

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

鹽害及中性化混凝土橋梁維修費用估算模式之研究

Rehabilitation Cost Model of Salt Attack and  
Neutralization Concrete Bridge

林楷倫

Kai-Lun Lin

指導教授：曾惠斌 博士

Advisor: Hui-Ping Tserng, Ph.D

中華民國 105 年 5 月

May 2016

國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

鹽害及中性化混凝土橋梁  
維修費用估算模式之研究

Rehabilitation Cost Model of Salt Attack and  
Neutralization Concrete Bridge

本論文係林楷倫君 (R03521703) 在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 105 年 5 月 27 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：

曾 惠 斌

(指導教授)


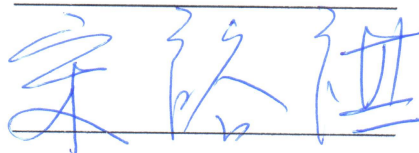

宋 裕 祺

徐 景 文

林 祐 正

呂 良 正

系主任



(簽名)

# 誌謝



在撰寫這篇誌謝時，表示我在臺大當研究生的日子也接近尾聲了，在研究所的這段日子裡，感謝有許多人的陪伴以及幫助，讓我能夠順利畢業。

這篇論文能夠順利完成，首先需要感謝的就是指導教授曾惠斌老師，感謝老師於大學以及研究所六年來的教導，讓學生前後共參與了三個研究案，了解業界所需，並能夠在研究案進行的同時，學習解決事情的能力，且能夠認識業界上的先進們，向他們學習，老師更在人生的規劃上給予了寶貴的建議，讓學生獲益良多，並以曾家的一分子為榮。

感謝璨華學姊的幫忙，讓研究案能夠順利結束，且在撰寫論文時提供許多資源供我參考；感謝學妹子維從旁協助，在繁瑣的計算以及推導的過程中給予許多幫忙，並且尋找了許多有用的資料，讓此篇論文能夠更加完善；感謝同為曾家的好朋友昕諺，碩一就和我在研究室為各自的研究案打拼，一起努力，且在研究案忙碌的時候你也跟著我們一起咪聽，讓我在做研究的時候更有幹勁。

再來要感謝徐景文處長以及工程會同仁們的大力幫忙，讓我從案例的索取到維修工法統整能夠順利完成。感謝 714 研究室一起努力互相扶持的同學們，在研究所這兩年一起修課、一起規劃畢業旅行、一起籌辦謝師宴，在撰寫論文同時也能夠互相加油打氣，能跟大家互相學習是我的榮幸。

最後我要感謝我的父母，感謝你們從小到大的教導，讓我在外宿這兩年能夠打理自己的生活，謝謝你們總是對我很放心，讓我能夠自己選擇要做什麼決定，且永遠在背後支持我，也要感謝高中以及大學時期的好朋友，在我心情煩悶的時候願意花時間跟我到外面聊天打屁透透氣。在許多人的幫助下，成就了今天的我，並且順利完成此篇論文。

林楷倫 謹誌

2016 年 6 月於臺大

## 中文摘要

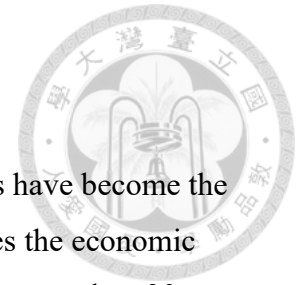


臺灣因為山脈南北縱走、河川東西分流的特性，橋梁成為聯絡各個區域之間的重要通道，並帶動經濟發展。橋梁建設於臺灣行之有年，截至目前為主，臺灣的橋梁使用超過 30 年者已超過興建橋梁總數之 50% 以上，但因為臺灣的地理位置之特性為四面環海、氣候相對其他國家較為潮濕、季風盛行使海洋中的水氣送至臺灣、高人口密度以及工廠排放廢氣等因素，造成橋梁在多年使用之後，其構材的性能因各種腐蝕因子的侵入而呈現日趨惡化之現象，進而嚴重影響混凝土橋梁的正常使用性能以及安全性。而於橋梁材料劣化的部分，往往須於其使用年限內花上大筆費用進行維修工作，造成政府嚴重的財政負擔，如何在橋梁的生命週期間將維修成本做最有效的分配與利用是很重要的課題。

本研究藉由文獻回顧的方式，了解橋梁劣化產生的原因與現象，從中尋找鹽害及中性化之影響因素，並探討兩者交互影響之關係，進而建立橋梁構件斷面損失與時間之曲線。接著整合過去劣化有關之文獻，對於不同劣化程度給予一參考的維修方式，將其與實際案例結合，並給予一參考之修補費用。最後，藉由本論文建立一套試算模型以評估橋梁於使用年限間之劣化情形，並分析其可能造成之維修費用以及維修時所需之成本估算，亦可提供政府編列橋梁維修預算時之經費參考。

關鍵字：鹽害、中性化、橋梁維修、維修費用

# Abstract



For the particular location and geographic environment, bridges have become the important channel in Taiwan. Besides, building bridges also promotes the economic indirectly. So far, more than 50% bridges have already been used for more than 30 years. The members' performance of the bridges gradually decreases because of the corrosion factors, and it will seriously affect the safety of the bridges. How to allocate and use the maintenance fund in the life cycle of bridges has become the important issue recently.

In this study, the reasons and phenomenon of the deterioration will be sorted out by literature review first. The relationship between salt attack and neutralization will be discussed and the curve followed by section loss through the time will be established later.

Second, this study integrates previous literature about the deterioration, and concludes the repairing methods. Then, this study combines the results with the real cases, and provides the recommended cost of maintenance.

To sum up, this study proposes a standard operation procedure (SOP) of the calculation process to evaluate the deterioration through the life cycle and estimate the possible cost of maintenance. Moreover, the government could refer to the model to assess the maintenance budget of the bridges.

**Keywords:** Salt Attack, Neutralization, Bridge Maintenance, Budget of Maintenance

# 目錄

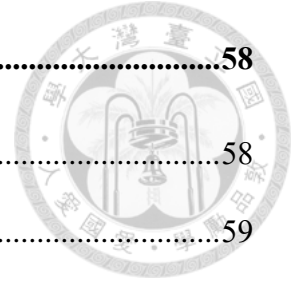


口試委員會審定書 .....	i
誌謝 .....	ii
中文摘要 .....	iii
Abstract .....	iv
目錄 .....	v
圖目錄 .....	viii
表目錄 .....	x
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究動機 .....	2
1.3 研究目的 .....	3
1.4 研究範圍與限制 .....	3
1.5 研究方法與流程 .....	4
<b>第二章 文獻回顧 .....</b>	<b>5</b>
2.1 橋梁生命週期成本分析 .....	5
2.1.1 橋梁生命週期成本評估項目 .....	5
2.1.2 橋梁生命週期成本分析架構 .....	7
2.2 橋梁劣化原因 .....	8
2.2.1 劣化定義 .....	8
2.2.2 橋梁劣化原因 .....	8
2.3 橋梁劣化現象 .....	12



2.4 鹽害與中性化腐蝕機理介紹 .....	16
2.4.1 鹽害腐蝕機理 .....	16
2.4.2 中性化腐蝕機理 .....	18
2.4.3 鋼筋腐蝕原理 .....	18
2.5 橋梁劣化維修工法 .....	19
2.5.1 維修與補強一般說明 .....	19
2.5.2 維修工法一般說明 .....	21
2.6 橋梁易損性曲線 .....	24
2.7 小結 .....	27
<b>第三章 劣化橋梁生命週期模式分析 .....</b>	<b>28</b>
3.1 鹽害之影響因子 .....	28
3.2 中性化之影響因子 .....	31
3.3 鹽害及中性化交互影響模式 .....	33
3.4 橋梁生命週期斷面損失模式建立 .....	36
3.5 小結 .....	39
<b>第四章 劣化混凝土經費估算模式 .....</b>	<b>40</b>
4.1 劣化混凝土維修方式 .....	40
4.2 劣化混凝土維修工法分析 .....	43
4.3 劣化混凝土維修費用分析 .....	45
4.4 劣化混凝土生命週期維修費用 .....	49
4.5 劣化混凝土維修費用分析流程 .....	51
4.6 其他相關費用分析 .....	52
4.7 小結 .....	57

<b>第五章 案例分析 .....</b>	<b>58</b>
5.1 玉里大橋概況 .....	58
5.2 案例分析 .....	59
<b>第六章 結論與建議 .....</b>	<b>63</b>
6.1 結論 .....	63
6.2 建議與後續研究 .....	64
<b>參考文獻 .....</b>	<b>65</b>





# 圖目錄



圖 1.1 研究流程圖 .....	4
圖 2.1 橋梁生命週期成本評估項目 .....	5
圖 2.2 橋梁生命週期分析架構 .....	7
圖 2.3 橋梁劣化物理性因子 .....	9
圖 2.4 橋梁劣化化學性因子 .....	9
圖 2.5 混凝土修補工法 .....	21
圖 2.6 結構物之耐震能力圖 .....	25
圖 2.7 易損性曲線 .....	26
圖 3.1 部分中性化區域示意圖 .....	31
圖 3.2 氯離子濃度變化曲線示意圖 .....	33
圖 3.3 氯離子濃度變化曲線示意圖 .....	34
圖 3.4 鹽害中性化交互影響疊加示意圖 .....	36
圖 3.5 橋梁劣化斷面損失流程圖 .....	37
圖 3.6 橋梁生命週期鋼筋斷面損失率圖 .....	38
圖 4.1 橋梁劣化維修總費用圖 .....	50
圖 4.2 劣化混凝土維修費用分析流程 .....	51
圖 4.3 橋梁維修標單費用之組成 .....	52
圖 4.4 臨海距離與總費用之關係圖 .....	56

圖 4.5 臨海距離與工期之關係圖 .....	56
圖 5.1 玉里大橋 .....	58
圖 5.2 玉里大橋之臨海距離 .....	59
圖 5.3 玉里大橋之施工照片(組圖) .....	61
圖 5.4 玉里大橋橋梁劣化總維修費用圖 .....	61



# 表目錄



表 2.1 裂縫產生原因 .....	12
表 2.2 鋼筋除鏽與防鏽工法 .....	24
表 3.1 裸露鋼筋腐蝕速率公式 .....	30
表 3.2 鹽害各階段之影響因子 .....	30
表 3.3 中性化之影響因子 .....	33
表 3.4 中性化試體與無中性化試體氯離子濃度與鋼筋腐蝕速率比較分析表 .....	35
表 3.5 鹽害與中性化交互影響測試表 .....	35
表 4.1 混凝土劣化建議維修方式 .....	40
表 4.2 不同維修方式之建議維修工法 .....	43
表 4.3 不同劣化類型不同損壞程度下之建議維修工法對照表 .....	44
表 4.4 工法分類 .....	46
表 4.5 工法費用分析 .....	47
表 4.6 不同劣化類型不同損壞程度下之平均單位維修費用 (單位：元/M <sup>2</sup> ) .....	48
表 4.7 不同損壞程度下之總維修費用 (單位：元/M <sup>2</sup> ) .....	49
表 4.8 機具費用 (單位：元) .....	53
表 4.9 管理費用 (單位：元) .....	53
表 4.10 劣化維修費用、伸縮縫費用、交通維持費用以及其他費用 (單位：元) .....	54

表 4.11 標單基本資訊 .....	54
表 5.1 花蓮地區年平均風速 .....	60
表 5.2 最大許可水灰比之規定 .....	60





# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

臺灣地處亞熱帶地區，氣候相對於溫帶與寒帶地區較為炎熱，另臺灣為歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊擠壓而生之島嶼，其地理位置之特性為四面環海，又因其位於歐亞大陸與太平洋之間，故季風盛行，風將海洋中的水氣送至臺灣，導致臺灣相對其他國家較為潮濕，且海水中的所挾帶的鹽類對於工程亦會造成深遠的影響。

於 60 年代政府推動十大建設開始，臺灣進入工業化時代，工廠陸陸續續的在興建。為了要帶動經濟發展，並且為了將南北兩地及其他地區能夠彼此聯繫，橋梁開始大量的興建，截至目前為止，臺灣橋梁總數已超過 28,000 座。根據臺灣內政部統計，目前臺灣的人口總數已超過 2,300 萬人，人口密度於全球排名第二。再者，由於汽機車為臺灣人口主要的代步工具，導致二氧化碳之排放量可見一般。

臺灣山脈南北縱走，又為狹長形之島嶼，橋梁成為聯絡兩地之重要聯絡通道，橋梁在經過多年使用之後，其構材的性能會因各種腐蝕因子的侵入而呈現日趨惡化之現象，進而嚴重影響混凝土橋梁的正常使用性能，且對於使用者來說，會嚴重影響其安全性。



## 1.2 研究動機

臺灣的氣候相對於內陸國家較為潮濕，對於鐵件等構材來說，充足的水份與過多的鹽份會加速其腐蝕的情況；另臺灣地理位置位於亞熱帶地區的關係，氣候相對於溫帶與寒帶地區較為溫暖，亦會加速鐵件鏽蝕的情況，而在兩者的作用之下，對於構材之使用性與安全性之影響可見一般。

臺灣高密度人口與工業化發達兩者之影響下，對於二氧化碳的排放是個不容忽視的議題，其為加強溫室效應之主要氣體，亦是全球暖化的元兇之一，而對於混凝土材料來說，二氧化碳的存在會使其結構性能喪失，進而影響混凝土材料之耐久性。

臺灣特殊的地形，造就山脈南北縱走，河川東西分流的現象，橋梁成為聯絡各個區域之間的重要通道，並帶動臺灣的經濟發展。橋梁建設於臺灣行之有年，截至目前為主，臺灣的橋梁使用超過 30 年者已超過興建橋梁總數之 50% 以上，如何將其維修使其能繼續使用是個不容忽視的議題。

而於橋梁材料劣化的部分，往往須於其使用年限內花上大筆費用進行維修工作，造成政府嚴重的財政負擔，如何在橋梁的生命週期間將維修成本做最有效的分配與利用是很重要的課題。



### 1.3 研究目的

1. 藉由文獻回顧的方式，了解橋梁劣化產生的原因與現象，建立橋梁構件斷面損失與時間之關係。
2. 整合過去文獻，對於不同劣化程度給予一參考的維修方式，並藉由實際案例給定不同維修方式之建議修補費用。
3. 藉由本論文建立一套試算模型以評估橋梁於使用年限間之劣化情形，並分析其可能造成之維修費用以及維修時所需之成本估算。

### 1.4 研究範圍與限制

1. 本論文主要的研究對象以臺灣的混凝土橋梁為主。
2. 橋梁的斷面類型以矩形梁的標準橋為依據。
3. 假設中性化與鹽害的開始時間為混凝土結構物完工時間。
4. 假設維修之混凝土橋梁構件其性能可以恢復到正常使用之標準。



# 1.5 研究方法與流程

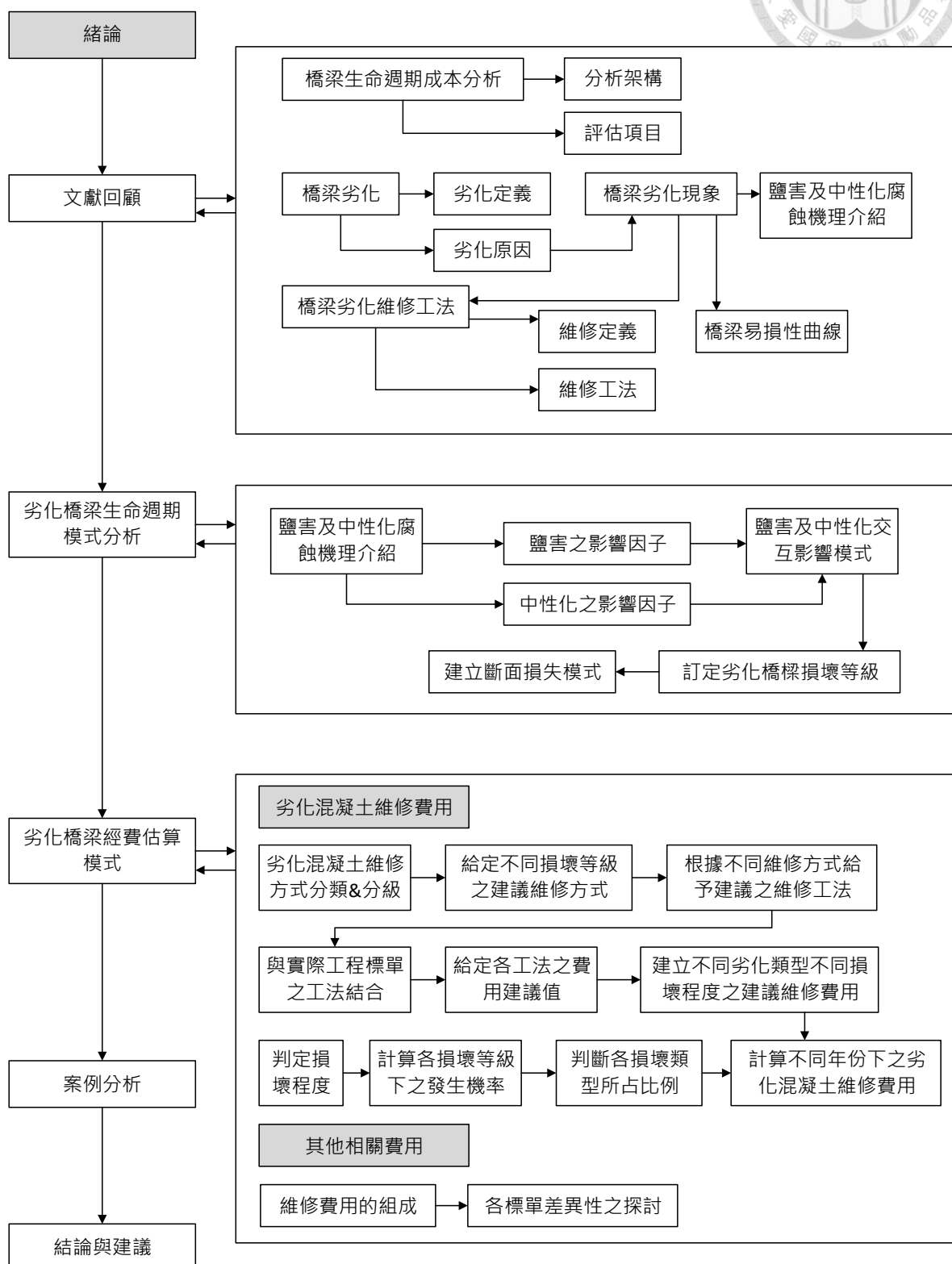


圖 1.1 研究流程圖





## 第二章 文獻回顧

### 2.1 橋梁生命週期成本分析

橋梁生命週期成本分析於過去論文中已有不少先進有做過探討，而其所考量的較為全面且一般性，本研究與以往所做的成本分析最大的差異主要為探討橋梁受到鹽害以及中性化兩者的影響所造成的維修成本分析。

#### 2.1.1 橋梁生命週期成本評估項目

根據陳屏甫(2005)的研究指出，橋梁生命週期成本分為兩大類：可量化成本與不可量化成本，而可量化成本又包含：興建成本、預防性定期維護成本、可預期不確定成本、不可預期不確定成本、用路人成本、效益、拆除成本與回收成本等八項(圖 2.1)。其中，不可預期不確定成本為橋梁受到重大災害或規範功能性需求改變時，所急需進行之維修補強作業之成本，因此部份屬於無法預估之事故成本，其發生時間、修補規模或金額均無法預測，故不列為本研究模式之評估項目。

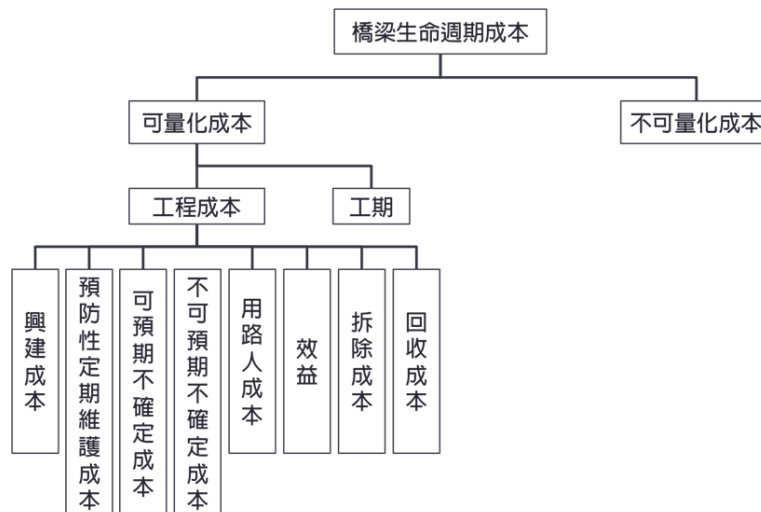


圖 2.1 橋梁生命週期成本評估項目



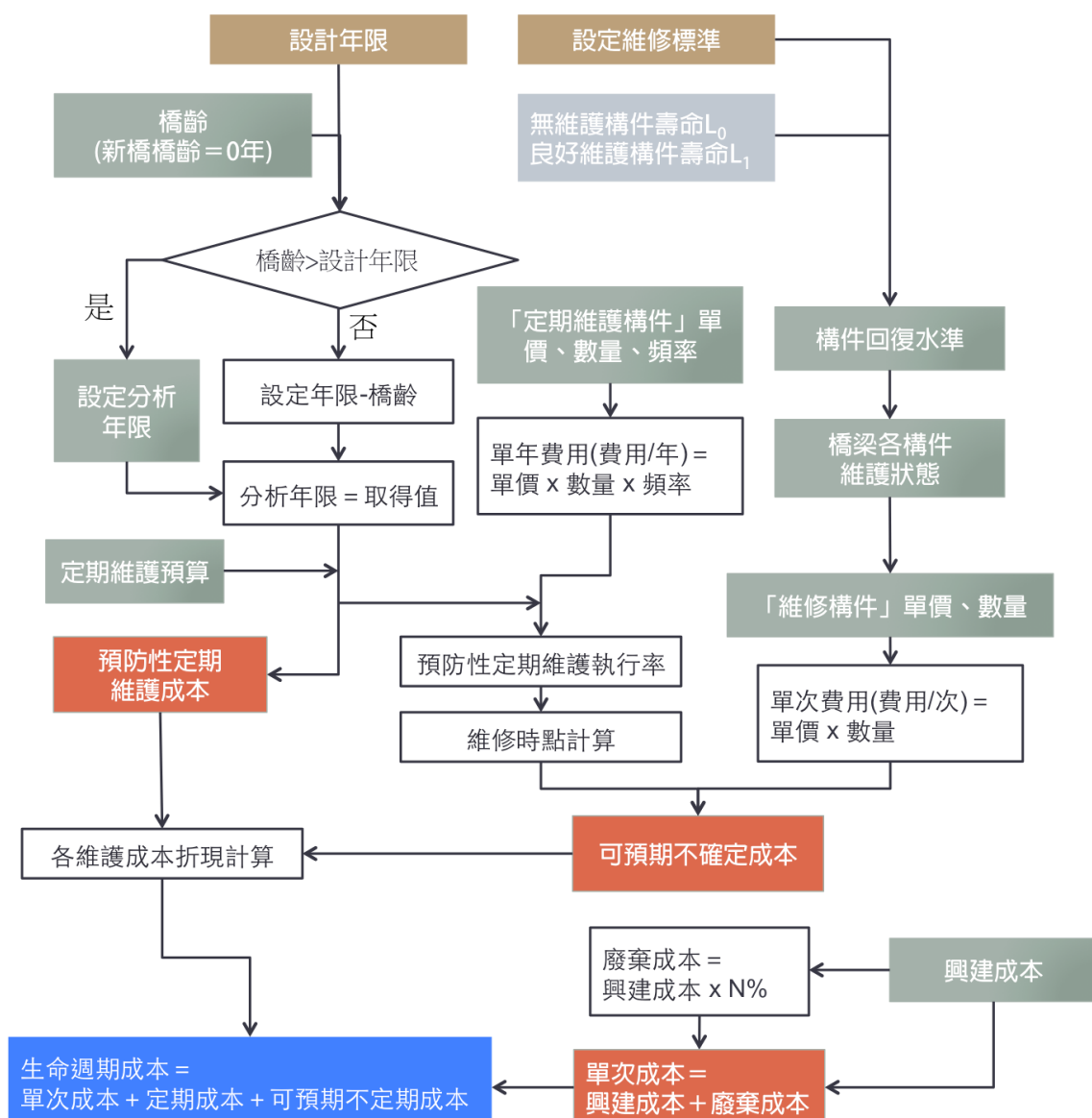
而整理自陳屏甫(2005)以及連夷左(2003)，歸納其他可量化成本之評估項目分述如下：

1. 興建成本：主要指橋梁之規劃設計成本與施工成本，其他如工程保險費用、勞工安全衛生費用等亦歸為此類。
2. 預防性定期維護成本：為使橋梁維持原定服務水準，並延長橋梁使用年限，所需進行之日常養護工作。其主要作業為：定期性檢測、週期性構建維護、週期性塗裝防鏽等等。
3. 可預期不確定成本：橋梁因外在環境影響，如腐蝕、氯化、鹼骨材、裂縫、疲勞、中性化等因素，導致性能劣化而低於使用者標準，此時需進行維修或置換之動作，以確保其安全性與服務水準，本研究所著重之中性化與鹽害危害即屬於此類成本。其中，維修方式僅能將該構件回復至原狀況之一固定比率，對用路人之影響性較小，用路人成本較低。而置換方式雖可將該構件恢復至全新狀態，但卻對用路人造成較大影響，用路人成本也相對較高。
4. 用路人成本：當橋梁進行維修補強作業時，原用路人因橋梁施工帶來的不便所損失之成本，主要為駕駛人延時成本、車輛運行成本與事故發生成本。
5. 效益：此處為橋梁施工快慢所造成之橋梁先行通車之效益，因此類成本難以量化分析，本研究中亦不納入計算。
6. 拆除成本：當橋梁服務性功能未達需求時，該橋梁即面臨廢棄階段，必須拆除。拆除成本包含橋體打除成本與運送營建廢棄物之費用。
7. 回收成本：本研究所討論混凝土橋之混凝土塊屬較單純之混凝土塊，因回收成本效益較低固不討論此項成本。



## 2.1.2 橋梁生命週期成本分析架構

延續章節 2.1.1 所整理之各評估項目，本研究參考陳威廷(2004)所建立之橋梁生命週期分析架構(圖 2.2)，預計於後續研究中整合臺灣地區中性化及鹽害危害度地圖，進一步優化、精進原有架構，建立更完善之橋梁全生命週期成本分析模式。





## 2.2 橋梁劣化原因

### 2.2.1 劣化定義

在探討橋梁劣化原因之前，首先需要先了解劣化的定義。根據蘇暉傑(2003)的研究結果歸納得知：劣化是混凝土結構在生命中無法避免的老化現象。可將其解釋成混凝土中力學、物理與化學特性之改變與衰敗現象。一般而言，混凝土結構物會依照不同環境而有不同劣化速率，可以藉由防治技術使劣化速率減緩，但是無法完全避免劣化的情形發生。另外，亦有人以混凝土結構物隨時間之增長，因無適當的養護而產生的損傷(如龜裂、剝落等)稱之。故混凝土劣化無法從物理現象明確將其定義並量化之。

### 2.2.2 橋梁劣化原因

橋梁劣化的原因根據眾說紛紜，依照交通部運輸研究所《RC 橋梁材料劣化評估與殘餘壽命預測技術手冊》，將其分為物理性(圖 2.1)與化學性(圖 2.2)兩部分，物理性主要的現象為面層破壞與裂縫擴張；化學性主要的原因是由於侵蝕性物質與混凝土漿體產生化學反應。此外，混凝土亦可能因為鋼筋腐蝕而造成剝落及裂縫擴張等現象。

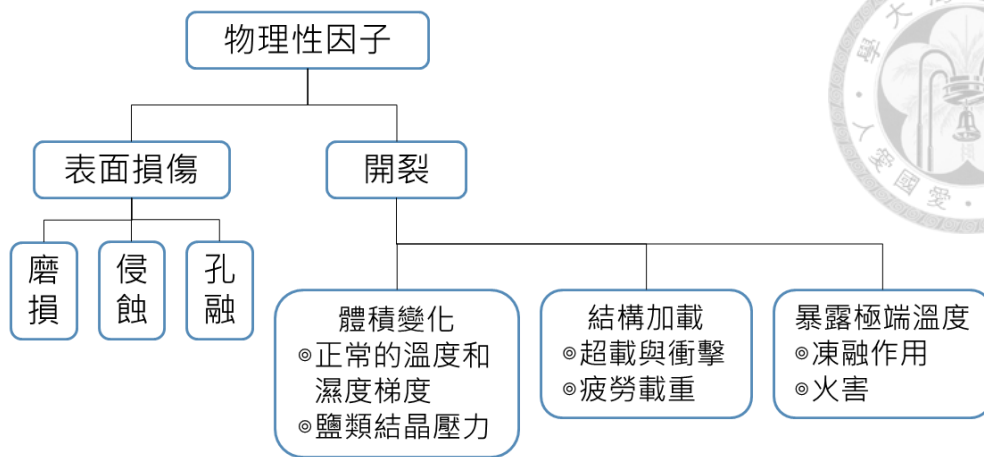


圖 2.3 橋梁劣化物理性因子

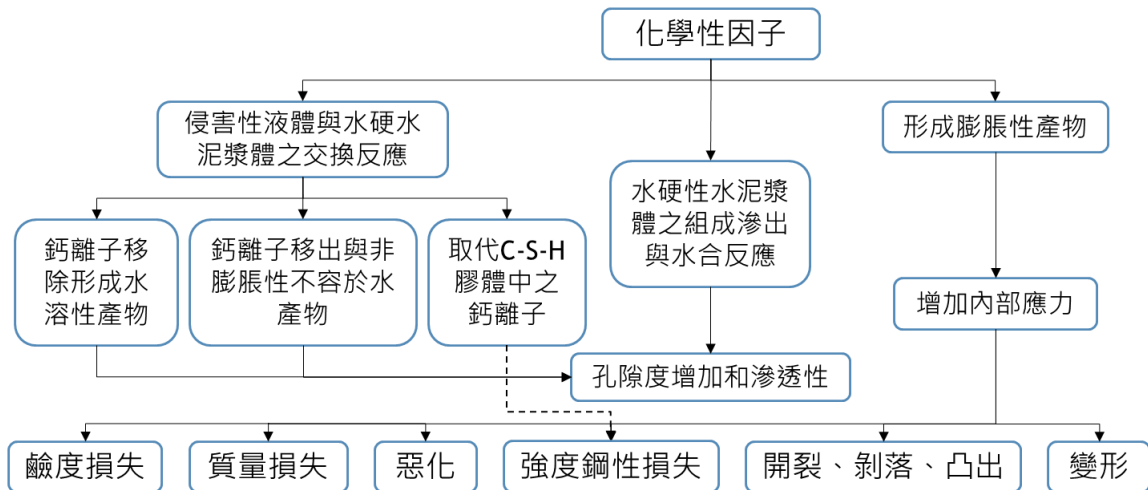


圖 2.4 橋梁劣化化學性因子

根據李有豐、林安彥(2000)、張晉璋(2004)、陳克劼(2007)、陳進喜(2008)等人的研究結果，將混凝土劣化的原因分成以下六類，分別描述其破壞原因如下：

1. 橋梁設計不當：

包含(1)結構型式、斷面型式與尺寸及鋼筋位置配置不當不符力學要求，或撓度不符舒適度要求等造成的結構設計不當，(2)水泥使用類型不適當、水泥使用量不足、水灰比過高、骨材及配不良，或鋼筋佈置不合理



等造成的材料設計不當，以及(3)使用舊版設計規範導致溫度變化、混凝土預力及設計地震力考慮不足等缺失。

#### 2. 施工品質不良：

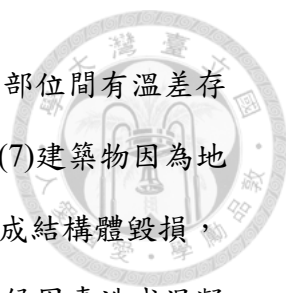
包含混凝土拌合不均、模板接合不良導致漏漿及過早拆模導致的缺陷，以及鋼筋配置不當、搭接長度不足及保護層厚度不足等造成混凝土強度不足或不均勻的現象，另外亦包括搗實不足或過度導致混凝土產生蜂窩或析離的現象、施工縫處理不當、水泥硬化前受到擾動、施工中超載、錯誤的設計及圖說等。

#### 3. 材料使用不當：

包含(1)混凝土在澆置後及凝固前的塑性階段，因空氣及混凝土溫度、相對濕度、風速等因素使水分蒸發，產生塑性乾縮裂縫，(2)在澆置、搗實、抹平後，混凝土仍有繼續沉陷的趨勢，在這段期間混凝土受到束制導致沉陷裂縫的產生，(3)水泥漿體中失去水分造成的乾縮裂縫，(4)所使用之骨材含氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ ) 與氧化鋁 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 等活性成分，造成骨材本身與水泥產生鹼骨材效應，形成鹼性膠體，其會吸水膨脹使混凝土產生裂縫，進而使鋼筋附錄造成鏽蝕情形，以及(5)使用氯含量過高之劣質混凝土，造成混凝土內部鋼筋鏽蝕膨脹，導致混凝土破裂。

#### 4. 環境因素影響：

包含(1)結構物周遭有侵蝕性物質，如工廠排放之廢水等，(2)酸性地下水與地表下混凝土結構物接觸，導致混凝土鹼度下降，使其喪失保護鋼筋免於鏽蝕之能力，(3)含硫酸鹽之地下水會使混凝土表面出現白色物質，(4)空氣中或溶於水中之二氧化碳侵蝕混凝土，會使混凝土中性化，降低混凝土強度，(5)混凝土中含有氯離子，破壞鋼筋之鈍態氧化鐵保護膜，會加速混凝土中鋼筋之鏽蝕，造成鋼筋體積膨脹，使混凝土產生裂縫或



剝離的情形，(6)建築物因為溫度效應，造成混凝土不同部位間有溫差存在，當拉應力超過混凝土抗拉強度時，即會產生裂縫，(7)建築物因為地盤較弱、地盤厚度不同等因素產生不均勻沉陷，進而造成結構體毀損，以及(8)混凝土受到凍融循環、乾溼作用及冷熱交替等天候因素造成混凝土結構物破壞。

5. 自然現象影響：

包括(1)混凝土結構物因乾縮、潛變及預力損失產生的結構自然老化現象，(2)設計時未考慮足夠之隔熱與散熱等措施，以及(3)地震、洪水沖刷等外力，使構建產生裂縫、撓曲或扭曲，甚至是斷裂等情形。

6. 人為破壞影響：

包含車輛超載降低橋梁強度與耐久性、火災降低混凝土強度與勁度、橋面版、緣石或護欄等磨損、交通工具撞擊造成混凝土構建損壞及定期維護工作不足使短期損壞持續擴大等影響。

另外黃紹翔(2012)將混凝土劣化分成內在因素與外在因素兩部份：

1. 內在因素：

包括水灰比、水泥種類、骨材、礦物摻料及添加劑(如爐石粉、飛灰、矽灰等)之使用等。

2. 外在因素：

又可分為物理性破壞與化學性破壞，物理性破壞如凍融作用、乾溼作用、溫度作用、磨損及磨耗等；化學性破壞如酸鹼侵蝕、骨材鹼值反應、硫酸鹽侵蝕及溶解與析晶等。



最後，根據日本混凝土工程協會出版的《混凝土工程裂縫調查及補強加固技術規程》，將裂縫產生的原因分成以下四類：

表 2.1 裂縫產生原因

類型		原因
材料	使用材料	水泥(非正常凝結、水化熱、非正常膨脹)、骨材(含泥土、骨料質量低劣、使用了反應性骨料)
	混凝土	混凝土中的氯化物、混凝土的壓縮、泌水、乾縮
施工	混凝土	拌合不均、攪拌時間過長、泵送時改變配比、澆築(順序錯誤，速度太快)、振搗不足、養護(硬化前受到震動或加荷、養護時急驟乾燥、初期凍害)、接打處理不當
	鋼筋	鋼筋被擾動、保護層厚度不足
	模板	變形、漏水、過早拆模、支撐下沉
使用與環境	物理方面	溫溼度(環境溫濕度變化、物件兩面的溫濕之差、反覆凍融、火災、表面加熱)
	化學作用	酸或鹽類的化學作用、中性化、氯化物侵入使內部鋼筋鏽蝕
結構及外力	荷重	永久荷載及長期荷載(設計荷載之內或超過設計荷載的永久、長期荷載)、活載重及短期荷重(設計荷重之內或超過設計荷重的活載重)
	結構設計	斷面及鋼筋用量不足
	支承條件	結構物的差異沉陷、凍脹

## 2.3 橋梁劣化現象

橋梁劣化原因有諸多種，而在此節要探討的是劣化所產生的現象，根據徐耀賜(1995)、李有豐(2007)、林文雄(2008)、黃志評(2008)、李有豐、林安彥(2000)、張荻薇、王炤烈、宋裕祺(1999)、中華民國交通部(2003)、蔣偉寧(2002)等人的研究，將劣化之現象歸納成以下 19 類：





## 1. 裂縫(Cracks)：

裂縫是混凝土中最常見之缺陷，也是導致混凝土內鋼筋鏽蝕的主要原因，至於裂縫主要分成結構裂縫與非結構裂縫兩類：

### a、 結構裂縫：

此種裂縫係由靜載重與活載重造成，主要分成撓曲裂縫與剪力裂縫兩者。撓曲裂縫一般發生在構件最大張力區，如跨徑中點底部或是連續梁橋墩構件上部；而剪力裂縫一般發生在大梁支承點附近之梁腹底部。

### b、 非結構裂縫：

此種裂縫雖不影響構件之安全，但裂縫深度深入內部，也有可能會傷到構件，主要分成以下五類：

- (1)因溫度變化引起之熱漲冷縮裂縫/溫度裂縫。
- (2)混凝土養護期間造成之乾縮裂縫。
- (3)澆築大範圍混凝土後，混凝土內外溫度差造成之大體積裂縫。
- (4)混凝土施工期間因齡期不同或不等量收縮造成之施工縫裂縫。
- (5)鋼筋鏽脹推擠混凝土造成之鋼筋鏽蝕裂縫。

## 2. 鋼筋鏽蝕(Reinforcing Steel Corrosion)：

鋼筋鏽蝕係鋼筋混凝土構件破壞的主因，雖受混凝土鈍化膜保護而不易鏽蝕，但是發現時往往已呈嚴重破壞，造成鋼筋鏽蝕主要原因包含：

- (1)鋼筋受水氣與氧氣之作用
- (2)混凝土中性化之影響
- (3)鋼筋表面氯離子含量過高之影響

依照鏽蝕程度可將其分成以下三個等級：

- (1)輕度鏽蝕：鋼筋漆面銹或鱗片狀。



(2) 中度鏽蝕：鋼筋表面鏽或薄片狀，可明顯辨識生鏽之範圍。

(3) 嚴重鏽蝕：鋼筋表面成數層鱗片，甚至有穿孔。

### 3. 剝落(Spalling)：

剝落係因混凝土表面之水泥砂漿流失，導致粗骨材外露所造成，通常會發生在混凝土表層品質較差之部位。

### 4. 剝離(Spalling, Pothole)：

剝離係指混凝土結構物片狀剝落的現象，一般剝落的形狀近似圓形或橢圓形，主要原因為鋼筋鏽蝕或混凝土因為溫度變化導致其承受超過容許應力所造成。其與剝落主要之區別在於流失面積較剝落大。

### 5. 層隙或脫層(Delamination)：

層隙係指構件受到氯氣或鹽水侵襲，造成構件內部之鋼筋鏽蝕體積膨脹，於混凝土內部形成隱藏式裂紋，當裂紋擴大增長，將導致鋼筋與附近之混凝土分離產生剝離。

### 6. 蜂窩(Honeycombs)：

蜂窩係指混凝土澆注時，因模板漏漿或搗實不當，導致水泥砂漿無法充分填充產生混凝土空洞。其會降低混凝土強度，並使空氣中之氣體及腐蝕因子侵入混凝土，造成混凝土中性化及鋼筋鏽蝕。

### 7. 白華、析晶(Efflorescence)：

白華係指混凝土滲水將氫氧化鈣溶解析出表面，產生白色的結晶物。白華通常都會伴隨裂縫一同出現。

### 8. 表皮髮裂(Crazing)：

表皮髮裂係指混凝土表層因乾縮較內層快而產生之微細裂紋，其形狀通常不規則，且不會破壞混凝土結構之完整性，又稱為毛細裂紋(Hairline



Crack)。

9. 爆開(Popout)：

爆開係因不健全之粗骨材顆粒吸水，在冰凍狀況下膨脹使表面水泥砂漿層較薄處爆開，且爆開後之孔洞將會儲水造成更進一步之破壞。此種破壞通常發生在日夜溫差大之區域。

10. 窪坑(Pitting)或碎裂：

碎裂的範圍大致呈網狀，且會與混凝土面成平行或傾斜之剝離，有時亦會導致鋼筋暴露。

11. 孔蝕(Cavitation)：

孔蝕發生的原因一般認為是突出物突然出現水流漩渦造成的氣泡所致，其外觀類似蜂窩，通常在混凝土澆置後數月至數年的時間才會出現。

12. 失色：

失色係指混凝土部份之色澤退化，造成混凝土表面色澤不一致之現象。失色不只影響結構物之美觀，亦有可能是混凝土內部缺陷的徵兆。

13. 脫皮：

脫皮的成因通常發生在混凝土劣化或模板拆除時，會產生表面薄片狀之脫皮現象。

14. 滲膠：

滲膠係指混凝土裂縫或孔隙中流出液狀或膠狀物質，並滯留在混凝土表面的現象。

15. 滲漏：

滲漏係指水份由橋面版表面滲入並由橋面版底部漏出之現象。



16. 磨損：

磨耗係指混凝土長期受交通車流的磨損或其他清潔維護工作導致混凝土磨損的情形。

17. 撞損：

撞損係指混凝土結構物受到車輛、滾石等撞擊造成之損壞情形。

18. 沖刷：

沖刷主要發生在橋墩及橋台，其經常受到急流的水流和水中夾帶的顆粒而造成混凝土表面之侵蝕或沖刷的情況。

19. 沉陷(Settlement)：

橋梁之沉陷通常無法避免，當發生沉陷時，結構物之內力將重新分配，若沉陷超過設計值則會產生裂縫。

## 2.4 鹽害與中性化腐蝕機理介紹

### 2.4.1 鹽害腐蝕機理

根據龔永健(2007)、陳進喜(2008)、陳育聖(2011)、黃紹翔(2012)的整理結果，認為氯離子侵蝕是造成鋼筋混凝土腐蝕最主要的因素之一，而混凝土中氯離子的來源主要可分為以下三個來源：

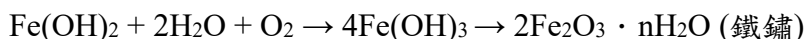
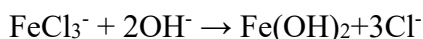
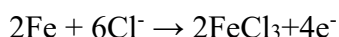
1. 混凝土組成材料本身如細骨材及拌合水等就含有氯離子成份。
2. 混凝土中添加含有氯離子成份之化學摻料，如強塑劑等。
3. 經由混凝土外部滲透進入，如臨海區域鹽類侵入混凝土等。

詹穎雯(2000)曾針對混凝土耐久性，舉出國內外規範規定相關設計參數容許

之最大/最小值，其中包含鋼筋保護層及氯離子含量等。混凝土因外界鹽份侵入或使用含有鹽份之材料，當鋼筋表面氯離子含量超過某一臨界值時，鋼筋表面之鈍化膜會遭受破壞而產生腐蝕。至於鋼筋在含有氯離子的混凝土中，其腐蝕之影響與游離態氯離子和氫氧根離子之比率有關(即  $Cl^-/OH^-$ )，其中  $OH^-$  和水泥含量有關，在一般情況之下，氯離子濃度要比水泥含量多出 0.2~0.4%， $Cl^-/OH^-$  之比值有機會大於 0.6，鋼筋才會開始腐蝕。

經由混凝土實驗結果得知，氯離子入侵會破壞膠體產物(C-S-H)，產生高溶解的氯化鈣，並將混凝土析出，擴大混凝土孔隙，導致混凝土滲透率變大，進而增加混凝土劣化的機率。

氯離子入侵鋼筋混凝土後，主要會造成鋼筋孔融(Pitting)，當氯離子濃度高到某一程度後，其會破壞鋼筋表面的鈍化膜( $\gamma-Fe_2O_3$ )，並與鐵離子反應產生水溶性氯化鐵錯合物( $FeCl_4^-$ )，此錯合物會離開鋼筋表面，溶於孔隙溶液中與氫氧根離子反應產生氫氧化鐵( $Fe(OH)_2$ )，最後再與氧及水反應生成鐵鏽( $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ )，完整反應過程如下：

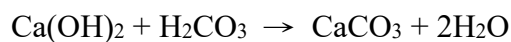
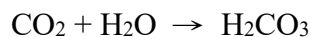


由上述反應可見氯離子有催化鋼筋腐蝕的功能，同一時間腐蝕反應亦消耗混凝土中之  $OH^-$ ，使混凝土中 pH 值下降，不易產生鈍化膜，使得鋼筋腐蝕速度變快。在氫氧根離子減少的同時，此種游離性氯離子釋出，再次與鐵離子反應，此種鋼筋腐蝕反應持續進行，直到鋼筋腐蝕貫穿，故氯離子為鋼筋腐蝕的主要原因，其對結構物主要會造成耐久性的影響。



## 2.4.2 中性化腐蝕機理

根據王傳輝(2005)、龔永健(2007)、陳進喜(2008)的整理結果，混凝土中的水泥熟料經水化反應生成氫氧化鈣( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，簡稱 CH)和水矽酸鈣( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ，簡稱 C-S-H)為可碳化物質，新鮮混凝土其酸鹼值(pH 值)介於 12~14 之間，若空氣中之二氧化碳入侵混凝土內部達 0.03%，此時 CH 和 C-S-H 會與其發生碳化反應(中性化反應)，使混凝土的 pH 值降低到 9 左右，此時受到鈍態膜保護之鋼筋遭到破壞，若混凝土不夠緻密或鋼筋保護層不足，則很容易產生腐蝕的現象。完整反應過程如下：

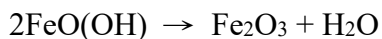
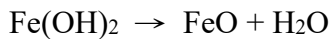
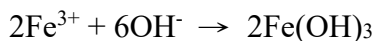
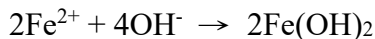
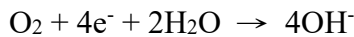


由上述式子可知，當 pH 值降低，鋼筋表面會由鈍化區變成具有腐蝕之狀態，因此鋼筋腐蝕的情形無法避免。另一方面，一般水泥水化會產生約 20%之氫氧化鈣，其與二氧化碳反應會產生低溶解性之碳酸鈣，其體積較原來水化反應物之體積膨脹約 17%，能使混凝土孔隙降低，增加混凝土的緻密性。但是，若混凝土持續中性化，則碳酸鈣會變成溶解性較高之碳酸氫鈣，其從混凝土析出增加孔隙的產生，降低混凝土強度，並使有害物質更容易入侵至混凝土中。

## 2.4.3 鋼筋腐蝕原理

根據王傳輝(2005)、陳進喜(2008)、黃紹翔(2012)的整理結果，鋼筋腐蝕為一種電化學的反應過程，在過程中需要氧化物、水及電子在金屬內移動，有一連串的化學反應發生。鋼筋腐蝕產生的鐵鏽其主要成分為鐵的氫氧化合物或氧化鐵水化合物，腐蝕產生的產物其體積比鋼筋體積大約 3~7 倍，造成鋼筋與混凝土間之

握裹力降低，最終導致混凝土剝落，加速鋼筋腐蝕的現象。腐蝕反應主要分成兩個階段，第一階段係因局部電池的產生，造成鋼材表面特性不均勻，若此表面處於腐蝕環境中，鋼筋會放出二價鐵離子( $\text{Fe}^{2+}$ )存在混統孔隙溶液中以及電子，形成陽極反應，若再與水及氧接觸，則產生氫氧根離子，形成陰極反應。第二階段為後續反應，由鐵離子與氫氧根離子反應產生氫氧化鐵( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ )或氫氧化亞鐵( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )，再繼續反應會成為水和氧化物( $\text{FeO}(\text{OH})$ )或紅鏽( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )，其反應如下：



除此之外，在紅鏽產生的過程中，若氧的供給不充裕，則氧化的結果將產生黑鏽( $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )。

## 2.5 橋梁劣化維修工法

### 2.5.1 維修與補強一般說明

在探討維修工法之前，需要先將「維修」一詞做個定義。一般會把維修與補強兩者放在一起做討論，但根據交通部臺灣區國道高速公路局《公路鋼筋混凝土

《結構橋梁之檢測及補強規範》草案委託研究計劃，在計劃中分別將維修與補強兩者定義之：



「維修」目的係因結構缺陷已確實存在，主要將措施為防止橋梁繼續劣化，使其滿足使用功能及耐久性之對策，但其強度與勁度不見得會提升，且構件本身不具有立即性之安全危害。

「補強」目的係因結構受損且即將導致立即性危險的情況下會進行，主要會提升橋梁之強度、勁度或乘載力，用以降低補強構建之應力狀況或使橋梁安全能符合公路養護管理機關之要求。

此外亦列舉出維修與補強之五項原則：

1. 於規劃設計階段應先進行充分調查，參考檢測評估結果，並考量維修與補強作業之特性，選擇合適之維修補強工法。
2. 應依其目標，採用不同方式進行維修與補強作業，如恢復或改善結構系統功能、增加結構強度或韌性、置換損傷構件等方式。
3. 進行維修與補強時應注意施工安全及現有交通之影響，輔以必要之臨時安全措施，並避免施工過程中結構系統產生弱點。
4. 依公認之學理與方法如分析計算法或實測法等進行補強效果之確認。
5. 材料須考慮與底材間之相容性及修復補強程序，注意所採用之材料是否具有符合國家標準或相關國際標準之認可證明。

本篇論文主要著重於「維修」方面，以使構件能夠回復其使用功能與安全性為主要目的。





## 2.5.2 維修工法一般說明

混凝土構件維修工法的部分，主要分成混凝土結構物之維修工法與鋼筋除鏽兩者，根據黃志評(2008)、張凱帆(2009)、翁愷翔(2009)、黃冠嘉(2015)等人的歸納整理，混凝土結構物之修復工法依照缺陷程度分成三類，分別是(1)表面處理工法(2)裂縫修補工法(3)表層缺陷修補工法，修補工法之細項如圖 2.3 所示。

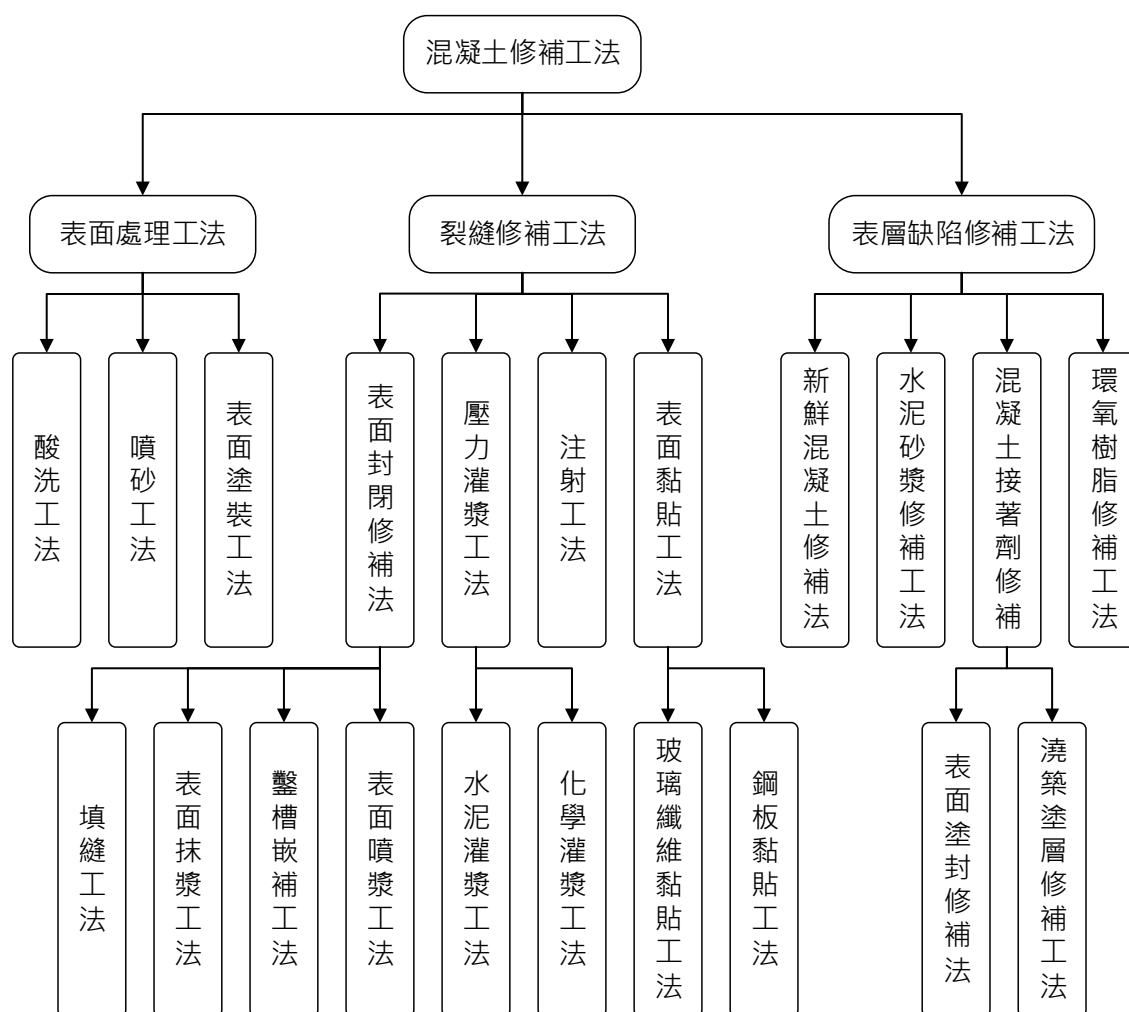


圖 2.5 混凝土修補工法

### 1. 表面處理工法

混凝土橋梁在正常使用情況下，多少會產生細微裂紋以及少許砂漿流失等情形，使用表面處理工法除了能讓結構物更美觀之外，長期而言亦可



減少日後損壞的機率，依照對混凝土表面處理的方式又可將其分成酸洗、噴砂及表面塗裝三類。

- a、酸洗工法：混凝土本身具有高鹼性，利用酸的腐蝕效果作為混凝土修補前之表面處理可達到一定效果。其中鹽酸最常被拿來使用，其與混凝土表面外露的細骨材反應後，立刻用鋼刷刷淨至不冒泡，再以清水沖洗防止混凝土中性化。
- b、噴砂工法：使用高壓泵浦推送砂粒噴擊混凝土表面，使其呈粗糙狀以增加附著力。但此種工法會產生砂塵造成環境汙染，且價格較為昂貴，故實用性不及酸洗工法。
- c、表面塗裝工法：塗刷砂漿、塗料或類似環氧樹脂等化學藥品以塗封混凝土龜裂處，以防止進一步惡化的情況。此種工法適用在輕微的表層龜裂情況。

## 2. 裂縫修補工法

此種工法的主要目的，就短期而言是為恢復結構的整體性；長期而言是為保持結構強度、剛度、耐久性、抗滲性及美觀度。主要可分為表面封閉修補法、壓力灌漿工法、注射工法以及表面黏貼工法等四類。

- a、表面封閉修補法：尚可再細分成(1)填縫工法(2)表面抹漿工法(3)鑿槽嵌補工法(4)表面噴漿工法等四類，其中表面抹漿工法更可再分成水泥砂漿塗抹以及環氧砂漿塗抹兩種。
- b、壓力灌漿工法：此種工法係將漿液加壓灌入結構物內部，使裂縫閉合並恢復結構強度、耐久性以及抗滲性等效果。其中最常使用的方法為水泥灌漿工法與化學灌漿工法兩者。



c、注射工法：適用於寬度較小的龜裂情況，先將龜裂分區，再利用注射方式將環氧樹脂注入，其中會將裂縫表面除注射孔外其餘皆封閉以防止注射材料流出。

d、表面黏貼工法：將混凝土表面以玻璃布或鋼板黏貼，達到封閉裂縫的目的，亦能提高結構物之強度與勁度。其中分成玻璃纖維布黏貼與鋼板黏貼等方式。

### 3. 表層缺陷修補工法

混凝土表層之損壞程度，已不適宜採取表面處理工法及裂縫修補工法進行修補時，如混凝土表面產生片塊狀之剝離，則須使用表層缺陷修補法進行修補。此種工法通常採用填充工法進行，會先敲除已損壞或品質不良之混凝土，再重新澆置新拌混凝土，使龜裂的情況不再發生或提升原構件之品質。依照填充之材料可分為新鮮混凝土修補法、水泥砂漿修補工法、混凝土接著劑修補以及環氧樹脂修補工法。

a、新鮮混凝土修補法：當混凝土出現蜂窩或空洞等較大範圍的缺陷時，會先除去鬆落之混凝土，將修補之部位鑿毛，清除覆蓋之塵土並保持濕潤。其中為確保新舊混凝土接著性，應在鋼筋及混凝土周圍塗抹一層水泥漿或其他接著劑，若修補面積較大，澆置前需組立模板，完成後如同一般混凝土澆置需進行養護。

b、水泥砂漿修補工法：用於損壞程度較淺之缺陷，施工方法與新鮮混凝土修補法相同，惟需加強壓實工作，另避免乾縮裂縫，於新填補的區域周圍再塗上樹脂或漿液，以避免構件內部遭空氣與水侵入。

c、混凝土接著劑修補：適用於損壞程度較嚴重且有深入構造內之情形，通常以表面塗封修補或澆築塗層修補之。

- d、環氧樹脂修補工法：此種工法使用較佳的修補材料，其具有較高的強度和抗蝕、抗滲能力，並能與混凝土產生較佳的黏結，但是其價格較為昂貴且工法操作難度較高，通常使用於高品質的情況。

至於鋼筋除鏽的施工方法，依照張凱帆(2009)的文獻整理成表 2.2。

表 2.2 鋼筋除鏽與防鏽工法

維修方式	維修工法	施工項目
除鏽	人工除鏽工法	用鋼絲刷、砂盤、麻袋布等輕擦鏽蝕鋼筋→將鏽蝕鋼筋在砂紙堆上來回拉動除鏽
	機械除鏽工法	細條鋼筋通過冷拉和調直過程自動去鏽→粗鋼筋採用圓盤鋼絲刷除鏽機除鏽→利用空壓機產生的強大氣流形成高壓砂流除鏽
	化學除鏽工法	用鋼筋除鏽劑清洗鋼筋→清水沖洗
防鏽處理	陰極防蝕工法	安裝鈦、鋅、鋁網當作陽極→連接引線至鋼筋當作陰極→施加電流
	腐蝕抑制劑工法	塗抹防鏽劑
	表面防水膜塗封工法	混凝土表面施作防水膜→多層施作防水膜塗封
	環氧樹脂被覆工法	鋼筋表層塗刷環氧樹脂
	鋅漆被覆工法	鋼筋表層塗刷鋅漆

## 2.6 橋梁易損性曲線

易損性曲線的定義係指各類結構物在不同最大地表加速度(PGA)或頻譜位移或最大位移反應下，所產生不同損壞狀況的機率值。在結構物受損評估中，經常使用易損性曲線作為依據。

根據許家銓(2012)「公路橋梁震災風險評估輔助分析系統」之研究結果，將最大地表加速度(PGA)作為結構物損壞曲線之地動參數，因其為自然界所發生之現象，故依照常態分布做假設。將其樣本中之 PGA 平均值 $\mu$ ，標準偏差 $\sigma$ ，並將



資料做標準化  $z=(x-\mu)/\sigma$ ，其標準常態分布之機率密度函數  $P_z(z)$  如下所示：

$$P_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}, Z \in (-\infty, \infty)$$

將曲線積分後，可以得到累積機率函數曲線積分式：

$$P[Y \leq y] = F_y(y) = \int \frac{1}{y\sigma_x\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2\right\} dy, -\infty \leq x \leq \infty$$

其中  $x = \ln y$ ， $y$  為原始 PGA 蒐集樣本值。由此可藉由各橋梁各損壞等級之 PGA 計算平均值與標準差，再參考內政部建築研究所出版之《鋼筋混凝土建築物耐震評估手冊－視窗化輔助分析系統 SERCB Win2012》，將結構物之耐震能力以雙線性關係圖(圖 2.4)表示之，再依照以下四種結構性能等級作為地震損壞評估之依據：

1. 結構性能一(PO<sub>1</sub>)：當結構物之位移達到降伏位移之 80% 時。
2. 結構性能二(PO<sub>2</sub>)：當結構物之位移達到降伏位移時。
3. 結構性能三(PO<sub>3</sub>)：當結構物之位移達到韌性容量之 2/3 時。
4. 結構性能四(PO<sub>4</sub>)：當結構物之位移達到韌性容量時。

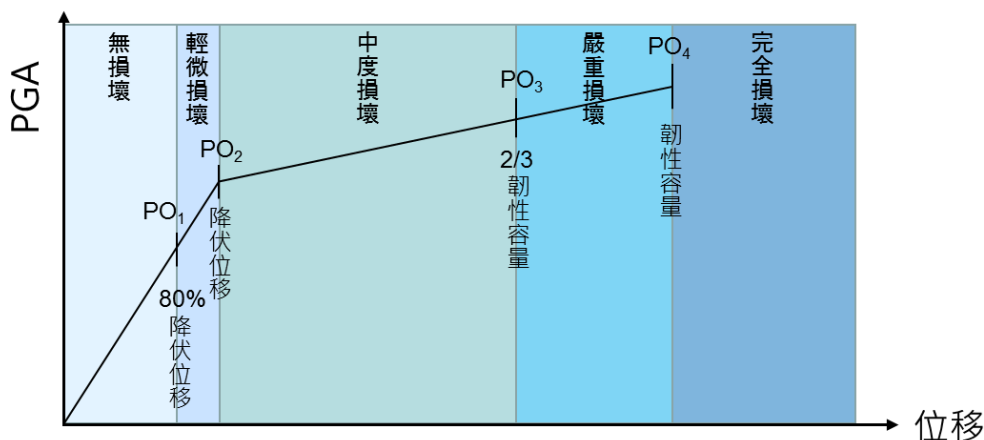


圖 2.6 結構物之耐震能力圖



依照上述損壞分級情況，可以區分成五種損壞等級：(1)無損壞  $R_1$ ；(2)輕微損壞  $R_2$ ；(3)中度損壞  $R_3$ ；(4)嚴重損壞  $R_4$  與(5)完全損壞  $R_5$ ；其對應之發生機率  $P_r(R_i)$ 可表示為：

$$P_r(R_1)=1-P_1$$

$$P_r(R_i)=P_{i-1}-P_i, i=2\sim 4$$

$$P_r(R_5)=1-P_4$$

分別計算出橋梁各損壞等級下其所屬的累積機率函數曲線，再根據各損壞等級之累積損壞率，可繪製出易損性曲線 (Fragility Curve)，如下圖(圖 2.5)所示。當地震發生後，可藉地震之 PGA 值，對應到易損性曲線，即可由各曲線之差值，得各損壞狀況之發生機率。

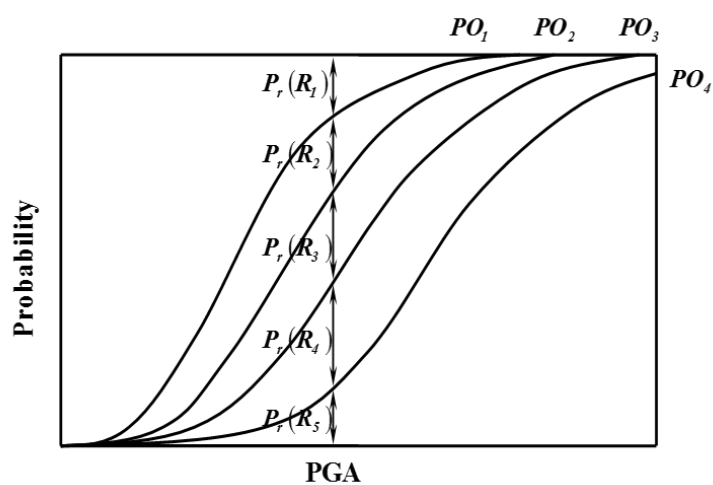


圖 2.7 易損性曲線



## 2.7 小結

本章一開始定義劣化為「混凝土結構在生命中無法避免的老化現象」，再探討橋梁劣化之原因，依照不同工程單位有不同的分類方式，如分為物理性與化學性；分為內在因素與外在因素；亦有人將其區分成六大類或四類。

接著將探討橋梁劣化所產生的現象，依照各個文獻的彙整將其歸納成 19 類，分別為裂縫、鋼筋鏽蝕、剝落、剝離、層隙或脫層、蜂窩、白華、析晶、表皮髮裂、爆開、漥坑或碎裂、孔蝕、失色、脫皮、滲膠、滲漏、磨損、撞損、沖刷以及沉陷。再來要討論劣化中鹽害、中性化以及鋼筋之腐蝕機理，了解整個反應過程。

另一部分要回顧的是維修與補強的差異，前者主要為防止橋梁繼續劣化；後者會提升橋梁之強度使橋梁安全能符合要求。接著探討維修所需之工法，綜合過去所歸納的結果，分成混凝土結構物修復工法以及鋼筋除鏽兩大類，前者依照缺陷程度分成表面處理工法、裂縫修補工法以及表層缺陷修補工法三類。最後根據橋梁易損性曲線將劣化程度作分級，本研究將沿用工法之分類以及劣化程度的分級做進一步分析。



## 第三章 劣化橋梁生命週期模式分析

延續章節 2.3 所整理之鹽害與中性化腐蝕機裡介紹，本研究分別將鹽害與中性化做進一步的探討與分析，並藉由結合各經驗公式，建立出一套斷面損失隨時間之變化圖。

### 3.1 鹽害之影響因子

根據涂鋒鈞(2012)的研究指出，鋼筋混凝土鹽害鏽蝕的過程，根據不同時期會有不同的腐蝕速度，分成潛伏期、進展期、加速期前期、以及加速期後期等四個階段。

於潛伏期階段，參考 Weyers(1998)建議之公式計算混凝土鹽害深度：

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (3.1)$$

其中  $C(x,t)$  為時間  $t$  與混凝土表面距離  $x$  處之氯離子濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $C_i$  為混凝土中氯離子起始濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $C_s$  為混凝土表面氯離子濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $\operatorname{erf}(z)$  為誤差函數； $D_c$  為氯離子擴散係數，參考日本土木學會(JSCE, 2008)之建議，如下式所示：

$$\log D_c = -6.77(w/c)^2 + 10.1(w/c) - 3.14 \quad (3.2)$$

式中， $D_c$  為氯離子擴散係數； $w/c$  為水灰比(%)。

考量橋梁離海距離與所處位置之平均風速，將以上兩個參數代入飛來鹽量預測公式，得知其位置之飛來鹽量  $C_{\text{air}}$ ，再根據蕭輔沛(2012)研究建立臺灣混凝土表面附著之氯鹽量  $C_0$  公式。





$$C_0 = 13.137 \times C_{air}^{0.6394} \quad (3.3)$$

式中， $C_0$  為混凝土表面附著氯鹽量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $C_{air}$  為飛來鹽量。

於進展期階段，將其定義為鋼筋開始腐蝕至混凝土表面裂縫產生之時期，目前多數研究仍以現地實驗為參考，歸納出鋼筋腐蝕量而建立評估模式。本文參考莊育泰(2012)將鋼筋腐蝕臨界氯鹽量定義為  $1.0\sim 1.2\text{kg}/\text{m}^3$  且呈現均勻分布，參考日本混凝土協會(1997)鋼筋年腐蝕速率公式如式(3.4)作為鋼筋腐蝕程度的評估標準，以式(3.5)重量減少率作為量化指標，再以式(3.6)將式(3.4)鋼筋之年腐蝕速率單位從(%)轉化為(%/year)。

$$V_{corr}(t) = \frac{78}{\sqrt{c}} \times (0.578 \times Cl(t) + 0.023(W/c) - 1.52) \quad (3.4)$$

$$\Delta W_{corr} / W = \frac{4V_{corr}}{\gamma \times d_{bi}} \quad (3.5)$$

式中， $d_{bi}$  為原始鋼筋直徑(mm)； $\gamma$  為鋼筋密度( $\text{mg}/\text{cm}^3$ ；約為 7850)。

$$V_{corr}(t) = \left(\frac{1}{c}\right)^2 \times [0.578 \times Cl(t) + 0.023 \times (W/C) - 1.52] \quad (3.6)$$

式中， $V_{corr}$  為平均每年鋼筋鏽蝕之重量減少率(%/year)； $W/C$  為水灰比(%)； $c$  為鋼筋保護層厚度(mm)； $Cl(t)$  為鋼筋表面氯鹽量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

於加速期前期，參考莊育泰(2012)將其定義為混凝土表面裂縫超過臨界寬度，將產生剝離或脫落的現象。根據日本建築學會(1997)建議之臨界寬度假設為  $0.5\sim 1.0\text{cm}$ 。目前此階段研究成果尚嫌不足，故參考鳥取誠一等人(2004)建議，假設進展期與加速期前期之鏽蝕速率相同。

至於加速期後期的定義為鋼筋重量減少率超過混凝土開裂臨界腐蝕重量減少率時稱之，此階段鏽蝕速度近似於裸露鋼材之腐蝕速度，其混凝土開裂臨界腐蝕



重量減少率參考日本土木學會(2008)的建議值  $V_{cr}=3.28\%$ ，再參考莊育泰(2012)建立適用於本土化之裸露鋼筋鏽蝕速率  $V_{crack}$ ，如表 3.1 所示。

表 3.1 裸露鋼筋腐蝕速率公式

區域	回歸試驗線	混凝土開裂後腐蝕速率
北部	桃園、蘇澳	$V_{crack} = e^{-0.0809T} \times (RH - 0.45)^{0.2288} \times d^{-0.0374}$
中部	台中、台塑六輕	$V_{crack} = e^{-0.0513T} \times (RH - 0.45)^{0.938} \times d^{-0.0522}$
南部	高雄、核三廠	$V_{crack} = e^{-0.0169T} \times (RH - 0.45)^{1.765} \times d^{-0.0601}$
東部	花蓮	$V_{crack} = e^{-0.0934T} \times (RH - 0.45)^{0.28} \times d^{-0.0875}$

$V_{crack}$ ：裸鋼筋腐蝕速率(mm/year)、T：環境平均溫度(°C)、RH：環境平均濕度(%)、d：離海岸線之距離(km)。

經由上述四個階段可得知不同階段有不同的計算公式，根據方程式內容歸納出相對應之影響因子，整理如表 3.2 鹽害各階段之影響因子：

表 3.2 鹽害各階段之影響因子

鋼筋鏽蝕階段	影響因子
潛伏期	-
進展期	鋼筋保護層厚度 c 鋼筋表面氯鹽量 Cl(t) 水灰比 w/c
加速期前期	鋼筋保護層厚度 c 鋼筋表面氯鹽量 Cl(t) 水灰比 w/c
加速期後期	年平均溫度 T 年平均濕度 RH 年平均風速 d



### 3.2 中性化之影響因子

依照日本學者岸谷孝一(1979)提出“中性化殘量”的概念，將其定義為鋼筋開始鏽蝕時，用酚酞試劑測出的中性化前緣到鋼筋表面的距離(如圖 3.1 所示)，並指出鋼筋開始鏽蝕的中性化殘量與構件所在環境(相對濕度)、混凝土抗壓強度及混凝土保護層厚度等有關。根據宋裕祺與王傳輝(2005)將徐善華(2003)之數學模式簡化得到中性化殘量經驗公式如下：

$$D_0 = 5.9063(-RH^2 + 1.5RH - 0.45)(c - 5)(\ln f'_c - 2.3) \quad (3.7)$$

式中， $D_0$  為中性化殘量(mm)； $RH$  為環境年平均濕度(%)； $c$  為混凝土保護層厚度(mm)，當  $c > 50\text{mm}$  時，取  $c = 50\text{mm}$ ； $f'_c$  為混凝土抗壓強度(MPa)。

再根據一般大氣環境鋼筋開始鏽蝕條件，可以得到鋼筋開始鏽蝕時間為：

$$t_i = \left( \frac{c - D_0}{K} \right)^2 \quad (3.8)$$

式中： $t_i$  為鋼筋開始鏽蝕時間(year)； $D_0$  為中性化殘量(cm)； $c$  為混凝土保護層厚度(cm)； $K$  為中性化速度係數( $\text{cm}/\text{year}^{0.5}$ )。

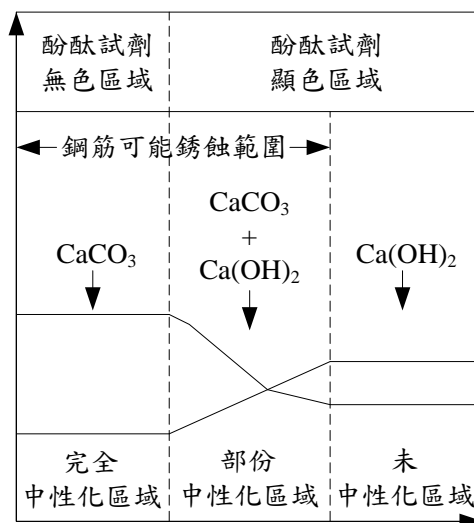


圖 3.1 部分中性化區域示意圖



橋梁受到中性化後的斷面損失除考量混凝土中性化深度之外，尚需考量鋼筋有效斷面積減少。參考牛荻濤(2003)、王傳輝(2004)以及蘇進國(2008)的研究成果，可將混凝土中性化過程分成潛伏期、進展期、加速期以及劣化期等四個階段，分別對混凝土與鋼筋做探討。

潛伏期階段為新澆注完成的混凝土開始進行中性化到鋼筋開始鏽蝕的經過時間；進展其階段為鋼筋開始鏽蝕膨脹致混凝土保護層發生裂縫的經過時間；加速期階段為混凝土的保護層發生裂縫初期致鋼筋混凝土構件必須進行維護補修的經過時間；劣化期階段為因鋼筋鏽蝕量的曾與混凝土開裂狀況嚴重導致結構物承载力不足的經過時間。

根據蘇進國(2008)之中性化橋梁檢測資料並參酌牛荻濤之鋼筋鏽蝕速率回歸式，依非線性回歸法可得到鋼筋鏽蝕速率預測模式如式(3.9)，其中進展期與加速期以混凝土因鋼筋鏽蝕引致體積膨脹造成混凝土保護層發生開裂之時間  $t_{cr}$  作為分界點，且混凝土保護層開裂時之鋼筋鏽蝕速率約為  $R_{corr}^{crack} = 5.805 \times 10^{-3} (mm/yr)$ ；加速期之鋼筋鏽蝕速率根據牛荻濤(2003)的分析結果取為進展期之 2.5 倍；劣化期之速率則假設為與加速期相同。利用上述條件可以求得進展期與加速期之鋼筋鏽蝕深度，如式(3.10)、(3.11)。

$$R_{corr}^{prop}(t) = 1.022 \times 10^{-3} \exp^{0.04 \times Temp} \left( \frac{RH - 45}{100} \right)^{\frac{2}{3}} c^{-1.36} t^{1.83} \quad (3.9)$$

其中， $t(year)$  為橋梁之使用年期、 $RH(\%)$  為年平均溼度、 $c(mm)$  為保護層厚度、 $Temp(^{\circ}C)$  為年平均溫度。

$$\delta_{prop}(t) = R_{corr}^{prop}(t) \times (t - t_i) \quad (3.10)$$

$$\delta_{acee}(t) = \delta_{prop}(t_{cr}) + R_{corr}^{acee}(t) \times (t - t_{cr}) \quad (3.11)$$



經由上述四個階段可得知中性化於不同階段時考量的影響因子皆相同，根據方程式內容歸納出影響因子，整理如表 3.3 中性化之影響因子：

表 3.3 中性化之影響因子

斷面劣化類型	影響因子
混凝土中性化	年平均濕度 RH 鋼筋保護層厚度 $c$ 混凝土抗壓強度 $f'c$ 斷面尺寸 B、H
鋼筋鏽蝕	年平均溫度 T 年平均濕度 RH 鋼筋保護層厚度 $c$

### 3.3 鹽害及中性化交互影響模式

鹽害及中性化交互影響於過去研究中甚少提及，搜尋國內相關論文後，參考陳乃菱(1995)之研究，中性化作用下低氯離子濃度的試體變化情形如圖 3.2，但高氯離子濃度之試體並無此現象。

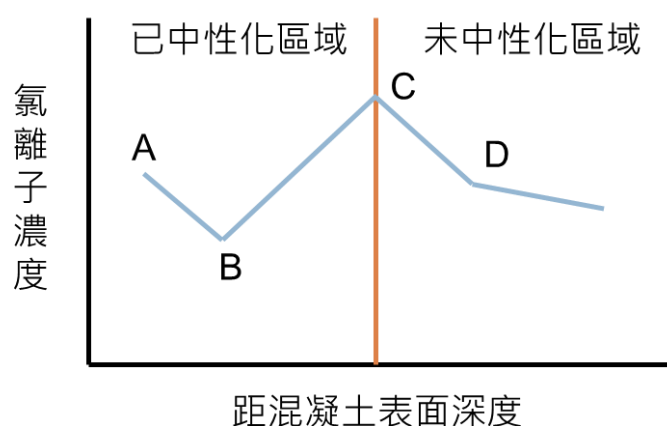


圖 3.2 氯離子濃度變化曲線示意圖



陳乃菱(1995)對此現象進行以下解釋：

1. A 點係因混凝土表面處於較乾燥之環境，而混凝土中含有相對較多的水分，故水分由混凝土內部向外移動，將混凝土內的  $\text{CaCl}_2$  帶至混凝土表面，導致氯離子濃度上升。
2. 中性化過程中因為鈣離子與碳酸根離子結合成碳酸鈣沉澱，導致中性化區域內正負離子不能平衡，將帶負電的氯離子往未中性化區域吸引，造成中性化界面的氯離子含量驟增，示意圖如圖 3.3。
3. 高氯離子濃度的試體，因為其吸水率偏高，導致試體相當潮溼，故 A 點氯離子向混凝土表面流動的現象並不明顯。

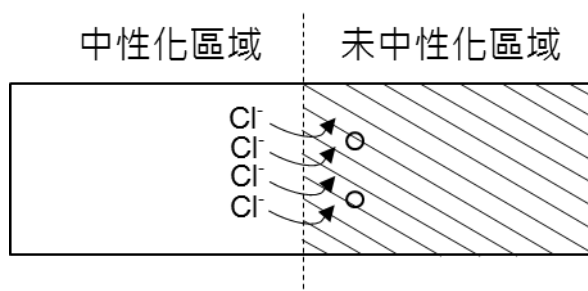


圖 3.3 氯離子濃度變化曲線示意圖

參考陳乃菱(1995)之實驗數據如表 3.4，根據其實驗結果可以從中得知：有中性化的試體其氯離子濃度會重新分配，在低氯離子情況下腐蝕速率會有加乘效果；而在高氯離子的情況下反而會降低腐蝕速率。因考量到實際橋梁腐蝕情況以低氯離子濃度的情況為主，故本研究假設交互影響的情形為向量疊加的方式，利用表 3.4 的數據推測中性化與鹽害之間的關係，分別考慮一次方與二次方的情形，所得到的結果如表 3.5。

表 3.4 中性化試體與無中性化試體氯離子濃度與鋼筋腐蝕速率比較分析表

有中性化試體				無中性化試體
原氯離子濃度 (Wt%)	試體編號	實測氯離子濃度 (Wt%)	鋼筋腐蝕速率 (uA/cm <sup>2</sup> )	鋼筋腐蝕速率 (uA/cm <sup>2</sup> )
0.1	B-1	0.1112	0.4646	0.1537
	B-2	0.2680	0.6119	0.1867
	B-3	0.1538	0.5113	0.1885
0.2	C-1	0.2603	0.3889	0.2546
	C-2	0.2883	0.6220	0.2601
	C-3	0.2520	0.5500	0.2172
0.3	D-1	0.4170	0.6420	0.3869
	D-2	0.6820	0.6197	0.3098
	D-3	0.3601	0.6236	0.3623
4.0	E-2	3.5235	3.2773	8.6073
	E-3	3.9837	4.8469	7.7245

表 3.5 鹽害與中性化交互影響測試表

中性化	鹽害	中性化值	殘差平方和
一次方	一次方	0.0695	0.055687271
一次方	二次方	0.2446	0.047246018
二次方	一次方	0.2636	0.055687266
二次方	二次方	0.3800	0.260868075

從上表，考量中性化值的合理性並利用殘差平方和取小者作為方法依據，鹽害及中性化交互影響的速率為鹽害所造成的影響乘上平方倍，再將中性化所造成的影響相加後，最後將其開根號為最後疊加的情形。計算方式如圖 3.4 及式 3.12 所示：

$$\text{鋼筋交互影響腐蝕速率} = \sqrt{\text{鹽害腐蝕速率}^2 + \text{中性化腐蝕速率}} \quad (3.12)$$

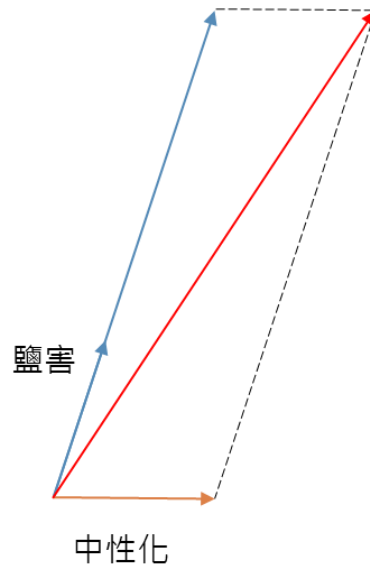


圖 3.4 鹽害中性化交互影響疊加示意圖

### 3.4 橋梁生命週期斷面損失模式建立

依照陳厚亨(2010)之研究結果顯示，鋼筋腐蝕會對劣化橋梁結構之力學性能產生極大影響，當鋼筋之斷面損失率  $\eta(t)$  達到 10% 時，該結構已不能承受最大地震力；當  $\eta(t)$  達到 12% 時，該結構已不能承受設計地震力；而  $\eta(t)$  達到 35% 時，該結構已不能承受中度以上之地震力。為了要建立一套斷面損失模式，本研究藉由上述之結果，分別將斷面損失率之 5%、10%、12%、35% 設定為混凝土橋梁之輕微損壞、中度損壞、嚴重損壞與完全損壞之臨界值。

根據表 3.2 鹽害各階段之影響因子以及表 3.3 中性化之影響因子，決定影響鋼筋腐蝕參數，並使用 3.1 節與 3.2 節之參考公式，建立出一套計算斷面損失之流程圖，如圖 3.5 所示。



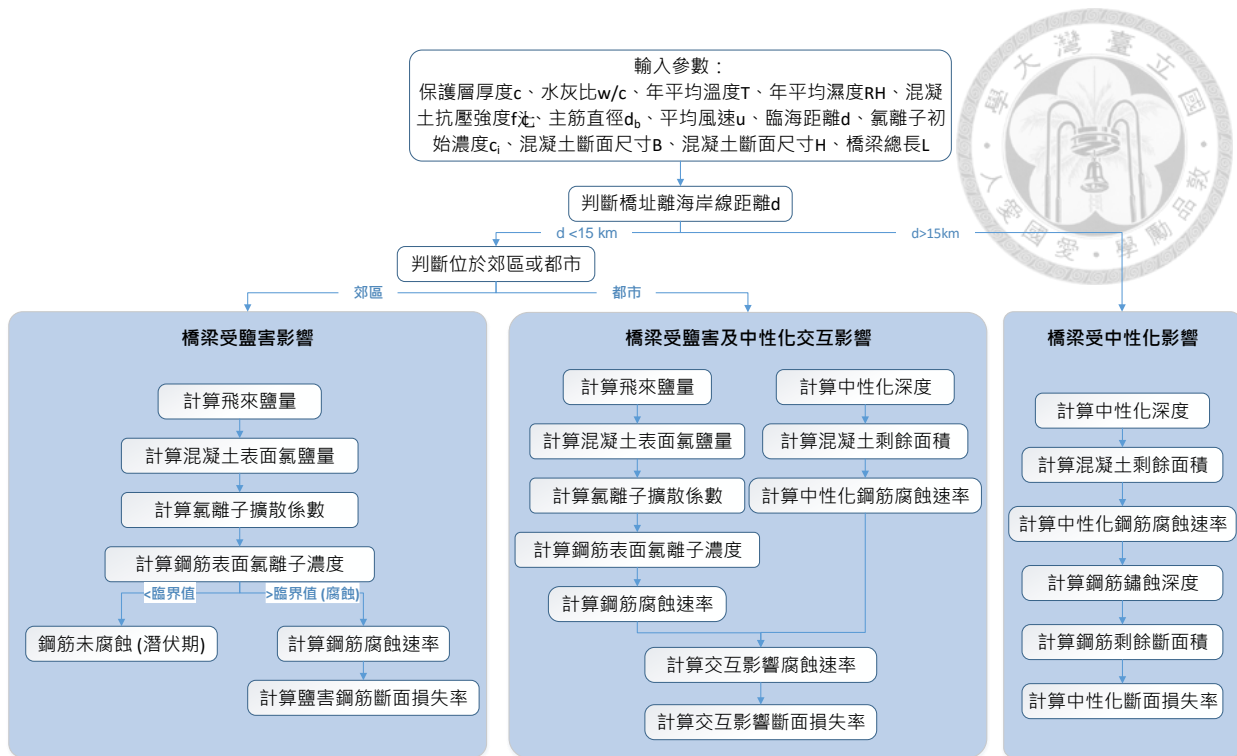


圖 3.5 橋梁劣化斷面損失流程圖

根據圖 3.5 之流程，本研究給予參數之設定，並根據假設的條件繪製出圖 3.6 橋梁生命週期鋼筋斷面損失率圖，假設條件如下：

- (1) 保護層厚度  $c$  : 40 mm
- (2) 水灰比  $w/c$  : 0.6
- (3) 年平均溫度  $T$  : 23.88 °C
- (4) 年平均濕度  $RH$  : 75 %
- (5) 混凝土抗壓強度  $f'c$  : 210kgf/cm<sup>2</sup>
- (6) 主筋直徑  $d_b$  : 25.4mm
- (7) 平均風速  $u$  : 0.238m/s
- (8) 臨海距海  $d$  : 5 km



(9)氯離子初始濃度  $c_i$  :  $0.15\text{kg/m}^3$

(10)混凝土斷面尺寸 B :  $2000\text{mm}$

(11)混凝土斷面尺寸 H :  $2000\text{mm}$

(12)地點 : 台北市

(13)橋梁總長 :  $500\text{m}$

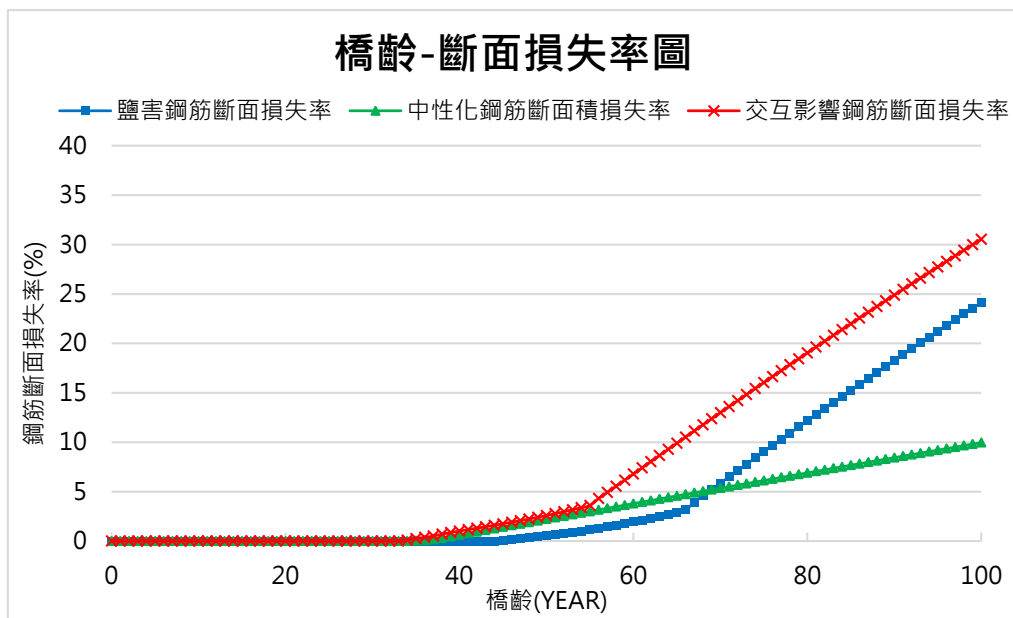


圖 3.6 橋梁生命週期鋼筋斷面損失率圖

由上述的圖表可以看出：混凝土橋梁鋼筋開始鏽蝕的時間點約在 35 年附近，而於 55 年左右橋梁會受到鹽害與中性化交互影響的作用，使得鋼筋鏽蝕速率有提前產生加速之情形。而在下一章節，本研究要針對混凝土橋梁之維修費用做進一步探討。



### 3.5 小結

本章主要目的係建立橋梁斷面隨時間的損壞情形，於第一節探討鹽害的影響因子，其會依照不同鏽蝕階段而有不同影響因素，於進展期以及加速期前期之影響因子為鋼筋保護層厚度、鋼筋表面氯鹽量以及水灰比三者；於加速期後期之影響因子為年平均溫度、年平均濕度以及年平均風速三者。

第二節探討中性化的影響因子，其並不會依照不同階段而有不同因素，而是依照斷面類型有所區隔，於混凝土部分其影響因子為年平均濕度、鋼筋保護層厚度、混凝土抗壓強度以及斷面尺寸四者；於鋼筋部分影響因子為年平均溫度、年平均濕度以及鋼筋保護層厚度三者。

第三節將參考過去鹽害及中性化交互影響之研究數據，並假設交互影響的模式，推測其可能的關係為鹽害所造成的影響乘上平方，再將中性化所造成的影響相加後，最後將其開根號，所得為交互影響的結果。最後於第四節中利用前三節的公式結果，建立起橋梁斷面隨時間之劣化情形。












## 第四章 劣化混凝土經費估算模式







### 4.1 劣化混凝土維修方式

鑒於橋梁構件劣化類型、維修方式與維修工法有許多種，為了要建立一套系統化步驟，本文參考橋梁目視檢測評估手冊、張凱帆(2009)的研究建議，並結合2011年交通部運輸研究所的參考圖例，將混凝土維修方式分成5種類型，分別是混凝土剝落、混凝土蜂窩、混凝土裂縫、保護層厚度不足以及混凝土表面劣化，另依照易損性曲線將損壞程度區分成五個等級，分別是無損壞、輕微損壞、中度損壞、嚴重損壞以及完全損壞，並分別給予劣化情況之描述、參考圖例以及維修方式，如表4.1所示。其中無損壞因為沒有劣化情況亦不需維修；完全損壞則以拆除置換為主要解決方式，故兩者並未納入表中。

表 4.1 混凝土劣化建議維修方式

劣化類型		損壞程度		
		輕微損壞	中度損壞	嚴重損壞
一、 混凝土剝落	劣化情況	1.鋼筋尚未露出且混凝土輕微剝落 2.鋼筋完全露出但無腐蝕現象	鋼筋有腐蝕的現象，且部分露出	鋼筋完全腐蝕且露出
	對照圖例			
	維修方式	3.表層缺陷修補法 3.表層缺陷修補法 5.防鏽處理	3.表層缺陷修補法 4.除鏽 5.防鏽處理	3.表層缺陷修補法 4.除鏽 5.防鏽處理

劣化類型		損壞程度		
		輕微損壞	中度損壞	嚴重損壞
二、 混凝土蜂窩	劣化情況	有少量的蜂窩而且鋼筋並未外露	1.鋼筋部分外露，且已有腐蝕現象 2.鋼筋完全外露，但尚未有腐蝕現象	鋼筋完全露出而且預力管露出，但尚未腐蝕
	對照圖例			
	維修方式	3.表層缺陷修補法	3.表層缺陷修補法 4.除鏽 5.防鏽處理 3.表層缺陷修補法 5.防鏽處理	3.表層缺陷修補法 5.防鏽處理
三、 混凝土裂縫	劣化情況	裂縫寬度 0.3mm 以下，沒有滲水或鋼筋鏽蝕現象	1.裂縫寬度介於 0.3 ~ 0.6mm，但沒有滲水或鋼筋鏽蝕現象 2.裂縫寬度 0.3mm 以下，但有滲水或鋼筋鏽蝕現象	1.裂縫寬度大於 0.6 mm 以上，但沒有滲水或鋼筋鏽蝕現象 2.裂縫寬度介於 0.3 ~ 0.6mm，但有滲水或鋼筋鏽蝕現象
	對照圖例			
	維修方式	2.裂縫修補法	2.裂縫修補法 2.裂縫修補法 4.除鏽 5.防鏽處理	2.裂縫修補法 2.裂縫修補法 4.除鏽 5.防鏽處理

劣化類型	損壞程度			
	輕微損壞	中度損壞	嚴重損壞	
四、保護層厚度不足	劣化情況	由於保護層厚度不足使混凝土表面產生些微鏽斑顯示鋼筋已鏽蝕	沿鋼筋的方向在混凝土表面有明顯的鏽斑；沿鋼筋方向有細微裂縫產生	鋼筋的鏽蝕現象持續擴散且造成局部的剝落
	對照圖例			
	維修方式	3.表層缺陷修補法 4.除鏽 5.防鏽處理	3.表層缺陷修補法 4.除鏽 5.防鏽處理	3.表層缺陷修補法 4.除鏽 5.防鏽處理
五、混凝土表面劣化	劣化情況	滲水或污染造成局部混凝土表面輕微褪色、變質或白華現象	滲水或污染造成局部混凝土表面嚴重褪色、變質或白華現象	滲水或污染造成大範圍混凝土表面嚴重褪色、變質或白華現象
	對照圖例			
	維修方式	1.表面處理法	1.表面處理法	1.表面處理法

綜合以上圖表之整理，因為維修方式僅列出五大方向，於不同損壞程度所對應到之維修方式依照大項目來說可能會相同，但是實際上之維修工法卻會有所差異，故本研究於下一結將針對維修工法做進一步之探討。



## 4.2 劣化混凝土維修工法分析

繼上一節將不同劣化類型給予大項目之分類，本節將結合張凱帆(2009)之研究成果，延續 2.4 節之分類方式(表 4.2)，並做進一步之工法細分。另考量維修工法通常不會單一使用，本研究經由專家訪談之結果，將不同劣化類型分別依照損壞程度給予建議之維修工法歸類，整理後如表 4.3。

表 4.2 不同維修方式之建議維修工法

維修方式	建議維修工法	
表面處理法	1.1 酸洗工法 1.3 表面塗裝工法	1.2 噴砂工法
裂縫修補法	2.1 表面封閉修補工法 2.3 注射工法	2.2 壓力灌漿修補工法 2.4 表面黏貼工法
表層缺陷修補法	3.1 新鮮混凝土修補工法 3.3 混凝土接著劑修補工法	3.2 水泥砂漿修補工法 3.4 環氧樹脂材料修補工法
除鏽	4.1 人工除鏽工法 4.3 化學除鏽工法	4.2 機械除鏽工法
防鏽處理	5.1 陰極防蝕工法 5.3 表面防水膜塗封工法 5.5 鋅漆被覆工法	5.2 腐蝕抑制劑工法 5.4 環氧樹脂被覆工法

表 4.3 不同劣化類型不同損壞程度下之建議維修工法對照表

劣化類型	損壞程度	維修工法
混凝土剝落	輕微	3.2 水泥砂漿修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法、5.2 腐蝕抑制劑工法
	中度	3.1 新鮮混凝土修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法、4.2 機械除鏽工法、5.2 腐蝕抑制劑工法
	嚴重	3.2 水泥砂漿修補工法、3.3 混凝土接著劑修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法、4.2 機械除鏽工法、5.2 腐蝕抑制劑工法
混凝土蜂窩	輕微	3.2 水泥砂漿修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法
	中度	3.2 水泥砂漿修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法、4.2 機械除鏽工法、5.2 腐蝕抑制劑工法
	嚴重	3.2 水泥砂漿修補工法、3.3 混凝土接著劑修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法、5.2 腐蝕抑制劑工法
混凝土裂縫	輕微	2.3 注射工法
	中度	2.3 注射工法、4.2 機械除鏽工法、5.4 環氧樹脂被覆工法
	嚴重	2.3 注射工法、4.1 人工除鏽工法、5.2 腐蝕抑制劑工法、5.3 表面防水膜塗封工法、5.4 環氧樹脂被覆工法
保護層厚度不足	輕微	3.2 水泥砂漿修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法、4.1 人工除鏽工法、5.2 腐蝕抑制劑工法
	中度	3.1 新鮮混凝土修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法、4.1 人工除鏽工法、5.3 表面防水膜塗封工法



劣化類型	損壞程度	維修工法
	嚴重	3.1 新鮮混凝土修補工法、3.2 水泥砂漿修補工法、3.4 環氧樹脂材料修補工法、4.1 人工除鏽工法、5.2 腐蝕抑制劑工法、5.3 表面防水膜塗封工法
混凝土表面劣化	輕微	1.1 酸洗工法
	中度	1.3 表面塗裝工法
	嚴重	1.1 酸洗工法、1.3 表面塗裝工法

但於實際工程標單中並未有統一之工法名稱，相同工作內容可能於不同標單中描述會有所差異，故於下節中將對此做進一步說明。

### 4.3 劣化混凝土維修費用分析

本研究榮幸有中華民國行政院公共工程委員會以及臺灣世曦工程顧問股份有限公司兩者之協助，提供採購金額達一千萬以上具有相當規模之橋梁維修有效案例共計 21 筆供研究分析。其中，選取一千萬以上金額之目的係因其相對其他維修工程較具規模，對於各施工項目之金額較具一定可靠度，且採購金額達一千萬以上者亦有維修項目之單價可供進一步分析，故本研究分別將單價分析表中與混凝土修補有關之工法做整理。

首先，先將所有標單中之工法名稱做初步分類，將混凝土維修部分單獨列出，並將工程單位所描述之名稱與張凱帆(2009)之研究成果做結合，把相關之工程內容列在同一編號內，經過專家訪談後，建議之整理結果如表 4.4。

表 4.4 工法分類

編號	名稱	工程單位命名
1.1	酸洗工法	打毛處理 / RC 混凝土面打毛 混凝土表面處理，整體拉毛 / 混凝土表面打毛
1.2	噴砂工法	防蝕塗裝，噴砂處理+熔射塗裝
1.3	表面塗裝工法	樹脂水泥防護塗佈 / 表面環氧樹脂砂漿修補 修補混凝土 / 劣質混凝土破損修復
2.2	壓力灌漿 修補工法	伸縮縫混凝土塊整修
2.3	注射工法	混凝土裂縫灌漿 / 裂縫注射工法 裂縫修補 / 結構裂縫 EPOXY 灌注修補工程 結構性裂縫修補 / 混凝土裂縫修補
3.1	新鮮混凝土 修補工法	混凝土修復，蜂窩及剝落修補，水刀鑿除 蜂窩修補 / 表面蜂窩修補
3.2	水泥砂漿 修補工法	輕微混凝土受損修復工法 端隔梁混凝土剝落修復 混凝土剝落鋼筋鏽蝕修復
3.3	混凝土接著劑 修補工法	劣質混凝土破損修復 混凝土剝落修補 / 新舊混凝土接著劑
3.4	環氧樹脂材料 修補工法	混凝土剝落修補 / 混凝土表層修復 護欄塊狀剝落鋼筋鏽蝕混凝土修補 鋼筋外露環氧樹脂輕質砂漿修復
4.1	人工除鏽工法	鋼筋除鏽處理

編號	名稱	工程單位命名
4.2	機械除鏽工法	欄杆高壓水刀除鏽 水刀除鏽及清洗表面處理
5.2	腐蝕抑制劑工法	混凝土防護塗佈 / 大梁防鏽劑塗刷 防鏽漆塗刷 / 鋼筋塗防鏽油漆
5.3	表面防水膜 塗封工法	油漆剝落修復
5.4	環氧樹脂 被覆工法	樹脂水泥防護塗佈 / 表面環氧樹脂塗佈 混凝土防護塗佈

將維修工法分類後，依照表 4.4 之分類結果，再將標單中每筆工法之單位維修費用與該項目之總費用做統計與分析，分別列出每項工法在具有相當規模之維修標單下之使用頻率、該項工法之平均值，以及該項工法在所有標單中之累計總費用，統計後之結果如表 4.5 所示。

表 4.5 工法費用分析

編號	工法名稱	統計次數	單位	平均值	累計總費用
1.1	酸洗工法	8	M <sup>2</sup>	240	493,528
1.2	噴砂工法	2	M <sup>2</sup>	1,316	39,216
1.3	表面塗裝工法	8	M <sup>2</sup>	418	150,746
2.2	壓力灌漿修補工法	1	M	2,013	100,645
2.3	注射工法	23	M	1,332	5,216,797
3.1	新鮮混凝土修補工法	5	M <sup>2</sup>	1,358	313,786
3.2	水泥砂漿修補工法	5	M <sup>2</sup>	2,615	1,086,715

編號	工法名稱	統計次數	單位	平均值	累計總費用
3.3	混凝土接著劑修補工法	11	M <sup>2</sup>	2,516	4,564,053
3.4	環氧樹脂材料修補工法	24	M <sup>2</sup>	3,120	13,709,447
4.1	人工除鏽工法	17	M <sup>2</sup>	345	937,258
4.2	機械除鏽工法	3	M <sup>2</sup>	427	1,280
5.2	腐蝕抑制劑工法	28	M <sup>2</sup>	423	1,663,330
5.3	表面防水膜塗封工法	14	M <sup>2</sup>	261	176,970
5.4	環氧樹脂被覆工法	16	M <sup>2</sup>	588	837,079

根據上述統計結果顯示，目前工程上使用次數最為頻繁者仍為環氧樹脂相關工法，而在累計總費用上亦可看出此種情形。為做進一步之分析，本研究結合表 4.4 工法分類建議之結果與表 4.5 之工法費用分析，將統計出在不同劣化類型不同損壞程度下之平均單位維修費用，所得到的數據結果如表 4.6 所示。

表 4.6 不同劣化類型不同損壞程度下之平均單位維修費用（單位：元/M<sup>2</sup>）

劣化類型	損壞程度		
	輕微損壞	中度損壞	嚴重損壞
混凝土剝落	4,901	6,585	9,100
混凝土蜂窩	5,735	6,585	8,674
混凝土裂縫	1,332	8,674	2,950
保護層厚度不足	5,247	6,341	8,122
混凝土表面劣化	240	418	658

表 4.6 可以將其應用在劣化類型已知的情況下做費用的分析，但若要推估數年後之維修費用，因無法預測是哪種劣化情況，故本研究綜合所有劣化類型的單位成本，依照損壞等級做加總，可以得到不同損壞程度下之總維修費用，如表 4.7 所示。至於構建完全損壞所需的置換成本，本研究參考陳平甫於 2005 年之研究成果得知置換所需之單位維修成本於當年度之費用為 29,514 元，使用消費者物價指數 (CPI) 換算成 2016 年之現值為 33,386 元。

表 4.7 不同損壞程度下之總維修費用 (單位：元/M<sup>2</sup>)

損壞程度	區間單位維修費用(元/M <sup>2</sup> )
無損壞	0
輕微損壞	17,455
中度損壞	22,276
嚴重損壞	29,504
完全損壞	置換成本 33,386

#### 4.4 劣化混凝土生命週期維修費用

為了要推估數年後所需之維修費用，需要繪製劣化混凝土生命週期維修成本曲線。本節接續 3.4 節之假設前提，經由專家訪談的討論結果，研擬一套維修面積之假設方式，假設公式如式 4.1 所示：

$$\text{維修總面積} = \text{全橋總表面積} \times \text{斷面損失參數} \quad (4.1)$$

$$\text{斷面損失參數} = \text{斷面損失率} / 35\% \quad (4.2)$$

在式 4.2 中之斷面損失率部分，本研究繼續採用陳厚亨(2010)之研究結果，分別將柱斷面損失率  $\eta=5\%$ 、 $10\%$ 、 $12\%$ 、 $35\%$  對應到損壞程度之輕微損壞、中度損

壞、嚴重損壞以及完全損壞的界線，再結合表 4.6 不同劣化類型不同損壞程度下之平均單位維修費用，分別假設不同損壞類型所占維修總面積的比例參數分別為：混凝土剝落占 $\alpha\%$ 、混凝土蜂窩占 $\beta\%$ 、混凝土裂縫占 $\gamma\%$ 、保護層厚度不足占 $\delta\%$ 、混凝土表面劣化占 $\omega\%$ ，其中 $\alpha+\beta+\gamma+\delta+\omega=100$ 。在前提為預測橋梁劣化的維修費用情況下，本研究擬將各比例參數平均分配，即 $\alpha=\beta=\gamma=\delta=\omega=20$ ，分別將不同劣化類型之單位維修費用乘上對應之維修總面積，可以得到不同劣化類型之維修費用，再將所有劣化類型做加總，便可以得到最後圖 4.1 之結果。

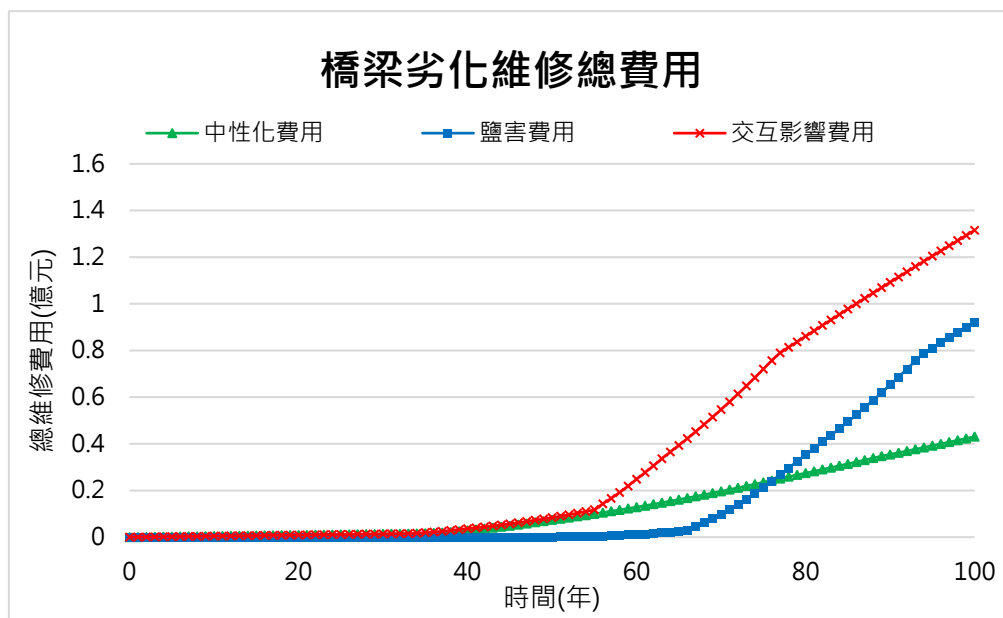


圖 4.1 橋梁劣化維修總費用圖

由上圖可以得知，在橋齡為 55 年左右，橋梁因劣化所需維修之總費用會因中性化與鹽害交互影響之關係而有金額遽增的現象，故宜在此之前做橋梁維修之措施。



## 4.5 劣化混凝土維修費用分析流程

結合第三章與第四章之結果，本研究研擬出一套劣化混凝土維修費用分析流程，用以估算臺灣混凝土橋梁單純受到鹽害及中性化兩種劣化情況下之維修費用估算模型，結果如圖 4.2 所示。藉由本流程之步驟推演結果，可以推算出混凝土橋梁維修費用歷時之情況。

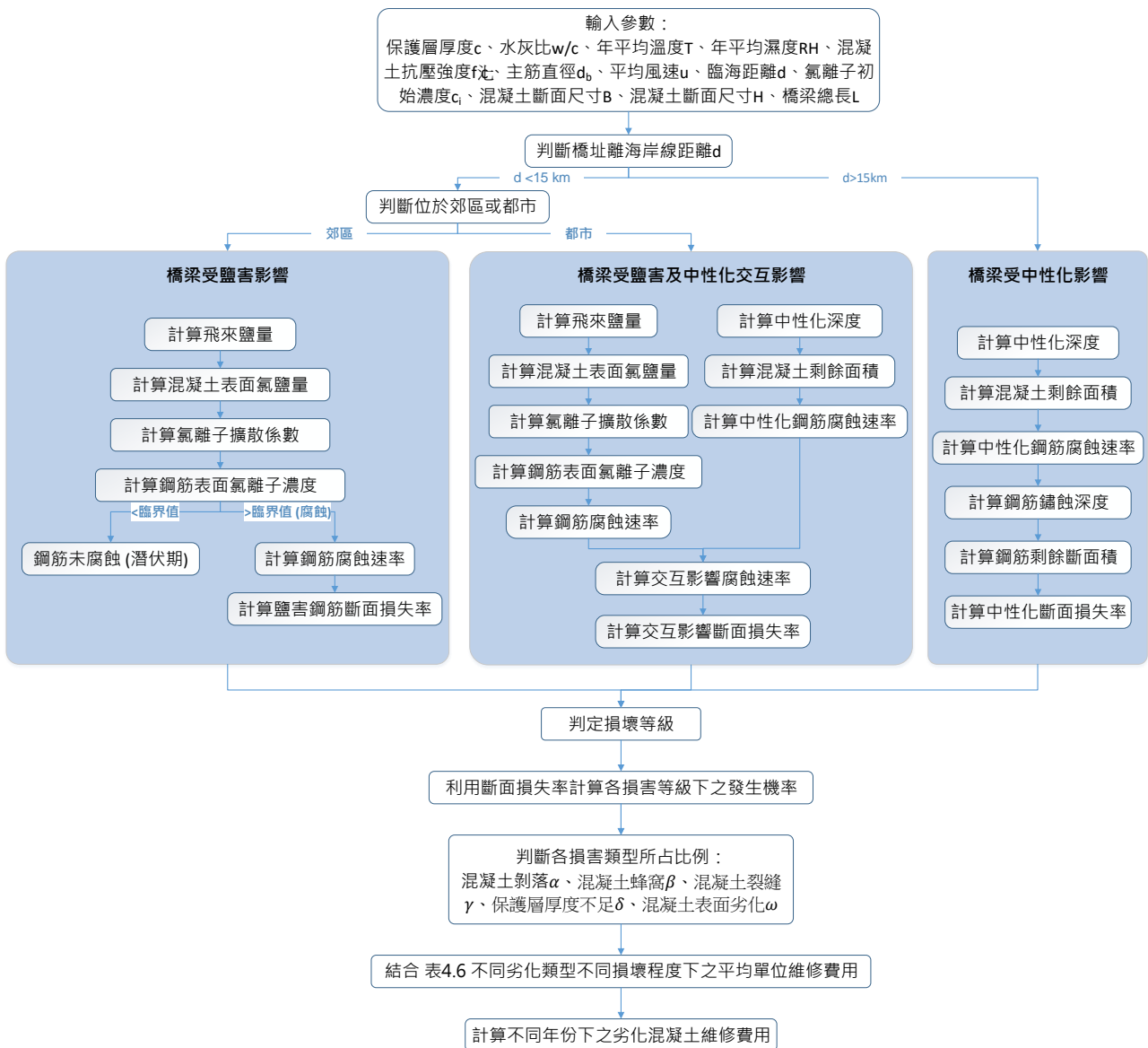


圖 4.2 劣化混凝土維修費用分析流程



於橋梁標單來說包含了許多面向，其中包含了維修費用、補強費用，另外亦有討論到伸縮縫及橋面板等等，但本研究以劣化維修費用為主要討論內容，至於其他費用將於下一節作探討。

## 4.6 其他相關費用分析

劣化維修費用為本研究主要探討之項目，其內容除考慮到材料費用外尚有考慮人力費用，但於標單中尚有機具使用費、交通維持費等項目未考量進去，而這些費用無法做準確預測，故本研究僅將此種相關費用做彙整，並給予其費用所需之範圍。

依照橋梁維修有效案例共計 21 筆標單資料，本研究將費用分為六大類如圖 4.3 所示，並分別統計各項金額所占之比例。



圖 4.3 橋梁維修標單費用之組成

於橋梁維修標單費用之組成中，本研究將機具費用裡高空作業車以及吊車單獨列出，因為此二者並非所有維修有關之工程都會用到，而其單價費用又相對於其他機具來講單價偏高，故將機具費用分成此二種機具以及其他機具三種，整理之金額如表 4.8 所示；管理費用則將其細分成安衛、品管、監造費、保險費、環





保清潔費以及稅，整理之金額如表 4.9 所示；剩下的劣化維修費用、伸縮縫費用、交通維持費用以及其他費用整理成表 4.10。

表 4.8 機具費用（單位：元）

	高空作業車	吊車	其他機具
平均費用	153,898	108,668	810,485
比例範圍	0~3.87%	0~1.89%	0~9.66%
平均比例	0.62%	0.39%	3.06%
機具總費用範圍	0.2%~11.42%	平均所占比例	4.07%

表 4.9 管理費用（單位：元）

	安衛	品管	監造	保險	環保清潔	稅
平均費用	397,216	401,349	2,869,200	96,338	257,135	992,768
比例範圍	0.29~9.02%	0~4.06%	0~36.77%	0~0.91%	0~7.67%	0~10.07%
平均比例	1.58%	1.70%	13.63%	0.51%	0.96%	4.70%
總管理費範圍	8.82%~49.42%		平均所占比例			23.08%

表 4.10 劣化維修費用、伸縮縫費用、交通維持費用以及其他費用 (單位：元)

	劣化維修費用	伸縮縫費用	交通維持費用	其他費用
平均費用	1,473,520	1,738,825	1,167,814	11,586,937
比例範圍	0.14%~42.45%	0%~45.40%	0.57%~24.74%	18.22%~74.49%
平均所占比例	5.88%	9.28%	5.01%	52.67%

經由表 4.8 至 4.10 之整理結果顯示，機具使用費於標單中所占的比例平均約落在 4.07%；交通維持費用於標單中所占的比例平均約落在 5.01%；劣化維修費用於標單中所占的比例平均約落在 5.88%；伸縮縫費用於標單中所占的比例平均約落在 9.28%；管理費用於標單中所占的比例平均約落在 23.08%；至於其他費用於標單中所占的比例平均約落在 52.67%。

本研究嘗試以所取得之標單做進一步分析，本欲將每筆標單分別帶入圖 4.2 劣化混凝土維修費用分析流程進而對其做進一步比較，但由於標單資料中所得到的資訊略顯不足，且由於標單內容皆以區域為範圍，在同一份標單中所包含的不只有一座橋梁，此外每座橋梁的使用年皆不相同，要分析出標單中之橋梁維修曲線會造成極大的誤差，故本節僅將探討這些標單之構成及可能存在之現象。

由於工程名稱不便提供，故將由編號來代替說明之。本研究所取得的標單主要為西部地區，臨海距離 0.5km~36.2km 不等，詳細資訊如表 4.11 所示。

表 4.11 標單基本資訊

標單編號	所在區域	臨海距離(km)	總費用(元)	預定開工	預定完工	工期(天)
1	雲林縣	17.3	28,639,922	102.1.1	102.12.31	365
2	台南市	23	20,000,000	103.12.3	104.9.1	274
3	新北市	19.7	12,046,000	103.2.20	104.3.31	406

標單編號	所在區域	臨海距離(km)	總費用(元)	預定開工	預定完工	工期(天)
4	新北市	1.8	11,000,000	103.2.28	104.2.28	366
5	台北市	20.4	20,000,000	103.4.22	104.3.31	345
7	新北市	13.2	45,219,667	103.1.27	104.3.31	430
8	新竹縣	7.7	15,178,204	103.11.25	104.9.30	311
9	新北市	14.3	45,000,000	104.3.23	104.12.31	284
10	新北市	19.3	8,000,000	103.4.1	104.3.31	366
11	彰化縣	23.8	23,938,940	104.3.5	104.10.30	240
13	台中縣	0.5	67,209,012	102.7.16	103.3.26	254
14	雲林縣	34.1	14,850,000	102.10.15	102.12.31	78
15	雲林縣	36.2	15,000,000	104.6.5	104.11.30	179
16	雲林縣	33.8	16,000,000	103.3.31	103.11.30	245
17	新北市	1.9	13,703,000	104.1.23	104.12.31	344
18	新北市	1.7	15,842,500	103.3.1	104.3.31	397
19	新北市	1.7	17,627,000	104.4.1	104.12.31	275

從表中將臨海距離分別與總費用以及工期繪圖，可以得到圖 4.4 及圖 4.5 的結果，分別繪出其趨勢線。雖然無法一一將每筆標單中之橋梁做分析，且尚有其他影響因素如中性化的存在，但仍可以看出臨海距離與維修費用約略成反向關係，此外臨海距離與維修所需的時間亦呈現反向關係，由此二者可以間接說明越接近海邊所需的維修成本越高以及所需的維修時間越長。

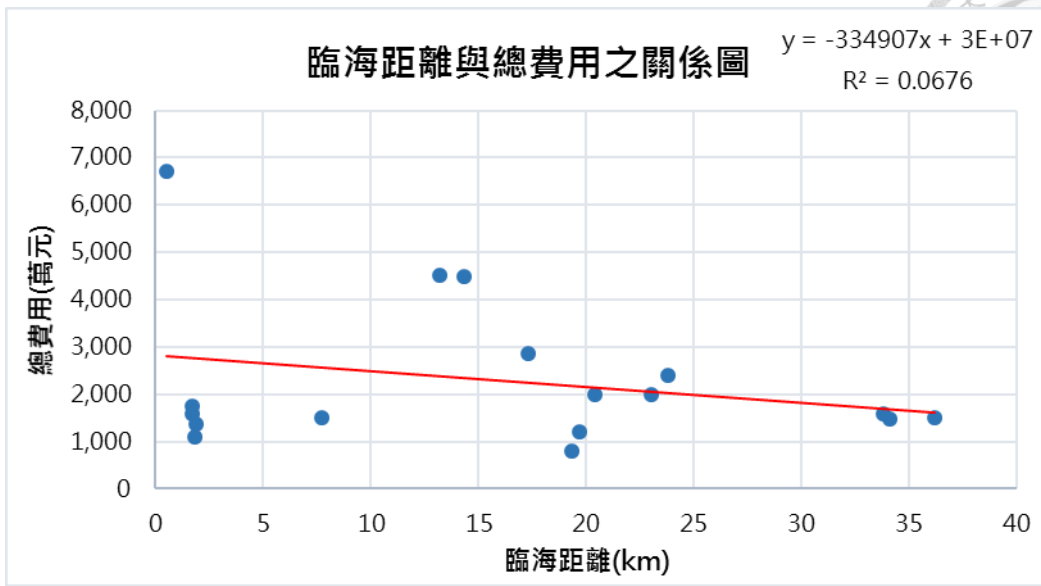


圖 4.4 臨海距離與總費用之關係圖

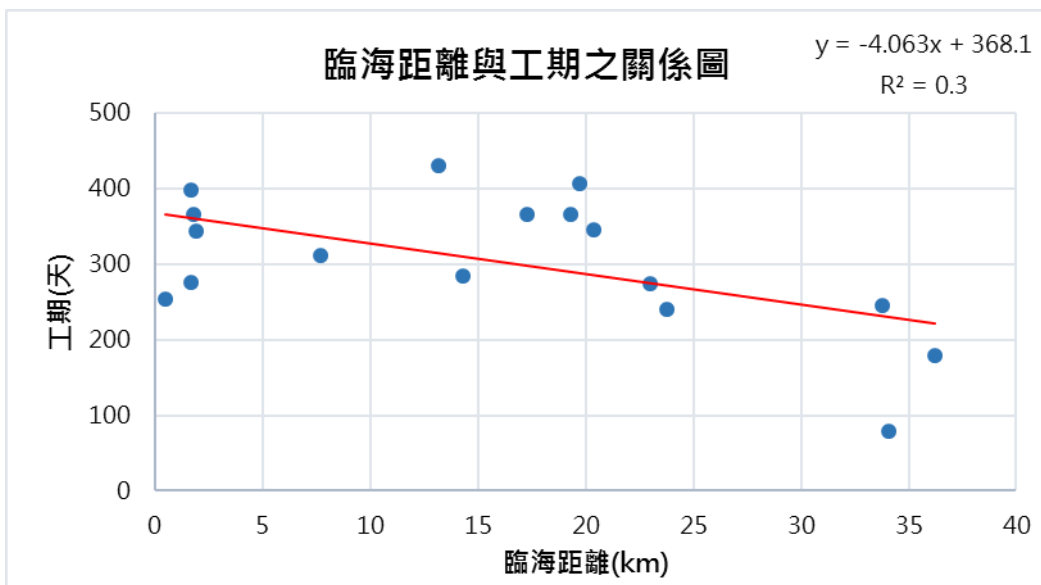


圖 4.5 臨海距離與工期之關係圖



## 4.7 小結

本章延續第三章之結果，結合過去所整理的混凝土維修方式，於第一節歸納整理不同劣化類型不同損壞程度下之建議維修方式，再根據專家訪談的結果，於第二節給出不同劣化類型不同損壞程度下建議的維修工法。

接著於第三節取得實際案例資料，將工程上之標單名稱與維修工法做結合，並把標單中每筆工法之維修費用做統計與分析，給予一建議之工法維修費用，並計算出不同劣化類型不同損壞程度下之平均單位維修費用。於第四節研擬一套維修面積之假設方式，結合第三章的結果，建立起橋梁劣化維修所需之費用隨時間之變化曲線，並將流程彙整於第五節。

第六節要探討的內容為標單之組成，本研究將其分成劣化維修費用、交通維持費、管理費用、機具費用、伸縮縫費用以及其他費用六大類，分析每一類型於標單中所占之比例。接著從標單資訊中得知臨海距離與維修費用以及維修所需工期成反向關係，間接證明距海遠近會對維修造成一定程度之影響。

## 第五章 案例分析



### 5.1 玉里大橋概況

本研究以一實際橋梁為案例作分析，所選定之橋梁為位於臺灣東部的玉里大橋，其相關資訊如下：

1. 橋梁 TM 二度分帶座標 X：282873 m Y：2580271 m
2. 橋梁使用年期 t：40 年
3. 橋長 L：575 m
4. 保護層厚度 c：40 mm
5. 年平均溫度 T：23.22 °C
6. 年平均濕度 RH：79.72 %
7. 混凝土抗壓強度  $f'_c$ ：210 kgf/cm<sup>2</sup>
8. 橋梁柱斷面原始寬度 B：2296.35 mm
9. 橋梁柱斷面原始深度 H：2296.35 mm
10. 鋼筋號數：#10
11. 鋼筋斷面積  $A_s$ ：37457.8 mm<sup>2</sup>



圖 5.1 玉里大橋

(圖片來源：<https://www.flickr.com/photos/milkcan620/3986459431/>)



## 5.2 案例分析

在計算維修費用時，參考 4.5 節劣化混凝土維修費用分析流程，先將參數找出，其中所缺少的條件為水灰比  $w/c$ 、平均風速  $u$ 、臨海距離  $d$  以及氯離子初始濃度  $c_i$  四者。由於有橋梁 TM 二度分帶之座標，本研究藉由座標資訊，結合網路上之地圖軟體 Google earth，估算橋梁臨海距離約為 10 km，如圖 5.2 所示；因為缺少水灰比的資訊，本研究參考中國國家標準(CNS)混凝土配比設計準則編號 12891 之規定，取混凝土抗壓強度  $f'_c$  為  $210 \text{ kgf/cm}^2$  時之水灰比值為 0.58 為參考，混凝土等級之相關規定如表 5.1 所示；至於平均風速則參考中央氣象局 1981 年至 2010 年之統計結果顯示，花蓮地區之年平均風速為  $2.5 \text{ m/s}$ ，如表 5.1 所示，氯離子初始濃度，採取初始濃度值為 0 做為假設。

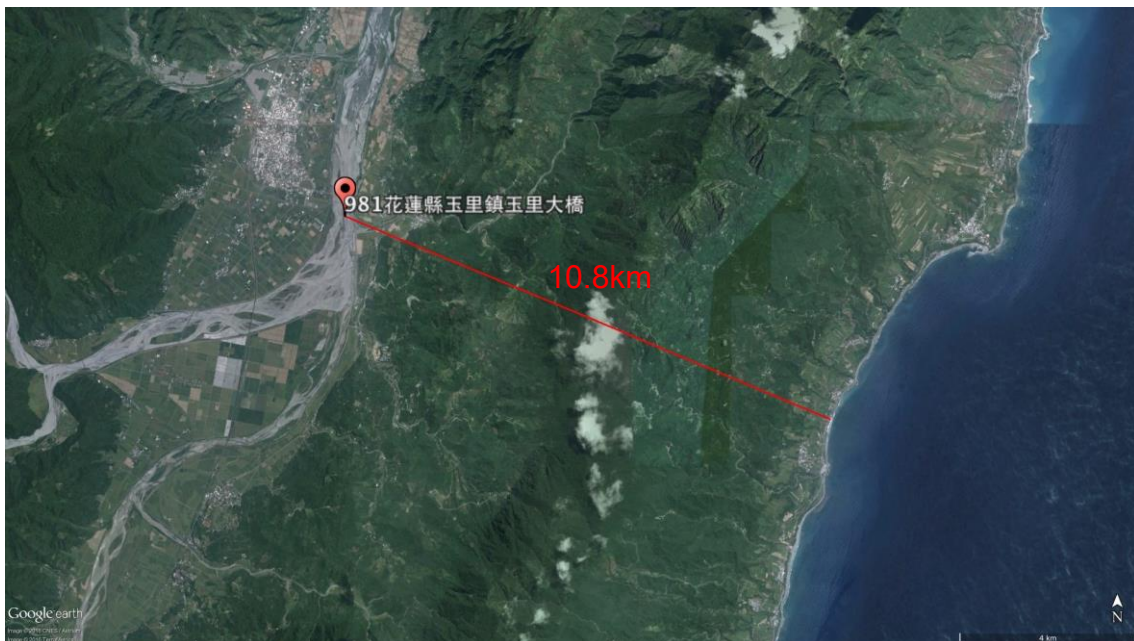


圖 5.2 玉里大橋之臨海距離

(圖片來源：Google earth)

表 5.1 花蓮地區年平均風速

地名	一月	二月	三月	四月	五月	六月	平均
花蓮	2.7	2.6	2.5	2.4	2.2	2.3	2.5
	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	統計時間
	2.5	2.3	2.4	2.7	2.7	2.8	1981-2010

(資料來源：交通部中央氣象局，網址：

[http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/monthlyMean/Taiwan\\_ws.htm](http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/monthlyMean/Taiwan_ws.htm))

表 5.2 最大許可水灰比之規定

抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	絕對水灰比	
	非輸氣混凝土	輸氣混凝土
f <sub>c</sub> = 175	0.67	0.54
f <sub>c</sub> = 210	0.58	0.46
f <sub>c</sub> = 245	0.51	0.40
f <sub>c</sub> = 280	0.44	0.35
f <sub>c</sub> = 315	0.38	註(1)
f <sub>c</sub> = 350	註(1)	註(1)

\*註(1)：超過 315 kgf/cm<sup>2</sup>(非輸氣混凝土)和 280kgf/cm<sup>2</sup>(輸氣混凝土)強度之混凝土配比應依照工地經驗或試拌試驗紀錄之配比方法建立。

(資料來源：中國國家標準(CNS)混凝土配比設計準則編號 12891)

將參數找齊以後，根據公路總局提供的施工前照片，如圖 5.3 所示，推估劣化類型主要以混凝土剝落( $\alpha$ )與混凝土裂縫( $\gamma$ )兩者為主，其中根據施工現場照片推測剝落程度為中度損壞，裂縫程度為輕微損壞，假設兩者所占維修面積比例分別為 $\alpha=30%$ ， $\beta=0%$ ， $\gamma=70%$ ， $\delta=0%$ ， $\omega=0%$ 。





圖 5.3 玉里大橋之施工照片(組圖)

(資料來源：交通部公路總局)

將上述所有資訊經由 4.5 節劣化混凝土維修費用分析流程步驟計算，可以得到圖 5.4 橋梁劣化總維修費用曲線隨時間變化的情形。

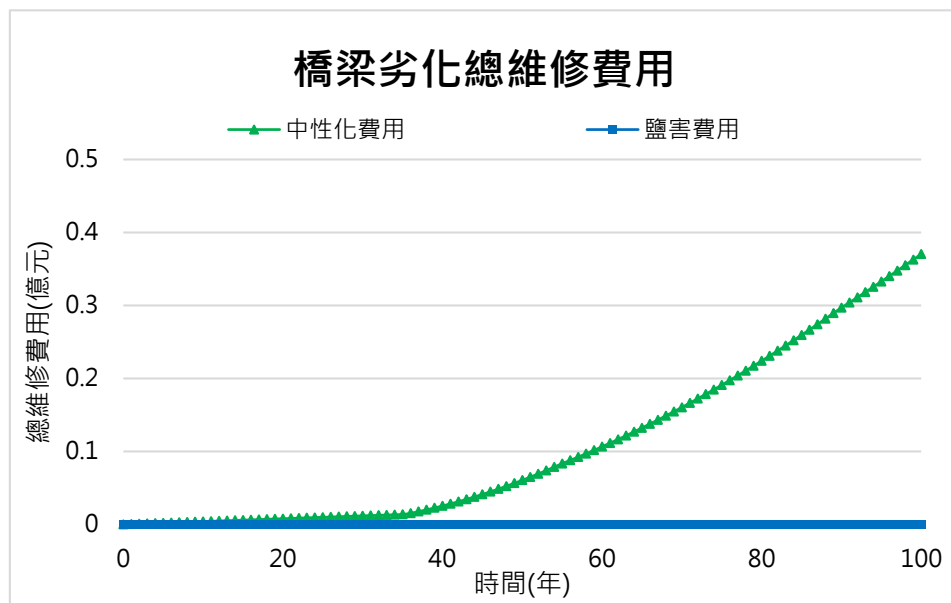



圖 5.4 玉里大橋橋梁劣化總維修費用圖



根據上圖顯示之結果，於橋齡 40 前時，混凝土劣化主要仍以中性化為主，而從曲線上可以得知 40 年之維修費用需要 2,870,930 元，若依照表 4.10 劣化維修費用平均比例 5.88%反推的結果，可以得到所需費用約為 43,103,560 元。當中很榮幸能得到實際維修標單來做進一步檢視，就所得到的 2011 年資料，標單總費用為 25,805,932 元，然而其單價分析表中與劣化有關的維修費用為 270,052 元，僅占總費用之 1%。

在維修費用上面，估算結果與實際所得數據有所差異，考慮其可能造成的原因有以下幾點：

1. 計算公式上之誤差：

在推導斷面損失情況時，往往需要使用經驗公式以及回歸所得到的結果，然而其回歸式中本身就有誤差的存在，如 3.1 節表 3.1 裸鋼筋腐蝕速率公式，其所採用的資料為港灣研究中心資料庫之裸鋼試片腐蝕實驗數據，並結合中央氣象局各地區之年平均溫度與濕度的資料，依照文獻中之公式進行回歸使得到適用於臺灣本土化之裸露鋼筋腐蝕速率，參考此公式做進一步計算，亦有可能造成誤差傳播的效果，導致最後結果的差異性。

2. 參數的誤差：

鑒於橋梁使用已達 40 年以上，當初興建橋梁之一般資訊並未完善保存，導致參數需要使用推估的方式進行，進而造成誤差的來源。

3. 實際維修情形的差異：

主管機關在發包工程的時候，往往會將整區所有道路以及橋梁維修工程併成同一筆工程標單作為發包依據，導致在計算時無法單純以一座橋梁的維修來做分析；此外，維修的原則往往是看見有缺陷就修，故所得到的標單資料並不是第一次修補的情形，而使得維修費用會比估算還來的低。

## 第六章 結論與建議




### 6.1 結論

本研究透過文獻回顧的方式，探討橋梁普遍劣化之原因以及現象，並將範圍縮限至鹽害及中性化混凝土橋梁，整合過去對於鋼筋混凝土受到鹽害以及中性化的研究，探討腐蝕機理，並了解整個反應過程。接著探討維修所需之工法，綜合過去所歸納的結果，分成混凝土結構物修復工法以及鋼筋除鏽兩大類，前者依照缺陷程度分成表面處理工法、裂縫修補工法以及表層缺陷修補工法三類。

藉由探討鹽害以及中性化的影響因子，參考過去鹽害及中性化交互影響之研究數據，並假設交互影響的模式，推測其可能的關係為鹽害所造成的影響乘上平方，再將中性化所造成的影響相加後，最後將其開根號，所得為交互影響的結果，建立橋梁斷面隨時間的損壞情形，

再者，結合過去所整理的混凝土維修方式，依照專家訪談的結果，給予不同劣化類型不同損壞程度下建議的維修工法，並將工程上之標單名稱與維修工法做結合，把標單中每筆工法之維修費用做統計與分析，給予一建議之工法維修費用，並計算出不同劣化類型不同損壞程度下之平均單位維修費用，研擬一套維修面積之假設方式，建立出橋梁劣化維修所需之費用隨時間變化之關係。最後整理出以下三點結論：

1. 本研究首次對於常見之鹽害與中性化劣化情形給予建議之交互影響模式，在了解劣化產生的原因後，建立橋梁斷面損失隨時間的情形，進而推算所需的維修費用，使其更能符合實際的情形。

- 
2. 本研究對於不同種類以及不同劣化程度下之橋梁分別給予建議之維修方式，並藉由實際所得到的工程標單做進一步分析與整理，將其與建議之維修方式做結合，彙整出各種維修方式下的建議維修金額。
  3. 本研究建立一套試算模型用以估算橋梁於使用年限期間之維修費用，並研擬一套分析流程，提供維修單位於工程發包前分析維修時所需之成本估算的一個參考依據。


## 6.2 建議與後續研究


1. 本研究所考慮的交互影響模式為斷面加成效果，但對於兩者同時作用造成的時間提前尚須做進一步探討。
2. 本研究很榮幸可以獲得實際標單做分析，若要更準確估算每項工法之維修金額，建議再取得更多的實際案例來做比較與進一步分析，最後可將其統計結果提供給業界做為工項費用的參考依據。
3. 本研究在計算實際費用時，因為獲得的資料有限，並未考慮不同損壞程度下相同維修工法之間的差異性，若要更準確估算維修費用，應再對維修工法於不同損壞程度下之維修費用做進一步分析。
4. 本研究所探討的為一般混凝土橋梁未受地震、颱風等自然災害，單純只受到正常使用、鹽害以及中性化影響，可進一步討論橋梁受到地震以及鹽害、中性化等複合作用下的情形，會更接近實際工程上遇到的情況。
5. 本研究所考量的費用僅以維修為討論內容，亦可對於橋梁構件補強做進一步探討。


## 參考文獻




1. Federal Highway Administration, Bridge Inspector's Training Manual/90, U.S. Department of Transportation, July 1991.
2. Participant Notebook, Federal Highway Administration, Safety Inspection of In-service Bridges, U.S. Department of Transportation, May 1994.
3. Weyers, R. E., 1998. Service Life Model for Concrete Structures in Chloride Laden Environments, Materials Journal, pp. 445-453, April 2006.
4. 中華民國交通部，交通技術標準規範公路類公路工程--公路養護規範，2012。(書籍)
5. 王傳輝，「台灣地區鋼筋混凝土橋中性化效應之耐久性評估」，碩士論文，國立臺北科技大學土木與防災研究所，臺北，2005。
6. 牛荻濤，混凝土結構耐久性與壽命預測，科學出版社，2003。(書籍)
7. 內政部建築研究所研究報告，既有 RC 建築物劣化及其修復之研究，內政部，2006。
8. 日本コンクリート学会、日本混凝土協會，「鉄筋コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム(委員報告書)」，1997。
9. 日本建築學會，「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)同解説」，丸善株式會社，1997。
10. 日本土木學會，「コンクリート構造物の信頼性設計に関する研究小委員会(336 委員会)成果報告書」，第三篇，耐久性信頼評價，2008。(書籍)

- 
11. 交通技術標準規範公路類公路工程，公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範，交通部，2014。(書籍)
  12. 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，交通部，2011。(書籍)
  13. 交通部運輸研究所，「橋梁目視檢測評估手冊(草案)」之研擬，交通部，2011。(書籍)
  14. 呂岳聰，「考慮複合劣化影響之橋梁耐震可靠度分析研究」，碩士論文，國立臺灣科技大學營建工程系，臺北，2013。
  15. 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，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，台北，2011。(書籍)
  16. 李有豐、林安彥，橋梁檢測評估與補強，全華科技圖書股份有限公司，新北市，2011。(書籍)
  17. 何明錦、蔡益超、宋裕祺，鋼筋混凝土建築物耐震評估手冊—視窗化輔助分析系統 SERCB Win2012，內政部建築研究所，2012。
  18. 何寬鈞，「簡支型橋梁墩柱受地震破壞之維修費用推估」，碩士論文，國立臺灣大學，臺北，2014。
  19. 呂岳聰，「考慮複合劣化影響之橋樑耐震可靠度分析研究」，碩士論文，國立臺灣科技大學營建工程系，臺北，2013。
  20. 林文雄，「橋梁管理維護機制建立探討」，碩士論文，國立中興大學土木工程學系研究所，台中，2008。

- 
21. 岸谷孝一，「コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究」，日本建築學會論文報告集，第 283 號，第 11-15 頁，1979。（期刊）
  22. 胡弘昌，「碳化及鹽害環境下混凝土性質及腐蝕行為之研究」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系，基隆，2005。
  23. 陳乃菱，「鹽害及中性化同時作用下鋼筋腐蝕機理之研究」，碩士論文，私立中原大學建築研究所，桃園，1995。
  24. 陳克劼，「類神經網路於台灣省道橋梁橋梁檢測資料分析及劣化預測之研究」，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，臺北，2007。
  25. 陳育聖，「北台灣沿海地區氯鹽環境與混凝土耐久性質之研究」，博士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，台北，2011。
  26. 陳進喜，「老舊鋼筋混凝土校舍破壞行為機制分析與比較」，碩士論文，私立中華大學，新竹，2008。
  27. 陳尚德，「鋼筋混凝土橋梁鋼筋腐蝕危害地圖建立與應用」，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，臺北，2015。
  28. 陳彥廷，「混凝土中性化對鋼筋腐蝕行為之影響」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，台北，2010。
  29. 陳厚亨，「含腐蝕橫向鋼筋之鋼筋混凝土梁耐震行為」，碩士論文，國立臺灣科技大學營建工程系，台北，2011。
  30. 陳屏甫，「國道預力混凝土橋與鋼橋生命週期成本評估個案之研究」，碩士論文，國立中央大學營建管理研究所，桃園，2005。

- 
31. 陳威廷，「生命週期導向橋梁評估系統之研究」，碩士論文，國立中央大學營建管理研究所，桃園，2004。
32. 連夷左，「橋梁維護管理生命週期成本評估模式之研究」，碩士論文，國立中央大學營建管理研究所，桃園，2003。
33. 涂豐鈞，「考慮劣化與震損影響之 RC 校舍耐震能力評估研究」，碩士學位論文，國立臺灣科技大學，臺北，2012。
34. 徐耀賜，公路橋梁之養護與維修，國彰出版社，1996。(書籍)
35. 莊育泰，「劣化 RC 牆生命週期耐震能力研究」，碩士論文，國立臺灣科技大學，臺北，2012。
36. 章崇業，「理論研究氯離子擴散係數」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系，基隆，2005。
37. 許家銓，「地震防災管理系統建置之研究」，博士論文，國立台北科技大學工程科技研究所，臺北，2012。
38. 鳥取誠一、宮川豐章，「中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測」，土木學會論文集，第 64 卷，第 767 期，第 35-46 頁，2004。
39. 張凱帆，「橋梁維修標準工項之初步研究」，碩士論文，國立中央大學營建管理研究所，桃園，2009。
40. 張晉璋，「台灣地區鋼筋混凝土橋梁構件劣化模型之建立」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園，2004。
41. 張荻薇、王炤烈、宋裕祺，橋梁劣化與災害損傷之現況及原因探討，橋梁安全維護管理研討會論文集，第 21-94 頁，1999。(書籍)



- 
42. 曾志煌、許書耕、巫柏蕙、姚乃嘉、陳明正、葉啟章、蔡欣局、廖先格，橋梁目視檢測評估手冊，交通部運輸研究所，臺北，2011。(書籍)
43. 黃志評，「省、縣道橋梁檢測及評鑑制度之探討—以交通部公路總局為例」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園，2008。
44. 黃紹翔，「臨海養護環境對於高爐混凝土與一般混凝土性質影響研究」，博士論文，國立中興大學土木工程學系，台中，2012。
45. 葉祥海，既有 RC 建築物劣化及其修復之研究，內政部建築研究所，2006。
46. 詹穎雯，國外混凝土耐久性相關規範之概述，臺灣營建研究院叢書-混凝土結構耐久性技術，第 29-53 頁，2000。(書籍)
48. 楊禮澤，「氯離子環境下混凝土橋梁的壽命預測與面板的劣化」，博士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系，基隆，2012。
49. 蔣偉寧，橋梁目視檢測簡介，橋梁檢測評估與維修人員訓練講習講義，交通部運輸研究，2002。
50. 蘇進國，「模糊遺傳演算法在橋梁耐震性能設計之應用與耐震維修補強生命週期成本最小化之研究」，博士論文，國立台北科技大學工程科技研究所，臺北，2008。
51. 蘇暉傑，「既有橋梁損壞相關影響因素之研究—以台中縣為例」，碩士論文，私立逢甲大學交通工程與管理學系碩士班，台中，2003。
52. 龔永健，「受震後新築混凝土現地檢測技術評估與案例探討」，碩士論文，私立中原大學土木工程學系，桃園，2007。