

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究計劃

委託單位：中國鋼鐵股份有限公司

研究單位：台灣省交通處港灣技術研究所

計劃主持人：陳桂清（民國81.1.1～84.8.31）

副研究員

林維明（民國79.1.1～80.12.31）

研究員

協同主持人：柯正龍（民國81.1.1～84.8.31）

助理研究員

陳桂清（民國79.1.1～80.12.31）

副研究員

研究人員：

饒正、黃永光、吳信昇、李國綱

徐如娟、陳正義、何木火、林隆貞

顏素雯、李昭明、王培源

執行期間：民國79年1月1日至民國84年8月31日

報告日期：民國84年8月31日

目 錄

摘要	II
致謝	III
表目錄	IV
圖目錄	VI
第一章 緒論	1
第二章 文獻回顧	4
第三章 研究規劃及試驗項目	44
第四章 試驗結果與分析	64
第五章 結論與建議	116
第六章 參考文獻	118

摘 要

鋼筋混凝土在常態環境下爲一極具耐久性之材料，但浸漬於海洋惡劣環境下，則其耐久性堪慮。鑑於許多國外研究報告指出，高爐石粉添加於普通混凝土內具有優越之抵抗硫酸鹽（海水）侵蝕之效應，並且又可改善混凝土之品質。因此，爲瞭解海域地區使用混凝土材料之耐久性以及探討鋼筋混凝土結構物劣化之原因，必須進行各項試驗及長期性之曝露試驗。

本研究係以不同之爐石比例添加於混凝土中量測其抗壓強度、透水係數、彈性模數及凝結時間等基本材料性質及利用天然海水乾濕循環加速試驗後進行抗壓強度、透水係數、彈性模數、鋼筋腐蝕電位、氯離子滲透及硫酸鹽含量等各項試驗，並在本所海水循環水槽潮汐帶置放試體，進行長期曝露試驗。

歷經五年的試驗分析，明顯發現添加適量之高爐石於混凝土中，可改善混凝土的品質，諸如增加晚期抗壓強度，有效降低混凝土的透水率（降低孔隙率），致使鋼筋混凝土不易遭受海水侵蝕，提高R.C.結構物耐久性。

致 謝

本研究承蒙中鋼公司贊助研究經費始得完成，特此誌謝。研究期間曾蒙中鋼公司趙清先生、楊貫一先生、國立台灣大學陳振川教授、中央大學李釗教授提供不少寶貴資料，同時行峰公司賴本源先生提供高爐石粉，特藉此致十二萬分之謝意。

表 目 錄

表2-1	常用骨材岩石之抗壓強度·····	7
表2-2	JIS R5211高爐水泥抗壓強度規範·····	10
表2-3	水泥及水泥砂漿透水率比較·····	23
表2-4	高爐水泥混凝土之凝結時間·····	24
表2-5	依ASTM C452 方法之硫酸鹽膨脹試驗·····	30
表2-6	依Koch與Steinegger方法之硫酸鹽膨脹試驗（強度比）·····	30
表2-7	依Mehta方法之硫酸試驗（強度比）·····	31
表2-8	水泥砂漿試驗在硫酸鹽溶液與依據ASTM C452 規範試驗之膨脹量·····	31
表2-9	北海爐石混凝土損害調查·····	35
表2-10	相對於銅／硫酸銅半電池之電位值·····	36
表2-11	不同材質下鋼筋之腐蝕速率·····	37
表2-12	使用普通卜特蘭水泥與高爐石水泥製作之水泥砂漿在不同之硬化下鈉、鉀及氯離子之擴散係數·····	38
表2-13	棧橋混凝土橋面板之氯離子含量與保護層厚度之關係·····	41
表3-1	高爐石粉及水泥熟料之化學組成與物理性質·····	47
表3-2	粗骨材篩分析結果·····	47
表3-3	細骨材篩分析結果·····	48
表3-4	骨材物理性質分結果·····	48
表3-5	試驗所需之試體種類及數量·····	49
表3-6	各項試驗項目及其規範·····	50
表3-7	100T萬能試驗機之試驗荷重速率表(ASTM)·····	58
表3-8	鋼筋腐蝕電位值與腐蝕機率關係·····	62
表4-1	爐石混凝土之透水試驗結果·····	67
表4-2	爐石混凝土抗壓強度試驗結果·····	67
表4-3	爐石混凝土彈性模數與柏松比·····	68
表4-4	爐石混凝土凝結時間及貫入壓力結果·····	69

表4-5	爐石混凝土初凝、終凝時間試驗結果·····	70
表4-6	爐石混凝土初凝、初凝之相對時間關係·····	70
表4-7	水灰比0.5含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值(-mV)·····	71
表4-8	水灰比0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值(-mV)·····	72
表4-9	爐石混凝土經12次循環週期後其化學成份分析結果·····	73
表4-10	爐石混凝土抗壓強度、彈性模數與柏松比（經12次乾濕循環週期）·····	73
表4-11	爐石混凝土長期曝放於海水後之透水係數·····	86
表4-12	爐石混凝土長期曝放於海水後其抗壓強度、彈性模數與柏松比之分析結果·····	87
表4-13	爐石混凝土長期曝放於海水後其試體內鋼筋之腐蝕電位變化(-mV)·····	88
表4-14	水灰比0.5爐石混凝土長期曝放於海水後其化學含量分析結果	89
表4-15	水灰比0.7爐石混凝土長期曝放於海水後其化學含量分析結果	90

圖 目 錄

圖1-1	研究流程與試驗方法	3
圖2-1	影響混凝土強度因素	5
圖2-2	優良級配示意圖	7
圖2-3	浮水產生狀況	7
圖2-4	混凝土破壞時裂縫延伸路徑與骨材最大粒徑之關係	8
圖2-5	試體直徑對混凝土強度之影響性	10
圖2-6	試體高度直徑比與混凝土強度之影響性	11
圖2-7	典型含50%爐石混凝土相對於普通卜特蘭水泥混凝土之壓力強度發展關係	11
圖2-8	養護狀況23℃，RH100%下，各種混凝土強度發展情形	12
圖2-9	含不同比例爐石混凝土之壓力強度發展關係	13
圖2-10	水與膠結材料比對含爐石混凝土之強度影響	13
圖2-11	爐石含量與爐石水泥漿強度之關係	14
圖2-12	典型混凝土應力－應變圖	17
圖2-13	骨材含量對彈性模數的影響	17
圖2-14	影響彈性模數之參數	18
圖2-15	彈性模數與抗壓強度之關係	18
圖2-16	彈性模數與抗壓強度之關係（混凝土為45級，正常養生）	19
圖2-17	彈性模數與抗壓強度之關係（混凝土為25級，正常養生）	20
圖2-18	彈性模數與抗壓強度之關係（混凝土為45級，絕熱養護）	20
圖2-19	彈性模數與抗壓強度之關係（混凝土為25級，絕熱養護）	21
圖2-20	變化高爐熟料添加量對混凝土凝結時間之影響	25
圖2-21	不同水泥組合在固定水灰比($W/C=0.6$)下水泥砂漿試體之抗硫酸鹽膨脹試驗	32
圖2-22	曝露於海水25年後之損壞情形	39
圖2-23	在海水中經19年間浸泡的混凝土角柱體之相對重量	39
圖2-24	C/ϕ 對鋼筋腐蝕之影響	42

圖2-25	各水灰比下之 Cl^- 擴散係數·····	42
圖2-26	鹽份侵透深度與材齡·····	42
圖3-1	海水循環水槽之位置圖·····	45
圖3-2	海水循環水槽配置圖·····	46
圖3-3	混凝土各項材料準備之情形·····	50
圖3-4	混凝土進料拌合之情形·····	50
圖3-5	混凝土拌合後量測漿體溫度·····	50
圖3-6	量測混凝土之坍度·····	50
圖3-7	試體內埋入鋼筋之情形·····	51
圖3-8	試體內埋入鋼筋灌製之情形·····	51
圖3-9	試體編號情形·····	51
圖3-10	試體置於養生室養生之情形·····	51
圖3-11	加速試驗用之小試體·····	52
圖3-12	試體之蓋平（做抗壓強度用）·····	52
圖3-13	貼應變計於抗壓試體上·····	52
圖3-14	試體做抗壓強度試驗情形·····	52
圖3-15	試體擺置於海水循環水槽內之情形·····	53
圖3-16	海水循環水槽之全景·····	53
圖3-17	加速（乾濕循環）試驗儀器·····	53
圖3-18	貫入試驗之情形·····	53
圖3-19	試體做透水試驗時用石臘及松香灌入試體模內之情形·····	54
圖3-20	透水試驗設備·····	54
圖3-21	混凝土應力應變圖·····	59
圖3-22	半電位儀量測裝置圖·····	63
圖4-1	水灰比0.5添加不同爐石含量之滲透係數變化情形·····	74
圖4-2	水灰比0.7添加不同爐石含量之滲透係數變化情形·····	74
圖4-3	水灰比0.5添加不同爐石含量之混凝土抗壓強度與齡期之關係	75
圖4-4	水灰比0.7添加不同爐石含量之混凝土抗壓強度與齡期之關係	75
圖4-5	水灰比0.5添加不同爐石含量之混凝土彈性模數與齡期之關係	76
圖4-6	水灰比0.7添加不同爐石含量之混凝土彈性模數與齡期之關係	76

圖4-7	水灰比0.5含不同爐石比例之凝結時間曲線圖·····	77
圖4-8	水灰比0.7含不同爐石比例之凝結時間曲線圖·····	77
圖4-9	水灰比0.5含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係·····	78
圖4-10	水灰比0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係·····	79
圖4-11	水灰比0.5試體經劈裂後檢視內部鋼筋腐蝕狀況·····	80
圖4-12	水灰比0.7試體經劈裂後檢視內部鋼筋腐蝕狀況·····	81
圖4-13	水灰比0.5試體 Cl^- 含量與深度關係·····	82
圖4-14	水灰比0.7試體 Cl^- 含量與深度關係·····	82
圖4-15	水灰比0.5試體 SO_3^{2-} 含量與深度關係·····	83
圖4-16	水灰比0.7試體 SO_3^{2-} 含量與深度關係·····	83
圖4-17	爐石混凝土曝放海水一年後其透水係數變化·····	91
圖4-18	爐石混凝土曝放海水二年後其透水係數變化·····	91
圖4-19	爐石混凝土曝放海水三年後其透水係數變化·····	92
圖4-20	爐石混凝土曝放海水四年後其透水係數變化·····	92
圖4-21	爐石混凝土曝放海水五年後其透水係數變化·····	93
圖4-22	水灰比0.5之爐石混凝土其抗壓強度與曝露年期之關係·····	94
圖4-23	水灰比0.7之爐石混凝土其抗壓強度與曝露年期之關係·····	94
圖4-24	水灰比0.5之爐石混凝土其彈性模數與曝露年期之關係·····	95
圖4-25	水灰比0.7之爐石混凝土其彈性模數與曝露年期之關係·····	95
圖4-26	水灰比0.5試體曝露一年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	96
圖4-27	水灰比0.7試體曝露一年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	97
圖4-28	水灰比0.5試體曝露二年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	98
圖4-29	水灰比0.7試體曝露二年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	99
圖4-30	水灰比0.5試體曝露三年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	100
圖4-31	水灰比0.7試體曝露三年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	101
圖4-32	水灰比0.5試體曝露四年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	102
圖4-33	水灰比0.7試體曝露四年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	103
圖4-34	水灰比0.5試體曝露五年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	104

圖4-35	水灰比0.7試體曝露五年其鋼筋腐蝕電位變化情形·····	105
圖4-36	水灰比0.5試體曝露一年其 Cl^- 含量分佈情形·····	106
圖4-37	水灰比0.7試體曝露一年其 Cl^- 含量分佈情形·····	106
圖4-38	水灰比0.5試體曝露二年其 Cl^- 含量分佈情形·····	107
圖4-39	水灰比0.7試體曝露二年其 Cl^- 含量分佈情形·····	107
圖4-40	水灰比0.5試體曝露三年其 Cl^- 含量分佈情形·····	108
圖4-41	水灰比0.7試體曝露三年其 Cl^- 含量分佈情形·····	108
圖4-42	水灰比0.5試體曝露四年其 Cl^- 含量分佈情形·····	109
圖4-43	水灰比0.7試體曝露四年其 Cl^- 含量分佈情形·····	109
圖4-44	水灰比0.5試體曝露五年其 Cl^- 含量分佈情形·····	110
圖4-45	水灰比0.7試體曝露五年其 Cl^- 含量分佈情形·····	110
圖4-46	水灰比0.5試體曝露一年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	111
圖4-47	水灰比0.7試體曝露一年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	111
圖4-48	水灰比0.5試體曝露二年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	112
圖4-49	水灰比0.7試體曝露二年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	112
圖4-50	水灰比0.5試體曝露三年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	113
圖4-51	水灰比0.7試體曝露三年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	113
圖4-52	水灰比0.5試體曝露四年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	114
圖4-53	水灰比0.7試體曝露四年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	114
圖4-54	水灰比0.5試體曝露五年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	115
圖4-55	水灰比0.7試體曝露五年其 SO_3^{-2} 含量分佈情形·····	115

第一章 緒論

1-1 研究動機

由於混凝土不論在任何地方、任何人都可製作，可就地取材，結構造型變化大，加以嚴格之施工則可製作為非常均勻性，適合各種強度及顏色之要求，因此為經濟、耐久及堅固之營建工程材料。

一般而言在建造一混凝土結構物時，如果設計正確，材料使用適當及施工技術優良，則極具有耐久性，甚至可認定為半永久性，像高雄港及花蓮港有許多碼頭，為日據時代建造，但至今仍正常使用，毫無異樣。

然而混凝土結構物建造後，承受各種自然環境力（受環境之氣體或液體之侵蝕）及人為因素作用等影響，例如在海洋環境下，由於常年受海水乾濕反覆作用，海風之凌虐以及海洋腐蝕因子諸如氯化物、硫化物、氧氣、濕氣等容易侵入結構體，因此逐年產生化學上之變質和物理性之變形等惡化現象，持續進行因而造成損壞。尤其是當設計、材料及施工不當（有錯誤）或使用條件及環境條件太過於惡劣時，將由結構物上之弱點處開始發生惡化而出現損傷現象，因此使結構體的材料特性改變，因而影響結構物的安全性、耐久性及使用功能降低或可能隨時有發生崩毀之現象。

混凝土材料為一種複雜的組合材料，其中以水泥影響混凝土性質最鉅，且其單位成本最高，為改善水泥對混凝土材料部份性質的不良影響尤其在耐久性方面，並且降低生產成本，故研究以水淬爐石粉來取代部份水泥，以求達到節約的目的，有鑑於此，特委託進行本研究工作。

1-2 研究目的

本研究之主要目的乃為瞭解波特蘭鋼筋混凝土添加高爐石後對其耐久性以及抑制鋼筋腐蝕之效應為何？

1-3 研究範圍

本研究範圍包括下列各項

1. 基本性質試驗：包括抗壓強度、透水係數、彈性模數及凝結時間等項目。
2. 短期加速試驗：採用天然海水乾濕循環試驗後進行抗壓強度、透水係數、彈性模數、腐蝕電位、氯離子滲透、硫酸鹽侵入、保護層厚度之影響性等各項試驗工作。
3. 長期曝露試驗：在本所海水循環水槽內，於潮汐帶間置放試體，定期取回進行上述各項試驗工作。

1-4 研究流程及方法

本研究之流程及試驗探討要點如圖1-1所示

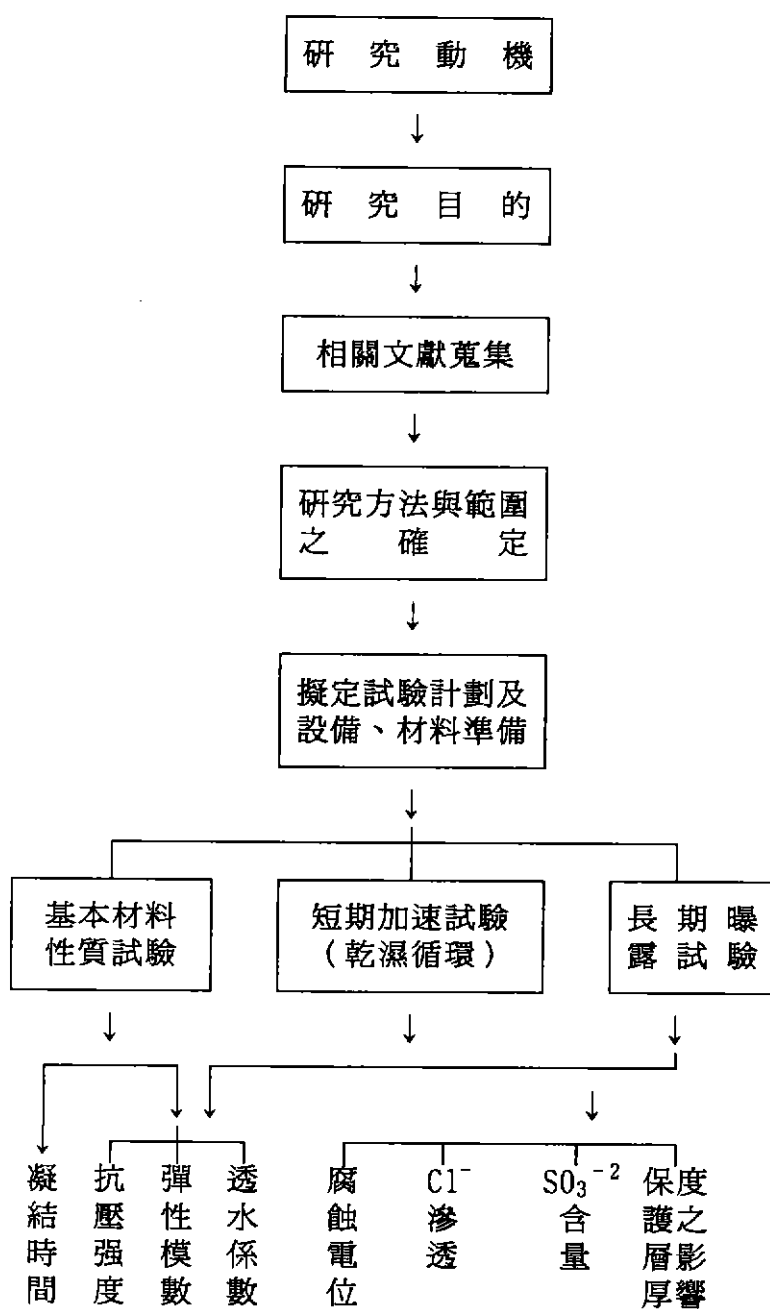


圖1-1 研究流程與試驗方法

第二章 文獻回顧

爐石為煉鋼廠所產生之副產品，國內早期均將視為廢棄物未能妥善利用，且需耗資運送丟棄，部份爐石並造成環境污染問題。近些年來中鋼公司著力於推動爐石資源化之工作，學術界亦頗有研究成效⁽¹⁾。中鋼公司之高爐石曾被使用於水泥製造與混凝土應用。高爐石可經由其冷卻處理方式而製成水淬爐石與氣冷爐石。水淬爐石具有與水泥熟料相近之特性，並含有高量玻璃質，且具有潛在之膠結能力，如加以適當的催化，則易與水份、氫氧化鈣產生波索蘭反應(pozzolanic reaction)，而形成類似水泥熟料之水化生成物C-S-H膠體。水淬爐石可在水泥廠當做熟料，以分開研磨再與卜特蘭水泥均勻攪拌，或與水泥熟料一起研磨之方式製成高爐水泥。亦可將水淬爐石先經乾燥後直接研磨成爐石粉，而在工地直接替代水泥應用於混凝土中。此外水淬爐石亦可在混凝土中充當細骨材。本試驗為探討水淬爐石加入混凝土中對抗壓強度、透水性、彈性模數及凝結時間之影響，同時進行天然海水之短期乾濕循環試驗及長期曝露於海水循環水槽，以試驗鋼筋腐蝕電位，氯離子滲透，硫酸鹽侵入，保護層厚度之影響以及抗壓強度、彈性模數及透水性等耐久性問題之檢討。故本章係就相關研究進行文獻回顧如后：

(一)混凝土強度

混凝土抵抗壓力之強度稱為抗壓強度，抵抗拉力之強度稱為抗拉強度，抵抗彎力之強度稱為抗彎強度，抵抗剪力之強度則稱為抗剪強度。抵抗鋼筋間之滑動力謂之握裹強度。所謂混凝土強度一般係指抗壓強度而言，因為抗壓強度遠優於其它強度，且抗壓強度增高，則其它強度亦隨之增高。故由混凝土的抗壓強度可以估算其它強度而判斷其品質之優劣。

上述混凝土材料之強度係以抵抗外力使其不致發生破壞之能力。影響混凝土強度之因素頗為複雜，Metha⁽²⁾將之分為三類即與試體參數、外載參數及組成材料強度有關，相關圖如圖2-1所示，並概述如下：

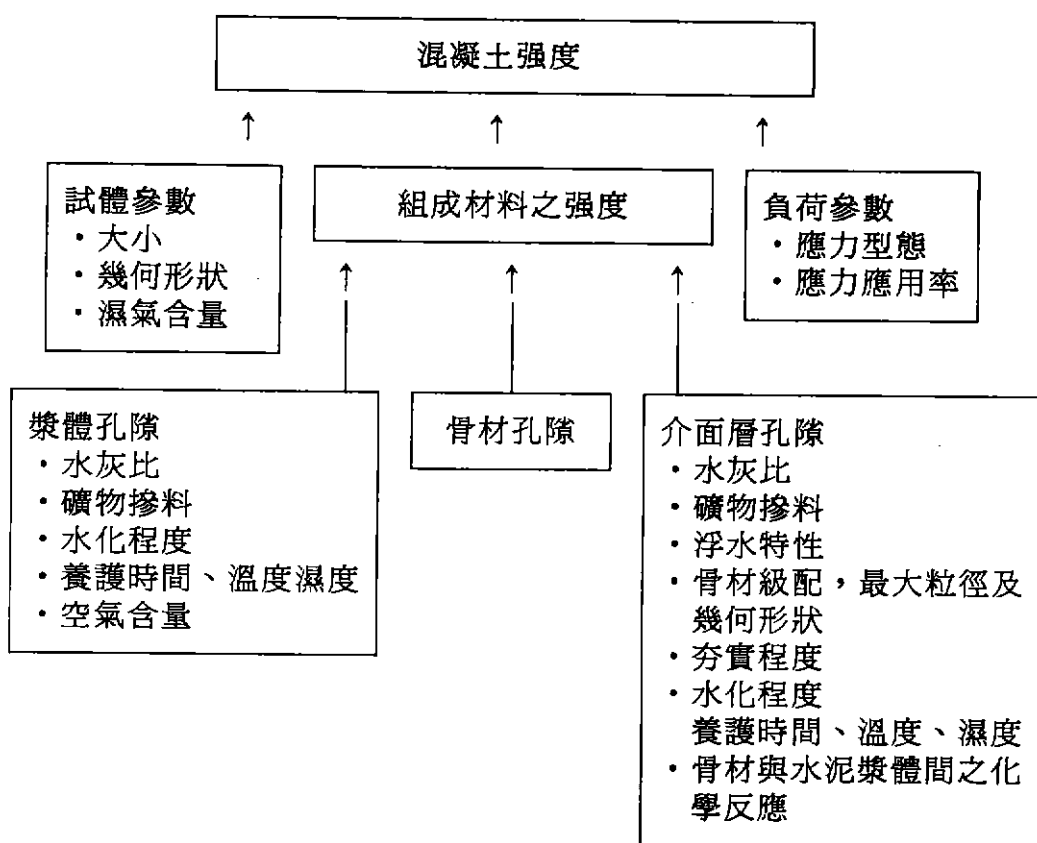


圖2-1 影響混凝土强度因素

1. 混凝土組成材料強度

混凝土組成材料强度間接決定其力學行為，組成材料之强度則維繫於其孔隙比之大小，因此混凝土之强度依其組成材料可經由骨材孔隙(aggregate porosity)、漿體孔隙(matrix porosity)與骨材砂漿界面層孔隙(transition zone porosity)等決定。水灰比、礦物摻料、水化程度、含氣量等分別影響了漿體與界面層之孔隙比大小，也就影響了混凝土之强度。當混凝土含有低孔隙或高强度之骨材時，材料强度即由漿體或臨界面層强度決定。通常在材齡較低之混凝土臨界面層强度較漿體為低，在材齡較高時則反之。含有較低之水灰比、高含氣量或低水化程度之試體，其强度較低。在較高之溫度、濕度的養護狀況下，混凝土之强度則較高，使用輸氣摻料通常會降低混凝土强度；填加矽灰或爐石、飛灰等摻料則初期强度會降低，然而後

期强度會增大。組成材料對混凝土强度之影響可說明如下：

A.水泥漿體(cement paste)

混凝土完全靠水泥漿體將骨材粘結組成，故水泥漿體粘著性愈大，則混凝土强度愈高。影響水泥漿體强度主要因素如下：

- (一)水灰比：水灰比是影響水泥漿體强度最主要因素，水灰比愈高則强度將遞減。通常高强度混凝土之水灰比由0.40→0.30，坍度通常由10cm→5cm，工作性較差，不易施工。
- (二)水泥細度：通常水泥水化作用，受水泥細度影響極大。愈細則水化速率愈快，水化作用也愈完全，混凝土强度亦愈高。
- (三)水泥種類：隨著水泥種類不同，水泥化學成份亦不同，影響混凝土强度亦不同，即使同類型水泥中，因廠牌不同，其產生混凝土强度也不同。

B.骨材(aggregate)

如表2-1所示，為常用骨材岩石之抗壓强度，較水泥漿體的强度大很多。但混凝土中之風化石或長扁片含量多的骨材，則會降低其强度。一般骨材基本性質應該符合潔淨、堅硬、强度高、耐久性、級配佳之要求。若採用同一種骨材，影響最大的參數為級配的優劣。優良級配是大骨材間之孔隙為較小骨材所填充，而較小骨材間亦為更小粒徑的骨材所填充如圖2-2所示。

C.骨材介面鍵結强度(interface bonding stress)

通常混凝土為顧及工作性，將使用過多的水量。同時為保持相同水灰比，則採用過高的水泥用量，不但不經濟而且較易發生浮水現象。因此混凝土受振動搗實時，水會上浮而積存在骨材下緣形成脆弱區(weak area)如圖⁽³⁾2-3所示。

表2-1 常用骨材岩石之抗壓強度⁽³⁾

母岩種類	試樣數目	抗壓強度(kg/cm ²)		
		全部樣品 之平均值	剔除極高極低值後	
			最 高	最 低
花 崗 岩	278	1,810	2,620	1,160
Felsite 岩	12	3,300	5,330	1,230
Trap 岩	59	2,900	3,840	2,040
石 灰 岩	241	1,600	2,440	940
砂 岩	79	1,300	2,440	450
大 理 岩	34	1,200	2,480	520
石 英 岩	26	2,600	4,280	1,260
片 麻 岩	36	1,500	2,380	950
結晶片岩	31	1,700	3,020	920

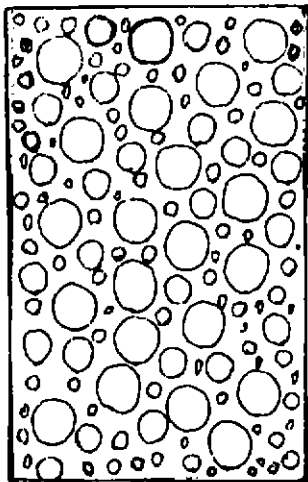


圖2-2 優良級配示意圖

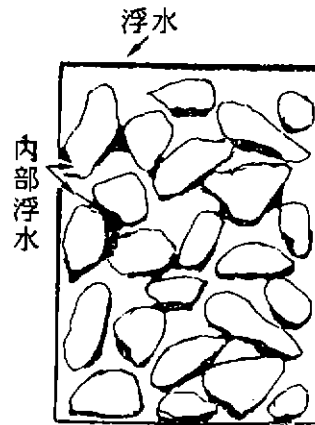


圖2-3 浮水產生狀況

另一方面在骨材邊緣容易集結水作用之生成物如氫氧化鈣(CH)結晶體，以致受壓力作用時，會產生壓力集中現象，而造成微細裂縫(micro crack)，降低界面抵抗滑動的能力，因此骨材和水泥漿的介面是混凝土中最脆弱的一環，通常破壞都是從介面的微裂縫開始。

基本上增加骨材介面鍵結強度之方法通常採用以下幾方種方法：

(一)使用較低的水灰比，以減少浮水並採用良好的施工方式，以避免骨材分離。

(二)選用適宜粗糙的碎石料，粗糙多角形骨材較圓形，光滑骨材佳，但須考慮混凝土工作性，可能要增加細砂用量，因而增加拌合用水量。

(三)骨材表面必須潔淨，選用最大粒徑較小之粗骨材，以增加表面積。通常骨材顆粒愈小，其表面積愈大，可以跟水泥漿作更密切的結合。而且受力時，因其顆粒較小，排列較亂，裂縫要延伸必須受較多骨材的阻擋，更可提高強度，如圖2-4所示。

但爲了增加鍵結強度而採用此法，會喪失經濟性而增加成本，因爲骨材粒徑愈小，則細砂、拌合用水量須同時提高，才能保持混凝土工作度，若要保持相同水灰比時亦須增加水泥用量才可以。

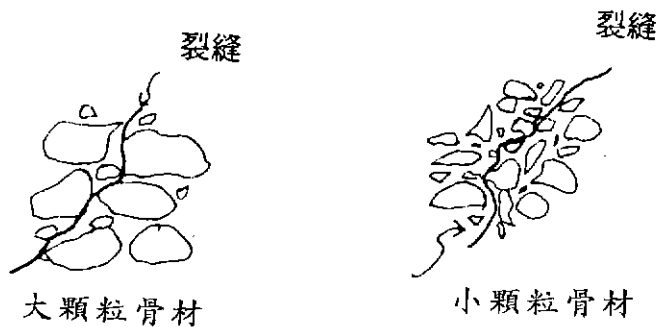


圖2-4 混凝土破壞時裂縫延伸路徑與骨材最大粒徑之關係

D.施工狀況

在施工過程中，混凝土拌合是否均勻，澆置方法是否正確，粒料才不會有分離現象。搗實是否確實才不會造成有冷縫、蜂窩，養護方法是否正確，才不會有龜裂出現，這些都直接影響混凝土強度很大。

2. 試體參數(specimen parameters)

在美國，抗壓試驗之標準試體爲6×12"圓柱體，其高度與直徑比維持等於2，而在各種不同直徑的圓柱體製作之混凝土試體進行試驗發現直徑愈大

者，強度將降低。如圖2-5所示，小試體之強度較大而直徑超過18"者則其強度減少量將相當小，此乃因大試體之統計均勻度增大所致。

試體之高度與直徑比(L/D)不同對抗壓強度之關係如圖2-6所示，通常其比值較大，則所得之強度將較低。如使用 $L/D=1$ 與 $L/D=2$ 比較，前者之強度約增加15%，歐洲普遍使用6"立方試體，則其強度較美國之 6×12 "圓柱體約高出10-15%。

抗壓試體之潤濕狀況之影響性亦很重要，標準試驗程序要求在試驗時，試體保持在潮濕的情況下，比較試驗結果發現空氣乾燥之試體較在飽和水狀況下之強度約高20-25%，後者之強度較低之原因可能是在水泥漿內有分離壓力(disjoining pressure)所致。

3. 外載參載(loading parameter)

混凝土之抗壓強度一般在試驗依ASTM C 469規範，以萬能試驗單軸抗壓試驗，負荷漸增，約過2-3分鐘試體破壞所量得之數據，而實際上大多數結構體在不定時間下承受呆重，有時承受反覆荷重和衝擊負荷，因此需了解實驗室之試驗條件下之混凝土強度與實際負荷之間的關係，在各種應力狀況下之混凝土行為，這些都是影響混凝土強度的重要因素。

水泥中添加爐石用以製造混凝土，與普通卜特蘭混凝土比較，爐石混凝土之早期強度較低，但其長期強度則常超過卜特蘭混凝土（見圖2-7⁽⁴⁾及圖2-8⁽⁵⁾），然而在各種取代量之爐石混凝土，其強度在何時可達控制試體（普通卜特蘭混凝土）之強度，各文獻不盡相同，一般而言30%-50%取代量之爐石混凝土，其強度在7天時均已超過普通混凝土（見圖2-9）⁽⁶⁾。就水灰比而言，Meusel與Rase⁽⁴⁾指出在高水灰比時，爐石替代水泥之效率最高（圖2-10）。

而日本JIS R 5211及R 5210對高爐水泥混凝土的抗壓強度所定的規格如下表2-2。

表2-2 JIS R 5211高爐水泥混凝土抗壓強度規範

抗壓強度 (kgf/cm^2)	高爐A型水泥 混 凝 土	高爐B型水泥 混 凝 土	高爐C型水泥 混 凝 土	波特蘭水泥 混 凝 土
三天	≥ 70	≥ 60	≥ 50	≥ 70
七天	≥ 150	≥ 120	≥ 100	≥ 150
廿八天	≥ 300	≥ 290	≥ 280	≥ 300

根據日本實際測試各種高爐石含量的水泥砂漿，發現其抗壓強度隨齡期之增長而遞增如圖2-11所示⁽⁸⁾。

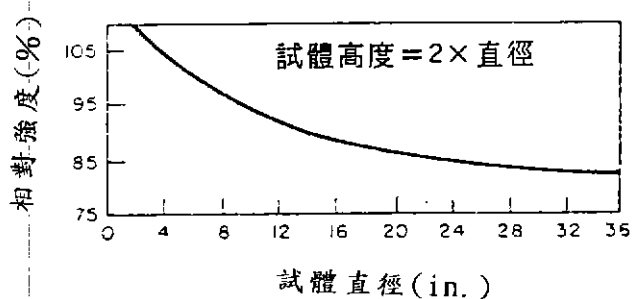


圖2-5 試體直徑對混凝土強度之影響性

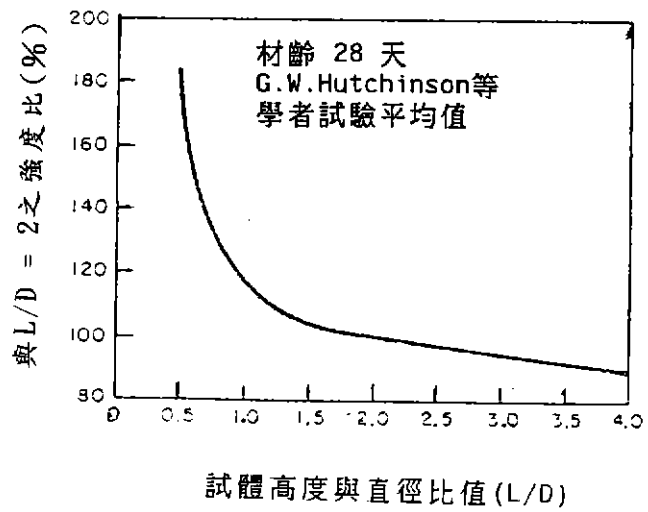


圖2-6 試體高度直徑比與混凝土強度之影響性

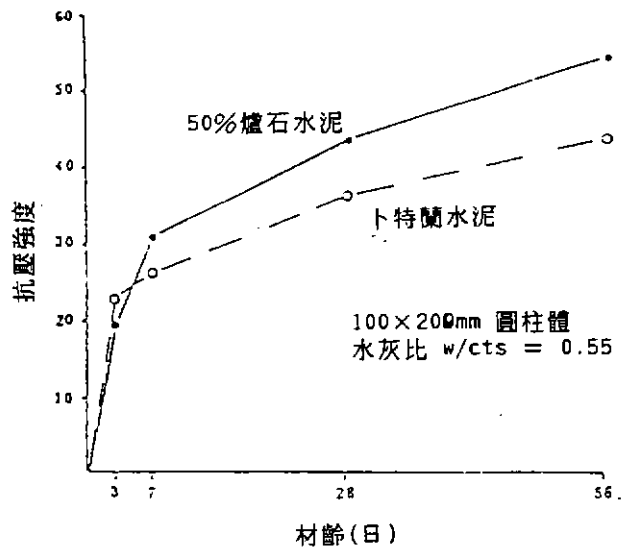


圖2-7 典型含50%爐石混凝土相對於普通卜特蘭水泥混凝土之壓力強度發展關係⁽⁶⁾

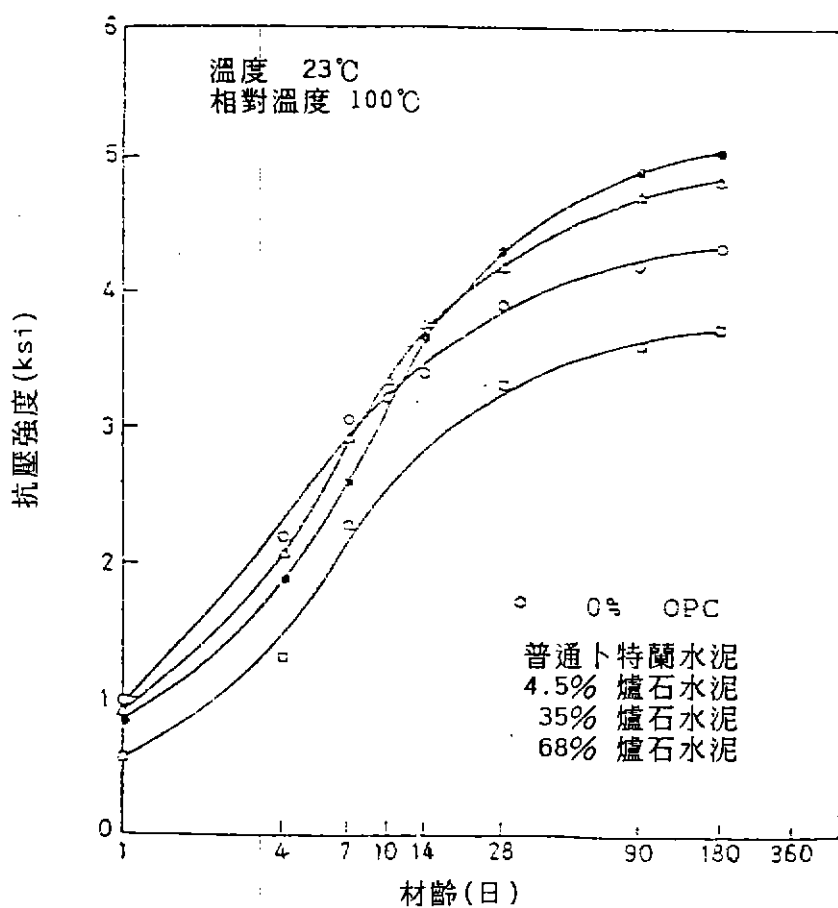


圖2-8 養護狀況23°C，RH100%下，各種混凝土強度發展情形

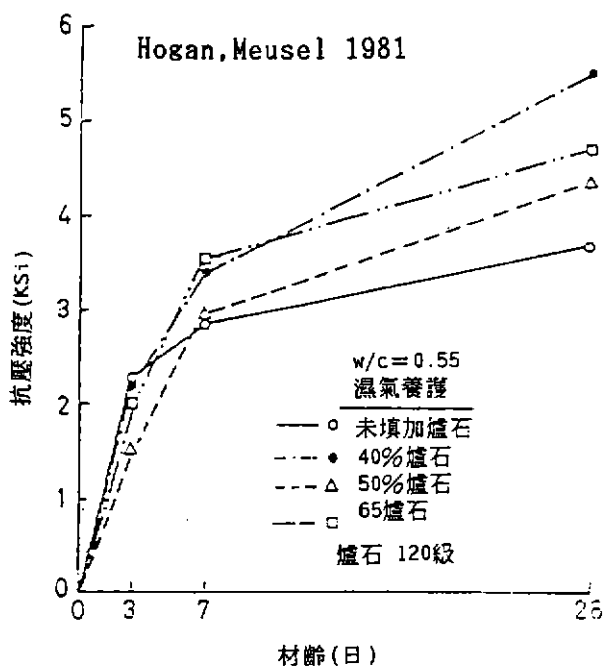


圖2-9 含不同比例爐石混凝土之壓力強度發展關係⁽⁷⁾

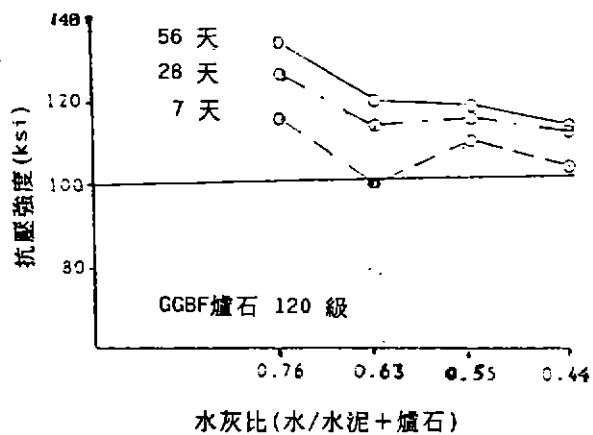


圖2-10 水與膠結材料比對含爐石混凝土之強度影響⁽⁶⁾

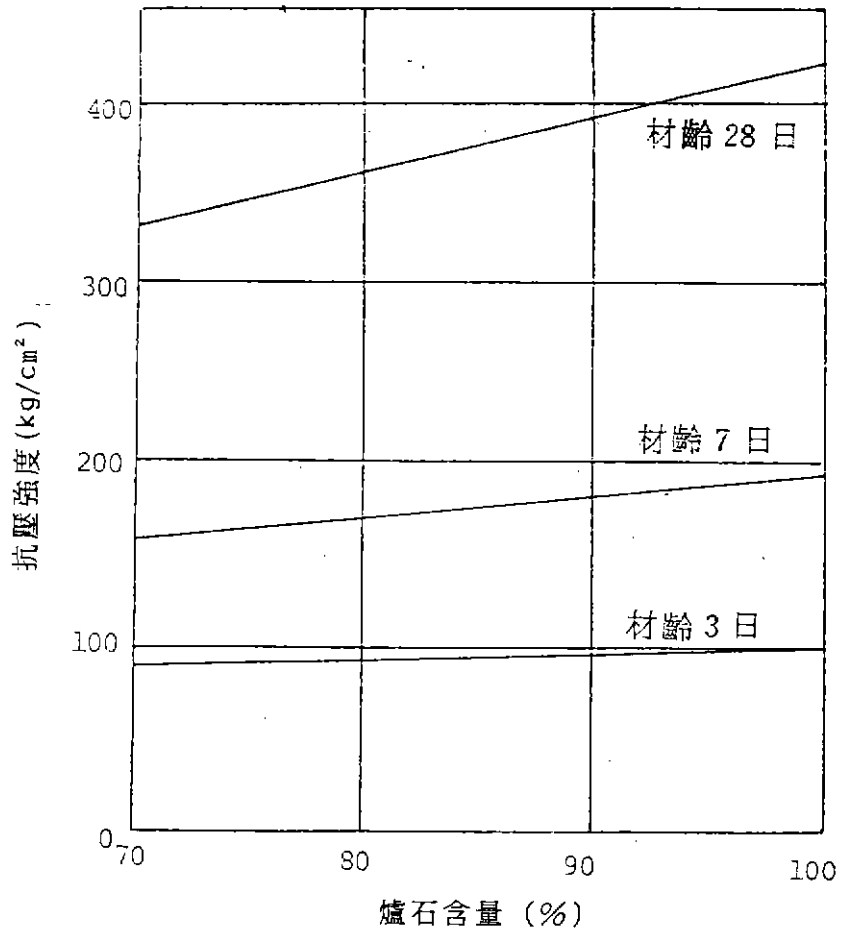


圖2-11 爐石含量與爐石水泥漿强度之關係

(二)彈性模數(modulus of elasticity)

彈性模數為材料勁度之指標，為應力與瞬間應變之比值，混凝土為一黏彈性(viscoelastic)材料，在應力作用下之變形並非真正的彈性變形，實際上為瞬間變形(instantaneous deformation)。理論上，彈性模數可微觀原子結構作用應力一位移曲線之斜率求出，即 $df/dl \propto E$ ，原子鍵結力大則彈性模數值愈大，彈性模數是材料的主要性質之一。一般彈性模數可應力—應變圖（圖2-12）量出或採用動彈性量測之，或照下列經驗公式算，或以複合材料原理估算（如圖2-13所示）。

1. ACI建築法規：

$$E_c = 33 \rho^{3/2} (\sigma_c')^{1/2} \quad \text{Psi}$$

式中 E_c ：正割模數(secant modulus)

ρ ：混凝土單位重

σ_c' ：6" $\phi \times 12$ " 試體抗壓強度。

2. 英國施工法規(British code of practice)：

$$E = 9.1 \rho (\sigma_c')^{1/3} \quad \text{GPa} \quad (\rho \geq 2300 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 9.1 \left(\frac{\rho}{2300} \right)^2 \rho (\sigma_c')^{1/3} \quad \text{GPa} \quad (\rho < 2300 \text{ kg/m}^3)$$

3. CEB歐洲混凝土委員會：

$$E = 9.5 (\sigma_c' + 8)^{1/3} \quad \text{GPa} \quad (\rho \geq 2400 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 9.5 \left(\frac{\rho}{2400} \right)^2 (\sigma_c' + 8)^{1/3} \quad \text{GPa} \quad (\rho < 2400 \text{ kg/m}^3)$$

由上列公式可見彈性模數與強度及密度有密切關係，因此影響強度及密度之因素亦會對彈性模數造成影響，在均質之材料，其彈性模數與其密度與強度有直接之關係存在，而在異質多相之材料例如混凝土，其主要組成材料之密度和體積比及轉換區（孔隙）之特性等決定其彈性行為，因為密度與孔隙率成相對之關係。顯然地，影響骨材間孔隙、水泥漿體和轉換區之因素都是相當地重要。對混凝土而言，強度與彈性模數之直接關係，受混凝土組成材料間孔隙之影響。圖2-14為影響混凝土彈性模數之主要參數概述如下：

①骨材

在粗骨材之特性中影響混凝土之彈性模數者，似乎以孔隙率最為重要，此係因骨材之孔隙決定其勁度而相繼地控制骨材能抑制混凝土之應變量。緊密之骨材其彈性模數較高。通常在混凝土中所含高彈性模數之粗骨材數量較大則混凝土之彈性模數亦較大。因為在低或中強度混凝土，混凝土之強度不受骨材之孔隙率所影響，此表示所有變數可能並非以同一方法控制混凝土的強度及彈數模數。

根據岩石之鑽心試驗結果顯示如花崗岩，玄武岩等低孔隙率之天然骨材

之彈性模數約為 $(10\sim20)\times10^6\text{psi}$ ，而砂岩、石灰岩或卵石等多孔性者之彈性模數為 $(3\sim7)\times10^6\text{psi}$ 。輕質骨材具高孔隙率者，其彈性模數範圍約為 $(1\sim4)\times10^6\text{psi}$ 。一般約為 $(2\sim3)\times10^6\text{psi}$ 為同樣強度常重混凝土的彈性模數之50～75%。而影響混凝土彈性模數的骨材其他特性如最大粒徑、形狀、表面紋理、級配和礦物組成等將對轉換區之微裂造成影響而且影響應力－應變曲線的形狀。

②水泥漿體(cement paste matrix)

水泥漿體之彈性模數由其孔隙率決定，控制因素如水灰比、空氣含量、礦物摻料和水化程度，如圖2-1所示。據報導其彈性模數約為 $(1\sim4)\times10^6\text{psi}$ ，此數值與輕質骨材之彈性模數相似。

③轉換區

通常在轉換區內的孔隙區域，微裂和氫氧化鈣之結晶走向等都較水泥漿體更為普遍，因此在決定混凝土中之應力應變之關係上，扮演一相當重要的角色。影響轉換區之孔隙之因素如圖2-1所示。

據報導混凝土之強度及彈性模數受養護時間因素作用並非以相同程度影響。如圖2-15所示不同強度之骨材所製作之混凝土其後期材齡（如3月～1年），彈性模數增加之速率較抗壓強度為高。由於水泥漿體與骨材間緩慢的化學作用結果造成轉換區內的密度之改善，很顯然的對應力應變關係之影響性較之抗壓強度有利。

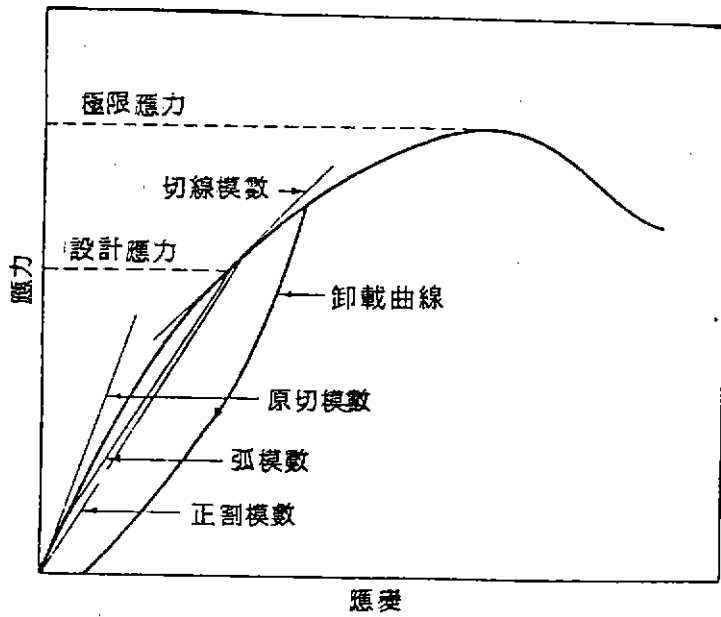


圖2-12 典型混凝土應力-應變圖

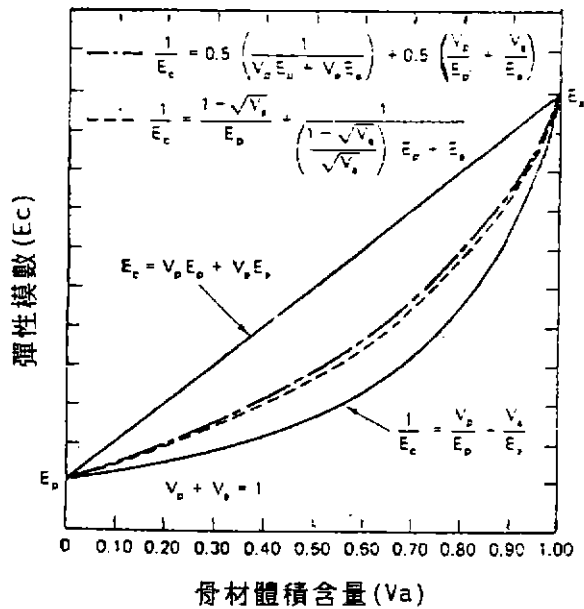


圖2-13 骨材含量對彈性模數的影響

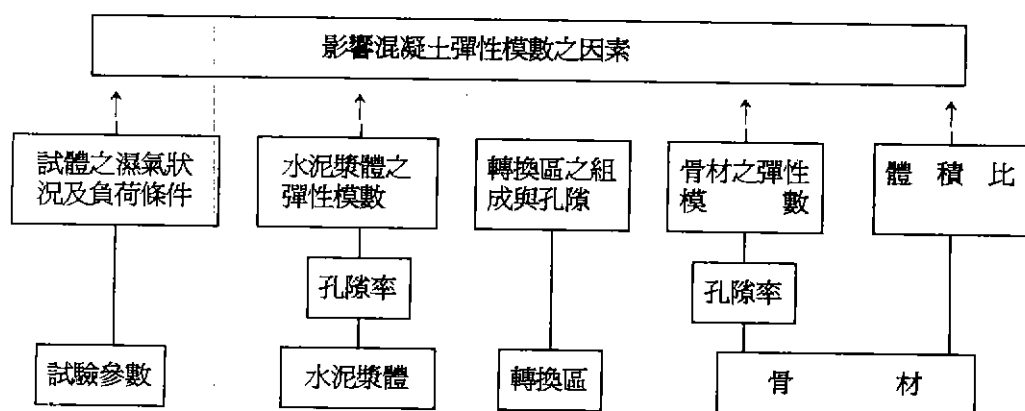


圖2-14 影響彈性模數之參數

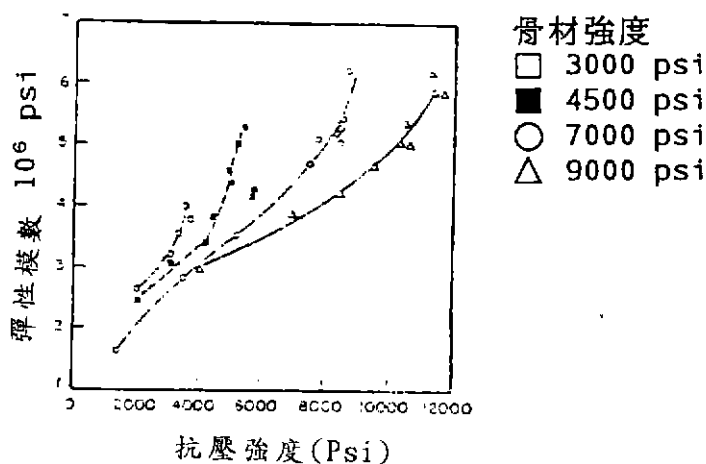


圖2-15 彈性模數與抗壓強度之關係

④試驗參數：

混凝土試體之濕氣狀態與負荷條件都是影響參數，顯然地，不管配比或養生時間長短，如果試體在潮濕條件下進行試驗，彈性模數將較乾燥條件下高出15%，而抗壓強度則相反，即乾燥情況下之抗壓強度約高15%，似乎混凝土乾燥則對水泥漿體所產生的不同之影響性較轉換區為甚。而前者由於在水化產物增加Van der waals吸引力而使強度增加。而後者由於微裂而造成強度損失。當水泥漿之強度增強則抗壓強度亦隨之而增。然而在轉換區之彈性模數降低係因微裂增多而頗受其應力應變行為之影響所致。對於上述現象之另一解釋為，在一飽和之水泥漿，C-S-H中之吸附水為負載，因此其對

彈性模數有所貢獻，而在另一方面，C-S-H內之分離壓力將減少Van der waals吸引力而使強度降低。

非線性應力應變曲線之出現與程度，很顯然地將依作用力速率而定，故彈性模數依作用力速率而定，在瞬間負荷下，破壞前僅有一些應變可能發生，故彈性模數相當高。一般測試之時間需2~5分鐘，其應變量增加約15~20%，因此將再使彈性模數降低。

圖2-16至圖2-19為彈性模數與抗壓強度之關係，前兩圖為兩種不同等級之混凝土在常溫（20℃）下養生，發現高爐水泥混凝土與普通卜特蘭水泥混凝土之行爲比較略有差異。而後兩圖為在繼熱養生情況下之比較亦同樣有所差異，這種現象經過多位學者實驗，結果都很類似。這種隨摻加爐石而使彈性模數與抗壓強度之關係略為增加，可視為由於高爐石水化與普通混凝土之性質改變所致。

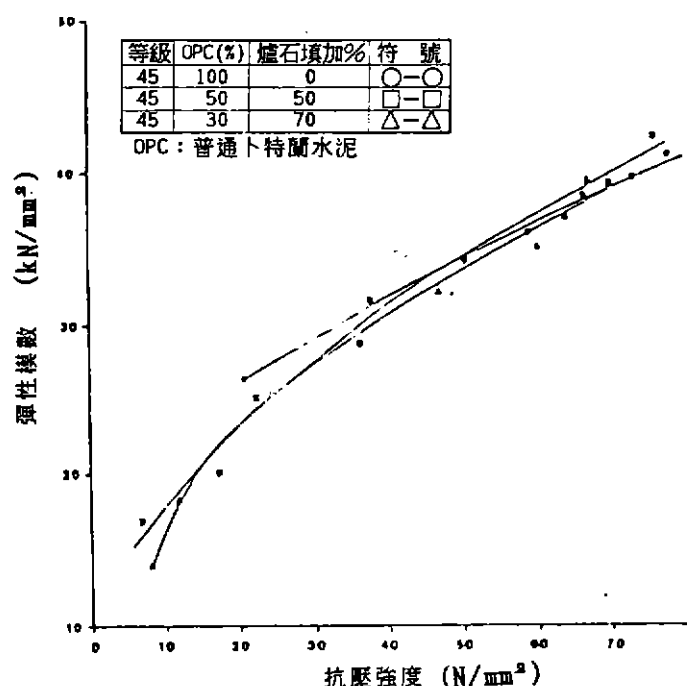


圖2-16 彈性模數與抗壓強度之關係
(混凝土為45級，正常養生)

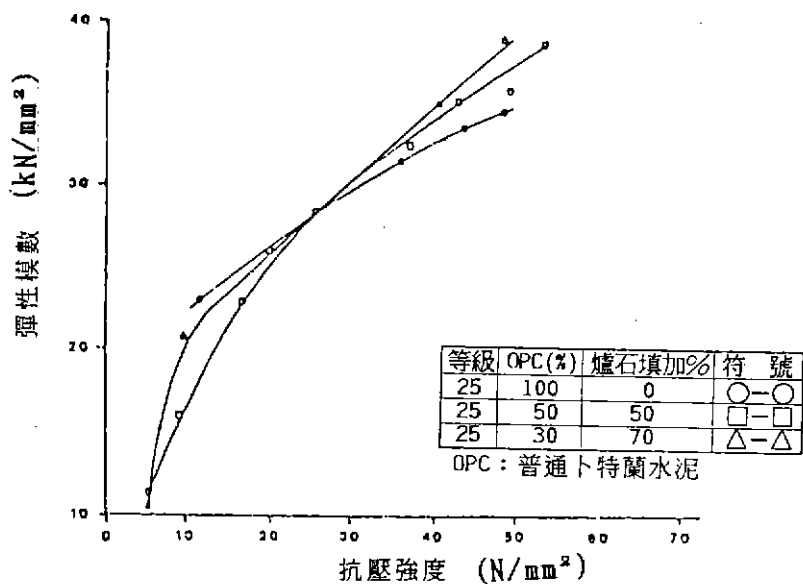


圖2-17 彈性模數與抗壓強度之關係
(混凝土為25級，正常養生)

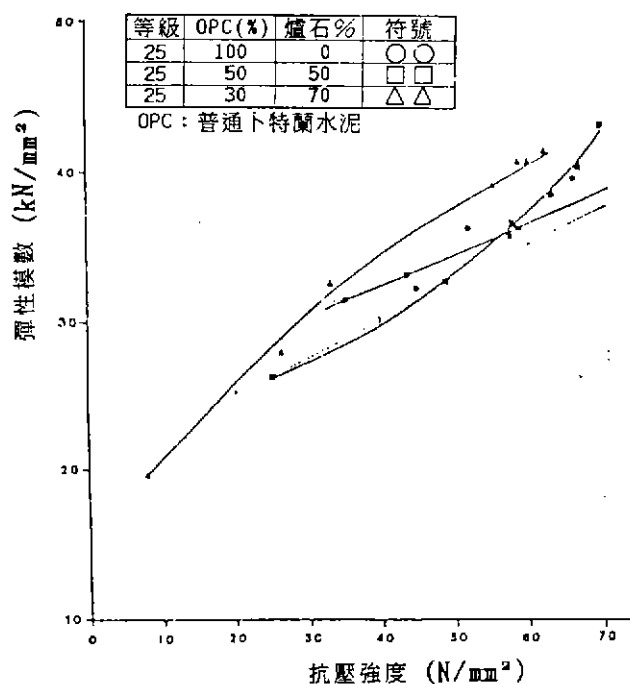


圖2-18 彈性模數與抗壓強度之關係
(混凝土為45級，絕熱養護)

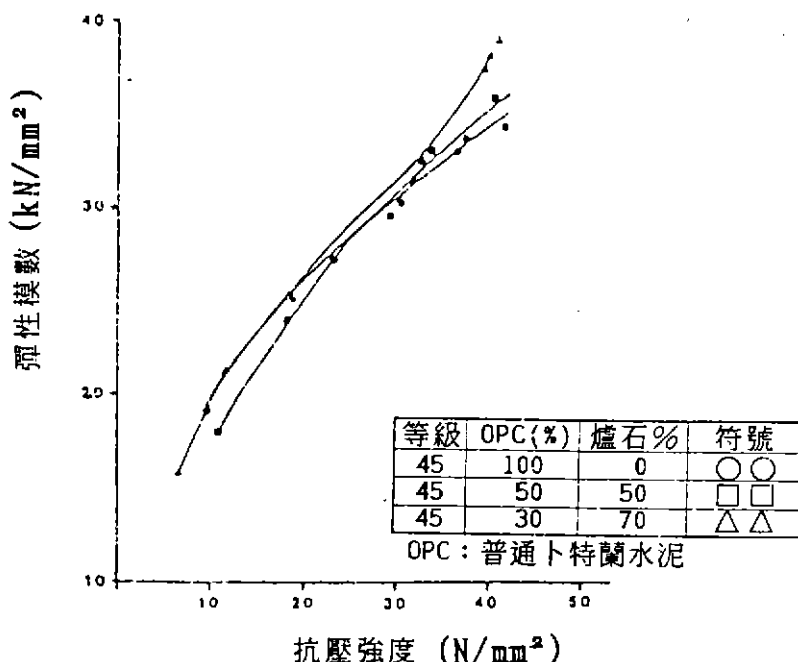


圖2-19 彈性模數與抗壓強度之關係
(混凝土為25級，絕熱養護)

(三)透水性之檢討

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，則形成之毛細管孔愈大，當水灰比小於0.7時，經適當養護，水泥漿體水化充分，則毛細管會受適當的阻隔。當水灰比太大時(大於0.7)則將造成孔隙的連通性。

混凝土添加高爐水泥後，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矽石量之增加而降低，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性孔隙之產生而增加水密性。

3. 添加高爐水泥後，增加硬化混凝土水密性之原理

(1)添加適量高爐水泥，將可增加混凝土的工作性，使其更易於澆注與搗實，避免材料分離造成蜂窩現象，增加混凝土密度及提高其水密性。

(2)選用優良品質之高爐水泥，在保持新鮮混凝土相同坍度時，將可節省

用水量，降低水灰比，減少混凝土孔隙率，提高水密性。

(3)因高爐水泥的波索蘭反應，消耗掉混凝土 Ca(OH)_2 ，而使混凝土的孔隙被阻隔或減少，而可增加混凝土的水密性。

(4)在水化過程中，因大量降低水化熱，減少巨積混凝土內熱膨脹及外冷收縮之龜裂機會，及藉波索蘭反應，增加抵抗硫酸鹽侵蝕，減少裂縫產生，增加混凝土水密性。

表2-3為日本對各種不同高爐水泥之透水率測定結果，試驗法係依據日本JIS A1404之規範進行，由表中可見高爐水泥之透水率較普通卜特蘭水泥要低很多。

表2-3 水泥及水泥砂漿透水率比較⁶⁰
(a)水泥

水 泥 種 類	透 水 量(gm)	透 水 率
普通卜特蘭水泥	119	1
A型BF爐石水泥	75	0.63
B型BF爐石水泥	67	0.56
C型BF爐石水泥	53	0.45

(砂：標準Toyoura砂；壓力：0.3MPa)

(b)水泥砂漿

混 合 比 (%)		總吸水率／168小時 (指數) (%)			
爐石	卜特蘭水泥	材 齡 (週)			
		2	3	4	5
0	100	100	100	100	100
40	60	78	50	20	10
50	50	30	15	19	5
60	40	7	12	9	11
70	30	3	13	16	12

砂漿拌合比為水泥：砂：水=1：3：.08

(四)凝結時間

高爐水泥混凝土因減少水泥用量，降低水化熱，致使水化速度減慢，因而降低整體的活性，致使凝結速率減慢因而延長其凝結時間。表2-4所示為中鋼公司研究計劃CS1571，爐石添加量與凝結時間之關係。由表中可見，添加量愈多，其初終凝時間愈往後延長，而終凝延後的時間較初凝更加明顯。一般添加量在30%以內，凝結時間大約延長半小時左右，若添加量超過40%，則其凝結時間將延後約1小時以上。此外混凝土凝結時間與混凝土溫度、養護溫度、水灰比、坍度、含氣量及水泥的成份、細度等都有很大關係。

國立交通大學土木工程研究所郭一羽教授曾根據ASTM C403規定，以貫入阻力試驗混凝土凝結時間的方法進行實驗。強度達500 psi時為初凝；達4000 psi時為終凝。普通和40%及60%高爐水泥混凝土的28天的抗壓強度分別為345.76kg/cm²、297.35kg/cm²以及284.5kg/cm²。

圖2-20係比較不同高爐熟料添加量對高爐水泥混凝土凝結行為的影響。如圖所示，添加高爐熟料會延後混凝土的初凝及終凝。由實驗結果顯示，初凝約延後1~2小時；終凝約延後2~3小時。且熟料添加量愈多，凝結時間愈延後。

在港灣工程，由於施工上之要求，所使用的混凝土坍度需要低，但坍度低則凝結時間短又施工不易，故凝結時間的遲滯顯然是有利的條件。

表2-4 高爐水泥混凝土之凝結時間

水 泥 型 態	台泥一型水泥	5%爐石	25%爐石	40%爐石	標準英國一型水泥
ASTM C191凝結時間					
初凝(分鐘)	215	225	225	295	180
終凝(分鐘)	270	260	305	350	250
標準稠度含水量(%)	24.25	24.5	25.0	25.25	27.0

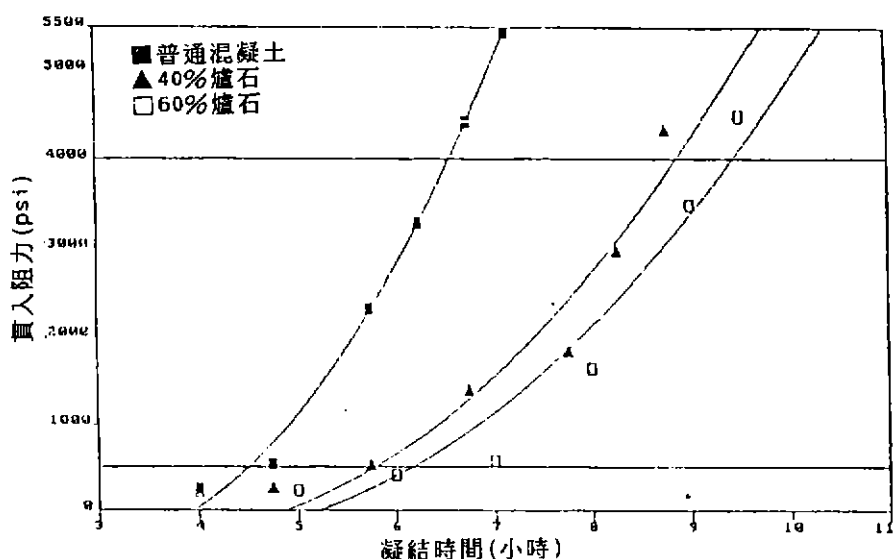


圖2-20 變化高爐熟料添加量對混凝土凝結時間之影響

(五)硫酸鹽侵襲之探討

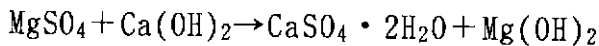
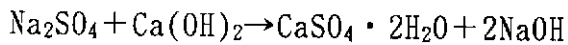
根據Rasheedu zzafar⁽⁹⁾等學者在沙烏地阿拉伯，沿著GULF海岸調查42個混凝土結構物發現在10~15年內破壞相當嚴重，其原因有二，即鋼筋腐蝕與硫酸鹽的侵襲。文獻中曾針對該區常被含鹽水份與含硫酸鹽的地下水侵襲下的地下混凝土結構物進行研究，結果發現混凝土破壞的主因為受到硫酸鎂的強烈侵襲及含硫酸鹽地下水分解硫酸鈣所導致的侵襲現象。

有關硫酸鹽侵襲造成混凝土破壞的報告在全世界各地都有實例。例如加拿大草原各省及美國西部各州。早在1936年，美國農墾局(U. S. Bureau of Reclamation)所出版的混凝土建造手冊中就曾提出警告說明，當可溶性硫酸濃度超過0.1%即會對混凝土造成傷害，而超過0.5%則可能構成嚴重地傷害。

Bellport⁽¹⁰⁾曾概述美國農墾局在美國各地的水力結構物(hydraulic structures)受到硫酸侵襲的各種經驗。Edward⁽¹¹⁾亦報告相當多受硫酸鹽侵襲而毀壞的結構，在南達可達州一座橋因受硫酸鹽侵襲而造成橋墩發生腐蝕剝落現象，該地水中所含硫酸鹽濃度高達9900ppm，亦有很多其他的報告亦說明硫酸鹽侵襲在世界各地均已造成很嚴重的問題^(12~13)。

普通卜特蘭水泥因含有較多的 $C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3)$ ，水化後會生成較多的自由氫氧化鈣 $(Ca(OH)_2)$ ，此生成物易與硫酸鹽反應而生成 $CaSO_4$ ，導致水泥

體積膨脹，進而引起混凝土開裂，其化學反應式如下：



上述生成的硫酸鈣，又會與水泥中的C₃A反應生成3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O的鈣帆石(ettringite)體積約膨脹 2 倍以上，導致混凝土發生龜裂現象。

Ettringite (鈣帆石) 為一般被公認因硫酸鹽導致混凝土膨脹的主因。但鈣帆石形成造成膨脹之機理(mechanisms)至今仍受爭論。鈣帆石晶體之形成而造成外擠壓力的增加及其不完整之晶相導致在鹼性環境中吸收水份而造成膨脹為兩個較被研究者所接受的假設。陽離子取代反應(cation exchange reactions)形成之石膏亦會造成混凝土之膨脹；Reading⁶⁰指出鈣帆石之膨脹較石膏為嚴重。膨脹和裂縫現象使結構體之勁度及強度降低，將導致混凝土的毀壞。

在硫酸鈉侵襲下，反應的副產品若為氫氧化鈉，則會保持整個系統的鹼性，並維持C-S-H膠體之穩定。

而在硫酸鎂侵襲，氫氧化鎂不易溶解，會降低整個系統的鹼性。因而導致C-S-H的穩定降低，所以硫酸鎂對混凝土的侵襲較為嚴重。

由上述可知，硫酸鹽之侵蝕將造成混凝土之損壞，而其影響因子，根據英國BRE之建議⁶⁹有下列五項：

- (一)硫酸鹽類的性質種類及數量。
- (二)水位線(level of water table)的位置及其季節性之變化。
- (三)地下水位及土壤之多孔性。
- (四)構造物之形式。
- (五)混凝土的品質。

其中第(五)項，尤其使用透水性低的混凝土為最佳保護硫酸鹽的侵襲之措施。

約在60年前就了解使用含C₃A量低的水泥具有良好的抗硫酸鹽性能而到1940年左右，ASTM發展卜特蘭五型抗硫酸鹽水泥之規範(C₃A含量低於 5 %

），同時亦開始了解使用波索蘭(pozzolans)材料對抗硫酸鹽性能方面具有優越的成果。

卜特蘭五型抗硫酸鹽水泥嚴格地限制 C_3A 的含量，但其功效仍然有限，而其中最有效的方法之一則是使用BFSC(blast furnace slag cement)取代普通水泥(OPC)，以下為一些對使用爐石具有正面優點的相關文獻報告：

(一)在Daube及Bakker¹⁰之研究指出爐石取代量超過65%的水泥，具有良好抵抗硫酸鹽及海水的侵襲之功能，因為爐石水泥使混凝土的透水性降低，可比較使用高爐石含量之水泥與OPC之混凝土其離子之擴散速率便可獲知。

而此透水率之降低，因BFSC為一兩成份的系統(two-component system)，並在水泥熟料及爐石之間的自由空間之中，連結額外的水化沉澱物，填充在兩者之間的空隙所致，因此在BENELUX標準的抗硫水泥規定可使用OPC然而 Al_2O_3 含量不得超過5%， MgO 量不得超過5%及 C_3A 量不得超過3%，亦可使用BFSC而其Slag含量為65~80%（荷蘭）及70~85%（比利時）。

(二)在Frigione¹¹之研究調查中，依照Mehta試驗及ASTM的檢驗結果顯示水泥中含高量爐石粉，則其抗硫酸鹽侵襲效果相當好，而且與爐石粉的玻璃質含量，石膏含量以及研磨細度並無太大關係。

(三)SP 79-1「Pozzolanic & Cementitious By-Products as Mineral Admixtures for Concrete-A Critical Review」by P. Kumar Mehta¹²曾指出爐石中氧化鋁之含量與其抗硫酸鹽能力具有相當的影響，歐洲的爐石所含氧化鋁數量相當高(13~15%)，而美國爐石含量為8~10%，中鋼公司爐石含量亦頗高約為13~14%，在歐洲對抗硫水泥建議採用70%以上的爐石取代Type I水泥。Hooten等學者¹³亦證實在加拿大使用50%爐石取代Type I水泥(12% C_3A)其抗硫酸鹽性質與Type V抗硫酸鹽卜特蘭水泥相當。

爐石水泥中活性氧化鋁與自由氧化鈣的含量的減少，因波索蘭反應之故，會增加其抗硫酸鹽的能力。

Mehta亦曾在文獻20中提及因波索反應將導致孔隙的微細性(re-

finement)因而可降低透水性的重要性，故適當的養護是相當重要的。

(四)在Guyot等之研究調查130個水泥試體包括各種卜特蘭水泥及使各種填加料如FA或高爐石及在三種硫酸鹽環境($MgSO_4$, $CaSO_4$, Na_2SO_4)及在海水中的行為比較，發現高爐石含量之水泥具有良好的表現⁽²⁰⁾。

(五)在Frearson的研究調查中⁽²¹⁾，採用德國「Flat Prism」之試驗法⁽²²⁾，使用高爐水泥或是水泥中填加爐石粉與OPC或SRPC（抗硫酸鹽水泥 sulfate resisting portland cement）比較其抗硫酸鹽類之能力，爐石含量介於30%至80%之間。

實驗結果大致為爐石含量增加則抗硫酸鹽之能力亦增加，70%爐石含量之水泥漿較SRPC者為佳，並發現爐石含量較水灰比之影響為大，圖2-21為水灰比0.6時，各種試體抗硫酸鹽侵襲之比較，可看出70%爐石含量表現最好。

(六)Cattaneo及Frigione⁽²³⁾之研究實驗結果，依照ASTM C452試驗方法，其結果如表2-5所示。依照Koch及Steinegger⁽²⁴⁾試驗方法，其結果如表2-6所示。依照Meththa^(26,27)試驗方法其結果如表2-7所示。表中資料顯示依本實驗材料配比（組成：slag 70%，水泥熟料28%，石膏2%），依各方法所求出之抗硫能力均約略相等，如與卜特蘭水泥比較（表2-8），則本配比的水泥砂漿試體之抗硫能力很明顯較為優越。

綜合實驗結果，爐石含量佔70%，其熟料中 C_3A 含量不超過8%，其抗硫酸鹽侵蝕之能力與卜特蘭五型水泥相當，但更值得注意的是其在能量節省方面的功效。此類水泥取代第五型抗硫水泥，在歐洲已製造很久⁽²⁸⁾，其配方為卜特蘭水泥熟料(23%~28%)gbfs(70~75%)及石膏或無水石膏(gypsum or unhydrite)(1%~3%)。

(七)Hooten等⁽²⁹⁾的研究調查結果顯示50%的一型卜特蘭水泥（ C_3A 含量為12%），由爐石取代其抗硫酸鹽的能力與卜特蘭五型抗硫水泥相當。

(八)Wong與Poole⁽³⁰⁾研究硫鹽對水泥砂漿試體影響之研究指出，依據砂漿試體膨脹速率為比較基準，大多數填加波索蘭材料之試體增加抗硫酸

鹽能力，僅有少數試體抗硫酸鹽效應略少於Type II水泥製成之試體。

(v)Feldman²⁹之研究調查中顯示使用爐石較使用OPC或飛灰(FA)抗硫酸鹽侵蝕之耐久性為佳，可能 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量較低所致。

(vi)其它有很多的文獻調查，其結果均顯示高含量爐石取代之水泥，對抗硫酸鹽侵襲具有很好的效果，並可用於取代低 C_3A 含量之卜特蘭抗硫水泥。

從諸多文獻之證明得知，爐石材料應用在抗硫酸鹽之優越性，適用於海岸結構，污水下水道或含硫量較高之地區使用，但Malhotra的試驗指出，填加爐石材料之混凝土在惡劣環境作用下，其破壞反而隨爐石填加量增加而更嚴重。雖然在本省凍融現象不會發生，但乾溼之交互作用與海水浪潮之經年侵襲亦可能對爐石或飛灰海岸混凝土產生負面之作用，應加注意。至於文獻之相互矛盾則可能由於試驗方法的差異性，純從實驗室內之抗硫酸鹽試驗與透水性研究，並不足以模擬實際結構在外力與硫酸鹽交互作用下之行爲，爐石與飛灰混凝土抗海水之耐久能力將須靠海域之直接曝露而獲得更確切之佐證。

在使用爐石時，爐石含鋁量，水泥合 C_3A 量與爐石替代水泥量在探討混凝土抗硫酸鹽能力之相互關係應特加注意。

表2-5 依ASTM C452方法之硫酸鹽膨脹試驗

水泥型態	膨脹率 (%)	
	試驗時間	
	14 天	3個月
A1	0.061	0.108
A2	0.040	0.060
A3	0.056	0.096
A4	0.095	0.112
B1	0.056	0.090
B2	0.042	0.068
B3	0.070	0.117
B4	0.088	0.103
C1	0.056	0.082
C2	0.042	0.062
C3	0.051	0.090
C4	0.077	0.099
D1	0.061	0.114
D2	0.039	0.057
D3	0.065	0.105
D4	0.070	0.118

註明：A,B,C,D代表四種不同廠牌之爐石；1,2,3,4代表不同C₃A含量之水泥熟料，1為0.3%，2為2.0%，3為7.1%，4為12.3%。（組成爐石70%，水泥熟料28%，石膏2%）

表2-6 依Koch與Steinegger方法之硫酸鹽試驗（強度比）^④

水泥型態	在硫酸鹽中之強度／ 在水中之強度
A1	1.10
A2	1.12
A3	1.09
A4	0.98
B1	1.15
B2	1.13
B3	1.09
B4	0.95
C1	1.08
C2	1.08
C3	1.06
C4	0.96
D1	1.11
D2	1.09
D3	1.00
D4	0.96

表2-7 依Mehta方法之硫酸鹽試驗
(強度比)^(26,27)

水泥型態	浸於硫酸鹽後之強度/ 浸於硫酸鹽前之強度
A1	1.05
A2	1.03
A3	1.00
A4	0.96
B1	1.03
B2	1.02
B3	1.01
B4	1.00
C1	1.01
C2	1.03
C3	1.02
C4	0.98
D1	1.02
D2	1.02
D3	1.01
D4	0.95

表2-8 水泥砂漿試驗在硫酸鹽溶液與依據ASTM C452規範試驗之膨脹量²⁸

水泥種類	5年後膨脹量 (%)			依據ASTM C452膨脹量 (%)	
	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	水	14天後	2年後
A4	0.030	0.030	0.030	0.095	0.180
C3	0.038	0.049	0.023	0.051	0.103
D1	0.048	0.048	0.031	0.061	0.130
卜特蘭4型水泥			0.020	0.090	不可量測
卜特蘭3型水泥		1.280	0.024	0.070	1.060
卜特蘭1型水泥	0.120	0.160	0.015	0.035	0.187

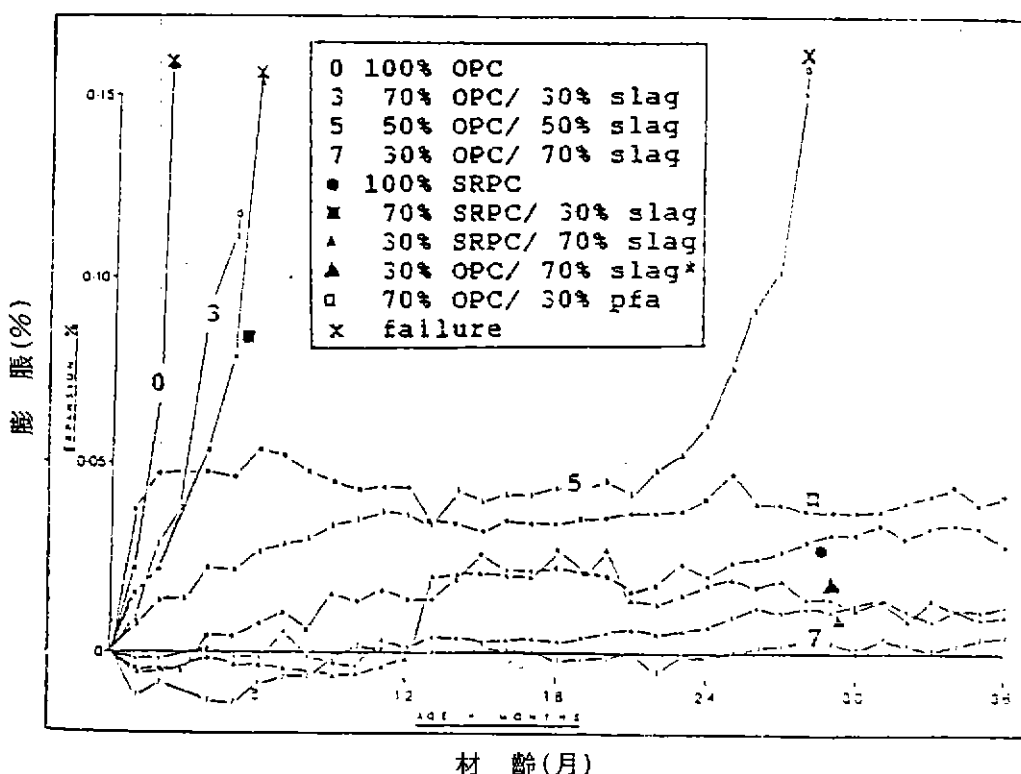


圖2-21 不同水泥組合在固定水灰比($W/C=0.6$)下之水泥砂漿試體之抗硫酸鹽膨脹試驗⁽⁶⁾。(SO₄含量為30,000 ppm)

(六)氯化物滲透之探討

混凝土結構物中埋設有金屬，如導管、管線(conducts & pipes)，鋼筋或是預力鋼線。因此金屬發生腐蝕往往為造成混凝土毀壞的主要原因之一。

金屬的腐蝕造成混凝土毀壞，其形式有膨脹龜裂及保護層的逐漸剝落。造成混凝土斷面的減小及與鋼筋之間的握裹(bond)消失，最後導致結構物的毀壞。破壞之事例在世界各濱海結構物普遍可發現，國內如澎湖跨海大橋⁽⁶⁾及各港灣之碼頭工程⁽⁷⁾。

混凝土中之鋼筋發生腐蝕為一種電化學反應，可能由於其周界之溶解離子濃度不同而形成陰極與陽極，使鐵金屬放出離子變為鐵離子，再與氫氧根離子生成氫氧化鐵之鐵銹生成物，其體積最大可增大為原金屬鐵的六倍。此

體積的膨脹為混凝土龜裂的主要原因。而上述電化學反應形成必須在含有水份之情況下才能進行。若無濕氣供應，則離子移動將受干擾而使腐蝕反應中止。通常在混凝土中之鋼筋由於水泥水化作用所提供之鹼性環境，使鋼筋表面之氧化鐵膜具鈍態；但是在氯離子侵襲的情況下。尤其是 Cl^-/OH^- 之比值大於0.6，保護鋼筋之氧化鐵層變成不穩定且具透水性。一般氯離子的來源為，水泥填加料(admixtures)、含鹽分骨材、解冰鹽類溶液的滲透(penetration of deicing salt solutions)以及海水等。所以氯離子的存在常為混凝土中鋼筋腐蝕的主因之一⁸³。

由上述可知混凝土中鋼筋腐蝕對結構物造成的損害及其反應的機理，可得到下列六點防止鋼筋發生銹蝕的策略。

- ①混凝土保護層(cover layer)建造為不透水性。
- ②在混凝土表面塗裝保護膜(waterproofing coating)。
- ③鋼筋表面塗裝環氧樹脂或鍍鋅。
- ④陽極保護（當犧牲品）。
- ⑤陰極保護。
- ⑥保持乾燥。

而使用爐石為水泥熟料或填加料，對防止混凝土中鋼筋腐蝕的相關研究文獻可概述如下。

- (1)在Uomoto以及Kobayashi⁸⁴之研究中，發現使用爐石石膏水泥(slag-gypsum cement)之混凝土在齡期 4 週時即有鋼筋腐蝕的現象。

腐蝕發生的原因可能是爐石與石膏發生反應，一般在較低的pH值較易發生腐蝕。而在長期方面，有證據顯示鋼筋腐蝕與混凝土碳化(carbonation)有密切關係。保持低的水灰比，適當的混凝土配比設計，以及足夠的保護層厚度，對於混凝土中鋼筋的腐蝕都是很重要的考慮因素。

- (2)Wiebenga⁸⁵研究調查荷蘭沿北海(North Sea)64個使用爐石的混凝土結構物，其齡期分別為 3 年到63年不等。表2-9為有關損壞調查之結果，沒有發生腐蝕的現象所佔的百分比非常高(88%)。並可得結論如下：

- ①鋼筋腐蝕與海水中氯離子滲透性有關。

②鋼筋的腐蝕與水泥的含量無關，而與齡期及保護層的厚度有密切關係。即齡期越長（超過30年），保護層越薄（低於45mm）者較易腐蝕，總之，一般而言，使用爐石水泥之混凝土結構物，因滲透性較低，對鋼筋之腐蝕行為尚稱良好。

(3)Hongan及Meusel³⁹之研究實驗，使用爐石水泥混凝土，在氯化鈣溶液中，反覆乾燥、潮濕之實驗，其電位(electrical potential)量測結果詳表2-10。

負電位值越大，越容易發生腐蝕，剛開始時，爐石水泥有較大之量測值，但在七個循環之後，爐石水泥及普通卜特蘭水泥其電位值均有下降趨勢，而無重大的腐蝕發生跡象。

(4)在Gouda⁴⁰之研究調查。以靜電極化技術(galvanostatic polarization technique)研究使用爐石水泥之鋼筋腐蝕現象。其使用線極化量測方式(linear polarization measurements)所得結果如表2-11。其抗腐蝕的能力與爐石的細度有很大的關係。使用比表面積(blaine area)高的爐石水泥，其鋼筋腐蝕的情形與一般卜特蘭水泥相近。

(5)荷蘭水泥公司(Dutch cement industry)之混凝土研究中心做過很多深入的研究，調查結果顯示高爐水泥混凝土因滲透性(permeability)較低，所以對於鹼性骨材反應及硫酸鹽類侵襲的抵抗能力較高。依照Bakker⁴¹之試驗結果（詳如表2-12），由表中可看出高爐水泥較普通卜特蘭水泥，其滲透性要低得很多。在常溫之下，此一滲透性的差別，即為高爐水泥與OPC對於抗鹼骨材反應、抗硫酸鹽性以及抗氯離子滲透性(chloride penetration)等之不同的原因⁴²，其在養護或水化反應溫度較高的情況之下亦然。

(6)Roy, Kumar及Rhodes⁴³的研究，在模擬的海水溶液下，研究氯化鈉等之擴散(diffusion)情形，其結果顯示使用混合水泥，對於氯離子及硫酸根離子的擴散較OPC為低，因為其有較低的孔隙(lower porosities)及較細的孔隙結構(finer pore structure)。鹽類離子的移動及擴散，對混凝土耐久性影響很大，例如氯離子對混凝土鋼筋的腐蝕即有很大的影響⁴⁴，其它有關類似的研究，了解水灰比、溫度及化

學組成對於擴散、滲透，造成混凝土材料毀壞的情形^{(42)~(44)}。

(7)高爐水泥在海水環境中與硫酸鹽作用時會生成緊密的矽酸鈣水合物(silicate hydrate)，而普通水泥則因含有較多的 C_3A ，與硫酸鹽作用生成鈣帆石以致造成混凝土龜裂。故高爐水泥對海水的抵抗力極佳，且其抵抗力隨高爐石在水泥中含量之增加而增加。

在荷蘭，含高爐石70%以上之高爐水泥砂漿試體，經30~50年的長久海水浸泡後仍表現非常良好的行為。至於荷蘭在海堤、港灣工程，跨海大橋建築方面所用之混凝土則皆屬含爐石量高(60~75%)的高爐水泥。

圖2-22說明混凝土試體置放于海水中25年後，其總體未受損部份之比率，由圖可見含爐石量為水泥重之60~75%的高爐水泥表現最佳⁽⁵⁰⁾。

圖2-23則說明不同水泥混凝土試體經十九年海水浸泡後所得到之結果。相形之下，普通卜特蘭水泥混凝土之耐蝕力遠遜於高爐水泥混凝土。此外在圖中亦可看出，使用水灰比愈低時，其抗蝕能力愈強⁽⁵⁰⁾。

表2-9 北海爐石混凝土損壞調查⁽⁵⁰⁾

損害程度	觀測之數量；() 為%			
	腐蝕	龜裂	裂痕	風化
無	56(88)	42(66)	58(91)	32(50)
少許	2(3)	14(22)	5(8)	24(38)
中等	3(4.5)	7(11)	1(1)	8(12)
嚴重	3(4.5)	2(1)	0(0)	0(0)
合計	64(100)	64(100)	64(100)	64(100)

表2-10 相對於銅／硫酸銅半電池之電位值（伏特）⁵⁰

循環	0 %SC	40%SC	50%SC	65%SC	0 %SC	40%SC	50%SC	65%SC
	0.40W/C	0.4W/C	0.40W/C	0.40W/C	0.55W/C	0.55W/C	0.55W/C	0.55W/C
1	-0.09	-0.18	-0.48	-0.50	-0.05	-0.48	0.54	-0.50
2	-0.03	-0.08	-0.30	-0.36	-0.07	-0.40	-0.58	-0.45
3	-0.03	-0.08	-0.29	-0.35	-0.07	-0.39	-0.58	-0.45
4	-0.06	-0.07	-0.30	-0.35	-0.08	-0.39	-0.17	-0.21
5	-0.06	-0.07	-0.31	-0.36	-0.09	-0.11	-0.13	----
6	-0.06	-0.08	-0.31	-0.36	-0.10	-0.11	-0.12	0.11
7	-0.04	-0.04	-0.07	-0.19	-0.10	-0.06	-0.11	-0.09
8	-0.05	-0.03	-0.08	-0.02	-0.06	-0.05	-0.09	-0.08
9	-0.03	-0.03	-0.05	-0.03	-0.06	-0.04	----	----
10	-0.03	-0.03	-0.05	-0.04	-0.05	-0.04	-0.09	-0.08
11	-0.05	-0.03	-0.06	-0.04	-0.05	-0.05	-0.10	0.08
12	-0.13	-0.03	-0.13	-0.12	-0.06	-0.12	-0.13	-0.14
13	-0.14	-0.03	-0.13	-0.13	-0.14	-0.13	-0.14	-0.15
14	-0.11	-0.09	-0.12	-0.11	-0.11	-0.12	-0.13	-0.14
15	-0.14	-0.10	-0.13	-0.12	-0.18	-0.13	-0.13	-0.14

SC：為礆石含量

W/C：水灰比

表2-11 不同之材質下鋼筋之腐蝕速率（線性極化量測結果）³⁷⁾

材 質	平均極化阻抗 (μ A/mV)	腐 蝕 速 率 (mdd)
爐石水泥（細度6535m ² /g）		
(1)W/C=0.18	0.05	0.31
(2)W/C=0.25	0.04	0.27
(3)W/C=0.70	0.05	0.31
(4)W/C=0.25+1%CaCl ₂	0.09	0.63
(5)W/C=0.25+1%CaCl ₂	0.23	1.57
.....		
爐石水泥（細度3600m ² /g）		
(1)W/C=0.18	0.08	0.60
(2)W/C=0.25	0.07	0.50
(3)W/C=0.70	0.28	0.60
(4)W/C=0.25+1%CaCl ₂	0.23	1.57
(5)W/C=0.25+1%CaCl ₂	0.27	1.88
.....		
(1)石灰水	0.05	0.31
(2)石灰水+2%CaCl ₂	0.27	1.88
(3)石灰水+3%CaCl ₂	0.50	3.13
(4)石灰水+5%CaCl ₂	0.73	5.01

表2-12 使用普通卜特蘭水泥與高爐石水泥製作之水泥砂漿在不同之硬化時下鈉、鉀及氯離子之擴散係數⁽⁸⁾

擴散之離子	硬化時間 (日)	水灰比	擴散係數 $D_m (\times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec})$		
			OPC	BFC	爐石含量 (%)
鈉(Na^+)	3	0.50	7.02	1.44	75
	14	0.50	2.38	0.10	75
	28	0.55	1.47	0.05	60
	28	0.60	3.16	0.05	60
	28	0.65	4.73	0.06	60
鉀(K^+)	3	0.50	11.38	2.10	75
	14	0.50	3.68	0.21	75
氯(Cl^-)	28	0.55	3.57	0.12	60
	28	0.60	6.21	0.23	60
	28	0.65	0.53	0.41	60
	5	0.50	5.08	0.42	75
	103	0.50	2.96	0.04	75
	60	0.50	4.47	0.41	65

OPC：普通卜特蘭水泥

BFC：高爐石水泥

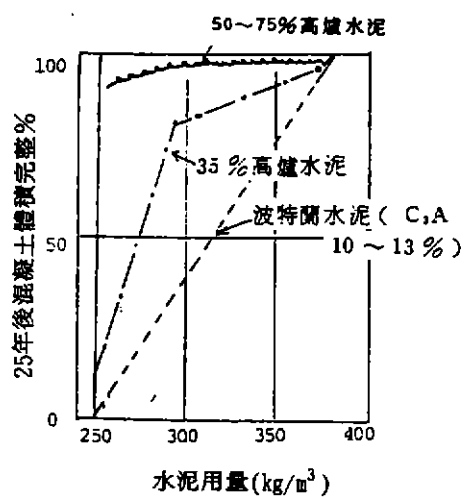


圖2-22 曝露於海水25年後之損壞情形

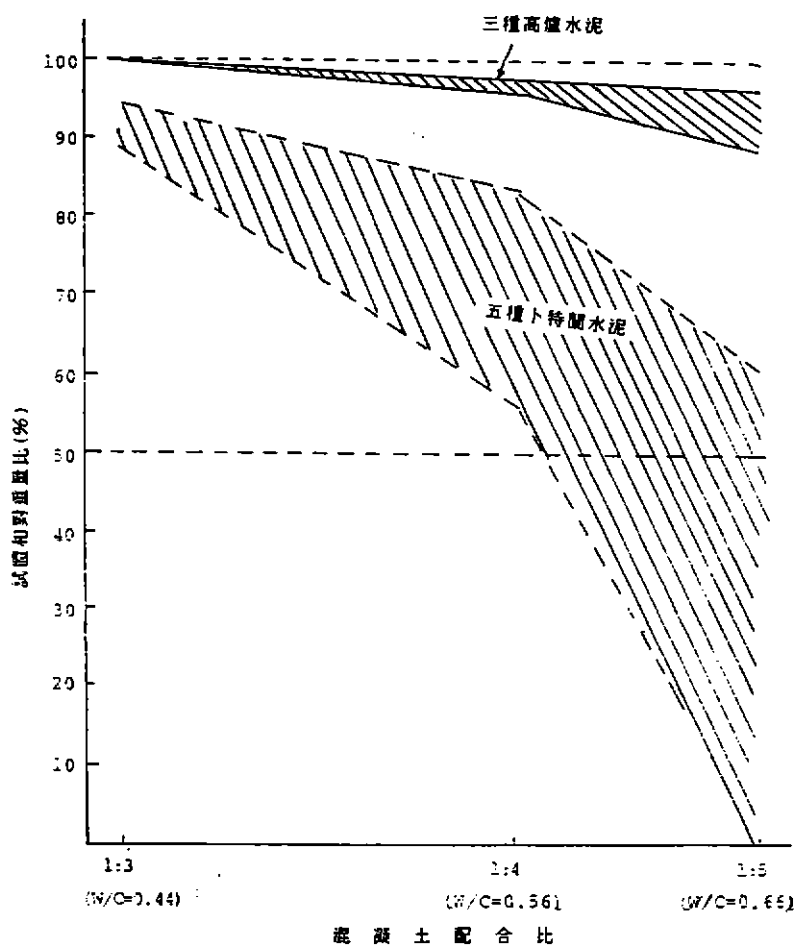


圖2-23 在海水中經19年間浸泡的混凝土角柱體之相對重量

綜合德、比、荷三國以不同水泥製成混凝土試體，長期放置於潮汐帶海水中所得到的結論有如下諸點⁶⁹：

- (1)含高爐石50%以上之高爐水泥混凝土顯示有極佳之耐蝕性。
- (2)水泥中所含 C_3A 數量 $> 9\%$ 者，其耐久性最差。
- (3) C_3A 含量在 6% ，混凝土中水泥含量在 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 時，其耐久性與高爐水泥混凝土者相當。
- (4) C_3A 含量在 3% 時，則不論水泥含量在合理範圍內如何變化，其耐久性均可與高爐水泥相等。
- (5)含高爐石比例略低，但其中 C_3A 及 $C_2S(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ 含量適度， CaO/SiO_2 比在低值， Al_2O_3 量亦低的高爐水泥混凝土亦有較佳之耐海水侵襲能力。
- (6)高爐水泥之透水性低，故其混凝土不易為氯離子所侵入，故其所用之鋼筋直徑可為普通卜特蘭水泥混凝土之半值，即原用直徑六分者，在高爐水泥中用三分者已足。

(七)保護層厚度之影響性

濱海地區之鋼筋混凝土結構物，如果無龜裂時，氯離子滲透遵循Fick之擴散法則，從混凝土表面滲透至鋼筋表面。因此如果能建造緻密度高保護層厚之混凝土，則氯離子擴散之速率會非常地緩慢。根據大郎先生之實驗⁶⁹，在潮汐帶附近對已建造15年之棧橋混凝土之橋面板，進行調查其保護層厚度與氯離子擴散速率（以水泥漿中氯離子含量表示）之關係求其擴散係數，其結果如表2-13所示。

表中顯示，保護層厚度愈厚，滲透侵入混凝土內部之氯離子量愈少。所以增加保護層厚度對於防止水份，鹽份及氧氣之滲透有顯著之效果，在防蝕之對策上為一非常重要的措施之一。

近年來鋼筋混凝土用的鋼筋直徑有增大之趨勢，使用大直徑之鋼筋時，由於對混凝土之乾燥收縮之拘束增大，內部易產生微細龜裂，又由於混凝土之界面增大易產生泌水，易產生孔蝕，降低其防蝕性。因此設計時應考慮配合鋼筋直徑比以決定鋼筋混凝土保護層之厚度。據Attimtay⁶⁹及page⁶⁹實驗，保護層厚度與鋼筋直徑之比值採取 $2.5 \sim 3.0$ 時，其防蝕性最為有效及小林

，宮川先生⁶⁰等曾做過加速試驗結果後，亦主張保護層與鋼筋直徑之比以 4 爲宜。日本建築學會⁶⁴之研究，請參考圖 2-24。讀取各水灰比下之氯離子擴散係數，如圖 2-25 所示，再以臨海地域別乘修正係數，將計算結果繪製於圖 2-26⁶⁰，以氯離子達到臨界含鹽濃度之年數，決定具有耐久性保護層之厚度。對於海洋混凝土結構鋼筋保護層厚度，各國都訂有規範，而日本建築學會規定臨海地區之混凝土保護層厚度爲大氣區及海中區均爲 5 公分而潑濺帶爲 7 公分。

表 2-13 棧橋混凝土橋面板之氯離子含量與保護層厚度之關係

棧橋 之 混 凝 土 面 板	水泥單位用量(C) 及水灰比(W/C)	保護層厚度 (cm)	氯離子含量* ² (%)	經過年數 (年)	計 算 值	
					Co%	Dc* ¹
	C=315 kg/m ³ W/C=36%	2.5	0.08	20	0.1	3.9
		7.5	0.05			
		12.5	0.035			
		17.5	0.03			
	C=430 kg/m ³ W/C=36%	2.5	0.53	20	0.56	1.3
		7.5	0.21			
		12.5	0.10			
		17.5	0.03			

*1: $\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$

*2: 氯離子含量與水泥漿之重量比(%)

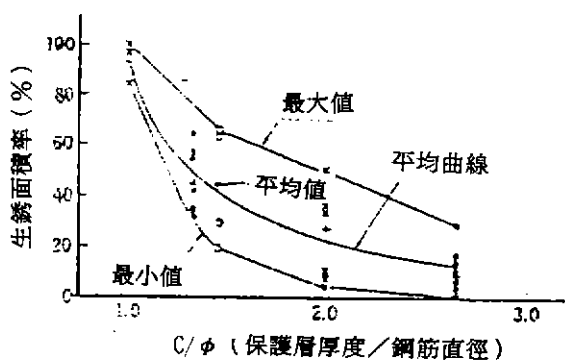


圖2-24 C/ϕ 對鋼筋腐蝕之影響

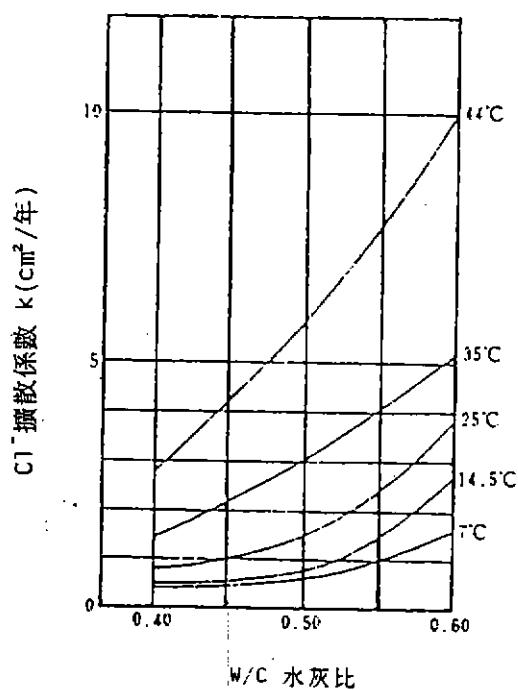


圖2-25 各水灰比下之 Cl^- 擴散係數

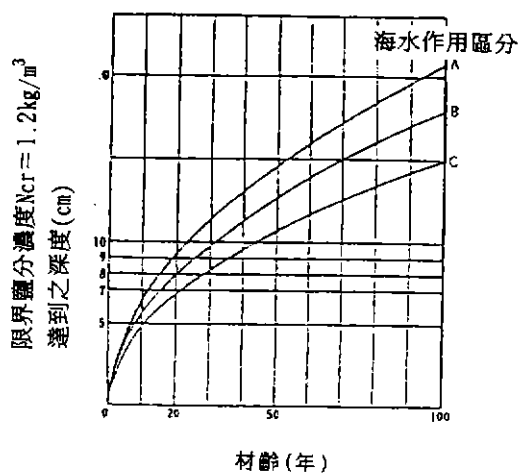


圖2-26 鹽份侵透深度與材齡

第三章 研究規劃及試驗項目

鋼筋混凝土在常態環境下為一極具耐久性之材料，但浸漬於海洋惡劣環境下，則其耐久性堪慮。鑑於許多國外研究報告指出，高爐石粉添加於普通混凝土內具有優越之抵抗硫酸鹽（海水）侵蝕之效應，並且又可改善混凝土之品質。因此，為瞭解海域地區使用混凝土材料之耐久性以及探討鋼筋混凝土結構物劣化之原因，必須進行各項試驗及長期性之曝露試驗。

3-1 研究規劃

本研究分為短期性試驗（包含有多項材料基本性質試驗及加速試驗）與長期曝露試驗等兩部份。相關試驗內容，簡述如下：

1. 基本性質試驗：包括混凝土之抗壓強度、透水係數、彈性模數及凝結時間等項目。
2. 短期加速試驗：採用天然海水經乾濕循環試驗後，進行抗壓強度、透水係數、彈性模數、腐蝕電位、氯離子滲透、硫酸鹽侵入、保護層厚度之影響性等各項試驗工作。
3. 長期曝露試驗：在本所海水循環水槽內，於潮汐帶置放試體，定期取回進行上述各項試驗工作。

上述各部份之試驗條件如下：

A、基本性質試驗部份

試體之養生齡期如下：

1. 抗壓強度：7天，14天，28天，56天，90天，180天。
2. 透水係數：28天，56天，90天，180天。
3. 彈性模數：28天，56天，90天，180天。

B、短期加速試驗條件：

1. 採用天然海水循環試驗。
2. 溫度50℃，相對濕度0%，乾燥4天。
3. 溫度20℃，相對濕度100%，潤濕3天。

4. 7天為一循環週期(cycle)。
5. 預計進行15~20次之乾濕循環週期。
6. 腐蝕電位值每一週期量測一次，直到量測所得電位值 $< -350\text{mV}$ 時，即停止試驗。

C、長期曝露試驗部份：

1. 試驗場所：本所內海水循環水槽，其位置及水槽配置如圖3-1及圖3-2。
。本海水循環水槽距台中港區碼頭岸邊約250公尺，直接抽取台中港區內13、14號碼頭間之海水，經由港區內之涵管導入本所海水循環水槽內。為模擬真實海水每日潮汐變化，水槽相對配合做抽取與排放海水（約每間隔6小時抽排一次），使試驗水槽之狀況與實際海水潮汐漲落的情形配合一致。
2. 試驗範圍：潮汐帶。
3. 試驗時間：1年期、2年期、3年期、4年期、5年期。

3-2 試體材質設計

1. 配比設計（依據ACI 211.1-815規範設計）
 - a. 水灰比：0.5、0.7。
 - b. 爐石摻料比例：0%、40%、60%、80%。
 - c. 坍度：8~10cm。
2. 使用材料
 - a. 水泥：台灣水泥公司第一型水泥。
 - b. 水淬高爐石粉（中鋼公司水淬高爐石）。其化學成份如表3-1所示。
 - c. 鋼筋：省產一般竹節鋼筋表面刨光，直徑10mm，長度270mm。
 - d. 骨材：粗骨材係採用大甲溪之碎石，最大粒徑為2.5cm。細骨材係用人工碎砂及天然河砂混合料，細度模數為2.72。各種骨材分析結果如表3-2至表3-4所示。
 - e. 拌合水：飲用之自來水。

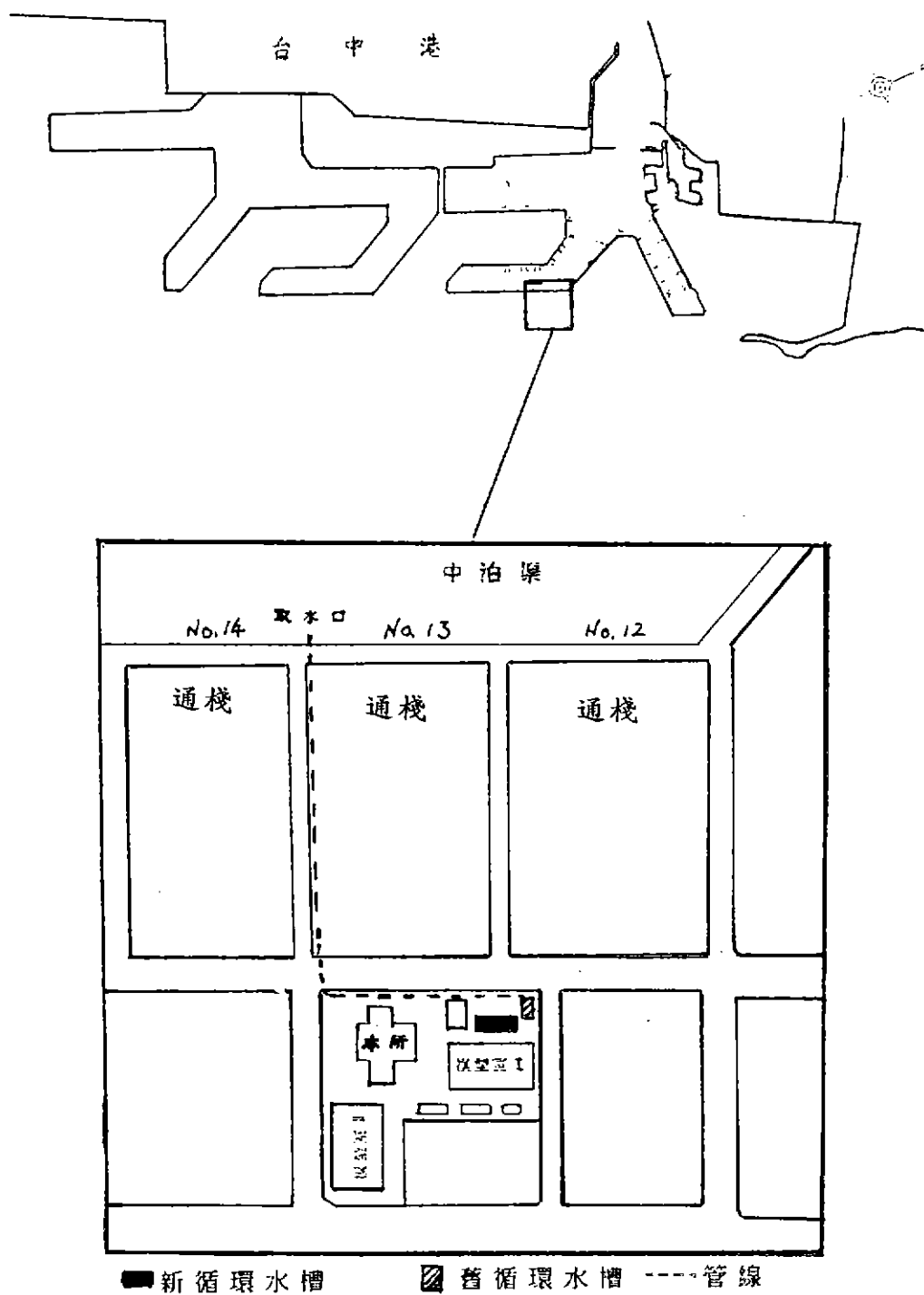


圖3-1 海水循環水槽之位置圖

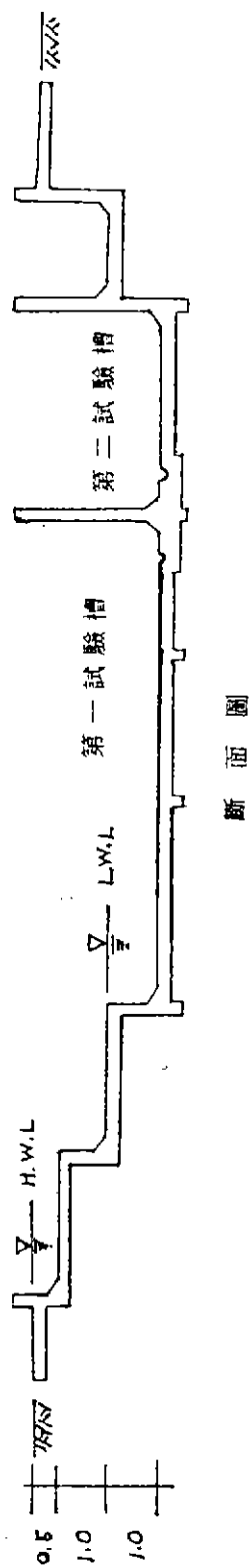
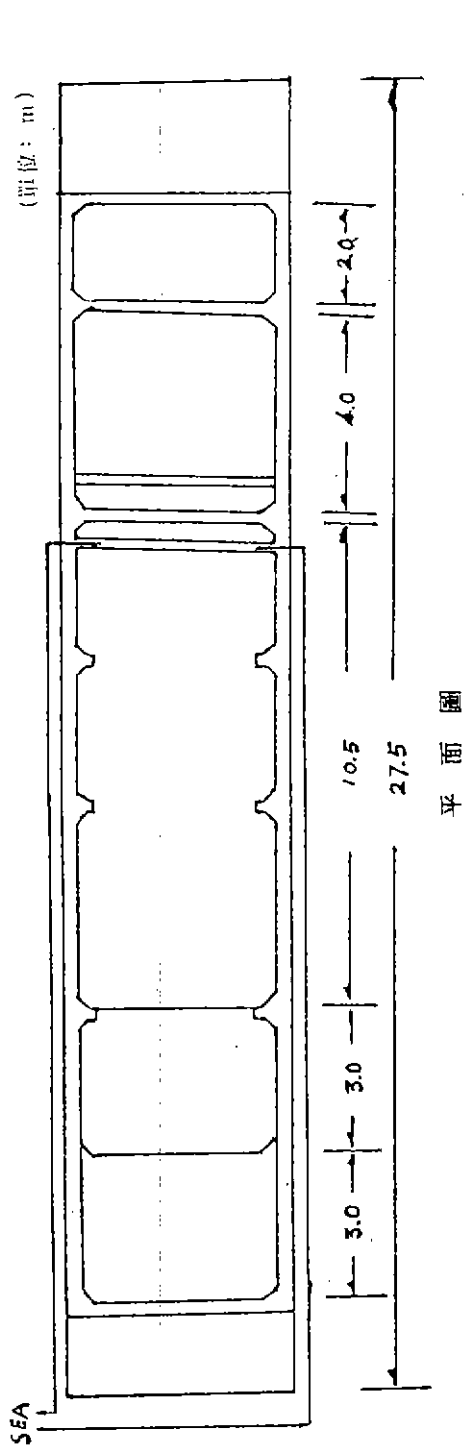


圖3-2 海水循環水槽配置圖

表3-1 高爐石粉及水泥熟料之化學組成與物理性質

化學成份	高爐石粉	卜特蘭水泥第 I 型
CaO (%)	39.3	63.7
MgO (%)	8.0	1.5
SiO ₂ (%)	33.6	22
Al ₂ O ₃ (%)	14.0	5.1
SO ₃ (%)	0.88	2.0
S (%)	0.8	-
FeO (%)	0.7	-
P ₂ O ₅ (%)	<0.01	-
MnO (%)	0.7	0.14
TiO ₂ (%)	0.5	0.29
K ₂ O (%)	0.4	0.59
燒失量 (%)	-	1.06
比 量	2.93	3.15
細 度 (cm ² /g, blaine)	3500	3400

表3-2 粗骨材篩分析結果

篩網尺寸 in(mm)	停留 (%)	通過 (%)
1 (25.0)	0	100
3/4(19.0)	16.5	83.5
1/2(12.5)	33.4	50.1
3/8(9.5)	21.9	28.2
#4 (4.75)	25.2	3.0
#8 (2.36)	3.0	

表3-3 細骨材篩分析結果

篩網尺寸 No. (mm)	停留 (%)		通過 (%)
	個別	累計	
# 4(4.75)	1.2	1.2	98.8
# 8(2.36)	12.5	13.7	86.3
# 16(1.18)	15.9	29.6	70.4
# 30(0.60)	23.1	52.7	47.3
# 50(0.30)	26.2	78.9	21.1
#100(0.15)	17.0	95.9	4.1
Pan	4.1		
細度模數 F.M.	2.72		

表3-4 骨材物理性質分析結果

物理性質 骨材	比重	吸水率 (%)	單位體積 (kg/m ³)	含泥量 (%)
粗骨材	2.63	1.07	1547	0.39
細骨材	2.63	1.23	1616	0.95

3-3 試體製作

依ACI 211.1~815規範，進行混凝土配比設計。爾後按ASTM規範製作標準試體，每種配比製作三個試體，所需製作試體種類及數量如下表3-5：

表3-5 試驗製作之試體種類及數量

試體種類尺寸	數量	說明
1. $10\phi \times 20\text{cm}$	72	短期加速（乾濕循環）試驗
2. $15\phi \times 30\text{cm}$	240	長期曝露試驗
3. $15\phi \times 30\text{cm}$	240	基本物理性質試驗

進行鋼筋腐蝕電位量測之試體，則於試體中適當保護層厚度處埋置有鋼筋。如 $10\phi \times 20\text{cm}$ 試體，鋼筋置於保護層5公分處， $15\phi \times 30\text{cm}$ 試體則於保護層厚度2公分、4公分及7公分處各埋置一根鋼筋。

本研究計劃中各類試體製作過程，從進料、秤重、拌合、灌製、養生過程以及進行各項試驗分析情形，如圖3-3至圖3-20所示。

3-4 試驗項目與規範

本研究中所進行之各項試驗及其規範，簡列於下表3-6中：

表3-6 各項試驗及項目及其規範

試驗項目	試驗規範	試驗區分		
		基本性質試驗	短期加速試驗 (乾濕循環)	長期曝 露試驗
抗壓強度	ASTM C-39	√	√	√
透水係數	U.S. Bureau of Reclamation	√	√	√
彈性係數	ASTM C-469	√	√	√
腐蝕電位量測	ASTM C-876		√	√
Cl^- 含量分析	ASTM C-114		√	√
SO_3^{-2} 含量分析	ASTM C-114		√	√
保護層厚度之影響				√
凝結時間	ASTM C-403	√		

各項試驗方法及步驟簡述於后：



圖3-3 混凝土各項材料準備之情形



圖3-5 混凝土拌合後量測漿體溫度

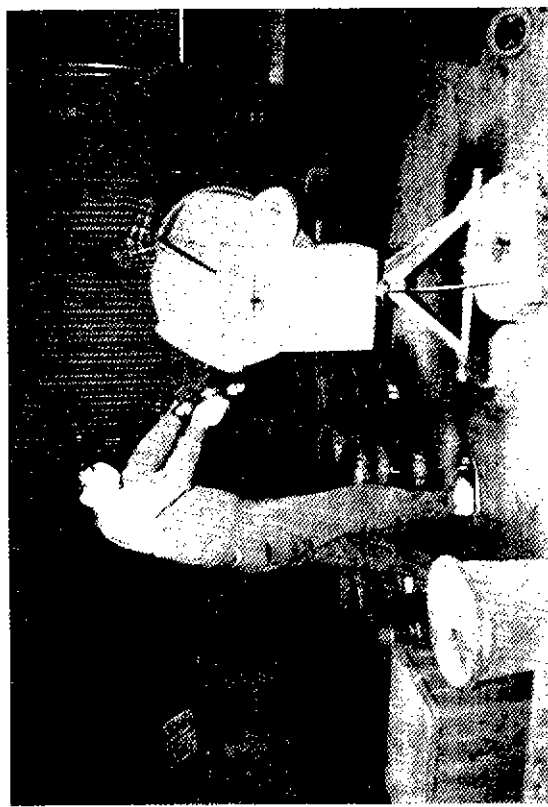


圖3-4 混凝土進料拌合之情形



圖3-6 量測混凝土之坍度

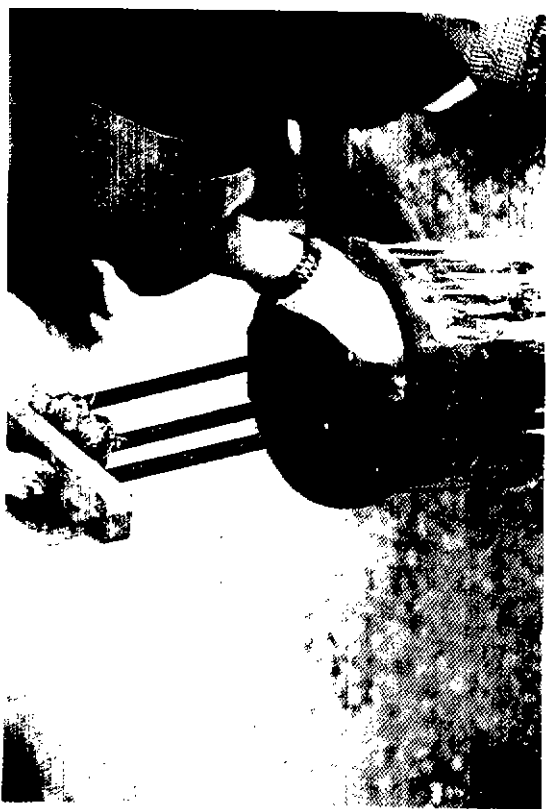


圖3-7 試體內埋入鋼筋之情形



圖3-8 試體內埋入鋼筋灌製之情形



圖3-9 試體編號情形

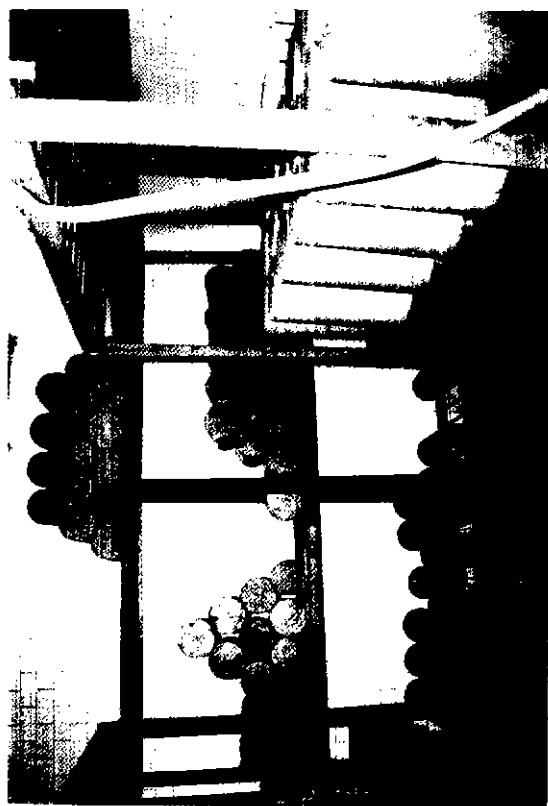


圖3-10 試體置於養生室養生之情形



圖3-11 加速試驗用之小試體



圖3-12 試體之蓋平（做抗壓強度用）



圖3-13 相應變計於頂壓試體上



圖3-14 試體做抗壓強度試驗情形

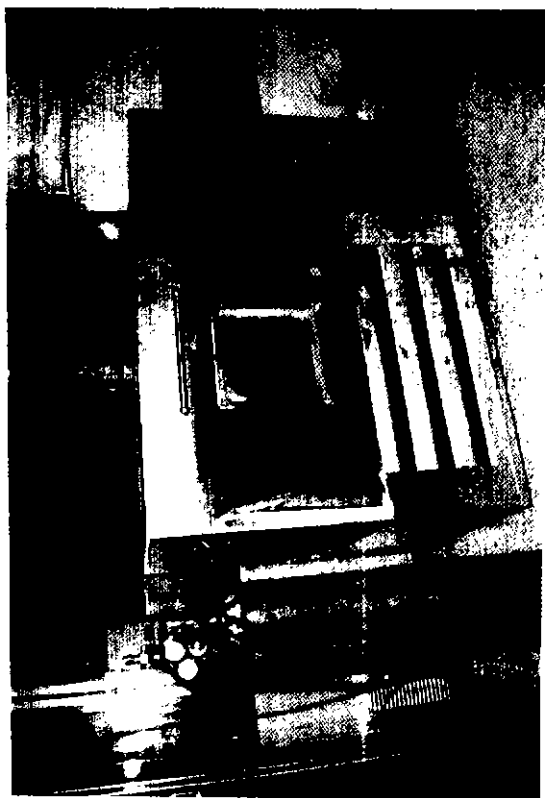


圖3-17 加速（乾濕循環）試驗儀器



圖3-18 質入試驗之情形

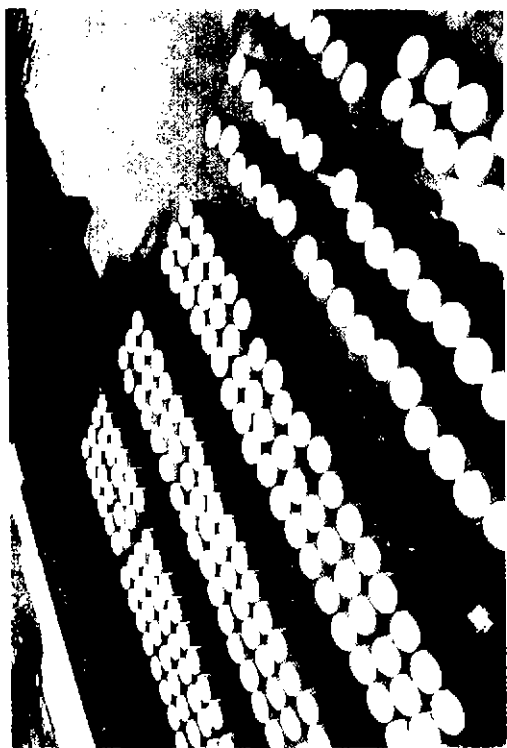


圖3-15 試體擺置於海水循環水槽內之情形



圖3-16 海水循環水槽之全景



圖3-19 試體做透水試驗時用石臘及松香灌入試體模內之情形

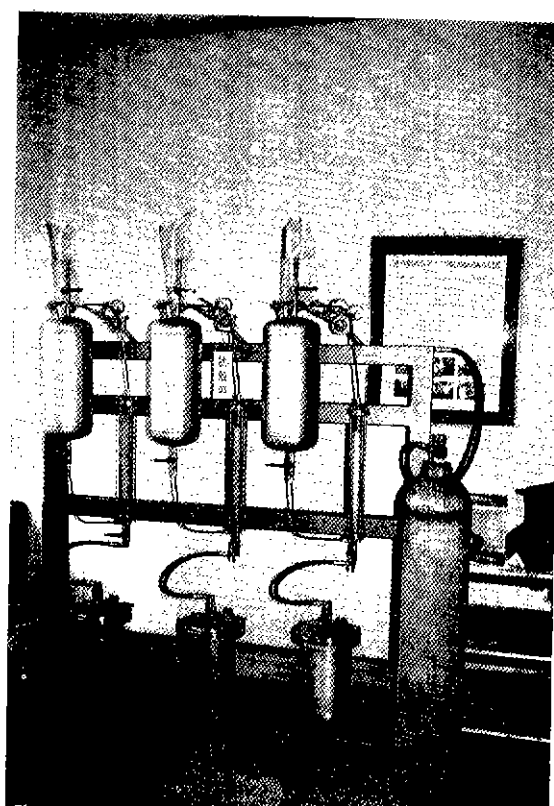


圖3-20 透水試驗設備

A. 透水試驗

(一) 試驗目的

本試驗目的，在求添加不同含量的高爐熟料後，各種爐石混凝土之透水特性。由於高爐石熟料成份中二氧化矽(SiO_2)含量多，故添加於混凝土中時，與混凝土中的氫氧化鈣(Ca(OH)_2)發生波索蘭反應而形成C-S-H膠體，並使孔隙減小，降低混凝土的透水性。透水性一旦降低，則水也就無法將一些有害物引入混凝土中。

(二) 試驗步驟及量測方法

1. 試驗設備

本試驗所採用之設備為美壘務局型（如圖3-20）具有三組試體容器直徑為17公分，適合 $15\phi \times 30\text{cm}$ 之試體，連接三組儲水槽及三個量筒，量筒內徑為30mm，其側緣備一量尺，精度1mm，用於讀取滲透水量。量筒及儲水槽相互連通，並連接一氮氣瓶。氮氣瓶出口端分成三岐管，每一岐管各裝有一分壓錶，藉以調整每一量筒之氣壓，各主要管路間皆裝有閥門，可以開關設備中之迴路。由於氮氣瓶所提供之壓力，使本試驗為定水頭透水試驗法。

2. 試驗前準備

- (1) 採用石腊及松香依1:1之比例，經融熔後，灌入模內使試體之側面成為一不透水面。
- (2) 先灌水後排氣，使連接試體之各管路中無氣泡存在。
- (3) 開啓氮氣瓶，並調整分壓錶至試驗所需之壓力。
- (4) 調整量筒之水面高度，並從量筒側緣之量尺讀取起始讀數。

3. 試驗

經試驗前準備就緒後，即開始進行試驗。試驗間得隨時調整各分壓錶之壓力，使試驗之壓力維持一定。

4. 記錄

於試驗開始後之0，1，2，4小時，1，2，3，4日止計測試4日，記錄量筒之水位，所記錄之時間及其透水係數，便可計算該量測試體之透水係數。

5. 計算

由達西公式(Darcy formula)：

$$V = Ki \dots\dots\dots (式3-1)$$

$$Q = Av \quad \dots\dots\dots (式3-2)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} D_1^2 \Delta h \div \Delta t \quad \dots\dots\dots (式3-3)$$

$$A = \frac{\pi}{4} D_2^2 \quad \dots\dots\dots (式3-4)$$

$$i = p/r \div L \quad \dots\dots\dots (式3-5)$$

$$* K = \frac{\frac{\pi}{4} D_1^2 \Delta h r L}{\frac{\pi}{4} D_2^2 P \Delta t} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \cdot \frac{\Delta h r L}{p(t_2 - t_1)} \quad \dots (式3-6)$$

式中：

K：滲透係數

D₁：量筒之直徑(30mm)

D₂：試體之直徑(150mm)

P：試驗氣壓（採用5kg/cm²）

△h：量筒之水位差距

r：水之密度

L：試體長度(300mm)

△t：試驗時間差距

將已知各量代入式(3-6)，可得：

$$k : 2.4 \times 10^{-4} \Delta h / \Delta t \quad \dots\dots\dots (式3-7)$$

B. 抗壓及彈性模數試驗

(一) 試驗目的：

混凝土為一種複雜之組合材料（由水、粗骨材、細骨材、摻劑、水泥等組成），其中以水泥影響混凝土最鉅，且單價成本最高，為改善水泥對混凝土材料部份性質之不良影響，增加耐久性，並且降低生產成本，且符合經濟效益，故研究添加爐石粉取代部份水泥，以求達到節約目的。本試驗探討以添加不同比例之爐石粉對混凝土抗壓強度及彈性模數之影響程度，並作柏松比(poisson ratio)試驗。

(二)試驗步驟及量測方法

1. 試驗設備

(1)抗壓強度試驗係按ASTM C 39-72規範進行試驗，試驗設備主要為萬能試驗機，最大荷重能量100噸，附屬設備有一組壓具，一圓盤刻度、一標準轉速盤(load pacer)及指示針一組。其中上壓具為三半球形一凹一之組合，可以隨試體面作自由轉動，圓盤刻度共有500小格，可精確讀取全荷重之五百分之一，標準轉速盤可以作為標準荷重速率之準則，其設定值如表3-7所示，而指示針具有一記錄指針隨荷重數值而改變，一最大荷重指針不隨荷重數值而改變，但試驗時與記錄指針成一體，當試體破壞時，應力消退，記錄指針退卻，最大荷重指針則停留於最大荷重處。

(2)彈性模數試驗係依據ASTM C 469-65規範進行試驗，為精確讀取試體應變數據，本試驗配合7V13 DATA LOGGER應變測定儀讀取應變數據，量測時讀數可讀至 1×10^{-6} 。

(3)柏松比試驗：同彈性模數試驗過程。

2. 試驗準備

適齡之試體自23°C養護室取出後，利用石膏蓋平，蓋平後試體其受壓之兩平面應保持平行，誤差值不得超過ASTM C39之規定。

抗壓強度試驗之進行參照ASTM C39規範，彈性模數及柏松比試驗之進行則參照ASTM C469-65規範，其中應變測定採用應變計配合7V13 DATA LOGGER應變測定儀測定，試驗前，分別在試體一半高度位置，平行於加壓方向之任二相對側面上，貼上測定縱橫二向應變計共二片，測點之應變值是以二應變計測定之平均數為準。

3. 試驗步驟

- (1)將試體置於萬能試驗機上之壓具內，使試體之中心與壓具之中心成一直線，控制油壓，試驗機之指示針歸零。
- (2)將DATA LOGGER所需數據設定輸入，並使讀數歸零平衡。
- (3)調整標準轉速盤(load pacer)之速率。
- (4)開啓油壓閥門，執行試驗，油壓每至讀數為 5^T 、 7.5^T 、 10^T 、 12.5^T 、 15^T 、 17.5^T 、 20^T 、 22.5^T 、 25^T 、 27.5^T 、 30^T 及 35^T 後，每增加 5^T 時，按DATA LOGGER RUN指令，讀取試體應變量，至試體破壞時止。 100^T 萬

能試驗機之試驗荷重速率表如表3-7所示。

- (5) 試體破壞時，應力消退，最大荷重指示針停留之位置為該試體之抗壓荷重，讀取並記錄之。

4. 計算

- (1) 抗壓強度 $\alpha = P/A$

式中P=破壞時抗壓荷重（萬能試驗機上讀數）

$$A = \text{試體之受壓平均斷面積} \quad A = \frac{\pi}{4} d^2$$

- (2) 彈性模數及柏松比之推算，依據試驗所得縱橫二向之應力應變曲線，利用下列二式（式3-8，式3-9）求之，但正割模數之上界壓力採用極限抗壓強度的1/3，如圖3-21所示。

表3-7 100T萬能試驗機之試驗荷重速率表(ASTM)

名 稱	噸 數	5T	10T	25T	50T	100T
尺 寸	Load Pacer	小 平均 大	小 平均 大	小 平均 大	小 平均 大	小 平均 大
抗 壓	10 ϕ ×20cm	673 — —	336 600 840	135 240 337	67 120 167	34 60 86
	15 ϕ ×30cm	— — —	770 — —	308 540 770	154 270 385	77 135 193
劈 裂	10 ϕ ×20cm	222 333 444	111 166 222	44 67 89	22 33 44	11 17 22
	15 ϕ ×30cm	500 750 1000	250 375 500	100 150 200	50 75 100	25 38 50
抗 彎	4×4×14cm	20 24 28	10 12 14	4 5 6	2 2 3	1 2 2
	6×6×20cm	45 54 63	23 28 33	9 11 13	5 6 7	2 2 3
彈性模數 及 柏 松 比	10 ϕ ×20cm	————	600	240	120	60
	15 ϕ ×30cm	————	————	540	270	135
韌 性	4×4×14cm	24	12	5	2	2
	6×6×20cm	54	28	11	6	2
行程控制	4×4×14cm	(0.05mm~0.1mm/min)				
	6×6×14cm	→0.87×(")				

$$\text{彈性係數 } E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.000500} \dots\dots\dots (\text{式3-8})$$

$$\text{柏松比 } \mu = \frac{\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}}{\epsilon_2 - 0.000500} \dots\dots\dots (\text{式3-9})$$

式中： S_2 ＝相對於1/3極限（破壞時）強度之應力(kgf/cm²)

S_1 ＝相對於縱向應變量 ϵ_1 達0.000500之應力(kgf/cm²)

ϵ_2 ＝由應力 S_2 造成之應變量

$\epsilon_1 = 0.000500$

ϵ_{t2} ＝由壓力 S_2 造成橫向應變量

ϵ_{t1} ＝由壓 S_1 造成之橫向應變量

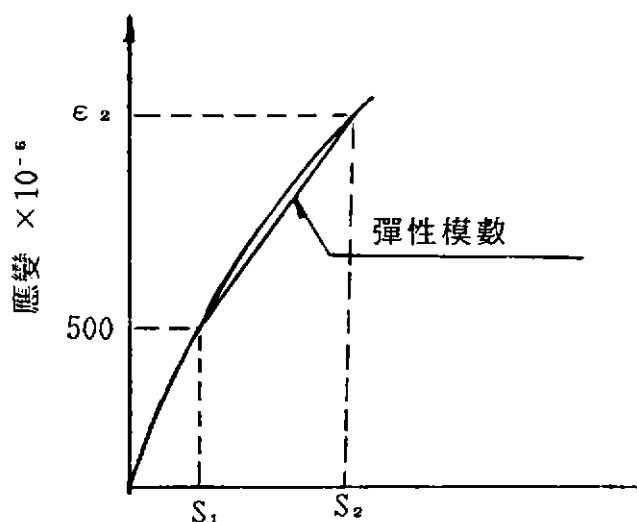


圖3-21 混凝土應力應變圖

C、凝結時間試驗

(一)試驗目的

本試驗之目的，在求高爐混凝土中不同爐石含量之初凝、終凝時間，以瞭解初凝前可供作業之時間，便利安排灌漿作業等施工規劃，及終凝時間以安排後續作業，期能使工程施工更加順利。

(二)試驗步驟及量測方法

本試驗依據ASTM-C403規範試驗。

1. 試驗設備

- (1)試驗設備為貫入壓力計，貫入總力可自0至200磅，及一組可更換貫入桿，其截面積自 1in.^2 至 $1/40\text{in.}^2$ 共6個。
- (2)容器採用夾板製木模，邊長及高至少為 5in. ，木模表面塗上重油，以避免木模吸收拌合水而影響試驗結果。

2. 試驗前準備

混凝土拌合後以濕篩法篩取通過4號篩之水泥砂漿，充分拌合後置於木模內搗實之，除去表面溢水後加蓋以防止拌合水蒸發。

3. 試驗

- (1)拌合水接觸水泥後開始計時，約3～4小時後作第一次貫入試驗，如圖3-18所示。以後視凝結速度每數小時至數十分鐘做一次，但每一試體至少試驗6次，記錄試驗時間及貫入總力。
- (2)貫入壓力計在 10 ± 2 秒內，漸漸加壓使貫入桿貫入 $1\pm 1/16\text{in.}$ ，讀取貫入總力。
- (3)貫入點選擇未擾動之位置，即兩次貫入點相距二倍桿徑以上，並不小於 $1/2\text{in.}$ 。
- (4)試驗室之室溫為 $25^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ 。

4. 計算

- (1)凝結時間=貫入試驗之時間－拌合水和爐石水泥接觸之時間。
- (2)貫入壓力=貫入總力÷貫入桿截面積。
- (3)以凝結時間為橫座標，貫入壓力為縱座標，作成二次迴歸曲線，如圖4-7、圖4-8，量取貫入壓力為 500psi 之凝結時間為初凝時間，及貫入壓力為 $4,000\text{psi}$ 之凝結時間為凝時間。
- (4)相對初、終凝時間

以純水泥之相對凝結時間為1，爐石水泥之凝結時間除以純水泥之凝結時間為相對凝結時間。

$$T_n = \frac{t_n}{t_o}$$

$$n=0, 40, 60, 80$$

T_n ：相對凝結時間

t_n ： $n\%$ 之爐石水泥之凝結時間

t_0 ：純水泥之凝結時間

D. 短期加速試驗

(一)試驗目的：

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反覆作用。爲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。本試驗主要的目的爲瞭解普通波特蘭水泥中添加高爐石粉後，對混凝土之耐久性及抑制鋼筋腐蝕之效應爲何？

(二)試驗方法及步驟：

爲配合乾濕循環設備之容量，本試驗所製作之試體規格 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 之混凝土圓柱試體，於試體之中央即 5cm 處理置有一支鋼筋($10\text{mm}\phi$)。試體於灌製完成靜置一日後，隨即拆模並將試體置於養生室($23 \pm 0.7^\circ\text{C}$)養生28天。於養生結束後，取出試體放置於乾濕循環設備內，進行定期乾濕反覆循環之試驗，以加速試體之惡化，並定期檢測各項分析。

1. 試驗方法（試驗條件）

- (1)採用台中港區內之天然海水，對試體進行全程之噴霧潤濕。
- (2)每一乾濕循環週期爲7天。
- (3)溫度 50°C ，相對濕度 0% 下，試體乾燥4天。
- (4)溫度 20°C ，相對濕度 100% 下，試體潤濕3天。

2. 試驗步驟：

- (1)將試體從養生室取出置於乾濕循環設備內。
- (2)調整設備溫度至 50°C ，相對濕度爲 0% ，乾燥時間爲4天。
- (3)於乾燥時間完畢後，將設備溫度調整至溫度爲 20°C ，相對濕度爲 100% ，潤濕時間爲3天。
- (4)於每一循環週期（計7天）結束時，將試體取出，量測試體內之鋼筋

腐蝕電位值，及做超音波速度量測。

(5)將試體再置入乾濕循環設備內，重覆步驟(2)~(4)之過程，直到量測之鋼筋腐蝕電位值 $<-350\text{mV}$ 時，即停止試驗。

(6)將試體取出分別進行其它各項試驗分析工作。（諸如：化學成份分析，抗壓試驗……等）。

(三)分析項目

1. 鋼筋腐蝕電位量測

混凝土試體經過乾濕循環加速惡化的過程中，混凝土品質可能已發生損壞，海水中之有害物質諸如氯離子、硫酸根離子等更容易侵入而造成鋼筋之腐蝕。量測鋼筋腐蝕電位之目的，的即在判斷及印證混凝土內之鋼筋是否已發生腐蝕情形。

電位量測方法：（依據ASTM C876規範）

1. 使用以 Cu/CuSO_4 所構成通路之半電位儀，量測鋼筋腐蝕電位。
2. 半電位儀上包含有二極，其中一極以導線，連接於混凝土中之鋼筋（視為陽極）。
3. 將混凝土表面充份潤濕之。
4. 將半電位儀另一極（參考電極， Cu/CuSO_4 ）接觸於潤濕之混凝土表面上。
5. 從電位計表上讀出鋼筋腐蝕電位值。

（半電位儀量測裝置如圖3-22所示。）

判斷混凝土中鋼筋腐蝕之機率與電位值之腐蝕關係，如下表3-8所示。

表3-8 鋼筋腐蝕電位值與腐蝕機率關係(ASTM C876)

電位值 (mV. v.s. CSE)	腐蝕機率
>-200	$<10\%$
$-200\sim-350$	$>50\%$
<-350	$>90\%$

2. 化學成份分析

將經過N次乾濕循環試驗過之試體（不含鋼筋），從圓柱試體上面，依次以深度（厚）1公分，2公分，3公分，4公分，5公分處（亦即每隔1cm切一小試片），將切割後之每一段深度之小試片，依ASTM及ACI之處理規定，將小試片研磨成粉狀小顆粒（小於 $200\text{m}\mu$ 之粒徑），此即為化學分析之試樣。化學成份分析主要目的乃在探討混凝土內遭受海水有害化學物質侵入之深度及其含量有多少，主要分析的有害成份為 Cl^- 及 SO_3^{2-} 。 Cl^- 是造成鋼筋發生腐蝕主要之因素， SO_3^{2-} 會使混凝土內形成結晶物質（諸如鈣凡石等）造成體積膨脹致使混凝土發生龜裂。

3. 物理性質分析：

由於試體經過反覆乾濕循環加速惡化的過程後，混凝土品質已受到某種程度的損壞，為瞭解損壞程度與鋼筋之關係，必須將試體進行物性方面的試驗。試驗包含有抗壓強度、彈性模數及柏松比等。

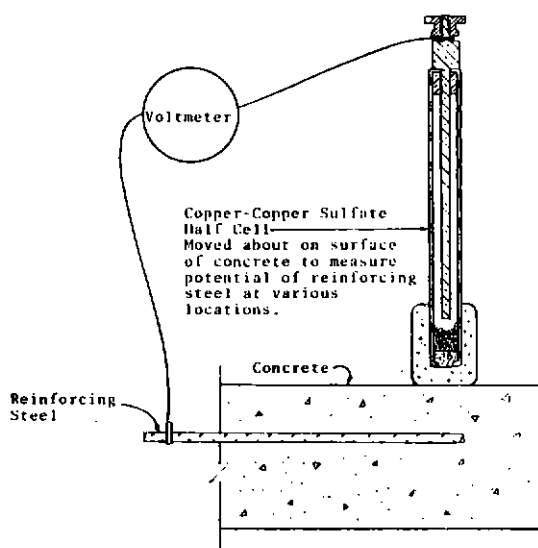


圖3-22 半電位儀數測裝置

第四章 試驗結果與分析

(一) 混凝土基本性質試驗

1. 透水係數試驗

表4-1及圖4-1與圖4-2分別為混凝土水灰比0.5及0.7，含不同比例爐石粉，養生齡期為28天至180天期之透水試驗結果。圖中顯示，在低水灰比時，摻入爐石粉有較顯著降低混凝土滲透性之效應，且在養生56天齡期後，其滲透性已趨於穩定，而高水灰比之爐石混凝土，則養生齡期延至90天期後，才漸趨穩定。

2. 抗壓、彈性模數試驗

抗壓強度、彈性模數及柏松比等試驗結果分別列於表4-2與表4-3及圖4-3至圖4-6所示。分析圖4-3與圖4-4，任一水灰比之爐石混凝土之早期強度（7天、14天齡期），均較普通混凝土（爐石含量0%）之強度為低，而養生齡期28天以後，其晚期強度則均較普通混凝土高出許多（但爐石含量80%者除外）。從試驗結果中亦發現，爐石含量40%至60%之爐石混凝土，其晚期強度最佳。

圖4-5及圖4-6則分別為水灰比0.5及0.7之爐石混凝土之彈性模數與齡期及爐石含量之關係，一般而言彈性模數約為300,000kg/cm²左右，且與抗壓強度略成正比關係。而混凝土之柏松比約界於0.19-0.22之間，為正常值範圍內。

3. 凝結時間試驗

表4-4及圖4-7與圖4-8為含不同比例爐石混凝土之凝結時間與貫入壓力之結果。初凝、終凝時間及其相對時間之關係，則分別列於表4-5至表4-6中。從上述表4-5中顯示，水灰比0.7比水灰比0.5之凝結時間長，分別為初凝時間延長數十分鐘至數小時，終凝時間延長數小時之久。同時混凝土中添加爐石量越高時，則其初凝及終凝時間相對越延長。

如爐石含量80%之初凝時間較爐石含量0%，增加40%（約延長2小時），終凝時間增加130%（約延長7~12小時）。

若爐石含量在40%以下時，則對凝結時間之影響不大，因為爐石含量40%與爐石含量0%比較時，初凝時間僅增加2—4%，終凝時間增加約10%。

(二)短期加速（乾濕循環）試驗

1. 鋼筋腐蝕電位量測分析

混凝土試體經過乾濕循環加速惡化的過程中，混凝土品質可能已發生損壞，海水中之有害物質諸如氯離子、硫酸根離子等更容易侵入而造成鋼筋之腐蝕。

短期加速試驗所得之鋼筋腐蝕電位量測數據列於表4—7及表4—8。圖4—9至圖4—10分別為水灰比0.5及0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係。

圖4—9為三組同材質($W/C=0.5$)之試體，圖中於第一組試體中顯示含40%及60%爐石之試體，其鋼筋腐蝕電位值之分佈相當平穩，其電位值大約介於 $-200\text{mV} \pm 50\text{mV}$ ，顯然試體內之鋼筋尚未發生腐蝕。經劈裂該試體並觀察鋼筋表面後，證實試體內之鋼筋仍然完好，沒有銹蝕發生，如圖4—11(B)(C)所示。含80%爐石之試體則其鋼筋腐蝕電位值在第11、12次循環週期時已達小於 -350mV 之值，此現象已顯示試體內之鋼筋已有90%概率發生腐蝕。經過劈裂試體觀察後，發現鋼筋表面有輕微的腐蝕情形，如圖4—11(D)所示。不含爐石之試體其鋼筋腐蝕電位值分佈有偏高的現象（亦即電位值與含40%及60%爐石試體之電位值相差約有 -100mV 左右），但仍然未達鋼筋發生腐蝕概率之臨界值（亦即小於 -350mV ），該試體經劈裂後並未發現有產生腐蝕現象，如圖4—11(A)所示。

在圖4—9另外兩組試體中亦發現含40%及60%爐石之試體，其鋼筋腐蝕電位值之分佈亦相當平穩，其電位值亦介於 $-200\text{mV} \pm 50\text{mV}$ 附近，試體內之鋼筋顯然亦未發現腐蝕現象。不含爐石及含80%爐石試體之鋼筋腐蝕電位值分佈情形與第一組所測得結果大略相同。

圖4—10為水灰比0.7含不同爐石比例之三組試體內之鋼筋腐蝕電位值與循環週期之關係，由於水灰比較大，混凝土之品質較差（諸如強度低，孔隙大……），因此在第8次循環週期時，不添加爐石之試體內之鋼筋腐蝕電位值已測得為 $-400\text{mV} \pm 50\text{mV}$ ，顯示試體內之鋼筋已有發生腐蝕的現象，而含80%爐石之試體之鋼筋腐蝕電位值亦達 $-350\text{mV} \pm 50\text{mV}$ ，而含40%及60%之試體

，其鋼筋腐蝕電位值仍然未達小於 -350mV 。爲了證實鋼筋是否發生腐蝕，特將試體一一劈裂，結果印證不含爐石之試體其鋼筋已發生嚴重腐蝕，如圖4-12(A)所示，含80%爐石之試體也有發生腐蝕現象，如圖4-12(D)所示。而含40%及60%爐石之試體，其鋼筋表面尚完好，沒有鏽蝕發生，如圖4-12(B)(C)所示。

綜合上述試驗結果，低水灰比(0.5)本來即較不易發生腐蝕，添加爐石時，防蝕效果理應更好。而高水灰比(0.7)由於孔隙較大滲透性高，鋼筋很容易發生腐蝕，但從本試驗結果發現，水灰比0.7添加爐石後之試體內，其鋼筋有較不易發生腐蝕之效果，而以含40%及60%爐石之防蝕效果較好。

2. 化學成份分析

化學成份分析結果列於表4-9中，圖4-13至圖4-16則爲混凝土內化學成份含量變化與深度關係圖。圖4-13至圖4-14顯示，水灰比較低者， Cl^- 侵入量相對地較小，但是這兩種水灰比之試體內，每一深度的 Cl^- 侵入量均相當高，約爲水泥重量之2.0~4.0%之間，已超出混凝土內鋼筋腐蝕 Cl^- 之臨界值（約爲0.4%水泥量）甚多，因此試體內之鋼筋在經過12次循環週期後顯然已發生腐蝕行爲。

圖4-15及圖4-16中，發現爐石含量爲40%及60%之試體，其 SO_3^{2-} 含量均甚低，約爲水泥重0.20%以內，而不含爐石之試體則約在0.6~0.8%之間。因此可見添加爐石之試體內， SO_3^{2-} 含量有明顯降低。

3. 物理性質分析

由於試體經過反覆乾濕循環加速惡化的過程後，混凝土品質已受到某種程度的損壞，爲瞭解損壞程度與鋼筋腐蝕之關係，必須將試體進行物性方面的識驗。分析結果如表4-10所示。

由表4-10發現，經過12次循環週期之加速試驗後，各種配比試體之抗壓強均明顯下降。水灰比0.5之高爐石混凝土試體經過12次循環週期加速惡化後，其抗壓強度約降爲28天齡期（標準養生，未受到加速惡化過程）之60%。水灰比0.7之高爐石混凝土試體經過12次循環週期加速惡化後，其抗壓強度約降爲28天齡期之70%左右。可見高爐石混凝土之品質已有顯著的劣化變化現象。但含40%之爐石混凝土，其抗壓強度仍然表現較佳。

表4-10中，同時亦可看出，經過12次循環週期加速化過程後，所測得

之彈性係數與28天齡期之彈性係數，有顯著的差異（大幅降低）。柏松比亦有些微之變化。

表4-1 爐石混凝土之透水試驗結果

水灰比 (w/c)	爐石含量 (%)	透水係數 ($\times 10^{-11}$ m/sec)			
		28天	56天	90天	180天
0.5	0	9.86	3.51	2.38	3.15
	40	13.60	2.82	2.90	2.29
	60	5.08	11.30	2.87	2.92
	80	4.65	3.26	2.94	2.29
0.7	0	7.94	6.81	10.6	4.72
	40	15.80	12.60	8.31	5.58
	60	22.60	22.20	9.35	2.78
	80	20.00	11.60	11.40	6.91

表4-2 爐石混凝土抗壓強度試驗結果（單位：kg/cm²）

齡 期		7 天	14天	28天	56天	90天	180天
水灰比	爐石含量 (%)						
0.5	0	203	259	338	342	364	369
	40	161	231	346	391	405	418
	60	158	225	319	386	416	443
	80	150	214	269	288	317	355
0.7	0	159	203	247	259	280	289
	40	128	161	233	295	335	347
	60	105	147	218	287	347	372
	80	93	122	196	210	232	259

表4-3 爐石混凝土彈性模數與柏松比

齡 期		28天		56天		90天		180天	
水 灰 比	爐石 含量 (%)	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比
0.5	0	296377	0.20	304260	0.21	296790	0.21	297832	0.21
	40	307224	0.19	272972	0.21	326907	0.21	327401	0.22
	60	279946	0.20	285565	0.20	328212	0.20	337474	0.21
	80	265184	0.19	252624	0.20	319106	0.20	277219	0.20
0.7	0	265184	0.19	289044	0.20	265238	0.20	285641	0.20
	40	259668	0.20	274183	0.19	294731	0.20	304126	0.20
	60	258364	0.19	284372	0.20	303535	0.19	306255	0.21
	80	233684	0.19	259320	0.20	259224	0.21	286915	0.20

表4-4 爐石混凝土凝結時間及貫入壓力結果

爐石含量 時間 壓力 水灰比	0%		40%		60%		80%	
	凝結時間 (小時)	貫入壓力 (PSi)	凝結時間 (小時)	貫入壓力 (PSi)	凝結時間 (小時)	貫入壓力 (PSi)	凝結時間 (小時)	貫入壓力 (PSi)
W/C=0.5	4.00	141	4.00	217	3.75	110	3.50	53
	4.50	301	4.50	363	4.75	312	5.50	304
	5.00	468	5.00	580	5.75	677	7.75	673
	5.50	983	5.50	910	6.75	970	9.75	993
	6.00	1320	6.00	1447	7.75	1833	12.50	1633
	6.50	1860	6.50	2227	9.40	2120	13.75	2127
	7.00	2720	7.00	2480	10.40	3627	14.75	3027
	7.50	4027	7.50	3573	10.90	3947	16.75	3200
	8.25	4413	8.25	4040	11.23	4040	22.50	4787
W/C=0.7	4.08	128	4.42	372	4.58	68	4.75	39
	4.80	815	5.05	920	5.10	230	6.92	560
	5.05	1320	5.25	1130	5.75	410	8.08	1133
	5.25	1530	5.58	1347	6.20	680	9.10	2053
	5.45	2150	6.15	2200	6.75	720	10.70	2347
	5.65	2610	6.35	3700	7.00	1750	11.10	2747
	5.90	3450	6.58	3413	7.25	2050	12.10	3253
	6.15	3760	7.15	4800	7.75	2750	12.60	3840
	6.25	4840	7.75	6533	7.92	4147	12.92	4020

表4-5 爐石混凝土初凝、終凝時間試驗結果

單位：小時

凝結時間 初終凝 水灰比		爐石含量	0%	40%	60%	80%
0.5	初凝		4.56	4.65	6.19	6.19
	終凝		6.11	6.80	8.06	13.09
0.7	初凝		4.71	4.90	5.38	6.55
	終凝		8.08	7.83	11.11	19.72

表4-6 爐石混凝土初凝、終凝之相對時間關係

凝結時間 初終凝 水灰比		爐石含量	0%	40%	60%	80%
0.5	初凝		1	1.02	1.36	1.39
	終凝		1	1.11	1.32	2.14
0.7	初凝		1	1.04	1.14	1.39
	終凝		1	0.97	1.37	2.44

表4-7 水灰比0.5含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值(-mV)

爐石比例 循環週期	0%	40%	60%	80%
1.	1. 207 2. 197 3. 203	1. 205 2. 195 3. 204	1. 220 2. 214 3. 213	1. 240 2. 215 3. 232
2.	1. 300 2. 222 3. 233	1. 195 2. 200 3. 220	1. 221 2. 207 3. 273	1. 342 2. 397 3. 332
3.	1. 314 2. 207 3. 190	1. 223 2. 211 3. 201	1. 212 2. 203 3. 238	1. 315 2. 331 3. 299
4.	1. 288 2. 189 3. 189	1. 201 2. 206 3. 199	1. 210 2. 197 3. 207	1. 302 2. 313 3. 267
5.	1. 293 2. 214 3. 241	1. 207 2. 234 3. 222	1. 207 2. 196 3. 219	1. 286 2. 308 3. 258
6.	1. 292 2. 238 3. 256	1. 197 2. 231 3. 233	1. 217 2. 186 3. 196	1. 299 2. 289 3. 262
7.	1. 277 2. 275 3. 246	1. 202 2. 236 3. 214	1. 223 2. 212 3. 243	1. 244 2. 318 3. 232
8.	1. 233 2. 277 3. 299	1. 167 2. 182 3. 169	1. 229 2. 173 3. 186	1. 347 2. 310 3. 267
9.	1. 220 2. 268 3. 266	1. 175 2. 205 3. 195	1. 211 2. 222 3. 215	1. 244 2. 289 3. 282
10.	1. 340 2. 335 3. 285	1. 164 2. 164 3. 166	1. 176 2. 158 3. 175	1. 242 2. 280 3. 219
11.	1. 284 2. 281 3. 289	1. 159 2. 161 3. 158	1. 173 2. 160 3. 168	1. 365 2. 307 3. 355
12.	1. 289 2. 287 3. 280	1. 159 2. 164 3. 160	1. 180 2. 158 3. 174	1. 433 2. 429 3. 433

表4-8 水灰比0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值(-mV)

爐石比例 循環週期	0%	40%	60%	80%
1.	1. 205 2. 210 3. 231	1. 256 2. 320 3. 199	1. 281 2. 246 3. 205	1. 270 2. 421 3. 260
2.	1. 266 2. 219 3. 263	1. 325 2. 295 3. 259	1. 320 2. 276 3. 243	1. 317 2. 339 3. 341
3.	1. 229 2. 239 3. 241	1. 209 2. 260 3. 206	1. 313 2. 239 3. 228	1. 323 2. 320 3. 267
4.	1. 231 2. 246 3. 287	1. 221 2. 290 3. 200	1. 285 2. 241 3. 215	1. 304 2. 276 3. 283
5.	1. 250 2. 246 3. 308	1. 213 2. 318 3. 226	1. 259 2. 242 3. 229	1. 264 2. 323 3. 281
6.	1. 212 2. 318 3. 318	1. 197 2. 319 3. 249	1. 250 2. 243 3. 269	1. 303 2. 295 3. 359
7.	1. 218 2. 307 3. 315	1. 229 2. 293 3. 244	1. 249 2. 233 3. 267	1. 266 2. 312 3. 250
8.	1. 405 2. 443 3. 363	1. 191 2. 401 3. 215	1. 255 2. 228 3. 228	1. 249 2. 290 3. 283
9.	1. 389 2. 449 3. 356	1. 220 2. 379 3. 262	1. 277 2. 241 3. 241	1. 252 2. 277 3. 329
10.	1. 375 2. 449 3. 373	1. 172 2. 395 3. 239	1. 220 2. 230 3. 183	1. 245 2. 270 3. 349
11.	1. 399 2. 441 3. 480	1. 181 2. 286 3. 335	1. 237 2. 221 3. 426	1. 336 2. 277 3. 226
12.	1. 399 2. 459 3. 513	1. 164 2. 305 3. 342	1. 204 2. 223 3. 410	1. 430 2. 368 3. 326

表4-9 爐石混凝土經12次循環週期後其化學成份分析結果

水 灰 比 0.5				水 灰 比 0.7			
爐石含量 (%)	試體深度 (mm)	Cl ⁻ 含量 (%)	SO ₃ ⁻² 含量 (%)	爐石含量 (%)	試體深度 (mm)	Cl ⁻ 含量 (%)	SO ₃ ⁻² 含量 (%)
0	0~10	2.49	0.780	0	0~10	2.43	0.367
	10~20	2.38	0.576		10~20	2.42	0.524
	20~30	2.33	0.656		20~30	2.59	0.431
	30~40	3.62	0.649		30~40	2.53	0.329
	40~50	2.64	0.660		40~50	2.86	0.483
40	0~10	2.01	0.036	40	0~10	2.87	0.338
	10~20	1.94	0.057		10~20	3.65	0.288
	20~30	2.96	0.082		20~30	2.61	0.082
	30~40	2.62	0.196		30~40	2.54	0.339
	40~50	3.12	0.123		40~50	2.32	0.154
60	0~10	3.09	0.072	60	0~10	2.69	0.403
	10~20	2.52	0.052		10~20	2.55	0.414
	20~30	3.36	0.165		20~30	3.28	0.445
	30~40	2.44	0.103		30~40	2.87	0.310
	40~50	2.74	0.067		40~50	2.97	0.352
80	0~10	2.83	0.514	80	0~10	3.34	0.176
	10~20	2.87	0.257		10~20	3.27	0.683
	20~30	2.83	0.195		20~30	3.10	0.393
	30~40	2.86	0.205		30~40	2.62	0.414
	40~50	3.26	0.216		40~50	2.68	0.393

表4-10 爐石混凝土抗壓強度、彈性模數與柏松比（經12次乾濕循環週期）

齡期 材質		28天			12個循環週期 (84天)		
水 灰 比	爐 石 含 量 (%)	抗壓 強度 kg/cm ²	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	抗壓 強度 kg/cm ²	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比
0.5	0	338	296377	0.20	197	205184	0.22
	40	346	307224	0.19	206	203429	0.19
	60	319	279946	0.20	198	193657	0.19
	80	269	265184	0.19	160	178293	0.21
0.7	0	247	265184	0.19	171	190331	0.21
	40	233	259668	0.20	175	185713	0.18
	60	218	258364	0.19	155	171571	0.17
	80	196	233684	0.19	129	168310	0.23

單位：(E-10)

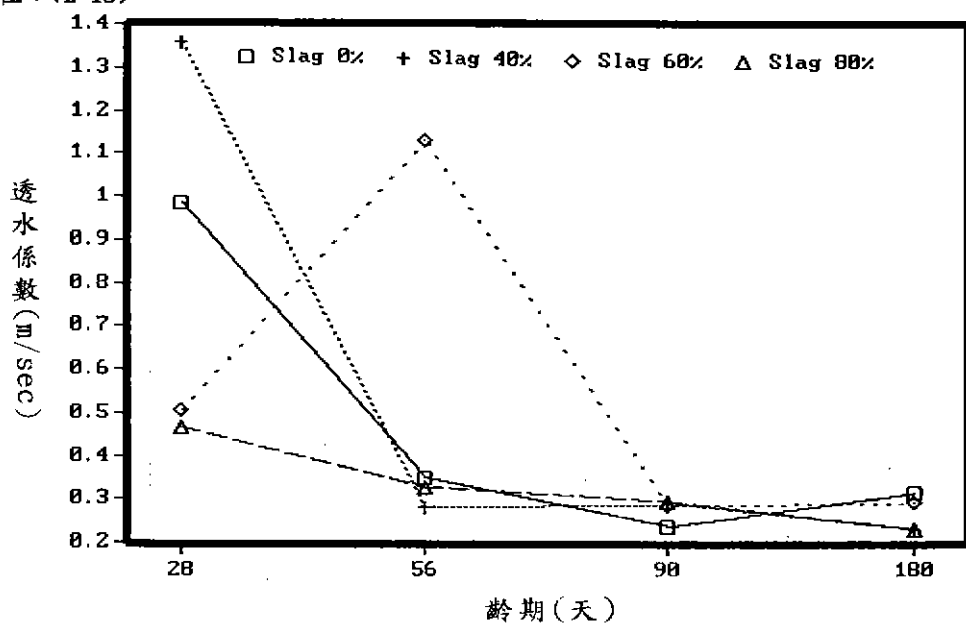


圖4-1 水灰比0.5添加不同爐石含量之滲透係數變化情形

單位：(E-10)

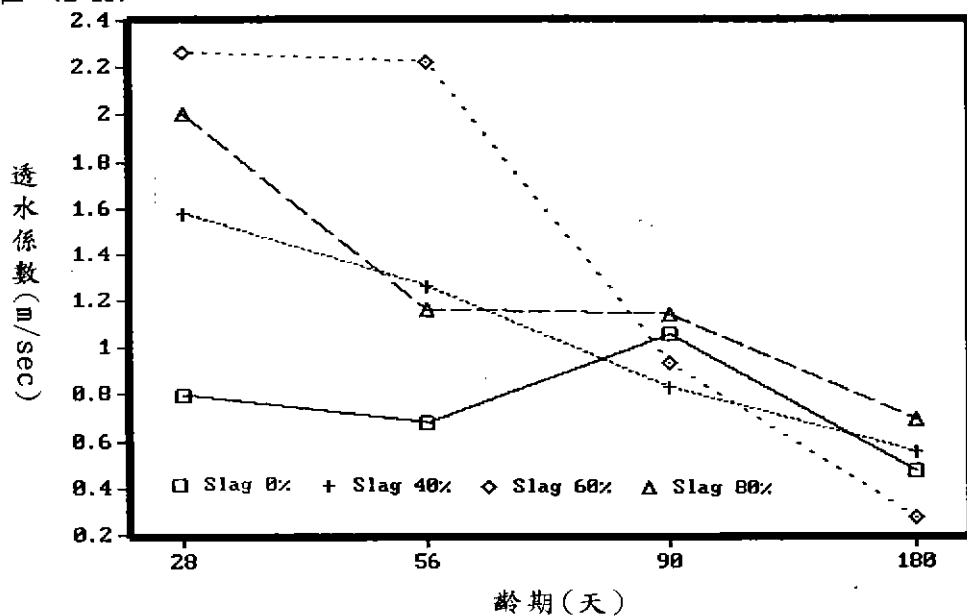


圖4-2 水灰比0.7添加不同爐石含量之滲透係數變化情形

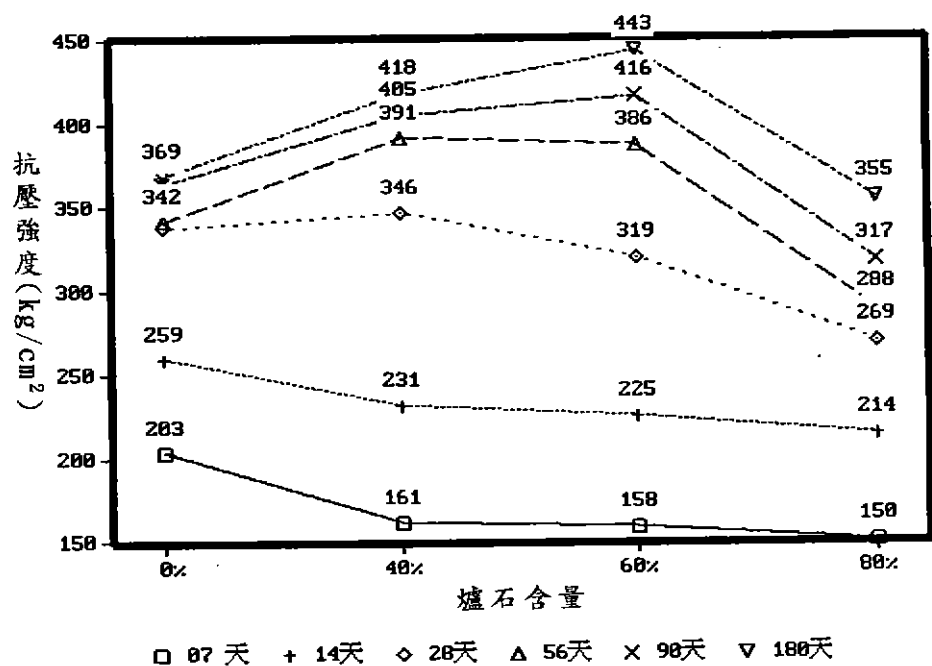


圖4-3 水灰比0.5添加不同爐石含量之混凝土抗壓強度與齡期之關係

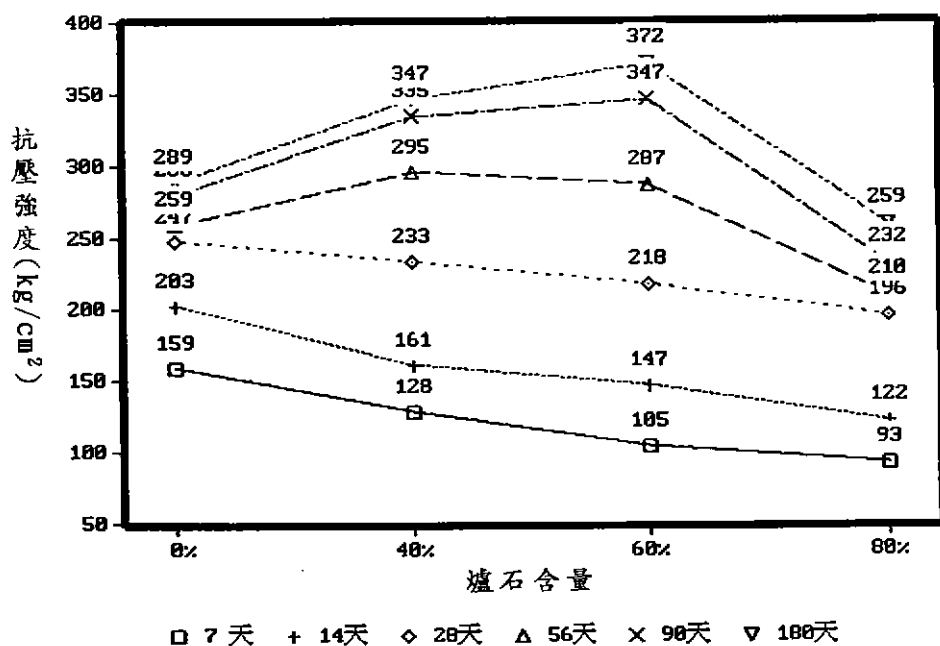


圖4-4 水灰比0.7添加不同爐石含量之混凝土抗壓強度與齡期之關係

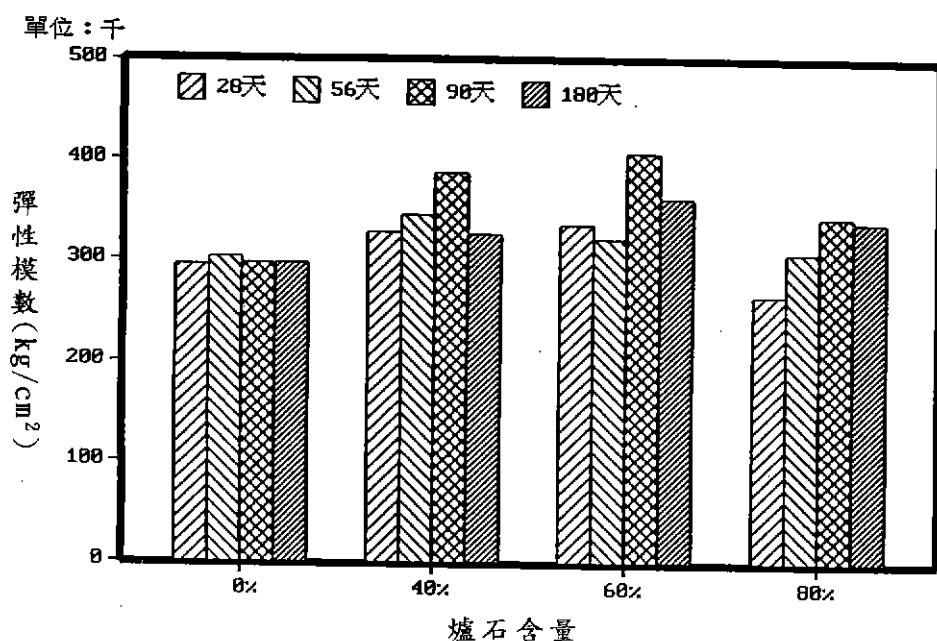


圖4-5 水灰比0.5添加不同爐石含量之混凝土彈性模數與齡期之關係

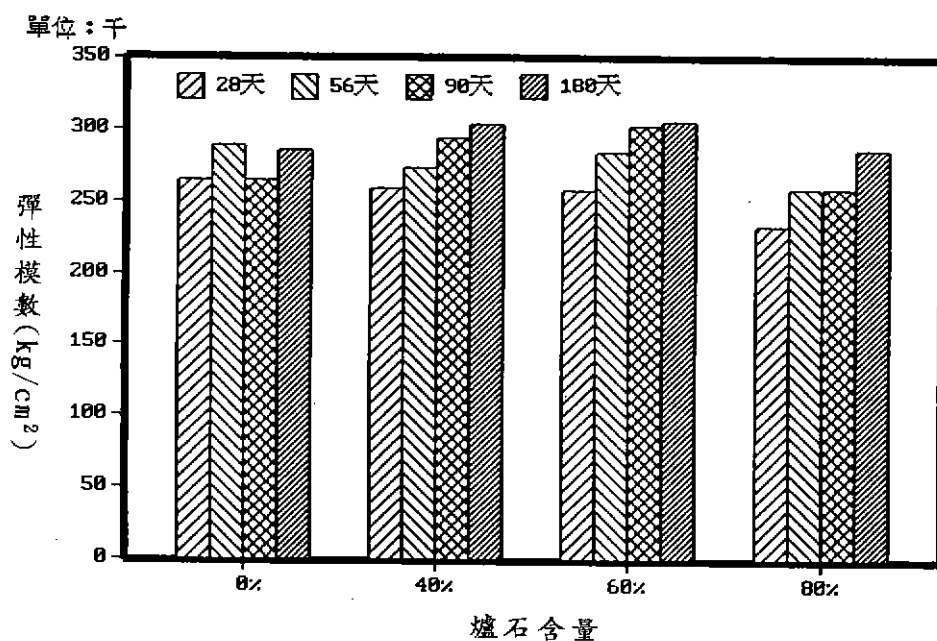


圖4-6 水灰比0.7添加不同爐石含量之混凝土彈性模數與齡期之關係

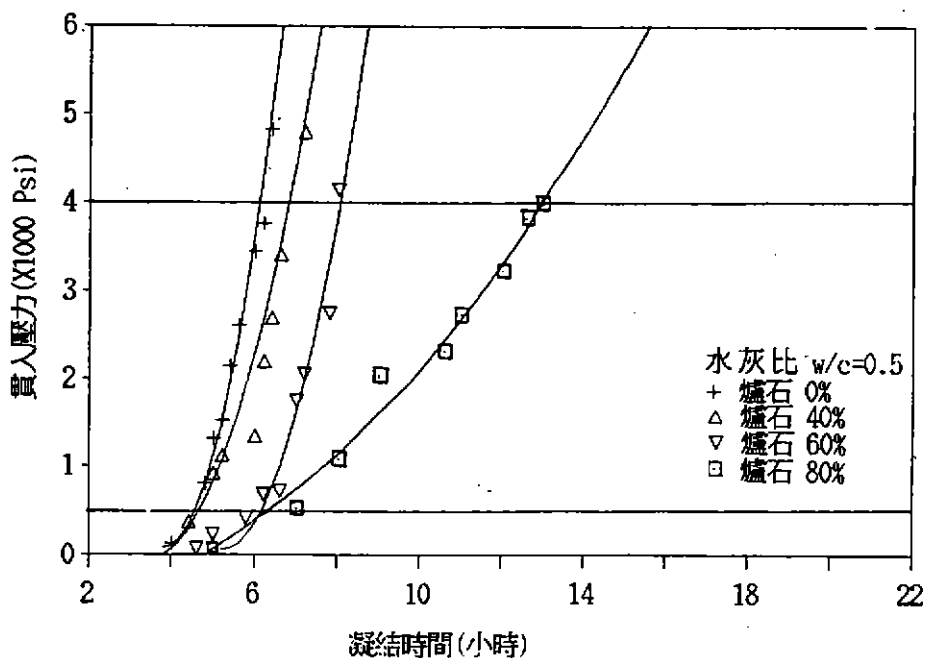


圖4-7 水灰比0.5含不同爐石比例之凝結時間曲線圖

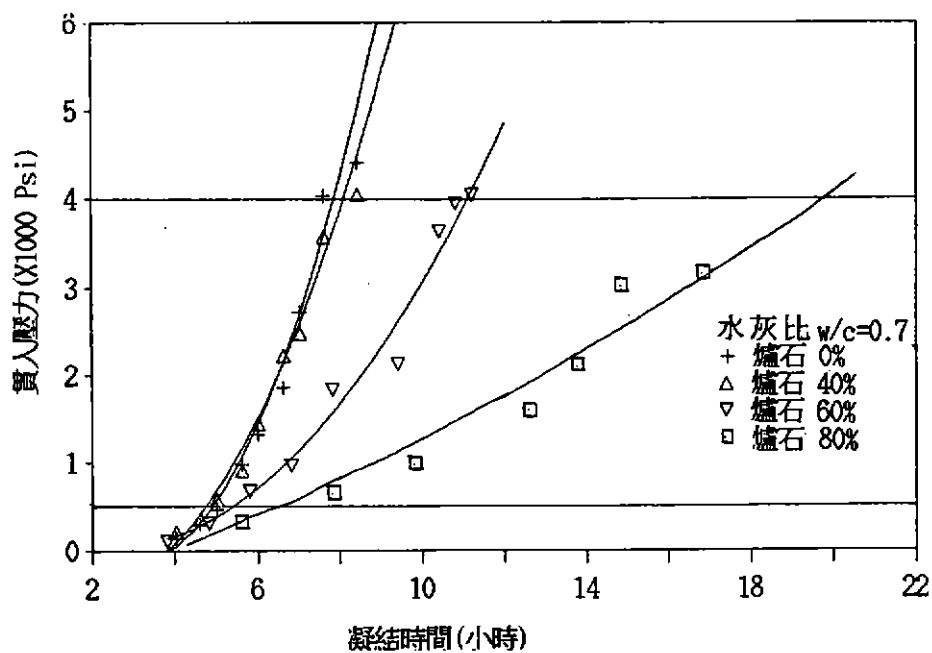


圖4-8 水灰比0.7含不同爐石比例之凝結時間曲線圖

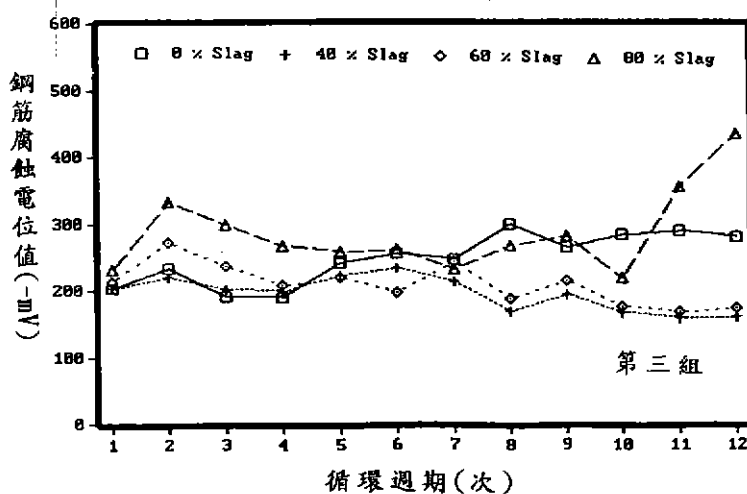
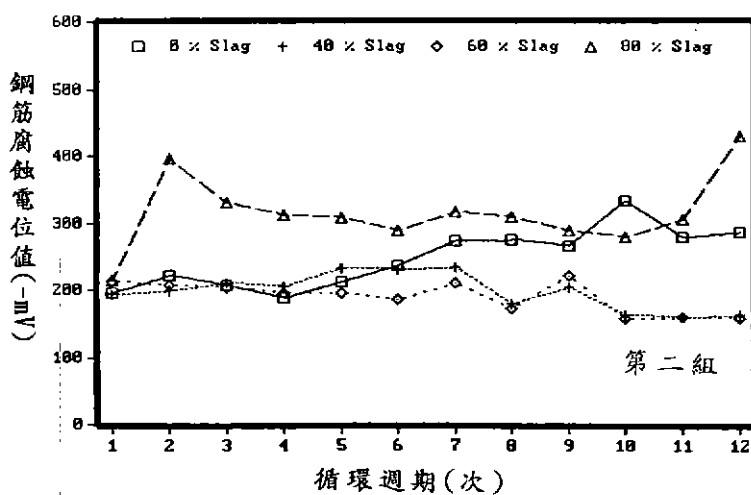
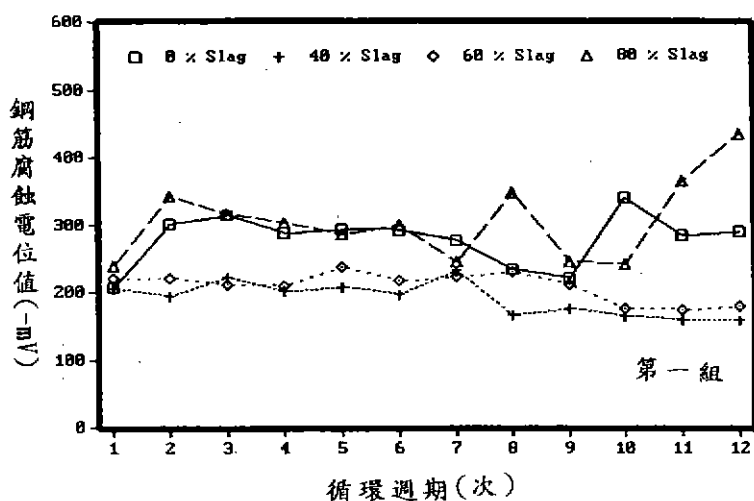


圖4-9 水灰比0.5含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係

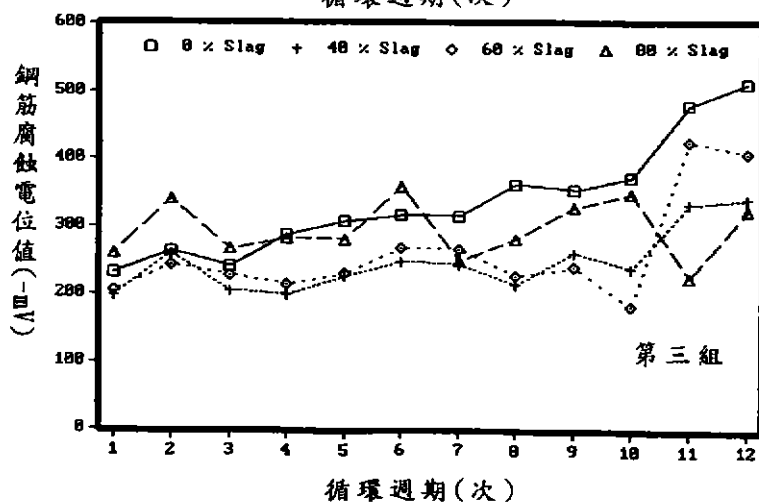
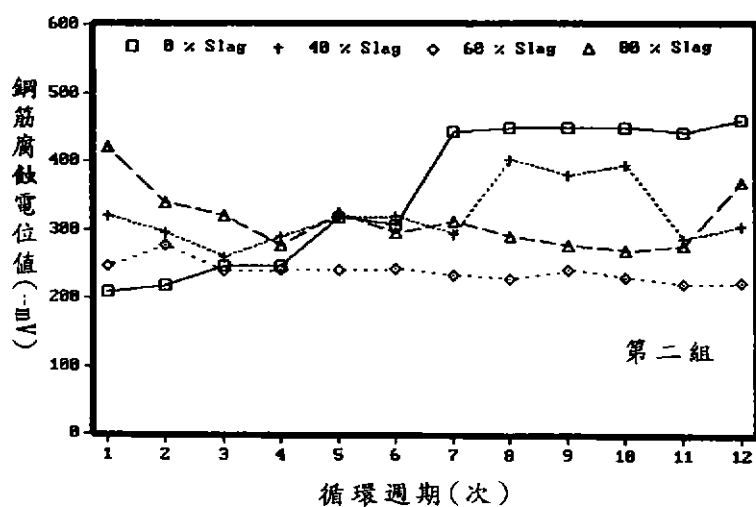
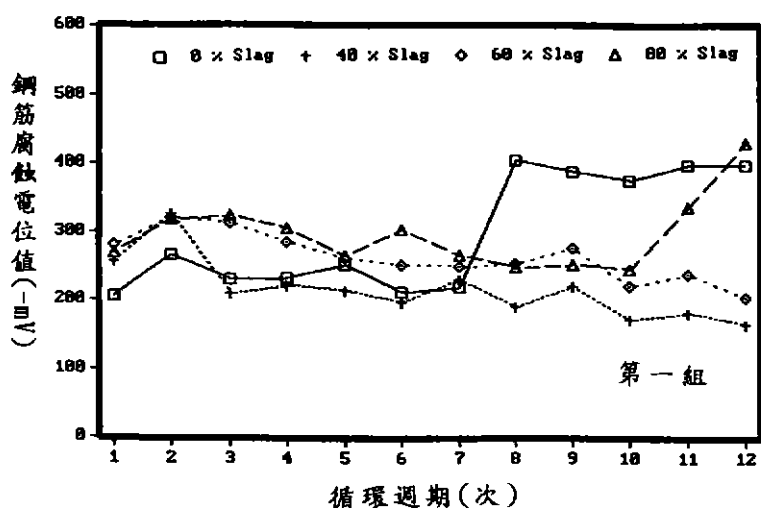


圖4-10 水灰比0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係

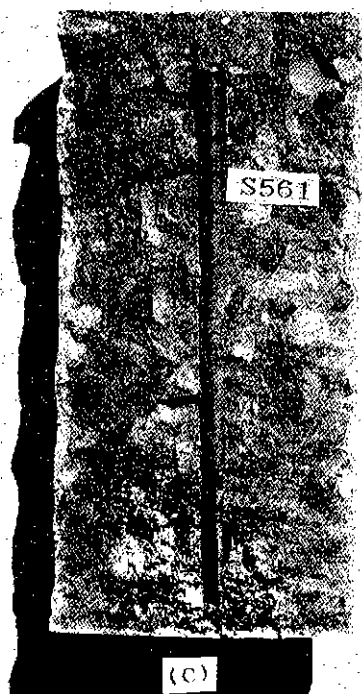


圖4-11 水灰比0.5試體經劈裂後檢視內部鋼筋腐蝕狀況

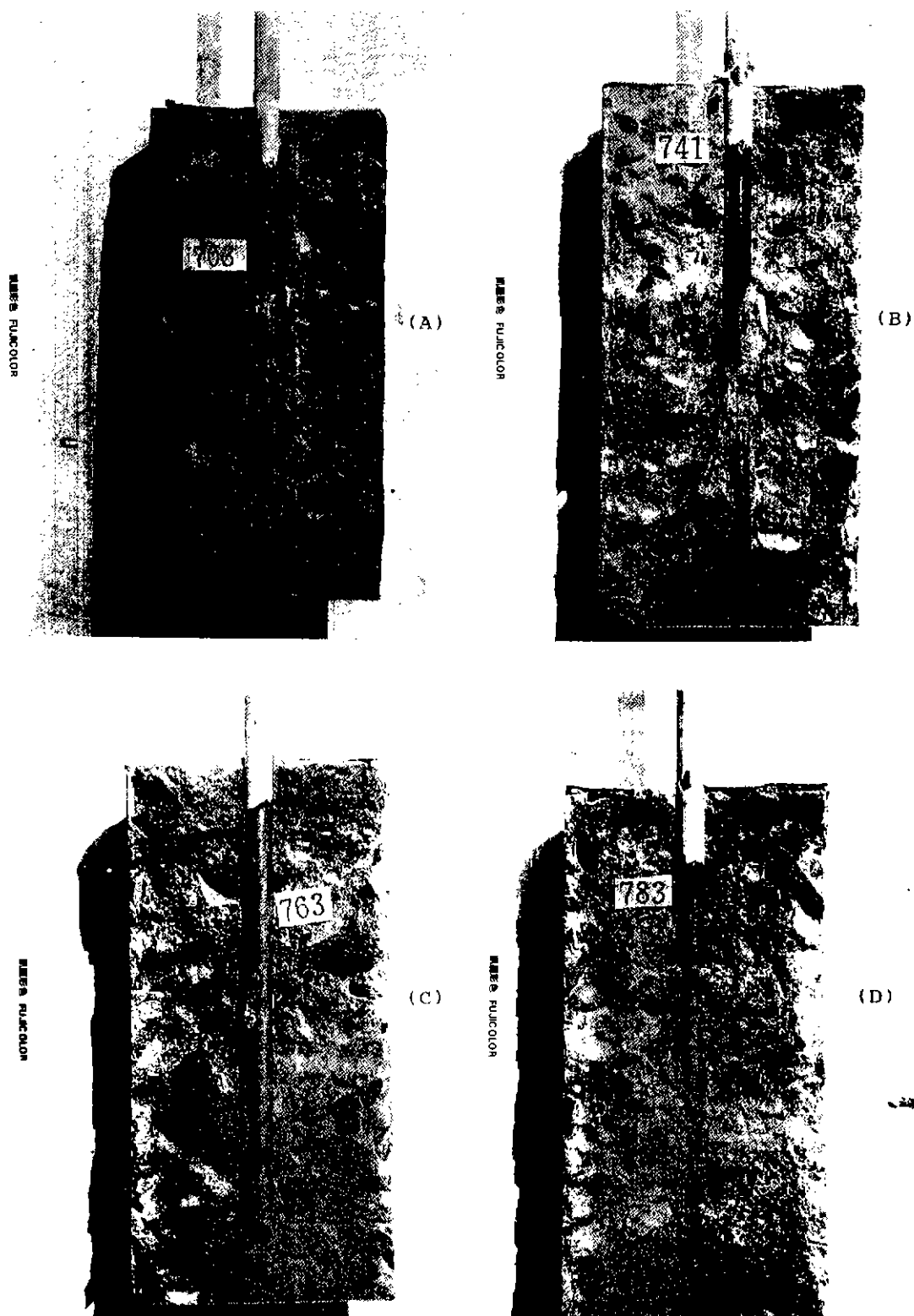


圖4-12 水灰比0.7試體經劈裂後檢視內部鋼筋腐蝕狀況

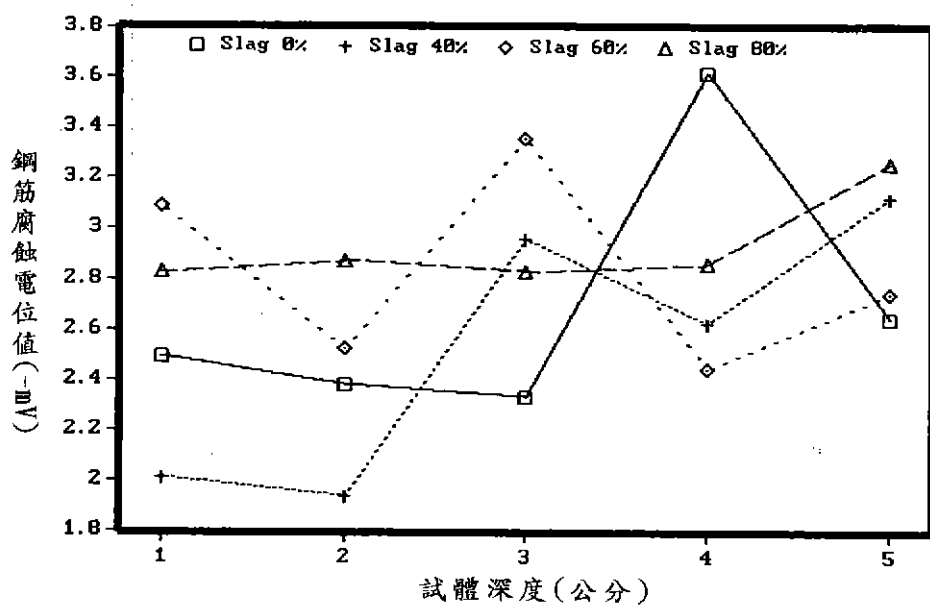


圖4-13 水灰比0.5試體 Cl^- 含量與深度關係

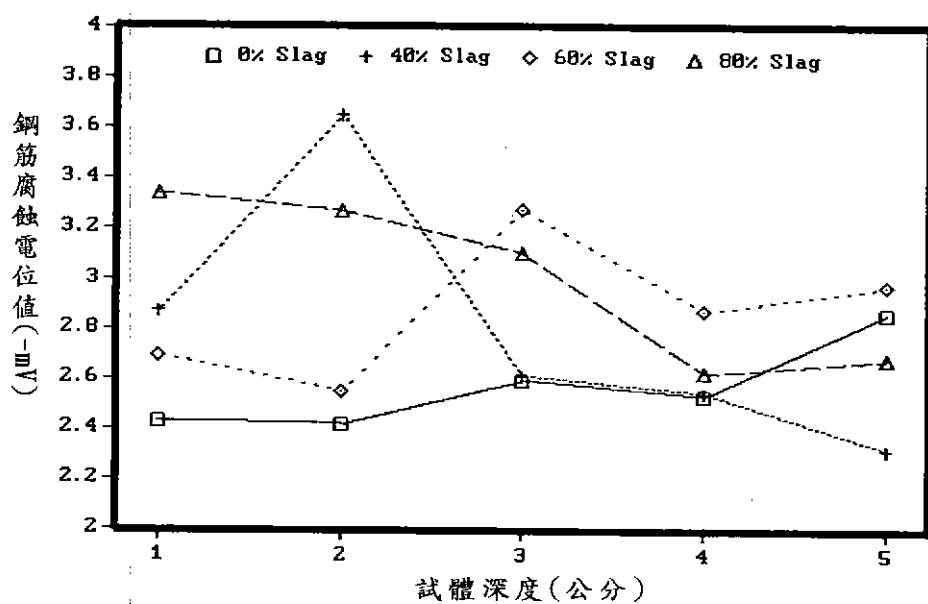


圖4-14 水灰比0.7試體 Cl^- 含量與深度關係

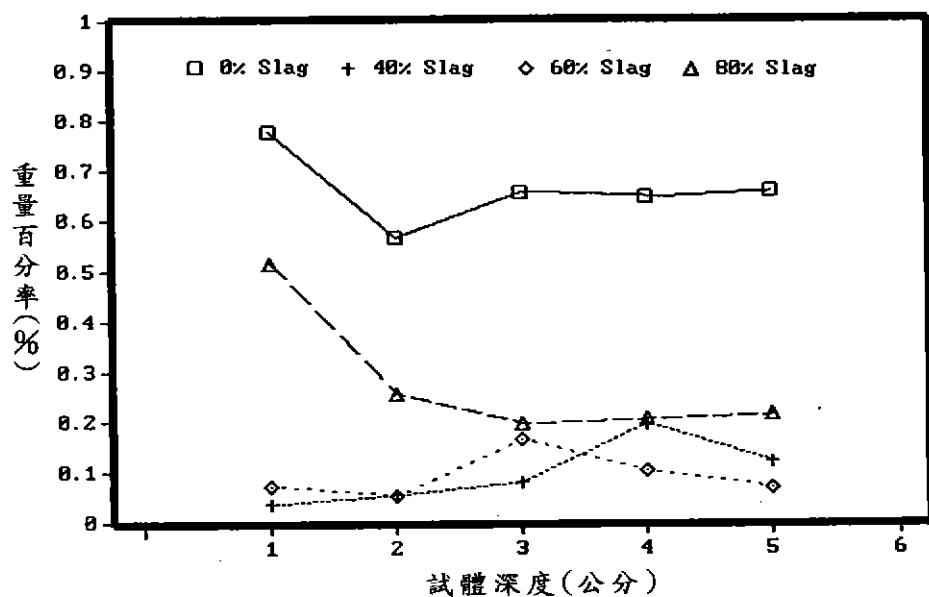


圖4-15 水灰比0.5試體 SO_3^{2-} 含量與深度關係

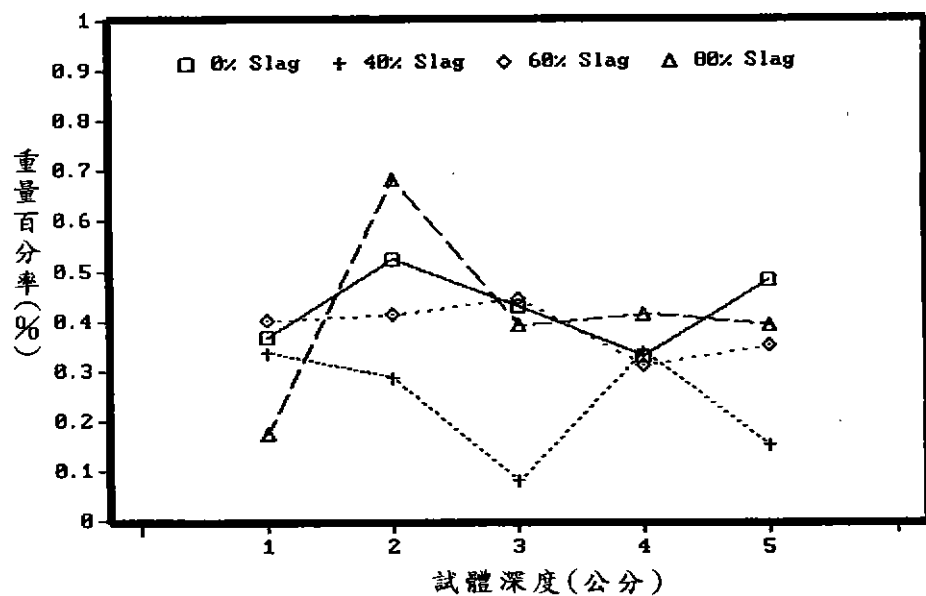


圖4-16 水灰比0.7試體 SO_3^{2-} 含量與深度關係

(三)長期曝露試驗

1. 透水係數試驗

表4-11為爐石混凝土試體，曝放於海水循環水槽內一至五年之久，其透水試驗所得之結果。爐石含量與透水係數之變化情形則分別顯示於圖4-17至圖4-21中。一般而言，水灰比高的混凝土其孔隙較大，因此滲透性較低水灰比者為高。

圖4-17為曝放一年期之透水係數變化，圖中顯示在水灰比0.5時，其各比例爐石含量之試體其透水係數，均較水灰比0.7者小很多。二者之間相差有數倍至數十倍之鉅，可見水灰比、摻料對混凝土之滲透性影響很大。

圖4-18至圖4-21為曝放二年期至五年期不等，其透水係數變化亦如前述之結果。整體而言，在低水灰比(0.5)下，添加40%或60%爐石，可得到較低之透水係數，亦即添加適量的爐石，可有降低混凝土孔隙的效應。而在高水灰比(0.7)時，其透水係數變化較為散亂，並沒有一定明顯趨勢出現，可能是水灰比太大時，添加爐石後對混凝土的緻密性改善有限，加上試體製作時，品質控制差異所致。水灰比0.7在前三年期曝露結果，以添加40%爐石，對降低滲透性有較佳的效果。

2. 抗壓強度與彈性模數試驗

表4-12為爐石混凝土曝露海水循環水槽內一至五年期間，其抗壓強度、彈性模數及柏松比之試驗結果。圖4-22及圖4-23顯示，抗壓強度隨曝露期間之增長而增加，水灰比低者之抗壓強度，遠大於水灰比高者甚多。上述抗壓強度分佈圖中亦可發現，兩個水灰比之試體中，以添加60%爐石之混凝土，可得較佳之抗壓強度，其次依序為40%、0%、80%等。

圖4-24及圖4-25為彈性模數與爐石含量之關係，大體而言，彈性模數差異不大，範圍約界於 $300,000 \pm 50,000 \text{ kg/cm}^2$ ，柏松比為0.18-0.24之間，混凝土品質屬於正常範圍內，且彈性模數與抗壓強度略成正比關係，顯然，添加爐石於混凝土中，對改善混凝土之品質有正面的效果。

3. 鋼筋腐蝕電位量測分析

爐石混凝土試體長期曝放於海水潮汐帶一至五年期間，試體內鋼筋腐蝕電位值變化情形如表4-13所示。圖4-26至圖4-35則分別描繪不等曝放期間，試體內鋼筋力腐蝕電位變化與保護層厚度之關係。從前述圖中可發現，

水灰比高的試體內之鋼筋腐蝕電位值，較水灰比低者之電位值為更負值，亦即鋼筋較易傾向於腐蝕方向進行。同時，鋼筋腐蝕電位值，亦隨試體曝放海水之期間增長，而有傾向更負值的現象。

保護層厚度亦是一個影響鋼筋腐蝕電位的重要因素之一，上述數圖中，保護層厚度為2公分處之鋼筋，其鋼筋腐蝕電位值已明顯較保護層厚度為4公分及7公分處之鋼筋電位值，更趨向負值許多，亦即二者間之電位差值很大，顯示出保護層厚度2公分處之鋼筋已較接近腐蝕的範圍。

本試驗中發現前三年期間試體內之鋼筋腐蝕電位值變化較和緩（大都低於350mV以下，此處為方便闡述以絕對值表示），鋼筋發生腐蝕生銹的概率很小（<5%），但經第四年期及五年期曝放後，試體內之鋼筋腐蝕電位有明顯往負值增加，此時，已提高試體內鋼筋發生腐蝕生銹的機率。

4. 化學成份分析

表4-14及表4-15分別為水灰比0.5與0.7試體，曝放海水五年期間其化學成份變化之結果。Cl⁻化學成份與試體深度之關係如圖4-36至圖4-45所示。

從上述數圖中均顯示，不論水灰比為0.5或0.7之爐石混凝土，經每一不等期間之曝放後，其Cl⁻之滲透量大致上都隨著試體之深度有遞減的趨勢。水灰比大的試體，其Cl⁻滲透量較水灰比小的試體多。在試體表面0~1公分處，由於常年接觸海水之浸漬，因此此部份之Cl⁻含量偏高，爾後隨試體之深度增加，則Cl⁻之滲入量有驟降的現象，可見混凝土之保護層厚度，有阻絕外界有害物質侵入的一定效果。

圖4-36至圖4-45中亦顯示，添加40%及60%之爐石混凝土中，大致上其Cl⁻之滲透量較少，此現象可與鋼筋腐蝕電位值，透水係數及抗壓強度等結果相互印證。

圖4-46至圖4-55中，爐石混凝土中SO₃⁻²含量變化不大，在表面0~1公分處，由於受海水之浸漬，因此SO₃⁻²含量較多，約為0.6~0.8%，試體深度2公分至六公分處，則含量變化穩定。

5. 鋼筋保護層厚度之影響

在鋼筋腐蝕電位量測時，發現鋼筋埋置於保護層厚度為2公分處，所測

得的腐蝕電位值，均較保護層為4公分及7公分處之電位值為小（亦即電位更趨向負值），顯示保護層2公分處之鋼筋，較保護層4公分及7公分處之鋼筋容易發生腐蝕生鏽行為。可見保護層厚度之增加，對鋼筋防蝕可正面的作用。同時，如保護層厚度增加，可阻延外界有害物質滲入混凝土內部接觸鋼筋之時間，前述化學成份分析中，已顯示出有害物質 Cl^- 之滲入量，隨試體之深度（亦即保護層厚度）之增加，有顯注的下降現象。

表4-11 爐石混凝土長期曝露海水後之透水係數

水灰比 (w/c)	爐石含量 (%)	透水係數 ($\times 10^{-11}$ m/sec)				
		一年期	二年期	三年期	四年期	五年期
0.5	0	4.65	6.85	1.94	1.18	3.19
	40	3.89	2.04	4.24	0.90	1.20
	60	2.22	11.0	4.79	1.74	1.88
	80	1.82	11.8	2.71	5.42	4.79
0.7	0	15.4	11.5	16.3	2.92	2.78
	40	11.4	10.5	5.35	4.72	9.33
	60	10.6	23.2	11.2	6.81	4.44
	80	37.1	25.2	25.6	32.4	38.9

表4-12 爐石混凝土曝露海水後其抗壓強度、彈性模數與柏松比之分析結果

齡 期		在海水中曝露之時間															
		一 年 期			二 年 期			三 年 期			四 年 期			五 年 期			
水 灰 比	爐石 含量 (%)	抗壓 強度 kg/cm ²	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	抗壓 強度 kg/cm ²	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	抗壓 強度 kg/cm ²	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	抗壓 強度 kg/cm ²	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	抗壓 強度 kg/cm ²	彈性 模數 kg/cm ²	柏 松 比	
		0	377	360340	0.19	390	312887	0.17	401	328751	0.17	592	322806	0.18	602	314465	0.22
		40	413	328198	0.21	395	345932	0.16	538	387077	0.19	617	326508	0.17	596	300489	0.19
		60	420	336206	0.20	461	323056	0.16	578	407659	0.18	636	363391	0.22	638	385671	0.17
		80	339	266672	0.20	351	309073	0.18	514	344503	0.19	568	338926	0.19	559	313761	0.19
0.7	0	290	278625	0.20	276	312129	0.17	365	282164	0.17	414	303576	0.19	433	305094	0.18	
	40	345	310043	0.19	352	293175	0.19	402	324785	0.18	424	393788	0.20	440	305876	0.22	
	60	361	312112	0.20	370	304943	0.20	452	350854	0.18	462	316203	0.18	476	340565	0.22	
	80	248	267428	0.20	281	283073	0.18	319	323108	0.24	374	330791	0.22	385	320273	0.20	

表4-13 爐石混凝土曝光海水後其試體內鋼筋之腐蝕電位變化(-mV)

水灰比 (w/c)	爐石含量 (%)	保護層厚度 (鋼筋位置) (cm)	第一年期			第二年期			第三年期			第四年期			第五年期		
			試體 (組別) 1-2-3			試體 (組別) 1-2-3			試體 (組別) 1-2-3			試體 (組別) 1-2-3			試體 (組別) 1-2-3		
0.5	0	2	153	180	177	193	213	201	239	196	186	368	353	381	401	394	353
		4	148	134	151	183	187	211	216	177	212	304	296	296	318	311	301
		7	157	145	162	219	191	204	191	193	176	293	289	301	303	296	332
	40	2	184	174	199	211	208	206	263	217	392	354	375	315	443	453	483
		4	169	176	164	224	212	228	254	237	417	342	312	286	323	341	296
		7	157	148	173	226	209	241	258	244	343	303	287	312	356	320	313
0.5	60	2	189	196	183	204	196	211	276	258	353	321	368	412	461	432	428
		4	188	205	202	183	204	189	317	280	338	363	286	335	381	351	317
		7	170	207	187	201	218	206	296	304	354	347	301	310	350	318	298
	80	2	189	187	201	215	201	216	349	296	285	428	396	461	469	428	493
		4	161	190	214	195	211	221	303	284	215	370	293	338	335	318	348
		7	184	187	192	201	208	202	318	285	217	381	321	324	304	301	316
0.7	0	2	255	233	230	368	348	323	431	475	338	426	474	491	501	513	489
		4	240	202	220	318	312	301	428	438	446	360	309	317	370	398	363
		7	227	215	206	270	286	302	401	335	325	340	303	323	351	345	336
	40	2	256	250	248	309	318	298	419	416	444	437	483	473	488	514	524
		4	268	245	238	311	302	276	336	347	367	356	362	382	343	401	420
		7	231	226	218	274	275	259	272	328	357	341	306	376	313	378	404
0.7	60	2	237	224	246	326	311	314	384	434	419	480	411	469	501	531	516
		4	240	244	218	303	301	288	333	334	399	337	312	355	398	414	423
		7	210	205	199	268	292	279	292	303	386	332	323	356	331	383	371
	80	2	241	279	276	303	302	312	421	406	417	477	485	466	525	505	514
		4	184	242	215	298	294	298	358	357	420	303	347	324	438	424	398
		7	193	215	207	279	276	273	484	305	441	315	319	325	397	387	406

表4-14 水灰比0.5爐石混凝土長期曝露於海水後其化學含量分析結果

單位：(%)

爐石含量 (%)	試體深度 (從試體表面算起, mm)	第一年期		第二年期		第三年期		第四年期		第五年期	
		Cl ⁻	SO ₃ ⁻²	Cl ⁻	SO ₃ ⁻²	Cl ⁻	SO ₃ ⁻²	Cl ⁻	SO ₃ ⁻²	Cl ⁻	SO ₃ ⁻²
0	0~10	1.51	0.64	1.27	0.54	1.04	0.51	0.93	0.61	0.96	0.54
	10~20	0.81	0.21	0.73	0.31	0.33	0.31	0.29	0.41	0.36	0.40
	20~30	0.35	0.34	0.31	0.33	0.21	0.34	0.21	0.29	0.23	0.43
	30~40	0.21	0.21	0.23	0.34	0.11	0.30	0.23	0.33	0.24	0.28
	40~50	0.14	0.26	0.06	0.31	0.10	0.33	0.13	0.35	0.08	0.34
	50~60	0.08	0.27	0.04	0.34	0.06	0.31	0.16	0.28	0.10	0.31
40	0~10	1.21	0.51	1.17	0.62	0.93	0.53	0.86	0.49	0.84	0.55
	10~20	0.46	0.39	0.38	0.42	0.17	0.34	0.21	0.36	0.39	0.38
	20~30	0.26	0.45	0.16	0.38	0.13	0.29	0.18	0.41	0.21	0.31
	30~40	0.17	0.44	0.11	0.36	0.09	0.33	0.14	0.33	0.14	0.33
	40~50	0.19	0.37	0.08	0.39	0.05	0.29	0.08	0.30	0.11	0.41
	50~60	0.10	0.30	0.10	0.41	0.06	0.31	0.12	0.40	0.10	0.43
60	0~10	1.24	0.47	1.13	0.59	0.98	0.57	0.74	0.51	0.91	0.49
	10~20	0.71	0.31	0.60	0.46	0.21	0.40	0.31	0.39	0.41	0.40
	20~30	0.22	0.45	0.11	0.43	0.10	0.31	0.16	0.36	0.21	0.30
	30~40	0.14	0.22	0.07	0.49	0.06	0.36	0.20	0.41	0.11	0.35
	40~50	0.10	0.32	0.04	0.46	0.05	0.29	0.11	0.28	0.14	0.33
	50~60	0.08	0.35	0.04	0.43	0.06	0.32	0.09	0.31	0.09	0.33
80	0~10	1.80	0.53	1.26	0.65	0.86	0.54	0.83	0.48	0.81	0.51
	10~20	0.96	0.57	0.71	0.43	0.24	0.39	0.31	0.41	0.37	0.39
	20~30	0.33	0.42	0.16	0.41	0.11	0.31	0.22	0.33	0.13	0.41
	30~40	0.26	0.39	0.09	0.44	0.09	0.34	0.11	0.31	0.21	0.31
	40~50	0.18	0.40	0.10	0.42	0.05	0.29	0.12	0.29	0.11	0.30
	50~60	0.10	0.30	0.06	0.44	0.05	0.32	0.07	0.42	0.09	0.36

表4-15 水灰比0.7爐石混凝土長期曝露於海水後其化學含量分析結果

單位：(%)

爐石含量 (%)	試體深度 (從試體表面算起,mm)	第一年期		第二年期		第三年期		第四年期		第五年期	
		Cl ⁻	SO ₃ ⁻²	Cl ⁻	SO ₃ ⁻²	Cl ⁻	SO ₃ ⁻²	Cl ⁻	SO ₃ ⁻²	Cl ⁻	SO ₃ ⁻²
0	0~10	1.61	0.67	1.33	0.72	1.13	0.59	1.09	0.53	1.10	0.58
	10~20	1.02	0.27	0.81	0.38	0.43	0.41	0.38	0.41	0.34	0.49
	20~30	0.48	0.30	0.31	0.32	0.18	0.36	0.24	0.37	0.22	0.41
	30~40	0.29	0.37	0.15	0.31	0.10	0.30	0.18	0.34	0.21	0.31
	40~50	0.34	0.26	0.07	0.36	0.05	0.33	0.11	0.36	0.14	0.33
	50~60	0.21	0.34	0.09	0.36	0.05	0.31	0.09	0.40	0.16	0.35
40	0~10	1.42	0.53	1.34	0.69	1.01	0.53	0.98	0.61	1.17	0.49
	10~20	0.30	0.43	0.53	0.47	0.29	0.39	0.31	0.43	0.51	0.43
	20~30	0.39	0.34	0.26	0.44	0.13	0.41	0.23	0.40	0.38	0.37
	30~40	0.26	0.36	0.09	0.44	0.09	0.36	0.14	0.39	0.24	0.40
	40~50	0.11	0.30	0.11	0.41	0.04	0.34	0.07	0.33	0.16	0.38
	50~60	0.09	0.32	0.05	0.41	0.04	0.34	0.11	0.35	0.09	0.42
60	0~10	1.38	0.49	1.18	0.63	0.97	0.61	1.03	0.57	1.21	0.61
	10~20	0.41	0.50	0.55	0.51	0.21	0.41	0.41	0.38	0.44	0.43
	20~30	0.26	0.43	0.21	0.47	0.11	0.38	0.20	0.41	0.20	0.40
	30~40	0.17	0.46	0.13	0.42	0.10	0.33	0.11	0.35	0.11	0.38
	40~50	0.11	0.35	0.08	0.45	0.05	0.34	0.09	0.34	0.08	0.35
	50~60	0.10	0.39	0.05	0.40	0.05	0.38	0.06	0.34	0.10	0.35
80	0~10	2.18	0.55	1.46	0.74	1.08	0.49	1.14	0.52	1.17	0.53
	10~20	1.18	0.55	0.79	0.49	0.27	0.40	0.44	0.38	0.47	0.41
	20~30	0.29	0.23	0.25	0.43	0.18	0.34	0.30	0.35	0.23	0.44
	30~40	0.21	0.35	0.08	0.45	0.10	0.38	0.27	0.39	0.12	0.37
	40~50	0.12	0.33	0.06	0.46	0.06	0.33	0.09	0.41	0.11	0.31
	50~60	0.09	0.36	0.06	0.43	0.06	0.34	0.06	0.30	0.13	0.33

單位：(E-10)

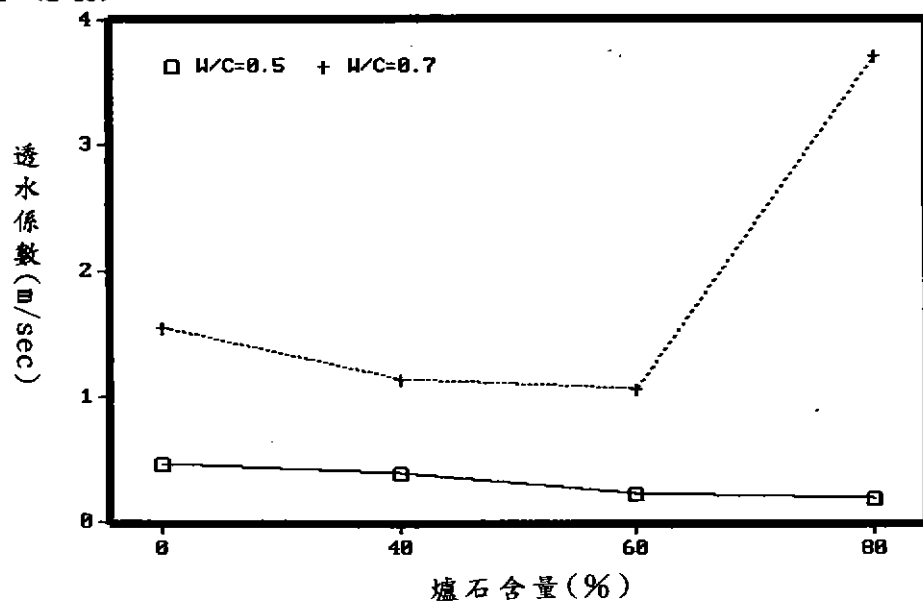


圖4-17 爐石混凝土曝放海水一年後其透水係數變化

單位：(E-10)

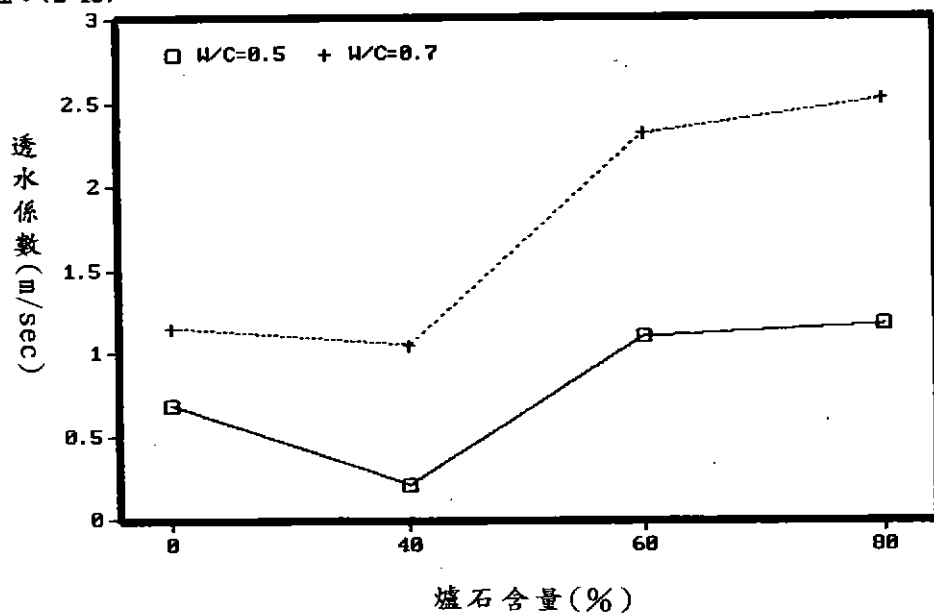


圖4-18 爐石混凝土曝放海水二年後其透水係數變化

單位：(E-10)

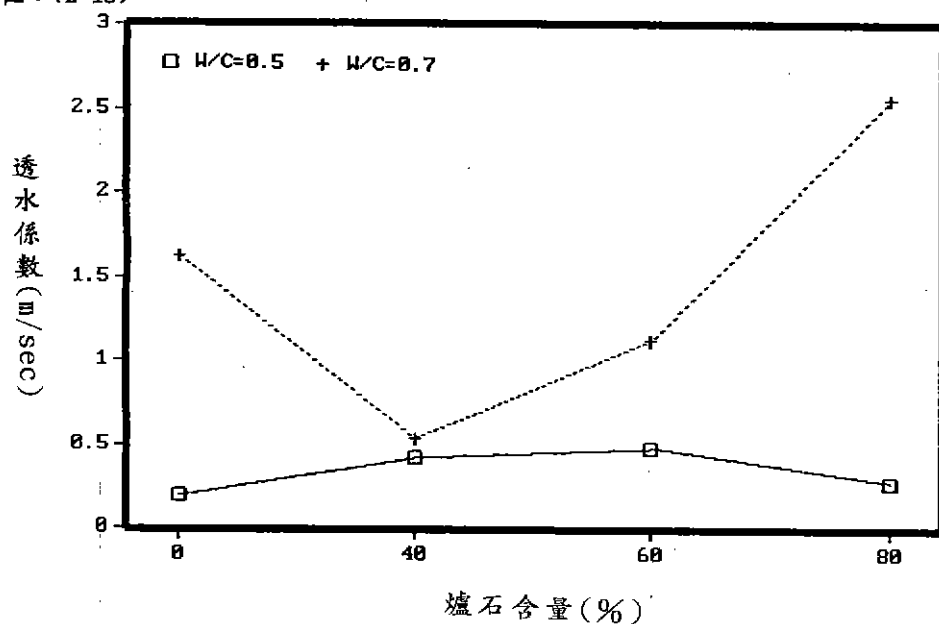


圖4-19 爐石混凝土曝放海水三年後其透水係數變化

單位：(E-10)

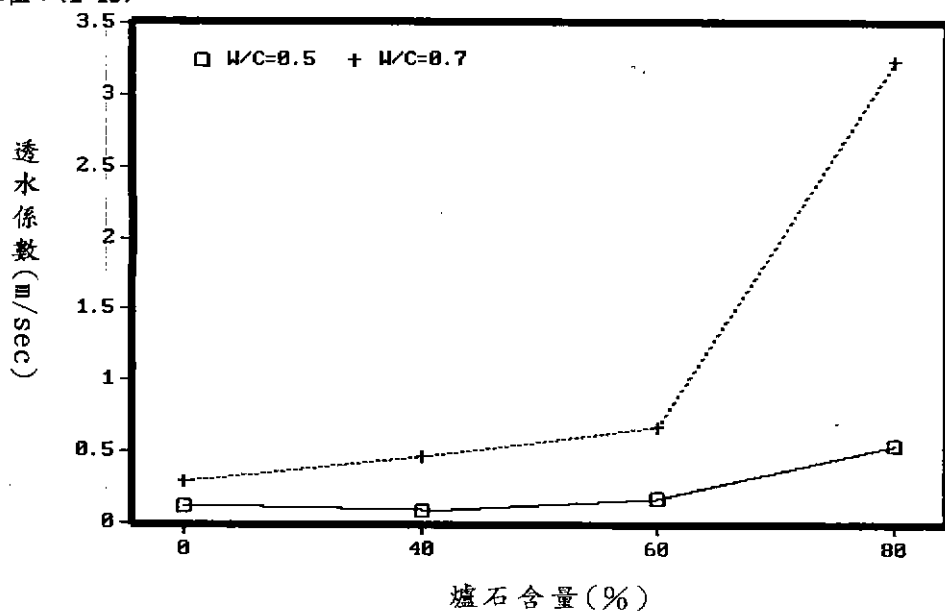


圖4-20 爐石混凝土曝放海水四年後其透水係數變化

單位：(E-18)

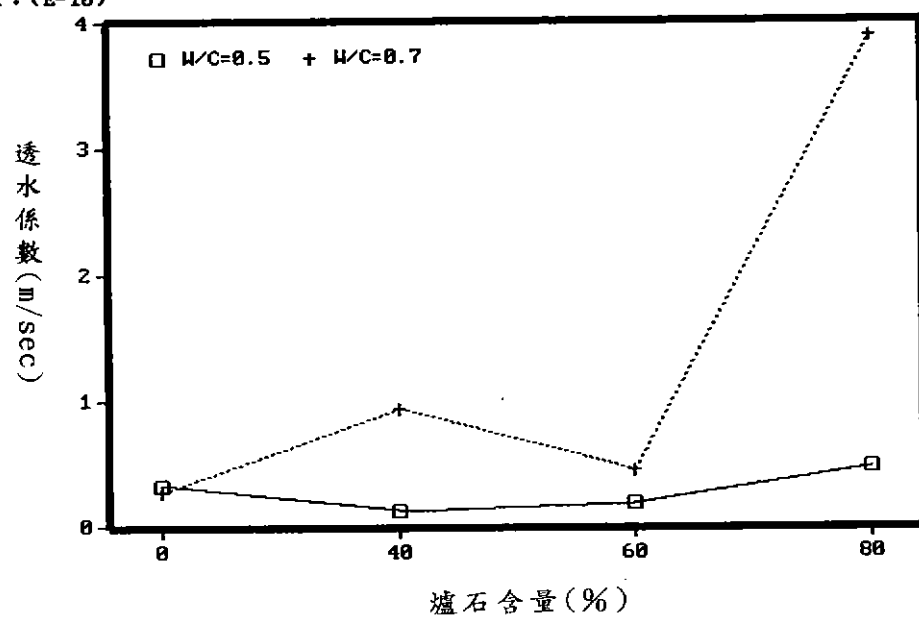


圖4-21 瀝石混凝土曝放海水五年後其透水係數變化

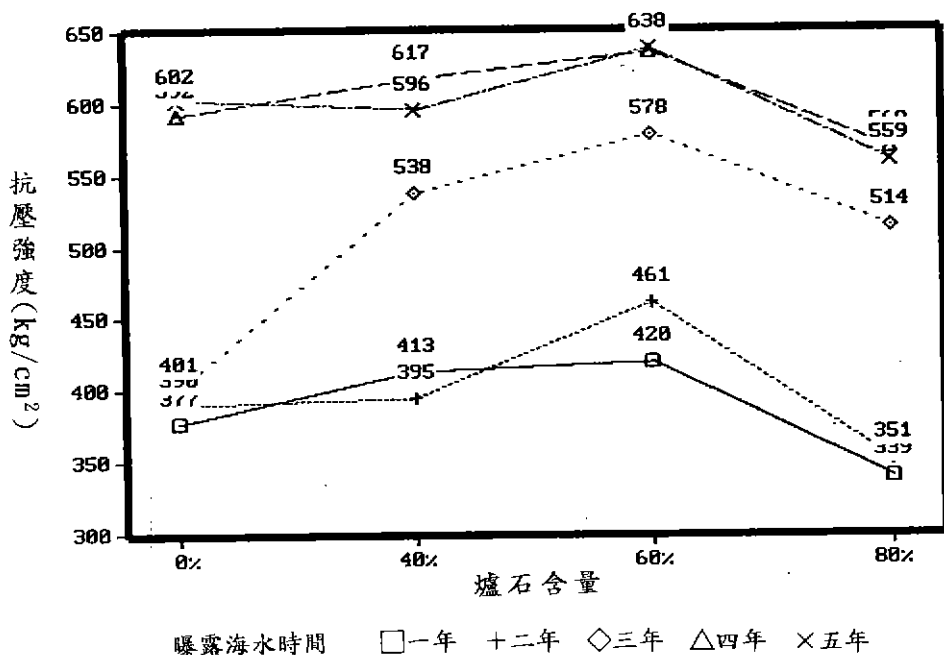


圖4-22 水灰比0.5之爐石混凝土其抗壓強度與曝露年期之關係

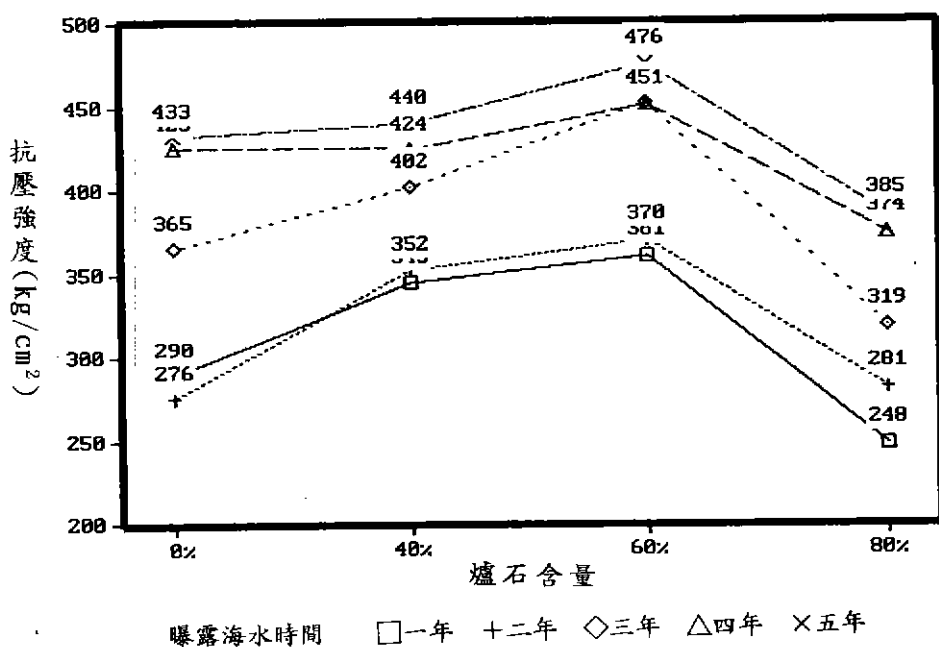


圖4-23 水灰比0.7之爐石混凝土其抗壓強度與曝露年期之關係

單位：千

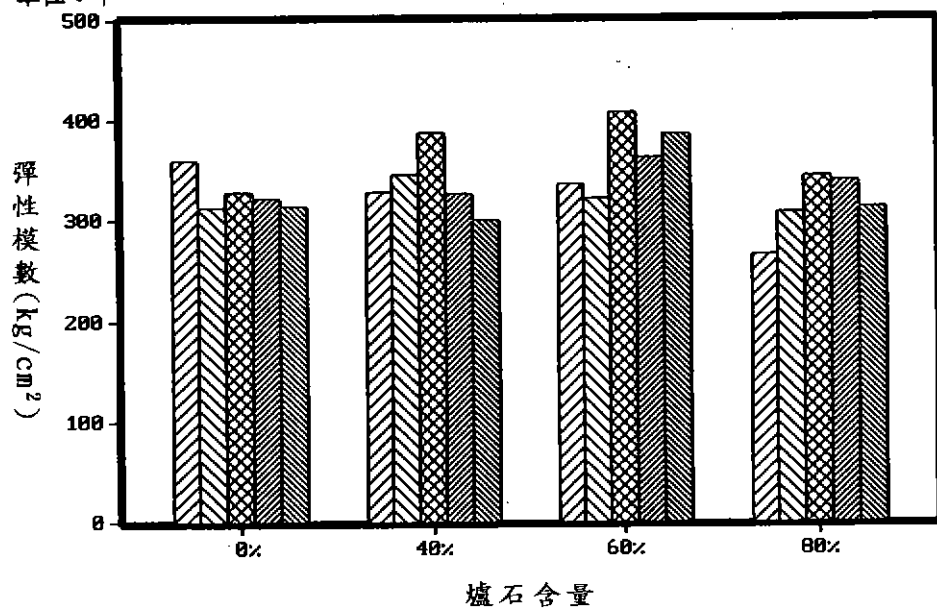


圖4-24 水灰比0.5之爐石混凝土其彈性模數與曝露年期之關係

單位：千

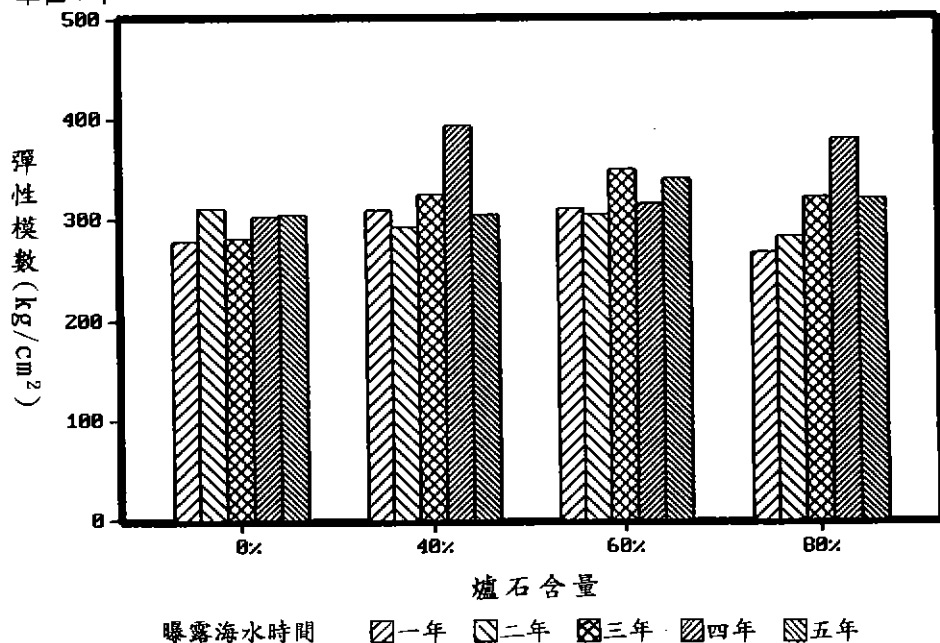


圖4-25 水灰比0.7之爐石混凝土其彈性模數與曝露年期之關係

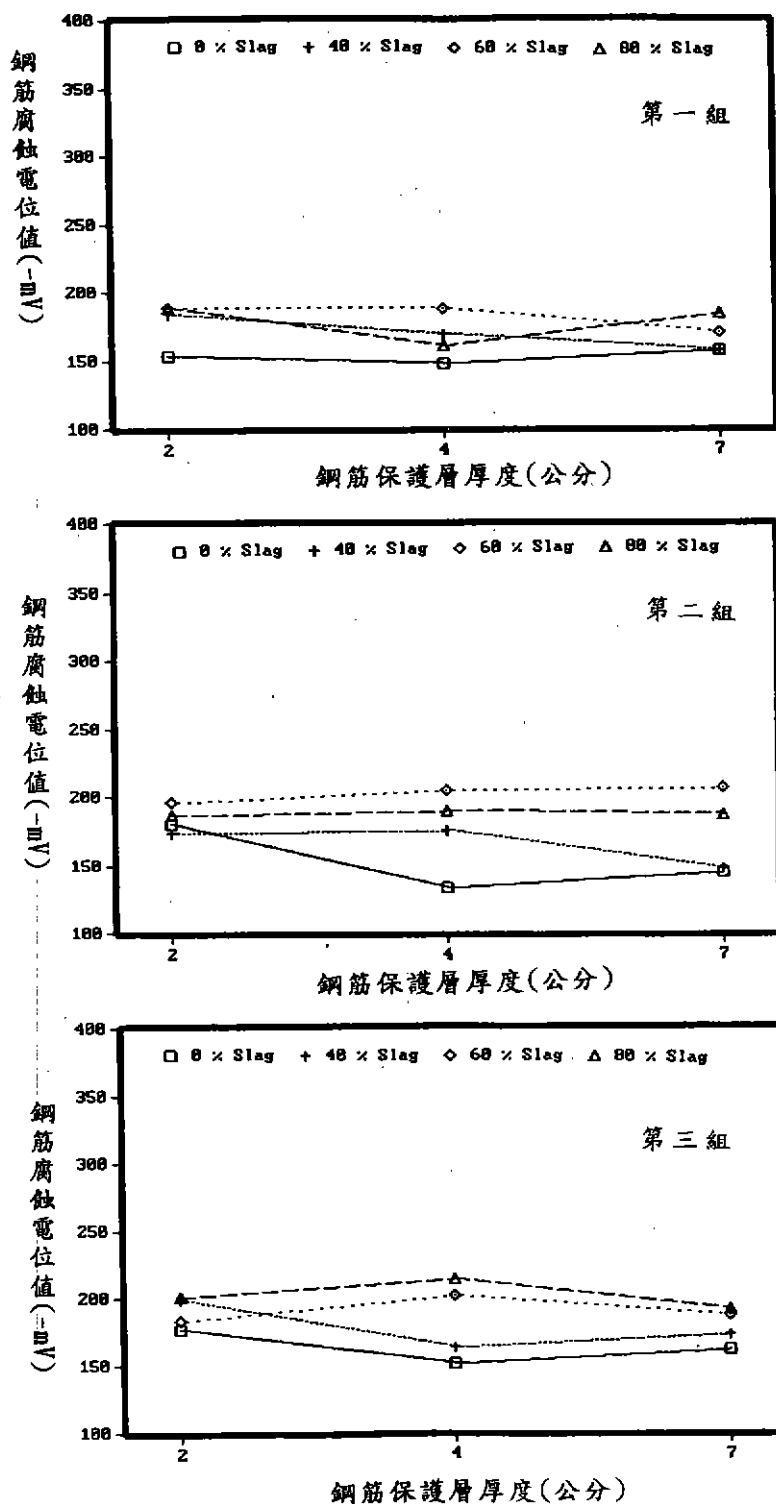


圖4-26 水灰比0.5試體曝露一年其鋼筋腐蝕電位變化情形

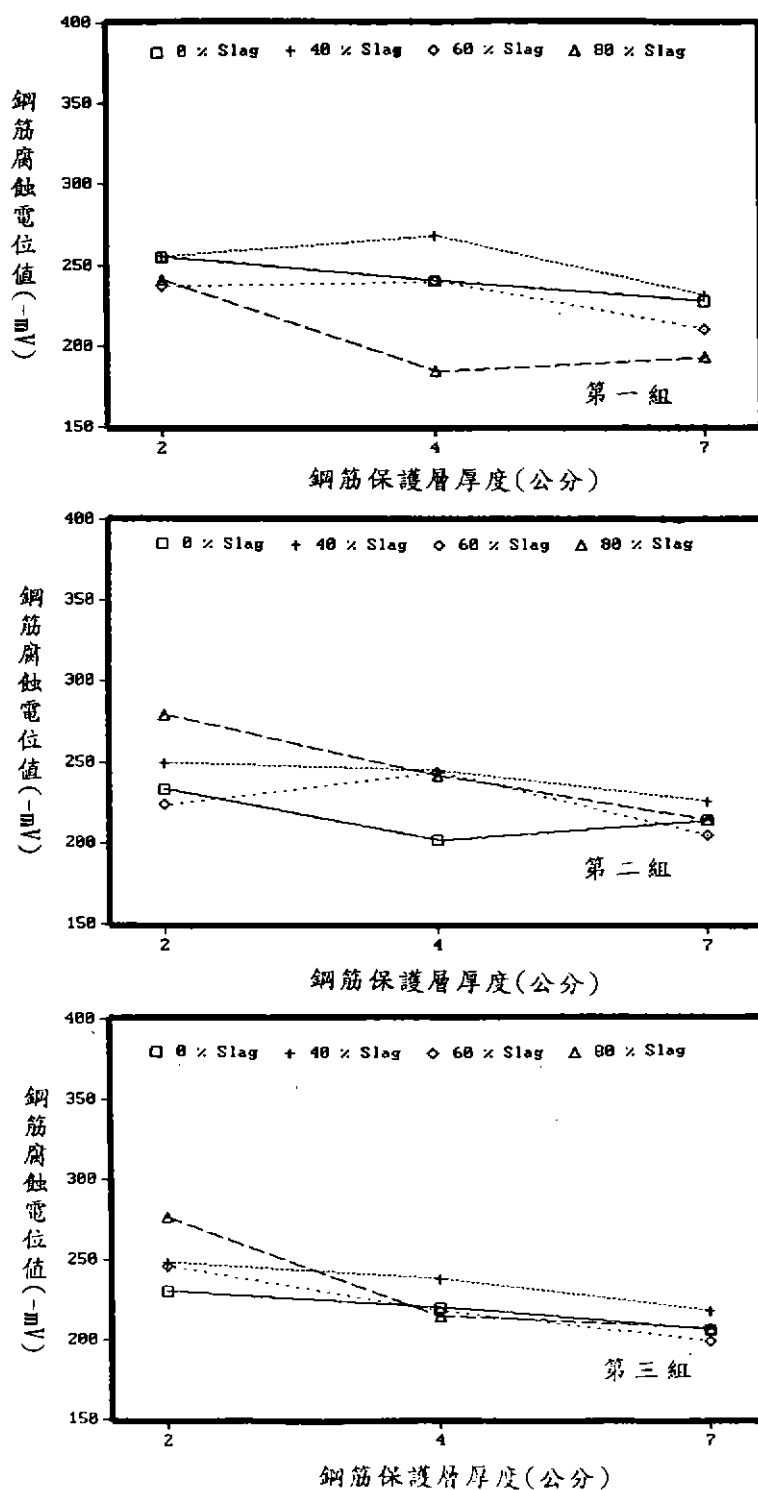


圖4-27 水灰比0.7試體曝露一年其鋼筋腐蝕電位變化情形

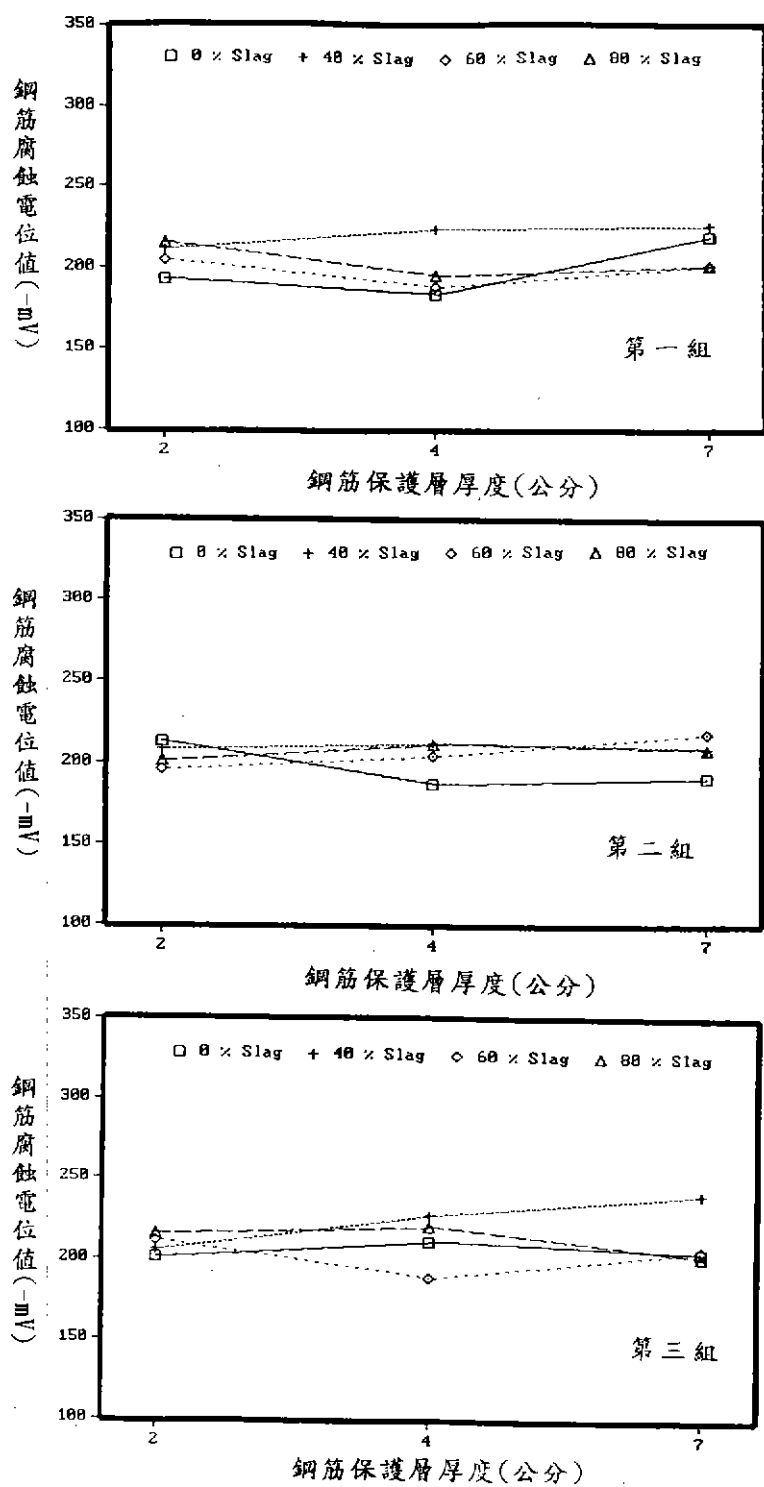


圖4-28 水灰比0.5試體曝露二年其鋼筋腐蝕電位變化情形

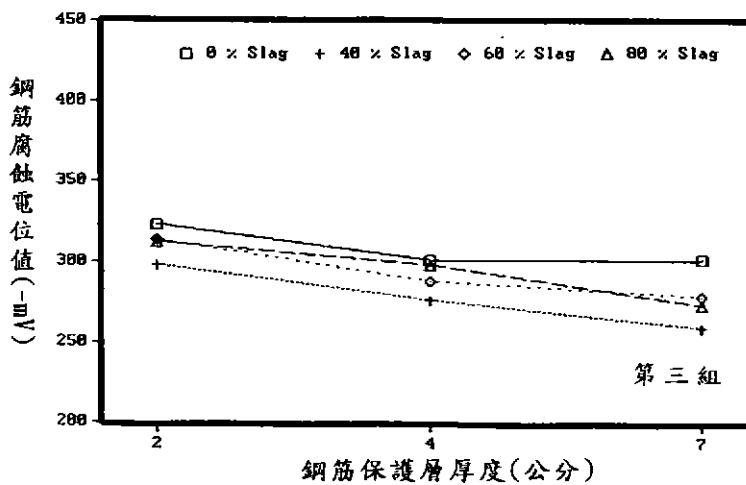
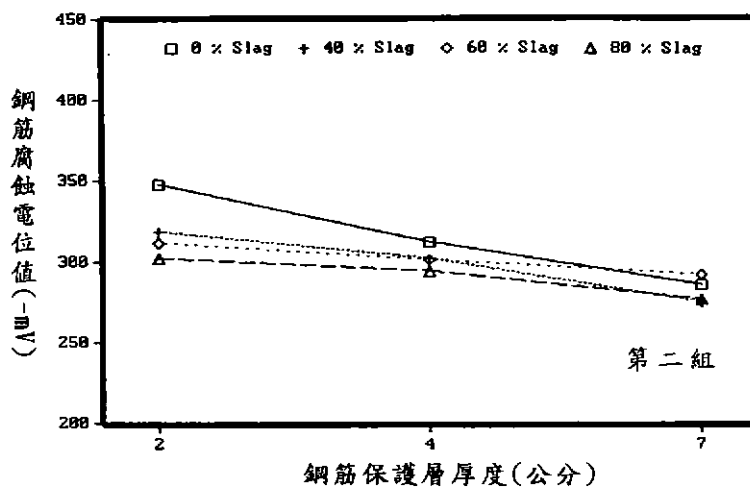
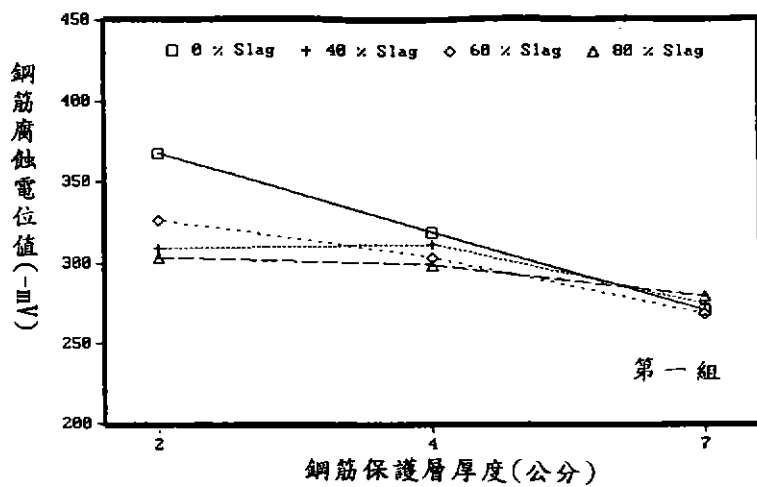


圖4-29 水灰比0.7試體曝露二年其鋼筋腐蝕電位變化情形

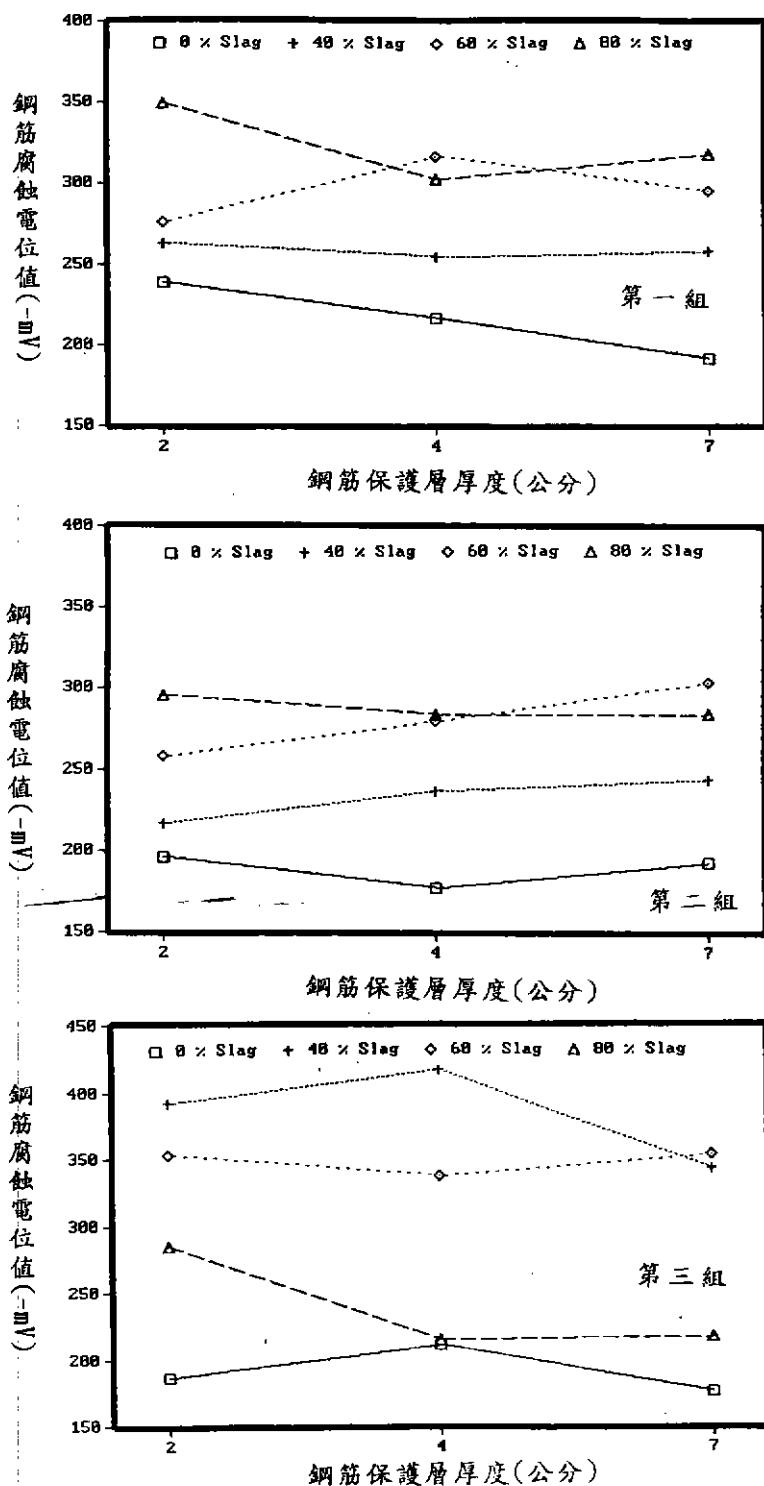


圖4-30 水灰比0.5試體曝露三年其鋼筋腐蝕電位變化情形

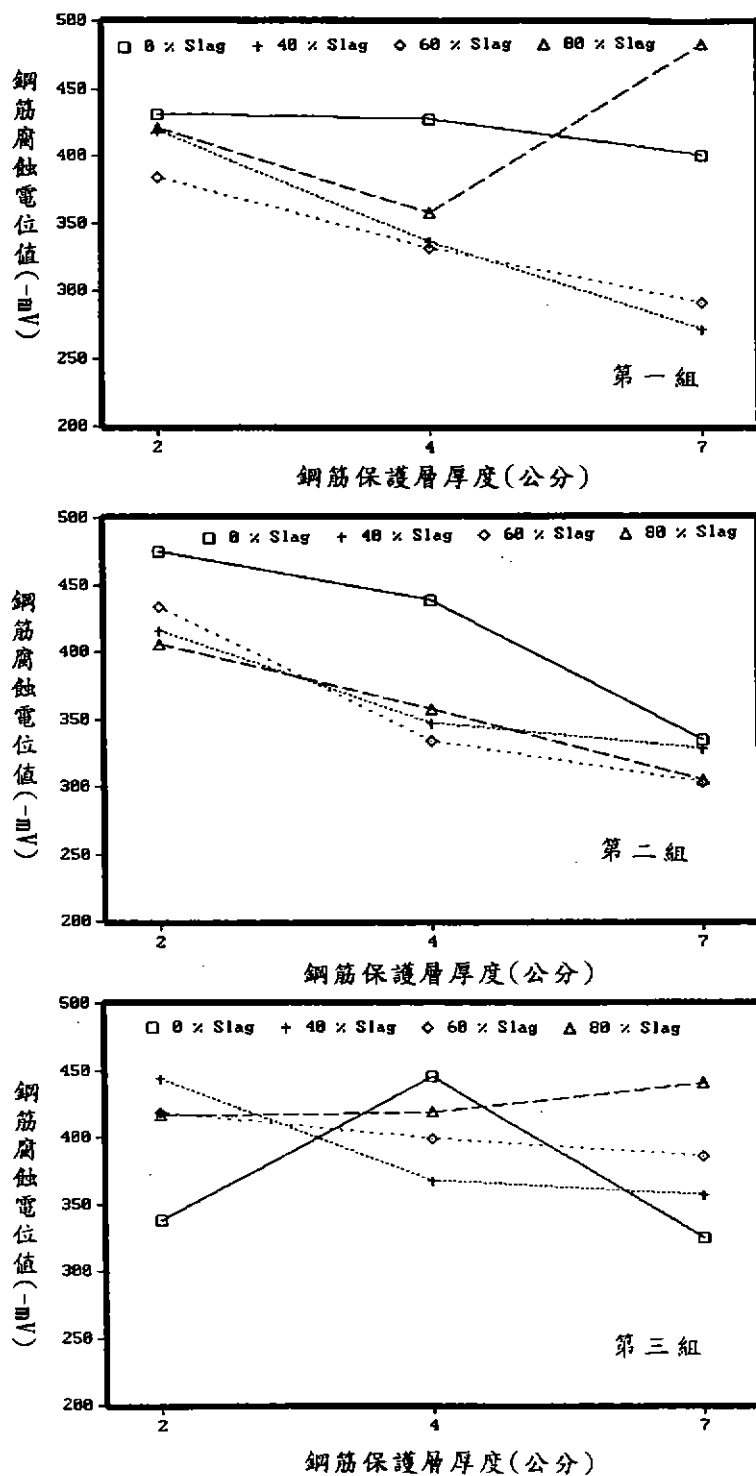


圖4-31 水灰比0.7試體曝露三年其鋼筋腐蝕電位變化情形

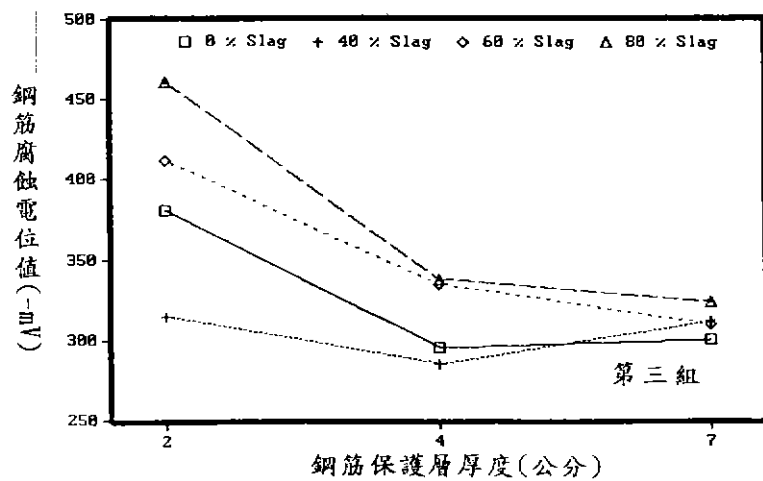
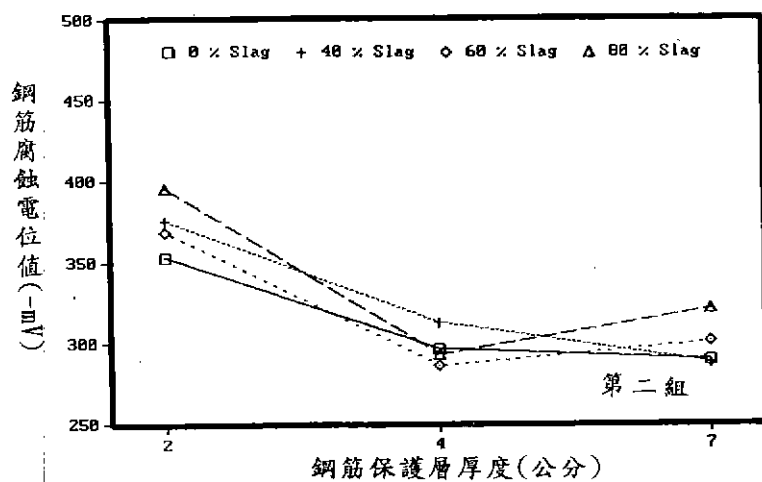
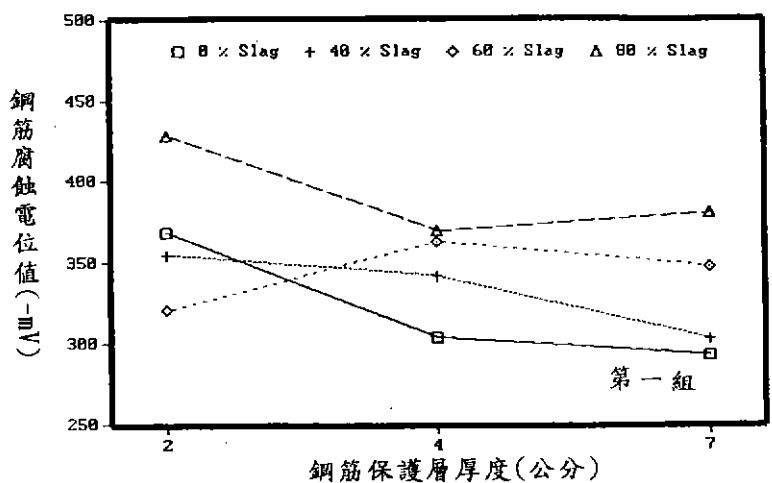


圖4-32 水灰比0.5試體曝露四年其鋼筋腐蝕電位變化情形

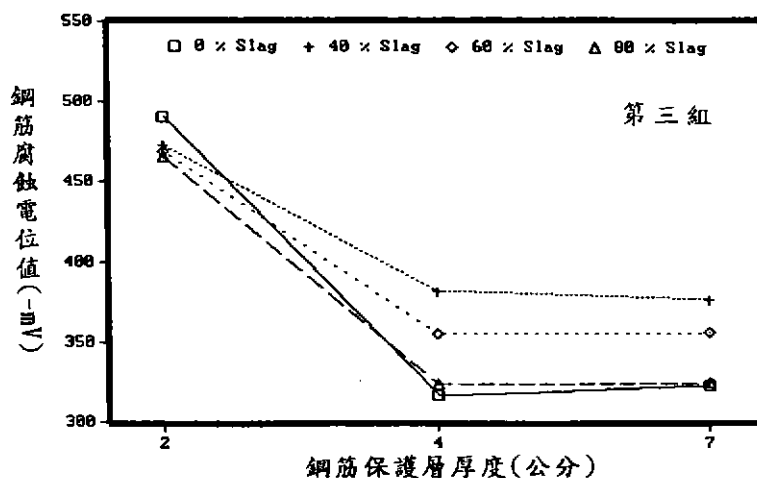
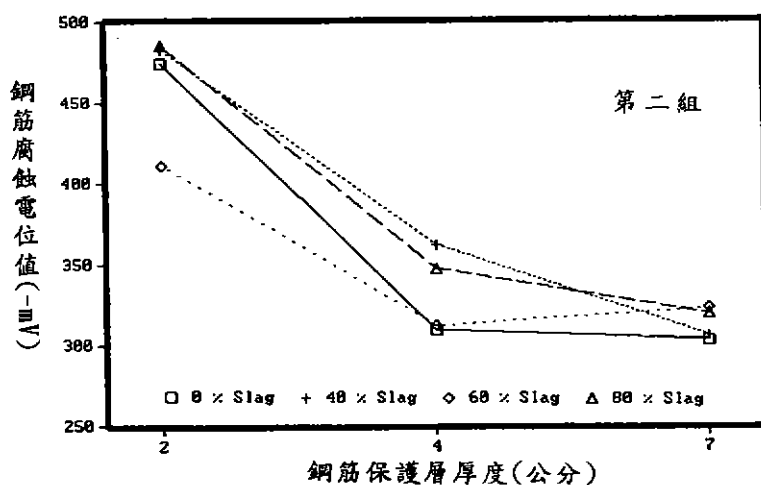
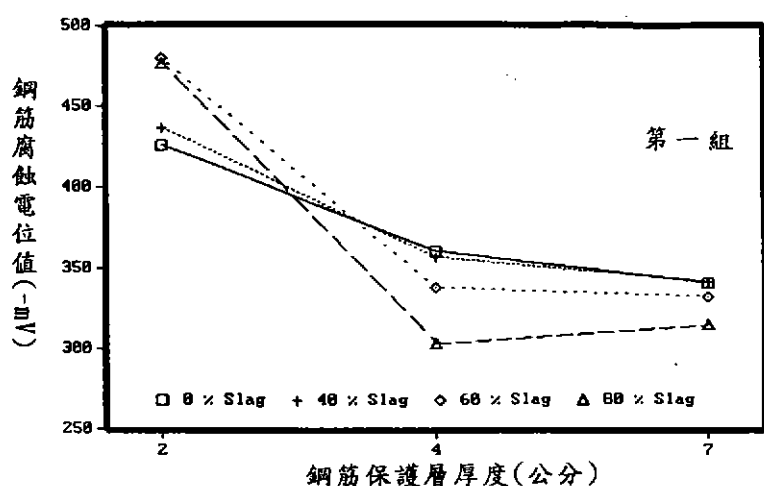


圖4-33 水灰比0.7試體曝露四年其鋼筋腐蝕電位變化情形

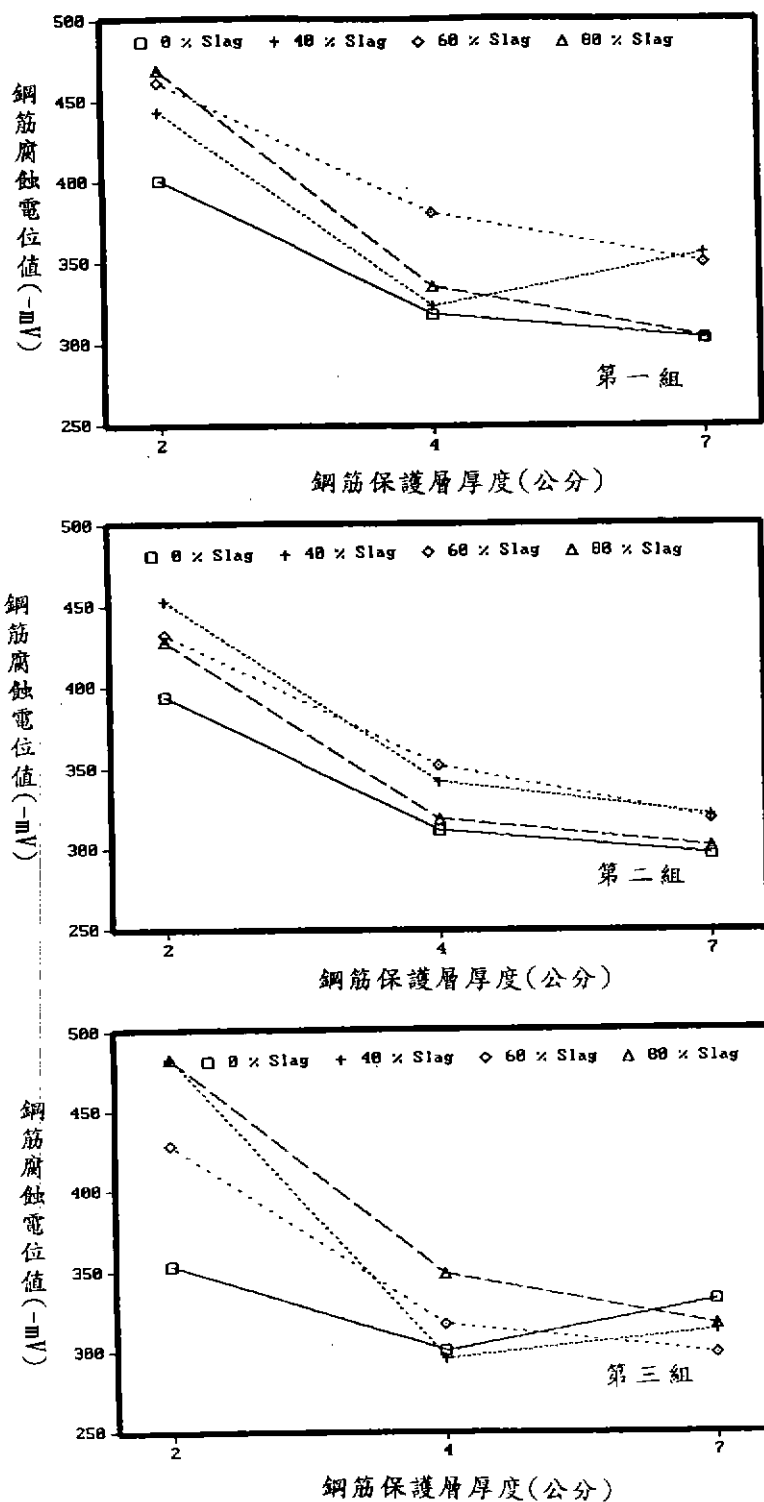


圖4-34 水灰比0.5試體曝露五年其鋼筋腐蝕電位變化情形

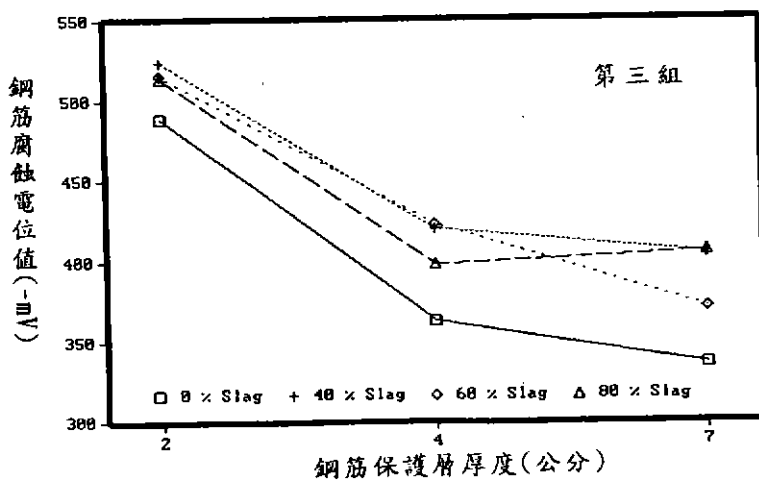
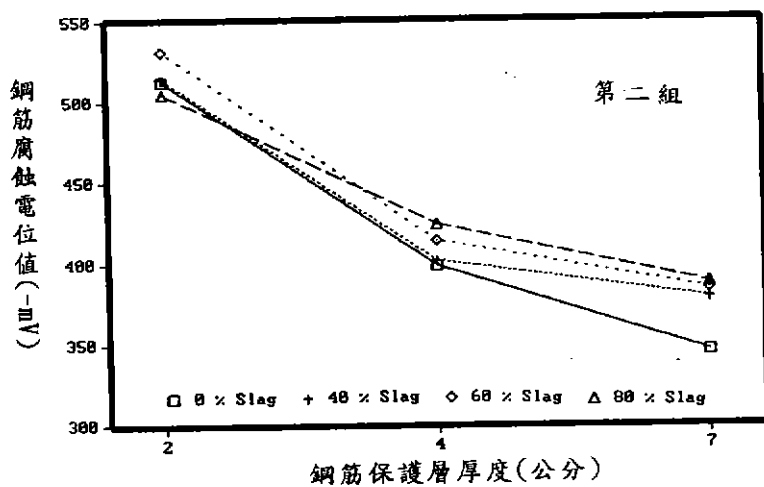
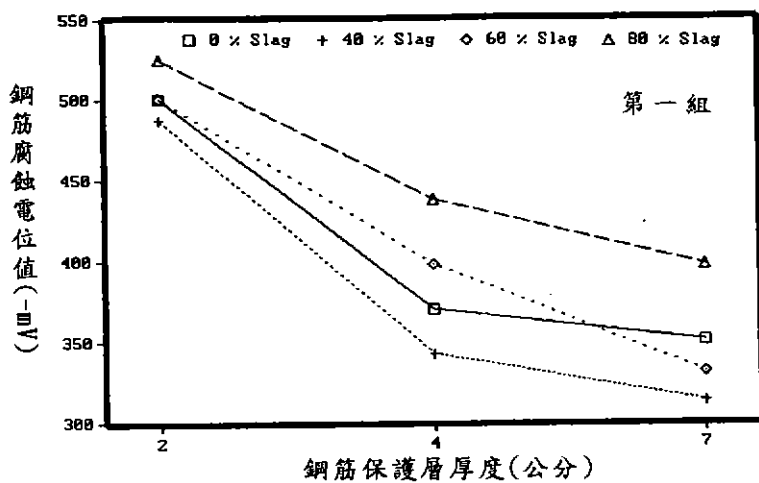


圖4-35 水灰比0.7試體曝露五年其鋼筋腐蝕電位變化情形

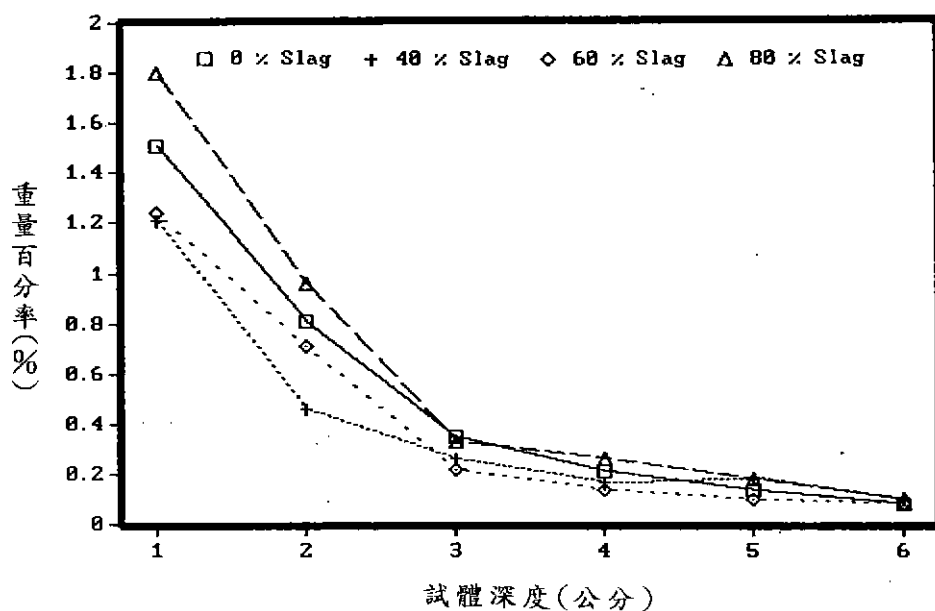


圖4-36 水灰比0.5試體曝露一年其 Cl^- 含量分佈情形

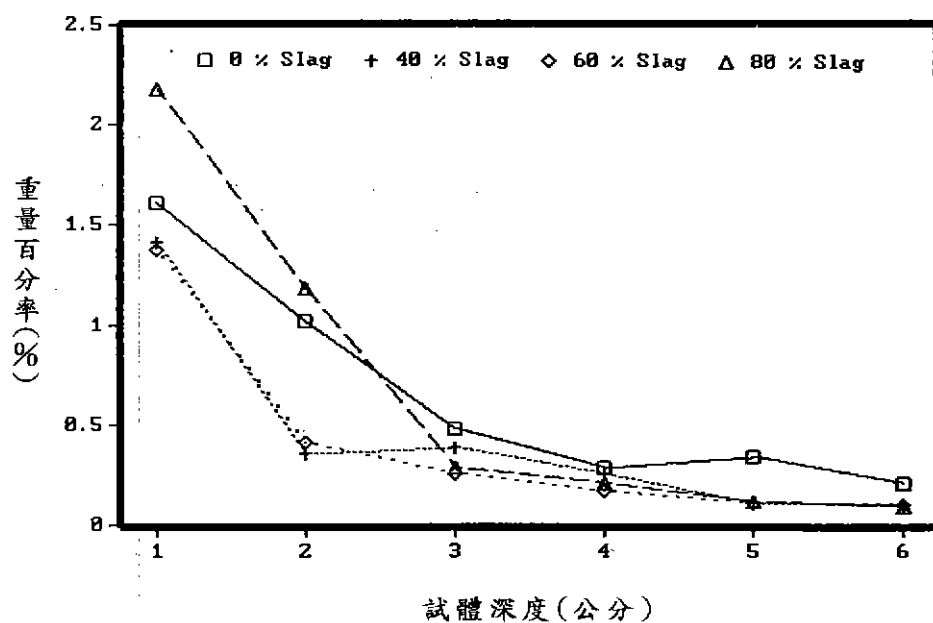


圖4-37 水灰比0.7試體曝露一年其 Cl^- 含量分佈情形

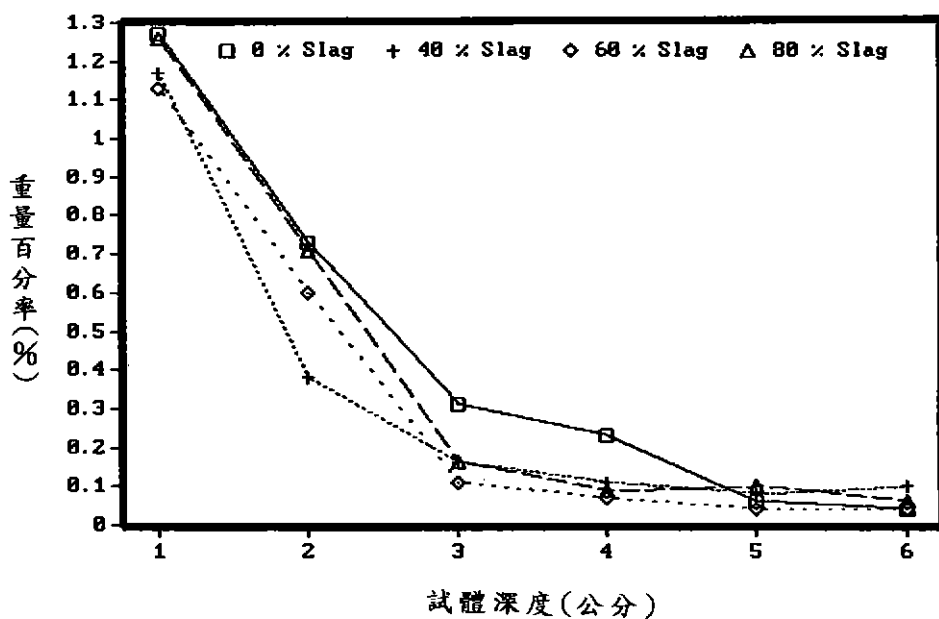


圖4-38 水灰比0.5試體曝露二年其 Cl^- 含量分佈情形

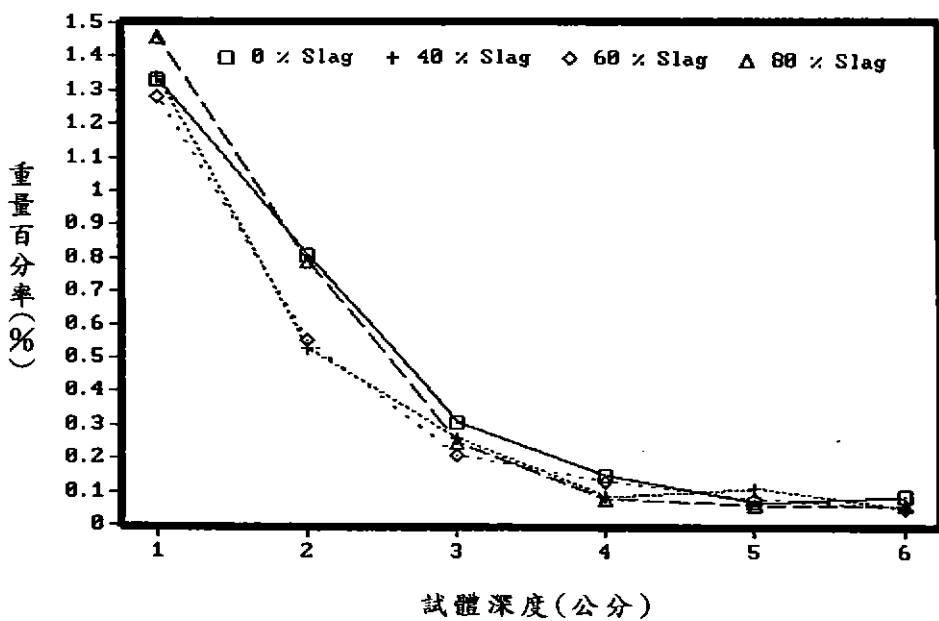


圖4-39 水灰比0.7試體曝露二年其 Cl^- 含量分佈情形

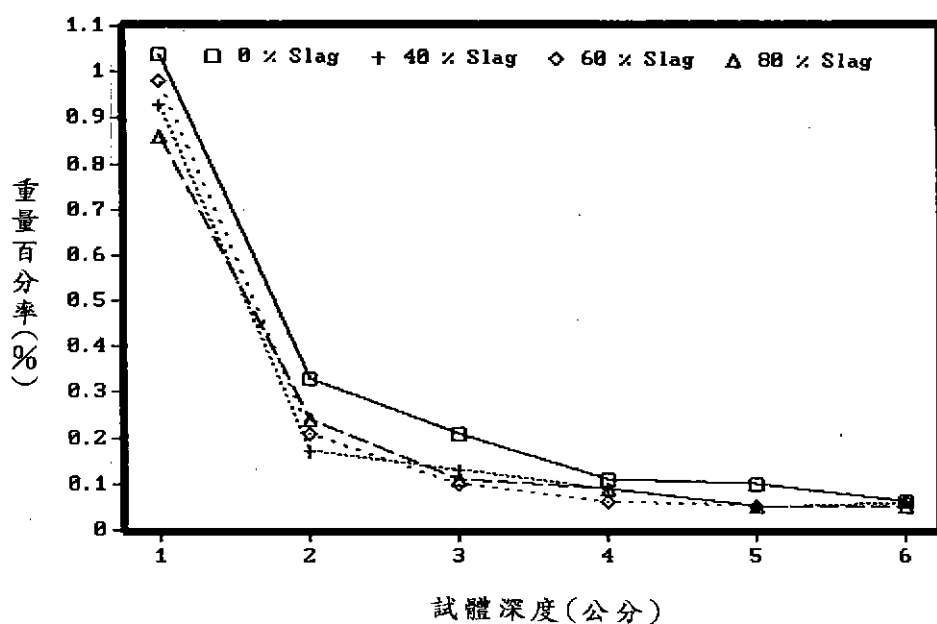


圖4-40 水灰比0.5試體曝露三年其 Cl^- 含量分佈情形

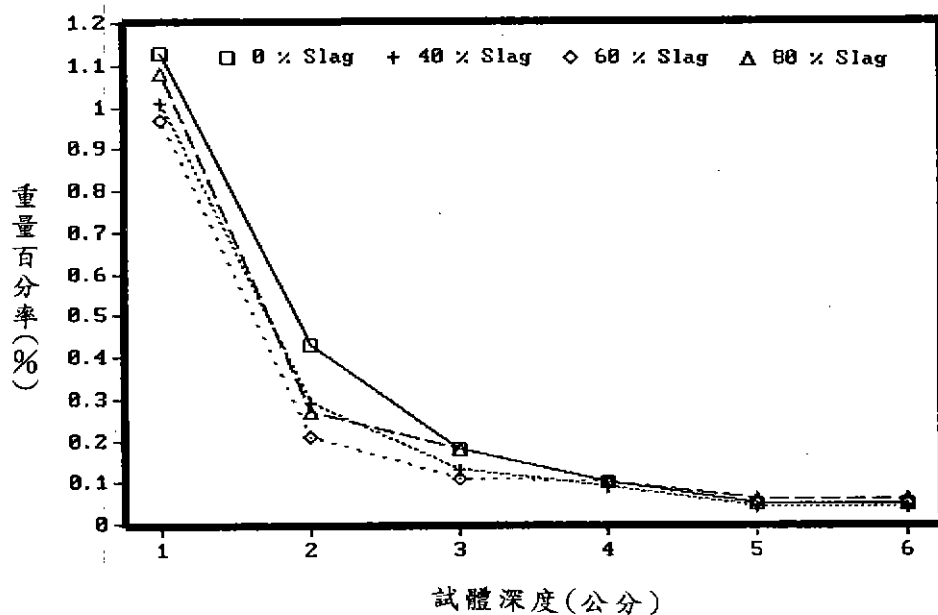


圖4-41 水灰比0.7試體曝露三年其 Cl^- 含量分佈情形

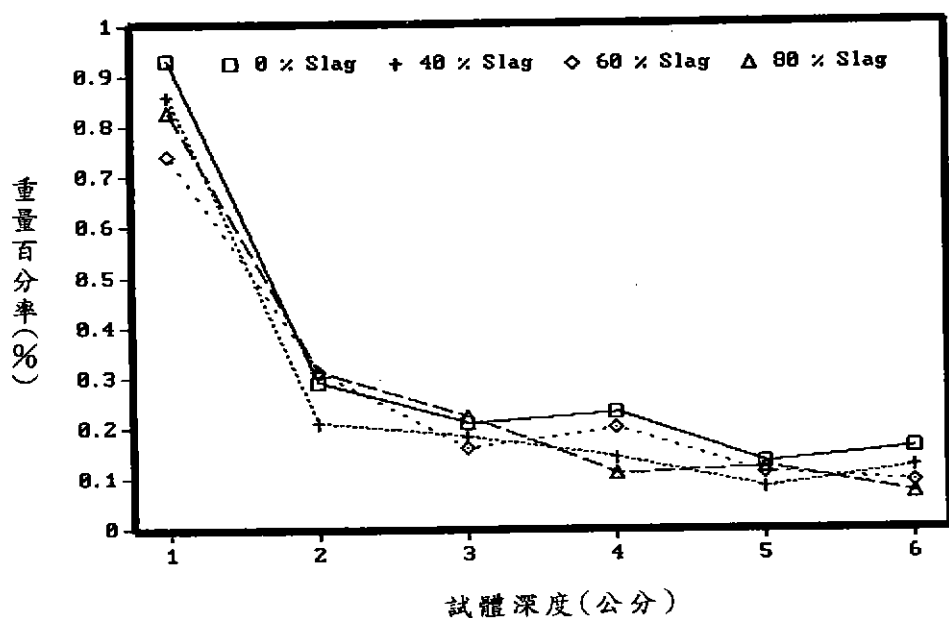


圖4-42 水灰比0.5試體曝露四年其Cl⁻含量分佈情形

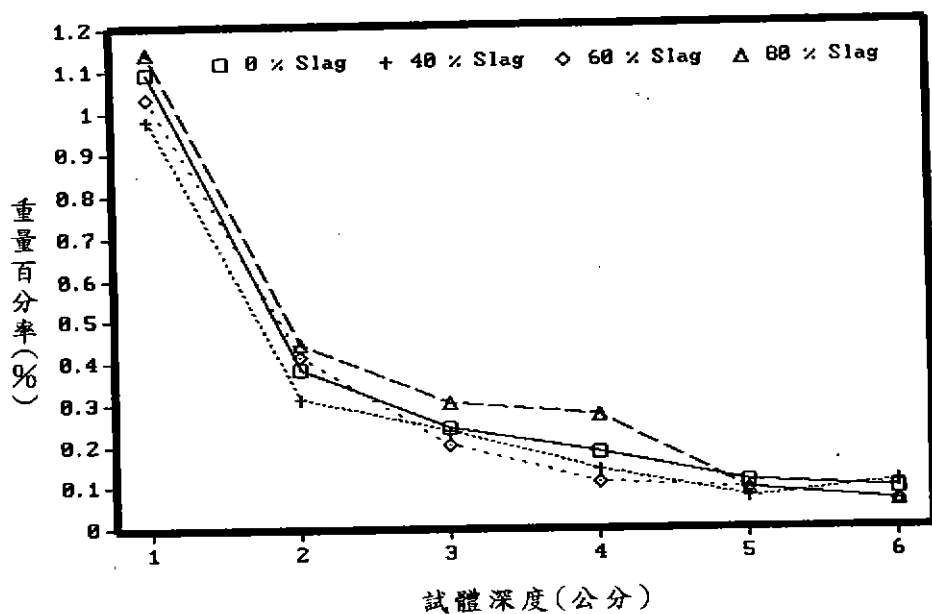


圖4-43 水灰比0.7試體曝露四年其Cl⁻含量分佈情形

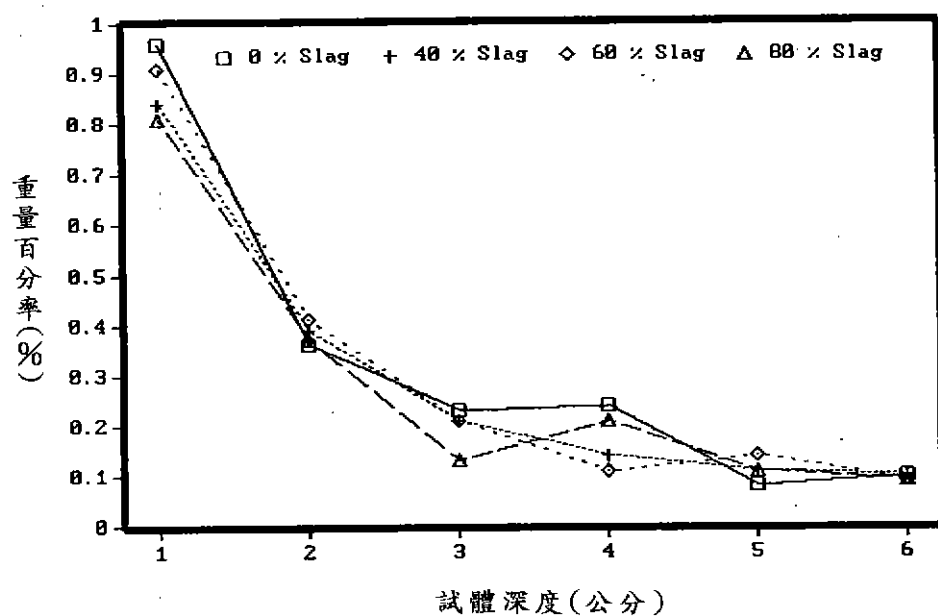


圖4-44 水灰比0.5試體曝露五年其 Cl^- 含量分佈情形

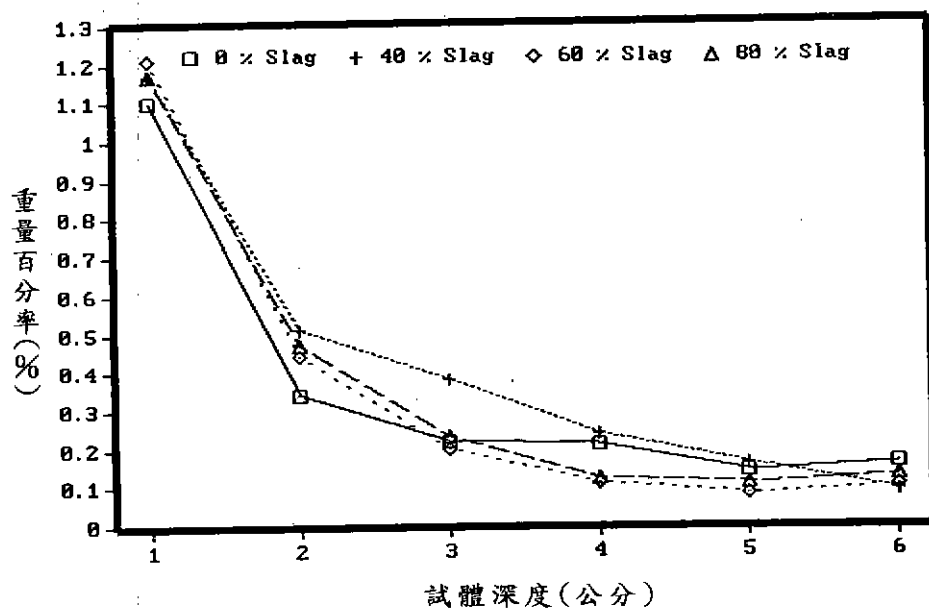


圖4-45 水灰比0.7試體曝露五年其 Cl^- 含量分佈情形

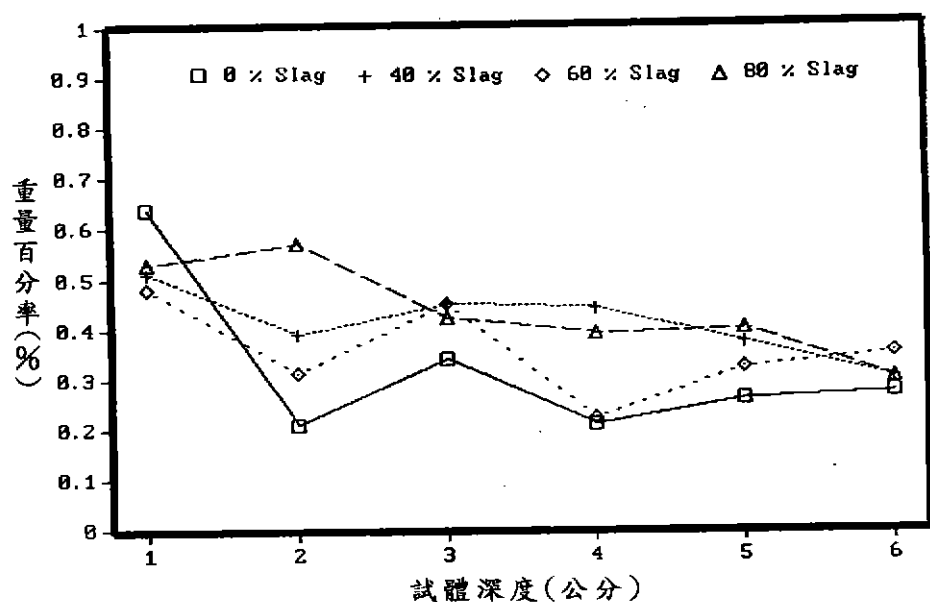


圖4-46 水灰比0.5試體曝露一年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

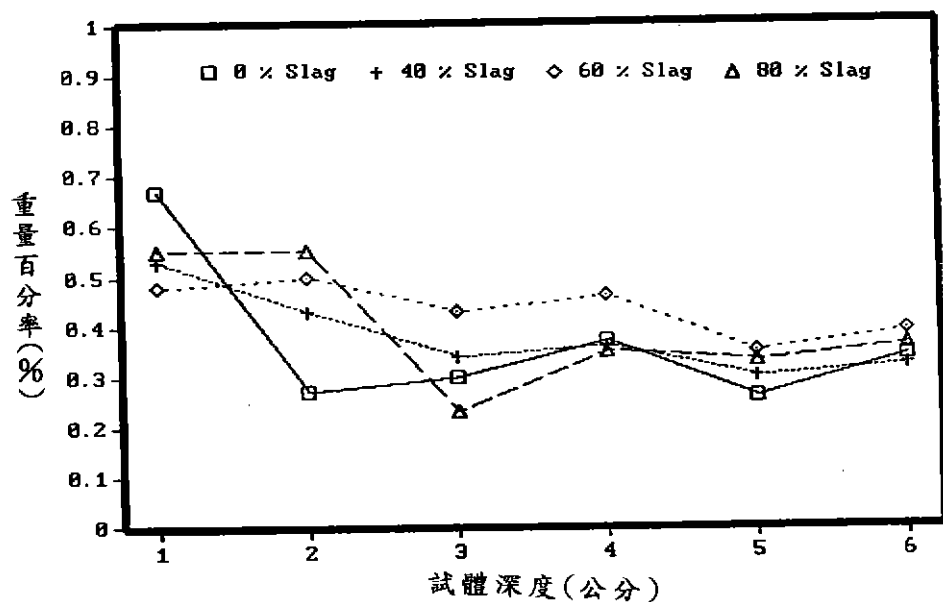


圖4-47 水灰比0.7試體曝露一年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

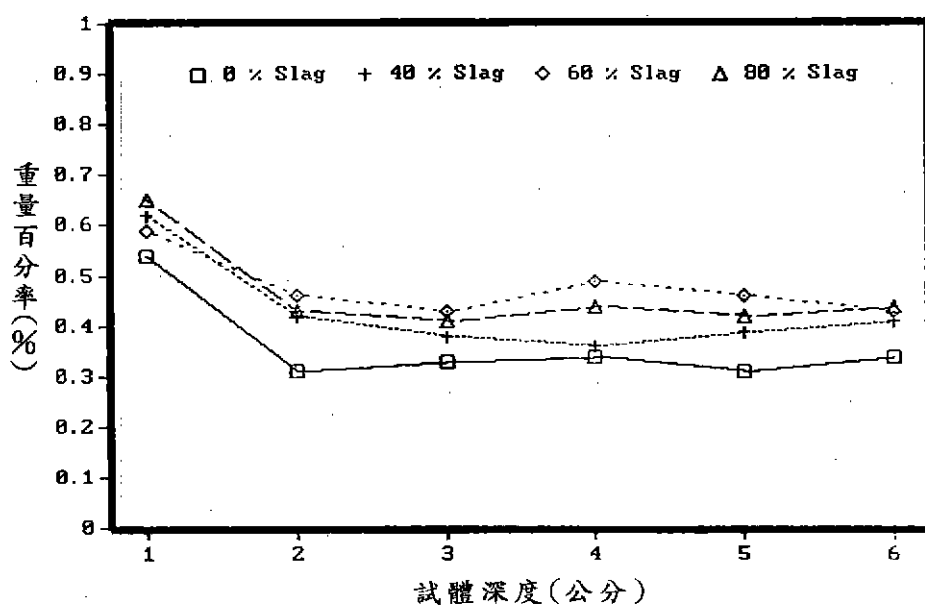


圖4-48 水灰比0.5試體曝露二年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

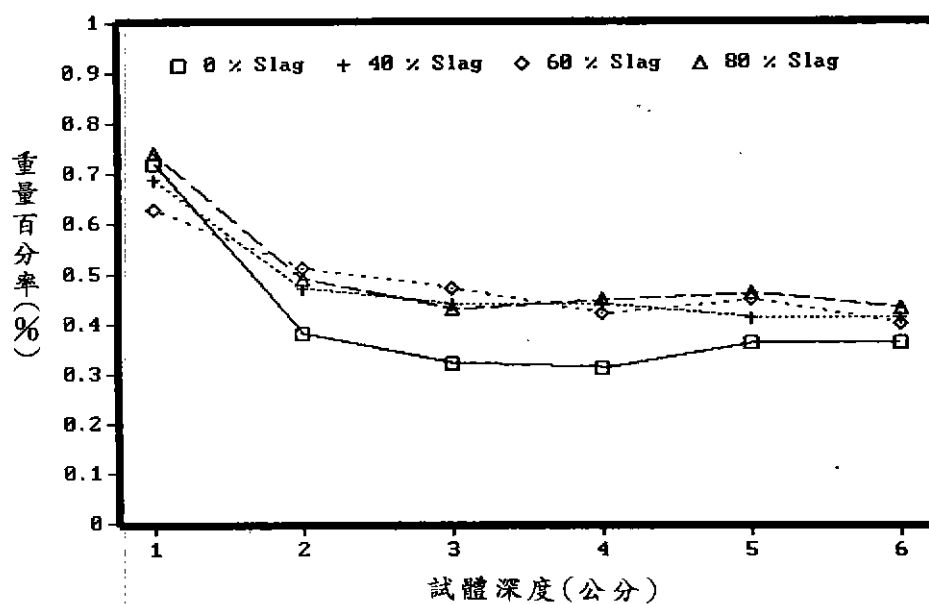


圖4-49 水灰比0.7試體曝露二年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

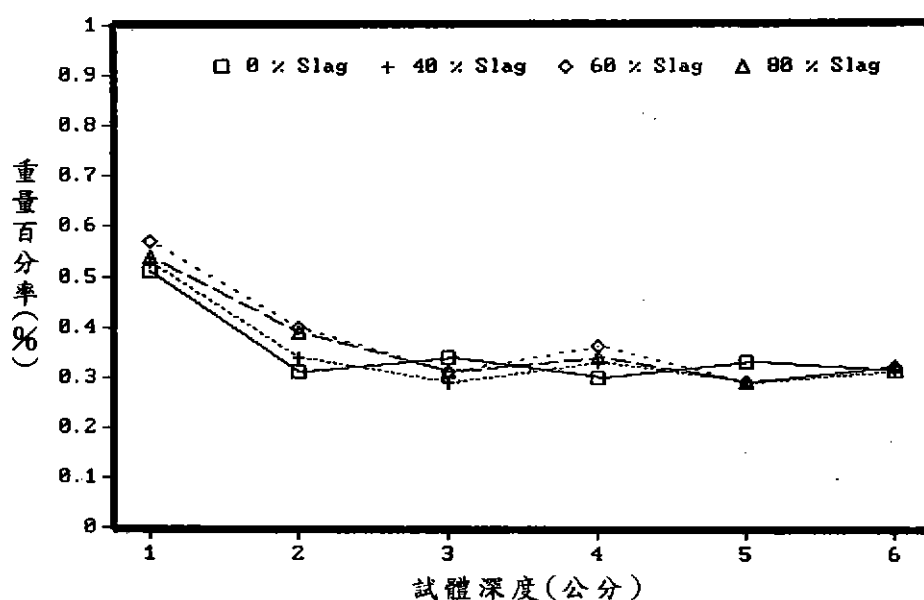


圖4-50 水灰比0.5試體曝露三年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

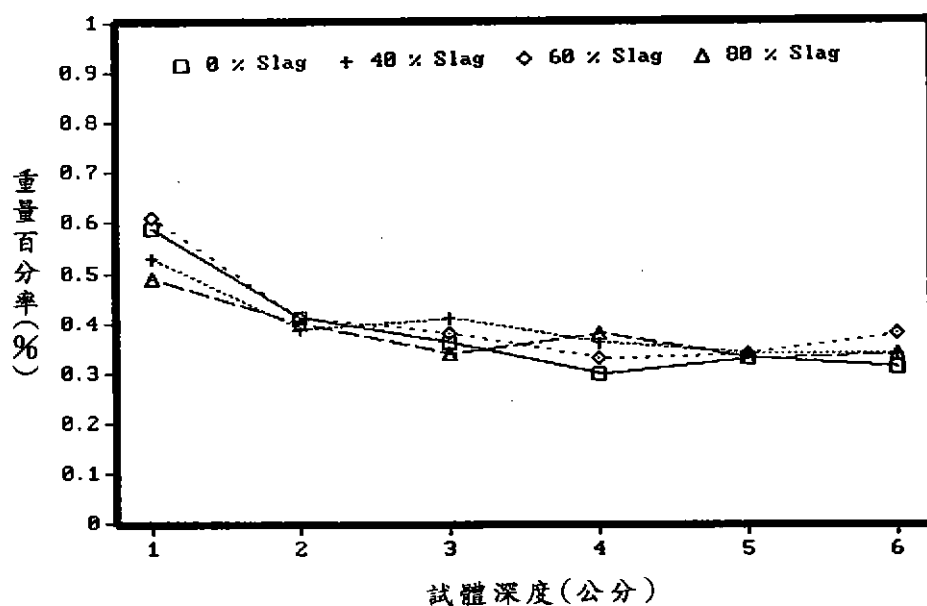


圖4-51 水灰比0.7試體曝露三年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

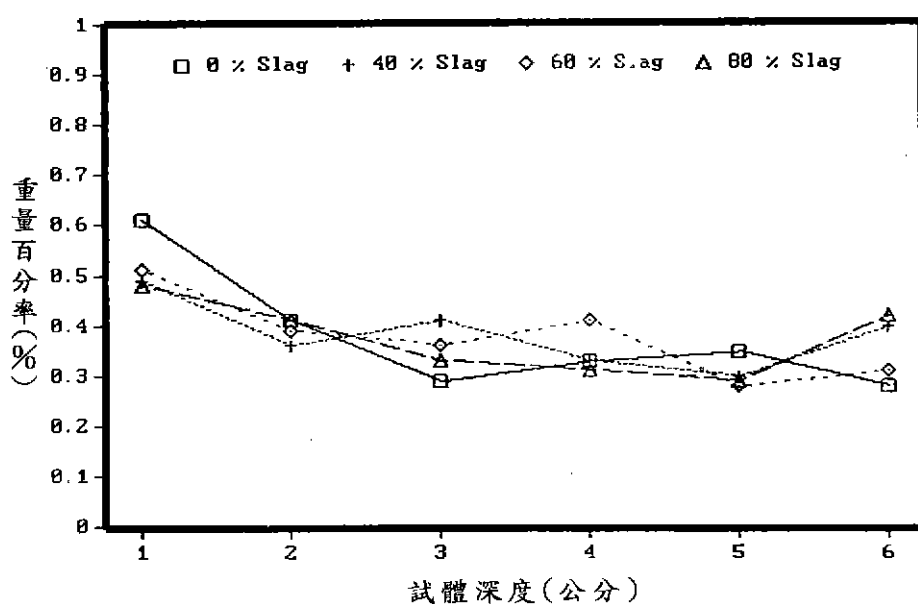


圖4-52 水灰比0.5試體曝露四年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

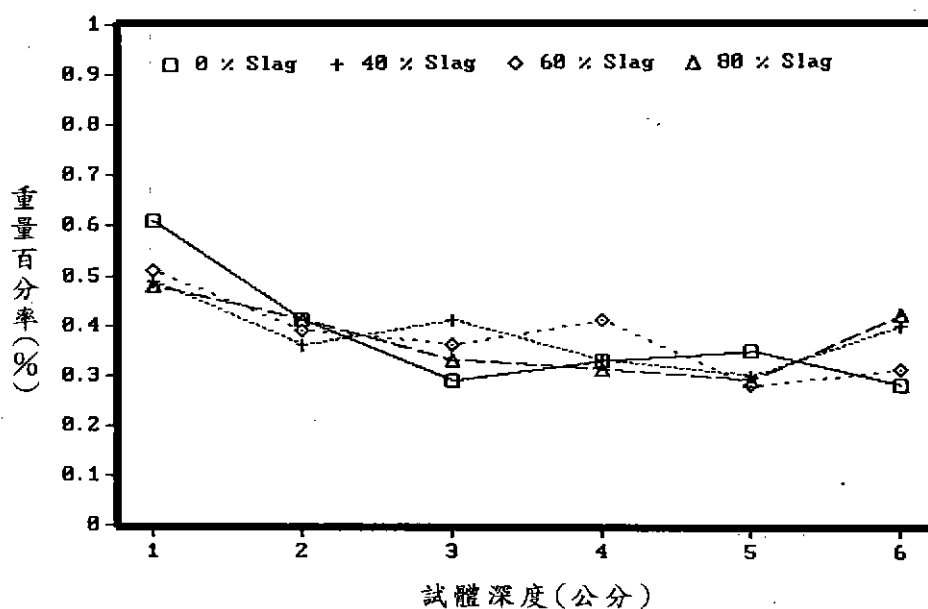


圖4-53 水灰比0.7試體曝露四年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

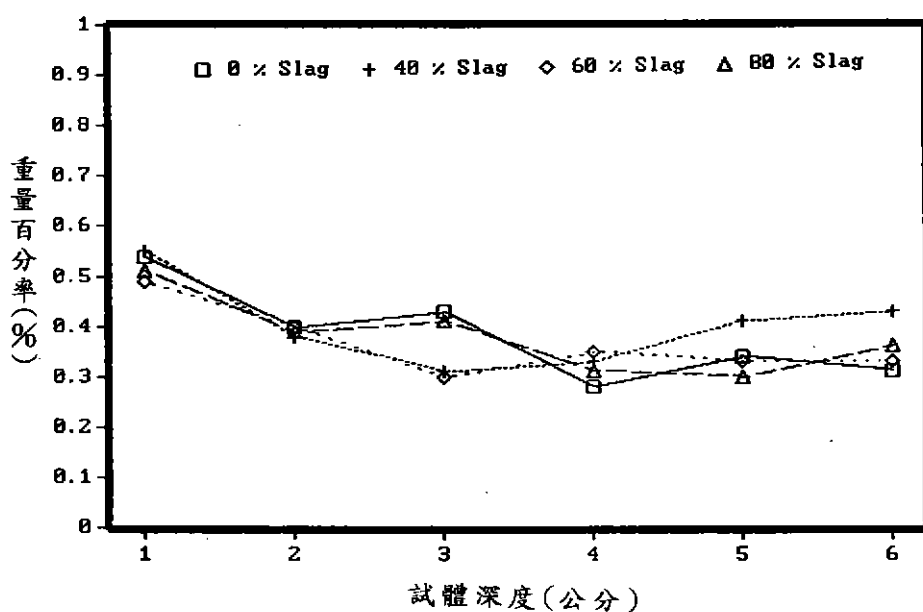


圖4-54 水灰比0.5試體曝露五年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

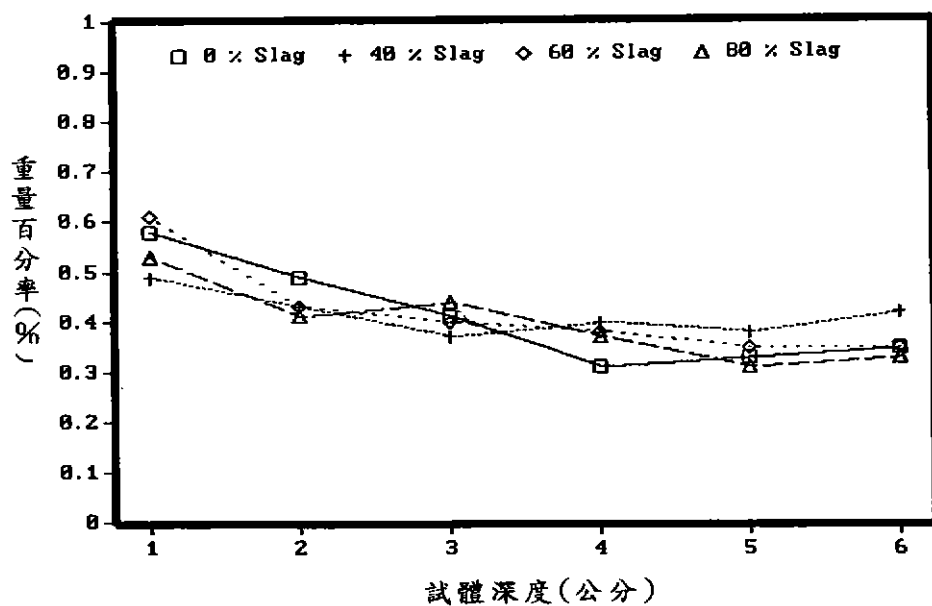


圖4-55 水灰比0.7試體曝露五年其 SO_3^{2-} 含量分佈情形

第五章 結論與建議

本研究以添加不同比例之高爐石粉於普通混凝土中，進行相關係列之基本物理性質分析，同時以短期加速試驗方式，搭配長期性曝露試驗，相互探討高爐水泥對港灣混凝土結構物而久性及抑制鄉岡筋腐蝕效應為何？歷經五年期間之試驗，獲得之結論歸納如下：

1. 在低水灰比($w/c=0.5$)下，添加高爐石於混凝土中，有明顯降低混凝土透水性之效應，且養生齡期在56天時，透水性即可趨於穩定狀態。
2. 高水灰比($w/c=0.7$)時，添加高量(80%)高爐石於混凝土中，對改善混凝土之水密(透水)性，並無明顯作用，且各比例含量之爐石混凝土，在養生齡期延至90天期後，其透水性才漸趨穩定。
3. 爐石混凝土之水密性，或許因試體製作品質差異所致，其透水係數變化較無明顯趨勢，但大體而言，以添加40%及60%爐石可得較低之透水係數。
4. 爐石混凝土早期強度(齡期28天以前)，均較同齡期之普通混凝土之強度為低，但晚期強度(除含80%爐石外)，則均高出普通混凝土。研究中以添加60%爐石，可得較佳之強度。
5. 同齡期之爐石混凝土水灰比0.5時其抗壓強度、彈性模數均較水灰比0.7為高，強度隨齡期增加而增加。
6. 在短期養生中，同齡期之爐石混凝土，以添加40%及60%爐石，其抗壓強度最佳。經長期曝露海水後，其結果亦大致相同。
7. 彈性模數與抗壓強度略成正比關係。
8. 柏松比在0.17—0.24間，品質略有變化。
9. 爐石混凝土之初凝及終凝時間均較普通混凝土為長。
10. 爐石含量愈高之混凝土，其初終凝時間相對愈延長(後)。
11. 爐石含量在40%以下之混凝土，其凝結時間與普通混凝土差異很小，其初凝時間僅增加2—4%，終凝時間增加10%。
12. 水灰比大的試體其鋼筋腐蝕電位值，較水灰比小者之電位值為小(亦即更為負值)，顯示水灰比大者其試體內之鋼筋，較易傾向於腐蝕方

向。

13. 短期試驗中顯示，高水灰比試體，於第八循環週期時，部份試體內部鋼筋之腐蝕電位 $< -350\text{mV}$ ，鋼筋已發生腐蝕生鏽，而水灰比 0.5 之試體，經 12 週循環週期後，才發現含 80% 爐石之試體，其鋼筋電位值 $< -350\text{mV}$ 。
14. Cl^- 之滲透量隨試體深度之增加，有明顯遞減現象，其分佈狀況大致遵行 Fick's 的擴散曲線。
15. SO_3^{2-} 含量變化不大。

建議：

1. 以爐石取代部份水泥拌合時，混拌必須均勻，否則容易造成混凝土局部品質不良，致使鋼筋發生腐蝕生鏽，降低 R.C. 結構物而久性。
2. 添加高爐石於普通混凝土中，添加量不要過高，建議採用 40~60% 左右較為適當。

第六章 參考文獻

1. 趙清，「中鋼爐石資源化之路」，爐石資源化研討暨展示會，民國77年12月，第5頁。
2. P. K. Mehta, "Concrete Admixtures Handbook Property, Science and Technology" Chapter 6, pp.325-328.
3. 林平全「飛灰混凝土」科技圖書 民國78年，第60頁。
4. Meusel, J. W., & J. H. Rose, "Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrow Point, and the Workability and the Stength Potential of Concrete Incorporating the Slag", ACI SP. 79-47, pp.867-890, 1980.
5. 陳振川、高健章、詹穎雯、湯豐銘，「不同環境溫、濕度對高爐水泥及卜特蘭水泥混凝土強度影響與變形之研究」，1987年10月。
6. Hogan, F. J. and J. W. Meusel, "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Cement, Concrete, and Aggregates", Vol.3, No.1, Summer, pp.40-52, 1981.
7. "Blast Furnace Slag and Blast Furnace Slag Cement in Japan", By Dr. S. Numata of Nippon Steel Corp. 1986.
8. 「高爐水泥在海洋混凝土構造物方面之應用」小林一輔博士（東京大學），1983。
9. Rasheeduzzafar et al., J. ACI, proc., Vol. 81, No.1 pp.13-20, 1984.
10. Bellport, B. P. in "Performance of Concrete", ed. E. G. Swenson, University of Toronto press, Toronto, 1968, pp. 77-92.
11. Harboe, Edward M. "Long Time Studies and Field Experiences with Sulfate Attack", ACI publication SP-77 pp.1-20, 1982.
12. Novokschenov, V., "Investigation of Concrete Deterioration Due to Sulfate Attack-A Case History", ACI Sp-100, pp. 1979-2006, 1987.
13. 陳清泉、陳振川等，「爐石為水泥熟料與填加料對混凝土特性影響之文獻及國外現況調查研究」，營建中心報告TR-76004, 1987.
14. Reading, T. J., "Physical Aspects of Sodium Sulfate Attack on Concrete", ACI Sp-77, pp.75-82, 1982.

15. Building Research Establishment Digest 250, Her Majesty's Stationery Office, London, 1981. Hereafter, BRE Digest 250.
16. Daube, J. & Bakker, R. "Portland Blast-Furnace Slag Cement: A Review", Blended Cement, ASTM STP 897, G. Frohnsdorff, Ed., American Society for Testing & Materials, Philadelphia, 1986, pp.5-14.
17. Frigione, G., "Manufacture and Characteristics of Portland Blast Furnace Slag Cements in Blended Cement", ASTM STP 897, G. Frohnsdorff, Ed., ASTM, Philadelphia, 1986, pp.15-28.
18. Mehta, P. Kumar, "Pozzolanic and Cementitious Byproducts as Mineral Admixtures for Concrete A critical Review", ACI publication, SP. 79-1, pp. 1-46, 1983.
19. Hooten, R. D., Enery, J. J., and Low, C. A., "Sulfate Resistance of Slag Cements", Proceedings, International Conference on Slags & Blended Cements, Mons, Belgium, September 1981.
20. Mehta, P. K., "Sulfate Resistance of Blended Portland Cements Contain Pozzolans and Granulated Blast Furnace Slag" *ibid.*, pp.35-50.
21. "Comparison of the Resistance to Sulfate Solutions & to Sea Water of Different Portland Cements with or without Secondary Constituents", By Robert Guyost, Roger Ranc. & Andre Varization, ACI publication SP 79-24, PP. 453-470.
22. Frearson, P. H. "Sulfate Resistance of Combinations of Portland Cement & Ground Granulated Blast Furnace Slag" ACI SP 91-74, pp.1495-1524, 1986.
23. Locher F. W., "Zur Frage Des Sulfat Widerstandes Von Hutten-zementen" ("The Problem of the Sulfate Resistance of Slag Cement"), Zement-Kalk-Gips, 9, 1966, pp. 395-401.
24. Cattanes, A. and Frigione, G., "Performance of Blast Furnace Slag Cement", Cement Concrete and Aggregate, CCAGDP Vol. 5, No. 1, pp.42-46, 1983.
25. Koch, A. and Steinegger, H., Zement-Kalk-Gips, Vol. 13 No.7, July 1960, pp. 317-324.
26. Mehta, P. K. and Gjorv, O. E., Journal of Testing and Evaluation, Vol. 2,

- No.6, Nov. 1974, pp.510-514.
- 27.Mehta, P. K. Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, Vol. 72, No.10, Oct. 1975, pp.573-575.
- 28.Loncher, F. W., Zement-Kalk-Gips, Vol. 66. No.9 Sept. 1977, pp.420-429.
- 29.Feldmam, R. F., "Significance of Porosity Measurements on Blended Cement Performance", ACI SP 79-22, 1983, pp.415-433.
- 30.Wong, G. S. and Poole, T. S., "The Effect of Pozzolans and Slags on the Sulfate Resistance of Hydraulic Cement Mortars", ACI SP-100, pp.2121-2134, 1987.
- 31.林維明、饒正，"澎湖跨海大橋腐蝕調查研究"專刊第41號，港灣技術研究所，台中，1987。
- 32.林維明等"鋼筋混凝土結構物腐蝕研究"專刊第43號，港灣技術研究所，台中，1987。
- 33.林維明"海洋混凝土結構物耐久性之檢討"海洋混凝土工程研討會資料彙刊，港灣技術研究所專刊第38號，民國76年81第1/1~1/5頁。
- 34.Taketo Uonoto and Kazusuke Kobayashi, "Strength and Durability of Slag Gypsum Cement Concrete", ACI publication, SP 79-54, pp.1013-1038, 1983.
- 35.J. G. Wiebenga, "Durability of Concrete Structure Along the North Sea Coast of the Netherlands", ACI publication SP 65-24, pp.437-452, 1980.
- 36.Hogan, F. J. and Meusel, J. W. "Cement, Concrete, and Aggregate", Vol. 3, No.1, Summer 1981, pp.40-52. "Evaluation for Durability and strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag".
- 37.V. K. Gouda, M. A. Shater, R. Sh. Mikhail, "Hardened Portland Blast Furnace Slag Cement Pastes II. The Corrosion, Behavior of Steel Reinforcement" Cement and Concrete Research. Vol.5, pp.1-13, 1975.
- 38.Bakker, R. F. M. in Proceedings, 1th International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, Montebello Canada 1983. ACI, Publication SP-79, p.589. "Permeability of Blended Cements".
- 39.Bakker, R. F. M.; "On the Cause of Increased Resistance of Concrete Made

- from Blastfurnace Cement to the Alkali-Silica Reactioun and to Sulfate Corrosion"; Thesis, Th-Aachen, Aachen. Federal Republic of German, 1980.
- 40.D. M. Roy, A. Kumar, and J. P. Rhodes; "Diffusion of Chloride and Cesium Ions in Portland Cement Pastes and Mortars Containing Blast Furnace Slag and Fly Ash", ACI publication SP91-70, pp. 1423, 1986.
 - 41.Page, C. L., Short, N. R., and El Tarras, A. "Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes"; Cem. Concr. Res., 11(3), 1981, 395-406.
 - 42.Colleparidi, M. Marieals. A., and Turriziani, R., "Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes"; J. Am. Cer. Soc. 55(10), 1972, 534-535.
 - 43.Ushiyama, H., and Goto, S., "Diffusion of Various Ions in Hardened Portland Cement Paste"; Proc. 6th Intl. Cong. Chem. Cement, Moscow, Vol. II -1, 1974, 331-337.
 - 44.Verbeck, G. J. "Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete"; p.113-124, Performance of Concrete, Canadian Building, Ed. E. G. Wsanson, University of Toronto Press(1968).
 - 45.Lawrence, C. D. "Durability of Concrete; Molecular Transport Processes and Test Methods"; Cement and Concrete Association, Technical Report 544.
 - 46.Goto, S., and Roy, D. M. "Diffusion of Ions Through Hardened Cement Pastes"; Cem. Concr. Res. 11(5), 1981, 751-757.
 - 47.Andersson, K., Torstenfelt, B., and Allard, B., "Diffusion of Cesium in Concrete"; Scientific Basic for Nuclear Waste Management, 3, 235-242, Ed. J. G. Moore, Plenum Press, NY (1981).
 - 48.Atkinson, A., and Nickerson, A. K., "The Diffusion of Ions Through Water Saturated Cements"; Materials Development Division, AERE Harwell, DOE Report No. DOE/RW//83.137(1983).
 - 49.Midgley, H. G., and Illston, J. M., "The Penetration of Chlorides into Hardened Cement Paste"; Cem. Concr. Res.14, 453-614 (1984).
 - 50.趙清 "高爐石水泥在海洋混凝土用混凝土中之地位及其利用" 海洋混凝土工程研討會資料彙刊, 港灣技術研究所專刊第38號, 民國76年10月, 第20/1~20/9頁。

- 51.大郎森：海洋環境下にれけるコンワリート中の鹽素に素關する考察，土木學會論文集，第332號，1983。
- 52.Attimay, E: Chloride Corrosion of Reinforced Concrete, Texas Univ. 1971. 3.
- 53.小林和夫・宮川豐章等：かぶりユワリートか鐵筋腐食に與える影響，セメント技術年報36卷，1982.12，pp.497-501。
- 54.JASS 5. 1986, P.413.