

港灣環境下高性能混凝土結構體之性質研究(二)

台灣省政府交通處

港灣技術研究所

台中 梧棲

中華民國八十八年 六 月

港灣環境下高性能混凝土結構體 之性質研究(二)

全程計畫：自 86 年 7 月至 89 年 12 月

本年度計畫：自 87 年 7 月至 88 年 6 月

執行單位：港工材料組

計畫主持人：林維明(自 86 年 7 月至 87 年 9 月)
饒 正(自 87 年 9 月起)

共同主持人：張道光

研究人員：陳桂清 柯正龍 羅建明

陳正義 何木火 李昭明

王培源 林隆貞

(港灣技術研究所)

呂振龍(英銓實業有限公司)

江天裕(新瑞實業有限公司)

摘要

本研究係探討高性能混凝土在海洋環境下之物理、化學及力學性質之行為，並評估中長期 HPC 之耐久性能。研究時首先選用適合國內本土化中低強度之高性能混凝土，然後製作圓柱試體與鋼筋混凝土試驗牆(在牆內埋設多種感應器)，於適當齡期下進行大氣及海水曝露環境下之試驗，進而分析量測其坍度、坍流度之新拌性質與檢測在海洋環境下硬固混凝土之強度、電阻係數、滲透及鋼筋腐蝕速率及電量等之防蝕性能。

研究結果顯示高性能混凝土具有良好之工作性，澆置時無須搗實與振動，而在電阻係數方面 HPC 之低水膠比(W/B)比高水膠比有較大的電阻係數，且電阻係數隨著齡期的增長而增加，且各配比 HPC 之電阻係數都高於控制組一般混凝土(OPC)。

耐久性之探討是本研究之重點，因目前齡期僅 56 天，並不能以此評估耐久性之指標，其長期性能有待繼續觀測。

目錄

摘要	I
目錄	II
表目錄	IV
圖目錄	V
照片目錄	VII
第一章 前言	1
1-1 研究動機	1
1-2 研究目的	2
1-3 實施方法	2
1-4 預期成果	2
第二章 文獻回顧	3
2-1 高性能混凝土之定義	3
2-2 高性能混凝土之特性	4
2-3 摻料對混凝土之影響	7
2-3-1 強塑劑對新拌混凝土之影響	7
2-3-2 強塑劑對硬固混凝土之影響	8
2-3-3 波索蘭材料對高性能混凝土之影響	11
2-4 氯化物滲透與透水性之探討	14
2-4-1 Cl^- 之來源	14
2-4-2 對鋼筋之侵蝕	14
2-4-3 混凝土材料中氯化物的容許含量	15
2-4-4 氯離子在混凝土中之擴散模式及電滲試驗	16
2-4-5 透水性	19
2-5 混凝土電阻性質之影響參數	20
2-6 混凝土耐久性	28
2-6-1 混凝土之耐久性指標	28
2-6-2 高性能混凝土耐久性設計策略	28
2-7 高性能混凝土之應用及近況	27
第三章 研究方法與步驟	39
3-1 研究規劃	39

3-2 試體製作	39
3-2-1 配比	39
3-2-2 試驗變數及試體編號	43
3-2-3 試體製作	44
3-2-4 齡期及養護方式	44
3-2-5 海水乾濕循環方式	44
3-3 試驗方法與設備	51
3-3-1 工作性試驗	51
3-3-2 硬固混凝土性能試驗	51
3-3-2-1 強度試驗	51
3-3-2-2 品質試驗	51
3-3-3 試驗牆試驗	55
3-3-3-1 腐蝕電位量測	55
3-3-3-2 鋼筋腐蝕速率量測	55
3-3-3-3 Anode-Ladder-System 監測系統量測	64
第四章 結果與討論	69
4-1 工作性 (坍度與坍流度)	69
4-2 硬固混凝土性質試驗	73
4-2-1 強度發展	73
4-2-2 超音波速量測	77
4-2-3 電阻量測	77
4-3 試驗牆試驗	83
4-3-1 腐蝕電位量測	83
4-3-2 腐蝕電流量測	83
4-3-3 電阻之量測	83
4-3-4 Anode-Ladder-System 之量測	84
第五章 結論與建議	95
第六章 參考文獻	96

表目錄

表 2-1 高性能混凝土與其他混凝土之比較	5
表 2-2 混凝土添加波索蘭材料之特性	12
表 2-3 各國對鋼筋混凝土構造物氯化物含量之規定	16
表 2-4 Cl^- 含量與鋼筋腐蝕之關係	15
表 2-5 氯離子擴散係數與混凝土之滲透性之關係	18
表 2-6 國內外學者對混凝土電阻性質相關研究之彙整	23
表 2-7 混凝土電阻與其中鋼筋腐蝕活性之關係	26
表 2-8 ASTM C1202 電量規定值	28
表 2-9 ACI 318-95 混凝土耐久性設計要求	31
表 2-10 鋼筋混凝土防蝕之最大氯離子含量	33
表 2-11 高性能混凝土之優點及應用性	35
表 2-12 HPC 應用之結構形態，增進之工程性質及實例	36
表 2-13 使用 HPC 施工之代表性範例	37
表 2-14 北海混凝土結構物之挑戰與需求	38
表 2-15 北海耐久性混凝土十大重要的法則	38
表 3-1 混凝土之相關試驗內容	41
表 3-2 混凝土試體配比設計數據	42
表 3-3 試驗變數	43
表 3-4 超音波脈波速度與混凝土品質之關係	52
表 3-5 ASTM C-876 鋼筋電位值與腐蝕機率之關係	55
表 3-6 腐蝕電流與鋼筋腐蝕狀態之關係	60
表 3-7 腐蝕電流與鋼筋表面厚度損失速率之關係	60
表 3-8 試驗項目及設備	68
表 4-1 高性能混凝土之基本性質	70
表 4-2 各齡期混凝土的超音波速與電阻係數	81

圖目錄

圖 2-1 強塑劑對混凝土凝結時間之影響 -----	9
圖 2-2 添加強塑劑混凝土之坍度損失 -----	9
圖 2-3 固定坍度含不同強塑劑量混凝土之強度發展 -----	10
圖 2-4 混凝土內部 pH 質與 Cl^- 濃度對鋼筋腐蝕之關係 -----	10
圖 2-5 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕有關文獻比較 -----	22
圖 2-6 混凝土水灰比與電阻性質之關係 -----	22
圖 2-7 W/C、W/B 及 W/S 對電阻係數之影響 -----	24
圖 2-8 混凝土齡期與電阻性質之關係 -----	24
圖 2-9 相對濕度與混凝土電阻性質之關係 -----	25
圖 2-10 混凝土之溫度與電阻性質關係 -----	25
圖 2-11 混凝土的摻料效應對電阻性質及鋼筋電位的關係 -----	27
圖 2-12 降低水膠比增進鍵結力 -----	30
圖 2-13 水泥漿量對超音波速之影響 -----	30
圖 3-1 研究計劃流程圖 -----	40
圖 3-2 單座試驗牆之設計詳圖 -----	46
圖 3-3 試驗牆埋設之監視系統詳圖 -----	47
圖 3-4 混凝土試體及試驗牆曝露位置配置圖 -----	50
圖 3-5 四探針式之電阻量測簡示圖 -----	53
圖 3-6 鋼筋腐蝕測儀之簡示剖圖 -----	59
圖 3-7 混合電位理論之極化曲線圖 -----	61
圖 3-8 Anode-Ladder-System 之原理 -----	66
圖 3-9 Anode -Ladder-System 之排置詳圖 -----	67
圖 4-1 HPC-4000psi 之強度發展 -----	74
圖 4-2 OPC-4000psi 之強度發展 -----	74
圖 4-3 HPC-5000psi 之強度發展 -----	75
圖 4-4 HPC-3000psi 之強度發展 -----	75
圖 4-5 在養生室內養護下各配比混凝土之強度發展 -----	76
圖 4-6 在大氣工地養護下各配比混凝土之強度發展 -----	76
圖 4-7 HPC-4000psi 之超音波速 -----	78

圖 4-8 OPC-4000psi 之超音波速 -----	78
圖 4-9 HPC-5000psi 之超音波速 -----	79
圖 4-10 HPC-3000psi 之超音波速 -----	79
圖 4-11 養生室養護下各配比混凝土之超音波速發展 ---	80
圖 4-12 工地養護下各配比混凝土之超音波速發展 -----	80
圖 4-13 養生室養護下各配比混凝土之電阻發展 -----	82
圖 4-14 大氣工地養護下各配比混凝土之電阻發展 -----	82
圖 4-15 各配比鋼筋混凝土試驗牆之腐蝕電位 -----	85
圖 4-16 各配比混凝土以 GECOR6-CSE、AgCl 及 MnO ₂ 電極 量測試驗牆之電位比較圖 -----	86
圖 4-17 HPC 和 OPC-4000psi 在大氣與海水曝露環境下腐 蝕電位之比較圖 -----	87
圖 4-18 各配比試驗牆之鋼筋腐蝕電流 -----	88
圖 4-19 HPC 和 OPC-4000psi 在大氣與海水曝露環境下腐 蝕電流之比較圖 -----	89
圖 4-20 各配比鋼筋混凝土試驗牆之電阻 -----	90
圖 4-21 HPC 和 OPC-4000psi 在大氣與海水曝露環境下電 阻之比較圖 -----	91
圖 4-22 Ladder System 量測各配比混凝土之電位關係圖 -----	92
圖 4-23 Ladder System 量測各配比混凝土之電流關係圖 -----	93
圖 4-24 Ladder System 量測各配比混凝土之電阻關係圖 -----	94

照片目錄

照片 3-1 試驗室內圓柱試體之灌製 -----	45
照片 3-2 單座試驗牆之實際佈置情形 -----	45
照片 3-3 試驗牆 Sensor 埋設之情形 -----	48
照片 3-4 試驗牆及圓柱試體以濕麻布濕治養護 -----	48
照片 3-5 混凝土電阻量測儀 -----	53
照片 3-6 MnO_2 參考電極 -----	56
照片 3-7 $AgCl$ 參考電極 -----	56
照片 3-8 鋼筋腐蝕測儀 -----	58
照片 3-9 感應計緊貼牆面 -----	58
照片 3-10 Anode-Ladder-System 腐蝕監視系統 -----	65
照片 3-11 可攜式 CANIN 量測儀 -----	65
照片 4-1 配比 A HPC-4000psi 之坍度及坍流度 -----	71
照片 4-2 配比 B OPC-4000psi 之坍度及坍流度 -----	71
照片 4-3 配比 C HPC-5000psi 之坍度及坍流度 -----	72
照片 4-4 配比 D HPC-3000psi 之坍度及坍流度 -----	72

第一章 前言

1-1 研究動機

港灣鋼筋混凝土結構物，常年處在海洋環境下，因此較容易遭致鋼筋腐蝕與混凝土劣化的情形發生。由於傳統混凝土之坍度及坍流度過小流動性差，以至工人擅自加水，造成析離及泌水現象，又在施工中未適當的搗實，則易產生冷縫及蜂窩的現象，這些潛在的因素，受到海洋惡劣環境物理和化學侵蝕下，使混凝土有過高的滲透性或產生裂縫，而使有害物質容易侵入混凝土內部，在經由各種因素的交互作用和惡性循環，使混凝土產生新裂縫，並加速舊裂縫之延伸，擴大海洋環境侵蝕，進而使氯離子更容易侵入混凝土結構體，而破壞鋼筋表面的鈍態保護膜，使鋼筋發生腐蝕，因而減少結構物的使用年限，尤其台灣四面環海，在高溫高濕的腐蝕環境下，混凝土腐蝕問題更為顯著。

高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)為當今世界各國混凝土工程界重要的研發與應用課題，因其具有高流動性與高品質之特性。其高流動性可使混凝土施工具有不需搗實，可自動澆置與減少施工噪音優點；廣泛的自流特性能減少混凝土之輸配及可流通至狹窄之鋼筋間距中或斷面上，達到充分填充效果，在施工階段亦可發現其具有減少骨材析離與泌水現象之優越性，且在硬固後保有高品質之耐久性，由於這些優點，更能取代傳統之混凝土，確保結構物在惡劣環境下有較長的耐久性。

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。未來在土木建築工程上勢必扮演著非常重要的角色。基於為提昇港灣工程混凝土科技的研發與應用水準，需徹底瞭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特性，以利推廣應用，因此決定執行本研究計畫。

1-2 研究目的

本研究之主要目的係應用添加飛灰、爐石等波索蘭材料與強塑劑之本土化材料，所配製之高性能混凝土。進而分析量測其坍度、坍流度之新拌性質與檢測在海洋環境下硬固混凝土之強度、電阻係數、滲透及鋼筋腐蝕速率、電量等之防蝕性能，綜合評估中長期 HPC 之耐久性，期能提昇混凝土之工程品質。

1-3 實施方法

- 1.進行 HPC 之試拌及量測其坍度、坍流度及強度等發展特性。
- 2.選用較佳之 HPC 配比，製作試體與鋼筋混凝土試驗牆，並在試驗牆內埋設多種感應器以進行相關試驗，後進行海水曝露試驗。
- 3.在適當的齡期下，取出試體進行各項物理性、化學性及力學性質之測試。
- 4.量測混凝土電阻、滲透及鋼筋腐蝕速率。
- 5.評估 HPC 中長期之耐久性能。

1-4 預期成果

- 1.希由各種檢測方式與耐久性指標評估 HPC 之防蝕特性。
- 2.推廣高性能混凝土在港灣工程上之應用。
- 3.本研究所進行的海洋曝露試驗之測試結果，可供研擬施工規範及建立資料庫，提供相當有利的詮釋數據。

第二章 文獻回顧

2-1 高性能混凝土之定義

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($fc' > 8000$ 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 $fc' = 4000 \sim 5000$ 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。

2-2 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/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($20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$)，

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、爐石粉或稻殼灰取代部分水泥及砂，使用量 5~20%水泥量	飛灰、砂灰、爐石粉或稻殼灰取代水泥或砂，用量視設計需要而定
配比設計		坍度依結構物而定，水灰比視耐久性及強度而定水泥用量 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

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。

2-3 摻料對混凝土之影響

摻料對混凝土之影響可分為強塑劑及波索蘭材料。

2-3-1 強塑劑對新拌混凝土之影響

強塑劑對混凝土之影響，可分為新拌混凝土及硬固混凝土兩方面加以詳述⁽⁵⁴⁾。

1. 水化程度

混凝土中添加強塑劑時，當水泥一接觸到水後，鈣離子立即被釋放出而進入溶液且吸附於水泥顆粒表面，因此表面變成帶正電荷，而溶液中強塑劑即吸附於表面而阻礙水化之進行，由於強塑劑有分散作用，可增加水泥漿體之工作度且藉著擴散作用通過保護層進入水泥顆粒，因此造成此系統內壓力增加而破壞保護層，進而加速水化作用。添加強塑劑對水泥砂漿之水化程度會有幫助，強塑劑由於可均勻分散水泥，使水化空間有效地利用，因而水化程度較高。而添加強塑劑對水泥漿卻相反，因強塑劑具有分散及促凝之作用，會使其水化產物生成量較少，而殘留較大量之未水化水泥顆粒，因此水化程度降低⁽⁵⁾。

2. 泌水及分離現象

若在適當劑量下，強塑劑對新拌混凝土泌水 (Bleeding) 及

分離(Segregation)現象並不十分明顯，但對於輸送帶灌置流質混凝土時，必須小心預防產生分離現象⁽⁶⁾，Soshiroda 曾指出⁽⁷⁾，當強塑劑作為減水效應時(工作性固定)，可降低新拌混凝土分離現象。從另一觀點來說，若強塑劑作為分散水泥或是減少水泥含量(增加骨材含量)效應時，會增加混凝土之泌水及分離現象，但若添加輸氣劑(Air-entraining admixture)則對控制析離十分有效。

3.凝結時間

一般而言，添加強塑劑均會延緩初凝時間，並且隨劑量之增加而延長初凝時間⁽⁸⁾，如圖 2-1 所示，而此種緩凝之作用並不致於影響硬化後混凝土之性質。

4.坍度損失

坍度損失(Slump loss)為影響混凝土工作性及施工品質重要因素之一。一般強塑劑較常應用於預鑄混凝土，若應用於預拌混凝土工業時，則須先克服坍度損失在技術上之困難。至於坍度損失正真正之原因，目前尚無明確之解釋，只能推測由於新拌混凝土中水泥漿化學及物理性質改變所致。對於坍度隨時間快速損失之現象，如圖 2-2 所示^(8,9)，Hattori 曾解釋為在水泥漿體中，水泥顆粒水化凝結之潛伏期比水泥顆粒在水化過程中形成化學鍵結(Chemical bonding)扮演更重要角色^(10,11)。

2-3-2 強塑劑對硬固混凝土之影響

添加強塑劑雖會延長混凝土初凝之時間，但對硬化後混凝土性質並無不良之影響。在不改變水灰比情況下，高流動混凝土之抗壓強度會低於一般混凝土⁽¹²⁾，但強塑劑若以減水劑來使用時，強度會隨減水率相對增加，如圖 2-3 所示⁽¹⁰⁾。就硬固後混凝土之乾縮現象(Drying shrinkage)而言，通常高流動混凝土較一般混凝土約大 11%左右；在相同強度之流動混凝土，其彈性係數略高於一般混凝土⁽¹²⁾。潛變(Creep)與添加強塑劑無多大關連，在十分乾燥之環境下，含強塑劑混凝土顯示較大之潛變量

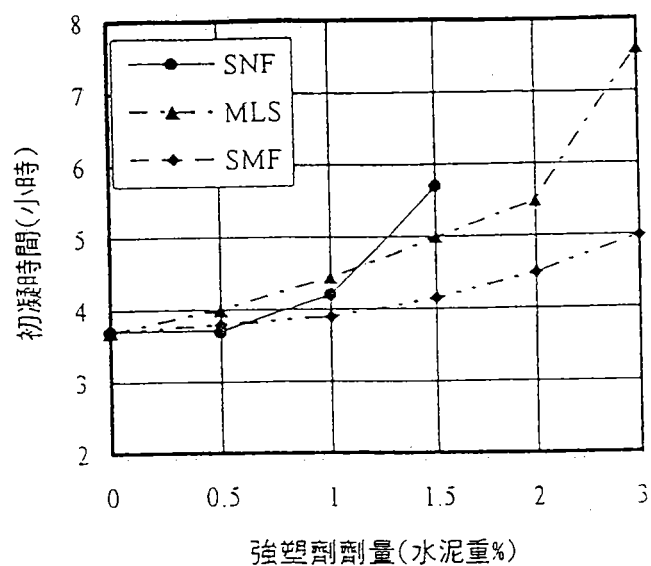


圖 2-1 強塑劑對混凝土凝結時間之影響⁽⁸⁾

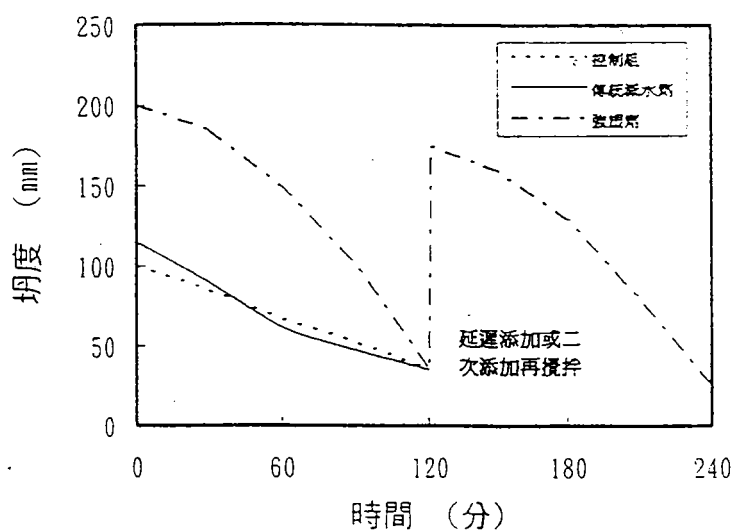


圖 2-2 添加強塑劑混凝土之坍度損失^(8.9)

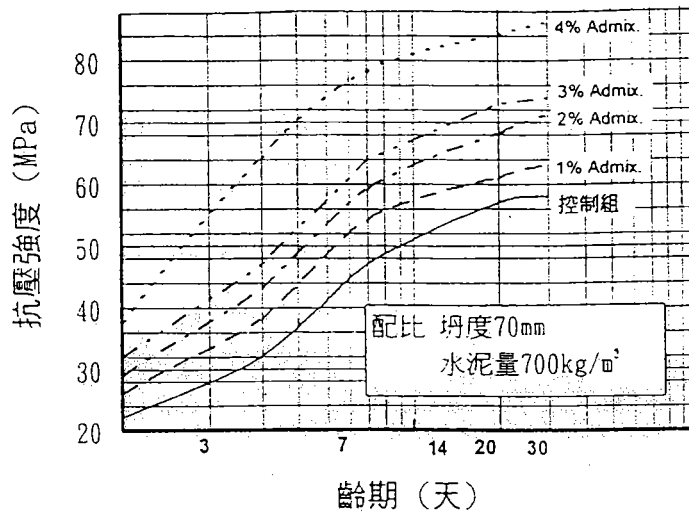


圖 2-3 固定坍度含不同強塑劑量混凝土之強度發展⁽¹⁰⁾

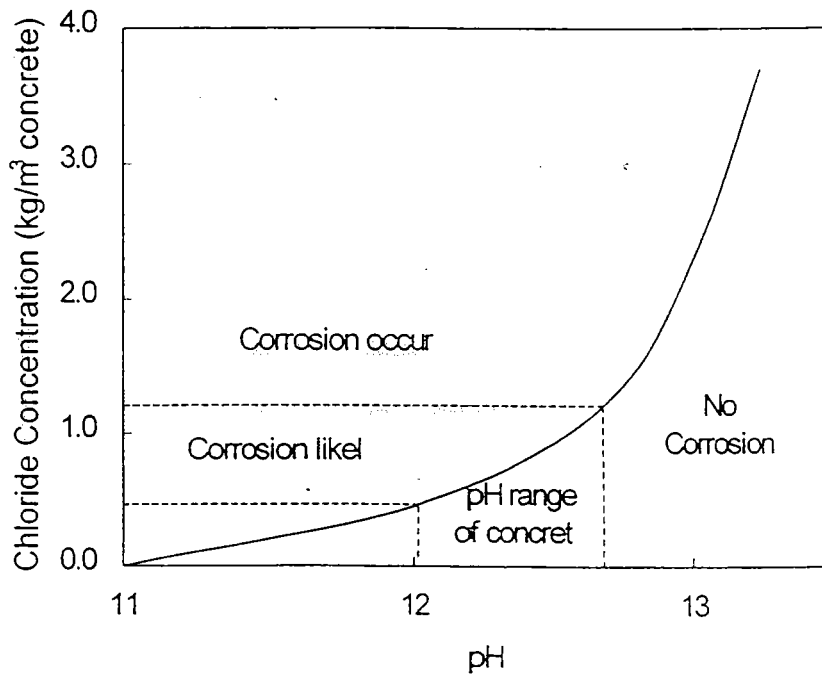


圖 2-4 混凝土內部 pH 質與 Cl^- 濃度對鋼筋腐蝕之關係^(9.26)

，因此對於高應力之結構設計必須加以考慮⁽¹⁰⁾。

2-3-3 波索蘭材料對高性能混凝土之影響

根據 ASTM C618 之定義：波索蘭材料是一種含矽或含矽及鋁之材料，本身不具或稍具膠結能力，但是在常溫且有水之情況下會與氫氧化鈣產生反應，而在常溫下波索蘭材料與氫氧化鈣進行緩慢之反應稱為波索蘭反應(Pozzolanic Reaction)⁽¹³⁾，以下針對波索蘭材料之種類、波索蘭反應之機理及其對混凝土之影響作介紹⁽⁵⁴⁾。

一般常用波索蘭材料包括飛灰(Fly Ash)、爐石粉(Slag)及矽灰(Silica Fume)及稻穀灰等如表 2-2^(14,15)所示。

由於添加於混凝土中之波索蘭材料，都具有粒徑小(細度 3000cm²/g 以上)及水化較慢之波索蘭反應，因此對混凝土諸多性質如新拌性質、硬固性質、耐久性及體積穩定性等都產生改變，茲分述如下：

1. 新拌性質

對於有泌水或析離傾向之新拌混凝土，摻入細粉料之顆粒，可以減少空隙體積，故通常可以使工作性得到改善。飛灰或爐石粉之粒徑細小，又呈玻璃質，故可在一定坍度下降低用水量，但矽灰由於較具黏性則對工作度有降低之作用⁽¹⁶⁾。

2. 強度

添加飛灰及爐石粉之混凝土由於波索蘭反應較慢，因此早期強度較一般混凝土為低，但晚期強度則較一般混凝土為高。Tsukayama 及 Miyosui 以飛灰混凝土進行 28 天之抗壓試驗，在 21℃ 養護下，其強度可達普通混凝土 90 天強度，在 10 年後，其強度可達 120%^(16,18)。矽灰由於對水有很高之親和力(Affinity)，在拌和物中很少有游離水存在，使得相同水灰比有較少之孔隙，因而早期強度較其它兩種材料為高，矽灰對混凝土強度之主要貢獻，在正常養護溫度下大約發生在齡期 3~8 天，此時添加 10%

表 2-2 混凝土添加波索蘭材料之特性^(14,15)

	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. 估膠結料 8% → 預拌混凝土 2. 估膠結料 15~35% → 混凝土污工製品 3. 估膠結料 30% → 巨積混凝土 4. 估膠結料 22% → 高性能混凝土	1. 估膠結料 20~30% → 氣候較冷期間 2. 估膠結料 50% → 抗硫侵蝕混凝土 3. 估膠結料 75% → 巨積混凝土 4. 估膠結料 40~50% → 高性能混凝土 5. 估膠結料 40~65% → 抗凍融及鹼砂骨材反應	1. 估膠結料 12% → 減低水泥含量 2. 估膠結料 3~18% → 增加含飛灰或爐石混凝土早期強度 3. 估膠結料 10% → 減少氯離子侵入混凝土 4. 估 膠 結 料 20~33% → 高強度及超高強度混凝土 5. 估膠結料 6% → 耐火混凝土 6. 估膠結料 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

矽灰混凝土之強度約大於未添加矽灰混凝土強度之 30%⁽¹⁷⁾。

3. 耐久性

當水泥混合料添加波索蘭材料時，由於波索蘭材料能影響用水量、稠度及膠結特性。並因晚期之波索蘭反應，能由不定形 (Amorphous) 之矽酸鹽與氫氧化鈣作用 ($\text{CH} + \text{A/S} + \text{H} \rightarrow \text{C} - \text{A/S} - \text{H}$) 結合成 C-S-H 膠體及 C-A-H 鹽類，如此能減小孔隙、改變晶相，同時 CH 量溶出減少，因此抗硫酸鹽能力增加⁽⁹⁾。同時水化過程中 Aft 及 Afm 相對地減少，因而減少體積之膨脹，增加耐久性。Kimurs 做過長時間之實驗，將試體浸於海中，結果 10 年後，發現其抗硫酸鹽侵蝕之能力大於普通水泥混凝土之試體，R.Doug Hooton 及 T.Gerry 並做過相同之試驗，添加 30% 飛灰之膨脹率為 0.026，而普通水泥混凝土試體則為 0.152^(16,18)。在一般之條件下添加波索蘭材料，因在幾天內不會產生明顯反應，故在巨積混凝土中添加波索蘭材料能降低水化熱，進而減少裂縫產生及增加耐久性。

4. 體積穩定性

由於飛灰之波索蘭反應時間較慢，以致在膠體結構內之水份(層間水及化學鍵水)與飛灰作用較慢。因此在相同水灰比下，當其承受暫態濕度變化，大孔隙與小孔隙間之水份較易流動，造成水流速率增加而破壞尚未生成完整之膠體而導致較大潛變，當高齡期時由於波索蘭反應生成之膠體填充空隙而降低潛變。添加爐石粉之混凝土，在水泥水化作用完全時，潛變比普通水泥混凝土小或相同。但如在水化早期(4~7 天)就承受載重時，由於波索蘭反應較慢，混凝土之硬化未完全，因此潛變係數會比普通水泥混凝土為大⁽¹⁹⁾。矽灰混凝土由於矽灰與水之親和力較大，泌水較少，水份大部份都被包含在混凝土內，且因矽灰顆粒較小，故乾縮變形較一般混凝土為大，且易因塑性收縮而產生裂縫^(20,21)。

2-4 氯化物滲透與透水性之探討

2-4-1 Cl^- 之來源

混凝土內含 Cl^- 之來源甚多，大致可分為內含與外來兩方面；內含之 Cl^- 是在混凝土拌合的過程過中，經由拌合材料進入混凝土。另一來源則是自外界經由裂縫、孔隙滲入混凝土中⁽²²⁾。

新拌混凝土之 Cl^- 之來源，最可能由下列幾種材料，受到污染而進入：(1)拌合水(2)骨材(3)摻料。

混凝土原本為一多孔隙材料，除了上述在混凝土拌合時即已存在的 Cl^- 來源外，亦可能由外在環境的污染而滲入混凝土中。一般而言， Cl^- 經由外在環境滲入混凝土內的方式，有下列幾種^(23,24)：

- 1.經由混凝土裂縫侵入。
- 2.於混凝土潮溼時，藉由擴散作用，緩慢滲透進入混凝土孔隙溶液中。
- 3.混凝土乾燥時，藉由毛細管的虹吸作用將含有 Cl^- 的水溶液以虹吸作用吸入混凝土中。

通常，處於海岸區、飛沫帶、工業污染區以及去冰鹽使用地區的混凝土構造物，特別容易遭受外，在 Cl^- 的侵入，經過日積月累之後將會造成嚴重的鋼筋腐蝕問題⁽²²⁾。

2-4-2 對鋼筋之侵蝕

氯化物乃是公認為會致使鋼筋發生腐蝕的主要有害物質，幾乎所有的研究學者都認為，在鋼材的腐蝕反應過程中， Cl^- 是拌演一個重要的催化作用。當 Cl^- 含量高時， Cl^- 會破壞鐵材表層之鈍態氧化膜，並造成金屬離子的溶解。 Cl^- 對於混凝土內鋼筋腐蝕的影響，還得考慮到混凝土的性質。如果混凝土品質佳，水份與氧氣不易滲入，則鋼筋產生腐蝕的機會較小。此外，若混

凝土的鹼性高，則可以容忍較高的氯離子含量，而不致產生鋼筋腐蝕⁽²⁵⁾。當混凝土內 pH 值較高時，則產生氧化鐵保護膜的反應較強勢，所以可以容忍較高 Cl⁻含量的存在。反之，若混凝土因為中性化等作用使其 pH 降低時，則 Cl⁻破壞氧化鐵保護膜的作用較為強勢，因此僅低含量的 Cl⁻存在時，便能導致鋼筋腐蝕的產生。混凝土內 pH 值和 Cl⁻濃度對鋼筋腐蝕的影響如圖 2-4^(9,26) 所示。

2-4-3 混凝土材料中氯化物的容許含量

依據日本建築學會 1977 年的建築規範 JASS 中，曾修訂在混凝土材料中細骨材的氯化鈉(NaCl)含量，以 0.1%為其上限(以絕對乾燥砂重為基準)，超過此值鋼筋開始有生鏽的威脅，而生鏽的量將隨時間的增長而增加，若氯化鈉含量在 0.3%以上，鋼筋將全面的生鏽，至於混凝土內氯化物之含量亦訂定有規定⁽²⁷⁾。表 2-3⁽²²⁾摘要簡列歐、美、日等國與中國國家標準(CNS)對氯化物含量之相關規定。

又一般 pH 值為 12.5 至 13.2 的鹼性環境，氯含量規定不得超過 0.2~2.8kg/m³ 混凝土^(26,27,28)。氯離子含量與鋼筋腐蝕程度之關係如表 2-4^(23,29)。

表 2-4 Cl⁻含量與鋼筋腐蝕之關係^(23,29)

Cl ⁻ 含量(佔水泥量之%)	鋼筋腐蝕狀態
<0.4	忽略
0.4-1.0	可能腐蝕
1.0-2.0	或有腐蝕
>2.0	一定腐蝕

表 2-3 各國對鋼筋混凝土構造物氯化物含量之規定⁽²²⁾

國 家	規 範	構件型態及環境下	Cl ⁻ 重量 (kg/m ³ 混凝土)	Cl ⁻ , (%) (佔水泥用量)
美 國	ACI 318-89	1.R.C. 曝露於氯化物下	0.45	0.15
		2.R.C.在一般環境下	0.90	0.30
		3.R.C.在乾燥環境下	3.00	1.00
		4.預力混凝土	0.18	0.06
英 國	BS 1880 BS 8110-85	1.一般 R.C.結構物	0.60	0.20
		2.骨材	1.92	0.64
		3.骨材(含 CaCl ₂)	2.87	0.95
日 本	JASS 5 土木協會	1.細骨材(I 級)	0.10	---
		2.混凝土	0.30	0.10
		3.一般 R.C.結構物	0.49	0.16
中 華 民 國 (台灣)	CNS 12891	硬固混凝土		
		1.預力混凝土	0.15	
		2.R.C.結構物(需耐久性考慮者)	0.30	
		3.一般 R.C.結構物	0.60	
	CNS 3090	預拌混凝土		
		1.預力混凝土	0.15	
		2.R.C.結構物(需耐久性考慮者) ^a	0.30	
		3.一般 R.C.結構物	0.60	
	ANS 1240	混凝土粒料(細)於：		
		預力混凝土中	0.012%	
		其它混凝土中	0.024%	

2-4-4 氯離子在混凝土中之擴散模式及電滲試驗

鋼筋混凝土中之鋼筋發生腐蝕主要是由於受到侵蝕性的鹽類破壞其周界之混凝土所能提供之鹼性保護所致，其中又以氯離子作用最為強烈，氯離子侵入混凝土之程度會依結構物所處位置不同而異，一般而言當依結構物曝露於飛沫地區，則氯離子之侵入狀況最為嚴重，主因為飛沫帶具有海水乾濕反覆作用，在潮濕狀況下，因毛細管作用，大量的氯離子和水會侵入混凝土結構體中，然而當乾燥時則水分被蒸發掉，只剩氯離子留在混凝土中，而造成混凝土表面或內部存留大量的氯離子。而根據最近有關混凝土中氯離子滲透情形之研究結果顯示實際侵入之氯離子濃度與其滲透度之關係，可應用 Fick 第二擴散定律，表示如下式⁽³⁰⁾：

$$C_{(X,t)} = C_0 \left[1 - \text{Erf} \left(\frac{X}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

式中：Erf 為誤差函數(Error function)，其定義為

$$\text{Erf}(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(y^2/2) dy$$

C_0 ：混凝土表面起使之氯離子濃度(ppm)

$C_{(xt)}$ ：任何時間，任何深度下之氯離子濃度(ppm)

X：深度(cm)

t：時間(sec)

D：氯離子擴散係數(cm^2/sec)

根據英國混凝土學會所做之研究指出氯離子之擴散係數與混凝土之滲透性之關係如表 2-5 所示⁽³¹⁾。

表 2-5 氯離子擴散係數與混凝土之滲透性之關係 ⁽³¹⁾

氯離子之擴散係數(cm^2/sec)	混凝土之滲透性
$<1 \times 10^{-8}$	低
$(1 \sim 5) \times 10^{-8}$	中等
$>5 \times 10^{-8}$	高

混凝土滲透性支配耐久性質，低滲透表示水分子或其它有害離子不易進入混凝土內。傳統測試混凝土滲透性是以水的滲透試驗為主，滲透係數傳達水的難易程度。

AASHTO T-277 則建議使用氯離子電滲法，評估混凝土受有害離子滲入的抵抗能力。在 ACI 318-95 第四章耐久性專章中，對於混凝土曝露於氯離子環境中之抗蝕能力，建議採用 AASHTO T-277 方法評估混凝土的適用性，而本法亦由 ASTM C 1202-97 列為標準規範。氯離子電滲法無法測出氯離子滲透(或擴散)係數，但由於具方便、快速且透過量測過的電量可供判斷混凝土有防蝕考量時配比適宜性。影響混凝土電滲性質包含水化程度、膠結料、毛細孔隙量、電阻係數及電解質多寡等 ⁽³²⁾。

2-4-5 透水性⁽³³⁾

1. 混凝土的孔隙結構

以肉眼看混凝土，覺得相當結實，但若以顯微鏡觀察，則將發現有極多的孔隙存在且互相連通，可視為多孔結構。混凝土剛澆置後比重較大者往下沉，水份被迫上升，其所經過的路徑即形成毛細管孔，升至混凝土表面者為浮水(bleeding)。這些毛細管孔(capillary pores 大於 100 Å)體積是視水灰比而定。因水份充滿新拌水泥漿體之空間，這些空間隨著水化作用程度逐漸被 C-S-H 膠體所填充，而部份空間未被水化膠結物所填者形成膠體孔隙，該膠體孔隙(膠孔 gel pores 小於 100 Å)之體積比將視水化程度而定。由此可見，混凝土孔隙之形成與水灰比及水化程度(齡期)關係相當大。水灰比愈大，則形成之毛細孔愈大，當水灰比小於 0.7 時，經適當養護，水泥漿體水化充分，則毛細孔會受適當的阻隔。當水灰比太大時(大於 0.7)則將造成孔隙的連通性。

混凝土添加波索蘭材料後，由於具有波索蘭反應之特性，能減少用水量，降低水灰比且顆粒填充膠體孔隙和毛細管孔。以致改變硬化混凝土整體孔隙結構，因此使得混凝土毛細管孔相對減少，且孔隙亦趨微細，整個結構更為緻密而不易透水，且其透水率亦隨水泥中所含爐石量之增加而降低，因此對混凝土的水密性、強度、及耐久性具有很大幫助。

2. 影響混凝土水密性主要原因

混凝土具有極多孔隙且互相連通，因此無法完全緊密，影響水密性(不透水性)的因素有下列幾項：

(1) 材料：水泥、骨材及添加劑的性質對混凝土之水密性有很大關係。

水泥：當水灰比一定時，使用水化較快之水泥，則混凝土之水密性較好，水泥細度較高的混凝土，水密性較差。

骨材：混凝土骨材的最大粒徑較大，級配良好、有足夠細粒料、無蜂窩現象，則混凝土的水密性較高。

添加劑：添加輸氣劑可增加混凝土的輸氣含量，改善混凝土的工作度，減少浮水現象，且輸氣後可形成不連續的氣泡，或添加減水劑、強塑劑等都可降低水灰比及增加工作度因而增加水密性。

(2) 配比：在良好施工狀況下水灰比愈低，則水密性愈佳，水灰比超過 0.65 時，透水性增加很快，例如水灰比為 0.8 的透水性約為 0.4 者的 100 倍。若因水灰比太低，致使施工不良而形成之滲漏(孔隙)，則較水灰比大之透水性更嚴重，因此欲得最佳水密性，宜採用工作性良好之最低水灰比較為理想。

(3) 施工：混凝土之拌合、澆置、搗實與養護等施工嚴格控制對水密性均有很大的影響。正確之拌合、澆置與充分搗實可增加混凝土均勻性，避免材料分離並排除氣泡及消除蜂窩現象，而充分的養護可以減少龜裂，並使水泥完全水化，增加混凝土中之不連續孔隙之產生而增加水密性。

2-5 混凝土電阻性質之影響參數

混凝土導電性能與其微結構其孔隙內電解質溶液之成份與濃度有關，電解質中離子的活性與數量為決定混凝土導電性質良劣之參數，即決定混凝土的電阻性質。Buenfeld 等人⁽³⁴⁾之研究結果顯示曝露於海水中之混凝土電阻係數較一般混凝土情況有增加的趨勢，此係因高活性的霏石(Aragonite)/氫氧化鎂(Brucite)之產物的生成發展及大孔隙之減少而小孔隙增加之現象出現。Hope 等人之研究結果發現，Cl⁻及 O₂ 之侵入會影響到混凝土之電阻係數及鋼筋之腐蝕⁽³⁵⁾。Young 則認為由於極化效應(Polarizing effects)，混凝土中電流通至鋼筋提供高電阻的環境⁽⁹⁾。混凝土的電阻係數並沒有一個標準值，主要原因為混凝土

之電阻對環境條件的敏感，且由於配比不同或量測方法有異，導致各學者研究提出之電阻係數差異性頗大。Young 認為乾燥的混凝土電阻係數為 $10^{12}\text{k}\Omega\text{-cm}$ ，而潮濕時為 $10^5\text{k}\Omega\text{-cm}$ ⁽⁹⁾，而 Buenfeld 等人則認為乾燥的混凝土之電阻係數為 $10^8\text{k}\Omega\text{-cm}$ ，而潮濕時為 $5\text{k}\Omega\text{-cm}$ ，雖然二者之研究結果差異高達 10000 倍，但仍可發現其電阻性質對判斷混凝土性質仍具有相當地重要性，尤其是應用於腐蝕反應上，由圖 2-5^(34,36) 可發現雖然學者對電阻係數與鋼筋腐蝕的建議值有一些差異，然而可發現當電阻係數大於 $20\text{k}\Omega\text{-cm}$ 則鋼筋皆不致於發生腐蝕。表 2-6⁽⁵⁶⁾ 為彙整國內外學者以不同量測技術所得混凝土電阻性質之結論，影響混凝土電阻係數之因素有水泥含量、含水量、鹼鹽含量、氯離子、氫氧根離子、水化程度、溫度、濕度、齡期及孔隙結構等參數，其影響性概述如下：

1. 水灰比：水灰比可決定混凝土微結構與空隙內水溶液的離子濃度，故與混凝土的電阻性質有密切關連。由圖 2-6⁽³⁷⁾ 可知低水灰比($W/C=0.4$)比高水灰比($W/C=0.6$)有較大的電阻係數，其原因為孔隙中的水及鹼鹽之滲透使混凝土整體性的電氣阻抗降低，而腐蝕電流藉由離子的自由移動通過混凝土孔隙，故水灰比較高時，則其腐蝕反應將較易進行。圖 2-7 為 HPC 之 W/C 、 W/B 及 W/S 對電阻係數之影響⁽⁵⁵⁾ 當水灰比及水膠比降低時，其電阻係數有提昇之趨勢。
2. 齡期：由圖 2-8 所示可發現，電阻係數隨著齡期增加而遞增⁽³⁷⁾ 其原因應為混凝土或水泥砂漿內部之孔隙粒徑及孔隙率隨著其水化生成物 C-S-H 膠體的成長與填塞作用而日漸減小，因而使得電導通路變長或受阻，使提高電阻係數。
3. 相對濕度：一般而言相對濕度高，則其電阻係數將較低，當相對濕度自 100% 降到 18% 其電阻係數即從 $7\text{k}\Omega\text{-cm}$ 增至 $600\text{k}\Omega\text{-cm}$ 如圖 2-9 所示⁽³⁸⁾。顯現相對濕度與混凝土電阻係數有成反比之趨勢。
4. 腐蝕：由於腐蝕是一種電化學反應，故腐蝕的難易程度便與電

電阻係數		鋼筋腐蝕狀況		
		Brian & Alan	Taylor Woodrow	Vassie
電阻 (KΩ cm)	2	非常可能 發生腐蝕	腐蝕程度 非常高	幾乎發 生腐蝕
	4			
	6.5	腐蝕程度高	可能發 生腐蝕	
	8.5			
	12	非常不可能 發生腐蝕	腐蝕程度 中等至低	不可能 發生腐蝕
	16			
	20			
	不致發生腐蝕			

圖 2-5 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕有關文獻比較 (34, 36)

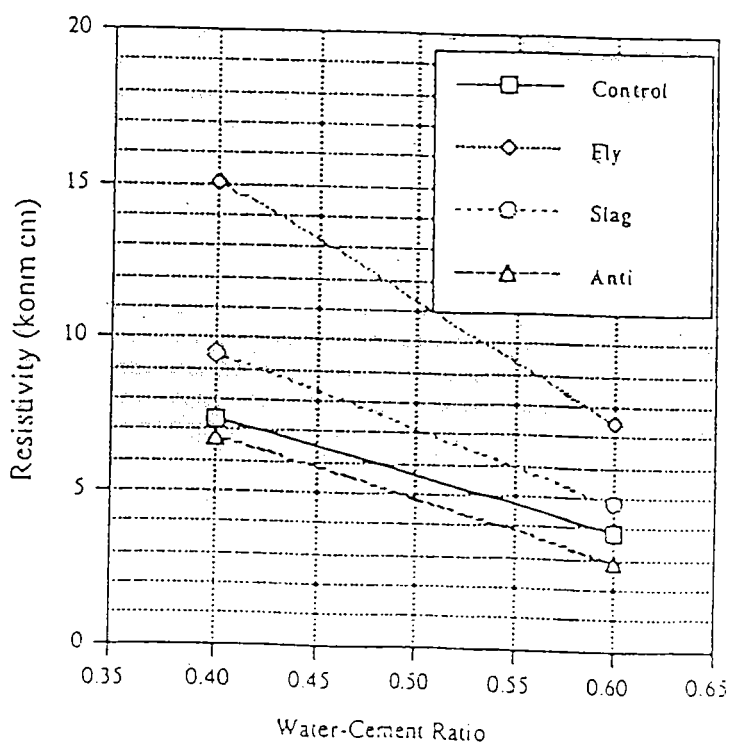


圖 2-6 混凝土水灰比與電阻性質之關係 (37)

表 2-6 國內外學者對混凝土電阻性質相關研究之彙整⁽⁵³⁾

研究者 (年代) [文獻]	試驗方法	試驗變數	結 論
Hansson (1983)	DC 電阻法	電極有效面 電極間距	電阻係數以抗硫水泥>高爐水泥>普通波特蘭水泥 電阻係數在添加波索蘭材料則隨齡期增加而增加 孔隙體積毛細管孔分佈及膠體孔可由低溫微熱測得
Brian & Alan (1985)	KHz 電熱器 充電	電阻間距 溫濕度	電阻在 6.5~8.5k Ω cm 由可能轉為非常不可能腐蝕 混凝土電阻係數與溫度成負效應關係 飽和混凝土電阻與 W/C 成反比而部份飽和混凝土反之
Buenfeld Newmn & Page (1986)	不 鏽 鋼 電 阻 電 池	水泥種類 石灰比 水灰比 摻料	潮溼混凝土電阻係數約 5k Ω cm 如半導體 過乾混凝土電阻係數約 10 ⁸ k Ω cm 如良好七緣體 混凝土電阻的溫度係數為 0.025/°C 曝露海水環境，電阻增加
Brain & Alan (1987)	阻 抗 器 量 測 AC 電阻	溫度 濕度 齡期	在考量爐石含量下隨含量增加混凝土電阻提高 添加爐石的混凝土電阻係數比普通卜特蘭混凝土對儲存條件有較大敏 感性 氯離子和氧的使用為混凝土電阻係數的直接函數
Alonso Andrade & Gonzalez (1988)	極化電阻	水泥種類 飛灰水泥	建立 I _{corr} 供電阻之關係為斜率-1 之直線 當鋼筋為鈍態時不受混凝土電阻之影 當鋼筋為活性時，混凝土電阻影響鋼筋腐蝕 鋼筋腐蝕之混凝土電阻臨界質為 50~100k Ω cm
Schlessl (1988)	四地 極 式 大 測 電 阻 探	---	四極式大地電阻探測所得電阻係數為大約值 埋置混凝土內金屬片與導線易因本身腐蝕而影響結果 電位與電阻之關係因鋼筋為活性或鈍化而異
Sharp Figg & Leeming (1988)	四地 極 式 大 測 電 阻 探	水泥種類 保護層 製造種類	建立混凝土電阻與鋼筋腐蝕可能性及腐蝕速率之關係 電阻必須考慮到表面接觸效應及電極直徑插入深度 間距及接觸液體方能提供正確資料預測腐蝕行為
Pathmanaban (1990)	四測 極 式 探 電 阻 顯 示	---	不透水混凝土電阻超過 100 k Ω cm，品質差者低於 1 k Ω cm 影響因素混凝土內之化學含量孔隙尺寸分佈及種類 欲建立 R/R _l 為腐蝕指標
彭耀南 趙文成 (1991)	二 極 式 電 阻 顯 示 器	水泥種類 河砂 海砂	建立電阻與時間、氯離子、電位之關係 電阻與氯離子濃度成正比 電阻與水泥含量成正比，而與水泥種類無明顯差異
黃兆龍 邱英嘉 (1992)	高 絕 緣 電 阻 歐 姆 計	水灰比 摻料種類 齡期 振波速度	水灰比愈低混凝土電阻係數愈高 添加飛灰、爐石之混凝土電阻係數愈高 28 天以前混凝土電阻係數與齡期成正比 混凝土電阻係數與脈波速度成正比
黃兆龍 陳廷芳 (1994)	四地 極 式 大 測 電 阻 探	水灰比 摻料種類 反覆載重	水灰比愈低混凝土電阻係數愈高 添加飛灰、爐石之混凝土電阻係數愈高 在海水中裂縫的產生導致電阻係數下降

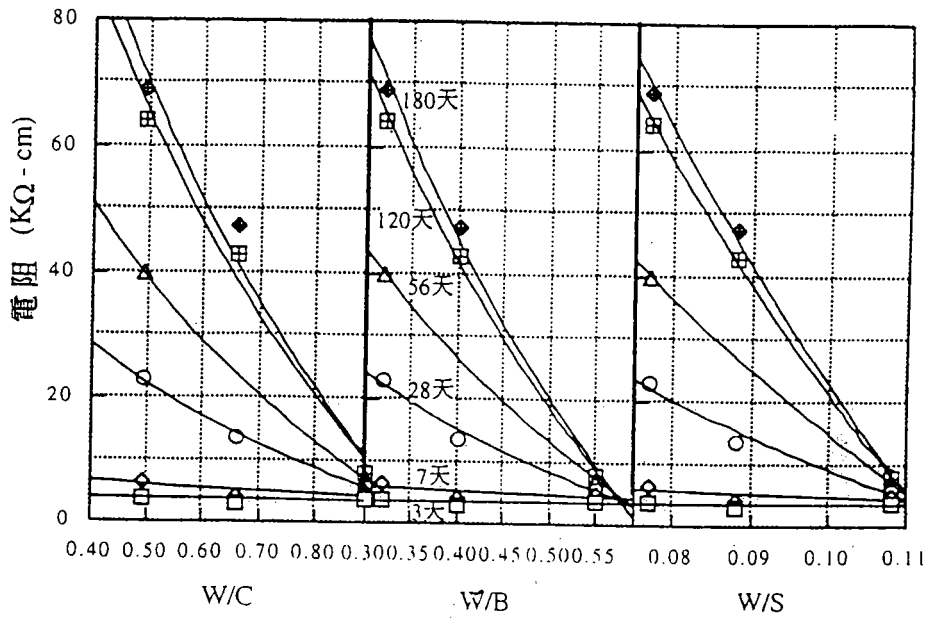


圖 2-7 W/C、W/B 及 W/S 對電阻係數之影響⁽⁵²⁾

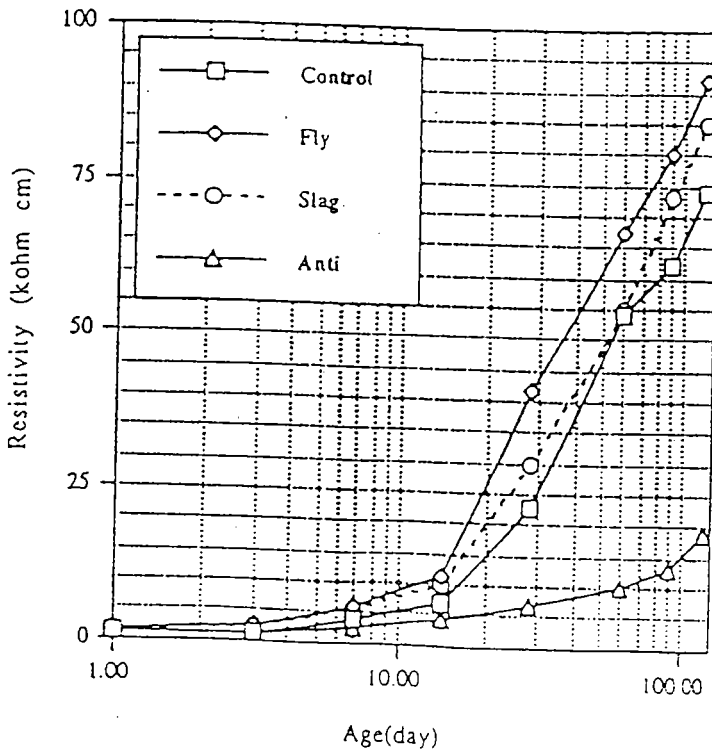


圖 2-8 混凝土齡期與電阻性質之關係⁽³⁷⁾

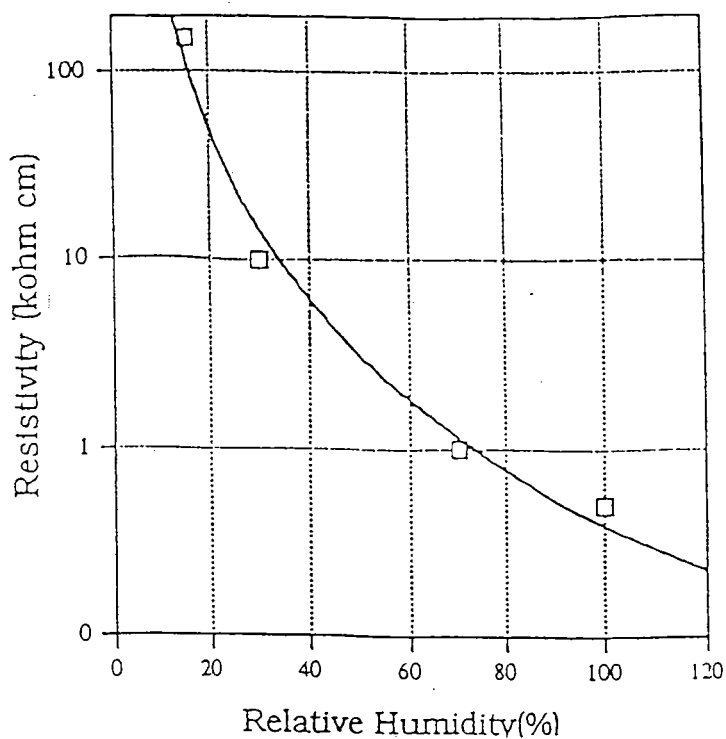


圖 2-9 相對濕度與混凝土電阻性質之關係 (38)

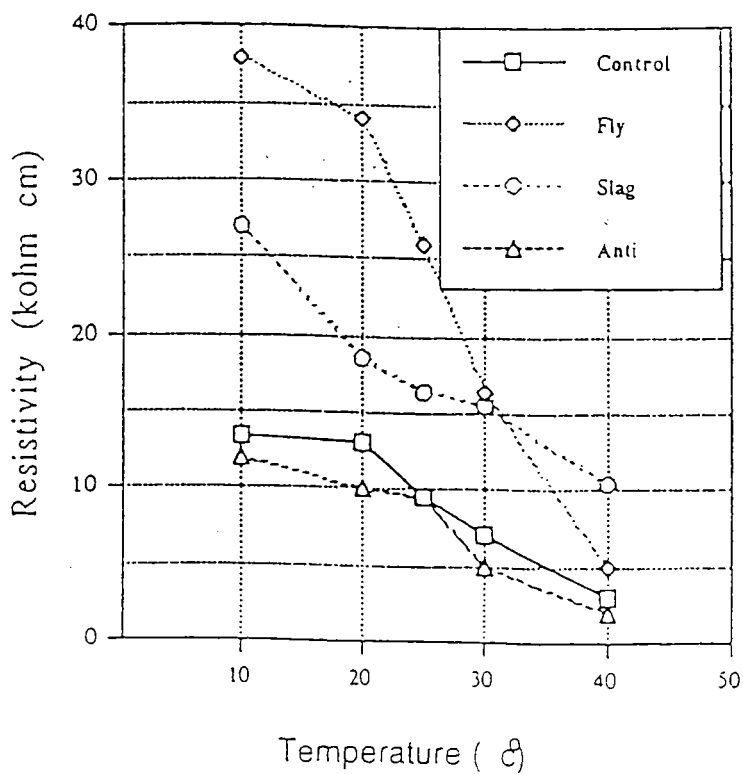


圖 2-10 混凝土之溫度與電阻性質關係 (35, 37)

阻係數的高低成正比關係，電阻係數愈高表示離子較不易游離導電，因此較不利於腐蝕反應的進行，若混凝土的電阻係數超過 $(50-70) \times 10^3 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，則混凝土內的鋼筋應不會發生腐蝕⁽³⁸⁾，Brian Vassie 與 Taylor Woodrow 等學者則分別以 $8.75 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 、 $12 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 、 $20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 等較低電阻係數值作為判斷不可能發生腐蝕之指標，如圖 2-5^(34,36) 所示。

5.溫度：溫度對混凝土電阻而言為負面效應，當溫度上升時，則其電阻係數反而減少如圖 2-10 所示^(35,37)其原因乃混凝土內電流藉離子的自由移動而通過孔隙，故離子游離的難易程度決定混凝土的導電度，當溫度升高時，分子擴散的活化能增加，擴散係數亦變大，因此加速離子游離的速率，使其更能順利地通過孔隙。

6.摻料：由圖 2-11⁽³⁷⁾可發現飛灰混凝土之電阻係數成長率較純混凝土高，且其鋼筋電位下降率亦較低，由此可印證飛灰混凝土在鋼筋防蝕性能之正面意義。

根據學者所提出之混凝土電阻與其中所含鋼筋之活性程度之關係如表 2-7 所示⁽³⁹⁾，可供測試作定期評估之參考。

表 2-7 混凝土電阻與其中鋼筋腐蝕活性之關係⁽³⁹⁾

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

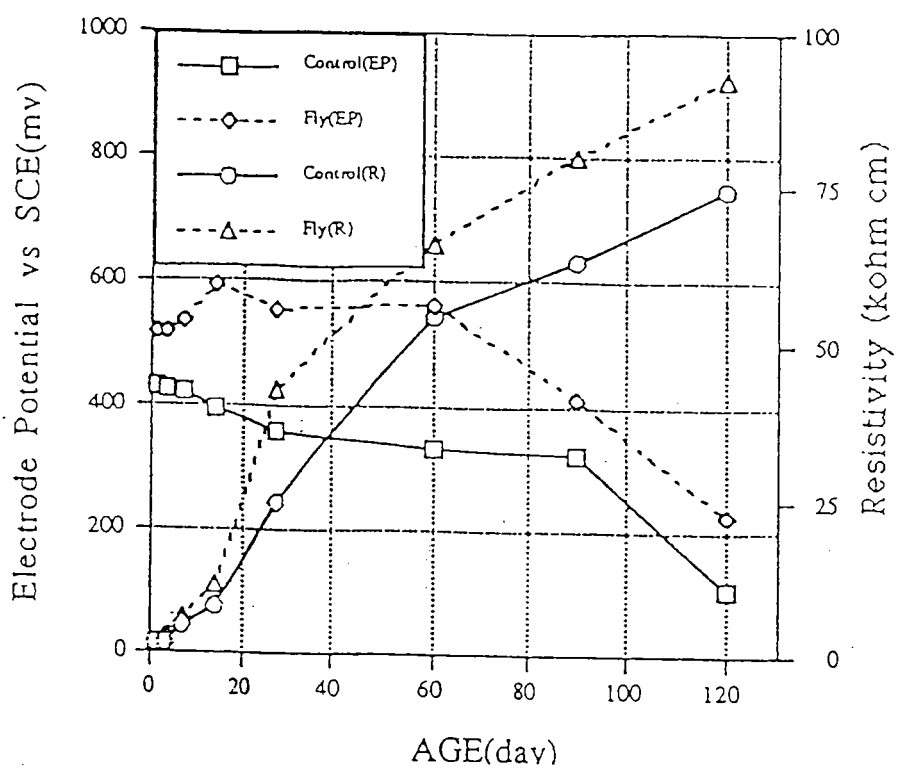


圖 2-11 混凝土的摻料效應對電阻性質及鋼筋電位的關係⁽³⁷⁾

2-6 混凝土耐久性

2-6-1 混凝土之耐久性指標

國內中華民國結構工程學會第一次將電阻、電滲放進耐久性設計中及規定量測值，規定內容則在高性能混凝土特別條款中⁽⁴⁰⁾。其次美國混凝土設計規劃 ACI 318-95，一改過去保守心態將卜作嵐材料視為膠結材料，且將耐久性問題列入專章(第四章)，對於可能受氯離子侵蝕的結構物，最嚴格者不僅限制水膠比(W/B)應小於 0.40，且設計強度應大於 5000Psi，此對於臨海或海洋結構物設計有相當重要的意義，而且建議使用 AASHTO T-277(ASTM C1202-97)的氯離子電滲法評估混凝土配比的合宜性⁽³²⁾，表 2-8 為 ASTM C1202 電滲規定值。另外，加拿大的跨峽大橋，這座目前世界上唯一使用 DBOT(含設計)的工程，曝露於海洋環境中要求混凝土電阻係數大於 50 k Ω -cm 且氯離子電滲小於 1000 庫侖，這些限制是基於腐蝕的耐久性考量，而這些設計的參數也是國內優生混凝土所強調者⁽³²⁾。

表 2-8 ASTM C1202 電量規定值

電流量(庫侖)	氯離子滲透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	非常低
<100	可忽略

2-6-2 高性能混凝土耐久性設計策略⁽⁴¹⁾

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 2-12 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 2-9 所示⁽⁴²⁾。按台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

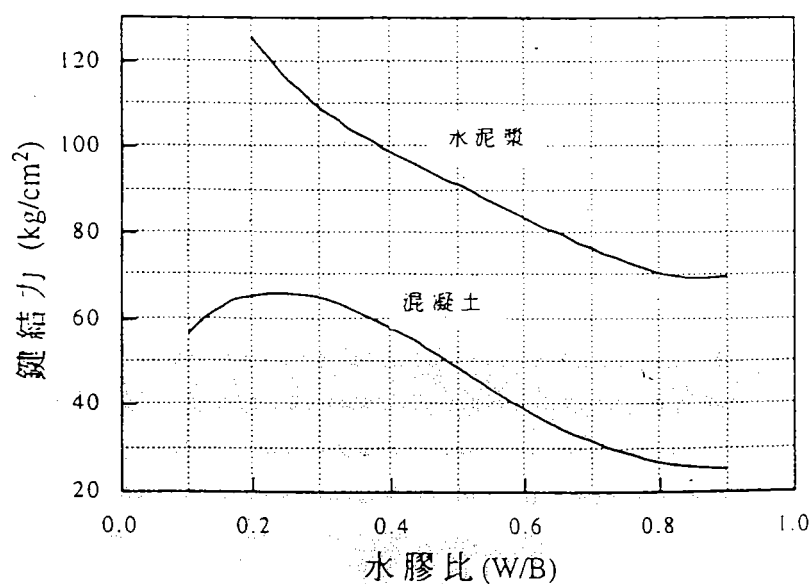


圖 2-12 降低水膠比增進鍵結力⁽⁴¹⁾

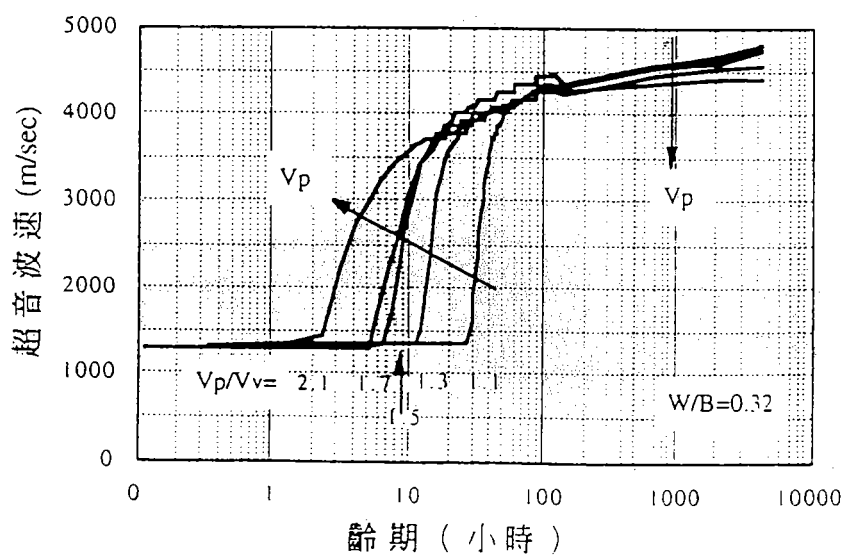


圖 2-13 水泥漿量對超音波速之影響⁽⁴¹⁾

表 2-9 ACI 318-95 混凝土耐久性設計要求⁽⁴²⁾

(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 ⁼) ，%重量	水中硫酸鹽 (SO ₄ ⁼),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	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。					

降低水泥漿對長期耐久性是有利的，圖 2-13 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 2-10⁽⁴¹⁾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⁽⁴³⁾。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。見圖 2-5 所示。

(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 2-10 鋼筋混凝土防蝕之最大氯離子含量⁽⁴¹⁾

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	

2-7 高性能混凝土之應用及近況

高性能混凝土之優點及應用性如表 2-11⁽⁴⁴⁾ 所示，因此如今高性能混凝土以普遍在混凝土界引起廣泛之興趣，應用於高樓建築物，海域平台、港灣碼頭核能與橋樑工程及預力混凝土，其優點如下：⁽⁴²⁾

1. 增進工作度與強度，使其施工快速及具經濟性。
2. 更為耐久，對於橋樑，外海及核能結構物，碼頭與公路工程特別重要。
3. 增強結構特性，使得結構設計更具經濟性及更能發揮其功能。
4. 混凝土摻加卜作嵐材料可增加其結構體之緻密性，不僅使其更具耐久且具環保性。

表 2-12⁽⁴⁵⁾ 列出 HPC 在各種結構物上應用之型態，可增進的工作性質及實例，而表 2-13^(46,47) 所示在港灣及海域工程上國外應用實例。在北海混凝土平台自 1973 年至 1995 年共有 27 座。水深自 70 公尺至 345 公尺，其挑戰性及需求如表 2-14⁽⁴⁸⁾ 所示。北海之混凝土能保持耐久性是保持如表 2-15 所示之十大重要法則⁽⁴⁹⁾。

國內 HPC 之應用始於 1990 年，在台北興建之遠企大樓，1994 年高雄東帝士 85 層國際廣場大廈、南二高一座橋樑、中油防爆牆控制室、1997 年國立海洋生物博物館及即將興建之台北國際金融大樓新建工程，HPC 規範以引入高鐵之施工規範中，鄰近的日本、印尼、香港、馬來西亞及澳大利亞、新加坡亦相繼採用。未來工程將陸續採用 HPC，此乃為大勢所趨，不得不作之抉擇。

表 2-11 高性能混凝土之優點及應用性⁽⁴⁴⁾

(1)早期强度高 • 抗壓強度 6 小時：30~40 kgf/cm² 24 小時：200~400 kgf/cm² • 抗壓強度 18~24 小時：28~42 kgf/cm² • 利於 PC 施工 • 提早拆模 • 減少支 需求 • 鋪面施工迅速 • 減少養護及保養時間	(4)耐久性高 • 與在使用條件下抗劣化成正比 • 可提供抵抗： 1.磨耗 2.化學侵蝕 3.鹼性骨材反應 4.氯離子引起之腐蝕	(7)可控制水化時間 • 可控制凝結時間 • 減少水泥浪費 • 減少拌合水量 • 增加搬運距離 • 改善施工時程
(2)極限强度高 • 抗壓強度 28 天：400~700 kgf/cm² 56 天：700~1250 kgf/cm² • 適用高層建築施工 • 縮小柱子斷面大小 • 增加混凝土與鋼筋相對強度 • 減少柱子數量，增加可利用空間 • 可提早拆模 • 降低裝模費用 • 加速預鑄樑柱之施工 • 增加樑柱間距 • 減少樑柱數量	(5)工作性高可泵送及修飾性佳 • 坍度 25± 2 公分(0 分鐘) • 坍度 23 公分(45 分鐘) • 坍流度 60 公分(0 分鐘及 45 分鐘) • 節省勞工 • 增加澆置速率 • 降低泵送壓力 • 減少超時工作量 • 改善結構體表面平滑度 • 良好坍度控制 • 不泌水析離 • 易於修飾 • 自行凝固	(8)水中澆置性 • 在水下施工條件下，可減少被刷掉 • 抗流動水 • 無埋設幫浦及可免用密特管工法，可使用一般管線輸送 • 修理時，不需除水
(3)彈性模數(ME)高 • 450,000~500,000 kgf/cm² • 適用於建築施工 • 混凝土與鋼筋相對之 ME 提高 • 適用複合材料設計	(6)在任何天候下均可澆置 • 全年可施工 • 減少超時工作量 • 可在炎熱天候下施工 1.坍度之損失量少 2.搬運距離長 3.溫度控制佳	

表 2-12 HPC 應用之結構形態，增進之工程性質及實例⁽⁴⁵⁾

結構物形態	改善性質	工程實例
橋 樑	早期強度，工作性，耐久性， 延緩變形，極限強度	Joigny(F). Rance (F) Perthuiset(F). Louhans(F) Champs du Comte(F) Sylans(F). Re(F). Auzon(F)
外海結構	耐久性，抗壓及剪力，工作性 ，磨耗及撞擊	Gulfaks B.C(N) Tere Neuve(CAN) Terre Adelie(F)
高樓建築	抗壓及剪力，工作性，早期強度， 圍束	Water T PL Chicage(USA) Nova Scotia Toronto(CAN) 2 Union Sq. Seattle(USA) 1 Wacker Chicago(USA) 225 Wacker Chigaco(USA) 181 Wacker Chicago(USA) NW Hospital Chicago(USA) Arche Paris(F) Chibune R.S.Osaka(JAP)
隧 道	耐久性，抗壓，早期強度	Villejust(F) Manche(F and G.B.) La Baume(F)
公 路	磨耗，撞擊，凍融，剪力，耐 久性，工作性	Valerenga Oslo(N) Highway E18-E6(N) Ranasfoss BR.(N) Shestad TU.(N) Highway 86 Paris(F) Paris Airport(F)
預鑄結構件	早期強度，抗壓及剪力，工作 性	Precast joists (F) Precast floor slabs(F)
鋼骨混凝土	剪力，抗壓，工作性，束 限	La Roize(F) 2U Sq. Seattle(USA)
排 水	耐久磨耗，抗壓，工作性	Paris(F)
特殊基礎支柱	抗壓，工作性，短期強度，延 緩變形	Hassan Mosque(MAR)
核能結構	耐久性，強度，防水	Civeaux(research)(F)

F：法國 N：挪威 USA：美國 CAN：加拿大 JAN：日本

表 2-13 使用 HPC 施工之代表性範例^(46,47)

工程計劃	地 點	施工時間	使用HPC 理由	混凝土性能組成及品質	設計考慮及規範
橋柱修理	Hokuriko 高速鐵路(日本、海岸區)	1991	磨耗量低，增加耐久性	指定強度 80 Mpa	
挪威大多數公路結構及橋樑維修	挪威	自 1989 年起至今	耐久性，耐海洋環境下氯離子之侵蝕	水膠比 0.4 及使用砂灰	NS 3473 挪威 Process code 2"/1989
乾船塢岸壁維修	葡萄牙 Setubal	1991	耐久性	平均強度 74 Mpa 10 Mpa(最高值) 水膠比 0.35	葡萄牙規範 (REPAP)及 CEB-FIP
海岸碼頭嵌板	澳大利亞雪梨機場	1993	耐久性，抗氯離子之侵蝕	40 Mpa 混凝土摻砂灰	海洋環境
液化天然氣槽	日本橫濱	1993	耐久性	水灰比 0.3， 指定強度為 60 Mpa	日本土木學會高性能混凝土規範
石油浮式生產平台	挪威北海 Troll Floater	1993/94	減少尺寸及重量，耐氯離子之侵蝕	平均強度 75 Mpa 水膠比 0.38 5%砂灰混凝土 43,000m ³	NS3473
浮式平台	法國在 Marseille 地區建造	1994/95	易於澆置，强度高，耐久性	需要強度 70 Mpa	大的預力浮式駁船(200m 長)
石油生產張力腳平台	挪威北海 Heidrum 浮體	1993/95	浮力相對牆厚使用壽命長	平均強度 75 Mpa 水膠比 0.36 坍度 200~220mm 空氣含量 3~5% 密度 1940kg/m ³ 混凝土用量 65,000 m ³	NS3473 水深 350m
輕質骨材混凝土浮式橋樑	挪威 Bergsoysundet	1990/92	減輕七個浮筒重量，總長度 835m	使用 LC-55 級水泥 水膠比 0.40 密度 1920kg/m ³ 混凝土用量 4500m ³	NS3473
外海平台	紐芬蘭 Hibemia 外海平台	1994/95	---	水膠比 0.34 坍度 21cm 砂灰 8.5% 水泥用量 165,000 m ³	NS3473 重力式基座結構，直徑 108m，高 111m
外海石油平台/動力基礎結構	挪威北海 Draugen	1990/93	耐水靜壓力，波浪及風負荷，使用壽命	平均強度 80 Mpa 水膠比 0.4~0.42 坍度 22~25cm 水泥用量 80,000 m ³	NS3473 水深 251m
外海天然氣平台	挪威北海 Troll 重力式平台	1992/95	同上	平均強度 82 Mpa 水膠比 0.38~0.40 坍度 24~26cm 水泥用量 224,000 m ³	NS3473 水深 303m
外海天然氣平台/重力基礎結構	挪威北海 Sleipner	1991/93	同上	平均強度 78 Mpa 水膠比 0.4~0.42 水泥用量 75,000 m ³	NS3473 水深 83m
浮式海城平台基礎	挪威北海 Helgrun	1993/94	強度	83 Mpa(平均強度) 水膠比<0.43	NS3473

表 2-14 北海混凝土結構物之挑戰與需求⁽⁴⁸⁾

性 質	挑 戰	需 求
強 度	指定混凝土等級一般混凝土(C) 1970s : 45 to 55 Mpa 1980s : 55 to 70Mpa 1990s : 80 to 100 Mpa	抗壓強度 抗拉強度 現場強度
耐 久 性	腐蝕與化學侵蝕 水侵入 15 mm 最大為 25 mm 抗凍融(潑濺區)	健全的組成料 低滲透性(<1X10 ⁻¹³ m/sec) W/C(水中 0.45, 潮汐區 0.4) 水泥含量(350kg/m ³) 足夠之保護層厚度(最少 50 mm) 輸氣劑
混凝土等級 與彈性模數	C60-90 : 2450kg/m ³ C75 Ec : 3.0-4.0 Gpa Lc60 Ec : 2.0-2.5 Gpa	彈性模數, 應力應變關係
單 位 重	C80-90 : 2450kg/m ³ LC75 : 2250kg/m ³ LC65 : 1950kg/m ³	混凝土密度, 現場單位重
可施工性	鋼筋密集與埋設、活動模板高生產速率 與最新泵送系統、低單位重混凝土之輸 送系統、高壓混凝土泵送一般混凝土、 混凝土 70°C, 耐高溫溫度梯度為 1°C/cm , 巨積混凝土	工作性高(坍度>22 公分) 無泌水或析離 可調整與預測凝結時間, 反振動 品質及材質一致性 控制拌合和配比 高泵送性 混凝土溫度 水化熱

表 2-15 北海耐久性混凝土十大重要的法則⁽⁴⁹⁾

1. 選擇高品質的施工材料
2. 正確的配比設計
3. 應用最新的自動拌合廠
4. 發展健全的施工程序
5. 混凝土搗實充分
6. 確保有足夠的鋼筋保護層厚度
7. 注意施工接縫
8. 容許溫差之變化
9. 保持設計簡單
10. 雇用經訓練或熟練的操作員

第三章 研究方法與步驟

3-1 研究規劃

本研究之主要目的在探討港灣環境下高性能凝土結構體之性質。在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，4000 Psi，5000 Psi (試驗組)，此配比係經試拌再調整且符合 HPC 性質之要求，配比確定後製作一系列之圓柱試體及試驗牆(內排鋼筋及 Sensor)，在經過適當的養護後，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 進行大氣曝露試驗。當試體在一定齡期下，進行及量測 HPC 之各項性質。同時選用一組 4000 Psi 普通混凝土(控制組)製作試體，進行類似 HPC 之試驗，以比較與 HPC 間之差異，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。

3-2 試體製作

3-2-1 配比

本次配比乃採用原基本研究「港灣環境下高性能混凝土結構體之性質研究(一)」之相同配比設計。唯考慮到應用在一般混凝土工程上大都是中低強度混凝土，因此，再加上 3000 Psi 之 HPC 以符合實際之需求，其配比之數據如表 3-2 所示。

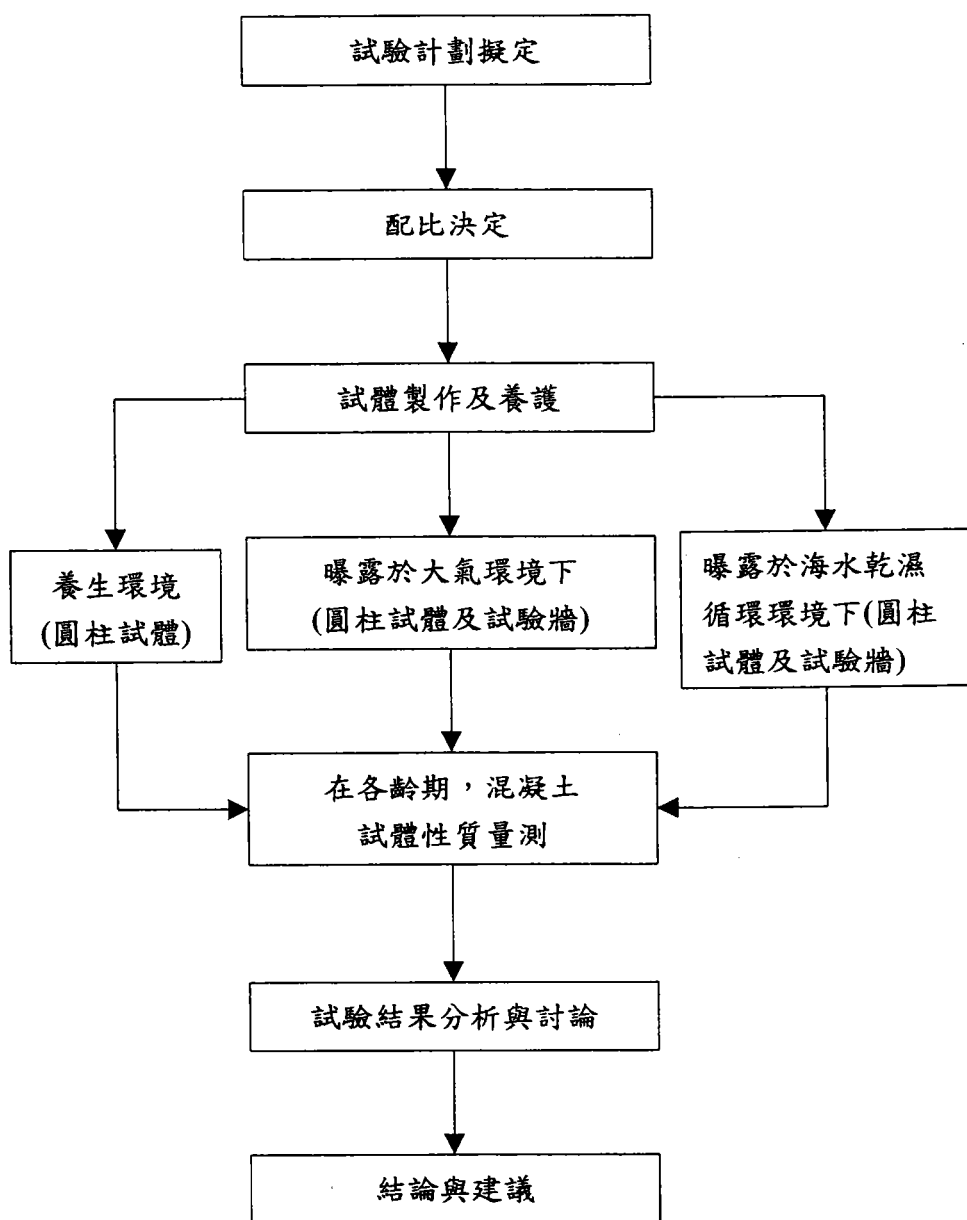


圖 3-1 研究計劃流程圖

表 3-1 混凝土之相關試驗內容

項目 試體種數		養護條件	試驗項目	試驗齡期
圓 柱 試 體	Φ15×30	試體拆模後，分別置入養生室及大氣試驗場，在大氣下以濕麻布養治 14 天，齡期 28 天後，進行大氣及海水乾濕循環試驗	抗壓強度、超音波、電阻	7 天、14 天、28 天、56 天、90 天、半年、1 年、1.5 年、2 年
	Φ10×20	試體拆模後，分別置入養生室及大氣試驗場，在大氣下以濕麻布養治 14 天，齡期 28 天後，進行大氣及海水乾濕循環試驗	氯離子電滲	56 天、90 天、半年、1.5 年、2 年
	Φ10×20	試體拆模後，在大氣下以濕麻布養治 14 天，齡期 28 天後，進行大氣及海水乾濕循環試驗	透水(特製試體)	56 天、90 天、半年、1.5 年、2 年
試 驗 牆	配比 A、B	試體拆模後，在大氣下以濕麻布養治 14 天，齡期 28 天後，進行大氣及海水乾濕循環試驗	電阻、鋼筋腐蝕速率、腐蝕電位、超音波	7 天、14 天、28 天、後每週一次、56 天、90 天、每個月一次、半年、1 年、1.5 年、2 年
	配比 C、D	試體拆模後，在大氣下以濕麻布養治 14 天，齡期 28 天後，進行海水乾濕循環試驗	電阻、鋼筋腐蝕速率、腐蝕電位、超音波	7 天、14 天、28 天、後每週一次、56 天、90 天、每個月一次、半年、1 年、1.5 年、2 年
說明：配比 A：為 HPC-4000 Psi 配比 B：為 OPC-4000 Psi 配比 C：為 HPC-5000 Psi 配比 D：為 HPC-3000 Psi				

表 3-2 混凝土試體配比設計數據

性質 編號	設計強度(f_c') 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)
			粗骨材	細骨材	水泥	飛灰 + 爐石	水	強塑劑			
A	280	HPC	990	780	245 } 270	200	139 } 168	9.5 } 10.0	0.31	0.079	0.56
B	280	OPC	894	834	387	---	205	---	0.53	0.097	0.53
C	350	HPC	980	880	198 } 220	200	129 } 145	10.9 } 12.0	0.27	0.082	0.47
D	210	HPC	1000	710	280 } 300	220	139 } 168	9.5 } 11.2	0.35	0.077	0.70

3-2-2 試驗變數及試體編號

1.試驗變數：如表 3-3 所示

表 3-3 試驗變數

項 目	試 驗 變 數
混凝土配比	A 型、B 型、C 型、D 型
養護環境	養生室、濕麻布
曝露環境	大氣曝露、海水乾濕循環
齡 期	7 天、14 天、28 天、56 天、90 天、半年、1 年、1. 年、2 年

2.試驗編號

本試驗共有四個配比，其中編號 H4 為 HPC 設計強度 4000Psi，編號 O4 代表一般混凝土(OPC)設計強度為 4000Psi，編號 H5 為 HPC 設計強度為 5000Psi，編號 H3 為 HPC 設計強度為 3000Psi。在試體上分為兩種，C 代表圓柱試體，W 代表試驗牆，而試體在不同曝露環境下，以"R" 表示養生室養生環境，"A" 為大氣環境之工地養護，"S" 為海水乾濕循環環境。

舉例如下：

(1)H4CA

H4：配比 A(HPC-4000Psi)

C：圓柱試體

A：大氣環境之工地養護

(2)H3WS

H3：配比 D(HPC-3000Psi)

W：試驗牆

S：海水乾濕循環環境

3-2-3 試體製作

本次研究除了灌製 $\Phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ 及 $\Phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體外(如照片 3-1 所示)，特別設計了六面的鋼筋混凝土試驗牆，其設計尺寸及鋼筋之排置如詳圖 3-2 所示，實際情形如照片 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，其埋設工作如照片 3-3。

為使大量的混凝土拌製工作順利，本研究先經實驗室試拌後，再由英詮實業公司之預拌場製作後，由拌合車送至本所，進行各項的澆置作業。

3-2-4 齡期及養護方式

1.齡期：

本研究計畫預計測試時間為兩年，為利於比較硬固混凝土之各種性質發展，因此預定在齡期為 7 天、14 天、28 天、56 天、90 天、180 天、1 年、1.5 年、2 年分別進行各項試驗。

2.養護：

由於混凝土養治條件對其硬固之性質影響很大，因此本計畫考慮二種條件：(1)圓柱試體在養生室恆溫恆濕環境下養護。(2)試體灌製拆模後，在大氣下以濕麻布濕治 14 天養護(如照片 3-4)後模擬混凝土工程工地現場之養護方式，28 天後進行海水乾濕循環曝露及大氣曝露試驗。

3-2-5 海水乾濕循環方式

港灣鋼筋混凝土結構物常年浸漬於海洋惡劣的環境下，受到海水嚴重的侵襲導致結構物易於發生腐蝕劣化。而造成混凝土結構物發生腐蝕劣化的原因，不外乎是結構受到海水的乾濕



照片 3-1 試驗室內圓柱試體之灌製



照片 3-2 單座試驗牆之實際佈置情形

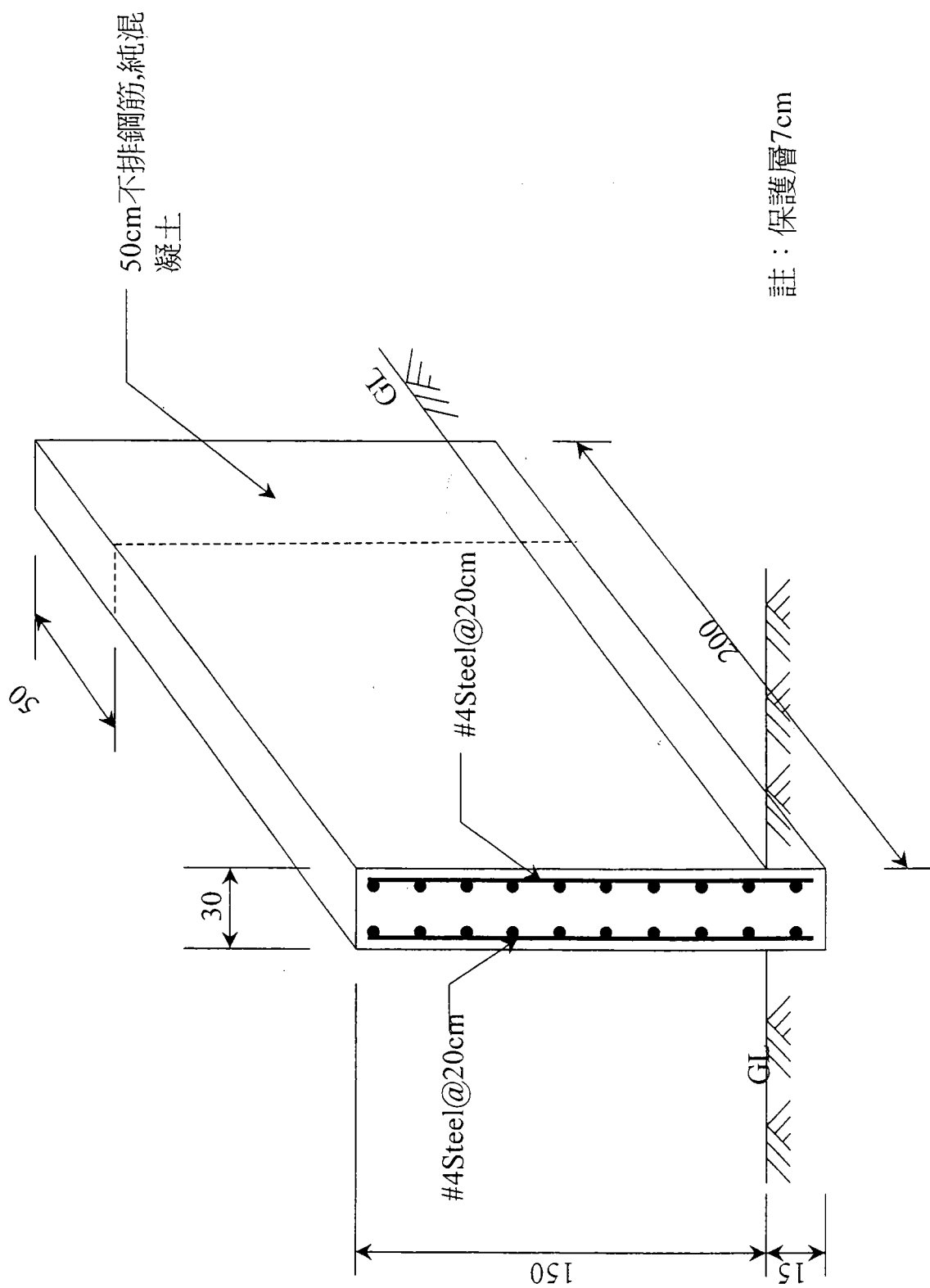


圖3-2單座試驗牆之設計詳圖

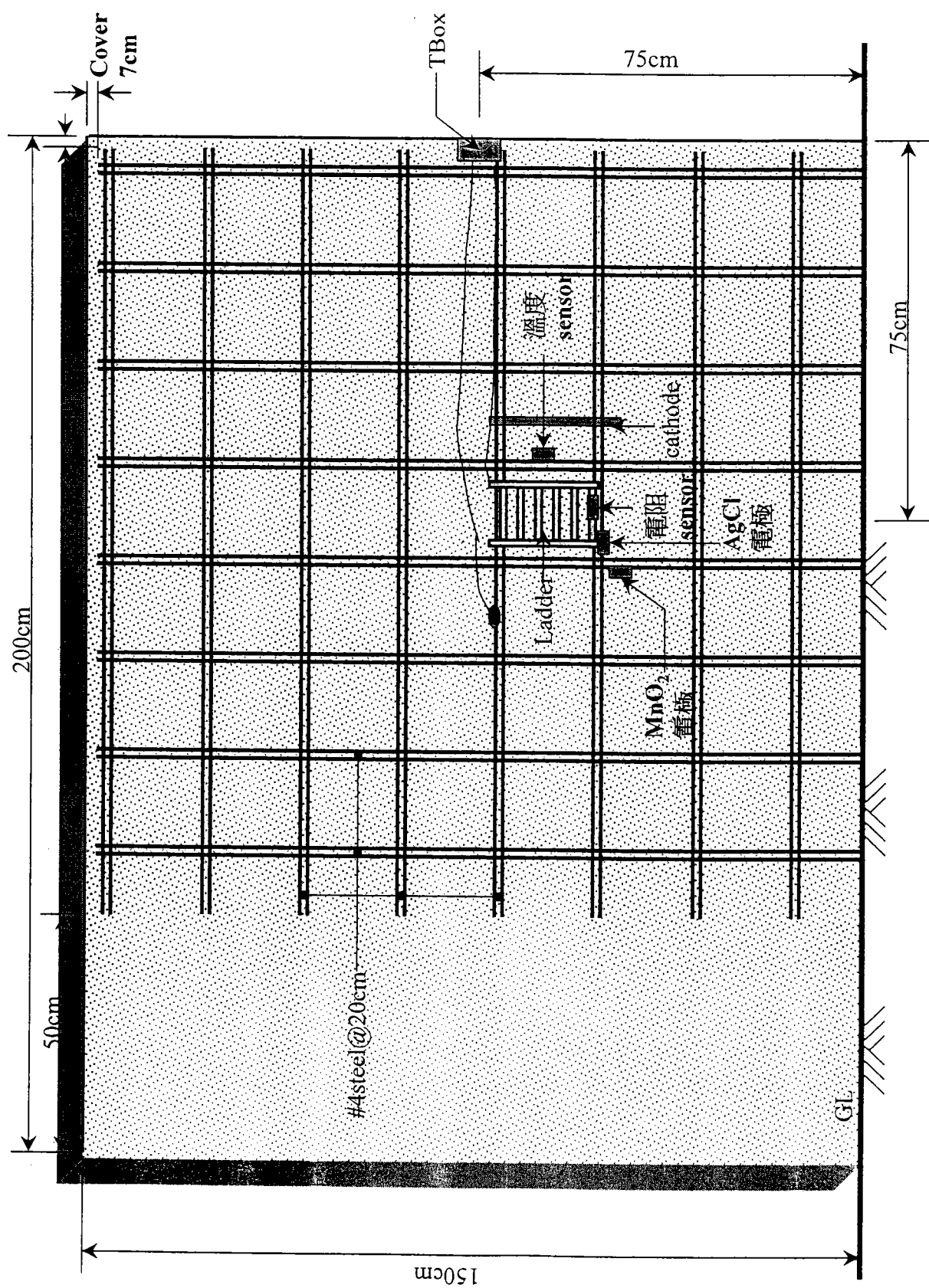
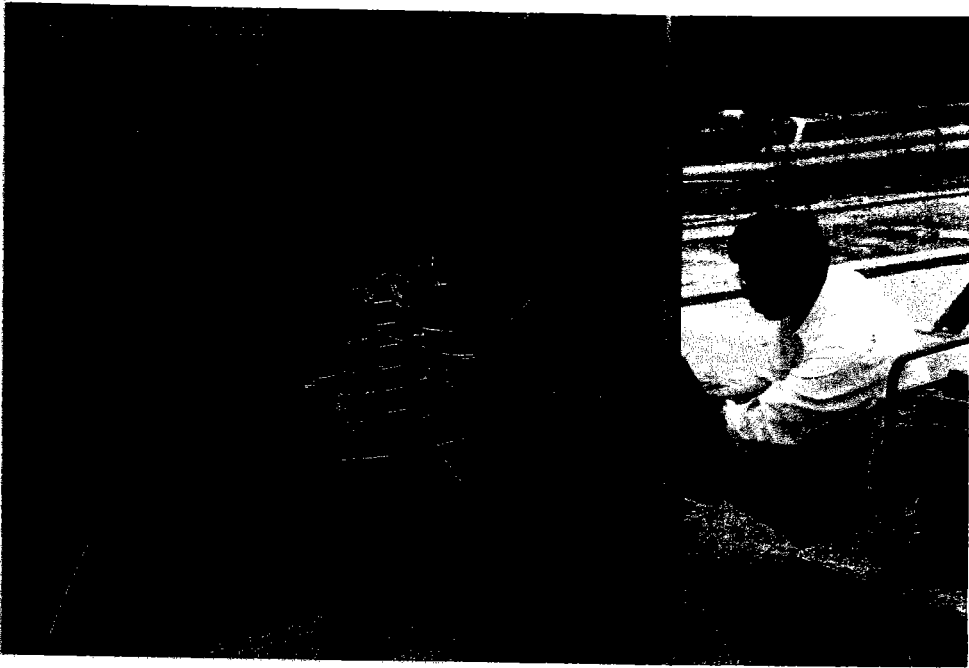
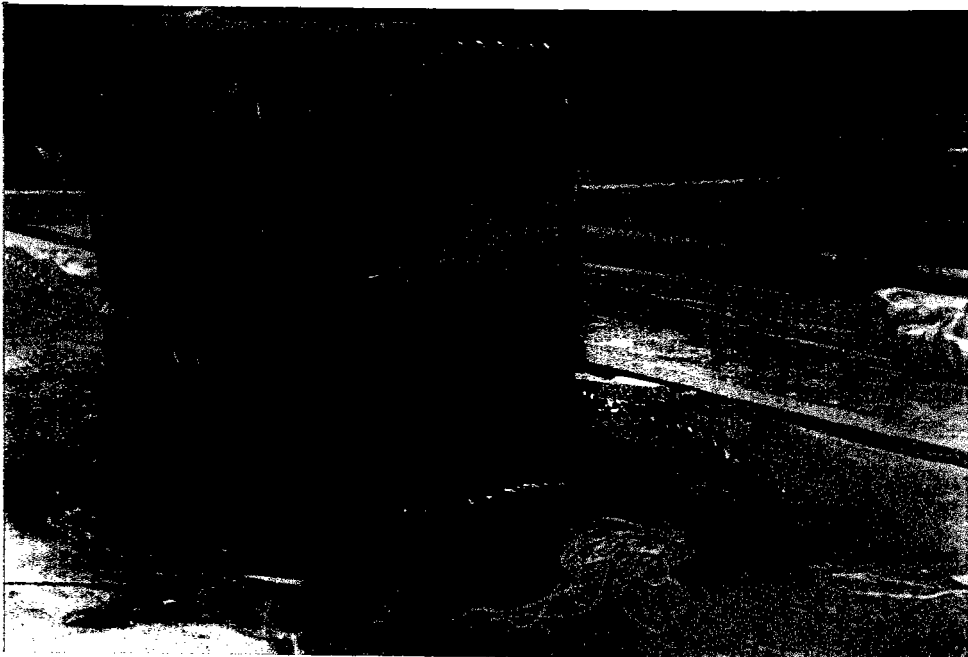


圖3-3 試驗牆埋設之監視系統詳圖



照片 3-3 試驗牆 Sensor 埋設之情形



照片 3-4 試驗牆及圓柱試體以濕麻布濕治養護

反覆作用。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，每小時在試驗牆單面噴海水 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。

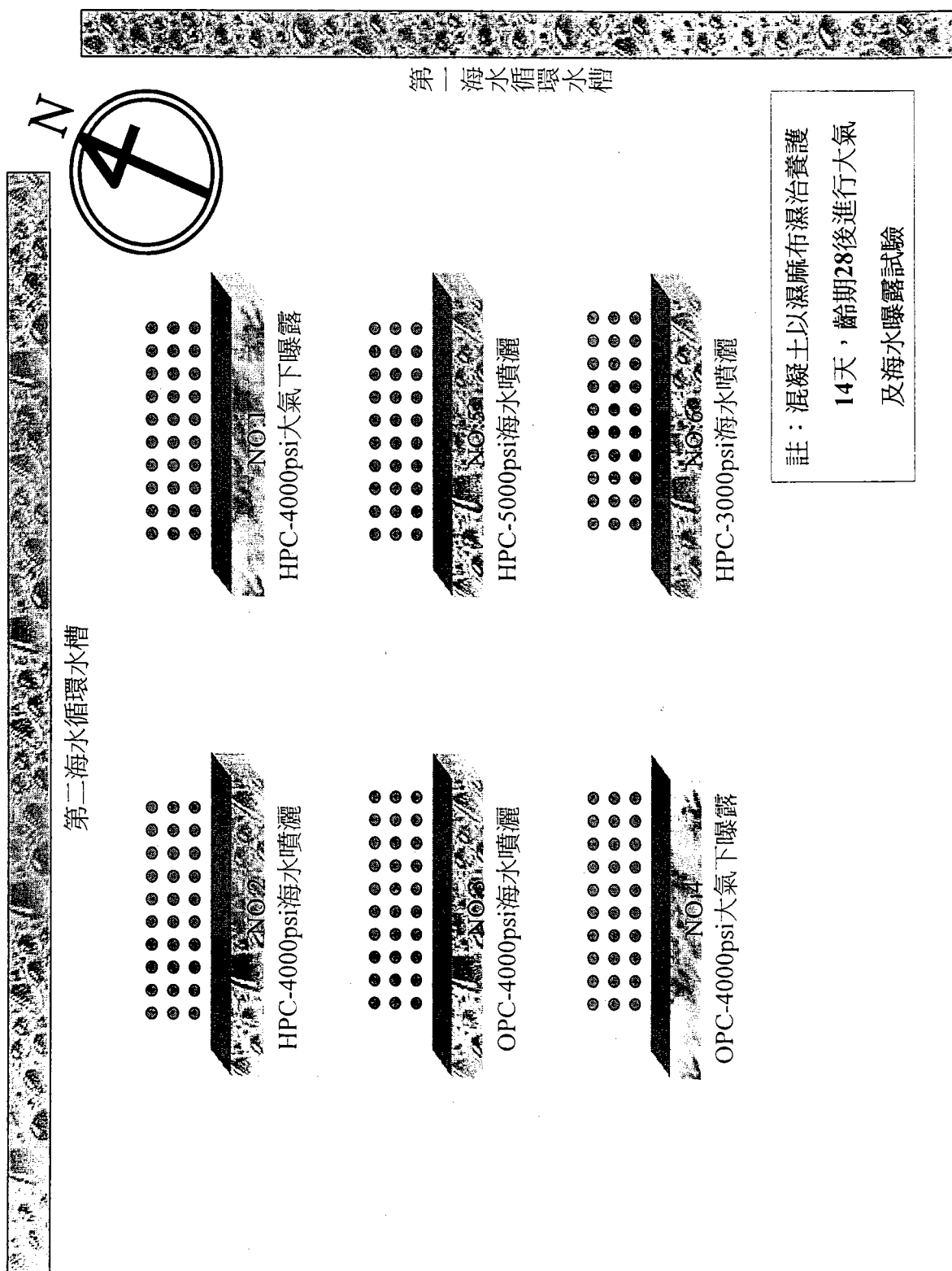


圖3-4混凝土試體及試驗牆曝露位置配置圖

3-3 試驗方法與設備

3-3-1 工作性試驗

高性能混凝土之工作性，常以坍度及流坍度來評估其工作度。

- 1.工作度之量測最常用的方法為「坍度試驗」，是全球公認的簡易試驗方法，CNS 1176 有明確的規定。量測的器具主要為一圓錐體之坍度模，頂端直徑 10cm、底端直徑 20cm、高度 30cm，加上一支直徑 16mm Φ ，長度 60cm 之半圓球頂之鋼棒。其試驗方法為將混凝土分三層填入坍度模，每一層以搗棒均勻搗實 25 次後，立即將坍度模向上垂直拔起，量測錐頂面至坍下混凝土之垂直高度，即為坍度。
- 2.用坍度來表示混凝土之工作性，不足以表現流動的特有性質，因而有「坍流度試驗」，其方法係在坍度試驗之後，量測新拌混凝土擴散之直徑。

3-3-2 硬固混凝土性能試驗

3-3-2-1 強度試驗

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

3-3-2-2 品質試驗

1.超音波：

本研究使用英國 CNS 儀器公司之 PUNDIT(Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)超音波測定儀。主要包括時間顯示器及脈波發射器和接收器。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⁽⁵⁰⁾。

表 3-4 超音波脈波速度與混凝土品質之關係⁽⁵⁰⁾

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

2. 電阻：

當電阻在混凝土中產生，其離子移動將會產生阻抗，因此其電阻與混凝土中之孔隙率相關，電阻大則混凝土中之孔隙率低及水密性佳，因此腐蝕因子不易侵入，所以鋼筋不易發生腐蝕。由此可供定性評估混凝土之耐久性。

本研究採用英國 Colebrand Advanced Engineering 公司之具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，即可立即讀出電阻值。圖 3-5 為四針式之電阻量測簡示圖，照片 3-5 為其儀器。根據學者所提出之混凝土電阻與其中所含鋼筋之活性程度之關係如下表所示⁽³⁹⁾，可供測試作定期評估之參考。

混凝土電阻與其中鋼筋腐蝕活性之關係⁽³⁹⁾

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

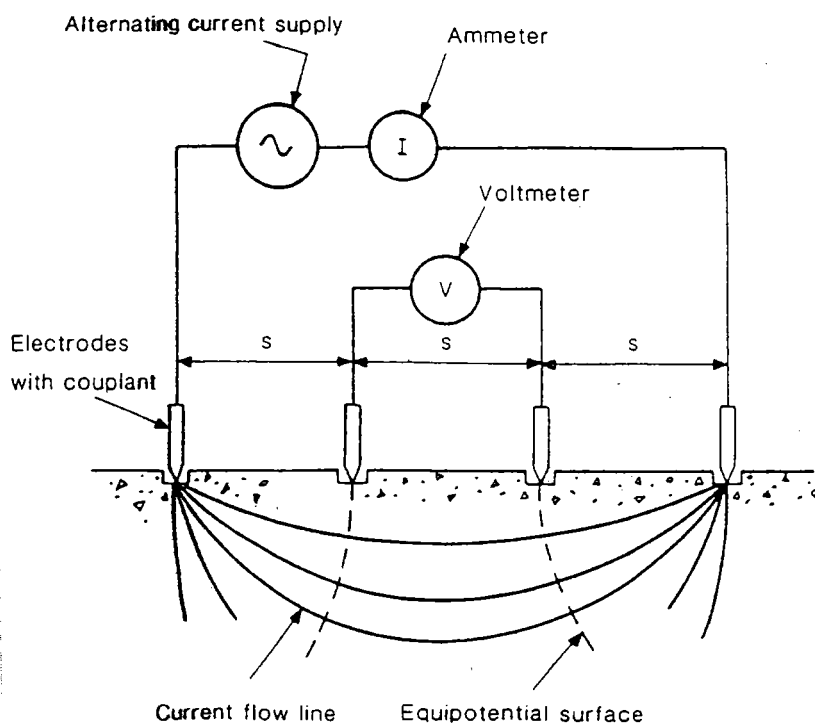
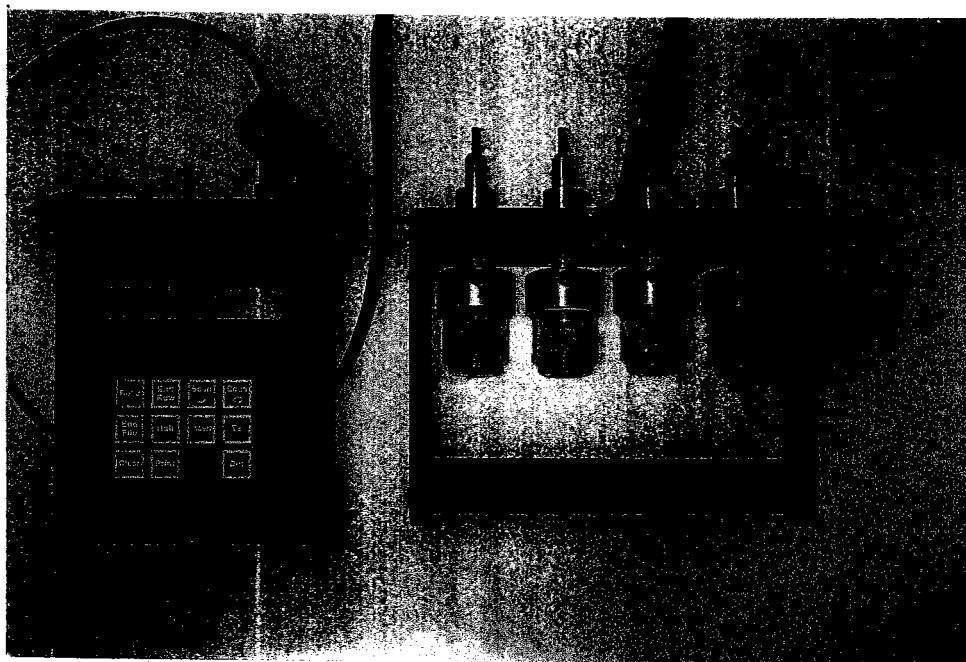


圖 3-5 四探針式之電阻量測簡示圖



照片 3-5 混凝土電阻量測儀

3.電滲：

參考 ASTM C1202 作氯離子滲透性量測，利用外加直流電壓(60V)，使電解液(NaCl，NaOH)解離產生，帶電的陰離子，並加速其對混凝土的滲透，量取隨時間變化其通過混凝土電流的大小，再計算其電量(庫倫=安培×秒)作為氯離子滲透性的指標。下表為 ASTM C1202 電量規定值。

ASTM C1202 電量規定值

電流量(庫倫)	氯離子滲透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	非常低
<100	可忽略

4.混凝土透水試驗：

硬固混凝土之滲透性為影響混凝土抗化學物侵蝕之耐久最主要的原因。在水化後混凝土大孔隙之體積與其不透水性及強度成負性關係。基本上有害物質在混凝土傳輸的行為，可分濃度差所引起的擴散現象及因壓力差而降低水分子移動的滲透現象。擴散難易的程度以離子擴散係數表示，而滲透的難易則以透水係數表示⁽⁵³⁾。

本研究採用日製之內壓式透水試驗儀，可供四組直徑10×20cm 試體同時測試。該儀器之壓力來源來自高壓氮氣，氮氣瓶配備高壓(300kg/cm²)及低壓(70kg/cm²)錶各一個，具有調壓

之功能，在四聯式透水試驗容器及給水容器上方皆按裝壓力錶 50 kg/cm² 各一個。

3-3-3 試驗牆試驗

3-3-3-1 腐蝕電位量測^(51,52)

依據 ASTM C-876 規範⁽⁵¹⁾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。

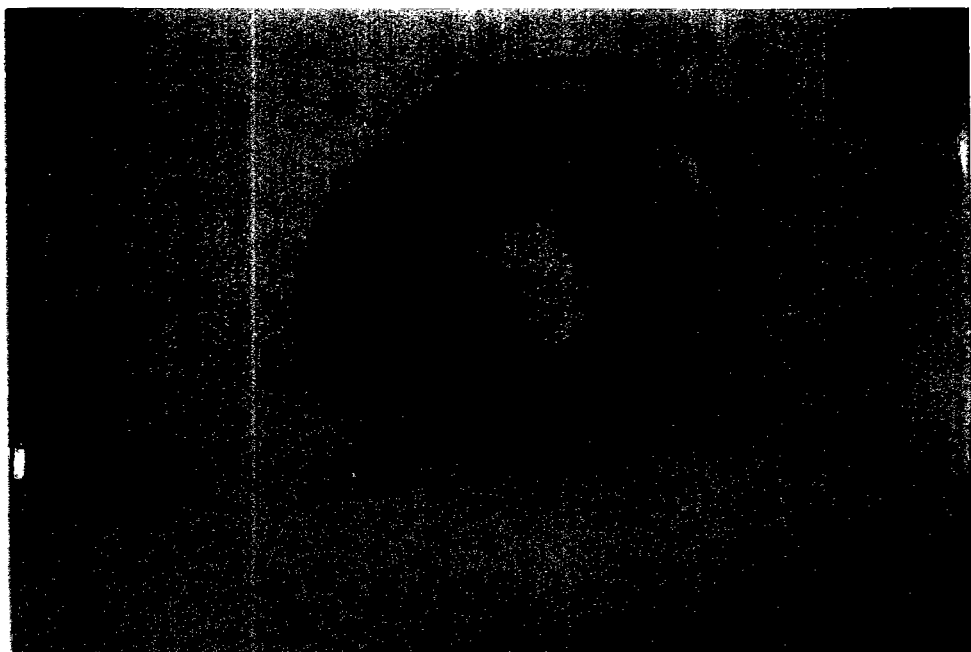
偵測混凝土中鋼筋保護電位之參考電極，由於須埋置混凝土中，因此其規格必須適合埋置混凝土環境使用。本實驗評估二種埋置式參考電極於鹽害混凝土環境之使用效果，參考電極種類分別 MnO₂ 及 Ag/AgCl 見照片 3-6，3-7。為避免電位測量產生 IR drop 造成誤差，埋置時參考電極感應端與鋼筋保持 1~2cm 距離。本實驗牆試體中埋置之參考電極位置如圖 3-3 所示。根據 ASTM C-876 的建議，當以 Cu/CuSO₄ 參考電極來量測鋼筋腐蝕電位時，其腐蝕狀況可以根據下表 3-5 來判斷。

表 3-5 ASTM C-876 鋼筋電位值與腐蝕機率之關係⁽⁵¹⁾

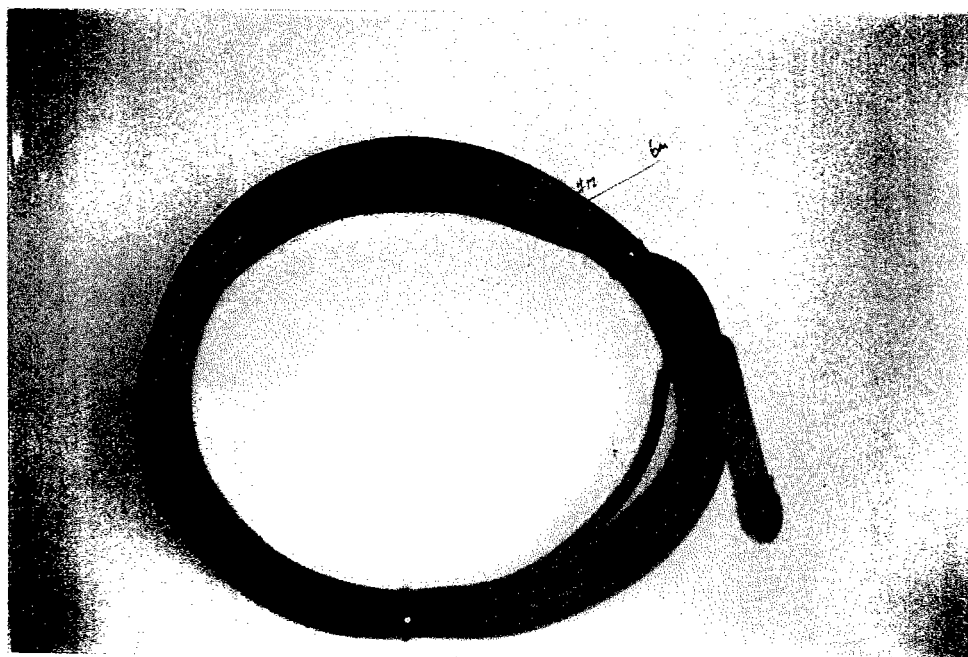
電位值範圍	鋼筋腐蝕狀態
-200mv < 電位值	90% 機率不腐蝕
-350 < 電位值 < -200mv	腐蝕可能發生
電位值 < -350	90% 機率發生腐蝕

3-3-3-2 鋼筋腐蝕速率量測：

本研究採用西班牙製之 The GECOR6 CORROSION RATE



照片 3-6 MnO₂ 參考電極



照片 3-7 AgCl 參考電極

METER 之鋼筋腐蝕測儀，如照片 3-8 所示。該儀器附有感應計 A，B，可量腐蝕速率、腐蝕電位及混凝土阻抗。量測時為了形成一通路，須在鋼筋上接一導線，以利作業，同時感應器 Sensor A 與接觸面必須緊靠，如照片 3-9 才可得到正確的數據，儀器量測如簡示剖面圖 3-6a,b。相關之鋼筋腐蝕電流與腐蝕狀態可由表 3-6 及 3-7 之關係比較。

本研究以線性極化電阻法(linear polarization method)量測鋼筋腐蝕速率。線性極化電阻法的偵測，為一種包含工作電極、參考電極、輔助電極之三極式的量測裝置，在極化過程中於自然腐蝕電位 E_{corr} 附近，亦即電位在 $\pm 10\text{mV}$ 範圍之間，其極化曲線約呈直線關係，亦即外加電流(Δi)與極化電位變化量($\Delta \epsilon$)是直線關係。因此， $\Delta i/\Delta \epsilon$ 即為直線之斜率，由 i/ϵ 之關係可求出 R_p (極化電阻)，是謂線性極化電阻法。

基礎理論：

在一混合電位理論之極化曲線圖中(包含有陰、陽極電位控制曲線圖)，如圖 3-7 所示。通常金屬極化曲線可由下面之陰、陽極電流與電位之變化關係予以描繪出其軌跡：

當極化受陰極電位控制時，陰極之外加電流為

$$i_{app,c} = i_c - i_a \quad \dots\dots\dots(1)$$

當極化受陽極電位控制時，陽極之外加電流為

$$i_{app,a} = i_a - i_c \quad \dots\dots\dots(2)$$

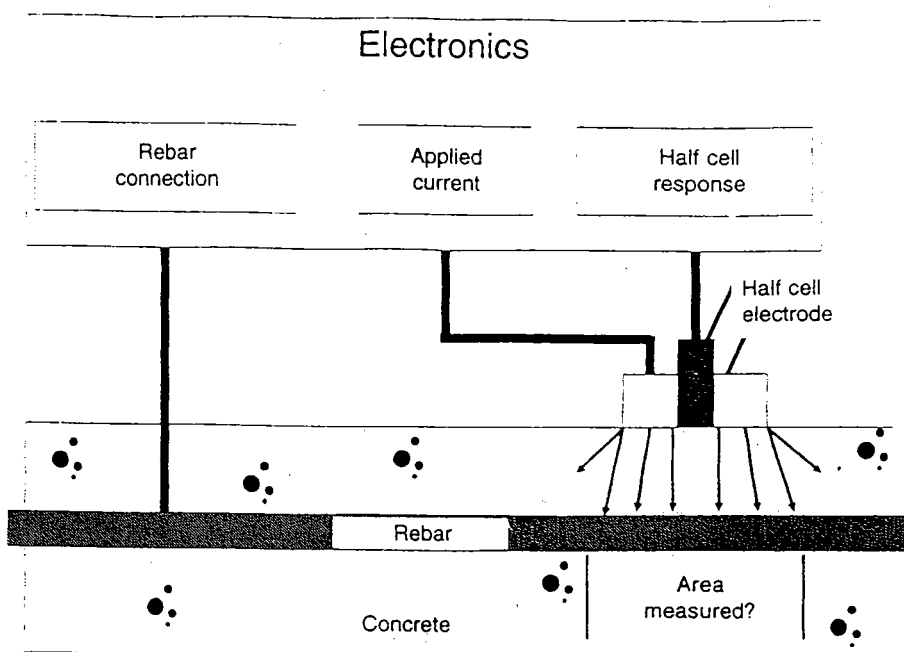
如極化是受腐蝕電位(corrosion potential, E_{corr})所影響時，其偏離平衡電位之變化(亦即極化電位變化量， ϵ)與電流之關係則可由下列公式表示之：



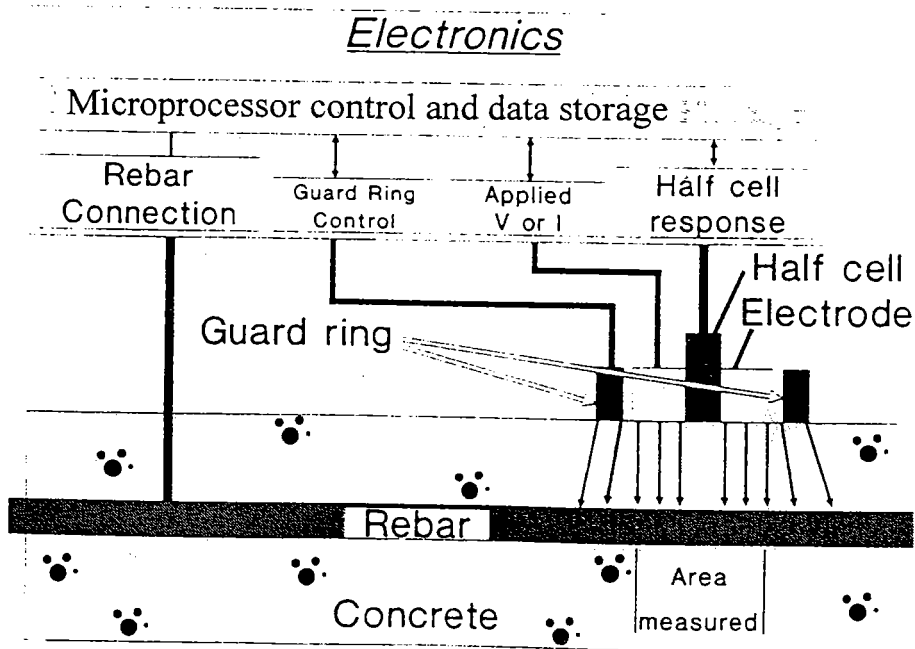
照片 3-8 鋼筋腐蝕測儀



照片 3-9 感應計緊貼牆面



a



b

圖 3-6 鋼筋腐蝕測儀之簡示剖圖

表 3-6 腐蝕電流與鋼筋腐蝕狀態之關係⁽²²⁾

Icorr(μ A/cm ²)	鋼筋腐蝕狀況	預估結構體內鋼筋 發生 蝕之時間
<0.1	鈍化狀態	沒有腐蝕之預期
0.1~0.5	低~中等腐蝕	10~15 年內
0.5~1.0	中~高等腐蝕	2~10 年內
>1.0	高腐蝕	2 年內

表 3-7 腐蝕電流與鋼筋表面厚度損失速率之關係⁽²²⁾

Icorr(μ A/cm ²)	鋼筋斷面厚度損失 速率(μ m/yr.)	鋼筋表面 層厚度 成長速率(μ m/yr.)
0.1	1.1	3
1.0	11.5	34
5.0	57.5	173
10	115	345

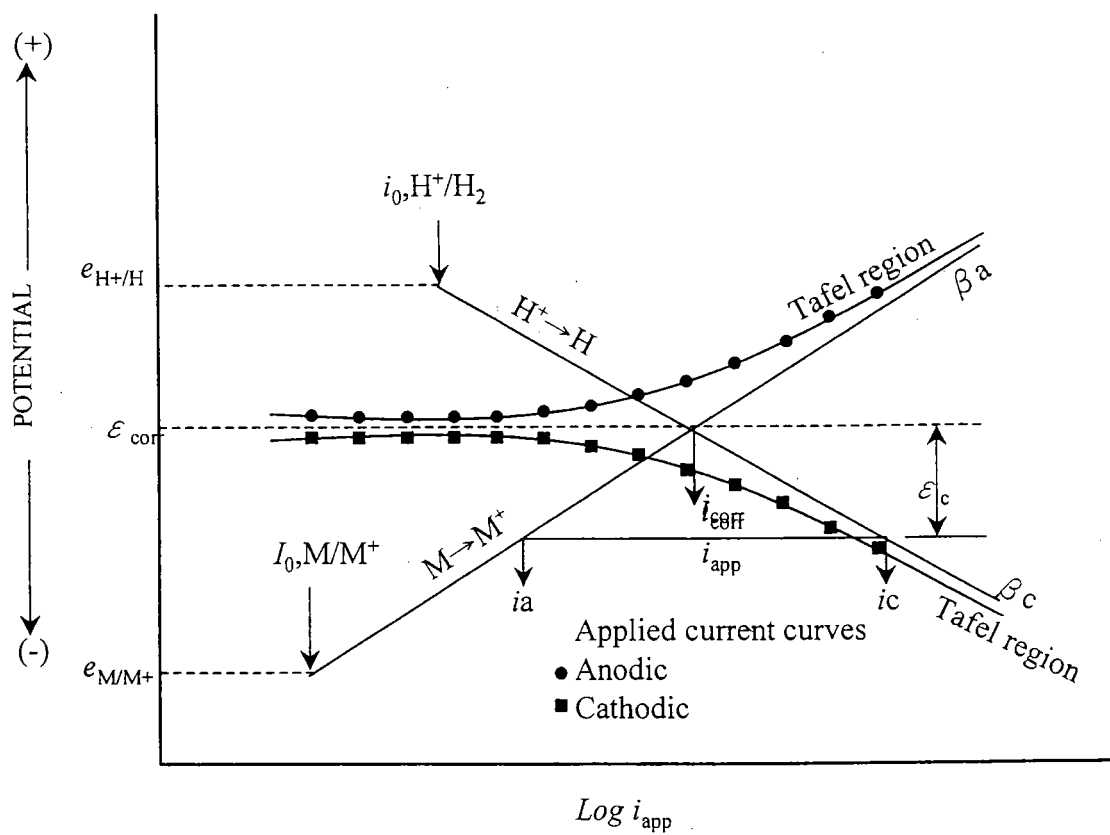


圖 3-7 混合電位理論之極化曲線圖

$$\text{受陰極過電位影響時} \quad \varepsilon_c = \beta_c \log (i_c/i_{\text{corr}}) \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{受陽極過電位影響時} \quad \varepsilon_a = \beta_a \log (i_a/i_{\text{corr}}) \dots\dots\dots(4)$$

將式(3)與式(4)轉換為指數形式後代入式(1)中，得下式：

$$i_{\text{app},c} = i_{\text{corr}} (10^{-\varepsilon_c/\beta_c} - 10^{\varepsilon_a/\beta_a}) \dots\dots\dots(5)$$

將式(5)微分並整理後，即可求得極化電阻(R_p)如下：

$$\begin{aligned} R_p &= [d\varepsilon / di_{\text{app}}]_{\varepsilon \rightarrow 0} = \Delta\varepsilon / \Delta i_{\text{app}} \\ &= \beta_a \times \beta_c / (2.303 i_{\text{corr}} (\beta_a + \beta_c)) = B / i_{\text{corr}} \end{aligned}$$

或腐蝕電流為

$$i_{\text{corr}} = B / R_p = 0.026 / R_p$$

鋼筋之腐蝕速率(腐蝕電流密度)則為

$$I = i_{\text{corr}} / A (\text{鋼筋偵測之面積})$$

i_a ：陽極氧化反應之電流

i_c ：陰極還原反應之電流

$i_{\text{app},a}$ ：外加陽極電流

$i_{\text{app},c}$ ：外加陰極電流

i_{corr} ：鋼筋腐蝕電流

β_a ：陽極 tafel 曲線之斜率

β_c ：陰極 tafel 曲線之斜率

ε_c ：陰極極化電位變化量($E_c - E_{\text{corr}}$)

ε_a ：陽極極化電位變化量($E_a - E_{\text{corr}}$)

B ：為一常數 ($B = \beta_a \times \beta_c / 2.303 (\beta_a + \beta_c) = 0.026$)，在混凝土

環境下鋼筋極化曲線圖中之 β_a 、 β_c 值為 0.12。

R_p ：極化電阻

$\Delta\varepsilon$ ：極化電位變化量

Δi ：電流變化量

I ：腐蝕電流密度

A ：鋼筋偵測(擾動)之面積

線性極化電阻法通常在幾分鐘內即可測得腐蝕速率，具高靈敏性(極輕微的腐蝕狀況亦可精確量出)，可重覆量測多次亦不破壞原有狀況。但此法有一些技術上之困難必需考慮之，茲簡述於下：

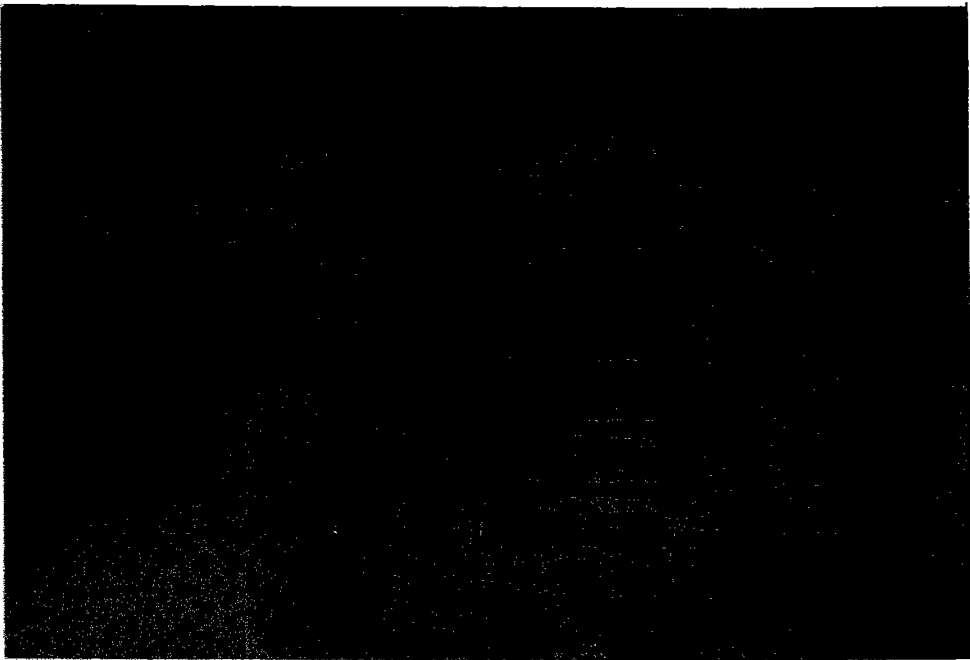
1. 系統平衡可能需要較長的時間，如量測時間較短時，倉促的量測會造成不正確的腐蝕速率。
2. 輔助電極至鋼筋間由於混凝土之電阻極高，因此在量測極化電阻(R_p)時，可能會造成明顯的誤差，除非從 R_p 中扣除混凝土電阻。
3. B 值之決定必需預先知道鋼筋的腐蝕狀態。
4. 假設鋼筋為均勻腐蝕。
5. A 面積不易確定。
6. 某一位置之鋼筋腐蝕速率不能視為平均腐蝕速率，因為混凝土之周遭之溫度、濕度及氧的含量，可能造成顯著瞬間腐蝕速率。

3-3-3-3 Anode-Ladder System 監測系統量測：

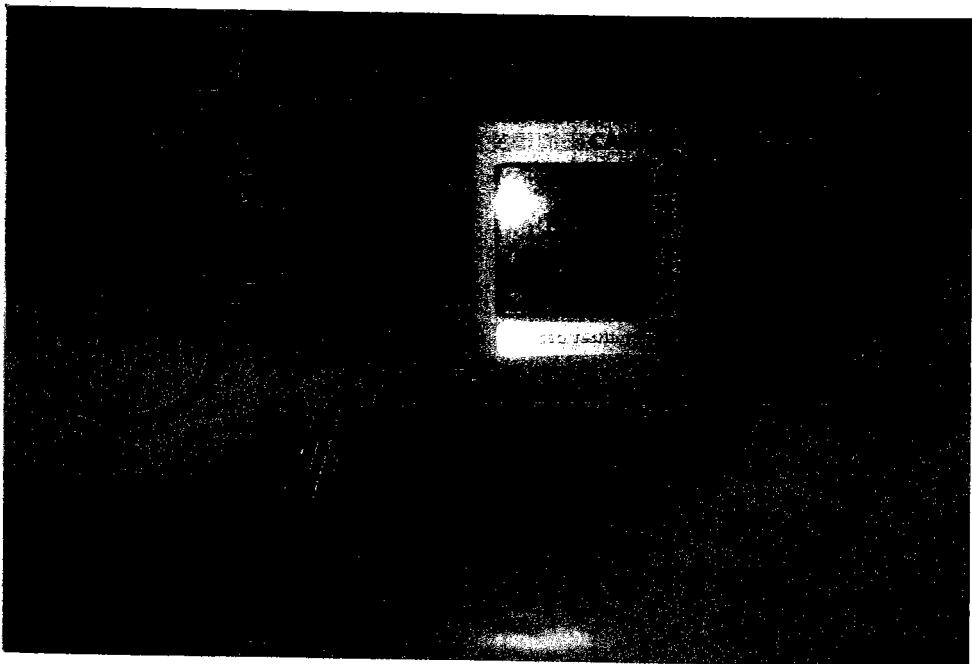
本研究採用德國製之 Anode-Ladder System 腐蝕監視系統，該系統包含了 1.陽極梯(Anode Ladder-AL)內含 6 根單獨的陽極元件及溫度偵測器。2.陰極桿(Cathode Bar-C)，為一塗上白金的鈦金屬桿，其直徑為 8mm，長度為 40cm。3.連接電纜線，主要連接(Sensor 與 terminal box)。4.終端盒(Terminal box-Tbox)，見照片 3-10。5.可攜式 CANIN 量測儀，照片 3-11。

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 3-8 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 3-8 所示。

本試驗的 Anode -Ladder-System 之排置見詳圖 3-9 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 3-10 Anode-Ladder-System 腐蝕監視系統



照片 3-11 可攜式 CANIN 量測儀

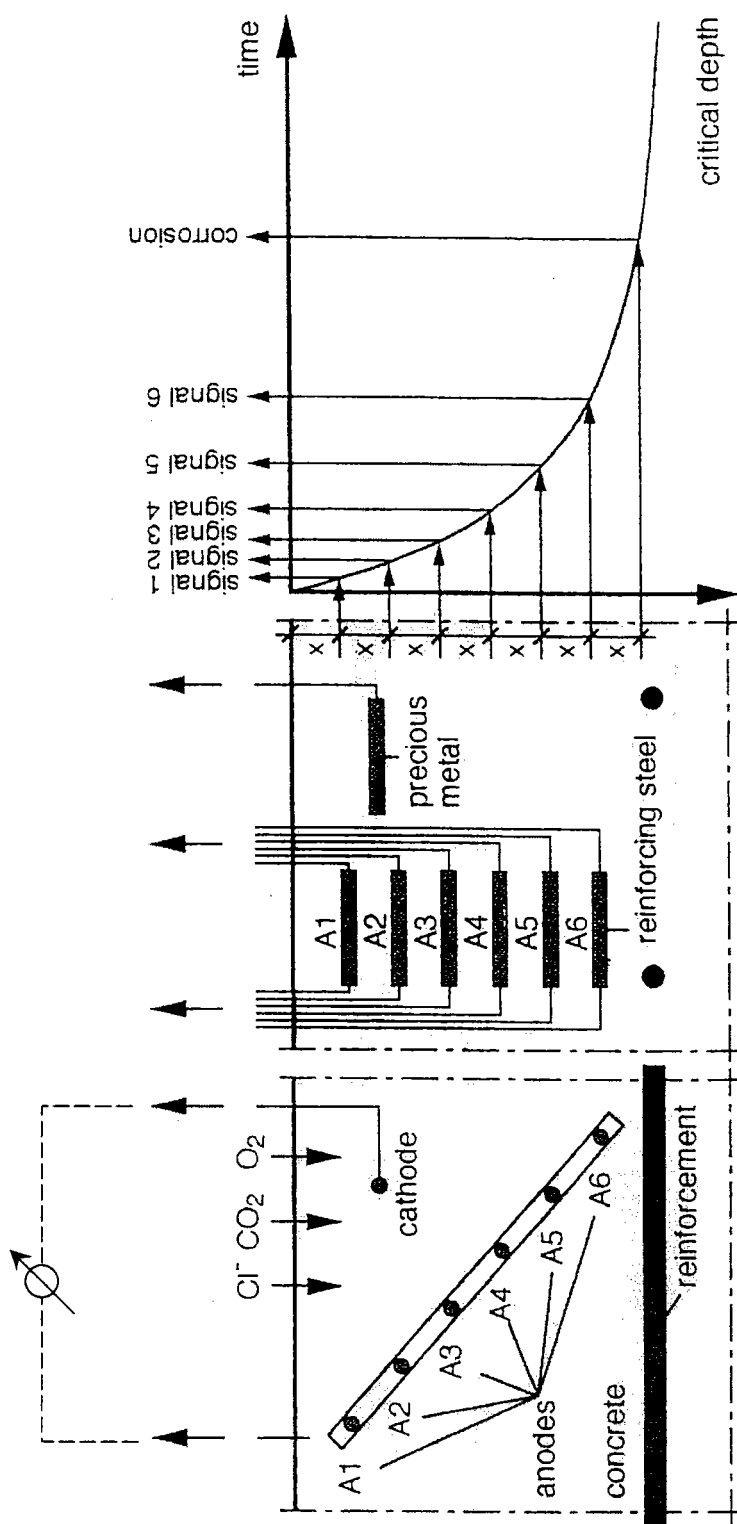


圖3-8 Anode-Ladder-System之原理

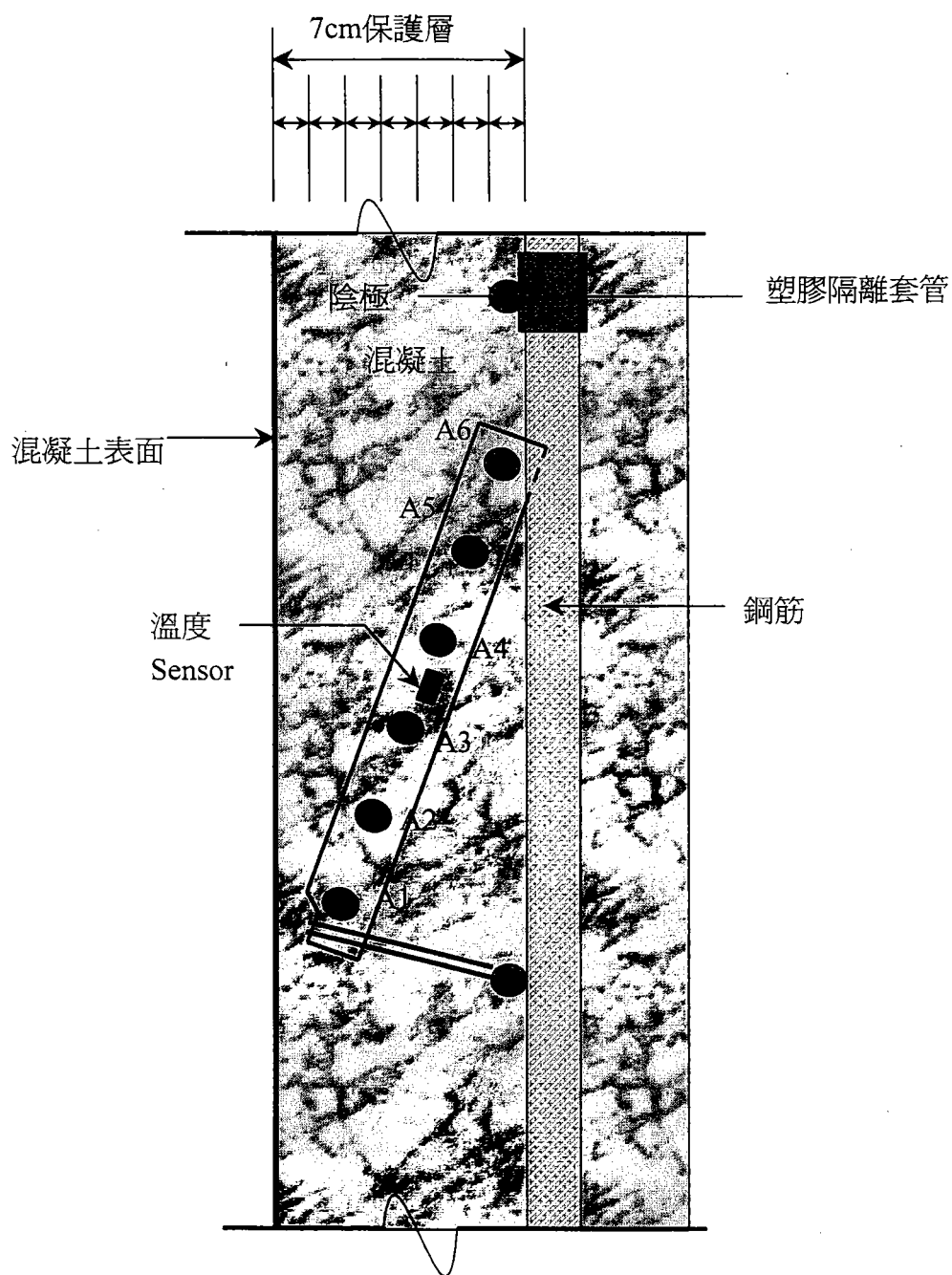


圖 3-9 Anode -Ladder-System 之排置詳圖

茲將試驗項目及設備詳列於表：

表 3-8 試驗項目及設備

試驗項目	試驗設備	備 註
抗壓強度	ELE 2000 KN 抗壓試驗機	
超音波	英國 CNS 儀器之 PLNDIT 超音波測定儀	
電阻量測	英國 Colebrand Advanced Engineering 公司之四探針並排之電阻量測儀	照片 3-5
透水試驗	四聯式內壓透水試驗儀	
氯離子滲透性量測	依據 ASTM C1202 製作之滲透儀	
鋼筋腐蝕速率量測	西班牙製之 The GECOR6 CORROSION RATE METER 之鋼筋腐蝕測儀	照片 3-6
鋼筋腐蝕電位量測	Ag/AgCl 參考電極、MnO ₂ 參考電極、電錶	照片 3-8 照片 3-9
腐蝕監視系統 (電位、電流、電阻)	使用德國製之 Anode-Ladder - System 腐蝕監視系統	照片 3-10 照片 3-11

第四章 結果與討論

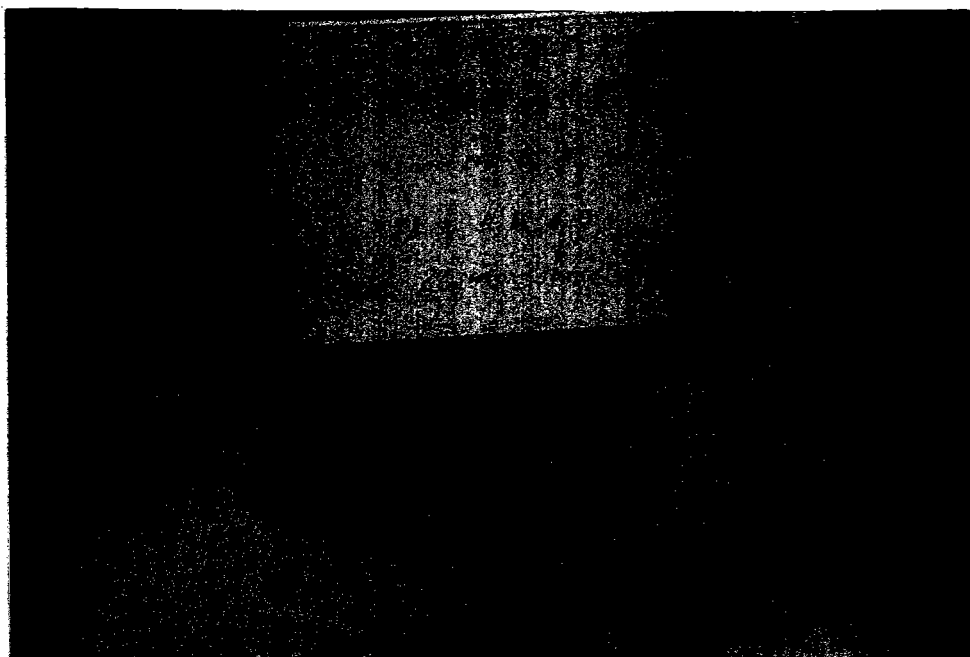
4-1 工作性（坍度與坍流度）

新拌混凝土的性質是影響選擇混凝土澆置振動及修飾方法與機械設備的重要因素，同時工作性的表現對日後硬固混凝土引響甚大，因此 HPC 之工作性最好能使混凝土成塑性態或是液態狀，而使混凝土能輕易的填充至模版的各角落。一般對工作性的要求是以坍度及坍流度為依據，因此兩者之要求分別為 $250 \pm 20\text{mm}$ 及 500mm 以上。當坍度及坍流度較小時則其流送阻力將受減，因此為使混凝土施工順利，一般均要求坍度及坍流度要大為施工原則，在本研究中各種配比均以能達到上述坍度及坍流度標準為目標，且控制用水量在 200kg/m^3 以內，實驗結果如表 4-1 所示，各配比之拌製結果如照片 4-1~4-4，由此結果可發現 HPC 之坍度及坍流度均能符合要求，且這些數據是預拌車經過 1 個小時行程後到達港研所試驗室之測試結果。因此對於現場施工可以相當符合施工上的要求。

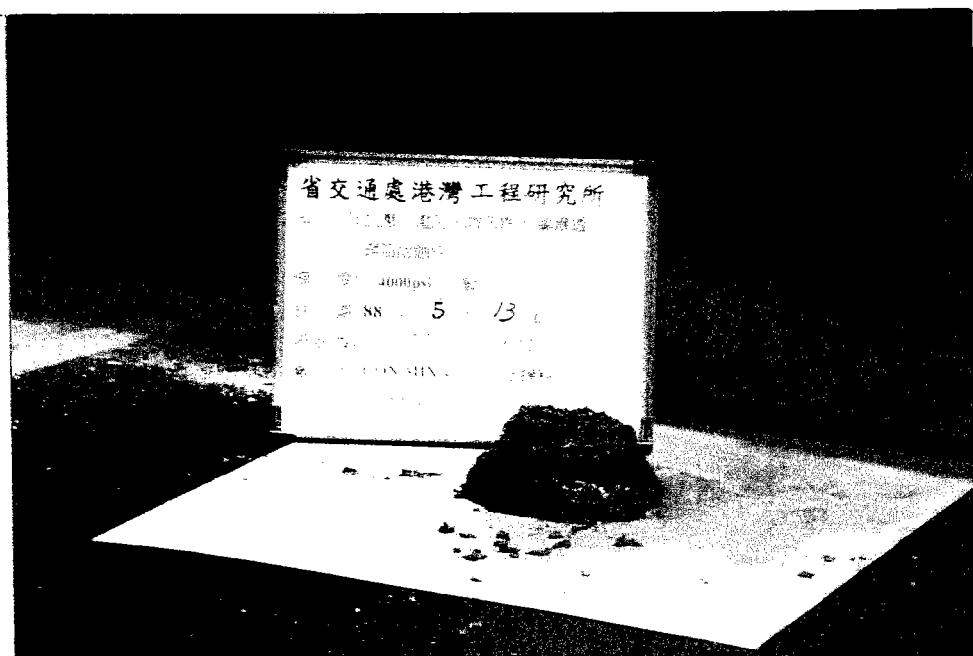
然而在控制組方面，一般混凝土的坍度與坍流度顯然就低很多，從照片 4-1 及 4-2 就可比較出同是 4000psi 設計強度的混凝土，HPC 就有較佳的工作性，分析原因乃是本研究之 OPC 配比採用美國混凝土學會(ACI)要求的最低坍度標準當作設計坍度，由於此法常會導致混凝土施工困難，其工作性相對的就會不佳。而在高性能混凝土方面由於有添加波索蘭材料，其顆粒粒徑小又是呈玻璃球狀，故可使工作性改善，同時又有強塑劑的作用可延緩初凝時間，防止坍度損失，所以工作性較佳。

表 4-1 高性能混凝土之基本性質

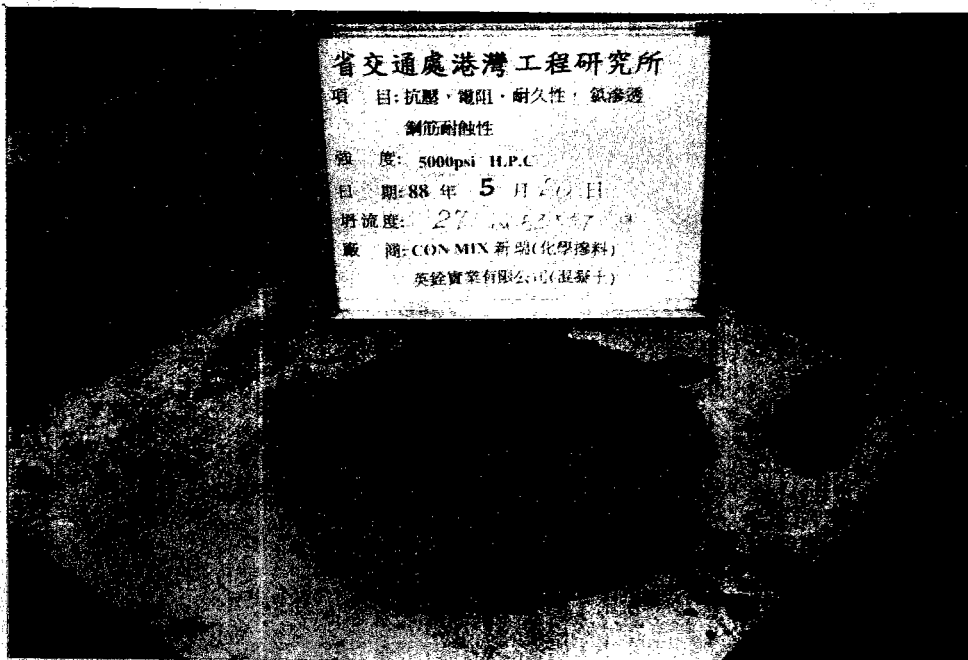
基本性質 配比種類			H4	O4	H5	H3
坍度 (cm)			26.0	17.5	27.0	27.0
坍流度 (cm)			50×54	25×28	57×58	62×66
泌水析離情形			無	無	無	無
抗 壓 強 度 (kg/cm ²)	7 天	養生室養生	189	173	244	160
		大氣下濕 麻布養生 14 天	183	169	239	158
	14 天	養生室養生	232	210	301	189
		大氣下濕 麻布養生 14 天	228	192	299	180
	28 天	養生室養生	291	275	362	229
		大氣下濕 麻布養生 14 天	285	269	350	213



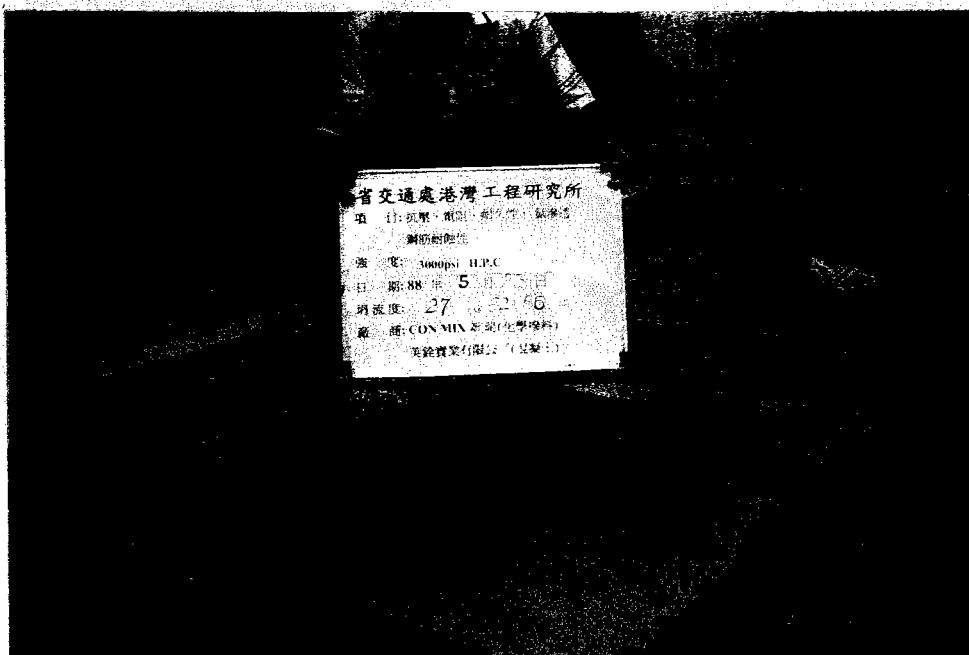
照片 4-1 配比 A HPC-4000psi 之坍度及坍流度



照片 4-2 配比 B OPC-4000psi 之坍度及坍流度



照片 4-3 配比 C HPC-5000psi 之坍度及坍流度



照片 4-4 配比 D HPC-3000psi 之坍度及坍流度

4-2 硬固混凝土性質試驗

本試驗包括抗壓強度、超音波速及電阻量測。

4-2-1 強度發展

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。例如抗壓強度高之混凝土，其彈性係數、抗拉強度、水密性及耐久性亦均較理想⁽⁵⁴⁾。

抗壓強度試驗為混凝土強度試驗中最普遍之試驗，其原因有(1)混凝土之大多數性質直接與抗壓強度有關連；(2)混凝土主要用於承受壓力，因此抗壓強度在工程應用中極為重要；(3)混凝土結構設計規範主要以抗壓強度為依據；(4)進行抗壓試驗較為容易且較便宜⁽⁹⁾。

本研究之抗壓強度見表 4-1 所示，各種不同配比之高性能混凝土其 28 天抗壓強度皆可達到設計之要求，且隨齡期持續成長，如圖 4-1~4-4 所示，實驗結果可歸納成下列各點：

1. 在大氣下以濕麻布濕治 14 天的混凝土與在養生室養護的混凝土其抗壓強度有略低的趨勢，但是不很明顯，這也說明了 HPC 在拆模後，只要適當的養護應該可達到設計之強度，當然了若能在養生室內養護其效果可更好。
2. 在 28 天養生室養護的試體其抗壓強度比在大氣下的混凝土為高，原因是養生室內有較佳之養護環境，而曝露在大氣下試體缺少混凝土水化所需之水分，故其強度較低。
3. 本次的 HPC 配比其水膠比 (W/B) 均低於 0.4，且水灰比 (W/C) 也大於 0.42，均符合高性能混凝土之要求。在強度發展上，W/B 越低其強度發展亦高，見圖 4-5，4-6 所示。

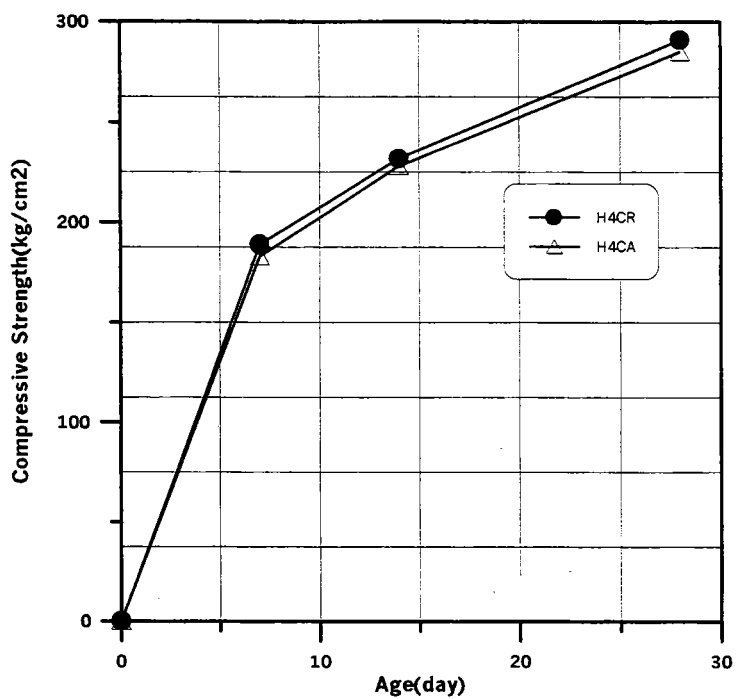


圖 4-1 HPC-4000psi 之強度發展

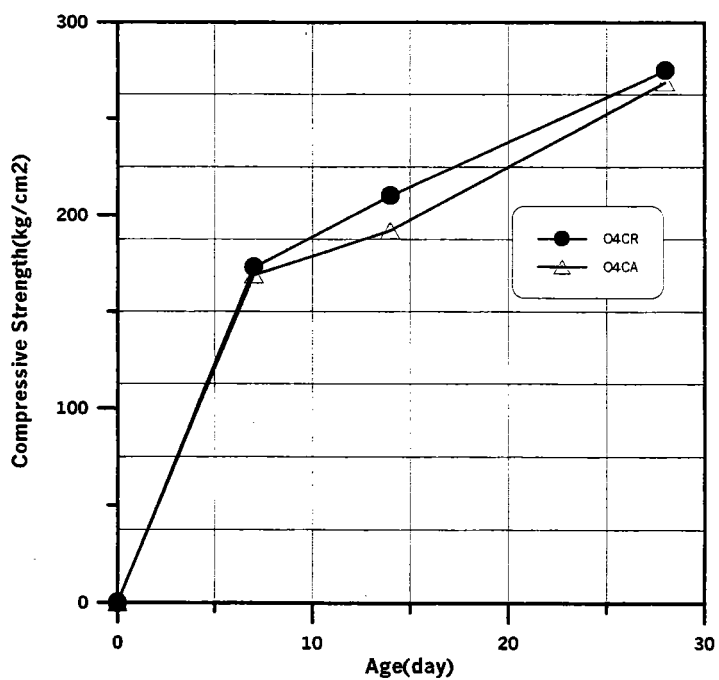


圖 4-2 OPC-4000psi 之強度發展

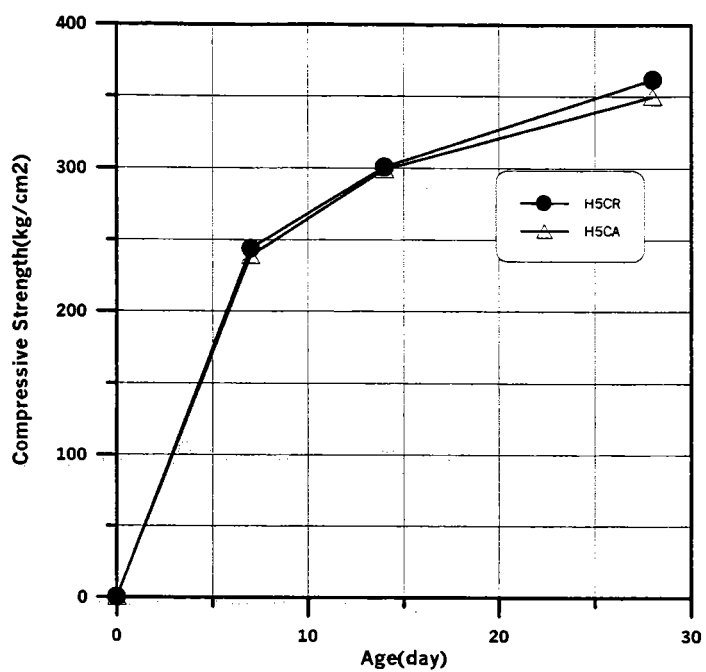


圖 4-3 HPC-5000psi 之強度發展

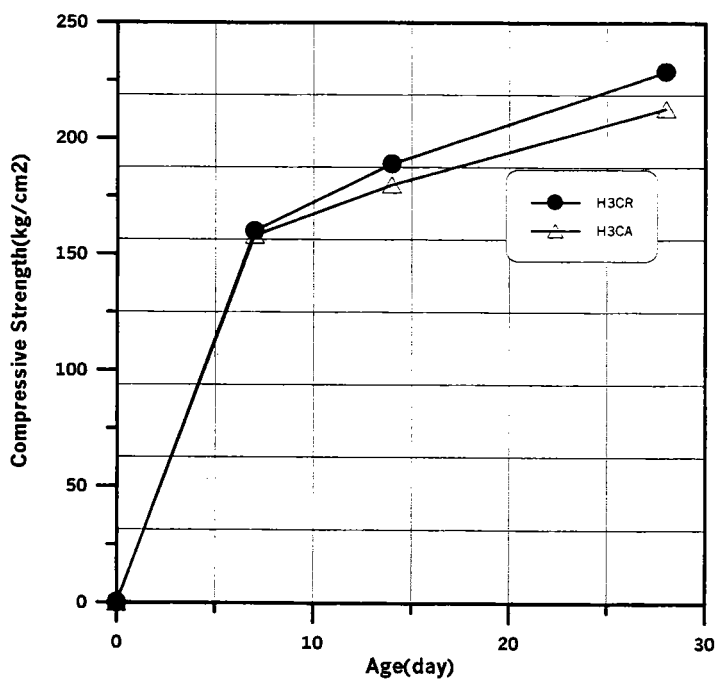


圖 4-4 HPC-3000psi 之強度發展

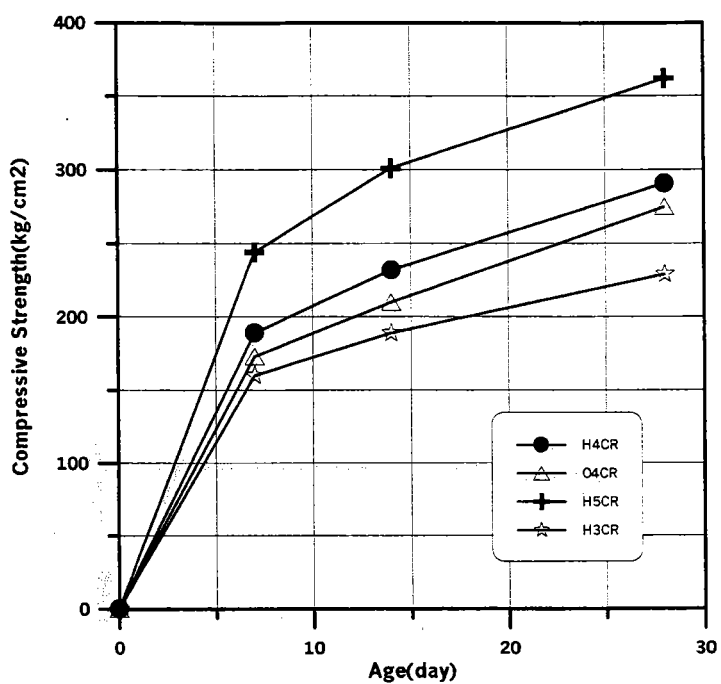


圖 4-5 在養生室內養護下各配比混凝土之強度發展

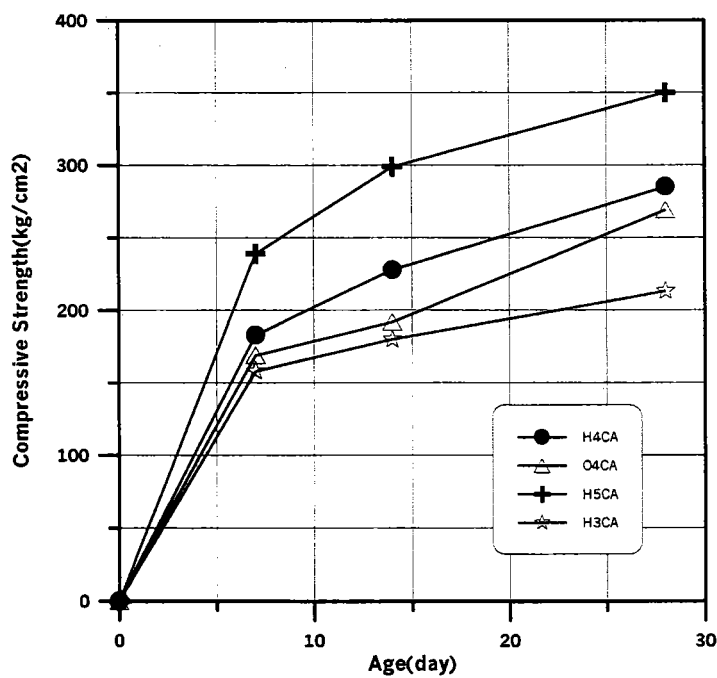


圖 4-6 在大氣工地養護下各配比混凝土之強度發展

4.在控制組 OPC 混凝土上，其強度略達不到要求的設計強度，分析原因可能是預拌車運至本所之時間稍長，已影響到混凝土之初凝時間而造成強度的折減，但是反觀 HPC 方面，一樣的路程其強度不因時間而有所影響，探究原因乃 HPC 有添加波索蘭材料及強塑劑，具有延長混凝土的凝結時間，這也說明了 HPC 的優點。

4-2-2 超音波速量測

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

本研究中混凝土的養護方式有二種；一為養生室養護，一為大氣下以濕麻布養治 14 天，我們發現在養生室內的試體，其波速比在大氣下的波速為快（如圖 4-7~4-10，與表 4-2 所示），分析原因為混凝土之養護和含水量的關係，因含水量高會增加脈波速度，且有充分養護之混凝土其內部也較緻密，脈波也會增加。另外，一般抗壓強度高的混凝土，其超音波速也會相對的提高，由初步測試資料（表 4-2，圖 4-11~圖 4-12 所示）顯示高性能混凝土的波速隨著齡期與抗壓強度而增高，推究為強度高的試體，其內部的孔隙及裂縫少，密度相對的增加，故波速也會增快。

4-2-3 電阻量測

混凝土電阻性質可做為混凝土品質的指標，電阻越大表示混凝土具阻止電子或離子在混凝土中移動之能力，一般電阻大於 $20\text{k}\Omega\text{-cm}$ ，則鋼筋皆不致發生腐蝕。

本研究之各配比電阻係數與齡期關係如表 4-2 與圖 4-13，4-14 所示，實驗結果可歸納成下列各點：

- 1.從表 3-2 之試體配比與表 4-2 電阻係數之數據，可發現低水膠比（W/B）比高水膠比有較大的電阻係數，推測為低的 W/B 其毛細孔體積較小及少，對於水即鹼鹽之滲透有阻隔之作用，

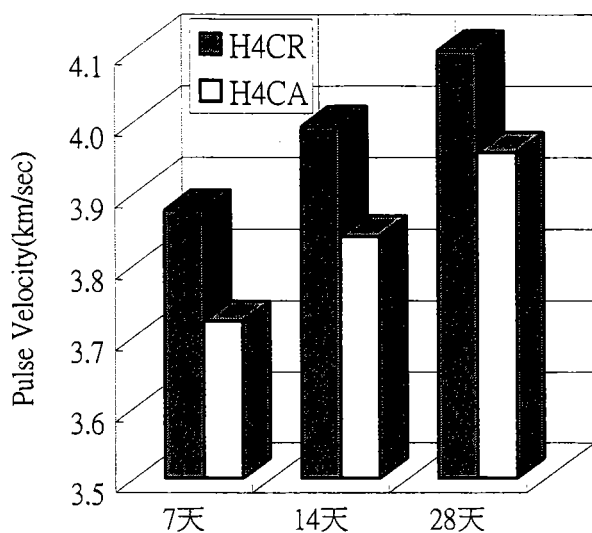


圖 4-7 HPC-4000psi 之超音波速

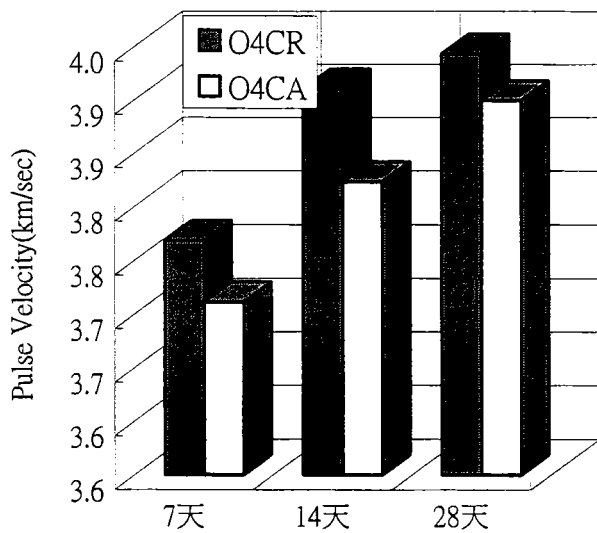


圖 4-8 OPC-4000psi 之超音波速

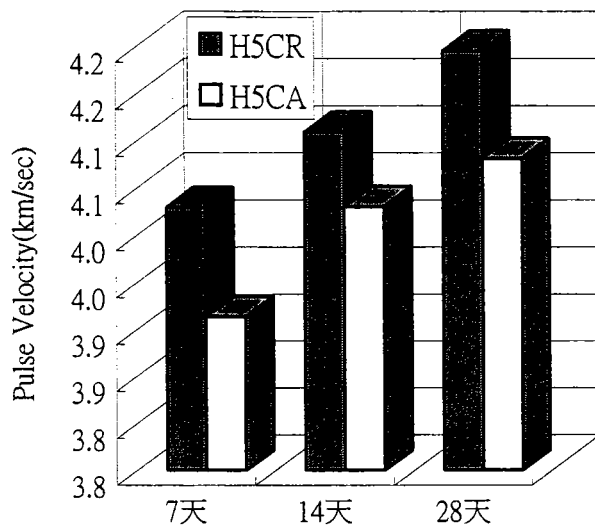


圖 4-9 HPC-5000psi 之超音波速

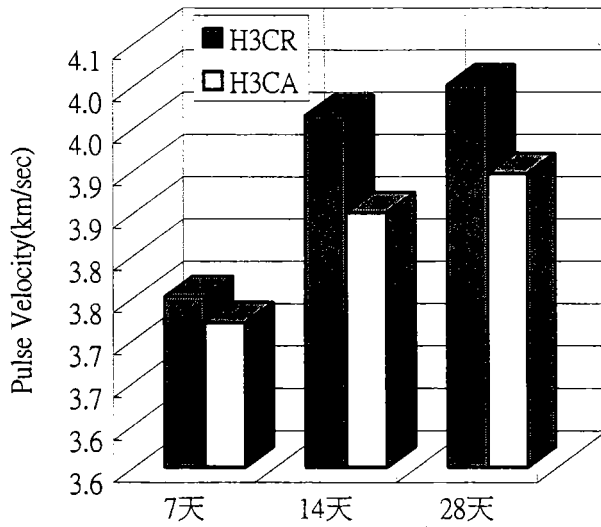


圖 4-10 HPC-3000psi 之超音波速

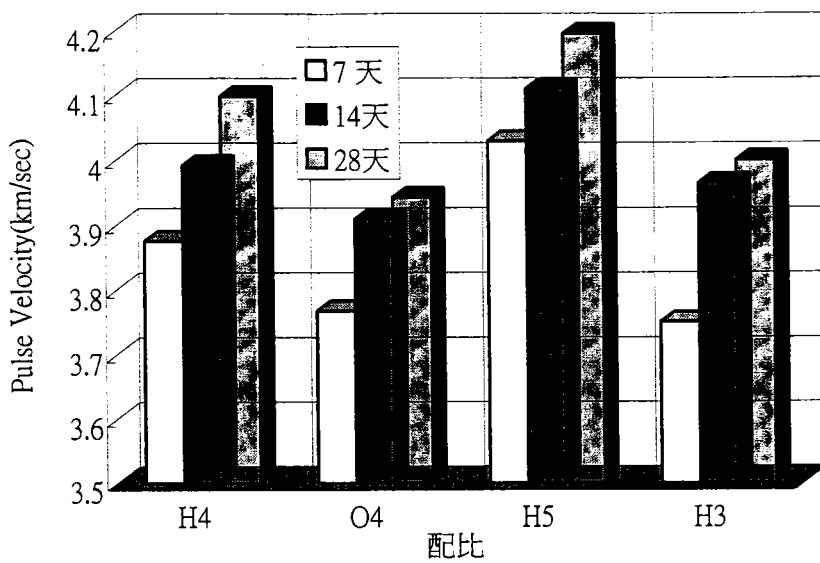


圖 4-11 養生室養護下各配比混凝土之超音波速發展

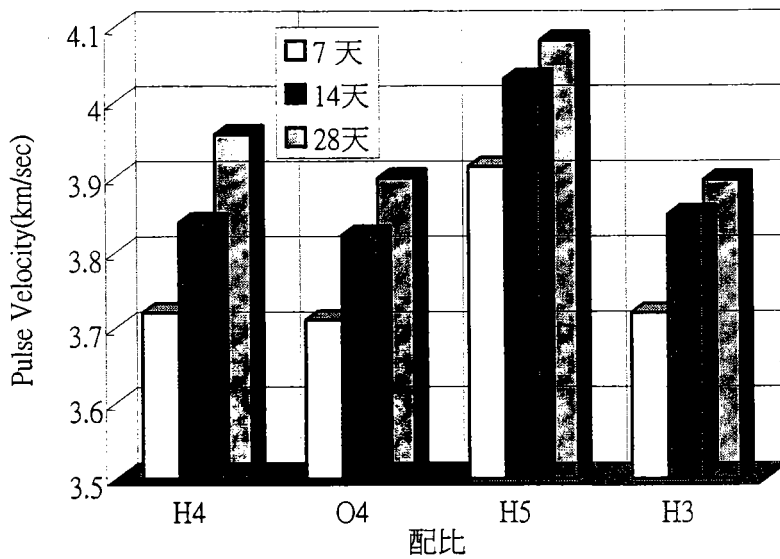


圖 4-12 工地養護下各配比混凝土之超音波速發展

表 4-2 各齡期混凝土的超音波速與電阻係數

配比	種類 養生 環境	超音波速 (km/sec)			電阻係數 (k Ω -cm)		
		7 天	14 天	28 天	7 天	14 天	28 天
H4	養生室	3.876	3.993	4.099	4.8	12.8	21.3
	大氣	3.721	3.840	3.957	5.8	13.2	20.5
O4	養生室	3.768	3.910	3.943	4.0	7.6	11.2
	大氣	3.711	3.823	3.899	4.2	7.5	10.9
H5	養生室	4.030	4.110	4.196	5.9	15.2	23.0
	大氣	3.914	4.031	4.082	6.2	16.3	22.2
H3	養生室	3.751	3.965	4.001	4.5	10.6	17.9
	大氣	3.720	3.850	3.896	5.5	10.3	17.3

不易讓腐蝕電流藉由離子的自由活動通過混凝土的孔隙，當然其腐蝕反應就較難進行，所以水膠比會影響到電阻的大小。

2. 由圖 4-13，4-14 可發現電阻係數隨著齡期的增長而增加，原因可能為混凝土內部之孔隙粒徑即孔隙率隨著水化生成物 C—S—H 膠體的成長與填塞作用而日漸減小，因而使的電導通路變長或受阻，使提高電阻係數。然而在控制組 OPC 方面，電阻係數隨著齡期增加而稍有增長，但並不是很大，顯示其內部組織較為鬆散孔隙可能較多。
3. 又由圖 4-13，4-14 得知各配比之高性能混凝土其電阻係數的成長比控制組 OPC 為高，推測原因為 HPC 有添加飛灰爐石等波

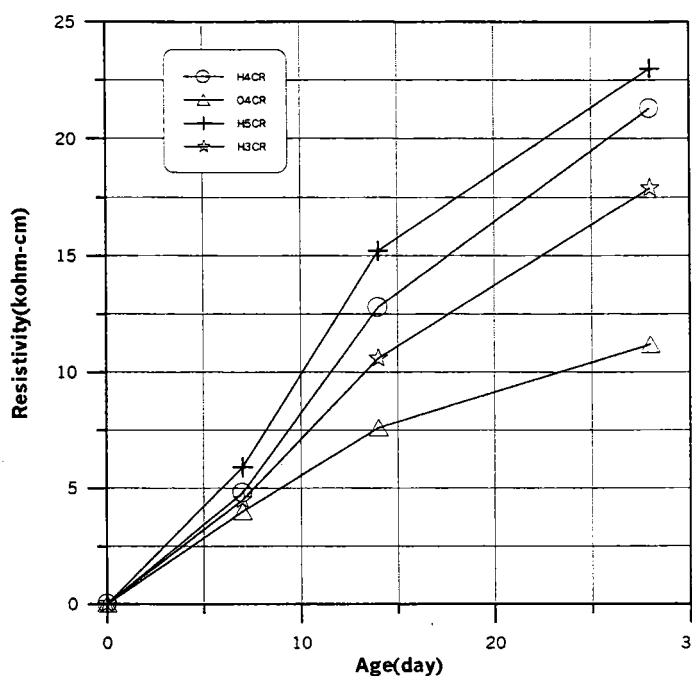


圖 4-13 養生室養護下各配比混凝土之電阻發展

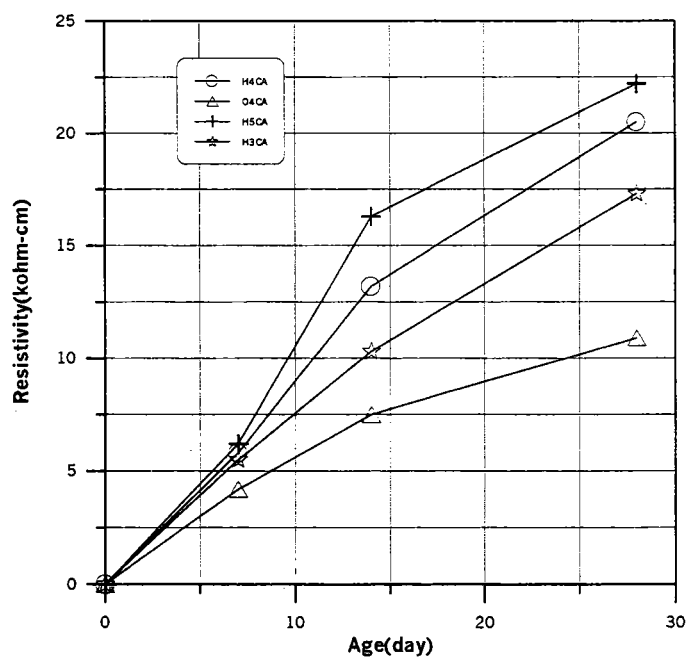


圖 4-14 大氣工地養護下各配比混凝土之電阻發展

索蘭材料，而波索蘭反應形成的 C-S-H 膠體可改變混凝土孔隙結構使其較為緻密，且能減少 OH^- 的含量，阻斷孔隙結構的連通性，增加對外來有害物質的抵抗能力，故可看出有添加波索蘭材料的混凝土其電阻阻抗和成長會比 OPC 大。

4-3 試驗牆試驗

4-3-1 腐蝕電位量測

利用前述之 Gecor6 Corrosion Rate Meter 量測出各牆之腐蝕電位如圖 4-15 所示，在前 28 天其腐蝕電位隨著齡期之增加而遞減，28 天後以海水作乾濕循環曝露之試體，腐蝕電位有增加之趨勢，未做海水乾濕循環之試體其腐蝕電位持續遞減。而在利用 AgCl 與 MnO_2 之電極量測之腐蝕電位如圖 4-16 所示，其腐蝕電位之成長趨勢也略同於 Gecor 6 所量測結果，此乃說明 28 天後海水作用之試體，其會影響到腐蝕電位，而在不同形式之電極其腐蝕電位也不同($\text{MnO}_2 > \text{AgCl} > \text{Gecor-CSE}$)。圖 4-17 乃 4000 Psi 之 HPC 與控制組 OPC 之腐蝕電位比較圖，兩者之成長趨勢略同，由於齡期只 56 天，其結果尚須長期觀察。

4-3-2 腐蝕電流量測

利用 Gecor 6 量測各牆之腐蝕電流如圖 4-18 所示，圖 4-19 乃 4000 Psi 之 HPC 與控制組 OPC 之腐蝕電流比較圖，其腐蝕電流都隨著齡期之增加而遞減。

4-3-3 電阻之量測

圖 4-20 為各配鋼筋混凝土試驗牆之電阻，從圖可發現電阻是隨齡期的成長而增加，而 28 天後以海水作乾濕循環之試體，其電阻有降低趨勢，後隨時間的增長電阻又開始恢復。圖 4-21 為 4000 Psi 之 HPC 與控制組 OPC 之電阻比較圖，從圖可看出 HPC 之電阻比 OPC 為大，推論為 HPC 有添加波索蘭材料，其電阻成長較純混凝土高，故可得電阻較大，此結果對鋼筋防蝕性能有正面之意義。

4-3-4 Anode Ladder System 之量測

本試驗之 Ladder System 在模擬不同混凝土保護層厚度下之鋼筋腐蝕情形，圖 4-22~圖 4-24 為各配比混凝土之電位、電流及電阻之比較關係圖，從圖可得知在 HPC 方面，離混凝土表面 3 公分內之保護電位，電流有降低之趨勢，而在 3cm 以上時，則明顯有上昇的情形，在控組 OPC 混凝土上，則發現其電位及電流在離混凝土表面之 1~6cm 有明顯的趨於一致，這是否說明一般混凝土在保護鋼筋之腐蝕上較為不利，而 HPC 的保護效能較好。在電阻方面，可看出離混凝土表面愈遠的 Ladder System，其電阻發展愈大。由於 Ladder System 尚在評估階段，是否能應用在新建工程之結構體內，則須繼續觀察。

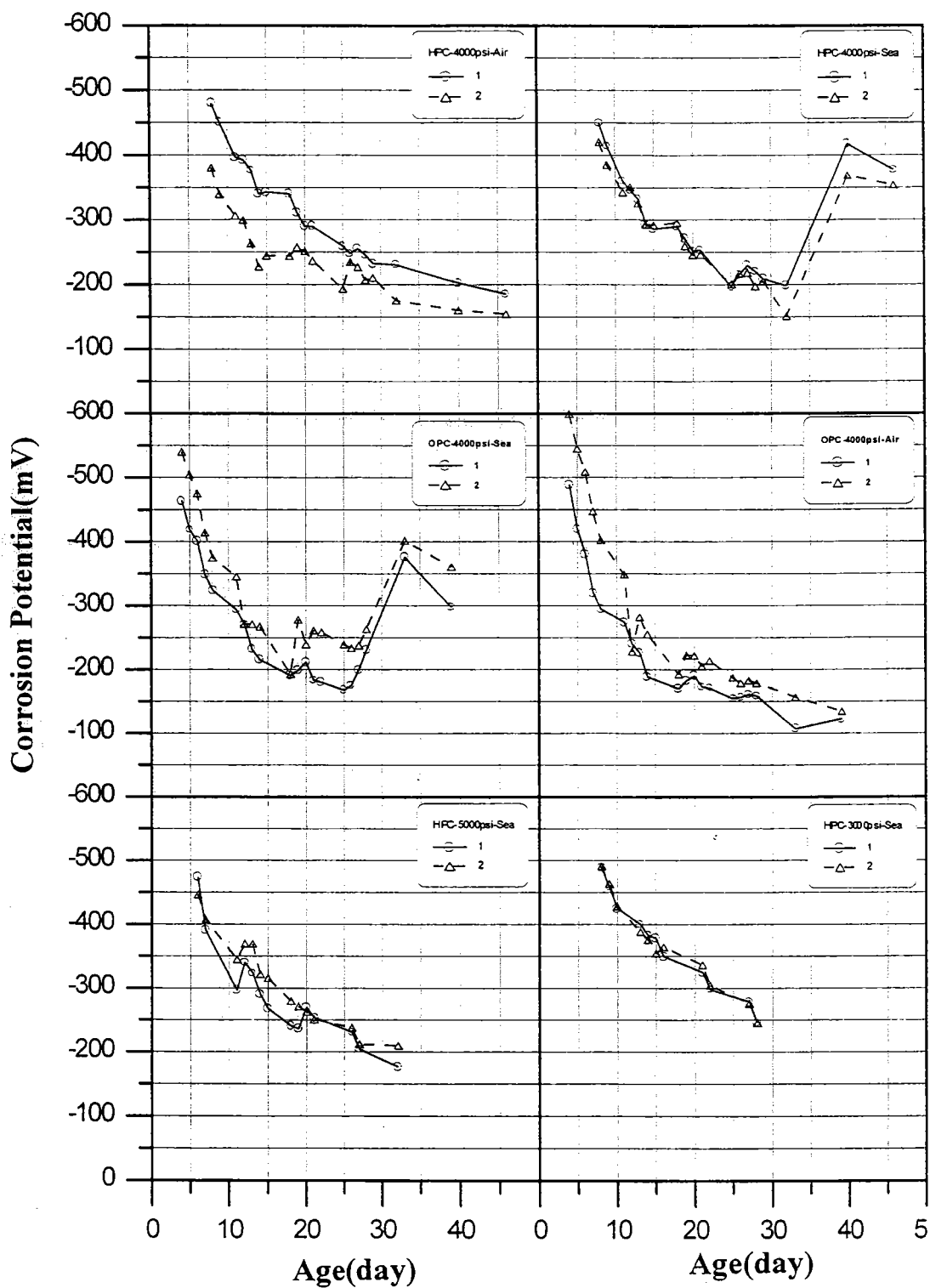


圖 4-15 各配比鋼筋混凝土試驗牆之腐蝕電位

Corrosion Potential(mV)

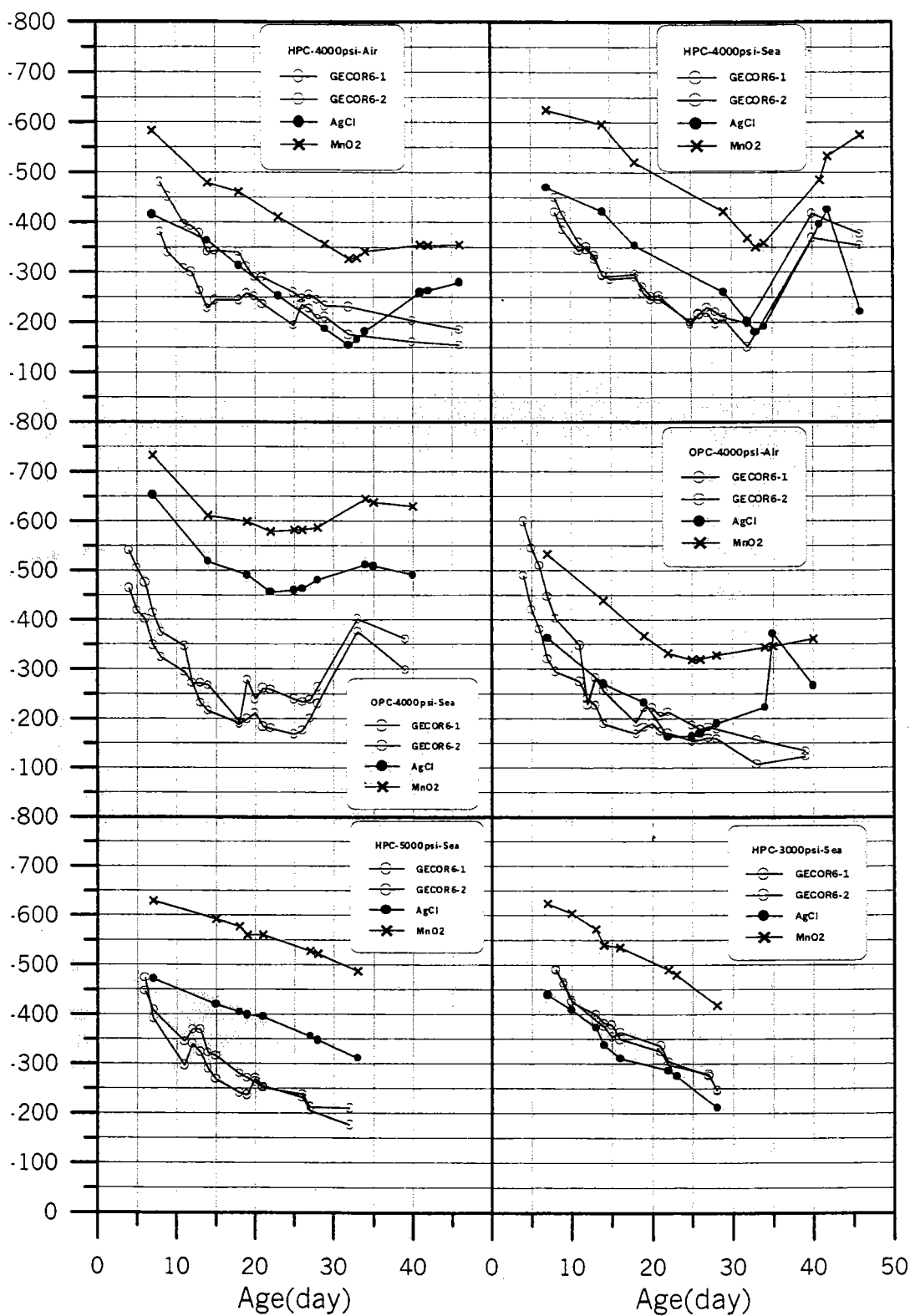


圖 4-16 各配比混凝土以 GECOR6 -CSE、AgCl 及 MnO₂ 電極量測試驗牆之電位比較圖

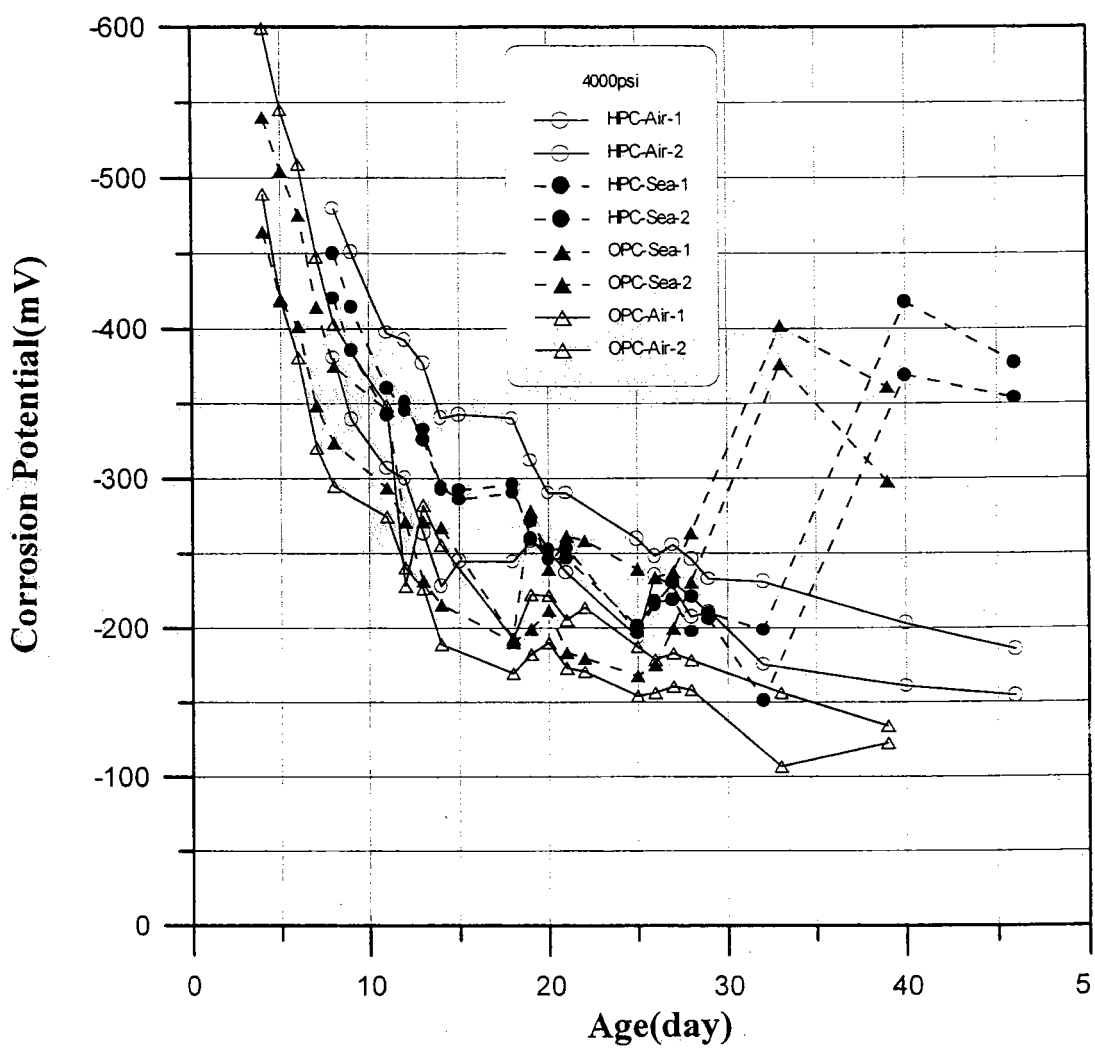


圖 4-17 HPC 和 OPC-4000psi 在大氣與海水曝露環境下腐蝕電位之比較圖

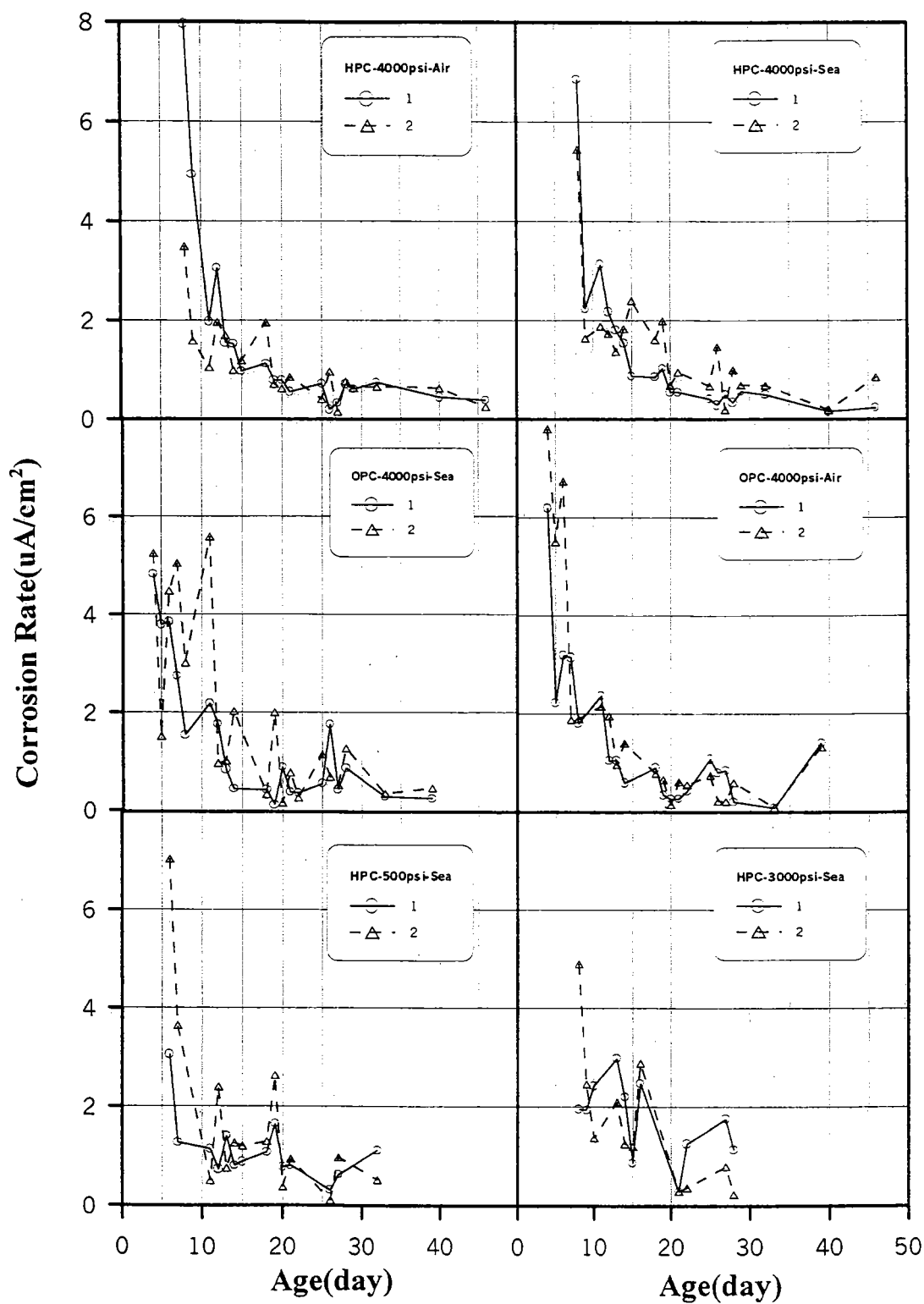


圖 4-18 各配比試驗牆之鋼筋腐蝕電流

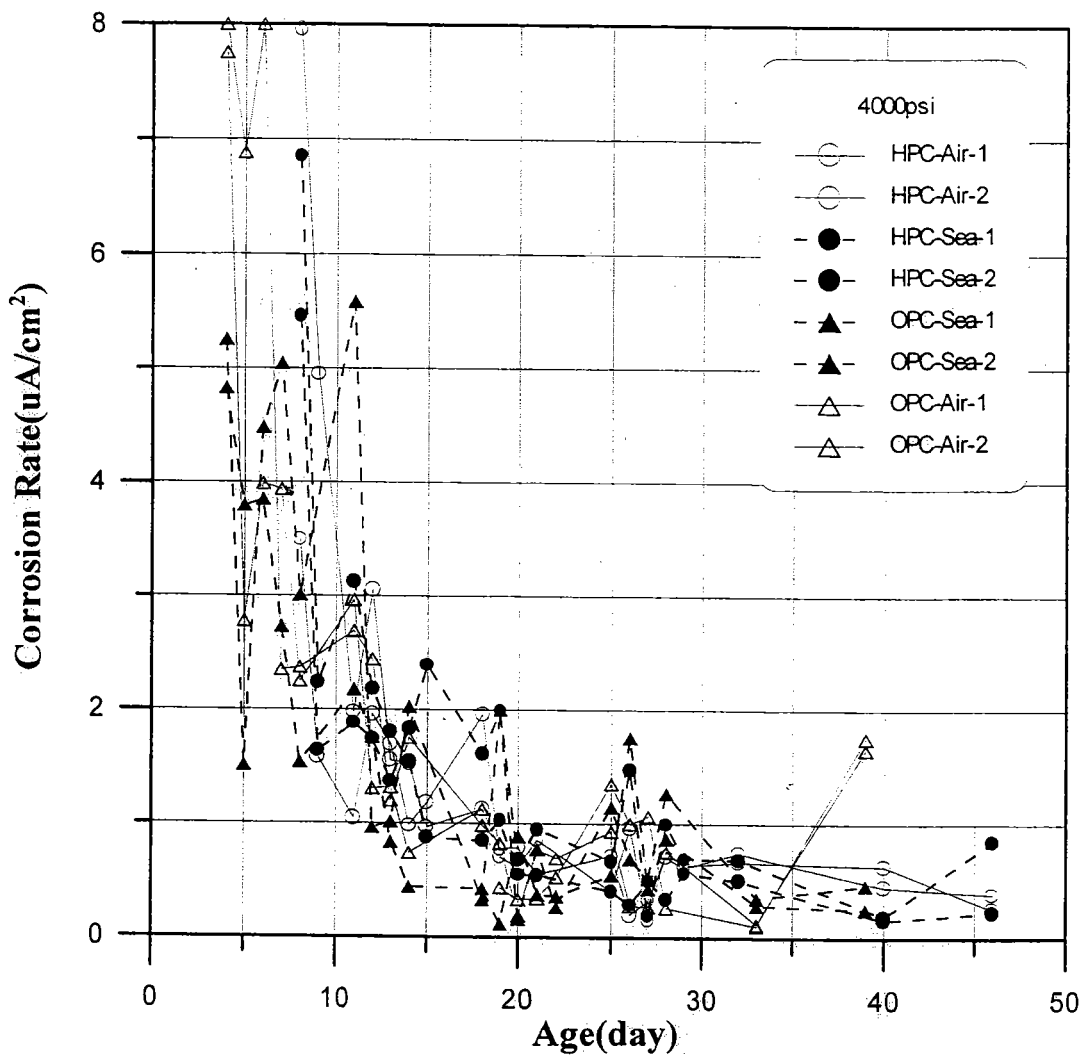


圖 4-19 HPC 和 OPC-4000psi 在大氣與海水曝露環境下腐蝕電流之比較圖

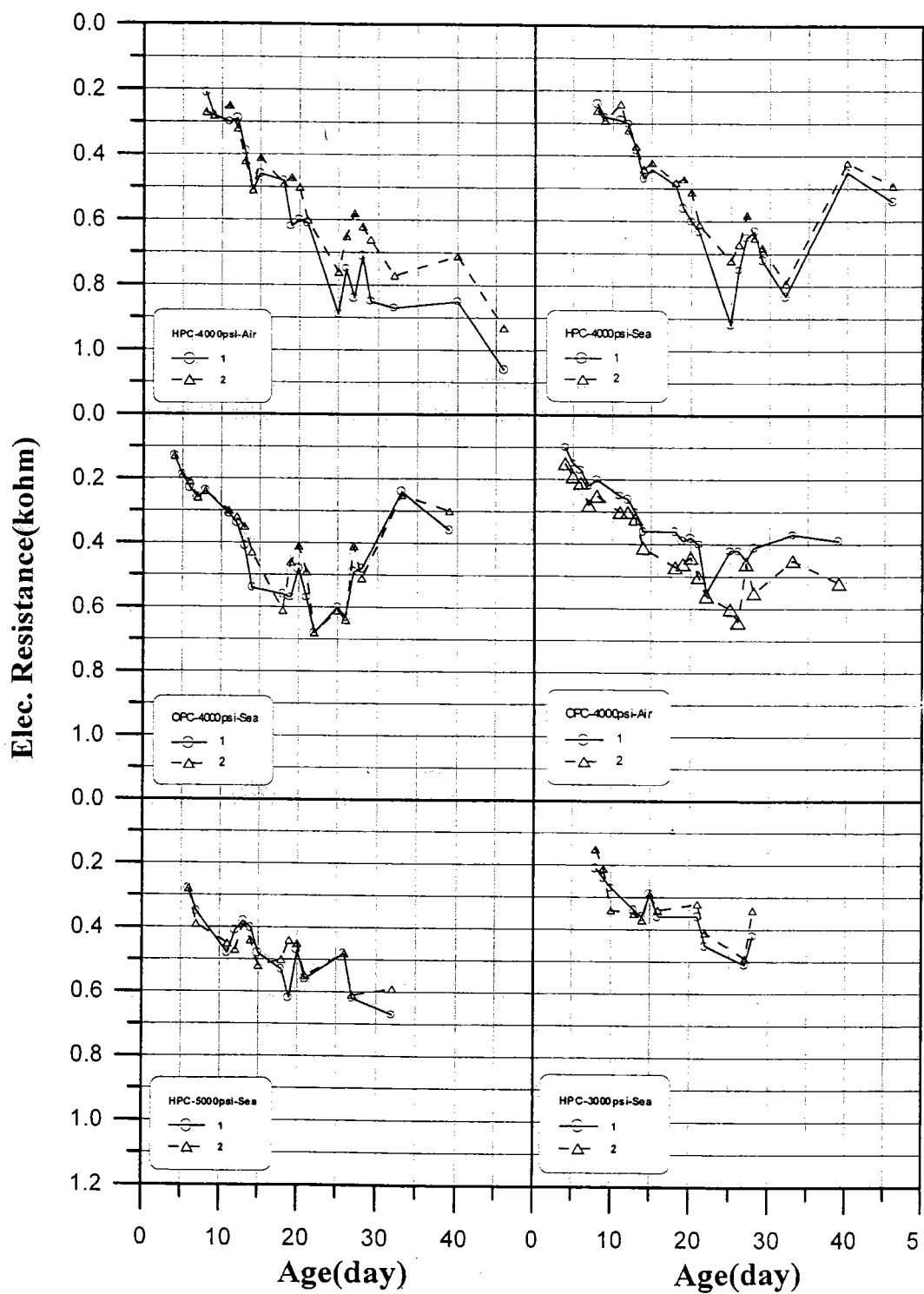


圖 4-20 各配比鋼筋混凝土試驗牆之電阻

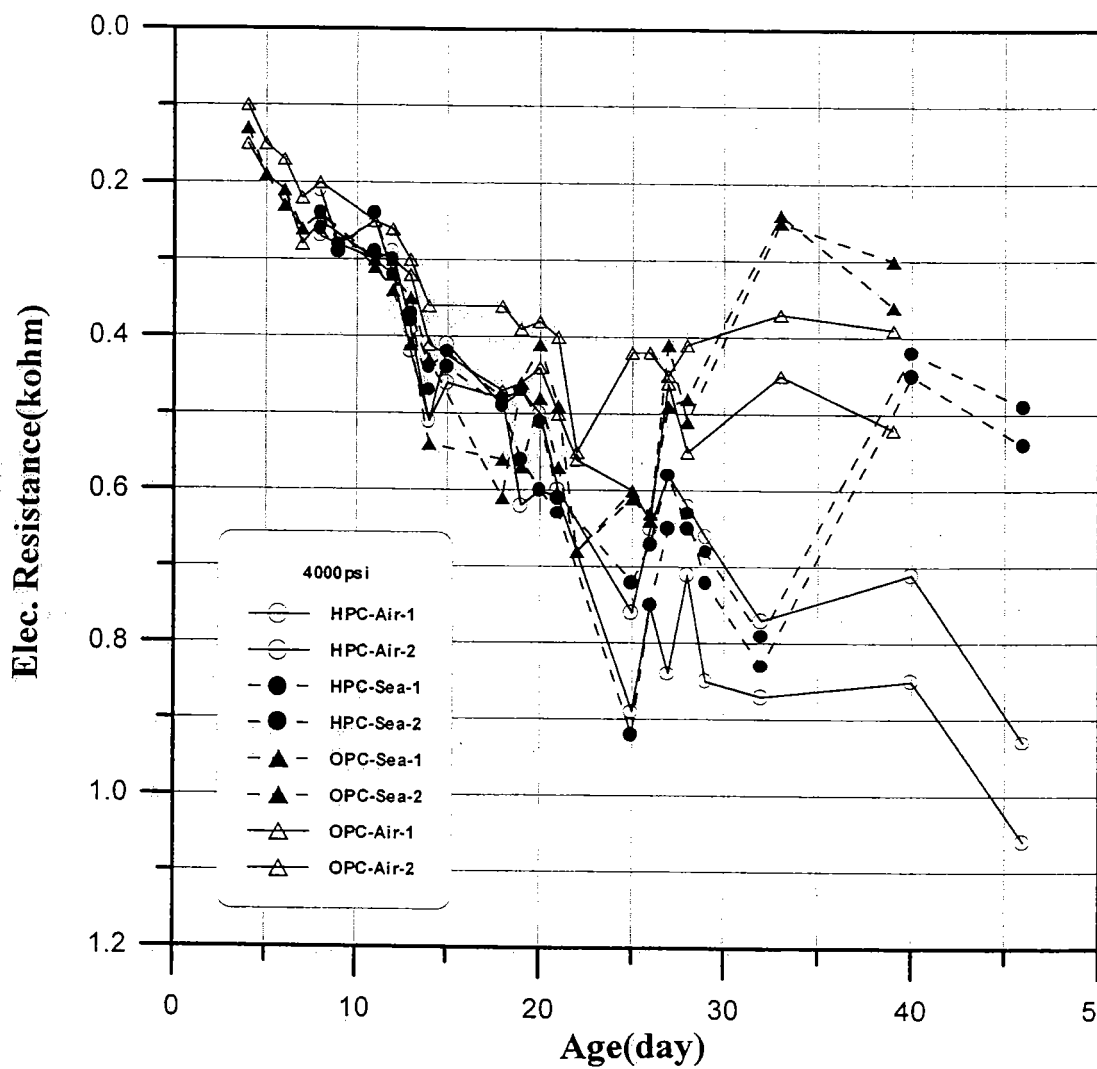


圖 4-21 HPC 和 OPC-4000psi 在大氣與海水曝露環境下電阻之比較圖

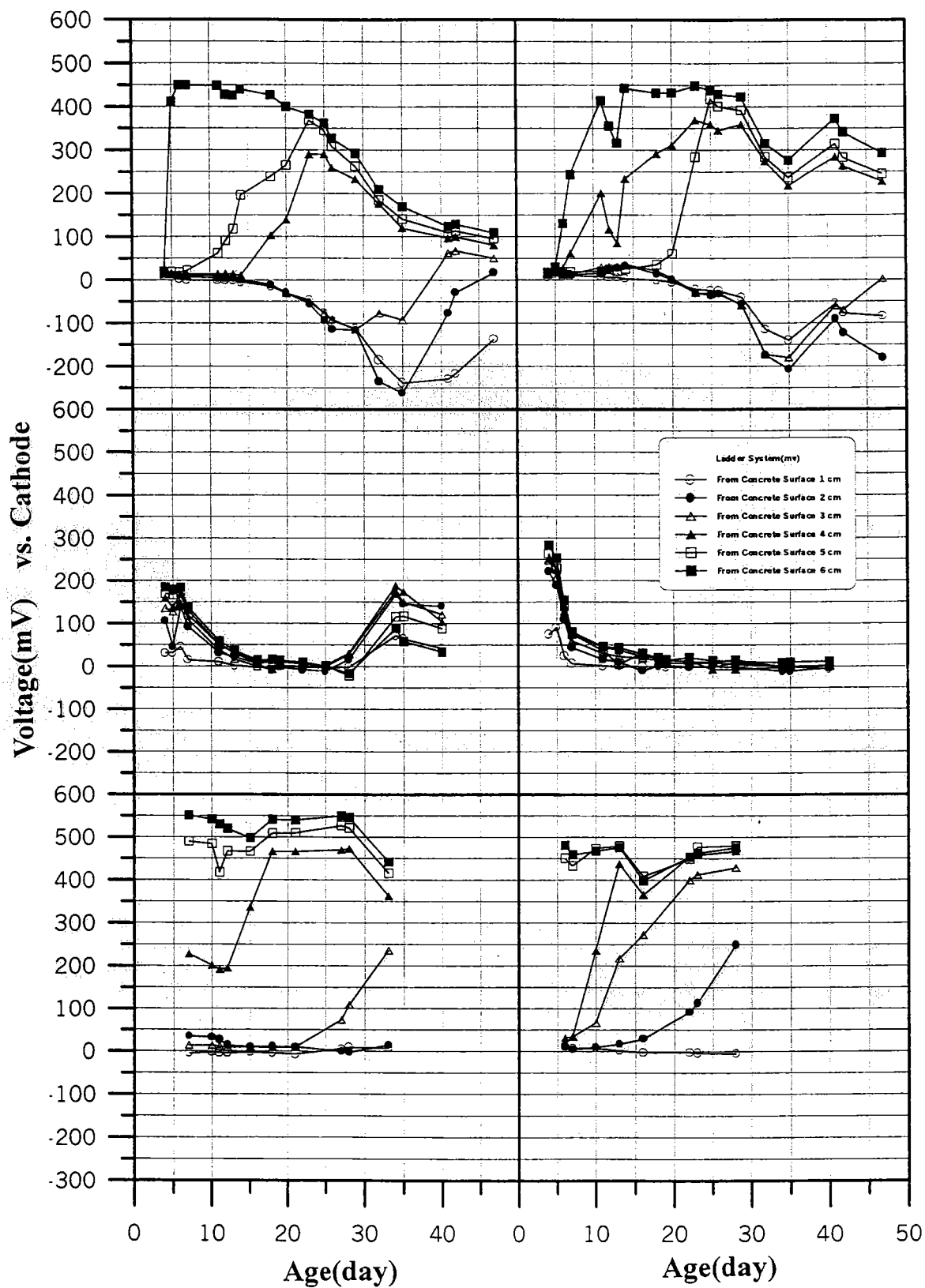


圖 4-22 Ladder System 量測各配比混凝土之電位關係圖

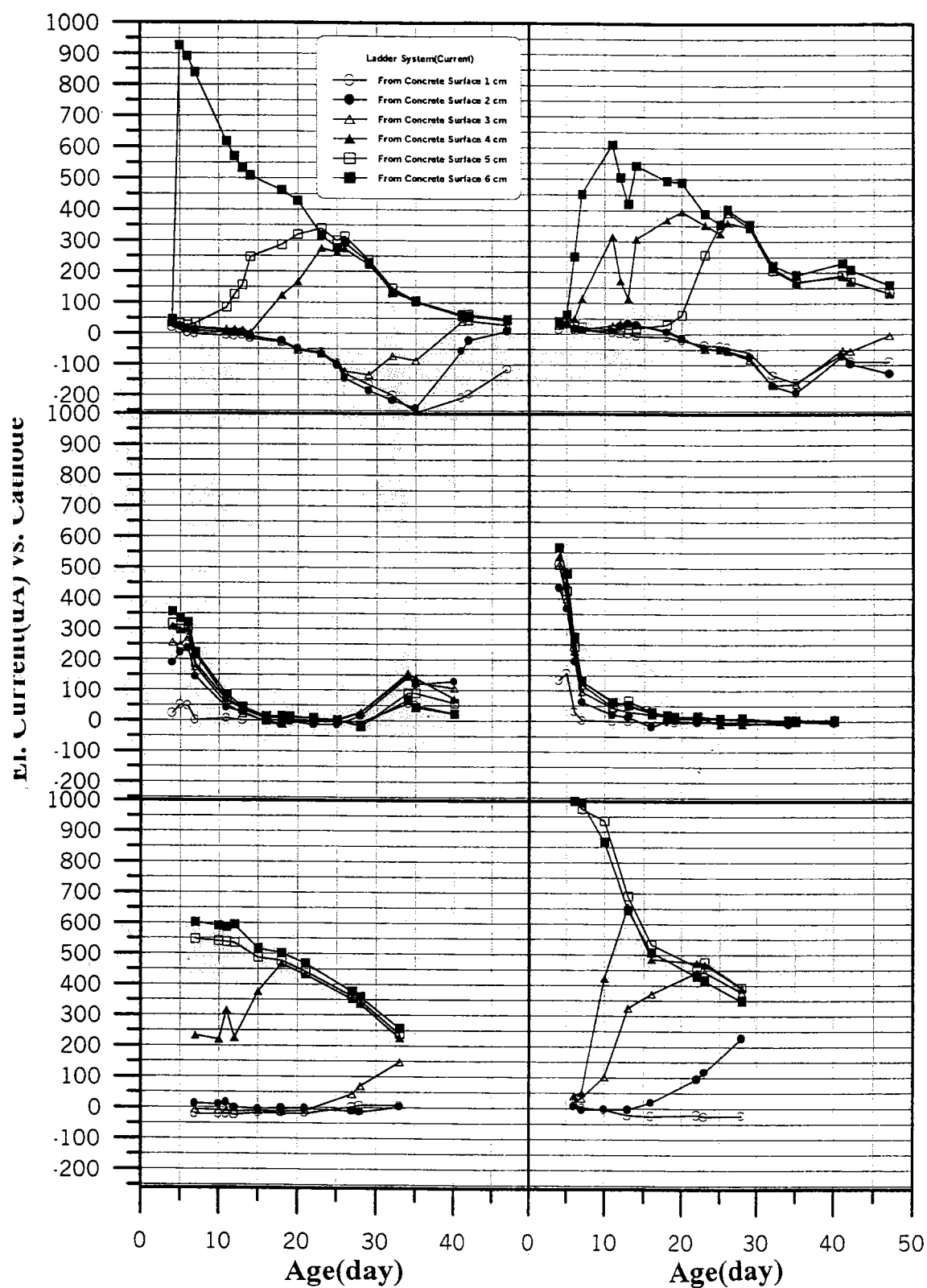


圖 4-23 Ladder System 量測各配比混凝土之電流關係圖

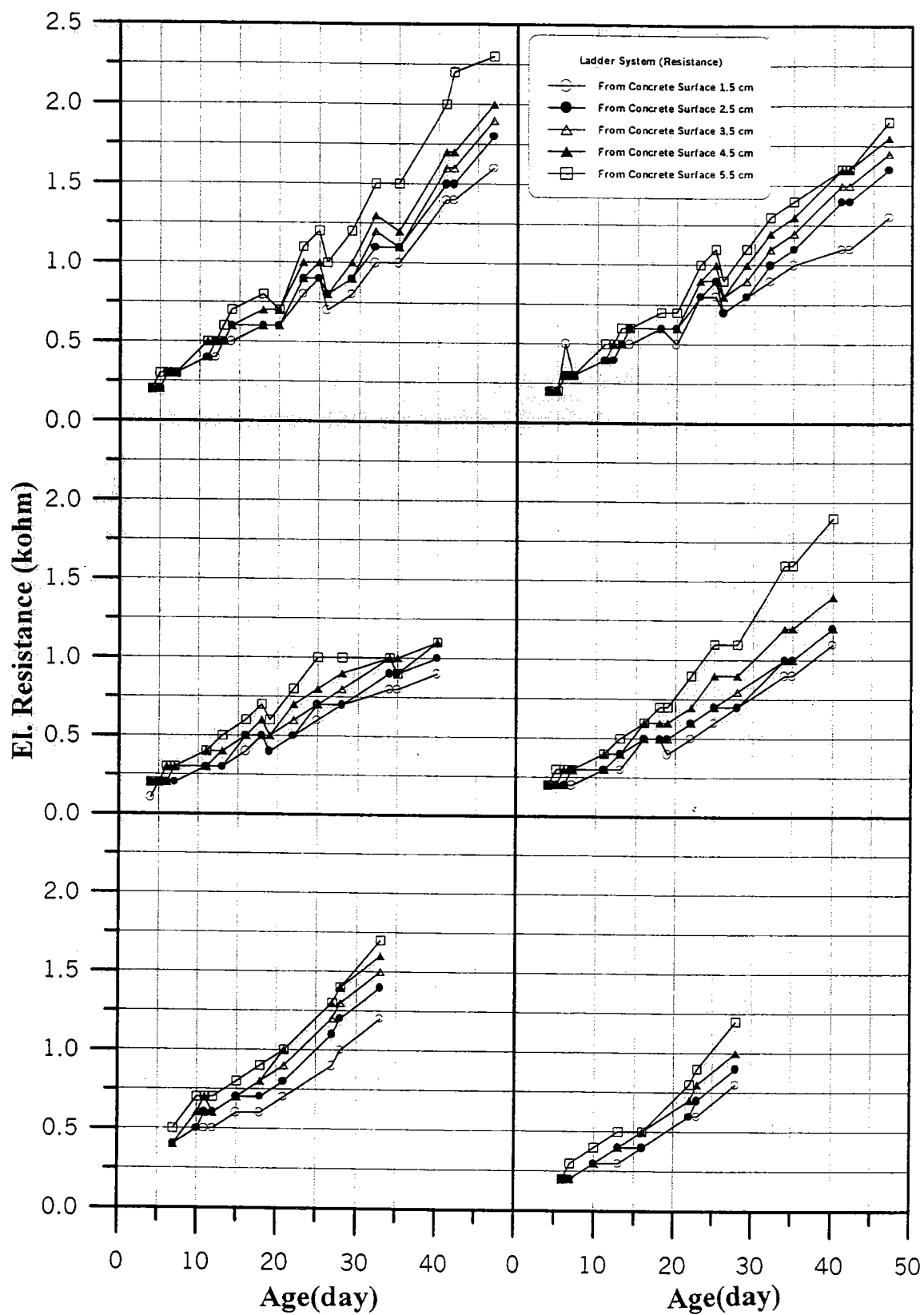


圖 4-24 Ladder System 量測各配比混凝土之電阻關係圖

第五章 結論與建議

- 1.本研究製作之高性能混凝土其工作性非常良好，在坍度(大於 26 cm)及坍流度(大於 50 cm)均能符合一般 HPC 之要求，同時澆置時也無須搗實與振動，若能應用在港灣工程上將可提高工程品質。
- 2.高性能凝土在養生室內養護的試體其抗壓強度比在大氣下以濕麻布濕治的試體略高，但是不很明顯，這也說明了 HPC 在拆模後，只要適當的養護應該可達到設計之強度。
- 3.一般抗壓強度高的混凝土，其超音波速也會相對的提高，由初步測試資料顯示高性能混凝土的波速隨著齡期與抗壓強度而增高。
- 4.在圓柱試體之電阻係數量測方面，研究結果顯示 HPC 之低水膠比(W/B)比高水膠比有較大的電阻係數，且電阻係數隨著齡期的增長而增加。然而在控制組 OPC 其電阻係數比各配比之 HPC 為低，此乃說明了使用高性能混凝土對降低鋼筋腐蝕之效能比一般混凝土有較正面意義。
- 5.本研究以鋼筋腐蝕測儀量測之腐蝕電位及電流均隨齡期之增加而遞減，而在 28 天後以海水作乾濕循環體，腐蝕電位有增加趨勢。在電阻量測方面，可發現電阻是隨齡期的成長而增加，且 HPC 之電阻比 OPC 為高。
- 6.在 Anode Ladder System 之量測結果顯示，HPC 在保護鋼筋被腐蝕有較好的效能。由於本系統尚在評估階段，是否能應用於新建工程，則須繼續觀察。
- 7.耐久性之探討是本研究之重點，因目前齡期僅 56 天，並不能以此評估耐久性之指標，其長期性能有待繼續觀測。

第六章 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，P2, 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. 沈政南，「化學摻料對普通混凝土耐火性能影響之研究」，國立台灣工業技術學院碩士論文，（1994）。
6. Continental Engineering Corporation，"Final Report on Concrete Quality YUAN SHAN Bridge"，（1979）。
7. T.Soshiroda, "Segregation Characteristics of Concrete Containing a High Range Water-Reducing Admixture"，Superplasticizers in Concrete, P121-138,（1979）。
8. V.M.Malhotra and Malanka, "Performance of Superplasticizers in Concrete"，Superplasticizers in Concrete. PP209~243,（1979）
9. Mindess,S.and J.F.,Young, "Concrete",Prentice Hall,Englewood Cliffs,N.J.,（1981）。
10. V.M.Malhotra，"Superplasticizers：Their effect on Fresh and Hardened Concrete"，Concrete International（1985,5）。
11. 黃兆龍，「混凝土添加強塑劑之效能研究」，台灣營建研究中心，民國 75 年 8 月。

12. Ravindra K. and Dhir and Andrew W.f.Yap. "Superplasticized Flowing Concrete : Strength and Deformation Properties" , Magazine of Concrete Research, vol.36 No.129, Dec. (1984) .
13. ASTM, "1984 Annual Book of ASTM Standard" , Vol.04.01~04.24.1984.
14. 林柄炎,「飛灰矽灰高爐石用在混凝土中」, (1993)。
15. 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)。
16. 沈得縣、黃兆龍,「高爐熟料與飛灰之波索蘭反應機理及對水泥漿體巨微觀性質影響之研究」, 國立台灣工業技術學院博士論文, (1991)。
17. 林柄炎,「矽灰對耐火混凝土的物理性和化學成分的影響」, 現代營建 112 期, (1989)。
18. Metha,P.K., "Concrete Strucure, Properties and Materials" , Prentice-Hall, (1993) .
19. 松下博通,「高爐水泥混凝土之應用」, 混凝土技術研討會, (1993)。
20. R.D.Hooton, "Influence of Sillica Fume Replacement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack , Freezing and Thawing , and Alkali-silica Reactivity" , ACI Materials Journal March-April, 143-151 , (1993) .
21. Hwang, C.L.and C.YLin, "Strength Development of Blended Blast-Furnace Slag-Cement Mortars" , Journal of the Chinese Institute of Engineers , Vol.9, No.3 , Taiwan, 233-239, (1986) .
22. 陳桂清,「電化學技術應用於鹽害 R.C 結構物之去鹽成效與鋼筋腐蝕行為研究」(1999)。

23. A.Bentur,S.Diamond and N.S.Berke, "Steel Corrosion in Concrete" ,E&FN SPON ,London,1st.ed., (1997) .
24. N.B.Berke ,et.al, "Corrosion of steel in Cracked Concrete" ,Corrosion Engineering , Vol.49, No.11,PP.934~943,Nov. (1993) .
25. M.N.Haque and O.A.Kayyali, " Free and Water Soluble Chloride in Concrete " , Cement and Concrete Research, Vol.25, No.25, PP.531-542, (1995) .
26. Mehta,p.k., " Concrete-Structure, Properties and Materials " , PP.151~154, Prentice-Hall, Inc.N.J. (1986) .
27. 陳建成、黃兆龍,「海洋混凝土構造物耐久性之考量」,海洋工程品質與施工技術研討會論文集,港灣技術研究所,民國84年4月。
28. Anik Delagrave, Michel Pigeon , Jacques Marchand and Eliane Revertgat, " Influence of Chloride Ions and pH Level on the Durability of High Performance Cement Pastes (Part II), " Cement and Concrete Research , Vol.26, No.5 , PP.749-760, (1996) .
29. J.P.Broomfield "Corrosion of Steel in Concrete" , E&FN SPON,London ,1st.ed., (1997) .
30. Taylor Woodrow Research Laboratories , "Concrete in the Oceans-Marine Durability Survey of Tonqul Sands Tower" , Tech. Report No.5 CIRIA/LEG Cement and Concrete Association, Department of Energy London, (1980) .
31. The Concrete Society, "Permeability of Concrete and Its Control " , Technical Report, PP.56., (1985) .
32. 黃兆龍、湛淵源,「高性能混凝土的電阻與電滲設計及分析」,高性能鋼筋混凝土防蝕策略研討會論文輯, P21~31, 民國88年4月。

33. 林維明、陳桂清、饒正、吳信昇、柯正龍、黃永光，「高爐水泥對港灣混凝土結構物耐久性及抑制鋼筋腐蝕效應研討計劃」，P21-22, 民國 80 年 3 月。
34. Buenfeld, N.R., J.B. Newman and C.L. Page, "The Resistivity of Mortar Immersed in Sea-Water", Cement and Concrete Research, Vol.16, PP.511-524 (1986).
35. Brain B. Hope and K.C. Ip. Alan, "Corrosion of Steel in Concrete Made with Slag Cement", ACI Materials Journal, PP.525-530 (1987).
36. Cavalier, P.G. and P.R. Vassie, "Investigation and Repair of Reinforcement Corrosion in a Bridge Deck", Proc. Inst. of Civil Engineers, Vol.70, Part I, PP.460-480 (1981).
37. 邱英嘉，(黃兆龍，張大鵬指導)，「鋼筋混凝土性質影響腐蝕行為之研究」，碩士論文，國立臺灣工業技術學院營建工程技術研究所，(1992)。
38. Gjfriv O.E., Vennesland, f, and El-Busaidy, A.H.S., "Electrical Resistivity of Concrete in the Ocean", Offshore Technology Conference, (1977).
39. Langford, P. and Broomfield, J. "Monitoring the Corrosion of reinforcing steel", Construction Repair. NO.2, PP.33-36, (1987).
40. 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。
41. 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。
42. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete

- and Commentary, (ACI 318-95/ACI 418R-95) American Concrete Institute, Farmington Hills (1995).
43. Malhotra, V.M., editor, "High-performance Concrete", American Concrete Institute, Special Publication Sp-149, 884P (1994).
 44. 林維明、饒正、張道光,「新建工程之品質提昇研究」, P9-10, 民國 86 年 6 月。
 45. Grandet, J. "Durability of High Performance Concrete in Relation to External Chemical Attack" in High Performance Concrete, Ed. Yves Malier, Pub. E & FN Spon, London, PP25-30.
 46. Malier, Y. "Introduction", *ibid*, PP1-12.
 47. CEB-FIP, "Application of High Performance Concrete", CEB-FIP Bulletin Information #222, PP53-60, Nov. (1994).
 48. Haug A.K. "Concrete Technology, the key to Current Concrete Platform Concepts" ACI-SP-149 PP63-60.
 49. Monksnes J., "Oil and Gas Concrete Platform in the North Sea-Reflection on two Decades of Experience", in Proc. Of International Experience with Durability of Concrete in Marine Environment, University of California, Berkeley, California, (1989).
 50. J.H. Bungey and S.G. Millard, "Testing of Concrete in Structures", 3rd.ed., Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, (1996).
 51. ASTM C876-91, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete".
 52. Miguel A. Climent-Liorca, Estanislao Vigueira-Perez and M. Mar

Lopez-Atalaya, "Embeddable Ag/AgCl Sensors For In-Situ Monitoring Chloride Contents in Concrete", Cement and Concrete Research, V01.26,NO.8,PP1157-1161,(1996).

53. 王和源,「飛灰增進混凝土耐久性之研究」,公共工程橋樑問題暨防蝕對策研討會論文輯 p73,民國 87 年 5 月。
54. 吳長信,「含爐石粉高性能混凝土之配比技術與性質量測」,國立台灣工業技術學院碩士論文,(1997)。
55. 黃兆龍「高性能混凝土之優生設計法」,高性能混凝土研發及推廣研討會論文輯 p91~121,台北,(1997)。
56. 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)」,(1998)。