

96-66-7280

MOTC-IOT-95-H1DA001-2

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究(2/4)



交通部運輸研究所

中華民國 96 年 4 月

96-66-7280

MOTC-IOT-95-H1DA001-2

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究(2/4)

著 者：張道光、陳桂清、柯正龍

交通部運輸研究所

中華民國 96 年 4 月

96

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究
(2/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009601081

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. (2/4) / 張道光
， 陳桂清， 柯正龍著. -- 初版. -- 臺北市：
交通部運研所， 民 96

面： 公分

參考書目：面

ISBN 978-986-00-9569-2(平裝)

1. 鋼筋混凝土 2. 港埠工程

440. 328

96008011

港灣鋼筋混凝土耐久性之研究 (2/4)

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 96 年 4 月

印 刷 者：承亞興企業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 110 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：1009601081

ISBN：978-986-00-9569-2 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

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(2/4)			
國際標準書號（或叢刊號） 978-986-00-9569-2(平裝)	政府出版品統一編號 1009601081	運輸研究所出版品編號 96-66-7280	計畫編號 95-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、柯正龍 聯絡電話：04-26587119 傳真號碼：04-26564418			研究期間 自 95 年 01 月 至 95 年 12 月
關鍵詞：高性能混凝土、水庫淤泥、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，持續去年(94年)的HPC試驗牆的監測研究。第二部份為使用水庫淤泥取代細粒料拌拌混凝土之影響。第三部份為混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查與潛勢分析，持續鹼質與粒料混凝土試體之量測。 研究結果顯示；(1)高性能混凝土的耐久性比一般混凝土為佳；(2)水庫淤泥不適合取代做為混凝土中之細粒料；(3)摻加20%飛灰、40%爐石粉或10%水庫淤泥、10% 活性粉於不具活性之大甲溪粒料或東河、三仙台等活性粒料中，均可達到抑制混凝土發生鹼質與粒料反應之效果。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
96 年 4 月	94	100	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密【限】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 (2/4)			
ISBN (OR ISSN) 978-986-00-9569-2 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009601081	IOT SERIAL NUMBER 96-66-7280	PROJECT NUMBER 95-H1DA001-2
DIVISION: HARBOR AND MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Yung-fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tao-kuang Chang PROJECT STAFF: Chen Kuei-ching , Ko Jeng-long PHONE: 04-26587119 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM January 2006 TO December 2006
KEY WORDS: High Performance Concrete, Reservoir Sludge, Alkali-silica reaction, Re-bar corrosion			
ABSTRACT: The study is carried out as three parts. The first part focuses on “The durability of High Performance Concrete”; the second part is on “ The feasibility of reservoir sludge substituted for fine aggregate in concrete ”; the third part is on “Field Investigation and potentiality for Alkali-Aggregate reaction on concrete structures at east coast of Taiwan. ” Our findings are as follows. First, durability of high performance concrete is much better than ordinary concrete. Second, reservoir sludge isn’t suitable for substituting for fine aggregate in cementitious concrete. Third, adding 20% fly ash, 40% slug, 10% reservoir sludge, or 10% reactive powder with non-reactive coarse aggregate obtained at Dachia river and reactive powder obtained at Tungho river & Sanshen Tier performs a good resistibility to alkali-silica aggregate reaction in concrete structures.			
DATE OF PUBLICATION April 2007	NUMBER OF PAGES 94	PRICE 100	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

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	----- 2-6
2.2 添加波索蘭材料對混凝土的影響	----- 2-11
2.3 水庫淤泥相關文獻	----- 2-14
2.3.1 水庫淤泥物理性質	----- 2-15
2.3.2 水庫淤泥化學性質	----- 2-15
2.3.3 水庫淤泥再生利用之相關研究	----- 2-18
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 水庫淤泥取代細粒料拌拌混凝土之性質	3-18
3.2.1 試驗規劃	3-18
3.2.2 混凝土之使用材料	3-18
3.2.3 混凝土配比	3-22
3.2.4 試體編號	3-22
3.2.5 試驗方法與設備	3-22
3.3 混凝土鹼質與粒料反應	3-23
3.3.1 試驗計畫	3-24
3.3.2 試驗材料	3-24
3.3.3 試驗器材	3-26
3.3.4 試驗步驟	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 用水庫淤泥取代細粒料拌拌混凝土之影響	4-10
4.3 混凝土鹼質與粒料反應	4-18
4.3.1 ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹試驗法	4-18
4.3.2 ASTM C1260 水泥砂漿棒加速膨脹試驗法	4-21
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 -----	2-3
表 2.2 ACI、SCC 及 DMDA 之性質比較表-----	2-4
表 2.3 ACI 318-95 混凝土耐久性設計要求-----	2-10
表 2.4 鋼筋混凝土防蝕之最大氯離子含量 -----	2-11
表 2.5 混凝土添加波索蘭材料之特性 -----	2-13
表 2.6 水庫淤泥物理特性 -----	2-16
表 2.7 水庫淤泥化學特性 -----	2-17
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 粒料之基本物理性質 -----	3-18
表 3.8 石門水庫淤砂物理性質表 -----	3-20
表 3.9 石門水庫淤砂化學性質分析表 -----	3-21
表 3.10 配比 A(水灰比 0.45) -----	3-22
表 3.11 配比 B(水灰比 0.60) -----	3-22
表 3.12 水泥成份檢測報告 -----	3-25
表 3.13 砂漿棒材料配比 (0.513m ³ /每盤) -----	3-27

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) -----	4-3
表 4.3 鑽心試體之電阻係數-----	4-4
表 4.4 鑽心與灌製試體之抗壓強度(kg/cm ²) -----	4-5
表 4.5 試體抗壓強度試驗結果 (kg/cm ²) -----	4-14
表 4.6 試體超音波脈波速度試驗結果 (km/sec) -----	4-17
表 4.7 ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹量試驗結果-----	4-19
表 4.8 ASTM C1260 水泥砂漿棒膨脹量試驗結果 -----	4-22

圖目錄

圖 2.1 降低水膠比增進鍵結力 -----	2-9
圖 2.2 水泥漿量對超音波速之影響 -----	2-9
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 ASTM C227 法試驗及鑑定粒料活性流程圖-----	3-28
圖 3.10 ASTM C1260 法試驗及鑑定粒料活性流程圖-----	3-30
圖 4.1 超音波脈之發展-----	4-4
圖 4.2 混凝土之強度發展-----	4-6
圖 4.3 腐蝕電位與齡期之關係-----	4-8
圖 4.4 Ladder System 各陽極對陰之電位與齡期關係 -----	4-9
圖 4.5 淤泥粒徑分佈曲線 -----	4-10
圖 4.6 配比 A 試體之抗壓強度發展趨勢-----	4-15
圖 4.7 配比 B 試體之抗壓強度發展趨勢-----	4-15
圖 4.8 各配比試體之超音波脈波速度與齡期的關係-----	4-16

圖 4.9 各配比試體之電阻係數與養生齡期的關係-----	4-18
圖 4.10 大甲溪粒料各組試體 ASTM C227 膨脹量試驗結果 -----	4-19
圖 4.11 東河粒料各組試體 ASTM C227 膨脹量試驗結果 -----	4-20
圖 4.12 三仙台粒料各組試體 ASTM C227 膨脹量試驗結果 -----	4-20
圖 4.13 大甲溪粒料各組試體 ASTM C1260 膨脹量試驗結果-----	4-22
圖 4.14 東河粒料各組試體 ASTM C1260 膨脹量試驗結果-----	4-23
圖 4.15 三仙台粒料各組試體 ASTM C1260 膨脹量試驗結果-----	4-23

照片目錄

照片 3.1 混凝土試驗牆鑽心試驗	3-10
照片 3.2 超音波試驗儀	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 4.1 94 年量測中性化較為嚴重的 OPC 混凝土試體	4-2
照片 4.2 95 年量測中性化較為嚴重的 OPC 混凝土試體	4-2
照片 4.3 塊狀水庫淤泥	4-11
照片 4.4 洛杉磯磨損試驗儀	4-11
照片 4.5 淤泥過篩	4-12
照片 4.6 雷射分析儀	4-12
照片 4.7 編號 AR 配比之坍度	4-13
照片 4.8 編號 BR 配比之坍度	4-13
照片 4.9 水庫淤泥結成糰塊狀	4-13
照片 4.10 增加水量水庫淤泥之工作性	4-13

第一章 前言

1.1 研究動機

臺灣地區四面環海，港灣鋼筋混凝土結構物長年處於高溫高濕的氣候且受到海洋惡劣環境之侵蝕下，易使混凝土產生劣化，再加上傳統混凝土有很多之缺陷，諸如施工性不良、工人擅自加水及未適當之搗實，造成材料析離、泌水及冷縫蜂窩之現象，這些不良因素在海洋環境下，更加速混凝土之劣化。混凝土為一多孔隙之材料，經由這些劣化因子的交互作用下，使其產生新裂縫致使有害物質如氯離子甚易入侵混凝土內部，破壞鋼筋表面之鈍態保護膜，造成鋼筋發生腐蝕銹斷，影響結構物安全甚巨。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民國 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。

由於臺灣的水庫淤泥嚴重，常需進行水庫的浚渫作業工作，而浚渫後所產生的大量的淤泥，則會造成環保的嚴重問題。然而如何利用這些淤泥廢棄物再生利用則是當今重要的課題。本研究乃藉由取得的石門水庫淤泥，探討取代一般混凝土的細粒料，評估其應用於混凝土的可行性。

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.持續監測高性能混凝土的耐久性探討。2.以添加石門水庫之淤泥於混凝土中，探討混凝土之基本性能變化及其適用性，並評估對混凝土影響性，以提供爾後使用水庫淤泥於混凝土中之參考。3.持續對臺灣花東地區部份河川之混凝土結構物之取樣進行調查與試驗，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 $\leq 30\%$ 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。

又依據美國混凝土學會（ACI-American Concrete Institute）對「高性能混凝土」之定義，指稱「高性能混凝土」（HPC-High Performance Concrete）為性質優於傳統混凝土。為其「性質」所指為何未詳述，應可包含強度、彈性模數、工作度、流動性、體積穩定性、耐久性、耐磨性、水密性、完整性及其他特殊功能（如低水化熱）經濟性等。因此所謂高性能乃是針對一般傳統混凝土的施工方式仍無法滿足工程需求的情況下，所開發出來的混凝土，高性能混凝土可能具有一種甚至數種的「高性能」以符合工程的需求。其實可將「高性能混凝土」視為是一個較廣義的工程材料名稱^[3]。

然而黃兆龍教授^[4]也提出了臺灣緻密設計(Densified Mixture Design Algorithm, DAMA)的高性能混凝土，其設計採用最緻密粒料量，最少漿量，限制用水量在 150kg/m^3 以下，並透過 PDCA 的方式，建立標準作業程序(SOP)移植配比至實際結構體上，所以臺灣的 HPC 並不是 HPC 材料，而是結構體上的 HPC。

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^[5]為高性能混凝土與其他混凝土之比較，而表 2.2^[4]為一般混凝土 ACI 配比設計法及自充填混凝土(SCC)及緻密設計高性能混凝土配比之性質比較。

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：^[6]

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

表 2.1 高性能混凝土與其他混凝土之比較^[5]

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
	卜作嵐材料	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	由材料料源之品管, 混凝土製程品管及模型試驗、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

表 2.2 ACI、SCC 及 DMDA 之性質比較表^[4]

內容	ACI 配比設計法	SCC 配比設計法	DMDA 配比設計法
設計模式	半經驗模式	完整理論模式	完整理論模式
設計目標	強度、工作性、耐久性個別設計	強度、工作性	強度、工作性、耐久性、經濟性與生態性兼顧
設計觀念	水泥漿(W/C)為強度主要來源。工作性由水泥漿量調整，W/C和強度可決定耐久性	大量水粉漿(W/P)為支配強度，為了增加工作性之需求，犧牲粒料用量，並限制粒料粒徑及總量	粒料堆積為混凝土主架構，降低拌合水量，卜作嵐材料填塞粒料空隙，利用摻料科技達到設計目標
設計特色	只要粒料基本性質(D_{max} ，FM)固定，無論任何情況下，只有粗粒料維持不變，砂用量隨坍度和 W/C 調整，將失去粒料緻密性	大量採用摻劑及摻料，限制粒料總量，改變並調整各材料之總用量，使的工作性及流動性增大	只要粒料基本性質(D_{max} ，FM)固定，無論任何情況下，粗細粒料和飛灰用量比例均不變，將可維持粒料緻密性
配比條件限制	在耐久性考量時，允許以水膠比代替水灰比	1.限制粒料用量 粗粒料總用量 50% 細粒料總用量 40% 2.依各國 SCC 設計法不同，而採取不同摻劑及摻料用量限制 3.使用卜作嵐材料與強塑劑	1.水量限制低於 150kg/m^3 2.水灰比 > 0.42 3.水泥量限制低於 $\frac{f'_c(\text{psi})}{20(\text{psi/kg})}$ 4.強度依實測資料決定 $\frac{W}{C+P}$ 5.使用卜作嵐材料與強塑劑

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/m^3 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($20\text{k}\Omega\text{-cm}$)，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，不能一味地減少水泥用量，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^[7]

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。

(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 2.3 所示^[8]。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。

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 2.4^[7]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^[9]。此種作法也可以增加混凝土的電阻係數至 $20\text{ k}\Omega\text{-cm}$ 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。

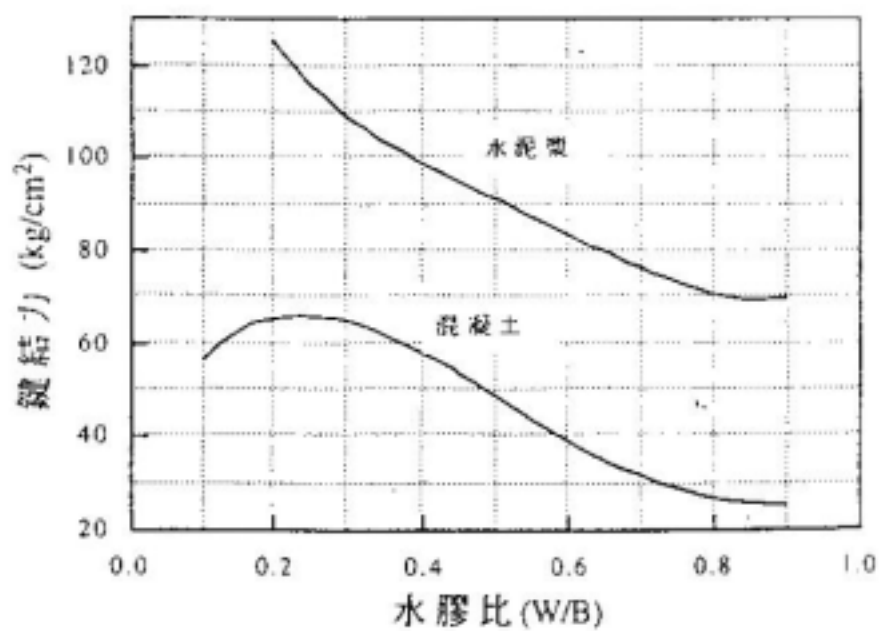


圖 2.1 降低水膠比增進鍵結力^[7]

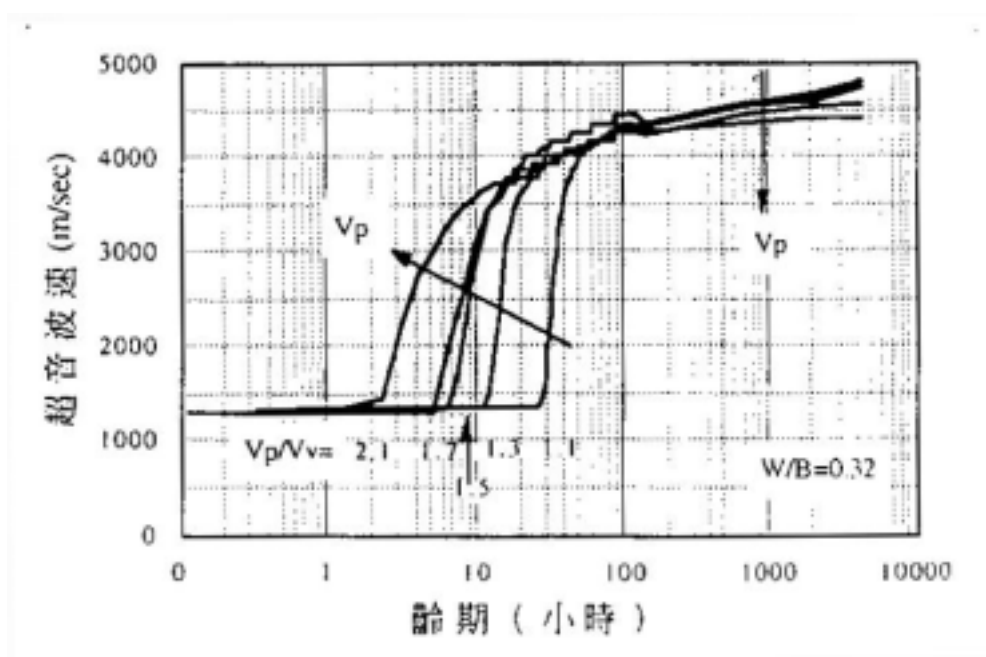


圖 2.2 水泥漿量對超音波速之影響^[7]

表 2.3 ACI 318-95 混凝土耐久性設計要求^[8]

(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 fc'(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 fc'(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	II, I 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。					

表 2.4 鋼筋混凝土防蝕之最大氯離子含量^[7]

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 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。波索蘭材料包括稻穀灰，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^[10,11] 所示，摻料簡要說明於下；

(1) 飛灰

飛灰含有豐富之氧化矽 (SiO₂)、氧化鋁 (Al₂O₃) 以及氧化鐵 (Fe₂O₃)，其結構為玻璃質球狀物，粒徑約在 0.4um~100um 之間，其比重為 2.0~2.2。當波索蘭反應發生時，飛灰中的 SiO₂ 及 Al₂O₃ 與水泥漿體中之氫氧化鈣 (Ca(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

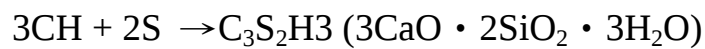
爐石為熔煉鋼鐵時所生的副產物，其中含有氧化矽（ SiO_2 ）、氧化鋁（ Al_2O_3 ）以及氧化鐵（ Fe_2O_3 ）等成份。爐渣由高爐排出冷卻所得之固體物，稱為高爐石，依其冷卻方式的不同，可分為水淬爐石與氣冷爐石兩種。水淬爐石是高爐熔渣以噴水方式急速冷卻，使爐渣碎裂成粒狀，由於冷卻時間過於短促，晶體不易形成且微結構凌亂開放，活性大增且具膠結性，只要細加研磨即可取代部分水泥，亦稱為高爐熟料。氣冷爐石是採用徐冷方式，形成構造較堅固且緻密，活性不佳且無膠結性，可做混凝土骨材或製造水泥之原料。活性高的高爐熟料在水中表面會產生一層酸膜阻隔水份的進入，故需利用氫氧化鈣與石膏等觸媒的侵蝕酸膜，使高爐熟料、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^[10, 11]

	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^[12]：

- (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。

2.3 水庫淤泥相關文獻

臺灣目前的重要水庫均有淤積的問題，總淤積量高達 4 億 7 仟多萬立方公尺^[13]，已經超過一座翡翠水庫的蓄水量，並且每年淤積量不斷地增加中。雖然水庫可靠浚漂淤泥來延長壽命與蓄水功能，但所產生的淤泥卻衍生了環保的問題，如淤泥棄置、掩埋或填方易造成土壤

的沉陷與不透水性、淤泥拋海恐有污染海洋之疑慮....。所以若能開發再生利用水庫淤泥，則可解決環保問題，同時更可增進資源再利用獲取可觀的經濟價值。

2.3.1 水庫淤泥物理性質^[14]

大部分水庫淤泥依統一土壤分類法，其中土壤粒徑小於 0.075mm 定義為黏土及粉土，0.075mm~4.75mm 定義為砂，土壤粒徑大於 4.75mm 則定義為礫石。至於判別黏土及粉土之界限，則採用 ASTM D-653 以 0.005mm 為界，當土壤粒徑小於 0.005mm 定義為黏土，而土壤粒徑介於 0.005mm 至 0.075mm 間則定義為粉土。台灣各水庫淤泥組成成份大部份均為粉土及黏土，如表 2.6 所示，僅有部份水庫之淤泥土壤組成含有較粗 顆粒之礫石。此外，水庫淤泥屬性依統一土壤分類法可區分為低塑性黏土(CL)、低塑性粉土(ML)、高塑性黏土(CH)及粉土質砂(SM)。

2.3.2 水庫淤泥化學性質^[14]

經由相關試驗之測定，台灣水庫淤泥之化學特性如表 2-7 所示，約有下列三項：

- 1.化學成份：採用藥品定量定性分析法，主要分析可得 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等化學成分。
- 2.營養及鹽類成份：從表 2-7 中可知水庫淤泥的 pH 值、有機質 C 含量、氮含量及磷含量，由各項含量值可判斷其是否可應用於農業肥料之生產。
- 3.重金屬成份：重金屬含量多寡可做為水庫淤泥棄置時之處理及判別環境污染之指標。

表 2.6 水庫淤泥物理特性

		土壤組成成份(%)				物理性質												
區別	水庫名稱	礫石	砂土	粉土	黏土	比重		孔隙比(%)		液性限度(%)		塑性限度(%)		塑性指數(%)		土壤分類		
北區	翡翠水庫	0	8.1	71.7	20.2	2.71		-		40.1	40.1	-		11.9		黏土		CL
	石門水庫	0	2.1	37.6	60.3	2.73		0.867		49.67	46.6	29.55		20.12	22.9	粉土與黏土		CL
	青草湖水庫	0	9.4	61.5	29.1	2.72		-		34.4	-	9.9		9.9	-	-		CL
	寶山水庫	0	54.9	39.8	5.3	2.68		-		-		-		NP	-	-		SM
	大埔水庫	0	1.6	62.6	35.8	2.65	2.72	2.63		43.1	34.5	24.4		18.7	5	粉土質黏土		
中區	明德水庫	0	6.3	71.2	22.5	2.68	2.73	2.96		56.6	39.9	31.5		25	12	灰褐色有機質粉土與黃褐色沃黏土		CL
	石岡壩	-	-	-	-	-		-		-		-		-		黃褐色泥質砂土		-
	明潭水庫	0	26.0	64.2	9.8	2.69		-		48.7		-		25.3		-		
南區	仁義潭水庫	0	0.6	54.7	44.7	2.73		1.77		29.55	54.1	3.64		3.64	30.9	有機質粉土與粉土		CH
	烏山頭水庫	-	-	-	-	-		-		-	-	-		-		灰褐色粉質壤土		-
	白河水庫	0	22.1	55.3	22.5	2.72	2.69	1.54		46.06	46.06	19.4		26.66	NP	灰色泥質砂土與中等塑性之黏土		CL
	虎頭埤水庫	0.3	2.4	59.7	37.6	2.73		-		37.2	37.2	-		19.3		灰褐色粉質壤土		CL
	阿公店水庫	0	0	31.9	68.1	2.7	2.73	1.78		50	47.8	24.7		24.3	25.2	粉土與黏土		CL
	澄清湖水庫	1.5	6.9	45.6	46	2.45	2.72	-		53	82.5	-		26	50.2	-		CL
	鳳山水庫	5.5	81.9	11	1.6	2.24	2.66	-		58	58	-		23	NP	粉土質砂		SM

注 1：孔隙比：孔隙體積與顆粒體積之比。 注 2：塑性限度：指土壤在塑性狀態時，含有最低水量之界限。

注 3：液性限度：黏土於塑性體轉變為滯性流體之含水量。 注 4：塑性指數：液性限度與塑性限度之差。

注 5：NP 為無塑性

來源資料：《水庫淤泥生態性利用之整體研究》，黃忠信、郭文毅、彭淑娟，國立成功大學，P.37，2004.12。

表 2.7 水庫淤泥化學特性

		一般營養及鹽類成份				重金屬成份					化學成份			
區別	水庫名稱	PH	有機質 C (%)	總氮 (mg/kg)	總磷 (mg/kg)	鉛 Pb (mg/kg)	鎘 Cd (mg/kg)	鉻 Cr (mg/kg)	銅 Cu (mg/kg)	鋅 Zn (mg/kg)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	其他 (%)
北區	翡翠水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-	68.52	15.32	4.9	11.27
	石門水庫	6.82	66.96	71.6	71.6	28.23	-	16.35	27.04	132.04	59.66	18.33	6.14	15.87
	青草湖水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74.37	11.45	4.2	9.98
	寶山水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77.96	8.83	4.05	9.16
	大埔水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73	12.32	4.12	10.56
中區	明德水庫	7.45	7.3	516	420	5.04	3.04	0.262	3.31	-	69.13	13.41	5.21	12.25
	石岡壩	7.21	0.218	213	278	9.36	-	14.75	6.48	-	-	-	-	-
	日月潭水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61.47	18.07	6.15	14.31
	明潭水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72.88	12.19	3.73	11.2
南區	仁義潭水庫	7.11	2.25	74.08	74.08	14.07	-	-	25.13	103.6	56.58	19.14	6.85	17.43
	鏡面水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74.02	10.68	4.2	11.1
	烏山頭水庫	7.43	0.713	668	662	18.07	ND	32.13	15.68	-	-	-	-	-
	白河水庫	6.96	3.1	83.41	83.41	24.17	ND	13.74	8.99	71.25	57.32	18.48	7.08	17.12
	德元埤水庫	-	-	1094	890	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	虎頭埤水庫	7.09	0.464	409	366	5.14	-	12.53	6.52	-	71.45	13.76	4.28	10.51
	阿公店水庫	-	-	-	-	4.459	0.067	3.369	3.162	14.46	53.03	22.32	8.56	16.09
	澄清湖水庫	-	-	0.79	0.37	0.35	0.09	0.07	0.19	0.79	65.73	18.78	4.35	11.1
	鳳山水庫	-	-	1.93	0.879	2.22	1.66	0.8	15.3	34.2	16.32	39.38	2.65	41.64

註 1：ND 為 not detected，因濃度過低而無法量測。

來源資料：《水庫淤泥生態性利用之整體研究》，黃忠信、郭文毅、彭淑娟，國立成功大學，P.38，2004.12。

2.3.3 水庫淤泥再生利用之相關研究

目前國內水庫淤泥主要的處置方式有四種，即掩埋或填方、農地改良、海拋、及燒製固化等方式^[15]，相關研究如下：

1. 掩埋及農地改良處理方式：

這是臺灣最常見的處理方式，也就是浚渫之淤泥後，經過適度之脫水與固化處理後於水庫附近之低窪處掩埋，其土地則可供農耕、植生等利用。然而來自日本的學者，提出的水庫淤泥清除的地工沙管新工法方法，它是將淤泥吸入以纖維編織而成的管狀（或袋狀）之所謂地工沙管（袋）中，在水庫之緩坡處堆疊後經過自然脫水與硬化，成為新土坡之工法。只要在水庫選定適當山凹處，以地工沙管（袋）堆疊成土壩，充分利用儲水位上方無用之坡地 做為立體的淤泥脫水及堆積場，於填滿淤泥後可加以植生綠化。如此不但可解決水庫淤積、容量減小的問題，亦能解決最棘手的淤泥運棄問題，更可避免受到突如其來的土石流所重創^[16]。

2. 海拋處理方式^[14]：

浚渫後水庫淤泥可用於海埔地之填置，或製成足夠強度之塊狀物，而拋置於海堤或海中。水庫淤泥在進行海拋之前，須經過固化處理，以防有機物及有害物質之釋出而污染海域。同時，在運輸水庫淤泥過程中，亦須避免造成二次公害。經過填置之海埔新生地，一般皆會被開發與利用，若採用水庫淤泥 替代混凝土以填置海埔新生地，則需經由適當處理以達相當抗壓強度，方能避免日後發生地層下陷的問題。

3. 燒製固化處理方式

臺灣水庫上游蘊藏著豐富製作輕質骨材所需的料源，水庫淤泥皆是水庫上游經由雨水沖刷地表軟弱土層流至水庫淤積而成，因此水庫浚渫後所產生之淤泥則含有製作輕質骨材的重要成份。由於淤泥含

有頁岩黏土礦物原料，很多專家學者都已進行許多相關的研究與探討，其中以高溫燒結成輕質骨材為主要的研究方向。

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」，延續去年的 HPC 試驗牆的監測研究。第二單元為「用水庫淤泥取代細粒料拌拌混凝土之影響」。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」，延續鹼質與粒料混凝土試體之量測。

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。

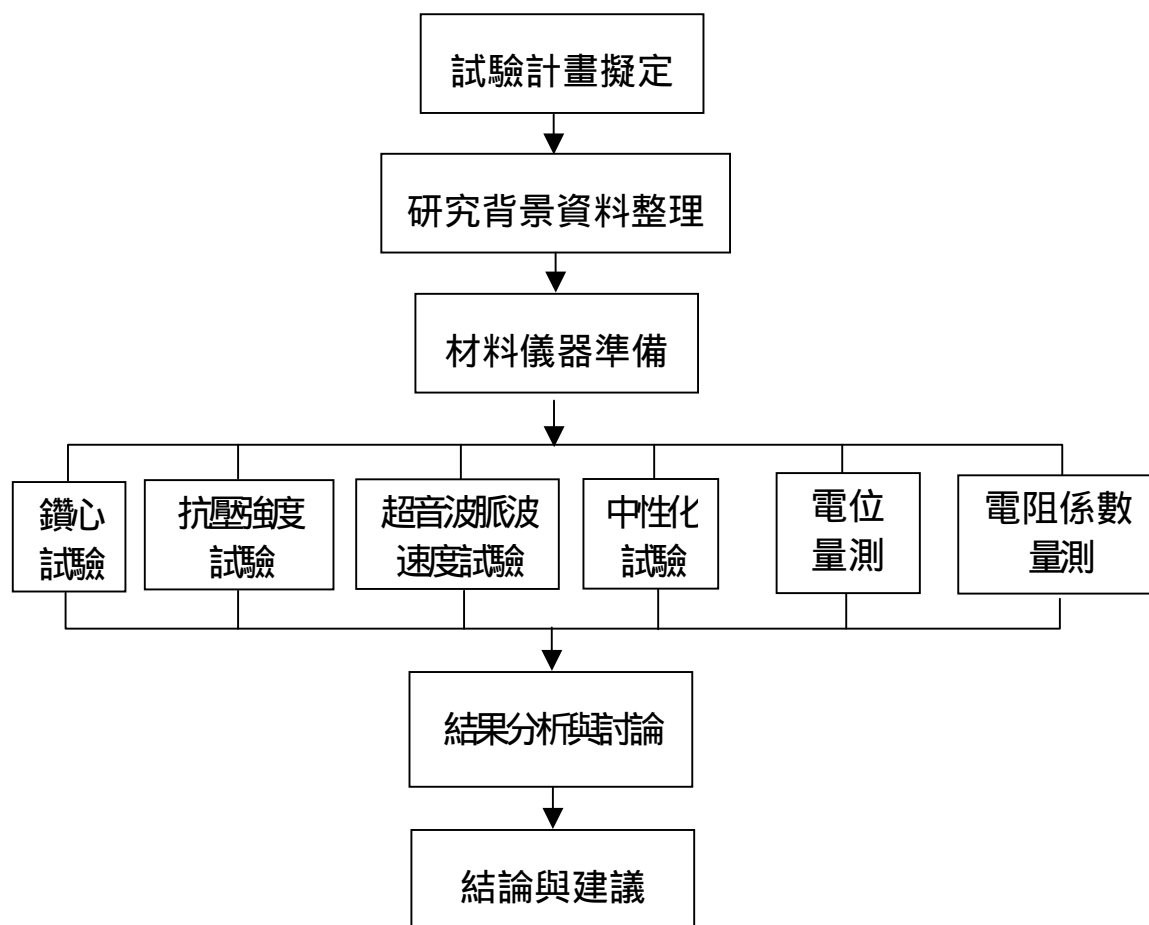


圖 3.1 試驗流程

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	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 3.4 所示。

本次量測的試驗牆起於民國 88 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持續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

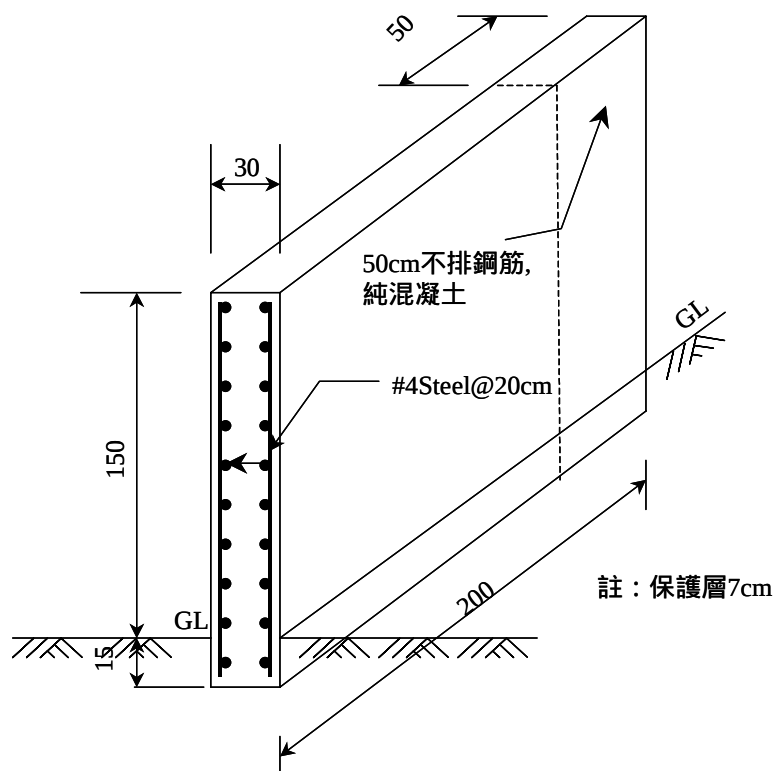


圖 3.2 單座試驗牆之設計詳圖

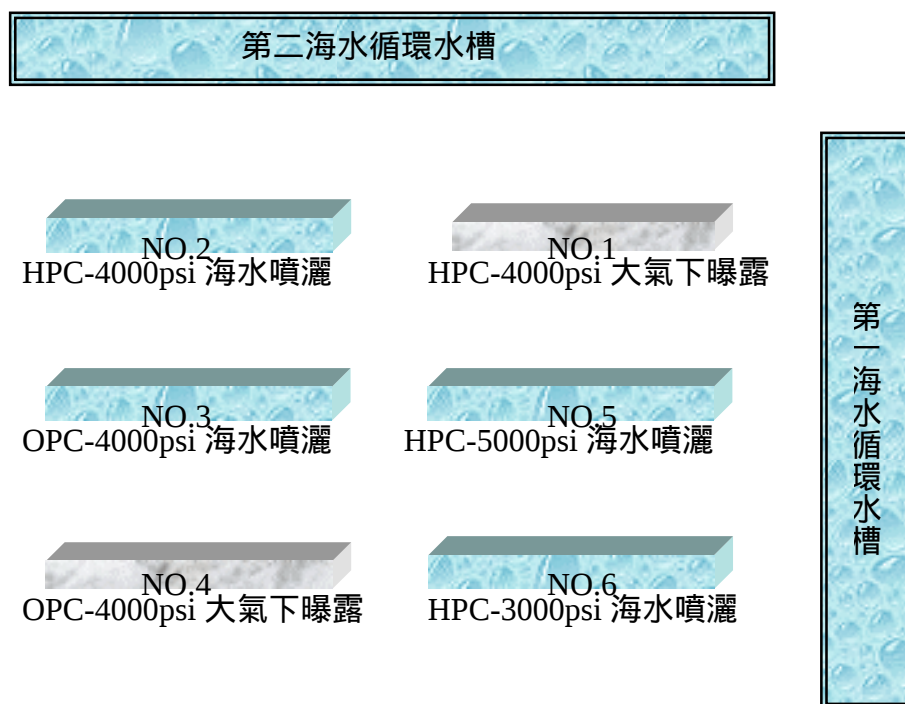


圖 3.4 試驗牆曝露位置配置圖

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 3.3 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^[17]。

表 3.4 超音波脈波速度與混凝土品質之關係^[17]

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

本研究之超音波試驗是針對鑽心試體進行量測，其試驗儀器如照片 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^[18]。

表 3.5 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕活性之關係⁽¹⁸⁾

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 超音波試驗儀

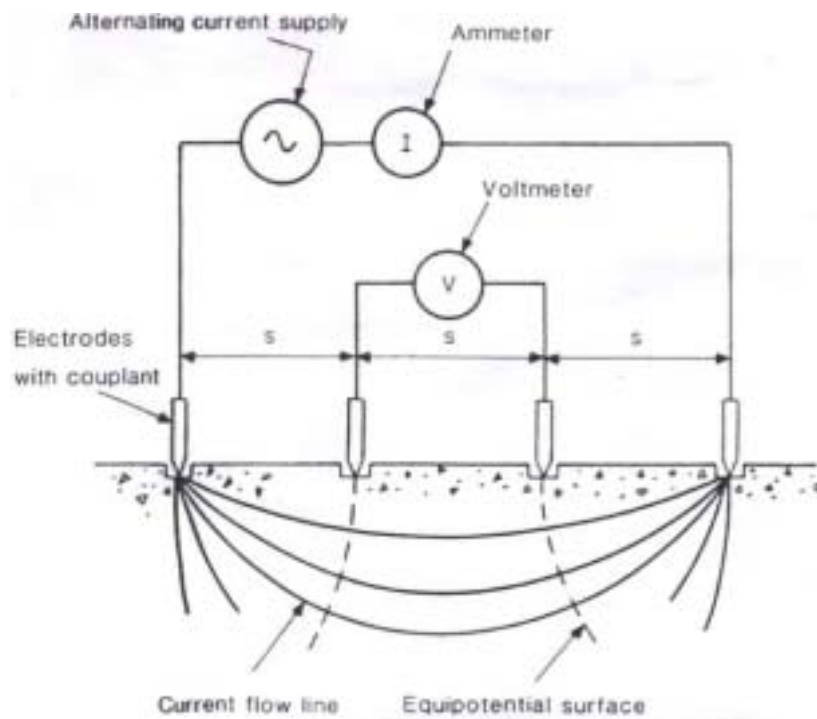


圖 3.5 四探針式之電阻量測示意圖



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^[17]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^[17]

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。

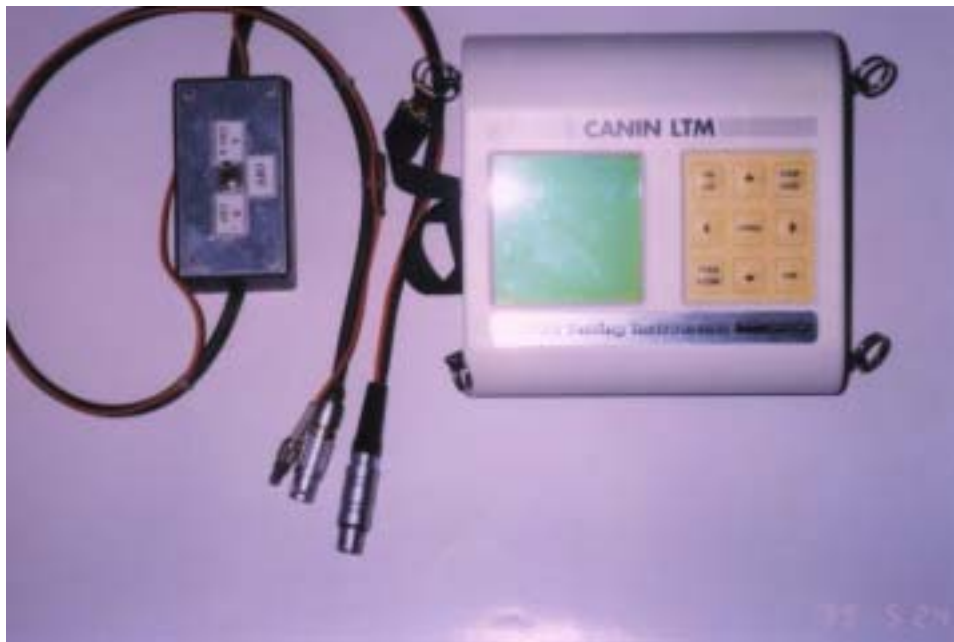
本試驗的 Anode -Ladder-System 之排置見詳圖 3.7 所示。試驗量測為 $A_1 \sim A_6$ 與陰極之電位、電流及各陽極間之電阻作為判斷 $A_1 \sim A_6$ 之陽極（亦就是在模擬不同混凝土保護層厚度下）腐蝕現況。如果此系統能正確評估內部鋼筋之腐蝕現況，即可應用於新建工程之結構體內，以便隨時監控混凝土及其內部鋼筋之現況。



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

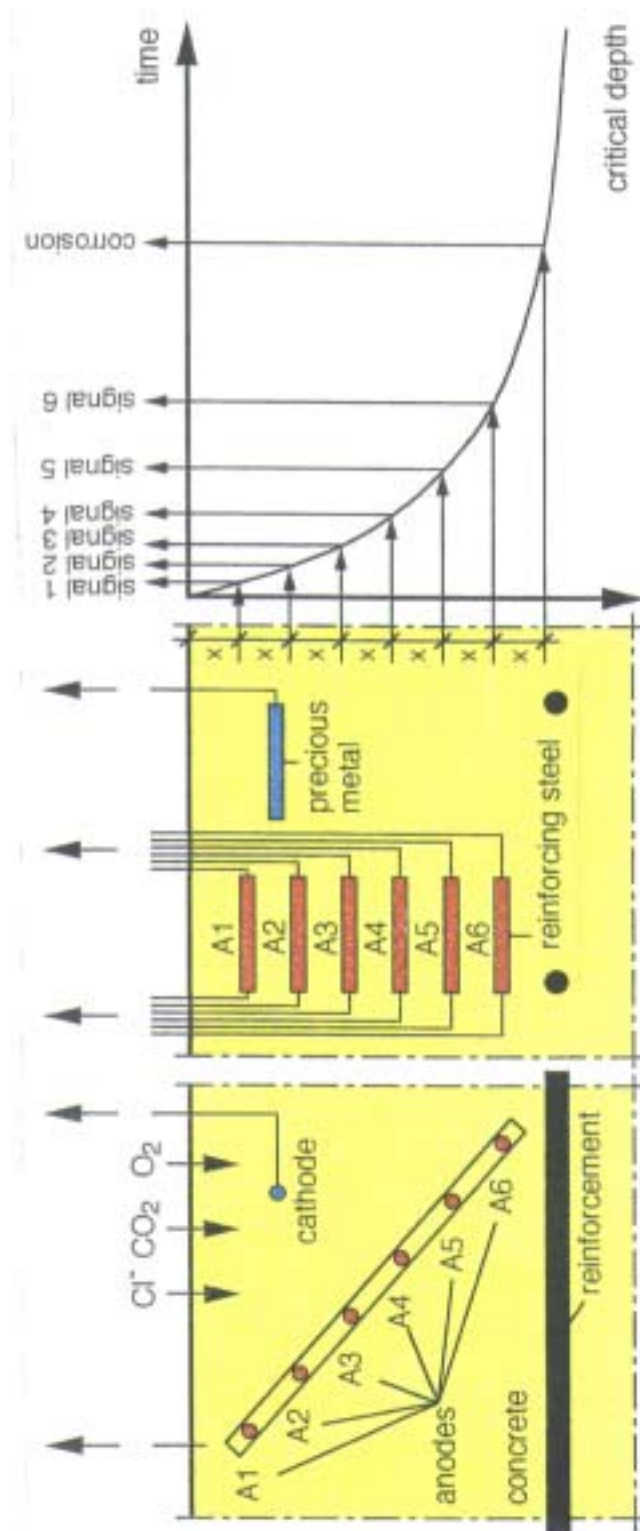


圖 3.6 Anode-Ladder-System 之原理

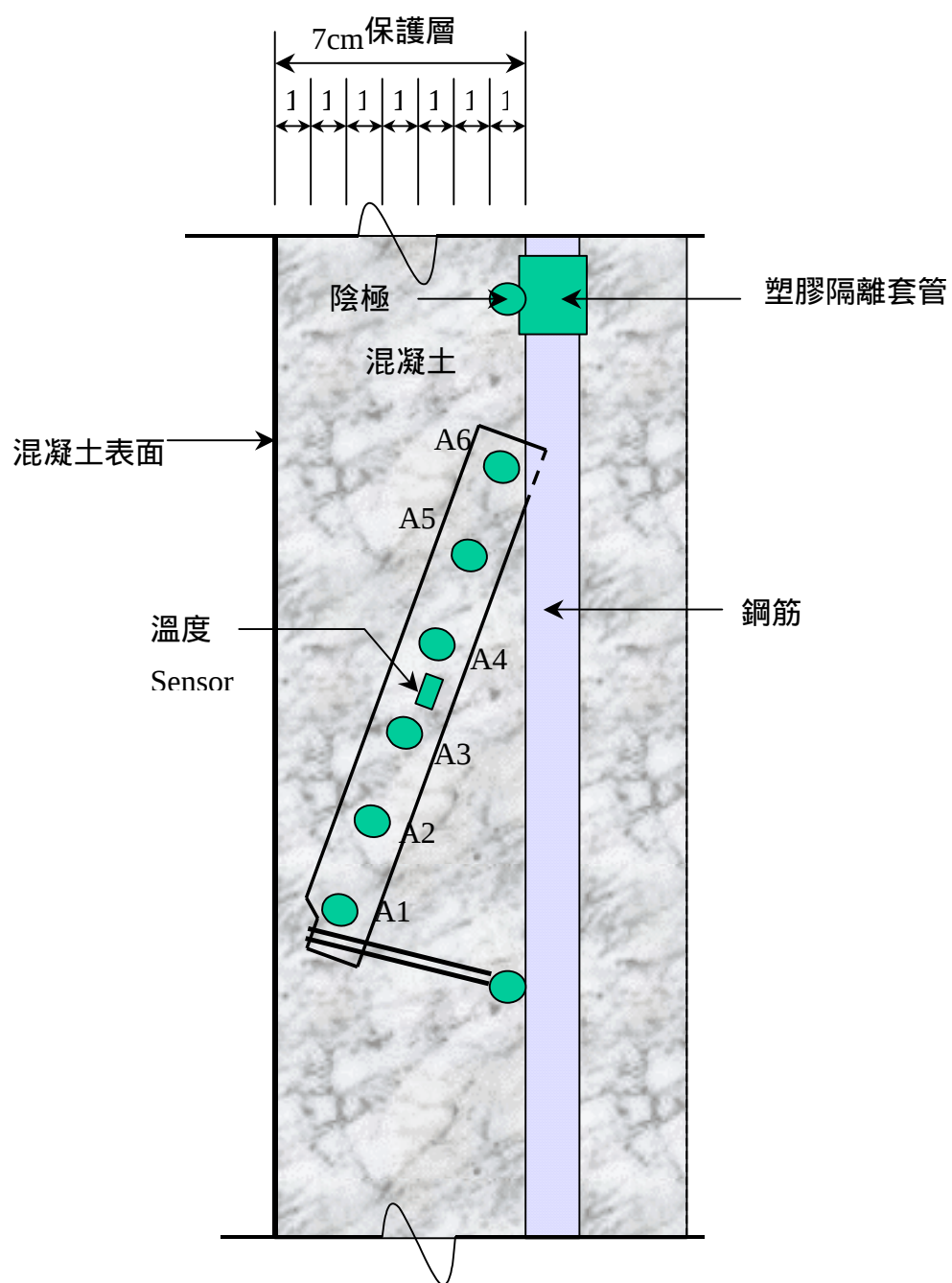


圖 3.7 Anode-Ladder-System 之排置詳圖

3.2 水庫淤泥取代細粒料混拌混凝土之性質

3.2.1 試驗規劃

採用 ACI 混凝土配比設計法，設計出一般混凝土的配比，再以水庫淤泥取代混凝土中的細粒料，進行漿體拌製之基本性質試驗，以及硬固後之各項試驗。試驗流程如圖 3.8 所示。

3.2.2 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)粒料：粗粒料最大粒徑 1/2”，細粒料之細度模數 FM 為 2.70，粒料之物理性質如表 3.7。

(4)水庫淤泥：採用石門水庫之淤泥，其物化性如下^[19]。

表 3.7 粒料之基本物理性質

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

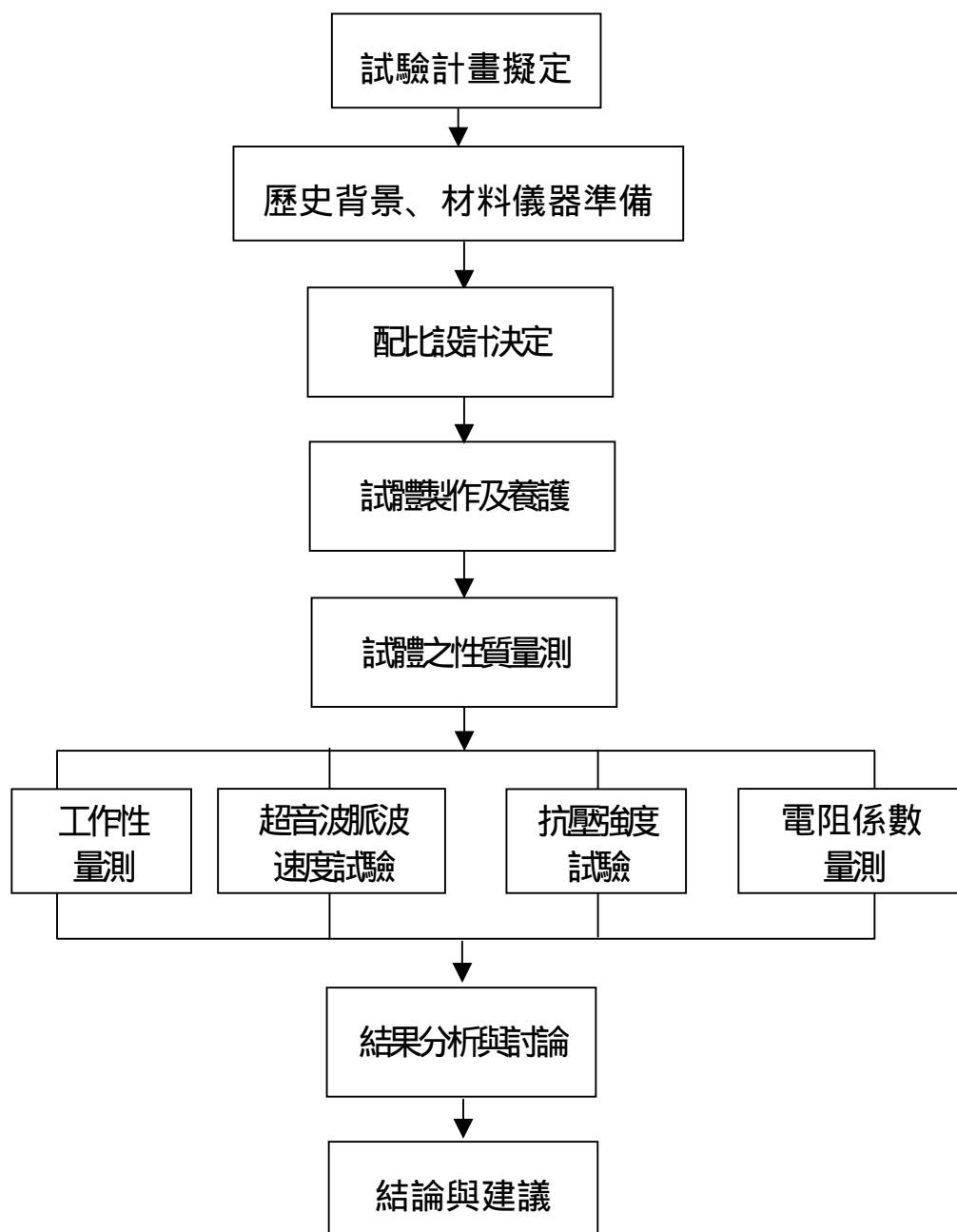


圖 3.8 試驗流程

1. 物理性質

依據底泥及集水區土壤樣體黏土礦物之組成及其含量標準分類，石門水庫沈積之淤泥多為伊利石（Illite）與綠泥石（Chlorite），其化學成分中矽佔 60.95 %、鋁佔 17.48 %、鐵佔 6.6 %，為既細又稠的高塑性黏土，且經由石門水庫第五號沈澱池之淤泥採樣，實際分析淤泥之物理、化學性質結果如表 3.8 及表 3.9 所示：由表 3.8 石門水庫淤砂物理性質成果表可知，第五號沈澱池之淤泥含水量平均為 27.06%，當地比重為 2.73，孔隙比在 0.76% 1.02%之間，液性限度約為 49.67%，塑性限度約為 29.55%，塑性指數約 20.12%。

2. 化學性質

依據表 3.9 石門水庫淤砂化學性質分析表可知，水庫淤泥之有機質含量約為 4.58% 4.73%，自然含水量介於 27.8 29.04%，總固體物平均值約為 71.60。而重金屬鎘、鉻、汞含量甚至低於儀器可偵測出之濃度。對於浚渫棄土是否導致土壤重金屬污染之問題，由檢測結果顯示浚渫土之重金屬含量很低，故此項顧慮應可排除。

表 3.8 石門水庫淤砂物理性質表^[19]

土樣 編號	含水量 (%)	比重 (g/g)	孔隙比 (%)	液性限度 (L.L.) (%)	塑性限度 (P.L.) (%)	塑性指數 (P.I.) (%)
1	25.92	2.73	0.812	49.07	30.91	18.16
2	26.55		1.025	52.39	21.88	30.51
3	28.72		0.764	47.56	28.19	19.37
平均	27.06	2.73	0.867	49.67	29.55	20.12

附註： 依美國統一土壤分類表，判定淤泥為 ML（無有機質土壤，粉土）及 OL（有機質粉土）。

表 3.9 石門水庫淤砂化學性質分析表 (1/3) ^[19]

樣品號碼	成分分析					平均值與標準偏差
	1	2	3	4	5	
PH	7.08	6.70	6.71	6.75	6.88	6.82±0.160
EC(導電度)	393	310	343	437	296	355.8±58.77
含水量(%)	27.85	29.04	28.47	29.03	27.59	28.40±0.665
灰份(%)	67.53	66.23	66.88	66.35	67.83	66.96±0.706
可燃份(%)	4.62	4.73	4.65	4.62	4.58	4.64±0.056
總固體物(%)	72.15	70.96	71.53	70.97	72.41	71.60±0.665

表 3.9 石門水庫淤砂化學性質分析表 (2/3) ^[19]

單位：ppm

樣品 號碼	金屬總量					平均值與標準偏差
	1	2	3	4	5	
Pb	28.22	28.72	29.07	28.29	26.83	28.23±0.853
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	17.82	14.36	15.77	17.01	16.71	16.35±1.333
Cu	30.20	26.74	26.61	26.34	25.31	27.04±1.854
Zn	138.62	146.57	124.17	127.80	123.03	132.04±10.19

附註：ND—not detected，濃度過低無法偵測。

表 3.9 石門水庫淤砂化學性質分析表 (3/3) ^[19]

單位：ppm

樣品 號碼	溶出試驗 (TCLP)					平均值與標準偏差
	1	2	3	4	5	
Pb	ND	ND	0.06	0.07	0.09	0.04±0.042
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	0.08	0.02	0.01	0.04	0.02	0.03±0.028
Zn	1.08	1.38	0.95	1.45	0.91	1.15±0.248

附註：ND—not detected，濃度過低無法偵測。

3.2.3 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 3.10~3.11 所示。

表 3.10 配比 A(水灰比 0.45)

編號	粗粒料 (kg/m^3)	細粒料 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	水泥 (kg/m^3)	淤泥取代 細粒料 (kg/m^3)
AR	863	718	218	484	0 %
AD	863	718	218	484	100 %

表 3.11 配比 B(水灰比 0.6)

編號	粗粒料 (kg/m^3)	細粒料 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	水泥 (kg/m^3)	淤泥取代 細粒料 (kg/m^3)
BR	863	819	218	363	0 %
BD	863	819	218	363	100 %

3.2.4 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,若水庫淤泥未取代細粒時第二編碼為 R,若使用水庫淤泥取代細粒時第二編碼為 D。

3.2.5 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

3.3 混凝土鹼質與粒料反應

混凝土發生鹼質與粒料反應會導致混凝土開裂、龜裂、起泡爆裂，大幅降低其抗拉、抗壓強度和動彈性模數等力學性能，影響構造物設計功能，間接引起混凝土內部鋼筋腐蝕，造成構造物崩毀，降低其使用年限，使經濟蒙受重大損失受損危及人民生命財產安全，1995 年日本神戶大地震部份橋墩因鹼質與粒料反應造成損壞即為典型案例。

國內混凝土鹼質與粒料反應之調查研究，發現台灣東部部份地區之砂石具有活性，少數混凝土構造物如消波塊、堤防、橋樑和擋土牆等有鹼質與粒料反應跡象^[19-21]；研究結果顯示適量添加飛灰、爐石粉等卜作嵐材料與氫氧化鋰等添加劑可改善或抑制鹼質與粒料反應之發生，為確保混凝土構造物使用安全，建議新建或維護之混凝土結構物，應針對混凝土材料，尤以水泥和砂石粒料，事先進行有關鹼質與粒料反應之試驗與檢測^[21,22]。

鹼質與粒料反應發生時間多在構造物完工 5~12 年後，一旦發生損壞，其影響層面相當重大。由於台灣地區具備產生鹼質與粒料反應所需之高濕度和高含鹽分等條件，未來混凝土如發生鹼質與粒料反應，加上颱風、地震等天災侵襲，將嚴重威脅混凝土構造物安全，故如何早期發現混凝土鹼質與粒料反應危險，並採取適當之防制對策(包括補強、維修、強化、更新等)，對混凝土材料與構造物建立可供信賴的規範與檢測方法，為確保混凝土構造物安全、避免遭受重大損失的重要課題。

本節將以目前檢測混凝土鹼質與粒料反應常用之水泥砂漿棒測長法，選定兩種東部砂石與大甲溪粒料各添加不同摻料進行試驗，期能提供相關單位選用粒料及摻料參酌使用，以達抑制混凝土鹼質與粒料反應發生，確保混凝土工程品質之目的。

3.3.1 試驗計畫

1. 岩種及粒料試樣取樣

本研究首先蒐集國內相關文獻，依實際可能使用粒料來源，選定東河、三仙台等具高活性粒料地區之岩石及多為非活性粒料之大甲溪粒料。其中，三仙台主要岩種為紅色及綠色斑狀安山岩，東河為紅色、綠色及黃色斑狀安山岩、石灰石、變質砂岩^[22]。

2. 試驗方法及試驗流程

上述試樣取回試驗室後，經破碎、過篩、清洗及調整級配等程序，依據 ASTM C227 砂漿棒法、ASTM C1260 快速砂漿棒法等規範進行試驗，將含鹼量均調整為 1.0%，水泥砂漿棒水灰比採固定值 0.47。

研究進行步驟如下：

- (1) 檢測水泥成份及採集岩石與粒料試樣。
- (2) 將岩石與粒料試樣經破碎、過篩、調整級配後，依設計之水灰比、含鹼量、摻料等因素，分別進行 ASTM C1260 快速水泥砂漿棒試驗、ASTM C227 傳統水泥砂漿棒試驗，並在規定齡期量測試體長度變化。摻料種類包括飛灰、水淬爐石粉、石門水庫淤泥、活性粉（粒徑小於#200 篩）等。

3.3.2 試驗材料

1. 水：ASTM C227 浸泡溶液使用去離子水，ASTM C1260 為蒸餾水。
2. 水泥：成份如表 3.12 所示。

表 3.12 水泥成份檢測報告

試驗項目			樣品名稱 CNS 規範	台泥品牌水泥
物理 試驗	細度	比表面積 cm^2/g	2800	3620
化學 成份 %	SiO_2			20.40
	Al_2O_3			5.38
	Fe_2O_3			3.27
	CaO			61.88
	MgO		6.0	3.85
	SO_3		3.5	2.43
	Na_2O			0.30
	K_2O			0.58
	Eq. $\text{Na}_2\text{O} = (\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O})$			0.68
	礦物 組成	C_3S		45.0
		C_2S		25.0
		C_3A		8.7
		C_4AF		10.0

- 3.非活性粒料：使用大甲溪粒料作為非活性粒料。
- 4.摻料：包括飛灰、水淬爐石粉、石門水庫淤泥、活性粉等。
- 5.試體含鹼量調整之藥劑及方法：試體含鹼量以添加 NaOH 調整之，添加方法如下列公式，砂漿棒材料配比如表 3.13 所示。

$$\text{NaOH添加量} = \left[\frac{\text{設計含鹼當量} - \text{水泥含鹼當量}}{\text{Na}_2\text{O分子量}} \right] \times 2 \times \text{NaOH分子量}$$

3.3.3 試驗器材

1.粒料處理

使用破碎機、顎碎機、細粒料搖篩機、烘箱等器材。

2.ASTM C227 砂漿棒法試驗設備

使用電子秤、拌合機、砂漿棒模具、砂漿棒儲存箱、養護箱、比長儀。

3.ASTM C1260 加速砂漿棒法試驗設備

使用電子秤、拌合機、砂漿棒、砂漿棒儲存箱、養護箱、恆溫橫濕水槽、比長儀。

3.3.4 試驗步驟

1.粒料處理

經過破碎、過篩、清洗、烘乾及儲存等過程。

2.ASTM C227 水泥砂漿棒法

依據 ASTM C227 之養護條件定期量測養護期間之水泥砂漿棒長度變化，評估某一水泥與粒料組合是否具發生鹼質與粒料反應潛勢。本試驗法較不適於檢驗鹼—碳酸鹽反應，因為此種反應所引起之水泥砂漿棒膨脹量，通常甚小於鹼—氧化矽之反應所致者。試驗流程如圖 3.9 所示。

表 3.13 砂漿棒材料配比 (0.513m³/每盤)

試體 編號	水泥	水	粒料							添加料	備註
			來源	#8	#16	#30	#50	#100	活性粉		
A	828.0	388.8	大甲溪	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	0	----
AF20	662.4	388.8	大甲溪	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	165.6	20%飛灰
AS40	496.8	388.8	大甲溪	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	331.2	40%爐石粉
AW10	745.2	388.8	大甲溪	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	82.8	10%沉泥
AR10	828.0	388.8	大甲溪	167.4	419.0	419.0	419.0	251.1	186.2	0	10%活性粉 取代粒料
B	828.0	388.8	東河	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	0	----
BF20	662.4	388.8	東河	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	165.6	20%飛灰
BS40	496.8	388.8	東河	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	331.2	40%爐石粉
BW10	745.2	388.8	東河	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	82.8	10%沉泥
BR10	828.0	388.8	東河	167.4	419.0	419.0	419.0	251.1	186.2	0	10%活性粉 取代粒料
C	828.0	388.8	三仙台	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	0	----
CF20	662.4	388.8	三仙台	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	165.6	20%飛灰
CS40	496.8	388.8	三仙台	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	331.2	40%爐石粉
CW10	745.2	388.8	三仙台	186.0	465.6	465.6	465.6	279.0	0.0	82.8	10%沉泥
CR10	828.0	388.8	三仙台	167.4	419.0	419.0	419.0	251.1	186.2	0	10%活性粉 取代粒料

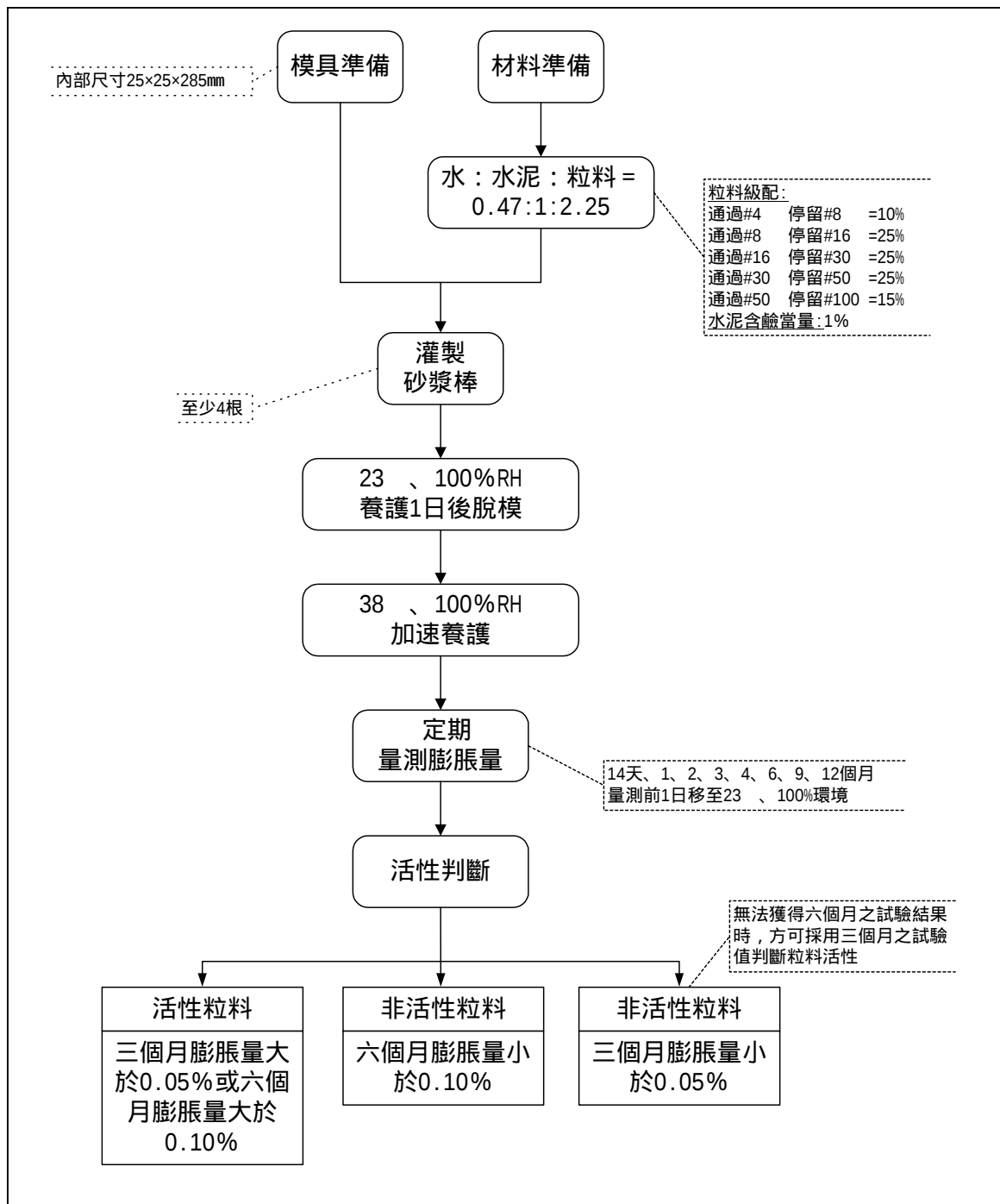


圖 3.9 ASTM C227 法試驗及鑑定粒料活性流程圖

3.ASTM C1260 加速水泥砂漿棒法

依據 ASTM C1260 量測儲存期間之水泥砂漿棒長度變化，判定粒料是否具反應活性。由於使用高溫高鹼的養護環境，本法特別適用於反應速率慢或反應晚期才產生膨脹之粒料；而有關水泥含鹼量、配比、試驗環境等則不在評估範圍內。另外，若發生過量膨脹量，則應再進行其他補充試驗以確認膨脹是由鹼—矽反應所引起。試驗流程如圖 3.10 所示。

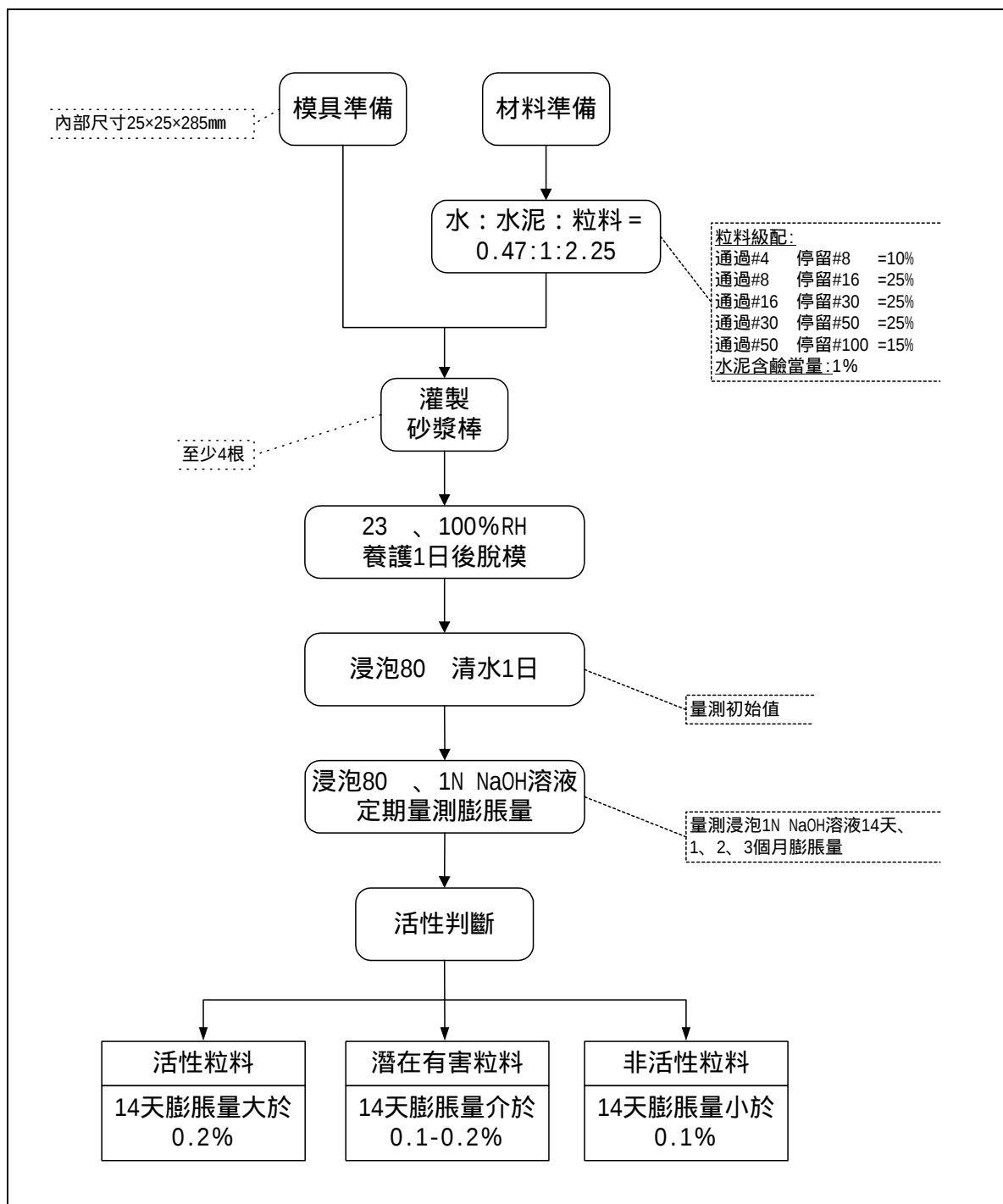


圖 3.10 ASTM C1260 法試驗及鑑定粒料活性流程圖

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。從表可發現持續兩年的量測也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 4.1~4.2 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	94 年量測 中性化深度(cm)	95 年量測 中性化深度(cm)
HPC-4000psi	Air	0.1	0.1
HPC-4000psi	Sea	0	0
OPC-4000psi	Sea	0.5	0.4
OPC-4000psi	Air	1.5	1.0
HPC-5000psi	Sea	0	0
HPC-3000psi	Sea	0	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



照片 4.1 94 年量測中性化較為嚴重的 OPC 混凝土試體



照片 4.2 95 年量測中性化較為嚴重的 OPC 混凝土試體

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，又從圖 4.1 發現高性能混凝土超音波脈波速度均大於一般混凝土，這也說明 HPC 較緻密，品質也較優。

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	
2350 天	4.595	4.628	4.201	4.147	4.625	4.618	鑽心試體
2615 天	4.588	4.601	4.211	4.201	4.618	4.599	

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 4.3 為 94 年及今年 95 年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。

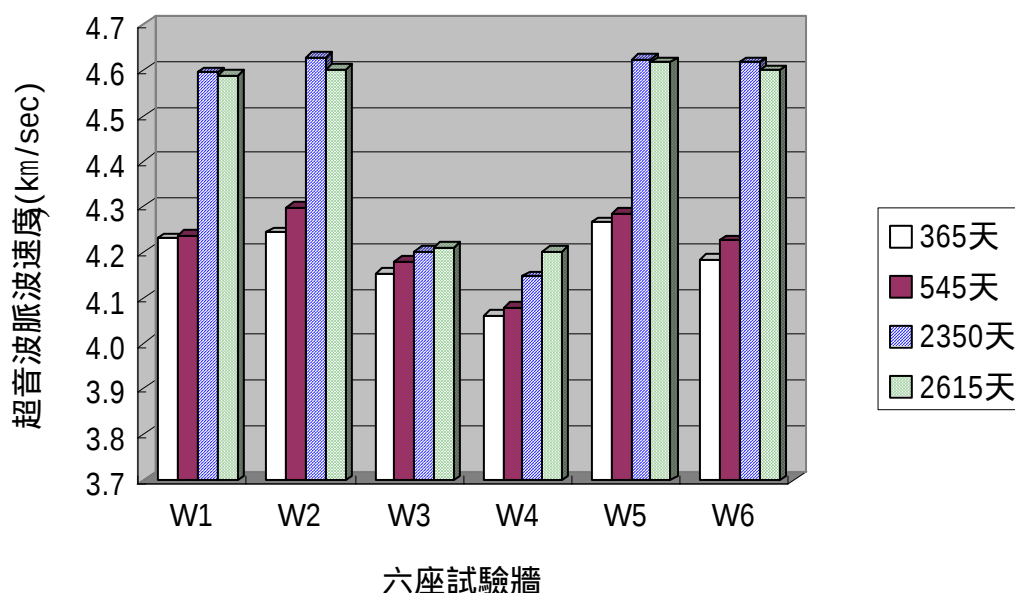


圖 4.1 超音波速之發展

表 4.3 鑽心試體之電阻係數

混凝土配比	暴露環境	94 年電阻係數 (K Ω cm)	95 年電阻係數 (K Ω cm)
HPC 4000psi	AIR	42.9	43.1
HPC 4000psi	SEA	44.4	45.3
OPC 4000psi	SEA	30.8	31.0
OPC 4000psi	AIR	34.2	34.6
HPC 5000psi	SEA	41.4	42.3
HPC 3000psi	SEA	51.8	52.1

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。

本研究經過兩年持續的量測，其抗壓強度見表 4.4 所示，強度發展如圖 4.2。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，且從今年的量測也發現 HPC 之抗壓強度之發展已經趨於緩和，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 7.5 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。

表 4.4 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
2645 天	603	634	350	301	594	531	

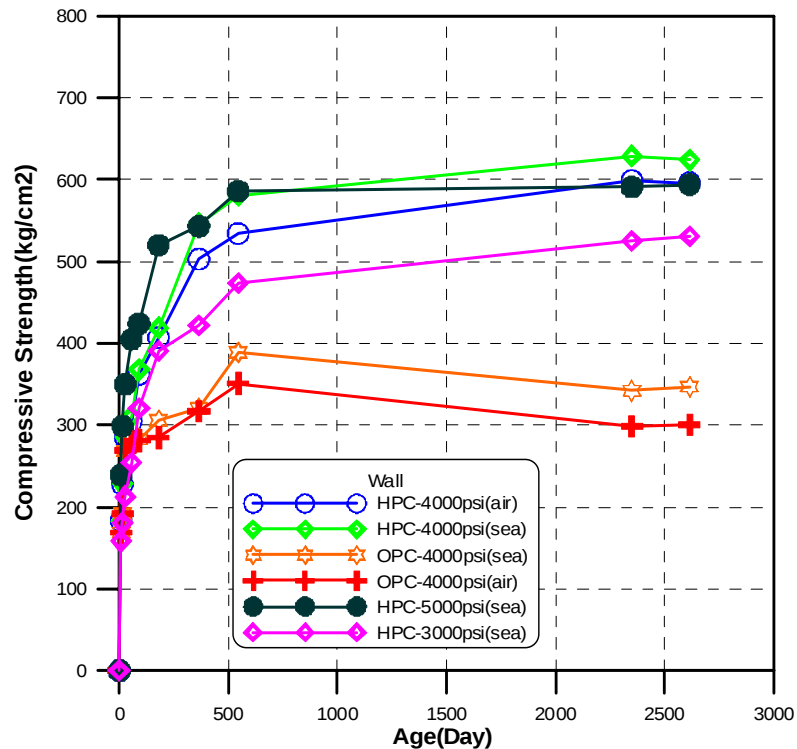


圖 4.2 混凝土之強度發展

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 4.3 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 4.3 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 0~30 天之間），電位變化最為激烈，從 -500 mV （以 AgCl 為例說明各章節內之電位均已此表示之）上升至 -200 mV 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 -200 mV ），亦即鋼筋處於鈍化狀態。本研究從去年(94 年)就持續量測，在經過 7.5 年期間，從圖 4.3 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。

6. Anode Ladder System 之量測

圖 4.4 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。從去年至今年量測之結果,大致並沒有多大變化,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。

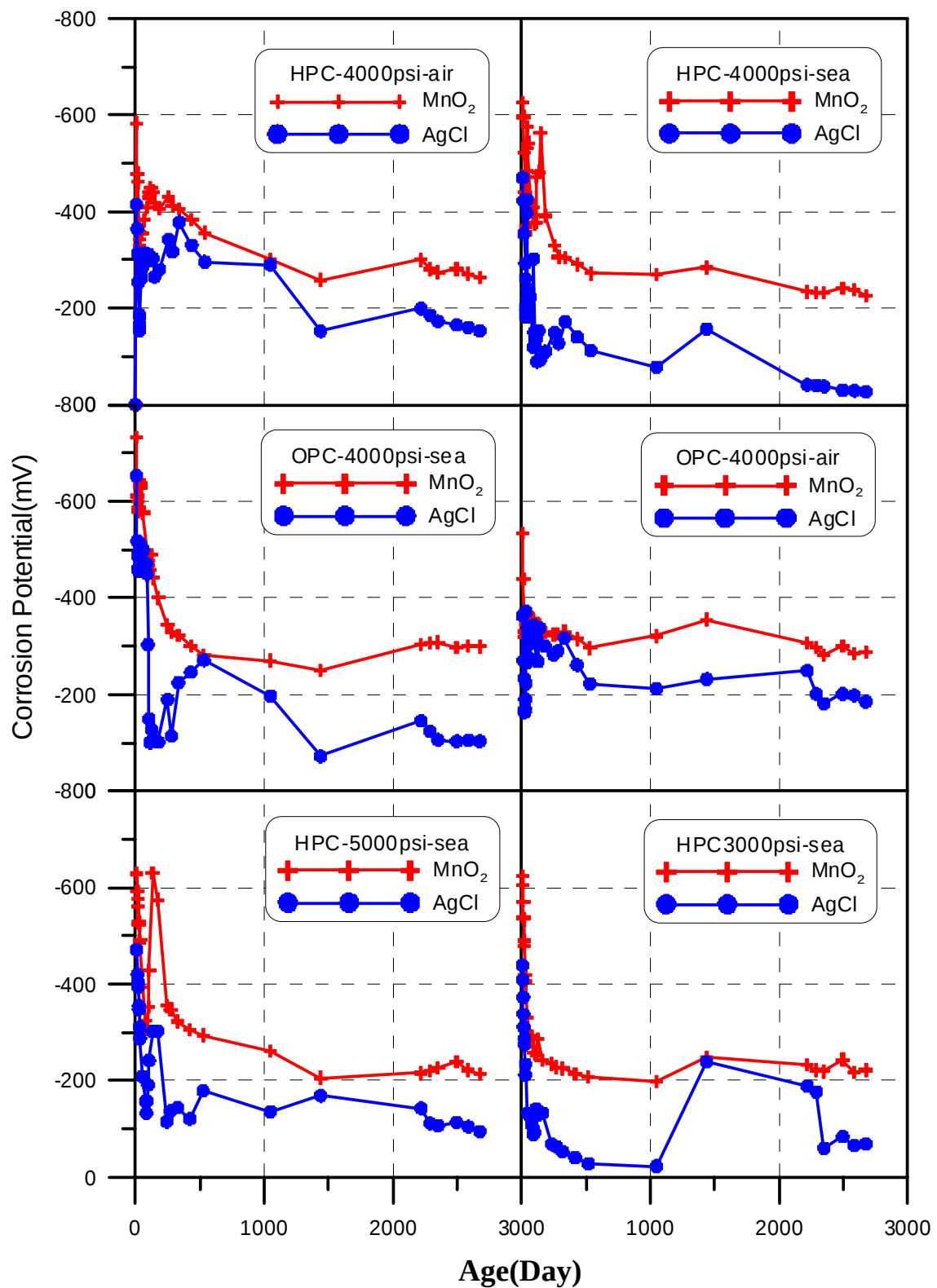


圖 4.3 腐蝕電位與齡期之關係

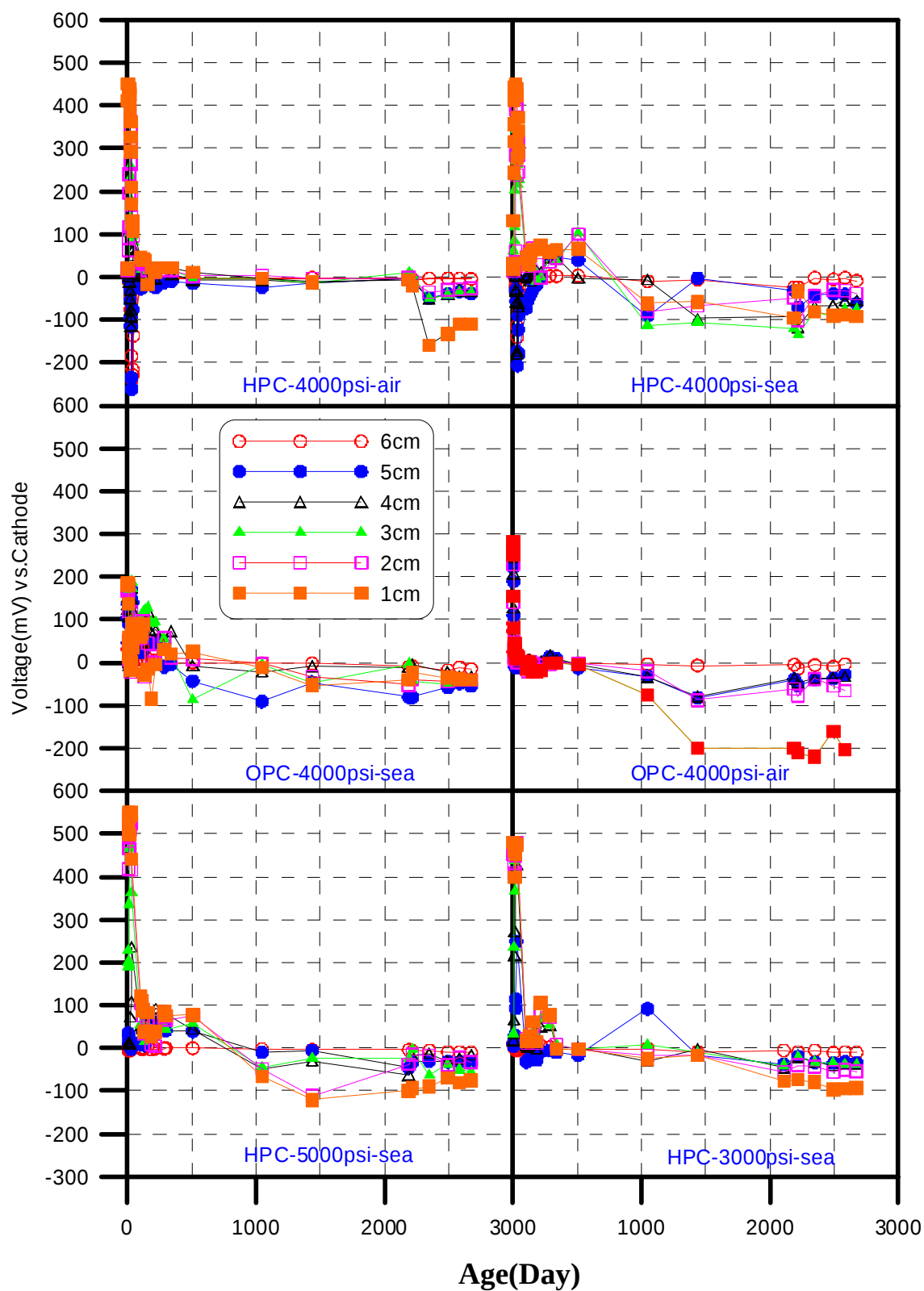


圖 4.4 Ladder System 各陽極對陰之電位與齡期關係

4.2 用水庫淤泥取代細粒料混拌混凝土之影響

1. 淤泥性質

本研究所使用之石門水庫淤泥都結成塊狀如照片 4.3 所示，故需先進行壓碎處理才可進行拌合。其粉碎方法則將塊狀淤泥放入洛杉磯磨損試驗儀(如照片 4.4 所示)內，同時製入鋼球，隨著機器轉動使淤泥塊進行粉碎，粉碎之淤泥經過篩網篩後如照片 4.5，再進行混凝土的後續研究。同時取出之淤泥也以雷射分析儀(如照片 4.6)分析其粒徑分佈，粒徑分佈曲線如圖 4.5 所示，從圖中淤泥的最大粒徑約為 0.015mm，若依統一土壤分類法粒徑小於 0.075mm 則可被歸類為粉土及黏土，又參考表 3.8 石門水庫淤砂物理性質，淤泥則被判定為 ML(無有機質土壤，粉土)及 OL(有機質粉土)

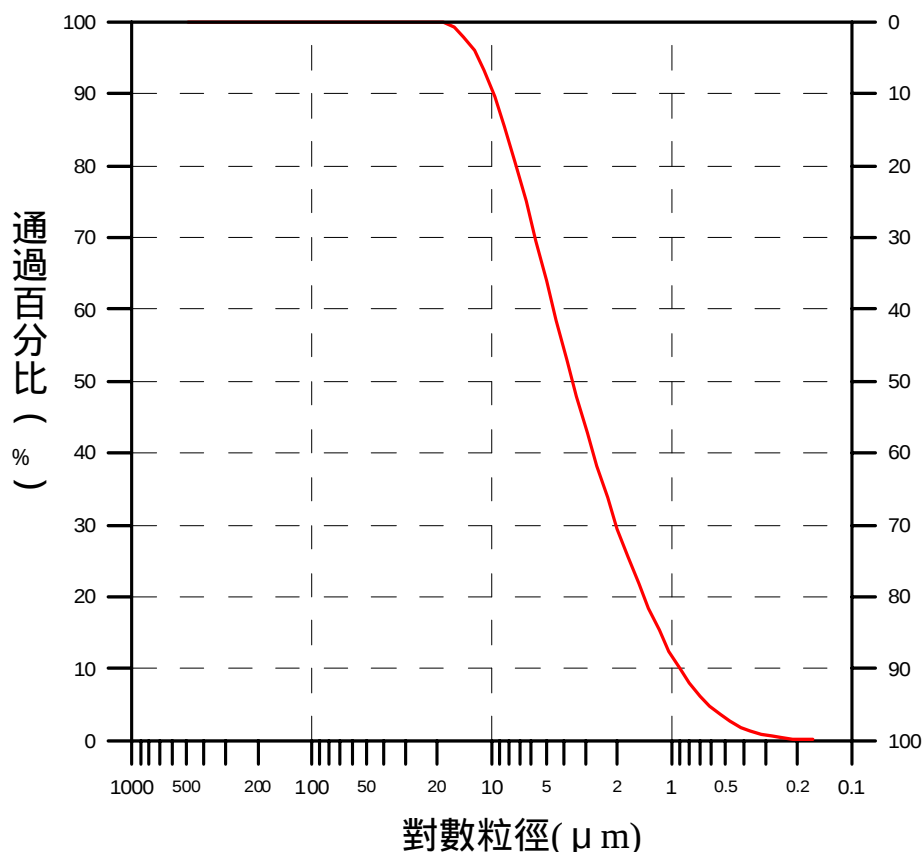


圖 4.5 淤泥粒徑分佈曲線



照片 4.3 塊狀水庫淤泥



照片 4.4 洛杉磯磨損試驗儀



照片 4.5 淤泥過篩



照片 4.6 雷射分析儀

2. 工作性與配比

本研究依 ACI 配比設計法所設計之配比，其配比 AR 與 BR 坍度均符合設計之需求，如照片 4.7~4.8 所示。但另外配比 AD 與 BD 經過拌合後發現以水庫淤泥取代細骨材的兩個配比在拌合鼓內混拌的混凝土都結成糰塊狀見照片 4.9，且依一般混凝土拌合的水量都不夠，故為使混凝土能順利拌製，經過試拌後以調整 AD 及 BD 的配比增加兩倍的用水量，以增加其工作性，但雖增加用水量，其工作性質還是不好，見照片 4.10 所示。



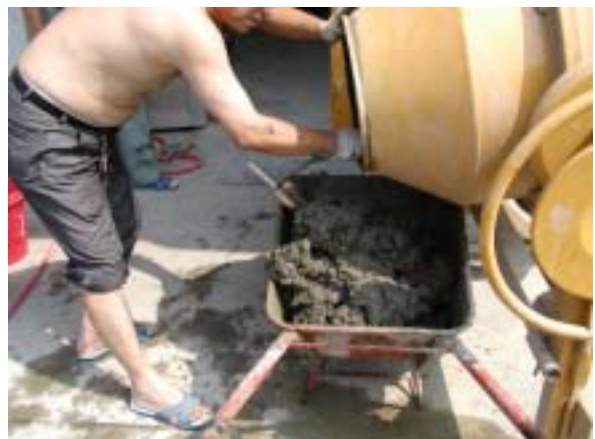
照片 4.7 編號 AR 配比之坍度



照片 4.8 編號 BR 配比之坍度



照片 4.9 水庫淤泥結成糰塊狀



照片 4.10 增加水量水庫淤泥之工作性

3. 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。

表 4.5 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 4.6 至圖 4.7。從圖中可發現用水庫淤泥取代細骨材的配比 AD 及 BD 其強度與 AR 及 BR 配比比都低很多，這是必然的，因為本研究原本是以水庫淤泥來取代混凝土中的砂，但經過加入淤泥拌合後發現混凝土形成糰塊，根本無工作性可言，所以為了讓其能順利澆置，經過試拌發現加入原配比兩倍的用水量，才稍有工作性。當然水灰比變大，其抗壓強度一定會降低。又從圖表中顯示配比 A 之各類型試體之抗壓強度均較配比 B 高出甚多，驗證低水灰比可得較高強度混凝土。

表 4.5 試體抗壓強度試驗結果 (kg/cm²)

齡期 試體編號	7 天	14 天	28 天	56 天
AR	427	491	534	570
AD	101	138	143	151
BR	355	407	467	491
BD	51	66	83	90

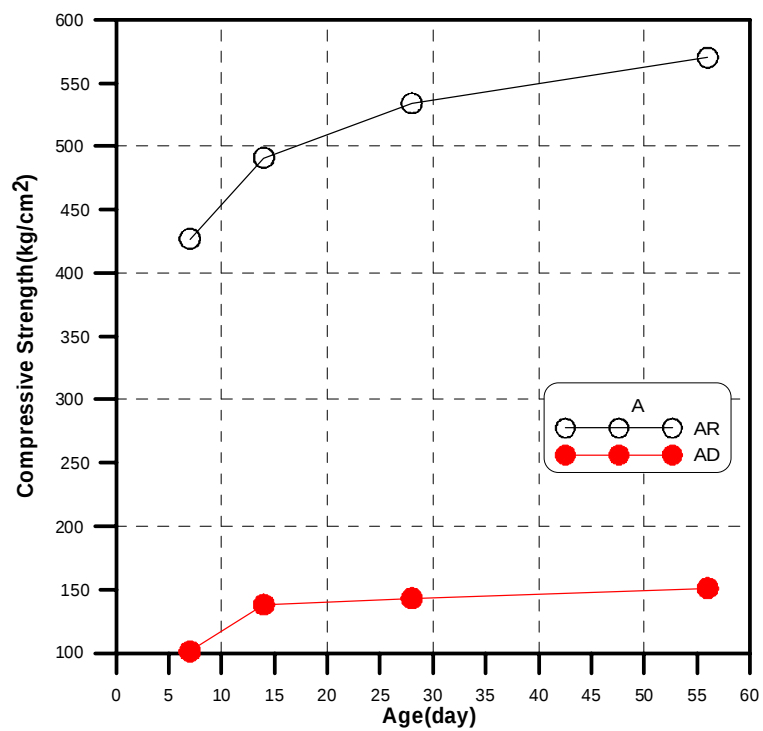


圖 4.6 配比 A 試體之抗壓強度發展趨勢

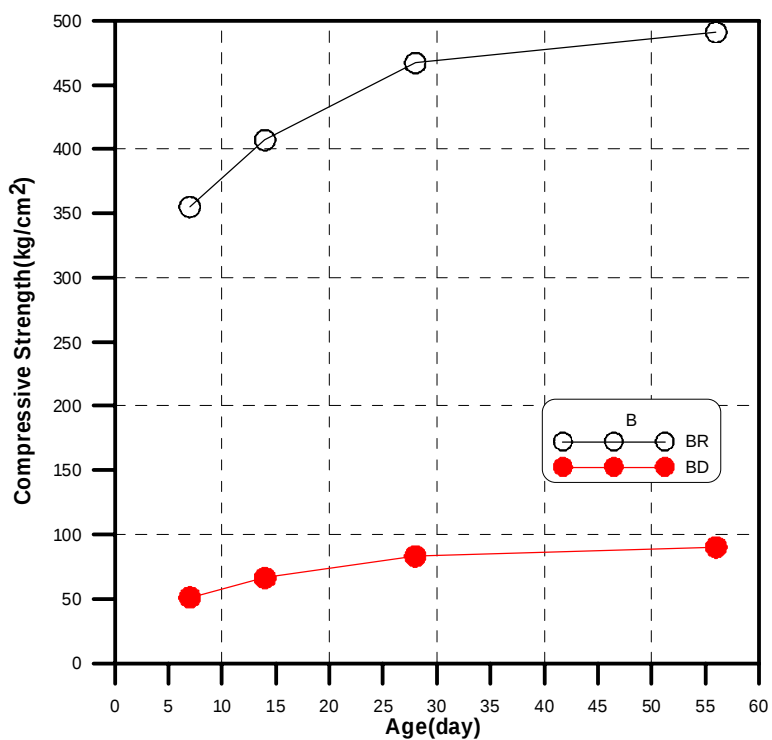


圖 4.7 配比 B 試體之抗壓強度發展趨勢

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 4.6 及圖 4.8 為各配比試體進行超音波脈波速度量測所得之結果。從圖表顯示配比 AR 及 BR 的一般混凝土之超音波脈波速均大於 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。然而 AD 及 BD 之添加淤泥之配比因為增加用水量使其水灰比增大，其脈波速就較低，但兩者在 56 天時其值大於 2.5km/sec 以上，依表 3.4 顯示混凝土品質屬於中等。同時從混凝土齡期脈波波速之發展趨勢與抗壓強度的趨勢，都非常相吻合。

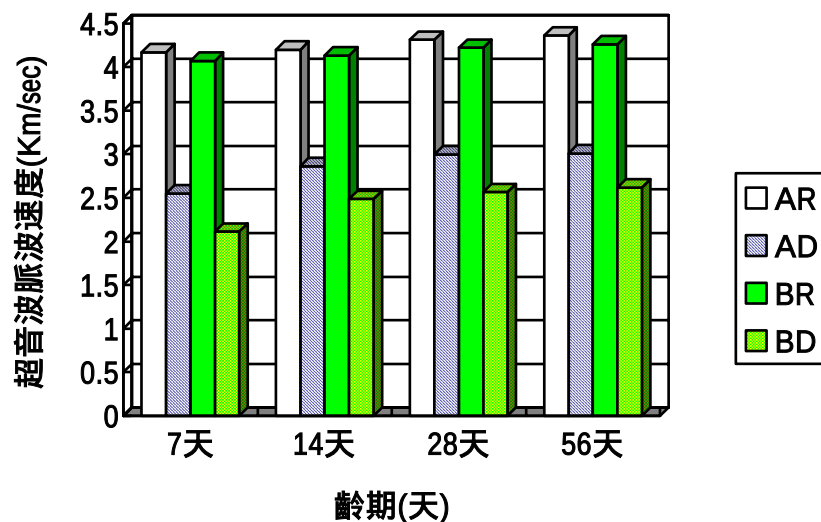


圖 4.8 各配比試體之超音波脈波速度與齡期的關係

表 4.6 試體超音波脈波速度試驗結果 (km/sec)

齡期 試體編號	7 天	14 天	28 天	56 天
AR	4.169	4.200	4.312	4.360
AD	2.551	2.861	2.999	3.011
BR	4.069	4.132	4.221	4.259
BD	2.113	2.486	2.566	2.617

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 4.9 為配比 A 與配比 B 試體之電阻係數試驗結果。圖中顯示，配比 AR 及 BR 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有相同之趨勢，且低水灰比有較高的電阻係數。然而配比 AD 及 BD 因為增加用水量所以造成電阻係數偏低，且電阻值在 5~7K Ω .cm 之間，若依表 3.5 判定鋼筋腐蝕程度是很高的。

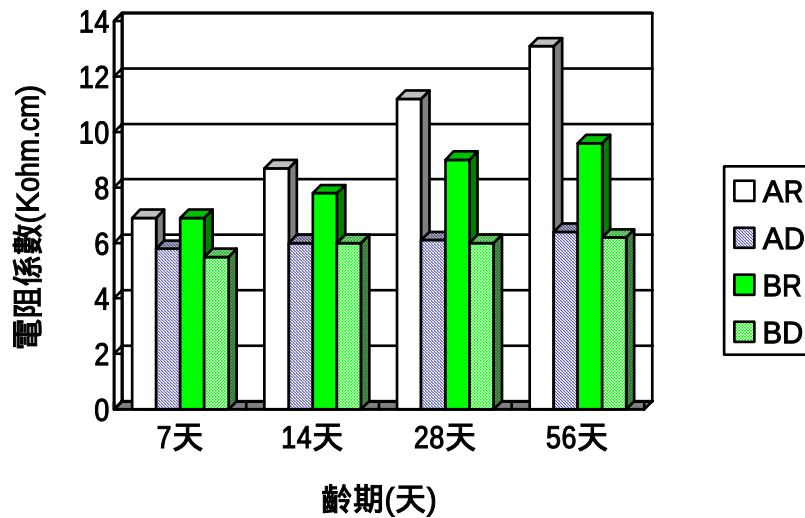


圖 4.9 各配比試體之電阻係數與養生齡期的關係

4.3 混凝土鹼質與粒料反應

4.3.1 ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹試驗法

膨脹量量測結果示於表 4.7 及圖 4.10 至圖 4.12。結果顯示，試體齡期達三個月時，大甲溪粒料未添加摻料及摻加 10%沉泥兩組試體如以三個月膨脹量超過 0.05 % (0.069%、 0.057%)，判斷屬具活性粒料；但六個月膨脹量則未超過 0.10 %，判斷屬不具活性粒料，故應視為具潛在活性危害，其餘各組則均屬於無活性危害(三個月膨脹量小於 0.05 % 且六個月膨脹量亦小於 0.10 %)。東河及三仙台粒料各組試體則三個月膨脹量超過 0.05 % 且六個月超過 0.10 %，均高於規定之臨界膨脹量，故判斷試驗所選用之東河及三仙台粒料各組配比為具有活性危害。

試驗結果顯示，三種粒料各組試體如摻加 20%飛灰或 40%爐石粉等具卜作嵐特性材料，可明顯降低發生鹼質與粒料反應之機率，摻加水庫沉泥或活性粉則效果較不明顯。由於活性粒料粒徑大於 0.85mm 或小於 0.074mm 時其膨脹量較小，故本研究摻加粒徑小於 0.074mm 之活性粉於試體中，能有效抑制鹼質與粒料反應效益^[17]。

表 4.7 ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹量試驗結果（單位：％）

養護齡期 粒料	14 天	30 天	90 天	180 天	結果判斷		
					3 個月	6 個月	綜合判斷
大甲溪粒料	0.001	0.023	0.069	0.065	有害	無害	潛在有害
大甲溪粒料 + 20 % 飛灰	0.001	0.016	0.022	0.035	無害	無害	無害
大甲溪粒料 + 40 % 爐石粉	0.002	0.021	0.023	0.040	無害	無害	無害
大甲溪粒料 + 10 % 沉泥	0.001	0.033	0.057	0.058	有害	無害	潛在有害
大甲溪粒料 + 10 % 活性粉	0.001	0.022	0.032	0.055	無害	無害	無害
東河粒料	0.042	0.213	0.325	0.363	有害	有害	有害
東河粒料 + 20 % 飛灰	0.033	0.128	0.138	0.186	有害	有害	有害
東河粒料 + 40 % 爐石粉	0.025	0.138	0.135	0.193	有害	有害	有害
東河粒料 + 10 % 沉泥	0.025	0.178	0.213	0.322	有害	有害	有害
東河粒料 + 10 % 活性粉	0.018	0.157	0.244	0.299	有害	有害	有害
三仙台粒料	0.023	0.292	0.386	0.482	有害	有害	有害
三仙台粒料 + 20 % 飛灰	0.016	0.194	0.234	0.313	有害	有害	有害
三仙台粒料 + 40 % 爐石粉	0.025	0.191	0.295	0.351	有害	有害	有害
三仙台粒料 + 10 % 沉泥	0.036	0.288	0.325	0.324	有害	有害	有害
三仙台粒料 + 10 % 活性粉	0.029	0.285	0.317	0.338	有害	有害	有害

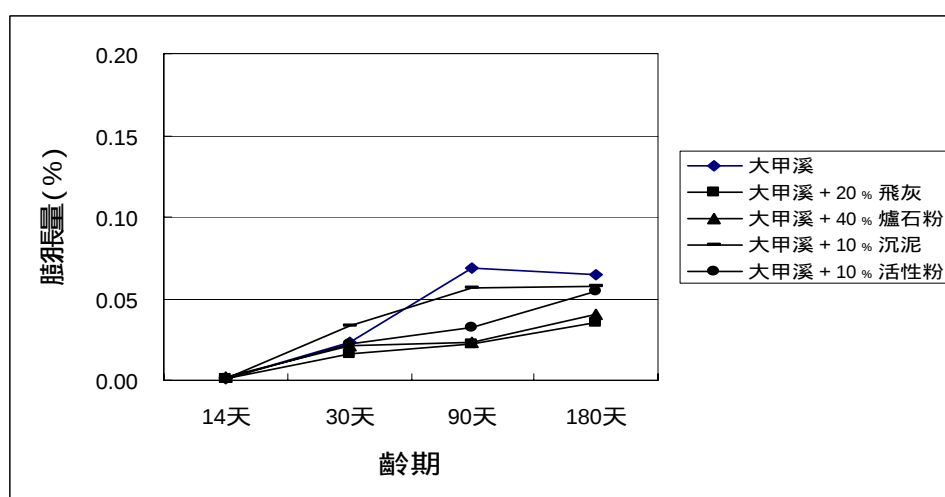


圖 4.10 大甲溪粒料各組試體 ASTM C227 膨脹量試驗結果

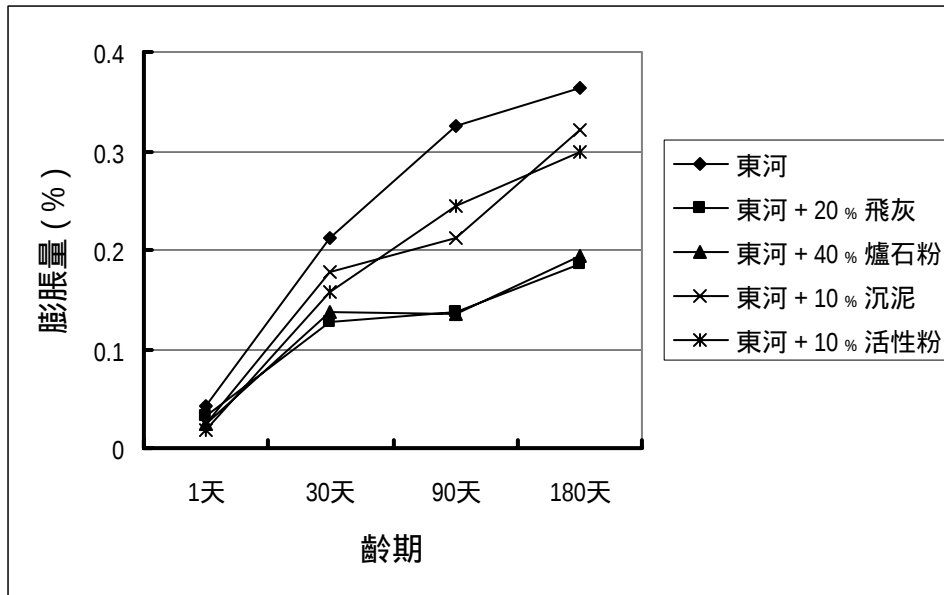


圖 4.11 東河粒料各組試體 ASTM C227 膨脹量試驗結果

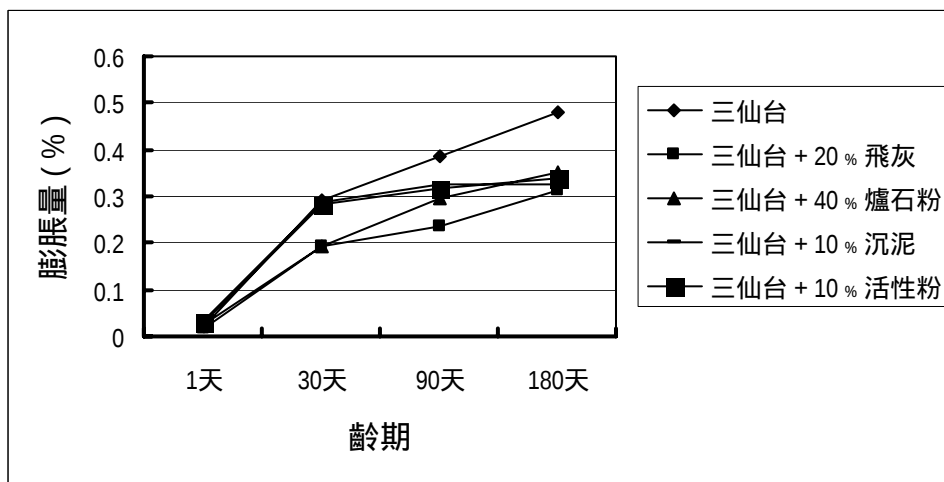


圖 4.12 三仙台粒料各組試體 ASTM C227 膨脹量試驗結果

國內早期如翡翠水庫等大型工程，為預防混凝土發生鹼質與粒料反應，多以 ASTM C289 及 C227 試驗為檢測標準，其他國內相關研究亦是，民國 84 年 CNS 並正式將此兩項試驗納入規範。本法之試驗結果與目前之現地經驗大致符合，但對於反應較慢之粒料仍存在不確定性；且試體置放於 38℃、相對濕度 100%環境中長達六個月，溶液鹼性可能因濃度變化產生誤差，又粗粒料顎碎成細粒料後之反應行為未必全能代表粗粒料本身等，致使本法的準確性受質疑，目前許多國家已針對本法提出改良或不同試驗方法，故建議採用本法應與其他檢測法搭配應用。

4.3.2 ASTM C1260 水泥砂漿棒加速膨脹試驗法

試驗結果示如表 4.8 及圖 4.13 至圖 4.15。結果顯示，大甲溪粒料各組試體 14 天膨脹量介於 0.089～0.167 % 間，遠低於無害粒料界限值 0.1 %，但東河除添加爐石粉之試體 14 天膨脹量為 0.195%屬不具活性者外，其餘各組與三仙台粒料之各組試體皆超過 0.2 %（東河：0.218～0.423 % 間，三仙台：0.234～0.586 % 間），依據規範判定皆屬於具活性危害。三種粒料各組試體如摻加 20%飛灰或 40%爐石粉等具卜作嵐特性材料，可明顯降低發生鹼質與粒料反應之機率，摻加水庫沉泥或活性粉則效果較不明顯。由於活性粒料粒徑大於 0.85mm 或小於 0.074mm 時其膨脹量較小，故本研究摻加粒徑小於 0.074mm 之活性粉於試體中，能有效抑制鹼質與粒料反應之效益。

表 4.8 ASTM C1260 水泥砂漿棒膨脹量試驗結果（單位：％）

養護齡期 粒料	1 天	7 天	14 天	結果判斷
大甲溪粒料	-0.002	0.087	0.131	不具活性
大甲溪粒料 + 20 % 飛灰	-0.005	0.064	0.089	不具活性
大甲溪粒料 + 40 % 爐石粉	0.002	0.065	0.094	不具活性
大甲溪粒料 + 10 % 沉泥	-0.008	0.073	0.167	不具活性
大甲溪粒料 + 10 % 活性粉	0.008	0.063	0.109	不具活性
東河粒料	0.047	0.087	0.423	具活性
東河粒料 + 20 % 飛灰	-0.003	0.068	0.218	具活性
東河粒料 + 40 % 爐石粉	0.002	0.082	0.195	不具活性
東河粒料 + 10 % 沉泥	0.020	0.078	0.313	具活性
東河粒料 + 10 % 活性粉	0.000	0.076	0.344	具活性
三仙台粒料	0.019	0.092	0.586	具活性
三仙台粒料 + 20 % 飛灰	0.000	0.054	0.234	具活性
三仙台粒料 + 40 % 爐石粉	0.016	0.061	0.295	具活性
三仙台粒料 + 10 % 沉泥	0.000	0.068	0.425	具活性
三仙台粒料 + 10 % 活性粉	0.019	0.088	0.517	具活性

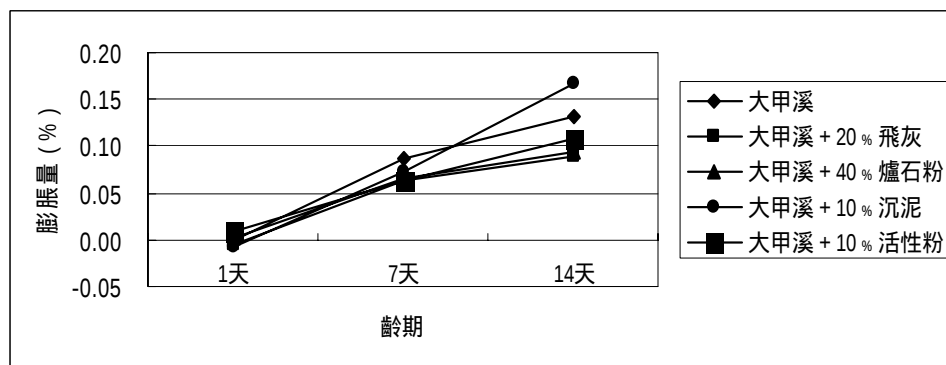


圖 4.13 大甲溪粒料各組試體 ASTM C1260 膨脹量試驗結果

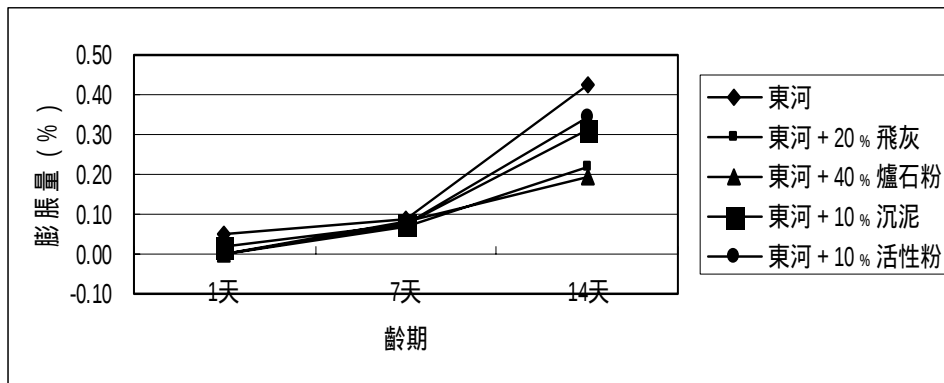


圖 4.14 東河粒料各組試體 ASTM C1260 膨脹量試驗結果

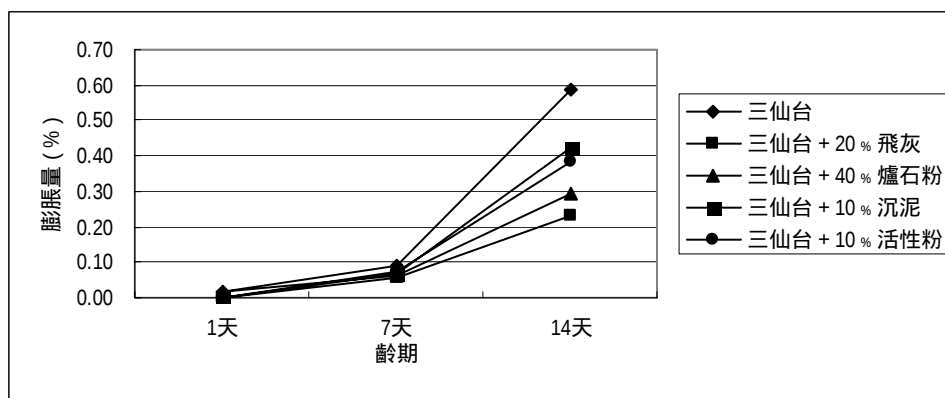


圖 4.15 三仙台粒料各組試體 ASTM C1260 膨脹量試驗結果

本法在澆置後僅需 16 天即可相當準確判定粒料活性程度，是快速檢測鹼質與粒料反應的利器，惟依據國外相關研究顯示，某些現地不具活性之粒料，以本法檢測卻可能屬具活性。因此，部份學者建議選用本法仍應注意不宜逕用為作判定合格或拒收之唯一依據，採用本法判定屬具活性危害粒料者，僅表示應做更進一步的檢測，例如混凝土角柱試驗膨脹量試驗（ASTM C1293）等，且膨脹界限可能會隨粒料的種類或組成而改變。

第五章 結論

- 1.本研究之高性能混凝土經過兩年持續量測，發現 OPC 之中性化較為嚴重，在鑽心試體的超音波及抗壓強度上 HPC 都比 OPC 佳，顯現有較好的耐久性，同時試驗牆內部之腐蝕電位監測已趨於緩和，變化並不大。
- 2.水庫淤泥取代細粒料拌混凝土之研究發現淤泥並不適合取代砂，因淤泥粉末太細，會大量吸水造成混凝土結糰，工作性變差，若加水增加工作性，會使混凝土強度降低。
- 3.摻加 20%飛灰、40%爐石粉或 10%水庫淤泥、10% 活性粉於不具活性之大甲溪粒料或東河、三仙台等活性粒料中，均可達到抑制混凝土發生鹼質與粒料反應之效果。
- 4.抑制發生鹼質與粒料反應之效益，飛灰或爐石粉大於活性粉及水庫淤泥。
- 5.近年國內外相關研究顯示，ASTM C227 及 ASTM C1260 之檢測方法仍有部份須待修正或無法完全適用於各種粒料，建議重大工程如採用上述之檢測方法，必須輔以其他方法再確認。

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] 陳松堂、林建宏，「自充填混凝土之適用介紹」，臺灣公路工程，第三十卷，第五期，2003。
- [4] 黃兆龍、陳峙江，「美國 ACI(NC)、日本 SCC 及臺灣 HPC 之發展釋疑」，土木水利，第三十三卷，第二期，2006，4。
- [5] 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）。
- [6] 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）。
- [7] 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。
- [8] ACI Committee 318，Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary，（ACI 318-95/ACI 418R-95）American Concrete Institute，Farmington Hills（1995）。
- [9] Malhotra, V.M., editor, High-performance Concrete, American concrete Institute，Special Publication.Sp-149，884P（1994）。
- [10] 林柄炎，「飛灰矽灰高爐石用在混凝土中」，1993。
- [11] 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。
- [12] 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。

- [13] 經濟部水資會，「臺灣地區之水資源」，1994。
- [14] 陳志榮，「改質水庫淤泥對水泥漿工程性質之影響」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，2005,6。
- [15] 陳豪吉、顏聰、王順元、林正毅，「水庫淤泥輕質骨材之產製研究」，第二屆輕質骨材混凝土研討會暨國科會產學合作成果發表會，p54,2005,10。
- [16] 黃景川，成功大學土木工程研究所教授。
- [17] ASTM C876-91，"Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete"。
- [18] 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。
- [19] 李釗，陳桂清，許書王，港區混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析研究，台灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1999 年。
- [20] 李釗、陳桂清、許書王、柯正龍、巫柏蕙，高雄港區混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析研究，交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究報告，2000 年。
- [21] 李釗，許書王，台灣地區鹼質與粒料反應抑制策略之研究，國立中央大學土木工程研究所博士論文，1999 年。
- [22] 李釗，劉志堅，台灣地區粒料活性探討暨鹼質與粒料反應電化學維修策略研究，國立中央大學土木工程研究所博士論文，2003 年。
- [23] ASTM C1260-94 "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)", 1998.
- [24] ASTM C227-97a "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)", 1998