計規範」
6.5	0.13	0.82	109 年版「公路橋梁設計規範」(設計年限 50 年)

註 1：為自取樣日期 105 年 3 月 14 日起算。

2. 非臨海地區跨河市區道路橋梁案例 [臺北市中正橋]

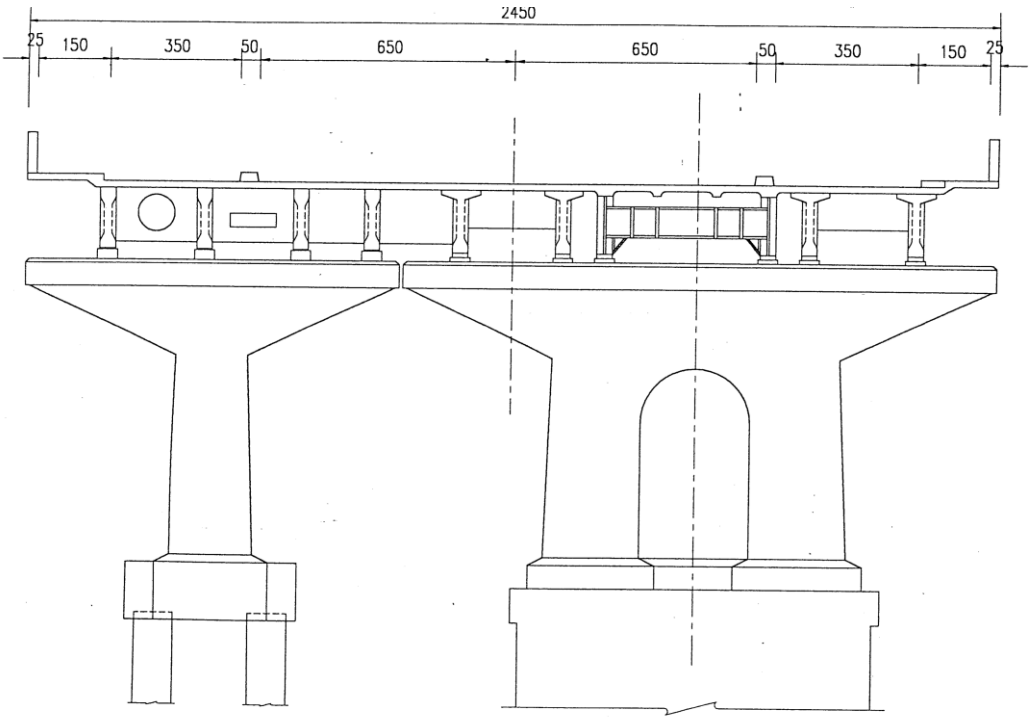
(1) 案例橋梁基本資料

案例橋梁主橋段橫跨新店溪橋梁結構型式主要為鋼板梁橋+鋼筋混凝土橋墩(上承式結構)，改建經費約為 25.44 億元(108 年，決標金額，含三次契約變更)，案例橋梁歷經 3 次擴建(民國 43 年第 1 次擴寬、民國 50 年第 1 次擴建、民國 61 年第 2 次大規模擴建工程)，橋梁總長度為 500 m(含多跨連續結構)，寬度約 24 m(擴建後最大橋寬)，跨數為 17 跨(橋墩水中數 16 個)，橋高約 11.8 m。結構型式鋼板與鋼梁以鋼板梁+鋼筋混凝土墩支撐橋體，為跨越新店溪的重要典型鋼梁橋，鋼板大多用鉚釘連接，為典型舊式鋼橋連結方式，在臺北市現存橋中較少見，下部結構採混凝土實體橋墩，基礎與地形結合以承受河水及車流載重，如圖 2.7 所示，橋梁基本資料如表 2-10 所示。

108 年 5 月新中正橋開工，案例橋梁改建工程旨在提升抗震、防洪安全性，並解決雙北通勤的交通瓶頸。新橋採用全台跨度最大的「弦月造型鋼拱橋（不對稱單塔空間斜撐鋼拱橋）」，主體工程已於 113 年底前達成雙向全面通車，預計於 115 年 5 月完成景觀工程後竣工，工程總經費約 33 億，結構型式為三點式鋼拱橋，主橋跨度達 215 m，並將橋底抬高以符合現代防洪標準。



圖 2.6 非臨海地區跨河市區道路橋梁改建後照片



(a)橋梁橫斷面示意圖



(b)橋梁照片

圖 2.7 非臨海地區跨河市區道路橋梁示意圖與照片[6]

表 2-10 非臨海地區跨河市區道路橋梁基本資料表[7]

橋梁位置	跨越新店溪，連接臺北市重慶南路三段與永和市永和路二段。
施工時間	舊橋部分建於日據時代,拓寬部分則於民國 61 年完工。
設計規範與材料強度	
設計規範	AASHTO 公路橋梁標準規範(1969) ACI: Building Code(1963)
設計活載重	H20-S16-44
材料強度	
A.無筋混凝土	f'c = 140 kgf/cm²
B.鋼筋混凝土	f'c = 211 kgf/cm^2
C.預力混凝土	f'c = 350 kgf/cm²
D.鋼筋	
一般鋼筋	fy = 3000 kgf/cm²
7 毫米金屬線	f's = 15500 kgf/cm^2
鋼筋保護層厚度	
預力混凝土梁、版、欄杆、緣石	2.5 cm
上部結構之隔梁	4.0 cm
橋墩、橋台、擋土牆	10.0 cm
橋墩及橋台之基礎	8.0 cm
結構型式與配置	
上部結構 預力混凝土Ｉ型梁	共分為 17 孔，跨徑配置為 13@23.1+4@25.0 m，舊橋 A1~P13 間之構造型式為中間主橋係一桁架式鋼構造，其兩旁各配置 2 支 T 型梁；拓寬部分則配置 4 支預力Ｉ型梁,梁深 1.65 m,場鑄橋面板厚度為 17 cm。P13~A2 間四跨之舊橋與拓寬部分均為鋼筋混凝土 I 型梁，舊橋配置 6 支 R.C.梁，拓寬部分則配置 4 支 R.C.梁，橋面板厚度亦為 17 cm。橋面總寬 24.5 m，南北向各設置有兩線快車道，一線機車道及人行道，另外，在橋梁兩側均附掛有一自來水管線。
下部結構 橋墩及橋台之基礎	舊橋除 P13 為壁式橋墩外，其餘均為中央拱型開口之框架式橋墩，P1~P13 基礎為沈箱;拓寬部分則 「為單柱懸臂式橋墩，基礎為 1.0 或 1.5 公尺之基樁。拓寬後之 A1 為壁式橋台，A2 為半重力式橋台。

(2) 案例橋梁狀況：案例橋梁原橋係日治時代所建，主橋採鋼構型式，第 1 次拓建則採混凝土梁建構，第 2 次拓建則於民國 61 年底，並增構單柱式新橋墩，依相關資料目視檢測及非破壞性檢測結果(民國 85 年)，對案例橋梁整體結構耐久性評估為：

①原橋之鋼梁部份區域油漆剝落並有銹蝕現象，建議將銹蝕區域徹底除銹，並塗上油漆或防銹塗層，以延長鋼橋之使用壽命。

②橋梁之上部結構及下部結構的混凝土構件，經強度衝錘試驗及鑽心取樣試驗結果，除下部結構之臺北端橋台及 P13 橋墩之強度衝錘試驗結果顯示其強度較差外，其餘構件之強度均高於設計強度值，顯示中正橋橋體結構強度良好。

③案例橋梁腐蝕問題輕微，由中性化試驗結果，案例橋梁中性化深度皆未超過保護層厚度，因此，目前的腐蝕是保護層厚度不足所造成。為避免結構體繼續中性化造成更多區域腐蝕，可考慮在混凝土表面塗刷抗中性化塗料；由氯離子檢測結果，案例橋梁氯離子濃度含量皆未超出標準值；由混凝土保護層厚度檢測結果，案例橋梁永和端 P9 橋墩與主梁多處保護層厚度不足 25 mm，並已出現鋼筋外露情形(如圖 2.8 所示)；臺北端預力梁底部及橋面板部分測點亦有保護層偏薄現象。整體而言，局部構件之保護層不足，恐影響鋼筋防蝕功能；由鋼筋腐蝕速率檢測結果，案例橋梁由上面的檢測數據可知永和端橋墩及臺北端橋面板(如圖 2.8 所示)已有輕微腐蝕的現象，保護層厚度不足及鋼筋外露是造成輕微腐蝕的原因。



(a)橋墩帽梁鋼筋外露銹蝕　　(b)主梁鋼筋外露銹蝕

圖 2.8 非臨海地區跨河市區道路橋梁構件劣化照片[7]

④案例橋梁有部分大梁裂縫超過保護層厚度，建議以環氧樹脂灌注以防止鋼筋進一步腐蝕。

⑤案例橋梁原橋鋼梁與新橋混凝土梁間之橋面板出現兩處縱向裂縫，為防止滲入橋面板之雨水對鋼筋造成進一步之銹蝕而影響其耐久性，應儘速維修橋面板之縱向裂縫。

(3) 案例橋梁維護探討：

根據目視檢測及各項非破壞性檢測結果，案例橋梁橋體之結構強度大致良好，惟部分橋墩墩體及大梁有局部混凝土剝落鋼筋銹蝕現象，另外數根大梁有裂縫寬度大於 0.3 mm 之裂縫出現，且深度超過保護層厚度；因此除了設置監測系統，對於一般劣化現象應儘速加以維修，以防止劣化狀況進一步惡化。修復建議如下：

①將混凝土剝落鋼筋銹蝕區域之鋼筋除銹並修補混凝土。

②混凝土剝落、蜂窩部份修補混凝土。

③橋墩墩體及大梁裂縫寬度大於 0.3mm 之裂縫，以環氧樹脂灌入修補。

④橋面伸縮縫損壞部份必須更新。

⑤鋼梁及混凝土梁之鋼支承銹蝕，必須除銹防蝕。

3. 臨海公路橋梁案例 [WH06-1]

(1) 案例橋梁基本資料

本案例全橋距離海岸約在 300 m 內，於民國 88 年設計，民國 94 年竣工，依據 76 年版公路橋梁設計規範(以下簡稱 76 年版規範)設計，有關材料及鋼筋保護層規定如表 2-11 所示。案例橋梁上構主要為場撐逐跨架設工法及懸臂工法，下構為單柱式及框架式橋墩，振動單元數如表 2-12 所示。

76 年版規範中並無海洋環境下防蝕設計或耐久性規定，交通部於民國 98 年 12 月 31 日頒布 98 年版公路橋梁設計規範(以下簡稱 98 年版規範)，新增海洋環境下防蝕設計章節；民國 104 年 4 月 13 日將 98 年版規範第十二章「海洋環境下防蝕設計」修改為「耐久性設計」，針對鹽害環境下作用等級進行分類如表 2-13 所示，並對鹽害環境下混凝土最大水膠比、最低抗壓及鹽害環境下主要鋼筋最小保護層厚度進行規定，詳見表 2-14 及表 2-15。

本案例橋梁依「臺灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究」乙案之鹽害環境作用等級分區範圍(如表 2-16、表 2-17)為「嚴重鹽害區」。

表 2-11 臨海公路橋梁案例材料及鋼筋保護層厚度相關規定[8]

1.材料設計強度，除另有註明者外，應依下列數字為準：	
(1)混凝土之 28 天最小抗壓強度(f_c')： A.無筋混凝泥土 B.鋼筋混凝土 (a)場鑄基樁(210kg/cm^2 水中混凝土) (b)橋台、擋土牆、進橋板、橋頭燈柱及欄杆胸牆 (c)橋墩及基礎 C.預力混凝土：施預力時之起始抗壓強度	 f_c'≧140kg/cm^2 f_c'依施工說明書規定辦理 f_c'≧245kg/cm^2 f_c'≧280kg/cm^2 f_c'≧350kg/cm^2 f_{ci}'=280kg/cm^2
(2)竹節鋼筋應符合 CNS560 或 ASTMA706 之規定 19ø(含)以上 16ø(含)以下 場鑄混凝土基樁之鋼筋及其他需銲接之高強度鋼筋(fy≧4200 kg/cm^2)，須符合 ASTM A706 GRAD E60 材質之規定。	 fy≧4200kg/cm^2 fy≧2800kg/cm^2
(3)結構鋼料 ASTM A706 Grade 36	fy≧2520kg/cm^2
(4)其他：如圖示	
2.鋼筋之保護層除另有註明者外，依下列規定：	
(1)橋面板底面、緣石、預力梁、橫隔梁側面、隔梁底面、欄杆胸牆、橋面中央分隔島	4.0 cm
(2)橋面板頂面	5.0 cm
(3)橋台、橋墩、擋土牆及下部結構之基礎	7.5 cm

表 2-12 臨海公路橋梁案例振動單元表[4]

振動單元		配置	橋寬(m)
主線	BNA-1	5@37	11.4
	BNA-2	3@40+2@32.5	11.4
	BSA-1	5@37	11.4
	BSA-2	2@32.5+3@40	11.4
	BNA-3	5@39	22.8
	BNA-4	5@36	22.8
	BNA-5	33+34+33	22.8
	BNA-6	6@35	22.8
匝道	RAMP A	3@36	6.5
	RAMP B	33+34+33	6.5

表 2-13 鹽害環境下作用等級(104 年公路橋梁設計規範)[9]

環境作用等級	離海岸的距離
極嚴重鹽害區	海水中飛沫區
嚴重鹽害區	離海岸 300 m 以內之區域
中度鹽害區	離海岸 300 m 至 3 km 以內之區域

表 2-14 鹽害環境下混凝土品質要求(104 年公路橋梁設計規範)[9]

	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
最大水膠比	0.4	0.4	0.45
最低抗壓強度 f_c' (kgf/cm^2)	350	350	280

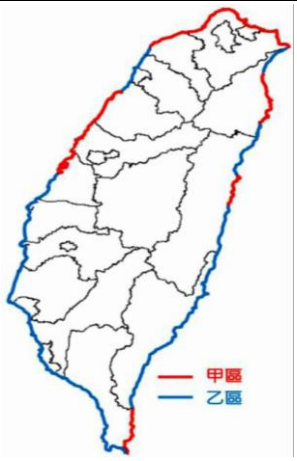
表 2-15 鹽害環境下主要構件鋼筋最小保護層厚度(104 年公路橋梁設計規範)[9]

設計年限	50 年			100 年		
環境作用等級 / 橋梁部位	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
基樁、基礎	10	10	10	10	10	10
柱、牆	10	7.5	7.5	10	10	7.5
橋面板頂層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
橋面板下層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
箱梁底層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
「I」「T」梁、箱梁腹板外露面	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
混凝土面未直接曝露於大氣、未與土壤或水接觸	4	4	4	4	4	4

表 2-16 鹽害環境作用等級分區範圍[2]

環境作用等級	離海岸線的距離	
	甲區	乙區
極嚴重鹽害區	海水中飛沫區及 離海岸 100 m 以內之區域	海水中飛沫區
嚴重鹽害區	離海岸 100 m 至 300 m 以內之區域	離海岸 100 m 以內之區域
中度鹽害區	離海岸 300 m 至 3 km 以內之區域	離海岸 100 m 至 1 km 以內之區域

表 2-17 鹽害環境作用等級分區之地域劃分[2]

鹽害分區	地域劃分	
甲區	1.新北市(含基隆市)至桃園市觀音區 2.苗栗縣後龍鎮至彰化縣福興鄉 3.宜蘭縣壯圍鄉至宜蘭縣蘇澳鎮 4.花蓮縣花蓮市至花蓮縣壽豐鄉 5.屏東縣東岸 上述地區離海岸線 3 公里以內之濱海地帶	 鹽害環境作用等級分區之海岸線劃分示意圖
乙區	1.桃園市新屋區至苗栗縣竹南鎮 2.宜蘭縣頭城鎮 3.宜蘭縣南澳鄉至花蓮縣新城鄉 4.花蓮縣豐濱鄉至臺東縣達仁鄉 5.彰化縣芳苑鄉至屏東縣南岸 上述地區離海岸線 1 公里以內之濱海地帶	

(2) 案例橋梁狀況

本案例於 2019 年進行主梁與橋墩的相關混凝土試驗(包含中性化、腐蝕電位、氯離子含量、抗壓強度等試驗)。氯離子含量試驗主梁以 S11(編號 S11-2，如圖 2.9 所示)較高(16.80 kg/m^3)；墩柱以 PA11(編號 PA11-L-4，如圖 2.9 所示)較高(14.68 kg/m^3)。後續之維修即考量此試驗之結果進行設計，相關試驗結果如表 2-18、表 2-19 所示。

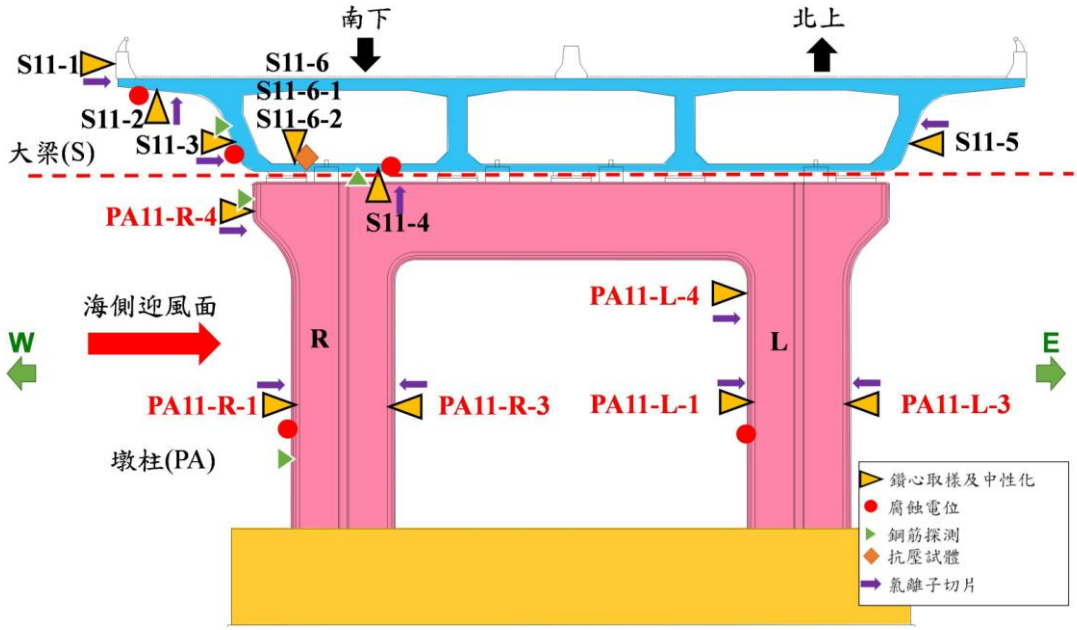


圖 2.9 臨海公路橋梁案例 PA11 試驗點位置(S11-2、PA11-L-4)[10]

表 2-18 臨海公路橋梁案例大梁氯離子含量檢測表[10]

試樣編號	取樣深度(cm)	滴定氯離子重量百分率(%)	滴定氯離子重量 (kg/m^3)	試樣編號	取樣深度(cm)	滴定氯離子重量百分率(%)	滴定氯離子重量 (kg/m^3)
S5-R-1	0.45	0.081	1.89	S11-5	0.57	0.665	15.44
	3.47	0.018	0.41		3.74	0.343	7.96
	6.38	0.008	0.19		6.69	0.092	2.13
S5-R-2	0.46	0.475	11.03	S11-4	0.47	0.138	3.21
	3.48	0.297	6.91		3.47	0.012	0.27
	6.36	0.026	0.60		6.34	0.013	0.31
S5-L-1	0.44	0.202	4.70	S12-1	0.46	0.022	0.52
	3.41	0.050	1.16		3.45	0.130	3.03
	6.30	0.008	0.18		6.37	0.101	2.35
S5-R-3	0.46	0.378	8.78	S12-2	0.46	0.467	10.85
	3.48	0.285	6.62		3.49	0.158	3.67
	6.38	0.105	2.45		6.43	0.017	0.40
	9.19	0.023	0.52				
S5-R-5	0.46	0.072	1.67	S12-3	0.43	0.476	11.06
	3.48	0.019	0.44		3.43	0.076	1.76
	6.38	0.011	0.25		6.34	0.016	0.37
	9.19	0.005	0.12				

S5-L-2	0.45	0.404	9.37	S12-4	0.44	0.339	7.87
	3.49	0.328	7.61		3.45	0.211	4.91
	6.40	0.088	2.05		6.37	0.010	0.23
S5-L-4	0.46	0.168	3.89	S12-5	0.46	0.087	2.03
	3.52	0.022	0.51		3.49	0.006	0.14
	6.42	0.011	0.26		6.40	0.007	0.16
S5-R-4	0.45	0.225	5.22	S20-L-1	0.45	0.174	4.04
	3.45	0.147	3.42		3.45	0.030	0.71
	6.34	0.013	0.30		6.33	0.007	0.16
S5-L-3	0.48	0.187	4.34	S20-L-2	0.48	0.216	5.03
	3.54	0.198	4.61		3.51	0.171	3.97
	6.44	0.012	0.27		6.42	0.018	0.41
S11-1	0.46	0.070	1.64	S20-L-4	0.45	0.279	6.49
	3.49	0.076	1.76		3.47	0.228	5.31
	6.40	0.030	0.71		6.35	0.021	0.49
S11-2	0.48	0.723	16.80	S20-L-3	0.49	0.076	1.75
	3.52	0.055	1.27		3.54	0.091	2.11
	6.41	0.008	0.19		6.46	0.021	0.48
S11-3	0.46	0.532	12.37				
	3.45	0.222	5.16				
	6.27	0.053	1.23				

備考：依 AASHTO-T260 利用混凝土單位重 2323 kg/m^3 計算滴定氯離子重量。

表 2-19 臨海公路橋梁案例橋墩氯離子含量檢測表[10]

試樣編號	取樣深度(cm)	滴定氯離子重量百分率(%)	滴定氯離子重量 (kg/m^3)	試樣編號	取樣深度(cm)	滴定氯離子重量百分率(%)	滴定氯離子重量 (kg/m^3)
PA5-R-1	0.6	0.097	2.25	PA12-R-3	0.6	0.154	3.00
	3.5	0.046	1.06		3.4	0.197	4.56
	6.4	0.017	0.39		6.2	0.025	0.57
PA5-R-3	0.6	0.031	0.72	PA12-R-4	0.6	0.178	4.13
	3.4	0.071	1.64		3.7	0.052	1.20
	6.1	0.024	0.55		6.8	0.058	1.34
					9.6	0.048	1.11
PA5-R-4	0.7	0.061	1.40	PA12-C-1	0.6	0.093	2.15
	3.8	0.078	1.81		3.6	0.077	1.78
	6.7	0.047	1.09		6.4	0.027	0.63
PA5-L-1	0.6	0.085	1.98	PA12-C-2	0.6	0.229	5.31

	3.6	0.086	2.00		3.6	0.164	3.80
	6.4	0.010	0.23		6.5	0.225	5.23
PA5-L-3	0.7	0.067	1.56	PA20-R-1	0.6	0.036	0.84
	3.7	0.021	0.48		3.5	0.093	2.15
	6.5	0.015	0.35		6.3	0.036	0.84
PA5-L-4	0.6	0.212	4.93	PA20-R-3	0.7	0.247	5.72
	3.8	0.304	7.06		3.9	0.105	2.43
	6.8	0.133	3.09		6.9	0.050	1.15
PA11-R-1	0.6	0.110	2.56	PA20-R-4	0.7	0.041	0.96
	3.5	0.103	2.38		3.8	0.158	3.66
	6.6	0.026	0.60		6.6	0.089	2.05
	9.8	0.019	0.44				
PA11-R-3	0.6	0.107	2.48	PA20-C-1	0.6	0.107	2.49
	3.2	0.240	5.56		3.6	0.046	1.07
	5.7	0.090	2.09		6.3	0.073	1.70
	8.4	0.017	0.39		7.38	0.047	1.10
PA11-R-4	0.7	0.274	6.35	PA20-C-2	0.6	0.027	0.62
	4.0	0.077	1.79		3.5	0.144	3.34
	7.2	0.048	1.11		6.3	0.041	0.94
PA11-L-1	0.51	0.127	2.95	PA25-C-1	0.6	0.069	1.59
	4.56	0.339	7.88				
	7.60	0.111	2.57		3.6	0.139	3.22
	10.75	0.032	0.73				
	14.72	0.011	0.25		6.5	0.050	1.15
	18.81	0.002	0.05				
PA11-L-3	0.6	0.054	1.26	PA25-C-3	0.7	0.105	2.43
	3.5	0.103	2.38		3.6	0.144	3.35
	6.3	0.025	0.57		6.4	0.052	1.21
PA11-L-4	0.63	0.401	9.31	PA26-C-1	0.7	0.129	2.98
	5.18	0.632	14.68				
	8.65	0.029	0.67		3.7	0.121	2.81
	11.78	0.018	0.41				
	15.78	0.011	0.25		6.4	0.037	0.86
	20.12	0.002	0.06				
PA12-R-1	0.5	0.076	1.76	PA26-C-3	0.7	0.040	0.93
	3.4	0.068	1.57		3.7	0.029	0.66
	6.3	0.041	0.95		6.6	0.014	0.33
PA12-C-2-	0.59	0.108	2.50				

1	4.75	0.077	1.78				
	7.69	0.030	0.70				
	8.77	0.029	0.68				
	13.18	0.026	0.60				
	16.67	0.008	0.19				

備考：依 AASHTO-T260 利用混凝土單位重 2323 kg/m^3 計算滴定氯離子重量。

(3) 案例橋梁維修設計

案例橋梁維修經費約為 1.34 億元(109 年，決標金額，含兩次新增項目)，案例維修設計依上部結構(大梁、橫隔梁)與下部結構(墩柱)說明如下。

①上部結構

大梁及隔梁修復，說明如後，a.打除剝落或受汙染之混凝土，b.鋼筋除銹，c.以水膠比小於 0.4 之無收縮水泥砂漿修補。d.大梁 S11 梁底及 PA12、PA20 隔梁底部混凝土大面積剝落，經鋼筋除銹並修補後表面再貼覆 CFRP 補強(如圖 2.10、圖 2.11 所示)。

②下部結構

PA8 以北鹽害較輕微採用擴柱 10 cm 之方案，說明如後，a.打除氯離子含量高之混凝土，亦即將混凝土打除至見主筋，b.鋼筋除銹，c.放置 16φ@30 之溫度鋼筋，d.以水膠比小於 0.4 之自充填混凝土組模灌漿(亦須符合 CNS 14795 表 1「低」即「通過電荷量(庫倫)在 2000 庫倫以下」之標準)，設計圖如圖 2.12 所示；PA8 以南鹽害較嚴重採用擴柱增筋，擴柱 20 cm 並新增 19φ之鋼筋網之方案，說明如下，a.打除氯離子含量高之混凝土，亦即將混凝土打除至見主筋，b.鋼筋除銹，c.放置 19φ@20 之鋼筋網，d.以水膠比小於 0.4 之自充填混凝土組模灌漿(亦須符合 CNS 14795 表 1「低」即「通過電荷量(庫倫)在 2000 庫倫以下」之標準)，設計圖如圖 2.13 所示。

本案例依 76 年版公路橋梁設計規範設計，橋墩與基礎鋼筋保護層為 7.5 cm，符合 109 年版公路橋梁設計規範在嚴重鹽害

區、50 年設計年限下的最低要求，但若以 100 年設計年限則不足；而上部結構如橋面板、梁底等保護層多為 4~5 cm，明顯低於 109 年版規範對嚴重鹽害區主筋(≥5.5 cm 或更高)的要求，因此整體而言原設計保護層厚度並未完全符合 109 年版規範。

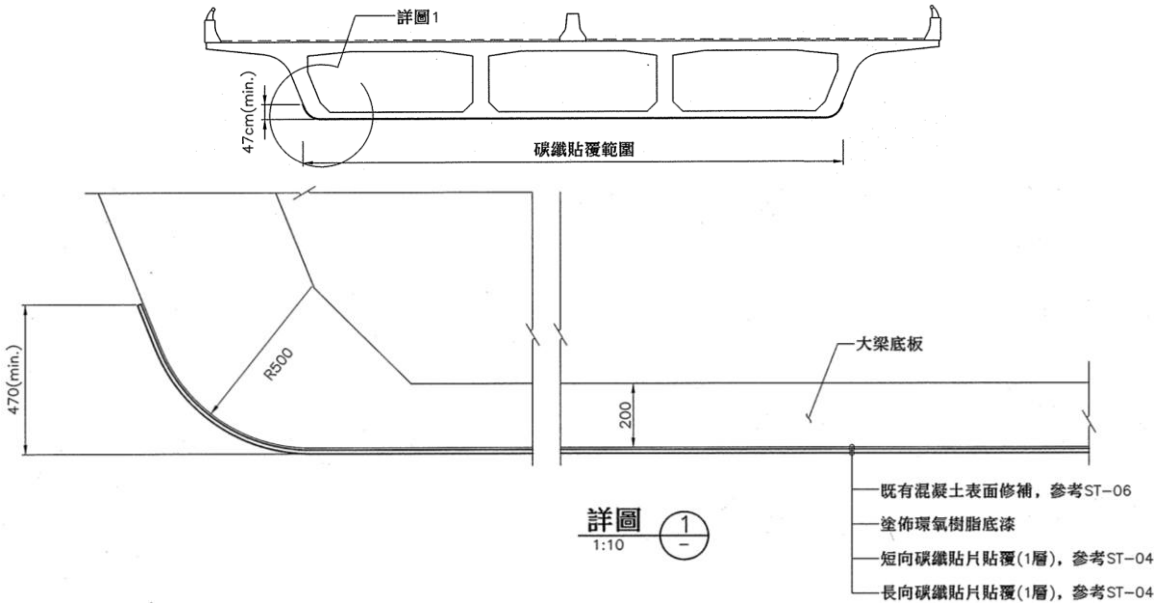


圖 2.10 臨海公路橋梁案例大梁底面碳纖維貼覆斷面圖及詳圖 [11]

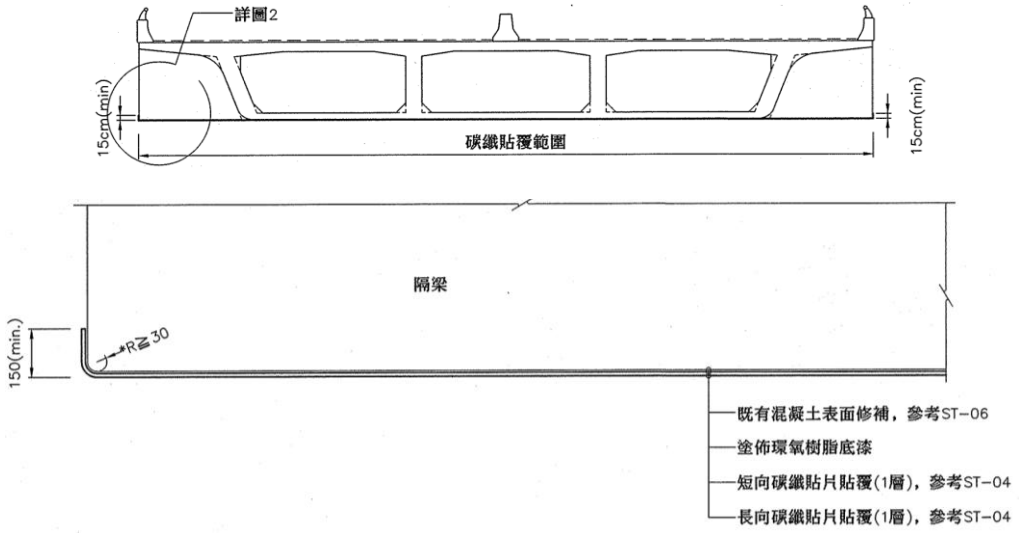


圖 2.11 臨海公路橋梁案例橫隔梁底面碳纖維貼覆斷面圖及詳圖 [11]

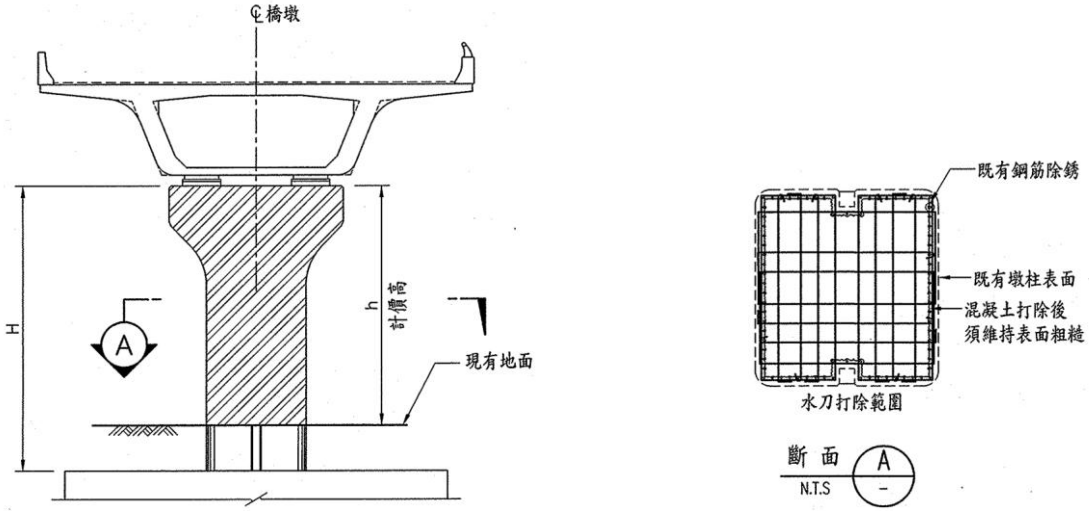
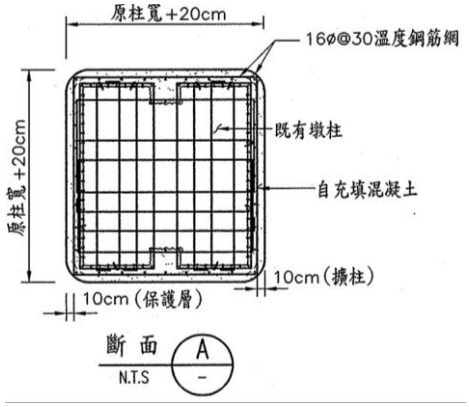
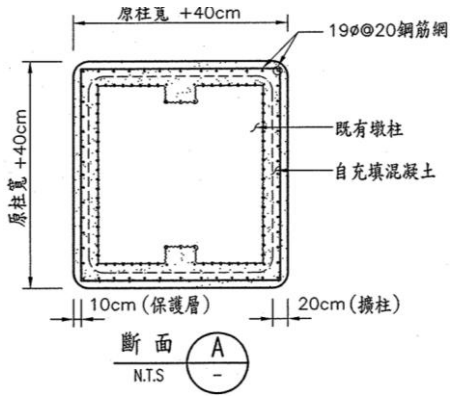


圖 2.12 臨海公路橋梁案例墩柱柱身打除示意圖 [11]

	1. 全面灌注採自充填混凝土，擴柱 10 cm(不含原保護層)，並補 16φ 溫度鋼筋。 2. 自充填混凝土需符合氯離子擴散規定，應使用符合 CNS61 規定之卜特蘭第 II 型水泥。

(a)PA8 以北墩柱

	1. 全面灌注採自充填混凝土，擴柱 20 cm(不含原保護層)，並補 19φ 溫度鋼筋。 2. 自充填混凝土需符合氯離子擴散規定，應使用符合 CNS61 規定之卜特蘭第 II 型水泥。

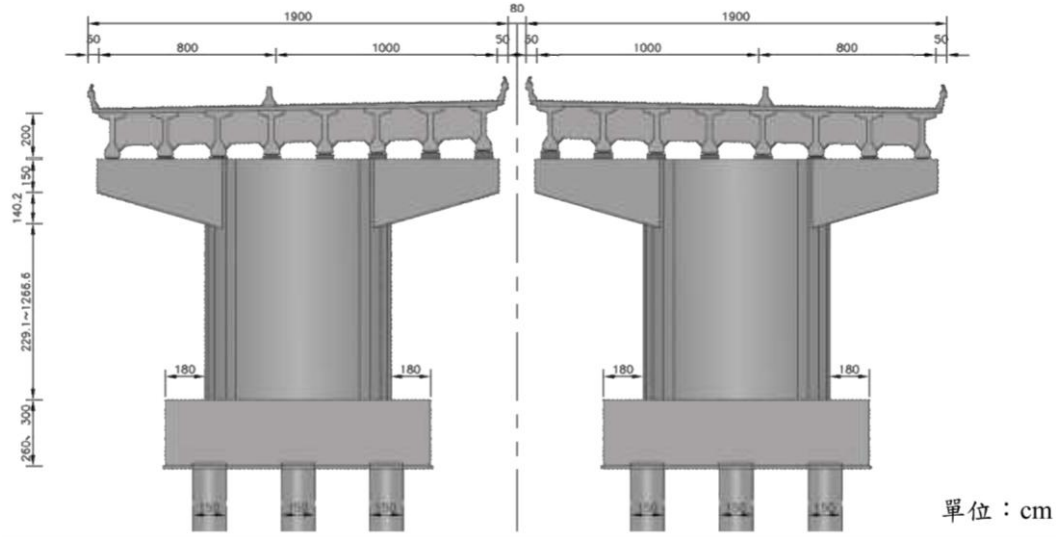
(b)PA8 以南墩柱

圖 2.13 臨海公路橋梁案例墩柱柱身打除示意圖 [11]

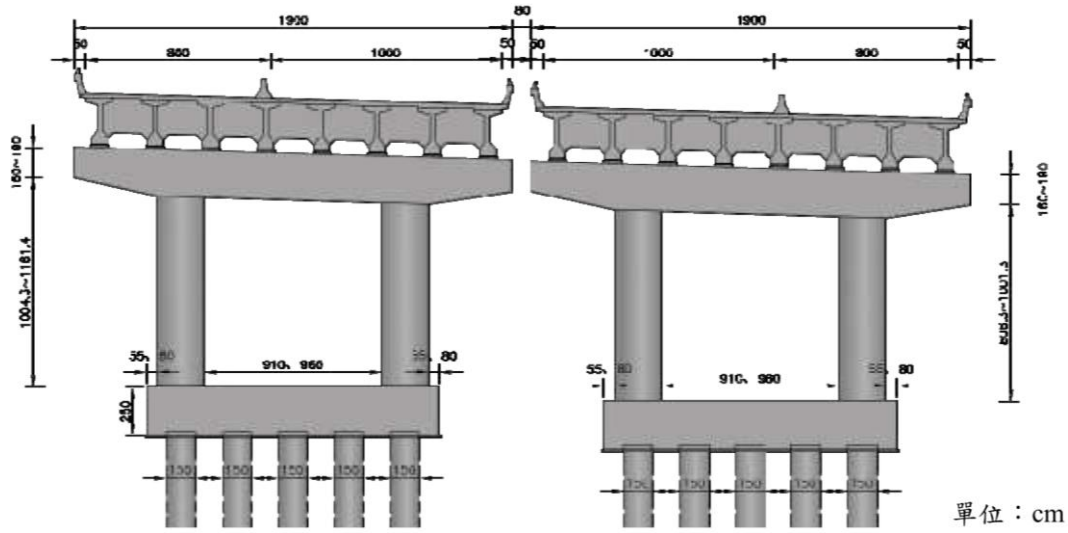
4. 臨海公路橋梁案例–[後龍觀海大橋]

(1) 案例橋梁基本資料

案例橋梁位於苗栗縣後龍鎮跨越後龍溪，分為北上線及南下線，民國 84 年 12 月興建完成，上部結構為 23 跨簡支預力梁及 2 跨鋼箱梁橋組成，跨距配置為 20@40 M+2@25 M+1@50 M+1@35 M+1@40 M=975 m，位處西部臨海之感潮帶，離海岸 300 m 以內。



(a) P1~P20 橋墩標準斷面圖



(b) P21~P24 橋墩標準斷面圖

圖 2.14 臨海公路橋梁橋墩標準斷面圖[12]

(2) 案例橋梁狀況

案例橋梁經檢測有混凝土劣化、鋼筋銹蝕及氯離子含量超標等狀況(圖 2.15、表 2-20)。依表 2-21 分析結果，案例橋梁單元六(深槽區 P14~P17)與單元七(深槽區 P17~P20)於平行車行方向設計地震狀況下，規範要求耐震能力需達 0.28 g，而兩單元分析結果耐震能力不足，需進行耐震補強或局部改建作業。其餘分析單元雙向耐震能力均屬足夠，建議將混凝土破損鋼筋外露銹蝕部分修復。



圖 2.15 臨海公路橋梁混凝土破損鋼筋銹蝕情形[12]

表 2-20 臨海公路橋梁構件混凝土氯離子含量試驗成果表[12]

試體編號	取樣位置	氯離子含量(kg/m^3)
#1	第 2 跨橋面板	2.397
#2	第 2 跨橋面板	1.523
#3	第 1 跨橋面板	1.406
P2-1	P2 橋墩柱	5.300
P2-2	P2 橋墩柱	1.809
P2-3	P2 橋墩柱	4.167
P20-1	P20 橋墩柱	12.388
P20-2	P20 橋墩柱	1.154
P20-3	P20 橋墩柱	19.008
P21-1	P21 橋墩柱	0.890
P21-2	P21 橋墩柱	2.437
P21-3	P21 橋墩柱	1.500

表 2-21 臨海公路橋梁構件單元耐震評估分析(以分析單元五、六為例)[12]

分析單元五	橋軸向(行車向)			橋橫向(垂直行車向)		
	規範需求(g)	分析值(g)		規範需求(g)	分析值(g)	
中度地震耐震能力	0.086	0.3414	OK	0.086	0.7596	OK
設計地震耐震能力	0.280	0.4855	OK	0.280	0.7772	OK
分析單元六	橋軸向(行車向)			橋橫向(垂直行車向)		
	規範需求(g)	分析值(g)		規範需求(g)	分析值(g)	
中度地震耐震能力	0.086	0.2470	OK	0.086	0.4441	OK
設計地震耐震能力	**0.280**	**0.2625**	**NG**	0.280	0.8456	OK

(3) 案例橋梁維修設計

經調查進行之混凝土破損及鋼筋銹蝕狀況修復，案例橋梁局部改建經費(含西湖溪橋全橋改建)約為 1.34 億元(110 年，決標金額，含六次變更預算)，修補面積下部結構約 420 m^2(扣除基樁裸露，採取換底方式修復之 P15~P18)，上部結構約 715 m^2(全橋上構)，以下分就墩柱包覆補強修復(P2~P7、P9~P20)與混凝土保護層修復鋼筋除銹方式說明如下。

後龍觀海大橋位於離海岸 300 m 以內的鹽害環境，依 109 年公路橋梁設計規範，橋墩及柱牆在嚴重鹽害區的最小鋼筋保護層厚度約為 7.5~10 cm，其他構件如橋面板與梁體也多需達 4~5.5 cm；本案修復設計採用柱牆保護層 10 cm(包覆後 14 cm)及其他構件 6.5 cm，整體保護層厚度已符合 109 年規範要求。

①墩柱包覆補強修復：

橋墩保護層修復包覆範圍由基礎頂部上 5 cm 至帽梁最低點下 5 cm 止，墩柱與補強模板之間隙，採無收縮混凝土灌漿，28 天規定抗壓強度 $fc' \geq 350$ kgf/cm^2，包覆厚度為 14 cm(如所示)，修復示意如圖 2.16~圖 2.18 所示。

②混凝土保護層修復鋼筋除銹：

依各構件位置處理原則如圖 2.19 所示。施工步驟如下：

A. 固定灌漿用結構模板及角材，使混凝土保護層滿足保護層厚度(柱牆 10 cm、其他混凝土外露面 6.5 cm)，如圖 2.20(a)所示。

B. 灌注無收縮混凝土及養護，如圖 2.20(b)所示。

C. 拆模後用鏝刀以環氧樹脂無收縮水泥砂漿抹平順接及養護，如圖 2.20(c)所示。

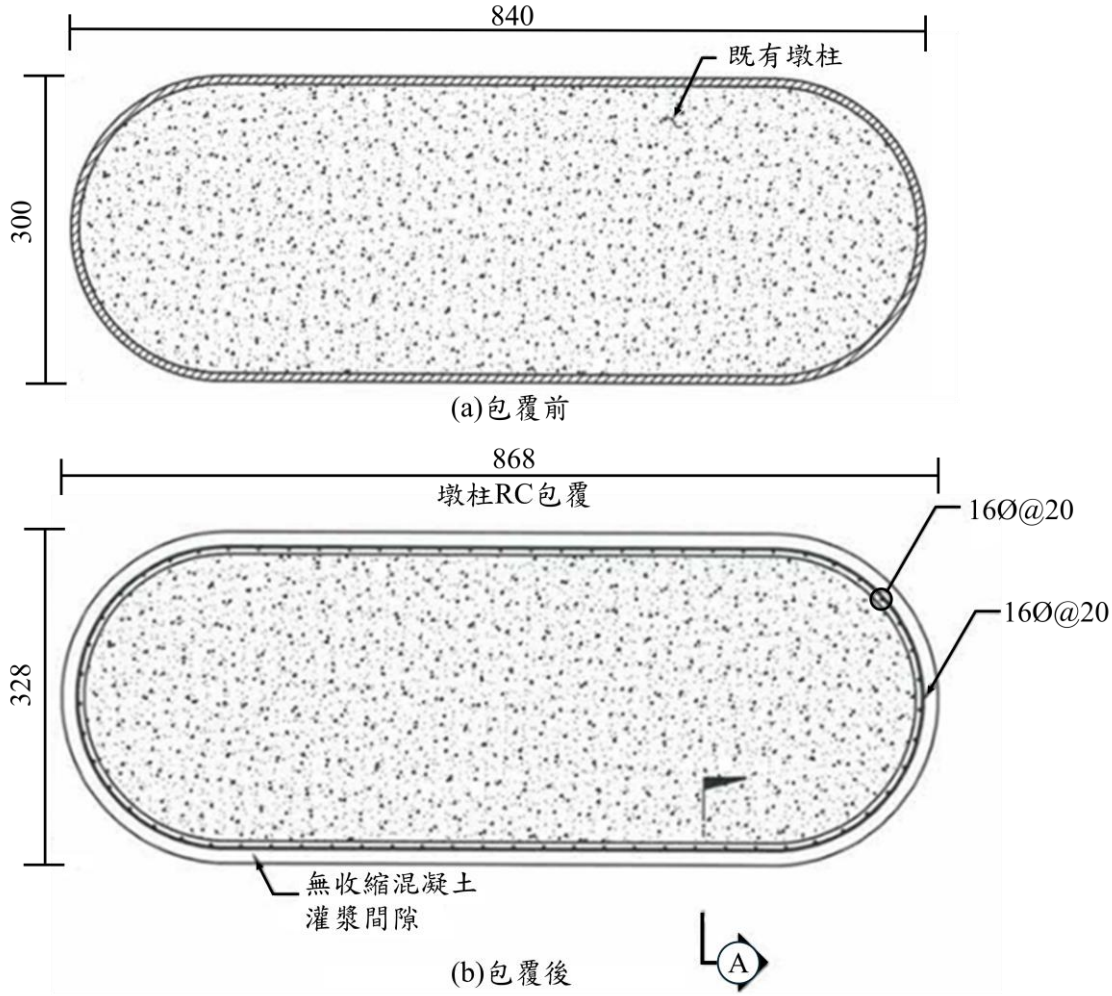


圖 2.16 臨海公路橋梁混凝土墩柱包覆平面示意圖[13]

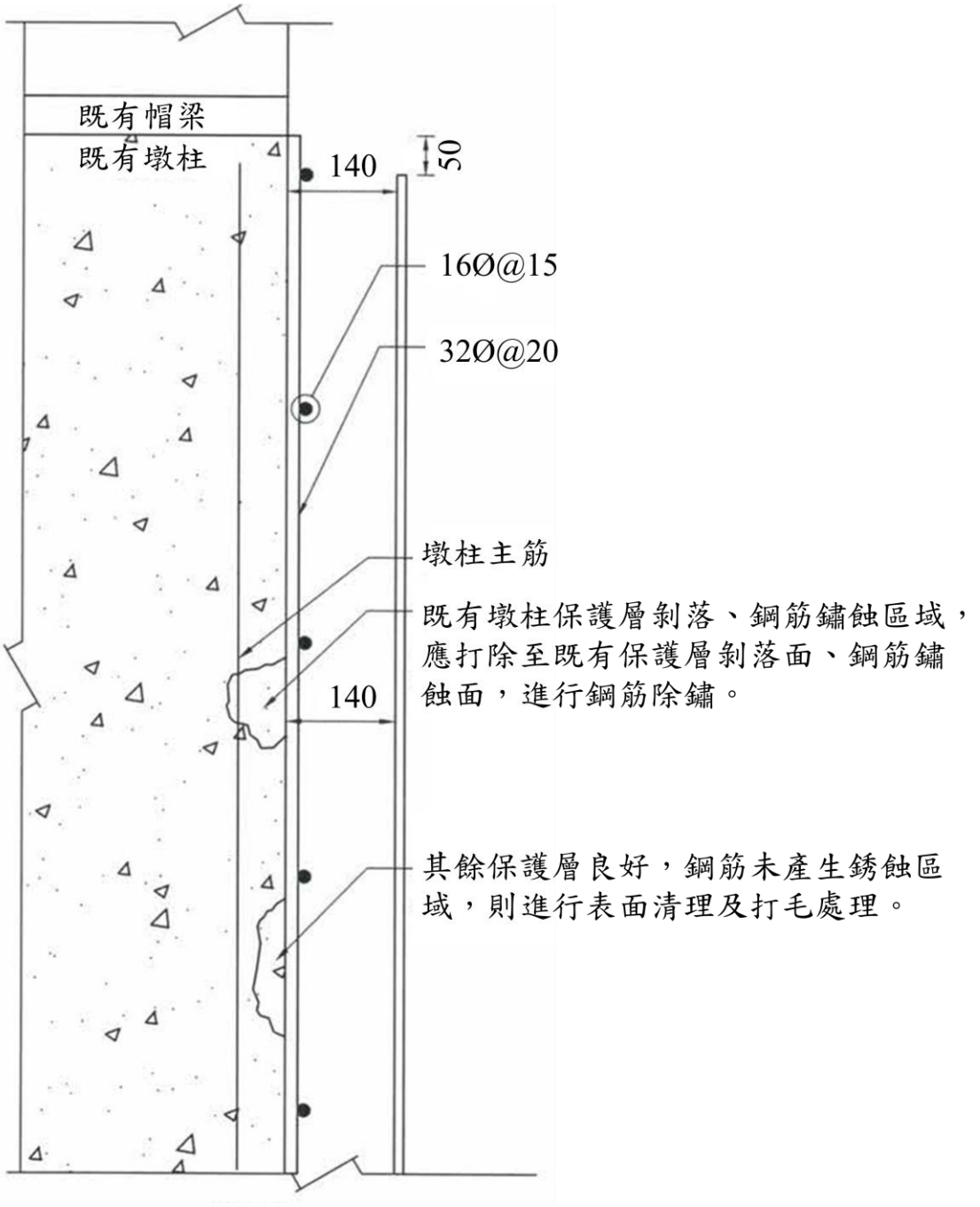


圖 2.17 臨海公路橋梁混凝土墩柱包覆平面(斷面 A-A)示意圖[13]

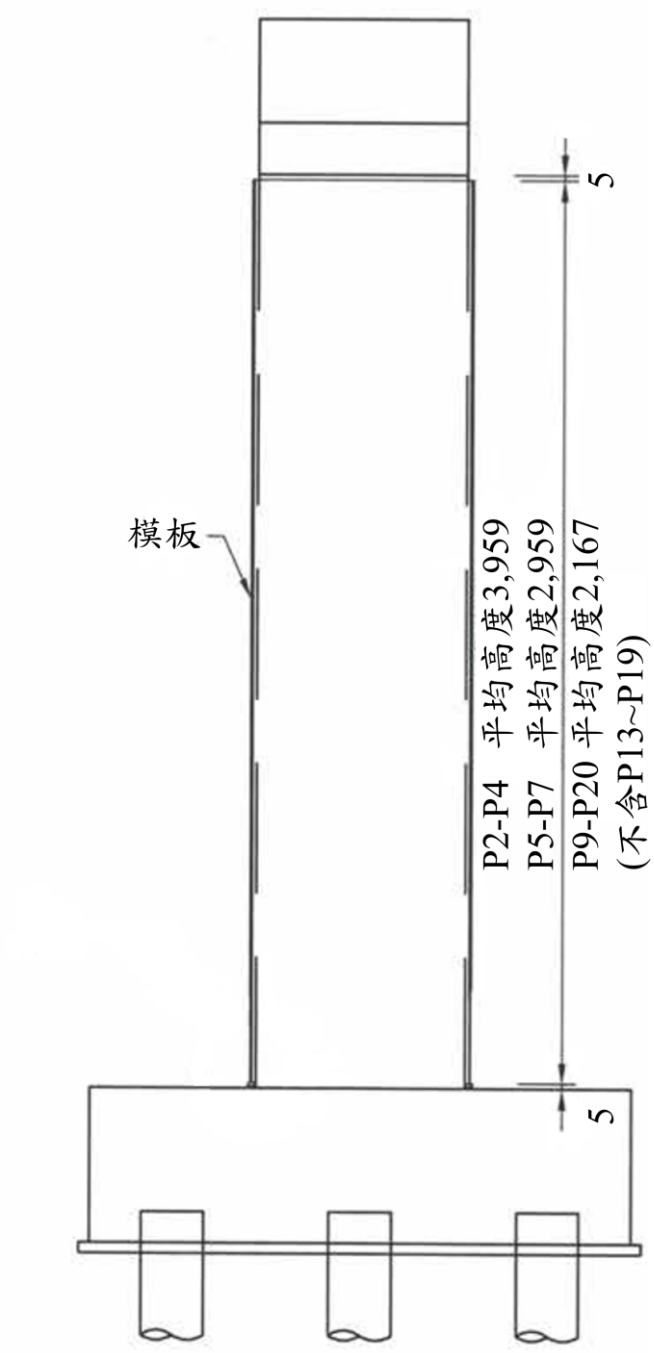
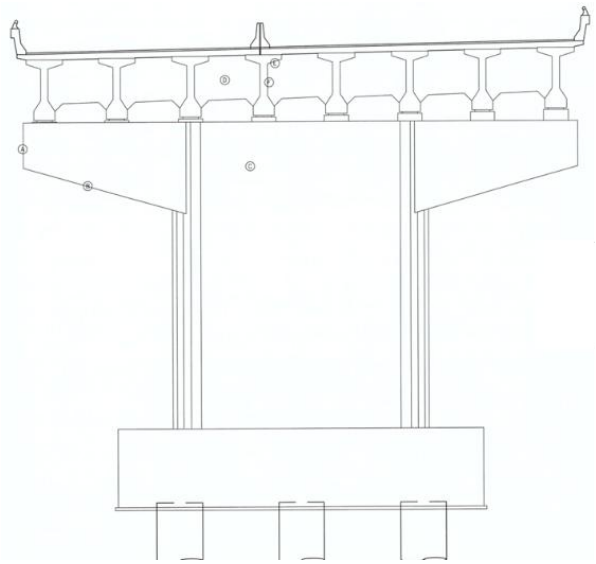


圖 2.18 臨海公路橋梁混凝土墩柱包覆側視示意圖[13]



A.帽梁左右側面位置，整面保護層修補。

B.帽梁漸變段下緣，整面保護層修補。

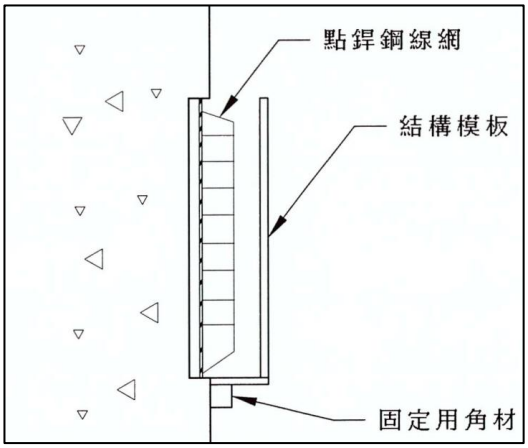
C.帽梁側面，局部保護層修補。

D.橫隔梁，局部保護層修補。

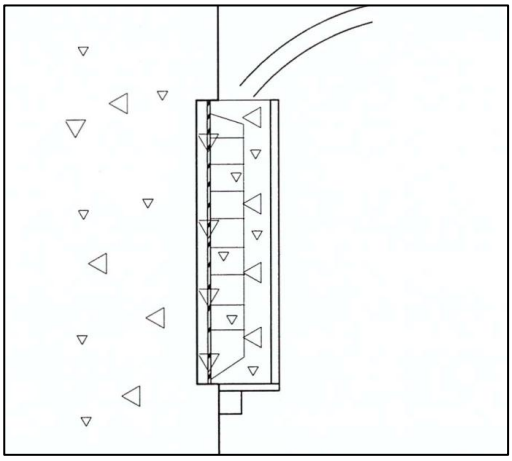
E.大梁上翼板，整面保護層修補。

F.大梁其它位置，局部保護層修補。

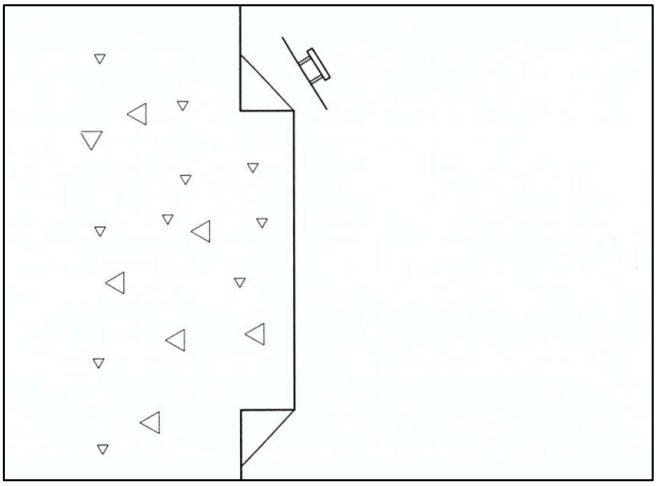
圖 2.19 臨海公路橋梁混凝土保護層修復鋼筋除銹示意圖[13]



(a)固定灌漿用結構模板



(b)灌注無收縮混凝土及養護



(c)拆模後用鏝刀以環氧樹脂無收縮水泥砂漿抹平順接及養護

圖 2.20 臨海公路橋梁混凝土保護層修復施工步驟[13]

5. 臨海公路橋梁案例 [玄寶大橋]

(1) 案例橋梁基本資料

案例橋梁位於中港溪下游出海口附近，跨越中港溪連接竹南鎮與後龍鎮，全長 840 m。南北向為雙向分離型式，橋面全寬分別為 19 m，合計 38 m，中央間隔約 1 m。橋梁於民國 85 年 3 月竣工，橋齡約 29 年。其中上構型式為預力混凝土 I 型梁，跨距為 24@35 m 等跨距，橋面板為 3 跨鉸接連續，每 3 跨設置一伸縮縫，如圖 2.21、圖 2.22 所示。案例橋梁依交通部「公路橋梁設計標準(76)」及美國公路運輸協會(AASHTO, 1983)設計，其混凝土構件保護層厚度，上部結構至少 4 cm，下部結構 10 cm 以上。使用之混凝土強度，橋面板、橋墩及橋台為 210 kg/cm^2，預力梁為 350、320 kg/cm^2。

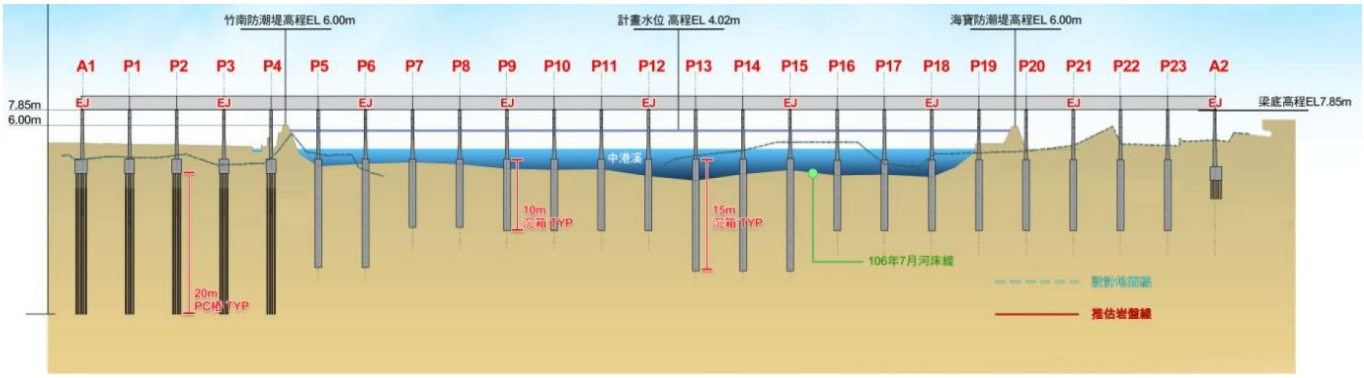
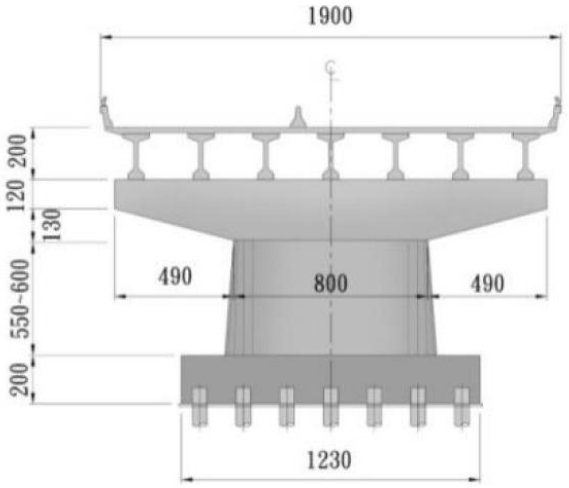
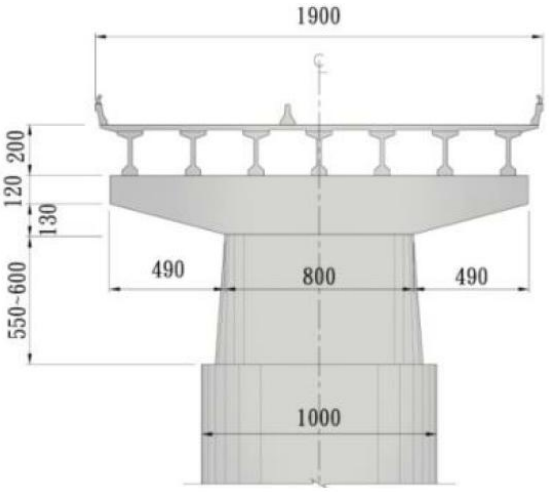


圖 2.21 臨海公路橋梁立面圖[14]



(a) P1~P4(單向)斷面圖



(b) P5~P23(單向)斷面圖

圖 2.22 臨海公路橋梁墩柱斷面圖[14]

(2) 案例橋梁狀況

①案例橋梁所屬環境：

案例所屬鹽害環境依表 2-16、表 2-17 為甲區海岸線之中度鹽害區域。由該橋民國 108 年目視檢視結果可看出，案例橋梁劣化情形與設計規範之混凝土抗壓強度、上部結構之鋼筋最小保護層厚度及濱海環境調查資料的不足有絕對關係。



(a)北上線護欄保護層不足，鋼筋外露　(b)北上線墩柱破損，鋼筋外露

(c)南下線大梁保護層不足，鋼筋外露　(d)南下線墩柱破損，鋼筋外露

圖 2.23 臨海公路橋梁橋梁劣化照片[14]

②案例橋梁劣化情形：

案例橋梁並藉由混凝土鑽心取樣與氯離子含量檢測，針對各構件不同深度氯離子含量數據進行迴歸分析，可得各試體所在位置之混凝土表面氯離子含量 C_0 (%)及氯離子擴散係數(cm^2/sec)，如表 2-22 所示，橋墩(P19D-2 及 P5U-3)靠海側混凝土 C_0 介 0.103~0.801 %，而橋墩(P19U-4 及 P5D-3)靠山側混凝土 C_0 介於 0.035~0.401 %，靠海側與山側之混凝土 C_0 高達 2 倍差異，且感潮區墩柱(P5U-3 及 P5D-3)之混凝土 C_0 偏高；SPAN20 預力大梁(SPAN20-S)靠海側混凝土 C_0 為 0.039 %，而 SPAN20 預力大梁(SPAN20-N)靠山側混凝土 C_0 為 0.048 %，靠海側與山側之混凝土 C_0 無太大差異，且因 SPAN20 預力大梁位於堤防上，導致其表面氯離子含量 C_0 偏低。

感潮區墩柱(P5U-3 及 P5D-3)混凝土表面氯離子含量與交通部公路總局「臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究總期末報告」中，鹽害環境下的作用等級(表 2-5)嚴重鹽害區(I)之混凝土表面氯離子含量 C0 相近；非感潮區墩柱(P19D-2)混凝土表面氯離子含量與交通部公路總局「臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究總期末報告」中，鹽害環境下的作用等級表 2-5 中度鹽害區(II)之混凝土表面氯離子含量 C0 相近。

美國 Life-365 手冊及日本土木學會(2001)「混凝土標準示方書(維持管理編)」對於混凝土內鋼筋開始腐蝕之臨界氯離子濃度，大多採用 0.05 %。因此感潮區墩柱、非感潮區部分墩柱之混凝土內鋼筋已產生腐蝕情形，而 SPAN20 預力大梁則接近臨界氯離子濃度。將 P5、P19 橋墩及 SPAN20 預力大梁試體迴歸分析得到之混凝土表面氯離子含量 C0 及氯離子擴散係數，檢核民國 104 年修訂版「公路橋梁設計規範」保護層相關規定，如表 2-15 所示，是否能滿足 50 年之服務年限要求。

由表 2-23 可知，SPAN20 預力大梁與非感潮區墩柱(P19D-2 與 P19U-4)依據民國 104 年修訂版「公路橋梁設計規範」規定之鋼筋保護層厚度，可滿足 50 年服務年限要求。感潮區墩柱(P5D-3 與 P5U-3)依據 104 年修訂版「公路橋梁設計規範」規定之鋼筋保護層厚度，無法滿足 50 年服務年限要求。

(3) 案例橋梁維修設計

案例橋梁是採用選擇合適的修補材料(考量強度、收縮、彈性模數)與落實表面處理工序(混凝土敲除、薄邊處理、鋼筋除銹，如表 2-23 所示)進行修復，其改建經費約為 9.13 億元(112 年，決標金額，含四次新增項目與三次新增數量)，修補材料規格如表 2-24 所示，對於保護層厚度(橋墩、支承墊、基礎、箱梁內外側為 10 cm)、對抗壓強度有明確要求，也使用II型水泥、熱浸鍍鋅鋼筋等。

依案例橋梁氯離子檢測結果，感潮區墩柱(P5D-3、P5U-3)目前氯離子含量已明顯超過鋼筋腐蝕臨界值(0.05 %)，且 50 年後仍

會持續升高，表示即使按 104 年版公路橋梁設計規範的保護層厚度也無法達到 50 年耐久性。

表 2-22 臨海公路橋梁鑽心試體氯離子含量迴歸分析結果[14]

鑽心試體	表面氯離子含量 C_0(%)	氯離子擴散係數 (cm^2/sec)(E-08)
P19D-2	0.103	1.628
P19U-4	0.035	5.099
P5D-3	0.401	3.092
P5U-3	0.801	5.972
SPAN20-N	0.048	1.463
SPAN20-S	0.039	4.576

表 2-23 臨海公路橋梁構件鋼筋位置之氯離子含量[14]

編號	保護層厚度(cm)	現況(23 年)	50 年	備註
		氯離子含量(%)		
P19D-2	10	0.00409	0.0168	原設計
	10	0.00409	0.0168	104 年修訂版「公路橋梁設計規範」(設計年限 50 年)
P19U-4	10	0.00852	0.014	原設計
	10	0.00852	0.014	104 年修訂版「公路橋梁設計規範」(設計年限 50 年)
P5D-3	10	0.054 (>0.05)(NG)	0.125 (>0.05)(NG)	原設計
	10	0.054 (>0.05)(NG)	0.125 (>0.05)(NG)	104 年修訂版「公路橋梁設計規範」(設計年限 50 年)
P5U-3	10	0.226 (>0.05)(NG)	0.373 (>0.05)(NG)	原設計
	10	0.226 (>0.05)(NG)	0.373 (>0.05)(NG)	104 年修訂版「公路橋梁設計規範」(設計年限 50 年)
SPAN20-N	4	0.018	0.026	原設計
	5.0	0.013	0.021	104 年修訂版「公路橋梁設計規範」(設計年限 50 年)
SPAN20-S	4	0.024	0.028	原設計
	5.0	0.021	0.026	104 年修訂版「公路橋梁設計規範」(設計年限 50 年)

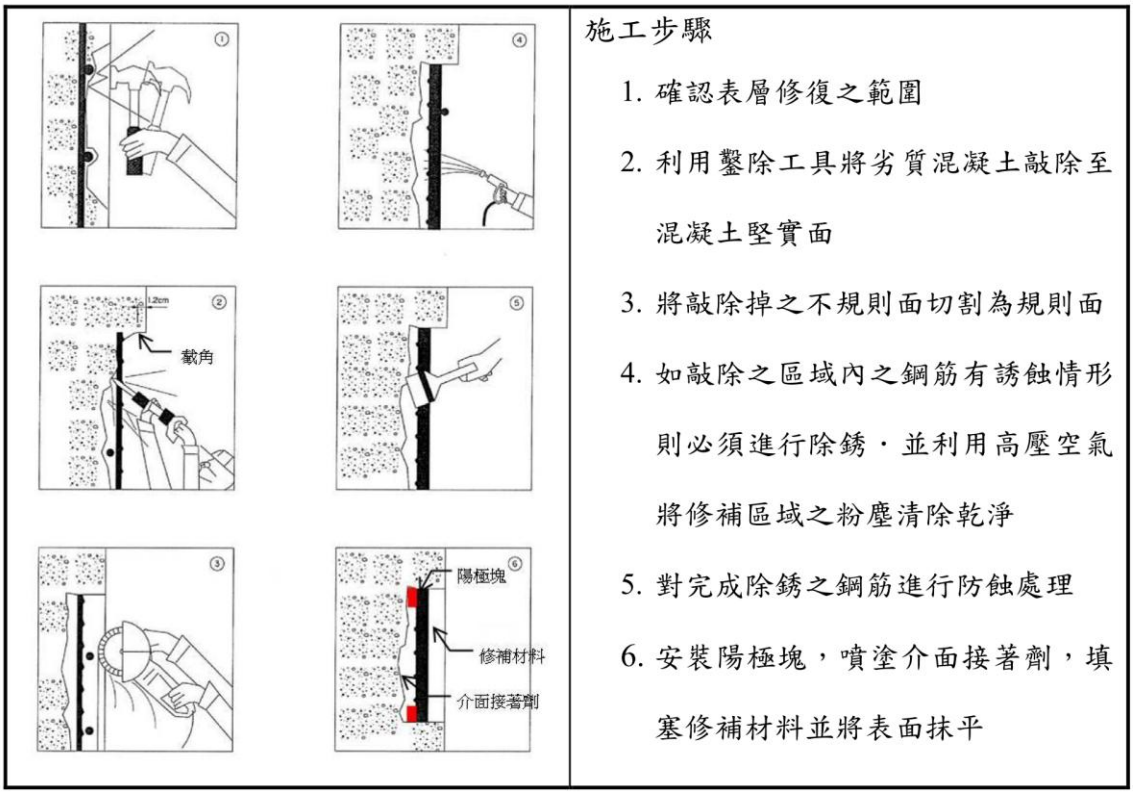


圖 2.24 混凝土表層修復工序[15]

表 2-24 臨海公路橋梁構件修補材料規格[15]

試驗項目	測試結果	測試方法
抗壓強度	≥180 kgf/cm² 7 天 ≥220 kgf/cm² 28 天	CNS1010 (ASTMC109-90)
黏結強度	≥15 kgf/cm²	ASTM C882-99
膨脹率	0~0.4 % @7 天	ASTM C827
最大水溶性氯離子含量	≤0.15 kg/m^3	CNS3090(標準) CNS13465(方法)

6. 離島跨海公路橋梁案例 [金門大橋]

(1) 案例橋梁基本資料

案例橋梁全長 4.77 km，為我國首座大規模之跨海橋梁，建造經費約為 96.62 億元（101 年決標，含追加/變更經費），其配置區域分為主橋段、邊橋段與引橋段，皆採預力混凝土箱型梁橋，其中主橋段主要跨越通航航道及深槽區，採 5 橋塔 6 跨連續、主跨徑 200 公尺之預力混凝土脊背橋。考量案例橋梁為跨海橋梁，海水、海風等外在條件易對混凝土構造物造成侵蝕危害，為提昇橋梁耐久性，於規劃設計階段配合工址環境調查以了解工址腐蝕條件，並收集國內外鋼筋混凝土防蝕對策研究與工法評估，做為案例橋梁防蝕目標及策略，亦擬訂監測計畫，配合施工階段、完工階段之構件初始值量測及長期材料腐蝕試驗與橋墩腐蝕監測，用以進行案例橋梁所使用混凝土之相關材料特性探討。

主橋為 6 跨連續脊背橋(如圖 2.25 所示)，橋跨配置為 125+4@200+125=1,050 m，上部結構型式為預力混凝土箱型梁；銜接主橋兩端之邊橋為 3 跨連續預力混凝土箱型梁懸臂工法橋，各 1 單元，橋跨配置為 110+150+100=360 m，其餘部分則為引橋，共計 13 單元，亦為預力混凝土箱型梁橋採支撐先進工法施工，跨徑配置有 30+3@50+45=225 公尺、45+4@50=245 m、45+3@50=195 m、2@45+3@50=240 m 及 45+2@50=145 m 等 5 種，橋梁配置詳如圖 2.26 所示。主橋橋塔及各橋段之下部結構橋墩為場鑄鋼筋混凝土構造。基礎型式為 150 cm、200 cm 與 250 cm 直徑之全套管基樁。基礎板高程設計原則為位於深槽區之主橋及邊橋退潮時露出基礎板但不露出基樁；引橋則於退潮時基礎板及基樁皆不露出。



圖 2.25 離島跨海公路橋梁照片[16]

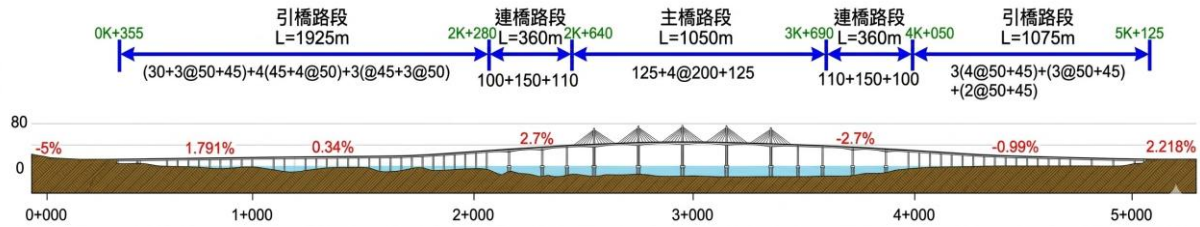


圖 2.26 離島跨海公路橋梁僑梁配置圖[16]

(2) 案例橋梁設計

針對本案例橋梁混凝土設計之混凝土抗氯離子穿透能力(構件為橋梁下部結構(不包含橋台)之基樁、基礎、墩柱、橋塔及上部結構之箱型梁)，為 56 天以內齡期應符合 CNS 14795 表 1「低」以下之標準(通過電荷量≤2,000)。

①上部結構

案例橋梁工址位於海水中及近海岸受海水飛沫之影響，屬極嚴重鹽害區，今基於整體考量，均建議混凝土使用 C_3A 含量適度之 TYPE II 水泥添加高爐石粉或飛灰等卜作嵐材料(飛灰、高爐石粉上限 45%)或 IS(MS)高爐中度抗硫水泥、IP(MS)卜作嵐中度抗硫水泥，最大水膠比為 0.40，另混凝土強度採 420 kgf/cm^2，亦可增加其水密性，有助於防蝕，並配合混凝土抗氯離子穿透能力試驗，要求使用之配比須符合 56 天齡期混凝土符合 CNS 14795 等級為"低"以下標準。在設計上採 0 張應力以避免裂縫產生。預力鋼腱部分，施完預力後於套管內灌注水泥砂漿保護，以達到防蝕效果。在混凝土保護層加厚處理方面，依工址腐蝕條件，配合現行規範辦理；另於施工規範要求現場施工應妥善控制水泥與混凝土品質及保護層厚度(如表 2-25)，以達到防蝕需求。

②下部結構

橋墩、橋台及基礎板係採用現場澆置施工，施工時應配合控制水泥與混凝土品質及保護層厚度(如表 2-25)，以達到防蝕需求。墩柱及橋塔採用自充填混凝土(SCC)，具有高度流動能力，

澆置過程不需振動搗實，完全藉由自身流動性能填充至鋼筋間隙及模板之各角落，克服鋼筋密集及封閉性空間不易澆置構件之缺點，可提高混凝土施工品質，增進結構物耐久性。依施工技術規範之規定，350 kgf/cm^2 混凝土強度之最大水膠比為 0.40，可符合 ACI 之規定，並配合混凝土抗氯離子穿透能力試驗，要求使用之配比須符合 56 天齡期混凝土符合 CNS 14795 等級為”低”以下標準。混凝土使用 C_3A 含量適度之 TYPEII 水泥添加高爐石粉或飛灰等卜作嵐材料(飛灰、高爐石粉上限 45 %)，鋼筋採鍍鋅鋼筋或環氧樹脂鋼筋，加厚保護層，以增加其防蝕效果。基礎施工(巨積混凝土)為防制裂縫產生，若採分層澆置時，澆置接著面須作黏結處理後方可澆置下一昇層混凝土，位於外露面之接縫須作防水處理以杜絕可能的腐蝕因子，混凝土養護期最短 14 天，且養護期間應以適當措施控制其冷卻速率，養護期間混凝土表面溫度每 24 小時之累計溫降不超過 11℃。

③橋墩基樁

基樁長期埋置於海水及地表面下係受土壤圍束及海水中低含氧量之構造物，其侵蝕危害程度較外露於潮汐飛沫帶之構造物為低，案例橋梁之基樁混凝土建議亦選用 C_3A 含量適度之 TYPE II 水泥添加高爐石粉或飛灰等卜作嵐材料(飛灰、高爐石粉上限 45 %)，最大水膠比不得大於 0.4 及 315 kgf/cm^2 混凝土(設計強度 280 kgf/cm$^{2)}$，樁體設計採 10 cm 保護層，配合混凝土抗氯離子穿透能力試驗，要求使用之配比須符合 56 天齡期混凝土符合 CNS 14795 等級為”低”以下標準。施工時若能控制水泥混凝土品質均勻度，且對混凝土保護層厚度(表 2-25)確實管控，可減輕鹽份對混凝土結構侵蝕影響。

④外置預力斜索

脊背橋使用之外置預力斜索採同步射出高密度聚乙烯(HDPE)內套管並灌注油脂之鍍鋅單根鋼絞線(Co-extruded mono-strand)；並配合高密度聚乙烯(HDPE)材質外套管具四層防蝕保護功能，應可滿足耐久性需求。

⑤鍍鋅鋼筋之應用

案例橋梁為提升耐久性於橋墩之基礎(不含基樁)、墩柱(含伸入箱型梁內之鋼筋)、盤式支承之混凝土墊，鋼筋均採用熱浸鍍鋅鋼筋(圖 2.27)。且採用之鋼筋續接器、施工樣架及基礎組立鋼筋支撐架，亦須配合鍍鋅。所有熱浸鍍鋅鋼筋之附著量及均勻性須符合 CNS 1247 相關規定。

表 2-25 離島跨海公路橋梁鋼筋保護層厚度規定[17]

項目	構件	保護層(cm)	備註
上部結構 (預力箱型梁橋)	預力橋橋面板頂面、橋塔	6.5	如橋面板採用鋼性路面，則需另加 1.5 cm 之磨耗層。
	箱型梁外側	6.5	
	箱型梁內側及隔梁	4.0	
下部結構 與擋土牆	橋墩(主鋼筋) 橋墩(繫筋箍筋及螺旋筋)	12.0 10.0	
	橋台、翼牆及擋土牆	10.0	
	基礎(含橋墩、橋台、翼牆及擋土牆等之基礎)、沉箱	10.0	
	場鑄基樁	10.0	
其他構件	橋護欄、橋隔欄	4.0	
	緣石	3.0	
	進橋板頂面及側面 進橋板底面	5.0 7.5	
	箱涵外側 箱涵內側	10.0 5.0	

註：鋼筋之保護層係由混凝土外緣至繫筋、箍筋及螺旋筋之外緣



(a)鋼筋於鍍鋅槽鍍鋅



(b)鍍鋅鋼筋於現場擺放



(c)鋼筋組立



(d)現場扭力試驗



(e)鋼筋續接器(公頭配合帽蓋)



(f)鋼筋續接器(母頭配合保護)

圖 2.27 離島跨海公路橋梁鍍鋅鋼筋生產及現場施工照片[16]

7. 臨海跨河公路橋梁案例 [淡江大橋]

(1) 案例橋梁基本資料

案例橋梁主橋段橫跨淡水河，建造經費約為 230.38 億元(108 年決標金額，1~3 標合計)，跨徑配置為 2@75+450+175+75+70=920 m，為全世界最長單塔不對稱斜張橋(立面圖參見圖 2.28、圖 2.29)，起迄里程 STA5K+780~6K+700。上部結構為複合斷面鋼箱梁，下部結構為場鑄鋼筋混凝土構造，橋墩基礎採用 Φ2.5 m 及 Φ2 m 之全套管基樁。西側上下匝道橋梁長約 910 m(STA4K+870~5K+780)，橋梁結構配置大致可區分為 3 個區段，詳見表 2-26。案例橋梁東側交流道橋梁長約 211 m(STA6K+700~6K+911)，結構配置詳見表 2-27。



圖 2.28 臨海跨河公路橋梁照片[17, 18]

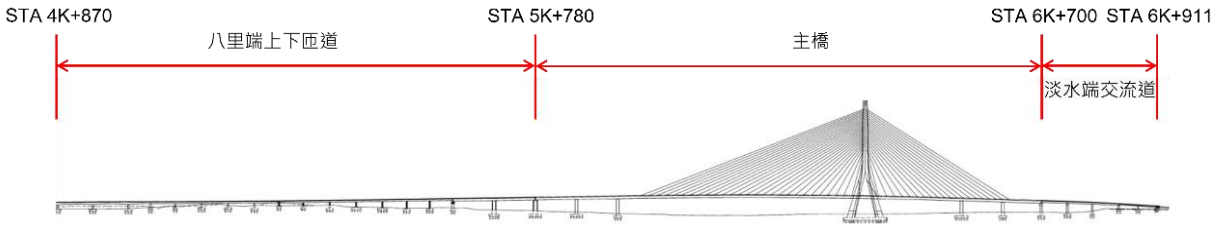


圖 2.29 臨海跨河公路橋梁案例立面圖[17, 18]

表 2-26 臨海跨河公路橋梁案例西側上下匝道橋梁結構配置表[17, 18]

類別	單元編號	跨徑配置(m)	橋梁型式	施工方式
一般橋梁	U1N(S)	40+2@65+40=210	預力混凝土箱型梁橋	場鑄逐跨工法
	U2N(S)	45+3@48+45=234	預力混凝土箱型梁橋	場鑄逐跨工法
	U3N(S)	44+3@48+44+2@42=316	預力混凝土箱型梁橋	場鑄逐跨工法
	U4	2@75=150	預力混凝土箱型梁橋	場撐工法
	RR2	3@48+45=189	預力混凝土箱型梁橋	場鑄逐跨工法
	RL1	45+48=93	預力混凝土箱型梁橋	場撐工法
	BR2 (A~C)	(3@35)+(2@22.5+21.75)+ (21.75+2@21.56)=236.62	預力混凝土板梁橋	場撐工法
	BL1 (A~C)	(2@20.38+20.3)+(20.3+2@21.5) +(3@35)=229.36	預力混凝土板梁橋	場撐工法
公車專用道	L02	48+45+44=137	預力混凝土箱型梁橋	場鑄逐跨工法
	L03	3@48=144	預力混凝土箱型梁橋	場鑄逐跨工法
	L04	44+2@42=128	預力混凝土箱型梁橋	場鑄逐跨工法

表 2-27 臨海跨河公路橋梁案例東側交流道橋梁結構配置表[17, 18]

類別	單元編號		橋長(m)	橋梁型式	施工方式
一般橋梁	U5N(S)		1@47.7	預力混凝土箱型梁橋	場撐工法
	U6N(S)		40.3+45 =85.3(45.3+48=93.3)	預力混凝土箱型梁橋	場撐工法
	U7N(S)		2@35=70	預力混凝土板梁橋	場撐工法
	RL2	A/B	2@35=70 / 2@35=70	預力混凝土板梁橋	場撐工法
		C	1@37.3	預力混凝土箱型梁橋	
	RR3	A	32.4+2@40+35=147.4	預力混凝土箱型梁橋	場鑄逐跨工法
		B	3@35=105	預力混凝土板梁橋	場撐工法
	ML2	A	34+30.3+33=97.3	預力混凝土板梁橋	場撐工法
		B	32.9+33.1+48.7=114.7	預力混凝土箱型梁橋	
	MR1	A	32.8+40=72.8	預力混凝土箱型梁橋	場撐工法
		B	2@35=70	預力混凝土板梁橋	
	BL2		30+32+28=90	預力混凝土板梁橋	場撐工法
公車專用道	L05		47.7+42.9+46.5=137.1	預力混凝土箱型梁橋	場撐工法
	L06		17.5+18+17+17.5=70	預力混凝土板梁橋	場撐工法

(2) 案例橋梁設計探討

①耐久性設計依據：

案例橋梁依據 104 年公路橋梁設計規範進行耐久性設計，橋址於極嚴重鹽害區。

其環境分區另參考美國加州交通廳設計者備忘錄(編號 10-5)及丹麥 DNV 規範進行海水中環境分區(表 2-28)。

案例橋梁設計年限 120 年，部分構件須於年限內進行次數不等的更換以滿足設計年限要求(各構件詳見表 2-29)。

表 2-28 臨海跨河公路橋梁案例考量之海水中環境分區[17, 18]

區域	美國加州交通廳		DNV 規範		案例橋梁		備註
	計算方法	高程(m)	計算方法	高程(m)	計算方法	高程(m)	高程(m)
大氣區	MHHW +6m 以上	≧1.53+6 =7.53	最高天文潮位 +0.6H1/3	≧2.0+0.6*1.72=3.82	設計水位+6m 以上	≧3.03+6 =9.03	≧10
飛沫區	大氣區下界至 MLLW	7.53 ~ -0.95	大氣區下界至最低天文潮位 +0.4H1/3	3.82 ~ -(1.67+0.4*1.72)= -2.358	大氣區下界至最低天文潮位 +0.4H1/3	9.03 ~ -(1.67+0.4*1.72)= -2.358	10 ~ -3
水下區	飛沫區 以下	< -0.95	飛沫區 以下	< -2.358	飛沫區 以下	< -2.358	< -3

註：H1/3(重現期 100 年之有義波高)

表 2-29 臨海跨河公路橋梁案例各構件設計年限[17, 18]

區段	結構組件	設計年限	更換次數
主橋段	橋塔	120	-
	斜拉鋼索	65	1
	支承系統	40	2
	阻尼器	50	2
	鋼橋面	120	-
	密級配瀝青混凝土鋪面(DGAC)	10	11
	流動性瀝青混凝土鋪面 (Gussasphalt, Guss)	20	5
	橋面伸縮縫	30	3
	錨碇設施	70	1
	金屬橋護欄	40	2
	排水	40	2
	燈柱	120	-
	標誌牌	40	2
	塗裝	25	4
	橋墩	120	-
	樁帽	120	-
	基樁	120	-
	檢測維修桁架	40	2
	錨固鋼索	65	1
	船舶防撞保護	20	5
	航道警示燈	20	5
匝(環)道(含 P100 及 P160 橋墩、基礎)	土木結構(主梁、橋墩、基礎)	120	-
	橋面磨耗層	10	11
	混凝土護欄(主體)	50	2
	盤式支承	40	2

②耐久性設計考量

A.混凝土材料規定：案例橋梁針對結構用混凝土之檢驗，增列條文『(1)抗氯離子滲透性試體的製作、養護和試驗按北歐 NT BUILD 492 (Chloride Migration Coefficient from Non – Steady - State Migration Experiments)試驗法辦理。』各齡期耐久性設計要求的混凝土氯離子擴散係數，如表 2-30 所示。

B.構造措施：引道預力梁採全壓應力(0 張應力)設計，避免裂縫產生;主橋混凝土裂縫寬度依據歐洲規範 2 第 1-1 部分第 7.3.4 條,檢核適用性極限狀態(SLS)組合 1 之最大裂縫寬度(如表 2-31))。本計畫在服務年限預測模式中加入 β_{cl} 係數，考量混凝土瑕疵及裂縫的影響,依據服務年限預測分析結果,訂定鋼筋保護層厚度的規定(如表 2-32)。

C.施工品質要求：案例橋梁針對結構用混凝土、自充填混凝土、巨積混凝土增列「溫度管控」相關規定，以維其施工品質，下以結構用混凝土說明如下。依據 ACI 301-10 建議，當結構物中混凝土最小澆置尺寸達 120 cm 以上、膠結材料用量超過 390 kg/m^3 或在難以散熱的環境下澆置時，須依工程特性考量水合熱問題。主橋塔混凝土，承包商應於施工前提送混凝土溫度管控計畫書，並經工程司核可，其內容至少包括：

(a) 確保混凝土澆置後之內部最高溫度不大於 70℃及心表溫差不致超過 20 ℃之相關措施。

(b) 混凝土最高溫度及心表溫差之計算書。

(c) 現場溫度監測計畫(包含溫度監測儀器及配置圖、監測紀錄提送頻率、溫度異常之應變措施等)。

(d) 養護及保護措施(包含材料及方法、養護期程、模板拆除程序等資料)。

③附加保護措施

河道內橋墩位於極嚴重鹽害區域，且易受海水、潮汐及飛沫之影響，對於位於河道之橋墩採取附加的保護措施，包括(1)外層主筋及箍筋採熱浸鍍鋅鋼筋，熱浸鍍鋅鋼筋鍍鋅層附著量應符合 CNS 14771 A2283 等級一之規定；(2)於橋墩表面進行混凝土防蝕處理(一般混凝土防蝕塗裝、聚脲混凝土防蝕塗裝)。有關附加保護措施及範圍請參見表 2-23。

表 2-30 臨海跨河公路橋梁案例各齡期耐久性設計之混凝土氯離子擴散係數[17, 18]

類型		部位		保護層 (cm)	氯離子擴散係數 $D_{nssm,k}$($10^{-12}m^2/s$)	
					28 天	56 天
主橋	下部結構	橋墩(塔)	大氣區 (＞EL. 10)	7.5	5.0	3.0
			水下區+飛沫區 (EL. -11.4~10)	10.0	5.0	3.0
		橋墩(塔)基礎		10.0	7.0	5.0
		場鑄基樁		10.0	7.0	5.0
其他橋梁	上部結構	預力箱型梁	橋面板頂面	7.5	5.0	3.0
			箱型梁外側	7.5	5.0	3.0
			箱型梁內側及隔梁	4.0	5.0	3.0
	下部結構、擋土牆	河道內橋墩	大氣區 (＞EL. 10)	7.5	5.0	3.0
			水下區+飛沫區 (EL. -11.4~10)	10.0	5.0	3.0
		河道外橋墩		7.5	5.0	3.0
		橋臺、翼牆及擋土牆		10.0	7.0	5.0
		橋墩、橋臺、翼牆及擋土牆等之基礎		10.0	7.0	5.0
		場鑄基樁		10.0	7.0	5.0
	其他	橋護(隔)欄		5.5	5.0	3.0

表 2-31 臨海跨河公路橋梁案例最大裂縫寬度[17, 18]

橋塔和橋墩	大氣區	最大裂縫寬度 w = 0.25 mm
	飛沫區	最大裂縫寬度 w = 0.15 mm
	水下區	最大裂縫寬度 w = 0.25 mm
複合橋面板	混凝土版	最大裂縫寬度 w = 0.25 mm

表 2-32 臨海跨河公路橋梁案例鋼筋保護層厚度規定[17, 18]

	部位	保護層 (cm)	備註
匝(環)道	橋面板頂面	7.5	
	橋面板底面	7.5	
	箱型梁、板梁外側	7.5	
	箱型梁、板梁內側及隔梁	4.0	
	場鑄基樁	10.0	
	橋墩及混凝土支承墊	7.5	河道內橋墩高程 >EL.+10.0m 區域及河道外橋墩
		10.0	河道內橋墩高程 ≦EL+10.0m 區域
	橋台、翼牆及擋土牆	10.0	
	橋墩、橋台、翼牆及擋土牆等之基礎	10.0	
	箱涵內側	10.0	
	箱涵外側	10.0	
	橋護欄、橋隔欄	5.5	
	緣石	5.5	
	進橋板頂面及側面	6.5	
	進橋板底面	10.0	
主橋段	P130 橋塔和橋墩(P110，P120，P140 及 P150)	7.5	外層結構鋼筋
		10.0	外層結構鋼筋(大氣區以下(EL≦+10.0m))
		4.0	外層溫度筋
		4.5	內層
	橋護欄	5.5	
	支承墊	7.5	
	複合橋面板，頂部(密封)	3.5	
	複合橋面板，底部	3.0	

表 2-33 臨海跨河公路橋梁案例附加保護措施及範圍[17, 18]

對策	方法	範圍	
熱浸鍍鋅處理	熱浸鍍鋅鋼筋	匝(環)道 (含 P100，P160)	柱底至帽梁頂範圍內之最外層主筋及箍筋
		主橋段 (P110~P150)	最外層的主筋及橫向箍(繫) (飛沫區(EL-3.0m~+10.0m)
混凝土防蝕處理	一般混凝土防蝕塗裝	河道內橋墩	高程 EL-1.0~+10.0m
	聚脲混凝土防蝕塗裝		高程 EL-1.0m 以下至樁帽頂

備考：河道內橋墩，主橋 P100~P160；引道公路橋 P17、P18N(S)、P19N(S)、RL2P3、RL2P4、RR3P1、ML2P3、ML2P4、BL2P2、MR1P1；公車專用道 P18L、P19L。

2.1.2 鋼橋

1. 基隆臨海鋼箱型拱橋案例 [社寮橋]

(1) 案例橋梁基本資料

案例橋梁於 104 年 4 月竣工通車，為 185 m 之臨海鋼箱型拱橋，拱肋由橋台 A1 端為單拱型式，過橋梁中點後，分岔變為雙拱型式，直至橋台 A2 兩端。拱橋高 43.2 m，全橋無落墩。橋面雙向共兩車道，兩側各有一個機車道及人行道。主拱圈跨越主梁上方至 2/3 分叉成雙拱，橋尾兩側各配置 4 處鋼索，中央配置 20 處鋼索，全橋合計有 28 處鋼索。



圖 2.30 基隆臨海鋼箱型拱橋照片[19]

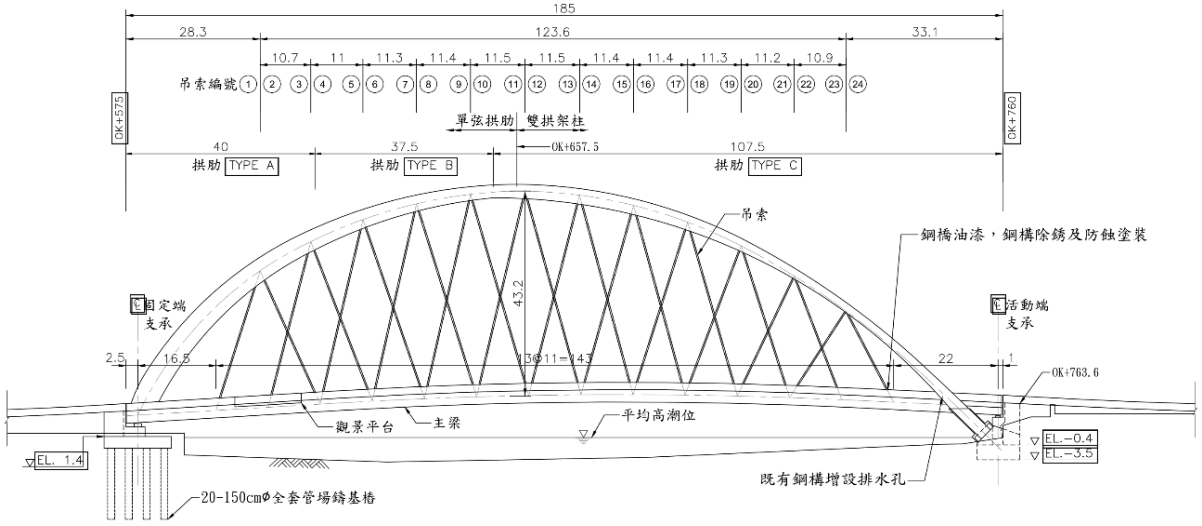


圖 2.31 基隆臨海鋼箱型拱橋立面圖[19]

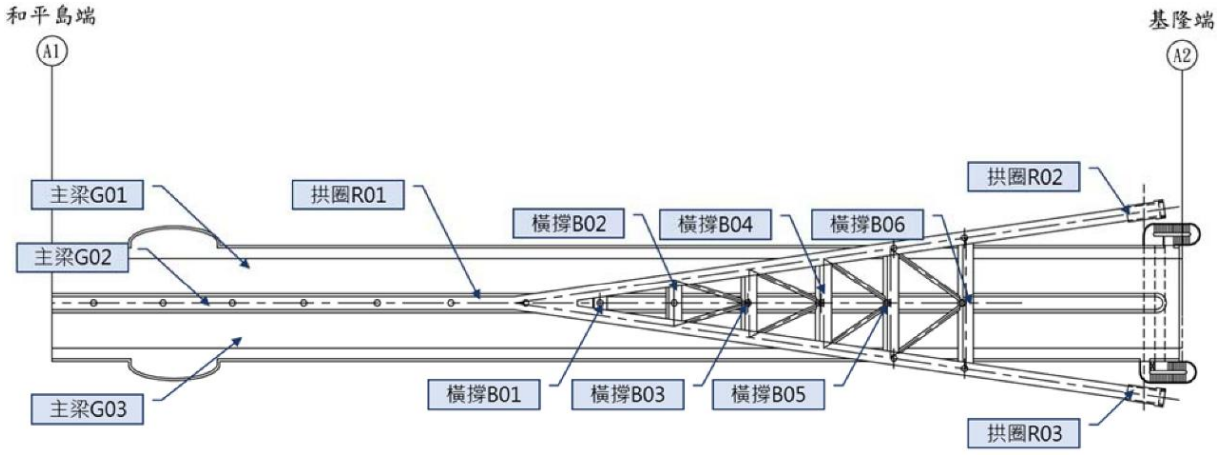


圖 2.32 基隆臨海鋼箱型拱橋鋼索圖[19]

(2) 案例橋梁狀況：

案例橋梁鋼構皆有銹蝕及滲水之情形發生，其中以主梁G02(如圖 2.33(a)所示)及拱圈 R01~拱圈 R03(如圖 2.33(b)所示)特別嚴重，其 D.E.R.&U.值為 3322。鋼箱內部檢測結果之劣化/缺失樣態重點說明如下：

①油漆燒焦起泡(如圖 2.34(a)所示)：係因施工時外側進行銲接作業，導致鋼構件及內部表面燒焦，產生銹蝕情形。

②螺栓、鋼板及銲道銹蝕(如圖 2.34(b)所示)：係因雨水經由連接板接縫進入鋼箱，長期堆積箱體內，導致銹蝕情況。

③螺栓/連接板未塗裝(如圖 2.34(c)所示)：係因未確實進行塗裝，導致構件及螺栓有微幅表面銹蝕情形產生。

④箱內積水(如圖 2.34(d)所示)：係因雨水自連接板滲入，造成箱內積水。



(a)G02 大梁　　(b)拱圈

圖 2.33 基隆臨海鋼箱型拱橋大梁與拱圈劣化照片[20]



(a)油漆燒焦起泡　　(b)銲道銹蝕

(c)螺栓/連接板未塗裝　　(d)箱內積水

圖 2.34 基隆臨海鋼箱型拱橋箱梁內劣化照片[20]

(3) 案例橋梁設計

案例橋梁維修改善經費約為 3.5 億元(113 年，決標金額，含基隆市特殊橋梁先行鋼索除銹、油漆處理約 6,200 萬元)。其塗裝系統如表 2-34 至表 2-36，示意圖分別如、圖 2.35，相關說明如下。

①塗裝施工面應在乾燥情況下施工，各道之塗膜可採無氣噴塗法或手工塗刷，其中鋼構件與接合板之間隙，應於塗刷時將縫隙填滿。應以塗裝檢查員資格人員(CIP)擔任自主品管工作，以增加維護工作品質。

②塗裝前表面處理注意事項：清洗用水須為清潔之淡水，不得含雜質或油質，且不得使用會傷害被清洗面之清潔劑及工具。

③接合板處孔隙填補規定：既有鋼構於接合有部分空隙，須採用 PU 系填縫膠填補或晶蠟帶等防水材填滿止水，經確認空隙填補完成後，再進行塗裝程序。

④所有鋼結構於表面處理完成後，須於 4 小時內塗裝第一層底漆，如添加抑銹劑則另依添加劑規定辦理。

⑤每一道漆施塗時，須完全覆蓋施工面，且每一道漆完成必須遵照塗裝材料規定之塗裝間隔，才可施塗下一道漆，如超過規定時間時，須將漆面磨粗以增加其附著力。

⑥表面潮濕、拱圈內部大氣相對濕度在 85 %RH 以上、氣溫 10°C~35°C 範圍之外、鋼材表面溫度大於 50°C 及鋼材表面有起泡狀況時，應避免施工。

⑦兩液型油漆，主劑與硬化劑必須按塗裝材料製造商規定之比例均勻混合；如須稀釋應使用專用調薄劑，以防氣泡及針孔之發生。

表 2-34 基隆臨海鋼箱型拱橋鋼橋油漆內面(維修)(Type A)[20]

項次	處理步驟	塗料名稱	乾膜厚度	塗裝間隔
1	表面處理	1. 如採用高壓水清洗，輕微銹蝕部分至少須達清潔度 WJ4。 2. 除銹後之表面不平整處須以電動工具處理劣化之介面至 St2 才可進行底漆塗裝。 3. 除銹完成後不可留置超過 4 小時，若超過時限未施作底漆者，廠商無償重新除銹至要求等級，方可接續進行塗裝作業。		
2	第一道漆	環氧樹脂防蝕塗料	150 μm	10 hr~7 天
3	第二道漆	環氧樹脂防蝕塗料	150 μm	

表 2-35 基隆臨海鋼箱型拱橋鋼橋油漆內面(維修)(Type B)[20]

項次	處理步驟	塗料名稱	乾膜厚度	塗裝間隔
1	表面處理	1. 如採用高壓水清洗，輕微銹蝕部分至少須達清潔度 WJ2。 2. 除銹後之表面不平整處須以電動工具處理劣化之介面至 St3 才可進行底漆塗裝。 3. 除銹完成後不可留置超過 4 小時，若超過時限未施作底漆者，廠商無償重新除銹至要求等級，方可接續進行塗裝作業。		
2	第一道漆	環氧樹脂防蝕塗料	150 μm	10 hr~7 天
3	第二道漆	環氧樹脂防蝕塗料	150 μm	10 hr~7 天
4	第三道漆	聚氨基甲酸酯樹脂塗料	1000 μm	

表 2-36 基隆臨海鋼箱型拱橋鋼橋油漆、鋼構除銹及防蝕塗裝[20]

項次	處理步驟	塗料名稱	乾膜厚度	塗裝間隔
1	表面處理	1. 如採用高壓水清洗，輕微銹蝕部分至少須達清潔度 WJ2。 2. 除銹後之表面不平整處須以電動工具處理劣化之介面至 St3 才可進行底漆塗裝。 3. 除銹完成後不可留置超過 4 小時，若超過時限未施作底漆者，廠商無償重新除銹至要求等級，方可接續進行塗裝作業。		
2	第一道漆	環氧樹脂防蝕塗料	150 μm	10 hr~7 天
3	第二道漆	環氧樹脂防蝕塗料	150 μm	10 hr~7 天
4	第三道漆	聚氨基甲酸酯樹脂塗料	1000 μm	8 hr~30 天
5	第四道漆	聚胺基甲酸酯塗料	60 μm	

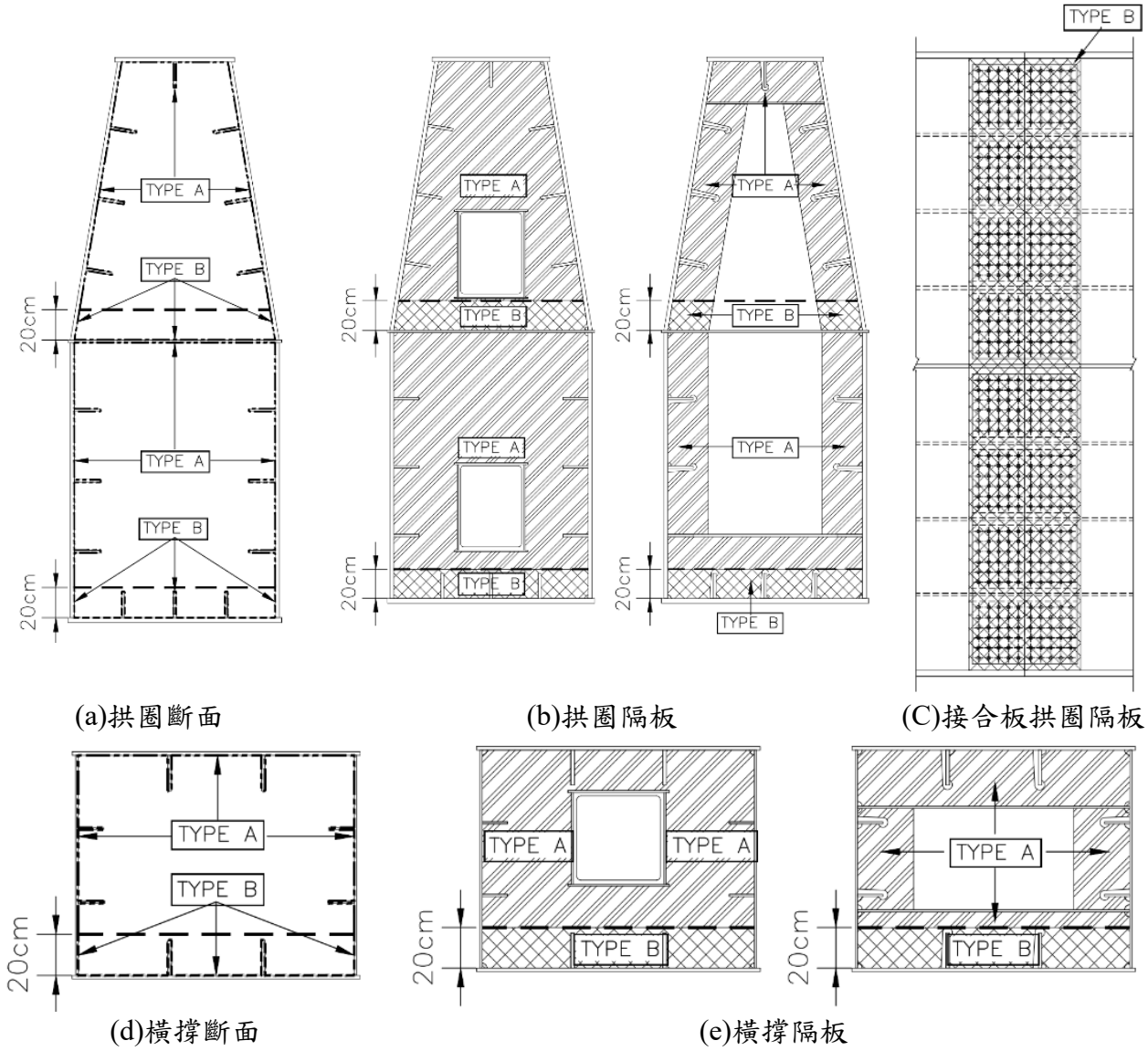


圖 2.35 基隆臨海鋼箱型拱橋各構件塗裝示意圖[20]

(3)螺栓更換

①接合板依相關規定進行表面處理後，若螺栓腐蝕度達 4、5 等級(參考「日本長崎縣橋梁修補與補強手冊」螺栓腐蝕健全度評等，詳施工說明書)，應紀錄並回報螺栓位置及數量，經同意後得辦理螺栓更換作業。

②螺栓更換作業原則以每 2 處接合板除銹處理完成後進行 1 批，每批更換原則不得超過 2 顆螺栓，且應紀錄更換數量及位置。

2. 港區聯絡鋼拱橋案例 [南方澳大橋]

(1) 案例橋梁基本資料

結構型式為雙叉式單拱橋，主橋為單拱頂拱造型(全電銲拱橋)，橋長 140 m，主梁為高度 2.5 m 鋼箱梁，橋面板寬 15 m，拱肋支承配置為 750 T 單向活動鋼支承，鋼箱支承配置為人造橡膠支承墊+剪力鋼棒(P6 活動端、P7 鉸接端)，為構架式鋼筋混凝土橋墩，鋼材為 A709 耐候性高強度低合金鋼，鋼索為鍍鋅七絞索，87 年 6 月 20 日完工，建造經費約 3.7 億(84 年，工程預算書)，其餘資料詳表 2-37。

表 2-37 港區聯絡鋼拱橋基本資料[21]

結構型式	雙叉式單拱橋
主橋型式	單拱頂拱造型(全電銲拱橋)
跨徑配置	橋長 140 m
主梁配置	2.5 m 梁深鋼箱梁
橋面板寬	15 m
橋梁淨高	橋下至海面高度 18m 橋面至拱 25.27 m
拱肋支承配置	750 T 單向活動鋼支承
鋼箱支承配置	人造橡膠支承墊+剪力鋼棒(P6 活動端、P7 鉸接端)
橋墩型式	構架式鋼筋混凝土橋墩
鋼材種類	A709 耐候性高強度低合金鋼
鋼索材料	鍍鋅七絞索
鋼板數量	1535 T
鋼板厚	11 種板厚(最薄 8mm，最厚 40mm)
案例橋梁照片	

(2) 案例橋梁狀況

橋梁塗裝系統如為外露面總膜厚為 315 μm，非外露面 240 μm，於 108 年 10 月 1 日上午 9 時 30 分左右發生橋梁崩塌事件。

依據分析報告針對鋼索、端錨、錨頭銹蝕與外套管狀況部分之現場勘查結果說明如下(鋼索與上下端錨損害情況如表 2-38)。

事件發生原因研判是普遍性的鋼索(僅以紅色外表之 HDPE 外套管保護，無填塞或塗抹過防蝕油脂)或其錨碇裝置(無錨碇套筒)腐蝕生銹(尤其是 C8~C13 鋼索特別明顯)，致使此些鋼索無法發揮承受大梁載重的功能，並在其斷裂後，其他鋼索無法承受此些鋼索斷裂後所轉嫁過來的力量，因而發生幾近瞬間同時失效之斷落現象，最後造成大梁斷裂以及橋拱崩落。

案例橋梁自 101 至 107 年編列將近 1,800 萬元檢測與維修費用，維修項目集中在欄杆鐵件、油漆、伸縮縫整修、路面修補、景觀與照明等工程，並無涵蓋攸關結構安全的鋼索系統(含錨碇裝置)、鋼箱梁內部與鋼拱圈內部之檢測與維護。

①鋼索銹蝕情況

鋼索的銹蝕可分為全長均銹蝕、上端銹蝕、下端銹蝕幾類。案例橋梁全長有銹蝕的鋼索，主要有 C5 鋼索與 C9 鋼索(如圖 2.36(a)(b))。此部份可能是因上方外套管下滑、未伸進拱圈內造成雨水經由上方流入套管內，或因外套管有破損等因素所造成；上端錨因雨水是往下流，鋼索上端銹蝕機會較少，而上弦拱圈又位在高處且通風良好，雖拱圈底板開孔周邊略有銹蝕，但附近鋼索尚無嚴重銹蝕情形，僅前項所述之 C11 上方鋼索有銹蝕現象，研判 C11 是因外套管長度未進入到拱圈結構體內，且剛好 C11 鋼索中有部份鋼索碰觸到開孔周邊銹蝕鋼板，導致 C11 有部份鋼索銹蝕嚴重；鋼索下端之銹蝕是本橋最主要問題之一，因本橋橋面主梁開孔處之防水保護不理想及橋面大梁內之錨碇機構會積水，造成各鋼索下方普遍有銹蝕現象，例如 C1、C7 及 C9 至 C13 鋼索之下端都有銹蝕情形，甚至如 C7、C9 至 C12 在發生落橋前，可能有部份鋼索銹蝕嚴重。依事件報告，除整根鋼索之銹蝕情況外，僅下端鋼索有銹蝕之鋼索，其下端銹蝕長度約 50 cm 左右，銹蝕最長的是 C10 之 85 cm，最短是 C1 的 24 cm。

②端錨銹蝕情況

下端錨研判有多處錨碇機構可能因長期積水，造成位在當中之錨頭銹蝕，並導致錨碇功能不佳與附近鋼索銹蝕嚴重，研判受影響有 C7 至 C13。例如圖 2.36 (c)(d)所示，C12 下端承壓座外側之螺牙已幾乎銹蝕，稍敲擊，其腐蝕之螺牙就脫落，依此研判本鋼索位在承壓座內部、會與積水接觸之錨頭更嚴重腐蝕；另如 C9 下端之套筒，其裝置位置在主橋錨碇機構下方，但由套筒外側下端之水痕(該端錨是傾斜配置)，顯示上方錨碇機構之積水常會滲流至下方此處，依此研判在錨定機構上方、會與積水接觸之錨頭亦同樣有腐蝕。

上端錨上弦拱圈位在高處且通風良好，雖拱圈底板開孔周邊略有銹蝕，但位在拱圈內部之上方端錨，大部分並無受雨水侵入與銹蝕問題，且大部分上端錨內部仍有保護油脂，故上端錨與附近鋼索較無銹蝕問題。

③錨頭破裂情況

鋼索之端錨是要將鋼索力量傳遞至橋梁結構體。為此，一般端錨之夾片需能充分咬合七絞索、咬合七絞索後之夾片須能塞住錨頭之孔洞、錨頭與承壓板要密合、能承壓在橋梁結構體之固定鋼線板上。依事件報告，C1 下方錨頭亦已破裂、分離，但因破碎之錨頭、夾片中有銹層聚積，且破裂之夾片尚能咬住七絞索，該錨頭在落橋前恐怕早已存有裂縫及銹蝕情形。

④外套管構造情形

案例橋梁各鋼索外側僅以紅色外表之 HDPE 外套管保護。依事件報告，案例橋梁外套管之外徑為 15.6 cm、壁厚約 1 cm。未明顯發現套管內部曾有填塞或塗抹過防蝕油脂，加上各鋼索未如目前工程一般常用之保護方式，水分一旦進入套管內，易使鋼索腐蝕。

表 2-38 港區聯絡鋼拱橋鋼索與上下端錨損害情況[21]

鋼索編號	上方端錨情況	鋼索情況	下方端錨情況
C1	● 錨頭完整，套筒脫離 ● 夾片與鋼索咬合完整	● 下端嚴重銹蝕	● 銹蝕嚴重 ● 錨頭破碎，套筒未脫落 ● 夾片失效，鋼索脫離
C2	● 錨頭遭拉破、碎裂 ● 鋼索與錨頭全數脫離	● 全長輕微銹蝕	● 銹蝕中等 ● 鋼索回彈，衝離承壓板 ● 與鋼索咬合大致完整
C3	● 錨頭破壞 ● 鋼索與錨頭全數脫離	● 全長無明顯銹蝕	● 銹蝕中等 ● 鋼索回彈，衝破套筒 ● 與鋼索咬合大致完整
C4	● 錨頭遭拉破、碎裂 ● 鋼索與錨頭全數脫離	● 全長無明顯銹蝕	● 套筒嚴重銹蝕 ● 鋼索回彈，衝破套筒 ● 與鋼索咬合大致完整
C5	● 錨頭拉破，套筒未脫落 ● 鋼索仍咬合 1 股	● 全長均銹蝕	● 錨頭與套筒銹蝕 ● 錨頭完整，套筒未脫落 ● 與鋼索咬合大致完整
C6	● 錨頭拉破，套筒未脫落 ● 鋼索與錨頭全數脫離	● 下方斷裂處銹蝕	● 銹蝕中等 ● 鋼索回彈，衝破套筒 ● 與鋼索咬合大致完整
C7	● 套筒未脫離 ● 與鋼索咬合大致完整	● 下端嚴重銹蝕 ● 上端鋼索配置爆開 ● 斷裂於下端錨前	● 銹蝕嚴重 ● 套筒未脫離、無破壞現象 ● 鋼索仍咬合 1 股
C8	● 錨頭拉破，套筒未脫落 ● 鋼索仍咬合 1 股	● 斷裂處銹蝕	● 銹蝕中等 ● 套筒未脫離、無破壞現象 ● 與鋼索咬合大致完整
C9	● 套筒未脫離，無破壞 ● 與鋼索咬合大致完整	● 6 股鋼索全長銹蝕 ● 斷裂於下端錨前	● 銹蝕中等 ● 套筒未脫離、無破壞現象 ● 與鋼索咬合大致完整
C10	● 套筒未脫離，無破壞 ● 與鋼索咬合大致完整	● 下端嚴重銹蝕 ● 斷裂於下端錨前	● 銹蝕嚴重 ● 套筒未脫離、無破壞現象 ● 與鋼索咬合大致完整
C11	● 套筒未脫離，無破壞 ● 與鋼索咬合大致完整	● 下端嚴重較銹蝕 ● 3 股斷裂於上端，其他斷裂下端錨前	● 銹蝕嚴重 ● 套筒未脫離、無破壞現象 ● 與鋼索咬合大致完整
C12	● 套筒未脫離，無破壞 ● 與鋼索咬合大致完整	● 下端嚴重銹蝕 ● 斷裂於下端錨前	● 嚴重銹蝕 ● 套筒未脫離、無破壞現象 ● 與鋼索咬合大致完整
C13	● 套筒未脫離，無破壞 ● 上端部份鋼索反彈衝 ● 脫夾片	● 下端嚴重銹蝕 ● 主要斷於下端錨前	● 嚴重銹蝕 ● 套筒未脫離、無破壞現象 ● 與鋼索咬合大致完整



(a)C5 鋼索銹蝕情形



(b)C9 鋼索銹蝕情形



(c)C12 下端錨頭之螺牙情況



(d)C12 下端鋼索與端錨情況

圖 2.36 港區聯絡鋼拱橋 C5、C9、C12 鋼索、端錨與錨頭照片[21]

(3) 案例橋梁破壞原因[22-24]

①防蝕技術面問題：南方澳大橋位於漁港出海口，環境屬於「重鹽害、高濕度」區域，其吊索系統的防蝕失效是導致斷裂的主因：

A.防水設施劣化與積水

(a) 大橋使用多年後，吊索系統的防水設施逐漸劣化。特別是中央分隔島金屬箱體與 HDPE（高密度聚乙烯）套管之間的防水接縫封條發生「硬質破壞」。

(b) 雨水沿著 HDPE 套管滲入槽狀的橋面錨定機構，產生積水現象。

B.嚴重的鹽害銹蝕

(a) 橋面端錨與鋼絞線長期處於具鹽分的積水中，導致積水線附近的鋼絞線發生嚴重銹蝕。

(b) 事故發生前，10、11、12、13 號吊索的鋼絞線已陸續銹斷，有效殘餘截面積僅剩約 22 %至 27 %。

C.材料防蝕不均：試驗顯示鋼絞線表面的鍍鋅層厚度不均勻，這

會直接影響其耐蝕性能。

②管理面問題：管理制度的不完善與檢測落實不到位，使得上述防蝕問題未能及時被發現與修復。

A.管理權責不清（法律定位不明）：

(a) 南方澳大橋所屬道路長期不屬於公路系統，導致在法律上無明確的「公路主管機關」。

(b) 交通部航港局及臺灣港務公司並非公路法定義的主管機關，缺乏對橋梁維護與檢測規範的專業了解，多年來僅執行一般性巡查。

B.檢測方式不當與頻率不足

(a) 該橋屬於「特殊性橋梁」，重要承載構件（如吊索、端錨）位於隱蔽處（如拱架、套管、鋼箱梁內），僅靠外部「目視檢測」極難發現內部劣化。

(b) 竣工後執行的 7 次檢測皆為定期目視檢測，且事故前 3 年 7 個月間，完全未進行任何橋梁檢測作業 。

C.規範與培訓缺失

(a) 當時的《公路橋梁檢測及補強規範》著重於一般性橋梁，對特殊性橋梁缺乏具體檢測指引。

(b) 橋梁檢測人員的培訓課程中，缺乏特殊性橋梁檢測的相關訓練，無法確保檢測人員具備進入局限空間（如箱梁內部）檢測的能力。

D.資料保存與系統漏洞

(a) 關鍵文件（如結構計算書、材料測試文件）因時間久遠、銷毀或火災而滅失，影響養護評估。

(b) 當時的橋梁管理資訊系統對「逾期未檢」缺乏提醒機制，且管理機關變更後，未能透過督導考核發現檢測時程已逾期。

3. 桃園漁港聯絡鋼拱橋案例 [彩虹橋] [25]

(1) 案例橋梁基本資料

案例橋梁位於某漁港內，橋身設計採紐爾遜鋼拱橋，為三向度變化之拱橋造型(如圖 2.37 所示)，單跨度 180 m，高 31 m，主要功能係連接漁港及周邊濱海地區，為省道進入該漁港之重要樞紐，近期於 110 年 12 月維修完成。



圖 2.37 桃園漁港聯絡鋼拱橋照片 [25]

(2) 案例橋梁狀況

案例橋梁腐蝕環境為 C5/CX，經檢測其主要劣化情形如下。

①鋼拱、主梁、橫梁塗裝劣化或鋼構銹蝕，如圖 2.38 所示。

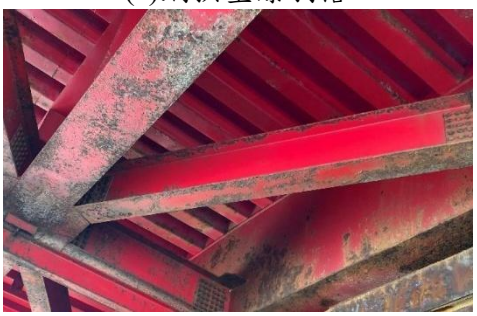
②主梁螺栓銹蝕，如圖 2.38(d)所示。



(a)鋼拱塗漆剝落



(b)橫梁鋼構銹蝕



(c)主梁鋼構銹蝕



(d)主梁螺栓銹蝕

圖 2.38 桃園漁港聯絡鋼拱橋劣化照片 [25]

(3) 案例橋梁維修設計

依上述劣化，案例橋梁進行之修復如下，其維修改善經費約為 8,425 萬元(113 年，決標金額)。

①鋼構件除銹及塗裝：

依鋼橋外露(銹蝕處)、鋼橋外露(非銹蝕處)、箱梁內部與車道欄杆等有其不同的除銹與塗裝方式。其塗裝系統考量特點為。

A.總乾膜厚最大為 380 μm(鋼橋外露(銹蝕處))。

B.考量水刀除銹粗糙度無法達至設計要求，故改以有機環氧樹脂鋅粉底漆替代，提高附著性。

C.案例橋梁銹蝕表面處理方式，如下所示。

(a) 30000 psi 高壓水刀表面處理，鋼構材外露面以高壓水刀處理達 WJ2(金屬表面需處理到至少 95 %以上呈現黯淡金屬光澤，且無殘留物質)以上。水刀處理時須採用潔淨之淡水，嚴禁採用海水。

(b) 10000 psi 高壓水刀表面處理，鋼構材外露面以高壓水刀處理達 WJ4(金屬表面處理至將鬆散的鐵銹、軋屑及塗料完全除去)以上。水刀處理時須採用潔淨之淡水，嚴禁採用海水。

(c) 5000 psi 高壓水刀表面清潔，使用潔淨之淡水進行高壓沖洗表面，經檢查合格後方可塗裝，如塗裝前發現再度汙染，必須重新處理清潔。此道清潔工序在每一度漆塗裝前時採用。

D.主要結構之塗裝系統分為鋼橋外露面(銹蝕處)、鋼橋外露面(非銹蝕處)與鋼梁(箱梁內部)，如表 2-39 所示。

表 2-39 桃園漁港聯絡鋼拱橋鋼橋外露面(銹蝕處)塗裝系統[25]

	工項	塗料規格	標準塗佈量 g/m^2	最小乾膜厚度	塗裝間隔	油漆規範及檢驗法
銹蝕	表面處理	超高壓水刀清除既有塗裝、除銹至 WJ-2 級(Sa-2),表面粗糙度 50~75μm 以上				
	底漆	厚塗型無機鋅粉底漆	750 無氣噴塗法	110μm	1 日以上 10 日以內	CNS4936 K2087
	中塗漆第一層	環氧樹脂 M.I.O 塗料	360 無氣噴塗法	75μm	1 日以上 10 日以內	CNS4938 K2089
	中塗漆第二層	環氧樹脂 M.I.O 塗料	360 無氣噴塗法	75μm	1 日以上 10 日以內	CNS4938 K2089
	面漆第一層	氟素樹脂塗料中塗漆	170 無氣噴塗法	35μm	1 日以上 10 日以內	CNS15665 K2247
	面漆第二層	氟素樹脂面漆	140 無氣噴塗法	35μm	-	CNS15665 K2247
非銹蝕	表面處理	高壓水刀表面清潔,處理完成後表面處理標準須達 WJ4 等級以上				
	底漆	環氧樹脂合金底漆	140 無氣噴塗法	25μm	8 小時以上 10 日以內	CNS4938 K2089
	中塗漆第一層	環氧樹脂 M.I.O 塗料	360 無氣噴塗法	75μm	1 日以上 10 日以內	CNS4938 K2089
	中塗漆第二層	環氧樹脂 M.I.O 塗料	360 無氣噴塗法	75μm	1 日以上 10 日以內	CNS4938 K2089
	面漆第一層	氟素樹脂塗料中塗漆	170 無氣噴塗法	35μm	1 日以上 10 日以內	CNS15665 K2247
	面漆第二層	氟素樹脂面漆	140 無氣噴塗法	35μm	-	CNS15665 K2247
銹蝕處	表面處理	除銹至 SSPC-SP-3 (SIS ST3)以上,表面粗糙度 50~75μm				
	底漆	厚塗型無機鋅粉底漆	300 手刷法	90μm	1 日以上 7 日以內	CNS4936 K2087
	面漆	氟素樹脂面漆	300 手刷法	35μm	-	CNS15665 K2247

②螺栓更新：

分 A~D 類，銹蝕較輕微的 AB 兩類為除銹重新塗裝；CD 兩類為螺栓更換。其材料規定與施工檢驗重點如下。

A.材料規定：將原有之 M22 A325 TYPE I 鍍鋅螺栓更換為 M22 A325 TYPE III 鍍鋅高拉力無斷尾螺栓增加其結構強度，其螺栓性能須符合表 2-40 之規定(依 ASTM F606/F606M-21 試驗)。

表 2-40 港區聯絡鋼拱橋螺栓規格要求[25]

試驗內容	性能	要求
螺栓機械性質試驗	降伏強度	≧92000 psi
	抗拉強度	≧120000 psi
	深長率	≧14 %
	斷面收縮率	≧35 %
	硬度值	24~35 HRC
螺帽硬度試驗		26~36 HRC
墊片硬度試驗		26~45 HRC

B.螺栓更換原則及檢驗方式

為以利工進，螺栓巡查工作與水刀除銹處理同時進行，因此會造成螺栓檢查時現場會有兩種情況，即水刀未處理及已使用水刀除銹，螺栓巡查方式以下列兩種方式處理：

(a) 現場還未以水刀清洗，漆銹尚未去除時，判斷標準如表 2-41。

(b) 現場已以水刀清洗，除去漆身表面者，以設定螺栓頭尺寸小於原螺栓頭尺寸 12 %為標準，符合此法之螺栓應優先更換，詳如表 2-42。

C.螺栓自主檢查方式

為驗證螺栓更換完成後之緊實度，後續於更換過程中以每更換 30 顆時即辦理自主檢查，並將相關檢查位置、扭力值、填具於扭力自主檢查表，以驗證相關螺栓更換是否確實固鎖或因扭力試驗下有無異樣。

表 2-41 港區聯絡鋼拱橋螺栓更換判斷標準[25]

銹蝕等級	銹蝕程度	照片	處理方式
A	鋼材表面完全為氧化層覆蓋，看不出有鐵銹或極少量情況。		銹蝕程度較輕微，對螺栓斷面積影響較小，採除銹與重新上漆修復。
B	鋼材表面開始銹蝕，開始呈現鱗片形狀銹斑。		
C	鋼材表面開始銹蝕，已完全看不出氧化層，肉眼可以看出少量孔蝕。		銹蝕程度較嚴重，經評估實際狀況，應進一步進行螺栓抽換。
D	鋼材表面全面銹蝕，以肉眼可以看出大量孔蝕。		

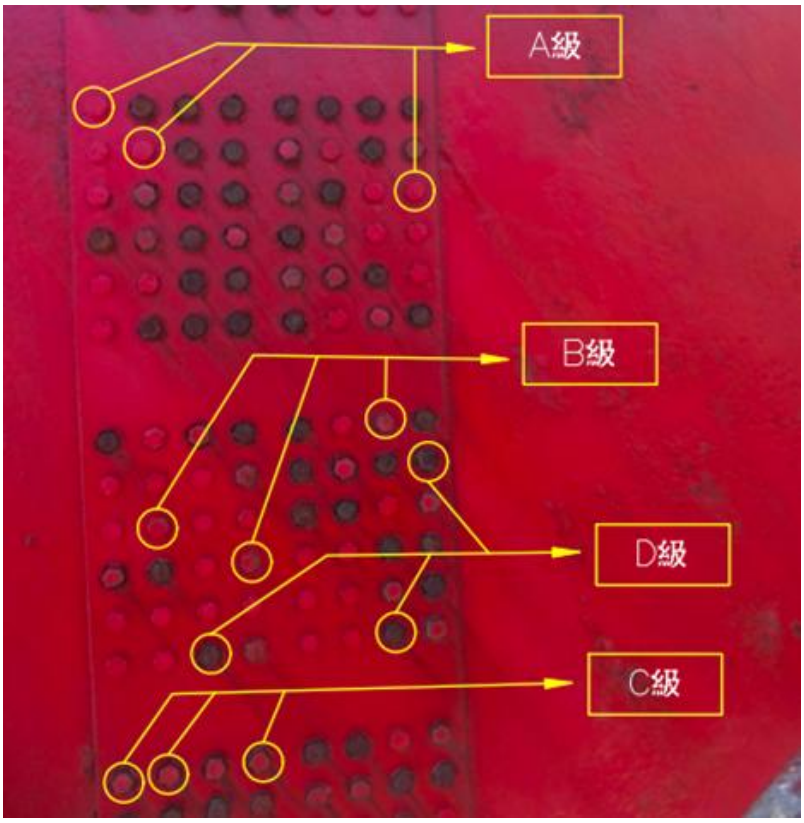
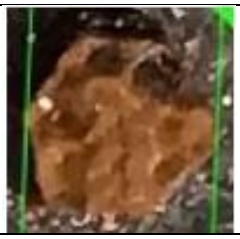


圖 2.39 桃園漁港聯絡鋼拱橋螺栓判斷等級照片[25]

表 2-42 港區聯絡鋼拱橋螺栓更換判斷標準(除去漆身表面)[25]

級別			
C	大於 32 mm ，小於 36 mm	大於 37 mm ，小於 42 mm	—
D	小於 32 mm	小於 37 mm	螺栓頭嚴重變形者

4. 縣道公路鋼拱橋案例[頭份大橋]

(1) 案例橋梁基本資料

於 91 年 4 月完工，橋址位於苗栗縣北橫公路 124 丙縣道跨越中港溪，橋身設計採提籃下路式鋼拱橋，跨度 142 m，高 28 m，橋寬 24 m，雙向各兩車道，一機車道與一人行道，吊索系統採日本黑澤建設株式會社 15.22 mm-9T-27T，11 種組合型式，使用夾片錨頭，設計之防蝕塗裝系統如表 2-43。

表 2-43 縣道公路鋼拱橋原設計防蝕塗裝系統[26]

鋼橋外露面表面塗裝		鋼橋內面塗裝	
塗層類型	設計膜厚 (μm)	塗層類型	設計膜厚 (μm)
表面噴砂處理及無機鋅粉底漆	20	表面噴砂處理及無機鋅粉底漆	20
第一層無機鋅粉底漆	75	內面第一層變性環氧樹脂漆	90
第二層中間黏層	—	內面第二層變性環氧樹脂漆	90
第三層環氧樹脂底漆	60	內面第三層變性環氧樹脂漆	90
第四層環氧樹脂底漆	60		
第五層環氧樹脂中塗漆	30		
第六層氟素樹脂面漆	25		
合計	290	合計	290

(2) 案例橋梁狀況

案例橋梁於 109 年經查雖有辦理定期檢測，惟係以人工目視檢測未就橋梁重要構件之鋼索、錨碇裝置、鋼索及鋼拱圈進行詳細檢測。橋管單位已於當年度年底辦理案例橋梁特殊橋梁檢測，發現部分錨座、鋼絞線有滑線及夾片脫落，為此先行禁止 21 T 以上重車及聯結車通行外，並爭取補助經費辦理案例橋梁之改善。



(a)鋼構塗裝劣化(外露面)



(b)鋼構塗裝銹蝕(箱梁內)



(c)銲道銹蝕



(d)接合板螺栓銹蝕

圖 2.40 縣道公路鋼拱橋劣化照片[27]

(3) 案例橋梁維修設計

依據案例橋梁詳細檢測結果，以吊索錨頭銹蝕、鋼腱滑線等劣化為主，其評等已達更換程度，而鋼橋塗裝維護併入辦理，其維修改善經費約 7,363 萬。

①吊索更換與塗裝修復部分說明

A. 吊索更換 44 索(15 T-15.2 mm)，逐索更換，架設臨時支撐架方式更換。

B.增設吊索防水罩及外套筒更換 44 處、索夾更換 42 處(配合吊索尺寸)。

C.拱圈人孔更換，6 處、拱頭鑽設排水孔 φ2 cm，12 孔、拱頭設置通風孔ϕ25 cm(配合箱內局限空間施工增設)，4 處。

D.鋼拱橋外露面重新塗裝，包含橋拱圈及其橫撐、主梁及其橫梁、斜撐、鋼床板及橋上欄杆等(保留底漆採表面水洗清潔、局部銹蝕處採電動或手工除銹清理)。

E. 保留底漆部分，表面清洗採高壓水洗至 SSPC-SPWJ-4 級清潔度。

F. 局部銹蝕部分，表面清洗採高壓水刀至 SSPC-SPWJ-3 級清潔度。

G.鋼拱橋箱內積水處、銲道銹蝕處、塗裝受損處重新塗裝，表面處理採電動或手工具除銹至 St 3 級清潔度。

H.既有吊索拆驗(檢視銹蝕及取樣試驗)，拆驗 44 索取樣 8 索。

②吊索錨碇系統修復

A.端錨、鋼絞線、外保護套管及其防蝕填充材應於原廠加工之成品索，實心斷面，以確保一體性防蝕效果。

B.錨碇段之防蝕保護程度應不低於吊索自由端防蝕保護程度。

C. 吊索及端錨系統之鋼材外露部分應有良好的防蝕措施，防蝕耐久性不低於鋼構塗裝。

D.端錨及其配件之強度不得小於吊索極限抗拉強度，其防蝕應採熱浸鍍鋅或鍍鎘或鋅鋁熔射等，如採鍍鋅應達 500 g/m^2，若採其防蝕系統亦不得低於熱浸鍍鋅防蝕等級。

E. 防蝕系統以鍍鋅處理，其附著量應符合 CNS 10007 規定(500 g/m)。

③防蝕塗裝系統修復：

塗裝分為鋼構外露面(塗裝系統 A，鋼橋外露表面塗裝含鋼床板)與內面(塗裝系統 B，積水處、銲道銹蝕處、塗裝受損處、螺栓)，如表 2-44。

表 2-44 縣道公路鋼拱橋修復塗裝系統[27]

	塗層項目	塗料規格	塗裝次數	塗佈量(1) (g/m^3)	最少乾膜厚(μm)	塗裝間隔	調薄劑	塗裝規範
A	表面處理	保留底漆：高壓水洗處理(HP WC)5,000 psi~10,000 psi 清洗至 WJ-4(除去表面油漬、灰塵及鬆散之塗料)。 局部銹蝕部分：表面清洗採高壓水刀清除至 SSPC-SP WJ-3 級清潔度。						
	底漆	環氧樹脂鋅粉底漆(濕氣硬化型)	1	360	60 (銹蝕處)	8 小時以上、30 日內	環氧樹脂系	CNS 4936
	中塗漆	環氧樹脂漆第一種	2	360	150			CN 4938 第一種
	第一道面漆	氟素樹脂塗料面漆	1	140	30	8 小時以上 10 日內	氟素樹脂系	JIS K5659: 2008
	第二道面漆	氟素樹脂塗料面漆	1	140	30			JIS K5659: 2008 第 1 級
	合計	保留底漆新塗最小總膜厚 210μm 局部銹蝕新塗最小總膜厚 270 μm						
B	表面處理	表面電動研磨處理 SSPC-SP-3 或 SIS St2 級						
	底漆	環氧樹脂鋅粉底漆	1	360	50	8 小時以上、30 日內	環氧樹脂系	CN 4938 第一種
	第一道中塗漆	環氧樹脂漆第一種	1	360	120		環氧樹脂 M.I.O. 系	
	第二道中塗漆	環氧樹脂漆第一種	1	360	120			
	合計	最小總膜厚 290μm						

註 1：無氣噴塗法。

5. 公路跨河鋼拱橋案例 [關渡橋]

(1) 案例橋梁基本資料

「關渡橋」是橫跨於臺灣北部的淡水河的橋梁，為省道台 15 線首段，連結新北市八里區、五股區與淡水區、臺北市北投區關渡，距離淡水河口約 10 km，在淡江大橋完工前為淡水河流域最靠近出海口的一座橋梁。橋梁從 69 年 4 月起動工，並於 72 年 10 月 31 日完工通車，建造經費約 25 億(69 年，預算金額)。

案例橋梁跨越淡水河，總長度 809 m(主橋 539 m、引道 270 m)，主橋為鋼構橋，引道為鋼筋混凝土橋，主橋重量約 6000 公噸。主橋由橋墩 P4 至 P9 共分為 5 跨，跨徑配置為 44+143+165+143+44=539 m。橋面寬度 19 m，邊跨拱頂高程為 33.695 m，中央跨拱頂高程為 39.7 m，各橋墩拱圈底部高程分別為 4.165 m 與 4.049 m，詳如圖 2.41 所示。案例橋梁上部結構以鋼箱型梁為主，斷面共分為縱向大梁、拱圈、橫梁與立柱，版厚自 1 cm 漸變至 4 cm，其中大梁與拱圈配置情形詳如圖 2.42，最大版厚皆配置於大梁與拱圈交接處。由於橋梁位於淡水河河口高氯鹽環境，橋墩長期受潮汐與浪濺作用影響，鋼筋腐蝕風險高。為提升結構耐久性，於橋墩關鍵區域有設置陰極防蝕系統，使鋼筋電位降低至不易腐蝕狀態，達到延緩劣化、延長使用年限之目的。

案例橋梁鋼索採用雙側面配置，每單側共 8+10+8 處配置 2 束鋼索(靠近淡水為 CA,靠近八里端為 CB)，全橋共有 104 根主纜索，隨著橋齡上升，考量長期載重作用與預力鋼鍵鬆弛等問題，且為防止更換前後吊索力量差異過大，於 101 年 4 月全橋主纜索已全數更換完畢[d]，鋼索位置與編號詳如圖 2.43 所示，其中上、下游 CA,CB 索之編號皆相同，故以上、下游側標示區別。此外橋梁原始設計與現行公路橋梁耐震設計規範不同，加上鋼筋出現銹蝕，交通部公路總局在 106 年編列預算修繕，於 108 年 5 月發包進行耐震補強工程，並於 110 年 3 月完工。

由於橋址地盤以沖積層為主，地層軟弱且受潮汐及河床沖刷影響顯著。為確保橋梁結構之承載能力、穩定性及耐久性，橋墩基礎採用大型鋼管樁群樁基礎型式，屬深基礎設計。

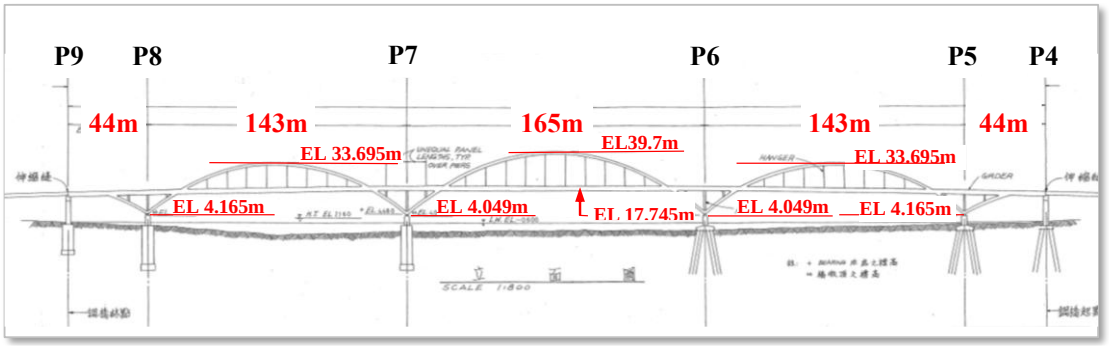


圖 2.41 關渡橋配置圖[28]

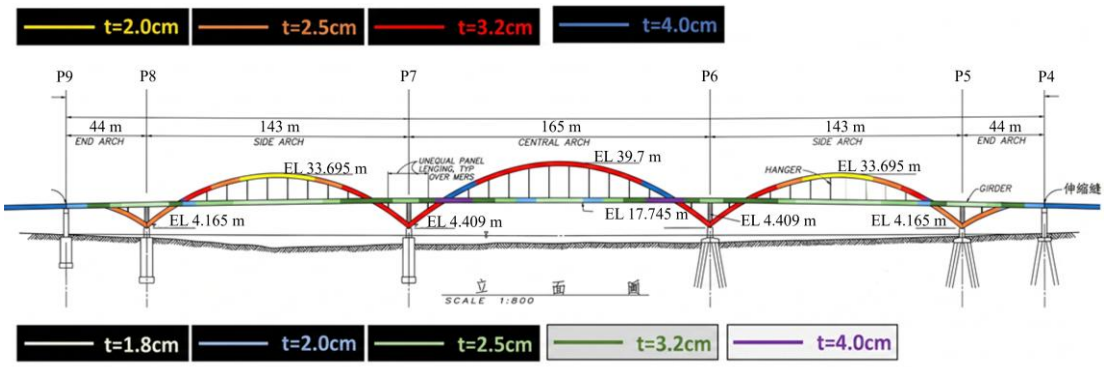


圖 2.42 大梁與拱圈版厚配置圖[28]

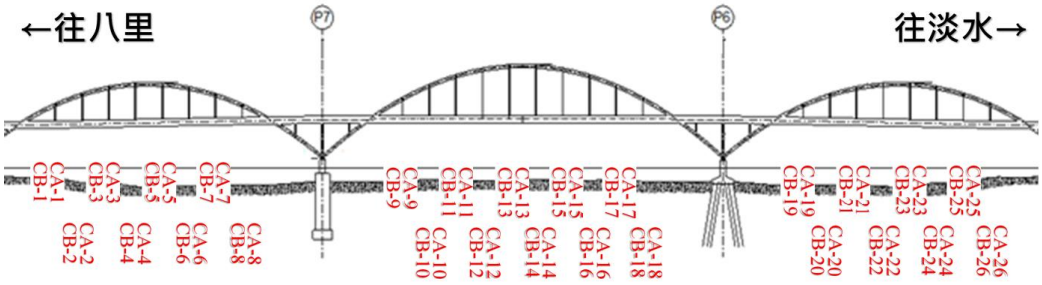


圖 2.43 各鋼索位置與編號[29]

(2) 案例橋梁防蝕現況(依據 104 年台 15 線關渡橋檢測、安全評估及防災措施工作檢測報告書第 14 章[30])：

①主梁接頭螺栓銹蝕現況：根據目視檢測結果，鋼箱梁接頭處存在顯著的劣化現象。

A.未塗裝區域：上、下游鋼梁之接頭「1」、「2」、「5」、「6」共八處均發現未進行塗裝防蝕處理。

B.嚴重銹蝕部位：上游側鋼梁接頭「2」(共有 28 顆螺栓銹蝕)與「5」(共有 18 顆螺栓銹蝕)的下翼板螺栓銹蝕最為嚴重。

C.螺栓狀態：嚴重銹蝕處的螺栓頭已出現脆化現象，判定已失去結構強度功能。

D.滲水現象：箱梁外部靠內側的接頭螺栓群發現明顯水漬(如圖 2.44 所示)，顯示有雨水滲入。



圖 2.44 鋼梁外部靠內側接頭螺栓群水漬情形[30]

②鋼床板 U-Rib 裂縫及銹蝕(如圖 2.45)：銲道裂縫初步研判屬疲勞裂縫，由於疲勞破壞屬於無預警的脆性破壞，建議立即補強。

A.U-Rib 銲接處損壞：發現約有 11 處 U-Rib 銲接處出現局部裂縫或全面斷裂。

B.銹蝕破洞：1 處鋼床板銹蝕破洞，位置於下游處第 3 個 U-Rib 與鋼床板交界銲道處（位於人行道下方，有漏水情形）。

C.一般銹蝕：多處 U-Rib 銲道有銹蝕現象。



圖 2.45 鋼梁外部靠內側接頭螺栓群水漬情形[30]

③混凝土構件防蝕現況

A.嚴重區域(氯離子濃度)：主橋 P5(主橋 P5 橋墩含量達規定的 5 倍)與 P8(P8 橋墩則為 2 倍)橋墩、淡水端引橋 P3 橋墩、匝道橋"8"EP3 與 EP4 間的主梁。

B.結構現狀：中性化深度均小於混凝土保護層厚度；外觀檢測顯示鋼筋目前尚受到保護，無明顯腐蝕現象；評估之結果為暫無進行結構性補強的必要，但建議採取阻隔措施以防止惡化。

(3) 案例橋梁防蝕處理方式(依據 104 年台 15 線關渡橋檢測、安全評估及防災措施工作檢測報告書第 14 章[31])：

①主梁接頭螺栓銹蝕處理

A.螺栓更換與防蝕

(a) 逐顆抽換：建議儘速辦理上游側鋼梁「2」及「5」接頭螺栓的更換作業，並採逐顆抽換方式進行以維持結構穩定。

(b) 全面塗裝：針對目前未塗裝的接頭（除 3、4 號外），應增加塗裝防蝕處理，範圍包含鋼梁內部及內側面。

(c) 增設排水：於易積水空間設置排水管，以利水分排除。

B.滲水缺口封堵

(a) 鋼板填塞：針對人行道花紋鋼板的缺口，建議使用適當尺寸的鋼板進行填塞，使其密合。

(b) 點銲與密封：填塞鋼板與原花紋鋼板以現場點銲方式連接；與主梁腹板連接板的接縫處，則使用填縫膠封閉，澈底阻絕雨水流入。

②鋼床板 U-Rib 裂縫及銹蝕處理

A.U-Rib 銲接處斷裂補強：採用螺栓續接方式(如圖 2.46 所示)。

(a) 於 U-Rib 銲道兩側腹板鑽孔，添加補強接合板。

(b) 為利於螺栓鎖固，需於 U-Rib 下方開設工作孔。

(c) 強度維持：補強板厚度需加厚，以確保力量傳遞平順，且不折減原有的斷面積及慣性矩。

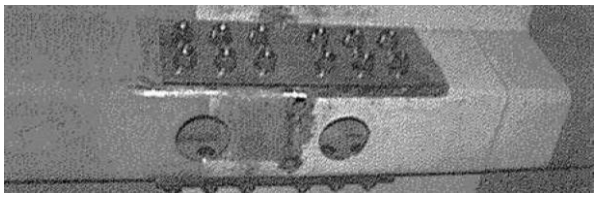


圖 2.46 U-Rib 螺栓補強照片[30]

B. 鋼床板銹蝕破洞補強：針對人行道下方的銹蝕破洞，建議拆除人行道鋼板後，加設鋼板(如圖 2.47 所示)，並於補強後局部重新施作防水層。



圖 2.47 鋼床板銹蝕破洞補強示意圖(摘自 2010 年日本土木學會鋼床版疲勞)[30]

C.表面防蝕處理：針對多處銹蝕銲位，重新進行表面處理後，塗布 環氧樹脂柏油漆，或符合規範之鋼橋油漆規定。

③混凝土構件防蝕建議

A.陰極防蝕：分為「外加電流法」與「犧牲陽極法」，雖經 FHWA 驗證對腐蝕控制相當有效，但考量費用高昂與目前構件現況，建議只需進行混凝土表面處理即可。

B.表面塗佈工法（建議方案）：現階段應針對橋墩進行混凝土表面處理，先以砂包阻水，修復劣化部分後，塗佈防水塗層（如：有機矽滲透劑，如壓克力聚合物系統，其乾膜厚度需至少 1 mm 以上或水泥基塗層系統，其厚度需至少 2 mm 以上）以抑制有害物質滲入。

6. [淡江大橋]

(1) 案例橋梁基本資料

①上部結構（鋼橋面與鋼箱梁）

A.鋼橋面設計：主橋段上部結構包含鋼橋面，設計年限為 120 年。

B.斷面型式：分離段是由以橫梁連接的「雙鋼箱梁」組成，梁深為 4.1 m；寬度變化為兩鋼箱梁間的距離隨橋軸向改變，在橋塔位置最寬達 18 m。

C.車道配置：橋面採雙向四車道，並加設機慢車道及人行/自行車道。中央預留空間未來供輕軌系統使用，現階段暫作公車專用道，如圖 2.48 所示。

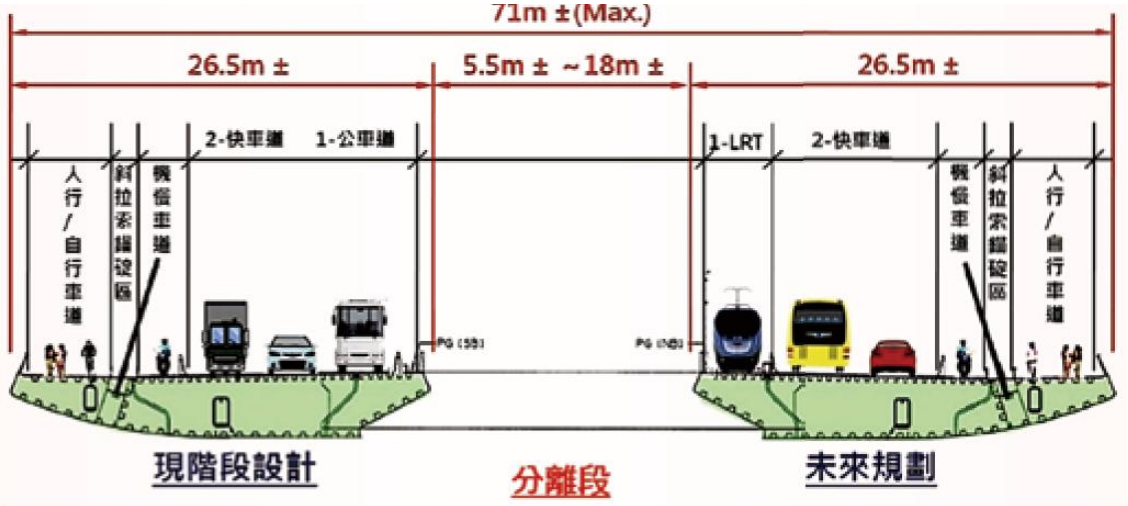


圖 2.48 主橋分離段橋面車道配置[17]

D.鋪面系統：鋼橋面上方採用流動性瀝青混凝土及密級配瀝青混凝土。

②斜拉鋼索與錨碇系統

A.斜拉鋼索：配置於鋼索錨碇於機慢車道與人行道之間的橋面板處，鋼索錨固於鋼箱梁內部，便於檢查與維修，鋼索設計年限為 65 年，預計於橋梁壽命期間更換 1 次。

B.橋塔錨碇：斜拉鋼索錨碇於橋塔混凝土共構的「鋼箱結構」中。

(2) 案例橋梁防蝕設計探討

①鋼箱梁設計：上部結構採雙鋼箱梁設計。鋼索錨固於鋼箱梁內部，此設計不僅保護錨固端不受環境直接侵蝕，亦為鋼索提供了良好的檢查與維修空間。

②鋼材及斜拉鋼索

案例橋主橋上部結構為鋼材，鋼材及斜拉鋼索材質及防蝕方法規劃如下：

A.鋼材及斜拉鋼索：案例橋梁鋼材相關規格請參見表 2-45。斜拉鋼索由鋼鉸線股索組成，鋼鉸線股索為七線預應力鍍鋅鋼鉸線，套上高密度聚乙烯套管(HDPE)，鋼鉸線之間注入石蠟填充。鋼鉸線股索穿入一體化製造方法製成的高密度聚乙烯套管(HDPE)，外套管內的空隙不予以填充。服務年限暫估 65 年，120 年設計年限期間需進行 1 次更換。

B.防蝕方法：案例橋梁之碳鋼環境腐蝕分類等級為 C4(腐蝕性高(high))~C5(腐蝕性非常高(very high))，環境相對溼度高，鋼材採油漆塗裝系統來防止鋼材腐蝕，服務年限暫估為 25 年，在 120 年設計年限期間，需進行 4 次重新塗裝。鋼橋外露表面及內面塗裝系統請參見表 2-46、表 2-47。

③維修檢測通道設計

在鋼箱梁內部與橋墩墩頂（如 P110、P120、P140、P150）皆設有維修檢測出入口。以確保在 120 年的生命週期內，工程人員能定期檢查鋼材腐蝕狀況並進行必要的維修塗裝作業。

表 2-45 臨海跨河公路橋梁案例主橋上部結構鋼材規格[17, 18]

類型	規格	降伏強度(fy)
結構鋼料	ASTM A36 ASTM A709 GR50W	≧2500 kgf/cm^2 ≧3500 kgf/cm^2
型鋼	ASTM A36	≧2500 kgf/cm^2
橋塔內斜拉鋼索錨碇鋼箱及錨碇梁、橋面錨碇之承壓板	ASTM A709 GR HPS70W	≧4900 kgf/cm^2(板厚 t≤100 mm)
景觀燈柱的結構鋼	ASTM A709 GR HPS70W	≧4900 kgf/cm^2(板厚 t≤100 mm)

表 2-46 臨海跨河公路橋梁案例鋼橋外露表面塗裝系統規格[17, 18]

項目	塗料規格	最小乾膜厚度(μm)	備註
第 1 層底漆	厚塗型無機鋅粉底漆	75	
第 2~4 層底漆	環氧樹脂 M.I.O 塗料	100*3	
中塗漆	氟素樹脂塗料中塗漆 1 道	30	
面漆	氟素樹脂塗料面漆	30	
總膜厚		435	

表 2-47 臨海跨河公路橋梁案例鋼橋內面塗裝系統規格[17, 18]

項目	塗料規格	最小乾膜厚度(μm)
第 1 層底漆	環氧富鋅底漆	60
第 2~4 層底漆	變性環氧樹脂塗料內面用	120*3
總膜厚		420

7. 中和快速道路高架橋案例 [中和中正路立體交叉工程]

(1) 案例橋梁基本資料

本案例之立體交叉工程於民國 85 年竣工，此工程全線高架橋長 1.672 公里，單層高架橋長 1.006 km，雙層高架橋長 0.666 km，如圖 2.49 所示。其中約 1,273 m 鋼梁採熱浸鍍鋅防蝕。上部結構採用三至四跨 I 型梁橋，其中跨越連城路及中山路兩路口採較大跨徑 35+50+35 m，一般路段採 4@30m 或 3@31 m，下部結構採用門架式(如圖 2.50)或單柱式鋼橋墩，基礎採樁基礎，全線高架橋面積約 45,000 m^2 ，使用鋼重約 14,500 公噸，其中約 6,958 公噸 I 型鋼梁、斜撐、連接板及高強度螺栓採熱浸鍍鋅防蝕(設計附著量 610 g/m^2)。鋼橋墩及少部份之鋼梁因大於鍍鋅槽故採塗裝防蝕，建造經費約 12 億元，雖採熱浸鍍鋅防蝕鋼構件部分增加約 2,800 萬元(約 7,000 噸x每噸增加 4,000 元，費用佔總費用約 2.3 %)，但因位處於都會區 C3 腐蝕環境，其可免維護年限可達 100 年，相較於同環境一般油漆塗裝約 10-15 年塗裝一次，可減少塗裝次數 7 次以上，每次全橋塗裝約需 7,000 萬，總防蝕費用可減少 4.9 億以上。

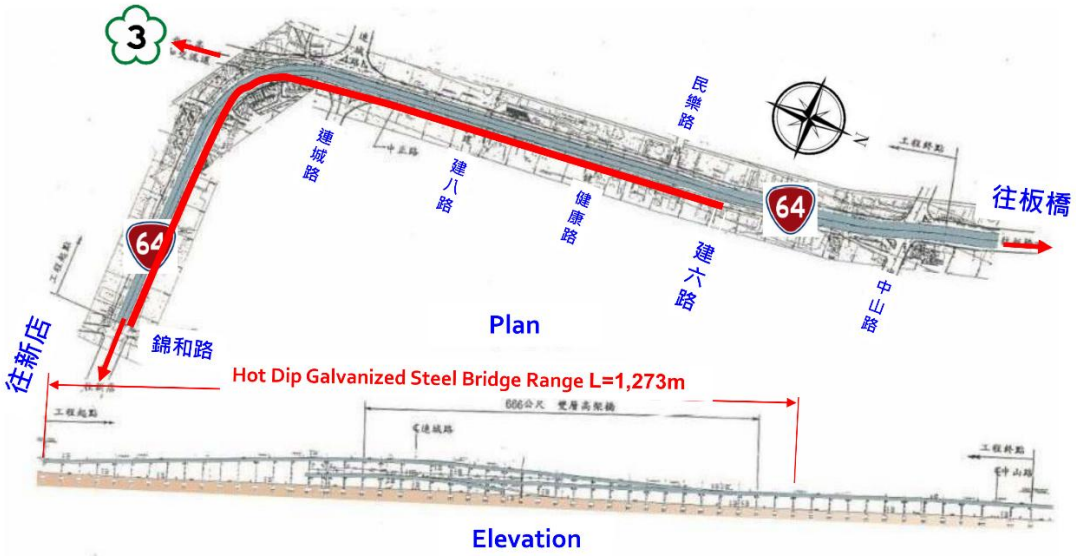


圖 2.49 中和快速道路高架橋平面位置圖[32]

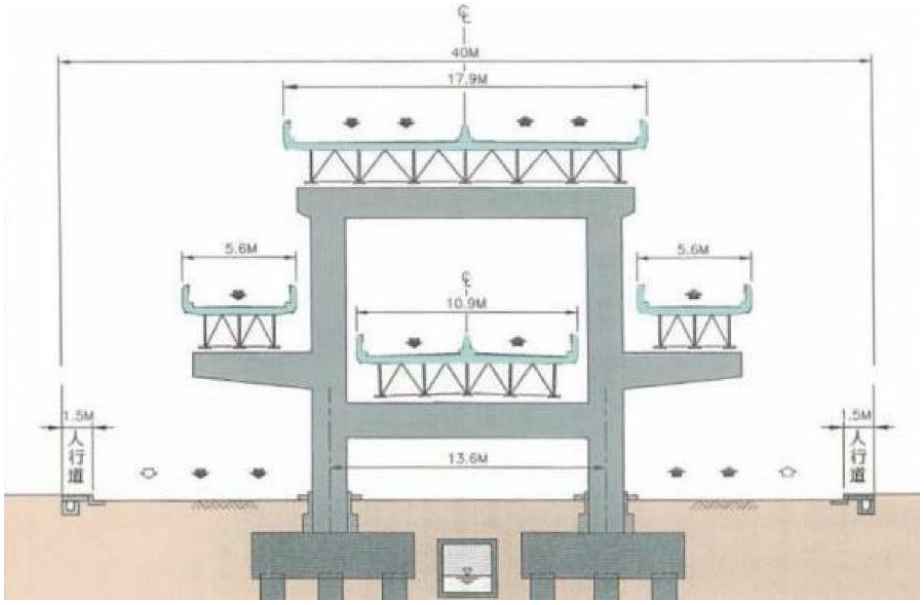


圖 2.50 中和快速道路高架橋平面斷面圖(門架式)[32]



圖 2.51 中和快速道路高架橋主梁吊裝照片[32]

(2) 案例橋梁檢測資料

本案例於竣工後的第 1~4 年與第 9 年進行熱浸鍍鋅腐蝕量的量測，如表 2-48，參考 ISO 9223-2012 與 ISO 9224 鋅的大氣腐蝕速率(如表 2-49)，其腐蝕等級 C2。本案例於竣工第 23 年進行熱浸鍍鋅構件的膜厚量測(如圖 2.52)，每一處之膜厚值，係以量測 10 點以上之平均值，量測結果如圖 2.53，除一路口因鋼梁受排水口沖洗，雖有白色粉狀(俗稱白銹)產生(對鍍鋅膜厚無影響)，其餘的熱浸鍍鋅構件皆無異狀(如圖 2.54)。

表 2-48 中和快速道路高架橋案例熱浸鍍鋅腐蝕量的量測表[32]

年份(自 1995 年開始)	年腐蝕量(g/m^2)
第 1 年	2.80
第 2 年	3.07
第 3 年	3.08
第 4 年	2.73
第 9 年	1.55

表 2-49 鋅的大氣腐蝕速率(單位：g/m^2) [32]

腐蝕等級	第 1 年 腐蝕速率	第 10 年平均 腐蝕速率	第 30 年平均 腐蝕速率	腐蝕性
腐蝕性非常低(C1)	r_{corr}≦0.7	r_{av}≦0.5	r_{lin}≦0.36	非常低
腐蝕性低(C2)	0.7<r_{corr}≦5	0.5<r_{av}≦3.6	0.36<r_{lin}≦2.86	低
腐蝕性中等(C3)	5<r_{corr}≦15	3.57<r_{av}≦10	2.86<r_{lin}≦7.85	中等
腐蝕性高(C4)	15<r_{corr}≦30	10<r_{av}≦20	7.85<r_{lin}≦15.7	高
腐蝕性非常高(C5)	30<r_{corr}≦60	20<r_{av}≦40	15.7<r_{lin}≦31.4	非常高
腐蝕性極嚴重(CX)	60<r_{corr}≦180	40<r_{av}≦114	31.4<r_{lin}≦92.8	極嚴重



圖 2.52 中和快速道路高架橋膜厚量測照片[32]

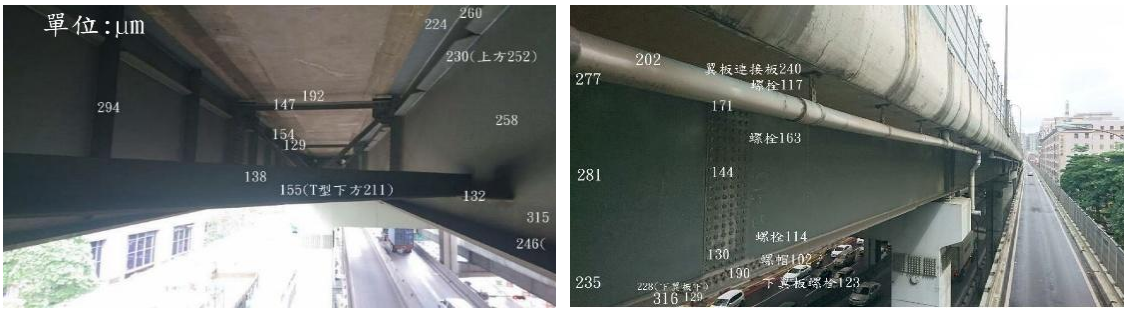


圖 2.53 中和快速道路高架橋膜厚量測結果[32]



圖 2.54 中和快速道路高架橋鋼構件現況照片(第 23 年)[32]

8. 鐵路跨河桁架橋案例 [小清水溪(東正線)橋]

(1) 案例橋梁基本資料

113 年 7 月凱米颱風襲臺，案例橋梁西行線因土石流沖斷，於 113 年 12 月修復(改建為桁架橋)，由於重建後高程較高，因安全考量，故將案例橋梁東行線進行改建，其建造經費約 7,848 萬(114 年，決標金額)，並於 114 年 5 月完工通車。完工後之桁架橋橋長 39.6 m，橋高 3.5 m，橋寬 7.45 m。



圖 2.55 鐵路跨河桁架橋案例照片(完工後)[33]

(2) 案例橋梁維修設計探討

案例橋梁之防蝕設計說明如下。

①鋼板之鋼橋構件須符合 ASTM A709 GR.50 高強度低合金鋼之規定。其它構件須符合 ASTM A709/A572 GR.50 或 A709GR.36/A36 之規定。

②強力螺栓須鍍鋅並符合 A325 type1.H.S.B。

③鋼構件均須經熱浸鍍鋅處理，鋼管內層亦須鍍鋅，其鍍鋅附著量為 650 g/m^2。

④考量案例橋梁所屬環境為 C4 等級，故桁架橋外露面除熱浸鍍鋅外，亦以塗裝系統防蝕(如表 2-50、表 2-51 所示)，總膜厚為 200 μm。

表 2-50 鐵路跨河桁架橋案例桁架橋表面塗裝系統-鋼橋外露表面[33]

施工場所	塗裝工程	塗料規格	塗佈量(1) (g/m^3)	最小乾膜厚(μm)	塗裝間隔	調薄劑
工廠鍍鋅	表面處理	噴砂除銹至 SSPC-SP-10 或 SIS Sa 2½以上，表面粗糙度 25~75 μm。				
	附著量	650 g/m^2				
現場塗裝	補修及表面處理	依第 05081 章熱浸鍍鋅處理				
	底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆	140	50	8 小時以上、10 日內	環氧樹脂系
	中塗漆	氟素樹脂中塗漆	510	90	1 日以上、10 以日內	氟素樹脂系(2)
	第一道面漆	氟素樹脂面漆	160	30		
	第二道面漆	氟素樹脂面漆	160	30		
	合計	最小總膜厚 290μm				

備考：接合板與鋼梁之接合面部分，於工廠塗裝時須分層噴塗厚塗型無機鋅粉底漆，相關規定如下：
(1)接合面每層最小乾膜厚 30 μm 以上，總乾膜厚 90~200 μm。
(2)乾膜鋅含量 80 %以上，鋅末粒徑(50 %平均粒徑)10 μm 程度以上。
註 1：無氣噴塗法。
註 2：中塗漆及面漆塗裝須符合本章品質及保固規定；氟素樹脂塗料品質須符合 JIS K5659 規定。

表 2-51 鐵路跨河桁架橋案例桁架橋表面塗裝系統-鋼橋(含鋼拱橋)內面[33]

施工場所	塗裝工程	塗料規格	塗佈量 (g/m^3)	最小乾膜厚(μm)	塗裝間隔	調薄劑
組立前處理	表面處理	噴砂除銹至 SSPC-SP-10 或 SIS Sa 2½以上，表面粗糙度 25~75 μm。				
	防銹預塗底塗	無機鋅粉底漆	700 無氣噴塗法	15	12 個月以內	無機鋅粉系(1)
工廠鍍鋅	表面處理	依第 05081 章熱浸鍍鋅處理				
	附著量	650 g/m^2				
現場塗裝	補修及表面處理	依第 05081 章熱浸鍍鋅處理				

備考：接合板與鋼梁之接合面部分，於工廠塗裝時須分層噴塗厚塗型無機鋅粉底漆，相關規定如下：
(1)接合面每層最小乾膜厚 30 μm 以上，總乾膜厚 90~200 μm。
(2)乾膜鋅含量 80 %以上，鋅末粒徑(50 %平均粒徑)10 μm 程度以上。
註 1：防銹預塗底塗所用無機鋅粉底漆，對於鋼板之銲接工作，不得有不良影響；無機鋅粉底漆品質應優於或符合 CNS 4936 規定。

2.1.3 鐵公路橋梁劣化原因分析

對於國內鐵公路橋梁案例探討，以下依案例之規範規定、設計與施工(含過往之相關經驗)、維護管理之注意事項等之說明如下。

1. 規範規定(彙整如表 2-52 所示)

(1)混凝土橋部分：

混凝土橋梁設計規範之發展，早期以結構安全與承載能力為設計考量，對於環境作用與耐久性僅以混凝土保護層厚度做為主要控制手段，未進行系統性的腐蝕或鹽害環境分級。隨著沿海橋梁之劣化與設計觀念的改變，後續規範逐步導入海洋環境防蝕與耐久性設計概念，建立腐蝕環境分區制度，並依不同環境條件明確規範水膠比、混凝土強度、保護層厚度及附加防護措施。近年修訂進一步強調設計年限、全生命週期理念與維護管理考量，使混凝土橋梁設計由單一結構強度導向，轉型為兼顧安全性、耐久性與可維護性的整體性設計方式。

(2)鋼橋部分：

我國鋼橋防蝕設計規範係隨橋梁耐久性與維護管理理念之發展而逐步建構完成。早期之公路及鐵路橋梁設計規範(公路 76 年版、鐵路 93 年版)尚未明確納入防蝕設計內容，僅著重於結構安全與承載能力之要求。至公路橋梁設計規範 98 年版，始正式將海洋環境下之防蝕設計納入規範體系，針對鋼橋主要構造物、附屬設施、支承與伸縮縫等部位，規定須考量環境腐蝕影響，以降低腐蝕風險。

隨後，104 年版公路橋梁設計規範進一步引入大氣腐蝕環境調查與分類制度，將腐蝕環境劃分為 C1 至 C5 等級，並依不同環境等級訂定相對應之構件防蝕設計原則，使防蝕設計具備量化與分級依據。109 年版規範則結合全生命週期設計理念，將防蝕設計與後續之維護管理、檢測維修及特殊性橋梁之設計考量一併納入，提升鋼橋整體耐久性與使用效能。

在鐵路橋梁方面，112 年版鐵路橋梁設計規範於耐久性章節中，對應公路橋梁設計規範 104 年版之防蝕與環境分類概念，使鋼橋防蝕設計原則於公、鐵系統間趨於一致。整體而言，現行鋼橋防蝕設計規範已由單純之材料保護，發展為涵蓋環境評估、防蝕系統選擇、結構細部設計及全生命週期管理之完整體系。

表 2-52 鐵公路橋梁設計規範規定彙整

類型	內容
混凝土橋	公路橋梁設計規範： ● 76 年版規範[34]並無鹽害區劃分，僅有保護層厚度規定，而對於腐蝕、海洋環境或其他嚴重曝露情況，是以酌予增加保護層厚度或使用其他保護進行設計。 ● 98 年版規範[35]新增第十二章海洋環境下防蝕設計，進行腐蝕環境分區，並依不同鹽害區規定對應之水膠比、抗壓強度、保護層厚度，並提供 4 種特殊保護措施進行設計。 ● 104 年版[9]將第十二章更改為耐久性設計，新增一般環境之環境作用等級、保護層規定，並增加了 50 年與 100 年設計年限之設計概念，特殊保護措施更改為附加保護措施。 ● 109 年[5]對於 1.1 節適用範圍(新增脊背橋、拱橋、混合橋梁、複合橋梁等)與 1.4 節設計原則(加入全生命週期、維護管理、檢測維修、特殊性橋梁設計考量等)進行修訂，耐久性設計方面同 104 年版規範。 鐵路橋梁設計規範： ● 93 年版規範[36]同 76 年版公路橋梁設計規範[34]。 ● 112 年版規範[4]第六章耐久性設計對應 104 年版公路橋梁設計規範[9]，並新增各鹽害區對應之村里，以供海洋鹽害環境作用等級之行政區劃分。 公路橋梁檢測及補強規範： ● 103 年規範為公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範[37]，規定檢測之一般規定、定期檢測、特別檢測(重大災害後)、結構安全評估、構材維修與結構補強之規定。 ● 107 年版規範[38]合併鋼筋混凝土與鋼結構橋梁之內容，以統一標準進行檢測補強作業。 鐵路橋梁之檢測及補強規範： ● 108 年版[39]相較於 107 年公路橋梁檢測及補強規範[38]，對於檢測評估、維護補強方面有更詳細之規定。 CNS 3090 A2042 預拌混凝土[40]： ● 自民國 59 年至民國 80 年第二次修訂時，對於新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量皆無特別規定。

	● 83 年第三次修訂，規定新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量，一般環境為 0.6 kg/m^3，所處環境須作耐久性考量者，為 0.3 kg/m^3。 ● 84 年第四次修訂，規定鋼筋混凝土所有環境最大新拌水溶性氯離子含量，為 0.3 kg/m^3。 ● 104 年第五次修訂，規定鋼筋混凝土、預力混凝土，為 0.15 kg/m^3。
鋼橋	公路橋梁設計規範： ● 76 年版規範[34]並無防蝕設計之內容。 ● 98 年版規範[35]第十二章規定海洋環境下防蝕設計，以考量鋼橋主要構造物、附屬設施、伸縮縫、支承等之防蝕工作，亦應考慮各構造物間結合材料之電位，以減少電化學之反應。鋼橋防蝕方式可從鋼構基材之選擇及鋼材表面處理兩方面著手。 ● 104 年版[9]新增大氣腐蝕環境調查分類將腐蝕環境分為 C1~5，以及構件防蝕設計內容。 ● 109 年版[5]對於 1.1 節適用範圍(新增脊背橋、拱橋、混合橋梁、複合橋梁等)與 1.4 節設計原則(加入全生命週期、維護管理、檢測維修、特殊性橋梁設計考量等)進行修訂。 鐵路橋梁設計規範： ● 93 年版規範[36]並無防蝕設計之內容。 ● 112 年版規範[4]第六章耐久性同樣對應 104 年版公路橋梁設計規範。 公路橋梁檢測及補強規範： ● 98 年版規範為公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範[41]，規定檢測之一般規定、定期檢測、特別檢測(重大災害後)、鋼結構橋梁結構安全評估、維修與補強等規定。 ● 107 年版規範[38]合併鋼筋混凝土與鋼結構橋梁之內容，以統一標準進行檢測補強作業。 鐵路橋梁之檢測及補強規範： ● 99 年規範為鐵路鋼結構橋梁之檢測及補強規範[42]，內容對應 98 年版公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範[41]。 ● 108 年版[39]相較於 107 年公路橋梁檢測及補強規範[38]，對於檢測評估、維護補強方面有更詳細之規定。

2. 設計注意事項

(1)混凝土橋部分：

早期(98 年以前)依據的設計規範對耐久性考量不足，導致許多橋梁尤其是濱海地區因氯離子侵入與鹽害環境而產生鋼筋腐蝕與混凝土劣化問題。隨著規範演進，防蝕設計逐步從單純結構安全轉向耐久性管理，現行規範強調以服務年限為目標並要求設計階段同步規劃後續維護管理策略，以降低維修成本並延長橋梁壽

命。防蝕設計應採取材料、構造與施工管理的綜合策略，包括提高混凝土密實度與保護層厚度、選用耐久性材料、針對鹽害環境採用防水或陰極保護等措施，並配合施工品質與定期檢測。整體而言，未來橋梁設計需以耐久性為核心，結合壽命週期成本與維護管理制度，以確保橋梁在全壽命期間維持安全與功能。

另針對不同環境下的混凝土耐久性設計之注意事項，應以降低滲透性與控制侵蝕速率為核心，如為中性化環境應透過降低水膠比、增加保護層厚度及加入粉煤灰、爐石粉等摻料提升密實度；鹽害環境則需採用低水膠比、高抗氯離子能力之混凝土(可參考表4-18)，以減緩氯離子滲透與鋼筋腐蝕；硫酸鹽環境則應使用 C_3A 含量較低之水泥(如 Type II 或 Type V)，以降低硫酸根與水泥反應生成膨脹性產物而造成開裂。

另可考量在鹽害環境中之結構細節，以提升耐久性之防蝕設計，如避免水分與腐蝕介質滯留，例如帽梁頂部應設置排水坡度並避免死水區之排水設計；如接角採圓弧化設計，可降低應力集中與塗層在稜角處失效的風險之形狀優化。

(2)鋼橋部分：

早期(98 年以前)國內鋼橋設計缺乏防蝕規範，防蝕設計多參考國外手冊；自民國 96 年起開始進行大氣腐蝕環境調查，並於民國 100 年及 103 年由中華民國鋼結構學會陸續發布塗裝與熱浸鍍鋅技術手冊，提供國內防蝕設計參考。由於早期規範與技術文件不足，導致部分鋼橋防蝕性能不足。近年設計者對防蝕技術重視度提升，已有橋梁採用複合防蝕系統(熱浸鍍鋅＋塗裝)以改善耐久性。以下針對各種防蝕方法說明如下。

①塗裝防蝕的核心在於以塗膜隔離鋼材與氧氣、水分及鹽分，設計時需依橋址腐蝕性分級選擇適當系統，並考量沿海高鹽環境、未來檢查與維修需求及施工溫濕度限制。塗裝系統由多層塗料構成，必須確保各層相容並依內外部環境選用不同系統，螺栓接合處及高溫瀝青下方需採專用規格。結構應避免積水、積塵與狹窄

密閉空間，銳角處需圓弧化以維持膜厚，並確保施工動線良好；施工品質則以符合 ISO 8501-1 Sa 2½ 的表面處理及鹽分檢測與清洗為重點。

②耐候性鋼材透過初期形成的穩定銹層保護底材，降低板厚損耗，但在高鹽分、長期濕潤或通風不良環境下，銹層難以形成，防蝕效果會下降，因此國內多數耐候鋼橋仍採全橋塗裝；設計上應避免積水、積塵與死角，並設置排水與規範螺栓間距以降低間隙腐蝕，必要時對沿海噴鹽區、融雪劑影響區、長期濕潤部位或混凝土包覆交界處採局部塗裝，施工時也需清除油污銲渣並使用耐候性相容的銲材。

③熱浸鍍鋅防蝕設計需依橋址大氣腐蝕級別(C1－CX)評估壽命，鋅層可提供屏障與犧牲陽極雙重保護，但在沿海 CX 環境腐蝕速率會顯著提高；構件尺寸須符合鍍鋅槽規格，過大需分割並注意接頭防蝕。結構細部應設置排氣、排鋅孔及加勁板扇形孔，避免死角、狹縫與疊板結構，並採用對稱截面以減少熱變形；螺栓與銲接處需採用鍍鋅材料並在銲後補鍍鋅或塗鋅粉漆。

④金屬熔射透過將鋅、鋁或其合金熔融噴塗於鋼材表面形成犧牲陽極型防蝕層，需配合封孔、設計可噴塗性與嚴格表面處理與厚度管制，適用於沿海等重防蝕環境且可搭配面漆延長壽命。

3. 施工注意事項

(1)混凝土橋部分：

施工期間應確實管控混凝土品質、鋼筋保護層厚度及新拌混凝土氯離子含量，以確保結構耐久性；隨著施工品管制度的完善，混凝土橋梁之耐久表現已明顯提升。混凝土結構之防蝕耐久性須自施工前即加以控制，透過低水膠比配比設計並摻用飛灰、爐石粉或矽灰以提升緻密度，並依中性化、鹽害或硫酸鹽環境選用適當水泥及鋼筋防蝕措施；施工過程中應確實控制保護層厚度、確保混凝土充分搗實並落實早期養護，以避免孔隙與裂縫產生；施

工後則須加強材料、保護層與裂縫之檢測與品質管制，以延緩腐蝕介質侵入，確保結構長期耐久性能。

(2)鋼橋部分：

施工細節直接影響防蝕成效，隨著品管與施工、監造人員認證制度落實，鋼橋耐久性已逐步提升。

鋼構防蝕施工應落實工期與品質管理，塗裝作業須安排於最後階段並預留充分乾燥養護時間,尤其在低溫季節更需審慎控制。構件表面應避免油性標記、徹底去除鑽孔毛邊，並對切割邊緣進行圓弧化處理以確保塗層附著性；運輸與存放過程須防止塗膜損傷及鹽分污染。不同防蝕工法另有其施工重點，如塗裝須妥善處理銲接部位，金屬熔射須達到規定噴砂品質並進行封孔，耐候鋼則需防止銹水污染並於不利部位補強塗裝。此外，設計階段即應考量排水與維修空間配置，以避免積水並提升整體耐久性。

4. 維護管理注意事項

(1)混凝土橋部分：

民國 88 年交通部運輸研究所建置「全國橋梁管理資訊系統」以前，除高公局外，多數橋梁養護單位之橋梁檢測與維護作業尚未制度化。加以橋梁數量龐大且相關規範未臻完善，導致檢測人員素質參差不齊，進而衍生影響用路人生命與財產安全之橋梁損傷事件。此外，橋梁維護經費是否充足，亦直接影響檢測與修繕作業之執行成效，進而左右整體行車安全。

既有橋梁的維護管理應依不同環境採取對應檢測指標，中性化環境以中性化深度與鋼筋腐蝕量為主；鹽害環境以氯離子濃度與鋼筋腐蝕量為主；硫酸鹽環境則以劣化因子滲透深度與鋼筋腐蝕量為主。維護檢查應包含表面裂縫、混凝土剝落與保護層厚度等項目，並在乾濕交替區或高 CO_2區域加強巡檢。既有橋梁的維護管理應以生命週期成本分析做為維護決策依據，以達成長期耐久與經濟效益。

(2)鋼橋部分：

目前「公路橋梁檢測及補強規範」與「鐵路橋梁之檢測及補強規範」雖要求塗裝劣化維修需依檢測結果判斷，但實務上普遍缺乏完整的塗裝系統檢測、評估與追蹤紀錄；此外，新建橋梁多以保固期滿後才啟動防蝕維護，可能導致鋼構基材在未受控狀況下劣化；既有橋梁的防蝕系統修復亦需依據國內外規範並考量腐蝕環境條件進行設計，以避免修復後再次快速劣化並增加維護成本。鋼橋防蝕維護管理時需定期檢查防蝕層劣化狀況(如膜厚不足、剝落、銹蝕)，同時監測環境因素(塵埃、鹽分、排水阻塞等)並建立完整防蝕記錄；補修應具備局部或全面更新的可行性，並優先處理積水、漏水等結構問題。

2.2 其他各類交通設施遭遇之腐蝕問題

1. 隧道

隧道主體結構以襯砌為主，其所遭遇之腐蝕問題說明如下。

(1)有害水

地盤中的湧水因含有下述有害物質，以及酸性而造成隧道襯砌的劣化。通常隧道滲漏水的 pH 值在 4~5 以下，因此該等水分所浸透的混凝土及勾縫砂漿常產生劣化導致強度降低。有害水所產生的劣化現象大都是在襯砌的背面進行，因此要多加留意。

①因植物的光合作用以及細菌造成生物體的分解而產生的二氧化碳氣體溶於地下水中。

②地下水含有植物遺骸等不完全分解所產生的腐質酸。

③火山地帶常見的強酸性溫泉水以及自礦床湧出的地下水。

(2)鹽害

鹽害可分為下列兩類：

①受到含有由大海飛來的海鹽粒子的大氣所傷害之外在鹽害。

②使用除鹽程度不完全的海砂和使用不適當的氯化鈣系混和劑而產生的內在鹽害。

另外尚有海底隧道漏水所受到的海水侵害。溶存於海水中主要的離子有氯離子(Cl^-)，硫酸離子(SO_4^{2-})，鈉離子(Na^+)，鉀離子(K^+)，鈣離子(Ca^{2+})與鎂離子(Mg^{2+})。其中由於氯離子與鈉離子的濃度較高，因此在使用海砂等非海水直接作用的場合，因間接供給此兩種離子的緣故，很容易產生與水泥水化物反應產生之劣化生成物，造成鋼材顯著的生銹腐蝕，產生鹼性骨材反應等現象，因而導致混凝土的耐久性降低。而在海水直接作用的處所，由於海水充份供給硫酸離子及鎂離子的緣故，因此同樣地這些離子將與水泥的水化物反應產生劣化生成物，造成混凝土的劣化。因此混凝土構造物的鹽害可大致可分為下列兩大類：

①混凝土本身劣化：海水中的氯離子與水泥水化物中氫氧化鈣反應產生氯化鈣($CaCl_2$)及 $3CaO{\cdot}A1_2O_3{\cdot}CaC1_2{\cdot}10H_2O$，使得混凝土呈多孔質化並有膨脹現象，造成混凝土表面剝落與裂縫產生。海水中的硫酸離子同樣會與氫氧化鈣反應而生成石膏($CaSO_4{\cdot}2H_2O{\cdot}$)及 $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$，導致混凝土產生裂縫。構造物如欲避免上述離子作用的現象，可藉由使用高爐水泥、飛灰水泥、耐硫酸鹽之波特蘭水泥來抑制劣化的影響，日本青函隧道和臺灣高雄過港隧道的海底段即採用此種措施。

②混凝土中鋼筋腐蝕：存在於海水中的 $C1^{-1}$ 及 SO_4^{-2} 將會破壞鋼材表面而形成一層銹。鋼材生銹後的銹蝕體積為鐵的 2.5 倍，因場合不同會達到 6~7 倍之多。因此將使得保護層沿著鋼材而裂開出現混凝土剝離、產生斑銹等異常狀態，甚至產生剝落的現象。

(3) 中性化

中性化是因車輛所排放的煙，以及煙附著於襯砌表面，因此產生襯砌材質劣化的現象。若排放出的氣體中含有氮氧化合物(NO_X)及亞硫酸氣體(SO_3^{-2})。這些物質將因隧道漏水而溶解於滲入隧道之水中，使得混凝土及勾縫砂漿產生劣化的現象，容易發生

煙害的條件有以下幾項：

①長隧道，煤煙很難排出坑外的場合。

②煤煙車運行次數過多的場合。

③縱坡過陡，列車運行較為吃力的場合。

④單線隧道。

(4)滲漏水

隧道外來湧水原則上由襯砌背面的排水孔及垂直排水管予以集流排除。除此之外所產生的集中湧水或襯砌表面不規則的潤濕水稱之為漏水。一般會影響隧道電力機房(如圖 2.56(a)所示)、通風站(如圖 2.56(b)所示)、通車隧道(如圖 2.56(c)(d)所示)、管線廊道(如圖 2.56(e)所示)與導坑(如圖 2.56(f)所示)等之使用，產生漏電、設備銹蝕、滲水白華與鋼筋腐蝕等情形。

填縫砂漿及混凝土因漏水而被浸透，同時混凝土中氫氧化鈣與之溶解後，再與空氣中的二氧化碳反應而造成中性化的現象。氫氧化鈣原是混凝土中具有重要功用的結合材，若與水溶解後流出，將造成砂漿及混凝土的劣化。

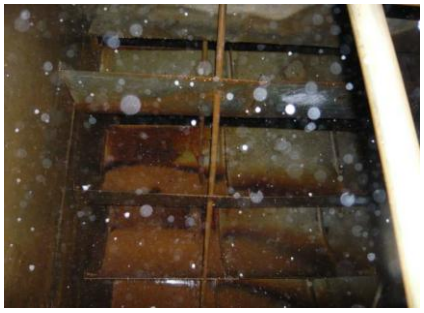
磚砌襯砌若有漏水發生，磚塊中的可溶性鹽類將受到浸透水而溶出，在表面產生白色的結晶(白華，Efflorescence)，是造成磚砌襯砌劣化的主因。

(5)材質劣化

隧道支撐的品質取決於骨材材料以及施工管理良窳等因素，但目前老舊隧道支撐材料的劣化，仍與材質不良有著密切關係。除了材質不良的因素外；尚有鋼筋組立不良、混凝土澆灌不良、施工縫的施工不良等施工管理因素存在，混凝土的品質將因而降低，致使構造物產生異常的狀況。



(a)變電站積水



(b)通風站漏水與導流片銹蝕



(c)隧道襯砌漏水



(d)隧道襯砌滲水白華



(e)隧道管線廊道積水



(f)隧道管線廊道積水

圖 2.56 隧道滲漏水照片[43]

2. 港灣

港灣設施主要以碼頭結構為主，其型式及主要檢查項目分類如表 2-53[44]。依各型式碼頭，其腐蝕問題說明如下。

(1) 重力式碼頭(沉箱式或方塊式)：以本體結構的沉箱的空洞化、混凝土的劣化、損傷；上部結構的混凝土劣化(如圖 2.57(a)所示)、損傷；繫船柱劣化、損傷(如圖 2.57(b)所示)較易有腐蝕情形發生。

(2) 板樁式碼頭(鋼板樁或 RC 板樁)：以鋼板樁鋼材的腐蝕、穿孔、損傷；上部結構的混凝土劣化(如圖 2.57(c)所示)；鋼板塗裝防蝕工、陰極防蝕工(如圖 2.57(d)所示)；繫船柱劣化、損傷較易有腐蝕情形發生。

(3)棧橋式碼頭：以鋼管樁鋼材的腐蝕、穿孔、損傷；上部結構混凝土的劣化、損傷(如圖 2.57(e))；鋼板樁塗裝防蝕工、陰極防蝕工；繫船柱劣化、損傷較易有腐蝕情形發生。

(4)浮動式碼頭：以鋼製浮箱鋼材的腐蝕、穿孔、損傷；混凝土製浮箱混凝土的劣化、損傷；固定樁鋼材的腐蝕、穿孔、損傷；連絡橋、渡橋安全性損傷、腐蝕；固定樁及浮箱等鋼構材塗裝防蝕工、陰極防蝕工；繫船柱劣化、損傷較易有腐蝕情形發生。

表 2-53 碼頭型式及主要檢查項目分類表[44]

類別 / 型式	巡檢診斷項目分類		
	I	II	III
重力式碼頭(沉箱式或方塊式)	● 岸壁法線：凹凸、出入 ● 鋪面：淘出、空洞化、下陷、坍塌 ● 本體結構：沉箱的空洞化、混凝土的劣化、損傷 ● 海底地基：沖刷、土砂的淤積	● 鋪面：混凝土・瀝青鋪面等的劣化、損傷 ● 上部結構：混凝土劣化、損傷	左欄以外
板樁式碼頭(鋼板樁或 RC 板樁)	● 岸壁法線：凹凸、出入 ● 鋪面：淘出、空洞化、下陷、坍塌 ● 鋼板樁：鋼材的腐蝕、穿孔、損傷 ● 海底地基：沖刷、土砂的淤積	● 鋪面：混凝土/瀝青鋪面等的劣化、損傷 ● 上部結構：混凝土的劣化、損傷 ● 鋼管樁：塗裝防蝕工、陰極防蝕工	
棧橋式碼頭	● 棧橋法線：凹凸、出入 ● 鋪面：淘出、空洞化、下陷、坍塌 ● 鋼管：鋼材的腐蝕、穿孔、損傷 ● 海底地基：沖刷、土砂的淤積 ● 擋土護岸：淘出、空洞化	● 鋪面：混凝土/瀝青鋪面等的劣化、損傷 ● 上部結構：混凝土的劣化、損傷 ● 鋼管樁等：塗裝防蝕工、陰極防蝕工 ● 渡版：移動、損傷	
浮動式碼頭	● 鋼製浮箱：鋼材的腐蝕、穿孔、損傷 ● 混凝土製浮箱：混凝土的劣化、損傷 ● 固定樁：鋼材的腐蝕、穿孔、損傷 ● 滾輪：滾輪的劣化、損傷 ● 連絡橋、渡橋：安全性損傷、腐蝕	● 鋪面：混凝土/瀝青鋪面等的劣化、損傷 ● 固定樁及浮箱等鋼構材：塗裝防蝕工、陰極防蝕工	

備考：影響程度

I 類：1.對設施性能與安全性產生直接影響的構件、2.設施整體的位移和沉陷

II 類：1.對設施性能產生影響的構件、2.鋼鐵構件的防蝕設施

III 類：1.附屬設施、防舷材、繫船柱、2.防護欄、爬梯等



(a)重力式碼頭上部結構岸肩鋼筋外露腐蝕



(b)碼頭繫船柱腐蝕劣化



(c)板樁式碼頭上部結構冠牆鋼筋外露腐蝕



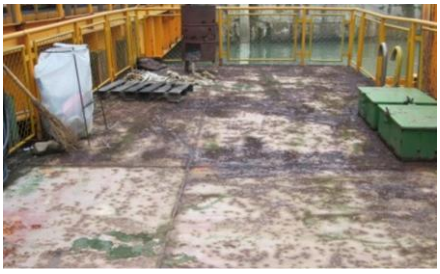
(d)板樁式碼頭陽極塊耗損



(e)棧橋式碼頭上部結構岸肩混凝土板底部鋼筋外露銹蝕



(f)固定樁鋼材的腐蝕





(g)混凝土製浮箱混凝土的劣化

圖 2.57 港灣設施腐蝕劣化照片[45, 46]

3. 捷運

捷運設施主要結構為高架橋梁段與地下隧道段，橋梁腐蝕問題與本案鐵公路橋梁標的相似，隧道部分與前述 2.3.1 節相似，惟其所處環境以都市計畫區為主，橋梁部分除有臨海距離較近(約 300 m)之情形，較易有腐蝕問題(如圖 2.58(a))；隧道部分除有混凝土裂縫、滲漏水、剝落與鋼筋外露等，其餘主要是因混凝土保護層不足或塗膜問題造成小部份之劣化情形(如圖 2.59)。



(a)鋼結構橋梁接合板螺栓銹蝕　(b)RC 橋橋面板底部鋼筋外露　(c)鋼橋橫隔梁銹蝕

圖 2.58 捷運高架橋梁段腐蝕照片[47]



(a)捷運隧道滲漏水　(b)捷運隧道混凝土剝落鋼筋外露

圖 2.59 捷運地下隧道段段劣化照片[47]

4. 機場

機場設施(土建部分)以跑道與航空站建築等為主，跑道主要受飛機起降之衝擊力而損壞，與腐蝕問題較無關係。航空站建築如為臨海環境或因老劣化因素，於航空站建築外牆、聯絡道橋梁與其附屬設施，較容易有腐蝕問題發生(如圖 2.60 所示)，國內機場維管單位針對此些情形，會定期檢視並進行修繕作業。



(a)聯絡道橋梁銹蝕　　(b)聯絡道橋梁壁磚劣化

圖 2.60 機場設施建物腐蝕劣化照片[48]

5. 各類設施核心差異化的腐蝕問題(彙整如表 2-54 所示)

(1)隧道設施：隧道多屬封閉空間，長期受地下水及通風條件影響，其腐蝕特性以化學性劣化與滲漏水相關問題為主。

①地下湧水呈酸性，含二氧化碳、腐植酸或硫酸根等，易造成混凝土襯砌背面劣化。

②滲漏水導致中性化、白華生成及鋼筋腐蝕，且劣化位置多隱蔽、不易察覺。

③長隧道或通風不良環境易受車輛排放氣體影響，產生煙害與中性化加劇現象。

(2)港灣設施：港灣設施長期曝露於海洋環境，為各類設施中腐蝕環境最嚴苛者，其腐蝕特性以鹽害與鋼構腐蝕為主。

①海水中氯離子、硫酸離子與鎂離子濃度高，易引發混凝土化學劣化及鋼材鏽蝕。

②潮汐、飛沫區及乾濕交替區，鋼構腐蝕速率顯著提升。

③防蝕塗裝及陰極防蝕系統性能衰退，將加速結構劣化。

(3)捷運設施

①高架橋段腐蝕型態與一般橋梁相似，臨海路段易受鹽害影響。

②地下隧道段以裂縫、滲漏水、鋼筋外露及局部混凝土剝落為主，多與施工品質及保護層不足相關。

③都市環境污染亦可能加速中性化之情形。

(4)機場設施

①跑道主要受荷載與疲勞影響，腐蝕非主要劣化因素。

②臨海機場之航站建築、聯絡道橋梁及鋼構件，易受鹽害與大氣腐蝕影響。

③腐蝕多屬局部性，透過定期巡檢與修繕可有效控制。

隧道設施以混凝土襯砌因有害水、鹽害、中性化、材質劣化，導致鋼筋外露腐蝕與滲漏水之問題；港灣設施以碼頭混凝土與鋼構件因臨海環境，導致鋼筋外露腐蝕與鋼板樁(或鋼管樁)銹蝕之問題；捷運設施之高架橋梁段與地下隧道段，與鐵公路橋梁、隧道有相似之腐蝕問題；機場設施以航空站建築因臨海環境或老劣化，導致外牆構材鋼筋外露腐蝕與鋼構件銹蝕之問題。綜上，建議其餘各類交通設施，可重新檢視自身交通設施特性，建立適宜之防蝕技術指引，以確保提升設施的品質及壽齡與減少生命週期之維護成本。

表 2-54 各類交通設施腐蝕問題差異化比較表

設施類型		腐蝕機制	腐蝕問題
隧道	隧道 主體結構	中性化環境 地下水滲漏	● 含二氧化碳、腐植酸或硫酸根等酸性地下湧水，導致混凝土襯砌背面劣化。 ● 酸性滲漏水導致中性化、白華生成及鋼筋腐蝕，且劣化位置多隱蔽、不易察覺。 ● 屬於封閉空間之隧道，因通風不良與車輛排放氣體影響，使得隧道內之中性化腐蝕現象加劇。
港灣	重力式碼頭 (沉箱式或方塊式)	鹽害環境 (極嚴重鹽害區)	● 海水中氯離子、硫酸離子與鎂離子濃度高，易引發混凝土化學劣化及鋼材鏽蝕。 ● 潮汐、飛沫區及乾濕交替之極嚴重鹽害區內之鋼構腐蝕速率顯著提升。 ● 防蝕塗裝及陰極防蝕系統性能衰退，加速結構劣化。
	板樁式碼頭 (鋼板樁或RC板樁)		
	棧橋式碼頭		
	浮動式碼頭		
捷運	高架橋梁	中性化環境(都市) 鹽害環境(臨海)	腐蝕問題與鐵公橋梁類似，可參考2.1節「國內橋梁防蝕設計案例」之內容。
	地下隧道		腐蝕問題同隧道設施，臨海路段易受鹽害影響、地下隧道段以地下水滲漏為主、都市環境以中性化為主。
機場	跑道	主要受荷載與疲勞影響，腐蝕非主要劣化因素。	
	航空站建築	中性化環境(都市) 鹽害環境(臨海)	● 機場之航站建築、聯絡道橋梁及鋼構件，易受鹽害與大氣腐蝕影響。 ● 多屬局部性腐蝕，透過定期巡檢與修繕可有效控制。

第三章　鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討

本章將國內外現有之橋梁或結構物防蝕耐久性相關規範(包含相關準則、導引、手冊)作一概括性之整理，主要分混凝土橋及鋼結構橋二大部分。整理美國、歐洲、日本、中國大陸以及國內等地區之相關規範、準則、導引、手冊等。

3.1 混凝土橋耐久性設計規範

3.1.1 國外耐久性設計規範

1. 美國規範

(1)加州交通局(Caltrans)： Bridge Design Specifications

美國加州交通局設計者備忘錄[49](編號 10-5)之環境分區，為目前相關規範準則中將腐蝕環境較具體規劃分區者，此分區模式係結合了地域及海岸線距離，以及環境(包含大氣、水、土壤)情況做為鹽害腐蝕環境之區分，同時納入高程之考量。此種分類方法對於腐蝕環境的區分即具有清楚且定量的描述，對於構造物興建地點或環境情況亦提供了明確的鹽害分區指示，其鹽害環境分區方式如圖 3.1、表 3-1 所示，可分為下列①~⑥區：

①無腐蝕性大氣/土壤/水區。

②飛沫區(距平均較高高潮位(MHHW)與陸地交界處水平距離 300 公尺以內)。

③在平均較低低潮位(MLLW)水位以上具腐蝕性土壤，再依氯離子濃度分為 500-5000 ppm，5001-10000 ppm 及大於 10000 ppm 三種情形。

④在 MLLW 以下的腐蝕性土壤。

⑤在 MLLW 以下具永久性之腐蝕性水質。

⑥腐蝕性飛沫區(距 MHHW 與陸地交界處 6 公尺水平距離以內及

距 MLLW 以上至 MHHW 上方 6 公尺內)，再依氯離子濃度分為 500-5000 ppm、5001-10000 ppm 及大於 10000 ppm 三種情形。

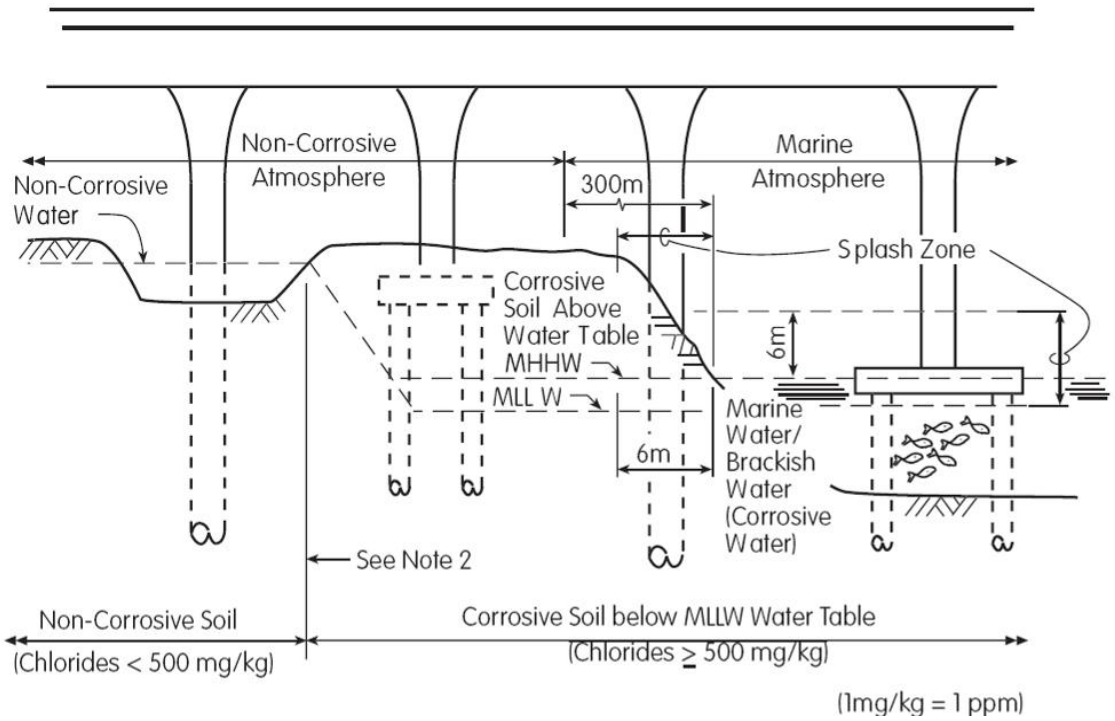


圖 3.1 橋梁鹽害腐蝕環境分區示意圖[49]

表 3-1 鹽害環境之分區[50]

類別	混凝土之環境條件		
非腐蝕性環境	大氣、土壤、水		
非海洋性環境	腐蝕性土壤目前或位於記錄(測量)的最低地下水位以下 3 英尺處	氯離子濃度 (ppm)	500~5,000
			5,001~10,000
			大於 10,000
海洋性環境	大氣		
	水下(永久位於 MLLW 以下)		
	飛沫區	氯離子濃度 (ppm)	500~5,000
			5,001~10,000
			大於 10,000
凍融	除冰鹽、融雪水或除雪機噴濺區		

美國加州交通廳最小保護層設計規定以 75 年為設計年限而給予不同腐蝕環境下各構件之設計規定，其鹽霧區、鹽水區及飛沫區環境下所規定之保護層厚度如表 3-2，此外不同構件之重要性而增加額外之保護規定包含：

①水膠比不得大於 0.4。

②需使用預塗(pre-fabricated)的環氧樹脂鋼筋。

③需使用後塗(post-fabricated)的環氧樹脂鋼筋。

④需添加礦物摻料。

⑤最小保護層規定僅限於直接曝露於該環境的構件。

⑥預鑄 I 型與 T 型梁保護層厚度可折減(視現場情形)等。

表 3-2 美國橋梁設計規範服務年限 75 年之鋼筋最小混凝土保護層之相關規定[50]

結構型式	各曝露環境下保護層厚度(cm)									
	非腐蝕性環境	非海洋環境			海洋環境					凍融
	大氣、土壤、水	腐蝕性土壤位於目前最低地下水位以上並向下延伸至低於該水位 3 英尺處，或低於有記錄/測量的最低地下水位 3 英尺處。			大氣(1)	水下(永久位於 MLLW 以下)(1)(2)	飛沫區			除冰鹽、融雪水或除雪機噴濺區(1)(3)(5)
		氯離子濃度(ppm)					氯離子濃度(ppm)			
		500~5,000(1)	5,001~10,000(1)	大於 10,000(1)			500~5,000(1)(2)	5,001~10,000(1)(2)	大於 10,000(1)(2)	
基礎樁帽	7.5	7.5	10	12.5	7.5	5	5	7.5	9	6.5
牆、柱、場鑄樁	5	7.5	10	12.5	7.5	5	5	7.5	9	6.5
預鑄樁	5	5(4)	6.5(2)(4)	6.5(2)(4)	5(4)	5	5	5(d)	7.5(4)	5(4)
橋面板頂層筋	5				6.5		6.5	6.5	6.5(4)	6.5
橋面板下層筋(7)	4				4		5	6.5	6.5(4)	6.5
箱梁底層筋	4				4		5	6.5	6.5(4)	3.5
I 及 T 梁、箱梁腹版外露面(6)	4				7.5		5	6.5	6.5(4)	7.5
緣石、柵欄	2.5				2.5(2)		2.5	2.5	2.5(4)	2.5
不曝露於大氣、土壤或水的混凝土表面 (如梁內部)：										
成束預應力鋼索或直徑大於 0.5 吋之鋼索；大於 No.11 鋼筋										4
非成束預應力鋼索(直徑 ≤0.5 吋)與 No.11 或更小之鋼筋										2.5

註 1：水膠比不得超過 0.40。

註 2：鋼筋至少應符合 ASTM A934 環氧塗層要求。

註 3：鋼筋至少應符合 ASTM A775 環氧塗層要求。

註 4：需滿足其他輔助膠凝材料（SCM）規範要求。

註 5：曝露於除冰鹽、雪水徑流或吹雪機噴淋的結構構件的最小混凝土保護層厚度和其他要求，僅在結構構件直接曝露於這些腐蝕性環境時才適用。否則，應採用非腐蝕性環境的要求。

註 6：對於預製梁和板，表中所示的最小保護層厚度可減少½英吋（在工廠條件下）。

註 7：置於橋面板底部的永久支撐鋼筋的保護層厚度可比表中所示的數值減少½英吋。

(2) 美國混凝土學會 ACI 318-19(22) [51]

ACI CODE-318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022)的環境條件分類分為 4 種腐蝕因子(F 類：凍融、S 類：硫酸鹽、W 類：接觸水、C 類：氯離子)，各 3~4 個等級(0~3)，參見表 3-3。各曝露條件對設計參數的要求如表 3-4，主要控制參數為水膠比、抗壓強度。

表 3-3 ACI 318-19(22)曝露環境類別與分級[51]

類別	分級	混凝土之環境條件	
凍融 (F)	F0	混凝土非曝露於凍融循環	
	F1	混凝土曝露於偶而受潮之凍融循環	
	F2	混凝土曝露於經常受潮之凍融循環	
	F3	混凝土曝露於經常受潮及使用除冰化學藥劑之凍融循環	
硫酸鹽 (S)		土壤中之水溶性硫酸鹽 (SO_4^{2-})，質量% (依 ASTM C1580 測定)	水中溶解之硫酸鹽(SO_4^{2-})，ppm (依 ASTM D516 或 ASTM D4130 測定)
	S0	SO_4^{2-}<0.10	SO_4^{2-}<150
	S1	0.10≦SO_4^{2-}<0.20	150≦SO_4^{2-}<1,500 或海水
	S2	0.20≦SO_4^{2-}≦2.00	1,500≦SO_4^{2-}≦10,000
	S3	SO_4^{2-}>2.00	SO_4^{2-}>10,000
與水接觸 (W)	W0	混凝土處於乾燥環境	
	W1	混凝土與水接觸，不需要求低滲透性	
	W2	混凝土與水接觸，需要求低滲透性	
鋼筋的腐蝕防護 (C)	C0	混凝土處於乾燥環境或有防潮處理	
	C1	混凝土曝露於潮濕但無外來氯鹽之環境	
	C2	混凝土曝露於潮濕且有外來氯鹽之環境，如除冰化學藥劑、鹽、微鹼水、海水或其潑濺水	

表 3-4 ACI 318-19 各曝露條件設計參數要求[51]

曝露等級		最大水膠比	最小 fc' (psi)	額外要求			對水泥材料的限制
				空氣含量			
F0		N/A	2500	N/A			N/A
F1		0.55	3500	濕拌噴射混凝土 5.0%			N/A
F2		0.45	4500	濕拌噴射混凝土 6.0%			N/A
F3		0.40	5000	濕拌噴射混凝土 6.0%、乾拌噴射混凝土 4.5%			26.4.2.2(b)
				膠結材類型			氯化鈣外加劑
				ASTM C150	ASTM C595	ASTM C1157	
S0		N/A	2500	無類型限制	無類型限制	無類型限制	無限制
S1		0.50	4000	II 型	含 MS 標記之分類	MS	無限制
S2		0.45	4500	V 型	含 MS 標記之分類	HS	不允許
S3	選項 1	0.45	4500	V 型+卜作嵐或高爐礦碴[7]	含 HS 標記之分類+卜作嵐或高爐礦碴	HS +火山灰或礦碴	不允許
	選項 2	0.40	5000	V 型	含(HS)標記之分類	HS	不允許
W0		N/A	2500	無限制			
W1		N/A	2500	對於被認定在使用期間曝露於水中的混凝土，應提交證明資料，以證明其混凝土配比符合以下條件(1)與(2)： (1)骨材不具鹼-矽反應性，或已採取措施抑制鹼-矽反應。 (2)骨材不具鹼-碳酸鹽反應性。			
W2		0.50	4000				
				最大水溶性氯離子含量 (%)		額外要求	
				非預力混凝土	預應力混凝土		
C0		N/A	2500	1.00	0.06	無限制	
C1		N/A	2500	0.30	0.06		
C2		0.40	5000	0.15	0.06	見混凝土保護層要求	

(3) 美國混凝土學會 ACI-365.1R-17[52]

ACI PRC-365.1-17: Report on Service Life Prediction[52]主要講述影響混凝土耐久性之劣化機制(以滲透造成之氯離子侵入為主)、設計考量、使用年限之評估模型介紹以及生命週期成本分析與相關案例介紹。

①預測新建混凝土結構

A.於經驗的預測：實驗室、現場測試之經驗可以用於服務年限之半定量預測(估計值)，但有預測服務年限之需求或新的、惡劣的環境，或是使用新材料都會使其失效。

B.基於效能比較的預測：類似組成或曝露環境之混凝土將具有接近之年限，但實際上每個混凝土結構都具有一定的獨特性，而材料的進步與微氣候(混凝土表面環境)的差異也會造成此方法的失準。

C.加速試驗：加速試驗通常透過短期測定混凝土的離子傳輸性質，預測腐蝕起始時間，而非腐蝕損害的擴展過程。

D.數學模型：可靠度法與累積損傷隨機模型。

(a) 可靠度法：可靠度法通常會輔以電腦分析工具，結合加速試驗與機率概念來預測使用年限，失效機率函數通常假設符合魏布爾分布，且可透過時間轉換函數 $p_i(t)$與高應力下的分布相關聯[53]，依此可繪製應力-時間-失效機率(P-S-T)圖，圖 3.2 中各曲線(如 $F(t) = 0.10$ 曲線)為等機率線，表示在各應力水平下，某一百分比試體預期失效所需的時間。

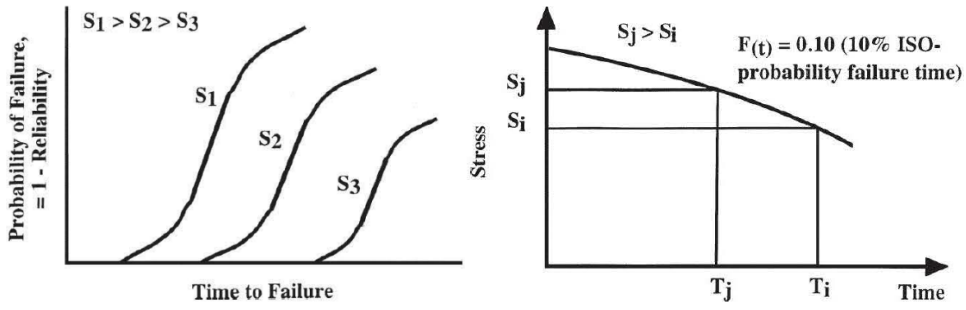


圖 3.2 失效機率函數與失效機率(P-S-T)圖[53]

$$F_i(t) = F_0\left(p_i(t)\right) \quad \text{.....(3-1)}$$

其中，t：時間。

$F_i(t)$：第 i 個高應力水平下的壽命分布。

$F_0(t)$：服役應力水平下的使用壽命分布。

(b) 累積損傷隨機模型：混凝土結構的性能被離散為一系列損傷狀態，例如無損輕微損傷、嚴重損傷與最終失效。模型核心是 Bogdanoff 提出的「工作週期」(duty cycle)概念[54]，即混凝土結構每經過一段固定或變化的時間(如一年、兩年)，在環境與載重影響下累積損傷。此假設意味著損傷累積過程可建模為離散時間、離散狀態的過程(如圖 3.3)。

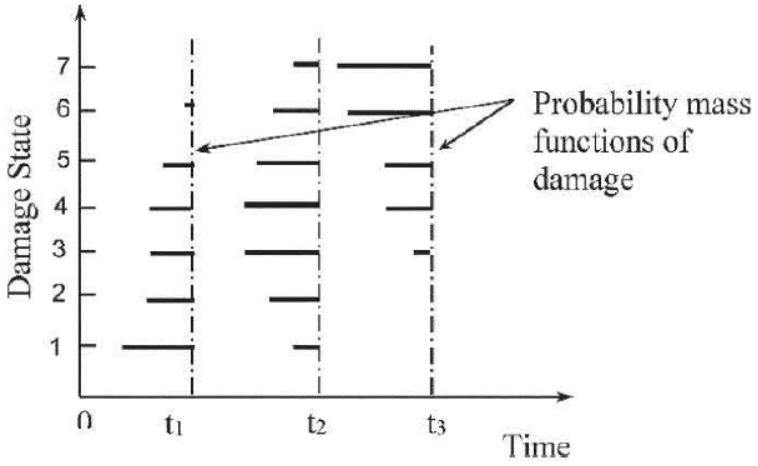


圖 3.3 混凝土結構劣化損傷機率模型[55]

②建模法

既有結構的預測方法基本與新建結構相同，但既有結構擁有實際材料性質與環境影響等數據。一般程序包括：

A.確認結構現況。

B.辨識鋼筋或混凝土劣化原因。

C.判定構成結構使用壽命終點的狀態。

D.自當前狀態進行時間推估至該終點，以確定剩餘壽命。

此方法基於假設環境條件與混凝土性質於未來期間大致保持一致。因此，實務上常假設氯離子擴散係數與表面氯離子濃度於整個剩餘使用壽命期間皆為常數，雖然實際上此一假設未必完全準確。建模法僅考慮腐蝕「起始期」，並假設氯離子擴散為控制速率的主因，其計算方法式與步驟如下：

A.自混凝土結構中不同深度採樣，測定其氯離子含量。

B.利用下列方程式推算表面氯離子濃度 C_0 與擴散係數 D_{Cl}。

C.取得 C_0 與 D_{Cl} 後，可計算任一時間與深度下的氯離子濃度。

D.鋼筋處濃度達水泥質量 0.4%視為臨界,所需時間即剩餘壽命。

$$C(x,t)=C_{crit}=C_0\left(1-erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{Cl}t}}\right)\right) \quad \text{.....(3-2)}$$

$$D_{cl}=D_t=D_{28}\left(\frac{28}{t}\right)^m+D_{ult}\left(1-\left(\frac{28}{t}\right)^m\right) \quad \text{.....(3-3)}$$

$$m=0.26+0.4\left(\frac{FA}{50}+\frac{SG}{70}\right) \quad \text{.....(3-4)}$$

$$D_{28}=2.17\times10^{-12}e^{\frac{-\frac{w}{cm}}{-0.279}} \quad \text{.....(3-5)}$$

$$D_{ult}=D_{28}\left(\frac{28}{36500}\right)^m \quad \text{.....(3-6)}$$

其中，$C(x,t)$：時間為 t 後深度 x 處的氯離子濃度。

C_{crit}：臨界氯離子濃度，參見 ACI 365 1R-17

C_0 ：表面氯離子濃度。

D_{c1} ：氯離子擴散係數。

D_{28} ：28 天氯離子擴散係數。

D_{ult} ：氯離子極限擴散係數。

m：衰減係數。

C_0 ：表面氯離子濃度。

(4) Life-365^{TM}

Life-365^{TM} 為 ACI 委員會及多家材料與建築產業組織共同開發的鋼筋混凝土結構耐久性與全壽期成本分析模型。以大量文獻與試驗數據為基礎，提供多種防護措施的比較，包括高性能低滲透混凝土、化學性緩蝕劑、鋼筋塗層(如環氧或鍍鋅)、不銹鋼或非金屬筋材、防水膜與陰極保護等。其用於預測氯鹽滲入混凝土後導致鋼筋腐蝕的時間，評估防蝕策略對結構使用年限與維修成本的影響，使用者可透過壽命週期成本分析(LCCA)找出最具經濟效益的方案。Life-365^{TM} 假設鋼筋腐蝕起始階段係以擴散為主、且混凝土無裂縫存在，接著將氯離子擴散係數做為時間的函數代入[56]，如式(3-7)。

$$D(t) = D_{ref}\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^{m} \quad \text{.....(3-7)}$$

其中，$D(t)$：時間 t 的擴散係數 $(\mathrm{m}^2/\mathrm{s})$。

D_{ref}：時間 t_{ref} 時的擴散係數 $(\mathrm{m}^2/\mathrm{s})$。

m：衰減常數。

式(3-8)衰減常數與混凝土中的礦物摻料添加量有關：

$$m = 0.2 + 0.4\left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70}\right) \quad \text{.....(3-8)}$$

其中，$FA\%$：飛灰添加百分比(%)。

$SG\%$：爐石添加百分比(%)。

D_{ref} 和 m 可根據使用者輸入之混凝土配比資料來決定，為了防止擴散係數隨時間不斷地減小，其被限制衰減至 25 年，$D(t)$超過 25 年則維持在D(25 年)的值。混凝土表面氯離子濃度則可依據結構類型(橋面板、停車場結構等)、曝露類型(潮汐區、鹽霧區等)及地理位置(各臨海城市)從資料庫選取，表 3-5 即為加州洛杉磯地區在不同鹽害鹽域之混凝土表面氯離子建議值。臨界氯離子濃度 C_t 則定為混凝土重量之 0.05%。

表 3-5 Life-365 加州洛杉磯之表面氯離子參數[56]

區域	累積速率(%/年)	最終值(%)
飛沫區	0.1	1.0
潮汐區	瞬間發生	0.8
800 m 以內	0.04	0.6
1,500 m 以內	0.02	0.6

2. 歐洲規範

(1) EN1992-1-1(2023)

EN1992-1-1[57]的環境條件分類將環境分為無腐蝕 X0、中性化 XC、氯鹽 XD、海水 XS、凍融 XF、化學侵蝕 XA 及機械磨損 XM 等七種，其中氯鹽環境分為 XD1(濕度適中)、XD2(潮濕)及 XD3(乾濕循環)，海洋氯鹽環境分為 XS1(曝露於大氣氯鹽中但不直接接觸海水)、XS2(永久浸沒於海水中)及 XS3(潮汐區和飛沫區)，如表 3-6；化學腐蝕分類定義如表 3-7；氯離子環境與中性化環境之最小保護層厚度規定如表 3-8 與表 3-9。

表 3-6 EN1992-1-1 環境分類條件

分類	環境條件	案例說明
1.無腐蝕(No risk or corrosion or attack)		
X0	除凍融、磨損或化學侵蝕外的所有情況	無鋼筋的一般混凝土構件
2.中性化(Corrosion induced by carbonation)		
XC1	乾燥	室內空氣濕度低的混凝土構件，腐蝕速率可忽略
XC2	潮濕或永久性高濕，偶爾乾燥	長期接觸水的混凝土表面或永久浸泡於高濕環境，如水池、地基
XC3	濕度適中環境	室內中等濕度無永久性高濕；外部構件但有遮蔽雨水
XC4	乾濕交替環境	反覆接觸水但未遮蔽雨水的外部構件 (如牆面、立面)
3.除海水外，氯鹽引起的鋼筋腐蝕 (Corrosion of embedded metal induced by chlorides, excluding sea water)		
XD1	濕度適中環境	接觸氯鹽的外部構件(例如某些室外混凝土表面)
XD2	潮濕、少乾燥環境	游泳池 / 曝露於含氯化物工業用水的混凝土構件；若水中氯含量低，可用 XD1
XD3	乾濕交替環境	橋梁部件、道路、停車場等經常使用除冰鹽的區域
4.海洋氯化物腐蝕(Corrosion induced by chlorides from sea water)		
XS1	曝露於大氣鹽霧中 但不直接接觸海水	海岸線附近的結構物(不直接接觸)
XS2	永久浸沒於海水中	永久性浸於海水之結構(如海洋平台基礎)
XS3	潮汐區、飛沫區	結構部位位於潮汐區或直接曝露於浪濺區
5. 凍融(Freeze / Thaw Attack)		
XF1	中度飽水且無除冰鹽	曝露於雨水及冰凍的垂直表面
XF2	中度飽水且有除冰鹽	曝露於冰凍及除冰鹽的垂直表面
XF3	高度飽水且無除冰鹽	受雨淋及冰凍的水平表面
XF4	高度飽水且有除冰鹽或海水	曝露於冰鹽的路面及橋面板/飛沫帶受冰凍的海洋結構物
6. 化學物質侵蝕(Chemical attack)		
XA1	輕度腐蝕環境	依表 3.5 定義的環境(如 pH、SO_4^{2-})
XA2	中度腐蝕環境	依表 3.5 定義的環境(如 pH、SO_4^{2-})
XA3	高度腐蝕環境	依表 3.5 定義的環境(如 pH、SO_4^{2-})
7. 機械磨損侵蝕(Mechanical attack of concrete by abrasion)		
XM1	中度磨損	工業區車輛(充氣輪胎)
XM2	重度磨損	工業區有叉車(實心輪胎)
XM3	極重磨損	工業區有履帶車或鋼輪載具

表 3-7 化學物質侵蝕分類依據

化學特性	參照規範	XA1	XA2	XA3
SO_4^{2-} (mg/L)	EN 196-2	≤ 200	200~600	> 600
pH 值	ISO 4316	> 5.5	5.5~4.5	< 4.5
CO_2 (mg/L)	EN 13577	≤ 15	15~40	> 40
NH_4^+ (mg/L)	ISO 7150-1	≤ 15	15~30	> 30
Mg^{2+} (mg/L)	EN ISO 7980	≤ 300	300~1000	> 1000
SO_4^{2-} (mg/kg) total	EN 16502	> 200	-	-

表 3-8 氯離子侵蝕環境(氯鹽 XD、海水 XS)之最小保護層厚度[57]

環境抵抗等級 ERC	環境作用等級-氯離子侵蝕(包含氯鹽 XD、海水 XS)					
	XS1/ XD1		XS2/ XD2		XS3/ XD3	
	設計年限(年)					
	50	100	50	100	50	100
	最小保護層厚度(mm)					
XRDS 0.5	20	20	20	30	30	40
XRDS 1	20	25	25	35	35	45
XRDS 1.5	25	30	30	40	40	50
XRDS 2	25	30	35	45	45	55
XRDS 3	30	35	40	50	55	65
XRDS 4	30	40	50	60	60	80
XRDS 5	35	45	60	70	70	-
XRDS 6	40	50	65	80	-	-
XRDS 8	45	55	75	-	-	-
XRDS 10	50	65	80	-	-	-

備考 1：抗氯離子侵入引起鋼筋腐蝕的 XRDS 等級，是根據在標準條件下，混凝土中氯離子滲透深度(特徵值，90%分位數)所推導而得。該滲透深度對應於參考氯離子濃度(膠結材料質量中氯離子含量為 0.6%，膠結材料指水泥加上 II 型添加材)，並假設混凝土在單側曝露於參考海水(30 g/L NaCl)下於 20°C 持續 50 年後所產生的結果。XRDS 的指定值具有擴散係數的因次，單位為 [10^{-13} m^2/s]。

備考 2：建議的最小混凝土保護層厚度 $C_{min,dur}$，是基於符合 EN 13670 的施工與養護條件，並假設至少達到施工等級 2 與養護等級 2。

備考 3：若有特殊需求(例如：更嚴苛的環境條件)，最小保護層厚度可透過額外的安全係數 $\Delta c_{dur,y}$ 增加。

表 3-9 中性化環境(XC)之最小保護層厚度[57]

環境抵抗等級 ERC	環境作用等級-中性化(XC)							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	設計年限(年)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
	最小保護層厚度(mm)							
XRC 0.5	10	10	10	10	10	10	10	10
XRC 1	10	10	10	10	10	15	10	15
XRC 1.5	-	-	-	-	-	-	-	-
XRC 2	10	15	10	15	15	25	15	25
XRC 3	10	15	15	20	20	30	20	30
XRC 4	10	20	15	25	25	35	25	40
XRC 5	15	25	20	30	25	45	30	45
XRC 6	15	25	25	35	35	55	40	55
XRC 7	15	30	25	40	40	60	45	60

備考 1：抗碳化引起鋼筋腐蝕的 XRC 等級，是根據在標準條件下(即：二氧化碳濃度為 400 ppm，相對濕度 65%，溫度 20°C)50 年後的碳化深度(特徵值，90%分位數)所推導而得。XRC 的指定值具有碳化速率的因次，單位為 [mm/年]。

備考 2：建議的最小混凝土保護層厚度 $C_{min,dur}$，是以依照 EN 13670 的施工與養護方式為前提，且至少達到施工等級 2 與養護等級 2 為假設條件。

備考 3：當有特殊需求(例如：更嚴苛的環境條件)，最小保護層厚度可透過額外的安全係數 $\Delta c_{dur,y}$ 增加。

(2) 英國 BS 8500-1(2019)[58]

BS 8500-1 之環境分類代號同 EN1992-1-1，對於受氯化物侵蝕之鋼筋混凝土及預力混凝土耐久性需求有較完整之規定，分別針對目標工作年限(intended working life)為 50 年及 100 年的結構物，給予最小保護層厚度、混凝土抗壓強度、最大水膠比、最少水泥或膠結料用量及膠結料種類等規定。

表 3-10 為各符號對照表 3-11 為目標工作年限 100 年之相關規定，其中 C20/25 表示若以混凝土圓柱試體進行試驗，則抗壓強度需達 20 MPa，若以方塊試體進行試驗則抗壓強度需達 25 MPa。保護層厚度除耐久性需求之厚度外應再加上保護層的施工誤差，而表中所使用的混凝土為常重混凝土，且粗粒料最大尺寸為 20 mm。目標工作年限為 100 年的結構物，在海洋氯鹽腐蝕環境中 XS1、XD3 及 XS3 環境作用等級下，若結構物所設計之保護層厚度較小時，則不使用純水泥或卜作嵐材料添加比例較少的混凝土配比；表中亦針對不同環境作用條件提出混凝土膠結料種類及添加比例之建議，其中在最嚴重的海洋氯鹽中(XS3)，建議爐石粉取代水泥用量可達 66%～80%或飛灰取代水泥用量可達 36%～55%。

表 3-10 各符號代表之膠結料種類及添加比例[58]

符號	膠結料種類及比例
CEM I	波特蘭水泥
SRPC	抗硫波特蘭水泥
IIA	添加 6%～20%飛灰、爐石粉、石灰石；添加 6%～10%矽灰
IIB-S	添加 21%～35%爐石粉
IIB-V	添加 21%～35%飛灰
IIB-SR	添加 25%～35%飛灰
IIIA	添加 36%～65%爐石粉
IIIA+SR	添加 36%～65%爐石粉，高度抗硫需求
IIIB	添加 66%～80%爐石粉
IIIB+SR	添加 66%～80%爐石粉，高度抗硫需求
IVB-V	添加 36%～55%飛灰

表 3-11 目標工作年限 100 年之結構物耐久性需求[58]

標稱蓋 mm	抗壓強度等級、最大水膠比和最小水泥或普通重量混凝土的組合含量)，最大厚度為 20 毫米之粒料												水泥/組合型
	15+Δc	20+Δc	25+Δc	30+Δc	35+Δc	40+Δc	45+Δc	50+Δc	55+Δc	60+Δc	70+Δc	80+Δc	
中性化引起的腐蝕(曝露等級 XC)													
XC1	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	C20/25 0.70 240	表 3.10 全部
XC2	-	-	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	表 3.10 全部
XC3/4	-	-	-	C40/50 0.45 340	C35/45 0.50 320	C32/40 0.55 320	C28/35 0.60 280	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	除 IVB-P、IVB-Q IVB-V 外其餘之表 3.10
	-	-	-	-	C40/50 0.45 340	C35/45 0.50 320	C32/40 0.55 300	C28/35 0.60 280	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	C25/30 0.65 260	IVB-P、IVB-Q、IVB-V
由海水以外的氯化物引起的腐蝕(XD 曝露等級)足以應對任何相關的碳化引起的腐蝕 (XC)													
XD1	-	-	-	C45/55 0.40 380	C40/50 0.45 340	C35/45 0.50 340	C32/40 0.55 320	C28/35 0.60 300	C28/35 0.60 300	C28/35 0.60 300	C28/35 0.60 300	C28/35 0.60 300	表 3.10 全部
XD2	-	-	-	-	-	C35/45 0.45 360	C32/40 0.55 340	C28/35 0.55 320	C28/35 0.55 320	C28/35 0.55 320	C28/35 0.55 320	C28/35 0.55 320	CEM I、IIA、IIB-M、IIB-S、CEM I-SR0、CEM I-SR3
	-	-	-	-	-	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIB-P、IIB-Q、IIB-V、IIIA
	-	-	-	-	-	C28/35 0.45 360	C25/30 0.50 340	C20/25 0.55 320	C20/25 0.55 320	C20/25 0.55 320	C20/25 0.55 320	C20/25 0.55 320	IIIB、IVB-P、IVB-Q、IVB-V
	-	-	-	-	-	-	C40/50 0.40 380	C35/45 0.40 380	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIB-P、IIB-Q、IIB-V、IIIA
	-	-	-	-	-	-	C32/40 0.40 380	C28/35 0.45 360	C25/30 0.55 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIIB、IVB-P、IVB-Q、IVB-V
由海水中的氯化物引起的腐蝕(XS 曝露等級)足以應對任何相關的碳化引起的腐蝕 (XC)													
XS1	-	-	-	-	-	-	-	-	C45/55 0.35 380	C40/50 0.40 380	C35/45 0.40 360	C32/40 0.50 340	CEM I、IIA、IIB-M、IIB-S
	-	-	C40/50 0.35 380	C40/50 0.35 380	C35/45 0.40 380	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIB-P、IIB-Q IIB-V、IIIA
	-	-	-	C35/45 0.40 380	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIB-P 或 Q ≥25% 卜作嵐，IIB V ≥25% 飛灰，IIIA ≥46% ggbs
	-	-	-	C32/40 0.45 360	C28/35 0.45 360	C25/30 0.55 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIIB
	-	-	-	C35/45 0.40 380	C30/37 0.45 360	C28/35 0.50 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IVB-P、IVB-Q IVB-V
XS2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CEM I、IIA、IIB-M、IIB-S
	-	-	-	-	-	C40/50 0.35 380	C35/45 0.40 380	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 340	C28/35 0.50 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIB-P、IIB-Q IIB-V、IIIA
	-	-	-	-	C40/50 0.35 380	C35/45 0.40 380	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 340	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIB-P 或 Q ≥25% 卜作嵐，IIB V ≥25% 飛灰，IIIA ≥46% ggbs
	-	-	-	-	C35/45 0.35 380	C32/40 0.40 380	C28/20 0.45 360	C25/30 0.50 340	C20/25 0.55 320	C20/25 0.55 320	C20/25 0.55 320	C20/25 0.55 320	IVB-P、IVB-Q IVB-V、IIIB
XS3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CEM I、IIA、IIB-M、IIB-S
	-	-	-	-	-	-	-	C40/50 0.35 380	C40/50 0.35 380	C35/45 0.40 380	C40/50 0.35 380	C28/35 0.50 340	IIB-P、IIB-Q、IIB-V、IIIA
	-	-	-	-	-	-	-	C40/50 0.35 380	C35/45 0.40 380	C32/40 0.45 360	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IIB-P 或 Q ≥25% 卜作嵐，IIB V ≥25% 飛灰，IIIA ≥46% ggbs
	-	-	-	-	-	-	-	C35/45 0.35 380	C32/40 0.40 380	C28/35 0.45 360	C25/30 0.55 320	C25/30 0.55 320	IVB-P、IVB-Q、IVB-V、IIIB

(3) fib Bulletin 34: Model code for Service Life Design[59]

fib Bulletin 34 使用的使用年限設計法(SLD)為基於混凝土性能的設計方法(performance-based design)[59]，此設計法以「可靠度設計」(reliability-based design)為核心概念，透過機率分析量化結構達到極限狀態的風險。可用於：

①新建結構設計；

②現有結構之服務年限更新；

③殘餘使用年限評估。

SLD 涵蓋之主要劣化機制包括：二氧化碳誘發鋼筋腐蝕；氯離子誘發腐蝕；凍融作用(含或不含除冰鹽)。

未納入者(因缺乏普遍接受之模型)包括：(a)鹼-矽反應(ASR)；硫酸鹽侵蝕；(b)鋼筋腐蝕與動態疲勞交互影響(腐蝕疲勞)等。年限設計法(SLD)設計流程包含四步驟：

①建立劣化模型。

②定義極限狀態(鋼筋去鈍化、開裂、剝落等)；同 EN 1990 第 3 節。

③計算發生極限狀態的機率(以可靠性指數β表示)。

④決定極限狀態(SLS：使用極限狀態；ULS：承載極限狀態)。

可靠性指數β是用來衡量結構物距離失效有多遠的統計學指標，數值越大代表結構物失效概率越小，年限設計法(SLD)所使用之靠性指數β建議值如表 3-12 所示。

極限狀態的類型包含 SLS(使用極限狀態)與 ULS(承載極限狀態)兩種，鋼筋去鈍化通常視為 SLS(對結構安全無立即威脅)；若開裂與剝落可能導致結構崩塌，則視為 ULS。

表 3-12 SLD 使用的可靠性指數β的建議最小值(用於設計壽命)[59]

曝露等級 歐洲規範 2	描述	可靠性等級	SLS	ULS
			鋼筋去鈍化	結構崩塌
XC3	二氧化碳誘發鋼筋腐蝕	RC1	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	3.7 ($pf \approx 10^{-4}$)
		RC2	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	4.2 ($pf \approx 10^{-5}$)
		RC3	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	4.4 ($pf \approx 10^{-6}$)
XD3	除冰鹽	RC1	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	3.7 ($pf \approx 10^{-4}$)
		RC2	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	4.2 ($pf \approx 10^{-5}$)
		RC3	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	4.4 ($pf \approx 10^{-6}$)
XS3	海水	RC1	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	3.7 ($pf \approx 10^{-4}$)
		RC2	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	4.2 ($pf \approx 10^{-5}$)
		RC3	1.3 ($pf \approx 10^{-1}$)	4.4 ($pf \approx 10^{-6}$)

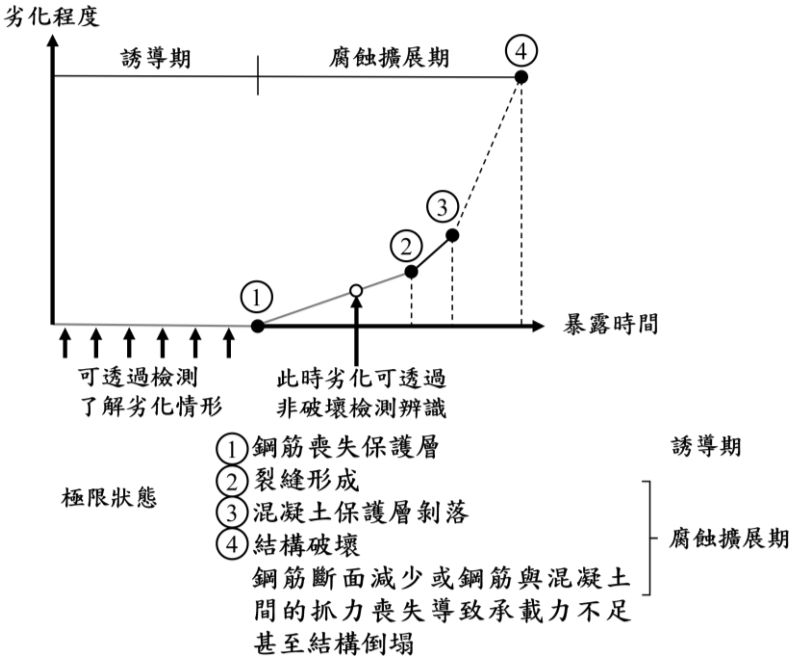


圖 3.4 SLD 極限狀態[59]

由於鋼筋開始去鈍化(Depassivation)意味服務年限的結束，故目前的預測模型只適用於未開裂之混凝土(初始階段)。使用年限設計法(SLD)之設計驗證方法如下：

A.二氧化碳誘發腐蝕(未開裂混凝土)

(a) 全機率法：當極限狀態為鈍化層破壞時，其鈍化層破壞機率如下。

$$P\{\ \} = P_{dep.} = P\{a - x_c(t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad \text{.....(3-9)}$$

其中，P：時間發生鈍化層破壞的機率。

a：混凝土保護層厚度 [mm]。

$x_c(t_{SL})$：設計使用壽命 t_{SL} 年時的中性化深度[mm]。

t_{SL}：設計使用壽命 [年]。

p_0：目標失效機率。

在評估既有結構時，上述常數可合併，簡化為以下表達式：

$$g\left(a,x_c\left(t\right)\right)=a-x_c\left(t\right)$$
$$=a-\sqrt{2k_ek_c\left(k_tR_{ACC,0}^{-1}+a_t\right)C_S}\cdot\sqrt{t}\cdot W\left(t\right) \quad \text{.....(3-10)}$$

其中，t：時間 [年]。

k_e：環境因子。

k_c：施工轉換參數。

k_t：迴歸參數。

$R_{ACC,0}^{-1}$：時間[年]。

C_S：CO_2 濃度[kg/m³]。

$W(t)$：氣候函數。

極限狀態為腐蝕導致的開裂、剝落與崩壞時，其方程式如下：

$$p\{\ \}=p_{crank}=p\left\{\Delta r_{(R)}-\Delta r_{(S)}\left(t_{SL}\right)<0\right\}<p_0$$
$$=p\left\{t_{SL}-t_{ini}-t_{prop}<0\right\}<p_0 \quad \text{.....(3-11)}$$

其中，p：碳化導致開裂的機率。

$\Delta r_{(R)}$：混凝土可容許不開裂最大鋼筋半徑增厚量 [μm]。

$\Delta r_{(S)}(t_{SL})$：因鋼筋腐蝕導致的半徑增加量[μm]。

t_{ini}：腐蝕啟動期 [年] ，需以全機率方法量化。

t_{prop}：腐蝕擴展期 [年] ，需以全機率方法量化。

(b) 部分係數法：使用部分係數法必須滿足以下極限狀態函數。

$$a_d - x_{c,d}\left(t_{SL}\right) \geq 0 \quad \text{.....(3-12)}$$

$$a_d = a_k - \Delta a \quad \text{.....(3-13)}$$

$$x_{c,d}\left(t_{SL}\right) = x_{c,c}\left(t_{SL}\right) \cdot \gamma_f \quad \text{.....(3-14)}$$

其中，a_d：混凝土保護層之設計值[mm]。

$x_{c,d}(t_{SL})$：在 t_{SL} 年時碳化深度的設計值[mm]。

a_k：混凝土保護層的特徵值[mm]。

Δa：保護層的安全邊際[mm]。

a_d：混凝土保護層之設計值[mm]。

$x_{c,c}(t_{SL})$：t_{SL} 年時碳化深度的特徵值(平均值)[mm] 。

γ_f：碳化深度的部分安全係數 [-]。

B. 氯離子誘發腐蝕(未開裂混凝土)

(a) 全機率法：當極限狀態為鈍化層破壞時

$$p\{\ \} = p_{dep.} = p\left\{C_{Crirt} - C\left(a, t_{SL}\right)\right\} < p_0 \quad \text{.....(3-15)}$$

其中，C_{Crit}：臨界氯離子含量(佔膠結材料重量百分比)。

$C(a,t_{SL})$：臨界氯離子含量(佔膠結材料重量百分比)。

極限狀態為腐蝕引發裂縫、剝落與崩塌、與部分係數法之方程式，皆同二氧化碳誘發腐蝕之案例公式。

3. 日本規範

(1) 日本道路協會：道路橋示方書[60]

日本道路協會制定之「道路橋示方書•混凝土橋編」，鹽害依地區及距海岸線距離劃分鹽害區位(如表 3-13、圖 3.5)，其中將日本國土分為三種地域，各地域內再依海岸線距離分為 S、I、II 及 III 四種鹽害對策分區，並依此分區建議不同構造物之各保護層厚度，如表 3-14 所示。

表 3-13 鹽害對策區分[60]

地域區分	地域	距海岸線的距離	對策區分
A	沖繩縣	海上部分及距海岸線 100 m 部分	S
		100 m 至 300 m 範圍	I
		上記以外的範圍	II
B	如下圖中的地域	海上部分及距海岸線 100 m 部分	S
		100 m 至 300 m 範圍	I
		300 m 至 500 m 範圍	II
		500 m 至 700 m 範圍	III
C	上述以外的地域	海上部分及距海岸線 20 m 部分	S
		20 m 至 50 m 範圍	I
		50 m 至 100 m 範圍	II
		100 m 至 200 m 範圍	III

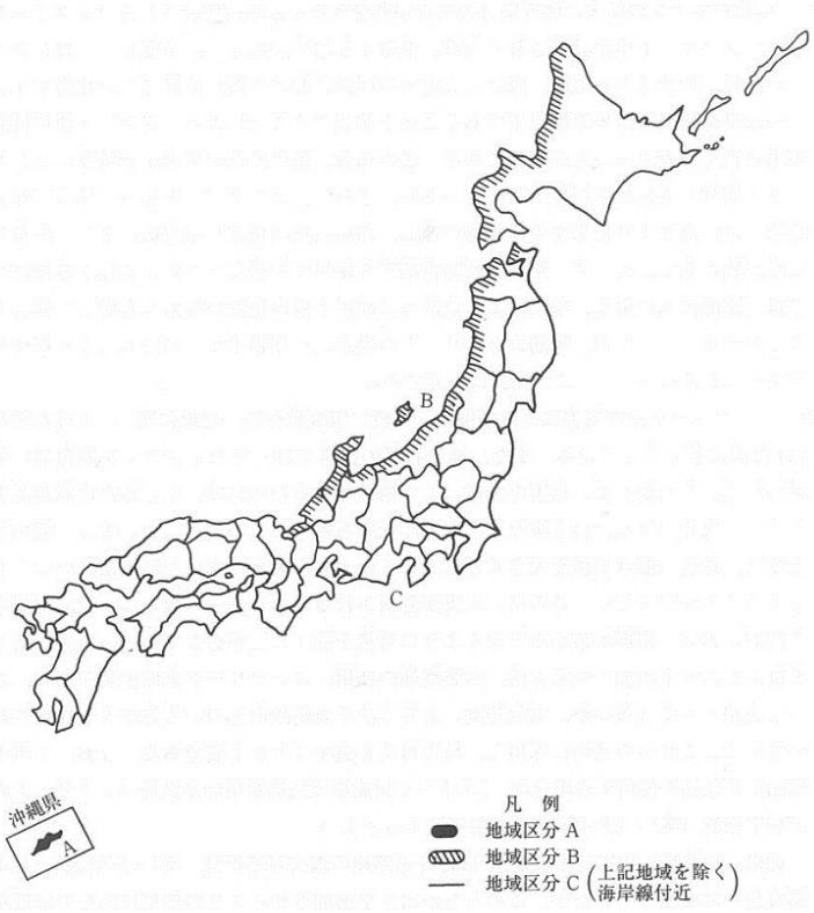


圖 3.5 鹽害對策地域區分圖[60]

表 3-14 最小保護層厚度(mm)[60]

對策區分	(1) 預鑄預力混凝土構造	(2) (1)以外預鑄預混凝土構造	鋼筋混凝土構造
S	70(1)	70(1)	70(1)
I	50	70	70(1)
II	35	50	70
III	25	30	50

註 1：除以塗裝鋼筋或混凝土塗裝作為保護層措施外，應同時採用其他防護方法。

(2) 日本土木學會：混凝土標準示方書[61]

日本土木學會之「混凝土標準示方書-設計編」，於「設計編：本編」第 8 章有耐久性之相關規定，而「設計編：標準」第 2 編「耐久性相關設計」則在介紹本編第 8 章中有關中性化、鹽害、凍害及化學侵蝕之評估方法。

①中性化

以鋼筋腐蝕深度在設計年限內不達到設計臨界深度為設計原則，其考量為孔隙溶液 pH 值未受中性化影響而降低，若橋址現地環境之滲水作用頻繁，則需在設計中保留適當安全裕度。計算公式內之係數，若有相關試驗結果或現地數據得以優先採用。

式(3-16)用於判別中性化深度是否大於臨界深度，計算結果小於 1 時，即代表設計年限內中性化深度不會達到臨界深度。式(3-17)之鋼筋腐蝕極限深度計算有考慮氯離子影響，若為受較為嚴重鹽害之環境，c_k 可採用 10~25 mm 進行計算。計算式(3-20)使用之中性化速度係數之特性值(α_k)可以依現地數據按式(3-21)進行計算，或是依「混凝土標準示方書-設計編」[61]提供之文獻[62]依經驗式(3-23)計算。

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \le 1.0 \quad \text{.....(3-16)}$$

$$y_{lim} = c_d - c_k \quad \text{.....(3-17)}$$

$$c_d = c - \Delta c_e \quad \text{.....(3-18)}$$

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot a_d \sqrt{t} \quad \text{.....(3-19)}$$

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \quad \text{.....(3-20)}$$

$$\alpha_k = \gamma_k \cdot \gamma_p \alpha_p \quad \text{.....(3-21)}$$

$$\alpha_p = a + b \cdot \frac{W}{B} \quad \text{.....(3-22)}$$

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \frac{W}{B} \quad \text{.....(3-23)}$$

$$B = C_p + k \cdot A_d \quad \text{.....(3-24)}$$

其中，γ_i：結構物係數，一般可採用 1.0～1.1。

y_{lim}：鋼筋腐蝕之極限深度。

c_d：耐久性設計之被覆厚度(mm)，考量施工誤差。

c_k：中性化殘餘深度(mm)，普通環境可採用 10 mm。有不可忽視氯離子影響之環境宜採用 10 ～ 25 mm。

c：保護層(mm)。

Δc_e：保護層施工誤差(mm)。

y_d：中性化深度之設計值(mm)。

α_d：中性化速度係數之設計值(mm/$\sqrt{年}$)。

α_k：中性化速度係數之特性值(mm/$\sqrt{年}$)。

β_e：表示環境作用係數，一般可採用 1.6。

γ_c：混凝土材料係數，一般為 1.3。高流動混凝土時可採用 1.1。

γ_{cb}：中性化深度設計值之安全係數，一般可為 1.0。

t：設計年限(年)，計算以 100 年為上限。

α_p：中性化速度係數之預測值。

γ_k：特性值設定之安全係數，一般可採用 1.0。

γ_p：考量材料特性預測精度之安全係數，一般可為 1.0。

a、b：依水泥(結合材)種類由實績決定之係數。

W/B：有效水膠比。

B：單位體積有效結合材質量。

C_p：單位體積波特蘭水泥質量。

A_d：單位體積摻料質量。

k：摻料種類之常數，飛灰為 0，水淬高爐石粉為 0.7。

②鹽害

鹽害環境分區部分係將日本國土分為飛來鹽份多及少的二種環境，並依離海岸線的距離給予不同之表面氯離子濃度 C_0，如表 3-15 所示，藉由構造物設計之耐用年限、保護層厚度及表面氯離子濃度，由 JSCE G572 試驗法可求得混凝土所需的最大設計擴散係數 D_d，並根據構造物容許之裂縫寬度可加以修正，其容許裂縫寬度 w_a 為 0.2 mm。

表 3-15 混凝土表面之鹽化物氯離子濃度(kg/m³)[61]

		飛沫帶	離海岸線距離(km)				
			海岸線	0.1	0.25	0.5	1.0
飛來鹽份多的地域	北海道、東北、北陸、沖繩	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛來鹽份少的地域	關東、東海、近畿、中國、四國、九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

耐久性設計方面分為鋼材腐蝕和混凝土劣化二部分，鋼材腐蝕包含了裂縫寬度、中性化及鹽害，而混凝土劣化包含了凍害及化學侵蝕，以下將針對鹽害之部分加以介紹。

氯離子侵入對鋼筋腐蝕的設計以鋼筋位置氯離子濃度設計值 C_d 對鋼筋腐蝕發生臨界濃度 C_{lim} 之比值，乘上構造物係數 γ_i 之值在 1.0 以下。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad \text{.....(3-25)}$$

$$C_d = \gamma_{cl} \times C_0 \left(1 - erf\left(\frac{0.1 \times c_d}{2\sqrt{D_d \times t}}\right)\right) + C_i \quad \text{.....(3-26)}$$

$$c_d = C - \Delta c_e \quad \text{.....(3-27)}$$

$$D_d = \gamma_c D_k + \lambda\left(\frac{w}{l}\right) D_0 \quad \text{.....(3-28)}$$

$$\frac{w}{l} = \frac{\delta_{se}}{E_s}\left(or\ \frac{\delta_{pe}}{E_p}\right) + \varepsilon'_{csd} \quad \text{.....(3-29)}$$

其中，γ_i：一般可為 1.0~1.1。

C_{lim}：鋼筋腐蝕臨界氯離子濃度(kg/m^3)。可參考類似構造物實測結果和試驗結果訂定。若無參考資料，可利用下列公式訂定，但 W/B 的範圍為 0.30~0.55。而若受到凍融作用時，可小於此值。

普通波特蘭水泥　C_{lim}=-3.0$\left(\frac{W}{C}\right)$+3.4....(3-30)

高爐水泥、飛灰水泥　C_{lim}=-2.6$\left(\frac{W}{C}\right)$+3.1....(3-31)

低熱高爐水泥，早強波特蘭水泥　C_{lim}=-2.2$\left(\frac{W}{C}\right)$+2.6....(3-32)

矽灰水泥　C_{lim}=1.2.....(3-33)

C_0：混凝土表面氯離子濃度(kg/m^3)，該值規範提供表格供查詢。

c_d：耐久性考量的保護層設計值(mm)，應考慮施工誤差。

C：保護層。

Δc_e ：施工誤差(mm)。

t：有氯離子侵入之耐用年限(以 100 年為上限)。

γ_{cl}：考量鋼筋位置氯離子濃度設計值 cd 之安全係數，一般可為 1.3，但使用高流動混凝土的情況可為 1.1。

D_d：針對氯離子之設計擴散係數(cm^2/年)。

γ_c：混凝土材料係數，一般為 1.3，高流動混凝土 1.1。

D_k：混凝土氯離子之擴散係數特性值(cm^2/年)。

λ：裂縫存在對擴散係數的影響係數，一般可為 1.5。

D_0：混凝土中氯離子移動對造成裂縫影響的常數，一般可為 400 cm^2/年。

w/l：裂縫寬度與裂縫間隔比，一般可用下式求得。

C_i：初期氯離子濃度(kg/m^3)，一般可為 0.30 kg/m^3。

σ_{se}：鋼筋應力之增加量(N/mm^2)。

σ_{pe}：預力鋼鍵應力之增加量(N/mm^2)。

E_s：鋼筋之楊氏係數(N/mm^2)。

E_p：預力鋼鍵之楊氏係數(N/mm^2)。

ε'_{csd}：考量混凝土乾縮及潛變之裂縫寬度增加值。

混凝土的氯離子擴散係數特性值 D_k，可以下列方法求出，包含水膠比和概略擴散係數之關係式、使用電泳法和含浸法的室內實驗或自然曝露實驗、實際構造物調查。在沒有室內實驗和自然曝露實驗等結果的情況，可使用根據以往數據的下述預測公式，但水膠比應在 0.30~0.55 之間。

普通波特蘭水泥　$$D_k = \gamma_k \gamma_p 10^{3.4(\frac{W}{C})-1.3} \times t^{-0.52} \quad \text{.....(3-34)}$$

高爐、飛灰水泥　$$D_k = \gamma_k \gamma_p 10^{3.4(\frac{W}{C})-1.7} \times t^{-0.64} \quad \text{.....(3-35)}$$

飛灰水泥　$$D_k = \gamma_k \gamma_p 10^{3.4(\frac{W}{C})-1.5} \times t^{-0.73} \quad \text{.....(3-36)}$$

上述設計若難以合格時，原則上使用耐蝕性高的補強材和防銹措施的補強材，抑制鋼筋腐蝕的混凝土表面被覆，或防止腐蝕發生的電氣化學法。考量維護管理計畫後，必須以適當方法評估其效果。在受到外部氯離子影響的環境，構造物的保護層訂為粗粒料最大尺寸的 3/2 倍以上；不受影響的環境，混凝土產製時中所含氯離子總量若在 0.30 kg/m^3 以下，構造物要求性能不會因氯離子而損失則可。

③凍害

預期有凍結防止劑散布的混凝土構造物中，考量鹽害發生的同時可藉由設置具可靠性的適當防水和排水工程，以避免氯離子侵入混凝土中。凍害部分驗證應分為內部損害與外部損害兩部分，內部損害之驗證如下：

$$\gamma_i \frac{E_{\min}}{E_d} \le 1.0 \quad \text{.....(3-37)}$$

$$E_d = \frac{E_k}{\gamma_c} \quad \text{.....(3-38)}$$

其中，γ_i：一般可為 1.0~1.1。

E_d：凍融試驗相對動彈性模數的設計參考值。

E_k：凍融試驗相對動彈性模數的特性值(見表 3-16)。

E_{min}：凍融試驗相對動彈性模數的下限值(見表 3-17)。

表 3-16 混凝土凍融試驗相對動彈性模數與符合條件之水膠比[61]

水膠比(%)	65	60	55	45 以下
凍融試驗相對動彈性模數(%)	60	70	85	90

表 3-17 滿足混凝土結構凍害性能凍融試驗相對動彈性模數下限值[61]

氣象條件 / 構造物曝露狀態 / 斷面	凍融反覆頻繁		氣溫偶爾低於冰點	
	薄斷面(2)	一般斷面	薄斷面(2)	一般斷面
(1) 持續或頻繁處於水飽和狀態的構造物部分(1)	85	70	85	60
(2) 一般露出狀態(不屬於(1)者)	70	60	70	60

註 1：指以下構造物中接近水面、經常處於水飽和狀態的部位：如水道、水槽、橋台、橋墩、擋土牆、隧道襯砌等；以及雖離水面較遠，但因融雪、流水、水花飛濺等仍會被水飽和的部分，例如橋梁主梁、橋面板等。

註 2：指斷面厚度約為 20 公分以下的構造部分等。

凍害部分之表面損害(剝落)驗證如下所示：

$$\gamma_i \frac{d_d}{d_{\lim}} \le 1.0 \quad \text{.....(3-39)}$$

$$d_d = \frac{d_k}{\gamma_c} \quad \text{.....(3-40)}$$

其中，d_d：混凝土剝落量的設計參考值(g/m^2)。

d_{lim}：混凝土剝落量的下限值 (g/m^2)。

d_k：混凝土剝落量的特性值。

④化學侵蝕

混凝土的化學侵蝕包括酸、鹼、鹽等，但劣化狀態根據物質的種類和濃度而變化很大，故需根據劣化環境採取適當的對策。若已根據其他設計條件設定覆蓋層設計值，則透過將化學侵蝕深度的設計小於用於耐久性的保護層的設計值來驗證：

$$\gamma_i \frac{y_{ced}}{c_d} \le 1.0 \quad \text{.....(3-41)}$$

$$y_{ced} = \gamma_c \times y_{ce} \quad \text{.....(3-42)}$$

其中，γ_i：一般可為 1.0~1.1。

y_{ced}：化學侵蝕深度的設計參考值。

c_d：保護層厚度(考量施工誤差)。

γ_c：混凝土材料係數，一般可為 1.3

y_{ce}：化學侵蝕深度的特性值。

確保抗化學侵蝕所需最大水膠比如表 3-18，在化學侵蝕嚴重的環境下，建議考慮使用附加保護措施進行耐久性設計。

表 3-18 確保抗化學侵蝕的最大水膠比[61]

劣化環境	最大水膠比
當接觸到含有 0.2%或更多硫酸鹽的土壤或水時	0.50
使用防凍劑時	0.45

備考：經實際經驗與研究結果等證實，可在表中數值上加 0.05～0.10。

4. 中國規範

(1) 中國混凝土結構耐久性設計規範 GB/T 50476[63]

GB/T 50476 共分 8 章，包括混凝土結構耐久性設計的基本原則、環境作用類別與等級的劃分、設計使用年限、混凝土材料的基本要求以及腐蝕環境作用下的耐久性設計方法。結構物所處環境按其對鋼筋和混凝土材料的腐蝕機理如表 3-19，各環境類別與作用等級之耐久性要求之對應之混凝土最低強度等級如表 3-20，表中之 C_a 為引氣混凝土。

表 3-19 環境類別與作用等級[63]

劣化機理	環境類別	作用等級 / 名稱	A 輕微	B 輕度	C 中度	D 嚴重	E 非常嚴重	F 極端嚴重
正常大氣作用引起鋼筋銹蝕	I	一般環境	I-A	I-B	I-C			
反覆凍融導致混凝土撰傷	II	凍融環境			II-C	II-D	II-E	
氯鹽侵入引起鋼筋銹蝕	III	海洋氯化物環境			III-C	III-D	III-E	III-F
氯鹽侵入引起鋼筋銹蝕	IV	除冰鹽等其他氯化物環境			IV-C	IV-D	IV-E	
除冰鹽等其他氯化物環境	V	化學腐蝕環境			V-C	V-D	V-E	

表 3-20 滿足耐久性要求之混凝土最低強度等級[63]

環境類別與作用等級	設計使用年限		
	100 年	50 年	30 年
I-A	C30	C25	C25
I-B	C35	C30	C25
I-C	C40	C35	C30
II-C	C_a35，C45	C_a30，C45	C_a30，C40
II-D	C_a40	C_a35	C_a35
II-E	C_a45	C_a40	C_a40
III-C、IV-C、V-C、III-D、IV-D、V-D	C45	C40	C40
III-E、IV-E、V-E	C50	C45	C45
III-F	C50	C50	C50

①一般環境

第四章一般環境下混凝土結構的耐久性設計作用等級分為三級(A~C)，各等級的環境條件如表 3-21，各構件之最小保護層厚度如表 3-22。

表 3-21 一般環境的作用等級[63]

環境等級	環境條件	結構構件示例
I-A	室內乾燥環境	常年乾燥、低濕度環境中的結構內部構件
	長期浸沒水中環境	所有表面均處於水下的構件
I-B	季乾濕交替的結構內部潮濕環境	中、高溫度環境中的結構內部構件
	非乾濕交替的露天環境	不接觸或偶爾接觸用水的外部構件
	長期濕潤環境	長期與水或濕潤土體接觸的構件
I-C	乾濕交替環境	與冷凝水、露水或與蒸氣頻繁接觸的結構內部構件；地下水位較高的地下室構件；表面頻繁淋雨或頻繁與水接觸的構件

表 3-22 一般環境中混凝土性質與鋼筋的最小保護層厚度(mm) [63]

設計使用年限 / 環境作用等級		100 年			50 年			30 年		
		混凝土強度	最大水膠比	保護層	混凝土強度	最大水膠比	保護層	混凝土強度	最大水膠比	保護層
板、牆等面形結構	I-A	≥C30	0.55	20	≥C25	0.60	20	≥C25	0.60	20
	I-B	C35 ≥C40	0.50 0.45	30 25	C30 ≥C35	0.55 0.50	25 20	C25 ≥C30	0.60 0.55	25 20
	I-C	C40 C45 ≥C50	0.45 0.40 0.36	40 35 30	C35 C40 ≥C45	0.50 0.45 0.40	35 30 25	C30 C35 ≥C40	0.55 0.50 0.45	30 25 20
梁、柱等條形結構	I-A	C30 ≥C35	0.55 0.50	30 25	C25 ≥C30	0.55 0.50	25 20	≥C25	0.60	20
	I-B	C35 ≥C40	0.50 0.45	35 30	C30 ≥C35	0.55 0.50	30 25	C25 ≥C30	0.60 0.55	30 25
	I-C	C40 C45 ≥C50	0.45 0.40 0.36	45 40 35	C35 C40 ≥C45	0.50 0.45 0.40	40 35 30	C30 C35 ≥C40	0.55 0.50 0.45	35 30 25

②凍融環境

長期與水體直接接觸並會發生凍融循環的混凝土結構構件應考慮凍融作用，且施工養護結束至初次受凍時間不得少於一個月並避免與水接觸。冬期施工中接觸零下溫度時的強度應大於 10N/mm^2。作用等級與保護層規定如表 3-23、表 3-24，重要和大型工程抗凍耐久性指數不應低於表 3-25 之要求。

表 3-23 凍融環境的作用等級[63]

環境等級	環境條件	結構構件示例
II-C	微凍地區的無鹽環境混凝土高度飽水	微凍地區的水位變動區構件及頻繁受雨淋的構件水平表面
	嚴寒和寒冷地區的無鹽環境混凝土中度飽水	嚴寒和寒冷地區受雨淋構件的垂直表面
II-D	嚴寒和寒冷地區的無鹽環境混凝土高度飽水	嚴寒和寒冷地區的水位變動區構件和頻繁受雨淋的構件水平表面
	嚴寒和寒冷地區的有鹽環境混凝土高度飽水	有氯鹽微凍地區的水位變動區構件和頻繁受雨淋的構件水平表面
	嚴寒和寒冷地區的有鹽環境混凝土中度飽水	有氯鹽嚴寒和寒冷地區受雨淋構件的垂直表面
II-E	嚴寒和寒冷地區的有鹽環境混凝土中度飽水	有氯鹽嚴寒和寒冷地區的水位變動區構件和頻繁受雨淋的構件水平表面

表 3-24 凍融環境中混凝土性質與鋼筋的最小保護層厚度(mm)[63]

使用環境 / 作用等級			100 年			50 年			30 年		
			混凝土強度	最大水膠比	保護層	混凝土強度	最大水膠比	保護層	混凝土強度	最大水膠比	保護層
板、牆等面形結構	II-C 無鹽		C45 ≥C50 C_a35	0.40 0.36 0.50	35 30 35	C45 ≥C50 C_a30	0.40 0.36 0.55	30 25 30	C40 ≥C45 C_a30	0.45 0.40 0.55	30 25 25
	II-D	無鹽	C_a40	0.45	35	C_a35	0.50	35	C_a35	0.50	30
		有鹽									
	II-E 有鹽		C_a45	0.40		C_a40	0.45		C_a40	0.45	
梁、柱等條形結構	II-C 無鹽		C45 ≥C50 C_a35	0.40 0.36 0.50	40 35 35	C45 ≥C50 C_a30	0.40 0.36 0.55	35 30 35	C40 ≥C45 C_a30	0.45 0.40 0.55	35 30 30
	II-D	無鹽	C_a40	0.45	40	C_a35	0.50	40	C_a35	0.50	35
		有鹽									
	II-E 有鹽		C_a45	0.40		C_a40	0.45		C_a40	0.45	

表 3-25 混凝土之抗凍耐久性指數 *DF*(%)[63]

設計使用年限	100 年			50 年			30 年		
環境條件	高度飽水	中度飽水	含鹽環境下凍融	高度飽水	中度飽水	含鹽環境下凍融	高度飽水	中度飽水	含鹽環境下凍融
嚴寒地區	80	70	85	70	60	80	65	50	75
寒冷地區	70	60	80	60	50	70	60	45	65
微凍地區	60	60	70	50	45	60	50	40	55

③海洋氯化物環境

海洋氯化物環境對鋼筋混凝土結構構件的作用等級分為四級(C~F)，如表 3-26；與海水氯化物接觸的筋混凝土結構構件應按海洋氯化物環境進行耐久性設計，當氯化物環境作用等級為E、F 級時，鋼筋混凝土結構中的重要構件應採用防蝕附加措施，並應在耐久性設計中提出結構使用期間定期檢測的要求，重要工程尚應在設計階段作出定期檢測的詳細規劃，並設置專供檢測取樣用的構件。

對於一側接觸海水或含有海水土體，另一側接觸空氣的海中或海底隧道鋼筋混凝土結構構件，其環境作用等級不宜低於E。江河入海口附近水域的含鹽量應根據實測確定，當含鹽量明顯低於海水時，其環境作用等級可根據具體情況低於表中的規定。海洋氯化物環境中混凝土性質與鋼筋的最小保護層厚度應符合

表 3-27 規定；而作用等級為 E 和 F 的鋼筋混凝土，宜採用大摻量礦物摻料的混凝土，否則應提高表中的混凝土強度等級或增加鋼筋的保護層最小厚度。

對於氯化物環境中的重要鋼筋混凝土結構工程，設計時應提出混凝土的抗氯離子侵入性指標，混凝土擴散係數採用北歐 NT BUILD 492 試驗法求得，D_{RCM} 應滿足表 3-28 之要求。

表 3-26 海洋氯化物環境的作用等级[63]

環境等級	環境條件	結構構件示例
III-C	水下區和土中區：周邊永久浸沒於海水或埋於土中	橋墩、承台、基礎
III-D	大氣區(輕度鹽霧)：距平均水位 15 m 高度以上的海上大氣區；漲潮岸線以外 100~300 m 內的陸上室外環境	橋墩，橋梁上部結構構件；靠海的陸上建築外牆及室外構件
III-E	大氣區(重度鹽霧)：距平均水位上方 15 m 高度以內的海卜大氣區；離漲潮岸線 100 m 以內、低於海平面以上 15 m 的陸上室外環境	橋梁上部結構構件；靠海的陸上建築外牆及室外構件
	潮汐區和飛沫區，非炎熱地區	橋墩、承台、碼頭
III-F	潮汐區和飛沫區，炎熱地區	橋墩、承台、碼頭

表 3-27 氯化物環境中混凝土性質與鋼筋的最小保護層厚度(mm) [63]

設計使用年限 / 環境作用等級		100 年			50 年			30 年		
		混凝土強度	最大水膠比	保護層	混凝土強度	最大水膠比	保護層	混凝土強度	最大水膠比	保護層
板、牆等面形結構	III-C IV-C	C45	0.40	45	C40	0.42	40	C40	0.42	35
	III-D IV-D	C45 ≥C50	0.40 0.36	55 50	C40 ≥C45	0.42 0.40	50 45	C40 ≥C45	0.42 0.40	45 40
	III-E IV-E	C50 ≥C55	0.36 0.33	60 55	C45 ≥C50	0.40 0.36	55 50	C45 ≥C50	0.40 0.36	45 40
	III-F	C50 ≥C55	0.36 0.33	65 60	C50 ≥C55	0.36 0.36	60 55	C50	0.36	55
梁、柱等條形結構	III-C IV-C	C45	0.40	50	C40	0.42	45	C45	0.42	40
	III-D IV-D	C45 ≥C50	0.40 0.36	60 55	C40 ≥C45	0.42 0.40	55 50	C40 ≥C45	0.42 0.40	50 40
	III-E IV-E	C50 ≥C55	0.36 0.33	65 60	C45 ≥C50	0.40 0.36	60 55	C45 ≥C50	0.40 0.36	50 45
	III-F	C50 ≥C55	0.36 0.33	70 65	C50 ≥C55	0.36 0.36	65 60	C50	0.36	55

表 3-28 混凝土的抗氯離子侵入性指標[63]

設計使用年限	100 年		50 年	
侵入性指標 / 作用等級	D	E	D	E
28d 齡期氯離子擴散係數 D_{RCM}(10^{-12} m^2 / s)	≤7	≤4	≤10	≤6

④化學腐蝕環境

作用等級分類依環境與大氣汙染環境方式進行區分，如表 3-29 至表 3-31，各構件之最小保護層厚度如表 3-32。

表 3-29 水、土中硫酸鹽及酸類物質環境作用等級[63]

作用因素 / 作用等級	水中硫酸根離子濃度 SO_4^{2-}(mg/L)	土中硫酸根離子濃度 SO_4^{2-} (mg/L)	水中鎂離子濃度 (mg/L)	水中酸鹼度 (pH 值)	水中腐蝕性二氧化碳濃度(mg/L)
V-C	200~1000	300~1500	300~1000	6.5~5.5	15~30
V-D	1000~4000	1500~6000	1000~3000	5.5~4.5	30~60
V-E	4000~10000	6000~15000	≥3000	≤4.5	60~100

表 3-30 乾旱、高寒地區硫酸鹽環境作用等級[63]

作用因素 / 作用等級	水中硫酸根離子濃度 SO_4^{2-} (mg/L)	土中硫酸根離子濃度 SO_4^{2-} (mg/L)
V-C	200~500	3000~750
V-D	500~2000	750~3000
V-E	2000~5000	3000~7500

表 3-31 大氣污染環境作用等級[63]

環境作用等級	環境條件	結構構件範例
V-C	汽車或機車廢氣	受廢氣直射的結構構件，處於封閉空間內受成氣作用的車庫或隧道構件
V-D	酸雨(霧、露)4.5≤pH 值≤5.6	遭酸雨頻繁作用的構件
V-E	酸雨 pH 值小於 4.5	遭酸雨頻繁作用的構件

表 3-32 化學腐蝕環境下混凝土材料與鋼筋的保護層最小厚度(mm) [63]

設計使用年限 / 環境作用等級		100 年			50 年			30 年		
		混凝土強度	最大水膠比	保護層	混凝土強度	最大水膠比	保護層	混凝土強度	最大水膠比	保護層
板、牆等面形結構	V-C	C45	0.40	40	C40	0.45	35	C40	0.45	30
	V-D	C45 ≥C50	0.40 0.36	45 40	C40 ≥C45	0.45 0.40	40 35	C40 ≥C45	0.45 0.40	35 30
	V-E	C50 ≥C55	0.36 0.33	45 40	C45 ≥C50	0.40 0.36	40 35	C45	0.40	35
梁、柱等條形結構	V-C	C45 ≥C50	0.40 0.35	45 40	C40 ≥C45	0.45 0.40	40 35	C40 ≥C45	0.45 0.40	35 30
	V-D	C45 ≥C50	0.40 0.36	50 45	C40 ≥C45	0.45 0.40	45 40	C40 ≥C45	0.45 0.40	40 35
	V-E	C50 ≥C55	0.36 0.33	50 45	C45 ≥C50	0.40 0.36	45 40	C45	0.40	40

3.1.2國內耐久性設計規範

1. 交通部 109 年公路橋梁設計規範、112 年鐵路橋梁設計規範(二版)[4, 5]

交通部鐵、公路橋梁設計規範對於使用年限與耐久性設計規定有較明確之說明，「公路橋梁設計規範」第十二章「耐久性設計」與「鐵路橋梁設計規範」第六章「耐久性設計」之相關規定如下：

(1)設計年限

①設計年限係指依據相關規範設計及施工，並在正常使用及維護狀態下之年限。

②高速公路、重要公路、跨越重要設施之公路橋梁、城鎮之主要聯外公路橋梁或經主管機關認為必要者，設計年限不小於 100 年；鐵路橋梁除主管機關另定需求，設計年限不小於 100 年。

③其他公路橋梁，設計年限不小於 50 年。

④橋梁主要構件在設計年限內無需大修，非主要構件(如伸縮縫、護欄、緣石等)及可更換構件(如支承、隔震及防落設施等)可設計成易於更換的型式，或能夠經濟合理地進行維修，其設計年限可低於結構整體的設計年限，並應在設計圖說中明確規定。

(2)一般環境(中性化環境)

①一般環境下混凝土結構的耐久性設計，係為在正常大氣作用下混凝土中性化引起的內部鋼筋銹蝕。

②一般環境下之耐久性設計，除需符合環境作用等級之規定外(表 3-33)，尚應符合鋼筋之最小混凝土保護層(表 3-34)的規定。

表 3-33 鐵路橋梁設計規範、公路橋梁設計規範中性化環境分類[4,5]

環境作用等級	環境條件	結構構件示例
I	非乾濕交替環境	箱梁內部
II	乾濕交替環境	柱、橋台、版、「I」「T」梁、箱梁外露面等

③設計年限為 100 年的構件，其混凝土抗壓強度不應低於 280 kgf/cm^2，設計年限為 50 年的構件，其混凝土抗壓強度不應低於 245 kgf/cm^2。預力混凝土鋼筋保護層厚度可按表 3-34 辦理。

表 3-34 中性化環境混凝土材料與鋼筋最小保護層厚度[4,5]

設計年限 / 環境作用等級	50 年		100 年	
	最大水膠比	最小保護層厚度 (cm)	最大水膠比	最小保護層厚度 (cm)
I	0.50 0.45	3.0 2.5	0.50 0.45	3.5 3.0
II	0.50 0.45 0.40	4.0 3.5 3.0	0.45 0.40 0.35	4.5 4.0 3.5

(3)海洋鹽害環境

①海洋鹽害環境之作用等級，依離海岸的距離可分為極嚴重鹽害區、嚴重鹽害區及中度鹽害區三種等級，如表 3-35 所示。其中極嚴重鹽害區係指橋梁位於海水中，會受海浪飛沫影響之部份，如橋墩柱。至於未直接受海浪飛沫影響之部份，如橋面板則為嚴重鹽害區。若橋面板冬季需做撒鹽除冰，橋面則屬極嚴重鹽害區。

②橋梁所在位置如有環境之實測數據，則可依學理進行耐久性設計，不需按表 3-35 規定之離海岸距離進行分級。

表 3-35 鹽害環境下作用等級[4,5]

環境作用等級	離海岸的距離
極嚴重鹽害區	海水中飛沫區
嚴重鹽害區	離海岸 300 公尺以內之區域
中度鹽害區	離海岸 300 公尺至 3 公里以內之區域

③保護層厚度規定

A.海洋鹽害環境中各環境作用等級的鋼筋混凝土構件，混凝土最大水膠比及最低抗壓強度應符合表 3-36 之規定。

B.主要構件鋼筋保護層厚度依設計年限、橋梁部位及所處環境作用等級列於表 3-37。

C.海洋鹽害環境下，主要構件應採用添加礦物摻料之混凝土，礦物摻料總量不得超過總膠結材料重量之 50%，且建議不小於總膠結材料重量之 40%，其中飛灰不得超過 15%，巨積混凝土或特殊用途混凝土除外。

D.當採用附加保護措施或非本規範建議之混凝土水膠比、抗壓強度、礦物摻料取代量時，可另依學理或試驗提出合適之鋼筋最小保護層厚度。

E.預力混凝土的鋼筋保護層厚度可按照本節的規定執行。

表 3-36 鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度[4,5]

	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
最大水膠比	0.4	0.4	0.45
最低抗壓強度f_c'(kgf/cm^2)	350	350	280

表 3-37 鹽害環境下主要構件鋼筋最小保護層厚度(cm)[4,5]

設計年限	50 年			100 年		
環境作用等級 橋梁部位	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
基礎、基樁	10	10	10	10	10	10
柱、牆	10	7.5	7.5	10	10	7.5
橋面板頂層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
橋面板下層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
箱梁底層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
「I」「T」梁、箱梁腹版外露面	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
混凝土面未直接曝露於大氣、未與土壤或水接觸	4	4	4	4	4	4

④附加保護措施

A.鋼筋表面保護：鋼筋表面處理可採用環氧樹脂或鍍鋅來增強抵抗腐蝕環境。環氧樹脂材料應符合 ASTM A934 之規定；鍍鋅鋼筋應符合 CNS 14771 或 ASTM A767 之規定。若使用環氧樹脂鋼筋或鍍鋅鋼筋，其受拉伸展長度、搭接長度、標準彎鉤之伸展長度應適度增加。

B.混凝土摻料：混凝土中添加腐蝕抑制劑可減緩混凝土中鋼材腐蝕時間。腐蝕抑制劑之效能試驗依照 ASTM G129 之規定辦理。混凝土添加腐蝕抑制劑後，不應影響混凝土基本性質，其抗壓、抗彎強度依 AASHTO M194 之規定不得低於未添加者混凝土強度之 90%。

C.混凝土表面處理：混凝土構件若長期直接受到水分滲入之影響時，可於混凝土表面施作適當防護措施以降低水分及氯離子之侵入。此種混凝土表面處理包含防水膜、表面塗封劑或滲透型塗封劑。

D.陰極防蝕：鋼筋混凝土結構可採用陰極防蝕工法做為保護鋼筋之方法之一，不論新建或使用中之橋梁構件均可應用陰極防蝕工法進行防蝕保護。陰極防蝕工法包括外加電流法與犧牲陽極法。外加電流不適用於預力混凝土構材。

2. 內政部建築物混凝土結構設計規範[64]

內政部最新版「建築物混凝土結構設計規範」於 113 年 1 月正式生效，本版次係依據美國 ACI318-19(22)加以修定，其中第十九章為「混凝土：設計與耐久性要求」增加許多混凝土耐久性之規定。

(1)曝露環境類別與分級

施工者須確認設計圖說中依表 3-38 規定之各種曝露類別及構材的預期曝露程度設定曝露分級，S0 級曝露適用於接觸低濃度水溶性硫酸鹽，不需考慮硫酸鹽侵蝕之條件。S1、S2 與 S3 級曝露適用於直接接觸到含水溶性硫酸鹽土壤或水之結構混凝土構材。曝露之嚴重程度由 S1 級遞增至 S3 級，以土壤中所量測之水溶性硫酸鹽濃度或水中溶解硫酸鹽濃度之臨界值為依據。土壤中硫酸鹽之質量百分比應依 ASTM C1580 測定。水中溶解硫酸鹽之濃度 ppm 應依 CNS 1237 測定。海水環境列為 S1 級曝露。

表 3-38 曝露環境類別與分級[64]

類別	分級	混凝土之環境條件	
凍融 (F)	F0	非曝露於凍融循環	
	F1	曝露於偶而受潮之凍融循環	
	F2	曝露於經常受潮之凍融循環	
	F3	曝露於經常受潮及使用除冰化學藥劑之凍融循環	
硫酸鹽 (S)		土壤中之水溶性硫酸鹽(SO_4^{2-})，質量%(依 ASTM C1580 測定)	水中溶解之硫酸鹽(SO_4^{2-})，ppm(依 CNS 1237 測定)
	S0	$SO_4^{2-}<0.10$	$SO_4^{2-}<150$
	S1	$0.10 \leqq SO_4^{2-}<0.20$	$150 \leqq SO_4^{2-}<1{,}500$ 或海水
	S2	$0.20 \leqq SO_4^{2-} \leqq 2.00$	$1{,}500 \leqq SO_4^{2-} \leqq 10{,}000$
	S3	$SO_4^{2-}>2.00$	$SO_4^{2-}>10{,}000$
與水接觸 (W)	W0	處於乾燥環境	
	W1	與水接觸，不需要求低滲透性	
	W2	與水接觸，需要求低滲透性	
鋼筋的腐蝕防護 (C)	C0	處於乾燥環境或有防潮處理	
	C1	曝露於潮濕但無外來氯鹽之環境	
	C2	曝露於潮濕且有外來氯鹽之環境，如除冰化學藥劑、鹽、微鹼水、海水或其潑濺水	

(2)硫酸鹽環境(曝露類別 S)：

曝露類別 S 混凝土拌成物要求，除非另有規定外，應提供符合表 3-39 與表 3-40 要求的混凝土，此是基於結構構件受到硫酸鹽曝露的等級，或滿足其他契約文件中指定的要求，提交的文件須驗證且符合指定要求。

表 3-39 曝露類別 S 的要求[64]

曝露等級		最大 W/B(1, 2)	最小 f_c' (kgf/cm^2)	膠結材料種類(3)		
				CNS 61	CNS 15286	氯化鈣摻料
S0		NA	210	無限制	無限制	無限制
S1		0.50	280	II型(4, 5)	含(MS)標記之分類	無限制
S2		0.45	315	V型(5)	含(HS)標記之分類	不允許
S3	選項 1	0.45	315	V型加卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉(6)	含(HS)標記之分類加卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉(6)	不允許
	選項 2	0.40	350	V型(7)	含(HS)標記之分類	不允許

註 1：W/B 係基於混凝土拌成物中所有的膠結及輔助膠結材料。

註 2：表中之 W/B 最大限值不適用於輕質粒料混凝土。

註 3：所列膠結材料之替代組合經抗硫酸鹽測試且能符合規範準則者，允許使用。

註 4：曝露於海水環境下，若 W/B 不超過 0.40 時，允許使用 C_3A10%以下之其他類型卜特蘭水泥。

註 5：允許於曝露分級 S1 或 S2 中使用其他種類之水泥，如 I 型或 III 型，若 C_3A 含量低於 8%則可用於 S1 曝露分級或含量低於 5%則可用於 S2 曝露分級。

註 6：當使用於含 V 型水泥之混凝土時，指定來源之卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉用量，須至少達可改善抗硫酸鹽能力使用紀錄之用量。或者，指定來源之卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉用量，須至少為符合 CNS 14794 及符合規範準則所定之用量。

註 7：若僅使用 V 型水泥做為膠結材料時，須指定 CNS 61 任選規定中，抗硫酸鹽膨脹下之最大膨脹量 0.040%。

表 3-40 建立受到水溶性硫酸鹽的膠結材組合適用性的要求[64]

曝露等級		最大膨脹率(CNS 14794)，%		
		6 個月	12 個月	18 個月
S1		0.10	NA	NA
S2		0.05	0.10(1)	NA
S3	選項 1	NA	NA	0.10
	選項 2	0.05	0.10(1)	NA

備考：12 個月膨脹率的限制要求只有在量得的膨脹率超過 6 個月時的最大膨脹率限制。

(3)與水接觸環境(曝露類別 W)：

曝露類別 W 之混凝土應符合表 3-41 的要求，包括最大水膠比 W/B、最小 f_c'、膠結材的限制及其他附加要求等。

表 3-41 曝露類別 W 的要求[64]

曝露等級	最大 W/B(1, 2)	最小 f_c' kgf/cm^2 (MPa)	附加要求
W0	NA	210(21)	NA
W1	NA	210(21)	註(3)
W2	0.50	280(28)	註(3)

註 1：W/B 係基於混凝土拌成物中所有的膠結及輔助膠結材料。

註 2：表中之 W/B 最大限值不適用於輕質粒料混凝土。

註 3：對於混凝土確認用於接觸水之環境者，須提交證明混凝土拌成物符合(a)和(b)之規定：

(a) 非鹼-氧化矽反應活性粒料，或另訂減輕鹼-氧化矽反應之措施，依據 CNS 13618 或 CNS 13619 等檢驗方式。

(b) 非鹼-碳酸鹽反應活性粒料，依據 ASTM C1778 檢驗方式。

(4)鋼筋腐蝕防護環境(曝露類別 C)：

曝露類別 C 之混凝土應符合表 3-42 的要求。當混凝土所曝露環境須考量對於鋼筋腐蝕影響時，對於結構物之硬固混凝土有氯離子含量要求，依使用混凝土類別與曝露等級，須確認其硬固狀態之混凝土氯離子含量是否符合上述規範或相關規範要求，檢驗方式依國家標準進行。

表 3-42 曝露類別 C 的要求[64]

曝露等級	最大 W/B(1, 2)	最小 f_c' kgf/cm^2	硬固混凝土中最大水溶性氯離子含量相對於配比中總膠結材重量比(%) (3)
非預力混凝土			
C0	NA	210	1.0
C1	NA	210	0.30
C2	0.40	350	0.15
預力混凝土			
C0	NA	210	0.06
C1	NA	210	0.06
C2	0.40	350	0.06

註 1：W/B 係基於混凝土拌成物中所有的膠結及輔助膠結材料。

註 2：表中之 W/B 最大限值不適用於輕質粒料混凝土。

註 3：根據 ASTM C1218/C1218M 測定齡期在 28-42 天之間的混凝土混合物硬化樣品的水溶性氯離子含量。

3. 臺灣地區鹽害環境分區與本土化氯離子侵蝕耐久性分析模式

財團法人臺灣營建研究院執行之交通部公路局委託之「臺灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究(2006.08~2010.10)」[65]及「臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究(2012.04~2015.12)」研究案[2]，主要在探討鹽害環境下鋼筋混凝土之耐久性並進行臺灣沿海地區之氯鹽環境調查，持續近 10 年的時間於全省臨海地區佈設超過 100 組氯鹽採集器及以每月 1 次的頻率進行採集，完成全臺灣之氯鹽量分佈調查及繪製出氯鹽等位線圖，此外藉由現地濱海既有老舊結構物之混凝土鑽心取樣，量測混凝土表面氯離子濃度及各深度氯離子濃度，探討混凝土材料及環境參數之關聯性，進而建立混凝土表面氯離子濃度與大氣中氯鹽量之關係，同時利用混凝土氯離子擴散係數試驗成果，提出本土化鹽害耐久性分析模式，可得到各種配比在不同氯鹽環境下所需要之保護層厚度。

其中，有關臨海地區大氣中氯鹽量之調查，財團法人臺灣營建研究院採用改良自日本土木研究所研發之飛來鹽份採集器來進行調查，共規劃 35 處濱海地區之直線佈設點，每處於不同離海岸線距離分別設置 2~9 個採集器，全臺合計共佈設 125 個採集器，取樣頻率為每月 1 次，共進行 36 次之調查工作，其設置分布狀況與儀器設計之示意圖與實體照片如圖 3.6 所示。

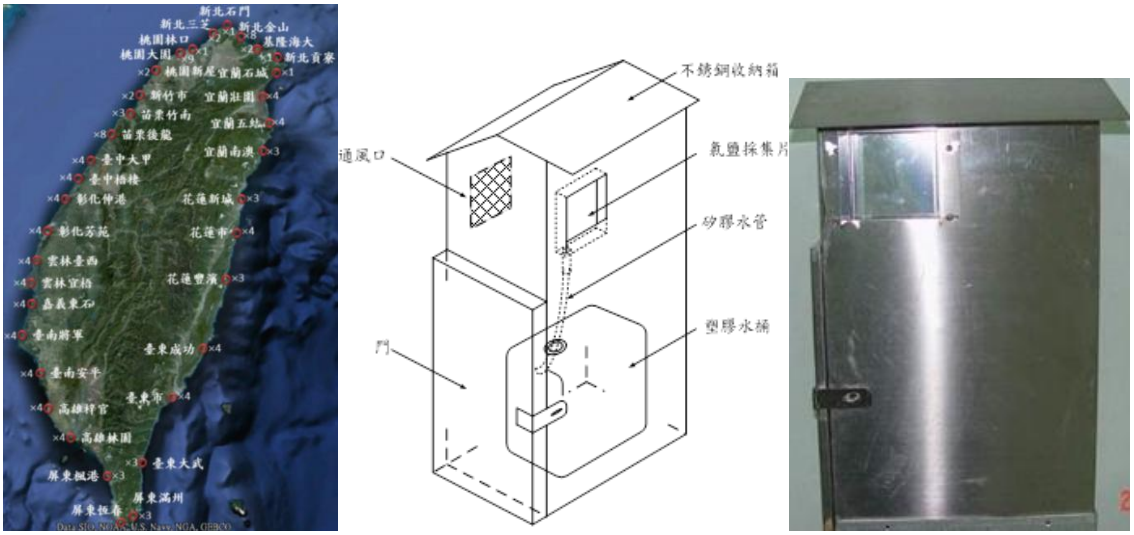


圖 3.6 飛來鹽份採集器布設位置(左)與示意圖(中)及實體照片(右)[2, 65]

由各年度之氯鹽量隨離海岸線距離的分布結果，可發現全臺各地區氯鹽量均明顯隨海岸線距離愈遠而有遞減之趨勢，且各年度均具有相當良好的重現性，如圖 3.7 所示，係臺中大甲及屏東滿州之試驗結果。而以各地區臨海點 3 年之年平均氯鹽量來比較，如圖 3.8 所示，可明顯發現氯鹽量較嚴重的地區有新北貢寮以南至桃園大園、苗栗後龍至彰化伸港、屏東滿州、花蓮市、宜蘭的五結與壯圍等 5 個區域，主要分布在臺灣西部海岸的北部、中部地區，及臺灣東部海岸的南部、中部與北部地區，其年均總氯鹽量介於 1.74 ~ 8.38 mg/100cm^2/day，其餘地區相對較輕微介於 0.19 ~ 1.38 mg/100cm^2/day。對照如圖 3.7 所示之年平均氯鹽量等位線分布圖，亦可發現臺灣地區氯鹽量較嚴重及較輕微地區的分布狀況。

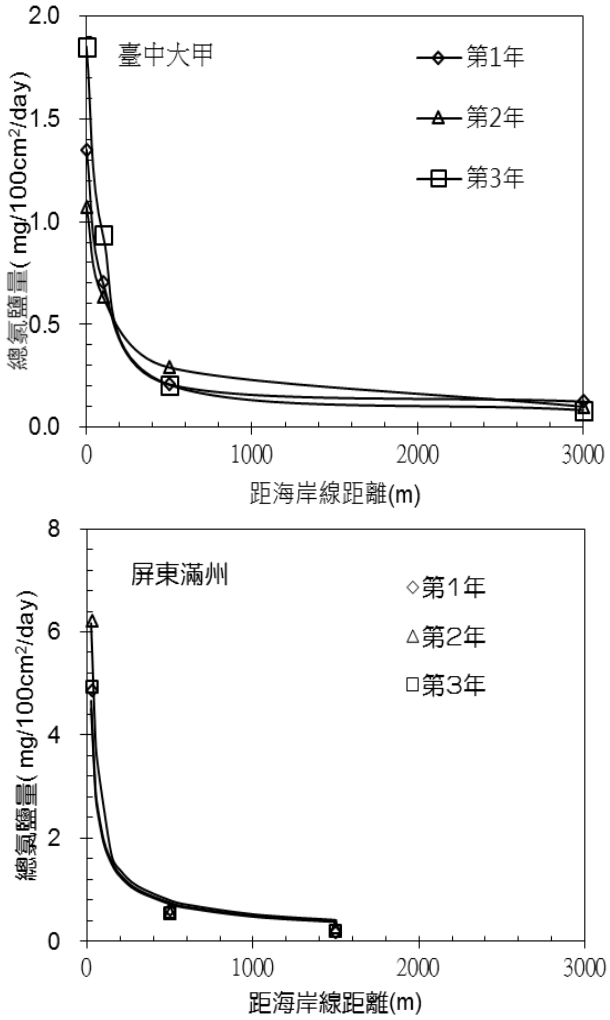


圖 3.7 氯鹽量隨離海岸線距離分布曲線圖[2, 65]

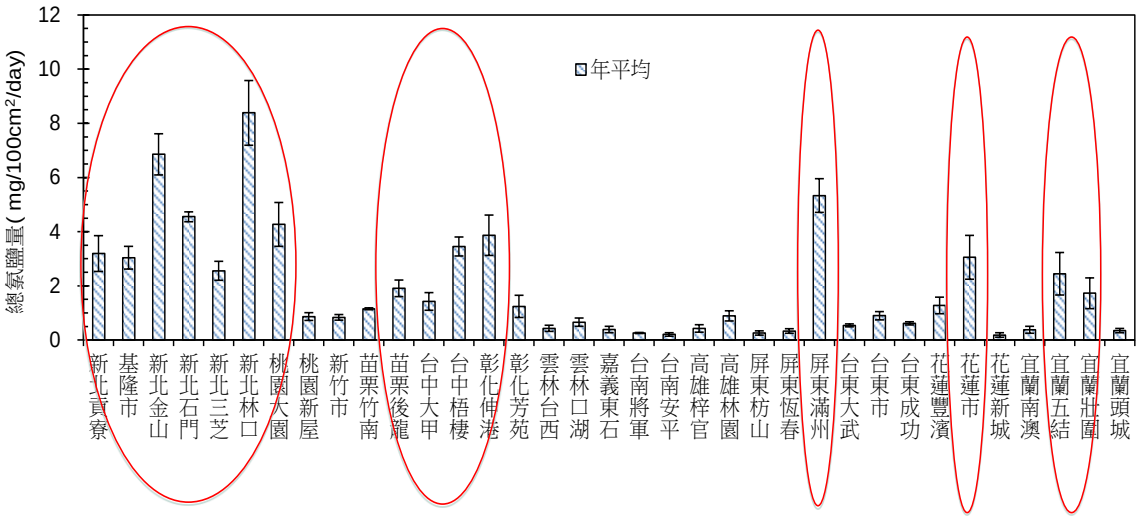


圖 3.8 各地區臨海點 3 年平均之年均氯鹽量比較圖[2, 65]

結構物表面氯離子濃度(C_0)為氯鹽擴散公式中之重要指標，與所處環境中氯鹽濃度有直接之關係，財團法人臺灣營建研究院曾執行 52 座既有濱海橋梁之鑽心，選取之橋梁位置如圖 3.9 所示，其橋齡都在 10 年以上，絕大多數為超過 20 年的橋齡，其約占 75%。橋梁鑽心試驗主要之檢測項目包含抗壓強度試驗及氯離子含量試驗，其中氯離子含量試驗係將混凝土鑽心試體由表面起每 5~10 mm 切一試片，並依 AASHTO T260 電位滴定分析混凝土中氯離子含量，進而分析氯離子在混凝土內的滲透情形，並依擴散方程式推估其表面氯離子濃度及擴散係數。



圖 3.9 既有濱海橋梁鑽心試驗之位置圖[2, 65]

既有濱海橋梁鑽心試體抗壓強度平均值大多為 200 kgf/cm^2 以上，約 72%介於 200~400 kgf/cm^2 之間，其中抗壓強度小於 200 kgf/cm^2 之 2 座橋梁其橋齡均為 35 年以上的老舊橋梁。各鑽心試體不同深度切片的氯離子濃度分布及藉由氯離子擴散方程式迴歸之曲線圖如圖 3.10 所示，同時可藉由氯離子擴散方程式推估其表面氯離子濃度及擴散係數。

圖 3.10 為 52 座橋梁面海側混凝土表面氯離子濃度與大氣中氯鹽量之關係圖，可看出表面氯離子濃度與氯鹽量呈對數函數關係，其 R^2 約為 0.75，顯示大氣中總氯鹽量超過一定數值時，其相對應之混凝土表面氯離子濃度之增幅會逐漸趨緩，而為考量將來鹽害作用等級分區的保守性，將圖 3.11 之對數函數關係簡化成如圖 3.12 之折線圖，由此可得到 C_0 與大氣中總氯鹽量 C_{air} 之經驗式如下：

$$C_0 = 12.56 \times C_{air} \qquad C_0 < 23\left(kg/m^3\right) \quad \text{.....(3-43)}$$

$$C_0 = 1.35 \times C_{air} + 21 \qquad C_0 \geq 23\left(kg/m^3\right) \quad \text{.....(3-44)}$$

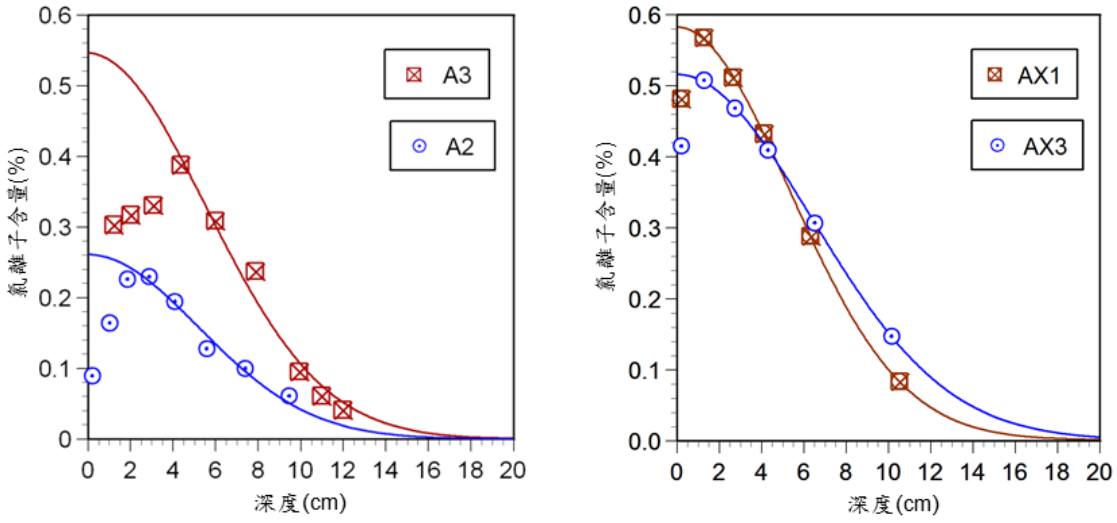


圖 3.10 鑽心試體不同深度切片的氯離子濃度分布及迴歸曲線圖[2, 65]

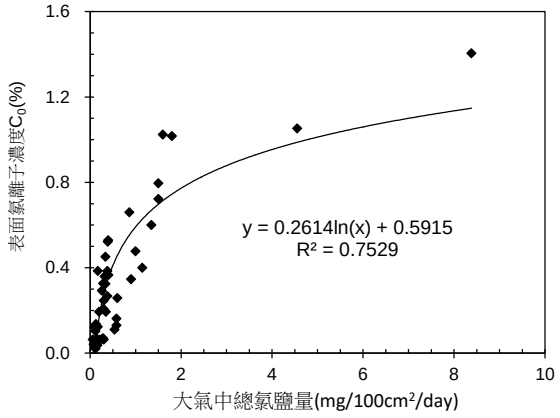


圖 3.11 表面氯離子濃度與氯鹽量之對數(左)及折線(右)關係圖

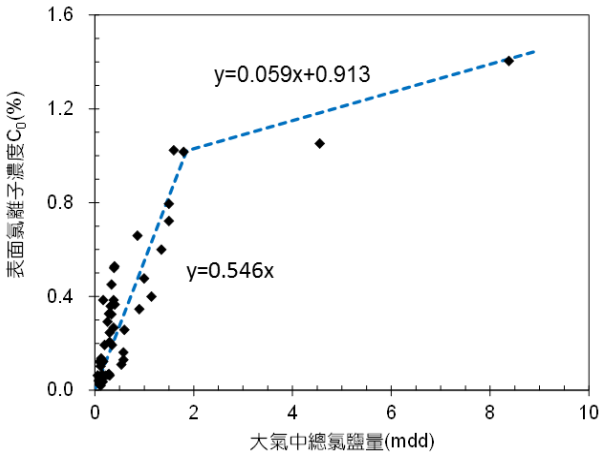


圖 3.12 表面氯離子濃度與氯鹽量之折線關係圖[2, 65]

財團法人臺灣營建研究院依過去近 10 年之沿海大氣環境中氯鹽量的調查成果，將大氣中氯鹽量作成等位線分布如圖 3.13，並透過現地老舊結構物的混凝土鑽心取樣，得到各區域之混凝土表面氯離子濃度，建立起大氣中氯鹽量與混凝土表面氯離子濃度之關係，進而可將臺灣鹽害環境之作用等級分為三類，分別為極嚴重鹽害區、嚴重鹽害區及中度鹽害區，各鹽害區所對應之 C_0 值如表 3-43。

臺灣各區域因地理環境不同加上季風影響，各區域之鹽害程度有明顯差異，因此又可將臺灣各區域分為甲區和乙區二種鹽害等級分區，如表 3-44，而各分區的鹽害環境作用等級之範圍如表 3-45，甲區所需考量鹽害的範圍為離海岸線 3 km 以內之濱海地帶，乙區為離海岸線 1 km 以內之濱海地帶。

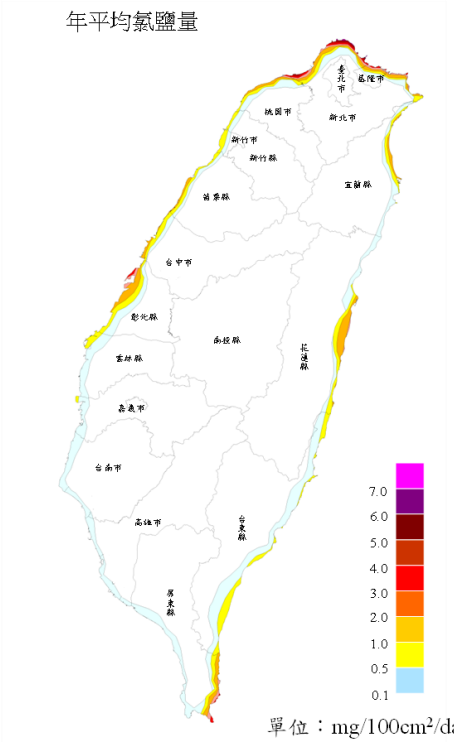


圖 3.13 鹽害對策地域區分圖[2]

表 3-43 各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度[2]

作用等級	混凝土表面氯離子濃度C_0(kg/m^3)
極嚴重鹽害區	20 ~ 30
嚴重鹽害區	10 ~ 20
中度鹽害區	4 ~ 10

表 3-44 鹽害環境作用等級分區之地域劃分[2]

鹽害等級分區	地域劃分
甲區	一、新北市(含基隆市)至桃園市觀音區 二、苗栗縣後龍鎮至彰化縣福興鄉 三、宜蘭縣壯圍鄉至宜蘭縣蘇澳鎮 四、花蓮縣花蓮市至花蓮縣壽豐鄉 五、屏東縣東岸 上述地區離海岸線 3 km 以內之濱海地帶
乙區	一、桃園市新屋區至苗栗縣竹南鎮 二、宜蘭縣頭城鎮 三、宜蘭縣南澳鄉至花蓮縣新城鄉 四、花蓮縣豐濱鄉至臺東縣達仁鄉 五、彰化縣芳苑鄉至屏東縣南岸 上述地區離海岸線 1 km 以內之濱海地帶

表 3-45 鹽害環境作用等級分區範圍[2]

環境作用等級	離海岸線的距離	
	甲區	乙區
極嚴重鹽害區	海水中飛沫區及離海岸 100 m 以內之區域	海水中飛沫區
嚴重鹽害區	離海岸 100 m ~ 300 m 以內之區域	離海岸 100 m 以內之區域
中度鹽害區	離海岸 300 m ~ 3 km 以內之區域	離海岸 100 m ~ 1 km 以內之區域

本土化鹽害耐久性分析模式採用 Fick 第二擴散定律，如式(3-41)，氯離子擴散係數參考美國 Life-365 以時間函數型式表示，如(3-42)，經驗係數 m 如(3-47)。其中與時間有關的 $D(t)$移至等號左側後得式(3-48)，再令$\partial T = D(t)\partial t$ 代入後可得式(3-49)。依初始條件 $C(x \geqq 0, t=0) = C_i$ 與邊界條件 $C(x=0, t>0)=C_0$、$C(x=\infty, t>0) = C_i$ 解偏微分方程式，可得式(3-50)。

積分∂T時考量擴散係數於一定時間 t_s 後衰減停止，故以 t_s 區分兩種情況，形成式(3-51)，再其代入式(3-50)可得式(3-52)。最終當鋼筋位置處任一時間點的氯離子濃度 $C(x,t)$不超過鋼筋腐蝕臨界濃度 C_t，即可得耐久性設計方程式，式(3-53)。

由於擴散係數遞減上限為 25 年，因此只有當氯離子侵入之時間(年) t 大於 25 時式(3-51)才成立。若 t 小於 25(年)時，須帶入條件 $t=t_s$ 計算(3-51)，改寫後的方程式如式(3-54)，將(3-54)帶入式(3-50)後可以得到式(3-55)，最後帶入條件 $C(x,t) \leq C_t$，即可得到式(3-56)。

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{.....(3-45)}$$

$$D(t) = D_P\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad \text{.....(3-46)}$$

$$m = 0.2 + 0.4\left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70}\right) \quad \text{.....(3-47)}$$

$$\frac{1}{D(t)} \times \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{.....(3-48)}$$

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial T} = \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{.....(3-49)}$$

$$C(x,t) = C_i + (C_0 - C_i)\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{T}}\right)\right] \quad \text{.....(3-50)}$$

$$\begin{aligned} T &= \int_0^t D(t)dt = \int_0^{ts} D_P\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt + \int_{ts}^t D_P\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt \\ &= D_P\left[\frac{t_{ref}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m (t - t_s)\right] \end{aligned} \quad \text{.....(3-51)}$$

$$C(x,t) = C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\frac{x_d - \Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_P\left[\frac{{t_{ref}}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m (t - t_s)\right]}}\right) \quad \text{....(3-52)}$$

$$C_t \geq C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\frac{x_d - \Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_P\left[\frac{{t_{ref}}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m (t - t_s)\right]}}\right) \quad \text{....(3-53)}$$

$$T = \int_0^t D(t)\,dt = \int_0^t D_P\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt = D_P\left[\frac{{t_{ref}}^m t^{1-m}}{1-m}\right] \quad \text{.....(3-54)}$$

$$C(x,t) = C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\frac{x_d - \Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_P\left[\frac{{t_{ref}}^m t^{1-m}}{1-m}\right]}}\right) \quad \text{.....(3-55)}$$

$$C_t \geq C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\frac{x_d - \Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_P \left[\frac{t_{ref}{}^m t^{1-m}}{1-m}\right]}}\right) \quad \text{.....(3-56)}$$

其中，C_i：混凝土初始氯離子濃度(kg/m^3)，參見 CNS 3090 規定。

C_0：混凝土表面氯離子濃度(kg/m^3)，參考表 3-45。

x：保護層厚度(cm)。

x_d：耐久性要求之最小保護層厚度(cm)。

Δx：保護層施工誤差(cm)。

t：氯離子侵入之時間(年)。

t_s：混凝土氯離子擴散係數不再遞減之時間(年)，取 25 年。

β_{cl}：考量混凝土瑕疵及裂縫影響的係數，主要構件為 1.4、次要構件為 1.25。

D_P：混凝土氯任一參考時間之擴散係數。

t_{ref}：D_P 對應之參考時間，取 90 天。

m：經驗係數，與卜作嵐摻料添加量有關。

FA：飛灰添加百分比。

SG：爐石粉添加百分比。

C_t：鋼筋腐蝕臨界氯離子濃度(kg/m^3)，參考日本「混凝土標準示方書-設計編」。

3.1.3 混凝土耐久性設計規範探討

1. 各國耐久性設計規範之比較

國內外之混凝土耐久性設計規範大致可分為兩種，第一種是透過曝露環境等級與設計使用年限，依照規範中所提供的表格，直接查得建議的混凝土等級、水膠比、保護層厚度等設計參數之查表型耐久性設計規範。另一種是允許設計者自訂結構設計年限與曝露條件，並透過物理、化學與數理模型(如氯離子擴散、碳化等)進行計算推導，得到保護層厚度、材料設計參數等結果，但通常需搭配材料測試或保守假設之理論公式型耐久性設計規範。相關規範比較(含規範類型、環境分區方式、耐久性設計參照要件)如表 3-46。

當前之臺灣規範(公/鐵路橋梁設計規範、建築物混凝土結構設計規範)對於耐久性之設計僅對保護層厚度、抗壓強度、水膠比(包含膠結材之使用)有所限制，並未對於抗氯離子能力有所要求(例如氯離子擴散係數、傳輸係數)，但混凝土之抗壓強度與抗氯離子能力並非直接關聯；而理論公式型耐久性設計規範大多都是以 Fick 第二擴散定律為基礎，配合各國規範之各種係數(材料、衰減)與氯離子濃度之計算(表面、初始、臨界)，最終以當氯離子侵入之深度超過保護層厚度時，定義其為侵入，然而透過將各國公式進行轉換，可以得到各國用於計算服務年限之方程式，如式(3-57)至(3-60) (相關代號可參考 3.1.1 節)。

由於各國規範之計算需要混凝土配比、傳輸係數、擴散係數等數據，故採用國內擁有最完整試驗數據之國立臺灣海洋大學材料所楊仲家教授之研究群近年之研究數據進行服務年限之計算模擬，模擬數據使用之混凝土配比為爐石 35%、飛灰 15%之混凝土配比進行計算與分析，相關參數詳見表 3-47、服務年限計算結果如表 3-48，可以看出在同一組混凝土配比之耐久性試驗結果(傳輸係數、擴散係數)，於各國模擬規範模擬之下對於不同保護層厚度所對應之服務年限，其數據趨勢有很大的不同，其因素包含了曝露環境之不同、相關係數的影響等，故為了能更直觀的比較各國規範之差異，單獨將

耐久性相關之時間函數 *D(t)*進行比較後，各水膠比的時間函數 *D(t)* 與服務年限之關係如圖 3.14 所示。

美國 ACI 365.1R -17	$t=\dfrac{\left(\dfrac{x}{erf^{-1}\left(1-\dfrac{C_{crit}}{C_0}\right)}\right)^2}{4\left(2.17\times10^{-12}e^{\frac{-\frac{w}{cm}}{-0.279}}\left[\dfrac{28^m\left(t^m+36500^m-28^m\right)}{\left(36500t\right)^m}\right]\right)}$ .....(3-57)
歐盟 fib Bulletin 34	$t_{SL}=\left(\dfrac{\left(\dfrac{C_{\min}-\Delta x_k}{2\times erfc^{-1}\left(\dfrac{C_{crit}-C_{0,k}}{\left(C_{S,\Delta x,k}\times\gamma_C-C_{0,k}\right)}\right)}\right)^2}{k_{e,k}D_{RCM,k}\left(t_0\right)\gamma_D t_0^{\frac{\alpha_k}{\gamma_a}}}\right)^{\frac{1}{1-\frac{\alpha_k}{\gamma_a}}}$ .....(3-58)
日本混凝土標準示方書設計編	$t=\left(\dfrac{\left(\dfrac{0.1\times c_d}{2erf^{-1}\left(1-\dfrac{C_{crit-}C_i}{\gamma_i\gamma_{cl}C_0}\right)}\right)^2}{\gamma_c\gamma_k\gamma_p\beta_{cl}D_r}\right)^{\frac{1}{1-k_D}}$ .....(3-59)
臺灣地區鹽害環境分區與本土化氯離子侵蝕耐久性分析模式	$t=\dfrac{\left(\dfrac{x}{2\times erf^{-1}\left(1-\dfrac{C_{crit-}C_i}{(C_0-C_i)}\right)}\right)^2}{\beta_{cl}D_{ref}}-\dfrac{t_{ref}{}^m t_s^{1-m}}{1-m}+t_s$ .....(3-60)

表 3-46 各國耐久性設計規範分區與設計方式總表

國家	規範	設計類型	環境分區		耐久性設計	
			環境類別	作用等級	設計年限	需求、查表項目或計算要件
美國	Bridge Design Specifications	查表	依環境、距海遠近、高程考量分為 6 區	無	75 年	保護層厚度
	ACI 318-19(22)	查表	凍融、硫酸鹽、氯鹽、接觸水等 4 種類別	0~3	無	抗壓強度、水膠比
	ACI 365.1R -17	理論公式	無明定分級，但會依結構類型、曝露類型及地理位置分區，進行算之考量		無	保護層厚度、氯離子擴散係數
	Life-365™	理論公式	無環境分區，但強調設計應根據環境類型進行評估。		可任意設定	保護層厚度、氯離子擴散係數
歐洲	EN1992-1-1	查表	無腐蝕、中性化、非海水氯鹽、海洋氯化物、凍融、化學侵蝕、機械磨損等 7 類	0~4	50、100 年	保護層厚度、抗壓強度、水膠比、膠結料用量等
	BS 8500-1	查表				
	fib Bulletin 34	理論公式	無環境分區，但會根據腐蝕類型帶入相應模型計算		無	保護層厚度、氯離子傳輸係數
日本	道路橋示方書·混凝土橋編	查表	將日本分為三種地域再依海岸線距離分為 S、I、II 及 III 四種鹽害對策分區		100 年	保護層厚度、氯離子擴散係數
	混凝土標準示方書·設計編	理論公式			100 年為限	水膠比、膠結料、保護層、氯離子擴散係數
中國	GB/T 50476	查表	一般、凍融、海洋氯化物、其他氯化物、化學腐蝕環境等 5 類	6 類 (A~E)	30、50、100 年	保護層厚度、抗壓強度、水膠比、氯離子傳輸係數
臺灣	公路橋梁設計規範	查表	一般環境與海洋環境 2 種	一般:2 種 海洋:3 種	50、100 年	保護層厚度、抗壓強度、水膠比
	鐵路橋梁設計規範	查表				
	建築物混凝土結構設計規範	查表	凍融、硫酸鹽、與水接觸、鋼筋的腐蝕防護等 4 種	0~3	無	抗壓強度、水膠比、膠結料
	臺灣地區鹽害環境分區與本土化氯離子侵蝕耐久性分析模式	理論公式	環境分區等級依沿海距離分成 3 種、 鹽害等級分區可分為甲區和乙區		可任意設定	保護層厚度、膠結料、氯離子擴散係數

表 3-47 計算模擬用相關參數

<table>
<tr><td colspan="6">模擬環境：臨海(極嚴重鹽害區)</td></tr>
<tr><td>規範</td><td colspan="2">氯離子濃度計算 (kg/m^3)</td><td>計算公式出處或相關規範</td><td colspan="2">其餘相關參數(代號請參照 3.1 節各規範之部分)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">美國
ACI 365</td><td>C_i(初始)</td><td>-</td><td>ACI 365 無計算初始氯離子濃度[52]</td><td colspan="2" rowspan="3">衰減係數：m = 0.58
時間函數：28 天擴散係數(設計年限 100 years)
$D(t) = D_{28}\left(\frac{28}{365\times t}\right)^m + D_{ult}\left(1-\left(\frac{28}{365\times t}\right)^m\right)$</td></tr>
<tr><td>C_0(表面)</td><td>0.8 wt.%concrete</td><td>ACI 365.1R-17 第 7.10 節[52]</td></tr>
<tr><td>C_{lim}(臨界)</td><td>0.4 wt.% binder</td><td>ACI 365.1R-17 第 5.3.1 節[52]</td></tr>
<tr><td rowspan="3">歐盟
fib
Bulletin
34</td><td>C_i(初始)</td><td>0.05 wt.% binder</td><td>fib Bulletin 76 第 2.2.4.7 節[66]</td><td colspan="2" rowspan="3">衰減係數：(αk /γa) = 0.5
其他係數：αk=0.6、γa=1.2、γc =1.9、γd=1.6、k_e=1.1667
時間函數：28 天傳輸係數
$D(t) = k_e \cdot D_{28} \cdot \gamma_D \cdot k_t \cdot \left(\frac{t_c}{t}\right)^{\frac{\alpha_k}{\gamma_a}}$</td></tr>
<tr><td>C_0(表面)</td><td>4 wt.% binder</td><td>fib Bulletin 76 表 2-6[66]</td></tr>
<tr><td>C_{lim}(臨界)</td><td>0.6 wt.% binder</td><td>fib Bulletin 34 第 B2.2.6 節[59]</td></tr>
<tr><td rowspan="3">日本
標準示
方書</td><td>C_i(初始)</td><td>0.30</td><td>混凝土標準示方書 限制[67]</td><td colspan="2" rowspan="3">衰減係數：k_D=0.64
其他係數：γ_i=1.1、γ_k =2.1、γ_c =1.3、γ_P =1、β_{cl} =1、γ_{cl} =1.1
時間函數：設計擴散係數(cm^2/年)
$D_k = \gamma_k \gamma_p \gamma_c 10^{3.4(\frac{W}{C})-1.7} \times t^{-0.64}$</td></tr>
<tr><td>C_0(表面)</td><td>13</td><td>表 3-15 飛沫帶數據[60, 61]</td></tr>
<tr><td>C_{lim}(臨界)</td><td>$-2.6\left(\frac{W}{B}\right)+3.1$</td><td>式(3-31)混合水泥公式[61]</td></tr>
<tr><td rowspan="3">臺灣
本土化
模式</td><td>C_i(初始)</td><td>0.15</td><td>CNS 3090 新拌混凝土規定[40]</td><td colspan="2" rowspan="3">衰減係數：m = 0.52
影響係數：β_{cl} =1、1.25(次要構件)、1.4(主要構件)
時間函數：91 天擴散係數(遞減上限 25 年)
$D(t) = D_{28} \cdot \left(\frac{91}{365\times t}\right)^m$</td></tr>
<tr><td>C_0(表面)</td><td>30</td><td>表 3-43 極嚴重鹽害區[2]</td></tr>
<tr><td>C_{lim}(臨界)</td><td>同日本公式</td><td>式(3-31)低熱高爐水泥公式[61]</td></tr>
<tr><td colspan="6">保護層厚度：10、7.5、6.5、6、5.5、5 cm (施工誤差：10mm)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">配比 S35F15</td><td rowspan="4">卜作嵐摻料
爐石 35%
飛灰 15%</td><td>W/B</td><td rowspan="4">傳輸係數
Unit：10^{-12} m^2 / s</td><td>28 天</td><td rowspan="4">擴散係數
Unit：10^{-12} m^2 / s</td><td>91 天</td></tr>
<tr><td>0.35</td><td>3.0</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>0.45</td><td>4.0</td><td>2.2</td></tr>
<tr><td>0.55</td><td>7.0</td><td>3.7</td></tr>
</table>

表 3-48 各國模型於鹽害環境下不同保護層厚度服務年限(年)

保護層厚度(cm)	水膠比	服務年限(年)					
		美國ACI 365	歐盟fib Bulletin 34	日本標準示方書	臺灣本土化模式		
					β_{cl}		
					1	1.25 次要構件	1.4 主要構件
10.0	0.35	506	695	>100	277	217	190
	0.45	330	391	>100	167	128	111
	0.55	218	128	31	80	58	49
7.5	0.35	285	193	>100	138	105	91
	0.45	186	108	58	78	57	48
	0.55	122	35	5	31	20	16
6.5	0.35	214	100	>100	94	70	60
	0.45	139	56	23	50	35	28
	0.55	92	18	2	16	10	8
6	0.35	182	69	>100	75	55	46
	0.45	119	39	14	38	25	20
	0.55	78	13	1	11	7	6
5.5	0.35	153	46	86	57	40	33
	0.45	100	26	8	27	17	13
	0.55	66	8	1	8	5	4
5	0.35	126	29	45	41	28	22
	0.45	82	16	4	17	11	9
	0.55	54	5	0	5	3	2

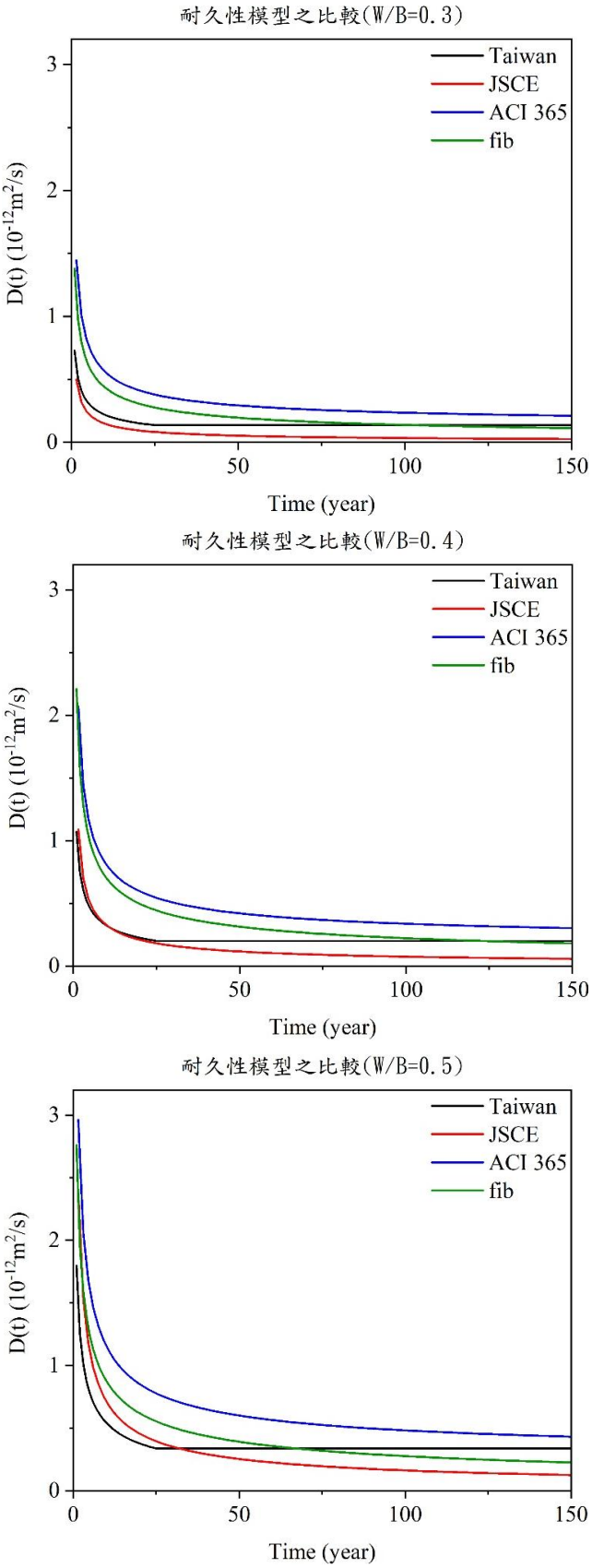


圖 3.14 各國理論公式型耐久性設計規範時間函數比較

2. 公路橋梁設計規範之沿革

104 年版規範與 98 年版之差異在於從海洋環境防蝕設計轉變為耐久性設計，強化整體設計思維與週期維護概念，並明訂了不同重要性橋梁之設計年限與建立設計「可替換非主要構件」的策略，整體上之耐久性設計有所加強但仍有不足，建議可以訂定混凝土抗氯離子能力相關要求。109 年版規範僅針對第一章之適用範圍與設計原則修正，故表 3-49 仍以 104 年版規範之討論為主。

表 3-49 104 年與 98 年版公路橋梁設計規範之差異[9, 35]

	98 年	104 年
章節	第十二章海洋環境下防蝕設計	第十二章耐久性設計
適用範圍	針對海水、海風對構造物所引起之腐蝕而採取之設計對策。對於其他腐蝕來源之防蝕對策，不在規定範圍之內。	鋼筋混凝土於中性化及鹽害環境下之耐久性設計，以及鋼結構之防蝕設計。
設計原則	無	1. 定義耐久性設計，為結構達到設計年限所需之最低要求，並須根據設計年限、環境類別、作用等級以及生命週期之觀點進行設計。 2. 同時承受多個環境作用時，應按環境作用等級較高的要求進行耐久性設計。 3. 新增明確設計年限規定：依重要程度分為 50 年及 100 年。設計年限內橋梁主要構件無需大修，非主要構件及可更換構件可進行更換維修。
設計考量	材料之隔絕性、管理條件、結構型式、橋梁位置與海平面高度及排水設施等。	從原先之管理條件更改為維護方式，對於橋梁所採用之各項組件，新增了日後檢查、維修方便性之考量。
環境分區	1. 將腐蝕環境區分為海洋環境、工業環境、都市環境及鄉村環境。 2. 海洋腐蝕環境依距海遠近分為極嚴重鹽害區、嚴重鹽害區、中度鹽害區與一般區域。	1. 分為一般環境與海洋鹽害環境 2. 一般環境：依環境乾濕交替區分 3. 海洋鹽害環境：依距海遠近區分，但移除 98 年版之一般區域。
混凝土橋	規定不同鹽害區之最大水膠比、最低強度與保護層厚度。	新增混凝土橋耐久性設計之規定，分為「一般環境」及「海洋鹽害環境」，並區分設計年限 50 年與 100 年不同規定，保護層厚度也有所增加。
保護層	第七章鋼筋混凝土設計，對於腐蝕、海洋環境或其他嚴重曝露情況下之保護層僅提到應酌予增加。	腐蝕、海洋環境或其他嚴重曝露情況下之混凝土保護層厚度應依第十二章相關規定辦理。
保護措施	將鋼筋表面保護、混凝土摻料、混凝土表面處理與陰極防蝕列為特殊保護措施。	「特殊保護措施」修改為「附加保護措施」，並修訂部份內容。
鋼橋	僅簡述鋼橋防蝕工作設計原則與方式。	新增大氣腐蝕環境調查分類與構件防蝕設計

3.2 鋼橋耐久性設計規範

3.2.1 國內防蝕設計規範與手冊

1. 防蝕設計

(1) 交通部「公路橋梁設計規範」、「鐵路橋梁設計規範」[4, 5]

根據 109 年公路橋梁設計規範，鋼結構之防蝕設計於第十二章「耐久性設計」第 12.5 節「鋼橋」中，後續修訂之 112 年鐵路橋梁設計規範(二版)之相關規定則於第六章「耐久性設計」之 C6.5 節「鋼橋，兩者講述內容相同[4]，包括大氣腐蝕環境調查分類相關規定(CNS 13401、13753、13754)、構件防蝕設計、防蝕方法等。

鋼橋構件防蝕設計應儘量減少腐蝕物質接觸到或停留在鋼材上，以降低腐蝕機會。腐蝕物質較可能長期滯留之部位，應加強防蝕保護。鋼橋之構材設置、斷面形狀與附屬設施等各項構造細部均應考量進行防蝕設計。

①鋼橋結構之構造細部

A.斷面較小之箱型構材或圓管構材，如不易進入內部塗裝時或未來無法重塗，應予完全密閉，以充分阻絕腐蝕因子侵入。

B.對於位在濱海地區，會有鹽份附著之鋼橋，其構材下翼緣之鋼板組合方式，應避免含氯離子之腐蝕氣體聚集和附著。

②橋面板構造

A.橋採用混凝土橋面板時，應避免橋面板產生裂縫，而使雨水滲入鋼梁處；必要時應設置防水層，以阻絕雨水滲入。

B.鋼橋採用鋼床板之橋面板構造時，應於鋼床板上方設置防水層，惟因鋪設 AC 面層時熔融瀝青溫度較高，防水層及鋼床板之油漆塗裝均須具耐高熱性。

③鋼橋結構之構造細部螺栓接頭

A.螺栓接頭處之塗裝應採用適當塗料或增加塗層厚度，並應審慎施工，特別在使用斷尾螺栓時，避免斷尾螺栓斷裂面於箱

外，並應注意箱外之斷裂面及尖銳處應予以研磨滑順，以確保螺栓接頭各部位均有足夠塗膜厚度與防蝕能力。

B.鋼橋鍍鋅時仍應搭配鍍鋅螺栓，不應採斷尾螺栓以避免銳緣腐蝕。

④雨水可能滯留部位：例如鋼梁下翼板底面與外側腹板下緣部分，以及易受積水滯留或漏水影響之梁端鋼材，應較其他部位增加塗層厚度，或採用適用於更惡劣腐蝕環境之塗裝系統，以確保和增強該等較易成為最先銹蝕點部位之防蝕能力。

⑤附屬設施

A.伸縮縫、支承構造及其附近鋼橋構造應避免水分、塵土等腐蝕因子停留或堆積。支承周邊宜設置防水板或防塵罩。

B.設置金屬欄杆、防震拉桿、管線架與電桿基座設施等，應注意其設置方式或選用適當金屬，以避免與鋼橋產生電化學反應。

鋼構基材可分為一般結構用鋼材(如 ASTM A709、ASTM A36、ASTM A572、CNS 2947 等)及耐候性鋼材(如 ASTM A588、ASTM A709-W、CNS 4269、JIS G3114 等)。選擇耐候性鋼材應依環境腐蝕性配合採用有油漆塗裝處理或無油漆塗裝處理等方式。鋼材之防蝕方法可分為油漆塗裝、熱浸鍍鋅、金屬熔射等，應就鋼橋所處之環境條件、結構特性、防蝕材料的耐用年限、新建或既建、維修困難性、施工性及經濟性等加以適當評估後選擇合適之表面防蝕處理方式，詳述如下。

①油漆塗裝：為最常用之防蝕方式，在不同大氣腐蝕環境分類及不同結構位置下可採用不同之塗裝系統，由主辦機關依需要選用之。其中鋼橋外露表面塗裝系統可參考 ISO 12944-5 低合金碳鋼於各大氣腐蝕環境分類之油漆塗裝系統。

②熱浸鍍鋅：

A.鍍鋅量可參考 ISO 9224 中對於鋅在不同腐蝕環境分類下的建

議值(由 ISO 9224 提供之平均和穩態鋅腐蝕速率的資料腐蝕速率，計算鍍鋅量)，由主辦機關依需要規定之。

B.鋼橋位於嚴重腐蝕環境(如海洋環境中之鹽霧帶及飛沫帶、硫磺區、工業區等)時，構件經熱浸鍍鋅後表面應再施以油漆塗裝可依據鋼橋所在的大氣腐蝕環境分類，參考 ISO 12944-5 熱浸鍍鋅之塗裝系統。

③金屬熔射：

A.金屬熔射的主要材料有鋅、鋁或鋅鋁合金，熔射材料及膜厚由主辦機關依環境腐蝕性需要規定之。

B.金屬熔射系統包括表面處理、熔射層、封孔劑及面漆等，為增進整體防蝕性，可選擇與封孔劑相容的油漆塗裝系統於封孔後塗裝，可參考 ISO 12944-5 金屬熔射之塗裝系統。

(2) CNS 13401 金屬及合金之腐蝕－大氣腐蝕性之分類(對應 ISO 9223)[68]

大氣腐蝕性分類，應依 CNS 13401 [金屬及合金之腐蝕–大氣腐蝕性之分類] (ISO 9223)之規定辦理。該大氣腐蝕性分類，可依標準金屬試片腐蝕速率做分類，或依污染之測定做分類。大氣腐蝕性可分為 C1~CX 等 6 類，如表 3-50，依標準金屬試片腐蝕速率做分類，其腐蝕性分類與腐蝕速率之關係如表 3-51。當無法使用標準試片曝露方式判定腐蝕性時，可由環境數據、或環境條件與曝露情境計算出腐蝕速率，再用以評估其大氣腐蝕性。計算時使用 SO_2 乾沉積量、氯離子乾沉積量、溫度和相對濕度等 4 個劑量，經劑量-效應公式評估得不同金屬在大氣環境中第一年曝露試驗之腐蝕速率，並查表得大氣腐蝕性分類。大氣腐蝕環境調查分類以碳鋼或鋅之腐蝕速率為主要分類依據，兩者因腐蝕速率而產生不同分類時，一般以碳鋼為主。惟鋼橋之防蝕採熱浸鍍鋅時，則以鋅之腐蝕速率進行分類為宜。

CNS 13401 為 ISO 9223： Corrosion of metals and alloys–Corrosivity of atmospheres–Classification 之中文對應版本。CNS

13401 規定特定地區 C1～CX 級的大氣腐蝕性分類，可由腐蝕因子調查(濕潤時間及污染)或曝露試驗(CNS 13753 標準試片之腐蝕速率)對照相關表格後獲得 C1 ~ CX 的大氣腐蝕性分類。CNS 13401 之流程及引用之相關標準如圖 3.15：其腐蝕速率計算是先以每平方公尺之克數 g/(m^2·a) [即 g/(m^2·year)]表示，經四捨五入計算後，再以每年微米數μm/a (即μm/year)表示之。

表 3-50 大氣腐蝕環境分類(CNS 13401, ISO 9223)[69]

分類	腐蝕性
C1	非常低
C2	低
C3	中等
C4	高
C5	非常高
CX	極端

表 3-51 標準金屬在不同分類之大氣腐蝕性第一年曝露的腐蝕速率 (r_{corr}) [69]

腐蝕性分類	金屬的腐蝕速率				
	單位	碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	g/(m^2·yr)	$r_{corr} \le 10$	$r_{corr} \le 0.7$	$r_{corr} \le 0.9$	可忽略
	μm/ yr	$r_{corr} \le 1.3$	$r_{corr} \le 0.1$	$r_{corr} \le 0.1$	-
C2	g/(m^2·yr)	$10 < r_{corr} \le 200$	$0.7 < r_{corr} \le 5$	$0.9 < r_{corr} \le 5$	$r_{corr} \le 0.6$
	μm/ yr	$1.3 < r_{corr} \le 25$	$0.1 < r_{corr} \le 0.7$	$0.1 < r_{corr} \le 0.6$	-
C3	g/(m^2·yr)	$200 < r_{corr} \le 400$	$5 < r_{corr} \le 15$	$5 < r_{corr} \le 12$	$0.6 < r_{corr} \le 2$
	μm/ yr	$25 < r_{corr} \le 50$	$0.7 < r_{corr} \le 2.1$	$0.6 < r_{corr} \le 1.3$	-
C4	g/(m^2·yr)	$400 < r_{corr} \le 650$	$15 < r_{corr} \le 30$	$12 < r_{corr} \le 25$	$2 < r_{corr} \le 5$
	μm/ yr	$50 < r_{corr} \le 80$	$2.1 < r_{corr} \le 4.2$	$1.3 < r_{corr} \le 2.8$	-
C5	g/(m^2·yr)	$650 < r_{corr} \le 1500$	$30 < r_{corr} \le 60$	$25 < r_{corr} \le 50$	$5 < r_{corr} \le 10$
	μm/ yr	$80 < r_{corr} \le 200$	$4.2 < r_{corr} \le 8.4$	$2.8 < r_{corr} \le 5.6$	-
CX	g/(m^2·yr)	$1500 < r_{corr} \le 5500$	$60 < r_{corr} \le 180$	$50 < r_{corr} \le 90$	$10 < r_{corr}$
	μm/ yr	$200 < r_{corr} \le 700$	$8.4 < r_{corr} \le 25$	$5.6 < r_{corr} \le 10$	-

備考 1：評估大氣腐蝕性級別係依標準試片腐蝕速率作評定(參考 ISO 9226)

備考 2：腐蝕速率以每平方公尺每年克數[g/(m^2. yr)]表示，或以每年微米(μm/yr) 表示，且四捨五入。

備考 3：材料規格參考 ISO 9226。

備考 4：鋁試片可能發生均勻及局部腐蝕，最大的孔蝕深度或孔蝕數較能反映其可能之危害，孔蝕和最後應用有關，但本表僅以均勻腐蝕速率表示。由於鋁鈍化作用減緩腐蝕，第 1 年曝露試驗無法用來評估均勻腐蝕和局部腐蝕。

備考 5：腐蝕速率超過 C5 極限時，表示腐蝕性非常嚴重。CX 腐蝕性級別與海洋環境或海洋工業複合環境有關(參照 CNS 13401 附錄 C)。

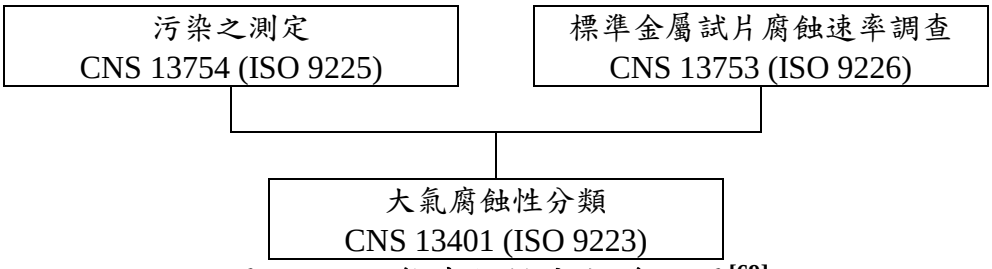


圖 3.15 大氣腐蝕性分類流程圖[69]

(3) CNS 16238 金屬及合金之腐蝕－大氣腐蝕性－腐蝕性級別的指引值(對應 ISO 9224)[70]

該標準與 CNS 13401 結合使用，規定金屬及合金曝露於自然戶外大氣中超過 1 年的腐蝕指引值，可用於標準結構材料的工程計算，規範各標準金屬級別的技術內涵。工程應用上腐蝕性級別定義的平均腐蝕速率區間可使用做為較普遍的腐蝕指引值，各類金屬在大氣中各分類腐蝕性級別的腐蝕速率如表 3-52。

標準中的腐蝕指引值可用於根據第一年曝露於室外大氣中的腐蝕量值測來預測長期曝露中的腐蝕程度。使用標準中的方法獲得的腐蝕估計，可用於預測金屬構件的使用壽命，在某些情況下，還可用於預測曝露於 CNS 13401 涵蓋的室外大氣中金屬鍍層的使用壽命。腐蝕侵蝕結果也可用於預測金屬構件的使用壽命，決定是否需採取保護措施(例：塗層)來實現所需的產品壽命。

表 3-52 碳鋼、鋅和銅在大氣中各分類腐蝕性級別的腐蝕速率[70]

金屬	第一個 10 年內的平均腐蝕速率(r_{av}) (單位:μm/ yr)					
	C1	C2	C3	C4	C5	CX
碳鋼	$r_{av} \leq 0.4$	$0.4 < r_{av} \leq 8.3$	$8.3 < r_{av} \leq 17$	$17 < r_{av} \leq 27$	$27 < r_{av} \leq 67$	$67 < r_{av} \leq 233$
鋅	$r_{av} \leq 0.07$	$0.07 < r_{av} \leq 0.5$	$0.5 < r_{av} \leq 1.4$	$1.4 < r_{av} \leq 2.7$	$2.7 < r_{av} \leq 5.5$	$5.5 < r_{av} \leq 16$
銅	$r_{av} \leq 0.05$	$0.05 < r_{av} \leq 0.3$	$0.3 < r_{av} \leq 0.6$	$0.6 < r_{av} \leq 1.3$	$1.3 < r_{av} \leq 2.6$	$2.6 < r_{av} \leq 4.6$
金屬	第一個 30 年內的穩態腐蝕速率(r_{lin}) (單位:μm/ yr)					
	C1	C2	C3	C4	C5	CX
碳鋼	$r_{lin} \leq 0.3$	$0.3 < r_{lin} \leq 4.9$	$4.9 < r_{lin} \leq 10$	$10 < r_{lin} \leq 16$	$16 < r_{lin} \leq 39$	$39 < r_{lin} \leq 138$
鋅	$r_{lin} \leq 0.05$	$0.05 < r_{lin} \leq 0.4$	$0.4 < r_{lin} \leq 1.1$	$1.1 < r_{lin} \leq 2.2$	$2.2 < r_{lin} \leq 4.4$	$4.4 < r_{lin} \leq 13$
銅	$r_{lin} \leq 0.03$	$0.03 < r_{lin} \leq 0.2$	$0.2 < r_{lin} \leq 0.4$	$0.4 < r_{lin} \leq 0.9$	$0.9 < r_{lin} \leq 1.8$	$1.8 < r_{lin} \leq 3.2$

2. 油漆塗裝

(1)CNS 16174 油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護(ISO 12944) [71-79]

CNS 16174(對應 ISO 12944-1~9)共分為 9 部，主要內容為防蝕塗裝對鋼結構之防蝕與保護。

CNS 16174-1 將塗裝耐久性定義為 4 種等級(如表 3-53)，並提到，耐久性等級並非保證期限，耐久性是一項可協助業主設定維護計畫之技術考量(規劃參數)。保證期限為合約管理部分中法律條款之考量項目。保證期限通常短於耐久性等級。2 種時間期限之連結無任何規則；CNS 16174-5 提供 16174-2 定義之不同環境(CX 與級別 Im4 除外)、16174-4 規定之不同表面處理等級及 CNS 16174-1 預定耐久性等級的油漆系統選擇指引。

表 3-53 塗裝耐久性等級[71]

等級	年限
短期(L)	<7
中期(M)	7~15
長期(H)	15~25
超長期(VH)	>25

(2)鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊(第二版)[80]

鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊由中華民國鋼結構協會及中華民國防蝕工程學會於 99 年編訂完成，最新版為 113 年出版之第二版。有關鋼橋防蝕塗裝作業各階段對應之作業流程項目與防蝕塗裝手冊對應之章節，如表 3-54 至表 3-56。

表 3-54 作業流程項目與手冊內容對照表(1)[80]

作業階段		作業流程項目	手冊相關內容	備註
規劃階段	一.大氣腐蝕性分類與防蝕方法	通則	1.1	
		Yes 大氣腐蝕性分類 ← 調查後	1.2	
		NG 大氣腐蝕環境調查 (金屬試片製作或大氣污染測定)	1.3	
		鋼橋腐蝕型態	1.4	
		防蝕方法	1.5	
	二.鋼橋規劃及設計之防蝕考量	1.通則 2.防蝕考量因素 3.耐候鋼材之使用 4.鋼材之最小厚度 5.橋梁規劃之防蝕要點 6.橋梁結構之防蝕設計 7.檢修設施之設置	2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6.1~2.6.6 2.7	
塗裝系統設計階段	三.塗裝系統設計	通則	3.1	
		鋼材預塗	3.2	
		構件塗裝系統之塗層分類	3.3	
		構件塗裝系統之選擇： 1.外部塗裝系統 2.內部塗裝系統 3.鋼橋面板之塗裝系統 4.螺栓接合部之塗裝系統 5.工地現場銲接部塗裝系統 6.非裸鋼面塗裝系統	3.4 3.5.1~3.5.10 3.6.1~3.6.3 3.7 3.8.1~3.8.5 3.9.1~3.9.3 7.1~7.5.4	
		鋼構橋梁防蝕與塗裝的新技術	3.10	
		(續)		
施工準備階段	四.塗裝施工計畫	(接續) 1.通則	4.1	
		2.塗裝施工計畫書	4.2	
		3.塗料之儲存與搬運	4.3	
		NG 4.塗料檢驗	4.4	
		5.施工方法 6.施工準備： (1)施工機具或設備 (2)檢驗儀器或設備	4.5 4.6 4.6.1 4.6.2	
		NG 7.試噴塗作業 (僅針對新塗料/新系統/新工法)	3.10	
		8.塗裝作業之環安衛措施	4.7.1~4.7.3	

表 3-55 作業流程項目與手冊內容對照表(2)[80]

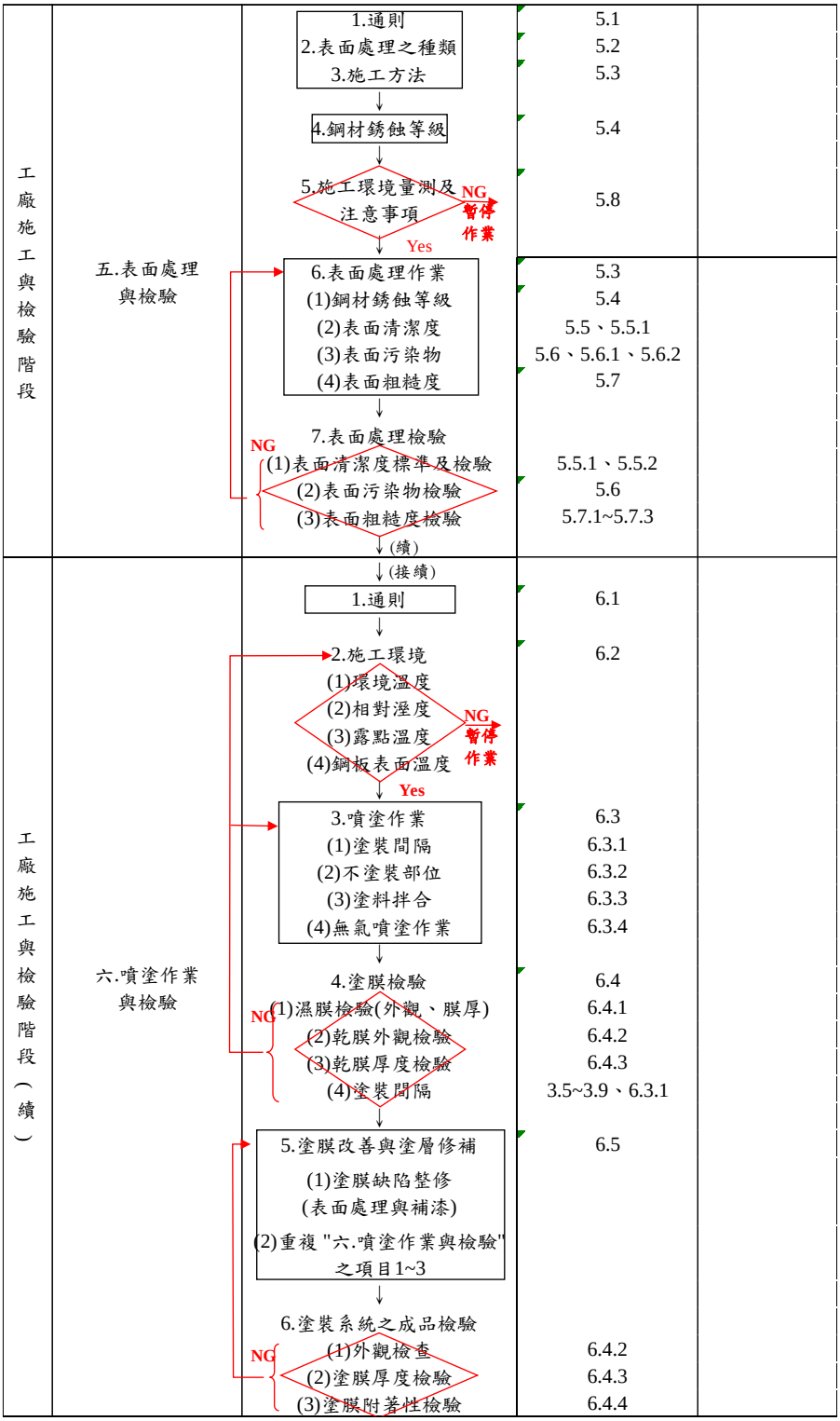


表 3-56 作業流程項目與手冊內容對照表(3)[80]

工地施工階段	構件安裝	構件儲存與運輸 ↓ 構件安裝/銲接		非本手冊範圍
	塗裝與檢驗	工地塗裝施工 ↓ NG ← 工地塗裝檢驗	3.8、3.9、6.5並重複工廠施工與檢驗階段中五~六之作業項目與內容 3.8、3.9、6.5重複工廠施工與檢驗階段中五~六之檢驗項目與內容	已包含於五、六之範圍內
	七.品質管制與驗收	驗收	6.4	

3. 熱浸鍍鋅

(1) CNS 9 鋅錠 (對應 ISO 752) [81]

鋅錠之種類與化學成分如表 3-57，買方驗收鋅錠時可進行外觀檢查及分析試驗，每 2.5 公噸及其餘數為一組進行驗收。外觀檢查若發現表面有雜質污斑或混雜其他種類貨品，賣方需剔除並重新提交驗收。

表 3-57 鋅錠種類及化學成分[81]

鋅錠種類	Zn	Pb	Cd	Fe	Sn	Cu	Al	雜質總量
一號	99.9995 以上	0.003 以下	0.003 以下	0.002 以下	0.001 以下	0.001 以下	0.005 以下	0.0050 以下
二號	99.9990 以上(1)	0.003 以下	0.003 以下	0.003 以下	0.001 以下	0.002 以下	0.005 以下	0.010 以下
三號	99.95 以上	0.03 以下	0.02 以下	0.02 以下	0.001 以下	0.002 以下	0.005 以下	0.05 以下
四號	99. 5 以上	0.45 以下	0.15 以下	0.05 以下	(2)	-	0.010 以下(3)	0.5 以下
五號	98.5 以上	1.4 以下	0.20 以下	0.05 以下	(2)	-	0.02 以下(3)	1.5 以下

備考 1：防蝕用鋅錠須為 Fe 含量 0.001%以下之一號鋅錠。
備考 2：成分判定時，對表 1 內所示之數值最末位數以下之值，得以 CNS 2925 修整法整理。
註 1：若 Zn 含量 99.990%之合金不用於壓鑄時，Pb 含量為 0.005%以下。
註 2：輥軋用料時，Sn 含量為 0.003%以下。
註 3：輥軋用料時，Al 含量為 0.005%以下。

(2) CNS 1247 熱浸鍍鋅檢驗法 (對應 JIS H0401)[82]

鋼鐵及鋼鐵加工製品之熱浸鍍鋅層檢驗法，依照 CNS 1247 熱浸鍍鋅檢驗法進行相關試驗，熱浸鍍鋅層檢驗法之分類與對應之 CNS 1247 章節如表 3-58，記錄項目如表 3-59。

表 3-58 熱浸鍍鋅層檢驗法之分類與對應之 CNS 1247 章節[82]

鋼鐵及鋼鐵製品分類	檢驗法						
	鍍鋅層附著量檢驗			鍍鋅層均勻性檢驗	鍍鋅層附著性檢驗		性質檢驗
	直接法	間接法	膜厚法	硫酸銅試驗	目視法	鎚擊試驗	耐鹼性試驗
管類	5.1	5.2	5.3	6	7.1	-	8[(a)]
壓軋鋼料類	5.1	5.2	5.3	6	7.1	7.2	-
加工品類	5.1	5.2	5.3	6	7.1	7.2	-
螺栓、螺帽類	5.1	5.2	5.3	6	7.1	7.2	-
鑄鍛造品類	5.1	5.2	5.3	6	7.1	7.2	-

表 3-59 檢驗法及記錄項目[82]

檢驗法	檢驗法						
	鍍鋅層附著量檢驗			鍍鋅層均勻性檢驗	鍍鋅層附著性檢驗		性質檢驗
	直接法	間接法	膜厚法	硫酸銅試驗	目視法	鎚擊試驗	耐鹼性試驗
記錄項目	鍍鋅層附著量 (g/m^2)			試驗次數	是否產生龜裂或剝離	是否產生連續凸起或剝離	反應時間(分鐘)

(3) CNS 4237 結件－熱浸鍍鋅被覆(對應 ISO 10684)[83]

標準適用於 M8 至 M64 鋼製粗螺紋結件以熱浸旋轉鍍鋅被覆，規範材料、製程、尺度及性能要求，涵蓋性質等級 10.9 以下的螺栓、螺釘、螺樁及等級 12 以下的螺帽，不適用於直徑小於 M8 或螺距小於 1.25mm 的螺紋結件。需注意 M8 及 M10 螺栓、螺釘的縮小螺紋及螺帽的加大攻螺紋，其拉伸負載及保證負載低於 CNS 4028 及 CNS 3934。

CNS 4237 主要規範螺紋鋼製結件的熱浸鍍鋅，亦適用於墊圈等無螺紋鋼製零件。附著性測試使用堅硬刀尖以壓力切割或撬開

鍍鋅被覆，若被覆呈層狀或片狀剝落曝露基材則附著性不足，但邊緣或角落不做為測試點，移除小顆粒不構成不合格。螺栓、螺釘與螺帽組裝強度因螺紋修改(依 CNS 15564-4 或 CNS 15564-5)可能降低。為達 6g/6H 螺紋公差全組裝強度，建議：螺栓及螺釘加工至 6az 公差(CNS 15564-4)，不超過 CNS 3934 最小拉伸強度，性質等級 8.8 螺栓避免氫脆化不超最大硬度；螺帽加工至 6AZ 公差(CNS 15564-5)，可配合高一級性質等級螺帽或以 2 型螺帽高度替代 1 型；直徑大於 M10 的 6AX 公差螺帽需更高性質等級螺帽。

(4) CNS 8503 熱浸鍍鋅作業方法[84]

適用於鋼鐵產品為防蝕而在其表面施以熱浸鍍鋅之作業(但不適用連續式鍍鋅鋼片及鍍鋅鋼線)，規範熱浸鍍鋅工法，包括底材處理(開孔)、前處理、浸鍍與後處理與不良品之處裡(CNS 10007)，對於橋梁用鋼構件，可做為長期耐蝕性防護的基本工法依據。以方形管狀桁架構造物為例，其圖例與開孔面積和占截面積之百分比分別如圖 3.16 與表 3-60。垂直及傾斜管的連接部分開孔方式如小圖 A、B 所示，管兩端於管側各開兩個孔，彼此相距 180°(如 C 與 D 或 E 與 F)，兩孔大小宜相同，單端開孔面積總和需達截面積 30%以上，水平管端板則以兩端內徑全開孔為理想狀態。

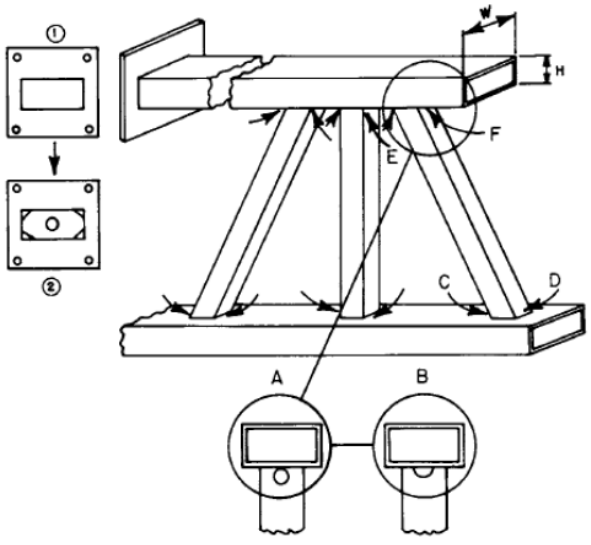


圖 3.16 方形管狀桁架構造物圖例[84]

表 3-60 方形管狀桁架構造物開孔面積和占截面積之百分比[84]

水平管尺寸 H+W (mm)	開孔面積和占截面積之百分比(%)
(H+W)≧600	≧25
400≦(H+W)＜600	≧30
200≦(H+W)＜400	≧40
(H+W)＜200	100

熱浸鍍鋅時底材與熔融鋅液形成鋅鐵合金層(如γ層、δ層、ζ層)，提出鍍鋅槽時熔融鋅液在合金層表面固化形成 η 層(圖 3.17)。底材中矽(Si)和磷(P)成分對鍍鋅品質影響顯著，當 Si 含量在 0.05%~0.12%或>0.24%或 Si%+2.5×P%在 0.10%~0.20%時，鐵鋅合金反應活躍，鍍鋅層增厚(見圖 3.18、圖 3.19)，可能產生燒灰現象(暗灰色、斑駁外觀)，宜控制 Si%+2.5×P%在 0.09%以下。燒灰現象使ζ層增加、η層減少，鍍鋅層脆性較高、附著性較差，曝露大氣可能出現紅色斑點但與底材腐蝕無關。鍍鋅層主要提升耐腐蝕性而非美觀，正常或加速成長的合金層耐腐蝕性無明顯差異。

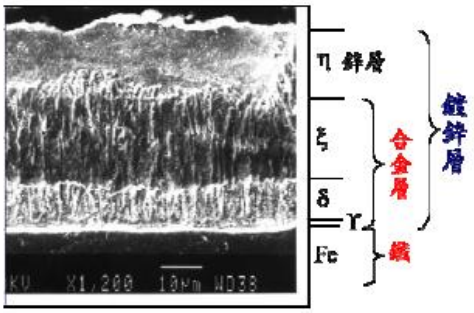


圖 3.17 熱浸鍍鋅層橫截面之金相組織圖例[84]

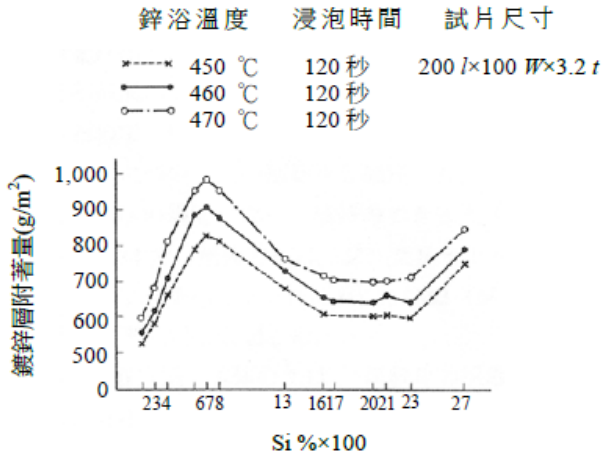


圖 3.18 鍍鋅層附著量與 Si 含量之關係圖例[84]

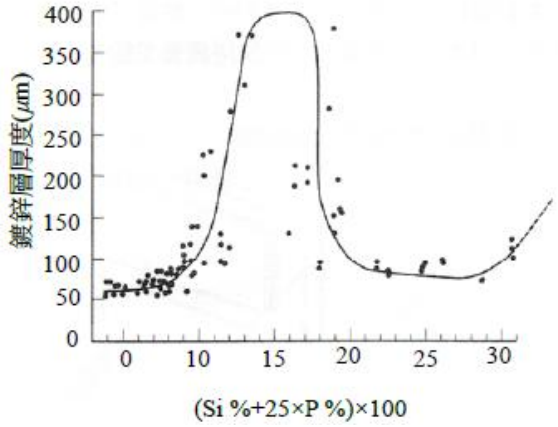


圖 3.19 鍍鋅層厚度與(Si %+2.5×P %)量之關係圖例[84]

鍍鋅鋼鐵置入混凝土前應經鈍化處理，鈍化處理可採用下列3種方法之一。

①在大氣中自然曝露數星期。

②鍍鋅後進行表面鈍化膜處理。

③在混凝土中添加符合環保規範之腐蝕抑制劑。

若無鈍化膜在鍍鋅層的表面或混凝土中無鉻酸鹽存在，則鋅金屬與混凝土水溶液有產生反應的傾向，釋放出少量的氫氣泡。當混凝土層較薄而鍍鋅鋼鐵與混凝土接觸面積大時，則逸出之氫氣泡可能導致混凝土表面粗糙。

(5) CNS 10007 鋼鐵之熱浸鍍鋅(對應 JIS H8641)[85]

CNS 10007 標準適用於鋼鐵及鋼鐵加工產品(底材)為防蝕目的施以熱浸鍍鋅的有效面，但不適用於連續式鍍鋅鋼板、鐵線及鋼線，有效面由買賣雙方協議定義。鍍鋅槽使用符合 CNS 9 五號鋅或以上品質的鋅錠[81]，鋅液純度保持 97.5%以上，可添加金屬成分提升品質及作業性。鍍鋅表面需平整實用，無妨礙使用的裸點等缺陷，燒灰或白銹等外觀色澤不影響耐蝕性，不做為合格判定依據。

鍍鋅層附著量依 CNS 1247[82]，均勻性以硫酸銅試驗(表 3-61)判定，附著性需良好，無連續凸起或剝離。尖銳鋅垂滴需用研磨機或銼刀去除，裸點修補限總面積 0.5%以下、單一裸點不大於 5cm^2，超標者由雙方協議修補或重鍍。修補依 CNS 15257[86]，底材分為管類、壓軋鋼料、加工品、螺栓螺帽及鑄鍛造品五類，表面狀態、厚度、材質及構造需利於形成良好鍍鋅層，矽和磷含量需確認以確保品質一致。不適用於鍍鋅的底材(表 3-62)若處理可能產生裸點等缺陷，需與專業人士協議前處理，底材製作者須依表 3-63 進行鍍前處理

表 3-61 鍍鋅層附著量與硫酸銅試驗次數[85]

種類	符號	硫酸銅試驗次數	鍍鋅層附著量 g/m^2	全區平均鍍鋅膜厚 μm	局部鍍鋅膜厚 μm
1 類 A	HDZ A	4 次	-	28～42	-
1 類 B	HDZ B	5 次	-	35～49	-
2 類 35	HDZ 35	-	350 以上	49 以上	35 以上
2 類 40	HDZ 40	-	400 以上	56 以上	49 以上
2 類 45	HDZ 45	-	450 以上	63 以上	56 以上
2 類 50	HDZ 50	-	500 以上	69 以上	63 以上
2 類 55	HDZ 55	-	550 以上	76 以上	69 以上

備考 1：鍍鋅膜厚係指從鍍鋅表面到底材表面之膜厚值。
備考 2：1 類 A 及 B 之平均鍍鋅膜厚值係由硫酸銅試驗次數推算而得之最小鍍鋅膜厚範圍。
備考 3：平均鍍鋅膜厚係以鍍鋅層附著量除以鋅之密度 7.2 g/cm^2 而得。
備考 4：全區平均鍍鋅膜厚及局部鍍鋅膜厚之定義參照 ISO 1461。

表 3-62 底材應改善之缺陷[85]

分類	現象
表面狀態	1. 夾渣、深的輥輪傷痕等的材料缺陷、孔蝕，或嚴重的腐蝕。 2. 底材表面有銹、污染物、油脂或油漆附著物而經前處理之脫脂、酸洗後仍無法去除者。 3. 嚴重的紅銹、有異常氧化層等不平滑表面者。 4. 鑄件砂眼、縮孔、銲接凹坑等缺陷。
構造狀態	1. 作業中可能破損或變形者。 2. 噴砂時有死角者。 3. 具有封閉之中空體者。 4. 鋅液不易流入、流出之構造者。 5. 浸入鋅浴中， 部分空氣不易排出者。

表 3-63 鍍前處理方式[85]

底材或組合底材之狀態	處理方法
有重疊面接合面時	密接面要完全連續銲接。 參考：將重疊部分之油脂及水分去除。當兩重疊板面厚度不同，因板面受熱溫度不均，厚度較薄者會產生變形，故重疊面積宜控制在 200 mm×200 mm 以下。重疊面積若超過 200 mm×200 mm，在未重疊及全周銲接前，使兩板面完全密接排出滯留氣體，再實施板周邊之全周銲接，俟完成銲接後進行鍍鋅作業。
管類或圓棒類之周圍有捲撓之鋼板時	其表面之油脂在加工前應完全除去。
底材板厚差異很大的銲接組合構件者	避免極大板厚之差異。 參考：底材板厚差異大時，易發生附著量、外觀、翹曲等不良現象，宜與鍍鋅業者於設計階段協商因應對策。
有電弧銲接者	在酸洗前應以噴砂、刷光等方法完全去除銲接之殘渣。
鑄件與熱軋鋼材組合時	利用噴砂處理等方法將氧化物除去。 參考：因組合鋼材具不同化學成分及表面粗糙度，鍍鋅後各組件將呈現不同鍍鋅外觀。
含有管或部分有袋狀者	管之兩端或一端必須開通。 袋狀須於角落處開孔。
舊底材與新底材組合時	應避免很舊的底材與新底材組合。 參考：兩種底材同時以酸洗除銹時，會對新底材造成過度酸洗，對銹蝕嚴重舊底材亦無法於鍍鋅後產生光滑表面。
厚氧化物的底材有一部分需重新機械加工者	在加工前全部底材應先加以噴砂處理。
具螺帽及附有螺紋者	將螺帽及內螺紋加大尺寸攻牙或經熱浸鍍鋅後再攻牙(對於螺栓及外螺紋類則鍍鋅後再套合)。
有異種金屬組合者	應儘量避免。 參考：例如鋼材與銅或銅合金組合時，銅或銅合金在鍍鋅過程易溶解出來，尤其銲接部位會被溶解而脫落。若需要此類組合，可於鍍鋅後再組裝。
有可動部分者	底材具有可動部分者，應留有充分之間隔。
具有對品質影響之殘留應力者	以適當之熱處理消除殘留應力。 參考：有顯著殘餘應力之底材或調質鋼、高張力鋼、高強度螺栓類等，會因氫脆而產生龜裂、翹曲破損，可事先由買賣雙方協議。有顯著殘餘應力之底材，應於鍍鋅前採用適當之熱處理消除殘留應力。對於調質鋼、高張力鋼及高強度螺栓等，可於鍍鋅前以高壓噴砂等法除去氧化物。

(6) CNS 15257 熱浸鍍鋅層損傷及裸點修補

CNS 15257 標準適用於鋼鐵配件、鋼構及鋼鐵加工製品的熱浸鍍鋅鍍層損傷及裸點修補[86]，損傷可能由銲接、火焰切割、搬運或組裝撞擊引起，修補部位大小及方法由買賣雙方協議，需符合安全與健康法規。

修補材料需達原設計鍍層厚度，提供犧牲陽極及隔絕層保護功能，常用材料包括：鋅基銲料(鋅錫銅合金，液相線349℃~354℃)、鋅粉漆(鋅粉佔漆料 65%~69%或乾膜含鋅≥92%)及鋅熔射(熔融鋅線、鋅帶或鋅粉)。鋅基銲料修補需先以鋼刷、研磨或噴砂處理表面，清除銲渣及濺渣，預熱至 315℃~400℃，擦拭或撒布銲料均勻分佈，修補後以清水去除助熔劑，依 CNS 15200-1-7 測膜厚[87]。

鋅粉塗料施工前，須將修補部位之油脂、舊塗膜、腐蝕生成物等清理乾淨，保持乾燥。預估現場施工條件，包括浸泡水中環境，修補表面須噴砂至 ISO 8501-1 規定之 Sa2½ (非常徹底的噴砂除銹)等級，對於腐蝕較不嚴重部位,修補表面須噴砂至最少達 ISO 8501-1 規定之 St3(非常徹底的手工和動力工具除銹至表面潔淨)等級，若環境不允許噴砂或電動工具處理，修補表面須以手工具清理至 ISO 8501-1 規定之 St2(徹底的手工和動力工具除銹)等級，須確保修補層平滑，表面處理須擴展至未損傷之鍍層，表面處理方法及範圍由買賣雙方協議之，間隔足夠硬化時間，測膜厚同上。鋅熔射修補需清除雜質，噴砂至 Sa3 等級，確保表面平滑，立即熔射鋅至乾燥表面，熔射層需均勻無結塊或鬆散顆粒，膜厚由雙方協議，測量依 CNS 15200-1-7[87]。NACE、SSPC、ISO 及 BSI 表面處理標準比較如表 3-64，其中 NACE 為 National Association of Corrosion Engineers，於 2021 年與 SSPC(Steel Structures Painting Council)合併稱為 AMPP(Association for Materials Protection and Performance)。

表 3-64 NACE、SSPC、ISO 及 BSI 表面處理標準比較[86]

表面處理標準	NACE(1)	SSPC(2)	ISO 8501-1	BS 7079(3)
非噴砂潔淨(Nonabrasive blast cleaning)				
有機溶劑潔淨 (Solvent cleaning)	-	SSPC-SP-1	-	-
手工具潔淨 (Hand tool cleaning)	-	SSPC-SP-2	St 2(Through hand and power tool cleaning) or St 3(Very through hand and power tool cleaning)	St 2 or St 3
電動工具潔淨 (Power tool cleaning)	-	SSPC-SP-3	St 2 or St 3	St 2 or 3
電動工具潔淨至裸金屬面 (Power tool cleaning to bare metal)	-	SSPC-SP-11	-	-
火焰潔淨 (Flame cleaning)	-	SSPC-SP-4	F1	F1
酸洗 (Pickling)	-	SSPC-SP-8	-	-
噴砂潔淨(Abrasive blast cleaning)				
噴砂潔淨至新金屬面 (White metal)	NACE No. 1	SPC-SP-5	Sa 3 (Blast cleaning to visually clean steel)	Sa 3
噴砂潔淨接近新金屬面 (Near-white metal)	NACE No. 2	SPC-SP-10	Sa 2 ½ (Very thorough blast cleaning)	Sa 2 ½
噴砂潔淨(Commercial)	NACE No. 3	SPC-SP-6	Sa 2(Thorough blast cleaning)	Sa 2
拂掃(Brush-off)	NACE No. 4	SPC-SP-7	Sa 2(Thorough blast cleaning)	Sa 1
濕式噴砂 (Water blasting)	NACE No. 5	SPC-SP-12	-	-

備考：本表僅供比較參考，各種標準間並非完全相等，但 BS7079 與 ISO 8501-1 相等。

註 1：NACE 為美國防蝕工程師協會(National Association of Corrosion Engineers)之標準。

註 2：SSPC 為美國防護塗料協會(The Society for Protective Coatings)之標準。

註 3：BS 為英國標準協會(British Standard Institution)之標準。

(7)鋼結構橋梁熱浸鍍鋅技術手冊

中華民國熱浸鍍鋅協會發布之手冊[88]，設計要點節錄如下：

①鋼材表面應要減少與水分接觸之機會，尤應要避免雨水聚集與滯留之可能。

②構材內部應要儘量阻絕腐蝕因子入侵與停留。

③與混凝土構造接合之部位，應防範混凝土結構可能產生龜裂與滲水情形。

④橋梁各部位之構造方式與附屬設施之設置方法應避免水分、濕氣、鹽份、沙土等之可能停留與堆積。

⑤採用熱浸鍍鋅加塗裝防蝕時，水分等腐蝕因子較可能滯留部位，應酌量增加塗層厚度或採用適當塗料。

⑥鋼材邊角應避免銳緣，以防範鍍鋅層厚度不均勻，而降低保護能力，另外，有銳緣之螺栓應注意其設置方式，避免銳緣設在較易腐蝕之一邊。

4. CNS 7797 鋅、鋁及其合金之熔射 (對應 ISO 2063)

CNS 7797[89]適用以鐵、鋼防蝕為目的而施作鋅、鋁及其合金之熔射層，但不適用於舊有熔射層之維護，規範內容包括熔射金屬層之塗層分類、製造規定、膜厚以及試驗方法等，熔射材料規定如表 3-65、最小塗層厚度如表 3-66。

然而，現行 CNS 7797 之最小塗層厚度建議(表 3-66)為引用 2005 年版之 ISO 2063 規範，實務應用上可參考最新之 2019 年版 ISO 2063 規範(詳見表 3-74)。

表 3-65 熔射材料[89]

熔射材料	規定
鋅	CNS9 規定之 2 號鋅錠(純度 99.990%以上)
鋁	CNS8 規定之第 4 種鋁錠(純度 99.5%以上)
鋅鋁合金	鋅含量在 84%~86%之間;鋁含量在 14%~16%之間的合金
鋁鎂合金	CNS 3667 規定合金編號 5056 之鋁合金成分

表 3-66 不同環境建議之熔射塗層最小塗層厚度[89](μm)

環境	ISO 12944-2 環境分類	鋅		鋁		Al-5%Mg		Zn-15% Al	
		未塗裝	塗裝	未塗裝	塗裝	未塗裝	塗裝	未塗裝	塗裝
鹽水	$1m^2$	N.R.(1)	100	200	150	250(2)	200(2)	N.R.(1)	100
淡水	$1m^3$	200	100	200	150	150	100	150	100
都市地帶	C2 及 C3	100	50	150	100	150	100	100	50
工業地帶	C4 及 C5-I	N.R.(1)	100	200	100	200	100	150	100
大氣海洋環境	C5-M	150	100	200	100	250(2)	200(2)	150	100
乾燥室內環境	C1	50	50	100	100	100	100	50	50

註 1：N.R.:不建議。

註 2：適用於海上或海岸邊用之製品。

5. CNS 4269 銲接結構用耐候性熱軋鋼料

CNS 4269[90]規定之耐候性熱軋鋼料定之耐候性熱軋鋼料，為在大氣中具耐腐蝕性質者，相關規定如表 3-67 至表 3-69。

表 3-67 耐候鋼種類及適用厚度[90]

種類符號	鋼料	適用厚度(mm)
SMA400AW	鋼板、鋼帶、型鋼及扁鋼	200 以下
SMA400AP		
SMA400BW	鋼板、鋼帶、型鋼及扁鋼	200 以下
SMA400BP		
SMA400CW	鋼板、鋼帶及型鋼	100 以下
SMA400CP		
SMA490AW	鋼板、鋼帶、型鋼及扁鋼	200 以下
SMA490AP		
SMA490BW	鋼板、鋼帶、型鋼及扁鋼	200 以下
SMA490BP		
SMA490CW	鋼板、鋼帶及型鋼	100 以下
SMA490CP		
SMA570W	鋼板、鋼帶及型鋼	100 以下
SMA570P		

備考：符號 W 代表通常以裸露狀或經安定化處理；P 代表通常經塗裝後使用

表 3-68 碳當量規定[90]

種類符號		SMA490AW SMA490BW SMA490CW	SMA490AP SMA490BP SMA490CP
適用厚度	50mm 以下	0.41%以下	0.40%以下
	超過 50mm 100mm 以下	0.43%以下	0.42%以下

備考：厚度超過 100mm 之鋼板其碳當量由買賣雙方協議之

表 3-69 銲接冷裂敏感指數規定[90]

種類符號		SMA490AW SMA490BW SMA490CW	SMA490AP SMA490BP SMA490CP
適用厚度	50mm 以下	0.24%以下	0.24%以下
	超過 50mm 100mm 以下	0.26%以下	0.26%以下

備考：厚度超過 100mm 之鋼板其銲接冷裂敏感指數由買賣雙方協議之

3.2.2 國外防蝕設計規範與手冊

1. 防蝕設計

(1) ISO 9223:2012

ISO 9223:2012 — Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation[69]以污染物濃度、溫濕度與濕潤時間評估大氣腐蝕性，給出 C1–C5、CX 等級與測定/估算方法，做為鋼橋防蝕設計的環境分級與壽命預估依據，後續塗裝或金屬層標準多以此選定設計等級，且 ISO 9223 在第 7 節指出，一年之腐蝕試驗數據不能以簡單之外插方式來預測其長期之腐蝕行為。

(2) ISO 9224:2012

ISO 9224:2012 — Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Guiding values for the corrosivity categories[91]提供各等級年腐蝕速率/厚度損失的指引值與時間函數，供鋼構件在目標壽命內選擇塗層厚度與維護週期。ISO 9224 指出標準中的腐蝕指引值可用於根據第一年曝露於室外大氣中的腐蝕量值測來預測長期曝露中的腐蝕程度。使用標準中的方法獲得的腐蝕估計，可用於預測金屬構件的使用壽命，在某些情況下，還可用於預測曝露於 CNS 13401 涵蓋的室外大氣中金屬鍍層的使用壽命。腐蝕侵蝕結果也可用於預測金屬構件的使用壽命，決定是否需採取保護措施(例：塗層)來實現所需的產品壽命。

(3) 日本道路協會鋼道路橋防蝕便覽

日本道路協會發布之鋼道路橋防蝕便覽[92]，共有五篇，各篇內容皆包含防蝕設計、施工、維護等內容。防蝕設計需貫穿規劃、設計與施工各階段，並在各階段進行適當考量，防蝕方法須與周邊環境協調、耐久性及生命週期成本密切相關，部分防蝕方法需從設計初期階段考慮構件形狀、尺寸或接頭型式，因此，建議在橋梁型式選定階段即選擇防蝕方法及其規格。

即便在橋梁型式選定階段確定防蝕方法與規格，隨後設計與施工階段的深入考量可能揭示初始選定方法難以確保良好施工品質，部分情況下需對細部結構或防蝕規格進行修正或調整。故橋梁型式選定後需持續在設計與施工各階段檢討防蝕方法、規格及細部結構，進行必要修正，以確保達到所需防蝕性能。此外，需預設供用期間內進行防蝕方法的檢查與補修等維護管理並將其納入維護管理計畫。腐蝕需特別注意的環境與部位的防蝕方法劣化案例，以及防蝕方法選定時的審查項目，設計流程如圖 3.20。

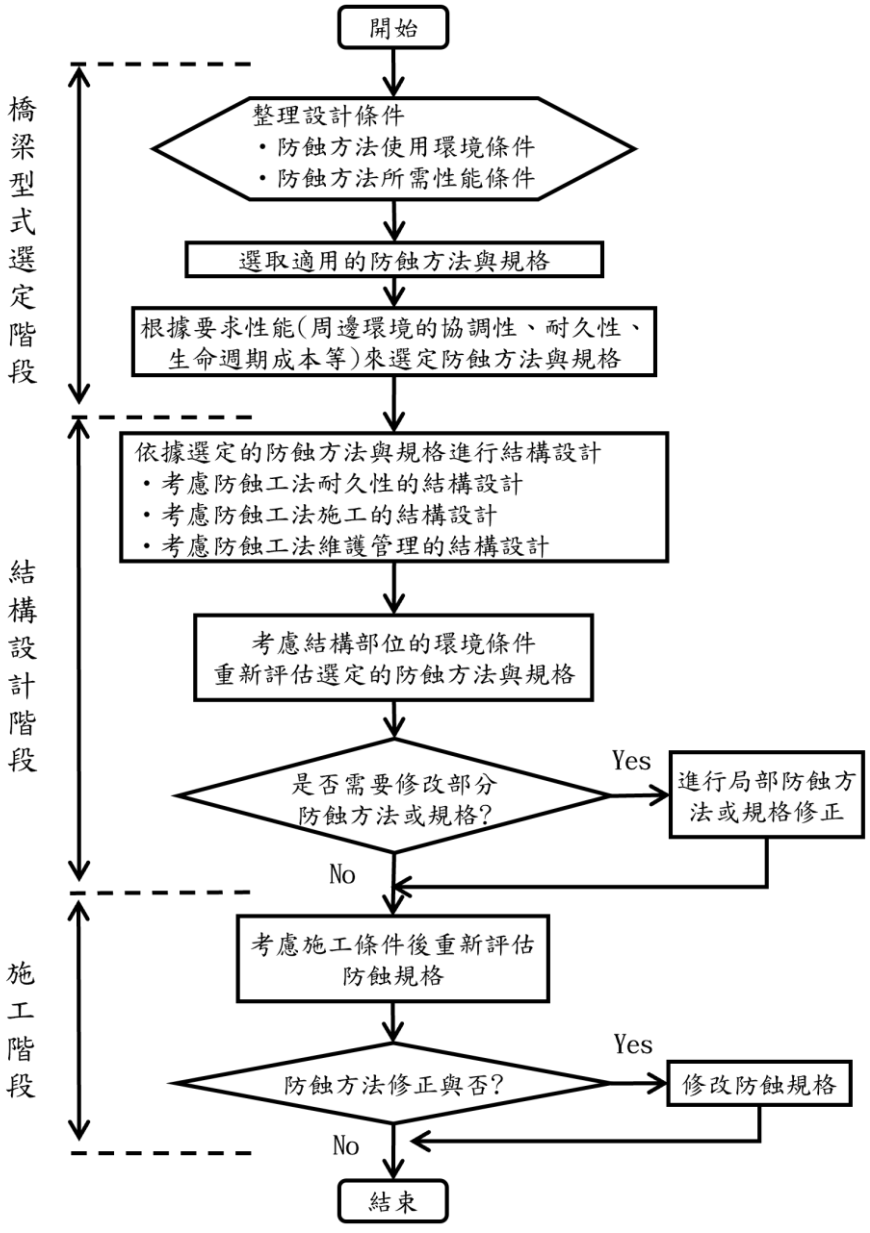


圖 3.20 防蝕設計流程[92]

防蝕性能受施工品質影響，施工後發現品質不足補救困難或補救大規模經濟不利，為避免返工，施工時需採取充分品質確保措施。例如，施工條件影響品質確保程度差異大時，宜改用易確保品質的防蝕規格或優化施工流程改善條件。塗裝案例，製作工廠至架設現場輸運或保管中塗膜附著飛來鹽份或塵埃未徹底移除，現場塗裝易早期剝離，重防蝕塗裝系統建議全工廠塗裝至面漆，確保品質管理，其注意事項如表 3-70。

表 3-70 品質確保應注意的施工條件示例[92]

	工廠施工案例	現場施工案例
施工場所	1. 溫度、濕度、飛來鹽影響等環境條件 2. 養護設備等 3. 構件、材料(塗料、稀釋劑)保管條件	1. 溫度、濕度、飛來鹽影響等環境條件 2. 養護設備、安全設備等 3. 構件、材料(塗料、稀釋劑)保管條件 4. 對周邊地區影響(噪音、粉塵等) 5. 沾染銹、飛砂、油等其他作業影響
設備環境	1. 加工、製作設備 2. 噴砂設備等施工設備能力與規格 3. 構件保管、移動、進出條件(設備能力與規格)	1. 構件保管、移動、輸運條件(設備能力與規格、路線) 2. 噴砂設備等施工設備能力與規格 - 對周邊地區影響之設備條件 - 廢棄物處理條件 3. 燃油電力、照明等設備
作業環境	1. 臨時設備、安全設備條件 2. 其他工種或設備干涉	臨時設備、安全設備條件
構件條件	1. 作業空間(姿勢、鷹架等) 2. 細部結構施工性(狹窄部、設備適用性與作業便利性)	1. 作業空間(姿勢、鷹架等) 2. 細部結構施工性(狹窄部、設備適用性與作業便利性)
檢查條件	1. 檢查設備能力與規格 2. 檢查方法適用範圍	1. 檢查設備能力與規格 2. 檢查方法適用範圍
其他	補修相關施工注意事項依上所述	補修相關施工注意事項依上所述

防蝕性能、外觀及耐久性在很大程度上取決於施工品質，進行防蝕施工時，應事先編製施工計畫書，確認施工條件與作業內容，針對這些條件制定管理項目及管理標準，確保獲得規定施工品質。施工中需按照施工計畫確實執行施工條件確認、各種檢查等施工管理並保留記錄，確認施工適當進行且達到規定品質。編製施工計畫及實施施工管理需考慮工期與安全。

輸運、架設等過程中，需注意避免損傷防蝕或影響防蝕機制。然而，施工中防蝕損傷或鹽份等有害物質附著在一定程度上難以避免。若發生此類情況，應立即補修，以確保達到規定耐久性。故編製施工計畫時，需審查預期施工中可能發生的損傷及鹽份等有害物質附著的應對方法。一般而言施工計畫書應包含表 3-71 之事項，施工計畫書係指在製作、輸運、保管、架設等橋梁施工各階段前，預先確定其要領與施工管理方法並記載於書類中的總稱。表中所示記載事項僅為代表性示例，不必完全涵蓋或限制於此，應參考該表，根據個別施工條件，確保良好施工品質，納入防蝕方法、防蝕規格、結構物形狀、施工時機、製作、輸運、保管、架設方法及其他工種協調等必要事項，製作成符合該工程與橋梁條件的計畫書。

表 3-71 施工計畫書記載事項示例[92]

工事概要	1. 主體、施工工期、線路名稱、施工地點、位置圖、總圖、施工細節應遵守的標準及規範 2. 流程圖
流程圖	工作流程、檢驗流程等
現場組織	1. 現場組織圖 2. 工人名單(工作年資、取得的資格等)
使用材料	產品名稱、標準、顏色、製造公司名稱(若使用專用工廠則為施工公司名稱)、使用量等。
使用機器	名稱、標準、形狀、性能、數量
安全措施	1. 現場安全管理組織、緊急通訊系統圖、火災、地震對策 2. 安全會議、安全巡邏等
交通措施	調節方法(圖示)
環境措施	週邊環境污染及噪音防治措施
臨時設備方案	現場辦公室、倉庫位置圖、結構圖、電話號碼等。
施工方法	1. 一般事項：施工順序、天氣條件、晝夜區別 2. 防蝕施工 3. 鷹架：鷹架結構、安裝方法 4. 採光、通風：採光、通風方式
施工管理	1. 流程管理：日報(週、季、月)報告、進度管理圖 2. 品質控制 3. 照片管理：製程照片、工作照片
管理設備	溫度計、濕度計、風速計、表面溫度計、氯離子檢測儀等

2. ISO 12944 1-9

ISO 12944— Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems 共有 9 部分[93-101]，規範鋼結構塗裝防蝕的環境分級、耐久等級、設計細節、表面處理與性能試驗；第 5 部分為系統選擇與最小乾膜厚度[96]，第 9 部分為加速試驗與驗證[101]，廣用於鋼橋塗裝設計，可參考國內規範 CNS 16174 1-9[71-79]。

3. 熱浸鍍鋅

(1) ISO 752：2004

ISO 752：2004 [102]為熱浸鍍鋅與鋅鋁熔射的原料品質基準；在鋼橋防蝕中，間接影響鍍層純度、附著性與長期耐蝕表現。

(2) ISO 1460：2020

ISO 1460：2020[103]以化學剝離與稱重法測定鍍鋅層單位面積質量並換算厚度，用於工地或廠內對鋼橋鍍鋅件抽驗與品質確認。

(3) ISO 10684：2004

ISO 10684：2004 規範螺栓、螺帽等緊固件旋浸熱浸鍍鋅之材料、製程、尺寸與性能要求(典型適用 M8–M64)[104]；確保鋼橋連接用件的鍍層厚度、配合與耐蝕性。

(4) ISO 1461：2022

ISO 1461：2022 為鋼構製品批量熱浸鍍鋅之通用規範[105]，包含外觀、最小鍍層厚度/質量、附著、修補與抽樣檢驗；鋼橋構件常以本標準做為鍍鋅驗收基準。

(5) ISO 14713：2017

ISO 14713 共分三部，第一部內容為防蝕設計與一般原則[106]、第二部為熱浸鍍鋅[107]、第三部為滲鋅[108]。ISO 14713-1 定義之耐久性類別[106]如表 3-72，鋅層系統在不同腐蝕性類別中的首次維護壽命如表 3-73 所示。

表 3-72 ISO 14713-1 耐久性類別[106]

極低(VL)	0 至 <2 年
低(L)	2 至 <5 年
中等(M)	5 至 <10 年
高(H)	10 至 <20 年
極高(VH)	≥20 年

表 3-73 選定鍍鋅層系統在不同腐蝕性類別中的首次維護壽命[106]

系統	參考標準	最小厚度(μm)	選定腐蝕性類別首次維護壽命最小/最大(年)及耐久性類別							
			C3		C4		C5		CX	
熱浸鍍鋅	ISO 1461	85	40 / >100	VH	20 / 40	VH	10 / 20	H	3 / 10	M
		140	67 / >100	VH	33 / 67	VH	17 / 33	VH	6 / 17	H
		200	95 / >100	VH	48 / 95	VH	24 / 48	VH	8 / 24	H
熱浸鍍鋅板	EN 10346	20	10 / 29	H	5 / 10	M	2 / 5	L	1 / 2	VL
		42	20 / 60	VH	10 / 20	H	5 / 10	M	2 / 5	L
熱浸鍍鋅管	EN 10240	55	26 / 79	VH	13 / 26	H	7 / 13	H	2 / 7	L
滲鋅	ISO 17668	10	5 / 14	M	2 / 5	L	1 / 2	VL	0 / 1	VL
		15	7 / 21	H	4 / 7	M	2 / 4	L	1 / 2	VL
		30	14 / 43	VH	7 / 14	H	4 / 7	M	2 / 4	L
		45	21 / 65	VH	11 / 25	H	5 / 11	M	3 / 6	L
		60	29 / 86	VH	14 / 29	VH	7 / 14	H	2 / 7	L
		75	36 / >100	VH	18 / 36	VH	9 / 18	H	3 / 9	M
電鍍板	ISO 2081	5	2 / 7	L	1 / 2	VL	1 / 1	VL	0 / 1	VL
		25	12 / 36	H	6 / 12	M	3 / 6	M	1 / 3	VL
機械鍍層	ISO 12683	8	4 / 11	M	2 / 4	L	1 / 2	VL	0 / 1	VL
		25	12 / 36	H	6 / 12	M	3 / 6	L	1 / 3	VL

4. 金屬熔射

(1) ISO 2063

第一部為防蝕系統設計考量與品質要求[109]，包含熔射層腐蝕與防護準則、防蝕系統與其規劃要求等；第二部為防蝕保護系統執行[110]，包括製造商要求與品質保證措施、及熔射層的操作和措施與熔射執行，ISO 2063-1 對於金屬層厚度值建議如表 3-74。

(2) JIS H 8300：2021

規範鋼鐵構造物表面以熔射方式施加鋅、鋁或其合金層之最小熔射層厚度。施工過程需確保基材清潔與粗糙度並控制熔射條

件以獲得均勻熔射層。完成後需進行外觀、厚度、附著力及封孔性檢測，並提供檢驗文件。該標準是日本工業標準，以 ISO 2063-1 和 ISO 2063-2 為基礎制定，並對該標準進行了技術修改。

5. Uncoated Weathering Steel Reference Guide

美國鋼結構協會(NSBA)對於無塗層耐候鋼(UWS)製訂之參考指南[111]，包含環境影響、結構設計、施工、檢驗、與維護之程序。不同環境下使用建議如表 3-75，維護清潔建議如表 3-76。

表 3-74 首次維護前使用壽命超過 20 年的建議熔射層厚度值(μm)[109]

腐蝕性類別符合 ISO 12944-2	金屬－熔射材料											
	Zn99.99			ZnAl15			Al99.5			AlMg5		
	as	as+s	as+s+oc	as	as+s	as+s+oc	as	as+s	as+s+oc	as	as+s	as+s+oc
C1 very low	80	80	50	80	80	50	NR	NR	-	NR	NR	-
C2 low	150	80	50	150	80	50	150	150	150	150	150	150
C3 medium	150	100	80	150	80	80	150	150	150	150	150	150
C4 high	NR	150	100(3)	200	100	100(3)	200	200	150	200	200	150
C5 very high	NR	NR	100(3)	200	150	100(3)	250	200	200	250	250	200
CX extreme	NR	NR	200(3)	250	150	100(3)	250	200	200	250	250	200
lm1	NR	NR	100	NR	NR	100	NR	NR	NR	NR	NR	NR
lm2	NR	NR	250(3)	NR	NR	150(3)	350	200	NR(2)	350	200	NR(2)
lm3	NR	NR	100	NR	NR	100	NR	NR	NR	NR	NR	NR
lm4(1)	NR	NR	250	NR	NR	150	350	300	NR	350	300	NR

備考：as = 熔射後未處理；s = 封孔處理；oc = 有機塗層；NR = 不推薦

註 1：與陽極保護結合使用

註 2：不建議覆蓋厚有機塗層，但可用薄層或彩色封層做為裝飾

註 3：有機塗層為環境適用者，為塗層系統的必要部分

表 3-75 不同環境下使用 UWS 之建議[111]

微觀環境	宏觀環境		
	所有其他環境	高濕環境	沿海
所有其他環境	UWS 是理想選擇	慎重使用 UWS	慎重使用 UWS
極度使用除冰鹽的公路交叉口	慎重使用 UWS	慎重使用 UWS	慎重使用 UWS
垂直淨空較低的跨水橋	如果植被茂密，則不建議使用 UWS	不建議使用 UWS	不建議使用 UWS
植被茂密或有遮蔽的場地	如果可以維護植被，並且對於水域交叉口，提供足夠的水面垂直淨空，則 UWS 是理想選擇	不建議使用 UWS	根據嚴重程度，不建議使用 UWS，或建議使用犧牲厚度的 UWS

表 3-76 清潔及清洗活動及頻率建議[111]

區域	組件/元件	清潔方式	描述	間隔(年)
橋面板	道路和路肩 伸縮縫和排水槽 排水格柵、排水孔和管道 人行道、隔離帶、路緣石 欄桿和護欄	掃掠/壓縮空氣吹掃	使用乾法清除並處理污垢、鹽和其他碎片。	1-2
		清洗/沖洗	掃除/吹掃後透過清洗去除殘留材料。沖洗所有甲板排水系統。	1-2
上層建築	軸承 道路上方梁和梁的底部翼緣 橋面接縫下方梁和大梁的端部距離接縫每側梁深度的 1 至 1.5 倍以內 端部隔膜和交叉框架 飛沫區的桁架構件；處於或低於道路水平面的桁架構件	壓縮空氣吹/刷/乾洗	使用乾法清除並處理污垢、鹽和其他碎片。	1-2
		洗	透過清洗去除並處理污垢、鹽和其他碎片。	2-4
子結構	橋台座、後牆和橋墩座 飛沫區的橋墩和橋台區域	壓縮空氣吹/刷/乾洗		1-2
		洗	透過清洗去除並處理污垢、鹽和其他碎片。	2-4
全部	如適用	植被移除	砍伐、移除和處置與結構接觸或接近接觸的植被	1-2

3.2.3 防蝕方法比較

有關塗料塗裝、熱浸鍍鋅、金屬熔射與耐候性鋼材等主要防蝕方法之概要防蝕原理、設計要點、工法特性、維護需求與限制情況等鋼橋典型防蝕方法列如表 3-77。

表 3-77 鋼橋典型防蝕方法[92]

防蝕方法	塗裝		耐候性鋼材	熱浸鍍鋅	金屬熔射
	一般塗裝	重防蝕塗裝			
防蝕原理	塗膜隔離環境	塗膜隔離環境及高鋅塗料防蝕	緻密銹層降低腐蝕速度	鍍鋅層隔離環境及採用鋅防蝕	熔射層隔離環境及採用鋅、鋁防蝕
劣化因子	紫外線、鹽分、水分(持續潮濕狀態)	紫外線、鹽分、水分(持續潮濕狀態)	鹽分、水分(持續潮濕狀態)	鹽分、水分(持續潮濕狀態)	鹽分、水分(持續潮濕狀態)
防蝕材料	塗料	塗料	添加降低腐蝕速度的合金元素	鋅	鋅、鋁、鋅鋁
施工方法	噴塗、刷塗、滾塗	噴塗、刷塗、滾塗	採用添加合金元素之鋼材	浸入鍍槽(鍍鋅工廠)	使用熱噴槍進行熔射
結構與施工限制	溫度、濕度等施工環境條件限制	溫度、濕度等施工環境條件限制	積水、濕氣對策	積水、濕氣對策	熱噴槍操作限制
外觀 (色彩)	色彩 自由選擇	色彩 自由選擇	限定 (茶褐色)	限定 (灰白色)	限定 (霧面銀白)
維護管理	檢查銹蝕、塗膜消耗、變色；塗膜劣化時重新塗裝	檢查銹蝕、塗膜消耗、變色；塗膜劣化時重新塗裝	確認無異常銹形成，腐蝕進展時進行塗裝等防蝕	追蹤鋅層，鋅層消耗後進行塗裝等防蝕	對鋅、鋁等熔射層進行後續檢查。熔射層磨損後，透過金屬熔射或塗裝等進行防蝕
複合防蝕	-	-	與塗裝一起使用	與塗裝一起使用	與塗裝一起使用

第四章　不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議

鐵、公路橋梁一旦開始使用，即成為鐵、公路路網絡的一部分，需長期持續發揮功能，因此無論其功能暫時受損，或對周邊環境造成不良影響，均應避免。因此，鐵、公路橋梁的防蝕方法必須滿足以下的條件，以確保所需的防蝕功能。

1. 可靠的防蝕性能

混凝土的防蝕需採用防蝕原理與耐久性等防蝕性能明確的方法，本計畫從此觀點出發，涵蓋混凝土耐久性設計及附加保護措施，現行較為成熟的技術包括：混凝土表面處理、耐腐蝕鋼筋、腐蝕抑制劑、陰極保護；鋼橋的防蝕需採用防蝕原理與耐久性等防蝕性能明確的方法，本計畫從此觀點出發，涵蓋塗裝、耐候性鋼材、熱浸鍍鋅及金屬熔射等較為成熟的技術。

然而，即使防蝕方法本身的原理明確，實際橋梁因場址環境條件、結構及施工條件各異而無法統一。若未適當考慮這些因素，可能導致設計預期的防蝕性能無法發揮或耐久性顯著下降。因此，應用時需充分考量橋梁實際所處的環境條件與施工條件。若考慮採用國內尚無使用實績的防蝕方法，需確認其防蝕原理無問題，並預先驗證在適用條件下是否具備規定耐久性及施工性。特別是耐久性方面，應透過反映橋址環境與施工條件的曝露試驗或加速試驗，明確現地條件下的性能。雖嚴格反映現地條件進行耐久性驗證或推定可能有困難，但可透過與其他防蝕原理相同且耐久性明確的防蝕方法進行比較試驗，間接評估耐久性。比較試驗通常採用加速試驗，該試驗需基於防蝕原理，能評估實橋長期劣化情況。

2. 易於維護管理性

防蝕方法在施工中或開始使用後的環境條件，與設計階段的考量難以完全一致，塵埃堆積、結露、鹽分附著程度等可能比設計時

預期更嚴苛。通常防蝕方法的耐久性短於橋梁使用期間，故混凝土橋設計需預設使用期間內防蝕方法的檢測與維護管理問題納入考量。

因此，鐵、公路橋梁的防蝕方法應考慮未來維護管理，需有明確的劣化或損傷狀態判定方法，並具備部分或全面維修的可能性。此處部分或全面維修可能意指維修後的防蝕方法仍能獲得規定的防蝕功能與耐久性，而非必須採用與初始防蝕方法相同的修補方式。完工後應依相關規定辦理定期維護及檢查，若有腐蝕跡象產生，應進行原因分析與採取防蝕對策。且評估各種防蝕對策時更應考量橋梁維護與管理之所需，降低日後的維修成本，達到經濟化的目標。

3. 其他考量

(1) 橋梁之設置環境

鐵、公路橋梁依現行橋梁設計規範及施工規範進行設計與施工，鋼筋應不易產生腐蝕，若因設計考慮未周詳，施工不當，材料選用不良或橋梁位處高腐蝕潛勢環境等因素，則仍有腐蝕問題產生。因此，在工程規劃或設計階段應先就橋址地形及地勢、橋址水文及氣象、橋址腐蝕條件等進行調查評估，若有鋼筋會產生腐蝕之虞，則應提出防蝕對策與工法評估，需在橋梁選線與配置，橋梁構件斷面與型式，及排水等即加以考慮，特別是跨河或跨海橋梁，在橋址與線型的選擇上能減少跨越河川或海洋的長度，則可減少橋梁腐蝕機會。

(2) 各種相關防蝕技術及其耐久性

防蝕對策乃是藉由充分把握地形、水文、氣象以及距海岸線距離、海象等狀況，再根據這些條件進行適當的設計、選材及施工，且必須在經濟有效的原則下確保混凝土結構物之耐久性。

(3) 使用年限內整體費用之評估

對於橋梁建設初期之防蝕費用與使用後維護管理費用等，均為橋梁防蝕設計時所應加以考量，以此達到最經濟的設計目標。

4.1 混凝土橋

4.1.1 混凝土橋腐蝕機理

自然環境下，鋼筋若與水、氧氣接觸會發生電化學反應造成腐蝕，因此應避免與水接觸或給予鋼筋適當保護以達到防蝕目的。

1. 混凝土中鋼筋腐蝕

(1) 腐蝕機理

本節所稱之鋼筋腐蝕破壞是指在混凝土保護層覆蓋下之鋼筋的電化學反應(反應如圖 4.1)，其有別於一般的鋼結構電化學腐蝕而自成特性。在鋼筋腐蝕產物將混凝土保護層脹裂以前，環境侵蝕介質是通過混凝土保護層慢慢滲透侵入的。反之，任鋼筋腐蝕發展到使混凝土保護層脹裂後，侵蝕介質將沿著混凝土裂縫長驅直入，鋼筋腐蝕將迅猛發展，從而難以收拾，此為混凝土中鋼筋電化學腐蝕所特有的共通性。工程師應認識並掌握此共通性，按現行標準與關於鋼筋電化學腐蝕與保護的科學知識，加強混凝土結構耐久性設計以及施工以至使用全過程、各環節的技術管理，以達到妥善解決鋼筋腐蝕問題之目的。

具體混凝土結構中的鋼筋腐蝕破壞，視具體環境、結構、材料、成分、組織、使用條件的不同，各有不同的特點，有時還可能與其它劣化並發，如鹼質粒料反應、凍害、化學腐蝕、超載、溫度、應力裂縫、乾縮裂縫等，相互促進，因而必須從實際出發，針對不同機理，綜合辨證施治。

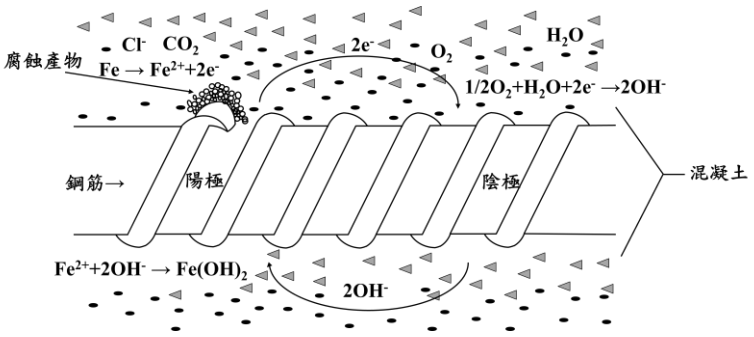


圖 4.1 鋼筋腐蝕的電化學反應[112]

混凝土中造成鋼筋腐蝕之機理為陽極、陰極反應，其形成的必要條件為水分、氧氣與氯離子，混凝土之高鹼性使鋼筋附近形成之鈍態氧化膜可保護鋼筋不致發生腐蝕。由於酸蝕或氯離子的破壞，再加上足夠之氧與水分存於鋼筋表面陽極附近，陽極反應開始進行而形成腐蝕電池，此時若有良好之電通路，鋼筋之腐蝕即開始進行。歸納造成混凝土中鋼筋腐蝕之必要條件如下：

①足夠水分之滲透

②足夠之氧

③足夠氯離子(鹽害)或酸蝕(混凝土中性化)破壞鋼筋之高鹼性鈍態氧化膜

④良好之電通路

然而對於品質良好之混凝土本身的保護系統，亦可達到阻抗鋼筋或鋼腱腐蝕劣化的效果，例如：

①混凝土若為高強度低透水性材料，將有效阻隔水分之滲透。

②品質較佳之混凝土中氣體與離子之擴散速率相當緩慢，且多經由微裂縫與毛細孔隙形成之交錯網路。

③混凝土本身高鹼性使鋼筋附近形成之鈍態氧化膜。

④低透水性之混凝土為不易導電之材料，且對於導電之阻抗隨養護齡期增加而上升。

因此在混凝土材料保護系統失效的情況下，鋼筋混凝土才有可能因腐蝕發生破壞，故鋼筋混凝土的腐蝕行為主要乃取決於使用材料之品質與外在環境腐蝕介質之多寡。

(2)劣化機制

鋼筋混凝土劣化過程大略可分為兩個階段：

①誘發期：在誘發期間，鋼筋表面尚未生銹但混凝土品質在改變中。當鋼筋表面的混凝土品質因中性化或氯離子侵入而使鋼筋產生了腐蝕，誘發期結束，而腐蝕期開始。

②腐蝕期：在腐蝕期中，鋼筋腐蝕速度決定鋼筋的殘餘有效截面積和腐蝕生成物的量，因此決定了混凝土結構物的殘餘壽命。在腐蝕期間，劣化現象可概分成三個階段，分別為：

A.鋼筋腐蝕到混凝土龜裂：鋼筋腐蝕生成物的體積遠比鐵金屬體積要大，可達 3~7 倍，因此會對混凝土產生張力，當腐蝕生成物累積到某一個程度時，混凝土表面會產生裂縫。

B.混凝土龜裂到剝落：混凝土出現裂縫後，空氣和水分更容易接近鋼筋而可促進鋼筋表面的腐蝕。由於所生成的鐵銹性質鬆脆而多孔，當腐蝕愈深入鋼筋及愈大面積的鋼筋發生腐蝕，鋼筋和混凝土之間的握裹力逐漸消失，最後混凝土剝落。

C.鋼筋混凝土結構物強度不足：鋼筋在腐蝕性高的混凝土中持續的腐蝕，其有效的截面積會因而逐漸縮減，又因握裹力的降低而可導致混凝土剝落、迸裂等現象。

2. 腐蝕劣化分類和型式

單純從材料面觀點探討鋼筋混凝土橋梁結構受損主因，可歸納為混凝土劣化與鋼筋腐蝕兩部分，而兩者又會交互影響，其中以鋼筋腐蝕為重要指標。當鋼筋腐蝕發展到使混凝土脹裂後，腐蝕介質更可長驅而入引致鋼筋腐蝕，此時不僅鋼筋因腐蝕而使斷面變小、拉力承受度變小，混凝土也因鋼筋銹蝕而脹裂導致更大裂縫甚而保護層剝落，致使構件整體承載力大幅滑落。

因此，提升混凝土品質以減少其劣化程度與機率，使外在腐蝕介質不易侵入以降低鋼筋腐蝕速率，從而控制與預防鋼筋腐蝕，此為延長鋼筋混凝土橋梁結構整體壽命之最直接手段，而控制混凝土中鋼筋腐蝕的重要因素又與混凝土劣化程度與大氣腐蝕介質濃度相關密切。環境因子相關的腐蝕劣化之機理、要因與指標如表 4-1。

表 4-1 鋼筋混凝土腐蝕劣化之機理、要因與指標

劣化機理	劣化要因	劣化指標
中性化	二氧化碳	・中性化深度 ・鋼筋腐蝕量
鹽害	氯離子	・氯離子濃度 ・鋼筋腐蝕量
凍害	凍結溶解作用	・凍害深度 ・鋼筋腐蝕量
化學的侵蝕	酸性物質 硫酸根離子	・劣化因子滲透深度 ・中性化深度 ・鋼筋腐蝕量
鹼質與粒料反應	反應性粒料	・膨脹量
橋面板疲勞	大型車通行量	・開裂量

另外，大氣腐蝕介質(水、氯鹽等)與混凝土中性化介質(二氧化碳、二氧化硫等)之含量也為影響鋼筋腐蝕之關鍵，腐蝕與中性化介質含量愈高腐蝕機率與速率也愈高，故而瞭解各種環境大氣中腐蝕介質之種類與含量，並對其於混凝土中滲透或擴散之速率實施相應之研究與試驗，最後回饋於鋼筋混凝土橋梁之耐久性設計，使設計者能根據構造物所處環境之外在腐蝕因子特性，推求混凝土之相應品質與保護層厚度所需之要求，以確保構造物之耐久性可達設計年限，甚而可應用於結構物生命週期之分析。

造成混凝土橋腐蝕之主要因素，分別為中性化、鹽害與硫酸鹽。中性化腐蝕係由於橋梁部份構件可能曝露在高濃度的二氧化碳下如橋護欄，橋墩等，致混凝土酸鹼值降低，鋼筋失去鈍態保護膜，致容易產生銹蝕；鹽害現象係由於海岸線附近的混凝土結構物因表面附著鹽分隨著時間滲入混凝土內部，造成混凝土內部鋼筋銹蝕膨脹，導致混凝土產生裂縫或剝離，從而加速鋼筋腐蝕。特別是預力鋼筋，因處於高張力狀態，若一旦發生腐蝕，其產生的影響程度更大；另外海水或土壤中高濃度的硫酸根離子易使混凝土劣化，導致鋼筋腐蝕。以下將根據中性化、鹽害與硫酸鹽造成腐蝕之機理進行說明。

3. 中性化導致之鈍化膜破壞

在都市或工業區，橋梁構件可能會曝露在高濃度二氧化碳，如橋梁護欄因汽車停滯時不斷排放廢氣於護欄附近，橋下停車場，地下停車空間汽車廢氣不易排散處等，致混凝土酸鹼值降低，鋼筋失去混凝土的鹼性鈍態保護膜，從而產生腐蝕。中性化腐蝕防治原則以降低混凝土之滲透性為主，可藉由降低水膠比、添加卜作嵐摻料、增加混凝土保護層厚度等方式達成。中性化引起的鋼筋腐蝕破壞，大多因混凝土品質低劣、混凝土水密性不佳或保護層不足所導致。

(1) 腐蝕機理

水泥與水拌合後開始發生水化反應，從而產生氫氧化鈣 $Ca(OH)_2$ 並很快達到飽和，使得混凝土呈鹼性(pH 值約等於 12.5)。混凝土硬固後亦具有很高的 pH 值，使得埋置之鋼筋於高鹼性環境中會產生鈍化作用，並阻止鋼筋在混凝土中產生銹蝕。然而，當混凝土在含有酸性氣體(CO_2、SO_2、HCl)的空氣中會發生中性化作用，其反應過程如下所示：

$$H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3 \quad \text{.....(4-1)}$$

$$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O \quad \text{.....(4-2)}$$

碳酸會與混凝土中的氫氧化鈣發生中和作用，導致混凝土的鹼性下降。鋼的鈍化膜在 pH 值小於 11.5 時便已不再穩定，當混凝土中性化後其 pH 值降到 9 以下時，鋼筋表面的鈍化膜由於失去保護而產生破壞，此時，若具備其他腐蝕條件將使得鋼筋產生銹蝕，因此，混凝土的中性化是評估鋼筋混凝土腐蝕損傷和耐久性的重要指標。鋼筋一般在中性化環境中的腐蝕反應如下所示：

$$Fe \xrightarrow{O_2} FeO \xrightarrow{H_2CO_3} FeCO_3 \xrightarrow{H_2O+O_2} Fe(OH)_3 \quad \text{.....(4-3)}$$

凡是能與 $Ca(OH)_2$ 進行中和反應的酸性氣體，如 SO_2、SO_3、H_2S 以至於氣相 HCl 等，均能進行上述中和反應，使混凝土鹼度降低，導致鋼筋去鈍化。這層混凝土表層中性化後，大氣中的 CO_2

繼續沿混凝土中未完全充水的毛細孔道向混凝土深處進行氣相擴散，更深入地進行中性化反應。當混凝土中性化深度達到鋼筋表面時，鋼筋鈍化膜遭到破壞，從而形成鐵銹色之 $Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O$、α-FeOOH、β-FeOOH 及 Fe_2O_3的混合物，鐵氫氧化物的體積大於其原始鋼材約 2 至 6 倍(詳見圖 4.2)，隨著腐蝕反應進行所造成的體積膨脹，會在混凝土內部產生應力，此應力足以導致混凝土保護層產生裂縫，甚至發生剝落。

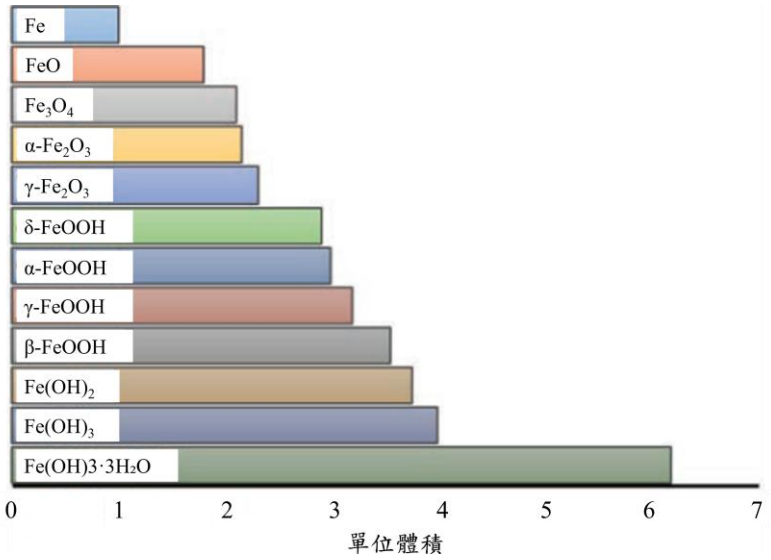


圖 4.2 鐵及其腐蝕產物之相對體積關係

(2) 腐蝕因素

①材料因素

A. 水膠比：水膠比大小決定混凝土的品質，水膠比越低滲透性越小，中性化作用深度也越小。無論是普通卜特蘭水泥混凝土或水硬性混合水泥混凝土，其中性化深度均隨水膠比的減少而降低。因此，水膠比不僅決定混凝土滲透性，亦會影響混凝土之中性化速度。

B. 水泥種類與用量：不同種類的水泥與不同摻料之使用將導致水化產物中的鹼性物質含量有所差異，從而直接影響混凝土中性化速度。依據研究數據，中性化深度與水泥用量成反比，其原因主要為水化物中鹼性物質含量所導致。即使是同一品

牌水泥，仍會因鹼性物質含量不同而使得混凝土抵抗中性化能力也有所差別。

C.摻劑：強塑劑能提升新拌混凝土之工作性，並減少孔隙的產生，使得混凝土的滲透性降低，減弱混凝土中性化的作用。

D.卜作嵐材料：卜作嵐反應會增加混凝土的緻密性，從而降低其滲透性，並進一步導致中性化程度降低。因此，卜作嵐摻料與氫氧化鈣結合雖會導致混凝土之 pH 值降低，但實際上有助於降低混凝土的中性化程度。

E.施工品質和養護條件：養護條件對混凝土中性化速度有很大的影響，早期養護不良之混凝土表層水分失去較快，使得混凝土滲透性增大，抗中性化能力降低。混凝土澆置和養護的影響，將導致同一等級混凝土的不同構件，甚至同一構件的不同部位之中性化速度有顯著差別。

F. 混凝土的強度：中性化深度隨混凝土強度的增高而下降。

G.混凝土的緻密度：混凝土是一多孔性材料，而其孔隙與孔隙之間的接連性會影響二氧化碳和水在混凝土中的擴散。若混凝土有類似蜂巢式的缺陷，二氧化碳可以直接深入混凝土，使得鋼筋表面中性化發生時間更快。

H.混凝土中的裂縫：裂縫的存在使二氧化碳和水更容易接近鋼筋附近之混凝土，鋼筋表面混凝土中性化發生的更快。

I. 保護層厚度：若混凝土沒有蜂巢式缺陷或裂縫，則鋼筋表面發生中性化的時間隨保護層厚度增加而延長。

②環境因素

A.大氣的相對濕度：當環境相對濕度較高時，才能使混凝土中性化反應充份進行，若環境相對濕度過高至混凝土接近飽水狀態，則 CO_2 的擴散速度反而緩慢，使中性化發展也很慢，當環境相對濕度較低(約在 55%以下)時，孔隙水不充分，CO_2 與水化產物不會產生化學作用，亦即中性化反應受到限制。

B.大氣的溫度：溫度對中性化的影響相當複雜，混凝土在炎熱氣

侯下的中性化速度比在溫和氣候下快，並與變化的幅度、頻率、結構幾何尺寸和形狀以及混凝土的孔隙率有關。

C.酸性介質的濃度：若大氣的 CO_2 含量越高則中性化越快，中性化速度與 CO_2 濃度的平方根為一近似線性關係。

D.外界風壓：由於空氣之擴散與一般擴散有所不同，當風突然產生時，由於壓力變化而滲入混凝土孔隙中，使得直接受風壓作用面的中性化深度大於間接受風壓作用面的中性化深度。

E.應力狀態：鋼筋混凝土橋梁結構中，不同結構部位承受不同的應力，在拉應力作用下，加速了混凝土微裂縫的擴張與延伸，以及微裂縫間連接貫通，增大混凝土的空隙縫，降低混凝土的抗滲性，以及微裂縫的抗中性化能力。由橋梁調查中發現，鋼筋銹蝕引起的混凝土崩裂都發生在拉力區，而壓力區多安然無恙，可能與前述因素有關。

4. 氯離子侵入導致之腐蝕

氯離子侵蝕是造成鋼筋混凝土腐蝕最主要因素之一，氯離子來源有水泥、摻料、拌合水、粒料或環境中之氯離子。其對鋼筋之影響由含水量與陰極反應所需之含氯量而定。

(1) 腐蝕機理

混凝土由於外界鹽分侵入或使用含鹽材料，使鋼筋表面氯離子含量超過臨界氯離子濃度時，鋼筋表面的鈍化膜便會遭破壞而產生腐蝕。鋼筋遇混凝土孔隙中之氧氣、水分及氯離子所產生的腐蝕反應如下所示：

$$2Fe+6Cl^- \rightarrow 2FeCl_3^- +4e^- \quad \text{.....(4-4)}$$

$$FeCl_3^- + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 3Cl^- \quad \text{.....(4-5)}$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad \text{.....(4-6)}$$

由其反應機構可見氯離子有催化鋼筋腐蝕之作用，同時腐蝕反應消耗 OH^-亦有使 pH 值降低的可能。此處之氯離子乃指游離

態氯離子，另一種型態則為固定態氯離子。游離態氯離子存於混凝土毛細孔中，遇水會溶解；固定態的則被水泥中的鋁酸三鈣(C_3A)固定住而不溶於水。當混凝土中性化後，固定態之氯離子將被釋放成為具侵蝕性之游離形態，若氯離子為混凝土硬固後才由外界滲透，則氯離子會以游離態存在。

鋼筋在含有氯離子的混凝土中，其腐蝕可能性和游離態氯離子及氫氧離子之比率有關(即 Cl^-與 OH^-)。其中 OH^-和混凝土中的水泥含量有關。研究資料顯示當 Cl^-與 OH^-比值大於值 0.6 時，鋼筋會開始腐蝕，一般環境下氯離子要超過水泥重的 0.2 到 0.4%，Cl^-/OH^-才會大於 0.6。

在此情形下的氯離子含量要相當大鋼筋才會生銹，因為大部分的氯離子會形成固定態的化合物，只有少部分氯離子是以游離態存在；當外界氯離子持續滲入，大多會以游離態存在，若游離態氯離子在鋼筋表面的濃度超過臨界值時，鋼筋即可能生銹[113]。而影響鋼筋表面游離態氯離子含量的因素說明如下。

(2) 腐蝕因素

①水泥成分：水泥的氯離子固定能力與 C_3A 有關，C_3A 量愈高氯離子固定力愈強。Type I 水泥 C_3A 含量約為 11.4％，而 Type V 水泥中 C_3A 含量不超過 5％。

②混凝土的成分：混凝土的成分中，水膠比和水泥種類決定氯離子在混凝土中的滲透率。水膠比較低，滲透率較低。飛灰及爐石粉的添加會降低滲透速度，亦會降低氯離子侵入速率。

③混凝土的緻密度：混凝土因空隙增加而產生之蜂巢式缺陷使氯離子的擴散距離相對減小，氯離子快速滲入將使鋼筋表面的氯離子含量快速增加。

④裂縫：裂縫的存在，增加氯離子的滲入速度。

⑤水膠比：水膠比的大小決定了混凝土的品質，水膠比越高造成混凝土的緻密性不佳，所以滲透性較大，因此水膠比的大小決定了水及氯離子的滲透性。

⑥外在環境：氯離子在混凝土中擴散必須要有水存在，而水在混凝土中的擴散則由一般擴散方式或由虹吸原理進行。當混凝土中的孔隙含有鹽分時，水會由虹吸原理而迅速擴散到混凝土中，從而使得氯離子擴散滲入到混凝土中。這種擴散方式最常在乾濕交替的環境中，例如在潮汐區發生。在漲潮時，海水滲入混凝土中，在退潮時，水的入侵會更加迅速。另外，如果混凝土含鹽量增加，由於滲透作用，使得混凝土不容易乾燥，這使得腐蝕的速度增加。因此乾濕交替的環境是腐蝕最嚴重的位置。

(3) 臨界氯離子濃度

臨界氯離子濃度為造成混凝土內鋼筋開始產生腐蝕之氯離子濃度，其數值可參考類似構造物實測結果和試驗結果訂定。各國鹽害耐久性分析的理論公式都是藉由 Fick 第二擴散定律去推導氯離子擴散方程式，但臨界氯離子濃度之定義有所不同，詳述如下：

①美國 ACI 365 1R-17

ACI 365 1R-17[52]之既有混凝土結構之剩餘服務年限預測模型，其臨界氯離子濃度之計算，以總膠結材之重量百分濃度 0.4 %進行計算，而混凝土中鋼筋所在深度之氯離子濃度，達到臨界氯離子濃度所需的時間，即為剩餘服務年限。

②歐盟 fib Bulletin 34

fib Bulletin 34[59]對於臨界氯離子濃度之定義為「足以使鋼筋失去保護性鈍化膜並開始產生鐵氧化反應的氯離子總含量，不論此時混凝土表面是否已出現可見的腐蝕跡象」。此時臨界氯離子濃度為 Beta 分布，平均值為總膠結材之重量百分濃度 0.6 % (0.6 wt.% binder)。

③日本混凝土標準示方書

日本混凝土標準示方書[61]對於臨界氯離子濃度之計算依膠結材種類不同而有所差異，如下所示：

普通卜特蘭水泥 $$C_t=-3.0\left(\frac{W}{B}\right)+3.4 \quad ...(4\text{-}7)$$

混合水泥(爐石粉、飛灰) $$C_t=-2.6\left(\frac{W}{B}\right)+3.1 \quad ..(4\text{-}8)$$

低熱高爐水泥，早強卜特蘭水泥 $$C_t=-2.2\left(\frac{W}{B}\right)+2.6 \quad ..(4\text{-}9)$$

矽灰水泥 $$C_t=1.2 \quad .....(4\text{-}10)$$

其中，C_t：鋼筋腐蝕臨界氯離子濃度(kg/m^3)。

W/B：混凝土之水膠比。

5. 硫酸鹽導致之膨脹與開裂

混凝土橋梁若與海水接觸，或因地下水鹽化或有硫酸鹽存在，將有發生硫酸鹽侵蝕可能，嚴重者會導致混凝土剝落而加速鋼筋腐蝕，故應將硫酸鹽侵蝕納入防蝕對策中加以考量。

當硫酸根離子與混凝土接觸時會與混凝土內的 C_3A 產生反應，其反應產物體積變大，可能造成混凝土膨脹、龜裂、剝落，致鋼筋失去保護作用，腐蝕加速。防止方法主要在於使用含鋁酸三鈣量較低之水泥，如 II 型、V 型水泥及 MS、HS 混合水泥，亦可使用卜作嵐摻料取代部份水泥以降低鋁酸三鈣總量，達防治目標。

(1) 腐蝕機理

天然存在於土壤或混凝土結構鄰近地下水中與海水中均含有大量的硫酸鹽，通常包含鈉、鉀、鈣或鎂等元素。當溶液中的硫酸根離子進入混凝土後，硫酸根離子與水泥水化所生成的自由氫氧化鈣反應，形成硫酸鈣(石膏)後產生「石膏反應壓力」，此時甚易進一步與「單硫型鋁酸鈣水化物」($3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaSO_4\cdot 12H_2O$，

簡稱 $C_3A\cdot C\bar{S}\cdot 12H$)化合，形成俱有膨脹性破壞能力之硫鋁酸鈣(鈣礬石) ($3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O$，簡稱 $C_3A\cdot 3C\bar{S}\cdot 32H$)，導致混凝土產生表面粉化，甚至整片剝落破裂的損壞，反應機理如下：

$$SO_4^{2-}(\text{液}) \xrightarrow{\text{透過滲透}} SO_4^{2-}(\text{水泥}) \quad \text{.....(4-11)}$$

$$Ca(OH)_2 \xrightarrow{\text{透過溶解}} Ca^{2+} + 2(OH)^- \quad \text{.....(4-12)}$$

$$SO_4^{2-} + Ca^{2+} + 2H_2O \xrightarrow{\text{析晶}} CaSO_4\cdot 2H_2O \ (\text{即}C\bar{S}H_2) \quad \text{...(4-13)}$$

$$C_3A\cdot C\bar{S}\cdot 12H + 2C\bar{S}\cdot 12H + 16H \rightarrow C_3A\cdot 3C\bar{S}\cdot 32H \quad \text{.....(4-14)}$$

由化學式中可以觀察出硫酸鹽的侵蝕必須透過滲透作用，而水分是少不了的媒介，必須有水分將土壤中或外界之硫酸鹽溶解成硫酸根離子(SO_4^{2-})，透過混凝土表面滲入，如果混凝土品質不佳或孔隙多，則硫酸根離子隨著水分滲入水泥中。而在滲透之過程，如果混凝土含水量過多或外界濕氣進入混凝土，而使氫氧化鈣游離成鈣離子(Ca^{2+})及氫氧根離子(OH^-)，則又在有濕氣及水分的條件下與硫酸根離子反應結合而成「石膏」，此種反應稱之為「石膏膨脹反應」，此物理壓力可能進一步導致混凝土破壞，其反應過程如圖 4.3。

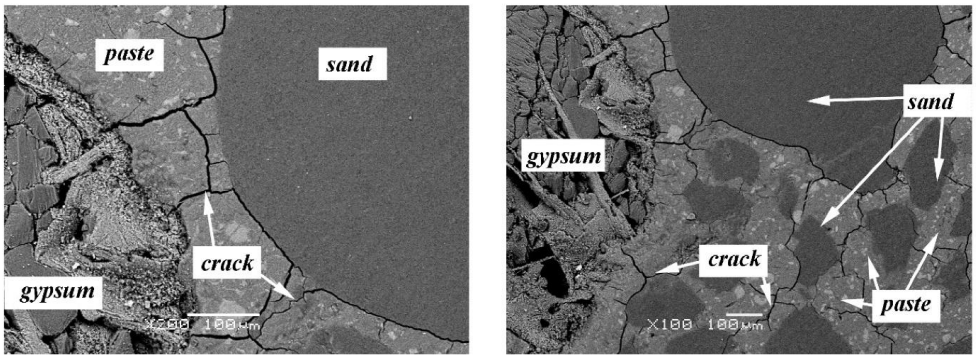


圖 4.3 硫酸鹽導致之混凝土開裂行為 (左:120 天、右:240 天)[114]

石膏的形成使得混凝土中之單硫型鋁酸鈣水化物有機會在水的媒介下，形成膨脹性鈣礬石。由這些機理也可以看出，硫酸鹽侵蝕若是外界有害硫酸根離子侵入，便僅止於表面粉化反應，但若是混凝土本身有較大量的硫酸鹽，其損壞將是整體性分解的。

為了消除硫酸根離子的侵蝕，基本上採用添加卜作嵐材料及降低水膠比的方式。卜作嵐材料係透過「卜作嵐反應」，先行消耗氫氧化鈣及鹼性物質(NaOH 及 KOH)，並且透過卜作嵐反應之產物來堵塞孔隙，減少水的滲透。

(2) 腐蝕因素

①內部影響因素

A. 水泥化學成分和礦物組成：對於卜特蘭水泥而言，鋁酸三鈣($3CaO\cdot Al_2O_3$ 簡稱 C_3A)、矽酸三鈣($3CaO\cdot SiO_2$ 簡稱 C_3S)、矽酸二鈣($2CaO\cdot SiO_2$ 簡稱 C_2S)、鋁鐵酸四鈣($4CaO\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3$ 簡稱 C_4AF)各組成成分含量對混凝土的硫酸鹽侵蝕有很大的影響，其中 C_3A 與 C_3S 為重要的指標，C_3S 含量過高將會生成過多的氫氧化鈣，易受硫酸鹽入侵而形成石膏鹽類，造成混凝土膨脹產生裂隙；另一方面，C_3A 含量過高則易於生成過多具有膨脹性的鈣礬石，導致混凝土膨脹開裂。

B. 水膠比與水灰比：混凝土的水膠比影響其緻密性，一般而言，水膠比較低的混凝土，其結構較為緻密，具有較低的滲透性以及較高的硫酸鹽侵蝕抵抗能力。

C. 膠結材種類與組成比例：混凝土中添加適量的飛灰、爐石粉、矽灰等卜作嵐材料，除了能夠降低 C_3A、C_3S 的含量外，帶有活性的摻料還能與水泥水化產物氫氧化鈣發生二次水化反應，使二次水化產物填充混凝土中的孔隙，可以增進混凝土的緻密性，降低整體孔隙率，使侵蝕介質侵入混凝土內部更為困難，同時也能增加混凝土的強度，進而提高抵抗硫酸鹽侵蝕的性能，即使在硫酸鹽濃度較高的環境中，也會使石膏結晶和鈣礬石結晶侵蝕受阻。

②外部影響因素

A. 硫酸鹽濃度：

美國 ACI 318-19(22)[51]與內政部「建築物混凝土結構設計規範」[64]，依據混凝土所處環境，將溶液中的硫酸鹽濃度分為

四個等級。當侵蝕等級越為嚴重時，所要求的混凝土水膠比將會越低，抗壓強度需求也將會提高。

(a) 硫酸鹽濃度低於 150 ppm 視為可忽略的侵蝕。

(b) 硫酸鹽濃度在 150 ppm 至 1,500 ppm 為中度侵蝕。

(c) 硫酸鹽濃度 1,500 ppm 至 10,000 ppm 為嚴重侵蝕。

(d) 硫酸鹽濃度高於 10,000 ppm 為非常嚴重侵蝕。

B.陽離子類型：

硫酸鹽侵蝕的陽離子類型有鈉離子、鎂離子、銨離子和鈣離子，由於硫酸鈣的溶解度很小(1,400 mg/L)，又銨離子通常只存在於農業土壤中，因此一般而言以鈉、鎂離子的侵蝕較為普遍。硫酸鈉對混凝土的影響僅有硫酸根離子會產生作用，而硫酸鎂反應如式(4-15)所示，硫酸鎂除了會與氫氧化鈣反應生成石膏，並使單硫型鋁酸鈣水化物轉變成鈣礬石，造成混凝土體積膨脹破壞與剝落外，鎂離子亦會以陽離子交換方式將水化矽酸鈣(hydrated calcium silicate 簡稱 C-S-H)膠體中的鈣離子由鎂離子取代，形成不具膠結性的水化矽酸鎂(hydrated magnesium silicate 簡稱 M-S-H)，使混凝土強度及耐久性降低，其反應如式(4-17)及(4-18)所示。

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2 \quad \text{.....(4-15)}$$

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 12H_2O + 3MgSO_4 + 2Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 11H_2O + 3Mg(OH)_2 \quad \text{.....(4-16)}$$

$$C\text{-}S\text{-}H + MgSO_4 + 5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2 + 2H_2SiO_4 \quad \text{.....(4-17)}$$

$$2Mg(OH)_2 + 2H_2SiO_4 \rightarrow 2M\text{-}S\text{-}H + H_2O \quad \text{.....(4-18)}$$

C.其他陰離子：

主要的考量包括有碳酸根離子與氯離子，當氯離子與水泥中的 C_3A 或鈣礬石接觸時，會反應生成弗氏鹽類(Friedel's salt)，使混凝土孔隙尺寸縮小，並讓孔隙路徑趨向蜿蜒(tortuous path)，造成硫酸根離子不易通過，降低混凝土受硫酸鹽侵蝕的影響，其化學反應如式(4-19)與(4-20)所示。除此之外，碳酸根離子則會與水泥中的氫氧化鈣反應生成碳酸鈣，間接的降低石膏產量，導致硫酸鹽侵蝕的鈣礬石產量減少，降低硫酸鹽侵蝕反應對混凝土所造成的影響。

$$3CaO\cdot Al_2O_3 + CaCl_2 + 10H_2O \rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaCl_2\cdot 10H_2O \quad \text{.....(4-19)}$$

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O + 3CaCl_2 \rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaCl_2\cdot 32H_2O + 3CaSO_4 \quad \text{.....(4-20)}$$

D.溫度：

混凝土所處環境之溫度升高將會提高硫酸根離子的擴散性，同時也會導致化學反應速率提高及離子遷移速率加快，間接提高硫酸鹽侵蝕的速率。溫度的升高也會影響一些水化產物的穩定性，例如鈣礬石，當溫度高於 70 ℃時，混凝土中的單硫型鋁酸鈣將會消失，若溫度恢復到常溫狀態時，則混凝土中將會生成 2 次膨脹的鈣礬石，稱為延遲鈣礬石反應，若此反應發生於混凝土已硬固階段，同樣會有明顯之體積不穩定問題，造成混凝土崩解剝落。由此可知溫度的增加不僅提高硫酸鹽侵蝕的反應速率，更會影響混凝土結構物本身的穩定性。

E.pH 值：

環境 pH 值對混凝土硫酸鹽侵蝕也具有重要影響，石膏只會在 pH 值小於 12.9 的溶液中產生，如果 pH 值大於 12.9，即使有更高濃度的硫酸根離子溶液，石膏也很難產生。

4.1.2 混凝土橋防蝕設計

1. 設計年限

設計年限是指結構物自腐蝕開始至腐蝕極限所需之時間，fib Bulletin 34 將腐蝕極限狀態分為使用極限狀態(SLS)與承載極限狀態(ULS)，鋼筋去鈍化通常視為 SLS，此時對結構安全無立即威脅，而當混凝土結構開始開裂與剝落則視為 ULS，此時可能導致結構崩塌。鋼筋的腐蝕階段包含誘導期與腐蝕擴展期(圖 4.4)，當前各國設計年限之相關規範大多以鋼筋開始去鈍化為設計年限終點。

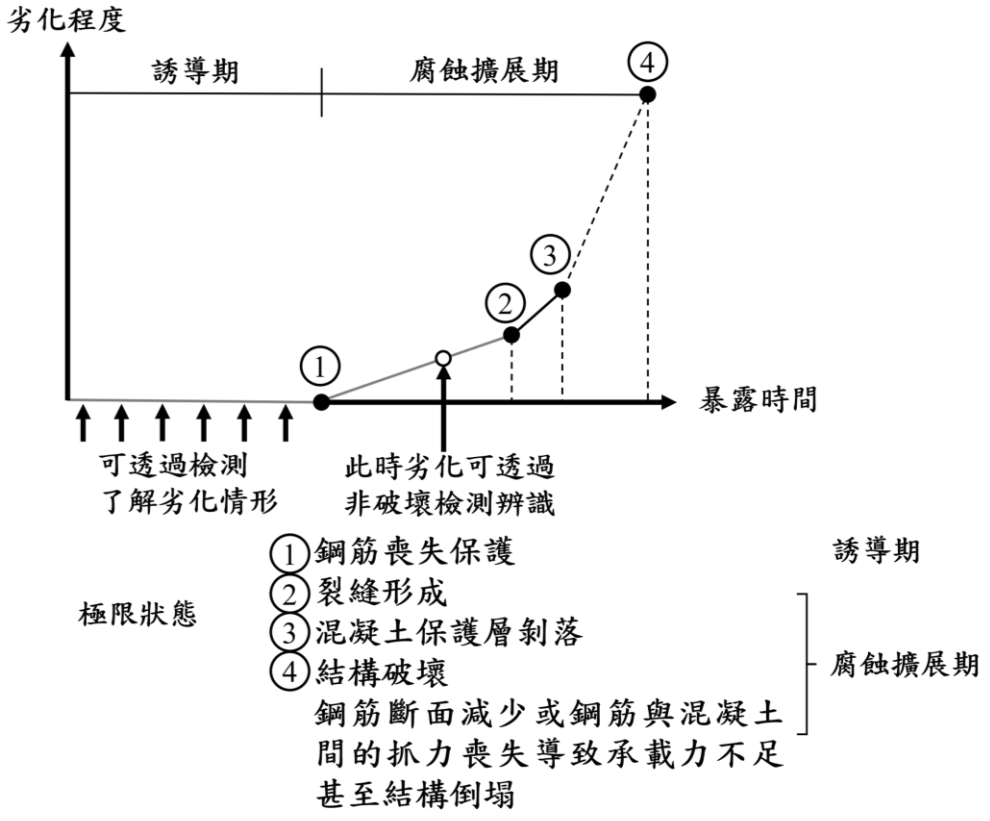


圖 4.4 鋼筋腐蝕階段[59]

以鹽害環境腐蝕為例，自氯離子侵入混凝土保護層開始，至侵入深度達到鋼筋所在位置的那一刻為設計年限終點，而整個過程所經過的時間，即為設計年限。故鋼筋混凝土之設計年限並非結構物從新建到損壞或產生裂縫所需的時間，而是腐蝕達到鋼筋去鈍化所需的時間。各國耐久性設計規範之設計年限規定，整理如下：

(1) 臺灣

104 年版「公路橋梁設計規範」將第十二章更改為耐久性設計，新增一般環境之環境作用等級、保護層規定，並增加了 50 年與 100 年設計年限之設計概念，特殊保護措施更改為附加保護措施，現行 109 年版「公路橋梁設計規範」與 112 年版「鐵路橋梁設計規範」，設計年限之定義與規定詳述如下：

①設計年限係指依據相關規範設計及施工，並在正常使用及維護狀態下之年限。

②高速公路、重要公路、跨越重要設施之公路橋梁、城鎮之主要聯外公路橋梁或經主管機關認為必要者，設計年限不小於 100 年；鐵路橋梁除主管機關另定需求，設計年限不小於 100 年；其他公路橋梁，設計年限不小於 50 年。

③橋梁主要構件在設計年限內無需大修，非主要構件(如伸縮縫、護欄、緣石等)及可更換構件(如支承、隔震及防落設施等)可設計成易於更換的型式，或能夠經濟合理地進行維修，其設計年限可低於結構整體的設計年限，並應在設計圖說中明確規定防蝕設計。

(2) 美國

美國公路及運輸官員協會(AASHTO)所制定的「公路橋梁設計規範(AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 10th Edition, 2024)」[115]，於第 1.2 節即說明設計年限(Design Life)為藉由對瞬時載重統計推導的期間，該規範訂為 75 年，而使用年限(Service Life)係指橋梁預期運轉的期間。

(3) 歐洲

歐洲 EN1990(Eurocode)[116]是構造物設計的基礎規範，其主要是規定結構安全、服務性及耐久性的原則，以做為設計的指導方針，需與 EN1991(Eurocode1)~EN1999(Eurocode9)等規範配合使用。其中有關結構物設計工作年限的規定在 EN1990 第 A.1.4 節

中，其針對結構物的重要性及用途訂定出 4 種類別，並規定 10~100 年不等的設計年限，如表 4-2。此外，Eurocode 2「Applaction To Concrete Highway Bridges」[117]亦提及耐久性考量之設計年限應基於由合格且有經驗之人員負責設計及施工，並有正常維護工作之規劃與執行。

表 4-2 EN1990 設計工作年限之規定[57]

結構類別	設計使用年限 T_{lf}(年)
• 橋梁、其他承載道路或鐵路交通的土木工程結構	100
• 主承重構件具較低防護等級之橋梁	50
• 可替換之構件(非受拉構件)	25
• 臨時結構	≤ 10

(4) 日本

日本土木學會於 2022 年制定之「混凝土標準示方書-設計編」[61]，耐久性設計中並未明確規定其使用年限，僅於中性化及鹽害之設計公式中規定其耐用年限以 100 年為上限。

(5) 中國

中國 JTG D62「公路鋼筋混凝土及預應力混凝土橋涵設計規範」[118]，於第 1 章總則規定該規範採用的設計基準期為 100 年。中國 GB/T 50476「混凝土結構耐久性設計規範」[63]，於第 3 章規定混凝土結構的設計使用年限應按建築物的合理使用年限確定，不應低於現行中國國家標準 GB 50153「工程結構可靠性設計統一標準」[119]的規定；對於城市橋梁等市政工程結構應按照表 4-3 的規定。一般環境下民用建築在設計使用年限內無需大修，其結構構件的設計使用年限應與結構整體設計使用年限相同。嚴重環境作用下的橋梁、隧道等混凝土結構，其部分構件可設計成易於更換的型式。可更換構件的設計使用年限可低於結構整體的設計使用年限或能夠經濟合理地進行大修，並應在設計文件中明確規定。

中國 GB 50153「工程結構可靠性設計統一標準」[119]，其對於設計使用年限定義為設計規定的結構或結構構件不需進行大修即可按預定目的使用的年限。於第 3.3 節有關於設計使用年限和耐久性之規定，其規定工程結構設計時，應規定結構的設計使用年限；並應對環境影響進行評估，當結構所處的環境對其耐久性有較大影響時，應根據不同的環境類別採用相應的結構材料、設計構造、防護措施、施工品質要求等，並應制定結構在使用期間的定期檢修和維護制度，使結構在設計使用年限內不致因材料的劣化而影響其安全或正常使用。GB 50153 附錄 A.3 針對公路橋涵結構有專門之規定，其中，公路橋梁結構的設計基準期為 100 年，設計使用年限應按表 4-4 採用，表中示例可參考表 4-5 之定義。

表 4-3 混凝土結構的設計使用年限[63]

設計使用年限	適用範圍
不低於 100 年	城市快速路和主幹道上的橋梁以及其他道路上的大型橋梁、隧道、重要的市政設施等
不低於 50 年	城市次幹道和一般道路上的中小型橋梁，一般市政設施

表 4-4 公路橋涵結構的設計使用年限[119]

類別	設計使用年限	示例
1	30	小橋、涵洞
2	50	中橋、重要小橋
3	100	特大橋、大橋、重要中橋

表 4-5 橋梁涵洞分類[119]

橋涵分類	多孔跨徑總長 L(m)	單孔跨徑 L_k(m)
特大橋	L>1000	L_k>150
大橋	100≦L≦1000	40≦L_k≦150
中橋	30<L<100	20≦L_k<40
小橋	8≦L≦30	5≦L_k<20
涵洞	—	L_k<5

2. 耐久性防蝕設計

交通部「公路橋梁設計規範」及「鐵路橋梁設計規範」對於鋼筋混凝土防蝕設計基本原則，說明如下：

(1) 耐久性設計要求，為結構達到設計年限所需之最低要求，設計中可根據工程的特點、當地的環境條件與工程經驗，以及具體的施工條件等適當提高。

(2) 結構的耐久性設計應根據橋梁的設計年限、橋梁所處的環境類別及作用等級進行設計。同時應考慮材料之最新發展，亦不限於使用單一方法，設計者應就橋梁生命週期之觀點，選擇最適當之方式為之。

(3) 當混凝土結構構件同時承受其他環境作用時，應按環境作用等級較高的要求進行耐久性設計。

(4) 設計年限

A. 設計年限係指依據相關規範設計及施工，並在正常使用及維護狀態下之年限。

B. 高速公路、重要公路、跨越重要設施之公路橋梁、城鎮之主要聯外公路橋梁或經主管機關認為必要者，設計年限不小於 100 年。

C. 其他公路橋梁，設計年限不小於 50 年。

D. 橋梁主要構件在設計年限內無需大修，非主要構件(如伸縮縫、護欄、緣石等)及可更換構件(如支承、隔震及防落設施等)可設計成易於更換的型式，或能夠經濟合理地進行維修，其設計年限可低於結構整體的設計年限，並應在設計圖說中明確規定。

混凝土橋的防蝕設計需涵蓋規劃、設計、施工與維護管理各階段，並在各階段進行適當考量，確保橋梁構件不會因腐蝕導致功能提前下降。在規劃設計階段，除須就橋梁型式、設計年限、結構系統、耐震設計、耐風設計及疲勞設計等方面予以詳加考量之外，對

於橋梁耐久性設計方面，亦應列入規範設計重點，進行深入的比較探討，並選用合宜的防蝕設計。此外，橋梁可視為由多項構件組合而成，故防蝕考量範圍包括各構件如橋臺及翼牆、下部結構(基礎、墩柱及帽梁)、上部結構(梁、橋面板)及附屬設施(伸縮縫、護欄、防震拉條)等，故防蝕設計基本原則亦應包含以下幾點：

(1) 橋梁各構件在載重下所衍生的受力情況及變形行為各不相同，又曝露在腐蝕環境方式不同，影響性亦不一，因此，各構件所須防蝕要求也有所不同。

(2) 防蝕設計係以提高對鋼筋的保護程度及增進鋼筋的耐蝕能力來達成，其方法可概分為基本方法與附加保護措施兩種。

(3) 基本防蝕方法係從橋梁結構設計及提昇混凝土品質兩方面為著眼點，橋梁結構設計應注意事項包括結構型式選擇、載重設計、排水設計、保護層厚度及裂縫控制等；提昇混凝土品質方面則從混凝土組成材料選擇、水膠比、抗壓強度、抗氯離子能力及膠結材組成等加以規定。

(4) 附加保護措施係指以外加手段方式來提昇鋼筋抗腐蝕能力，包括混凝土表面處理、耐腐蝕鋼筋或陰極保護等。

(5) 防蝕方法選擇與橋梁曝露環境的影響程度有關，應先採基本方法，若腐蝕環境較為嚴重，經評估基本方法仍無法確定鋼筋在橋梁預期的使用年限內能有免於腐蝕之虞時，則可進一步考慮採行一種或多種附加保護措施的組合。

(6) 防蝕基本原則在阻斷有利於鋼筋腐蝕的有害物質，如水分、濕氣、氧氣、二氧化碳、硫酸根離子及鹽分等之侵入，或以電化學原理抑止鋼筋腐蝕。其基本方法可藉由改善混凝土品質、增加保護層厚度、混凝土表面處裡、耐腐蝕鋼筋或併用數種方法等。若採用上述對策以外的方法時，則須對其防蝕效果和施工性有充足的調查試驗，且須確認具有如同上述方法同等以上的性能。

有關本計畫建議之防蝕設計流程詳見圖 4.5。

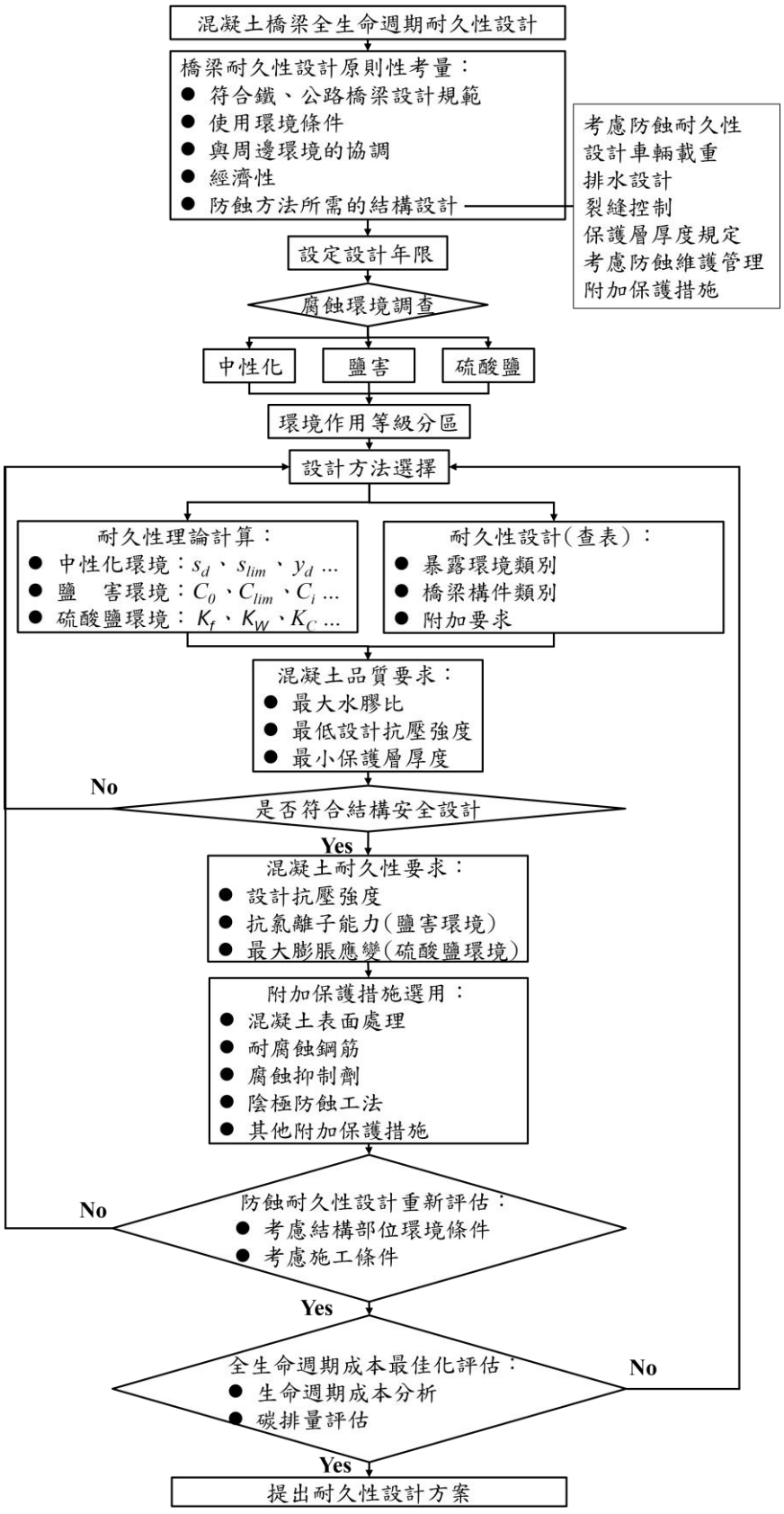


圖 4.5 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖

3. 混凝土耐久性設計的使用環境條件

混凝土之耐久性設計與品質要求需基於掌握橋址環境條件，根據環境作用等級決定耐久性設計，故建議進行現地調查。若附近有既有橋梁或構造物，調查其腐蝕情況可獲取有效環境資訊，有助耐久性設計與混凝土品質要求選定。惟地理地形微小差異可能顯著改變防蝕環境條件，個別構造物因結構因素或施工品質導致防蝕功能下降，參考既有構造物防蝕情況時需注意這些因素。

選定防蝕方法與規格時需根據實際環境條件判斷可行性。影響環境條件除氣象與地理區域因素外，尚包括結構因素。結構因素導致的環境條件差異包含降雨清洗作用、飛來鹽分累積、漏水、積水或濕氣滯留等。為減少差異需採取適當排水措施避免雨水積聚，設計通風良好結構。然而僅靠這些措施難以統一各結構部位環境條件，宜根據同一橋梁或構件內各部位環境條件，選用防蝕方法與規格。

4. 經濟性

橋梁經濟性不僅需考量建設費等初期投資，還應從長期視角考量檢測、維修等維護管理階段費用，追求整體生命週期成本最小化，或整體考量之最佳化。防蝕做為橋梁費用一部分，選定時應注重生命週期成本經濟性。防蝕生命週期成本一般用以下公式表示：

$$LCC = I + M + R \quad \text{.....(4-21)}$$

其中，LCC：防蝕生命週期成本

I：防蝕初期成本

M：防蝕檢測、部分維修(維護管理)成本

R：防蝕全面維修與更新成本

生命週期成本計算方法與評估期間目前無統一標準，需依目的與比較內容選用適當方法，評估期間最好使用橋梁設計時考慮的設計年限。橋梁設計時考慮的設計年限通常是其耐久性的目標週期，並不代表達到設計年限後橋梁就無法繼續使用，若期間能進行適當之維護管理，多數橋梁仍能在橋齡達設計年限後持續使用。

5. 考量防蝕的結構設計

即便根據橋址環境條件與要求性能選定適當防蝕方法與規格，若結構設計未考慮耐久性、施工與維護管理，可能顯著降低防蝕功能與耐久性，甚至難以透過檢測維修維持功能。考慮這些因素的結構設計，應與適當防蝕方法選定併行，為防蝕設計主要項目，需注意防蝕方法與規格考量一致。結構設計所需防蝕措施多樣，特別對結構細部要求高，需明確記載於設計圖，確保設計理念能確實傳達給施工者。實施多項防蝕措施時，注意措施間不相互影響，並避免對結構本體造成不良影響。

本計畫基於混凝土橋一般條件與相關見解，說明結構細部注意事項。但個別橋梁或構件因防蝕性能與環境需求，未必完全適用。具體結構設計時，應充分考慮各橋梁及部位防蝕要求與環境條件，必要時組合多項措施，滿足所需性能且符合經濟性。混凝土橋之相關品質作業規定與施工圖說案例，將於本計畫第四章進行說明。

6. 可維護性設計

在結構投入使用後的維修工作中進行的防蝕工作中，作業姿勢和作業空間等條件通常會妨礙防蝕維護。此外，在檢查時，如果沒有維護通道可能會無法進行所需檢測與維護，因此必須從設計階段就考慮應對方法，並採取適當措施，以下是考慮到防腐蝕維護和管理的結構設計範例。

(1) 確保作業空間

為了進行檢查和維修工作，必須在橋梁下方或兩側搭建維護通道。若橋梁下方或兩側有公路、鐵路、建築物或其他設施，則必須確保有足夠的空間搭建維護通道，且不影響這些設施的使用。

(2) 設置維護管理設施

考慮到在使用期間可能需要進行防蝕檢查和維修等維護工作，在設計安裝位置和結構時必須充分考慮可維護性。下部結構維護通道也可做為通往上部結構維護通道。然而，由於梁端經常

發生因漏水 而導致的支座等構件的劣化和損壞，因此，當下部結構頂部維護困難時，最好為了維護目的而安裝維護通道。

(3) 可更換構件

檢查通道、排水系統等輔助設施通常空間狹窄，難以進行防蝕修復。在這種情況下，當腐蝕加劇、功能降低時，考慮更換構件可能更具經濟效益。在考慮此類維護方法時，建議考慮到使用壽命期間需要進行防蝕設施的檢查和修復等維護，採用易於更換構件的結構，並提前設置更換所需的設施，並在結構設計階段就充分考慮未來的更換需求。

(4) 關鍵部位之檢測和維修考量

結構型式應便於對關鍵部位進行檢測和維修，應適當設置檢測、維護和採取補充保護措施的通道，且對處於腐蝕較嚴重部位的構件，應考慮其易於更換的可能性。

7. 附屬設施的防蝕考量

附屬設施常是橋梁檢測發現腐蝕產生之位置，其防蝕措施亦應加以重視，應在橋梁設計階段以審慎考慮防蝕需求，包括排水設施、導水設施、伸縮縫、胸牆、欄杆設施、維修通道設施等。

附屬設施之重要性雖然不及主體結構，惟若發生腐蝕損傷，其危害程度仍會間接影響主體結構。排水、導水設施的功能直接影響到橋梁上部結構的排水效果，如果排水效果不彰，則易使橋梁上部結構積水，造成局部腐蝕環境。伸縮縫、支承構造亦為橋梁上部結構較易於形成死角的部位，在設計上，應考慮其週邊之淨空及洩水坡度等，避免附近易於堆積雜物，加速腐蝕。

胸牆、欄杆設施則對用路人之行車安全與景觀有重要的影響。維修步道設施目前不是一般橋梁設計上之標準設施，並不是每一座橋梁均設有維修步道設施，考量未來橋梁檢測維修之需求，應儘可能在橋梁設計階段便將其考慮進來，則未來的檢測與維修工作方可順利進行，此對橋梁耐久性之提昇將有莫大的助益。

橋梁附屬設施往往是腐蝕最早發生的部位，且直接影響用路人安全與橋梁整體觀感。故附屬設施之防蝕考量與設計，建議依不同腐蝕環境等級進行材料選用與防蝕處理建議，屬於鋼材之附屬設施可參見 4.2 節「鋼橋」之對應內容。

8. 附加保護措施

除上述防蝕方法外，當橋梁處於較嚴苛之腐蝕大氣環境或其構件屬於局部嚴苛腐蝕環境時，則可併採行一種或多種之附加保護措施，附加保護措施主要目的在於增進結構物防蝕能力，故若受限於保護層厚度之考量而欲以附加保護措施取而代之時，應審慎評估之設計者不應以採用附加保護措施而減少保護層之厚度。附加保護措施之相關內容詳見 4.1.6 節「附加保護措施」。

9. 重新評估防蝕耐久性設計

(1) 考慮結構部位環境條件的防蝕方法重新評估

在混凝土橋設計中，通常會考慮整體環境條件、與周圍環境的協調性、生命週期成本以及其他所需性能，並根據橋梁的各種性能要求進行結構設計。此時，結構設計完成階段各結構構件的環境條件可能與選擇時所假設的環境條件不同。因此，有必要在結構設計完成階段重新評估防蝕方法及其混凝土品質規定，並根據需要修改防蝕方法及其混凝土品質規定。

(2) 考慮施工條件的防蝕方法重新評估

防蝕效果受施工品質的影響很大，但事後往往很難評估施工品質。即使在防蝕施工後發現品質沒有得到充分保證，也往往很難透過維修等方式進行改善，即使可以改善，維修工作規模也很龐大，而且在經濟上也不利。因此，在進行防蝕施工時，必須採取充分的品質保證措施，避免重複施工。如果根據施工條件，品質保證的難易度有很大差異，則需要考慮將防蝕規格更改為更容易確保施工品質的規格，避免因施工困難導致施工品質較難到位，而加速鋼筋生銹劣化，亦或是重新檢視施工流程，改善施工條件。

4.1.3 中性化環境之設計標準建議

1. 環境作用等級

空氣中的二氧化碳、硫化物(SO_X)、氮化物(NO_X)或其他物質所形成的酸雨與混凝土表面接觸時，會逐漸導致混凝土碳酸化，嚴重時甚至可能貫穿保護層，但通常需經歷數年以上。內陸地區之腐蝕型式以中性化為主，而橋梁主要構件與空氣接觸的混凝土抗壓強度多在 280 kgf/cm²以上，具備抗中性化能力。

鋼筋混凝土結構中性化環境分類方式摘自交通部「公路橋梁設計規範」[5]第十二章與「鐵路橋梁設計規範」[4]第六章。正常大氣作用下混凝土中性化引起的內部鋼筋銹蝕須符合一般環境之耐久性設計(如表 4-6)，由於混凝土必然與空氣接觸，中性化難以避免，但其發生與二氧化碳濃度、環境濕度及混凝土品質(水膠比、強度、表面狀況)等因素相關，並非所有混凝土皆會產生嚴重中性化。

表 4-6 鐵路橋梁設計規範、公路橋梁設計規範中性化環境分類[5] [4]

環境作用等級	環境條件	結構構件示例
I	非乾濕交替環境	箱梁內部
II	乾濕交替環境	柱、橋台、版、「I」「T」梁、箱梁外露面等

2. 混凝土材料規定

交通部「公路橋梁設計規範」[5]第十二章與「鐵路橋梁設計規範」[4]第六章對於中性化環境之材料與保護層厚度規定如表 4-7，預力混凝土的鋼筋保護層厚度可參照本節的規定，設計年限為 100 年的構件，其混凝土抗壓強度不應低於 280 kgf/cm²，設計年限為 50 年的構件，其混凝土抗壓強度不應低於 245 kgf/cm²。

表 4-7 中性化環境混凝土材料與鋼筋最小保護層厚度[4, 5]

設計年限 / 環境作用等級	50 年		100 年	
	最大水膠比	最小保護層厚度(cm)	最大水膠比	最小保護層厚度(cm)
I	0.50 0.45	3.0 2.5	0.50 0.45	3.5 3.0
II	0.50 0.45 0.40	4.0 3.5 3.0	0.45 0.40 0.35	4.5 4.0 3.5

3. 中性化深度理論計算

日本土木學會「混凝土標準示方書-設計編」[61]對於中性化所造成的鋼筋腐蝕，以鋼筋腐蝕深度在設計年限內不達到設計臨界深度為原則進行設計，其考量為孔隙溶液之 pH 值未受中性化影響而降低，若橋址現地環境之滲水作用頻繁，則需在設計中保留適當安全裕度。中性化深度理論計算公式內之係數，若有相關試驗結果或現地數據得以優先採用。

式(4-22)用於判別中性化深度是否大於臨界深度，當計算結果小於 1，代表設計年限內中性化不會達到臨界深度。式(4-23)之鋼筋腐蝕極限深度計算為考慮氯離子影響之鋼筋腐蝕極限深度，其中性化殘餘深度(c_k)小於 10 mm 時，代表該環境之氯離子侵蝕為輕微腐蝕，因此一般環境下 c_k 以 10 mm 帶入式(4-23)計算鋼筋腐蝕極限深度即可，若為受較為嚴重鹽害之環境，c_k 可採用 10~25 mm 進行計算。

計算式(4-26)使用之中性化速度係數之特性值(α_k)可以依現地數據按式(4-27)進行計算，或是依「混凝土標準示方書-設計編」[61]提供之文獻[62]依經驗式(4-29)計算。

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \le 1.0 \quad \text{.....(4-22)}$$

$$y_{lim} = c_d - c_k \quad \text{.....(4-23)}$$

$$c_d = c - \Delta c_e \quad \text{.....(4-24)}$$

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \quad \text{.....(4-25)}$$

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \quad \text{.....(4-26)}$$

$$\alpha_k = \gamma_k \cdot \gamma_p \alpha_p \quad \text{.....(4-27)}$$

$$\alpha_p = a + b \cdot \frac{W}{B} \quad \text{.....(4-28)}$$

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \frac{W}{B} \quad \text{.....(4-29)}$$

$$B = C_p + k \cdot A_d \quad \text{.....(4-30)}$$

其中，γ_i：結構物係數，一般可採用 1.0～1.1。

y_d：中性化深度之設計值(mm)。

y_{lim}：鋼筋腐蝕之極限深度。

c_d：耐久性設計之被覆厚度設計值(mm)，考量施工誤差。

c：保護層(mm)。

Δc_e：保護層施工誤差(mm)。

c_k：中性化殘餘深度(mm)，普通環境為 10。氯離子影響之環境採用 10～25。

γ_{cb}：考量中性化深度設計值之安全係數，一般可採用 1.0。

α_d：中性化速度係數之設計值(mm/$\sqrt{年}$)。

t：設計年限(年)，用於式(4-4)之計算以 100 年為上限。

α_k：中性化速度係數之特性值(mm/$\sqrt{年}$)。

β_e：表示環境作用係數，一般可採用 1.6。

γ_c：混凝土材料係數，一般為 1.3。高流動混凝土為 1.1。

α_p：中性化速度係數之預測值。

γ_k：特性值設定之安全係數，一般可採用 1.0。

γ_p：考量材料特性預測精度之安全係數，一般可採用 1.0。

a、b：依水泥(結合材)種類由實績決定之係數。

W/B：有效水膠比。

B：單位體積有效結合材質量。

C_p：單位體積波特蘭水泥質量。

A_d：單位體積摻料質量。

k：摻料種類之常數，飛灰為 0，水淬高爐石粉為 0.7。

4.1.4鹽害環境之設計標準建議

1. 環境作用等級

參考交通部「公路橋梁設計規範」[5]、「鐵路橋梁設計規範」[4]、美國加州交通廳「橋梁設計者備忘錄」[49]與「臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究」[2]，對於鹽害環境下作用等級之建議分區方式如表 4-8 與圖 4.6 所示。海岸線為平均最高高潮位(HHWL)與陸地之交界區域。極嚴重鹽害區之分區範圍包含離海岸線 100 公尺以內之陸地區域與海水中飛沫區兩部分，此區受鹽害與乾溼循環影響；嚴重鹽害區包含離海岸線 100 公尺至 300 公尺以內之陸地區域、平均最高高潮位+15 公尺以上之水上區域與海水中飛沫區以下之水下區域三個部分，水下區域並無乾溼循環，故列為嚴重鹽害區；中度鹽害區為離海岸線 300 公尺至 3 公里以內之陸地區域，其餘區域則屬於非鹽害區。

鐵路橋梁設計規範[4]第六章「耐久性設計」，對於鹽害環境下作用等級之區域給出了詳盡的縣市村里劃分，如表 4-9、表 4-10 所示，考量到離海岸 100 公尺與 300 公尺區域大致上完全重疊，故於設計之參照上，建議可以先根據鐵路橋梁設計規範之縣市村里劃分大致區分為極嚴重與嚴重鹽害區、中度鹽害區後，在依照表 4-9、表 4-10 之分級建議進行詳細的劃分。當橋梁之鋼筋混凝土主要構件，其環境作用等級為極嚴重鹽害區或嚴重鹽害區時，得採用附加保護措施，不限於使用單一方法。

表 4-8 鹽害環境下作用等級之建議分區方式

環境作用等級	分區範圍
極嚴重鹽害區	• 離海岸線 100 公尺以內之陸地區域 • 海水中飛沫區：平均最低低潮位(LLWL)以上至平均最高高潮位(HHWL)+15 公尺以下之水上區域
嚴重鹽害區	• 離海岸線 100 公尺至 300 公尺以內之陸地區域 • 平均最高高潮位+15 公尺以上之陸上及水上區域 • 海水中飛沫區以下之水下區域
中度鹽害區	• 離海岸線 300 公尺至 3 公里以內之陸地區域

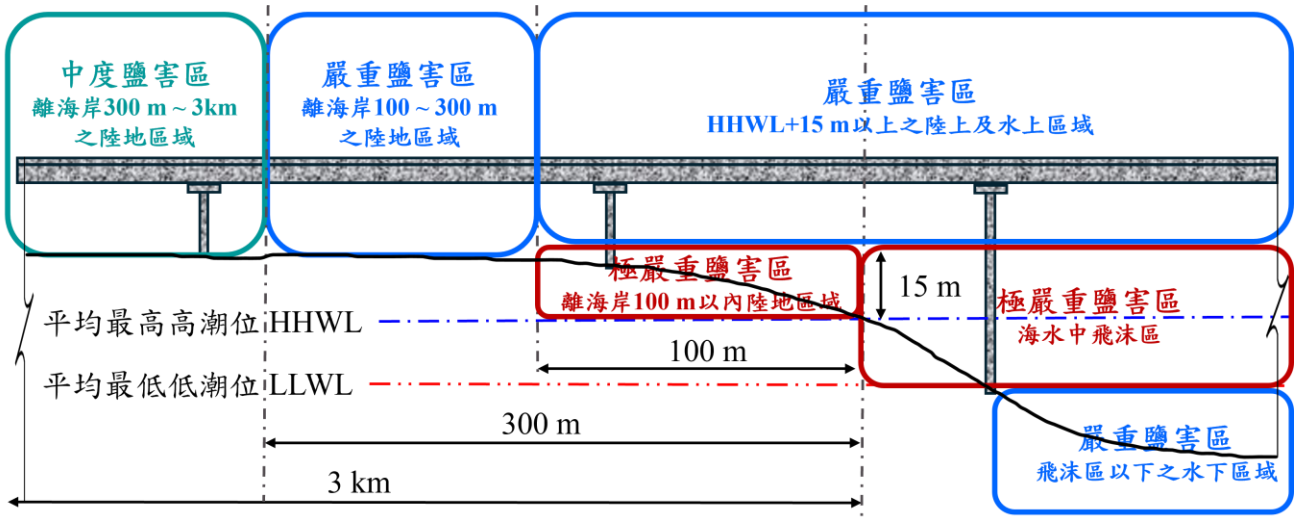


圖 4.6 鹽害環境下作用等級之建議分區及範圍示意圖

表 4-9 離海岸 300 公尺以內(極嚴重與嚴重鹽害區)之村里[4]

縣/市	區	村/里
金門縣	全區	全村里
連江縣	全區	全村里
澎湖縣	全區	全村里
宜蘭縣	五結鄉	季新村，成興村，錦眾村
	壯圍鄉	大福村，新社村，永鎮村，過嶺村，復興村，東港村
	南澳鄉	澳花村，武塔村
	頭城鎮	新建里，竹安里，大坑里，港口里，外澳里，更新里，合興里，大溪里，大里里，石城里
	蘇澳鎮	南寧里，朝陽里，東澳里，南建里，永春里，蘇東里，港邊里，存仁里，頂寮里

花蓮縣	吉安鄉	東昌村，仁安村
	秀林鄉	和平村，崇德村
	花蓮市	主安里，民立里，民樂里，民運里，民治里，主計里，主和里，民有里，民主里，民權里，民孝里，民心里，民德里
	新城鄉	新城村，順安村，大漢村，康樂村
	壽豐鄉	鹽寮村，水璉村
	豐濱鄉	港口村，靜浦村，磯崎村，新社村，豐濱村
屏東縣	牡丹鄉	旭海村
	車城鄉	埔墘村，後灣村，射寮村，新街村，海口村，福安村
	佳冬鄉	塭豐村，崁溫村，賴家村
	東港鎮	盛漁里，朝安里，南平里，嘉蓮里，鎮海里，豐漁里
	枋山鄉	善餘村，楓港村，加祿村，枋山村
	枋寮鄉	中寮村，安樂村，東海村，大庄村，隆山村，保生村，新龍村，枋寮村
	林邊鄉	崎峯村，水利村
	恆春鎮	德和里，頭溝里，鵝鑾里，墾丁里，南灣里，水泉里，大光里，山海里
	琉球鄉	全村里
	新園鄉	共和村
	獅子鄉	南世村，楓林村，內獅村，獅子村，竹坑村
	滿州鄉	港仔村，九棚村，長樂村，港口村，里德村
苗栗縣	竹南鎮	中美里，天文里，崎頂里，海口里，中英里，龍鳳里，竹興里
	後龍鎮	福寧里，外埔里，南港里，中和里，龍坑里，龍津里，水尾里，秀水里，海埔里，海寶里，大山里
	苑裡鎮	房裡里，海岸里，苑港里，西平里
	通霄鎮	白西里，白東里，內島里，新埔里，通灣里，五北里，五南里，通南里，通西里
桃園市	大園區	海口里，北港里，內海里，圳頭里，沙崙里
	新屋區	蚵間里，深圳里，笨港里，永安里，永興里
	蘆竹區	海湖里，坑口里
	觀音區	富林里，樹林里，草漯里，保障里，保生里，大潭里，白玉里，觀音里
高雄市	小港區	龍鳳里，鳳源里，鳳興里，鳳森里，鳳鳴里
	左營區	崇實里
	永安區	鹽田里，新港里，永華里
	林園區	中汕里，西汕里，東汕里，中芸里，鳳芸里，北汕里，港嘴里，西溪里，港埔里，中門里
	茄萣區	崎漏里，嘉福里，嘉泰里，嘉樂里，吉定里，大定里，光定里，保定里，嘉定里，嘉安里，嘉賜里，白雲里，萬福里
	梓官區	赤西里，赤東里，信蚵里，智蚵里，禮蚵里，赤崁里
	楠梓區	中和里，盛昌里

	鼓山區	高雄港，桃源里
	旗津區	實踐里，安順里，中洲里，振興里，永安里，高雄港，中興里，上竹里，南汕里，北汕里，中華里，復興里，慈愛里，旗下里
	彌陀區	南寮里，海尾里，舊港里，光和里
基隆市	中山區	文化里，中和里，太白里，協和里
	中正區	新豐里，砂子里，碧砂里，基隆嶼，花瓶嶼，棉花嶼，彭佳嶼，長潭里，八斗里，平寮里，和憲里，社寮里，海濱里
	安樂區	內寮里
雲林縣	口湖鄉	青蚶村，湖口村，成龍村，港西村，崙中村，下崙村
	四湖鄉	廣溝村，林厝村，蔦子村，崙南村，崙北村
	麥寮鄉	三盛村，中興村
	臺西鄉	和豐村，五港村，蚊港村，海口村
新北市	八里區	大崁里，下罟里，頂罟里，埤頭里
	三芝區	後厝里，錫板里，新庄里，古庄里
	石門區	草里里，茂林里，乾華里，尖鹿里，石門里，山溪里，老梅里，富基里，德茂里
	林口區	太平里，瑞平里，嘉寶里，下福里
	金山區	清泉里，永興里，萬壽里，磺港里，豐漁里
	貢寮區	和美里，福連里，真理里，仁里里，福隆里，龍門里
	淡水區	大庄里，沙崙里，油車里，崁頂里，義山里，興仁里，賢孝里，屯山里
	瑞芳區	鼻頭里，南雅里，深澳里，瑞濱里，海濱里，濂洞里，濂新里
	萬里區	大鵬里，野柳里，龜吼里，萬里里
新竹市	北區	海濱里，港北里，舊港里，南寮里
	香山區	內湖里，南港里，鹽水里，海山里，朝山里，美山里，大庄里，浸水里，虎山里，港南里
新竹縣	竹北市	尚義里，崇義里，新港里
	新豐鄉	鳳坑村，新豐村，坡頭村
嘉義縣	布袋鎮	布袋港，好美里，龍江里，岑海里
	東石鄉	掌潭村，鰲鼓村，塭仔村，副瀨村，塭港村，猿樹村，東石村
彰化縣	大城鄉	三豐村，西港村，臺西村
	伸港鄉	什股村，全興村，海尾村，蚵寮村，曾家村
	芳苑鄉	五俊村，博愛村，新寶村，王功村，和平村，永興村，仁愛村，漢寶村，新街村，信義村，芳中村，芳苑村
	鹿港鎮	海埔里，山崙里，東石里
	福興鄉	福興村，二港村，福寶村，頂黍村
	線西鄉	寓埔村，溝內村，塭仔村，頂庄村
臺中市	大甲區	建興里，福德里，西岐里
	大安區	海墘里，福住里，永安里，頂安里，龜壳里，中庄里，南庄里，南埔里
	梧棲區	臺中港

	清水區	臺中港，臺中港，高北里，高南里，高西里，海濱里
	龍井區	臺中港，麗水里，福田里
臺東縣	大武鄉	大竹村，南興村，尚武村，大武村，大鳥村
	太麻里鄉	大王村，三和村，香蘭村，金崙村，華源村，泰和村，美和村，北里村，多良村
	成功鎮	忠智里，忠孝里，信義里，和平里，忠仁里，三仙里，博愛里
	卑南鄉	富山村
	東河鄉	隆昌村，都蘭村，興昌村，東河村
	長濱鄉	樟原村，寧埔村，竹湖村，長濱村，三間村
	達仁鄉	安朔村，南田村
	綠島鄉	南寮村，中寮村，公館村
	臺東市	復國里，復興里，成功里，建國里，知本里，建農里，豐原里，豐里里，豐谷里，豐榮里，新興里，富岡里
	蘭嶼鄉	全村里
臺南市	七股區	塭埕里，龍山里，十份里，三股里，西寮里
	北門區	永華里，永隆里，慈安里，雙春里，保吉里
	安平區	漁光里，金城里
	安南區	海南里，四草里，城西里
	南區	松安里，永寧里，鯤鯓里，佛壇里，省躬里，喜南里，喜北里
	將軍區	鯤鯓里，平沙里，長沙里

表 4-10 離海岸 300 公尺至 3 公里以內(中度鹽害區)之村里[4]

縣/市	區	村/里
宜蘭縣	五結鄉	大吉村，協和村，孝威村，利澤村
	冬山鄉	補城村，武淵村，大興村，三奇村
	壯圍鄉	吉祥村，功勞村，古結村，美城村，新南村，忠孝村，古亭村
	南澳鄉	碧候村，南澳村，東岳村
	頭城鎮	金盈里，二城里，福成里，金面里，拔雅里，城北里，下埔里，城西里，城東里，中崙里，城南里，頂埔里，武營里
	礁溪鄉	白雲村，二龍村，玉田村，時潮村
	蘇澳鎮	聖湖里，永光里，蘇西里，聖愛里，新城里，蘇南里，龍德里，南強里，隘丁里，長安里，永榮里，永樂里，南正里，蘇北里，南成里，南安里，南興里
花蓮縣	光復鄉	東富村
	吉安鄉	稻香村，南昌村，宜昌村，勝安村，北昌村，仁里村，仁和村，光華村
	秀林鄉	富世村，秀林村，佳民村，景美村
	花蓮市	國裕里，國富里，國強里，國聯里，國盛里，國魂里，國防里，主權里，國華里，國安里，國風里，主力里，民享里，民意里，國威里，主工里，主學里，民政里，主信里，主睦里，國治里，

		主義里，國光里，主商里，民勤里，民生里，主勤里，主農里，民族里
	新城鄉	佳林村，嘉新村，北埔村，嘉里村
	瑞穗鄉	奇美村
	壽豐鄉	平和村，月眉村
	鳳林鎮	山興里
屏東縣	牡丹鄉	石門村，東源村，高士村
	車城鄉	溫泉村，保力村，統埔村，福興村，田中村
	佳冬鄉	大同村，玉光村，萬建村，佳冬村，羌園村，六根村
	東港鎮	大鵬里，興東里，頂新里，新勝里，船頭里，頂中里，東和里，興台里，中興里，大潭里，共和里，東隆里，八德里，興漁里
	枋寮鄉	太源村，內寮村，天時村，地利村，人和村
	林邊鄉	竹林村，永樂村，中林村，鎮安村，仁和村，林邊村，田厝村，光林村
	恆春鎮	網紗里，山腳里，仁壽里，龍水里，茄湖里，四溝里
	春日鄉	春日村
	新園鄉	中洲村，興龍村，南龍村，五房村，鹽埔村
	獅子鄉	內文村
	滿州鄉	响林村，滿州村，永靖村
苗栗縣	竹南鎮	新南里，正南里，竹南里，照南里，大厝里，開元里，大埔里，中港里，佳興里，中華里，營盤里，聖福里，山佳里，公義里，龍山里，港墘里
	西湖鄉	湖東村，三湖村，二湖村
	後龍鎮	大庄里，北龍里，中龍里，東明里，灣寶里，南龍里，溪洲里
	苑裡鎮	中正里，田心里，苑坑里，新復里，客庄里，苑南里，苑東里，苑北里，西勢里
	通霄鎮	圳頭里，內湖里，平安里，福龍里，福源里，梅南里，平元里，通東里
	造橋鄉	朝陽村，龍昇村，談文村
	頭份市	田寮里，後庄里
桃園市	大園區	橫峰里，菓林里，大園里，溪海里，埔心里，後厝里，田心里，南港里，竹圍里
	新屋區	下田里，石牌里，大坡里，楝榔里，後庄里，下埔里
	蘆竹區	外社里，山腳里
	觀音區	塔腳里，三和里，坑尾里，武威里，廣興里
高雄市	三民區	鳳南里，德西里，豐裕里，千歲里，力行里，川東里，裕民里，千秋里，千北里，立德里
	小港區	港后里，港南里，港墘里，港明里，港正里，山明里，坪頂里，小港里，鳳宮里，港口里，高雄港，鳳林里

	左營區	永清里，廟東里，新下里，中南里，尾西里，中北里，進學里，頂北里，尾北里，聖后里，聖西里，頂西里，聖南里，埤東里，城南里，合群里，海勝里，果惠里，路東里，廍北里，果峰里，埤北里，果貿里，廍南里，埤西里，自助里，明建里
	永安區	保寧里，維新里，永安里
	岡山區	石潭里
	林園區	潭頭里，溪州里，林園里，王公里，林家里，仁愛里，東林里，廣應里，文賢里，五福里，龔厝里，頂厝里
	前金區	北金里，榮復里，社西里，國民里，博孝里，林投里，後金里，新生里
	前鎮區	明禮里，振興里，平等里，忠誠里，建隆里，平昌里，鎮海里，明道里，明義里，明正里，忠純里，信德里，鎮昌里，德昌里，鎮東里，鎮榮里，興邦里，鎮陽里，興仁里，信義里，草衙里，前鎮里，鎮中里，仁愛里，興化里，明孝里，鎮北里，高雄港
	苓雅區	城西里，田西里，鼓中里，城北里，意誠里，苓雅里，博仁里，苓洲里，苓昇里，苓中里，苓東里
	茄萣區	福德里，和協里
	梓官區	同安里，梓和里，梓信里，梓義里，梓平里，典寶里，大舍里，茄苳里
	湖內區	海山里，文賢里，逸賢里，劉家里，中賢里，忠興里
	楠梓區	建昌里，裕昌里，泰昌里，國昌里，藍田里，大昌里，福昌里，興昌里，廣昌里，久昌里，中興里
	路竹區	頂寮里，新達里
	鼓山區	華豐里，裕豐里，裕興里，民強里，龍水里，平和里，鼓峰里，河邊里，厚生里，光榮里，忠正里，樹德里，綠川里，寶樹里，雄峰里，前峰里，民族里，內惟里，建國里，山下里，光化里，興宗里，登山里，麗興里，延平里，新民里，維生里，正德里，惠安里，鼓岩里，峰南里，龍井里，壽山里，哨船頭里，自強里
	鳳山區	福興里
	橋頭區	頂鹽里
	彌陀區	鹽埕里，彌靖里，彌仁里，彌壽里，彌陀里，過港里，文安里，漯底里
	鹽埕區	育仁里，光明里，藍橋里，沙地里，府北里，瀨南里，南端里，河濱里，壽星里，新樂里，慈愛里，中原里，江南里，新化里，博愛里，中山里，陸橋里，港都里，教仁里，新豐里，江西里
基隆市	中山區	新建里，安民里，西榮里，安平里，中山里，西華里，民治里，西定里，中興里，西康里，仁正里，健民里，和慶里，居仁里，和平里，德和里，通化里，仙洞里，通明里，德安里

2. 混凝土材料與保護層規定

交通部「公路橋梁設計規範」[5]第十二章與「鐵路橋梁設計規範」[4]第六章，海洋鹽害環境下混凝土品質要求如下：

(1)海洋鹽害環境中各環境作用等級的鋼筋混凝土構件，混凝土最大水膠比及最低抗壓強度應符合表 4-11 之規定。

表 4-11 鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度[4, 5]

	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
最大水膠比	0.4	0.4	0.45
最低抗壓強度最小 f_c' (kgf/cm^2)	350	350	280

(2)凝土最小保護層厚度依各種不同曝露等級會有不同建議值，惟橋梁可能會同時面臨二種以上之環境，鋼筋保護層厚度應就各環境所需厚度中選擇較厚者為該構件之最小保護層厚度。交通部「公路橋梁設計規範」[5]與「鐵路橋梁設計規範」[4]規定如下：

①主要構件鋼筋保護層厚度依設計年限、橋梁部位及所處環境作用等級列於表 4-12。

表 4-12 鹽害環境下主要構件鋼筋最小保護層厚度(cm) [4, 5]

設計年限	50 年			100 年		
環境作用等級 / 橋梁部位	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
基礎、基樁	10	10	10	10	10	10
柱、牆	10	7.5	7.5	10	10	7.5
橋面板頂層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
橋面板下層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
箱梁底層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
「I」「T」梁、箱梁腹版外露面	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
混凝土面未直接曝露於大氣、未與土壤或水接觸	4	4	4	4	4	4

②基礎

A.鑽掘樁鋼筋保護層厚度於有永久性套管時不可小於 5 cm，無套管時不可小於 7.5 cm。當基樁置於具腐蝕或鹼性環境、或於水中或泥漿中澆置混凝土時，則無套管之基樁或具永久性套管但腐蝕抵抗能力不足之基樁，其鋼筋保護層厚度不應小於 10 cm。

B.預力樁之表面與鋼筋間之淨距不得小於 5 cm，但以離心式製造者除外。大口徑空心圓樁之壁厚不得小於 13 cm。

③鋼筋混凝土

鋼筋最小混凝土保護層如表 4-13，若處於腐蝕、海洋環境或其他嚴重曝露情況下則應參照該「公路橋梁設計規範」第 12.4 節或「鐵路橋梁設計規範」第 6.4 節之規定辦理。此外，應注意工作筋之設立位置，否則保護層厚度應由工作筋位置開始算起。

表 4-13 鋼筋最小混凝土保護層厚度[4, 5]

	最小保護層厚度(cm)
不曝露大氣中或不與土壤接觸之混凝土	
主鋼筋	4.0
肋筋、箍筋及螺箍筋	2.5
溫和氣候中之混凝土橋板	
頂層鋼筋	5.0
底層鋼筋	2.5
露置於土中或大氣中之混凝土	
主鋼筋	5.0
肋筋、箍筋及螺箍筋	4.0
直接澆置且永久埋置於土中或水中之混凝土	7.5
直接澆置且(或)永久埋於土中之混凝土樁	7.5

③預力混凝土

A.預力鋼材及鋼筋防蝕保護採用最小混凝土保護層規定如下：

(a) 預力鋼材及主鋼筋為 4 cm。

(b) 版鋼筋－版之頂層為 4 cm；版之底層為 2.5 cm。

(c) 肋筋及繫筋為 2.5 cm。

(d) 構材曝露於鹽水、鹽性水沫或化學蒸氣中時保護層應加厚。

B.錨碇、端部配件、連接器及外露鋼腱應有永久保護措施。

(3) 主要構件應採用添加礦物摻料之混凝土，礦物摻料總量不得超過總膠結材料重量之 50%，且建議不小於總膠結材料重量之 40%，其中飛灰不得超過 15%，巨積混凝土或特殊用途混凝土除外。

(4) 當採用附加保護措施或非規範建議之混凝土水膠比、抗壓強度、礦物摻料取代量時，可另依學理或試驗提出合適最小保護層厚度。

當前 109 年版「公路橋梁設計規範」及 112 年版「鐵路橋梁設計規範」之保護層訂定考量，50 年設計年限保護層厚度係參考 98 年版規範規定訂定而成，100 年設計年限以「本土化氯離子侵蝕耐久性分析模式」(即本節之鹽害耐久性分析模式)計算而得。然而該規範用於計算保護層厚度所使用之氯離子擴散係數(D_P)為一固定值，並未根據不同鹽害區進行差異化。若將 D_P 進行差異化後重新帶入鹽害耐久性分析模式，而保護層厚度按原規範之規定值，嚴重鹽害區之混凝土抗氯離子能力要求須高於極嚴重鹽害區才可滿足其設計年限，將造成不甚合理之規定。故本計畫重新分析各鹽害分區在設計年限 50 年及 100 年時所需之保護層厚度，並提出混凝土抗氯離子能力要求的建議值，如表 4-15 所示。表 4-15 與「鐵路橋梁設計規範」、「公路橋梁設計規範」不同之處在於嚴重鹽害區設計年限 50 年之柱與牆保護層厚度為 7.5 cm，橋面板與梁之保護層厚度為 5.5 cm，表 4-15 建議增加為 9 cm 與 6 cm；設計年限 100 年之嚴重鹽害區橋面

板與梁保護層厚度為 6.5 cm，建議增加為 7 cm，中度鹽害區設計之柱與牆保護層厚度為 7.5 cm，建議增加為 8 cm。

「鹽害耐久性分析模式」係以 90 天貯鹽試驗(Ponding test)之氯離子擴散係數進行設計年限與保護層厚度分析(參照規範 CNS 15649、AASHTO T259 或 ASTM C1543)，但試驗需以養護 91 天齡期之試體再進行 90 天之貯鹽過程，共需約 180 天之試驗時間，參考文獻[2, 65, 120]有關於氯離子傳輸係數與擴散係數之關係式、淡江大橋之耐久性探討報告之擴散係數建議值[120]及其聯絡道工程(第 3 標)鋼筋混凝土結構服務年限預測模式[121] (參見圖 4.7、圖 4.8)以及淡江大橋施工說明書第 03310 章「結構用混凝土」之 3.3.9 節抗氯離子滲透性之相關規定為基礎，提出 28 天與 56 天之氯離子非穩態傳輸係數試驗進行代替。各鹽害分區氯離子擴散係數(D_P)與傳輸係數(D_{RCM})建議值如表 4-18 所示，建議以混凝土齡期 28 天之氯離子傳輸係數做為品質控制標準、齡期 56 天氯離子傳輸係數為評定依據。

表 4-14 鐵路橋梁設計規範、公路橋梁設計規範之保護層對應抗氯離子能力要求(擴散係數 $10^{-12}m^2/s$)

設計年限	50 年			100 年		
環境作用等級 / 橋梁部位	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
基礎、基樁	≤4.24	≤5.26	≤8.13	≤2.57	≤3.19	≤4.93
柱、牆	≤4.24	≤2.90	≤4.41	≤2.57	≤3.19	≤2.68
橋面板頂層筋	≤1.69	≤1.46	≤1.82	≤1.40	≤1.27	≤1.65
橋面板下層筋	≤1.69	≤1.46	≤1.82	≤1.40	≤1.27	≤1.65
箱梁底層筋	≤1.69	≤1.46	≤1.82	≤1.40	≤1.27	≤1.65
「I」「T」梁、箱梁腹版外露面	≤1.69	≤1.46	≤1.82	≤1.40	≤1.27	≤1.65

表 4-15 鹽害環境下主要構件保護層厚度建議(cm)

設計年限	50 年			100 年		
環境作用等級 / 橋梁部位	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
基礎、基樁	10	10	10	10	10	10
柱、牆	10	**9**	7.5	10	10	**8**
橋面板頂層筋	6.5	**6**	5	7.5	**7**	6
橋面板下層筋	6.5	**6**	5	7.5	**7**	6
箱梁底層筋	6.5	**6**	5	7.5	**7**	6
「I」「T」梁、箱梁腹版外露面	6.5	**6**	5	7.5	**7**	6
混凝土面未直接曝露於大氣、未與土壤或水接觸	4	4	4	4	4	4

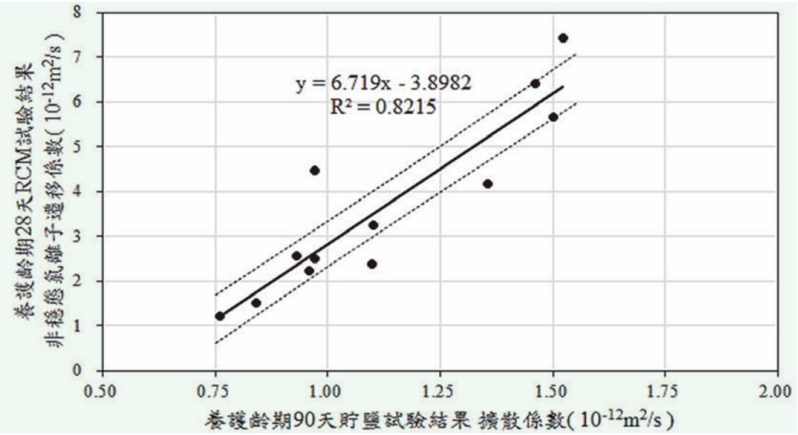


圖 4.7 28 天齡期 RCM 試驗與養護齡期 90 天貯鹽試驗結果關係圖[121]

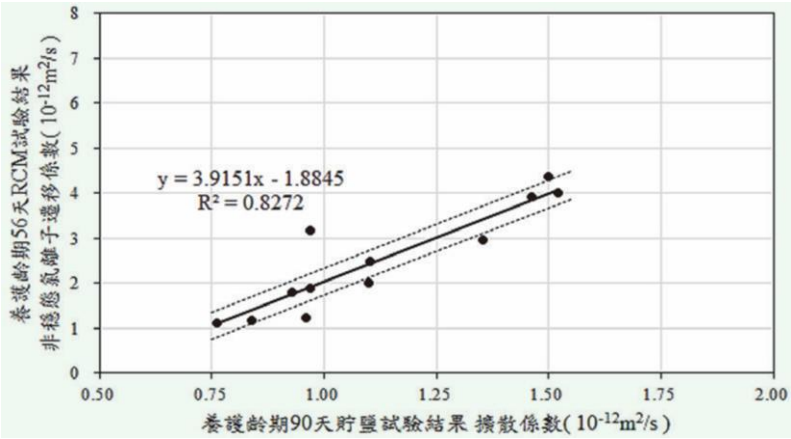


圖 4.8 56 天齡期 RCM 試驗與養護齡期 90 天貯鹽試驗結果關係圖[121]

表 4-16 各齡期之擴散係數與傳輸係數之簡易倍數轉換關係[120]

配比編號	非穩態傳輸係數($10^{-12}m^2/s$)		91 天傳輸係數	倍數轉換關係	
	28 天(M_{28})	56 天(M_{56})	($10^{-12}m^2/s$)(D_{91})	(M_{28})/(D_{91})	(M_{56})/(D_{91})
350OPC	7.43	4.00	1.52	4.89	2.63
420OPC	6.39	3.91	1.46	4.38	2.68
490OPC	4.16	2.98	1.35	3.08	2.21
350SCC	5.66	4.36	1.50	3.77	2.91
420SCC	4.48	3.17	0.97	4.62	3.27
490SCC	2.56	1.79	0.93	2.75	1.92
擴散係數與傳輸係數之平均倍數關係				3.9	2.6
擴散係數與傳輸係數之簡易倍數轉換關係				**4.0**	**2.5**

表 4-17 考量 10mm 誤差下淡江大橋各構件 D_{RCM} 建議值[120]

類型		部位		保護層 (cm)	設計強度 kgf/cm^2	水膠比	混凝土種類	原招標文件值		極嚴重鹽害區 C_0=30 kg/m^3			嚴重鹽害區 C_0=20 kg/m^3			建議值	
								D_{RCM} 最大值		D_{ref}	推估 D_{RCM}		D_{ref}	推估 D_{RCM}		D_{RCM} 最大值	
								28 天	56 天		28 天	56 天		28 天	56 天	28 天	56 天
								10^{-12}m^2/s									
			水下區+飛沫區 (EL. -11.4~10)	10.0	560	0.35	II型低鹼	6.5	4.5	2.05	9.9	6.1	-	-	-	5.0	3.0
		橋墩(塔)基礎		10.0	350	0.40	自充填/巨積	7.0	5.0	1.99	9.5	5.9	-	-	-	7.0	5.0
		場鑄基樁		10.0	350	0.40	水中	7.0	5.0	1.99	9.5	5.9	-	-	-	7.0	5.0
其他橋梁	上部結構	預力箱型梁	橋面板頂面	7.5	420	0.40	I型	7.5	5.5	-	-	-	1.36	5.3	3.4	5.0	3.0
			箱型梁外側	7.5	420	0.40	I型	6.0	4.0	-	-	-	1.36	5.3	3.4	5.0	3.0
			箱型梁內側及隔梁	4.0	420	0.40	I型	6.0	4.0	-	-	-	-	-	-	5.0	3.0
	下部結構、擋土牆	河道內橋墩	大氣區 (>EL. 10)	7.5	560	0.35	II型低鹼	6.5	4.5	-	-	-	1.42	5.6	3.7	5.0	3.0
			水下區+飛沫區 (EL. -11.4~10)	10.0	560	0.35	II型低鹼	6.5	4.5	2.05	9.9	6.1	-	-	-	5.0	3.0
		河道外橋墩		7.5	420	0.40	II型低鹼	7.0	5.0	-	-	-	1.36	5.3	3.4	5.0	3.0
		橋臺、翼牆及擋土牆		10.0	350	0.40	I型	7.5	5.5	-	-	-	2.52	13.0	8.0	7.0	5.0
		橋墩、橋臺、翼牆及擋土牆等之基礎		10.0	350	0.40	自充填	7.0	5.0	-	-	-	2.52	13.0	8.0	7.0	5.0
		場鑄基礎		10.0	350	0.40	I型	7.0	5.0	-	-	-	2.52	13.0	8.0	7.0	5.0
		橋護(隔)欄 (設計年限 50 年)		5.0	350	0.40	I型	7.5	5.5		-	-	1.26	4.6	3.0	5.0	3.0

表 4-18 鹽害環境下主要構件混凝土抗氯離子能力建議

設計年限	50 年			100 年		
環境作用等級 / 抗氯離子能力	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
90 天齡期混凝土 貯鹽試驗 D_P ($10^{-12}m^2/s$)	≤ 1.6	≤ 1.8	≤ 1.8	≤ 1.4	≤ 1.4	≤ 1.6
56 天齡期混凝土 RCM 試驗 D_{RCM} ($10^{-12}m^2/s$)	≤ 4.0	≤ 4.5	≤ 4.5	≤ 3.5	≤ 3.5	≤ 4.0
28 天齡期混凝土 RCM 試驗 D_{RCM} ($10^{-12}m^2/s$)	≤ 6.5	≤ 7.0	≤ 7.0	≤ 5.5	≤ 5.5	≤ 6.5

3. 鹽害耐久性分析模式

文獻[2, 65, 120]以 2006 至 2015 年(近 10 年)間之臺灣沿海地區氯鹽環境調查結果為基礎提出之「臺灣地區鹽害環境分區」與「本土化鹽害耐久性分析模式」，透過帶入初始氯離子濃度(C_i)、表面氯離子濃度(C_0)、臨界氯離子濃度(C_t)、設計年限與保護層厚度等數據，計算混凝土所需之抗氯離子能力(擴散係數)。「臺灣地區鹽害環境分區」定義之各鹽害環境之混凝土表面氯離子濃度如表 4-19。

表 4-19 各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度[2, 65, 120]

作用等級	混凝土表面氯離子濃度 C_0 (kg/m^3)
極嚴重鹽害區	20 ~ 30
嚴重鹽害區	10 ~ 20
中度鹽害區	4 ~ 10

本土化鹽害耐久性分析模式採用 Fick 第二擴散定律，如式(4-31)，氯離子擴散係數參考美國 Life-365 以時間函數表示，如(4-32)，經驗係數 m 如(4-33)。其中與時間有關的 $D(t)$移至等號左側後得式(4-34)，再令$\partial T = D(t)\partial t$ 代入後可得式(4-35)。依初始條件 $C(x \geqq 0, t=0) = C_i$ 與邊界條件 $C(x=0, t>0)=C_0$、$C(x=\infty, t>0) = C_i$ 解偏微分方程式，可得式(4-36)。積分∂T 時考量擴散係數於一定時間 t_s 後衰減停止形成式(4-37)，再其代入式(4-36)可得式(4-38)。最終當氯離子濃度 $C(x,t)$不超過臨界濃度 C_t，即可得式(4-39)。

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{.....(4-31)}$$

$$D(t) = D_P\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad \text{.....(4-32)}$$

$$m = 0.2 + 0.4\left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70}\right) \quad \text{.....(4-33)}$$

$$\frac{1}{D(t)} \times \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{.....(4-34)}$$

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial T} = \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{.....(4-35)}$$

$$C(x,t) = C_i + (C_0 - C_i)\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{T}}\right)\right] \quad \text{.....(4-36)}$$

$$\begin{aligned} T &= \int_0^t D(t)dt = \int_0^{ts} D_P\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt + \int_{ts}^t D_P\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt \\ &= D_P\left[\frac{t_{ref}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m (t - t_s)\right] \end{aligned} \quad \text{.....(4-37)}$$

$$C(x,t) =$$

$$C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\frac{x_d - \Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_P\left[\frac{{t_{ref}}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m (t - t_s)\right]}}\right) \quad \text{....(4-38)}$$

$$C_t \geq$$

$$C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\frac{x_d - \Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_P\left[\frac{{t_{ref}}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m (t - t_s)\right]}}\right) \quad \text{....(4-39)}$$

擴散係數遞減上限為 25 年，只有當氯離子侵入之時間(年) t 大

於 25 時式(4-37)才成立。若 t 小於 25(年)，須帶入條件 $t= t_s$ 計算(4-37)，改寫後的方程式如式(4-40)，將(4-40)帶入式(4-36)後可以得到式(4-41)，最後帶入條件 $C(x,t) \le C_t$，即可得式(4-42)。表 4-18 包含 D_P 與 D_{RCM} 兩種係數，不同配比組成之混凝土皆會有不同之 D_P 與 D_{RCM} 關係式，本計畫建議若有貯鹽試驗與 RCM 試驗數據，得以優先使用試驗數據求得關係式後，進行擴散係數與傳輸係數之轉換。若無相關試驗數據，可參考本計畫依據混凝土耐久性試驗相關研究數據與分析模式(參考文獻[2, 65, 120-125])整理之混合水泥(爐石粉、飛灰)混凝土貯鹽試驗 D_P 與 RCM 試驗 D_{RCM} 轉換經驗式進行簡易換算，56 天齡期 RCM 試驗經驗式如式(4-43)、28 天如式(4-44)。

$$T = \int_0^t D(t)\,dt = \int_0^t D_P \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt = D_P \left[\frac{{t_{ref}}^m t^{1-m}}{1-m}\right] \quad \text{.....(4-40)}$$

$$C(x,t) = C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\,\frac{x_d - \Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_P \left[\dfrac{{t_{ref}}^m t^{1-m}}{1-m}\right]}}\right) \quad \text{.....(4-41)}$$

$$C_t \ge C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\,\frac{x_d - \Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_P \left[\dfrac{{t_{ref}}^m t^{1-m}}{1-m}\right]}}\right) \quad \text{.....(4-42)}$$

$$D_{RCM}\left(56\ \text{Days}\right) = D_P \times 2.5 \quad \text{.....(4-43)}$$

$$D_{RCM}\left(28\ \text{Days}\right) = D_P \times 4 \quad \text{.....(4-44)}$$

普通卜特蘭水泥 $C_t = -3.0\left(\dfrac{W}{B}\right) + 3.4$ ....(4-45)

混合水泥(爐石粉、飛灰) $C_t = -2.6\left(\dfrac{W}{B}\right) + 3.1$ ....(4-46)

低熱高爐水泥，早強卜特蘭水泥 $C_t = -2.2\left(\dfrac{W}{B}\right) + 2.6$ ....(4-47)

矽灰水泥 $C_t = 1.2$ .....(4-48)

其中，C_i：混凝土初始氯離子濃度(kg/m^3)，參見 CNS 3090。

C_0：混凝土表面氯離子濃度(kg/m^3)，參考表 4-19。

x：保護層厚度(m)。

x_d：耐久性要求之最小保護層厚度(m)。

Δx：保護層施工誤差(m)。

t：氯離子侵入之時間(年)。

t_s：混凝土氯離子擴散係數不再遞減之時間(年)，取 25 年。

β_{cl}：混凝土瑕疵及裂縫影響係數，主要構件 1.4、次要 1.25。

D_p：混凝土氯任一參考時間之擴散係數(10^{-12}m^2/s)。

t_{ref}：D_P 對應之參考時間，取 90 天。

m：經驗係數，與卜作嵐摻料添加量有關。

D_{RCM}： RCM 試驗混凝土傳輸係數(10^{-12}m^2/s)。

W/B：混凝土水膠比。

FA：飛灰添加百分比。

SG：爐石粉添加百分比。

C_t：鋼筋腐蝕臨界氯離子濃度(kg/m^3)。

本土化鹽害耐久性分析模式需先確定所用之混凝土配比之水膠比與膠結材組成(礦物摻料使用量)，以此計算臨界氯離子濃度(C_t)，再將初始氯離子濃度(C_i)、混凝土表面氯離子濃度(C_0)、臨界氯離子濃度(C_t)等代入式(4-21)，即可根據需求分析設計年限、保護層厚度或混凝土之氯離子擴散係數，分析方法如下。若有特定設計條件，如 120 年設計年限、特定保護層厚度以及混凝土氯離子擴散係數大於表 4-18 者，可以式(4-39)進行計算。然而，當所需之設計年限(或計算結果)經式(4-39)計算後小於 25 年者，須以式(4-42)重新計算。

(1)設計年限：帶入構件之保護層厚度與混凝土之氯離子擴散係數

(2)保護層厚度：帶入設計年限與混凝土之氯離子擴散係數

(3)混凝土之氯離子擴散係數：帶入設計年限與保護層厚度。

4.1.5 硫酸鹽環境之設計標準建議

1. 環境作用等級

參考美國混凝土學會 ACI 318-19(22)[51]及內政部「建築物混凝土結構設計規範」[64]第 19.3.1 節之規定，硫酸鹽環境(S 類)適用於接觸含有害量水溶性硫酸根離子土壤或水之混凝土，其作用環境分級如表 4-20 所示：

(1)S0 級曝露適用於接觸低濃度水溶性硫酸鹽，不需考慮硫酸鹽侵蝕之條件。

(2)S1、S2 與 S3 級曝露適用於直接接觸到含水溶性硫酸鹽土壤或水之結構混凝土構材。曝露之嚴重程度由 S1 級遞增至 S3 級，以土壤中所量測之水溶性硫酸鹽濃度或水中溶解硫酸鹽濃度之臨界值為依據。

(3)土壤中硫酸鹽之質量百分比應依 ASTM C1580 測定。水中溶解硫酸鹽之濃度 ppm 應依 CNS 1237 測定。

表 4-20 硫酸鹽環境之作用環境分級[51, 64]

類別	分級	混凝土之環境條件	
		土壤中之水溶性硫酸鹽 (SO_4^{2-}),質量%(1)	水中溶解之硫酸鹽 (SO_4^{2-}),ppm(2)
硫酸鹽 (S)	S0	SO_4^{2-}<0.10	SO_4^{2-}<150
	S1	0.10≦SO_4^{2-}<0.20	150≦SO_4^{2-}<1,500 或海水
	S2	0.20≦SO_4^{2-}≦2.00	1,500≦SO_4^{2-}≦10,000
	S3	SO_4^{2-}>2.00	SO_4^{2-}>10,000

註 1：土壤中硫酸鹽的質量百分比應依 ASTM C1580 測定。

註 2：水中溶解硫酸鹽的濃度 *ppm* 應依 CNS 1237 測定。

2. 混凝土品質要求

曝露類別 S 混凝土拌成物要求，除非另有規定外，應提供符合

表 4-21 及表 4-22 要求的混凝土，此是基於結構構件受到硫酸鹽曝露的等級，或滿足其他契約文件中指定的要求，提交的文件須驗證且符合指定要求。

基於國內混合水泥之種類較少，當工程設計使用水硬性混合水泥時，仍得依性能需求複合使用水淬高爐石粉、燃煤飛灰、矽灰等輔助膠結材料，但水硬性混合水泥中之輔助膠結材與配比中額外摻用之輔助膠結材總量比例，若合約中有使用量要求，則仍應符合用量比例限制。

表 4-21 曝露類別 S 的要求[64]

曝露等級		最大 W/B(1,2)	最小 f_c' kgf/cm^2(MPa)	膠結材料(3)-種類		氯化鈣摻料
				CNS 61	CNS 15286	
S0		NA	210(21)	無限制	無限制	無限制
S1		0.50	280(28)	II型(4,5)	含(MS)標記之分類	無限制
S2		0.45	315(31)	V型(5)	含(HS)標記之分類	不允許
S3	選項 1	0.45	315(31)	V型加卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉(6)	含(HS)標記之分類加卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉(6)	不允許
	選項 2	0.40	350(35)	V型(7)	含(HS)標記之分類	不允許

註 1：W/B 係基於混凝土拌成物中所有的膠結及輔助膠結材料。

註 2：表中之 W/B 最大限值不適用於輕質粒料混凝土。

註 3：所列膠結材料之替代組合經抗硫酸鹽測試且符合表 4-12 中準則者允許使用。

註 4：曝露於海水環境下，若 W/B 不超過 0.40 時，允許使用鋁酸三鈣(C_3A)為 10%以下之其他類型卜特蘭水泥。

註 5：允許於曝露分級 S1 或 S2 中使用其他種類之水泥，如 I 型或 III 型，若 C_3A 含量低於 8%則可用於 S1 曝露分級或含量低於 5%則可用於 S2 曝露分級。

註 6：當使用於含 V 型水泥之混凝土時，指定來源之卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉用量，須至少達可改善抗硫酸鹽能力使用紀錄之用量。或者，指定來源之卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉用量，須至少為符合 CNS 14794 及符合表 4-12 中準則所定之用量。

註 7：若僅使用 V 型水泥做為膠結材料時，須指定 CNS 61 任選規定中，抗硫酸鹽膨脹下之最大膨脹量 0.040%。

表 4-22 曝露類別 S 的最大膨脹應變要求[64]

曝露等級		最大膨脹應變(符合 CNS 14794 測試規定)，%		
		6 個月	12 個月	18 個月
S1		0.10	NA	NA
S2		0.05	0.10(1)	NA
S3	選項 1	NA	NA	0.10
	選項 2	0.05	0.10(1)	NA

註 1：12 個月膨脹率限制要求只有在量得的膨脹率超過 6 個月時的最大膨脹率限制。

3. 硫酸鹽侵蝕理論計算

硫酸鹽侵蝕破壞成因為硫酸根離子和混凝土中的氫氧化鈣發生反應，生成具有膨脹性的石膏或鈣礬石。目前國際上對於硫酸鹽侵蝕理論計算設計年限並無統一標準，若有硫酸鹽侵蝕評估之需求者，可參閱表 4-23 之參考文獻進行計算，表 4-23 列出相關文獻中有關硫酸鹽侵蝕評估方式與所需之對應參數，以供設計人員有硫酸鹽侵蝕評估者參考。否則，混凝土之混凝土品質條件可依照內政部「建築物混凝土結構設計規範」[64]第 19.3.1 節之規定辦理。

表 4-23 各種硫酸鹽侵蝕預測式之比較說明表

參考文獻	所需輸入的參數	說明
Sulphate resistance of buried concrete; second interim report on long-term investigation at Northwick Park (1981)[126]	①水泥中 C_3A 含量 ②溶液中鎂離子含量 ③溶液中硫酸根離子含量 ④時間	較著重於處置場近場環境溶液中所含的化學成分對混凝土造成的劣化深度影響。
Prediction model of life span degradation under sulfate attack regarding diffusion rate by amount of sulfate ions in seawater (2013)[127]	①硫酸根離子在混凝土中之擴散係數 ②水泥中 C_3A 含量 ③溶液中鎂離子含量 ④溶液中硫酸根離子含量 ⑤時間	較著重於處置場近場環境溶液中所含的化學成分對混凝土造成的劣化深度影響。
Bond strength of deformed bars in large reinforced concrete members cast with industrial self-consolidating concrete mixture(2010)[128]	①硫酸根離子在混凝土中之擴散係數 ②水泥中C_3A含量 ③混凝土表層之硫酸根離子濃度 ④時間	模型計算結果顯示，C_3A 含量越高，劣化深度反而越小，這與腐蝕機理互相違背。
Model for sulfate diffusion depth in concrete under complex aggressive environments and its experimental verification. (2015)[129]	①硫酸根離子在混凝土中之擴散係數 ②水泥中 C_3A 含量 ③混凝土表層之硫酸根離子濃度 ④乾濕循環影響常數 ⑤擴散係數衰減常數 ⑥時間	模型計算結果顯示，C_3A 含量越高，劣化深度反而越小，這與腐蝕機理互相違背。
Mechanistic model for the durability of concrete barriers exposed to sulphate-bearing groundwaters (1989)[130]	①硫酸根離子在混凝土中之擴散係數 ②混凝土彈性模數 ③溶液中硫酸根離子含量 ④造成混凝土表面產生裂縫所需能量 ⑤裂縫表面粗糙度 ⑥泊松比 ⑦時間	較著重於混凝土基本性質的不同對其抵抗硫酸鹽入侵深度的影響。
隧道襯砌混凝土對硫酸鹽侵蝕耐久壽命預測模型研究(2014)[131]	①混凝土強度劣化係數 ②混凝土水膠比 ③環境中硫酸根離子濃度 ④卜作嵐摻料添加比例 ⑤養護法 ⑥時間	較著重混凝土基本性質的不同對硫酸鹽侵蝕強度劣化的影響。

由於表 4-23 所列預測式大多需要代入硫酸根離子在混凝土中之擴散係數，但目前國際上並沒有標準之試驗規範，僅有文獻[131]提出之預測式，評估變因著重在混凝土基本性質，且不需輸入擴散係數數值，其評估經驗式說明如下：

$$K_f = K_W \cdot K_C \cdot K_F \cdot K_M \cdot K_S \cdot K_Y \cdot e^{-0.003t} \quad \text{.....(4-49)}$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{K_W K_C K_F K_M K_S K_Y}{0.75}\right)}{0.003} \quad \text{.....(4-50)}$$

其中，K_f：混凝土硫酸鹽侵蝕強度劣化係數。

K_W：水膠比影響係數。

K_C：硫酸鹽濃度影響係數。

K_F：飛灰摻量影響係數。

K_M：爐石摻量影響係數。

K_S：矽灰摻量影響係數。

K_Y：養護方法影響係數(標準 1.0、蒸氣 0.952、自然養護 0.869、相同環境養護 0.791)。

t：使用年限。

依據 GB/T 50082 規範[132]中建議，當混凝土強度劣化係數低於 75%時，混凝土遭受硫酸鹽侵蝕損傷已較為嚴重，故預測式(4-49)中訂定強度劣化係數 75%做為混凝土耐久性之門檻值。另外預測式(4-49)、(4-50)中的 K_w、K_c、K_F、K_M、K_S 可藉由式(4-51)至(4-55)求得。

$$K_W = -2.30117\frac{W}{B} + 1.97009 \quad \text{.....(4-51)}$$

$$K_C = -0.00018C^3 + 0.00446C^2 - 0.004632C + 1 \quad \text{.....(4-52)}$$

$$K_F = e^{-0.00052F^2 + 0.02350F} \quad \text{.....(4-53)}$$

$$K_M = -0.00023M^2 + 0.01116M + 1 \quad \text{.....(4-54)}$$

$$K_S = -0.00005S^4 + 0.00029S^3 + 0.00746S^2 - 0.03561S + 1 \quad \text{.....(4-55)}$$

其中，*W/B*：水膠比。

C：硫酸鹽溶液質量濃度(%)。

F：飛灰摻量(取代水泥量，%)。

M：爐石粉摻量(取代水泥量，%)。

S：矽灰摻量(取代水泥量，%)。

4.1.6 附加保護措施

在橋梁耐久性設計中，附加保護措施之性質屬於防蝕設計之第二道保險，雖然交通部「鐵路橋梁設計規範」與「公路橋梁設計規範」中附加保護措施並不屬於強制性規定，但對臺灣嚴苛之腐蝕環境而言，附加保護措施之使用有其必要性。對於嚴重鹽害區建議採用至少一種附加保護措施，極嚴重鹽害區採用至少兩種附加保護措施。此外，在橋梁耐久性設計中不應以採用附加保護措施而減少保護層之厚度或降低混凝土品質等方式進行設計。本章針對常用之附加保護措施，如混凝土表面防護、耐腐蝕鋼筋、腐蝕抑制劑與陰極保護等加以說明。

1. 混凝土表面防護

保護系統用在混凝土時需要一種或多種表面防護方法。混凝土表面防護相關內容可參考 ACI 222R[133]、歐盟規範 EN1504-2[134]與財團法人中興工程顧問社「混凝土結構物修補技術指引」[135]。

表面防護主要針對用於混凝土修補與防止鋼筋腐蝕的材料與方法，產品及技術的種類繁多，且新的產品和方法也不斷地研發推廣與應用，因此不可能全部列入。本計畫將表面防護概分為：滲透式密封劑、表面應用之腐蝕抑制劑、表面密封劑、厚塗塗料、薄膜和被覆層。各種不同表面防護的成本差異很大，而正確成本只能從個別計畫中的製造廠商與施工者獲得。

(1)滲透式密封劑

滲透式密封劑是指在施工後通常會滲入混凝土的基底的材料，其滲透深度與產品的特性和混凝土的性質有關。滲透深度由密封劑材料分子大小及混凝土內孔隙結構的尺寸來決定。有時需要較大的滲透深度，尤其是在易受磨蝕的表面上應用時，但這個指標卻不是評估滲透式密封劑效能最重要的指標(ACI 515.1 R)。這種密封劑主要是以撥水劑(Water repellents)或表面硬化劑的配方來達到保護效果，其本身沒有修補裂縫的能力。某些具疏水性(Hydrophobic)產品，可減少水分滲入狹窄的裂縫，這類的產品通

常不會改變混凝土表面的外觀，但有一些產品可能會使混凝土些微地改變顏色。滲透式密封劑不能掩飾表面修補區、裂縫和任何其他的瑕疵。此類的密封劑包含但不限於精煉胡麻子油(Boiled linseed oil)、矽烷 (Silanes)、矽氧烷(Siloxanes)、特定的環氧樹脂(Epoxy)、氟矽酸鎂 (Magnesium)和氟矽酸鋅(Zinc fluorosilicates)和高分子量甲基丙烯酸脂(High Molecular-Weight Methacrylates, HMWM)。如果以環氧樹脂為滲透配方只能輕微地滲入混凝土，或完全不滲透。其應用和限制如下所示：

①滲透式密封劑可用塗刷、滾輪、刮板或噴灑方式在混凝土基底上施作，由於滲透式密封劑易受表面污染物及先前已存在的密封劑影響，因此適當的表面處理是非常重要的。與其他塗料或薄膜系統相較，其抗紫外線及抗磨蝕通常較好。

②滲透式密封劑對新產生或既有的裂縫沒有封閉能力。這類產品有溶劑型和水溶性型，溶劑型產品可能有要符合揮發性有機化合物法規限制的問題。

(2) 表面應用之腐蝕抑制劑

腐蝕抑制劑應能降低鋼筋的腐蝕速率，但由於腐蝕抑制劑的效能隨腐蝕抑制劑類型、混凝土特性和現場使用狀況有顯著差異，因此很難預估其使用成效與年限。報告顯示使用同種配方的腐蝕抑制劑，其效能卻有極大差異，這顯示對一特定腐蝕抑制劑，使用參數不同將影響腐蝕抑制劑的效果。因此，研究腐蝕抑制劑效果是修補材料及其應用應重視的問題、生產商應提供完整的資料包括腐蝕抑制劑的類型、建議使用方式、使用頻率、限制因素、預期效果、監測方法等。

(3) 表面密封劑

表面密封劑通常指鋪或黏附於混凝土表面厚度在 0.25 mm 或以下的產品。表面塗料和油漆的乾膜厚介於 0.03 到 0.25 mm，雖然這些產品可加入顏料或有其自身的顏色，但有些是透明的，並

可使表面形成一個潤濕或光澤的外觀。他們可明顯的改變混凝土表面質地，但難以掩蓋大部分的表面瑕疵。表面密封劑沒有明顯的封閉裂縫能力，雖然有一些產品具疏水性可能降低水分進入狹窄的裂縫。除此之外，某些產品可能填滿靜止的裂縫，以減少水分經由這些裂縫滲入。這類的產品包含環氧樹脂(Epoxies)、聚氨脂(Polyurethanes)、高分子量甲基丙烯酸脂(HMWM)、矽氧烷(Siloxanes)、矽烷(Silanes)、濕氣硬化型胺酯 (Moisture-cured urethanes)和丙烯酸樹脂(Acrylic resins)。某些塗料不管是油基(Oil-based)或乳膠基(Latex-based)(如苯乙烯-丁二烯(Styrene-butadiene))、聚醋酸乙烯酯(Polyvinyl acetate)、丙烯酸(Acrylic)的或上述塗料與其他分散於水中的聚合物)，只要厚度少於 0.25 mm 也包含在這分類中。

表面密封劑可減少水、氯化物和一些溫和化學物滲入混凝土，可用毛刷、滾輪、刮板或噴灑方式塗在混凝土表面上。一些產品內的化學載體(Chemical carriers)可能引起使用限制，使用時應遵循製造廠商的安全建議。表面密封劑通常降低防滑性，也不能封閉活動裂縫，但可有效填滿(不是修補)小的靜止裂縫。大部分這些產品易受到紫外線及表面磨蝕的影響。根據使用的溶劑種類，某些產品有符合揮發性有機化合物法規的問題。現行能符合揮發性有機化合物法規的較新配方產品其使用時間不長。

(4)厚塗塗料

厚塗塗料是指應用於混凝土表面其乾膜厚大於 0.25 mm 小於 0.75 mm 的材料。厚塗塗料會改變混凝土表面的外觀，可外加顏料，而且能部分地掩蓋混凝土的表面瑕疵。這類產品的基本聚合體包含(但不限於)丙烯酸(Acrylics)、醇酸樹脂(Alkyds)、 苯乙烯丁二烯共聚(Styrene butadiene copolymers)、乙烯基酯(Vinyl esters)、氯化橡膠(Chlorinated rubbers)、胺基甲酸乙酯(Urethanes)、矽酮(Silicones)、聚酯 (Polyesters)、聚氨脂(Polyurethanes)、聚脲(Polyurea)和環氧樹脂(Epoxies)。

厚塗塗料通常使用於裝飾或保護屏蔽系統，某些產品可能適用於抗風雨、鹽份和溫和的化學品。其應用和限制如下：

①這些產品可用毛刷、滾輪、刮板或噴灑塗佈。用於室外環境，塗料必須能抗氧化和紫外線、紅外光照射，如用於樓地板上，則同時要能抗磨蝕、敲擊和溫和的化學品(如鹽份，油脂和清潔劑)。

②除了塗料的耐久性之外，應能維持塗料和混凝土基底間的黏著，縱使有適當的表面處理，黏著也可能會破壞。如果塗料的水蒸汽滲透性低，水可能在混凝土與塗料的介面間凝結而破壞黏著。

③環氧樹脂普遍使用於修補材料，具有好黏著性和耐久性，當摻細粒料時可以改善磨蝕和防滑性。一些應用在平面的厚塗塗料，包括沒有粒料的環氧樹脂，在表面濕潤的狀況下其抗滑性能不足，因此不適用於行人道或車道。無彈性的厚塗塗料通常不能封閉活動裂縫，但可有效的填滿細小的靜止裂縫，這類產品抗磨耗特性相較薄塗料的系統好。

④在修補工程中用於降低鋼筋腐蝕的塗料，可能同時要達到結構防水、抵抗化學侵蝕或改良外觀功能。選擇用於外牆與地坪上的保護塗料時，材料的透氣性是一個重要的性質。目前已有能使用做為裝飾，同時可提供充份防水保護的厚塗塗料配方。

⑤有些產品為溶劑型，早期的配方可能有揮發性有機化合物法規問題，新型能符合揮發性有機化合物法規的配方產品並沒有長期現場使用經驗。

(5) 薄膜

薄膜系統係指在混凝土表面上且厚度介於 0.7 mm 至 6 mm 間的表面防護層。它與混凝土表面可能是黏著、部分黏著或不黏著的。這些產品能明顯改變混凝土的表面外觀並能遮掩混凝土表面瑕疵。彈性薄膜和一些厚塗塗料屬於這類產品。

彈性薄膜系統通常具有足夠的厚度和柔性來封閉不同寬度的狹窄靜止裂縫，有些甚至在裂縫寬度有變動的情況下亦能修補。

某些系統使用前需先將寬度大於 0.25 至 0.375 mm 的裂縫予以開槽嵌縫(Routing and caulking)。彈性薄膜通常是灰或黑色的，某些製造廠商提供不同顏色產品，但在紫外線照射下可能會褪色。詳細資料請參考 ACI 362.1R、362.2R 和 350.1/350.1R。這些產品包含(但不限於)胺基甲酸乙酯(Urethanes)、丙烯酸(Acrylics)、環氧樹脂、合成橡膠(Neoprenes)、水泥、聚合物混凝土、和瀝青產品等。薄膜材料應用和限制如下：

①當這些產品為液態時，可以毛刷、刮板、滾輪、鏝刀或噴塗施工。在混凝土邊緣使用預先成形的片材密封以形成一個連續防水膜。大部分薄膜具有抗水性並能封閉小於 0.25 mm 的活動或靜止裂縫。在薄膜表面塗上硬的胺基甲酸乙脂 (Urethane)砂漿或環氧樹脂砂漿層可在交通載重之下提供高抗滑性及抗磨蝕性。對於停車場結構上外露的薄膜可能需要的時常維護，如急坡道、轉彎車道、起動和剎車區域，有些含顆粒表面外塗料的薄膜，雖具抗磨耗防滑特性但難以保持乾淨且本身可能會磨損。

②測定彈性薄膜特性的試驗，特別是用於公路路面上的相當少。製造廠商通常在他們產品技術說明書上列出一些測試結果，但這些結果大都是在各自實驗室採用非標準方法所測出的。

③對交通承載薄膜系統，其關鍵性能指標應與獨立實驗室標準化的測試結果比對，像是滲透率、延伸性、抗拉強度、撕裂強度、黏著性、彈性模數、磨耗阻力、低溫韌性、和水蒸氣透氣性。

(6)被覆層

以黏著、部分黏著或不黏著的方式應用於混凝土表面上，且厚度大於 6 mm 的產品，包括(但不限於此)聚合物混凝土、卜特蘭水泥混凝土、環氧樹脂、聚酯和聚合物改性混凝土。被覆層會改變既有混凝土表面的外觀、質地和既有混凝土面高程。被覆層的厚度能用來改善混凝土板表面的排水性，被覆層可以封閉不移動的裂縫，除非經適當設計，否則活動裂縫可能擴展至被覆層。使用被覆層可提供不同顏色和表面效果的選擇。被覆層可做為耐磨

層並防止水和氯離子的入侵，具抗磨性並可提供裝飾功能(ACI 222 R、345R、546.1R、548.4 和 548.5R)，應用和限制如下：

①被覆層可以澆置或鏝抹、刮刷、噴塗等方法於混凝土表面上施作一或多層，其重量與厚度成正比，因此分析既有結構時應考慮其所增加的靜載重。被覆層能成為既有結構的複合體系，但有時必須考慮額外的補強，如採用銲接鋼線網、鋼筋或纖維來補強。

②為了使被覆層能充份發揮功能，混凝土表面必須潔淨、堅實且有適當粗糙度。而表面處理所產生的浮漿、灰塵和碎屑應移除乾淨。

③開裂對某些黏著型被覆層是一個問題，既有的裂縫會反射至薄的被覆層，因此黏著型被覆層不應使用於有活動裂縫存在或結構會位移的部位，在這些情況下應使用部分黏著或不黏著的被覆層產品。

④在處理冰凍氣候的地坪時，不應使用具水氣屏蔽的被覆層或塗料，因為使用這些材料就會形成一個水蒸氣阻隔層，基底混凝土中滲出的水分被阻隔或倒流，聚集在阻隔層的下部或後面，導致基底混凝土臨界飽和，並因循環凍融而使混凝土迅速劣化。

⑤薄的水泥被覆層因為表面-體積比(Surface-to-volume ratio)較高，在乾燥條件下(如低相對濕度和有風的情況下)會促進水分迅速蒸發，容易產生塑性收縮開裂。同時，因為這些混凝土通常水膠比較低，泌水少無法彌補蒸發的水分。被覆層澆置前應確定預期的施工環境條件，為避免乾燥情況可考慮在清晨或夜間施工。

⑥黏著型被覆層開裂至少有以下四個原因:表面修整時間延誤導致表面撕裂，過度乾燥引起的塑性收縮，由於溫度差或乾縮造成基底和被覆層之間的不均勻位移，或既有的裂縫反射至被覆層。有關開裂的資訊可參考 ACI 224.1R。

⑦混凝土表面防護前後應進行現地混凝土試驗，以確定混凝土的破壞模數及被覆層施工後的黏著強度，測試方法應參照

ACI503R 附錄 A 所規定的直接拔出試驗法。

常用的被覆層系統包含不黏著或部分黏著系統、水泥混凝土、乳膠改性混凝土、聚合物混凝土與矽灰混凝土被覆層，整理如下：

①不黏著或部分黏著系統

不黏著或部分黏著的被覆層是用來提供耐磨(層)和在防水薄膜上做為排水坡道，也可用於建築外露板或車道的表面處理。常用瀝青、瀝青混凝土或混凝土材料來達成此目的(ACI 546.1R)。

瀝青和瀝青混凝土是多孔性材料，本身沒有防水功能。在瀝青或混凝土不黏著被覆層下，若缺少有效的防水系統會因凍融導致板的破壞，這些系統可用在橋面板、廣場地面、停車場、辦公場所和防水層之上。

②黏著的水泥混凝土被覆層

通常僅是一水平混凝土層，澆置於已適當處理的既有混凝土表面上，用來修復剝落或崩解的混凝土表面或提供一個保護屏障。卜特蘭水泥被覆層有時用纖維和其他添加劑來補強。低坍度混凝土被覆層屬於此類。黏著的水泥混凝土被覆層可做為防止結冰鹽滲入的屏障，有時並可提高下層混凝土的承載能力。被覆層的厚度取決於其使用目的，可從 40 mm 至任何合理的厚度，卜特蘭水泥被覆層可應用在各式各樣場合，例如能使用在橋面板或停車場結構上剝離或開裂混凝土表面重鋪，增加鋼筋保護層厚度，提高抗滑力或樓板整平等。其他應用包含對受磨耗、凍融或火災損害的混凝土表面修補，和破壞路面修補等。

低坍度混凝土被覆層是以改變材料混合比例，而產生較緻密且更耐久的水泥混凝土被覆層。在適當的基底前處理下，低坍度混凝土被覆層有好的黏著性，且由於有較低的水膠比，耐久性也提高。這類系統的成本較改性混凝土系統便宜。低坍度混凝土的性能取決於原材料和施工品質，通常性能比較好。曾有局部的

黏著損壞，但通常歸因於不適當的表面處理或施工不良(ACI 222R、 546.1R 和 PCA IS144 1996)。

低坍度混凝土被覆層和其他卜特蘭水泥被覆層在連續多跨結構上使用時容易開裂。如果原先的損壞為化學侵蝕所造成，則不應使用卜特蘭水泥基的被覆層，因為這些化學物可能會繼續侵蝕被覆層中的卜特蘭水泥(ACI515.1R)。卜特蘭水泥被覆層可用在停車場耐磨走道和廣場防水或裝飾系統中的排水，也可與交通或道路的彈性薄膜系統同時使用。

③乳膠改性混凝土(LMC)被覆層

乳膠改性混凝土(LMC)除了含有乳膠和較少的水以外，與傳統的混凝土類似。用在橋和停車場地坪時，常以含 15%卜特蘭水泥重量的膠固材料做為被覆層材料，摻用時乳膠內的水量應計入為水泥水合所需的用水量中。因乳膠具有好的黏著特性及低水膠比，所以耐久性、黏著性與抗氯離子滲透性均較佳。LMC 被覆層常用在橋面板和停車場地板上做為耐磨層、保護層或做為廣場地坪和停車場之防水或裝飾系統。

LMC 被覆層的面層修飾常出現問題。炎熱和刮風天氣，乾燥速度快，使得修飾較困難，易產生收縮開裂，因此拌和、澆置和修飾應在 30 分鐘內完成，使乳膠有足夠的時間聚合，若無法如此，可能導致混凝土內形成的乳膠膜撕裂。

LMC 應在一個移動式的攪拌器中拌和，若用混凝土拌和車或鼓式攪拌器拌和，混凝土必須在乳膠加入後 3 分鐘內拌和完成。拌和時間太長將導入空氣使總含氣量增加，導致抗壓強度和抗磨耗性明顯降低，夜間施工能使這些問題降到最低。另一個要注意的問題是，如果 LMC 過早進行紋理飾面，則紋理可能會崩塌。如果紋理飾面遲至膠乳膜形成後，則表面常會發生撕裂並出現裂縫。詳細細節可參考 ACI 548.3R、ACI548.4、ACI 222R 和「混凝土結構物修補技術指引」6.15 節。

④聚合物混凝土(PC)被覆層

PC 是一種含廣泛系列砂漿和混凝土的複合材料，常用於聚合物混凝土中的聚合物材料為環氧樹脂、聚酯和乙烯基酯。各聚合物黏著劑的成分不同，但可適用於大部分的工程，某些情況下適用於特殊部位。詳細細節可參考 ACI548.5R 和「混凝土結構物修補技術指引」6.16 節。PC 被覆層主要是黏著在於已處理的混凝土基底上，可提供一耐久、耐磨的表面，若經適當調配可形成一抗水、化學品和氯離子滲透的保護層，有助於混凝土抵抗凍融和化學侵蝕。這類材料與經適當處理的混凝土表面有良好黏著力，但選擇材料時其黏著面的抗拉、抗剪強度至少不應低於基底混凝土的抗拉、抗剪強度。在許可的範圍內，被覆層表面能製成抗滑和抗積水的表面特性。

相較其他的被覆層系統，PC 具有迅速的硬化特性，可縮短交通中斷時間，降低交通管制成本與加快修補時程，此外，PC 被覆層不需要昂貴的設備來施工。其缺點是必須施作於乾燥表面，工作性和硬化速率則需取決於施作溫度。此外，PC 被覆層通常用於防水或裝飾系統中的耐磨層。

⑤矽灰混凝土被覆層

矽灰混凝土是以卜特蘭水泥混凝土添加矽灰改性而成，可做為乳膠改性混凝土(LMC)或低坍度混凝土的替代品。矽灰混凝土被覆層較緻密且滲透性低，可阻止氯化物滲入。此外，這類被覆層抗磨耗佳，能增加早期和最終強度以及提高與基底混凝土的黏著性。矽灰混凝土被覆層可用於橋面板和停車場地坪做為耐磨層，也可做為惡劣化學環境中的結構保護層。

矽灰混凝土易產生乾縮裂縫與塑性開裂，如果在每盤混凝土拌和結束前才加入矽灰，它可做為緩凝劑(Retarding admixture)。矽灰添加後，混凝土拌和物會變黏，造成後續修飾困難，同時，矽灰混凝土被覆層會受基底混凝土中裂縫反射影響。

2. 耐腐蝕鋼筋

(1)環氧樹脂鋼筋

利用環氧樹脂塗料以均勻厚度熱融而附著在鋼筋表面，經熱硬化反應形成一環氧樹脂塗膜的鋼筋，即為環氧樹脂鋼筋，其具有電氣絕緣性能，可有效遮斷腐蝕電流或雜散電流，而達到保護鋼筋的功效。然而，環氧樹脂之塗布會降低鋼筋和混凝土間之黏著力，因此造成鋼筋握裹強度之降低，而降低之幅度端視握裹破壞之模式而定。若鋼筋周遭之束制有限而為劈裂式破壞時，則握裹強度會大量損失；但若鋼筋周遭束制良好而為拉拔式破壞時，則握裹強度降低之幅度較小。相關之國內外標準與規定如下：

①美國 ASTM A934

②美國 ASTM A775

③ISO 14654

④日本土木学会基準 JSCE-E 102

⑤交通部「公路橋梁設計規範」

⑥交通部「鐵路橋梁設計規範」

待塗層鋼筋依 ASTM A934 與 A775 規定，應符合 ASTM A615 / A615M、A706 / A706M 或 A996 / A996M 之一規定(詳見表 4-24)，且應無油脂、油污或油漆等污染物。且應以噴砂清潔至符合 SSPC-SP10 要求。環氧樹脂鋼筋之搬運系統應具有襯墊接觸且捆紮帶應襯墊，或使用適當捆紮材料以防止塗層損傷。捆束應使用強力背梁、吊具橫樑、多點支撐或平台橋吊起，以防止捆束下垂造成鋼筋間磨損。鋼筋或捆束不得拋落或拖拉。

若需戶外存放超過兩個月，應實施保護性儲存措施，保護材料免受陽光、鹽霧及天候曝露。且應以不透光聚乙烯布或其他適當不透光保護材料覆蓋。堆疊捆束時，保護覆蓋物應披覆於堆疊周邊。

覆蓋物應充分固定，並允許空氣在鋼筋周圍流通，以盡量減少覆蓋物下之凝結水。環氧樹脂鋼筋（個別鋼筋或捆束，或兩者）應置於地面以上之保護性墊木上儲存。所有鋼筋之標記應在塗層及預製過程直至出貨點全程維持。

表 4-24 彎曲試驗要求[136]

A 615M、A 706M 或 A 996M		A 615、A 706 或 A 996M			
鋼筋號數	彎曲直徑（mm）(1)	鋼筋號數	彎曲直徑（in.）(1)	彎曲角度（回彈後，度）	完成時間（秒）
10	75	3	3	180	15
13	100	4	4	180	15
16	125	5	5	180	15
19	150	6	6	180	15
22	175	7	7	180	45
25	200	8	8	180	45
29	230	9	9	180	45
32	250	10	10	180	45
36	280	11	11	180	45
43	430	14	17	90	45
57	580	18	23	90	45

註 1：表中同一行之相似尺寸公制及英制鋼筋彎曲直徑可互換使用。

(2) 熱浸鍍鋅鋼筋

鋼筋混凝土用之熱浸鍍鋅鋼筋(以下簡稱鍍鋅鋼筋)，應符合 CNS 14771「鋼筋混凝土用熱浸鍍鋅鋼筋」或 ASTM A767/A767M「Standards Specification for zinc-coated (galvanized) steel bars for concrete reinforcement」之規定，CNS 14771 之鍍鋅層附著量規定如表 4-25。鍍鋅鋼筋可使用符合環保規範之腐蝕抑制劑後處理，以阻絕鍍鋅層與新拌混凝土中卜特蘭水泥漿之反應。

表 4-25 CNS 14771 鍍鋅層附著量規定[137]

鍍鋅等級		竹節鋼筋稱號	單位面積(1)最小鍍鋅層附著量 (g/m^2)
鋼筋	等級一	D10 D13 以上	915 1070
	等級二	D10 以上	610

註 1：竹節鋼筋之表面積依 CNS 560 之標稱周長計算後再乘以 1.2 倍以計算鍍鋅層附著量。

鍍鋅鋼筋表面處理品質要求如下：

①鍍鋅表面需平整堅實，無未鍍鋅裸點、起泡、助熔劑、鋅渣、熔渣或黑點，黏連或有妨礙使用的熔滴及尖銳鋅垂滴均不合格，燒灰現象不視為不合格，係因鋼筋中矽、碳、磷等合金元素加速鋅鐵合金層成長，或因質量、形狀及冷加工量導致。

②鍍鋅層與底材鋼筋附著性應良好，搬運或組立不得造成破裂或剝落。

③任一 0.3 m 長度鋼筋的裸點及損傷(不含末端切斷面)總面積超1%時，需重新鍍鋅；若在 1%以下，依 CNS 15257 修補[86]。

④製造、搬運、組裝、剪切造成損傷及末端切斷面依 CNS 15257 修補[86]。

鋼筋加工分為鍍鋅前與鍍鋅後兩種。鍍鋅前加工需遵循規定：鋼筋彎曲加工的彎曲直徑不得小於表 4-26 之規定，若經適當應力消除(加熱溫度 480℃~560℃，每 25 mm 直徑加熱 1 小時)，可避免鍍鋅脆化，彎曲直徑不受限制，但不得小於 CNS 560 規定。鍍鋅後加工因彎曲可能導致鍍鋅層破裂或剝落，隨鋼筋直徑、彎曲直徑及速率增加而加劇，需依 CNS 15257 修補以防腐蝕，建議避免鍍鋅後加工[86]。

鍍鋅鋼筋形狀、尺度、質量及誤差依 CNS 560 規定，檢驗批次為同一種類鋼筋在同一鍍鋅槽以相同條件加工，隨機抽取 3 支檢驗。鍍鋅層附著量若未達表 4-25 要求需抽取 6 支重驗，若平均值符合表 4-25 則合格，否則拒收。鍍鋅鋼筋標示除依 CNS 560 規定外[138]，合格鋼筋需捆縛並標示種類及符號、鍍鋅等級、製造日期或批號、製造廠商名稱或商標，螺紋鋼筋需依原標示顏色重新標示，並應符合商品標示法規定。

表 4-26 最小彎曲直徑[137]

鋼筋稱號	鋼筋種類		
	SD 280、SD 280 W	SD 420、SD 420 W	SD 490
D10、D13、D16	6 *d*	6 *d*	-
D19	6 *d*	6 *d*	6 *d*
D22、D25	6 *d*	8 *d*	8 *d*
D29、D32、D36、D39	-	8 *d*	8 *d*
D43、D50、D57	-	10 *d*	10 *d*

備考：本表之代號 *d*，係指鋼筋標稱直徑。

(3) 其他種類耐腐蝕鋼筋

①不銹鋼鋼筋

不銹鋼鋼筋在眾多的鋼筋材料中，耐腐蝕性能最為優異但造價約是普碳鋼鋼筋的 6~10 倍，且施工中受到損壞並不會影響耐腐蝕性能。另外需要對延展性加以注意。不銹鋼鋼筋能夠為曝露於腐蝕性環境的混凝土結構提供優異的防腐蝕性能。與碳鋼只能在鹼性環境中形成鈍化膜形成對比的是，不銹鋼表面的鈍化膜在鹼性、中性和弱酸性環境中都是穩定的，故不銹鋼不會發生均勻腐蝕，即使在已經中性化的混凝土中也不會發生腐蝕。

由於在不銹鋼鋼筋表面形成了氧化鉻鈍化層，不銹鋼鋼筋的氯化物極限濃度要比碳鋼鋼筋高很多倍，具有優異的抵抗氯化物腐蝕的能力。如果氯化物濃度超過不銹鋼鋼筋的極限濃度，不銹鋼鋼筋將會發生點蝕。不銹鋼鋼筋的氯化物極限濃度取決於它的化學成分和微觀結構、表面處理狀況和是否存在銲接銹皮、混凝土溶液的 pH 值和環境條件(濕度和溫度)。

點蝕程度隨著氯化物含量的增加而增加。混凝土中性化會導致鋼筋之鈍化膜破壞，使得鋼筋腐蝕之臨界氯離子濃度隨之降低，為不銹鋼鋼筋提供防腐蝕性能的鈍化膜會完全或部分破壞，從而導致腐蝕發生。但是，在含有氧氣的環境中(如在空氣和充氣的溶液中)，破壞的鈍化膜具有再次鈍化的能力。目前許多國家已經制定相關標準，對不銹鋼鋼筋的生產和測試，以及不銹鋼鋼筋生產廠家的認證都做出了相應的規定。

A.歐盟 EN 10204、EN 10088-3

B.英國 BS 6744、BS 8666

C.美國 ASTM A955/A955M-20C

②不銹鋼包覆鋼筋

不銹鋼鋼筋具有優異的耐腐蝕性能但是造價高。為了使鋼筋同時具有不銹鋼的高耐腐蝕性能和經濟性，國外研製開發了不銹鋼包覆鋼筋(SCC)，即在碳鋼鋼芯外包裹一層不銹鋼。其優點主要有：比不銹鋼鋼筋便宜、材料性能良好時壽命預期值高；缺點為：與碳鋼相比，造價相對較高、包覆層厚度不均勻、包覆層與碳鋼芯之間脫開、包覆層缺陷會造成腐蝕集中、為了防止不銹鋼包覆鋼筋端頭露出的碳鋼筋的腐蝕，必須對鋼筋端頭進行封閉處理。鋼筋的降服強度可能會比需要的值小很多，目前還不能生產小直徑的鋼筋與生產廠家較少等。

③纖維增強聚合物鋼筋

用於混凝土增強的纖維增強聚合物(FRP)包括碳纖維增強聚合物(CFRP)、玻璃纖維增強聚合物(GFRP)以及玄武岩纖維等。FRP 鋼筋製造中使用多種樹脂類型和上漿劑，聚合物基體將纖維黏結成特定形狀並提供層間剪切強度，可能為環氧樹脂、乙烯基酯或混合物。纖維上漿劑通常用於改善聚合物基體與纖維之間的界面，以增強強度和耐久性。纖維、上漿劑和聚合物基體的組合影響 FRP 鋼筋在混凝土中的短期和長期機械性能。

FRP 加固的主要價值在其電化學惰性和對氯化物污染混凝土的抗腐蝕的能力，但設計者應考慮 FRP 鋼筋的長期殘餘強度。儘管 GFRP 鋼筋不會表現出經典腐蝕，但當曝露於腐蝕性溶液和曝露條件(例如高 pH 值、鹽害、高溫、凍融循環和乾濕循環)時，GFRP 增強材料的拉伸能力顯著降低，國外標準與規定如下：

A.中國 GB/T 26743

B.中國 GB 50608

C.中國 JG/T 406

D.法國 AFGC FRP 指南

3. 腐蝕抑制劑

腐蝕抑制劑可防止或降低混凝土中鋼筋腐蝕，一般含有氧化離子如亞硝酸鹽、硫代硫酸鹽、鉻酸鹽、安息酸鹽、亞鐵鹽及二價錫鹽等。其可經由穩定鈍態膜或形成不可溶的保護層(如添加鉻酸鹽、磷酸鹽等)的方式抑止陽極反應或經由擷取氧分子抑止陰極反應(如添加亞硝酸鹽、安息酸鹽、亞鐵鹽、及二價錫鹽等)。

腐蝕抑制劑可提供鋼筋適當的保護，透過材表面產生反應，阻止或延緩腐蝕電化學反應中的陽極或陰極反應與氯離子在鋼筋表面反應。如陽極抑制劑(亞硝酸鹽)可促使氧化鐵(Fe_2O_3)保護層形成，阻擋氯離子侵蝕並抑制腐蝕發生。但有研究報告指出安息酸鹽、鉻酸鹽中鹼金屬或鹼性鹽會延緩混凝土的凝結時間；添加鉻酸鹽可能會使混凝土產生色差。有些抑制劑會影響輸氣劑的使用量及降低混凝土的抗壓、抗彎強度，需特別注意。國內外之相關標準如下所示：

(1) ASTM G109

透過計算總積分電流(庫侖)以評估因宏觀腐蝕電池而發生的腐蝕。但當混凝土覆蓋鋼筋的厚度小於 40 mm 或水膠比高於 0.45 時，該試驗方法可能無法正確排序不同腐蝕抑制劑的性能。選擇的混凝土混合比例和鋼筋覆蓋層旨在加速氯化物滲入。某些抑制劑可能影響此過程，導致結果與實際使用中的預期不同。

(2) AASHTO M194

腐蝕抑制劑添加入混凝土後的抗壓與抗彎強度不得低於無添加者之 90%，以規範腐蝕抑制劑對混凝土強度性質之影響程度，符合該要求之腐蝕抑制劑方可使用。

(3)CNS 12456、12457

一般混凝土摻和材料使用之鋼筋混凝土用腐蝕抑制劑防銹劑(防銹劑)參照 CNS 12456「鋼筋混凝土用防銹劑」之規定辦理，須符合表 4-27 之規定，試驗方法依照 CNS 12457「鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法」。

表 4-27 氧化性腐蝕抑制之性能[139]

試驗項目	規定			試驗方法
鋼筋之浸鹽水試驗	不得有銹蝕現象			CNS12457 第 3.1 節
混凝土中之 鋼筋加速銹蝕試驗	防銹率 95%以上			CNS12457 第 3.2 節
混凝土凝結時間 及抗壓強度試驗	凝結時間差異	初凝	±60 分鐘內	CNS12457 第 3.3 節
		終凝		
	抗壓強度比	7 天	0.90 以上	
		28 天		

①鋼筋之浸鹽水試驗

依 CNS 12457 配置鹽份溶液後將試樣浸泡至溶液內，於 1 小時至 7 天目視觀察銹蝕並使用直流電壓計量測電壓，確認銹蝕表面斑點、溶液著色或電壓曲線有無異常。

②混凝土中之鋼筋加速銹蝕試驗

將試體置於高壓蒸鍋升溫至 180℃、0.98 MPa，保持 5 小時，自然冷卻後浸水 24 小時，重複一次後擊破試體取出鋼筋量測銹蝕面積。試驗報告需包括防銹劑名稱、標準使用量、製造日期、水泥與粒料品質、混凝土配比與坍度、防銹率。

③混凝土之凝結時間及抗壓強度試驗

試驗方法依 CNS 12283 混凝土用化學摻料之規定[140]。但抗壓強度試驗之試體齡期為 7 天及 28 天。

4. 陰極保護

陰極保護工法能主動預防混凝土中鋼筋(含有機塗層鋼筋)的電化學腐蝕，不論新建橋梁或是使用中之橋梁均可應用陰極保護，設計流程如圖 4.9 所示。

執行陰極保護系統之設計、安裝監督、試運轉、操作監督、量測、監測及維護監督等人員，必須具備與上述職務相當之專業資格。其專業資格依不同的工作性質，應具有 EN 15257、NACE 陰極保護訓練及驗證課程、AMPP 認證陰極防蝕專家 (Cathodic Protection Specialist level4)或任何其他同等方案之驗證。

陰極保護系統(Cathodic Protection, CP)可分為外加電流陰極保護系統(Impressed Current Cathodic Protection, ICCP)與犧牲陽極保護系統(Galvanic Cathodic Protection, GCP)兩類，犧牲陽極保護系統之設計、施工與維護可參考 Nace SP0216「Galvanic Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures」規範；外加電流陰極保護系統可參考 Nace SP0290「Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures」與 ISO 12696「Cathodic protection of steel in concrete」規範，預力混凝土結構陰極保護之標準可參考 NACE 01102「State-of-the-Art Report: Criteria for Cathodic Protection of Prestressed Concrete Structures」。

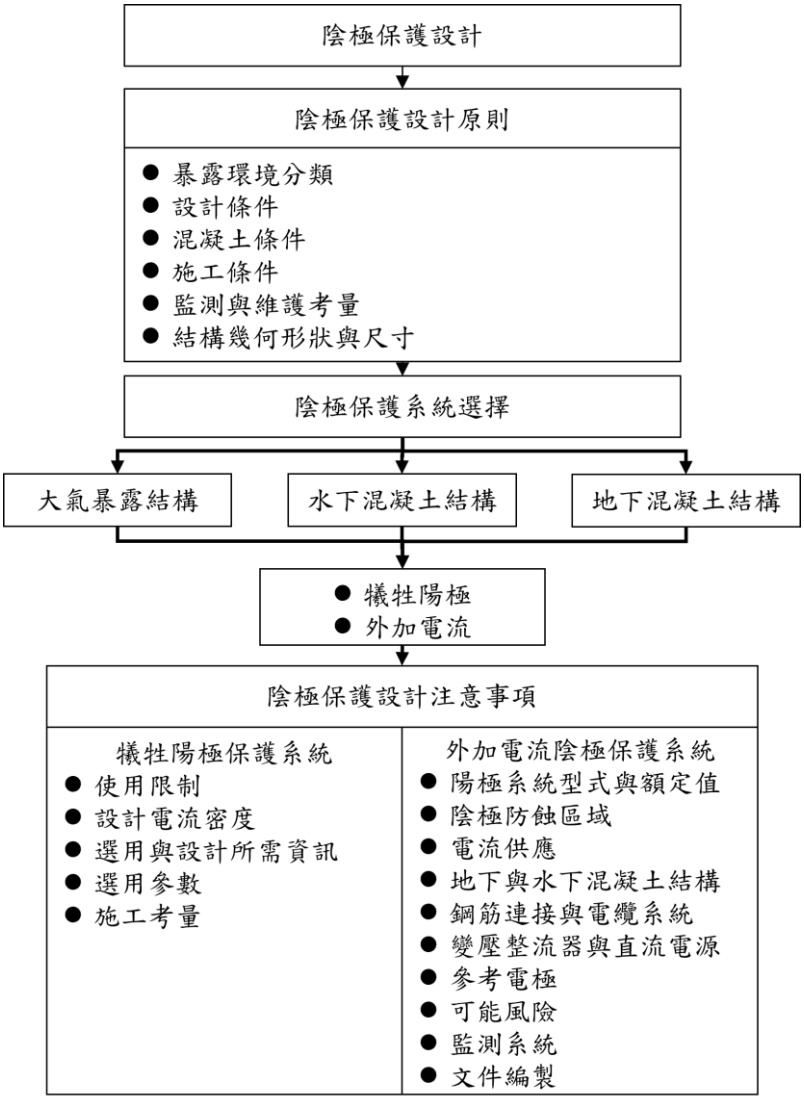


圖 4.9 陰極保護設計流程圖

(1)陰極保護原理

混凝土內的鋼筋因鹼性的卜特蘭水泥形成氧化鈍態膜保護而不產生腐蝕。當攻擊性離子如氯離子入侵至鋼筋周圍的混凝土時，會破壞鋼筋表面鈍態膜，進而導致鋼筋腐蝕。

腐蝕為電化學過程，發生在鋼筋表面的陽極和陰極區域之間。當陽極和陰極電連通且處於同一電解質時，腐蝕發生在陽極區。當腐蝕發生時會產生一電流流經陽極、陰極和電解質並形成一腐蝕電池；除非抑制這個電化學反應，否則腐蝕持續發生在陽極區直到破壞為止。

陰極保護已證實為能控制受污染混凝土中之鋼筋一種方法，其保護的原理係讓鋼筋處於陰極狀態，使鋼筋不再進一步腐蝕。有兩種方法可以使鋼筋處於陰極狀態，一為將鋼筋連接一個比鋼筋更活潑或更容易腐蝕的金屬例如鋅，此時這個金屬會被加速腐蝕來保護鋼筋。這種利用犧牲一個金屬來達到保護鋼筋的方式稱為犧牲陽極保護系統，示意如圖 4.10。

另外一種方式是利用外加電源，強迫一個小電流與腐蝕過程產生的電流方向相反，流入鋼筋來抑制腐蝕，故必須使用一個腐蝕非常慢的金屬，例如鉑或銥做為提供電流的陽極，此方法稱為外加電流陰極保護系統，示意圖如圖 4.11。

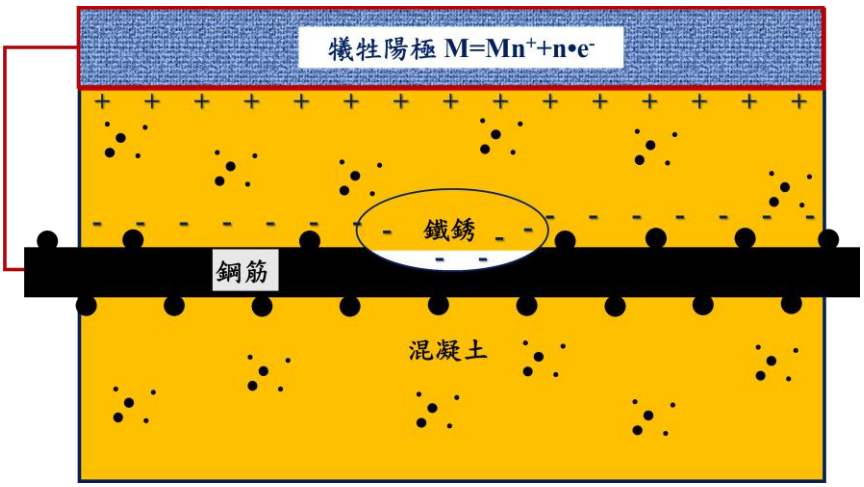


圖 4.10 犧牲陽極保護系統示意圖

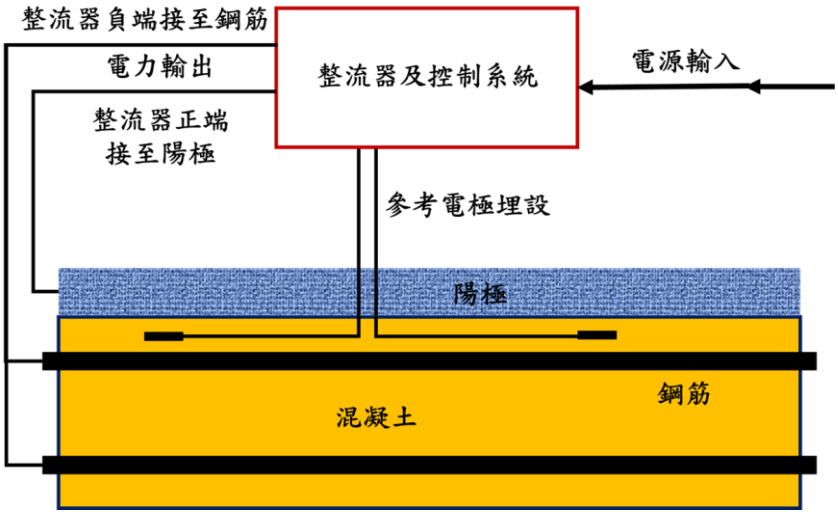


圖 4.11 外加電流陰極保護系統示意圖

(2)陰極保護設計原則

陰極保護系統設計應確保整個結構在設計年限期間均達到腐蝕控制目標，在可行性評估並確認陰極保護為新結構的最佳保護選項或現有結構的最佳修復選項後，根據以下因素進設計，包括但不限於：

①曝露環境分類(地下、水下、潮汐、飛沫、大氣、遮蔽、曝露等)

②設計條件

A.設計年限與服務環境

B.結構幾何形狀與尺寸

C.陽極重量、分佈與評估電流需求

D.分區設計

(a) 將結構分為獨立電路(每區 200~500 m^2)，避免單一陽極故障影響全區

(b) 每區需獨立設置參考電極(至少 3 支)與電流監測點

E. 電流影響：雜散電流、宏觀電池或加凡尼電流

F. 錨具區為腐蝕與氫脆最高風險區，必須設置局部陽極或導電填料，確保電位正於 ≥ -0.80 V(SCE)

③混凝土條件

A.設計：混凝土厚度與鋼筋表面積、鋼筋混凝土、預力混凝土

B.品質：電阻率、滲透性、水泥固有鹼度

C.狀態：濕度含量、氯化物含量、中性化深度

④施工條件

A.設計文件：

(a) 詳細之相關計算

(b) 安裝圖紙、材料及設備規格

(c) 安裝、測試、啟用、啟動及操作之詳細方法陳述或規格

(d) 預力構件之氫脆及雜散電流風險評估

B.安裝限制

⑤監測與維護考量

A.運作條件與維護便利性

B.監測系統：

(a) 埋入式參考電極(單極或雙電極)

(b) 鋼筋電位探針(連至普通鋼筋或錨具)

(c) 陰極保護電流、陽極電流、斷電電位自動記錄器

(d) 遠端監控系統及數據管理平台

(3)陰極保護系統選擇

①犧牲陽極保護系統

適用於小型結構或電流需求低的區域，陽極材料應選擇與環境匹配，如鎂、鋅或鋁合金(限海水)，陽極間距、總重量及接地方式需經計算，以確保電流供應均勻。犧牲陽極保護系統包含犧牲陽極以及陽極與鋼筋間之連接，種類如下：

A.埋入式陽極

在含氯離子之混凝土結構進行修補時，可使用離散式犧牲陽極以減少「新陽極效應(incipient anode)」或「環形陽極效應(ring anode effect)」，或提供更大範圍的防蝕保護，使鄰近未受損但含氯之母材混凝土獲得保護。此類陽極為包覆於專用活化材料中的鋅金屬，並以導線連接至鋼筋，可於混凝土修補區內安裝一個或多個陽極，或將其置於修補區內部或周圍之鑽孔或鑽心孔中，並與鋼筋連接，適用於局部修補之防蝕。若需提供更大範圍之保護，可於未損壞的母材混凝土中鑽孔或鑽心後安裝多個陽極，並將其串接成線狀或網格配置。

B.熱熔射導電金屬層(Thermally sprayed metallic coatings)

陽極系統應包含熱熔射的 Zn、Al-Zn、Al-Zn-In 或 Ti 金屬層。Zn 金屬層既用作外加電流陽極，也用作犧牲陽極；Al-Zn 及 Al-Zn-In 合金陽極用作犧牲陽極。Ti 用作外加電流陽

極，並塗催化劑以降低陽極至混凝土介面電阻。當熱熔射金屬層用作犧牲陽極時，可直接施加於曝露的鋼筋/鋼材，以及主要施加於完好混凝土表面，但須符合能監測陰極保護系統性能的要求。

C. 自黏式鋅片 (Adhesive zinc-sheet anode)

由約 250 μm 厚的鋅箔捲材構成，其一面塗佈專用離子導電黏著凝膠(hydrogel)。陽極貼覆於處理過的混凝土表面後，邊緣需進行封邊。此系統亦可加施塗料做為保護或裝飾用途。

D. 夾套式鋅網陽極

由膨脹鋅網置入永久性的玻璃纖維增強套筒中，並灌漿使其緊密貼合於混凝土橋墩、樁柱或柱體表面。此系統一般用於海洋環境的防蝕保護。

E. 離散式陽極

類似埋入式陽極，但係安裝於混凝土鑽孔或切削孔中，並以導線連接。

F. 混合式陽極

為犧牲陽極之變型，可在初期以外加電流陰極保護系統通電啟動，之後再改為直接接至鋼筋、以犧牲陽極方式運作。設計與施工與犧牲陽極保護系統有所區別。

(4) 外加電流陰極保護系統

外加電流陰極保護系統適用於大型結構或高電流需求情況，系統包括整流器、陽極網絡與電源控制裝置。設計需避免過度極化及局部電流集中，以防混凝土受損或高強度鋼氫脆，外加電流陽極種類如下：

①碳基導電塗層 (Conductive coatings)

可採刷塗、滾塗或無氣噴塗方式施工，已廣泛應用於北美及歐洲大氣曝露混凝土中鋼筋的陰極保護，如高速公路構造物、建築物及停車場等，施工良好情況下預期壽命約 5~15 年，但無法

承受長時間濕潤環境，故不適用於海洋環境(除非遠離潮汐區與飛沫區)與有永久性凝結水的區域，且不耐磨耗或磨損；如處於易磨耗環境，需施加保護層或定期重新塗佈。通電後因局部高電流需求可能快速產生局部缺損，但可於初期數月內修補，隨著極化作用與局部電流需求下降，修補處通常能維持系統剩餘壽命。

碳基導電塗層施作乾膜厚度約 250 ~ 500 μm。導電所需的碳會在陽極反應中被消耗，但塗層中碳含量通常遠高於導電所需與整個設計壽命的理論消耗量。主要失效機制包括：

A.陽極反應產生酸性物質攻擊混凝土造成塗層失黏、剝落

B.局部受潮造成塗層脫黏

②熱熔射導電金屬層

同犧牲陽極保護系統之熱熔射導電金屬層。

③MMO/Ti 陽極 (Activated titanium)

以混合金屬氧化物(MMO)塗層覆於鈦基材，可嵌入新建混凝土或施加於既有結構。應用方式包括置於被覆層中、鑿槽或鑽孔內安裝或固定於表面並覆以玻璃纖維增強套筒(GRP)。此類陽極可用於地下、水下環境或大氣曝露之混凝土結構，其壽命由塗層成分與塗佈量決定。

MMO/Ti 陽極均需與鋼筋保持至少 15 mm 間距，基材可為膨脹網、帶狀、線材及管材等，由設計電流需求決定。表面安裝之網格型 MMO/Ti 陽極需覆以水泥基覆層，其基面處理、界面預處理與覆層施工品質對系統效能相當重要。管狀離散 MMO/Ti 陽極(鑽孔灌漿)亦常用於大氣曝露混凝土。MMO/Ti 及早期 Pt/Ti 曾做為電流分佈導體，用於石墨漿背填陽極中；未塗層的鈦連接條若操作電位超過 8 V 在氯鹽環境中可能發生點蝕。

④其他種類

A.導電水泥基材料：包含顆粒狀碳、金屬鍍層碳纖維，採噴塗方式施工，並可再施加保護或裝飾塗層。其操作電流密度與導電塗層類似，可達 20 mA/m²，短期可至 30 mA/m²。

B.導電陶瓷陽極：為導電性二氧化鈦陶瓷管，長度與直徑可變，鑽孔安裝，並以水泥基材料背填。

(5)犧牲陽極保護系統注意事項

依照 Nace SP0216 規範，設計注意事項如下：

①使用限制

A.在特定情況下，陰極保護可能成為結構組成部分，或顯著影響鋼筋混凝土結構之使用性與結構性能，因此應由結構工程師審查此類影響。

B.該標準限於大氣曝露混凝土結構之犧牲陽極保護系統，適用於傳統鋼筋混凝土及預力混凝土。

C.犧牲陽極保護系統須設置監測設施，以判定其相對於本標準所定準則之性能。未設置監測系統或量測方法之犧牲陽極保護系統，無法驗證其符合本標準實務。

D.陰極保護為既有結構特定應用中，控制鋼鐵腐蝕之已驗證技術。惟陰極保護無法補回已損失之鋼筋，亦無法使已腐蝕鋼筋恢復原始斷面。傳統檢查技術看似完好之鋼筋混凝土區域，實際上可能正發生腐蝕並接近拉力破壞之腐蝕相關應力。此類區域於施加犧牲陽極保護系統後可能發生剝落、裂縫或分層。

E.驅動電壓受限於陽極與被保護鋼筋間之電位差，此可能限制電流輸出與電化學特性。

F.鋅、鋁合金陽極因驅動電壓低，使得預力鋼材及鋼筋較不易因過保護(over-protection)而氫脆。

②設計電流密度

鋼筋混凝土結構達成陰極保護之設計電流密度通常介於鋼筋表面積之 0.2~20 mA/m²(0.02~1.9 mA/ft²)，視環境條件而定。除有資料證明可採用其他值外，應以此範圍決定所需陽極質量、陽極類型與表面積。犧牲陽極保護系統之電流輸出特性隨時間變化亦須納入考量，確保預定使用年限內可提供設計電流。若腐

蝕主因氯離子污染，通常所需電流密度高於碳酸化引起者。若結構曝露於氧氣而非飽水(導致鋼筋表面缺氧)，亦需較高電流密度。

③選用與設計所需資訊

A.設計圖或施工圖

B.現況調查(依 NACE SP0308、ACI 201.1R、ACI 562)

C.腐蝕電位調查(依 NACE SP0308、ASTM C876)

D.氯離子含量分析與中性化深度測定

E.埋入金屬電氣連續性

F.修補與維修紀錄(依 NACE SP0390)

G.混凝土保護層厚度(依 NACE SP0308)

H.混凝土電阻率資料(依 NACE SP0308)

④選用參數

A.犧牲陽極保護系統於預定使用年限內須提供足夠電流予受保護結構，且電流分佈須使選定之陰極保護準則達成。

B.陰極保護設計年限須與受保護混凝土結構剩餘使用年限相符。

C.陽極電化學性能

(a) 不同陽極材料在不同環境放電時消耗速率不同。陽極初始電流輸出取決於陽極電化學性質、周圍材料及陽極體積、表面積與幾何形狀等物理性質。陽極電流輸出通常隨腐蝕產物累積及陽極體積、表面積、幾何形狀與電化學性質改變而隨時間下降，設計時須考量此變化。

(b) 混凝土乾燥會增加電路電阻，限制電流傳輸。特定陽極可使用保濕劑提升乾燥環境下電流傳輸。

(c) 已開發化學增強砂漿包覆特定陽極以提升電流傳輸，須考量特定化學增強砂漿與陽極之初始及長期電流輸出。

D.結構考量

(a) 選用陽極系統時應考量通行權維護、維修便利性及防滑性。天花板淨高與恆載限制可能排除某些構件使用覆面系統。

(b) 考量未來混凝土修補及陰極保護系統擴充。

(c) 選用陽極材料之物理性質須與混凝土結構相容。

(d) 施工與修補技術使用高電阻材料(如環氧灌注)、高溫(如瀝青覆層)或衝擊荷載時，應考量對陽極系統、監測儀器與配線之影響。

(e) 受犧牲陽極保護系統保護之鋼筋若有接地，需考慮包含與設施接地電極電氣隔離或連接之影響。

⑤施工考量

A.所有材料與施工做法應提供詳細規範，包含運輸、儲存、搬運與廢棄要求。若採用性能規範，應明確列出評估程序與業界認可標準，並清楚定義性能要求、持續時間與術語。

B.應製作詳細設計圖，標示受保護混凝土範圍與陽極系統類型，並顯示測試站、電氣連接、電氣絕緣體及鄰近金屬埋件位置。

C.設計應優化陽極佈置與安裝，Nace SP0216 保護準則如下：

(a) 大氣曝露混凝土中埋入鋼筋達成陰極保護及腐蝕控制之準則已公布於 AMPP SP21520，並應逐案評估符合與否。

(b) 因犧牲陽極保護系統無法調整電流，務必安裝足量陽極材料，以於預定使用年限內提供鋼筋所需陽極電流密度。

(c) 若性能評估已達保護準則無需進一步動作。若未達成且無法增加電流，應進一步評估腐蝕風險。必要時得增補犧牲陽極保護系統之陽極以降低風險。

(d) 設計應儘可能納入監測功能。將代表性樣本或全部陽極設置為可監測。有些情況監測並非必要或不具成本效益，惟未監測系統無法驗證符合 Nace SP0216 準則。

(e) 評估性能時除電位外，應一併量測電流以確認陽極提供可

接受之保護程度。記錄至少代表性陽極之電流輸出亦可估算陽極消耗量。若全部陽極直接與鋼筋連接且無監測設施，則無法量測電流輸出。

D.犧牲陽極保護系統組件應設置於不易受損或人為破壞之位置。

E.應製作各犧牲陽極保護系統安裝之設計或施工圖、細部圖與表冊，顯示數量、詳細陽極佈置、相關典型斷面及組件位置。

(6)外加電流陰極保護系統設計注意事項

①陽極系統型式與額定值

對於預定以嵌入混凝土內部或設置於混凝土表面的陽極進行防護的區域(通常為曝露於大氣環境的構造物)，須確保局部陽極的電流供應能與局部陰極的電流需求相匹配。設計時應根據鋼筋及其他鋼材的表面積、分布情形、預期或量測的陰極電流密度，計算陰極防護所需電流量，進而求得各陽極的操作陽極電流密度，最後利用該數值確認陽極型式，並選定合適的覆層材料。

若為採用較遠端陽極的地下結構或水下環境應用，則應依一般設計流程，確保整體結構的電流分布充足，如 EN 12473、EN 12954、EN 12495 與 EN 12474 所述。由於遠端陽極可調整其電流分布以符合各區域鋼筋的陰極電流需求，故無須對局部鋼筋表面積進行過於細緻的區分與計算。

②陰極保護區域

不同部位的曝露條件各異，可能需在同一構造物中設置多個陰極保護區，不同結構元素亦可整合為單一防蝕區，如下所示：

A.水下區(海水中水下陽極依 EN 12473 與 EN 12495 規定)。

B.潮汐區(由水下陽極與嵌入混凝土陽極共同提供電流防護)。

C.飛沫區(以嵌入或表面安裝之陽極防護，依 ISO 12696 規定)。

D.大氣區(嵌入或表面陽極防護，依 ISO 12696 規定)。

部分陽極系統(如 MMO/Ti 陽極)，可在單一複雜防蝕區中調整陽極的分布與等級，以符合各區域之電流需求，並確保鋼筋表面電流密度均勻。此設計特別適用於大氣曝露結構，或需在高電阻電解質中分布陽極的情況。

③電流供應

應根據操作電流需求與預留容量計算總電流供應量，典型電流需求如下(所列為整體結構中鋼筋的平均值)。

A.含氯化物混凝土中之鋼筋陰極保護：2 mA/m²~20 mA/m²。

B.無氯化物混凝土中之鋼筋陰極預防：0.2 mA/m²~2 mA/m²。

C.當氯離子含量、濕度與溫度較高時，所需電流密度亦隨之增加。

D.在溫帶氣候且氯化物污染有限的情況下，多數既有腐蝕構造的應用於啟用時之電流密度通常低於 10 mA/m²。

E.由於鋼筋與混凝土介面發生極化作用(化學變化)，陰極保護的電流需求將隨時間而下降。

F.距陽極較近的鋼筋所接受的陰極電流密度會高於距陽極較遠者，設計時應考慮此「遮蔽效應」，以確保所有鋼筋皆能獲得足夠且均勻的陰極保護與預防電流密度。

④地下與水下混凝土結構

設計時應根據當地條件、電流需求、安裝與維護要求等因素，選定適合之系統型式(外加電流式或犧牲陽極式)。當陽極或陽極接地床設置於接近混凝土結構之處，應考慮電流分布，確保不會有區域因過度電流導致過保護或因遮蔽而導致電流供應不足。

設計應確保任何陽極電纜均有完善支撐或保護(如導管或鋼製護套)，並適用於曝露環境，且能承載最大設計電流(外加安全裕度)並具電壓下降時可以為負載的瞬態負載提供更大的裕度的

能力。若陽極直接固定於結構上，應同時考慮其重量負載與結構需求。

⑤鋼筋連接與電纜系統

設計與鋼筋或其他埋入鋼材之連接方式，包括電流迴路與監測迴路，並計算所需的連接數量與位置，以提供足夠安全裕度並最小化電壓與負載實際接收到電壓之間的差值，相關設計應同時參照地下與水下混凝土結構設計要點之原則。

對外加電流系統，應確定正極與負極電纜的截面積及走線路徑，以確保具備安全裕度並降低電位差。同時，應確定接線盒位置與配置，依長期使用環境，選擇適當的絕緣與護套材料，以確保電纜之耐久性與安全性。

⑥變壓整流器與直流電源

根據操作電流與預留容量，並利用迴路電阻計算變壓整流器所需輸出電壓。同時確定所需之附屬功能，例如監測裝置與數據記錄設備，以滿足直流電源供應及控制之需求。

⑦參考電極

A.可攜式參考電極

用於現場量測鋼筋或混凝土電位、埋入式電極之校正及陰極保護系統測試。常用 $Cu/CuSO_4$(CSE，飽和硫酸銅)，其次為 Ag/AgCl/0.5M KCl。

B.永久埋入式參考電極

做為陰極保護系統長期監測主感測器。常用 MnO_2(鹼性錳)與 Ag/AgCl/0.5M KCl 雙電極設計兩種，壽命可達 20 至 30 年。

C.常見問題與對策

(a) 埋入式電極常因「多孔陶瓷與混凝土離子介面不良」導致失效，安裝時務必以高流動水泥漿完整包覆。

(b) 失效徵兆：電位異常正漂、斷電瞬間 IR 降過大、高/低阻

抗電錶量測差值 > 30 mV(低阻抗電錶: 10MΩ~20MΩ; 高阻抗電錶: 500MΩ~1000MΩ)。

(c) 飽和甘汞(Hg/Hg_2Cl_2)含汞)因環保法規，已幾乎全面禁用。

(d) 常見參考電極與各參考電極之保護判釋標準如表 4-28。

表 4-28 常見參考電極與保護判釋標準[141]

參考電極	電解液	對標準氫電極 NHE (25 °C，V)	對 CSE ($Cu/CuSO_4$) 換算值(V)	斷電電位 (V)	24 h 衰減後電位(V)	極化形成值 (V)	過保護上限 (V)
Ag/AgCl	KCl 0.1 mol/L	+0.288	+0.032	−0.758	−0.188	−0.938	−1.138
	KCl 0.5 mol/L	+0.250	−0.070	−0.720	−0.150	−0.900	−1.100
	KCl 3 mol/L	+0.210	−0.110	−0.680	−0.110	−0.860	−1.060
	KCl 3.5 mol/L	+0.205	−0.115	−0.675	−0.105	−0.855	−1.055
	KCl 飽和	+0.199	−0.121	−0.669	−0.099	−0.849	−1.049
Ag/AgCl	NaCl 3 mol/L	+0.209	−0.111	−0.679	−0.109	−0.859	−1.059
Ag/AgCl	海水	+0.250	−0.070	−0.720	−0.150	−0.900	−1.100
$Cu/CuSO_4$	$CuSO_4$飽和	+0.320	0(基準)	−0.790	−0.220	−0.970	−1.170
$Hg/Hg_2SO_4/SO_4^{2-}$	K_2SO_4飽和	+0.640	+0.320	−1.110	−0.540	−1.290	−1.490
$Hg/HgO/OH^-$	NaOH 1 mol/L	+0.098	−0.222	−0.568	+0.002	−0.748	−0.948
MnO_2	NaOH 0.5 mol/L	+0.414	+0.094 (實務常取 +0.100)	−0.884	−0.314	−1.064	−1.264

⑧可能風險

A.預力鋼材與氫脆風險

因預應力鋼材對氫致脆裂極度敏感，設計、施工、監測與維護之每個環節皆須採取比普通鋼筋混凝土更嚴格之標準。不負於−0.90 V(SCE)的斷電電位 目前被北美與臺灣主流工程界視為安全與實務可行之折衷值；若條件許可(犧牲陽極或極高電阻率混凝土)，保持電位更正於 −0.80 V(SCE)是最保險之做法。

B.鹼矽反應(ASR)

依據 ISO 12696 標準實施之陰極保護，已證實對鹼矽反應(ASR)或鹼質粒料反應(AAR)無影響。

C. 握裹強度喪失(Loss of Bond)

NACE Publication 01102-2018 技術報告指出[142]，陰極極化可能引發鹼金屬離子之電遷移，造成水泥水化產物軟化或劣化，進而降低鋼筋與混凝土之握裹強度。然而，在一般採用的保護電流密度(約 11 mA/m^2)條件下，發生顯著握裹強度喪失約需 48 年。基於此研究結果[143]，只要符合預力鋼材相關標準及陰極保護設計與操作準則，陰極保護對多數預應力混凝土結構所造成之握裹強度喪失，並非主要工程疑慮。

⑨監測系統

應決定監測所需的感測器種類、監測頻率與安裝位置，並選擇適合之儀器設

應完整記錄設計內容、材料與組件之規格、安裝程序與系統配置，並附上品質計畫，說明各階段應執行之測試項目與試運程序。設計文件應足以證明設計之適切性，並顯示其具備充分細節，以確保所有需陰極保護與預防的結構部位皆獲得足夠之電流供應與監測配置，同時應確認該設計經過正確檢核與驗證。

4.2 鋼橋

4.2.1 鋼橋腐蝕機理

1. 鋼材腐蝕

鋼材是透過精煉(還原)鐵礦石(鐵的氧化物等)製成的，從熱力學角度來看屬於不穩定的狀態。因此，鐵具有透過腐蝕(氧化)回歸到原始穩定狀態(氧化物等)的特性。

鋼材的腐蝕可大致分為濕式腐蝕與乾式腐蝕兩類。濕式腐蝕是在常溫下，水與氧氣存在時發生的腐蝕，是鐵離子化並溶解於水中的電化學反應，通常的腐蝕屬於此類型；乾式腐蝕是在高溫下與環境中物質反應發生的腐蝕，幾乎均為氧化物生成反應。其典型例子是鋼材在軋製過程中，鋼材表面生成的氧化鐵層。乾式腐蝕在常溫下的腐蝕進行速度極慢。鋼材腐蝕的電化學反應如圖 4.12 所示。

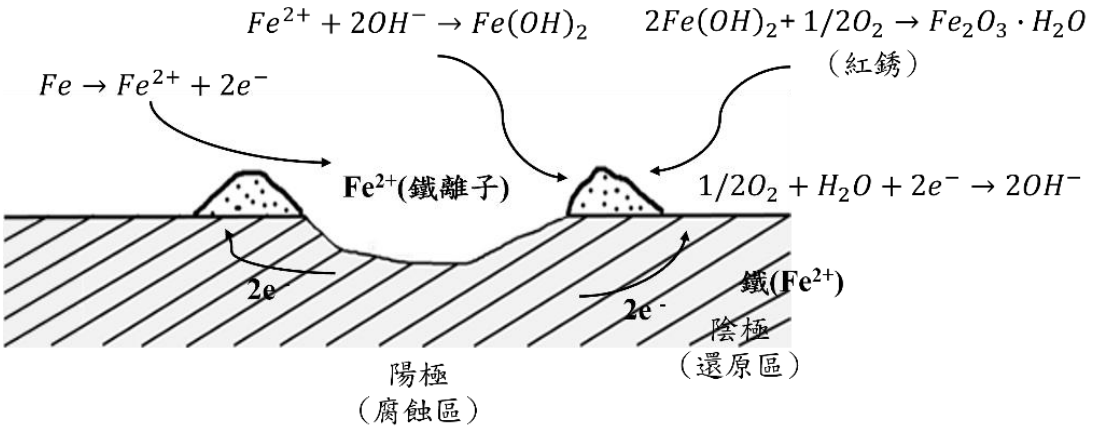


圖 4.12 鋼材腐蝕的電化學反應[92]

在腐蝕反應中，陽極區域發生的反應(陽極反應)與陰極區域發生的反應(陰極反應)必須等量進行，若一方反應受到抑制，另一方反應也會自動受到抑制。鐵溶出的陽極反應需要水分與鐵接觸，陰極反應的進行則需要水與氧氣的存在。由此可見，水與氧氣是濕式腐蝕反應發生的必要條件。因此，防止濕式腐蝕的基本對策是切斷水或氧氣的供給。

2. 腐蝕分類和型式

(1)鋼材腐蝕分類

鋼材的腐蝕具有多種型態，鋼橋典型的腐蝕分類如圖 4.13。當金屬表面曝露於均一的環境時，整個表面都會發生均勻腐蝕，這種情況稱之為全面腐蝕。一般而言，全面腐蝕的進行速度較慢，從腐蝕開始到對結構物造成顯著不良影響的情況較少。

局部腐蝕是指因金屬表面狀態不均勻或環境不均一，導致腐蝕集中於局部發生的現象。由於腐蝕位置(陽極位置)固定，因此，腐蝕速率比全面腐蝕顯著加快。一般而言，腐蝕導致的損傷多由局部腐蝕引起，這是因為腐蝕部位深陷並形成凹陷，斷面減少量大於全面腐蝕，因此鋼橋中防止局部腐蝕尤為重要。鋼橋典型的局部腐蝕包括：異種金屬接觸腐蝕、孔蝕及間隙腐蝕。

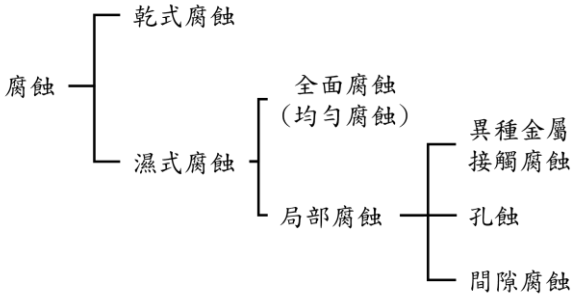


圖 4.13 鋼橋典型的腐蝕分類[92]

(2)異種金屬接觸腐蝕(加凡尼腐蝕)

當不同電位的金屬接觸，且存在電解質溶液時，兩金屬間會形成腐蝕電池，導致活性較高(還原電位較低)的金屬被氧化(腐蝕)，這稱為異種金屬接觸腐蝕。例如，普通鋼與不銹鋼接觸，且存在含電解質的雨水等水分時，普通鋼會顯著腐蝕。常見純金屬相對於標準氫電極的還原電位，如表 4-29，還原電位愈低之金屬活性愈強愈容易腐蝕。海水是一個常見的腐蝕環境，一些常用金屬在海水中依容易腐蝕之次序排列的加凡尼序列，如表 4-30 所示。這些表僅供參考，因為不同金屬的加凡尼序列有可能會隨著環境的改變、材料的種類、是否有經過鈍化處理(如不銹鋼)而發生

相對次序的改變。

為防止異種金屬接觸腐蝕，當使用不同材質金屬組合時，應選擇電位差小的金屬組合;若電位差可能導致異種金屬接觸腐蝕，需避免金屬間相互接觸(如電氣絕緣，詳見圖 4.14)。在銲接部位因局部過熱、冷卻後，金屬組織改變及產生殘留拉應力，與未受熱影響的部位相比還原電位較低，進而形成電位差。但因電位差小，在大氣環境中通常不會產生顯著腐蝕，然而，若處於持續潮濕狀態，則可能發生顯著腐蝕。

表 4-29 常見純金屬於標準氫電極之還原電位

	反應	還原電位(V)
↑ 惰性或陰極	$Au^{3+}_{(aq)} + 3\ e \rightarrow Au_{(s)}$	+1.50
	$Ag^{+}_{(aq)} + e \rightarrow Ag_{(s)}$	+0.799
	$Cu^{2+}_{(aq)} + 2\ e \rightarrow Cu_{(s)}$	+0.337
	$2\ H^{+}_{(aq)} + 2e \rightarrow H_{2(g)}$	0.00
	$Sn^{2+}_{(aq)} + 2e \rightarrow Sn_{(s)}$	−0.14
	$Ni^{2+}_{(aq)} + 2e \rightarrow Ni_{(s)}$	−0.25
	$Cd^{2+}_{(aq)} + 2e \rightarrow Cd_{(s)}$	−0.40
活性或陽極 易腐蝕 ↓	$Fe^{2+}_{(aq)} + 2e \rightarrow Fe_{(s)}$	−0.44
	$Zn^{2+}_{(aq)} + 2e \rightarrow Zn_{(s)}$	−0.763
	$Al^{3+}_{(aq)} + 3e \rightarrow Al_{(s)}$	−1.66
	$Mg^{2+}_{(aq)} + 2e \rightarrow Mg_{(s)}$	−2.37

表 4-30 常用金屬在海水中的加凡尼序列

	鈦
	3xx 系不銹鋼
↑ 惰性或陰極	4xx 系不銹鋼
	鎳基合金
	銅合金
	錫
	鉛
	鑄鐵、鋼
活性或陽極 易腐蝕 ↓	鋁合金
	鎘
	鋅
	鎂及鎂合金

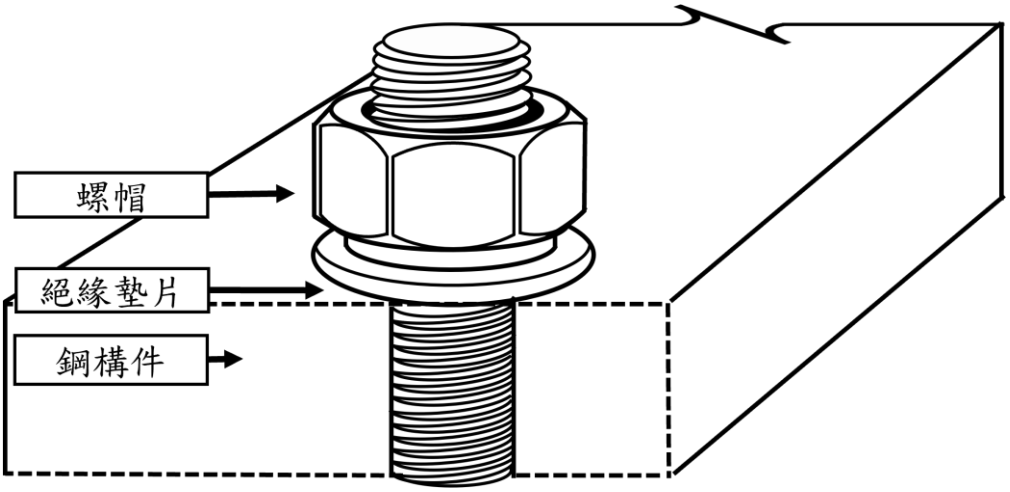


圖 4.14 電氣絕緣示意圖

(3)孔蝕

孔蝕是金屬從表面以孔狀型式被侵蝕的腐蝕現象。常見於形成鈍化膜的不銹鋼等金屬，當鈍化膜因氯化物離子局部破壞時，該部位成為陽極，腐蝕進展形成孔洞(圖 4.15)。在鈍化膜易破壞的環境下使用時，建議與塗裝等被覆防蝕結合使用。

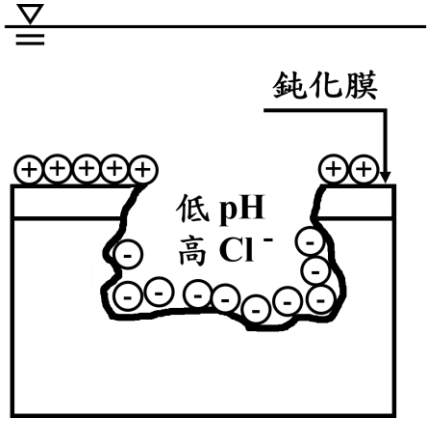


圖 4.15 孔蝕示意圖[92]

(4)間隙腐蝕

間隙腐蝕是金屬間接觸部位(如鋼板重疊部位或螺栓下方)的間隙內，金屬發生腐蝕的現象。間隙內氧氣濃度降低，導致間隙外與間隙內形成濃差電池，外部為陰極、氧氣少的內部為陽極產生腐蝕。隨著腐蝕進行，鐵離子與氫離子聚集，再加上鹽分濃度增加且 pH 值下降，進一步加速腐蝕，如圖 4.16 所示。

防止間隙腐蝕的最佳方法是採用不易形成間隙的結構設計，但對於薄板構件使用間歇銲接時，間隙難以避免。若間隙可能進水，需採用具耐水性與耐久性的塗裝或密封材料覆蓋。需注意，密封材料的劣化速度常與結構本體防蝕不同，維護管理計畫中應明確密封材料的維修時機。

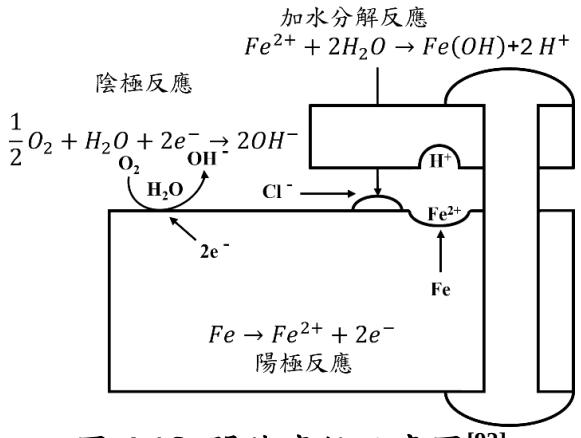


圖 4.16 間隙腐蝕示意圖[92]

3. 環境與腐蝕

鐵的腐蝕反應在水與氧氣存在下的情況下發生。大氣中，氧氣從空氣中持續供給，水則透過降雨或結露提供。當水與氧氣直接接觸鐵時，就會發生腐蝕反應，但腐蝕反應的速度、範圍及程度受氣溫、日照等氣象條件，以及大氣中含有的鹽分(海鹽顆粒、融雪劑等)、汽車廢氣、煤煙、工廠排放物、火山氣體、塵埃等物質的影響。

大氣中促進腐蝕的物質含量因地區而異，傳統上根據鋼材腐蝕量與大氣環境的關係進行分類。大氣腐蝕性分類，應依 CNS 13401(ISO 9223)之規定辦理。該大氣腐蝕性分類，可依標準金屬試片腐蝕速率做分類，或依污染之測定做分類。

(1) 大氣腐蝕性可分為 C1~CX 等 6 類，如表 4-31 所示。

(2) 依標準金屬試片腐蝕速率做分類，其腐蝕性分類與腐蝕速率之關係如表 4-32 所示。

(3) 當無法使用標準試片曝露方式判定腐蝕性時，可由環境數據、或環境條件與曝露情境計算出腐蝕速率，再用以評估其大氣腐蝕性。

計算時使用 SO_2 乾沉積量、氯離子乾沉積量、溫度和相對濕度等 4 個劑量，經劑量-反應公式評估得不同金屬在大氣環境中第一年曝露試驗之腐蝕速率，並查表得大氣腐蝕性分類(相關表格請參見 CNS 13401 附錄 B)，或可依描述大氣腐蝕曝露條件推估參考腐蝕性(請參見 CNS 13401 附錄 C)。

表 4-31 大氣腐蝕性分類(CNS 13401)[68]

分類	腐蝕性
C1	非常低
C2	低
C3	中等
C4	高
C5	非常高
CX	極端

表 4-32 各種標準金屬之大氣腐蝕環境分級表[68]

腐蝕性分類	金屬的腐蝕速率				
	單位	碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	g/(m^2·yr)	$r_{corr} \le 10$	$r_{corr} \le 0.7$	$r_{corr} \le 0.9$	可忽略
	μm/ yr	$r_{corr} \le 1.3$	$r_{corr} \le 0.1$	$r_{corr} \le 0.1$	-
C2	g/(m^2·yr)	$10 < r_{corr} \le 200$	$0.7 < r_{corr} \le 5$	$0.9 < r_{corr} \le 5$	$r_{corr} \le 0.6$
	μm/ yr	$1.3 < r_{corr} \le 25$	$0.1 < r_{corr} \le 0.7$	$0.1 < r_{corr} \le 0.6$	-
C3	g/(m^2·yr)	$200 < r_{corr} \le 400$	$5 < r_{corr} \le 15$	$5 < r_{corr} \le 12$	$0.6 < r_{corr} \le 2$
	μm/ yr	$25 < r_{corr} \le 50$	$0.7 < r_{corr} \le 2.1$	$0.6 < r_{corr} \le 1.3$	-
C4	g/(m^2·yr)	$400 < r_{corr} \le 650$	$15 < r_{corr} \le 30$	$12 < r_{corr} \le 25$	$2 < r_{corr} \le 5$
	μm/ yr	$50 < r_{corr} \le 80$	$2.1 < r_{corr} \le 4.2$	$1.3 < r_{corr} \le 2.8$	-
C5	g/(m^2·yr)	$650 < r_{corr} \le 1500$	$30 < r_{corr} \le 60$	$25 < r_{corr} \le 50$	$5 < r_{corr} \le 10$
	μm/ yr	$80 < r_{corr} \le 200$	$4.2 < r_{corr} \le 8.4$	$2.8 < r_{corr} \le 5.6$	-
CX	g/(m^2·yr)	$1500 < r_{corr} \le 5500$	$60 < r_{corr} \le 180$	$50 < r_{corr} \le 90$	$10 < r_{corr}$
	μm/ yr	$200 < r_{corr} \le 700$	$8.4 < r_{corr} \le 25$	$5.6 < r_{corr} \le 10$	-

備考：r_{corr} 表腐蝕速率，為金屬在大氣環境下曝露第 1 年之平均腐蝕速率。

自 1971 年起，臺灣電力公司、工業技術研究院等研究單位，開始以試片腐蝕速率量測方式，進行臺灣大氣腐蝕性分類。惟 1995 至 2006 年，大規模整合性的大氣腐蝕性分類調查近乎停頓。2007 年

起，對臺灣地區大氣腐蝕性分類之調查再度展開。交通部運輸研究所運輸技術研究中心(簡稱：運技中心；2023 年 9 月行政院組織調整前名稱為「港灣技術研究中心」，習稱「港研中心」)委託工業技術研究院(材料與化工所)，於臺灣本島佈設 88 處試驗點，系統化的調查臺灣地區大氣腐蝕劣化因數並進行分類，並以運技中心為調查結果之彙整單位。自 2008 年起運技中心除了彙整國內各單位多年期的大氣腐蝕資料之外，也持續進行臺灣 94 個地點的大氣腐蝕數據記錄，並且每年彙整成年報公開自由下載。有需要參考者，可從運技中心官網點選「臺灣腐蝕環境資訊分類」進行互動查詢；或從運技中心官網點選「中心出版品」，再從搜尋中以"大氣腐蝕"查詢，就可自由下載，2008 年以後之「臺灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報」及「離岸風電基地母港與鄰近海域腐蝕因子調查」。2019 年之後，並有「臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究」、「離岸風電基地母港與鄰近海域腐蝕因子調查」等鋼料水下腐蝕之試驗報告。

「臺灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報」2020 至 2024 年度調查結果如表 4-33 與表 4-34 所示[144-148]。2024 年一年期之濕潤時間、氯鹽沉積速率二氧化硫沉積速率，如圖 4.17 至圖 4.18，碳鋼、鋅、銅、鋁之年腐蝕速率 ISO 分級圖如圖 4.19、圖 4.20 與所示。

表 4-33 2020 至 2024 年臺灣大氣腐蝕環境分類表(腐蝕速率)[144-148]

	試驗地點	碳鋼	鋅	銅	鋁
1	基隆試驗線 0m	C5	C5	C5	C4~C5
2	基隆試驗線 100m	C5~CX	C5~CX	C5~CX	C4~C5
3	梗枋安檢所	C4~C5	C4~C5	C5~CX	C3~C4
4	龍德產業園區(龍德工業區)	C4~C5	C4~C5	C5~CX	C3~C4
5	蘇澳港試驗線 0m	C4	C4~CX	C5	C3~C4
6	蘇澳港試驗線 300m	C3~C4	C4~C5	C3~C4	C3~C4
7	南澳安檢所	C3~C4	C4~C5	C5	C3
8	和平產業園區(和平工業區)	C3	C3	C3~C4	C3~C4
9	太魯閣國家公園管理處	C3	C3~C4	C3	C2~C3
10	美崙產業園區(美崙工業區)	C3~C4	C3~C4	C4~C5	C3~C5
11	花蓮港試驗線 0m	C5	C5	C5~CX	C4~C5
12	花蓮港試驗線 100m	C3~C4	C3~C4	C5	C3
13	花蓮港試驗線 500m	C3~C4	C3~C4	C5	C3~C4
14	橄仔樹安檢所	C5	C5~CX	C4~CX	C4~C5

15	石梯安檢所	C4	C4~C5	C5~CX	C3~C4
16	成功安檢所	C4	C4~C5	CX	C3~C4
17	金樽安檢所	C4	C4~C5	CX	C3~C4
18	伽藍安檢所	C4~C5	CX	C4~CX+	C4
19	豐樂產業園區(豐樂工業區)	C2~C3	C3~C4	C4	C3~C4
20	尚武安檢所	C3~C4	C4~C5	C5~CX	C3~C4
21	核三廠試驗線 0m	C4~C5	C5~CX	CX	C3~C5
22	核三廠試驗線 100m	C3~C4	C4	CX	C3~C4
23	核三廠試驗線 300m	C3~C4	C4~C5	C5~CX	C4
24	核三廠試驗線 1km	C2~C3	C4	C4~CX	C3~C4
25	屏東產業園區(屏東工業區)	C3~C4	C3~C4	C4~C5	C2~C4
26	中油林園廠	C3	C3~C4	C5	C3~C4
27	中鋼公司(臨海工業區)	C3	C3~C4	C5	C4
28	鳳山產業園區(鳳山工業區)	C3~C4	C3~C4	C4	C3~C4
29	大發產業園區(大發工業區)	C3~C4	C3~C4	C4~CX	C3~C4
30	高雄港試驗線 0m	C3~C4	C3~C4	C4~C5	C3
31	高雄港試驗線 300m	C3~C5	C4~C5	C5	C3~C5
32	高鐵左營站	C3	C3~C4	C4~C5	C3
33	永安產業園區(永安工業區)	C3~C4	C3~C4	C3~CX	C2~C4
34	興達火力電廠	C3~C4	C3~C4	C5~CX	C4~C5
35	安平產業園區(安平工業區)	C3~C4	C3~C4	C4~C5	C2~C4
36	成大水工試驗所	C3	C3~C4	C5	C3~C4
37	官田產業園區(官田工業區)	C3~C4	C3~C5	C5~CX	C2~C4
38	東石安檢所	C5	C5~CX	CX~CX+	C3~CX
39	朴子產業園區(朴子工業區)	C4	C3~C5	C5	C2~C4
40	高鐵嘉義站	C3~C4	C3~C4	C4~CX	C3~C4
41	斗六產業園區(斗六工業區)	C2~C3	C3~C4	C3~C4	C3
42	台塑六輕試驗線 0m	C5~CX	CX	CX~CX+	C5~CX
43	台塑六輕試驗線 300m	C5	CX	CX~CX+	CX
44	台塑六輕試驗線 800m	C5	CX	CX	C5~CX
45	台塑六輕試驗線 2km	C5	C5~CX	C5~CX	CX
46	台塑六輕試驗線 3km	C5	C5~CX	CX~CX+	C5~CX
47	王功安檢所	C5~CX	CX	CX~CX+	CX
48	彰濱產業園區(彰濱工業區)	C5	CX	CX	C5~CX
49	田中產業園區(田中工業區)	C3	C3~C4	C4	C3~C4
50	南崗產業園區(南崗工業區)	C3	C3~C5	C3~C4	C2~C4
51	大里產業園區(大里工業區)	C2~C3	C3~C4	C3	C2~C3
52	高鐵臺中站	C3~C4	C3~C4	C3~C5	C3~C4
53	臺中產業園區(臺中工業區)	C3~C4	C3~C5	C4~C5	C3~C4
54	臺中港關連產業園區(關連工業區)	C4	C5	C5~CX	C3~C5
55	臺中火力電廠	C5	C5~CX	C5~CX	C5
56	臺中港試驗線 0m	C4~C5	C5~CX	CX	CX
57	臺中港試驗線 100m	C4	C5	C5~CX	C4~C5
58	臺中港試驗線 300m	C4	C5	C5~CX	C4~C5
59	臺中港試驗線 2km	C4	C4~C5	C5~CX	C4~C5
60	五甲安檢所	C5	CX	CX	C4~CX
61	通霄火力電廠	C2~C5	C4~CX	C5~CX	C4~C5
62	外埔安檢所	C5	CX	CX	C5

63	竹南產業園區(竹南工業區)	C3~C4	C4	C4~C5	C4
64	頭份產業園區(頭份工業區)	C3~C4	C4~C5	C4~C5	C4
65	工業技術研究院	C3~C4	C3~C5	C4~C5	C3~C4
66	新竹產業園區(新竹工業區)	C3~C4	C3~C5	C4	C3~C4
67	平鎮產業園區(平鎮工業區)	C3~C4	C4	C4~C5	C3~C4
68	桃園試驗線 100m	C5~ CX	CX	C1~CX	C5~CX
69	桃園試驗線 500m	C5~CX	C5~CX	C5~CX	C4~CX
70	桃園試驗線 2km	C5	C4~CX	C5	C4~CX
71	樹林產業園區(樹林工業區)	C3~C5	C3~C4	C3~C5	C3~C4
72	臺北市自來水事業處	C3~C4	C4~C5	C4~C5	C3~C5
73	陽明山國家公園管理處	C4~CX	C4~C5	C4~CX+	C2~C3
74	陽明山硫磺區	CX	CX	CX~CX+	C3~CX
75	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	C3	C3~C4	C3~CX	C2~C3
76	東北角風景區福隆遊客中心	C5	C4~C5	C4~C5	C3~C4
77	臺北港監測站	C3~C4	C3~C4	C4~C5	C3~C4
78	平鎮產業園區(服務中心)	C4~C5	C3~C5	C4~C5	C4
79	觀音產業園區(服務中心)	C5	C4~CX	C5	C4~CX
80	永安安檢所	C5~CX	CX	C5~CX	C5~CX
81	新竹安檢所	C3~C5	CX	C4~CX	C5~CX
82	金門水頭商港	C3~C4	C3~C4	C5~CX	C4
83	高雄港 39 號碼頭	C3~C4	C3~C4	C5~CX	C4~C5
84	高雄港 75 號碼頭	C3~C5	C3~C5	C4~CX	C3~C4
85	公路局南區(第三區)養護工程分局澎湖工務段	C5~CX	CX	CX	C4~C5
86	馬祖福澳港碼頭	C4~C5	C3~C5	C5~CX	C4~C5
87	公路局中區(第二區)養護工程分局新中橫監工站	C2~C3	C3~C4	C2~C3	C2~C3
88	公路局中區(第二區)養護工程分局埔里工務段	C3~C4	C3~C4	C5	C2~C3
89	公路局中區(第二區)養護工程分局霧社監工站	C2~C3	C3~C4	C2~C3	C2~C3
90	公路局中區(第二區)養護工程分局處谷關工務段	C2~C3	C3~C4	C3~C4	C2~C3
91	公路局北區(第一區)養護工程分局復興工務段	C2~C3	C3~C4	C3~C4	C2~C3
92	公路局雲嘉南區(第五區)養護工程分局石卓監工站	C2	C3~C4	C3	C2
93	十八王公橋	CX	CX	CX+	CX

備考：ISO 9223-2012 將大氣腐蝕性分類為分為 C1~C5 與 CX 六個等級，CX 表示腐蝕性極端高(extra high)

表 4-34 2020 至 2024 年臺灣大氣腐蝕環境分類表(環境因子)[144-148]

	試驗地點	濕潤時間分類	氯鹽沉積速率分類	SO_2沉積速率分類
1	基隆試驗線 0m	τ3 ~ τ5	S1 ~ S2	P0* ~ P1*
2	基隆試驗線 100m	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P0* ~ P1*
3	梗枋安檢所	τ4 ~ τ5	S0 ~ S1	P0* ~ P1*
4	龍德產業園區(龍德工業區)	τ4 ~ τ5	S1	P2 ~ P3
5	蘇澳港試驗線 0m	τ3 ~ τ5	S0 ~ S1	P1*
6	蘇澳港試驗線 300m	τ3 ~ τ5	S0 ~ S1	P1*
7	南澳安檢所	τ3~ τ5	S0 ~ S1	P1 ~ P1*
8	和平產業園區(和平工業區)	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1*	P0 ~ P1
9	太魯閣國家公園管理處	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P0 ~ P1
10	美崙產業園區(美崙工業區)	τ4	S1* ~ S2*	P0 ~ P1
11	花蓮港試驗線 0m	τ4	S1 ~ S2	P0* ~ P1*
12	花蓮港試驗線 100m	τ4	S1	P0* ~ P1*
13	花蓮港試驗線 500m	τ4	S1	P0* ~ P1*
14	橄仔樹安檢所	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P0* ~ P1*
15	石梯安檢所	τ4 ~ τ5	S0 ~ S1	P0* ~ P1*
16	成功安檢所	τ4~ τ5	S1 ~ S2	P0* ~ P1*
17	金樽安檢所	τ4 ~ τ5	S1	P0* ~ P1*
18	伽藍安檢所	τ3 ~ τ4	S1 ~ S2	P0* ~ P1*
19	豐樂產業園區	τ3 ~ τ4	S1* ~ S2*	P0 ~ P2
20	尚武安檢所	τ3 ~ τ4	S1	P0* ~ P1*
21	核三廠試驗線 0m	τ3 ~ τ4	S1	P0* ~ P1*
22	核三廠試驗線 100m	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P0* ~ P1*
23	核三廠試驗線 300m	τ3 ~ τ4	S1	P0* ~ P1*
24	核三廠試驗線 1km	τ4	S1	P1*
25	屏東產業園區(屏東工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P1 ~ P2
26	中油林園廠	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P1 ~ P3
27	中鋼公司	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P2 ~ P3
28	鳳山產業園區(鳳山工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P1 ~ P2
29	大發產業園區(大發工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P1 ~ P3
30	高雄港試驗線 0m	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P2* ~ P3*
31	高雄港試驗線 300m	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P2* ~ P3*
32	高鐵左營站	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P1 ~ P2
33	永安產業園區(永安工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P1 ~ P2
34	興達火力電廠	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P1 ~ P2
35	安平產業園區(安平工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P1 ~ P3
36	成大水工試驗所	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P1 ~ P2
37	官田產業園區(官田工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P3
38	東石安檢所	τ3 ~ τ4	S1	P1* ~ P3*
39	朴子產業園區(朴子工業區)	τ4 ~ τ5	S0* ~ S1*	P1 ~ P2
40	高鐵嘉義站	τ3 ~ τ5	S0 ~ S1	P1 ~ P2
41	斗六產業園區(斗六工業區)	τ3 ~ τ5	S0* ~ S1*	P1 ~ P2
42	台塑六輕試驗線 0m	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P2*
43	台塑六輕試驗線 300m	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P2*
44	台塑六輕試驗線 800m	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P2*

45	台塑六輕試驗線 2km	τ4 ~ τ5	S1	P2*
46	台塑六輕試驗線 3km	τ4 ~ τ5	S0 ~ S1	P2*
47	王功安檢所	τ3 ~ τ5	S1 ~ S2	P2*
48	彰濱產業園區(彰濱工業區)	τ3 ~ τ5	S1	P2 ~ P3+
49	田中產業園區(田中工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P1 ~ P2
50	南崗產業園區(南崗工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P0 ~ P2
51	大里產業園區(大里工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P0 ~ P2
52	高鐵臺中站	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P1 ~ P2
53	臺中產業園區(臺中工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P0 ~ P2
54	臺中港關連產業園區(關連工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P1 ~ P2
55	臺中火力電廠	τ3 ~ τ4	S1	P1 ~ P3
56	臺中港試驗線 0m	τ3 ~ τ4	S1	P2*
57	臺中港試驗線 100m	τ4	S1	P2
58	臺中港試驗線 300m	τ3 ~ τ4	S1	P1 ~ P2
59	臺中港試驗線 2km	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P1* ~ P2*
60	五甲安檢所	τ3 ~ τ4	S1 ~ S2	P1* ~ P2*
61	通霄火力電廠	τ3 ~ τ4	S1 ~ S2	P2 ~ P3
62	外埔安檢所	τ3 ~ τ4	S1 ~ S2	P1* ~ P2*
63	竹南產業園區(關連工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P0 ~ P2
64	頭份產業園區(關連工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P0 ~ P2
65	工業技術研究院	τ4	S0* ~ S1*	P0 ~ P2
66	新竹產業園區(新竹工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P0 ~ P1
67	平鎮產業園區(平鎮工業區)	τ4	S0 ~ S1*	P0 ~ P2
68	桃園試驗線 100m	τ4	S1	P3
69	桃園試驗線 500m	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P2 ~ P3
70	桃園試驗線 2km	τ4 ~ τ5	S1	P1 ~ P2
71	樹林產業園區(樹林工業區)	τ3 ~ τ4	S0* ~ S1*	P0 ~ P2
72	臺北市自來水事業處	τ4	S0 ~ S1	P0 ~ P1
73	陽明山國家公園管理處	τ5	S0 ~ S1	P3 ~ P3+
74	陽明山硫磺區	τ5	S0* ~ S1*	P3 ~ P3+
75	公路局雲嘉南區養護工程分局阿里山工務段	τ4 ~ τ5	S0 ~ S1	P0 ~ P1
76	東北角風景區福隆遊客中心	τ4 ~ τ5	S0 ~ S1	P1 ~ P2
77	臺北港監測站	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P1* ~ P2*
78	平鎮產業園區(服務中心)	τ3 ~ τ5	S0*	P1 ~ P2
79	觀音產業園區(服務中心)	τ4 ~ τ5	S0* ~ S1*	P3 ~ P3+
80	永安安檢所	τ4	S1 ~ S2	P2~ P3
81	新竹安檢所	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P2*
82	金門水頭商港	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P1 ~ P2
83	高雄港 39 號碼頭	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P1* ~ P3*
84	高雄港 75 號碼頭	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P1* ~ P3*
85	公路局南區(第三區)養護工程分局澎湖工務段	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P1 ~ P3
86	馬祖福澳港碼頭	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P1 ~ P2
87	公路局中區(第二區)養護工程分局新中橫監工站	τ4 ~ τ5	S0	P0 ~ P1
88	公路局中區(第二區)養護工程分局埔里工務段	τ4 ~ τ5	S0 ~ S1	P1 ~ P2
89	公路局中區(第二區)養護工程分局霧社監工站	τ4 ~ τ5	S0	P0 ~ P1
90	公路局中區(第二區)養護工程分局處谷關工務段	τ3 ~ τ4	S0 ~ S1	P0 ~ P1

91	公路局北區(第一區)養護工程分局復興工務段	τ4	S0 ~ S1	P0 ~ P1
92	公路局雲嘉南區(第五區)養護工程分局石卓監工站	τ4 ~ τ5	S0 ~ S1	P0 ~ P1
93	十八王公橋	τ4 ~ τ5	S1 ~ S2	P3 ~ P3+

備考：*表示以相近試驗點資料推估；+表示腐蝕性超過分級中的級別。

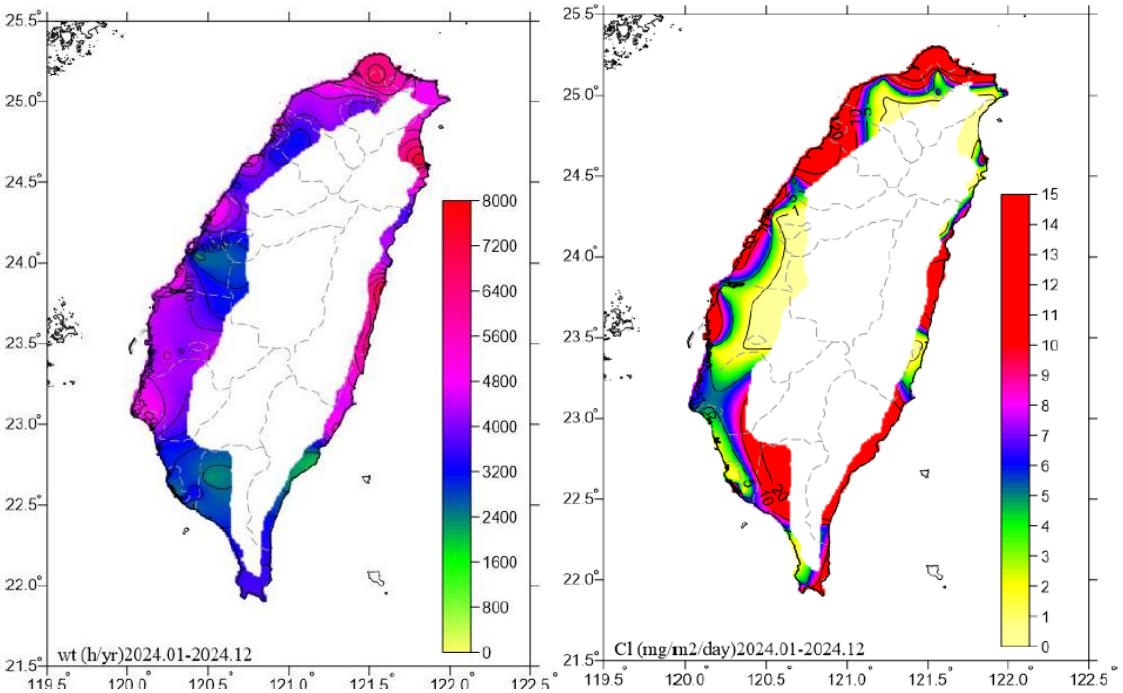


圖 4.17 2024 年一年期潤濕時間圖(左)、氯鹽沉積速率圖(右)[144]

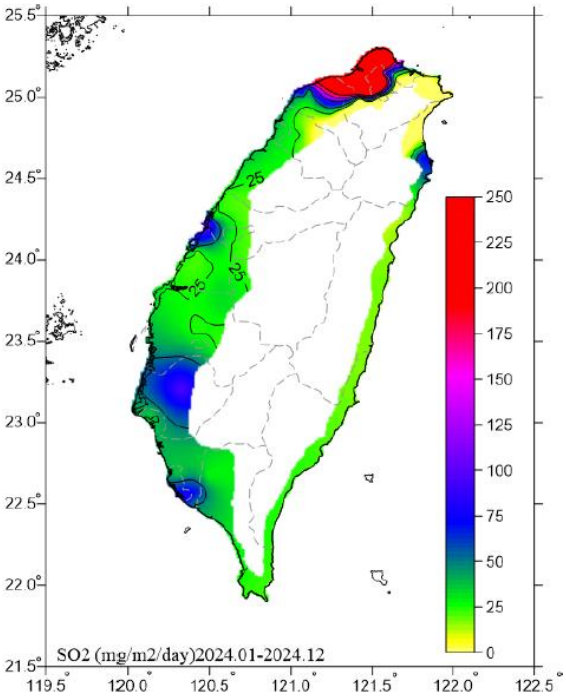


圖 4.18 2024 年二氧化硫沉積速率圖[144]

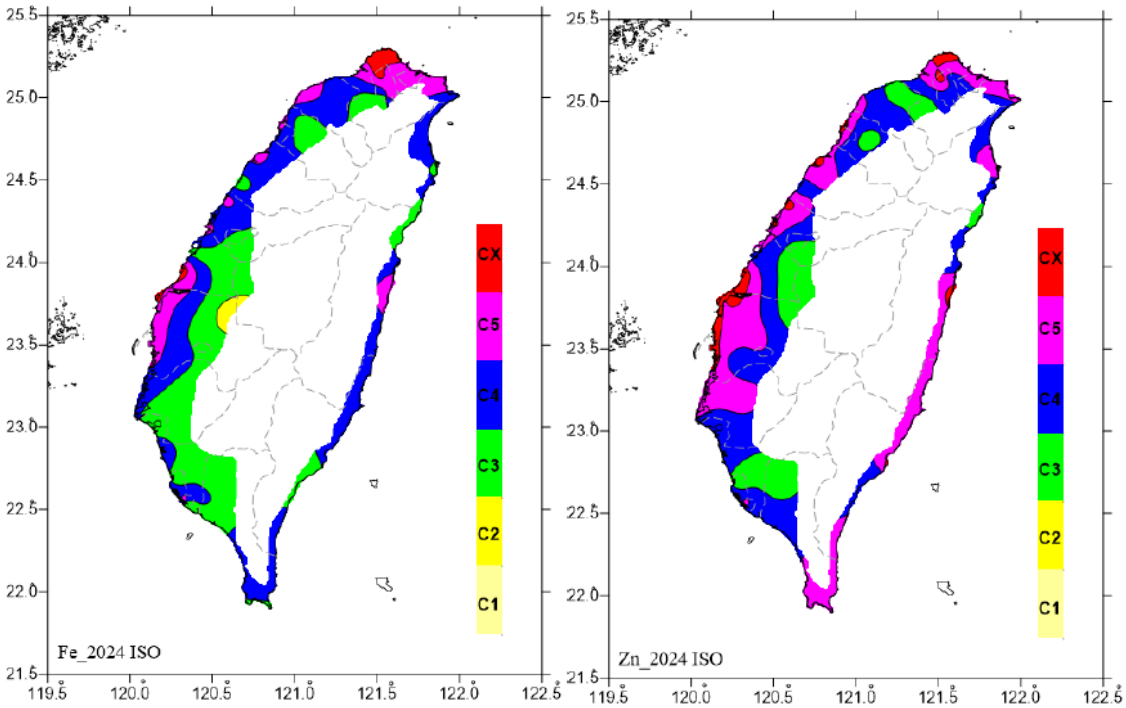


圖 4.19 2024 年碳鋼(左)、鋅(右)年腐蝕速率 ISO 分級圖[144]

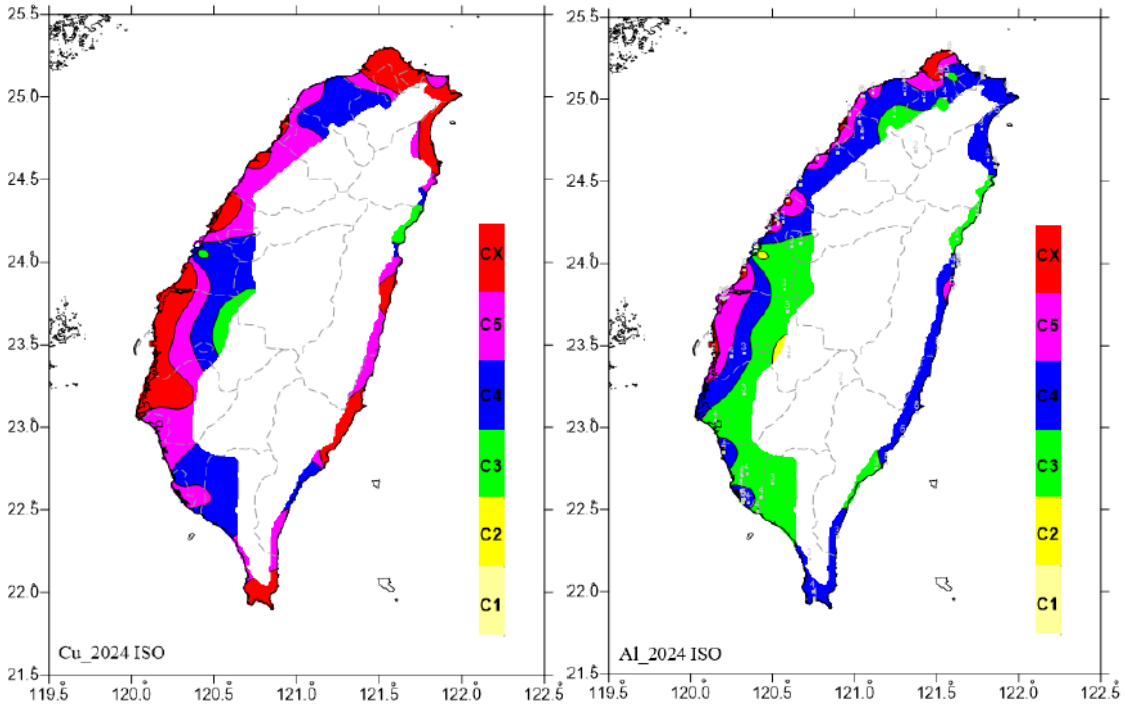


圖 4.20 2024 年銅(左)、鋁(右)年腐蝕速率 ISO 分級圖[144]

前述之相關研究或調查報告，所呈現之各地點大氣腐蝕性調查及分類資料，大都以大區域之方式表示，故參考時，仍應再行確認橋址附近之環境現況是否有所改變，於必要時得進行橋址處之大氣腐蝕性調查以更明確橋址之腐蝕分類。由於該調查結果基於有限地區的曝露試驗，局部地區可能因濕度、汽車廢氣或工廠排放物影響，需注意腐蝕環境與分類平均條件差異較大。沿海地區鋼材易銹蝕，是因飛濺海水帶來的大氣中鹽分附著於鋼材表面，促進腐蝕反應，屬於較嚴酷的腐蝕環境。

鹽分具潮解性，易吸取空氣中的水蒸氣形成溶液，附著鹽分的部位易保持潮濕狀態。此外，鹽為強電解質，溶於水後顯著提高水的電導率，加速鐵的腐蝕。此外，鋼材表面附著鹽分是否因降雨洗滌、或梁端部等封閉部位因結露導致濕氣滯留等結構因素，也會影響腐蝕環境。有關腐蝕的因子與地理、地形及結構因素，請參考表4-35。

表 4-35 腐蝕促進因子與地理、地形及結構因素[92]

腐蝕因子	水、氧氣	
腐蝕促進因子	日照、氣溫、鹽分 汽車廢氣、工廠排放物、火山氣體...局部性 酸雨...近年影響受關注	
地理與地形因素	鹽	地理與地形因素
	水	封閉空間(建築物包圍的都市、樹木包圍的山區等等)
	其他(局部因素)	交通量大的路線(周圍有建築物容易積聚腐蝕物質) 工業區 火山區 飛砂
結構因素	鹽	結構因素
	水	漏水(伸縮裝置、排水裝置、橋面板裂縫等) 積水(排水坡度、排水孔、扇形孔等) 大梁端部等封閉部位 塵埃(支承周邊、桁架或拱的節點部位等) 大梁下方空間不足

4. 其他腐蝕

(1)鋁合金的腐蝕

鋁合金本身為高度活性的材料，但表面生成的氧化膜形成堅固的鈍態膜，抑制腐蝕。然而，若因物理或氯化離子(Cl^-)等化學原因導致氧化皮膜部分破壞，則會從該部位開始腐蝕進展。此外，在酸性或鹼性環境中，氧化膜會溶解，失去抑制腐蝕的功能。

鋁護欄與混凝土接觸部位的腐蝕現象，係因混凝土中強鹼性，導致鋁的氧化膜溶解(鹼性腐蝕)所致。為防止此種鹼性腐蝕，需透過被覆等方法避免鋁直接與混凝土接觸。

(2)雜散電流引起的腐蝕

雜散電流是指直流電流從電車軌道或其他使用直流電流的設備等，洩漏至地下的電流。當雜散電流流入鋼結構物時，電流流出部位會發生腐蝕情形。雜散電流引起的腐蝕難以預測，且局部腐蝕可能迅速進展並造成嚴重損傷，因此在土中建議採用被覆等絕緣防蝕方法。

(3)碰撞引起的腐蝕

在運輸、臨時放置或架設過程中，因碰撞導致鋼材曝露，失去防蝕效果，進而造成局部腐蝕。此類腐蝕雖為局部，但可能擴展腐蝕範圍，需適當的修補。

4.2.2 鋼橋防蝕考量與方法

1. 鋼橋防蝕方法應具備的條件

鐵、公路橋梁一旦開始使用，即成為鐵、公路路網絡的一部分，需長期持續發揮功能，因此必須避免其功能暫時受損，或對周邊環境造成不良影響。鐵、公路橋梁的防蝕方法必須滿足以下的條件，以確保所需的的防蝕功能。

(1) 可靠的防蝕性能

鋼橋的防蝕需採用防蝕原理與耐久性等防蝕性能明確的方法。本指引從此觀點出發，涵蓋塗裝、耐候性鋼材、熱浸鍍鋅及金屬熔射等較為成熟的技術。然而，即使防蝕方法本身的原理明確，實際橋梁因應用環境條件、結構及施工條件各異而無法統一。由此，若未適當考慮這些因素，可能導致設計預期的防蝕性能無法發揮，或耐久性顯著下降。因此，應用時需充分考量橋梁實際所處的環境條件與施工條件。若考慮採用尚無使用實績的防蝕方法時，需確認其防蝕原理無問題，並預先驗證在適用條件下，是否具備規定耐久性及施工性無障礙。特別是耐久性方面，應透過反映橋址環境與施工條件的曝露試驗或加速試驗，來驗證在實際橋梁條件下的性能。雖嚴格反映實際橋梁條件進行耐久性驗證或推定可能有困難，但可透過與其他防蝕原理相同，且耐久性明確的防蝕方法進行比較試驗，間接評估耐久性。比較試驗通常採用加速試驗，該試驗需基於防蝕原理，能評估實際橋梁長期劣化情況。

(2) 易於維護管理性

在實際橋梁中，防蝕方法在施工中或開始使用後的環境條件，與設計階段的考量難以完全一致，塵埃堆積、結露、鹽分附著程度等可能比設計時預期更嚴苛。一般而言，防蝕方法的耐久性短於橋梁使用期間，因此鋼橋設計需預設使用期間內進行防蝕方法的檢查與維修等維護管理，並納入考量。因此，鋼橋的防蝕方法

應考慮未來維護管理，需有明確的劣化或損傷狀態判定方法，並具備部分或全面維修的可能性。此處「部分或全面維修可能」係指維修後的防蝕方法仍能獲得規定的防蝕功能與耐久性，而非必須採用與初始防蝕方法相同的修補方式。

(3) 其他

傳統使用的防蝕材料中，少量含鉛化合物、六價鉻化合物及多氯聯苯(PCB)等有害物質。使用含此類有害物質的防蝕材料，或維護管理使用該材料防蝕的鋼橋時，需遵守相關法規與標準(如大氣污染、水質污染及土壤污染的環境基準)，並在施工過程中採取充分的安全措施，確保作業時不對人體健康或環境造成不良影響。

2. 鋼橋防蝕方法

(1) 一般

防止鋼橋腐蝕的方法可如圖 4.21 所示，分為被覆防蝕、使用耐腐蝕材料、改善環境及陰極保護等四大類。

①被覆防蝕：將鋼材與導致腐蝕的環境(水或氧氣)隔離，來防止鋼材產生腐蝕，包括非金屬被覆(如塗裝、防銹罩等)及金屬被覆(如熱浸鍍鋅、金屬熔射等)兩種方法。

②使用耐腐蝕材料：在鋼材中添加降低腐蝕速度的合金元素，製成具耐蝕性鋼材。例如：在鋼材表面形成緻密銹層，抑制一定程度上腐蝕發展的耐候性鋼材。

③改善環境：排除鋼材周邊腐蝕因子，將鋼材置於不易腐蝕的環境下，包括透過結構改善排除水或氧氣，以及透過除濕強制保持濕度低於一定值的方法。

④陰極保護：對鋼材通電消除表面電位差，阻止腐蝕電流迴路形成，包含犧牲陽極方式與外加電流方式，常應用於海水中的鋼製橋墩或混凝土主梁防蝕。有關鋼橋典型的防蝕方法請參見表 4-36。

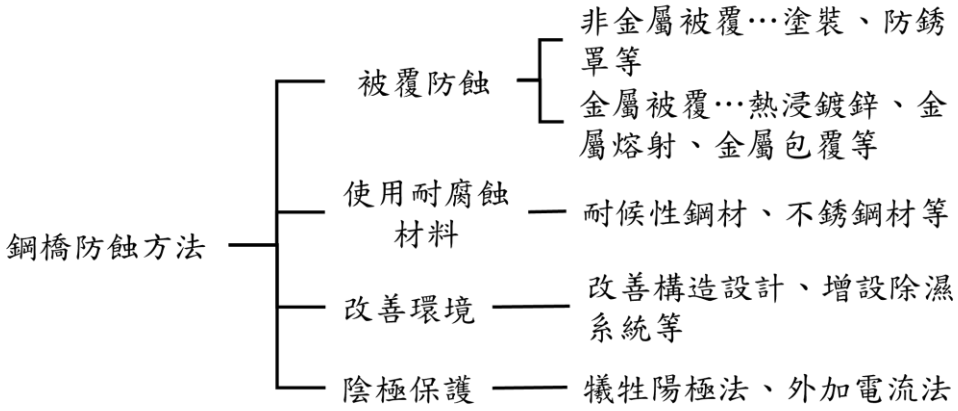


圖 4.21 鋼橋防蝕方法[92]

表 4-36 鋼橋典型防蝕方法[92]

防蝕方法	塗裝		耐候性鋼材	熱浸鍍鋅	金屬熔射
	一般塗裝	重防蝕塗裝			
防蝕原理	塗膜隔離環境	塗膜隔離環境及高鋅塗料防蝕	緻密銹層降低腐蝕速度	鍍鋅層隔離環境及採用鋅防蝕	熔射層隔離環境及採用鋅、鋁防蝕
劣化因子	紫外線、鹽分、水分(持續潮濕狀態)	紫外線、鹽分、水分(持續潮濕狀態)	鹽分、水分(持續潮濕狀態)	鹽分、水分(持續潮濕狀態)	鹽分、水分(持續潮濕狀態)
防蝕材料	塗料	塗料	添加降低腐蝕速度的合金元素	鋅	鋅、鋁、鋅鋁
施工方法	噴塗、刷塗、滾塗	噴塗、刷塗、滾塗	採用添加合金元素之鋼材	浸入鍍槽(鍍鋅工廠)	使用熱噴槍進行熔射
結構與施工限制	溫度、濕度等施工環境條件限制	溫度、濕度等施工環境條件限制	積水、濕氣對策	積水、濕氣對策	熱噴槍操作限制
外觀(色彩)	色彩自由選擇	色彩自由選擇	限定(茶褐色)	限定(灰白色)	限定(霧面銀白)
維護管理	檢查銹蝕、塗膜消耗、變色;塗膜劣化時重新塗裝	檢查銹蝕、塗膜消耗、變色;塗膜劣化時重新塗裝	確認無異常銹形成，腐蝕進展時進行塗裝等防蝕	追蹤鋅層，鋅層消耗後進行塗裝等防蝕	對鋅、鋁等熔射層進行後續檢查。熔射層磨損後，透過金屬熔射或塗裝等進行防蝕
複合防蝕	-	-	與塗裝一起使用	與塗裝一起使用	與塗裝一起使用

3. 塗裝

塗裝是透過在鋼材表面形成的塗膜，隔離導致腐蝕的氧氣、水分及促進腐蝕的鹽類等物質(環境隔離)，保護鋼材的防蝕方法。

塗膜除隔離環境保護鋼材外，還具備色彩選擇自由度高、便於與周邊景觀協調的外觀著色功能，以及提升自身耐候性的要求。因此，通常根據使用目的與環境條件，採用多層不同塗料組合形成塗膜，並按塗裝系統分類。

塗裝系統選定時，不僅需考慮橋址的環境條件，還要顧及結構部位環境差異、施工條件及維護管理條件，確保所需性能。同一橋梁內，根據腐蝕環境差異常使用多種塗裝系統，例如箱型梁內外分別使用外表面與內表面塗裝系統，或考慮施工條件選定現場連接部位與鋼橋面板背面塗裝系統。

在設計結構時，必須考慮塗裝條件，結構和形狀應便於表面處理和塗裝，並確保達到最佳施工品質。並根據需要對構件的自由端進行倒角，以確保塗層厚度符合要求。

此外，值得注意的是，施工過程中對溫度和濕度等環境條件有許多限制。尤其是在沿海地區進行現場塗裝時，必須徹底養護，以防止飛來鹽或海水噴濺，導致鹽分附著在塗裝表面。如果擔心鹽分附著，則必須測量鹽分附著量；如果發現鹽分，則必須用水沖洗，以確保施工在無鹽狀態下進行。

在塗裝過程中，完工後很難確認表面處理和底漆乾燥(硬化)狀態等施工條件，是否符合要求的施工質量，由於這些條件對耐久性有重大影響，因此在整個施工過程中進行充分的品質控制非常重要。

採塗裝防蝕之橋梁，可以透過檢查來檢測和評估防蝕功能的劣化和異常情況，以了解漆膜的劣化狀態，例如銹蝕、漆膜磨損、變色等。如果在檢查過程中發現銹蝕或漆膜劣化等異常情況，可以找出原因並消除，並在適當的時候採取修補塗裝等適當措施，以維持和恢復防蝕功能。

4. 耐候性鋼材

耐候性鋼材是添加可降低腐蝕速度的合金元素製成合金鋼，透過鋼材表面生成緻密銹層(保護性銹)，保護鋼材免受氧氣與水影響，抑制銹蝕進展的防蝕方法。耐候性鋼材除各種鋼板外，尚應用於銲接材料、高強度螺栓、支承等，鋼材與銲接材料須符合規範規定。

耐候性鋼材在表面形成緻密銹層前，與普通鋼材類似，會產生銹水，因此常結合開發的耐候性鋼材表面處理，抑制初期銹生成並促進緻密銹層形成。惟若未在適當條件下使用，初期可能出現銹斑或銹水流出，但通常時間久了，鋼材表面形成暗褐色緻密銹層，銹水流出亦會停止。緻密銹層形成需鋼材曝露於大氣並經適度乾濕循環。惟在鹽分多的環境中，緻密銹層難以形成，可能生成層狀剝離銹，因此需在飛來鹽分量未超過適用範圍的環境下使用。針對飛來鹽分量較多的地區，尚有應用含高鎳量鎳系高耐候性鋼材的案例，但選用時需個別確認橋址與局部環境的適用性。

耐候性鋼材初期可能產生銹水，污染下部結構；下承式橋梁使用時，銹水可能滴落污染路面，需視情況考慮結構改良對策。色彩若不額外塗裝，限於茶褐色或黑褐色，初期可能有銹水流出或銹斑，但若使用環境條件適當，隨時間色彩趨於均一，銹水流出亦停止。在設計結構時，必須特別注意防止持續潮濕環境，例如積水和濕氣聚積。採螺栓連接時，需要考慮限制連接板的邊緣距離，並將連接板分開以防止積水。

對於耐候鋼而言，鹽分聚積和長時間的水分滯留，會阻礙緻密銹層的形成，並導致在緻密銹層形成期間顏色不均勻。因此，應避免在鹽分含量遠超預期應用條件，或無法進行適當乾濕循環的環境下使用耐候鋼。此外，在安裝前的運輸和臨時存放過程中，也必須注意防止鹽分聚積和長時間的水分滯留。例如，在運輸和臨時存放期間，應根據需要用板材保護構件，以防止海風和海水造成的鹽分積聚。在暫時存放期間，也應注意部件的擺放位置，以防止長時間的水分滯留。

使用耐候鋼的橋梁必須進行檢查，以確認其應用環境是否適合所用鋼材，以及是否出現異常銹蝕。如果在檢查過程中發現異常銹蝕，必須找出並消除原因，並採取適當措施，例如必要時用油漆修補銹蝕區域。此外，如果懷疑應用環境不適合耐候鋼，最好盡快調查其適用性並採取相應的防蝕措施。

5. 熱浸鍍鋅

熱浸鍍鋅防蝕方法憑藉物理阻隔和犧牲陽極機制，保護鋼材。透過鋼材表面形成的鍍鋅層，隔離鋼鐵與外界環境腐蝕性性因子接觸，同時因鋅金屬氧化電位較鐵高，在接觸到氧氣、水分，鋅會優先成為陽極被腐蝕來保護鐵，而鋅腐蝕生產緻密性氧化物進一步阻絕腐蝕因子進入鋼鐵底材。熱浸鍍鋅附著量因板厚與材料尺寸而異。惟熱浸鍍鋅耐久性與附著量成正比，小附件或普通螺栓因附著量難以增加，需注意防蝕鍍層壽命可能縮短。

熱浸鍍鋅在鹽分多的環境中消耗較快，於飛來鹽分量多或受融雪劑影響的構件適用有限。當防蝕鍍層消耗需維修時，必須徹底移除促進腐蝕的物質如鹽分。為改善嚴苛鹽分環境的適用性，已開發如熱浸鍍鋅鋁合金等新技術，但本計畫主要記述傳統實績較多的熱浸鍍鋅。

熱浸鍍鋅本身色彩因表面氧化物限於灰白色，但可於鍍層表面塗裝，自由選定色彩。塗裝時，需透過掃砂等適當底層處理，並使用適合熱浸鍍鋅表面的塗裝系統，因附著性可能不足。熱浸鍍鋅表層純鋅耗盡後，下層合金層顯露，該層含少量鐵成分，露出後鐵成分腐蝕可能使外觀轉為黃褐色，此狀態仍具耐蝕性，但選用時需考慮外觀變色。

熱浸鍍鋅製程要求待鍍構件從預處理到浸鍍，依序浸入不同的溶液槽中，這些設施的要求對構件的尺寸和重量都有一定的限制。此外，由於構件浸入溫度約 440℃的熔融鋅中，在設計和鍍鋅過程中必須考慮熱效應，例如採取措施防止構件變形等。

熱浸鍍鋅層堅硬，且良好的熱浸鍍鋅層會在基材表面形成一層合金層，使其在運輸和安裝過程中不易受損。然而，一旦發生損傷，難以對受損區域進行重新浸鍍，因此必須採用熱浸鍍鋅以外的防蝕方法進行修復，例如塗裝。在這種情況下，修復區域的防蝕性能取決於修復塗料的耐久性。因此，在運輸或安裝熱浸鍍鋅構件時必須格外小心，避免損傷熱浸鍍鋅層。

當使用熱浸鍍鋅材料進行高強度螺栓摩擦連接時，必須透過掃砂或其他方法確保預定的粗糙度，以確保摩擦連接面所需的滑動係數。熱浸鍍鋅橋梁必須進行檢查，以查明是否有銹蝕、熱浸鍍鋅層磨損、白銹以及其他熱浸鍍鋅層劣化現象。如果在檢查過程中發現異常劣化，必須找出並消除原因，並根據劣化程度採取適當措施，例如塗裝修補。

6. 金屬熔射

金屬熔射是透過鋼材表面形成的熔射層，隔離導致腐蝕的氧氣、水分及促進腐蝕的鹽類等物質(環境隔離)，保護鋼材的防蝕方法。金屬熔射除環境隔離外，尚有使用鋅等熔射材料利用犧牲陽極作用提升防蝕性能的案例，性能因熔射材料不同而異。鋼橋常用的金屬熔射鍍層包括鋅熔射鍍層、鋁熔射層、鋅鋁合金及擬合金熔射層等。

一般金屬熔射鍍層為多孔質，需另行進行封孔處理。金屬熔射構件色彩限於霧面銀白色，但可於熔射表面塗裝，自由選擇色彩。

結構設計需要仔細考慮，以確保結構和形狀便於表面處理和熱熔射，同時確保品質。對構件的自由邊緣進行倒角處理也至關重要，以確保即使在最細微之處也能獲得合適的熔射層厚度。對於熱熔射結構必須便於噴槍操作。在熔射過程中，保持噴槍噴嘴與被熔射表面之間的適當角度和距離，對於確保良好的熔射品質尤其重要。由於熔射高強度螺栓時難以保證質量，因此金屬熔射部件通常採用熱浸鍍鋅高強度螺栓。

除了溫度和濕度等環境因素的限制外，熔射過程還要求確保表面處理和粗糙化的質量，並且必須謹慎操作，以防止表面粗糙度過大以及殘留異物影響導電性。此外，由於熱熔射設備體積較大，現場施工需要搭建施工架以便運輸設備。採用金屬熔射時，如果熔射層受損，且修補區域較小，則可能難以保證熔射品質。在這種情況下，通常採用其他防蝕方法進行修補，例如塗裝，並且必須注意避免在運輸和安裝過程中損壞熔射層。

需要注意的是，目前在鋼結構橋梁應用金屬熔射的經驗較少，因此在採用該工法之前，必須事先確認並考慮確保耐久性和施工品質的方法，以及金屬熔射層劣化的檢測、評估和修復方法。需要對熔射橋梁進行檢查，以調查熔射層的劣化情況，例如銹蝕的形成、熔射層的磨損以及白銹的形成。如果在檢查過程中發現異常劣化，則必須找出原因並消除，並根據劣化程度採取適當的措施，例如用油漆進行修補。

7. 鋼橋的防蝕設計

鋼橋的防蝕設計需涵蓋規劃、設計與施工各階段，並在各階段進行適當考量，確保橋梁構件不會因腐蝕導致功能提前下降。有關防蝕設計流程詳見圖 4.22。防蝕方法與周邊環境協調、耐久性及經濟性(生命週期成本)密切相關，部分防蝕方法需從設計初期階段考慮構件形狀、尺寸或接頭型式，否則可能導致結構設計的大幅重工。因此，建議在橋梁型式選定階段即選擇防蝕方法及其規格。然而，即便在橋梁型式選定階段確定防蝕方法與規格，隨後設計與施工階段的深入考量，可能顯示初始選定的防蝕方法難以確保良好施工品質，部分情況下需對細部結構或防蝕規格進行修正或調整。因此，橋梁型式選定後，需持續在設計與施工各階段檢討防蝕方法、規格及細部結構，並進行必要修正，以確保達到所需防蝕性能。此外，需預設使用期間內進行防蝕方法的檢查與維修等維護管理，並將其納入維護管理計畫。

有關各種防蝕方法劣化案例，以及選擇各種防蝕方法需要考慮的事項，可參考日本道路協會出版之「鋼道路橋塗裝・防蝕便覽資料集」[149]。

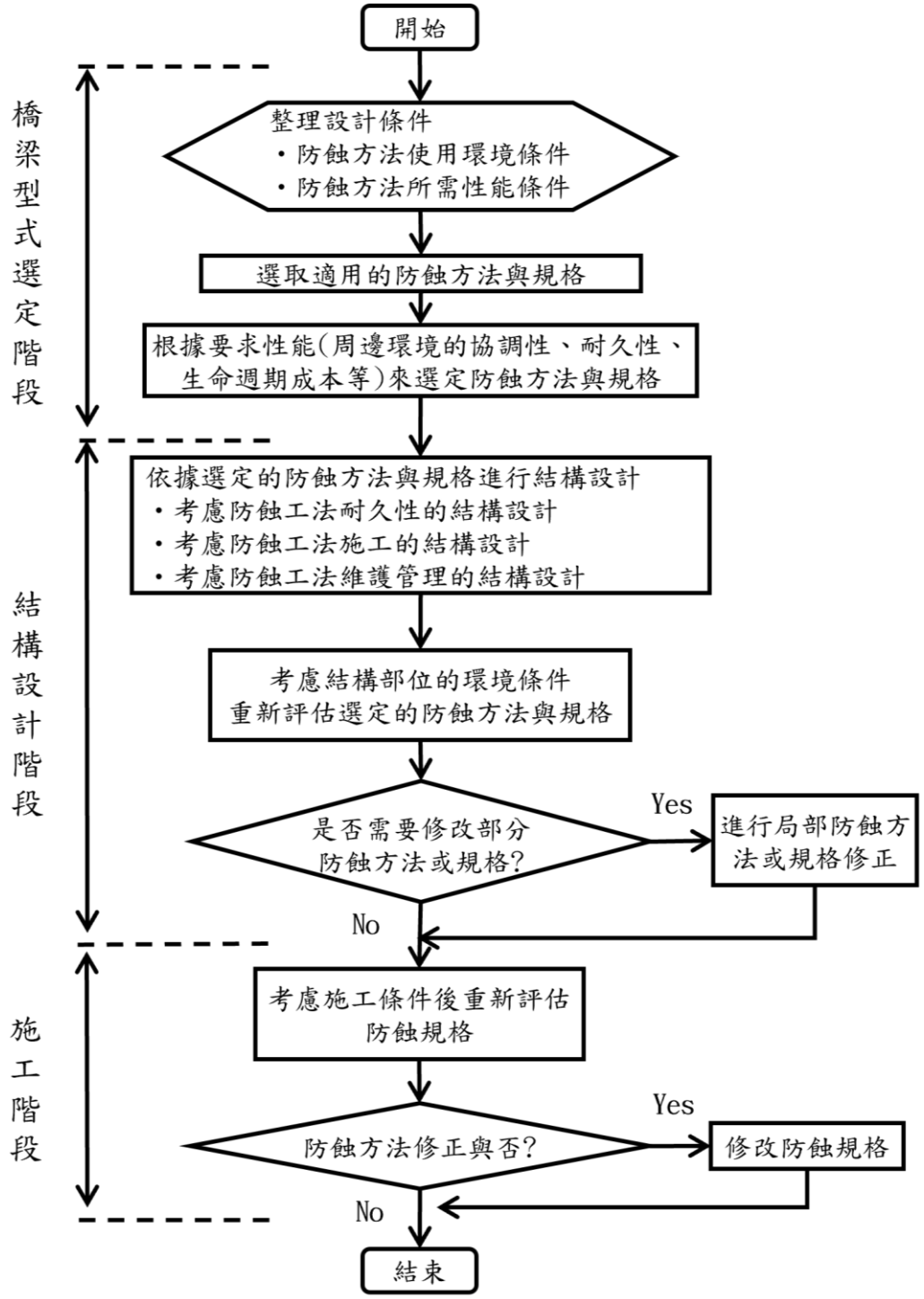


圖 4.22 防蝕設計流程圖[92]

8. 防蝕方法的選擇

(1)防蝕方法選用的基礎

在防蝕方法與其規格的選定時，需在掌握各防蝕方法特性基礎上，結合橋址環境條件、周邊環境協調性、耐久性、經濟性(生命週期成本)及維護管理條件等防蝕要求性能，確保符合該橋所需防蝕性能。同時，設計至施工全過程中，應盡可能在前一階段充分考慮後續結構設計與施工，減少重工。

橋梁型式選定階段，路線線形與橋址通常已經確定，成為防蝕選定的重要條件。然而，若橋梁各構件環境條件超出防蝕方法適用範圍，僅靠結構細部或防蝕規格調整，難以確保充分防蝕性能。因此，應在橋梁型式選定階段充分考慮路線線形、橋址環境及預期維護管理條件，並反映於防蝕方法與規格選定中。

地表或水面與橋下空間不足時，通風不良易導致濕氣滯留，形成易腐蝕環境。因此，應考量確保梁下空間與通風，決定路線線形與橋梁位置；若空間不足，選定不易因持續濕潤而降低防蝕功能與耐久性的方法。另可用混凝土覆蓋地表改善濕氣滯留，並結合環境改善措施進行防蝕方法選定。

下承式橋梁垂直構件或斜構件貫穿橋面板結構，易形成狹窄空間導致積水、塵埃堆積，結露或雨水沿構件流動造成持續濕潤，甚至混凝土埋設部位浸水，導致顯著腐蝕與斷面損失，且檢查維修困難，應避免採用；若不得已採用，需預先充分考慮防蝕方法、規格及檢查維修方案。

支承容易積水積塵，通常位於通風不良的密閉空間內，極易產生腐蝕。因此，在設計時，必須仔細考慮如何創造有利於防蝕的環境。採用防水罩用於改善軸承的腐蝕環境，它能有效防止雨水和外部滲漏對支承的影響，但如水分積聚在防水罩內，就難以排出，反而會形成更容易發生腐蝕的環境。此外，根據結構的不同，檢查支承狀況也可能變得困難。因此，在安裝防水罩時，必

須注意防止水分積聚，並仔細考慮如何確保支承的維護可靠且方便。

鋼橋常在鋼構件製作與架設後進行混凝土橋面板施工或鋪裝，需注意此過程不影響既有防蝕工之功能與耐久性。例如，鋪設瀝青混凝土的鋼橋面板，施工熱影響可能導致橋面板下表面高溫，若選用塗裝防蝕，需使用耐熱塗料。一般混凝土附著對防蝕不利，橋面板施工時應防止混凝土洩漏；若發生附著，需立即水洗徹底移除。

新橋施工期間，輸運、架設至橋面板混凝土澆置前，若忽視臨時防蝕，可能導致銹水污染橋身及下部結構或周邊，建議採取臨時防蝕措施。防蝕方法與規格選定時，需考慮後續施工過程對防蝕工的影響，避免功能降低或耐久性受損。

(2) 防蝕方法的使用環境條件

防蝕方法與規格選定需基於掌握橋址環境條件，建議參考表 4-35 所示腐蝕因子與地理地形因素，現場詳細勘查。

若附近有既有橋梁，調查其腐蝕情況可獲取有效環境資訊，有助防蝕方法與規格選定。惟地理地形微小差異可能顯著改變防蝕環境條件，個別橋梁因結構因素或施工品質導致防蝕功能下降，參考既有橋防蝕情況時需注意這些因素。

橋梁型式選定階段，若現場踏勘困難或僅依現有資訊難以推估完成後之環境條件，可參考各防蝕方法標準適用環境區分。但應盡早踏勘現場，準確掌握完成後環境條件，重新評估選定防蝕方法，必要時修正或調整。為減少規劃與結構設計重工，建議盡早踏勘，特別在施工階段重工困難前，結構設計完成前務必完成踏勘。有關鋼橋典型防蝕方法適用環境，請參見表 4-37。

目前難以定量評估各方法劣化因子以明確適用環境區分，表中適用環境僅為各方法標準規格在一般條件下的參考。選定防蝕

方法與規格時，需參考表中內容，謹慎考慮實際環境條件，判斷採用可行性。

表 4-37 鋼橋典型防蝕方法適用環境

防蝕方法		劣化因子／劣化促進因子	飛來鹽分量較少 ⟷ 飛來鹽分量較多
塗裝	一般塗裝	紫外線、水、氧氣／鹽分、二氧化硫氣體等	適用範圍
	重防蝕塗裝	紫外線、水、氧氣／鹽分、二氧化硫氣體等	適用範圍
耐候性鋼材	－	水、氧氣／鹽分、二氧化硫氣體等	適用範圍
	塗裝	紫外線、水、氧氣／鹽分、二氧化硫氣體等	適用範圍
熱浸鍍鋅	－	水、氧氣／鹽分、二氧化硫氣體等	適用範圍
	塗裝	紫外線、水、氧氣／鹽分、二氧化硫氣體等	適用範圍
金屬熔射	封孔處理	水、氧氣／鹽分、二氧化硫氣體等	適用範圍
	塗裝	紫外線、水、氧氣／鹽分、二氧化硫氣體等	適用範圍

註 1：表中適用環境區分基於妥善施工情況，如未妥善施工，耐久性可能顯著下降。
註 2：適用環境主要依飛來鹽分量影響來區分，融雪劑影響未納入。
註 3：溫泉區等受二氧化硫氣體等非鹽分腐蝕促進物質影響強烈環境需另行考慮。
註 4：金屬熔射適用範圍依熔射材料不同，鋅熔射類似熱浸鍍鋅，鋅鋁合金熔射、擬合金熔射或鋁熔射適用範圍稍廣。
註 5：在超過適用範圍的嚴苛環境下，防蝕方法的耐用年限會縮短，鋼橋應盡量避免使用該防蝕方法。

影響防蝕環境條件的因素除氣象與地理區域因素外，尚包括結構因素。結構因素導致的環境條件差異包含降雨清洗作用、飛來鹽分累積、漏水、積水或濕氣滯留等(詳見表 4-36)。為減少這些差異，需採取適當排水措施避免雨水積聚，設計通風良好結構。然而，僅靠這些措施難以統一各結構部位環境條件，宜根據同一橋梁或構件內各部位環境條件，適當組合適用防蝕方法與規格。例如，使用耐候性鋼材的橋梁，梁端部易濕氣滯留或因伸縮裝置漏水，建議考慮塗裝等措施。

(3)與周邊環境的協調

由於橋梁幾乎都是永久性建築，其顏色和設計必須經過精心考慮，以與周圍環境相協調，確保使用者的舒適度並創造出美麗的景觀。尤其近年來，隨著景觀設計日益受到重視，對美觀和景觀的考量至關重要。此外，考慮到未來的維護，不僅要考慮防蝕，還要考慮顏色和光澤等因素，包括其耐久性和抗污性。因此，在選擇防蝕方法及其規範時，必須全面考慮鋼結構橋梁的預期用途，包括所需的性能。還必須考慮未來的維護計畫和全生命週期成本，同時確保與周圍環境的協調。

(4)經濟性

橋梁經濟性不僅需壓縮建設費等初期投資，還應從長遠角度考量檢測、維修等維護管理階段費用，追求整體費用(生命週期成本)最小化。防蝕為橋梁整體費用的一部分，選定時應注重生命週期成本經濟性。防蝕生命週期成本一般用以下公式表示：

$$LCC = I + M + R \quad \text{.....(4-56)}$$

其中，LCC：防蝕生命週期成本

I：防蝕初期成本

M：防蝕檢測、部分維修(維護管理)成本

R：防蝕全面維修與更新成本

生命週期成本計算方法與評估期間目前無統一標準，需依目的與比較內容選用適當方法。評估期間通常最好使用橋梁設計時考慮的防蝕方法的週期。橋梁設計時考慮的周期，通常是橋梁設計時考慮其耐久性的目標週期，並不意味著橋梁在服務期滿後會失去其防蝕功能。經適當維護管理後，多數橋梁可在此期間後持續使用。

9. 防蝕方法所需的結構設計

即便根據橋址環境條件與要求性能選定適當防蝕方法與規格，若結構設計未考慮耐久性、施工與維護管理，可能顯著降低防蝕功能與耐久性，甚至難以透過檢測維修維持功能。考慮這些因素的結構設計，應與適當防蝕方法選定併行，為防蝕設計主要項目，需注意防蝕方法與規格考量一致。結構設計所需防蝕措施多樣，特別對結構細部要求高，需明確記載於設計圖，確保設計理念傳達施工單位。實施多項防蝕措施時，注意措施間不相互影響，並避免對結構本體造成不良影響。例如，熱浸鍍鋅高強度螺栓強度等級有使用限制；使用耐候性鋼材時，高強度螺栓接頭部對連接板短邊端距離有受限。依據選擇的防蝕方法可能會有特定結構設計要求。本計畫基於鋼橋一般條件與最新見解，記述最佳結構細部注意事項。但個別橋梁或構件因防蝕性能與環境需求，完全依本指引未必適當。在結構設計時，應充分考慮各橋梁及部位防蝕要求與環境條件，必要時組合多項措施，滿足所需性能且符合經濟性，並採取適宜對策。

(1) 考慮防蝕耐久性的結構設計

考慮防蝕耐久性的結構設計，係指針對防蝕方法，透過結構細部考量(如漏水、積水對策，異種金屬接觸腐蝕或間隙腐蝕等局部腐蝕對策)，盡可能確保其原始性能的發揮。考慮防蝕耐久性的結構設計範例圖說，將於第五章「防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例」進行說明。

(2) 考慮防蝕施工的結構設計

結構設計要考慮防蝕方法的施工，例如，對將要塗裝、熱浸鍍鋅或金屬熔射的構件的端部研磨成圓弧角(倒角)；根據鍍槽的大小和鍍覆工作的難易程度，確定要進行熱浸鍍鋅的構件尺寸，並提供加強結構以防止熱變形。為了確保所選的防蝕方法及其規格具有實現其預期功能所需的品質，必須確保可靠地實施這些措施。須注意的是，實施防蝕所需的結構條件會因所選的防蝕方法及其規格而異。典型防蝕方法施工所需結構條件請參見表 4-38。

表 4-38 典型防蝕方法施工所需結構條件

典型防蝕方法	施工所需結構條件
塗裝	● 塗裝施工姿勢、空間 ● 斷尾型螺栓之處裡 ● 構件銳緣圓弧化
耐候性鋼材	-
熱浸鍍鋅	● 構件尺寸與重量限制 ● 鋅液之流通性 ● 熱收縮對策 ● 構件銳緣圓弧化
金屬熔射	● 熔射施工姿勢、空間 ● 構件銳緣圓弧化

(3) 考慮防蝕維護管理的結構設計

考慮防蝕維護的結構設計是指在設計時充分考慮維護階段，例如確保檢查和維修工作的空間以及提前建造必要的施工架。一般而言，在結構開始使用後的維修工作中進行的防蝕工作，作業姿勢和作業空間等條件通常會受到與製造和安裝階段不同的各種限制。因此，在設計時考慮維修方法並採取必要措施非常重要。在設計結構開始使用後安裝的配件以及安裝維修和加固材料時，也必須考慮確保作業空間，以免妨礙防蝕維護。此外，在檢查時，如果沒有施工架等適當的設備，可能會出現因目標區域太近，無法進行所需檢查的情況，因此必須從設計階段就考慮應對方法，並採取適當措施，例如根據需要搭建施工架。以下是考慮到防蝕維護和管理的結構設計範例。

①確保作業空間

為了進行檢查和維修工作，必須在橋梁下方或兩側搭建作業施工架。如果橋梁下方或兩側有公路、鐵路、建築物或其他設施，則必須確保有足夠的空間搭建作業施工架，且不影響這些設施的使用。以下是一些考慮到工作空間的施工細節的範例。

A.梁端結構：

在橋台和橋墩附近，某些地方的構件間距可能非常狹窄，以至於無法單手伸入其中進行工作，但必須確保所有構件都有足夠的維護空間。必須在主梁的腹板或翼板上設置人孔，或切除橋台翼牆，以確保工作空間。也建議考慮從下部結構頂部到下翼板底面的空間，因為這是一個容易發生腐蝕的環境。特別是當翼板寬度較寬時，例如箱梁，建議注意確保維護空間。

B.密閉結構：

對於箱型梁和橋墩等封閉斷面構件，若構件尺寸過小(如桁架橋斜桿)，內部無法保證足夠的工作空間，必須完全密封，以防止腐蝕加劇。然而，從修復疲勞損傷的角度來看，也必須考慮採用密封結構的可行性。此處的「密閉結構」是指透過銲接與外界完全隔離的結構，不包括人孔、手孔等蓋板用螺栓緊固的結構。也就是說，即使蓋板採用高強度螺栓緊固，也未必是氣密結構。因此，耐腐蝕密封結構應視為透過銲接與外界完全隔離的結構。

②設置維護管理設施

檢查和維修的施工架，必須在鋼製橋墩的大梁或橫梁上，安裝施工架起重設備。由於安裝施工架並不容易，特別是對於翼板寬度較寬的箱梁和大梁較高的桁架橋，因此需要確定施工架的結構，並安裝必要的施工架起重設備。此外，對於較長的海上橋梁，如果需要根據檢查結果進行局部維修，則需要安裝可以執行檢查和維修工作的設備(例如檢查車)。施工架起重設備的安裝位置很可能是開始使用後容易發生疲勞損壞的結構，因此必須考慮安裝結構和安裝方法。

箱梁、橋墩等封閉斷面構件，必須在適當的位置設置人孔和通風孔，以便對內表面進行防蝕檢查和維修。此外，考慮到在使用期間可能需要進行防蝕檢查和維修等維護工作，在設計安裝位置和結構時必須充分考慮可維護性。

下部結構檢查軌道也可做為通往上部結構檢查軌道的通道。然而，由於梁端經常發生因漏水而導致的支座等構件的劣化和損壞，因此，當下部結構頂部維護困難時，最好為了維護目的而安裝該軌道。

③可更換構件

檢查通道、排水系統等輔助設施通常空間狹窄，難以進行防蝕修復。在這種情況下，當腐蝕加劇、功能降低時，考慮更換構件可能更具經濟效益。在考慮此類維護方法時，建議考慮到使用壽命期間需要進行防蝕設施的檢查和修復等維護，採用易於更換構件的結構，並提前設置更換所需的設施，在結構設計階段就充分考慮未來的更換需求。

10.重新評估防蝕方法

(1)考慮結構部位環境條件的防蝕方法重新評估

在鋼橋設計中，通常會考慮整體環境條件、與周圍環境的協調性、生命週期成本以及其他所需性能，並根據橋梁的各種性能要求進行結構設計。此時，結構設計完成階段各結構構件的環境條件可能與選擇時所假設的環境條件不同。因此，有必要在結構設計完成階段重新評估防蝕方法及其規格，並根據需要修改防蝕方法及其規格。

(2)考慮施工條件的防蝕方法重新評估

防蝕效果受施工品質的影響很大，但事後往往很難評估施工品質。即使在防蝕施工後發現品質沒有得到充分保證，也往往很難透過維修等方式進行糾正，即使可以糾正，維修工作規模也很龐大，而且在經濟上也不利。因此，在進行防蝕施工時，必須採取充分的品質保證措施，避免重複施工。如果根據施工條件，品質保證的難易度有很大差異，則需要考慮將防蝕規格更改為更容易確保施工品質的規格，或重新檢視施工流程，改善施工條件。

確保各防蝕方法的品質需要特別注意的施工條件範例請參考表 4-39。這些事項必須從施工計畫階段就認真考慮，以確保具備獲得良好施工品質的條件，並根據需要在規格和防蝕方法的考慮中予以反映。

表 4-39 確保品質應注意的施工條件[92]

	工廠施工	現場施工
施工場所	● 溫度、濕度、海鹽顆粒影響等環境條件 ● 養護設備等 ● 構件、材料(塗料、稀釋劑)保管條件	● 溫度、濕度、海鹽顆粒影響等環境條件 ● 養護設備、安全設備等 ● 構件、材料(塗料、稀釋劑)的保管條件 ● 對周邊地區影響(噪音、粉塵等) ● 生銹、飛砂、油等其他作業的影響
設備環境	● 加工、製作設備 ● 噴砂設備等施工設備能力與規格 ● 構件保管、移動、進出條件(設備能力與規格)	● 構件保管、移動、輸運條件(設備能力與規格、路線) ● 噴砂設備等施工設備的能力與規格 ● 對周邊地區影響之設備條件 ● 廢棄物處理條件 ● 燃料、電力、照明等設備
作業環境	● 臨時設備、安全設備條件 ● 其他工項或設備干擾	● 臨時設備、安全設備的條件
構件條件	● 作業空間(姿勢、施工架等) ● 細部結構施工性(狹窄空間、設備適用性與作業便利性)	● 作業空間(姿勢、施工架等) ● 細部結構施工性(狹窄空間、設備適用性與作業便利性)
檢查條件	● 檢查設備的能力與規格 ● 檢查方法適用範圍	● 檢查設備的能力與規格 ● 檢查方法適用範圍
其他	● 維修相關施工注意事項如上所述	● 維修相關施工注意事項如上所述

4.2.3 塗裝之設計標準建議

塗裝防蝕設計係根據橋梁施工環境和養護體系(維護管理計畫)選擇合適的塗裝系統，並考慮和決定基底處理方法、塗裝方法、重塗週期等，以確保塗裝系統性能的充分發揮。本節將塗料類型和薄膜厚度的組合稱為塗裝系統，將塗料類型、塗膜厚度、標準使用量和塗裝間隔的組合稱為塗料規格。

1. 透過塗裝進行防蝕

鐵的最穩定狀態是氧化物(鐵銹)，鐵要氧化(腐蝕)，需要氧氣和水(腐蝕因子)，氯離子也會促進腐蝕。塗料形成緊密黏附在鋼材上的塗層，阻隔環境並使腐蝕因子難以到達鋼材表面。即使腐蝕因子到達鋼材表面，它還具有使鋼材難以腐蝕的防蝕功能。塗裝系統由具有防蝕性能的底漆、確保底漆和面漆膜之間附著力的中塗漆、以及防止中塗漆和底漆膜因紫外線等而劣化的耐候性優良的面漆組成，以保護鋼材。面漆還可以選擇顏色，這也起到改善景觀和美觀的作用。

2. 塗料的功能

塗料依其功能分為防銹底漆、中塗漆、面漆，但塗裝是一種將這些塗料適當組合的複合防蝕方法。各塗料的主要特徵與角色如下：

(1) 防銹底漆：直接塗於鋼材表面以抑制或防止銹蝕發生。防銹底漆塗膜應具對鋼材有良好之附著性，於鋼材膨脹或收縮時不產生剝離或剝落。

(2) 中塗漆：中塗漆之功能為增加塗層的厚度，以阻絕氧氣、水分及其他腐蝕因子等之侵蝕。其塗膜表面較粗糙可增強與底漆、面漆之附著性。

(3) 面漆：為塗裝系統中之最上層塗膜，具備耐候(如維持光澤及避免褪色)、耐水、耐藥品、耐污染、耐碰撞及易清洗等特性，並保護其下層塗料。

3. 塗膜劣化

根據橋梁施工環境和塗裝系統的不同，長久下來可能會出現各種劣化現象。特別是對於一般塗裝系統，塗裝後不久就會出現塗膜劣化，包括銹蝕(貫穿塗膜之銹蝕及可看見的底材銹蝕)、粉化、龜裂、片狀剝落和起泡等現象。

4. 設計流程

塗裝防蝕設計流程請詳見圖 4.23。

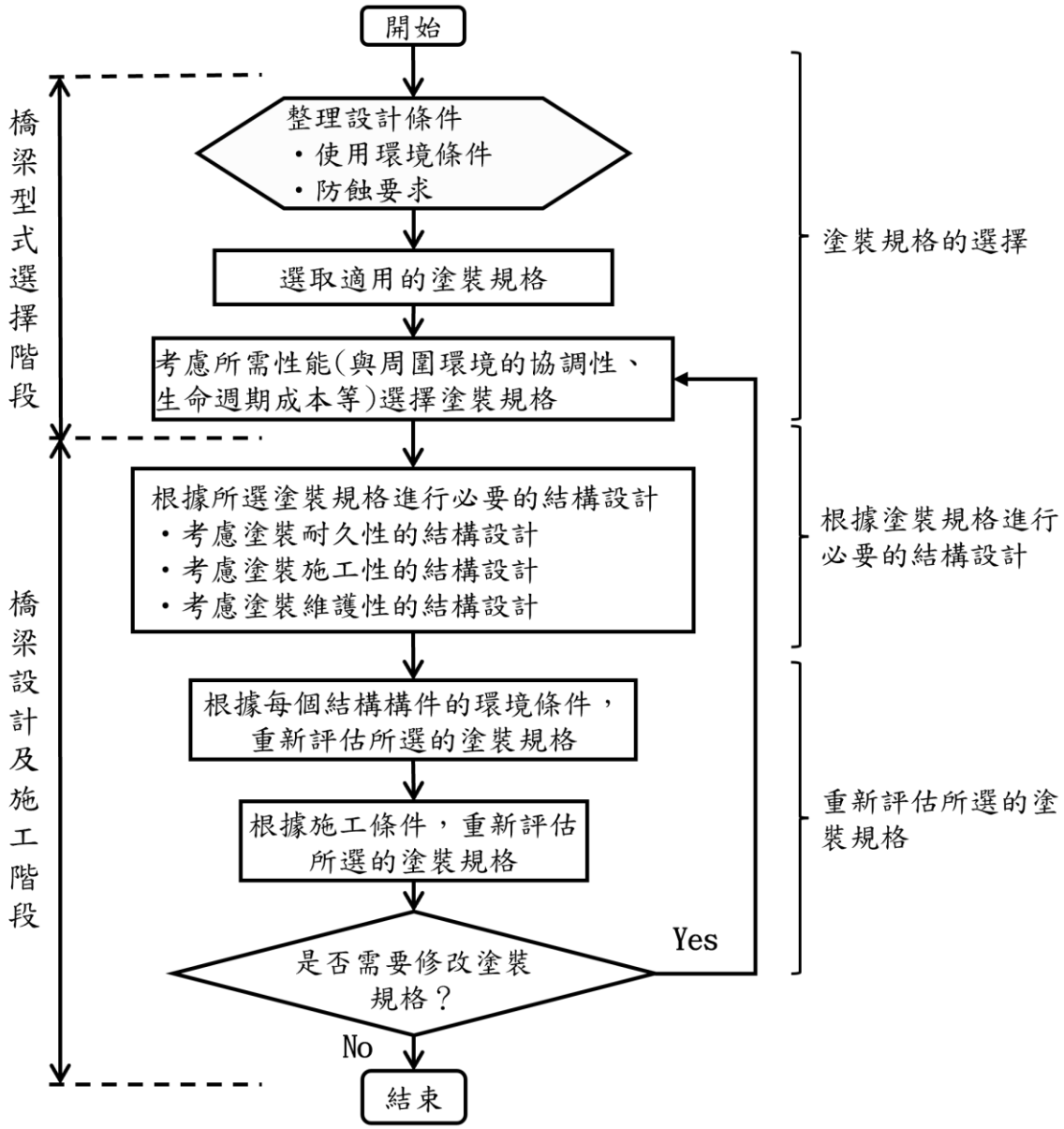


圖 4.23 塗裝防蝕設計流程圖[92]

5. 塗料

(1) 一般

塗料具有多種功能，通常由固體粉末顏料、液體或固體樹脂、添加劑和溶劑組成。透過組合這些材料，可以配製出具有各種性能特徵的塗料。

(2) 塗料的成分

顏料是與樹脂一起形成塗層的主要成分，其主要作用是為塗層著色(用於此目的的塗料稱為著色塗料)和防銹效果(用於此目的的塗料稱為防銹顏料)。顏料也用於控制塗層的物理性質，增加塗層厚度，並改變流動特性以提高可施工性(用於這些目的的塗料稱為填料顏料)。將樹脂與顏料混合，塗覆並乾燥後形成塗層。使用合成樹脂的塗料稱為合成樹脂塗料。合成樹脂塗料也依所使用的合成樹脂名稱分為環氧樹脂塗料、氟碳樹脂塗料等。樹脂對塗層性能有很大影響，應根據腐蝕環境的嚴重程度和預期用途進行選擇。此外，還應根據塗料在塗裝系統中的作用和位置(例如底漆和面漆)來選擇樹脂，使其能夠充分發揮其功能。

添加劑的作用是加速塗料的乾燥，防止顏料沉澱，及防止施工過程中起泡和流動，並賦予塗層光滑度。

溶劑用於溶解樹脂並使其具有流動性，因此它們在塗覆後會蒸發，不會形成塗層，但它們對塗覆過程中的可操作性和塗層的最終效果有很大影響。通常使用有機溶劑做為溶劑，但也有使用水代替有機溶劑的水性塗料。有些塗料混合在一起後會迅速反應，即使密封在罐中也會變硬。因此，會將各組分分開存放，並在施工前進行混合。這類塗料稱為多組分塗料，大多數是雙組分塗料。

塗料的乾燥方式分為自然乾燥型和強制乾燥型兩種，但橋梁等大型結構物的塗裝通常採用自然乾燥型，因為構件較大，強制乾燥較為困難，塗料乾燥機制包括加成聚合反應、縮聚反應、氧化聚合反應。

(3) 塗料的組合

如果塗裝系統中塗料的組合不合適，塗層之間的附著力可能會很差，並且下面的塗層可能會膨脹並起皺紋。但是，如果要更改塗裝系統對構件的不同區域進行塗裝，則需要仔細考慮各種塗料的組合。不同塗料間之相容性，詳見表 4-40。

表 4-40 不同塗料間之相容性[80]

上塗塗料 / 底塗塗料	醇酸樹脂塗料	氯化橡膠樹脂塗料	聚氯乙烯樹脂塗料	環氧樹脂塗料	無機鋅粉底漆	無機鋅粉預塗底漆	苯酚樹脂塗料	硝化纖維塗料	聚胺酯塗料	氟碳樹脂塗料
醇酸樹脂塗料	○	△	╳	╳	╳	╳	△	╳	╳	╳
氯化橡膠樹脂塗料	○	○	△	╳	╳	╳	○	╳	╳	╳
聚氯乙烯樹脂塗料	○	○	○	╳	╳	╳	△	╳	╳	╳
環氧樹脂塗料	△	△	○	○	╳	╳	△	╳	○	○
無機鋅粉底漆	╳	○	○	○	╳	╳	△	╳	○	○
無機鋅粉預塗底漆	╳	○	○	○	╳	╳	△	╳	○	○
苯酚樹脂塗料	○	○	╳	╳	╳	╳	○	╳	╳	╳
硝化纖維塗料	△	△	△	△	╳	╳	△	○	╳	╳
聚胺酯塗料	△	△	△	○	╳	╳	△	╳	○	○
氟碳樹脂塗料	╳	╳	╳	╳	╳	╳	╳	╳	╳	○

備考：相容性符號表示，○佳；△普通；╳差(不得使用)。

(4) 裸鋼面新設塗裝規格

鋼構橋梁裸鋼面新設塗裝分為鋼材預塗及構件塗裝。鋼材預塗及構件塗裝所使用之各種塗料均應指定其品質標準，以確認所使用之塗料品質能符合塗裝系統設計之性能。

本計畫所列之塗裝系統引用「鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊(第二版)」(以下簡稱「防蝕塗裝技術手冊」)所建議之塗裝系統，有關各塗裝系統之規格(含施工作業程序)，請參閱「防蝕塗裝技術手冊」。

(5)熱浸鍍鋅面塗裝系統

熱浸鍍鋅面塗裝系統依 CNS16174-1 所處大氣腐蝕性級別及耐久性等級，區分為 G3、G4、G5 及 GX 等四種塗裝系統。另外考慮臺灣地區 CX 腐蝕環境之高風險性，新增 GX^{+}增厚塗裝系統。各塗裝系統適用大氣腐蝕性級別及耐久性等級，如表 4-41 所示。

本章節熱浸鍍鋅面塗裝系統參考 CNS 16174-5 附錄 D 塗裝系統，考量臺灣腐蝕環境複雜性及施工環境條件較差，且因每個耐久性等級塗裝系統最小乾膜厚差異僅 40μm，對整體防蝕成本影響甚小，故選擇每一大氣腐蝕性級別其耐久性等級為超長期(VH)之系統，大氣腐蝕性級別從 C3~C5 區分為 G3、G4 及 G5 三種塗裝系統。另外針對 CX 大氣腐蝕性級別，因於 CNS16174-9 其最高耐久性等級僅為長期(H)，故 GX 及 GX^{+}塗裝系統選擇之耐久性等級為長期(H)。

表 4-41 熱浸鍍鋅面塗裝系統適用之大氣腐蝕性級別及耐久性等級[80]

塗裝系統	大氣腐蝕性級別	耐久性等級(年)
G3	C3	超長期(25 以上)
G4	C4	超長期(25 以上)
G5	C5	超長期(25 以上)
GX	CX	長期(15~25)
GX^{+}	CX	長期(15~25)

(6)金屬熔射面塗裝系統

金屬熔射面塗裝系統依 CNS16174-1 所處大氣腐蝕性級別及耐久性等級，區分為 T4、T5 及 TX 等三種塗裝系統。另外考慮臺灣地區 CX 腐蝕環境之高風險性，新增 TX^{+}增厚塗裝系統。各塗裝系統適用之大氣腐蝕性級別及耐久性等級，如表 4-42 所示。

本章節金屬熔射面塗裝系統參考 CNS 16174-5 附錄 E 塗裝系統，考量臺灣腐蝕環境複雜性及施工條件較差且每個耐久性等級

最小乾膜厚差異僅 40μm，對整體防蝕成本影響甚小，故選擇每一大氣腐蝕性級別其耐久性等級為超長期(VH)之系統，大氣腐蝕性級別從 C4~C5 區分為 T4 及 T5 二種塗裝系統。另外針對 CX 大氣腐蝕性級別，因於 ISO 16174-9 其最高耐久性等級僅為長期(H)，故 TX 及 TX^+塗裝系統之耐久性等級為長期(H)。

表 4-42 金屬熔射面塗裝系統適用之大氣腐蝕性級別及耐久性等級[80]

塗裝系統	大氣腐蝕性級別	耐久性等級(年)
T4	C4	超長期 (25 以上)
T5	C5	超長期 (25 以上)
TX	CX	長期 (15~25)
TX^+	CX	長期 (15~25)

(7) 色彩設計上的注意事項

塗裝的顏色選擇範圍廣泛，可根據當地環境進行色彩設計，例如用於提升地形等各種用途。在設計顏色時，需要仔細考慮橋梁的存在對周圍景觀和當地居民的影響與環境的和諧，並考慮塗料顏色耐候性避免保色性較差短期內褪色影響外觀。因防蝕塗料面漆所用顏料一般為有機顏料其色系對耐紫外線能力有所差異，依曝曬觀察發現，不同色系耐紫外線能力有所差異且如同色系一般深色較淺色保色性佳。

在景觀設計方法上，建議參考相關技術規範或專業文獻。在城市橋梁景觀設計上，建議參考以往的案例，以達到居民心理的和諧，並選擇有效的色彩。表 4-43 列出了在建造橋梁時通常應考慮的景觀和對當地居民的影響等事項的例子。

表 4-43 色彩設計時對景觀與居民的考慮事項[92]

景觀考慮事項	居民考慮事項
1. 反映地區特徵的色彩 每個城鎮都有其獨特的特徵，這些特徵是長期形成的，包括不同的氣候、習俗、歷史、傳統和文化。這些構成了城鎮的個性，可以說是城鎮的面貌。這種個性也體現在當地獨有的色彩。橋梁的顏色最好能展現城鎮的個性。 2. 區域功能的色彩 城市由居住區、工業區、商業區、行政區、歷史景觀(保護)區等多個不同的功能區域組成，各區域所要求的外觀因其功能而異。 因此，選擇能夠增強橋梁建造區域所需功能的顏色非常重要。 3. 自然條件的色彩 自然、建築以及其他人造景觀，共同構成了景觀的重要元素。在許多情況下橋梁的色彩需要與自然景觀完美融合。	1. 公共利益的色彩 做為公共空間一部分的橋梁必須具有吸引許多人的顏色。 2. 美麗和諧的色彩 只有當接收者覺得顏色美麗時，顏色的選擇才算真正發揮作用。基於接收者的想法進行色彩設計至關重要，例如，要與街道景觀協調一致，與自然背景相協調。 3. 利用標示的色彩 由於其性質，橋梁還具有做為當地地標的附加價值。 當地人為他們的橋梁感到自豪，有時橋梁的顏色需要做為他們城鎮的面貌傳達某種訊息。 4. 與材質和形狀相符的色彩 評估顏色的優缺點，不能不考慮其與材質的關係。此外，就其與形狀的關係而言，需要選擇與各種形狀相符的顏色，例如簡潔的桁架結構或優雅的拱橋，並充分凸顯這些意象。 5. 安全性的色彩

6. 結構設計注意事項

橋梁上的油漆會因各種環境因素而老化，因此需要定期重新塗裝以保持塗膜的性能。因此，在設計結構時，必須確保對塗膜進行充分的檢查和重新塗裝，並採取必要的措施以便進行檢查和重新塗裝。結構細節的設計也需要防止漏水和積水等導致塗膜早期老化的現象，並確保良好的塗裝施工品質，避免漆膜厚度不足。

(1)防蝕對策

在設計待塗裝橋梁的結構時，必須確保足夠的工作空間用於表面處理和塗裝作業，消除難以塗裝的狹窄空間，並注意防止泥漿、灰塵和水的聚積。

此外，由於本計畫描述了每種防蝕方法在標準條件下實現固有防蝕性能和耐久性的方法，它不一定是針對單個橋梁的條件或塗裝所需性能的最佳方法，並且在某些情況下，性能可能會過度或不足，因此必須非常小心。因此，在防蝕系統設計和施工時，請務必充分考慮具體情況，以確保所採用的方法是合適的。

①對構件角部進行圓弧化處理

構件的邊緣角部難以確保膜厚，為提升塗裝壽命，進行圓形處理至關重要。為獲得與一般部位相當的塗膜性能，建議採用半徑 2R 以上的曲面型式(C5(含)以上環境建議採 3R 以上曲面型式)。角部曲面形型式意圖詳見圖 4.24。

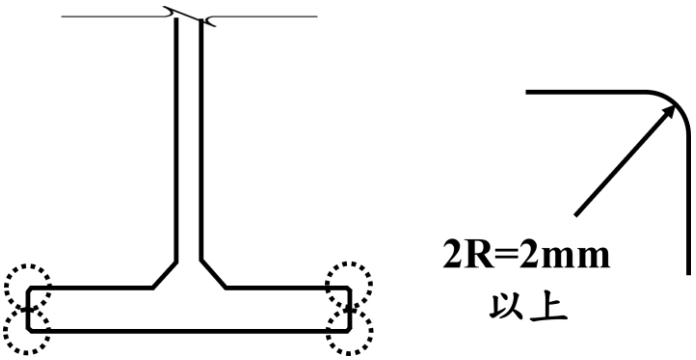


圖 4.24 角部曲面型式示意圖[92]

②使噴砂等表面處理作業及塗裝作業易於進行，銲接部位若有不規則凹凸、欠切或重疊，恐難確保適當塗膜厚度。銲接部外觀從疲勞耐久性角度需進行充分品質管理，在防蝕上也同樣重要。特別是扇形孔或銲接線交錯處，銲接形狀容易不規則，需特別注意。

③外露結構薄板的扇形孔及開口建議約 50 mm，厚板的扇形孔及開口建議加大(最少 1.5 倍板厚)。

④消除狹窄的部位。

⑤改善大梁端部的通風。

⑥防止泥土、塵埃堆積及積水，改善排水。

⑦防止橋面板、伸縮裝置、排水管漏水。

⑧排水管盡可能從排水井垂直下垂，確保足夠突出長度超過鋼構件最下端。

⑨若為橫拉式排水裝置，需設置足夠排水坡度，並使用大口徑管，以防止管道接頭滲漏。

⑩若橋面板設排水孔，需用軟管或其他方式，將水導至適當位置，確保水不直接流至鋼梁位置。

⑪使用非排水型伸縮裝置。

⑫高強度螺栓接續使用扭力型高強度螺栓時，斷尾痕跡形狀尖銳，塗裝時難以充分附著。此時透過研磨或專用工具機平滑處理，可確保與一般螺栓頭或螺帽部位相當的塗裝品質。

(2)作業空間的確保

塗裝作業用施工架需配置以便各部位塗裝作業順利進行，確保良好施工品質。若橋下或側方有公路、鐵路、建築物，需在不影響其使用情形下，確保設置作業用施工架的空間。現有橋梁中，橋台或橋墩附近構件間距局部狹窄，難以單手作業。結構設計階段需從腹板或翼板切口，或加大支承墊座高度等確保作業空間。

箱型梁、鋼製橋墩、桁架橋弦材、斜材、拱構件等閉斷面構件，若因尺寸小難以確保內部作業空間，需完全密封該部位，防止銹蝕進行。

(3)構件角部的處理

構材角部若因氣體切割形成尖銳邊緣時，塗料難以充分附著，塗膜會變薄，易導致早期銹蝕。因此，需用專用加工機或研磨機對角部進行圓弧化處裡，並先行塗裝。為獲得與一般部位相當的塗膜性能，建議 2R 以上曲面形狀(C5(含)以上環境建議採 3R 以上曲面形狀)。

(4)漏水或積水的防止

塗膜浸水時間越長，劣化速度越快，也越容易生銹。梁端伸縮裝置漏水常導致主梁或支承嚴重腐蝕，需採取雙重止水設施等措施完全防止漏水

箱型梁或鋼製橋墩等封閉斷面之構件若無法完全密封，需盡可能防止雨水進入，透過密封材填補連接部位隙縫，防止水從隙縫浸入，同時設置排水孔，排除結露水或吹入水，避免積水。

(5)附屬設施的設置

為安全設置塗裝用之施工架，設計階段充分考量塗裝維護管理所需附屬設施，需於大梁或鋼製橋墩梁設置施工架吊掛用零件等。特別是翼板寬的箱型梁或高大的桁架橋，施工架設置作業不易，決定施工架結構後，設置必要吊掛用零件。海上長大橋構件臨近接觸作業多，塗膜檢查時可能同時進行局部補修塗裝，建議設置檢查作業車等裝置以進行檢查與塗裝。

箱型梁或鋼製橋墩等封閉斷面之構件，需於適當位置設置人孔或通風孔，以便進行內面塗裝更新。

4.2.4 耐候性鋼材之設計標準建議

1. 防蝕的原理

(1) 防蝕原理

耐候性鋼材係在普通鋼材中添加適量的銅(Cu)、磷(P)、鉻(Cr)等金屬元素，使鋼材表面形成緻密的氧化層(保護性銹蝕)保護鋼材表面，抑制後續銹蝕的進展，相較於普通鋼材的腐蝕速度降低，從而抑制鋼材因腐蝕導致的板厚減少。

耐候性鋼材緻密氧化層的生成機制如圖 4.25 所示。耐候性鋼材在使用初期，表面的 Fe 經過溶解、水解及析出等作用循環反應生成 γ-FeOOH，如圖 4.25(a)。經過一段時間後，γ-FeOOH 再次透過溶解與析出等反應在外層銹與底材間生成非晶質的鐵氫氧化合物(Amorphous Ferric oxyhydroxide, $FeO_x(OH)_{3-2x}$)，如圖 4.25(b)。當使用時間更久時，非晶質氫氧化物會轉變為保護性良好的富鉻 α-FeOOH (α-$(Fe_xCr_{1-x})OOH$，通常又稱 Cr-FG)，如圖 4.25 (c)。

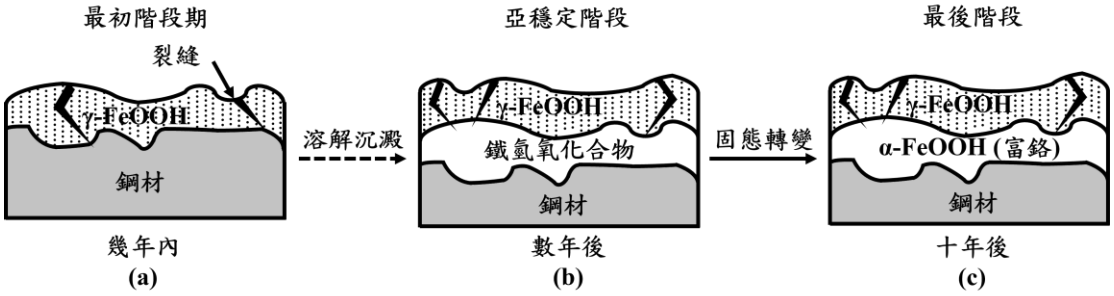


圖 4.25 耐候性鋼材緻密氧化層的生成機制[150]

因此，耐候性鋼材的防蝕設計基本原則，需充分考慮橋梁的架設環境及維持管理體制，確保確實形成緻密銹蝕層，來進行使用鋼材的選定及結構細部的檢討。

以往，在適當環境條件下，腐蝕速度降低至無需特殊維持管理的程度，時常被稱為「銹蝕穩化」，但腐蝕進展並未完全停止。在理想的環境條件下，無塗裝狀態下的腐蝕速度可降低至預期耐久性提升的程度。

(2) 耐蝕性

在適度乾濕循環且大氣中鹽分量少的條件下，耐候性鋼材會生成緻密銹蝕層。然而，在大氣中鹽分量多或鋼材表面持續濕潤的環境條件下，無法形成預期的緻密銹蝕層，導致產生顯著腐蝕或層狀剝離銹蝕發生。

即使長期間曝露於良好環境形成緻密銹蝕層的耐候性鋼材，若環境條件變化而曝露於高鹽分環境，銹蝕的保護性可能受損，腐蝕速度開始增加。

(3) 橋梁的銹蝕外觀

耐候性鋼材的銹蝕狀態取決於鋼材表面的腐蝕環境。例如 I 型鋼橋之外梁外表面與其他鋼材表面的銹蝕狀態，會因是否被雨水沖刷而有所不同。此外，濕潤時間和沈積物的影響因鋼材表面是水平還是垂直方向而異。因此，鋼橋的不同部位會受到不同的腐蝕環境影響，即使在同一座橋內，不同部位也會有不同類型的銹蝕，且銹蝕進展速度也不同。

(4) 層狀剝離銹蝕

耐候性鋼材橋梁的銹蝕與其周邊環境及細部結構的有極大的關聯。表 4-44 列出了導致層狀剝離銹蝕的部位與原因。

表 4-44 耐候性鋼材橋梁層狀剝離銹蝕外觀及發生部位與原因[92]

銹蝕外觀	發生部位	主要發生原因
層狀剝離銹蝕發生或有發生徵兆	整體	● 橋梁地點靠近海岸，受海鹽分飛來影響大。 ● 橋梁整體濕氣顯著滯留(位於河流或湖泊，梁下空間狹窄，下方濕氣供給多且通風不良)。
	局部	● 橋面板排水管等水密性不良，或伸縮裝置、排水管損壞或老化導致漏水、滯水，使梁體難以乾燥(特別是融雪劑的漏水、滯水促進層狀剝離銹蝕)。 ● 梁端部與地面或橋台混凝土面接近，濕氣顯著滯留。 ● 構件水平面上面堆積物吸濕，濕潤時間變長。 ● 多量撒布融雪劑地區，上下線分離並列路線，相鄰高位車道梁下翼板受低位車道車輛捲起的含融雪劑路面水影響；或地勢接近的梁下翼板受車道車輛捲起的霧狀含融雪劑路面水沿地形下降影響。

(5)銹水

耐候性鋼材在早期階段(2-3 年)，雨水落在鋼材表面時，鋼材表面會形成含有溶解性鐵離子的銹水。當落在鋼構件上的雨水流經特定的水路，或降雨後雨滴集中在特定區域時，含有銹的水會污染周圍的設施(如橋下結構、橋墩(台)…等)。對於因銹水滴落而造成污染的橋梁，基於美觀方面的考慮，需重視排出含有銹水的方法。

2. 設計理念

耐候性鋼材是一種透過緻密的銹層逐漸抑制鋼板厚度的減少來防止腐蝕的鋼材，因此，在設計考慮的時間內，將鋼板厚度的減少量控制在一定範圍內，可以確保橋梁的耐久性。因此，為了確保耐候鋼橋的耐久性，重要的是評估橋梁現場的環境條件，確保耐候性鋼材能夠發揮所需的防蝕性能，並在設計、製造和安裝過程中進行考慮，並進行適當的維護和管理。

3. 防蝕設計

當計畫採用耐候性鋼材做為鋼橋的防蝕方法時，應考慮的事項以及為確保橋梁達到規定性能的程序和內容，如表 4-45 所示。

表 4-45 採用耐候性鋼材做為鋼橋防蝕方法之設計流程[92]

程序	內容	備註
環境條件的確認 ↓ 使用材料的選定 ↓ 對景觀的考量 ↓ 細部結構的處理 ↓ 製作及組裝條件確認 ↓ 維護管理方法的建議	確認建設地點的環境是否適於耐候性鋼材。	
	選定適當的鋼材、銲接材料、高強度螺栓。	
	確認耐候性鋼材特有的暗褐色與環境協調，並檢討銹水等外觀是否需特別處理。	
	進行有利於防蝕的結構細部設計。	
	確認採用有利於防蝕與外觀的製作方法與組裝方法。	
	建議檢測與評估、維護與管理的方法。	

4. 適用環境

(1)環境因子與環境劃分

①環境因子

耐候性鋼材發揮規定性能需在適當環境下使用。支配耐候性鋼材腐蝕環境的主要因子被認為是鹽分與水分(因結露水等導致鋼材表面長期濕潤)。鋼橋的鹽分包括飛來鹽與融雪劑鹽分。水分和鹽分含量是重要因素，但日本尚未對其數值條件進行研究。美國聯邦公路管理局 (FHWA) 已使用年濕潤時間做為指標制定了應用條件。在日本，目前尚無將水分做為獨立參數的標準，但已提出了一些評估腐蝕環境程度的指標，這些指標考慮了空氣中鹽分含量和濕潤時間等其他環境因素，並基於這些指標預測鋼板厚度減少量的技術。

②環境劃分

環境分類是指代表橋梁所在地的平均環境(地區環境)。然而，影響橋梁各部分腐蝕的鹽分和水分含量不僅取決於代表橋梁所在地的地域環境，還取決於受橋梁所在地地形影響的地形環境，以及橋梁構件(例如梁端部)與地形或構件本身造成的局部環境。因此，不能僅根據地區環境來估計耐候鋼橋的腐蝕程度；重要的是要考慮每個構件和組件單獨曝露的環境。以下是考慮耐候鋼橋上發生的腐蝕時，環境條件分類的範例。

A.地區環境(宏觀環境)：代表橋梁位置影響橋梁整體的環境，與該地點飛來鹽量相關，耐候性鋼橋適用環境即指此環境。

B.地形環境(微觀環境)：由橋址地形與橋梁關係形成的環境，影響橋梁整體。例如水面距離、撒布融雪劑路線的橋梁與地形關係或並列橋位置。若地區環境或地形環境導致層狀剝離銹蝕，需在結構型式選定中給予考慮，或規劃階段避免建設耐候性鋼橋。後述所示適用環境即由上述地區環境及地形環境來判斷。

C.局部環境：由構件本身形成的局部狹窄範圍環境，局部影響橋梁構件。具體指梁端部濕氣等，屬部位或構件固有環境，透過細部結構改良可避免影響。即使地區環境及地形環境判斷適用耐候性鋼材，橋梁各部腐蝕環境最終由局部環境來決定。

(2)適用環境

①飛來鹽考量

關於 JIS G 3114 規定的銲接結構用耐候性熱軋鋼材，日本「道路橋示方書 II 鋼橋編」中規定：「以規定方法測量的飛來鹽分量不超過 0.05mdd(NaCl: mg/100cm^2/day)的地區，或圖 4.26 所示地區，一般可無塗裝使用。」，飛來鹽分量測量方法採「土研法」或 JIS Z 2381、JIS Z 2382 的「紗布法」。

日本基於三方聯合研究曝露試驗結果及後續 17 年曝露試驗

結果顯示，在飛來鹽含量為 0.05 mdd 或更低的條件下，曝露的試樣在大約 10 年內未觀察到銹層剝落，且預計 50 年內的厚度減少不超過 0.3 mm。圖 4.27 顯示 JIS G 3114 銲接結構用耐候性熱軋鋼材在該地區環境下預計 100 年內的厚度減少大約 0.5 mm。



區域分類	可以省略飛來鹽含量測量的區域
I(北海道北部、日本海北部)	距離海岸線超過 20 公里的區域
II(日本海中、南部)	距離海岸線超過 5 公里的區域
太平洋沿岸	距離海岸線超過 2 公里的區域
瀨戶內海沿岸	距離海岸線超過 1 公里的區域
沖繩	沒有

圖 4.26 日本耐候鋼無需塗裝的適用範圍[151]

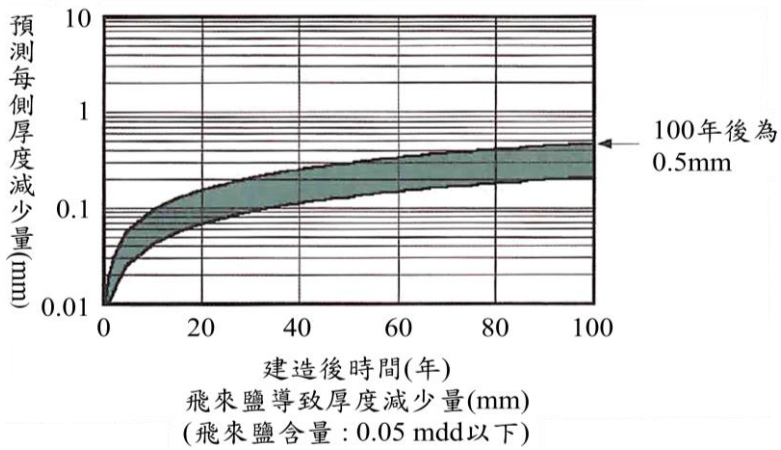


圖 4.27 JIS 耐候性鋼的腐蝕預測曲線[152]

②融雪劑考量

在大量噴灑融雪劑的路線上，路面積水可能會被交通車輛濺起，並附著在附近其他橋梁的組件或橋梁本身上。因此，在規劃階段，需要考慮避開可能受其他路線濺水影響的地點，或靠近受反彈(地形環境條件)影響的斜坡或山脈的位置，或在可能受濺水影響的區域採用其他防蝕方法。在對廣泛噴灑融雪劑的高速公路上銹蝕情況進行調查的例子中，結果表明，在融雪劑與地形環境的關係方面，需要考慮以下幾點。

A.靠近山脈的橋梁應保持距離，以免路面上的水被氣流吹到橋梁主梁上，造成濕氣滯留。如圖 4.28 所示，與山面的水平距離 s 必須大於 5m，垂直距離 h 必須大於 2m。

B.對於平行橋梁，上橋應與下橋保持一定距離，避免噴灑融雪劑的下橋將融雪劑濺到上橋大梁。如圖 4.28 所示，水平距離 d 必須大於 3m，垂直距離 f 必須大於 10 m 或小於 2 m。

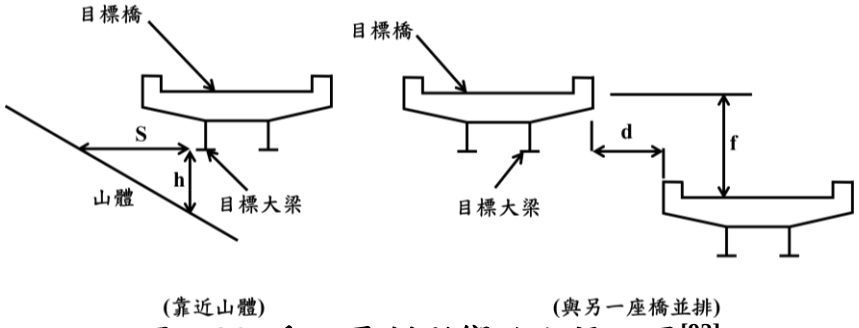


圖 4.28 受融雪劑影響的大梁配置[92]

此外，美國聯邦公路局(FHWA)建議，在立體交叉(例如圖 4.29 所示的溝槽式立體交叉)中應避免使用耐候性鋼材，因為在橋梁和路面之間會形成類似隧道的封閉空間。

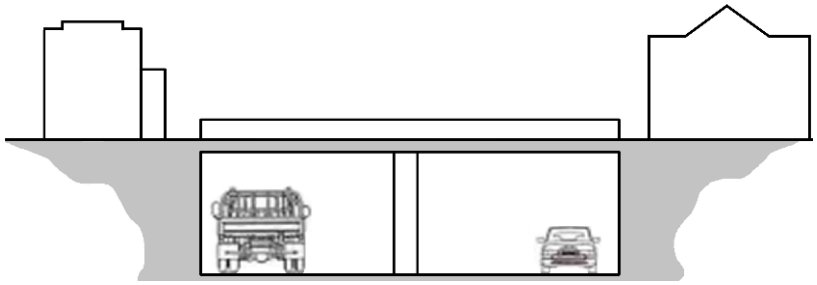


圖 4.29 溝槽式立體交叉橋[153]

③水面或植被濕氣考量

水面、濕地或植被影響的地形環境，梁體可能處於濕潤狀態。透過與水面、濕地、植被保持足夠距離，考慮地形關係，可降低層狀剝離銹蝕風險。例如美國聯邦公路局(FHWA)規定：

A.河流等動水面，梁下翼板與水面保持 8 ft(約 2.4 m)以上距離。

B.湖泊等靜水面，梁下翼板與水面保持 10 ft(約 3 m)以上距離。

④不同環境下使用耐候性鋼材的概念與建議

美國鋼結構學會(AISC/NSBA) “Uncoated Weathering Steel Reference Guide”提出，基於宏觀和微觀環境的耐候性鋼材使用總體概念及不同環境下使用耐候性鋼材的建議如圖 4.30 及表 4-46 所示。就橋梁位置而言，大多數宏觀環境、微觀環境及其組合都會使耐候性鋼材性能良好。在宏觀環境和微觀環境的嚴重組合下，可能會導致不建議使用耐候性鋼材，或者在沒有周密的維護計畫和/或為了腐蝕裕度而犧牲厚度的情況下，不建議使用耐候性鋼材。

表 4-46 不同環境下使用耐候性鋼材的建議[111]

微觀環境	宏觀環境		
	其他	高濕潤時間環境	沿岸
其他	耐候性鋼材是理想選擇	謹慎使用耐候性鋼材	謹慎使用耐候性鋼材
跨越經常使用融雪劑道路	謹慎使用耐候性鋼材	謹慎使用耐候性鋼材	謹慎使用耐候性鋼材
跨越低淨空水域	若植被稀少，可謹慎使用耐候性鋼材；如果植被茂密，則不建議使用耐候性鋼材	不建議使用耐候性鋼材	不建議使用耐候性鋼材
植被茂密或有遮蔽的場地	如果可以維護植被，並且對於水域路段，能提供足夠的淨空，則耐候性鋼材是理想選擇	不建議使用耐候性鋼材	根據嚴重程度，不建議使用耐候性鋼材，或建議使用犧牲厚度的耐候性鋼材

備考：下列請參考“Uncoated Weathering Steel Reference Guide”對應章節。
註 1：有關高濕潤時間環境的定義，請參閱第 2.2.3.1 節。
註 2：有關沿海環境的定義，請參閱第 2.2.3.3 節。
註 3：有關對該微觀環境進行分類時應考慮的標準，請參閱第 2.3.3 節。
註 4：有關對該微觀環境進行分類時應考慮的標準，請參閱第 2.3.4 節。
註 5：有關對該微觀環境進行分類時應考慮的標準，請參閱第 2.3.2 節。
註 6：有關提供犧牲層厚度的詳細建議，請參閱第 2.4.3 節。

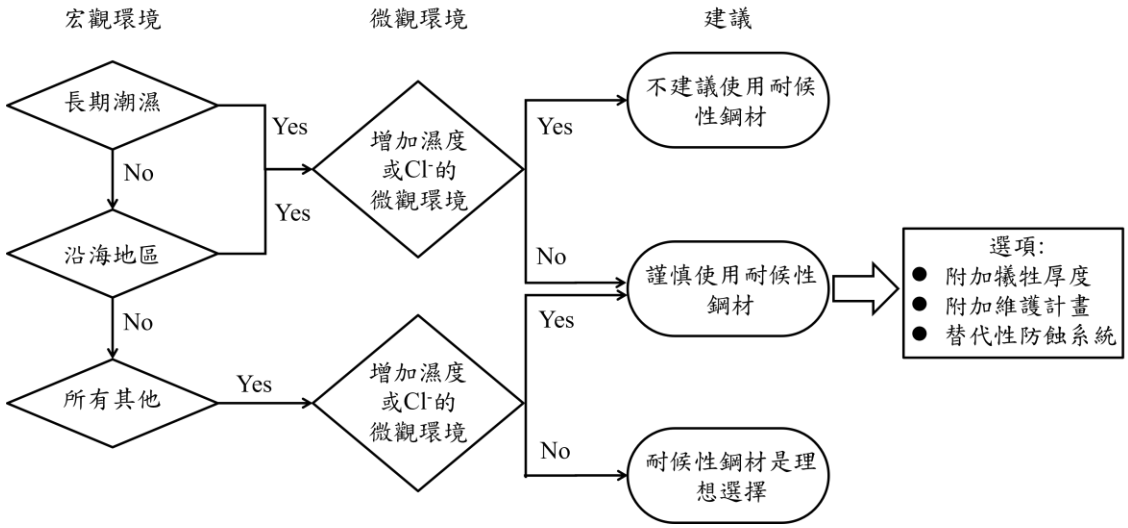


圖 4.30 基於宏觀和微觀環境的耐候性鋼材使用總體概念[111]

5. 使用材料

(1)鋼材

主結構構件使用耐候性鋼材有 ASTM A588、ASTM A709-W、CNS 4269、CNS 15504、JIS G3114 及 JIS G 3140 等耐候性鋼材。耐候性鋼橋中，部分構件完全覆蓋混凝土或塗裝，可在不妨礙工廠製作範圍內使用普通鋼材。填料薄板難使用耐候性鋼材時，宜使用高耐候性軋鋼材 SPA-H(JIS G 3125)或其同等品。

(2)接合材料

耐候鋼橋梁所使用的高強度螺栓的耐候性能應等於或高於主要結構構件的耐候性能。與 JIS 耐候鋼材料相對應的耐候高強度螺栓尚未通過 JIS 標準化，但應符合 JIS B 1186 摩擦接頭用高強度螺栓、六角螺帽和平墊圈的 F10T 或 F8T 標準，或日本道路協會標準(扭斷型高強度螺栓、六角螺帽和平墊圈組)的 S10T 標準。為了提供與耐候性鋼材類似的耐候性能，建議使用添加了 Cu、Cr 和 Ni 等元素的螺栓。若耐候鋼橋梁中使用的普通螺栓不是由耐候性鋼材製成的，最好改用不銹鋼螺栓，前提是螺栓周圍不會積聚水分。電化學腐蝕通常發生在可能積聚水分的區域，因此使用時必須格外小心。

耐候鋼橋梁所用銲接材料應具有與母材相當的耐候性。銲接要求應符合 AASHTO/AWS D1.5M/D1.5“Bridge Welding Code”。銲接和銲接製作的進一細節可參考 FHWA“Bridge Welding Reference Manual (2019)”[154]和 AASHTO/NSBA“Steel Bridge Fabrication Guide Specification(2018)”[155]。

(3)耐候性鋼用表面處理劑

耐候性鋼材表面處理劑的基本功能是幫助耐候性鋼材表面形成緻密的銹層，是為了防止施工初期出現銹斑和銹水滲漏而開發的。也具有減輕環境影響、著色等附加功能的產品，但最好根據各橋梁的使用目的，考慮耐候性鋼材表面處理劑的性能。

於耐候性鋼材料的表面處理劑，經過較長時間會風化消失，之後在耐候性鋼材料表面會形成緻密的銹層，所以不是為了提高防蝕功能，也不是重新塗裝。因此，重要的是適用的環境條件與基材耐候性鋼材的適用範圍相當。因此，即使耐候性鋼材塗有耐候性鋼材表面處理劑，也不宜在含鹽量超標的地區使用，並且在適用環境之外使用時，必須徹底調查和考慮環境條件。

需要注意的是，隨著耐候性鋼材表面處理過程的老化，構件的表面外觀可能會發生不均勻的變化，甚至生銹。此外，耐候性鋼材表面處理的初始顏色最終會被一層緻密的銹層所取代。

6. 防蝕規格

(1)鋼材

在飛來鹽量不超過 0.05mdd 地區的，鋼橋使用無塗裝結構鋼材，依本章“2. 使用材料”小節規定辦理。

(2)局部塗裝

鋼橋整體非同一腐蝕環境，例如橋端部較中央部環境惡劣。為統一橋梁整體腐蝕耐久性，考慮在環境惡劣部位採用防蝕性能高的其他方法。耐候性鋼材橋梁需按條件在特定部位採用其他防蝕法，確保整體耐久性。併用塗裝或熔射等非耐候性鋼材防蝕法規格，可參考各防蝕方法技術資料。因母材為耐候性鋼材，不需特別規格，與普通鋼材規格相同。

局部採用其他防蝕法，該部位需進行相應防蝕方法檢測和維護管理。設計結構細部及維持管理設備時，需按採用防蝕方法進行考慮。

①大梁的端部

大梁端部為塗裝防蝕鋼橋通常需特別防蝕考慮的惡劣環境部位，耐候性鋼材橋梁端部施加塗裝等防蝕法時，宜採用耐久性優異的塗裝系統。例如，塗裝範圍以梁內側面至下部結構頂端為

基準，達到與一般部位同等環境範圍為基本。此時塗裝部與無塗裝部外觀差異，需注意避免景觀障礙。塗裝規格請參考 4.2.3 節「塗裝」。

②箱型梁的內面

內面指箱型梁或鋼製橋墩等封閉斷面構件的內側面。箱型梁內面為封閉空間，易產生結露，多不適用耐候性鋼材。類似普通鋼材箱型梁，適用內面用塗裝規格請參考第四章。

③摩擦接合面的處理

耐候性鋼橋摩擦接合面處理可考慮無機鋅粉底漆塗布或無塗裝。無塗裝時，確保所需滑動係數，現場接合前充分去除摩擦接合面浮銹、油、泥等污物為重要。摩擦面塗布無機鋅粉底漆時，其塗覆條件與基材狀態相同。

④具鋼筋混凝土橋面板的箱型梁上翼板上面

箱型梁上翼板與鋼筋混凝土橋面板間空間狹窄封閉，幾乎無法維持管理。該部位上翼板上面宜採用耐久性優異的內面用塗裝規格(請參考 4.2.3 節)。其他如 I 型梁上翼板與橋面板混凝土接觸面，與塗裝橋不同無需考慮銹水污染，基本可無塗裝。

⑤局部環境惡劣部位

局部環境惡劣部位如撒布融雪劑量多路線地勢接近的I型梁橋外梁下翼板等。該部位選定防蝕法需考慮日照、濕潤環境、色調。傳統案例如下翼板與腹板立起 200 mm 範圍採用內面用塗裝規格。

⑥鋼橋面板上面

架設中防止流銹，鋼橋面板上面施加塗裝時，與一般塗裝橋相同，選定與鋪裝材料特性相符的塗裝規格。

(3) 支承

耐候性鋼材橋梁支承有熱浸鍍鋅、金屬熔射、塗裝或耐候性鋼材規格。考慮橋端部局部環境惡劣及更換困難，宜採複合防蝕方法提升防蝕性能。

(4) 對景觀的考量

完工後數年銹蝕生成活躍階段，雨水中溶出的鐵離子(Fe^{2+})長期滴落同一處，導致該處染成銹色。該類污染若成景觀問題，則需採取措施。銹水對策基本為適當導流含銹的雨水，可施加耐候性鋼用表面處理於鋼材防止，或於鋼橋面板上面施加薄塗裝防止。

此外，最好避免在行人容易接近的構件(例如欄杆和鋼製甲板蓋)上使用未塗裝的耐候性鋼材，因為生銹會讓行人感到不適。耐候性鋼材上的銹跡顏色會因環境和時間而變化，但通常會變成深棕色或黑褐色。初期可能會出現不均勻的銹跡，但如果使用環境合適，長久下來，會形成緻密的銹層，最終呈現均勻的顏色。

7. 複合系統

有鑑於採用耐候性鋼材防蝕之橋梁，常局部併用其他防蝕方法(例如:塗裝、金屬熔射)，以確保整體的耐久性。為方便採用耐候性鋼材之橋梁的設計、施工、維護管理工作及提升橋梁耐久性，亦可於新建時全面外加塗裝防蝕，提供複合防蝕系統。因此，結構細部設計及維護管理時，需按塗裝防蝕方法進行考慮

4.2.5 熱浸鍍鋅之設計標準建議

1. 防蝕的原理

熱浸鍍鋅是在鋼鐵基材上形成一層薄膜(熱浸鍍鋅層)，該薄膜由鋅和鐵的合金層與表面的純鋅層組成。在一般熱浸鍍鋅條件下觀察到的薄膜結構，由外表面與鋅浴成分相同的純鋅層(η(eta)層)和朝向鋼鐵基材的合金層(ζ(zeta)層、δ1(delta-1)層和 γ(gamma)層)組成，如圖 4.31 所示。

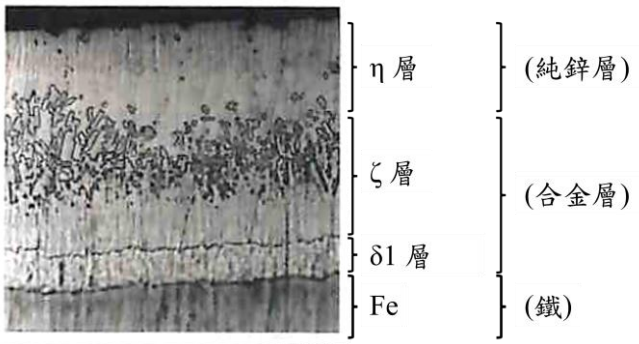


圖 4.31 熱浸鍍鋅層的顯微照片[92]

(1) η (Eta)層：此層屬於六方晶系(hexagonal system)，成分與鋅浴相同，含鐵量約為 0.03%。當待鍍鋼鐵構件從鋅浴中取出時，該層會附著在待鍍鋼鐵構件的表面上。由於 η 層是純鋅，初始表面有光澤，維式硬度約 Hv 70。純鋅層的厚度會根據熱浸鍍鋅時的鍍液溫度、拉起角度、拉起速度、被鍍鋼鐵構材的材質而改變。根據被鍍鋼鐵構材的厚度，可能會出現晶體圖案。

(2) ζ (Zeta)層：此層屬於單斜晶系(monoclinic system)，膜層中晶體最為突出，具有柱狀結構。這些晶體比其他層不對稱，彼此之間的結合不牢固，可能會形成裂縫。一般為 $FeZn_{13}$ 化合物，鐵含量約 6%，維式硬度約 Hv 150。如果腐蝕進展到該層，它可能會變成紅褐色斑點。然而，儘管純鋅表面層消失，但合金層仍然存在，仍然保持耐腐蝕性。

(3) δ 1(Delta-1)層：此層位於鍍膜最深處，具有緻密而複雜的六方晶體結構(又稱柵欄層)，富有韌性和延展性。有一部分晶體與上面的

ζ層的混合，一般為 $FeZn_7$ 的化合物，鐵含量為 7%至 11%。維氏硬度超過 Hv 200，打磨後的類似鋼鐵。

(4) γ (Gamma)層：此層與鋼鐵基材接觸，非常薄，即使用顯微鏡也可能無法清楚地觀察到。它的晶體結構是立方體，是 Fe_3Zn_{10} 的化合物。

(5) 在大氣環境下的熱浸鍍鋅薄膜，表面的鹼性碳酸鋅等腐蝕產物，具有高耐腐蝕性，可抑制內部鋅的腐蝕。有關鋅和鐵在防蝕機制的差異請參見圖 4.32。熱浸鍍鋅的一大特點是鋅對鐵具有犧牲防蝕的作用，因為鋅本身是一種電化學性能比鐵較高的活潑金屬，容易形成離子，即使鍍膜被刮傷露出鋼材，也要等到面積達到一定尺寸後才會起作用；在熱浸鍍鋅層受損部分，周圍的鋅比鋼材先產生腐蝕，並再次被鋅腐蝕產物覆蓋。由於抑制了後續腐蝕的進展，因此不易發生局部腐蝕和點蝕。但熱浸鍍鋅層的保護範圍並非無限制，在大氣環境中以不超過 5 mm 之缺陷為限。有關鋅的犧牲腐蝕保護機制請參見圖 4.33。

	鋅	鐵
基材	Zn	Fe
氧化物生成	銹 $Zn(OH)_2$ (生成一層緻密的氧化薄膜)	銹 $Fe(OH)_2$ (生成疏鬆的氧化物)
氧化物生成以後	銹 $ZnO \cdot nH_2O$ (緻密的氧化膜變成堅固的鈍化膜)	銹 $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ (鐵的氧化膜孔隙多，防護能力很小，腐蝕會持續進展)

圖 4.32 鋅、鐵的腐蝕機制[92]

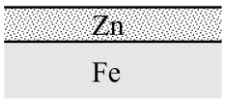
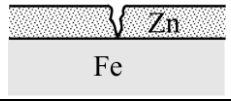
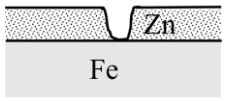
	熱浸鍍鋅
基材	
破裂狀態	
腐蝕狀態	 (由於鋅的防蝕作用，鋼材不會腐蝕)

圖 4.33 熱浸鍍鋅的防蝕機制[92]

2. 防蝕設計

即使鍍膜最外層的鋅被消耗，下一層合金層曝露，鋼材的防蝕功能也不會改變。但是，如果合金層曝露，即使鋼基體沒有曝露，合金層中的鐵也容易氧化，導致出現黃斑或黃褐色變色，因此必須注意不要將其與鋼基體上的鐵銹混淆。

對於熱浸鍍鋅，如果鍍膜磨損或損壞，則無法重新熱浸鍍鋅，因此恢復防蝕保護的唯一修復方法是其他防蝕方法，例如塗裝或金屬熔射。

使用熱浸鍍鋅做為防蝕方法時，需進行滿足以下條件的設計。若無法滿足條件，則需重新審視防蝕方法的選擇或進行額外考量。

(1) 橋址的環境條件適用於熱浸鍍鋅。

(2) 構件尺寸在預定的熱浸鍍鋅工廠鍍槽的容許範圍內，且其形狀能確保熱浸鍍鋅作業的良好品質。

(3) 使用熱浸鍍鋅高強度螺栓。

(4) 腹板的板厚 t_w 與翼板的板厚 t_f 滿足板厚比要求。

(5) 橫隔板的開口部確保約 30%以上。

3. 適用環境

對於大多數應用而言，當鍍鋅鋼製品曝露於大氣條件下時，鍍鋅層的壽命與鍍鋅層的厚度成正比(ISO 1461)。ISO 14713-1 基於第

一年的曝露數據(ISO 9223)，對鍍鋅層的可能性能提供了保守的建議。表 4-47 顯示了在這些腐蝕性類別範圍內曝露的選定的鍍鋅層首次維護壽命。每個選定系統和耐久性等級皆有最小和最大預期壽命。耐久性等級包含：極低(VL)：0 至<2 年、低(L)：2 至<5 年、中等(M)：5 至<10 年、高(H)：10 至<20 年、極高(VH)：≥20 年。

ISO 9224(CNS 16238)附錄 B 提供了有關平均和穩態鋅腐蝕速率的資料(詳見表 4-48，這些資料有助於預測鍍鋅層在大氣環境中的長期性能。國內「鋼結構橋梁熱浸鍍鋅技術手冊」對於鍍鋅層的耐用年限，係以鍍鋅層附著量之 90%除以鍍鋅層所處大氣腐蝕性環境之腐蝕速率(鋅金屬的穩定態腐蝕速率(r_{lin}, μm/a)來評估。

表 4-47 熱浸鍍鋅系統在不同腐蝕性級別中的首次維護壽命[69]

系統	參考標準	最小厚度(μm)	選定腐蝕性級別(ISO 9223)首次維護壽命最小/最大(年)及耐久性等級(VL, L, M, H, VH)							
			C3		C4		C5		CX	
熱浸鍍鋅	ISO 1461	85	40 />100	VH	20 /40	VH	10 /20	H	3 / 10	M
		140	67 />100	VH	33 / 67	VH	17 / 33	VH	6 / 17	H
		200	95 />100	VH	48 / 95	VH	24 / 48	VH	8 / 24	H
註 1：壽命數字已四捨五入到整數。耐久性等級的分配基於計算的首次維護壽命的最小和最大值的平均值，例如，85μm 熱浸鍍鋅層在腐蝕性類別 C4(鋅的腐蝕速率在 2.1μm/年至 4.2μm/年之間)，預期耐久性為 85/2.1=40.476 年(四捨五入為 40 年)和 85/4.2=20.238 年(四捨五入為 20 年)。平均耐久性為(20+40)/2=30 年(指定為"VH")。										

表 4-48 碳鋼、鋅和銅在大氣中各分類腐蝕性級別的腐蝕速率(r_{av} 與 r_{lin})[91]

金屬	第一個 10 年內的平均腐蝕速率(r_{av}) (單位:μm/ yr)					
	C1	C2	C3	C4	C5	CX
碳鋼	$r_{av} \leq 0.4$	$0.4 < r_{av} \leq 8.3$	$8.3 < r_{av} \leq 17$	$17 < r_{av} \leq 27$	$27 < r_{av} \leq 67$	$67 < r_{av} \leq 233$
鋅	$r_{av} \leq 0.07$	$0.07 < r_{av} \leq 0.5$	$0.5 < r_{av} \leq 1.4$	$1.4 < r_{av} \leq 2.7$	$2.7 < r_{av} \leq 5.5$	$5.5 < r_{av} \leq 16$
銅	$r_{av} \leq 0.05$	$0.05 < r_{av} \leq 0.3$	$0.3 < r_{av} \leq 0.6$	$0.6 < r_{av} \leq 1.3$	$1.3 < r_{av} \leq 2.6$	$2.6 < r_{av} \leq 4.6$
金屬	第一個 30 年內的穩態腐蝕速率(r_{lin}) (單位:μm/ yr)					
	C1	C2	C3	C4	C5	CX
碳鋼	$r_{lin} \leq 0.3$	$0.3 < r_{lin} \leq 4.9$	$4.9 < r_{lin} \leq 10$	$10 < r_{lin} \leq 16$	$16 < r_{lin} \leq 39$	$39 < r_{lin} \leq 138$
鋅	$r_{lin} \leq 0.05$	$0.05 < r_{lin} \leq 0.4$	$0.4 < r_{lin} \leq 1.1$	$1.1 < r_{lin} \leq 2.2$	$2.2 < r_{lin} \leq 4.4$	$4.4 < r_{lin} \leq 13$
銅	$r_{lin} \leq 0.03$	$0.03 < r_{lin} \leq 0.2$	$0.2 < r_{lin} \leq 0.4$	$0.4 < r_{lin} \leq 0.9$	$0.9 < r_{lin} \leq 1.8$	$1.8 < r_{lin} \leq 3.2$

當同一結構體由不同材質或不同板厚的構件構成時，各構件的熱浸鍍鋅附著量會產生差異，進而導致構件間耐腐蝕性的差異。此

外，排水裝置、檢查通道、螺栓等因板厚或形狀的限制，初期附著量較少，因此在與主梁相同環境下，這些部位的熱浸鍍鋅層劣化通常較快。因此，對於初期附著量較少的構件，需考慮在新建時即對熱浸鍍鋅表面進行塗裝等措施以應對劣化。

此外，橋梁各部位的熱浸鍍鋅耐腐蝕性最終受局部環境條件影響，因此會因橋梁的上下、左右等曝露部位的環境條件(例如易結露部位與不易結露部位、與地面接觸部位與非接觸部位等)而產生耐腐蝕性差異。

需注意的是，耐用年數僅指主梁本體熱浸鍍鋅層的耐用年數，並非橋梁本身的壽命。因此，當熱浸鍍鋅層達到耐用年數時，透過適當的表面處理，可充分確保橋梁的功能。在腐蝕環境嚴苛且未來難以進行塗裝的部位，需考慮在新建時即進行塗裝。

4. 使用材料

依據 CNS 10007 鋼鐵之熱浸鍍鋅第 5 節規定，鍍鋅槽中鋅液所使用的鋅，須符合 CNS 9 之 5 號鋅或同等以上品質之鋅錠。鍍鋅槽中鋅液的純度原則上應保持 97.5 %以上。若為提升品質及作業性，得添加有效的金屬成分。

5. 防蝕規格

熱鍍鋅橋梁標準熱浸鍍鋅附著量如表 4-49 所示。在鋼橋梁中，主梁、斜梁、橫梁、連接板等構件所用的鋼板具有一定的厚度，考慮到防蝕性能將其熱浸鍍鋅附著量訂為 600 g/m^2 或以上，對於其他構件，建議熱浸鍍鋅附著量至少為 550 g/m^2，以確保良好的熱浸鍍鋅品質並達到通常預期的防蝕性能。對於檢查通道等配件中使用的薄板和普通螺栓，在不損害構件性能的情況下，很難保證 550 g/m^2 以上的熱浸鍍鋅附著量，因此標準是根據每個構件的板厚來保證熱浸鍍鋅附著量。

當熱浸鍍鋅附著量較小時，熱浸鍍鋅層的耐久性相對較差，因此在檢查時必須確保不要忽視劣化的進展，並根據需要進行維修或

更換構件。另外，為了在嚴苛的腐蝕環境下保持長期耐久性，有對熱浸鍍鋅表面進行塗裝的情況。

表 4-49 熱浸鍍鋅附著量[92]

構件名稱	規格	附著量
主梁、對傾構件、橫構件、連結板等厚度 8 mm 以上的鋼材及型鋼類	HDZ 55	600 g/m^2 以上
厚度 6 mm 以上、8 mm 未滿的鋼材及型鋼類		550 g/m^2 以上
支承		
高強度螺栓		
厚度 3.2 mm 以上、6 mm 未滿的鋼材及型鋼類	HDZ 45	450 g/m^2 以上
檢查通道的管狀扶手、條紋鋼板	HDZ 35	350 g/m^2 以上
厚度 3.2 mm 未滿的鋼材		
螺栓		

6. 複合系統(ISO 14713-1)

鍍鋅鋼結構的使用壽命比最初採用的鍍鋅系統更長，因為在結構變得無法使用之前，部分鋼材可能會因腐蝕而損失。如果需要延長鍍鋅層的使用壽命，則必須在鋼材生銹之前進行維護，最好在鍍鋅層厚度至少為 20~30μm 時進行。這使得經過維護的鍍鋅層加有機塗裝系統，比單純的有機塗裝系統具有更長的總使用壽命。

熱浸鍍鋅層加有機塗裝系統的總壽命，通常顯著大於熱浸鍍鋅層和有機保護塗層壽命的總和。兩者之間存在協同效應，即鍍鋅層的存在可以減少漆膜的銹蝕；而有機塗層則可以保護熱浸鍍鋅層免受早期腐蝕。如果希望保留一層較為完整的漆層做為維護的基礎，則初始塗覆的塗裝系統應具有相當的厚度。

維護通常發生在熱浸鍍鋅層失去外觀或老化時。熱浸鍍鋅層的老化通常比油漆慢。因此，ISO 14713-1 建議鍍鋅層使用 20 年或更長時間直至首次維護；而同樣的熱浸鍍鋅層，如果塗有油漆，出於外觀考慮，ISO 14713-1 建議使用時間僅為 10 年直至首次維護。還應注意，老化的油漆區域會吸收水分，從而加速金屬腐蝕，尤其是在未被雨水沖刷的表面。CNS 16174-5 (ISO 12944-5)提供了有關應

用於熱浸鍍鋅之有機塗裝系統相關資料。有關熱浸鍍鋅面塗裝系統請參見 4.2.3 節。

如果維護延遲到熱浸鍍鋅層消耗並開始生銹時，則必須以與生銹的塗裝塗裝鋼相同的方式進行維護。

7. 景觀的考量

熱浸鍍鋅構件的表層為鋅層，因此外觀初期呈現光澤的銀灰色，隨著時間形成氧化層，光澤消失並轉為濃灰色。因此，在熱浸鍍鋅的情況下，若不進行塗裝，外觀色彩會受到限制並逐漸變化。此外，當熱浸鍍鋅層的鋅層耗盡，合金層曝露時，合金層中的鐵成分腐蝕可能導致外觀變為黃褐色。

在採用熱浸鍍鋅時，需考慮這些外觀特點，並對景觀進行考量。亦即，在景觀上需積極調整色彩的情況下，可併用塗裝；在重視景

8. 結構設計注意事項

熱浸鍍鋅橋的設計中，使用的鋼材、容許應力、使用板厚與一般橋梁的設計相同，結構設計的基本事項宜依據相關規範進行。

本計畫主要以鋼橋的主結構為例，針對與熱浸鍍鋅橋相關的特殊事項進行說明。此外，為確保所需的熱浸鍍鋅層厚度，即使是附屬物，也應使用板厚 3.2 mm 以上的材料。相關注意事項與圖說案例將於第五章「防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例」進行說明。

4.2.6 金屬熔射之設計標準建議

1. 金屬熔射的防蝕原理

金屬熔射透過熔射層的環境遮斷效果及電化學防蝕作用，保護鋼材免於腐蝕。其防蝕性能、耐久性以及適用環境，因熔射使用的金屬材料種類而異，因此在採用時，需根據環境條件、使用條件等，選擇適當的金屬材料與規格。以鋅為主的熔射，在熔射後的初期階段，鋅成分氧化形成氧化生成物，填充熔射層氣孔，使熔射層緻密化，發揮環境遮斷效果的防蝕作用。對鋁而言，從初期開始，表面形成的鋁氧化膜即發揮環境遮斷效果，當熔射層局部消耗或因刮痕導致鋼材基體曝露時，電化學防蝕作用才開始發揮。

(1)環境遮斷效果的防蝕作用

在金屬熔射中，透過在鋼材基體表面形成熔射層，阻隔水分，進而發揮防蝕效果。金屬熔射初期通常具有若干貫通氣孔，水滴或水蒸氣易於滲透。長期下來，熔射金屬成分與水分反應，生成鹼性碳酸鹽或氫氧化物，這些生成物會堵塞貫通氣孔，使熔射層成為無氣孔狀態，進而發揮優異的環境遮斷效果。

(2) 電化學防蝕作用

鋼橋的金屬熔射，是將比鐵更活潑的金屬(鋅、鋁、鋅鋁合金、鋅鋁擬合金、鋁鎂合金等)以熔融微粒子的型式噴射覆蓋在鋼材基體，阻隔環境的同時，熔射金屬層優先於鐵的腐蝕，使鐵不活化，從而防止腐蝕。當熔射金屬與大氣中的氧氣、二氧化碳、水分等反應生成的氧化生成物填充氣孔時，因腐蝕生成物不導電，可能導致電化學防蝕效果減弱，但實際上腐蝕生成物含有水分，因此可期待防蝕效果仍存在。

(3)熔射層劣化的機制

熔射層的金屬與大氣中的氧氣、二氧化碳、水等反應，轉化為生成物。熔射層隨此反應逐漸消耗，生成物含量比例逐漸增加，最終所有金屬轉化為反應生成物，達到壽命。此時，金屬反應生

成物難以導電，難以維持防蝕電位，電化學防蝕作用消失。此外，當熔射層內部金屬氧化，熔射層體積膨脹，易含水分，生成物依其水溶解度溶出，環境遮斷效果逐漸減弱。

2. 防蝕設計的理念

(1) 金屬熔射的防蝕法

金屬熔射使用的金屬包括鋅、鋁、鋅鋁合金，及同時熔射鋅線材與鋁線材形成兩金屬混雜狀態的擬合金等，近年使用鋁鎂合金的案例亦增加。

熔射層在自然環境中的耐久性因金屬種類而異。在田園山間等大氣中鹽分(海鹽粒子)較少的地區，腐蝕因子主要為降雨水和氧氣，熔射層表面生成由緻密鹼性碳酸鹽組成的保護膜，熔射層的消耗速度較慢。

鋅在鹽分較多的環境下溶解速度加快，因此在鹽分與水分供應較多的地區(如海岸飛沫帶、散布融雪劑的地區等)，熔射層的消耗速度加快；鋁即使在鹽分較多的環境中，表面形成的氧化物穩定，溶解速度較慢，耐久性相對穩定。但氧化膜變厚，電位升高接近鋼材電位，可能導致電化學防蝕效果下降。

鋅鋁合金熔射層及擬合金熔射層表現出介於鋅單獨熔射層與鋁單獨熔射層之間的行為。

鋁鎂合金熔射層透過在鋁中添加約 5%鎂，改善了電化學防蝕作用，除鋁的特性外，電化學防蝕能力更強。

因此，金屬熔射的防蝕性與耐久性因熔射金屬種類及曝露環境而異，防蝕設計需選擇適於腐蝕環境的規格。有關代表性熔射金屬的一般特性請參見表 4-50、表 4-51。

表 4-50 熔射金屬的性能[92]

性狀 \ 熔射金屬		鋅	鋁	鋅鋁合金及擬合金	鋁鎂合金
曝露導致的消耗溶解性	鹽水(1)	X	O	△~O	O
	鹼性水(2)	△	△	△~O	△
	降雨水	O	◎	◎	◎
	酸性藥品類(3)	X 快	△慢	△慢	△慢
防蝕性	環境隔阻効果	O	◎	◎	◎
	電化學防蝕效果	◎	O	◎	O

備考：符號說明：◎：優異，O：良好，△：稍差，X：差

註 1：鹽水指海水飛沫附著、飛來鹽分堆積部位的結露、融雪劑附著等。

註 2：鹼性水指混凝土橋面板流出的鹼性水導致的溶解消耗性等。

註 3：指結露時汽車及工廠排氣(SOx、NOx)溶入水、酸性雨附著的溶解性。

表 4-51 金屬熔射層表面生成的化合物種類及溶解度[92]

金屬名	氧化物	氫氧化物	碳酸鹽	氯化物	硫酸鹽
鋅	不溶	$1.3X10^{-3}$	難溶	432	115
鋁	不溶	$1.9X10^{-32}$	難溶	47	39
鎂	難溶	$9.8X10^{-5}$	難溶	75	27

備考：數字為 100g 水(0℃~25℃)的溶解量(g)。

(2) 金屬熔射層的特性

金屬熔射層的基本防蝕效果，即電化學防蝕作用與環境遮斷性，因熔射金屬種類而異。電化學防蝕作用依序為：鋅>鋅鋁合金、擬合金>鋁鎂合金>鋁；環境遮斷性依序為：鋁鎂合金>鋁>鋅鋁合金、擬合金>鋅。

ISO 2063-1 提供鋅、鋁及其合金金屬熔射材料的特性及腐蝕行為。詳見表 4-52。

表 4-52 金屬熔射材料的特性及腐蝕行為(ISO 2063-1)[109]

熔射材料	特性	腐蝕行為
鋅 (Zn99.99) 與鋅鋁合金 (ZnAl15)	鋅因其對大氣侵蝕的鈍化行為，具有高度抗蝕性。然而，其年腐蝕速率仍會受到大氣成分影響。鋅或鋅熔射層在水中的腐蝕速率主要取決於水的 pH 值、二氧化碳含量，以及水中鹽分與氧氣含量。 在中性或微鹼性的水中，鋅的腐蝕極為輕微。當鋁合金化至鋅基材中達 15%質量時，相較於純鋅，在低 pH 值條件下，其在海洋性大氣中的耐蝕性更佳。 鋁因氧化作用產生的鈍化保護，能與鋅的陰極保護作用結合，效果顯著。熔射鋅與鋅鋁合金常應用於工業及海洋環境下的鋼結構防護。	鋅(Zn99.99) ● 在 pH 7 至 pH 12 的鹼性環境中具高耐蝕性，並對大氣腐蝕提供極佳保護。 ● 具有顯著的「陰極(長距離防護)作用」。 ● 配合有機塗層在土壤中具高耐蝕性。 ● 使用壽命與熔射層厚度成正比。 ● 在空氣中鹽分含量較高(如沿海地區)時，保護不足，需搭配塗裝。 ● 腐蝕行為與熱浸鍍鋅類似。 鋅鋁合金(ZnAl15) ● 抗大氣腐蝕性優於純鋅。 ● 對氯化物及特別是含 SO_2 的大氣環境具更高耐蝕性。 ● 配合有機塗層在土壤中具高耐蝕性。 ● 具陰極保護，但效果小於 Zn99.99。
鋁(Al99.5)與鋁鎂合金 (AlMg5)	鋁材的耐蝕性主要來自表面所形成的電絕緣性氧化鋁層，即使表面受到機械性損傷，該氧化層仍能自發性再生。 鋁在微酸性至微鹼性環境中，展現極高的耐蝕性，特別適用於含 SO_2 的工業大氣環境以及海洋環境中鋼結構的防蝕保護。 鋁熔射層在工業與海洋環境，以及海水浸漬中均已證實有效。	鋁(Al99.5) ● 在 pH 4 至 pH 9 的環境中具高度耐蝕性。 ● 特別適用於含 SO_2 的工業大氣環境。 ● 適用於海洋性大氣及海水環境。 ● 具高耐熱性。 ● 在大氣中的陰極保護作用低。 ● 僅在強電解質(如海水)中，陰極保護作用顯著。 鋁鎂合金(AlMg5) ● 做為熔射層，與純鋁應用範圍相同。 ● 在腐蝕性中等的環境，損耗速率顯著低於 Al99.5。 ● 適用於腐蝕性分類 Im2 與 CX(鹽水、離岸設施)之環境條件。 ● 在大氣中的陰極保護作用低。 ● 僅在強電解質(如海水)中，陰極保護作用顯著。

3. 防蝕設計

金屬熔射的防蝕透過將鋅、鋁、鋅鋁合金、鋁鎂合金等熔融後噴射至材料表面，形成保護膜，防止腐蝕因子或腐蝕促進因子的侵入，同時做為電化學陽極發揮防蝕作用。熔射層的防蝕性能因熔射金屬種類及熔射層厚度而異，因此防蝕設計需根據環境條件及適用構件條件，決定適當的熔射方式及其規格。此時，為確保獲得良好熔射層，需一併考量結構限制及施工條件。決定金屬熔射規格時，

一般需考量及確認的內容如下：

(1)確認橋址環境的鹽分環境適用於金屬熔射層的防蝕，且能獲得所需的防蝕效果。

(2)確認製作構件的狹窄部位少，結構能確保良好施工品質。若完工後狹窄部位較多，需確認不會影響後續維護管理。

(3)確保高強度螺栓的防蝕規格考慮金屬熔射，並符合所需接合性能。需使用熱浸鍍鋅層高強度螺栓，或可更換為熱浸鍍鋅高強度螺栓。只要高強度螺栓本體可進行表面處理及熔射施工，並能生成規定金屬熔射層，則不在此限。

(4)確認是否因景觀考量等需對熔射施工面著色或特定外觀要求。

(5)若為現場施工，需確認表面處理及熔射能適當進行。

4. 適用環境

鋼橋的熔射主要應用於曝露於大氣的外表面部位。雖然內表面亦可適用，但需確保施工空間，以便在適當條件下進行施工。

(1)適宜環境

金屬熔射在都市、田園、山岳等一般環境，或遠離海岸(約0.3km 以上)、飛來鹽分不堆積的場所，具有優異的防蝕性能。反之，在飛來鹽分堆積的場所或頻繁噴灑融雪劑的場所，一般難以單獨應用金屬熔射。在此環境下採用時，需根據熔射金屬種類，選擇結合金屬熔射與保護塗裝的規格。

若不施加塗裝著色處理，色彩受熔射金屬限制，由於隨氧化膜的形成，顏色會隨時間變為暗灰色。因此，若因景觀考量要求特定色彩時，難以單獨應用金屬熔射。

(2)需注意的環境

金屬熔射若在不合適的環境下使用，不僅無法發揮預定的防蝕性能，還可能無法確保耐久性，導致提早失效。以下場所應用時，宜事先透過測試確認耐久性。

①結構系統存在異種金屬接觸部位

②飛沫帶的結構物

③汽車及工廠排氣氣體易滯留的場所

④橋面板漏水部位

⑤埋入混凝土的情況

5. 使用材料

金屬熔射施工使用專為熔射製造的線材及封孔劑。採用動力工具清潔工法(包含掃砂或噴砂)時，使用粗面形成劑；採用上層塗裝表面處理時，使用塗料。

(1)熔射線材

鋼橋防蝕的金屬熔射，傳統使用純度 99.99%以上的鋅、純度 99.50%以上的鋁單體金屬，近年多使用防蝕效果更佳的鋅鋁合金、鋅鋁擬合金等。此外，使用鋁鎂合金的案例亦增加。鋅鋁擬合金指同時熔射純度 99.99%以上的鋅及純度 99.50%以上的鋁，形成各金屬混雜堆積的熔射層，電化學上表現類似合金的行為，環境遮斷熔射層以鋅氧化物與鋁氫氧化物混雜的型式發揮功能。CNS 7797 規範第 6.2 節之熔射材料規定之熔射材料如下：

①鋅為 CNS 9 規定之 2 號鋅錠(純度 99.990 %以上)。

②鋁為 CNS 8 規定之第 4 種鋁錠(純度 99.5 %以上)。

③鋅鋁合金須使用鋅含量在 84 %～86 %之間；鋁含量在 14 %～16 %之間的合金。

④鋁鎂合金須使用 CNS 3667 規定合金編號 5056 之鋁合金成分。

(2)封孔劑

熔射層的封孔處理以適當的無機、有機塗料等封孔劑，滲透填充開口氣孔將氣孔密封，改善熔射層的化學及物理性質，覆蓋金屬表面降低其活性，同時保護表面為目的。

封孔處理需特別注意第一層封孔劑的黏度及樹脂選定，需良好滲透至熔射層的開口氣孔，與熔射層及鋼材基體無有害反應，且不影響使用目的。一般使用含磷酸丁醛系、烷基矽酸酯系、鹼性矽酸酯系、環氧系樹脂塗料等，使用的材料需透過加速試驗等事先確認封孔劑性能。

封孔劑分為與熔射金屬反應，降低金屬表面活性的類型，及以遮斷外界為主的類型，均透過氣孔填充效果提升熔射層的防蝕性。封孔劑主要為透明及白色系，可簡單著色，但受熔射表面粗糙度影響，難以獲得塗裝表面處理的光澤或均一外觀。

能與鋅、鋁、鋅鋁合金及擬合金反應的封孔劑，對穩定熔射金屬表面非常有效。由於多含有機溶劑，操作時需如同塗料，遵守消防法、有機溶劑中毒預防規則等相關法規。

(3) 塗料

金屬熔射為遮斷環境提升耐久性或與環境協調，需在熔射層上塗裝著色表面。CNS 16174-5 (ISO 12944-5)提供封孔後金屬熔射層追加之有機塗層(稱為複合防蝕系統)建議事項。施作與規劃時應參考 CNS 16174-7 (ISO 12944-7)與 CNS 16174-8 (ISO 12944-8)規範。有關金屬熔射面塗裝系統請參見 4.2.3 節「塗裝」。

(4) 粗面形成劑

粗面形成劑是一種利用無機顆粒和環氧樹脂在基材上人為製造粗糙度的材料，以便在用電動工具處理基材或使用導電底漆塗層鋼板時，使熔射層能夠粘附在鋼基材上。對於塗裝鋼板，經過掃砂處理使用粗面形成劑後也可以進行熔射。但是，如果需要電化學腐蝕防蝕，則必須確認其與鋼材機體的導電性。

6. 防蝕規格

防蝕規格原則上需充分考量環境條件。在鹽分較少的一般環境中，採用至封孔處理的規格；在受鹽害的嚴苛環境中，宜採用封孔處理後加塗裝的規格。

特別是單獨熔射鋅，因鋅對鹽分具溶解性，需耐久性時建議在金屬熔射面加塗裝的規格。考慮鋅的消耗，若使用鋅熔射規格，需增加熔射層厚度等考量。

(1)一般部位規格

封孔處理是指用封孔劑滲入熔射層，以填充熔射層中的孔隙並使其穩定。在正常大氣條件下，即使不進行封孔處理，金屬熔射層也會與空氣中的氧氣和水反應，反應產物會填充孔隙。但是，如果水或鹽在反應完全進行之前附著並滲入熔射層，則可能導致熔射層受損。因此，封孔處理已成為金屬熔射的標準步驟，以保護鋼橋免受腐蝕。此外，即使在封孔劑中添加顏料進行著色，熔射層的粗糙度通常也會影響封孔劑的外觀，使其難以達到與塗膜相同的美觀效果。因此，通常使用透明或白色封孔劑，因為它們能使後處理瑕疵不那麼明顯。金屬熔射規格如表 4-53 所示。

表 4-53 金屬熔射規格[92]

表面處理	噴砂處理，清潔度 ISO 8501-1 Sa 2½以上 表面粗糙度 Rz 50 μm 以上(或粗面化處理 Rz 50 μm 以上) 透過噴砂處理等去除附著油分、水分、塵埃等，形成清淨表面
金屬熔射	最小熔射層厚度 100 μm 以上
封孔處理	封孔劑或油漆塗裝
適用場所	一般都市及田園環境中腐蝕促進因子(鹽分、藥品類、塵埃)附著少的場所
備註	飛來鹽分多的場所易產生白銹

在金屬熔射層上進行塗裝表面處理的塗裝規格，請參見 4.2.3 節「塗裝」。JIS H8300 基於使用條件、使用環境的腐蝕性及待熔射構件的預期使用壽命，選擇適合的最小局部厚度。最小局部厚度應從表 4-54 中每個金屬熔射材料以雙線顯示的範圍中選擇。當由於特殊條件 (使用目的、環境及待熔射物品的使用壽命) 而需要上述範圍以外的厚度時，可基於購買者與製造商之間的協議，從表 4-54 中每個金屬熔射材料以虛線顯示的範圍中選擇最小局部厚度。

表 4-54 金屬熔射材料種類及最小局部厚度(JIS H8300)[156]

金屬熔射材料類型	最小局部厚度範圍(1) 最小局部厚度(μm) 50 100 150 200 250 300
Zn 99.99	
Al 99.5	
AlMg 5	
ZnAl 15	

備考：ISO 2063-1 包含與每種熔射材料的防蝕系統組合(僅金屬熔射層、金屬熔射層+封孔層或金屬熔射層+封孔層+有機塗層)和各種環境條件相對應的金屬熔射層厚度建議值。這些內容在 JIS H8300：2021 的附錄 C 中提供，以供參考。

註 1：最小局部厚度範圍包括表示範圍的線兩端的值。

有關 JIS H8300：2021 附錄 C 摘錄如下：「ISO 2063-1 包含了金屬熔射層厚度的建議值，針對首次維護壽命 ≥20 年的情況，對應於每種熔射材料(僅金屬熔射層、金屬熔射層+封孔或金屬熔射層+封孔+有機塗層)的防蝕系統組合及各種環境條件」。表 4-55 中這些內容可供參考

表 4-55 金屬熔射塗層厚度的建議值(單位：μm)(ISO 2063-1)[109]

典型環境	腐蝕性類別	金屬熔射層材料											
		Zn99.99			ZnAl15			Al99.5			AlMg5		
		as	as+s	as+s +oc	as	as+s	as+s +oc	as	as+s	as+s +oc	as	as+s	as+s +oc
乾燥的室內環境	C1	80	80	50	80	80	50	NR	NR	-	NR	NR	-
市區	C2	150	80	50	150	80	50	150	150	150	150	150	150
	C3	150	100	80	150	80	80	150	150	150	150	150	150
工業區	C4	NR	150	100(1)	200	100	100(1)	200	200	150	200	200	150
	C5	NR	NR	100(1)	200	150	100(1)	250	200	200	250	250	200
沿海和近海地區	CX	NR	NR	200(1)	250	150	100(1)	250	200	200	250	250	200
淡水	lm1	NR	NR	100	NR	NR	100	NR	NR	NR	NR	NR	NR
海水	lm2	NR	NR	250(1)	NR	NR	150(1)	350	200	NR(2)	350	200	NR(2)

備考：as = 熔射後未處理；s = 封孔處理；oc = 有機塗層；NR = 不推薦

註 1：與電化學陰極保護結合使用

註 2：不建議覆蓋厚有機塗層，但是為了裝飾目的，而所採用薄的面漆或有顏色的封孔劑

(2)連接部位規格

連接部位通常結構複雜且不平整，易造成金屬熔射施工困難，難以獲得穩定的熔射層。連接部位的熔射規格如表 4-56 所示。

表 4-56 連接部位熔射規格 [92]

表面處理	噴砂處理，清潔度 ISO 8501-1 Sa 2½以上 表面粗糙度 Rz50μm 以上(或粗糙化處理 Rz50μm 以上) 透過噴砂處理等去除附著油分、水分、塵埃等，形成清淨表面。
金屬熔射	最小熔射層厚度 100μm 以上
封孔處理	封孔劑可以用噴塗或刷塗的方式。
適用場所	適用於基材、連接板的金屬對金屬表面、外表面和銲接接頭。 連接螺栓為熱浸鍍鋅高強度螺栓。

原則上，連接部位應採用與主體相同的規格。連接部位可在工廠施工，也可現場施工，因此在確定規格之前，必須充分考慮是否能夠進行金屬熔射施工。在螺栓螺紋上很難均勻地熔射，如果在螺栓鎖緊後現場進行金屬熔射，則會出現熔射層難以熔射的區域，因此必須事先考慮對策。

由於現場施工條件較差，難以保證良好的熔射品質，因此最好事先在工廠對連接板和連接板附近基材進行熔射。螺栓使用熱浸鋅鍍層高強度螺栓(F8T)，螺帽使用熱浸鋅鍍 F10T 螺帽。施加熱浸鍍鋅的高強度螺栓需符合 JIS B 1186 的規格。為進一步提升防蝕性，建議塗覆一層金屬熔射用封孔劑。使用經防蝕處理的高強度螺栓時，在熔射施工困難部位採用表 4-57 的規格。外表面著色美觀表面處理依 4.2.3 節進行塗裝。

表 4-57 熔射施工困難部位的防蝕規格[92]

適用範圍	扇形孔端部及螺栓接頭等
表面處理	動力工具處理 ISO 8501-1 St 3
底漆	有機鋅粉底漆，刷塗 75μm(300g/m²×2)
中塗漆	超厚膜型環氧樹脂塗料，刷塗 150μm×2(500g/m²×2)

(3)熔射施工困難部位規格

①若需在此進行著色塗裝表面處理時，請先塗一層氟碳樹脂中塗漆再上面漆。表 4-57 為示範例，若確認具同等以上耐久性的規格，亦可採用。

②使用熱浸鍍鋅高強度螺栓時，外露部位須進行封孔處理或塗裝等表面處理。

7. 景觀考量

需透過著色進行景觀對應時，請先塗一層環氧樹脂中塗漆再上面漆，進行塗裝表面處理以滿足景觀要求。景觀設計及塗裝作業可參考 4.2.3 節「塗裝」。

8. 結構設計注意事項

相較於使用高溫鍍槽的熱浸鍍鋅，金屬熔射不會影響鋼材的機械性能。因此，金屬熔射橋梁所用鋼材的規格、容許應力和厚度範圍可以與塗裝橋梁相同。在橋梁設計時，基本上可以遵循設計規範。

第五章　防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例

5.1 混凝土橋

5.1.1 考量防蝕的結構設計

1. 考慮防蝕耐久性的細部設計

混凝土橋結構型式的選擇，應以能避免濕氣聚集、不易讓鹽分附著，且混凝土澆置、搗實便利，施工品質易於控制為原則，結構曝露表面積與混凝土體積之比率愈大，則有害物質滲入混凝土中使鋼筋銹蝕的可能性愈大。而考慮防蝕耐久性的結構設計，係指針對防蝕方法，透過結構細部考量，儘可能確保其原始性能的發揮。以下為考慮防蝕耐久性的結構設計範例：

(1)避免複雜的結構型式或多角型的構件

對於較複雜或尺寸較大之斷面型式，必須考慮潛在之施工困難及因施工品質落差可能引致的耐久性折減程度(如先拉法和後拉法在防蝕效益上之差異)。如結構物的損傷，以梁腹部接角為最常發現，這可歸因於接角處常為混凝土澆置、搗實等施工弱點極易形成的部位以及接角處可由水平、垂直二方向遭受鹽分入侵。

為了設計出不易受鹽害的結構物，除需考量使結構物形狀便於混凝土澆置、搗實外，也應儘可能減少結構物的接角以及減少鹽份可附著面積等方面進行考量，詳見圖 5.1，此外，接角應進行圓弧化處理且附近的鋼筋彎鉤半徑需加大，並增加保護層厚度或採用耐腐蝕鋼筋。

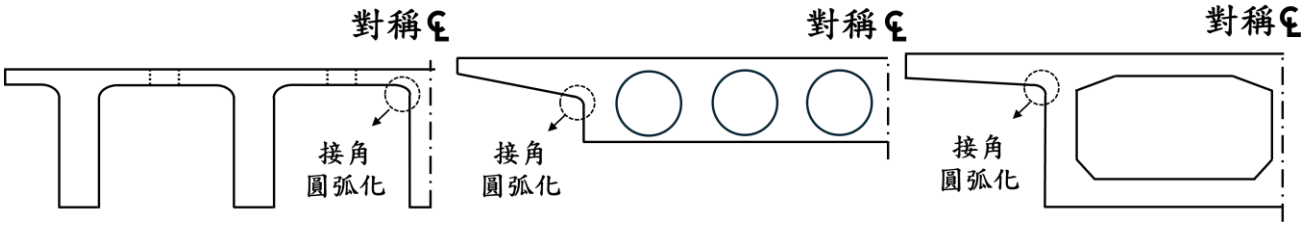


圖 5.1 結構物接角圓弧化示意圖

(2)斷面中性軸儘量靠近拉力緣，減少裂縫產生

就結構力學觀點而言，若能使中性軸靠近拉力緣，可降低斷面最大拉應力，減少裂縫產生的機會。一般簡支橋梁拉力緣位於下側，而箱型梁的中性軸通常較 T 型梁為低，因而在抑制裂縫方面較具優勢。在合成斷面中，如下承式構造因橋面板位於梁底，使得合成斷面中性軸明顯低於上承式，如圖 5.2 所示，進一步降低梁底拉應力並有效抑制裂縫，因此在耐久性設計上更為理想。綜上所述，箱型斷面較 T 型斷面有利於耐久性設計，但須配合完善的內部排水規劃，方能發揮最佳效果。

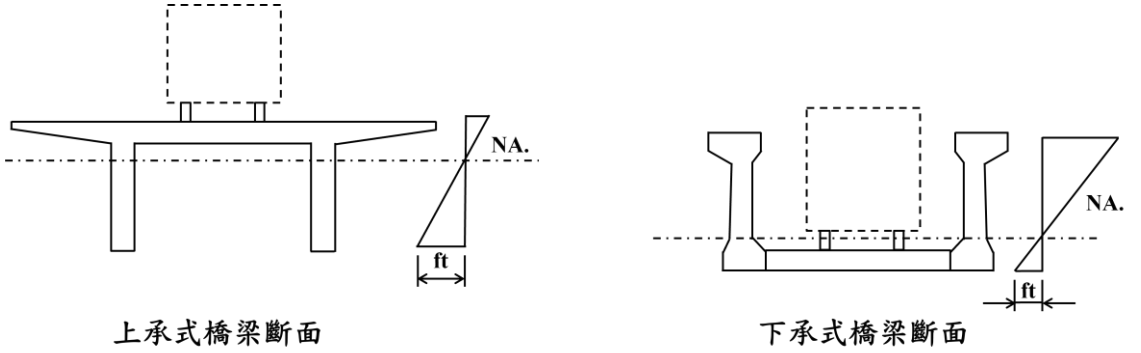


圖 5.2 上承式與下承式斷面受拉應力大小之比較

(3)斷面外型應儘量平坦，避免腐蝕氣體聚集

混凝土橋梁若位於海岸帶、海上或橋下設置停車場且高度不高，梁底區域容易聚集鹽份、CO_2 等腐蝕性氣體。斷面形狀與通風條件對腐蝕風險影響甚鉅：若梁底平坦且通風良好，氣體不易聚集，可降低銹蝕機會；但 T 型與 I 型梁組成之合成斷面，因大梁與隔梁阻隔，通風性明顯劣於箱型梁或中空版梁，如圖 5.3，更易形成腐蝕環境。

雙向相連之箱型梁懸臂板連接處，因施工上常於主結構完成後再澆置，水密性不足加上兩向撓度不同導致拉力裂縫，更助長腐蝕發生，故建議避免此類施工法，若需使用則需考慮在連接部增加錨頭預留孔設置橫向預力以降低風險。

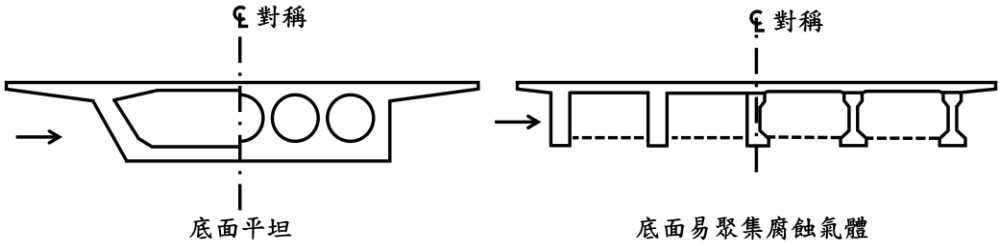


圖 5.3 斷面通風性比較

(4)斷面內外應避免有積水可能

場鑄預力Ｉ型梁橋因橋面板下方與梁間形成半封閉空間，水氣容易滯留不易消散，進而加速橋面板底部鋼筋與Ｉ型梁鋼筋的腐蝕。相較之下，箱型梁橋因梁身平整寬闊，能減少鹽份附著與堆積，整體而言耐久性較佳；但若箱型梁內部排水不良，反而會形成長期積水與高濕環境，加劇鋼筋銹蝕。因此設計時，除應選擇合適斷面外，更須將內部排水規劃納入考量，以避免局部積水造成嚴重腐蝕。

橋面構造中常需要適當排水設施，以使雨水能迅速排除，避免影響行車及防止水分侵入橋梁結構體。此項排水設施包括橋面洩水孔、排水管、橋面坡度等。

對於斷面構造部分，主要在於橋面要有適當排水坡度，尤其在構造接縫處不要有積水可能；另在斷面構造中常被疏忽之積水部位是在箱型梁之斷面內部，因為常有橋面排水管基於景觀考慮，繞經箱型梁內部，如內部排水管有漏水，會造成箱型梁內積水，並使原本通風就較差之內部濕度增高，甚至會有水氣凝聚於版頂、版壁，不但造成腐蝕，對有裂縫、接縫、應力集中等原已有腐蝕可能之部位，更會加快腐蝕速度。

對於防止斷面內部之積水，首先應排除任何可能水源進入，最好將排水管設置於箱型梁外部；而箱型梁斷面更要設置適當排水孔，使內部積水及濕度較高之水氣能排出，可參考圖 5.4。

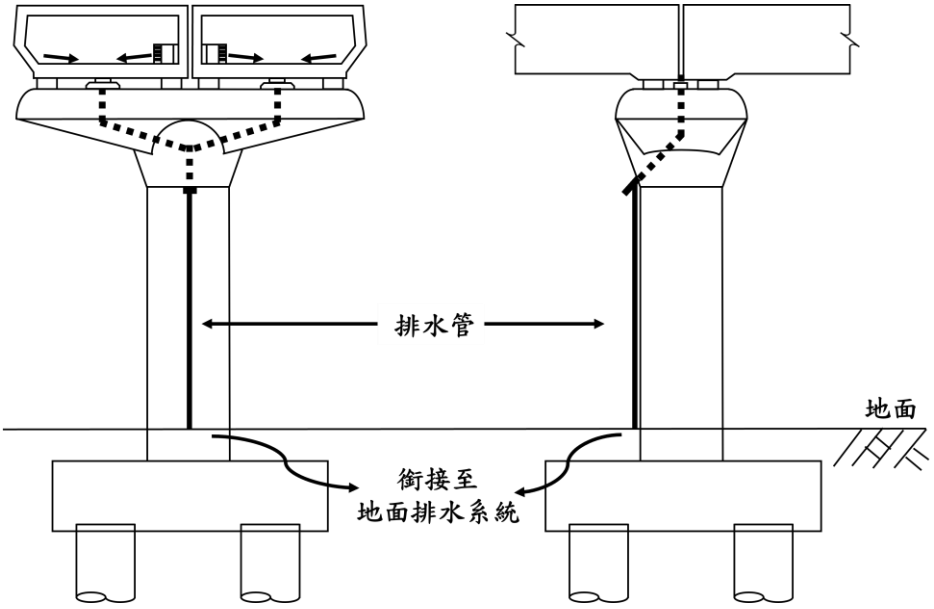


圖 5.4 混凝土箱型梁排水系統示意圖[157]

(5)接縫應避開易積水與應力較大之位置

施工接縫是工程作業所不能避免，但接縫處常因不同期所澆置混凝土之不等收縮、接合面清理與處理不良等因素，使水密性較一般構造差，容易使水氣滲入造成裂縫。此種接縫除施工時應特別注意外，於設計時亦應注意接縫之斷面構造，例如，避免預力鋼腱等與橋梁強度有重大影響之構件沿著接縫平行設置；接縫應避開易積水與應力較大位置，接合面兩邊儘量使用同強度混凝土；接合面兩邊混凝土澆置時間應避免間隔過久；接合面應加設補強鋼筋、加大厚度、施加預力等。

混凝土橋梁腹版斷面尺寸應兼顧強度與施工性。預力混凝土構造為減少自重及高預力產生之應力，在不太降低慣性矩的情況下，都應減小斷面厚度，譬如，腹版斷面常是既高且薄的形狀，加上需埋設預力鋼套管,使得原本養護已較其他部位困難之腹版，成為橋梁構造中最不易澆置之部位。一般鋼腱套管外徑約近 10 cm，如斷面厚度太薄，常會使套管太貼近混凝土表面，混凝土不易澆置及搗實易於套管下方形成蜂窩，在施預力時使得套管與混凝土間黏結力不足，造成沿鋼腱位置之混凝土開裂，此種開裂可能使腐蝕因子侵入至預力鋼腱，對耐久性與強度影響尤大。

(6)混凝土斷面保護層厚度應配合環境與施工條件

除參照規範之要求外，應再視個案及相關環境因素決定合適厚度。目前規範所規定最小厚度大都僅依斷面性質及是否與土壤接觸來分類，但橋梁構造是直接與所處環境接觸，各部位都得配合環境條件(包括整體環境與部位局部環境)採用適當保護層厚度。

(7)其他防蝕設計之注意事項

①應處理好構件的連接與接縫，支承與節點的選擇，使結構由於變形引致的拘束作用降到最低。橋梁支承大多以鋼材為主，相關防蝕方法請參見 4.2 節「鋼橋」。此外，防塵罩之設置容易使濕氣聚集且不易進行檢測及清洗，故不建議設置防塵罩。

②鋼筋間距應能保證混凝土澆置均勻與搗實且不宜小於 50 mm，必要時可採用兩根鋼筋之束筋。配筋的密集將導致混凝土澆置不均勻，使混凝土拌合物各個成分遭受配筋的不同阻擋作用而析離，從而產生不密實性或呈蜂窩狀，因此鋼筋間距不宜過小，應合理並得到施工的可靠保證。進行構件承載力與勁度計算時，鋼筋直徑和保護層厚度應按等值直徑考慮，而在進行裂縫寬度和防蝕設計時，保護層厚度應從箍筋的外輪廓線算起。

③當結構曝露面無法避免截面突變或施工縫時，應嚴格按照相關規定，保證混凝土之品質與處理好施工縫並增加防水層。施工縫應設置於對結構體強度影響較小之處，除按工程圖說或施工計畫設置之預定施工縫外，若有需要設置非預定施工縫，其位置及形狀須經監造者許可。

④「施工縫」、「伸縮縫」及「預留工作筋」等易產生防蝕破口的局部區域，應加強防水或採用附加保護措施(如鍍鋅或環氧樹脂鋼筋)等第二道防線。

⑤在支承反力與預力鋼腱端錨處等應力集中且複雜的曝露部位，應檢核局部拉應力，其計算值不應超過混凝土容許抗拉強度，當

上述要求無法滿足或難以計算時，應採用附加保護措施。

⑥端錨封頭部位在作構件設計時，應考慮端錨封頭部位之處理，使其不曝露於排水、落雨之路徑，而發生腐蝕。

⑦橋面板於預力梁端部之錨定處，最好能使其突出並懸垂於預力梁頂面，以防止從伸縮縫流下的水分從端錨的孔洞或裂隙流入端錨內。

⑧封閉預力鋼腱端錨應採用無收縮混凝土或砂漿，如圖 5.5 所示，材料性質及保護層厚度應符合本指引各腐蝕分區之規定。

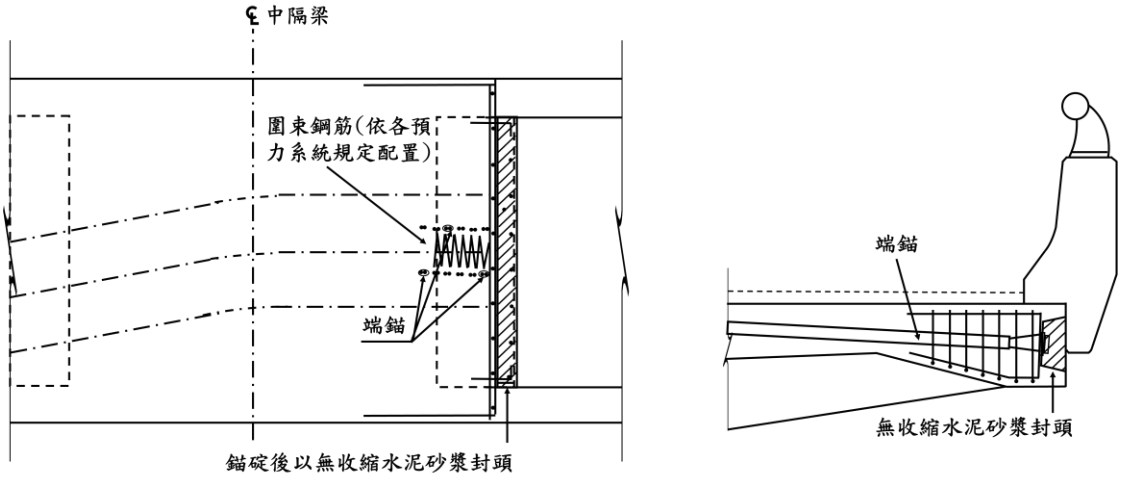


圖 5.5 端錨封頭示意圖

⑨耐震措施(如止震塊)構件、水氣聚集區、迎風面區、預留鋼筋或工作筋的防蝕，應增加防蝕保護或採用附加保護措施進行設計。鄰近鐵道或捷運等使用直流電系統之設施時，可能產生雜散電流，當預力混凝土有雜散電流之顧慮時，端錨及套管之固定處應有絕緣之處理或有接地之連接以避免雜散電流影響預力鋼材。

⑩橋墩或基礎表面可能受到船、漂浮物、土石流或海水沖擊劇烈的部位，宜適當加大保護層厚度、配置附加鋼筋或採用纖維混凝土。

⑪澆置在混凝土中並曝露在外之臨時或永久性的吊環、緊扣件、預埋件等，應與混凝土中的任何配筋絕緣。否則，應採用陰極保護。

埋入混凝土中曝露在外的所有鋼筋置入件等不應曝露在外，若外露則需採用防蝕處理。若與配筋接觸，則構成巨觀腐蝕電偶，加劇配筋腐蝕，從而加速埋入物之腐蝕。

⑫由於不均勻沉陷、混凝土收縮或溫度效應引起之應力，應透過合理的設計和採用伸縮縫、隔離縫、溫度控制等施工措施控制在允許範圍內。

2. 設計車輛載重

橋梁的設計車輛載重應依據交通部「公路橋梁設計規範」橋址之重車交通量，依橋梁之重要性來決定，以確保橋梁耐久性。

橋梁的超載是導致橋梁開裂的主因之一，超載的形成則不外是因為橋梁設計載重不足或橋梁使用管制不當所造成。因此，在橋梁規劃階段即應對未來之載重型式、最大載重、車流量等加以確實調查、預估、確認，依相關法規決定足夠之設計載重，並設計足夠的梁深，以控制橋梁變位，避免裂縫寬度過大，在橋梁實際營運過程，主管機關則應依據其設計載重大小，嚴格執行管制維護工作，來確保橋梁之服務年限。

3. 排水設計

混凝土橋上部結構應有適當的排水設施，以使雨水、露水等得以迅速排除，排水設施的設計包括橋面洩水孔、排水管、舖面坡度、泛水板等，詳見圖 5.6，且排水管儘量不要埋在結構體內或埋在結構體內部份愈短愈好。同時在上部結構之接縫處應避免積水的可能，箱型梁則應避免箱梁內部積水與濕氣聚積。

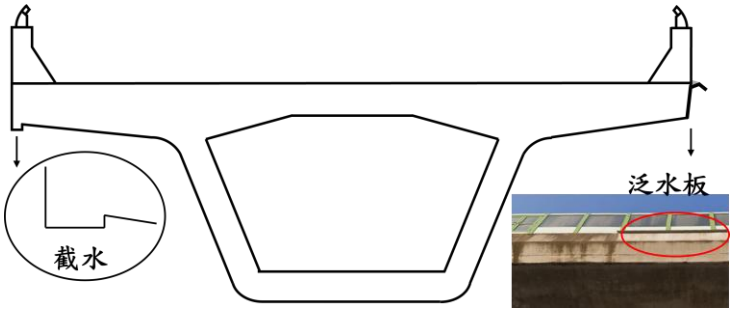


圖 5.6 混凝土橋上部結構排水設施示意圖[157]

易於積水的橋梁上部結構，往往成為極不利的局部腐蝕環境，因此除了橋面應有適當的縱、橫坡外，箱型梁之任一箱室內之最低點必須有適當洩水孔，以防積水，詳見圖 5.7，且使用之鋼筋應做防蝕處理。由於橋面的排水設施相較於橋梁的結構功能，顯得較為次要，易被忽略，經常流於型式，實質功能不彰，因而需要特別重視。

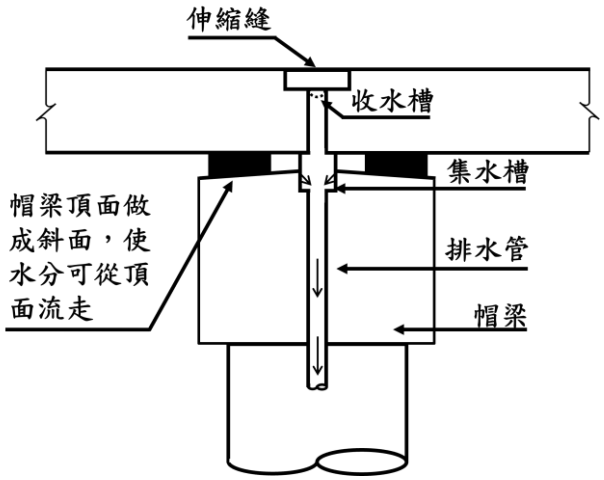


圖 5.7 帽梁頂部排水設計示意圖

4. 裂縫控制

在不同的混凝土齡期，有不同的混凝土收縮現象，是造成混凝土構件材料性裂縫的主因。包括混凝土終凝前因混凝土均勻性不佳、大量泌水、粒料沉陷等可能引發塑性收縮及塑性開裂(特別是大面積澆置場合)、初期因水合熱導致升溫、在降溫過程之收縮可導致熱應變開裂(特別是巨積混凝土)、硬固後混凝土逐漸發生乾縮而產生束制裂縫等，諸如此類的材料性裂縫，而適當之混凝土配比設計及材料選擇得以避免材料性裂縫之產生，相關的設計考量包括：

(1) 塑性收縮

塑性收縮發生於混凝土澆置後至硬固前這一階段，新澆置之混凝土表面可能因為養護不當、日照、風速過大等因素而急速喪失水分，造成表面嚴重之龜裂，對混凝土耐久性有極不利影響。與塑性收縮相關的混凝土材料設計參數包括水膠比、最大骨粒徑、粗粒料級配等，以及混凝土拌合均勻性、振動、搗實等施工因素。

(2) 熱應變收縮

混凝土在澆置完成後至硬固成形之初期，其溫度對混凝土行為影響甚鉅；在混凝土固化初期，將因水化作用而釋放水合熱，由於混凝土導熱性不佳，故當混凝土之體積較大時，其中心位置散熱不易，此時若結構物未受束制，則將經由混凝土心表溫差而導致一純內部束制應力，若此心表溫差大於 20℃，溫度應力將可能使混凝土產生表面裂縫，影響混凝土體積之穩定性。

除了心表溫差可能造成裂縫外，當混凝土硬固後再遭受大於 70℃之高溫時，混凝土中之初始鈣礬石將解離，並於數月至數年之時間與單硫型鋁酸鈣反應形成延遲鈣礬石，而此階段由於混凝土已硬固，延遲鈣礬石之膨脹將對混凝土產生內部之膨脹壓力，嚴重者可使混凝土由內向外產生猶如鹼骨材反應之裂縫。

因此，ACI 301[158]及施工綱要規範第 03700 章[159]建議結構物中混凝土最小澆置尺寸不小於 120 cm，或混凝土配比中使用特殊成分使早期水合熱較高時，或膠結材料用量較高時，或在難以散熱的環境下澆置時，皆應視為巨積混凝土，並依工程特性考慮水合熱問題。由此觀之，橋梁之基礎、橋墩、橋塔甚至大梁均有可能歸類為巨積混凝土。承包商應於施工前，提送巨積混凝土溫度管控計畫書，內容至少包括(1)確保混凝土最高溫度及心表溫差不致超過規範值之相關說明、(2)混凝土最高溫度及心表溫差之計算書、(3)現場溫度監測計畫及(4)養護及保護措施等，以確保混凝土的最高心溫及心表溫差能符合規範的要求。

(3) 乾燥收縮

與乾燥收縮相關的混凝土材料設計參數包括水膠比、水泥用量、卜作嵐材料用量、總粒料用量等。裂縫控制的重點在於提昇施工品質、落實養護措施，並且避免超額載重，絕大多數的混凝土開裂肇因於施工初期養護不當，或施工品質不良所導致的混凝土孔洞、蜂窩等材料瑕疵，因此，混凝土施工過程的每一環節，均應依照相關的混凝土施工規範確實執行。此外，近年來逐漸被

應用於混凝土工程上的纖維也證實能有效抑制施工初期因材料收縮所造成裂縫的發生，因此對於較為重要的構造物或有特殊的耐久性需求時，於混凝土中添加適量的纖維，是一種可考慮的防蝕設計方式。另外，有關預力混凝土之設計應依照交通部「公路橋梁設計規範」[5]第八章或「鐵路橋梁設計規範」[4]第四章之規定。

5.1.2 耐久性試驗

1. 劣化因素

設計圖說規定的抗壓強度以構造物安全性為基準，而耐久性則依用途、使用年限、維修成本及環境條件，採保守方式訂定最低抗壓強度與最大水膠比，混凝土配比需同時滿足安全與耐久性要求。混凝土耐久性與有害物質進出移動密切相關，若存在裂縫及孔隙且環境提供充足有害物質(如硫酸離子、海水、鹽霧、酸雨)，將加速劣化。裂縫及孔隙與拌和用水量及養護品質有關，內在因素如氯鹽、活性粒料及鋼筋也具影響，但拌和水量為關鍵，限制其用量是提升耐久性的重要策略，劣化因素示意圖如圖 5.8。

工程規劃設計階段應調查構造物附近環境，區分環境條件，檢討地下水中硫酸鹽、氯化物含量，於設計圖說中規定混凝土配比注意事項。施工時需依契約圖說進行加速耐久性試驗，驗證配比合宜性，並嚴格管制施工品質以減少裂縫，因裂縫將使有害物質直接侵入導致嚴重劣化，耐久性試驗法參見表 5-1。

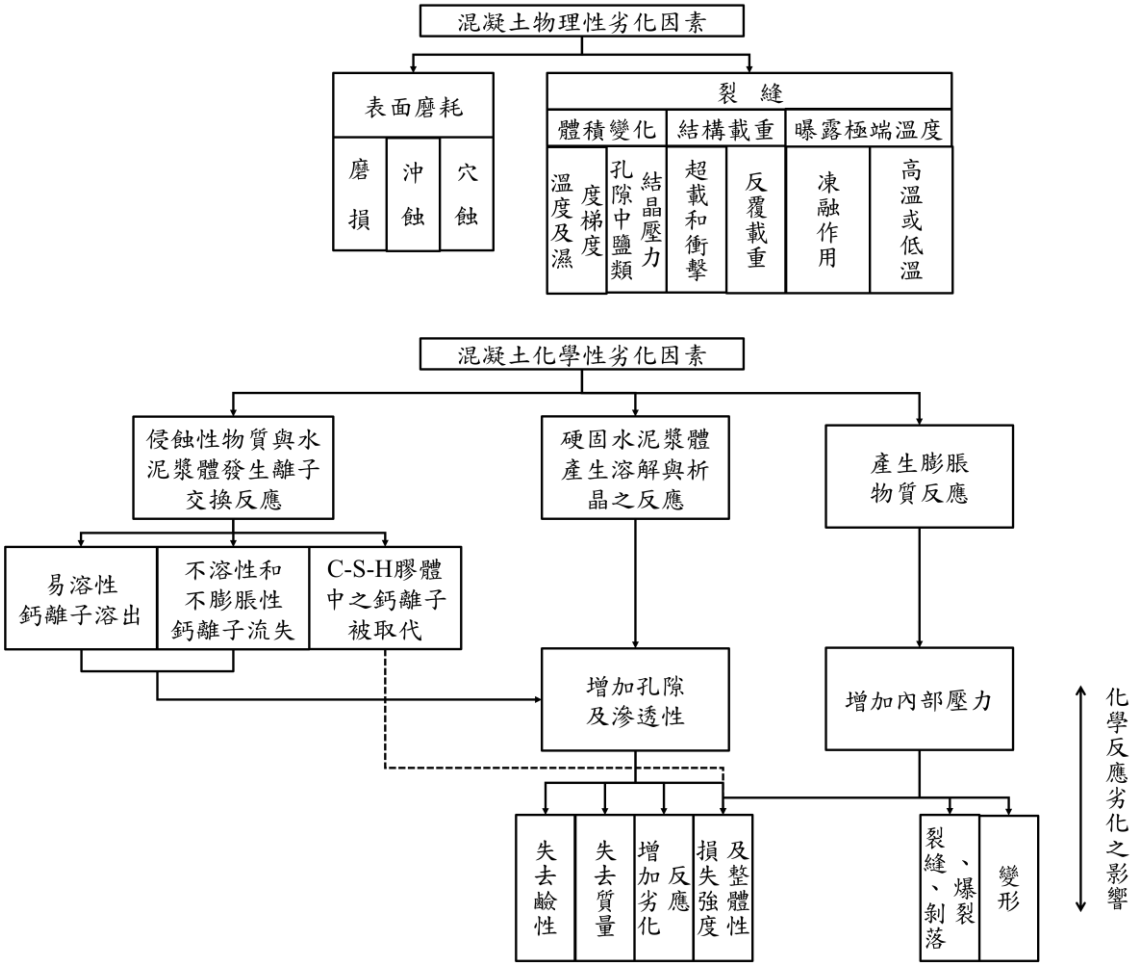


圖 5.8 混凝土劣化因素示意圖[160]

表 5-1 混凝土耐久性試驗法[160]

測定項目	試驗標準
中性化深度	RILEM CPC-18
	BS EN 14630
硫酸鹽侵蝕	CNS 14794
	ASTM C1012
快速氯離子滲透	CNS 14795
	AASHTO T277
快速氯離子傳輸	NT Build 492
貯鹽試驗	CNS 15649
	AASHTO T259
	ASTM C1543

2. 耐久性試驗

(1) 中性化

混凝土中性化深度檢測參照 RILEM CPC-18[161] 或 BS EN 14630[162]做為測試方法依據，標準程序與方法如下：

首先使用直徑約 20mm 或更大的衝擊鑽在混凝土結構構件上鑽孔取樣，每測區至少設置 3 個均勻分布的測孔，每 200 平方公尺取樣 1 點，每樓層不少於 3 點。接著，使用酸鹼指示劑測試，常用 1–2%酚酞溶液(75%乙醇配製)，噴灑於鑽孔新鮮斷面，紫紅色表示未中性化，無色表示已中性化，以游標卡尺或捲尺量測分界面至表面的距離，精度達 1mm。

建議使用彩虹指示劑更準確，若用酚酞則應在測值加 1.5mm 補償以避免低估。測區需涵蓋不同條件與品質的混凝土，測孔間距大於 2 倍保護層厚度，清理乾淨後噴灑指示劑以確保顏色界線清晰。測量後記錄各測區的最大、最小及平均中性化深度，繪製分布圖並標記測點位置，以評估中性化程度及維修範圍。在臺北市高氯離子混凝土鑑定中，若中性化深度平均值達 2cm 或以上，且符合其他條件，視為有耐久性損害，需進一步評估。

(2) 氯離子侵入

①快速氯離子滲透試驗(RCPT)

快速氯離子滲透試驗(RCPT)為用於評估混凝土之抗氯離子滲透能力之試驗方法，參照規範為 AASHTO 277[163]與 ASTM C1202[164]，國內之規範 CNS 14795[165]便是參照上面兩者建立而成，RCPT 試驗可分為真空飽和處理與電化學加速試驗兩個部分。為使試體孔隙處於飽和狀態，通電前須對 φ10cm×5cm 之混凝土圓柱試樣進行真空處理，處理程序參照表 5-2。

RCPT 之電化學加速試驗，將完成真空處理之試樣組裝於模具中(如圖 5.9)，其陰極槽使用的是濃度 3%氯化鈉溶液，陽極槽使用的是濃度 0.3N 之氫氧化鈉溶液，兩個槽內各置一片 20 號網目黃銅網做為電極。裝置完成後電壓設定為 60.0±0.1 V，起始溫度須維持在 20~25°C，而後施以 6 小時 60V 之直流電，並由通電 6 小時獲得之總電量對混凝土之抗氯離子滲透能力進行評估，通電期間每 30 分鐘紀錄 1 次電流(安培)，而後透過計算總電量，總電量之計算方式如式(5-1)所示，得到總電量後透過評估電量表將通電 6 小時所獲得之總電量將混凝土試樣進行分級，共分成 5 種氯離子滲入性，如表 5-3。

表 5-2 真空處理程序[165]

乾抽	真空壓力	3 torr
	時間	3 小時
濕抽	溶液	去離子水(或經煮沸之清水)
	時間	1 小時
浸泡	溶液	去離子水(或經煮沸之清水)
	時間	18±2 小時

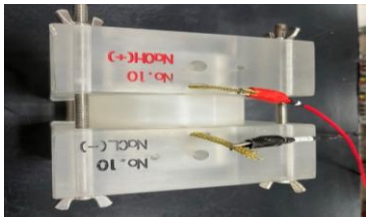


圖 5.9 RCPT 試驗設備

$$Q = 900\left(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \cdots + 2I_{300} + 2I_{360}\right) \text{.....(5-1)}$$

表 5-3 氯離子穿透性之評估分級[165]

通過電荷量(庫倫)	氯離子穿透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	甚低
<100	可忽略

②快速氯離子傳輸試驗(RCM)

試驗標準參照 Nord Test 制定之 NT Build 492[166]規範，以指定加壓電場加速氯離子於水泥質材料進行傳輸，並於指定試驗時間後將試樣劈裂並噴灑硝酸銀，利用白色沉澱之氯化銀進行侵入深度之判別與量測，計算氯離子非穩態傳輸係數以評估混凝土之抗氯離子能力。RCM 試驗需進行真空前處理與電化學試驗，真空前處理參考 NT Build 492[166]與 ASTM C1202[164]試驗標準進行，與 RCPT 試驗不同的是，其濕抽與浸泡程序使用的是飽和氫氧化鈣($CaOH_2$)溶液，完成真空處理程序後進行電化學試驗；電化學試驗需施以 30V 電壓測得初始電流後透過電流調整表(表 5-4)決定通電電壓與試驗時間，其試驗照片與示意圖如圖 5.10。

表 5-4 NT Build 492 電流調整表[166]

30V 電流	試驗伏特	試驗電流	試驗時間
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leqq I_0 < 10$	60	$10 \leqq I_0 < 20$	48
$10 \leqq I_0 < 15$	60	$20 \leqq I_0 < 30$	24
$15 \leqq I_0 < 20$	50	$25 \leqq I_0 < 35$	24
$20 \leqq I_0 < 30$	40	$25 \leqq I_0 < 40$	24
$30 \leqq I_0 < 40$	35	$35 \leqq I_0 < 50$	24
$40 \leqq I_0 < 60$	30	$40 \leqq I_0 < 60$	24
$60 \leqq I_0 < 90$	25	$50 \leqq I_0 < 75$	24
$90 \leqq I_0 < 120$	20	$60 \leqq I_0 < 80$	24
$120 \leqq I_0 < 180$	15	$120 \leqq I_0 < 180$	24
$180 \leqq I_0 < 360$	10	$60 \leqq I_0 < 360$	24
$I_0 \geqq 360$	10	$I_0 \geqq 120$	6

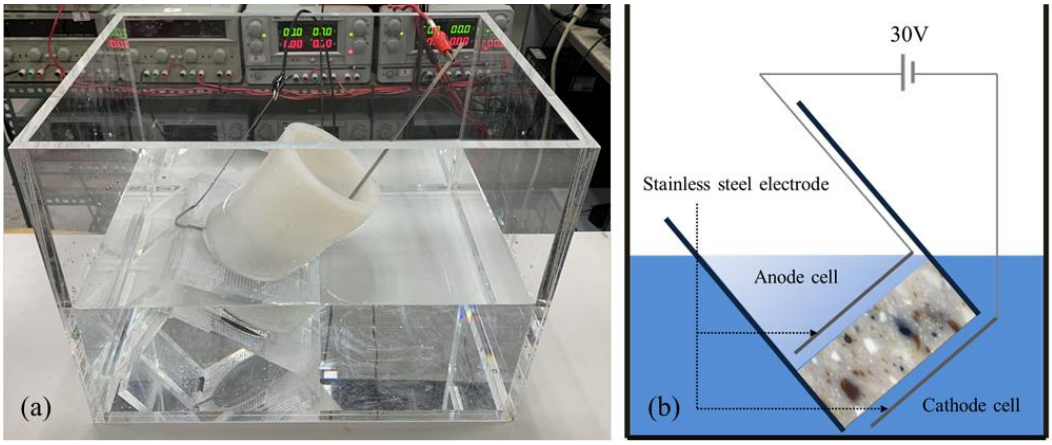


圖 5.10 RCM 試驗照片與示意圖

將完成電化學試驗後之試樣利用抗壓機進行劈裂，而後將劈裂面噴灑上 0.1N 之硝酸銀溶液並靜置 30 分鐘，待試樣上之氯離子與硝酸銀充分反應後，而後取一定間距量測 7 個點，兩面共 14 點位後取其平均用於計算平均侵入深度，硝酸銀變色反應如下式，侵入深度量測示意圖如圖 5.11 所示。

$$Ag^{+} + Cl^{-} \rightarrow AgCl\downarrow$$
$$White\ color = 100\%AgCl + 0\%Ag_2O \quad \text{.....(5-2)}$$

$$Ag^{+} + OH^{-} \rightarrow AgOH \rightarrow Ag_2O\downarrow$$
$$Brown\ color = 0\%AgCl + 100\%Ag_2O \quad \text{.....(5-3)}$$

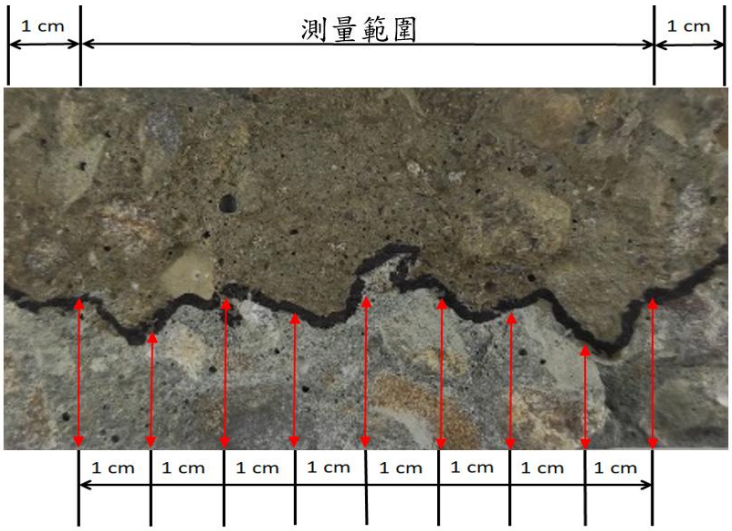


圖 5.11 侵入深度量測示意圖

測得平均侵入深度後，即可根據通電電壓、通電時間、溫度、侵入深度等數據，計算比色法非穩態傳輸係數，計算如式(5-4)。

$$M_c = \frac{0.0239\times(273+T)L}{U\times t}\times\left(x_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)L\times x_d}{U}}\right) \quad (5\text{-}4)$$

其中，M_c：比色法非穩態傳輸係數，(m^2/s)。

U：試驗電壓，(V)。

T：初始與結束溫度之平均值，(K) 。

L：試體長度，(m)

x_d：侵入深度之平均值，(m)

t：試驗時間，(s)

③貯鹽試驗(Ponding Test)

貯鹽試驗為最常用於評估混凝土抗氯離子滲透能力，參照規範 AASHTO T259[167]與 ASTM C1543[168]。貯鹽試驗是將混凝土試樣頂部浸泡 90 天之 3%氯化鈉溶液後，以逐層磨粉之方式進行取樣，藉此分析硬固混凝土內部之氯離子分布情形，並透過質量守恆之觀念將 Fick's Law 進行推導，衍生出 Fick's First Law，如式(5-5)所示；利用質量守恆定即可推到出(5-6)，而當擴散係數 D_f 為定值時，可將式(5-6)改寫成式(5-7)；而將三維之式(5-7)簡化單向擴散時，即可得到得式(5-8)，此方程式即為 Fick's Second Law of Diffusion，又稱為擴散方程式(Diffusion equation)。

此方程式運用於一維方向之質量傳遞擴散行為，且須為等溫等壓系統下且離子不與產生化學反應之情形下使用，當離子濃度變化與時間相關時能以 Fick's Second Law 進行解釋。而對於耐久性較高之混凝土而言，90 天貯鹽試驗可能無法使氯離子侵入至一定深度，從而導致試驗結果難以對混凝土之耐久性進行評估，因此對於更高耐久性之混凝土，可能需要延長貯鹽試驗之氯化鈉溶液浸泡時間。

$$J = -D_f \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{.....(5-5)}$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = 0 \quad \text{.....(5-6)}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_f \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}\right) \quad \text{.....(5-7)}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{.....(5-8)}$$

其中，J：氯離子含量，(mass,%/cm^3)。

x：氯離子之擴散深度，(cm)。

F_x：x 方向之單位面積物質通過率。

F_y：y 方向之單位面積物質通過率。

F_z：z 方向之單位面積物質通過率。

t：試驗時間，(s)。

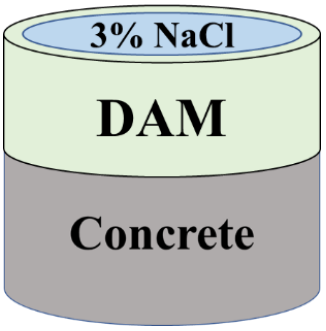


圖 5.12 貯鹽試驗示意圖

(3) 硫酸鹽腐蝕

抗硫酸鹽侵蝕為混凝土耐久性的其中一項重要指標，硫酸鹽侵蝕的機理是硫酸鹽與試體產生化學反應產生膨脹,在硬化的混凝土內部產生內應力，進而使混凝土產生破壞;或是形成沒有膠凝性的物質使混凝土變軟。試驗法依據美國 ASTM C1012 測試標準「Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement

Mortars Exposed to a Sulfate Solution」[169]，中華民國國家標準為CNS 14794「水硬性水泥砂漿棒曝露於硫酸鹽溶液中之長度變化試驗法」[170]，試驗方式如下：

①試體製作：

漿體灌模後，迅速將模蓋住，並放置在養護容器中，密封後並保持在 35±3℃的養護溫度中，持續 23.5 小時後，浸泡於 23±2°C 的飽和石灰水環境，並使用 CNS1010 測定方塊試體抗壓強度[171]，直到抗壓強度到達 20MPa。

②浸泡硫酸鹽溶液：

試體抗壓強度到達 20MPa 時，量測試體初始長度，再將試體存放至裝有硫酸鹽溶液的密封容器中，控制溫度於 23±2℃。硫酸鹽溶液為每 1 立方體積包含 352 莫耳的硫酸鈉(50 g/L)。

③長度變化計算：

於規劃齡期將試體取出並量測其長度，計算如下[170]：

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \quad \text{.....(5-9)}$$

其中，ΔL：齡期長度變化。

L_x：齡期標準桿值。

L_i：初始測量值。

L_g：標秤標準長度或 250 mm。

④試驗報告

報告需說明所用水泥的型別，若使用混合材料，需報告其識別及各組成比例，無論純水泥或混合材料，均須符合適用標準。每一支水泥砂漿棒於浸入硫酸鹽溶液時，需以長度比較測微器記錄初始讀值做為長度變化基準。報告個別砂漿棒後續長度變化佔基準的百分率，精確至 0.001%；平均值則報告至 0.01%，

試驗結束後需評論試體外觀狀況[170]。

每份水泥砂漿棒於特定齡期的平均長度變化報告，需包含試驗棒數量 n、長度變化標準差及變異係數。每齡期至少需 3 支砂漿棒數據以構成有效試驗，長度變化最大許可全距依餘存試體數量不得超過表 5-5 規定的百分率值，與 CNS 14794 試驗步驟有差異之部分，如硫酸鹽溶液之組成、濃度、溫度、水泥砂漿之配比、齡期或成熟度， 以及類似因子等有相關時，均需呈現於試驗報告中[170]。

表 5-5 長度變化許可全距 (%)[170]

餘存試體數目	混合水泥	卜特蘭水泥
3	0.034	0.010
4	0.037	0.011
5	0.039	0.012
6	0.041	0.012

⑤精密度與偏差：

CNS 14794 標準試驗法[170]的精密度依水泥型別而異，經共同試驗評估如下：對於混合水泥，當膨脹量介於 0.04~0.07%時，單一操作者標準差為 0.010%，同一操作者對相同混合水泥的兩次正確試驗結果差異不得超過 0.028%；多實驗室間標準差為 0.020%，不同實驗室對相同混合水泥(IP 或 IS 型)的兩次正確試驗結果差異不得超過 0.056%。

對於卜特蘭第II型水泥，膨脹量在 0.04~0.07%時，單一操作者標準差為 0.005%，兩次正確試驗結果差異不得超過 0.014%；多實驗室間標準差為 0.020%，不同實驗室試驗結果差異不得超過 0.056%。對於卜特蘭第 V 型水泥，膨脹量在 0.04~0.07%時，單一操作者標準差為 0.003%，試驗結果差異不得超過 0.009%；多實驗室間標準差為 0.010%，不同實驗室試驗結果差異不得超過 0.028%。

5.1.3 材料

混凝土橋梁結構之主要材料包含混凝土、鋼筋、預力鋼腱、錨定器及續接器、套管、灌漿液及黏接劑等，各項材料之相關規定說明如下。

1. 混凝土

(1) 混凝土材料包括水硬性水泥、輔助膠結材料、粒料、拌和水及摻料等。

(2) 混凝土(含預力、鋼筋混凝土)材料之氯離子含量規定：

①拌和用水需符合 CNS 13961，低於 250 ppm 以下。

②粒料需符合 CNS 1240，水溶性氯離子含量不得超過 0.012 %。

③水泥需符合 CNS 61，I型水泥不得超過 0.035%、II~VI型不得超過 0.02 %。

④新拌混凝土需符合 CNS 3090，鋼筋混凝土水溶性氯離子含量不得超過 0.30 kg / m^3；預力混凝土不得超過 0.15 kg / m^3。

(3) 水硬性水泥可使用 CNS 61〔卜特蘭水泥〕或 CNS 15286〔水硬性混合水泥〕。

(4) 卜特蘭水泥型別依 CNS 61 規定之五種型別中，第 II 型特別用於需要抵抗中度硫酸鹽侵蝕者，第 V 型特別用於需要抵抗高度硫酸鹽侵蝕者，CNS 15286 中也有中度抗硫酸鹽(MS)和高度抗硫酸鹽(HS)類別之混合水泥，故在面臨腐蝕環境之橋梁可加以考慮使用。

2. 粒料

常重混凝土所用粒料應為堅硬、緻密、耐久且潔淨之材質者。CNS 1240 規範規定粒料之級配、比重、吸水率、健度、有害物質或有機不潔物之容許含量、磨損率、顆粒形狀等品質要求。混凝土所用之粒料應為潔淨之天然河川砂石、開挖級配料或由品質良好山礦石所製造之機製砂石。陸上開採之粒料須特別注意鹼質粒料潛在反應，其判定基準詳 CNS 1240。海砂(包括沿海地區地下挖出之砂)若含鹽份不符合 CNS 1240 之規定者，不得用做混凝土細粒料。

天然或人工製造之輕質粒料因原料來源不同，粒料性質會有極大的差異，不同來源之粒料對於新拌混凝土工作性、硬固混凝土強度及耐久性等功能之影響，會有很大的差異，使用時需事先有妥善之配比設計、試驗驗證及品質保證程序後方可使用。各種混凝土粒料須符合之相關規範如下：

(1)混凝土粒料：CNS 1240；

(2)結構用混凝土之輕質粒料：CNS 3691；

3. 輔助膠結材料

添加輔助膠結材料的混凝土可大幅提升其耐久性，故位於腐蝕環境之橋梁應在符合規範添加量下儘量使用，各類輔助膠結材料須符合之相關標準如下，使用其他摻料須符合 CNS 相關規定辦理，並須於施工前充分檢討其適用性。

(1)混凝土用飛灰：CNS 3036；

(2)水淬高爐爐碴粉：CNS 12549；

(3)膠結混合料用矽灰：CNS 15648；

(4)混合輔助性膠結材料：CNS 15647。

4. 拌合用水

混凝土拌合用水須符合 CNS13961〔混凝土拌和用水〕之規定，其檢驗應按 CNS1237〔混凝土用水品質試驗法〕之規定。

5. 摻料

各項混凝土摻料之使用，應以能達所要求之混凝土性能，且對混凝土其他性質無妨害為原則，並應經監造者許可。各項摻料須符合如下相關規範，若使用其他摻料時亦須符合 CNS 或 ASTM 等相關規定，並須於施工前充分檢討其適用性。

(1)化學摻料：CNS 12283；

(2)輸氣摻料：CNS 3091；

(3)流動化摻料：CNS 12833；

(4)纖維混凝土用鋼纖維：CNS 12892；

(5)礦物填料：ASTM C1797。

6. 腐蝕抑制劑(防銹劑)

(1)腐蝕抑制劑可參照 CNS12456〔鋼筋混凝土用防銹劑〕及CNS12457〔鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法〕相關規定辦理。

(2)腐蝕抑制劑的成效亦可以 ASTM G109 評估。

7. 鋼筋

(1)普通鋼筋

除螺箍筋可為光面鋼筋或光面鋼線外，鋼筋必須為竹節鋼筋，鋼線須為麻面，並應為契約規定之級別，鋼筋應符合 CNS 560〔鋼筋混凝土用鋼筋〕之規定，麻面鋼線、光面鋼線、銲接麻面鋼線網及銲接光面鋼線網須符合 CNS 1468、CNS 6919 或相關規定。耐震構材用鋼筋應符合內政部「建築物混凝土結構設計規範」第20.2.2.5 節之規定。

(2)環氧樹脂鋼筋

使用於鋼筋混凝土結構物中之環氧樹脂鋼筋需符合 ASTM A775 或 ASTM A934 規定。在使用前，環氧樹脂之性質需經充分調查與試驗，施工前亦應確認環氧樹脂鋼筋沒有塗層破損之處。

(3)熱浸鍍鋅鋼筋

應符合 CNS 14771〔鋼筋混凝土用熱浸鍍鋅鋼筋〕規定。鍍鋅鋼筋具有阻絕外界有害因子接觸鋼筋的效果，當鍍鋅層須作修補時，必須符合 CNS 15257〔熱浸鍍鋅層損傷及裸點修補〕規定。

8. 預力鋼腱

預力鋼腱包括預力鋼線、預力鋼絞線、預力鋼棒、鍍鋅鋼腱等，其品質須符合下列規定：

(1) 預力混凝土用鋼線及鋼絞線：CNS 3332；

(2) 預力混凝土用硬鋼線：CNS 8695；

(3) 預力混凝土用鋼棒(即本章所稱之預力鋼棒)：CNS 9272；

(4) 鋼腱表面應潔淨，不得有浮銹、生鱗屑或凹點。

(5) 預力鋼腱若有新產品或國家標準沒有的規定，可參考國際通用規範(PTI、CIP 等規範)或材料製造產品規格，但應符合工程圖說。

(6) 無黏裹鋼腱應以認可之塗料，如環氧樹脂、油脂、臘、塑膠、瀝青材料或鍍鋅鋼腱予以防銹，且塗料之使用應符合下列要求。

①在結構物可能之溫度變化範圍內，塗料應保持韌性，不生裂紋且不致液化。

②塗料不得與鋼腱、混凝土及套管材料發生化學反應。

③全部無握裹長度皆應以塗料包覆。

(7) 位於含鹽份或高濕度大氣中結構物之鋼腱及曝露於混凝土外之後拉法構材之鋼腱應於工地加敷經許可之塗料。

(8) 鋼腱在工地貯存過程中，若有變形、腐蝕時，應再作試驗確定其品質後方可使用。

9. 錨定器及續接器

錨定器及續接器應具有錨定或續接鋼腱達到規格所定之極限荷重前不被破壞或不產生顯著變形。錨定器可用以錨定有黏裹鋼腱與無黏裹鋼腱，錨固性能均應符合規定並由試驗驗證，若錨定器及續接器採鍍鋅處理則須符合相關鍍鋅規定確保其有足夠的防蝕保護。

10. 套管

(1) 套管可提供對鋼腱的保護，故應具相當剛性以防施工中變形或損壞，套管間接縫應具水密性。

(2) 套管品質試驗應依 CNS 12739〔預力混凝土用螺旋套管〕及 CNS 12740〔預力混凝土用螺旋套管檢驗法〕規定辦理。

(3) 未埋於混凝土中外露鋼腱之保護管應具有保護鋼腱及供灌注防銹填充劑套管之功能。保護管之品質應具有所需之強度與耐久性，其本身亦須施以有效之防銹處理。

(4) 無黏裹鋼腱套管可為鋼製、鋁合金或 HDPE 管包裹塗敷油脂鋼腱之防水紙或塑膠材料，套管內應灌注防銹油脂保護鋼腱免於生銹。

11.灌漿材料

(1) 灌漿材料在填滿套管內空隙，以包裹預力鋼腱防止生銹，並使混凝土構材與預力鋼腱結合為一體。

(2) 灌漿材料所使用的摻料中氯化物、氟化物、硝酸鹽等不得超出含量限制，以防止其對預力鋼腱及配件之腐蝕。摻料應經試驗合格或具使用實績，並經監造者認可始得使用。

12.黏接劑

(1) 用於接合預鑄節塊之黏接劑，如混凝土、水泥砂漿、水泥漿及環氧樹脂等，應具有所需強度、耐久性及水密性，且適合於接合部位之施工。黏接劑的強度不低於結構混凝土強度，並應考慮其耐久性，在結構使用年限內不會劣化或脆化。

(2) 環氧樹脂為常用的黏著劑，其品質可考參考日本 JSCE-H 101「プレキャストコンクリート用樹脂系接着剤(橋げた用)品質規格」之規定。

13.新材料

(1) 若須使用新材料，須於設計或施工前充份檢討其適用性。

(2) 新材料若涉及專利時，應由承包商取得專利權人或其代理人之同意。必要時，應由專利權人或其代理人指派專門技術人員指導，以免發生糾紛或誤差。

14.材料儲存

(1) 鋼筋及預力鋼腱宜貯放在倉庫內，放於室外時應加覆蓋，並應做適當之支承與地面隔離，不得直接放於地上。並防止有害油脂、

鹽份或灰塵之附著，避免銹蝕、損傷及變形之發生。

(2)錨定器、續接器應儲藏於倉庫內，以防止螺紋之生銹，與混凝土接觸部份不得附著油脂、灰塵及浮銹等。

(3)套管、裹襯宜放在倉庫內，放於室外時應妥切用防水布覆蓋以防止銹蝕，並不得附著有害之油脂、鹽份、灰塵等或損傷及變形等。

(4)黏接劑之儲藏應防止材料析離、變質、雜物混入。儲藏期間過久者，使用前應作試驗以確認其品質無異狀時方可使用。

5.1.4 施工

橋梁結構以混凝土為主要構件材料者，若混凝土強度不足、孔隙多或龜裂，成為失去基本防蝕能力的不健全構造，此時再投入更多的防蝕費用亦無法達到完全防蝕效果。混凝土結構物劣化腐蝕之發生位置，多數係位於保護層厚度不足或混凝土充填不完全之部位，故混凝土結構物施工良窳為混凝土防蝕能力影響重要因素之一，為確保長期耐久性所需品質，施工前應對施工計畫進行充分的檢討，將施工中可能產生與導致鋼筋腐蝕的因素加以提出並加強品管。

施工計畫中對施工時期也須特別注意，如季風會夾帶鹽份量增加的時期，須儘可能避免施工，若無法避免則需適當地配置防護設備，減低浪潮及海風的影響。

1. 施工計畫

(1)為確保橋梁結構物防蝕性，施工時必須加強與防蝕相關的材料及施工管理。

(2)施工計畫應將施工期間各項防蝕措施及防護設備等納入考量，使混凝土和鋼筋受到腐蝕因子如浪潮和海風的影響儘可能降至最低，並確保各項防蝕設計能落實。

(3)橋梁若位於腐蝕環境影響範圍內，其施工計畫應特別針對下列事項作充分檢討：模板工程、一般鋼筋、預力鋼腱、埋設物、混凝土施工、後續施工部位(外露部份)之處理等。

2. 模板工程

(1)模板要確實組裝並防止施工中產生漏漿情形，水泥砂漿若自模板接縫處外漏易造成該處拆模後形成蜂窩，增加及增大混凝土內孔隙，對混凝土緻密性有極大損害並可能降低其強度，故模板組裝時應儘量避免接縫空隙之產生,並在混凝土澆置前作充分的檢查。

(2)模板繫結材或模板組裝用的附屬鋼件，宜採用可自保護層拆移之型式，模板繫結材的錐形擴張器，可分埋設型和拆移型二種，埋設型一般使用於構件厚度較薄的部位，因可能會有從外露部分開始腐蝕之潛在危險，應避免使用，若使用拆移型的錐形擴張器，除須注意不讓此擴張器之尾端殘留於保護層中，其餘留下之坑洞必須以低坍度水泥砂漿或無收縮水泥砂漿謹慎地填補。

(3)露面混凝土施工縫處，續接之模板應確實緊貼於硬固混凝土以防止偏移或漏漿並保持施工縫處表面之平整,施工縫即為一種接縫,若未妥適處理則如同裂縫將提供水分或有害物質滲入路徑，施工縫設置及施工要加以重視。當施工縫採用免拆模板工法時，宜避免全斷面使用，保護層處仍應使用可拆式模板，以避免在保護層處形成縫隙。

(4)模板拆除時應避免任何部位之混凝土受力過大發生裂縫與混凝土表面遭受損傷；如發現混凝土面有裂縫、蜂窩或其他缺點時，應先經監造者查看，研議適當之維修補強工法，若監造者認為不宜修補者，得令其拆除重做。混凝土面有蜂窩或其他缺點，會影響結構體的水密性，若監造者認為修補方法或結果無法確保混凝土結構體的整體性或水密性，可令其拆除重做。

3. 鋼筋

(1)一般原則

①為防止鋼筋上有鹽份附著而導致腐蝕，可採倉庫內保管或在屋外保管時施以適當的遮覆措施。因季節風或颱風可能夾帶鹽份，故鋼筋於工地存放時需特別注意防止腐蝕發生。此外，經加工的

鋼筋也應儘早使用，若有需數日存放，則經加工鋼筋亦應有同樣的保護措施。

②鋼筋為避免在澆置混凝土時產生移位，除應按設計圖所標示之位置排置，還要確實固定。在鋼筋排置後，若因接觸海風或浪潮可能引致鹽份附著於鋼筋及模板上，應先進行清洗後再進行混凝土澆置。確保所需保護層厚度為相當重要，應按設計圖所標示位置精確地排置，且要求施工時不產生鋼筋移位。

③鋼筋之混凝土保護層務必全部控制在設計厚度以上，為確保所需保護層厚度，需在適當位置間隔配以支墊或間隔器。接觸於模板的支墊或間隔器，可考慮使用與原混凝土同等強度以上品質的混凝土或水泥砂漿所製成的材料。支墊或間隔器的設置數目，在基礎、柱、護欄等處可以 2 個 / m^2 以上，而梁、橋面板等地方則以 4 個 / m^2 以上為原則。一般慣用的鋼製支墊或間隔器，雖在與模板接觸的部分會施以防銹處理，但根據既有的橋梁調查結果，在腐蝕環境嚴重的地域中使用鋼製支墊或間隔器，常有生銹及因銹水的滲出造成混凝土表面變為褐色的情況發生，是防蝕上的弱點。因此，具腐蝕環境地域不宜採用未經防蝕處理之鋼製支墊或間隔器。

(2)環氧樹脂鋼筋

①當環氧樹脂包覆層須作修補時，如現場彎曲、搬運或施工過程中環氧樹脂層受損，必須使用符合 ASTM A775 規定之修補材料，惟每 30 公分長之鋼筋受損面積應不得超過鋼筋總面積之 2%。

②搬運環氧樹脂鋼筋之設備，其與鋼筋接觸之部份須有保護措施。

③成束環氧樹脂鋼筋應以多點方式吊升，以防因垂曲使鋼筋間產生相互擦損。

④環氧樹脂鋼筋或成束環氧樹脂鋼筋不可拋丟或拖移，並應貯放於有保護作用之場所。

⑤修補應按照施工說明書或材料製造廠之使用說明規定辦理。

環氧樹脂鋼筋於運送前的綑紮、運送、貯存、組立、搭接、補漆及於混凝土澆置中，均不可傷及環氧樹脂包覆，施工前需作審慎的規劃及檢查。為了達到防蝕的目的，使用環氧樹脂鋼筋時，應先徹底了解如何確保環氧樹脂鋼筋的品質及使用法，特別是確保鋼筋每一部位之厚度都是非常均勻，為達此目的應對包覆材料的品質、生產方法及施工之各階段都加以控制。

(3) 熱浸鍍鋅鋼筋

①當鍍鋅層須作修補時，應依 CNS 14771 規定，使用含鋅量 94% 以上之高濃度鋅粉塗料，惟每 30 公分長之鋼筋受損面積應不得超過鋼筋總面積之 2%。修補應按照施工說明書或材料製造廠之使用說明之規定辦理。

②以續接器續接後均應依上述之規定修補，包括鋼套、螺絲及螺帽，均須以修補鋼筋所用塗布材料塗布之。

4. 預力鋼腱

(1) 預力混凝土橋預力系統的腐蝕防治，應著重於施工層面，包括預力鋼腱保護層控制、套管週圍混凝土施工、套管內灌漿及端錨區處置等。一般預力構件中鋼筋與鋼腱同時存在，常造成過於侷促現象，增添施工困難度，故預力構件施工中的灌漿過程應特別加以注意。發生嚴重腐蝕的預力構件通常與其施工品質不良、預力套管或端錨處理不當有關，建議以預力套管加厚或鍍鋅量加大之方式進行改善。此外，預力鋼腱與鋼筋相同，都是預埋於混凝土中，故理論上是受混凝土所保護，但如有裂縫存在，則會發生鋼筋腐蝕問題，同樣也會發生於預力鋼腱。

(2) 套管週圍混凝土施工首重混凝土施工性，並注意設計圖說中之鋼筋、鋼腱配置與間距是否合理可工作，實際施工時應注意套管週邊之振動夯實動作，以確保混凝土填充的緻密性，避免填充不實的情形發生，必要時可考慮採用高流動性混凝土。

(3) 套管內灌注之水泥漿應有適當流動性，灌漿時由低點至高點灌注

需確認由另一端溢出，並於最高點設透氣管，使無孔隙、氣泡留存在套管內。灌漿用水泥漿所用附加劑若內含有氯化物其量不得超過附加劑本身重量的 5%，含亞硝酸鹽及硝酸鹽者均不得使用。

(4) 灌漿前套管應先清洗並使用空壓機吹乾，且灌漿應使用專用之灌漿用保護蓋，不可採用傳統之砂漿封頭。鋼腱施預力後，須在一週內完成套管內水泥漿灌注，若未能在期限內進行，則須做臨時防蝕措施。

(5) 預力構件於端錨組立時就應考量其保護層是否足夠，故在混凝土澆置前需再加以確認其位置是否正確，鋼腱、鋼筋與模板間之墊塊是否固定牢固，不致在混凝土澆置時發生移位情形。構件端錨區通常有較大的幾何形狀變化，此部位之保護層控制極為重要。通過此部位之鋼腱佈置應於設計時加以檢核，包含防爆筋、格柵筋、承壓板、摩擦剪力筋等，以確保有足夠的保護層。

5. 埋設物

(1) 若有鋼筋以外之其他埋設物如管道、管線或錨栓等，應都有適當之混凝土加以隔離，以防止電化學腐蝕反應。鋁製品者不允許埋設於混凝土內。

(2) 埋設的支墊、間隔器或鋼筋續接器等物件，應避免其導致混凝土產生裂縫對透水性的影響，尤其施工縫附近更應注意施工。

6. 混凝土施工

(1) 混凝土材料輸送、澆置、搗實及養護工作應嚴格控制，尤其不可在施工中任意加水而影響設計水膠比，以確保混凝土品質。

(2) 為克服構造物配筋密集或不易澆置處，應使用自充填混凝土或高流動化混凝土，以完全填充鋼筋間隙與模板內之空間。

(3) 最高水位與最低水位間，不得設有任何施工縫。上述兩水位間混凝土，在澆置後三十天內，不得與海水直接接觸。

(4) 混凝土施工需確實做好品質管制，避免有泌水及析離之現象。

(5)混凝土澆置完成後應加強養護及保護措施，以防止各種裂縫的產生及成為緻密性混凝土。

(6)混凝土所用養護水原則上使用自來水，不可用海水。若使用地下水，則需檢測氯離子含量是否符合規定。

因構件配筋設計及構件斷面形狀與尺寸之故，混凝土澆置有需採用較佳工作性之自充填或高流動性混凝土，減少單位用水量仍能得高工作性，並應嚴禁以加水方式獲得工作性。此外，亦應充分檢討澆置方法和設備，謹慎進行澆置、搗實及養護，尤其應有足夠的養護期，以獲得緻密度高的混凝土。混凝土施工時需確實做好品質管制，以避免有泌水及析離等現象。

混凝土的澆置界面，往往為鹽份和水分易滲透之部位，成為防蝕上的弱點。因此，應於澆置混凝土時檢討如何使澆置界面儘量減少，如橋墩的水平方向澆置界面、連續梁橋面板的垂直方向澆置界面、平衡懸臂連續梁的垂直方向澆置界面等，都應為施工上所需避免的地方。為防止前述結構部位的澆置界面成為防蝕上的弱點，應遵循橋梁相關施工觀念與方法，謹慎地予以施工。

7. 後續施工部位之處理

(1)因設計或施工考量使鋼筋長時間暴放於大氣中，應針對腐蝕發生之可能，對鋼筋有適切的保護措施。對於將來有設計變更或擴增的結構物，或是上、下構施工時期有所差隔的結構物，以及有所謂分階段施工的結構(如預留搭接鋼筋)，則必須針對腐蝕採取因應的措施。另外，緣石、護欄處的鋼筋、預力後拉法預鑄大梁等的鋼筋端錨，若亦有一段時間曝露於大氣的可能，應以水泥漿塗刷、薄板或布等方式覆蓋，並採附加保護措施，減低受鹽份影響。

(2)預力端錨或施工用鋼件撤去後所遺留的痕跡或施工人孔，應以無收縮混凝土或水泥砂漿進行填補。對於預力鋼腱端錨的混凝土填補，是為避免端錨鋼筋腐蝕的進行。因此，宜於施加預力灌漿後儘快地進行。另外，施工用鋼件撤去後所遺留的痕跡，亦為同樣

施工原則，至於填補的部分，因往往與原混凝土間密著性不高，也不易形成一體，故應預留錨定鋼筋或鋼絲網，並將原先之混凝土表面進行粗糙化處理，在進行清洗後，用無收縮水泥砂漿或環氧樹脂砂漿等，謹慎地施工處理。

8. 陰極保護工法

(1) 犧牲陽極保護系統

犧牲陽極保護系統施工可參考 NACE SP0216 規範。安裝缺陷會嚴重影響犧牲陽極保護系統性能。材料與施工應符合、AMPP、ACI、ASTM 及其他適用規範，並以最小環境衝擊方式執行。

①材料與設備

A.規範要求時，製造商應提供每批陽極合金成分證明。獨立抽樣測試(如有要求)應由認證實驗室依規範抽樣率執行。

B.特殊安裝設備(如熔射鋅或鋁陽極設備)應於設計文件指定，並經原製造商認證適合用途且狀況良好。

C.材料品管可接受製造商證明、現場測試或合格獨立實驗室抽樣測試，設計規範應明確規定品管要求。

D.品管測試設備應符合規範規定，且在校正有效期限內，校正證書由施工廠商及/或品管人員保存備查。

②混凝土修補

A.修補方法與材料會影響陰極保護系統運作與性能，特別是修補材料電阻率會干擾犧牲陽極電流輸出及傳至鋼筋。

B.將施作陰極保護區域之混凝土修補，應使用與系統相容並經陽極/陰極保護系統製造商核可之修補砂漿。

C.混凝土修補應依規範及 ICRI、ACI 相關指引或標準執行。

D.熱熔射金屬陽極前，修補混凝土須乾燥以降低表面含水率，通常 7~28 天。使用熱熔射鋁合金陽極時，混凝土須養護(超過 28 天)至表面 pH 足夠低，避免混凝土表面與陽極發生不良反應。

E.埋入式陽極應依製造商建議完全以水泥質修補材料包覆。

③鋼筋電氣連續性測試與修正

A.陰極保護系統正常運作仰賴鋼筋及其他受保護埋入金屬之電氣連續性。測試、修正與外來金屬有意排除應依規範執行。

B.測試方法依規範，至少於修補開挖曝露鋼筋處確認電氣連續性。因移除劣化混凝土而曝露之鋼筋均須測試。必要時得增開測試孔。所有不連續鋼筋均須修正為電氣連續。

C.電氣連續性修正依規範執行。銲接或其他熱接方法須嚴控以確保接點良好並避免鋼筋熱損傷。設計若指定某些埋入金屬排除於保護外，承包商須測試確認電氣連續性，若需修正應依規範執行並記錄位置。

④陽極、結構體與接地連接

A.陽極可永久直接連接鋼筋，或透過測試站連接。測試站便於監測。若透過測試站連接，鋼筋須與陽極電氣隔離。

B.鋼筋連接應依規範程序於乾淨鋼筋上執行以降低接觸電阻並確保良好接合，接點須塗覆非導電、耐水保護材料。

C.每一參考電極須有獨立專用接地線。

D.混凝土澆置前後均須小心避免損壞任何線路，須驗證結構與接地與鋼筋間電氣連續性。

(2) 外加電流陰極保護系統

外加電流陰極保護系統的施工可參考 ISO 12696、NACE SP0290、NACE 01102 等規範，其中 NACE SP0290 適用於曝露於大氣的鋼筋混凝土結構，NACE 01102 適用於預力混凝土結構。本計畫僅摘錄部分內容加以說明，詳細施工步驟請參閱上述規範。

①結構評估和修復

既有結構的評估工作包括圖說及相關記錄之審視、目視檢

查和結構表面劣化評估、氯離子含量試驗、中性化深度測量、混凝土保護層及鋼筋尺寸和位置的測量、尺寸、分佈、搭接和連續性、鋼筋電連通性測試、鋼與混凝土電位調查及混凝土電阻率等，可參考 EN 1504 的相關建議進行。

本節所稱「修復」指在陰極保護安裝前恢復受損或劣化的混凝土，以提供陰極保護電流的無阻礙路徑。剝落層或蜂巢狀混凝土，以及電阻係數過高的修補材料或含金屬纖維的混凝土應予敲開、清除。若蜂巢狀混凝土深入範圍超越主鋼筋，則鑿除深度應至主筋後之適當距離。此外，應以敲錘回音測試法或其他方法來確保所有剝落層均已清除。

若修補至結構物底層或修補區域過大，則必須檢測新舊混凝土間的接合性。混凝土表面若有與鋼筋接觸的任何繫網、釘子或其他鋼件，應予切開並與鋼筋保持一定距離。混凝土修復應使用水泥基材料進行混凝土修復，不得使用含有金屬(纖維或粉末)的修復材料，且電阻率特性和力學性能應與原混凝土相容。

②新建結構評估

新建結構若以陰極保護做為預防系統，除施工標準要求外，應在設計和施工程序中評估以下問題。

A.鋼筋電連通性：按照系統安裝規定檢查和提供鋼筋電連通性。

B.監測感測器與電纜保護：確保監測感測器及所有電纜及其連接的充分固定和保護，以避免在混凝土澆置和振動期間損壞或干擾。

C.連接、定位與絕緣：其他金屬固定裝置、配件或其他項目的連接、定位或絕緣，以避免對陰極預防系統的不利影響。

D.電位監測：對於嵌入混凝土結構的陽極，需提供足夠的剛性絕緣間隔器和附件以固定陽極位置並防止在混凝土澆置和振動期間產生短路。應在混凝土澆置期間監測陽極與鋼筋(陰極)之間的電位，確保無短路產生。

③系統安裝

A.鋼筋電連通性測試：

陰極保護施工前需先確認結構物鋼筋的電連通性。鋼筋間電連通性的確認為量測鋼筋間的電阻，且電阻值不得超過 1 Ω。若發現電連通性不良的地方，應予改善。

B.鋼筋負極的連接：

每個陰極保護區域應提供多個(最少兩個)負極電纜連接用於電流輸送，並至少一個測試連接用於電位量測。每個區域內所有負極連接和測試連接之間的電氣連續性必須測試，且電阻應小於 1.0 Ω，電纜與鋼筋的連接方法應確保長期電纜-鋼筋電阻小於 0.01 Ω。連接完成後，混凝土表面的修復應使用符合 EN 1504 之材料與方法施工，以確保耐久性與導電性能。

C.陽極安裝與連接：

安裝必須依照設計圖說及產品說明書並受控的環境條件下進行。陽極系統必須避免與鋼筋、金屬組件或混凝土中的任何雜鋼發生短路。外加電流系統的每個區域應提供多個正極電纜與陽極連接，以確保任何單一連接失效時，該區域的性能不致顯著受損，區域內任何單一陽極或電纜失效不應使局部區域陽極電流密度降低超過標稱陽極電流密度的 10%。

D.監測感測器安裝：

每個區域必須配備至少兩個永久嵌入式的參考電極，用於監測輸出電壓和輸出電流。永久安裝的參考電極或其他感測器，若放置在包含鋼筋或其他嵌入鋼鐵的混凝土修復處或附近，可能會受到不利影響或變得失去代表性，故應避開已進行鋼筋修復的混凝土區域，儘可能放置在距離包含鋼筋的混凝土修復處至少 500 mm 的位置。

E. 電氣安裝與測試

所有電氣作業應符國家安全標準，對於沒有覆蓋層或電氣屏障以防止人畜直接接觸的陽極系統(如導電塗層)，供電電

壓必須限制在 24 V DC。安裝完成後應根據品質計書進行測試，測試內容包含所有電路的極性檢查、所有電路的連續性檢查、所有電路和電流系統監測區域的絕緣檢查等，並詳加記錄。

④陰極保護系統的調試

A.目視檢查

必須對陰極保護系統及其所有組件進行完整的目視檢查，確認所有組件和電纜已正確安裝並受到保護。埋入或嵌入的組件應在回填或澆置混凝土之前進行檢查，對於水下的組件，則需由潛水員或攝像機進行。

B.預通電測量

在對外加電流系統進行通電之前，每個區域必須測量並記錄陽極與鋼筋之間的電阻、鋼筋與嵌入式參考電極之電位差、達到陰極保護所需的計算電流、陽極電纜連接和陰極電纜連接的電阻和連續性等參數。

C.初步通電與調整與性能評估

系統應以低電流輸出開始通電，電流應在規定的時間內逐漸增加到設計電流密度。必須調整電流輸出，以確保鋼筋的穩態電位處於設計所要求的範圍內。

初步性能評估應在系統初次通電或安裝後至少 28 天進行，以確保系統已穩定。評估內容包括測量所有操作參數(如電流、電壓)、測量瞬時斷開電位、測量直流電源切換至恆定開路後電位的衰減等。

D.外加電流系統的保護電流調整

如果保護標準未達到或未來可能無法達成，則必須進一步調整電流輸出。在進一步調整後，必須至少間隔 28 天重複進行上述性能評估。

5.1.5 品質管制

1. 基本檢查

(1)一般規定

①為確保橋梁結構物的防蝕性，必須加強各階段防蝕相關的材料及施工檢查並擬定檢查計畫。橋梁施工之檢查工作除需做一般檢查外，同時應實施耐久性防蝕之相關檢查。表 5-6 為現場耐久性防蝕施工之相關主要檢查項目和檢查單位。

②擬定檢查計畫時，需要考慮於材料進料、施工中、完工後的各階段都能檢查耐久性防蝕所要求的性能。

③若要採用新材料、新施工法時，於檢查計畫內需要明確記載所要求之性能的檢查方法、明確把握所需性能，並制定適當檢查計畫及檢查方法。

④對於有關耐久性防蝕的檢查，如果未能確保所需要的性能時，其處理方法應於檢查計畫中記載。各檢查中有關合格與否或不能判定處理方法者，須事先檢討並記載於檢查計畫內。

表 5-6 耐久性防蝕之主要檢查項目

階段	檢查項目	檢查內容
進料	混凝土之品質確認出貨證明相關文件	種類、水膠比等所須品質
	加工鋼筋	形狀尺寸、加工之品質
	耐腐蝕鋼筋	確品質基準與確認無任何構造性質之傷害
	施工用附屬鋼件	種類品質、避免異質金屬之接觸
	新材料	新材料、新技術相關之資訊及維護管理計畫
混凝土澆置前	模板	穩固性
	間隔物	測定其間隔是否足夠、穩固於否
	保護層	保護層厚度
完成後	混凝土的表面	目視檢查
	保護層	保護層厚度檢測記錄

(2) 進料檢查

①混凝土品質：混凝土澆置作業前務必依施工規範規定就混凝土種類、水膠比等所須品質進行確認。

②加工鋼筋：應確認其形狀尺寸、加工之品質，並考慮搭接部位之接頭處理，鋼筋之彎紮組立及交叉部位，應事先確認設計圖以便鋼筋無束制性的組合。

③耐腐蝕鋼筋：包含鍍鋅鋼筋與環氧樹脂鋼筋，應確認合乎所需之品質基準與確認無任何構造性質之傷害。現場若有對鍍鋅鋼筋或環氧樹脂鋼筋作加工時，若有裸露面或是塗層損傷時，應對其作修補處理。

④施工用附屬鋼件：

A.確保有關支墊或間隔器等施工間隔材料為指定之形狀尺寸。

B.被埋在混凝土之施工附屬鋼件要確認所需要之種類品質，且，避免異質金屬之接觸，以免產生腐蝕而傷害構造物之耐久性。

(3) 施工檢查

①模板：模板要依指定之尺寸組合，並檢查確認其穩固性，以免施工時變形、移動。混凝土澆置中若模板變形、移動，鋼筋組立之穩固性即受影響，而無法確保鋼筋保護層之厚度，故需要確實檢查所須之模板支撐及其穩固性。

②間隔物：應檢查確認支墊或間隔器依所須之個數配置在適當位置，並確認支墊或間隔器固定穩固，以免混凝土澆置中移動。當大規模構造物之鋼筋組合後，若要再確認鋼筋表面和模板內之間隔更加困難，故在組合鋼筋時應適時的測定其間隔是否足夠。

③保護層：應檢查確認組立後鋼筋和模板內面之間隔可達到所需之保護層厚度。鋼筋組合後若長期放置，必須於混凝土澆置前再度針對鋼筋配置確認，如鋼筋的保護層厚度、鋼筋表面防蝕與模板脫模劑等。

A.模板與保護層墊塊安裝好後，混凝土澆灌前，應按每[10][ ]m^2一點檢測鋼筋保護層的厚度，其正偏差不應大於 10 mm，且不得有負偏差，檢測不合格時應立即進行校正。

B.橋塔、橋墩、上部結構、基礎、橋台、翼牆、擋土牆、護欄等構造物於混凝土養護拆模完成後，應採用非破壞檢測方式進行保護層厚度檢驗，採用非破壞方法檢測時，所用儀器應進行校準。非破壞檢測方法宜根據保護層厚度按表 5-7 選擇，檢測儀器的精度應滿足表 5-8 之規定。

表 5-7 不同鋼筋保護層厚度的檢測方法

保護層厚度(cm)	檢測方法
≦6	電磁感應技術
>6	雷達探測技術

表 5-8 檢測儀器之精度

保護層厚度(cm)	檢測精度(mm)
<5	±1
5~6	±2
≧6	±3

C.混凝土保護層厚度檢測的結構部位，應根據結構構件的重要性選定。檢驗批可按構件類型或時間段劃分。同類型構件按其總數的 10%抽取構件(且不少於 10 個)，每個構件原則上選擇 3 處進行保護層厚度檢測，當構件體積大於[1000][ ]m^3時，每[1000][ ] m^3 增加 1 處，所餘數量未足[1000][ ] m^3 但超過[300][ ]m^3時再增加 1 處。

D.每處受檢部位應選擇有代表性的最外側 12 根受力鋼筋(主筋及箍筋)進行混凝土保護層厚度之檢測，每根鋼筋選擇 3 個代表部位檢測。

E. 不合格之研判及處理

(a) 單處測點的判別：每處受檢部位之保護層厚度檢測結果中，最小值低於設計值 5 mm 或最大值高於設計值 18 mm 時，檢測結果判定為不合格。

(b) 檢驗批的判別：受檢構件全部鋼筋保護層合格點率不小於 95%，該檢驗批鋼筋保護層厚度判為合格。當鋼筋保護層合格點率小於 95%，但不小於 85%時，可抽取相同數量的構件進行檢測，且按兩次抽樣總和計算的合格點率為 95%及以上時，該檢驗批鋼筋保護層厚度可判為合格；否則，該檢驗批鋼筋保護層厚度為不合格。

(c) 對於檢驗批保護層厚度檢測不合格之構件，應增加檢測頻率以確認該構件不合格之範圍，並由承包商提出改善方案，確保耐久性設計年限，改善方案應經工程司核可，改善方案之費用及衍生費用，概由承包商負擔。

(4) 完成後檢查

①混凝土表面：為避免鹽份易於滲入，可用目視檢查確認表面無產生充填不良(如孔洞、蜂窩等)及有害之裂縫或破損等。若有裂縫、破損或空洞之情形，實質上仍然會導致混凝土降低保護層之功效，所以務必要用目視檢查確認其是否發生而加以處置，並確定認修補工法與材料之適用性。

②保護層：拆模後可用非破壞檢查儀器確認保護層厚度是否適當。保護層之檢查除在組合後之鋼筋配置檢查中施作外，仍會因混凝土之澆置而使鋼筋及間隔移動，使保護層之厚度起變化。因此澆置完成後之保護層測定仍應實施抽驗。保護層的檢測記錄將成為橋梁維護管理的重要資料。保護層之非破壞檢測儀器測定前都要校驗，同時依照測定方法設定適當之容許值。測量鋼筋保護層厚度可以使用磁漏法或雷達波法。

③檢查報告書：有關鍍鋅鋼筋與性能之檢查事項應用書面記錄之。有關鍍鋅鋼筋與之相關施工、檢查記錄為便於交給維護管理部門，應整理成書面報告。做成鍍鋅鋼筋與對策相關書面檢查項目可列舉以下各點：

A.實際使用水泥之種類、配比、新拌混凝土工作性、氯離子含量、抗壓強度、氯離子傳輸係數等試驗結果。

B.混凝土澆置前及完成時之保護層測定結果。

C.完成時之破壞或空洞、有害破裂等之初期缺點位置、可知狀況及照片。

D.有關新材料・新技術相關之資訊及維護管理計畫。

E.施工時之主問題點和處置方式。

2. 混凝土抗氯離子性能

混凝土耐久性防蝕之品質要求，除了一般之檢驗項目外，應特別對混凝土抗氯離子性能進行檢驗，相關檢驗與驗收標準說明如下：

(1) 試驗方法

混凝土抗氯離子性能可以氯離子非穩態傳輸係數試驗來進行檢測，而試體製作、養護和試驗可按北歐 NT BUILD 492 試驗法辦理。

(2) 混凝土抗氯離子性能的檢驗與驗收

①混凝土抗氯離子性能試體之數量：樁、基礎、墩柱、大梁及其它混凝土，同一配比的混凝土每累計澆置[1000][ ] m^3 隨機取樣 1 組，所餘數量未足[1000][ ] m^3 但超過[300][ ] m^3 時應增加 1 組。

②每組試體由六個試體組成，包含 28 天和 56 天兩個齡期，以 28 天混凝土的氯離子傳輸係數做為品質控制標準，以 56 天混凝土的氯離子傳輸係數做為評定合格與否之依據，同一組試體製作時試樣應取自同一混凝土運輸車之混凝土。

③以 3 個試體的氯離子傳輸係數平均值做為該組的代表值。若三個試體中，最大值與中間值的差、以及最小值與中間值的差皆超過中間值的 15%，則以中間值為代表值。若僅有最大值或最小值其中之一與中間值的差超過中間值的 15%，則剔除該異常值，並以其餘兩個數值的平均值做為代表值。

④混凝土氯離子傳輸係數的驗收應分批進行，每批驗收的混凝土應由氯離子傳輸係數設計要求值相同、配比和產製方式相同的混凝土組成，承包商可按分項工程或估驗期程劃分每批驗收的組數。

(3) 不合格之研判及處理

①任一驗收批混凝土氯離子傳輸係數試驗結果超過合格統計標準時，代表該驗收批取樣頻率的混凝土數量為不合格，該驗收批所代表之混凝土數量及其連帶受影響之結構體，承包商應提出改善方案，確保耐久性設計年限，改善方案應經工程司核可，改善方案之費用及衍生費用，概由承包商負擔。

②如工程司或承包商對試驗結果懷疑時，得要求辦理鑽心試驗(鑽心試驗以一次為限，試驗單位由業主指定)，鑽心試驗取樣之時機以達氯離子傳輸係數規定齡期為主，最晚不得超過規定齡期 14 天。其試驗方法依 CNS 1238 辦理，鑽心試體直徑為 100 mm，長度至少 50 mm。每一混凝土可疑處應取 3 個代表性試體，取樣位置由工程司決定，以對結構體影響最小為原則。若試驗前發現試體於取出或處理過程中有損壞之現象時，應重新取樣。鑽心試體之氯離子傳輸係數試驗結果大於耐久性設計要求之上限時，代表混凝土不合格，應依上述規定辦理，鑽心試驗費用由提出者負擔。

③不合格之混凝土構造物及其連帶受影響之結構體應於收到工程司之通知後 30 日內進行處理。

3. 陰極保護系統檢查

(1) 犧牲陽極保護系統

品質管制要求與紀錄項目可參考 Nace SP0216，化學成分與電化學特性，依不同材質參照對應 CNS 規範，如下所示：

①品質檢測

A.化學成分：鋅合金(CNS 13519)、鋁合金(CNS 13520)、鎂合金(CNS 13518)。

B.電化學特性分析：每生產 15,000 kg 陽極(或甲、乙雙方協議)及其餘數應各採樣 1 次，鋅、鋁合金依 CNS 13520 或 CNS 13521-1、鎂合金依 CNS 13521 或 ASTM G97 進行試驗。

②目視檢查

A.陽極材料目視檢查有助評估其消耗程度、安裝缺失等。目視檢查可辨識受保護構件腐蝕引發之裂縫、銹漬、分層、剝落等。

B.檢查範圍與細節程度須與執行人員資格、結構狀況及重要性相符。目視檢查雖可由技術員或受訓工程師執行，但狀況評分或性能判定應由 AMPP 認證陰極保護專家執行。

③電流量測

A.量測犧牲陽極保護系統之電流需於混凝土外設置陽極與鋼筋電氣連接，可將兩者導線引至接線盒。電流可用數位電流表串聯量測，或量測陽極與鋼筋間已知電阻分流器兩端電壓換算。若使用分流器，其電阻應小於陽極與鋼筋間交流電阻之 10%，但亦可故意使用較高電阻分流器限制電流。

B.表面塗佈陽極(如熔射鋅/鋁)可隔離已知面積之一段陽極，透過開關與周圍陽極連接，量測隔離段與結構間電流即可精確得知電流密度。隔離段面積不得小於 1 m^2(10 ft^2)。

C.可設置與結構鋼筋同材質之探棒量測流出鋼筋之電流，保護層厚度與混凝土組成相同，探棒一端接線引出混凝土外，接點塗環氧樹脂。

④電位量測

A.系統性能亦可透過量測鋼筋電位或極化發展與衰減判定。電位量測較電流量測困難但資訊較多，需使用精確穩定之參考電極(依 NACE Publication 11100)。

B.參考電極可埋入鋼筋附近，導線引至接線盒便於量測，特別適用於遠端監測或難以到達之構件。埋入參考電極之選用、測試、安裝與應用須符合 NACE Publication 11100。

C.結構易於到達時亦可使用手持可攜式參考電極。量測表面塗佈陽極下鋼筋電位時，常於陽極開孔接觸混凝土表面。但使用可攜式參考電極常會濕潤混凝土表面，導致造成顯著誤差。碳酸化或表面污染物亦會影響測值，建議使用電位井或電解橋以更準確量測真實鋼筋電位。

D.若極化發展或衰減不足，可由電流量測判斷原因。

(2) 外加電流陰極保護系統

陰極保護系統之品質管制要求與紀錄項目，可參考 ISO 12696 或是 Nace SP0290 之規定，應紀錄之品質管制項目如下：

①品質檢測紀錄

品質計畫、由此產生的品質文件、目視檢測和測試結果均應構成系統安裝的永久記錄。

②安裝與測試報告

陰極保護系統的安裝和調試報告，建議至少包括以下內容，所有測量數據應保存至少設計年限或直到系統完全拆除，且報告應清楚指出是否達到腐蝕控制目標，並對偏離目標的區域提出改進建議。電氣連續性

A.工程總體描述、工程相關人員(例如客戶、設計工程師、監造工程師、承包商、分包商)以及負責陰極保護系統設計、監督和調試的關鍵人員及其各自職責。

B.系統安裝和測試所依據的方法聲明或規格和圖紙的副本，標明所有偏差或變化，以及設計數據計算的副本。

C.完整的安裝和測試工作的詳細描述，包括下列項目：

(a) 陽極安裝位置、材料與重量。

(b) 整流器型號、設置與輸出電流。

(c) 初始測試數據(電位、極化值、電流密度)。

(d) 定期測量結果及維護記錄。

(e) 關鍵日期。

D.竣工圖說、詳細說明安裝及其組件，足以提供未來檢查、維護和系統及其主要組件重建的所有要求。

E.在系統通電前和通電期間以及初始系統性能評估期間採集的所有測量及測試數據，與使用的性能評估數據和數據的解釋。

F.系統「最終運行」條件的記錄。

G.指定的永久記錄的副本。

H.對陰極保護系統的任何修訂建議。

I. 必要的其他文件。

5.2 鋼橋

5.2.1 塗裝

1. 塗裝系統施工圖說案例

(1)構件塗裝系統

構件塗裝系統分為外部塗裝系統、內部塗裝系統及特殊部位塗裝系統。外部塗裝系統及內部塗裝系統之選擇，應依構件所處之腐蝕環境辦理。直接受陽光照射或與大氣環境直接接觸之部位，應使用外部塗裝系統。未直接受陽光照射且不與大氣環境直接接觸之部位，得使用內部塗裝系統。特殊部位塗裝系統包括：鋼橋面板塗裝系統、螺栓接合部位塗裝系統及工地銲接部位塗裝系統。

構件外部塗裝系統(A3~A5 及 AX~AX^{+})，適合使用於如圖 5.13 及圖 5.14 所示之部位。構件內部塗裝系統(B1~B3)，適合使用於如圖 5.13 及圖 5.14 所示之部位。其中圖 5.13 所示之 B1 塗裝系統，係適用於不與混凝土結合之鋼板。上鋪瀝青混凝土之鋼床板系統中(如圖 5.14 所示)，D1 塗裝系統使用於鋼床板及鋼箱梁上翼板上表面，D2 塗裝系統使用於鋼床板系統之鋼箱梁上翼板內面。

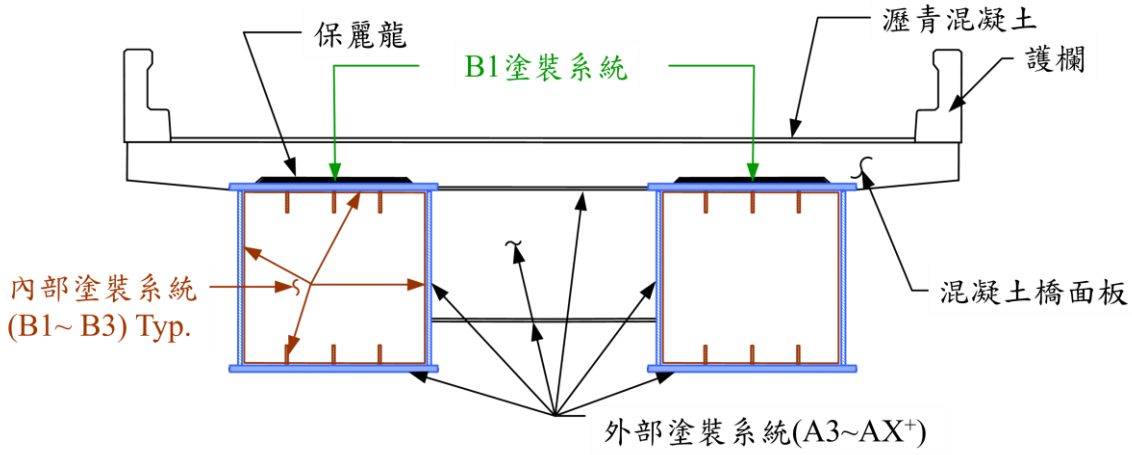


圖 5.13 含混凝土橋面板之鋼橋塗裝示意圖[80]

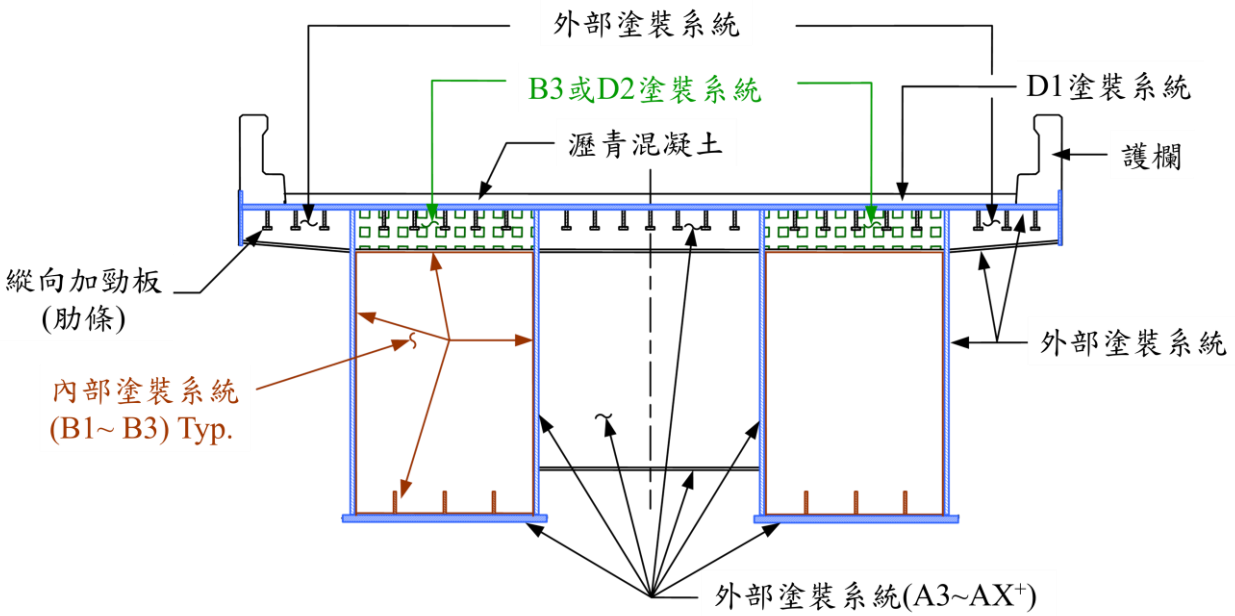


圖 5.14 鋼床板及鋼箱梁塗裝示意圖[80]

(2)螺栓接合部之塗裝系統

鋼橋以高強度螺栓接合時，其接合部(如圖 5.15 所示)之塗裝系統應依下列之規定辦理：

①接合密貼面，包括構件接合面與接合板接合面，採用 E1 塗裝系統。

②外露接合板外表面及外露螺栓頭、墊圈與螺帽，採用 E2 塗裝系統。

③箱梁內或鋼橋墩內之內部接合板外表面及外露螺栓頭、墊圈與螺帽，採用 E3 塗裝系統。

④與 RC 橋面板接觸之接合板外表面及外露螺栓頭、墊圈與螺帽，採用 E4 塗裝系統。

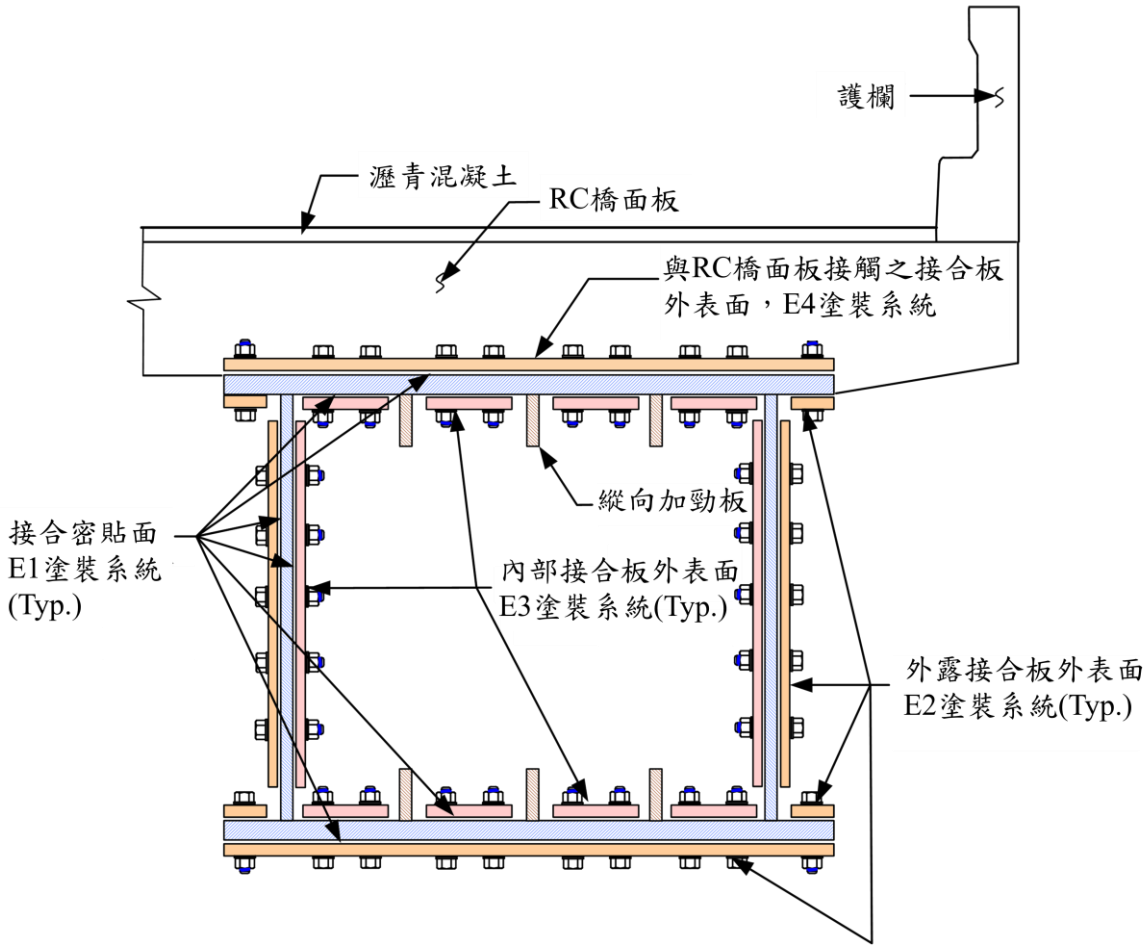


圖 5.15 螺栓接合部塗裝系統示意圖[80]

(3)對構件角部進行圓弧化處理

構件的邊緣角部難以確保膜厚，為提升塗裝壽命，進行圓形處理至關重要。為獲得與一般部位相當的塗膜性能，建議採用半徑 2R 以上的曲面型式(C5(含)以上環境建議採 3R 以上曲面型式)。角部曲面形型式意圖詳見圖 5.16。

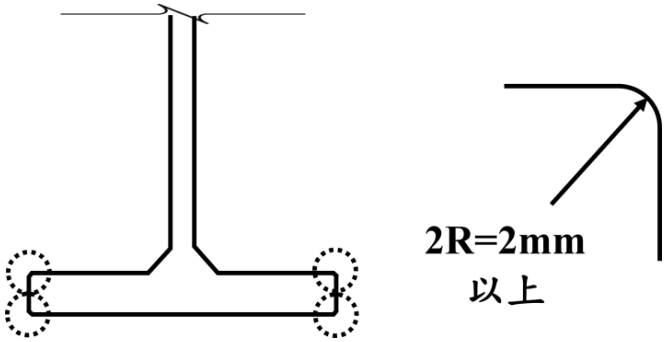


圖 5.16 角部曲面型式示意圖[92]

2. 製作及施工注意事項

(1)一般

①工期

A.由於塗裝是最後一道工序，因此很容易出現進度限制，例如前幾道工序的延誤，或運輸和安裝工序的限制，從而難以確保原計畫的工期。但是，為了確保良好的施工品質，制定一個在塗裝和養護期之間留出適當間隔的施工計畫非常重要。在冬季，還需要考慮的是，由於氣溫下降，塗裝間隔可能會更長。

B.如果產品在工廠存放較長時間，塗裝表面在安裝到現場之前就會褪色，導致接頭塗裝部分與現場塗裝部分的色調出現差異。在這種情況下，建議在選擇色調時考慮到，某些顏色的差異比其他顏色更不明顯。

②結構型式

在鋼筋混凝土橋面的I型梁橋中，大梁通常使用支撐架和手動張拉機等架設設備在現場組裝，這會導致現場出現許多區域(例如支撐架的現場接頭和支撐點)在架設過程中發生塗裝損壞。為了確保良好的塗裝品質，必須事先充分考慮構件劃分方法、支撐架的施工方法。採用鋼-混凝土複合橋面或預製預力混凝土橋面時，主梁數量較少的結構，無需現場安裝模板，結構簡單，所需構件數量少，可有效減少安裝過程中的塗裝損傷。

③塗裝系統選擇

A.為防止運輸及安裝過程的塗層損壞，除原本的運輸及安裝對策外，應選擇熱固性塗裝系統(如環氧樹脂系或氟碳樹脂系等)。

B.冬季施工時，應改善塗裝環境，選用乾燥速度快的油漆，並使用暖風乾燥。

④運輸及安裝對策

鋼橋的運輸和架設需要用起重機吊裝、千斤頂臨時支撐、鋼索牽引等，因此在確定吊裝五金配件的位置和結構時，要盡量避免對塗膜造成損傷，並配合運輸和架設計畫。

⑤安裝材料的考慮

模板支架和施工架的懸吊配件，或用於安裝維護設備的配件的位置，塗裝可能會很困難，並且可能無法獲得良好的塗裝品質。此外，在安裝完成後拆卸構件時，如果拆卸區域不平整，該區域的漆膜可能會成為薄弱點。因此，在安裝構件時，必須考慮如何防止這些區域成為將來重新塗裝或漆膜的薄弱點。

(2)標記

構材標記應盡可能避免使用油性塗料，若使用則須在塗裝工序前完全移除。未完全移除油性塗料可能導致塗膜膨脹或剝落等缺陷。此外，鑽孔後孔周圍的毛邊(翻邊毛刺)可能妨礙適當底層處理或難以確保塗膜厚度成為塗裝弱點，需用研磨機具等完全去除。

(3)切割及銲接

①切割部位施工

構材切割部位表面不易平滑，特別是邊緣易形成尖銳邊緣。組裝後切割部位需依需要進行倒角處理，確保所需平滑度以獲得規定塗裝品質。尖銳邊緣需進行 2R 以上倒角(C5(含)以上環境建議採 3R 以上倒角)。

②銲接部位施工

銲接部位相較一般部位易產生塗膜缺陷並提早發生銹蝕，需注意以下事項並採取適當措施後塗布塗料。銲接接頭品質需符合相關規定。

A.如果銲接後立即塗裝，可能會出現氣泡。這是氫氣造成，是由於銲接中溶解的氫氣隨後從銲道表面釋放而產生的。為防止

氣泡，應避免銲接後立即塗裝，並在氫氣完全釋放後再進行塗裝。如果無法避免銲接後立即塗裝，則有必要在塗裝前對銲接處進行加熱，以加速氫氣的擴散和釋放，並減少銲接中殘留的擴散氫量。需要注意的是，必須謹慎選擇加熱溫度，以免影響鋼材的材料特性。

B. 必須特別注意加強筋、角撐板等角銲縫的起始和終止處，因為這些部位容易出現不平整的表面。必須避免銲蝕、搭疊、銲冠過高等銲接缺陷，同時也要確保達到規定的塗裝品質所需的平整度。

C. 銲渣和銲道上粘附的銲蝕、搭疊和凹坑會造成塗裝缺陷，因此在塗裝前必須改善任何銲道不規則性並去除任何異物或表面刮痕。

(4) 工廠塗裝

在工廠塗裝中，為了確保能夠可靠地發揮塗裝性能的塗裝品質，需要正確的塗裝管理以及品質管理和檢查。因此，在塗裝前，徹底建立包括塗裝管理系統和檢查在內的品質管理系統至關重要。

工廠塗裝時，構件與臨時支撐用墊木接觸部位塗膜可能損傷，或補修部位與一般部位外觀差異產生違和感。為防止墊木接觸部位塗膜損傷，可使用約 5 mm 厚橡膠片疊加約 0.3 mm 厚聚乙烯板做為保護片，置於塗裝構件下，避免直接接觸墊木。

(5) 摩擦接合部的處理

高強度螺栓接合的摩擦接合部若沒有塗裝，為防止全工廠塗裝方式下工廠保管、架設期間銹水污染塗裝面，建議對連接板、母材、填板塗布無機鋅粉底漆。僅靠無機鋅粉底漆無法確保長期防蝕性，工廠塗裝至現場塗裝間隔應控制在 1 年內。間隔過長時，需調整工期避免超過 1 年。如迫不得已超過 1 年，建議採取覆蓋防護布等保護無機鋅粉底漆塗膜。

(6)運輸及架設

①存放

塗裝後的構件最好存放在室內，但由於室內空間不足，許多情況下會被存放在室外。長時間存放在室外會導致塗裝表面褪色，從而導致現場塗裝的接縫處色調出現差異。此外，當室內以改質環氧樹脂塗料塗裝在陽光直射的區域時，可能會因紫外線而變色。由於變色僅限於漆膜表層，因此通常不會影響漆膜的性能。但是，為了防止漆膜受損，需要盡可能縮短工廠塗裝和安裝之間的時間間隔。

②運輸

A.構材清掃-工廠內保管塗裝構材若有明顯污垢，建議於運輸前在設備較佳、作業性優的工廠水洗至清潔狀態。

B.附著鹽分-現場塗裝部若附著鹽分將降低塗膜層間附著性，於海岸地區保管、海上運輸或長距離臨海運輸後構件可能附著鹽分，依其含量限制塗裝前須進行水洗。其構件容許鹽分附著量，依雙方契約、引用規範或依使用塗裝系統及耐久性要求不同從 20~100 mg/m^2不等，其一般建議測量附著鹽分量，NaCl 超過 50 mg/m^2時需水洗。瑳

C.堆疊-構材堆疊需穩定，避免振動或衝擊損傷塗膜，構材間或與緩衝材間不得摩擦，用鏈條或鋼索固定時需使用緩衝材防護。

D.覆蓋保護-使用拖車運輸，可能遭泥水濺及時，應對運輸部位實施覆蓋保護。若為海運，對於難以水洗的部位(例如鋼梁螺栓接合部位、箱型梁內部)更應實施保護，以防止鹽分附著。

E.裝卸-裝卸需按預定方法(如主梁吊點用件處吊掛)進行，避免塗膜損傷。吊裝鋼索安裝移除時易傷塗膜，需特別小心。非專用吊具吊裝時，建議使用尼龍吊帶或軟材，防止塗膜損傷，此原則適用保管、運輸、架設全過程。

③架設時的保護

架設期間塗膜易受損傷，需採取以下防損措施與安排：

A.臨時放置構件支撐盡可能於無機鋅粉底漆部位，若於塗膜面支撐，需使用緩衝材。

B.銹水對策-使用經熱浸鍍鋅處理的臨時螺栓、導孔沖銷，並檢查臨時設備預先排除銹水原因。

C.油對策-架設時液壓機械或燃料油、潤滑油可能附著塗膜，需檢查臨時設備防止漏油，發現油污立即移除。

D.緩衝材-施工架鏈條、夾具、虎鉗、鋼索與構件接觸處，支撐架與構材接觸處均插入緩衝材避免塗膜損傷。

E.混凝土澆置時注意事項-現場澆置混凝土橋面板時，模板可能漏出水泥漿影響塗裝，建議預先用填縫膠防止，施工中若發現水泥漿流出，立即擦拭或清洗。

(7)塗膜改善與塗層修補

①塗膜因噴塗之外觀缺陷、破壞性檢驗，或因構件搬運、儲置、架設與現場支撐拆除後，所造成之塗膜局部損傷均須加以修補。

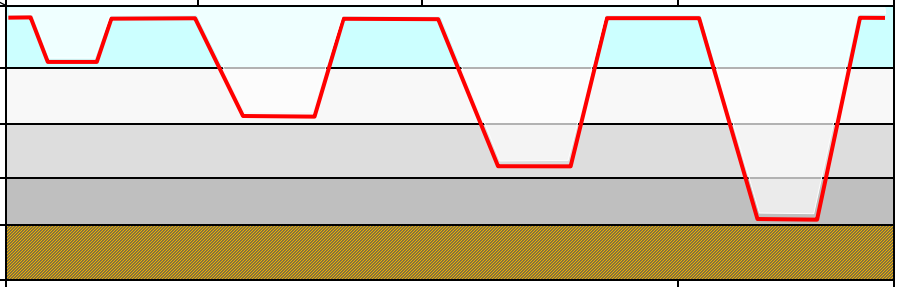
②塗膜厚度不足時，則補噴塗至規定最小乾膜厚度。塗膜過厚且影響安裝或防蝕功能時，應將其研磨至規定之最大乾膜厚度值以下。

③塗層修補作業之程序與塗層之損傷程度息息相關，各種塗層損傷之程度與其修補程序應依表 5-9 所示之方法辦理。若採用其他修補程序時應提出相關技術文件並經工程司認可後據以施作。

④塗層損傷至鋼材表面外露時，應採用動力工具進行表面處理後，再依原塗裝系統各塗層之規定實施補漆作業。

⑤塗層損傷未及至鋼材表面時，得採用砂紙研磨或手工具進行表面處理後，再依原塗裝系統各塗層之規定實施補漆作業。

表 5-9 塗層損傷程度與修補施工方法[80]

<table>
<tr><td>塗層損傷程度
塗層與施工方法</td><td>面漆塗層</td><td>面漆與
中塗漆塗層</td><td>面漆、中塗漆
與底漆塗層</td><td>至鋼材表面</td></tr>
<tr><td>[面漆塗層]</td><td colspan="4" rowspan="5">  </td></tr>
<tr><td>[中塗漆塗層]</td></tr>
<tr><td>[底漆塗層]</td></tr>
<tr><td>[無機鋅粉漆層]</td></tr>
<tr><td>[鋼材]</td></tr>
<tr><td>表面處理作業</td><td colspan="3">砂紙研磨處理</td><td>電動工具處理</td></tr>
<tr><td rowspan="2">底漆施作</td><td colspan="2" rowspan="2">不適用</td><td colspan="2">環氧樹脂鋅粉漆</td></tr>
<tr><td>1道40 μm</td><td>2道共80 μm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">中塗漆施作</td><td rowspan="2">不適用</td><td colspan="3">依塗裝系統之中塗漆規格塗料施作</td></tr>
<tr><td>1道達規定膜厚</td><td colspan="2">至少2道達規定膜厚</td></tr>
<tr><td rowspan="2">面漆施作</td><td colspan="4">依塗裝系統之面漆規格塗料施作</td></tr>
<tr><td>1道30 μm</td><td colspan="3">2道共60 μm</td></tr>
</table>

3. 新設塗裝施工

(1) 塗裝工程

新設橋梁的塗裝工程，可大致分為 1.廠內施工至中塗漆，現場二道面漆塗裝；2.廠內施工至第一道面漆，現場第二道面漆塗裝；3.廠內施工至第二道面漆，現場補修。表 5-10 說明在不同施工環境下，不同施工順序與塗裝品質管控的優缺點，故構件之塗裝系統設計需考量施工環境。

表 5-10 塗裝系統廠內與現場噴塗面漆優、缺點比較表[80]

項目	廠內施工至中塗漆， 現場二道面漆塗裝	廠內施工至第一道面漆， 現場第二道面漆塗裝	廠內施工至第二道面漆， 現場補修
優點	1.色澤統一。 2.面漆與面漆無層間剝離問題。 3.碰傷修補較單純。	1.色澤統一(無色差)。 2.可縮短中塗漆與第一道面漆之塗裝間隔，改善第一道面漆與中塗漆之附著性。	1.不會污染現場施工環境。 2.對現場施工環境污染最輕微。 3.整體塗膜施工品質最易掌握。 4.已完成之面積在工地受質疑的變因較少。 5.不受塗裝間隔影響。 6.不會有人員墮落之虞。 7.交通維持所需之防護較少。
缺點	1.塗料用量耗損量較大，並造成周遭污染。 2.易造成附近擾民糾紛及鄰損糾紛。 3.因跨河段水氣易影響中塗漆與面漆接合面，而造成面漆脫落。 4.車輛排放油垢污染中塗漆，不易清除完全，造成面漆保用期限縮短。 5.因地形影響，不易防護 6.因施工而影響交通之暢順，交通維持防護需求較高。 7.死角處不易上塗完整。 8.塗裝間隔較長，表面易受環境污染造成清洗不易。 9.中塗對面漆間之塗裝間隔受限。 10.塗裝間隔超過須加塗黏結層(tie coat)。	1.塗料用量耗損量大，並造成周遭污染。 2.易造成附近擾民糾紛及鄰損糾紛。 3.因跨河段水氣易影響面漆與面漆接合面，易造成第二道面漆脫落。 4.車輛排放油垢污染表面，不易清洗完全，導致第二道面漆保用期限縮短。 5.因地形影響，不易防護 6.因施工而影響交通之暢順，交通維持防護需求較高。 7.塗裝間隔較長，表面易受環境污染造成清洗不易。	1.修補處與舊塗膜稍有色差。 2.要注意碰傷修補之正確程序。 3.膜厚不足時於工地修補不易。
塗裝品質管控	良	優	最優

(2)表面處理

①裸鋼面表面處理

裸鋼面表面處理包括一次及二次表面處理，一次表面處理係指未塗裝裸鋼之表面處理或含預塗底漆表面全面處理至裸鋼之表面處理。二次表面處理係指去除局部銹蝕、污染物或鬆散之塗膜，但保留完整舊塗膜(含預塗底漆)之表面處理。一次表面處理一般以噴射法為主，二次表面處理一般以動力工具為主，另可採用局部噴射、局部手工具及局部機械打磨等方式辦理。

使用噴射法進行表面處理時，應依據設計使用年限、預算成本、塗料選擇、設備種類、所需之粗糙度等級與回收之可行性、所需清潔度要求、施工環境適用性等，選擇合適的噴射方法、噴砂材料與規格等級。

表面處理所使用之噴砂材料，應具有清潔、易清理及不得污染構件表面之特性。表面處理時應依據施工方法與所需之粗糙度，選擇適當之材料種類與尺寸等級。鋼材表面處理後必需考慮能維持其清潔度，故若使用噴射法時，所使用之噴砂材料及噴砂所用噴出之空氣，均需確認清潔度與乾燥度。

施工前應量測施工環境之相對濕度，當超過 85%時不得進行施工。施工中應每四小時或於必要時量測鋼材表面溫度以及週遭環境之相對濕度、露點溫度，當相對濕度大於 85% 或鋼材表面溫度以及露點溫度差在 3°C 以內，即暫停作業或採適當因應措施。施工地點靠近海邊或於海上，宜有遮蔽措施以阻擋海風挾帶之氯鹽。

②熱浸鍍鋅面塗裝前處理

熱浸鍍鋅面塗裝前，確實執行表面處理，能確保塗膜在預期耐久性等級內良好附著於熱浸鍍鋅面，以達到額外阻絕保護效果。熱浸鍍鋅鋼材可依曝露時間長短分為：新鍍鋅鋼材、部分風化鍍鋅鋼材及風化鍍鋅鋼材。塗裝前每一類型的處理方式不同，

其後續塗膜附著結果也不同。熱浸鍍鋅面塗裝前之表面預處理可區分為三步驟，分別為熱浸鍍鋅構件出廠前「表面平滑處理」及塗料塗裝前「表面清潔」與「表面粗化處理」。熱浸鍍鋅面塗料塗裝前必須清潔且無油脂、灰塵，鍍鋅層表面必須具備一定範圍的粗糙度以利塗膜長期附著。

③金屬熔射面塗裝前處理

有缺陷或損壞的金屬熔射層，在塗裝前應修補，以恢復金屬熔射層的防護功能。為延長金屬熔射層的使用壽命，金屬熔射面應立即進行封孔處理，以免腐蝕因子沉積孔隙中。在高度大氣腐蝕級別(C4)以上，符合 CNS 7797 金屬熔射層上，可採用塗料塗裝加強塗膜阻絕效果。塗料與封孔劑間必須相容且無礙塗料塗膜附著。金屬熔射面塗裝前表面必須清潔且無油脂、灰塵。

(3) 塗裝作業

①塗料品質的確認

塗裝前需確認使用塗料的品質，應使用有效期限內之塗料。

②塗料拌合

塗料拌合時應嚴格遵守塗料製造商對塗料拌合之稀釋、攪拌時間、靜置時間、使用及其他各項之規定。未經工程司之書面許可，不得任意變更其塗料配比、摻雜其他廠牌之塗料或採用任何之代用品。塗料混合後應於規定時間內噴塗完畢。

③塗裝方法

塗裝施工方法包括無氣噴塗法、空氣噴塗方法、滾塗方法及刷塗方法。使用時應以無氣噴塗法為主，如施工上有困難，經徵得工程司之認可，得改用手刷法或塗料供應商所建議之工法施作。使用噴塗法施工時，對於角邊、螺栓、銲接、扇形孔等處及其他不易噴塗之處，應以手刷法或滾塗法先塗刷一次，再以噴塗法全面塗裝。

所有塗裝工作，應依塗料之塗裝間隔規定施作。工作場所附近揚起之灰塵過多，足以影響塗裝工作時，承包商應採取有效措施，以防塵垢沾污新漆或未塗裝之鋼材表面。

採無氣噴塗時應依塗料廠商之產品說明書及施工條件，調整適當之空氣壓力。噴塗時噴嘴與噴塗面應保持適當之距離，一般以保持 25~38 cm 為原則，必要時應配合空氣壓力、構件幾何形狀及膜厚等調整。

噴塗方向應垂直於被塗物之表面，噴嘴之移動應平行於被塗物之表面，以避免前後端噴塗部位不均勻。噴塗面採多道噴塗時，道與道間噴塗之塗層應有噴幅寬度 1/3 至 1/2 之重疊。

④塗裝間隔

表面處理完成後應在 4 小時內進行防銹底漆之塗裝。表面處理完成後超過 4 小時未塗裝者，塗裝前應再檢查鋼板表面之清潔度，若已產生回銹，應再進行表面處理至規定之清潔度。

塗料之乾燥應採自然乾燥法。下層塗膜未達最低塗裝間隔時間或乾燥前，不得進行次一層之噴塗作業。各層塗料間之塗裝間隔時間應符合第 3 章之規定，並依據塗料之特性辦理。

⑤不塗裝部位

A.除契約另有規定，通常下列部位不塗裝：

(a) 銲接前，工地銲接部位及其相鄰接兩側各 100 mm 範圍內之區域，及對銲接部超音波探傷會有障礙之範圍(一般為對象板厚 t 之 6 倍以上)。

(b) 摩阻型高強度螺栓接合面。

(c) 埋入混凝土內之埋件及構件，但埋件及構件自混凝土表面算起 100 mm 深度內仍須塗裝。

(d) 會與軸件或滾輪等密著之接觸面或滑動面。

(e) 氣密空間之內露面。

B.不塗裝部位應於整體構件塗裝前，以膠帶貼附或其他適當方法隔離塗料。銲接部位若採膠帶貼附保護時，應於銲接施工前確認銲接面之清潔，必要時應以工具研磨或其他適當方法清潔之。

⑥施工環境

A.一般塗料塗裝時之大氣溫度應在 5℃~40℃之間，相對濕度應在 85%以下。

B.鋼板表面溫度應高於施工環境露點溫度 3℃以上，且不得超過 50℃。

C.但塗料技術文件另有規定者，從其規定。

4. 施工及品質管理

鋼橋塗裝的防蝕效果、外觀及耐久性在很大程度上取決於施工的優劣。因此，施工必須在充分的管理下進行。

施工前，應制定施工計畫書，確認作業內容，並明確規定管理項目及管理標準。施工期間，需透過記錄和現場確認，確保維持規定的品質及施工狀態。此外，還需充分考慮工程進度與安全。

(1)塗裝施工計畫書

塗裝施工計畫書應包括下列事項：塗裝系統說明、塗料之品名與規格、塗裝樣板、塗料之儲存與搬運、塗料檢驗、表面處理、塗裝施工方法與順序、成品檢驗及其它事項。

(2)施工記錄

施工記錄用於確認塗裝作業是否良好進行，並在塗膜出現異常時提供原因調查與對策的施工資訊，因此需適當記錄。

(3)表面處理的管理

表面處理檢驗項目包括表面清潔度檢驗、表面污染物檢驗及表面粗糙度檢驗等。

①表面清潔度與檢驗

A.表面清潔度：鋼材表面清潔度係指鋼材經表面處理後，可目視檢驗之清潔程度。所有鋼材表面於塗裝前，均應進行鋼材表面清潔度之檢驗。除契約另有規定外，以噴射法進行表面處理時，一次處理後之表面應至少達 Sa 2½等級，二次處理後之表面應至少達 PSa 2½等級。工具法僅可使用於二次表面處理，處理後之鋼材表面清潔度應達 PSt 3 等級。

B.表面清潔度檢驗：應以各等級之文字描述的清潔度定義為主，並輔以比對鋼材表面與標準照片之方式辦理。表面處理前各種銹蝕等級之鋼材，在噴射法表面處理後，其清潔度檢驗所使用之照片應採用該鋼材銹蝕等級之對應照片應參照 ISO 8501-1。各種鋼材表面條件與使用工具之表面處理時，其清潔度比對照片應參照 ISO 8501-1，比對照片編號如表 5-11。

表 5-11 鋼材銹蝕等級與表面清潔度對應照片編號表(ISO 8501-1)

銹蝕等級 / 清潔度等級	A	B	C	D
Sa 1(PSa 1)	--	B Sa 1	C Sa 1	D Sa 1
Sa 2(PSa 2)	--	B Sa 2	C Sa 2	D Sa 2
Sa 2½(PSa 2½)	A Sa 2½	B Sa 2½	C Sa 2½	D Sa 2½
Sa 3(PSa 3)	A Sa 3	B Sa 3	C Sa 3	D Sa 3
St 2	--	B St 2	C St 2	D St 2
St 3	--	B St 3	C St 3	D St 3
Fl	A Fl	B Fl	C Fl	D Fl

②表面污染物與檢驗

A.可溶性表面汙染

(a) 鋼材表面污染物係指鋼材經表面處理後，無法以目視檢驗之清潔度，如可溶性鹽類。

(b) 若有下列情況，應進行污染物之檢驗，其檢驗項目、方法與頻率應依契約規定執行。

ⓐ施工地點或噴砂所用之材料，有造成鋼材表面可溶性鹽沉積之疑慮者。

ⓑ表面處理前鋼材表面之銹蝕等級已達到 D 級者。

(c) 表面污染物檢驗目前以氯離子含量為主，其檢驗法除另有規定外，應依 ISO 8502-6 「以 Bresle 方式取樣與分析表面可溶鹽」及 ISO 8502-9「以電導計決定可溶鹽之現場方法」進行之。

(d) 其他污染物如含硫化合物、含氮化合物，應視施工現場之大氣環境，必要時於契約中訂定檢測方法、檢測頻率及合格標準。

B.表面粉塵汙染

(a) 鋼材表面噴砂後，表面一定會留下粉塵或沙塵。如果是矽砂，礦砂類的會容易卡在表面，後續影響塗裝的附著。如果是鋼砂，產生的鐵粉，更會是日後造成沙孔檢測瑕疵，或是起銹的源頭。

(b) 檢驗方法是以 ISO 8502-3 的膠帶黏著法。膠帶黏著法，主要是將表面粉塵的顆粒大小以及密度將其以比對的方式進行量化。一般而言顆粒 2 級，密度 2 級是可以被接受的。

(c) 檢測位置都是尋找粉塵比較容易累積的位置，如向上的平面(縱向加勁板、人孔水平板等)。

③表面粗糙度與檢驗

A.表面粗糙度

以 Ry 平均值(或稱 Rz、Rmax 平均值)表示，計算為在 55 cm^2(如 7.5 cm×7.5 cm)之範圍內讀取 10 個 Ry 數值並平均。

B.表面粗糙度之檢驗與標準

(a) 除契約另有規定外，Ry 量測方法應依 ASTM D4417 Method B 或其他適用之方法進行之。

(b) 表面粗糙度之檢驗時機與頻率應依表 5-12 之規定進行。

(c) 一次表面處理後，鋼材表面粗糙度(Ry 平均值)依塗料特性要求應在 25~75 μm 之間。

(d) 二次表面處理後之鋼材表面，除契約另有規定外，可不規定表面粗糙度。

表 5-12 表面粗糙度之檢驗時機與頻率[92]

施工方式	自動噴砂 (如鋼珠)	手工噴砂	
		可回收噴砂材 (如鋼礫、石榴石)	非回收噴砂材 (如矽砂)
檢驗時機	每天		
	施工方式變更		
	鋼珠規格變更	噴砂材料(種類或粒徑)變更	
	設備停機維修後	噴砂人員變更	
	添加噴砂材料	添加噴砂材料	--

(4) 塗料的管理

①塗料檢驗

A.塗裝時應使用在有效期限內之塗料。塗料進場前，承包商應提供原製造廠依據 CNS 9007 規定取樣檢驗每一批次塗料之品質證明，其內容應包含品名、批次、數量、檢驗標準及檢驗結果等資料，經工程司核可後方可進行後續取樣檢驗。

B.取樣頻率：塗裝施工前，承包商應會同工程司按每一工程契約所使用之每一種塗料依下列頻率抽驗：

(a) 該工程所需使用之任一種塗料其用量不超過 250 加侖，若該種塗料具有有效(一年內)之正字標記認證報告，則不必取樣抽驗，若該塗料無有效(一年內)之正字標記認證報告，則應取樣抽驗一次。

(b) 每一種塗料其用量在 250 至 10,000(10K)加侖間取一組試樣抽驗，超過 10,000(10K)加侖之塗料，則於每增加 5,000(5K)加侖，再增加一組試樣。

(c) 每一種具有效(一年內)正字標記認證報告之塗料(抽驗塗料標籤上商品名可能與正字標記證書所登錄產品學名不同)，其製造批次累計超過 10 個時，應再抽取一組試樣；每一種無有效(一年內)正字標記認證報告之塗料，其製造批次累計超過 5 個時，應再抽取一組試樣。

(d) 若同一種類塗料係由二家以上廠牌提供，亦需分別依廠牌及其數量按上述抽取試樣。

(e) 取樣方式依據 CNS 9007 之規定辦理，並送認可之試驗機構進行檢驗。

C.所抽取試樣依該塗料產品規格標準之試驗項目及其規定之試驗方法進行檢驗。相關試驗方法應以 CNS 15200 為主。各種塗料之品質標準請參見第 4.2.2 節。

②塗料之儲存與搬運

A.塗料之容器應標明品名、容量、製造日期、批次、有效期限等各項資料。

B.塗料應存放於陰涼處，並依塗料的特性控制儲放區之溫度且應低於 40°C。

C.搬運時應防止容器碰撞、破損。

(5) 塗膜檢驗

塗膜檢驗可區分為濕膜檢驗與乾膜檢驗。濕膜之檢驗項目包含外觀、厚度等檢驗。乾膜之檢驗項目包含外觀、厚度與附著力等檢驗。

①濕膜外觀與厚度檢驗

A.噴塗作業中濕膜出現橘皮或垂流等缺陷時，應立即採取適當措施消除之。

B.濕膜厚度檢驗應依據廠商提供產品說明書之塗料容積固含量(固體容積)、乾膜規定厚度與調薄劑用量等資料計算之。

表 5-13 列舉一些除塗料本身品質不良的因素外，塗裝作業中常發生之缺陷及防範與處理方法，供塗裝作業時參考應用。

②乾膜外觀檢驗

A.每一塗層之乾膜均應進行外觀檢驗，乾膜外觀檢驗採目視方式進行之。

B.乾膜表面應避免垂流、起皺、橘皮、塌凹，且不得有龜裂、氣泡、吐色、針孔、剝離、漏塗等缺陷。

塗膜檢查有外觀缺陷，應依製作及施工注意事項之規定改善。

③乾膜厚度檢驗

除契約另有規定外，檢驗時機、頻率及合格基準依本節之規定辦理。

A.檢驗時機：在最後一道底漆、中塗漆及面漆施作完成並乾燥後，應分別進行檢驗。

B.乾膜厚度之量測應根據 CNS 15200-1-7 方法 6「磁力法」辦理。

C.檢驗頻率：

(a) 主要構件：以每一構件做為一批。

(b) 次要構件及接合(連接)板：不同塗裝系統及膜厚之塗裝應分批檢驗，相同系統及膜厚之塗裝其累積面積每 300 m2 為一批，未達 300 m2 者視為一批。

(c) 每批應至少檢查 16 處，每處應於 4 公分直徑範圍內量測 3 個讀數，取 3 個讀數之平均值為該處測定值。

D.合格基準：每批測定值均符合下列 3 項規定方屬合格。

(a) 每批乾膜厚度測定值之平均值，不得小於設計膜厚，且不得超過設計膜厚的 3 倍。

(b) 每處乾膜厚度測定值，應達設計膜厚的 80%以上。

(c) 每批乾膜厚度測定值之標準差，不得超過平均值之 20%。

E.每批第一次檢驗不合格時，應進行複驗。

F. 複驗時每批應再增加檢查至少 16 處，併同第一次檢驗之數據進行分析判定，合格基準同項次 4 合格基準之規定。

G.複驗仍不合格者應按第 4.3.1 節之規定改善。

④塗膜附著性檢驗

A.塗膜附著性檢驗一般於試噴作業中進行，若需於實際構件上之塗裝作業中進行檢驗，應於契約中規定之。若對實際構件所造成塗膜損傷應依第 4.3.1 節之規定進行修補作業。

B. 塗膜附著性檢驗方法依 CNS 15200-5-6 或 CNS 15200-5-7 之規定進行之，合格標準應於契約中規定。

表 5-13 塗裝作業中常發生之缺陷及防範與處理方法[80]

缺陷	現象	可能發生的原因	防範與處理
橘皮 (Orange Peeling)	塗膜表面呈現橘子皮狀的凹凸。	1.塗料黏度太高以致霧化不完全。	須做做適當的稀釋。
		2.溶劑溶解力不良或揮發太快。	使用廠商指定的稀釋劑。
		3.噴槍運行太快或與距被塗面太遠。	調整施工的速度及距離。
		4.被塗面溫度太高或氣溫太高或風速太大。	在適當的底材溫度及環境下施工(可參考廠商技術資料)
塌凹 (Cissing)	塗膜表面呈現許多見底的凹陷及孔穴。	1.被塗面或塗裝工具有油漬、水分或污染物(如：silicone)附著。	徹底清洗被塗面或塗裝工具。
		2.被塗面太過平滑與堅硬。	以砂紙或電動工具將表面磨粗
氣泡 (Bubbling)	塗膜表面產生包覆空氣的小泡。	1.塗料攪拌時太過強勁，大量空氣進入後無法消除。	攪拌不可太劇烈或靜置待氣泡減少後才施工。
		2.被塗面溫度太高，溶劑揮發太快。	使用揮發性較慢的稀釋劑。
		3.厚塗型無機鋅粉底漆未做薄塗(mist coat)即上塗。	以底塗或中塗 1：1 稀釋後做薄塗(mist coat)。
拉絲 (Cobwebbing)	噴塗時於噴槍口呈霧化不全的絲狀。	1. 噴塗時黏度太高或溶劑揮發太快(此現象最常發生於聚氯乙烯或氯化橡膠塗料)。	使用溶解力好、揮發性較慢的稀釋劑。
		2.噴槍口徑太大或壓力太小。	調整噴槍口徑及壓力大小。
垂流 (Sagging)	垂直面部分塗料流下並聚結成厚膜之情形。	1.噴嘴太大、噴塗距離太近或噴槍運行太慢，以致一次噴塗量太多。	調整噴槍口徑、噴塗距離或噴塗速度，使噴塗量得以控制。
		2.底材或底漆面太過光滑。	以砂紙或電動工具將表面磨粗。
		3.稀釋劑添加過多致塗料粘度過低。	調整稀釋劑使用量。
刷痕 (Brush Mark)	隨著漆刷運行方向留下凹凸刷紋。	1.使用粗糙短毛的油漆刷施工。	使用刷毛較柔軟的油漆刷。
		2.塗料本身流展性不良或溶劑揮發的速度太快。	使用揮發性較慢的稀釋劑。
		3.被塗面太過粗糙，容易吸收溶劑。	先以稀釋過的塗料做一薄層。
吐色 (Bleeding)	下層塗膜顏色溶解滲透至上層。	1.下層塗膜未乾或塗裝間隔太短隨即上塗。	須等底層塗膜完全乾燥後才可上塗。
		2.環氧樹脂柏油漆上塗面漆。	柏油漆上避免再上塗面漆。
色分離 (Flocculation)	塗膜表面顏色濃淡不均。	1.稀釋劑添加過多。	控制稀釋劑添加量。
		2.塗膜厚度不均。	噴塗時控制塗膜厚度。
		3.塗料攪拌不均勻。	塗料打開後須先攪拌均勻。
乾燥不良 (Delaying of Drying Time)	塗膜於乾燥時間內未乾燥或硬化。	1.氣溫太低、濕度太高或通風不良。	改善塗裝環境。
		2.被塗面有水分或油漬。	水分或油漬等需擦拭乾淨。
		3.塗膜太厚。	調整施工手法及控制濕膜厚度。
		4.二液型硬化劑比例錯誤。	按廠商規定之比例添加。

(6)安全管理

鋼橋塗裝作業需遵守安全及衛生相關法規。塗料為引火性液體，依消防法列為危險物，含有的有機溶劑及重金屬高濃度時對人體有害。運輸、保管、塗布各階段需遵守法規，防止爆炸或中毒。鋼橋現場塗裝大多於施工架上進行，易發生作業員墜落或工具、塗料掉落傷及第三者，拆除臨時施工架尤為危險。在公路或鐵路上作業時，需與管理單位事先充分協議施工時間、範圍、安全設備及聯絡體制，並記錄於施工計畫書，施工時相關人員需周知。在鋼製橋墩或箱型梁內部等封閉空間作業，需確保充分照明與通風。

①塗裝作業前應行注意安全事項

A.作業場所應設置適當之標示板如「通風中」、「禁止進入」、「嚴禁煙火」及衛生注意事項。

B.施工前應備妥塗裝作業人員及管理監督人員所需防護器具。

②塗裝作業時應行注意安全事項

A.塗裝作業人員及管理監督人員皆應依規定穿戴適當防護器具。

B.在塗裝作業中，為預防中毒、爆炸的危險，應於通風、照明電氣設備、靜電火花保護器具等依規定要求，徹底執行。

③塗裝施工後應行注意事項

A.施工後作業場所仍應持續保持通風、並嚴禁煙火，進入作業場所仍應依規定佩戴防護具。

B.從事塗裝及粉塵作業者應依規定進行健康檢查。

(7)塗裝管理人員資格要求

承包商於塗裝工作期間應指派至少 1 位具有中華民國防蝕學會、AMPP(原 NACE & SSPC)或 FROSIO 等專業機構授證之塗裝檢驗員資格者，進行塗裝相關作業之品質管理與檢驗。

(8) 塗裝記錄表

為合理維護管理，需準確記錄調查、設計、施工、品質管理等階段資訊，適當傳遞以供維護使用。鋼橋維護中，塗裝系統、塗料名稱、塗裝時期等防蝕資訊尤為重要，建議將塗裝記錄及品質、施工記錄資料庫化保存。塗裝記錄表需記載於結構物以供維護管理。

塗膜檢查或塗換時，需明確塗裝系統、塗料名稱及塗裝時期。塗裝記錄應保存於竣工文件或管理系統，塗換時據此確認內容。為防文件遺失或誤記，結構物上常記載塗裝記錄表，但內容有限，僅供現場確認概要。

5.2.2 耐候性鋼材

在計畫使用耐候性鋼材做為防蝕方法時，重要的是要考慮施工現場的環境條件是否符合所用材料的應用。在這種情況下，環境條件是指當地和地形環境條件，但為了確保耐候性鋼材的規定性能，需要詳細的結構設計以進一步適應當地環境。所有防蝕方法的通用要求在第三章 3.3.3 節進行了說明。此外，還需要設計一個易於維護的結構，並在第三章 3.3.3 中說明了需要考慮的事項。為調整局部環境，細部結構需注意以下項目：

(1) 防止土砂、塵埃堆積

(2) 避免滯水

(3) 防止濕氣滯留

(4) 避免同一處受雨水等水分滴落或濺灑影響

本節介紹的鋼橋防蝕方法被認為能夠在標準條件下發揮其固有的防蝕性能和耐久性，因此並不一定適合所有橋梁狀況和所需性能，在某些情況下，性能可能過高或不足。因此，在設計和建造單座橋梁時，需仔細考慮合適的方法，以確保其適用於每種情況。

1. 結構設計上的注意事項

結構設計上的注意事項包括因構件位置關係或空間條件導致耐候性鋼材難以適應環境的部位，以及考慮高強度螺栓連接部等局部狹窄或易滯水、塵埃堆積的結構部位。

前者如梁端部，因與下部結構的位置關係，常形成通氣不良的濕潤環境。此外，纜索固定部、斜材或支柱的安裝部等多構件交點處，易發生滯水或塵埃堆積。其他如桁架或拱式下承式橋中，位於路面下方的下弦材，因與欄杆、配水設備、檢查道等附屬物或橋面板的位置關係，可能形成嚴苛的腐蝕環境。因此，構件間位置關係及由此形成的空間條件，需盡可能創造良好環境，尤其撒布融雪劑路線的下承式橋，路面水飛散導致滯水影響較大，需特別注意。

此外，高強度螺栓連接部因鋼板重疊，局部環境條件較其他部位惡劣，應考慮避免滯水等結構。以下為連接部的主要注意事項：

(1) 主梁構件間隙(母材間隙)

主梁下翼板的高強度螺栓連接處，基材間隙中積聚的水分難以乾燥，有時會停滯。因此，建議在基材之間留出允許範圍內的間隙，並在連接板的下側進行分割，從而建造易於排水和乾燥的結構。一般建議留出 10 至 20　mm 的間隙，以防止積水。

對於箱梁等結構，如果有雨水滲入縫隙的風險，則務必採取緊密封梁上緣等措施。需要注意的是，密封材料會隨著時間而劣化，出現脫落或剝落，因此建議在檢查時進行確認，並恢復到正常狀態。

(2) 連接板

I 型梁腹板高強度螺栓接頭，宜在容許範圍內加大上翼板下面與連接板端面間隙，消除難以乾燥的縫隙。若結構允許，腹板的連接板宜不分割，使用整塊板，以防止滯水(如圖 5.17 所示)。I 型梁下翼板連接部下面側連接板分割，可利於排水與乾燥(如圖 5.18)。

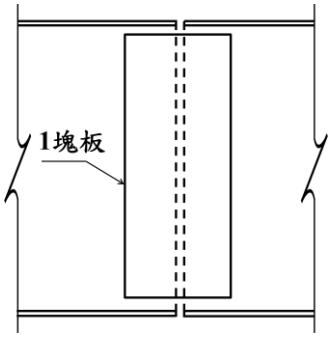


圖 5.17 腹板連接板範例[92]

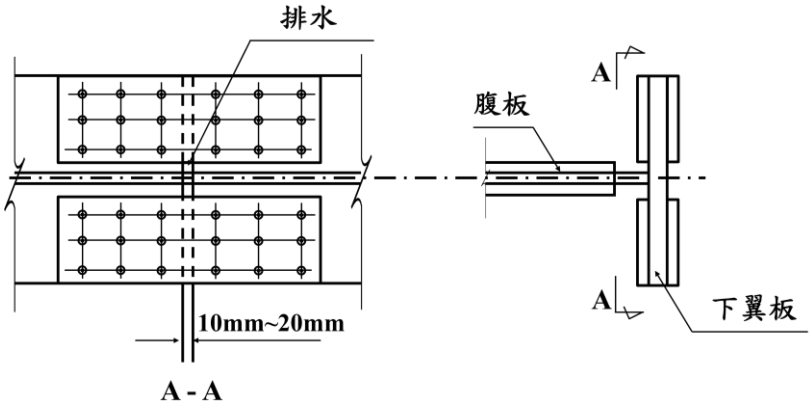


圖 5.18 I 型梁底部翼板連接板範例[92]

(3) 螺栓排列

螺栓應按網格狀排列，螺栓間距應盡可能小，以確保板之間盡可能良好的接觸。無論螺栓處於受壓或受拉狀態，最大中心距應為表 5-14 中較小的值。另外，基於同樣的考量，最大邊距應盡可能小，但不能低於規範規定的最小邊距，且不應超過 50 mm。但是，即使在箱型斷面拱肋等，難以使翼板連接板覆蓋端部腹板的情況下，宜將其設為連接板厚度的 6 倍。

由於連接部位的局部環境因橋梁及其構件而異，上述方法並非總是最佳的。因此，在設計每座橋梁時，重要的是要充分考慮連接部位的環境條件，並在結構允許的範圍內做出反應。另外，如果拱橋的橫梁為箱型斷面，橫梁會傾斜，有縫隙的端部會朝上，雨水很容易進入箱型斷面內。在這種情況下，最好用填縫材料填充連接處的縫隙，以防止雨水進入。此外，填縫材料可能會隨著

時間而變質並脫落，因此最好在檢查時特別注意，並將其恢復到正常狀態。

表 5-14 螺栓的最大中心間隔[92]

螺栓規格	最大中心間隔		
	p		g
M20	130	12t 交錯排列的情況下 15t-3/8 g 但最大不得超過 12t	12t
M22	150		
M24	170		

備考 1：t，外側鋼板或型鋼的厚度(mm)
備考 2：p，螺栓沿應力方向的間距(mm)
備考 3：g，螺栓垂直於應力方向的間距(mm)

(4)填板

為合理化設計與施工，減少鋼材板厚種類，填板使用需求增加。填板需使用具防蝕功能的耐候性鋼材。當薄耐候性鋼材填板難獲得時，宜使用高耐候性鋼材 SPA-H(JIS G 3125)或其同等品，確保與母材同等耐候性。

(5)摩擦接合面

螺栓連接部摩擦接合面處理分無塗裝或塗布無機鋅粉底漆，高強度螺栓摩擦接合面的容許應力會因摩擦接合面是否塗裝而有所不同，設計時需注意。

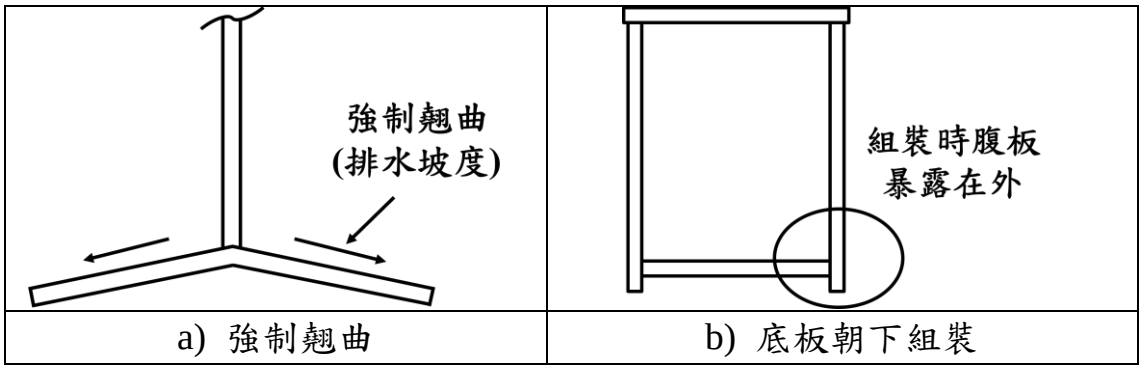
2. 細部結構的注意事項

(1)細部結構的形狀

①翼板等水平構件

I 型截面構件的下翼板可能因與腹板銲接而承受向上的應變，導致水滯留。因此，在某些情況下，會採用一種製造方法，使翼板預應變程度高於常規水平，導致銲接後仍保持向下的坡度。然而，這種方法的有效性尚不清楚。由於實際橋梁存在相當大的坡度，即使沒有強制排水坡度，水滯留也很少發生，且沒有銹蝕惡化的報告。事實上，在惡劣環境下，有報告指出由於強制

排水坡度的存在，翼板下側會出現層狀銹蝕，而雨水無法將其沖走。此外，在承重區域，底板和下翼板之間可能會形成縫隙。因此，不希望出現極端的反向應變，最好將翼板加工到能夠防止水滯留的程度，就像典型的塗裝橋梁一樣(如圖 5.19 所示)。



a) 強制翹曲	b) 底板朝下組裝

圖 5.19 翼板等水平構件應避免的結構示意圖[92]

此外，對於桁架弦桿，當腹板朝下組裝時也會出現同樣的問題，因此最好避免使用這種方法；然而，當結構上不可避免的時候，這並不適用，因為在形成緻密銹層的環境中，問題並不明顯。

在噴灑大量融雪劑的線路上，橋梁伸縮縫的漏水會沿著下翼板蔓延，造成大範圍影響。做為應對措施，在邊緣塗裝區域的邊緣安裝止水板在某些情況下可能有效，因此最好在規劃安裝時考慮施工後的情況。然而，安裝方法必須謹慎以免造成結構弱點。例如採用銲接安裝，則必須注意確保連接構件的疲勞耐久性不受影響。有關公路鋼橋疲勞設計的規定，請參閱設計規範。

②下部結構頂端的排水溝

為了防止下部結構頂部排水造成的銹斑(如圖 5.20 所示)，如果在下部結構(橋台、橋墩)頂部設置輸水邊牆或排水溝，則很多情況下，由於輸水管道故障、沉積物或灰塵堆積等原因，排水無法按預期流動，反而會在頂部積水或從輸水路線以外的地方漏水，導致梁端被潮濕。在這種情況下，橋台頂部潮濕的不利影響大於防止銹斑的效果，因此在規劃邊牆或排水溝的安裝時，充分考慮未來的可維護性非常重要。

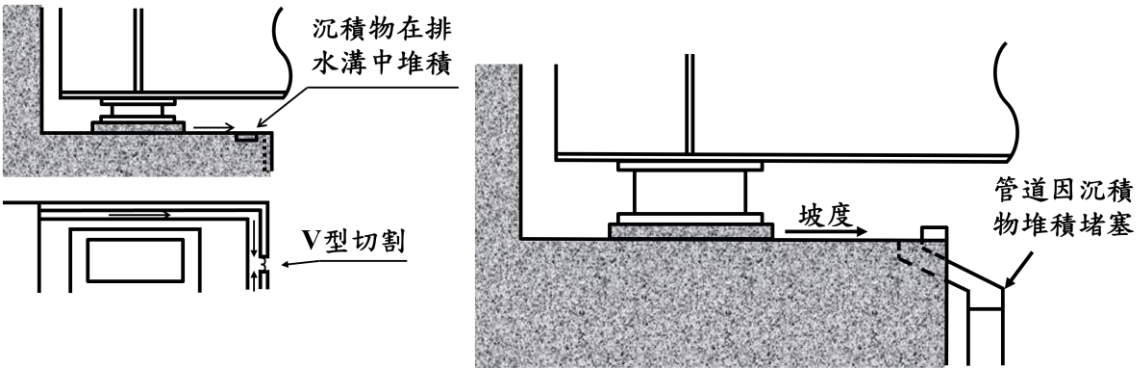


圖 5.20 導水用的排水溝或邊牆應避免的結構示意圖[92]

此外，應注意防止下部結構頂部積土和灰塵，建議提供足夠的排水坡度，盡可能防止積水，同時不妨礙維護工作等。

下部結構(橋台、橋墩)表面生銹造成的污漬，通常是由於在施工階段，例如在未安裝橋面板的情況下，大梁長時間曝露在雨水中造成的，導致排水集中在一處並沿著下部結構(橋台、橋墩)流動。在這種情況下，在底部翼板安裝止水板是有效的，這樣可以使雨水在到達下部結構(橋台、橋墩)之前立即落到地面(如圖 5.21 所示)。

在這種情況下，重要的是要將止水板放置在不會直接接觸檢查路徑的位置。此外，止水板的安裝方式必須不會影響構件的性能，例如疲勞耐久性。

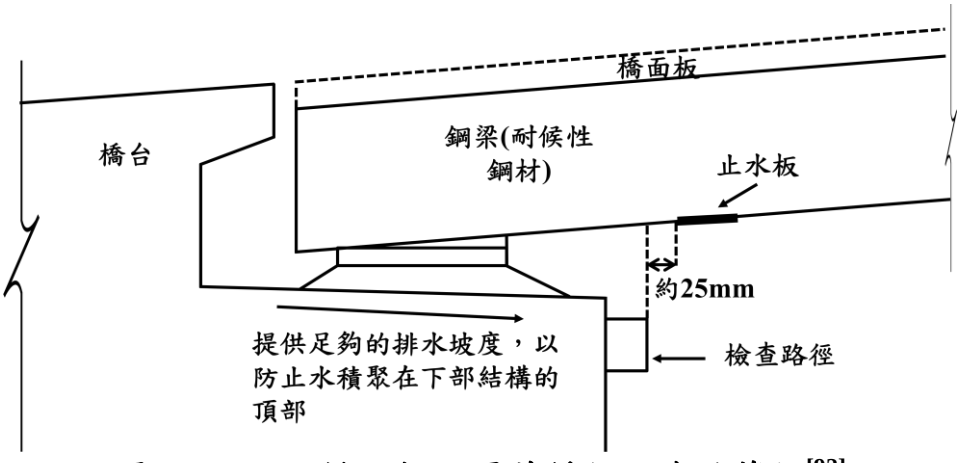


圖 5.21 防止橋面板設置前銹蝕污染的範例[92]

(2)局部塗裝

①梁的端部塗裝

梁的端部通風不良，是結構連續性中斷的區域，由於橋面排水處理不充分或伸縮縫漏水，梁可能會長時間處於潮濕狀態。梁的端部容易成為防蝕的薄弱環節，因此在距離地面沒有空間、通風不良且無法獲得良好環境的區域，最好採用塗裝等單獨的防蝕方法。連續梁的中間墩通常也通風不良，因此最好營造一個不會積水的環境。

塗裝時，應以橋下結構頂部以上區域為基準，如圖 5.22 所示。在梁靠近地面的地形中，最好以該區域為基準進行塗裝(如圖 5.23 所示)。在噴灑融雪劑的橋梁上，橋面排水可能會從橋面覆蓋層的不連續區域流到外梁的外表面，或從伸縮縫的受損區域落。在這種情況下，最好塗裝的區域大約等於梁的高度，包括外梁的外表面(如圖 5.24 所示)。此外，如果橋下結構上安裝了檢查軌道，鐵銹可能會掉落到檢查軌道上並影響其完整性，因此在確定塗裝區域時務必考慮檢查軌道的寬度。

選擇油漆顏色時，最好考慮與未上漆部分的色調差異以及美觀方面。

在局部塗裝中，塗裝區域和未塗裝區域的邊界很可能成為防蝕的弱點。因此，最好將局部塗裝區域盡可能擴大到環境良好的區域，並將邊界設置在即使未塗裝也不會出現問題的位置。檢查時，務必注意銹蝕從邊界區域滲透到漆膜下方的情況。

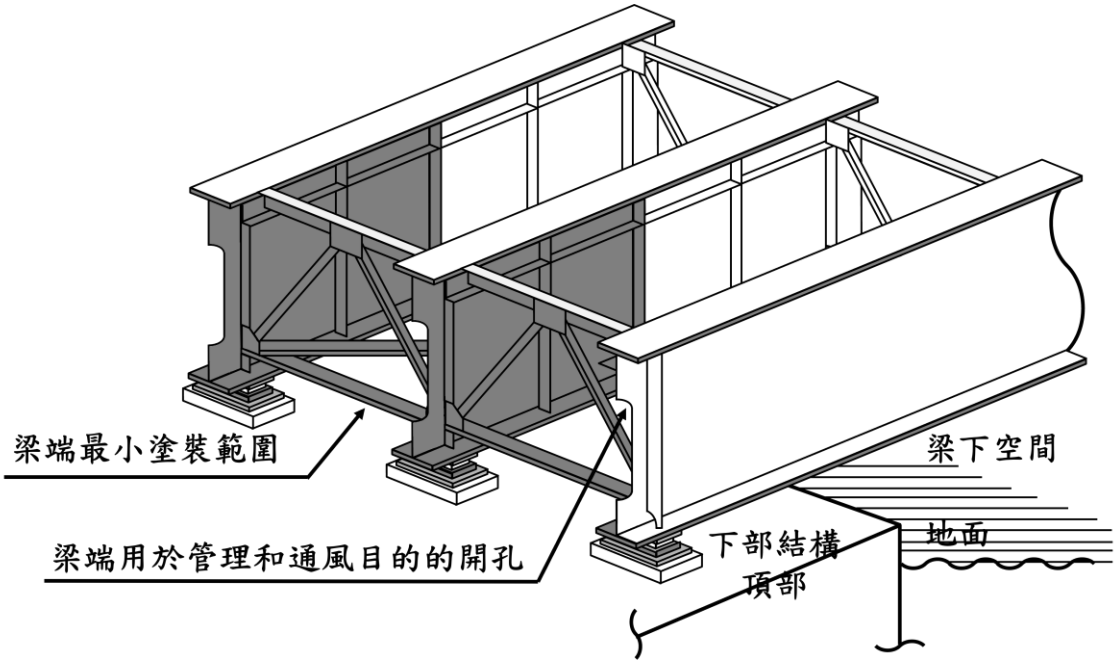


圖 5.22 下部結構(橋台)上方塗裝範圍範例[92]

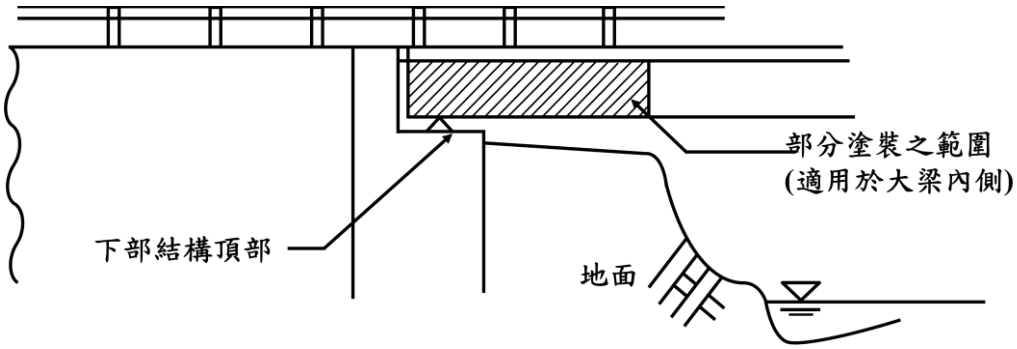


圖 5.23 地面接近區域下的局部塗裝範例[92]

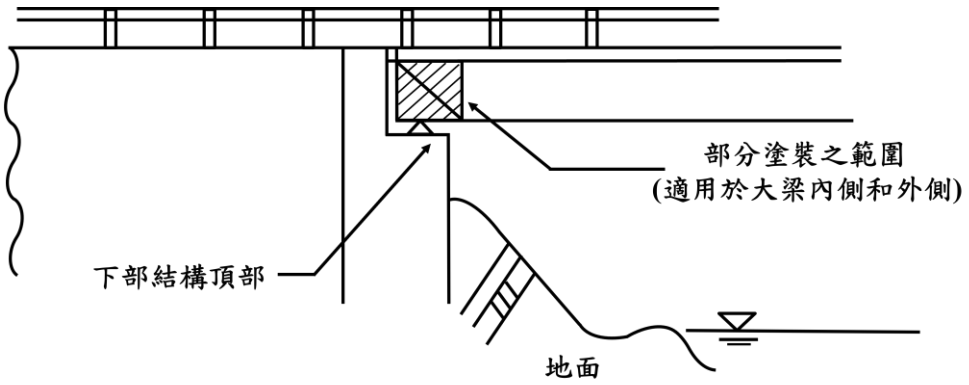


圖 5.24 撒布融雪劑情況下的局部塗裝範例[92]

②箱型梁的內面處理

「內表面」係指箱梁、鋼橋墩等封閉截面構件的內表面。一般認為箱梁內部並非密閉，容易因冷凝和雨水滲入而受潮，但實際環境條件仍有許多未知數。此外，由於箱梁內部排水管損壞導致滲漏，或橋面裂縫透過接縫縫隙滲漏，也可能導致內部積水。因此，最好像普通橋梁塗裝一樣對箱梁內表面進行塗裝。

然而，也存在結構完全密封的情況，例如桁架構件的箱型斷面或鋼橋面板的封閉截面垂直肋。此外，若橫斷面為箱型，則內部不需要塗裝，就像塗裝的橋梁一樣。

由於箱梁內部經過塗裝處理，內部構件基本上可以用普通鋼材製造，但對於連接板等內外板形狀相同，在製造、安裝時容易產生混淆的情況，最好使用耐候性鋼材，以免誤用。

③水管引起的結露

當在橋梁上安裝水管時，管道上的冷凝水會形成一種難以形成緻密銹層的環境，因此在某些情況下可能需要考慮對周圍的大梁進行塗裝。

④橋梁附掛

在梁側或梁間設置水管等輔助結構時，會形成一個極其封閉的空間滯留濕氣，使該區域的腐蝕環境惡化，而且濕氣還會從輔助結構中濺回。水的影響會使某些區域難以形成緻密的銹層。因此，在設計附掛結構時，必須充分考慮鋼材對環境的影響。

3. 製作時的注意事項

(1)加工及組裝

原板經噴砂去除氧化皮後，工廠製作時應謹慎避免灰塵、油脂、標記等附著，若有附著，宜於工廠出貨前去除。使用水溶性標記等情況下，難以完全去除，宜考慮使標記位於梁內側面，並於出貨前以動力工具或噴砂(Sa2 程度)去除污物或標記。

構件角部處理，無塗裝使用以去毛邊程度為宜，但局部塗裝等塗裝範圍，需進行 2R 以上倒角並完成曲面處理(C5(含)以上環境建議採 3R 以上曲面形狀)，以確保塗膜性能。

(2)臨時存放

構材臨時存放若達長期(長期保管情況)，應考慮盡可能避免飛來鹽分附著，採用片材保護，同時注意暫置地點、姿勢、高度，避免雨水等滯水或污水跳返影響。暫置時附著的銹蝕不均或污物雖有隨時間消失傾向，但部分環境可能長期殘留。殘留將導致外觀難看，需充分注意避免附著，尤其中長期保管易附著銹蝕不均或污物，宜於工廠運出前進行噴砂處理(Sa2 程度)。

4. 運輸及安裝注意事項

(1)運輸

運送耐候性鋼材構件時，應盡量避免飛來鹽分的附著。如果鹽分附著在未塗裝保護的鋼構件上，用水沖洗很難將其完全去除，這不僅不利於形成緻密的銹層，還會導致銹跡顏色不均勻。因此，在海運時，應盡量避免堆置在無頂篷的船舶甲板上運輸。但是，如果大型構件無法避免，則必須在運輸過程中，以板材或其他材料進行全面保護，防止海風和海水的影響。此外，如果在運輸後或安裝前懷疑有鹽分附著，請務必檢查，如果確認有鹽分附著，則應用水沖洗等方法徹底去除。

(2)混凝土澆置

當混凝土、砂漿、泥土、沙子等附著在耐候性鋼材上時，即使清洗也難以完全清除。尤其需要注意的是，像砂漿乾燥後難以去除的物質附著在表面，一旦黏附，必須立即用水沖洗等方法清除。

鋼橋的混凝土施工包括橋面板、牆體女兒牆、地面護欄、端部橫梁的混凝土包覆。進行施工時，必須採取足夠的措施來防止砂漿或水泥漿從模板滲漏，並須小心確保任何滲漏都能迅速排除。

如果現場安裝和澆置橋面混凝土之間的時間間隔過長，就會導致生銹，正如工廠製造時的注意事項中所提到的。由於安裝現場的雨水會導致生銹，因此很難避免，在這種情況下，可預先塗抹耐候性鋼材表面處理劑。

此外，如果距離混凝土橋面澆置時間較長，根據雨水流向和水路情況，銹水可能會污染橋台和橋墩。下翼板充當了銹水沿下縱坡方向流動的水路，污染橋台和橋墩，因此一些應對措施包括安裝止水板，使銹水在橋台和橋墩前滴落(如圖 5.21 所示)。

5. 防蝕施工

耐候性鋼材是一種依賴材料本身抵抗環境影響能力的防蝕方法，其耐腐蝕性取決於鋼中所含合金元素的作用，形成具有高度保護性的銹層。因此，防蝕的主要製程是在煉鋼過程中添加合金元素，以生產具有所需性能的鋼材。然而，為了確保橋梁建成後在大氣環境中形成預期的緻密銹層，必須在製造或施工過程中對鋼材表面進行處理，使其易於形成緻密銹層。此處的「表面處理」是指去除黑色氧化皮、銹跡和附著鹽分。

(1)施工

①耐候性合金元素的添加

根據耐候性鋼材性能所需的合金成分設計，在煉鋼廠適量添加銅、磷、鉻、鎳等元素。

鋼廠會將新增的合金元素數量記錄在鋼材檢驗證書上，並隨鋼材一起交付給客戶。因此，在施工前，必須檢查鋼材檢驗證書，確認鋼材是否添加了規定量的合金元素。

②鋼材表面的調整

在橋梁建造或架設過程中，有必要對鋼材表面進行調整，使其在大氣環境下易於形成緻密的銹層，並保持所需的一致外觀。

保持一致的外觀意味著銹蝕不均勻程度極小，並且會隨著時間而逐漸消失。

如果耐候性鋼材表面附著黑色氧化皮，黑色氧化皮的附著力會不均勻，導致黑色氧化皮和銹跡之間出現不均勻的現象，即使所有黑色氧化皮都去除後，銹跡也可能殘留不均勻的顏色。此外，如果橋梁部位的黑色氧化皮剝落，銹跡可能會污染橋梁周圍區域。因此，對於在鋼廠未塗裝使用的耐候性鋼材，最好將表面的黑色氧化皮去除。

去除氧化皮方法有原板噴砂與產品噴砂兩種，此處所示噴砂程度為表面處理 Sa 2 1/2 程度。原板噴砂指在製作加工(開孔、切割、銲接組裝)前於製鋼工廠預先去除鋼板氧化皮的方法；產品噴砂指針對銲接加工等無障礙部分，在製作工廠對銲接後的橋梁構件狀態進行噴砂去除氧化皮的方法。原板噴砂所需勞力較少，但製作加工時附著的污物可能殘留；產品於製作工程最後(含暫置)進行噴砂，出廠時呈污物少、均勻銹蝕狀態，但需處理銲接加工部等殘留氧化皮，需相當多的人工。

近年原板噴砂案例增多，該方法較產品噴砂易導致銹蝕均一性不足。製作時的銹蝕不均大多隨時間消失，但為從工廠出貨起確保持續均一外觀，宜於工廠作業時去除標記、油污、燒焦等，於出貨前以噴砂(Sa 2 程度)清除。

為形成耐候性鋼材表面預期之緻密銹蝕層，必須避免鋼材表面附著鹽分。在工廠暫置、運輸、架設現場暫置時，應確認無鹽分附著，並為判斷鹽分附著防護必要性，在運輸前或暫置時等適當時機量測附著鹽分量。發現難以避免鹽分附著時，需採取以片材覆蓋或定期水洗等措施。若確認有鹽分附著，需立即水洗等方法去除。

6. 施工及品質管理

(1)耐候性鋼材製造廠化學成分檢驗

耐候性鋼材的化學成分在 JIS、CNS 及 ASTM 規範中有規定，但在建造橋梁時，需要透過檢查材料的鋼材檢驗證書來確認合金成分是否符合規定值。

(2)鋼材表面調整的管理

防止鋼材表面污染並不是發揮防蝕性能的直接條件，但做為耐候鋼橋，保持一定的外觀品質是必要的。防止污染是指產品暫時保管時的位置、保管環境、保管期間等進行規劃和管理，從工廠生產到施工完成為止，將生銹和污染的發生控制在最低限度。為了形成緻密的銹層，必須避免長期存放在空氣中鹽分含量高的地方。這種存放方式容易導致鋼梁生銹不均勻，並容易產生鹽分附著。如果無法避免存放在容易產生鹽分附著的地方，或懷疑在運輸過程中發生了鹽分附著，則必須立即確認鹽分附著量是否達到足以阻止保護性銹蝕形成的程度。如果發現鹽分黏附過多，則必須用水徹底沖洗以徹底去除鹽分。

目前尚無測量耐候性鋼材表面鹽附著量的成熟方法。採用擦拭法(或簡易電導法)對製造後初始銹蝕狀態進行測量，可獲得相當穩定的測量值，因此可將此方法測得的值做為鹽附著量的指標值。由於很少有研究闡明鹽附著量與銹蝕狀態變化之間的關係，因此無法定量地確定鹽附著量的限值。然而，在橋梁建成後長期保持良好狀態並形成緻密銹層的區域，鹽附著量可認為約為 50 mg/m^2 至 1,000 mg/m^2。建議在工廠儲存期間或安裝現場的初始狀態下黏附的鹽量限制為約 100 mg/m^2。最好在工作過程的停留檢查點檢查粘附的鹽量，例如在生產結束時或在架設大梁之前，此時可以進行修復工作以消除原因。

(3)防蝕記錄

耐候鋼橋防蝕應記錄的內容包括所使用的鋼材、局部塗裝的規格、如有的耐候性鋼材表面處理劑的規格等。防蝕記錄應記錄在隨結構附設的防蝕記錄表中。

5.2.3 熱浸鍍鋅

1. 結構設計上的注意事項

(1)構件尺寸

熱浸鍍鋅橋梁的設計，必須考慮熱浸鍍鋅工廠熱浸鍍鋅槽的尺寸及起重機能力的限制，來決定構件尺寸。

①熱浸鍍鋅槽尺寸

橋梁構件的熱浸鍍鋅一般由專業工廠進行。對於箱型梁等大型構件進行熱浸鍍鋅時，能處理此類構件的工廠因擁有大型熱浸鍍鋅槽而有限，因此在設計階段需調查並在構件尺寸及形狀的考量中納入考慮。

目前主要鍍鋅廠之大型鍍鋅槽大小與吊重能力如表 5-15，依此資料，鍍鋅鋼橋之最大鍍鋅節塊尺寸宜以長 16m、寬 1.6m、高 2.9m、重量 15 噸為限。鋼橋採用熱浸鍍鋅防蝕方法時，於設計與施工前，宜再調查當時之鍍鋅廠施作能力。在選擇工廠時，除熱浸鍍鋅槽尺寸外，還需考慮橋梁構件的熱浸鍍鋅經驗、處理能力、工廠位置等因素。

熱浸鍍鋅施工因需減小浮力或避免直線性垂流而以傾斜角度進行浸漬等施工條件，因此需對表 5-15 所示熱浸鍍鋅槽尺寸設定具有餘裕的構件尺寸。此外，因熱浸鍍鋅工廠的設備能力限制，構件重量也可能受到限制，需特別注意。為確保良好的施工品質，宜盡可能採用對熱浸鍍鋅槽具有餘裕的構件尺寸。

表 5-15 臺灣地區具代表性之鍍鋅槽一覽表

鍍鋅廠	區域	鍍鋅槽尺寸(m)			吊重能力(噸)
		長	寬	深	
A	高雄	17	1.8	3.2	30
B	高雄	16.5	1.8	3.3	30
C	桃園	16	1.8	3	40
D	桃園	12.5	1.8	3.2	20
E	桃園	14	1.8	2.2	15
F	高雄	13	1.8	3.3	14
G	桃園	13	2.0	3.2	13
H	彰化	14	1.9	3.2	16
I	彰化	13	1.85	2.7	15
J	彰化	16	1.9	3.2	-

註 1：本表調查時間為 2025.07.30

註 2：設計時構件最大尺寸應略小於鍍鋅爐標示尺寸

②箱型梁分割與非分割的判定

熱浸鍍鋅施工中，同一構件不得分兩次浸漬，分兩次進行熱浸鍍鋅施工時，會因兩次熱浸鍍鋅作業的重疊部位導致色彩或表面性狀不均一的外觀問題。更重要的是，因浸漬於熱浸鍍鋅槽內的部分與外部的溫度差，會產生較大的應力，可能導致構件變形或裂縫。當構件較大時，需考慮熱浸鍍鋅槽尺寸及起重機能力，必要時對構件進行分割。圖 5.25 為箱型梁分割方法示意圖。箱型梁的斷面形狀有大有小、縱長或橫長等多種，因熱浸鍍鋅施工工廠的能力限制其形狀，需調查熱浸鍍鋅工廠的能力、架設地條件及施工實績等，進行綜合判斷。

在圖 5.25 中確定箱梁是否應進行分割時，必須考慮 A 行箱涵的寬度和高度之間的平衡。翼板厚度與腹板厚度之比應約為 2.5:1 做為判斷的參考值，如果翼板厚度大於該比例，則為了防止因板層施工而產生裂紋，最好採用 A-1 所示的分割結構。即使在這種情況下，該比例也應以 3:1 為宜。對於 B 型箱梁，考慮是否可以在不分割箱梁的情況下將其傾斜 90 度。如果無法實現，則應將其分成兩段或三段，並設定翼板，如 B-1 形狀所示。

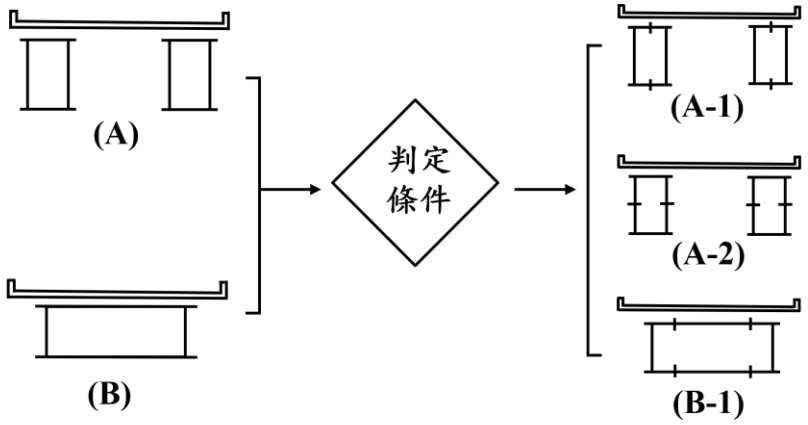


圖 5.25 箱型梁的分割方法示意圖

③箱型梁橋的斷面構造

若決定將箱梁設計為剖分結構，接合位置可從以下方法中選擇：在翼板處將其一分為二(垂直剖分)；在腹板處將其一分為二(水平剖分)；或在翼板處將其一分為三，然後將構件一分為四(四剖分)。箱型梁分割法典型範例請參見圖 5.26。

分割方法取決於箱梁的尺寸和重量限制，但一般從經濟性和防止變形的角度考慮，最好採用自由端為厚翼板的垂直分割。但是，如果箱梁高度過大，超出了鍍鋅槽的限制，則會採用水平分割，但在這種情況下，必須考慮以下幾點。

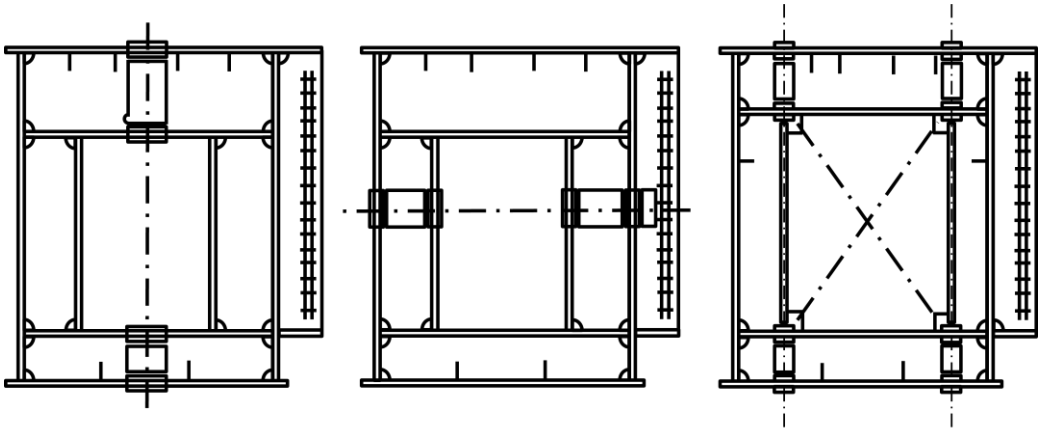


圖 5.26 箱型梁分割法典型範例[92]

A.由於薄腹板成為自由端，預計波紋的凸起會變大，因此需要防止橋梁軸向的凸起。防止變形的約束材料(支撐、間隔保持器等)可有效防止凸起。

B.由於螺栓連接處在側面可見，因此在外觀方面應多加注意。此外，如果由於重量原因，即使兩段也無法進行浸鍍，則應使用四段。如果在支撐點處難以分離隔膜、底板等，則應縮短構件在橋軸方向的長度，並提供可沿寬度方向浸入鍍鋅槽的接頭(如圖 5.27 所示)。當將箱梁分成幾段並按上述方法進行熱浸鍍鋅時，必須仔細考慮設計，包括確保品質和美觀，具體取決於分割方法。

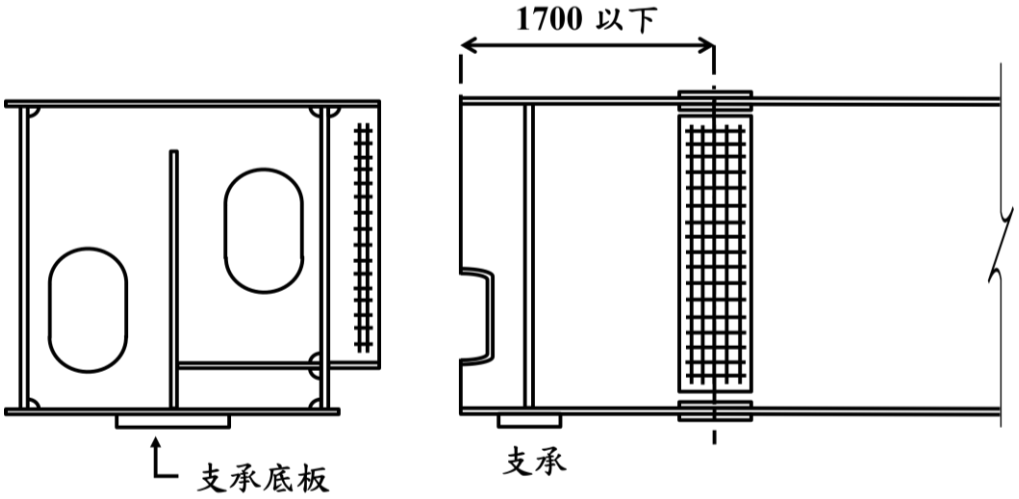


圖 5.27 支承處接頭範例[92]

(2)連結

①一般

國內橋梁用高強度螺栓大致可分美國與日本系統兩種，美國系統主要以 ASTM F3125 A325 M 級及 A490 M 級為主，而日本及國內則以 JIS B1186 及 CNS11328 之 F8T 及 F10T 為主，其鋼種材料除 ASTM 有對材料成分做明確規定外，其餘則是各家廠商自行選用鋼種，但鋼種仍以為硼鋼、中碳鋼、耐候鋼等為主。高強度螺栓之機械性質如表 5-16 所示。

表 5-16 高強度螺栓的機械性質

標準	種類	降伏強度	抗拉強度	伸長率 (%)	斷面收縮率(%)	硬度 HRC
ASTM F3125	A325M 級	660Mpa 以上	830MPa 以上	14 以上	35 以上	25~34
	A490M 級	940MPa 以上	1040~1210MPa	14 以上	40 以上	33~38
JIS B1186	F8T	640 N/mm²以上	800~1000 N/mm²	16 以上	45 以上	18~31
	F10T	900 N/mm²以上	1000~1200 N/mm²	14 以上	40 以上	27~38
CNS 11328	F8T	64 kgf/mm²以上	80~100 kgf/mm²	16 以上	45 以上	18~31
	F10T	90 kgf/mm²以上	100~120 kgf/mm²	14 以上	40 以上	27~38
	F11T	95 kgf/mm²以上	110~130 kgf/mm²	14 以上	40 以上	30~40

備考：$1N/mm^2=1MPa=1.01972\times10^{-1}\ kgf/mm^2$

②熱浸鍍鋅高強度螺栓

鋼橋連結部的設計依據相關規範規定，此處僅針對熱浸鍍鋅橋的特有注意事項進行說明。

A.高強度螺栓

高強度螺栓經熱浸鍍鋅處理時，ASTM F3125 A325(M)級之品質要求依其內文之規定為依照 ASTM A153 之 C 級 381g/m²辦理，而 F8T 之品質要求則依照 CNS 10007 第 2 種 HDZ55 之 550g/m²規定辦理，但 A325(M)之附著量品質要求較低而須提高時亦可參照 CNS 10007 第 2 種 HDZ55 之 550g/m²規定。雖然熱浸鍍鋅處理時溫度並不影響高強度螺栓之規定機械性質，但為提高安全係數因素下常採用 A325(M)、F8T 高強度螺栓。熱浸鍍鋅高強度螺栓之組合搭配方式則參照表 5-17 及表 5-18，A325(M)高強度螺栓搭配 A563(或 A194)螺帽與 F436 墊圈，F8T 高強度螺栓則搭配 F10 螺帽與 F35 墊圈。

鋼結構施工規範 (TISC 031-2022)[172]規定「F10T 及 ASTM F3125 A490 級若採熱浸鍍鋅時，鍍鋅前之表面處理得採用噴砂，不得採用酸洗，惟應於噴砂處理後 4 小時內完成熱浸鍍鋅作業。」以降低抗遲滯破壞性能，鍍層品質依據 JIS H8641 或 CNS 4237 規範。若回火溫度在 500 ℃以上時，可

採用添加 Cr、Mo 的鉻鉬鋼(JIS G4105: SCM822)的材料，確保鍍後 F10T 之強度。

表 5-17 熱浸鍍鋅 ASTM A325 螺栓組合

螺栓	螺帽	墊圈
A325 type1 (英制)	A563 DH	F436
	A194 2H	
A325M type1(公制)	A563M 10S	F436M

備考：品質要求依照 ASTM A153 之 C 級 381g/m^2 辦理。

表 5-18 熱浸鍍鋅 F8T 螺栓組合

機械性質種類	螺栓	螺帽	墊圈
1 種	F8T	F10	F35

備考：品質要求依照 CNS 10007 第 2 種 HDZ55 之 550g/m^2 辦理。

B.熱浸鍍鋅附著量

熱浸鍍鋅附著量應為 550g/m^2 以上，並使用離心分離機等進行垂流去除，確保螺紋部位處於良好狀態

C.接合面處理

即使是熱鍍鋅橋梁，高強度螺栓摩擦接頭的設計也須遵循相關規範的要求，並假設滑移係數應達到 0.4 或更高。

(3)板厚比與開口率

熱浸鍍鋅因將銲接結構構件浸入約 440℃的熔融熱浸鍍鋅浴中，急劇的溫度上升及隨後的溫水冷卻導致溫度下降，會產生較大的熱應變，可能造成梁的扭轉或腹板的鼓脹等殘留變形。因此，在構件設計時需考慮熱應變。

① I 型梁橋的設計注意事項

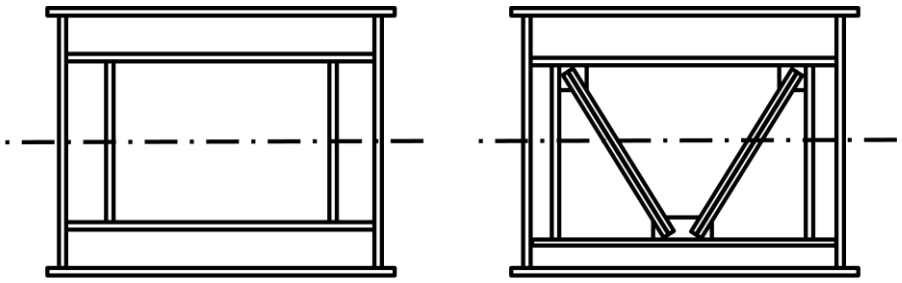
A.應減少構件左右的不對稱性，並避免極端的斷面變化或多種材質變化。

B.腹板厚度 t_w 與翼板厚度 t_f 的關係應滿足 $t_w > t_f/3$。

②箱型梁橋的設計注意事項

A.非分割箱型梁的情況，根據 FEM 熱應力分析或實驗，箱型梁浸漬時會影響熱浸鍍鋅裂縫或殘留應變。腹板產生的熱膨脹應力的反力(最大熱壓縮應力或應變)隨翼板板厚越薄而減小，隨浸漬速度越快而減小。為防止熱浸鍍鋅裂縫，腹板板厚 t_w 與翼板板厚 t_f 的關係宜滿足 $t_w > t_f / 2.5$。若無法滿足 $t_w > t_f / 2.5$，需充分考量結構細節，以避免裂縫或較大的殘留應變。

B.非分割結構的橫隔板，開口率宜為 30%以上。中間橫隔板的形狀可考慮圖 5.28 所示的框架式與斜撐構架式，但非分割結構中，因箱型斷面較小，宜採用可設置較大開口的剛架方式。



(a) 框架式 **(b) 斜撐構架式**

圖 5.28 中隔板型式示意圖[92]

C.橫隔板開口部的大小以圖 5.29 所示的符號表示，宜滿足 A×B ≥ 0.3×Hw×Bw 的關係。在橫隔板或橫肋位置，為防止熱浸鍍鋅施工時構件拉起時熔融鋅的積聚，宜設置扇形口。分割與非分割結構均適用的標準扇形口形狀如圖 5.29 所示。特別是將對應於橫隔板下橫肋的部分加寬更為有效。此外，縱肋周圍及翼板與腹板的角落部位的扇形口，也需確保圖 5.29 所示的程度。

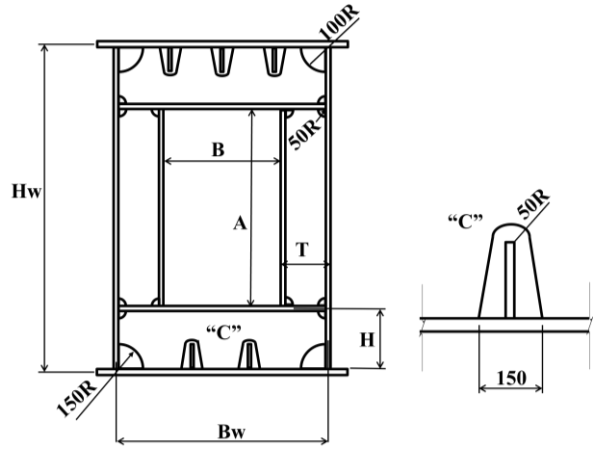


圖 5.29 隔板開口和扇形孔形狀範例[92]

D.端部支承上的橫隔板，若結構上為每個箱型梁 1 個支承，難以設置較大的開口部。此處的標準人孔及扇形切口形狀如圖 5.30 所示。熱浸鍍鋅浴的浸漬方法如圖 5.31 所示，以端支點側較高進行。若構件寬度較大且超出熱浸鍍鋅槽限制，如圖 5.32 所示，可在支點附近設置現場接頭以改良支點結構。

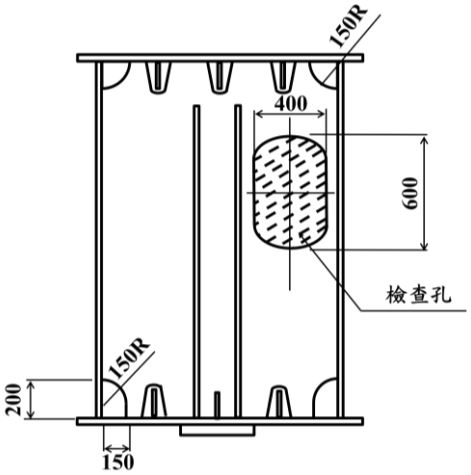


圖 5.30 端部隔板型式範例[92]

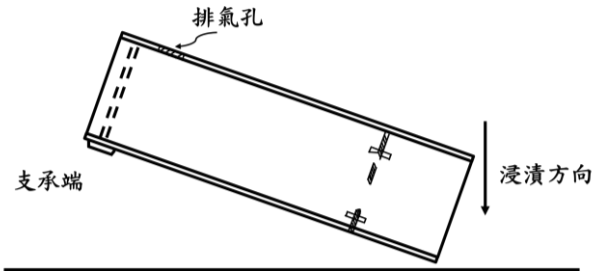


圖 5.31 端部支撐側構件的浸入方式示意圖[92]

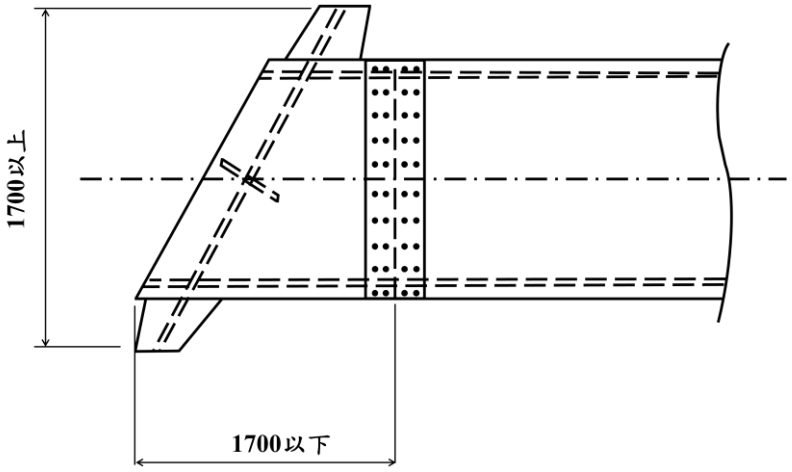


圖 5.32 構件端部較寬時的接頭位置範例[92]

E. 在中間支承上安裝隔板時，很難確保浸入所需的開口。由於隔膜位於構件中心附近，它會極大地影響熔融鋅的進出，進而影響浸入速度。圖 5.33 顯示了中間支架上典型的隔膜形狀。

F. 在未分割的箱梁中，端部支撐和中間支撐上的橫隔板開口通常尺寸不足。另一方面，為了提高浸入速度，必須確保熔融鋅能夠順暢地流入箱梁。在這種情況下，為了確保浸入速度，設定排氣孔是有效的，如圖 5.34 所示，以便快速排出箱梁內的空氣。排氣孔的直徑應為 120 mm 至 150 mm，並應以與手孔相同的方式進行加固和覆蓋。

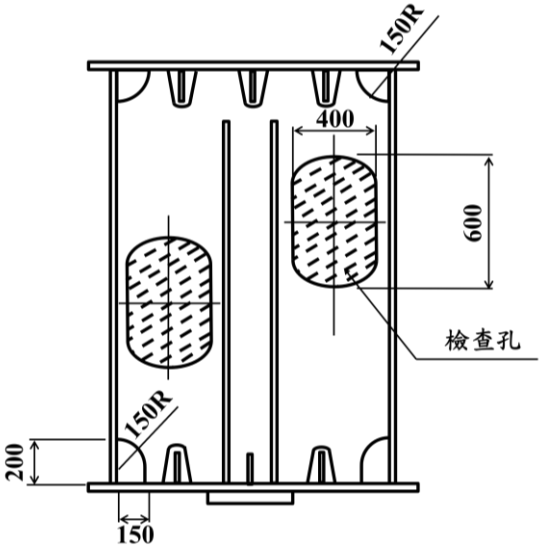


圖 5.33 中間支撐處隔板型式範例[92]

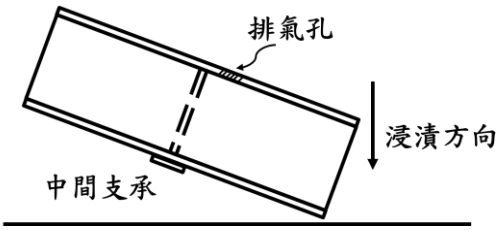


圖 5.34 構件浸入方式和排氣孔示意圖[92]

③桁架橋的設計注意事項

A.箱型斷面的構件不得為密閉結構

通常，桁架橋的桁架弦桿等構件會採用密封結構，以防止腐蝕，並用於螺栓連接。但這種會封住空氣的密封結構不能用於熱浸鍍鋅構件，因為在熱浸鍍鋅過程中存在構件爆裂的風險。相反，如果設置了排氣孔，內部將不再是密閉空間，無法進行充分的熱浸鍍鋅，導致防蝕問題。因此，如圖 5.35 所示，有必要採用開口充足的結構，而不是採用斜撐等構件變窄的密封結構。

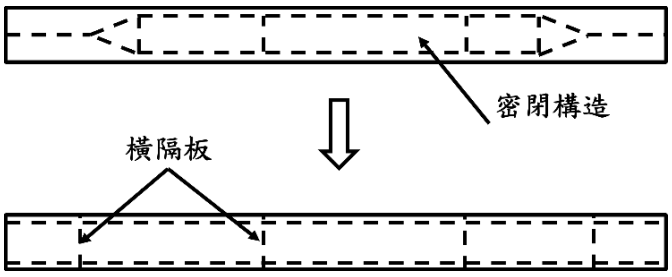
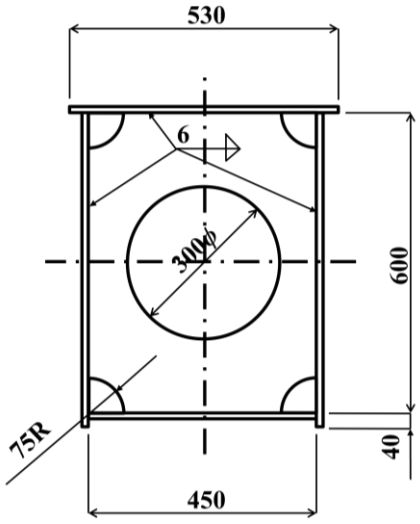


圖 5.35 垂直和斜向構件收窄結構變化範例[92]

B.隔板的開孔率必須達到 30%以上，包括四個角落的扇形切口

鍍鋅構件必須具有能夠確保盡可能大的開口率的結構，同時仍能保持隔板的原有功能。圖 5.36 顯示了橫隔板開口率為 30% 或更大的上弦桿的範例。



（開口率32.7%）

圖 5.36 隔板開口範例[92]

C.桁架構件與樓板框架構件採用搭接連接時，自由端伸出量較大，且因板層引起的熱變形較大，因此應盡可能採用對接連接方法

透過對橫梁接頭和垂直構件的連接角撐板採用對接方式，可以減少自由端的突出量。因此，可以使構件形狀更小，從而簡化熱浸鍍鋅作業時的操作，並最大程度地減少變形。圖 5.37 顯示了使用對接方法的案例結構的細節。

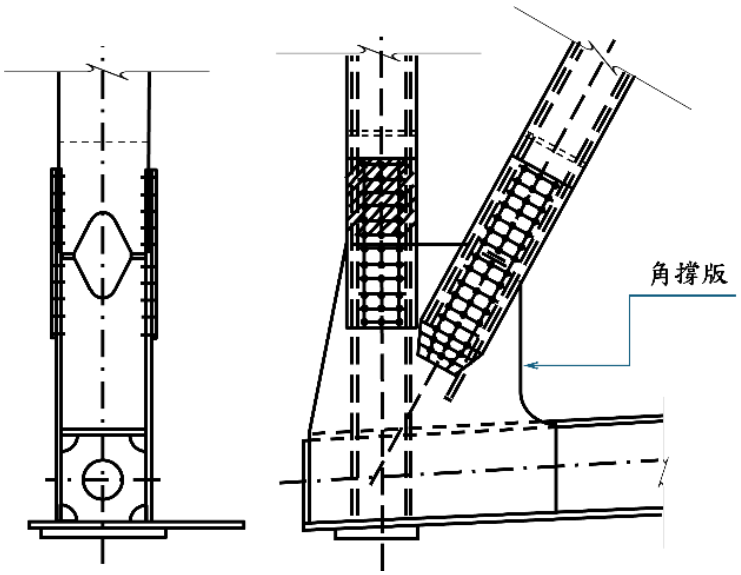


圖 5.37 對接方法詳圖[92]

D.箱型截面(例如桁架構件)的下沉式翼板內表面可以從構件末端到端部隔板進行角銲，但從端部隔板開始的部分區域可能無法進行角銲。在這種情況下，鋅的表面張力會封閉翼板和腹板交接處大部分角落的縫隙，但需要注意的是，可能會殘留一些預鍍溶液或出現一些未鍍區域。這些預鍍溶液通常會在熱浸鍍鋅後幾天內被洗掉，鋅的犧牲腐蝕保護作用會將未鍍區域的範圍限制在一定範圍內，從而防止後續生銹。因此，除非環境惡劣，否則無需進行特殊處理即可進行防蝕。箱型斷面詳圖詳見圖 5.38。

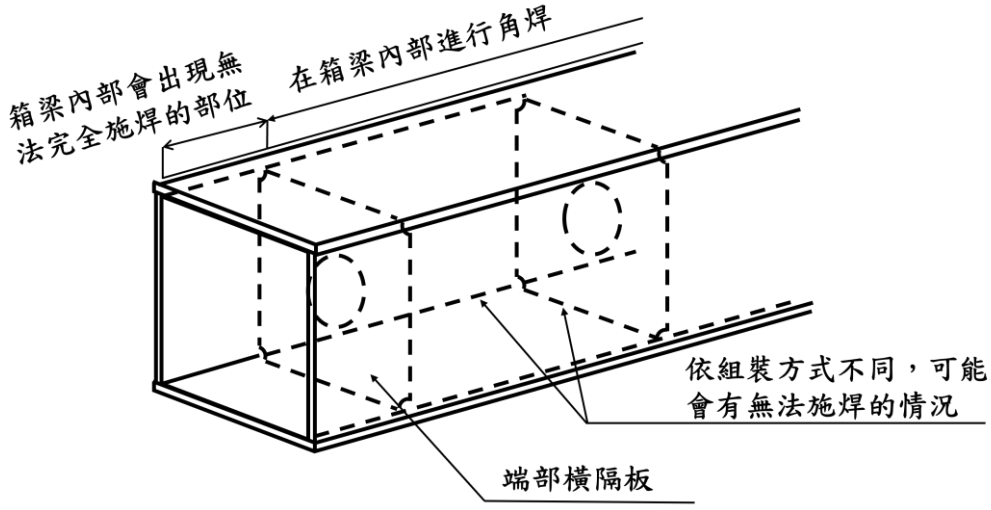


圖 5.38 箱型斷面詳圖[92]

2. 細部結構注意事項

(1)加勁板

①水平向加勁板與豎向加勁板宜分別安裝於腹板的相對側。

形狀不對稱的構件(例如，僅在一側設有加勁板的外部梁)更容易因熱浸鍍鋅而變形。做為應對措施，如圖 5.39 所示，在外梁外表面設置豎向加勁板，在內表面設置水平向加勁板，可防止變形。豎向加勁板的另一個優點是可以與施工架懸吊五金件搭配使用。

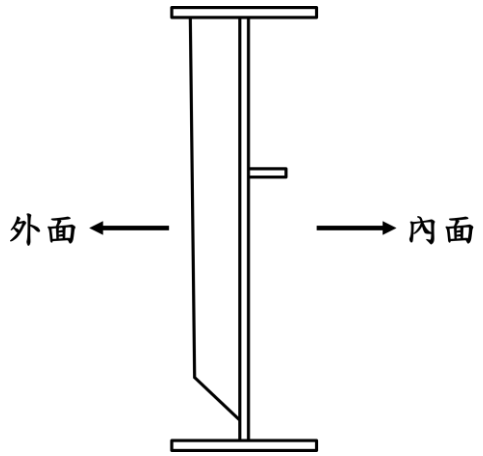


圖 5.39 加勁板安裝位置範例[92]

②水平向加勁板及豎向加勁板的形狀，以及端部的環銲部形狀，需考慮防止熱浸鍍鋅裂縫。標準形狀如圖 5.40 及圖 5.41 所示。

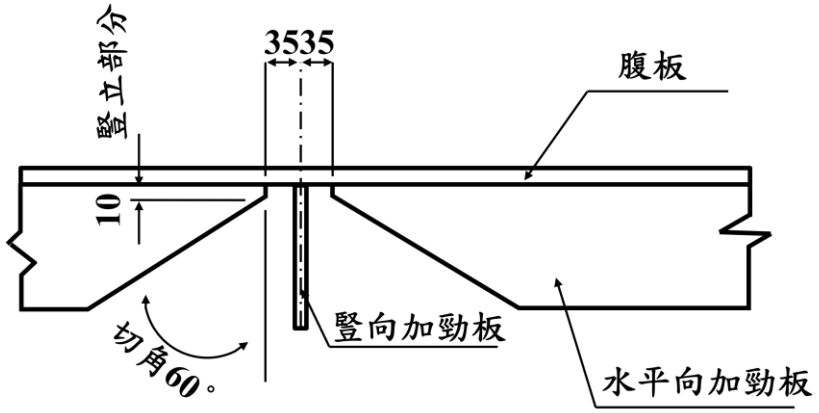


圖 5.40 水平向加勁板端部範例[92]

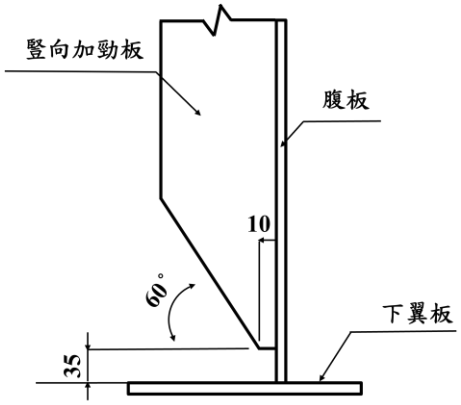


圖 5.41 豎向加勁板端部範例[92]

浸鍍的補強材端部可能發生熱浸鍍鋅裂縫。一般採用 45 度切角，但 60 度切角對防止裂縫更有效，這是由於應力集中的減低效果。因此，補強材端部的切角如圖 5.40 及圖 5.41 所示，宜為 60 度，立起部的尺寸考慮環銲施工性，約 10 mm 較為理想。此外，下翼板與垂直補強材下端的距離，若結構上可行，宜設置較大的空間做為裂縫對策。因此，如圖 5.41 所示，必要距離以 35 mm 為標準。當然，需以滿足結構設計上所需性能為前提。

③箱型梁補強材的形狀與 I 型梁相同

無論分割或非分割，箱型梁相較於 I 型梁，浸漬速度較慢。箱型梁的翼板與腹板最大板厚比相較於 I 型梁更嚴格，但補強材端部的環銲部可能發生熱浸鍍鋅裂縫。因此，水平補強材及垂直補強材端部的細節與 I 型梁的補強材細節相同。

④為防止箱型梁腹板的鼓脹，宜追加防止鼓脹的水平補強材

箱型梁因浸漬速度慢於 I 型梁，腹板的鼓脹也較 I 型梁更大。做為對策(如圖 5.42 所示)，在腹板的拉伸應力側追加一段水平補強材，可減小腹板的鼓脹。此外，將垂直補強材間隔設為小於耐荷力所需的間隔也有效果。此外，增加腹板本身的板厚對防止鼓脹也有成效。

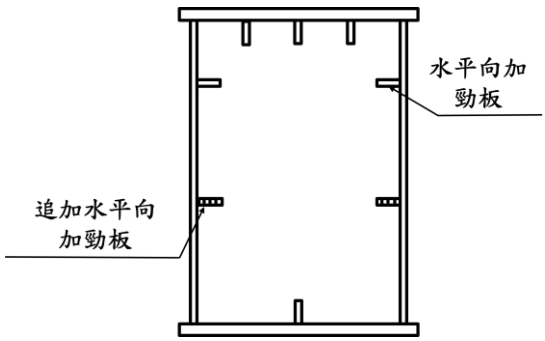


圖 5.42 防止膨脹的加勁板範例[92]

(2)熱浸鍍鋅施工的注意事項

①防止未熱浸鍍鋅

若浸漬時存在熔融鋅無法進入的空隙，可能導致未熱浸鍍鋅，成為銹蝕原因。為避免未熱浸鍍鋅，需確保熱浸鍍鋅浴浸漬時熔融鋅能遍及的結構。防止未熱浸鍍鋅所需的各部位詳細注意事項範例(如圖 5.43 所示)。

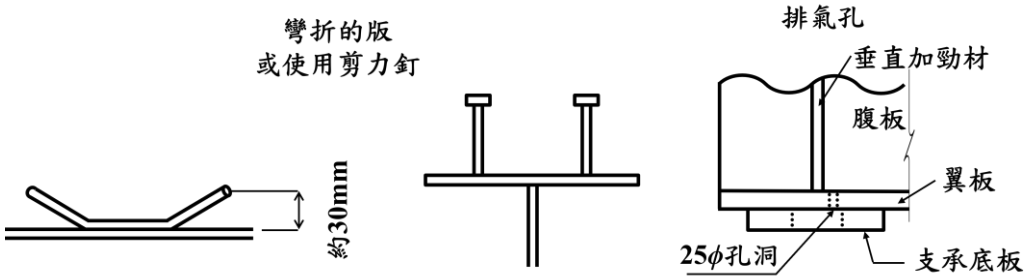


圖 5.43 防止未鍍區域的細部範例[92]

②改善垂流

熱浸鍍鋅表面附著的鋅垂流雖對防蝕功能無問題，但可能導致表面粗糙，損害外觀，或因灰塵、雨水積聚導致局部環境惡化。因此，需設置扇形切口或加大垂直補強材的切口等措施(如圖 5.44 所示)。在支點上及節點部等垂直補強材下端的扇形切口需回填時，宜在下翼板設置垂流用孔。

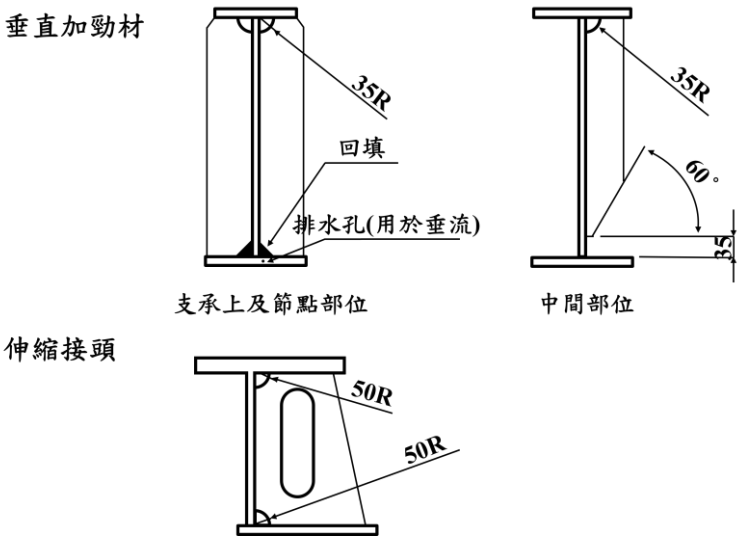
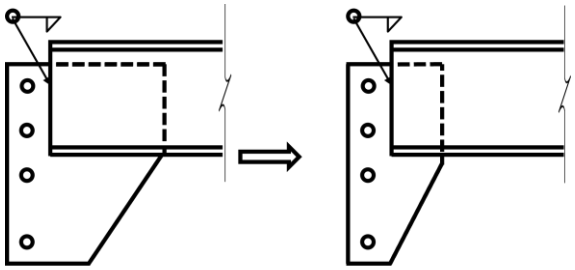


圖 5.44 改善熔融鋅滴落範例[92]

③構件的搭接銲

對於以全周銲接方式疊合構件的結構，若疊合面積較大，內部空氣或水分的膨脹可能導致疊合構件鼓脹或銲接部產生裂縫，因此宜採取必要的最小疊合量(如圖 5.45 所示)。需注意的是，此類疊合銲接接頭因難以確保疲勞耐久性，應用於鋼橋時，需限於不要求疲勞耐久性的構件等注意事項。



加勁板與構件的重疊接合部位

圖 5.45 預防不熱浸鍍鋅範例[92]

3. 支承及附屬物

(1) 支承

為維持滑動或旋轉性能，高強黃銅支承板支承、氟樹脂支承板支承的滑動面，宜進行未熱浸鍍鋅處理，並在熱浸鍍鋅後安裝不銹鋼板等進行防銹處理。

同樣，對於銷支承、樞軸支承、滾輪支承的旋轉部，宜進行未熱浸鍍鋅處理，並在熱浸鍍鋅後塗抹潤滑脂等進行防銹處理。

滾輪支承的滾輪及滾輪的滾動面，宜使用耐腐蝕材料(馬式體不銹鋼 C-13B)。此時，若熱浸鍍鋅與不銹鋼直接接觸，可能引發異種金屬接觸腐蝕，因此必需採取絕緣接觸面等措施。

當支承與底板以現場銲接接合時，因銲接熱影響會損傷熱浸鍍鋅層，在銲接線兩側約 100 mm 範圍內不可進行熱浸鍍鋅處理。

(2)附屬物

①檢查通道等

此類結構的走道板安裝多採用銲接結構，但因熱浸鍍鋅會產生較大變形，宜採用螺栓接合而非銲接。特別是構件長度超過5m的長型結構，需充分注意變形及其影響。手扶欄安裝的連接受板疊合銲接部分，通常不設螺栓孔而採用全周銲接。然而，疊合銲接因熱浸鍍鋅施工的熱影響可能導致疊合構件鼓脹或銲接部裂縫，宜考慮採用螺栓接合。

檢查通道的手扶欄等管狀結構，需設置空氣排出孔，避免密閉結構。

②防落橋裝置等

防落橋裝置的托架結構，宜考慮主梁結構設計的注意事項進行設計。

③伸縮裝置等

使用非排水型鋼製指形接頭的伸縮裝置，若對單一構件進行熱浸鍍鋅，各構件會因熱變形導致熱浸鍍鋅後難以滿足裝置整體的組裝精度要求。因此，為確保組裝精度，宜在裝置整體組合狀態下進行熱浸鍍鋅施工。防落橋裝置所需的填充材注入，應在熱浸鍍鋅施工後進行。

4. 製作及施工注意事項

熱浸鍍鋅橋的製作中，關於本章未提及的項目，應與一般橋梁的製作相同，依據「道路橋示方書Ⅱ鋼橋編」進行。本章主要以鋼橋的主結構為例，針對與熱浸鍍鋅橋相關的特殊事項進行描述，但也適用於檢查通道或排水裝置等附屬物的製作與施工。

本計畫根據既往實績等確認具有一定有效性的熱浸鍍鋅橋製作中應注意的事項進行說明，但所述方法僅為在鋼橋防蝕方法標準條件下，能發揮其原有防蝕性能及耐久性的方法。因此，不一定對所

有鋼道路橋的條件或要求性能均為最佳，視情況可能存在性能過剩或不足的情形。因此，在個別鋼橋的設計與施工中，應針對各條件進行充分考量，選擇合理且適當的方法。

(1)冷加工及鑽孔

①構件標記使用的塗料宜為水性塗料。

②構件外側的角部宜進行約 3 mm 的倒角。

③鑽孔後孔周圍的毛邊(翻邊、毛刺)需以砂輪機等去除。

④螺栓孔的孔徑不考慮熔融鋅的附著，採用標準孔徑。

(2)切割及銲接

①宜降低銲接熱輸入量並避免過大的銲腳長度。

②避免產生銲蝕、搭疊、凹坑等銲接缺陷。

③去除銲接時產生的熔渣及飛濺物。

④銲接部需確保疲勞耐久性。

⑤盡量避免產生銲接應變等。

(3)摩擦接合面的處理

①摩擦接合的處理

摩擦接合面需以噴砂處理達到表面粗糙度 60μmRz 以上。此外，需去除摩擦接合面及螺栓孔的熱浸鍍鋅積聚。因熱浸鍍鋅表面光滑，無法確保設計考慮的滑動係數 μ=0.4，因此需以噴砂處理確保摩擦接合面的滑動係數 μ=0.4。

表面粗糙度的確認需製作試驗板進行熱浸鍍鋅及噴砂處理，確保達到所需表面粗糙度，並在作業中與樣本板比較進行適時確認。除採用噴砂處理外，亦可塗佈有氧化劑鹽的酸性磷酸鋅溶液，形成磷酸鋅晶體，達到上述要求。

②處理範圍

若完全噴砂至摩擦接合面邊界，因連結板或接合構件間的精度可能導致噴砂部位曝露，引發防銹問題，因此處理範圍應為接合面邊界內側約 5 mm 的區域。摩擦接合面的處理範圍如圖 5.46 所示。

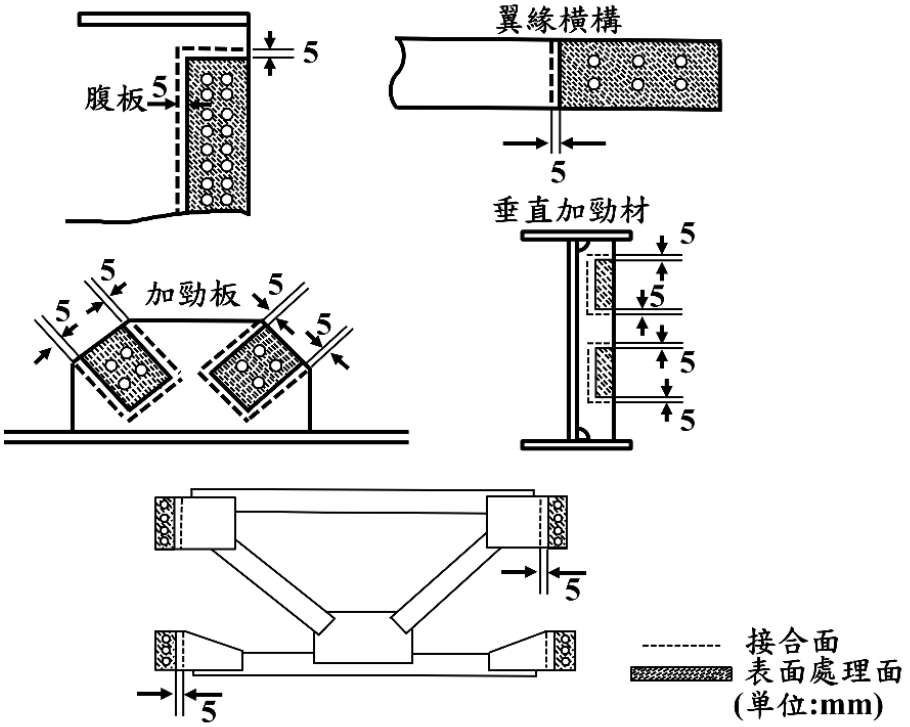


圖 5.46 摩擦接合面處理範圍範例[92]

③表面粗糙度的確認

表面粗糙度的確認需製作約 100 mm 見方的試驗板，在噴砂作業時進行對比。此處使用的試驗板需以熱浸鍍鋅附著量較少的薄板厚製作，並與產品同時進行熱浸鍍鋅。試驗板的噴砂需使用與產品相同的設備進行，因熱浸鍍鋅表面較軟為確保不移除過多熱浸鍍鋅層，並確認表面粗糙度達 60μmRz 以上，進行噴砂時除須注意使用噴砂材粒徑、材質、壓力及噴嘴距離外，如為達粗糙度要求而在不影響性能下所造成表面局部點表面純鋅層翹殼起皮是可接受。

5. 運輸及架設

(1)運輸及存儲

①運輸：在構件運輸時，需充分注意避免損傷熱浸鍍鋅層。

②存儲：存放鍍鋅構件時，必須小心謹慎，以免對鍍膜的耐腐蝕性產生不利影響。

(2)架設

①架設方法

因熱浸鍍鋅施工可能導致構件產生各種變形(扭轉)，需採用考慮此因素的架設方法。I 型梁因熱浸鍍鋅施工產生的扭轉，可能在架設過程中暫時放置時穩定性較差。此時，以對傾構、橫構等組合的塊體進行架設，可增加架設作業中梁的穩定性。在架設前安裝對傾構或橫構，不僅有助於確保架設作業的穩定性，還可確認對傾構、橫構等連結部的接口，減少高空架設作業。

箱型梁、桁架梁等因熱浸鍍鋅施工幾乎不產生扭轉，可與塗裝梁同樣進行架設作業；鋼絲、千斤頂及其他架設機材與熱浸鍍鋅構件接觸的部位，需墊以毛氈、橡膠等，保護熱浸鍍鋅層不受損傷；使用沒有生銹的導孔沖銷和臨時緊固螺栓，建議使用直徑比正常直徑小的導孔沖銷(約-0.5 mm)，以盡量減少錘入時對螺栓孔的損壞。

②吊掛配件的安裝

吊施工架五金、模板支撐等吊掛五金，需在熱浸鍍鋅施工前於工廠安裝，以避免污染或損傷熱浸鍍鋅表面。除非影響橋面板等結構，最好不要拆除安裝懸掛硬體等。如果需要拆除，則應以氣體切割等方法拆除，但在這種情況下，需要用防火板等保護構件表面，以防止火花損壞鍍鋅層。鏈條、夾具、管材等與熱浸鍍鋅構件的接觸面，需以布、橡膠、合板面板等保護，避免損傷熱浸鍍鋅層。混凝土澆置時，需以膠帶、橡膠、海綿等密封模板接

縫的間隙，防止砂漿或水泥漿滲漏。若混凝土附著，需立即以水洗或以抹布等擦拭去除。

(3)接合部的施工

鋼結構施工規範(TISC 031-2022)[172]規定「熱浸鍍鋅螺栓之安裝不得採用扭力控制方式(包括校正扳手法及斷尾螺栓法) 鎖固。應採用螺帽旋轉法或直接張力指示器法，並應適當考量鍍鋅可能造成的預拉力損失。」;《道路橋示方書II鋼橋編》建議「熱浸鍍鋅高強度螺栓的鎖固採用螺帽旋轉法進行，透過施加接近螺栓強度的軸向力，補償因潛變導致的螺栓軸力下降。

6. 其他注意事項

(1)熱浸鍍鋅用吊掛五金

①設計

依據日本土木學會「鋼結構架設設計施工指針」[173]進行設計，該指針第 5.5 節吊掛五金，吊掛五金需考慮除構件本身重量外，還必須考慮構件本身重量的 50 % (2 點吊裝)和 100 % (4 點吊裝)的非均勻荷重。熱浸鍍鋅層重量及浸漬時的浮力無需考慮。一般熱浸鍍鋅作業多採用直吊，但從安全性考慮，宜假設斜吊情況，設計吊鋼絲與構件的交角為 60 度。

②安裝位置

主梁熱浸鍍鋅作業用吊掛五金的安裝位置，宜設於距構件端部約構件長度的 1/5 處，一般與架設用吊掛五金設置於不同位置。對於主梁等長型構件，採用兩點吊掛進行熱浸鍍鋅作業，因此在兩端部距構件長度約 1/5 處設置吊掛五金，如圖 5.47 所示進行直吊。原則上，吊掛五金的安裝位置應使腹板中心線上呈現吊掛狀態，確保腹板垂直。對於分割箱型梁等無腹板側，宜安裝於橫隔板或橫肋位置等，並需在梁內側設置熱浸鍍鋅施工時的變形防止材。此外，對於梁高較高的構件，需確認包括吊掛五金在內的全高是否能進行熱浸鍍鋅施工。

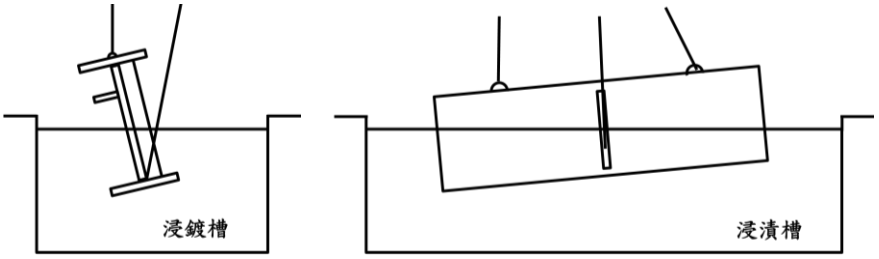


圖 5.47 懸掛吊具和浸沒狀態範例[92]

③其他

一般而言，主梁吊掛五金的孔徑與銷釘直徑差越小，銷的拔除越困難。另一方面，從設計角度，孔徑與銷徑差越大，孔周圍的應力集中越大，因此宜使孔徑與銷徑差盡量小。一般架設用吊掛五金的孔徑與銷徑差設計為 4 mm，但熱浸鍍鋅用吊掛五金需考慮熱浸鍍鋅導致的銷釘直徑增大，宜將孔徑與銷釘直徑差設計 5 mm 左右。

(2) 變形防止用拘束材和其運用

主梁現場接合側的腹板端部為未補強的部位，熱浸鍍鋅導致的鼓脹通常較大。透過在該部位預先設置變形防止用拘束材，可顯著減少變形量。使用的變形防止用拘束材，宜採用易於取得且具剛性的山形鋼。安裝時使用普通螺栓，在梁本體與拘束材之間，宜在端部四方設置直徑 10 mm 以上的半圓形鋅流出孔的管狀間隔件，並將其銲接於拘束材上進行組裝。

①以腹板高度 2m 以上時，現場接合側的腹板端部需安裝拘束材防止變形。

②箱型梁無論腹板高度如何，現場接合側的腹板端部均需設置變形防止用拘束材。

③分割梁中，做為熱浸鍍鋅施工時的變形防止措施，宜在縱分割部設置撐桿、撐板等。

④分割箱型梁的拘束材宜保留至箱型形狀組裝完成。

(3)表面處理

①腹板的平面度管理

補強材銲接後的應變去除，採用氣體燃燒器加熱矯正法或壓機矯正法進行。在應變去除作業中，為使熱浸鍍鋅後的變形盡量減小，針對腹板的鼓脹，宜以腹板高度的 1/500 至 1/600 的平面度做為精度管理的目標。

若製作時的應變以加熱矯正處理，因熱浸鍍鋅工程中加熱至約 440℃，應變可能部分釋放，導致類似矯正前的應變再次發生，需特別注意。但一般而言，應變量會比矯正前減少。

熱浸鍍鋅施工後的矯正原則上採用壓機等的冷間加工進行，進行壓機矯正時需使用毛氈或墊板，避免損傷熱浸鍍鋅層。

②熱浸鍍鋅作業的處理

通常直接寫於構件上的標記會因熱浸鍍鋅施工而消失，導致無法識別構件，因此需以適當方法確保熱浸鍍鋅後能識別構件。主梁等可採用在標籤(鋼製，厚度約 3.2 mm)上打刻構件編號並以鐵絲固定於主梁上的方法。連結板在外側表面，對傾構等在連接受板部直接打刻構件編號。

在進行熱浸鍍鋅施工前，需確認已完成防止未熱浸鍍鋅、改善垂流、空氣排出孔、吊掛五金等熱浸鍍鋅施工所需的處理。

(4)精度

熱浸鍍鋅後產品的精度，與一般鋼橋的精度相同。為確認精度，必要時宜在熱浸鍍鋅施工前後進行假組立。為減小損傷熱浸鍍鋅層的風險，對於形狀或接口複雜的情況，宜在熱浸鍍鋅施工前進行假組立以確認接口等。

對於實績較少的結構型式橋梁，若無法預測熱浸鍍鋅導致的變形，宜進行假組立以確認熱浸鍍鋅變形是否在限制值內。進行假組立時，需注意避免損傷熱浸鍍鋅層或附著油脂類物質。

(5)熱浸鍍鋅表面塗裝

隨著塗裝技術的進步，可在施加熱浸鍍鋅的鋼鐵產品上進一步進行塗裝，因此熱浸鍍鋅表面塗裝開始被應用。對熱浸鍍鋅產品進行塗裝的目的依用途不同而異，大致分為以下幾類。有關熱浸鍍鋅表面的塗裝，可參考 4.2.3 節「塗裝」。

①為環境美化等外觀色彩賦予的塗裝

②為修補困難的結構物提升耐久性

③嚴苛腐蝕環境中的長期耐久性保持

7. 熱浸鍍鋅施工

承包商在施工前應依工程合約及設計圖說之規定，製作熱浸鍍鋅施工計畫書，並經工程司核可後方可施工。熱浸鍍鋅施工計畫書應包含工廠規模與人力配置、熱浸鍍鋅適用標準、熱浸鍍鋅原料、鍍鋅廠設備、熱浸鍍鋅施工作業流程、構件底材管理、成品搬運與儲放、鍍鋅工廠之環境安全衛生、自主檢查與品質管理等項目。

熱浸鍍鋅作業前，鍍鋅廠應先了解鋼橋構件尺寸大小及重量，以評估鍍鋅廠之機具與設備是否有足夠的容量進行鍍鋅作業，並先與鋼構廠商討論並調整結構細部與施工作業，以利熱浸鍍鋅品質之控制。熱浸鍍鋅施工應依據 CNS 10007 鋼鐵之熱浸鍍鋅及 CNS 8503 熱浸鍍鋅作業方法來進行。

(1)底材管理

熱浸鍍鋅用底材須符合 CNS 10007 附錄 A 相關規定。底材之表面狀態、厚度、材質及構造，必須能形成良好熱浸鍍鋅層的表面狀態之條件。為使鍍鋅之品質一致，底材必須事先有明確的材質證明，特別是底材中化學成分之矽(Si)、磷(P)，對熱浸鍍鋅品質影響很大，所以須確認含量。

各項不適用於鍍鋅之表面狀態及構造的底材(如 CNS 10007 表 A.1 所示)若進行熱浸鍍鋅處理會產生裸點、有礙使用等缺陷，

其前處理應於設計及生產製作前與具有專門知識者(例：經認證之熱浸鍍鋅業者等)協議之。

(2)作業流程

鋼橋構件之熱浸鍍鋅作業應依圖 5.48 所示之流程進行之。其中，脫脂、去除氧化物、助熔劑處理稱為前處理工程，是形成良好熱浸鍍鋅層所需的必要工程。

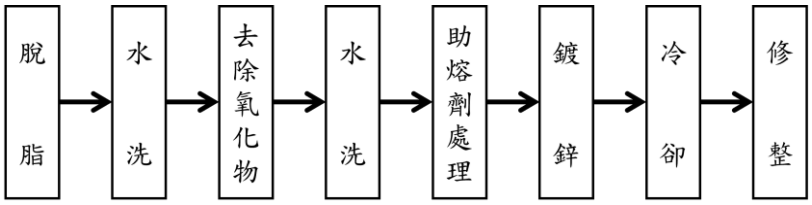


圖 5.48 鋼構件熱浸鍍鋅作業流程

①前處理工程

A.脫脂

製作完成的主梁或附屬物的鋼材表面附著有銹蝕、加工時的油脂、標記塗料等，若這些殘留會導致未熱浸鍍鋅。因此，一般將待熱浸鍍鋅的構件浸入鹼性水溶液中進行脫脂。對於僅靠鹼性脫脂無法去除的附著物，可使用有機溶劑或噴砂等方法去除。

B.去除氧化物

熱浸鍍鋅層的合金層由鐵與鋅的合金反應生成。為使此反應順利進行，需去除妨礙界面相互接觸的銹蝕或氧化皮。必要時須用機械法(用噴砂機、鋼刷)或化學方法(用硫酸、鹽酸、氫氟酸等之水溶液)去除。高強度螺栓採噴砂方式處理。

C.助熔劑工程

熱浸鍍鋅層由鐵與熔融鋅反應形成，若兩者接觸面存在銹蝕、污物(鹼性鐵鹽)、氧化鋅等雜質會妨礙合金反應，導致未能鍍鋅。因此，使用氯化鋅與氯化銨的混合水溶液(助熔劑)進行洗淨。助熔劑不僅能防止材料表面的氧化，還能溶解去除

這些雜質，促進合金反應順利進行，幫助形成完整的熱浸鍍鋅層。對於小型構件的助熔劑處理，有時也使用氯化銨水溶液。

②浸鍍作業

將已處理之底材，以適當之裝置浸泡於熔鋅浴中，保持一定時間，從清淨之浴面中提出， 除去過量之鋅後冷卻。

同鋼種同尺寸之底材浸鍍時，浴溫之變化應保持在±5 ℃以內，浸鍍時間之變化應在±5 秒以內。浸鍍件吊離鍍浴後，利用輕搖、離心力、空氣或水蒸氣等方式去除鋅垂滴。除去鋅垂滴之後，可以空冷或水冷方式冷卻。

A. I 型梁的熱浸鍍鋅

I 型梁的浸漬一般以 6m/min 的浸漬速度為目標，傾斜 3 至 5 度迅速進行浸漬。對於主梁，浸漬時間的設定依據底板或翼板等最大板厚決定。這是因為板厚較厚的部分熱傳導較慢，熱浸鍍鋅形成需較長時間。熱浸鍍鋅完成並拉起構件時，需充分去除浴表面的鋅氧化物(進行除渣作業)，從清淨的浴面拉起。拉起時的構件，為避免下翼板底面產生直線性垂流，需不僅在長度方向，還在拉起過程中或拉起完成後，在橫向也給予一定角度。圖 5.49 顯示了吊掛五金的安裝情況及考慮垂流去除的構件拉起角度要領。

B. 箱型梁的熱浸鍍鋅

箱型梁的熱浸鍍鋅施工基本上依據 I 型梁的要領進行，但非分割結構梁的熱浸鍍鋅施工浸漬方法需注意以下幾點：

(a) 浸入熱浸鍍鋅浴的浸漬速度與 I 型梁相同，對熱浸鍍鋅後產品的變形及銲接止端部的裂縫等有影響，因此需盡可能以較快的速度進行浸漬。

(b) 當由不同板厚構件組成的銲接結構物浸入熱浸鍍鋅浴時，各構件會熱膨脹，但浸漬途中構件的溫度差導致拘束部位

產生應力(熱應力)。此浸漬中產生的熱應力隨浸漬速度加快而趨於減少。

(c) I 型梁的浸漬速度通常可超過 6m/min，但非分割箱型梁因構件形狀導致的浮力較大，需以 4m/min 以上的浸漬速度為目標進行規劃。為確保非分割箱型梁的浸漬速度，減小浮力至關重要，需設置橫隔板開口率 30%以上。

(d) 此外，圖 5.49 所示，浸漬姿態需以自重顯著作用的方式，將浸漬角度設為約 20 度較大，並考慮橫隔板的位置及開口率決定浸漬方向。即使分割，若構件寬度較大，浸漬速度也會下降，需特別注意。

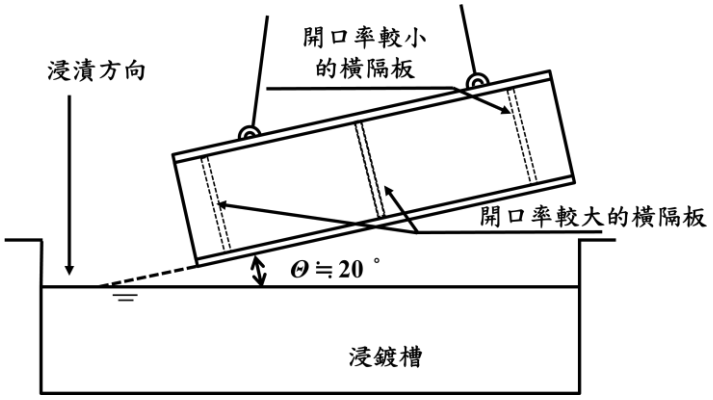


圖 5.49 未分割箱梁浸沒方式示意圖[92]

8. 不良品之處理

水冷後，殘餘於鍍件之冷卻水應徹底去除，並保持乾燥。不良品之處理依 CNS 10007 之 6.4 規定辦理。

(1) 熱浸鍍鋅層缺陷的修補

熱浸鍍鋅層的缺陷分為影響耐腐蝕性及耐久性的未熱浸鍍鋅、刮痕、除渣殘留等缺陷，以及發生於連結面的垂流、接縫、粗糙等對使用有害的缺陷。垂流、粗糙、除渣殘留等需以銼刀或砂輪機平滑處理。未熱浸鍍鋅、刮痕等需依第(3)項所示方法進行修補。

(2) 熱浸鍍鋅施工後構件形狀的修補

熱浸鍍鋅施工導致的構件彎曲、腹板鼓脹等形狀不良，宜以壓機等進行修補。此時需注意使用治具等避免損傷熱浸鍍鋅表面或附著塗料、油脂等。

加熱矯正效果較小且會損傷熱浸鍍鋅層，原則上不得進行。

(3) 熱浸鍍鋅層損傷部位的修補

熱浸鍍鋅層損傷時，無法透過再次熱浸鍍鋅處理恢復至損傷前的皮膜。因此，需以塗裝等不同防蝕方法進行修補，修補方法不同會導致修補後劣化程度不同，因此損傷部位的處理在維護管理中需特別注意。依 CNS 15257 之規定進行修補，修補方法包括：鋅基銲料熱浸鍍鋅修補、鋅粉漆修補及鋅熔射修補等方法。

9. 施工及品質管理

熱浸鍍鋅的品質應依據 CNS 10007 鋼鐵之熱浸鍍鋅，熱浸鍍鋅表面需平滑，不得有未熱浸鍍鋅或其他對防蝕性及耐久性有害的缺陷。此外，熱浸鍍鋅層需與鋼材基體良好密著，在通常處理下不得發生剝離或裂縫。熱浸鍍鋅的附著量及附著性試驗方法依據 CNS 1247 熱浸鍍鋅檢驗法規定辦理。

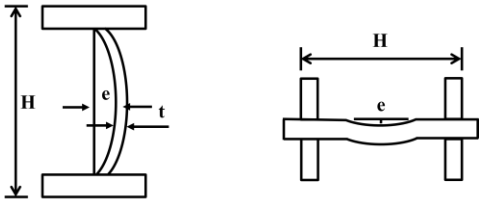
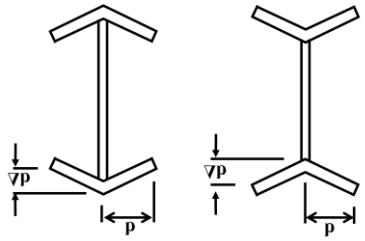
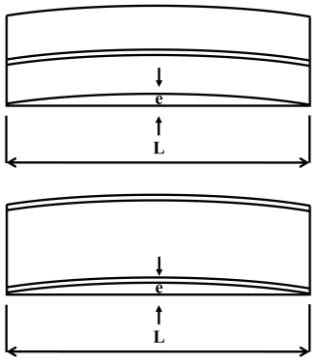
(1) 外觀

依據 CNS 10007 6.1 節外觀之規定：鍍鋅表面應平整實用，外觀應由買賣雙方依鍍鋅製品之用途協議之，不得有妨礙使用上之裸點等缺陷。此外，熱浸鍍鋅外觀與其耐蝕性無關之色澤明亮性如燒灰，或濕氣產生之腐蝕生成物如白銹，不能做為判定合格與否之依據。

(2) 構件鍍鋅後變形量

本項檢查適用於 I 型梁、桁架梁等構造單純之檢查。箱型梁則採鍍鋅後於預組裝時檢查。I 型主梁熱浸鍍鋅後應進行 100%變形量檢查，檢驗項目包括腹板平整度、翼板與腹板間之夾角、構件彎曲度。熱浸鍍鋅鋼構件之變形量應符合表 5-19。

表 5-19 鍍鋅後構件之容許誤差[174]

項次	檢查項目	容許誤差	圖示
1	腹板彎曲度 (e)	$e \leq H/150$ H：腹板高(mm)	
2	斷面直角度 (Δb)	$\Delta b \leq b/100$	
3	彎曲度 (e)	$e \leq L/1000$ L：構材長度(mm)	

(3)螺栓孔檢查

熱浸鍍鋅構件應進行 100%之螺栓孔檢驗。熱浸鍍鋅構件螺栓孔檢驗之貫穿率及阻塞率，如表 5-20 所示。

表 5-20 熱浸鍍鋅構件螺栓孔貫穿率及阻塞率[174]

螺栓(標稱直徑 D)	貫穿標準規直徑(mm)	貫穿率	阻塞標準規直徑(mm)	阻塞率
摩阻型	D+1.5	100%	D+2.5	80%

(4)鍍鋅層附著量與鍍鋅層均勻性檢驗

鍍鋅層附著量依據 CNS 10007 第 7.3 節之規定進行試驗，並應符合表 5-21 之規定。鍍鋅層均勻性檢驗依據第 7.4 節之規定進行硫酸銅試驗，並應符合表 5-21 之試驗次數，判定基準依 CNS 1247 第 6.7 節規定辦理。

表 5-21 鍍鋅層附著量與硫酸銅試驗次數(CNS 10007)[85]

種類	符號	硫酸銅試驗次數	鍍鋅層附著量 g/m^2	全區平均鍍鋅膜厚μm	局部鍍鋅膜厚μm
1類 A	HDZ A	4次	-	28～42	-
1類 B	HDZ B	5次	-	35～49	-
2類 35	HDZ 35	-	350以上	49以上	35以上
2類 40	HDZ 40	-	400以上	56以上	49以上
2類 45	HDZ 45	-	450以上	63以上	56以上
2類 50	HDZ 50	-	500以上	69以上	63以上
2 類 55	HDZ 55	-	550 以上	76 以上	69 以上

備考 1：鍍鋅膜厚係指從鍍鋅表面到底材表面之膜厚值。
備考 2：1 類 A 及 1 類 B 之平均鍍鋅膜厚值，係由硫酸銅試驗次數推算而得之最小鍍鋅膜厚範圍。
備考 3：平均鍍鋅膜厚係以鍍鋅層附著量除以鋅之密度 7.2 g/cm^2 而得。
備考 4：全區平均鍍鋅膜厚及局部鍍鋅膜厚之定義參照 ISO 1461。

(5)鍍鋅層附著性

ISO 1461:2022 指出目前尚無適用於測試熱浸鍍鋅層在鋼鐵製品上附著性的國際標準。鋅與基材金屬之間的附著性通常無需測試，因為鍍鋅製程本身即可提供足夠的結合力，鍍鋅製品應能承受與鍍鋅層性質和厚度以及製品正常使用相符的操作，且不會出現剝落或脫落。如果買方要求進行附著力測試，則任何此類測試都應在鍍鋅前由鍍鋅廠和買方協商確定。

(6)防蝕記錄

在進行防蝕調查、修補時，為確認防蝕方法及施工時期，需在結構物上記入防蝕記錄表。若在熱浸鍍鋅層上進行塗裝，宜併同記錄塗裝的相關記錄。依據 CNS 10007 鋼鐵之熱浸鍍鋅 9 節規定，熱浸鍍鋅之產品應標示下列項目：

①鍍鋅層種類符號。

②加工年月或其批號。

③加工廠商名稱或其商標。

5.2.4 金屬熔射

為確保噴砂和金屬熔射的良好品質，務必與待處理表面保持一定距離，並儘可能直接面對該表面。因此，需要為此確保盡可能多的工作空間(約 $1m^3$)(如圖 5.50 所示)。由於桁架和拱形系統的節點和橫梁接頭處，通常難以確保工作空間，因此必須仔細考慮工作空間及金屬熔射時的姿勢。如果設計中無法避免扇形開孔等無法正確進行金屬熔射的區域，則應根據金屬熔射困難區域的修復規範，從一開始就對這些區域進行防蝕處理。

為了最大限度地發揮金屬熔射的防蝕性能，在結構細節設計上應避免濕氣積聚或局部環境中積水。但是，如果結構設計不可避免地會造成超出金屬熔射適用範圍的區域，則建議採取其他防蝕措施。

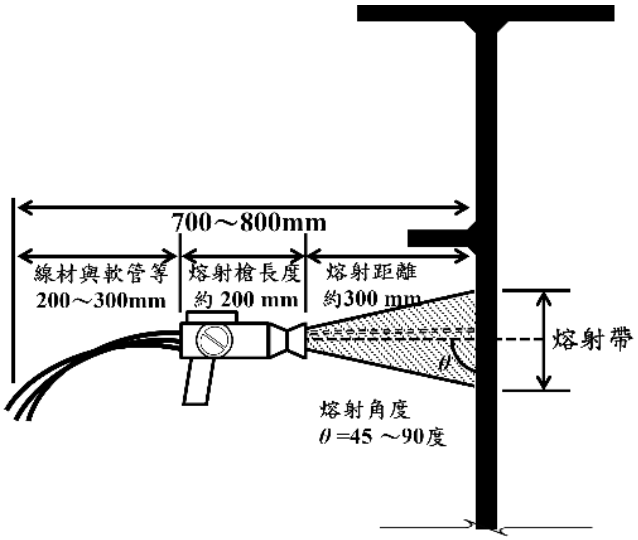


圖 5.50 熔射的作業條件示意圖[92]

1. 結構設計注意事項

以下是從結構設計階段就必須考慮的設計因素：

(1) 高強度螺栓摩擦接合連接部位的設計

①高強度螺栓的接合方式採用摩擦接合，熱浸鍍鋅高強度螺栓種類與等級請參考 4.2.5 節。鍍層附著量需為 $550g/m^2$ 以上。

②鋼橋的接合面處理一般為噴砂處理或無機鋅粉底漆塗布處理。

若對接合面施加金屬熔射，需確認滑動係數，確保所需接合性能。若接合面採用無機鋅粉底漆規格，需充分考慮對熔射區域邊界產生不良影響，並事先確認接合完成後是否可進行熔射施工。

(2)加勁板的設計

①豎向加勁板

A.加勁板的扇形切口為熔射施工困難部位，宜進行填銲處理。但填銲扇形切口部時，需確保達到所需的疲勞耐久性。

B.如果鋼梁的豎向加勁板與翼板不銲接，會留下狹窄空間，成為熔射施工困難部位，因此最好進行銲接。此情況同樣需另行確認是否能達到所需的疲勞耐久性。

②橫撐設計

當橫撐連板靠近主梁翼板時，可能導致該部位熔射施工困難。此情況下，需變更安裝高度或將連板改為螺栓接合的分離結構，以確保良好金屬熔射效果。

2. 細部結構注意事項

針對鋼橋防蝕法，描述在標準條件下可發揮固有防蝕性能及耐久性的方法，但不一定對所有鋼橋的條件或要求性能最佳，可能存在性能過剩或不足的情況。ISO 2063-1 提供了避免產生腐蝕區域之構件設計建議。因此，鋼橋的設計、施工需參考相關規範，根據各自條件充分檢討，採用合理且適當的方法。以下是一些可以在設計階段選擇的詳細結構範例。

(1)構件自由邊緣角處理

構件組裝後成為自由端的切斷面角部尖銳，熔射層易剝離，需進行角部倒角處理。特別是如圖 5.51 所示，進行 2R 以上的倒角(C5 以上環境建議採 3R 倒角)，有助於確保熔射層厚度。若局部熔射層厚度不足，環境遮斷性及電化學防蝕作用減弱，可能加速該部位銹蝕。

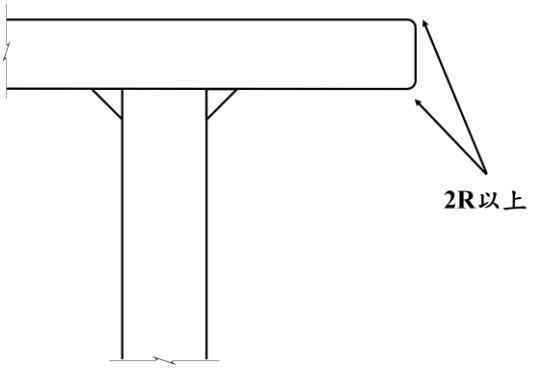


圖 5.51 2R 以上倒角範例[92]

(2)加勁板

鋼梁加勁板的安裝需盡可能避免產生狹窄部位。例如，豎向加勁板與水平向加勁板安裝在同一平面時，宜採如圖 5.52 所示方式處理。

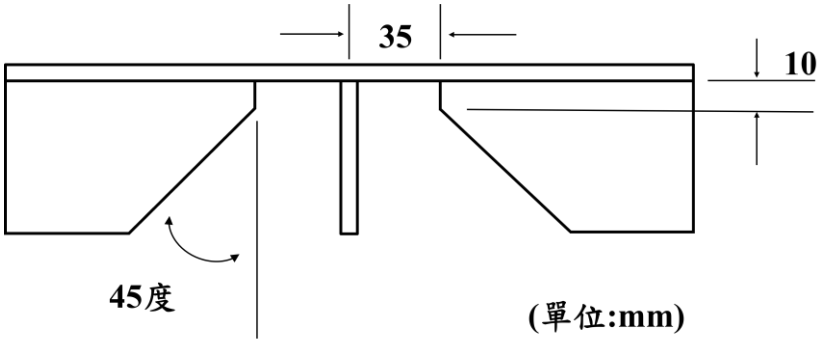


圖 5.52 加勁板切口範例[92]

(3)支承及附屬物

①支承

支承部位易積濕、受伸縮裝置部漏水、雨水吹入或滯水影響，且可能堆積土壤或塵埃，屬於易受水影響的部位。此類部位宜選擇「熔射+塗裝」的規格。因此，需從橋梁規劃及設計階段充分檢討確保現場熔射施工的作業空間。

②檢查通道及排水裝置

檢查通道及排水裝置多為小型構件，狹窄部位的施工存在難點。從保護熔射層的觀點，構件操作需注意。

這些構件不一定需與橋本體採用相同防蝕工法，需充分檢討施工性、耐久性等條件，根據維持管理方式選擇適當的防蝕工法與規格。

③附屬物安裝配件等

銲接於本體的附屬物安裝配件，宜採用與本體相同的防蝕規格。透過螺栓等與其他構件接合的部件，相較銲接，供用後的更新對本體結構影響較小，可在充分考慮金屬性質避免異種金屬接觸問題的情況下，不限於熔射，選擇最適合該構件的防蝕規格。

3. 熔射困難部位

在金屬熔射作業中，噴槍需要盡可能直接面向表面，因此通常需要約 1 m^3 的工作空間。圖 5.53~圖 5.55 顯示了由於空間有限而難以在鋼橋梁上進行金屬熔射作業的典型情況範例。

由於熔射的金屬顆粒沿著直線飛行，因此熔射的顆粒不會附著在飛行線另一側的表面上。在扇形切口內部等噴槍不直接面對、熔射金屬顆粒不易直接擊中的區域，難以確保熔射層厚度，需要在這些區域單獨熔射以滿足所需的防蝕性能。需要注意的是，在熔射困難且單位面積面積較小的區域，可以使用表 4-53 所示的超厚膜環氧樹脂塗料進行重防蝕塗裝。此外，如果熔射角度較小、距離較長，熔射金屬的附著效率會降低，熔射層也會變得粗糙。在這些部位，也建議採用超厚膜環氧樹脂塗料來提高耐腐蝕性。

對於鋼橋面梁來說，這些區域包括腹板連接板與下翼板連接板重疊的下翼板螺栓、腹板側的表面以及扇貝的端面。通常情況下，這些區域的面積較小，但由於整座橋梁都採用了類似的細節，因此有相當多的區域存在施工難度。因此，在設計階段就必須仔細考慮如何處理這些難以熔射的區域。

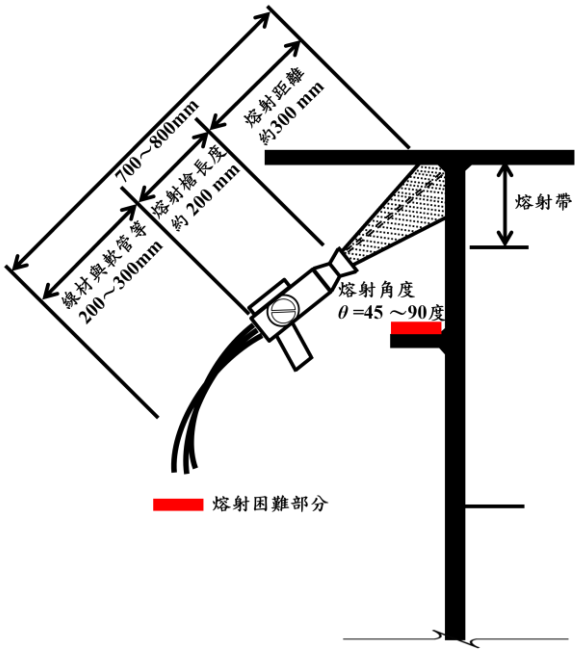


圖 5.53 熔射困難部位示意圖[92]

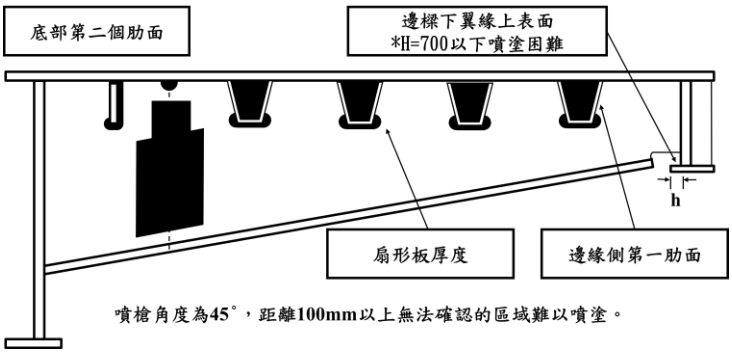


圖 5.54 熔射困難部位(狹窄部位)示意圖[92]

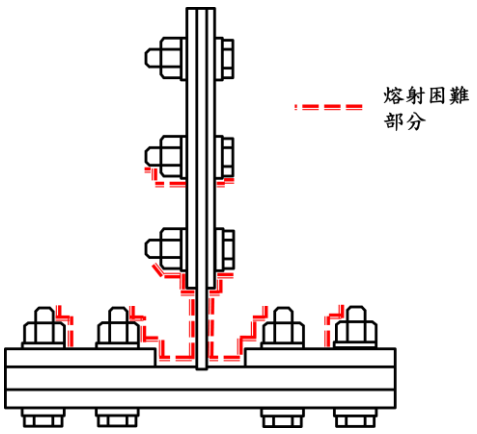


圖 5.55 熔射困難部位(螺栓部位)示意圖[92]

4. 製作及施工注意事項

關於採用金屬熔射防蝕的橋梁在製作與施工上，除本章記述的項目外，其他項目與採用塗裝的一般橋梁相同。此外，未在本章記述的事項，請依據橋梁設計規範進行。本章僅介紹與金屬熔射相關的注意事項。

(1)加工與鑽孔

加工與鑽孔作業的注意事項如下：

①構件標記最好使用水性塗料，避免可能導致熔射層附著不良。

②鋼板但鑽孔後孔周圍的毛邊(翻邊與毛刺)需使用研磨機等確實去除，以防止孔周圍發生熔射遺漏。

(2)切割與銲接

①鋼橋的製作中，對於氣體切割的厚板鋼材，因輸入熱量較大，切割面因熱影響而硬化，進行噴砂粗面化時，需注意選擇研磨材以獲得熔射所需的表面粗糙度。

②加勁板及連接板的全周銲接部需避免產生銲蝕、搭疊。這些缺陷及銲接部終端形狀不均，需在熔射施工前使用研磨機等平滑修補。

③銲接接合部的缺陷(凹坑、搭疊、銲蝕)可能成為熔射不良的原因，需事先修補。

④若銲接線不連續，熔射後可能發生銹蝕，需確保銲接線完全連續。

⑤銲接作業應於金屬熔射之前完成。若構件需於後續銲接，則應遮蔽銲接區域，並於距離坡口約 100 mm 範圍內不得進行熔射。若銲接可於金屬熔射後進行，則僅需依 ISO 8501-3 對銲接區域進行表面處理並局部塗覆。

(3)摩擦接合面的處理

摩擦接合面的處理需充分檢討以下事項，確保連接部位要求的性能及施工品質加勁板及連接板的全周銲接部需避免產生銲蝕、搭疊。這些缺陷及銲接部終端形狀不均，需在熔射施工前使用研磨機等平滑修補。

①摩擦接合的高強度螺栓接觸面需施加適當處理，確保設計假定的滑動係數。若在承壓接合中以改善接合部性能為目的，對螺栓施加緊固軸力以期待摩擦力傳遞力，或在拉伸接合中以接觸面摩擦力傳遞剪力，接合面需進行與摩擦接合相同的處理。

②接觸面常附著浮銹、油、泥沙等。此情況下，需在現場接合前充分清潔接觸面，去除這些物質。

③使用熱浸鍍鋅高強度螺栓。

(4)運輸及架設

熔射構件的運輸與架設需謹慎操作，盡可能避免損傷熔射層。

①構件標記：熔射層表面不平滑，標記後難以去除，因此在已施加熔射的表面進行構件標記需注意。

②運輸時的注意事項

A.構件重量達 5t 以上時，宜在顯眼位置以鋁箔貼紙等，記錄重量及重心位置，以利現場作業防止事故。

B.構件運輸時的損傷可能發生於裝載、運輸途中、卸貨時，需牢固固定並小心運輸。若運輸途中可能附著鹽分，需採取養護措施避免飛來鹽分直接接觸構件，必要時進行水洗等處理。

③構件的儲存與暫時置放：工廠儲存及架設現場構件暫時置放時，需注意存放位置及防止構件傾倒等損傷熔射層。

④架設及防護

A.熔射構件架設中，其他構件或工具可能接觸導致熔射層損傷。

視損傷程度可能需進行修補，因此需充分注意。

B. 架設完成後，與施工的混凝土或鋪裝接觸部位等，若因降雨等預期發生銹蝕，需充分考量現場條件，使用無機鋅粉底漆等進行臨時防蝕處理。

C. 對熔射層進行防護時，若使用覆蓋膜，需注意覆蓋膜中的塑化劑不影響塗膜。若使用不透水覆蓋膜進行防護，需注意施工避免熔射層長時間處於濕潤狀態。

⑤高強度螺栓的緊固：螺栓軸力的導入採用螺帽旋轉法。高強度螺栓使用熱浸鍍鋅高強度螺栓，接合板的接觸面需施加適當處理，確保滑動係數達到 0.4 以上。若接觸面附著浮白銹、油汙、泥漿等，需充分清潔接觸面徹底去除這些物質。

5. 金屬熔射施工

金屬熔射是一種透過熱源將具有防蝕效果的金屬加熱熔融，製成微細的熔融金屬粒子，並以高壓空氣或燃燒火焰等將其噴射至被處理面(鋼橋的情況為鋼材表面)形成熔射層的方法(圖 5.56)。金屬熔射形成的熔射層具有以下特徵：

(1)熔射層中通常含有 1~15%的氣孔。

(2)表面具有類似噴砂面的粗糙度，不平滑。

(3)熔射層與鋼材主要透過機械式結合，若鋼材表面無適當粗糙度，則無法密著。

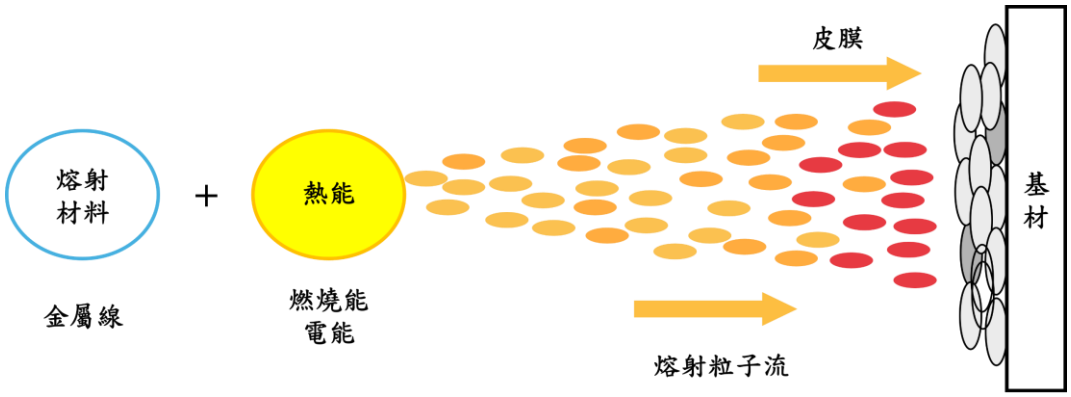


圖 5.56 金屬熔射方法配置及成膜機制示意圖[92]

(1)施工流程

熔射施工的一般流程如圖 5.57 所示，圖中並列出各工項間的允許間隔。無論工廠施工或現地施工，熔射施工的施工步驟及工項間的允許時間均相同。

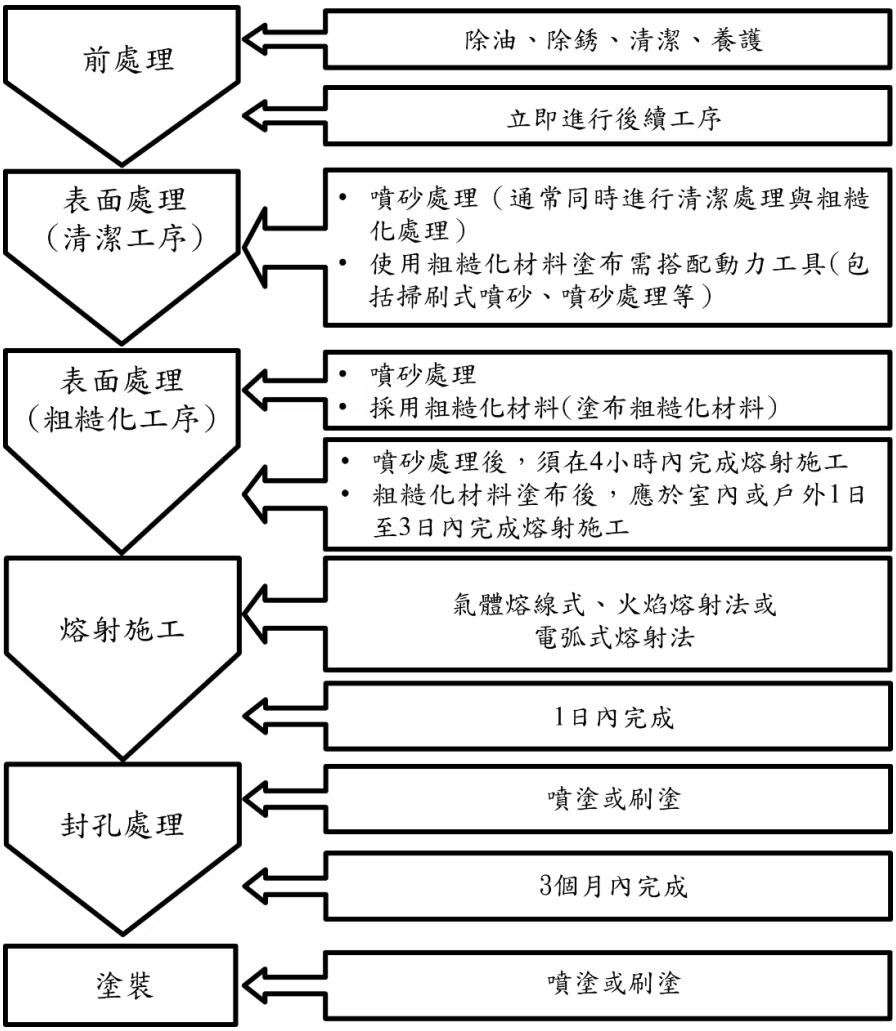


圖 5.57 金屬熔射施工流程圖[92]

(2)表面處理

表面處理是指為使金屬熔射良好附著，去除鋼材表面的氧化皮、銹等不利附著的物質，並賦予鋼材表面適當粗糙度的處理工程。在工廠中，表面處理的噴砂加工以噴砂法進行。現地的噴砂處理因使用的研磨材及施工條件與工廠施工不同，需透過試驗等充分檢討後決定。

①清潔化工程

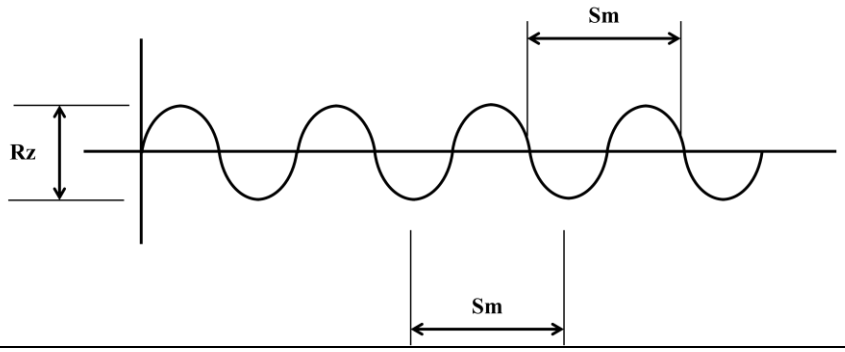
清潔化是指去除阻礙熔射層附著的氧化皮、銹、鹽類及油分等污物的工程，清潔度評估鋼材表面附著物的程度及導電性等，評估方法依據 ISO 8501-1，與照片比較進行目視對比。以噴砂法進行清潔化工程時，使用研磨材研磨鋼材表面，去除氧化皮、銹、鹽類、油分等污物，達到熔射施工所需的清潔度。若選擇粗面形成材法，則以動力工具或掃砂處理達到熔射施工所需的清潔度。熔射所需的清潔度如表 5-22 所示。此基準為熔射施工前的狀態。

表 5-22 金屬熔射表面處理的要求[92]

項目		工作標準
清潔度	噴砂法	鋅、鋅鋁合金 ISO 8501-1 Sa 2 1/2 以上 鋁、鋁鎂合金 ISO 8501-1 Sa 3
	粗面形成劑法	ISO 8501-1 Sa 2 以上
粗糙度	噴砂法	Ra 8μm 且 Rz 50μm 以上
	粗面形成劑法	$RSm/Rz_{jis} \leq 3.5$ 平均值，4 最大值(註 1)
		必須與鋼材緊密接觸(註 2)

註 1：RSm/Rz_{jis}：表示表面粗糙度的密度。每單位長度的粗糙度峰密度越高(Sm/Rz 越低)，附著力越好。

註 2：如果使用粗面形成劑賦予粗糙度，則應確認導電性。



②粗面化處理

粗面化是為使熔射層與鋼材表面密著，求取所需表面粗糙度的工程。表面粗糙度需評估熔射層與鋼材表面間獲得必要密著性的錨定圖案。評估方法包括依據 JIS Z 0313 以表面粗糙度測量儀測進行測量，或依據 ISO 8503-1 規定的比較板對比評估方法等。亦可製作標準粗糙度樣本進行比較。

A.噴砂法-以噴砂法進行粗面化處理時，需使用 ISO 8501-1 中規定的粒度與材質的研磨材。熔射所需的表面粗糙度如表 5-22 所示。

B.粗面形成劑法-以無機質顆粒與環氧系樹脂構成的粗面形成劑，塗布於鋼材表面進行粗面化的方法。粗面形成劑含有機溶劑，需如同塗料般操作。使用粗面形成劑的動力工具表面處理方法如表 5-23 表 4-23，所需清潔度與表面粗糙度如表 5-22。

表 5-23 使用粗面形成劑的表面處理[92]

表面處理	動力工具處理(ISO 8501-1 St 3 以上)(確認導電性後) 動力工具處理後，去除附著油分、水分、塵埃等，形成清淨表面。 粗面形成劑採噴塗塗裝，100g/m²以上

(3) 其他防蝕法補修用的表面處理

金屬熔射有時用於熱浸鍍鋅等其他被覆系防蝕法的補修。此時，不一定需完全去除既有防蝕被覆。表面處理方法亦可能與新設鋼材表面不同。補修需採用各防蝕法適當的方法。現場噴砂施工時，因使用的研磨材及環境條件與工廠施工不同，需事先透過試驗等檢討並決定規格。

①熱浸鍍鋅

以金屬熔射補修熱浸鍍鋅層時，原則上需以噴砂法去除劣化的熱浸鍍鋅層、銹、鹽分等異物，確保規定表面粗糙度。但即使存在無法去除之鍍鋅層，只要達到規定的表面粗糙度，也可以在上面進行熔射施工。

②耐候性鋼材

耐候性鋼材補修需以噴砂處理完全去除銹層及鹽分等，並確保規定表面粗糙度。由於耐候性鋼材的銹層較嚴重，噴砂處理時需事先透過試驗等，充分檢討研磨材及施工條件。

(4) 金屬熔射

①熔射方法：金屬熔射通常使用線材火焰熔射(WFS)或電弧熔射(AS)進行鋅、鋁及其合金之金屬熔射。對小面積與修補作業，亦可使用粉末火焰熔射(PFS)。各工法詳見 ISO 14917 規範。金屬熔射多為人工操作，亦可採機械方式。為保證金屬熔射層品質可重現，建議優先採機械或自動化熔射。製造說明中應規定依 ISO 2063-2 規範的監督與測試措施。

②熔射結束後的允許時間：熔射施工結束後，為防止環境附著物或結露侵入熔射層氣孔，需迅速進行封孔處理。鋼橋的金屬熔射宜在熔射施工後立即進行封孔處理。

③熔射作業者：為確保金屬熔射的良好施工品質，需高度技術。鋼橋的熔射作業，無論氣體熔線式火焰熔射或電弧式熔射，均需由熟悉安全衛生問題及對策的熟練工進行。

(5) 封孔處理

熔射後的熔射層表面易受空氣中濕度影響，原則上需在熔射施工結束後 24 小時內進行封孔處理。

封孔劑有兩種類型：一種主要透過其形成的塗層提供環境絕緣，例如環氧漆；另一種是反應性密封劑，其中密封劑的成分與鋅和鋁等金屬發生反應，生成穩定的金屬磷酸鹽，同時密封劑中所含的樹脂成分會密封金屬熔射層中的孔隙。亦可採自然封孔方式(氧化)，只要環境合適且生成之氧化物、氫氧化物與鹽類在該環境中不具溶解性。不過，須避免在封孔完成前發生銹蝕。

封孔劑應具低黏度以利滲透，並須與金屬熔射層相容。對鋅與鋅合金，不宜使用醇酸樹脂基封孔劑。若後續施加有機塗層，亦須考量封孔劑與其相容性。封孔程序應依 ISO 2063-2 執行。

①封孔劑的塗布：封孔處理需均一塗布封孔劑，確保填充熔射層表面及內部氣孔，無塗布遺漏。

②下一工序的允許時間：封孔處理後若進行塗裝，需在異物或污物附著前進行塗裝施工。

(6)上層塗裝：金屬熔射上層之追加有機塗層(雙重防蝕系統)，請參考4.2.3 節「塗裝」。

6. 施工及品質管理

(1)檢驗要求

應依 ISO 2063-2 檢查環境條件(濕度、露點、周圍溫度與構件溫度)。常用的金屬熔射層非破壞檢測方式如下：

A.目視檢查；

B.金屬熔射層厚度測量；

C.破壞性檢測(於對照試體進行)：

D.附著力試驗(拉拔測試，依 ISO 4624 規範辦理)；

E.拉伸附著力試驗(依 ISO 14916 規範辦理，限於製程認證或製造說明要求時進行)；

F. 金相分析(熔射層厚度與品質評估)。

由於某些測試無法對構件本體進行，應備有對照試體。試體型式應適合破壞試驗，建議型式見 ISO 2063-2:2017 附錄 E。試體數量與類型應載明於製造說明中。對照試體應使用與構件相同之熔射程序規範(TSPS)進行塗佈，並考慮熔射位置(如水平、仰噴、垂直下噴)、熔射方法(手動、機械)與場所(工廠、現場)之差異。若需針對特定構件區域進行測試，可由雙方協議製作模擬試件。

①目視檢查：熔射層表面應具均勻外觀，無夾雜物或裸露區，且不得有不附著或可能損害服務壽命與防護效果之缺陷。表面瑕疵與缺陷說明請參見 ISO 14923 規範。目視檢查之執行依 ISO 2063-2 規範辦理。

②熔射層厚度：建議使用符合 ISO 2178 規範的可攜式電磁測厚儀

進行測量。測點位置與數量應足以代表整體熔射層狀況。此類熔射層厚度測量技術會測量整體厚度，包括任何封孔劑與後續的有機塗層。因此，金屬熔射層的厚度只能在塗覆任何後續層之前以此方式測量。熔射層厚度亦可透過破壞性的方式於對應試體上進行測量(冶金顯微鏡調查)。若有需要，應於製造指示中規定此項測量。

③附著強度：若有需要，應依據 ISO 2063-2 規範並參照 ISO 4624 規範測定拉伸附著強度。拉伸附著強度的平均值應由契約雙方協議決定，典型附著強度值見表 5-24。

同樣地，若需採用其他試驗方法，亦須由契約雙方協議。待熔射之構件或對應試體之表面應為平整且具足夠剛性，以避免測試時產生撓曲。在對構件進行拉伸附著強度測試時，其測試位置應具有代表性。

通常情況下，不使用 ISO 14916 規範所規定的拉伸附著測試做為品質管控措施。若因認證等目的需要進行此測試，應於熔射規範或製造指示中規定對應試體的數量。

表 5-24 未封孔金屬熔射層的拉拔強度典型值(ISO 4624)[175]

熔射材料		拉拔強度(最小 MPa)[a]
		線材火焰熔射/電弧熔射
Zn, ZnAl15	鋅，85/15 鋅鋁	4
Al, AlMg5	鋁，95/5 鋁鎂	4,5

備考：a 若熔射層未切割，典型值高 20%至 25%。

註 1：若測量值顯著低於典型值，則可預期熔射層品質不足(包括表面準備)。

註 2：值受以下因素影響：

- 封孔：未圍繞試驗圓柱切割；機械熔射；不當熔射位置(頂部和垂直向下)
- 現場條件
- 表面處理，噴砂材料。

註 3：當達到指定的附著強度最小值時，可中斷拉拔試驗。此方法避免了因試驗損壞區域的修復必要性。透過加熱軟化黏合劑，並敲擊試驗圓柱側面，可去除黏結的試驗圓柱。此試驗方法僅可在製造順序中的品質保證措施情況下執行，熔射層品質可能受損。

④冶金顯微鏡調查：若有需要，熔射層厚度可透過冶金方法量測。應從塗覆之對應試體中取樣橫截面。該調查應依照 ISO 1463 規範的規定進行。可接受的缺陷限值，若有需要，應由契約雙方協議決定。試驗程序、試驗結果評估及其紀錄，依據 ISO 2063-2 規範的規定辦理。熔射層品質評估的主要條件如下：

A.熔射層缺陷，例如裂縫、孔洞、剝落、脫層、外觀不規則、熔射層厚度不足。

B.表面噴砂過度：基材與熔射層界面處殘留過多磨料或孔隙。

C.熔射層中單一孔隙過大，或整體孔隙率過高。

(2)熔射層缺陷及其修復

小型局部缺陷，例如短裂紋、裸露斑點、夾雜物及組裝工作或破壞性試驗造成的損壞，若會損害防蝕保護，可在適當表面準備後使用有機塗料(例如鋅粉塗料)修復，若無反對此程序的具體協定。然而，整個缺陷表面不得超過整個熔射層表面的 1%，單一缺陷不得超過 10 cm^2。

對於較大的扁平缺陷，應全部或部分去除缺陷熔射層，並透過熔射進行修復。銲縫上及銲縫附近的較長裂紋或裸露區域應按照 ISO 8501-1:2007 規範對 Zn/ZnAl15 進行 Sa 2.5 級清理，對 Al/AlMg5 進行 Sa 3 級清理，並按照 ISO 8503-1 規範進行粗糙化處理，並透過熔射進行保護。此類熔射層區域的防蝕品質要求應與構件本身的品質要求一致。在每種情況下，都應檢查並考慮是否有消除缺陷的特定指導方針或協議。

如果熔射層或隨附試樣不符合試驗規範的要求，則應移除相關熔射層。清潔和表面處理後，可使用現有的熔射程序規範(TSPS)重新熔射。如果發現現有熔射程序規範(TSPS)無法滿足熔射規範的要求，則應進行修正或重新準備並評估新的熔射程序規範(TSPS)。試驗及其範圍應依照試驗規範的規定進行。

(3)施工記錄

為確認表面處理、熔射、封孔處理作業良好進行，及便於熔射層發生變形時的調查檢討，需記錄熔射作業的主要項目。主要項目指品質管理中列明的各項目。

(4)安全衛生

製造熔射防蝕保護層時，應滿足有關健康、安全和環境保護的適用要求。進一步細節見 ISO 2063-2 規範附錄 J。

熔射產生的鋅、鋁及其合金的噪音、灰塵和煙霧可能傷害人員健康並影響環境。應採取技術或組織對策。在製造熔射鋁或鋁合金的密閉空間時，應採取防火措施。

關於熔射過程封閉、工廠製造防塵、防煙、防氣體及噪音的說明，可參考 CEN/TR 15339-6。安全要求可參考 CEN/TR 15339-3 噴槍或銲炬和電源設備，以及 CEN/TR 15339-5 熔射材料進料器。

現場作業的氣候和條件可能比工廠更為困難，應制定額外要求以確保性能和員工安全，確保品質。

(5)防蝕記錄

金屬熔射的維護管理中，檢測、各種調查及補修需明確(包括：熔射金屬、施工方法、施工時期)，宜在結構物上設置防蝕記錄表。

第六章　研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引

國內缺乏環境特性與大氣條件對混凝土結構物腐蝕影響的參考數據，而使鐵公路橋梁防蝕設計之考量均參考國外相關規範或研究，以致本土化之防蝕設計不易落實。為維護鐵公路橋梁之長期安全與耐久性，確保運輸系統之通暢，本計畫將依研究成果分別針對混凝土橋梁及鋼橋梁研訂不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引。

6.1 混凝土橋篇

本計畫擬定之「鐵公路橋梁之防蝕技術指引-混凝土橋篇」，參考交通部「公路橋梁設計規範」、「鐵路橋梁設計規範」、「公路工程施工規範」，內政部「建築物混凝土結構設計規範」、「結構混凝土施工規範」，以及相關之國內 CNS 規範、歐洲 EN 規範、美國 ASTM、ACI 等規範。指引之組成架構如圖 6.1 所示，可做為使用本指引進行防蝕設計與施工、維護的章節參照。

指引所稱之橋梁混凝土構造，係指鐵公路系統之混凝土橋之上下部結構與鋼橋之混凝土橋面板及下部結構，其混凝土構件內含有鋼筋或預力鋼腱者。對於橋梁與其附屬設施中使用的混凝土構件，其基本理念與多數內容同樣適用。但在應用時，需根據該構件的環境條件及所需的混凝土耐久性進行具體考量。

指引主要適用於鐵公路橋梁之混凝土構造在規劃、設計、材料選用、施工與維護管理等階段之腐蝕防治，主要係為防止與降低海岸線附近因浪潮及海風侵襲之鐵公路橋梁混凝土構造遭受鹽害、硫酸鹽侵蝕或因大氣中二氧化碳造成混凝土中性化，導致鋼筋或鋼腱腐蝕之必要的設計、施工及維護上的規定。

指引以橋梁生命週期的觀點，訂定鐵公路新建橋梁在規劃、設計、材料、施工與維護管理各階段所需注意之事項，既有橋梁在維護管理階段之腐蝕防治亦可參考使用，特殊橋梁之混凝土構件除需符合本指引

之規定外，尚需符合其特定之要求。鐵公路混凝土橋梁設計、施工應遵照交通部「公路橋梁設計規範」、「鐵路橋梁設計規範」、「公路工程施工規範」、公共工程委員會「施工綱要規範」及內政部「結構混凝土施工規範」等相關規定。指引內容僅為混凝土橋防蝕的標準性理念與方法。混凝土橋全生命週期耐久性設計流程可參考

指引根據不同腐蝕型式提供查表與理論分析兩種方法以供耐久性設計使用，以滿足其條件下的所需之混凝土耐久性，然而，即使嚴格遵循指引內容，在某些條件下也可能非最佳方法，需特別注意。除依據指引之規定外，必要時可依橋梁之特性，另訂額外之規定。

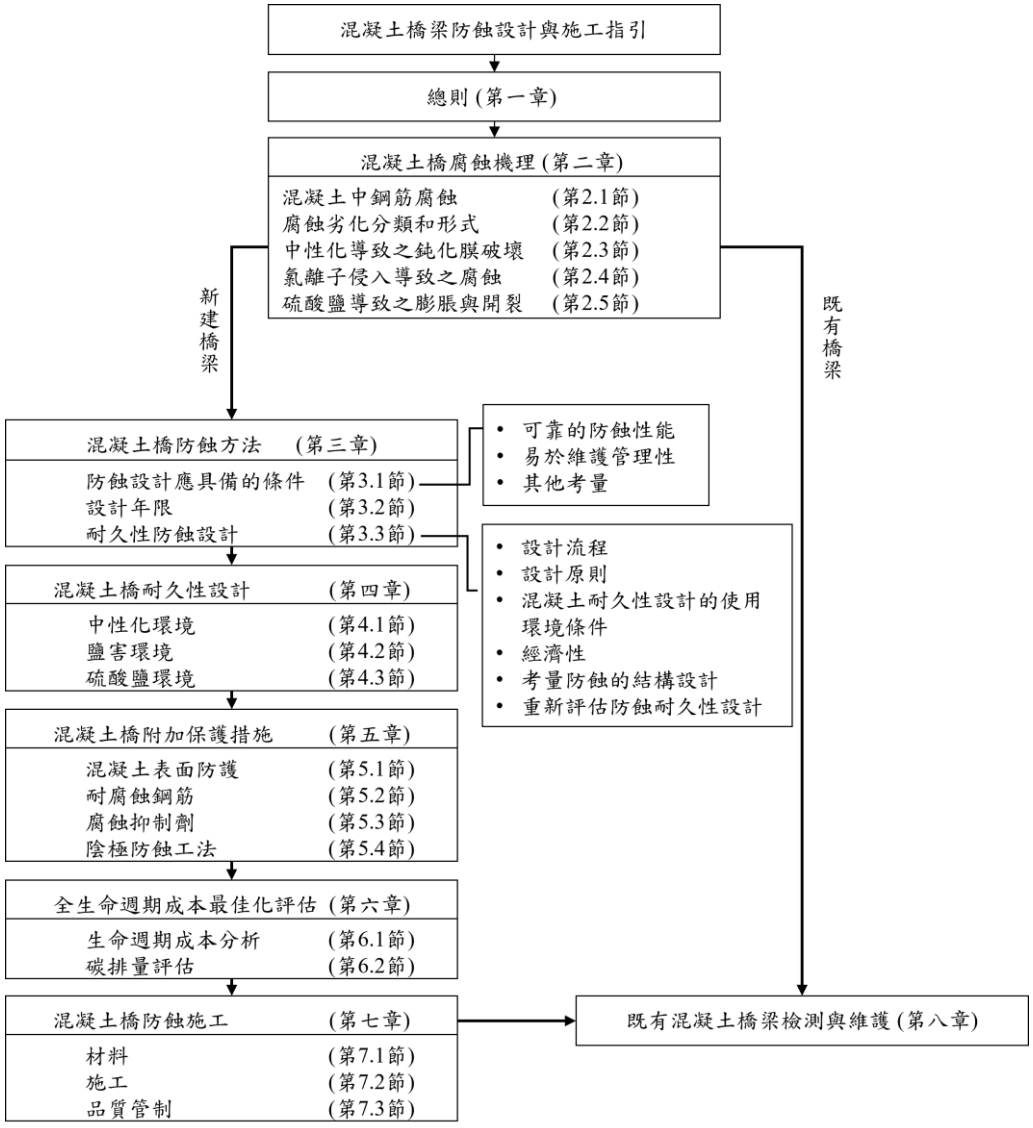


圖 6.1 混凝土橋篇組成架構

混凝土橋篇指引之章節大綱如表 6-1 所示，第二章除了混凝土中鋼筋腐蝕外，還包含中性化、鹽害與硫酸鹽之腐蝕機理。第三章包含防蝕設計之原則性內容，而後需根據不同腐蝕環境於第四章「混凝土橋耐久性設計」決定混凝土之品質與耐久性需求。耐久性設計流程可參考圖 6.2 進行耐久性設計。

附加保護措施之選擇可參考第五章，本計畫建議嚴重鹽害區建議採用至少一種附加保護措施，極嚴重鹽害區採用至少兩種附加保護措施。而後施工之材料、施工、品質管制可參考第七章之相關規定。而第六章與第八章屬於第二年度工作內容，將於第二年度完成該部分指引。

表 6-1 混凝土橋篇章節大綱

章節名稱	章節內容
第一章 總則	1.1 前言 1.2 適用範圍 1.3 參考規範
第二章 混凝土橋腐蝕機理	2.1 混凝土中鋼筋腐蝕 2.2 腐蝕劣化分類和型式 2.3 中性化導致之鈍化膜破壞 2.4 氯離子侵入導致之腐蝕 2.5 硫酸鹽導致之膨脹與開裂
第三章 混凝土橋防蝕方法	3.1 防蝕設計應具備的條件 3.2 設計年限 3.3 耐久性防蝕設計
第四章 混凝土橋耐久性設計	4.1 中性化環境 4.2 鹽害環境 4.3 硫酸鹽環境
第五章 混凝土橋附加保護措施	5.1 混凝土表面防護 5.2 耐腐蝕鋼筋 5.3 腐蝕抑制劑 5.4 陰極保護
第六章 全生命週期成本最佳化評估(第二年工作範圍)	6.1 生命週期成本分析 6.2 碳排量評估
第七章 既有混凝土橋腐蝕檢測評估	7.1 材料 7.2 施工 7.3 品質管制
第八章 既有混凝土橋梁檢測與維護(第二年工作範圍)	(第二年工作範圍)

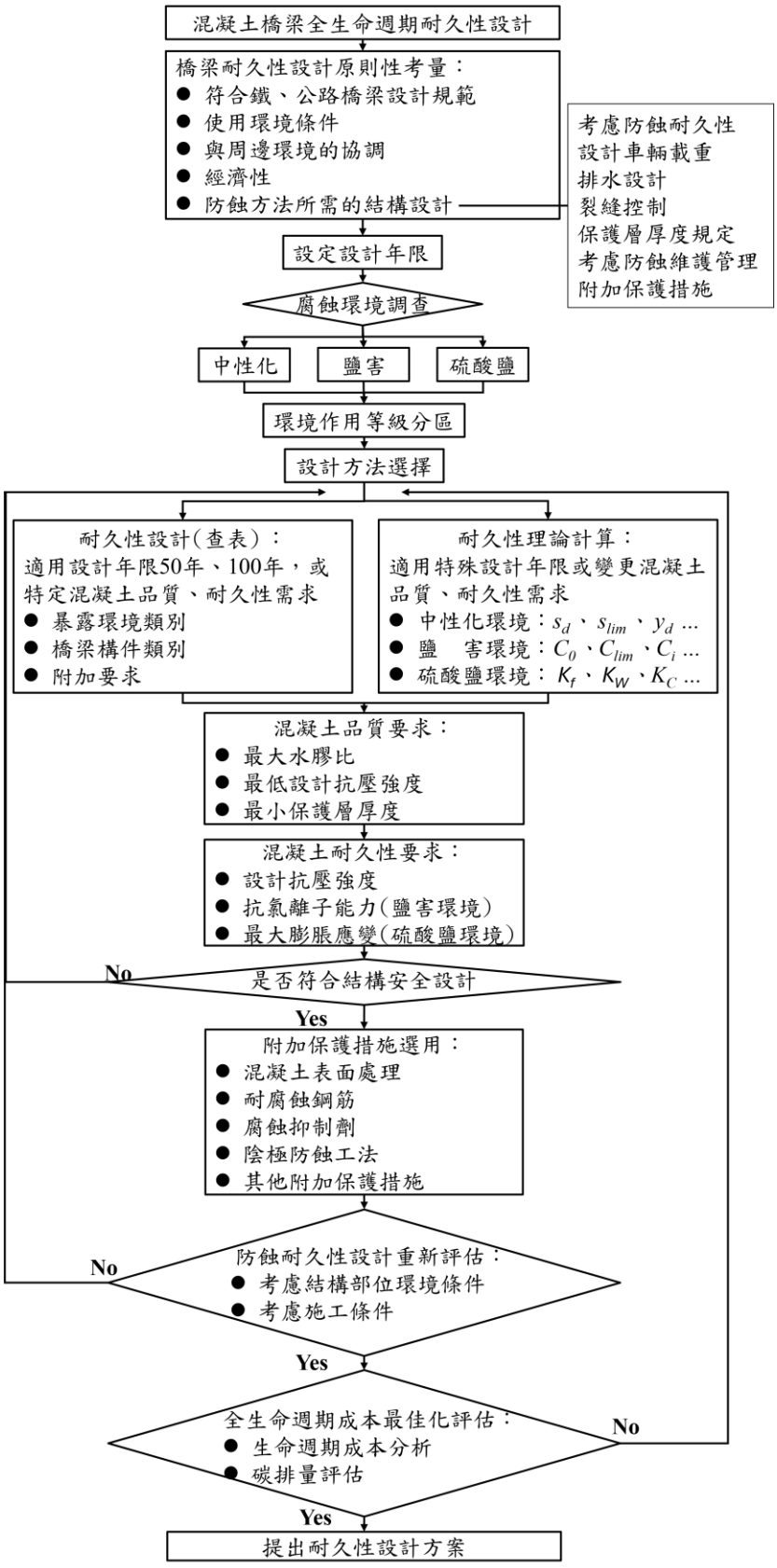


圖 6.2 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖

6.2 鋼橋篇

鋼橋篇之擬定主要參考日本「鋼道路橋防蝕便覽」之架構與國內相關規範、手冊，與最新之 ISO、JIS、ASTM 等規範。指引主要適用於鐵、公路橋中以鋼結構為主的上部結構及橋墩結構。此外，對於鋼橋中使用的鋼構件，其基本理念與多數內容同樣適用。但在應用時，需根據該構件的環境條件及所需的防蝕性能進行具體考量。

指引所述內容僅為鋼橋防蝕的標準性理念與方法，對於個別橋梁的構件或部位，僅需滿足其條件下所需防蝕性能即可，不必完全符合本指引內容。反之，即使嚴格遵循本指引內容，在某些條件下也可能非最佳方法，需特別注意。

本指引組成架構與參考順序如圖 6.3，第 4 章至第 7 章所述塗裝、耐候性鋼材、熱浸鍍鋅及金屬熔射內容，係以標準鋼橋的適用為前提，對於特殊施工條件或結構型式的橋梁，需謹慎考慮本指引的適用性或參考適用性。例如：鋼製橋墩常設置於土中、淡水或海水環境，指引未特別提及此類情況的對策，需另行考慮。對於土中或水下鋼構件的防蝕，可參考「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)」。除指引外，尚有適用於特殊環境的防蝕方法，採用時需充分研究其防蝕原理、適用環境條件、結構與施工限制及注意事項。

指引中對部分鋼構件細部結構的描述與範例，基本上僅從防蝕角度考量，採用時除需滿足橋梁或構件的防蝕性能外，其他的性能尚需另行考慮。有關鋼橋疲勞耐久性評估可參考「公路橋梁檢測及補強規範」第 6.3 章及「鐵路橋梁檢測及補強規範」第 6.5 章。

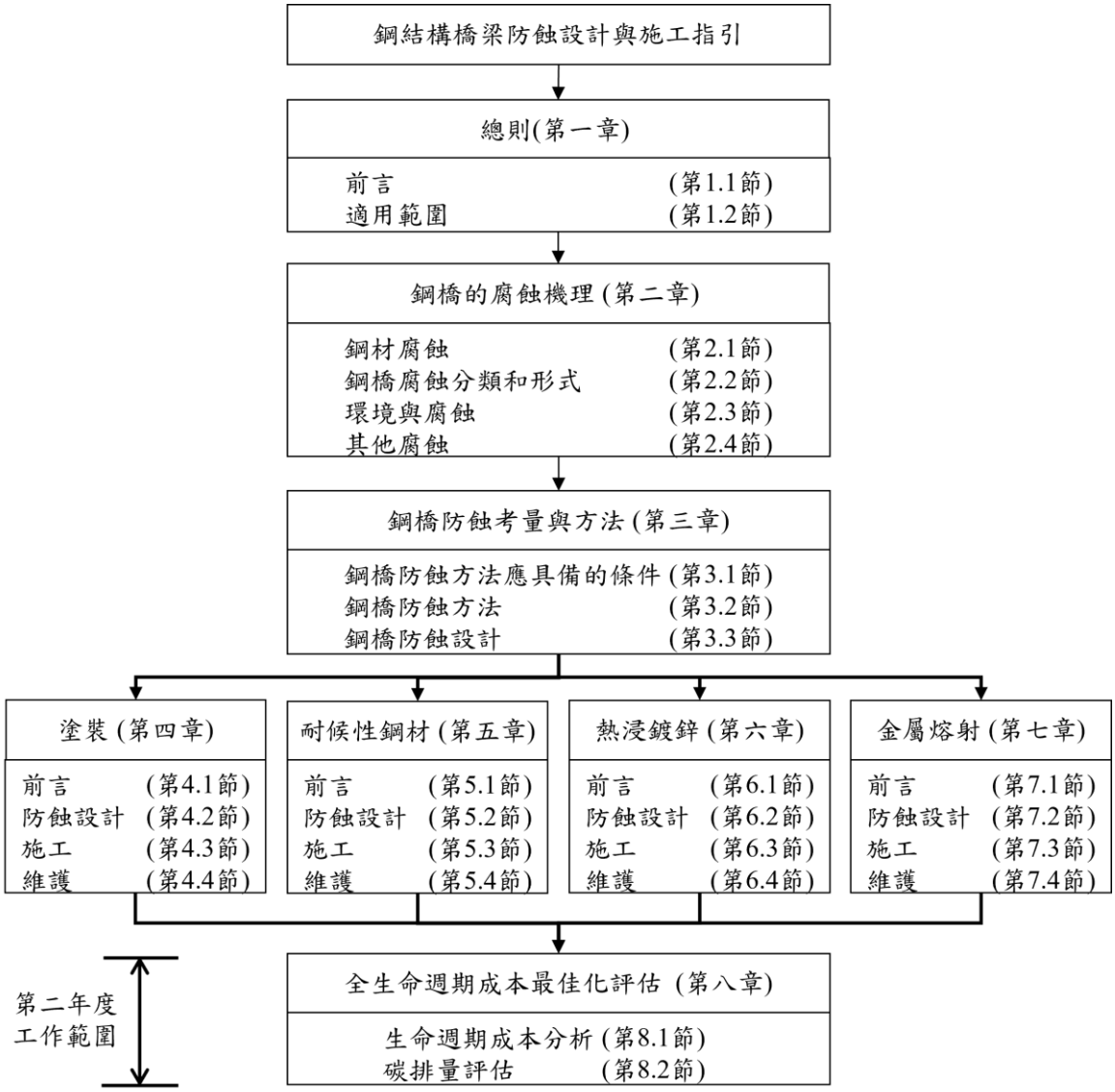


圖 6.3 指引組成架構與參考順序

鋼橋篇指引之章節大綱如表 6-2 所示，其前段架構與混凝土橋篇類似，第二章為腐蝕機理、第三章包含防蝕設計之原則性內容，其執行流程與各流程對應之章節可參考圖 6.4 進行鋼橋之防蝕設計。

因鋼橋各防蝕方法之概念有別於混凝土橋，為保持內容之連貫性，因此第四至第七章不同於混凝土橋篇以設計、施工進行章節的區分，而是以各防蝕方法為主軸，分別說明各防蝕方法之設計、施工等內容，而第四至第七章之檢測與維護以及第八章之生命週期成本最佳化評估均屬第二年度之工作內容。

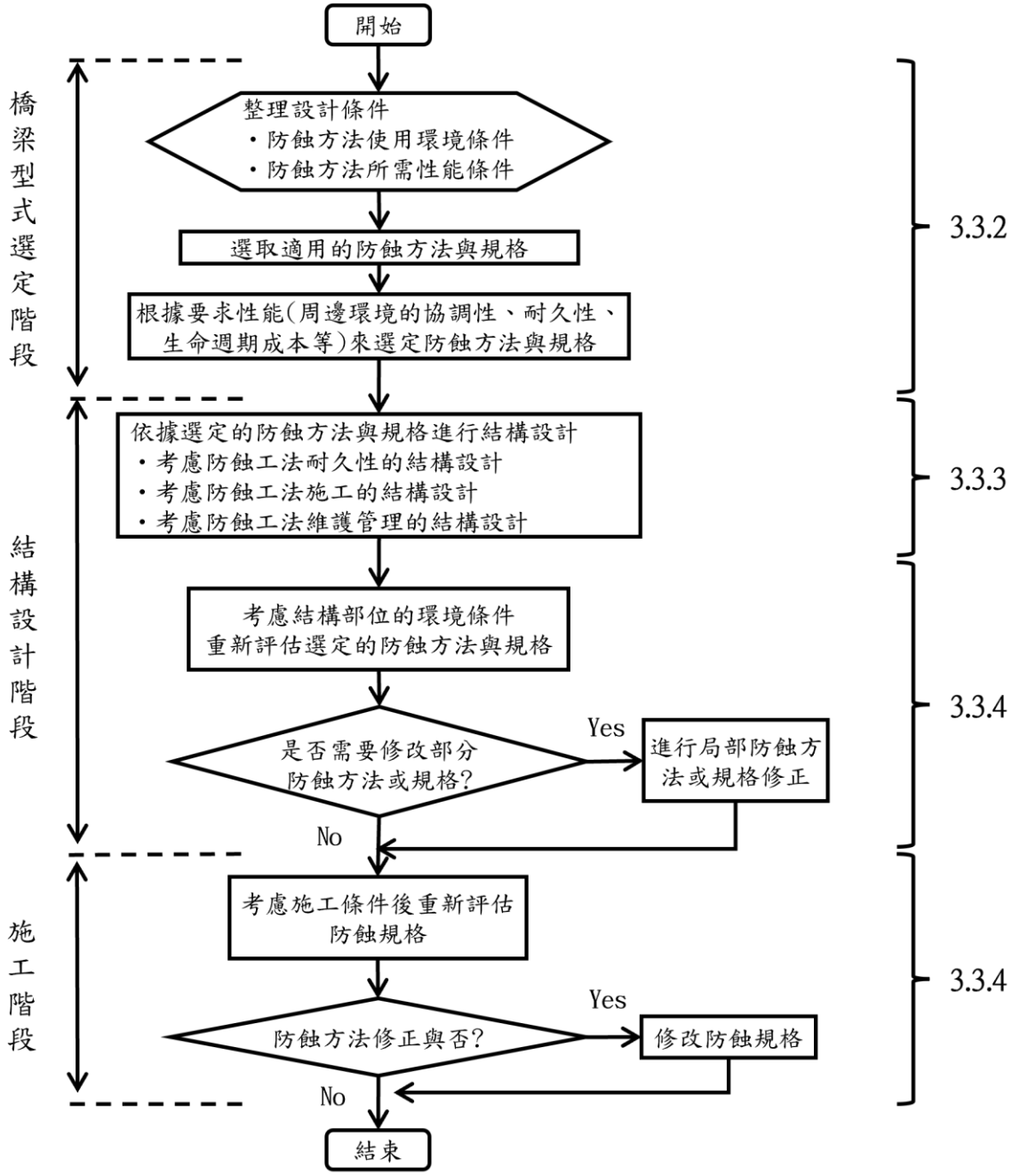


圖 6.4 防蝕設計流程圖[92]

表 6-2 鋼橋篇章節大綱

章節名稱	章節內容
第一章 總則	1.1 一般 1.2 適用範圍 1.3 參考規範
第二章 鋼橋腐蝕	2.1 鋼材腐蝕 2.2 鋼橋腐蝕分類和型式 2.3 環境腐蝕 2.4 其他腐蝕
第三章 鋼橋防蝕考量與方法	3.1 鋼橋防蝕方法應具備的條件 3.2 鋼橋防蝕方法 3.3 防蝕設計 3.3.1 一般 3.3.2 防蝕方法的選擇 3.3.3 防蝕方法所需的結構設計 3.3.4 重新評估防蝕方法
第四章 塗裝	4.1 前言 4.1.1 一般 4.1.2 適用範圍 4.2 防蝕設計 4.2.1 設計理念 4.2.2 防蝕設計 4.2.3 結構設計注意事項 4.3 施工 4.3.1 製作及施工注意事項 4.3.2 新設塗裝施工 4.3.3 施工及品質管理
第五章 耐候性鋼材	5.1 前言 5.1.1 一般 5.1.2 適用範圍 5.2 防蝕設計 5.2.1 設計理念 5.2.2 防蝕設計 5.2.3 結構設計注意事項 5.3 施工 5.3.1 製作及施工注意事項 5.3.2 防蝕施工 5.3.3 施工及品質管理
第六章 熱浸鍍鋅	6.1 前言 6.1.1 一般 6.1.2 適用範圍

	6.2 防蝕設計 6.2.1 設計理念 6.2.2 防蝕設計 6.2.3 結構設計注意事項 6.3 施工 6.3.1 製作及施工注意事項 6.3.2 熱浸鍍鋅施工 6.3.3 施工及品質管理
第七章 金屬熔射	7.1 前言 7.1.1 一般 7.1.2 適用範圍 7.2 防蝕設計 7.2.1 設計理念 7.2.2 防蝕設計 7.2.3 結構設計注意事項 7.3 施工 7.3.1 製作及施工注意事項 7.3.2 金屬熔射施工 7.3.3 施工及品質管理
第八章 生命週期成本最佳化評估 (第二年工作範圍)	8.1 生命週期成本分析 8.2 碳排量評估

第七章　辦理研究成果說明會(3 場次)

7.1 鋼橋篇

1. 第一場成果說明會辦理

第一場成果說明會辦理情形如下所示，說明會議程如表 7-1、辦理情形如圖 7.1。

(1)說明會對象：交通部所屬各機關承辦橋梁設計與維護管理人員、專家學者與顧問(如表 7-2 所示)

(2)說明會內容：包含鐵公路橋梁(鋼橋篇)的腐蝕機理、防蝕考量與方法、防蝕(或耐久性)設計、防蝕附加保護措施與施工技術等指引。

(3)說明會日期：114 年 12 月 3 日(星期三)上午 9 點 30 分。

(4)說明會地點：財團法人臺灣營建研究院教室(新北市新店區中興路二段 190 號 11 樓)

表 7-1 第一場成果說明會議程

時間	課程講題	主持人/主講人
09:00-09:30	報到	
09:30-09:40	長官致詞	蔡立宏主任 邱建國院長
09:40-10:30	鐵公路橋梁防蝕設計及施工技術指引 鋼橋篇	梁智信博士
10:30-11:50	Q&A	邱建國院長
11:50~	~賦歸~	

表 7-2 第一場成果說明會出席名單

交通部運輸研究所	蔡立宏 主任 賴瑞應 科長 黃烟宏 副研究員
財團法人臺灣營建研究院	邱建國 院長 陳育聖 組長 梁智信 博士 簡臣佑 副研究員 羅永霖 助理研究員
專家學者與顧問	詹穎雯 教授 李家順 工程司 黃裔炎 委員 林舜元 委員 林曜滄 顧問 吳忠民 顧問 蔡明達 顧問
交通部高速公路局	陳恩成 林耿億
交通部公路局	張書嘉 洪宗亨
交通部鐵道局	蔡宏仁
國營臺灣鐵路股份有限公司	周行健
臺灣港務股份有限公司	蕭保呈 傅靖雯 王珮品



圖 7.1 第一場成果說明會辦理情形

2. 鋼橋篇修正建議與辦理情形

第一場成果說明會後，對於專家學者與交通部部屬機關提出之修正建議與辦理情形，如表 7-3 所示。

表 7-3 鋼橋篇修正建議與辦理情形

項次	建議	辦理情形
一、 蔡明達 顧問		
1	指引內有些論述之邏輯性建議再整理，例： ● 7-3 頁 金屬熔射的防蝕原理(1.熔射合金,不會是鋅單獨氧化形成氧化生成物。2.阻隔水分，第二段中又是與水分反應) 。 ● 4-4 頁 塗膜劣化，包括生銹(塗膜不會生銹) ● 3-3 頁 表 3-2、3-1 耐候性鋼材在臺灣應考慮複合防蝕應列入,且在第四章未將耐候性鋼材塗裝系統納入。 ● 表 3-2 耐候性鋼材範圍比熱浸鍍鋅窄，耐候性鋼材應加上重防蝕塗裝。熱浸鍍鋅應比照熔射 ● 4-12 頁 考量臺灣 CX---，相當高風險而加了增厚型塗裝系統，為何?應交代(前文，臺灣依 ISO9223、CNS13401 試驗區分 6 個腐蝕等級，為何又高風險)。又，GX、GX^{+}、TX、TX^{+}耐久性等級同為 15~25、 ● 3-15 頁 倒數第一、二段不通(看不懂)。倒數二段應該在敘述人孔等，但應該讓它更通順。倒數第一段，箱梁內施工時吸入的水?	依建議整理論述之邏輯性。
2	5-10 頁備註不符，4-19 頁表 4-2$^{(1)}$不符、4-8 頁表 4-2 不符、7-11 頁表 7-5 中本標準的附錄 C?哪個的本標準。	依建議修正附註。
3	參考文獻(1-3 頁 增加 ISO 9224、CNS 16238，44.CNS 1247 應是 104 年 11 月) 。	依建議辦理規範新增與修正。
4	6-14 頁 表 6-6 單位公制英制、表 6-7 A325 已合併於 F3125。	依建議修正內容。
5	參考文獻 45、46、47 類號不用。所有參考標準都只有總號，唯獨熱浸鍍鋅相關都加上類號。	依建議刪除浸鍍鋅相關文獻 CNS 類號。
二、 吳忠民 顧問		
1	P3-4/說明雖非錯誤，但建議補強犧牲保護作用說明。	依建議補強犧牲保護作用說明。
2	P3-5/建議以掃砂為普遍用語。	依建議辦理修正。
3	P3-8/環境比較表易造成誤解，建議用 ISO 12944-2 / ISO 9223 環境分類表示。	因為 ISO 12944-2 / ISO 9223 環境分類沒有談及防蝕方法，故維持原意不做修正。
4	P4-4/中塗漆之說明可能造成誤解。	依建議調整內容。

5	P4-5/塗料成分說明，語意上無法充分傳達，建議調整。	依建議調整內容。
6	P4-26/建議增加顏色與耐久性上影響參考。	依建議增加顏色與耐久性上影響。
7	P4-31/建議修正用語為熱固性塗裝系統。	依建議辦理。
8	P4-34/NaCl 超過 50 mg/m^2 需水洗說法，建議增加選擇性，如依使用塗料環境背景及契約規定，於 SSPC NORSOK M501 及 ISO 12944 皆有(不同)相同規定.應該是不同。	依建議調整內容。
9	P4-43/正字標記認證報告與產品商業名稱可能無法對應。	依建議調整內容。
10	P4-47/明年維護部分期待其材料選用工法及工程管理...，針對塗裝人員資格及檢查人員資格設定	建議內容屬第二年度工作範圍，後續參酌。
11	P6-25/如何避免 60μm 粗糙度而不損傷鍍鋅層過多，值得注意。	依建議調整內容。
12	P7-2/針對維護使用熔射表面處裡完整性疑慮。	依建議調整內容。
13	P7-22/表面粗糙度 R_z50μm 以上依 CNS 7797 H3094 須 75μm 以上，NACE AWS 65~125μm 之間。	加註表面粗糙度規定出處。
14	防蝕工法日新月異，可說明目前所列為主流，但防蝕工法適材適所，可說明依需求採用。	本指引第 3 章已說明。
三、 林曜滄 顧問		
1	3-11 頁，圖 3.3 之垂直加勁鋼材，建議用規範之用詞，改為豎向加勁板。	依建議修正為豎向加勁板。
2	本土化之腐蝕案例及調查，請增加納入。	本土化之腐蝕案例及調查，詳見本計畫報告，不適合列入指引中。
3	再增加混合防蝕工法之內容及適用性。	本指引第 4~7 章已說明各項典型防蝕方法及注意事項，是否採用混合防蝕工法，由設計者及業主決定，不宜增加混合防蝕工法的論述，以免造成誤導，調整 3.3.2 章內容。
4	再增加複合防蝕工法之內容及適用性。	本指引第 4~7 章已說明各項典型防蝕方法及注意事項，是否採用複合防蝕工法，由設計者及業主決定，不宜增加複合防蝕工法的論述，以

		免造成誤導，調整 3.3.2 章內容。
5	維護管理，請增加表面清潔之要求，而非僅限縮在重漆上。	建議內容屬於第二年度工作範圍，後續參酌。
6	請增加各種防蝕工法之優良設計案例標準圖說，讓使用者可以參考。	防蝕案例是否優良有賴設計，施工，維護相關單位共同努力，本指引第 4~7 章已分別針對各種防蝕方法注意事項提供示意圖，不宜增加所謂的優良設計案例標準圖，以免造成誤導。
7	有關防蝕工法之選擇要強調全生命週期成本為考量。	建議內容屬於第二年度工作範圍，後續參酌
8	另外，指引也要提醒各工法，例如防蝕塗裝之施工綱要規範，包含 09910、09971、09972、09973，惟熱浸鍍鋅之施工綱要規範僅 05081 一章，建議請各防蝕工法之施工綱要規範也請一併配合修訂。	施工綱要規範修訂非本計畫工作範圍。
9	請增部分熱浸鍍鋅、部分塗裝之優良案例。	本指引第 4~6 章已分別針對各種防蝕方法注意事項提供示意圖，不宜增加所謂的優良案例標準圖，以免造成誤導。
四、 李家順 工程司		
1	2.2 鋼橋腐蝕分類與型式章節內容建議增加常見之「鋼橋腐蝕樣態及發生位置」，可參考 TISC「鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊(第二版)」中內容，這樣才能呼應指引所採之「防蝕與改善對策」。	依建議調整內容。
2	表 2-5「腐蝕的因子與地理、地形及結構因素」之項目與對應因素可再調整編排方式，以利更能明確表示。	依建議調整編排方式。
3	表 3-1 鋼橋典型防蝕方式中，耐候性鋼材是可採複合防蝕的，因目前國內採耐候鋼之橋梁均有塗裝維護。	依建議調整編排方式。
4	表 3-2 鋼橋典型防蝕方法適用比較表中，建議增加耐候性鋼材與熱浸鍍鋅採複合防蝕項目。	依建議調整內容。
5	3.3.3 「防蝕方法所需的結構設計」內容中部分文字說明未夠明確精準，也與國內橋梁工程實際施作方式有所出入，雖本文是摘自日本「鋼道路防蝕便覽(2014)」部分內容，建議仍	依建議調整內容。

	應考量國內鋼橋常用施工方式與工法，調整適用本土環境之防蝕細節。本章所建議之防蝕對策與圖面，所用圖面若 TISC「鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊(第二版)」第 2.6 章中有更詳細顯而易懂之圖面，建議優先採用。	
6	表 3.3「典型防蝕方法施工所需結構條件範例」內容，建議再做調整以符實際需求。	依建議調整內容。
7	第四章 4.1.1-1 臺灣塗料發展(3)1980~2000 年代，關渡大橋時期尚未採用氟素面漆(應為 PU)。	依建議辦理修正。
8	表 4-1 不同塗料間之相容性，建議增加環氧樹酯鋅粉底漆。	環氧樹酯鋅粉底漆與表中環氧樹酯塗料相同，不新增。
9	4.2.3 結構設計注意事項之 1.防蝕對策(1)對構件角部進行圓形處理，建議視環境而有區別，如 C5 及 CX 環境，外露構件應採 R3 甚至 R5(本局施工說明技術規範早已定為 R3)。	依建議調整內容。
10	4.3.1 製作及施工注意事項之文字說明內容，內容中部分文字說明未夠明確精準，也與國內橋梁工程實際施作方式有所出入，建議再調整修正。	依建議調整內容。
11	第五章耐候性鋼材中所建議之銲材規格均為日規，缺少 CNS 及 AWS，本手冊是指引性質，可強調若採用耐候性鋼材應搭配同耐候及強度等級之耐候銲接材料即可，若要納入銲材規格，建議仍應納入 CNS 及 AWS 規格。	依建議調整內容。
12	第六章熱浸鍍鋅內容增加局部構件鍍鋅之防蝕策略，因就國內鋼橋容易發生銹蝕位置以工地之接頭螺栓、續接板案例最多，鋼箱型梁因礙於鍍鋅池尺寸無法浸鍍，而無法採熱浸鍍鋅，若較小構件(例如橫梁、托梁、縱小梁及各接頭連接板螺栓)能採熱浸鍍鋅及塗裝，這對橋梁全生命週期減少維護次數是有很大幫助的。	依建議調整 3.3.2 章內容。
五、 林舜元專家		
1	鐵公路橋梁之防蝕技術指引，是給設計者一個方向跟建議，鋼板腐蝕速率與大氣腐蝕性分類有絕對關係，指引提出 4 個典型防蝕方法，能否建議不同大氣腐蝕環境可對應那些適當防蝕方法給我們一個建議跟方向。	第 4~7 章已說明各防蝕方法適用環境，並非僅依據大氣腐蝕環境即可選定合適的防蝕方法。
2	再者嚴重腐蝕區鋼橋是否適當選擇嗎?不採鋼橋是否是一個方案或選項，大家可以集思廣	12/3 會議中已討論。

	益。	
3	針對耐候鋼防蝕方法，耐候性鋼材的防蝕原理是依賴緻密銹層的形成來「逐漸抑制鋼板厚度的減少」，在臺灣環境條件設計耐候鋼都會採用塗裝與一般鋼材一樣，使用耐候鋼防蝕方法要有更進一步說明，例如它是用於 C1 環境就可以不用塗裝，發揮耐候鋼性能。	本指引第 5 章已詳細說明。
4	在第五章提了許多耐候鋼設計注意事項，請問這些注意事項前提是否採用裸鋼不塗裝前提下才須依此注意事項執行，因為這些規定比一般鋼材還嚴格例如表 5-7 螺栓間距與一般鋼橋差異很大，例如： ● (一般建議留出 10 至 20 mm 的間隙，以防止積水。 ● 最小邊距，且不應超過 50 mm(M22 38mm)。 ● 表 5-7 螺栓的最大中心間隔 M22 150mm 與 12t 取小值。	是。
5	耐候鋼局部塗裝部分要求很費工例如： ● 梁的端部塗裝。 ● 箱型梁的內面處理。 ● 水管引起的結露等。 ● 橋梁附掛等，現場施工有困難。	如有需要還是必須塗裝。
六、 黃裔炎 委員		
1	1-2 頁第 1 列文字，「尚需另行考慮」，本詞後似有遺漏內容，未說明須另行考慮的事項。	依建議補充說明。
2	3-7 頁第 16 列，「應防止混凝土洩漏」，洩漏二字意義不清楚。	依建議調整用詞。
3	3-10 頁第 7 列，「未必完全依本指引適當」，建議修正為「完全依本指引未必適當」。	依建議修正文字。
4	3-11~3-14 頁圖 3.3、圖 3.4、圖 3.5、圖 3.6、圖 3.7 等圖示建議再加強標示說明，修飾精確，俾易於清楚理解。	依建議加強標示說明。
5	3-13 頁第 8 列文字「水乙滲入」修正為「水已滲入」。	依建議修正文字。
6	4-27 頁，表 4-44 中，居民注意事項 5.安全意識顏色，請補充說明安全意識顏色內容。	刪除 5.安全意識顏色。
7	5-8 頁。本頁內有關②防凍劑考量一節，因國內並無防凍劑之使用，本節似無列為本指引之必要。	融雪劑的使用對鋼橋防蝕有重大影響，考慮指之引完整性，仍予以保留。
8	6-13 頁，第四列，「多加註意」修正為「多加注意」。	依建議修正。

七、 交通部鐵道局		
1	圖 3.2 以設計流程寫出防蝕設計流程，建議可另提供以計畫流程(可研、綜規、基設、細設)的角度敘述需進行的防蝕工作。	圖 3.2 已涵蓋三階段(橋梁型式選定階段，結構設計階段，施工階段)，各階段詳細說明請參閱 3.3.2~3.3.4 節整。
八、 交通部公路局		
1	簡報 p48 簡報提到某廠商建議 CNS 10007 鋼鐵之熱浸鍍鋅拿除鍍鋅層附著性的規定，請教： ● 是否有對應的其他條文來控制附著性? ● 若沒有對應規定，則是否本項對於相關品質控制上沒有影響? ● 鍍鋅量太高太厚，對於熱浸鍍鋅品質是正面或負面?例如鍍鋅量超出原設計 2 倍膜厚(ex 設計規定 550 g/m^2，檢驗結果>1100 g/m^2) 。	12/3 說明會中已討論。
2	本指引的定位是否為上位規範?例如指引與各公部門的施工規範或部頒公路橋梁設計規範，公路工程施工規範之適用順序?有無部頒「整體道路規劃指引」之執行程序。	本指引為交通部運輸研究所委託研究案之工作成果，僅供參考。
九、 國營臺灣鐵路股份有限公司		
1	依據本次簡報，後續主辦單位還有維護部分的指引，建請考量軌道運輸維護時間短、可能需要夜間施工的部分，指引適合現場施作的材料與工法；另外，因原材料與修補材料可能不同，亦請考慮材料間的接合度、黏著性等，避免造成日後脫落；並且納入現場施工人員、監造人員與業主單位的檢查標準，以供三方及驗收時做為參考。	建議內容屬第二年度工作範圍，後續參酌。

7.2 混凝土橋篇

1. 第二場成果說明會辦理

第二場成果說明會辦理情形如下所示，說明會議程如表 7-4、辦理情形如圖 7.2。

(1) 說明會對象：交通部所屬各機關承辦橋梁設計與維護管理人員、專家學者與顧問(如表 7-5 所示)

(2) 說明會內容：包含鐵公路橋梁(混凝土橋篇)的腐蝕機理、防蝕考量與方法、防蝕(或耐久性)設計、防蝕附加保護措施與施工技術等指引。

(3) 說明會日期：114 年 12 月 15 日(星期一)上午 9 點 30 分。

(4) 說明會地點：財團法人臺灣營建研究院 16 樓會議室(新北市新店區中興路二段 190 號 16 樓)

表 7-4 第二場成果說明會議程

時間	課程講題	主持人/主講人
09:00-09:30	報到	
09:30-09:40	長官致詞	蔡立宏主任 邱建國院長
09:40-10:30	鐵公路橋梁防蝕設計及施工技術指引 混凝土橋篇	陳育聖博士
10:30-11:50	Q&A	邱建國院長
11:50~	~賦歸~	

表 7-5 第二場成果說明會出席名單

交通部運輸研究所	蔡立宏 主任 賴瑞應 科長 黃烟宏 副研究員
財團法人臺灣營建研究院	邱建國 院長 陳育聖 組長 梁智信 博士 簡臣佑 副研究員 羅永霖 助理研究員
專家學者與顧問	楊仲家 名譽教授 李家順 工程司 黃炳勳 委員 林舜元 委員 林曜滄 顧問 吳忠民 顧問 蔡明達 顧問
交通部高速公路局	林耿億
交通部公路局	張書嘉 洪宗亨
交通部鐵道局	蔡宏仁
臺灣港務股份有限公司	黃奕坦



圖 7.2 第二場成果說明會辦理情形

2. 混凝土橋篇修正建議與辦理情形

第二場成果說明會後，對於專家學者與交通部部屬機關提出之修正建議與辦理情形，如表 7-6 所示。

表 7-6 混凝土篇修正建議與辦理情形

項次	建議	辦理情形
一、 李家順 工程司		
1	混凝土橋梁之橋檢缺失，大多發生在施工部分，如工作縫之滲漏水等問題，應思考這部分該如何落實	相關內容，已於本指引 7.2 節「施工」第 2.模板工程，第(3)進行補充。
2	5-10 頁備註不符，4-19 頁表 4-2(1) 不符、4-8 頁表 4-2 不符、7-11 頁表 7-5 中本標準的附錄 C? 哪個的本標準	1. 本指引之耐久性設計目標，為設計年限內易於維護，並搭配完善之檢測與維護管理計畫進行耐久性設計。 2. 施工縫部分，已於本指引 7.2 節「施工」第 2.模板工程，第(3)進行補充。
二、 吳忠民顧問		
1	第五章「混凝土橋附加保護措施」，說明各種防護材料特性，但如何讓讀者與使用者能有一選用基準參考，如材料選用條件一覽表，有助本指引實用性	附加保護措施種類眾多，設計者可考量環境條件、經費預算等決定之，本指引僅說明各種防護材料特性以供設計者參考。
2	第七章「混凝土橋防蝕施工」，針對附加防蝕材料之表面防護材料規格，施工及品質管制相對欠缺。	表面防護材料規格種類眾多，相關規定建議可參照本指引 5.1 節。
三、 林曜滄顧問		
1	耐久性是要搭配維護管理的機制，請再加強論述。	維護管理部分，將於第二年度進行說明。
2	附屬設施很多是鋼構造，請在混凝土橋篇也應有說明。	遵照辦理，相關內容，已於本指引 3.3 節「耐久性防蝕設計」第 5.之(7)附屬設施的防蝕考量，進行說明。
3	我們一定要將防腐蝕機制建立第二道防線，若有損傷徵兆缺失發生，其改善機制及工法與耐用年限，請作通盤考量與說明。	檢測與維護部分之內容，將於第二年度於第八章進行說明。
4	施工縫、伸縮縫、拉力構件、耐震措施(如止震塊)構件、水氣聚集區、迎風面區或外層鋼筋、預留鋼筋、工作筋的防蝕，建議適度增加防蝕保護或第二道防線之內容。	已於本指引 3.3 節「耐久性之防蝕設計」第 5.第(1)項之 7「其他防蝕設計之注意事項」，進行補充。
5	耐久性設計，需依照結構設計年限做為設計依據，並應以設計年限內免維修為設計目標，請加強論述。	本指引之耐久性設計目標為設計年限內易於維護，並搭配完善之檢測與維護管理計畫進行耐久性設計。維修部分將於第二年度於第六章與第八章進

		行說明，感謝指教。
四、 黃炳勳 委員		
1	第四章 P.4-1 所提三個腐蝕環境之理論計算，在實務設計上較少使用，建議以表格呈現各種條件下所需數值。另鹽害環境除考量水平距離外，建議納入垂直距離之考量。	1. 當設計上有特殊之需求，以至於指引所提供之表格無法滿足時，建議可用理論計算公式，計算不同腐蝕環境對應數混凝土抗氯離子能力或保護層厚度。 2. 鹽害環境分區之垂直距離考量，詳見本指引之表 4-4。
2	有關 5.1 混凝土表面防護中列出常用之項目，建議請舉例使用場合或部位，簡述使用規定及施工步驟等規定，以利工程的應用參考。另其中(6)被覆層各種常見系統係運用於廣場地面、停車場等，鮮少運用於橋梁工程，請考量是否刪除。	混凝土表面防護種類眾多，礙於篇幅，本指引僅做原則性之介紹。被覆層會用於橋梁橋墩處，防止橋墩受河水沖刷，或維護補強時也會有所應用，故不建議刪除。指引列出目的為介紹並供設計、使用者做選擇上之參考，實際之使用仍需由設計者做決定。
3	橋梁構件中，支承為連結上、下部結構間重要的傳遞力量構件，因應橋梁長期管養維護且考量支承更換不易，建議增加支承部之國內外相關防蝕規定之蒐集與對策。	已於本指引 3.3 節「耐久性之防蝕設計」第 5.第(1)項之 7「其他防蝕設計之注意事項」，進行補充。
五、 林舜元專家		
1	目前標準圖，保護層適用於一般環境，僅達到指引內約 100 年中度鹽害區水準，若是極嚴重鹽害與嚴重鹽害區，要適度修正標準圖保護層厚度。	一般環境之保護層厚度規定，可參考本指引 3.3 節之表 3-5 鋼筋最小混凝土保護層厚度，鹽害環境，4.2 節之表 4-7 鹽害環境下主要構件保護層厚度建議。
2	保護層厚度增加之後，設計方面衍生問題是橋面板及墩柱斷面尺寸也要局部加厚，否則會有抗彎能力不足或預力鋼鍵等配置空間會受擠壓情形。	本指引對於保護層厚度之增加建議(嚴重鹽害區、中度鹽害區)，皆未超出原先「鐵路橋梁設計規範」、「公路橋梁設計規範」極嚴重鹽害區之規定。
3	耐久性與保護層有絕對關係，但是過大保護層也可能容易產生撓曲裂縫，臺灣是在地震帶，中小地震頻率也相當高，在「公路橋梁設計規範」第 7.3.10 節中受撓鋼筋之分佈，從裂縫控制公式顯示，當保護層加厚是不利於裂縫控制，也就是構件受撓曲時亦產生裂縫，這裂縫產生是否影響到耐久性，撓曲裂	附加保護措施僅為第二道保險，若當前保護層厚度無法滿足耐久性設計要求，可採提升混凝土抗氯離子能力之方式進行耐久性設計，相關計算，可參考本指引 4.2 節「鹽害環境」第 3.鹽害耐久性理論計算，根據當前保護層厚度與設計年限，計算對應之混凝土抗氯離子能力要求。

	縫 z 值對於適度曝露情況者不得不大於 30,300 kgf/cm 30 MN/m，對於嚴重曝露情況者不得不大於 23,200 kgf/cm 不易滿足，建議應採附加保護措施。	
4	目前橋梁設計在推高強度鋼筋與大號數，若是保護層過大撓曲裂縫會更難控制，因此耐久性問題亦同時須考慮撓曲裂縫。	4.2 節之表 4-7 鹽害環境下主要構件保護層厚度建議所建議加厚之保護層厚度，並無超過原先「鐵路橋梁設計規範」與「公路橋梁設計規範」極嚴重鹽害區之規定，若有特定保護層厚度之設計，可參考本指引 4.2 節「鹽害環境」第 3.鹽害耐久性理論計算，根據當前保護層厚度與設計年限，計算對應之混凝土抗氯離子能力要求。
5	在橋梁耐久性設計中不應以採用附加保護措施而減少保護層之厚度或降低混凝土品質等方式進行設計，反能要思考因無法增加保護層之厚度而增加採用附加保護措施。	附加保護措施僅為第二道保險，若當前保護層厚度無法滿足耐久性設計要求，可採提升混凝土抗氯離子能力之方式進行耐久性設計，相關計算可參考本指引 4.2 節「鹽害環境」第 3.鹽害耐久性理論計算，根據當前保護層厚度與設計年限，計算對應之混凝土抗氯離子能力要求。
6	提醒施工中常用工作筋議題，尤其板筋鋪設施工常用工作筋支撐，以確認鋼筋保護層厚度主筋是滿足保護層規定，但是工作筋則無法滿足，因此在高公局規定，工作筋均採鍍鋅鋼筋。	工作筋之防蝕設計，已於本指引 3.3 節「耐久性之防蝕設計」第 5.第(1)項之 7「其他防蝕設計之注意事項」，進行補充。
7	基於上述理由個人認為，在嚴重或極嚴重鹽害區可能無法僅用加厚保護層來增加耐久性，應該思考適當保護層加上附加保護措施，可能是較佳方式。	混凝土之防蝕耐久性設計除了保護層厚度外，亦有規定混凝土之抗氯離子能力，附加保護措施僅能做為第二道保護措施進行使用。
六、 蔡明達 顧問		
1	1. P5-11，第 12 行，全部是國內外標準? 2. P5-12，ASTM A934，建議改為 ASTM A775 及 A934。ASTM A775 是直筋、A934 是加工鋼筋 3. P5-15，第 6 行，…….混凝土碳化會導致氯化物極限濃度的降低?	1. P5-11 第 12 行已修改為國內外之標準與規定。 2. P5-12，已補充 ASTM A775。 3. 混凝土中性化會導致鋼筋之鈍化膜破壞；氯離子之腐蝕機理為鋼筋表面氯離子含量超過臨界氯離子濃度時，鋼筋表面的鈍化膜便會遭破壞而產生腐蝕。因此混凝土性化化會

		導致氯化物極限濃度的降低。
2	第五章，針對臨山區橋梁下部結構，建議增加橋墩鋼板防護考量，減少豪大雨造成土石對橋墩撞擊損傷保護層或混凝土開裂問題。	臨山區橋梁下部結構,已補充至 3.1 節「防蝕設計應具備的條件」第 3.之(1)橋梁之設置環境。
3	建議在陰極保護章節，增加捷運系統對鄰近鐵公路橋梁下部結構因雜散電流對結構的產生腐蝕預防或檢測。	雜散電流部分，已於本指引 3.3 節「耐久性之防蝕設計」第 5.第(1)項之 7「其他防蝕設計之注意事項」，進行補充。
七、 王自強 顧問		
1	5.4 陰極防蝕工法正名為“陰極保護”	遵照辦理。
2	P5-20、5-21，電位的敘述如 電位≧ -0.80 V (SCE)，應加入 電位”正於” ≧ -0.80 V (SCE)。	遵照辦理。
3	P 5-26 預力鋼材與氫脆風險 因預應力鋼材對氫致脆裂極度敏感，設計、施工、監測與維護之每個環節皆須採取比普通鋼筋混凝土更嚴格之標準。不負於 -0.90V(SCE) 的斷電電位目前被北美與臺灣主流工程界視為安全與實務可行之折衷值;若條件許可(犧牲陽極或極高電阻率混凝土),保持電位正於-0.80V(SCE) 是最保險之做法。	遵照辦理。
4	7-11 陰極防蝕工法 執行陰極保護系統之設計、安裝監督、試運轉、操作監督、量測、監測及維護監督等人員，必須具備與上述職務相當之專業資格，應具有 EN 15257、NACE 陰極保護訓練及驗證課程或任何其他同等方案之驗證。	1. 人員資格認證已補充於第五章，故第七章不再重複敘述。 2. 遵照辦理。
八、 交通部高速公路局		
1	圖 3-2 設計流程部分，目前設計目標以 50、100 年為主，除兩者年限之外，可否提供設計流程參考?	遵照辦理，已於第三章混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖，進行補充。
2	不同腐蝕環境，設計流程的終點得到什麼設計值，如依本指引架構規定水膠比、強度、保護層厚度以控	目前國際上並無以硫酸鹽環境計算設計年限之相關規範，因此硫酸鹽環境之耐久性設計,建議參照內政部「建築

	制不同腐蝕環境之設計年限。簡報30頁，若硫酸鹽計算完畢後，後續該如何進一步設計，簡報後續未詳述，望可作補充。	物混凝土結構設計規範」之作用等級、混凝土品質規定與最大膨脹應變要求即可。
3	簡報7頁，雙向橋構造部分，中間連接採分離橋設計，圖示則採連接橋設計，為防誤會請修正。	指引該段落內容敘述，是指雙向橋構造有分離方式與連接方式兩種構造，而與採分離方式之箱梁相比，箱梁採連接方式之雙向橋梁(圖 3.6)在箱梁連接處，因施工上常於主結構完成後再澆鑄，水密性不足加上兩向撓度不同導致拉力裂縫，更助長腐蝕發生，因此需考慮在連接部設置橫向預力以降低風險。指引此部分有做補充敘述，以免誤會。
4	簡報 23 頁，對於同一標工程盡量以統一腐蝕環境為準，避免廠商混用，但營建院則除了水平距離劃分外，還需考量垂直高度。表 4-5 將距海 300 公尺內村里列出，可否將極嚴重鹽害再進一步細分，因兩者標準非一致：垂直高出 15 m 則變為嚴重鹽害區。上述是否可在「極嚴重鹽害」區另外備註高出 15 m 之區域，以降回「嚴重鹽害」，以供設計單位有參考依據。	由於村里一般範圍都大於 100 公尺，因此要分開列出有所困難，高程方面也需視橋梁結構主體而有所不同，因而難以分開列出，建議可先確認是否為中度鹽害區後，在依離海水平距離與高程劃分其為極嚴重鹽害區或嚴重鹽害區。
5	對於工作筋防蝕部分，依金門大橋為例，距海 3 km 內結構物，位於保護層之工作筋應採熱浸鍍鋅、環氧樹脂、非金屬材質之工作筋，應可納入參考。	工作筋之防蝕設計，已於本指引 3.3 節「耐久性之防蝕設計」第 5.第(1)項之 7「其他防蝕設計之注意事項」，進行補充。
6	本局近幾年某些橋段之盤式支承銹蝕嚴重，固本局有將盤式支承之防蝕標準拉高到鋅熔射等級，於實務上會實際執行，後續可納入報告進行說明。	橋梁支承大多以鋼材為主，相關防蝕規定，建議可參考鋼橋篇之相關內容。
7	因本局公路跨鐵路規定中，須以角鋼防止雜散電流導致鋼筋腐蝕，此部分可納入。	雜散電流部分將納入指引，已於本指引 3.3 節「耐久性之防蝕設計」第 5.第(1)項之 7「其他防蝕設計之注意事項」，進行補充。
九、 交通部公路局		
1	對於設計年限，能否提供保護層厚度、水膠比、抗壓強度以外的指標	鹽害環境之混凝土設計年限，抗氯離子能力為重要指標，相關規定可參考

	或規定，以供設計(例如設計年限120年需要什麼要件)。	本指引 4.2 節之表 4-8 鹽害環境下主要構件混凝土抗氯離子能力建議。
2	保護層厚度的檢驗，於施工前、施工後的驗收，導致保護層的誤差，是否會影響到設計年限的計算。	已於第 7.3 節第 1.基本檢查第(3)施工檢查，新增保護層之驗收標準。
3	有關生命週期之最小化，是以成本做考量為出發，但建議以最佳化來敘述，會更為全面。	該段落確實是以成本為出發點進行敘述，生命週期相關內容，將於第二年度新增於第六章，屆時將會更有完整之說明。
4	有關淡江大橋之抗氯離子能力的驗證，是以國外規範來進行，國內雖無相關標準，但工程之驗收，是以10倍之方式進行氯離子的驗收，原規範是每120 m^3取樣一次，建議此處可改為1200 m^3取樣一次，並考慮國內是否有這個量能完成抗氯離子能力之驗證。	1. 指引僅提供將驗收頻率之參考數量，各單位可依照需求進行調整。 2. 驗證量能部分，SGS 與華光皆擁有 RCM 試驗之 TAF 認證。
5	異常值方面，可參考 CNS11771 進行。	異常值方面，指引僅提供檢驗與驗收之參考建議，各單位可依照需求進行調整。
6	膠結材的用量是否會導致 RCM 之試驗結果造成影響。	不同卜作嵐摻料用量，會對 RCM 之試驗結果造成影響。
十、 交通部鐵道局		
1	設計年限在指引裡面的描述，應為抄寫一般規範，較針對公路橋梁，未提及鐵道橋梁設計規範。內容提及公路橋梁設計年限多為 50 年，鐵道則多為 100 年，為防誤會請描述清楚。	遵照辦理，於本指引第 3.2 節設計年限，進行修改。
2	P4-5「平均最高潮位+6 m」應改為「平均最高潮位+15 m」。	遵照辦理。
十一、 臺灣港務股份有限公司		
1	P4-12、P4-13(簡報 23-25 頁)有列出在嚴重鹽害區應如何設計，可以在最後附錄，彙整成完整的設計流程，較容易參閱。尤其針對第五章嚴重鹽害區相關之防蝕、耐久性與防護措施表格可依序集中於附錄以方便查閱，避免遺漏。	相關內容會於本指引第 4.2 節「鹽害環境」第 3.鹽害耐久性理論計算，進行補充。
2	簡報 37 頁，因港灣結構物浸泡於海水，常發生結構物無異狀但氯離	感謝指教。

	子檢測結果超標，固針對氯離子濃度標準放寬到 0.3 kg/m^3 表示支持。	
十二、 交通部綜合規劃司		
1	P.3-1，3.1-1 第 3 段「若考慮採用國內尚無使用實績的防蝕方法，需確認其防蝕原理無問題，並預先驗證在適用條件下是否具備規定耐久性及施工性無障礙。特別是耐久性方面，應透過反映橋址環境與施工條件的曝露試驗或加速試驗，明確現地條件下的性能。雖嚴格反映現地條件進行耐久性驗證或推定可能有困難，但可透過與其他防蝕原理相同且耐久性明確的防蝕方法進行比較試驗，間接評估耐久性。比較試驗通常採用加速試驗，該試驗需基於防蝕原理，能評估實橋長期劣化情況。」；其中比較試驗(或加速試驗)，其辦理評估的期程或時間，建議提出量化值，以利實務面執行。	防蝕方法種類眾多，對於國內尚無使用實績的防蝕方法(新材料、新工法)，業者須自行提出所需之性能檢查方法或性能驗證報告供監造單位核定。本指引僅於第 7.3 節「品質管制」之第 1. 第 3 項，給出原則性規定。
2	P.4-5，4.2-1 第 1 段「…交通部公路總局「臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究」[23]…」，與 P.參-II 參考文獻所列財團法人臺灣營建研究院不一致，建請釐清。	該文獻為交通部公路總局委託研究，財團法人臺灣營建研究院為研究報告之作者，已於參考文獻處，進行修正。
3	P.4-6~4-11，表 4-5，建議增加村里位置圖，較易以圖像瞭解離海岸 300 公尺以內(極嚴重與嚴重鹽害區)之村里位置。	該表摘自交通部「鐵路橋梁設計規範」，若臺灣村里位置以圖像呈現，各村里之標示過為細小，難以於 A4 紙面上呈現，因此本指引僅給出表格以供設計者進行參考。
4	P.4-14，「…若 t 小於 25(年)時，須帶入條件 t=ts 計算(4-19)，改寫後的方程式如式(4-29)，將(4-29)帶入式(4-18)後可以得到式(4-30)，最後帶入…」；其中式(4-29)、式(4-30)相關參數，似乎與式(4-19)無關，建請釐清。	遵照辦理，已進行修正。
5	本次係針對第一年工作範圍辦理成果說明會，有關第二年工作範圍涉及第八章「既有混凝土橋梁檢測與維護」部分，建議並提醒運輸研	感謝指教，遵照辦理。

	究所應將行政院公共工程委員會針對「橋梁檢測檢討與精進」之建議事項納入參考，俾利與時俱進。	
十三、　交通部運輸研究所 賴瑞應 科長		
1	簡報 13 頁，計算防蝕設計年限，若考量附加補護措施，是否可延長結構物服務年限?	附加保護措施之性質為防蝕設計之第二道保險，並不能以此為依據延長服務年限。
2	簡報 32、23 頁，鹽害分級是否可以不考量高度，僅以水平距海遠近評估?	本指引參考國外規範與對於經濟性之考量，從而提出考慮高程之鹽害分級建議。

7.3 混凝土橋篇與鋼橋篇

1. 第三場成果說明會辦理情形

第三場成果說明會辦理情形如下所示，說明會議程如表 7-7、辦理情形如圖 7.3。

(1) 說明會對象：交通部所屬各機關承辦橋梁設計與維護管理人員、專家學者與顧問(如表 7-8 所示)

(2) 說明會內容：包含鐵公路橋梁(包含鋼橋與混凝土橋)的腐蝕機理、防蝕考量與方法、防蝕(或耐久性)設計、防蝕附加保護措施與施工技術等指引。

(3) 說明會日期：115 年 1 月 14 日(星期三)上午 9 點。

(4) 說明會地點：台大集思會議中心拉斐爾廳(106 臺北市大安區羅斯福路四段 85 號 B1。

表 7-7 第三場成果說明會議程

時間	課程講題	主持人/主講人
08:30-09:00	報到	
09:00-09:10	長官致詞	蔡立宏主任、邱建國院長
09:10-09:50	鐵公路橋梁防蝕設計及施工技術指引 混凝土橋篇	陳育聖組長
09:50~10:30	鐵公路橋梁防蝕設計及施工技術指引 鋼橋篇	梁智信博士
10:30-10:40	課間休息	
10:40-11:50	Q&A	邱建國院長
11:50~	~賦歸~	



圖 7.3 第三場成果說明會辦理情形

表 7-8 第三場成果說明會出席名單

交通部運輸研究所	蔡立宏 主任 賴瑞應 科長 黃烟宏 副研究員
財團法人臺灣營建研究院	邱建國 院長 陳育聖 組長 梁智信 博士 簡臣佑 副研究員 何季軒 副研究員 羅永霖 助理研究員 梁喬茵 助理研究員
專家學者與顧問	楊仲家 名譽教授 李家順 工程司 林曜滄 顧問
交通部綜合規劃司	鄧煒霖 技士 高育林 技正
交通部高速公路局	林耿億 副工程司 王志男 幫工程司
交通部高速公路局第一新建工程分局	曾善賜 工程員
交通部高速公路局第二新建工程分局	黃佑寧 工程員
交通部高速公路局中區養護工程分局	林哲詠 副工程司 陳俞華 工程員 陳祈丞 幫工程司
交通部高速公路局南區養護工程分局	張榮泰 副工程司
交通部高速公路局北區養護工程分局木柵工務段	章騏峯 工程員
交通部公路局	楊證傑 副工程司
交通部公路局蘇花公路改善工程處	邱雅淳 副工程司
交通部公路局蘇花公路改善工程處第 4 工務段	黃韻睿 職務代理人
交通部公路局北區養護工程分局	游嘉鴻 工程員 黃志嘉 工程員
交通部公路局東區養護工程分局頭城工務段	林文信 工程員
交通部公路局東區養護工程分局花蓮工務段	婁渥・卡第 幫工程司
交通部公路局南區養護工程分局	陳鈺沅 工程員 王惠玉 僱用工程員
交通部公路局南區養護工程分局鳳屏工務段	陳仕霖 工程員
交通部公路局南區養護工程分局楓港工務段	程永隆 副段長
交通部公路局雲嘉南區養護工程分局斗南工務段	陳信宏 副工程司
交通部公路局雲嘉南區養護工程分局曾文工務段	陳俊穎 工程員
交通部公路局中區養護工程分局員林工務段	楊偉園 工程員
交通部公路局北區公路新建工程分局	邱紀勳 工程員

	顏士閔 工程員
交通部鐵道局	蔡宏仁 工程員
交通部鐵道局中部工程分局	葉人瑞 幫工程司 廖呈豪 幫工程司
交通部鐵道局北部工程分局	連嘉一 幫工程司 江羿寬 工程司
交通部鐵道局南部工程分局	林思齊 幫工程司 王蒙納 助理工程師
交通部鐵道局東部工程分局	林明達 工程員 林志明 工程員
國營臺灣鐵路股份有限公司	張雅雯 助理工程師
國營臺灣鐵路股份有限公司花蓮工務段	林育臣 工程師
國營臺灣鐵路股份有限公司臺北工務段	賴信全 助理工程師
臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司	陳雅芳 橋梁維護主辦工程師
臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司	王信傑 資深技術員
臺灣港務股份有限公司高雄港務分公司	林育仁 經理 鄭有宏 副工程師
台灣世曦工程顧問股份有限公司	蔡東樺 計畫工程師 林聖學 工程師
中興工程顧問股份有限公司	劉昶慶 工程師 林辰鴻 工程師
林同棪工程顧問股份有限公司	李梓綸 結構工程師 孫詠棋 結構工程師

2. 混凝土橋篇與鋼橋篇修正建議與回覆

第三場成果說明會後，對於專家學者與交通部部屬機關提出之修正建議與辦理情形，如表 7-9 所示。

表 7-9 混凝土篇與鋼橋篇修正建議與辦理情形

項次	建議	辦理情形
一、 李家順 工程司		
鋼橋篇		
1	P2-3,金屬在銲接部位因局部過熱、冷卻後，除了金屬組織的改變以外，還會產生殘留拉應力，建議此類應力腐蝕，一同納入指引。	遵照辦理。
2	1. 表 3-1「鋼橋典型防蝕方法」， 耐候性鋼材之施工方法為製鋼時添加合金元素，此為製作方法，並非施工方法，建議修正。此外，考量臺灣工程上之使用習慣，建議將塗裝納入耐候性鋼材之複合防蝕中。 2. 表 3-2 「鋼橋典型防蝕方法適用環境」，耐候性鋼材與熱浸鍍鋅建議依臺灣工程上之使用習慣，建議增加複合防蝕(塗裝)之考量。 3. 表 3-3「典型防蝕方法施工所需結構條件」，倒角建議改為構件銳緣圓弧化。	遵照辦理。
3	3.3.3 節「防蝕方法所需的結構設計」 1. 扇形孔排水，位於下翼板處扇形孔應加大尺寸。 2. 箱型梁內排水管接頭可能因外力作用損壞造成滲漏，建議補充至內文中。 3. 圖 3.5 伸縮縫止水結構導水範例,導水管並不明顯，建議修改。 4. 圖 3.6 橋面板(防水層)上排水範例，該圖例之排水設施，臺灣工程並不常用，建議建議修改。 5. 圖 3.7 橋面板截水範例，圖中的角鋼，因維護不易應採用非金屬材料，建議修正。	遵照辦理。
4	1. 4.2.3 節塗裝「結構設計注意事項」，構件角部進行圓弧化處理，建議採用半徑	遵照辦理。

	2R 以上的曲面型式(C5(含)以上環境建議採 3R 以上曲面型式) 2. 4.3.2 節「新設塗裝施工」，不塗裝部位之範圍定義，建議加入「超音波探傷會有障礙之範圍(一般為對象板厚 t 之 6 倍以上)」，進行補充說明。 3. 4.3.3 節「施工及品質管理」，建議增加「塗裝管理人員資格要求之內容」。	
5	6.3.1 節熱浸鍍鋅「製作及施工注意事項」，2.冷加工及鑽孔，構件外側的角部宜進行約 1mm 的倒角。建議改成 3mm 倒角。	遵照辦理。
混凝土橋篇		
1	1.2 節「適用範圍」，原文僅提及鋼橋下部結構，建議補充鋼橋之混凝土橋面板。	遵照辦理。
2	2.1 節「混凝土中鋼筋腐蝕」，1.腐蝕機理，除原文之鹼質粒料反應、凍害、化學腐蝕、超載、溫度、應力裂縫以外，尚須增加乾縮裂縫，建議補充。	遵照辦理。
3	除了環境造成之腐蝕外(如中性化、鹽害)，尚須考慮局部嚴苛腐蝕環境造成之影響，例如易於積水的橋梁上部結構、伸縮縫、施工縫等均屬之，建議納入指引內文中。	有關局部腐蝕環境，於 3.3 節「耐久性防蝕設計」中，對應之結構部位之內文進行補充。
4	施工縫應避免使用免拆模板工法，且避免全斷面使用。此外，對於結構曝露面無法避免截面突變或施工縫時，足了需要處理好施工縫之外，建議增加防水層。	遵照辦理。施工縫相關內容於 3.3 節「耐久性防蝕設計」、7.2 節「施工」，進行補充。
5	7-2 節「施工」第 4.增加補充以下實務經驗內容： 1. 灌漿時由低點至高點灌注需確認由另一端溢出，並於最高點設透氣管 2. 灌漿前套管應先清洗並使用空壓機吹乾，且應使用專用之灌漿用保護蓋，不可採用傳統之砂漿封頭。 3. 通過此部位之鋼腱佈置應於設計時加以檢核，包含防爆筋、格柵筋、承壓板、摩擦剪力筋等，以確保有足夠的保護層。	遵照辦理。
6	7-2 節「施工」第 6.：混凝土所用養護水原則上使用自來水，不可用海水。若使用地下水，則需檢測氯離子含量是否符合規定。	遵照辦理。
7	7-2 節「施工」第 7.增加補充以下實務經驗內容：	遵照辦理。

	1. 上、下構施工時期有所差隔的結構物，以及有所謂分階段施工的結構(如預留搭接鋼筋)，必須針對腐蝕採取因應的措施。 2. 預力端錨或施工用鋼件撤去後所遺留的痕跡或施工人孔，應以無收縮混凝土或水泥砂漿進行填補。 3. 填補的部分，因往往與原混凝土間密著性不佳，也不易形成一體，故應預留錨定鋼筋或鋼絲網，並將原先之混凝土表面進行粗糙化處理。	
二、 交通部運輸研究所 蔡立宏 主任		
1	希望能在指引中有寫清楚關於各階段的注意事項(就是常可能發生的錯誤)，以提點設計單位注意，看是要融入主文中，還是要放在附錄中特別寫出來。	遵照辦理，相關內容已融入指引主文中。 1. 混凝土橋篇部分，設計階段注意事項已列入 3.3 節「耐久性防蝕設計」，施工階段注意事項已列入第七章「混凝土橋防蝕施工」，依對應內容列入各小節中。 2. 鋼橋篇部分，第四至第七章各防蝕方法均有「結構設計注意事項」、「製作及施工注意事項」兩個小節，專門提點設計與施工階段的注意事項。
2	除了彙整各資料外，希望能多一點經驗上的東西(就是上面寫的這些常出現問題的地方)，讓後續的使用者能避免再發生這些錯誤。	實務經驗上之內容，與各委員之意見，皆有納入指引。
三、 國營臺灣鐵路股份有限公司		
1	混凝土橋篇 P4-7，北區與香山區應屬新竹市。	遵照辦理。

第八章　結論與建議

8.1 結論

1. 鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查

鐵公路橋梁主體結構防蝕設計案例探討，包含混凝土橋與鋼構橋共 14 座案例橋梁，並以規範、設計、施工、維護等層面進行探討。混凝土橋案例探討結果顯示，其劣化成因主要為早期之耐久性設計規範有所不足所導致。早期(98 年以前)依據的設計規範以結構安全與承載能力為設計考量，對於環境作用與耐久性僅以混凝土保護層厚度做為主要控制手段，未進行系統性的腐蝕或鹽害環境分級。最終因耐久性考量不足，導致許多橋梁(尤其是濱海地區)因氯離子侵入與鹽害環境而產生鋼筋腐蝕與混凝土劣化問題。近年設計規範修訂進一步強調設計年限、全生命週期理念與維護管理考量，使混凝土橋梁設計由單一結構強度導向，轉型為兼顧安全性、耐久性與可維護性的整體性設計方式。

鋼橋案例探討結果顯示，其劣化大多是因為疏於維護管理所導致，當前「公路橋梁檢測及補強規範」與「鐵路橋梁之檢測及補強規範」雖要求塗裝劣化維修需依檢測結果判斷，但實務上普遍缺乏完整的塗裝系統檢測、評估與追蹤紀錄；此外，新建橋梁多以保固期滿後才啟動防蝕維護，可能導致鋼構基材在未受控狀況下劣化；既有橋梁的防蝕系統修復亦需依據國內外規範並考量腐蝕環境條件進行設計，以避免修復後再次快速劣化並增加維護成本。鋼橋防蝕維護管理時需定期檢查防蝕層劣化狀況(如膜厚不足、剝落、銹蝕)，同時監測環境因素(塵埃、鹽分、排水阻塞等)並建立完整防蝕記錄；補修應具備局部或全面更新的可行性，並優先處理積水、漏水等問題。

各類交通設施之案例探討結果顯示，隧道主體結構遭遇之腐蝕問題主要以中性化環境與地下水滲漏為主，且由於隧道屬於封閉空

間，從而導致隧道內之中性化腐蝕現象因通風不良與車輛排放氣體影響而加劇；港灣部分，屬於及極嚴重鹽害環境，受潮汐、飛沫區及乾濕交替影響，導致混凝土劣化、鋼構腐蝕、且防蝕塗裝及陰極防蝕系統性能衰退更進一步加速結構劣化；捷運與機場設施部分之腐蝕問題與鐵、公路橋梁較為接近，都市化地區以中性化為主，臨海地區以鹽害為主；而機場跑道主要受飛機起降之衝擊力而損壞，與腐蝕問題較無關係。綜上，建議其餘各類交通設施可依循鐵公路橋梁研擬防蝕技術指引之方式，以確保提升設施的品質及壽齡與減少生命週期之維護成本。

2. 鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討

混凝土橋之耐久性規範探討，內容包含美國、歐洲、日本、中國、臺灣之耐久性設計規範，各國耐久性設計規範大致可分為查表與理論公式兩大類，查表類規範透過曝露環境等級與設計使用年限，依照規範中所提供的表格，直接查得建議的混凝土等級、水膠比、保護層厚度等設計參數。理論公式類規範允許設計者自訂結構設計年限與曝露條件，並透過物理、化學與數理模型(如氯離子擴散、碳化等)進行計算推導，得到保護層厚度、材料設計參數等結果，但通常需搭配材料測試或保守假設。由於各國之理論公式類規範皆有屬於自己的模型與係數，未必能符合所有國家之情境作使用，因此 3.1.3 節針對理論公式類規範進行進一步之分析比較，透過帶入相同之混凝土材料條件，對比各規範計算之服務年限差異，以便於本計畫第四章與混凝土橋篇指引之擬訂做參考。

鋼橋之防蝕設計規範則以防蝕設計、油漆塗裝、熱浸鍍鋅、金屬熔射、耐候性鋼材 5 個部分，進行國內外規範、手冊、指引之蒐集，並最終比較各鋼橋典型防蝕方法(塗裝、熱浸鍍鋅、金屬熔射與耐候性鋼材)之概要防蝕原理、設計要點、工法特性、維護需求與限制情況。防蝕設計規範部分，除了防蝕設計以外亦包含大氣腐蝕環境分類之內容；油漆塗裝部分，包含塗裝耐久性等級、表面處理、

熱浸鍍鋅與金屬熔射塗裝系統等內容；熱浸鍍鋅則包含材料、檢驗、作業方式、品質管理與修補等；金屬熔射與耐候性鋼材皆包含材料、品質管理等內容，且耐候性鋼材還有美國鋼結構協會製訂之參考指南的相關內容。

3. 不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議

根據「鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討」之結果，本計畫對於不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準進行建議。混凝土橋之設計標準建議，包含鋼筋腐蝕機理、防蝕設計建議(設計年限、設計流程、耐久性設計原則與考量)以及中性化、鹽害與硫酸鹽三種腐蝕環境之環境作用等級、混凝土材料規定(查表類規範)與理論計算之建議，防蝕保護策略部分以附加保護措施與其參考規範為主。

腐蝕環境之混凝土材料規定以查表為主即可，而當設計上有特殊之需求，以至於當前建議之表格無法滿足時，才需使用理論計算公式,計算不同腐蝕環境對應數混凝土抗氯離子能力或保護層厚度。

附加保護措施種類眾多，且性質差異較大難以進行比較，因此設計者可考量環境條件、經費預算等決定之，本計畫(以及擬定之指引)僅就各防護材料特性做原則性介紹以供設計者參考。

鋼橋防蝕保護策略包含鋼材腐蝕機理、大氣腐蝕環境、鋼橋防蝕方法、防蝕設計流程與原則等內容。塗裝、耐候性鋼材、熱浸鍍鋅、金屬熔射四種防蝕方法之設計標準建議，皆包含防蝕原理、防蝕設計原則、結構設計注意事項與相關考量等內容。

4. 防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例

施工品質作業規定，以上述設計標準建議之防蝕設計原則與結構設計注意事項為基礎，對於其施工細節進行圖說範例之補充。混凝土橋之施工品質作業規定，包含考慮防蝕耐久性的細部設計(包含設計要點與圖說)、混凝土耐久性試驗介紹、混凝土材料規定、施工品質作業規定等內容。

鋼橋四種類防蝕方法之施工之品質作業規定,均包含結構設計、製作及施工上的注意事項、施工及品質管理等內容，此外，塗裝部分亦包含塗層修補施工方法、表面處理、塗膜檢驗等內容；耐候性鋼材亦包含運輸及安裝注意事項；熱浸鍍鋅包含開口、切割範例、構件許可性誤差及附著性檢驗；金屬熔射包含表面處理與熔射層缺陷及其修復等內容。

5. 研擬公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引

本計畫基於上述成果，進行鐵公路橋梁防蝕技術指引之擬訂，並根據橋梁種類分為混凝土橋篇與鋼橋篇。混凝土橋篇指引，第二章除了混凝土中鋼筋腐蝕外，還包含中性化、鹽害與硫酸鹽之腐蝕機理。第三章包含防蝕設計之原則性內容，而後需根據不同腐蝕環境於第四章「混凝土橋耐久性設計」決定混凝土之品質與耐久性需求(一般設計以查表方式即可,如有特殊需求或指定之混凝土品質條件，可參考理論公式計算所需之混凝土條件)。附加保護措施之選擇可參考第五章,本計畫建議嚴重鹽害區採用至少一種附加保護措施,極嚴重鹽害區採用至少兩種附加保護措施。而後施工之材料、施工、品質管制可參考第七章之相關規定。

鋼橋篇指引，第二章為腐蝕機理、第三章包含防蝕設計之原則性內容，因鋼橋各防蝕方法之概念有別於混凝土橋，為保持內容之連貫性，因此第四至第七章不同於混凝土橋篇以設計、施工進行章節的區分,而是以各防蝕方法為主軸,分別說明各防蝕方法之設計、施工與複合防蝕等內容。

6. 辦理研究成果說明會(3 場次)

本計畫所辦理之 3 場次成果說明會分別於 114 年 12 月 3 日、15 日以及 115 年 1 月 14 日完成，3 場次均為實體會議，說明會對象為交通部所屬各機關承辦橋梁設計與維護管理人員、專家學者與顧問。3 場次成果說明會後，均根據修正建議進行回覆與指引內容之修正。

8.2 建議

1. 「鐵路橋梁設計規範」、「公路橋梁設計規範」等規範，僅是規定最低標準。本計畫所擬定之「鐵公路橋梁之防蝕技術指引」，混凝土橋篇與鋼橋篇根據各類腐蝕環境給出防蝕方法、耐久性設計、品質檢驗之建議，因考量橋梁之全生命週期成本，使得部分建議有高於當前設計規範之要求。建議未來規範修訂時，能基於全生命週期成本的角度，將本指引提出之防蝕、耐久性設計建議納入參考。
2. 建議各機關未來如果有委員審查設計成果時，能基於全生命週期成本之角度，主動說明機關的作業要點，並給予高保護標準防蝕的作法指導與建議，而非僅以初期成本之角度進行否定，並請設計單位採用較高標準的耐久性設計。
3. 各機關未來訂定設計施工作業要點時，建議可參考本指引之內容，根據機關的各項設施使用年限與腐蝕環境，訂定符合機關的作業要點，以讓本計畫發揮加乘效益。
4. 本指引提出之品質檢驗頻率與規定，僅提供驗收頻率之參考數量，若各機關已有原先之作業要點，可按需求進行修改。抑或是各機關原先之作業要點，具有相較於本指引更高之標準者，建議仍以各機關原先之作業要點為主。
5. 全生命週期成本之概念應包含設計、施工、檢測與維護四個部分，當前之鐵公路橋梁防蝕技術指引僅包含設計與施工部分，建議後續可納入有關檢測、維護以及生命週期成本最佳化評估等章節，使指引內容得以更加完整。
6. 生命週期成本最佳化評估應包含蘊含碳評估，計算包括材料生產、運輸、施工過程中的碳排放，從而結合全生命週期成本之概念提供更全面的經濟效益分析。如此不僅能提升鐵公路橋梁的耐久性與經濟效益，更能為交通部及相關單位在實踐 2050 淨零排放目標上，提供更為具體的技術支持與行動方案。

參考文獻

1. 梁智信、朱我帆、蔡旭彥、莊豐瑜，「鐵路鋼筋混凝土橋梁耐久性探討」，臺鐵資料季刊，第 367 期，P.81~102，2018 年。
2. 財團法人臺灣營建研究院，「臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究：總期末報告」，交通部公路總局委託研究，2015 年。
3. 日本土木学会，「コンクリート標準示方書設計編〕」，2012 年。
4. 交通部，「鐵路橋梁設計規範」，2023 年。
5. 交通部，「公路橋梁設計規範」，2020 年。
6. 臺北市政府養護工程處，「八十五年度橋梁安全檢測工作(第二標)中正橋維修示意圖」，1996 年。
7. 臺北市政府工務局養護工程處，「中正橋橋涵安全檢測報告」，1996 年。
8. 中興工程顧問股份有限公司，「台 61 線 WH06-1(24K+155~25K+210)及 WH07-1(31K+831~35K+378)橋梁耐震能力評估及損傷維修補強、耐震能力補強設計委託服務工作服務建議書」，2018 年。
9. 交通部，「公路橋梁設計規範」，2015 年。
10. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「WH06-1 標高架橋儀器檢測及試驗報告」，2019 年。
11. 交通部公路總局第一區養護工程處，「台 61 線 WH06-1(24K+155~25K+210)鹽害改善工程設計圖」，2020 年。
12. 交通部公路總局第二區養護工程處，「台 61 線西湖溪橋及後龍觀海大橋耐震補強工程委託設計服務工作」，2019 年。
13. 交通部公路總局西部濱海公路北區臨時工程處，「台 61 線後龍觀海大橋改善工程細部設計圖」，2020 年。

14. 交通部公路總局第二區養護工程處，「台 61 線 94K+455 玄寶大橋補強工程委託設計服務工作-P9~P15 耐洪能力評估及河道變異分析報告」，2020 年。

15. 交通部公路總局第二區養護工程處，「台 61 線 94K+455 玄寶大橋局部補強及改建工程細部設計圖」，2022 年。

16. 陳明谷，「金門大橋混凝土構造物防蝕策略及鍍鋅鋼筋使用之介紹」，熱浸鍍鋅雜誌，第 68 期，2020 年。

17. 梁智信、羅嘉麟、楊仲家，「國內橋梁耐久性設計現況與展望」，混凝土科技，第十七卷，第三期，2023 年。

18. 梁智信、羅嘉麟、詹文宗，「淡江大橋及其連絡道工程(第三標)耐久性設計」，混凝土科技，第十四卷，第三期，2020 年。

19. 基隆市政府，「社寮橋拱圈內部除銹塗裝維護工程細部設計圖(初稿)」，2024 年。

20. 基隆市政府，「基隆市實踐橋等六座鋼纜索特殊橋梁檢測委託技術服務作業橋梁檢測報告書(核定版)」，2021 年。

21. 交通部公路總局，「南方澳跨港大橋倒塌事件分析報告」，2020 年。

22. 國家運輸安全調查委員會，「南方澳大橋斷裂重大公路事故-重大運輸事故調查報告第一冊」，2020 年。

23. 國家運輸安全調查委員會，「南方澳大橋斷裂重大公路事故-重大運輸事故調查報告第二冊」，2020 年。

24. 國家運輸安全調查委員會，「南方澳大橋斷裂重大公路事故-重大公路事故事實資料報告」，2020 年。

25. 桃園市政府養護工程處，「桃園市大園區彩虹橋維護改善工程基本及細部設計圖」，2020 年。

26. 苗栗縣政府，「頭份市頭份大橋改善工程細部設計圖」，2021 年。

27. 苗栗縣政府，「頭份大橋特殊橋梁檢測報告」，2020 年。

28. 臺灣省公路局關渡橋工程處,「關渡橋主橋新建工程竣工圖」,1983年。

29. 謝易儒,「更換關渡橋吊索之研究」,國立臺灣科技大學營建工程系碩士學位論文，2012 年。

30. 交通部公路局,「台 15 線關渡橋檢測、安全評估及防災措施工作檢測報告書第 14 章」,2015 年。

31. 國立中央大學,「關渡大橋鋼管樁檢測報告書」,2022 年。

32. 林曜滄,「新北市政府養護工程處 114 年度教育訓練-橋梁耐久性防蝕與熱浸鍍鋅工法設計要點」,2025 年。

33. 國營臺灣鐵路股份有限公司,「臺鐵北迴線東小清水溪橋改建工程(土建部分)細部設計圖」,2024 年。

34. 交通部,「公路橋梁設計規範」,1987 年。

35. 交通部,「公路橋梁設計規範」,2009 年。

36. 交通部,「鐵路橋梁設計規範」,2004 年。

37. 交通部,「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」,2014 年。

38. 交通部,「公路橋梁檢測及補強規範」,2018 年。

39. 交通部,「鐵路橋梁之檢測及補強規範」,2019 年。

40. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 3090 A2042 「預拌混凝土」,2015 年。

41. 交通部,「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」,2008 年。

42. 交通部,「鐵路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」,2010 年。

43. 交通部高速公路局,「國道 5 號雪山隧道超高壓變電站相關電力系統及其交控設施實施總體檢改善研究委託研究計畫期末報告(隧道滲漏水處理部分)」,2010 年。

44. 交通部運輸研究所,「港灣構造物維護策略研析與管理資訊系統應

用推廣」，2021 年。

45. 臺灣港務股份有限公司高雄港務分公司，「高雄港第一期既有碼頭結構安全性分析、補強評估工作-既有碼頭及附屬設施補強評估成果報告書(初稿)」，2021 年。

46. 交通部運輸研究所，「金門港區港灣構造物維護管理系統建置與安全評估之研究期末報告-附錄 7、金門港碼頭(含浮動碼頭)經常與定期檢測表」，2015 年。

47. 駿馳工程股份有限公司，「完工案例分享-營運中捷運隧道修繕-隧道經常性維護止漏加固」，2025 年。

48. 桃園國際機場股份有限公司，「桃園國際機場橋梁修繕及零星維護工程設計圖」，2024 年。

49. Caltrans “MEMO TO DESIGNERS 10-5 PROTECTION OF REINFORCEMENT AGAINST CORROSION DUE TO CHLORIDES, ACIDS AND SULFATES,” (2010).

50. Caltrans “California Amendments to the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications -8th Edition,” (2022).

51. ACI CODE-318-19(22) “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022),” (2022).

52. ACI PRC-365.1R-17 “Report on Service Life Prediction,” (2017).

53. Martin, J. W., “Service life prediction from accelerated aging test results using reliability theory and life testing analysis,”In Problems in Service life prediction of Building and construction materials (pp. 191-211). Dordrecht: Springer Netherlands (1985).

54. Bogdanoff, JL., “A new cumulative damage model: Part 1,” (1978).

55. Lounis, Z., “Reliability-based life prediction of aging concrete bridge,” In In PRO 16: International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures (Vol. 16, p. 229) (2000).

56. Life-365TM “Service Life Prediction ModelTM,” (2020).

57. BS EN 1992-1-1 2023 “Eurocode 2. Design of concrete structures - General rules. Structural fire design,” (2023).
58. BS 8500-1:2015+A2:2019 “Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206 - Method of specifying and guidance for the specifier,” (2020).
59. fib bulletin 34 “Model code for service life design,” (2006).
60. 日本道路協会，「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編」，2017 年。
61. 日本土木学会，「コンクリート標準示方書〔設計編〕」，2022 年。
62. 日本土木学会，「フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究」，1968 年。
63. 中華人民共和國國家標準，GB/T 50476-2019「混凝土結構耐久性設計標準」，2019 年。
64. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，2024 年。
65. 財團法人臺灣營建研究院，「臺灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究」，交通部公路總局委託研究，2010 年。
66. fib Bulletin 76 “Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards,” (2015).
67. 日本土木学会，「コンクリート標準示方書〔施工編〕」，2023 年。
68. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13401「金屬及合金之腐蝕－大氣腐蝕性－分級、測定與評估」，2019 年。
69. ISO 9223 “Corrosion of metals and alloys–Corrosivity of atmospheres–Classification,” (2012).
70. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16238「金屬及合金之腐蝕－大氣腐蝕性－腐蝕性級別的指引值」，2024 年。
71. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-1「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 1 部：總則」，

2022 年。

72. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-2「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 2 部：環境分類」，2022 年。

73. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-3「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 3 部：設計考量事項」，2022 年。

74. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-4「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 4 部：表面及表面處理類型」，2022 年。

75. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-5「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 5 部：防護油漆系統」，2022 年。

76. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-6「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 6 部：實驗室性能試驗法」，2022 年。

77. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-7「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 7 部：油漆工程執行與監工」，2022 年。

78. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-8「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 8 部：新工程與維護規範之制定」，2022 年。

79. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS16174-9「油漆與清漆－防護油漆及塗裝系統對鋼結構物之腐蝕防護－第 9 部：離岸及相關結構之防護油漆系統及實驗室性能試驗法」，2022 年。

80. 中華民國鋼結構協會、中華民國防蝕工程學會，「鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊(第二版)」，2024 年。

81. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 9「鋅錠」，2005 年。

82. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 1247「熱浸鍍鋅檢驗法」，2015 年。

83. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 4237「結件－熱浸鍍鋅被覆」，2021 年。

84. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 8503「熱浸鍍鋅作業方法」，2015 年。

85. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 10007「鋼鐵之熱浸鍍鋅」，2015 年。

86. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15257「熱浸鍍鋅層損傷及裸點修補」，2009 年。

87. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15200-1-7「塗料一般試驗法－第 1-7 部：通則－膜厚測定」，2022 年。

88. 中國土木水利工程學會，「鋼橋之熱浸鍍鋅設計與施工手冊」，2002 年。

89. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 7797「鋅、鋁及其合金之熔射」，2011 年。

90. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 4269「銲接結構用耐候性熱軋鋼料」，2014 年。

91. ISO 9224 “Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Guiding values for the corrosivity categories,” (2012).

92. 日本道路協会，「鋼道路橋防食便覧」，2014 年。

93. ISO 12944-1 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 1: General introduction,” (2017).

94. ISO 12944-2 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 2: Classification of

environments,” (2017).

95. ISO 12944-3 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 3: Design considerations,” (2017).
96. ISO 12944-5 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 5: Protective paint systems,” (2018).
97. ISO 12944-4 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 4: Types of surface and surface preparation,” (2017).
98. ISO 12944-6 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 6: Laboratory performance test methods,” (2018).
99. ISO 12944-7 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 7: Execution and supervision of paint work,” (2017).
100. ISO 12944-8 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 8: Development of specifications for new work and maintenance,” (2017).
101. ISO 12944-9 “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures,” (2018).
102. ISO 752:2004 “Zinc ingots,” (2004).
103. ISO 1460:2020 “Metallic coatings — Hot dip galvanized coatings on ferrous materials — Gravimetric determination of the mass per unit area,” (2020).
104. ISO 10684:2004 “Fasteners — Hot dip galvanized coatings,” (2004).
105. ISO 1461:2022 “Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles — Specifications and test methods,” (2022).

106. ISO 14713-1 “Zinc coatings — Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures Part 1: General principles of design and corrosion resistance,” (2017).
107. ISO 14713-2 “Zinc coatings — Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures Part 2: Methodology leading to verification procedures,” (2015).
108. ISO 14713-3 “Zinc coatings — Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures Part 3: Sherardizing,” (2017).
109. ISO 2063-1 “Thermal spraying — Zinc, aluminium and their alloys Part 1: Design considerations and quality requirements for corrosion protection systems,” (2017).
110. ISO 2063-2 “Thermal spraying — Zinc, aluminium and their alloys Part 2: Execution of corrosion protection systems,” (2017).
111. National Steel Bridge Alliance “Uncoated Weathering Steel Reference Guide,” (2022).
112. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. “Concrete microstructure, properties, and materials,” McGraw-hill (2006).
113. Mehta, P. K., “Effect of cement composition on corrosion of reinforcing steel in concrete. In Chloride corrosion of steel in concrete,” pp. 12-19. ASTM International (1977).
114. Chen, Weifeng, et al. “Deterioration process of concrete exposed to internal sulfate attack,”Materials 13.6 : 1336 (2020).
115. AASHTO LRFD “Bridge Design Specifications 10th Edition,” (2024).
116. BS EN 1990 “Eurocode - Basis of structural and geotechnical design,” (2023).
117. Eurocode 2 ”APPLICATION TO CONCRETE HIGHWAY BRIDGES,” (2007).
118. 中華人民共和國行業標準，JTG D62-2004「公路鋼筋混凝土及預力混凝土橋涵設計規範」，2004 年。

119. 中華人民共和國行業標準，GB 50153-「工程結構可靠性設計統一標準」，2008 年。

120. 財團法人臺灣營建研究院，「淡江大橋鋼筋混凝土材料耐久性之探討 成果報告」，2017 年。

121. 梁智信、陳育聖、羅嘉麟、楊仲家，「淡江大橋及其聯絡道工程（第 3 標）鋼筋混凝土結構服務年限預測模式」，混凝土科技，第十四卷，第四期，2020 年。

122. 黃康訓，「以電化學加速試驗探討界面過渡區之傳輸性質並建立擴散與傳輸係數之關係」，國立臺灣海洋大學河海工程學系博士學位論文，2023 年。

123. 黃康訓、楊仲家，「改良 RCM 模型評估混凝土擴散係數」，中國土木水利工程學刊，第 32 卷，第 4 期，321-327 頁，2020 年。

124. 羅永霖，「利用快速氯離子傳輸試驗探討爐灰對混凝土耐久性之影響」，國立臺灣海洋大學河海工程研究所碩士班論文，2024 年。

125. 葉冠麟，「利用快速氯離子滲透試驗與 90 天貯鹽試驗探討不同礦物摻料取代量對爐灰混凝土耐久性之影響」，國立臺灣海洋大學河海工程研究所碩士班論文，2024 年。

126. Harrison, W. H., and David Clayton Teychenné.,“Sulphate resistance of buried concrete; second interim report on long-term investigation at Northwick Park,”. No. Monograph (1981).

127. Lee, H. J., Cho, M. S., Lee, J. S., & Kim, D. G., “Prediction model of life span degradation under sulfate attack regarding diffusion rate by amount of sulfate ions in seawater,” Int. J. Mater. Mech. Manuf, 1(3), 251-255 (2013).

128. Hassan, A. A. A., K. M. A. Hossain, and M. Lachemi., “Bond strength of deformed bars in large reinforced concrete members cast with industrial self-consolidating concrete mixture,” Construction and Building Materials 24.4 : 520-530 (2010).

129. Zhou, Yingwu, et al., “Model for sulfate diffusion depth in concrete

under complex aggressive environments and its experimental verification," Advances in Materials Science and Engineering 2015.1 : 693834 (2015).

130. Atkinson, Alan, and John A. Hearne., "Mechanistic model for the durability of concrete barriers exposed to sulphate-bearing groundwaters," MRS Online Proceedings Library (OPL) 176 : 149 (1989).

131. 王海彥、仇文革、杜立峰、龔倫，「隧道襯砌混凝土對硫酸鹽侵蝕耐久壽命預測模型研究」，現代隧道技術，51(3)，91-97 頁，2014 年。

132. 中華人民共和國國家標準，GB/T 50082「普通混凝土長期性能及耐久性能試驗方法標準」，2024 年。

133. ACI 222R-19 "Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete Against Corrosion," (2019).

134. BS EN 1504-2:2004 "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Surface protection systems for concrete," (2004).

135. 劉楨業、梁智信、翁榮洲、張奇偉、鄭振定、鄭華，「混凝土結構物修補技術指引」，中興工程顧問社，2009 年。

136. ASTM A775/A775M-22 "Standard Specification for Epoxy-Coated Steel Reinforcing Bars," (2022).

137. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 14771「鋼筋混凝土用熱浸鍍鋅鋼筋」，2015 年。

138. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 560「鋼筋混凝土用鋼筋」，2018 年。

139. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 12456「鋼筋混凝土用防銹劑」，1988 年。

140. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 12283「混凝土用化

學摻料」，2017 年。

141. ISO 12696:2022 “Cathodic protection of steel in concrete,” (2022).

142. NACE Publication 01102-2018 “State-of-the-Art Report: Criteria for Cathodic Protection of Prestressed Concrete Structures,” (2018).

143. Bertolini, Luca, S. W. Yu, and C. L. Page., “Effects of electrochemical chloride extraction on chemical and mechanical properties of hydrated cement paste,” Advances in Cement Research 8.31 : 93-100 (1996).

144. 謝幼屏、賴瑞應、鄭登鍵、蔡立宏，「2024 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」，交通部運輸研究所，2025 年。

145. 謝幼屏、賴瑞應、羅建明、蔡立宏，「2023 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」，交通部運輸研究所，2024 年。

146. 蔡立宏、羅建明、賴瑞應、謝幼屏，「2022 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」，交通部運輸研究所，2023 年。

147. 蔡立宏、羅建明、柯正龍、賴瑞應、莊凱迪，「2021 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」，交通部運輸研究所，2022 年。

148. 蔡立宏、羅建明、賴瑞應、莊凱迪、黃宇謙，「2020 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」，交通部運輸研究所，2021 年。

149. 日本道路協会，「鋼道路橋塗装・防蝕便覧資料集」，2010 年。

150. Morcillo, M., Díaz, I., Chico, B., Cano, H., & De la Fuente, D. J. C. S., “Weathering steels: From empirical development to scientific design. A review,” Corrosion Science, 83, 6-31 (2014).

151. 日本道路協会，「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編」，2017 年。

152. 建設省土木研究所(社)、鋼材倶楽部(社)、日本橋梁建設協会，「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XVII)-全国暴露試験のまとめ(概要編)一」，1993 年。

153. FHWA: Technical Advisory T5140.22 “Uncoated Weathering Steel in Structures,” (1989).

154. FHWA “Bridge Welding Reference Manual,” (2019).

155. AASHTO/NSBA:2018 “Steel Bridge Fabrication Guide Specification,” (2018).

156. JIS H8300:2021「亜鉛，アルミニウム及びそれらの合金溶射」，2021 年。

157. 陳俊宏、周延聲、李臺生、謝文凱，「臺中捷運鳥日文心北屯線-高架橋梁伸縮縫滲漏水漬探討與改善」，土木水利，第四十八卷，第四期， 88-94 頁，2021 年。

158. ACI SPEC-301-16 “Specifications for Structural Concrete,” (2016).

159. 行政院公共工程委員會，施工綱要規範第 03700 章「巨積混凝土」，2024 年。

160. 中國土木水利工程學會，「混凝土工程施工規範與解說」，2007 年。.

161. DE LA RILEM, RECOMMANDATIONS., “CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth,” (1988).

162. BS EN 14630:2006 “Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method,” (2006).

163. AASHTO T 277-23 “ElectricalIndication of Concrete’s Ability to Resist ChlorideIon Penetration,” (2023).

164. ASTM C1202-22 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration,” (2022).

165. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS14795「混凝土抗氯離子穿透能力試驗法－通過電荷量表」，2020 年。

166. NT BUILD 492 “Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments,” (1999).

167. AASHTO T259-02 “Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration, in Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing,” (2021).

168. ASTM C1543-10a “Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding (Withdrawn 2019),” (2019).

169. ASTM C1012 “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution,” (2024).

170. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 14794「水硬性水泥砂漿棒暴露於硫酸鹽溶液中之長度變化試驗法」，2003 年。

171. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 1010「水硬性水泥墁料抗壓強度檢驗法（用 50 mm 或 2 in.立方體試體）」，1993 年。

172. 中華民國鋼結構協會,「鋼結構施工規範 TISC 031-2022」,2022 年。

173. 日本土木学会,「鋼構造架設設計施工指針【2024 年版】」,2024 年。

174. 中華民國鋼結構協會、中華民國熱浸鍍鋅協會,「鋼結構橋梁熱浸鍍鋅技術手冊」，2013 年。

175. ISO 4624:2023 “Paints and varnishes — Pull-off test for adhesion,” (2023).

附錄一　各月工作會議意見回覆表

計畫編號：MOTC-IOT-114-H1DB008

計畫名稱：研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2)-設計及施工階段

執行單位：財團法人臺灣營建研究院

討論議題與重點紀要	回應情形
114 年 4 月工作會議紀要	
1. 本案需探討其他各類交通設施(捷運、港灣、隧道、航空)遭遇之腐蝕問題,依臺灣營建研究院簡報第 9 頁尚缺「航空」設施,後續請臺灣營建研究院蒐集相關資料納入報告。 2. 研究成果說明會邀請對象主要係專家學者,為廣收其他人員意見,建議可同步召開視訊會議。	1. 遵照辦理，詳見「期末報告」2.2 節「其他各類交通設施遭遇之腐蝕問題」。 2. 成果說明會均為實體辦理,辦理情形詳見「期末報告」第七章「辦理研究成果說明會(3 場次)」(P7-1~23)。
臺灣營建研究院若需交通部其他部屬機關(構)之工程案例、成果報告或資料等,請提送需求清單予本中心,以利協助發文相關單位索取資料。	遵照辦理，已於 6/16、7/1 收到防蝕設計案例資料。
本案依契約第 8 條第(二十七)款規定「乙方於履約期間，應於每月月底前依據工作計畫書所載進度，提送書面『工作報告』送交甲方審閱...」，爰請臺灣營建研究院依契約準時提送。	遵照辦理，已於 114 年 9 月 12 日完成期中報告初稿之提送。
請臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理，詳見「期末報告」圖 1.1 計畫期程控管圖(P1-7)。
114 年 5 月工作會議紀要	
交通部鐵道局： 建議將「鐵路橋梁設計規範」及「鐵路橋梁耐震設計規範」納入參考。	1. 鐵路橋梁設計規範之耐久性設計內容大致與公路橋梁設計規範相同，但對於鹽害環境下作用等級之區域給出了詳盡的縣市村里劃分,相關內容已納入「期

	末報告」與指引。 2. 鐵路橋梁耐震設計規範與耐久性設計較無關聯，故報告與指引不納入此規範。
交通部公路局： 1.「公路橋梁設計規範」預計將於 115 年啟動修定程序，後續建議依該規範修訂進度進行本指引內容調整。 2. 本次簡報第 4 頁有關公路局的相關橋名有誤，建議確認後修正；另西湖溪橋現況已拆除，是否要做為案例分析，請臺灣營建研究院斟酌。	1. 遵照辦理，屆時將同步進行修正。 2. 遵照辦理，橋名問題已根據各案例之招標文件、設計圖等資料進行修正。
請臺灣營建研究院再多蒐集有關防蝕設計、施工或維護不佳的案例，並進行原因探討，以做為指引研擬的重點參考。	遵照辦理，詳見「期末報告」第二章「鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查」，2.1.1 節「混凝土橋」與 2.1.2 節「鋼橋」共蒐集 14 座案例橋梁資料。
請臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理。
114 年 6 月工作會議紀要	
交通部公路局： 簡報第 4 頁有關公路局的相關橋名及建議如下： 1. 觀海大橋已更改為後龍觀海大橋。 2. 西濱北淡江大橋建議修正為淡江大橋。 3. 中和中正路立體交叉工程(鋼橋)建議與橋管單位聯絡後，使用一致的橋名。	遵照辦理，詳見「期末報告」第二章「鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查」。
高速公路局： 簡報第 4 頁南方澳大橋應不是斜張橋，建議再確認清楚。	遵照辦理，詳見「期末報告」第二章「鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查」。
請臺灣營建研究院依蒐集的案例分析及專業人員過往的經驗，綜整不同階	遵照辦理，將根據 2.1.1 節「混凝土橋」與 2.2.2「鋼橋」共

段(設計、施工、維護)造成橋梁腐蝕問題之原因，以利後續工程人員借鏡。	14 座案例橋梁資料進行綜合考量後，以規範、設計、施工、維護等方面，對「期末報告」2.1.3 節「鐵公路橋梁劣化原因分析」內容進行改寫(P2-73~79)。
請臺灣營建研究院就國內既有規範進行探討，若國內規範有不足之處，請提供相關建議。	遵照辦理，詳見「期末報告」第四章「不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議」。
腐蝕環境區分為 C1~CX 共 6 個等級，請臺灣營建研究院研議各腐蝕等級可對應使用的防蝕規定或標準。	遵照辦理，相關內容詳見「期末報告」第四章「不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議」。
請臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理。
114 年 7 月工作會議紀要	
交通部高速公路局： 1. 簡報 29 頁有關鋼橋防蝕設計方法，建議加入複合式防蝕工法之說明。 2. 建議將支承的防蝕標準也納入指引內容。 3. 建議於指引中加入因應環境變異性之處置說明，例如設計時腐蝕環境為 C3 等級，但施工中或施工完成前腐蝕環境已變更為C4等級之處置建議	1. 遵照辦理，詳見詳見「期末報告」表 4-38 鋼橋典型防蝕方法(P4-101)。 2. 支承之防蝕詳見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引 鋼橋篇」第三章 「鋼橋防蝕考量與方法」。 3. 相關內容詳見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引 鋼橋篇」3.3.4「重新評估防蝕方法」(P3-22、23)。
運輸技術研究中心： 1. 簡報第 8 頁有關臺鐵小清水溪橋之防蝕設計疑有誤植，請再行確認並修正。 2. 鋼結構協會及熱浸鍍鋅協會均有出版相關技術手冊，請財團法人臺灣營建研究院納入訂定本指引之參考	1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理，國內外相關技術手冊於指引擬定時均會參考。
本計畫預計於 114 年 9 月中旬提交期	遵照辦理，已於 114 年 9 月

中報告，並於 114 年 11 月至 12 月辦理成果說明會，爰請財團法人臺灣營建研究院於114年10 月底前完成本指引初稿，以利本所提供給與會的部屬機關(構) 先行檢視後修訂，以利後續成果說明會之進行。	12 日完成期中報告初稿之提送。
請財團法人臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理。
114 年 8 月工作會議紀要	
交通部高速公路局： 建議防水膜施工應採用耐熱型防水膜施工方法,避免因鋪設 AC 後造成防水膜失敗問題。	由於附加措施種類眾多，本計畫之「期末報告」與指引僅做原則性介紹，並列出相關規範以供使用者做為參考。
交通部鐵道局： 本次月會資料僅有鄰近海岸範圍資料，建議報告納入都會區之防蝕方法。	遵照辦理，依腐蝕類型納入中性化(都市)、鹽害、硫酸鹽環境之耐久性設計內容，詳見「期末報告」第四章「不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議」。
運輸技術研究中心： 各項防蝕施工方法請說明依循之施工規範,若無國內相關施工規範,請敘明建議施工方法及參考之國外施工規範。	遵照辦理,詳見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引」，各別施工、防蝕方法均有附上參考規範。
本計畫需於 114 年 9 月 13 日前提交期中報告，請財團法人臺灣營建研究院依限發文提送。	遵照辦理，已於 114 年 9 月 12 日完成期中報告初稿之提送。
請財團法人臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理。
114 年 9 月期中審查意見	
詳見：期中審查意見回復	
114 年 10 月工作會議紀要	
交通部鐵道局： 1.「鐵道工程碳管理程序」與「碳排係數參考表」待定稿後，再行提供參	1. 遵照辦理，屆時將同步進行指引之修正。

考。	
運輸技術研究中心： 1. 說明會名稱應與發包文件的「委託研究計畫之研究主題 與重點」一致，採用「研究成果說明會」為宜。 2. 成果說明會邀請交通部部屬機關應包含公路局、高速公 路局、鐵道路、國營臺灣鐵路股份有限公司、臺灣港務股份有限公司	遵照辦理。成果說明會辦理情形詳見「期末報告」第七章「辦理研究成果說明會(3 場次)」。
本計畫預計於 114 年 12 月 3 日辦理第一場研究成果說明會(鋼橋篇)，請財團法人臺灣營建研究院於 114 年 11 月 10 日前提送鋼橋篇指引(初稿)予本中心。	遵照辦理，已於 114 年 11 月 7 日完成「鐵公路橋梁之防蝕技術指引 鋼橋篇」初稿之提送。
請臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理。
114 年 11 月工作會議紀要	
交通部高速公路局： 建議後續 2 場成果說明會採用紙本發文並檢附一本紙本指引，以利後續簽派作業。	遵照辦理。第二、三場之成果說明會均以採用紙本發文並檢附一本紙本指引。
運輸技術研究中心： 目前第 1 場說明會為鋼橋篇(114 年 12 月 3 日)、第 2 場次為混凝土橋篇(114 年 12 月 15 日)、第 3 場次為 鋼橋篇及混凝土橋篇(114 年 12 月 30 日)，因第 3 場次為依前兩 場次回饋意見修正，屬於較完善之成果，為提供部屬機關相 關人員能出席提供意見，建議第 3 場次成果說明會能擴大舉 辦。	第 3 場次成果說明會因需進行前兩 1 次回饋意見修正，並提供運輸技術研究中心確認無誤後，再 函文通知部屬機關參與成果說明會，爰考量上述作業時程， 建議第 3 場次成果說明會延後至 115 年 1 月中旬辦理。
本計畫預計於 114 年 12 月 15 日辦理第 2 場研究成果說明會(混凝土橋篇)，請財團法人臺灣營建研究院於 114 年 12 月 1 日前提送混凝 土橋篇指引(初稿)予本中心確認。	遵照辦理，已於 114 年 11 月 26 日完成「鐵公路橋梁之防蝕技術指引混凝土橋篇」初稿之提送。
有關第 3 場次成果發表會時間調整問	遵照辦理，已於 114 年 12 月

題，請財團法人臺灣營建研究院另行函文本所(敘明調整理由及調整後預計時間)備查。	17 日完成發文。
請臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理。
114 年 12 月工作會議紀要	
交通部公路局： 若第 3 場說明會有人數限制時，建議於通知單上載明各單位人數上限，以利後續簽派作業。	遵照辦理，已於 115 年 1 月 5 日完成發文。各單位人數上限已於附件進行說明。
本計畫預計 115 年 1 月 14 日於集思臺大會議中心辦理第 3 場研究 成果說明會(鋼橋篇+混凝土橋篇)，請財團法人臺灣營建研究院 於 114 年 12 月 31 日前提送前 2 次各單位意見修正後指引(初稿)予 本中心確認。	遵照辦理，已於 114 年 12 月 31 日完成「鐵公路橋梁之防蝕技術指引」混凝土橋篇與鋼橋篇初稿之提送。
為利蒐集各單位意見修訂防蝕指引，請財團法人臺灣營建研究 院於會議通知時檢附會議規劃人數(如後附件)，以利各單位簽 1 派作業。	遵照辦理，已於 115 年 1 月 5 日完成發文。各單位規劃人數已於附件進行說明。
請財團法人臺灣營建研究院於第 3 次成果說明會後儘速依各單位 意見進行修訂，並依照契約規定於 115 年 2 月 10 日提送「期末報告」。	遵照辦理。
請財團法人臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理。
115 年 1 月工作會議紀要	
交通部鐵道局：本局已完成「鐵道工程減碳參考指引」，提供貴所制定防蝕技術指引之參考。	遵照辦理，第二年度之計畫，將參考「鐵道工程減碳參考指引」，進行相關內容之擬訂。
本計畫已於 115 年 1 月 14 日完成第 3 場研究成果說明會(鋼橋篇+混 凝土橋篇)，請財團法人臺灣營建研究院依各單位意見進行修訂，並依照契約規定	遵照辦理。

於 115 年 2 月 10 日提送「期末報告」。	
請財團法人臺灣營建研究院依照規劃進度執行相關議題研究。	遵照辦理。

附錄二　期中審查意見回覆表

計畫編號：MOTC-IOT-114-H1DB008

計畫名稱：研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2)-設計及施工階段

執行單位：財團法人臺灣營建研究院

審查日期：114 年 9 月 25 日

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
黃三哲 委員		
1.各分期應完成工項應繪製甘特圖，以管制完成時限。	遵照辦理，詳見「期末報告」圖 1.1 計畫期程控管圖(P1-7)。	同意。
2.對每次工作會報或審查各單位意見處理情形應列表說明。	遵照辦理，詳見本附錄。	同意。
3.第二章各案例調查，請補充非臨海地區產生腐蝕案例情形(P.1 有說明市區人行天橋有此狀況者)。	遵照辦理，所蒐集的案例中，除中和中正路立體交叉工程為非臨海地區案例外，已補充臺北市中正橋案例於「期末報告」2.1.1 節案例 2 所示(P2-9~12)。	同意。
4.各混凝土橋案例劣化分析有部分未說明(如後龍觀海大橋)請補充；各案例修補之後的目前狀況能否說明(已修補約 6 年)?	1. 遵照辦理，已補充案例橋梁分析之說明如 P2-22 案例橋梁狀況內容所述。 2. 各案例修補之後的目前狀況，由於尚沒有相關之書面資料，若後續有取得再進行補充。	同意研究單位說明及處理方式。
5.P.17 表 2.16~表 2.17 引用資料，其中有資料異常情形是否應說明(如 PA11-L-1 及 PA11-L-4 深	此為現地結構物鑽心取樣試體常見之現象，混凝土表面氯離子會	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
度 5cm 處其氯離子重量均較 0.5cm 處含量多?)	因雨水沖刷或外部環境影響使得氯離子含量降低，而使得部分試體呈現表面濃度較內部濃度低的現象，此可透過迴歸分析回推表面氯離子濃度，從而計算擴散係數。	
6.名詞應統一或附錄附詞彙表，如 P.10 之 C_0 是代表氯離子含量(表 2.3)，表 2.4 中 C_0 代表氯離子濃度；P.21 表 2.18 為氯離子含量，請說明。	遵照辦理，C_0 將統一改為表面氯離子含量；第三章各國理論公式的部分，因涉及因次與定義問題，將按照各規範原先之定義表示。	同意研究單位說明及處理方式。
7.P.154 混凝土橋耐久性設計可補充與鋼橋防蝕設計類似之流程。	遵照辦理，詳見「期末報告」圖 4.4 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖(P4-25)。	同意。
8.P.159 表 4.13 可否簡化為下部結構與上部結構外露面(如淡江大橋)。	該表格(期中報告表 4.9～4.11、4.13)系按照交通部鐵、公路橋梁設計規範原有內容進行擴充，考量到與規範的一致性，建議不做簡化。	同意研究單位說明及處理方式。
9.施工品質可於附錄提供瑕疵及改善介紹。	本年度計畫的指引主要針對防蝕的設計與施工，瑕疵及改善介紹部分請參考內政部結構混凝土施工規範。	同意研究單位說明及處理方式。
10.防蝕設計施工指引可加入強制性規定與建議性附加保護措施。	遵照辦理，詳見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引-混凝土橋篇」，第五	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	章「混凝土橋附加保護措施」、第七章「混凝土橋防蝕施工」。	
11.品質檢驗項目未提及頻率，應加以確定並考量複合型結構橋梁防蝕問題。	遵照辦理，品質檢驗項目之檢驗頻率，詳見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引-混凝土橋篇」第七章「混凝土橋防蝕施工」。複合型結構橋梁防蝕問題建議依不同腐蝕環境等級進行材料選用與防蝕處理建議，屬於鋼材之附屬設施可參見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引-鋼橋篇」。	同意研究單位說明及處理方式。
黃裔炎 委員		
1.報告 P.8 倒數第 2 列「部分試體鋼筋位置之氯離子濃度為 1.2 kg/m^3 已超過上述臨界氯離子濃度」，此 1.2 kg/m^3 係為臨界濃度，應為誤植，請再檢核。	遵照辦理	同意。
2.報告 P.111 第 3 列，「內政部 104 年公路橋梁設計規範」，"內政部"應修正為交通部。	遵照辦理	同意。
3.本報告引述之交通部公路橋梁設計規範多為 104 年版，惟於 P.11、P.12、表 2.7、表 2.8 則引述 109 年版，此設計規範最新修訂版確係於 109 年 1 月發佈，爰本指引應引述何一版本，請再檢討確認。	109 年版公路橋梁設計規範僅對於 1.1 節適用範圍(新增脊背橋、拱橋、混合橋梁、複合橋梁等)與 1.4 節設計原則(加入全生命週期、維護管理、檢測維修、特殊性橋梁設計考量等)進行修訂，耐久	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	性設計方面同 104 年版規範，以下將根據「期末報告」各章節進行說明： 1. 2.1 節根據各案例橋興建時所參照之版本進行引用。 2. 2.1.3 節新增關於 109 年版規範之敘述。 3. 3.1.2、3.2.1 節已修正引用 109 年版。 4. 表 3-49 討論之公路橋梁設計規範之沿革，因 109 年版規範無修訂耐久性設計相關內容，故仍引用 104 年版規範。	
4.報告 P.55 第 2.1.3 節，名稱「鐵公路橋梁案例」探討，惟本節僅列有表 2.49「鐵公路橋梁劣化原因」，爰本節名稱「案例探討」似不相稱。	遵照意見辦理，修正為 2.1.3 「鐵公路橋梁劣化原因分析」。	同意。
5.P.154 第 4.2 節，提到「…實際施工上可能窒礙難行…」，建議修正此敘述，接寫清楚不合理的原因。	遵照辦理，該段落於「期末報告」之 4.14 節，已改寫為如下段落「…若將「鐵路橋梁設計規範」、「公路橋梁設計規範」建議之鹽害區保護層厚度規定(表 4-12)帶入本節第 3.「鹽害耐久性分析模式」分析後可知，若按照原建議之保護層厚度，嚴重	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	鹽害區之混凝土抗氯離子能力要求須高於極嚴重鹽害區，才可滿足其設計年限(詳見表4-14)，抑或是在使用相同抗氯離子能力混凝土之情況下，部分嚴重鹽害區構件的保護層厚度應有所提升。」。	
6.第 4.2 節混凝土的設計標準不如第 4.3 節鋼橋設計標準清楚，建議 4.2 節應再調整補充。	遵照辦理，詳見「期末報告」圖 4.4(P4-25) 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖。	同意。
7.報告 P.213，第 7.1 節結論三，倒數第三列，「因應月會所提出之…」，「月會」一詞意義為何，或是誤植字，請修正。	遵照辦理，該段落語句已修改，詳見「期末報告」8.1 節「結論」(P8-2)第 3.不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議。	同意。
8.第五章內容多為相關試驗方法或施工品質作業要求說明，未見有明確的施工圖說範例。	遵照辦理，「期末報告」第五章混凝土橋部分 5.1.1 節為防蝕結構設計圖說(P5-1~7)；鋼橋部分 5.2.1 節~5.2.4 節包含塗裝(P5-43~45)、耐候性鋼材(P5-67~72)、熱浸鍍鋅(P5-80~106)、金屬熔射(P5-108~117)之相關圖說案例。	同意。
9.報告 P.21，倒數第二列，「表 9.3-3」應為誤植，請修正。	遵照辦理。	同意。
10.報告中部分圖中的字不清楚，建議整本報告再重新確認。	遵照辦理，5.1.1 節(P5-1~7)、5.2.1 節~5.2.4 節	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	(P5-43~117)之相關圖說均有重新繪製。	
蔡承洋 委員		
1.第二章之建議新增關渡大橋防蝕現況分析(塗裝、鋼管橋 CP、腐蝕監測等)。	遵照辦理，已將關渡大橋之防蝕現況分析補充於 2.1.2 鋼橋案例 5(P2-64~67)。	同意。
2.第二章之淡江大橋腐蝕監測器的說明。	該內容非本案工作範圍內。	同意研究單位說明及處理方式。
3.第二章之南方澳大橋強化根本原因分析(Root Cause Analysis, RCA)：運維管理面向，例如，SOP 不完備、風險評估不完整、人因防阻、教育訓練不足及後續改善做為。	遵照辦理，已依相關資料補充案例橋梁破壞原因，請參閱 2.1.2 節(P2-54)。	同意。
4.第二章之各橋成敗因素建議再補充說明。	遵照辦理，將針對 2.1.1 節「混凝土橋」與 2.2.2「鋼橋」案例橋梁資料進行綜合考量，以規範、設計、施工、維護等方面，在「期末報告」2.1.3 節 「鐵公路橋梁劣化原因分析」內容進行改寫 (P2-73~79)。	同意研究單位說明及處理方式。
5.P.142，報告採用飛來鹽進行環境分級分法，建議採用交通部分級方法(ISO 9226)。	1. ISO 9226 濕燭法適用範圍為金屬材料，混凝土材料並不適用。 2. 飛來鹽僅做為判斷方法不影響分級，分級方式將以離海岸線距離區分。	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
6.第五章,混凝土部分,強化品質作業規定及圖說，加速試驗不適宜納入本章節。	加速試驗係為評估混凝土耐久性之重要指標，建議保留。	同意研究單位說明及處理方式。
7.P.188，DNV RP401 不適合引用，建議用 ISO 12696、NACE SP0290、NACE/AMPP RP490、AMPP SP2150。	遵照辦理,陰極保護相關內容已根據 Nace SP0216、Nace SP0290、NACE 01102 及 ISO 12696 等規範重新編排。詳見「期末報告」4.1.6 節「附加保護措施」(P4-69~83)及 5.1.4 節「施工」(P5-29~33)。	同意。
8.P.192，表 5.21 應重新整理，內容應包含電源組成、初期/長期成本、適用範圍、使用期限等進行比較,建議刪除 ICCP 有雜散電流及氫脆的問題。	遵照辦理,陰極保護相關內容已根據 Nace SP0216、Nace SP0290、NACE 01102 及 ISO 12696 等規範重新編排。	同意。
9.第六章，P.210 表 6.1 請新增耐蝕鋼筋；P.211 表 6.2 新增既有鋼結構橋梁腐蝕、檢測評估與維護。	1. 遵照辦理,已新增耐腐蝕鋼筋,詳見「期末報告」表 6-1(P6-3)。 2. 既有鋼結構橋梁腐蝕、檢測評估與維護,為第二年度之工作內容,後續將寫入指引中，謝謝指導。	同意研究單位說明及處理方式。
10.請考慮新增附錄討論國際防蝕新技術，例如，熱浸鍍鋅鋁鎂、低 VOC 塗料、CP、新型混凝土、腐蝕監測、塗裝檢測工具。	本指引之標的為臺灣現行常用之防蝕工法，對於尚無標準或規範之新材料新工法會簡單提及,但不進行詳細論述。	同意研究單位說明及處理方式。
蕭勝彥 委員		

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
1.P.94，(d)I.第二行：鍍鋅鋼筋不必增加伸展長度等，握裹強度不影響，請修正。	該章節為文獻回顧，內容摘自 109 年公路橋梁設計規範，此部分將於「鐵公路橋梁之防蝕技術指引-混凝土橋篇」第 5.2 節「耐腐蝕鋼筋」內做修正。指引混凝土橋篇 P5-10~11，僅環氧樹脂鋼筋有此敘述，鍍鋅鋼筋部分並無此問題。	同意研究單位說明及處理方式。
2.P.113，B 的 a 中 ISO 9224(CNS 16238)並沒有對鍍鋅量有建議值，同樣，C.金屬熔射也沒有。與 B 的 a 敘述有出入！	遵照辦理，該段落將根據交通部「公路橋梁設計規範」、「鐵路橋梁設計規範」、ISO 9224 進行改寫，詳見「期末報告」3.2.1 節「國內防蝕設計規範與手冊」(P3-58~59)。	同意研究單位說明及處理方式。
3.P.113，C.金屬熔射，建議改為金屬熔射(符合 CNS 7797，與 P.129 符合)。	遵照辦理。	同意。
4.P.116，二(1)第三行：金屬熔射塗膜，建議改為金屬熔射，而非塗膜。	遵照辦理。	同意。
5.P.129，表 3.70 中鋅鋁鎂，應為鋅鋁。	遵照辦理。	同意。
6.P.129 表 3.71，ISO 12944-2 環境分類建議更新為 2018 年版，C1~CX 及 1m1~1m4。表 3.71 是 CNS 7797 相對 ISO 2063-2005 版，已有 2018 年版。	於「期末報告」第 3.2.1 節為介紹「國內」防蝕設計規範與手冊，為了與現行 CNS 規範內容一致，故不建議修改，但會加註說明(P3-77)。而 ISO 2063 之最新表	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	格已放至 3.2.2「國外防蝕設計規範與手冊」表 3-79 首次維護前使用壽命超過 20 年的建議熔射層厚度值(P3-86)。	
7.P.130，「五 (1)CNS 4269 銲接…」，應修正為「...銲接...」，另文中其他所有的「銲接」應修正為「銲接」；表 3.73 及表 3.74 中「100mm 以下」建議修正為「50~100mm 以下」。	1. 遵照辦理，「期末報告」全文相關部分已完成修正。 2. 期中報告表 3.73 及表 3.74 係摘自 CNS 4269 規範內容，該部分為文獻回顧，為了與現行 CNS 規範內容一致，故不建議修改。	同意研究單位說明及處理方式。
8.P.131 第 3.2.2 節，一(1)塗層，改為層；(3)的第二行熔融鋅鍍層，改為熱浸鍍鋅。	遵照辦理。	同意。
9.P.116 與 P.135，表 3.53 與表 3.77，耐久性類別代號一樣但意義不一樣，對設計者容易混淆。	期中報告之表 3.53 為塗裝規範、表 3.77 為熱浸鍍鋅規範。	同意研究單位說明及處理方式。
10.P.136，表 3.78 建議改為鍍鋅層；雪瑞達，應為滲鋅。建議簡化成熱浸鍍鋅與熔射；P.136，四(1) ISO 2063，熱噴塗，建議改為熔射，以符合標題及 CNS 7797；(2)JIS H8300 熱噴塗改為熔射，塗層改為合金層，最小熔射層均勻熔射層。	遵照辦理。	同意。
11.P.137，表 3.79 標題及表中塗層改為熔射層；塗層材料改為	遵照辦理。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
熔射材料。as=熔射後未處理；s=封孔處理。		
12.P.139 熱浸鍍鋅層，施工方法中浸入鍍層槽改浸入鍍鋅槽(鍍鋅工廠)。	遵照辦理。	同意。
13.P.139 耐候鋼，亦應屬複合防蝕。另，113 參考文獻似乎不符合。	1. 該內容摘自日本「鋼道路橋防蝕便覽」，參考文獻已進行修正。 2. 耐候性鋼材已新增複合防蝕，詳見「期末報告」表 4-38 (P4-101) 鋼橋典型防蝕方法。	同意研究單位說明及處理方式。
14.P.141，表 4.1 與表 3.50 要如何勾稽?建議要整合，建議 3 種環境作用等級依 C1~CX 類別區分。	期中報告之表 4.1(對應「期末報告」表 4-8)為混凝土用之環境分級、表 3.50(對應「期末報告」表 3-50)為鋼結構之大氣腐蝕環境分類，兩者並不互相適用且有各自之分級方法與對應試驗。	同意研究單位說明及處理方式。
15.P.147，表 4.6 環境分類是依試片或腐蝕因子分類 C1~CX?ISO 9223-2012(CNS 13401-2019)，有測定(方法 1)及推估(方法 2 及方法 3)。	該內容摘自運研所之臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報，已根據審查意見進行補充。詳見「期末報告」4.2.1 節「鋼橋腐蝕機理」第 3.環境與腐蝕(P4-89~90)。	同意研究單位說明及處理方式。
16.P.153，圖 4.3、4.4 腐蝕速率是依螺旋試片所得數據，與 CNS、ISO 不同，是否有比對	該內容摘自運研所之臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報，	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
過其差異?無法與世界、CNS接軌!	因試驗從 2007 年開始建置試驗點，當時CNS 13753: 1996 規範的標準試樣有螺旋狀及平板狀兩種形態，故該試驗選用螺旋狀試樣，並沿用迄今；雖與目前CNS13753: 2019 規範的標準試樣為平板狀試樣不同，但試驗結果仍可供參考。	
17.P.163，(4)經濟性：只有道路橋?	已將道路橋部分修正為橋梁。	同意研究單位說明及處理方式。
18.P.164 第四行，鷹架改為鷹架、銲、高強度螺栓(P.165 同)。	遵照辦理。	同意。
19.P.193 腐蝕環境分類 C1~CX 是 CNS 與 ISO 標準接軌，且運技中心也分 C1~CX。但 5.2 節油漆系統分 C1~CX，而 P.204、P.205 表 5.32 及表 5.34 增加 GX^+、TX^+不合理。依文獻資料，熱浸鍍鋅再加油漆塗裝有加成效果，是否有考慮？且 P.136 表 3.78 的維護壽命高過 P.116 表 3.53 耐久甚多。	1. 「期末報告」已參考鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊(第二版)進行修改，新增 GX^+、TX^+塗裝系統之目的是考量臺灣地區 CX 腐蝕環境具高風險性，僅提供參考無強制規定。相關段落詳見「期末報告」4.2.3 節「塗裝」(P4-120、121)。 2. 熱浸鍍鋅加油漆塗裝對於鋼橋壽命而言確實有加成效果，但就橋梁生命週期維護成本而言，熱浸鍍鋅加油漆塗裝的	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	第一次維修時機，係依據塗裝系統劣化的時間點或是塗裝系統完全失效後熱浸鍍鋅層劣化的時間點，須業主決定，本計畫不進行近一步研析。 3. 期中報告 P136 表 3.78 係參考 ISO 14713-1 規範(熱浸鍍鋅第一次維修)，P.116 係參考 CNS 16174 系列(ISO12944 系列)規範(塗裝第一次維修)，兩者對應的防蝕工法不同。	
20.P.203，E.鍍鋅附著性，建議不列入。因 ISO、ASTM、JIS 標準中皆沒有，且鍍鋅協會已函文標準局建議刪除。	該內容摘 CNS 1007，待規範修訂後將同步進行修改。	同意研究單位說明及處理方式。
21.P.200 增加底材管理(參考 CNS 10007、8503 標準)，考慮鍍鋅程的品質需求，增加相關的底材預留孔、尺寸最小值規定、現場銲接後防蝕。並增加螺栓的防蝕，讓橋梁整體防蝕年限相當，避免未使用相同防蝕工法，產生腐蝕弱點，影響整體效益。	遵照辦理，「期末報告」已新增底材管理相關內容。詳見「期末報告」5.2.3 節「熱浸鍍鋅」第 7.「熱浸鍍鋅施工」，第(1)項「底材管理」(P5-101~102)。	同意。
22.建議增加大於熱浸鍍鋅槽構件，採用熱浸鍍鋅工法時製作方式，可在一些嚴重腐蝕環境	對於大於熱浸鍍鋅槽構件，可採分割方式處裡，分割浸鍍方式由設	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
下，採用局部構件熱浸鍍鋅方式補強的標準圖說(例如高強度螺栓、續接板、外桁構築等)。	計者決定，相關圖說，詳見「期末報告」5.2.3「熱浸鍍鋅」圖5.25箱型梁分割法典型範例(P5-80)。	
23.除了熱浸鍍鋅外，建議增加熱噴浸鍍鋅鋁鎂的防蝕工法與技術，提供國內後續的技術發展使用。	遵照辦理，該部分屬於金屬熔射防蝕工法，詳見「期末報告」5.2.4 節「金屬熔射」。	同意研究單位說明及處理方式。
24.整份指引寫得相當完整但總覺得是將所有標準、規範、文獻資料及書籍內容資訊等整合在指引中，是否能對業主、設計者有幫助?	本計畫為期中報告初稿，指引部分會重新進行編排，謝謝指導。	同意研究單位說明及處理方式。
25.建議未來指引在第三章鋼橋防蝕方法增加 3.4 節能減碳與生命週期成本。	該內容為第二年度工作項目，屆時將撰寫相關內容。	同意研究單位說明及處理方式。
簡阿松 委員		
1.不同的腐蝕等級應有不同的設計塗層厚度，但以往的設計者並未依結構物實際的腐蝕環境等級進行塗裝系統設計，本指引應提醒設計者須注意實際結構物的腐蝕環境差異問題。	遵照辦理，相關內容詳見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引-鋼橋篇」，3.3.2「防蝕方法的選擇」已有提點，並於3.3.4「重新評估防蝕方法」提醒設計者，有必要在結構設計完成階段重新評估防蝕方法及其規格，並根據需要修改防蝕方法及其規格。	同意研究單位說明及處理方式。
2.實際腐蝕的位置常發生在斷面及螺栓處，建議應有重點腐蝕區域的塗裝建議施工圖說，以利設計者參考。	遵照辦理，相關內容詳見「期末報告」5.2.1「塗裝」圖5.14 螺栓接合部塗裝系統示意圖	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	(P5-44、45)，或「鐵公路橋梁之防蝕技術指引-鋼橋篇」4.2.2「防蝕設計」之圖4.4 螺栓接合部塗裝系統示意圖(P4-16)。	
交通部公路局工務組		
1.簡報 P.7，劣化案例探討綜整表格，可以了解各案例的類型，建議將此表格納入報告書內。	遵照辦理。	同意。
2.簡報 P.8，台 61 線下三叉河橋屬鐵道橋，請刪除省道編號。	遵照辦理。	同意。
3.簡報 P.54，混凝土橋耐久性設計標準與建議，列出各主要構件厚度及氯離子擴散係數等，建議將此成果納入後續公路橋梁設計規範修訂建議。	遵照辦理。	同意。
4.表 3.48 各國模型於鹽害環境下不同保護層厚度服務年限(年)，其計算模擬結果，部分數值達 2-300 年甚 4000 年以上，惟依據各國規範之設計年限大約 50~100 年，其模擬結果是否與實際現況產生落差。	1. 雖然各國鹽害環境下的理論分析模式都是基於擴散理論所發展出來， 但各國參數所使用的數值或經驗式卻差異很大，以表面氯離子濃度為例，日本和臺灣是用實際調查的數值、但歐盟和美國卻是用膠結材或混凝土量的比例，而其值美國、歐洲約為臺灣之 2/3、日本約為 2/5 左右，此外，臨界氯離子值亦不相同，歐盟較其他國的	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	高出約 1.5 倍，因此各國分析出來的服務年限普遍較高，而對比其查表式的規範，亦顯示要達 100 年設計年限，其保護層和水膠比的要求相對較低。 2. 另依據日本混凝土示方書規定其分析模型的服務年限上限為 100 年，故計算結果超過 100 年者，修正為>100 年。修正後表格詳見「期末報告」表 3-48 各國模型於鹽害環境下不同保護層厚度服務年限(P3-55)。	
5.P.111，公路橋梁設計規範之沿革，內文提及「內政部 104 年公路橋梁設計規範…」，應為交通部，請修正。	遵照辦理。	同意。
交通部公路局養路組		
1.文字誤植或贅字請修正： (1)P.67，預「應」混凝土。 (2)P.139，噴塗或塗漆等進行防「腐」。 (3)P.141，倒數第 6 行，與水下構件腐蝕模式相異之問題「不」。	遵照辦理。	同意。
2.P.94，請補充「附加保護措施」(鋼筋表面保護、混凝土摻料等)之比較。	混凝土附加保護措施性質差異較大難以比較，但第二年度會將各列出各措施之成本供	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	參考。	
3.P.125 略以，「鍍鋅鋼鐵可直接埋至於混凝土中，置入凝土前鍍鋅鋼鐵需經鈍化處理，方法包括：鍍鋅後進行表面鈍化膜處理，或在混凝土添加符合環保規範的腐蝕抑制劑」，請補充說明此鈍化處理程序對於混凝土橋採用鍍鋅鋼筋是否也為必要之程序?	標準中鈍化有3種方式，其中之一是大氣中自然曝放。鋼筋在工廠內鍍鋅，到工地時間至少已有幾天以上，工廠鍍鋅後表面即與空氣中氧氣形成一層氧化鋅，隨著時間增長氧化鋅會演變成碳酸鋅，而後再與空氣中的水反應形成氫氧化鋅。因此，鋅幾乎不會直接與水泥砂漿直接反應，鈍化處理程序對於混凝土橋採用鍍鋅鋼筋並非必要，鍍鋅鋼筋也不會對於握裹強度有所影響。	同意研究單位說明及處理方式。
交通部鐵道局		
1.該報告詳細檢討了各類防蝕工法與規範，並強調了全生命週期成本(Life Cycle Costing, LCC)的概念，這與 PAS 2080《建築與基礎設施碳管理標準》 的核心精神高度契合。PAS 2080 強調，碳管理必須貫穿基礎設施的整個生命週期，包括規劃、設計、施工、營運和拆除階段。然而，報告中雖然將「減碳及永續發展」列為計畫目標，但對於如何將「碳排放」做為防蝕工法選擇的量化評估指標，並未有明確的闡述。	該項目為第二年度之工作項目，謝謝指導。	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
因此，建議在後續的報告及技術指引中，應將「全生命週期碳管理」與 LCC 結合，使其成為防蝕策略評估的關鍵環節。		
2.納入碳排放評估與量化比較： (1)建立碳排放評估方法：在探討不同防蝕工法時，應納入其「蘊含碳(Embodied Carbon)」的評估。這包括材料生產、運輸、施工過程中的碳排放。例如，可比較不同塗裝系統的碳足跡，或分析熱浸鍍鋅與其他工法在製造過程中的能耗和碳排放差異。 (2)結合全生命週期成本：防蝕工法應不僅考慮初期的建置成本，更應評估其在維護、修復甚至更換階段所產生的碳排放。這份報告第二年期工作計畫書已涵蓋 LCC 評估方法，建議可在此基礎上，將「碳成本」納入 LCC 計算，以提供更全面的經濟效益分析。	該項目為第二年度之工作項目，謝謝指導。	同意研究單位說明及處理方式。
3.優化低碳材料與工法建議 (1)低碳混凝土：報告中多次提及混凝土橋梁的耐久性問題。建議在混凝土防蝕部分，除了控制水膠比與保護層厚度，應明確鼓勵使用摻有卜作嵐材料(如飛灰、爐石粉)的低碳混凝土。這不僅能提升混凝土的抗氯離子滲透能力，也能顯著減少水泥用量，降低蘊含碳。臺灣的淨零排放路徑已將此列	1. 卜作嵐摻料之應用方面，鐵、公路橋梁設計規範皆有提及，卜作嵐摻料總量不得超過總膠結材料重量之 50%，且建議不小於總膠結材料重量之 40%。 2. 該項目為第二年度之工作項目，謝謝指導。	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
為重要減碳措施。 (2)複合防蝕系統：報告中已提及複合式防蝕工法。建議可更深入比較不同複合系統(例如，熱浸鍍鋅搭配塗裝)的碳排與壽命效益。特別是針對腐蝕性極高的環境(如 CX 等級)，應提供明確的複合防護策略，並量化其在維護週期延長後的總碳排與成本效益。		
4.強化與現行政策的連結 (1)與公共工程減碳檢核機制接軌：行政院公共工程委員會已訂定《公共工程節能減碳檢核注意事項》，要求特定規模工程需進行減碳檢核。這份指引應與此檢核機制對應，例如，在施工階段的防蝕工法選擇上，可以如何符合「使用低碳工法及機具」、「採用再生及環保材料」等檢核事項。 (2)參考其他機關經驗：報告中可引用交通部鐵道局正在建立的「鐵道工程碳管理程序」與「碳排係數參考表」的經驗。此外，亦可借鑒經濟部水利署的「水利工程系統性減碳」經驗，其已律定工程碳預算管理機制，並將減碳設計做為主要減碳手段。	1. 就目前之現狀，混凝土之耐久性問題仍是最優先考量之事項，將會以先耐久後低碳之原則進行指引之撰寫。 2. 該項目為第二年度之工作項目，「鐵道工程碳管理程序」與「碳排係數參考表」完成後請鐵道局協助提供相關資料。	同意研究單位說明及處理方式。
5.納入智慧化監測與維護建議 (1)智慧監測：在後續維護管理的部分，可建議採用智慧感測器，即時監測橋梁構件的腐蝕	該項目非本案工作範圍內，建議可以另外立案辦理。	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
電位、氯離子濃度等關鍵指標。這不僅能實現預防性維護，也能避免過度維護所造成的資源浪費與碳排放。 (2)資料庫與數位化管理：建議建立橋梁防蝕與維護的數位資料庫，記錄各項防護措施的工法、材料、成本與實際效能。這能為未來的全生命週期碳排與成本分析提供可靠的本土數據。		
6.此份期中報告內容紮實，為後續指引的研訂奠定了堅實基礎。若能將上述「全生命週期碳管理」的思維與量化評估方法融入防蝕技術指引，將使其更具前瞻性與實用性。這不僅能提升鐵公路橋梁的耐久性與經濟效益，更能為交通部及相關單位在實踐 2050 淨零排放目標上，提供強而有力的技術支持與行動方案。期待貴單位能將這些建議納入考量，共同推動臺灣公共工程的永續轉型。	謝謝指導。	同意研究單位說明及處理方式。
運輸技術研究中心蔡立宏 主任		
1.本計畫內容除考量防蝕的方法成效外，亦需考量未來使用者可以便利參考應用。	遵照辦理。	同意。
2.建議腐蝕環境分級與防蝕策略之連結應更具體及操作性，目前報告雖有提出建議(如表 4.11、表 4.14)，但仍分散在各處，建議可在第四章末或第六	遵照辦理，詳見「期末報告」圖 4.4 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖(P4-25)。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
章指引草案中，研擬一個防蝕設計決策流程圖。		
3.雖然生命週期成本LCC評估方法是第二年的工作項目，但第一年期的設計與施工指引應先納入LCC概念，如在案例探討(第二章)與防蝕策略建議(第四章)中，提前導入LCC的初步比較概念，提高指引的說服力。	遵照辦理，相關內容詳見「期末報告」4.1.2節(P4-26)、4.2.2 節(P4-111)。	同意。
4.橋梁附屬設施往往是腐蝕最早發生的部位，且直接影響用路人安全與橋梁整體觀感，建議新增一節，探討橋梁附屬設施(如金屬護欄、排水管、燈桿、標誌門架、隔音牆、支承與伸縮縫等)的防蝕策略。再依不同腐蝕環境等級，提出具體的材料(如不銹鋼等級、鋁合金)選用與防蝕處理建議(如熱浸鍍鋅等級、塗裝系統)。	遵照辦理，已於指引中補充說明，附屬設施建議可依不同材質參考指引對應內容，進行材料選用與防蝕處理建議。	同意研究單位說明及處理方式。
5.報告內容尚缺乏施工中臨時防蝕措施的探討，建議在第五章或第六章中，增加「施工階段臨時防蝕措施」一節，內容可包含：各構件的工地存放(如墊高、覆蓋)、吊裝時的保護措施、銲接或切割後的臨時防護塗裝要求，以及破損的修補標準。	遵照辦理，施工階段臨時防蝕措施小節將列入指引。	同意研究單位說明及處理方式。
運輸技術研究中心賴瑞應 研究員兼科長		
1.報告第二章羅列了 13 個橋梁案例，並詳述其劣化狀況與維修方式，內容相當詳盡。然而，在 2.1.3 節的案例探討中，僅以表格方式簡要歸納劣化原因，	遵照辦理，將根據2.1.1節「混凝土橋」與2.2.2「鋼橋」案例橋梁資料進行綜合考量後，以規範、設計、施工、	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
未能深入剖析原始設計的防蝕策略(或其不足之處)與後續劣化結果之間的因果關係。建議將案例名稱去識別化後，以專業角度探討成敗因素，以做為後續指引訂定之有力佐證。	維護等方面，對「期末報告」2.1.3 節 「鐵公路橋梁劣化原因分析」內容進行改寫(P2-73)。	
2.報告 2.2 節整理了隧道、港灣、捷運及機場的腐蝕問題，但在結論中僅籠統建議「可依循鐵公路橋梁研擬防蝕技術指引之方式」。此建議過於空泛，建議能增加 1 小節，說明每類設施至少一項核心差異化的腐蝕問題，並建議其他權管單位參考本計畫研訂防蝕技術指引。	遵照辦理，詳見「期末報告」2.2 節「其他各類交通設施遭遇之腐蝕問題」，第 5.各類設施核心差異化的腐蝕問題，並彙整於表 2-54 各類交通設施腐蝕問題差異化比較表(2-87、88)。	同意。
3.許多維護困難源於設計階段未充分考量，如南方澳大橋案例即顯示，難以檢測及維修的吊索錨碇系統是結構安全的致命傷。建議在第四章的設計標準建議與第六章的指引草案中，納入「可維護性設計」的專章或原則。	1. 遵照辦理，相關原則性內容詳見「期末報告」第四章「不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議」(P4-1、2)、4.1.2 「混凝土橋防蝕設計」(P4-26、27)、「4.2.2 鋼橋防蝕方法」(P4-112~114)。 2. 指引部分，混凝土橋篇詳見 3.1 節「防蝕設計應具備的條件」(P3-1、2)、3.3 節「耐久性防蝕設計」(P3-19~20)。 3. 鋼橋篇詳見 3.1 節「鋼橋防蝕方法應具備的條件」(P3-1)、	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	3.3.3 節「防蝕方法所需的結構設計」(P3-21~23)。	
4.第五章彙整了施工品質規定與圖說範例，但目前的圖說多為標準斷面圖或施工步驟示意圖。一份好的防蝕指引，其圖說範例應能指導工程師繪製與審查防蝕的「關鍵細部」。建議補充更多針對「易積水、易腐蝕」部位的細部設計標準圖。	1. 遵照辦理，混凝土橋相關圖說範例，詳見「期末報告」5.1.1「考量防蝕的結構設計」(P5-1~7)；鋼橋部分詳見 5.1.1「考量防蝕的結構設計」(P5-1~7)、5.2.1「塗裝」(P5-43~45、51)、5.2.2「耐候性鋼材」(P5-66~72)、5.2.3「熱浸鍍鋅」(P5-78~99)、 5.2.4「金屬熔射」(P5-108~115)。 2. 指引部分，混凝土橋篇，詳見 3.3 節「耐久性防蝕設計」(P3-10~16) 3. 鋼橋篇塗裝詳見 4.2.2「防蝕設計」(4-8、9、16)、4.2.3「結構設計注意事項」(P4-31)；耐候性鋼材詳見 5.2.3「構設計注意事項」(5-15~22)；熱浸鍍鋅詳見；6.2.3「構設計注意事項」6-10~26)；金屬熔射詳見 7.2.2「防蝕設計」(7-13~18)。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
5.第六章的混凝土橋及鋼結構橋防蝕技術指引大綱，建議章節名稱及架構邏輯能一致，雖兩者有其不同的材料特性，但架構邏輯建議一致為宜。	混凝土橋與鋼結構橋設計邏輯有其差異，考量使用之便利性才進行此安排，架構與章節名稱會盡量保持一致。	同意研究單位說明及處理方式。
運輸技術研究中心胡啟文 副研究員		
1.依本案研究主題與重點，鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查項目內尚涵蓋防蝕設計案例的經費，此部分未於報告中看到，此部分亦可做為第二年成本評估方法參考資料之用，再請補充。	遵照辦理，經費部分(建造經費或維修改善經費)，已補充於各案例文字中，詳見「期末報告」2.1「國內橋梁防蝕設計案例」(P2-1~72)。	同意。
2.鋼橋防蝕案例中，基隆社寮橋與桃園彩虹橋皆有提及螺絲更換原則，前者採日本長崎縣橋梁修補與補強手冊分 1~5 級，後者採 ABCD 級分類原則，兩種方法之比較及納入指引使用之適用性?	檢測與維修補強將於第二年度工作進行研析比較，謝謝指導。	同意研究單位說明及處理方式。
3.P.139，表 3.82 已整理出鋼橋常用防蝕方法比較，這些方法有其適用時機，未來在指引要如何呈現?再請研擬，方能更為引導使用者參照。	遵照辦理，該部分詳見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引-鋼橋篇」，3.3.2 節「防蝕方法的選擇」(P3-9~13)	同意。
4.P.142，表 4.3 中，極嚴重鹽害區-海水飛沫區定義為「最低低潮位(LLWL)以上至最高高潮位(HHWL)+6 公尺以下)之水上區域」；嚴重鹽害區「平均最高高潮位+6 公尺以上之水上區域」。因最高高潮位高於平均最高高潮位，使得上述兩分區存有重疊區域，未來指引使用上	遵照辦理，「期末報告」已更正相關表格與示意圖。詳見「期末報告」表 4-8 鹽害環境下作用等級之建議分區方式(P4-34)、圖 4.5 鹽害環境下作用等級之建議分區及範圍示意圖(P4-34)。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
會有模糊地帶，建議比照美國加州交通局(Caltrans)之高程分級方式(表 4.2)，將各區域精確銜接、沒有重疊模糊空間。		
5.比較表 6.1 與表 6.2 涵蓋設計、施工及維護，惟鋼橋篇未見到品質管制篇幅，建議研究團隊將其增列或細化，以確保技術指引的實務完整性。	品質管制部分會於施工章節中進行說明。	同意研究單位說明及處理方式。
6.依本案研究主題與重點，指引內容須包含維護管理及全生命週期成本評估方法，雖前述事項為第 2 年期工作內容，為能呈現整體脈絡，請於調整納入指引大綱。	遵照辦理，該部份詳見「鐵公路橋梁之防蝕技術指引」。混凝土橋篇之第第六章「全生命週期成本最佳化評估」、第八章「 既有混凝土橋梁檢測與維護」與鋼橋篇第八章「生命週期成本最佳化評估」均有先行列入大綱。	同意研究單位說明及處理方式。
7.第六章所列之指引大綱，已有相當之完整性，惟參考其他相關指引，本案大綱建議可研議朝向步驟式或流程化的編排方式，以增加指導效能，亦較為符合指引概念。	遵照辦理。「鐵公路橋梁之防蝕技術指引」也有增加對應之流程圖供使用者作參考。混凝土橋篇包含圖 3.2 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖(P3-8)、圖 5.1 陰極保護設計流程圖(P5-17)；鋼橋篇包含圖 3.2 防蝕設計流程圖(P3-9)、圖 4.1 塗裝防蝕設計流程圖(P4-5)、表 5-3 採用耐候性鋼材做為鋼橋防蝕方法之設計流程	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	(P5-6)、圖 7.8 金屬熔射施工流程圖(P7-2)。	
8. 誤植或語意不完全： (1) 圖 2.23…全「僑」…。 (2) P.35：…新增「第 0323A 章斜拉及錨固鋼索(新增)」施工明書，此句語意不明。 (3) P.35：案例橋「量」範圍碳…來防止「鋼材蝕」。 (4) P.50：…鋼絞線有滑線及夾片脫落現象(詳如圖 2.42 所示)…，內容與附圖不符。 (5) P51：依據案例橋梁詳細檢測結果，「主」以吊索錨頭，請刪除贅字。 (6) P.53：113 年 7 月「米颱風」襲臺，案例…。 (7) P.56：108 年版[29]相「救」於…。 (8) P.112：B.橋面板構造項下內容與 C.鋼橋結構之構造細部螺栓接頭項下內容一致，請檢視。 (9) P.116：耐久性是一項可協助業「王」設定維護…。 (10) P.131：(3)日本道路協會鋼道路橋防「食」便覽。 (11) P.133 及 P.169：工「場」施工案例。 (12) P.138：「膨脹縫」和排水槽。 (13) P.139 表 3.82 及 P.167 表 4.16：金「屬」熔射。 (14) P.141：…後，「在」依照表 4.4；表 4.5 之分級建議進行詳細的	遵照辦理，將依據委員意見進行修正。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
劃分。 (15) P.160：…下降，防蝕設計流程如…，缺漏圖號。		
運輸技術研究中心黃烟宏 助理研究員		
1.本計畫的最終目標是建立全生命週期成本最佳化評估方法，建議第二章案例補充以下基本資料，以利後續人員參考： (1) 鋼構橋原始設計條件及修繕時的腐蝕環境等級(C4/C5/CX等)。 (2) RC 橋梁設計時的水膠比 W/B(或水灰比 W/C)、混凝土強度等基本資料。 (3) 各橋梁原始完工時間、建造經費、後續修繕的經費、修繕時間、修繕後的耐久性目標(可維持多久?),後續是否有建議的檢修頻率或標準等。 (4) 橋梁案例分析建議可以 A、B、C...等編號方式進行去識別化編號，並應說明清楚各橋梁除材料之外的可能因設計、施工或維管問題造成後續的修繕問題。	1. 第(1)~(3)項相關基本資料，已就所蒐集資料補充原始設計條件，其餘部分因管理單位並無法提供，故無法補充。 2. 第(4)項案例去識別化部分，因各案例皆有述明基本資料(如跨越河川名稱、相關位置圖等)，故以編號方式仍可辨別，建議於案例劣化原因探討部分，以去識別化方式說明。	同意研究單位說明及處理方式。
2.建議補充說明熱浸鍍鋅構造物開孔的重要性及範例樣態，以提醒設計者注意，並說明其他可引用之參考手冊。	遵照辦理，該部分內容詳見「期末報告」5.2.3「熱浸鍍鋅」(P5-78~107)，各段落有引用者皆有註明出處。指引鋼橋篇詳見第六章「熱浸鍍鋅」,6.2.3「結構設計注意事項」(P6-10~)、6.3.1「製作及施	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	工注意事項」(P6-26、27)有完整說明，並於1.3「參考規範」與「參考文獻」章節，列有詳細文獻。	
3.為達到結構耐久性設計年限的需求，設計者可透過調整水膠比、增加保護層厚度、添加腐蝕抑制劑、使用陰極防蝕、採用鍍鋅鋼筋等措施，建議團隊是否可擬定一個設計流程圖，以利設計者參考評估該採用哪些耐久性措施?	遵照辦理，混凝土橋耐久性設計流程圖詳見「期末報告」圖 4.4(P4-25)「混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖」。指引部分詳見混凝土橋篇圖 3.2「混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖」(P3-8)。	同意。
4.其他： (1) 請依本所出版品印刷相關規定調整報告內容，例如，中英文摘要、內容字體及字型大小等。 (2) P.15：「kg/cm^3」單位錯誤，應為「kg/m^3」。 (3) P.167：「…需確實施施這些措施。…」，應為「…實施…」 (4) P.214：「…已完成大鋼之擬訂」，應為「…大綱…」;「…如蒙承攬…」應刪除。 (5) P.215：參考文獻 2「…大氣中氣鹽與…」，應為「…氯鹽…」;參考文獻 15「江大橋…」，應為「淡江大橋…」	遵照辦理。	同意。
主席結論		
本案期中報告審查結果，原則通過，請財團法人臺灣營建研究院針對前開審查意見，配合檢視調整計畫相關內容。	遵照辦理。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
請財團法人臺灣營建研究院就前開審查意見，逐項具體回應，並製作「期中報告審查意見處理情形表」。	遵照辦理，詳見「期末報告」附錄「期中報告審查意見處理情形表」。	同意。

附錄三　期末審查意見回覆表

計畫編號：MOTC-IOT-114-H1DB008

計畫名稱：研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2)-設計及施工階段

執行單位：財團法人臺灣營建研究院

審查日期：115 年 3 月 12 日

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
黃裔炎 委員		
期末報告(初稿)審查意見如下：		
1.P2-9：表 2-1 案例橋梁彙整表中，淡江大橋除列為混凝土新建案例，亦同時列為鋼橋新建案例，惟於「2.1.2 鋼橋」一節中，並無淡江大橋說明案例，僅在「2.1.1 混凝土橋」有簡要鋼材防蝕規劃說明。	遵照辦理，補充於「期末報告」P2-75，2.1.2 節鋼橋第 6 個案例。	同意。
2.P2-17：本案所列台北市中正橋修復補強案例(民國 61 年完工)，建議應另說明本橋已於 2024 年改建完成，原舊橋保留為行人與自行車道。	遵照辦理，補充於期末報告」P2-10 第二段 2.1.1 節混凝土橋第 2 個案例。	同意。
3.P2-33：圖 2.15 之(a)、(b)包覆前、已覆後之圖形比例尺不一致，包覆後之墩柱尺寸較包覆前大，但顯示之圖示反而相對較小。又圖 2.15、2.16、2.17 中標示說明文字均太小，看不清楚。	遵照辦理，詳見「期末報告」P2-28。	同意。
4. P2-41：金門大橋的新建經費約為「96.62 億元（101 年，決標金額，含追加/變更經費）」，建議刪除「金額」2 字，修正為	遵照辦理，詳見「期末報告」P2-38。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
「96.62 億元（101 年決標，含追加/變更經費）」。		
5. P4-3：本頁第 11 列，「侵蝕介質將沿著順筋裂縫長驅直入」，其中「順筋裂縫」似應修正為「混凝土裂縫」；於技術指引(初稿)P2-1 亦有同樣誤植文字。	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-3。；「指引混凝土橋篇」P2-1。	同意。
6.P4-8：本頁第 3 列，「從而形成了α-FeOOH 相」，此α-FeOOH 相為何物，對鋼筋腐蝕影響為何，建議再補充說明。	遵照辦理，補充說明如下：「從而形成鐵銹色之 $Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O$、α-FeOOH、β-FeOOH 及 Fe_2O_3的混合物，鐵氫氧化物的體積大於其原始鋼材約 2 至 6 倍，隨著腐蝕反應進行所造成的體積膨脹，會在混凝土內部產生應力，此應力足以導致混凝土保護層產生裂縫，甚至發生剝落」，詳見「期末報告」P4-8。	同意。
7. P4-13：本頁第 15、16 列之化學符號「$C_3A \cdot CS \cdot 12H$」應修正為「$C_3A \cdot CS$-12H」，「$C_3A \cdot 3CS$-32H」應修正為「$C_3A \cdot 3\overline{CS}32H$」；又同頁式(4-13)右邊之化學式中之「$2H_2C$」似應為「$2H_2O$」；於本頁出現之水泥化學符號如 $\overline{S}$、C、H 等為簡稱，應另加以說明其原化學式內容。（於技術指引 P2-11 同樣內容亦請一併	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-14;「指引 混凝土橋篇」P2-13。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
修正）。		
8. P4-16：式(4-15)、(4-16)、(4-17)中之「$CaOH_2$」、「$MgOH_2$」請修正為「$Ca(OH)_2$」、「$Mg(OH)_2$」。（技術指引 P2-13、P2-14 同樣內容亦請一併修正）	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-16 與「指引混凝土橋篇」P2-16。	同意。
技術指引(初稿)審查意見如下：		
1. P1-3：本頁開始所列之「參考規範」中有部分規範亦重複列於參-I 頁後之「參考文獻」，是否有必要？	「參考規範」為本指引擬定內容時所參考的相關規範，會根據實務需求、收集的資料等進行調整；「參考文獻」為引用該文獻之內容、表格等，為學術引用之範疇，兩者並不相同，故區分兩者有其必要性。	同意研究單位說明及處理方式。
2.P2-9：倒數第 6 列「水會由虹吸原理而迅速擴散到混凝土中」按水在混凝土孔隙內之擴散，似應以毛細現象為主。	遵照辦理，修正為毛細管作用 (Capillary Action)，詳見「指引混凝土橋篇」P2-11。	同意。
3. P3-14：倒數第 10 列，「保護層厚度應從併筋的外輪廓線算起」，文字中「併筋」是否為「箍筋」之誤植？	遵照辦理，修正為「箍筋」，詳見「指引 混凝土橋篇」P3-15。	同意。
4.P4-10：倒數第 10、12 列之「表 4-7」應為「表 4-6」之誤植。	遵照辦理，詳見「指引混凝土橋篇」P4-12。	同意。
5.P5-10：本頁 5.2 節「1.環氧樹脂鋼筋」，建議加強補充材料品質、施工規定等相關內容。	遵照辦理，依據 ASTM A934 與 A775 規範，於「指引 混凝土橋篇」P5-11~12 新增待塗層鋼筋要求、搬運與儲存規定。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
6. P2-11：本頁倒數第 5 列，「滲 O 透」一詞中多一「O」之贅字。	遵照辦理。	同意。
7.本技術指引應將期末報告(初稿)P8-5 之建議事項「4.本指引提 出之品質檢驗頻率與規定…，建議仍以各機關原先之作業要點為主。」說明內容納入指引內之相關章節。	遵照辦理，詳見「指引 混凝土橋篇」P1-2;「指引 鋼橋篇」P1-2。	同意。
何鴻文 委員		
1.混凝土橋篇 4.2 節針對嚴重鹽害區、中度鹽害區之不同設計年限橋梁建議再增加保護層厚度，請補充說明交通部頒「公路橋梁設計規範」當初訂定現行保護層之考量依據，以利對照。	(1) 遵照辦理，於「指引 混凝土橋篇」P4-11 新增表 4-6「鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度」。 (2) 遵照辦理，於「指引 混凝土橋篇」P4-12 補充相關說明。	同意。
2.前述保護層厚度增加將有導致混凝土表面裂縫寬度加大風險，建議再輔以混凝土材質改良（如添加矽灰、高爐石粉等礦物摻料等）降低滲透係數或調整鋼筋間距等之技術指引，以提升鹽害環境混凝土橋之耐久性。	(1) 保護層厚度增加均未超過原規範相同鹽害區之最大值。 (2) 混凝土材質改良相關規定詳見「指引 混凝土橋篇」P4-11「2.混凝土材料與保護層規定」。 (3) 鋼筋間距相關規定詳見「指引 混凝土橋篇」P3-15，	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	「⑦其他防蝕設計之注意事項」。	
3.淡江大橋、金門大橋有將抗氯離子滲透性試驗列為混凝土品質驗收、配比設計項目，建議將相關規範納入報告供參。	(1) 金門大橋採用 RCPT 試驗，淡江大橋採用 RCM 試驗作為氯離子滲透性之檢驗方法，本計畫考慮試驗結果之準確性，建議以淡江大橋採用之 RCM 試驗作為抗氯離子能力檢驗標準。 (2)「指引 混凝土橋篇」P7-19~23 之保護層厚度檢測與混凝土抗氯離子性能之驗收標準與檢測頻率，即為淡江大橋之混凝土抗氯離子滲透性試驗相關規定。	同意研究單位說明及處理方式。
4.鋼橋篇各章頁碼請由 N-1 編起。(如第四章塗裝前言頁碼不宜為 4 24)。	遵照辦理。	同意。
蔡承洋 委員		
1.期末報告 P2-72 關渡大橋防蝕現況還是引用 111 年檢測報告，請向交通部北部養護工程分局調閱報告(114 年台 15 線關渡橋檢測、監測及整體安全評估工作)，說明最新的防蝕現況。	遵照辦理，已參考養護單位提供資料，補充於「期末報告」2.1.2 節鋼橋第 5 個案例(P2-72~P2-75)。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
2.防蝕指引表 3-1(P3-3)，請加入雙重防蝕系統。	「指引 鋼橋篇」P3-3，表 3-1 之複合防蝕，即為雙重防蝕系統。	同意研究單位說明及處理方式。
3.南方澳大橋的事故原因說明仍不夠清楚，請引用 TTSB 的事故調查報告，就防蝕技術的關鍵問題及管理面向的關鍵問題進行定義及說明，並將防蝕技術關鍵問題(防水接縫封條失效、鋼絞線鍍鋅厚度不均)的改善方案研擬至防蝕指引。	(1) 遵照辦理，補充於「期末報告」P2-59~60，2.1.2 節鋼橋第 2 個案例。 (2) 有關鋼纜系統之防蝕不適合列入本指引中，特殊性橋梁之鋼纜系統屬專業廠商之產品，設計時設計者僅針對鋼纜提出性能需求，鋼纜之防蝕細節因各家廠商產品不同，因此不做詳細規定。	同意研究單位說明及處理方式。
4.防蝕指引第二章，鋼橋腐蝕機理及分類之說明，請參考鋼結構橋梁防蝕塗裝手冊重新編寫。	(1) 鋼橋產生腐蝕的型態很多，本指引對於鋼橋腐蝕之分類僅列出典型的腐蝕分類(即常見的腐蝕)。 (2) 腐蝕分類方式依參考資料來源不同而有差異。請委員見諒。	同意研究單位說明及處理方式。
5.雜散電流成因及改善方案請強化說明。	雜散電流造成之腐蝕為系統機電設備電流外溢造成，橋梁上系統機電設施一般都有防雜散電流之接地裝置，其改善方案屬系	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	統機電專業，非本指引範疇。	
蕭勝彥 委員		
期末報告(初稿)審查意見如下：		
1. P4-143：最後一段提到 20 年首次維護，太保守。從 P2-76 案例及表 4-49、50 得知高出很多。若 20 年需維護，與塗裝 10 年維護有何差異?直接採用塗裝即可。	(1) 相關論述摘錄自 ISO 14713-1 第 6.5 節，於「期末報告」P4-147 與「指引鋼橋篇」P6-10 標註出處，「…ISO 14713-1 建議鍍鋅層使用 20 年或更長時間直至首次維護；而同樣的熱浸鍍鋅層，如果塗有油漆，出於外觀考慮，ISO 14713-1 建議使用時間僅為 10 年直至首次維護…」。 (2) 而對於 ISO 14713-1 提出之建議，本計畫不予評論。	同意研究單位說明及處理方式。
2.P4-143：複合系統(ISO 14013-1)，ISO 無此標準!	遵照辦理，「期末報告」P4-147 修正為「6. 複合系統(ISO 14713-1)」。	同意。
3.P3-63 表 3-54 內容及翻譯有問題。Sealer 是封孔劑，非頭部(度)底漆。(CNS 16174-5)	該章節屬於文獻探討，不便對當前 CNS 規範內容進行修改，考量此表並不影響 CNS 16174 探討之完整性，為避免與當前	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	規範衝突，將移除此表。	
4. P3-65：表 3-55~58，是由參考文獻 71(CNS 16174-5)的，非 67(CNS 16174-1)。Blast 一般稱噴砂，噴射應沒人聽懂(文、表 3-55)。前後文也稱噴砂。表 3-55、56 無備考參照表 A.1。表 3-57、58 備考中「重塗」，應是再塗裝(或雙重防蝕。參考文獻:Rapid Degradation of Painted TSA)。	該章節屬於文獻探討，不便對當前 CNS 規範內容進行修改，考量表 3-55~58 並不影響 CNS 16174 探討內容之完整性，為避免與當前規範衝突，將移除表 3-55~58。	同意研究單位說明及處理方式。
5. P3-75：倒數第 6 行，有誤，應為…若環境不允許噴砂或電動工具處理，修補表面須以手工具清理至 ISO 8501-1 規定之 St2(徹底的手工和動力工具除銹)等級。	遵照辦理，詳見「期末報告」P3-74。	同意。
6. P3-76：表 3-69，建議加註 NACE(1) 為 National Association of Corrosion Engineers，於 2021 年與 SSPC(Steel Structures Painting Council) 合併稱為 AMPP(Association for Materials Protection and Performance)。	遵照辦理，詳見「期末報告」P3-74。	同意。
7.混凝土抗壓強度符號 fc´(內政部)或 f´c(公路橋梁設計規範)，要統一!	遵照辦理，全文統一為「f_c'」。	同意。
8.P3-31：表 3-24 中多個強度及保護層值錯誤!	遵照辦理，根據原規範進行修正，詳見「期末報告」P3-32。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
9. P2-90、91：鋼板樁、鋼浮箱，有龜裂是否正確?另陰極防蝕工、塗裝防蝕工?	遵照辦理，修正為「穿孔」，詳見「期末報告」P2-93~94。	同意。
10.P2-94：最後一段排版有問題，可能在表 2-54 前或之後!	遵照辦理，詳見「期末報告」P2-98。	同意。
11. P3-62：倒數第三行一段，看不懂!可參考 CNS 13401、16238 內容。「ISO 9223(CNS 13401)在第 7 節指出，一年之腐蝕試驗數據不能以簡單之外插方式來預測其長期之腐蝕行為。」、「ISO9224(CNS 16238)指出標準中的腐蝕指引值可用於根據第一年曝露於室外大氣中的腐蝕量值測來預測長期曝露中的腐蝕程度。使用標準中的方法獲得的腐蝕估計，可用於預測金屬構件的使用壽命，在某些情況下，還可用於預測曝露於 CNS 13401 涵蓋的室外大氣中金屬鍍層的使用壽命。腐蝕侵蝕結果也可用於預測金屬構件的使用壽命，決定是否需採取保護措施(例：塗層)來實現所需的產品壽命。」(同 P3-79 頁(1)ISO 9223 內容，…….與壽命預估依據)。	遵照辦理，詳見「期末報告」P3-63、78。	同意。
12. P3-69：CNS 1247 相對應的是 JIS H0401 而非 ISO 1460;P3-72 之 CNS 10007 相對應的是 JIS H8641 而非 ISO 1461。	遵照辦理，詳見「期末報告」P3-68、71。	同意。
13. P2-11：全文中回歸、迴歸及迴歸分析、回歸分析應統一。擴散係數 D、D 要統一。	遵照辦理，全文統一為「迴歸」。但文獻探討內之擴散係數，為	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	對照原規範內容，維持原規範之表示方式。	
14.P2-14：C_0 要改成 C_0，特別是全文第三、四章公式(3-2、3-26、3-43、3-44)。	遵照辦理。	同意。
15. P2-21：倒數第三行，台灣苗栗北部地區……，應是台灣地區……。	該案例係引用「臺灣苗栗以北地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究」，該報告同樣有「鹽害環境作用等級分區之地域劃分」，內文錯誤之報告名稱已修正。	同意研究單位說明及處理方式。
16. P2-24：m3，應是 m^3。P2-37，cm2 同樣。	遵照辦理。	同意。
17. P2-38：感潮區、飛沫區、浪濺區、潮間帶、潮汐區、潮汐帶、噴霧區(表 3-6)，全文中應統一。公路橋梁「設計」規範。	遵照辦理，「潮間帶」、「潮汐區」、「潮汐帶」統一為「潮汐區」;「噴霧區」、「浪濺區」、「飛沫區」統一為「飛沫區」;「感潮區」不予更動。	同意研究單位說明及處理方式。
18. P2-47、P3-1：表 2-28 潮位名稱是否應統一?	遵照辦理。	同意。
19.P2-64：建議將案例 3 歷年之維修費用加上，如附表。	為與其他案例有一致性之說明，建議以目前該案例橋梁 113 年度之維修改善金額進行說明。	同意研究單位說明及處理方式。
20. P2-66：表 2-43 中螺帽硬度可能錯誤，表 2-44、圖 2.38 之圖應加強解析度。	(1) 「期末報告」表 2-40，修正螺帽硬度	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	試驗為 26~36 HRC。 (2)「期末報告」P2-65，加強圖片之解析度。	
21.P2-72：倒數第 5 行，參考文獻?	遵照辦理，已完成參考文獻之更正。	同意。
22.P2-74：繡及全文中的繡，應改為銹。	遵照辦理。	同意。
23. P2-77：表 2-49 中 r 及全文中 γ (表 3-51、P3-62)，應改為 r。	遵照辦理。	同意。
24. P2-79：倒數第 9 行，非”耐候性”高強度低合金。	遵照辦理，已完成修正，詳見「期末報告」P2-82。	同意。
25. P2-80：表 2-50、51 中附著量單位不對。	遵照辦理，已修正為「g/m^2」。	同意。
26.P2-84：倒角，應改為圓弧化。	遵照辦理。	同意。
27.P2-85：銲，應為銲。	遵照辦理。	同意。
28.P2-87、88：Cl^{-1}、Na^{+1}，建議改為 Cl^-、Na^+。並且全文中之 SO_4^{-2}、SO_4^{2-}要統一	遵照辦理。	同意。
29.P3-3：全文中的水灰比(表 3-18、P3-81)，應改為水膠比。	遵照辦理。	同意。
30.P3-5：全文中暴露(第三章)與曝露，應統一。	遵照辦理，全文統一為「曝露」。	同意。
31. P3-7：第 2、13 行，……離子侵入?	遵照辦理，修正為「氯離子侵入」。	同意。
32. P3-10：公式 3-7，m 或 M?	遵照辦理，修正為「m」。	同意。
33.P3-12：表 3-6 中，脫冰鹽?	遵照辦理，修正為「除冰鹽」。	同意。
34. P3-16：表 3-11 中碳化引起?及 P3-18 碳化深度?	遵照辦理，修正為「中性化」。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
35. P3-17：脫鈍?鈍化層?文中 β 無統一	遵照辦理，全文統一為「鋼筋去鈍化」。	同意。
36. P3-18、19：公式、縮寫解說中，符號為統一(有無斜體、上下標)。	遵照辦理。	同意。
37. P3-21：表 3-14 中，混凝造?	遵照辦理，修正為「混凝土」。	同意。
38. P3-24：表 3-15 中，汀線?	遵照辦理，修正為「海岸線」。	同意。
39. P3-30：第一行，第四章?各構建?	遵照辦理，修正為「各構件」。	同意。
40. P3-31：第三行，負溫是否為零下?、表 3-23 中，有很鹽?有氣塩鹽?	遵照辦理，修正為「零下溫度」、「有鹽環境」。	同意。
41. P3-32：DF、D_{RCM} 表 3-26 承台?表 3-28 中 D_{RCM}，28d 應為 28 天。江河?保護層最小厚度，名稱是否應統一。	此些用詞皆與原規範相同，該章節屬於文獻探討，應與原規範保持一致性，不宜修改。	同意研究單位說明及處理方式。
42. P3-33：表 3-27Ⅲ-F 中強度 C55 應為 C50，且少一≧C55。	遵照辦理，遵照辦理，根據原規範進行修正，詳見「期末報告」P3-34。	同意。
43.P3-34：汙染?各構建?表 3-29、30 中 SO^{l-} 是否應為 SO_4^{-2}?	原規範之用語，即為「大氣汙染環境作用等級」；已修正為 SO_4^{2-}。	同意。
44.P3-42：第一行、第一段第一行及 P3-44、46，本團隊?	遵照辦理，全文更改為「財團法人臺灣營建研究院」	同意。
45.P3-48：第五行及其中文中，x、t，應斜體且字體不一致。	遵照辦理。	同意。
46.P3-58：倒數第八行及文中，橋	遵照辦理。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
面版應為橋面板。		
47.P3-59：…鋼材之表面處理可分……?表面處理是否恰當?	遵照辦理，修正為「防蝕方法」，詳見「期末報告」P3-60。	同意。
48.P3-60：金屬鎔射，應為金屬熔射。	遵照辦理。	同意。
49. P3-77：熔射不應用塗層，應改為熔射層(或披覆層、或金屬層)。表 3-70 鋅、鋁應指材料成分。	(1) 該部分為 CNS 規範之用語，應與原規範保持一致性，不宜修改，此部分將於指引進行修正。 (2) 「期末報告」表 3-65「熔射材料」(原表 3-70)，遵照辦理，詳見「期末報告」P3-76。	同意。
50. P3-78：表 3-72、73、74 文字排版有誤。表 3-73、4 最後一列少「超過 50mm」。	遵照辦理，詳見「期末報告」P3-77。	同意。
51.P3-79 ： (1)ISO 9223 內容，…….與壽命預估依據，與實際內容有異。「ISO 9223(CNS 13401)在第 7 節指出，一年之腐蝕試驗數據不能以簡單之外插方式來預測其長期之腐蝕行為。」、「ISO 9224(CNS 16238)指出標準中的腐蝕指引值可用於根據第一年曝露於室外大氣中的腐蝕量值測來預測長期曝露中的腐蝕程度。使用標準中的方法獲得的腐蝕估計，可用於預測金屬構件的使用壽命，在某些情況下，還可用於預測曝露於 CNS	遵照辦理，詳見「期末報告」P3-78。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
13401 涵蓋的室外大氣中金屬鍍層的使用壽命。腐蝕侵蝕結果也可用於預測金屬構件的使用壽命，決定是否需採取保護措施(例：塗層)來實現所需的產品壽命。」		
52.P3-81：第二、四行之工場，應為工廠。	遵照辦理。	同意。
53.P3-82:表 3-76 倒數第二列中，工藝照片?流程(或製程)照片	遵照辦理，修正為「製程照片」。	同意。
54.P3-84：表 3-78，溶鋅，應為滲鋅。第三行，鋅塗層，應為鋅層。	遵照辦理。	同意。
55. P3-85：4.金屬熔射，第三行熔射塗層，應為熔射層；(2)JIS H8300:2021 倒數第二行「該標準採納並修訂 ISO 2063 內容…..」應有誤。原意應為該標準是日本工業標準，以 ISO 2063-1（第二版於 2019 年發布）和 ISO 2063-2（第一版於 2017 年發布）為基礎制定，並對該標準進行了技術修改。	遵照辦理，詳見「期末報告」P3-83。	同意。
56.P3-86：表 3-79，成分中的逗號應為小數點(表 4-57 同)。	遵照辦理，詳見「期末報告」P3-84、4-158。	同意。
57.P3-87；表 3-81 中樑應為梁。	遵照辦理。	同意。
58.P3-88：全文中鹽分、水分，及鹽分、水份(第四章)應統一。	遵照辦理，全文統一為「鹽分」、「水分」。	同意。
59.P4-28：第十六行，4.1.5 節應為 4.1.6 節。	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-28。	同意。
60.P4-31：公式 4-22~30 中多個 α 打成 a，及少了幾個縮寫說明。兩個 α_k 的說明，其中一個應該是 α_p，中性化速度係數之預測	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-31~32。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
值。γ_p 應該是 γ_p。		
61. P4-41：倒數第 10 行提到 4-14，與 P4-42 表 4-14 標題與敘述是否一致?	遵照辦理，修正為「表 4-18」，詳見「期末報告」P4-42。	同意。
62. P4-43：圖 4.6、4.7，90 天齡期貯鹽試驗是否應為 90 天貯鹽試驗?	貯鹽試驗可以任意齡期之試體進行。90 天齡期貯鹽試驗亦即以 90 天齡期之混凝土試體進行 90 天貯鹽試驗，全期程為 180 天。	同意研究單位說明及處理方式。
63.P4-43:表 4-16 中倍數轉換關係表示，是否顛倒?應為該 M_{28}/D_{91}、M_{56}/D_{91}。	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-44。	同意。
64.P4-45：表 4-18 中 91 天貯鹽試驗,是否應為90天貯鹽試驗?	遵照辦理，已修正為「90 天齡期混凝土貯鹽試驗氯離子擴散係數 ($10^{-12}m^2/s$)」，詳見「期末報告」P4-46。	同意。
65. P4-49：表 4-20 逗號應為千位逗號。	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-50。	同意。
66.P4-52：公式 4-48 中，K 是否應為 K_Y?	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-53。	同意。
67.P4-70：圖 4.9 鐵鏽應為鐵銹。	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-73。	同意。
68. P4-88：表 4-31 中 r_{corr} 應為 r_{corr}。	遵照辦理，已完成全文修正。	同意。
69. P4-99：圖 4.19 金屬塗層，應為被覆。第四行，防蝕帽蓋?	(1) 「非金屬塗層」修正為「非金屬被覆」。 (2) 「金屬塗層」修正為「金屬被覆」。 (3) 「電器防蝕」修正為「陰極保護」。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
70.P4-120：增加 GX^+、TX^+係稱因考慮臺灣地區 CX 腐蝕環境高風險性，對於高風險性仍未多加解說原因!	(1) GX^+、TX^+系統係摘錄自鋼結構橋梁防蝕塗裝手冊(第二版) (2) 此為考量臺灣 CX 大氣腐蝕級別區域，其腐蝕環境存在相當高風險，但因臺灣無相關耐久性等級實績數據佐證，故 AX^+-Z 塗裝系統係依據 CNS 16174-5 的 C5 腐蝕環境超長期(VH)所建議之塗裝系統，等差加上膜厚 60 μm 而成，但耐久性仍維持長期(H)，此 60 μm 由來是依 CNS 16174-5 腐蝕性級別推論遞增量而增加之膜厚，詳細內容可參考鋼結構橋梁防蝕塗裝手冊(第二版)。	同意研究單位說明及處理方式。
71. P4-142、143：鍍鋅重量，應為鍍鋅附著量。倒數第十一行 um，應為 μm。	遵照辦理。	同意。
72. P4-152：(1)一般部位規格第一行的浸漬，應為滲入(或侵入)。	遵照辦理。	同意。
73. P4-155：倒數第三行，本節主要介紹……，並無介紹!	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-159。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
74. P5-14：公式 5-6 中 Ut 無解釋。T，單位是否為 K?	Ut 是 U 乘 t，已於公式中增加乘號避免誤導；T 的單位為 K，已補充單位於說明。	同意研究單位說明及處理方式。
75.P5-16：公式 5-9 縮寫說明 *Li* 應為 L_i。	遵照辦理。	同意。
76.P5-109：倒數第 3 行及 P5-47 倒數第 5 行、P5-95 第 7 行，倒角?	有關倒角之定義請參見 P5-112 圖 5.51「2R 以上倒角範例」。	同意研究單位說明及處理方式。
77. P5-121：表 5-24 中 4,5 是否正確?	(1) 4,5 分別為 Al ,AlMg5 拉拔強度。 (2) Al 拉拔強度(最小 Mpa) 4。 (3) AlMg5 拉拔強度(最小 Mpa) 5。	同意研究單位說明及處理方式。
78.指引相關文字修訂，提供書面資料供參。	遵照辦理。	同意。
技術指引(初稿)審查意見如下：		
1.混凝土橋 P2-1 水膠比與水灰比?	遵照辦理，全文統一為「水膠比」。	同意。
2.混凝土橋 P2-5 αFeOOH 建議改為 α-FeOOH(與 P5-3 一致)	遵照辦理。	同意。
3.混凝土橋 P2-13、14 公式 2-15~18 化學式位置跑掉	遵照辦理，詳見「指引混凝土橋篇」P2-16。	同意。
4.混凝土橋 P3-3 圖 3.1 中①的說明是否應為鋼筋喪失保護?非保護層	遵照辦理，詳見「指引混凝土橋篇」P3-3。	同意。
5.混凝土橋 P3-13 倒數第 4 行，腹板	遵照辦理。	同意。
6.混凝土橋 P3-17 全文中鹽分、水分，及鹽份、水份應統一	遵照辦理，全文統一為「鹽分」、「水分」。	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
7.混凝土橋 P3-19 表 3-5,暴露應統一	遵照辦理，全文統一為「曝露」。	同意。
8.混凝土橋 P4-2 公式 4-6 a_k，應 α_k	遵照辦理，詳見「指引混凝土橋篇」P4-3。	同意。
9.混凝土橋 P4-3 γ_p，應為 γ_p	遵照辦理。	同意。
10.混凝土橋 P4-12 表 4-7，是否應為 90 天貯鹽試驗?倒數第四行 x、t 應為斜體	遵照辦理，已完成修正，詳見「指引 混凝土橋篇」P4-13、14。	同意。
11.混凝土橋 P4-12 最後一段排版有問題，可能在表 2-54 前或之後!	混凝土橋篇無表 2-54，期末報告部分已進行修正。	同意。
12.混凝土橋 P4-13 公式 4-10~21， C_0 要改成 C_0	遵照辦理。	同意。
13.混凝土橋 P4-16 逗號應為千位逗號	遵照辦理，詳見「指引混凝土橋篇」P4-17。	同意。
14.混凝土橋 P4-19 公式 4-27 中，K 是否應為 K_Y？	遵照辦理，詳見「指引混凝土橋篇」P4-20。	同意。
15.混凝土橋 P5-18 圖 4.9 鐵鏽應為鐵銹	遵照辦理。	同意。
16.混凝土橋參-1 參考文獻 14……國家標準	遵照辦理。	同意。
17.鋼橋 P3-2 圖 3.1 電氣防蝕，建議改為陰極保護(混凝土篇一致)	遵照辦理，詳見「指引鋼橋篇」P3-4。	同意。
18.鋼橋 P3-18 圖 3.8，建議文字改為標楷體	遵照辦理，詳見「指引鋼橋篇」P3-21。	同意。
19.鋼橋 P3-20 第五行敘述有問題，……導致電性”較不”惰性的普通鋼材發生嚴重腐蝕。	遵照辦理，「指引 鋼橋篇」P3-22 修正為「為了提高配件和螺栓的耐用性，有時會使用比普通鋼材(例如不銹鋼)更惰性的材料。然而，在惡劣環境	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	下，兩者之間的電位差會導致普通鋼材發生嚴重腐蝕，即所謂的異種金屬接觸腐蝕」。	
20.鋼橋 P3-21 表 3-3 中”處理”	遵照辦理。	同意。
21.鋼橋 P3-21 3.考慮防蝕維護管理的結構設計，建議增加(4)增設維護檢查步道方案	已在「指引 鋼橋篇」P3-25，「(2)設置維護管理設施」有論述，不再新增。	同意研究單位說明及處理方式。
22.鋼橋 P5-1 第二段第二行，….以試誤方式進行適用?	更正為「錯誤」，詳見「指引 鋼橋篇」P5-1。	同意。
23.鋼橋 P5-23 第二段、倒數第八行，工廠。	遵照辦理。	同意。
24.鋼橋 P7-11 表 7-6，成分中的逗號應為小數點	遵照辦理。	同意。
25.鋼橋 P7-22 表 7-9 中 4,5 是否正確?	(1) 4,5 分別為 Al,AlMg5 拉拔強度。 (2) Al 拉拔強度(最小 Mpa) 4。 (3) AlMg5 拉拔強度(最小 Mpa) 5。	同意研究單位說明及處理方式。
簡阿松 委員		
基於 AX-Z 系統在底漆性能與膜厚上優於 AX-N，且經多年實務觀察證明 AX-Z 防蝕效果更佳；為簡化非專業設計者的決策難度，建議於「防蝕技術指引」中明確將 AX-Z 作為首選(或標準)建議系統。	(1) AX-Z 及 AX-N 系統係依據 CNS16174-9，皆可符合 CX 腐蝕等級環境，提供設計者不同的選擇。 (2) 本指引提供多種塗裝系統供設計	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	者依各橋實際需求進行選擇。	
交通部公路局(養路組)		
期末報告(初稿)審查意見如下：		
1. P2-72，關渡大橋 110 年已完成耐震補強及維護工程，針對鏽蝕構件有辦理更換、除鏽及塗裝保護工作，建議可增加上構維修部分並回歸本計畫設計、施工階段。另陰極防蝕系統目前運作功能及後續關渡大橋的維管作為，請再確認。	遵照辦理，已參考養護單位提供資料，補充於「期末報告」P2-72~P2-75，2.1.2 節鋼橋第 5 個案例。	同意。
2.P2-81，2.1.3 節「鐵公路橋梁劣化原因分析」內容包含「維護管理注意事項」，建議於第一段「設計與施工(含過往之相關經驗)」後方加入「、維護管理」。	遵照辦理，詳見「期末報告」P2-83。	同意。
3. P4-24，圖 4.4「混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖」，於「是否符合結構安全設計」、「防蝕耐久性設計重新評估」、「全生命週期成本最佳化評估」三個評估節點，若為「No」，流程應回到「設計方法選擇」，還是逕行「耐久性設計(查表)」或「耐久性理論計算」，請補充說明或修正流程圖。	遵照辦理，詳見「期末報告」P4-24。	同意。
4.結構量體大之混凝土橋，可能因為材料配比或施工品質控管問題，於完工後產生裂縫，增加構件鏽蝕風險，報告部分請補充類似巨積混凝土或其他材料設計及品質控管注意事項。	「指引 混凝土橋篇」P3-19~20，(4)裂縫控制，包含①塑性收縮、②熱應變收縮、③乾燥收縮，其中巨積混凝土品質控管注意事	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	項，可參考「②熱應變收縮」。	
5.混凝土橋有依距離及深度建議環境作用等級與區分建議，鋼橋部分是否也能比照環境分區建議去應用。	(1) 混凝土橋與鋼橋特性不同，防蝕工法也不同。 (2) 鋼橋4種不同防蝕方法已分別針對不同的環境分區、耐久性等級等條件，建議不同規格。	同意研究單位說明及處理方式。
6.鋼橋防蝕方法已歸納整理有 4 種主要防蝕方法，為讓使用者能更好應用，建議提出腐蝕環境等級與防蝕方法之適用性關係。	(1) 有關鋼橋防蝕方法的選擇請參見「指引 鋼橋篇」3.3.2 節鋼橋防蝕方法的選擇。 (2) 各種防蝕工法之規格請參見「指引鋼橋篇」4~7 章。	同意研究單位說明及處理方式。
7.P5-6、P5-7，排水設計，圖 5.4「帽梁頂部排水設計施作示意圖」，帽梁頂面做成斜面，使水分不易積於帽梁頂部，惟仍可能產生水漬，影響橋梁美觀，亦存在腐蝕風險，爰建議於伸縮縫處增加排水槽連接排水系統，避免雨水等排放於橋墩(台)座面上。	遵照辦理，新增排水系統於圖 5.7 帽梁頂部排水設計示意圖，詳見「期末報告」P5-8。	同意。
8.文字誤植或贅字： (1) P4-112，表 4-40，金「屬」熔射。 (2) P5-36、P5-38，檢測(驗)數量級距數字及其後方有「[ ]」符號。	(1) 遵照辦理。 (2) [ ]符號並非誤植，係參考施工綱要規範之型式，表示檢測(驗)數量級距數字可視使用者	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	(機關)需求進行調整，非強制性規定指定檢測(驗)數量級距數字。	
技術指引(初稿)審查意見如下：		
1.混凝土橋 P3-8，意見同(一)、3。	遵照辦理，詳見「指引 混凝土橋篇」P3-8。	同意。
2.混凝土橋 P3-16，意見同(一)、7。	遵照辦理，「指引 混凝土橋篇」P3-18 新增排水系統於圖 3.10 帽梁頂部排水設計示意圖。	同意。
3.文字誤植或贅字： (1) P3-16，第 2 行，排水達到下部結構或「樓板」構件。 (2) P3-21，表 3-3，金「屬」熔射。	遵照辦理。	同意。
交通部高速公路局		
1.本指引現行內容多聚焦於橋梁主體結構，然支承等附屬構件亦為維持橋梁功能之關鍵，其防蝕效能直接影響結構安全。為求防蝕體系之完備，建請增列支承等重要設施之防蝕設計與維護說明，以資公務機關同仁執行參考。	有關支承之防蝕規定，可參考「指引 混凝土橋篇」P3-15，⑦其他防蝕設計之注意事項；P3-23，(7)附屬設施的防蝕考量。「指引 鋼橋篇」P3-11，1.防蝕方法選用的基礎；3.3.3 節防蝕方法所需的結構設計；P5-17，(3)支承；表 6-4 熱浸鍍鋅附著量(P6-10)；圖 6.6 支承處接頭範例(P6-15)；均有提及支承之設計內容。	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
2.混凝土橋篇 3.2 設計年限：鑒於本節所述「設計年限」之定義多元，為利公務機關同仁理解與適用，建請重新分類並綜整相關說明；或請進一步釐清我國現行定義之範疇，以資明確，避免實務執行產生誤解。	遵照辦理，設計年限之定義，「指引 混凝土橋篇」P34，更改為「1.國內設計年限規定」、「2.國外設計年限規定」，以免誤導。	同意研究單位說明及處理方式。
3.混凝土橋篇第四章混凝土橋耐久性設計：鑒於我國規範將混凝土橋環境分為一般、中度、嚴重及極度重鹽害等四類，為強化實務應用之精準度，建請增設綜整表件，將各環境類別下之最大水膠比、最低設計抗壓強度及最小保護層厚度等關鍵數值一併納入。期透過標準化之彙整，利於公務機關同仁快速檢索並正確判讀，進而確保工程品質與防蝕效能。	遵照辦理，「指引 混凝土橋篇」P4-11 新增表 4-6「鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度」。	同意。
4.鋼橋篇表 3-2 鋼橋典型防蝕方法適用環境：本表雖已就飛來鹽分量提供防蝕建議，然參酌我國現行規範架構，鋼橋防蝕設計係以「大氣腐蝕性分類」為核心評估基準。為確保與上位規範之銜接及設計之一致性，建請改以大氣腐蝕性分類作為適用範圍之參考依據，並將複合式防蝕方法納入說明，以資公務機關同仁於實務執行時有所遵循。	(1) 表 3-2 為各種防蝕方法適用環境的比較並非防蝕方法選用之準則 (2) CNS 13401「金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-分級測定與評估」規範一般不作為不同的防蝕方法的選擇基準，而是同一防蝕方法中不同規格的依據(如塗裝防蝕方法中不同	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	大氣腐蝕等級的塗裝系統) (3) 複合防蝕方法請參見第四~七章	
5.鋼橋篇第五章耐候鋼：本章關於耐候鋼之設計理念，多以「裸露大氣環境」為論述核心；然考量我國鋼橋實務設計時，多採「搭配塗裝防蝕」之複合機制，建請增列相關說明或對照規範，以利公務機關同仁正確判讀與應用，避免實務執行產生落差。	(1) 耐候性鋼材的防蝕原理係藉由鋼材表面產生緻密的銹層，來達到防蝕的功能，部分位於腐蝕嚴重環境區域之構件，為了讓全橋耐久性達到一致，才進行局部塗裝。 (2) 國內採耐候性鋼材搭配全面塗裝來進行防蝕的作法與國外不同，只有在塗裝完全失效後，才有機會讓耐候性鋼材產生緻密的銹層，來提供防蝕的功能，但一般在塗裝完全失效前，橋梁養護單位就已開始進行塗裝系統維護(重塗)。 (3) 採用耐候性鋼材搭配全面塗裝的鋼結構橋梁，在結構及塗裝防蝕設計方面之相關規定與採一般性鋼	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	材橋梁相同，因此無須增列相關說明或對照規範。	
6.期末報告 P2-9，表 2-1：金門大橋養護機關非屬高速公路局，請修正。	遵照辦理，修正為「金門縣政府」，詳見「期末報告」P2-1。	同意。
7.期末報告 P7-20：本局單位名稱有誤，請修正。	遵照辦理，「期末報告」P7-23，表 7-8「第三場成果說明會出席名單」修正為「交通部高速公路局第一新建工程分局」、「交通部高速公路局第二新建工程分局」。	同意。
臺灣港務股份有限公司		
本指引(混凝土橋篇)第四章中鹽害環境等級分區方式係考量海岸線平面距離及距海水潮位垂直範圍，爰若僅根據鐵路橋梁設計規範之縣市村里表(表 4-4 及 4-5)進行鹽害區初步區分恐將遺漏部分區域，如基隆港及高雄港等屬內港性質部分區域離海岸線 300 公尺以外而未列入該表中，建議表 4-4 及 4-5 所列範圍再行檢討以提高適用性。	遵照辦理，「指引 混凝土橋篇」P4-7，表 4-4「離海岸 300 公尺以內(極嚴重與嚴重鹽害區)之村里」，新增高雄市小港區：港正里，小港里，鳳宮里，港口里，高雄港；前鎮區：興化里，明孝里，鎮北里，高雄港；基隆市仁愛區：文昌里、新店里、仁德里。	同意。
運輸技術研究中心 蔡立宏 主任		
1.指引不應過於繁雜，讓主辦機關或工程師容易上手。針對提醒工程師須注意的地方(例如：伸縮縫、大梁端防積水等)，除文字說明外，建議增加詳細示	遵照辦理，詳述如下。 (1)「指引 混凝土橋篇」P3-14 新增圖 3.6「混凝土箱型梁排水系統示意圖」	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
意圖，以利工程師容易理解設計時應特別注意之細節。	(2)「指引 混凝土橋篇」P3-16 新增圖3.7「端錨封頭示意圖」 (3)「指引 混凝土橋篇」P3-18 新增圖3.8「混凝土橋上部結構排水設施示意圖」 (4)「指引 混凝土橋篇」P3-18 修改圖3.9「帽梁頂部排水設計示意圖」,增加排水設施細節。	
2.指引內容減少冗長的理論推導，建議可將公式推導過程移至附錄，前文則盡量提供查表方式或參數設定，方便使用者直接查閱結果。	遵照辦理，「指引 混凝土橋篇」P4-14 已簡化「鹽害耐久性理論計算」之推導過程，並新增附錄一「鹽害耐久性理論計算範例」。	同意研究單位說明及處理方式。
3.混凝土指引 4-11 頁：提到文獻引用不需列出教授的全名與所別，應依照一般學術或技術報告格式修正。	遵照辦理，更改為「混凝土耐久性試驗相關研究數據與分析模式(參考文獻[23-30]))」，詳見「指引 混凝土橋篇」P4-14。	同意。
運輸技術研究中心 賴瑞應 研究員兼科長		
1.報告第五章，在混凝土橋施工品質方面，針對保護層厚度的查驗，報告規定了單點負偏差不得大於 5mm、合格率須達95%的嚴格標準。建議在實務執行上,可特別提醒「施工縫」、「伸縮縫」及「預留工作筋」等	遵照辦理，「期末報告」P5-5、「指引 混凝土橋篇」P3-16 增加相關提醒。	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
易產生防蝕破口的局部區域，應加強防水或採用鍍鋅/環氧樹脂鋼筋等第二道防線。		
2.防蝕指引(混凝土橋篇)第三章，納入了「考量防蝕的結構設計」，例如教導設計者將接角圓弧化、盡量選擇平坦或通風良好的箱型斷面以避免腐蝕氣體聚集，以及避免箱梁內部積水等實務細節。文字描述雖清楚，但若能提供標準的「防蝕細部設計大樣圖」(如標準滴水線設計、端錨防護防水包覆大樣圖等)，將能有效降低設計與施工的錯誤率。	(1)「指引 混凝土橋篇」P3-14 新增圖 3.6「混凝土箱型梁排水系統示意圖」 (2)「指引 混凝土橋篇」P3-16 新增圖 3.7「端錨封頭示意圖」 (3)「指引 混凝土橋篇」P3-18 新增圖 3.8「混凝土橋上部結構排水設施示意圖」	同意研究單位說明及處理方式。
3.防蝕指引(鋼橋篇)第二章，異種金屬接觸腐蝕(加凡尼腐蝕)在鋼橋中常因零配件（如不銹鋼螺栓與普通鋼材接觸)引起。建議可針對複合材料接合處提供更詳細的絕緣墊圈材質或電氣絕緣設計標準圖例。	遵照辦理，「指引 鋼橋篇」P2-4 新增圖 2.3「電氣絕緣示意圖」，絕緣墊圈材質因各家廠商產品不同，因此不做詳細規定。	同意研究單位說明及處理方式。
4.防蝕指引(鋼橋篇)，將防蝕考量深度融入結構設計中，例如規定外露構件自由邊緣需進行 2R（C5 以上環境需 3R）的圓弧倒角處理以確保漆膜厚度；規定箱型梁的橫隔板開口率需達 30%以上且設置扇形孔，以利熔融鋅液進出並防止爆裂；同時提醒金屬熔射作業需要約 1 立方公尺的作業空間，且噴槍角度需在 45~90 度之間，提醒	(1) 扇形孔細部設計，請參見「指引 鋼橋篇」P3-16「①扇形孔排水」圖 3.3「扇形孔範例」、P6-18 圖 6.8「隔板開口和扇形孔形狀範例」。 (2) 倒角，請參見「指引 鋼橋篇」P7-17	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
設計者避免創造狹窄難以施工的死角。這些文字規定非常詳盡，但實務上設計師與現場製圖人員更依賴圖面。建議能將這些防蝕細部設計（如標準扇形孔、倒角、排水導坡、梁端局部塗裝範圍等）能有「標準大樣圖」，將大幅提升從設計到製造的正確率。	圖 7.2「2R 以上倒角範例」。 (3) 排水坡度，請參見「指引 鋼橋篇」P3-17 圖 3.4「箱型梁排水孔範例」。 (4) 梁端局部塗裝範圍，請參見「指引鋼橋篇」P5-25 圖 5.12、圖 5.13、圖 5.14。	
運輸技術研究中心 胡啟文 副研究員		
期末報告(初稿)審查意見如下：		
1.第二章鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查中關渡橋案例，因該橋為國內座極具代表性的「大跨距鋼拱橋」，且位於淡水河口高鹽害、高濕度環境，其維修案例具參考應用價值，惟該案例目前內容多偏重於劣化描述，建議研究團隊補充維修設計對策相關資料。	遵照辦理，已參考養護單位提供資料補充於「期末報告」P2-72~P2-75，2.1.2 節鋼橋第 5 個案例。	同意。
2. 8.2 節建議：研究團隊所提建議內容多似部頒規範前言內所述規範屬原則性、訓示性、適用性等等開宗明義的說明，建議研究團隊可將建議事項彙整擇要的寫入混凝土及鋼橋指引前言內。	遵照辦理，詳見「指引混凝土橋篇」表 P1-2、「指引 鋼橋篇」P1-2。	同意。
技術指引(初稿)審查意見如下：		
1.防蝕指引(混凝土橋篇)：關於鹽害環境之內容考量其計算過程較為繁雜，鑑於技術指引應具備設計可操作性，建議研究團	遵照辦理，「指引 混凝土橋篇」P4-14 已簡化「鹽害耐久性理論計算」之推導過程，並	同意。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
隊於本末或附錄中增補「鹽害環境耐久性分析計算案例」，將有助於使用者快速了解並正確引用本指引參數。	新增附錄一「鹽害耐久性理論計算範例」。	
2.防蝕指引(鋼橋篇) P3-3：表 3-1 鋼橋典型防蝕方法，建議可增加一欄「實務案例」，將期末報告書第二章調查之案例與表格工法對應，因案例是最好的說明書，能讓使用者更直觀地將數據與實務進行連結，以符指引之目的。	(1) 「期末報告」第二章調查之案例著重在劣化原因探討(資料由橋梁主管機關提供或網路上蒐集)，由於橋梁主管機關提供之資料有限，未能涵蓋全部工法且年代久遠，因此無法如委員預期整理實務案例。 (2) 指引內容無法全面涵蓋各種工法之細節，指引中已列出參考文獻(如中華民國鋼結構協會出版之塗裝及熱浸鍍鋅技術手冊..等)，有需求者可自行參酌。	同意研究單位說明及處理方式。
3.防蝕指引(鋼橋篇) P3-11：以指引好用性之角度來看，表 3-2，各防蝕方法在不同飛來鹽下之適用環境，在橫軸部分對於飛來鹽分量係以定性化的方式來判斷適用範圍，不夠明確會讓使用者產生疑義，建議在有足夠數據支持下，以定量化之飛來鹽分量方式來區分不同適用	(1) 「指引 鋼橋篇」表 3-2 為各種防蝕方法適用環境的比較，並非防蝕方法選用之準則。 (2) 飛來鹽是重要指標但國內數據不足，且無法用單一	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
範圍為宜。	指標來區分適用範圍。	
4.防蝕指引(鋼橋篇)P4-41：耐候鋼因需生成緻密保護性銹層，其初期噴砂清潔度與粗糙度要求與一般塗裝鋼材之預備處理是否存在差異?若相同，建議加註含耐候鋼;若不相同，建議應分別說明，明確指示避免使用者混淆。	(1)「指引 鋼橋篇」P4-44(原 P4-41)係針對一般裸鋼。 (2)如耐候性鋼材外加全面塗裝，表面處理與一般裸鋼相同，請參見「指引 鋼橋篇」P5-17，「4.複合系統」。	同意研究單位說明及處理方式。
5.防蝕指引(鋼橋篇) P7-9：提及金屬熔射後為遮斷環境提升耐久性或與環境協調，可在熔射層上塗裝，當使用此複合防蝕情形時，其塗裝前之表面處理為何?請研究團隊補充金屬熔射後複合塗裝之層間處理，增補具體要求，以明確指引使用。	(1)有關熱浸鍍鋅面塗裝前處理請參見「指引 鋼橋篇」P4-44「(2)熱浸鍍鋅面塗裝前處理」。 (2)有關金屬熔射面塗裝前處理請參見「指引 鋼橋篇」P4-45「(3)金屬熔射面塗裝前處理」。	同意研究單位說明及處理方式。
其他內容文字調正		
1.報告書 P7-9：「115」年 12 月，年度誤繕；	遵照辦理，詳見「期末報告」P7-10。	同意。
2. 混凝土橋篇：圖 3.5，底面「可」聚集腐蝕氣體，建議調整為「易」； P5-1，…能從「各個」個別計畫中的製造廠商與…，「」內建議刪除；P7-17、P7-19，[1000][ ] m^3 時，每[1000][ ] m^3 增加 1 處…，[ ]是否為贅號?；P7-21，文末敘述不全，…電氣	(1)遵照辦理，詳見「指引 混凝土橋篇」P3-13。 (2)「指引 混凝土橋篇」P7-20、P7-22 [ ]符號並非誤植，係參考施工綱要規範之型式，表示檢	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
連續性?	測(驗)數量級距數字可視使用者(機關)需求進行調整，非強制性規定指定檢測(驗)數量級距數字。 (3) 電氣連續性為誤植，已移除。	
3. 鋼橋篇：P2-8，「…因此在土中建議採用被覆等…」，建議調整為「…因此埋入土中之鋼結構物建議採用被覆等…」較為明確；P3-13，…防蝕方法選定「並」行…，請修正為「併」行；圖 3.8、圖 5.3，字體請請其它圖示字體統一；P3-21，金「屬」熔射，請修正為「屬」； P3-23，「 …避免重工.. 」，建議調整為「…避免重複施工…」較為明確；P4-31，導則?；表 4-44，請檢視 5.安全性的色彩是否有遺漏說明內容；P433，橋腳?非慣用詞，請修正；P5-11，表 5-4 下方說明欄「參閱第 2.2.3.1 節、第 2.2.3.2 節、第 2.2.3.3 節、第 2.2.3.4 節、第 2.4.3 節?」未能正確對應。	(1) P2-10(原 P2-8)，遵照辦理。 (2) P3-15(原 P3-13)，遵照辦理。 (3) 圖 3.8、圖 5.3，遵照辦理。 (4) P3-23(原 P3-21)，遵照辦理。 (5) P3-26(原 P3-23)，遵照辦理。 (6) P4-33(原 P4-31)，導則為誤植，已移除；安全性的色彩並無遺漏內容。 (7) P4-36(原 P4-33)，遵照辦理，修正為「橋墩」。 (8) 表 5-4，新增備考補充說明出處。	同意研究單位說明及處理方式。
運輸技術研究中心 黃烟宏 副研究員		
1.報告書格式及打字錯誤修正建議如下： (1)公式前方請加上「.....」。 (2)水膠比的符號有 W/B 及 w/cm，建議符號一致。	(1) 遵照辦理。 (2) 遵照辦理，統一為「W/B」。 (3) 遵照辦理，全表格已統一。	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
(3)表格下方註解格式有[1]、(1)…等，建議顯示格式一致。 (4)標號 I. II. III. VI.等，格式請對齊。 (5)表格中，部分會加底色，若有特殊性，應於文章中加說明，無特殊性，請移除底色。 (6)每一章的最後一頁若為空白頁(補成偶數頁)，下方頁碼應不顯示。 (7)第二章起始頁碼應為「2-1」，非「2-9」。 (8)表 2-4：氯離子擴散係數後方顯示為「E^{-08}」，應修正為「E-8」或「×10-8」。 (9)圖 2.12，子圖標示建議修改為(a)、(b)。 (10)「台灣」或「台北」請修正為「臺灣」及「臺北」，例如，2-21、2-72、2-88 等。 (11)表 2-42，「塗裝間格」是否應修正為「塗裝間隔」? (12)P2-72：「 …於 101 年 4 月全橋主纜索已全數更換完畢[d]…」，[d]是否引用連結錯誤? (13)表 2-50：「附著量 650g/cm^3」，是否應修正為「附著量 650g/cm^2」? (14)表 2-52：鋼橋最後一點「108 年版相救於...」應修正為「108 年版相較於...」。 (15)P2-88：Cl^{-1} 應修正為 Cl^-。	(4) I. II. III. VI，等已更改為 A. B. C.、(a) (b) (c)、ⓐ ⓑ ⓒ。 (5) 遵照辦理，全表格已移除底色。 (6) 遵照辦理。 (7) 遵照辦理，頁碼已修正。 (8) 遵照辦理，修正為($10^{-8}cm^2/sec$) (9) 遵照辦理。 (10)遵照辦理，除部分專有名詞外，已統一為「臺灣」及「臺北」等。 (11)遵照辦理，修正為「塗裝間隔」。 (12)遵照辦理，已修正參考文獻。 (13)遵照辦理，修正為「g/m^2」。。 (14)遵照辦理。 (15)遵照辦理。 (16)遵照辦理。 (17)遵照辦理。 (18)遵照辦理。 (19)遵照辦理，修正為「⑤安裝材料的考慮。 (20)遵照辦理。 (21)遵照辦理。 (22)遵照辦理。 (23)遵照辦理，已根據紙本標註修正。	

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
(16)表 3-60:「六、噴塗作業與檢驗」中之「4.塗膜改善與塗層修補」編號應為「5.塗膜改善與塗層修補」;後方編號 5 應為 6。 (17)表 4-40：塗「裝」應修正為塗「裝」。 (18)表 4-40 及表 4-53：「 金屬…」應修正為「金屬…」 (19)P5-47:「③運輸及安全對策」及「④安裝材料等的考慮」編號應修正為④及⑤。另外,「安裝材料等的考慮」語氣不順，建議修正。 (20)P7-1:「 第二場成果…」應修正為第一場。 (21)P7-23：上方文字敘述有誤，請修正更新。 (22)部分「形式」應修正為「型式」,例如,2-73、3-35、3-79、4-123 等。 (23)其他：詳紙本標註處。		
2.報告書相關建議修正或說明內容如下： (1) 文中水灰比是否應全部修正為水膠比? (2) P2-82:「鹽害環境則需採用低水膠比、高抗氯離子能力之混凝土，減緩氯離子滲透與鋼筋腐蝕…」, 建議修正為「鹽害環境則需採用低水膠比、高抗氯離子能力之混凝土，以減緩氯離子滲透與鋼筋腐蝕…」, 另建議說明	(1) 遵照辦理，統一為「水膠比」。 (2) 遵照辦理，增加說明，高抗氯離子能力之混凝土(可參考「期末報告」表 4-18 鹽害環境下主要構件混凝土抗氯離子能力建議)。 (3) 遵照辦理。已修改為「既有橋梁的維	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
何謂「高抗氯離子能力之混凝土」? (3) P2-86:「 裂縫控制與附加防護系統功能維護為重點,…」似乎不完整,請再確認。 (4) P2-94:總結隧道、港灣捷運等之問題,建議移至本節最後方。另外,「綜上,建議其餘各類交通設施,可依循鐵公路橋梁研擬防蝕技術指引之方式,以確保提升設施的品質及壽齡與減少生命週期之維護成本。」語句不完整,建議修正為「綜上,建議其餘各類交通設施,可重新檢視自身交通設施特性,建立適宜之防蝕技術指引,…」。 (5) P3-1:「除以上所述結合二者之分區方式外,同時納入高程之考量作為鹽害環境之分區,以下針對其分區方式作一說明,其鹽害環境區分可參照下圖 3.1、表 3-1 分為:…」, 語句不順,建議重新修訂。 (6) P3-2 之「飛沫區」及 3-3 頁之「潑濺區」:建議全文統一為「浪濺區」或「飛沫區」(含表 3-1 之修正) 。 (7) 表 3-4:「 不曝露於天氣…」建議修正為「不曝露於大氣…」 (8) P3-17 及 3-18:「鋼筋脫鈍」建議全文統一為「鋼筋去鈍	護管理應以生命週期成本分析做為維護決策依據,以達成長期耐久與經濟效益。」 (4) 遵照辦理。 (5) 遵照辦理,修改為「…此分區模式係結合了地域及海岸線距離,以及環境(包含大氣、水、土壤)情況做為鹽害腐蝕環境之區分,同時納入高程之考量。此種分類方法對於腐蝕環境的區分即具有清楚且定量的描述,對於構造物興建地點或環境情況亦提供了明確的鹽害分區指示,其鹽害環境分區方式如圖 3.1、表 3-1 所示…」。 (6) 遵照辦理,「潮間帶」、「潮汐區」、「潮汐帶」統一為「潮汐區」;「噴霧區」、「浪濺區」、「飛沫區」、「潑濺區」統一為「飛沫區」;「感潮區」不更動;「潑濺水」為	

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
化」。 (9) 表 3-24：梁柱等條形結構中 II-D 之表格資料疑有誤，請再確認。 (10)P3-20:「全機率法：當極限狀態為極限狀態(鈍化層破壞)」敘述疑有誤? (11)P3-38:「 …若使用環氧樹脂鋼筋或鍍鋅鋼筋，其受拉伸展長度、搭接長度、標準彎鉤之伸展長度應適度增加。」此敘述是否有誤? (12)表 3-69：表中的 NACE(1)、SSPC(2)、BS 7079(3)，(1)~(3)有特殊意義?請補充說明。 (13)表 3-75：表中的「海鹽粒子」疑為翻譯名詞，請確認該名詞是否須修正。 (14)P3-81：「…重防蝕塗裝系建議全工場塗裝至面塗…」語句疑有誤，請修正。 (15)P3-83：DFT 代表意義?文中無說明。 (16)建議 4.1.3 節~4.1.5 節及 4.2.3~4.2.6 節修正節標題為「…之設計標準建議」例如，「中性化環境之設計標準建議」、「塗裝之設計標準建議」，以符合第四章之標題。 (17)P4-21：文中的附錄 A.3 是指中國 GB 50153 規範?文中應釐清。 (18)表 4-39 中，以飛來鹽分量較多及較少來界定鋼橋防蝕	「建築物混凝土結構設計規範 112 年版」用詞(其內容參照 ACI 318-19(22))，為與原規範保持一致性，「期末報告」表 3-3(P3-5)、3-38(P3-40)之「潑濺水」不予修改。 (7) 遵照辦理。 (8) 遵照辦理。 (9) 遵照辦理，已根據原規範進行修正。 (10)遵照辦理，修正為「全機率法：當極限狀態鈍化層破壞」。 (11)鍍鋅鋼筋不須增加長度，但該部分為「公路橋梁設計規範」之內容，該章節屬於文獻探討，應與原規範保持一致性，不宜修改。此部分於「指引 混凝土橋篇」已修正。 (12)遵照辦理，根據 CNS 15257 補充表格內容。 (13)遵照辦理，修正為「飛來鹽」。	

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
方法適用範圍，但並無說明何謂較多及較少?是否有定量的數字? (19)P5-54：「塗布作業」及「塗布方法」建議修正為「塗裝作業」及「塗裝方法」。 (20)P5-118：文中敘明「所需清潔度與表面粗糙度如表 5-23 所示」，但表 5-23 似乎無敘明表面粗糙度應達何種等級?	(14)遵照辦理，修正為「…重防蝕塗裝系統建議全工廠塗裝至面漆…」。 (15)遵照辦理，修正為「乾膜厚度」。 (16)遵照辦理。 (17)遵照辦理，修正為「GB 50153 附錄 A.3」。 (18)「期末報告」表 4-39 為各種防蝕方法適用環境的比較，並非防蝕方法選用之準則。飛來鹽是重要指標但國內數據不足，且無法用單一指標來區分適用範圍。 (19)遵照辦理。 (20)遵照辦理，「期末報告」P5-119 修正為表 5-22「金屬熔射表面處理的要求」。	
3.防蝕技術指引(混凝土橋篇)相關建議修正或說明內容如下： (1) P1-1：「 1.1 前言」語句不通順，請重新修正調整。 (2) P3-12：圖 3.4 為斷面比較，建議應在圖上補充何種斷面較佳。 (3) P4-10：第(3)保護層厚度「…若按照原建議之保護層厚	(1) 遵照辦理，詳見「指引 混凝土橋篇」P1-1。 (2) 該段僅是以力學角度比較兩種斷面受拉應力大小，為避免誤導，「指引 混凝土橋篇」P3-12，更正圖名為	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
度，嚴重鹽害區之混凝土抗氯離子能力要求須高於極嚴重鹽害 區，才可滿足其設計年限，或使用相同抗氯離子能力的混凝土，部分嚴重鹽害區構件的保護層厚度應有所提升。...」，建議文中應明確說明此為不合理的現象。	「上承式與下承式橋梁斷面受拉應力大小之比較」。 (3) 遵照辦理，「指引混凝土橋篇」P4-12補充如下：「若將 D_P 進行差異化後重新帶入鹽害耐久性分析模式，而保護層厚度按原規範之規定值，嚴重鹽害區之混凝土抗氯離子能力要求須高於極嚴重鹽害區才可滿足其設計年限，將造成不甚合理之規定。」	
4.防蝕技術指引(鋼橋篇)相關建議修正或說明內容如下： (1) 目錄第四章頁碼應為 4-1；第八章頁碼應為 8-1。 (2) 內文第四章：內文應移至下一頁開始。 (3) P3-13：第二段「…例如，熱浸鍍鋅高強度螺栓強度等級有使用限制；使用耐候性鋼材時，高強度螺栓接頭部對連接板短邊端距離有受限。…」請補充說明熱浸鍍鋅高強度螺栓之使用限制為何?或可參考本指引第幾章之內容?另「…高強度螺栓接	(1) 遵照辦理。 (2) 遵照辦理。 (3) 「指引 鋼橋篇」，3.3.3 防蝕方法所需的結構設計章節中只是概略性說明，對於經驗不足之設計者不可能只依據 3.3.3 節就能了解全部防蝕工法。有關各防蝕工法結構設計注意事項詳細之說明，請參見第四章塗裝 4.2.3 結構	同意研究單位說明及處理方式。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
頭部對連接板短邊端距離有受限…」，對於經驗不足之設計者恐無法理解本句話的意思，建議應補示意圖，並說明該短邊端距離受限之標準。	設計注意事項、第五章耐候性鋼材 5.2.3 結構設計注意事項、第六章熱浸鍍鋅 6.2.3 結構設計注意事項、第七章金屬熔射 7.2.3 結構設計注意事項。	
主席結論：		
1.本案期末報告審查結果，原則通過，請財團法人臺灣營建研究院針對前開審查意見，配合檢視調整計畫相關內容。	遵照辦理。	同意。
2.請財團法人臺灣營建研究院就前開審查意見，逐項具體回應，並製作「期末報告審查意見處理情形表」。	遵照辦理，詳見「期末報告」附錄三「期末審查意見回覆表」	同意。

附錄四　期末簡報


交通部運輸研究所
Institute of Transportation, MOTC
研擬鐵公路橋梁之防蝕技術指引(1/2)
設計及施工階段
期末簡報
計畫主持人：邱建國 院長/特聘教授
協同主持人：楊仲家 名譽教授
詹穎雯 教授
陳育聖 博士
梁智信 博士
財團法人臺灣營建研究院
2026/03/12


簡報大綱
計畫概述
橋梁防蝕設計案例現況調查
橋梁防蝕耐久性規範探討
防蝕保護策略與設計標準建議
防蝕施工品質作業規定與圖說範例
橋梁防蝕設計及施工技術指引
辦理研究成果說明會(3場次)
結論與建議
財團法人臺灣營建研究院
2


一、計畫概述

計畫緣起與目的

未充分瞭解臺灣腐蝕環境之嚴苛及
未完整評估結構物生命週期維護成本



橋梁使用不到10年就已發生腐蝕狀況
造成後續維護頻率與費用的增加

「公共建設工程經費估算編列手冊」
(工程會112.11.27)

落實手冊修訂後的新思維，重視總體生命週期成本(LCC)，採用高標準的腐蝕防治對策，使得工程生命週期成本降低，以提升整體工程的效益。

透過業界與學界合作建立「鐵公路橋梁之防蝕設計及施工技術指引」

- 探討鐵公路橋梁防蝕設計案例、耐久性規範與維護管理作業規定等
- 研擬不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議
- 防蝕施工品質作業規定與施工標準圖說範例
- 防蝕維護管理與修護施工品質作業規定與圖說範例

- 建立全生命週期成本最佳化維護管理方式
- 提升鐵公路橋梁的品質及壽齡
- 減少維護頻率、達到減碳及永續發展的目的

工作項目與進度

工作項目	第1月 (114.5)	第2月 (114.6)	第3月 (114.7)	第4月 (114.8)	第5月 (114.9)	第6月 (114.10)	第7月 (114.11)	第8月 (114.12)	第9月 (115.1)	第10月 (115.2)	第11月 (115.3)	第12月 (115.4)
1. 鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查												
(1)蒐集相關鐵公路橋梁主體結構等防蝕設計案例與成敗因素探討												
(2)探討其他各類交通設施遭遇之腐蝕問題												
2. 鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討												
3.不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議												
4.防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例												
5. 研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引												
6.辦理研究成果說明會(3場次)								◎				
7.相關報告繳交					◆					★		★
工作進度估計百分比(累積數)	4	13	22	34	43	49	58	67	78	88	94	100

預定查核點
(決標日為114.4.17)

預定進度　當前進度　尚未完成

※第1季：工作計畫書提送(得標後20日內，114.5.7)。
◆第2季：期中報告初稿提送(決標日起150日內，114.9.13.)。
◎第3季：成果說明會辦理，預計於114.10至114.12辦理。
★第4季：期末報告初稿提送(決標日起300日內，115.2.10)；期末報告修正定稿提送。

二、鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查



6

國內橋梁防蝕設計案例

種類	修復補強/新建	橋名	養護機關
混凝土橋	修復補強	下三叉河橋	臺鐵公司
		台北市中正橋	台北市政府
		台61線WH06-1	公路局
		後龍觀海大橋	
	修復補強與改建	玄寶大橋	
	新建	金門大橋	金門縣政府
		淡江大橋	公路局
鋼橋	修復補強	社寮橋	基隆市政府
		南方澳大橋	宜蘭縣政府
		彩虹橋	桃園市政府
		頭份大橋	苗栗縣政府
		關渡橋	公路局
	新建	淡江大橋	公路局
		中和快速道路高架橋(中和中正路)	公路局
	新建(改建)	小清水溪(東正線)橋	臺鐵公司

財團法人臺灣營建研究院

7

國內橋梁防蝕設計案例—混凝土橋

修復補強

案例橋梁	基本資料	腐蝕狀況	案例探討
下三叉河橋	距海:臨海 完工:1990年 檢測:2016年	**部分**試體氯離子濃度已**超過臨界氯離子濃度**，已產生**嚴重腐蝕**。	原設計參考**日本規範**，因**臺灣腐蝕環境**相較日本更為嚴苛，使得**設計之保護層厚度不足**。
台北市中正橋	距海:約20km 擴建:1972年 檢測:1996年	局部構件之**保護層不足**及**鋼筋外露**是造成**輕微腐蝕**的原因。	**橋墩與主梁多處保護層厚度不足與鋼筋外露未即時修復**導致輕微腐蝕。
台61線WH06-1	距海::<300m 完工:2005年 檢測:2019年	**部分主梁**、**墩柱氯離子含量偏高**。	原設計**保護層厚度不足**，未能符合當前109年版規範100年設計年限之要求。
後龍觀海大橋	距海:<300m 完工:1995年 檢測:2019年	**混凝土劣化**、**鋼筋銹蝕**及**氯離子含量超標**。	**原設計保護層厚度不足**，後續**修復設計已符合109年規範要求**。
玄寶大橋	距海:<300m 完工:1996年 檢測:2022年	**感潮區**、**非感潮區部分墩柱**之混凝土內**鋼筋已產生腐蝕**。	原設計之**混凝土抗氯離子能力與保護層厚度不足**，**未能符合**當前109年版規範**50年設計年限之要求**。

新建

案例橋梁	基本資料	設計探討
金門大橋	距海:臨海 完工:2022年	● **混凝土抗氯離子能力，56天齡期應符合CNS 14795 (通過電荷量≤2,000)**。 ● 外置預力斜索採同步射出HDPE內套管並灌注油脂之鍍鋅單根鋼絞線；並配合HDPE材質外套管具四層防蝕保護功能。 ● 附加保護措施採用熱浸鍍鋅鋼筋。
淡江大橋	距海:臨海 完工:2025年	● **設計年限120年，部分構件須於年限內進行次數不等的更換**。 ● **結構用混凝土抗氯離子能力，按北歐NT BUILD 492 試驗法辦理**。 ● 結構用混凝土、自充填混凝土、巨積混凝土**增列「溫度管控」相關規定**。 ● 附加保護措施採用熱浸鍍鋅鋼筋、**混凝土表面處理**(防蝕塗裝、聚脲)。

國內橋梁防蝕設計案例—鋼橋

修復補強

案例橋梁	基本資料	腐蝕狀況	案例探討
社寮橋	距海:臨海 完工:2015年 檢測:2024年	**油漆燒焦起泡**、螺栓、鋼板、銲道**銹蝕**、螺栓、連接板**未塗裝**、**箱內積水**。	建議氟碳樹脂面漆、Type A&B採用水刀表面清潔標準WJ2 & WJ4的適用性需考量。
南方澳大橋	距海:臨海 完工:1998年 分析:2020年	108年10月1日上午9時30分左右發生橋梁崩塌事件。	崩塌為**長期處於高度腐蝕環境下，鋼索與錨碇裝置系統性劣化，且未被有效檢測與維護所致**。
彩虹橋	距海:臨海 完工:2003 檢測:2020年	主要劣化包括:鋼拱、主梁、橫梁**塗裝劣化或鋼構銹蝕、螺栓銹蝕**。	維修包括:鋼纜套管及兩端鋼套筒之防塵更新、螺栓更新、鋼構件除銹及塗裝
頭份大橋	距海:<7km 完工:2002年 檢測:2020年	部分錨座吊索滑線及夾片脫落、塗裝劣化、銲道與接合鈑螺栓銹蝕。	維修內容包含吊索更換、吊索錨碇系統修復與塗裝修復。
關渡橋	距海:<7km 完工:1983年 檢測:2022年	管樁(41根)**表面明顯紅銹腐蝕**，且遍布**海生物附著**。	● 陰極保護系統雖有抑制效果但未完全中止腐蝕，建議可調整外加電流系統輸出。 ● 監測期間發現電位反轉，為雜散電流所導致。

新建

案例橋梁	基本資料	設計探討
中和快速道路高架橋	距海:約20km 完工:1996年	● I型鋼梁、斜撐、連接板及高強度螺栓採**熱浸鍍鋅防蝕(設計附著量610 g/m²)**。鋼橋墩及少部份之鋼梁因大於鍍鋅槽故採塗裝防蝕。 ● 於竣工第23年進行熱浸鍍鋅構件的膜厚量測，熱浸鍍鋅構件皆無異狀。
小清水溪(東正線)橋	距海:<300m 完工:2025年 (改建)	● 鋼板之鋼橋構件須符合ASTM A709 GR.50耐候性高強度低合金鋼之規定。其它構件須符合ASTM A709/A572 GR.50或A709GR.36/A36之規定。 ● **強力螺栓**須符合ASTM F3125 A325 Type 1 規定，**鍍鋅附著量為450 g/m²**。 ● **鋼構件**、**鋼管內層**均須鍍鋅，其**鍍鋅附著量為650 g/m²**。 ● **所屬環境為C4等級**，故桁架橋外露面除熱浸鍍鋅外，**亦以塗裝系統防蝕**。

鐵公路橋梁劣化原因分析與注意事項

混凝土橋	規範	● **早期規範未進行系統性的腐蝕或鹽害環境分級** 。 ● 後續規範**導入海洋環境防蝕與耐久性設計概念** ，建立腐蝕環境分區制度 ，與同環境條件之規範 。 ● **近年**修訂進一步**強調設計年限、全生命週期理念與維護管理考量** 。
	設計施工	● **98年以前的設計規範對耐久性考量不足** ，導致鹽害環境之鋼筋腐蝕與混凝土劣化問題 。 ● 隨著規範演進 ，防蝕設計逐步從單純結構安全轉向耐久性管理 。 ● **現行規範以服務年限為目標並要求設計時同步規劃維管策略 ，降低維修成本並延長橋梁壽命** 。
		● **混凝土結構之防蝕耐久性須自施工前即加以控制** ，並依中性化、鹽害或硫酸鹽環境進行設計 。 ● **施工期間、施工過程中以及施工後 ，均須根據**混凝土品質控制目標 ，落實檢測與管制 。
	維護	● **88年**以前除高公局外 ，**多數橋梁養護單位之檢測與維護作業尚未制度化 。加以橋梁數量龐大且相關規範未臻完善** 。此外 ，橋梁**維護經費是否充足 ，亦直接影響檢測與修繕作業之執行成效** 。 ● 既有橋梁的維護管理應依不同環境採取對應檢測指標 ，**維護檢查應包含表面裂縫 、混凝土剝落與保護層厚度等項目** ，並以生命週期成本分析作為維護決策依據 ，以達成長期耐久與經濟效益 。
鋼橋	規範	● **早期規範尚未明確納入防蝕設計內容** ，僅著重於結構安全與承載能力之要求 。 ● **109年版規範**則結合全生命週期設計理念 ，將**防蝕設計與後續之維護管理 、檢測維修及特殊性橋梁之設計考量一併納入** ，提升鋼橋整體耐久性與使用效能 。。
	設計施工	● 由於早期規範與技術文件不足 ，導致部分鋼橋防蝕性能不足 。近年設計者對防蝕技術重視度提升 ，已有橋梁採用**複合防蝕系統（熱浸鍍鋅＋塗裝）以改善耐久性** 。
		● 施工細節直接影響防蝕成效，隨著品管與施工、監造人員認證制度落實，鋼橋耐久性已逐步提升。 ● 鋼構防蝕**施工應落實工期與品質管理** ，**設計階段即應考量排水與維修空間配置** 。
	維護	● 目前「公路橋梁檢測及補強規範」與「鐵路橋梁之檢測及補強規範」 **雖要求塗裝劣化維修需依檢測結果判斷，但實務上普遍缺乏完整的塗裝系統檢測、評估與追蹤紀錄。** ● **新建橋梁多以保固期滿後才啟動防蝕維護，可能導致鋼構基材在未受控狀況下劣化** ；既有橋梁的**防蝕系統修復亦需依據國內外規範並考量腐蝕環境條件進行設計** ，以避免修復後再次快速劣化並增加維護成本。 ● 鋼橋防蝕維護管理時需定期檢查防蝕層劣化狀況，同時監測環境因素並建立完整防蝕記錄；補修應具備局部或全面更新的可行性，並優先處理積水、漏水等結構問題。

探討其他各類交通設施遭遇之腐蝕問題

設施類型		腐蝕機制	腐蝕問題
隧道	隧道主體結構	中性化環境 地下水滲漏	● 含二氧化碳 、腐植酸或硫酸根等酸性地下湧水 ，導致混凝土襯砌背面劣化。 ● 酸性滲漏水導致中性化 、白華生成及鋼筋腐蝕 ，且**劣化位置多隱蔽、不易察覺**。 ● 屬於**封閉空間**之隧道 ，因**通風不良**與**車輛排放氣體**影響使得隧道內之中性化腐蝕現象加劇。
港灣	重力式碼頭 板樁式碼頭 棧橋式碼頭 浮動式碼頭	鹽害環境 (極嚴重鹽害區)	● 海水中氯離子 、硫酸離子與鎂離子濃 度高 ，易引發混凝土化學劣化及鋼材鏽蝕。 ● 潮汐 、飛濺區及乾濕交替之極嚴重鹽害區內之鋼構腐蝕速率顯著提升。 ● 防蝕塗裝及陰極防蝕系統性能衰退，加速結構劣化。
捷運	高架橋梁	中性化環境(都市) 鹽害環境(臨海)	**腐蝕問題與鐵公橋梁類似**，可參考2.1節「國內橋梁防蝕設計案例」之內容。
	地下隧道		腐蝕問題同隧道設施，**臨海路段易受鹽害影響、地下隧道段以地下水滲漏為主、都市環境以中性化為主**。
機場	跑道	主要受荷載與疲勞影響，腐蝕非主要劣化因素。	
	航空站建築	中性化環境(都市) 鹽害環境(臨海)	● 機場之航站建築 、聯絡道橋梁及鋼構件 ，易受鹽害與大氣腐蝕影響。 ● 多屬局部性腐蝕，透過定期巡檢與修繕可有效控制。

建議可依循鐵公路橋梁研擬防蝕技術指引之方式，以確保提升設施的品質及壽齡與減少生命週期之維護成本。

三、鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討



混凝土橋耐久性設計規範

國家	規範	設計類型	環境分區		耐久性設計	
			環境類別	作用等級	設計年限	需求、查表項目或計算要件
美國	Bridge Design Specifications	查表	依環境、距海遠近、高程考量分為6區	無	75年	保護層厚度
	ACI 318-19(22)	查表	凍融、硫酸鹽、氯鹽、接觸水等4種類別	0~3	無	抗壓強度、水膠比
	ACI 365.1R -17	理論公式	無明定分級，但會依結構類型、曝露類型及地理位置分區，進行算之考量		無	保護層厚度、氯離子擴散係數
	Life-365™	理論公式	無環境分區，但強調設計應根據環境類型進行評估。		可任意設定	保護層厚度、氯離子擴散係數
歐洲	EN1992-1-1	查表	無腐蝕、中性化、非海水氯鹽、海洋氯化物凍融、化學侵蝕、機械磨損等7類	0~4	50、100年	保護層厚度、抗壓強度、水膠比、膠結料用量等
	BS 8500-1	查表				
	fib Bulletin 34	理論公式	無環境分區，但會根據腐蝕類型帶入相應模型計算		無	保護層厚度、氯離子傳輸係數
日本	道路橋示方書·混凝土橋編	查表	將日本分為三種地域再依海岸線距離分為S、I、II及III四種鹽害對策分區		100年	保護層厚度、氯離子擴散係數
	混凝土標準示方書·設計編	理論公式			100年為限	水膠比、膠結料、保護層、氯離子擴散係數
中國	GB/T 50476	查表	一般、凍融、海洋氯化物、其他氯化物、化學腐蝕環境等5類	6類(A~E)	30、50、100年	保護層厚度、抗壓強度、水膠比、氯離子傳輸係數
臺灣	公路橋梁設計規範	查表	一般環境與海洋環境2種	一般:2種 海洋:3種	50、100年	保護層厚度、抗壓強度、水膠比
	鐵路橋梁設計規範	查表				
	建築物混凝土結構設計規範	查表	凍融、硫酸鹽、與水接觸、鋼筋的腐蝕防護等4種	0~3	無	抗壓強度、水膠比、膠結料
	臺灣地區鹽害環境分區與本土化氯離子侵蝕耐久性分析模式	理論公式	環境分區等級依沿海距離分成3種、鹽害等級分區可分為甲區和乙區		可任意設定	保護層厚度、膠結料氯離子擴散係數

混凝土橋耐久性設計規範-理論公式規範探討

- 各國規範之服務年限計算公式

美國ACI 365.1R -17

$$t=\frac{\left(\frac{x}{erf^{-1}\left(1-\frac{C_{crit}}{C_0}\right)}\right)^2}{4\left(2.17\times10^{-12}e^{\frac{-\frac{w}{cm}}{-0.279}}\left[\frac{28^m\left(t^m+36500^m-28^m\right)}{(36500t)^m}\right]\right)}$$

歐盟fib Bulletin 34

$$t=\left(\frac{\left(\frac{C_{\min}-\Delta x_k}{2\times erfc^{-1}\left(\frac{C_{crit}-C_{0,k}}{\left(C_{S,\Delta x,k}\times\gamma_C-C_{0,k}\right)}\right)}\right)^2}{k_{e,k}D_{RCM,k}(t_0)\gamma_D t_0^{\frac{\alpha_k}{\gamma_\alpha}}}\right)^{\frac{1}{1-\frac{\alpha_k}{\gamma_\alpha}}}$$

日本混凝土標準示方書-設計編

$$t=\left(\frac{\left(\frac{0.1\times c_d}{2erf^{-1}\left(1-\frac{C_{crit}-C_i}{\gamma_i\gamma_{cl}C_0}\right)}\right)^2}{\gamma_c\gamma_k\gamma_p\beta_{cl}D_r}\right)^{\frac{1}{1-k_3}}$$

臺灣本土化耐久性分析模式

$$t=\frac{\left(\frac{x}{2\times erf^{-1}\left(1-\frac{C_{crit}-C_i}{(C_0-C_i)}\right)}\right)^2}{\beta_{cl}D_{ref}}-\frac{t_{ref}^{\,m}t_s^{\,1-m}}{1-m}+t_s$$

混凝土橋耐久性設計規範-理論公式規範探討

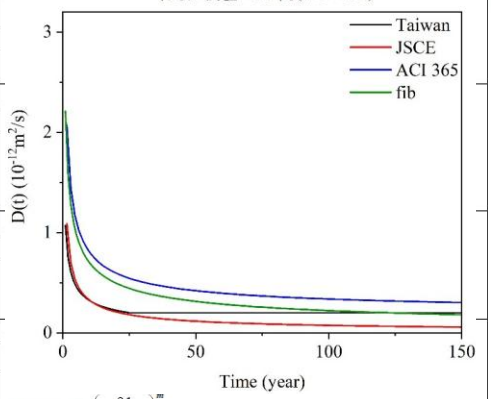
- 極嚴重鹽害區-數據模擬用相關設定條件

模擬環境：臨海(極嚴重鹽害區)

規範	氯離子濃度計算 (kg/m³)		計算公式出處或相關規範
美國 ACI 365	C_i(初始)	-	ACI 365 無計算初始氯離子濃度[13]
	C_0(表面)	0.8 wt.%concrete	ACI 365.1R-17 第 7.10 節[13]
	C_{lim}(臨界)	0.4 wt.% binder	ACI 365.1R-17 第 5.3.1 節[13]
歐盟 fib Bulletin 34	C_i(初始)	0.05wt.% binder	fib Bulletin 76 第 2.2.4.7 節[34]
	C_0(表面)	4 wt.% binder	fib Bulletin 76 表 2-6[34]
	C_{lim}(臨界)	0.6 wt.% binder	fib Bulletin 34 第 B2.2.6 節[20]
日本標準示方書	C_i(初始)	0.30	混凝土標準示方書 限制[35]
	C_0(表面)	13	表 3.15 飛沫帶數據[21, 22]
	C_{lim}(臨界)	$-2.6\left(\frac{W}{B}\right)+3.1$	式(3-23)低熱高爐水泥公式[22]
臺灣本土化模式	C_i(初始)	0.15	CNS 3090 新拌混凝土 規定[36]
	C_0(表面)	30	表 3.45 極嚴重鹽害區[27]
	C_{lim}(臨界)	同日本公式	式(3-23)低熱高爐水泥公式[22]

其餘相關參數(代號請參照 3.1 節各規範之部分)

耐久性模型之比較(W/B=0.4)



$$D(t)=D_{28}\cdot\left(\frac{91}{365\times t}\right)^m$$

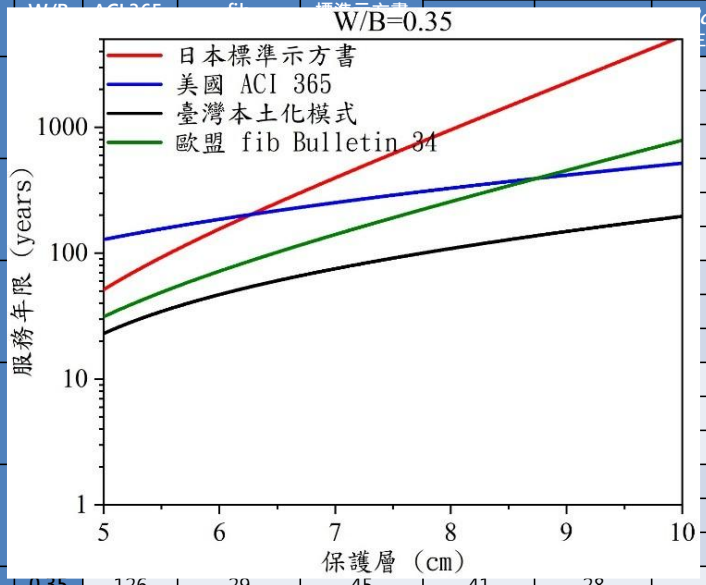
保護層厚度：10、7.5、6.5、6、5.5、5 cm (施工誤差：10mm)

配比 S35F15	卜作嵐摻料 爐石 35% 飛灰 15%	W/B	傳輸係數 (Unit：10^{-12} m²/s)	28 天	擴散係數 (Unit：10^{-12} m²/s)	91 天
		0.35		3.0		1.5
		0.45		4.0		2.2
		0.55		7.0		3.7

混凝土橋耐久性設計規範-理論公式規範探討

● 極嚴重鹽害區-不同保護層厚度之服務年限

混凝土條件		服務年限(年)					
保護層厚度(cm)	W/B	美國 ACI 365	歐盟 fib	日本 標準示方書	臺灣本土化模式		
							C_{cl} = 1.4 (主要構件)
10	0.35	126	29	45	41	28	190
	0.45	82	16	4	17	11	111
	0.55	54	5	0	5	3	49
7.5	0.35	71	16	25	23	16	91
	0.45	46	9	2	9	6	48
	0.55	30	3	0	3	2	16
6.5	0.35	54	12	19	17	12	60
	0.45	35	7	1	7	4	28
	0.55	23	2	0	2	1	8
6	0.35	40	9	14	13	9	46
	0.45	26	5	1	5	3	20
	0.55	17	1	0	2	1	6
5.5	0.35	30	7	10	10	7	33
	0.45	19	4	0	4	2	13
	0.55	13	1	0	1	1	4
5	0.35	126	29	45	41	28	22
	0.45	82	16	4	17	11	9
	0.55	54	5	0	5	3	2



鋼結構橋防蝕設計規範探討

	規範	內容及應用
防蝕設計	交通部「公路橋梁設計規範」 交通部「鐵路橋梁設計規範」	包括大氣腐蝕環境調查分類相關規定 (CNS 13401、13753、13754)、構件防蝕設計、防蝕方法等
	CNS 13401 (對應ISO 9223)	大氣腐蝕性分類、依標準金屬試片腐蝕速率作分類
	CNS 16238 (對應 ISO 9224)	用於標準結構材料的工程計算，規範各標準金屬級別的技術內涵
	日本道路協會 鋼道路橋防蝕便覽	共有五篇，各篇內容皆包含防蝕設計、施工、維護等內容
塗裝	CNS 16174 (對應ISO 12944)	共分為9部，主要內容為防蝕塗裝對鋼結構之防蝕與保護
	鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊	鋼橋防蝕塗裝作業各階段對應之作業流程項目與塗裝系統之選擇
熱浸鍍鋅	CNS 9 (對應ISO 752)	鋅錠之種類與化學成分
	CNS 1247 (對應ISO 1460)	鋼鐵及鋼鐵加工製品之熱浸鍍鋅層檢驗法
	CNS 4237 (對應ISO 10684)	螺紋鋼製結件的熱浸鍍鋅之材料、製程、尺度及性能要求
	CNS 8503	熱浸鍍鋅工法，包括底材處理、前處理、浸鍍與後處理與不良品之處裡
	CNS 10007 (對應ISO 1461)	鋼鐵及鋼鐵加工產品 (底材)為防蝕目的施以熱浸鍍鋅的有效面相關規定
	CNS 15257	鋼鐵配件、鋼構及鋼鐵加工製品的熱浸鍍鋅鍍層損傷及裸點修補
	鋼結構橋梁熱浸鍍鋅技術手冊	包含熱浸鍍鋅之設計、施工、品質檢驗與驗收
	ISO 14713	共分三部，包含防蝕設計與一般原則、熱浸鍍鋅與滲鋅
金屬熔射	CNS 7797 (對應ISO 2063)	熔射金屬層之塗層分類、製造規定、膜厚以及試驗方法等
	JIS H 8300	規範鋼鐵構造物表面以熔射方式施加鋅、鋁或其合金層之最小熔射層厚度
耐候鋼	CNS 4269	耐候性熱軋鋼料定之耐候性熱軋鋼料相關規定
	Uncoated Weathering Steel Reference Guide	美國鋼結構協會 (NSBA)對於無塗層耐候鋼 (UWS)製訂之參考指南，包含環境影響、結構設計、施工、檢驗、與維護之程序。

鋼結構橋防蝕設計規範探討-防蝕方法比較

● 各種防蝕方法比較

防蝕方法	塗裝		耐候性鋼材	熱浸鍍鋅	金屬熔射
	一般塗裝	重防蝕塗裝			
防蝕原理	塗膜隔離環境	塗膜隔離環境及富鋅塗料防蝕	緻密銹層降低腐蝕速度	鍍鋅層隔離環境及採用鋅防蝕	熔射層隔離環境及採用鋅 、鋁防蝕
劣化因子	紫外線、鹽分、水分（持續潮濕狀態）		鹽分、水分（持續潮濕狀態）		
防蝕材料	塗料		添加降低腐蝕速度的合金元素	鋅	鋅、鋁、鋅鋁
施工方法	噴塗、刷塗、滾塗		採用添加合金元素之鋼材	浸入鍍槽（鍍鋅工廠）	使用熱噴槍進行熔射
結構與施工限制	溫度、濕度等施工環境條件限制		積水、濕氣對策	積水、濕氣對策	熱噴槍操作限制
外觀(色彩)	色彩自由選擇		限定（茶褐色）	限定（灰白色）	限定（霧面銀白）
維護管理	檢查銹蝕 、塗膜消耗 、變色；塗膜劣化時重新塗裝		確認無異常銹形成，腐蝕進展時進行塗裝等防蝕	追蹤鋅層 ，鋅層消耗後進行塗裝等防蝕	對鋅 、鋁等熔射層進行後續檢查熔射層磨損後 ，透過金屬熔射或塗裝等進行防蝕
複合防蝕	-		與塗裝一起使用	與塗裝一起使用	與塗裝一起使用

四、不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議

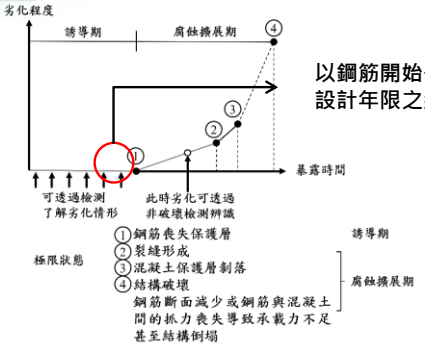


混凝土橋—防蝕設計

防蝕設計應具備的條件

1.可靠的防蝕性能
2.易於維護管理性
3.其他考量
(1)橋梁之設置環境
(2)各種相關防蝕技術及其耐久性
(3)使用年限內整體費用之評估

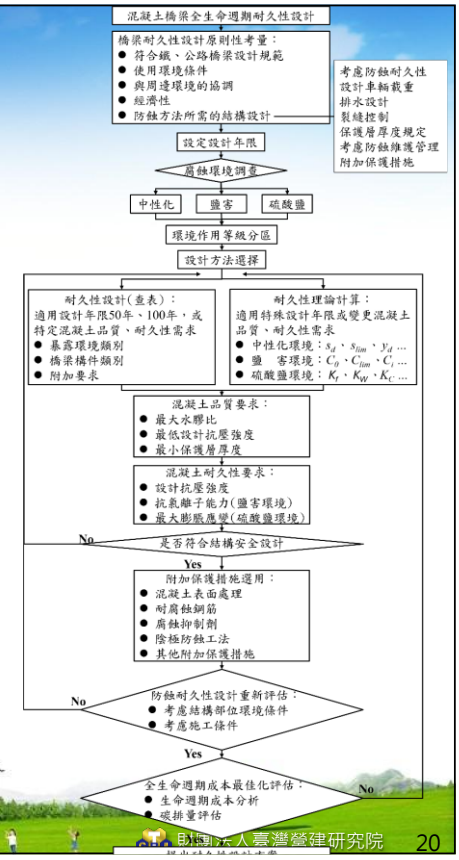
鋼筋腐蝕階段



以鋼筋開始去鈍化為設計年限之終點

設計年限

高速公路、重要公路、跨越重要設施之公路橋梁、城鎮之主要聯外公路橋梁或經主管機關認為必要者，設計年限不小於100年，其他公路橋梁，設計年限不小於50年；鐵路橋梁除主管機關另定需求，設計年限不小於100年。



混凝土橋—防蝕設計

● 設計原則

- 各構件所須防蝕要求依**暴露在腐蝕環境方式而有所不同**。
- 防蝕設計方法可概分為**基本方法**與**附加保護措施**。**基本防蝕**方法係從橋梁**結構設計及提昇混凝土品質**兩方面為著眼點。**附加保護措施**係指以外加手段方式來**提昇鋼筋抗腐蝕能力**。
- 防蝕方法**應先採基本方法，若腐蝕環境較為嚴重**，才進一步考慮**採行一種或多種附加保護措施**。
- 若是採用上述對策以外的方法時，則須對其防蝕效果和施工性有充足的調查試驗，並必須確認具有如同上述方法同等以上的性能。

● 混凝土耐久性設計的使用環境條件

- 掌握**橋址環境條件**，根據**環境作用等級**決定耐久性設計
- 有既有橋梁或構造物，有助耐久性設計與混凝土品質要求選定。
- 選定防蝕方法與規格時，需參考本指引第四章，謹慎考慮實際環境條件，判斷採用可行性。
- **影響防蝕環境條件的因素包含氣象與地理區域因素與結構因素**

● 經濟性

- **除建設費等初期投資外，還應考量檢測、維修等維護管理階段費用，追求整體生命週期成本最小化或整體考量之最佳。**
- 生命週期成本計算方法與評估期間目前無統一標準，**需依目的與比較內容選用適當方法**；評估期間最好使用橋梁設計時考慮的設計年限。
- 橋梁設計時考慮的**設計年限**通常是其耐久性的目標週期，**不代表達到設計年限後橋梁就無法繼續使用**，若期間能進行適當之維護管理，多數橋梁仍能在橋齡達設計年限後持續使用。

$$LCC = I + M + R$$

LCC：防蝕生命週期成本
I：防蝕初期成本
M：防蝕檢測、部分維修（維護管理）成本
R：防蝕全面維修與更新成本

混凝土橋—防蝕設計

考慮防蝕耐久性的細部設計	➢ 避免複雜的結構型式或多角型的構件；混凝土斷面保護層厚度應配合環境與施工條件 ➢ 斷面中性軸儘量靠近拉力緣，減少裂縫產生；接縫應避開易積水與應力較大之位置 ➢ 斷面外型應儘量平坦，避免腐蝕氣體聚集、斷面內外應避免有積水可能 ➢ 混凝土斷面保護層厚度應配合環境與施工條件 ➢ 其他防蝕設計之注意事項
設計車輛載重	**規劃階段確實調查**、預估、確認，依相關法規決定足夠之設計載重，**實際營運過嚴格執行管制維護**工作。
排水設計	**上部結構**應有適當**縱、橫坡**；**箱型梁**之任一箱室內之**最低點**必須有適當洩水孔、**避免箱梁內部積水與濕氣聚積**。
裂縫控制	相關的設計考量包括：**塑性收縮、熱應變收縮、乾燥收縮**。
保護層厚度規定	詳細可參考交通部「公路橋梁設計規範」與「鐵路橋梁設計規範」，不同腐蝕環境之保護層厚度規定與耐久性設計，參見本指引第四章。
可維護性設計	相關考量包括:**確保作業空間、設置維護管理設施、可更換構件、關鍵部位之檢測和維修考量。**
附屬設施的防蝕考量	➢ 附屬設施常是橋梁檢測發現腐蝕產生之位置，其防蝕措施亦應加以重視。 ➢ 包括**排水設施、導水設施、伸縮縫、胸牆、欄杆設施、維修通道設施**等。 ➢ 伸縮縫、支承構造在設計上，應考慮其週邊之淨空及洩水坡度等，避免附近易於堆積雜物，加速腐蝕。 ➢ **維修步道設施**目前不是一般橋梁設計上之標準設施，而考量未來橋梁檢測維修之需求，**應儘可能在橋梁設計階段進行考慮**。
附加保護措施	➢ 附加保護措施主要目的在於**增進結構物防蝕能力**，故若受限於保護層厚度之考量而欲以附加保護措施取而代之時，應審慎評估之，設計者不應以採用附加保護措施而減少保護層之厚度。 ➢ **本指引建議嚴重鹽害區建議採用至少一種附加保護措施，極嚴重鹽害區採用至少兩種附加保護措施**。

混凝土橋—腐蝕機理

鋼筋混凝土腐蝕劣化之機理與指標

劣化機理	劣化要因	劣化指標
中性化	二氧化碳	中性化深度 鋼筋腐蝕量
鹽害	氯離子	氯離子濃度 鋼筋腐蝕量
凍害	凍結溶解作用	凍害深度 鋼筋腐蝕量
化學的侵蝕	酸性物質 硫酸根離子	劣化因子滲透深度 中性化深度 鋼筋腐蝕量
鹼質與粒料反應	反應性粒料	膨脹量
橋面板疲勞	大型車通行量	開裂量

中性化作用

$$H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$$
$$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

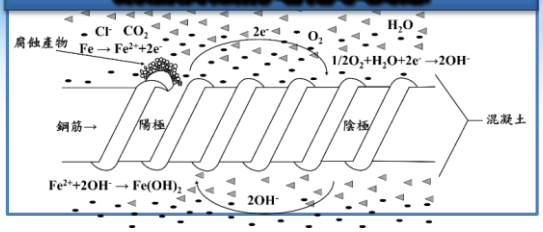
氯離子腐蝕反應

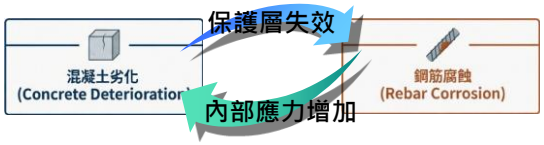
$$2Fe + 6Cl^- \rightarrow 2FeCl_3^- + 4e^-$$
$$FeCl_3^- + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 3Cl^-$$
$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3$$

硫酸鹽侵蝕反應

$$SO_4^{2-}(\text{液}) \xrightarrow{\text{透過滲透}} SO_4^{2-}(\text{水泥})$$
$$Ca(OH)_2 \xrightarrow{\text{透過溶解}} Ca^{2+} + 2(OH)^-$$
$$SO_4^{2-} + Ca^{2+} + 2H_2O \xrightarrow{\text{析晶}} CaSO_4 \cdot 2H_2C$$
$$C_3A \cdot C\bar{S} \cdot H_{12} + 2C\bar{S}H_{12} + 16H \rightarrow C_3A \cdot 3C\bar{S} \cdot 32H$$

鋼筋腐蝕的電化學反應





碳酸會與氫氧化鈣發生**中和作用**，導致混凝土的**鹼性下降**。在**pH值降到9以下**時，鋼筋表面的**鈍化膜會失去保護而產生破壞**。

混凝土由於外界鹽分侵入或使用含鹽材料，使**鋼筋表面氯離子含量超過臨界氯離子濃度時，鋼筋表面的鈍化膜便會遭破壞**而產生腐蝕。

硫酸根離子進入混凝土後與水泥水化所生成的自由氫氧化鈣反應，形成**硫酸鈣（石膏）**，進一步與「**單硫型鋁酸鈣水化物**」化合，形成俱有膨脹性破壞能力之**硫鋁酸鈣（鈣礬石）**。

混凝土橋—中性化環境

● 查表-「公路橋梁設計規範」與「鐵路橋梁設計規範」

作用等級	環境條件	結構構件示例
I	非乾濕交替環境	箱梁內部
II	乾濕交替環境	柱、橋台、版、「I」「T」梁、箱梁外露面等

設計年限 / 環境作用等級	50年		100年	
	最大水膠比	最小保護層厚度(cm)	最大水膠比	最小保護層厚度(cm)
I	0.50	3.0	0.50	3.5
	0.45	2.5	0.45	3.0
II	0.50	4.0	0.45	4.5
	0.45	3.5	0.40	4.0
	0.40	3.0	0.35	3.5

● 理論公式-日本土木學會「混凝土標準示方書-設計編」

(確認該式成立) $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \le 1.0$

↓

(計算臨界值) $y_{lim} = c - \Delta c_e - c_k$

$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \cdot \sqrt{t}$

$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$

$\alpha_k = \gamma_k \cdot \gamma_p \alpha_p$ ↓ $\alpha_k = -3.57 + 9.0\frac{W}{B}$

$\alpha_p = a + b \cdot \frac{W}{B}$ $B = C_p + k \cdot A_d$

(利用實驗數據) (利用經驗式)

γ_i：結構物係數

y_d：中性化深度之設計值(mm)

y_{lim}：鋼筋腐蝕之極限深度

c_d：保護層厚度設計值(mm)

c：保護層(mm)。

Δc_e：保護層施工誤差(mm)。

c_k：中性化殘餘深度(mm)

γ_{cb}：中性化深度設計值之安全係數。

α_d：中性化速度係數之設計值(mm/$\sqrt{\text{year}}$)。

t：設計年限(年)，以100年為上限。

α_k：中性化速度係數之特性值(mm/$\sqrt{\text{year}}$)。

β_e：表示環境作用係數

γ_c：混凝土材料係數

γ_k：特性值設定之安全係數

γ_p：考量材料特性預測精度之安全係數

α_p：中性化速度係數之預測值。

a、b：依膠結材種類決定之係數。

W/B：有效水膠比。

B：單位體積有效結合材質量。

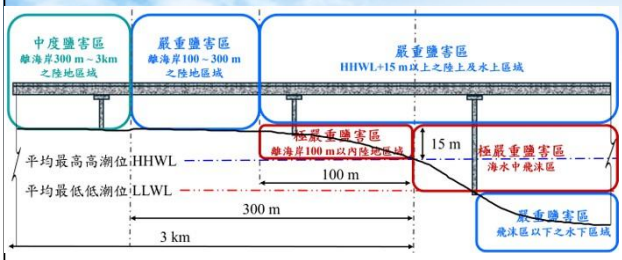
C_p：單位體積波特蘭水泥質量。

A_d：單位體積摻料質量。

k：依摻料種類決定之常數。

混凝土橋—鹽害環境

● 查表-環境作用等級與分區建議



	分區範圍
極嚴重鹽害區	➢ 海水中飛沫區：平均最低低潮位(LLWL)以上至平均最高高潮位(HHWL)+15公尺以下之水上區域 ➢ 離海岸線100公尺以內之陸地區域
嚴重鹽害區	➢ 平均最高高潮位+15公尺以上之陸上及水上區域 ➢ 離海岸線100公尺至300公尺以內之陸地區域 ➢ 海水中飛沫區以下之水下區域
中度鹽害區	➢ 離海岸線300公尺至3公里以內之陸地區域

● 保護層與混凝土材料之規定

設計年限 / 環境作用等級 / 橋梁部位	50年			100年		
	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
基礎、基樁	10	10	10	10	10	10
柱、牆	10	9	7.5	10	10	8
橋面版頂層筋	6.5	6	5	7.5	7	6
橋面版下層筋	6.5	6	5	7.5	7	6
箱梁底層筋	6.5	6	5	7.5	7	6
「I」「T」梁、箱梁腹版外露面	6.5	6	5	7.5	7	6
混凝土面未直接曝露於大氣、未與土壤或水接觸	4	4	4	4	4	4

單位：cm

混凝土材料規定	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
最大水膠比	0.4	0.4	0.45
最低抗壓強度 (kgf/cm²)	350	350	280

設計年限 / 環境作用等級 / 抗氯離子能力	50年			100年		
	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
91天貯鹽試驗擴散係數	≤1.6	≤1.8	≤1.8	≤1.4	≤1.4	≤1.6
56天RCM試驗傳輸係數	≤4.0	≤4.5	≤4.5	≤3.5	≤3.5	≤4.0
28天RCM試驗傳輸係數	≤6.5	≤7.0	≤7.0	≤5.5	≤5.5	≤6.5

單位：(10^{-12}m²/s)

混凝土橋—鹽害環境

● 理論公式-「本土化鹽害耐久性分析模式」

$$C(x,t)=C_i+(C_0-C_i)\left(1-erf\frac{x}{2\sqrt{2Dt}}\right)$$

$$D(t)=D_{ref}\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m$$

$$m=0.2+0.4\left(\frac{FA\%}{50}+\frac{SG\%}{70}\right)$$

$$T=\int_0^t D(t)\,dt=\int_0^{t_s} D_{ref}\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m dt+\int_{t_s}^{t} D_{ref}\left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m dt$$

$$=D_{ref}\left[\frac{t_{ref}^{\,m}t_s^{\,1-m}}{1-m}+\left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m(t-t_s)\right]$$

$$C_t\ge C_i+(C_0-C_i)\left(1-erf\frac{x_d-\Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl}D_{ref}\left[\frac{t_{ref}^{\,m}t_s^{\,1-m}}{1-m}+\left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m(t-t_s)\right]}}\right)$$

$$T=D_{ref}\left[\frac{t_{ref}^{\,m}t_s^{\,1-m}}{1-m}\right]$$

若計算結果<25年
需重新計算

$$C_t\ge C_i+(C_0-C_i)\left(1-erf\frac{x_d-\Delta x}{2\sqrt{\beta_{cl}D_{ref}\left[\frac{t_{ref}^{\,m}t_s^{\,1-m}}{1-m}\right]}}\right)$$

其中：

C_i：混凝土初始氯離子濃度(kg/m)，參見CNS 3090規定。

C_0：混凝土表面氯離子濃度(kg/m³)。

C_t：鋼筋腐蝕臨界氯離子濃度(kg/m³)，參考日本「混凝土標準示方書-設計編」。

x：保護層厚度(cm)。

x_d：耐久性要求之最小保護層厚度(cm)。

Δx：保護層施工誤差(cm)。

t：氯離子侵入之時間(年)。

t_s：混凝土氯離子擴散係數不再遞減之時間(年)，取25年。

β_{cl}：考量混凝土瑕疵及裂縫影響的係數，主要構件可為1.4、次要構件為1.25。

D_{ref}：混凝土氯任一參考時間之擴散係數。

t_{ref}：D_{ref}對應之參考時間，取90天。

m：經驗係數，與卜作嵐摻料添加量有關，如(4-15)。

FA：飛灰添加百分比。

SG：爐石粉添加百分比。

作用等級	混凝土表面氯離子濃度C_0 (kg/m^3)
極嚴重鹽害區	20 ~ 30
嚴重鹽害區	10 ~ 20
中度鹽害區	4 ~ 10

普通卜特蘭水泥	C_t=-3.0$\left(\frac{W}{C}\right)$+3.4
混合水泥(爐石粉、飛灰)	C_t=-2.6$\left(\frac{W}{C}\right)$+3.1
低熱高爐水泥，早強卜特蘭水泥	C_t=-2.2$\left(\frac{W}{C}\right)$+2.6
矽灰水泥	C_t=1.2

混凝土橋—硫酸鹽環境

● 查表-「建築物混凝土結構設計規範」及ACI 318-19(22)

類別	分級	混凝土之環境條件	
		土壤中之水溶性硫酸鹽(SO_4^{2-})，質量%	水中溶解之硫酸鹽(SO_4^{2-})，ppm
硫酸鹽(S)	S0	SO_4^{2-}<0.10	SO_4^{2-}<150
	S1	0.10≤SO_4^{2-}<0.20	150≤SO_4^{2-}<1,500 或海水
	S2	0.20≤SO_4^{2-}≤2.00	1,500≤SO_4^{2-}≤10,000
	S3	SO_4^{2-}>2.00	SO_4^{2-}>10,000

暴露等級		最大膨脹應變(符合CNS 14794測試規定)，%		
		(6個月)	(12個月)	(18個月)
S1		0.10	NA	NA
S2		0.05	0.10[1]	NA
S3	選項1	NA	NA	0.10
	選項2	0.05	0.10[1]	NA

[1]12個月膨脹率限制要求只有在量得的膨脹率超過6個月時的最大膨脹率限制，

暴露等級		最大w/cm	最小kgf/cm² [MPa]	膠結材料[1]種類		
				CNS 61	CNS 15286	氯化鈣摻料
S0		NA	210[21]	無限制	無限制	無限制
S1		0.50	280[28]	II型	含(MS)標記之分類	無限制
S2		0.45	315[31]	V型	含(HS)標記之分類	不允許
S3	選項1	0.45	315[31]	V型加卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉	含(HS)標記之分類加卜作嵐材料或水淬高爐爐碴粉	不允許
	選項2	0.40	350[35]	V型	含(HS)標記之分類	不允許

● 理論公式-混凝土硫酸鹽侵蝕強度劣化係數

參考文獻	所需輸入的參數	說明
隧道襯砌混凝土對硫酸鹽侵蝕耐久壽命預測模型研究(2014)[38]	①混凝土強度劣化係數 ②混凝土水膠比 ③環境中硫酸根離子濃度 ④卜作嵐摻料添加比例 ⑤養護法 ⑥時間	較著重混凝土基本性質的不同對硫酸鹽侵蝕強度劣化的影響。

不需輸入硫酸根離子在混凝土中之擴散係數即可計算
(國際上並沒有標準之試驗規範)

$$K_f=K_W\cdot K_C\cdot K_F\cdot K_M\cdot K_S\cdot K_Y\cdot e^{-0.003t}$$

$$t=\frac{\ln\left(\frac{K_W K_C K_F K_M K_S K}{0.75}\right)}{0.003}$$

$$K_W=-2.30117W+1.97009$$

$$K_C=-0.00018C^3+0.00446C^2-0.004632C+1$$

$$K_F=e^{\left(-0.00052F^2+0.02350F\right)}$$

$$K_M=-0.00023M^2+0.01116M+1$$

$$K_S=-0.00005S^4+0.00029S^3+0.00746S^2-0.03561S+1$$

K_f：混凝土硫酸鹽侵蝕強度劣化係數。
K_W：水膠比影響係數。
K_C：硫酸鹽濃度影響係數。
K_F：飛灰摻量影響係數。
K_M：爐石摻量影響係數。
K_S：矽灰摻量影響係數。
K_Y：養護方法影響係數。

t：使用年限
W/B：水膠比
C：硫酸鹽溶液質量濃度(%)
F：飛灰摻量(%)
M：爐石粉摻量(%)
S：矽灰摻量(%)

混凝土橋—附加保護措施

混凝土表面防護

滲透式密封劑
可用塗刷、滾輪、刮板或噴灑方式在混凝土基底上施作，抗紫外線及抗磨蝕較好。

表面密封劑
鋪或黏附於混凝土表面，無法封閉活動裂縫，但可有效填滿小的靜止裂縫。

表面應用之腐蝕抑制劑
生產商應提供完整的資料，包括類型、使用方式、使用頻率、限制因素、預期效果、監測方法等。

厚塗塗料
厚塗塗料會改變混凝土表面的外觀，可外加顏料，而且能部分地掩蓋混凝土的表面瑕疵。

薄膜
通常使用於保護、防水、交通或人行系統，某些配方可適用在防潮的系統。

被覆層
包含:不黏著或部分黏著系統 、黏著的水泥混凝土被覆層 、LMC被覆層、 PC被覆層等

耐腐蝕鋼筋

■ **環氧樹脂鋼筋**
國內外標準與規定：
ASTM A934、ASTM A775、ISO 14654、JSCE-E 102、交通部「公路橋梁設計規範」與「鐵路橋梁設計規範」。
品質檢驗要求：
塗裝目的與功能、表面處理要求、環氧膠敷層要求、相關標準要求(ASTM A934、ASTM A775、ISO 14654等

■ **熱浸鍍鋅鋼筋**
國內外標準與規定：
CNS 14771 、ASTM A767/A767M
若有損傷與瑕疵，依CNS 15257修補、形狀、尺度、質量及誤差依 CNS 560規定
品質檢驗要求：
鍍鋅層外觀、品質、附著性與損傷容許度、加工前後規範、檢驗方式與判定、標示要求

■ **不銹鋼鋼筋：**氯化物極限濃度最高，耐腐蝕性能最為優異，但費用昂貴，且延展性加以注意。

■ **不銹鋼包覆鋼筋：**比不銹鋼鋼筋便宜、材料性能良好時壽命預期值高，但降服強度可能變小

■ **纖維增強聚合物鋼筋：**具有電化學惰性和對氯化物污染混凝土的抗腐蝕的能力，但設計者應考慮長期殘餘強度。

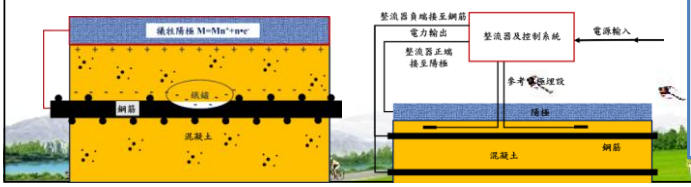
混凝土橋—附加保護措施

腐蝕抑制劑

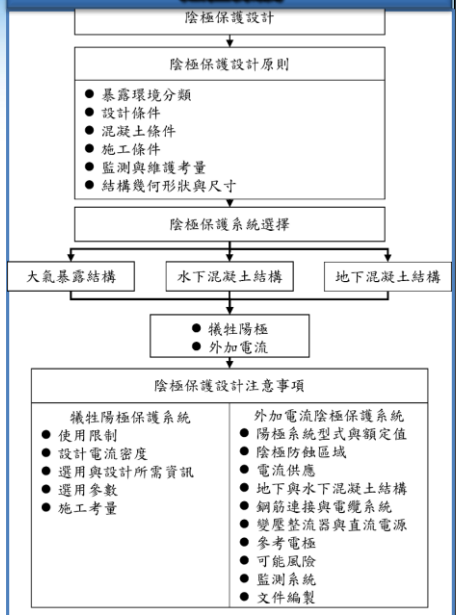
可防止或降低混凝土中鋼材腐蝕 ，其可經由**穩定鈍態膜**或**形成不可溶的保護層** (如添加鉻酸鹽 、磷酸鹽等)的方式抑止陽極反應或經由**擷取氧分子抑止陰極反應**(如添加亞硝酸鹽、安息酸鹽、亞鐵鹽及二價錫鹽等)。但有些抑制劑會影響輸氣劑的使用量及降低混凝土的抗壓、抗彎強度。

CNS 12456 鋼筋混凝土用防銹劑

試驗項目	規定			試驗方法
鋼筋之浸鹽水試驗	不得有銹蝕現象			CNS 12457第3.1節
混凝土中之鋼筋加速銹蝕試驗	防銹率95%以上			CNS 12457第3.2節
混凝土之凝結時間及抗壓強度試驗	凝結時間差異	初凝	±60分以內	CNS 12457第3.3節
		終凝		
	抗壓強度比	齡期 7天	0.90以上	
		齡期 28天		



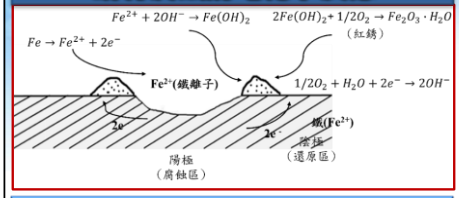
陰極保護



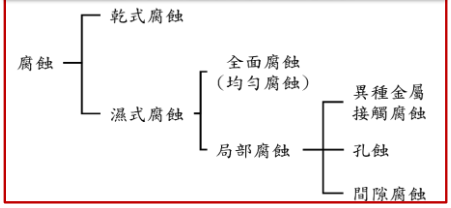
執行陰極保護系統之設計、安裝監督、試運轉、操作監督、量測、監測及維護監督等人員，**應具有EN 15257、NACE陰極保護訓練及驗證課程、AMPP認證陰極防蝕專家 (Cathodic Protection Specialist level4)**或任何其他同等方案之驗證。

鋼橋—腐蝕機理

鋼材腐蝕的電化學反應



鋼橋典型的腐蝕分類



大氣腐蝕性分類 (CNS 13401, ISO 9223)

分類	腐蝕性
C1	非常低
C2	低
C3	中等
C4	高
C5	非常高
CX	極端

各種標準金屬在不同分類之大氣腐蝕性第一年曝露的腐蝕速率(r_{corr})(CNS 13401)

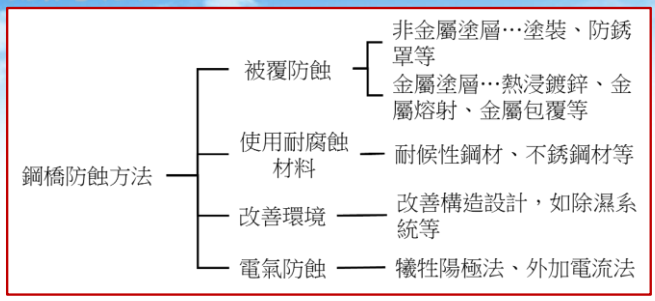
腐蝕性分類	單位	金屬的腐蝕速率 碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	g/(m²·a)	$r_{corr} \le 10$	$r_{corr} \le 0.7$	$r_{corr} \le 0.9$	-
	μm/a	$r_{corr} \le 1.3$	$r_{corr} \le 0.1$	$r_{corr} \le 0.1$	-
C2	g/(m²·a)	$10 < r_{corr} \le 200$	$0.7 < r_{corr} \le 5$	$0.9 < r_{corr} \le 5$	$r_{corr} \le 0.6$
	μm/a	$1.3 < r_{corr} \le 25$	$0.1 < r_{corr} \le 0.7$	$0.1 < r_{corr} \le 0.6$	-
C3	g/(m²·a)	$200 < r_{corr} \le 400$	$5 < r_{corr} \le 15$	$5 < r_{corr} \le 12$	$0.6 < r_{corr} \le 2$
	μm/a	$25 < r_{corr} \le 50$	$0.7 < r_{corr} \le 2.1$	$0.6 < r_{corr} \le 1.3$	-
C4	g/(m²·a)	$400 < r_{corr} \le 650$	$15 < r_{corr} \le 30$	$12 < r_{corr} \le 25$	$2 < r_{corr} \le 5$
	μm/a	$50 < r_{corr} \le 80$	$2.1 < r_{corr} \le 4.2$	$1.3 < r_{corr} \le 2.8$	-
C5	g/(m²·a)	$650 < r_{corr} \le 1500$	$30 < r_{corr} \le 60$	$25 < r_{corr} \le 50$	$5 < r_{corr} \le 10$
	μm/a	$80 < r_{corr} \le 200$	$4.2 < r_{corr} \le 8.4$	$2.8 < r_{corr} \le 5.6$	-
CX	g/(m²·a)	$1500 < r_{corr} \le 5500$	$60 < r_{corr} \le 180$	$50 < r_{corr} \le 90$	$10 < r_{corr}$
	μm/a	$200 < r_{corr} \le 700$	$8.4 < r_{corr} \le 25$	$5.6 < r_{corr} \le 10$	-

腐蝕促進因子與地理、地形及結構因素

腐蝕因子	水、氧氣	
腐蝕促進因子	日照、氣溫、鹽分 汽車廢氣、工廠排放物、火山氣體...局部性酸雨...近年影響受關注	
地理與地形因素	鹽	風向、風速、遮蔽物及類型、距海岸距離 融雪劑散布
	水	封閉空間（建築物包圍的都市、樹木包圍的山區等等）
	其他（局部因素）	交通量大的路線（周圍有建築物容易積聚腐蝕物質） 工業區、火山區、飛砂
結構因素	鹽	降雨沖刷作用 與融雪劑散布路線平行的橋梁 含融雪劑的漏水（大梁端部、伸縮裝置、排水裝置、橋面板裂縫等）
	水	漏水（伸縮裝置、排水裝置、橋面板裂縫等） 積水（排水坡度、排水孔、扇形孔等） 大梁端部等封閉部位 塵埃（支承周邊、桁架或拱的節點部位等） 大梁下方空間不足

財團法人臺灣營建研究院

鋼橋—防蝕方法



防蝕方法	塗裝 一般塗裝	塗裝 重防蝕塗裝	耐候性鋼材	熱浸鍍鋅	金屬熔射
防蝕原理	塗膜隔離環境	塗膜隔離環境及富鋅塗料防蝕	緻密銹層降低腐蝕速度	鍍鋅層隔離環境及採用鋅防蝕	熔射層隔離環境及採用鋅、鋁防蝕
劣化因子	紫外線、鹽分、水分（持續潮濕狀態）		鹽分、水分（持續潮濕狀態）		
防蝕材料	塗料		添加降低腐蝕速度的合金元素	鋅	鋅、鋁、鋅鋁
施工方法	噴塗、刷塗、滾塗		採用添加合金元素之鋼材	浸入鍍槽（鍍鋅工廠）	使用熱噴槍進行熔射
結構與施工限制	溫度、濕度等施工環境條件限制		積水、濕氣對策	積水、濕氣對策	熱噴槍操作限制
外觀（色彩）	色彩自由選擇		限定（茶褐色）	限定（灰白色）	限定（霧面銀白）
維護管理	檢查銹蝕、塗膜消耗、變色；塗膜劣化時重新塗裝		確認無異常銹形成，腐蝕進展時進行塗裝等防蝕	追蹤鋅層，鋅層消耗後進行塗裝等防蝕	對鋅、鋁等熔射層進行後續檢查。熔射層磨損後，透過金屬熔射或塗裝等進行防蝕
複合防蝕	-		與塗裝一起使用	與塗裝一起使用	與塗裝一起使用

鋼橋—塗裝

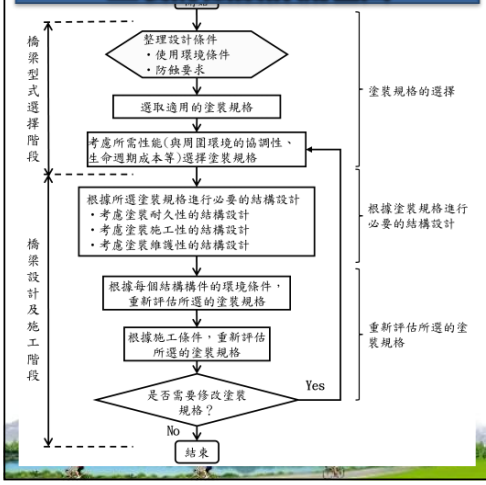
1.塗裝防蝕
2.塗料的功能
3.塗膜劣化
4.設計流程
5.塗料
6.結構設計注意事項

不同塗料間之相容性

底塗塗料 \ 上塗塗料	醇酸樹脂塗料	氯化橡膠樹脂塗料	聚氨乙烯樹脂塗料	環氧樹脂塗料	無機鋅粉底漆	無機鋅粉預塗底漆	苯酚樹脂塗料	硝化纖維塗料	聚胺酯塗料	氟碳樹脂塗料
醇酸樹脂塗料	○	△	×	×	×	×	△	×	×	×
氯化橡膠樹脂塗料	○	○	△	×	×	×	○	×	×	×
聚氨乙烯樹脂塗料	○	○	○	×	×	×	△	×	×	×
環氧樹脂塗料	△	△	○	○	×	×	△	×	○	○
無機鋅粉底漆	×	○	○	○	×	×	△	×	○	○
無機鋅粉預塗底漆	×	○	○	○	×	×	△	×	○	○
苯酚樹脂塗料	○	○	×	×	×	×	○	×	×	×
硝化纖維塗料	△	△	△	△	×	×	△	○	×	×
聚胺酯塗料	△	△	△	○	×	×	△	×	○	○
氟碳樹脂塗料	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○

備考：相容性符號表示，○佳；△普通；×差(不得使用)。

塗裝防蝕設計流程圖



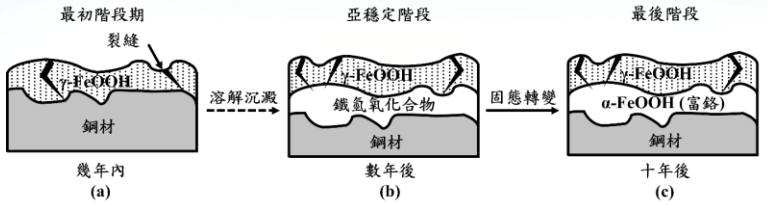
色彩設計時對景觀與居民的考慮事項

景觀考慮事項	居民考慮事項
1.反映地區特徵的色彩 2.區域功能的色彩 3.自然條件的色彩	1.公共利益的色彩 2.美麗和諧的色彩 3.利用標示的色彩 4.與材質和形狀相符的色彩 5.安全性的色彩

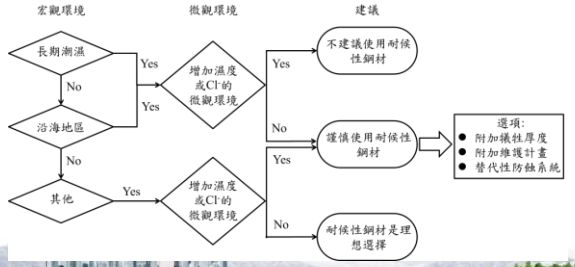
鋼橋—耐候性鋼材

1.防蝕的原理
2.設計理念
3.防蝕設計
4.適用環境
5.使用材料
6.防蝕規格
7.複合系統

耐候性鋼材緻密氧化層的生成機制



基於宏觀和微觀環境的耐候性鋼材使用總體概念



耐候性鋼作為鋼橋防蝕方法之設計流程

程序	內容
環境條件的確認	確認建設地點的環境是否適於耐候性鋼材。
使用材料的選定	選定適當的鋼材、焊接材料、高強度螺栓。
對景觀的考量	確認耐候性鋼材特有的暗褐色與環境協調，並檢討銹汁等外觀是否需特別處理。
細部結構的處理	進行有利於防蝕的細部結構設計。
製作・架設條件確認	確認採用有利於防蝕與外觀的製作法與架設法。
維持管理方法的提示	提示點檢・診斷、維持・管理的辦法。

鋼橋—熱浸鍍鋅

1.防蝕的原理
2.防蝕設計
3.適用環境
4.使用材料
5.防蝕規格
6.複合系統
7.景觀的考量
8.結構設計注意事項

複合系統(ISO 14013-1)

- **熱浸鍍鋅層加有機塗裝系統的總壽命，通常顯著大於熱浸鍍鋅層和有機保護塗層壽命的總和。**兩者之間存在協同效應，即鍍鋅層的存在可以減少漆膜的銹蝕；而有機塗層則可以保護熱浸鍍鋅層免受早期腐蝕。如果希望保留一層較為完整的漆層作為維護的基礎，則初始塗覆的塗裝系統應具有相當的厚度。
- **維護通常發生在熱浸鍍鋅層失去外觀或老化時。**熱浸鍍鋅層的老化通常比油漆慢。因此，鍍鋅層建議使用20年或更長時間直至首次維護；而同樣的熱浸鍍鋅層，如果塗有油漆，出於外觀考慮，建議使用時間僅為10年直至首次維護。還應注意，老化的油漆區域會吸收水分，從而加速金屬腐蝕，尤其是在未被雨水沖刷的表面。

600/7.2
=83.3

熱浸鍍鋅系統在不同腐蝕性級別中的首次維護壽命（ISO 14713-1)

系統	參考標準	最小厚度（μm）	選定腐蝕性級別（ISO 9223）首次維護壽命最小/最大（年）及耐久性等級（VL, L, M, H, VH）							
			C3		C4		C5		CX	
熱浸鍍鋅	ISO 1461	85	40 />100	VH	20 /40	VH	10 /20	H	3 / 10	M
		140	67 />100	VH	33 / 67	VH	17 / 33	VH	6 / 17	H
		200	95 />100	VH	48 / 95	VH	24 / 48	VH	8 / 24	H

備考：壽命數字已四捨五入到整數。耐久性等級的分配基於計算的首次維護壽命的最小和最大值的平均值例如，85μm熱浸鍍鋅層在腐蝕性類別 C4（鋅的腐蝕速率在2.1μm/年至4.2μm/年之間），預期耐久性為85/2.1=40.476年（四捨五入為 40年）和85/4.2=20.238年（四捨五入為 20年）。平均耐久性為(20+40)/2=30年（指定為 “VH” ）。

鋼橋—金屬熔射

1.金屬熔射的防蝕原理
2.防蝕設計的理念
3.防蝕設計
4.適用環境
5.使用材料
6.防蝕規格
7.景觀考量
8.結構設計注意事項

防蝕設計考量

- 確認橋址環境的**鹽分環境**適用於金屬熔射層的防蝕，且能獲得所需的防蝕效果。
- 確認製作構件的**狹窄部位少**，結構能確保良好施工品質。若完工後狹窄部位較多，需確認不會影響後續維護管理。
- 確保**高強度螺栓的防蝕規格考慮金屬熔射**，並符合所需接合性能。需**使用熱浸鍍鋅層高強度螺栓**，或可更換為熱浸鍍鋅高強度螺栓。只要高強度螺栓本體可進行表面處理及熔射施工，並能生成規定金屬熔射層，則不在此限。
- 確認是否因等需對熔射施工面進行著色或特定外觀的要求事項。**景觀考量**
- 若為**現場施工**，需確認表面處理及熔射能適當進行。

金屬熔射規格

表面處理	噴砂處理，清潔度ISO 8501-1 Sa 2½以上 表面粗糙度Rz 50 μm以上(或粗面化處理Rz 50 μm以上) 透過噴砂處理等去除附著油分、水分、塵埃等，形成清淨表面
金屬熔射	最小熔射層厚度100 μm以上
封孔處理	封孔劑或油漆塗裝
適用場所	一般都市及田園環境中腐蝕促進因子(鹽分、藥品類、塵埃)附著少的場所
備註	飛來鹽分多的場所易產生白銹

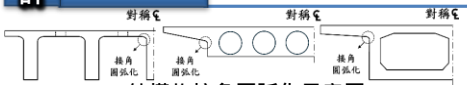
五、防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例

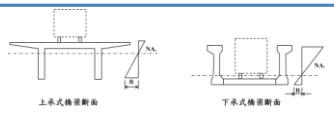


混凝土橋—結構設計、耐久性試驗

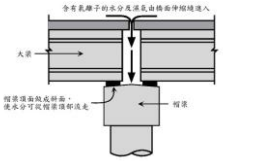
考慮防蝕的結構設計

考慮防蝕耐久性的細部設計	➢ 避免複雜的結構型式或多角型的構件；混凝土斷面保護層厚度應配合環境與施工條件 ➢ 斷面中性軸儘量靠近拉力緣，減少裂縫產生；接縫應避開易積水與應力較大之位置 ➢ 斷面外型應儘量平坦，避免腐蝕氣體聚集、斷面內外應避免有積水可能 ➢ 混凝土斷面保護層厚度應配合環境與施工條件 ➢ 其他防蝕設計之注意事項
設計車輛載重	**規劃階段確實調查**、預估、確認，依相關法規決定足夠之設計載重，**實際營運過嚴格執行管制維護**工作。
排水設計	**上部結構**應有適當**縱、橫坡**；**箱型梁**之任一箱室內之**最低點**必須有適當洩水孔、**避免箱梁內部積水與濕氣聚積**。
裂縫控制	相關的設計考量包括：**塑性收縮、熱應變收縮、乾燥收縮**。





上承式與下承式斷面比較

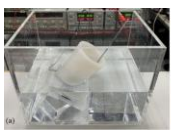


帽梁頂部排水設計施作示意圖

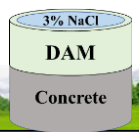
耐久性試驗

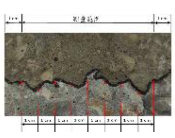
測定項目	試驗標準
中性化深度	RILEM CPC-18
	BS EN 14630
硫酸鹽侵蝕	CNS 14794
	ASTM C1012
快速氯離子滲透	CNS 14795
	AASHTO T277
快速氯離子傳輸	NT Build 492
貯鹽試驗	CNS 15649
	AASHTO T259
	ASTM C1543













混凝土橋—材料、施工、品質管制

材料
1. 混凝土
2. 粒料
3. 輔助膠結材料
4. 拌合用水
5. 摻料
6. 腐蝕抑制劑(防銹劑)
7. 鋼筋
8. 預力鋼腱
9. 錨定器及續接器
10. 套管
11. 灌漿材料
12. 黏接劑
13. 新材料
14. 材料儲存

施工
1. 施工計畫
2. 模板工程
3. 鋼筋
4. 預力鋼腱
5. 埋設物
6. 混凝土施工
7. 後續施工部位之處理
8. 陰極保護工法

品質管制
1. 基本檢查
   (1)一般規定
   (2)進料檢查
   (3)施工檢查
   (4)完成後檢查
2. 混凝土抗氯離子性能
   (1)試驗方法
   (2)混凝土抗氯離子性能的檢驗與驗收
   (3)不合格之研判及處理
3. 陰極保護系統檢查
   (1)犧牲陽極保護系統
   (2)外加電流陰極保護系統

保護層厚度

施工前
混凝土澆灌前，**應按每[10][ ] m^2一點檢測鋼筋保護層的厚度，其正偏差不應大於10 mm，且不得有負偏差，檢測不合格時應立即進行校正。**

施工後
- 同類型構件抽取總數10%，且不少於10個。每構件選擇3處進行檢測，**構件體積大於[1000][ ] m^3時，每[1000][ ] m^3增加1處，所餘數量未足[1000][ ] m^3但超過[300][ ]m^3時再增加1處。**
- 保護層厚度檢測結果**最小值低於設計值5 mm或最大值高於設計值18 mm時，判定為不合格。**

抗氯離子性能

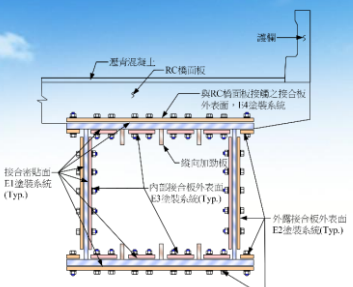
檢驗驗收
- 同一配比每累計澆築**[1000][ ] m^3隨機取樣1組，所餘數量超過[300][ ] m^3時應增加1組。**
- 每組包含28天和56天兩個齡期六個試體，**以28天混凝土的氯離子傳輸係數作為品質控制標準**，以**56天混凝土的氯離子傳輸係數作為評定合格與否之依據**，同一組試體製作時試樣應取自同一混凝土運輸車之混凝土。

不合格
- **任一驗收批試驗結果超過合格統計標準時，代表該驗收批取樣頻率的混凝土數量為不合格。**
- 如**對試驗結果懷疑時得要求辦理鑽心試驗**，取樣時機最晚**不得超過規定齡期14天**。其試驗方法**依CNS 1238辦理**，鑽心試體直徑為100 mm，長度至少50 mm。每一混凝土可疑處應取3個代表性試體。鑽心試體之氯離子傳輸係數試驗結果大於耐久性設計要求之上限時，代表混凝土不合格。

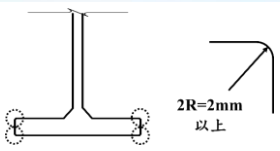
3

鋼橋—塗裝

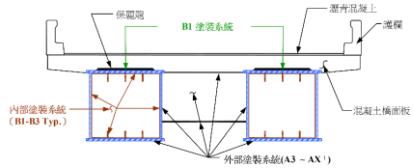
1.塗裝系統施工圖說案例
2.製作及施工注意事項
3.新設塗裝施工
4.施工及品質管理



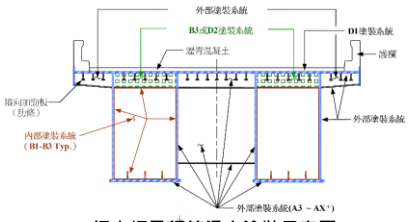
螺栓接合部塗裝系統示意圖



角部曲面形式示意圖



含混凝土橋面板鋼橋之塗裝示意圖



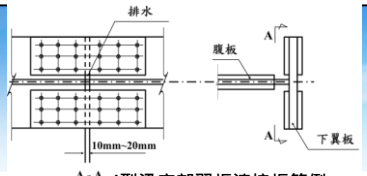
鋼床板及鋼箱梁之塗裝示意圖

塗層損傷程度與修補施工方法

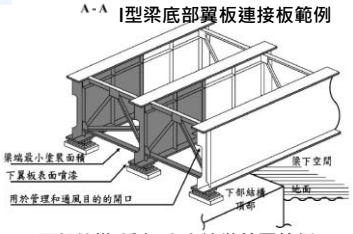
塗層損傷程度 / 塗層與施工方法	面漆塗層	面漆與中塗漆塗層	面漆、中塗漆與底漆塗層	至鋼材表面
[面漆塗層]				
[中塗漆塗層]				
[底漆塗層]				
[無機鋅粉漆層]				
[鋼材]				
表面處理作業	砂紙研磨處理			電動工具處理
底漆施作	不適用		環氧樹脂鋅粉漆 1道40 μm	2道共80 μm
中塗漆施作	不適用	依塗裝系統之中塗漆規格塗料施作 1道達規定膜厚		至少2道達規定膜厚
面漆施作	依塗裝系統之面漆規格塗料施作 1道30 μm		2道共60 μm	

鋼橋—耐候性鋼材

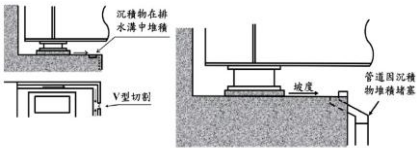
1.結構設計上的注意事項
2.製作時的注意事項
3.細部結構的注意事項
4.運輸及安裝注意事項
5.防蝕施工
6.施工及品質管理



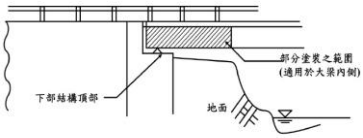
I型梁底部翼板連接板範例



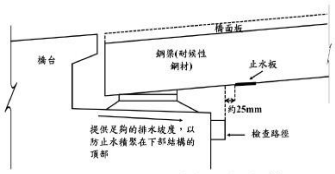
下部結構(橋台)上方塗裝範圍範例



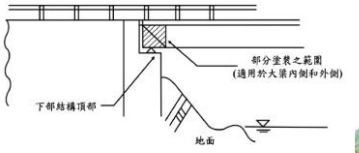
導水用的排水溝或邊牆應避免的結構示意圖



地面接近區域下的局部塗裝範例



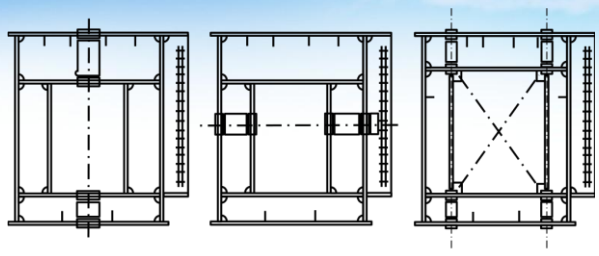
防止橋面板設置前銹蝕污染的範例



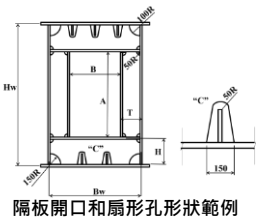
撒布融雪劑情況下的局部塗裝範例

鋼橋—熱浸鍍鋅

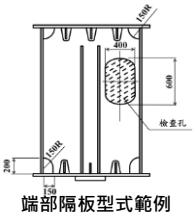
1.結構設計注意事項
2.細部結構的注意事項
3.支承及附屬物
4.製作及施工注意事項
5.運輸及架設
6.其他注意事項



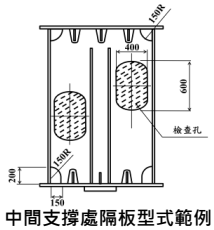
箱型梁分割法典型範例



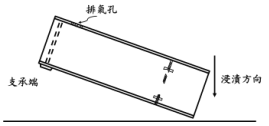
隔板開口和扇形孔形狀範例



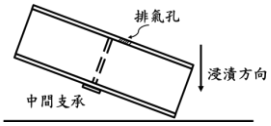
端部隔板型式範例



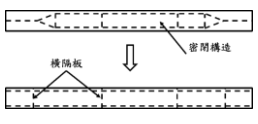
中間支撐處隔板型式範例



端部支撐側構件的浸入方式示意圖



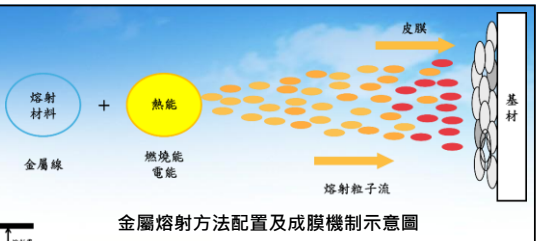
構件浸入方式和排氣孔示意圖



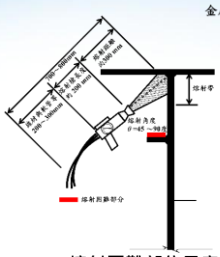
垂直和斜向構件收窄結構變化範例

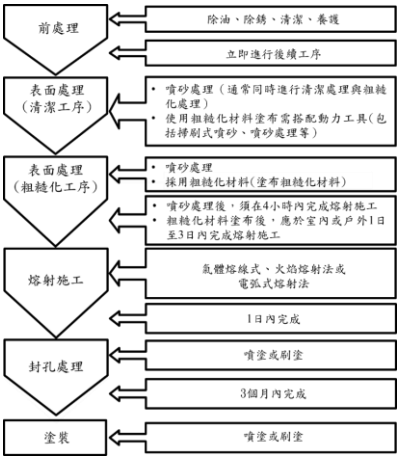
鋼橋—金屬熔射

1.結構設計注意事項
2.細部結構注意事項
3.熔射困難部位
4.製作及施工注意事項
5.金屬熔射施工
6.施工及品質管理

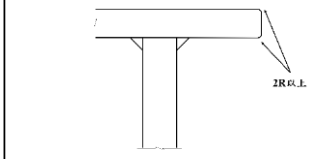


金屬熔射方法配置及成膜機制示意圖

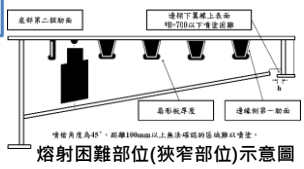

熔射困難部位示意圖

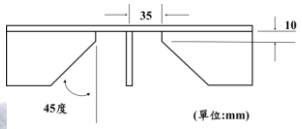


金屬熔射施工流程圖

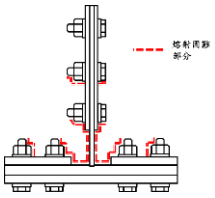


2R以上倒角範例


熔射困難部位(狹窄部位)示意圖



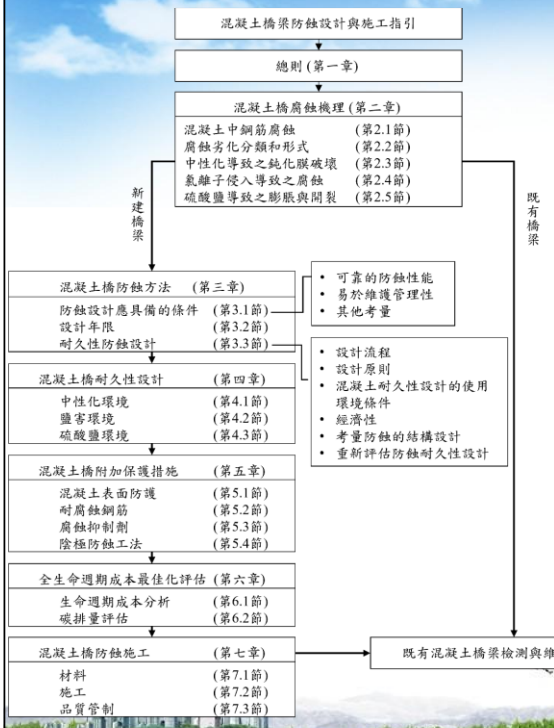
加勁板切口範例


熔射困難部位(螺栓部位)示意圖

六、研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引

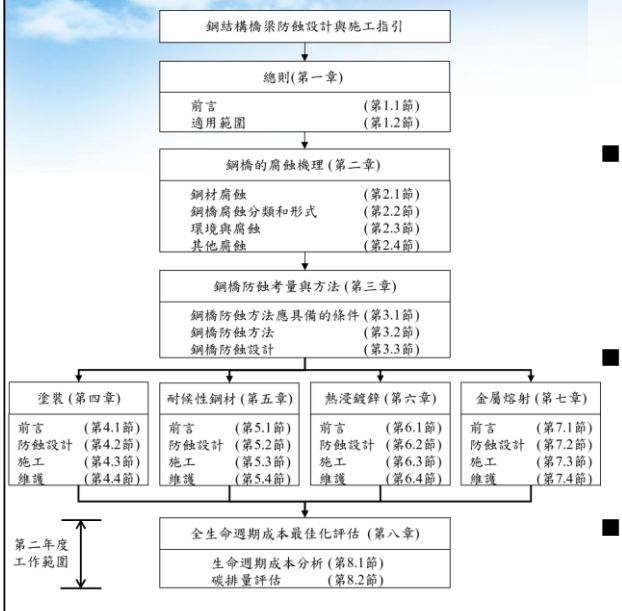


混凝土橋篇



- 本指引所稱之橋梁混凝土構造，係指**鐵公路系統之混凝土橋之上下部結構與鋼橋之混凝土橋面板及下部結構，其混凝土構件內含有鋼筋或預力鋼腱者。**
- 橋梁與其**附屬設施**中使用的混凝土構件基本理念與多數內容同樣適用，但應用時，需根據環境條件及混凝土耐久性進行具體考量。
- 指引所述內容僅為混凝土橋防蝕的標準性理念與方法。
- 本指引根據不同腐蝕形式提供**查表**與**理論分析**兩種方法以供耐久性設計使用。
- 即使嚴格遵循本指引內容，在某些條件下也可能非最佳方法，需特別注意。除依據本指引之規定外，必要時可依橋梁之特性，另訂額外之規定。

鋼橋篇



- 本指引主要適用於**鐵、公路橋中以鋼結構為主的上部結構及橋墩結構。**此外，對於鋼橋中使用的**鋼構件**，其基本理念與**多數內容同樣適用。**但在應用時，**需根據該構件的環境條件及所需的防蝕性能進行具體考量。**
- 本指引**所述內容僅為鋼橋防蝕的標準性理念與方法**，對於個別橋梁的構件或部位，僅需滿足其條件下所需防蝕性能即可，不必完全符合本指引內容。反之，**即使嚴格遵循本指引內容，在某些條件下也可能非最佳方法**，需特別注意。
- 第4章至第7章所述塗裝、耐候性鋼材、熱浸鍍鋅及金屬熔射內容，係以標準鋼橋的適用為前提，對於**特殊施工條件或結構型式的橋梁，需謹慎考慮本指引的適用性。**
- 本指引中對部分鋼構件細部結構的描述與範例，**基本上僅從防蝕角度考量**，採用時除需滿足橋梁或構件的防蝕性能外，**其他的性能尚需另行考慮。**

七、辦理研究成果說明會(3場次)



三場成果說明會辦理情形

說明會內容：鐵公路橋梁的腐蝕機理、防蝕考量與方法、防蝕（或耐久性）設計、防蝕附加保護措施與施工技術等指引。

說明會日期：

場次	內容	時間	參與人數
第一場	鋼橋篇	114年12月03日	24人
第二場	混凝土橋篇	114年12月15日	21人
第三場	混凝土橋篇與鋼橋篇	115年01月14日	62人

出席名單

- 邱建國 院長、詹穎雯 教授、楊仲家 名譽教授、林曜滄 顧問、吳忠民 顧問、蔡明達 顧問、李家順 工程司、黃裔炎 委員、林舜元 專家、 黃炳勳 專家
- 交通部運輸研究所、公路局、高速公路局、鐵道局、綜合規劃司、國營臺灣鐵路股份有限公司、臺灣港務股份有限公司
- 中興工程顧問股份有限公司、台灣世曦工程顧問股份有限公司、林同棪工程顧問股份有限公司、財團法人臺灣營建研究院



八、結論與後續工作



結論

- **鐵公路橋梁防蝕設計案例現況調查**
  - ✓ 完成混凝土橋與鋼橋共15座案例收集與劣化因素探討。
  - ✓ 完成與其餘設施(捷運、港灣、隧道、機場)之案例收集，並建議可依循鐵公路橋梁研擬防蝕技術指引之方式，以確保提升設施的品質及壽齡與減少生命週期之維護成本。
- **鐵公路橋梁防蝕耐久性規範探討**
  - ✓ 完成美國、歐洲、日本、中國、臺灣之規範、手冊、指引之收集與探討。
- **不同大氣腐蝕環境之防蝕保護策略與設計標準建議**
  - ✓ 針對鹽害環境下作用等級建議、大氣腐蝕環境分類、混凝土抗氯離子能力、鋼橋防蝕設計標準、施工，提出建議。
- **防蝕施工品質作業規定與施工圖說範例**
  - ✓ 混凝土橋：耐久性結構設計、耐久性試驗、附加保護措施。
  - ✓ 鋼橋：塗料塗裝、熱浸鍍鋅、金屬熔射、耐候鋼材。
- **研訂鐵公路橋梁於不同大氣腐蝕環境下之防蝕設計及施工技術指引**
  - ✓ 完成混凝土橋篇、鋼橋篇指引之擬訂。
- **辦理研究成果說明會(3場次)**
  - ✓ 已完成3場次成果說明會之辦理。

建議

- **規範僅是規定最低標準**，本計畫所擬定之指引考量橋梁之全生命週期成本，使得部分建議**有高於當前設計規範之要求**，**建議未來規範修訂時**，能基於全生命週期成本，將本指引提出之防蝕耐久性設計建議**納入參考**。
- 建議各機關審查設計成果時，能**基於全生命週期成本之角度**，而**非僅以初期成本之角度進行否定**，並**採用較高標準的耐久性設計**。
- 各機關未來訂定設計施工作業要點時，建議可參考本指引之內容，根據機關的各項設施使用年限與腐蝕環境，訂定符合機關的作業要點，以讓本計畫發揮加乘效益。
- 本**指引提出之品質檢驗頻率與規定**，**僅供驗收頻率之參考數量**，若各機關已有原先之作業要點，可按需求進行修改，若具有**相較於本指引更高之標準**者，建議**仍以**各機關**原先之作業要點為主**。
- **全生命週期成本之概念應包含設計**、**施工**、**檢測與維護**，當前之指引僅包含設計與施工部分，建議繼續編撰檢測維護以及生命週期成本最佳化評估等章節。
- 生命週期成本最佳化評估應包含**蘊含碳評估**，從而結合全生命週期成本之概念提供更全面的經濟效益分析。也能為交通部相關單位在**實踐2050淨零排放目標上，提供更為具體的技術支持與行動方案**。

簡報結束 敬請指教

財團法人臺灣營建研究院