

115-032-7E22

MOTC-IOT-114-H1DB008

鐵公路橋梁之防蝕技術指引



交通部運輸研究所

中華民國 115 年 4 月

115-032-7E22

MOTC-IOT-114-H1DB008

鐵公路橋梁之防蝕技術指引

混凝土橋篇

著者：邱建國、蔡立宏、賴瑞應、黃焜宏、
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

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	IV
第一章 總則.....	1-1
1.1 前言.....	1-1
1.2 適用範圍.....	1-2
1.3 參考規範.....	1-4
第二章 混凝土橋腐蝕機理.....	2-1
2.1 混凝土中鋼筋腐蝕.....	2-1
2.2 腐蝕劣化分類和型式.....	2-4
2.3 中性化導致之鈍化膜破壞.....	2-6
2.4 氯離子侵入導致之腐蝕.....	2-10
2.5 硫酸鹽導致之膨脹與開裂.....	2-13
第三章 混凝土橋防蝕方法.....	3-1
3.1 防蝕設計應具備的條件.....	3-1
3.2 設計年限.....	3-3
3.3 耐久性防蝕設計.....	3-7
第四章 混凝土橋耐久性設計.....	4-1
4.1 中性化環境.....	4-1
4.2 鹽害環境.....	4-5
4.3 硫酸鹽環境.....	4-17
第五章 混凝土橋附加保護措施.....	5-1

5.1 混凝土表面防護	5-1
5.2 耐腐蝕鋼筋	5-11
5.3 腐蝕抑制劑	5-17
5.4 陰極保護	5-19
第六章 全生命週期成本最佳化評估(第二年工作範圍).....	6-1
6.1 生命週期成本分析	6-1
6.2 碳排量評估	6-1
第七章 混凝土橋防蝕施工.....	7-1
7.1 材料	7-1
7.2 施工	7-7
7.3 品質管制	7-18
第八章 既有混凝土橋梁檢測與維護(第二年工作範圍).....	8-1
參考文獻.....	參-1
附錄一 鹽害耐久性理論計算範例.....	附 1-1

圖目錄

圖 1.1 本指引組成架構.....	1-3
圖 2.1 鋼筋腐蝕的電化學反應.....	2-1
圖 2.2 鐵及其腐蝕產物之相對體積關係.....	2-7
圖 2.3 硫酸鹽導致之混凝土開裂行為 (左:120 天、右:240 天).....	2-14
圖 3.1 鋼筋腐蝕階段.....	3-3
圖 3.2 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖.....	3-8
圖 3.3 結構物接角圓弧化示意圖.....	3-12
圖 3.4 上承式與下承式橋梁斷面受拉應力大小之比較.....	3-12
圖 3.5 斷面通風性比較.....	3-13
圖 3.6 混凝土箱型梁排水系統示意圖.....	3-14
圖 3.7 端錨封頭示意圖.....	3-16
圖 3.8 混凝土橋上部結構排水設施示意圖.....	3-18
圖 3.9 帽梁頂部排水設計示意圖.....	3-18
圖 4.1 鹽害環境下作用等級之建議分區及範圍示意圖.....	4-5
圖 5.1 陰極保護設計流程圖.....	5-19
圖 5.2 犧牲陽極保護系統示意圖.....	5-21
圖 5.3 外加電流陰極保護系統示意圖.....	5-21

表目錄

表 2-1 鋼筋混凝土腐蝕劣化之機理、要因與指標	2-4
表 3-1 EN1990 設計工作年限之規定	3-5
表 3-2 混凝土結構的設計使用年限	3-6
表 3-3 公路橋涵結構的設計使用年限	3-6
表 3-4 橋梁涵洞分類.....	3-6
表 3-5 鋼筋最小混凝土保護層厚度	3-21
表 4-1 鐵路橋梁設計規範、公路橋梁設計規範中性化環境分類	4-1
表 4-2 中性化環境混凝土材料與鋼筋最小保護層厚度	4-2
表 4-3 鹽害環境下作用等級之建議分區方式	4-6
表 4-4 離海岸 300 公尺以內(極嚴重與嚴重鹽害區)之村里.....	4-6
表 4-5 離海岸 300 公尺至 3 公里以內(中度鹽害區)之村里.....	4-9
表 4-6 鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度	4-11
表 4-7 鹽害環境下主要構件保護層厚度建議(cm).....	4-13
表 4-8 鹽害環境下主要構件混凝土抗氯離子能力建議	4-13
表 4-9 各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度	4-14
表 4-10 硫酸鹽環境之作用環境分級.....	4-17
表 4-11 曝露類別 S 的要求	4-18
表 4-12 曝露類別 S 的最大膨脹應變要求	4-19
表 4-13 各種硫酸鹽侵蝕預測式之比較說明表	4-19
表 5-1 彎曲試驗要求.....	5-12
表 5-2 CNS 14771 鍍鋅層附著量規定.....	5-13
表 5-3 最小彎曲直徑.....	5-14

表 5-4 氧化性腐蝕抑制之性能	5-18
表 5-5 常見參考電極與保護判釋標準	5-32
表 7-1 耐久性防蝕之主要檢查項目	7-18
表 7-2 不同鋼筋保護層厚度的檢測方法	7-20
表 7-3 檢測儀器之精度.....	7-20
表 A-1 計算範例之模擬情境.....	附 1-1
表 A-2 表面氯離子濃度對照表.....	附 1-2
表 A-3 模擬情境相關參數.....	附 1-3
表 A-4 各設計需求之計算結果.....	附 1-3

第一章 總則

1.1 前言

公共工程結構物設計使用年限大多為 50 年、100 年，但一些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。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。

基於此，本指引之擬訂以全生命週期之角度為基礎，對於新建橋梁之全生命週期耐久性設計與既有橋梁之檢測、修補與維護提出建議，期望透過較高標準之耐久性設計，改變以往以初期成本考量為重之設計思維，從而避免橋梁之汰換或大規模維修，努力延長其使用年限，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。同時，從事混凝土新建與維護管理的技術人員，須充分理解耐久性的關鍵性，並積極提升相關防蝕技術的專業能力。

1.2 適用範圍

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。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。

本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。

本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。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，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。

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「施工網要規範」及內政部「結構混凝土施工規範」等相關規定。本指引所述內容僅為混凝土橋防蝕的標準性理念與方法，部分建議因考量橋梁之全生命週期成本而有高於當前設計規範之要求。

本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。圖 1.1 為本指引的組成架構，可做為使用本指引進行防蝕設計與施工、維護的章節參照。

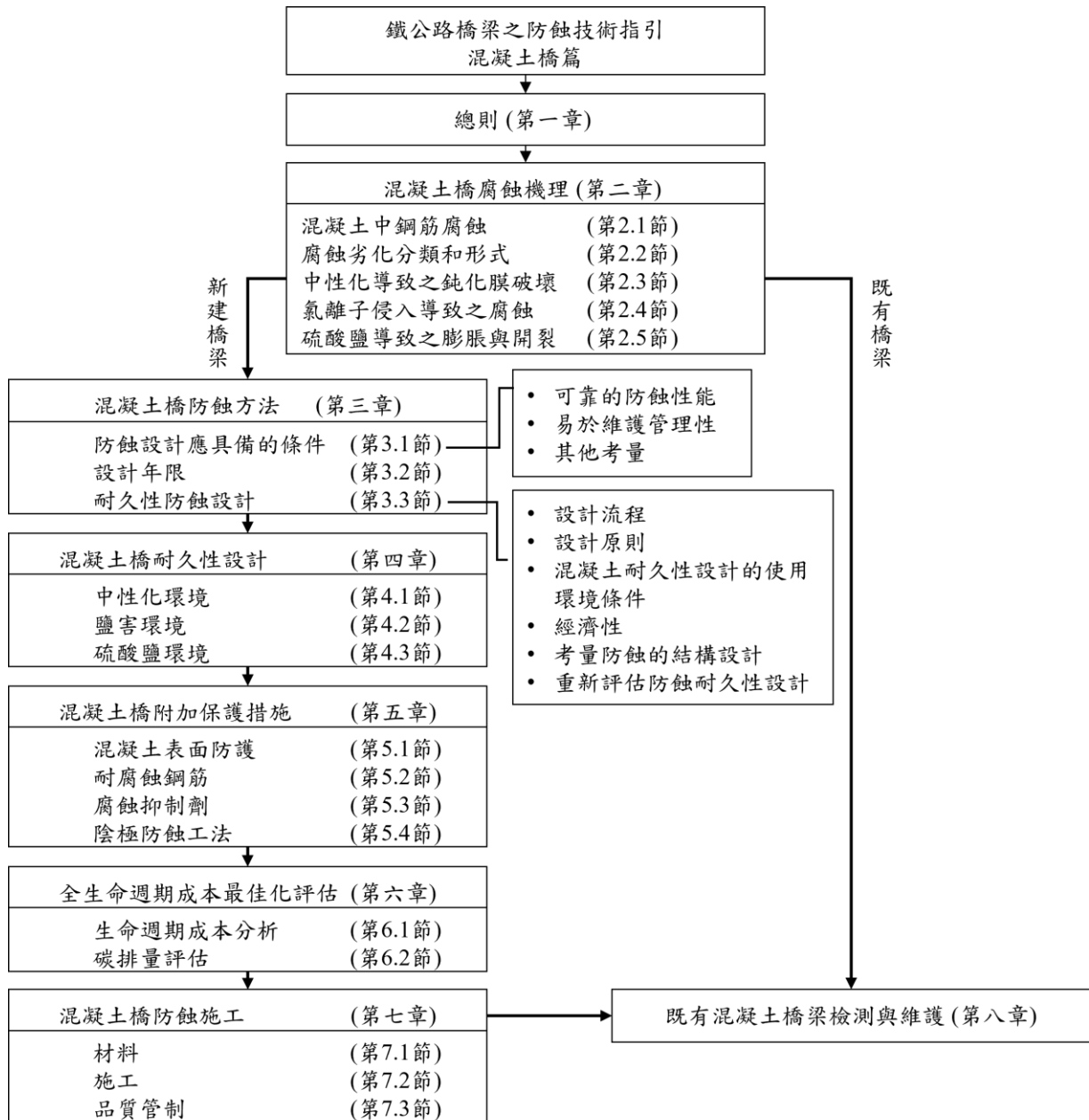


圖 1.1 本指引組成架構

1.3 參考規範

本準則所參考的相關規範及標準包括如下：

1. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，民國 112 年 8 月。
2. 內政部，「結構混凝土施工規範」，民國 110 年 7 月。
3. 交通部，「公路橋梁設計規範」，民國 109 年 1 月。
4. 交通部，「鐵路橋梁設計規範」，民國 112 年 2 月。
5. 交通部，「公路工程施工規範」，民國 112 年 12 月。
6. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 61「卜特蘭水泥」，民國 114 年 12 月。
7. 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」，民國 107 年 4 月。
8. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 1237「混凝土拌和用水試驗法」，民國 86 年 11 月。
9. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 1240「混凝土粒料」，民國 103 年 2 月。
10. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 3090「預拌混凝土」，民國 114 年 12 月。
11. 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」，民國 106 年 12 月。
12. 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」，民國 77 年 11 月。
13. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 12457「鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法」，民國 77 年 11 月。
14. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13961「混凝土拌和用水」，民國 104 年 1 月。

15. 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」，民國 104 年 11 月。
16. 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」，民國 98 年 3 月。
17. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15286 「水硬性混合水泥」，民國 111 年 8 月。
18. 交通部運輸研究所、中華民國防蝕工程學會，「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)」，民國 93 年 4 月。
19. 日本土木学会，「コンクリート標準示方書〔設計編〕」.(2022).
20. 日本道路協会，「コンクリート道路橋施工便覧」，2020 年 9 月。
21. 日本道路協会，「コンクリート道路橋設計便覧」，2020 年 9 月。
22. 日本道路協會，「鋼道路橋防食便覧」，2014 年。
23. 日本道路協会，「道路橋示方書・同解説Ⅲ コンクリート部材・コンクリート上部構造編」，2025 年 10 月。
24. JTG D62「公路鋼筋混凝土及預應力混凝土橋涵設計規範」，2004 年。
25. GB / T 50476-2019，「混凝土結構耐久性設計標準」，2019 年。
26. ACI 201.2R-16 Guide To Durable Concrete (2016).
27. ACI 222R-19 Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete Against Corrosion (2019).
28. ACI CODE-318-19(22) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”(Reapproved 2022).(2022).
29. ACI PRC-365.1R-17 Report on Service Life Prediction (2017).
30. ACI 546.1R-80: Guide for Repair of Concrete Bridge Superstructures (2017).
31. ASTM A775/A775M-22 Standard Specification for Epoxy-Coated Steel Reinforcing Bars (2022).

32. ASTM A767/A767M-24 Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement (2024).
33. ASTM A934/A934M-19 Standard Specification for Epoxy-Coated Prefabricated Steel Reinforcing Bars (2019).
34. ASTM C1543-10a Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding (2019).
35. ASTM C1580-20 Standard Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soil (2020).
36. ASTM G109-21 Standard Test Methods for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments (2021).
37. AASHTO Designation: M 194M/M 194-13 (2021) Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete (2021).
38. 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).
39. ISO 12696:2022 Cathodic protection of steel in concrete (2022).
40. ISO 14654:1999 Epoxy-coated steel for the reinforcement of concrete (1999).
41. Eurocode: Basis of structural design (2023).
42. EN 206-1:2024 Concrete - Specification, performance, production and conformity - Part 1: Performance, requirements, factory production control and assessment criteria for individual values (2024).
43. 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).
44. BS EN 1504-9:2008 Products and systems for the protection and repair of concrete structures Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 9: General principles for the use of

- products and systems (2008).
45. BS 8500-1:2023 - TC Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206 - Method of specifying and guidance for the specifier (2023).
 46. AMPP NACE SP0216-2023 Galvanic Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures (2023).
 47. NACE SP0290-2019 Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures (2019).
 48. NACE SP0308 Inspection Methods for Corrosion Evaluation of Conventionally Reinforced Concrete Structures (2018).
 49. NACE Publication 01102-2018 State-of-the-Art Report: Criteria for Cathodic Protection of Prestressed Concrete Structures (2018).
 50. Caltrans MEMO TO DESIGNERS 10-5 PROTECTION OF REINFORCEMENT AGAINST CORROSION DUE TO CHLORIDES, ACIDS AND SULFATES (2010).
 51. Caltrans California Amendments to the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications -8th Edition (2022).
 52. Life-365™ Consortium III Life-365™ Service Life Prediction Model™. (2020).
 53. fib Bulletin 34: Model code for Service Life Design (2006).
 54. NT BUILD 492 Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments (1999).

第二章 混凝土橋腐蝕機理

2.1 混凝土中鋼筋腐蝕

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. 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 2.1)，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。

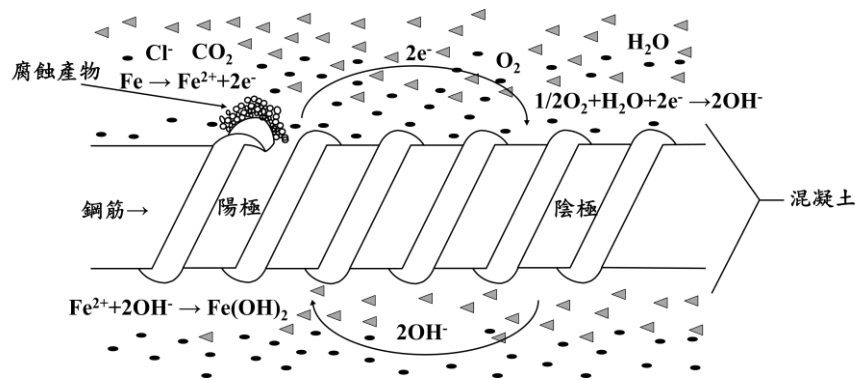


圖 2.1 鋼筋腐蝕的電化學反應^[1]

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：

鋼筋表面尚未生鏽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：

① 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。

② 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。

③ 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。

2.2 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，致使構件整體承载力大幅滑落。

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，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，與環境因子相關的腐蝕劣化重要因素與指標如表 2-1 所示。

表 2-1 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	<ul style="list-style-type: none"> • 中性化深度 • 鋼筋腐蝕量
鹽害	氯離子	<ul style="list-style-type: none"> • 氯離子濃度 • 鋼筋腐蝕量
凍害	凍結溶解作用	<ul style="list-style-type: none"> • 凍害深度 • 鋼筋腐蝕量
化學的侵蝕	酸性物質 硫酸根離子	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 膨脹量
橋面板疲勞	大型車通行量	<ul style="list-style-type: none"> • 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。

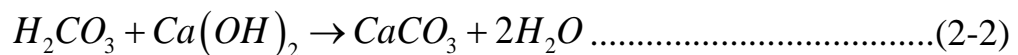
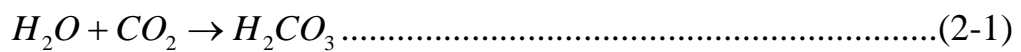
造成混凝土橋腐蝕之主要因素，分別為中性化、鹽害與硫酸鹽。中性化腐蝕係由於橋梁部份構件可能曝露在高濃度的二氧化碳下如橋護欄，橋墩等，致混凝土酸鹼值降低，鋼筋失去鈍態保護膜，致容易產生銹蝕；鹽害現象係由於海岸線附近的混凝土結構物因表面附著鹽分隨著時間滲入混凝土內部，造成混凝土內部鋼筋銹蝕膨脹，導致混凝土產生裂縫或剝離，從而加速鋼筋腐蝕。特別是預力鋼筋，因處於高張力狀態，若一旦發生腐蝕，其產生的影響程度更大；另外海水或土壤中高濃度的硫酸根離子易使混凝土劣化，導致鋼筋腐蝕。以下將根據中性化、鹽害與硫酸鹽造成腐蝕之機理進行說明。

2.3 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，致較易發生腐蝕。中性化腐蝕之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。

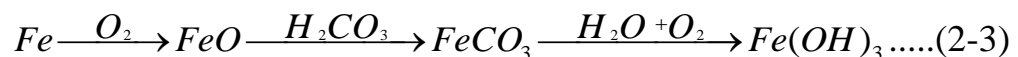
1. 腐蝕機理

水泥與水拌合後開始發生水化反應，從而產生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 並很快達到飽和，使得混凝土呈鹼性(pH 值約等於 12.5)。混凝土硬化後亦具有很高的 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。混凝土在含有酸性氣體(CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、氣相 HCl)的空氣中會發生中性化之反應過程如下：



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：



凡是能與 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 進行中和反應的酸性氣體，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 $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 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 2.2，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。

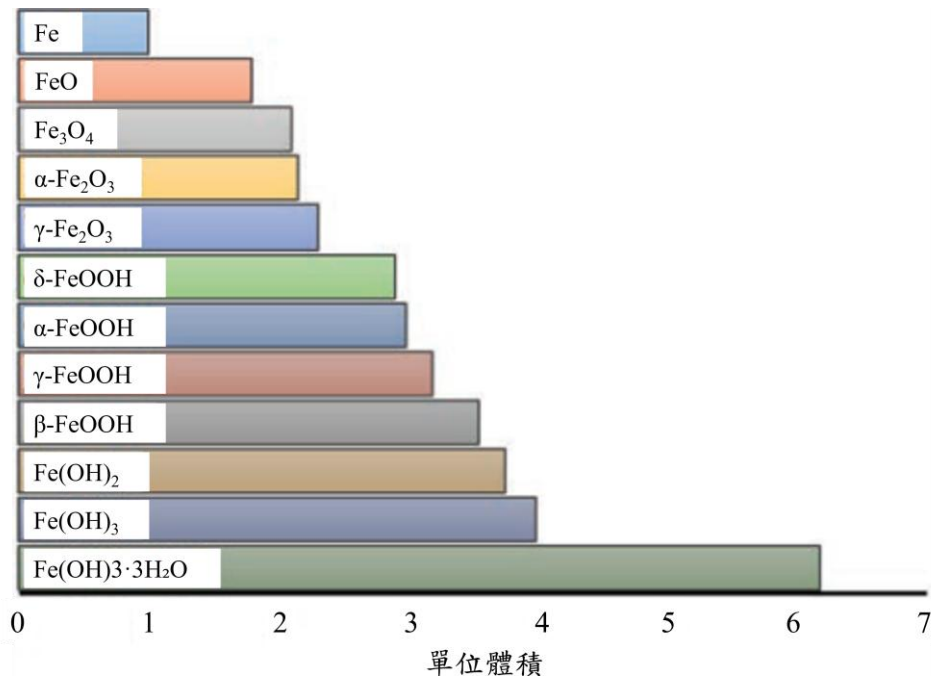


圖 2.2 鐵及其腐蝕產物之相對體積關係^[2]

2. 腐蝕因素

(1) 材料因素

① 水膠比

水膠比不僅決定混凝土滲透性，亦會影響中性化速度。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。

②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，從而影響混凝土中性化速度。中性化深度與水泥用量成反比，其原因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。

③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。

④卜作嵐材料

使用飛灰及爐石粉等卜作嵐摻料時，卜作嵐反應會增加混凝土的緻密性，從而降低其滲透性，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。

⑤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。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。

⑥混凝土的強度

中性化深度隨混凝土強度的增高而下降。

⑦混凝土的緻密度

混凝土為多孔性材料，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。混凝土若有類似蜂巢式的缺陷使二氧化碳直接深入，將導致鋼筋表面中性化發生時間更快。

⑧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。

⑨保護層厚度

混凝土若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

①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。

②大氣的溫度

溫度對中性化的影響相當複雜，混凝土在炎熱氣候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。

③酸性介質的濃度

環境溫濕度基本相同時，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。

④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。

⑤應力狀態

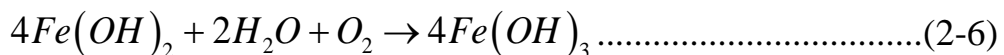
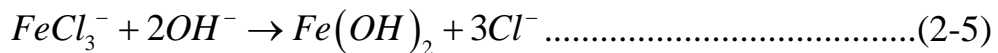
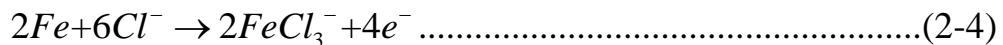
鋼筋混凝土橋梁結構中，不同結構部位承受不同的應力。在拉應力作用下，加速了混凝土微裂縫的擴張與延伸，以及微裂縫間連接貫通，增大混凝土的空隙縫，降低混凝土的抗滲性，以及微裂縫的抗中性化能力。由橋梁調查中發現，鋼筋銹蝕引起的混凝土崩裂都發生在拉力區，而壓力區多安然無恙，可能與此有關。

2.4 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

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：



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⁻亦有可能使 pH 值降低。此處之氯離子乃指游離態氯離子，而非固定態氯離子。游離態氯離子存於混凝土毛細孔中，遇水會溶解；固定態的因被水泥中的鋁酸三鈣(C₃A)固定住而不溶於水。而混凝土中性化後，固定態氯離子將被釋放成為具侵蝕性之游離態，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。

在含有氯離子的混凝土中，鋼筋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。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^[3]。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：

水膠比決定混凝土的品質，水膠比越高混凝土的緻密性越低，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毛細管作用(Capillary Action)進行。當混凝土中的孔隙含有鹽分時，水會由毛細管作用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^[4]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^[5]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^[6]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：

$$\text{普通卜特蘭水泥} \quad C_i = -3.0 \left(\frac{W}{B} \right) + 3.4 \dots (2-7)$$

$$\text{混合水泥(爐石粉、飛灰)} \quad C_i = -2.6 \left(\frac{W}{B} \right) + 3.1 \dots (2-8)$$

$$\text{低熱高爐水泥，早強卜特蘭水泥} \quad C_i = -2.2 \left(\frac{W}{B} \right) + 2.6 \dots (2-9)$$

$$\text{矽灰水泥} \quad C_i = 1.2 \dots (2-10)$$

其中， C_i ：鋼筋腐蝕臨界氯離子濃度(kg/m³)。

W/B ：混凝土之水膠比。

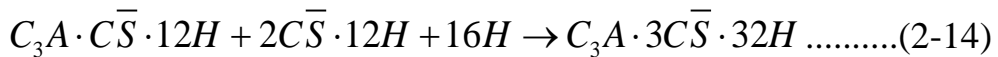
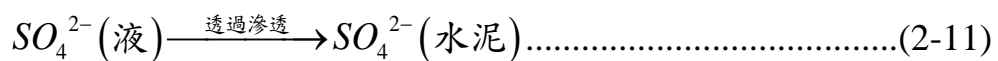
2.5 硫酸鹽導致之膨脹與開裂

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 C_3A 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 C_3A 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 $C_3A \cdot CS \cdot 12H$)化合，形成具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 $C_3A \cdot 3CS \cdot 32H$)，導致混凝土產生表面粉化，甚至整片剝落破裂的損壞，其反應機理歸納如下：



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，見式(2-11)，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」，見式(2-13)，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 2.3。

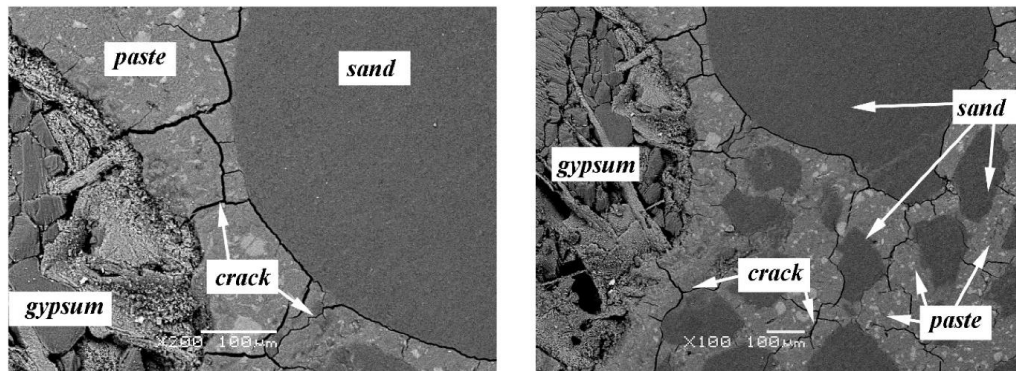


圖 2.3 硫酸鹽導致之混凝土開裂行為 (左:120 天、右:240 天)^[7]

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(W/B)的方式。卜作嵐材料，如爐石粉、飛灰及矽灰之使用係透過「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

① 水泥化學成分和礦物組成

對於卜特蘭水泥而言，鋁酸三鈣($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ，簡稱 C_3A)、矽酸三鈣($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ，簡稱 C_3S)、矽酸二鈣($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ，簡稱 C_2S)、鋁鐵酸四鈣($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，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； 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。

② 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。

③ 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

① 硫酸鹽濃度

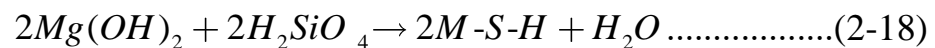
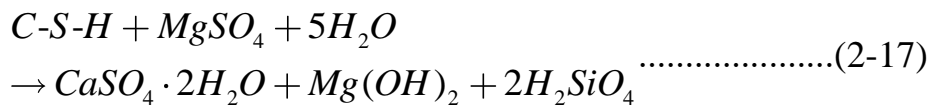
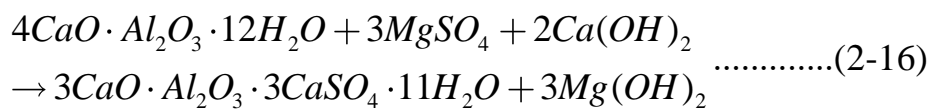
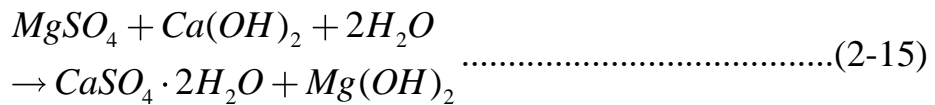
美國 ACI 318-19(22)^[8]與內政部「建築物混凝土結構設計規範」^[9]，依據混凝土所處環境，將溶液中的硫酸鹽濃度分為四個等級。當侵蝕等級越為嚴重時，所要求的混凝土水膠比將會越低，抗壓強度需求也將會提高。

- 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。

②陽離子類型

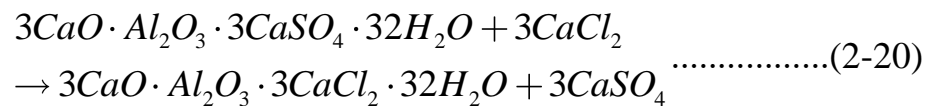
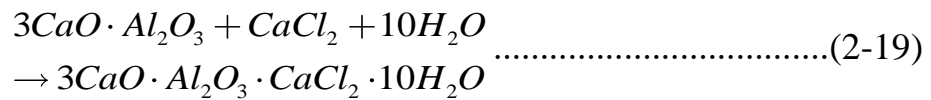
硫酸鹽侵蝕的陽離子類型有鈉離子、鎂離子、銨離子和鈣離子，由於硫酸鈣的溶解度很小(1,400 mg/L)，又銨離子通常只存在於農業土壤中，因此一般而言以鈉、鎂離子的侵蝕較為普遍。

硫酸鈉對混凝土的影響僅有硫酸根離子會產生作用，硫酸鎂反應如式(2-15)及(2-16)，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取代水化矽酸鈣(hydrated calcium silicate 簡稱 C-S-H)膠體中的鈣離子，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(2-17)及(2-18)。



③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 C₃A 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(2-19)與(2-20)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。



④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 °C 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，更會影響到混凝土結構物本身的穩定性。

⑤pH 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。

第三章 混凝土橋防蝕方法

3.1 防蝕設計應具備的條件

鐵、公路橋梁一旦開始使用，即成為鐵、公路網絡的一部分，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，本指引從此觀點出發，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如下：

- (1) 混凝土表面處理
- (2) 耐腐蝕鋼筋
- (3) 腐蝕抑制劑
- (4) 陰極保護

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。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。

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。一般而言，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進行防蝕方法的檢查與維修等維護管理，並納入考量。因此混凝土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方式。

完工通車後應依相關規定辦理定期維護及檢查，若有腐蝕跡象，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，研議如何降低日後的維修作業，達到經濟化的目標。

3. 其他考量

(1) 橋梁之設置環境

混凝土橋梁依現行橋梁設計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，則有鋼筋腐蝕問題產生。

混凝土橋梁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

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整體考量的，以此達到最經濟的設計目標。

3.2 設計年限

設計年限之定義，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兩個類型，分別為使用極限狀態(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^[5]。

鋼筋的腐蝕階段包含誘導期與腐蝕擴展期，如圖 3.1 所示，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之終點。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。

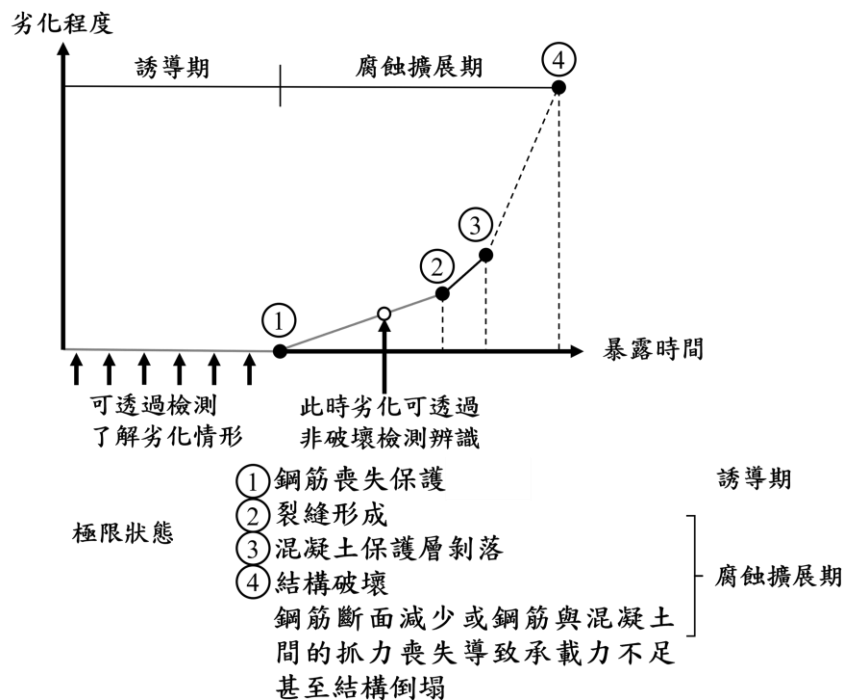


圖 3.1 鋼筋腐蝕階段^[5]

1. 國內設計年限規定

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。
- (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，應在設計圖說中明確規定防蝕設計。

2. 國外設計年限規定

(1) 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)」^[10]，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。

(2) 歐洲

歐洲 EN1990(Eurocode)^[11]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(Design working life)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，分別為臨時構造物、可替換之結構元件、農業用構造物、一般建築物及紀念性建築物、橋梁及其他土木工程等，並規定了 10~100 年不等的設計年限如表 3-1。此外，Eurocode 2「Application to concrete highway bridges」^[12]第二章設計基準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 3-1 EN1990 設計工作年限之規定^[13]

結構類別	設計使用年限 T_{If} (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

(3) 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」^[6]，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。

(4) 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」^[14]，第 1 章總則規定該規範採用的設計基準期為 100 年；GB/T 50476「混凝土結構耐久性設計規範」^[15]，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」^[16]的規定；對於城市橋梁等市政工程結構應按照表 3-2 的規定。

一般環境下的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，或能夠經濟合理地進行大修。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，並應在設計檔中明確規定。

GB 50153「工程結構可靠性設計統一標準」^[16]設計使用年限定義為工程結構設計時，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，並應對環境影響進行評估，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。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 3-2 採用，表中示例可參考表 3-4 之定義。

表 3-2 混凝土結構的設計使用年限^[15]

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 3-3 公路橋涵結構的設計使用年限^[16]

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 3-4 橋梁涵洞分類^[16]

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	$100 \leq L \leq 1000$	$40 \leq L_k \leq 150$
中橋	$30 < L < 100$	$20 \leq L_k < 40$
小橋	$8 \leq L \leq 30$	$5 \leq L_k < 20$
涵洞	-	$L_k < 5$

3.3 耐久性防蝕設計

1. 設計流程

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詳加考量外，橋梁耐久性設計亦應列入規範設計重點，並選用合宜的防蝕設計。

防蝕設計流程詳見圖 3.2。首先進行原則性考量後設定設計年限，而後根據腐蝕環境調查結果確定腐蝕類型與環境作用等級分級進行耐久性設計。本指引提供查表與理論計算兩種方法以供設計之參考，依照設計年限與混凝土設計條件(保護層厚度、水膠比等)即可確定所需之混凝土品質與耐久性要求。而後確認符合結構安全設計後，依腐蝕環境與施工條件選用附加保護措施，最後重新評估耐久性設計之以及全生命週期成本最佳化之後，提出耐久性設計方案。

2. 設計原則

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(詳見本指引第 3.2 節)

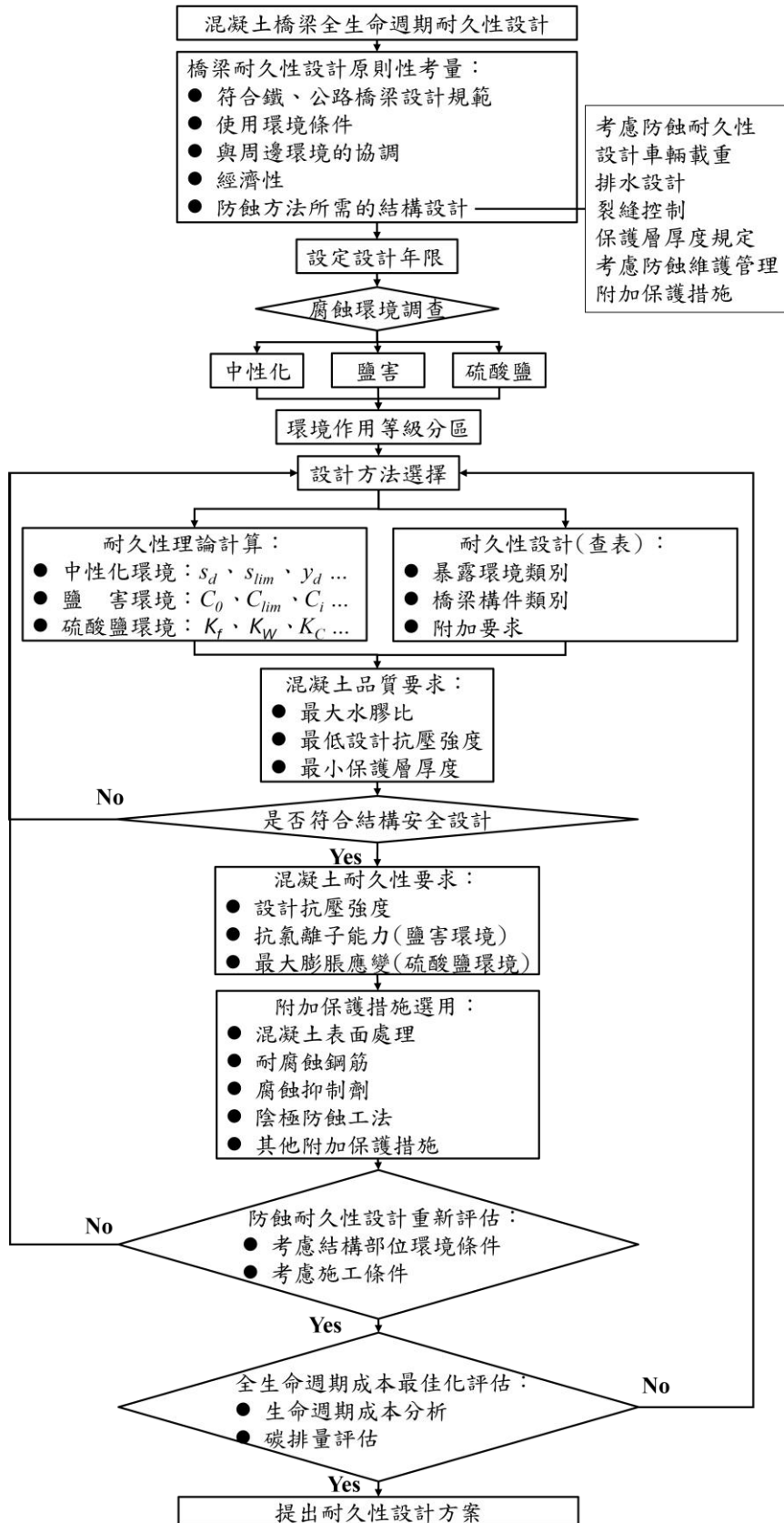


圖 3.2 混凝土橋全生命週期耐久性設計流程圖

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、混凝土表面處理、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。

3. 混凝土耐久性設計的使用環境條件

為掌握橋址環境條件，並根據環境作用等級決定混凝土耐久性設計與品質要求，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，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，因此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。

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：

$$LCC = I + M + R \dots\dots\dots(3-1)$$

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，評估期間通常使用橋梁設計時考慮的設計年限。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。

本指引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，未必完全適用本指引。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。

(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。

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)。以梁腹部接角為例，該處為最常發現之結構物損傷，其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分可附著面積等方面進行考量，詳見圖 3.3，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。

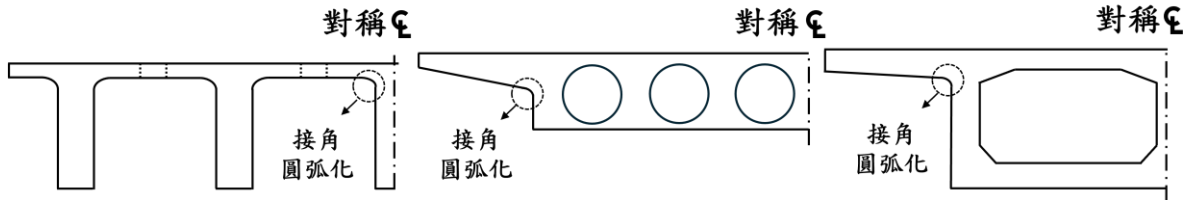


圖 3.3 結構物接角圓弧化示意圖

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 3.4 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。

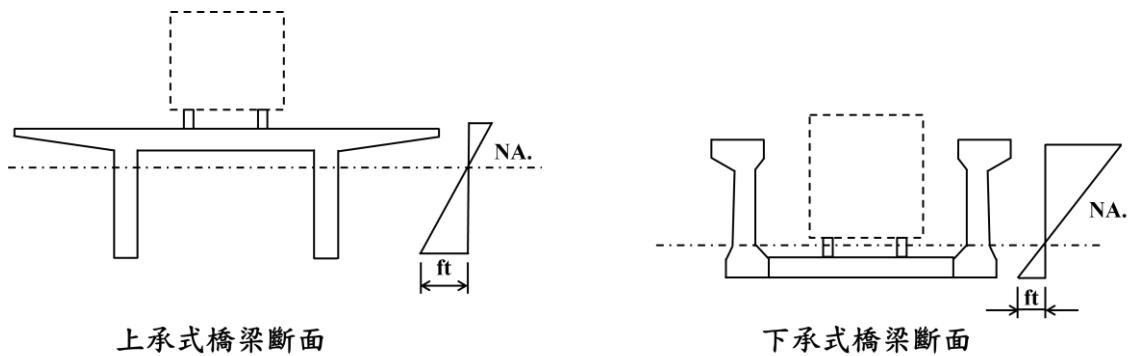


圖 3.4 上承式與下承式橋梁斷面受拉應力大小之比較

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分、CO₂ 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，更易形成腐蝕環境，詳見圖 3.5。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，易助長腐蝕，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。

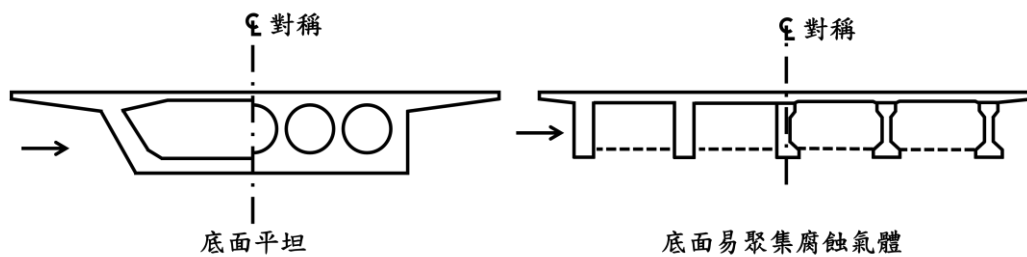


圖 3.5 斷面通風性比較

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，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，能減少鹽分附著與堆積，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。故設計時，除應選擇合適斷面，還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，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，橋面要有適當排水坡度，且構造接縫處應避免積水之可能。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 3.6。

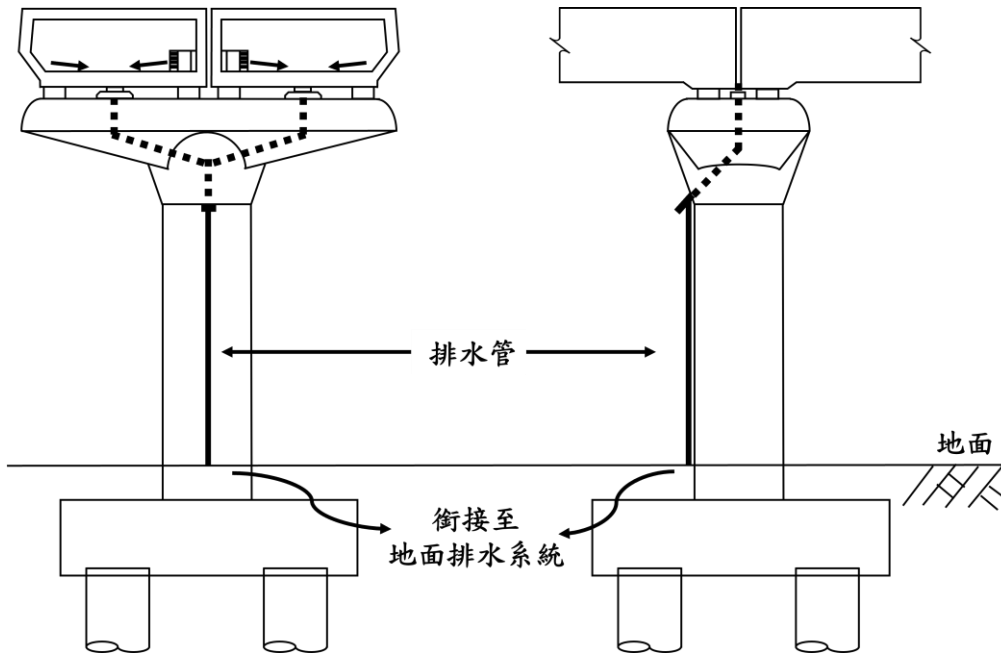


圖 3.6 混凝土箱型梁排水系統示意圖^[17]

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。

混凝土橋梁腹板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。例如，腹板斷面常是既高且薄的形狀，加上需埋設預力鋼套管，使得原本養護較困難之腹板，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甚大。

⑥ 混凝土斷面保護層厚度應配合環境與施工條件

橋梁保護層厚度除參照規範所定之要求外，應再視個案及相關環境因素決定合適厚度。目前規範所規定之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

- A. 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本指引鋼橋篇。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。
- B. 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。密集配筋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。
- C. 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。

- D. 「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。
- E. 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。
- F. 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。
- G. 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。
- H. 封閉預力鋼腱端錨應採用無收縮混凝土或砂漿，如圖 3.7 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。

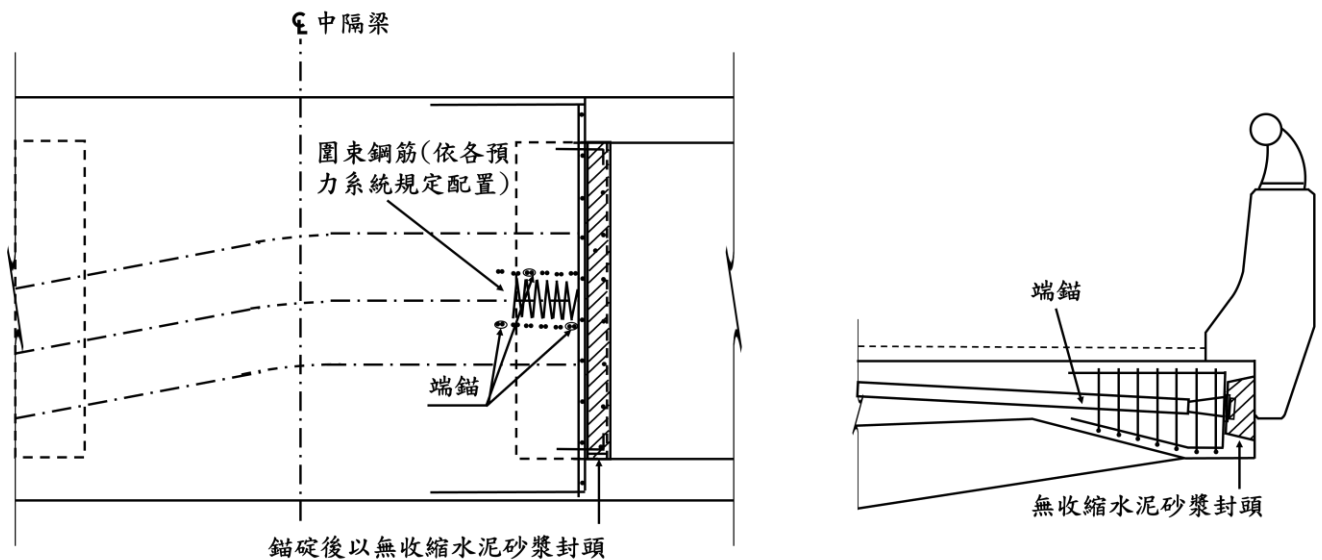


圖 3.7 端錨封頭示意圖

- I. 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，設計時應增加防蝕保護或附加保護措施。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，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處理或有接地之連接以避免雜散電流影響預力鋼材。

J. 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。

K. 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。

L. 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、鋪面

坡度、泛水板等，詳見圖 3.8，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。

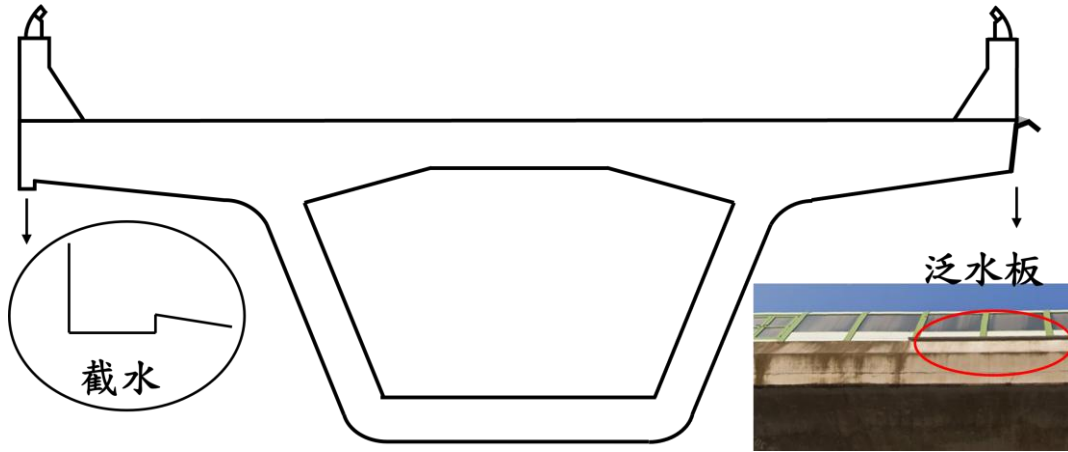


圖 3.8 混凝土橋上部結構排水設施示意圖^[17]

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，是橋梁上部結構最大的潛在威脅，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，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，因此，值得特別重視。

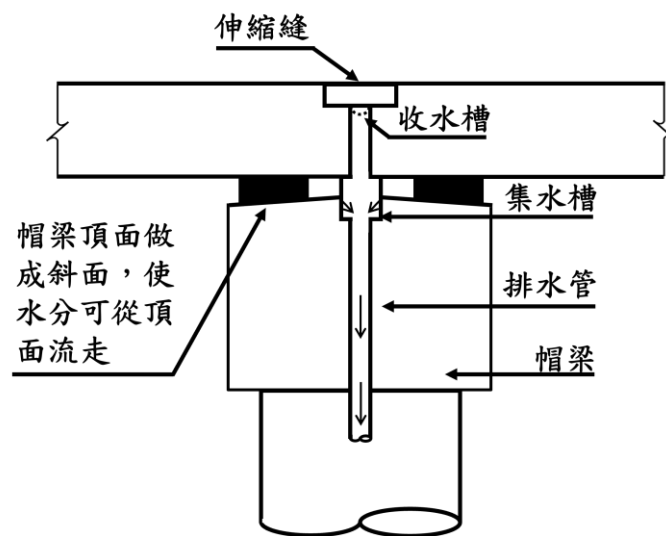


圖 3.9 帽梁頂部排水設計示意圖

(4) 裂縫控制

混凝土不同齡期有不同的收縮現象，為混凝土構件材料性裂縫的主因，包括混凝土終凝前因均勻性不佳、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。

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，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之前，新澆置之混凝土表面可能因養護不當、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°C，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°C 之高溫時，混凝土中之初始鈣礬石將解離，並於數月至數年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^[18]及施工綱要規範第 03700 章^[19]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，以確保混凝土的最高心溫及心表溫差能符合規範的要求。混凝土溫度管控計畫書內容如下：

- A. 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
- 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
- D. 養護及保護措施，

③ 乾燥收縮

乾燥收縮主要發生在混凝土硬固之後，因環境濕度或溫度變化等外部因素，導致混凝土內部孔隙結構中水分流失而體積縮小，為影響混凝土長期性能的重要因素之一。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。

(5) 保護層厚度規定

保護層厚度規定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」^[20]與「鐵路橋梁設計規範」^[21]規定如下：

①基礎(公路橋梁設計規範第五章、鐵路橋梁設計規範第四章)

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，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。

②鋼筋混凝土(公路橋梁設計規範第七章、鐵路橋梁設計規範第四章)

鋼筋最小混凝土保護層如表 3-5，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 3-5 鋼筋最小混凝土保護層厚度^[20, 21]

	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(公路橋梁設計規範第八章、鐵路橋梁設計規範第四章)

A.預力鋼材及鋼筋防蝕保護採用最小混凝土保護層規定：

- (a) 預力鋼材及主鋼筋為 4 cm。
- (b) 版鋼筋一版之頂層為 4 cm；版之底層為 2.5 cm。
- (c) 肋筋及繫筋為 2.5 cm。
- (d) 若構材曝露於鹽水、鹽性水沫或化學蒸氣中應加厚保護層。

B.錨碇、端部配件、連接器及外露鋼腱應有永久保護措施。

④耐久性設計

腐蝕環境保護層厚度規定與耐久性設計參見本指引第四章。

(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。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維護通道，且不影響設施的使用。

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，考慮更換零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，應在橋梁設計階段就其各自之防蝕需求加以審慎考慮，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本指引鋼橋篇。

(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本指引第五章。

6. 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环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，而加速鋼筋生鏽劣化，亦或是重新檢視施工流程，改善施工條件。

第四章 混凝土橋耐久性設計

本章中將腐蝕環境分為中性化、鹽害、硫酸鹽環境三種。設計者在決定是否須採用防蝕方法前應先調查了解大氣、水質或土壤中的氯化物及硫化物含量，並獲悉水中之平均最低低潮位(LLWL)、平均最高高潮位(HHWL)、橋址距海岸線的距離等有關腐蝕環境之相關資料。

4.1 中性化環境

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，因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。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。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，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」^[20]第十二章與「鐵路橋梁設計規範」^[21]第六章，如表 4-1。

表 4-1 鐵路橋梁設計規範、公路橋梁設計規範中性化環境分類^[20, 21]

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」^[20]第十二章與「鐵路橋梁設計規範」^[21]第六章對於中性化環境之材料與保護層厚度規定如表 4-2，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 4-2 中性化環境混凝土材料與鋼筋最小保護層厚度^[20, 21]

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

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」^[6]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。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(4-1)用於判別中性化深度是否大於臨界深度，計算結果小於 1 即代表設計年限內中性化深度不會達到臨界深度。式(4-2)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(4-2)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(4-5)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(4-6)進行計算，或是依「混凝土標準示方書-設計編」^[6]提供之文獻[22]依經驗式(4-8)計算。

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0 \dots\dots\dots(4-1)$$

$$y_{lim} = c_d - c_k \dots\dots\dots(4-2)$$

$$c_d = c - \Delta c_e \dots\dots\dots(4-3)$$

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \dots\dots\dots(4-4)$$

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \dots\dots\dots(4-5)$$

$$\alpha_k = \gamma_k \cdot \gamma_p \alpha_p \dots\dots\dots(4-6)$$

$$\alpha_p = a + b \cdot \frac{W}{B} \dots\dots\dots(4-7)$$

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \frac{W}{B} \dots\dots\dots(4-8)$$

$$B = C_p + k \cdot A_d \dots\dots\dots(4-9)$$

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)，一般可依式(4-4)求得。

y_{lim} ：鋼筋腐蝕之極限深度，一般可依式(4-2)求得。

c_d ：考量施工誤差之保護層厚度設計值(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)，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/ $\sqrt{\text{年}}$)。

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/ $\sqrt{\text{年}}$)。

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。

4.2 鹽害環境

1. 環境作用等級

參考交通部「公路橋梁設計規範」^[20]、「鐵路橋梁設計規範」^[21]、美國加州交通廳「橋梁設計者備忘錄」^[23]與「臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究」^[24]，本指引對於鹽害環境下作用等級之建議分區方式如圖 4.1 與表 4-3，所稱之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^[21]第六章「耐久性設計」，之鹽害環境下詳盡縣市村里劃分，如表 4-4、表 4-5，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 4-4、表 4-5 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，可依本指引第五章辦理，不限於使用單一方法。

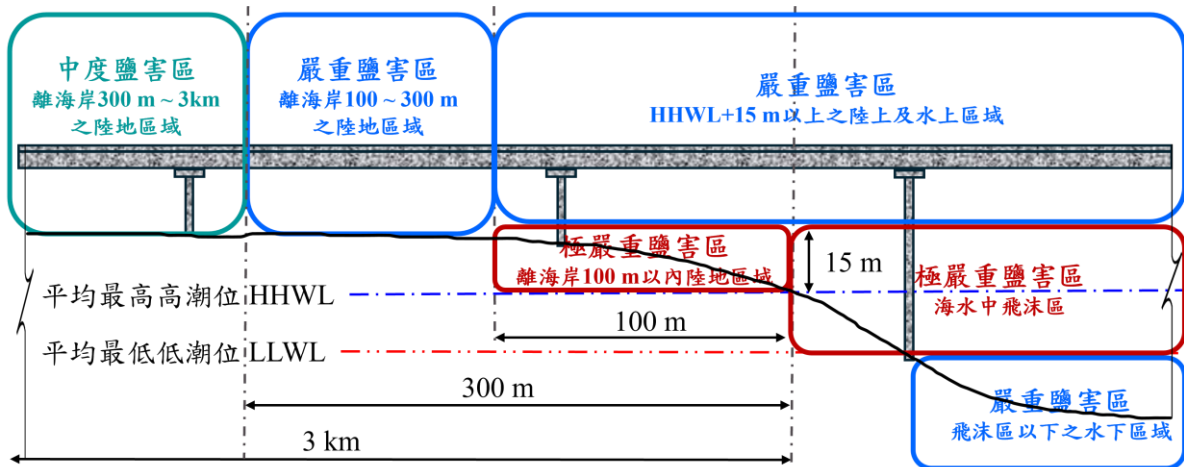


圖 4.1 鹽害環境下作用等級之建議分區及範圍示意圖

表 4-3 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 離海岸線 300 公尺至 3 公里以內之陸地區域

表 4-4 離海岸 300 公尺以內(極嚴重與嚴重鹽害區)之村里^[21]

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	塹豐村，燄溫村，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，港正里 ⁽¹⁾ ，小港里 ⁽¹⁾ ，鳳宮里 ⁽¹⁾ ，港口里 ⁽¹⁾ ，高雄港 ⁽¹⁾
	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 and 里
前鎮區 ⁽¹⁾	興化里 ⁽¹⁾ ，明孝里 ⁽¹⁾ ，鎮北里 ⁽¹⁾ ，高雄港 ⁽¹⁾	
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
	仁愛區 ⁽¹⁾	文昌里 ⁽¹⁾ 、新店里 ⁽¹⁾ 、仁德里 ⁽¹⁾
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，箔子村，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，頂黏村
	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	塩埕里，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，鯤鯨里，佛壇里，省躬里，喜南里，喜北里
	將軍區	鯤鯨里，平沙里，長沙里

註 1：本指引新增之行政區範圍

表 4-5 離海岸 300 公尺至 3 公里以內(中度鹽害區)之村里^[21]

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，糠榔里，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，廊北里，果峰里，埤北里，果貿里，廊南里，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
	茄苳區	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
	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，潔底里	

	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
	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」^[20]第十二章與「鐵路橋梁設計規範」^[21]第六章，海洋鹽害環境下混凝土品質要求如(1)至(4)項所示。本指引建議之保護層厚度與相關說明，如第(5)項所示。

- (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 4-6 之規定。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 預力混凝土的鋼筋保護層厚度可按此規定執行。

表 4-6 鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度^[20, 21]

	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

(5) 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。

故本指引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，分別如表 4-7 與表 4-8 所示。表 4-7 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 4-7 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。

本指引第 4.2 節「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之分析(參照規範 CNS 15649、AASHTO T259 或 ASTM C1543)，但貯鹽試驗過於耗時，需以養護 90 天齡期之試體再進行 90 天之貯鹽過程，總共需要約 180 天之試驗時間，故本指引參考文獻[24-26]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^[25]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^[27]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。

氯離子非穩態傳輸係數試驗又稱為快速氯離子傳輸試驗 (Rapid Chloride Migration, RCM)，可按照北歐 NT BUILD 492 「Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments」進行。各鹽害分區主要構件混凝土抗氯離子能力建議如表 4-8 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 4-7 鹽害環境下主要構件保護層厚度建議(cm)

設計年限 環境作用等級	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
橋梁部位						
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、箱梁腹板外 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

表 4-8 鹽害環境下主要構件混凝土抗氯離子能力建議

設計年限 環境作用等級	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
抗氯離子能力						
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. 鹽害耐久性理論計算

文獻[24-26]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 4-9。

表 4-9 各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度^[24-26]

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(4-10)，氯離子擴散係數參考美國 Life-365 以時間函數型式表示，如(4-11)，經驗係數 m 如(4-12)。耐久性設計方程式如式(4-13)，若式(4-13)之計算結果小於 25 年時，則需以式(4-14)重新計算。

表 4-8 之混凝土抗氯離子能力包含貯鹽試驗 D_P 與 RCM 試驗 D_{RCM} 兩種係數，然而，不同配比組成之混凝土皆會有不同之 D_P 與 D_{RCM} 關係式，因此本指引建議若有使用之混凝土配比的貯鹽試驗與 RCM 試驗數據，得以優先使用試驗數據求得關係式，而後進行擴散係數與傳輸係數之轉換。

若無相關試驗數據，可參考本指引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[24-31])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 試驗之經驗式如式(4-15)、28 天如式(4-16)。

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \dots\dots\dots(4-10)$$

$$D(t) = D_p \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \dots\dots\dots(4-11)$$

$$m = 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70} \right) \dots\dots\dots(4-12)$$

$$C_t \geq C_i + (C_0 - C_i) \left(1 - erf \frac{x_d - \Delta x}{2 \sqrt{\beta_{cl} D_p \left[\frac{t_{ref}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s} \right)^m (t - t_s) \right]}} \right) \dots\dots(4-13)$$

$$C_t \geq C_i + (C_0 - C_i) \left(1 - erf \frac{x_d - \Delta x}{2 \sqrt{\beta_{cl} D_p \left[\frac{t_{ref}^m t^{1-m}}{1-m} \right]}} \right) \dots\dots\dots(4-14)$$

$$D_{RCM} (56 \text{ Days}) = D_p \times 2.5 \dots\dots\dots(4-15)$$

$$D_{RCM} (28 \text{ Days}) = D_p \times 4 \dots\dots\dots(4-16)$$

普通卜特蘭水泥 $C_t = -3.0 \left(\frac{W}{B} \right) + 3.4 \dots\dots(4-17)$

混合水泥(爐石粉、飛灰) $C_t = -2.6 \left(\frac{W}{B} \right) + 3.1 \dots\dots(4-18)$

低熱高爐水泥，早強卜特蘭水泥 $C_t = -2.2 \left(\frac{W}{B} \right) + 2.6 \dots\dots(4-19)$

矽灰水泥 $C_t = 1.2 \dots\dots\dots(4-20)$

其中， t ：氯離子侵入之時間(年)。

t_{ref} ： D_p 對應之參考時間(sec)，取 90 天。

D_p ：混凝土氯任一參考時間之擴散係數($10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)。

m ：經驗係數，與卜作嵐摻料添加量有關，如(4-12)。

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), 如式(4-17)~(4-20)。

C_i : 混凝土初始氯離子濃度(kg/m^3), 參見 CNS 3090 新拌
混凝土最大水溶性氯離子含量規定。

C_0 : 混凝土表面氯離子濃度(kg/m^3), 參考表 4-9。

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_s : 氯離子擴散係數不再遞減之時間(sec), 取 25 年。

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

D_{RCM} : RCM 試驗混凝土傳輸係數($10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$)。

W/B : 混凝土水膠比。

4.3 硫酸鹽環境

1. 環境作用等級

參考美國 ACI 318-19(22)^[8]及內政部「建築物混凝土結構設計規範」^[9]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 4-10 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 4-10 硫酸鹽環境之作用環境分級^[8,9]

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 4-11 及表 4-12 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 4-11 曝露類別 S 的要求^[9]

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	V型加卜作嵐材料或水淬高爐爐渣粉 ⁽⁶⁾	含(HS)標記之分類加卜作嵐材料或水淬高爐爐渣粉 ⁽⁶⁾	不允許
	選項 2	0.40	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(C₃A)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 C₃A 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渣粉用量，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渣粉用量，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 4-12 曝露類別 S 的最大膨脹應變要求^[9]

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

備考：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 4-13 之參考文獻進行計算，表 4-13 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」^[9]第 19.3.1 節之規定辦理。

表 4-13 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) ^[32]	①水泥中 C ₃ A 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) ^[33]	①硫酸根離子在混凝土中之擴散係數 ②水泥中 C ₃ A 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) ^[34]	①硫酸根離子在混凝土中之擴散係數 ②水泥中 C ₃ A 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 ₃ A 含量越高，劣化深度反而越小，這與腐蝕機理互相違背。

參考文獻	所需輸入的參數	說明
Model for sulfate diffusion depth in concrete under complex aggressive environments and its experimental verification. (2015) ^[35]	①硫酸根離子在混凝土中之擴散係數 ②水泥中 C ₃ A 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 ₃ A 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) ^[36]	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) ^[37]	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 4-13 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[37]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：

$$K_f = K_W \cdot K_C \cdot K_F \cdot K_M \cdot K_S \cdot K_Y \cdot e^{-0.003t} \dots\dots\dots(4-21)$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{K_W K_C K_F K_M K_S K_Y}{0.75}\right)}{0.003} \dots\dots\dots(4-22)$$

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，標準養護 1.0、蒸氣養護 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^[38]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(4-26)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(4-26)、(4-27)中的 K_w 、 K_c 、 K_F 、 K_M 、 K_S 可藉由式(4-23)至(4-27)求得。

$$K_w = -2.30117 \frac{W}{B} + 1.97009 \dots\dots\dots(4-23)$$

$$K_c = -0.00018C^3 + 0.00446C^2 - 0.004632C + 1 \dots\dots\dots(4-24)$$

$$K_F = e^{-0.00052F^2 + 0.02350F} \dots\dots\dots(4-25)$$

$$K_M = -0.00023M^2 + 0.01116M + 1 \dots\dots\dots(4-26)$$

$$K_S = -0.00005S^4 + 0.00029S^3 + 0.00746S^2 - 0.03561S + 1 \quad (4-27)$$

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，%)。

第五章 混凝土橋附加保護措施

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。

本指引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。

5.1 混凝土表面防護

表面防護材料係指施作在混凝土表面上提供保護的各種材料，但要達成完善的保護系統要評估的並非只有這些，大部分的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 ACI222R^[2]、歐盟規範 EN1504-2^[39]與財團法人中興工程顧問社「混凝土結構物修補技術指引」^[40]。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指引。本指引將表面防護概分為：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. 一般原則

表面防護可應用於水平或垂直面，其施工方法和材料的選擇必須根據使用目的來進行考量。表面防護可減少混凝土之含水率，藉由阻止混凝土表面水分及氯化物滲入可降低鋼筋腐蝕的發生，雖然效果可能有差異，但是這些方法已在實驗室中證實有效且部分應用於現地時，對減緩腐蝕有實質效益。應用表面防護工法時，良好的

材料和施工品質是必要的。此外，確保防護方法、修補材料和既有混凝土表面狀況間的相容性同樣重要。評估使用各層材料彼此間的相容性，以避免各層材料間或與基底間的脫層及化學相關之失效。施工前適當的表面處理是必須的，且避免在不透氣表面防護間混入混凝土碎屑，施工應遵循製造廠商的建議和限制。

在規劃防護系統時，除了施作範圍本身，也必須一併評估其他可能影響防水或保護效果的因素。例如，未列入表面防護施工範圍的鄰近構造物，可能成為水分滲入的來源，包括相鄰的砌體、尚未修補或已修補的混凝土、樓板、隔水板的接縫或連續部位，以及其他可能降低防水系統性能的構造細節。

大多數表面防護工程必須在乾淨、乾燥且結構完整的基面上進行，並需在適當的溫度與濕度條件下、通風良好的環境中施工。若採用液態塗膜型材料，基面還需相對平整與光滑。由於實務現場未必能完全符合上述施工條件，因此為了達成這些要求所需投入的施工難度與成本，往往會影響防護系統的選擇。在防護系統施工前，所有混凝土表面必須完成修補並達到養護要求。多數材料製造商規定混凝土至少需養護 28 天後才能施作，但實際仍須依各產品規範辦理，必要時應向製造商確認其所需的硬化時間與施工條件。

對於膨脹縫、收縮縫端部、各類開孔、排水管線、緣石等細部位置，應事先檢討並採取適當的施工做法。混凝土板內含水率、溫度、污染物及其他環境因素，皆可能影響防護系統的施工品質與最終效果。施工過程中若產生可燃或有害的揮發性氣體，必須確實進行通風排除。施工時應完全依照製造商提供的施工規範執行，且所有使用材料均須符合揮發性有機化合物(VOC)相關法規要求。

由於各種防護系統及其材料皆有不同特性，在系統選用時，應針對重要性能加以評估，包括滲水率、水蒸氣滲透率、抗鋼筋腐蝕能力、裂縫封閉性能、延展性、防滑性、外觀表現、抗中性化能力，以及揮發性有機化合物相關特性等。

2. 表面防護材料

(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。某些具疏水性產品，可減少水分滲入狹窄的裂縫且通常不會改變混凝土表面的外觀，但有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酯(High Molecular-Weight Methacrylates, HMWM)。若以環氧樹脂為滲透配方只能輕微或完全不滲入混凝土，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 250 μm 或以下的產品。表面塗料和油漆的乾膜厚介於 30 μm 到 250 μm ，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 250 μm 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。表面密封劑通常會降低防滑性，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 250 μm 小於 750 μm 的材料，可外加顏料改變混凝土表面的外觀，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)等。厚塗塗料通常使用於裝飾或保護屏蔽系統，某些產品可適用於抗風雨、鹽分和溫和的化學品。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(如鹽分，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，具有良好黏著性和耐久性，摻細粒料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。無彈性的厚塗塗料不能封閉活動裂縫，但可填滿細小的靜止裂縫，且抗磨耗性相較薄塗料系統好。
- 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，與混凝土表面可能是黏著、部分黏著或不黏著的，能明顯改變混凝土表面外觀並能遮掩瑕疵。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、丙烯酸、環氧樹脂、合成橡膠(Neoprenes)、水泥、聚合物混凝土和瀝青產品等。薄膜材料通常使用於交通或人行系統的保護或防水，某些可用在防潮的系統。其應用和限制如下：

- ① 當這些產品為液態時，可以毛刷、刮板、滾輪、鏟刀或噴塗施工，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酯 (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。
- 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)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，其厚度能用來改善混凝土板表面的排水性。被覆層可用於封閉不移動的裂縫，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。詳細資料請參考 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、鏟抹、刮刷或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，並移除混凝土表面處理所產生的浮漿、灰塵和碎屑。
- ③ 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

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。詳細資料請參考 ACI 546.1R。瀝青和瀝青混凝土是多孔性材料，不具防水功能。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，可提高下層混凝土的承載能力。其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之水泥混凝土被覆層。在適當的基底前處理下具有良好黏著性，且因低水膠比，耐久性也有所提高。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，局部的黏著損壞，通常歸因於不適當的表面處理或施工不良。詳細資料請參考 ACI 222R、546.1R 和 PCA IS144。

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。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。詳細資料請參考 ACI515.1R。

③乳膠改性混凝土(LMC)被覆層

LMC 除了含有乳膠和較少的水以外，與傳統的混凝土類似。乳膠具有好的黏著特性及低水膠比，耐久性、黏著性與抗氯離子滲透性，摻用時乳膠內的水量應計入水泥的用水量中。其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。以含 15%卜特蘭水泥重量的膠固材料做為被覆層材料。但用於面層修飾時因氣候導致乾燥速度快將使得修飾較困難，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，否則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。此外，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，可提供耐久、耐磨的表面，若經適當調配可形成抗水、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，常用於防水或裝飾系統中的耐磨層。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，且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。

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 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，但其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。

5.2 耐腐蝕鋼筋

在腐蝕嚴苛的環境中，除施作基本防蝕方法外，可利用鋼筋表面防蝕加工之處理，達到更進一步的防蝕功能。鋼筋防蝕加工目前一般分為環氧樹脂鋼筋、熱浸鍍鋅鋼筋與其他種類之耐腐蝕鋼筋。

1. 環氧樹脂鋼筋

利用環氧樹脂塗料以均勻之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。環氧樹脂塗膜具有電氣絕緣性能，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，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。目前與環氧樹脂鋼筋有關之國內外標準與規定如下：

- (1) 美國 ASTM A934 「Standard Specification for Epoxy-Coated Prefabricated Steel Reinforcing Bars」。
- (2) 美國 ASTM A775 「Standard Specification for Epoxy-Coated Steel Reinforcing Bars」。
- (3) ISO 14654 「Epoxy-coated steel for the reinforcement of concrete」。
- (4) 日本 JSCE-E 102 「エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格」
- (5) 交通部「公路橋梁設計規範」第 7.1.13 節(受拉伸展長度)、第 7.1.16 節(帶有標準彎鉤受拉鋼筋之伸展)、第 7.1.21 節(鋼筋搭接設計)。
- (6) 交通部「鐵路橋梁設計規範」第 4.1.13 節(受拉伸展長度)、第 4.1.16 節(帶有標準彎鉤受拉鋼筋之伸展)、第 4.1.21 節(鋼筋搭接設計)。

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 5-1)，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，以儘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 5-1 彎曲試驗要求^[41]

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，鍍鋅層附著量規定如表 5-2 所示。

表 5-2 CNS 14771 鍍鋅層附著量規定^[42]

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	915
		D13 以上	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^[43]。
- (4) 製造、搬運、組裝、剪切造成損傷及末端切斷面依 CNS 15257 修補。

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 5-3 之規定，若經適當應力消除(加熱溫度 480°C~560°C，每 25 mm 直徑加熱 1 小時)，可避免鍍鋅

脆化，彎曲直徑不受表 5-3 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，因此建議避免^[43]。

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 5-2 要求需抽取 6 支重驗，若平均值符合表 5-2 則合格，否則拒收。鍍鋅鋼筋標示除依 CNS 560 規定外^[44]，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 5-3 最小彎曲直徑^[42]

鋼筋稱號	鋼筋種類		
	SD 280、SD 280 W	SD 420、SD 420 W	SD 490
D10、D13、D16	6 <i>d</i>	6 <i>d</i>	-
D19	6 <i>d</i>	6 <i>d</i>	6 <i>d</i>
D22、D25	6 <i>d</i>	8 <i>d</i>	8 <i>d</i>
D29、D32、D36、D39	-	8 <i>d</i>	8 <i>d</i>
D43、D50、D57	-	10 <i>d</i>	10 <i>d</i>

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承受氯化物極限濃度最高，耐腐蝕性能最為優異，而且在施工過程中如果鋼筋受到損壞，不會對其耐腐蝕性能產生影響。缺點是費用昂貴，造價約是普碳鋼鋼筋的 6~10 倍，另外需要對鋼筋的延展性加以注意。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)等。

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，從而導致不銹鋼鋼筋之鈍化膜完全或部分破壞，最終導致鋼筋腐蝕。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，許多國家已經制定了有關的標準，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。

- ① 歐盟 EN 10204 「Metallic products. Types of inspection documents」、EN 10088-1 「Stainless steels - Part 1: List of stainless steels」、EN 10088-3 「Stainless steels - Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resistant steels for general purposes」。
- ② 英國 BS 6744 「Stainless steel bars. Reinforcement of concrete. Requirements and test methods」、BS 8666 「Scheduling, dimensioning, bending and cutting of steel reinforcement for concrete. Specification」。
- ③ 美國 ASTM A955/A955M-20C 「Standard Specification for Deformed and Plain Stainless Steel Bars for Concrete Reinforcement」。

(2) 不銹鋼包覆鋼筋

為了使鋼筋同時具有不銹鋼的高耐腐蝕性能和相對較低的價格，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。目前有兩種加工製程，一種是將不銹鋼條銲接成管

狀，然後在壓力作用下將碳鋼顆粒填充在不銹鋼管子中形成碳鋼芯，形成兩端有皺褶的人造棒材，然後將其加熱軋製成鋼筋。另一種是在碳鋼鑄件上噴一層不銹鋼合金包覆層，然後將其加熱軋製成鋼筋。不銹鋼包覆鋼筋的優點主要有：鋼筋表面具有一層耐腐蝕層、比不銹鋼鋼筋便宜、材料性能良好時壽命預期值高；缺點以及可能出現的問題主要有：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 加固的主要價值在於其電化學惰性和對氯化物污染混凝土的抗腐蝕的能力，但設計者應考慮長期殘餘強度。儘管 GFRP 鋼筋不會表現出經典腐蝕，但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，將導致拉伸能力顯著降低，因此選擇 FRP 鋼筋時應謹慎。國外標準與規定如下：

- ① 中國 GB/T 26743 「結構工程用纖維增強複合材料筋」。
- ② 中國 GB 50608 「纖維增強複合材料工程應用技術標準」。
- ③ 中國 JG/T 406 「土木工程用玻璃纖維增強筋」。
- ④ 法國 「Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures」。

5.3 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，透過鋼材表面產生反應，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。國內外之腐蝕抑制劑相關標準如下所示：

1. ASTM G109

腐蝕抑制劑之效能試驗依照 ASTM G109 試驗方法，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

混凝土添加腐蝕抑制劑後，不應影響混凝土基本性質，依 AASHTO M194 之規定，腐蝕抑制劑需經過對混凝土強度之影響測試，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，須符合表 5-4 之規定，試驗方法依照 CNS 12457「鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法」。

表 5-4 氧化性腐蝕抑制之性能^[45]

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 配置鹽分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°C、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^[46]。但抗壓強度試驗之試體齡期為 7 天及 28 天。

5.4 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 5.1 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。

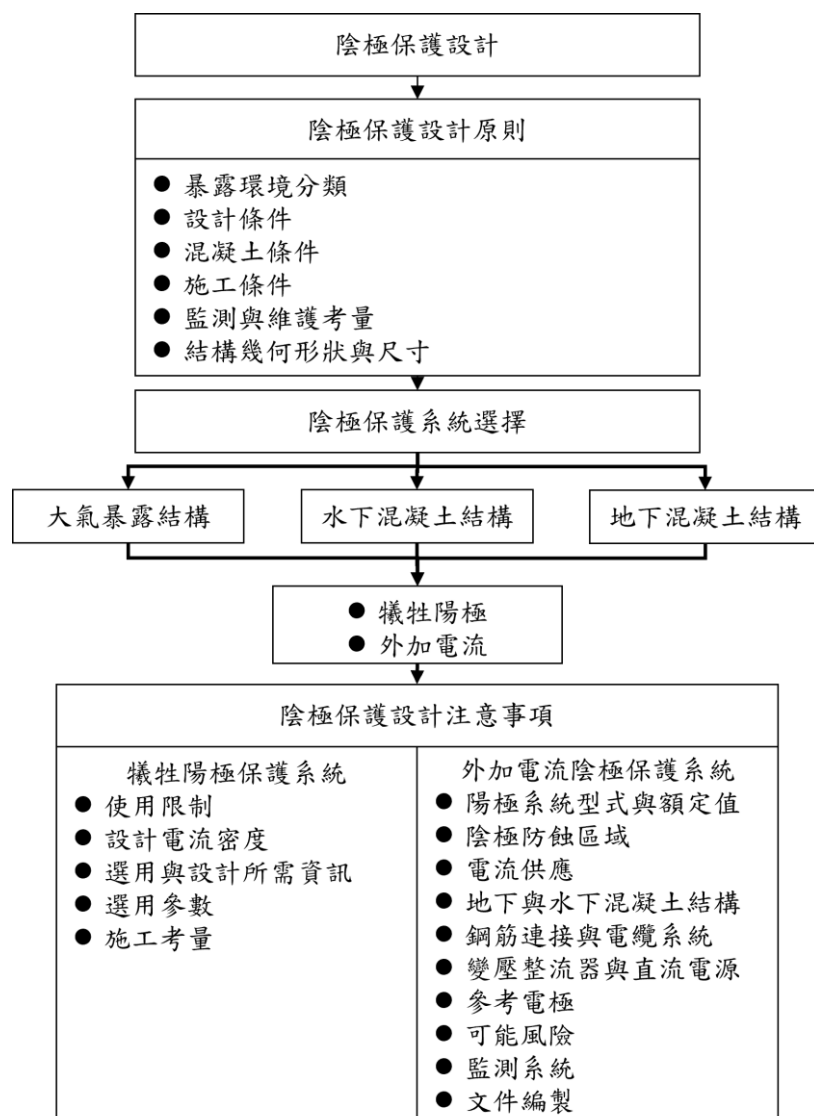


圖 5.1 陰極保護設計流程圖

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」。

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 5.2。

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，例如鉑或鈱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 5.3。

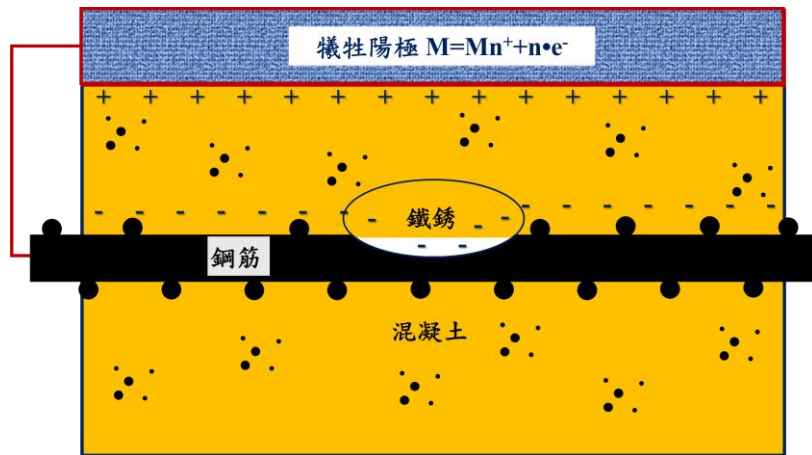


圖 5.2 犧牲陽極保護系統示意圖

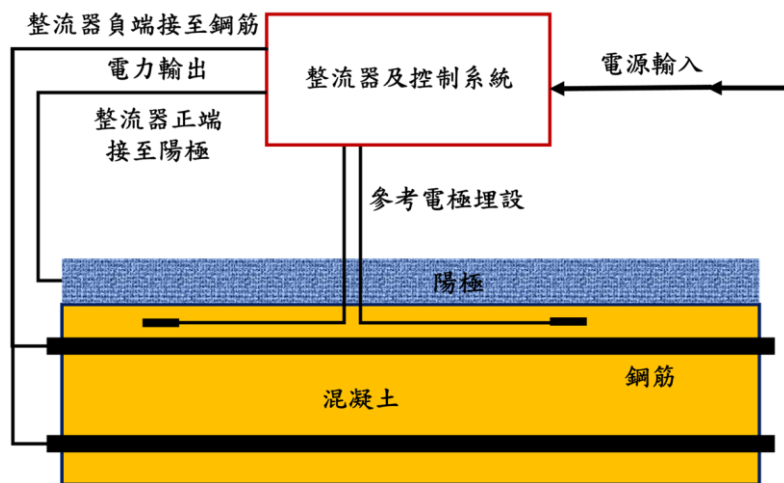


圖 5.3 外加電流陰極保護系統示意圖

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，依以下因素進設計，包括但不限於：

(1) 曝露環境分類(地下、水下、潮汐、飛濺、大氣、遮蔽、曝露等)

(2) 設計條件

① 設計年限與服務環境

② 結構幾何形狀與尺寸

③ 陽極重量、分佈與評估電流需求

④分區設計

A.將結構分為獨立電路(每區 200~500 m²)，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

⑤電流影響：雜散電流、宏觀電池或加凡尼電流

⑥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 $\geq -0.80 \text{ V(SCE)}$

(3)混凝土條件

①設計：混凝土厚度與鋼筋表面積、鋼筋混凝土、預力混凝土

②品質：電阻率、滲透性、水泥固有鹼度

③狀態：濕度含量、氯化物含量、中性化深度

(4)施工條件

①設計文件：

A.詳細之相關計算

B.安裝圖紙

C.材料及設備規格

D.安裝、測試、啟用、啟動及操作之詳細方法陳述或規格

E.預力構件之氫脆及雜散電流風險評估

②安裝限制

(5)監測與維護考量

①運作條件與維護便利性

②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 potential decay electrode(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計算，以確保電流供應均勻。系統包含犧牲陽極以及陽極與鋼筋間之連接，種類如下：

① 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，可於未損壞之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。

② 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 金屬塗層。Zn 塗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。

③ 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。

④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。

⑤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。

⑥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。

(2) 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(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。

4. 陰極保護設計注意事項

(1) 犧牲陽極保護系統

依 Nace SP0216 規範，犧牲陽極保護系統設計注意事項如下：

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，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 $0.2\sim 20 \text{ mA/m}^2$ ($0.02\sim 1.9 \text{ mA/ft}^2$)，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。若腐蝕為氯離子污染，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、維修便利性及交通面防滑性。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 保護準則規定如下：
 - (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。

(2) 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，以及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. 濺水區(以嵌入或表面安裝之陽極防護，依 ISO 12696 規定)。
- D. 大氣區(以類似或不同型式之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： $2 \text{ mA/m}^2 \sim 20 \text{ mA/m}^2$ 。
- B. 無氯化物混凝土中之鋼筋陰極預防： $0.2 \text{ mA/m}^2 \sim 2 \text{ mA/m}^2$ 。
- C. 當氯離子含量、濕度與溫度較高時，所需電流密度亦會隨之增加。
- 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/m^2 。
- 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)並具電壓下降時可為負載的瞬態負載提供更大裕度的能力。若陽極直接固定於結構，應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 $\text{Ag}/\text{AgCl}/0.5\text{M KCl}$ 。

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 $\text{Ag}/\text{AgCl}/0.5\text{M KCl}$ 雙電極設計，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 $> 30 \text{ mV}$ (低阻抗電錶: $10\text{M}\Omega \sim 20\text{M}\Omega$; 高

阻抗電錶: 500MΩ~1000MΩ)。

(c) 飽和甘汞(Hg/Hg₂Cl₂)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 5-5 所示。

表 5-5 常見參考電極與保護判釋標準^[47]

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 ₂ SO ₄ /SO ₄ ²⁻	K ₂ SO 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)最為保險之做法。

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^[48]，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/m²)條件下，發生顯著握裹強度喪失約需 48 年。基於此研究結果^[49]，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備，以達到所需的監測與控制精度。同時應確定資料管理需求，包括數據收集、儲存、分析與報告方式。

⑩ 文件編製

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。

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 混凝土橋防蝕施工

7.1 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 $0.30 \text{ kg} / \text{m}^3$ ；預力混凝土不得超過 $0.15 \text{ kg} / \text{m}^3$ 。

(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)若含鹽分不符合 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) 水淬高爐爐渣粉：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)

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〕規定辦理。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

鍍鋅鋼筋應符合 CNS 14771〔鋼筋混凝土用熱浸鍍鋅鋼筋〕之規定。鍍鋅鋼筋也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〕之規定。

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) 位於含鹽分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

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，其錨固性能均應符合規定並由試驗驗證之，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」。

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、鹽分或灰塵之附著，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、鹽分、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。

7.2 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，如季風會夾帶鹽分量增加的時期，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 為防止鋼筋上有鹽分附著而導致腐蝕，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分，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 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分附著於鋼筋及模板上，應先清洗後再進行混凝土澆置。確保所需保護層厚度為防蝕對策中極重要的一點，鋼筋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 / m² 以上，而梁、橋面板等地方則以 4 個 / m² 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捆紮、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，則同樣會發生鋼筋腐蝕問題。
- (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，往往為鹽分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，亦應以水泥漿塗刷、薄板或布等方式覆蓋，並採附加保護措施，減低受鹽分影響。
- (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

犧牲陽極保護系統的施工可參考 NACE SP0216 規範，安裝缺陷會嚴重影響犧牲其性能。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(通常超過 28 天)至表面 pH 足夠降低，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，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。本指引僅摘錄其部分內容加以說明，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，則除本指引之施工標準要求外，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之固定和保護，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 1.0Ω ，電纜與鋼筋的連接方法應確保長期電纜-鋼筋電阻小於 0.01Ω 。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 VDC。安裝後應根據品質計畫進行測試，測試的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。

7.3 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 7-1 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 7-1 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型質之傷害。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為所需要之種類品質，且避免異質金屬之接觸，防止產生腐蝕而傷害構造物耐久性。

(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上，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][] m² 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 7-2 選擇，檢測儀器的精度應滿足表 7-3 之規定。

表 7-2 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 7-3 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][] m³ 時，每 [1000][] m³ 增加 1 處，所餘數量未足[1000][] m³ 但超過 [300][] m³ 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：為避免鹽分易於滲入，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

混凝土要達到耐久性防蝕之品質要求，除一般之檢驗項目外，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][] m³ 隨機取樣 1 組，所餘數量未足[1000][] m³ 但超過[300][] m³ 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 m²(10 ft²)。

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設計年限或系統完全拆除，且報告應寫明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。

- 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與初始系統性能評估期間採集的所有測量及測試數據，以及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。

第八章 既有混凝土橋梁檢測與維護(第二年工作範圍)

參考文獻

1. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J., “Concrete microstructure, properties, and materials,” McGraw-hill (2006).
2. ACI 222R-19 “Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete Against Corrosion,” (2019)
3. 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).
4. ACI PRC-365.1R-17 “Report on Service Life Prediction,” (2017).
5. fib bulletin 34 “Model code for service life design,” (2006).
6. 日本土木学会，「コンクリート標準示方書〔設計編〕」，2022年。
7. Chen, Weifeng, et al., “Deterioration process of concrete exposed to internal sulfate attack,” Materials 13.6 : 1336 (2020).
8. ACI CODE-318-19(22) “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022),” (2022).
9. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，2024年。
10. AASHTO LRFD “Bridge Design Specifications 10th Edition,” (2024).
11. BS EN 1990 “Eurocode - Basis of structural and geotechnical design,” (2023).
12. Eurocode 2 “APPLICATION TO CONCRETE HIGHWAY BRIDGES,” (2007).
13. BS EN 1992-1-1 2023 “Eurocode 2. Design of concrete structures - General rules. Structural fire design,” (2023).
14. 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。
15. 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。

16. 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。
17. 陳俊宏、周延聲、李臺生、謝文凱，「臺中捷運烏日文心北屯線-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。
18. ACI SPEC-301-16 “Specifications for Structural Concrete,” (2016).
19. 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。
20. 交通部，「公路橋梁設計規範」，2020 年。
21. 交通部，「鐵路橋梁設計規範」，2023 年。
22. 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。
23. Caltrans “MEMO TO DESIGNERS 10-5 PROTECTION OF REINFORCEMENT AGAINST CORROSION DUE TO CHLORIDES, ACIDS AND SULFATES,” (2010).
24. 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。
25. 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。
26. 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。
27. 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。
28. 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。

29. 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。
30. 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。
31. 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。
32. 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).
33. 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).
34. 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).
35. 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).
36. 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).
37. 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。
38. 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。

39. 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).
40. 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。
41. ASTM A775/A775M-22 “Standard Specification for Epoxy-Coated Steel Reinforcing Bars,” (2022).
42. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 14771 A2283 「鋼筋混凝土用熱浸鍍鋅鋼筋」，2015年。
43. 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。
44. 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。
45. 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。
46. 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。
47. ISO 12696:2022 “Cathodic protection of steel in concrete,” (2022).
48. NACE Publication 01102-2018 “State-of-the-Art Report: Criteria for Cathodic Protection of Prestressed Concrete Structures,” (2018).
49. 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).

附錄一 鹽害耐久性理論計算範例

1. 參數設定

鹽害耐久性理論計算，首先須確定混凝土之條件，包含環境作用等級分區、構件類型、混凝土配比組成，而保護層厚度、混凝土抗氯離子能力(擴散係數)與設計年限，可視耐久性設計需求設為未知數，本範例之參數整理如表 A-1，可能知設計需求如下。

- (1) 求設計年限：帶入構件之最小保護層厚度與混凝土之氯離子擴散係數(D_p)。
- (2) 求考量施工誤差之最小保護層厚度：帶入設計年限與混凝土之氯離子擴散係數(D_p)。
- (3) 求最大擴散係數(D_p)：帶入設計年限與最小保護層厚度。

表 A-1 計算範例之模擬情境

橋址環境：臨海		
環境作用等級：極嚴重鹽害區		極嚴重鹽害區
構件類型：「I」「T」梁		$\beta_{cl}=1.4$
混凝土配比組成	水膠比	0.40
	爐石取代水泥量	35 (%)
	飛灰取代水泥量	15 (%)
保護層厚度		7.5 cm (0.075 m)
保護層施工誤差		0.5 cm (0.005m)
90 天齡期貯鹽試驗擴散係數(D_p)		1.4 ($10^{-12}m^2/s$)
設計年限		120 (years)

2. 計算公式

鹽害耐久性理論計算所需公式與詳細內容請參照 4.2 節「鹽害環境」，本附錄僅摘錄部份內容用於解說。

$$C_t \geq C_i + (C_0 - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x_d - \Delta x}{2 \sqrt{\beta_{cl} D_p \left[\frac{t_{ref}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s} \right)^m (t - t_s) \right]}} \right) \dots (A-1)$$

$$C_t \geq C_i + (C_0 - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x_d - \Delta x}{2 \sqrt{\beta_{cl} D_p \left[\frac{t_{ref}^m t_s^{1-m}}{1-m} \right]}} \right) \dots (A-2)$$

$$m = 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA\%}{50} + \frac{SG\%}{70} \right) \dots (A-3)$$

混合水泥(爐石粉、飛灰) $C_i = -2.6 \left(\frac{W}{B} \right) + 3.1 \dots (A-4)$

$$D_{RCM} (56 \text{ Days}) = D_p \times 2.5 \dots (A-5)$$

$$D_{RCM} (28 \text{ Days}) = D_p \times 4 \dots (A-6)$$

3. 氯離子濃度計算

式(A-1)包含三種氯離子濃度，臨界氯離子濃度(C_t)、初始氯離子濃度(C_i)、表面氯離子濃度(C_0)。

(1) C_t ：依式(A-4)，計算結果為，2.19 (kg/ m³)。

(2) C_i ：依 CNS 3090 規定，為 0.15 (kg/ m³)。

(3) C_0 ：依表 A-2，極嚴重鹽害區為 30 (kg/ m³)。

表 A-2 表面氯離子濃度對照表

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

4. 計算公式

當前所有已知條件整理如表 A-3，依需求帶入式(A-1)即可計算，結果如表 A-4。若有進一步之擴散係數轉換傳輸係數需求，可帶入式(A-5)或(A-6)。此外，若經式(A-1)計算後之設計年限小於 25 年，則需以式(A-2)帶入表 A-3 條件重新計算。而由表 A-4 可知：

- (1) 保護層 7.5cm、 D_P 為 $1.4 (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 之設計年限可達 101 年。
- (2) 設計年限 120 年、 D_P 為 $1.4 (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 之其最小保護層厚度為 8 cm。
- (3) 在設計年限 120 年、保護層厚度 7.5cm 之設計條件，90 天齡期混凝土 D_P 需小於 $1.21 (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ ，抑或是 56 天齡期之 D_{RCM} 需小於 $3.03 (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 、28 天齡期之 D_{RCM} 需小於 $4.84 (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 。

表 A-3 模擬情境相關參數

項目	數值	單位
C_t	2.19	(kg/ m ³)
C_i	0.15	(kg/ m ³)
C_0	30	(kg/ m ³)
m	0.52	-
Δx	0.005	(m)
t_{ref}	7776000	(sec)
t_s	788400000	(sec)
β_{cl}	1.4	-

表 A-4 各設計需求之計算結果

設計需求	已知條件	計算結果
求設計年限(t)	$x_d = 0.075(\text{m})$ $D_P = 1.4$	$t = 101 (\text{years})$
求考量施工誤差之 最小保護層厚度(x_d)	$t = 3784320000(120 \text{ 年})$ $D_P = 1.4$	$x_d = 0.08 (\text{m})$ $= 8 (\text{cm})$
求最大擴散係數(D_P)	$t = 3784320000(120 \text{ 年})$ $x_d = 0.075(\text{m})$	$D_P = 1.21 (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ $D_{RCM} (56) = 3.03 (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ $D_{RCM} (28) = 4.84 (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$

115-032-7E22

MOTC-IOT-114-H1DB008

鐵公路橋梁之防蝕技術指引

鋼橋篇

著者：邱建國、蔡立宏、賴瑞應、黃焜宏、
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

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	V
表目錄.....	VIII
照片目錄.....	XII
第一章 總則.....	1-1
1.1 前言.....	1-1
1.2 適用範圍.....	1-2
1.3 參考規範.....	1-3
第二章 鋼橋的腐蝕機理.....	2-1
2.1 鋼材腐蝕.....	2-1
2.2 鋼橋腐蝕分類和型式.....	2-2
2.3 環境與腐蝕.....	2-6
2.4 其他腐蝕.....	2-10
第三章 鋼橋防蝕考量與方法.....	3-1
3.1 鋼橋防蝕方法應具備的條件.....	3-1
3.2 鋼橋防蝕方法.....	3-2
3.3 鋼橋防蝕設計.....	3-9
3.3.1 一般.....	3-9
3.3.2 防蝕方法的選擇.....	3-11
3.3.3 防蝕方法所需的結構設計.....	3-15
3.3.4 重新評估防蝕方法.....	3-26
第四章 塗裝.....	4-1

4.1 前言	4-1
4.1.1 一般.....	4-1
4.1.2 適用範圍.....	4-3
4.2 防蝕設計	4-4
4.2.1 設計理念.....	4-4
4.2.2 防蝕設計.....	4-5
4.2.3 結構設計注意事項.....	4-34
4.3 施工	4-37
4.3.1 製作及施工注意事項.....	4-37
4.3.2 新設塗裝施工.....	4-42
4.3.3 施工及品質管理.....	4-47
第五章 耐候性鋼材	5-1
5.1 前言	5-1
5.1.1 一般.....	5-1
5.1.2 適用範圍.....	5-3
5.2 防蝕設計	5-3
5.2.1 設計理念.....	5-3
5.2.2 防蝕設計.....	5-6
5.2.3 結構設計注意事項.....	5-18
5.3 施工	5-27
5.3.1 製作及施工注意事項.....	5-27
5.3.2 防蝕施工.....	5-29
5.3.3 施工及品質管理.....	5-30
第六章 熱浸鍍鋅.....	6-1

6.1 前言	6-1
6.1.1 一般.....	6-1
6.1.2 適用範圍.....	6-4
6.2 防蝕設計	6-4
6.2.1 設計理念.....	6-4
6.2.2 防蝕設計.....	6-7
6.2.3 結構設計注意事項.....	6-11
6.3 施工	6-29
6.3.1 製作及施工注意事項.....	6-29
6.3.2 熱浸鍍鋅施工.....	6-36
6.3.3 施工及品質管理.....	6-40
第七章 金屬熔射	7-1
7.1 前言	7-1
7.1.1 一般.....	7-1
7.1.2 適用範圍.....	7-2
7.2 防蝕設計	7-3
7.2.1 設計理念.....	7-3
7.2.2 防蝕設計.....	7-7
7.2.3 結構設計注意事項.....	7-15
7.3 施工	7-20
7.3.1 製作及施工注意事項.....	7-20
7.3.2 金屬熔射施工.....	7-23
7.3.3 施工及品質管理.....	7-29
第八章 生命週期成本最佳化評估(第二年工作範圍).....	8-1

8.1 生命週期成本分析	8-1
8.2 碳排量評估	8-1
參考文獻.....	1

圖目錄

圖 2.1 鋼材腐蝕的電化學反應.....	2-1
圖 2.2 鋼橋典型的腐蝕分類.....	2-2
圖 2.3 電氣絕緣示意圖.....	2-4
圖 2.4 孔蝕示意圖.....	2-4
圖 2.5 間隙腐蝕示意圖.....	2-5
圖 3.1 鋼橋防蝕方法.....	3-4
圖 3.2 防蝕設計流程圖.....	3-10
圖 3.3 扇形孔範例.....	3-16
圖 3.4 箱型梁排水孔範例.....	3-17
圖 3.5 伸縮縫止水結構導水範例.....	3-18
圖 3.6 橋面板(防水層)上排水範例.....	3-20
圖 3.7 橋面板截水範例.....	3-20
圖 3.8 排水管垂流尾端處理範例.....	3-21
圖 4.1 塗裝防蝕設計流程圖.....	4-5
圖 4.2 含混凝土橋面板之鋼橋塗裝示意圖.....	4-9
圖 4.3 鋼床板及鋼箱梁塗裝示意圖.....	4-9
圖 4.4 螺栓接合部塗裝系統示意圖.....	4-18
圖 4.5 角部曲面形式示意圖.....	4-34
圖 5.1 耐候性鋼材緻密氧化層的生成機制.....	5-4
圖 5.2 日本耐候鋼無需塗裝的適用範圍.....	5-9
圖 5.3 JIS 耐候性鋼的腐蝕預測曲線.....	5-10
圖 5.4 受融雪劑影響的大梁配置.....	5-11

圖 5.5 溝槽式立體交叉橋.....	5-11
圖 5.6 基於宏觀和微觀環境的耐候性鋼材使用總體概念.....	5-13
圖 5.7 腹板連接板範例.....	5-19
圖 5.8 I 型梁底部翼板連接板範例.....	5-20
圖 5.9 翼板等水平構件應避免的結構示意圖.....	5-22
圖 5.10 導水用的排水溝或邊牆應避免的結構示意圖.....	5-23
圖 5.11 防止橋面板設置前銹蝕污染的範例.....	5-23
圖 5.12 下部結構(橋台)上方塗裝範圍範例.....	5-25
圖 5.13 地面接近區域下的局部塗裝範例.....	5-25
圖 5.14 撒布融雪劑情況下的局部塗裝範例.....	5-25
圖 6.1 臺灣歷年來熱浸鍍鋅橋梁重量統計圖.....	6-3
圖 6.2 鋅、鐵的腐蝕機制.....	6-6
圖 6.3 熱浸鍍鋅的防蝕機制.....	6-6
圖 6.4 箱型梁的分割方法示意圖.....	6-13
圖 6.5 箱型梁分割法典型範例.....	6-14
圖 6.6 支承處接頭範例.....	6-15
圖 6.7 中隔板形式示意圖.....	6-18
圖 6.8 隔板開口和扇形孔形狀範例.....	6-18
圖 6.9 端部隔板型式範例.....	6-19
圖 6.10 端部支撐側構件的浸入方式示意圖.....	6-19
圖 6.11 構件端部較寬時的接頭位置範例.....	6-19
圖 6.12 中間支撐處隔板型式範例.....	6-20
圖 6.13 構件浸入方式和排氣孔示意圖.....	6-20
圖 6.14 垂直和斜向構件收窄結構變化範例.....	6-21

圖 6.15 隔板開口範例.....	6-21
圖 6.16 對接方法詳圖.....	6-22
圖 6.17 箱形斷面詳圖.....	6-23
圖 6.18 加勁板安裝位置範例.....	6-23
圖 6.19 水平向加勁板端部範例.....	6-24
圖 6.20 豎向加勁板端部範例.....	6-24
圖 6.21 防止膨脹的加勁板範例.....	6-25
圖 6.22 防止未鍍區域的細部範例.....	6-26
圖 6.23 改善熔融鋅滴落範例.....	6-26
圖 6.24 預防不熱浸鍍鋅範例.....	6-27
圖 6.25 摩擦接合面處理範圍範例.....	6-30
圖 6.26 懸掛吊具和浸沒狀態範例.....	6-33
圖 6.27 鋼構件熱浸鍍鋅作業流程.....	6-37
圖 6.28 未分割箱梁浸沒方式示意圖.....	6-39
圖 7.1 熔射的作業條件示意圖.....	7-15
圖 7.2 2R 以上倒角範例.....	7-17
圖 7.3 加勁板切口範例.....	7-17
圖 7.4 熔射困難部位示意圖.....	7-19
圖 7.5 熔射困難部位(狹窄部位)示意圖.....	7-19
圖 7.6 熔射困難部位(螺栓部位)示意圖.....	7-20
圖 7.7 金屬熔射方法配置及成膜機制示意圖.....	7-23
圖 7.8 金屬熔射施工流程圖.....	7-24

表目錄

表 2-1 常見純金屬於標準氫電極之還原電位	2-3
表 2-2 常用金屬在海水中的加凡尼序列	2-3
表 2-3 大氣腐蝕性分類(CNS 13401)	2-6
表 2-4 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)	2-7
表 2-5 腐蝕促進因子與地理、地形及結構因素	2-9
表 3-1 鋼橋典型防蝕方法	3-3
表 3-2 鋼橋典型防蝕方法適用環境	3-13
表 3-3 典型防蝕方法施工所需結構條件	3-23
表 3-4 確保品質應注意的施工條件	3-27
表 4-1 不同塗料間之相容性	4-7
表 4-2 裸鋼面外部塗裝系統	4-10
表 4-3 A3-Z 塗裝系統	4-11
表 4-4 A3-N 塗裝系統	4-11
表 4-5 A4-Z 塗裝系統	4-12
表 4-6 A4-N 塗裝系統	4-12
表 4-7 A5-Z 塗裝系統	4-13
表 4-8 A5-N 塗裝系統	4-13
表 4-9 AX-Z 塗裝系統	4-14
表 4-10 AX-N 塗裝系統	4-14
表 4-11 AX ⁺ -Z 塗裝系統	4-15
表 4-12 AX ⁺ -N 塗裝系統	4-15

表 4-13 內部塗裝系統.....	4-16
表 4-14 B1 塗裝系統.....	4-16
表 4-15 B2 塗裝系統.....	4-16
表 4-16 B3 塗裝系統.....	4-17
表 4-17 D1 塗裝系統.....	4-17
表 4-18 D2 塗裝系統.....	4-17
表 4-19 E1 塗裝系統.....	4-19
表 4-20 E2 塗裝系統.....	4-19
表 4-21 E3 塗裝系統.....	4-20
表 4-22 E4 塗裝系統.....	4-20
表 4-23 F1 塗裝系統.....	4-21
表 4-24 F2 塗裝系統.....	4-22
表 4-25 F3 塗裝系統.....	4-22
表 4-26 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.....	4-23
表 4-27 G3-1 塗裝系統.....	4-24
表 4-28 G3-2 塗裝系統.....	4-24
表 4-29 G4-1 塗裝系統.....	4-25
表 4-30 G4-2 塗裝系統.....	4-25
表 4-31 G5-1 塗裝系統.....	4-26
表 4-32 G5-2 塗裝系統.....	4-26
表 4-33 GX-1 塗裝系統.....	4-27
表 4-34 GX-2 塗裝系統.....	4-27
表 4-35 GX ⁺ 塗裝系統.....	4-28

表 4-36 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.....	4-29
表 4-37 T4-1 塗裝系統.....	4-29
表 4-38 T4-2 塗裝系統.....	4-29
表 4-39 T5-1 塗裝系統.....	4-30
表 4-40 T5-2 塗裝系統.....	4-30
表 4-41 TX-1 塗裝系統.....	4-31
表 4-42 TX-2 塗裝系統.....	4-31
表 4-43 TX ⁺ 塗裝系統.....	4-32
表 4-44 色彩設計時對景觀與居民的考慮事項	4-33
表 4-45 塗層損傷程度與修補施工方法	4-42
表 4-46 塗裝系統廠內與現場噴塗面漆優、缺點比較表	4-43
表 4-47 鋼材銹蝕等級與表面清潔度對應照片編號表(ISO 8501-1)..	4-49
表 4-48 表面粗糙度之檢驗時機與頻率	4-51
表 4-49 塗裝作業中常發生之缺陷及防範與處理方法	4-53
表 5-1 國內採用耐候性鋼材橋梁案例	5-3
表 5-2 耐候性鋼材橋梁層狀剝離銹蝕外觀及發生部位與原因	5-5
表 5-3 採用耐候性鋼材做為鋼橋防蝕方法之設計流程	5-7
表 5-4 不同環境下使用耐候性鋼材的建議	5-12
表 5-5 橋梁結構用耐候鋼及其對應之銲接方法與適用銲材	5-14
表 5-6 螺栓的最大中心間隔	5-21
表 6-1 臺灣採用熱浸鍍鋅之大型板梁橋一覽表	6-3
表 6-2 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).....	6-8

表 6-3 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})(CNS 16238).....	6-8
表 6-4 熱浸鍍鋅附著量.....	6-10
表 6-5 臺灣地區具代表性之鍍鋅槽一覽表.....	6-12
表 6-6 高強度螺栓的機械性質.....	6-15
表 6-7 熱浸鍍鋅 ASTM A325 螺栓組合.....	6-16
表 6-8 熱浸鍍鋅 F8T 螺栓組合.....	6-17
表 6-9 鍍鋅後構件之容許誤差.....	6-41
表 6-10 熱浸鍍鋅構件螺栓孔貫穿率及阻塞率.....	6-41
表 6-11 鍍鋅層附著量與硫酸銅試驗次數(CNS 10007).....	6-42
表 7-1 熔射金屬的性能.....	7-5
表 7-2 金屬熔射層表面生成的化合物種類及溶解度.....	7-5
表 7-3 金屬熔射材料的特性及腐蝕行為(ISO 2063-1).....	7-6
表 7-4 金屬熔射規格.....	7-11
表 7-5 金屬熔射材料種類及最小局部厚度(JIS H8300).....	7-11
表 7-6 金屬熔射塗層厚度的建議值(單位： μm)(ISO 2063-1).....	7-12
表 7-7 連接部位熔射規格.....	7-12
表 7-8 熔射施工困難部位的防蝕規格.....	7-13
表 7-10 金屬熔射表面處理的要求.....	7-25
表 7-11 使用粗面形成劑的表面處理.....	7-26
表 7-9 未封孔金屬熔射層的拉拔強度典型值(ISO 4624).....	7-30

照片目錄

照片 5.1 關渡大橋(資料來源:國家發展委員會檔案管理局).....	5-3
照片 6.1 臺灣第一座採用熱浸鍍鋅之橋梁(馬槽橋).....	6-3
照片 6.2 臺灣第一座採用熱浸鍍鋅之鋼拱橋(福興橋).....	6-3
照片 6.3 文湖線 CB430 區段標鋼箱梁橋(P12~P15).....	6-4
照片 6.4 全橋鋼筋採用熱浸鍍鋅之橋梁(鹿安橋).....	6-4
照片 6.5 熱浸鍍鋅層的顯微照片 ^[2]	6-4

第一章 總則

1.1 前言

公共工程結構物設計使用年限大多為 50 年、100 年，但一些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。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。

基於此，本指引之擬訂以全生命週期之角度為基礎，對於新建橋梁之全生命週期耐久性設計與既有橋梁之檢測、修補與維護提出建議，期望透過較高標準之耐久性設計，改變以往以初期成本考量為重之設計思維，從而避免橋梁之汰換或大規模維修，努力延長其使用年限，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。

根據以往調查，鋼橋需改建的主要損傷型態包括：鋼材腐蝕與混凝土橋面板劣化，防止鋼橋腐蝕所導致的損傷，提升耐久性至關重要。因此，參與鋼橋新建及維護管理的相關技術人員，應充分認識防蝕的重要性，並精通防蝕技術。

1.2 適用範圍

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，本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)」^[1]。此外，若各機關已有原先之作業要點，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。

除本指引外，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。

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。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」^[2]第 6.3 章及「鐵路橋梁檢測及補強規範」^[3]第 6.5 章。本指引組成架構與參考順序如圖 1.1 所示。

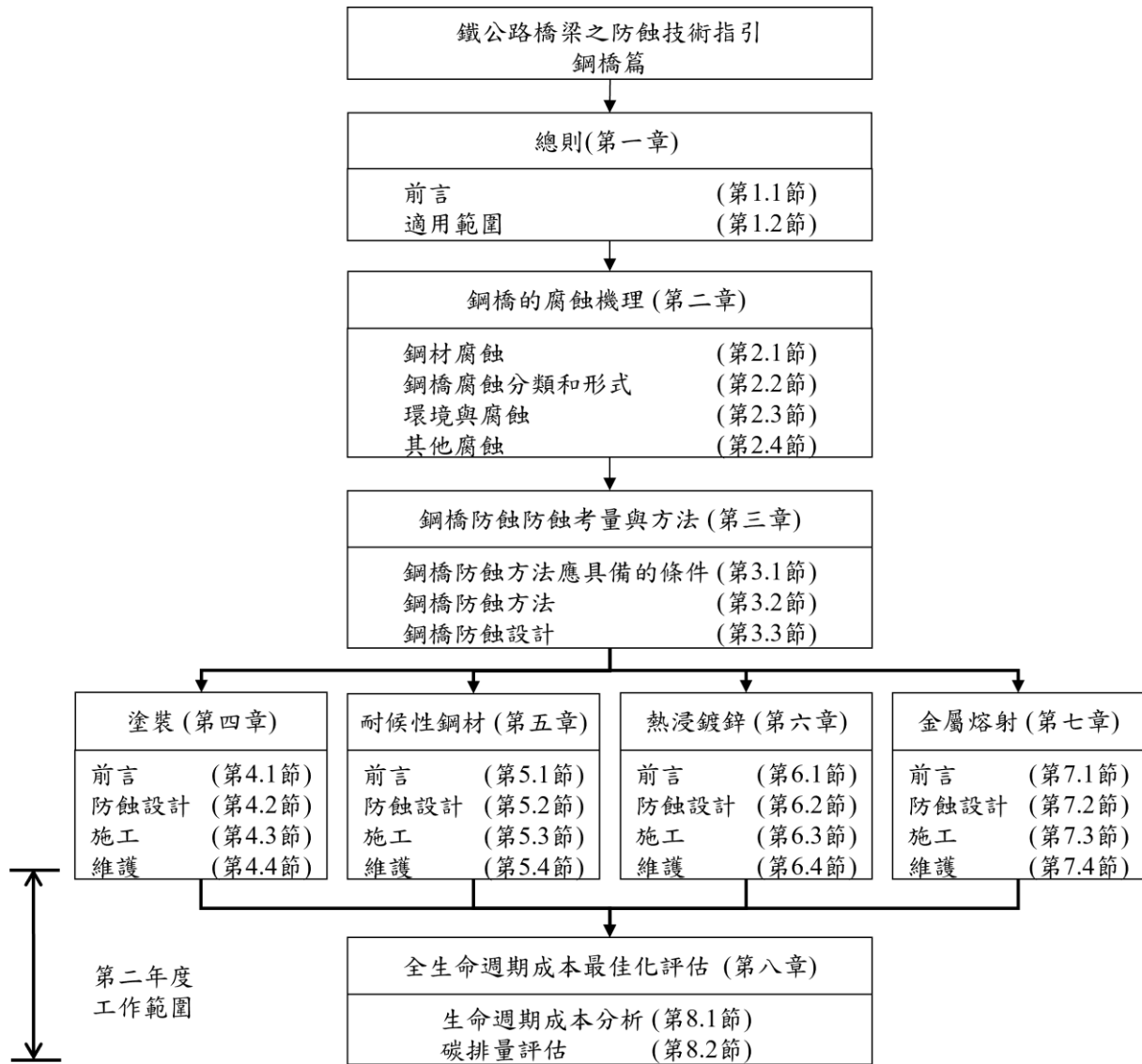


圖 1.1 本指引組成架構與參考順序

1.3 參考規範

本指引所參考的相關規範及標準如下：

1. 交通部，「公路橋梁設計規範」，民國 109 年 1 月 3 日。
2. 交通部，「公路橋梁檢測及補強規範」，民國 109 年 01 月 3 日。
3. 交通部，「鐵路橋梁設計規範」，民國 112 年 2 月 15 日。
4. 交通部，「鐵路橋梁之檢測及補強規範」，民國 114 年 9 月 24 日。

5. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 9「鋅錠」，民國 94 年 7 月。
6. 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」，民國 104 年 11 月。
7. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 3667「鋁及鋁合金棒及線」，民國 98 年 9 月。
8. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 4237「結件-熱浸鍍鋅被覆蓋」，民國 110 年 4 月。
9. 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」，民國 111 年 5 月。
10. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 4935「環氧樹脂非鋅底漆」，民國 75 年 5 月。
11. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 4936「厚塗型鋅粉漆」，民國 111 年 4 月。
12. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 4938「環氧樹脂漆」，民國 76 年 5 月。
13. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 4939「環氧樹脂柏油漆」，民國 106 年 10 月。
14. 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」，民國 100 年 9 月。
15. 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」，民國 104 年 11 月。
16. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 9007「塗料一般檢驗法—取樣及試驗一般條件」，民國 84 年 1 月。
17. 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」，民國 104 年 11 月。
18. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 11328「摩擦接合用高強度六角螺栓、六角螺帽及平墊圈組套件」，民國 74 年 8 月。

19. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13037 「耐候性鋼用被覆鍍條」，民國 96 年 5 月。
20. 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」，民國 108 年 10 月。
21. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15031 「鋼鐵熱浸鍍 5% 鋁—鋅」，民國 95 年 10 月。
22. 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」，民國 111 年 11 月。
23. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15200-5-6 「塗料一般試驗法—第 5-6 部：塗膜機械性質：附著試驗(方格法)」，民國 99 年 5 月。
24. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15200-5-7 「塗料一般試驗法—第 5-7 部：塗膜機械性質：附著試驗(拉脫法)」，民國 99 年 5 月。
25. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15257 「熱浸鍍鋅熱浸鍍鋅損傷及裸點補修」，民國 98 年 3 月。
26. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15504 「橋梁用高降伏強度鋼板」，民國 113 年 2 月。
27. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 15665 「鋼構用長期耐候性塗料」，民國 102 年 10 月。
28. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-1 「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」，民國 111 年 8 月。
29. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-2 「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」，民國 111 年 8 月。
30. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-3 「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」，民國 111 年 8 月。

31. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-4 「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」，民國 111 年 8 月。
32. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-5 「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」，民國 111 年 8 月。
33. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-6 「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」，民國 111 年 8 月。
34. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-7 「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」，民國 111 年 8 月。
35. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-8 「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」，民國 111 年 8 月。
36. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16174-9 「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」，民國 111 年 8 月。
37. 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」，民國 113 年 8 月。
38. ISO 1461: 2022 Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles-Specifications and test methods (2022).
39. ISO 1463:2021 Metallic and oxide coatings — Measurement of coating thickness — Microscopical method (2021).
40. ISO 2063-1:2019 Thermal spraying — Zinc, aluminium and their alloys, Part 1: Design considerations and quality requirements for corrosion protection systems (2019).
41. ISO 2063-2:2017 Thermal spraying — Zinc, aluminium and their alloys, Part 2: Execution of corrosion protection systems (2017).

42. ISO 2178:2016(en) Non-magnetic coatings on magnetic substrates — Measurement of coating thickness — Magnetic method (2016).
43. ISO 4624:2023 Paints and varnishes — Pull-off test for adhesion (2023).
44. ISO 4626:2023 Volatile organic liquids — Determination of boiling range of organic solvents used as raw materials (2023).
45. ISO 8501-1:2007 Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Visual assessment of surface cleanliness Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings (2007).
46. ISO 8502-3:2017 Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Tests for the assessment of surface cleanliness Part 3: Assessment of dust on steel surfaces prepared for painting (pressure-sensitive tape method) (2017).
47. ISO 8502-6:2020 Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Tests for the assessment of surface cleanliness Part 6: Extraction of water soluble contaminants for analysis (Bresle method) (2020).
48. ISO 8502-9:2020 Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Tests for the assessment of surface cleanliness Part 9: Field method for the conductometric determination of water-soluble salts (2020).
49. ISO 8503-1:2012 Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates Part 1: Specifications and definitions for ISO surface profile comparators for the assessment of abrasive blast-cleaned surfaces (2012).
50. ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation (2012).
51. ISO 9224:2012 Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Guiding values for the corrosivity categories (2012).
52. ISO 12944-1:2017 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 1: General introduction (2017).

53. ISO 12944-2:2017 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 2: Classification of environments (2017).
54. ISO 12944-3:2017 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 3: Design considerations (2017).
55. ISO 12944-4:2017 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 4: Types of surface and surface preparation (2017).
56. ISO 12944-5:2019 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 5: Protective paint systems (2019).
57. ISO 12944-6:2018 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 6: Laboratory performance test methods (2018).
58. ISO 12944-7:2017 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 7: Execution and supervision of paint work (2017).
59. ISO 12944-8:2017 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, Part 8: Development of specifications for new work and maintenance (2017).
60. ISO 12944-9:2018 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).
61. ISO 14713-1:2017 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).
62. ISO 14713-2:2019 Zinc coatings — Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures, Part 2: Hot dip galvanizing (2019).
63. ISO 14916:2017 Thermal spraying — Determination of tensile adhesive strength (2017).

64. ISO 14917:2017 Thermal spraying — Terminology, classification (2017).
65. ISO 14923:2003 Thermal spraying — Characterization and testing of thermally sprayed coatings (2003).
66. JIS B1186:2013 「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」, 2013 年。
67. JIS G3114:2022 Hot-rolled atmospheric corrosion resisting steels for welded structure (2022).
68. JIS G3140: 2023 Higher yield strength steel plates for bridges (2023).
69. JIS G3125:2021 「高耐候性圧延鋼材」, 2021 年。
70. JIS G4105:1979 「クロムモリブデン鋼鋼材」, 1979 年。
71. JIS H8300:2021 Thermal spraying — Zinc, aluminium and their alloys (2021).
72. JIS H8641:2021 「熔融亜鉛めっき」, 2021 年。
73. JIS H8643:2019 「熔融亜鉛アルミニウム合金めっき」, 2019 年。
74. JIS Z0313:2004 「素地調整用ブラスト処理面の試験及び評価方法」, 2004 年。
75. JIS Z2381:2017 「大気曝露試験方法通則」, 2017 年。
76. JIS Z2382:1998 「大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定」, 1998 年。
77. JIS Z3183:2012 「炭素鋼及び低合金鋼用サブマージアーク溶着金属の品質区分」, 2012 年。
78. JIS Z3214:2012 「耐候性鋼用被覆アーク溶接棒」, 2012 年。
79. JIS Z3315:2012 「耐候性鋼用のマグ溶接及びミグ溶接用ソリッドワイヤ」, 2012 年。
80. JIS Z3320:2012 「耐候性鋼用アーク溶接フラックス入りワイヤ」, 2012 年。
81. 日本道路公團規範, JHS-P-11 「変性エポキシ樹脂塗料(内面用)」。

82. ASTM A153/A153M-16a Standard Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware (2016).
83. ASTM A242/A242M-13 Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel (2018).
84. ASTM A325-09 Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength (2009).
85. ASTM A490-12 Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat Treated, 150 ksi Minimum Tensile Strength (2012).
86. ASTM A588/A588M-19 Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50 ksi [345 MPa] Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance (2024).
87. ASTM A709/A709M-21 Standard Specification for Structural Steel for Bridges (2024).
88. ASTM D4417-21 Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel (2021).
89. AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2025 Bridge Welding Code (2025).
90. AASHTO/NSBA:2018 Steel Bridge Fabrication Guide Specification (2018).
91. CEN/TR 15339-3:2014 Thermal spraying - Safety requirements for thermal spraying equipment - Part 3: Torches for thermal spraying and their connection and supply units (2014).
92. CEN/TR 15339-5:2014 Thermal spraying - Safety requirements for thermal spraying equipment - Part 5: Powder and wire feed units (2014).
93. CEN/TR 15339-6:2014 Thermal spraying - Safety requirements for thermal spraying equipment - Part 6: Spray booth, Handling system, Dust collection, Exhaust system, Filter (2014).

第二章 鋼橋的腐蝕機理

2.1 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 2.1 所示。

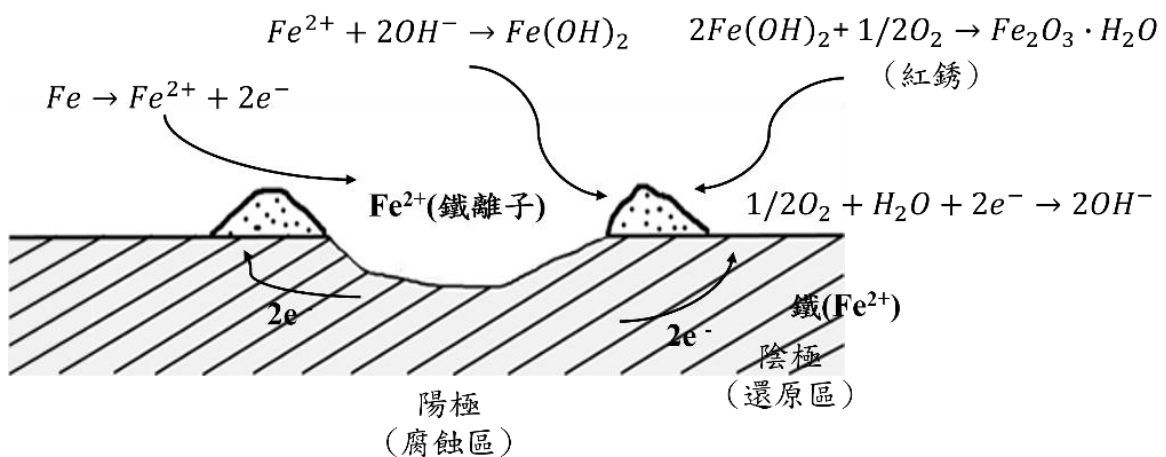


圖 2.1 鋼材腐蝕的電化學反應^[4]

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。

2.2 鋼橋腐蝕分類和型式

1. 鋼橋腐蝕分類

鋼材的腐蝕具有多種型態，鋼橋典型的腐蝕分類大致如圖 2.2 所示。

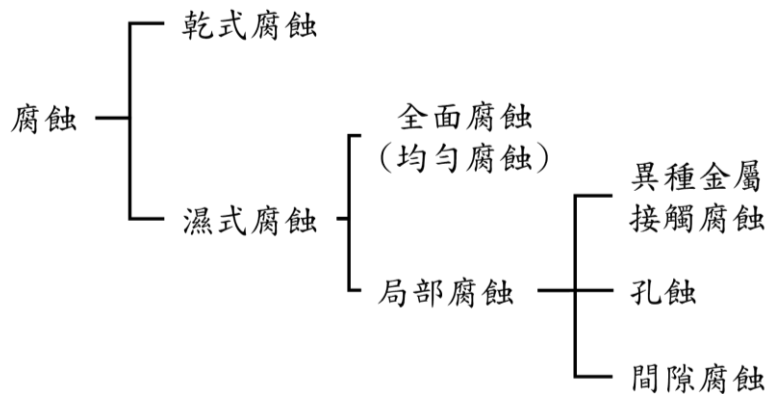


圖 2.2 鋼橋典型的腐蝕分類^[4]

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。

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，還原電位較低的普通鋼會顯著腐蝕。

常見純金屬相對於標準氫電極的還原電位，如表 2-1 所示，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 2-2 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。

表 2-1 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	$\text{Au}^{3+}_{(\text{aq})} + 3 \text{e} \rightarrow \text{Au}_{(\text{s})}$	+1.50
	$\text{Ag}^{+}_{(\text{aq})} + \text{e} \rightarrow \text{Ag}_{(\text{s})}$	+0.799
	$\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e} \rightarrow \text{Cu}_{(\text{s})}$	+0.337
	$2 \text{H}^{+}_{(\text{aq})} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})}$	0.00
↓ 活性或陽極 易腐蝕	$\text{Sn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2\text{e} \rightarrow \text{Sn}_{(\text{s})}$	-0.14
	$\text{Ni}^{2+}_{(\text{aq})} + 2\text{e} \rightarrow \text{Ni}_{(\text{s})}$	-0.25
	$\text{Cd}^{2+}_{(\text{aq})} + 2\text{e} \rightarrow \text{Cd}_{(\text{s})}$	-0.40
	$\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})} + 2\text{e} \rightarrow \text{Fe}_{(\text{s})}$	-0.44
	$\text{Zn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2\text{e} \rightarrow \text{Zn}_{(\text{s})}$	-0.763
	$\text{Al}^{3+}_{(\text{aq})} + 3\text{e} \rightarrow \text{Al}_{(\text{s})}$	-1.66
	$\text{Mg}^{2+}_{(\text{aq})} + 2\text{e} \rightarrow \text{Mg}_{(\text{s})}$	-2.37

表 2-2 常用金屬在海水中的加凡尼序列

↑ 惰性或陰極	鈦
	3xx 系不銹鋼
	4xx 系不銹鋼
	鎳基合金
	銅合金
↓ 活性或陽極 易腐蝕	錫
	鉛
	鑄鐵、鋼
	鋁合金
	鎳
	鋅
	鎂及鎂合金

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 2.3)。

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。

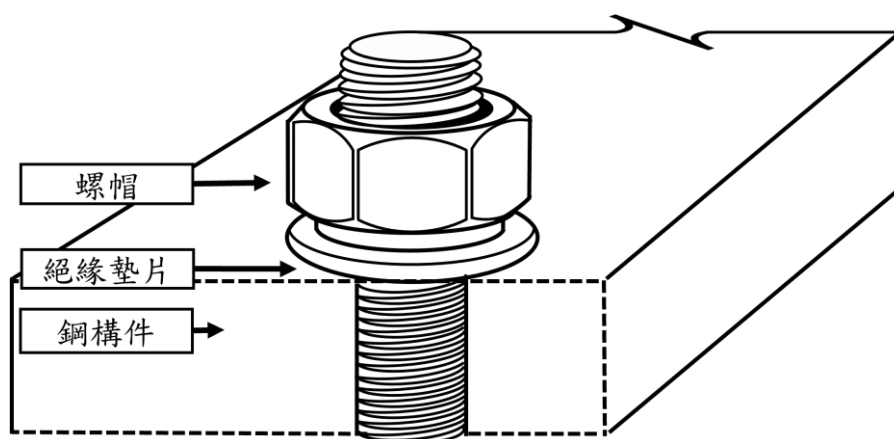


圖 2.3 電氣絕緣示意圖

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 2.4)。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。

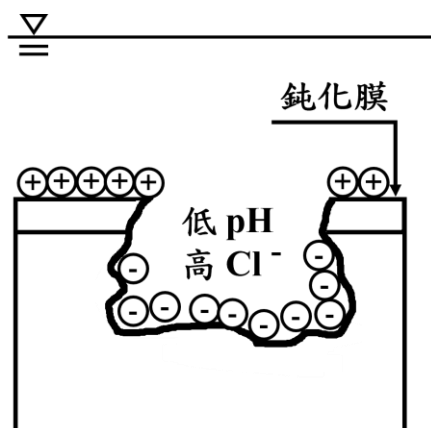


圖 2.4 孔蝕示意圖^[4]

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 2.5 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。

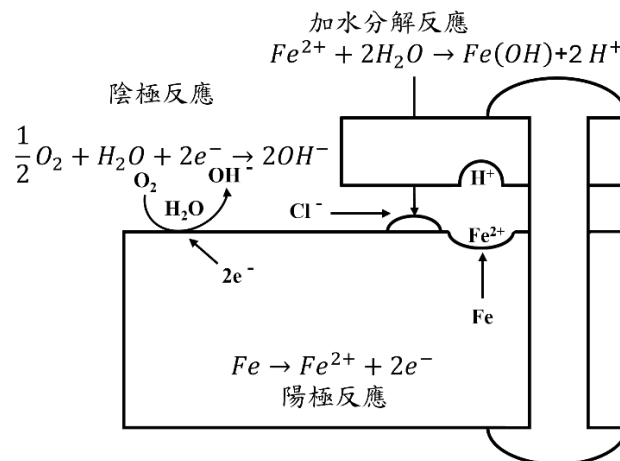


圖 2.5 間隙腐蝕示意圖^[4]

2.3 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作分類，或依污染之測定作分類。

1. 大氣腐蝕性可分為 C1~CX 等 6 類，如表 2-3 所示。
2. 依標準金屬試片腐蝕速率作分類，其腐蝕性分類與腐蝕速率之關係如表 2-4 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 SO₂ 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 2-3 大氣腐蝕性分類(CNS 13401)

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

表 2-4 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	金屬的腐蝕速率				
	單位	碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	g/(m ² ·a)	$r_{\text{corr}} \leq 10$	$r_{\text{corr}} \leq 0.7$	$r_{\text{corr}} \leq 0.9$	-
	μm/a	$r_{\text{corr}} \leq 1.3$	$r_{\text{corr}} \leq 0.1$	$r_{\text{corr}} \leq 0.1$	-
C2	g/(m ² ·a)	$10 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$0.7 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$0.9 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$r_{\text{corr}} \leq 0.6$
	μm/a	$1.3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$0.1 < r_{\text{corr}} \leq 0.7$	$0.1 < r_{\text{corr}} \leq 0.6$	-
C3	g/(m ² ·a)	$200 < r_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 12$	$0.6 < r_{\text{corr}} \leq 2$
	μm/a	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$0.7 < r_{\text{corr}} \leq 2.1$	$0.6 < r_{\text{corr}} \leq 1.3$	-
C4	g/(m ² ·a)	$400 < r_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < r_{\text{corr}} \leq 5$
	μm/a	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$2.1 < r_{\text{corr}} \leq 4.2$	$1.3 < r_{\text{corr}} \leq 2.8$	-
C5	g/(m ² ·a)	$650 < r_{\text{corr}} \leq 1500$	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 10$
	μm/a	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$4.2 < r_{\text{corr}} \leq 8.4$	$2.8 < r_{\text{corr}} \leq 5.6$	-
CX	g/(m ² ·a)	$1500 < r_{\text{corr}} \leq 5500$	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 90$	$10 < r_{\text{corr}}$
	μm/a	$200 < r_{\text{corr}} \leq 700$	$8.4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$5.6 < r_{\text{corr}} \leq 10$	-

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。

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 2-5。

表 2-5 腐蝕促進因子與地理、地形及結構因素^[4]

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

2.4 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，因此埋入土中之鋼結構物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。

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

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。

3.2 鋼橋防蝕方法

1. 一般

防止鋼橋腐蝕的方法可如圖 3.1 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 3-1

表 3-1 鋼橋典型防蝕方法^[4]

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,鋅層消耗後等進行塗裝防蝕	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

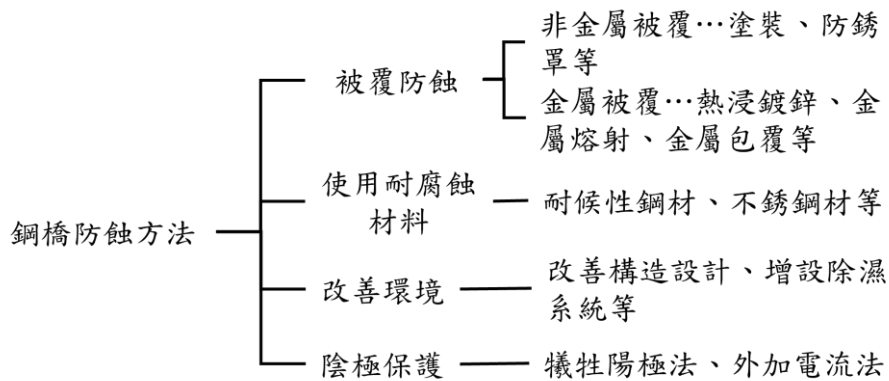


圖 3.1 鋼橋防蝕方法^[4]

2. 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，但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。

3. 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，透過鋼材表面生成的緻密銹層(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。

4. 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，因此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，但本指引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°C 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。

5. 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，以確保即使是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。

3.3 鋼橋防蝕設計

3.3.1 一般

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 3.2。

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」[5]。

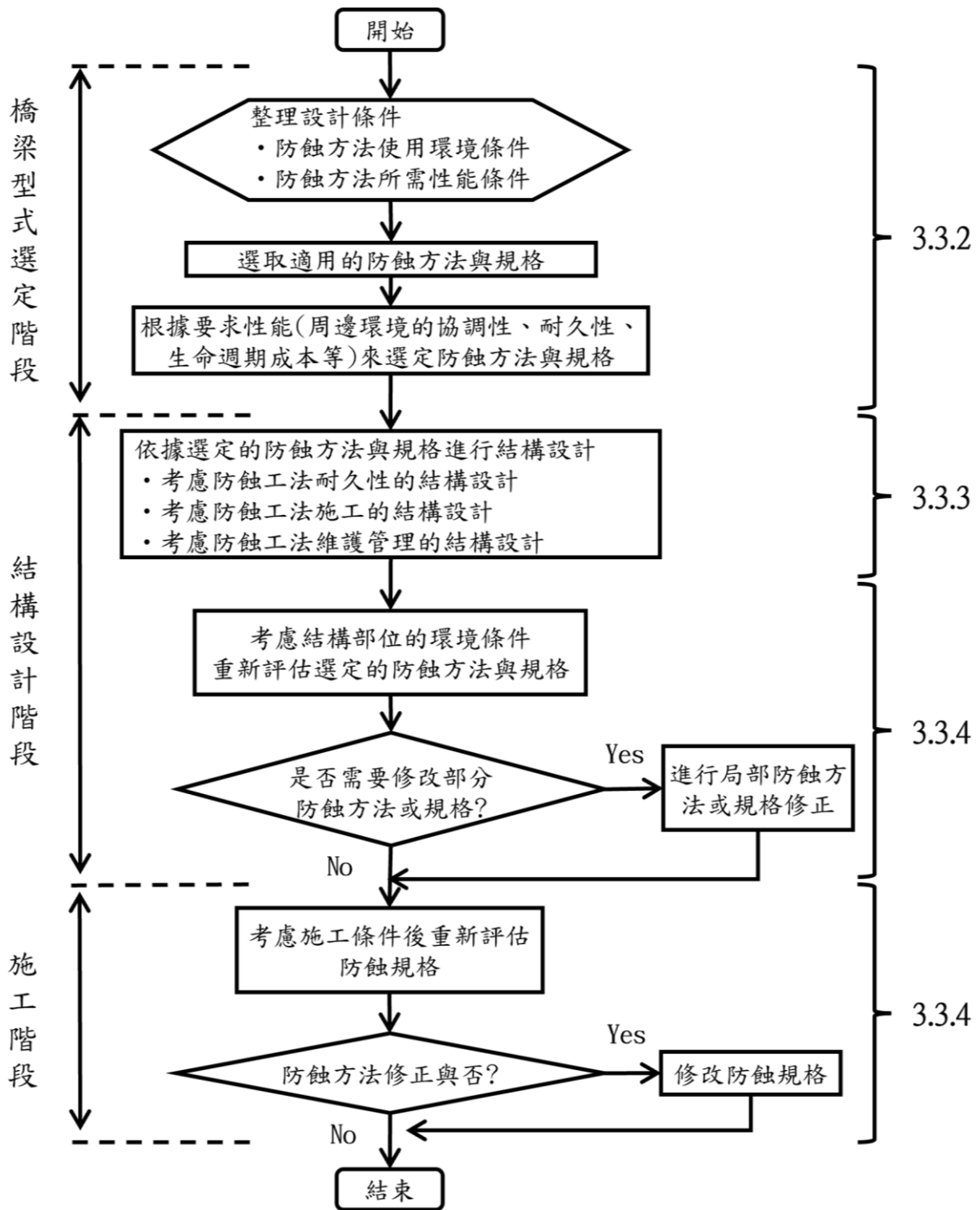


圖 3.2 防蝕設計流程圖^[4]

3.3.2 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 2-5 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 3-2。

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 3-2 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

備考 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。

備考 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。

備考 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。

備考 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。

備考 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 2-5)。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：

$$LCC = I + M + R \dots\dots\dots(3-1)$$

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目前無統一標準，需依目的與比較內容選用適當方法。生命週期成本的評估期間沒有統一的標準，但通常最好使用橋梁設計時考慮的防蝕方法的週期。橋梁設計時考慮的週期，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。

3.3.3 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。

本指引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。以下為考慮防蝕耐久性的結構設計範例：

(1) 漏水、積水對策

鋼橋如果在設計排水方案未考慮的區域發生漏水或積水時，可能會導致迅速老化，因此必須謹慎設計結構，以防止漏水和積水。為了防止積水，除了設置必要的排水坡度外，還必須注意結構細節，並考慮結構最終形狀的施工精度、防水性等。以下是一些考慮漏水和積水的結構細節範例：

①扇形孔排水

扇形孔(如圖 3.3 所示)通常是由於構件組裝和銲接等施工需求而設置，但它也可有效防止雨水和其他水分在構件各部分滯留。因此，即使無需在構件組裝或銲接過程中設置扇形孔，如果擔心豎向加勁板、橫隔板等部位積水，也可以考慮設置扇形孔。位於下翼板處扇形孔應加大尺寸。

即使使用密封材料阻止水進入箱梁高強度螺栓接頭等縫隙，樹脂等密封材料也會隨著時間逐漸的劣化，其止水功能最終不可避免地會降低，因此，建議設置扇形排水措施，以防止水滲入和積聚。

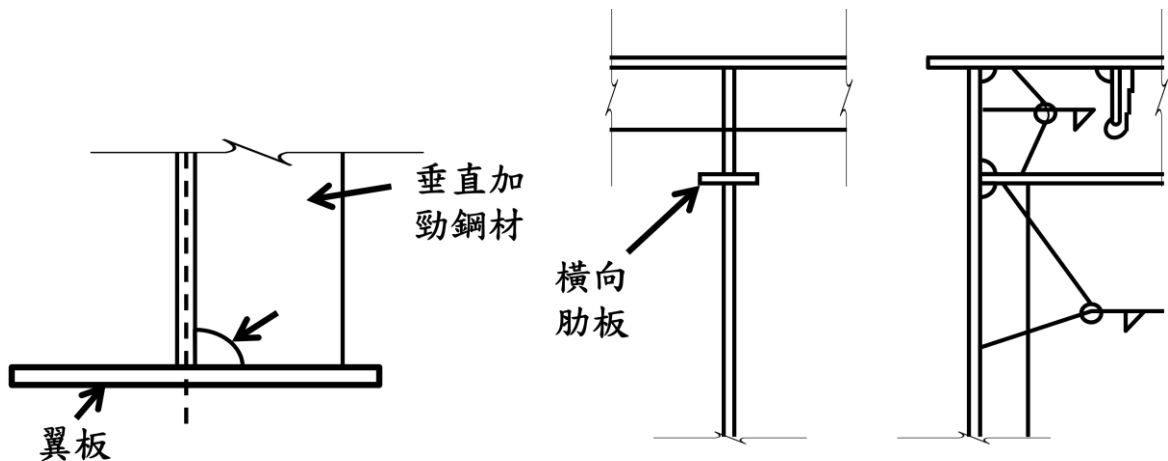


圖 3.3 扇形孔範例^[4]

②箱型梁內排水

箱梁內滲水的途徑有多種。滲入箱梁內的水會經由扇形孔向下流動，但在支承等處設置扇形孔可能較為困難。在難以設置扇形孔且有積水疑慮的區域，必須設置排水孔，將水排出箱梁外部。此外，在高強度螺栓接頭的下縱坡側設置排水孔，可以有效快速排出滲出的水(如圖 3.4 所示)。

如果必須在箱梁內部安裝排水管，從外部可能難以看到。因此，應制定維護計畫，以便快速檢測滲漏等異常情況，並防止管道故障導致意外滲漏並引發腐蝕。排水管接頭可能因外力作用

損壞造成滲漏；自來水水管等也會形成大量冷凝水，此外，如果輸送路面排水的排水管損壞，路面上的泥土和沙子會混入其中，堵塞排水孔和排水口，導致水在下翼板頂部積聚。在箱梁內安裝排水管時，維護管理時也必須考慮這些因素。

拱桁弦桿、鋼橋墩梁等，如果板厚有差異，為了美觀，將下面對齊，上面就會因板厚差異而產生凹凸面，從而導致積水。必要時，應將上方對齊，將板厚差異造成的凹凸面放在下面，或在適當的位置設置排水孔，防止積水。

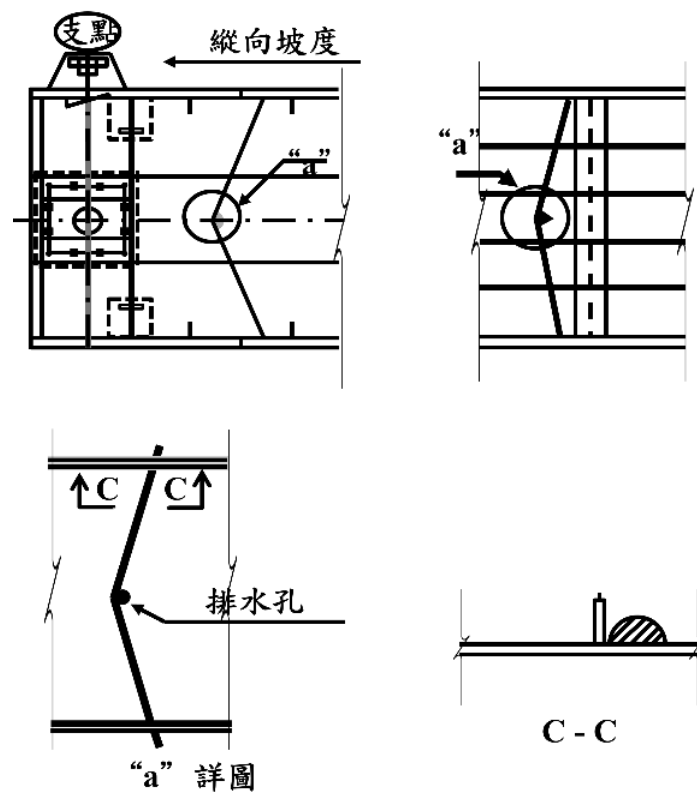


圖 3.4 箱型梁排水孔範例^[4]

③ 下部結構頂部排水

如果擔心下部結構頂部積水，建議設置排水坡度。排水坡度應考慮施工誤差、最終形狀以及排水面的防水性和不平整度，以確保竣工後能夠可靠排水。

使用抹刀在混凝土構件表面建立排水坡度時，施工過程中難免會出現一些不平整，模板接縫處也可能出現階梯狀。

對於鋼構件，除了高強度螺栓接頭銲接和連接板過多造成的不平整外，還可能存在銲接變形造成的不平整。在規劃排水坡度時，必須考慮這些結構特性和施工誤差。此外，為了改善排水性能，建議在不影響設計的情況下，從承載能力和疲勞耐久性的角度考慮，適當研磨過凸的銲冠等。

④伸縮裝置漏水防止對策

由於橋台和支承結構，在通風及排水不良的環境中容易積聚水分，主梁、橫梁、支承等常因伸縮縫漏水而造成嚴重腐蝕情況。因此，建議確保梁端部通風良好，防止水分積聚和結露，並儘可能避免形成通風不良的環境。此外，還應採取其他措施，例如確保下部結構頂部有足夠的排水坡度，以便應對因伸縮縫排水功能不良而導致的意外漏水。

建議將伸縮縫的排水管透過管道或其他方式引導至指定位置，以防止排水到達下部結構或樓板構件的頂部(如圖 3.5 所示)。此外，當水透過封閉截面管道輸送時，很難透過排水管漏水來檢查伸縮縫是否損壞。因此，在採用此類結構時，必須事先考慮檢查方法。

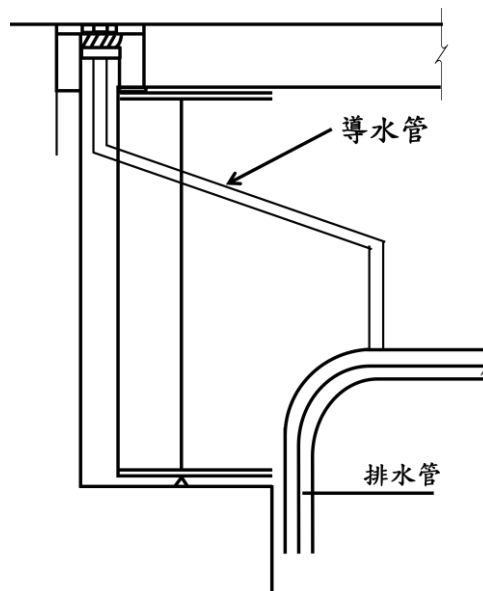


圖 3.5 伸縮縫止水結構導水範例

⑤橋面板漏水防止對策

水滲入混凝土橋面板會顯著降低橋面的疲勞耐久性，因此必須在橋面頂部實施防水處理，以防止水滲入橋面。此外，應定期進行檢查，以確認雨水或其他水已滲入混凝土橋面，並提前考慮措施，以便在發現橋面底部漏水時能夠盡快修復。

此外，對於底部為鋼板的鋼板-混凝土組合橋面板，或從橋面底面粘貼鋼板進行修補加固的混凝土橋面，如果雨水等從橋面頂部滲入內部，由於橋面底面一般都會滲漏，因此很難確認。

採用此類結構時，必須特別仔細設置橋面板防水措施，以防止水滲入橋面，並提前確定維護方法，以便在萬一發生滲水導致橋面損壞的情況下，能夠及時發現並採取措施。

⑥橋面板上方排水

如果橋面板與瀝青鋪面的交界處積水，會顯著降低鋪面的耐久性。如果沒有設置防水層，水會立即滲入混凝土橋面；如果是鋼橋面板，水會造成鋼橋面板腐蝕，這兩種情況都會顯著降低橋面板的耐久性。即使在設置防水層時，水滲入防水層與橋面的交界處，也會造成同樣的後果。此外，如果滲入的水沒有排出並滯留，通常也會對防水層的耐久性產生負面的影響。

因此，必須確保滲入橋面板的水能夠快速排出。為此，必須在橋面板低窪處、排水坑、伸縮縫附近等容易積水的地方安裝排水設施。

此時，排出的水必須像伸縮縫排水一樣，引導至附近的排水管，即使讓其自由流動，也必須將排水口設置在適當的位置，以防止排水濺到下部結構、橋面板桁架、大梁等構件的頂部(如圖3.6所示)。

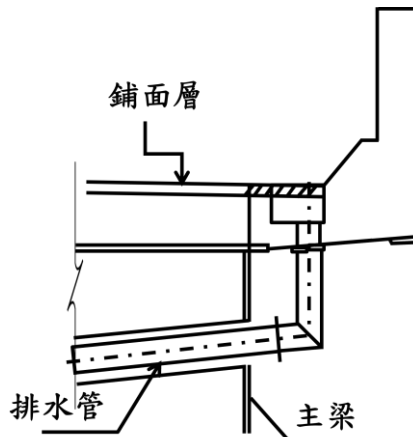


圖 3.6 橋面板(防水層)上排水範例

⑦ 橋面板截水

為防止橋面雨水等沿牆式護欄流至鋼梁，在橋面板橫向端部下面需設置截水。橋面截水方法包括橋面板下面混凝土設突起物或安裝角鋼(既有橋)、設置 V 形溝等(如圖 3.7 所示)。V 形溝施工需注意鋼筋覆蓋不足導致裂縫、混凝土裂縫或剝落掉落，結構與施工需謹慎。為防止混凝土掉落，可預設纖維片等，或使用非混凝土材料，注意避免掉落引發第三方損害。

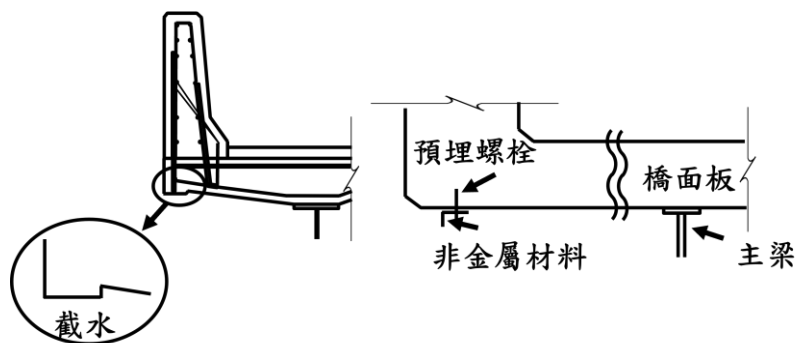


圖 3.7 橋面板截水範例^[4]

⑧ 排水管垂流尾端處理

排水管垂流時，需將排水管延長至適當位置，避免水濺至下部結構頂面、橋面板桁架或梁等構件。在這種情況下，可能導致排水飛散至下方以外的地方，特別支承附近垂流時，避免風將水吹向支承(如圖 3.8 所示)。

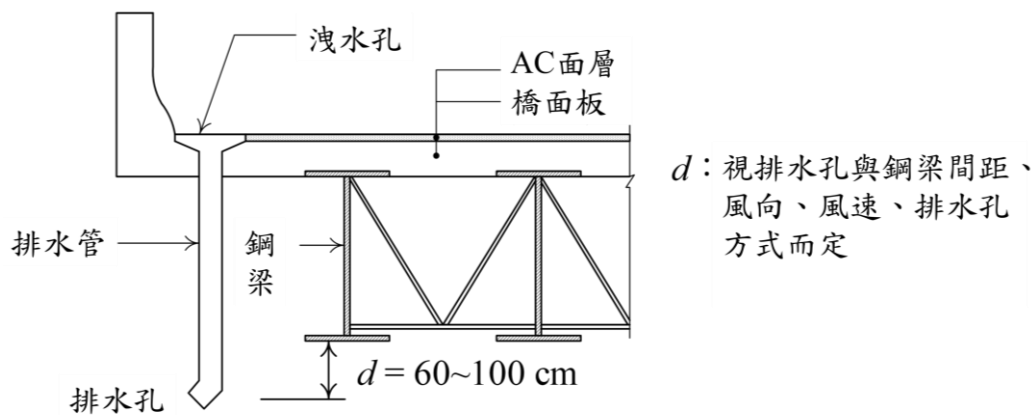


圖 3.8 排水管垂流尾端處理範例^[6]

⑨ 支承上加勁板區域積水對策

支承上加勁板下端通常無扇形孔，積水量雖少，通風良好時乾燥較快，對防蝕功能與耐久性影響小。但通風不良、漏水或積水易導致持續濕潤，梁端底板位置可能局部顯著腐蝕，嚴重影響防蝕功能與耐久性。若預期或開始使用後發現此腐蝕環境，應考慮改善腐蝕環境，採用樹脂等材料設置排水坡度等適當排水對策。

⑩ 箱型梁斷面止水對策

高強度螺栓連接節處，連接構件之間在施工上會留有縫隙，在沒有連接板的端部，不可避免地會出現縫隙。另一方面，箱型鋼梁中加勁構件佈置複雜，一旦水滲入內部，就很難有效地引導和排出。

因此，在箱型鋼梁中，必須防止水從外部侵入，例如仔細佈置連接板，並使用合適的排水板排出沿著構件表面流動的水。此外，還應根據需要採取密封縫隙等防水措施。對於箱梁上層有橋面板的橋梁，橋面板可以阻擋雨水；而對於橋墩或下承式拱橋的拱構件，由於橋面板無法阻擋雨水，因此防水措施尤為重要。然而，使用密封材料時，其耐久性通常比橋梁本身的耐久性更短，需要及時檢查和維修。因此，維護時也必須考慮密封材料的耐久性。

對於人孔或手孔如果僅用普通螺栓固定蓋子，水就會滲入人孔和手孔，因此建議在人孔或手孔外部安裝加強板，並採用橡膠墊圈等防水措施。

此外，如果在箱梁內部採取防水措施，要將箱梁內部變成近乎密封的環境時，在密封之前需要將施工時滲入內部的水排出。

①鋼製橋墩基部止水對策

鋼橋墩的底部，為了防止衝撞或腐蝕，通常會在基座或橋身周圍包裹混凝土。由於包裹的混凝土的頂部可能會積水或積灰，因此會將頂部抬高到路面以上並傾斜以改善排水，並妥善處理排水，防止其受到路面排水的影響。此外，考慮到混凝土的劣化和安裝環境，也會對包裹混凝土內的鋼材採取防蝕措施，但防蝕修復通常很困難。因此，通常會在包裹混凝土和鋼材之間的邊界塗抹填縫劑，因為擔心雨水等滲入。填縫劑會隨著時間逐漸劣化，其止水功能會降低，因此需要透過定期檢查來檢查是否能可靠地止水，如果止水功能降低，則需要採取更換填縫劑等措施。此外，鋼墩柱底座內部可能會積水，因此需要考慮柱內排水。

②鳥害防止對策

防止鳥害首要是阻止鳥類進入箱梁，建議檢查孔、手孔設置門或蓋，或安裝鳥害防止網，排水孔或接縫等結構部亦需防止鳥類進入措施。維護管理作業使用檢查孔門時，注意不要忘記關閉。

(2)局部腐蝕防治措施

①防止異種金屬接觸腐蝕措施

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。例如，與螺栓接觸區域的基材可能會腐蝕，導致螺栓脫落。因此，如果擔心異種金屬接觸腐蝕，則需要採取措施，例如避免

將不同種金屬一起使用，或使用絕緣墊圈來防止存在電位差的金屬之間接觸。

② 間隙腐蝕預防措施

間隙腐蝕是指雨水等滲入鋼構件搭接處或孔洞下方的縫隙而發生的腐蝕，在惡劣環境下會造成嚴重的腐蝕。因此，在設計結構時應盡可能消除此類縫隙，並在可能引起間隙腐蝕的區域採取措施，例如使用密封材料，防止雨水等滲入縫隙。然而，密封材料的耐久性通常比橋梁本身的耐久性更短，需要在適當的時候進行檢查和維修，因此在進行維護時也必須考慮這一點。

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 3-3。

表 3-3 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	<ul style="list-style-type: none"> ● 塗裝施工姿勢、空間 ● 斷尾型螺栓之處理 ● 構件銳緣圓弧化
耐候性鋼材	-
熱浸鍍鋅	<ul style="list-style-type: none"> ● 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	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。

① 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。

② 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。

3.3.4 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3-4。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 3-4 確保品質應注意的施工條件^[4]

	工廠施工	現場施工
施工場所	<ul style="list-style-type: none"> ● 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 	<ul style="list-style-type: none"> ● 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) ● 生鏽、飛砂、油等其他作業的影響
設備環境	<ul style="list-style-type: none"> ● 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) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 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	<ul style="list-style-type: none"> ● 臨時設備、安全設備條件 ● 其他工項或設備干擾 	<ul style="list-style-type: none"> ● 臨時設備、安全設備的條件
構件條件	<ul style="list-style-type: none"> ● 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) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 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	<ul style="list-style-type: none"> ● 檢查設備的能力與規格 ● 檢查方法適用範圍 	<ul style="list-style-type: none"> ● 檢查設備的能力與規格 ● 檢查方法適用範圍
其他	<ul style="list-style-type: none"> ● 維修相關施工注意事項如上所述 	<ul style="list-style-type: none"> ● 維修相關施工注意事項如上所述

第四章 塗裝

4.1 前言

4.1.1 一般

塗裝是一種歷史悠久經過考驗的防蝕方法，其原理係利用塗料在鋼材表面形成一層保護膜，阻隔氧氣、水和氯離子等促進腐蝕的物質(環境屏障)，從而保護鋼材。此外，透過適當的重新塗裝，可以保持或改善鋼材的防蝕性能和美觀度。

塗料傳統以植物油及天然樹脂為原料，俗稱「油漆」，現統稱為「塗料」，屬於精細化工產品，是化學工業中的一個重要行業。臺灣塗料產業從依賴進口到本土化，再到與國際接軌，見證了產業從民生油漆到高性能工業塗料的轉型。

臺灣自日治時期以來，經歷了工業化、基礎建設擴張與高科技產業崛起，塗料產業的演變與橋梁塗裝的歷史密不可分，鋼結構橋梁防蝕塗裝則從油性醇酸塗料走向性能更為優越環氧樹脂底漆、中塗漆及耐候面漆三層式重防蝕塗裝系統，並邁入高耐候與超長期維護生命週期設計的階段。未來，隨著淨零碳排政策與基礎建設需求，塗料產業將在「環保、長效、智慧維護」的方向持續演進。

1. 臺灣塗料的發展

(1) 日治時期

臺灣塗料工業萌芽於日治時期，當時多依賴日本進口，尚未形成本土產業，其最早的油漆工業歷史紀錄始於 1916 年由廖煌氏，在屏東設立臺灣化學工業所，開始從事油漆生產塗料，主要用於公共建築與船舶，材料以天然樹脂和亞麻仁油為主，雖能提供基本保護，但缺乏長效性。

(2) 1950~1960 年代

二戰結束後，國民政府接收兩家生漆加工廠和另外幾家小型油漆工廠改隸省營工礦公司，擁有松山油漆廠和銅鑼分廠兩個工廠，但因產品品質不高，當時油漆大部份從日本進口。戰後百業待興，1951 年，臺灣第一家本土油漆廠永記造漆在高雄創立，民間陸續成立本土塗料廠，品質也逐漸提升。1960 年代政府曾管制塗料進口，油漆工業成長相當快速。這個時期以建築用漆和自行車烤漆、木造漆等簡單內需塗料為主，技術引進大多來自日本。

(3) 1970~1980 年代

1970 年代十大建設陸續展開、房地產景氣看好，對塗料油漆產品之需求更為殷切且隨著石化工業興盛，合成樹脂普及，環氧與聚氨酯塗料進入市場，推動了環氧樹脂與防蝕塗料的發展。

(4) 1980~1990 年代

十大建設後，臺灣的石化、鋼鐵、電力等重工業蓬勃發展，此階段，臺灣經濟成長率平均在 10 個百分點以上，促成我國塗料油漆業步入興盛階段，一些主要大廠產能擴大，與國外名廠合作引進技術改善品質，如果要保持業界領先地位，投入研發的資金及人力相當可觀。國際品牌也進入臺灣，本土廠商開始投入專業工程塗料，與外商合作或競爭逐漸對塗料的高性能、長效防蝕及耐候性提出嚴格要求。電子業與高科技廠房需求，使地坪塗料、防靜電塗層與高耐候氟碳塗料逐漸普及。

(5) 2000 年~至今

21 世紀以來，環保與永續議題推動產業轉型。低 VOC 與水性塗料研發、防火、防蝕與潔淨室地坪系統亦持續供應建築與工業市場。今日，臺灣塗料業已形成「本土大廠+國際品牌」並存的格局，並朝高性能與低碳排方向發展。

2. 臺灣鋼橋塗裝的發展

(1) 1900~1950 年代

日治時期與戰後初期鋼橋，採紅丹底漆與油性面漆，如西螺大橋防蝕塗裝紅丹油漆雖然較好防銹效果，但因臺灣四面環海，難以抵抗臺灣潮濕與鹽害環境，造成維護頻繁。且因其防銹顏料含鉛具毒性，已在 1980 年代後被臺灣的重大工程規範排除使用。故老舊橋梁在維護時，多已逐步替換為無鉛的環保型防銹底漆(如磷酸鋅底漆或高鋅底漆)。

(2) 1950~1980 年代

臺灣進入公路建設高峰期，南部橫貫公路、中山高速公路等鋼橋，開始嘗試以高鋅底漆+聚氨酯面漆取代傳統油性漆，高鋅底漆的普及是臺灣重防蝕技術的分水嶺。它使塗裝防蝕從單純的「物理阻擋」升級為「電化學保護」。例如 1980 年代後興建或大規模改建的公路橋梁，幾乎都採用了高鋅底漆做為鋼材防護的第一道關卡。

(3) 1980~2000 年代

受國際標準影響，本土廠商與外商合作，提供「無機高鋅粉底漆+厚塗型環氧中塗漆+氟碳面漆」系統，並成為鋼橋防蝕塗裝規範，應用於多項重大工程如高屏溪斜張橋、關渡大橋等。此系統有效延長橋梁壽命，降低公共維護成本。

(4) 2000 年~至今

隨著塗料技術進步，耐久性規格要求提高，環境較為惡劣之跨海大橋與沿海工程普遍採用耐紫外線能力最佳氟碳面漆，並要求符合 ISO 12944 規範 CX 腐蝕環境等級，除確保外觀色彩的持久性和整體塗層的耐候性，大幅延長了橋梁的塗裝維護週期。

4.1.2 適用範圍

本章適用於以塗裝進行鋼橋防蝕。

4.2 防蝕設計

4.2.1 設計理念

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。

本章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，達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。

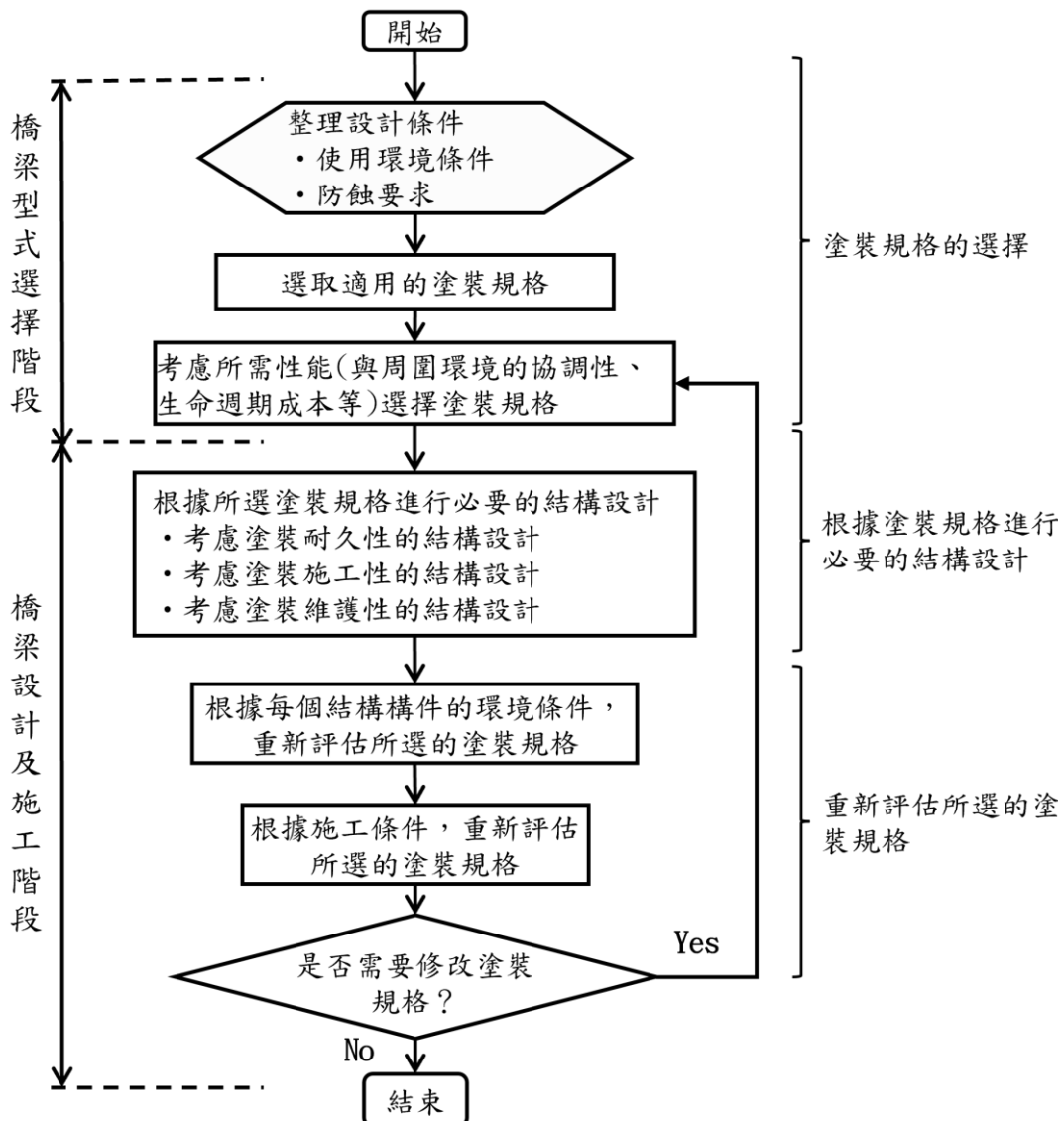
3. 塗膜劣化

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。

4.2.2 防蝕設計

1. 設計流程

塗裝防蝕設計流程請詳見圖 4.1。



2. 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。本指引中所述的塗裝系統已充分考慮了材料組合，因此不會出現任何問題。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 4-1。

表 4-1 不同塗料間之相容性^[6]

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	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○

說明：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。

本指引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」。

①鋼材預塗系統

最常用的鋼材預塗塗料為無機鋅粉預塗底漆，當其膜厚 $15\sim 20\mu\text{m}$ ，通常在 C4 以下環境中可耐 6 個月。若所需防蝕期間超過 6 個月或所處之腐蝕環境超過 C4 時，可以增加塗料鋅含量或提高膜厚。使用增加鋅含量之方法時，其膜厚不得小於 $15\mu\text{m}$ ；提高膜厚時，膜厚不宜超過 $50\mu\text{m}$ 以免影響鋼材加工性。

②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 4.2 及圖 4.3 所示之部位。構件內部塗裝系統(B1~B3)，適合使用於如圖 4.2 及圖 4.3 所示之部位。其中圖 4.2 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 4.3 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。

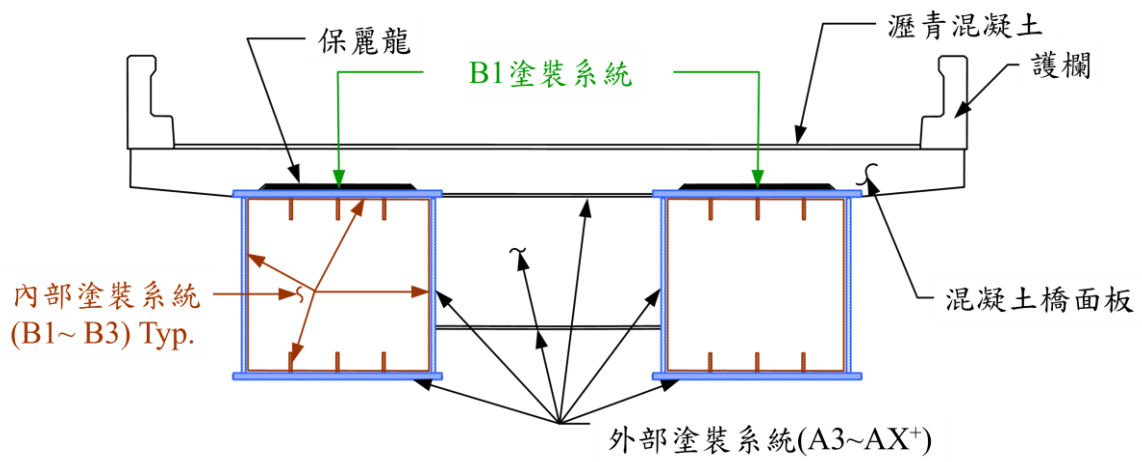


圖 4.2 含混凝土橋面板之鋼橋塗裝示意圖^[6]

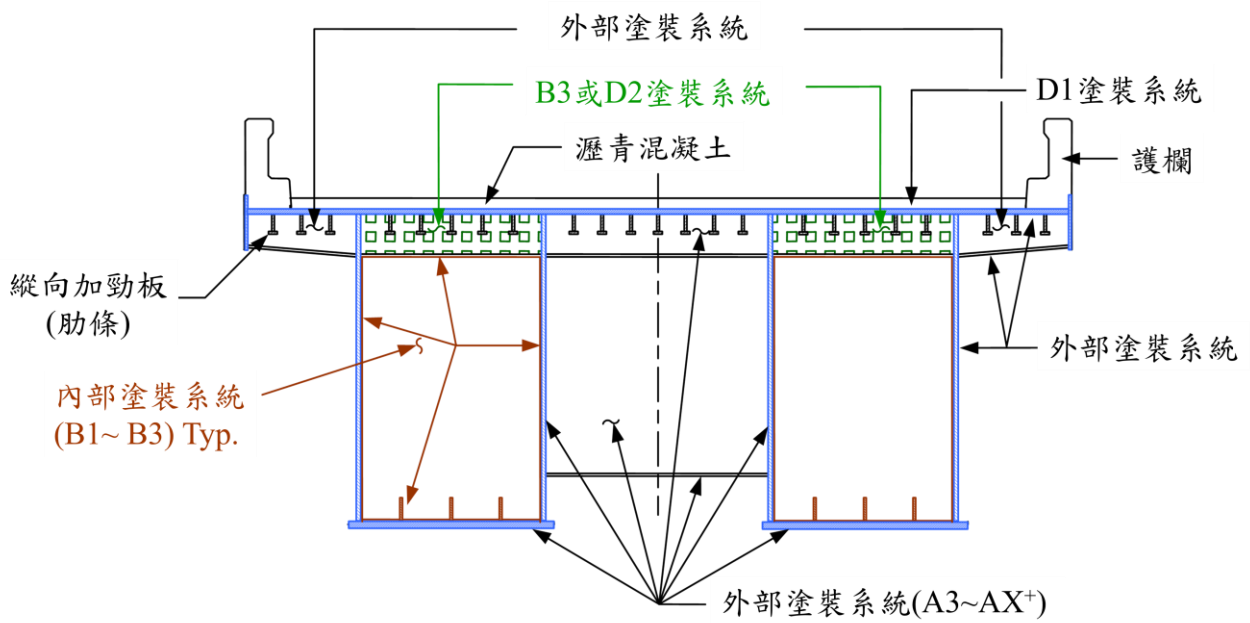


圖 4.3 鋼床板及鋼箱梁塗裝示意圖^[6]

A. 外部塗裝系統

外部塗裝系統 A3-AX⁺ 所代表的底漆種類、大氣腐蝕性級別、耐久性等級及最小總乾膜厚，如表 4-2 所示。本節所列 C3~C5 大氣腐蝕環境塗裝系統，參考 CNS 16174-5 附錄 C 塗裝系統，每一大氣腐蝕性級別其耐久性等級採用超長期(VH)之系統。

依據 CNS 16174-9，CX 級別(離岸)之耐久性只列長期(H)等級，故 AX-Z 鋅粉底漆系統最少總乾膜厚 280 μm ，AX-N 非鋅粉底漆系統最小總乾膜厚為 350 μm 。為考量臺灣 CX 大氣腐蝕級別，其腐蝕環境存在相當高之風險，增列長期(H)等級的增厚版，AX⁺-Z 鋅粉底漆系統最少總乾膜厚 380 μm ，AX⁺-N 非鋅粉底漆系統最少總乾膜厚 420 μm 。

表 4-2 裸鋼面外部塗裝系統^[6]

大氣腐蝕環境	C3		C4		C5		CX			
耐用年限	VH		VH		VH		H			
塗裝系統	A3-Z	A3-N	A4-Z	A4-N	A5-Z	A5-N	AX-Z	AX-N	AX ⁺ -Z	AX ⁺ -N
底漆種類	鋅	非鋅	鋅	非鋅	鋅	非鋅	鋅	非鋅	鋅	非鋅
最小總乾膜厚 (μm)	200	240	260	300	320	360	280	350	380	420
備考：Z 為鋅粉底漆，N 為非鋅粉底漆。										

(a) A3-Z 塗裝系統-本塗裝系統適用於 C3 以下大氣腐蝕級別，
如表 4-3 所示。本系統之最小總乾膜厚為 200 μm 。

表 4-3 A3-Z 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型(CNS 4936)	1	60-80 μm
封孔薄塗	環氧樹脂漆—第一種(CNS 4938 第一種)	1	—
中塗漆	環氧樹脂漆—第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	2-3 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯漆(CNS 15665 第 3 級)		
最小總乾膜厚	200 μm		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm 。			

(b) A3-N 塗裝系統：本塗裝系統亦適用於 C3 以下腐蝕環境，
如表 4-4 所示。本系統之最小總乾膜厚為 240 μm 。

表 4-4 A3-N 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種)	1	80-160 μm
中塗漆	環氧樹脂漆—第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	2-3 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯漆(CNS 15665 第 3 級)		
最小總乾膜厚	240 μm		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm 。			

(c) A4-Z 塗裝系統：本塗裝系統適用於 C4 以下腐蝕環境，如表 4-5 所示。本系統之最小總乾膜厚 260 μm 。

表 4-5 A4-Z 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型(CNS 4936)	1	60-80 μm
封孔薄塗	環氧樹脂漆—第一種(CNS 4938 第一種)	1	—
中塗漆	環氧樹脂漆—第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	3-4 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯漆 (CNS15665 第 3 級) 或氟碳樹脂漆(CNS15665 第 1 級)		
最小總乾膜厚	260 μm		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm 。			

(d) A4-N 塗裝系統：本塗裝系統適用於 C4 以下腐蝕環境如表 4-6 所示。本系統之最小總乾膜厚 300 μm 。

表 4-6 A4-N 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種)	1	80-240 μm
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	2-4 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級) 或氟碳樹脂漆(CNS 15665 第 1 級)		
最小總乾膜厚	300 μm		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm 。			

(e) A5-Z 塗裝系統：本塗裝系統適用於 C5 以下腐蝕環境之鋼橋外露表面塗裝系統，如表 4-7 所示。本系統之最小總乾膜厚 320 μm 。

表 4-7 A5-Z 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型(CNS 4936)	1	60-80 μm
封孔薄塗	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種)	1	—
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	3-4 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級) 或氟碳樹脂漆(CNS 15665 第 1 級)		
最小總乾膜厚	320 μm		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm 。			

(f) A5-N 塗裝系統：本塗裝系統適用於 C5 以下腐蝕環境之鋼橋外部表面塗裝系統如表 4-8 所示。本塗裝系統之最小總乾膜厚 360 μm 。

表 4-8 A5-N 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種)	1	80-200 μm
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	3-4 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級) 或氟碳樹脂漆(CNS 15665 第 1 級)		
最小總乾膜厚	360 μm		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm 。			

(g) AX-Z 塗裝系統：本塗裝系統適用於 CX(離岸)大氣腐蝕級別且耐久性為長期(H)之鋼橋外露表面鋅粉底漆塗裝系統，如表 4-9 所示。本系統之最小總乾膜厚 280 μm 。

表 4-9 AX-Z 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型(CNS 4936)	1	40 μm 以上
封孔薄塗	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種)	1	—
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	3 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級) 或氟碳樹脂漆(CNS 15665 第 1 級)		
最小總乾膜厚	280 μm 以上		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm 。			

(h) AX-N 塗裝系統：本塗裝系統適用於 CX(離岸)大氣腐蝕級別且耐久性為長期(H)之鋼橋外露表面非鋅底漆塗裝系統。如表 4-10 所示。本系統之最小總乾膜厚 350 μm 。

表 4-10 AX-N 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種)	1	60 μm 以上
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	3 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級) 或氟碳樹脂漆(CNS 15665 第 1 級)		
最小總乾膜厚	350 μm 以上		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm 。			

- (i) AX⁺-Z 塗裝系統：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，故 AX⁺-Z 為 AX-Z 塗裝系統的增厚版，且耐久性為長期(H)之鋼橋外露表面鋅粉底漆塗裝系統如表 4-11 所示。本塗裝系統之最小總乾膜厚 380 μm。

表 4-11 AX⁺-Z 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	鋅粉底漆-厚塗型(CNS 4936)	1	60-80 μm
封孔薄塗	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種)	1	—
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	4-5 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級) 或氟碳樹脂漆(CNS 15665 第 1 級)		
最小總乾膜厚	380 μm		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm。			

- (j) AX⁺-N 塗裝系統：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，故 AX⁺-N 為 AX-N 塗裝系統的增厚版，且耐久性為長期(H)之鋼橋外露表面非鋅粉底漆塗裝系統如表 4-12 所示。本塗裝系統之最小總乾膜厚 420 μm。

表 4-12 AX⁺-N 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種)	1	80-200μm
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	3-5 ⁽¹⁾	—
面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級) 或氟碳樹脂漆(CNS 15665 第 1 級)		
最小總乾膜厚	420 μm		
註 1：中塗漆與面漆應至少各施作一道，且面漆之最小乾膜厚為 30 μm。			

B. 內部塗裝系統

內部塗裝系統又分為 B1、B2 及 B3 系統，如表 4-13 所示。B1 及 B2 都適用於 C3-CX 之大氣腐蝕環境，惟按其適用場合及區域作區隔。

表 4-13 內部塗裝系統^[6]

大氣腐蝕環境	C3 ~ CX		
	B1	B2	B3
塗裝系統			
塗裝系統之塗膜組成	環氧樹脂柏油漆	環氧樹脂漆-第一種	變性/改質型環氧樹脂漆
最小總乾膜厚(μm)	240	240	240

(a) B1 塗裝系統:本塗裝系統適用於 C3-CX 之大氣腐蝕環境下鋼橋內部表面，且施工時較無通風顧慮之環境。B1 塗裝系統如表 4-14 所示。本系統之最小總乾膜厚 240 μm。

表 4-14 B1 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小總乾膜厚度
中塗漆	環氧樹脂柏油漆(CNS 4939 第二種)	2	240 μm

(b) B2 塗裝系統:本塗裝系統適用於 C3-CX 之大氣腐蝕環境下鋼橋內部表面，施工環境要求厚塗防水且無柏油味道時。B2 塗裝系統如表 4-15 所示。本系統之最小總乾膜厚 240 μm。

表 4-15 B2 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小總乾膜厚度
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種(CNS 4938 第一種)	2	240 μm

- (c) B3 塗裝系統：本塗裝系統適用於 C3-CX 之大氣腐蝕環境下鋼橋內部表面，施工環境要求耐溫差且無柏油味道時。B3 塗裝系統如表 4-16 所示。本系統之最小總乾膜厚 240 μm 。

表 4-16 B3 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小總乾膜厚度
中塗漆	變性/改質型環氧樹脂漆(JHS-P-11A)	2	240 μm

C. 鋼橋面板之塗裝系統

本塗裝系統適用於僅以瀝青混凝土鋪面之鋼床板鋼橋系統，其施作範圍包含：

- (a) 箱梁上翼板上表面與鋼床板上表面之 D1 塗裝系統如表 4-17 所示。
- (b) 箱梁內部上翼板之 D2 塗裝系統如表 4-18 所示。
- (c) 塗裝系統應用範圍，詳圖 4.3 鋼床板及鋼箱梁之塗裝示意圖所示。

表 4-17 D1 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	最小乾膜厚度	塗裝間隔
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型 (CNS 4936 第一種)	30 μm	—

表 4-18 D2 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	最小乾膜厚度	塗裝間隔
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型 (CNS 4936 第一種)	80 μm	—

D. 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 4.4 所示)之塗裝系統應依下列之規定辦理：

- (a) 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。
- (b) 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。
- (c) 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。
- (d) 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。

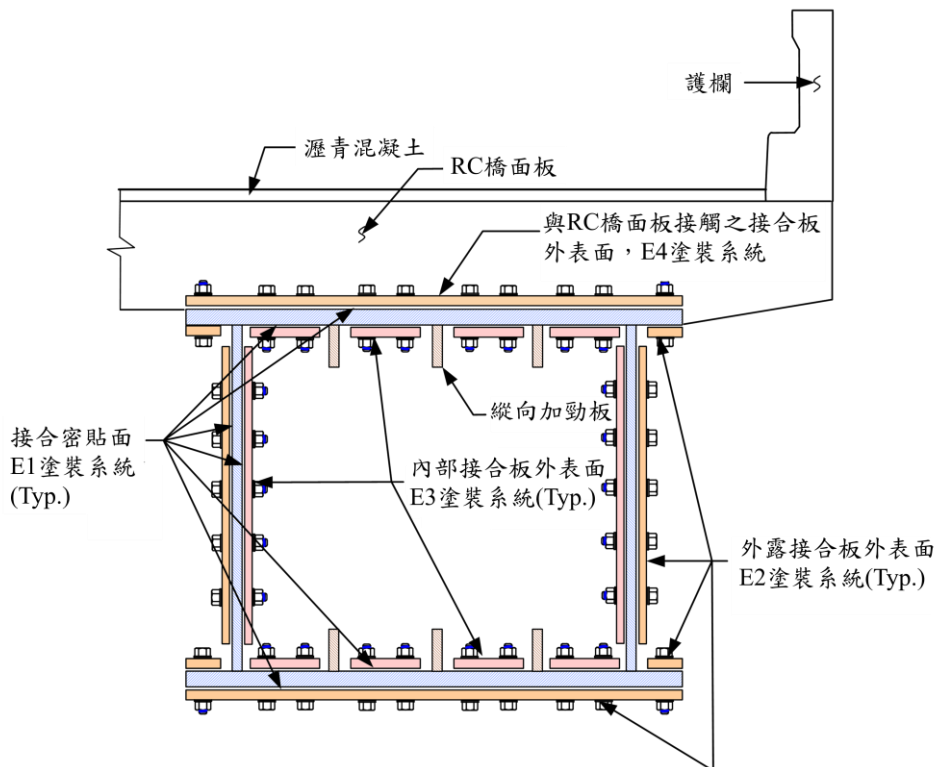


圖 4.4 螺栓接合部塗裝系統示意圖^[6]

- ① E1 塗裝系統：本塗裝系統適用於接合密貼面，包括構件接合面與接合板接合面。E1 塗裝系統如表 4-19 所示，其最小總乾膜厚度為 80 μm 。

表 4-19 E1 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型 (CNS 4936 第一種)	1	80 μm

⑥E2 塗裝系統：本塗裝系統適用於外露接合板外表面及外露螺栓頭、墊圈與螺帽。E2 塗裝系統如表 4-20 所示。其最小總乾膜厚介於 340 μm 至 500 μm。

表 4-20 E2 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數		最小乾膜厚度
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型 (CNS 4936 第一種)	外露接合板：1		80 μm
封孔薄塗	環氧樹脂非鋅底漆 (CNS 4935)	1		--
底漆	環氧樹脂非鋅底漆 (CNS 4935)	A3-Z、A3-N、 A4-Z 塗裝系統	外露螺栓部：2~4	80 μm ⁽¹⁾ +200 μm ⁽²⁾
			外露接合板：1~2	200 μm ⁽¹⁾
		A4-N A5-Z、A5-N AX-Z、AX-N AX ⁺ -Z、AX ⁺ -N 塗裝系統	外露螺栓部：2~4	120 μm ⁽¹⁾ +260 μm ⁽²⁾
			外露接合板：1~2	300 μm ⁽¹⁾
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種 (CNS 4938 第一種)	AX-N、AX ⁺ -Z、 AX ⁺ -N 塗裝系統	外露螺栓部：2~4	60 ⁽²⁾
			外露接合板：1~2	60 ⁽²⁾
第一道面漆	面漆及塗裝間隔同所指定之鋼橋外露表面塗裝系統 A3~A5。			
第二道面漆				
最小 總乾膜厚	A3-Z 塗裝系統(主體 200 μm) A3-N 塗裝系統(主體 240 μm) A4-Z 塗裝系統(主體 260 μm)		外露螺栓部：340 μm 外露接合板：340 μm	
	A4-N 塗裝系統(主體 300 μm) A5-Z 塗裝系統(主體 320 μm) A5-N 塗裝系統(主體 360 μm) AX-Z 塗裝系統(主體 280 μm)		外露螺栓部：440 μm 外露接合板：440 μm	
	AX-N 塗裝系統(主體 350 μm) AX ⁺ -Z 塗裝系統(主體 380 μm) AX ⁺ -N 塗裝系統(主體 420 μm)		外露螺栓部：500 μm 外露接合板：500 μm	
注意事項	(1) 此塗層施工採外露螺栓部與外露接合板一併以噴塗方式施作。 (2) 此塗層之施作應以手刷辦理。 (3) 施工時若有產生垂流及針孔等有害品質現象之疑慮時，宜分成二道施作。			

◎E3 塗裝系統：本塗裝系統適用於箱梁內或鋼橋柱內之接合板外表面及外露螺栓頭、墊圈與螺帽之 E3 塗裝系統如表 4-21 所示。

表 4-21 E3 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型 (CNS 4936)	外露接合板：1	80 μm
封孔薄塗	環氧樹脂非鋅底漆 (CNS 4935)	1	--
底漆	環氧樹脂非鋅底漆 (CNS 4935)	外露螺栓部：2~4	100 μm ⁽¹⁾ +220 μm ⁽²⁾
		外露接合板：1~2	240 μm ⁽¹⁾
最小總乾膜厚	外露螺栓部：320 μm 外露接合板：320 μm		
注意事項	(1) 此塗層施工採外露螺栓部與外露接合板一併以噴塗方式施作。 (2) 此塗層之施作應以手刷辦理。 (3) 施工時若有產生垂流及針孔等有害品質現象之疑慮時，宜分成二道施作。		

①E4 塗裝系統-本塗裝系統適用於與 RC 橋面板接觸之接合板外表面及外露螺栓頭、墊圈與螺帽，E4 塗裝系統如表 4-22 所示。

表 4-22 E4 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	無機鋅粉底漆-厚塗型 (CNS 4936)	外露接合板：1	80 μm
底漆	環氧樹脂柏油漆 (CNS 4939 第二種)	外露螺栓部：2~4	80 μm ⁽¹⁾ +160 μm ⁽²⁾
		外露接合板：1~2	160 μm ⁽¹⁾
最小總乾膜厚	外露螺栓部：240 μm 外露接合板：240 μm		
注意事項	(1) 此塗層施工採外露螺栓部與外露接合板一併以噴塗方式施作。 (2) 此塗層之施作應以手刷辦理。		

E. 工地現場銲接部塗裝系統

鋼橋在工地現場以銲接進行接合時，於銲道檢驗合格後，其銲道及銲道兩側各 100 mm 或 6 倍板厚之較寬範圍內，應依下列規定之塗裝系統施工：

- (a) 位於 C3~CX 腐蝕環境下之外露側現場銲接部，應採用 F1 塗裝系統。
- (b) 位於高酸鹼腐蝕環境下之外露側現場銲接部，應採用 F2 塗裝系統。
- (c) 箱型斷面之內面側現場銲接部，應採用 F3 塗裝系統。

①F1 塗裝系統-本塗裝系統適用於外露側現場銲接部位。依外露塗裝腐蝕環境之不同，其最小總乾膜厚 300 μm ~500 μm ，F1 塗裝系統如表 4-23 所示。

表 4-23 F1 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	環氧樹脂鋅粉底漆 (CNS 4936)	1	80 μm
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種 (CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆 (CNS 4935)	1~2 (A3 塗裝系統)	180 μm
		2~3 (A4 塗裝系統)	240 μm
		2~4 (A5 塗裝系統)	300 μm
		2~3 (AX 塗裝系統)	260 μm
		2~5 (AX ⁺ 塗裝系統)	360 μm
面漆	面漆及塗裝間隔同所指定 AX、AX ⁺ 鋼橋外露表面塗裝系統。		
最小總乾膜厚	A3 塗裝系統	320 μm	
	A4 塗裝系統	380 μm	
	A5 塗裝系統	440 μm	
	AX 塗裝系統	400 μm	
	AX ⁺ 塗裝系統	500m	

⑥F2 塗裝系統-本塗裝系統適用高酸鹼環境下採用 AX+-N 塗裝系統之外露側現場銲接部位。F2 塗裝系統如表 4-24 所示，其最小總乾膜厚為 600 μm 。

表 4-24 F2 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	環氧樹脂漆-第一種 (CNS 4938 第一種)	1	80 μm
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種 (CNS 4938 第一種)	2	460 μm
面漆	氟碳樹脂漆 (CNS 15665 第 1 級)	2	60 μm
最小總乾膜厚	600 μm		

⑦F3 塗裝系統-本塗裝系統適用箱型斷面之內面側現場銲接部，F3 塗裝系統如表 4-25 所示，其最小總乾膜厚為 320 μm 。

表 4-25 F3 塗裝系統^[6]

塗層	塗料規格	道數	最小乾膜厚度
底漆	環氧樹脂鋅粉底漆(CNS 4936)	1	80 μm
中塗漆	環氧樹脂漆-第一種 (CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆 (CNS 4935)	1~3	240 μm
最小總乾膜厚	B1、B2、B3 塗裝系統		320 μm

(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 4-26 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 40 μ m，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 4-26 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^[6]

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)

①G3 塗裝系統

G3 塗裝系統最小乾膜厚 160 μm ，使用於 C3(含)以下大氣腐蝕級別且耐久性等級為超長期(VH)，且有景觀、視覺需求之熱浸鍍鋅鋼構橋梁。G3 塗裝系統包括 G3-1 及 G3-2 兩種塗裝系統，G3-1 塗裝系統如表 4-27 所示，G3-2 塗裝系統如表 4-28 所示。其中 G3-1 塗裝系統使用氟碳樹脂面漆；而 G3-2 塗裝系統使用聚胺酯面漆。

表 4-27 G3-1 塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	--	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第一種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1	50
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	160 μm		

表 4-28 G3-2 塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	1	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第一種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1	50
第一道面漆	聚胺酯中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級)	1	30
最小總乾膜厚	160 μm		

②G4 塗裝系統

G4 塗裝系統最小乾膜厚 200 μm ，使用於 C4(含)以下大氣腐蝕級別且耐久性等級為超長期(VH)，且有景觀、視覺需求之熱浸鍍鋅鋼構橋梁。G4 塗裝系統包括 G4-1 及 G4-2 兩種系統，G4-1 塗裝系統如表 4-29 所示，G4-2 塗裝系統如表 4-30 所示。其中 G4-1 塗裝系統使用氟碳樹脂面漆；而 G4-2 塗裝系統使用聚胺酯面漆。

表 4-29 G4-1 塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	1	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第一種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	90
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	200 μm		

表 4-30 G4-2 塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	1	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第一種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	90
第一道面漆	聚胺酯中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級)	1	30
最小總乾膜厚	200 μm		

③G5 塗裝系統

G5 塗裝系統最小乾膜厚 240 μm，使用於 C5(含)以下大氣腐蝕級別且耐久性等級為超長期(VH)之熱浸鍍鋅鋼構橋梁。G5 塗裝系統包括 G5-1 及 G5-2 兩種塗裝系統，G5-1 塗裝系統如表 4-31 所示，G5-2 塗裝系統如表 4-32 所示。其中 G5-1 塗裝系統使用氟碳樹脂面漆；而 G5-2 塗裝系統使用聚胺酯面漆。

表 4-31 G5-1 塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	1	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第一種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	130
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	240 μm		

表 4-32 G5-2 塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	1	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第一種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	130
第一道面漆	聚胺酯中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級)	1	30
最小總乾膜厚	240 μm		

④GX 塗裝系統

GX 塗裝系統最小乾膜厚 200 μm ，使用於 CX 大氣腐蝕級別且耐久性等級為長期(H)之熱浸鍍鋅鋼構橋梁。GX 系統包括 GX-1 及 GX-2 兩種塗裝系統，GX-1 塗裝系統如表 4-33 所示，GX-2 塗裝系統如表 4-34 所示。其中 GX-1 塗裝系統使用氟碳樹脂面漆；而 GX-2 塗裝系統使用聚胺酯面漆。

表 4-33 GX-1 塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	1	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第 1 種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	90
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	200 μm		

表 4-34 GX-2 塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	1	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第 1 種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	90
第一道面漆	聚胺酯中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級)	1	30
最小總乾膜厚	200 μm		

⑤GX⁺塗裝系統

GX⁺塗裝系統最小乾膜厚 280 μm，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之熱浸鍍鋅鋼構橋梁塗裝系統，為 GX 塗裝塗裝系統增厚版。GX⁺塗裝系統建議直接採用氟碳樹脂面漆系統如表 4-35 所示。

表 4-35 GX⁺塗裝系統^[6]

鍍鋅層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
熱浸鍍鋅	熱浸鍍鋅作業方法(CNS 8503)	1	85
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆(CNS 4938 第 1 種)	1	50
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-3	170
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	280 μm		

(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 4-36 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 4-36 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^[6]

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)

①T4 塗裝系統

T4 塗裝系統最小乾膜厚 200 μm，使用於 C4(含)以下大氣腐蝕級別且耐久性等級為超長期(VH)，且有景觀、視覺需求之金屬熔射鋼構橋梁。T4 塗裝系統包括 T4-1 及 T4-2 兩種塗裝系統，T4-1 塗裝系統如表 4-37 所示，T4-2 塗裝系統如表 4-38 所示。其中 T4-1 塗裝系統使用氟碳樹脂面漆；而 T4-2 塗裝系統使用聚胺酯面漆。

表 4-37 T4-1 塗裝系統^[6]

金屬熔射層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
金屬熔射	鋅鋁及其合金之熔射作業方法 (CNS 7797)	1	100
封孔劑	透明環氧樹脂漆(CNS 4938 第 3 種)	1	--
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	140
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	200 μm		

表 4-38 T4-2 塗裝系統^[6]

金屬熔射層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
金屬熔射	鋅鋁及其合金之熔射作業方法 (CNS 7797)	1	100
封孔劑	透明環氧樹脂漆(CNS 4938 第 3 種)	1	--
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	140
第一道面漆	聚胺酯中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級)	1	30
最小總乾膜厚	200 μm		

② T5 塗裝系統

T5 塗裝系統最小乾膜厚 240 μm ，使用於 C5(含)以下大氣腐蝕級別且耐久性等級為超長期(VH)之金屬熔射鋼構橋梁。T5 系統包括 T5-1 及 T5-2 兩種塗裝系統，T5-1 塗裝系統如表 4-39 所示，T5-2 塗裝系統如表 4-40 所示。其中 T5-1 塗裝系統使用氟碳樹脂面漆；而 T5-2 塗裝系統使用聚胺酯面漆。

表 4-39 T5-1 塗裝系統^[6]

金屬熔射層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
金屬熔射	鋅鋁及其合金之熔射作業方法 (CNS 7797)	1	100
封孔劑	透明環氧樹脂漆(CNS 4938 第 3 種)	1	--
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-3	180
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	240 μm		

表 4-40 T5-2 塗裝系統^[6]

金屬熔射層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
金屬熔射	鋅鋁及其合金之熔射作業方法 (CNS 7797)	1	100
封孔劑	透明環氧樹脂漆(CNS 4938 第 3 種)	1	--
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-3	180
第一道面漆	聚胺酯中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級)	1	30
最小總乾膜厚	240 μm		

③TX 塗裝系統

TX 塗裝系統最小乾膜厚 200 μm ，使用於 CX 大氣腐蝕級別之金屬熔射鋼構橋梁。TX 塗裝系統包括 TX-1 及 TX-2 兩種塗裝系統，TX-1 塗裝系統如表 4-41 所示，TX-2 塗裝系統如表 4-42 所示。其中 TX-1 塗裝系統使用氟碳樹脂面漆；而 TX-2 塗裝系統使用聚胺酯面漆。

表 4-41 TX-1 塗裝系統^[6]

金屬熔射層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
金屬熔射	鋅鋁及其合金之熔射作業方法 (CNS 7797)	1	100
封孔劑	透明環氧樹脂漆(CNS 4938 第 3 種)	1	--
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	140
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	200 μm		

表 4-42 TX-2 塗裝系統^[6]

金屬熔射層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
金屬熔射	鋅鋁及其合金之熔射作業方法 (CNS 7797)	1	100
封孔劑	透明環氧樹脂漆(CNS 4938 第 3 種)	1	--
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-2	140
第一道面漆	聚胺酯中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	聚胺酯面漆(CNS 15665 第 3 級)	1	30
最小總乾膜厚	200 μm		

④TX⁺塗裝系統

TX⁺塗裝系統最小乾膜厚 280 μm，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之金屬熔射鋼構橋梁塗裝系統，為 TX 塗裝系統增厚版。TX⁺塗裝系統建議直接採用氟碳樹脂面漆系統如表 4-43 所示。

表 4-43 TX⁺塗裝系統^[6]

金屬熔射層及塗層	規格	道數	最小乾膜厚(μm)
金屬熔射	鋅鋁及其合金之熔射作業方法(CNS 7797)	1	100
封孔劑	透明環氧樹脂漆(CNS 4938 第 3 種)	1	--
中塗漆	環氧樹脂漆(CNS 4938 第一種) 或環氧樹脂非鋅底漆(CNS 4935)	1-3	220
第一道面漆	氟碳樹脂中塗漆(CNS 15665)	1	30
第二道面漆	氟碳樹脂面漆(CNS 15665 第 1 級)	1	30
最小總乾膜厚	280 μm		

(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 4-44 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 4-44 色彩設計時對景觀與居民的考慮事項^[4]

景觀考慮事項	居民考慮事項
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>5. 安全性的色彩</p>

4.2.3 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。以下列出了應做為防蝕措施考慮的典型範例。

此外，由於本指引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，請務必參考本指引的內容，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 4.5。

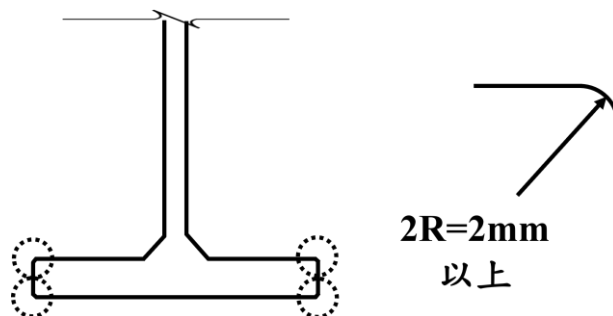


圖 4.5 角部曲面形式示意圖^[4]

(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)外露構件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、拱構件等閉断面構件，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理，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断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断面之構件，需於適當位置設置人孔或通風孔，以便進行內面塗裝更新。

4.3 施工

4.3.1 製作及施工注意事項

1. 一般

本指引介紹的方法和注意事項通常被認為在標準條件下可確保良好的塗層品質，因此，根據具體情況，本指引中描述的方法可能並非最佳。因此，在製造和建造個別橋梁時，有必要參考本指引中的說明，仔細考慮每個具體情況。

(1) 工期

- ① 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。
- ② 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

- ① 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，應選擇熱固性的塗裝系統(如環氧樹脂系或氟碳樹脂系等)。
- ② 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) 安裝材料等的考慮

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，在安裝完成後拆卸零件時，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，若使用油性塗料，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。

- ①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。
- ②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。
- ③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) 存放及運輸

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/m²不等，其一般建議測量附著鹽分量，NaCl 超過 50 mg/m²時需水洗。
- 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。

(2) 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：

- ① 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。
- ② 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。
- ③ 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。
- ④ 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。
- ⑤ 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 4-45 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 4-45 塗層損傷程度與修補施工方法^[6]

塗層損傷程度 塗層與 度 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		

4.3.2 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 4-46 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 4-46 塗裝系統廠內與現場噴塗面漆優、缺點比較表^[6]

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	<ol style="list-style-type: none"> 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。 	<ol style="list-style-type: none"> 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。 	<ol style="list-style-type: none"> 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	<ol style="list-style-type: none"> 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)。 	<ol style="list-style-type: none"> 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。 	<ol style="list-style-type: none"> 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表面處理及二次表面處理，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氣鹽。

(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. 塗布作業

(1) 塗料品質的確認

塗裝開始前，需確認使用塗料的品質。塗裝時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) 塗布方法

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

①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。

- ② 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

- ① 一般塗料塗裝時之大氣溫度應在 $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 之間，相對濕度應在 85% 以下。
- ② 鋼板表面溫度應高於施工環境露點溫度 3°C 以上，且不得超過 50°C 。
- ③ 但塗料技術文件另有規定者，從其規定。

4.3.3 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

① 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，均應依本節之規定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。

② 表面清潔度檢驗

鋼材表面清潔度檢驗，應以各等級之文字描述之清潔度定義為主，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，對應照片之編號如表 4-47 所示。

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 4-47 所示。

表 4-47 鋼材銹蝕等級與表面清潔度對應照片編號表(ISO 8501-1)

清潔度等級 \ 銹蝕等級	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

① 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。
- C. 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。
- D. 表面處理前鋼材表面之銹蝕等級已達到 D 級者。
- E. 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。
- F. 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。

②表面粉塵污染

- 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

①表面粗糙度

粗糙度以 Ry 平均值(或稱 Rz、Rmax 平均值)表示之。Ry 平均值為在 55 cm²(如 7.5 cm×7.5 cm)之範圍內讀取 3 個 Ry 數值，並取其平均值。

②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 4-48 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 4-48 表面粗糙度之檢驗時機與頻率^[4]

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)	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

- ① 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。
- ② 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。

③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

①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。

②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。

③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。塗膜檢查有外觀缺陷時，應依第 4.3.1 節之規定改善。

(1) 濕膜外觀與厚度檢驗

①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。

②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 4-49 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。

表 4-49 塗裝作業中常發生之缺陷及防範與處理方法^[6]

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。
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氣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。

(2) 乾膜外觀檢驗

- ①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。
- ②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。

(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。

- ①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。
- ②乾膜厚度之量測應根據 CNS 15200-1-7 方法 6「磁力法」辦理。
- ③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。
- ④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%。
- ⑤每批第一次檢驗不合格時，應進行複驗。
- ⑥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。
- ⑦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

- ① 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。
- ② 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。

6. 工程管理

工程管理不僅旨在達成所需品質的塗膜，還需更快速、更經濟、更安全地施工。適當工程管理需在施工前充分調查現場，制定詳細管理計畫。

與相關機關的協調應在準備階段充分進行，確保必要手續不延誤工程。塗料、作業員及設備安排需配合塗裝工程進度，考慮塗層間隔，管理進度。工程管理不僅為按期完工，亦為經濟地獲得高品質塗膜及安全施工的重要管理項目。

7. 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

- ① 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。

②施工前應備妥塗裝作業人員及管理監督人員所需之防護器具。

(2)塗裝作業時應行注意安全事項

①塗裝作業人員及管理監督人員皆應依規定穿戴適當之防護器具。

②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

①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。

②從事塗裝及粉塵作業者應依規定進行健康檢查。

8. 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。

9. 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。

第五章 耐候性鋼材

5.1 前言

5.1.1 一般

1933 年美國 United States Steel Corporation (U.S. Steel) 開發出第一代耐候鋼「COR-TEN® Steel」。在鋼材中添加銅(Cu)、磷(P)、鎳(Ni)、鉻(Cr)等微量元素，促進在大氣中形成穩定的「保護性銹層(Patina)」。用於貨車車廂、貨櫃、煤車、車架等，主要追求減少維護塗裝與提升耐久性。1950 年代末期開始應用於工業設施外牆、煙囪、鐵路貨車、小型鋼橋與建築結構。1960 年代耐候鋼性能被正式納入 ASTM 規範 ASTM A242(最早的耐候鋼標準，適用於結構板材)。ASTM A588(廣泛用於橋梁)。ASTM A709 Gr.50W(整合於交通用鋼結構規範中)。1970 年代起，美國、加拿大廣泛新建耐候鋼橋梁。

日本自 1960 年代(昭和 40 年代)開始使用耐候性鋼材。當時對於耐候性鋼材在日本氣候條件下的適用性尚無充分認識，實際上是以錯誤方式進行適用。1970 年代(昭和 50 年代)後，隨著社會資本的整備擴充，為了縮減初期建設費用並減輕維持管理負擔，對耐候性鋼橋的需求開始增加。1969 年(昭和 44 年)制定了 JIS G 3114。1983 年(昭和 58 年)進行修訂，分別規定了塗裝用(SMA-P)與無塗裝用(SMA-W)的鋼種。道路橋示方書在 1972 年版(昭和 47 年版)中納入了 JIS G 3114 的 SMA41、SMA50、SMA58 三種鋼種做為使用材料。其後，根據公路橋的使用情況，1990 年版(平成 2 年版)道路橋示方書僅規定了無塗裝用(SMA-W)做為其他用途鋼材。2008 年(平成 20 年)制定了 JIS G 3140。另一方面，為提升傳統耐候性鋼材的防蝕性能，開發了含有多量鎳的鎳系高耐候性鋼材。

國內最大鋼鐵公司中國鋼鐵股份有限公司(中鋼)成立於民國 60 年 12 月，耐候性鋼材(Weathering Steel)的研發過程可分為三個主要階段，與臺灣橋梁與建築用鋼之發展密切相關。以下為詳細的發展歷程整理：

1. 1980 年~1990 年

當時耐候鋼在日本(如 JIS G 3114 SMA 系列)已廣泛應用於橋梁與鐵道結構，中鋼開始關注此技術。初期研究方向參考日本新日鐵(Nippon Steel)及美國 Bethlehem Steel 的耐候鋼配方(Corten 系統)，著重在 Cu - Cr - Ni 合金系的耐蝕層形成機制。開發出對應於 ASTM A242 與 ASTM A588 的鋼材，主要應用於電塔、港口構件與建築外牆鋼構等用途。

2. 1990 年~2010 年

隨著公共工程導入「耐久性設計」概念，中鋼開始針對橋梁結構專用耐候鋼進行改良。技術發展方向包括：降低 P、S 雜質含量以改善銲接性與韌性、強化 Cu - Cr - Ni 系成分的穩定性，確保在亞熱帶高濕鹽害環境下仍能形成穩定保護銹層。參考 JIS G 3125 SMA490W、SMA570W 等規範，開發出性能等同於 JIS SMA 與 ASTM A588 系列材料。並於中鋼廠區、高雄港區及科研單位進行長期曝露試驗，分析銹層結構與腐蝕速率。部分橋梁(如高雄臨海工業區內部結構物)開始小規模應用。

3. 2010 年~至今

2010 年起，中鋼與顧問公司、學會合作，推動無塗裝耐候鋼橋試驗計畫。開發出對應 JIS G3114/SMA490W、SMA570W 及 ASTM A709 Gr.50W~70W 之鋼材。近年來成功開發出高功能橋梁用鋼包括：JIS G3140/SBHS400W、SBHS500W 與 ASTM A709 Gr. HPS 70W 等鋼材。

國內第一座採用耐候性鋼材之橋梁為 1983 年竣工之關渡大橋 (ASTMA588)(如照片 5.1 所示)。目前已有多座橋梁採用耐候性鋼材(如表 5-1 所示)，橋址涵蓋濱海地區及山區，且皆全橋進行塗裝防蝕。就耐候性鋼材的防蝕機理而言，並非所有地區均適用耐候性鋼材，使用時需考量架設地區特有的環境、結構部位及使用條件，適當評估適用環境並選定耐候性鋼材及銲材。

表 5-1 國內採用耐候性鋼材橋梁案例

鋼種	橋梁名稱(竣工日期)	備註
ASTM A588	關渡大橋(1983/10)、利澤簡橋(1992/05)、新寶橋(2011/08)	全橋進行塗裝防蝕
ASTM A709/50W	南方澳跨港大橋(1998/06)、桃園市大園區彩虹橋(2003/01)、六龜新發大橋(2011/06)、蘇澳白米景觀橋(2017/07)、三鶯大橋(2023/09)、花蓮大橋(2025/09)、淡江大橋(2026/01)、寶山二期鋼橋(2026/06)	
ASTM A709/HPS 70W	淡江大橋(2026/01)、北捷萬大樹林線(2026/12)	



照片 5.1 關渡大橋(資料來源:國家發展委員會檔案管理局)

5.1.2 適用範圍

本章適用於使用耐候性鋼材進行鋼橋防蝕。

5.2 防蝕設計

5.2.1 設計理念

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 Cu、P、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 5.1 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 5.1(a)所示。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物 (Amorphous Ferric oxyhydroxide, $\text{FeO}_x(\text{OH})_{3-2x}$)，如圖 5.1(b)所示。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 - $(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})\text{OOH}$ ，通常又稱 Cr-FG)，如圖 5.1 (c)所示。

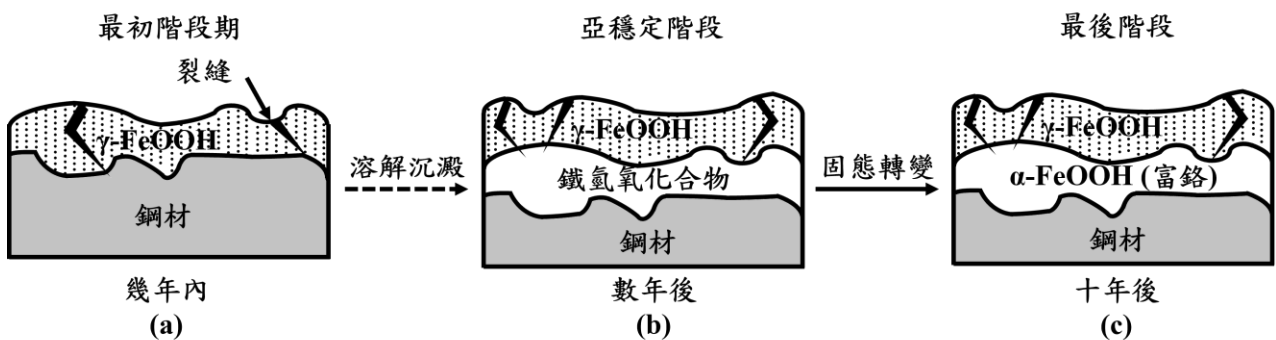


圖 5.1 耐候性鋼材緻密氧化層的生成機制^[7]

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 5-2 列出了導致層狀剝離銹蝕的部位與原因。

表 5-2 耐候性鋼材橋梁層狀剝離銹蝕外觀及發生部位與原因^[4]

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	<ul style="list-style-type: none"> ● 橋梁地點靠近海岸，受飛來鹽影響大。 ● 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	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。

5.2.2 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 5-3 所示。

表 5-3 採用耐候性鋼材做為鋼橋防蝕方法之設計流程^[4]

程序	內容	備註
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、銲接材料、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，並檢討銹水等外觀是否需特別處理。	
↓		
細部結構的處理	進行有利於防蝕的結構細部設計。	
↓		
製作及組裝條件 確認	確認採用有利於防蝕與外觀的製作方法與組裝方法。	
↓		
維護管理方法的 建議	建議檢測與評估、維護與管理的方法。	

1. 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，需在結構形式選定中給予考慮，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/100cm²/day)的地區，或圖 5.2 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 5.3 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 年內的厚度減少相當於 0.5 mm。

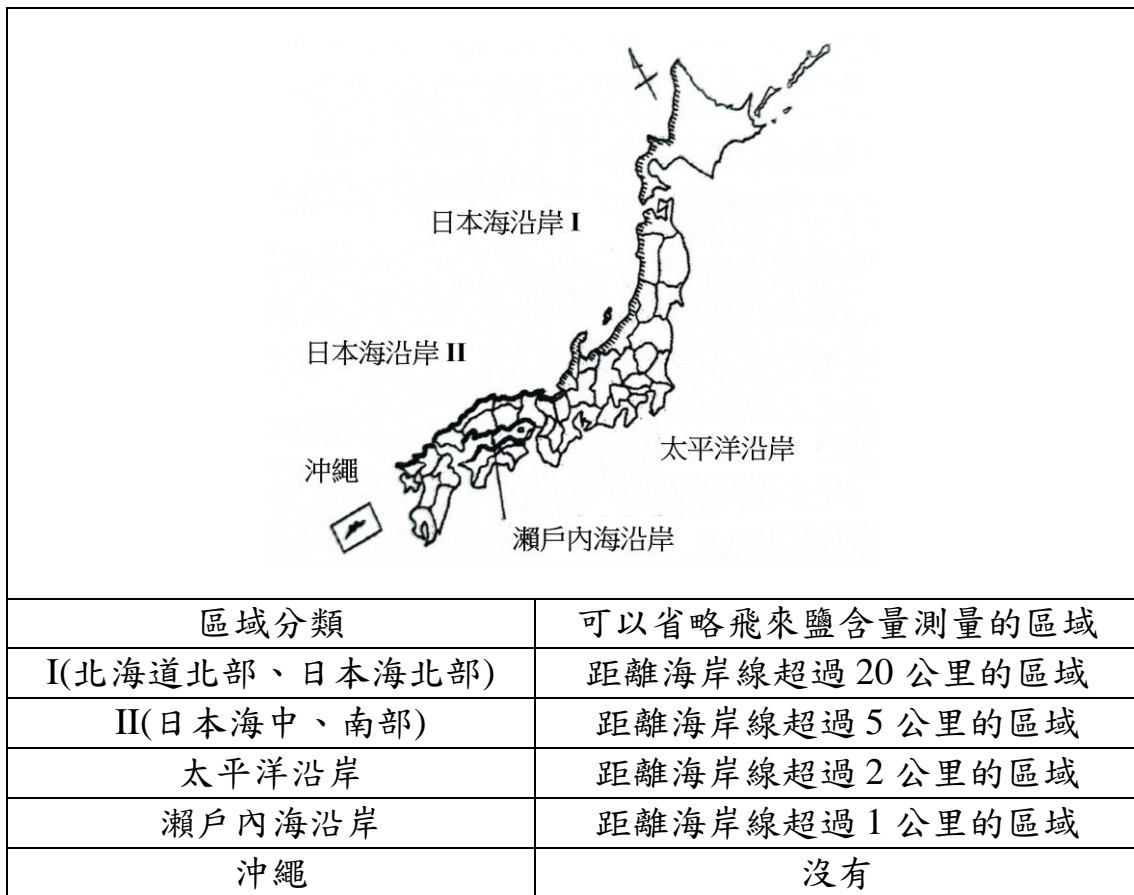


圖 5.2 日本耐候鋼無需塗裝的適用範圍^[8]

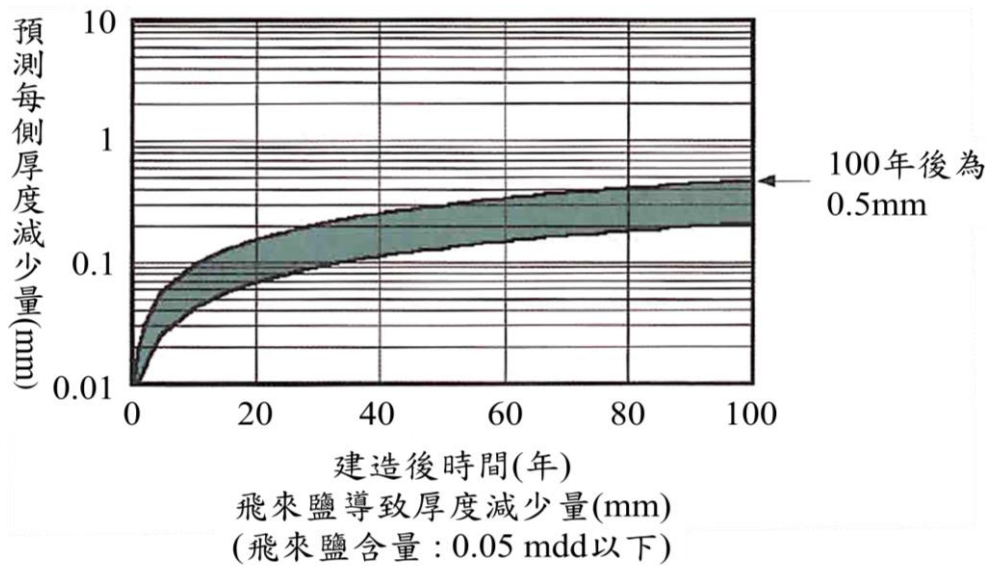


圖 5.3 JIS 耐候性鋼的腐蝕預測曲線^[9]

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 5.4 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 5.4 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。

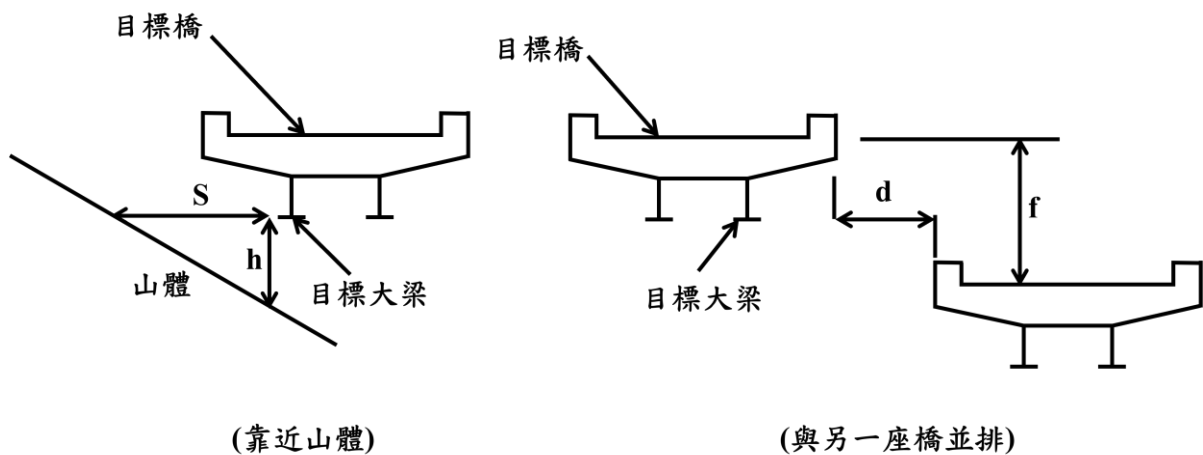


圖 5.4 受融雪劑影響的大梁配置^[4]

此外，美國聯邦公路局(FHWA)建議，在立體交叉(例如圖 5.5 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。

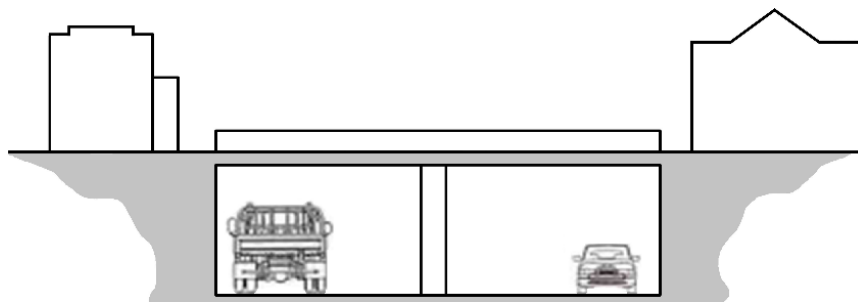


圖 5.5 溝槽式立體交叉橋^[10]

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表 5-4 及圖 5.6 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 5-4 不同環境下使用耐候性鋼材的建議^[11]

微觀環境	宏觀環境		
	其他	高濕潤時間環境 ⁽¹⁾	沿岸 ⁽²⁾
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 ⁽³⁾	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 ⁽⁴⁾	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 ⁽⁵⁾	如果可以維護植被，並且對於水域路段，能提供足夠的淨空 ⁽⁴⁾ ，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 ⁽⁶⁾
備考：下列定義與標準請參考“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。			

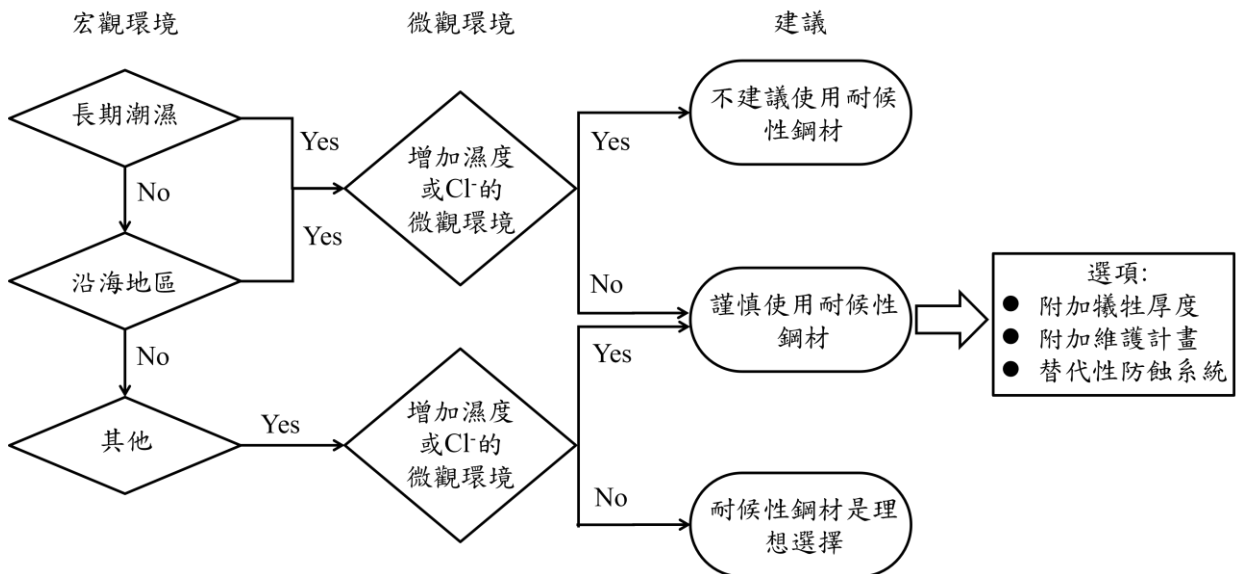


圖 5.6 基於宏觀和微觀環境的耐候性鋼材使用總體概念^[11]

2. 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)” [12]和 AASHTO/NSBA “Steel Bridge Fabrication Guide Specification(2018)” [13]。

表 5-5 為目前主要橋梁結構用耐候鋼之銲接方法與其對應之適用銲材。少部分銲材規格缺少對應之 CNS 國家標準，預計 2026~2027 年將陸續制定或隨 JIS、ISO 新版規範進行更新。耐候鋼材建議選用對應之適用銲材進行銲接，以確保銲道區域與母材具有相近之耐腐蝕特性。

表 5-5 橋梁結構用耐候鋼及其對應之銲接方法與適用銲材

鋼種	銲接方法	適用性	JIS 規格產品	AWS 規格產品	CNS 對應標準
SM490C	SMAW	全姿勢用	Z 3214 E4919-NCC2 U	A5.5 E7018-W1	CNS 13037
	FCAW	CO ₂ 全姿勢用 CO ₂ 填角銲接用	Z 3320 T553T1-1CA-NCC1	A5.29 E81T1-W2C	CNS 14599
A588	SMAW	全姿勢用	Z 3214 E5716-NCC1 U	A5.5 E8018-W2	CNS 13037
	FCAW	CO ₂ 全姿勢用 CO ₂ 填角銲接用	Z 3320 T553T1-1CA-NCC1	A5.29 E81T1-W2C	CNS 14599
SBHS400W A709 Gr.50W	SMAW	全姿勢用	Z 3214 E49J16-NCCAU	A5.5 E7016-G	CNS 13037
	GMAW	CO ₂ 用	Z 3315 G49JA0UC1-NCCJ	A5.28 ER80S-G	-
	FCAW	CO ₂ 全姿勢用 CO ₂ 填角銲接用	Z 3320 T49J0T1-1CA-NCC1-UH5 Z 3320 T49J0T1-0CA-NCC1-UH5	A5.20 E71T-1C A5.20 E70T-1C	CNS 14599
	SAW	對接接頭用 填角銲接用	Z 3183 S50J2-AW1 Z 3183 S50J2-AW1	A5.23 F7A2-EG-G A5.23 F7A0-EG-G	-
SBHS500W A709 Gr. HPS 70W	SMAW	全姿勢用	Z 3214 E57J16-NCC1AU	A5.5 E8016-G	CNS 13037
	GMAW	CO ₂ 用	Z 3315 G57JA1UC1-NCCJ	A5.28 ER80S-G	-
	FCAW	CO ₂ 全姿勢用 CO ₂ 填角銲接用	Z 3320 T57J1T1-1CA-NCC1-UH5 Z 3320 T57J1T1-0CA-NCC1-UH5	A5.29 E81T1-W2C A5.29 E81T1-W2C	CNS 14599
	SAW	對接接頭用 填角銲接用	Z 3183 S58J2-AW1 Z 3183 S582-AW1	A5.23 F8A2-EG-G A5.23 F8A0-EG-G	-

(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。

3. 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。塗裝規格請參考本指引第四章。

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鏽、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表面

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。該部位上翼板上表面宜採用耐久性優異的內面用塗裝規格(請參考本指引第四章)。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。

4. 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。

結構細部設計及維護管理時，需按塗裝防蝕方法進行考慮。有關塗裝防蝕工法請參見本指引第四章。

5.2.3 結構設計注意事項

1. 一般

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

本指引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，請務必參考本指引的內容，並仔細考慮合適的方法，以確保其適用於每種情況。

2. 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。

另一方面，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 5.7 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 5.8 所示)。

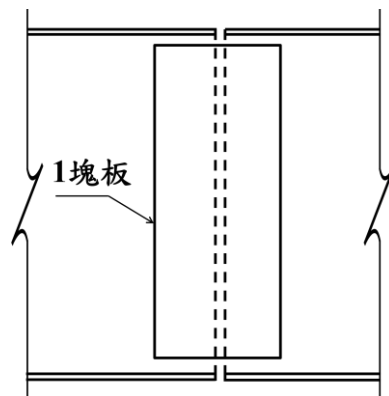


圖 5.7 腹板連接板範例^[4]

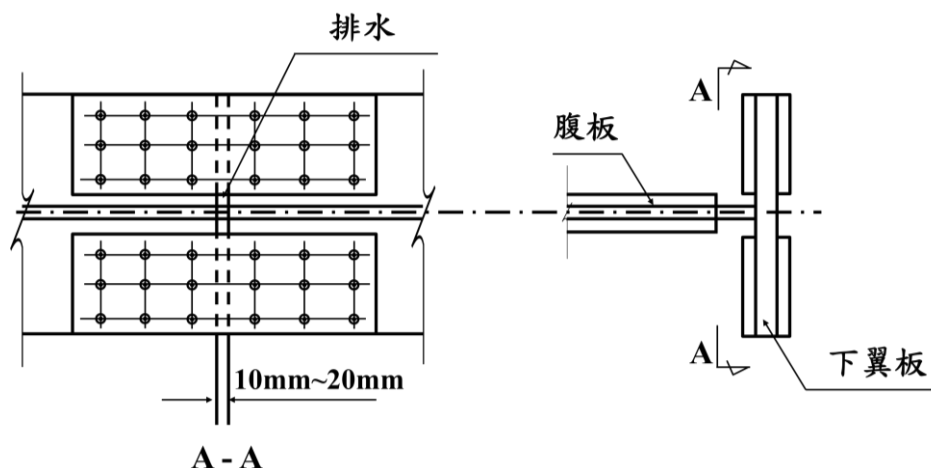


圖 5.8 I 型梁底部翼板連接板範例^[4]

(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 5-6 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，因此檢查時需特別注意，並將其恢復到正常狀態。

表 5-6 螺栓的最大中心間隔^[4]

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。

3. 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 5.9 所示)。

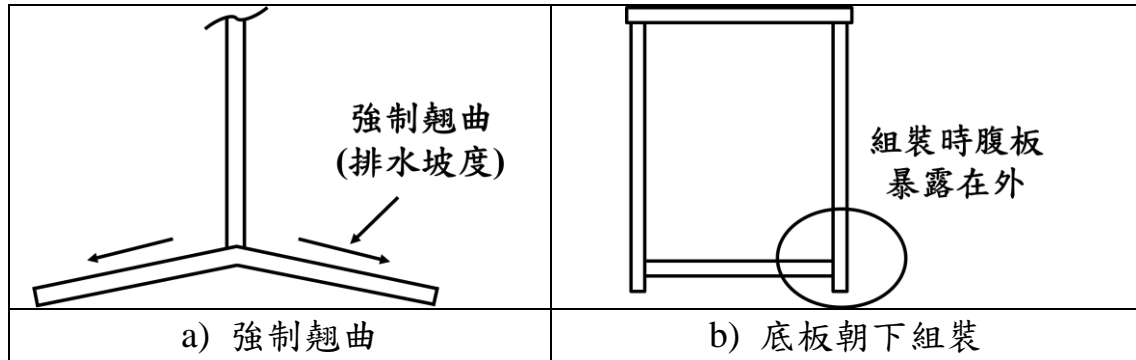


圖 5.9 翼板等水平構件應避免的結構示意圖^[4]

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，問題並不那麼明顯。

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，如果採用銲接安裝，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 5.10 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。

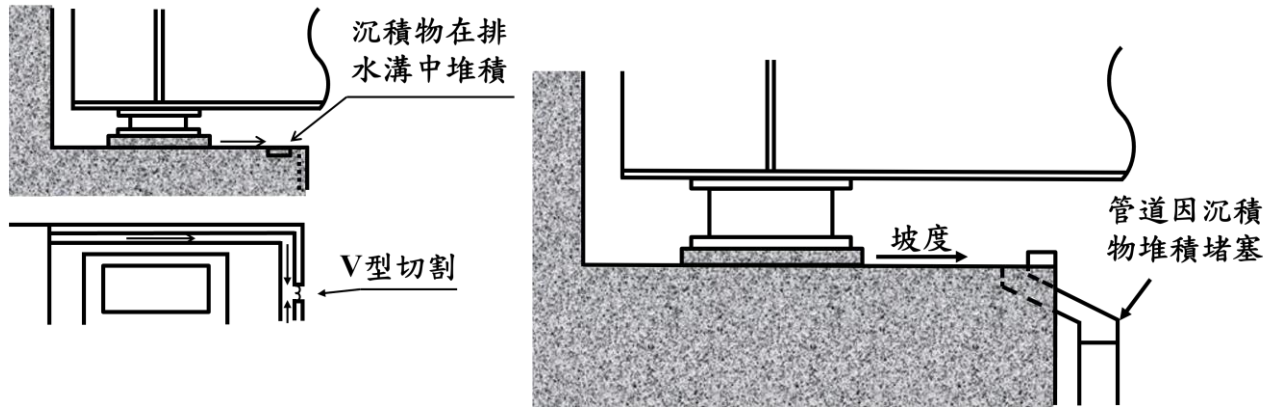


圖 5.10 導水用的排水溝或邊牆應避免的結構示意圖^[4]

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)表面生鏽造成的污漬，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 5.11 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。

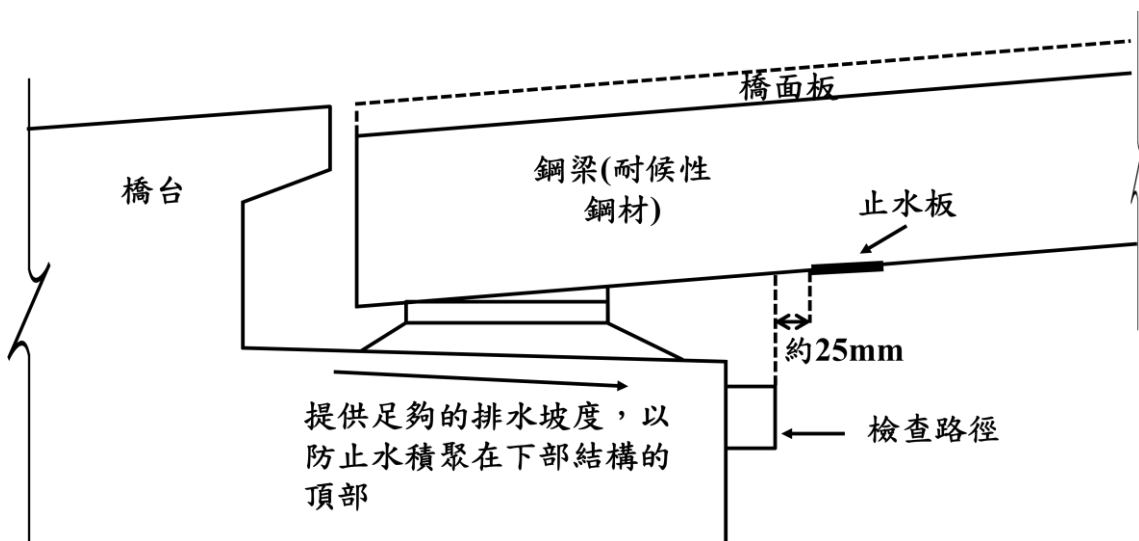


圖 5.11 防止橋面板設置前鏽蝕污染的範例^[4]

(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。連續梁的中間橋墩通常也通風不良，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 5.12 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 5.13 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下。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 5.14 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。

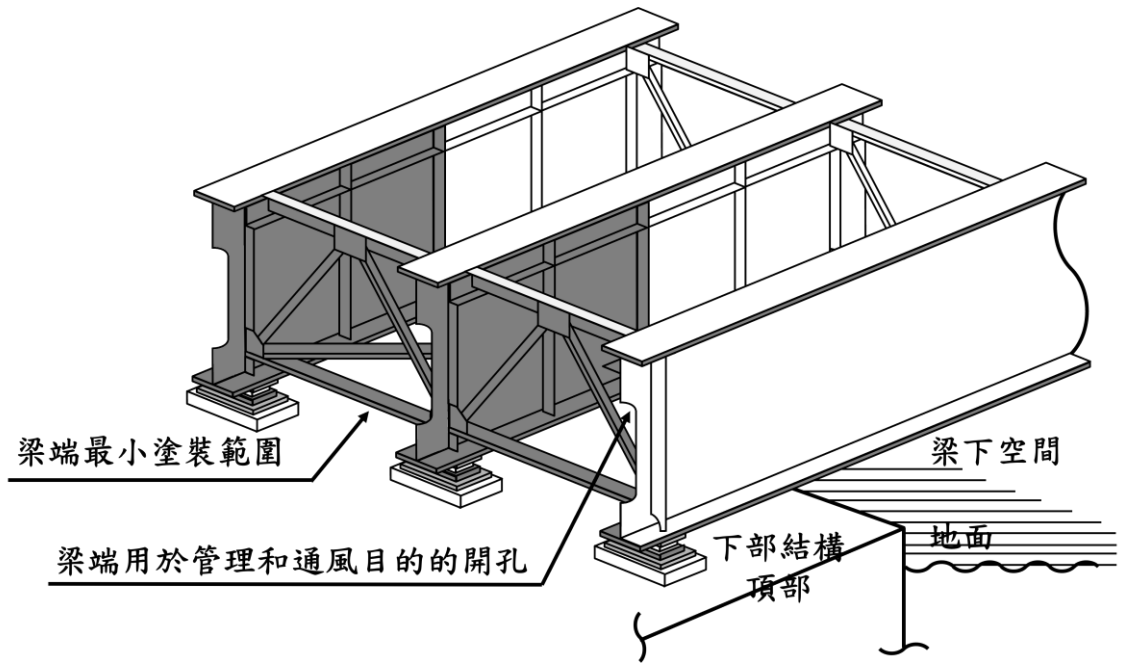


圖 5.12 下部結構(橋台)上方塗裝範圍範例^[4]

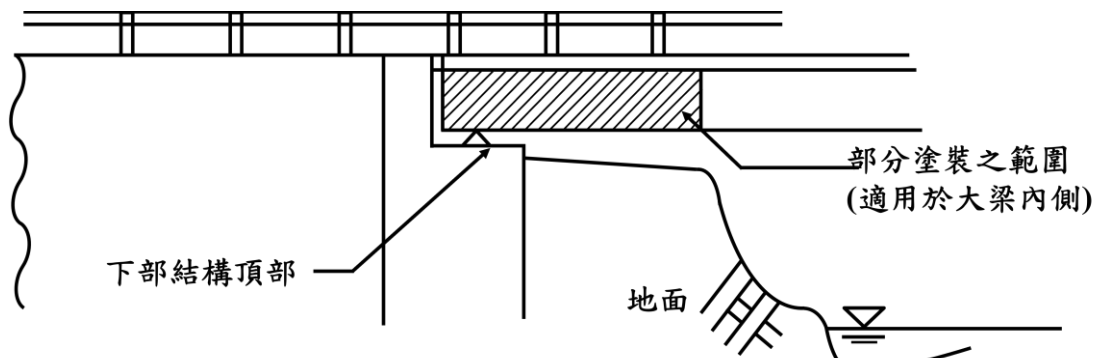


圖 5.13 地面接近區域下的局部塗裝範例^[4]

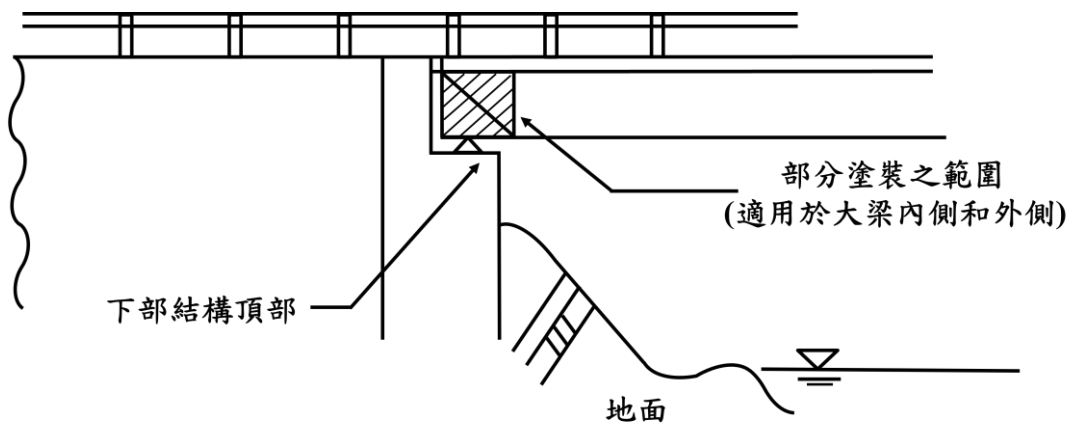


圖 5.14 撒布融雪劑情況下的局部塗裝範例^[4]

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。

如果橫斷面為箱型，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。

5.3 施工

5.3.1 製作及施工注意事項

1. 一般

本指引處理的耐候性鋼材鋼橋製作事項，除本節規定外，依設計規範處理，本章僅記述與普通鋼材不同或特別需注意的事項。

2. 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)。

3. 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。在進行這些施工時，必須採取足夠的措施來防止砂漿或水泥漿從模板滲漏，並且必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 5.11 所示)。

5.3.2 防蝕施工

1. 一般

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。

2. 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。

最好將耐候性鋼材表面的黑色氧化皮去除。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。

5.3.3 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 $1,000 \text{ mg/m}^2$ 。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。

第六章 熱浸鍍鋅

6.1 前言

6.1.1 一般

熱浸鍍鋅的歷史始於法國，1742 年時其方法被發表，36 年後在世界上首次實現工業化。其後，英國、德國、奧地利及歐洲各地相繼建設了熱浸鍍鋅工廠。1970 年前臺灣即有熱浸鍍鋅產業，但這些鍍鋅廠的設備及鍍鋅槽極為簡陋，只可鍍一些外銷貨櫃用或管用配件，甚至也無法鍍作具螺紋之螺栓螺帽。1972 年輸電鐵塔公司成立時，從日本進口鋼板製作設立 7m 長鍍鋅槽，從此進入新的熱浸鍍鋅時代。同年，臺灣開始大規模的基礎建設及新建高速公路，鍍鋅廠開始鍍護欄板、號誌架、標誌架等，而當時的輸電鐵塔用之鍍鋅角鋼構件仍從日本直接進口安裝，直到 1975 年才於臺灣自行製作及鍍鋅；至於具螺紋之螺栓螺帽，至 1977 年經專業熱浸鍍鋅廠自日本引進相關技術後於 1979 年開始製作。1992 年陸續有公司設立 16m 鍍鋅槽並以 LPG、LNG 當作加熱燃料以減少環境之污染。1989 年中華民國熱浸鍍鋅防蝕技術基金會成立，一方面作學術研究協助政府修訂熱浸鍍鋅國家標準，一方面推廣鋼橋、鋼筋熱浸鍍鋅處理，並邀請日本、澳洲等專家學者至臺灣舉辦研討會推廣熱浸鍍鋅橋梁、鋼筋。

1991 年第一座熱浸鍍鋅公路橋梁為陽明山國家公園內台 2 甲線陽金公路的馬槽橋，此橋為 SRC 結構共採用約 800 噸熱浸鍍鋅鋼箱梁等及 1,500 噸鋼筋(如照片 6.1 所示)，開啟橋梁熱浸鍍鋅之歷史。1992 年臺灣陸續設有 16m 長可鍍鋼橋之鍍鋅槽。第一座採用熱浸鍍鋅的鋼拱橋是 2000 年的鹿港福興橋(如照片 6.2 所示)。鋼板梁橋因跨距較短梁深較不高且無密閉空間，極適合熱浸鍍鋅處理。表 6-1 為臺灣幾座採用熱浸鍍鋅之大型板梁橋。鋼箱梁橋常因長跨距梁較深或寬、端隔板，且加勁板經過中隔板需銲接，常有中隔板須預留流鋅孔問題而鍍鋅難度稍高，加上跨距長鋼板設計較厚，箱梁單重也比較重，於鍍鋅處理時風險稍大，如 2001 年的新店市中興路銜接北宜路高架工程(能仁路橋)。

熱浸鍍鋅最早運用在鐵路橋是 2003 年的東部鐵路後續改善計畫。該計畫全長約 5.74 公里，其中三座鋼結構桁架橋採用熱浸鍍鋅處理，包含冬山河橋、力霸支線跨越橋及武荖坑橋。冬山河橋跨距 89.3m、橋寬 10.2m，最大箱梁為 15.2m×1.2m×0.8m(鋼板材質為 A709 Gr50)，配合景觀設計，鍍鋅表面再進行油漆塗裝；力霸支線跨越橋(跨距 86m、橋寬 12m)及武荖坑橋(3 跨連續鋼桁架橋、橋長 254m)僅熱浸鍍鋅處理，這三座橋梁螺栓皆採用 A325 type1 熱浸鍍鋅高強度螺栓。捷運橋梁則為開始於 2003 年的臺北捷運木柵延伸內湖(現為文湖線)CB430 區段標，在 P12~P15 跨民族東路口為三跨連續區鋼箱梁。鋼箱梁上翼板寬 2.34m 下翼板寬 1.84m，腹板以 11.3 度之傾斜角度配置(如照片 6.3 所示)，採熱浸鍍鋅加油漆塗裝，螺栓亦採用 A325 熱浸鍍鋅高強度螺栓。圖 6.1 為臺灣歷年經熱浸鍍鋅處理之橋梁噸數統計，其中有含少部份人行陸橋、自行車道橋及水管橋。

國內位於嚴重腐蝕環境之鋼筋混凝土橋梁，採用熱浸鍍鋅鋼筋做為附加保護措施，已成為常態，有全橋鋼筋採用熱浸鍍鋅，例如馬槽橋、鹿安橋(如照片 6.4 所示)；亦僅有過河段下部結構採用，例如西濱快 49 標(180K 附近，跨員林大排與二港溪)及金門大橋；最近也有用於高架橋之胸牆、分隔島、擋土牆等，以防止保護層不足或施工問題(例如西濱快觀音-新豐段)。截至目前，用於土木建築的鋼筋經熱浸鍍鋅處理之重量約有 110,000 噸。

熱浸鍍鋅為鋼橋主結構的防蝕方法，如前所述已被廣泛應用，但近年來因鍍層槽的限制及製作上的工夫需求，主結構的採用有所減少。然而，由於其防蝕性能及施工的便利性，做為檢查通道或排水裝置等附屬物的防蝕方法，無論在鋼橋或混凝土橋中均被廣泛使用。近年來，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(JIS H 8643、CNS15031...等)，提供優於熱浸鍍鋅層之耐蝕性能的防蝕方法，目前尚無大型鍍槽可應用於橋梁本體，但已用於防墜欄杆、檢查步道等附屬構造物。

表 6-1 臺灣採用熱浸鍍鋅之大型板梁橋一覽表

工程名稱	施工單位	重量(噸)	完成年份	備註
中和立體交叉工程	營建署	6,958	1996	台 64 八里新店線
林口高架橋	公路局	7,294	1996	台 61 線
新北環快一、二標	營建署	13,938	2002	
臺中環中路五~八段	營建署	17,177	2003	高鐵聯外道路

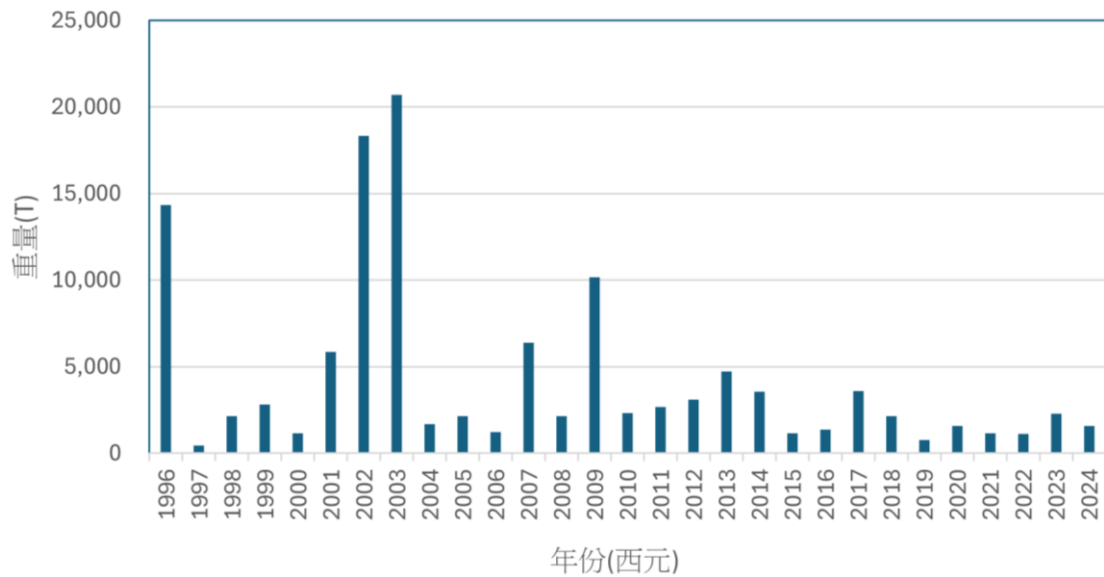
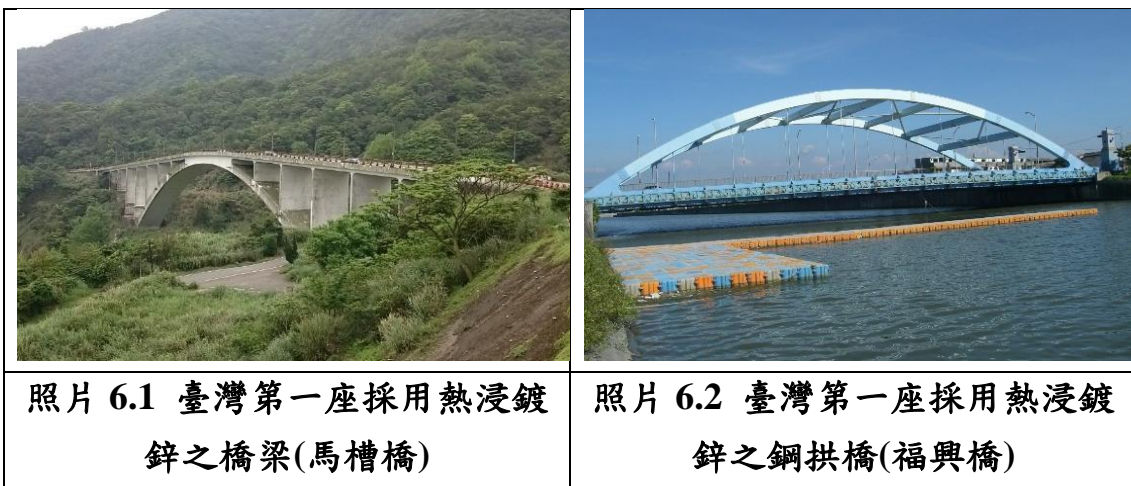


圖 6.1 臺灣歷年來熱浸鍍鋅橋梁重量統計圖



照片 6.1 臺灣第一座採用熱浸鍍鋅之橋梁(馬槽橋)

照片 6.2 臺灣第一座採用熱浸鍍鋅之鋼拱橋(福興橋)



照片 6.3 文湖線 CB430 區段標鋼箱梁橋(P12~P15)



照片 6.4 全橋鋼筋採用熱浸鍍鋅之橋梁(鹿安橋)

6.1.2 適用範圍

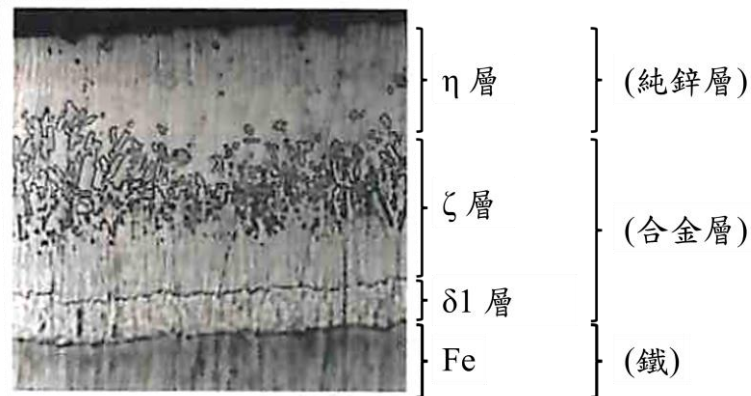
本章適用於以熱浸鍍鋅進行鋼橋防蝕。

6.2 防蝕設計

6.2.1 設計理念

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、 $\delta 1$ (delta-1)層和 γ (gamma)層)組成，如照片 6.5 所示。



照片 6.5 熱浸鍍鋅層的顯微照片^[4]

- (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 $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 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 6.2。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 6.3。

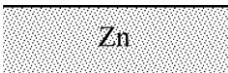
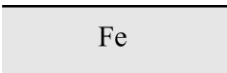
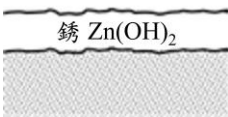
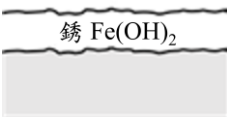
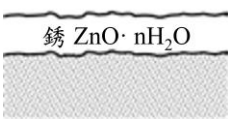
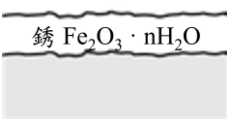
	鋅	鐵
基材		
氧化物生成	 (生成一層緻密的氧化薄膜)	 (生成疏鬆的氧化物)
氧化物生成以後	 (緻密的氧化膜變成堅固的鈍化膜)	 (鐵的氧化膜孔隙多，防護能力很小，腐蝕會持續進展)

圖 6.2 鋅、鐵的腐蝕機制^[4]

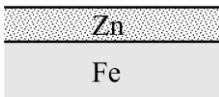
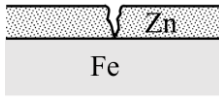
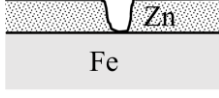
	熱浸鍍鋅
基材	
破裂狀態	
腐蝕狀態	 (由於鋅的防蝕作用，鋼材不會腐蝕)

圖 6.3 熱浸鍍鋅的防蝕機制^[4]

2. 防蝕設計理念

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。

6.2.2 防蝕設計

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。

1. 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 6-2 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。耐久性等級如下：

- (1) 極低(VL) : 0 至 <2 年
- (2) 低(L) : 2 至 <5 年
- (3) 中等(M) : 5 至 <10 年
- (4) 高(H) : 10 至 <20 年
- (5) 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 6-3，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(鋅金屬的穩態腐蝕速率(r_{lin} , $\mu\text{m/a}$)來評估。

表 6-2 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，85 μm 熱浸鍍鋅層在腐蝕性類別 C4(鋅的腐蝕速率在 2.1 $\mu\text{m}/\text{年}$ 至 4.2 $\mu\text{m}/\text{年}$ 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 6-3 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})(CNS 16238)

金屬	第一個 10 年內的平均腐蝕速率(r_{av}) (單位: $\mu\text{m}/\text{yr}$)					
	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: $\mu\text{m}/\text{yr}$)					
	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、左右等曝露部位的环境條件(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。

2. 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。

3. 防蝕規格

熱鍍鋅橋梁標準熱浸鍍鋅重量如表 6-4 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重量訂為 600g/m^2 或以上，對於其他構件，建議熱浸鍍鋅重量至少為 550g/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 550g/m^2 以上的熱浸鍍鋅重量，因此標準是根據每個構件的板厚來保證熱浸鍍鋅重量，如表 6-4 所示。

當熱浸鍍鋅重量較小時，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 6-4 熱浸鍍鋅附著量^[4]

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		

4. 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，則必須在鋼材生鏽之前進行維護，最好在鍍鋅層厚度至少為 20~30um 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鏽蝕；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本指引第四章。

如果維護延遲到熱浸鍍鋅層消耗並開始生鏽時，則必須以與生鏽的塗裝鋼相同的方式進行維護。

5. 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；在重視景觀的環境中，當鋅層耗盡導致鏽跡浮現時，需考慮進行修補。

6.2.3 結構設計注意事項

1. 一般

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。

本節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。

2. 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 6-5 所示，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 6-5 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 6-5 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	-

備考 1：本表調查時間為 2025.07.30
備考 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 6.4 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 6.4 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。特別是，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。

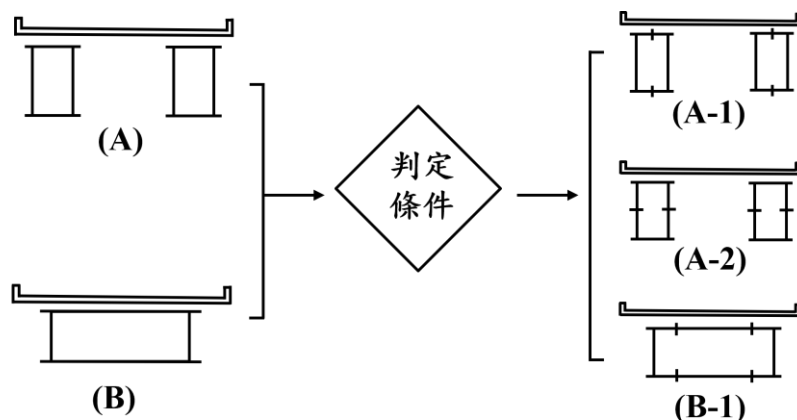


圖 6.4 箱型梁的分割方法示意圖

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 6.5。

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。

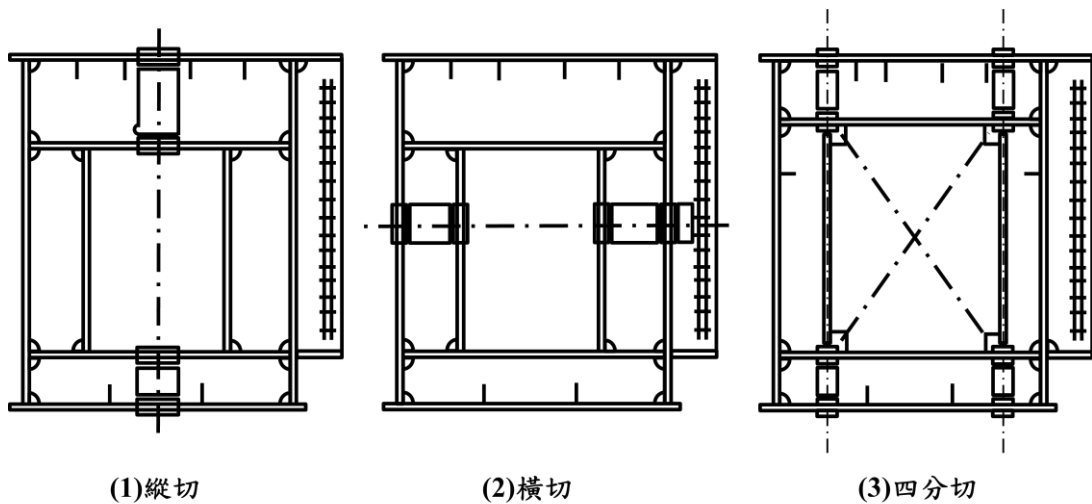


圖 6.5 箱型梁分割法典型範例^[4]

- 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 6.6 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。

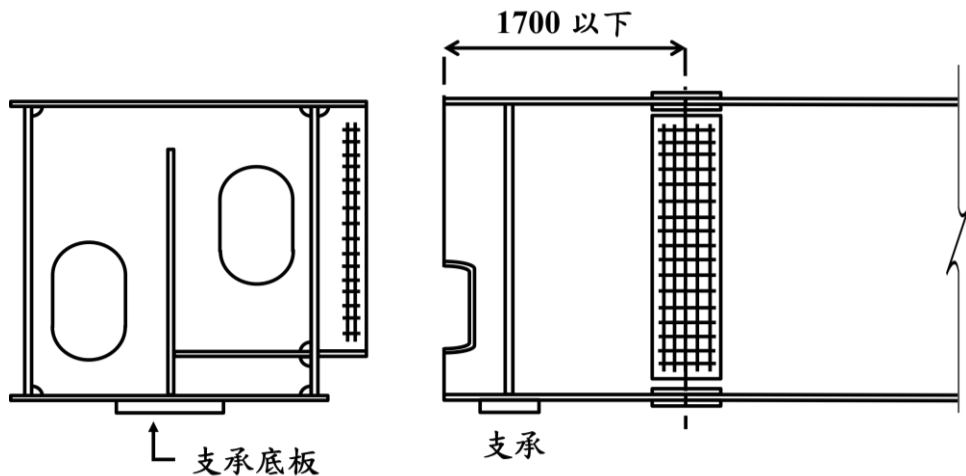


圖 6.6 支承處接頭範例^[4]

(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 6-6 所示。

表 6-6 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/mm ² 以上	800~1000 N/mm ²	16 以上	45 以上	18~31
	F10T	900 N/mm ² 以上	1000~1200 N/mm ²	14 以上	40 以上	27~38
CNS 11328	F8T	64 kgf/mm ² 以上	80~100 kgf/mm ²	16 以上	45 以上	18~31
	F10T	90 kgf/mm ² 以上	100~120 kgf/mm ²	14 以上	40 以上	27~38
	F11T	95 kgf/mm ² 以上	110~130 kgf/mm ²	14 以上	40 以上	30~40

註：1N/mm²=1MPa=1.01972×10⁻¹ kgf/mm²

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，但由於 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規定辦理。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 6-7 及表 6-8，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)^[14]規定「F10T 及 ASTM F3125 A490 級若採熱浸鍍鋅時，鍍鋅前之表面處理不得採用酸洗，得採用噴砂進行表面處理，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°C 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 6-7 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
註：品質要求依照 ASTM A153 之 C 級 381g/m ² 辦理。		

表 6-8 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
註：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/m² 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°C 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 6.7 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。

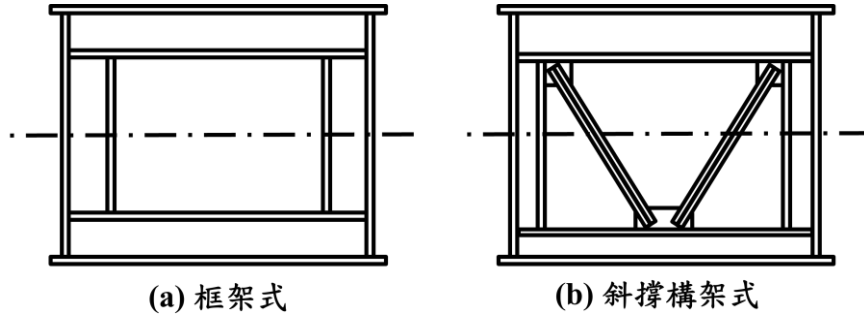


圖 6.7 中隔板形式示意圖^[4]

C.橫隔板開口部的大小以圖 6.8 所示的符號表示，宜滿足 $A \times B \geq 0.3 \times H_w \times B_w$ 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 6.8 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 6.8 所示的程度。

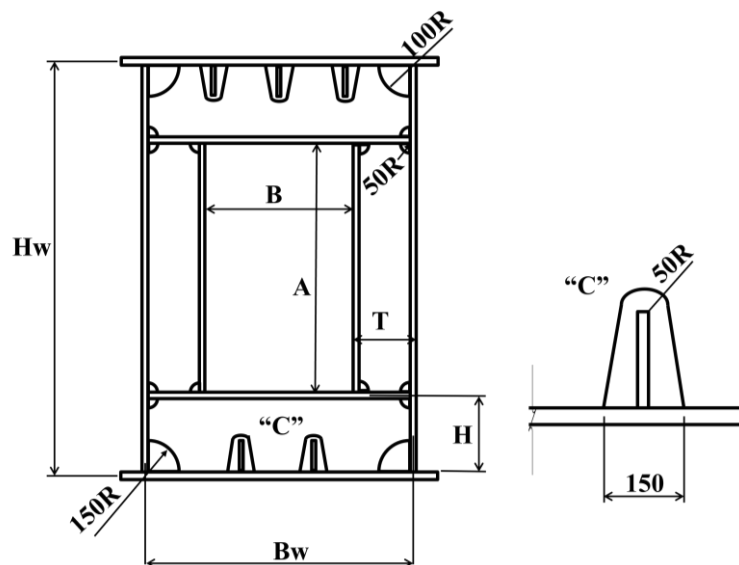


圖 6.8 隔板開口和扇形孔形狀範例^[4]

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 6.9 所示。熱浸鍍鋅浴的浸漬方法如圖 6.10 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 6.11 所示，可在支點附近設置現場接頭以改良支點結構。

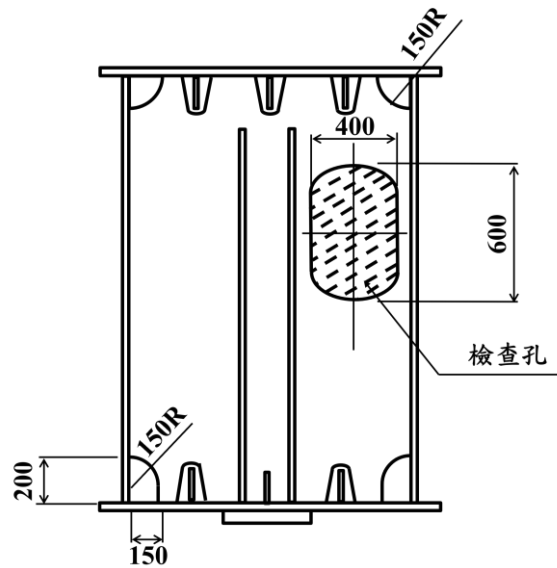


圖 6.9 端部隔板型式範例^[4]

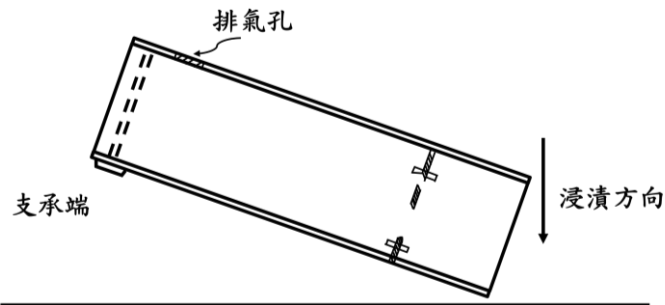


圖 6.10 端部支撐側構件的浸入方式示意圖^[4]

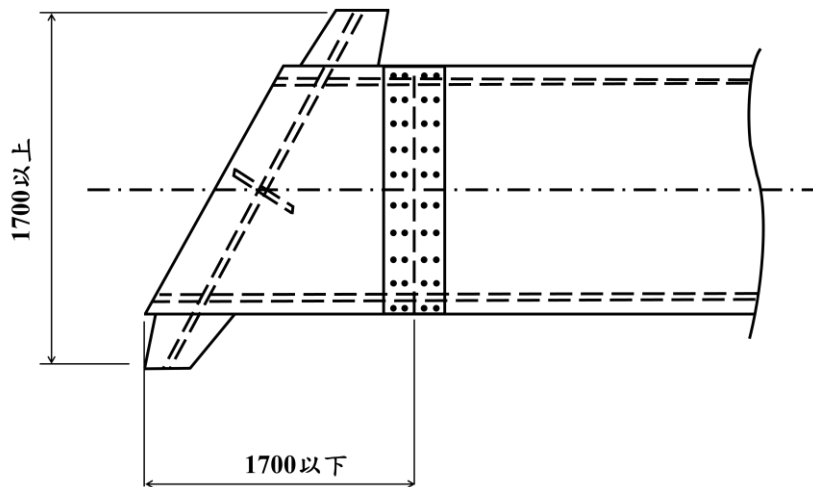


圖 6.11 構件端部較寬時的接頭位置範例^[4]

- 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 6.12 顯示了中間支承上典型的隔板形狀。
- F. 在未分割的箱梁中，端部支承和中間支承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 6.13 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。

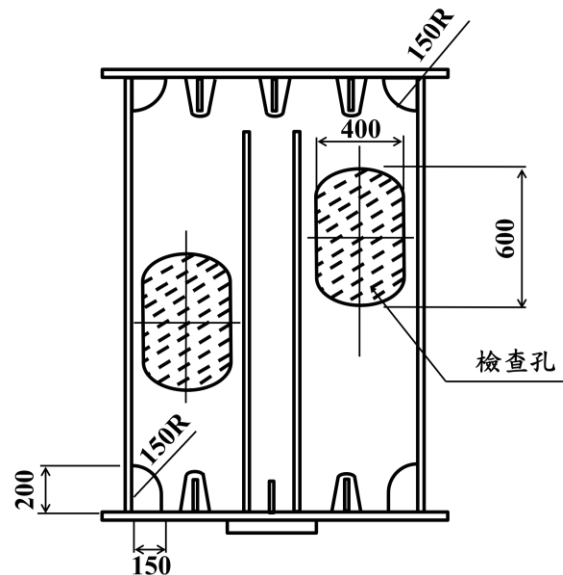


圖 6.12 中間支撐處隔板型式範例^[4]

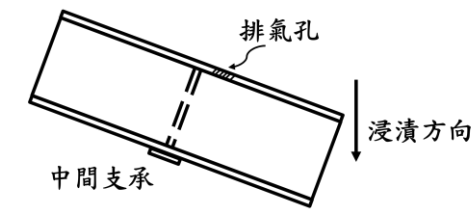


圖 6.13 構件浸入方式和排氣孔示意圖^[4]

③桁架橋的設計注意事項

A. 箱型斷面的構件不得採密封構造

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，斜撐等構件不應採用變窄的密封結構，必須採用有充分開口的構造，如圖 6.14 所示。

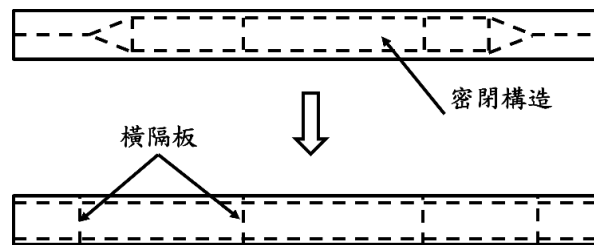
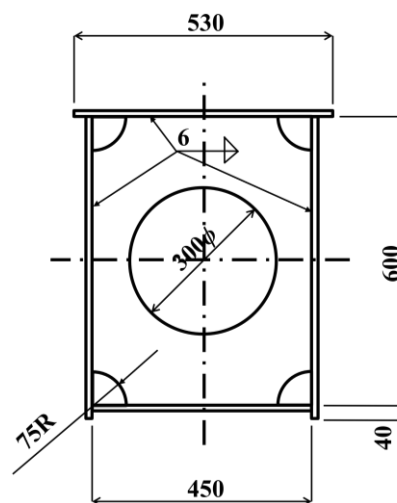


圖 6.14 垂直和斜向構件收窄結構變化範例^[4]

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 6.15 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 6.15 隔板開口範例^[4]

C. 桁架構件與橋面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 6.16 顯示了使用對接方法的案例結構的細節。

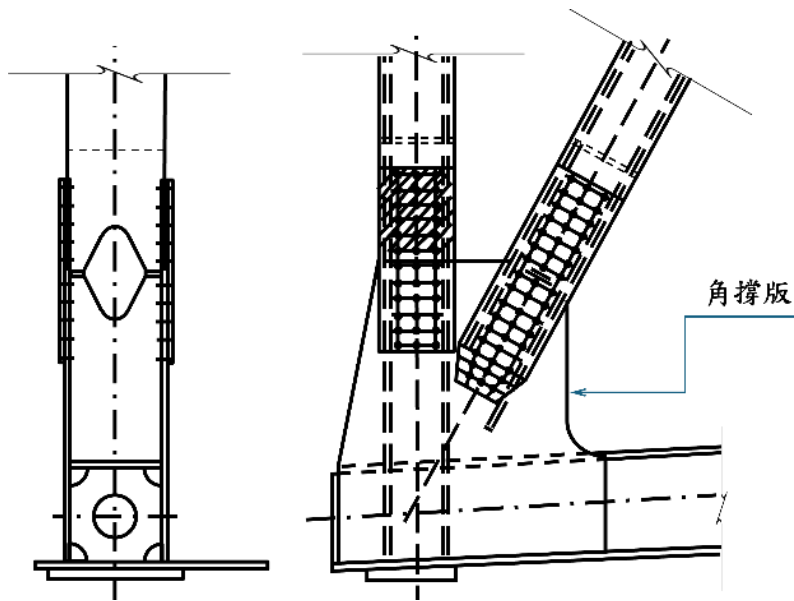


圖 6.16 對接方法詳圖^[4]

D. 桁架構件等箱型斷面的嵌入式翼板內表面，可以從構件末端到端部隔板進行角銲，但從端部隔板往內側方向，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，可能會殘留一些前處理溶液或出現一些未鍍區域。這些前處理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。箱形斷面詳圖詳見圖 6.17。

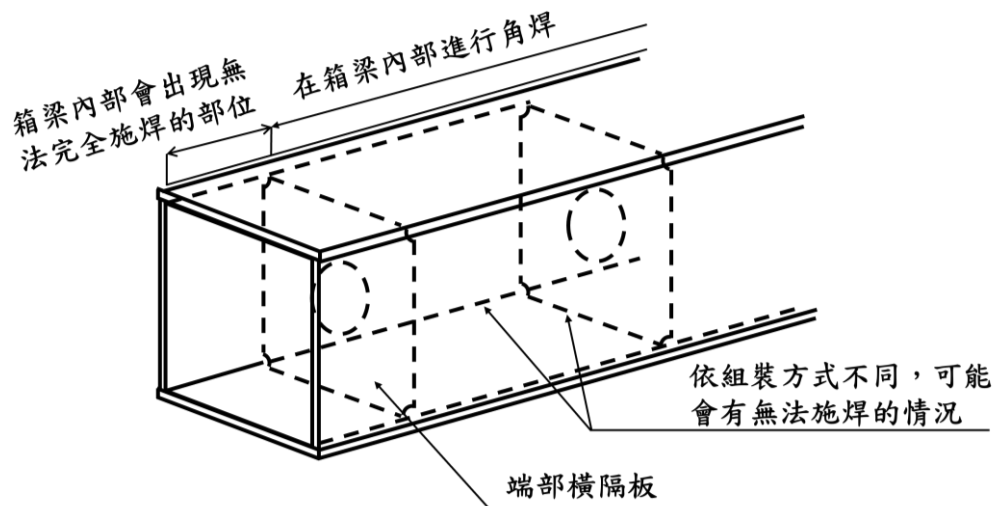


圖 6.17 箱形斷面詳圖^[4]

3. 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 6.18 所示，在外梁的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。

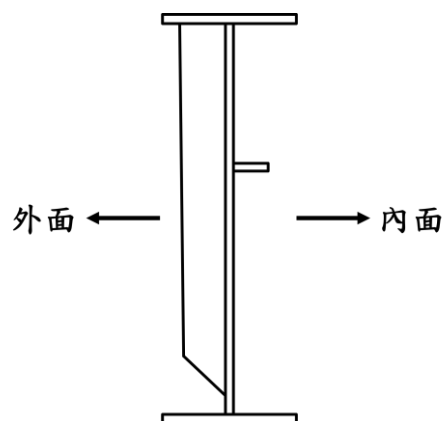


圖 6.18 加勁板安裝位置範例^[4]

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 6.19 及圖 6.20 所示。

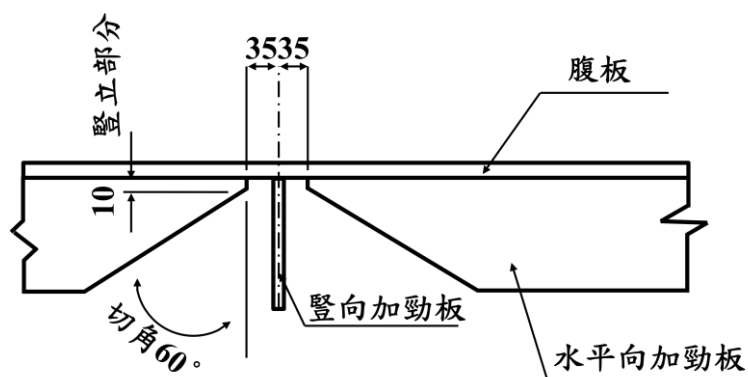


圖 6.19 水平向加勁板端部範例^[4]

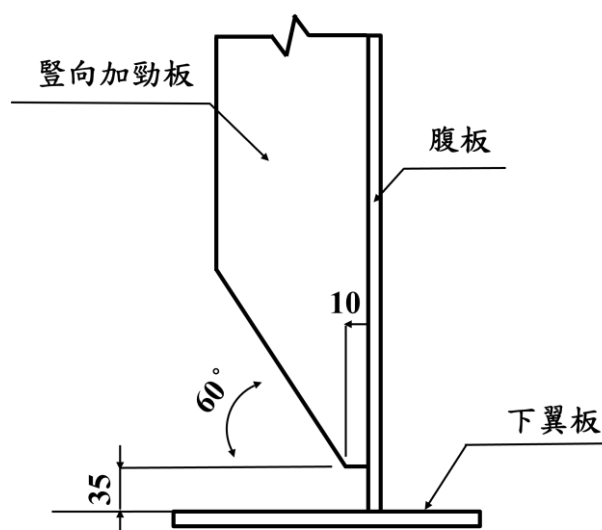


圖 6.20 豎向加勁板端部範例^[4]

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 6.19 及圖 6.20 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 6.20 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 6.21 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。

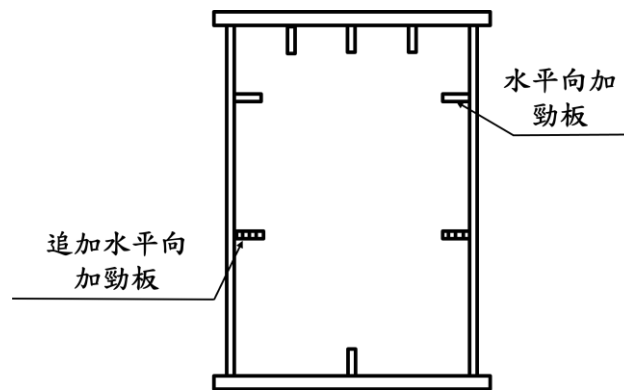


圖 6.21 防止膨脹的加勁板範例^[4]

(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 6.22 所示)。

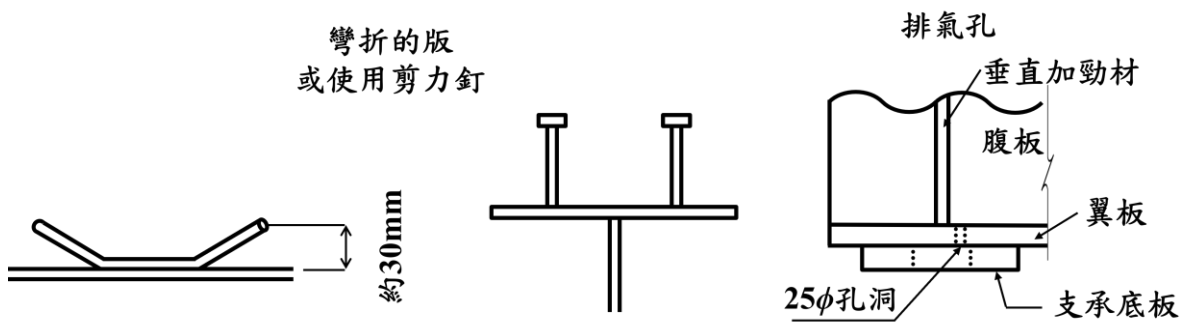


圖 6.22 防止未鍍區域的細部範例^[4]

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 6.23 所示)。在支承上及節點部等垂直加勁材下端的扇形切口需回填時，宜在下翼板設置垂流用孔。

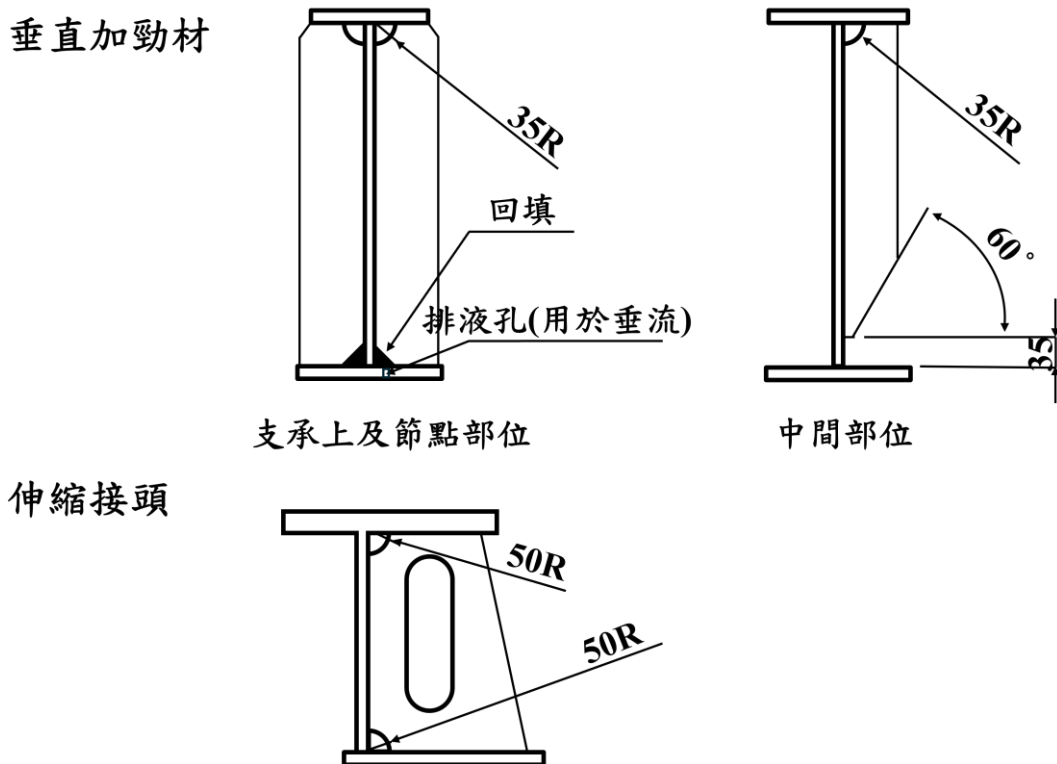
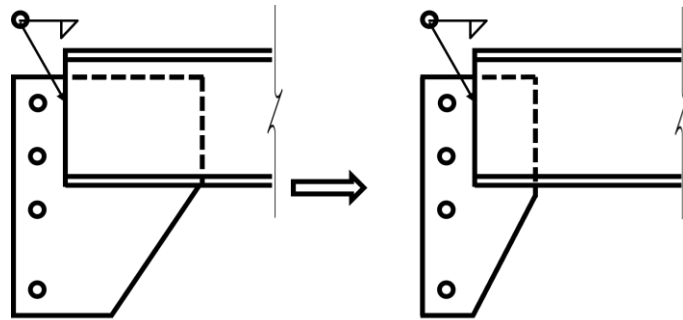


圖 6.23 改善熔融鋅滴落範例^[4]

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 6.24 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 6.24 預防不熱浸鍍鋅範例^[4]

4. 支承及附屬物

(1) 支承

為維持滑動或旋轉性能，高強度黃銅支承板支承、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。

6.3 施工

6.3.1 製作及施工注意事項

1. 一般

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。

本指引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，應參考本指引內容，針對各條件進行充分考量，選擇合理且適當的方法。

2. 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。

3. 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。

4. 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 $60\mu\text{mRz}$ 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 $\mu=0.4$ ，因此需以噴砂處理確保摩擦接合面的滑動係數 $\mu=0.4$ 。

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 6.25 所示。

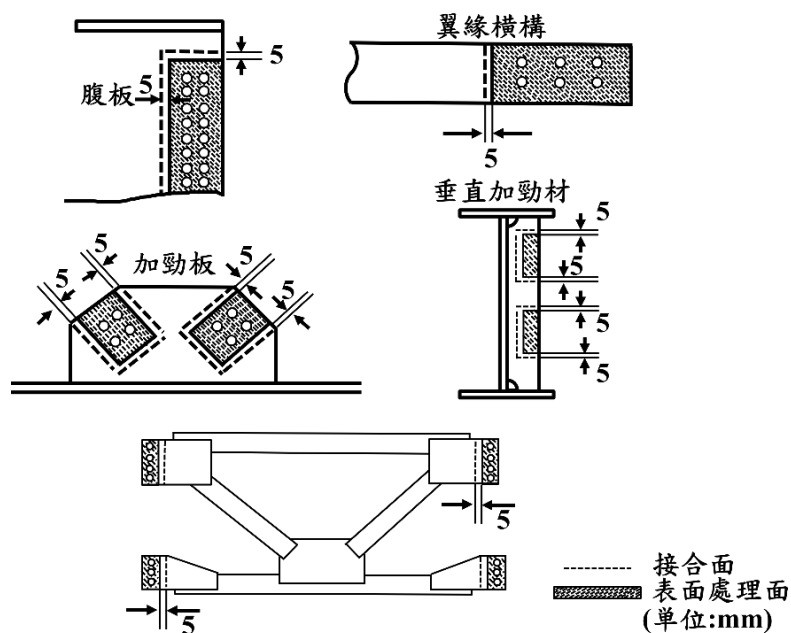


圖 6.25 摩擦接合面處理範圍範例^[4]

(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 $60\mu\text{mRz}$ 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。

使用沒有生鏽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)^[14]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

(1)熱浸鍍鋅用吊掛五金

①設計

熱浸鍍鋅用吊掛五金宜依據日本土木學會「鋼結構架設設計施工指針」^[15]進行設計。

根據日本土木學會「鋼結構架設設計施工指針」^[15]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 6.26 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。

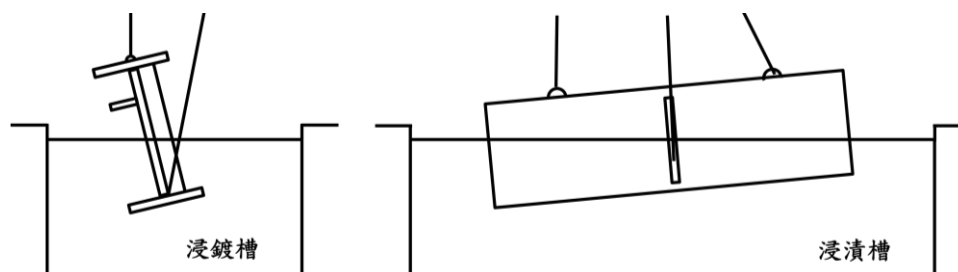


圖 6.26 懸掛吊具和浸沒狀態範例^[4]

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°C，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，故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形式橋梁，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，可參考本指引第四章。

- 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

6.3.2 熱浸鍍鋅施工

1. 一般

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，以利熱浸鍍鋅品質控制。

2. 施工

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 6.27 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。

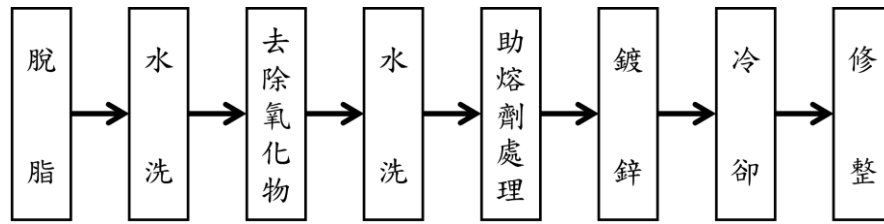


圖 6.27 鋼構件熱浸鍍鋅作業流程

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，導致未熱浸鍍鋅。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 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 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 $6\text{m}/\text{min}$ 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 6.25 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：

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。

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。

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。

此外，如圖 6.28 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。

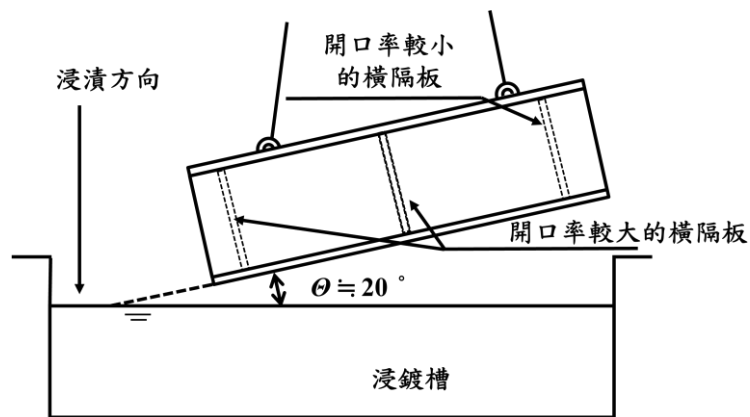


圖 6.28 未分割箱梁浸沒方式示意圖^[4]

3. 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：鋅基鋅料熱浸鍍鋅修補、鋅粉漆修補及鋅熔射修補等方法。

6.3.3 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 6-9。

表 6-9 鍍鋅後構件之容許誤差^[16]

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 6-10 所示。

表 6-10 熱浸鍍鋅構件螺栓孔貫穿率及阻塞率^[16]

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+1.0	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 6-11 之規定。鍍鋅層均勻性檢驗依據 CNS 10007 第 7.4 節之規定進行硫酸銅試驗，並應符合表 6-11 之試驗次數，判定基準依 CNS 1247 第 6.7 節規定辦理。

表 6-11 鍍鋅層附著量與硫酸銅試驗次數(CNS 10007)

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/cm³ 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。

第七章 金屬熔射

7.1 前言

7.1.1 一般

金屬熔射技術於 1909 年在瑞士開發，隨後在德國、法國及英國實現工業化。隨著技術的改良，應用範圍擴大。英國的 British Standards(英國規格)、德國的 Deutsche Industrie Norm(德國工業規格)、美國的 American Welding Society(美國銲接協會)等分別制定了規格及技術標準，品質管理方面亦得到完善。臺灣金屬熔射工法的發展，大致可分為三個階段：

1. 1970 年~1985 年

這個時期，臺灣正值經濟起飛，各項基礎建設陸續展開。金屬熔射主要用於機械零件的修復與磨損件的表面強化。例如：機具軸心、汽缸內壁等精密零件的修復，以延長設備壽命。引進的多為火焰熔射(Flame Spraying)和電弧熔射(Arc Spraying)等相對基礎的設備。材料則以鋅(Zn)、鋁(Al)或鋅鋁合金(Zn-Al)為主。由於成本考量與對新技術的不熟悉，此階段在公共工程，特別是在橋梁防蝕上的應用，仍處於試驗性質或小規模試點階段，主要針對熱浸鍍鋅鋼橋之銲道及損傷處補修，尚未全面使用，多數工程仍沿用傳統塗裝防蝕工法。

2. 1985 年~2000 年代

隨著臺灣經濟發展與國際交流增加，工程標準逐步與國際接軌，金屬熔射的優勢開始凸顯。電弧熔射因其熔射效率高、成本相對適中，成為重防蝕領域的主流。臺灣本地也出現了專門提供熔射服務的廠商，技術開始本土化。交通部、經濟部等相關單位開始參考國外標準(如美國 AASHTO、ISO、日本 JIS)，結合臺灣的實際環境條件，建立 CNS 7797 國家標準，並逐步建立或修訂關於鋼結構防蝕的技術規範，確定了金屬熔射的標準、檢驗項目(如熔射層厚度、附

著強度)與應用範圍，為後續的大規模應用打下基礎。除了純鋅、純鋁之外，鋅鋁(Zn-Al)等複合材料也開始被引入，以應對更嚴苛的海洋高鹽害環境。

3. 2000 年~至今

隨著重大公共工程(高鐵、捷運、高速公路延伸等)的全面開展，金屬熔射技術迎來了應用高峰。鋅鋁合金(Zn-Al 85/15)熔射，已成為鋼結構橋梁、跨海橋梁、港埠鋼結構等長期曝露於腐蝕環境下的標準或優先防蝕工法之一。搭配防蝕塗料其設計年限可達 25 年以上，大幅減少了維護頻率。除了電弧熔射外，高速火焰(High Velocity Oxy-Fuel, HVOF)等先進熔射技術也開始在臺灣應用，雖然在大型鋼結構橋梁上的應用相對較少，但在高性能構件或特定項目上發揮作用。

臺灣鋼結構橋梁應用金屬熔射工法的實績，雖遠不及重防蝕塗料塗裝及熱浸鍍鋅鋼橋，但也日漸增加，許多東西向快速道路的跨河橋梁、高速公路高架橋的部分路段，以及部分重大跨海橋梁有採用了鋅鋁合金(Zn-Al)電弧熔射，並搭配防蝕塗料做為複合防蝕工法實績。對於已營運多年、銹蝕嚴重的老舊鋼橋，如能確保表面清潔度及粗糙度符合要求，它也是重要的延壽工法。

儘管金屬熔射工法在臺灣鋼結構橋梁防蝕領域取得了應用實績，但仍面臨一些挑戰與發展機遇包括：1. 金屬熔射的初期投資成本高於傳統塗裝，部分預算受限的工程仍傾向於採用傳統工法。2. 熔射層品質高度依賴噴砂的徹底性(表面粗糙度與清潔度)和熔射操作者的技術，現場品管標準需持續加強。3. 戶外高濕度或風力過大的環境，會影響熔射顆粒的附著效率與熔射層品質。

7.1.2 適用範圍

本章適用於以金屬熔射進行鋼橋防蝕。

7.2 防蝕設計

7.2.1 設計理念

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)以熔融微粒子的形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(如海岸飛沫區、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 7-1~表 7-2。

表 7-1 熔射金屬的性能^[4]

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	環境隔阻效果		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(SO_x、NO_x)溶入水、酸性雨附著的溶解性。

表 7-2 金屬熔射層表面生成的化合物種類及溶解度^[4]

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°C~25°C)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 7-3。

表 7-3 金屬熔射材料的特性及腐蝕行為(ISO 2063-1)

熔射材料	特性	腐蝕行為
<p>鋅 (Zn99.99) 與 鋅鋁合金 (ZnAl15)</p>	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>鋅(Zn99.99)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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。 <p>鋅鋁合金(ZnAl15)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 抗大氣腐蝕性優於純鋅。 ● 對氯化物及特別是含 SO₂ 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。
<p>鋁 (Al99.5) 與 鋁鎂合金 (AlMg5)</p>	<p>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。</p> <p>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 SO₂ 的工業大氣環境以及海洋環境中鋼結構的防蝕保護。</p> <p>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。</p>	<p>鋁(Al99.5)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 在 pH 4 至 pH 9 的環境中具高度耐蝕性。 ● 特別適用於含 SO₂ 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。 <p>鋁鎂合金(AlMg5)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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。

7.2.2 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進行著色或特定外觀的要求事項。
- (5) 若為現場施工，需確認表面處理及熔射能適當進行。

1. 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 飛沫區的結構物
- 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

2. 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形式發揮功能。

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。相關塗料的選擇請參見第四章。

(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。

3. 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 7-4 所示。

表 7-4 金屬熔射規格^[4]

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，請參見本指引第四章。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 7-5 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 7-5 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 7-5 金屬熔射材料種類及最小局部厚度(JIS H8300)

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 7-6 中這些內容可供參考。

表 7-6 金屬熔射塗層厚度的建議值(單位： μm)(ISO 2063-1)

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：a 適用於此環境的有機塗層
 註 2：b 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 7-7 所示。

表 7-7 連接部位熔射規格^[4]

表面處理	噴砂處理，清潔度 ISO 8501-1 Sa 2½以上 表面粗糙度 Rz50 μm 以上(或粗糙化處理 Rz50 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。施加熱浸鋅鍍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 7-8 的規格。外表面著色美觀表面處理依本指引第四章進行塗裝。

表 7-8 熔射施工困難部位的防蝕規格^[4]

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 75 μm (300g/m ² ×2)
中塗漆	超厚膜型環氧樹脂塗料，刷塗 150 μm ×2(500g/m ² ×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 7-8 為示範例，若確認具同等以上耐久性的規格，亦可採用。品質確認方法依本指引第四章辦理。
- ②使用熱浸鋅鍍高強度螺栓時，外露部位須進行封孔處理或塗裝等表面處理。

4. 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本指引第四章。

5. 複合系統

與熱浸鍍鋅防蝕方法相比，金屬熔射防蝕系統的應用在開始設計前，應根據所用熔射材料和熔射技術，選擇合適的防蝕系統。對於嚴重的腐蝕環境，應在熔射層上塗覆一層額外的有機塗層(複合系統)，如此可以顯著提升防蝕性能。

- (1) 複合防蝕系統(例如：熔射層+封孔+有機塗層)的選擇應確保其符合構件的預期設計壽命。尤其是橋梁完工後無法接觸的表面，應採用在適當維護下，能滿足結構預期設計年限要求的系統。
- (2) 如果沒有能夠滿足預期設計年限要求的防蝕系統，則應使其在首次維護前不會發生腐蝕或僅發生輕微腐蝕，這樣維護期間只需更換有機塗層。
- (3) 有機塗層系統可根據 CNS 16174-5(ISO 12944-5) 中規定的腐蝕性等級進行選擇，或參考本指引第四章。

7.2.3 結構設計注意事項

1. 一般

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。本節主要介紹了結構設計中與金屬熔射相關的特殊注意事項。以下將說明在使用金屬熔射保護鋼公路橋梁免受腐蝕時，結構設計中應注意的要點。

- (1) 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，需要為此確保儘可能多的工作空間(約 1m^3)(如圖 7.1 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。
- (2) 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。但若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。

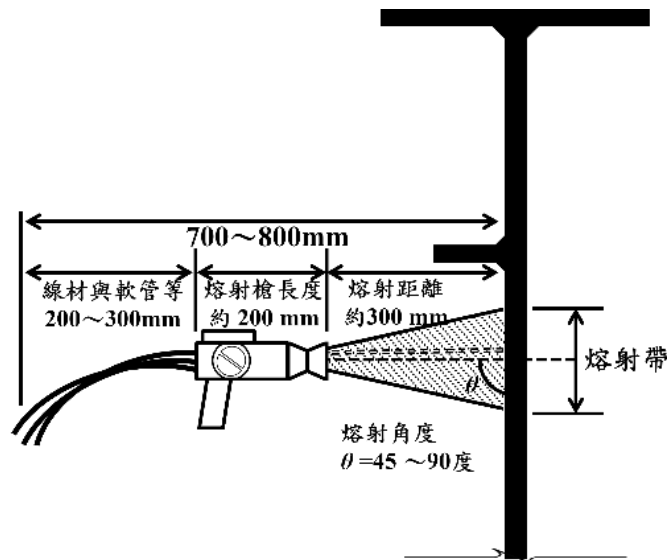


圖 7.1 熔射的作業條件示意圖^[4]

2. 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本指引第六章。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

- I. 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。
- II. 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。

3. 細部結構注意事項

本指引針對鋼橋防蝕法，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、施工需參考本指引內容及相關規範，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 7.2 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。

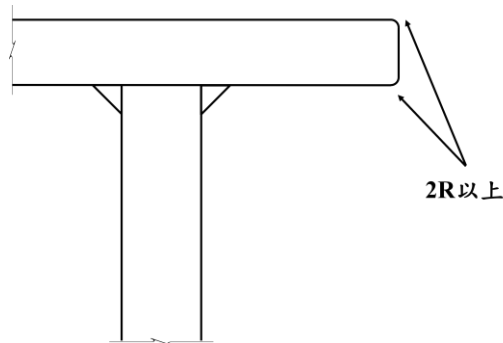


圖 7.2 2R 以上倒角範例^[4]

(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 7.3 所示方式處理。

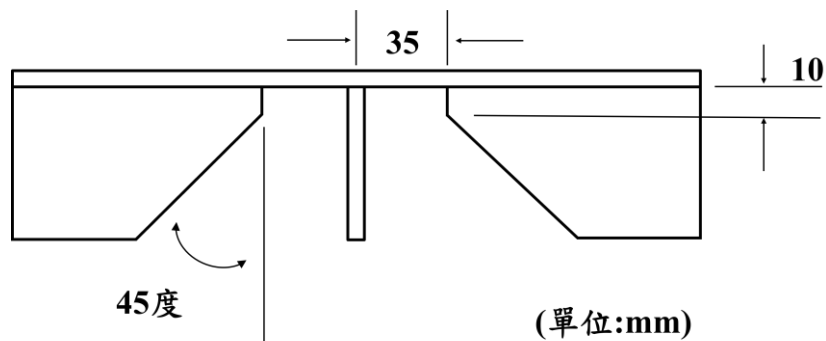


圖 7.3 加勁板切口範例^[4]

(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。

4. 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 1m^3 的工作空間。圖 7.4~圖 7.6 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 7-8 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。

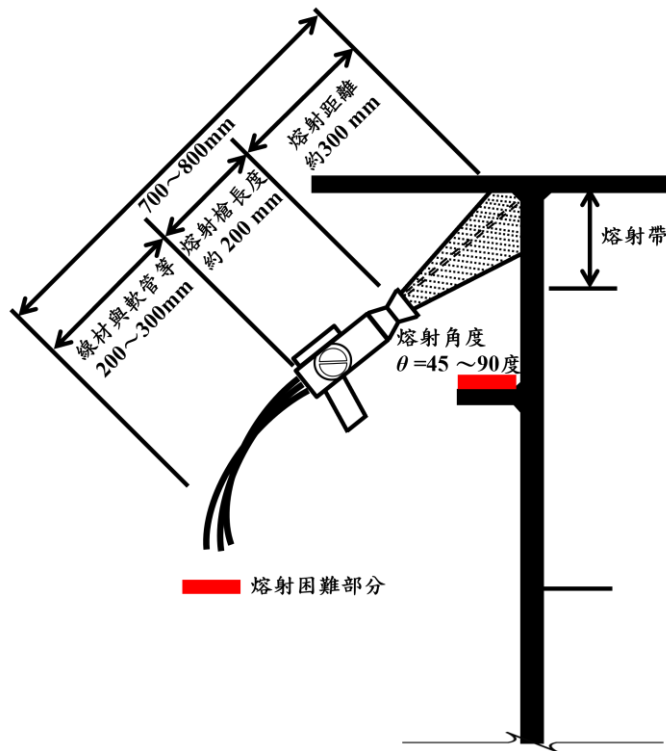


圖 7.4 熔射困難部位示意圖^[4]

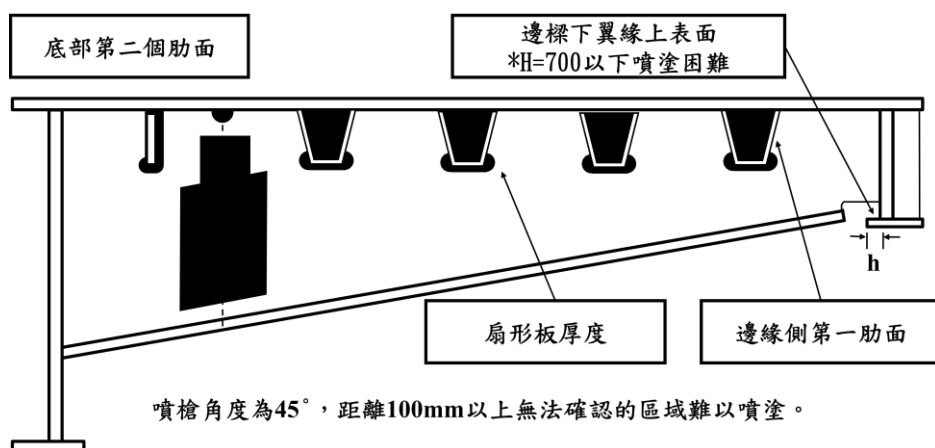


圖 7.5 熔射困難部位(狹窄部位)示意圖^[4]

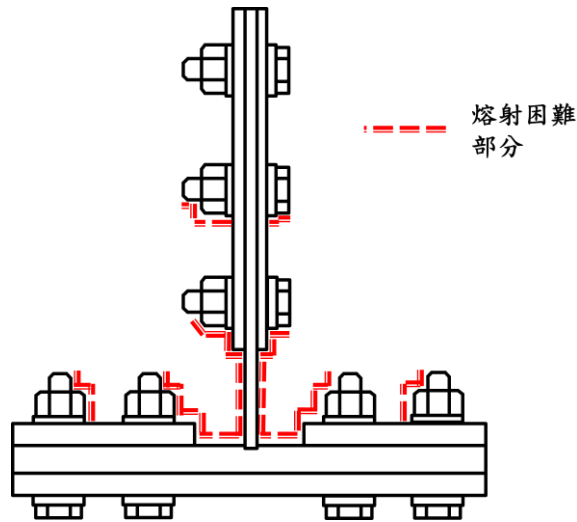


圖 7.6 熔射困難部位(螺栓部位)示意圖^[4]

7.3 施工

7.3.1 製作及施工注意事項

1. 一般

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。

2. 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為宜，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。

3. 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。

4. 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。

5. 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

- ① 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。
- ② 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

- ① 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。
- ② 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。
- ③ 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。

6. 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。

7.3.2 金屬熔射施工

1. 一般

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 7.7)。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。

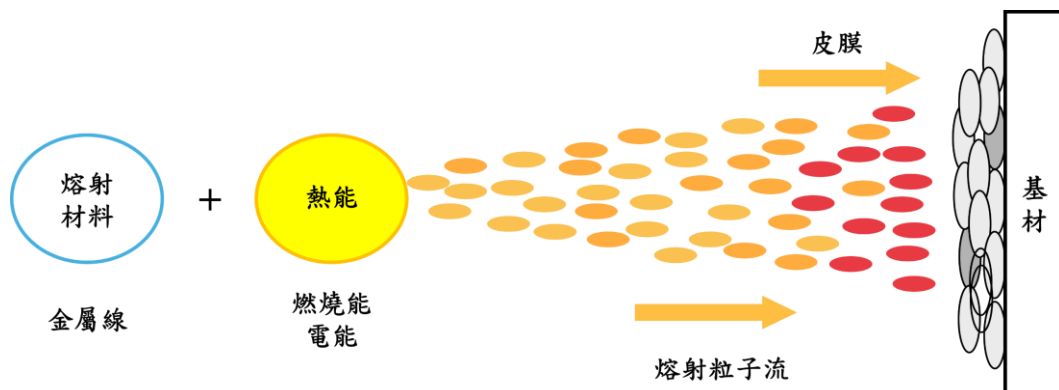


圖 7.7 金屬熔射方法配置及成膜機制示意圖^[4]

2. 施工

(1) 施工流程

熔射施工的一般流程如圖 7.8 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。

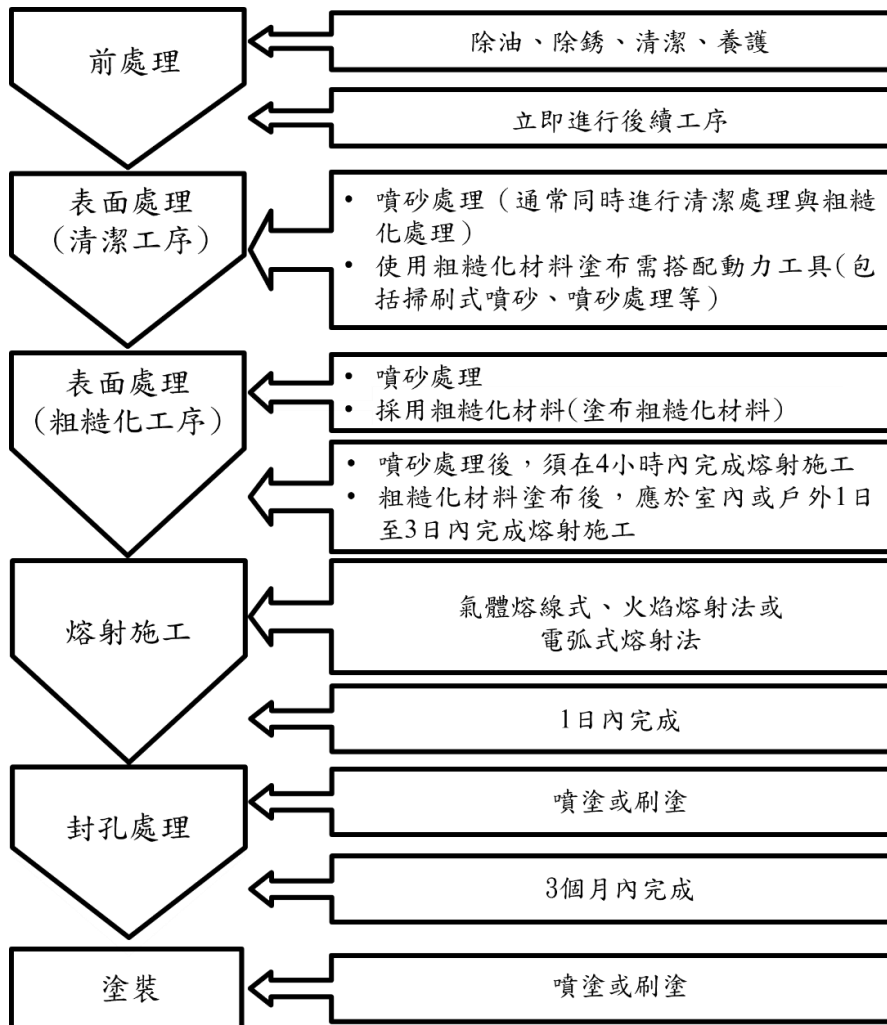


圖 7.8 金屬熔射施工流程圖^[4]

(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。

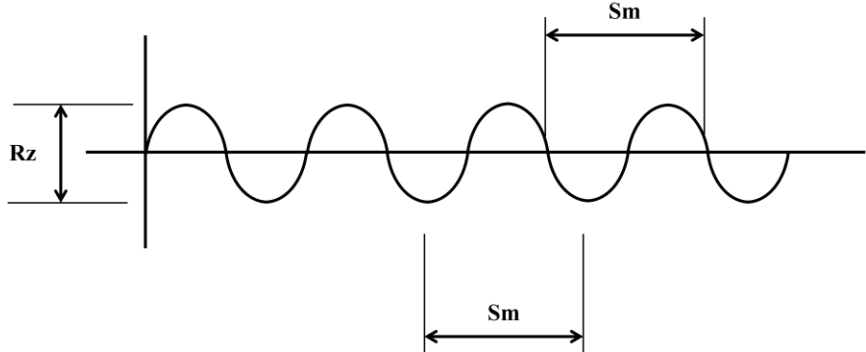
以噴砂法進行清潔化工程時，使用研磨材研磨鋼材表面，去除氧化皮、銹、鹽類、油分等污物，達到熔射施工所需的清潔度。若選擇粗面形成劑法，則以動力工具或掃砂處理達到熔射施工所需的清潔度。熔射所需的清潔度如表 7-9 所示。此基準為熔射施工前的狀態。

表 7-9 金屬熔射表面處理的要求^[4]

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 8 μ m 且 Rz 50 μ m 以上
	粗面形成劑法	RSm/Rz _{jis} ≤ 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 7-9 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 7-10 所示。所需清潔度與表面粗糙度如表 7-9 所示。

表 7-10 使用粗面形成劑的表面處理^[4]

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/m ² 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(複合防蝕系統)，請參考本指引第 4 章。

7.3.3 施工及品質管理

施工時需在各工程適當進行品質管理，確保熔射層的原性能。

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)。常用的金屬熔射層檢查方式如下：

非破壞檢測：

- ① 目視檢查；
- ② 金屬熔射層厚度測量；

破壞性檢測(於對照試體進行)：

- ① 附著力試驗(拉拔測試，依 ISO 4624 規範辦理)；
- ② 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)；
- ③ 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。試體形式應適合破壞試驗，建議形式見 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**錯誤! 找不到參照來源。**。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 7-11 未封孔金屬熔射層的拉拔強度典型值(ISO 4624)

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 1：a 若熔射層未切割，典型值高 20% 至 25%。
備考 2：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)。
備考 3：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。

備考 4：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。

熔射層品質評估的主要條件如下：

- ① 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；
- ② 基材表面噴砂過度，基材與熔射層界面處殘留過多磨料或孔隙；
- ③ 熔射層中單一孔隙過大，或整體孔隙率過高。

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。

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 cm²。

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 噴槍或鐸炬和電源設備，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

參考文獻

1. 交通部運輸研究所、中華民國防蝕工程學會，「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)」，2004 年。
2. 交通部，「公路橋梁檢測及補強規範」，2018 年。
3. 交通部，「鐵路橋梁之檢測及補強規範」，2019 年。
4. 日本道路協會，「鋼道路橋防食便覽」，2014 年。
5. 日本道路協會，「鋼道路橋塗裝・防蝕便覽資料集」，2010 年。
6. 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。
7. 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).
8. 日本道路協會，「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編」，2017 年。
9. 建設省土木研究所(社)、鋼材俱樂部(社)、日本橋梁建設協會，「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。
10. FHWA: Technical Advisory T5140.22 “Uncoated Weathering Steel in Structures,” (1989).
11. National Steel Bridge Alliance. “Uncoated Weathering Steel Reference Guide,” (2022).
12. FHWA “Bridge Welding Reference Manual,” (2019).
13. AASHTO/NSBA:2018 “Steel Bridge Fabrication Guide Specification,” (2018).
14. 中華民國鋼結構協會，「鋼結構施工規範 TISC 031-2022」，2022 年。
15. 日本土木学会，「鋼構造架設設計施工指針【2024 年版】」，2024 年。

16. 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。