

100-160-7578

MOTC-IOT-99-H1EB005

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 12 月

100-160-7578

MOTC-IOT-99-H1EB005

RC 橋梁材料劣化評估與殘餘 壽命預測技術手冊

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 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊
/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 978-986-03-1469-4 (平裝)
1. 橋樑工程 2. 鋼筋混凝土
441.8 101000009

RC 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊

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：10458 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臺灣技術研究中心網站

定 價：100 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 FB1・電話：(02)25180207

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

GPN：1010005074

ISBN：978-986-03-1469-4 (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分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

100

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

GPN : 1010005074

定價: 100 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 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-03-1469-4（平裝）	政府出版品統一編號 1010005074	運輸研究所出版品編號 100-160-7578	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			
摘要： 橋梁是公路和鐵路運輸的重要樞紐，橋梁承载力和通行能力是交通網絡貫通的關鍵因素，然而世界各國橋梁因老、劣化或使用不當發生損傷，降低承载力，甚且造成落橋的重大災難。其發生原因可能為實際使用情況與原先設計構思的狀況有所差異、位置與材料選擇的錯誤、基礎設計型式不正確或施工不當、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，更會加速橋梁缺陷和損傷的擴大。 針對既有鋼筋混凝土橋梁，利用檢測技術以瞭解其現況並評估其耐久性，進而推估殘餘使用壽命是交通管理單位重要的工作。工作流程係利用現場獲得的資料，透過系統分析及適當的參數值評估橋梁的耐久性及推估殘餘使用壽命。緣此，本技術手冊主要針對鋼筋混凝土橋梁材料耐久性檢測技術、評估方法及預測橋梁殘餘使用壽命方式，提供相關需要的檢測項目、檢測方法、評定標準及二案例說明。評定預測結果可作為橋梁結構物使用現況參考資料，更可作為橋梁管理者決定既有鋼筋混凝土橋梁維修、補強或拆除之參考。			
出版日期	頁數	工本費	本 出 版 品 取 得 方 式
100 年 12 月	94	100	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。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
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 Guide			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-03-1469-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010005074	IOT SERIAL NUMBER 100-160-7578	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: Bridge is a major structure for the land transportation network. Construction of bridge has been viewed as a key factor for the highway and railway transportation development. To ensure the loading and functional capacities of bridge for providing a complete transportation network is the responsibility of bridge maintenance authority. Thus, bridges play an important role on the development of social economics and welfare of citizens' lives. For the existing bridges, deterioration, aging, damage affecting loading capability or service function are very common and the traffic flow grows fast recently and cargo trucks become heavier. It is an urgent need to build higher standard bridge or strengthen the existing bridges. The existing bridges usually have some inherent flaws or damages during their service life which may result from wrong site selection, poor selection of materials, inappropriate foundation, misuse of structure types, mistakes in numerical analysis or poor construction management etc. For the existing reinforced concrete bridges, how to evaluate their durability using the testing or inspection become an important issue for the governmental bridge maintenance agency. Based on the in-situ measured data and systematic analysis results, the durability of RC bridges would be evaluated and the remaining service life be also assessed. This technical handbook will provide the aforementioned information about testing or inspection methods for concrete and rebar conditions and the methodology to evaluate the durability of the existing RC bridge. In addition, the assessment procedure for the remaining service life of RC bridges is discussed and two case studies are also demonstrated.			
DATE OF PUBLICATION December 2011	NUMBER OF PAGES 94	PRICE 100	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

RC 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖目錄	VI
表目錄	VIII
第一章 緣起.....	1
1.1 手冊緣起	1
1.2 適用範圍	2
第二章 RC 橋梁材料老劣化及檢測技術.....	3
2.1 鋼筋混凝土材料劣化	3
2.1.1 混凝土老劣化	3
2.1.2 鋼筋腐蝕	5
2.2 橋梁檢測技術及評估法相關資料	6
2.2.1 公路橋梁檢測技術	7
2.2.2 D.E.R&U.評估法	7
2.2.3 A.B.C.D.評估法	8
2.2 國內橋梁檢測執行概況	9
2.3.1 RC 橋梁現況評估方式.....	10
2.3.2 RC 橋梁檢測項目	10
2.3.3 RC 橋梁檢測等級.....	10

2.3.4	RC 橋梁檢測時機.....	11
2.3.5	RC 橋梁檢測辦理方式.....	12
第三章	RC 橋梁耐久性檢測及評定技術.....	13
3.1	前言	13
3.2	橋梁環境因子調查意義	15
3.2.1	環境條件影響因子	15
3.2.2	重車流量因子	15
3.2.3	橋梁齡期因子	17
3.3	材料因子耐久性評估意義	18
3.4	混凝土耐久性檢測與評定	19
3.4.1	混凝土耐久性指標	19
3.4.2	混凝土電阻率檢測與評定	19
3.4.3	混凝土強度檢測與評定	21
3.4.4	混凝土表面損傷檢測與評定	22
3.5	鋼筋腐蝕耐久性檢測與評定	29
3.5.1	鋼筋腐蝕耐久性指標	29
3.5.2	鋼筋腐蝕電位檢測與評定	30
3.5.3	混凝土中性化深度檢測與評定	33
3.5.4	混凝土中氯離子含量檢測與評定	34
3.5.5	鋼筋腐蝕電流檢測與評定	36
3.5.6	混凝土中鋼筋分佈及保護層厚度檢測與評定	38
3.6	耐久性綜合評估方法	41
第四章	RC 橋梁殘餘壽命預測方法	44

4.1	前言	44
4.2	橋梁使用壽命與殘餘壽命	45
4-3	殘餘壽命預測範例應用	47
第五章	案例說明	51
5.1	宜蘭縣五結橋	51
5.1.1	現場檢驗結果	51
5.1.2	混凝土材料耐久性評估結果	63
5.1.3	殘餘壽命預測結果	64
5.2	新竹市誠仁橋	67
5.2.1	現場檢驗結果	67
5.2.2	混凝土材料耐久性評估結果	72
5.2.3	殘餘壽命預測結果	74
5.3	綜合評定結果	76
參考文獻		參-1

圖目錄

圖 2-1	混凝土耐久性與性能關係圖	4
圖 2-3	混凝土劣化物理性因子	4
圖 2-4	混凝土劣化化學性因子	5
圖 2-5	鋼筋的電化學腐蝕示意圖	6
圖 3-1	RC 橋梁材料耐久性評定流程.....	14
圖 3-3	材料因子耐久性評估項目	17
圖 3-4	混凝土現況耐久性指標	18
圖 3-5	混凝土電阻率測試示意圖	19
圖 3-6	反彈錘	20
圖 3-7	鋼筋腐蝕現況耐久性指標	29
圖 3-8	銅/硫酸銅參考電極示意圖	30
圖 3-9	測試系統簡圖	31
圖 3-10	離子滴定儀	34
圖 3-11	利用 GalvaPulse 檢測腐示意圖	36
圖 3-12	鋼筋探測儀	37
圖 4-1	橋梁殘餘壽命預測流程圖	44
圖 4-2	結構物受氯離子擴散影響使用壽命	45
圖 4-3	碳化係數對累積機率之關係曲線	47
圖 4-4	氯離子濃度 - 深度曲線	49
圖 5-1	五結橋現況	50

圖 5-3	第一區調查位置	52
圖 5-4	第二區調查位置	52
圖 5-5	第三區調查位置	53
圖 5-6	第四區調查位置	53
圖 5-7	五結橋梁鋼筋探測位置示意圖	55
圖 5-8	編號 1 第一區探測影像(模糊)	56
圖 5-9	編號 19 第四區探測影像(清晰)	56
圖 5-10	接收點順序及可能裂縫位置：(a)腹版；(b)翼版.....	57
圖 5-11	誠仁橋現況	66
圖 5-12	誠仁橋示意圖	67
圖 5-13	誠仁橋鋼筋探測位置示意圖	68
圖 5-14	誠仁橋編號 12 訊號影像	69

表目錄

表 1-1	臺灣地區公路及鐵路橋梁統計	1
表 2-1	橋梁檢測規範與手冊	7
表 2-3	D.E.R.&U.評估檢測項目	8
表 2-4	D.E.R.&U.評估準則	8
表 2-5	A.B.C.D.評估檢測項目	8
表 2-6	A.B.C.D.評估準則	9
表 3-1	橋梁暴露環境條件影響建議分級及評定標準	14
表 3-3	國內重車種類及軸重-總重規定標準	15
表 3-4	重車流量評定標準	16
表 3-5	橋梁齡期因子評定標準	16
表 3-6	混凝土電阻率評定標準	19
表 3-7	結構混凝土現場檢測強度的評定標準	21
表 3-8	鋼筋混凝土構件表面損傷分級評定方法	22
表 3-9	鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準	23
表 3-10	預力混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準	24
表 3-11	鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準表	25
表 3-12	預力鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準	26
表 3-13	鋼筋混凝土結構構件表面損傷(除裂縫)分級評定標準	27
表 3-14	預力混凝土構件表面損傷(除裂縫)分級評定標準	28
表 3-15	結構混凝土中鋼筋鏽蝕電位評定標準	32
表 3-16	混凝土碳化深度評定標準	33

表 3-17	混凝土中氯離子含量評定標準	35
表 3-18	鋼筋腐蝕電流評定標準	36
表 3-19	混凝土保護層厚度評定係數值	38
表 3-20	混凝土保護層厚度評定標準	39
表 3-21	混凝土構件材料狀況檢測指標與耐久性指標權重	41
表 3-22	混凝土構件耐久性評估標準	41
表 3-23	混凝土橋梁各構件權重值	42
表 3-24	構件整體的耐久性綜合評定標準	42
表 4-1	橋梁構件碳化深度	46
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	48
表 5-1	鑽心試體抗壓強度試驗結果	51
表 5-2	反彈錘試驗結果	54
表 5-3	鋼筋探測試驗結果	57
表 5-4	推估混凝土裂縫深度(mm)	58
表 5-6	腐蝕量測試驗結果	59
表 5-7	混凝土中性化深度試驗結果	60
表 5-8	中性化深度及鋼筋保護層厚度檢測評定	60
表 5-9	混凝土水溶性氯離子含量試驗結果	61
表 5-10	五結橋混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重	62
表 5-11	五結橋整體結構耐久性評定	63
表 5-12	鑽心試體抗壓強度試驗結果	68
表 5-13	鋼筋探測試驗結果	69

表 5-14	腐蝕電流密度量測試驗結果.....	70
表 5-15	混凝土中性化深度試驗結果.....	70
表 5-16	混凝土水溶性氯離子含量試驗結果.....	70
表 5-17	誠仁橋混凝土構件材料狀況檢測指標與耐久性指標權重....	71
表 5-18	誠仁橋整體結構耐久性評定表.....	72

第一章 緣起

1.1 手冊緣起

橋梁是海陸運輸交通網絡的主要結構物之一，橋梁構造依材料可以分為木造橋、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大多數。橋梁是公路和鐵路運輸完整發展的基礎，為公路和鐵路系統暢通的咽喉，其承載力和通行能力是全線貫通的關鍵，主要扮演增進社會經濟發展與民眾生活福祉的樞紐角色。

台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。

表 1-1 臺灣地區公路及鐵路橋梁統計

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≥20M)	小橋 (2M≤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。

由於台灣四面環海，屬於海洋性腐蝕暴露環境。過去因混凝土施工品質水準參差不齊，如果再加上超載問題嚴重，往往會使得鋼筋混凝土橋梁產生可見裂縫與鋼筋腐蝕會產生加乘效應，進而擴大裂縫導致橋梁結構承載力不足，預期縮短壽命。2008 年國內交通部公路總局調查，全台共計 188 座危橋，

其中 50 座必須立即拆除重建，重建費用及其餘 138 座橋梁的維修補強費，預計新台幣約 1528 億元。

既有橋梁劣化、老化、損傷甚至承载力不足的情形時有所見，近年來，經濟發展交通量急速成長，大型重載的運輸工具越來越多，因此迫切需要高標準高程載的橋梁，但既有橋梁使用後常發生先天缺陷，主要因為使用中實際情況與原先設計構想有一定的差異、如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、達不到預先設計需求，再一方面若惡劣的暴露環境而引起橋梁結構加速產生缺陷和損傷縮短使用年限，橋梁的缺陷損傷及承载力不足有可能會造成生命與財產的巨大損失。因此如何維護現有橋梁功能並延長其使用壽命，為台灣橋梁管理單位必須面對的重要課題。

1.2 適用範圍

本手冊主要說明針對鋼筋混凝土橋梁之材料耐久性檢測評估技術及預測橋梁殘餘壽命預估方式，提供相關需要的檢測項目、檢測方法、評定標準及案例。評定預測結果可作為橋梁結構物使用現況參考資料，更可作為橋梁管理者的決策依據，亦即可作為決定既有鋼筋混凝土橋梁維修、補強或拆除之參考依據。

第二章 RC橋梁材料老劣化及檢測技術

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性與力學性不致於發生嚴重劣化，以確保結構物使用安全。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)及其它劣化過程(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。

由於暴露環境的影響與材料孔隙結構的改變裂縫的產生，材料性質多隨著時間而變化，因此可以說沒有材料具有永恆不變的耐久性。工程注重的是結構物設計年限與使用年限，通常可以材料的特性來評估或預測使用年限。而材料的耐久性是指構件材料劣化達到使用上不安全或是不具經濟性的生命週期(life cycle)。

結構物耐久性的評估與力學性質、建築費用等一樣重要，其重要性可分三方面說明。首先就經濟效益而言，在整個建築物的生命週期中，總投資成本應包括興建成本與後來的維修補強及拆除處理成本，如果在設計階段考量耐久性的因素，則可以降低維修補強的成本。就環保觀點而言，提高材料的耐久性即代表了耐久性構造物，不避免自然資源的浪費。最後，混凝土近年來廣泛使用在不同的結構上，諸如儲油槽、儲氣槽、核能電廠等多面臨高溫、低溫、高壓等異於一般環境的條件，甚至於濱海的橋梁上。所以材料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。

混凝土劣化的原因有許多，大致可分為物理性與化學性兩方面。物理性的原因如圖 2-2 所示，主要的現象為面層的破壞與裂縫的擴張；化學性的原因如圖 2-3 所示，常見的原因是由於侵蝕性物質與混凝土中的漿體產生化學反應。除此之外，混凝土亦可能因鋼筋腐蝕造成剝落及裂縫擴張等現象。一般混凝土的劣化是許多因素混合造成的，若能瞭解個別因素影響及機理並提出預防之道，必能提升整體混凝土構造物的耐久性。

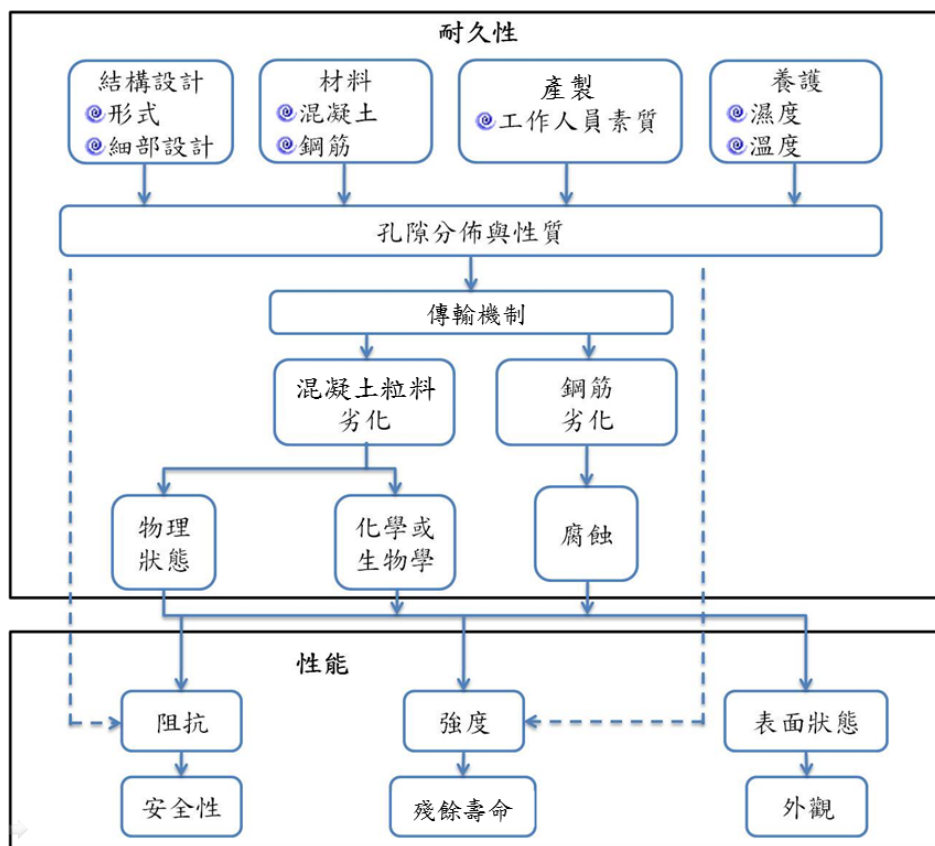


圖 2-1 混凝土耐久性與性能關係圖

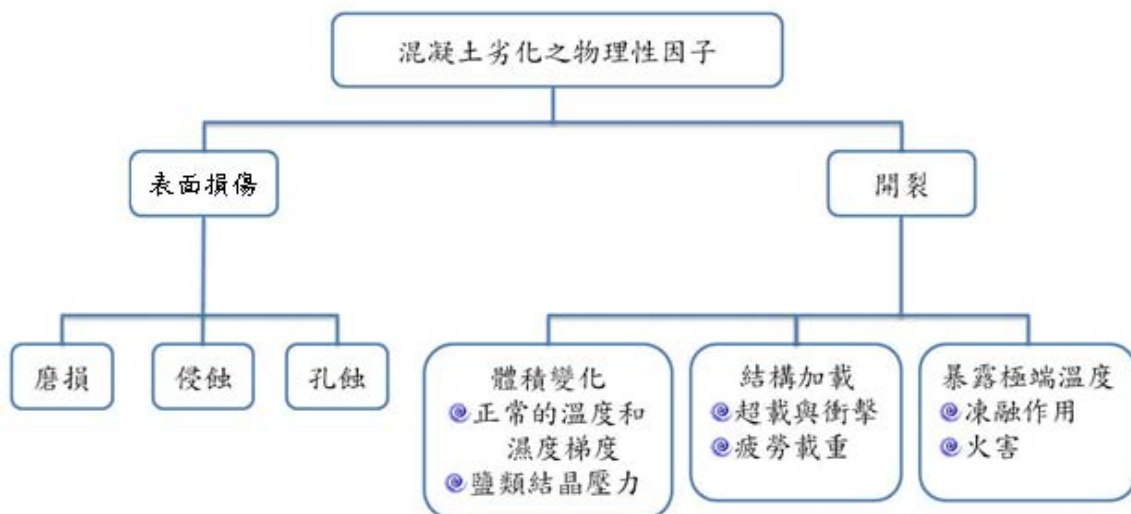


圖 2-2 混凝土劣化物理性因子

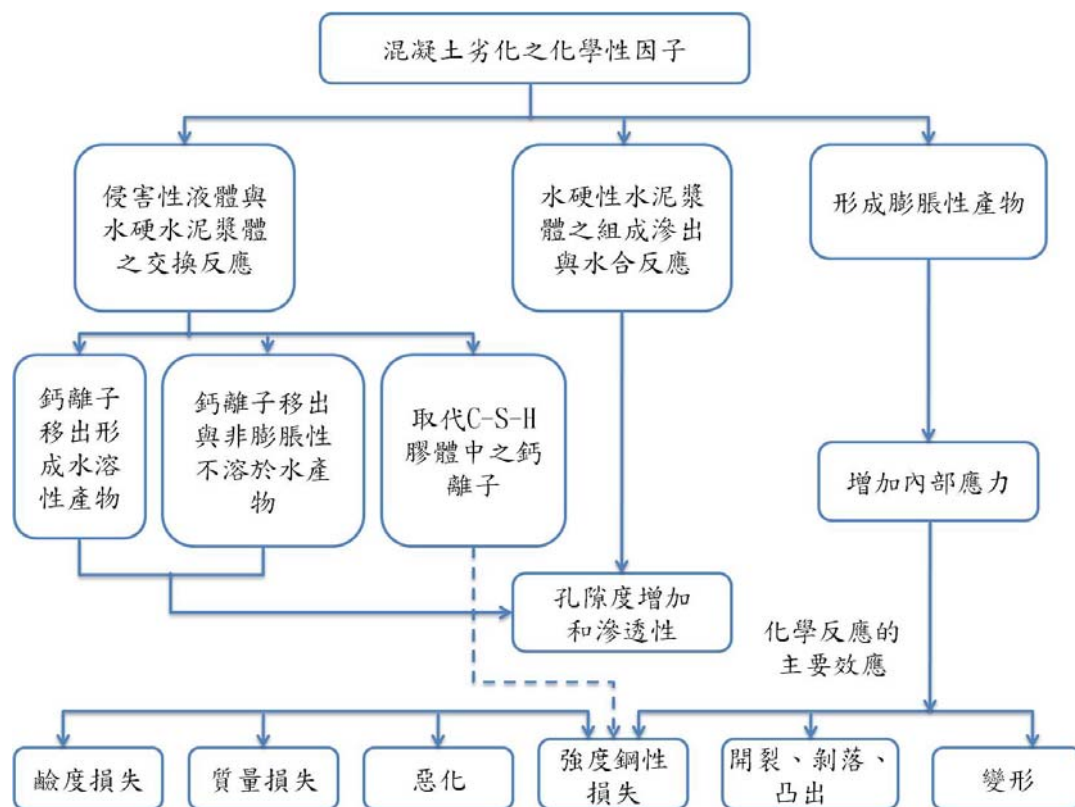


圖 2-3 混凝土劣化化學性因子

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，即在腐蝕鋼筋表面不同位置同時進行陰、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，則為腐蝕，腐蝕速率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(鈍態)的氧化保護膜，腐蝕速度迅速降低；當 pH 值接近 12 時，保護膜變的更加緊密，使陰極反應難以進行，漸漸停止腐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，產生腐蝕產物 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，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。

陽極 (Anode) : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ (氧化反應)

陰極 (Cathode) : $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ (還原反應)

混凝土中的鋼筋腐蝕屬於電化學腐蝕，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电位差。
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。

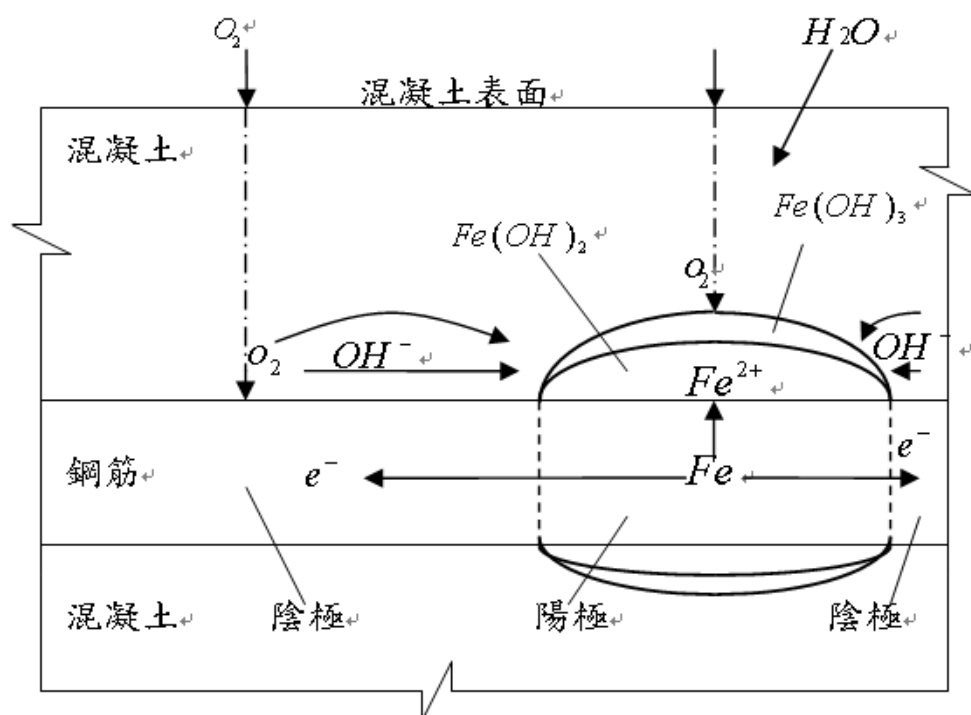


圖 2-4 鋼筋的電化學腐蝕示意圖

2.2 橋梁檢測技術及評估法相關資料

國內一直努力制定符合在地橋梁特性、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。本章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規範或手冊。

2.2.1 公路橋梁檢測技術

國內公路橋梁係以「公路養護手冊」為主要參考資料，屬於公路單位檢測方面的上位規範，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 2-1 為公路橋梁管理單位相關的檢測規範與手冊。

表 2-1 橋梁檢測規範與手冊

規範手冊名稱	檢測紀錄與評估方法	使用橋管單位
市區道路橋梁安全檢測手冊	A.B.C.D.(2000 年以後) D.E.R.&U.(2000 年以後)	各縣市政府
混凝土、鋼橋一般檢測手冊	A.B.C.D.(2000 年以後) D.E.R.&U.(2000 年以後)	省府住都局
公路橋梁安全檢查手冊	D.E.R.&U.	公路總局
公路橋梁一般目視檢測手冊	D.E.R.&U.	高公局
橋梁安全維護檢測手冊	D.E.R.&U.	通用
橋梁目視檢測評估手冊	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

2.2.2 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手冊中亦有採用 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 2-2。

表 2-2 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

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 2-3 所示。

表 2-3 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

2.2.3 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 2-4 所示。

表 2-4 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

A.B.C.D.評估法之將損傷分為 A~D 四級，如表 2-5 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 2-5 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。

2.3 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。

2.3.1 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。

2.3.2 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2-2與表2-4所示。

2.3.3 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：

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。

2.3.4 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「公路養護手冊」辦理，該手冊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手冊規定之原則，視需要自行訂定檢測頻率，執行情形簡述如下：

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前再辦理檢查。

3. 交通部台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。

2.3.5 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。

第三章 RC 橋梁耐久性檢測及評定技術

3.1 前言

本手冊目的主要是針對 RC 橋梁上部結構的材料狀況與耐久性作檢測評估(檢測方法可參考相關規範或標準)，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，可評估既有 RC 橋梁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，必要時可適當增加權重。而對於特殊環境之 RC 橋梁，如遭火災或海浪侵襲處等特殊狀況橋梁，除照本手冊規定外，應須遵照其他相關規範之要求。相關檢測流程詳如圖 3.1 所示。

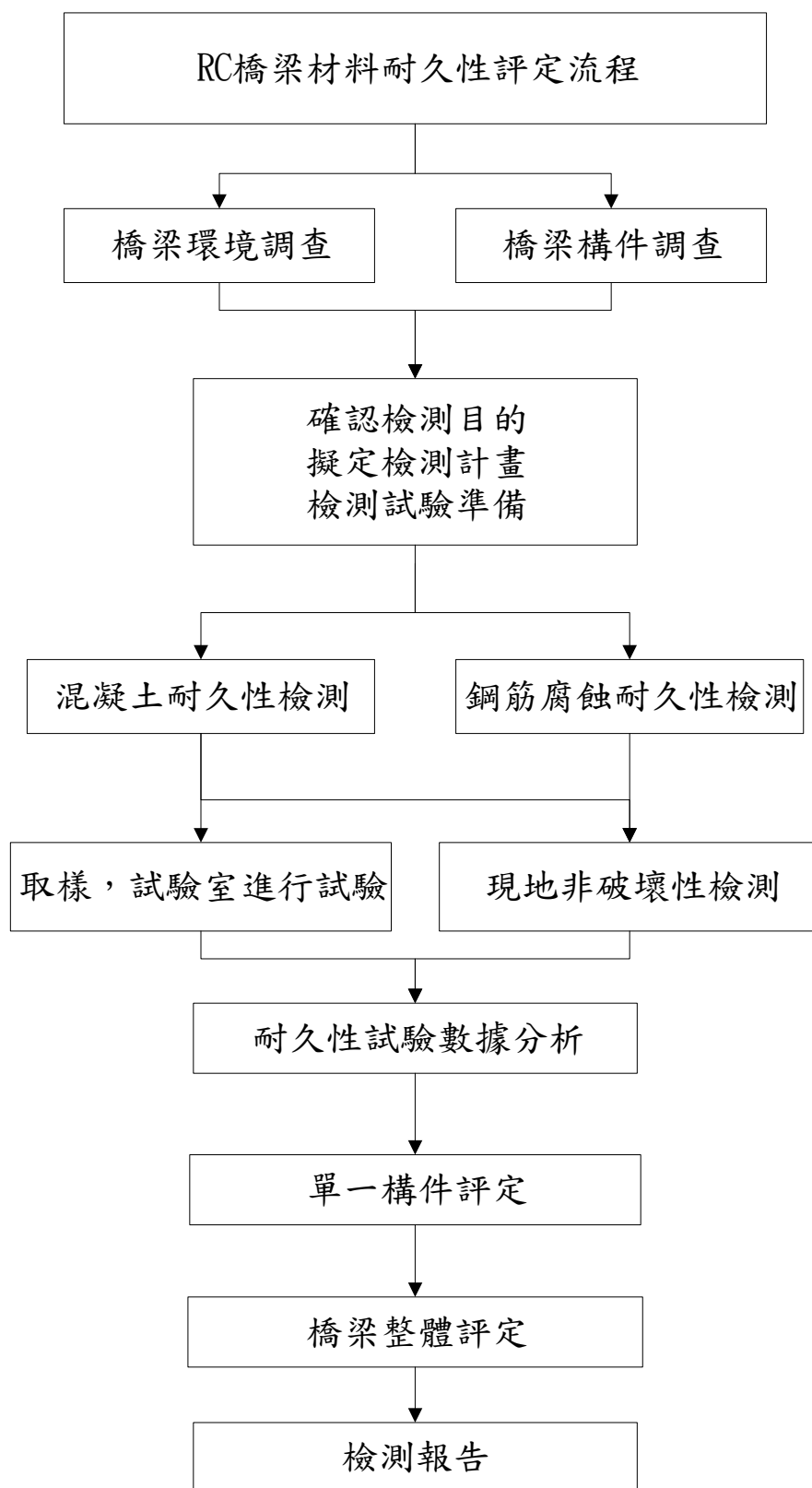


圖 3-1 RC 橋梁材料耐久性評定流程

3.2 橋梁環境因子調查意義

3.2.1 環境條件影響因子

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。表 3-1 針對腐蝕暴露環境類別分為五級，環境影響係數如表中所示。

表 3-1 橋梁暴露環境條件影響建議分級及評定標準

環境類別	環境條件		環境影響係數
I 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

3.2.2 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，國內重車種類及軸重如表 3-2，必須加入重車流量因子，以供日後橋梁管理維修之用。重車流量評定標準如表 3-3 所示。

表 3-2 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- <u>單</u> 軸	10	15
		TD，單- <u>雙</u> 軸	14.5	21
半 聯 結 車		T3，單-單- <u>單</u> 軸	10	35
		T4，單-單- <u>雙</u> 軸	14.5	
		T5，單- <u>雙</u> - <u>雙</u> 軸	14.5	
全 聯 結 車		F4，單-單- <u>雙</u> 軸	14.5	42
		F5，單- <u>雙</u> - <u>雙</u> 軸	14.5	
註：表中標黑處之軸重規定皆視 <u>最後軸</u> （主要分析軸組型式）為主要承重軸				

表 3-3 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

3.2.3 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，鋼筋腐蝕並不十分嚴重，但卻發生了構件破壞現象。因此，並不存在一個規律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、採用齡期因子來評定分類。橋梁齡期因子評定標準如表 3-4 所示。

表 3-4 橋梁齡期因子評定標準

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	$K = T1/T2$ T1=設計年限 T2=檢測時年限	

3.3 材料因子耐久性評估意義

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，本手冊只針對鋼筋混凝土橋梁，其他型式之橋梁並不在本手冊範疇之內。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，最後整體的評定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。因此在手冊中，僅針對材料因子進行評估作業，至於其他因子則以放大係數的觀念加入最後整體的評定當中，如圖 3-2 所示。

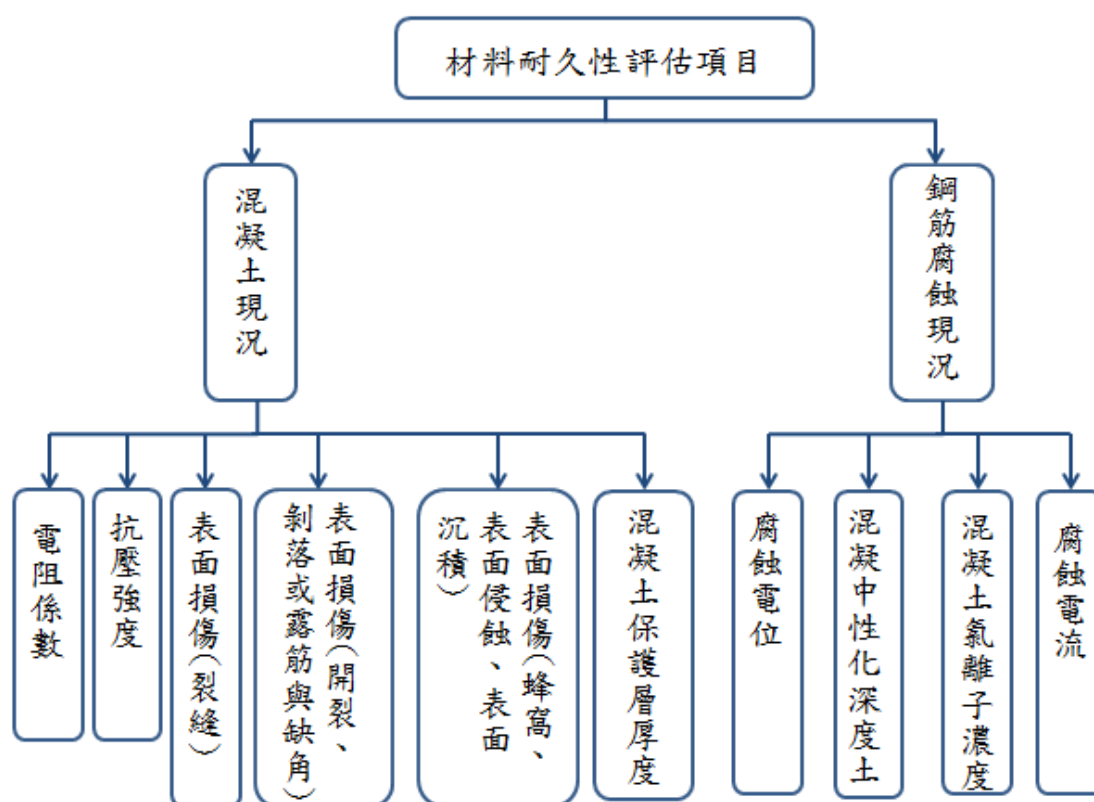


圖 3-2 材料因子耐久性評估項目

3.4 混凝土耐久性檢測與評定

3.4.1 混凝土耐久性指標

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 3-3 所示。

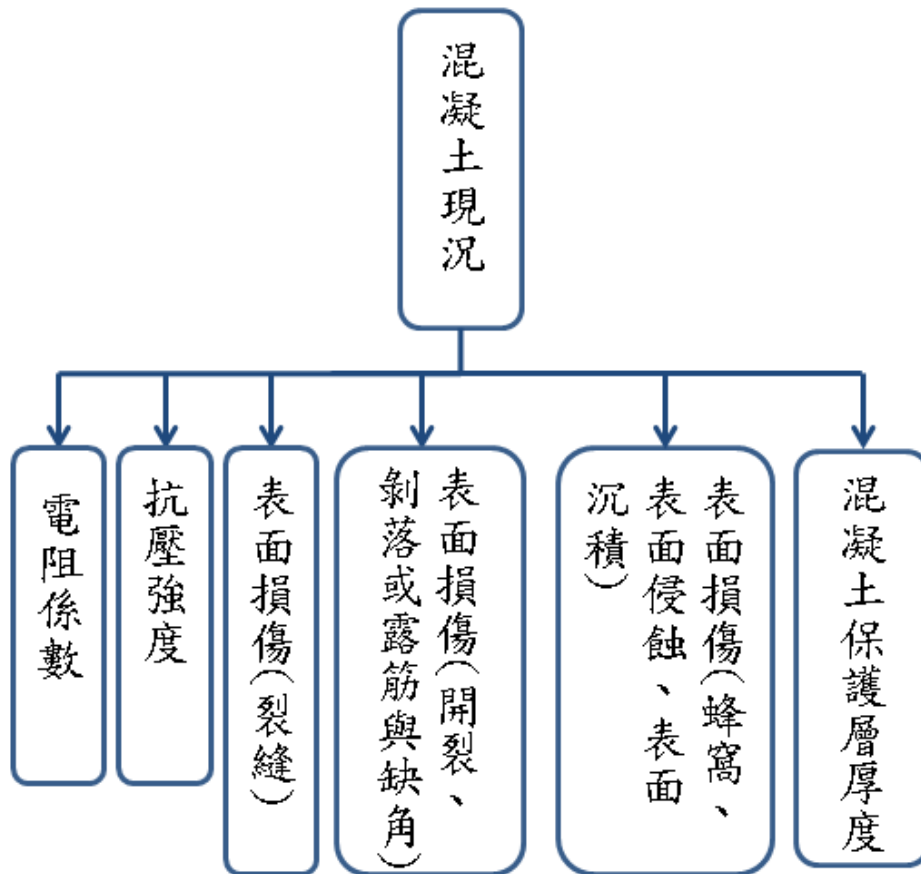


圖 3-3 混凝土現況耐久性指標

3.4.2 混凝土電阻率檢測與評定

1. 檢測目的

混凝土的電阻率影響其導電性。混凝土電阻率大，若鋼筋發生腐蝕，則發展速率慢，擴散能力弱；混凝土電阻率小，腐蝕發展速度快，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. 設備

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 μ 。如圖 3-4 所示。

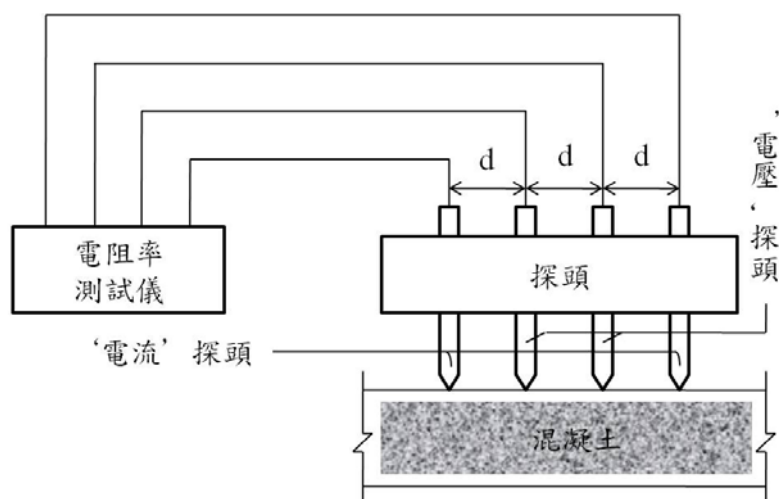


圖 3-4 混凝土電阻率測試示意圖

3. 測試方法

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。

4. 評定標準

混凝土電阻率的評定標準如表 3-5 所示。

表 3-5 混凝土電阻率評定標準

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。	

3.4.3 混凝土強度檢測與評定

1. 檢測目的

對於被測混凝土橋梁構件，當只有一個可測面時，可採用反彈錘法檢測其混凝土強度。

2. 設備

反彈錘如圖 3-5 所示。



圖 3-5 反彈錘

3. 測試方法

- (1) 檢測時反彈錘的軸線應始終垂直於混凝土檢測面，緩慢施壓，準確讀數，快速復位。

- (2) 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) 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。

4. 評定標準

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，並可按表 3-6 對其強度做出評定。

表 3-6 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	(1) $K_{bt} = \frac{R_{it}}{R}$ 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 (2) $K_{bm} = \frac{R_{im}}{R}$ 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		

3.4.4 混凝土表面損傷檢測與評定

1. 檢測目的

用目視方式及工具輔助檢測外觀的損傷。

2. 測試方法

- (1) 裂縫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。查明裂縫發生的時間和原因，並評定裂縫是否趨於穩定，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，監測時段以 6~12 個月為宜。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。

3. 評定標準

對混凝土橋梁構件的表面損傷，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 3-7 所示。而相關類型之橋梁表面損傷裂縫分級評定標準見表 3-8~3-13 所示。

表 3-7 鋼筋混凝土構件表面損傷分級評定方法

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

(1) 鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準如表 3-8 所示。

表 3-8 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	≤ 0.25	次要受力部位	少量短細裂縫
	≤ 0.20	主要受力部位	少量短細裂縫
2	≤ 0.30	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
	≤ 0.25	主要受力部位	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的2%以下
3	≤ 0.35	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
	≤ 0.30	主要受力部位	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4%以下
4	≤ 0.40	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
	≤ 0.35	主要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的7%以下；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
5	> 0.40	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，縫口有銹跡
	> 0.35	主要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的7%以上；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫，縫口有銹跡
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		

(2) 預力混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準如表 3-9 所示。

表 3-9 預力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		

(3) 鋼筋混凝土構件結構受力裂縫如表 3-10 所示。

表 3-10 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			

(4) 預力鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準如表 3-11 所示。

表 3-11 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			

(5) 鋼筋混凝土結構構件表面損傷(除裂縫) 分級評定標準如表 3-12 所示。

表 3-12 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	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20%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25%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30%
	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35%

(6) 預力混凝土結構構件非表面損傷(除裂縫) 分級評定標準表如表 3-13 所示。

表 3-13 預力混凝土構件表面損傷(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25%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於30%
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的30%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於35%

3.5 鋼筋腐蝕耐久性檢測與評定

3.5.1 鋼筋腐蝕耐久性指標

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，依序腐蝕現況裡的各項耐久性指標介紹，如圖 3-6。

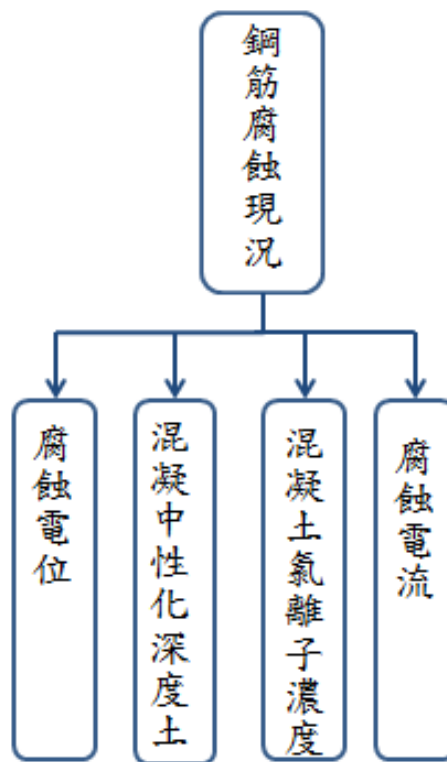


圖 3-6 鋼筋腐蝕現況耐久性指標

3.5.2 鋼筋腐蝕電位檢測與評定

1. 檢測目的

本方法用於評定混凝土中鋼筋的腐蝕活化程度。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。提出的評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。

2. 設備裝置

(1) 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銅棒構成，如圖 3-7 所示。

(2) 銅/硫酸銅參考電極溫度係數為 $0.9\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

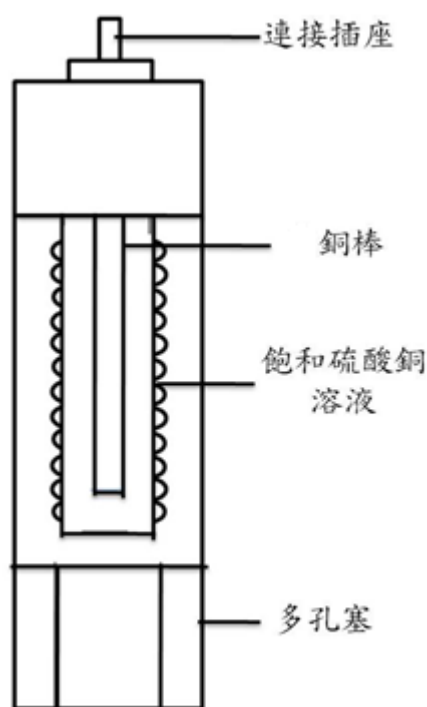


圖 3-7 銅/硫酸銅參考電極示意圖

3. 測試方法

(1) 測區的選擇與測點布置

- (a) 鋼筋腐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腐蝕的部位，但測區不應有明顯的腐蝕脹裂、脫空或層離現象。
- (b) 在測區上布置測試網格，網格結點為測點，網格間距可選
- (c) 20cm x 20cm、30cm x 30cm、20cm x 10cm 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。
- (d) 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。
- (e) 測區應統一編號，註明位置，並描述外觀情況。

(2) 混凝土表面

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/硫酸銅電極一般接電儀計的正輸入端，鋼筋

- (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 3-8 所示。

(4) 測量值的決定

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。

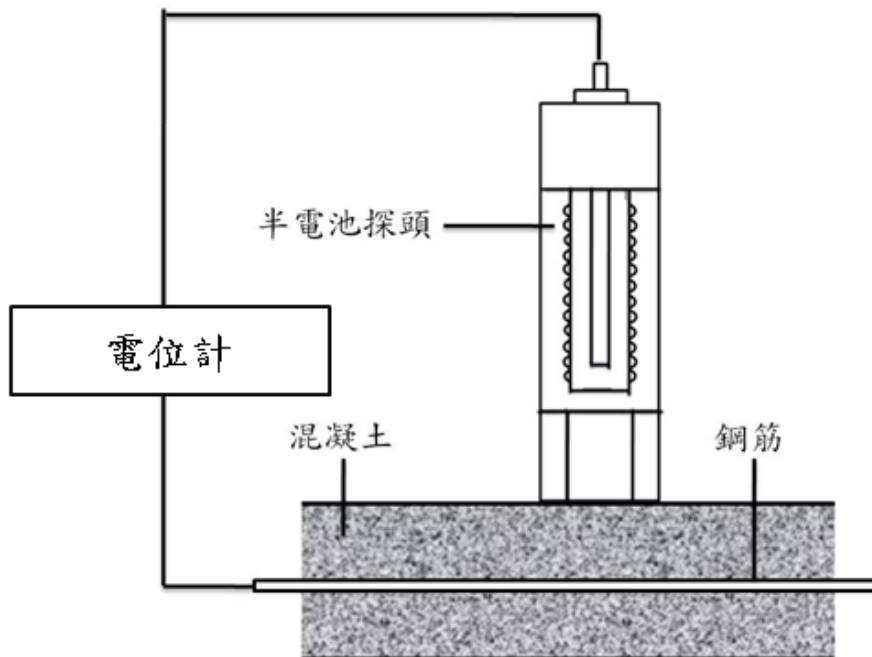


圖 3-8 測試系統簡圖

4. 評定標準

- (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 3-14 的規定評定混凝土中鋼筋發生腐蝕的概率或鋼筋正在發生腐蝕的腐蝕活化程度係數 TC。

表 3-14 結構混凝土中鋼筋鏽蝕電位評定標準

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。		

3.5.3 混凝土中性化深度檢測與評定

1. 檢測目的

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. 設備裝置

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。

3. 測試方法

- (1) 用裝有 20mm 直徑直徑鑽頭的衝擊鑽在測點位置鑽孔。
- (2) 測區應包含腐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，結構外側面應佈置測區。
- (3) 測區數不應小於 3 個，測區應均勻布置。
- (4) 測孔距構件邊角的距離應大於 2.5 倍保護層厚度。
- (5) 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。
- (6) 成孔後用圓形毛刷將孔中碎屑、粉末清除，露出混凝土新。
- (7) 將酚酞指示劑噴在測孔壁上。
- (8) 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。

(9) 將測區、測孔統一編號，並畫出示意圖，標上測量結果。

(10) 測量值的整理應標列出最大、小值和平均值。

4. 評定標準

混凝土碳化深度對鋼筋腐蝕影響的評定，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 3-15 對構件進行評定。

表 3-15 混凝土碳化深度評定標準

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				

3.5.4 混凝土中氯離子含量檢測與評定

1. 檢測目的

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評定引起鋼筋腐蝕的危險性。

2. 設備裝置

氯離子滴定儀，如圖 3-9 所示。



圖 3-9 離子滴定儀

3. 測試方法

混凝土中氯離子可引起並加速鋼筋的腐蝕。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。

(1) 取樣方法

使用直徑 20mm 以上的衝擊鑽在混凝土表面鑽孔，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。用一硬塑料管和塑料袋收集粉末，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。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。

(2) 滴定法

- (a) 將收集的樣品過篩，除去其中較大的顆粒。
- (b) 將樣品至於 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘箱內烘 2 小時候，冷卻至室溫。
- (c) 取 5g 樣品粉末(準確度優於 $\pm 0.1\text{g}$)放入燒杯中。
- (d) 緩慢加入 50ml(1.0mol/L) HNO_3 ，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。

(3) 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)。

4. 評定標準

氯化物浸入混凝土引起鋼筋的腐蝕，其腐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。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帶曲線，評定氯化物是混凝土製成時已有的，還是結構使用過程中由外界滲入的。混凝土中的氯離子含量允許值可參照表 3-16 的評定標準。

表 3-16 混凝土中氯離子含量評定標準

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

3.5.5 鋼筋腐蝕電流檢測與評定

1. 檢測目的

藉由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。

2. 設備裝置

腐蝕量測儀 GPM-5000，如圖 3-10 所示，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。

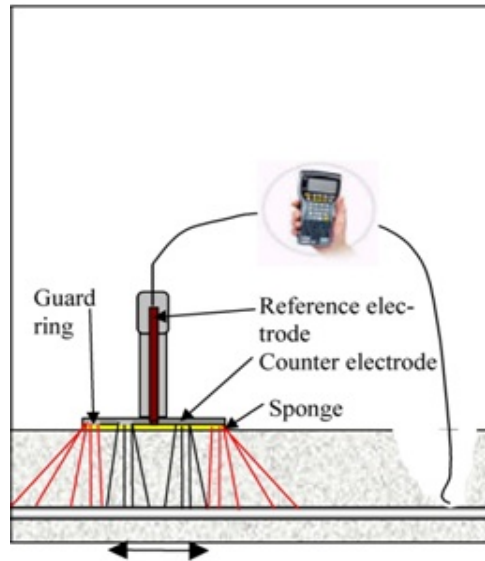


圖 3-10 利用 GalvaPulse 檢測腐示意图

3. 測試方法

- (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图。

4. 評定標準

評定標準如表 3-17 腐蝕電流評定。

表 3-17 鋼筋腐蝕電流評定標準

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

3.5.6 混凝土中鋼筋分佈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 3-11 所示。



圖 3-11 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件表面平行移動，當儀器顯示值最小時，傳感器正下方即是所測鋼筋的位置。
 - (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

- (a) 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)。

$$\bar{D}_n = \frac{\sum_{i=1}^n D_{ni}}{n} \dots\dots\dots(3.1)$$

式中： 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。

- (b) 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):

$$D_{ne} = \bar{D} - KS_D \dots\dots\dots(3.2)$$

式中： S_D -----測量部位測點保護層厚度的標準差，精確至 0.1mm；

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{ni})^2 - n(\bar{D}_n)^2}{n-1}} \dots\dots\dots(3.3)$$

K -----合格評定係數值，按表 3-18 取用。

表 3-18 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

- (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 3-19 來評定。

表 3-19 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	$0.85\sim0.95$	有輕度影響
3	$0.70\sim0.85$	有影響
4	$0.55\sim0.70$	有較大影響
5	<0.55	鋼筋易失去鹼性保護，發生銹蝕

3.6 耐久性綜合評估方法

本手冊參考文獻，提出以單一構件作出耐久性評定，然後再總合計算整體性耐久性評定的觀念。首先針對單一構件的耐久性評估計算方式如下：

$$D_l = \delta_1 \cdots \delta_k \times \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^{P_i} \beta_i A_{im} \alpha_{im} \dots\dots\dots(3.4)$$

其中 D_l 代表第 l 種單一構件的耐久性評定， $\delta_1 \dots \delta_k$ 為 k 個放大係數考量(在本手冊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)， β_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 個指標所得之評定(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 3-20。

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：

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

表 3-20 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	
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	0.61	0.20	0.32
	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	

因為在未考量放大因子前，單一構件之最大值為5(這是因為本手冊分為5評定等級之故)，乘上放大因子之後，則可能會有超過5的情況出現。由此可以將單一構件耐久性之評斷分為五級如表 3-21 所示：

表 3-21 混凝土構件耐久性評估標準

D_{total} 範圍	$1 \leq D_{total} < 2$	$2 \leq D_{total} < 3$	$3 \leq D_{total} < 4$	$4 \leq D_{total} < 5$	$D_{total} \geq 5$
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

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：

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

其中 D_{total} 代表橋梁整體之耐久性評定， D_j 代表第j個構件之單一構件耐久性評定， γ_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，可參考如表 3-22。但是實作上可依據橋梁所處環境、設計時之考量等之不同，由專家進行評定再給與權重。

表 3-22 混凝土橋梁各構件權重值

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。		

同樣地在整體橋梁耐久性評定上，可以針對橋梁整體耐久性評定分級，如表 3-23。

表 3-23 構件整體的耐久性綜合評定標準

<i>D total</i> 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	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

第四章 RC橋梁殘餘壽命預測方法

4.1 前言

早期國內所興建之橋梁，在長期服役下，很多既有之橋梁逐漸產生許多問題，例如：氯化問題、碳化問題與承載力不足問題等等。為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成為國內外未來重要的研究課題。

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。

本手冊將透過 t_i 、 t_p 、 t_{corr} 三階段的壽命預測，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, 1999]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表 4-1 所示。

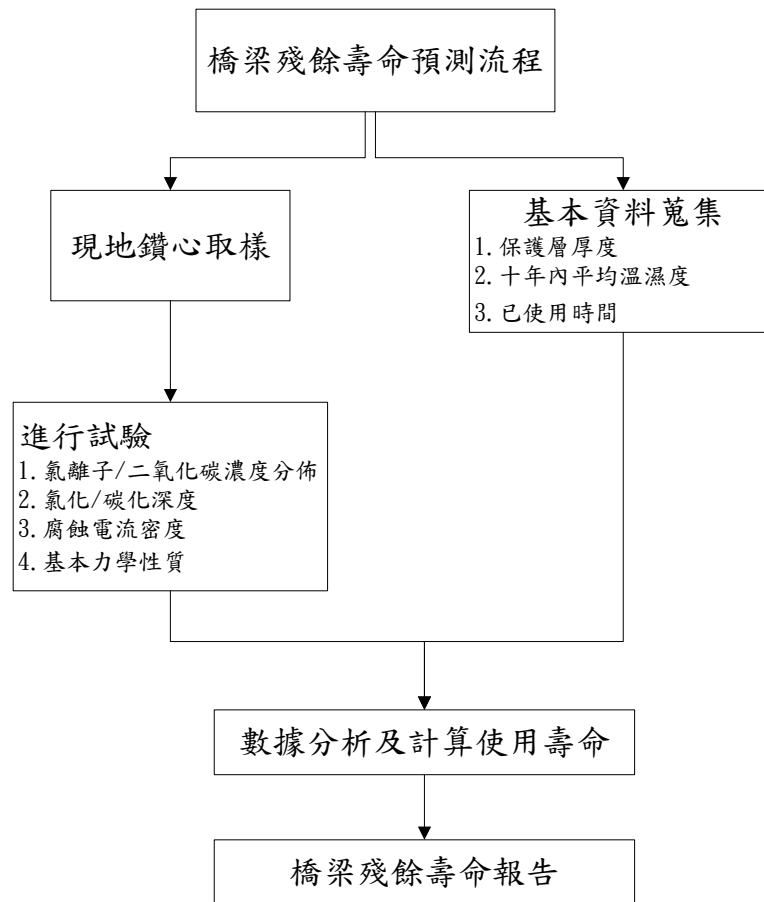


圖 4-1 橋梁殘餘壽命預測流程圖

4.2 橋梁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傳遞至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。[Liang,2002]指出橋梁使用壽命 t 為

$$t = t_i + t_p + t_{corr} \dots\dots\dots(4.1)$$

一、誘發期 t_i 的預測法

不論 Fick 第一擴散定律或 Fick 第二擴散定律，均可化為下列簡單式

$$x(t) = k\sqrt{t} \dots\dots\dots(4.2)$$

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。

二、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

$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_s}}} \right)^2 \dots\dots\dots(4.3)$$

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。

三、鋼筋腐蝕期 t_{corr} 的預測法

一般而言，(1) 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，本手冊將腐蝕引至結構物的劣化度(D_d) 定義為

$$t_{corr} = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{5} t_i \dots\dots\dots(4.4)$$

$$D_d = 1 - \frac{x}{100} \dots\dots\dots(4.5)$$

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

$$t_r = t - t_{ap} \dots\dots\dots(4.6)$$

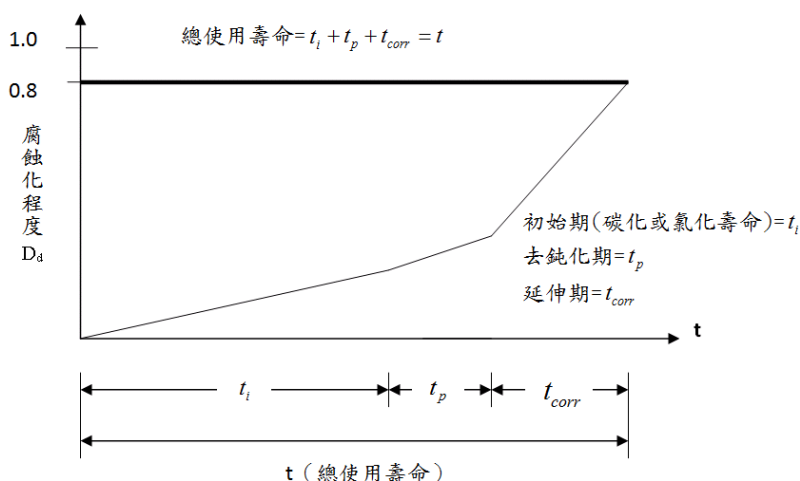


圖 4-2 結構物受氯離子擴散影響使用壽命

4-3 殘餘壽命預測範例應用

一、誘發期 t_i 的預測法

1. 碳化壽命

從現場鑽心取樣，俟乾燥後，將試體劈裂為兩半，將酚酞指示劑噴灑於劈裂面上，若為混凝土顏色表示已碳化，若為粉紅色表示未碳化。使用微尺量出碳化深度，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
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(2)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。

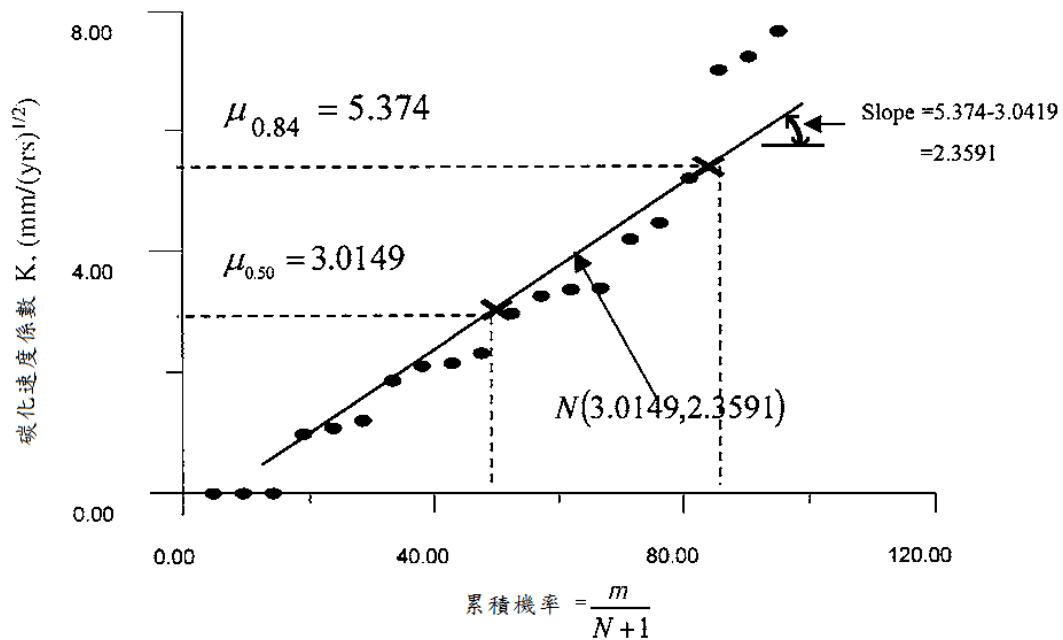


圖 4-3 碳化係數對累積機率之關係曲線

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	抗壓 強度 (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 ^{1/2})			統計方法 $x_{p t} = (\mu_K + \beta\sigma_K) \cdot \sqrt{t}$
					平 均 值	標 準 差	變異數 $\delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x}$	平 均 值	標 準 差	變異數 $\delta_K = \frac{\sigma_K}{\mu_K}$	
					μ_x	σ_x		μ_K	σ_K		
					(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		
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 $L=25\text{mm}$ 。

由表 4.2 知 $K = \mu_K = 2.97\text{mm} / \sqrt{\text{yr}}$ ，利用(2)式，因為 $x(t)=25\text{mm}$ ，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

$$x_{p|t} = (\mu_K + \beta\sigma_K)\sqrt{t} \quad (4.7)$$

式中 $x_{p|t}$ 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(7)式算出 $x_{95\%|50} = 48.19\text{mm}$ 。

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 $K=3.57\text{mm} / \sqrt{\text{yr}}$ ，而保護層厚度 $L=25\text{mm}$ ，利用(2)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。

二、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。

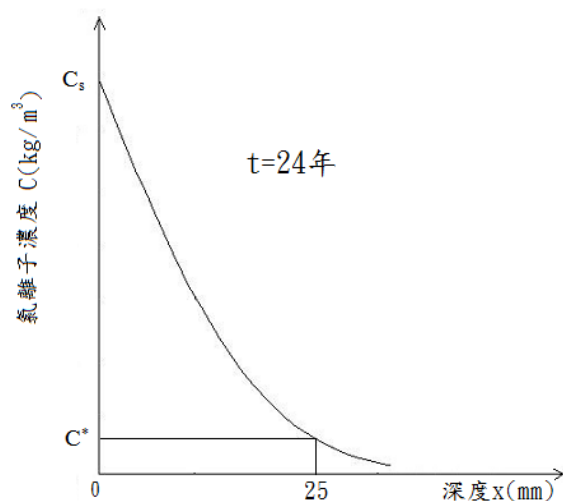


圖 4.4 氯離子濃度-深度曲線

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。

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] = C_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

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(3)式算出 t_p ，假設得知 $t_p = 5$ 年。

三、鋼筋腐蝕期 t_{corr} 的預測法

利用式(4) $t_{\text{corr}} = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{5} t_i$ ，已知 $t_i = 49$ 年，故 t_{corr} 為 $\frac{1}{4}(49) = 12.25$ 年。利

用(1)式得知該座橋梁的總使用壽命為，

$$t = t_i + t_p + t_{\text{corr}} = 49 + 5 + 12.25 = 66.25 \text{ 年，而該座橋梁已知使用 } t_{\text{ap}} = 24 \text{ 年，}$$

由式(6)知殘餘壽命 $t_r = t - t_{\text{ap}} = 66.25 - 24 = 42.25$ 年。

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 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。

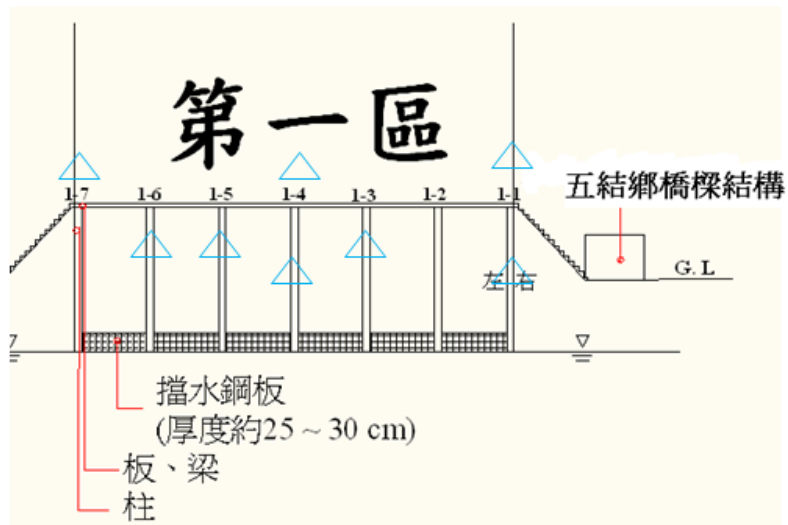


圖 5-2 第一區調查位置

(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。

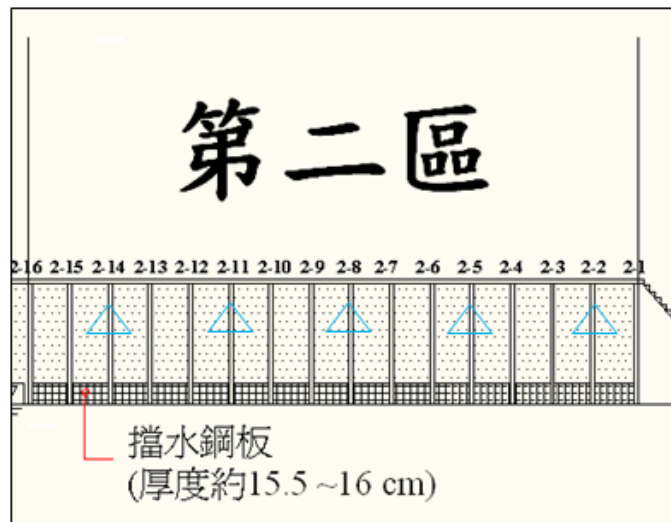


圖 5-3 第二區調查位置

(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。

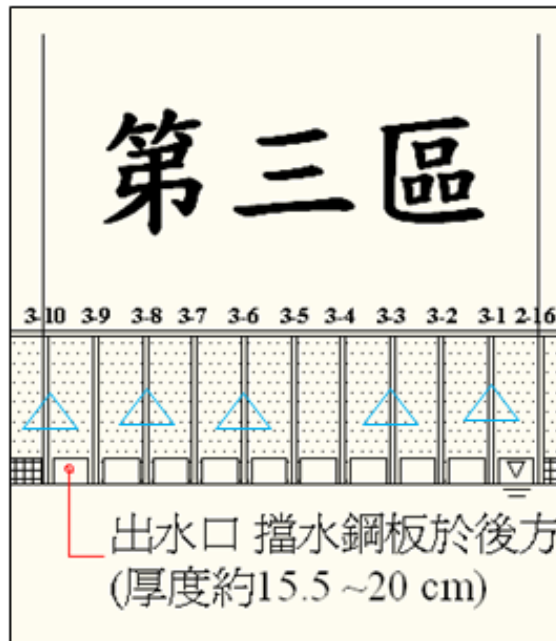


圖 5-4 第三區調查位置

(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。

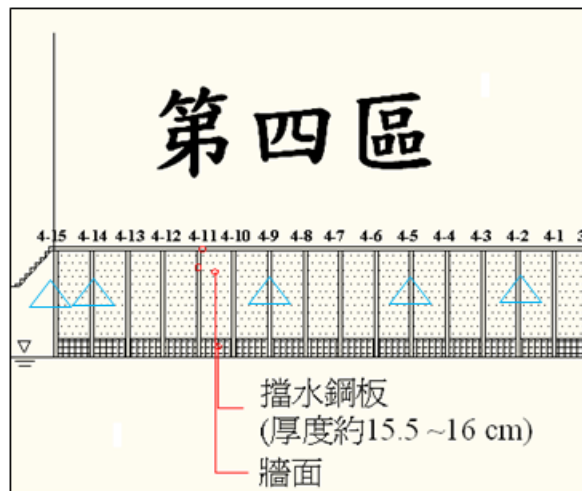


圖 5-5 第四區調查位置

(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。

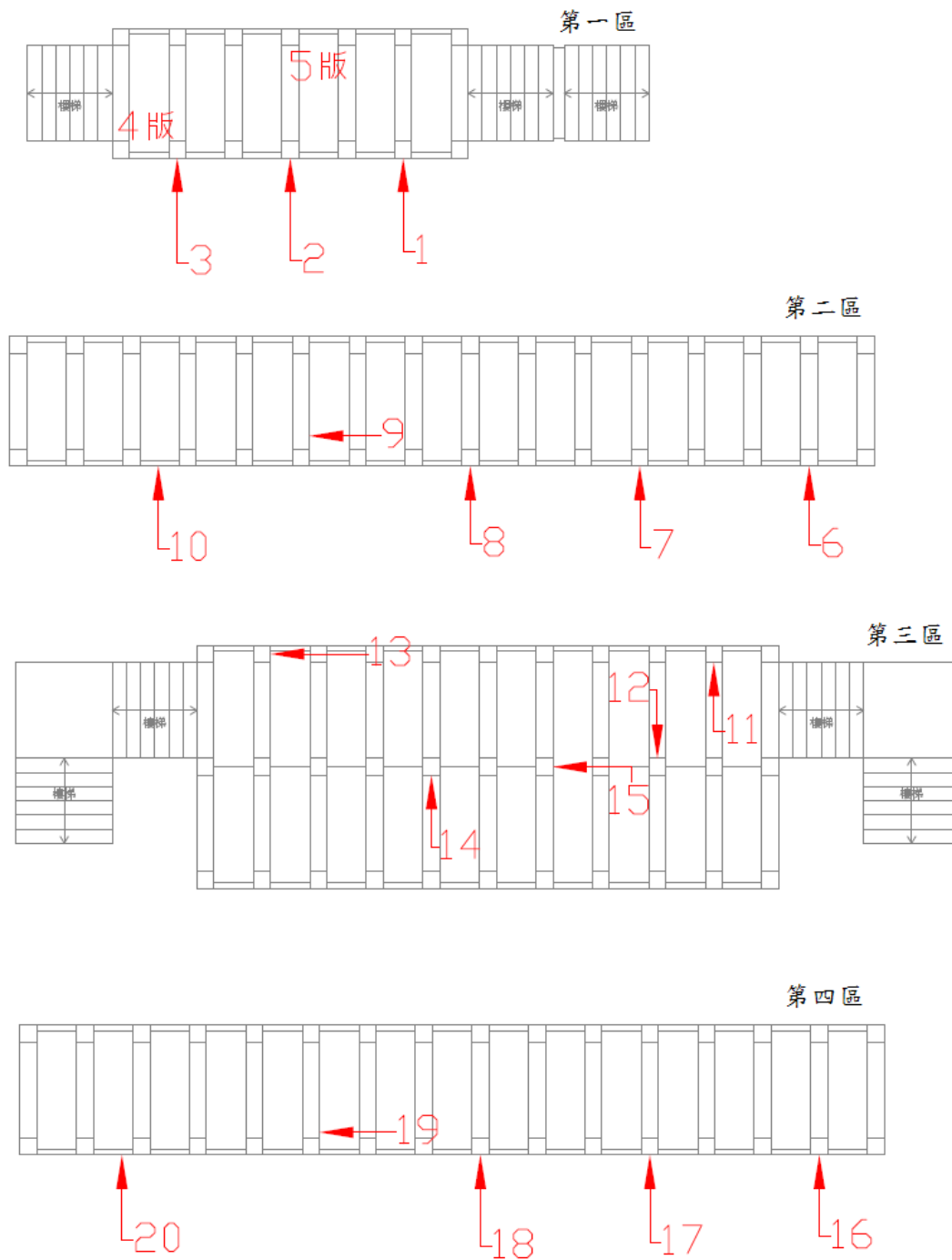


圖 5-6 五結橋梁鋼筋探測位置示意圖

(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。

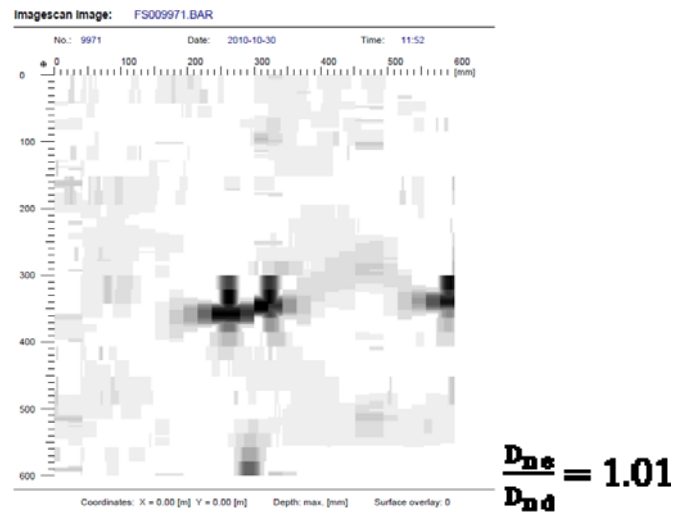


圖 5-7 編號 1 第一區探測影像(模糊)

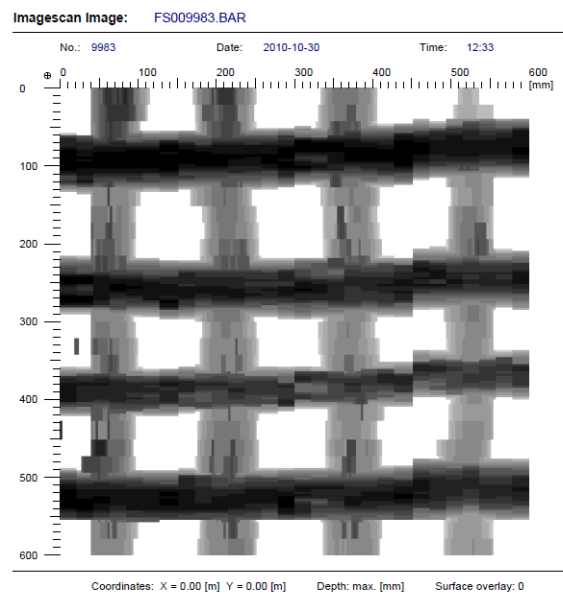


圖 5-8 編號 19 第四區探測影像(清晰)

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@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		直向筋#4@20 cm	橫向筋#4@30 cm	7
6	第二區	2-#7	#4@19 cm	7
7		2-#7	#4@18 cm	6.5
8		2-#7	#4@18 cm	7
9		3-#7	#4@22 cm	5
10		直向筋#4@15 cm	橫向筋#4@15 cm	7
11	第三區	3-#7	#4@21 cm	6.5
12		4-#7	#4@19 cm	6
13		3-#7	#4@21 cm	8
14		2-#7	#4@20 cm	7
15		3-#7	#4@20 cm	5.5
16	第四區	2-#7	#4@20 cm	5.5
17		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

5. 敲擊回音試驗結果

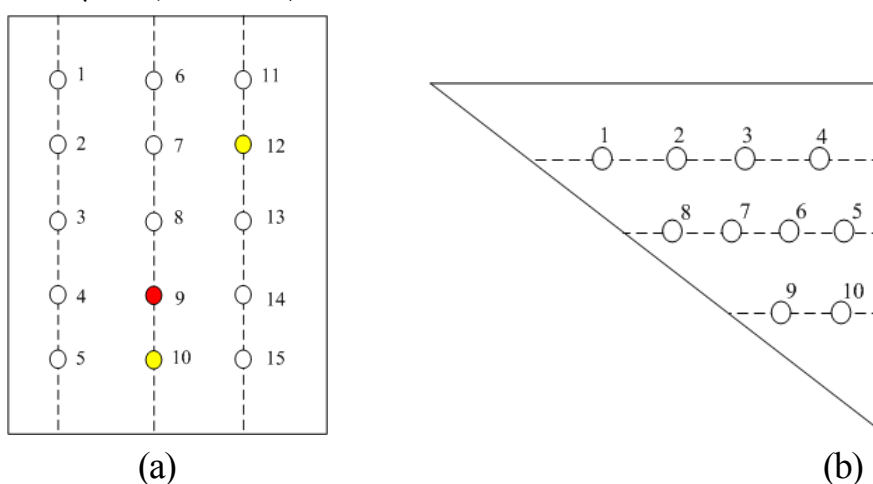


圖 5-9 接收點順序及可能裂縫位置：(a)腹版；(b)翼版

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	0.166	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 $0.079\sim 3.735(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ 、腐蝕速率 $0.04\sim 1.72(\text{mpy})$ ，腐蝕電流的評定標度值取 2。腐蝕電位 $-124\sim 823(\text{mV})$ ，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
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 5-6，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/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

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	2
	開裂、剝落或露筋與缺角	8	0.25		2
	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					
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：

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

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

$$= 2.45$$

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：

$$D_{total} = \sum_{i=1}^n D_i \gamma_i \dots\dots\dots(3.6)$$

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

$$= 3.31$$

$D_{total}=3.31$ ， $3 \leq D_{total} < 4$ ，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：

$$x = k\sqrt{t} \dots\dots\dots(4.2)$$

(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版之保護厚度，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]

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

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

$$t_i = 7.59 \cdot 0.85 \cdot 2.5^2 + 4 \cdot 2.5 = 50.32(\text{年})$$

2. 鈍化期 t_p 計算過程：

如 4-3 (3)式：
$$t_p = \frac{1}{12D} \left(\frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C^*}{C_s}}} \right)^2 \dots\dots\dots(4.3)$$

L ：保護層厚度(25mm)， D ：氯離子擴散係數(代 $77\text{mm}^2/\text{yrs}$)， C_s ：混凝土表面孔隙中的氯離子濃度(代 $25\text{kg}/\text{m}^3$)， C^* ：鈍態保護膜處的氯離子臨界濃度(代 $8\text{kg}/\text{m}^3$)， 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：

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

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($0.86735 \mu\text{A}/\text{cm}^2 =$

$0.86735 \times 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$)， Z 為鐵離子價數(代2)， δ 為材料損失(代

$1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}$)， F 為法拉第常數(代 $96485.33 \text{ C}/\text{mol}$)，

ρ_{st} 為鋼筋密度(代 $7.85 \text{ g}/\text{cm}^3$)，

計算結果 $t_{corr} = 3.76(\text{年})$

4. 剩餘壽命預測結果

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

已使用時間 $t_{ap} = 42(\text{年})$

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 1500 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，而本手冊主要針對橋梁

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。

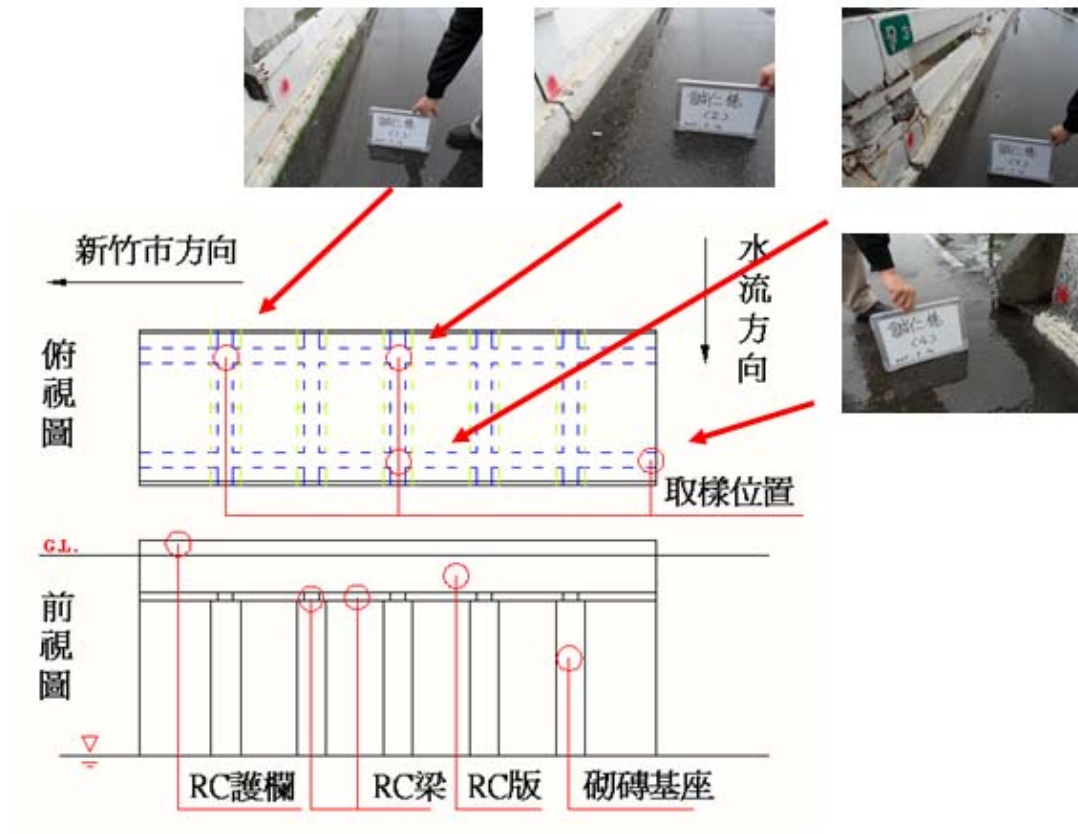


圖 5-11 誠仁橋示意圖

(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，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。

表 5-11 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)
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

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。

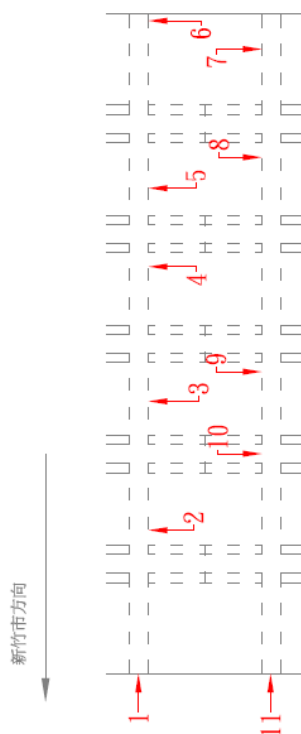


圖 5-12 誠仁橋鋼筋探測位置示意圖

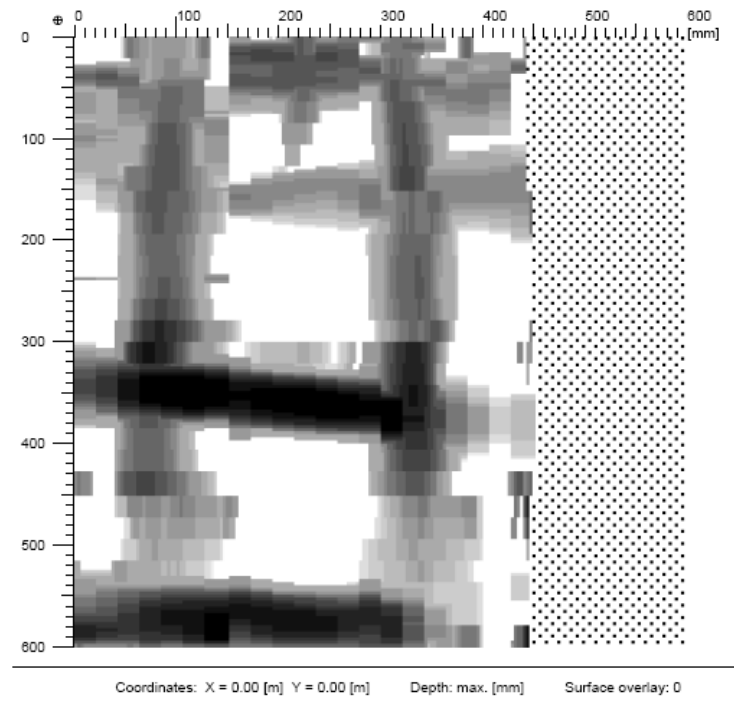


圖 5-13 誠仁橋編號 12 訊號影像

(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 5-12 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. 腐蝕量測試結果

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

表 5-13 腐蝕電流密度量測試結果

取樣位置	腐蝕電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐蝕電位(mV)	腐蝕速率 (mpy)
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 5-14 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 5-15 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/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

5.2.2 混凝土材料耐久性評估結果

表 5-16 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	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：

$$D_1 = \delta_1 \cdots \delta_k \left(\sum_{l=1}^2 \beta_l \frac{\sum_{m=1}^n A_{lm} a_m}{\sum_{m=1}^n a_m} \right) \dots\dots\dots (3.5)$$

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

$$= 3.3$$

，見表 3-22，範圍 $3 \leq D_1 < 4$ 之間構件耐久等級等級為 3，耐久性狀況為一般。

表 5-17 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：

$$D_{total} = \sum_{i=1}^n D_i \gamma_i \dots\dots\dots(3.6)$$

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

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：

$$x = k\sqrt{t} \dots\dots\dots(4.2)$$

因誠仁橋試驗結果中性化深度為 0，若使用式則 t_i 將會無限大，故無法使用。故補充

Hookham 法[Hookham, 1992]

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

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 ：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 $t_i = 7.59 \cdot 0.85 \cdot 4.5^2 + 4 \cdot 4.5 = 148.64$ (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 Erfc[]。

2. 活化期 t_p 計算過程：

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

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 $25\text{kg}/\text{m}^3$)， C^* ：鈍態保護膜處的氯離子濃度(代 $8\text{kg}/\text{m}^3$)， D 、 C_s 、 C^* 因無試驗資料故引用自[Liang et al., 2002]。

$$t_p = 14.3436(\text{年})$$

由於 t_p 之預測都是以Bazant為主體作延伸，故無須補充。

3. 鋼筋腐蝕期 t_{corr} 計算過程：

$$\text{4-2 (4)式} t_{\text{corr}} = \frac{1}{4} t_i = 15.96 \text{ 年}$$

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]

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

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($0.505925\mu\text{A}/\text{cm}^2 =$

$0.505925 \times 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$)， Z 為鐵離子價數(代2)，

δ 為材料損失(代 $1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}$)， F 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 $t_{corr}=6.45$ (年)

4. 剩餘壽命預測結果：

使用壽命

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

已使用時間 $t_{ap} = 67$ (年)

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

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。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究計畫，2011。
2. 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。
3. 趙卓、蔣曉東，受腐蝕混凝土結構耐久性檢測診斷，黃河水利出版社，2006。
4. 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。
5. 交通部技術標準規範公路類公路工程，公路養護手冊，2003 年。
6. 交通部運輸研究所，建立橋梁檢測制度方法及準則之研究(公路與道路橋梁)，2002 年。
7. 交通部台灣區國道高速公路局，交通部台灣區國道高速公路局橋樑檢測作業要點，2001 年。
8. 臺灣鐵路管理局，橋梁檢查及評估手冊，1999 年。