

100-159-7577

MOTC-IOT-99-H1EB005

RC 橋梁材料耐久性評估與 殘餘壽命預測之研究



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 12 月

100-159-7577

MOTC-IOT-99-H1EB005

RC 橋梁材料耐久性評估與 殘餘壽命預測之研究

著 者：邱永芳、謝明志、林雅雯、曾文傑
黃 然、張建智、葉為忠、梁明德
翁在龍、黃進國、羅冠顯、陳家隆

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 12 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究
/邱永芳等著. --初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，
民 100.12
面 ； 公分
ISBN 978-986-03-1319-2 (平裝)

1. 橋樑工程 2. 鋼筋混凝土

441.8 100027966

RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

著 者：邱永芳、謝明志、林雅雯、曾文傑、黃 然、張建智、葉為忠、梁明德
翁在龍、黃進國、羅冠顯、陳家隆

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 台北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 100 年 12 月

印 刷 者：彩霖股份有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 150 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組 電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 台北市中山區松江路 209 號 F1 電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 台中市中山路 6 號 電話：(04)22260330

GPN： 1010004949

ISBN：978-986-03-1319-2 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

100

RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

交通部運輸研究所

GPN : 1010004949
定價 200 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究			
國際標準書號(或叢刊號) ISBN978-986-03-1319-2 (平裝)	政府出版品統一編號 1010004949	運輸研究所出版品編號 100-159-7577	計畫編號 99-H1EB005
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳主任 計畫主持人：謝明志 研究人員：曾文傑、林雅雯 聯絡電話：04-26587116 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立臺灣海洋大學 計畫主持人：黃 然、張建智、葉為忠 梁明德、翁在龍 研究人員：黃進國、羅冠顯、陳家隆 地址：基隆市北寧路 2 號 聯絡電話：07-3814526 轉 6178	研究期間 自 99 年 10 月 至 100 年 12 月	
關鍵詞：RC 橋梁、材料耐久性評估、殘餘壽命預測			
<p>摘要：</p> <p>橋梁是陸地運輸交通網的主要結構物之一，橋梁依構造材料可分為幾種類型，其中鋼筋混凝土(RC)或預力混凝土(PC)橋梁佔台灣橋梁總數的比例甚高。橋梁是公路和鐵路運輸發展的重要樞紐，橋梁承載力和通行能力扮演著全線貫通的關鍵因素，更肩負增進社會經濟發展與民眾生活福祉的樞紐角色。然而既有橋梁的劣化、老化、損傷甚至承載力不足時有發生，此因交通量超過預期地快速增加或運輸工具超載所致，修復的橋梁需要符合更高的標準。既有橋梁缺陷發生的主要原因，不外是使用中實際情況與原先設計構思的狀況有一定的差異、場址與材料選擇的錯誤、基礎方案選擇不合理或施作不當、結構系統選擇的失誤、橋梁結構分析法選擇上的差異及施工管理不當等，可能導致橋梁品質低劣而達不到原先設計需求，若再加以暴露於惡劣的環境，更會加速橋梁結構缺陷和損傷的產生。</p> <p>針對既有的鋼筋混凝土橋梁，如何透過檢測手段以瞭解並評估其耐久性的狀況，進而預測其殘餘壽命是一重要的議題。從現場量測到的資料，透過有系統的分析方式，化為工程師可以理解的數據，再加以評估橋梁的耐久性現況、制定策略並評估其壽命，實為刻不容緩的課題。緣此，本計畫係針對鋼筋混凝土橋梁的材料劣化評估以及殘餘壽命預測進行研究。研究結果，可以提供評估橋梁耐久性等級的參考資料與殘餘壽命，以及針對既有的鋼筋混凝土橋梁採行維修、補強或拆除的決策參考。</p>			
出版日期	頁數	工本費	本 出 版 品 取 得 方 式
100 年 12 月	284	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按工本費價購。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密 (解密條件：<input type="checkbox"/> 年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密， <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Evaluation for Material Durability and Residual Life Predication of RC Bridges			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-03-1319-2 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010004949	IOT SERIAL NUMBER 100-159-7577	PROJECT NUMBER 99-H1EB005
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Yuang-fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ming-jyh Hsieh PROJECT STAFF: Wen-jier Tseng, Ya-wen Lin PHONE: 04-26587116 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM October 2010 TO December 2011
RESEARCH AGENCY: National Taiwan Ocean University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ran Huang, Jiang-Jhy Chang, Wei-chung Yeih, Ming-Te Liang, Tsai-Lung Weng PROJECT STAFF: Chin-Kuo Huang, Guan-Suan Luo, Jia-Long Chen ADDRESS: No.2, Beining Rd., Jhongjheng District, Keelung 202, Taiwan (R.O.C.) PHONE: +886-2-24622192ext6178			
KEY WORDS: RC Bridges, Evaluation of Material Durability, Residual Life Predication			
ABSTRACT:			
<p>Bridge is a major structure for the land transportation network. There exist many forms of the bridge and the reinforced concrete bridge is the majority. Bridges can be viewed as an important foundation for the highway and railway transportation development, to ensure the load capacity and transportation capacity of bridges is a major key to ensure the soundness of transportation network. In addition, bridges play an important role in the development of social economics and welfare of citizens' lives. For the existing bridges, the deterioration, aging, damage or insufficient load capability is commonly seen. On the one hand, the transportation flow grows fast recently and more and more heavyweight cargo vessels appear such that we need to require a higher standard bridge. On the other hand, the existing bridges have some inherent flaws induced by the differences between service life and design stage, the wrong site selection and poor selection of materials, inappropriate foundation, wrong selection of structure types, differences in the numerical methods to fulfill calculation in structure analysis and poor construction management, such that the quality of bridge structure cannot meet the design requirements. Furthermore, severe service environment is a major reason for the structure damages. Therefore, in this project we will focus on two topics: the durability evaluation for the material deterioration and remaining service life prediction. The research results would provide a guideline for engineers to evaluate the durability of bridges and criteria and prediction results for the decision-maker of bridge management authority to make a decision whether to repair, strengthen or tear down the structure.</p>			
DATE OF PUBLICATION December 2011	NUMBER OF PAGES 284	PRICE 200	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖目錄	VII
表目錄	X
第一章 緒論	1-1
1.1 計畫背景	1-1
1.2 研究內容與工作項目	1-5
1.3 重要性	1-8
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 鋼筋混凝土材料劣化	2-1
2.1.1 混凝土老劣化	2-1
2.1.2 鋼筋腐蝕	2-4
2.2 國外有關橋梁殘餘使用年限預測的發展現況	2-6
2.3 耐久性評估辦法	2-14
2.3.1 評估方法	2-14
2.3.2 層級分析法的原理	2-17
2.4 橋梁檢測技術及評估法相關資料	2-21
2.4.1 公路橋梁檢測技術	2-21

2.4.2 D.E.R&U.評估法.....	2-22
2.4.3 A.B.C.D.評估法.....	2-23
2.5 國內橋梁檢測執行概況.....	2-24
2.5.1 RC 橋梁現況評估方式.....	2-24
2.5.2 RC 橋梁檢測項目.....	2-25
2.5.3 RC 橋梁檢測等級.....	2-25
2.5.4 RC 橋梁檢測時機.....	2-26
2.5.5 RC 橋梁檢測辦理方式.....	2-27
2.6 鋼筋混凝土腐蝕預測殘餘壽命.....	2-27
2.6.1 腐蝕初始期(TC).....	2-27
2.6.2 鏽脹開裂壽命(TCR=TC+TP).....	2-28
2.6.3 承载力壽命(TT=TC+TP+TCORR).....	2-28
第三章 RC 橋梁材料耐久性評估.....	3-1
3.1 前言.....	3-1
3.2 定義與範疇.....	3-2
3.3 權重方法之決定.....	3-4
3.4 材料因子耐久性指標之分層.....	3-4
3.5 因子介紹.....	3-6
3.5.1 橋梁概況與環境條件的調查.....	3-6
3.5.2 重車流量因子.....	3-7
3.5.3 橋梁齡期因子.....	3-9
3.6 混凝土現況耐久性指標介紹.....	3-9

3.6.1	混凝土電阻率的檢測與評定	3-10
3.6.2	結構混凝土強度的檢測與評定	3-12
3.6.3	表面損傷的檢測與評定.....	3-21
3.7	鋼筋腐蝕現況耐久性指標介紹.....	3-28
3.7.1	鋼筋腐蝕電位的檢測與判定	3-29
3.7.2	結構混凝土碳化深度的檢測與評定	3-34
3.7.3	結構混凝土中氯離子含量的測定與評判	3-36
3.7.4	鋼筋鏽蝕電流的檢測與判定	3-39
3.7.5	混凝土中鋼筋分布及保護層厚度檢測與評定	3-41
3.8	耐久性綜合評估方法.....	3-43
3.9	橋梁耐久性評估之優先順序決定.....	3-46
第四章	既有鋼筋混凝土橋梁殘餘壽命預測之研究.....	4-1
4.1	前言.....	4-1
4.2	理論模式.....	4-4
4.2.1	線性擴散方程式.....	4-4
4.2.2	非線性擴散方程式.....	4-6
4.2.3	氯離子結合等溫線 (CHLORIDE BINDING ISOTHERM)	4-7
4.3	使用壽命與殘餘壽命.....	4-8
4.4	案例分析.....	4-13
4.4.1	擴散方程式於林邊橋與大津橋之應用	4-13
4.4.2	t_i 、 t_p 、 t_{corr} 之應用範例	4-16

4.4.3	t_i 、 t_p 、 t_{corr} 於五結橋梁結構及新竹誠仁橋之應用結果	4-20
4.5	討論	4-20
4.6	小結	4-21
第五章	案例說明	5-1
5.1	宜蘭縣五結橋	5-1
5.1.1	現場檢驗結果	5-1
5.1.2	混凝土材料耐久性評估結果	5-12
5.1.3	殘餘壽命預測結果	5-14
5.2	新竹市誠仁橋	5-16
5.2.1	現場檢驗結果	5-16
5.2.2	混凝土材料耐久性評估結果	5-20
5.2.3	殘餘壽命預測結果	5-21
5.3	綜合評定結果	5-23
第六章	結論	6-1
	參考文獻	參-1
附錄一	期中期末報告審查意見處理情形表	附錄 1-1
附錄二	專家座談會	附錄 2-1
附錄三	教育訓練成果	附錄 3-1
附錄四	RC 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊	附錄 4-1
附錄五	期末報告簡報資料	附錄 5-1

圖目錄

圖 1.1 結構的使用壽命與鋼筋腐蝕量關係示意圖	1-5
圖 1.2 研究流程圖	1-8
圖 2.1 混凝土耐久性與性能關係圖	2-2
圖 2.2 混凝土劣化之物理性因子	2-3
圖 2.3 混凝土劣化之化學性因子	2-3
圖 2.4 鋼筋的電化學腐蝕示意圖	2-5
圖 2.5 電位—PH 值關係圖	2-6
圖 2.6 瑞典橋梁結構構件損害所佔比例圖	2-7
圖 2.7 瑞典橋梁結構損害類型比例圖	2-7
圖 2.8 使用壽命流程圖	2-13
圖 2.9 層級分析法與網絡分析法架構圖	2-15
圖 2.10 服務功能、劣化因子、材料劣化程度、時間關係圖	2-17
圖 2.11 耐久性評估架構圖	2-20
圖 3.1 RC 橋梁材料耐久性評定流程	3-1
圖 3.2 材料因子耐久性評估項目	3-2
圖 3.3 混凝土現況耐久性指標	3-10
圖 3.4 混凝土電阻率測試技術示意圖	3-11
圖 3.5 反彈錘	3-12
圖 3.6 腐蝕現況耐久性指標	3-29
圖 3.7 銅/硫酸銅參考電極結構圖	3-30

圖 3.8 測試系統簡圖	3-33
圖 3.9 鑽孔取混凝土粉末的方法	3-37
圖 3.10 離子滴定儀	3-38
圖 3.11 利用 GALVAPULSE 測量地區的示意圖	3-40
圖 3.12 鋼筋探測儀	3-41
圖 4.1 橋梁殘餘壽命預測流程圖	4-4
圖 4.2 結構物受氯離子擴散影響使用壽命	4-13
圖 4.3 碳化係數對累積機率之關係曲線	4-17
圖 4.4 氯離子濃度-深度曲線	4-19
圖 4.5 在 $D_c^* - C_f$ 曲線下之面積比	4-22
圖 4.6 林邊橋橋梁構件編號系統示意圖	4-23
圖 4.7 大津橋橋梁樁件編號系統示意圖	4-23
圖 4.8 林邊橋暴露於氯離子為 0.05763 (% 混凝土重) 之環境下，四種 束縛數學模式代入線性與非線性解析解氯化壽命之預測	4-24
圖 4.9 大津橋暴露於氯離子為 0.01130 (% 混凝土重) 四種束縛數學模 式代入線性與非線性解析解氯化壽命之預測	4-25
圖 5.1 五結橋現況	5-1
圖 5.2 第一區調查位置	5-3
圖 5.3 第二區調查位置	5-3
圖 5.4 第三區調查位置	5-4
圖 5.5 第四區調查位置	5-4
圖 5.6 五結橋梁鋼筋探測位置示意圖	5-6

圖 5.7 編號 1 第一區探測影像(模糊)	5-7
圖 5.8 編號 19 第四區探測影像(清晰)	5-7
圖 5.9 接收點順序及可能裂縫位置：(A)腹版；(B)翼版	5-8
圖 5.10 誠仁橋現況	5-16
圖 5.11 誠仁橋示意圖	5-17
圖 5.12 誠仁橋鋼筋探測位置示意圖	5-17
圖 5.13 誠仁橋編號 12 訊號影像	5-18

表目錄

表 1-1 臺灣地區公路及鐵路橋梁座數統計.....	1-2
表 2-1 瑞典 BEA 橋梁構件損壞分級.....	2-8
表 2-2 橋梁檢測規範與計畫.....	2-21
表 2-3 D.E.R.&U.評估檢測項目.....	2-22
表 2-4 D.E.R.&U.評估準則.....	2-23
表 2-5 A.B.C.D.評估檢測項目.....	2-23
表 2-6 A.B.C.D.評估準則.....	2-24
表 2-7 預測數學模型(t_c).....	2-29
表 2-8 預測數學模型(t_p).....	2-30
表 2-9 預測數學模型(t_{corr}).....	2-31
表 3-1 『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷.....	3-4
表 3-2 『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷.....	3-2
表 3-3 『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷.....	3-5
表 3-4 推薦橋梁所處環境條件影響的分級評定標準.....	3-7
表 3-5 國內重車種類及軸重-總重規定標準.....	3-8
表 3-6 重車流量評定標準.....	3-8
表 3-7 橋梁齡期因子的評定標準.....	3-9
表 3-8 混凝土電阻率的評定標準.....	3-12
表 3-9 非水平狀態檢測時回彈值修正值.....	3-16
表 3-10 混凝土澆注表面、底面回彈值的修正.....	3-17

表 3-11 泵送混凝土測區混凝土強度換算值的修正值.....	3-19
表 3-12 結構混凝土現場檢測強度的評定標準.....	3-21
表 3-13 公路混凝土橋梁結構構件表面損傷的損傷度指標體	3-22
表 3-14 混凝土橋梁結構構件表面損傷的分級評定方法表	3-23
表 3-15 鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準	3-24
表 3-16 預力鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準	3-24
表 3-17 鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準表	3-25
表 3-18 預力鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準	3-26
表 3-19 鋼筋混凝土結構構件表面損傷(除裂縫)分級評定標準.....	3-27
表 3-20 預力鋼筋混凝土構件表面損傷(除裂縫)分級評定標準表.....	3-28
表 3-21 結構混凝土中鋼筋鏽蝕電位的判定標準.....	3-34
表 3-22 混凝土碳化深度的評定標準.....	3-35
表 3-23 結構混凝土中氯離子含量的評判標準.....	3-39
表 3-24 鋼筋鏽蝕電流的判定標準.....	3-40
表 3-25 混凝土保護層厚度評定係數值.....	3-42
表 3-26 混凝土保護層厚度評定標準.....	3-43
表 3-27 混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	3-44
表 3-28 混凝土單一構件之耐久性評估標準.....	3-44
表 3-29 混凝土橋梁各構(部)件權重值.....	3-45
表 3-30 構整體的耐久性綜合評價標準.....	3-46
表 4-1 橋梁構件碳化深度.....	4-16
表 4-2 碳化試驗統計結果和統計方法及預測橋梁使用 50 年後的碳化深度	4-18

表 4-3 林邊橋基本資料.....	4-26
表 4-4 大津橋基本資料.....	4-27
表 4-5 林邊橋氯離子濃度與保護層厚度.....	4-28
表 4-6 大津橋氯離子濃度與保護層厚度.....	4-29
表 4-7 計算林邊橋氯化壽命在總氯離子之真實擴散係數為定值的狀況 下所代入計算之參數.....	4-30
表 4-8 計算林邊橋氯化壽命在自由氯離子之真實擴散係數為定值的狀 況下所代入計算之參數.....	4-31
表 4-9 計算大津橋氯化壽命在總氯離子之真實擴散係數為定值的狀況 下所代入計算之參數.....	4-32
表 4-10 計算大津橋氯化壽命在自由氯離子之真實擴散係數為定值的狀 況下所代入計算之參數.....	4-33
表 4-11 計算林邊橋氯化壽命在總氯離子之真實擴散係數為不定值的狀 況下所代入計算之參數.....	4-34
表 4-12 計算林邊橋氯化壽命在自由氯離子之真實擴散係數為不定值的 狀況下所代入計算之參數.....	4-35
表 4-13 計算大津橋氯化壽命在總氯離子之真實擴散係數為不定值的狀 況下所代入計算之參數.....	4-36
表 4-14 計算大津橋氯化壽命在自由氯離子之真實擴散係數為不定值的 狀況下所代入計算之參數.....	4-37
表 4-15 林邊橋與大津橋線性對於非線性氯化壽命百分誤差	4-38
表 4-16 冬山河五結橋梁 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 三階段腐蝕壽命預測結果	4-39
表 4-17 新竹誠仁橋 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 三階段腐蝕壽命預測結果	4-39
表 5-1 鑽心試體抗壓強度試驗結果.....	5-2
表 5-2 反彈錘試驗結果.....	5-5

表 5-3 鋼筋探測試驗結果.....	5-8
表 5-4 推估混凝土裂縫深度(CM).....	5-9
表 5-5 腐蝕量測試驗結果.....	5-9
表 5-6 混凝土中性化深度試驗結果.....	5-10
表 5-7 中性化深度及鋼筋保護層厚度檢測評定.....	5-11
表 5-8 混凝土水溶性氯離子含量試驗結果.....	5-12
表 5-9 五結橋混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重	5-12
表 5-10 五結橋整體結構耐久性評定.....	5-13
表 5-11 鋼筋探測試驗結果.....	5-18
表 5-12 腐蝕電流密度量測試驗結果.....	5-19
表 5-13 混凝土中性化深度試驗結果.....	5-19
表 5-14 混凝土水溶性氯離子含量試驗結果.....	5-19
表 5-15 誠仁橋混凝土構件材料狀況檢測指標與耐久性指標權重 ...	5-20
表 5-16 誠仁橋整體結構耐久性評定表.....	5-21

第一章 緒論

1.1 計畫背景

橋梁是陸地運輸交通網的主要結構物之一，橋梁構造的種類可以分為木造橋、圬工橋、混凝土橋、鋼筋混凝土橋、預力混凝土橋和鋼構橋，其中鋼筋混凝土橋梁約佔橋梁總數的絕大多數。橋梁是公路和鐵路運輸發展的基礎，它更是肩負公路和鐵路暢通的咽喉，其承載力和通行能力是溝通全線的關鍵，亦扮演者增進社會經濟發展與民眾生活福祉的樞紐角色。

臺灣地區橋梁的種類包括公路橋梁、鐵路橋梁、市區道路橋梁，以及其他道路系統之橋梁如產業道路、防汛道路等。依交通部 2010 年普查統計資料顯示，其中具有橋台、橋墩且跨距達在 3M 以上之公路橋梁共計 11,067 座，鐵路橋梁計 1,863 座，詳如表 1-1 所示。

對既有橋梁而言，其劣化、老化、損傷甚至承載力不足時有所見，一方面交通量急速增加，且大型載重的運輸工具越來越多，因此需要高標準的橋梁，而另一方面針對既有橋梁的先天缺陷，不外是因為使用中實際情況與原先設計構思有一定的差異、場地與材料選擇的錯誤、基礎方案的不合理、結構體系選擇上的失誤、橋梁結構計算方法選擇上的差異、施工管理不當等導致品質低劣、達不到設計需求，再一方面與惡劣的使用環境而引起橋梁結構產生缺陷和損傷。而橋梁的缺陷與損傷則有可能會造成生命與財產的巨大損失，以下僅就國內外發生斷橋案例作一說明。

表 1-1 臺灣地區公路及鐵路橋梁座數統計

公路橋梁：(座)					
合計	國道	省道	縣道	鄉道	專用公路
11,067	1,421	2,696	1,559	5,307	84
鐵路橋梁：(座)					
合計	大橋 (長度 \geq 20M)	小橋 (2M \leq 長度 $<$ 20M)			
1,863	412	1,451			

資料來源: 2010 年底交通部網站

- 註：1.公路橋梁係國道、省道、縣道、鄉道及專用公路橋梁之合計。
 2.道路橋梁以橋名數當作橋梁座數；鐵路橋梁以橋名數當作橋梁座數，上下行橋梁分開橋墩者，以 2 座計。
 3.公路橋梁係指有橋台、橋墩且跨距在 3 公尺以上之橋梁。

位於美國 Minnesoda 州的 Minneapolis 市, 跨越 Mississippi 河的 I-35 橋, 於 2007 年忽然崩塌, 該橋美國交通部於 2005 年檢測評估時, 已被列為危險橋梁, 但並未將檢測結果公布並管制使用, 導致該橋於交通尖峰時間崩塌造成嚴重損失。美國橋梁目前約有 13% (約 7000 座橋梁) 被列為危險橋梁, 必須持續進行檢測評估, 以確認採行維修、補強或拆除等方案, 美國國會要求於 20 年內完成。

美國亞利桑那州 Mesa 市的一座道路面架橋, 於 2007 年 8 月 5 日在施工時, 忽然倒塌。中國於往貴州銅仁地區大興機場的二級公路堤溪段, 興建一座長 320m 寬 12m 的沱江大橋, 原預定於 2007 年 8 月 31 日竣工, 卻在 8 月 13 日下午忽然倒塌, 造成 14 人死亡, 2 人受傷。2007 年 9 月 26 日, 越南南部一座正在施工中的橋梁忽然崩塌, 導致 60 人死亡, 百餘人輕重傷。

綜觀國內, 2007 年 10 月 6 日, 柯羅沙強烈颱風侵襲臺灣, 位於桃園縣復興鄉長 15m, 橋齡 2 年的蘇樂便橋被沖毀; 位於台南縣楠西鄉橋齡 50 年的永興吊橋被沖失; 位於嘉義縣竹崎鄉橋齡 36 年的金福橋被沖毀; 位於苗栗縣大湖鄉橋齡 30 年的彼岸橋被沖失。2009 年 8 月 8 日

莫拉克颱風造成太麻里溪南岸潰堤，南迴鐵路將近 1 公里的路基和 4 座橋梁被沖毀，此外橫跨東港溪河口的雙園大橋亦發生斷橋事件，歷年來亦因洪水沖刷而發生的橋梁破壞事件頻傳，嚴重影響國內交通路網通暢與國民生活便捷。

橋梁是重要的公共結構物，它是會老化，劣化，遭受環境侵害及天然災害，一旦發生損傷或崩塌，可能會造成社會及經濟的重大問題，探討橋梁劣化原因與程度、使用安全與耐久以及殘餘使用壽命等，具有重大的意義。如何利用橋梁檢測資料，以評估橋梁的使用情況並在未處理的條件下，評估其可能的殘餘壽命，是橋梁維護管理系統上重要的研究課題之一。

橋梁檢測的內容一般包括混凝土抗壓強度、腐蝕速率、腐蝕電位、中性化深度、氯離子濃度、保護層厚度、裂縫寬度與位置等與腐蝕相關的數據。可使用這些數據並且考量其它非腐蝕因子來評估橋梁的耐久性，並且計算殘餘壽命是很重要的研究課題。

國內針對既有橋梁一般常用的評估法包括公路總局的 D.E.R&U 法、內政部營建署訂頒之「A.B.C.D 評等法」、模糊數學及層級分析法等。這些方法基本上有幾個共同的特點：(1)訂立需要具體的評估項目；(2)許多項目無法量化，因此需有量化的方式；(3)將代表不同意義的量化指標以及非量化指標統合在一起；(4)為訂立服務品質滿足的門檻。前述各項，需經過專家們的多次討論與研擬，然後經由數學操作得到一評估總分，最後仍須經過專家們的討論來決定數值所代表的意義。以量化角度而論，評估的系統的完整性與數學操作無關，而與取樣、問卷設計、參考資料的充足有關。也就是說一個評估系統的可靠性，決定於對問題考量的周延性與資料蒐集的完備性，必須降低人為的因子以保持客觀性。

預測橋梁殘餘壽命的方法涉及許多數學或統計學的運算。然而橋梁壽命預測需要考量的因子非常複雜，採用數學的方式來建模亦有其困難性。實務上若排除橋梁設計的錯誤以及施工的瑕疵，橋梁的使用

年限或設計年限應無疑慮。然而，橋梁的耐久性可能會受到惡劣暴露環境或設計施工不良所影響，而最後導致結構的服務品質無法達到需求水準，而提前終止使用壽命。RC 橋梁耐久性的研究，多著重於鋼筋腐蝕的影響。然而橋梁的整體服務品質並不只與材料耐久性有關，亦須考量基礎淘空、墩柱沖蝕、地震破壞、承載力不足等交互影響因素；如果在橋梁殘餘壽命預測只考慮個別因素或忽略機率因素，可能會有誤判之處。然而，多重因子的互相影響機制，目前尚無可靠的物理與數學的推估模式，亦即不易推得互相影響的函數；即使獲致互相影響函數，建立多因子的數學模式亦會龐大複雜；推得的數學模式，恐怕也不易得到理論解，同時數值解也無法驗證其正確性。目前橋梁殘餘壽命預測相關研究，多以耐久性為考量基礎，並以鋼筋生鏽影響使用壽命為推估主軸。倘若要考量其它因子的影響或可採用殘餘壽命折減因子法。基於耐久性計算出來的殘餘壽命乘上其它因子的等效折減因子，如下式所示：

$$t = F_L \times F_C \times \cdots \times F_D \times t_{R-D} \dots\dots\dots(1.1)$$

其中 t_{R-D} 代表由基於耐久性考量而計算出來的殘餘壽命； F_L 為考量載重因子下的折減因子； F_C 代表因瑕疵施工的折減因子； F_D 代表設計與實際使用上差異的折減因子；當然也可以考慮其他的折減因子。而折減因子的設定值可能因國情不同、地域環境不同、施工技術的不同等而有差異，可利用統計分析法決定之。綜上所述，本研究係以腐蝕耐久性為基本考量，評估橋梁的耐久性以及殘餘使用壽命。

既有鋼筋混凝橋梁殘餘使用壽命預測，可以採用機率法、可靠度分析法、承載力使用性與時間關係法、維修補強經費法、撓度與時間關係法、數學模式法和數理統計方法等。典型的數學模式有 Tuutti^[4]、Bazant^[2, 3]和 Liu and Meyers^[21]等提出之方法，可分為兩類(1)為採用機率與統計的方法，這種方法必須建立大量的統計數據；(2)為採用定量或半定量的方法，忽略次要因子，僅考量主要因子，然後以物理或化學反應所建立之數學式如擴散速率、化學反應速率、膨脹速率等推算

殘餘使用壽命。

前人研究結果^[40]提出鋼筋混凝土結構物的殘餘使用壽命,如圖 1.1 所示。該圖將鋼筋混凝土保護層對時間的碳化曲線和鋼筋腐蝕量對時間的腐蝕歷線疊加而成,結構物的使用壽命概分成碳化壽命 (t_i)、鏽脹開裂壽命 (t_{cr})、裂縫寬度控制壽命 (t_w) 和承載力壽命 (t_r) 四種,使用相關理論分別預測 t_i 、 t_{cr} 、 t_w 和 t_r 。本研究中對於殘餘壽命的預測,假設腐蝕為主要影響耐久性因子,並修正模式進行鋼筋混凝土結構物的使用壽命的估算。

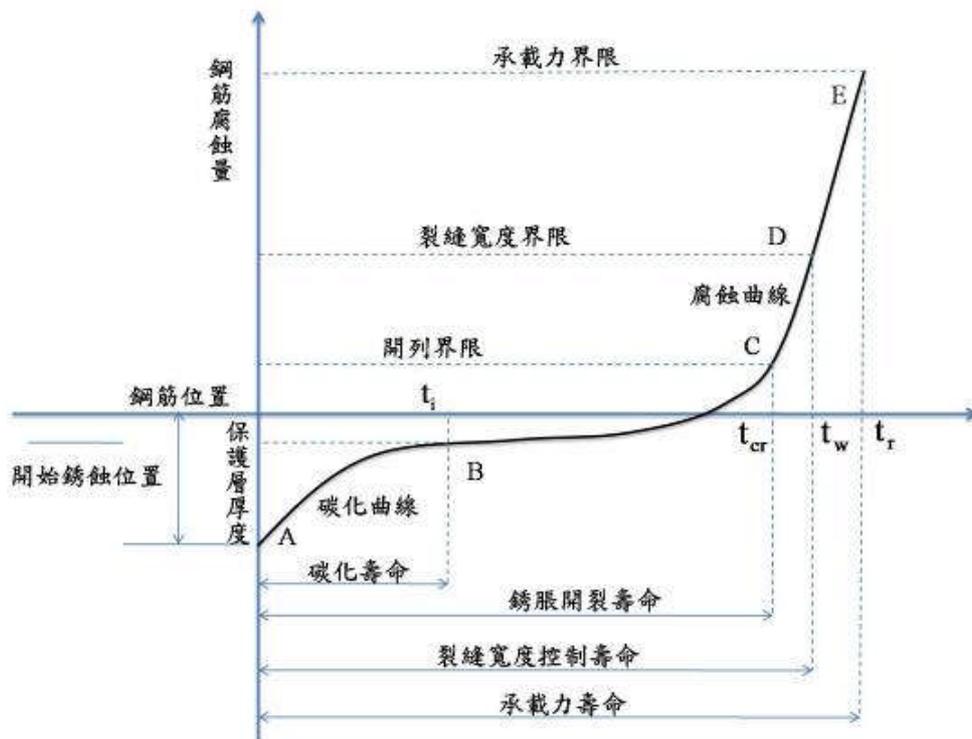


圖 1.1 結構的使用壽命與鋼筋腐蝕量關係示意圖

資料來源:參考文獻^[40]

1.2 研究內容與工作項目

臺灣四面環海,屬於海洋性腐蝕曝露環境。過往因混凝土施工品質水準參差不齊,如再加上超載問題嚴重,往往會使得鋼筋混凝土橋梁快速產生裂縫導致鋼筋腐蝕,進而導致結構承載力不足,縮短使用

壽命。國內目前至少有 70% 的橋梁橋齡已超過 20 年以上^[58]，且老劣化速率逐漸擴大。2008 年國內交通部公路總局統計，全台共有 188 座危橋，其中 50 座必須拆除重建，重建費用及其餘 138 座的維修補強費用合計約新台幣 1528 億元。使用適當工法維護補強現有橋梁，使能維持正常功能或能延長使用壽命，為臺灣橋梁管理單位必須探討的重要課題。

英國研究者^[13]依使用壽命終結的觀點，將使用壽命概分成三類：
(1)技術性使用壽命：是結構使用到某種技術指標（如結構完整性、承載力等）進入不合格狀態時的期限，這種狀態可能因混凝土剝落、鋼筋鏽蝕而引起；(2)功能性使用壽命：與使用功能有關，指結構使用到不能滿足實用功能要求的期限，如橋梁的行車能力已不能適應新的需求或結構的用途改變等；(3)經濟性使用壽命：是結構物使用到繼續維修保留比拆除重建更不經濟的期限。一般使用壽命多係指技術性的壽命。許多研究者利用鋼筋腐蝕建立鏽蝕量估計模型，並藉此分析現有結構的性能退化，以作為預測使用壽命和剩餘壽命。

如前所述，在橋梁壽命預測多半的研究是以鋼筋腐蝕為主要考量因子，也就是說排除設計或是施工的錯誤所造成的不利因素，而單考量腐蝕所造成的影響。在橋梁殘餘壽命分析中，研究者^[44]以碳化或鋼筋鏽脹開裂壽命作為鋼筋混凝土結構使用壽命的終結，似乎過於保守，比較適合應用於嚴格不允許鋼筋鏽蝕的構件如預應力構件，並不適用於鋼筋混凝土結構物壽命的計算。承載力壽命階段，很少人進行此方面的探討，事實上，因為橋梁劣化、老化所造成承載力不足已成為一個極廣泛的問題，加上汽車的年增量越來越多，橋梁車輛荷載增大，所以橋面版的承載力就顯得格外重要。

有關橋梁檢測一般多以目視檢測，目前國內外橋梁檢測評估制度與實施方法不相同，檢測評等紀錄方式亦不一樣，其因多以本國橋梁特性為出發點，並配合人文、地理環境及天候等因素，建立符合本國的橋梁評比方法（Rating Method），如美國聯邦公路總署（FHWA）訂定之「國家橋梁檢測標準」（National Bridge Inspection Standards，

NBIS)、日本道路公團之評等法及目前國內由內政部營建署訂頒之「A.B.C.D 評等法」及縣市政府、交通部國道高速公路局與公路總局使用之「D.E.R&U 評等法」等。

針對既有的鋼筋混凝土橋梁，如何透過檢測方手段以瞭解並評估其耐久性的狀況，並且進而預測其殘餘壽命，是一重要的議題。從現場量測到的資料，透過系統的分析方式，化為工程師可以理解的數據，再加以評估橋梁現況的耐久性等級、制定策略並評估其殘餘壽命，為刻不容緩的課題。本研究將針對鋼筋混凝土橋梁的材料劣化評估以及殘餘壽命預測進行研究。研究結果可以供做橋梁結構物耐久性評定的參考，而且可以作為橋梁系統管理的決策依據，亦即作為決定既有鋼筋混凝土橋梁維修、補強或拆除的參酌。研究內容及工作項目如下：

1. 國內外相關文獻蒐集與彙整
2. RC 橋梁材料耐久性評估
3. 建立劣化 RC 橋梁殘餘壽命預測模式
 - (1) 交通量影響、腐蝕劣化、開裂預測及橋梁劣化評估模式探討
 - (2) 案例分析
4. 現地檢測與驗證(選擇二座橋梁)，檢測項目如下：
 - (1) 混凝土品質:保護層厚度、抗壓強度、中性化深度、氯離子含量及電阻值
 - (2) 鋼筋材料：腐蝕電位、腐蝕速率、鋼筋尺寸
 - (3) 裂縫量測
5. 編撰橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊
6. 教育訓練講習會(一場)

本研究係透過現場所量測的數據，評估橋梁現況耐久性等級，並推斷鋼筋混凝土橋梁的殘餘使用壽命，研究流程如圖 1.2 所示。

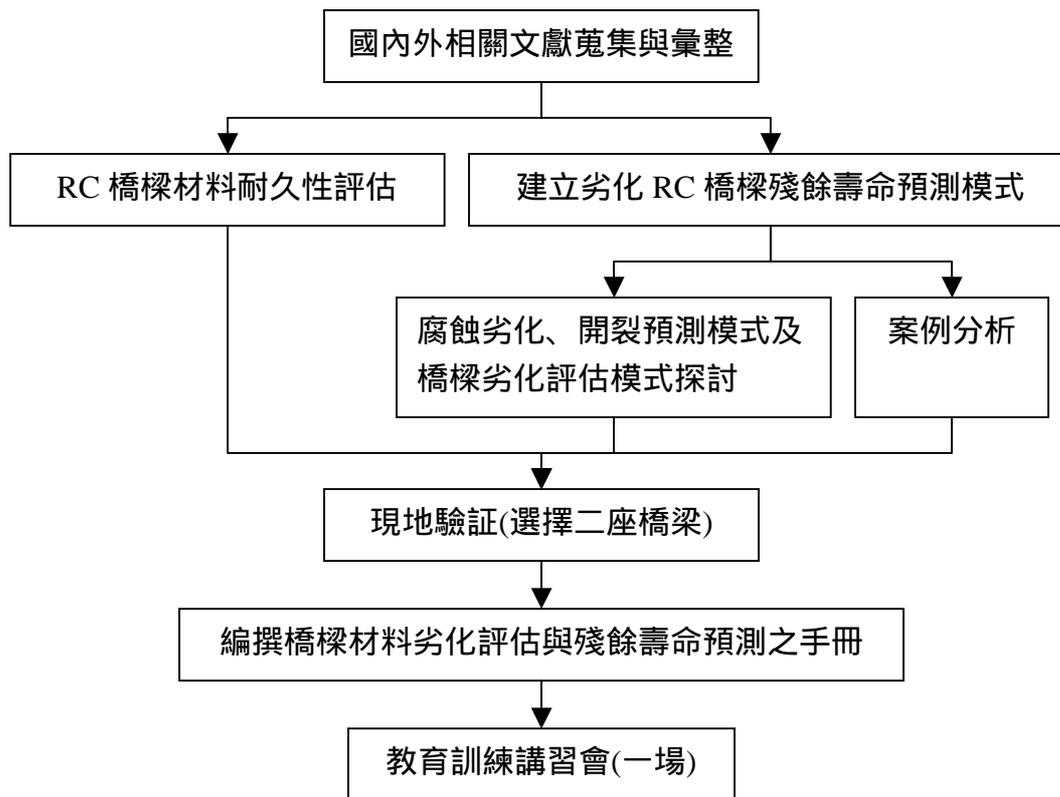


圖 1.2 研究流程圖

1.3 重要性

結構物設計的目的是使結構物能夠長期發揮其應有之服務功能。一般而言，強度與使用性(serviceability)是設計的基本需求條件。然而過去設計者往往較重視材料的力學反應，但卻忽視結構物暴露環境對材料或結構物耐久性之影響。實例顯示即使在一般暴露環境下，許多結構物在未達設計使用年限前，便會發生損壞，如需繼續使用，必將耗費大量資源加以維修或補強。所以若能針對結構物各影響耐久性因子作深入研究，並根據檢測成果對結構物耐久性作合理的評定與殘餘使用壽命預測，應可避免不必要的資源浪費。

既有鋼筋混凝土橋梁殘餘使用壽命預測之研究課題越來越受到重視，目前為國際上土木工程的重要研究項目之一，然而至今國內外相

關研究成果尚無法獲致普遍被接受的可靠預測殘餘使用壽命的方法，主要原因是此研究課題需要結合材料科學、土木材料、腐蝕、電化學腐蝕、化學、物理和數學等領域專家共同合作，若能結合這些領域專家或能得到具體的研究成果，作為橋梁耐久性評比參考，亦可做為橋梁管理者決策的重要參考依據。

第二章 文獻回顧

2.1 鋼筋混凝土材料劣化

2.1.1 混凝土老劣化

混凝土耐久性係指在使用年限內能維持其物理特性與力學性質不致發生嚴重劣化，以保障結構物的安全。根據 ACI Committee 201 對卜特蘭混凝土(portland cement concrete)耐久性的定義，耐久性是指其抵抗風化作用(weathering action)、化學侵蝕(chemical attack)、磨蝕(abrasion)及其它損傷過程(process of deterioration)的能力。亦即在曝露的環境下，具耐久性的混凝土能保持良好的外觀、性質與使用性。

由於環境的影響與材料孔隙結構的改變，材料性質隨著使用時間而變化，因此可以說沒有材料具有不變性。土木工程上所注重的是結構物的使用年限，通常可以材料的耐久性現況來評估結構物使用年限。而材料的耐久性是指其組成構件劣化達到使用上不安全或是不具經濟性的時間。

結構物耐久性的評估上與力學性質、投資費用等一樣重要，其重要性可分三方面說明。首先就經濟效益而言，在整個結構物的生命週期 (life cycle)中，總投資費用應包括興建成本與後來的維修補強成本，如果在設計階段考量材料耐久性的因素，或可以降低未來維修補強的費用。就環保觀點而言，提高材料的耐久性，增加構造物使用年限，即代表了避免自然資源的浪費^[16]。混凝土常被廣泛使用在不同的特殊結構上如儲油槽、儲氣槽、核能電廠等多暴露於高溫、低溫、高壓等環境，或使用於濱海/跨海的橋梁上。所以混凝土耐久性需求更顯重要。圖 2.1 是混凝土耐久性與性能的關係圖^[20]。

造成混凝土劣化的原因有許多，可概分為物理性原因與化學性原因。物理性原因如圖 2.2 所示^[5, 16]，表觀現象主要為混凝土面層的損壞與裂縫的擴張；化學性原因如圖 2.3 所示^[5, 16]，常見的原因是外部侵入

物質或內部潛在的物質與混凝土中的漿體發生膨脹性化學反應。除此之外，亦可能因鋼筋腐蝕造成混凝土裂縫擴張或剝落等損壞。一般而言混凝土的劣化常是由多種因素混合造成的，若能瞭解個別因素的影響機理並採行適當預防方法，必能提升混凝土及結構物的耐久性。

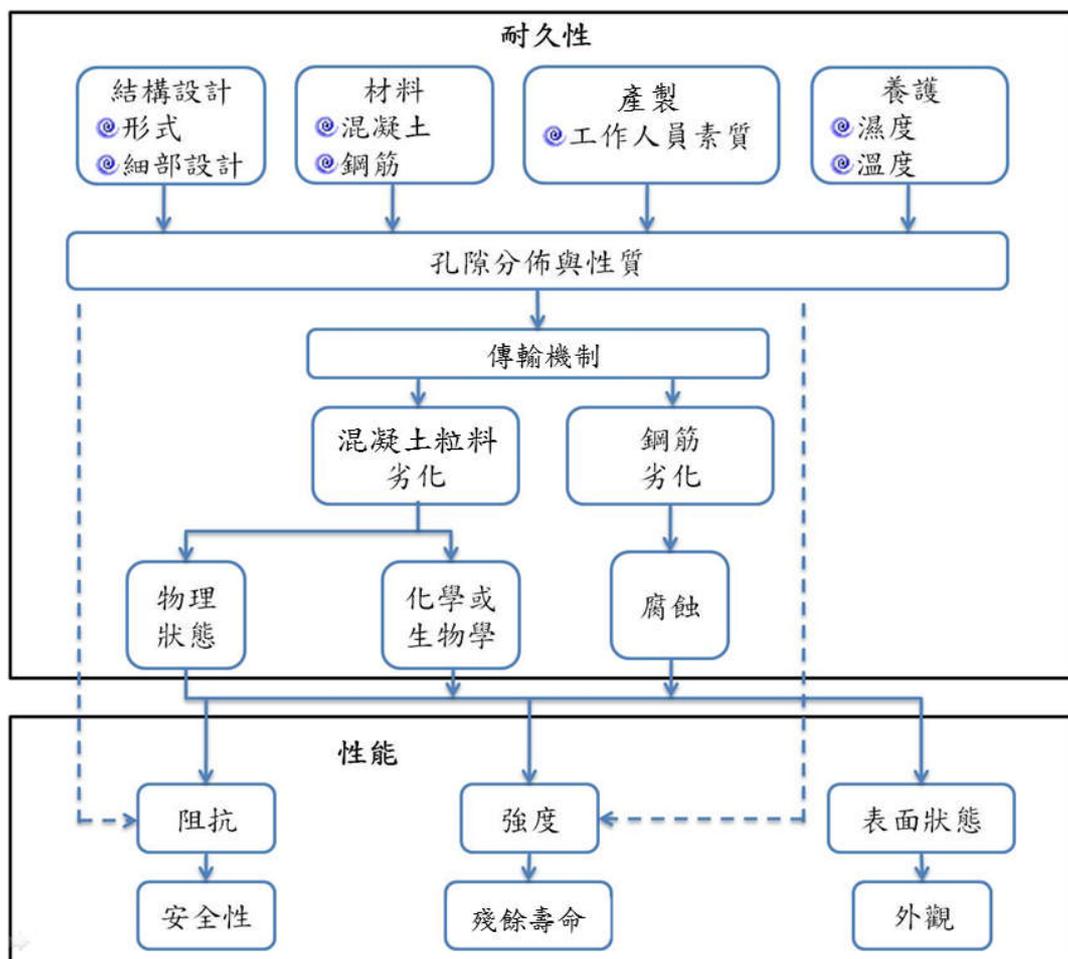


圖 2.1 混凝土耐久性與性能關係圖

資料來源:參考文獻^[20]

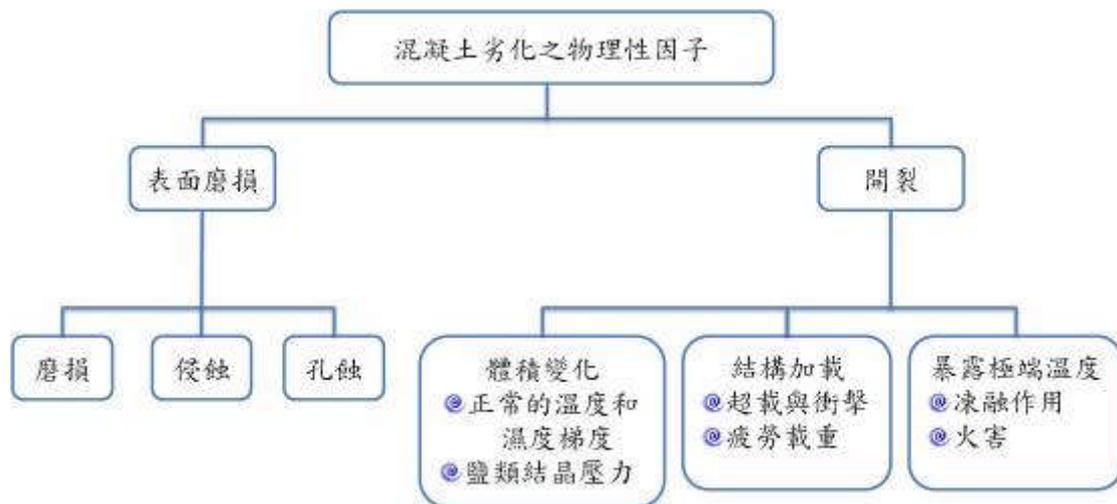


圖 2.2 混凝土劣化之物理性因子

資料來源:參考文獻^[5, 16]

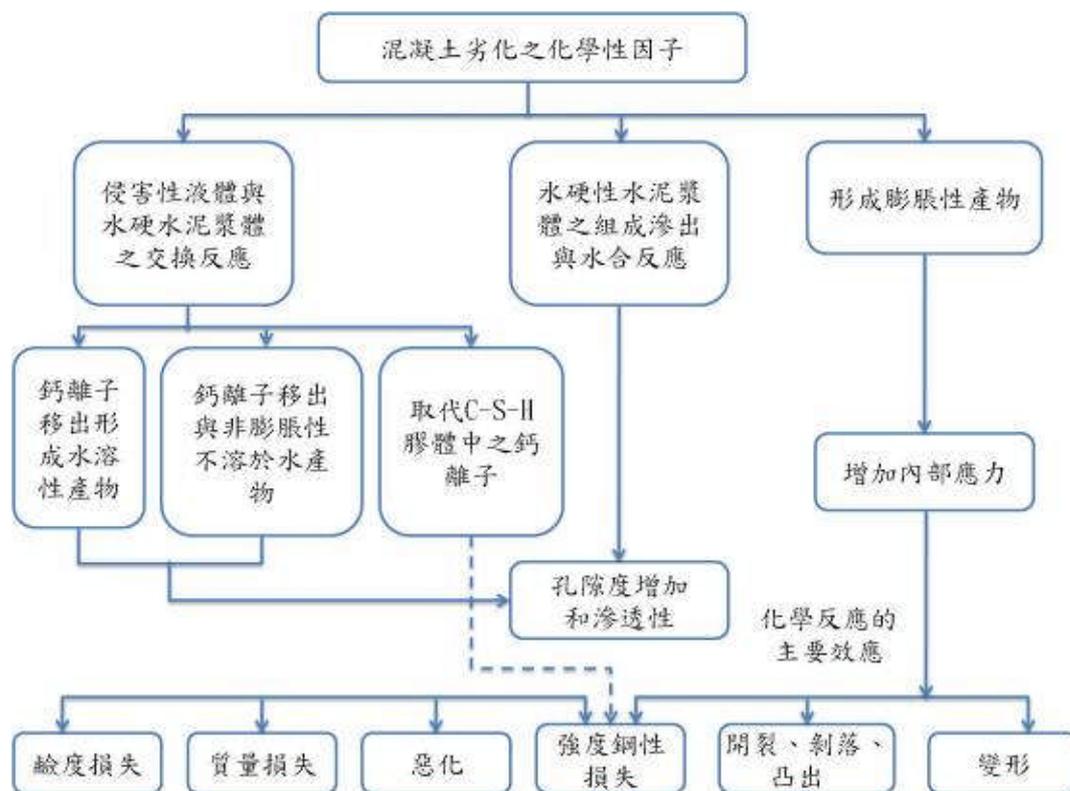
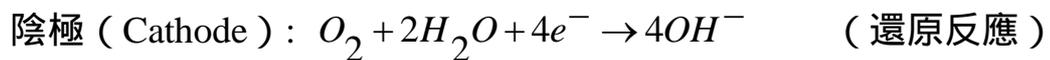
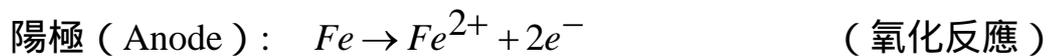


圖 2.3 混凝土劣化之化學性因子

資料來源:參考文獻^[5, 16]

2.1.2 鋼筋腐蝕

混凝土中鋼筋腐蝕是一種電化學過程，是由鐵與電解質溶液接觸所引起的，即在鏽蝕鋼筋表面同時進行陰、陽電極反應，當電解質溶液的 pH 值小於 4 時，腐蝕表現為酸蝕，即為氫的去極化反應，腐蝕速度很快；當 pH 值為 4 ~ 10 時，則為鏽蝕，鏽蝕速度受氧的去極化反應控制，腐蝕速度明顯降低；當 pH 值大於 10 時，鋼筋表面會生成一層溶解度很小的氧化保護膜，鏽蝕速度迅速降低；當 pH 值接近 12 時，保護膜變的十分緊密，使陰極反應難以進行，漸漸停止鏽蝕之後鋼筋處於鈍化狀態，所以氯離子、氧氣和水則是造成鋼筋表面電位差的主要原因。不同電位的區間就形成了陰極和陽極，一個是金屬的陽極溶解反應，即金屬被氧化，產生鏽蝕產物 Fe_2O_3 ；另一個是在陰極區，空氣中的氧 O_2 擴散到鋼筋表面並溶解鋼筋表面的水膜，並得到從陽極傳來的電子，產生還原反應。圖 2.4 為形成了腐蝕電流的閉合迴路^[2]，由於陽極之電位較陰極之電位為低，故由量測電位差，可推測金屬的腐蝕潛能。



混凝土中的鋼筋鏽蝕屬於電化學腐蝕，根據腐蝕電化學的原理，發生時必須具備以下三個條件：

1. 在鋼筋的表面存在陰陽極區的電位差。
2. 鋼筋表面的鈍態保護膜破壞，處於活化狀態。
3. 在鋼筋表面有腐蝕反應所需的水和溶解氧。

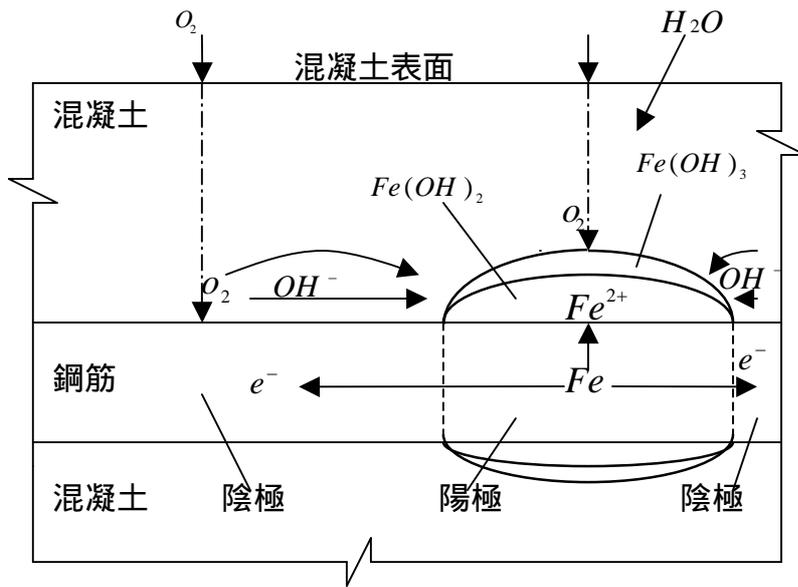


圖 2.4 鋼筋的電化學腐蝕示意圖

資料來源:參考文獻^[2]

正常的混凝土中，由於孔隙溶液內含有鈉、鉀等鹽類以及飽和的氫氧化鈣溶液，使混凝土得以維持在 pH 值為 12~14 的高鹼性環境。處於這樣的高鹼性環境下，鋼筋會自然生成一層與表面密切結合的鈍態保護膜($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)，此鈍化膜對鋼筋具有保護作用，能有效的阻隔水份與氧氣接觸鋼筋，從而避免腐蝕的產生。若混凝土在施工時能夠確實控制鋼筋的保護層厚度在規範的要求之內，則外界的水份、氧氣以及有害物質(CO_2 及 Cl^- 離子)等，也不容易滲透浸入混凝土。所以施工良好的鋼筋混凝土中，鋼筋的腐蝕是不容易產生的。由圖 2.5 E-pH 圖 (Pourbaix diagram)^[1]可知 pH 值在 9~14 之間時，鋼筋是不會產生腐蝕的，且在一定電位以下腐蝕亦不會產生。由此可知在一般情形下鋼筋是處於鈍化狀態，由於外在因素的影響，鋼筋可能會由鈍化區變化到腐蝕區。

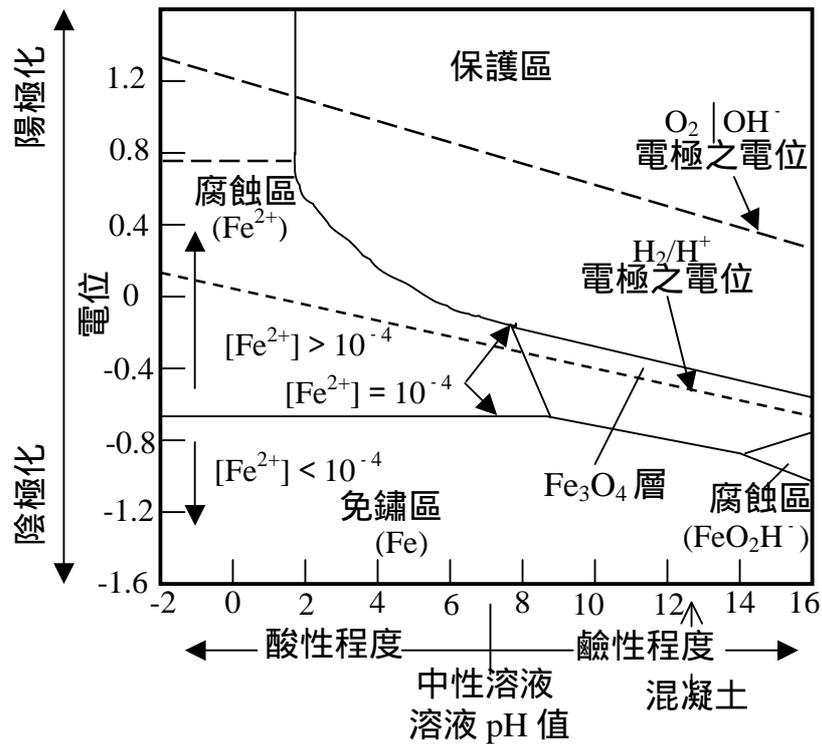


圖 2.5 電位 - pH 值關係圖

資料來源:參考文獻^[1]

2.2 國外有關橋梁殘餘使用年限預測的發展現況

橋梁殘餘使用年限預測研究課題，國外研究起步較早，成果也較具參考性，以下針對歐洲、美加地區以及日本計畫成果作說明。

歐洲地區發展比較成熟的方法是瑞典的橋梁構件分析法(Bridge Element Analysis)，此方法在預測橋梁構件的使用年限所使用的程序如下：

1. 確定分析的構件型式: 根據瑞典的研究，不同部位的構件，其損壞佔所有數據的比例都有所不同，如圖 2.6 所示^[28]，圖中顯示損害情況嚴重的以邊梁、支承還有橋面版為主，約佔 47%。
2. 確認損壞的原因: 根據瑞典研究顯示，腐蝕為主要的損壞原因，如圖 2.7 所示^[28]。而發生腐蝕的原因，又可以歸因於施工不當(5%)，使用不當(30%)，環境因素(43%)，意外事故(9%)，設計不當(1%)，

維護管理不當(3%)以及其他因素(9%)。

3. 構件分級分類: 依構件型式及損壞的程度, 擬定橋梁構件狀況級別 (Condition Class,CC)。概分為 4 級(0,1,2,3), 詳如表 2-1 所示。
4. 線性迴歸分析: 根據獲得的構件分級分類, 然後由統計所得構件分級分類與使用年限的線性迴歸統計關係圖中得到使用年限。

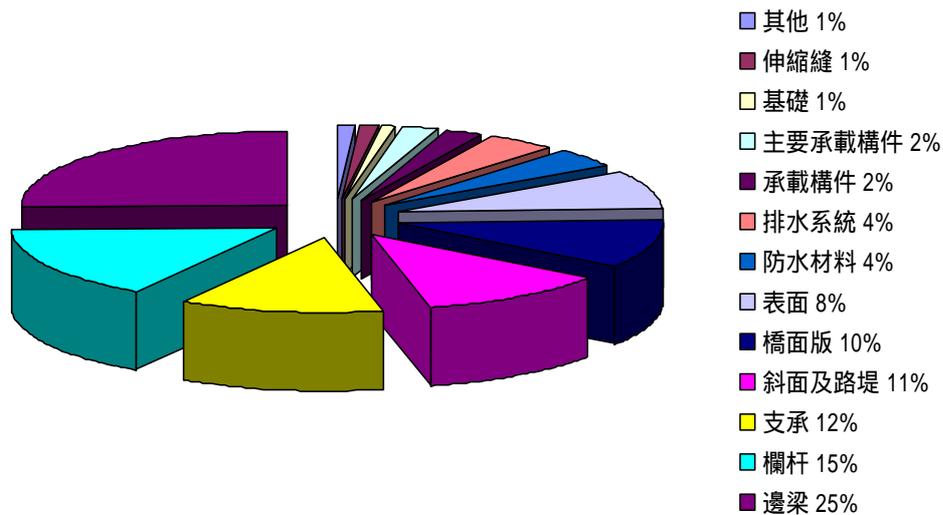


圖 2.6 瑞典橋梁結構構件損害所佔比例圖

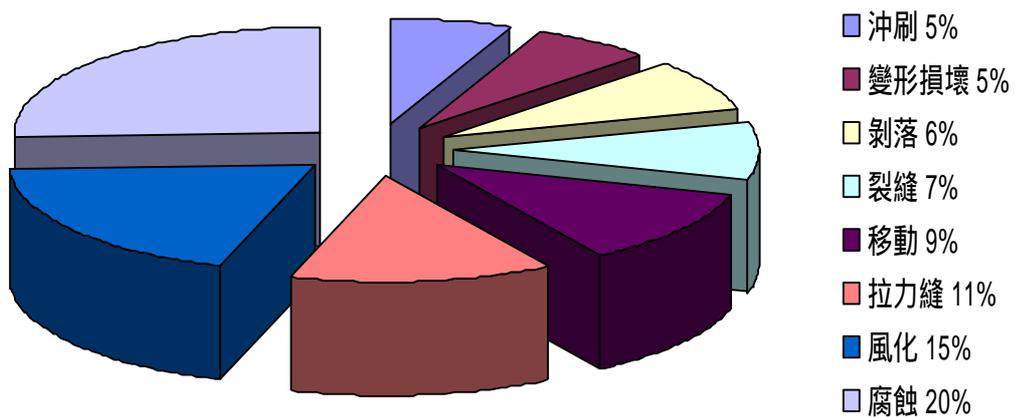


圖 2.7 瑞典橋梁結構損害類型比例圖

表 2-1 瑞典 BEA 橋梁構件損壞分級

狀況級數	狀況
3	短期時間內功能不完整
2	3 年內功能不完整
1	10 年內功能不完整
0	10 年以上功能不完整 (觀測並沒有損壞情況)

資料來源:參考文獻[28]

美加地區鋼筋混凝土橋梁使用年限的研究上，多半著重於橋面版的研究。1988 年，美國 NIST(National Institute of Standards and Technology)、ACI(American Concrete Institute)以及 ASTM(American Society for Testing and Materials)針對鋼筋混凝土使用年限以及生命週期成本召開聯合研討會，總結其預測鋼筋混凝土構件使用年限的建議的重點與方法如下：

1. 氯離子傳輸機制：包括氯離子的吸附與擴散機制，如何選用適當的量測技術以及考量環境影響之特徵等。
2. 鋼筋開始腐蝕的臨界值與腐蝕速率：不同狀態下與不同條件下鋼筋腐蝕的研究。
3. 鋼筋腐蝕與擴散速率：以資料庫的方式，評估與量化環境的影響。
4. 利用上述的資料，建立使用年限預測模式。

Cady 與 Weyers 建議模式中，對於混凝土橋面版暴露在鹽分的環境下之使用年限，分為四個時期：

1. 結構物的初始損壞；
2. 氯離子擴散造成鋼筋腐蝕；

3. 鋼筋持續腐蝕，造成混凝土開裂；
4. 腐蝕持續腐蝕損壞直到使用功能喪失，使用年限結束。

上述模式中，假設氯離子可由表面隨著滲透的途徑進入混凝土中，即是將混凝土中氯離子的傳輸行為作為主要的影響參數。另外，Weyers^[22]也提出另外一個模式，他將模式分為兩部份：

1. 擴散時期：氯離子擴散達到混凝土中鋼筋發生腐蝕時的臨界氯離子濃度所需要的時間；
2. 腐蝕時期：鋼筋開始腐蝕，橋面版發生劣化，直到功能喪失為止。

一般而言，美加地區的學者認為，建立橋梁使用年限預測的重要關鍵點在於：

1. 使用年限的建立：任何一個會造成橋梁破損的因子，都可以作為模式中的參數。目前所使用的參數仍然以腐蝕觀點定論模式，混合著統計與機率的手法為主^[53]。例如退化模式涉及使用年限的少數重要參數值，當使用者給定一組資料，合適的方程式就會產生。而有些人則使用 Markov 連鎖模式，用網絡工作，透過外表評估判斷，然後依照橋梁衰退機率估計過渡期機率，以此來預測使用年限。
2. 以重要構件的劣化行為做預測：這樣可以簡化整個數學模型，但如此做的前提是必須要有高品質的施工技術還有維護管理辦法。在美加地區，橋面版是最常被使用為重要構件的。
3. 電腦統計技術模式：利用電腦進行統計技術模式，是廣為使用的機率模式，如使用 Monte Carlo 法。輸入的參數根據分類去使用隨機多變的數學模式，然後描繪出使用年限。使用這種技術，其模式可以根據需要來反應，譬如根據輸入的參數來進行統計分布的估計使用年限就是很好的例子。

NIST(National Institute of Standards and Technology)發展一套 BridgeLCC 視窗化軟體，在軟體當中引入使用年限壽命的預測模式^[29]，

其使用方法如下：

1. 在混凝土橋面版的視窗中，輸入橋面版深度與標準差；
2. 在氯化等級的部份，可以直接輸入數據，或是選擇透過一個軟體所提供的外部濃度，而由軟體自行計算。在某些情況下，也可以自行更改內部的腐蝕等級；
3. 在混凝土配比方面，輸入混凝土的設計強度及水灰比等資料。

日本對於結構物使用年限的系列研究中，曾嘗試在耐久性設計中將使用年限的觀念做更具體化的表現。亦即日本學者認為在設計階段，就應該引入使用年限的觀念。在『結構物使用年限計畫指南』中，對於鋼筋混凝土結構物的使用年限，是使用中性化引發鋼筋腐蝕做為基準點來推估，推測公式如下：

$$Y = Y_s \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G \times H \dots\dots\dots(2.1)$$

其中，Y：鋼筋混凝土結構物之推估使用年限；

Y_s：鋼筋混凝土結構物標準使用年限 60 年；

A：混凝土種類係數；

B：水泥係數；

C：水灰比係數；

D：保護層厚度係數；

E：代替材料係數；

F：混凝土施工係數；

G：構造物維護管理係數；

H：地域環境係數。

日本的橋梁管理系統 J-BMS^[36]，提供劣化診斷機能及劣化預測機能，其發展理論也是以鋼筋腐蝕考量為主。該系統可以針對不同構件

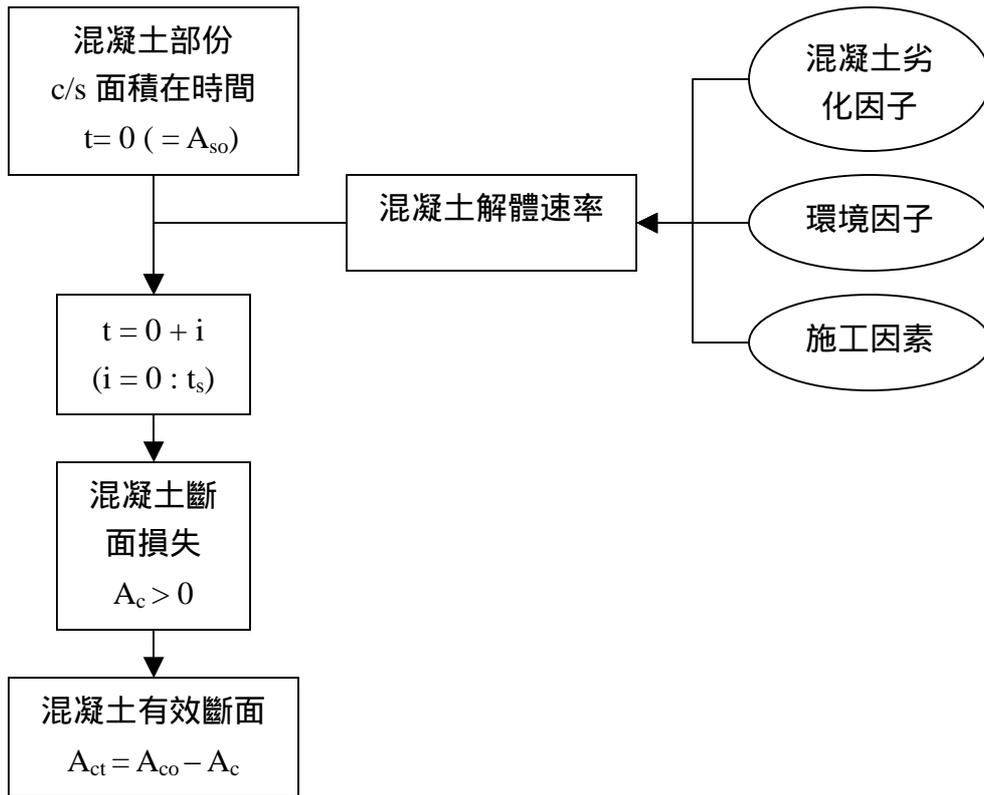
進行預測，如橋梁大梁及橋面版等。其中需使用到 93 項資料，系統會針對承載力、耐久性及耐用性各以 100 分為基準的健全度，獲致對應值。系統也具有預測功能，可針對橋梁的構件，依據耐久性需求提出是否需要修補，或是對於承載能力是否需要補強的指標，可以個別推算方式得到劣化曲線，即機能對使用時間的相對關係預測圖。

上述文獻中可以得到以下結論：

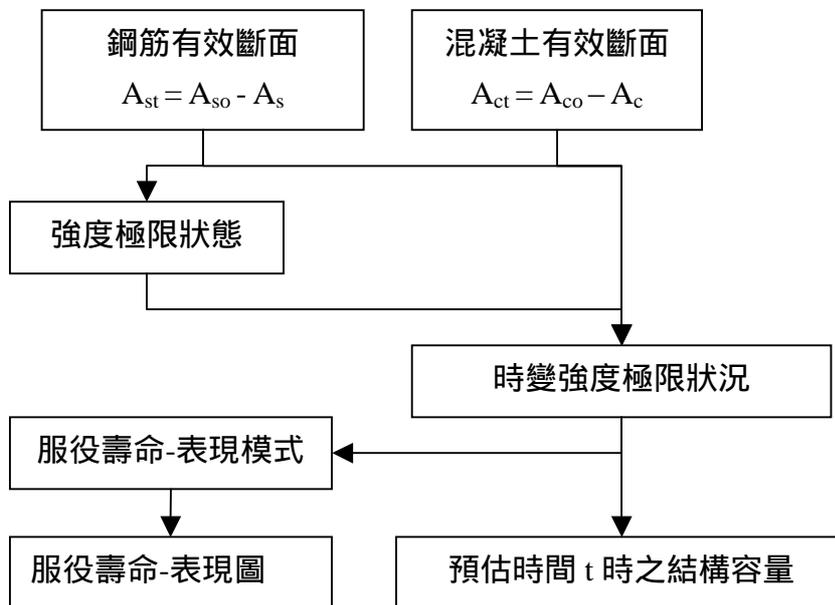
1. 推估鋼筋混凝土橋梁的使用年限主要是以鋼筋腐蝕為考量；
2. 腐蝕因子主要考量氯離子因子或是中性化程度；
3. 選擇重要橋梁構件進行分析，可以降低複雜性；
4. 有效結合定量數學模式與機率統計，以完成預測工作。

除上述歐美日的理論模式研發外，也有學者[39]預估混凝土耐久性年限時，進行鋼筋腐蝕引發混凝土開裂損失的等效面積計算，再由鋼筋鏽蝕量計算鋼筋損失的等效面積，綜合兩者則可以估算鋼筋混凝土整體承載強度的變化，並可得到使用壽命期間的功能圖，最後依設計年限，推估其殘餘壽命。

預測流程如下圖 2.8 所示：



(b)



(c)

圖 2.8 使用壽命流程圖

資料來源:參考文獻^[46]

2.3 耐久性評估辦法

2.3.1 評估方法

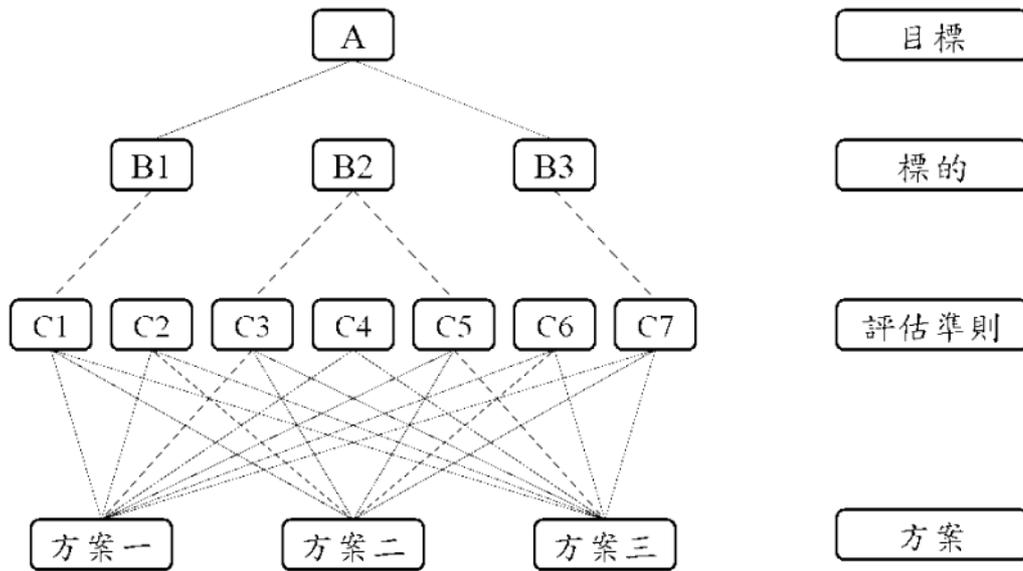
耐久性的評估方法主要分為內政部營建署訂頒之「A.B.C.D 評等法」及縣市政府、交通部國道高速公路局與公路總局使用之「D.E.R&U 評等法」、層級分析法(AHP)^[47]、模糊數學法^[7]以及網絡分析法^[54]等。這些方法主要都需要通過以下步驟來完成評估

1. 定義何為評估所需使用的項目，此項目必須為影響因子；
2. 定義何為目標，如耐久性指標等，此項目為輸出目標；
3. 建立影響因子的量化（如果非為量化數據，則應採用數學手段將之量化）；
4. 建立各影響因子對輸出目標的響應函數（若為線性函數則是建立權重矩陣；若為非線性，則視響應函數定義而建立相關係數）；
5. 定義目標函數的合理合格值或分類區間(如耐久性指標達 0.8)；
6. 比較目前的目標函數值處於何範圍，作出評估與判斷。

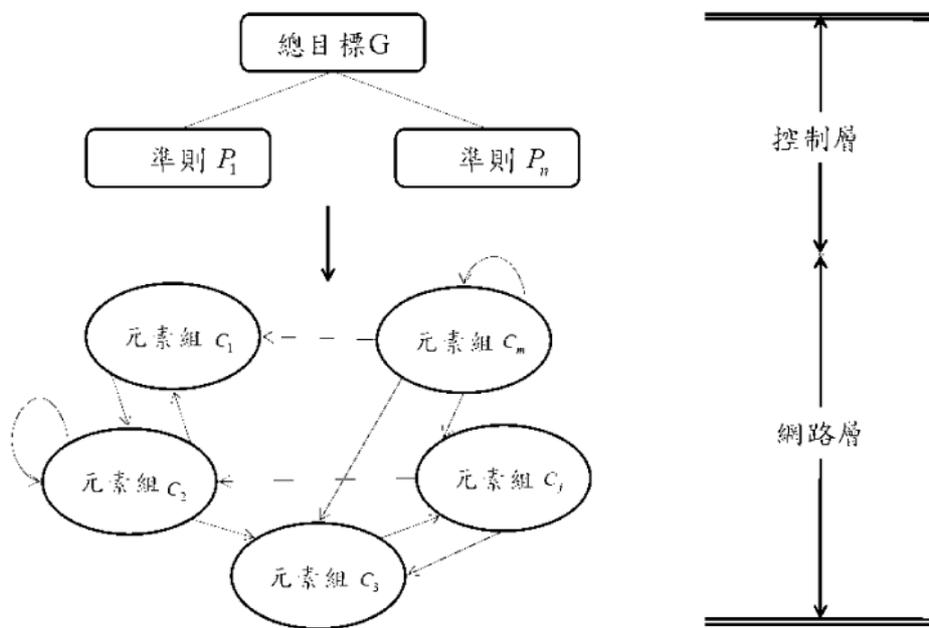
以上的各種方法，其數學操作模式都已經制式化，而在處理上比較會出現差異的反而是在於步驟(1)、(2)、(4)以及(5)，因為這些都涉及到建模者本身如何去定義一個系統，也就是說這些與經驗還有判斷有關，受到人為影響以及當初問卷設計的影響較大。如何盡量排除人為因子，其實是評估法成功與否最重要的關鍵，因此選擇一個優良的方式來排除人為因子，是極為重要的。

在使用專家評價的方法當中，比較常用的是層級分析法(AHP)以及網絡分析法(ANP)。兩者的差異在於層級分析法假設每層的因子間為獨立的，不會互相影響，且層與層之間的傳遞為單線，不能夠有回饋產生；而網絡分析法則允許控制層之各因子可以互相影響，並可以回饋。理論上來說層級分析法是網絡分析法的特例，也就是說網絡分析

法可以適用的範圍更為廣闊。然而，在數學操作上以及問卷的設計上，網絡分析法要比層級分析法要困難得多。網絡分析法與層級分析法的示意圖見圖 2.9 所示。



(a) 層級分析法架構圖



(b) 網絡分析法架構圖

圖 2.9 層級分析法與網絡分析法架構圖

國內學者^[41]曾經使用層級分析法來分析橋梁耐久性，在他們的方法中，影響橋梁耐久性的因子分為五類：環境因子、施工因子、設計因子、材料因子、維護營運。根據層級分析法的精神，這代表這五類因子間是彼此互相獨立的。不過，這樣子的假設，並不理想。比如說材料因子中氯離子的濃度，明顯地是與曝露的地緣環境有關，故假定這兩類因子間無關是不合理的。

中國大陸學者^[43]則提出不一樣的見解，他們認為材料因子為主要的考量，而其他的影響如環境因子可以相乘的方式視為放大或折減因子作用在材料因子上。這樣子的看法就是說，當我們對鋼筋混凝土橋梁耐久性得到一樣的指標時(如一樣的氯離子濃度、混凝土抗壓強度、)，則不同的地域環境將會造成不同的最後評價。不過，在文獻^[43]中，他們採用單一層級，將混凝土現況的指標與腐蝕的指標混在一起；本計畫將會把指標分為兩類：即為混凝土現況指標與腐蝕現況指標。並且在腐蝕現況指標上，文獻^[43]並沒有將腐蝕電流(或是腐蝕速率)作為指標，而是以半電池電位當作指標。理論上來說半電池電位僅能提供鋼筋腐蝕的熱力學趨勢，而並不是能夠定量化來評斷腐蝕的程度，故實應將腐蝕速率納入。

在計算完材料耐久性因子之後，在文獻^[43]中提供放大或折減因子的方法，將環境影響考量進入。故針對臺灣的地域環境，將考量環境影響以及重車流量影響。理論上其他影響(如沖刷潛勢、地震等)也可以納入，不過為簡化數學操作，本計畫僅就重要性挑選出上述兩影響。

而在文獻^[43]中，也針對不同構件部位給予不同權重，再由各別構件之耐久性評價乘上權重總合而得到整體耐久性評價。本計畫基本上也將採取同樣思考邏輯，設計本土化適用之權重。值得一提的是，每個橋梁各部位的重要性其實跟設計法、環境等有關係，所以可以根據不同橋梁由專家自訂出不同之權重出來。比如說橋墩(下部結構)對於跨河橋梁的重要性，就比陸地橋梁重要，因為跨河橋梁要考量沖刷的潛勢影響。

除了使用專家給予權重之評估法以外，另外也可以用定量計算的方式來達成評估的目標。這必須要透過完成服務功能、劣化因子、材料劣化程度、時間之關係，如圖 2.10 所示^[50]。當然其中的關係乃是基於實驗的經驗公式或是透過簡單推導出來的公式來評估。透過此種方法，則可以知道單一因子(如碳化)對於某一構件耐久性的影響(材料劣化程度)，甚至可以知道對於服務功能的影響(如梁之抗彎矩能力)，進而評估單一構件之壽命。

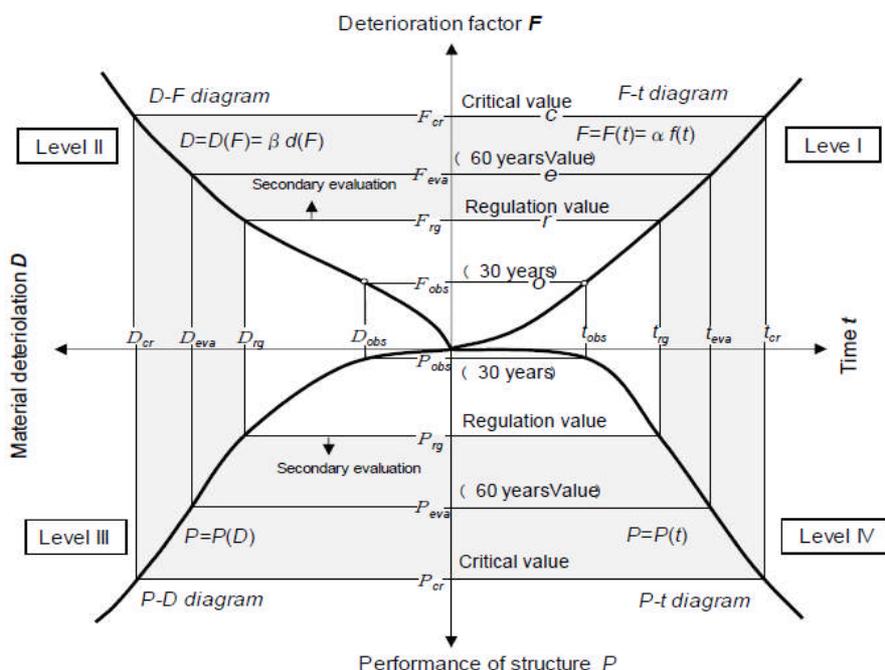


圖 2.10 服務功能、劣化因子、材料劣化程度、時間關係圖

資料來源:參考文獻^[50]

2.3.2 層級分析法的原理

本計畫中擬採用層級分析法，僅將層級分析法原理介紹如下。假設 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 為多目標價值模型中所考量之特性因子，而 $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 為各特性因子相對應之權重。以上可以看出來，若是要同時決定出所有之權重值，有其相當的困難性，並可能造成嚴重之誤差。層級分析法則應用特性因子之間的兩兩比較，得到特性因子之間的相

對權重比值，形成一權重比例矩陣 A 如下所示：

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_{n-1} & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_{n-1} & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_{n-1} & w_n/w_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.1)$$

經由一些簡單運算，可以發現以下關係存在

$$Aw = n \dots\dots\dots(2.2)$$

當已知矩陣 A，若要求 w 向量，此在數學上就是一特徵值問題，也就是解一 $Aw = \lambda w$ 的特徵值問題。經由解出以上特徵值問題，就可以求得各特性因子之權重值。並且由線性代數理論可知，當求解一特徵值問題時，若矩陣 A 中之元素有極小擾動，將會對特徵值造成影響。如果將特徵向量問題表為下式：

$$Aw = \lambda_{\max} w \dots\dots\dots(2.3)$$

若兩相比較之值具有一致性，則所得上式中之最大特徵值 λ_{\max} 將會相當接近 n (當然實際上只會大於或等於 n)，而其它之特徵值則會非常接近 0。由此，可以利用 $\lambda_{\max} - n$ 之值來評估一致性及所得結果合理性。定義一致性指標 C.I 為

$$C.I. \equiv \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \dots\dots\dots(2.4)$$

由(2.4)可見，當一致性指標越接近 0，則代表所選取的權重越合

理。

而由評估尺度 1~9 所產生的正倒數矩陣，在不同階數下，會產生不同之 C.I 值，稱為隨機指標(random index; R.I.) 其中矩陣階數為 1~11 階的 R.I 值為取 500 個樣本所得知平均數；階數 12~15 的 R.I.值則為取 100 個樣本所得平均數。

在相同矩陣階數下，其 C.I.值與 R.I.值的比例稱為一致性比值 (consistency ratio, C.R.)，也就是

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \dots\dots\dots (2.5)$$

當 C.R. \leq 0.1 時，則代表矩陣的一致性程度令人滿意。

在計算各層級要素間之權重以後，必須要再進行整體層級權重計算。首先須將 C.I.值以及 w 值代入，求出整體一致性指標 CIH 以及整體隨機性指標，

$$CIH = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m \omega_{ij} CI_{i,j+1} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$RIH = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m \omega_{ij} RI_{i,j+1} \dots\dots\dots (2.7)$$

其中 ω_{ij} 代表第 j 層級第 i 個元素之總權重值， $CI_{i,j+1}$ 代表第 j+1 個層級所有元素對 j 層級第 i 個元素之一致性指標， $RI_{i,j+1}$ 代表第 j+1 個層級所有元素對 j 層級第 i 個元素之隨機性指標。最後將 CIH 除以 RIH，則可以得到 CRH。若是 CRH 值小於 0.1 時，表示所建立之層級結構及計算之權重值是可以接受的。若是 CRH 大於 0.1 時，應對評估權重向量 W 重新評比後，再計算新的 CRH 值，檢驗其值是否小於 0.1。

這種層級分析法的過程當中，會涉及到如何設計權重，在本計畫

中擬使用會議進行，邀請各界專家學者對於耐久性間重要程度進行問卷填寫，最後在統整每位專家的問卷，計算出各項的權重值。

一般對於 RC 橋梁結構耐久性評估上，考量之重點涵蓋環境因素、材料因素、設計因素、施工因素及維護管理因素等五大層面，如圖 2.11 所示^[41]。其中各層級所含之子層級大致如下：

1. 環境因素：鹽害潛勢、沖刷潛勢、土石流潛勢、溫溼度因素、二氧化碳...等。
2. 材料因素：水泥、粒料、摻料、水灰比、抗壓強度、電阻值...等。
3. 設計因素：保護層厚度、設計強度...等。
4. 施工因素：氯離子含量、搗實、養護、施工縫處理...等。
5. 維護管理因素：裂縫現況、腐蝕狀態、維修狀況、交通量狀況...等。

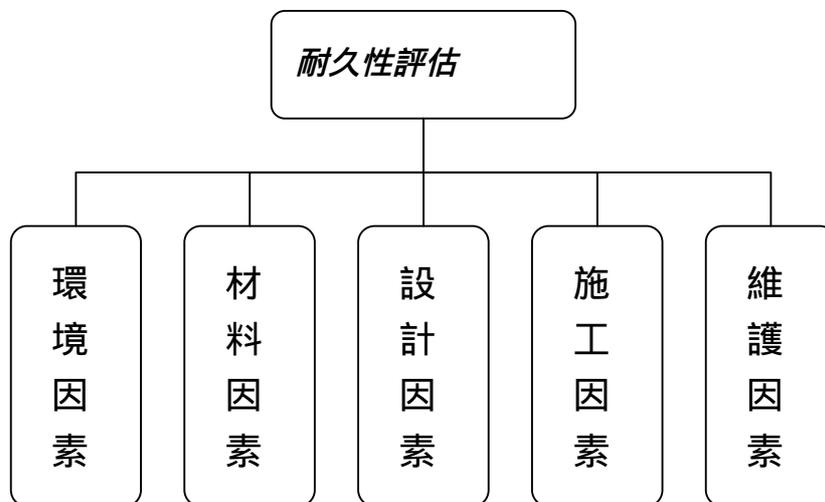


圖 2.11 耐久性評估架構圖

資料來源:參考文獻^[41]

2.4 橋梁檢測技術及評估法相關資料

國內一直努力制定符合本國橋梁特性、設計方式及地理環境之橋梁檢測制度與方法，並在 2000 年建立臺灣地區橋梁管理系統。本節將參考交通部運輸研究所相關文獻，列舉公路與鐵路橋梁相關檢測技術或計畫。

2.4.1 公路橋梁檢測技術

國內公路橋梁檢測技術係以「公路養護計畫」為主要參考資料，屬於公路管理單位檢測的上位規範，其內容涵蓋路基、邊坡、鋪面、橋梁、隧道、排水設施、交通安全設施、交控及通信設施、沿線路權內附屬設施、景觀及植生、養路車輛機械等各項養護工作，橋梁檢測為其中一部分。表 2-2 為公路橋梁管理單位的檢測規範與計畫^[42、51]。

表 2-2 橋梁檢測規範與計畫

規範/計畫名稱	評估方法	主要使用橋管單位
市區道路橋梁安全檢測計畫	A.B.C.D.(2000 年以後) D.E.R.&U.(2000 年以後)	各縣市政府
混凝土、鋼橋一般檢測計畫	A.B.C.D.(2000 年以後) D.E.R.&U.(2000 年以後)	省府住都局
公路橋梁安全檢查計畫	D.E.R.&U.	公路總局
公路橋梁一般目視檢測計畫	D.E.R.&U.	高公局
橋梁安全維護檢測計畫	D.E.R.&U.	通用
橋梁目視檢測評估計畫	D.E.R.&U.	通用
公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範	D.E.R.&U.並參考 A.B.C.D.的劣化等級	通用

資料來源:參考文獻^[51]

2.4.2 D.E.R&U.評估法

D.E.R.&U.(Degree、Extent、Relevancy and Urgency)評估法為昭凌顧問工程公司與南非 CSRI 公司共同發展之橋梁目視檢測評估法，初期是為了高速公路工程局開發橋梁管理系統時所制定之目視檢測評估準則，現已被「臺灣地區橋梁管理系統」所採用，使用之機關包括高公局、公路總局、鐵路局以及各縣市政府，交通部頒布之公路養護計畫中亦有採用 D.E.R.&U.目視檢測評估法。

D.E.R.&U.評估法適用於一般樑式混凝土橋，對於特殊型式橋樑無法完全適用，因此，又有後續研究針對斜張橋、拱橋、斜撐鋼橋所訂定適合之 D.E.R.&U.檢測項目。D.E.R.&U.評估法將一般橋梁分為 21 項檢測項目，其中第 1 到第 11 項為一般檢測項目，即橋梁全面性之宏觀檢測，第 12 至 20 項為逐跨檢測項目，第 21 項則為其他。檢測項目如表 2-3^[51]。

表 2-3 D.E.R.&U.評估檢測項目

1.引道路堤	8.摩擦層	15.支承 / 支承墊
2.引道護欄	9.橋面排水設施	16.止震塊 / 拉桿
3.河道	10.緣石及人行道	17.伸縮縫
4.引道護坡-保護措施	11.欄杆及護牆	18.主構件 (大樑)
5.橋台基礎	12.橋墩保護設施	19.副構件 (橫膈樑)
6.橋台	13.橋墩基礎	20.橋面版 / 絞接版
7.翼牆 / 擋土牆	14.橋墩墩體 / 帽梁	21 其他

資料來源:參考文獻^[51]

D.E.R.&U.評估法對每一個檢測項目依「劣化程度 (Degree)」、「劣化範圍 (Extent)」以及劣化情形或現象對橋梁安全性與服務性的「影響度 (Relevancy)」，分別給予 0-4 之評分，再針對該劣化構件需維修之「急迫性 (Urgency)」加以評定。評估準則如表 2-4 所示^[51]。

表 2-4 D.E.R.&U.評估準則

程度(D)	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損壞
範圍(E)	無法檢測	小於10%	10% ~ 30%	30% ~ 60%	60%以上
重要性(R)	無法判別	微	小	中	大
急迫性(U)	無法判別	例行維護	三年內	一年內	緊急處理

資料來源:參考文獻^[51]

2.4.3 A.B.C.D.評估法

A.B.C.D.評估法為中華顧問工程司於 1995 年為臺灣省政府住宅及都市發展局及鐵路管理局所發展之橋梁目視檢測評估法。該評估法將橋梁結構物分為：橋面版構件、上部結構、橋墩、基礎及土壤、橋台及引道、支承、伸縮縫及其他附屬設施等 8 大類別，每一類再分為數個檢查對象，每一檢查對象再往下系分為數個檢查項目，如表 2-5 所示。

表 2-5 A.B.C.D.評估檢測項目

檢查之結構分類	檢查對象
A.橋面版構件	1.磨耗層 2.緣石 3.人行道 4.中央分隔島 5.胸牆 6.欄杆 7.橋面沉陷
B.上部結構	1.橋面版結構 2.主結構 3.副結構
C.橋墩	1.帽樑 2.墩柱
D.基礎及土壤	1.基礎 2.河道沖刷、侵蝕、沉陷 3.地型斜坡 4.土壤液化 5.保護措施
E.橋台及引道	1.橋台 2.背牆 3.翼牆 4.引道 5.保護措施
F.支承	1.支承及其周邊 2.阻尼裝置 3.防止落橋措施
G.伸縮縫	1.伸縮縫裝置
H.其他附屬設施	1.標誌、標線 2.標誌架及照明設施 3.隔音牆 4.維修走道 5.排水設施 6.其他設施

資料來源:參考文獻^[51]

A.B.C.D.評估法之將損傷分為 A D 四級，如表 2-6 所示，若無此項目或無法評定結構物之損傷狀況時則評定為「N」，另外，當無法評定時需加以說明；若為上述以外則紀錄為「OK」。

表 2-6 A.B.C.D.評估準則

評定等級	狀 況
A	損傷輕微，需作重點檢查。
B	有損傷，需進行監視，必要時視狀況補修。
C	損傷顯著，變形持續進行，功能可能降低，必須加以補修。
D	損傷顯著，有重大變形及結構物功能降低，為確保交通之安全順暢，或避免對第三者造成障礙，必須採取緊急修補
N	無此項目或無法評定結構物之損傷狀況。
OK	上述以外。

資料來源:參考文獻^[51]

2.5 國內橋梁檢測執行概況

本節就國內目前橋梁檢測執行情形將參考交通部運輸研究所相關文獻，依評估方式、檢測項目、檢測等級、檢測時機及辦理方式等探討說明^[51]。

2.5.1 RC 橋梁現況評估方式

目視檢測法的目的在於對龐大數量的橋梁進行快速且統一標準的普查與篩選評估，依據橋梁的重要性與安全性作為後續維護補強的排序之參數，故檢測方式講求精簡、快速與客觀。綜觀國內外的目視檢測法對於評估橋梁劣化皆以在地化的氣候、人文、地質與建築習慣發展出適合的評估系統，以構件的分類與劣化程度的評等方式而言，目前國內橋梁管理系統所採用的 D.E.R&U.評等法在執行上較符合快速精簡的精神，在記錄劣化狀況的同時也考慮到維修的迫切性，在整體橋梁評等的排序上也提供不同的狀況指標予以參考。

A.B.C.D.評等法強調建立系統化的檢查架構，為避免遺漏任何檢測項目故針對各項主分類之下又細分多種構件項目，且根據不同劣化型式列出評等標準並解釋說明與量化，可提供檢查人員參照直接勾選損傷等級並紀錄說明文字。

2.5.2 RC 橋梁檢測項目

檢測執行項目包括橋梁目視檢查以及橋梁特殊檢查，其中，特殊檢查項目包括：抗壓強度試驗、中性化深度試驗、氯離子含量試驗、鹼骨材含量試驗、鋼筋腐蝕速率檢測、預力鋼鍵腐蝕檢測、混凝土裂縫深度檢測、鋼材厚度檢測、鋼材耐候性測試、鋼材焊接或螺栓檢測等。

目視檢測則依 D.E.R&U.或 A.B.C.D.之方式有不同的檢測項目，分別如表 2-3 與表 2-5 所示。

2.5.3 RC 橋梁檢測等級

公路橋梁檢測可依時效性分為經常巡查、定期檢查與特別檢測等，使用的方法可分為一般檢測及特殊檢測，分別說明如下^[51]：

1. 一般檢測

一般檢測是利用目視方式對整座橋梁做全面性的檢查。檢測過程中視需要於重要部位、破裂損壞部位、缺陷或異常現象部位拍攝照片，以為爾後研判之參考，另以數量化步驟對各個構件進行評估，已建立橋梁現況之基本管理資料，最後依權重分配得到橋梁綜合評估。

目視檢測之最大優點是容易執行，省時且耗費不多，但缺點是此法受於檢測者的主觀認知，評估結果有時與現場儀器檢測或載重試驗有甚大之差異。因此，目視檢測評估結果可作為橋梁現況之參考資料，可能無法完全反應結構主要性能。

2. 特殊檢測

橋梁的一般檢測(目視檢測)對結構物未造成任何破壞、簡單、容易、很快有結果且費用較低，是最常被利用的檢測方式。但是目視檢測無法深入了解結構物內部之狀況，因此在目視檢查完成後，通常選擇整體狀況較差之區域或功能異常的部分進行非破壞性或部分破壞性檢測，以鑑定結構的混凝土及鋼筋品質、對目視缺陷或異常現象檢測其缺陷範圍及劣化程度，並推估其主要原因，作為進一步評估與養護工作的依據。特殊檢測是利用現場試驗的方式來了解橋梁現況之直接方法，依其性質可分為非破壞性檢測及部分破壞性檢測兩種。

就橋梁整體的結構檢測而言，無論是非破壞性或是部分破壞性之檢測，有其優缺點，應利用不同方法相互驗證以達成檢測的目的。一般而言，非破壞性檢測可在現場立即完成，而且可以重複施測或是迅速移到下一點位進行試驗，如果針對特殊部位或是非破壞性檢測無法進行時，才施以破壞性的試驗。

2.5.4 RC 橋梁檢測時機

目前中央機關執行公路養護作業主要依據「公路養護計畫」辦理，該計畫適用於中華民國轄內各級公路養護主管機關之養護作業，目前各公路管理單位依據該計畫規定之原則，視需要自行訂定檢測頻率，執行情形簡述如下^[51]：

1. 高工局每年於4月(防汛期前)及11月(防汛期後)辦理半年檢測。檢測當月該橋辦理「定期檢測」時，則該期「半年檢測」免辦，以該「定期檢測」替代。
2. 交通部公路總局於1998年8月訂定「平時養路巡查重點」，規定每年4月30日前由轄管之工務段將轄區內所有的橋梁檢查完竣，並於5月15日前將檢測結果報局，因河道、橋台基礎、橋臺、橋墩保護措施、橋墩基礎及橋墩墩體等6項易受颱風影響，於11月15日再

辦理檢查。

3. 交通部臺灣鐵路局管理局訂定「鐵路橋隧檢查作業要點」第1.1.3定期檢查每月10月~12月間辦理。

2.5.5 RC 橋梁檢測辦理方式

各主管機關檢測工作，除中央政府少數單位可以自行辦理檢測外，大部分地方政府都因人力有限而委外辦理。而橋檢作業特別是劣化程度評定之技術層次較高，即使是中央單位，亦可能會有部分工作委外辦理。

2.6 鋼筋混凝土腐蝕預測殘餘壽命

針對鋼筋混凝土橋梁壽命預測部份，本計畫擬採用定量化方式來預測。也就是將定義所謂的使用壽命 $t = t_c + t_p + t_{corr}$ ，包括了：

1. 腐蝕初始期 (t_c): 由結構物完成直到鋼筋表面上的腐蝕因素到達臨界值(包含碳化造成氫氧根下降、氯離子滲入混凝土中達到臨界濃度)，造成鋼筋表面鈍態保護膜的破壞。
2. 去鈍化期 (t_p): 本期間是由鋼筋開始生鏽，鏽層擴大，然後造成混凝土內部產生裂縫，直至裂縫開裂到表面為止。
3. 腐蝕延伸期 (t_{corr}): 本期間是從混凝土表面發現有腐蝕順筋裂縫直到承載力下降到耐久性指標低於臨界值所需之時間。

對照圖 1.1 可將使用壽命區分為：

2.6.1 腐蝕初始期(t_c)

一般說起來，環境因子會造成混凝土內鋼筋的腐蝕不外乎碳化以及氯離子濃度。因此預測兩個因子到達誘發腐蝕所需要的時間，就需要使用數學模式來建模預測。以下先將有關於腐蝕誘發期的預測模式整理如表 2-7 所示。

2.6.2 鏽脹開裂壽命($t_{cr}=t_c+t_p$)

本期間所需要的時間，一般是使用計算氯離子擴散到鋼筋表面而達到瓶頸濃度的時間，然後再以經驗式將鋼筋開始生鏽，直到將保護層厚度貫穿為止所需要的時間計算出來，以下將有關鏽脹開裂壽命計算模式以及本計畫擬使用的模式整理如表 2-8 所示。

2.6.3 承載力壽命($t_t=t_c+t_p+t_{corr}$)

承載力壽命預測是比較困難的課題，因為其涉及的因子很多，與裂縫發生的位置、構件的部位、保護層厚度、鋼筋尺寸、混凝土抗張能力、鋼筋間距、腐蝕速率等都有關係，就目前所知道的數學模式整理見表 2-9 所示。

表 2-7 預測數學模型(t_c)

預測方法	方程式	備註	參考文獻
Fick 第二擴散定律	$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4D_{co_2} t_c}}$	L = 保護層厚度 C_0 = 混凝土表面之二氧化碳濃度 D = 擴散係數	Crank (1975) [55]
Guirguis	$t_c = \frac{L}{\lambda D_{co_2}}$	L = 保護層厚度 λ = 常數	Guirguis (1987) [8]
Hookham	$t_c = K_c K_e x^2 + K_a x$	K_c = 混凝土品質係數(7.59) K_e = 環境係數(0.85) K_a = 活態腐蝕係數(4.0)	Hookham (1992) [14]
AJMF	$c(x,t) = kt \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2D_{co_2} t} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{co_2} t}} \right) - \left(\frac{x}{\sqrt{\pi D_{co_2} t}} \right) e^{-\frac{x^2}{4D_{co_2} t}} \right\}$	$k = 0.1$	Amey et al. (1998) [23]
	$c(x,t) = k\sqrt{t} \left\{ e^{-\frac{x^2}{4D_{co_2} t}} - \left[\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D_{co_2} t}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{co_2} t}} \right) \right] \right\}$	$k = 0.545$	

表 2-8 預測數學模型(t_p)

預測方法	方程式	備 註	參考文獻
Bazant (Parabolic)	$t_p = \frac{1}{12D_c} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_0}}} \right)^2$	D_c = 氯離子擴散係數 (m ² /year) L = 保護層厚度 (m) C^* = 氯離子去鈍臨界濃度 (kg/m ³) C_0 = 混凝土表面之氯離子濃度 (kg/m ³)	Bazant (1979) [2, 3]
Liang (Straight)	$t_p = \frac{1}{4D_c} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_0}}} \right)^2$	D_c = 氯離子擴散係數 (m ² /year) L = 保護層厚度 (m) C^* = 氯離子去鈍臨界濃度 (kg/m ³) C_0 = 混凝土表面之氯離子濃度 (kg/m ³)	方聖安 (2007) [45]
Liang (Parabolic+ Straight)	$t_p = \frac{7}{384D_c} \left[\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_0}}} \right]^2 + \frac{1}{64D_c} \left[\frac{L}{1 - \frac{C^*}{C_0}} \right]^2$	D_c = 氯離子擴散係數 (m ² /year) L = 保護層厚度 (m) C^* = 氯離子去鈍臨界濃度 (kg/m ³) C_0 = 混凝土表面之氯離子濃度 (kg/m ³)	鄭浩元 (2008) [48]

表 2-9 預測數學模型(t_{corr})

預測方法	方程式	備註	參考文獻
Bazant	$t_{corr} = \rho_{cor} \frac{D \Delta D}{S j_r} ,$ $\Delta D = 2 f'_t \frac{L}{D} \delta_{pp}$	D = 鋼筋直徑 (m) δ_{pp} = 鋼筋孔洞之逕向柔度 f'_t = 混凝土抗拉強度 (kg/m^3) L = 保護層厚度 (m) S = 鋼筋間距 (m) ρ_{cor} = 穩態腐蝕階段中, 鋼筋的平均密度 (g/m^2) j_r = 腐蝕產物速率	Bazant (1979a, 1979b) [2, 3]
Bazant (Modified)	$t_{corr} = \rho_{cor} \frac{D \Delta D^*}{S j_r} ,$ $\Delta D^* = f'_t t [2(\frac{L}{D} + 1)] \delta_{pp}$	D = 鋼筋直徑 (m) δ_{pp} = 鋼筋孔洞之逕向柔度 f'_t = 混凝土抗拉強度 (kg/m^3) L = 保護層厚度 (m) S = 鋼筋間距 (m) ρ_{cor} = 穩態腐蝕階段中, 鋼筋的平均密度 (g/m^2) j_r = 腐蝕產物速率	Liang et al. (2002) [37]
Weyers	$t_{corr} = \frac{W_{crit}^2}{2k_p} ,$ $W_{crit} = \rho_{cor} \{ \pi [\frac{L f'_t}{E_{ef}} (\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_c) + d_0] D + \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \} ,$ $a = \frac{D + 2d_0}{2} , b = L + a$ $k_p = 0.098 \frac{1}{\alpha} \pi D i_{corr} ,$ $\alpha = 0.57$	D = 鋼筋直徑 (m) d_0 = 混凝土孔隙厚度 (m) f'_t = 混凝土抗拉強度 (kg/m^3) L = 保護層厚度 (m) a = 假想為混凝土薄管之內徑 b = 假想為混凝土薄管之外徑 ρ_{cor} = 鏽蝕物密度 k_p = 鏽蝕速率 i_{corr} = 腐蝕電流密度 (A/cm^2)	Weyers (1998) [22]
ME	$t_{corr} = \frac{\delta \rho_{st} ZF}{A i_{corr}} ,$ $\delta = \frac{A i t}{\gamma Z F}$	A = 鐵的原子量 (56g) Z = 2 F = 法拉第常數 ρ_{st} = 鋼材密度 γ = 材料密度 (g/cm^3) i_{corr} = 腐蝕電流密度 (A/cm^2)	Mangat and Elgarf (1999) [31]
CW	$t_{corr} = 2 \sim 5 \text{ years}$	指出一般鋼筋混凝土橋梁的穩態腐蝕階段之時間 t_{corr} 約為 2 ~ 5 年, 在此取平均值 3.5 年。	Cady and Weyers (1984)[6]

第三章 RC 橋梁材料耐久性評估

3.1 前言

本計畫目的主要是針對 RC 橋梁的材料狀況與耐久性作檢測評估，提供相關檢測項目、檢測方法與評定標準。而 RC 橋梁結構耐久性評估是以組成結構的構件之耐久性作為評估值，綜合考慮各構件之影響係數或外在環境條件等，並評估既有 RC 橋梁上部結構物之耐久性等級。而檢測應結合環境條件及結構自身特性，對影響耐久性的主要影響因素，進行重點檢測(檢測方法可參考相關規範或標準)，必要時可適當增加權重，相關檢測流程詳如圖 3.1 所示。

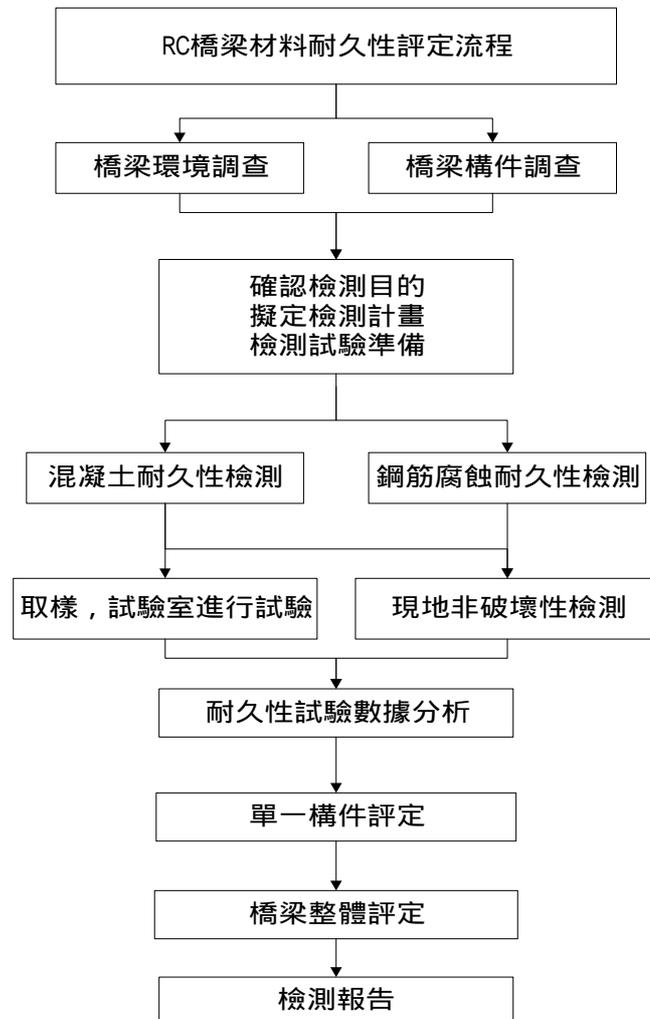


圖 3.1 RC 橋梁材料耐久性評定流程

3.2 定義與範疇

首先在研究範疇界定上，主要係針對鋼筋混凝土橋梁的材料耐久性進行評估。因此就對象而言，本研究只針對鋼筋混凝土橋梁，其他型式之橋梁並不在本研究範疇之內。而影響鋼筋混凝土橋梁的耐久性因子甚多，粗略來分可以環境因子、施工因子、設計因子、材料因子、維護營運因子等五類。若是將所有因子全部考量，則會造成兩個困境：其一為各因子所需的調查量以及數據過於龐雜，而使得最後評估的作業難以實踐；其二為若採用層級分析法作為決定因子間的相對權重時，因為層級分析法假設各層因子間為獨立關係，並無相關，最後整體的評價乃是由各因子評定分數乘上相對權重再加總起來。然而，如日本或是中國大陸^[43]則採用不同思維，他們認為影響橋梁耐久性的主要因素為材料因子，而其他的影響因子的作用則可以用放大係數將材料因子所得到的評分加以放大。這種思維很顯然地把其他因子的作用視為會影響材料因子，而非獨立的，此種思維在實務操作上較為可行。因此在本研究中，僅針對材料因子圖 3.2 進行評估作業，至於其他因子則以放大係數的觀念加入最後整體的評價當中。

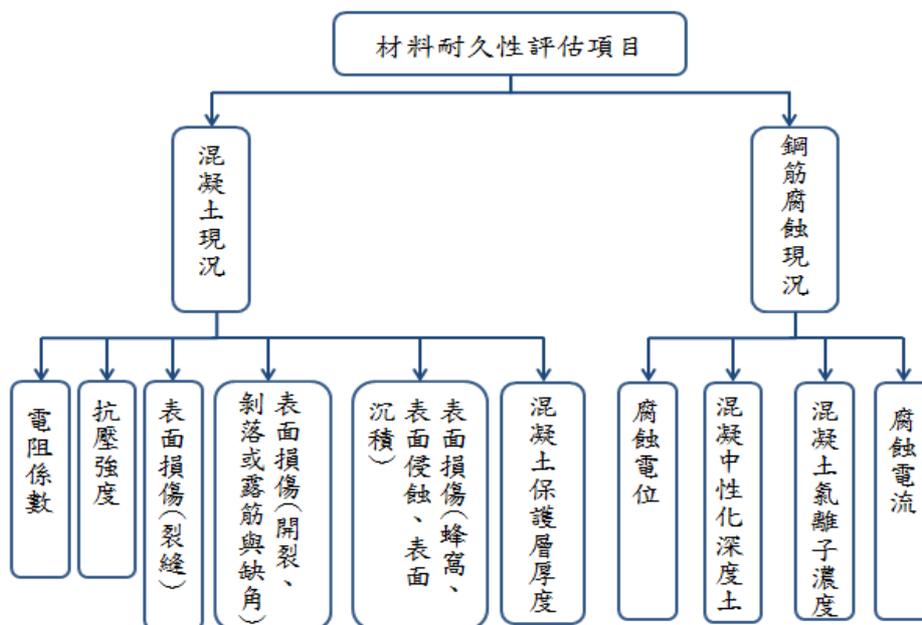


圖 3.2 材料因子耐久性評估項目

3.3 權重方法之決定

在決定權重上，一般來說可以採用層級分析法或是網絡分析法來決定。層級分析法基本上每一層的各因子間是互相獨立的，也就是說它們不會互相影響或是影響可以忽略；網絡分析法則可以容許因子間互相影響，甚至自我影響。理論上來說，網絡分析法比層級分析法更具合理性，不過以實際的應用層面來說，卻存在以下的弊端：其一為結果對各因子間的相互影響係數非常敏感，因此如果問卷設計上無法得到準確評斷，則經過累乘加總之後，其收斂值將會差異甚大；換言之，在問卷設計上須要分級精確；其二網絡分析法雖然理論上可以讓因子間存在互相影響的關係，不過若是因子間的影響關係不明確時(如氯離子與碳化深度之關係)，則即使在問卷設計上分級詳盡，但是確因為資訊不足造成專家無法確定其影響為何。緣此，本研究在決定材料因子的權重上採用層級分析法。

3.4 材料因子耐久性指標之分層

選定材料耐久性指標的原則在於：

1. 選定指標要具有現地可實作之可能，量測方法須明確。
2. 選定指標的評斷應該有明確之分級標準。

基於此原則，任何可以反應材料耐久性之試驗或方法都可以當作指標。本研究參照文獻^[43]之作法及國內常用之方法，共選定十個指標如下。

首先，將影響鋼筋混凝土橋梁材料耐久性因子分為兩類：混凝土現況與腐蝕現況。此兩因子羅列在第一層，其間相互關係的決定如表 3-1 所示，將進行專家訪談來決定其相對權重。決定相對權重其實會取決於所選定之指標的量測方法準確性、可信度等影響。

而針對混凝土現況，則羅列出第一類表面損傷(裂縫)、第二類表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)、第三類表面損傷(蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積)、混凝土強度、鋼筋分布與保護層厚度、混凝土電阻率共六個指標。其相對權重可經由專家決定，問卷調查如

表 3-2 所示；針對腐蝕現況，羅列出鋼筋自然電位、腐蝕電流、中性化深度、氯離子濃度四個指標。相對權重可經由專家決定，問卷調查如表 3-3 所示。

與文獻^[43]中相比較，本研究分為兩層級，而文獻^[43]中採用單一層級。並且，在指標上本研究相較於文獻^[43]，則多採用腐蝕電流作為指標。雖然本研究所採用手段與文獻^[43]相近，不過因為不同地區之專家對於各因子的重要性看法不盡相同，故最後成果應會有差異性。

表 3-1 『耐久性 材料因素』評估項目之權重問卷

針對耐久性項目，主要將其分為腐蝕現況、混凝土現況兩個評估準則，分別加以評估，表 3-1 之圈選方式是以左邊評估準則為準，與右邊評估準則作相對重要程度的比較。

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔		右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	
腐蝕現況																			混凝土現況

表 3-2 『耐久性 腐蝕現況』評估項目之權重問卷

針對腐蝕現況項目，主要將其分為腐蝕電位、中性化深度、氯離子、腐蝕電流四個評估準則，分別加以評估，表 3-2 之圈選方式是以左邊評估準則為準，與右邊評估準則作相對重要程度的比較。

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔		右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	
腐蝕電位																			中性化深度
腐蝕電位																			氯離子
腐蝕電位																			腐蝕電流
中性化深度																			氯離子
中性化深度																			腐蝕電流
氯離子																			腐蝕電流

表 3-3 『耐久性 混凝土現況』評估項目之權重問卷

針對混凝土現況項目，主要將其分為電阻係數、抗壓強度、表面損傷(裂縫)、表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)、表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)、鋼筋保護層厚度六個評估準則，分別加以評估，表 3-3 之圈選方式是以左邊評估準則為準，與右邊評估準則作相對重要程度的比較。

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔		右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	
電阻係數																			抗壓強度
電阻係數																			表面損傷(裂縫)
電阻係數																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數																			鋼筋保護層厚度
抗壓強度																			表面損傷(裂縫)
抗壓強度																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)																			鋼筋保護層厚度

3.5 因子介紹

3.5.1 橋梁概況與環境條件的調查

1. 橋梁概況的調查

- (1) 橋梁概況調查包括原始資料的調查和橋梁的實地考察兩部分。原始資料的調查主要是針對橋梁的設計、施工情況(包括施工工藝和施工原始資料)及使用、養護、維修、加固與管理情況進行的；橋梁的實地考察主要是初步了解橋梁的技術狀況和主要存在問題，並向相關人員調查了解橋梁病害史、使用中的特別事件、限重限速原因、交通狀況、今後改擴計劃、水文、氣候及環境等方面情況。
- (2) 設計情況調查的主要內容為:橋位地質鑽探資料及水文勘測資料、設計計算書及相關圖紙、變更設計計算書及相關圖紙等。
- (3) 施工情況調查的主要內容為:材料試驗資料、施工記錄、重大施工質量事故記錄、監理資料、施工監控資料、地基與基礎試驗資料、竣工圖紙及其說明、交工驗收資料、交工驗收荷載試驗報告及竣工驗收有關資料等。
- (4) 使用、養護、維修、加固與管理情況調查的主要內容為:橋梁檢查與檢測、歷次危害情況、荷載試驗資料，歷次橋梁維修、加固資料及歷次特別事件記載資料等。

2. 環境條件的調查

- (1) 環境條件調查包括橋梁所處地區的氣象條件調查和橋梁的工作條件調查兩部分。
- (2) 氣象條件調查的主要內容為:平均溫度、溼度；年最高溫度、年最低溫度、溼度；歷年最高溫度、最低溫度、溼度；年最大降雨量、最小降雨量、平均降雨量；橋址處風環境等。調查方法主要參考當地氣象部門的資料，必要時進行現場測定。

- (3) 工作條件調查的主要內容為:交通狀況、橋梁是否處於風口處、構件是否易受雨水侵蝕、潮湧與泡濺情況、構件工作環境的溫、溼度,乾溼交替情況、周圍二氧化碳濃度、有無有害氣體、酸鹼度及凍融情況等,調查方法以查詢橋梁養護管理人員為主,必要時可進行現場測定。
- (4) 推薦橋梁所處環境條件影響的分級評定標準見表 3-4。

表 3- 4 推薦橋梁所處環境條件影響的分級評定標準

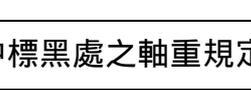
環境類別	環境條件		環境影響係數
可忽略	非常冷或寒冷地區的大氣環境,水或土壤無侵蝕性;乾燥環境;風環境	內陸乾旱地區	1.0
II 輕微	嚴寒地區的大氣環境:潮濕	不直接受日曬、雨淋或風蝕的構件:水下構件	1.05
III 中度	內陸潮濕氣候:乾濕交替	一般的環境,受日曬、雨淋或風蝕的構件;靠近地表受地下水影響的構件	1.10
IV 嚴重	酸雨或沿海環境:接觸除冰鹽構件	沿海鹽霧地區:酸雨或鹽鹼環境	1.15
V 惡劣	乾濕交替,有侵蝕性水、氣體或土壤;高度水飽和並受凍融循環	海水浪濺、潮差區	1.20

資料來源:參考文獻^[43]

3.5.2 重車流量因子

車輛超載將會造成橋梁發生材料疲勞等現象,或導致橋面版損壞。當通車的重車數量越多,對於橋梁所造成的震動次數增加,愈容易使結構產生裂縫,使得老劣化之情形加劇。為避免橋梁因重車流量過大而導致使用壽命降低,必須加入重車流量因子,以供日後橋梁管理維修之用。國內重車種類及軸重-總重規定標準如表 3-5。

表 3-5 國內重車種類及軸重-總重規定標準

類別	車型	說明	承重軸重 (公噸)	總重 (公噸)
單體大貨車		TS, 單-單軸	10	15
		TD, 單-雙軸	14.5	21
半聯結車		T3, 單-單-單軸	10	35
		T4, 單-單-雙軸	14.5	
		T5, 單-雙-雙軸	14.5	
全聯結車		F4, 單-單-雙軸	14.5	42
		F5, 單-雙-雙軸	14.5	

註：表中標黑處之軸重規定皆視最後軸（主要分析軸組型式）為主要承重軸

重車流量評定標準如下表 3-6。

表 3-6 重車流量評定標準

評定標準值	每日重車流量(輛)	橋梁損害的影響	車流影響係數	本研究建議係數	採用疊加建議係數
1	0 ~ 500	影響不顯著	1.0	1.0	0
2	500 ~1000	明顯發生損害	1.1	1.05	0.1
3	1000 ~1500	有影響	1.2	1.10	0.2
4	1500 ~2000	有較大影響	1.3	1.15	0.3
5	2000 以上	嚴重之損害	1.4	1.20	0.4

3.5.3 橋梁齡期因子

結構的使用壽命或耐久年限的定義為建築結構在正常使用和正常維護條件下，仍然具有其預定使用功能的時間。由於混凝土結構的性能退化過程是一個極其複雜的演化過程。不僅取決於結構本身，而且與結構所處環境有非常密切的關係，故在有些情況下，鋼筋鏽蝕並不十分嚴重，但卻發生了構件破壞現象；而有時鋼筋鏽蝕已出現明顯的斷面損失，卻未發生破壞，構件還在‘正常’使用。因此，並不存在一個規定不變的耐久性評估準則，為了能綜合考慮結構的經濟效益與社會效益、採用齡期因子來判定分類。橋梁齡期因子的評定標準如下表 3-7。

表 3-7 橋梁齡期因子的評定標準

評定標準值	K	齡期影響係數
1	$1 \leq K$	1.0
2	$0.75 \leq K < 1$	1.05
3	$0.5 \leq K < 0.75$	1.10
4	$0.25 \leq K < 0.5$	1.15
5	$K < 0.25$	1.20
註	$K = T1/T2$	T1=設計年限 T2=檢測時年限

資料來源:參考文獻^[43]

3.6 混凝土現況耐久性指標介紹

材料因子耐久性評估分為鋼筋腐蝕現況與混凝土現況兩大類，依序混凝土現況裡的各項耐久性指標介紹，如圖 3.4。

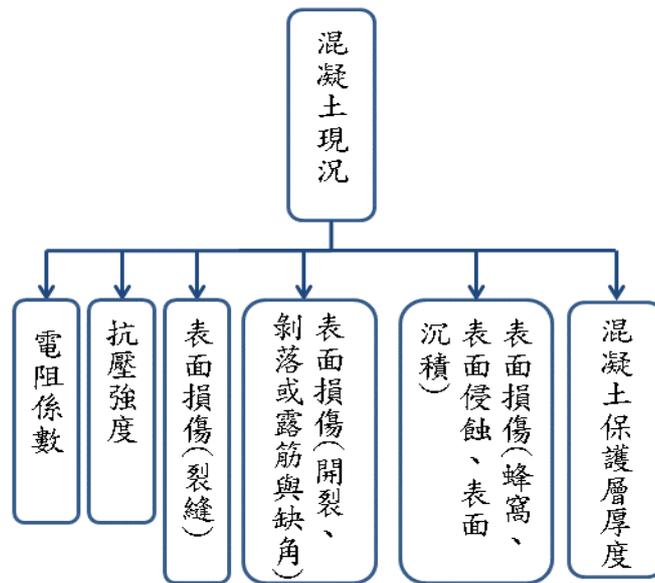


圖 3.3 混凝土現況耐久性指標

3.6.1 混凝土電阻率的檢測與評定

1. 混凝土電阻率的檢測方法

- (1) 混凝土的電阻率影響其導電性。混凝土電阻率大，若鋼筋發生鏽蝕，則發展速度慢，擴散能力弱；混凝土電阻率小，鏽蝕發展速度快，擴散能力強。因此對鋼筋狀況進行檢測評定，測量混凝土的電阻率是一項重要的內容。
- (2) 混凝土電阻率檢測測區，應根據鋼筋鏽蝕電位量測結果確定，對鋼筋鏽蝕電位測試結果表明鋼筋可能鏽蝕活化的區域，應進行混凝土電阻率測量。混凝土電阻率可採用四極式電阻測定，即在混凝土表面等間距接觸四支電極，兩外側電極為電流電極，兩內側電極為電壓電極，通過檢測兩電壓電極間的混凝土阻抗得知混凝土電阻率 ρ 。如圖 3.5 所示。

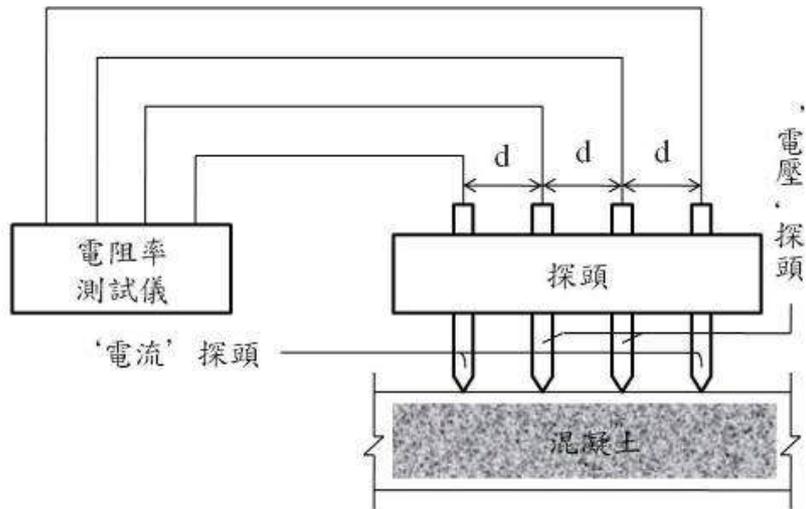


圖 3.4 混凝土電阻率測試技術示意圖

$$\rho = \frac{2\pi Vd}{I} \dots\dots\dots(3.1)$$

式中：V=電壓電極間所測電壓；

I=電流電極通過的電流；

d=電極間距。

2. 儀器檢查

在四個電極上分別接上三隻電阻，則儀器的顯示值為相應的電阻率值。例如：電阻值為 1k ，相應電阻率值為：2 d ×k .cm 。

3. 混凝土電阻率的測量

測區與測位布置可參照鋼筋鏽蝕自然電位測量的要求，在電位測量網格間進行，並且做好編號。混凝土表面應清潔、無油脂、無塵。為了提高量測的準確性，必要時可去掉表面碳化層。調節好電極的間距，一般採用的間距為 50mm。為了保證電極與混凝土表面有良好、連續的電接觸，應在電極前端塗上合劑，特別是當讀數不穩定時。測量時探頭應垂直置於混凝土表面，並施加適當的壓力。混凝土電阻率的評定標準如表 3-8。

表 3-8 混凝土電阻率的評定標準

評定標度值	電阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	鋼筋發生銹蝕可能的銹蝕速度
1	>20000	很慢
2	15000~20000	慢
3	10000~15000	一般
4	5000~10000	快
5	<5000	很快
備註	混凝土濕度對量測值有明顯影響，量測時構件應為自然狀態，否則不能使用此評判標準。	

資料來源:參考文獻^[43]

3.6.2 結構混凝土強度的檢測與評定

1. 結構混凝土強度檢測方法分類與要求

(1) 結構混凝土強度的檢測方法可分為非破壞檢測、半破壞檢測和破壞檢測。對於常用的反彈錘法測定混凝土強度方法作出規定，反彈錘如圖 3.6 所示。

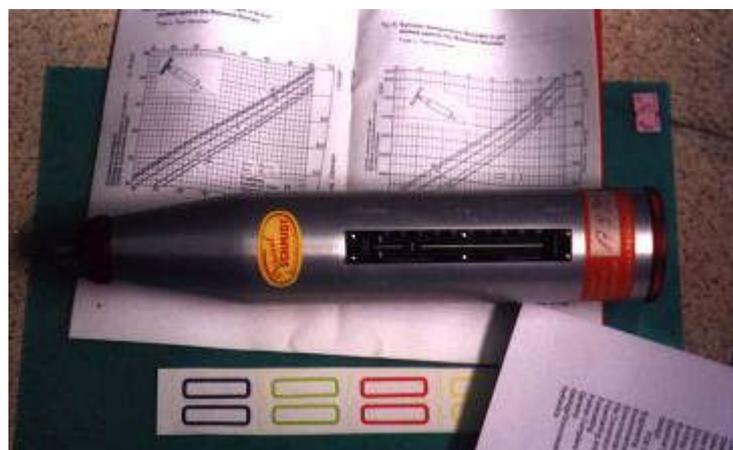


圖 3.5 反彈錘

- (2)為了突出混凝土橋梁結構的特殊性，混凝土強度檢測評定分為結構或構件的強度檢測評定與承重構件的主要受力部位的強度檢測評定。如主樑，根據具體檢測目的和檢測要求，選擇合適的方法進行檢測時，可對主樑整個構件進行檢測評定，也可對主樑跨中部位進行混凝土強度的檢測評定，但測區布置必須滿足本研究規定。
- (3)原則上對結構不採取破損檢測，但在其他方法不能準確評估結構(構件)或承重構件主要受力部位的混凝土強度時，應採用鑽心法結合其他方法綜合評定。在結構上鑽、截取試件時，應儘量選擇在承重構件的次要部位或次要承重構件上，應採取有效措施，確保結構安全。鑽、截取試件後，應及時進行修復或加固處理。

2. 反彈錘法檢測結構混凝土強度的方法

- (1) 對於被測混凝土橋梁結構或構件，當只有一個可測面時，可採用反彈錘法檢測其結構混凝土強度。
- (2) 下列情況下，不宜應用反彈錘法檢測結構混凝土強度：
- 遭受凍害、化學腐蝕、高溫損傷的混凝土。
 - 被測構件厚度小於 10cm。
 - 結構表面溫度低於 - 4 或高於 60 。
 - 碳化嚴重，表層與內部質量有明顯差異或其他內部存在缺陷的混凝土結構或構件。

3. 檢測技術

- (1) 一般規定
- 採用反彈錘法檢測結構或構件混凝土強度宜具有下列資料：
 - 工程名稱及設計、施工、監督和建設單位名稱。

- (b)結構或構件名稱、外形尺寸、數量及混凝土強度等級。
 - (c)水泥品種、強度等級、安定性、出產產名、砂、石品種、粒徑、混凝土配比等。
 - (d)模板類型、混凝土灌注和養護情況以及成型日期。
 - (e)檢測原因。
- b. 橋梁結構或構件混凝土強度檢測可採用下列兩種方式:
- (a)構件檢測:適用於單個結構或構件的檢測。
 - (b)部位檢測:適用於對結構或構件關鍵控制部位的檢測。
- c. 按構件方式檢測時,每一結構或構件的測區應符合下列規定:
- (a)每一結構或構件測區數不應少於 10 個。
 - (b)對某一方向尺寸小於 4.5m 且另一方向尺寸小於 0.3m 的構件,其測區數量可適當減少,但不可低於 6 個。
 - (c)相鄰兩測區の間距控制在 2m 以內。
 - (d)測區距構件端部或施工縫邊緣的距離不宜大於 0.5m,不宜小於 0.2m。
 - (e)測區面積不宜大於 0.04m^3 ,且應均勻分布。
 - (f)在構件的重要部位及薄弱部位必須布置測區,並應避開預埋件。
- d. 按部位檢測方式檢測時,每一部位的測區應符合下列規定:
- (a)每一部位的測區數不應少於 6 個。
 - (b)相鄰兩測區の間距應控制在 0.4m 以內。
 - (c)測區距構件端部或施工縫邊緣的距離不宜大於 0.4m,不宜小於 0.2m。

- (d) 測區面積不宜大於 0.04m^3 ，且應均勻分布，並應避開預埋件。
- e. 混凝土檢測面應清潔、平整，不應有疏鬆層、浮漿、油垢以及蜂窩、麻面，必要時可用砂輪清除疏鬆層和雜物，且不應有殘留的粉末或碎屑。
- f. 結構或構件的測區應標有清晰的編號，必要時應在記錄紙上描述測區布置和外觀質量情況。

(2) 回彈值的測量

- a. 檢測時，反彈錘的軸線應始終重直於混凝土檢測面，緩慢施壓，準確讀數，快速復位。
- b. 測點宜在測區範圍內均勻分布，相鄰兩測點的淨距不宜小於 20mm ；測點距外露鋼筋、預埋件的距離不宜小於 30mm 。測點不應在氣孔或外露石子上，同一測點只應彈擊一次。每一測區應記取 16 個回彈值，每一測點的回彈值讀數估讀至 1。

(3) 碳化深度值測量

- a. 回彈值測量完畢後，應在有代表性的位置測量碳化深度值，測點數不應少於測區數的 30%，取其平均值為該構件每測區的碳化深度值。
- b. 當碳化深度值級差大於 2.0mm ，應在每一測區量碳化深度值。
- c. 碳化深度值的測量方法，每一測孔測量值應不少於 3 個，取其平均值，每次讀數精確至 0.5mm 。

(4) 回彈值的計算

- a. 計算測區平均回彈值，應從該測區的 16 個回彈值中，分別剔除 3 個最大值和最小值，將餘下的 10 個回彈值按下列公式計算：

$$R_m = \sum_{j=1}^{10} R_j / 10 \dots\dots\dots(3.2)$$

式中： R_m --測區平均回彈值，精確至 0.1；

R_j --第 i 個測點的回彈值。

b. 非水平狀態檢測混凝土澆注側面時，應按下式進行修正：

$$R_a = R_{ma} + R_{aa} \dots\dots\dots(3.3)$$

式中： R_{ma} --非水平狀態檢測測區平均回彈值，精確至 0.1；

R_{aa} 非水平狀態檢測時回彈值修正值，按表 3-9 採用。

表 3-9 非水平狀態檢測時回彈值修正值

R_{ma} \ α	測試角度 α							
	$+90^\circ$	$+60^\circ$	$+45^\circ$	$+30^\circ$	-30°	-45°	-60°	-90°
20	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	+2.5	+3.0	+3.5	+4.0
30	-5.0	-4.0	-3.5	-2.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5
40	-4.0	-3.5	-3.0	-2.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0
50	-3.5	-3.0	-2.5	-1.5	+1.0	+1.5	+2.0	+2.5
備註	1.表中修正值可用內插法求得，精確至 0.1； 2.小於 20 或大於 50 時，均分別按 20 或 50 查表							

資料來源:參考文獻^[43]

c. 水平方向檢測混凝土澆注頂面或底面時，應按下列公式修正：

$$R_m = R_m^t + R_a^t \dots\dots\dots(3.4)$$

$$R_m = R_m^b + R_a^b \dots\dots\dots(3.5)$$

式中： R_m^t 、 R_m^b --水平方向檢測混凝土澆注表面、底面時，測區的平均回彈值，精確至 0.1；

R_a^t 、 R_a^b --混凝土澆注表面、底面回彈值修正值，可按表 3-10 採用。

表 3-10 混凝土澆注表面、底面回彈值的修正

R_{mi}	ΔR_s	
	混凝土澆注表面	混凝土澆注底面
20	+2.5	-3.0
25	+2.0	-2.5
30	+1.5	-2.0
35	+1.0	-1.5
40	+0.5	-1.0
45	0	-0.5
50	0	0
備註	1.表中修正值可用內插法求得，精確至 0.1； 2. R_{mi}^t 、 R_{mi}^b 小於 20 或大於 50 時，均分別按 20 或 50 查表 3.混凝土澆注表面為一般原漿抹面； 4.表列修正值為底面和側面採用同一類模板在正常澆注情況下的修正值	

資料來源:參考文獻^[43]

- d. 檢測時，如反彈錘處於非水平狀態，同時混凝土檢測面又不是混凝土的澆注測面，則應對測得測區平均回彈值，先進行角度修正，再進行不同澆注面的修正。

(5) 強度曲線

- a. 混凝土強度換算值，一般可採用以下三類測強曲線計算：
- (a)統一測強曲線:由全國有代表性的材料、成型養護工藝配製的混凝土試件，通過試驗所建立的曲線。
 - (b)地區測強曲線:由本地區常用的材料、成型養護工藝配製的混凝土試件、通過試驗所建立的曲線。
 - (c)專用測強曲線:由於結構或構件混凝土相同的材料、成型養護工藝配製的混凝土試件，通過試驗所建立的曲線。

- b. 檢測時，應按專用測強曲線、地區測強曲線、統一測強曲線的次序，選用測強曲線
- c. 統一測強曲線的表達式為：

$$f_{cu,j}^c = 0.250 \cdot R^{2.108} \cdot 10^{-0.0358d_{mj}} \dots\dots\dots (3.6)$$

式中： $f_{cu,j}^c$ 測區混凝土換算強度值，精確至 0.1MPa；

R_{mj} --測區經修正後的平均回彈值，精確至 0.1；

d_{mj} --測區平均碳化深度，精確至 0.5mm。 $d_{mj} < 0.5\text{mm}$ 時，按無碳化處理； $d_{mj} \geq 6\text{mm}$ 時，按 $d_{mj} = 6\text{mm}$ 計算。

- d. 統一測強曲線的平均相對誤差

(δ)為±14.0%，相對標準差(e_r)為±17.0%。

- e. 當有下列情況之一時，測區混凝土強度值不得使用統一測強曲線換算：

- (a)粗粒料最大粒徑大於 60mm。
- (b)特種成型工藝製作的混凝土。
- (c)檢測部位曲率半徑小於 250mm。
- (d)潮濕或浸水混凝土。

- f. 當構件混凝土抗壓強度大於 60MPa 時，可採用標準能量大於 2.207J 的混凝土反彈儀，並應另行制訂檢測方法及專用測強曲線進行檢測。

(6) 混凝土強度的計算

- a. 當有地區測強曲線或專用測強曲線時，混凝土強度換算值應

按地區測強曲線或專用測強曲線換算得出。

- b. 對於泵送混凝土，當碳化深度值不大於 2.0mm 時，每一測區混凝土強度換算值應按表 3-11 進行修正。

表 3-11 泵送混凝土測區混凝土強度換算值的修正值

碳化值深度	抗壓強度值(MPa)				
	0.0;0.5;1.0	f_{cu}^c (MPa)	≤ 40.0	45.0	50.0
k(MPa)		+4.5	+3.0	+1.5	0.0
1.5;2.0	f_{cu}^c (MPa)	≤ 30.0	35.0	40.0~60.0	-
	k(MPa)	+3.0	+1.5	0.0	-
備註	表中未列入的 f_{cu}^c (MPa) 值可用內插法求得其修正值,精確至 0.1MPa				

資料來源:參考文獻^[43]

- c. 結構或構件或關鍵控制部位的測區混凝土換算強度平均值，可根據各測區的混凝土強度換算值計算。當測區數為 10 個及以上時，應計算強度標準差。平均值及標準差應按下列公式計算：

$$m_{f_{cu}^c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m f_{cu,j}^c \dots\dots\dots(3.7)$$

$$S_{f_{cu}^c} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (f_{cu,j}^c)^2 - n(m_{f_{cu}^c})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(3.8)$$

式中: $m_{f_{cu}^c}$ --結構或構件測區混凝土強度換算值的平均值，精確至 0.1MPa；

n --結構或構件或關鍵控制部位的測區數；

$S_{f_{cu}^c}$ --測區混凝土換算強度值的標準差，精確至 0.1MPa。

- a. 結構或構件或關鍵部位的混凝土強度推定值 f_{cu} 應按下列

公式確定：

(a)當該結構或構件測區數少於 10 個時:

$$f_{cu,e}^c = f_{cu,min}^c \dots\dots\dots(3.9)$$

式中: $f_{cu,min}^c$ --結構或構件中或關鍵控制部位最小的測區混凝土換算強度值。

(b)當該結構或構件的測區強度值中出現小於 10.0MPa 時:

$$f_{cu,e}^c = 10.0MPa \dots\dots\dots(3.10)$$

(c)當該結構或構件測區數不少於 10 個時，應按下列公式計算：

$$f_{cu,e}^c = m_{f_{cu}^c} - 1.645S_{f_{cu}^c} \dots\dots\dots(3.11)$$

(d)當結構或構件或關鍵控制部位的測區數大於 10 個時，但測區混凝土強度換算值標準差過大(當混凝土強度等級低於或等於 C30 時， $S_{f_{cu}^c} > 4.0MPa$ ；當混凝土強度等級高於 C30 時， $S_{f_{cu}^c} > 5.0MPa$)時，則其混凝土強度推定值 $f_{cu,e}^c$ 可按下式計算:

$$f_{cu,e}^c = f_{cu,min}^c \dots\dots\dots(3.12)$$

(e)結構或構件的混凝土強度推定值是指相應於強度換算值總體分布中保證率不低於 95%的結構或構件或關鍵部位中的混凝土抗壓強度值。

4. 結構混凝土現場檢測強度的評定標準

(1) 結構混凝土強度，應在結構承重構件或其主要受力部位布置測區。

(2) 對混凝土橋梁結構，應根據每一承重構件或其主要受力部位的實測強度推定值和測區平均換算強度值，按下式計算其推定強度均質係數 K_{bt} 和平均強度均質係數 K_{bm} ，並可按表 3-12 對其強度狀態做出評定。

表 3-12 結構混凝土現場檢測強度的評定標準

評定標度值	K_{bt}	K_{bm}	強度狀態
1	0.95	1.00	良好
2	$0.95 > K_{bt} \geq 0.90$	0.95	較好
3	$0.90 > K_{bt} \geq 0.80$	0.90	較差
4	$0.80 > K_{bt} \geq 0.70$	0.85	差
5	< 0.70	< 0.85	很差
註	<p>(1) $K_{bt} = \frac{R_{it}}{R}$</p> <p>式中: K_{bt} = 平均強度係數; R_{it} = 承重構件或主要受力部位混凝土的實測強度 R = 承重構件混凝土極限抗壓強度</p> <p>(2) $K_{bm} = \frac{R_{im}}{R}$</p> <p>式中: K_{bm} = 平均強度係數; R_{im} = 承重構件或主要受力部位測區平均換算強度值</p>		

資料來源:參考文獻^[43]

3.6.3 表面損傷的檢測與評定

1. 混凝土橋梁結構構件表面損傷分類

混凝土橋梁結構構件的表面損傷總體上可分為如下三類:一是裂縫，包括非結構受力裂縫和結構受力裂縫；二是層離、剝落或露筋及掉棱或缺角；三是蜂窩麻面、表面侵蝕及表面沉積等。

2. 混凝土橋梁結構構件表面損傷的損傷度指標

混凝土橋梁結構構件表面損傷的損傷度指標如表 3-13 所例。

表 3-13 公路混凝土橋梁結構構件表面損傷的損傷度指標體

表觀損傷類型		損傷度指標
裂縫	非結構受力裂縫	(1)裂縫最大寬度； (2)開裂區域面積 A_i 占其所在構件表面面積 A_{pi} 的比值 V ，即 $V = A_i / A_{pi}$
	結構受力裂縫	(1)裂縫長度或高度； (2)受力鋼筋處的裂縫寬度； (3)裂縫的最小與平均間距
層離、剝落或露筋、掉棱或缺角		<p>累計損傷面積 $\sum A_i$ 占構件外露表面積 (A_p) 的比值 α，即 $\alpha = \frac{\sum A_i}{A_p}$；</p> <p>由於損傷引起的構件截面積最大損失率 δ，</p> $\delta = 1 - \frac{A_{pmin}}{A}$ <p>式中：A_{pmin} = 扣除損傷影響後的構件最小有效截面面積； A = 構件初始截面面積</p>
蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積		<p>累計損傷面積 $\sum A_i$ 占構件外露表面積 (A_p) 的比值 α，即 $\alpha = \frac{\sum A_i}{A_p}$；</p>

資料來源:參考文獻^[43]

3. 混凝土橋梁結構構件表面損傷檢測

裂縫檢測的主要內容為:裂縫的形態；裂縫分布情況；裂縫周圍有無鏽跡、鏽蝕產物和凝膠泌出物；裂縫的寬度、長度和間距等。檢測方法以目視檢查為主，輔以刻度放大鏡(最小分辨率不得大於 0.05mm)量測。用鋼捲尺(最小分辨率不得大於 1.0mm)測量裂縫的長度和間距。

在進行裂縫檢測時，應注意查明裂縫發生的時間和原因，並判斷裂縫是否趨於穩定，對尚未穩定的裂縫可用千分表、引伸儀等監測裂縫寬度和長度的發展情況，監測時間以 6~12 個月為宜。

對層離、剝落或露筋、掉棱或缺角、蜂窩麻面、表面侵蝕及表面沉積等表面損傷的檢測，主要檢測面積和深度，檢測方法為人力

目測、輔助鋼尺測量和錘擊檢查。

在進行表面損傷檢測時，應檢查寬度超過 0.05mm 的裂縫以及大小超過 20mm 的其他表面損傷。

裂縫檢測結果的描述應注意如實反映裂縫的形態、分布情況和裂縫周邊混凝土表面狀況，盡可能採用圖形和照相進行表面損傷的描述，對所有的表面損傷均應有詳盡的文字描述。

4. 表面損傷的分級評定

對混凝土橋梁結構構件的表面損傷，可根據表面損傷程度(大小、多少或輕重)、表面損傷對結構使用功能的影響程度(無、小、大)和表面損傷發展變化狀況(趨向穩定、發展緩慢、發展較快)等三個方面，以累加評分的方法作出等級評定。具體評定方法見表 3-14。而相關類型之橋梁表面損傷裂縫分級評定標準見表 3-15~3-20 所示。

表 3-14 混凝土橋梁結構構件表面損傷的分級評定方法表

表觀損傷程度及標度		組合評定標度					
		程度	小→大 少→多 輕度→嚴重				
			標度	0	1	2	
表觀損傷對結構使用功能的影響程度	無、不重要	0	0	1	2		
	小、次要	+1	1	2	3		
	大、重要	+2	2	3	4		
以上兩項評定組合標度			0	1	2	3	4
表觀損傷發展變化狀況的修正	趨向穩定	-1	0	1	2	3	
	發展緩慢	0	1	2	3	4	
	發展較快	+1	1	2	3	4	5
最終評定結果			1	2	3	4	5
結構構件表觀技術狀況			良好	較好	較差	差的	很差

資料來源:參考文獻^[43]

(1) 鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫按表 3-15 分級標準進行評定。

表 3-15 鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準

評定標度值	分級標準		
	裂縫最大寬度(mm)	裂縫部位	裂縫形態與分布
1	≤0.10	次要受力部位	少量短細裂縫
	無	主要受力部位或預應力筋部位	無裂縫
2	≤0.15	次要受力部位	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的3%以下
	≤0.05	主要受力部位或預應力筋部位	少量短細裂縫
3	≤0.20	次要受力部位	出現較多的短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以下
	≤0.10	主要受力部位或預應力筋部位	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的3%以下
4	≤0.25	次要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以下；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
	≤0.15	主要受力部位或預應力筋部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以下
5	>0.25	次要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以上；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
	>0.15	主要受力部位或預應力筋部位	出現網狀裂縫或出現沿預應力筋方向的裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以上
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用		

資料來源:參考文獻^[43]

(2) 預力鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫按表 3-16 分級標準進行評定。

表 3- 16 預力鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準

資料來源:參考文獻[43]

(1) 鋼筋混凝土構件結構受力裂縫按表 3-17 分級標準。

表 3- 17 鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準表

評定標度值	分級標準			
	裂縫部位	裂縫長度或高度	受力鋼筋處裂縫寬度(mm)	裂縫的最小與平均間距(cm)
1	次要受力部位	縱向長度小於構件長度1/6，或高度不足截面尺寸1/3	≤ 0.10	≥ 50cm
	主要受力部位		≤ 0.05	
2	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/6~1/4，或高度介於截面尺寸1/3~1/2	≤ 0.15	≥ 30cm
	主要受力部位		≤ 0.10	
3	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/4~1/3，或高度介於截面尺寸1/2~2/3	≤ 0.20	≥ 20cm
	主要受力部位		≤ 0.15	
4	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/3~1/2，或高度大於截面尺寸2/3	≤ 0.25	< 20cm
	主要受力部位		≤ 0.20	
5	次要受力部位	縱向長度大於構件長度1/2，或裂縫基本貫穿	> 0.30	開裂嚴重，裂縫與受力鋼筋方向、間距重合，縫口有銹跡
	主要受力部位		> 0.25	
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用			

資料來源:參考文獻^[43]

(2) 預力鋼筋混凝土構件結構受力裂縫按表 3-18 分級標準進行評定。

表 3-18 預力鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準

評定標度值	分級標準			
	裂縫部位	裂縫長度或高度	受力鋼筋處裂縫寬度(mm)	裂縫的最小與平均間距(cm)
1	次要受力部位	縱向長度小於構件長度1/6，或高度不足截面尺寸1/4	≤0.05	≥50cm
	主要受力部位		無	
2	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/6~1/4，或高度介於截面尺寸1/4~1/3	≤0.10	≥30cm
	主要受力部位		無	
3	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/4~1/3，或高度介於截面尺寸1/3~1/2	≤0.15	≥20cm
	主要受力部位		無	
4	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/3~1/2，或高度大於截面尺寸1/2~2/3	≤0.20	<20cm
	主要受力部位		≤0.10	
5	次要受力部位	縱向長度大於構件長度1/2，或高度大於截面尺寸2/3，裂縫基本貫穿	>0.20	開裂嚴重，裂縫與受力鋼筋方向、間距重合
	主要受力部位		>0.10	
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用			

資料來源:參考文獻^[43]

(3) 鋼筋混凝土結構構件表面損傷(除裂縫)按表 3-19 分級標準進行判定。

表 3-19 鋼筋混凝土結構構件表面損傷(除裂縫)分級評定標準

評定標度值	分級標準	
	缺陷部位	缺陷類型： 層離、剝落或露筋、掉棱或缺角 蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積
1	主要受力部位	構件外觀基本完好
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的3%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於5%
2	主要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的6%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於10%
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的10%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於15%
3	主要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的15%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於20%
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的10%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於15%
4	主要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的15%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於20%
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的15%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於20%
5	主要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的15%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於20%
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的15%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於20%

資料來源:參考文獻^[43]

(4) 預力鋼筋混凝土結構構件非表面損傷(除裂縫)按表 3-20 分級標準進行評定。

表 3-20 預力鋼筋混凝土構件表面損傷(除裂縫)分級評定標準表

評定標度值	分級標準	
	缺陷部位	缺陷類型： 層離、剝落或露筋、掉棱或缺角 蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積
1	主要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的3%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於5%
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的6%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於10%
2	主要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的10%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於15%
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的15%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於20%
3	主要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的15%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於25%
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的20%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於30%
4	主要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的15%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於20%
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的20%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於25%
5	主要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的20%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於25%
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的25%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於30%

資料來源:參考文獻^[43]

3.7 鋼筋腐蝕現況耐久性指標介紹

材料因子耐久性評估分為鋼筋腐蝕現況與混凝土現況兩大類，首先依序鋼筋腐蝕現況裡的各項耐久性指標介紹，如圖 3.9。

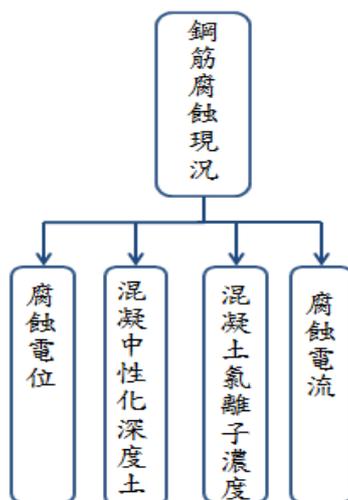


圖 3.6 腐蝕現況耐久性指標

3.7.1 鋼筋腐蝕電位的檢測與判定

本方法主要針對半電池電位法檢測混凝土中鋼筋鏽蝕狀況的原理，規定儀器的使用方法、檢測方法和判定標準的應用方法。

1. 鋼筋鏽蝕狀況檢測範圍，應為主要承重構件或承重構件的主要受力部位，或根據一般檢查結果有跡象表明鋼筋可能存在鏽蝕的部位。
2. 本方法用於評定混凝土中鋼筋的鏽蝕活化程度。提出的判定標準針對特殊環境如海水濺浪區、處於鹽霧中的混凝土結構等，不具有普遍適用性。

3. 應用

- (1) 本方法用於估測正在使用的現場和實驗室硬化混凝土中無鍍層鋼筋的半電池電位，測試與這些鋼筋的尺寸和埋在混凝土中的深度無關。
- (2) 本方法可以在混凝土構件使用壽命中的任何時期使用。
- (3) 已經乾燥到絕緣狀態的混凝土或已發生脫空層離的混凝土表面，測試時不能提供穩定的電迴路，不適用本方法。

- (4) 電位的測量應由有經驗的、從事結構檢測的工程師或相關技術專家檢測並解試，除了半電池電位測試之外，有必要使用其他數據，如氯離子含量、碳化深度、層離狀況、混凝土電阻率和所處環境調查等，以形成關於鋼筋腐蝕活動及其對結構使用壽命可能產生的影響。

4. 測試原理

半電池電位法是利用混凝土中鋼筋鏽蝕的電化學反應引起的電位變化來測定鋼筋鏽蝕狀態的一種方法。通過測定鋼筋/混凝土半電池電極與在混凝土表面的銅/硫酸銅參考電極之間的電位差的大小，評定混凝土中鋼筋的鏽蝕活化程度。

5. 測量裝置

(1) 參考電極(半電池)

- a. 本方法參考電極為銅/硫酸銅半電池。它由一根不與銅或硫酸銅發生化學反應的剛性有機玻璃管、一只通過毛細作用保持濕潤的多孔塞、一個處在剛性管裡飽和硫酸銅溶液中的紫銅棒構成，如圖 3.10 所示。
- b. 銅/硫酸銅參考電極溫度係數為 $0.9\text{mV} / \text{ }^\circ\text{C}$ 。

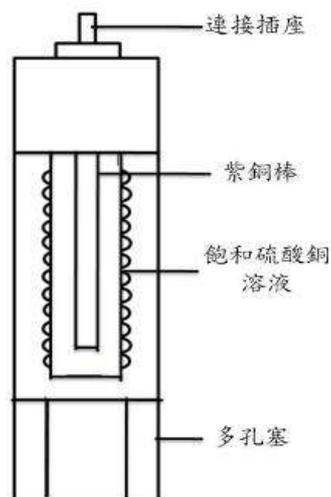


圖 3.7 銅/硫酸銅參考電極結構圖

(2) 二次儀表的技術性能要求:

- a. 測量範圍大於 1V。
- b. 準確度優於 $0.5\% \pm 1\text{mV}$ 。
- c. 輸入電阻大於 $10^{10}\Omega$ 。
- d. 儀器使用環境條件: 環境溫度 $0 \sim +40$; 相對濕度 95% 。

(3) 導線總長不應超過 150m, 一般選擇截面積大於 0.75mm^2 的導線, 以使在測試迴路中產生的電壓降不超過 0.1mV。

(4) 接觸液為使銅/硫酸銅電極與混凝土表面有較好的電接觸, 可在水中加適量的家用液態洗滌劑對被測表面進行濕潤, 減少接觸電阻與電路電阻。

(5) 在使用接觸液後仍然無法得到穩定的電位差時, 應分析是否為電迴路的電阻過大或是附近存在與橋梁連通的大地波動電流, 在以上情況下, 不應使用半電池電位法。

6. 測試方法

(1) 測區的選擇與測點布置

- a. 鋼筋鏽蝕狀況檢測範圍應為主要承重構件或承重構件的主要受力部位, 或根據一般檢查結果有跡象表明鋼筋可能存在鏽蝕的部位, 但測區不應有明顯的鏽蝕脹裂、脫空或層離現象。

在測區上布置測試網格, 網格結點為測點, 網格間距可選 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 、 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 、 $20\text{cm} \times 10\text{cm}$ 等, 根據構件尺寸而定, 測點位置距構件邊緣應大於 5cm, 一般不宜少於 20 個測點。

- b. 當一個測區內存在相鄰測點的讀數超過 150mV, 通常應減小測點的間距。
- c. 測區應統一編號, 註明位置, 並描述外觀情況。

(2) 混凝土表面處理

用鋼絲刷、砂紙打磨測區混凝土表面，去除塗料、浮漿等，並用接觸液將表面潤濕。

(3) 二次儀表與鋼筋的電連接

- a. 現場檢測時，銅/硫酸銅電極一般接二次儀表的正輸入端，鋼筋接二次儀表的負輸入端。
- b. 局部打開混凝土或選擇裸露的鋼筋，在鋼筋上鑽一小孔並擰上自攻螺釘，用加壓型鱷魚夾夾住並濕潤，確保有良好的電連接。若在遠離鋼筋連接點的測區進行測量，必須用萬用表檢查內部鋼筋的連續性，如不連續，應重新進行鋼筋的連接。
- c. 銅/硫酸銅參考電極與測點的接觸 測量前應預先將電極前端多孔塞充分浸濕，以保證良好的導電性，正式測讀前應再次用噴霧器將混凝土表面潤濕，但應注意被測表面不應存在游離水。連接方法如圖 3.11。

(4) 銅/硫酸銅電極的準備

飽和硫酸銅溶液由硫酸銅晶體溶解在蒸餾水中製成。當有多餘的未溶解硫酸銅結晶體沉積在溶液底部時，可以認為該溶液是飽和的。電極銅棒應清潔，無明顯缺陷，否則需用稀釋鹽酸溶液清潔銅棒，並用蒸餾水徹底沖淨。硫酸銅溶液應注意更換，保持清潔，溶液應充滿電極，以保證電連接。

(5) 測量值的收集

測點讀數變動不超過 2mV，可視為穩定。在同一測點，同一支參考電極，重複測讀的差異不超過 10mV；不同的參考電極重複測讀的差異不超過 20mV。若不符合讀數穩定要求，應檢查測試系統的各個環節。

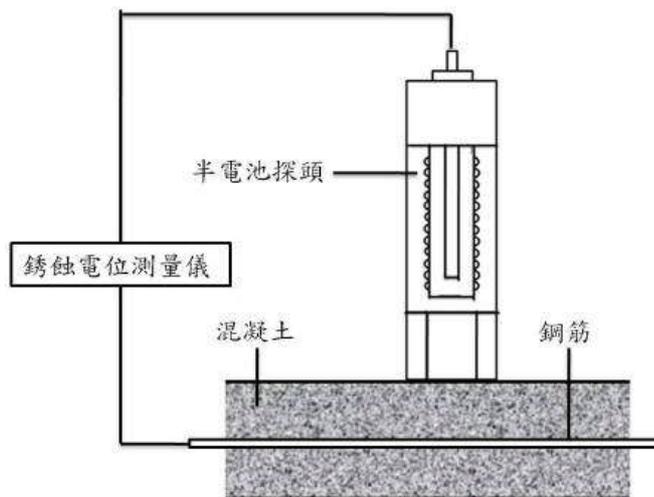


圖 3.8 測試系統簡圖

(6) 影響測量準確度的因素及修正

- a. 混凝土含水量對測值得影響較大，測量時構件應處在自然乾燥狀態。
- b. 為提高現場評定鋼筋狀態的可靠度，一般要進行現場比較性試驗。現場比較性試驗通常按已暴露鋼筋的鏽蝕程度不同，在他們的周圍分別測出相應的鏽蝕電位，比較這些鋼筋的鏽蝕程度和相應測值的對應關係，提高評判的可靠度，但不能與有明顯鏽蝕、脹裂、脫空、層離現象的區域比較。
- c. 若環境溫度在 22 ± 5 範圍之外，對應銅/硫酸銅電極做溫度修正。
- d. 各種外界因素產生的波動電流對測量值影響較大，特別是靠近地面的測區，因此應避免各種電、磁場的干擾。
- e. 混凝土保護層電阻對測量值有一定影響，除測區表面處理要符合規定外，儀器的輸入阻抗要符合技術要求。

7. 鋼筋腐蝕電位的判定標準

- (1) 在對已處理的數據(已進行溫度修正)進行判讀之前，按慣例將這些數據加以負號，繪製等電位圖，然後進行判讀。

(2)按照表 3-23 的規定判斷混凝土中鋼筋發生鏽蝕的概率或鋼筋正在發生鏽蝕的鏽蝕活化程度係數 T_c 。

表 3-21 結構混凝土中鋼筋鏽蝕電位的判定標準

評定標度值	序號	電位水平(mV)	鋼筋狀態
1	1	0 ~ -200	無鏽蝕活動或鏽蝕活動性不確定
2	2	-200 ~ -300	有鏽蝕活動性，但鏽蝕狀態不確定，可能抗蝕
3	3	-300 ~ -400	鏽蝕活動性較強，發生鏽蝕概率大於 90%
4	4	-400 ~ -500	鏽蝕活動性強，嚴重鏽蝕可能性極大
5	5	< -500	構件存在鏽蝕開裂區域
備註	(1) 表中電位水平為採用銅-硫酸銅電極時的測量值 (2) 混凝土濕度對量測值有明顯影響，量測時構件應為自然狀態，否則用此評定標準誤差較大。		

資料來源:參考文獻^[43]

3.7.2 結構混凝土碳化深度的檢測與評定

1. 檢測方法

- (1)鋼筋鏽蝕電位測試結果得知鋼筋可能發生鏽蝕的區域，應進行混凝土碳化深度測量。
- (2)混凝土碳化狀況的檢測通常採用在混凝土新鮮斷面噴灑酸鹼指示劑，通過觀察酸鹼指示劑顏色變化來確定混凝土的碳化深度。

2. 檢測步驟

- (1)選擇測區位置可參照鋼筋鏽蝕自然電位測試的要求，若在同一測區，應先進行保護層和鏽蝕電位、電阻率的測量，在進行碳化深度及氯離子含量的測量。
- (2)測區及測孔布置
 - a.測區應包含鏽蝕電位測量結果有代表性的區域，也能反應不同條件及不同混凝土質量的部位，結構外側面應布置測區。
 - b.測區數不應小於 3 個，測區應均勻布置。

- c.測孔距構件邊角的距離應大於 2.5 倍保護層厚度。
 - d.每一測區應布置三個測孔，孔距根據構件尺寸大小確定，但應大於 2 倍孔徑。
- (1)使用酸鹼指示劑噴在混凝土的新鮮破損面，根據指示劑顏色的變化，測量混凝土的碳化深度，量測值準確至毫米。
- a.配置指示劑(酚酞試劑):75%的酒精溶液與白色酚酞粉末配置成酚酞濃度為 1%~2%的酚酞溶劑，裝入噴霧器備用，溶劑應為無色透明的液體。
 - b.用裝有 20mm 直徑直徑鑽頭的衝擊鑽在測點位置鑽孔。
 - c.成孔後用圓形毛刷將孔中碎屑、粉末清除，露出混凝土新。
 - d.將酚酞指示劑噴在測孔壁上。
 - e.待酚酞指示劑變色後，用捲尺測量混凝土表面至酚酞變色交界處的深度，準確至 1mm。酚酞指示劑從無色變為紫色時，代表混凝土未碳化，酚酞指示劑未改變顏色處的混凝土已經碳化。
 - d.將測區、測孔統一編號，並畫出示意圖，標上測量結果。
 - e.測量值的整理應標列出最大、小值和平均值。

3. 評定標準

混凝土碳化深度對鋼筋鏽蝕影響的評定，可取構件的碳化深度平均值與該類構件保護層厚度平均值之比，並考慮其離散情況，參考表 3-24 對單個構件進行評定。

表 3- 22 混凝土碳化深度的評定標準

評定標度值	1	2	3	4	5
碳化層深度/保護層厚度	<1 ^{*1}	<1	=1	>1	>1 ^{*2}
備註	1. ^{*1} 構件全部實測比值均小於 1； 2. ^{*2} 構件全部實測比值均大於 1； 3. 宜分構件逐一進行評定				

資料來源:參考文獻^[43]

3.7.3 結構混凝土中氯離子含量的測定與評判

1. 測定方法

- (1) 混凝土中氯離子可引起並加速鋼筋的鏽蝕。氯離子含量的測定方法主要有兩種:試驗室化學分析法和滴定條法(Quanta-Strips)。滴定條法可在現場完成氯離子含量的測定。
- (2) 混凝土中的氯離子含量,可採用現場按混凝土不同深度取樣,測定結果須能反應氯離子在混凝土中隨深度的分布,根據鋼筋處的混凝土氯離子含量判斷引起鋼筋鏽蝕的危險性。
- (3) 氯離子含量測定,應根據構件的工作環境條件及構件本身的質量狀況確定測區,測區應能代表不同工作條件及不同混凝土質量的部位,測區宜參考鋼筋鏽蝕電位測量結果確定。

2. 取樣

- (1) 混凝土粉末分析樣品的取樣部位和數量
 - a. 分析樣品的取樣部位可參照鋼筋鏽蝕電位測試測區布置原則確定。
 - b. 測區的數量應根據鋼筋鏽蝕電位檢測結果以及結構的工作環境條件 確定。在電位水平不同的部位、工作環境條件、質量狀況有明顯差異的部位布置測區。
 - c. 每一測區取粉的鑽孔數量不宜少於 3 個,取粉孔可與碳化深度測量孔合併使用。
 - d. 測區、測孔應統一編號。
- (2) 取樣方法
 - a. 使用直徑 20mm 以上的衝擊鑽在混凝土表面鑽孔,鑽孔前應先確定鋼筋位置。
 - b. 鑽孔取粉應分層收集,一般深度間隔可取 3mm、5mm、10mm、

15mm、20mm、25mm、50mm 等。若需指定深度處的鋼筋周圍氯離子含量，取粉間隔可進行調整。

- c. 鑽孔深度使用附在鑽頭側面的標尺杆控制。
- d. 用一硬塑料管和塑料袋收集粉末，如圖 3.12，對每一個深度應使用一個新的塑料袋收集粉末，每次收集後，鑽頭、硬塑料管及鑽孔內都應用毛刷將殘留粉末清理乾淨，以免不同深度粉末混染。
- e. 同一測區不同孔相同深度的粉末可收集在一個塑料袋內，重量不應少於 25g，若量不夠，可增加同一測區測孔數量。不同測區測孔相同深度的粉末不應混合在一起。
- f. 收集粉末後，塑料袋應立即封口保存，註明測區、測孔編號及深度。

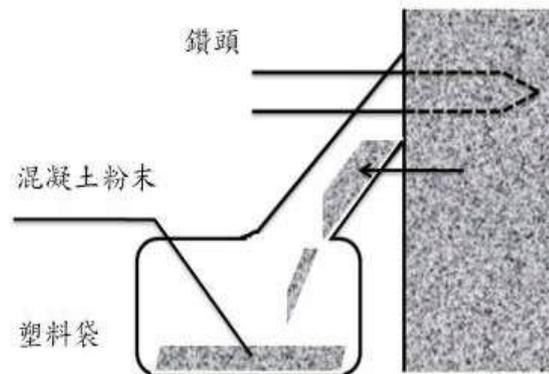


圖 3.9 鑽孔取混凝土粉末的方法

(3) 滴定法

分析步驟:

- a. 將收集的樣品過篩，除去其中較大的顆粒。
- b. 將樣品至於 105 ± 5 烘箱內烘 2 小時，冷卻至室溫。
- c. 取 5g 樣品粉末(準確度優於 $\pm 0.1g$)放入燒杯中。
- d. 緩慢加入 50ml(1.0mol)HNO₃，並徹底攪拌直至嘶嘶聲停止。

- e.用石蕊試紙檢查溶液是否呈酸性(石蕊試紙變紅)，如果不呈酸性，再加入適量硝酸。
- f.加入約 5g 無水碳酸鈉(Na_2CO_3)。
- g.用石蕊試紙檢查溶液是否呈中性(石蕊試紙不變)，否則再加入少量無水碳酸鈉直至容易呈中性。
- h.用過濾紙做一錐斗加入液體。
- i.當純淨的溶液滲入錐頭後，把滴定條插入液體中。
- j.待到滴定條頂端水平黃色細條轉變成藍色，取出滴定條並順著由下至下的方向將其擦乾。
- k.讀取滴定條顏色變化處的最高值，在該批滴定條表中查出所對應的氯離子含量值，此值是以百萬分之幾(ppm)表示的。

(4) 氯離子含量檢測

本氯離子濃度之量測採電位滴定儀。電位滴定儀測精度達 10ppm，且可由電腦連線紀錄試驗資料。主要藉由電極量測滴定過程中氯離子的氧化電位，當電位突然巨幅變化時，此為滴定終點(equivalence point,EP)，氯離子滴定儀如圖 3.13 所示。



圖 3.10 離子滴定儀

3. 氯離子含量的評判標準

- (1) 氯化物浸入混凝土引起鋼筋的鏽蝕，其鏽蝕危險性受到多種因素的影響，如碳化深度、混凝土含水量、混凝土質量等，因此應進行綜合的分析。
- (2) 根據每一取樣層氯離子含量的測定值，做出氯離子含量的深度分部曲線，判斷氯化物是混凝土生成時已有的，還是結構使用過程中由外界滲入的以及浸入的。
- (3) 混凝土中的氯離子含量可按表 3-25 的評判標準確定其引起鋼筋鏽蝕的可能性。

表 3- 23 結構混凝土中氯離子含量的評判標準

評定標度值	1	2	3	4	5
氯離子含量 (占水泥含量的百分比)	< 0.15	0.15~0.4	0.4~0.7	0.7~1.0	> 1.0
誘發鋼筋鏽蝕的可能性	很小	不確定	有可能誘發鋼筋鏽蝕	會誘發鋼筋鏽蝕	鋼筋鏽蝕活化

資料來源:參考文獻^[43]

3.7.4 鋼筋鏽蝕電流的檢測與判定

1. 鋼筋腐蝕偵測特色與適用範圍

腐蝕量測儀 GPM-5000 應用於混凝土結構內鋼筋的腐蝕電位、腐蝕電流及電阻之評估。測得鋼筋之腐蝕電位(平衡電位)後，然後使用一固定電流從輔助電極流向鋼筋(工作電極)，使整個系統構成一個迴路，進而求得待測鋼筋之腐蝕電位與腐蝕速率以及電極與鋼筋間混凝土的電阻，如圖 3.14。

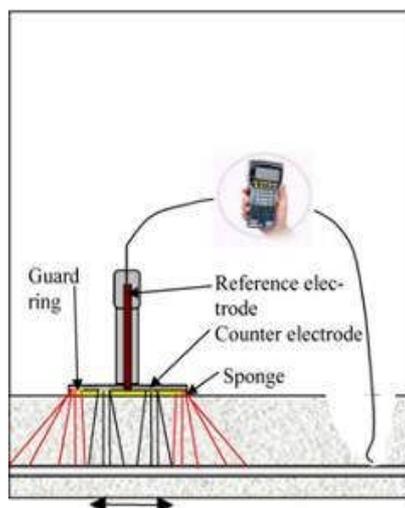


圖 3.11 利用 GalvaPulse 測量地區的示意圖

2. 測定方法

- (1) 開始量測以前，先將 GPM 儀器前端海綿浸濕，即可開始量測開路電位、腐蝕速率及電阻。
- (2) 應用機理為通以一固定電流，通常在 5 到 400 mA 的範圍內，持續約 10 秒。
- (3) 將實驗數據平均出圖繪製成電壓與電流的關係圖，並將 GP-5000 數據存入於電腦工作端中，以求出腐蝕電位(E_{corr})及腐蝕電流(I_{corr})，並繪出其區塊腐蝕程度示意圖。

鋼筋鏽蝕電流的判定標準如表 3-26。

表 3-24 鋼筋鏽蝕電流的判定標準

評定標度值	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Corrosion rate (mpy)	腐蝕程度
1	< 0.5	<0.23	忽略
2	0.5 - 5	0.23 - 2.3	低
3	5 - 10	2.3 - 4.6	中
4	10 - 15	4.6 - 6.9	高
5	> 15	>6.9	嚴重

資料來源：參考文獻^[43]

3.7.5 混凝土中鋼筋分布及保護層厚度檢測與評定

1. 檢測目的

採用電磁法無損檢測方法確定鋼筋位置，現場修正確定保護層厚度，估測鋼筋直徑，量測值準確至毫米。檢測範圍應為主要承重構件或承重構件的主要受力部位，或是一般檢查結果鋼筋可能腐蝕之部位。

2. 設備裝置

鋼筋探測儀如圖 3.12 所示。



圖 3.12 鋼筋探測儀

3. 測試方法

- (1) 測試前應了解有關圖紙資料，以確定鋼筋的種類和直徑。
- (2) 進行保護層厚度測讀前，應先在測區內確定鋼筋的位置與走向，做法如下：
 - a. 將保護層測試儀傳感器在構建表面平行移動，當儀器顯示值最小時，傳感器正下方即是所測鋼筋位置。
 - b. 找到鋼筋位置後，將傳感器在原處左右轉動一定角度，儀器顯示最小值時傳感器長軸線的方向即為鋼筋的走向。
 - c. 在構件測區表面劃出鋼筋位置與走向。

(3) 保護層厚度的測讀。

- a. 將傳感器置於鋼筋所在位置正上方，並左右稍稍移動，讀取儀器顯示最小值即為該處保護層厚度。
- b. 每一測點值宜讀取 2~3 次穩定讀數，取其平均值，準確至 1mm。
- c. 應避免在鋼筋交叉位置進行量測。

4. 評定標準

(1) 數據處理

首先根據某一測量部位各測點混凝土厚度實測值，按下式求出混凝土保護層厚度平均值 \bar{D}_n (精確至 0.1mm)。

$$\bar{D}_n = \frac{\sum_{i=1}^n D_{ni}}{n} \dots\dots\dots (3.18)$$

式中： \bar{D}_{ni} -- 結構或構件測量部位測點混凝土保護層厚度，精確至 1mm；

n--測點數。

- a. 按照下式計算確定測量部位混凝土保護層厚度特徵值 D_{ne} (精確至 0.1mm):

$$D_{ne} = \bar{D} - K S_D \dots\dots\dots (3.19)$$

式中： S_D -- 測量部位測點保護層厚度的標準差，精確至 0.1mm；

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{ni})^2 - n(\bar{D}_n)^2}{n-1}} \dots\dots\dots (3.20)$$

K--合格評定係數值，按表 3-27 取用。

表 3-25 混凝土保護層厚度評定係數值

n	10~15	16~24	25
K	1.695	1.645	1.595

資料來源:參考文獻^[43]

(2) 根據測量部位實測保護層厚度特徵值 D_{ne} 與其設計值 D_{nd} 的比值，混凝土保護層厚度對結構鋼筋耐久性評定標度按表 3-28 來評定。

表 3-26 混凝土保護層厚度評定標準

評定標度值	D_{ne}/D_{nd}	對結構混凝土耐久性的影響
1	>0.95	影響不顯著
2	0.85~0.95	有輕度影響
3	0.70~0.85	有影響
4	0.55~0.70	有較大影響
5	<0.55	鋼筋易失去鹼性保護，發生銹蝕

資料來源:參考文獻^[43]

3.8 耐久性綜合評估方法

在文獻^[43]中，提出先以單一構件作出耐久性評價，然後再總合計算整體性耐久性評價的觀念。在本研究中，亦採用同樣的概念並加以修正。首先針對單一構件的耐久性評估計算方式如下：

$$D_l = \delta_1 \cdots \delta_k \times \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^{p_i} \beta_i A_{im} \alpha_{im} \dots\dots\dots (3.21)$$

其中 D_l 代表第 l 種單一構件的耐久性評價， $1 \dots k$ 為 k 個放大係數考量(在本研究中僅考量兩個放大係數分別為重車流量影響以及環境影響)， α_i 為第 i 類因子所代表之權重(其中共有兩類，分別為混凝土現況以及腐蝕現況)， A_{im} 為第 i 類因子中第 m 個指標所得之評價(一律分為五級，值分別由 1 至 5)， α_{im} 則為第 i 類因子中第 m 個指標在第 i 類因子中所佔之權重。 p_i 代表第 i 類中之耐久性指標總數，若 $i=1$ ，則 $p_1=6$ ；若 $i=2$ ，則 $p_2=4$ 。各項權重值如表 3-29。

在實際操作上，可能在各類指標中實際所操作之項目並未達到建議之總指標數，而僅進行部份之檢測，則可以將各類指標之總合計算如下式所示：

$$D_1 = \delta_1 \cdots \delta_k \left(\sum_{j=1}^2 \beta_j \frac{\sum_{m=1}^n A_{jm} \alpha_m}{\sum_{m=1}^n \alpha_m} \right) \dots \dots \dots (3.22)$$

表 3-27 混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性 指標數	Local 權重值	Global 權重值
鋼筋腐蝕現況			0.44	0.44
	腐蝕電位	1	0.11	0.05
	中性化深度	2	0.26	0.12
	氯離子	3	0.35	0.15
	腐蝕電流	4	0.28	0.12
混凝土現況			0.56	0.56
	電阻係數	5	0.05	0.03
	抗壓強度	6	0.14	0.08
混凝土 表面損傷	裂縫	7	0.19	0.20
	開裂、剝落或露筋與缺角	8	0.25	0.07
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.17	0.05
	混凝土保護層厚度	10	0.2	0.05

資料來源:參考文獻^[43]

因為在未考量放大因子前，單一構件之最大值為 5(這是因為我們分為五評等級之故)，乘上放大因子之後，則可能會有超過 5 的情況出現。我們由此可以將單一構件耐久性之評斷分為五級如表 3-30 示：

表 3-28 混凝土單一構件之耐久性評估標準

<i>D total</i> 範圍	1 <i>D total</i> < 2	2 <i>D total</i> < 3	3 <i>D total</i> < 4	4 <i>D total</i> < 5	<i>D total</i> 5
單一構件 耐久等級	1	2	3	4	5
耐久性狀況	完好	較好	一般	較差	很差

資料來源:參考文獻^[43]

有了單一構件之耐久性評價，則可以針對橋梁整體結構耐久性作整體評價如下式所示：

$$D_{total} = \sum_{j=1}^q D_j Y_j \dots\dots\dots (3.23)$$

表 3- 29 混凝土橋梁各構(部)件權重值

構(部)件	名稱	推薦權重	評定標度植
1	橋台與基礎	0.23	-
2	橋墩與基礎	0.24	-
3	支承	0.07	4
4	上部主要承重構件	0.26	3.06
5	上部一般承重構件	0.12	3.66
6	橋面鋪裝	0.02	3
7	人行道承重構件	0.05	3
8	欄杆或護欄	0.01	3
備註	當評定標度值為“1”時，表示好的狀態，或表示沒有設置的構造部件，不再進行疊加。		

資料來源:參考文獻^[43]

其中 D_{total} 代表橋梁整體之耐久性評價, D_j 代表第 j 個構件之單一構件耐久性評價, r_j 則代表第 j 個構件在整體結構中所佔之權重, q 則代表考量之構件總數。有關可量構件之權重, 可參考文獻^[36]所建議, 如表 3-31。但是實作上可依據橋梁所處環境、設計時之考量等之不同, 由專家進行評價再給與權重。

同樣地在整體橋梁耐久性評價上, 我們也可以針對橋梁整體耐久性評價分級, 如表 3-32。

表 3- 30 構整體的耐久性綜合評價標準

<i>D total</i> 範圍	1 <i>D total</i> < 2	2 <i>D total</i> < 3	3 <i>D total</i> < 4	4 <i>D total</i> < 5	<i>D total</i> 5
結構耐久等級評定標度	1	2	3	4	5
耐久性狀況	完好	較好	一般	較差	很差
建議處理方式	正常使用	正常使用	持續維護	補強	拆除

資料來源:參考文獻^[43]

3.9 橋梁耐久性評估之優先順序決定

由於國內橋梁眾多，若是要在每一年內進行所有橋梁的耐久性評估是不切實際的。我們建議的排序方式乃是取決於前一次進行耐久性評估所得分數來進行排序，若是橋梁結構從未進行過耐久性評價，則假設其前次評價得分為 3。如此設計則可以綜合考量在環境因子、車流量因子還有齡期因子下之狀況，可以決定其應該要進行評估的優先順序。當上次評價時得分越高表示該橋梁之耐久性越差，若橋梁在上次評等後並未進行任何修復、補強等措施，則應優先考量進行再一次評估。

第四章 既有鋼筋混凝土橋梁殘餘壽命預測之研究

4.1 前言

RC 橋梁使用壽命可定義為(1)結構性使用壽命：係指橋梁達到不符某種技術指標規定值(如結構承載力或完整性不足等)的使用期限，此可能由於混凝土剝落或鋼筋腐蝕而造成使用壽命終了；(2)功能性使用壽命：係指結構使用到不能滿足實用功能的期限，如橋梁行車能力不能符合新的需求；(3)經濟性使用壽命：係指結構物拆除重建比繼續維修使用較具經濟性的使用期限。RC 橋梁使用壽命預測準則可分為(1)碳化壽命準則：以碳化深度達到保護層厚度，保護層喪失保護鋼筋的能力，使鋼筋發生腐蝕的期限，較適用於 PC 橋梁，使用於 RC 橋梁可能過於保守；(2)鏽蝕膨脹開裂準則：係以混凝土表面發生沿鋼筋方向的膨脹裂縫之期限。 $T=t_1+t_2$ (t_1 碳化深度達到保護層厚度的時間， t_2 鋼筋發生鏽膨的時間)，亦可以氯離子誘發鋼筋腐蝕為預測準則，利用試驗數據建立腐蝕量與腐蝕速率的關係來評估壽命；(3)裂縫寬度與鏽蝕量限值壽命準則；(4)承載力壽命準則：以結構因鋼筋鏽蝕承載力降低至一限值作為使用壽命結束(end-of-functional service life, EFSL)。

既有 RC 橋梁剩餘使用壽命預測準則可分為(1)基於試驗數據與以往經驗，對剩餘使用壽命進行半定量預測；(2)基於比較的預測方法，假定一期限內相似的混凝土結構具有大致相同的使用壽命，進行剩餘壽命推估；(3)加速試驗預測法；(4)數學模式預測法，利用數學模式預測剩餘壽命是目前較常使用的方法，其預測的可靠度與模式的合理性及材料與環境參數的選取的準確性有密切關係。評估既有 RC 橋梁剩餘使用壽命主要有兩種方法，(1)利用實際檢測時間外推方法；(2) 數學模式預測法，但建構模式需藉助實際檢測數據對預測模式進行修正。實際數據包括檢測結果與原設計符合的程度，劣化現象與劣化程度評估，及試驗室試驗如岩相分析、化學分析、混凝土與鋼筋試驗。利用試驗結果進行目前狀況下的不同承載作用下的結構分析。隨機碳

化壽命預測準則係利用碳化深度概率分布及統計參數，推算 RC 橋梁剩餘使用壽命。鏽蝕膨脹開裂壽命準則係利用保護層開裂加鋼筋鏽蝕量概率分布及統計特徵值，推算 RC 橋梁剩餘使用壽命。

早期國內所興建之橋梁，在長期使用下，很多既有之橋梁逐漸產生問題，例如：氯化問題、碳化問題與承載力不足問題等等。為了確保既有鋼筋混凝土橋梁服役之安全狀況，必須定期檢測、維修和補強，故鋼筋混凝土橋梁使用壽命變成為當前重要的研究課題。且既有鋼筋混凝土橋梁之使用壽命或殘餘壽命預測應該是國內外未來需要密切注意之研究方向，可望是往後研究的主流之一。

既有橋梁的劣化、老化、破損與承載力的不足是個全世界性共同面對的問題。而橋梁在長期的外部環境和使用材料因素下，就環境因素而言，譬如大氣中的 CO_2 、 Cl^- 、和 SO_2 ，土壤中的硫酸鹽類譬如 CaSO_4 、 MgSO_4 、 Na_2SO_4 等隨時都在侵蝕結構材料，至於材料因素，例如混凝土的強度、滲透性及鋼筋的保護層厚度等等都會影響橋梁的壽命。當空氣中 Cl^- 和 CO_2 從混凝土表面的孔隙中侵入，勢必導致材料的劣化，橋梁結構的功能逐漸地被削弱，甚至喪失，這是一個不可改變的客觀因素。

在鋼筋混凝土結構物的使用壽命上，氯離子誘導的腐蝕是主要問題之一，對於入侵的部份氯離子而言，它會與水泥中的 C_3A 反應生成氯鋁酸鹽(Friedels Salt)，而被束縛在水化產物中。另一誘導鋼筋混凝土結構腐蝕是 CO_2 ，當 CO_2 入侵混凝土中會與 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 產生 CaCO_3 且被束縛在孔隙壁上，並引致 pH 值的降低，當 pH 值小於 11.5 時，混凝土中的鋼筋就開始腐蝕。因此只有部分剩餘的自由氯離子或 CO_2 在孔隙溶液中繼續向內傳輸進入混凝土中，顯然，混凝土孔隙溶液中的自由氯離子或 CO_2 才是真正會破壞混凝土中鋼筋表面的鈍態保護膜。

Sergi^[15]實驗證實總氯離子 (C_t) 和自由氯離子 (C_f) 對深度的關係可用 Fick 第二定律表達，同時驗證 Langmuir adsorption isotherm 可以表示自由氯離子和束縛氯離子 (C_b) 之關係式。Yu^[17]實驗證明

Langmuir adsorption isotherm 表達的自由氯離子與束縛氯離子關係式的確可以闡釋氯離子結合對擴散的效應，同時驗證了由 Fick 第一定律和質量不滅推導得出的 Fick 第二定律確實可以表達自由氯離子的擴散特徵。Arya and Newman^[12]使用孔隙加壓、濾析、定量繞射分析及經驗關係等四種方法研究混凝土中自由氯離子的含量。Tang and Nilsson^[18]以水泥漿和水泥砂漿試體實驗探討氯離子結合量 (Chloride binding capacity)，若高自由氯離子濃度 (亦即 $> 0.01 \frac{\text{mol}}{l}$)，則以 Freundlich adsorption isotherm 表達束縛與自由氯離子的關係式，若低自由氯離子濃度 (亦即 $< 0.05 \frac{\text{mol}}{l}$)，則以 Langmuir adsorption isotherm 表達束縛與自由氯離子的關係式。Martin-Perez^[34]將 No binding Linear binding、Langmuir 和 Freundlich adsorption isotherm 等四種數學模式代入非線性 Fick 第二定律，以有限差分法預測混凝土使用壽命。然而，鄭皓元^[48]的碩士論文以 Kirchhoff 轉換結合 Laplace 轉換推導出非線性 Fick 第二定律結合初始及邊界條件的解析解，使用 Martin-Perez et al. 的輸入參數，所得的結果與 Martin-Perez et al. 之結果有誤差。

本章主要透過 t_k t_p t_{corr} 三階段的壽命預測，以及將 No binding、Linear binding、Langmuir 和 Freundlich adsorption isotherm 等四種數學模式代入線性〔擴散係數 (D) 為定值〕和非線性〔擴散係數 (D) 不為定值〕Fick 第二定律結合初始及邊界條件，由此所得的解析解，以現場取樣所試驗得到的總氯離子濃度 (亦即束縛氯離子和自由氯離子) 藉由商業軟體 “Mathematica” Wolfram Research^[56]反算時間，由此所得的橋面版、橋墩和橋台氯化壽命作為橋梁耐久性問題的指標。其殘餘橋梁殘餘壽命流程圖詳如圖 4.1 所示。

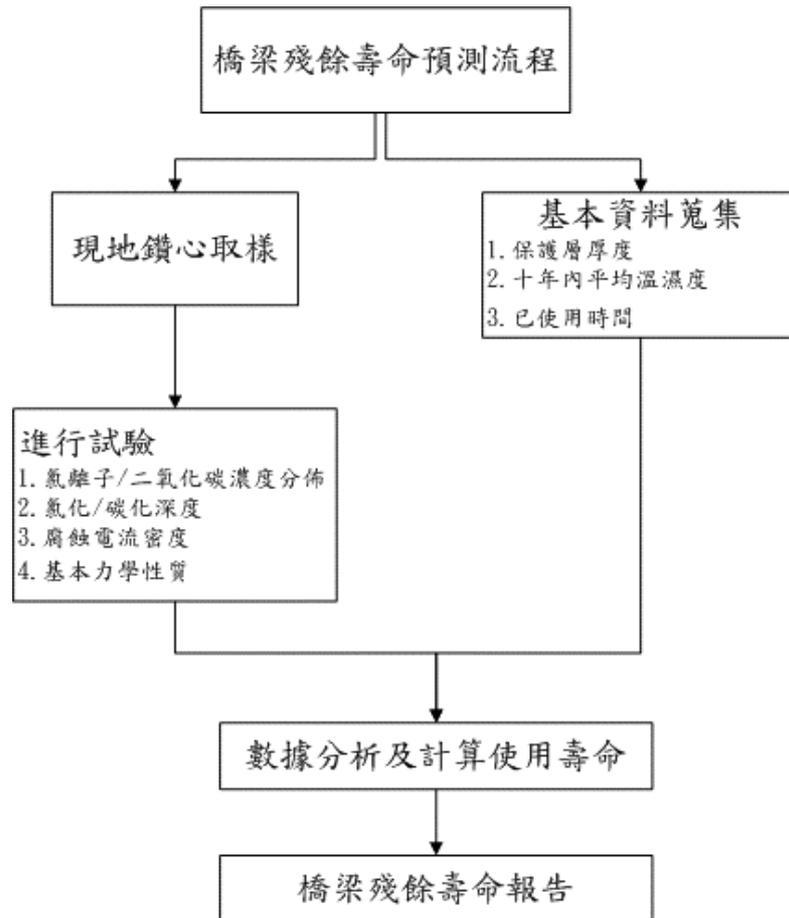


圖 4.1 橋梁殘餘壽命預測流程圖

4.2 理論模式

4.2.1 線性擴散方程式

混凝土若為飽和狀態，並且使用 Fick 第一擴散定律來描述氯離子傳輸率與濃度梯度的關係，則

$$J_c = -D_c w_e \frac{\partial C_f}{\partial x} = -\overline{D_c} \frac{\partial C_f}{\partial x}, \quad \overline{D_c} = D_c w_e, \quad w_e = \text{定值} \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

其中式中的 J_c 代表為氯離子擴散引致的通量， D_c 是真實擴散係數， w_e 是可蒸發水含量， C_f 是自由氯離子濃度與 x 代表的是深度。並且從氯離子在飽和混凝土中可以藉由質量不滅定律來得知，則

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = -\frac{\partial J_c}{\partial x} \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

式中 C_t 為總氯離子濃度， t 為時間。

侵入混凝土中的總氯離子(C_t)可分為束縛氯離子(C_b)與自由氯離子(C_f)，而它們之間的關係可以表示為

$$C_t = C_b + w_e C_f \dots\dots\dots(4.3)$$

將式 (4.1) 與式 (4.3) 代入式 (4.2) 並且使用連鎖律可以得到，

$$\left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w_e \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = D_c w_e \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} \dots\dots\dots(4.4)$$

再將式 (4.4) 改寫為

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = D_c^* \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2}, \quad D_c^* = \frac{D_c w_e}{\frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w_e} = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \dots\dots\dots(4.5a)$$

式中 D_c^* 為有效擴散係數，並且將式(4.5a)結合起始條件與邊界條件，則

$$C_f(x,0) = 0 \dots\dots\dots(4.5b)$$

$$C_f(0,t) = C_0 \dots\dots\dots(4.5c)$$

$$C_f(x \rightarrow \infty, t) = 0 \dots\dots\dots(4.5d)$$

式中 C_0 代表混凝土表面的氯離子濃度。使用 Laplace 轉換可以得到式(4.5)的解析解為

$$C_f(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_c^* t}} \right) \dots\dots\dots(4.6)$$

式中 erfc 為補誤差函數。

4.2.2 非線性擴散方程式

若擴散係數為非定值，則式(4.1)代入式(4.2)得到

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c w_e \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (4.7)$$

將式(4.3)代入式(4.7)，得到

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (4.8a)$$

式中

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \dots\dots\dots (4.8b)$$

結合初始與邊界條件

$$C_f(x,0) = 0 \dots\dots\dots (4.8c)$$

$$C_f(0,t) = C_0 \dots\dots\dots (4.8d)$$

$$C_f(x \rightarrow \infty, t) = 0 \dots\dots\dots (4.8e)$$

利用 Kirchhoff 及 Laplace 轉換法，可得到式 (4.8) 的解析解

$$\int_{C_f}^{C_R} D_c^*(C_f) dC_f = \int_{C_f}^0 D_c^*(C_f) dC_f + \left[\int_{C_f}^{C_0} D_c^*(C_f) dC_f - \int_{C_f}^0 D_c^*(C_f) dC_f \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_c^* t}} \right) \dots\dots\dots (4.9)$$

式中 C_R 為氯離子濃度任意參考值
式(4.9)可改寫為

$$\frac{\int_0^{C_f} D_c^*(C_f) dC_f}{\int_0^{C_0} D_c^*(C_f) dC_f} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_c^*t}}\right) \dots\dots\dots (4.10)$$

式(4.10)提供貫入深度 x 和時間 t 的 D_c^* 對 C_f 的關係，其左端可描述為在 D_c^* C_f 的曲線下分別從原點到 C_R 和從原點到 C_0 的面積比，如圖 4.5 所示。

4.2.3 氯離子結合等溫線 (chloride binding isotherm)

氯離子結合等溫線定義在已知溫度下描述混凝土中自由氯離子與束縛氯離子的關係式，今簡述如下：

1. 無膠結 (No binding)

$$C_b = 0, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = 0, \quad D_c^* = D_c \dots\dots\dots (4.11)$$

2. 線性膠結 (linear binding)

$$C_b = \alpha C_f, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \alpha, \quad D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{\alpha}{w_e}} \dots\dots\dots (4.12)$$

3. Langmuir isotherm

$$C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f}, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha}{(1 + \beta C_f)^2}, \quad D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{\alpha}{w_e(1 + \beta C_f)^2}} \dots\dots\dots (4.13)$$

4. Freundlich isotherm

$$C_b = \alpha C_f^\beta, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \alpha \beta C_f^{\beta-1}, \quad D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{\alpha \beta}{w_e} C_f^{\beta-1}} \dots\dots\dots (4.14)$$

將式(4.11)至(4.14)代入式(4.6)與(4.10)即可得當擴散係數為定值與非定值時的自由氯離子濃度值。

4.3 使用壽命與殘餘壽命

圖 4.1 中誘發期 t_i 定義為二氧化碳或氯離子由混凝土表面滲入至鋼筋鈍態保護膜表面的時間，去鈍化期 t_p 為鈍態保護膜被破壞的時間，傳遞(或腐蝕)期 t_{corr} 為混凝土中鋼筋腐蝕至劣化度為 0.8 的時間。故可以從此推估出橋梁各構件使用壽命。Treadaway, K^[11] 指出橋梁使用壽命 t 為

$$t = t_i + t_p + t_{corr} \dots\dots\dots (4.15)$$

1. 誘發期 t_i 的預測法

(1) Fick 第一擴散定律或 Fick 第二擴散定律均可化為下列簡單式

$$x(t) = k\sqrt{t} \dots\dots\dots (4.16)$$

式中 $x(t)$ 為碳化或氯化深度， K 為碳化或氯化速度係數， t 為時間。

(2) Weyes 法^[24]

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i)[1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \approx C_0[1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \dots\dots\dots (4.17)$$

$C(x,t)$ 為時間 t 距離 x 時之氯離子濃度， x 為擴散深度(mm)， t 為擴散時間， C_i 為混凝土中氯離子起始濃度， C_s 為混凝土表面氯離子濃度， $C_0 = C_s = C(0,t)$ 為混凝土表面氯離子濃度(Kg/m³)， D_c 為氯離子擴散係數， erf 為誤差函數。

(3) LZCL 法^[35]

$$C(x,t) = [C_i + (C_s e^{kt} - C_i) \text{erfc}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] e^{-kt} \dots\dots\dots (4.18)$$

C_i 為混凝土中氯離子起始濃度， C_s 為混凝土表面氯離子濃度， k 為化學反應係數(0.001)， x 為擴散深度(mm)， t 為擴散時間， erfc 為補誤差函數。

(4) Hookham 法^[57]

$$t = K_c \cdot K_e \cdot x^2 + K_a \cdot x \dots\dots\dots (4.19)$$

K_c 為混凝土品質係數, $K_c = 7.59$, K_e 為環境係數, $K_e = 0.85$, K_a 為活態腐蝕係數, $K_a = 4.0$, x 為保護層厚度 (cm)。

(5) AJMF 法^[23]

$$C(x,t) = kt \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2D_c t} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) - \left(\frac{x}{\sqrt{\pi D_c t}} \right) e^{-\frac{x^2}{4D_c t}} \right\} \dots\dots\dots (4.20)$$

$$C(x,t) = k\sqrt{t} \left\{ e^{-x^2/4D_c t} - \left[\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D_c t}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \right\} \dots\dots\dots (4.21)$$

$C(x,t)$ 為時間 t 距離 x 時之氯離子濃度, k 為常數(4.20 式代 0.1, 4.21 式代 0.545), D_c 為氯離子擴散係數, erfc 為補誤差函數, x 為擴散深度(mm), t 為擴散時間。

(6) Guirguis 法^[8]

$$t = \frac{L}{\lambda D_c} \dots\dots\dots (4.22)$$

D_c 為氯離子擴散係數, L 為保護層厚度(mm), λ 為一常數(0.01)。

2. 活化期 t_p 的預測法

當鈍態保護膜破壞變為活化時, 其活化期 t_p 可使用下式預測:

(1) Bazant 法^[2]

$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_s}}} \right)^2 \dots\dots\dots (4.23)$$

式中 D 為氯離子擴散係數, L 為保護層厚度, C_s 為混凝土

表面的氯離子濃度， C^* 為鈍態保護膜處的氯離子臨界濃度。

(2) Bazant(修改 1)法^[3]

$$t_p = \frac{1}{4D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_s}}} \right)^2 \dots\dots\dots(4.24)$$

D 為氯離子擴散係數， L 為保護層厚度， C_s 為混凝土表面的氯離子濃度， C^* 為鈍態保護膜處的氯離子臨界濃度。

(3) Bazant(修改 2)法^[3]

$$t_p = \frac{7}{384D} \left[\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_s}}} \right]^2 + \frac{1}{64D} \left[\frac{L}{1 - \frac{C^*}{C_s}} \right]^2 \dots\dots\dots(4.25)$$

D 為氯離子擴散係數， L 為保護層厚度， C_s 為混凝土表面的氯離子濃度， C^* 為鈍態保護膜處的氯離子臨界濃度。

3. 鋼筋腐蝕期 t_{corr} 的預測法

(1) 一般而言，

$$t_{corr} = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{5} t_i \dots\dots\dots(4.26)$$

(2) Bazant 法^[2]

$$t_{corr} = \rho_{cor} \frac{D \Delta D}{S j_r} \dots\dots\dots(4.27)$$

$$\Delta D = 2f_t' \frac{L}{D} \delta_{pp} \dots\dots\dots(4.28)$$

$$\delta_{pp} = \frac{D}{E_{ef}} (1 + \nu_c) + \frac{D^3}{2E_{ef} L(L + D)} + \frac{2D^3}{S^2 E_{ef}} \dots\dots\dots(4.29)$$

$E_{ef} = \frac{E}{1 + \phi_{cr}}$ = 混凝土有效彈性模數， E 混凝土抗壓彈性模數，

ϕ_{cor} 為潛變係數， ν_c 為混凝土普松比， L 為保護層厚度(m)，

D 為鋼筋直徑(m)， S 為鋼筋間距(m)， ΔD 為鋼筋直徑增量，

ρ_{cor} 為穩態腐蝕階段中，鋼筋的平均密度(3,600kg/m³)

j_r 為鏽蝕產物速度， f_t' 為混凝土抗拉強度。

(3) Bazant(修改)法^[3]

$$t_{corr} = \rho_{cor} \frac{D \Delta D^*}{S j_r} \dots\dots\dots(4.30)$$

$$\Delta D = f_t' [2(\frac{L}{D}) + 1] \delta_{pp} \dots\dots\dots(4.31)$$

$$\delta_{pp} = \frac{D}{E_{ef}} (1 + \nu_c) + \frac{D^3}{2E_{ef} L(L + D)} + \frac{2D^3}{S^2 E_{ef}} \dots\dots\dots(4.32)$$

$E_{ef} = \frac{E}{1 + \phi_{cr}}$ = 混凝土有效彈性模數，

E 為混凝土抗壓彈性模數， ϕ_{cor} 為潛變係數，

ν_c 為混凝土普松比， L 為保護層厚度(m)， D 為鋼筋直徑(m)，

S 為鋼筋間距(m)， ΔD 為鋼筋直徑增加量，

ρ_{cor} 為穩態腐蝕階段中，鋼筋的平均密度(3600kg/m³)，

j_r 為鏽蝕產物速度， f_t' 為混凝土抗拉強度。

(4) CW 法^[6]

$$t_{corr} = 2 \sim 5 \text{ years}$$

(5) Liu 法^[19]

$$t_{corr} = \frac{W_{crit}^2}{2k_p} \dots\dots\dots(4.33)$$

$$W_{crit} = \rho_{cor} \left\{ \pi \left[\frac{L f_t'}{E_{ef}} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right) + d_0 \right] D + \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \right\} \dots\dots\dots(4.34)$$

$$k_p = 7.081 \times 10^{-6} \times \frac{1}{\alpha} \pi D i_{corr}, \alpha = 0.57 \dots\dots\dots(4.35)$$

$$a = \frac{D + 2d_0}{2},$$

$$b = L + \frac{D + 2d_0}{2} \dots\dots\dots(4.36)$$

a 為假想為混凝土薄管的內徑， b 為假想為混凝土薄管外徑， L 為保護層厚度(cm)， f_t' 為混凝土抗拉強度， D 為鋼筋直徑(cm)， ν_c 為混凝土普松比， $E_{ef} = \frac{E}{1 + \varphi_{cr}}$ 為混凝土有效彈性模數， E 為混凝土抗壓彈性模數， φ_{cr} 為潛變係數， d_0 為鋼筋直徑的增量， ρ_{cor} 為穩態腐蝕階段中，鋼筋的平均密度(3600kg/m³)， ρ_{st} 為鋼筋質量密度(7.85g/cm³)， W_{st} 為鏽蝕鋼筋質量， W_{crit} 為臨界鏽蝕物產量。

(6) Faraday's law ^[10、38]

$$t_{corr} = \frac{\delta \rho_{st} Z F}{A i} \dots\dots\dots(4.37)$$

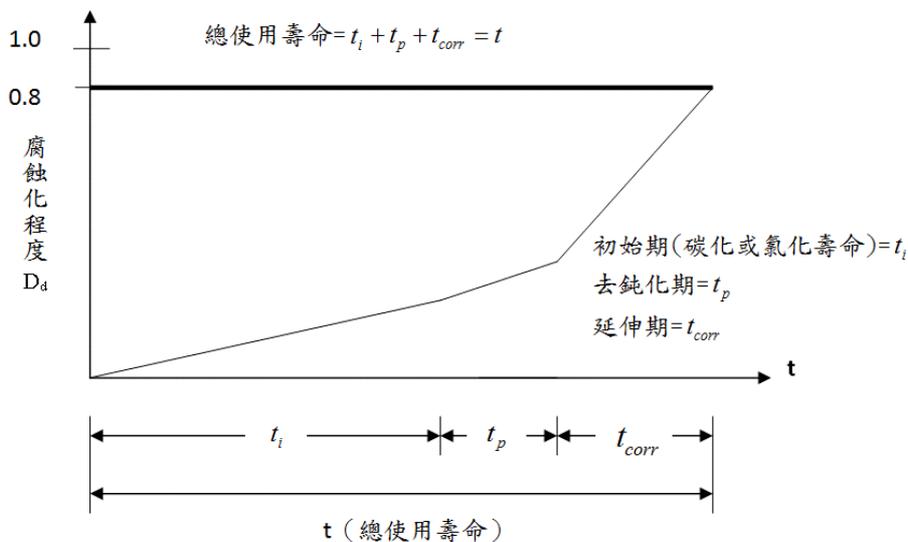
A 為鐵的原子量(代56)， i 為腐蝕電流密度試驗結果之平均值(A/cm²)， Z 為鐵離子價數(代2)， δ 為材料損失(1.2×10⁻¹⁰cm)， F 為法拉第常數(96485.33 C/mol)， ρ_{st} 為鋼筋密度(7.85g/cm³)

(4.15) 式適用於鋼筋混凝土橋梁，若為預力混凝土橋梁，則祇能預測 $t=t_i$ ，不考慮 t_p 和 t_{corr} 。對混凝土結構耐久性破壞準則的合理選擇式進行結構耐久性與壽命預測考量的準則，本計畫將腐蝕引至結構物的劣化度(D_d)定義為

$$D_d = 1 - \frac{x}{100} \dots\dots\dots(4.38)$$

式中 x 為結構物的完整性，譬如結構物非常完整，亦即 $x=100$ ，則 $D_d=0$ ，若完全崩塌，亦即 $x=0$ ，則 $D_d=1$ 。設 t_{ap} 為既有 RC 橋梁至今的服役時間，其殘餘壽命 t_r 為

$$t_r = t - t_{ap} \dots\dots\dots(4.39)$$



資料來源:參考文獻^[4.11]

4.4 案例分析

4.4.1 擴散方程式於林邊橋與大津橋之應用

為驗證上述理論的可行性與可靠性，本章節中，將以林邊橋[昭凌公司^[26]] 與大津橋[昭凌公司^[27]] 作為案例分析，並且本章內容將使用軟體“ Mathematica ” Wolfram Research^[56]來計算此章所推導得到的理論公式，其林邊橋與大津橋基本資料於表 4-4 與表 4-5 和圖 4.7 與圖 4.8 分別表示。並由昭凌工程顧問公司所量測之數據代入本章所提出的線性與非線性擴散方程式，並可求得林邊橋與大津橋之氯化壽命。

林邊橋與大津橋之氯離子含量檢測係利用酸溶法來量測橋梁之橋台、橋墩及橋面版等部位氯離子之濃度。酸溶法所量測之濃度為總氯離子濃度，Lu^[39]提出總氯離子濃度為自由氯離子濃度 2.2~3.2 倍，故本章將取總氯離子濃度為自由氯離子濃度之 2.5 倍，故可得知自由氯離子濃度。於真實擴散係數 Lu^[39]也提出總氯離子擴散係數為自由氯離子擴散係數的 2.8 倍，故本章節也將引用倍數之關係來求得出總氯離子真實擴散係數。Arya and Newman^[12]指出氯離子初始濃度與擴散係數可由已知使用壽命、氯化深度與氯離子濃度反推求得。本章節因從臺灣工程報告書無法得知氯化深度之參數，故本章節之氯離子初始濃度 (C_0)、四種數學模式之 Σ 值及可蒸發含水量 (W_e) 則是用 Martin-Perez^[34]所獲得之實驗數據來引用與推算。當真實擴散係數不為定值時，則採用數值模擬，亦即氯離子含量與擴散係數則是由線性方程已知求得之壽命，代入非線性擴散方程式〔式 (4.10)〕再將氯離子初始濃度、保護層厚度、 Σ 和 Σ 值等已知參數反推回去並畫圖，因此可得橋梁於橋面版、橋台、橋墩等構件之氯離子濃度與真實擴散係數。

表 4-6 與 4-7 分別為顧問公司於林邊橋與大津橋所測得之總氯離子濃度與保護層厚度，檢測工作乃進行現場混凝土鑽心試體取樣並量測氯離子濃度，自由氯離子濃度則是引用 Lu^[39]所提出總氯離子濃度與自由氯離子濃度倍數關係所推求之。計算壽命於線性擴散方程式需要氯離子初始濃度 (C_0)、氯離子濃度 ($C_{t,f}$)、真實擴散係數 (D_c)、深度 (x) 以及四種數學模式之 Σ 值。在計算前引用 Martin-Perez^[34]自由氯離子真實擴散係數 $D_{cf} = 1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，從 Lu^[39]可以得知總氯離子之擴散係數對自由氯離子的擴散係數倍數關係，本章節線性擴散方程式之總氯離子真實擴散係數為 $D_{ct} = 2.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。氯離子初始濃度本章則是利用 Martin-Perez^[34]初始濃度與濃度比值進行於兩座橋所量測得的氯離子濃度進行內插推算，並在以橋梁距海遠近進行修正推求得。於深度，本章研究視氯離子擴散至鋼筋表面的鈍態保護膜為破壞，故本章將保護層厚度當做為最後氯化深度。可蒸發含水量 (W_e) 則是引 Martin-Perez^[34]之蒸發含水量 (W_e) 為 8% (混凝土重)。用表 4-8 與

4-9 為林邊橋內插推算出表面氯離子濃度 (C_0)、四種數學模式之 Σ 和值、真實擴散係數 (D_{ctf})、深度 (x)、可蒸發含水量 (W_e) 與各檢測位置氯離子濃度 (C_{tf}) 平均值；表 4-10 與 4-11 為大津橋內插推算出表面氯離子濃度 (C_0)、四種數學模式之 Σ 和值、可蒸發含水量 (W_e)、真實擴散係數 (D_{ctf})、深度 (x) 與各檢測位置氯離子濃度 (C_{tf}) 平均值。將表 4-8 至 4-11 之真實擴散係數 (D_c)、氯離子濃度 (C_{tf})、可蒸發含水量 (W_e) 和值代入混凝土中氯離子與束縛氯離子的關係式〔式 (4.11) 至式 (4.14)〕即可得混凝土有效擴散係數 (D_c^*)。再將表 4-8 至 4-11 氯離子初始濃度 (C_0)、氯離子濃度 (C_{tf})、深度 (x) 與所算出來的有效擴散係數 (D_c^*) 代入式 (4.6) 即可求算出林邊橋與大津橋各構件在真實擴散係數為定值時之氯化壽命。

真實擴散係數不為定值時，本章節之氯離子含量與真實擴散係數則是用線性方程所求得之壽命，將它代入非線性擴散方程式〔式 (4.10)〕再將氯離子初始濃度 (C_0)、保護層厚度、 Σ 和值等已知參數反推回去並可得到真實擴散係數不為定值時的氯離子含量與真實擴散係數，因此可得林邊橋與大津橋於橋面版、橋台和橋墩等構件之氯離子濃度與真實擴散係數。表 4-12 與 4-13 為林邊橋反推所求得總和自由氯離子濃度與真實擴散係數以及當初的氯離子初始濃度 (C_0)、可蒸發含水量 (W_e)、深度 (x) 與四種數學模式之 Σ 和值；表 4-12 與 4-13 為大津橋反推所求得總和自由氯離子濃度與真實擴散係數以及當初的氯離子初始濃度 (C_0)、深度 (x)、可蒸發含水量 (W_e) 與四種數學模式之 Σ 和值。將表 4-12 至 4-15 之真實擴散係數 (D_c)、氯離子濃度 (C_{tf})、可蒸發含水量 (W_e) 和值代入混凝土中氯離子與束縛氯離子的關係式〔式 (4.11) 至式 (4.14)〕即可得混凝土有效擴散係數 (D_c^*)。再將表 4-12 至 4-15 氯離子初始濃度 (C_0)、氯離子濃度 (C_{tf})、深度 (x) 與上述所計算出來的有效擴散係數 (D_c^*) 代入式 (4.10) 即可以算出大津橋與林邊橋在真實擴散係數為不定值時氯化之壽命。

分析本章所提出的線性與非線性擴散方程式之氯化壽命於大津

橋與林邊橋其結果可由圖 4.8 與 4.9 可得知。氯離子的擴散只有部分剩餘的自由氯離子在孔隙壁中繼續貫入混凝土中才會繼續破壞混凝土，故本章節對於線性方程式與非線性方程式將針對自由氯離子作更深入探討。林邊橋與大津橋在線性與非線性方程式於自由氯離子擴散情形下，林邊橋的橋台與橋墩構件於線性膠結數學模式下，結構物氯化壽命為 80 至 90 年之間；橋面版在 Langmuir isotherm 數學模式下，氯化壽命為 55 年。大津橋於橋墩在線性膠結數學模式下，結構物氯化壽命為 71 至 72 年之間；橋面版在 Langmuir isotherm 數學模式下，氯化壽命為 50 年左右。

4.4.2 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 之應用範例

1. 誘發期 t_i 的預測法

(1) 碳化壽命

從現場鑽心取樣，使用測微尺量出碳化深度，表 4-1 為某一橋梁現場取樣試驗的碳化深度。

表 4-1 橋梁構件碳化深度

編號	構件名稱	抗壓強度 (kg/cm^2)	保護層厚度 L(mm)	碳化深度 x(mm)
1	G13-1 橋墩	248	25	0
2	S9 橋面版	314	25	0
3	S10 橋面版	171	25	0
4	P3 帽梁	178	20	0.48
5	P14 帽梁	203	20	0.53
6	G17-1 橋墩	178	25	0.59
7	G7-1 橋墩	378	25	0.91
8	G4-1 橋墩	204	25	1.03
9	G6-1 橋墩	339	25	1.05
10	G10-1 橋墩	138	25	1.05
11	P8 橋面版(背面)	171	25	1.45
12	P17 橋墩(背面)	177	30	1.59

編號	構件名稱	抗壓強度 (kg/cm ²)	保護層厚度 L(mm)	碳化深度 x(mm)
13	GR-2 橋墩	426	25	1.64
14	P4 帽梁	198	25	1.65
15	A18 橋台	258	20	2.15
16	P96 帽梁(背面)	113	25	2.18
17	P17 帽梁(背面)	320	20	2.54
18	P13 帽梁(背面)	159	25	3.43
19	B7 帽梁(背面)	230	25	3.54
20	DR-4 隔牆	173	25	3.75

備註：由於橋面版、橋台及橋墩的保護層厚度各不相同，故壽命預測時須分類進行，增加準確性。

使用 Excel 軟體利用表 4-1 之資料算出該橋梁碳化深度之平均值、標準差和變異數，如表 4-2 所示。使用 Excel 軟體和表 1 的資料與(4.16)式，繪製碳化速度係數對累積機率的關係曲線，如圖 4.3 所示。

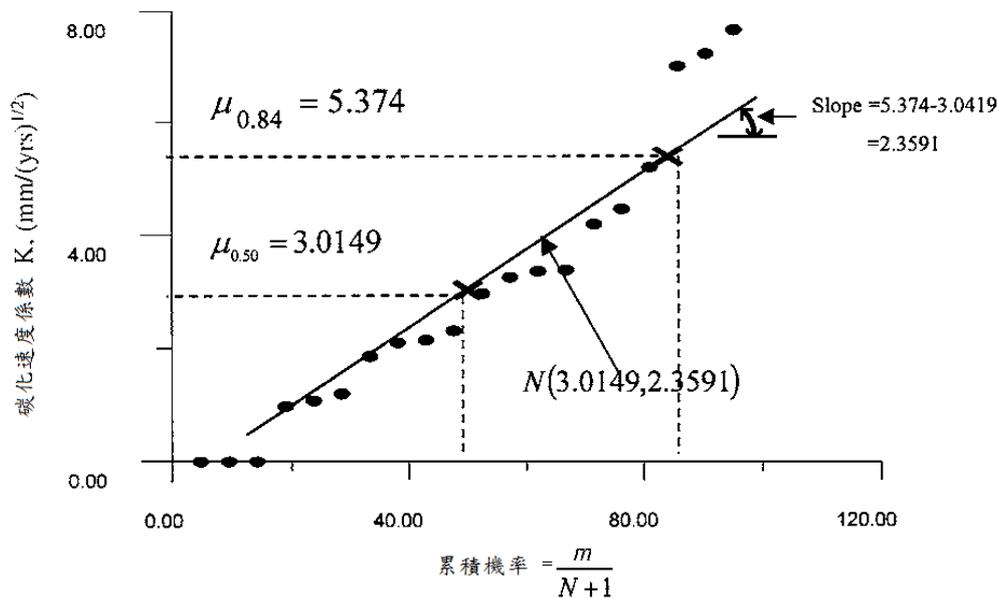


圖 4.3 碳化係數對累積機率之關係曲線

由圖 4.3 可得出碳化速度係數的平均值、標準差和變異數如表 4-2 所示。

表 4-2 碳化試驗統計結果和統計方法及預測橋梁使用 50 年後的碳化深度

橋梁名稱	混凝土強度 ρ (kg/cm ²)	水灰比 w/c	已服役時間 (年)	試驗點	碳化深度 x (mm)			碳化速度係數 K (mm / yr ²)			統計方法 $x_{pt} = (\mu_K + \beta\sigma_K)\sqrt{t}$
					平均值 μ_x (mm)	標準差 σ_x	變異數 $\delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x}$	平均值 μ_K (mm)	標準差 σ_K	變異數 $\delta_K = \frac{\sigma_K}{\mu_K}$	
某橋梁	223	0.5	24	20	14.77	11.25	0.762	2.97	2.34	0.762	48.19

由表 4.1 知保護層厚度 $L=25mm$ 。

由表 4.2 知 $K = \mu_K = 2.97mm / \sqrt{yr}$ ，利用(4.16)式，因為 $x(t)=25mm$ ，所以碳化壽命 $t_i=70.85$ 年。

在使用 t 年後的碳化深度可以利用下式預測

$$x_{pt} = (\mu_K + \beta\sigma_K)\sqrt{t} \dots\dots\dots(4.40)$$

式中 x_{pt} 為使用 t 年後且發生機率為 $P\%$ 的碳化深度， β 為對應於 $p(\%)$ 的常數，可由標準常態機率表查出。若預測使用 $t=50$ 年後，發生機率 $p=95\%$ 的碳化深度查機率表知 $\beta=1.645$ ，由(4.40)式算出 $x_{95\%|50}=48.19mm$ 。

(2) 氯化壽命

氯化壽命預測的方法類似碳化壽命預測的方法，祇要使用 $AgNO_3$ 溶液噴灑在另一半劈裂的試體上，若為深暗色，表示已氯化，若為混凝土原先的顏色，表示未氯化。一般而言，氯離子在混凝土內的擴散係數比二氧化碳在混凝土內的擴散係數要大，故氯化壽命較碳化壽命要小，假設預測的 $K = 3.57mm / \sqrt{yr}$ ，而保護層厚度 $L = 25mm$ ，利用(4.16)式得知氯化壽命為 49 年。取碳化壽命和氯化壽命的最小值做為 $t_i=49$ 年。

1. 活化期 t_p 的預測法

利用氯離子濃度對混凝土深度的關係曲線如圖 4.4 所示。

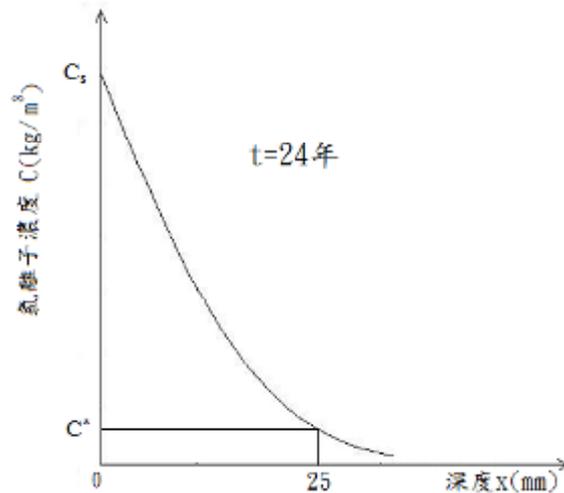


圖 4.4 氯離子濃度-深度曲線

利用圖 4.4 可分別得知 $x=0$ 的表面氯離子濃度 C_s 和在 $x=L$ 鈍態保護膜處的氯離子濃度 C^* ，再利用 Fick 第二擴散定律的解析解

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] = C_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \dots\dots\dots(4.41)$$

式中 erf 為誤差函數，erfc 為補誤差函數

和圖 4.4 反算得到擴散係數 D ，將這些已知的參數代入(4.23)式算出 t_p ，假設得知 $t_p = 5$ 年。

2. 鋼筋腐蝕期 t_{corr} 的預測法

利用式(4.26) $t_{corr} = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{5} t_i$ ，已知 $t_i=49$ 年，故 t_{corr} 為 $\frac{1}{4}(49) = 12.25$ 年。利用(4.15)式得知該座橋梁的總使用壽命為， $t=t_i+t_p+t_{corr}$ 年，而該座橋梁已知使用 $t_{ap} = 24$ 年，由式(4.39)知殘餘壽命 $t_r = t - t_{ap} = 66.25 - 24 = 42.25$ 年。

4.4.3 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 於五結橋梁結構及新竹誠仁橋之應用結果

表 4-17 為將冬山河五結橋梁試驗數據代入 2-1、2-2、2-3 所述各式後得出的 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 壽命預測結果。

將表 4-17 之三階段壽命最大者相加，可得

$$t_{\max}=96.18+29.58+66.71=192.47(\text{年})$$

反之，將三階段壽命最小者相加

$$t_{\min}=23.74+2.91+3.58=30.15(\text{年})$$

表 4-18 為新竹誠仁橋試驗數據代入 2-1、2-2、2-3 所述各式後得出的 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 壽命預測結果。

作法同前

$$t_{\max}=239.42+147.54+161.08=548.04(\text{年})$$

$$t_{\min}=50.31+4.23+3.5=58.04(\text{年})$$

4.5 討論

於橋梁各構件使用壽命，林邊橋整體在自由氯離子線性擴散方程式於線性膠結最大與最小壽命 t 為 121 年與 29 年。而林邊橋整體在自由氯離子非線性擴散方程式於 Langmuir isotherm 最大與最小壽命 t 為 438 年與 79 年。大津橋在自由氯離子線性擴散方程式於線性膠結橋面版與橋墩總使用壽命 t 為 26 年與 100 年。大津橋在自由氯離子非線性擴散方程式於 Langmuir isotherm 橋面版與橋墩總使用壽命 t 為 73 年與 361 年。至民國 98 年為止，林邊橋和大津橋服役時間分別為 33 年和 38 年。而林邊橋和大津橋在自由氯離子非線性擴散方程式於 Langmuir isotherm 橋面版使用壽命分別為 79 年和 73 年，由式(4.17)知林邊橋和大津橋橋面版的殘餘壽命分別為 46 年和 35 年。

對於較大之總使用壽命，原因則為在計算 t_c (氯化壽命) 時，橋台 (Abutment) 與橋墩 (Pier) 的保護層厚度較厚，氯離子擴散時間

將拉長，故將會使結構物氯化壽命增長。表 4-14 為林邊橋和天津橋線性與非線性百分誤差。值得特別注意的是，總與自由氯離子於 Langmuir isotherm 數學模式下，總與自由氯離子百分誤差是四種數學模式最小，其次為線性膠結，再來為 Freundlich isotherm，最後是無膠結 (No binding)。故 Langmuir isotherm 應較為精準。表 4-14 也可以得知總氯離子擴散比自由氯離子擴散之百分誤差來的大，並且氯離子的擴散是藉由自由氯離子繼續貫入孔隙壁中於混凝土才會繼續破壞混凝土，故預測結構物氯化壽命應為自由氯離子擴散較為合理。對於 Langmuir isotherm 在相較於兩座橋梁之橋面版 (Slab) 在非線性方程式自由氯離子擴散時，與實際橋梁所設計之使用壽命較為接近。且 Sergi^[15]與 Yu^[17]皆針對於 Langmuir isotherm 做討論與研究，因此，Langmuir isotherm 於非線性自由氯離子擴散之氯化壽命精確度也較高。線性膠結數學模式束縛下，式(4.12)所計算出之擴散係數較適用於較厚的保護層厚度，因為保護層厚度較厚，使用線性膠結來算結構物氯化壽命也較為保守，且線性膠結對於橋墩、橋台數值模擬算出來之氯化壽命也較為合理，故線性膠結較適合用於橋墩、橋台構件。Freundlich isotherm 數學模式束縛下，式(4.14)將會使有效擴散係數 (D_c^*) 降低，故將氯化壽命延長，對於預測結構物氯化壽命較為不合理。從圖 4.2 與 4.5 可以得知無膠結 (No binding) 是應用於林邊橋與天津橋之總氯離子擴散，且從表 4-14 可以得知無膠結 (No binding) 在線性對於非線性的百分誤差為最大，故無膠結 (No binding) 為四種數學模式中最不合理。

4.6 小結

氯離子結合等溫線的四個數學模式代入線性與非線性擴散方程式的理論，前面已經敘述過，而且以林邊橋和天津橋為實例驗證本章所提出之理論的可行性與可靠性，經研究結果得到下列重要結論：

當線性擴散方程式所計算出來的氯化壽命，與非線性擴散方程式時所算出來的氯化壽命，相距不會很大。從討論當中可以得知，線性對於

非線性氯化壽命之百分誤差，自由氯離子比總氯離子的百分誤差來的小，故預測結構物氯化壽命應為自由氯離子擴散較為合理。一般真實擴散係數為定值是為了計算方便，其實真實擴散係數會隨著時間與空間改變。因此，可以得知非線性方程式有效擴散係數為不定值較為準確。

線性對於非線性氯化壽命之百分誤差，會隨著四種數學模式的束縛下有所差異。從本章研究結果得知，Langmuir isotherm 自由氯離子之百分誤差為三種數學模式最小，且 Langmuir isotherm 在相較於兩座橋梁之橋面版 (Slab) 在非線性擴散方程式自由氯離子擴散時，與實際橋梁所設計之使用壽命較為接近。因此，Langmuir isotherm 於非線性自由氯離子擴散較為準確。其次為線性膠結 (linear binding) 較為準確，最後是 Freundlich isotherm 數學模式束縛。而無膠結 (No binding) 是屬於總氯離子擴散，故無膠結 (No binding) 為四種數學模式中最不合理。

在運用各種數學模式所考慮之參數不同，且各構件保護層厚度也有所不同，將會導致分析出來的橋梁氯化壽命會有一小段落差。故我們發現使用之參數數據影響甚大，在運算前有參數不足的情況發生，這時如果以文獻之參數代入作內插推算來分析，事實上，這樣將造成分析上的困難，並且有誤差發生之可能性。並且對於橋梁壽命預測也可以同時的考慮其他的重要因素,如:溫度,相對溼度、化學反應項等等，以獲得更精確的結果。

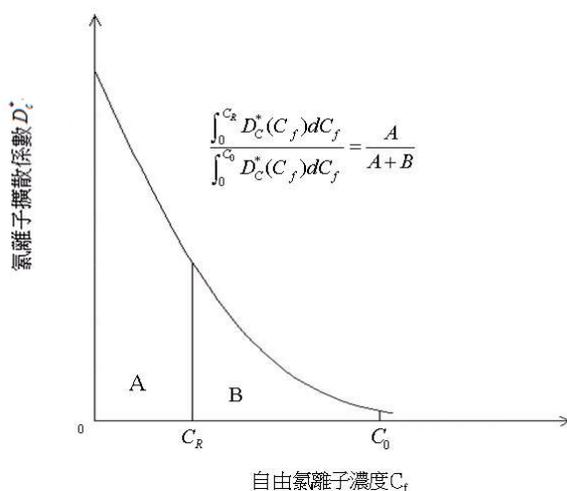


圖 4.5 在 $D_c^* \cdot C_f$ 曲線下之面積比

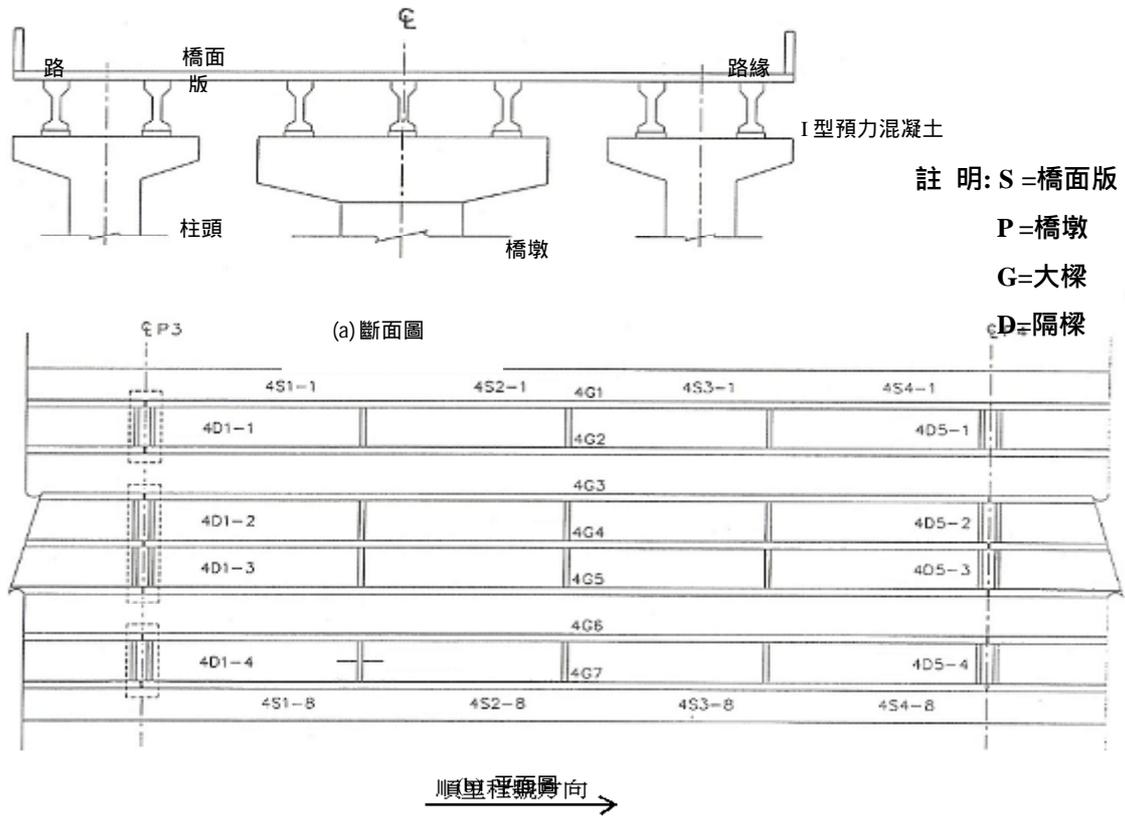


圖 4.6 林邊橋橋梁構件編號系統示意圖

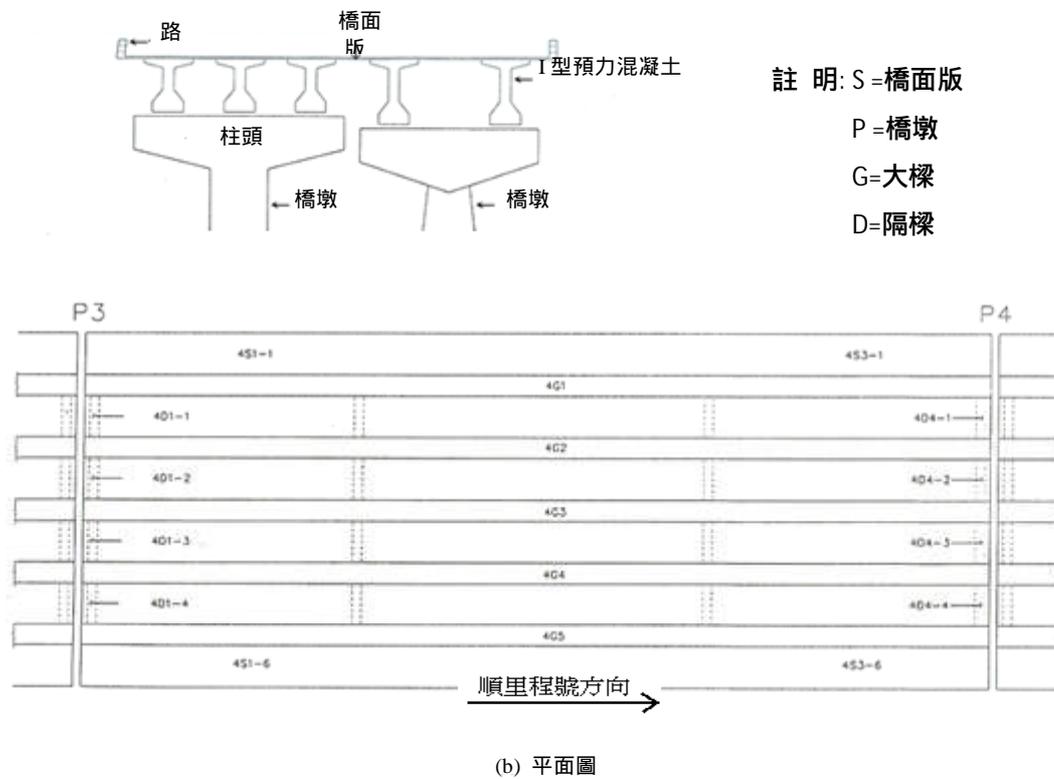
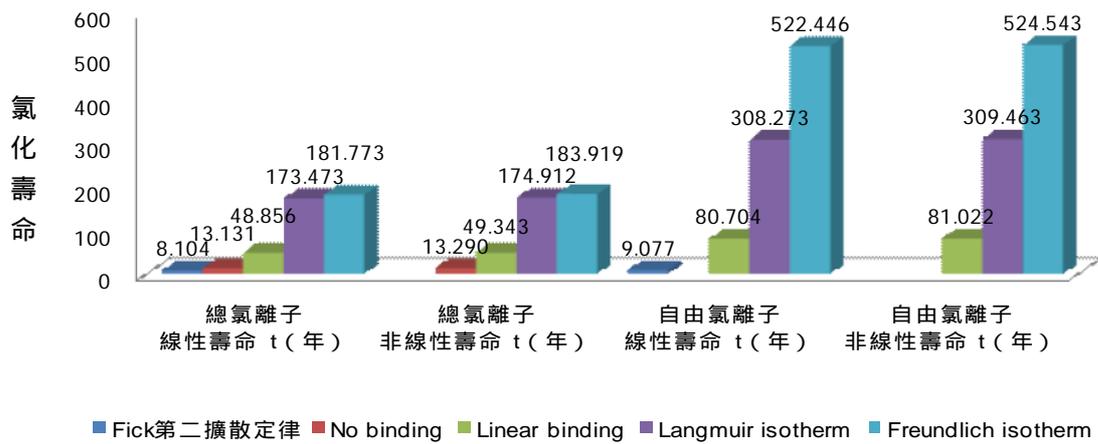
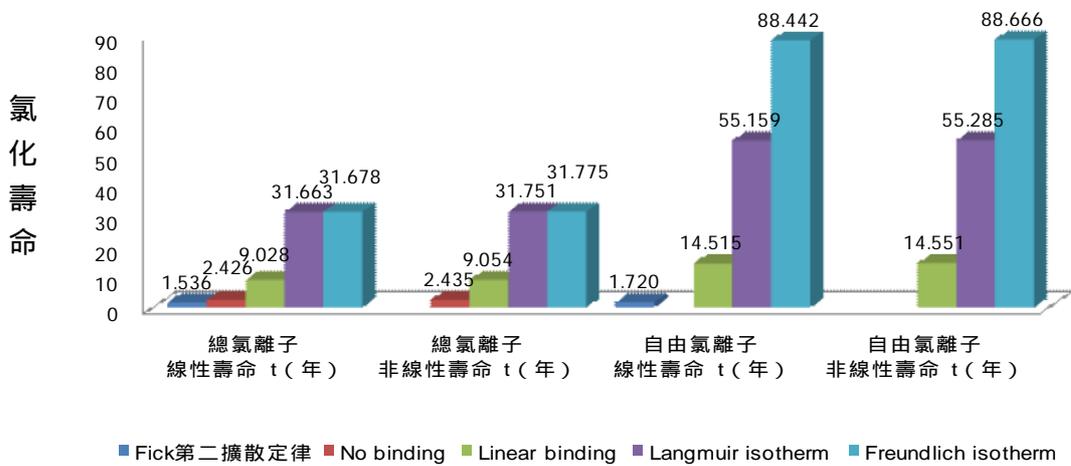


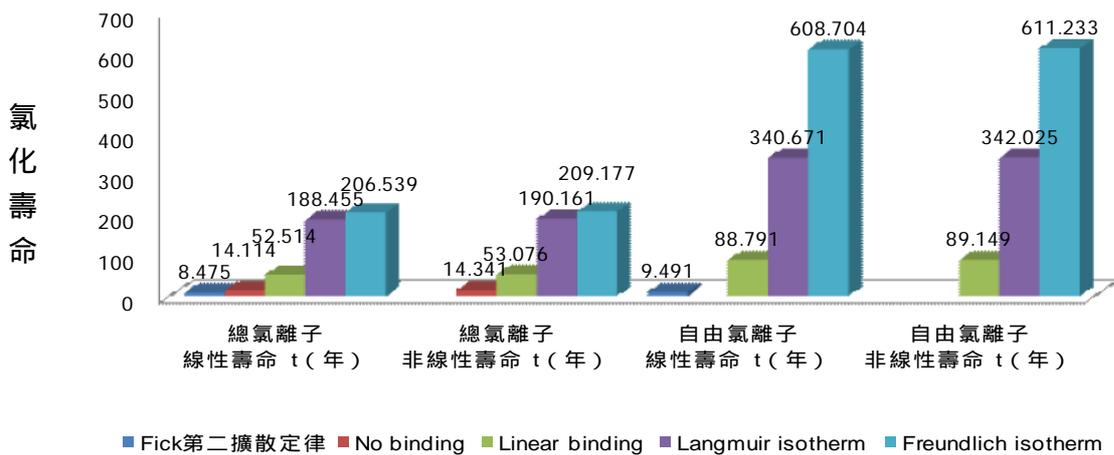
圖 4.7 大津橋橋梁構件編號系統示意圖



(a) 橋台 (Abutment)

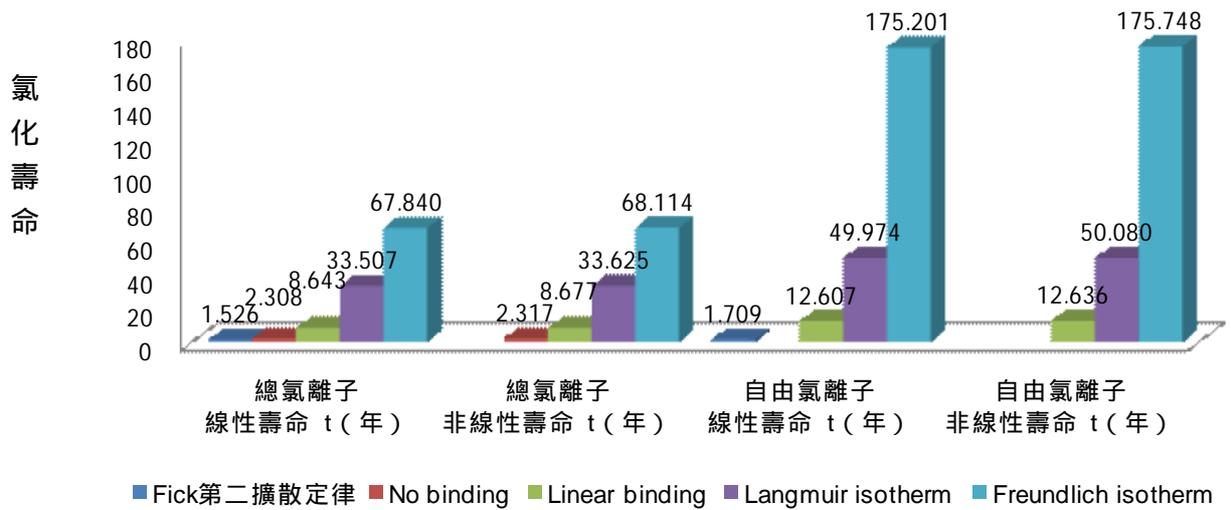


(b) 橋面版 (Slab)

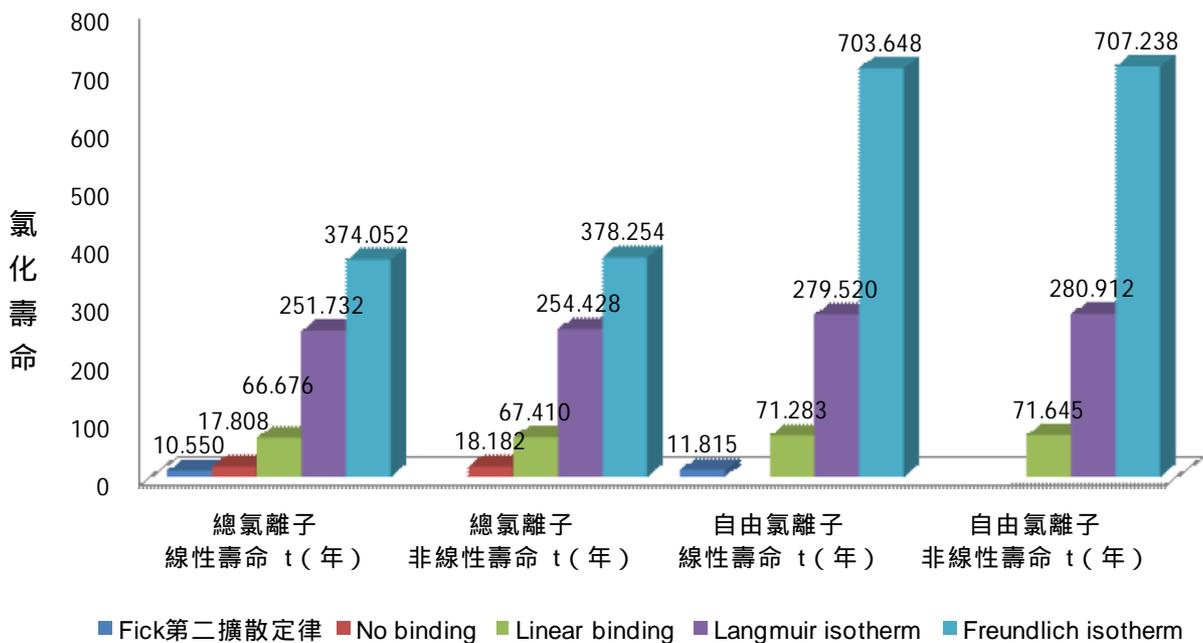


(c) 橋墩 (Pier)

圖 4.8 林邊橋暴露於氯離子為 0.05763 (% 混凝土重) 之環境下，四種束縛數學模式代入線性與非線性解析解氯化壽命之預測



(a) 橋面版 (Slab)



(b) 橋墩 (Pier)

圖 4.9 大津橋暴露於氯離子為 0.01130 (% 混凝土重) 四種束縛數學模式代入線性與非線性解析解氯化壽命之預測

表 4-3 林邊橋基本資料

項 目	內 容
橋梁位置	位於省道台 17 線 274K+387.54~274K+846.54，跨越林邊溪 聯絡林邊鄉與佳冬鄉。
施工期間	民國 65 年 4 月完工，71 年 10 月拓寬完成
材料強度	
A. 無筋混凝土	1 : 3 : 6 混凝土
B. 鋼筋混凝土	$f'c=210 \text{ kgf/cm}^2$
C. 預力混凝土樑	$f'c=350 \text{ kgf/cm}^2$ $f_{ci}=320 \text{ kgf/cm}^2$
D. 鋼筋（中級竹節鋼筋）	$f'c=280 \text{ kgf/cm}^2$
E. 預力鋼腱	12-7mm HTW（大樑用） 17-5mm HTW（橫隔樑用） 7mm ， 5mm $f's=16500 \text{ kgf/cm}^2$ （7mm） $f's=17500 \text{ kgf/cm}^2$ （5mm） $f_y=14500 \text{ kgf/cm}^2$ （7mm） $f_y=15500 \text{ kgf/cm}^2$ （5mm）
鋼筋保護層厚度	
橋面版	2.9 cm
欄杆柱	2.0 cm
樑、隔樑	3.3 cm
橋墩	7.5 cm
橋台	7.0 cm
結構形式與配置	
上部結構-鋼筋混凝土倒 T 型樑	本橋共分為 15 孔共長 459 公尺，跨徑配置為 15@30.6；橋面拓寬後，總寬度為 20 公尺，淨寬 19 公尺。橋面版厚度為 17 公分，設計摩擦層 5 公分。
下部結構-單柱橋墩及橋台	鋼筋混凝土構造物，採用樁基礎。
地質情況	主要為沈泥質砂、沈泥質黏土。

表 4-4 大津橋基本資料

項 目	內 容
橋梁位置	位於省道台 27 線 25K+015，跨越濁口溪，聯絡茂林與高樹
施工期間	民國 60 年 6 月完工，79 年 12 月拓寬完成
材料強度	
A. 鋼筋混凝土 (橋台、橋墩、欄杆、擋土牆)	$f'c=210 \text{ kgf/cm}^2$
B. 鋼筋混凝土 (橋面版、RC 樑、隔樑)	$f'c=210 \text{ kgf/cm}^2$
C. 沈箱	$f'c=280 \text{ kgf/cm}^2$
D. 竹節鋼筋	$f_y=2800 \text{ kgf/cm}^2$
鋼筋保護層厚度	
橋面版、欄杆、橋台胸牆	2.5 cm
下部結構軀體	5.0 cm
下部結構基礎	7.5 cm
結構形式與配置	
上部結構-鋼筋混凝土倒 T 型樑	共分為 10 孔共長 249.89 公尺，跨徑配置為 10@24.989 (平均值)。原橋淨寬 4.6 公尺，拓寬後橋面總寬度為 12.6 公尺，淨寬 12 公尺。橋面版厚度為 18 公分，設計摩擦層 5 公分。
下部結構-單柱橋墩及橋台	鋼筋混凝土構造物，採用沈箱基礎，P1~P4 及 P6~P9 深度 10 公尺，P5 深度 4.1 公尺。
地質情況	卵石與頁岩

表 4-5 林邊橋氯離子濃度與保護層厚度

檢測構件	林 邊 橋			
	檢測點位	總氯離子濃度 (% 混凝土重量)	自由氯離子濃度 (% 混凝土重量)	保護層厚度 (mm)
橋台 (Abutment)	A1-1	0.0084	0.0034	70
	A2-1	0.0082	0.0033	70
	A2-2	0.0086	0.0034	70
橋面版 (Slab)	1S4-8	0.0195	0.0078	29
	2S1-8	0.0168	0.0067	29
	S3	0.0070	0.0028	29
	S4	0.0096	0.0038	29
	S5	0.0082	0.0033	29
	S6	0.0071	0.0028	29
	S7	0.0052	0.0021	29
	S8	0.0073	0.0029	29
	S9	0.0074	0.0030	29
	S10	0.0047	0.0019	29
橋墩 (Pier)	P1-1	0.0066	0.0026	75
	P1-2	0.0066	0.0026	75
	P1-3	0.0062	0.0025	75
	P2-1	0.0068	0.0027	75
	P2-2	0.0068	0.0027	75
	P2-3	0.0075	0.0030	75
	P12-1	0.0093	0.0037	75
	P12-2	0.0147	0.0059	75
	P12-3	0.0065	0.0026	75
	P12-3 帽樑	0.0074	0.0030	75
	P13-1	0.0104	0.0042	75
	P13-2	0.0070	0.0028	75
	P13-2 帽樑	0.0063	0.0025	75
	P13-3	0.0097	0.0039	75
	P14-1 柱	0.0067	0.0027	75
	P14-2 柱	0.0060	0.0024	75
	P14-3 柱	0.0062	0.0025	75
P14-3 帽樑	0.0070	0.0028	75	

* 自由氯離子濃度是引用 Lu^[17]總與自由氯離子倍數關係推求。

表 4-6 大津橋氯離子濃度與保護層厚度

大 津 橋				
檢測構件	檢測點位	總氯離子濃度(% 混凝土重)	自由氯離子濃度(% 混凝土重)	保護層厚度 (mm)
橋面版 (Slab)	5S3-2	0.0026	0.0010	25
	5S3-5	0.0018	0.0007	25
	6S1-5	0.0030	0.0012	25
橋墩 (Pier)	P2-1 柱(1)	0.0033	0.0013	50
	P2-1 柱(2)	0.0033	0.0013	50
	P2-2 柱(1)	0.0093	0.0037	50
	P2-2 柱(2)	0.0063	0.0025	50
	P3-1 柱	0.0023	0.0009	50
	P3-1 帽樑(1)	0.0023	0.0009	50
	P3-1 帽樑(2)	0.0043	0.0017	50
	P3-2 柱	0.0103	0.0041	50
	P3-2 帽樑(1)	0.0043	0.0017	50
	P3-2 帽樑(2)	0.0033	0.0013	50
	P4-1 柱	0.0033	0.0013	50
	P4-1 帽樑(1)	0.0033	0.0013	50
	P4-1 帽樑(2)	0.0023	0.0009	50
	P4-2 柱	0.0083	0.0033	50
	P4-2 帽樑(1)	0.0033	0.0013	50
	P4-2 帽樑(2)	0.0033	0.0013	50
	P5-1 帽樑(1)	0.0053	0.0021	50
	P5-1 帽樑(2)	0.0033	0.0013	50
	P5-2 帽樑(1)	0.0033	0.0013	50
	P5-2 帽樑(2)	0.0023	0.0009	50
	P6-1 帽樑(1)	0.0033	0.0013	50
	P6-1 帽樑(2)	0.0033	0.0013	50
	P6-2 柱	0.0033	0.0013	50
	P6-2 帽樑(1)	0.0043	0.0017	50
P6-2 帽樑(2)	0.0033	0.0013	50	

* 自由氯離子濃度是引用 Lu[17]總與自由氯離子倍數關係推求。

表 4-7 計算林邊橋氯化壽命在總氯離子之真實擴散係數為定值的狀況
下所代入計算之參數

橋梁 構件	數學 模式	總氯離子					
		表面氯離子 濃度 C_0 (% 混凝土重)	氯離子濃 度 C_t (% 混凝土重)	真實擴散係數 D_{ct} (mm^2/year)	深度 x (mm)		
橋台 (Abutment)	Fick 第二擴 散定律	0.05763	0.00842	88.3008	70	-----	-----
	No binding	0.05763	0.00842	88.3008	70	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.00842	88.3008	70	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.00842	88.3008	70	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.00842	88.3008	70	1.0254	0.36
橋面版 (Slab)	Fick 第二擴 散定律	0.05763	0.00929	88.3008	29	-----	-----
	No binding	0.05763	0.00929	88.3008	29	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.00929	88.3008	29	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.00929	88.3008	29	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.00929	88.3008	29	1.0254	0.36
橋墩 (Pier)	Fick 第二擴 散定律	0.05763	0.00767	88.3008	75	-----	-----
	No binding	0.05763	0.00767	88.3008	75	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.00767	88.3008	75	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.00767	88.3008	75	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.00767	88.3008	75	1.0254	0.36

* 各構件氯離子濃度 C_t (% 混凝土重) 為表 2-3 總氯離子濃度 (% 混凝土重) 平均。

* 各構件可蒸發含水量 W_e 為 8% (混凝土重)。

表 4-8 計算林邊橋氯化壽命在自由氯離子之真實擴散係數為定值的狀況下所代入計算之參數

橋梁構件	數學模式	自由氯離子					
		表面氯離子濃度 C_0 (% 混凝土重)	氯離子濃度 C_f (% 混凝土重)	真實擴散係數 D_{cf} (mm^2/year)	深度 x (mm)		
橋台 (Abutment)	Fick 第二擴散定律	0.05763	0.00337	31.536	70	-----	-----
	No binding	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.00337	31.536	70	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.00337	31.536	70	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.00337	31.536	70	1.0254	0.36
橋面版 (Slab)	Fick 第二擴散定律	0.05763	0.00372	31.536	29	-----	-----
	No binding	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.00372	31.536	29	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.00372	31.536	29	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.00372	31.536	29	1.0254	0.36
橋墩 (Pier)	Fick 第二擴散定律	0.05763	0.00307	31.536	75	-----	-----
	No binding	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.00307	31.536	75	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.00307	31.536	75	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.00307	31.536	75	1.0254	0.36

* 各構件氯離子濃度 C_f (% 混凝土重) 為表 2-3 自由氯離子濃度 (% 混凝土重) 平均。

* 各構件可蒸發含水量 w_e 為 8% (混凝土重)。

表 4-9 計算大津橋氯化壽命在總氯離子之真實擴散係數為定值的狀況
下所代入計算之參數

橋梁 構件	數學 模式	總氯離子					
		表面氯離子 濃度 C_0 (% 混凝土重)	氯離子濃 度 C_t (% 混凝土重)	真實擴散係數 D_{ct} (mm^2/year)	深度 x (mm)		
橋面版 (Slab)	Fick 第二擴 散定律	0.01130	0.00244	88.3008	25	-----	-----
	No binding	0.01130	0.00244	88.3008	25	-----	-----
	Linear binding	0.01130	0.00244	88.3008	25	0.2195	-----
	Langmuir isotherm	0.01130	0.00244	88.3008	25	1.1252	0.3442
	Freundlich isotherm	0.01130	0.00244	88.3008	25	1.0251	0.36
橋墩 (Pier)	Fick 第二擴 散定律	0.01130	0.00421	88.3008	50	-----	-----
	No binding	0.01130	0.00421	88.3008	50	-----	-----
	Linear binding	0.01130	0.00421	88.3008	50	0.2195	-----
	Langmuir isotherm	0.01130	0.00421	88.3008	50	1.1252	0.3442
	Freundlich isotherm	0.01130	0.00421	88.3008	50	1.0251	0.36

* 各構件氯離子濃度 C_t (% 混凝土重) 為表 2-4 總氯離子濃度 (% 混凝土重) 平均。

* 各構件可蒸發含水量 w_e 為 8% (混凝土重)。

**表 4-10 計算大津橋氯化壽命在自由氯離子之真實擴散係數為定值的
狀況下所代入計算之參數**

橋梁 構件	數學 模式	自由氯離子					
		表面氯離子 濃度 C_0 (% 混凝土重)	氯離子濃度 C_f (%混凝土 重)	真實擴散係數 D_{cf} (mm ² /year)	深度 x (mm)		
橋面版 (Slab)	Fick 第二擴散 定律	0.01130	0.00097	31.536	25	-----	-----
	No binding	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Linear binding	0.01130	0.00097	31.536	25	0.2195	-----
	Langmuir isotherm	0.01130	0.00097	31.536	25	1.1252	0.3442
	Freundlich isotherm	0.01130	0.00097	31.536	25	1.0251	0.36
橋墩 (Pier)	Fick 第二擴散 定律	0.01130	0.00168	31.536	50	-----	-----
	No binding	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Linear binding	0.01130	0.00168	31.536	50	0.2195	-----
	Langmuir isotherm	0.01130	0.00168	31.536	50	1.1252	0.3442
	Freundlich isotherm	0.01130	0.00168	31.536	50	1.0251	0.36

* 各構件氯離子濃度 C_f (% 混凝土重) 為表 2-4 自由氯離子濃度 (% 混凝土重) 平均。

* 各構件可蒸發含水量 w_e 為 8% (混凝土重)。

表 4-11 計算林邊橋氯化壽命在總氯離子之真實擴散係數為不定值的
狀況下所代入計算之參數

橋梁 構件	數學 模式	總氯離子					
		表面氯離子 濃度 C_0 (% 混凝土重)	氯離子濃 度 C_t (% 混凝土重)	真實擴散係數 D_{ct} (mm^2/year)	深度 x (mm)		
橋台 (Abutment)	Fick 第二擴散 定律	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	No binding	0.05763	0.0085603	88.32429	70	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.0085356	88.32612	70	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.0085169	99.41740	70	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.0093304	632.63408	70	1.0254	0.36
橋面版 (Slab)	Fick 第二擴散 定律	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	No binding	0.05763	0.0093347	88.30216	29	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.0093247	88.28759	29	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.0093238	100.55114	29	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.0094925	630.03178	29	1.0254	0.36
橋墩 (Pier)	Fick 第二擴散 定律	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	No binding	0.05763	0.0078492	88.32579	75	-----	-----
	Linear binding	0.05763	0.0077893	88.32662	75	0.2177	-----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.0077717	98.41307	75	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.0089234	634.91610	75	1.0254	0.36

* 各構件可蒸發含水量 w_e 為 8% (混凝土重)。

表 4-12 計算林邊橋氯化壽命在自由氯離子之真實擴散係數為不定值的狀況下所代入計算之參數

橋梁構件	數學模式	自由氯離子					
		表面氯離子濃度 C_0 (% 混凝土重)	氯離子濃度 C_f (% 混凝土重)	真實擴散係數 D_{cf} (mm^2/year)	深度 x (mm)		
橋台 (Abutment)	Fick 第二擴散定律	----	----	----	----	----	----
	No binding	----	----	----	----	----	----
	Linear binding	0.05763	0.0033986	31.55062	70	0.2177	----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.0033982	33.11662	70	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.0117489	232.33051	70	1.0254	0.36
橋面版 (Slab)	Fick 第二擴散定律	----	----	----	----	----	----
	No binding	----	----	----	----	----	----
	Linear binding	0.05763	0.0037391	31.55027	29	0.2177	----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.0037377	33.28019	29	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.0109421	231.79375	29	1.0254	0.36
橋墩 (Pier)	Fick 第二擴散定律	----	----	----	----	----	----
	No binding	----	----	----	----	----	----
	Linear binding	0.05763	0.0030977	31.55116	75	0.2177	----
	Langmuir isotherm	0.05763	0.0030974	32.97695	75	1.1160	0.3407
	Freundlich isotherm	0.05763	0.0124603	232.80677	75	1.0254	0.36

* 各構件可蒸發含水量 w_e 為 8% (混凝土重)

表 4-13 計算大津橋氯化壽命在總氯離子之真實擴散係數為不定值的
狀況下所代入計算之參數

橋梁 構件	數學 模式	總氯離子					
		表面氯離子 濃度 C_0 (% 混凝土重)	氯離子濃 度 C_t (% 混凝土重)	真實擴散係數 D_{ct} (mm^2/year)	深度 x (mm)		
橋面版 (Slab)	Fick 第二擴 散定律	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	No binding	0.01130	0.0024501	88.44942	25	-----	-----
	Linear binding	0.01130	0.0024502	88.43674	25	0.2195	-----
	Langmuir isotherm	0.01130	0.0024491	91.64305	25	1.1252	0.3442
	Freundlich isotherm	0.01130	0.0024721	655.36454	25	1.0251	0.36
橋墩 (Pier)	Fick 第二擴 散定律	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	No binding	0.01130	0.0042661	88.32368	50	-----	-----
	Linear binding	0.01130	0.0042396	88.32613	50	0.2195	-----
	Langmuir isotherm	0.01130	0.0042388	93.87821	50	1.1252	0.3442
	Freundlich isotherm	0.01130	0.0042606	647.17176	50	1.0251	0.36

* 各構件可蒸發含水量 w_c 為 8% (混凝土重)

表 4-14 計算大津橋氯化壽命在自由氯離子之真實擴散係數為不定值的狀況下所代入計算之參數

橋梁 構件	數學 模式	自由氯離子					
		表面氯離子 濃度 C_0 (% 混凝土重)	氯離子濃度 C_f (% 混凝 土重)	真實擴散係數 D_{cf} (mm^2/year)	深度 x (mm)		
橋面版 (Slab)	Fick 第二擴 散定律	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	No binding	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Linear binding	0.01130	0.0009741	31.45935	25	0.2195	-----
	Langmuir isotherm	0.01130	0.0009738	31.91282	25	1.1252	0.3442
	Freundlich isotherm	0.01130	0.0017859	237.13848	25	1.0251	0.36
橋墩 (Pier)	Fick 第二擴 散定律	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	No binding	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Linear binding	0.01130	0.0016916	31.48521	50	0.2195	-----
	Langmuir isotherm	0.01130	0.0016914	32.27226	50	1.1252	0.3442
	Freundlich isotherm	0.01130	0.0017630	235.35112	50	1.0251	0.36

* 各構件可蒸發含水量 w_e 為 8% (混凝土重)。

表 4-15 林邊橋與大津橋線性對於非線性氯化壽命百分誤差

橋梁構件	數學模式	林邊橋		大津橋	
		百分誤差 (%)		百分誤差 (%)	
		總氯離子	自由氯離子	總氯離子	自由氯離子
橋台(Abutment)	No binding	1.214	————	————	————
	Linear binding	0.997	0.394	————	————
	Langmuir isotherm	0.830	0.386	————	————
	Freundlich isotherm	1.181	0.401	————	————
橋面版 (Slab)	No binding	0.387	————	0.407	————
	Linear binding	0.285	0.245	0.396	0.232
	Langmuir isotherm	0.277	0.229	0.351	0.212
	Freundlich isotherm	0.306	0.253	0.404	0.312
橋墩 (Pier)	No binding	1.605	————	2.100	————
	Linear binding	1.070	0.403	1.101	0.508
	Langmuir isotherm	0.905	0.397	1.071	0.498
	Freundlich isotherm	1.277	0.415	1.123	0.510

表 4-16 冬山河五結橋梁 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 三階段腐蝕壽命預測結果

腐蝕階段	t_i (years)						t_p (years)			t_{corr} (years)				
預測方法	Weyers	LZCL	Hookman	AJMF (1)	AJMF (2)	Guirguis	Bazant	Bazant 修改 1	Bazant 修改 2	Bazant	Modified Bazant	CW	Liu	Farady's law
預測結果	79.09	23.74	50.32	76.02	96.18	89.29	3.59	10.77	1.06	9.07	27.80	3.5	66.71	3.76

表 4-17 新竹誠仁橋 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 三階段腐蝕壽命預測結果

腐蝕階段	t_i (years)						t_p (years)			t_{corr} (years)				
預測方法	Weyers	LZ CL	Hookman	AJMF (1)	AJMF (2)	Guirguis	Bazant	Bazant 修改 1	Bazant 修改 2	Bazant	Modified Bazant	CW	Liu	Farady's law
預測結果	186.68	50.31	148.64	173.19	239.42	199.39	14.34	43.03	4.23	9.8	24.09	3.5	161.08	6.45

第五章 案例說明

5.1 宜蘭縣五結橋

宜蘭縣冬山河受潮汐影響，海水容易倒灌，每逢颱風豪雨即氾濫成災，宜蘭縣政府和水利會，在冬山河出海口設置一座清水防潮閘門，自動調節上下游水位，防止海水倒灌，1969年，防潮大閘門落成使用，20孔閘，每孔2.5公尺，對調節水量發揮極大的功能，自此以後，山洪暴發或海水倒灌成災，便成為冬山河下游居民過往記憶。1981年，因負荷量需求，又開工設置大型自動閘門，防汛防洪功能，更形增強。



圖 5.1 五結橋現況

5.1.1 現場檢驗結果

1. 橋梁暴露環境因子

(1) 橋梁齡期因子

冬山河五結橋梁於一1969年開始啟用，而檢測時間為2011年，橋梁設計齡期為50年，因此齡期影響係數取1。

(2) 環境調查因子

冬山河受潮汐影響，海水容易倒灌，每逢颱風豪雨即氾濫成災，宜蘭縣政府和水利會，在冬山河出海口設置一座清水防

潮閘門，自動調節上下游水位，防止海水倒灌，因此環境調查係數取 1.15。

2. 鑽心試體抗壓強度

(1) 試體鑽心取樣位置說明

於橋樑結構表面鑽心取樣(取樣後採無收縮水泥修復)，分別將取樣試體進行鑽心抗壓強度試驗、硬固混凝土氯離子含量試驗、混凝土中性化深度試驗，並於鑽心位置進行鋼筋混凝土腐蝕量測，最後採無收縮水泥填充修復鑽心孔洞。

(2) 鑽心試體抗壓強度數據

鑽心試體抗壓強度試驗結果，表 5-1。

表 5-1 鑽心試體抗壓強度試驗結果

取樣位置	修正係數	極限載重 (kgf)	受力面積 (cm ²)	抗壓強度 (kgf/cm ²)
1-1	0.93	3536	24.19	136
1-3	1	6974	24.11	289
1-4	1	7034	24.11	292
1-5	1	2957	24.11	123
1-7	1	8237	24.11	342
2-2	0.96	10165	24.02	406
2-5	0.94	7958	24.19	309
2-8	0.89	14283	24.02	529
2-11	0.93	14952	24.11	575
2-14	0.93	12694	24.11	490
3-1	0.91	8314	24.02	315
3-3	0.93	11443	24.11	441
3-6	0.94	5951	24.11	232
3-8	0.93	11741	24.11	453
3-10	0.97	15339	24.02	619
4-2	0.95	10476	24.02	414
4-5	0.98	12817	24.02	523
4-9	0.95	10941	24.11	431
4-14	0.93	10109	24.02	391
4-15	0.97	5166	24.02	209

3. 反彈錘試驗

(1) 反彈錘試驗取樣位置說明

a. 第一區取樣位置說明

第一區反彈錘試驗位置，為編號 1-1、1-3、1-4、1-5 及 1-6 柱中央與 1-1、1-4、1-7 柱上方板表面，共 8 點，詳如圖 5.2 所示。

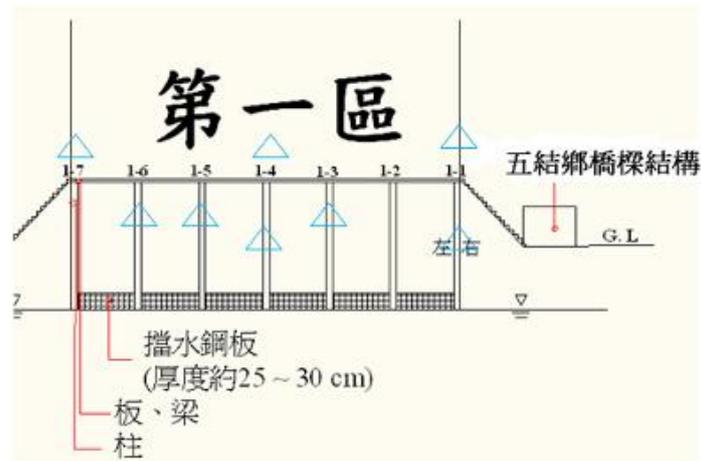


圖 5.2 第一區調查位置

b. 第二區取樣位置說明

第二區反彈錘試驗位置，為編號 2-2、2-5、2-8、2-11 及 2-14 牆面右側，共 5 點，詳如圖 5.3 所示。

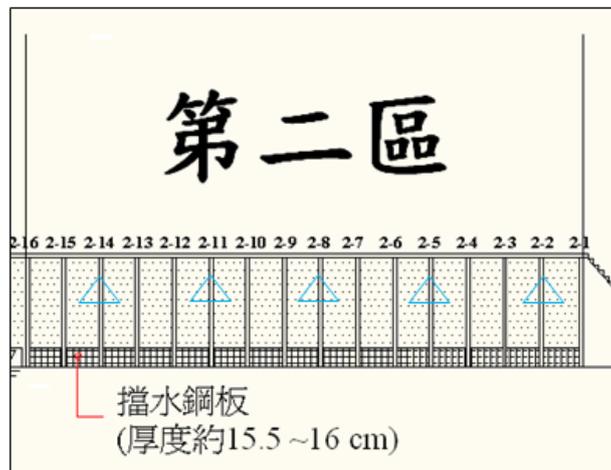


圖 5.3 第二區調查位置

c. 第三區取樣位置說明

第三區反彈錘試驗位置，為編號 3-1、3-3、3-6、3-8 及 3-10 牆面右側，共 5 點，詳如圖 5.4 所示。

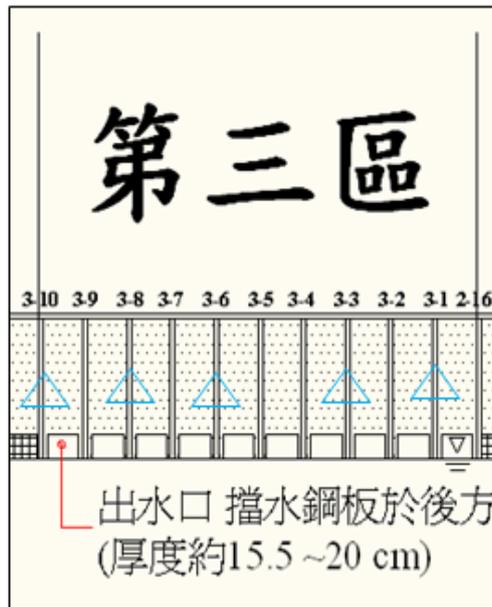


圖 5.4 第三區調查位置

d. 第四區取樣位置說明

第四區腐蝕量測及混凝土強度量測位置，為編號 4-2、4-5、4-9、4-14 及 4-15 牆面右側，共 5 點，詳如圖 5.5 所示。

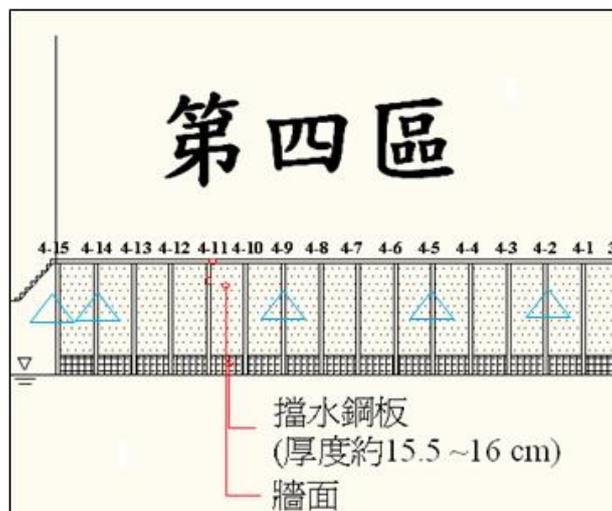


圖 5.5 第四區調查位置

(2) 反彈錘試驗結果

由於建造橋梁年代久遠，初始承重構件混凝土極限抗壓強度設計值無法取得，估此設計值約為 147kg/cm^2 ，計算出 $K_{bm}=2.10$ ， K_{bt} 皆大於 0.95，抗壓強度的評定標度值取 1。

表 5-2 反彈錘試驗結果

第一區		第二區	
取樣位置	抗壓強度 (kgf/cm^2)	取樣位置	抗壓強度 (kgf/cm^2)
1-1	218	2-2	377
1-3	137	2-4	447
1-4	137	2-8	323
1-5	160	2-11	294
1-7	278	2-14	225
1-1 板上方	207	-	-
1-4 板上方	164	-	-
1-7 板上方	192	-	-
第三區		第四區	
取樣位置	抗壓強度 (kgf/cm^2)	取樣位置	抗壓強度 (kgf/cm^2)
3-1	301	4-2	290
3-3	267	4-5	320
3-6	262	4-9	308
3-8	344	4-14	310
3-10	363	4-15	216

4. 鋼筋探測試驗結果

(1) 鋼筋探測位置說明如圖 5.6 所示。

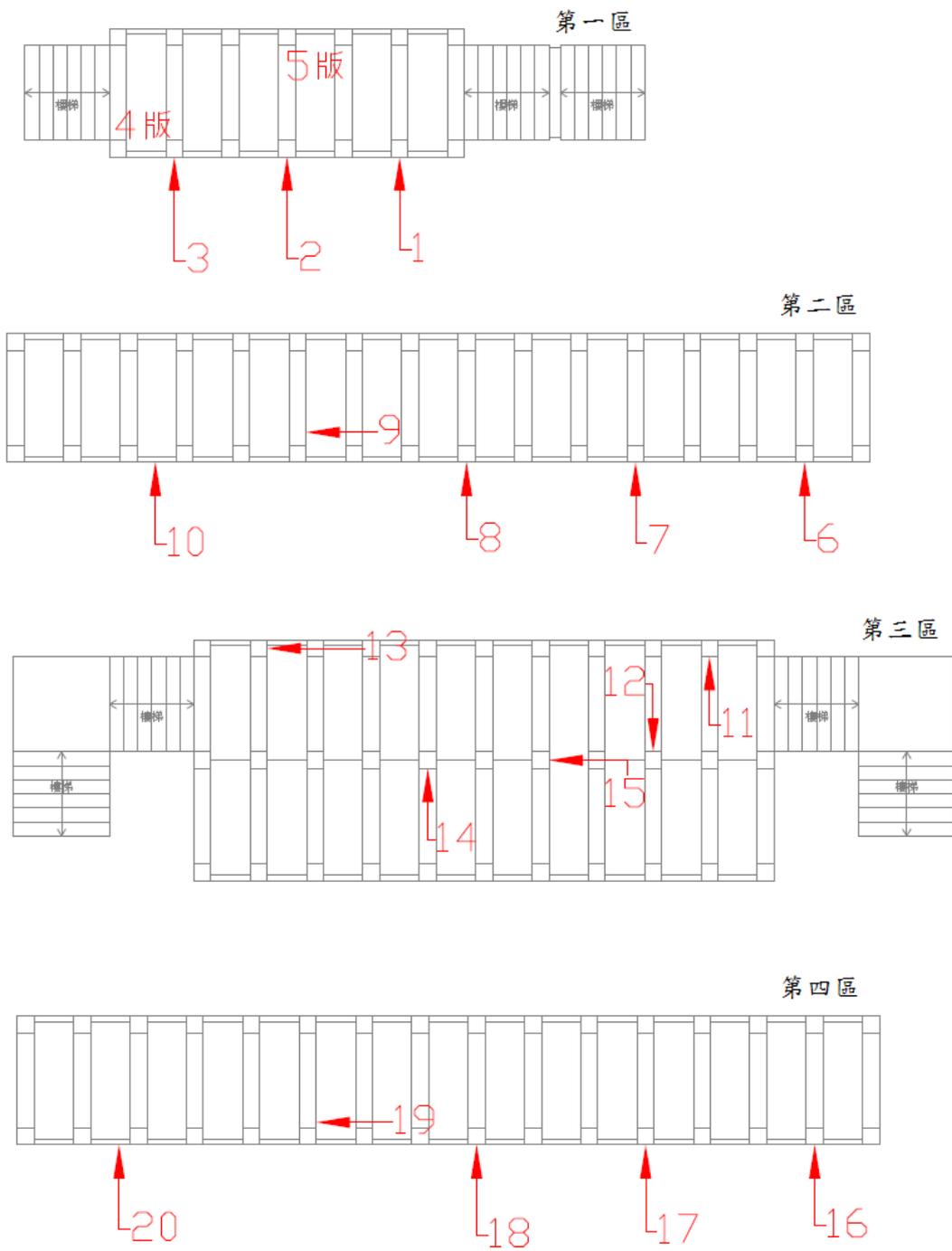
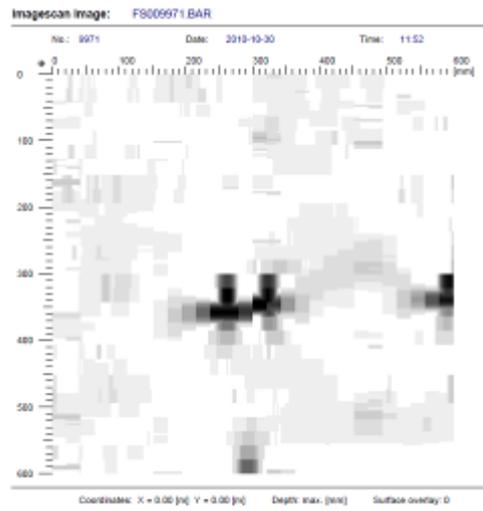


圖 5.6 五結橋梁鋼筋探測位置示意圖

(2) 鋼筋探測試驗結果

圖 5.7、圖 5.8 為訊號影像接收情形，試驗結果，如表 5-3 所示。實測保護層特徵值為 D_{ne} 與設計值 D_{nd} 的比值 $D_{ne}/D_{nd}=1.01$ ，混凝土保護層厚度的評定標準值取 1。



$$\frac{D_{ne}}{D_{nd}} = 1.01$$

圖 5.7 編號 1 第一區探測影像(模糊)

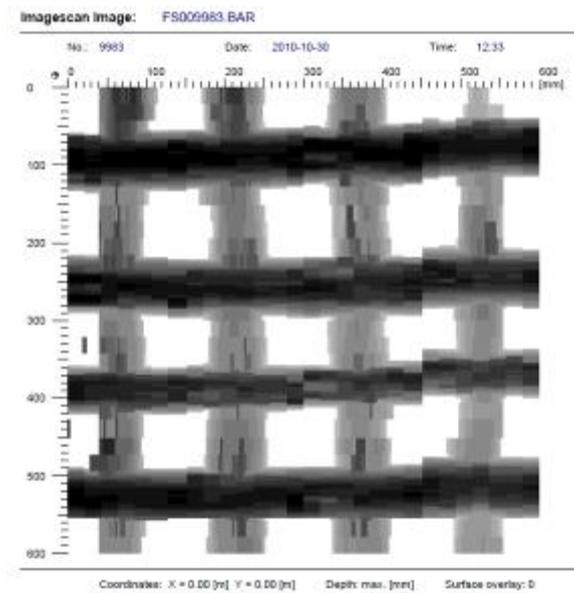


圖 5.8 編號 19 第四區探測影像(清晰)

表 5-3 鋼筋探測試驗結果

編號	位置	主筋	箍筋	保護層厚度 (cm)
1	第一區	保護層厚度過深，無清晰影像		
2		2-#7	#4@25cm	5
3		2-#7	#4@22cm	6.5
4		直向筋 #4@20cm	橫向筋 #4@20cm	7.5
5		直向筋 #4@20cm	橫向筋 #4@30cm	7
6	第二區	2-#7	#4@19cm	7
7		2-#7	#4@18cm	6.5
8		2-#7	#4@18cm	7
9		3-#7	#4@22cm	5
10		直向筋 #4@15cm	橫向筋 #4@15cm	7
11	第三區	3-#7	#4@21cm	6.5
12		4-#7	#4@19cm	6
13		3-#7	#4@21cm	8
14		2-#7	#4@20cm	7
15		3-#7	#4@20cm	5.5
16	第四區	2-#7	#4@20cm	5.5
17		2-#7	#4@22cm	7
18		2-#7	#4@18cm	6
19		3-#7	#4@21cm	6
20		直向筋 #4@15cm	橫向筋 #4@15cm	8

5. 敲擊回音試驗結果

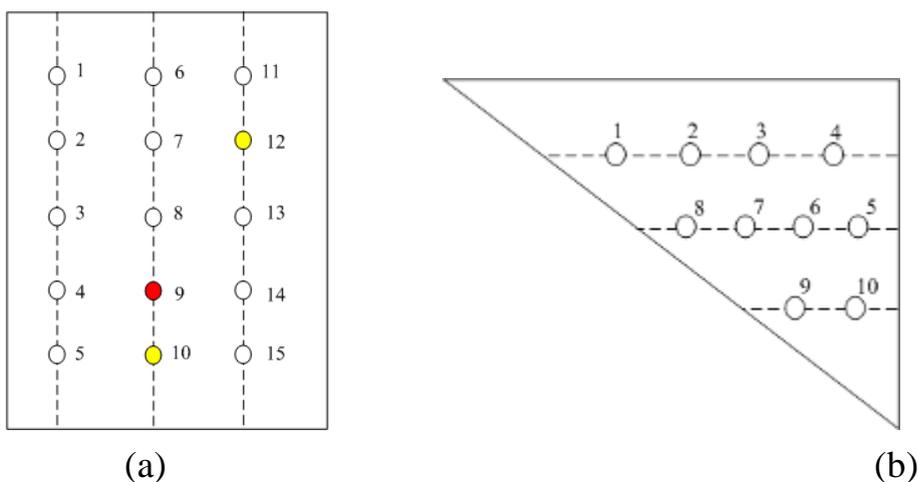


圖 5.9 接收點順序及可能裂縫位置：(a)腹版；(b)翼版

表 5-4 推估混凝土裂縫深度(cm)

翼版				腹版					
編號	深度	編號	深度	編號	深度	編號	深度	編號	深度
1.1	0.094	6.1	0.038	1.1	0.643	6.1	0.17	11.1	0.152
1.2	1.01	6.2	0.038	1.2	0.636	6.2	0.14	11.2	0.354
1.3	0.793	6.3	0.036	1.3	0.597	6.3	0.14	11.3	0.231
2.1	0.077	7.1	0.126	2.1	0.378	7.1	0.411	12.1	散射
2.2	0.208	7.2	0.145	2.2	0.724	7.2	0.448	12.2	散射
2.3	0.268	7.3	0.135	2.3	0.513	7.3	0.163	12.3	散射
3.1	0.39	8.1	0.022	3.1	0.54	8.1	0.21	13.1	0.186
3.2	0.311	8.2	0.016	3.2	0.551	8.2	0.214	13.2	0.074
3.3	0.602	8.3	0.013	3.3	0.412	8.3	0.276	13.3	0.446
4.1	0.058	9.1	0.152	4.1	0.206	9.1	散射	14.1	0.253
4.2	0.025	9.2	0.236	4.2	0.198	9.2	散射	14.2	0.218
4.3	0.195	9.3	0.1665	4.3	0.172	9.3	散射	14.3	0.299
5.1	0.162	10.1	0.067	5.1	0.227	10.1	散射	15.1	0.152
5.2	0.078	10.2	0.037	5.2	0.291	10.2	散射	15.2	0.152
5.3	0.072	10.3	0.043	5.3	1.34	10.3	散射	15.3	0.216

6. 腐蝕量測試結果

實測腐蝕電流 0.079~3.735($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、腐蝕速率 0.04~1.72(mpy)，腐蝕電流的評定標度值取 2。腐蝕電位-124~823(mV)，腐蝕電位的評定標度值取 1。

表 5-5 腐蝕量測試結果

取樣位置	腐蝕電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐蝕電位(mV)	腐蝕速率(mpy)
1-1	0.245	67.491	0.11
1-3	0.599	732.09	0.28
1-4	0.357	823.09	0.16
1-5	0.357	821.15	0.16
1-7	0.079	393.97	0.04
2-2	3.735	-64.19	1.72
2-5	0.33	-70.23	0.15

取樣位置	腐蝕電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐蝕電位(mV)	腐蝕速率(mpy)
2-8	0.35	-100.1	0.16
2-11	1.696	-100.9	0.78
2-14	0.526	-74.09	0.24
3-1	0.646	97.671	0.30
3-3	1.522	187.38	0.70
3-6	1.069	-124.2	0.49
3-8	1.822	-53.22	0.84
3-10	0.963	-87.24	0.44
4-2	0.576	-91.08	0.26
4-5	0.725	-58.43	0.33
4-9	0.703	-43.89	0.32
4-14	0.764	-1.097	0.35
4-15	0.283	-36.76	0.13

7. 混凝土中性化深度試驗結果

實測中性化深度與保護層厚度數據如表 5-7，構件皆小於 1，混凝土中性化深度評定標準值取 1。

表 5-6 混凝土中性化深度試驗結果

取樣位置	中性化深度(cm)	取樣位置	中性化深度(cm)
1-1	0.1	3-1	0.2
1-3	0.2	3-3	0.3
1-4	0.2	3-6	0.1
1-5	0.1	3-8	0.2
1-7	0.2	3-10	0.1
2-2	0.3	4-2	0.2
2-5	0.1	4-5	0.1
2-8	0.1	4-9	0.3
2-11	-	4-14	0.3
2-14	0.2	4-15	0.3

表 5-7 中性化深度及鋼筋保護層厚度檢測評定

編號	位置	中性化深度 (cm)	保護層厚 度 (cm)	中性化深度/ 保護層厚度
1	第一區	0.1	-	-
2		0.2	5	0.04
3		0.2	6.5	0.03
4		0.1	7.5	0.01
5		0.2	7	0.03
6	第二區	0.3	7	0.04
7		0.1	6.5	0.02
8		0.1	7	0.01
9		-	5	-
10		0.2	7	0.03
11	第三區	0.2	6.5	0.03
12		0.3	6	0.05
13		0.1	8	0.01
14		0.2	7	0.03
15		0.1	5.5	0.02
16	第四區	0.2	5.5	0.04
17		0.1	7	0.01
18		0.3	6	0.05
19		0.3	6	0.05
20		0.3	8	0.04

8. 硬固混凝土水溶性氯離子含量試驗結果

實測混凝土中的氯離子含量在 0.0075%~0.2%。氯離子含量大於 0.15% 就不確定誘發鋼筋腐蝕。氯離子含量的評定標度值取 2。

表 5-8 混凝土水溶性氯離子含量試驗結果

取樣位置	氯離子含量 %	氯離子含 量(kg/cm ³)	取樣 位置	氯離子含量 %	氯離子含 量(kg/cm ³)
1-1	0.0093	0.214	3-1	0.0257	0.591
1-3	0.0492	1.132	3-3	0.0106	0.244
1-4	0.0348	0.8	3-6	0.0266	0.612
1-5	0.0126	0.29	3-8	0.257	0.591
1-7	0.0259	0.596	3-10	0.0068	0.156
2-2	0.0135	0.311	4-2	0.0228	0.524
2-5	0.0091	0.209	4-5	0.0081	0.186
2-8	0.0109	0.251	4-9	0.0149	0.343
2-11	0.0111	0.255	4-14	0.0151	0.347
2-14	0.0153	0.352	4-15	0.0075	0.173

5.1.2 混凝土材料耐久性評估結果

表 5-9 五結橋混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重

項目		耐久性 指標數	權重值	評定 標準值
鋼筋腐蝕現況			0.44	
	腐蝕電位	1	0.11	1
	中性化深度	2	0.26	1
	氯離子	3	0.35	2
	腐蝕電流	4	0.28	2
混凝土現況			0.56	
	電阻係數	5	0.05	0
	抗壓強度	6	0.14	1
混凝土 表面損傷	裂縫	7	0.19	0.61
	開裂、剝落或露筋與缺角	8	0.25	
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.17	
	混凝土保護層厚度	10	0.2	1
環境影響因子				
	齡期影響係數		1	
	環境調查係數		1.15	
	重車流量係數		1	

將統計好的數據帶入單一構件的耐久性評估計算公式如下：

$$D_1 = \delta_1 \cdots \delta_k \left(\sum_{i=1}^2 \beta_i \frac{\sum_{m=1}^n A_{im} \alpha_m}{\sum_{m=1}^n \alpha_m} \right) \dots \dots \dots (3.5)$$

$$D_1 = 1 \times 1.15 \times 1 \left[\begin{array}{l} (0.44 \times \frac{(1 \times 0.11 + 1 \times 0.26 + 2 \times 0.35 + 2 \times 0.28)}{(0.11 + 0.26 + 0.35 + 0.28)}) + \\ (0.56 \times \frac{(3 \times 0.14 + 3 \times 0.19 + 2 \times 0.25 + 3 \times 0.17 + 2 \times 0.2)}{(0.14 + 0.19 + 0.25 + 0.17 + 0.2)}) \end{array} \right]$$

$$= 2.45$$

見表 3-22，範圍 $2 \leq D_1 < 3$ 之間構件耐久等級等級為 2，耐久性狀況為較好。

表 5-10 五結橋整體結構耐久性評定

構(部)件	名稱	推薦權重	評定標度值
1	橋台與基礎	0.23	-
2	橋墩與基礎	0.24	-
3	支承	0.07	4
4	上部主要承重構件	0.26	3.06
5	上部一般承重構件	0.12	3.66
6	橋面鋪裝	0.02	3
7	人行道承重構件	0.05	3
8	欄杆或護欄	0.01	3
備註	當評定標度值為“1”時，表示好的狀態，或表示沒有設置的構造部件，不再進行疊加。		

有了單一構件之耐久性評定，則可以針對橋梁整體結構耐久性作整體評定如下式所示：

$$D_{\text{total}} = \sum_{j=1}^q D_j Y_j \dots\dots\dots(3.6)$$

$$D_{\text{total}} = \frac{(4 \times 0.07 + 3.06 \times 0.26 + 3.66 \times 0.12 + 3 \times 0.02 + 3 \times 0.05 + 3 \times 0.01)}{(0.07 + 0.26 + 0.12 + 0.02 + 0.05 + 0.01)}$$

$$= 3.31$$

$D_{\text{total}}=3.31$ ， $3 \leq D_{\text{total}} < 4$ ，結構耐久等級評定度為 3，結構整體耐久性狀況為一般。

5.1.3 殘餘壽命預測結果

1. 誘發期 t_i 計算過程：

$$x = k\sqrt{t}$$

(1) 首先求 k，將式中 x 代入中性化深度試驗結果之平均值(18mm)，t 代入橋梁服役時間(42 年)，即可求得 k 為 0.27774，取值 0.278。

(2) 求得 k 後，將 x 改代為保護層厚度(25mm；此厚度是假設為橋面板之保護厚度，乃因五結橋梁結構沒有保護層厚度的試驗結果及相關資料，並非橋梁的真實保護層厚度)，則算出 $t = t_i = 8145$ (年)。破千年原因在於中性化深度的值，一般而言，碳化深度約 10 年 1cm，42 年平均中性化深度 1.8mm 實屬異常，其可信度不夠。故補充 Hookham 法^[Hookham, 1992]。

$$t_i = K_c \times K_e \times x^2 + K_a \times x$$

(3) K_c ：混凝土品質係數(取 7.59)， K_e ：環境係數(取 0.85)， K_a ：活態腐蝕係數(取 4.0)， K_c 、 K_e 、 K_a 之值皆引用自[Hookham, 1992]，x：保護層厚度(代 2.5cm)將保護層厚度代入後，得 $t_i = 7.59 \times 0.85 \times 2.5^2 + 4 \times 2.5 = 50.32$ (年)。

2. 鈍化期 t_p 計算過程：

$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_s}}} \right)^2$$

L ：保護層厚度(25mm)， D ：氯離子擴散係數(代 77mm²/yrs)， C_s ：混凝土表面孔隙中的氯離子濃度(代 25kg/m³)， C^* ：鈍態保護膜處的氯離子臨界濃度(代 8kg/m³)， D 、 C_s 、 C^* 皆因無試驗資料故引用自[Liang et al., 2002]。

$$t_p = 3.59(\text{年})$$

由於 t_p 之預測都是以 Bazant 為主體作延伸，故無須補充。

3. 傳遞(或腐蝕)期 t_{corr} 計算過程：

$$\text{式 } t_{corr} = \frac{1}{4} t_i = 2036.25(\text{年})$$

其可信度同樣太低，故補充

Faraday's law^{[Fontana, 1987][Mangat and Elfgarf, 1999]}

$$t_{corr} = \frac{\delta \rho_{st} Z F}{A i}$$

A 為鐵的原子量(代 56)， i 為腐蝕電流密度試驗結果之平均值(0.86735μA/cm²=0.86735×10⁻⁶A/cm²)， Z 為鐵離子價數(代 2)， δ 為材料損失(代 1.2×10⁻¹⁰cm)， F 為法拉第常數(代 96485.33 C/mol)， ρ_{st} 為鋼筋密度(代 7.85g/cm³)，計算結果 t_{corr} =3.76(年)

4. 剩餘壽命預測結果

$$\text{使用壽命 } t = t_i + t_p + t_{corr} = 50.32 + 3.59 + 3.76 = 57.67(\text{年})$$

$$\text{已使用時間 } t_{ap} = 42(\text{年})$$

$$\text{剩餘壽命 } t_r = t - t_{ap} = 57.67 - 42 = 15.67(\text{年})$$

5.2 新竹市誠仁橋

誠仁橋位於新竹市香山區，於 1944 年竣工。如圖 5.10 所示。



圖 5.10 誠仁橋現況

5.2.1 現場檢驗結果

1. 橋梁暴露環境因子

(1) 橋梁齡期因子

誠仁橋梁於 1944 年開始啟用，而檢測時間為 2011 年，橋梁設計齡期為 50 年，因此齡期影響係數取 1.1。

(2) 環境調查因子

新竹誠仁橋座落在一般的環境，受日曬、雨淋或風蝕的構件，因此環境調查係數取 1.10。

(3) 重車流量因子

因誠仁橋是對外聯繫的重要橋梁之一，每天車流量高達估 1,500 輛以上，因此重車流量係數取 1.15。

2. 鑽心試體抗壓強度試驗

(1) 試體鑽心取樣位置說明

試體鑽心取樣位置說明圖。由前視圖得知誠仁橋橋體大致是以 RC 梁、版、護欄及砌磚基座所組成，而本計畫主要針對橋梁 RC 結構進行現地試驗，經現場勘察規劃後，於橋面版上以新

竹市方向為起點，第 1 支、第 3 支砌磚柱及新竹市方向終點隨機取 4 點作為現地試驗區域，詳如圖 5.11 俯視圖所示。

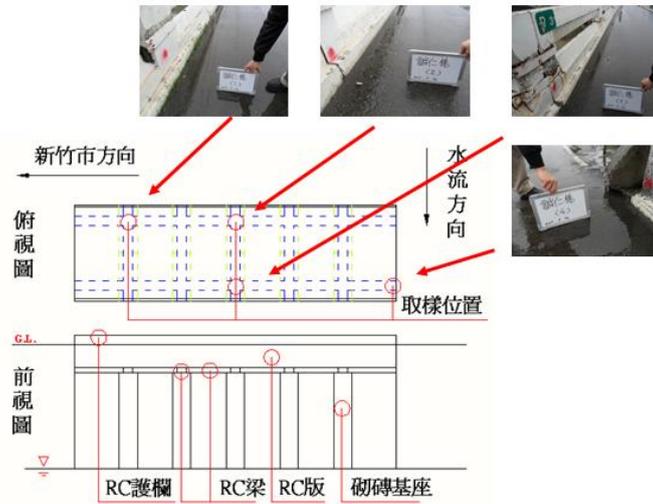


圖 5.11 誠仁橋示意圖

(2) 鑽心試體抗壓強度試驗結果

由於建造橋梁年代久遠，初始承重構件混凝土極限抗壓強度設計值無法取得，藉由取樣 9 處試體之平均值，估此設計值為 147kg/cm^2 計算出 $K_{bm}=3.10$ ， K_{bt} 皆大於 0.95，抗壓強度的評定標度值取 1。

3. 鋼筋探測試驗

(1) 鋼筋探測位置說明如圖 5.12 及圖 5.13 所示。

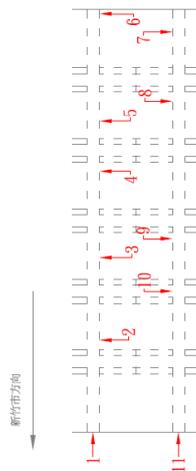


圖 5.12 誠仁橋鋼筋探測位置示意圖

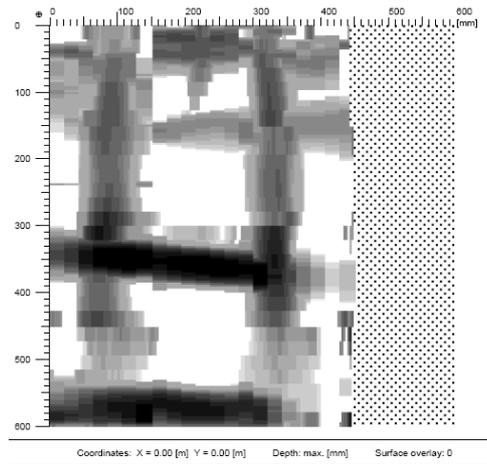


圖 5.13 誠仁橋編號 12 訊號影像

(2) 鋼筋探測試驗結果

實測保護層特徵值為 D_{ne} 與設計值 D_{nd} 的比值 $D_{ne}/D_{nd}=0.86$ ，混凝土保護層厚度的評定標準值取 2。

表 5-11 鋼筋探測試驗結果

編號	位置	主筋	箍筋	保護層厚度(cm)
1	第一區	3-#5	#3@23cm	6.5
2		2-#5	#3@33cm	5.5
3		2-#5	#3@17cm	5
4	第二區	2-#5	#3@32cm	4.5
5		2-#5	#3@14cm	5.5
6		3-#5	#3@15cm	7
7	第三區	2-#5	#3@15cm	5.5
8		2-#5	#3@35cm	4.5
9		2-#5	#3@16cm	6
10	第四區	2-#5	#3@34cm	5
11		3-#5	#3@18cm	6
12		2-#5	#3@15cm	6

4. 腐蝕量測試驗

實測腐蝕電流 $0.398\sim 1.057(\mu A/cm^2)$ 、腐蝕速率 $0.18\sim 0.47(mpy)$ ，腐蝕電流的評定標度值取 2。腐蝕電位 $407.1\sim 583(mV)$ ，腐蝕電位的評定標度值取 1。

表 5-12 腐蝕電流密度量測試驗結果

取樣位置	腐蝕電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐蝕電位 (mV)	腐蝕速率 (mpy)
第一區	0.398	407.1	0.18
第二區	0.671	425.8	0.30
第三區	1.057	570.1	0.47
第四區	0.849	583	0.37

5. 混凝土中性化深度試驗結果

實測中性化深度與保護層厚度數據如表 5-14，構件皆小於 1，混凝土中性化深度評定標準值取 0。

表 5-13 混凝土中性化深度試驗結果

取樣位置	中性化深度(cm)
1	0.0
2	0.0
3	0.0
4	0.0

6. 硬固混凝土氯離子含量試驗

實測混凝土中的氯離子含量在 0.0043%~0.0141%。氯離子含量小於 0.15%發生誘發鋼筋腐蝕很小。氯離子含量的評定標度值取 1。

表 5-14 混凝土水溶性氯離子含量試驗結果

取樣位置	氯離子含量%	氯離子含量 (kg/cm^3)
第一區	0.0141	0.324
第二區	0.0059	0.136
第三區	0.0043	0.099
第四區	0.0051	0.117

5.2.2 混凝土材料耐久性評估結果

表 5-15 誠仁橋混凝土構件材料狀況檢測指標與耐久性指標權重

項目		耐久性 指標數	權重值	評定 標準值	
鋼筋腐蝕現況			0.44		
	腐蝕電位	1	0.11	1	
	中性化深度	2	0.26	0	
	氯離子	3	0.35	1	
	腐蝕電流	4	0.28	2	
混凝土現況			0.56		
	電阻係數	5	0.05	0	
	抗壓強度	6	0.14	1	
混凝土 表面損傷	裂縫	7	0.19	0.61	5
	開裂、剝落或露筋與缺角	8	0.25		4
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.17		3
	混凝土保護層厚度	10	0.2		2
環境影響因子					
	齡期影響係數		1.1		
	環境調查係數		1.1		
	重車流量係數		1.15		

將統計好的數據帶入單一構件的耐久性評估計算公式如下：

$$D_1 = \delta_1 \cdots \delta_k \left(\sum_{i=1}^2 \beta_i \frac{\sum_{m=1}^n A_{im} \alpha_m}{\sum_{m=1}^n \alpha_m} \right) \dots \dots \dots (3.22)$$

$$1.1 \times 1.1 \times 1.15 \times \left[\begin{aligned} & \left(0.44 \times \frac{(1 \times 0.11 + 1 \times 0.35 + 2 \times 0.28)}{(0.11 + 0.35 + 0.28)} \right) + \\ & \left(0.56 \times \frac{(1 \times 0.14 + 5 \times 0.19 + 4 \times 0.25 + 3 \times 0.17 + 2 \times 0.2)}{(0.14 + 0.19 + 0.25 + 0.17 + 0.2)} \right) \end{aligned} \right]$$

$$= 3.3$$

表 5-16 誠仁橋整體結構耐久性評定表

構(部)件	名稱	推薦權重	評定標度值
1	橋台與基礎	0.23	-
2	橋墩與基礎	0.24	-
3	支承	0.07	-
4	上部主要承重構件	0.26	4.06
5	上部一般承重構件	0.12	4.66
6	橋面鋪裝	0.02	5
7	人行道承重構件	0.05	5
8	欄杆或護欄	0.01	5
備註	當評定標度值為“1”時，表示好的狀態，或表示沒有設置的構造部件，不再進行疊加。		

有了單一構件之耐久性評定，則可以針對橋梁整體結構耐久性作整體評定如下式所示：

$$D_{total} = \sum_{j=1}^q D_j \gamma_j \dots\dots\dots(3.23)$$

$$D_{total} = \frac{(4.46 \times 0.26 + 4.46 \times 0.12 + 5 \times 0.02 + 5 \times 0.05 + 5 \times 0.01)}{(0.26 + 0.12 + 0.02 + 0.05 + 0.01)} = 4.55$$

結果介於 $4 \leq D_{total} < 5$ ，結構耐久等級評定度為 4，結構整體耐久性狀況為較差。

5.2.3 殘餘壽命預測結果

1. 誘發期 t_i 計算過程：

$$x = k\sqrt{t}$$

因誠仁橋試驗結果中性化深度為 0，故補充：Hookham 法^[Hookham, 1992]

$$t_i = K_c \times K_e \times x^2 + K_a \times x$$

K_c ：混凝土品質係數(取 7.59)， K_e ：環境係數(取 0.85)， K_a ：態腐蝕係數(取 4.0)， K_c 、 K_e 、 K_a 之值皆引用自^[Hookham, 1992]， x ：鋼筋探測試驗結果的保護層厚度平均值(代 5cm)。

將保護層厚度代入後，得 $t_i = 7.59 \times 0.85 \times 4.52 + 4 \times 5 = 148.64$ (年)。

因兩百年壽命亦超出常理，故必須再補充：

LZCL 法 [Liang et al., 2011]

$$C(x, t) = [C_i + (C_s e^{kt} - C_i) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt_x}}\right)] e^{-kt}$$

C_i ：混凝土中氯離子起始濃度(假設為 0 kg/m^3)， C_s ：混凝土表面氯離子濃度(代 25 kg/m^3)， k ：化學反應係數(0.001)， D ：氯離子擴散係數(代 $77 \text{ mm}^2/\text{yr}$)， x ：擴散深度(代保護層厚度 50mm)， erfc 為補誤差函數， D 、 C_s 、 k 皆引用自^[Liang et al., 2002]。

求得 $t_i = 50.313$ 年

備註：操作商業軟體 Mathematica 時，補誤差函數 erfc 之使用指令為 $\operatorname{Erfc}[\]$ 。

2. 活化期 t_p 計算過程：

$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_s}}} \right)^2$$

L ：保護層厚度(50mm)， D ：氯離子擴散係數(代 $77 \text{ mm}^2/\text{yrs}$)， C_s ：混凝土表面的氯離子濃度(代 25 kg/m^3)， C^* ：鈍態保護膜處的氯離子濃度(代 8 kg/m^3)， D 、 C_s 、 C^* 因無試驗資料故引用自^[Liang et al., 2002]。

$t_p=14.3436$ (年)

由於 t_p 之預測都是以 Bazant 為主體作延伸，故無須補充。

3. 鋼筋腐蝕期 t_{corr} 計算過程：

$$t_{corr} = \frac{1}{4}t_i = 15.96 \text{ 年}$$

但因誠仁橋無中性化深度，且 t_i 採不同算法，故補充：

Faraday's law [Fontana, 1987][Mangat and Elfgarf, 1999]

$$t_{corr} = \frac{\delta \rho_{st} Z F}{A i}$$

A 為鐵的原子量，i 為腐蝕電流密度試驗結果之平均值
($0.505925 \mu \text{ A/cm}^2 = 0.505925 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$)，

Z 為鐵離子價數 (代 2)， δ 為材料損失 (代 $1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}$)，

F 微法拉第常數 (代 96485.33 C/mol)， ρ_{st} 為鋼筋密度 (代
 7.85 g/cm^3)，計算結果 $t_{corr}=6.45$ (年)

4. 剩餘壽命預測結果：

使用壽命 $t = t_i + t_p + t_{corr} = 50.313 + 14.3436 + 6.45 = 71.1066 \approx 71.11$ (年)

已使用時間 $t_{ap} = 67$ (年)

剩餘壽命 $t_r = t - t_{ap} = 71.11 - 67 = 4.11$ (年)

5.3 綜合評定結果

1. 冬山河五結橋梁和新竹誠仁橋梁屬於年代久遠之橋梁，但因皆曾對此座橋梁進行維修補強，且在結構體表層皆均勻覆蓋噴凝土補強，保護橋梁不受外界有害因子之腐蝕。
2. 新竹誠仁橋梁為所評估之橋梁中耐久性最為不良，推估其原因如下：由於其河道改道情形明顯可見，且無淤積現象，可知其沖刷情況較為嚴重。而專家評估耐久性關鍵因子之結果中，權重比重佔最

大者，即為沖刷所造成的危害，因此評估此二座橋梁結構物後可明顯的發現，誠仁橋耐久性指數為最低。

3. 橋梁中部份構件有混凝土之修復後再度剝落損傷的現象發生，尤以新竹誠仁橋梁為甚。推究其原因可能為所用之修復材料，未含適當的抗中性化或抗氯離子鹽害添加物，以致於未能達到防蝕效果，因此在現場檢測時即發現新竹誠仁橋梁腐蝕情況較冬山河五結橋梁嚴重。

第六章 結論

1. RC 橋樑材料耐久性評估，依據層級分析法完成問卷設計並召開兩次專家座談會，彙整專家意見經由一致性計算，獲得耐久性指標之權重，並可利用計算值評定既有 RC 橋梁耐久性等級。
2. 針對 RC 橋梁結構材料及單一構件的耐久性，已建立本土化綜合評估模式。
3. 完成二座案例橋梁現況檢測，檢試驗項目包括抗壓強度、氯離子滲透深度、中性化程度、腐蝕電流、腐蝕電位、腐蝕速率與混凝土開裂情況，依據檢測資料完成案例耐久性評估及殘餘使用壽命預測評估。評估結果大致合理。
4. 氯離子所引發之鋼筋腐蝕，採用線性擴散方程式或非線性擴散方程式估算 RC 橋樑使用壽命，所得結果大致相同。
5. 完成 RC 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊初稿擬定與專家座談(如附件)並擬於 100/12 舉辦訓練講習。

參考文獻

1. Pourbaix, M., *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*, pp. 307-321, Pergamon Press, New York, 1966.
2. Bazant Z. P., "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures Theory," *Journal of the Structural Division*, Vol.105, No. ST6, ASCE, 1979a, pp.1137-1153.
3. Bazant Z. P., "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures Application," *Journal of the Structural Division*, Vol.105, No. ST6, ASCE, 1979b, pp.1155-1166.
4. Tuutti, "Corrosion of Steel in Concrete," *CBI Forskning Research*, 1982.
5. Mehta, P.K. and Gerwick, B.C., *Journal of Concrete International*, 1982, 4, pp.45-51.
6. Cady, P. D., Weyers, R. E., "Deterioration Rate of Concrete Bridge Decks." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.110, No.1, 1984, pp.33-44.
7. Zadeh, L.A., *Fuzzy Sets and Applications: Selected Papers*, R.R. Yager, S. Ovchinnikov, R.M. Tong and H.T. Nguyen, editors, Wiley-Interscience, 1987.
8. Guirguis, S., "A Basis for Determining Minimum Cover Requirement for Durability," *Concrete Durability*, ACI, Detroit, 1987, pp.447-463.
9. Fontana, M. G. *Corrosion engineering*, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York. (1987)
10. Guirguis, S. "A basis for determining minimum cover requirement for durability." *Concrete durability*, ACI, Detroit, pp. 447-463 (1987).
11. Treadaway, K. "Corrosion period" *Corrosion of steel in concrete*, P. Schiessl, ed., Chapman and Hall, London. (1988).
12. Arya, C. and Newman, J.B., *An Assessment of Four Methods of Determining the Free Chloride Content of Concrete*, Materials and

- Structures, Vol.23, 1990, pp.319-330.
13. Somerville, G., *The Design Life of Structures*. Edi. Blackie and Son Ltd., 1992.
 14. Hookham, C. J., "Rehabilitation of Great Lakes Steel's No. One Dock," ACI Symposium of Durability of Concrete, ACI, Detroit, 1992.
 15. Sergi, G., Yu, S.W., and Page, C.L., Diffusion of Chloride and Hydroxyl Ions in Cementitious Materials Exposed to a Saline Environment, *Magazine of Concrete Research*, Vol.44, No.158, 1992, pp.63-69.
 16. Mehta, P.K. and Monteiro, J.M., *Concrete Structures, Properties and Materials*, 2nd Edition, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1993.
 17. Yu, S.W., Sergi, G., and Page, C.L., Ionic Diffusion Across an Interface between Chloride-Free and Chloride-Containing Cementitious Materials, *Magazine of Concrete Research*, Vol.45, No.165, 1993, pp.257-261.
 18. Tang, L., and Nilsson, L.O., Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Pastes and Mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol.23, No.2, 1993, pp.247-253.
 19. Liu, Y. "Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforcement concrete structures." PhD dissertation, Dept. of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Va., 171. (1996).
 20. Fookes, P.G., "Aggregates: a Review of Prediction and Performance, Prediction of Concrete Durability", *Proceedings of Stats 21st Anniversary Conference*, E&FN SPON, London, 1997.
 21. Liu, Y., Weyers, R. E., "Modeling the Time-to-Corrosion Racking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures," *ACI Materials Journal*, Vol.95, No.6, 1998, pp.675-681.
 22. Weyers, R.E. "Service life model for concrete structures in chloride laden environments", *ACI Materials Journal*, July-August, 1998, 445-453.

23. Amey, S. L., Johnson, D. A., Miltenberger, M. A., and Farzam H., "Temperature Dependence of Compressive Strength of Conversion-Inhibited High Alumina Cement Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.1, January-February 1998, pp.27-36.
24. Weyers, R.E., Pyc, W., and Spirnkel, M.M. "Estimating the service life of epoxy-coated reinforcing steel." *ACI Mater. J.*, Vol. 95, No. 5, pp. 546-557 (1998).
25. Amey, S. L., Johnson, D. A., Miltenberger, M. A., and Farzam, H. "Temperature dependence of compressive strength of conversioninhibited high alumina cement concrete." *ACI Struct. J.*, Vol. 95, No. 1, pp. 27-36 (1998).
26. 昭凌工程顧問股份有限公司，橋梁安全檢測報告 – 林邊橋，臺灣省政府交通處公路局，1998 年。
27. 昭凌工程顧問股份有限公司，橋梁安全檢測報告 – 大津橋，臺灣省政府交通處公路局，1998 年。
28. Racutanu, G.; "The real service life of road bridges in Sweden- A case study", 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components, National Research Council Canada 1999, 56-70.
29. Ehlen, M.A., "BridgeLCC 1.0 User Manual", NIST, 1999.
30. Custer, R. L., Scarcella, J. A., Stewart, B. R. (1999). The Modified Delphi Technique - A Rotational Modification. *Journal of Vocational and Technical Education*. Vol. 15, Num. 2, Spring 1999.
31. Mangat, P. S., Elgarf, M. S., "Flexural Strength of Concrete Beam with Corroding Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.1, January-February 1999, pp.149-158.
32. Liang, M.T., Wang, K.L., and Liang, C.H., Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures, *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.1411-1418.
33. 臺灣鐵路管理局，橋梁檢查及評估計畫，1999 年。

34. Martin-Perez, B., Zibara, H., Hooton, R.D., and Thomas, M.D.A., A Study of the Effect of Chloride Binding on Service Life Predictions, Cement and Concrete Research, Vol.30, 2000, pp.1215-1223.
35. Liang, M.T., Zhao, G. F., Chang, C. W., and Liang, C. H. "Evaluating carbonation damage to concrete bridge using a grey forecasting method combined with a statistical method." J. Chin. Inst. Eng., Vol. 24, No. 1, pp. 85-94 (2001).
36. "混凝土標準示方書-【維持管理編】", 日本土木學會, 丸善株式會社, 2001年。
37. Liang, M. T., Lin, L. H., Liang, C. H., "Service Life Prediction of Existing Reinforced Concrete Bridges Exposed to Chloride Environment", Journal of Infrastructure Systems, Vol.9, 2002, pp.76-85.
38. Liang, M.T., Lin, L.H., and Liang, C.H, Service Life Prediction of Existing Reinforced Concrete Bridge Exposed to Chloride Environment, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol.8, No.3, 2002, pp.76-85.
39. Lu, X., Li, C., and Zhang, H., Relationship between the Free and Total Chloride Diffusivity in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.32, 2002, pp.323-326.
40. 牛荻濤, 混凝土結構耐久性與壽命預測, 科學出版社, 北京, 2003。
41. 邱贊儒。建立橋梁耐久性評估方法之研究。國立中央大學碩士論文, 2003年。
42. 交通部技術標準規範公路類公路工程, 公路養護計畫, 2003年。
43. 張勁泉、宿健、程壽山、何玉珊等編著。混凝土舊橋材質狀況與耐久性檢測評定指南及工程實例。人民交通出版社, 2006年。
44. 藺石柱、胡長明、李燕飛, 在役鋼筋混凝土結構承載力壽命分析, 西安建築科技大學學報, 第38卷, 第1期, 2006年, pp.69-71.
45. 方聖安, 鋼筋混凝土橋樑分別遭受氯離子與碳化之壽命預測, 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文, 2007年。

46. Kansara, K.D. and Ramanjaneyulu, K., "Service-life-performance evaluation of RC bridges under environmental actions", IE(I) Journal, Vol. 88, pp.55-62, 2008.
47. Saaty, Thomas L.. "Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process". RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics) 102 (2): 2008, pp.251-318.
48. 鄭皓元，混凝土中自由與總氯離子之關係研究與壽命預測，國立臺灣海洋大學河海工程學系，碩士論文，6月，2008年。
49. Liang, M. T., Huang, R., Fang, S. A., and Yeh, C. J., "Service life prediction of pier for the existing reinforced concrete bridges in chloride-laden environment. " Journal of Marine Science and Technology, Vol. 17, No.4, pp. 312-319 (2009).
50. Y. Kitsutaka, Methodology on the Integrity Evaluation of Deteriorated Concrete Structures, The 4th Asian Concrete Federation International Conference, Taipei, Taiwan, 2010.
51. 交通部運輸研究所，橋梁殘餘壽命與保全評估決策模式之研發(1/4)，2011。
52. Liang, M. T., Chang, J. J., Chang, H. T., and Yeh, C. J., "Rust-expansion-crack service life predictions of existing reinforced concrete bridge/viaduct using time-dependent reliability analysis." Journal of Marine science and Technology, (Accepted) (2012).
53. Kirkpatrick, T. J., "Impact of specification changes on chloride induced corrosion service life of Virginia bridge decks", Virginia report.
54. Saaty, Thomas L. (1996). Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications. ISBN 0-9620317-9-8.
55. Crank, J., "The Mathematics of Diffusion," Oxford University Press, Oxford.

56. Wolfram Research, Inc., Mathematica User Manual, Version 3.0 (100 Trade Center Drive, Champaign, IL 61820-7237, USA).
57. Hookham, C. j. "Rehabilitation of Great Lakes Steel's no. one dock." ACI Symp. Of Durability of Concrete, ACI, Detroit.
58. 王仲宇，陳明正，臺灣地區橋梁延壽技術回顧與探討，pp.1-50。

附錄一

期中期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
李明君委員		
1.文研究成果良好，進度超前。	1.感謝委員肯定	同意。
2.著手進行問卷設計並採用層級分析法，屆時請專家學者填寫時，應詳細說明如何填表。	2.感謝委員意見，將修改問卷內容，以利填表。	同意。
3.有關使用壽命、殘餘壽命、氯化壽命、服役壽命、銹脹開裂壽命、承載力壽命等名稱，請定義說明。	3.設 $t_i = t_c = Cl^-$ 或 CO_2 由橋梁表面孔隙入侵至鈍態保護層並達到瓶頸濃度的時間， t_p = 活化期間 t_{cr} = 銹脹開裂時間 t_{corr} = 鋼筋銹脹至設定劣化度之時間 t_s = 服役時間 則氯化壽命 = $t_i = t_c$ 服役壽命 = t_s 銹脹開裂壽命 = $t_{cr} = t_i + t_p$ 使用壽命 = t_i = $t_i + t_p + t_{corr}$ = 承載力壽命 殘餘壽命 = $t_r = t_i - t_s$	同意。
4.初步成果利用 4 種數學模式進行使用壽命預測，提到以 Langmuir isotherm 模式之預測最準確。其林邊橋和天津橋橋面版的殘餘壽命分別為 46 年和 35 年，但此二橋均是超過 30 年的老橋，是否高估兩橋壽命。	4.如果從建造完成開始使用至今，兩座橋都不要檢測、維修和補強，則確實是高估了壽命。然而，此二橋梁都曾經維修和補強，如此就會延長壽命，所以沒有高估壽命。	同意。
5.圖 4.5 與圖 4.6 其縱座標無單位，橫座標 Bar Chart，數學模式說明不	5.縱座標單位是「年」，橫座標及 BAR CHART 本來是以不同顏色代表不	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
清。	同的數學模式，黑白當然無法相對應，可使用序號區別之。	
蔡佐良委員		
1.Fick 滲透理論之解宜採用前進模式，才能計算滲透深度。	1.感謝委員意見，氯離子滲透深度定義為當該處氯離子濃度等於瓶頸濃度。使用前進模式，是可以計算出氯離子滲透前緣，也可計算出氯離子滲透深度。雖然前進模式在物理上較為合理，然而針對氯離子滲入深度而言，本計畫所採用之概估使用的 FICK 滲透理論計算值與前進模式差異有限。	同意。
2.實驗方式可採用多維滲透方式進行，以縮短時間。	2.如需進行室內滲透試驗時，會採用委員建議之多維方式進行。	同意。
王和源委員		
1.研究架構完整，預期對 RC 橋梁材料耐久性之預估可見參考及研究貢獻。並可作為未來設計之參考依據。	1.感謝委員肯定。	同意。
2.年代以民國或西元表示，建議一致。	2.日後統一以西元表達。	同意。
3.耐久性問卷之對象規劃?驗證在南部地區，本系師生可支援之。	3.問卷擬邀請產官學界人士參與。至於實地驗證，若有需要在南部進行，多謝委員提供支援。	同意。
4.研究文獻 1、15、16、26、40 請附上年代。	4.文獻 1 改為: 王仲宇、陳明正；臺灣地區橋樑延壽技術回顧與探討，交通建設延壽技術研討會，2001 年 3 月 9 日。 文獻 15 改為： T.J.	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	<p>KIRKPATRICK, IMPACT OF SPECIFICATION CHANGES ON CHLORIDE INDUCED CORROSION SERVICE LIFE OF VIRGINIA BRIDGE DECKS, THESIS IN CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, VIRGINIA POLYTECHNIC INSTITUTE AND STATE UNIVERSITY, BLACKSBURG, VA, 2001.</p> <p>文獻 16 是 1999。 26 是 1975，40 是 1999。</p>	
5.全部進度期程及目前進度情形? 摘要可加期中成果。	5.將補列進度完成表。	同意。
6.請說明以林邊橋及大津橋為案例原由??與近代案例之可能差異情形，因設計條件已不同。	6.使用昭凌公司林邊橋及大津橋的檢測報告做為模式驗證分析。針對不同結構物設計，必須要就其設計條件進行分析比較。	同意。
7.P28 圖 2.8 服役壽命??服務壽命??	7.圖 2.8 中之服役壽命(SERVICE LIFE)代表著使用時間，其與表現指標(PERFORMANCE)間之關係可由模型中建立。也就是可以得到所關心的構件表現(如最大承受彎矩)與使用時間之間的關係。如果定義在 0.8 倍的原始設計值以下則為失敗 (FAILURE)，可以找出對應之服務	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	壽命。	
8.參考文獻甚多(45 篇)很用心，只是 2000 年以後僅 14 篇，可考量較新之文獻加入。	8.謝謝委員之建議。 較新之文獻將納入期末報告中。	同意。
顏聰委員		
1.期中報告書前面宜增列計畫主持人及參與工作之研究人員。	1.感謝委員意見，遵照辦理。	同意。
2.第一章，1.2 節內 7-9 頁所述與 1.1 節說明有頗多重複者，亦較類似為文獻回顧，宜加調整。	2.已作適度調整。	同意。
3.文獻蒐集完善並能整理出適當之參考資料。	3.感謝委員肯定。	同意。
4.對於 RC 橋材料耐久性評估，計畫研究大致上只參考文獻[23]所提方法。日本及歐美是否有不同之評估技術？宜並行納入分析比較，以提出更週延之評估法。	4.文獻[24]為日本所提出之技術。基本上耐久性評估分為兩個類別：其一為使用數學模式(大部份採用統計資料或是使用軟運算數學)建立表現與服役時間之關係，然後再以表現劣化的情況定義耐久性狀況(此方法與壽命評估採用手段相同)，歐美日多半採用此手法；另一種方法是使用層級分析法或是類似手段建立針對現況數據以權重方式評估耐久性等級，此種方法在國內與中國曾經使用。鑑於國內目前缺乏大量之統計數據，故擬採用後者作為研究主軸。	同意。
5.RC 橋殘餘壽命之預測，顯然係應	5.(1)因僅採用 LANGMUIR 模式應用	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
<p>用文獻[42]所提方法進行計算與評估。經利用林邊橋及大津橋案例進行分析後，其結果（殘餘壽命）宜加討論並提出誤差範圍。另在 4.3 節之案例分析部分，建議用條列方式說明，可讓參閱者更容易掌握內容。</p>	<p>於自由氯離子非線性擴散方程式的解析解預測林邊橋和大津橋橋面版的剩餘壽命，誤差主要出於模式的簡化，並不出於數學計算過程。由於缺乏實際數據驗證，所以無法得知誤差範圍有多大。</p> <p>(2)4.3 節之案例分析部分，採用表 4-6 至 4-14 及圖 4-5 和 4-6 配合說明，可考慮使用條列方式說明。</p>	
謝明志委員		
<p>1.除了考慮構件的劣化外，需針對整體橋梁的劣化做整體性的評估</p>	<p>1.本研究提出之方法先是對單一構件進行耐久性評估，然後再以專家所決定之各構件之權重加總，提出橋梁整體之耐久性評估。</p>	同意。
<p>2.殘餘壽命是針對材料劣化的觀點考量或是針對整體橋梁觀點的考量，須加以釐清。</p>	<p>2.就第四章而言，殘餘壽命就是可使用壽命減已經服役壽命。本計畫主要由材料劣化觀點進行探討。</p>	同意。
柯正龍委員		
<p>1.圖 1.1 建議內容改為繁體字。</p>	<p>1.遵照辦理。</p>	同意。
<p>2.P11 圖 1.2 案例分析未進行是否包含腐蝕劣化，開裂預測模式及橋梁劣化評估模式探討，請說明。</p>	<p>2.本研究已經提出因為氯離子影響所造成之腐蝕劣化模式，而開裂之後預測模式過於複雜，目前暫遵照文獻中所建議，先計算出腐蝕誘發期的時間，然後再以十年作為去鈍化期時間，最後腐蝕裂縫延伸期以誘發期時間乘上 1/4 計算。這三個時間合在一起，定義為為腐蝕劣化所得到的橋梁壽命。橋梁劣化評估指的是以表現指標與使用時間之關</p>	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
	係。在本研究中，我們就以上述方式計算壽命，並定義橋梁之材料行為在壽命到達時已經失去當初設計之目標，而導致失敗。	
3.P15 圖 2.1 至圖 2.3 建議內容翻譯為中文。	3.遵照辦理。	同意。
4.P26 表 2.1 建議前移至 P21 圖 2.7 後。	4.遵照辦理。	同意。
5.P64 自由氯離子濃度為總氯離子濃度推算而得，可否直接試驗求得自由氯離子濃度？	5.自由氯離子濃度可以直接試驗得之。	同意。
6.P65 氯離子初始度則係參考國外文獻進行內插推算，是否適用於國內橋梁推算使用。	6.本研究因缺乏國內氯離子初始濃度，因此引用國外文獻之數據進行內插演算。當然，此作法並不恰當。不過，在此僅為驗證模式工作，將來做實地驗證工作，則應採用國內數據為宜。	同意。
7.P80、P81 表 4.4~表 4.5 註記文獻錯誤，請修正。	7.註記文 LU[17]應修正為 LU[45]	同意。
交通部公路總局陳文信		
1.如何由各構件使用壽命推估整體橋樑壽命？	1.首先預測各構件使用壽命，再使用統計方法將各構件以並聯及/或串聯為系統模式推估整體橋梁壽命。	同意。
2.如何驗證各數學模式準確性？是否有相關試驗。	2.驗證數學模式之準確性最可靠的方法就是施作相關試驗比較。	同意。
3.報告中僅採用氯離子進行橋梁壽命是否易造成高估，因還有其他因素影響。	3.僅採用氯離子進行預測橋梁壽命會造成高估或低估，如果同時考慮其他因素(譬如 CO_2)或可獲致較低之殘餘壽命。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
交通部高速公路局黃紹明		
1.報告中提到林邊橋與大津橋氯離子濃度，是否補上出處？	1.此二橋氯離子濃度採用昭凌公司的檢測報告，出處已註明	同意。
2.大津橋除了考量氯離子濃度外，中性化是否需要加以考量？	2.除考慮氯離子濃度外，中性化或需加以考慮。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
顏聰委員		
1.現行之橋梁材料耐久性評估法主要有營建署之 A、B、C、D 準則及國公局與高公局之 D、E、R&U 準則，本計畫何以不採用之，而另主要採用文獻【23】，是否可獲更佳之評估結果？	1.期末報告將針對 D、E、R&U 進行評估，並與本次試驗方法比對分析。	同意。
2.表 3.25~3.27 中，對其他因子之放大係數所作之建議值，其數據為何？請說明。	2.環境影響係數及重車流量因子參考依據請參閱參考文獻【22】及【23】，而橋梁齡期因子為本研究新提出之構想。	同意。
3.P.109 中，提出耐久性評估對橋梁整體結構件之評價，其意義為何？是否只作各別構件評估即	3.本研究討論之橋梁整體結構，為橋梁上部結構之板梁系統，未包含橋墩或基礎。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
具參考性。		
4.P.122 中，對林邊橋使用壽命之分析結果有最大 121 年、最小 29 年及最大 438 年、最小 79 年情形，何以其差距如此大？請說明。	4.因各推估公式特性及較多之不確定因素考量，導致各數據分析結果差異較大。因此未來整體評估傾向耐久性評估為主，後續將於期末報告具體提出合理數據之相關成果。	同意。
李明君委員		
1.耐久性綜合評估方法中，評斷分為五級（5~1），其耐久性狀況為完好、較好、一般、較差與很差五級，個人建議不要使用“完好”或“較好”，畢竟橋梁已經使用一段時間，因此可以使用“良好”、“好”、一般、較差與很差五級較符合現況。	1.本研究耐久性綜合評估方法評斷五級之完好，是從英文 INTEGRATED 之翻譯而來，原意為完整性之意思，若委員仍覺不妥，將依委員意見修正或採用英文原意表達。	同意。
2.耐久性指標並未將驗骨材反應納入，請說明。	2.技術上較難取樣試體做驗骨材反應，因此尚未納入。	同意。
3.研究團隊在耐久性評估方面考慮重車流量因子相當良好，建議將單體車、半聯結車和全聯結車三種不同承重軸重換算不同軸重當量，並以每日重車軸重當量代替每日重車流量。	3.感謝委員意見，遵照辦理。	同意。
4.表 5.13(P172)瀝青路面與 RC 護欄其抗壓強度落於 1810 至 6274kgf/cm ² 其數據超大，請說明。	4.試驗數據誤值，將於以更正，謝謝指正。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
5.表 5.7(P158)推估裂縫深度無單位。	5.遵照辦理，將予以修正。	同意。
6.表 3.19(P88)結構混凝土中氯離子含量的評判標準其出處為何？	6.本研究評判標準主要參考 AASHTO-T260 硬固混凝土氯離子含量試驗(酸溶法)。	同意。
7.圖 5.1 至圖 5.4 其檔水鋼板厚度約 15.5 至 30cm，請確認鋼板厚度。	7.遵照辦理。	同意。
陳桂清委員		
1.報告中提到數種數學模式(表 2-4, 2-5, 2-6)來做預測，不知數種模式之間的關係為何及做完後如何驗證其正確性？是否有實際案例可做比較？	1.設 $t_i = t_c$ 為誘發期， t_p 為活化期， t_{corr} 為腐蝕傳輸期，則 RC 橋梁之總壽命為 $t = t_i + t_p + t_{corr}$ ，表 2-4、2-5、2-6 分別用來估算 t_i 、 t_p 和 t_{corr} 。期末報告中將會呈現五結橋和誠仁橋實際案例。	同意。
2.關於 CO2 的擴散在報告中並沒有說明，建議將重要及常用的評估方式，將其數學模式的演算過程放在附錄中，並撰寫成程式(例 Fortran 或 basic)讓其他參閱者可自行參考驗證。	2.有關 CO2 的擴散，後續期末報告中會補充其內容，數學模式求得過程將會說明，至於使用其解析解的公式預測壽命，使用商業軟體 MATHEMATICA 即可，應無須使用程式計算。	同意。
柯正龍委員		
1.本報告部分名詞，建議應予統一，例如碳化、中性化應用可用中性化(P65)取芯法可考慮改用鑽心取樣(P63)等。	1.感謝委員意見，遵照辦理。	同意。
2.本報告內容詳實豐富，但部分用語似乎仍沿用參考文獻，建議	2.遵照辦理，將予以修正。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
可將其改為我國常用用語，增加閱讀方便性(例如 P52 表征混凝土、表觀損傷、P.53 目力檢查、P.67 反彈儀、.74 二次儀表...等)。		
3.第五章初步案例成果，建議加列五結橋與誠仁橋之基本資料，作為後續檢測分析之比對參考。	3.感謝委員建議。	同意。
4.表 5.1 鑽心試體抗壓強度試驗結果，建議直接將依規範規定裁切之試體長度列出，另建議於表中註記其破壞形態(型態?)所代表意義。	4.表 5.1 已列出各鑽心試體長度，期末報告將補充破壞形態之相關說明。	同意。
5.表 5.2 氯離子含量試驗結果，請說明其檢測位置(混凝土表面或接近鋼筋處...)	5.詳請參照圖 5.1~圖 5.4 取樣位置說明。	同意。
6.表 5.7 推估裂縫深度建議增加說明推估方法。	6.本研究採用敲擊回音法推估裂縫深度。	同意。
林雅雯委員		
1.可參考公路養護手冊 D、E、R&U 檢測項目、指標權重值及評分判定標準。	1.感謝委員意見。	同意。
2.簡報 P.31 考量重車流量，其權重為何，是否考量每日平均交通量等，可參考美國 NBIS 的 SR 指標項目。	2.請委員提供相關資料，以供合作研究單位做參考。	同意。
3.簡報 P.47 耐久性綜合評估標準分數如何決定，五結橋及誠仁橋所得分數及分級是否與預期現	3.耐久性綜合評估標準分數是經由填寫問卷的專家，依照個人的主觀想法判定，各條件的所	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
場狀況一致。	估的權重，並將結果套入 AHP 軟體進行分析決定，而是否與現場狀況一致將於期末報告加以說明。	
4.可與「橋梁殘餘壽命與保全評估決策模式之研發(1/4)」研究計畫交流結合。	4.請委員提供相關資料，以供合作研究單位做參考。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
李明君委員		
1.計畫內容架構完整，包含兩座橋梁案例說明材料耐久性評估與殘餘壽命預測，評估結果大致合理，可為教育訓練之資訊。	1.感謝委員肯定。	同意。
2.目錄①第 V 頁 3.5.4 混凝土中鋼筋分佈及保護層厚度的檢測與評定和第 V 頁 3.6.5 項目名稱重複，應刪除其中之一。②第 V 頁(目錄)無 3.7 項目名稱。③第 VI	2.將予以修正目錄。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
頁(目錄)無第五章項目名稱。		
3.圖 2.2 其圖與文字說明不在同一頁(P.15)。	3.將予以修正格式。	同意。
4.圖 2.8 其圖中(a)、(b)與(c)無文字說明(P27~28)。	4.將補充文字說明。	同意。
5.構件和橋梁整體之耐久性評估標準(表 3-30 與表 3-32)其等級評定標度與其混凝土現況耐久指標之評定標度值大小次序相反，容易弄錯。	5.將修正評定值已利判讀。	同意。
6.圖 4.2 與圖 4.6 為同一圖，應省略其一。	6.將刪除其中一圖。	同意。
7.第 130 頁最後一行表 4-1 應為圖 4.1。	7.將予以修正文字。	同意。
8.第六章結論第 2 與 5 點之橋梁應為 RC 橋梁。	8.將予以補充文字。	同意。
9.參考文獻資料引用請統一格式。	9.將統一文字格式。	同意。
蔡佐良委員		
1.利用成熟的技術，量測定量數據，配合定性評估，以作務實結論。已達到原計畫預計目標，未來後續研究可增加實例分析數量，以確定分析方法之正確性。	1.感謝委員肯定。	同意。
葉啟章委員		
1.期末報告 P.9、P.29 縣市政府使用之評等法目前應是使用 DERU 法為主。	1.將修正內文說明。	同意。
2.P.39 鐵路鋼結構橋梁檢測及補強規範已於 99 年公告請修正本報告相關內容。	2.已調整報告內容。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
3.本報告用詞建議修正為工程界通稱如 P.84”目力檢查”請修正為目視檢查，還有”掉棱”、”蜂窩麻面”等用詞也請修改。	3.將予以修正文字及用詞。	同意。
4.P.106”150MV”→”150mV”?	4.將予以修正文字。	同意。
5.P.193 第五行，齡期影響係數 $50/(2011-1944)=50/67=0.746$ 影響係數應為 1.1。	5.將予以修正文字。	同意。
6.P.185 及手冊 P.60 表 5-4 單位為 mm 是否為 cm 之筆誤。	6.將予以修正單位。	同意。
邱建國委員		
1.P.189、P.199 中之推薦權重來源是否註明，另外整體耐久性評定中是沒有橋台、橋墩等，是否適當。	1.構件材料之權重質檢測指標與耐久性指標權重乃彙整專家意見經由一致性計算獲得，而整體結構耐久性評定則參考相關文獻。本計畫評定僅針對橋梁上部結構為主，將加註說明。	同意。
2.P.193 車流量高達 1500 輛以上，是否合於 P.61 中所定之”重車”標準。	2.符合標準。	同意。
3.P.135 中所示之劣化度 0.8 所代表意義為何?	3.劣化度 0.8 時結構物完整性為 20，即剩餘 20% 完整性時。其意義在於若是在安全(設太小)以及經濟效益(設太大)上取得平衡。	同意。
4.P.83 中之 R 值於實際評估時如何得之，有否適當之建議值。	4.R 值為混凝土抗壓強度之設計值，建議值須視構造物而訂定。	同意。
5.P.66 之表 3-7 請再確認，和範例之方法	5.範例資料誤植，將予以修	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
有異。	正。	
張達德委員：(書面審查)		
1.本計畫的構想創新與實務兼備。	1.感謝委員肯定。	同意。
2.國內外有關文獻資料收集完備。	2.感謝委員肯定。	同意。
3.關係式公式第四章以前依序排列註明，但第五章引用公式亦請註明，如P.200，另有引用參考文獻表示方法，人名右上標，或[Liang et al 2011]，請統一。	3.將予以修正。	同意。
4.所有引用圖、表，務必於表圖 title 後列參考文獻編號。	4.將予以修正。	同意。
謝明志科長		
1.P.32 三次提到”本研究...”，因本章(第二章)為文獻回顧，建議此部份挪到第三章。	1.將修正部分用詞。	同意。
2.P.65 圖 3.3 與圖 1.1 同，建議刪除圖 3.3 直接引述圖 1.1 即可。	2.已刪除圖 3.3。	同意。
3.P.158~P.160 的表 4-3 與表 2.7、2-8、2-9 相同，建議刪除表 4-3，直接引用表 2-7 至表 2-9 即可。	3.已刪除表 4-3。	同意。
4.第三章有兩個 3.2 節請修正，4.5 節標題為”結論”，建議改為”小節”，而目錄內第五章標題未列。	4.已修正第三章章節編碼及第四章標題。	同意。
5.第三章 3.4 節，引入 3 個影響因子及其影響係數，因與前述兩大類十大指標無關，不知引用自何處?或是本研究所產出，請說明或列參考文獻。	5.3 個因子為考量環境因素，為放大或折減因子，詳如 2.3.1 章節。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
6.文中所列之分級評定標準，請註明是引用或本研究產出。	6.將於表格中增加文獻出處。	同意。
7.第五章案例推算，各因子出現的順序，請調整和前面的描述(如第三章)順序相同，較適合參照閱讀。	7.將調整順序以利閱讀。	同意。
柯正龍研究員		
1.本研究所提技術手冊，建議內容及文字說明應予檢視，避免贅字，以利文章通順，例如”第一章緣起”、”1.1 手冊緣起”，表 1-1 可否改為文字說明。	1.將斟酌調整部分內容。	同意。
2.手冊內容建議專有名詞應參照中華民國國家標準(CNS)撰寫，例如 P.4 骨材應更正為粒料。	2.已修正用詞。	同意。
3.手冊表 2-1 第 2 欄第 2 列，”89 年以後”建議修正為”民國 89 年以後”。	3.已修正用詞。	同意。
4.手冊引用文獻建議應用最新版本，例如第 12 頁引用公路總局 1998 年 8 月應予更新(第六章參考文獻查無此項)。	4.平時養路巡查重點應為最新版本資料。	同意。
5.手冊 P.19 圖 3-2 鋼筋腐蝕現況(圖 3-6 亦同)建議中性化深度修改為混凝土中性化深度，氯離子修正為混凝土氯離子濃度。	5.將修正用詞。	同意。
6.手冊章節第 3.4 混凝土耐久性檢測與評定，建議應優先參照 CNS 規範辦理或加註其他可用方式。	6.將加註補充說明。	同意。
7.手冊圖 3-3 及圖 3-6 有無必要(同圖 3-2)。	7.目的為強調耐久性評估分為鋼筋腐蝕及混凝土現況兩部分。	同意。
8.研究報告應加入期中報告審查意見處理情形回覆表及第 1、第 2 次專家座談會會議紀錄。	8.將補充相關審查意見情形紀錄。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
9.引用文獻之圖表，建議加註資料來源。	9.遵照辦理。	同意。
10.研究報告之圖表建議清晰，表格格式宜統一並去除背景顏色。	10.將於以調整格式。	同意。
林雅雯研究員		
1.殘育壽命 t_i 6 個方法， t_p 3 個方法， t_{corr} 5 個方法，五結橋及誠仁橋所用之公式皆不同，結果差異亦很大，是否就公式背景，建議說明各方法適用情形範圍。	1.一般進行總使用壽命預測時，需盡可能蒐集關於每個階段壽命預測的文獻，並找出其中與目標結構物環境、背景或是設計相近者數個進行計算，而後在數個結果中挑選最小者或挑選最合理者作為該階段的使用壽命。	同意。
2.環境調查係數，重車流量係數。齡期影響係數，權重皆為 1，三者對耐久性影響是否皆相同。	2.環境調查係數，重車流量係數，齡期影響係數，代表考量環境因素，為放大或折減因子，評估材料因子以外之因素。	同意。
3.研究考量”重車流量因子”，是否考量現在交通量與原設計交通量其不同時之影響。	3.僅考量車流量對於橋梁結構造成之影響。	同意。
曾文傑副研究員		
1.請合作團隊於繳交期末報告定稿時，應於附錄中加入 2 次期中及本次期末的審查意見處理情形回覆表。	1.將予以補充相關資料。	同意。

附錄二

專家座談會

附錄 2-1 第一次專家座談會

第一次專家座談會-會議記錄表	
計畫名稱	RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究
開會事由	RC 橋梁耐久性評估之指標座談會
時間	2011/05/24(二) 下午 2 點 30 分
地點	蘇錦江建築師事務所
地址	臺北市大安區新生南路三段 2 號 9 樓之 3
主席	黃然教授、葉為忠教授
出席委員	翁在龍教授、陳君弢教授、蘇錦江教授、林世堂教授、王大衡董事長、何信隆先生、陳榮福技師、邱志強技正、張清雲總經理、錢少陵主任、陳明德教授、傅墩祺科長、王茲為博士。
會議內容	開場由黃然教授介紹整個計畫的動機與目的、計畫流程與細節。接著請葉為忠教授說明今天會議的目的與重點。首先說明層級分析法是一種決策分析，由在場所有專家學者每位填一份問卷，利用該法取得耐久性項目中彼此的權重值。填寫問卷時須有一定的共識程度與明白瞭解每項實驗的重要性，統整過後才能達到一致性指標。
會議結論	由於不同區域之專家學者對因子的重要性看法不盡相同，故藉由此專家座談會綜合各專家建議，提供符合在地化因子權重值。

會議情形



附錄 2-2 第二次專家座談會

第二次專家座談會-會議記錄表	
計畫名稱	RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究
開會事由	討論計畫技術手冊內容並作意見交流
時間	2011/9/30(五) PM1:30~2:30
地點	臺灣科技大學國際館 7 樓 707 會議室(營建系對面)
地址	臺北市 106 大安區基隆路 4 段 43 號
主席	黃然教授、葉為忠教授
出席委員	翁在龍教授、陳君弢教授、蘇錦江教授、林世堂教授、陳榮福技師、錢少陵主任、鄭安教授、徐輝明教授、黃然教授、紀茂傑教授、林威廷博士、陳賜賢理事長、葉為忠教授、羅志傳技師、張清雲技師。
會議內容	開場由計畫主持人黃然教授引言說明本次座談會目的，後續簡報由兼任助理鄒思宇介紹整個計畫的內容、計畫流程與細節，由於本計畫須提供技術計畫，故藉此讓與會人員了解計畫執行狀況與成果。簡報完畢後則請與會人員提出相關建議，以利計畫撰寫之完整。
會議結論	為符合契約之要求，本計畫將提供技術手冊供橋梁管理參考。本次專家座談會將彙整相關專家學者建議，擬定技術計畫初稿。

會議情形



附錄 2-3 第三次專家座談會

第三次專家座談會-會議記錄表	
計畫名稱	RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究
開會事由	RC 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術計畫審議會 議
時間	100 年 11 月 4 日(星期五)下午 2 時
地點	港灣技術研究中心二樓簡報室
地址	臺中市梧棲區中橫十路 2 號
主席	邱永芳主任
出席委員	顏聰教授、李明君教授、張達德教授、邱建國助理教授、 葉啟章經理、黃紹翔副主任。
會議內容	開場由計畫主持人黃然教授引言說明本次座談會目的及 介紹整個計畫的內容、計畫流程與細節，藉此讓與會委 員了解計畫執行狀況與成果。由於技術計畫初稿已完成， 故簡報完畢後請與會委員提出相關建議，以利計畫 完整。
會議結論	依照各委員意見修正技術計畫內容。

交通部運輸研究所合作研究計畫

2011.11.04 專家座談會意見處理情形表

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
國立臺灣科技大學邱建國委員		
1. 計畫用字 P4、P5、P6、P37 文中字體及用語須再確認，須使用臺灣常見之專門用語。	1. 相關文字錯誤已作修正。	同意
2. 各因子之說明請再詳細說明，公式也須再確認。	2. 相關因子及公式說明將予以補充。	同意
3. 表 3.1 表格中如何明確訂定橋梁在地之環境條件。	3. 將修正適合臺灣氣候環境之影響係數，以符合現況。	同意
4. 表 3.3 表格橋梁齡期因子評定標準 K 值請確認是否有誤。	4. 表格內容誤植，將予以修正。	同意
5. 請增加判定流程圖，以利計畫之使用。	5. 將補充流程圖於計畫內容中。	同意
6. 表 3.22 構件整體的耐久性綜合評估標準之耐久性狀況，是否可補充建議使用處理之用詞。	6. 將修正耐久性狀況用語，以利判讀。	同意
7. 請於計畫中補充介紹 Hookham 算法。	7. 將補充於計畫第四章節中。	同意
8. 案例中，鈍化期 t_p 計算過程中，混凝土表面氯離子濃度及鈍態保護膜處的氯離子濃度數值是否正確。	8. 數據誤植，將重新修正數據。	同意
朝陽科技大學李明君委員		
1. 計畫內容完整，包含兩座橋案例說明其耐久性評估與殘餘壽命預測結果，富教育訓練之資訊。	1. 感謝委員肯定。	同意
2. 請補充參考資料之年份。	2. 將予以補充。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
3. P10、P11、P12、P14、P52 及 P74、P84 有錯字，請修 正。	3. 相關文字錯誤將予以 修正。	同意
4. 兩座橋梁案例中有關混凝土 材料耐久性評估結果(5-1-2 與 5-2-2)其 D1 與 Dtotal 計算 有誤。	4. 計算錯誤，將予以修 正。	同意
中原大學張達德委員		
1. 採用的文獻中、英、日等眾 多，宜全面比對再予以收斂 建議在臺灣的使用方式。	1. 已針對混凝土構件材 料狀況檢測指標與耐 久性指標，舉辦專家座 談會訂定在地化之權 重。	同意
2. 各項評估因子在橋梁整體耐 久性好決定上，應建立一完 整思路，再由各步驟一一說 明各因子的權重。	2. 將於計畫內容增加相 關步驟並說明各因子 權重。	同意
3. 殘留壽命的意義宜明確反應 橋梁現況的嚴重程度，並以 等級說明維修對策。	3. 將補充等級說明維修 對策，以利判讀。	同意
中興大學顏聰委員		
1. 第二章節是否包含 RC 橋梁 材料之老劣化及橋梁劣化或 安全性檢測等四部份？	1. 內容均有包含。	同意
2. 建議將第 2.2 及 2.3 節合併一 章節。	2. 相關內容將作適度調 整排列。	同意
3. 橋梁材料之老劣化與耐久性 之關係與區別為何，未見敘 述於報告內，建議在第一 章內作開宗明義之說明。	3. 將予以補充說明。	同意
4. 耐久性應為橋梁材料老劣化 之上層意涵，是否將編到老 劣化章節之前為宜。	4. 相關內容將作適度調 整排列。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
5. 報告中，對耐久性檢測部分較為詳細說明，而老劣化部份未見檢測技術之提供(第二章)。對橋梁檢測技術僅說明國內執行概況並未提出檢測技術。	5. 本計畫著重於材料耐久性檢測評估之應用，對於其他老劣化檢測或橋梁檢測僅簡單敘述。	同意
6. 第 3.4 與 3.5 節頗具相關性，宜整合在同一節之內，可更為周延。	6. 相關內容將作適度調整排列。	同意
7. 橋梁殘餘壽命預測之實例說明，宜作較為實務運用流程化之解說，以協助本計畫之使用。	7. 將於案例說明中補充相關流程解說。	同意
中興工程顧問公司葉啟章委員		
1. 請增列參考文獻。	1. 將予以補充。	同意
2. P1 表 1.1 橋梁數量統計請確認。	2. 經確認後無誤。	同意
3. P10 表 2.1 請增列鐵路鋼結構橋梁檢測及補強規範，另使用橋管單位 OK 定義為何?	3. 本計畫僅針對 RC 橋梁做討論。橋管單位 OK 用詞不洽當，將予以修正。	同意
4. P24、P31、 P60 等有錯字，請修正或統一用詞。	4. 相關文字錯誤將予以修正。	同意
5. 公式排列請修正。	5. 格式將遵照甲方格式做調整。	同意
6. 強度單位建議統一，如 PSI、MPa、Kgf/cm ² 。	6. 強度單位將予以修正。	同意
7. P72 表 5.8 請增列單位。	7. 將予以增列單位。	同意
8. P75 5-1-3 節與 P85 5-2-3 節誘發期 t_i 計算方式不同，選擇時機如何確認。	8. 選擇時機將補充於計畫內容中。	同意
交通部臺灣區國道高速公路局黃紹翔委員		
1. 計畫是否可對於預力鋼鍵狀況評估考查?對於預力混凝土橋梁若能納入計畫內，較	1. 本計畫僅針對 RC 橋梁做為討論對象。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
能符合橋梁管理單位需要。		
2. P43 表 3.12 ~3.18 之意義關係為何請詳述說明?	2. 將予以詳述補充內容。	同意
3. P32 3-4-5 已對於鋼筋腐蝕電位求得已作介紹，是否 3-4-2 可刪去?	3. 感謝委員建議，將作適度修正。	同意
4. 5-3 綜合評定中結果對橋梁沖刷造成危害，惟文中各章節對於沖刷並無評定因子?	4. 橋梁沖刷造成危害僅為文中敘述橋梁現況，未設定為評定之因子。	同意
港灣研究技術中心邱永芳主任		
1. 語意須注意，應符合臺灣用語。	1. 感謝委員建議，將修正相關用語。	同意
2. 格式統一。	2. 格式將遵照甲方格式做調整。	同意
3. 計算過程應列出。	3. 將於案例成果中詳述相關內容。	同意
港灣研究技術中心謝明志科長		
1. 本計畫評估項目僅針對 RC 橋梁材料做檢測，建議內容需定義清楚。	1. 將於第一章節補充相關敘述及定義。	同意
2. 5-3 綜合評定結果，請修正內容用詞	2. 將予以修正內容用詞。	同意
港灣研究技術中心林雅雯研究員		
1. 背景與意義建議撰寫計畫緣起。	1. 將予以補充。	同意
2. 參考資料建議改為參考文獻，並移到後面。	2. 將予以修正。	同意
3. 第二章橋梁檢測 D、E、R&U 及 A、B、C、D 評估與後面第三章劣化評估之間連絡關係，建議補充撰寫。	3. 將補充相關內容於計畫中。	同意
4. 建議增加劣化評估流程及殘餘壽命評估流程。	4. 將補充流程於計畫中。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
5. P53 耐久性綜合評估結果建議，建議後續作為。	5. 將修正相關資料於計畫內容中。	同意
6. 案例說明，檢驗結果項目撰寫順序建議與第三章順序一致。	6. 將予以調整。	同意

會議情形



附錄三

教育訓練成果

「RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究」

教育訓練暨成果研討會

現場活動情形



現場議程表



現場報名區

現場活動情形



中心副主任致詞



中心副主任致詞

現場活動情形



第一場主講人黃然教授報告



第二場主講人葉為忠教授報告

現場活動情形



綜合座談一



綜合座談二

附件四

RC 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預 測技術手冊

(另成專冊)

附錄五

期末報告簡報資料



交通部運輸研究所臺灣技術研究中心

RC橋梁材料耐久性評估與 殘餘壽命預測之研究

2011.11.25(五)

期末報告

RC橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究

簡報大綱



1、結論

2、RC材料耐久性評估方法



3、RC橋梁殘餘壽命預測方法

4、案例說明



5、相關成果

1 緒論

緣起
研究內容與工作項目

緣起

針對既存鋼筋混凝土橋梁，**如何透過檢測方法評估其耐久性，並且進而預測其殘餘壽命**，是一重要的議題。從現場量測到的資料，透過有系統的分析方式，化爲工程師可以理解的數據，再加以評估橋梁的耐久性現況、制定策略並評估其壽命。

緣此，本計畫係針對鋼筋混凝土橋梁的材料劣化評估以及殘餘壽命預測進行研究。研究結果，可以**提供評估橋梁耐久性等級的參考資料及殘餘壽命**，與針對既有的鋼筋混凝土橋梁採行**維修、補強或拆除的決策參考**。

研究內容與工作項目

1. 國內外相關文獻蒐集與彙整。
2. RC橋梁材料耐久性評估。
3. 建立劣化RC橋梁殘餘壽命預測模式:
 - 腐蝕劣化、開裂預測模式及橋梁劣化評估模式探討
 - 案例分析
4. 現地檢測與驗證(選擇二座橋梁)，檢測項目如下:
 - 混凝土品質:保護層厚度、抗壓強度、中性化深度、氯離子含量及電阻值
 - 鋼筋材料:腐蝕電位、腐蝕速率、鋼筋尺寸
 - 裂縫量測
5. 編撰橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測之手冊。
6. 教育訓練講習會(一場)。

RC橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究
期末報告

2 RC材料耐久性評估方法

前言
定義與範疇
層級分析法
評定流程
耐久性綜合評估架構
橋梁概況與環境條件的調查
混凝土現況檢測與評定
鋼筋腐蝕現況檢測與評定

前言

1. 針對RC橋梁的**材料狀況與耐久性**進行檢測評估探討，包括**檢測項目、檢測方法與評定標準**。
2. RC橋梁耐久性評估係以**構件之耐久性**作為評估基準，考慮各構件之材料條件、影響係數及外在環境條件，評估既有RC橋梁耐久性等級。
3. 結合環境條件及結構特性，對耐久性的主要影響因素，進行重點檢測，並訂定適當權重。

定義與範疇

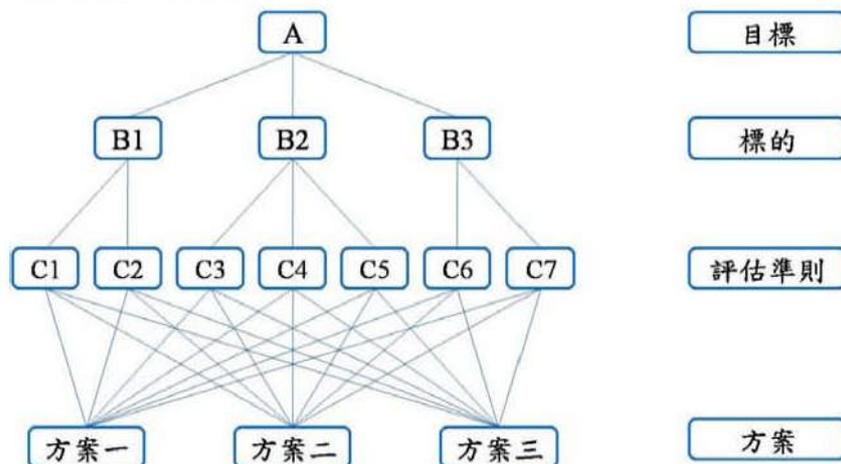
影響因子包括：**環境因子、施工因子、設計因子、材料因子、維護營運因子**。

需考量之困境：

- 各因子所需的調查量以及數據過於龐雜，經過累乘加總之後，其收斂值將會差異甚大。
- 若採用AHP，因子間獨立，為線性加乘（中國大陸與日本則考量用放大折減因子）。

層級分析法(1/2)

層級分析法架構圖



層級分析法(2/2)

AHP決策問題之分析

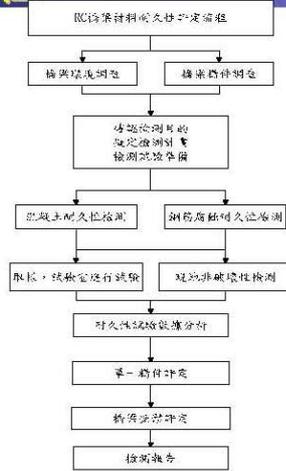
- 建立各層級之成對比較矩陣(Pair-wise Comparison Matrix)。
- 求取各層級要素的權重，利用數值分析中的特徵值解法計算出特徵值與特徵向量，求取各元素的相對權重，找出優先向量(priority eigenvector)。

一致性檢定

- 目的為檢測決策者在成對比較時前後的一貫性
- 一致性指標(Consistency Index, C.I.)

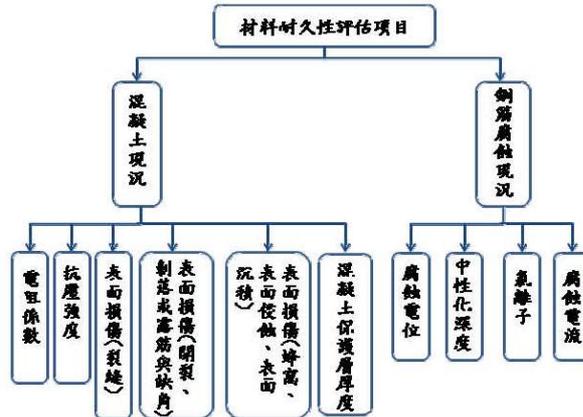
C.I.值愈小則一致性愈高，指標值建議在0.1左右，亦即當C.I.>0.1時則對應成對比較矩陣重新評比，如此一致性才能獲得保證。

評定流程



耐久性綜合評估架構

材料耐久性因素評估架構圖



橋梁概況與環境條件的調查(1/3)

環境因子

橋梁所處環境條件影響的分級評定標準

環境類別	環境條件		環境影響係數
I 可忽略	非寒冷或寒冷地區的大氣環境，水或土壤無侵蝕性；乾燥環境；風環境	內陸乾旱地區	1.0
II 輕微	嚴寒地區的大氣環境；潮濕	不直接受日曬、雨淋或風蝕的構件；水下構件	1.05
III 中度	內陸潮濕氣候；乾溼交替	一般環境，受日曬、雨淋或風蝕的構件；靠近地表受地下水影響的構件	1.10
IV 嚴重	酸雨或沿海環境；接觸除冰鹽構件	沿海鹽霧地區；酸雨或鹽鹼環境	1.15
V 惡劣	乾溼交替，有侵蝕性水、氣體或土壤；高度水飽和並受凍融循環	海水浪濺、潮差區	1.20

橋梁概況與環境條件的調查(2/3)

重車流量因子

- 車輛超載會造成橋梁發生材料疲勞等現象，或導致橋面板損壞。
- 通過的重車數量越多，對橋梁所造成的震動次數增加，愈容易使結構產生裂縫。

重車流量評定標準

評定標度值	每日重車流量 (輛)	橋梁損害的影響	重車流量影響係數
1	0 ~ 500	影響不顯著	1.0
2	500 ~ 1000	明顯發生損害	1.05
3	1000 ~ 1500	有影響	1.10
4	1500 ~ 2000	有較大影響	1.15
5	2000以上	嚴重之損害	1.20

橋梁概況與環境條件的調查(3/3)

齡期因子

- 結構的使用壽命或耐久年限的定義為建築結構在正常使用和正常維護條件下，仍然具有其預定使用功能的時間。

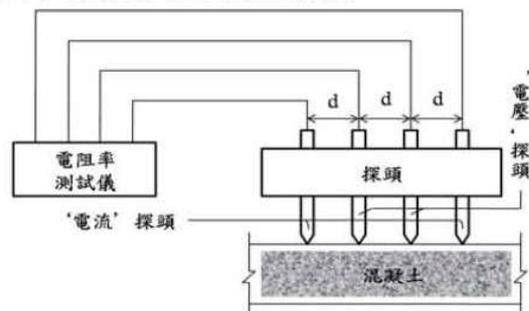
橋梁齡期因子的評定標準

評定標準值	K	齡期影響係數
1	$1 \leq K$	1.0
2	$0.75 \leq K < 1$	1.05
3	$0.5 \leq K < 0.75$	1.10
4	$0.25 \leq K < 0.5$	1.15
5	$K \leq 0.25$	1.20
註	$K = T_1 / T_2$	T ₁ =設計年限 T ₂ =檢測時年限

混凝土現況檢測與評定(1/6)

混凝土電阻率的檢測

- 混凝土的電阻率影響其導電性。混凝土電阻率大，若鋼筋發生銹蝕，則發展速度慢，擴散能力弱；混凝土電阻率小，銹蝕發展速度快，擴散能力強。
- 混凝土電阻率可採用四極式電阻測定。



混凝土現況檢測與評定(2/6)

混凝土電阻率的評定

評定標度值	電阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	鋼筋發生銹蝕可能的銹蝕速度
1	>20000	很慢
2	15000~20000	慢
3	10000~15000	一般
4	5000~10000	快
5	<5000	很快
備註	混凝土濕度對量測值有明顯影響，量測時構件應為自然狀態，否則不能使用此評判標準。	

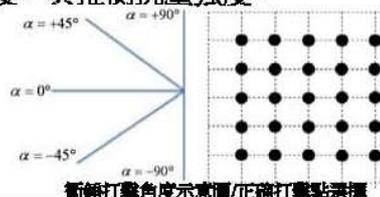
混凝土現況檢測與評定(3/6)

結構混凝土強度的檢測

- 結構混凝土強度的檢測方法可分為非破壞性檢測、半破壞性檢測和破壞性檢測，如：**回彈法**、**超聲回彈綜合法**、**回彈結合取芯法**等等。
- 混凝土強度檢測評定分為**結構或構件的強度檢測**評定與**承重構件的主要受力部位的強度檢測**評定。

反彈錘法檢測方法及原理

- 利用衝錘帶動衝擊棒以撞擊混凝土表面，利用反彈數得知混凝土表面硬度，其推測抗壓強度。



混凝土現況檢測與評定(4/6)

結構混凝土強度的評定

評定標度值	K_{bt}	K_{bm}	強度狀態
1	≥ 0.95	≥ 1.00	良好
2	$0.95 > K_{bt} \geq 0.90$	≥ 0.95	較好
3	$0.90 > K_{bt} \geq 0.80$	≥ 0.90	較差
4	$0.80 > K_{bt} \geq 0.70$	≥ 0.85	差
5	< 0.70	< 0.85	很差

註

式(1) $K_{bt} = \frac{R_{bt}}{R}$ 式中: K_{bt} = 推定強度均質係數;
 R_{bt} = 承重構件或主要受力部位混凝土的實測強度推定值
 R = 承重構件混凝土極限抗壓強度設定值

式(2) $K_{bm} = \frac{R_{bm}}{R}$ 式中: K_{bm} = 平均強度均質係數;
 R_{bm} = 承重構件或主要受力部位測區平均換算強度值

混凝土現況檢測與評定(5/6)

表面損傷的檢測

- 混凝土橋梁結構構件的**表面損傷總體上可分為如下三類**:一是裂縫,包括非結構受力裂縫和結構受力裂縫;二是層離、剝落或露筋及掉棱或缺角;三是蜂窩麻面、表面侵蝕及表面沉積等。
- **裂縫檢測的主要內容為**:裂縫的形態;裂縫分布情況;裂縫周圍有無鏽跡、鏽蝕產物和凝膠泌出物;裂縫的寬度、長度和間距等。檢測方法以目力檢查為主,輔以刻度放大鏡(最小分辨率不得大於0.05mm)量測。用鋼捲尺(最小分辨率不得大於1.0mm)測量裂縫的長度和間距。

混凝土現況檢測與評定(6/6)

表面損傷的評定

表觀損傷程度及標度		組合評定標度				
		程度	小→大 少→多 輕度→嚴重			
			標度	0	1	2
表觀損傷對結構使用功能的影響程度	無、不重要	0	0	1	2	
	小、次要	+1	1	2	3	
	大、重要	+2	2	3	4	
以上兩項評定組合標度			0	1	2	3 4
表觀損傷發展變化狀況的修正	趨向穩定	-1	0	1	2	3
	發展緩慢	0	1	2	3	4
	發展較快	+1	1	2	3	4 5
最終評定結果			1	2	3	4 5
結構構件表觀技術狀況			良好	較好	較差	差的 很差

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(1/10)

鋼筋腐蝕電位的檢測

- 鋼筋銹蝕狀況檢測範圍，主要承重構件或承重構件的主要受力部位。
- 本方法用於估測現場混凝土中無鍍層鋼筋的半電池電位。
- 本方法可以在混凝土構件使用中的任何時期進行。

測試原理

半電池電位法是利用混凝土中鋼筋銹蝕的電化學反應引起的電位變化來測定鋼筋銹蝕狀態的一種方法。通過測定鋼筋/混凝土半電池電極與在混凝土表面的銅/硫酸銅參考電極之間的電位差的大小，評定混凝土中鋼筋的活化程度。

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(2/10)

鋼筋腐蝕電位的評定

評定標度值	序號	電位水平(mV)	鋼筋狀態
1	1	0~-200	無銹蝕活動或銹蝕活動性不確定
2	2	-200~-300	有銹蝕活動性，但銹蝕狀態不確定，可能抗蝕
3	3	-300~-400	銹蝕活動性較強，發生銹蝕概率大於90%
4	4	-400~-500	銹蝕活動性強，嚴重銹蝕可能性極大
5	5	<-500	構件存在銹蝕開裂區域
備註	(1)表中電位水平為採用銅-硫酸銅電極時的測量值 (2)混凝土濕度對量測值有明顯影響，量測時構件應為自然狀態，否則用此評定標準誤差較大。		

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(3/10)

碳化深度的檢測

檢測方法

- 混凝土鋼筋銹蝕電位測試結果得知鋼筋可能發生銹蝕的區域，應進行混凝土碳化深度測量。
- 混凝土碳化狀況的檢測通常採用在混凝土斷面噴灑酸鹼指示劑，通過觀察酸鹼指示劑顏色變化來推估混凝土的碳化深度。

檢測步驟

- 選擇測區位置可參照鋼筋銹蝕自然電位測試的要求，若在同一測區，應先進行保護層和銹蝕電位、電阻率的測量，在進行碳化深度及氯離子含量的量測
- 使用酸鹼指示劑噴在混凝土的破損面，根據指示劑顏色的變化，測量混凝土的碳化深度，量測值準確至mm。

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(4/10)

碳化深度的評定

混凝土碳化深度對鋼筋鏽蝕影響的評定，可取構件的碳化深度平均值與該類構件保護層厚度平均值之比，並考慮其離散情況。

評定標度值	1	2	3	4	5
碳化層深度/保護層厚度	$<1^{*1}$	<1	$=1$	>1	$>1^{*2}$
備註	1. *1 構件全部實測比值均小於1； 2. *2 構件全部實測比值均大於1； 3. 宜分構件逐一進行評定				

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(5/10)

氯離子含量的檢測

測定方法

- 混凝土中的氯離子含量，可採用現場按混凝土不同深度取樣，測定結果須能反應氯離子在混凝土中隨深度的分布，根據鋼筋處的混凝土氯離子含量判斷鋼筋鏽蝕的可能性。
- 氯離子含量測定，應根據構件的使用環境及構件的品質狀況確定測區，測區應能代表不同曝露條件及不同混凝土品質的部位，測區宜參考鋼筋鏽蝕電位測量結果確定。

取樣

- 混凝土粉末樣品的取樣部位和數量。
- 分析樣品的取樣部位可參照鋼筋鏽蝕電位測試測區布置原則確定。
- 每一測區鑽孔數量不宜少於3個，取粉孔可與碳化深度測量孔合併使用。

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(6/10)

氯離子含量的評定

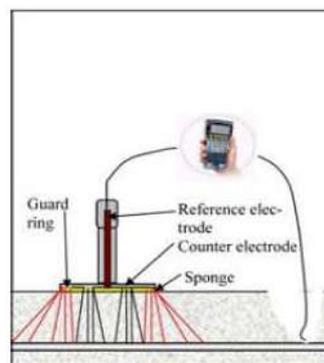
- 氯化物引起鋼筋的銹蝕，其銹蝕危險性受到多種因素的影響，如碳化深度、混凝土含水量、混凝土品質等，因此應進行綜合的分析。
- 根據每一取樣層氯離子含量，繪出氯離子含量與深度關係曲線，判斷氯化物是混凝土製成時混入，還是結構使用過程中由外界滲入。

評定標度值	1	2	3	4	5
氯離子含量 (占水泥含量的百分比)	<0.15	0.15~0.4	0.4~0.7	0.7~1.0	>1.0
誘發鋼筋銹蝕的可能性	很小	不確定	有可能誘發鋼筋銹蝕	會誘發鋼筋銹蝕	鋼筋銹蝕活化

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(7/10)

鋼筋銹蝕電流的檢測

腐蝕量測儀GPM-5000應用於混凝土結構內鋼筋的腐蝕電位、腐蝕電流及電阻之評估。測得鋼筋之腐蝕電位(平衡電位)後，然後使用一固定電流從輔助電極流向鋼筋(工作電極)，使整個系統構成一個迴路，進而求得待測鋼筋之腐蝕電位與腐蝕速率以及電極與鋼筋間混凝土的電阻。



利用GalvaPulse測量地區的示意圖

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(8/10)

鋼筋鏽蝕電流的評定

評定標度值	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	Corrosion rate(mpy)	腐蝕程度
1	< 0.5	< 0.23	忽略
2	0.5 - 5	0.23 - 2.3	低
3	5 - 10	2.3 - 4.6	中
4	10 - 15	4.6 - 6.9	高
5	> 15	> 6.9	嚴重

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(9/10)

保護層厚度的檢測

適用範圍

- 估測鋼筋位置、深度和尺寸的電磁檢測儀器工作原理，規定儀器的使用方法和評定標準的應用方法。
- 檢測針對主要承重構件或承重構件的主要受力部位，或鋼筋鏽蝕電位測試結果表明鋼筋可能鏽蝕活化的部位。

檢測方法及原理

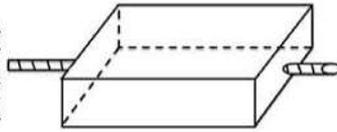
- 檢測方法:採用電磁法無損檢測方法確定鋼筋位置，現場修正確定保護層厚度，估測鋼筋直徑，量測值準確至mm。

鋼筋腐蝕現況檢測與評定(10/10)

保護層厚度的評定

保護層厚度的評定標準

根據測量部位實測保護層厚度特徵值 D_{ne} 與其設計值 D_{nd} 的比值，混凝土保護層厚度對結構鋼筋耐久性評定標度來判定。



評定標度值	D_{ne} / D_{nd}	對結構混凝土耐久性的影響
1	>0.95	影響不顯著
2	0.85~0.95	有輕度影響
3	0.70~0.85	有影響
4	0.55~0.70	有較大影響
5	<0.55	鋼筋易失去鹼性保護，發生銹蝕

耐久性綜合評估方法(1/4)

混凝土構件材料狀況檢測指標與耐久性指標權重

項目	耐久性指標數	Local 權重值	Global 權重值
腐蝕現況		0.44	0.44
腐蝕電位	1	0.11	0.05
中性化深度	2	0.26	0.12
氯離子	3	0.35	0.15
腐蝕電流	4	0.28	0.12
混凝土現況		0.56	0.56
電阻係數	5	0.05	0.03
抗壓強度	6	0.14	0.08
混凝土表面損傷	裂縫	0.19	0.20
	層離、剝落或露筋、掉棱與缺角	0.25	0.07
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	0.17	0.05
鋼筋保護層厚度	10	0.2	0.05

耐久性綜合評估方法(2/4)

單一構件的耐久性評估計算方式

$$D_l = \delta_1 \cdots \delta_k \times \sum_{i=1}^2 \frac{P_i}{\sum_{m=1}^n \beta_i A_{im} \alpha_{im}}$$

在實際操作上，可能在各類指標中實際所操作之項目並未達到建議之總指標數，而僅進行部份之檢測，則可以將各類指標之總合計算如下式所示：

$$D_l = \delta_1 \cdots \delta_k \left[\sum_{i=1}^2 \beta_i \frac{\sum_{m=1}^n A_{im} \alpha_m}{\sum_{m=1}^n \alpha_m} \right]$$

D_l 代表第 l 種單一構件的耐久性評價

$\delta_1 \cdots \delta_k$ 為 k 個放大係數考量

β_i 為第 i 類因子所代表之權重

A_{im} 為第 i 類因子中第 m 個指標所得之評價

α_{im} 為第 i 類因子中第 m 個指標在第 i 類因子中所佔之權重

P_i 代表第 i 類中之耐久性指標總數

耐久性綜合評估方法(3/4)

混凝土橋梁各構(部)件權重值

構(部)件	名稱	推薦權重
1	橋台與基礎	0.23
2	橋墩與基礎	0.24
3	支承	0.07
4	上部主要承重構件	0.26
5	上部一般承重構件	0.12
6	橋面鋪裝	0.02
7	人行道承重構件	0.05
8	欄杆或護欄	0.01
備註	當評定標度值為“1”時，表示好的狀態，或表示沒有設置的構造部件，不再進行疊加。	

耐久性綜合評估方法(4/4)

橋梁整體結構耐久性作整體評價

$$D_{total} = \sum_{j=1}^q D_j \gamma_j$$

- D_{total} 代表橋梁整體之耐久性評價。
- D_j 代表第j個構件之單一構件耐久性評價。
- γ_j 代表第j個構件在整體結構中所佔之權重。

D_{total} 範圍	$1 \leq D_{total} < 2$	$2 \leq D_{total} < 3$	$3 \leq D_{total} < 4$	$4 \leq D_{total} < 5$	$D_{total} \geq 5$
結構耐久等級評定標度	5	4	3	2	1
耐久性狀況	完好	較好	一般	較差	很差
建議處理方式	正常使用	正常使用	持續維護	補強	拆除

RC橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究
期末報告

3 RC橋梁殘餘壽命預測方法

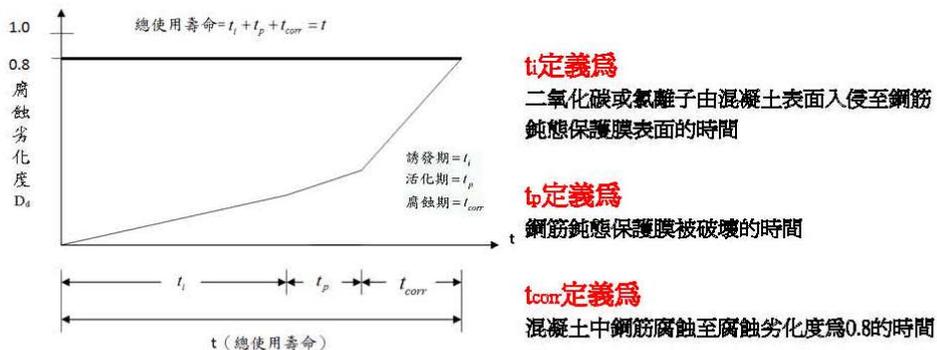
前言
使用壽命預測之方式
橋梁殘餘壽命預測流程

前言

- 1.既有橋梁的劣化、老化、破損與承載力的不足是個全世界性共同面對的問題。
- 2.當空氣中Cl⁻和CO₂從混凝土表面的孔隙中侵入，勢必導致材料的劣化，橋梁結構的功能逐漸地被削弱，甚至喪失。
- 3.氯離子誘導的腐蝕：入侵的氯離子與C3A反應生成氯鋁酸鹽，而被束縛在水化產物中。
4. CO₂誘導的腐蝕：CO₂入侵與Ca(OH)₂產生CaCO₃且被束縛在孔隙壁上，引致pH值的降低，且當pH值小於11.5時，混凝土中的鋼筋開始腐蝕。
- 5.未被束縛的自由氯離子與CO₂將繼續向混凝土內部傳輸，進而破壞鋼筋表面的鈍態保護膜。

使用壽命預測之方式(1/3)

Treadaway, K[1988]指出橋梁使用壽命 t 為 $t=t_i+t_p+t_{corr}$



使用壽命預測之方式(2/3)

腐蝕劣化度 D_d 定義為

$$D_d = 1 - \frac{x}{100}$$

式中 x 為結構物完整性，譬如結構物非常完整，即 $x=100$ ，則 $D_d=0$ ，若完全崩塌，即 $x=0$ ，則 $D_d=1$ 。

誘發期 t_i 的預測法

Fick第一擴散定律或Fick第二擴散定律均可化為下列簡單式

$$x = k\sqrt{t}$$

式中 x 為碳化或氯化深度， K 為碳化或氯化速度係數， t 為時間

使用壽命預測之方式(3/3)

活化期 t_p 的預測法

Bazant[1979b]所建立

$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_s}}} \right)^2$$

式中 D 為氯離子擴散係數，

L 為保護厚度

C^* 為鈍態保護膜處的氯離子臨界濃度

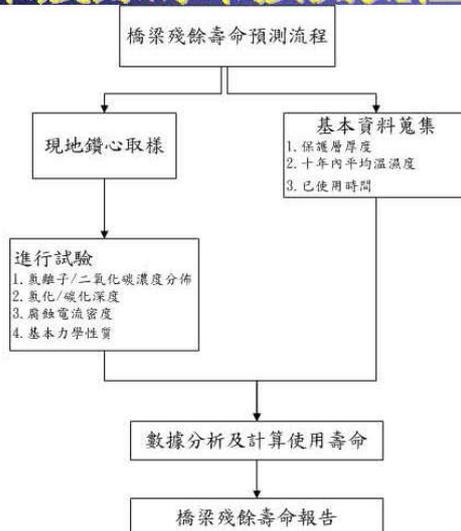
C_s 為混凝土表面的氯離子濃度。

腐蝕期 t_{corr} 的預測法

一般而言， t_{corr} 的時間約為 t_i 的四分之一到五分之一。

$$t_{corr} = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{5} t_i$$

橋梁殘餘壽命預測流程



RC橋梁殘餘壽命預測方法(2/2)

使用壽命公式

誘發期 t_i

鈍化期 t_p

傳遞(或腐蝕)期 t_{corr}

$$x(t) = k\sqrt{t}$$

$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C_s}{C_i}}} \right)^2$$

$$t_{corr} = \frac{\delta \rho_{st} ZF}{A_i}$$

Hookham法[Hookham, 1998]

$$t_i = K_c \cdot K_e \cdot x^2 + K_a \cdot x$$

LZCL法 [Liang et al., 2011]

$$C(x,t) = [C_i + (C_s e^{K_1} - C_i) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t_x}}\right)] e^{-K_2 t}$$

4 案例說明

案例說明
宜蘭縣五結橋
新竹市誠仁橋

案例說明(1/2)

於橋梁結構表面鑽心取樣。分別將取樣試體進行鑽心抗壓強度試驗、硬固混凝土氯離子含量試驗、混凝土中性化深度試驗，並於鑽心位置進行鋼筋混凝土腐蝕量測。

宜蘭縣五結橋



新竹市誠仁橋

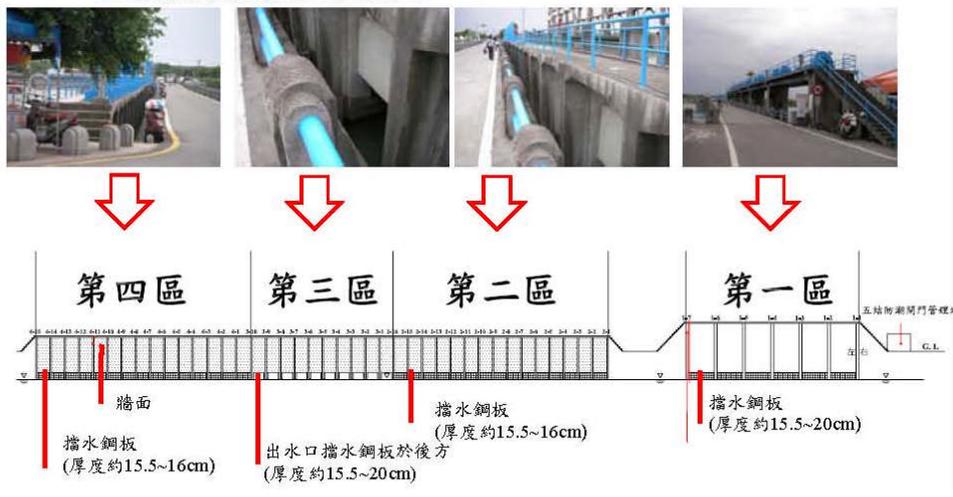


案例說明(2/2)

1. 五結橋和誠仁橋屬年代久遠橋梁，但曾對橋梁進行維修補強，且在**結構體表層皆均勻覆蓋噴凝土補強**，保護橋梁不受外界有害因子之腐蝕。
2. 誠仁橋梁評估**橋梁耐久性較為不良**，推估其原因如下：由於其河道改道情形明顯可見，且無淤積現象，可知其冲刷情況較為嚴重。而專家評估耐久性關鍵因子，**權重比重佔最大者，即為冲刷所造成的危害**。
3. 橋梁中部份構件有混凝土之**修復後再度剝落損傷的現象發生**，尤以新竹誠仁橋梁為甚。推究原因可能為所用之修復材料，未含適當的抗中性化或抗氯離子鹽害添加物，以致於未能達到防蝕效果，**因此在現場檢測時即發現新竹誠仁橋梁腐蝕情況較冬山河五結橋梁嚴重**。

宜蘭縣五結橋(1/12)

五結橋取樣範圍示意圖



宜蘭縣五結橋(2/12)

橋梁環境因子

橋梁齡期因子

冬山河五結橋梁於1969年開始啓用，而檢測時間為2011年，橋梁設計齡期為50年，因此齡期影響係數取1.05。

環境調查因子

冬山河受潮汐影響，海水容易倒灌，每逢颱風豪雨即氾濫成災，宜蘭縣政府和水利會，在冬山河出海口設置一座清水防潮閘門，自動調節上下游水位，防止海水倒灌，因此環境調查係數取1.15。

宜蘭縣五結橋(3/12)

鑽心試體抗壓強度

取樣位置	修正係數	極限載重 (kgf)	受力面積 (cm ²)	抗壓強度 (kgf/cm ²)
1-1	0.93	3536	24.19	136
1-3	1	6974	24.11	289
1-4	1	7034	24.11	292
1-5	1	2957	24.11	123
1-7	1	8237	24.11	342
2-2	0.96	10165	24.02	406
2-5	0.94	7958	24.19	309
2-8	0.89	14283	24.02	529
2-11	0.93	14952	24.11	575
2-14	0.93	12694	24.11	490
3-1	0.91	8314	24.02	315
3-3	0.93	11443	24.11	441
3-6	0.94	5951	24.11	232
3-8	0.93	11741	24.11	453
3-10	0.97	15339	24.02	619
4-2	0.95	10476	24.02	414
4-5	0.98	12817	24.02	523
4-9	0.95	10941	24.11	431
4-14	0.93	10109	24.02	391
4-15	0.97	5166	24.02	209

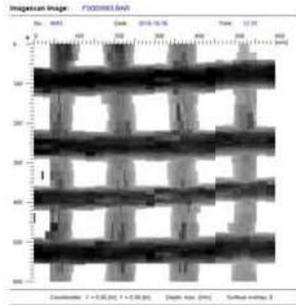
反彈錘試驗結果

估此設計值約為147kg/cm²，計算出K_{bm}=2.10，K_{bt}皆大於0.95，抗壓強度的評定標度值取1。

第一區		第二區	
取樣位置	抗壓強度 (kgf/cm ²)	取樣位置	抗壓強度 (kgf/cm ²)
1-1	218	2-2	377
1-3	137	2-4	447
1-4	137	2-8	323
1-5	160	2-11	294
1-7	278	2-14	225
1-1板上方	207	-	-
1-4板上方	164	-	-
1-7板上方	192	-	-
第三區		第四區	
取樣位置	抗壓強度 (kgf/cm ²)	取樣位置	抗壓強度 (kgf/cm ²)
3-1	301	4-2	290
3-3	267	4-5	320
3-6	262	4-9	308
3-8	344	4-14	310
3-10	363	4-15	216

宜蘭縣五結橋(4/12)

鋼筋探測試驗結果 混凝土保護層厚度的評定標準值取1



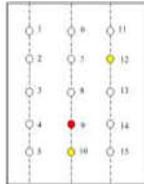
編號19第四區探測影像圖(清晰)

編號	位置	主筋	箍筋	保護層厚度 (cm)
1	第一區	保護層厚度過深，無清晰影像		
2		2-#7	#4@25 cm	5
3		2-#7	#4@22 cm	6.5
4		直向筋#4@20 cm	橫向筋#4@20 cm	7.5
5	第二區	直向筋#4@20 cm	橫向筋#4@30 cm	7
6		2-#7	#4@19 cm	7
7		2-#7	#4@18 cm	6.5
8		2-#7	#4@18 cm	7
9	第三區	3-#7	#4@22 cm	5
10		直向筋#4@15 cm	橫向筋#4@15 cm	7
11		3-#7	#4@21 cm	6.5
12		4-#7	#4@19 cm	6
13	第四區	3-#7	#4@21 cm	8
14		2-#7	#4@20 cm	7
15		3-#7	#4@20 cm	5.5
16		2-#7	#4@20 cm	5.5
17	第五區	2-#7	#4@22 cm	7
18		2-#7	#4@18 cm	6
19		3-#7	#4@21 cm	6
20		直向筋#4@15 cm	橫向筋#4@15 cm	8

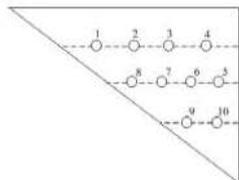
宜蘭縣五結橋(5/12)

敲擊回音試驗結果

(a)腹版



(b)翼版



接收點順序及可能裂縫位置圖

翼版				腹版			
編號	深度	編號	深度	編號	深度	編號	深度
1.1	0.094	6.1	0.038	1.1	0.643	6.1	0.17
1.2	1.01	6.2	0.038	1.2	0.636	6.2	0.14
1.3	0.793	6.3	0.036	1.3	0.597	6.3	0.14
2.1	0.077	7.1	0.126	2.1	0.378	7.1	0.411
2.2	0.208	7.2	0.145	2.2	0.724	7.2	0.448
2.3	0.268	7.3	0.135	2.3	0.513	7.3	0.163
3.1	0.39	8.1	0.022	3.1	0.54	8.1	0.21
3.2	0.311	8.2	0.016	3.2	0.551	8.2	0.214
3.3	0.602	8.3	0.013	3.3	0.412	8.3	0.276
4.1	0.058	9.1	0.152	4.1	0.206	9.1	散射
4.2	0.025	9.2	0.236	4.2	0.198	9.2	散射
4.3	0.195	9.3	0.166	4.3	0.172	9.3	散射
5.1	0.162	10.1	0.067	5.1	0.227	10.1	散射
5.2	0.078	10.2	0.037	5.2	0.291	10.2	散射
5.3	0.072	10.3	0.043	5.3	1.34	10.3	散射

宜蘭縣五結橋(6/12)

腐蝕量測試結果

實測腐蝕電流 $0.07\sim 3.7(\mu A/cm^2)$ 、 $0.04\sim 1.7(mpy)$ ，腐蝕電流的評定標度值取2。
腐蝕電位 $-124\sim 823(mV)$ ，腐蝕電位的評定標度值取1。

取樣位置	腐蝕電流 ($\mu A/cm^2$)	腐蝕電位(mV)	腐蝕速率(mpy)
1-1	0.245	67.491	0.11
1-3	0.599	732.09	0.28
1-4	0.357	823.09	0.16
1-5	0.357	821.15	0.16
1-7	0.079	393.97	0.04
2-2	3.735	-64.19	1.72
2-5	0.33	-70.23	0.15
2-8	0.35	-100.1	0.16
2-11	1.696	-100.9	0.78
2-14	0.526	-74.09	0.24
3-1	0.646	97.671	0.30
3-3	1.522	187.38	0.70
3-6	1.069	-124.2	0.49
3-8	1.822	-53.22	0.84
3-10	0.963	-87.24	0.44
4-2	0.576	-91.08	0.26
4-5	0.725	-58.43	0.33
4-9	0.703	-43.89	0.32
4-14	0.764	-1.097	0.35
4-15	0.283	-36.76	0.13

宜蘭縣五結橋(7/12)

混凝土中性化深度試驗結果

構件皆小於1，混凝土中性化深度評定標準值取1。

中性化深度及鋼筋保護層厚度檢測評定

混凝土中性化深度試驗結果

取樣位置	中性化深度(cm)	取樣位置	中性化深度(cm)
1-1	0.1	3-1	0.2
1-3	0.2	3-3	0.3
1-4	0.2	3-6	0.1
1-5	0.1	3-8	0.2
1-7	0.2	3-10	0.1
2-2	0.3	4-2	0.2
2-5	0.1	4-5	0.1
2-8	0.1	4-9	0.3
2-11	-	4-14	0.3
2-14	0.2	4-15	0.3

編號	位置	中性化深度(cm)	保護層厚度(cm)	中性化深度/保護層厚度
1	第一區	0.1	-	-
2		0.2	5	0.04
3		0.2	6.5	0.03
4		0.1	7.5	0.01
5		0.2	7	0.03
6	第二區	0.2	7	0.04
7		0.1	6.5	0.02
8		0.1	7	0.01
9		-	5	-
10		0.2	7	0.03
11	第三區	0.2	6.5	0.03
12		0.3	6	0.05
13		0.1	8	0.01
14		0.2	7	0.03
15		0.1	5.5	0.02
16	第四區	0.2	5.5	0.04
17		0.1	7	0.01
18		0.3	6	0.05
19		0.3	6	0.05
20		0.3	8	0.04

宜蘭縣五結橋(8/12)

硬固混凝土水溶性氯離子含量試驗結果

實測混凝土中的氯離子含量在0.0075%~0.2%。氯離子含量大於0.15%就不確定誘發鋼筋腐蝕。氯離子含量的評定標度值取2。

取樣位置	氯離子含量(%)	氯離子含量(kg/m ³)	取樣位置	氯離子含量(%)	氯離子含量(kg/m ³)
1-1	0.0093	0.214	3-1	0.0257	0.591
1-3	0.0492	1.132	3-3	0.0106	0.244
1-4	0.0348	0.8	3-6	0.0266	0.612
1-5	0.0126	0.29	3-8	0.257	0.591
1-7	0.0259	0.596	3-10	0.0068	0.156
2-2	0.0135	0.311	4-2	0.0228	0.524
2-5	0.0091	0.209	4-5	0.0081	0.186
2-8	0.0109	0.251	4-9	0.0149	0.343
2-11	0.0111	0.255	4-14	0.0151	0.347
2-14	0.0153	0.352	4-15	0.0075	0.173

宜蘭縣五結橋(9/12)

五結橋混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重

項目	耐久性指標數	權重值	評定標準值	
鋼筋腐蝕現況				
		0.44		
腐蝕電位	1	0.11	1	
中性化深度	2	0.26	1	
氯離子	3	0.35	2	
腐蝕電流	4	0.28	2	
混凝土現況				
		0.56		
電阻係數	5	0.05	0	
抗壓強度	6	0.14	1	
混凝土表面損傷	裂縫	7	0.19	2
	開裂、剝落或露筋與缺角	8	0.25	0.61
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.17	2
	混凝土保護層厚度	10	0.2	1
環境影響因子				
環境調查係數		1.15		
重車流量係數		1		
齡期影響係數		1.05		

宜蘭縣五結橋(10/12)

五結橋整體結構耐久性評定

構(部)件	名稱	推薦權重	評定標度值
1	橋台與基礎	0.23	-
2	橋墩與基礎	0.24	-
3	支承	0.07	4
4	上部主要承重構件	0.26	3.06
5	上部一般承重構件	0.12	3.66
6	橋面鋪裝	0.02	3
7	人行道承重構件	0.05	3
8	欄杆或護欄	0.01	3
備註	當評定標度值為“1”時，表示好的狀態，或表示沒有設置的構造部件，不再進行疊加。		

宜蘭縣五結橋(11/12)

橋梁結構耐久性評定

結構耐久等級評定度為**3**，
結構整體耐久性狀況為**一般**。

$$D_{total} = \sum_{j=1}^n D_j \gamma_j$$

$$D_{total} = 3.31$$

$$3 \leq D_{total} < 4$$

構件整體耐久性綜合評定標準表

D_{total} 範圍	$1 \leq D_{total} < 2$	$2 \leq D_{total} < 3$	$3 \leq D_{total} < 4$	$4 \leq D_{total} < 5$	$D_{total} \geq 5$
結構耐久等級評定標度	5	4	3	2	1
耐久性狀況	完好	較好	一般	較差	很差
建議處理方式	正常使用	正常使用	持續維護	補強	拆除

宜蘭縣五結橋(12/12)

殘餘壽命推估結果

使用壽命 $t = t_i + t_p + t_{corr}$
 $50.32 + 3.59 + 3.76 = 57.63$ (年)

已使用壽命 $t_{ap} = 42$ (年)

剩餘壽命 $t_r = t - t_{ap}$
 $63.94 - 42 = 15.67$ (年)

$$t_i = K_c \cdot K_e \cdot x^2 + K_a \cdot x$$

K_c = 混凝土品質係數, $K_c = 7.59$
 K_e = 環境係數, $K_e = 0.85$
 K_a = 活態腐蝕係數, $K_a = 4.0$
 x = 保護層厚度 (cm)

t_i

$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{C_s^t}} \right)^2$$

D = 氯離子擴散係數 (代 $28 \text{mm}^2/\text{yrs}$)
 L = 保護層厚度 (mm)
 C_s = 混凝土表面的氯離子濃度 (代 $25 \text{kg}/\text{m}^3$)
 C_s^t = 鈍態保護膜處的氯離子濃度 (代 $8 \text{kg}/\text{m}^3$)

t_p

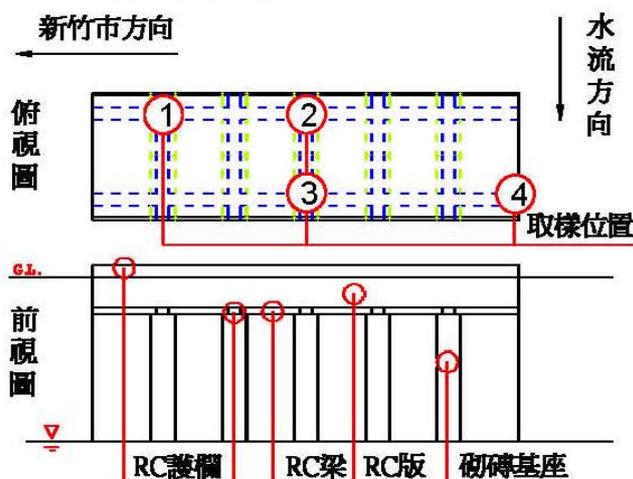
$$t_{corr} = \frac{\delta \rho_s Z F}{A i}$$

A = 鐵的原子量
 i = 腐蝕電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
 Z = 2
 δ = 材料損失 (代 1.2×10^{-10})
 F = 法拉第常數
 ρ_s = 鋼筋質量密度

t_{corr}

新竹市誠仁橋(1/9)

誠仁橋取樣範圍示意圖



新竹市誠仁橋(2/9)

橋梁環境因子

橋梁齡期因子

誠仁橋梁於1944年開始啓用，而檢測時間為2011年，橋梁設計齡期為50年，因此齡期影響係數取1。

環境調查因子

新竹誠仁橋座落在一般的環境，受日曬、雨淋或風蝕的構件，因此環境調查係數取1.10。

重車流量因子

因誠仁橋是對外聯繫的重要橋梁之一，每天車流量高達估1500輛以上，因此重車流量係數取1.15。

新竹市誠仁橋(3/9)

鑽心試體抗壓強度試驗結果

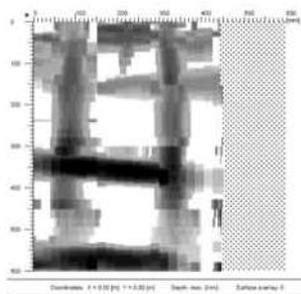
估此設計值為 147kg/cm^2 計算出 $K_{bm}=3.10$ ， K_{bt} 皆大於0.95，抗壓強度的評定標度值取1。

取樣位置	修正係數	極限載重 (kgf)	受力的檢 (cm ²)	抗壓強度 (kgf/cm ²)
第一區	0.92	11907	24.11	454
第二區	0.97	15112	24.19	606
第三區	0.98	7787	24.19	315
第四區	0.91	12139	24.11	458

新竹市誠仁橋(4/9)

鋼筋探測試驗結果

混凝土保護層厚度的評定標準值取2。



誠仁橋編號 12 訊號影像圖

編號	位置	主筋	箍筋	保護層厚度(cm)
1	第一區	3-#5	#3@23cm	6.5
2		2-#5	#3@33cm	5.5
3		2-#5	#3@17cm	5
4	第二區	2-#5	#3@32cm	4.5
5		2-#5	#3@14cm	5.5
6		3-#5	#3@15cm	7
7	第三區	2-#5	#3@15cm	5.5
8		2-#5	#3@35cm	4.5
9		2-#5	#3@16cm	6
10	第四區	2-#5	#3@34cm	5
11		3-#5	#3@18cm	6
12		2-#5	#3@15cm	6

新竹市誠仁橋(5/9)

腐蝕量測試驗結果

實測腐蝕電流 $0.67\sim 1.0(\mu A/cm^2)$ 、 $0.18\sim 0.47(mpy)$ ，腐蝕電流的評定標準值取2。腐蝕電位 $407\sim 583(mV)$ ，腐蝕電位的評定標準值取1。

取樣位置	腐蝕電流 ($\mu A/cm^2$)	腐蝕電位(mV)	腐蝕速率 (mpy)
第一區	0.398	407.1	0.18
第二區	0.671	425.8	0.30
第三區	1.057	570.1	0.47
第四區	0.849	583	0.37

混凝土中性化深度試驗結果

構件皆小於1，混凝土中性化深度評定標準值取0。

取樣位置	中性化深度(cm)
1	0.0
2	0.0
3	0.0
4	0.0

硬固混凝土氯離子含量試驗

氯離子含量小於0.15%發生誘發鋼筋腐蝕很小。氯離子含量的評定標準值取1。

取樣位置	氯離子含量(%)	氯離子含量(kg/m ³)
第一區	0.0141	0.324
第二區	0.0059	0.136
第三區	0.0043	0.099
第四區	0.0051	0.117

新竹市誠仁橋(6/9)

誠仁橋混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重

項目		耐久性 指標數	權重值	評定 標準值
鋼筋腐蝕現況			0.44	
	腐蝕電位	1	0.11	1
	中性化深度	2	0.26	0
	氯離子	3	0.35	1
	腐蝕電流	4	0.28	2
混凝土現況			0.56	
	電阻係數	5	0.05	0
	抗壓強度	6	0.14	1
混凝土 表面損傷	裂縫	7	0.19	5
	開裂、剝落或露筋與缺角	8	0.25	4
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.17	3
	混凝土保護層厚度	10	0.2	2
環境影響因子				
	環境調查係數		1.15	
	重車流量係數		1	
	齡期影響係數		1.05	

新竹市誠仁橋(7/9)

誠仁橋整體結構耐久性評定

構(部)件	名稱	推薦權重	評定標度值
1	橋台與基礎	0.23	-
2	橋墩與基礎	0.24	-
3	支承	0.07	-
4	上部主要承重構件	0.26	4.06
5	上部一般承重構件	0.12	4.66
6	橋面鋪裝	0.02	5
7	人行道承重構件	0.05	5
8	欄杆或護欄	0.01	5
備註	當評定標度值為“1”時，表示好的狀態，或表示沒有設置的構造部件，不再進行疊加。		

新竹市誠仁橋(8/9)

橋梁結構耐久性評定

$$D_{total} = \sum_{i=1}^n D_i \gamma_i$$

$$D_{total}=4.55$$

$$3 \leq D_{total} < 4$$

結構耐久等級評定度為**2**，
結構整體耐久性狀況為**較差**。

構件整體耐久性綜合評定標準表

D_{total} 範圍	$1 \leq D_{total} < 2$	$2 \leq D_{total} < 3$	$3 \leq D_{total} < 4$	$4 \leq D_{total} < 5$	$D_{total} \geq 5$
結構耐久等級評定標準	5	4	3	2	1
耐久性狀況	完好	較好	一般	較差	很差
建議處理方式	正常使用	正常使用	持續維護	補強	拆除

新竹市誠仁橋(9/9)

殘餘壽命推估結果

使用壽命 $t = t_i + t_p + t_{corr}$
 $50.31 + 14.34 + 6.45 = 71.11$ (年)

已使用壽命 $t_{ap} = 67$ (年)

剩餘壽命 $t_r = t - t_{ap}$
 $71.13 - 67 = 4.11$ (年)

$$C(x, t) = [C_1 + (C_2 e^{Kx} - C_1) \operatorname{erfc}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})] e^{-2Kx} \quad t_i$$

C_1 = 混凝土中氯離子起始濃度(代0)
 C_2 = 混凝土表面氯離子濃度(代0.4kg/m³)
 K = 化學反應係數(0.001)
 x = 擴散深度(代保護層厚度(mm))

$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}} \right)^2 \quad t_p$$

D = 氯離子擴散係數(代28mm²/yrs)
 L = 保護層厚度(mm)
 C_1 = 混凝土表面的氯離子濃度(代25kg/m³)
 C_2 = 鉍態保護膜處的氯離子濃度(代8kg/m³)

$$t_{corr} = \frac{\delta \rho_s Z F}{A i} \quad t_{corr}$$

A = 鐵的原子量
 i = 腐蝕電流密度(μ A/cm²)
 Z = 2
 δ = 材料損失(代1.2×10⁻¹⁰)
 F = 法拉第常數
 ρ_s = 鋼筋質量密度

5 相關成果

專家座談會
技術手冊
教育訓練
計畫成果

專家座談會(1/3)

議題:RC橋梁耐久性評估之指標

時間:2011/05/24(二)

會議內容

由於不同區域之專家學者對因子的重要性看法不盡相同，故藉由此專家座談會綜合各專家建議，提供符合在地化因子權重值。



專家座談會(2/3)

議題:討論計畫技術手冊內容並作意見交流

時間:2011/9/30(五)

會議內容

為符合契約之要求，本計畫將提供技術手冊供橋梁管理參考。本次專家座談會將彙整相關專家學者建議，擬定技術計畫初稿。



專家座談會(3/3)

議題:技術手冊初稿討論

時間:2011/11/04(五)

會議內容

本次座談會邀請各專家學者，針對技術手冊初稿，提供相關建議，以利手冊之完整性及實用性。



技術手冊

在完成建立RC橋梁材料耐久性評估與劣化RC橋梁殘餘壽命預測模式之後，將選擇二座橋樑進行現地檢測與驗證，最後再依據檢測試驗與驗證結果，編撰橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測之手冊。
(另成專冊檢附)

RC 橋梁材料劣化評估與
殘餘壽命預測技術手冊



交通部運輸研究所
中華民國 100 年 11 月

教育訓練

日期：100年12月6日(星期二)上午09:00至下午5:10止。

地點：交通部運輸研究所臺灣技術研究中心

項次	內容	主講
一	RC橋梁老劣化現象及原因探討	黃然 教授
二	RC橋梁材料劣化評估教學(含成果)	葉為忠 教授
三	RC橋梁檢測作業流程與注意事項	翁在龍 教授
四	RC橋梁殘餘壽命預測教學(含成果)	梁明德 教授

計畫成果

1. RC橋樑材料耐久性評估，依據層級分析法完成問卷設計並召開兩次專家座談會，彙整專家意見經由一致性計算，獲得耐久性指標之權重，並可利用計算值評定既有RC橋樑耐久性等級。
2. 針對橋樑結構材料及單一構件的耐久性，已建立本土化綜合評估模式。
3. 完成二座案例橋樑現況檢測，檢試驗項目包括抗壓強度、氯離子滲透深度、中性化程度、腐蝕電流、腐蝕電位、腐蝕速率與混凝土開裂情況，依據檢測資料完成案例耐久性評估及殘餘使用壽命預測評估。評估結果大致合理。
4. 氯離子所引發之鋼筋腐蝕，採用線性擴散方程式或非線性擴散方程式估算RC橋樑使用壽命，所得結果大致相同。
5. 完成橋樑材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊初稿擬定與專家座談(如附件)並擬於100/12舉辦訓練講習。

簡報結束
敬請指教
The End