

95-77-7214

MOTC-IOT-94-H1DA001-2

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究



交通部運輸研究所

中華民國 95 年 4 月

95-77-7214

MOTC-IOT-94-H1DA001-2

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究

著 者：張道光、陳桂清、饒正、柯正龍

交通部運輸研究所

中華民國 95 年 4 月

95

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究

交通部運輸研究所

GPN : 1009500949

定價 100 元

國家圖書館出版品預行編目資料

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究 / 張道光等著.

- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民95
面 ; 公分

ISBN 986-00-4956-4(平裝)

1. 鋼筋混凝土 2. 港埠工程

440.328

95006970

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究

著者：張道光、陳桂清、饒正、柯正龍

出版機關：交通部運輸研究所

地址：臺北市敦化北路 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 95 年 4 月

印刷者：大興國際科技有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 130 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定價：100 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書坊臺視總店：臺北市八德路 3 段 10 號 B1•電話：(02)25781515

五南文化廣場：臺中市中山路 2 號 B1•電話：(04)22260330

GPN：1009500949

ISBN：986-00-4956-4 (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份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：港灣鋼筋混凝土耐久性之研究			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 986-00-4956-4(平裝)	政府出版品統一編號 1009500949	運輸研究所出版品編號 95-77-7214	計畫編號 94-H1DA001-2
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：張道光 研究人員：陳桂清、饒 正、柯正龍 聯絡電話：04-26587119 傳真號碼：04-265713297 & 04-26564419			研究期間 自 94 年 01 月 至 94 年 12 月
關鍵詞：高性能混凝土、耐久性、鹼質與粒料反應、鋼筋腐蝕			
摘要： 本研究主要分為三個部份來執行；第一部份為高性能混凝土的耐久性探討。第二部份為以添加爐石於海砂混凝土中，探討混凝土之基本性能變化及其適用性，並評估對鋼筋腐蝕之影響性，以提供爾後使用海砂混凝土之參考。第三部份為對臺灣花東地區部份河川之混凝土結構物進行調查與試驗，以了解可能發生「鹼質與粒料反應」之潛勢。 研究結果顯示；(1)各項配比的高性能混凝土(HPC)的耐久性都比一般混凝土(OPC)佳；(2)添加爐石粉於普通混凝土及海砂混拌之混凝土，對混凝土品質與耐久性均有明顯提升；另外，花蓮、臺東地區部份混凝土構造物，諸如防波堤、消波塊等有疑似「鹼質與粒料反應」之現象，已取樣實驗驗證中。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
95 年 4 月	92	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定價價購。
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: Durability of Port Reinforced Concrete Structures			
ISBN(OR ISSN) ISBN 986-00-4956-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009500949	IOT SERIAL NUMBER 95-77-7214	PROJECT NUMBER 94-H1DA001-2
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chang, Tao-Kuang PROJECT STAFF: Chen, Kuei-Ching, Rau-cheng, Ko, Jeng-Long PHONE :04-26587119 FAX: 04-26564419			PROJECT PERIOD FROM January 2005 TO December 2005
KEY WORDS: High performance concrete, Durability, Alkali-silica reaction, Re-bar corrosion			
ABSTRACT: The study was carried out as three parts. The first part focuses on “The durability of High Performance Concrete”; the second part is on “Pozzolanic material of slag mixed with cementitious concrete”; the third part is on “Field investigation and possibility for Alkali-Aggregate reaction on concrete structures at east coast of the island.” The results in the first part showed that High Performance Concrete had better durability than Ordinary Concrete. Moreover, the results in second part indicated that pozzolanic material of slag mixed with cementitious concrete could significantly improve its quality and durability. As to the field investigation of concrete structures along eastern coast of Taiwan, there were some obvious symptoms found, which indicates that embankments, dolphins and landsite structures were being attacked by aggregate silica reaction.			
DATE OF PUBLICATION April 2005	NUMBER OF PAGES 92	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.			

目 錄

中文摘要	-----
英文摘要	-----
表目錄	-----
圖目錄	-----
照片目錄	-----
第一章 前言	----- 1-1
1.1 研究動機	----- 1-1
1.2 研究目的	----- 1-2
第二章 文獻回顧	----- 2-1
2.1 高性能混凝土	----- 2-1
2.1.1 定義	----- 2-1
2.1.2 高性能混凝土之特性	----- 2-2
2.1.3 高性能混凝土耐久性設計策略	----- 2-4
2.2 海砂性質與影響	----- 2-10
2.2.1 對鋼筋腐蝕之影響	----- 2-10
2.2.2 對混凝土之影響	----- 2-12
2.3 添加波索蘭材料對混凝土的影響	----- 2-14
2.4 使用海砂/海水混凝土抑制硫酸鹽侵蝕的策略	----- 2-17
第三章 研究方法與步驟	----- 3-1
3.1 高性能混凝土之耐久性研究	----- 3-1

3.1.1 試驗規劃	3-1
3.1.2 研究背景	3-3
3.1.3 試驗方法與步驟	3-6
3.2 摻用爐石對添加海砂混拌混凝土之耐久性影響	3-18
3.2.1 試驗規劃	3-18
3.2.2 研究背景	3-18
3.2.3 試驗方法與設備	3-22
3.3 混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查與潛勢	3-24
3.3.1 目視調查	3-24
3.3.2 現場非破壞性檢測	3-24
3.3.3 混凝土鑽心取樣試驗	3-25
3.3.4 水泥砂漿棒膨脹試驗法	3-26
第四章 試驗結果與討論	4-1
4.1 高性能混凝土耐久性研究	4-1
4.2 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響	4-13
4.3 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析	4-22
4.3.1 目視調查	4-22
4.3.2 非破壞性檢測	4-25
4.3.3 鑽心試體試驗	4-26
4.3.4 ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹試驗法	4-29
第五章 結論	5-1

參考文獻	6-1
------	-----

表目錄

表 2.1	高性能混凝土與其他混凝土之比較	2-5
表 2.2	ACI 318-95 混凝土耐久性設計要求	2-8
表 2.3	鋼筋混凝土防蝕之最大氯離子含量	2-9
表 2.4	海砂或海水中之成分對混凝土性質的影響	2-13
表 2.5	混凝土添加波索蘭材料之特性	2-16
表 2.6	使用海砂/海水混凝土抑制硫酸鹽侵蝕的策略	2-18
表 3.1	試體之相關試驗內容	3-2
表 3.2	混凝土試體配比設計數據	3-4
表 3.3	圓柱試體長度直徑比	3-8
表 3.4	超音波脈波速度與混凝土品質之關係	3-9
表 3.5	混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕活性之關係	3-9
表 3.6	ASTM C-876 鋼筋電位值與腐蝕機率之關係	3-12
表 3.7	配比 A(水灰比 0.45 , 河砂)	3-18
表 3.8	配比 A(水灰比 0.45 , 海砂)	3-18
表 3.9	配比 B(水灰比 0.60 , 河砂)	3-20
表 3.10	配比 B(水灰比 0.60 , 海砂)	3-20
表 3.11	粒料之基本物理性質	3-21
表 3.12	各類試體編號說明	3-21
表 4.1	各試驗牆之中性化深度	4-1
表 4.2	鑽心與灌製試體之超音波脈波速度(km/sec)	4-2

表 4.3 試驗牆現地超音波量測(km/sec)-----	4-5
表 4.4 鑽心試體之電阻係數-----	4-9
表 4.5 鑽心與灌製試體之抗壓強度(kg/cm ²)-----	4-10
表 4.6 試體抗壓強度試驗結果 (kg/cm ²) -----	4-14
表 4.7 試體超音波脈波速度試驗結果 (km/sec) -----	4-18
表 4.8 水灰比 0.45 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係 (mV) -----	4-21
表 4.9 水灰比 0.60 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係 (mV) -----	4-22
表 4.10 現場試錘試驗與中性化深度量測之結果 -----	4-25

圖目錄

圖 2.1 降低水膠比增進鍵結力 -----	2-7
圖 2.2 水泥漿量對超音波速之影響 -----	2-7
圖 2.3 氯離子對鋼筋腐蝕之影響 -----	2-11
圖 2.4 氯離子侵蝕鋼筋之機理與過程 -----	2-11
圖 3.1 試驗流程 -----	3-2
圖 3.2 單座試驗牆之設計詳圖 -----	3-4
圖 3.3 試驗牆埋設之監視系統詳圖 -----	3-5
圖 3.4 試驗牆曝露位置配置圖 -----	3-6
圖 3.5 四探針式之電阻量測示意圖 -----	3-11
圖 3.6 Anode-Ladder-System 之原理 -----	3-16
圖 3.7 Anode-Ladder-System 之排置詳圖 -----	3-17
圖 3.8 試驗流程 -----	3-19
圖 3.9 鋼筋腐蝕電位值量測示意圖 -----	3-23
圖 4.1 HPC-4000psi (Air)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec) -----	4-6
圖 4.2 HPC-4000psi(Sea)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec) -----	4-6
圖 4.3 OPC-4000psi(Sea)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec) -----	4-7
圖 4.4 OPC-4000psi(Air)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec) -----	4-7
圖 4.5 HPC-5000psi(Sea)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec) -----	4-8
圖 4.6 HPC-3000psi(Sea)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec) -----	4-8
圖 4.7 混凝土之強度發展-----	4-9

圖 4.8 腐蝕電位與齡期之關係 -----	4-11
圖 4.9 Ladder System 各陽極對陰之電位與齡期關係 -----	4-12
圖 4.10 配比 A 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢 -----	4-15
圖 4.11 配比 A 試體(以海砂混拌)之抗壓強度發展趨勢 -----	4-15
圖 4.12 配比 B 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢-----	4-16
圖 4.13 配比 B 試體(以海砂混拌)之抗壓強度發展趨勢-----	4-16
圖 4.14 配比 A 試體之超音波脈波速度與齡期的關係 -----	4-17
圖 4.15 配比 B 試體之超音波脈波速度與齡期的關係-----	4-18
圖 4.16 配比 A 試體之電阻係數與養生齡期的關係 -----	4-19
圖 4.17 配比 B 試體之電阻係數與養生齡期的關係-----	4-20
圖 4.18 石梯港消波塊 X 光繞射分析試驗結果 -----	4-26
圖 4.19 臺東海濱公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果 -----	4-27
圖 4.20 臺東大武公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果 -----	4-27

照片目錄

照片 3.1 混凝土試驗牆鑽心試驗	3-10
照片 3.2 現地混凝土試驗牆超音波量測	3-10
照片 3.3 混凝土電阻係數量測儀	3-11
照片 3.4 MnO_2 參考電極	3-14
照片 3.5 AgCl 參考電極	3-14
照片 3.6 Anode-Ladder-System 腐蝕監視系統	3-15
照片 3.7 可攜式 CANIN 量測儀	3-15
照片 3.8 鋼筋腐蝕電位量測之試體灌製前之情形	3-23
照片 3.9 鋼筋腐蝕電位值量測之情形	3-24
照片 4.1 中性化較為嚴重的 OPC 混凝土試體	4-2
照片 4.2 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 1	4-23
照片 4.3 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 2	4-23
照片 4.4 花蓮港航道消波塊地圖狀裂縫	4-23
照片 4.5 石梯港消波塊地圖狀裂縫	4-23
照片 4.6 新港漁港消波塊地圖狀裂縫	4-23
照片 4.7 富崗漁港堤防裂損現況	4-23
照片 4.8 臺東海濱公園消波塊地圖狀裂縫 1	4-24
照片 4.9 臺東海濱公園消波塊地圖狀裂縫 2	4-24
照片 4.10 臺東大武公園消波塊地圖狀裂縫	4-24
照片 4.11 跨越之臺九線鐵路橋平行主鋼筋方向裂縫	4-24

照片 4.12 臺九線公路橋樑橋墩裂縫 1-----	4-24
照片 4.13 臺九線公路橋樑橋墩裂縫 2-----	4-24
照片 4.14 鑽心試體中性化程度量測情形-----	4-25
照片 4.15 石梯港消波塊 SEM 照片 -----	4-28
照片 4.16 臺東海濱公園消波塊 SEM 照片 -----	4-28

第一章 前言

1.1 研究動機

港灣鋼筋混凝土構造物，長年受到海洋惡劣環境的侵蝕，易使有害物質氯離子侵入混凝土結構體內，進而破壞鋼筋表面的鈍態保護膜，使鋼筋發生腐蝕，導致結構物之損壞而減少其使用年限。而高性能混凝土兼具安全性、耐久性、工作性、經濟性及環保性等優越的工程材料特性，若應用於港灣工程則可確保結構物在惡劣環境下有較長之耐久性。因而為了解高性能混凝土之耐久性，本研究將持續對本中心於 88 年灌製之高性能混凝土試驗牆進行監測，以了解此種新材料所製作之結構體在港灣環境下所具有之耐久性之特性。

其次由於砂石的短缺，若能將海砂應用於混凝土中，將可彌補砂石短缺之危機。雖然海砂中 Cl^- 對鋼筋混凝土有腐蝕鋼筋及其他不良之影響，但是基於陸上砂石來源之匱乏與耗盡，以及海砂資源之豐富與利用，從另一角度思考，或許可從其它方法，諸如添加波索蘭材料、化學摻料（鋼筋腐蝕抑制劑）、電化學防蝕技術等，來改善海砂混凝土之耐久性與品質。本研究乃藉由添加波索蘭材料-爐石，探討海砂混凝土之各項新拌與硬固性質及其耐久性能，內部鋼筋之腐蝕狀況，並持續評估應用於 R.C. 結構物之可行性。

又從以前之報告顯示臺灣東部之粒料有潛在發生「鹼質與粒料之反應」，且港灣環境具有高濕與高鹼質之特性，加上潮汐與風等外力及乾濕循環的作用，使的混凝土構造物之耐久性面臨嚴重之考驗。本所港研中心數年前即對國內各大商港進行混凝土構造物之鹼質與粒料反應之調查，本研究將繼續過去數港之分析模式對臺東地區之混凝土構造物及其粒料來源進行調查與試驗，提供相關單位參酌，期望能協助港灣管理單位瞭解此一反應之潛勢與危害，進而在維修現有或規劃新建混凝土構造物時有所依據。

1.2 研究目的

本研究之主要目的；1.高性能混凝土的耐久性探討。2.以添加爐石於海砂混凝土中，探討混凝土之基本性能變化及其適用性，並評估對鋼筋腐蝕之影響性，以提供爾後使用海砂混凝土之參考。3.對臺灣花東地區部份河川之混凝土結構物進行調查與試驗，以了解可能發生「鹼質與粒料反應」之潛勢。

第二章 文獻回顧

2.1 高性能混凝土

2.1.1 定義

高性能混凝土名稱為世界各國所共用，並為最重要之研究領域與課題，惟其名稱之定義在世界各地均稍有不同，惟一相似者，即各國之定義均著重耐久性。在歐美國家，以強調高強度與高坍度，並達到耐久使用之目標來發展高性能混凝土。在日本，經過多年之整合，終於達成將高性能混凝土區分為三類，即(1)高強度高性能混凝土(2)高流動高性能混凝土與(3)特殊功能高性能混凝土。其中之第(2)項即自填充高性能混凝土，不須搗實即可達到均勻填充之混凝土，第(3)項即包括耐磨低熱、早強等特殊功能之混凝土⁽¹⁾。

在國內國科會對高性能混凝土之工作計劃要求為具高工作性、高流動性(坍度 > 250 mm)之高強度混凝土($f_c' > 8000$ psi)，並且在混凝土澆置 45 分鐘後仍具坍度 235 mm 之性質。然而，侷限於設計規範之強度限制，國內工程建設仍偏重使用一般強度(中低強度)之混凝土，為達從普及化觀點來全面提升國內混凝土材料品質與施工技術，國科會 HPC 研究群於民國 85 年 12 月 8 日開會討論，提出研發推動本土化中強度高流動高性能混凝土之決議。其規劃 HPC 之特性為 $f_c' = 4000 \sim 5000$ psi，並具有以下之性質，水泥應有每公斤 15 psi 強度以上之效益，水泥用量低於 300 kg/cm^2 ，初期坍度為 220 ± 20 mm，坍流度為 500 ± 100 mm，45 分鐘後坍度應大於 200 mm，坍流度在 400 mm 以上，水灰比 0.42，波索蘭材料 30% 為原則之免搗實混凝土⁽¹⁾。

另外中華民國結構工程學會之『高性能混凝土特別條款⁽²⁾』，定義高性能混凝土係混凝土經過品質保證技術，確保品質一致性及穩定性，滿足營建工程優良品質之需求。其特別條款乃依據美國混凝土學會 ACI 318 -95 「結構混凝土」精神及內涵所補充，在使混凝土由規劃

設計及配比時能考量有耐久性及能確保最終結構體混凝土品質。目的在確保 HPC 澆鑄之結構物品質，免除蜂窩，泌水及析離等問題，使達到「安全性、耐久性、經濟性、工作性及生態性」之準則。

2.1.2 高性能混凝土之特性

基本上，HPC 乃是由水泥、粗細骨材及摻料所組成之混凝土，但在材料選用、配比設計與品質管制上，較傳統混凝土嚴謹，如表 2.1⁽³⁾ 為高性能混凝土與其他混凝土之比較。

高性能混凝土之使用為確保混凝土之安全性、工作性及經濟性，並妥善應用飛灰及爐石等資源，以達到確保生態性，其特性為：⁽⁴⁾

1. 安全性

安全性並非無盡的超高強度或特別需求之標準，而是強調達到設計者目標要求的強度性質。通常可控制減水劑及強塑劑等多種方式，在不改變水泥膠結材料的用量下，可藉由降低水膠比(W/B)(指水與水泥加上卜作嵐材料總重和之比值)，提昇其安全性。且添加飛灰等卜作嵐材料，可改善水泥水化產物中「氫氧化鈣」的生產量，進而改善骨材與水泥漿之弱界面有利於長期強度之提昇，然而過度添加則會影響其早期強度。養護條件對強度之影響性甚大應特別注意。使用飛灰及爐石必須有該批材料品質穩定性之測試資料以驗證其安全性。

2. 耐久性

臺灣地區為海洋環境及潮濕區域，混凝土及結構體受鹽害及體積穩定性等耐久性的問題必須特別加以重視，以減少發生劣化之機率。因耐久性問題直接與水的流動有關，所以必須限制拌合水量在 170 kg/m³ 以下，或降低水膠比(W/B)，使其孔隙減少可阻礙水的移動。添卜作嵐材料及降低用水量常係控制降低孔隙的最佳策略。添加卜作嵐調整適度水膠比(W/B)，可消耗其中所含易溶性物質，提昇施工後組成材料在混凝土結構體內分佈之均勻性及穩定性，可增大結構混凝土之電阻(20kΩ-cm)，降低氯離子之滲透電量(<2000 庫倫)，因此可提高水密

性，對耐久性有當大的貢獻。在混凝土中添卜作嵐材料必須事先確認對耐久性的要求標準

3.工作性

以往常將美國混凝土學會(ACI)要求的最低坍度標準當作設計坍度，導致混凝土施工困難，因而造成工地的施工人員擅自加水，以滿足泵送性及施工性，而促成混凝土品質低落之現象。高性能混凝土所具良好的工作性質對現場施工者而言是相當重要的，尤其對結構體之連續性及減少發生蜂窩和泌水現象之機率，確保均勻性相當有利。飛灰摻入混凝土中，其正面效應是因中空圓球形顆粒之軸承效用可改善工作性。然而應注意飛灰燒失量及破裂之同心飛灰玻璃球會造成大量的吸附拌合水，而使其需求量大為提昇，以及漿體稠度增大等負面效應，故飛灰在使用前應事先以評估其可能對工作性之影響，並加以調整出最佳之填加量。。

4.經濟性

考慮高性能混凝土之經濟性，不能一昧地減少水泥用量，而係以提高「水泥強度效益」為主要之依據，水泥強度效益至少應達到每公斤水泥有 15psi 之抗壓強度之標準。且為確保其品質，在相同設計下，水膠比(W/B)必須確保不變，且需降低用水量。如以卜作嵐材料可直接取代部份水泥或部份砂，然而取代不當或過量使用將會造成早期強度嚴重不足之現象。另外考慮骨材顆粒堆積更為密實不但可減少骨材間的空隙，且可減少水泥用量能達到經濟性的訴求。

5.生態性

混凝土的應用考慮生態性的觀念在過去並不受重視，然而自從 1990 年起保護地球自然資源的觀念下，混凝土設計必須達到生態保護的目標，其最簡單的方法是必須減少使用可能會在製程中排放大量二氧化碳而造成嚴重溫室效應的水泥及鋼鐵材料的使用量。為增加混凝土構造物的使用壽命，在混凝土的組成材料中摻加工業固態廢料，應

用工業再生材料及應用本土化材料等為可行之道；例如使用卜作嵐材料如飛灰等可獲得緻密性之結構體可應用造紙廢料之木質素所製造之減水劑、強塑劑及輸氣劑可增加混凝土之流動性。直接可減少用水量，並可減少耗能的水泥材料之用量，均是達到確保生態性之方法。大量使用飛灰及爐石等卜作嵐材料可解決環保問題，節省自然資源，確實達到資源保護之功效。

2.1.3 高性能混凝土耐久性設計策略^[5]

混凝土的耐久性對結構體安全性是相當重要的，雖然有相當多的研究可考，但混凝土在實際配比及施工上，仍然無法達到理論上耐久性的領域，以致混凝土問題叢生，其主因是沒有將既有之耐久性知識，融入混凝土配比設計中。而施工時並沒有考慮到施工簡易及品質穩定的技術在內，因此在配比設計中，不能只單獨考慮到「安全性」或「經濟性」，必須同時考慮到「耐久性」或「工作性」基因在內。而高性能混凝土的耐久性設計的達成可考量各種不同的策略方式。

1.減少拌和水及水泥

為了達到耐久性的要求，有必要減少水量及水泥量，且不影響工作性及安全性。可透過下列策略達成：

- (1) 調整級配達最小孔隙率。
- (2) 添加減水緩凝劑或強塑劑。
- (3) 添加波索蘭材料。

2.增強界面的鍵結性

混凝土中骨材與水泥漿界面是最強的一環，容易產生泌水、析離及骨材與水泥漿變形不一致等問題，因此要如何才能增加鍵結性是相當重要的。

表 2.1 高性能混凝土與其他混凝土之比較^[3]

性質		傳統混凝土	高強度混凝土	高性能混凝土
強度(Mpa)		21~42	>42	>21
坍度(mm)		25~100	100	230~270
流動度(mm)		---	---	>600
用途		一般建築物	高層建築之底層柱、剪力牆、結構體	各類工程建築物
材料選擇	水泥	細度 2800 Blaine, 28 天強度 28 MPa (4000 psi)	C ₃ S 含量較高, 細度 3500~4000 Blaine, 品質均勻者, 7 天強度要求 29.4Mpa(4200 psi)	同高強度混凝土
	骨材	要求洗淨即可, 砂之 FM2.3~3.0 即可, 以 2.6 較佳, 粗骨材最大粒徑 1"或 1.5", 以求經濟性	3/8"~3/4"骨材最大徑有較佳之結果, 骨材表面不可有雜質或黏土, 粗骨材之用量可較高, 砂採用粗砂(FM=3.0)	3/16"~3/2"最大粒徑骨材, 餘同高強度混凝土之骨材
	摻料	無特別限制	必須使用減水劑、減水緩凝劑或強塑劑(高性能減水)	高性能減水劑、緩凝劑為必要添加之材料
	工作嵐材料	除 ACI 318 耐久性考慮外, 一般並不限定使用	飛灰、砂灰、爐石粉或稻穀灰取代部分水泥及砂, 使用量 5~20%水泥量	飛灰、砂灰、爐石粉或稻穀灰取代水泥或砂, 用量視設計需要而定
配比設計		坍度依結構物而定, 水灰比視耐久性與強度而定 水泥用量 320 kg/m ³ 以上	坍度 100mm 以上, 水泥用量 390~560 kg/m ³ , 水灰 0.3~0.4 範圍	緻密配比法, 坍度必須甚大, 水泥用量 <400 kg/m ³ , 水灰比 <0.6
拌合、澆置、搗實及養護		稠度良好; 不可過量振動, 以防止析離, 失去輸氣量; 一般養護作業	稠度甚硬和粘; 注意必須迅速搗實, 並且要充分振動, 寧可超振動; 養護作業特別重要	傳統拌合設備, 強調拌合程序, 利用泵送機泵送, 免振動搗實, 施工時必須注意模板的設計以防爆模, 養護作業非常重要
品質管制		一般性品質控制	預拌廠及現場必須有範圍較廣的品質控制計畫, 包括材料的儲存至施工階段均須嚴密控制, 確保強度及最小之變異	由材料來源之品質管, 混凝土製程品質管及模型試驗、原型試驗及現場施工檢驗, 必須有全盤性之品質保證制度, 施工前之配比證工作至少六個月以上

(1) 降低水膠比

降低水膠比因而提高長期強度，而且使界面強化，此仍須透過添加卜作嵐材料才能達成。此時波索蘭材料用量 (P) 必須不等於零 (即 $P \neq 0$)；換言之， $W/C \neq W/B$ 。透過長期的卜作嵐作用可促使界面強化，由圖 2.1 所示。目前美國混凝土學會 318-95 「結構混凝土規範」即已將此列入「耐久性要求」中如表 2.2 所示⁽⁶⁾。按臺灣西部沿海區域的混凝土設計，均應有防蝕考慮，其 W/B 應小於 0.4，或強度 $f_c' > 350 \text{ kg/cm}^2$ 。

(2) 降低水泥漿量及增加波索蘭材料

降低水泥漿對長期耐久性是有利的，圖 2.2 所示，水泥漿量在早期可獲較高之超音波速，然而晚期則非常不利，由超音波速的降低可預期內部產生的裂縫，此與水泥漿骨材變形不一致有關，齡期愈長則愈明顯，漿量減少同時也增加波索蘭界面固化作用，這對混凝土而言是有利的。

3. 增加電阻係數及降低毛細孔滲透性

有害物質在混凝土中滲透或擴散，都是透過電動勢的趨動，傳統混凝土降低滲透性的方法，純粹由降低水灰比 (W/C) 的方式達成，此只對「水泥漿」而言是有意義的，然而對水泥漿只佔 25 至 40% 的混凝土而言，只採用降低 W/C 是不足的，在 ACI 318-95 「結構物混凝土規範」的新觀念，採用 W/B 的耐久性設計理念有益的，然而更重要的是「水量」 (W) 的影響更不容忽視，否則同一用水量下，電阻係數大體上是類似的，大約 $10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，而添加卜作嵐材料 ($P \neq 0$)，則 $W/C \neq W/B \neq W/S$ 時，則電阻係數有機會提昇至 $30 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 以上，此點對結構混凝土是有利的，因此減低拌和水量對許多混凝土性質是有益的。

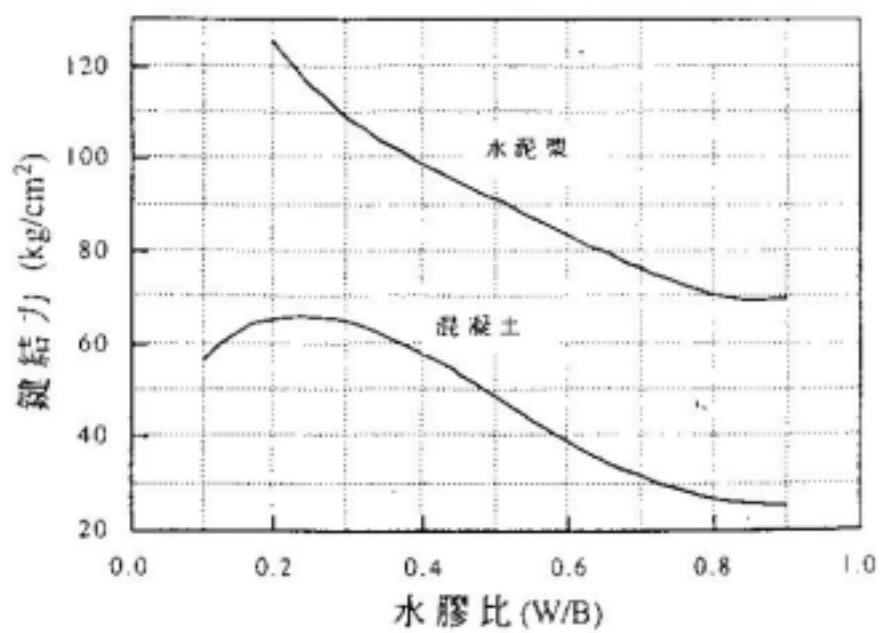


圖 2.1 降低水膠比增進鍵結力^[5]

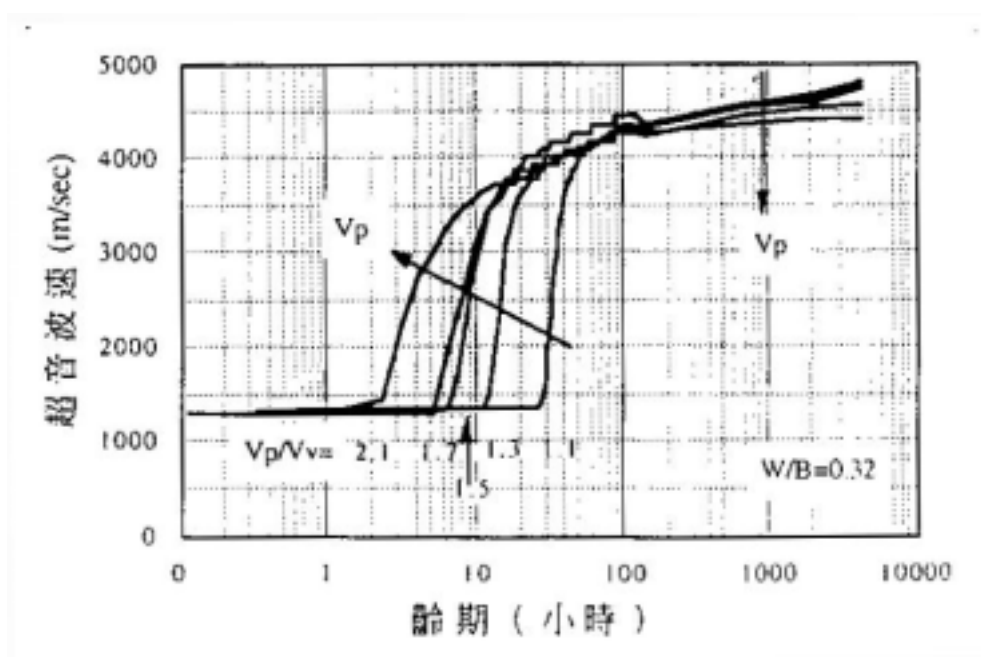


圖 2.2 水泥漿量對超音波速之影響^[5]

表 2.2 ACI 318-95 混凝土耐久性設計要求^[6]

(1)特殊曝露條件下水膠比與混凝土強度要求

曝露條件	常重混凝土 之最大水膠 比	常重和輕質混凝土之最低 $f_c'(kg/cm^2)$
混凝土曝露水環境下而須有低透水性	0.50	280
混凝土曝露濕潤凍融條件或卻冰鹽化學條件	0.45	315
鋼筋混凝土曝露卻冰鹽、鹽水、海水或此等有害物之霧氣下，且須考慮防蝕時	0.40	315

(2)混凝土曝露硫酸鹽溶液下之要求*

曝露硫酸 鹽程度	土壤中水溶 性硫酸鹽 (SO_4^{2-}), %重 量	水中硫酸鹽 (SO_4^{2-}), ppm	水泥型別	常重混凝土	常重和輕質混凝 土
				最大水膠比 (W/B)*	最低 $f_c'(kg/cm^2)$
輕微(可不 計)	0.00~0.10	0~150	—	—	—
中度(或海 水)	0.10~0.20	150~1500	P(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.5	280
嚴重	0.20~2.00	1500~10000	V	0.45	315
相當嚴重	>2.00	>1000	V+卜作嵐 **	0.45	315
*若考慮水密性或鋼筋防蝕時須考慮採用較低 W/B 及較高強度。					
**卜作嵐材料需要有試驗資料或實例證明與第 V 種水泥使用時俱抗硫酸鹽之效用。					

4.鋼筋腐蝕之防範

當鋼筋混凝土結構物曝露在海域環境下，則鋼筋防蝕變得特別重要，配比設計應考慮方向有：

(1) 控制混凝土材料中氯離子含量

氯離子都是由混凝土組成材料，包括拌和水、骨材、膠結料(水泥、卜作嵐材料)和摻料所提供。所以配比設計時先行按材料配比計算出總氯離子濃度，並事先加以控制；且硬固混凝土所含水溶性氯離子濃度不得超過表 2.3^[5]之規範值。

(2) 降低氯離子滲透量

依據 AASHTO 規定防蝕所需的氯離子滲透電量必須小於2000庫侖，為達到此一目的是必須添加卜作嵐摻料的^[7]。此種作法也可以增加混凝土的電阻係數至 20 kΩ-cm 以上。

(3) 確保混凝土品質及保護層厚度

鋼筋曝露於卻冰鹽、鹽水、有鹽分之水、海水和此等有害物鹽分之霧氣中者，必須依據中國國家標準之相關規定，控制混凝土最大水膠及最低抗壓強度。更重要的即必須確保有足夠的保護層厚度。

表 2.3 鋼筋混凝土防蝕之最大氯離子含量^[5]

結構型態		混凝土中最大水溶性氯離子 (Cl ⁻)含量	
		ACI 318-95 (%水泥重量)	CNS 12891 (kg/m ³ 混凝土)
預力混凝土		0.06	0.15
鋼筋 混凝土	曝露於含氯之環境	0.15	0.30
	經常保持乾燥或防止受潮	1.00	0.60
	其他狀況	0.30	

2.2 海砂性質與影響

通常一般海砂較河砂顆粒微小且細，含有高量之氯離子，氯離子主要乃儲存於海砂顆粒之表面薄層孔隙內，以及因海水蒸發而殘留(存)於海砂顆粒表面層上。除了 含有高量的氯離子外，海砂亦含有少量其它海水成份之離子，諸如鎂離子(Mg^{+2})、硫酸根離子(SO_4^{-2})、及其它鹼性離子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{+2})等，對鋼筋混凝土具有相當程度之侵蝕性，其影響性簡述如下：

2.2.1 對鋼筋腐蝕之影響

一般而言，鋼筋在品質良好的混凝土中是不會生鏽的，其原因是在混凝土的孔隙溶液(pore solution) 中，由於含有飽和的氫氧化鈣和鈉、鉀的鹽類，使混凝土內部成為高鹼性($pH = 12 \sim 13$)的環境，而鋼筋在此條件下會在表面生成與鋼筋密切結合鈍態的氧化鐵，對鋼筋形成保護作用，使鋼筋不會受到腐蝕。但是當混凝土內部有氯離子，且有氧和水分共同存在時，不論氯離子是來自水泥、骨材、拌合水、摻料等混凝土材料，或是來自海洋環境、去冰鹽等的氯離子，均會使混凝土中的鋼筋產生腐蝕。混凝土內部 pH 值和氯離子濃度與鋼筋腐蝕的關係如圖 2.3 所示。一般而言，當混凝土內部 $[Cl^-]/[OH^-]$ 的莫耳比(molar ratio) 大於 0.6 時，即使混凝土的 pH 值大於 11.5，鹼性環境對鋼筋的保護作用會消失，鈍態的氧化鐵保護膜會受到破壞，使鋼筋易於腐蝕。

氯離子對鋼筋腐蝕的影響機理，主要是氯離子會破壞鋼筋表面的鈍態氧化鐵保護膜，造成鐵離子(Fe^{+2})的溶出，並生成水溶性的氯化鐵($FeCl_2$)錯合物。這種氯化鐵錯合物會溶解且離開鋼筋的表面，並擴散進入混凝土的孔隙溶液中，與氫氧根離子(OH^-)反應生成 $Fe(OH)_2$ ，同時釋放出 Cl^- ， $Fe(OH)_2$ 會進一步與氧、水反應生成鐵鏽。上述一連串的反應，鋼筋將不斷地產生腐蝕反應，使鐵元素離開鋼筋表面；且由於反應中會再度釋放出 Cl^- ，使得 Cl^- 可以反覆不斷地參與腐蝕反應，其

侵蝕機理與過程如圖 2.4。一旦 Cl^- 含量達到足以產生鋼筋腐蝕的臨界值，則腐蝕便很難再加以抑制。

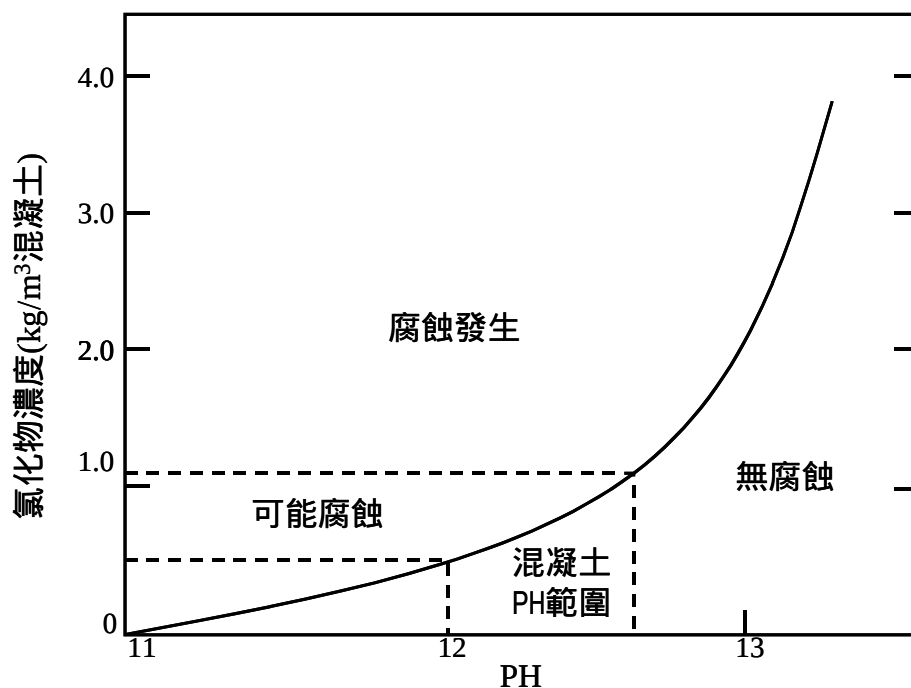


圖 2.3 氯離子對鋼筋腐蝕之影響

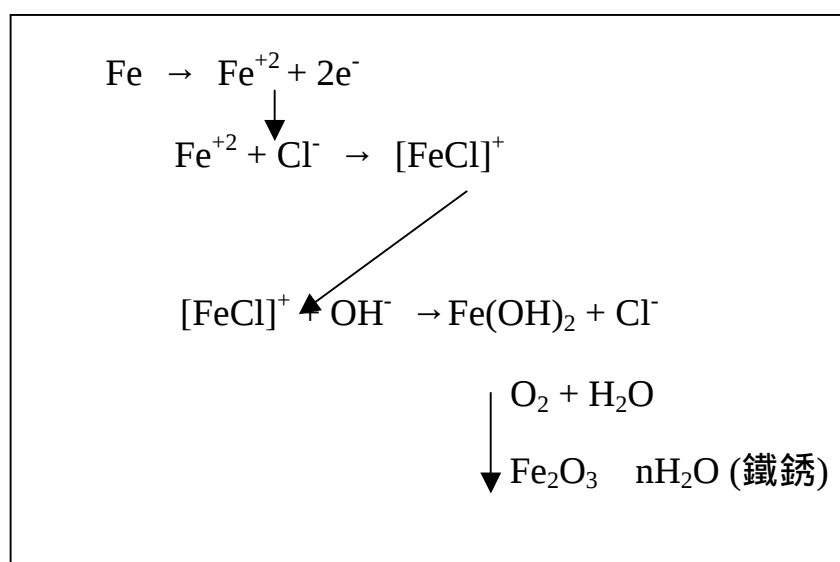
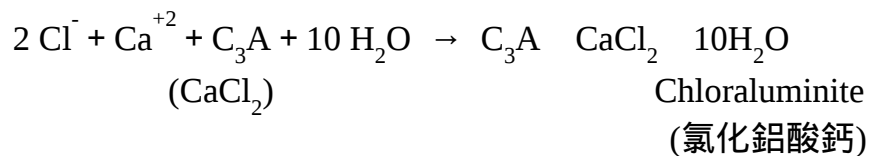


圖 2.4 氯離子侵蝕鋼筋之機理與過程

2.2.2 對混凝土之影響

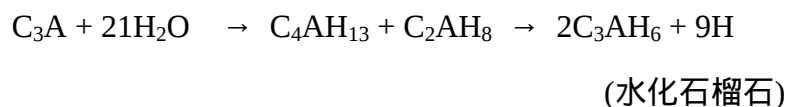
1. 氯離子

氯離子除了對鋼筋混凝土結構物中之鋼筋會造成腐蝕外， Cl^- 之侵入亦會致使混凝土材料在水化硬固過程中，發生水泥水化物膠體結構上的變化，造成硬固混凝土體積發生極大的變化。研究學者熟知，當水泥水化產物(CaO SiO_2 H_2O ，簡稱 C-S-H 膠體)與 Cl^- 接觸時會形成高溶解性的氯化鈣(CaCl_2)，而使原來具緻密性之 C-S-H 膠體溶出，變為多孔性的網狀結構，增加了水泥漿體的毛細孔體積。由於滲透性的增加，使得海水中之鎂離子(Mg^{+2})更易侵入混凝土內，取代 C-S-H 膠體中之鈣，而變成不具膠結性的 M-S-H (MgO SiO_2 H_2O)，造成混凝土強度損失。同時當氯化鈣與水泥中之鋁酸三鈣(C_3A)反應時，會生成氯化鋁酸鈣 (C_3A CaCl_2 $10\text{H}_2\text{O}$ ，chloridealuminate)；其反應式如下：

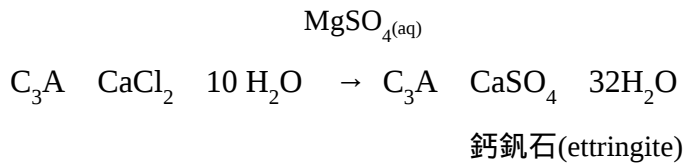


2. 硫酸根離子(SO_4^{-2})

硫酸根離子與混凝土漿體之反應過程甚為複雜，主要與鋁酸三鈣(C_3A)反應，產生所謂「硫酸鹽侵蝕」，使得水泥漿體積膨脹形成內應力進而導致混凝土構造物龜裂，一般較被接受的反應機理是由鈣鈣石二度膨脹和石膏腐蝕兩種反應組合而成，形成鈣鈣石二度膨脹的主要原因，乃是水泥中的鋁酸三鈣(C_3A)的水化產物對硫酸鹽不穩定所造成，由於純 C_3A 水化速率相當快，會造成混凝土閃凝的現象，而影響混凝土的工作性和日後的強度，其反應式如下；



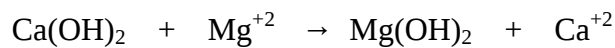
與



上述反應，致使混凝土體積膨脹，導致結構物發生龜裂，降低結構物之耐久性。

3.其它鹼性離子

海砂(水)中之 Mg^{+2} 能與混凝土漿體中之水化產物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反應產生難溶的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其化學反應如下：



$\text{Mg}(\text{OH})_2$ 為片狀結構，沉澱於表層連通性毛細管中，有阻塞外界物質進入之保護作用，孔隙結構雖然不會遭到明顯破壞，由於滲透性的增加，使得海砂(水)中之鎂離子(Mg^{+2})更易侵入混凝土內，取代 C-S-H 膠體中之鈣，而變成不具膠結性的 M-S-H ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)，造成混凝土強度損失。表 2.4 為海砂(水)成份對混凝土性質之影響。

表 2.4 海砂或海水中之成分對混凝土性質的影響^[8]

氯化鈉 (NaCl)	氯離子會造成鋼筋腐蝕 鈉離子會惡化鹼骨材反應
氯化鎂 (MgCl_2)	氯離子會造成鋼筋腐蝕 與氫氧化鈣反應生成氫氧化鎂和氯化鈣
硫酸鎂 (MgSO_4)	1.硫酸根離子會造成硫酸鹽侵蝕 2.鎂離子會與C-S-H中之鈣進行陽離子交換，生成M-S-H破壞水泥漿體結構，降低強度
硫酸鈣 (CaSO_4)	造成硫酸鹽侵蝕
氯化鈣 (CaCl_2)	造成鋼筋腐蝕
綜 合 影 響	1.加速水泥水化，縮短凝結時間 2.提高早期強度，降低晚期強度 3.水溶性鹽類易造成混凝土析晶現象 4.造成硫酸鹽侵蝕和鋼筋腐蝕 5.降低混凝土耐久性

2.3 添加波索蘭材料對混凝土的影響

波索蘭材料的使用量通常在 5~20% 的水泥重量。過低效果不佳，過高則可能影響工作性或影響強度，而且其反應不能充分發揮，因此每一種波索蘭材料皆應找出最佳使用量。波索蘭材料包括稻殼灰，矽灰，高爐石及飛灰等，具有下列之優點：

1. 降低水泥水化熱、高乾縮量及生產成本。
2. 波索蘭反應使得骨材/水泥漿界面形成具膠結性之物質，可改善漿體之水密性，增進耐久性。
3. 降低或減少鹼骨材反應所造成之潛在性膨脹。

一般常用之波索蘭材料如表 2.5^[9,10] 所示，摻料簡要說明於下；

(1) 飛灰

飛灰含有豐富之氧化矽 (SiO_2)、氧化鋁 (Al_2O_3) 以及氧化鐵 (Fe_2O_3)，其結構為玻璃質球狀物，粒徑約在 $0.4\mu\text{m}$ ~ $100\mu\text{m}$ 之間，其比重為 2.0~2.2。當波索蘭反應發生時，飛灰中的 SiO_2 及 Al_2O_3 與水泥漿體中之氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 反應，產生晶狀的鈣鋁鹽類 (C-A-H) 以及低密度的鈣矽膠體 (C-S-H)，來填塞混凝土中微小的孔隙，並提高骨材介面鍵結強度，減少混凝土的透水性並提高其耐久性。添加飛灰亦會影響新拌混凝土的用水量、稠度與膠結特性。在相同坍度條件下，當飛灰之燒失量小於 5.5% 時，可節省拌合用水量。反之，則必須增加更多的用水量以維持相同的坍度。含鈣質 (CaO) 較高之 C 型飛灰的波索蘭反應較快，迅速生成鈣矽膠體 (C-S-H) 來填塞混凝土中微小的孔隙，因此混凝土的早期強度較高。含鈣質較低之 F 型飛灰的波索蘭反應較慢，混凝土的早期強度便會降低。因此，在 ACI 規範中規定飛灰在一般混凝土取代量上 C 級為 15~35%，F 級為 15~25%。飛灰反應緩慢，故早期強度降低，但添加飛灰可改善混凝土的泌水現象及減小孔隙結構，提升其耐久性。

(2) 爐石

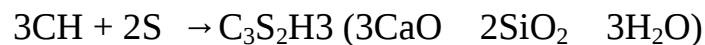
爐石為熔煉鋼鐵時所生的副產物，其中含有氧化矽(SiO_2)、氧化鋁(Al_2O_3)以及氧化鐵(Fe_2O_3)等成份。爐渣由高爐排出冷卻所得之固體物，稱為高爐石，依其冷卻方式的不同，可分為水淬爐石與氣冷爐石兩種。水淬爐石是高爐熔渣以噴水方式急速冷卻，使爐渣碎裂成粒狀，由於冷卻時間過於短促，晶體不易形成且微結構凌亂開放，活性大增且具膠結性，只要細加研磨即可取代部分水泥，亦稱為高爐熟料。氣冷爐石是採用徐冷方式，形成構造較堅固且緻密，活性不佳且無膠結性，可做混凝土骨材或製造水泥之原料。活性高的高爐熟料在水中表面會產生一層酸膜阻隔水份的進入，故需利用氫氧化鈣與石膏等觸媒的侵蝕酸膜，使高爐熟料水、氫氧化鈣產生水化作用。若高爐熟料取代量太大，則水泥水化所產生的氫氧化鈣與石膏等觸媒量相對減少，致使高爐水泥之初期強度發展因水化反應並不完全而低於普通水泥。後期因進行一般波索蘭反應(有效填充孔隙、消耗氫氧化鈉以抵抗硫化物侵蝕與鹼骨材反應)，因而提高混凝土的強度與耐久性。當用水量相同時，高爐水泥之坍度會大於普通水泥。

表 2.5 混凝土添加波索蘭材料之特性^[9,10]

	飛灰	爐石	矽灰	稻穀灰
成 份	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO , MgO , Na ₂ O , K ₂ O 及碳等化合物	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ 及 Fe ₂ O ₃	SiO ₂	纖維素 , 木質素及半纖維素
優 點	1.減少用水量,改善 工作度,增加水密 性 2.提高晚期強度 3.減少體積變化增 加耐久性	1.改善工作度 2.提高晚期強度 3.增加耐久性	1.降低水泥含量 2.生產超高強度混 凝土 3.增加耐久性	1.較高之早期強度及耐久性 2.有較高強度 3.凝結時間縮短 4.乾縮量小
缺 點	1.降低早期強度 2.延緩凝結時間	1.降低早期強度 2.乾縮量增加	1.工作性較差 2.價格高	1.工作度較差 2.性能了解不足,有待進一步 研究
應 用 方 向	1.佔膠結料 8% → 預拌混凝土 2.佔膠結 15~35% → 混凝土污工製品 3.佔膠結料 30% → 巨積混凝土 4.佔膠結料 22% → 高性能混凝土	1.佔膠結料 20~30% → 氣候較冷期間 2.佔膠結料 50% → 抗硫侵蝕混凝土 3.佔膠結料 75% → 巨積混凝土 4.佔膠結 40~50% → 高性能混凝土 5.佔膠結 40~65% → 抗凍融及鹼矽骨材 反應	1.佔膠結料 12% → 減低水泥含量 2.佔膠結 3~18% → 增加含飛灰或爐 石混凝土早期強度 3.佔膠結料 10% → 減少氯離子侵入 混凝土 4.佔膠結料 20~33% → 高強度及超高強 度混凝土 5.佔膠結料 6% → 耐火混凝土 6.佔膠結料 6~9% → 高性能混凝土	1.工作性及坍度隨添加量增 加而下降 2.稻穀灰之取代量以 20%為 上限超過則工作度將降底 3.一般以稻穀灰取代後會有 早凝及減少泌水之現象 4.稻穀灰之取代量以 20%以 內時早期及晚期抗壓強度 均可提高 → 高性能混凝土

(3) 矽灰

矽灰係由高純度的石英與煤在電弧爐中加熱至 2000 所產生矽金屬及鐵矽合金所濃縮的副產品。其成份為高含量不定型或非常細球型顆粒的二氧化矽，約佔 85~98%，其餘為少量的金屬化合物。典型的矽灰比重約在 2~2.5，遠小於波特蘭水泥的 3.15，其平均粒徑約為 0.1μm，約為波特蘭水泥顆粒的 1/100 倍，為相當分散的狀態，可與氫氧化鈉起化學反應，其反應式如下：



由於矽灰有較高之親水性，因此添加之矽灰量和需水量之間有密切的關係性，在固定坍度下需水量會隨矽灰用量增加而增加，所以在不增加用水量的理想工作度要求下，矽灰必須與強塑劑一起使用，方能發揮其最大功效。

目前國內應用爐石粉於混凝土有下列三種使用策略^[11]：

- (1) 作混凝土添加物：爐石粉在預拌廠中直接添加於水泥、水、砂石等材料中；或爐石粉與飛灰混合成爐灰再加入上述材料中。
- (2) 作混合水泥：爐石粉與卜特蘭水泥混合成水泥，稱為卜特蘭高爐水泥（爐石粉添加量約 30~70 %），作為混凝土的膠結料。其製造須符合 CNS 3654 之規定。
- (3) 作水泥添加物：在卜特蘭水泥製程中添加 5 % 以內之爐石粉，而視同卜特蘭 I 型水泥，為需符合 CNS 61 規範。

2.4 使用海砂/海水混凝土抑制硫酸鹽侵蝕的策略

使用海砂、海水於混凝土時對構造物造成不同程度的侵蝕，導致耐久性的降低，要完全避免鋼筋混凝土不發生腐蝕極為不易，但若在設計與材料選用、施工等過程能多加注意方可延遲腐蝕發生，或減低

侵蝕之程度，而增長結構物的使用壽命。茲將應用海砂、海水於混凝土時，抑制硫酸鹽侵蝕的改善策略列述於下表 2.6，以供參考^[12]。

表 2.6 使用海砂/海水混凝土抑制硫酸鹽侵蝕的策略

抑制策略	改善方法	改善
一、改良混凝土品質	1.水泥： . 減低鋁酸三鈣(C_3A)及鋁鐵酸四鈣(C_4AF)之含量，選用抗硫水泥(Type 2 或 Type 5)取代普通卜特蘭水泥(Type 1)。 . 調整水泥含量，以 C_4AF 替代一部份之 C_3A 含量。 2.細骨材： . 取用海砂，須經充分清洗之除鹽處理。 . 應使用骨材粒度佳，吸水率較小者。 3.摻料： . 選用波索蘭材料如飛灰，水淬爐石等。 . 添加亞硝酸鈣等防蝕劑作為腐蝕抑制劑。 4.調整配比： . 使用低水灰比混凝土。 . 增加水泥含量。 5.施工品控： . 嚴格執行施工計畫。全面品質管制及檢查。 . 確實搗實。 6.養護： . 利用蒸氣養護使 C-A-H 相分解。 7.其他： . 使用高分子含浸混凝土，直接將高分子與混凝土聚合成一體。 . 利用強塑劑或高度減水劑的減水混凝土。	抵抗硫酸鹽侵蝕。 使含鹽量在容許值以下達到較佳級配。 增加混凝土緊密程度，減低滲透性。 形成保護膜減少氯鹽所造成的鋼筋腐蝕。 增進混凝土強度。 避免混凝土孔隙發生可延緩鹽分滲透速度。 增加抗硫作用 可提高強度，降低水密性，減少龜裂。
二、增加鋼筋保護層厚度	. 足夠的鋼筋保護層厚度。	延遲鹽分到達鋼筋的時間
三、鋼筋充分的防銹處理	. 以環氧樹脂塗裝及鍍鋅處理。	使鋼筋的表面防銹蝕
四、混凝土表面塗佈	. 選用表面塗封材料如防水劑、瀝青塗覆。	遲滯氧氣、水分、氯化物鹽分的進入
五、杜絕腐蝕機會	. 嚴格限制超載之荷重。 . 容許裂縫寬度之限制。 . 防止或降低混凝土的乾燥收縮。	防患龜裂裂縫急腐蝕環境的產生

資料來源：國立臺灣工業技術學院營建材料研究室

第三章 研究方法與步驟

本研究分為三個單元來進行：第一單元為「高性能混凝土之耐久性研究」，第二單元為「摻用爐石對添加海砂混拌混凝土之耐久性影響」，第三單元為「混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查與潛勢分析」。

3.1 高性能混凝土之耐久性研究

3.1.1 試驗規劃

本研究之主要目的在探討本中心在 88 年灌製的高性能混凝土試驗牆之耐久性質。本研究中採用三種具本土性材料之高性能混凝土配比，其設計強度分別 3000 psi(210kgf/cm²)，4000 psi(280kgf/cm²)，5000 psi(350kgf/cm²) (試驗組)，與一組 4000 psi(280kgf/cm²)普通混凝土(控制組)製作之試驗牆(內排鋼筋及 Sensor)，於一定時間進行海水乾濕循環之曝露試驗，由於為了與大氣環境下試體之比較，於是選用一組 4000 psi 之 HPC 與 OPC 進行大氣曝露試驗，其試驗流程如圖 3-1 所示。相關試驗內容，述敘如表 3.1 所示。

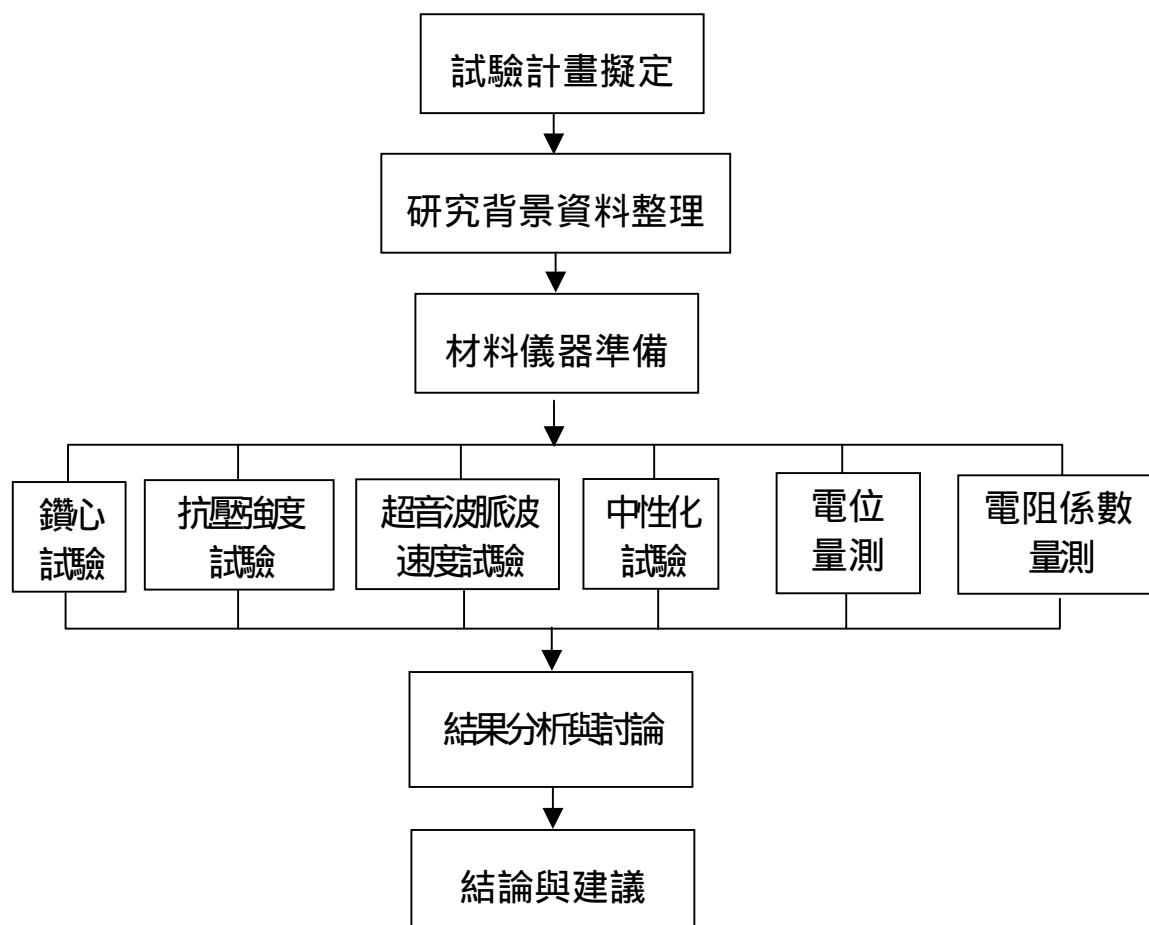


圖 3.1 試驗流程

表 3.1 試體之相關試驗內容

項目 檢測項目	試驗項目	試體種類
破壞性檢測 (試驗牆鑽心試體)	中性化試驗、抗壓強度、超音波脈波速度、電阻係數	鑽心試體 $\Phi 7.5 \times 15 \text{cm}$
非破壞性檢測 (試驗牆)	超音波脈波速度、鋼筋電位值量測	試驗牆

3.1.2 研究背景

本研究於民國 88 年共灌製六座高性能混凝土試驗牆，高性能混凝土特性是依據國科會 HPC 研究群於民國 85 年 12 月 8 日開會討論，提出研發推動本土化中強度高流動高性能混凝土之決議。其特性為 $f_c' = 4000 \sim 5000 \text{ psi}$ ，並具有以下之性質，水泥應有每公斤 15 psi 強度以上之效益，水泥用量低於 300 kg/cm^2 ，初期坍度為 $220 \pm 20 \text{ mm}$ ，坍流度為 $500 \pm 100 \text{ mm}$ ，45 分鐘後坍度應大於 200 mm，坍流度在 400 mm 以上，水灰比 0.42，波索蘭材料 30% 為原則之免搗實混凝土^[1]，試驗配比與灌製日期如表 3.2 所示。

本研究之 HPC 試驗牆共計有六面，其設計尺寸與鋼筋之排置如詳圖 3.2，同時為了瞭解混凝土之耐久性能，在試驗牆內部埋設了監測 (Sensor) 系統，以監控 RC 之性質，其埋設位置如詳圖 3.3 所示。

然而為了模擬海洋現地情況以及縮短在海洋自然環境條件下結構物發生腐蝕劣化所需之時間，因此必須藉由乾濕循環設備(控制環境變化因素)，進行試驗。本研究將製作之試體及試驗牆置於本所海水循環水槽附近的空地，利用定時之海水噴灑系統，每小時在試驗牆噴海水 15 分鐘，以加速混凝土劣化之速率。試體及試驗牆進行海洋曝露試驗之置放位置如圖 4.4 所示。

本次量測的試驗牆起於民國八十八年，原計畫「港灣環境下高性能混凝土結構體之性質研究」規劃的混凝土試體數量只有二年，故一些混凝土的試驗項目如抗壓強度、透水..等相關的試體數量也只到二年，但就混凝土試驗牆而言因內部有埋設多項 Sensor，可持續量測鋼筋混凝土的電位與電阻，所以高性能混凝土的耐久性研究將整理從一開始的資料與今年量測的數據作一個分析，同時配合破壞性檢測與非破壞性檢測對高性能混凝土做一個耐久性之評估。

表 3.2 混凝土試體配比設計數據

性質 編號	設計強度 (fc') kgf/cm ²	混凝土種類	重量(kg/m ³)						水膠比 (W/B)	水固比 (W/S)	水灰比 (W/C)	灌製日期
			粗骨材	細骨材	水泥	飛灰 + 爐石	水	強塑劑				
A	280 (4000psi)	HPC	990	780	250	200	140	10	0.31	0.079	0.56	88.05.06
B	280 (4000psi)	OPC	894	834	387	---	205	---	0.53	0.097	0.53	88.05.13
C	350 (5000psi)	HPC	1000	710	300	200	140	11	0.27	0.082	0.47	88.05.20
D	210 (3000psi)	HPC	980	880	200	220	140	9.5	0.35	0.077	0.70	88.05.23

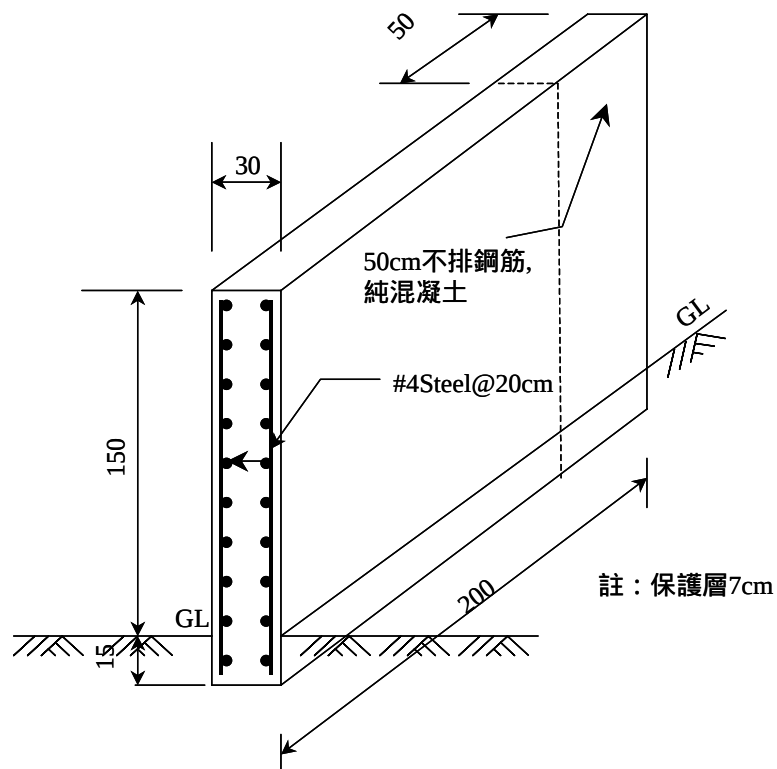


圖 3.2 單座試驗牆之設計詳圖

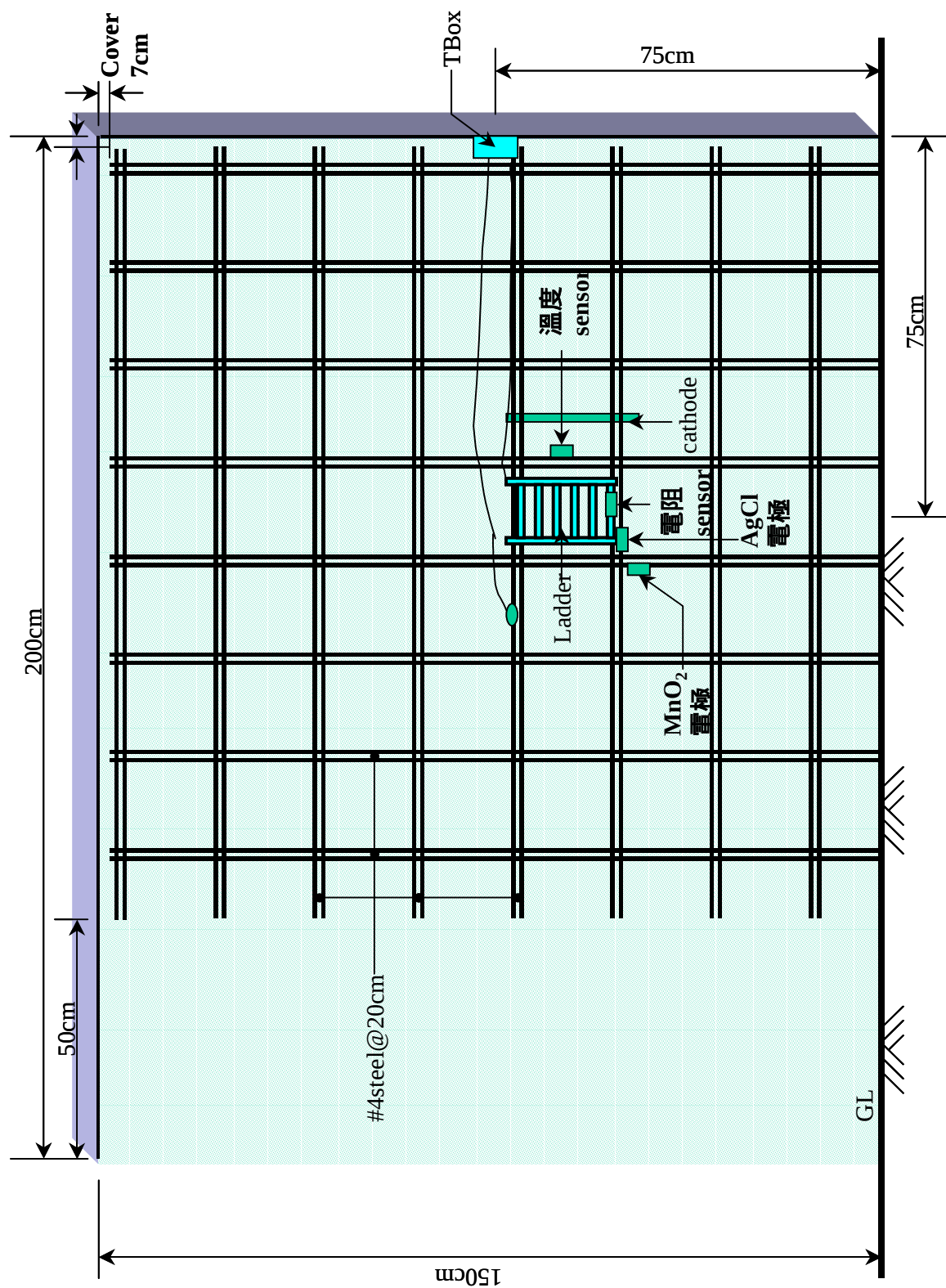


圖 3.3 試驗牆埋設之監視系統詳圖

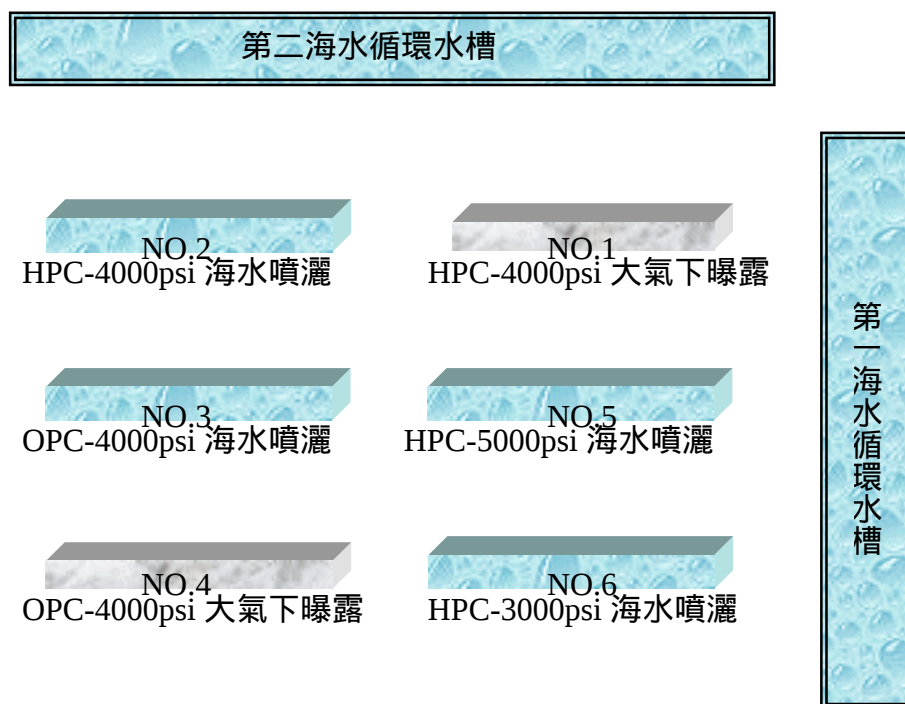


圖 3.4 試驗牆曝露位置配置圖

3.1.3 試驗方法與步驟

1. 混凝土試驗牆鑽心取樣

本研究之試驗是為破壞性試驗，試驗的主要目的是在決定結構體中部份區域之抗壓強度，同時取出之試體可做中性化試驗、超音波與電阻檢測。鑽心試驗是依據 CNS 規範中之規定，其取樣之試驗抗壓強度之圓柱試體，其試體直徑至少為最大粗粒料粒徑之 3 倍。鑽小試體長度最好為其直徑之 2 倍，或者不得小於其直徑。本次的鑽心試驗，於每面牆共鑽 3 顆試體，直徑為 7.5 公分，工作情形如照片 3.1 所示。

2. 中性化試驗

混凝土中的氫氧化鈣遇水後，會解離為鈣離子及氫氧離子，所以混凝土的 pH 值一般為 12~14，在此酸鹼度下鋼筋表面會形成一層具

有保護性之鈍化膜。然而空氣中的酸性物質(如二氧化碳、二氧化硫等)會降低混凝土的鹼度，其原先的 pH 值會降到 7~9 左右，此即混凝土之中性化。中性化不僅使混凝土失去保護鋼筋的作用，且破壞鋼筋表面的鈍化膜，使鋼筋在低鹼的環境下產生銹蝕；中性化的另一作用會加速混凝土的收縮，產生拉裂與結構破壞，對港灣構造物之影響更值得注意與防範。

測定混凝土中性化深度及中性化區域，最簡便也最常用之方法為酚太試劑，將現場所鑽取之混凝土試體或敲除之混凝土，放置在乾燥環境讓試體自然乾燥後，再將混凝土表面上噴灑酚太指示劑。

觀察指示劑顏色的變化，以判斷其中性化深度，該試劑在 pH 值在 8.5 以上之鹼性環境中會變為紅色，而 pH 值在小於 8.5 的環境下則為無色，實際測定則以剖面的分界點來判定未中性化程度。一般在維修時，即以此方法來判定應敲除混凝土劣化區域與決定修復範圍。中性化深度量測時最容易產生誤差有兩個：第一是指示劑不能放太久，否則混凝土變色不易；第二是混凝土試體取出後不能和空氣接觸太久，否則試體表面混凝土均已中性化就無從判斷混凝土中性化的深度。

3.鑽心試體抗壓試驗

鑽心試體進行抗壓試驗時應依以下之步驟進行：

(1)兩端平整處理

抗壓試驗用的圓柱體，其兩端需平滑並垂直於中軸，整個試體之直徑應相同，試體兩端平面上的突出物不得高出 5mm，並與垂直軸不得成 5° 以上之角度，其直徑與試體之平均直徑相差不得大於 3 mm，超出上述三種情形時，需鋸切或鑿琢使合於上述規定。

(2)潮濕狀況

試體未進行抗壓試驗 40-48 小時前，需全部浸入保持室溫之飽和石灰水中，試體自水中取出後需即行試驗，自水中取出至試驗前之一段時間內，試體需覆以潮濕之麻布或棉毯，試驗需在試體潮濕狀況下進

行。

(3)蓋平

抗壓試驗之試體，兩端需平整以符合 CNS 1230 混凝土抗壓及抗彎在試驗室澆置及養濕法之要求。

(4)度量

試驗前應先量蓋平後之試體長度，準確至 1mm。其平均直徑取試體長之中央，量二個成直角之直徑再平均得之，亦需準確至 1mm。

(5)試驗

可依 CNS1232 混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法試驗之。

(6)計算及報告

試體受力方向，與原結構物內受力方向之關係，需在報告內註明。試體之抗壓強度，可根據其平均直徑，算出每平方公分所受壓力。如試體長度直徑比小於 2 時，可將求得之抗壓強度乘以表 4.3 之更正因數(表中未列入之值，可由插入法求知)。

表 3.3 圓柱試體長度直徑比（資料來源：CNS 1238）

試體長度直徑比	1.75	1.50	1.25	1.10	1.00
強度修正因數	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87

抗壓試驗採用 ELE2000KN 之抗壓試驗機，試驗方法依據中國國家標準 CNS 1232 規範。

4.超音波脈波速度量測

使用英國 CNS 儀器公司出品之 PUNDIT(Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)超音波脈波速度測定儀，量測在硬固混凝土材質內超音波脈波之傳遞速度，了解混凝土之品質狀況。儀器本體主要包括時間顯示器及脈波發射器和接收器等兩部份。其應用於混凝土強度檢測之原理為利用脈波發射器，將超音波脈波傳

入混凝土中利用接收器量測脈波在其內部之傳遞時間，再依據脈波的傳遞路徑計算脈波速度。

試驗進行時，依其發射探頭與接收探頭之位置，分為直接法、半直接法及間接法三種。前二種方法可得較令人滿意的結果。故實際檢測時，多應用直接法求出速度後，配合混凝土試體密度及彈性模數，以判斷混凝土品質及均勻穩定程度。脈波速度與混凝土品質關係如表 3.4 所示，可作初步研判^[13]。

表 3.4 超音波脈波速度與混凝土品質之關係^[13]

脈波速度(m/sec)	混凝土品質判別
<2500	不良
2500~3000	中等
>3000	優良

本研究之超音波量測包含鑽心試體與現地高性能混凝土試驗牆量測，其試驗情形如照片 3.2 所示。

5. 電阻係數試驗

以英國 Colebrand Advanced Engineering 公司之四探針並排之電阻量測儀器，量測時盡量避開或遠離鋼筋位置，將混凝土表面磨平，四個探針接觸表面按下，即可由儀板上讀出電阻值。圖 3.5 為四針式之電阻量測儀器示意圖，試驗儀器如照片 3.3。混凝土電阻係數與其中所含鋼筋之活性程度之關係如表 3.5 所示^[14]。

表 3.5 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕活性之關係⁽¹⁴⁾

電阻係數(kohm.cm)	鋼筋腐蝕活性程度
<5	非常高
5-10	高
10-20	低/中等
>20	低



照片 3.1 混凝土試驗牆鑽心試驗



照片 3.2 現地混凝土試驗牆超音波量測

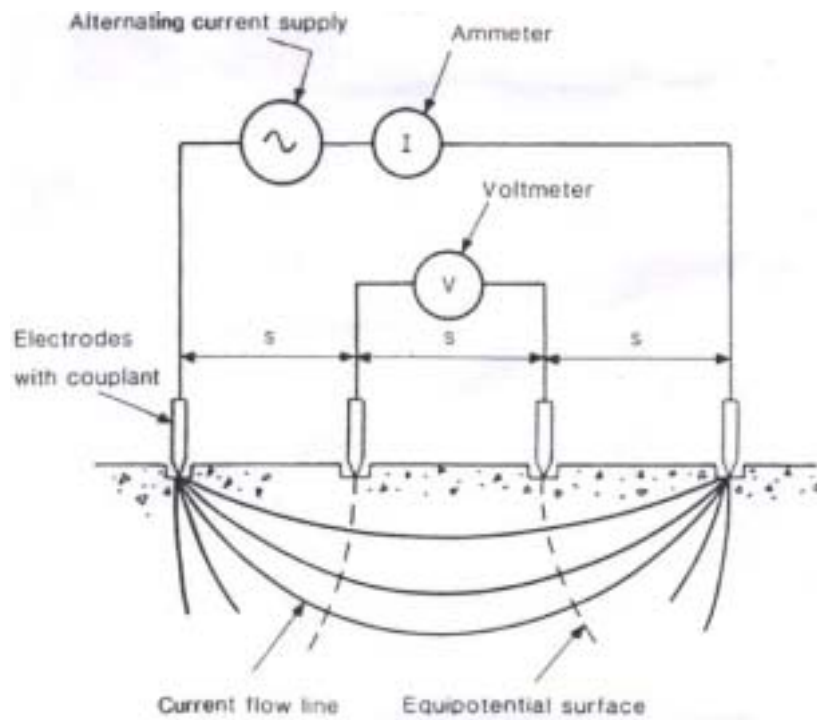


圖 3.5 四探針式之電阻量測示意圖



照片 3.3 混凝土電阻係數量測儀

6. 腐蝕電位量測

依據 ASTM C-876 規範⁽¹⁵⁾之方法，量測鋼筋的腐蝕電位。量測採用的參考電極為 Ag/AgCl，以海綿潤濕包裹參考電極前端，增加電荷傳導效應。量測時先將電位計上的「-」端與參考電極一端相接，而「+」端則與自鋼筋表面接出的導線相接，待電位計讀數穩定後，記錄其上所顯示之鋼筋腐蝕電位值。

偵測混凝土中鋼筋保護電位之參考電極，由於須埋置混凝土中，因此其規格必須適合埋置混凝土環境使用。本實驗評估二種埋置式參考電極於鹽害混凝土環境之使用效果，參考電極種類分別 MnO_2 及 Ag/AgCl 見照片 3.4，3.5。為避免電位測量產生 IR drop 造成誤差，埋置時參考電極感應端與鋼筋保持 1~2cm 距離。本實驗牆試體中埋置之參考電極位置如圖 3.3 所示。根據 ASTM C-876 的建議，當以 Cu/CuSO₄ 參考電極來量測鋼筋腐蝕電位時，其腐蝕狀況可以根據下表 3.6 來判斷。

表 3.6 ASTM C-876 鋼筋電位值與腐蝕機率之關係^[13]

電位值範圍	鋼筋腐蝕狀態
-200mv < 電位值	90 % 機率不腐蝕
-350 < 電位值 < -200mv	腐蝕可能發生
電位值 < -350	90 % 機率發生腐蝕

7. Anode-Ladder System 監測系統量測

本研究採用德國製之 Anode-Ladder System 腐蝕監視系統，該系統包含了 1.陽極梯(Anode Ladder-AL)內含 6 根單獨的陽極元件及溫度偵測器。2.陰極桿(Cathode Bar-C)，為一塗上白金的鈦金屬桿，其直徑為 8mm，長度為 40cm。3.連接電纜線，主要連接(Sensor 與 terminal box)。4.終端盒(Terminal box-Tbox)，見照片 3.6。5.可攜式 CANIN 量測儀，

照片 3.7。

Anode Ladder System 之原理，乃是將數個陽極金屬埋置在不同深度的混凝土內，與在其附近之陰極桿形成一個通路，(見圖 3.6 所示)，由於混凝土之表面會有氯離子，二氧化碳及氧的滲入，只要臨界氯離子含量和碳化並未到達第一個陽極(A_1)的表面，所有的電流是小的忽略，但當 A_1 受到氯離子及二氧化碳之作用，則會與陰極之間增大電流，然而其他的電極是零。隨著時間的增長，其他的陽極也開始受到腐蝕，藉由連續的量測電流，則可得到臨界氯離子含量或 CO_2 侵蝕的深度與時間的關係。有了這些的數據後，鋼筋的腐蝕時間是可以被預估的。其原理如圖 3.6 所示。

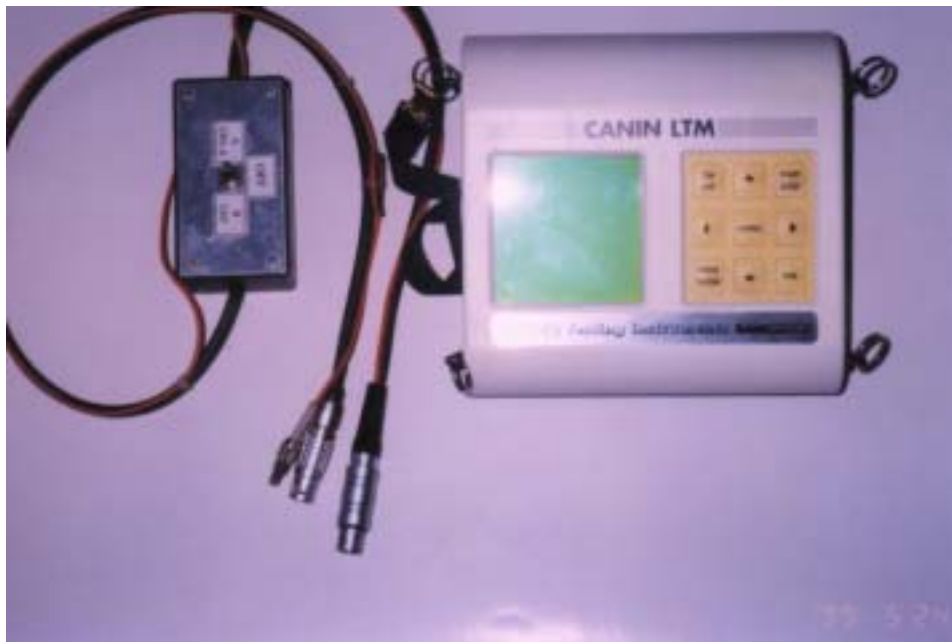
本試驗的 Anode -Ladder-System 之排置見詳圖 3.7 所示。試驗量測為 $A_1 \sim A_6$ 與陰極之電位、電流及各陽極間之電阻作為判斷 $A_1 \sim A_6$ 之陽極（亦就是在模擬不同混凝土保護層厚度下）腐蝕現況。如果此系統能正確評估內部鋼筋之腐蝕現況，即可應用於新建工程之結構體內，以便隨時監控混凝土及其內部鋼筋之現況。



照片 3.4 MnO_2 參考電極



照片 3.5 AgCl 參考電極



照片 3.6 Anode-Ladder-System 腐蝕監視系統



照片 3.7 可攜式 CANIN 量測儀

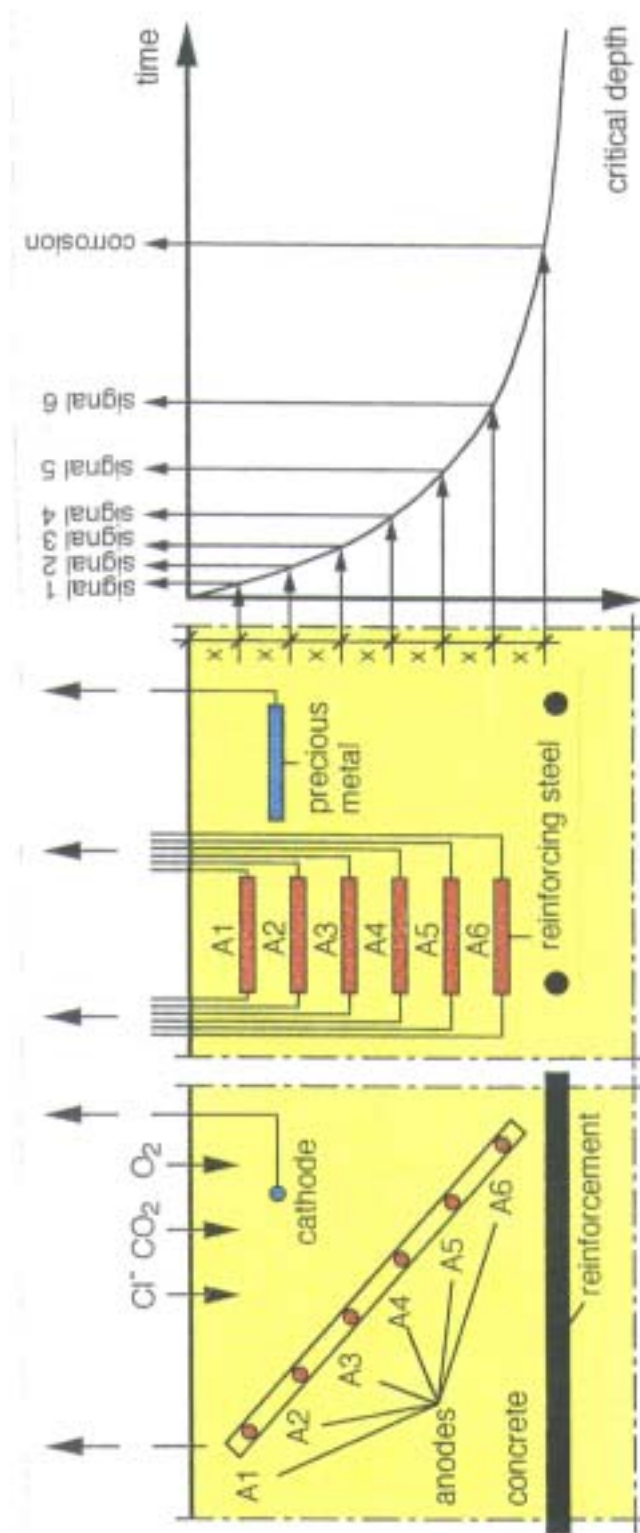


圖 3.6 Anode-Ladder-System 之原理

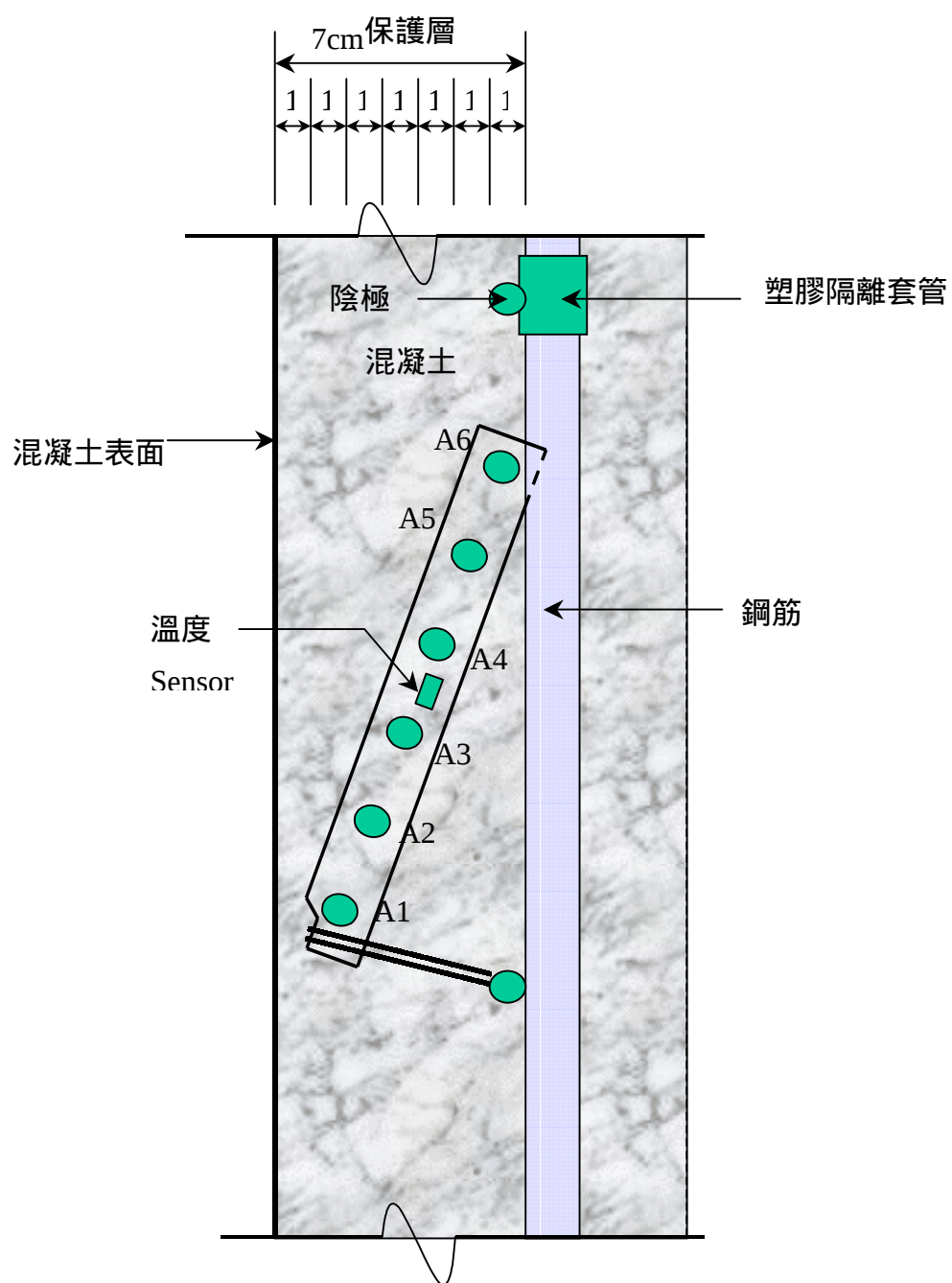


圖 3.7 Anode-Ladder-System 之排置詳圖

3.2 摻用爐石對添加海砂混拌混凝土之耐久性影響

3.2.1 試驗規劃

採用 ACI 混凝土配比設計法,以添加不等比例之爐石(取代水泥量)於海砂及河砂混拌之混凝土中,進行漿體拌製之基本性質試驗,以及硬固後之各項試驗。本研究持續對去年灌製的試體進行量測,試驗流程如圖 3.8 所示。

3.2.2 研究背景

1.混凝土配比

本研究以 ACI 混凝土配比設計法設計,試體水灰比為 0.45 與 0.60,設計強度分別為 450kg/cm^2 及 300kg/cm^2 ,漿體拌製所需之用料量,如表 3.7~3.10 所示。

表 3.7 配比 A(水灰比 0.45, 河砂)

編號	粗粒料 (kg/m^3)	細粒料 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	水泥 (kg/m^3)	爐石 (kg/m^3)	爐石取代 水泥量
A-R0	863	718	218	484	0	0 %
A-R30	863	718	218	339	145	30 %
A-R50	863	718	218	242	242	50 %

表 3.8 配比 A(水灰比 0.45, 海砂)

編號	粗粒料 (kg/m^3)	細粒料 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	水泥 (kg/m^3)	爐石 (kg/m^3)	爐石取代 水泥量
A-D0	807	789	218	484	0	0 %
A-D30	807	789	218	339	145	30 %
A-D50	807	789	218	242	242	50 %

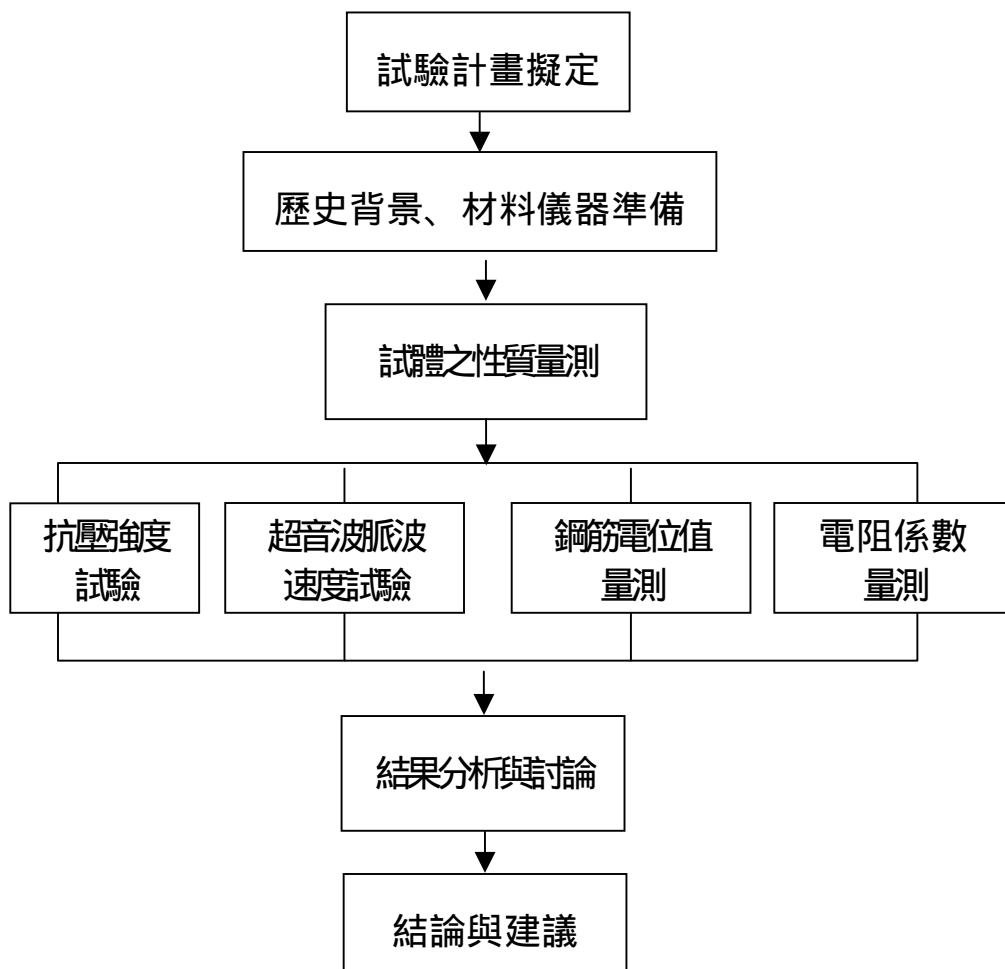


圖 3.8 試驗流程

表 3.9 配比 B(水灰比 0.60 , 河砂)

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
B-R0	863	819	218	363	0	0 %
B-R30	863	819	218	254	109	30 %
B-R50	863	819	218	181.5	181.5	50 %

表 3.10 配比 B(水灰比 0.60 , 海砂)

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
B-D0	807	892	218	363	0	0 %
B-D30	807	892	218	254	109	30 %
B-D50	807	892	218	181.5	181.5	50 %

2.混凝土之使用材料

(1)水泥：卜特蘭 型水泥。

(2)拌合水：自來水。

(3)爐石粉：國內中聯資源公司生產之高爐石粉，比重為 2.90。

(4)粒料：粗粒料最大粒徑 1/2”，細粒料之細度模數 FM 為 2.70。

(5)海砂：取自臺中港區航道海域浚挖之海砂，氯離子含量 0.24 %，細度模數 FM 為 2.13，粒料之物理性質如表 3.11。

表 3.11 粒料之基本物理性質

物理性質	粗粒料	細粒料 (河砂)	細粒料 (海砂)
細度模數 (FM)	-	2.70	2.13
比重 (SSD)	2.58	2.58	2.63
吸水率 (%)	1.72	2.20	1.36
乾單位重 (kg/m ³)	1529	-	-
乾比重	2.61	2.63	2.68
含水量 (%)	0.17	0.6	1.93

3.試體編號

試驗共有二個不同之配比，水灰比 0.45 配比其編號為 A，水灰比 0.60 配比其編號為 B，如使用海砂混拌時第二編碼為 D，河砂編碼為 R，第三編碼為爐石粉取代水泥量 0 %，30 %，50 %，其編碼為 0，30，50。各類試體編號說明如下表 3.12；

表 3.12 各類試體編號說明

編號代碼	水灰比	河砂	海砂	爐石取代量
A	0.45	-	-	-
B	0.60	-	-	-
R	-	*	-	-
D	-	-	*	-
0	-	-	-	0 %
30	-	-	-	30 %
50	-	-		50 %

試體編號說明如下：

A-R0：A(水灰比 0.45)，R (河砂)，0 (爐石取代水泥量 %)

B-R30：B(水灰比 0.60)，R (河砂)，30 (爐石取代水泥量 30 %)

A- D0：A(水灰比 0.45)，D (海砂)，0 (爐石取代水泥量 %)

B-D50：B(水灰比 0.60)，D (海砂)，50 (爐石取代水泥量 50 %)

3.2.3 試驗方法與設備

1.抗壓強度試驗

採用 ELE2000KN 之抗壓試驗機，試驗方法依據中國國家標準 CNS 1232 規範。

2.超音波脈波速度量

可參考 3.1.3 節之第 4 點

3.電阻係數試驗

可參考 3.1.3 節之第 5 點

4.鋼筋腐蝕電位值量測

混凝土中鋼筋之腐蝕狀況為一電化學反應，因此鋼筋表面會發展出有陽極與陰極之現象。本研究為量測混凝土內之鋼筋腐蝕電位值變化，特製作一個 10cm× 10cm× 36cm 矩型木模試體，內埋置 # 4 鋼筋，其中量測之導線一端與鋼筋焊接，如圖 3.9 所示。照片 3.8 為試體灌製前之情形，試體於澆置 24 小時後拆模，隨即將試體置入養生室進行養護，養護至一定齡期時進行電位值量測。電位量測使用三用電錶，一端接到導線，另一端接上氯化銀參考電極上並與混凝土表面接觸，在電錶上即可讀取腐蝕電位值，試驗情形如照片 3.9 所示。

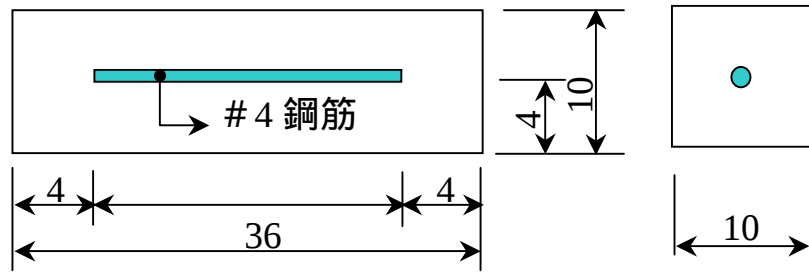


圖 3.9 鋼筋腐蝕電位值量測示意圖



照片 3.8 鋼筋腐蝕電位量測之試體灌製前之情形



照片 3.9 鋼筋腐蝕電位值量測之情形

3.3 混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查與潛勢

研究內容包括；資料之蒐集、現場目視調查、非破壞性檢測、鑽心取樣、試驗室之各項試驗、試驗數據之分析等。

3.3.1 目視調查

混凝土發生鹼質與粒料反應時，可從構造物表面的徵候做初步判斷。調查範圍包括花蓮港區及花東（臺 11 線）濱海公路沿線各類小型漁港設施，諸如防波堤、消波塊、碼頭；縱谷區則以鐵、公路橋樑及建築物為主。

3.3.2 現場非破壞性檢測

依據目視調查的結果，篩選防波堤、消波塊等構造物進行現場非破壞性檢測。由硬固混凝土之表面硬度、中性化深度、裂縫狀況等初步評估混凝土現況，並研判鹼質與粒料反應的發生之潛在趨勢。各項檢測項目及概要說明如下述：

1.反彈錘試驗

以反彈錘(Schmidt rebound hammer)撞擊混凝土表面，依據所得之反彈值，估計混凝土構造物表面之硬度，並研判混凝土的均勻性。比對反彈值推估所得與鑽心試體之抗壓強度試驗結果，探討混凝土強度變化和鹼質與粒料反應間之可能關係。

2.混凝土中性化試驗

本試驗主要係探討混凝土構造物中性化的程度，並與其他試驗相互比較分析。利用電鑽或鐵鎚先敲除少量結構體表面之混凝土，刷除混凝土新鮮面上之細顆粒後，以酚指示劑噴灑（刷）之，若表面呈現桃紅色，則表示該處屬於鹼性；若未變色，則表該處已中性化，而後量取混凝土的中性化深度。

3.3.3 混凝土鑽心取樣試驗

利用鑽心設備在現場進行鑽心取樣，除將試體攜回實驗室進行相關之試驗外，並與非破壞性試驗所得之結果相互印證。鑽心試體進行之試驗項目包括有 X 光繞射分析 (XRD)、掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)、加速浸泡試驗、與以醋酸鈦螢光法檢測反應產物等。

1.X 光繞射分析 (XRD)

X 光繞射分析係由 X 光發射管發出一已知波長之 X 光射線照射於試體上，並量測反射之 X 光射線強度為最大時所對應之角度，再由 Bragg's 公式計算出結晶體晶格面之間隔距離 d 。根據此一關係探討結晶體之構造特性，並進行礦物鑑別及定性分析。透過 XRD 分析可鑑定混凝土之化性（化合物）變化，並進一步探討病變之可能原因。

2.掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)

掃描式電子顯微鏡 (Scanning Election Microscopy , 簡稱 SEM) ,

係利用電子槍發射高能量聚焦電子光束，在磁力線圈的作用下，有系統地以電子光束在試體表面來回掃描，藉此得到試體表面外形或晶像之外觀。利用 SEM 分析可對混凝土孔隙結構分佈、晶相變化進行微觀分析，並觀察反應產物以鑑定可能病變之原因。

3.加速浸泡實驗

將現場鑽心試驗所得之鑽心試體儲存於不同的環境，並監測其鹼質與粒料反應的情形。鑽心試體裁切成適當長度後，表面粘設 4 組測點，每組測點之距離以測微計量測後，分別將試體置於 38℃，相對濕度 100%的環境中以及 1N NaOH 的溶液中，定期量測各環境中試體之長度變化。

4.醋酸鈷螢光法

由於鈷會取代鹼質與粒料反應後之鹼矽膠體中的鹼質，且產生之反應產物在短波（254nm）紫外光的照射下會有黃綠色的反應特徵，據此可檢測鹼質與粒料反應是否發生。

3.3.4 水泥砂漿棒膨脹試驗法（ASTM C227）

本試驗將自花東沿海地區可能具鹼質與粒料反應活性潛能之粒料，依據 ASTM C227 試驗方法及在指定的養護條件下，量測儲存期間砂漿棒長度變化，而判斷其是否具有反應活性。

第四章 試驗結果與討論

4.1 高性能混凝土耐久性研究

1. 中性化試驗

本研究之中性化試驗，是將鋼筋混凝土試驗牆鑽心取下之試體，以酚太試劑進行檢測，檢測結果如表 4.1 所示。從表可發現一般混凝土的中性化較大，且暴露於大氣下的較為嚴重，照片 4.1 為試驗牆混凝土鑽心試體中性化較為嚴重的 OPC 混凝土試體。

表 4.1 各試驗牆之中性化深度

混凝土配比	暴露環境	中性化深度(cm)
HPC-4000psi	Air	0.1
HPC-4000psi	Sea	0
OPC-4000psi	Sea	0.5
OPC-4000psi	Air	1.5
HPC-5000psi	Sea	0
HPC-3000psi	Sea	0

2. 超音波量測

超音波速測定，係藉由超音波脈動之傳遞以非破壞性之方式量測，由其傳遞速度瞭解混凝土之均勻性及組織之緻密性。

(1) 鑽心試體超音波量測

本試驗是量測六面試驗牆鑽心試體之超音波脈波速度，同時整理從 88 年起灌製之圓柱試體所量測各齡期之超音波脈波速度，量測結果整理如表 4.2 所示。從表中可看出經過六年之暴露試驗，其脈波速率均大於 4.0km/sec，若從表 3.4 超音波脈波速度與混凝土品質之關係 > 3.0km/sec 其混凝土品質均屬優良。



照片 4.1 中性化較為嚴重的 OPC 混凝土試體

表 4.2 鑽心與灌製試體之超音波脈波速度(km/sec)

試驗牆 齡期	1	2	3	4	5	6	備註
7 天	3.721	3.721	3.711	3.711	3.914	3.72	灌 製 圓 柱 試 體
14 天	3.840	3.840	3.823	3.823	4.031	3.850	
28 天	3.957	3.957	3.899	3.899	4.082	3.896	
56 天	4.001	3.999	3.914	3.976	4.110	3.948	
90 天	4.110	4.047	4.095	4.002	4.178	4.076	
180 天	4.206	4.218	4.129	4.059	4.263	4.163	
365 天	4.231	4.243	4.153	4.061	4.266	4.185	
545 天	4.237	4.300	4.18	4.080	4.285	4.226	鑽心試體
2350 天	4.595	4.628	4.201	4.147	4.625	4.618	

(2) 現地試驗牆超音波量測

為了了解現地之混凝土之性質，本研究在試驗牆面繪製 20 格避開鋼筋的方格，進行現地超音波之量測，量測之結果如表 4.3 與圖 4.1~4.6。從圖表可看出高性能混凝土的超音波脈波速率約在 4.0~4.2km/sec 之間，而一般混凝土約在 3.8~4.0km/sec 之間，雖然其速率均大 3km/sec，但可比較得知 HPC 確實有較好性質。

3. 鑽心試體電阻量測

混凝土電阻係數之大小在鋼筋混凝土結構物之腐蝕觀念中，可用來評估腐蝕電流通過混凝土介質的一種能力指標，電阻係數高表示電荷不易通過混凝土介質，電阻係數低則表示電荷較易流通，對混凝土內之鋼筋腐蝕威脅性高。此外，電阻係數亦可作為混凝土品質良窳鑑定標準之一。

表 4.4 為鑽心試體量測之電阻係數值，從表可發現每一個配比的試體其電阻值均大於 30 K Ω cm，依文獻表 3.5 得知電阻係數大於 20 K Ω cm 其鋼筋腐蝕活性程度很低，而高性能混凝土之電阻係數都比一般混凝土高，此乃可能是 HPC 較為緻密所致。

4. 抗壓試驗

混凝土之抗壓強度為現行混凝土品質控制之指標，在假定混凝土為均質材料之前提下，由混凝土單軸抗壓強度不但可知混凝土抗壓能力外，亦可評估混凝土之其他性質。例如抗壓强度高之混凝土，其彈性係數、抗拉強度、水密性及耐久性亦均較理想。

本研究的抗壓強度見表 4.5 所示，強度發展如圖 4.7。從圖表中可看出各配比之高性能混凝土的強度均有提升之趨勢，而一般混凝土的強度卻有下降的情形，雖然本研究之試體為鑽心試體與先前灌製之圓柱試體不同，但仍可發現高性能混凝土經過超過 6.5 年的暴露試驗，其強度仍然未有降低，這可能是因為 HPC 有添加飛灰爐石等波索蘭材料，與水泥水化物產生波索蘭反應，使 HPC 結構更加緻密，而提升混

凝土之晚期強度。然而一般混凝土的強度降低，也可從前面的中性化試驗得知 OPC 混凝土的中性化較為嚴重，其強度降低的原因可能是混凝土的正常老化所造成的結果。

5. 腐蝕電位分析

本研究在各試驗牆埋設 MnO_2 與 AgCl 等電極來量測混凝土電位變化。圖 4.8 為不同條件之 HPC 與 OPC 試體使用不同參考電極所測得之鋼筋腐蝕電位分佈情形。使用不同參考電極所測得之鋼筋腐蝕電位值似有明顯差距，事實上如換算以標準氫電極為基準零值電位時，則他們的電位值都應是一致的。因此圖 4.8 中各小圖內之用 MnO_2 與 AgCl 電極所測得的電位值差距應介於 $-100\sim-150\text{mV}$ 之間，顯然此兩種參考電極品質相當穩定，恰可相互對照校正。基本上 HPC 與 OPC 試體內之鋼筋，在試驗牆灌製後至水泥漿體大部份完成水化硬固階段（初期 $0\sim30$ 天之間），電位變化最為激烈，從 -500mV （以 AgCl 為例說明各章節內之電位均已此表示之）上升至 -200mV 附近，推就原因主要受到漿體內水分消長的影響，爾後隨著水泥漿體持續水化完全，漿體的穩定性與鹼性環境的上升，鋼筋之電位趨於穩定（小於 -200mV ），亦即鋼筋處於鈍化狀態。在經過 6.5 年期間，從圖 4.8 各小圖發現鋼筋腐蝕電位有持續下降之趨勢，但仍可比較出 OPC 比 HPC 混凝土的腐蝕電位有較大的情形。同時經過本次之量測結果，發現各電極並未有失效情形，若能持續監測則可更了解混凝土內部之變化。

6. Anode Ladder System 之量測

圖 4.9 為以埋置於 HPC 及 OPC 試驗牆內之偵測元件(Anode Ladder System)所量測到不同保護層厚度處之陽極對陰極電位與時間之變化趨勢。從圖可發現高性能混凝土的腐蝕電位在 $-5\sim-100\text{mV}$ ，而一般混凝土之電位在 $-5\sim-220\text{mV}$ ，OPC 比 HPC 之腐蝕電位有較大之趨勢，尤其是暴露在大氣下 OPC 混凝土其距離混凝土表面 1cm 的陽極梯，腐蝕電位達到 220mV 已經有腐蝕趨勢，同時由中性化試驗得知，該試驗牆之鑽心試體中性化最為嚴重，因此兩者間更可互相印證。

表 4.3 試驗牆現地超音波量測(km/sec)

		1	2	3	4	5
牆 1	1	4.155	4.098	4.076	4.071	4.155
	2	4.011	4.038	4.138	4.000	4.155
	3	4.208	4.071	4.149	4.021	4.132
	4	4.219	4.016	4.110	3.979	4.100
牆 2	1	4.021	4.237	4.144	4.104	3.881
	2	4.190	4.138	4.121	4.065	4.054
	3	4.190	3.995	4.110	4.049	4.202
	4	4.213	4.140	4.098	4.065	4.267
牆 3	1	3.866	3.881	4.000	3.958	3.979
	2	3.788	3.916	3.927	3.916	3.963
	3	3.797	3.906	3.979	3.968	3.927
	4	3.783	3.916	4.000	3.881	3.812
牆 4	1	3.958	3.963	4.076	4.032	3.958
	2	3.937	3.927	3.974	3.932	3.989
	3	4.038	3.922	3.876	3.932	4.016
	4	4.000	3.831	3.793	3.911	3.886
牆 5	1	4.261	4.225	4.249	4.127	4.267
	2	4.196	4.213	4.132	4.038	4.150
	3	4.184	4.161	4.219	4.208	4.093
	4	4.202	4.202	4.213	4.161	4.027
牆 6	1	4.144	4.087	4.087	4.000	4.038
	2	4.021	4.098	4.000	4.082	4.104
	3	4.110	4.082	3.968	3.958	4.076
	4	4.082	4.011	4.011	3.989	4.149

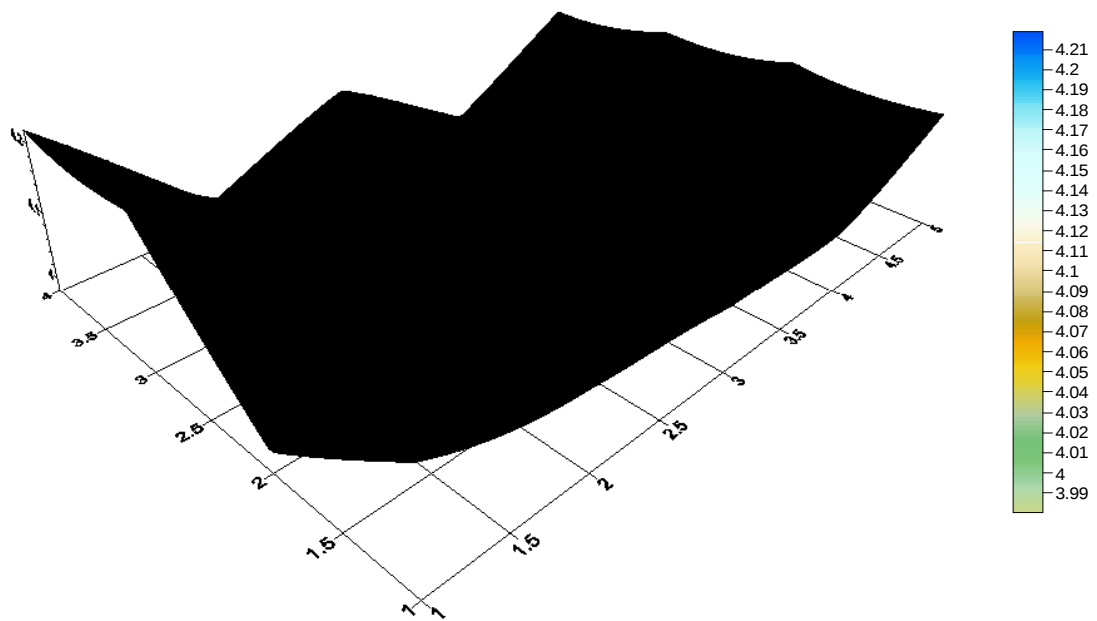


圖 4.1 HPC-4000psi(Air)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec)

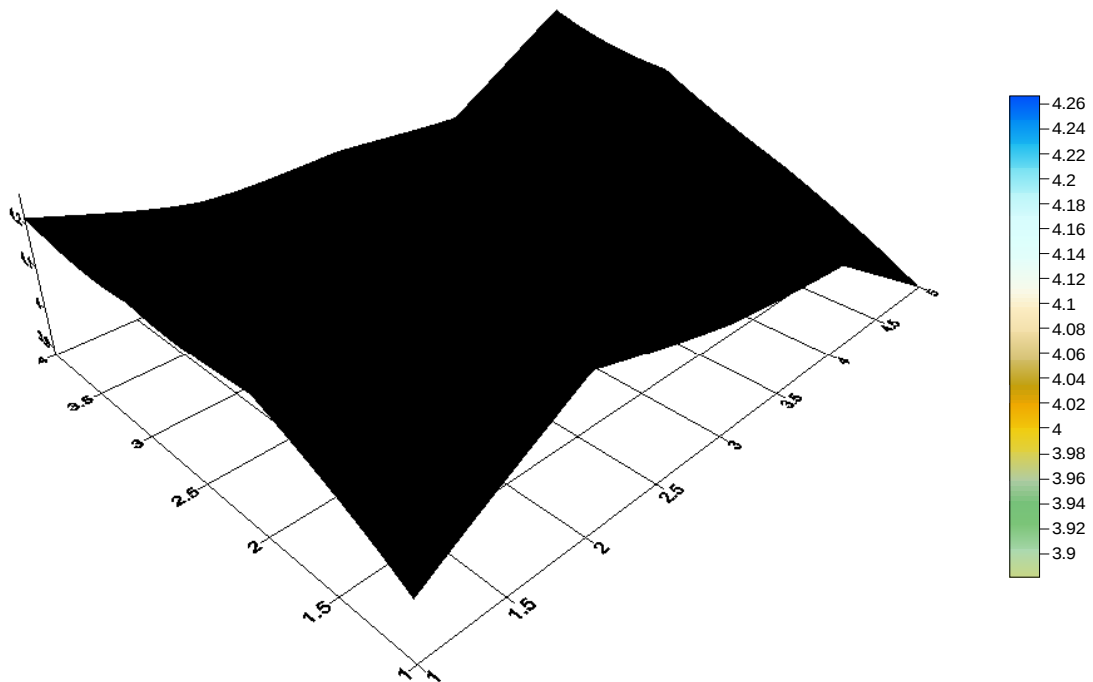


圖 4.2 HPC-4000psi(Sea)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec)

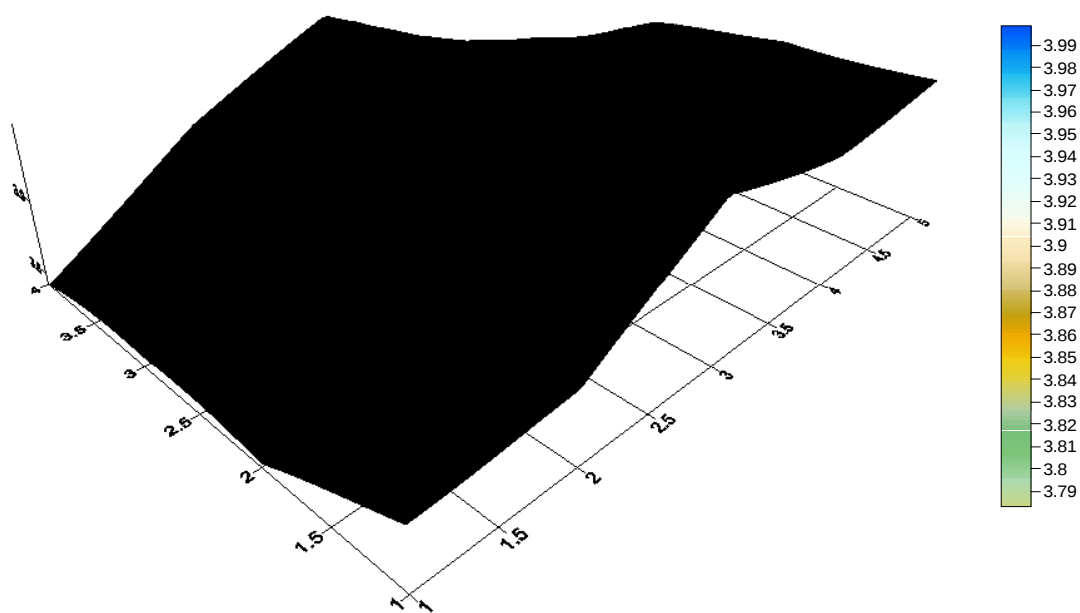


圖 4.3 OPC-4000psi(Sea)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec)

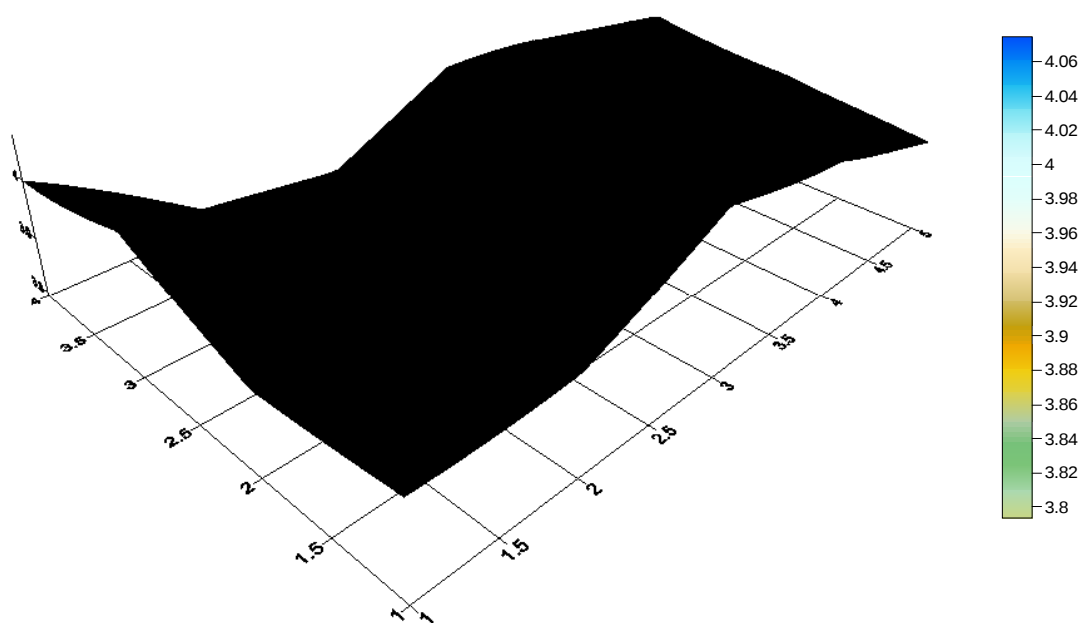


圖 4.4 OPC-4000psi(Air)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec)

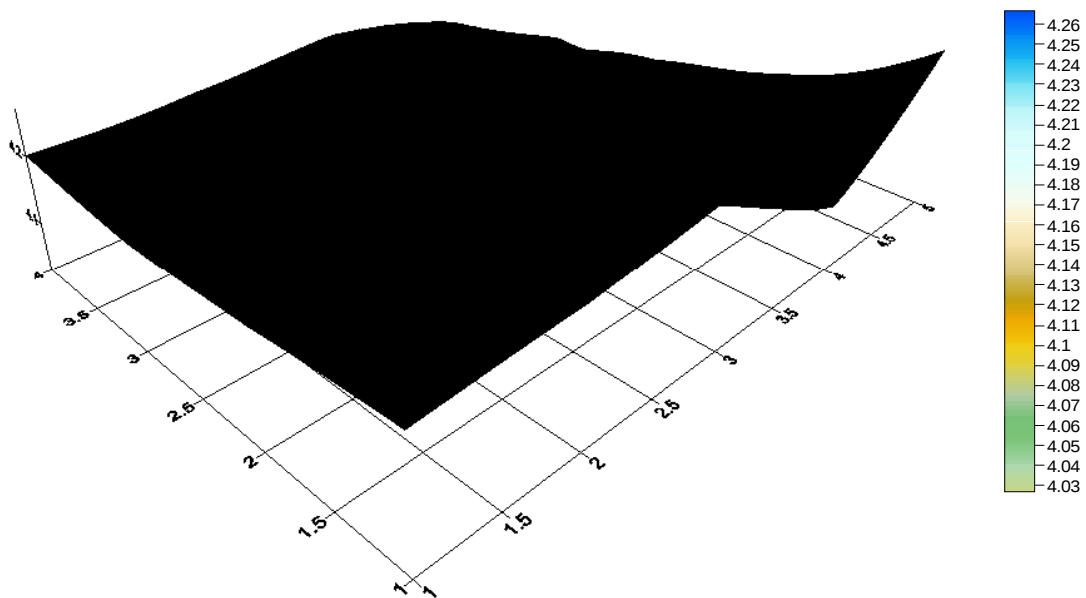


圖 4.5 HPC-5000psi(Sea)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec)

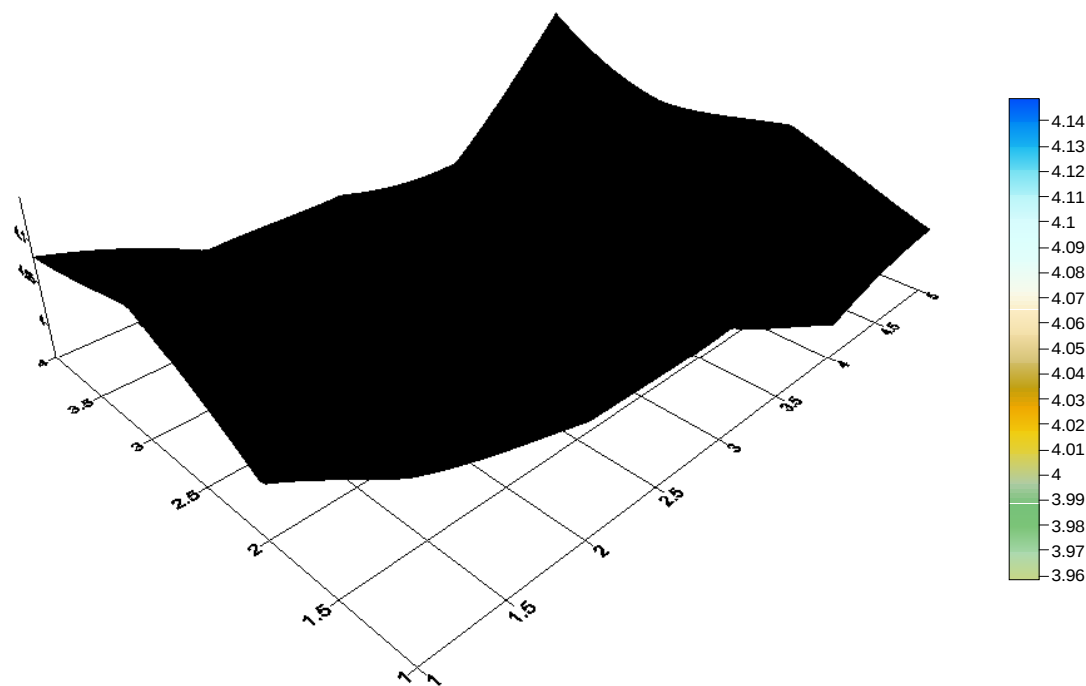


圖 4.6 HPC-3000psi(Sea)試驗牆之超音波脈波速率(km/sec)

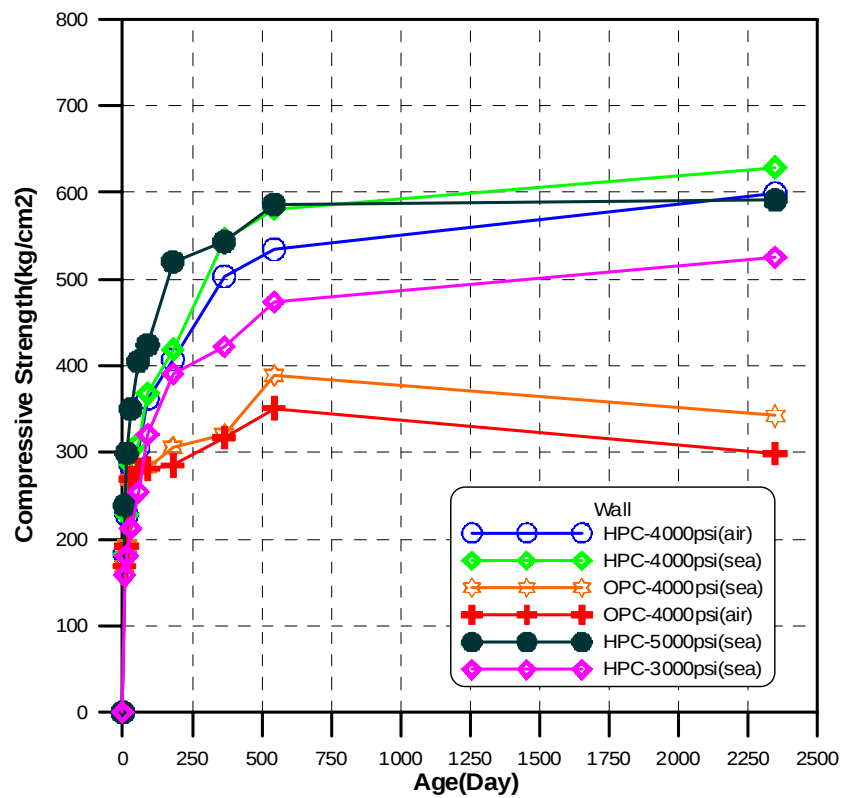


圖 4.7 混凝土之強度發展

表 4.4 鑽心試體之電阻係數

混凝土配比	暴露環境	電阻係數 KΩ cm
HPC 4000psi	AIR	42.9
HPC 4000psi	SEA	44.4
OPC 4000psi	SEA	30.8
OPC 4000psi	AIR	34.2
HPC 5000psi	SEA	41.4
HPC 3000psi	SEA	51.8

表 4.5 鑽心與灌製試體之抗壓強度(kg/cm²)

試驗牆 齡期	1	2	3	4	5	6	備註
7 天	183	183	169	169	239	158	圓 柱 試 體
14 天	228	228	192	192	299	180	
28 天	285	285	269	269	350	213	
56 天	305	311	282	280	405	255	
90 天	362	368	283	281	424	321	
180 天	407	419	306	285	520	391	
365 天	503	546	321	317	543	422	
545 天	534	580	389	351	586	474	
2350 天	599	629	342	299	591	525	鑽心試體

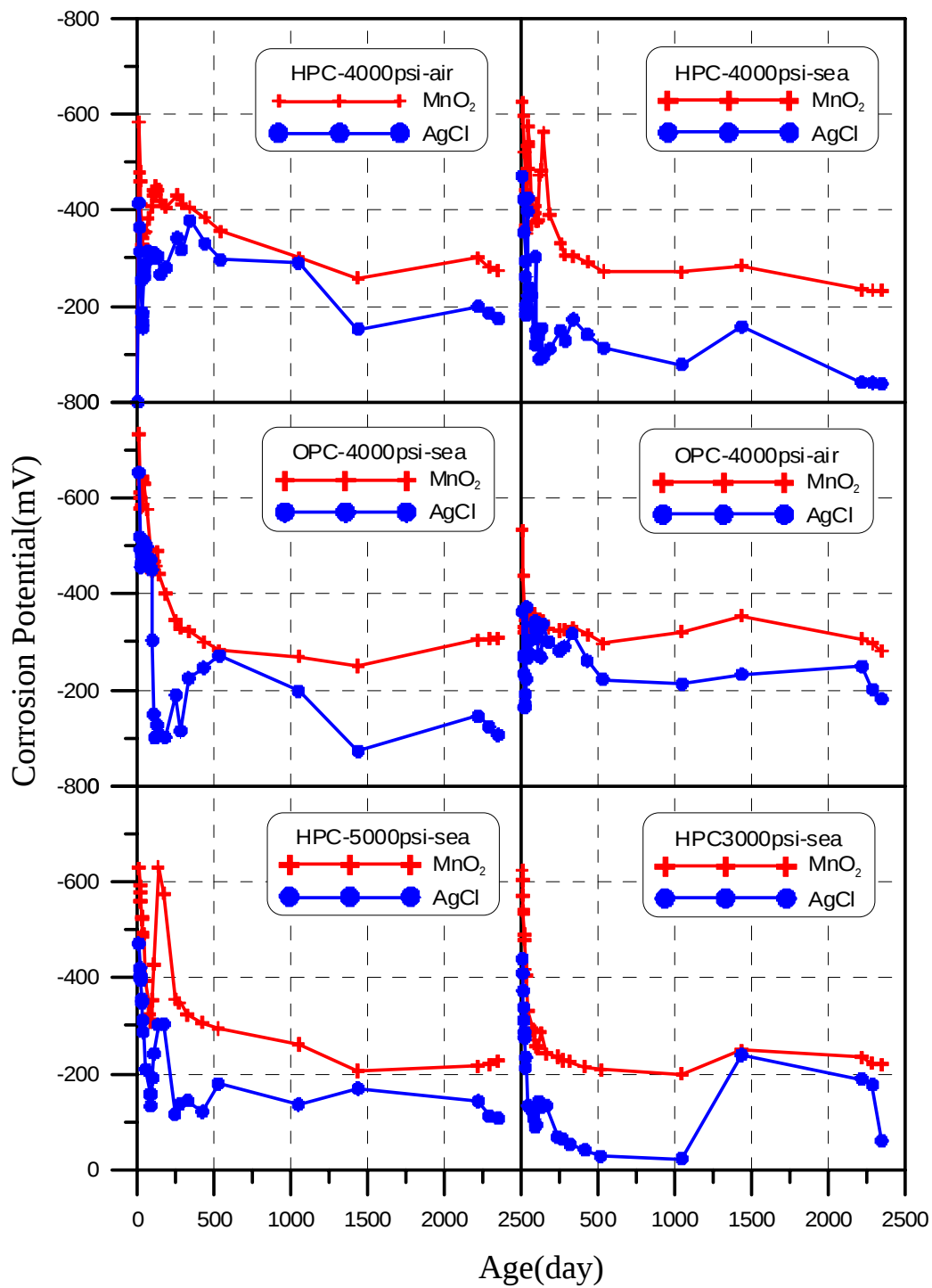


圖 4.8 腐蝕電位與齡期之關係

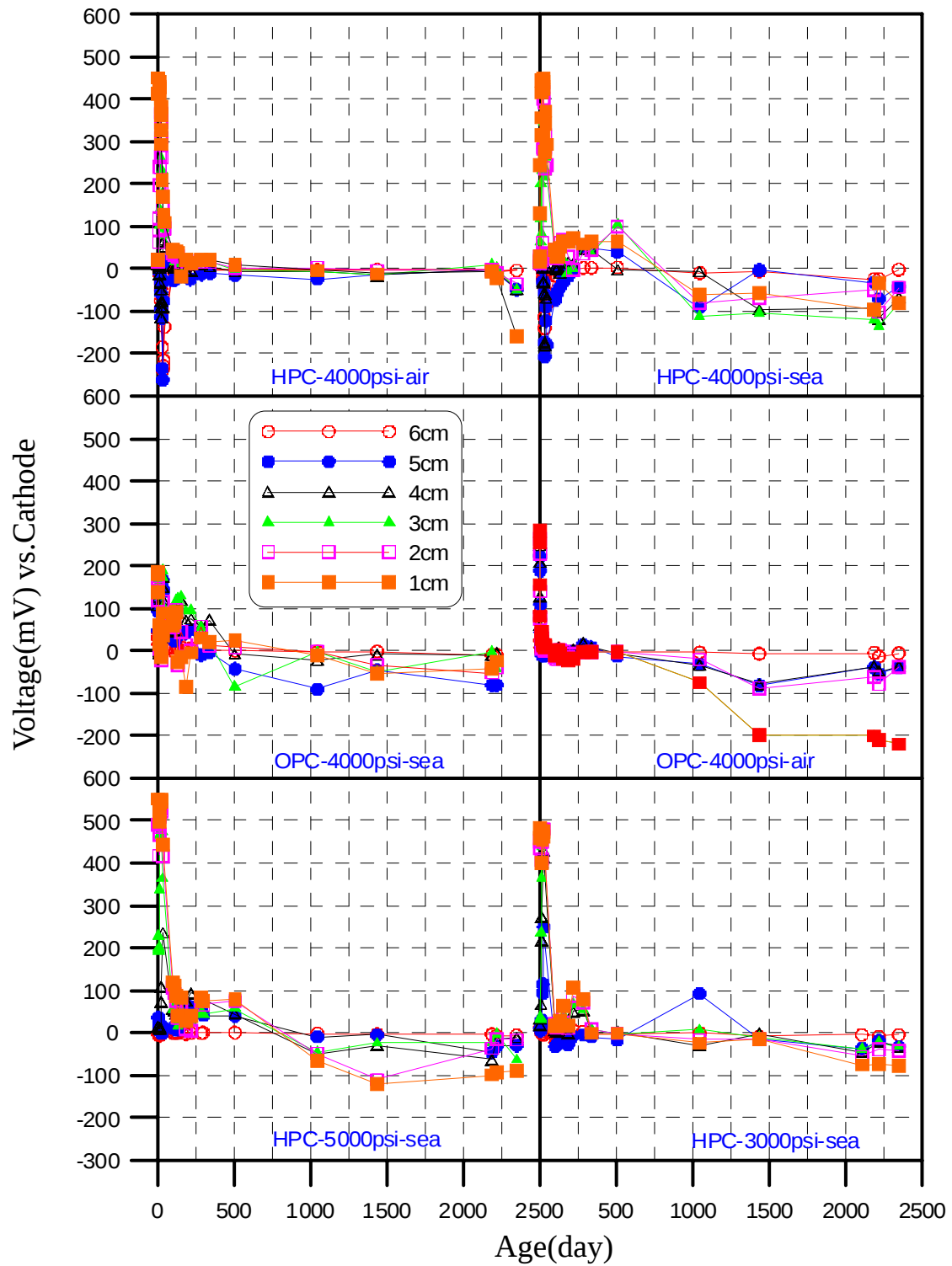


圖 4.9 Ladder System 各陽極對陰之電位與齡期關係

4.2 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響

1. 抗壓強度

抗壓強度為混凝土品質控制之重要指標之一，如假設混凝土為均質材料時，單軸抗壓除了可知道混凝土抵抗壓力能力外，亦可推估其它物理性質，例如抗壓强度高時，相對其彈性模數、抗拉強度、水密性及耐久性亦均較為理想。

本研究為持續量測摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響，表 4.6 為彙整各配比試體之抗壓強度與養生齡期間之試驗結果，各配比試體之抗壓強度發展趨勢，則繪製於圖 4.10 至圖 4.13。表 4.6 中顯示配比 A(水灰比 0.45)之各類型試體之抗壓強度均較配比 B(水灰比 0.60)高出甚多，驗證低水灰比可得較高強度混凝土。同時本研究在經過一年的齡期，其強度發展並未改變，例如配比 A(河砂，水灰比 0.45)試體，其抗壓強度發展與爐石粉取代水泥量及養生齡期，呈正向關係趨勢，亦即抗壓強度隨爐石粉取代水泥量及養生齡期之增加而增加，且其抗壓強度為各配比中最佳者，而配比 A 如以海砂來混拌混凝土，爐石取代水泥量 30 % 時，其強度卻較爐石取代量 50 % 者為高，推究其原因可能海砂之細度模數(F.M.=2.13)，較河砂之細度模數(F.M.=2.70)為小所致。而在配比 B 分別混拌河砂及海砂之混凝土試體之強度發展趨勢，以爐石粉取代水泥量 30%，可得到最大之抗壓強度，且有加爐石的海砂混凝土的強度比未加爐石有較高的抗壓強度，這也說明若海砂內有添加爐石取代水泥，其抗壓強度會比較高。

表 4.6 試體抗壓強度試驗結果 (kg/cm²)

齡期 試體編號		14 天	28 天	56 天	90 天	180 天	365 天
配比 A (W/C, 0.45)	A-R0	488	526	561	592	602	611
	A-R30	526	601	625	634	671	708
	A-R50	536	606	633	658	708	738
	A-D0	485	517	552	591	599	602
	A-D30	509	579	601	623	641	687
	A-D50	488	552	587	607	623	652
配比 B (W/C, 0.60)	B-R0	383	412	461	498	502	510
	B-R30	396	450	501	528	555	594
	B-R50	374	425	474	509	532	560
	B-D0	278	295	318	335	352	379
	B-D30	307	349	378	404	408	412
	B-D50	299	340	347	354	356	385

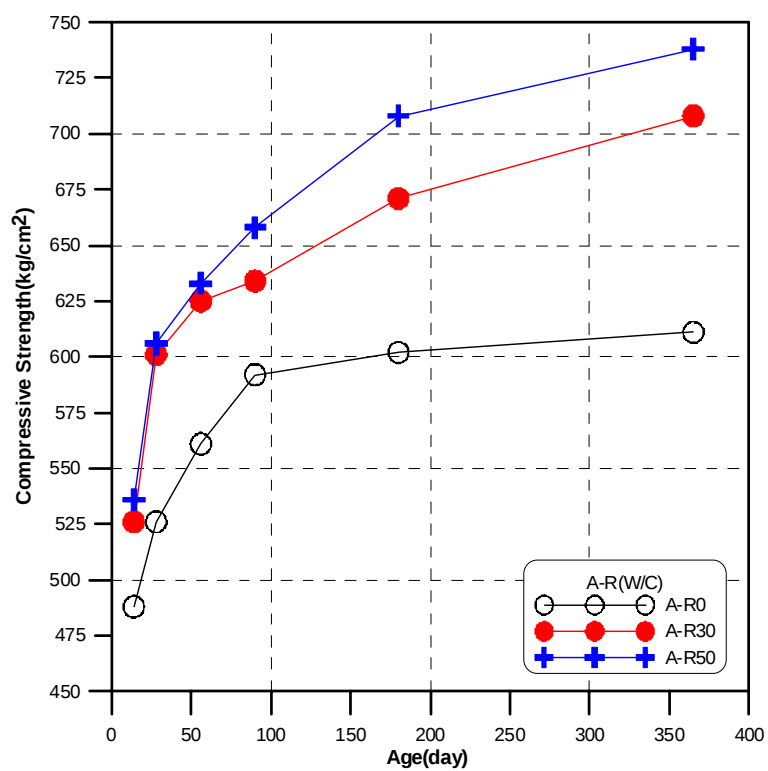


圖 4.10 配比 A 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢

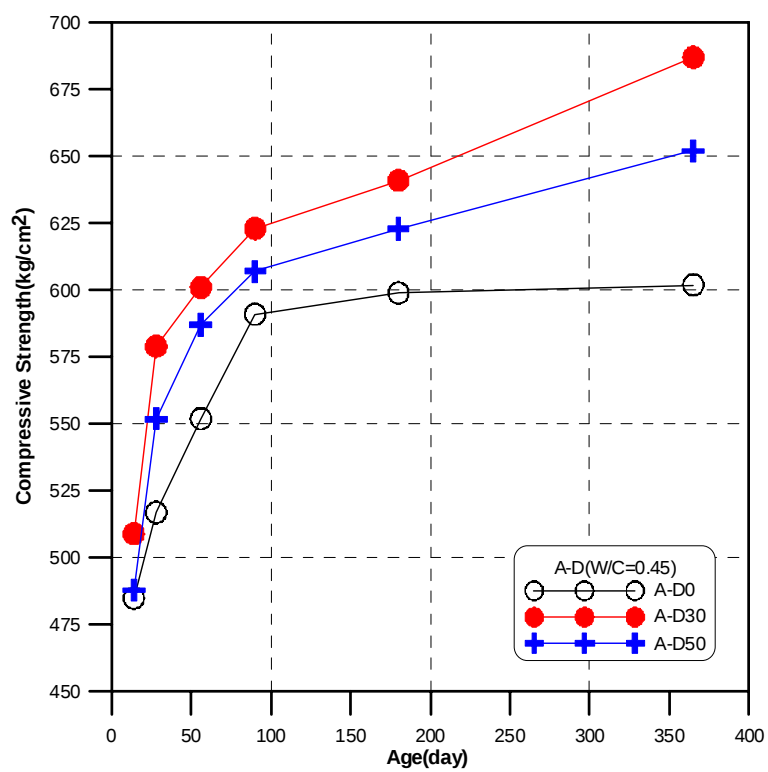


圖 4.11 配比 A 試體(以海砂混拌)之抗壓強度發展趨勢

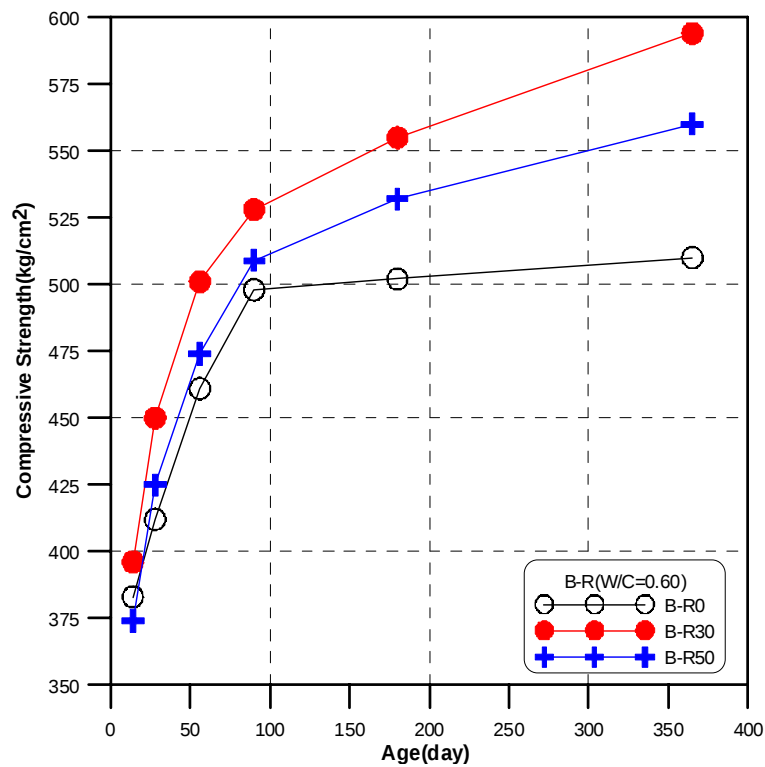


圖 4.12 配比 B 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢

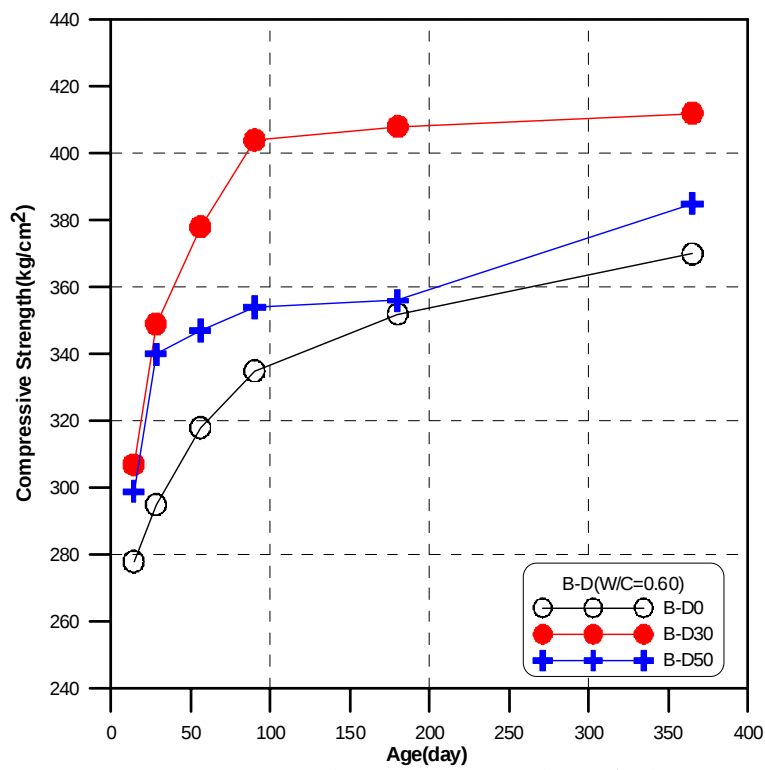


圖 4.13 配比 B 試體(以海砂混拌)之抗壓強度發展趨勢

2. 超音波脈波速度

超音波脈波速度量測，係藉由超音波脈動在介質內之傳遞速度之快慢，可評估受測介質內部之均勻性及其組織之緻密性為何？當介質緻密時則脈波速度快，若介質內部有孔隙或裂縫存在時，則其脈波速度顯著變慢。

表 4.7 及圖 4.14 與圖 4.15 為各配比試體進行超音波脈波速度量測所得之結果。表 4.7 中顯示，各類型試體之脈波速度均隨養生齡期之增加而變快，推究可能原因乃水泥漿體水化過程充分且持續進行，水化產物（C-S-H）膠體發展完整，並充分填滿孔隙路徑，致使漿體趨於緻密硬實，因此，波速通過介質（漿體）變為甚快。經過一年的齡期各類型試體於不同養生齡期下，其超音波脈波速度均大於 4.0km/sec 以上，如依據表 3.4 混凝土品質等級判別標準，混凝土之品質相當穩定且屬於優良等級。上述之結果恰與抗壓強度發展趨勢，關係呈一致性且相互驗證。

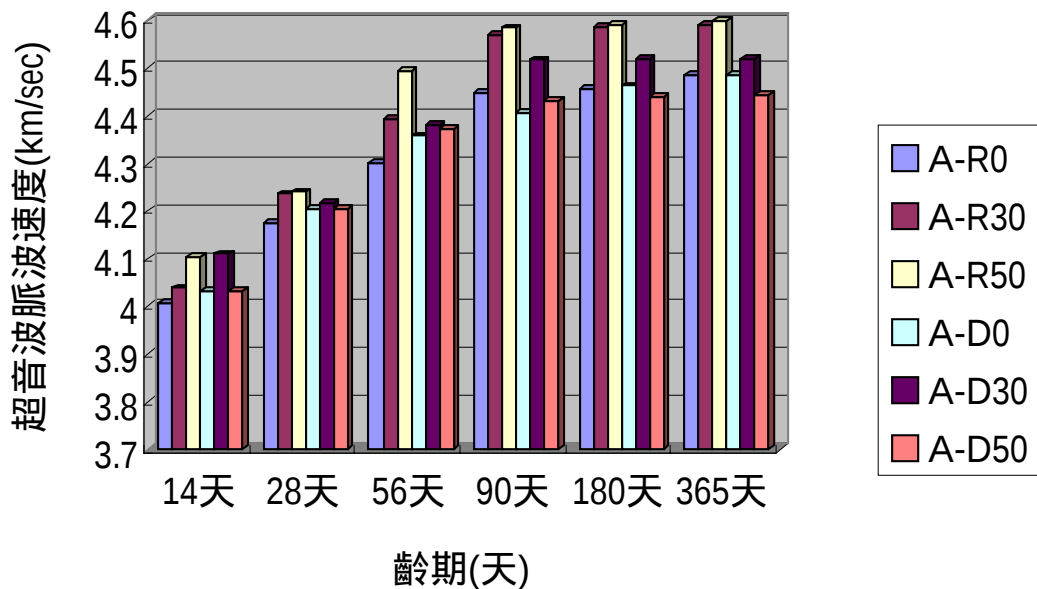


圖 4.14 配比 A 試體之超音波脈波速度與齡期的關係

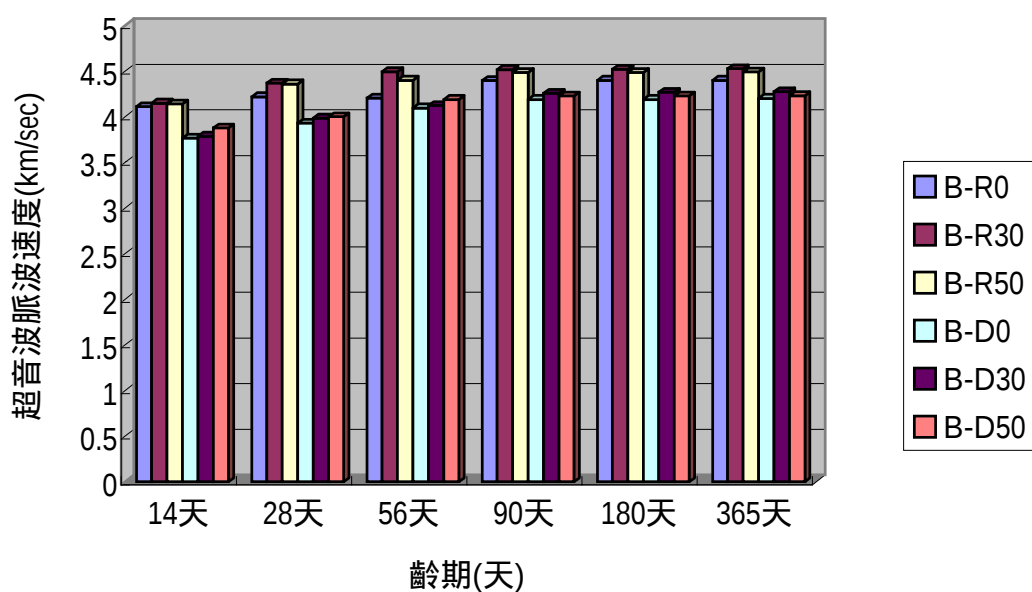


圖 4.15 配比 B 試體之超音波脈波速度與齡期的關係

表 4.7 試體超音波脈波速度試驗結果 (km/sec)

齡期		14 天	28 天	56 天	90 天	180 天	365 天
配比 A (W/C, 0.45)	A-R0	4.008	4.175	4.300	4.449	4.456	4.487
	A-R30	4.039	4.236	4.392	4.570	4.588	4.592
	A-R50	4.103	4.240	4.493	4.584	4.590	4.599
	A-D0	4.031	4.204	4.358	4.405	4.463	4.487
	A-D30	4.110	4.217	4.381	4.517	4.518	4.519
	A-D50	4.032	4.205	4.371	4.432	4.439	4.444
配比 B (W/C, 0.60)	B-R0	4.11	4.218	4.205	4.398	4.399	4.401
	B-R30	4.149	4.367	4.493	4.518	4.520	4.524
	B-R50	4.141	4.359	4.401	4.484	4.485	4.490
	B-D0	3.767	3.929	4.097	4.189	4.190	4.201
	B-D30	3.785	3.984	4.121	4.255	4.269	4.274
	B-D50	3.878	3.998	4.189	4.228	4.228	4.230

3. 電阻係數

混凝土電阻係數之大小在鋼筋混凝土結構物之腐蝕觀念中，可用來評估腐蝕電流通過混凝土介質的一種能力指標，電阻係數高表示電荷不易通過混凝土介質，電阻係數低則表示電荷較易流通，對混凝土內之鋼筋腐蝕威脅性高。此外，電阻係數亦可作為混凝土品質良窳鑑定標準之一。

圖 4.16 與圖 4.17 分別為配比 A 與配比 B 試體之電阻係數試驗結果。兩圖中顯示，混凝土之電阻係數均隨養生齡期之增加而增大，與混凝土之強度發展並未有相同之趨勢，探究原因可能為混凝土試體量測時其表面之乾濕度影響到量測。雖然乾濕度會影響到電阻量測但還是可發現在齡期一年時低水比的混凝土其電阻係數比高水灰比為高，且有添加爐石取代水泥的電阻係數也較高。

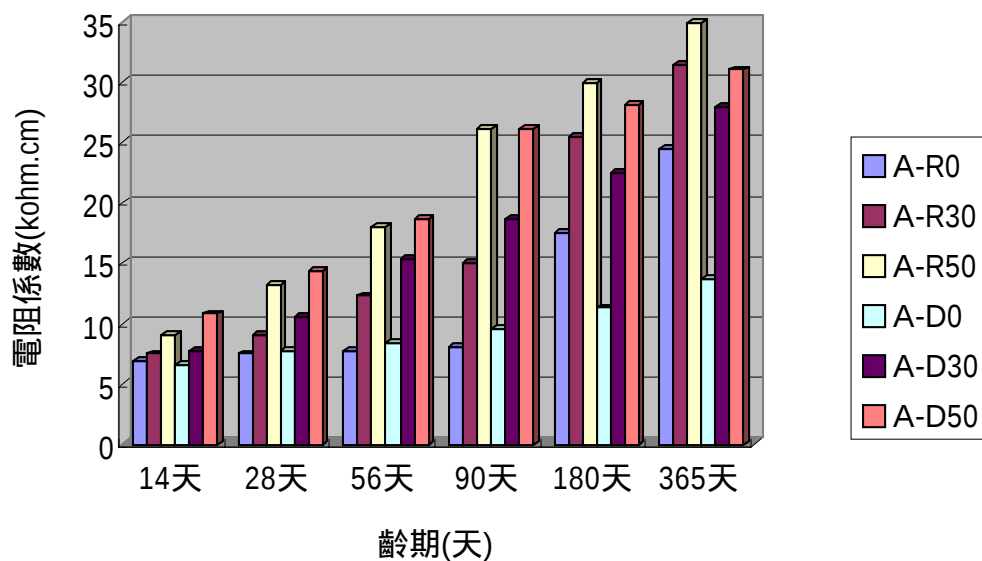


圖 4.16 配比 A 試體之電阻係數與養生齡期的關係

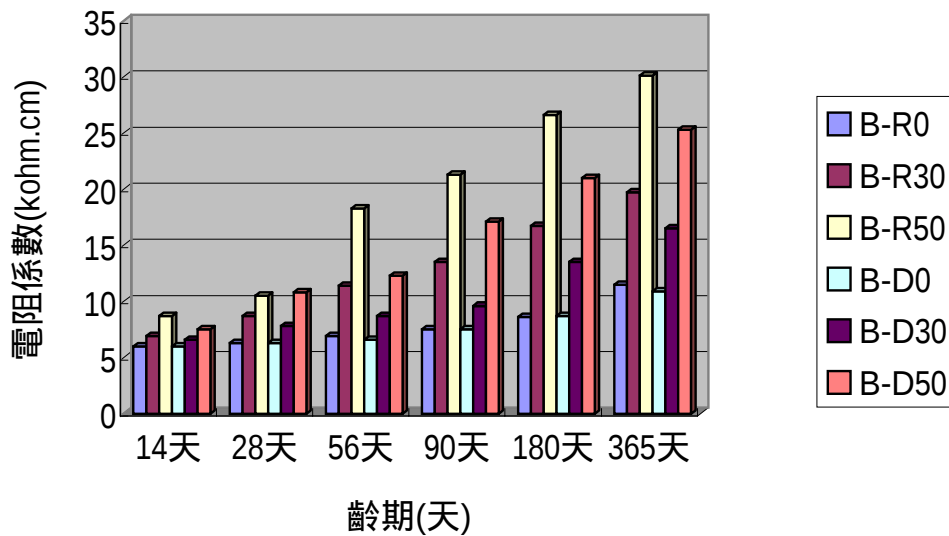


圖 4.17 配比 B 試體之電阻係數與養生齡期的關係

4.鋼筋腐蝕電位值量測

腐蝕是一種電化學反應，在鋼筋表面會形成許多陰極和陽極之小電池(cell)區域，在不同位置有不同的電位和電流產生。利用此理論，可檢測某一範圍之電位分佈狀況，以評估鋼筋表面發生腐蝕的可能程度與範圍。

表 4.8 與表 4.9 分別為配比 A 與配比 B 試體內之鋼筋腐蝕電位值量測結果。雖經過一年之量測，混凝土內之鋼筋腐蝕電位還是很不穩定，並未呈現明顯或規律趨勢，但可發現暴露在海水中的試體其腐蝕電位有較大的情形，此刻，甚難依據表中數據解讀內部鋼筋實際之腐蝕狀況，欲得正確之結果，以掌控鋼筋腐蝕發展過程，本項試驗應長期進行監測。

表 4.8 水灰比 0.45 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係 (mV)

齡期 配比		28 天	90 天	180 天	365 天
配比 A (W/C, 0.45)	A-R0 (Air)	-215	-218	-173	-62
	A-R0 (Sea)	-217	-228	-272	-385
	A-R30 (Air)	-538	-548	-436	-92
	A-R30 (Sea)	-537	-600	-609	-621
	A-R50 (Air)	-435	-516	-333	-62
	A-R50 (Sea)	-405	-553	-543	-599
	A-D0 (Air)	-106	-111	-97	-77
	A-D0 (Sea)	-116	-308	-317	-340
	A-D30 (Air)	-179	-181	-136	-101
	A-D30 (Sea)	-154	-526	-551	-572
	A-D50 (Air)	-343	-231	-200	-147
	A-D50 (Sea)	-350	-576	-574	-571

表 4.9 水灰比 0.60 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係 (mV)

齡期 配比		28 天	90 天	180 天	365 天
配比 B (W/C, 0.60)	B-R0 (Air)	-75	-80	-71	-66
	B-R0 (Sea)	-73	-82	-100	-122
	B-R30 (Air)	-162	-187	-102	-47
	B-R30 (Sea)	-157	-189	-599	-620
	B-R50 (Air)	-123	-148	-101	-65
	B-R50 (Sea)	-124	-204	-546	-615
	B-D0 (Air)	-93	-112	-113	-111
	B-D0 (Sea)	-86	-298	-596	-606
	B-D30 (Air)	-80	-87	-93	-112
	B-D30 (Sea)	-78	-305	-322	-344
	B-D50 (Air)	-86	-144	-123	-110
	B-D50 (Sea)	-89	-287	-277	-267

4.3 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析

4.3.1 目視調查

花蓮港新東堤與花東沿海之石梯港、長濱漁港、新港漁港之防波堤則出現地圖狀裂縫、裂縫處並有滲出物等疑似鹼質與粒料反應之徵候。此外，花蓮港西堤及航道東側之消波塊，各漁港內消波塊也都發現零星或大批地圖狀裂縫、滲出物等明顯鹼質與粒料反應徵候，省道臺 11 線及臺 9 線至臺東大武沿線之消波塊及部份橋樑之橋墩亦有多處發現類似徵候，且批段性十分明顯，如照片 4.2~4.13。



照片 4.2 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 1



照片 4.3 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 2



照片 4.4 花蓮港航道消波塊地圖狀裂縫



照片 4.5 石梯港消波塊地圖狀裂縫



照片 4.6 新港漁港消波塊地圖狀裂縫



照片 4.7 富崗漁港堤防裂損現況



照片 4.8 臺東海濱公園消波塊地圖狀裂縫 1



照片 4.9 臺東海濱公園消波塊地圖狀裂縫 2



照片 4.10 臺東大武公園消波塊地圖狀裂縫



照片 4.11 跨越之臺九線鐵路橋平行主鋼筋方向裂縫



照片 4.12 臺九線公路橋樑橋墩裂縫 1



照片 4.13 臺九線公路橋樑橋墩裂縫 2

4.3.2 非破壞性檢測

1. 試錘試驗

試錘試驗結果如表 4.10 所示。換算為混凝土之表面硬度，花蓮港新東堤堤身之測點除一處低於設計值 210 kg/cm^2 外，均大於設計值。消波塊部份其硬度除新港漁港明顯偏低外，均屬正常值 (140 kg/cm^2) 以上；由於消波塊屬消耗性構件，其強度不足並不致發生重大損害。

表 4.10 現場試錘試驗與中性化深度量測之結果

構造物名稱	表面硬度 (kg/cm^2)	中性化深度 (mm)
花蓮港新東堤	163 339	1 4
石梯漁港消波塊	162 195	0.5 3
新港漁港消波塊	105.0	0.5 3.
臺東濱海公園消波塊	243 351	1 3
大武公園消波塊	386 438	1 2.5

2. 中性化試驗

試驗結果詳如表 4.10 所示，中性化程度均不高，以花蓮港新東堤較高，約在 1 mm 至 4mm 深度左右，照片 4.14 為鑽心試體進行中性化深度量測之情形。



照片 4.14 鑽心試體中性化程度量測情形

4.3.3 鑽心試體試驗

1. X 光繞射分析 (XRD)

本試驗係將混凝土構造物以鑽心試體擇要敲取碎片，各試樣壓碎之碎片分袋，分別取出部份碎片，依規定研磨至通過所需篩號（#100）之粉末，進行 XRD 實驗，試驗結果如圖 4.18 至圖 4.20 所示，經比對可能具有活性之成分，活性成分主要有 Tridymite(鱗英石) Cristobalite (方英石) $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$ (鹼矽膠體) 及可能使混凝土發生膨脹之 Ettringite (鈣鉬石) 等。

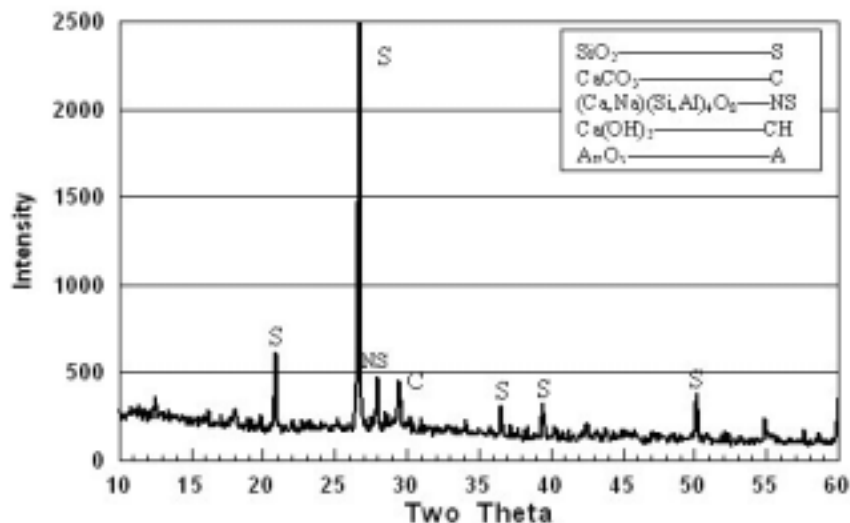


圖 4.18 石梯港消波塊 X 光繞射分析試驗結果

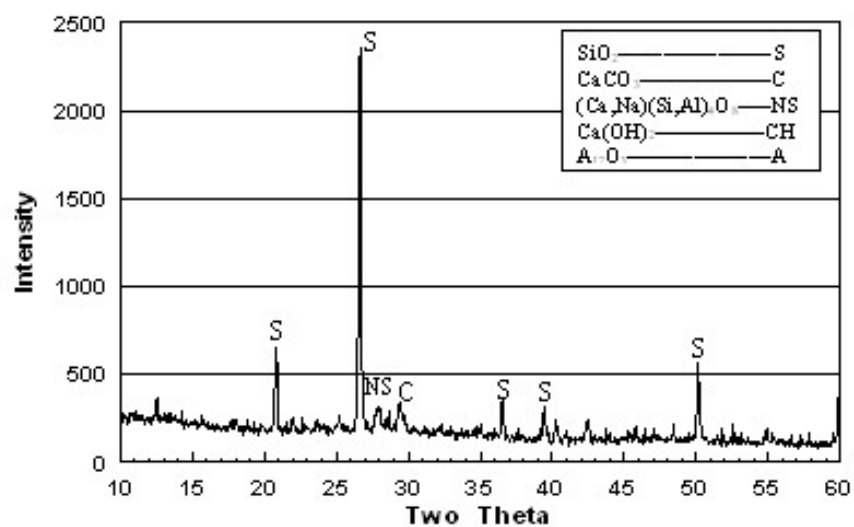


圖 4.19 臺東海濱公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果

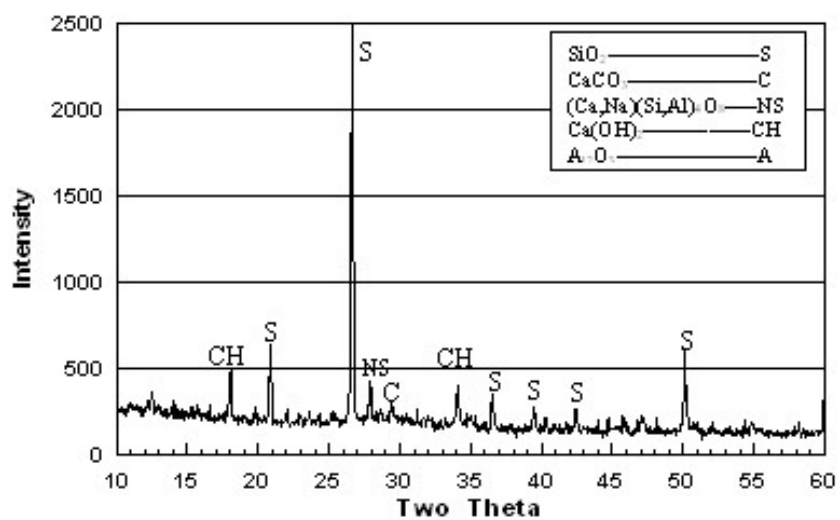
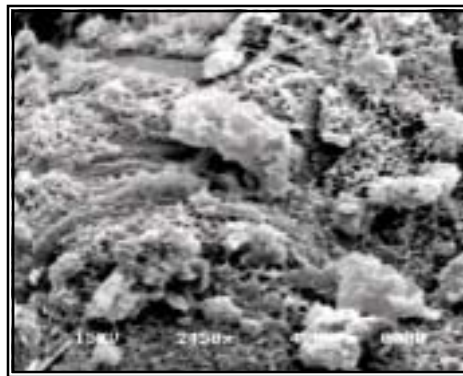


圖 4.20 臺東大武公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果

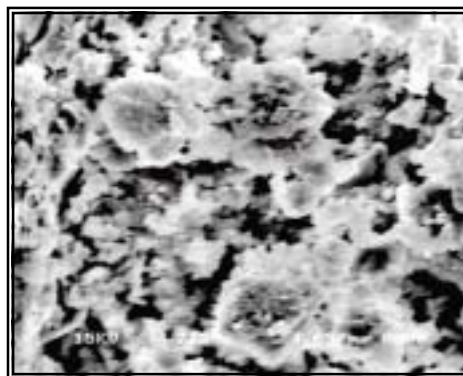
2. 掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)

本研究中所選擇的 SEM 試體，分別取自鑽心試體或鑿取自有疑似鹼質與粒料反應徵候之現地結構物碎片。石梯港及臺東海濱公園消波塊部份試體其內部有海綿狀體之膠結物，與屬於活性粒料和鹼性物質反應所生成的產物類似，部份形狀包括了海綿狀體之膠結物、細絲狀等，如照片 4.15 至 4.16 所示；顯示其組成成份包括鹼、矽、鈣、鋁和鈉之膠體，與外部徵候調查結果相互印證，應有鹼質與粒料反應之生成物存在。

為確認類似鹼質與粒料反應膠體產物的存在與反應膠體產物的成分，本研究後續將對部分完成浸泡試驗之試體同時進行 EDS 分析，如出現類似鹼性物質反應所生成的產物，且經分析含有鈉、鉀、矽、鈣等成分，可與 X 光繞射分析及目視檢測結果相互比對確認粒料活性。



照片 4.15 石梯港消波塊 SEM 照片



照片 4.16 臺東海濱公園消波塊 SEM 照片

3.鑽心試體斷面醋酸鈦法試驗

現場完成鑽心試體取樣後，以醋酸鈦法檢測試體表面是否含有鹼矽膠體。各試體斷面在噴灑醋酸鈦液體前後之照片比對分析，經過詳細色澤變化鑑定後，整體而言，尚無出現黃綠色反應(鹼矽膠體)的區域。

4.鑽心試體浸泡試驗膨脹量量測

鑽心試體浸泡環境分為 38 °C 1N NaOH 溶液，及 38 °C，相對濕度 100 % 兩種。本試驗因需長期觀測，目前試驗尚在進行中。

4.3.4 ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹試驗法

依據 ASTM C227 規範規定，將取自具活性潛能之地區（臺東縣東河、三仙台....等地區）之粒料製作成水泥砂漿棒，含鹼量則調整至 1.2 %，本試驗因需長期觀測，目前試驗尚在進行中。

第五章 結論

5.1 高性能混凝土的耐久性研究

- 1.本研究的高性能混凝土的中性化試驗,可看出部分 OPC 混凝土的中性化深度達 1.5cm , 而 HPC 則幾乎不受影響。
- 2.現地與鑽心試體超音波量測,都可發現 HPC 之脈波速度比 OPC 為高
- 3.本研究之 HPC 其抗壓強度在齡期 6.5 年有持續增加,而 OPC 混凝土的強度已下降折減,其折減原因乃混凝土老化之正常現象。
- 4.在 Anode Ladder System 之量測結果顯示,其腐蝕電位後隨齡期之增加而趨於緩和,HPC 之電位在-5~-100mV,而 OPC 之電位在-5~220mV 。
- 5.經本年度量測試驗牆的結果,埋設混凝土內部之電極並未失效,建議繼續長期監測。

5.2 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響

- 1.配比 A(水灰比 0.45)試體,不添加爐石的河砂與海砂其抗壓強度發展非常相似,而水灰比在 0.6 時以河砂的抗壓強度較高。
- 2.配比 A(水灰比 0.45)試體,添加 50 % 爐石的河砂其抗壓強度最高,而其他配比在添加 30% 爐石的河砂與海砂,其強度發展較高。
- 3.有添加爐石的海砂與河砂混凝土,其強度發展都比不添加爐石的佳。
- 4.含爐石粉之混凝土試體,其電阻係數較不含爐石粉試體者為高。

5.3 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析研究

花蓮港區內及花東地區部份小型漁港或護岸設施諸如堤防消波塊、以及陸上橋樑等構造物外觀,其外觀有發現鹼質與粒料反應之外

部徵候，顯示其有發生鹼質與粒料反應之潛能及疑慮。

參考文獻

- [1] 陳振川，「高性能混凝土研發及推廣研討論會文輯」，台北市台灣工業技術學院，P.2, 民國 86 年 6 月。
- [2] 高性能混凝土施工規範（草案），中華民國結構工程學會（1994）。
- [3] 黃兆龍，「由高雄 85 層 T&C Tower 論 HPC 材料選擇及性能」，高性能混凝土（HPC）研發及應用研討會論文輯，P83~109，（1994）。
- [4] 林維明 饒正 張道光，「港灣環境下高性能結構體之性質研究(一)」，P4~6（1998）。
- [5] 黃和源、黃兆龍，「高性能混凝土的耐久性設計策略」，高性能鋼筋混凝土防蝕策略研討會論文輯，P7-9。民國 88 年 4 月。
- [6] ACI Committee 318，Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary，（ACI 318-95/ACI 418R-95）American Concrete Institute，Farmington Hills（1995）。
- [7] Malhotra, V.M., editor, High-performance Concrete, American concrete Institute，Special Publication.Sp-149，884P（1994）。
- [8] 李釗，「港灣混凝土構造物劣化探討（一）」，港灣構造物安全檢測與評估研習會，交通部運輸研究所，2002。
- [9] 林柄炎，「飛灰矽灰高爐石用在混凝土中」，1993。
- [10] 黃兆龍，「高爐熟料及飛灰材料在混凝土工程上之應用」，高爐石與飛灰資源在混凝土工程上應用研討會，台灣營建研究中心，台北市，1986。
- [11] 蘇南，「高爐石粉對混凝土耐久性之影響」，應用礦物摻料提昇混凝土品質研討會論文輯，p93~p94,1999。

- [12] 王和源、黃兆龍，「海砂/海水混凝土巨觀特性與抑制策略」，混凝土摻用海砂之策略及檢測技術研討會論文輯，p 5~p 18,台北,1994。
- [13] ASTM C876-91，" Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete "。
- [14] 黃兆龍、湛淵源、廖東昇、楊偉奇，「污水處理防漏混凝土設計及施工驗證」，高性能混凝土設計及應用，p66，民國 88 年 5 月。