港灣技術研究所專刊第67號

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報告

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：林維明
研究員兼港工材料組組長
協同主持人：陳桂清
副研究員
研究人員：饒　正、黃永光、吳信昇
柯正龍、徐如娟、陳正義
何木火、林隆貞、顏素雯

執行期間：民國79年1月1日至民國83年12月31日
報告日期：民國80年3月31日

目　　錄

摘　　要…… Ⅱ

致　　謝…… Ⅲ

圖 目 錄…… Ⅳ

表 目 錄…… Ⅶ

第 一 章　緒　　論…… 1

第 二 章　文獻回顧…… 4

第 三 章　試驗規劃、設備與材料準備…… 51

第 四 章　實驗室試驗…… 62

第 五 章　結論與建議…… 103

摘　要

本研究係以不同之爐石水泥含量填加於混凝土中量測其抗壓强度、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、透水、彈性、腐蝕電位、氯離子滲透及硫酸塩侵入等各項試驗，並在本所海水循環水槽潮汐帶置放試體，定期取回進行上述各項試驗，以瞭解卜特蘭鋼筋混凝土添加高爐石水泥後，對其耐久性及抑制鋼筋腐蝕之效應。除長期曝露試驗還在繼續進行中外，其他已完成之試驗可得到如下之結論：

1. 在正常環境下，以爐石取代部份水泥，其晚期抗壓强度及彈性模數均較高，而以取代量爲60％爲最佳情況。
2. 在低水灰比情況下，透水係數較低，以填加40％及80％之爐石量爲最佳，而在高水灰比情況下，則以60％較具水密性。
3. 爐石取代量在40％以下對凝結時間影響性不大，爐石含量愈多則初凝與終凝時間就愈拉長。以80％而言，初凝約延長2小時，而終凝則延長約7～12小時，高水灰比之凝結時間將較低水灰比情況之凝結時間拉長。
4. 經過乾濕循環加速惡化之試驗結果發現就鋼筋腐蝕電位而言，以60％以下之爐石取代量防蝕效果爲最佳，即使在高水灰比情況下，80％爐石含量之鋼筋腐蝕電位亦較不含爐石者爲低。在低水灰比情況下，60％以下之爐石取代量之氯離子含量較不含爐石者爲低。而且發現填加爐石水泥之試體，其硫酸塩含量有顯著地降低，足見爐石水泥具有抑制鋼筋腐蝕及抗硫酸塩侵蝕之能力。
5. 經過12個乾濕反覆作用後，試體之抗壓强度與28天齡期情況下比較，顯見强度及彈性模數都有明顯地下降。柏松比變化不大。

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水泥，特藉此致十二萬分之謝意。

本計畫能獲得如此寶貴結果，實應歸功於本計劃之協同主持人陳桂清副研究員之負責不懈及窮理致知之精神以及本所港工材料組全體同仁共同發揮團隊精神，克服一切困難完成試驗工作並整理數據，得以完成本研究報告，亦併藉此致意，以表謝忱。

台灣省交通處港灣技術研究所

港工材料組組長　林　維　明

中華民國八十年三月三十一日

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……10

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 ……11

圖2-9　含不同比例爐石混凝土之壓力強度發展關係……12

圖2-10　水與膠結材料比對含爐石混凝土之強度影響……12

圖2-11　爐石含量與爐石水泥漿強度之關係……13

圖2-12　典型混凝土應力－應變圖……16

圖2-13　骨材含量對彈性模數的影響……16

圖2-14　影響彈性模數之參數……17

圖2-15　彈性模數與抗壓強度之關係……17

圖2-16　彈性模數與抗壓強度之關係(混凝土爲45級，正常養生)……19

圖2-17　彈性模數與抗壓強度之關係(混凝土爲25級，正常養生)……19

圖2-18　彈性模數與抗壓強度之關係(混凝土爲45級，絕熱養護)……20

圖2-19　彈性模數與抗壓強度之關係(混凝土爲25級，絕熱養護)……20

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)下之水泥砂漿試體之抗硫酸塩膨脹試驗……30

圖2-22　暴露於海水25年後之損壞情形……38

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……43
圖2-25 各水灰比下之Cl^-擴散係數……43
圖2-26 塩份侵透深度與材齡……44
圖3-1 混凝土各項材料準備之情形……57
圖3-2 混凝土進料拌合之情形……57
圖3-3 混凝土拌合後量測漿體溫度……57
圖3-4 量測混凝土之坍度……57
圖3-5 試體內埋入鋼筋之情形……58
圖3-6 試體內埋入鋼筋灌製之情形……58
圖3-7 試體編號情形……58
圖3-8 試體置於養生室養生之情形……58
圖3-9 加速試驗用之小試體……59
圖3-10 試體之蓋平(做抗壓强度用)……59
圖3-11 貼應變計於抗壓試體上……59
圖3-12 試體做抗壓强度試驗情形……59
圖3-13 試體擺置於海水循環水槽內之情形……60
圖3-14 海水循環水槽之全景……60
圖3-15 加速(乾濕循環)試驗儀器……60
圖3-16 貫入試驗之情形……60
圖3-17 試體做透水試驗時用石臘及松香灌入試體模內之情形……61
圖3-18 透水試驗設備……61
圖4-1 水灰比0.5爐石含量0%及40%四種不同齡期混凝土其量筒深度與時間關係……67
圖4-2 水灰比0.5爐石含量60%及80%四種不同齡期混凝土其量筒深度與時間關係……68
圖4-3 水灰比0.7爐石含量0%及40%四種不同齡期混凝土其量筒深度與時間關係……69

圖4-4 水灰比0.7爐石含量60%及80%四種不同齡期混凝土其量筒深度與時間關係……70
圖4-5 水灰比0.5，添加不等爐石含量其滲透係數變化情形 ……71
圖4-6 水灰比0.7，添加不等爐石含量其滲透係數變化情形 ……71
圖4-7 混凝土應力應變圖……75
圖4-8 水灰比0.5含不同爐石比例之混凝土抗壓强度與齡期之關係 …79
圖4-9 水灰比0.7含不同爐石比例之混凝土抗壓强度與齡期之關係 …79
圖4-10 水灰比0.5含不同爐石比例之混凝土抗壓强度發展比較 ……80
圖4-11 水灰比0.7含不同爐石比例之混凝土抗壓强度發展比較 ……80
圖4-12 水灰比0.5含不同爐石比例之混凝土彈性係數與齡期之關係 …81
圖4-13 水灰比0.7含不同爐石比例之混凝土彈性係數與齡期之關係 …81
圖4-14 水灰比0.7含不同爐石比例之凝結時間曲線圖 ……86
圖4-15 水灰比0.5含不同爐石比例之凝結時間曲線圖 ……86
圖4-16 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(第一組試體)……91
圖4-17 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(第二組試體)……91
圖4-18 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(第三組試體)……91
圖4-19 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(第一組試體)……92
圖4-20 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(第二組試體)……92
圖4-21 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(第三組試體)……92
圖4-22 水灰比0.5試體經劈裂後檢視鋼筋腐蝕狀況之照片 ……94
圖4-23 水灰比0.7試體經劈裂後檢視鋼筋腐蝕狀況之照片 ……95
圖4-24 水灰比0.5試體Cl^-含量與深度關係…… 99

圖4-25　水灰比0.7試體Cl^-含量與深度關係…… 99
圖4-26　水灰比0.5試體$SO_3^=$含量與深度關係…… 100
圖4-27　水灰比0.5試體$SO_3^=$含量與深度關係…… 100

表　目　錄

表2-1　常用骨材岩石之抗壓強度…… 7

表2-2　水泥及水泥砂漿透水率比較……23

表2-3　水泥之物理性質……25

表2-4　依ASTM C452 方法之硫酸塩膨脹試驗……31

表2-5　依Koch 與 Steinegger方法之硫酸塩膨脹試驗(強度比)……31

表2-6　依Mehta 方法之硫酸試驗(強度比)……32

表2-7　水泥砂漿試驗在硫酸塩溶液與依據ASTM C452 規範試驗之膨脹量……32

表2-8　北海爐石混凝土損害調查……36

表2-9　相對於銅/硫酸銅半電池之電位值…… 36

表2-10　在不同之材質下鋼筋之腐蝕速率……37

表2-11　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……37

表2-12　棧橋混凝土橋面板之氯離子含量與保護層厚度之關係……42

表3-1　高爐石粉及水泥熟料之化學組成與物理性質……55

表3-2　粗骨材篩分析結果……55

表3-3　細骨材分析結果……56

表3-4　骨材物理性質分析結果……56

表4-1　爐石混凝土之透水試驗結果(W/C＝0.5)……65

表4-2　爐石混凝土之透水試驗結果(W/C＝0.7)……66

表4-3　100T萬能試驗機之試驗荷重速率表(ASTM)……74

表4-4　爐石混凝土抗壓強度試驗結果……77

表4-5　爐石混凝土彈性係數與柏松比……78

表4-6　爐石水泥凝結時間及貫入壓力表結果……84

表4-7　爐石水泥初凝、終凝時間試驗結果……85

表4-8　爐石水泥初凝、終凝相對時間試驗結果……85

表4-9　水灰比0.5含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值(-mV)……89
表4-10　水灰比0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值(-mV)……90
表4-11　水灰比0.5試體內化學成份含量與深度關係 ……97
表4-12　水灰比0.7試體內化學成份含量與深度關係 ……98
表4-13　爐石混凝土抗壓强度、彈性係數與柏松比…… 102

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爲非常均勻性，適合各種强度及顏色之要求，因此爲經濟、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，甚至可認定爲半永久性，像高雄港及花蓮港有許多碼頭，爲日據時代建造，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）及人爲因素作用等影響，例如在海洋環境下，由於常年受海水乾濕反覆作用，海風之凌虐海洋腐蝕因子氯化物、硫化物、氧氣、濕氣容易侵入結構體，因此逐年產生化學上之變質和物理性之變形等惡化現象繼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。

混凝土材料爲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，爲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爲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爲何？

1—3 研究範圍

本研究範圍包括下列各項

1. 基本性質之試驗包括抗壓強度、透水係數、彈性係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、透水、彈性、腐蝕電位、氯離子滲透、硫酸塩侵入、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，潮汐帶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

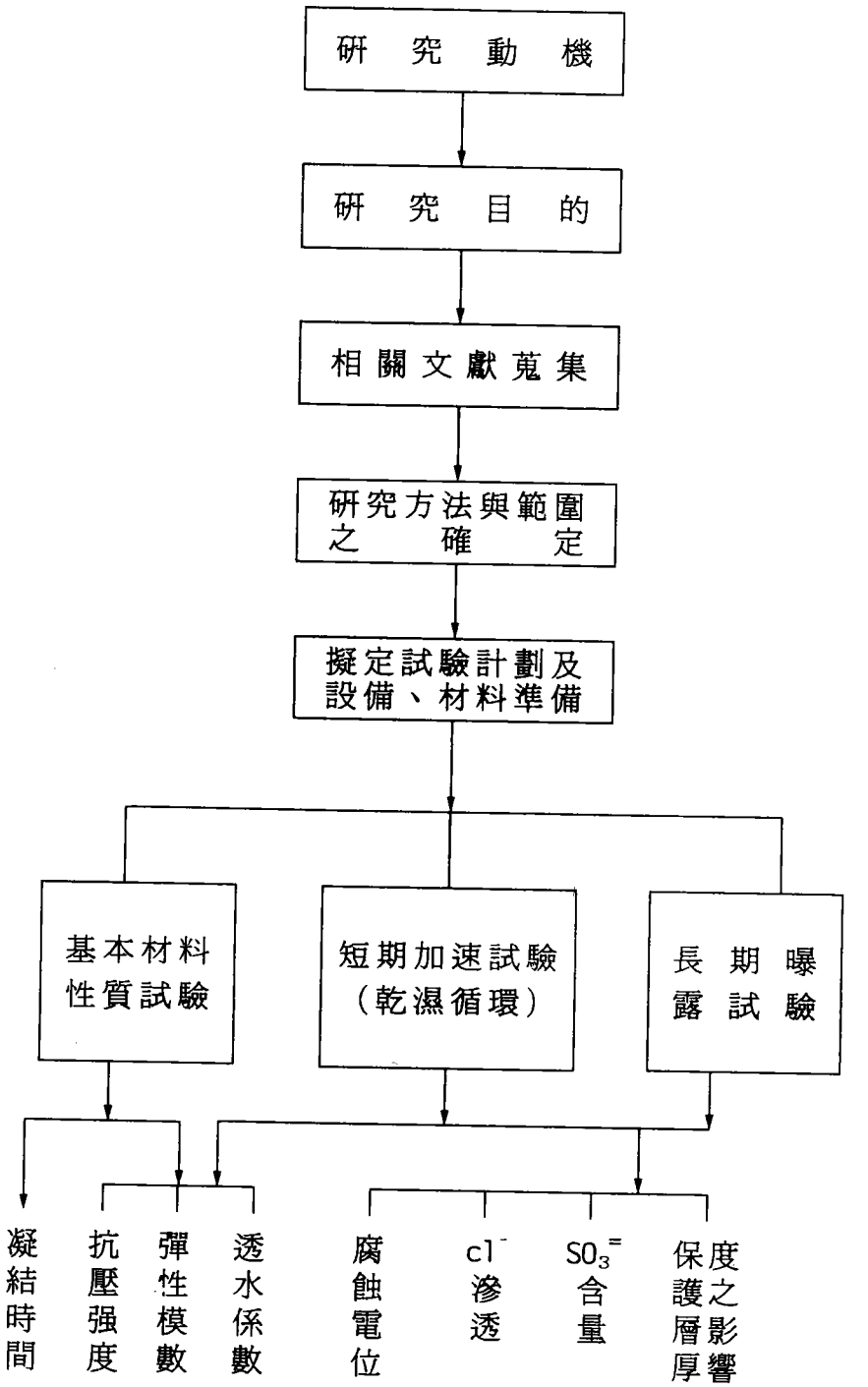


圖1.1 研究流程與試驗方法

第二章　文獻回顧

爐石爲鋼廠所產生之副產品，國內早期均將之視爲廢棄物未能妥善利用，且需耗資運送丟棄，部份並造成環境汚染問題。近些年來中鋼公司[1]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。本試驗爲探討水淬爐石加入混凝土中對抗壓强度、透水性、彈性模數及凝結時間之影響，同時進行天然海水乾濕短期循環試驗及長期曝露於海水循環水槽試驗腐蝕電位，氯離子滲透，硫酸塩侵入保護層厚度之影響以及抗壓、彈性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：

㈠混凝土强度

混凝土抵抗壓力之强度稱爲抗壓强度，抵抗拉力之强度抗拉强度，抵抗彎力之强度爲抗彎强度，抗剪强度則爲抵抗剪力之强度。抵抗鋼筋間之滑動力謂之握裹强度。所謂混凝土强度一般係指抗壓强度而言，因爲抗壓强度遠優於其他强度，且抗壓强度增高，則其他强度亦隨之增高。故由混凝土的抗壓强度可以估算其他强度而判斷其品質之優劣。

如上述混凝土材料之强度係以阻抗外力使其不致發生破壞之能力。影響混凝土强度之因素頗爲複雜，Metha[2] 將之分爲三類即與試體參數、外載參數及組成材料强度有關（圖2-1)概述如下：

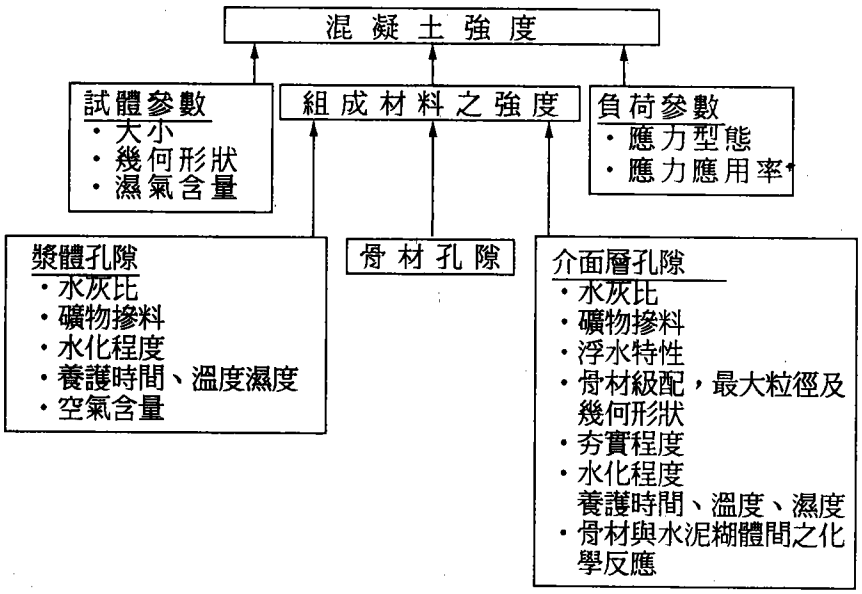


圖2－1 影響混凝土強度因素

1.混凝土組成材料強度

混凝土組成材料強度間接決定其力學行爲，組成材料之強度則維繫於其孔隙比之大小,因此混凝土之強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強度。當混凝土含有低孔隙或高強度之骨材時，材料強度即由漿體或臨界面層強度決定。通常在材齡較低之混凝土臨界面層強度較漿體爲低，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，其強度較低。在較高之溫度、濕度的養護狀況下，混凝土之強度則較高，使用輸氣摻料通常會降低混凝土強度；填加矽灰或爐石、飛灰等摻料則初期強度會降低，然而後期強度會增大。對於組成材料對混凝土強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：

㈠水灰比

㈡水泥細度

㈢水泥種類

①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，坍度通常爲10cm→5cm工作性較差，不易施工。

②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。

③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相同。

B 骨材(aggregate)

如表2－1所示　，爲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，影響最大的參數爲級配的優劣。優良級配是大骨材間之孔隙爲較小骨材所填充，而較小骨材間亦爲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 bording stress)

通常混凝土爲顧及工作性，將使用過多的水量。同時爲保持相同水灰比，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/cm²)		
		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

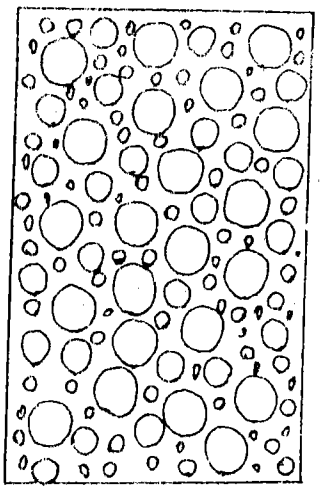


圖2－2 優良級配示意圖

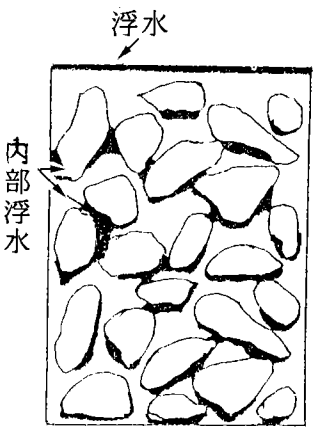


圖2－3 浮水產生狀況

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强度之方法通常採用以下幾方種方法：

㈠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。

㈡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。

㈢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，更可提高强度，如圖2－4所示。

但爲了增加鍵結强度而採用此法，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木粒徑之關係

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、蜂窩及養護方法是否正確，才不會有龜裂出現，這些都直接影響混凝土强度很大。

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，强度將降低。如圖2－5所示，小試體之强度較大而直徑超過18"者則其强度減少量將相當小，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)不同對抗壓强度之關係如圖2－6所示，通常其比值較大，則所得之强度將較低。如使用L/D＝1與L/D＝2比較，前者之强度約增加15%，歐洲普遍使用6"立方試體，則其强度較美國之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强度約高20－25%，後者之强度較低之原因可能是在水泥漿內有分離壓力(disjoining pressure)所致。

3. 外載參數(loading parameter)

混凝土之抗壓强度一般在試驗依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强度與實際負荷之間的關係，在各種應力狀況下之混凝土行爲，這些都是影響混凝土强度的重要因素。

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，爐石混凝土之早期强度較低，但其長期强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，其强度在何時可達控制試體（普通卜特蘭混凝土）之强度，各文獻不盡相同，一般而言30%－50%取代量之爐石混凝土，其强度在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JISR 5211及R 5210對高爐水泥混凝土的抗壓强度所定的規格如下表

日本所定高爐水泥混凝土抗壓强度規範

抗壓强度 (kgf/cm²)	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，發現其抗壓强度隨延時之增長而遞增如圖2－11所示[8]。

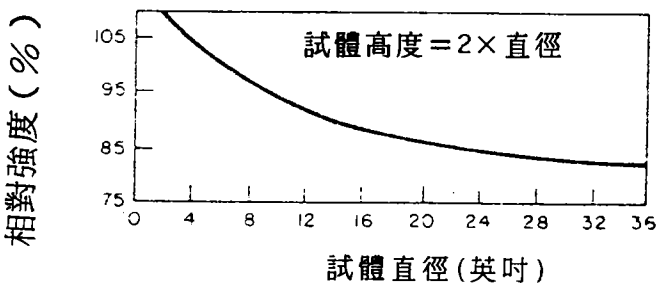


圖2－5　試體直徑對混凝土强度之影響性

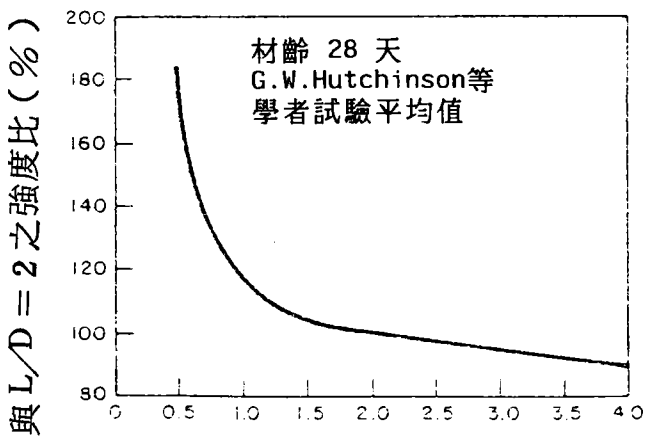


圖2－6　試體高度直徑比與混凝土强度之影響性

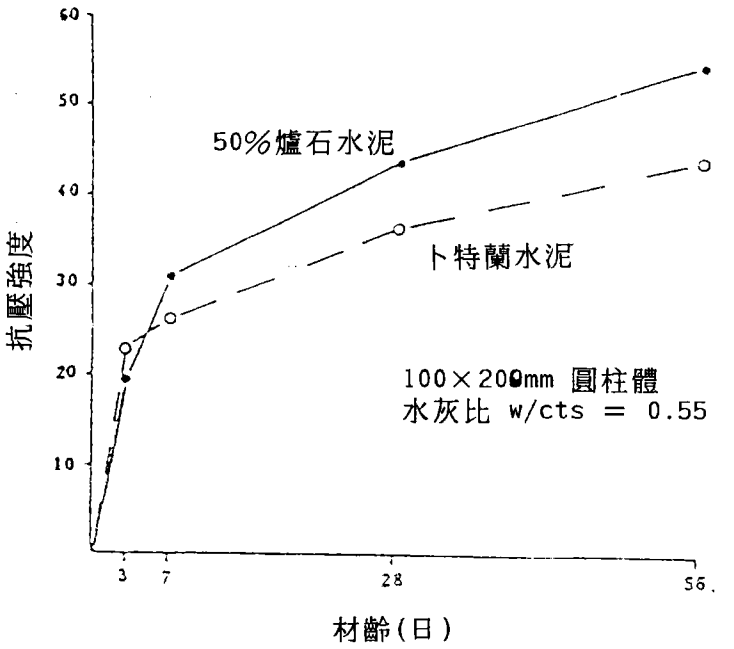


圖2－7　典型含50%爐石混凝土相對於普通卜特蘭水泥混凝土之壓力強度發展關係(6)

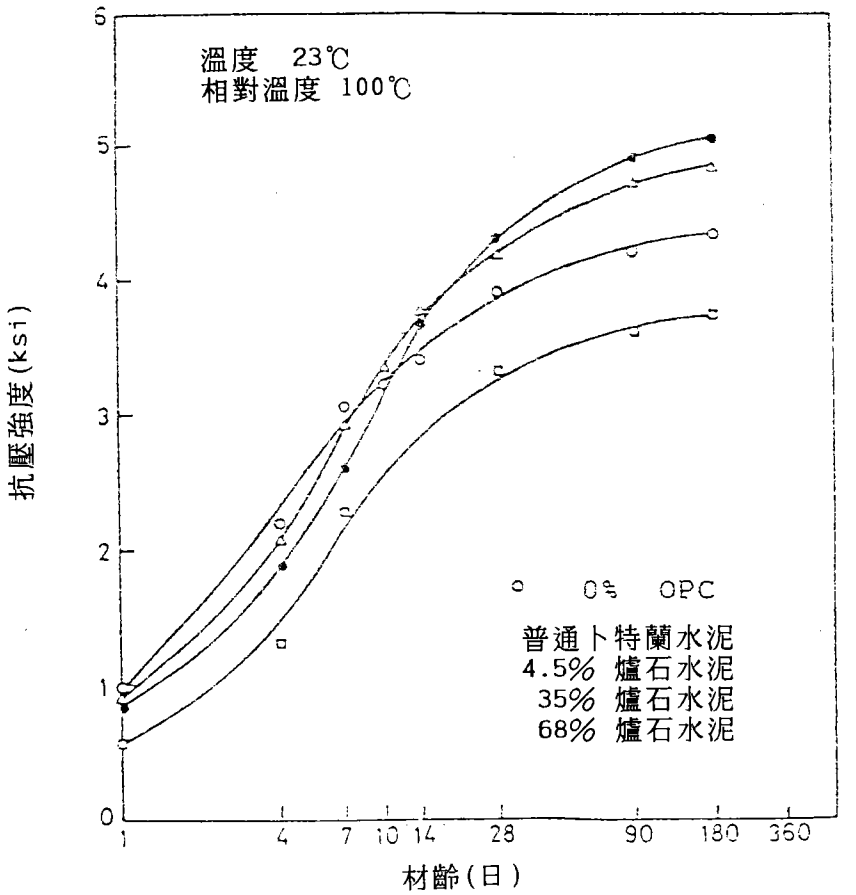


圖2－8　養護狀況23℃，RH100%下，各種混凝土強度發展情形(7)

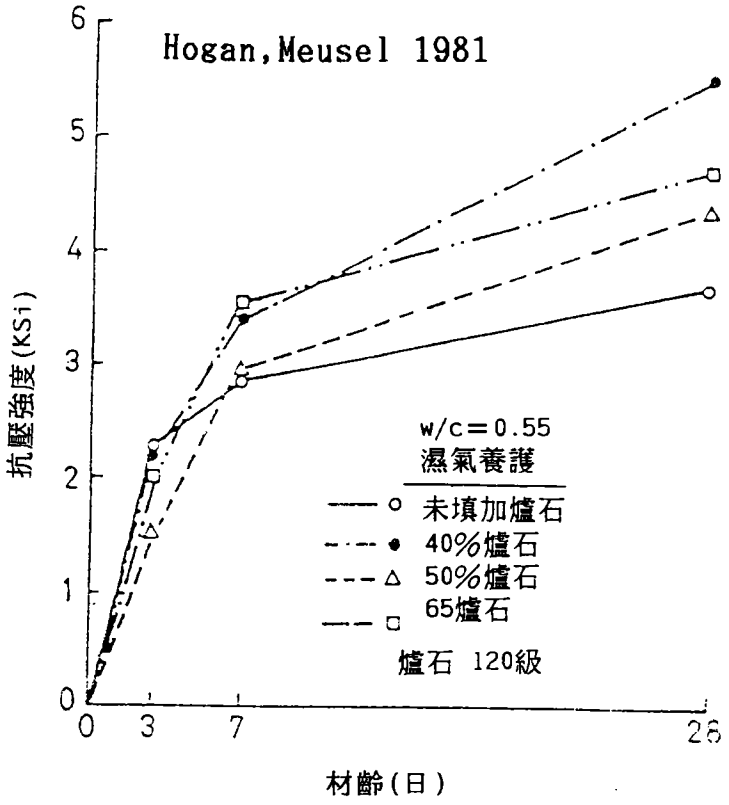


圖2－9　含不同比例爐石混凝土之壓力強度發展關係(7)

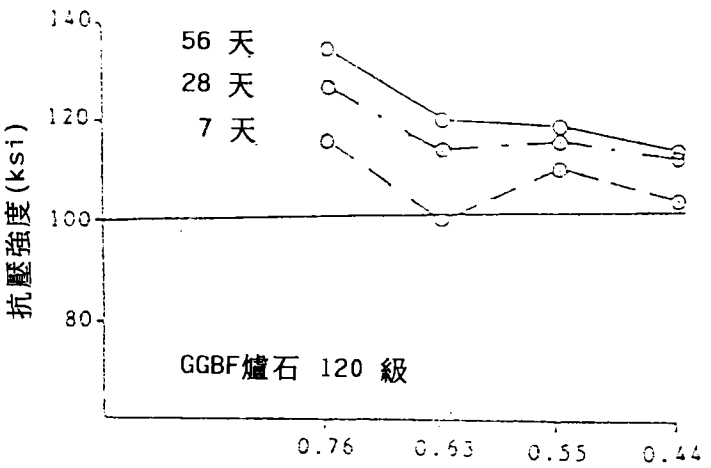


圖2－10　水與膠結材料比對含爐石混凝土之強度影響(6)

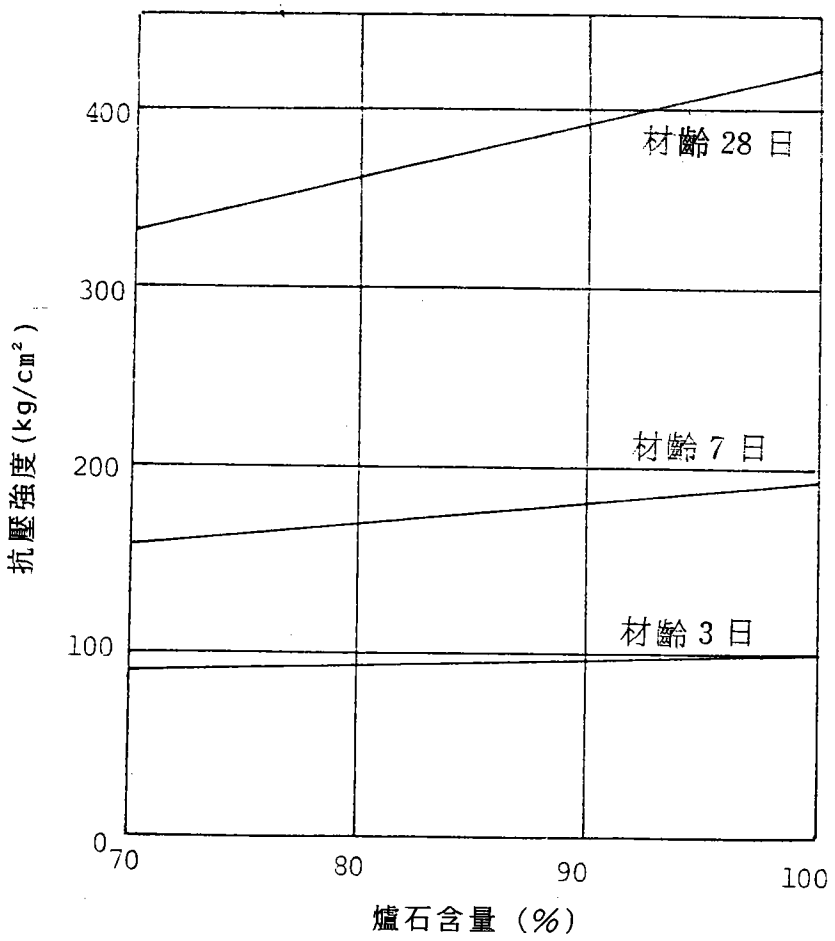


圖2－11　爐石含量與爐石水泥漿强度之關係

㈡彈性模數 (Modulus of Elasticity)

彈性模數爲材料勁度之指標，爲應力與瞬間應變之比值，混凝土爲一種黏彈性（Viscoelastic）材料，在應力作用下之變形並非眞正的彈性變形，而實際上爲瞬間變形（Instantaneous deformation)。理論上，彈性模數可由微觀原子結構作用應力一位移曲線之斜率求出，即 $dF/dl \propto E$，原子鍵結力愈大則彈性模數值愈大，彈性模數是材料的主要性質之一。一般彈性模數可以應力一應變圖，(圖2－12)量出或採用動彈性量測之，或照下列經驗公式推算，或複合材料原理估算（如圖2－13所示）。

1. ACI建築法規：

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

式中Ec：正割模數(secant Modulus)，

ρ：混凝土單位重，和

σ_c'：6"ϕ×12"試體抗壓强度。

2. 英國施工法規（British Code of Practice）：

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

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

3. CEB歐洲混凝土委員會：

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

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

由上列公式可見彈性模數與强度及密度有密切關係，因此影響强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强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爲，因爲密度與孔隙率成相對之關係。顯然地，影響骨材間孔隙、水泥糊體和轉換區之因素都是相當地重要。對混凝土而言，强度與彈性模數之直接關係係受混凝土組成材料間之孔隙之影響。圖2-14爲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，似乎以孔隙率最爲重要，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。緊密之骨材之彈性模數較高。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。因爲在低或中强度混凝土，混凝土之强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强度及彈數模數。

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爲(10～20)×10^6 psi 而砂岩，石灰岩或卵石等多孔性者之變化性爲 (3－7)×10^6 psi。輕質骨材具高孔隙率者，其彈性模數範圍約爲(1－4)×10^6 psi。一般約爲(2－3)×10^6 psi爲同樣强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到應力－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爲(1－4)×10^6 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之水泥漿體更爲普遍，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。

據報導混凝土之强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所示不同强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强度爲高。由於水泥糊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强度有利。

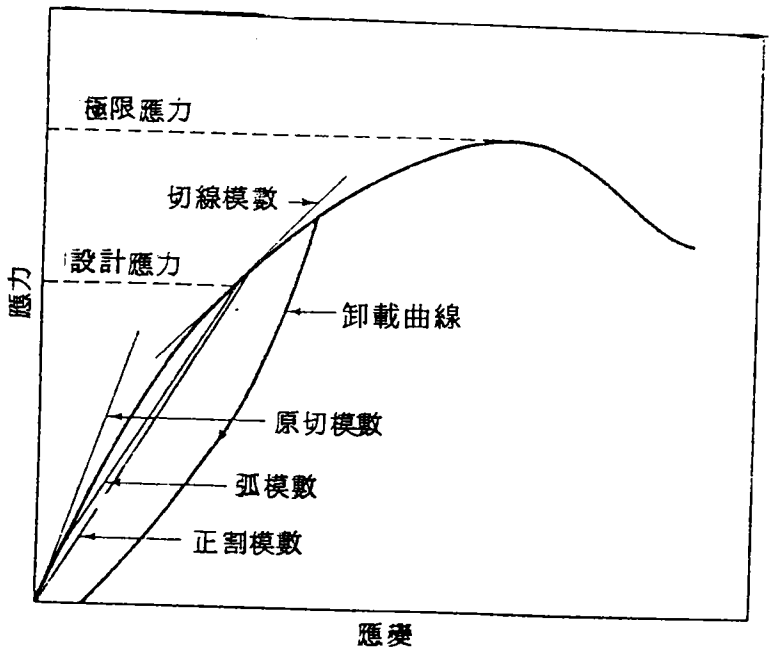


圖2－12　典型混凝土應力－應變圖

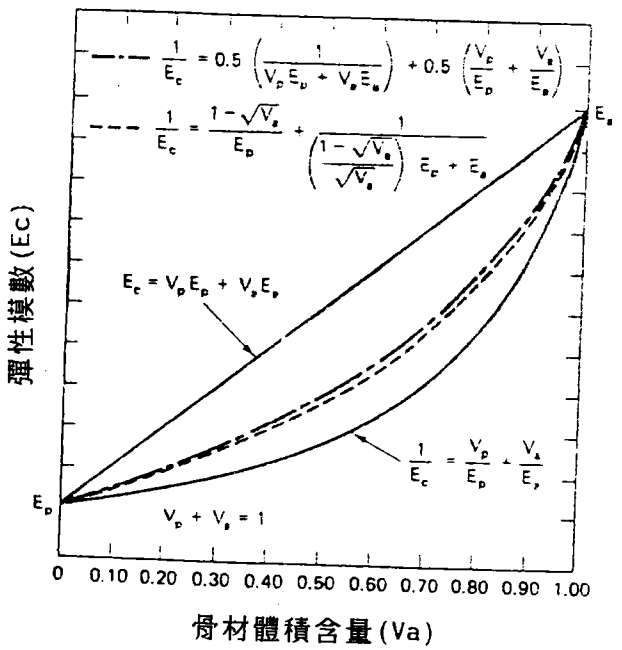


圖2－13　骨材含量對彈性模數的影響

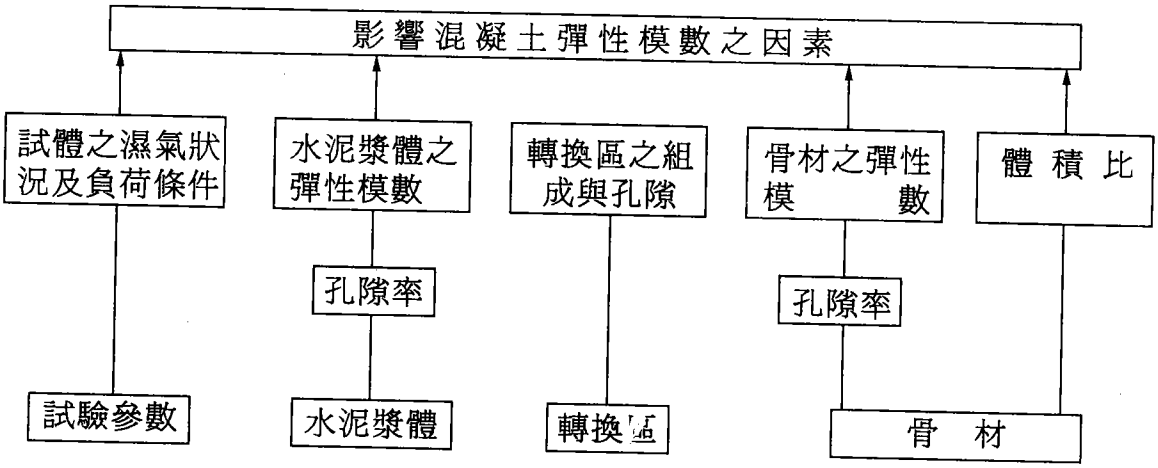


圖2－14　影響彈性模數之參數

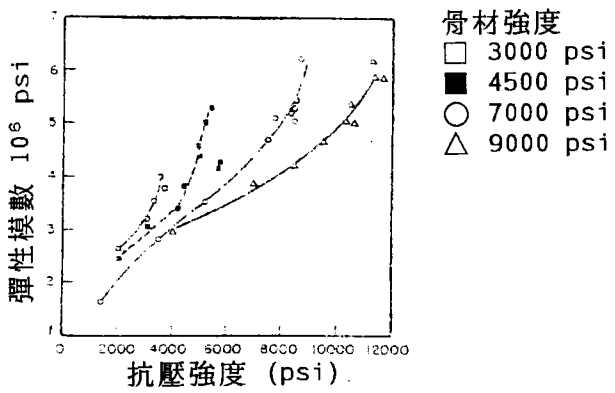


圖2－15　彈性模數與抗壓強度之關係

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爲甚。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爲之影響所致。對於上述現象之另一解釋爲，在一飽和之水泥漿，在C－S－H 中之吸附水爲負載，因此其對彈性模數有所貢獻，而在另一方面在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，在一定應力下造成龜裂之發展速率，故彈性模數依作用力速率而定，在瞬間負荷下，在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%，因此彈性模數亦同樣的降低。對非常緩慢之負荷速率將再加上彈性及潛變，因此將再使彈性模數降低。

圖2－16至圖2－19爲彈性模數與抗壓強度之關係，前兩圖爲兩種不同等級之混凝土在正常溫度20° 下養生，發現高爐水泥混凝土與普通卜持蘭水泥混凝土之行爲比較略有差異。而後兩圖爲在斷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爲增加可視爲由於高爐石水化與普通混凝土之性質改變所致。

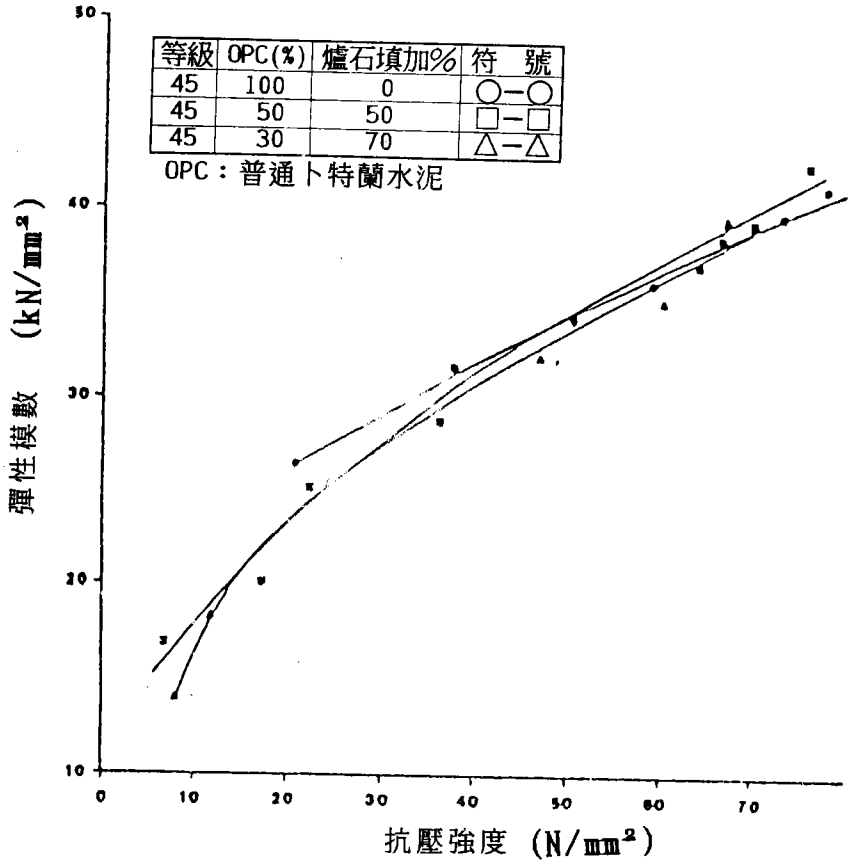


圖2－16 彈性模數與抗壓強度之關係
(混凝土為45級，正常養生)

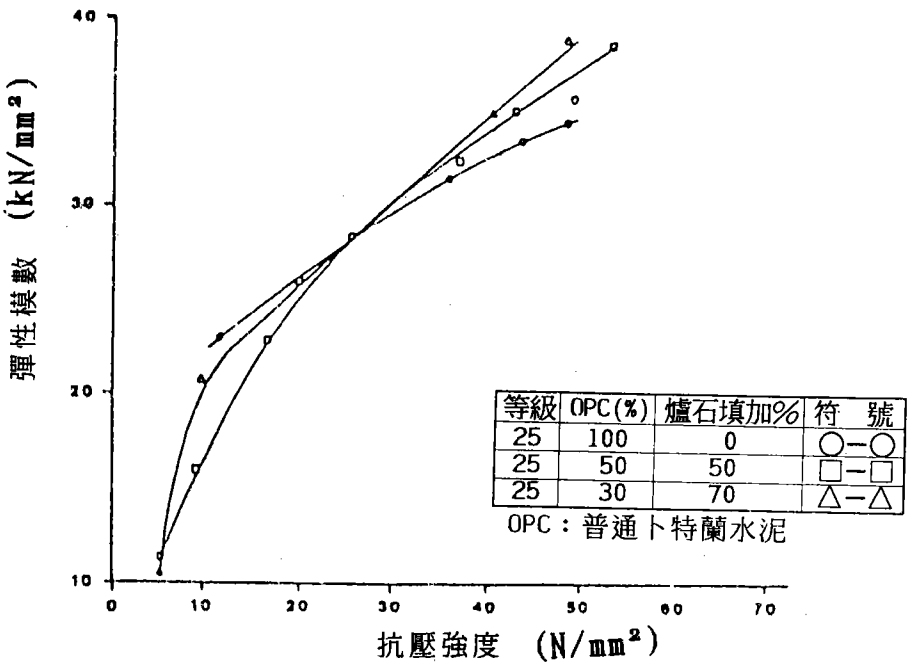


圖2－17 彈性模數與抗壓強度之關係
(混凝土為25級，正常養生)

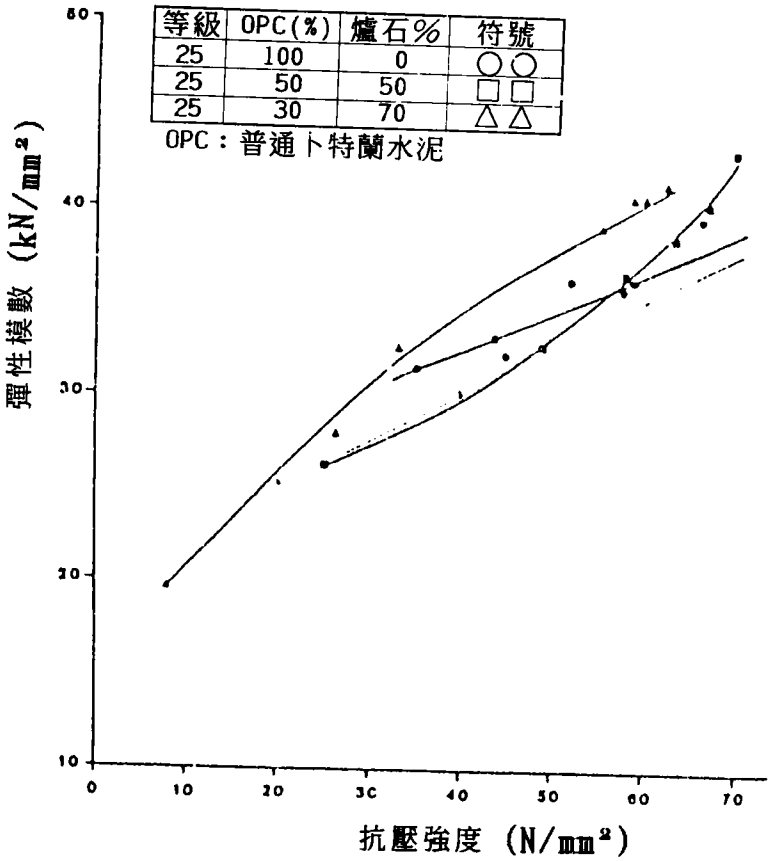


圖2－18　彈性模數與抗壓強度之關係
(混凝土為45級，絕熱養護)

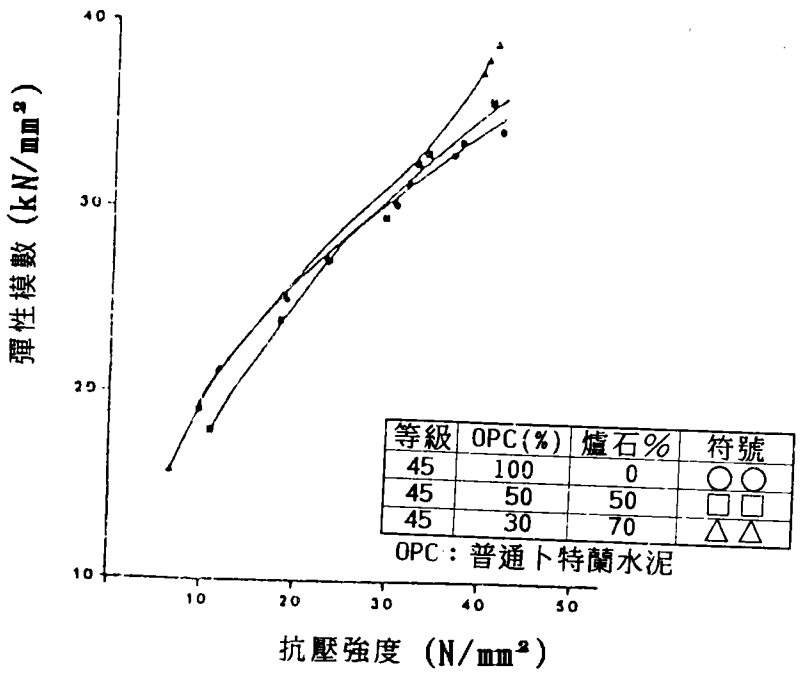


圖2－19　彈性模數與抗壓強度之關係
(混凝土為25級，絕熱養護)

㈢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，可視爲多孔結構。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，升至混凝土表面者爲浮水（bleeding）。這些毛細管孔（capillary pores 大於 100 A°）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100A°）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70%時，經適當養護，水泥漿體水化充分，則毛細管孔會受適當的阻隔。當水灰比太大時（大於70%）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，整個結構更爲緻密而不易透水，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、强度、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：

⑴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、强塑劑等都可降低水灰比及增加工作度因而增加水密性。

⑵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，例如水灰比爲0.8的透水性約爲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爲理想。

⑶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

⑴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。

⑵選用優良品質高爐水泥，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。

⑶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。

⑷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2－2爲日本對各種不同高爐水泥之透水率測定結果，測定法係依據日本JISA1404之規範進行，由表中可見高爐水泥之透水率較之普通卜特蘭

表2-2　水泥及水泥砂漿透水率比較 (50)

(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

砂漿拌合比爲水泥：砂：水＝1：3：.08

水泥要低很多。

㈣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，使其凝結速率減慢，而延長其凝結時間如表2－3所示爲中鋼公司研究計劃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。强度達500 psi 時爲初凝；達4000 psi時爲終凝。普通和40%及60%高爐水泥混凝土的28天的抗壓强度分別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爲的影響。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2-3　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

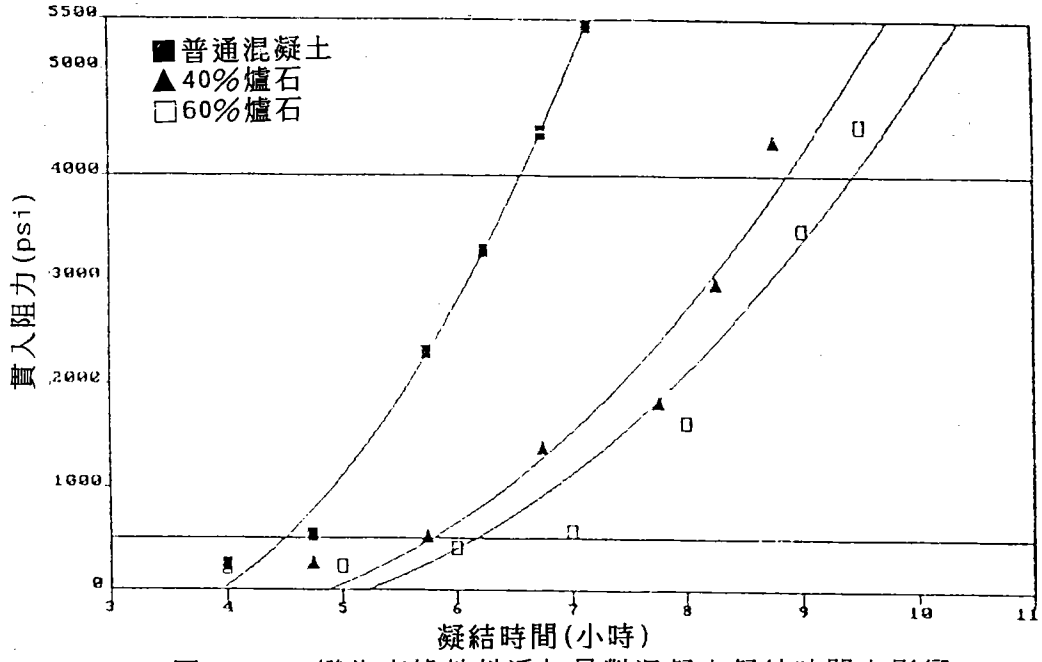


圖2－20　變化高爐熟料添加量對混凝土凝結時間之影響

(W/C＋S＝0.58)

㈤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，即鋼筋腐蝕與硫酸塩的侵襲。文獻中曾針對該區常被含塩水份與含硫酸塩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爲受到硫酸鎂的强烈侵襲及含硫酸塩的地下水分解硫酸鈣所導致的侵襲現象。

有關硫酸塩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.Bereau 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塩侵襲而毀壞的結構，在南達可達州一座橋因受硫酸塩侵襲而造成橋墩發生腐蝕剝落現象，該地水中所含硫酸塩濃度高達9900ppm 亦有很多其他的報告亦說明硫酸塩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，Al_2O_3)，水化後會生成較多的自由氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)此生成物易與硫酸塩反應而生成$CaSO_4$，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：

$$Na_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH$$

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2$$

上述生成的硫酸鈣，又會與水泥中的C_3A反應生成$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ 的鈣矾石 (Ettringite) 體積約膨脹2倍以上，導致混凝土發生龜裂現象。

Ettringite (鈣矾石) 爲一般被公認爲因硫酸塩導致混凝土膨脹的主因。但鈣矾石形成造成膨脹之機理 (mechanisms) 至今仍受爭論。鈣矾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

收水份而造成膨脹爲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。Reading[14]指出鈣矾石之膨脹較石膏爲嚴重。膨脹和裂縫現象使結構體之勁度及强度降低，將導致混凝土的毀壞。

在硫酸鈉侵襲下，反應的副產品若爲氫氧化鈉，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爲嚴重。

由上述可知，硫酸塩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[15]有下列五項：

㈠硫酸塩類的性質種類及數量。

㈡水位線（level of water table）的位置及其季節性之變化。

㈢地下水位及土壤之多孔性。

㈣構造物之形式。

㈤混凝土的品質。

其中第㈤項，尤其使用透水性低的混凝土爲最佳保護硫酸塩的侵襲之措施。

約在60年前就了解使用含C_3 A量低的水泥具有良好的抗硫酸塩性能，而到1940年左右，ASTM發展卜特蘭五型抗硫酸塩水泥之規範（C_3 A含量低於5％），同時亦開始了解使用波索蘭（Pozzolans）材料對抗硫酸塩性能方面具有優越的成果。

卜特蘭五型抗硫酸塩水泥嚴格地限制C_3 A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)，以下爲一些對使用爐石具有正面優點的相關文獻報告：

㈠在Daube及Bakker[16]之研究指出爐石取代量超過65％的水泥，具有良好抵抗硫酸塩及海水的侵襲之功能，因爲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

可以獲知。

而此透水率之降低，因BFSC爲一兩成份的系統（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含量爲65～80％(荷蘭)及70～85％(比利時)。

㈡在Frigione[17]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，則其抗硫酸塩侵襲效果相當好，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。

㈢SP 79-1「Pozzolanic & Cementitious By-Products as Mineral Admixtures for Concrete—A Critical Review」by P. Kumar Mehta[18]曾指出爐石中氧化鋁之含量與其抗硫酸塩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％)，而美國爐石含量爲 8～10％，中鋼公司爐石含量亦頗高約爲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[19]亦證實 在加拿大 使用50％爐石取代Type Ⅰ水泥(12％C_3A)其抗硫酸塩性質與Type Ⅴ抗硫酸塩卜特蘭水泥相當。

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，會增加其抗硫酸塩的能力。

Mehta亦曾在文獻20中提及因波索蘭反應將導致孔隙的微細性（refinement）因而可降低透水性的重要性，故適當的養護是相當重要的。

㈣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塩環境($MgSO_4$ ，$CaSO_4$ ，Na_2SO_4)及海水中的行爲比較，發現高爐石含量之水泥具有良好的表現[21]。

㈤在Frearson 的研究調查中[22]，採用德國「Flat Prism」之試驗法[23]，使用高爐水泥或是水泥中填加爐石粉與OPC 或 SRPC （抗硫酸塩水

泥Sulfate Resisting Portland Cement)比較其抗硫酸塩類之能力，爐石含量介於30%至80%之間。

實驗結果大致爲爐石含量增加則抗硫酸塩之能力亦增加，70%爐石含量之水泥漿較SRPC者爲佳，並發現爐石含量較水灰比之影響爲大，圖2－21爲水灰比0.6時，各種試體抗硫酸塩侵襲之比較，可看出70%爐石含量表現最好。

㈥Cattaneo及Frigione[24]之研究實驗結果，依照ASTM C452試驗方法，其結果如表2－4 所示。依照 Koch 及 Steinegger[25]試驗方法，其結果如表2－5所示。依照Mehta[26,27]試驗方法其結果如表2－6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，如與波特蘭水泥比較(表2－7)，則本配比的水泥砂漿試體之抗硫能力很明顯較爲優越。

綜合實驗結果，爐石含量佔70%，其熟料中C_3 A含量不超過８%，其抗硫酸塩侵蝕之能力與波特蘭五型水泥相當，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]，其配方爲卜特蘭水泥熟料(23%～28%)gbfs(70～75%)及石膏或無水石膏(gypsum or unhydrite)(1%～3%)。

㈦在Hooten等[19]的研究調查結果顯示50%的一型波特蘭水泥(C_3 A含量爲12%)，由爐石取代其抗硫酸塩的能力與波特蘭五型抗硫水泥相當。

㈧Wong與Poole[30]研究硫酸塩對水泥砂漿試體影響之研究指出，依據砂漿試體膨脹速率爲比較基準，大多數填加波索蘭材料之試體增加抗硫酸塩能力，僅有少數試體抗硫酸塩效應略少於 Type Ⅱ水泥製成之試體。

㈨在Feldman[29]之研究調查中顯示使用爐石較使用OPC 或飛灰(FA)對抗硫酸塩侵蝕耐久性爲最佳，可能$Ca(OH)_2$ 含量較低所致。

㈩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，對抗硫酸塩侵襲具有很好的效果，並可用於取代低C_3 A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塩之優越性，適用於海岸結構，汚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塩試驗與透水性研究，並不足以模擬實際結構在外力與硫酸塩交互作用下之行爲，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，水泥含C_3A量與爐石替代水泥量在探討混凝土抗硫酸塩能力之相互關係應特加注意。

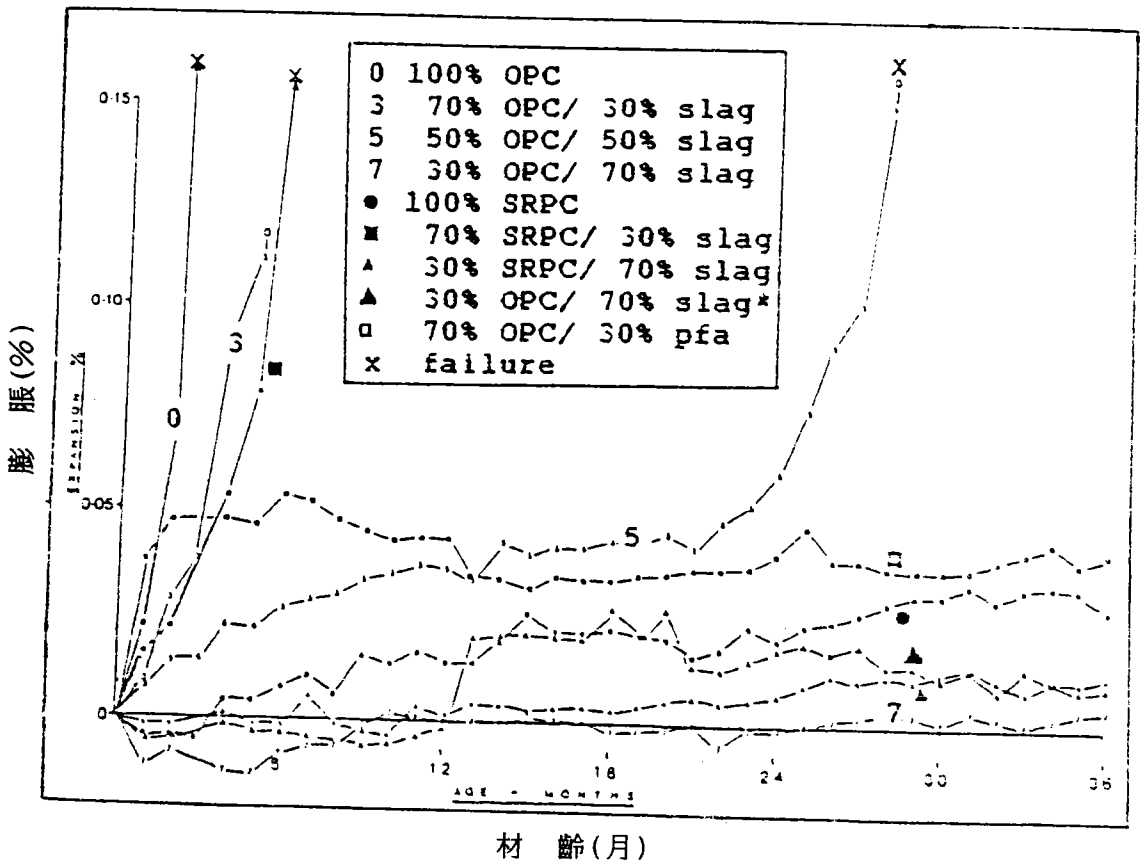


圖2-21 不同水泥組合在固定水灰比(W/C＝0.6)下之水泥砂漿試體之抗硫酸塩膨脹試驗[16]。

(SO_4 含量爲30,000ppm)

表2－4　依ASTM C452方法之硫酸鹽膨脹試驗

水泥型態	酸鹽膨脹試驗 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C_3 A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2-5 依 Koch 與 Steinegger 方法之硫酸鹽試驗 (强度比)[25]

水泥型態	在硫酸鹽中之强度／在水中之强度
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2-6 依 Mehta 方法之硫酸鹽試驗
(强度比)[26,27]

水泥型態	浸於硫酸鹽後之强度／浸於硫酸鹽前之强度
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2-7 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[27]

	5年後膨脹量(%)			依據ASTM C452膨脹量(%)	
水泥種類	Na_2SO_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

㈥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爲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[31]及各港灣之碼頭工程[32]。

混凝土中之鋼筋發生腐蝕爲一種電化學反應，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爲鐵離子再與氫氧根離子生成氫氧化鐵之鐵銹生成物之體積最大可增大爲原金屬鐵的六倍。此體積的膨脹爲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，而一般氯離子的來源爲，水泥填加料(admixtures)，含塩分骨材、解冰塩類溶液的滲透(Penetration of deicing salt solutions)以及海水等。所以氯離子的存在常爲混凝土中鋼筋腐蝕的主因之一[33]。

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)建造爲不透水性。

②在混凝土表面上塗裝保護膜(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。

而使用爐石爲水泥熟料或填加料，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Kobayashi[34]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)Wiebenga[35]研究調查荷蘭沿北海(North Sea)64個使用爐石的混凝土結構物，其齡期分別爲3年到63年不等。表2－8爲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關係。即齡期越長(越過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，對鋼筋之腐蝕行爲尙稱良好。

(3)Hongan及Meusel[36]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2－9。

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Gouda[37]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。其使用線性極化量測方式(linear polarization measurements)所得結果詳表2-10。

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塩類侵襲的抵抗能力較高。

依照Bakker[38]之試驗結果，詳如表2－11，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，即爲高爐水泥與OPC對於抗鹼骨材反應、抗硫酸塩性以及抗氯離子滲透性(Chloride Penetration)等之不同的原因[39]，其在養護或水化反應溫度較高的情況之下亦然。

(6)Roy, Kumar及Rhodes[40] 的研究，在模擬的海水溶液之下，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爲低，因爲其有較低的孔隙(lower poro - sities)及較細的孔隙結構(finer pore structure)。塩類的離子的移動及擴散，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[41]，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[42-49]。

(7)高爐水泥在海水環境中與硫酸塩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，與硫酸塩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爲。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，由圖可見含爐石量爲水泥重之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

表2－8　北海爐石混凝土損壞調查[35]

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2－9　相對於銅/硫酸銅半電池之電位值(伏特)[36]

循環	0% SC, 0.40 W/C	40% SC, 0.4 W/C	50% SC, 0.40 W/C	65% SC, 0.40 W/C	0% SC, 0.55 W/C	40% SC, 0.55 W/C	50% SC, 0.55 W/C	65% SC, 0.55 W/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	−0.01	−0.09	−0.06
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	−0.11
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	0.13	−0.12	−0.13	−0.11
15	−0.14	0.10	0.13	−0.12	−0.18	−0.13	−0.13	0.14

SC：為爐石含量
W/C：水灰比

表2-10 在不同之材質下，鋼筋之腐蝕速率（線性極化量測結果）[37]

材　　質	平均極化阻抗 (μA/mV)	腐蝕速率 (mdd)
爐石水泥 6535cm²/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＋5%$CaCl_2$	0.23	1.57
爐石水泥 3600cm²/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＋5%$CaCl_2$	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2-11 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[38]

擴散之離子	硬化時間(日)	水灰比	擴散係數 Dm(10^{-6} cm²/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

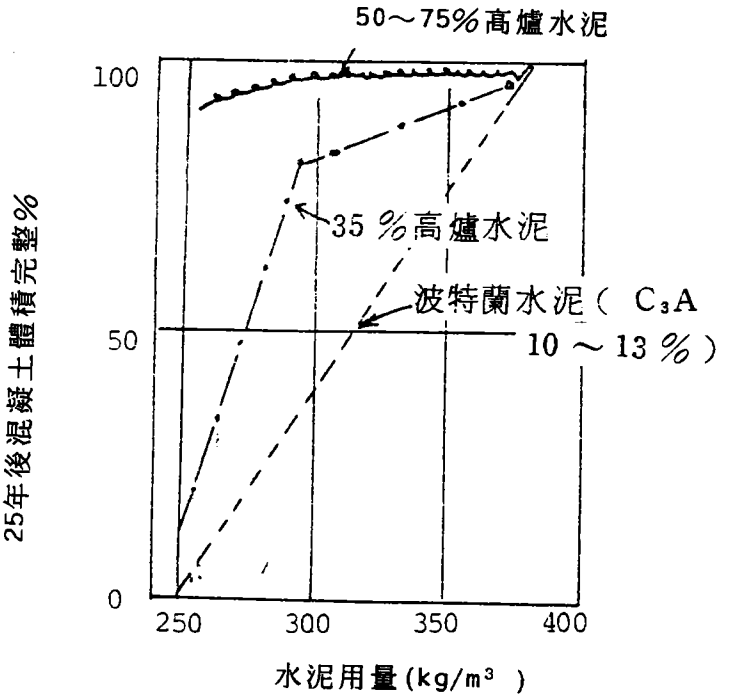


圖2－22　曝露於海水25年後之損壞情形

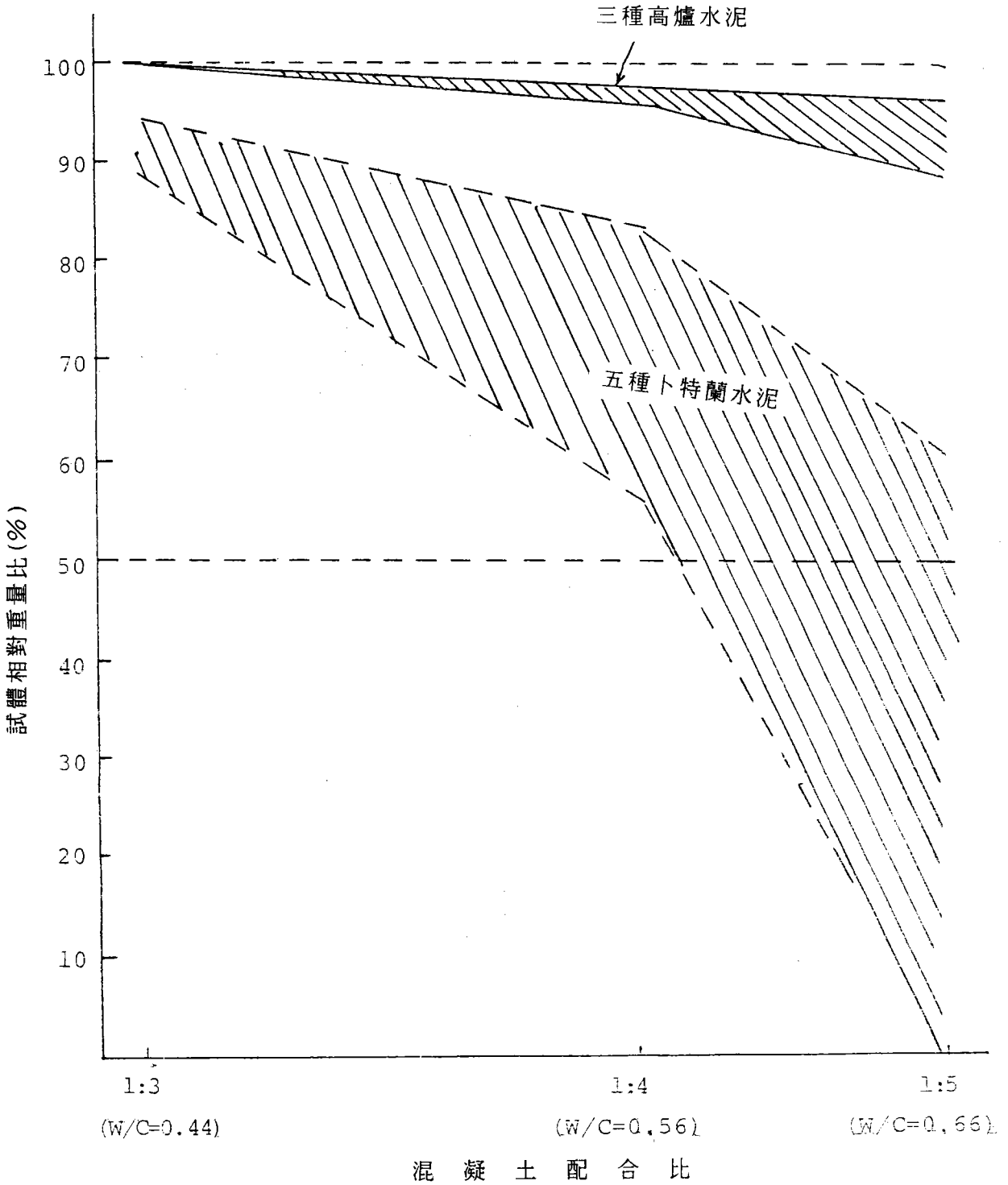


圖2－23　在海水中經19年間浸泡的混凝土角柱體之相對重量

。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，其抗蝕能力愈强[50]。

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[50]：

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，其耐力最差。

③C_3A含量在6%，混凝土中水泥含量在400kg/m^3 時 ，其耐力與高爐水泥混凝土者相當。

④C_3A含量在3%時，則不論水泥含量在合理範圍內如何變化，其耐力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($2CaO \cdot SiO_2$)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，故其混凝土不易爲氯離子所侵入，故其所用之鋼筋直徑可爲普通卜特蘭水泥混凝土之半值，即原用六分者，在高爐水泥中用三分者已足。

㈦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[51]，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2－12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，塩份及氧氣之滲透有顯著之效果，在防蝕之對策上爲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Attimtay[52] page[41]實驗，保護層厚度與鋼筋直徑之比值採取2.5～3.0時，其防蝕性最爲有效及小林，宮川先生[53]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[54]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2-26[41]，以氯離子達到臨界含塩濃度之年數，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，各國都定有規範，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2－12 棧橋混凝土橋面板之氯離子含量與保護層厚度之關係

	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	
					C_0 %	D_C *1
棧橋之混凝土橋面板	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 $\times 10^{-8}$ cm^2 ／sec

*2 氯離子含量與水泥漿之重量比（%）

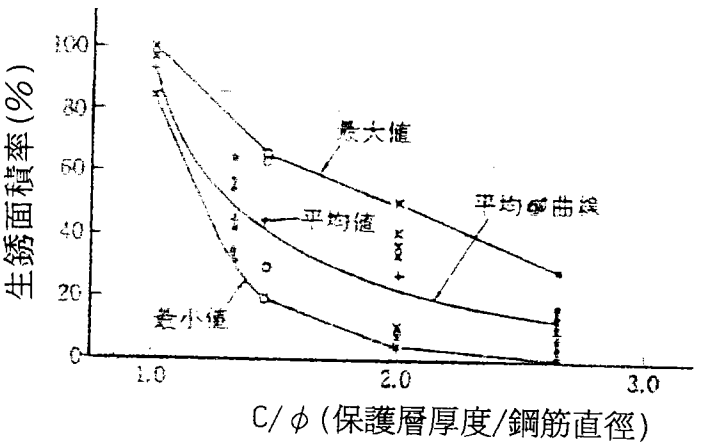


圖2－24　C/φ對鋼筋腐蝕之影響

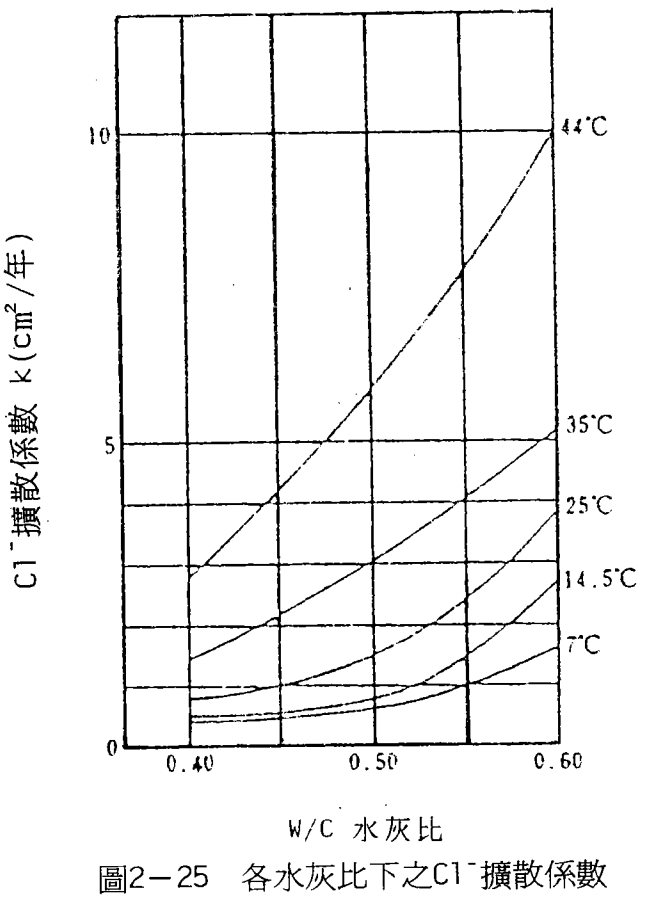


圖2－25　各水灰比下之Cl⁻擴散係數

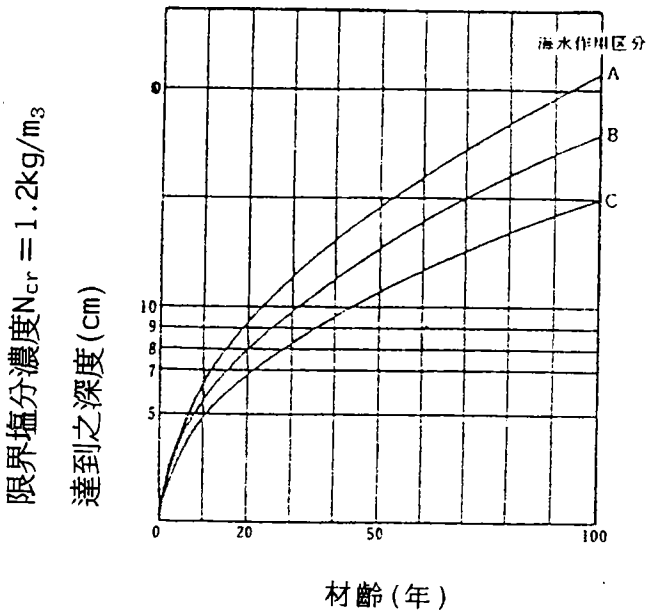


圖2－26　塩份侵透深度與材齡

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、溼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，陳振川等人，「爐石爲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 Sulpate 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 Furenace Slag Cements," in Blended Cemente, 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 Resis tance of Slag Cements," Proceedings, International Conference on Slags & Blended Cements, Mons, Belgium, September 1981.
20. Mehta, P.K., "Sulfate Resistance of Blended Protland 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.1495-15 24, 1986.
23. Locher F.W., "zur Frage des Sulfat widerstandes Von Huttenzementen" ("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 BlastFurnace 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 Reactiuon and to Dulfate 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 SP

91-70, 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. Collepardi, 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 Basis 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塩素に關する考察，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：かぶリユン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.

第三章　試驗規劃、設備與材料準備

㈠實驗計劃

1. 試驗室內進行短期加速試驗試體已經於79年3月中旬製作完成，預計一年內完成試驗工作

2. 基本物理性質試驗(包括抗壓、透水、彈性係數及凝結時間)

3. 長期現地曝露試驗(預計觀測五年)

地點選定在本所內海水循環水槽內，試體擺放地帶爲潮汐帶範圍，每年觀測一次，已經於79年5月擺放完成。

4. 上述試驗之混凝土材質設計如下：

⑴配比設計：

a. 水灰比：0.5 , 0.7

b. 爐石摻料：0% , 40% , 60% , 80%

c. 坍度：8～10cm

⑵材　　料：

a. 水泥：台泥公司卜特蘭第一型水泥

b. 摻料：高爐石(水淬高爐石粉)，其化學成份如表3－1所示

c. 鋼筋：省產一般竹節鋼筋

d. 骨材：粗骨材採用大甲溪之碎石，細骨材爲人工碎砂及天然河砂混合料，各項分析結果如表3－2至3－4所示

e. 拌合水：飲用之自來水

㈡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，需製作試體種類及數量

如下：

試體種類尺寸	數量	說　　明
1. 10ϕ ×20cm	72	短期加速(乾濕循環)試驗
2. 15ϕ ×30cm	240	長期曝露試驗
3. 15ϕ ×30cm	240	基本物理性質試驗

㈢試體項目與規範

試驗之項目與規範如下表

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 Reclaimation	✓	✓	✓
彈性係數	ASTM C-469	✓	✓	✓
腐蝕電位量測	ASTM C-876		✓	✓
cl^-滲透分析	ASTM C-114		✓	✓
$SO_3^=$含量分析	ASTM C-114		✓	✓
保護層厚度之影響				✓
凝結時間	ASTM C-403	✓		

***附 註：

A. 短期加速試驗方法：

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天爲一循環週期(cycle)

5.預計進行15～20循環週期

6.腐蝕電位值每一週期量測一次，直到量測電位值＜-350mV時，即停止試驗。

B. 基本性質試驗部份

試體之養生齡期如下：

1.抗壓强度：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.彈性係數：28天，56天，90天，180天

㈣試驗儀器設備配置

儀器設備名備	用途及說明
1. 100噸萬能試驗機	抗壓、抗彎强度試驗
2. 資料掃描處理機	應變測量
3. 拌合機	試體製作
4. 振動桌	試體製作
5. 貫入試驗儀	凝結時間測定
6. 透水試驗儀	透水係數測定
7. 磨損試驗儀	平面磨損率測定
8. 凍融試驗機	耐久性測定
9. 乾濕試驗機	耐久性測定
10.收縮試驗儀	長度變化量測
11.共振頻率測儀	動彈性係數測定
12.恒溫恒濕控制室	試體之標準養生
13.定電位計	鋼筋之腐蝕速率測定

㈤工作執行情形

各類試體製作過程，從進料、秤重、拌合到灌製、養生過程以及進行各項試驗分析情形，如圖3－1至圖3－18所示。

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_2O_3 (%)	14.0	5.1
SO_3 (%)	0.88	2.0
S (%)	0.8	—
FeO (%)	0.7	—
P_2O_5 (%)	＜0.01	—
MnO (%)	0.7	0.14
TiO_2 (%)	0.5	0.29
K_2O (%)	0.4	0.59
燒失量(%)	—	1.06
比 重	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
$\frac{3}{4}$ (19.0)	16.5	83.5
$\frac{1}{2}$ (12.5)	33.4	50.1
$\frac{3}{8}$ (9.5)	21.9	28.2
#4 (4.75)	25.2	3.0
#8 (2.36)	3.0	

表3－3 細骨材分析結果

篩網尺寸 No. (mm)	停留(%) 個別	停留(%) 累計	通過(%)
# 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/m³)	含泥量 (%)
粗骨材	2.63	1.07	1547	0.39
細骨材	2.63	1.23	1616	0.95

圖3-1　混凝土各項材料準備之情形

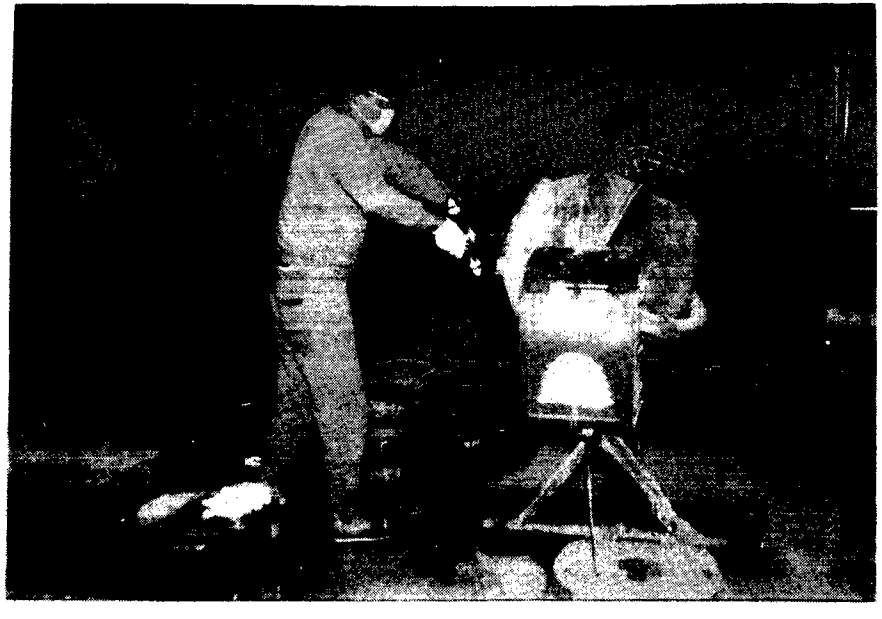


圖3-2　混凝土進料拌合之情形

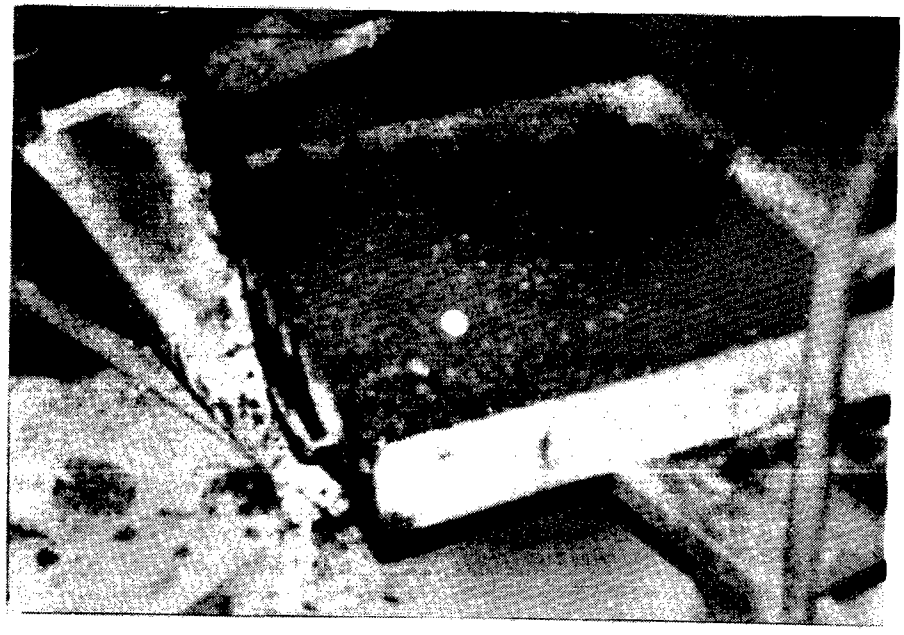


圖3-3　混凝土拌合後量測漿體溫度

圖3-4　量測混凝土之坍度

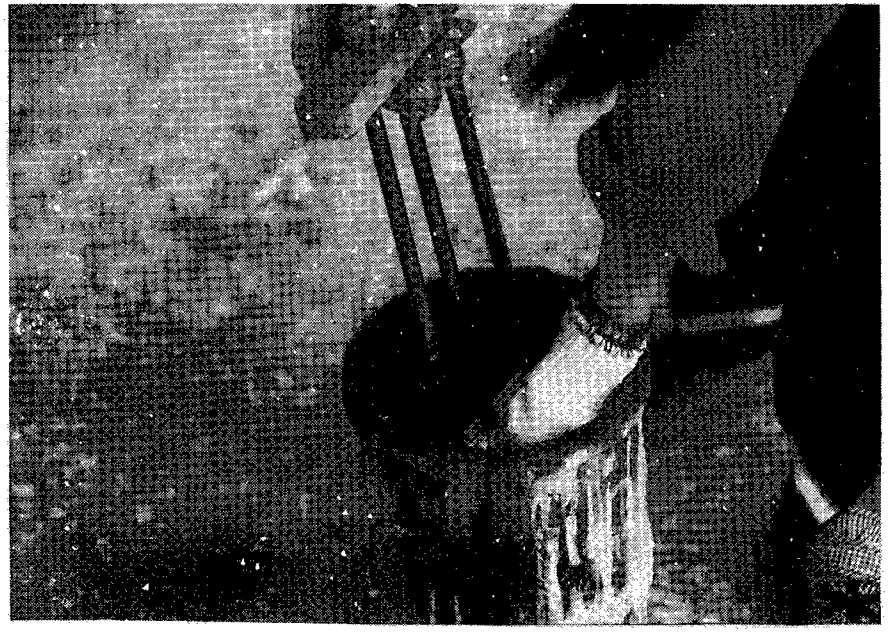


圖3-5　試體內埋入鋼筋之情形

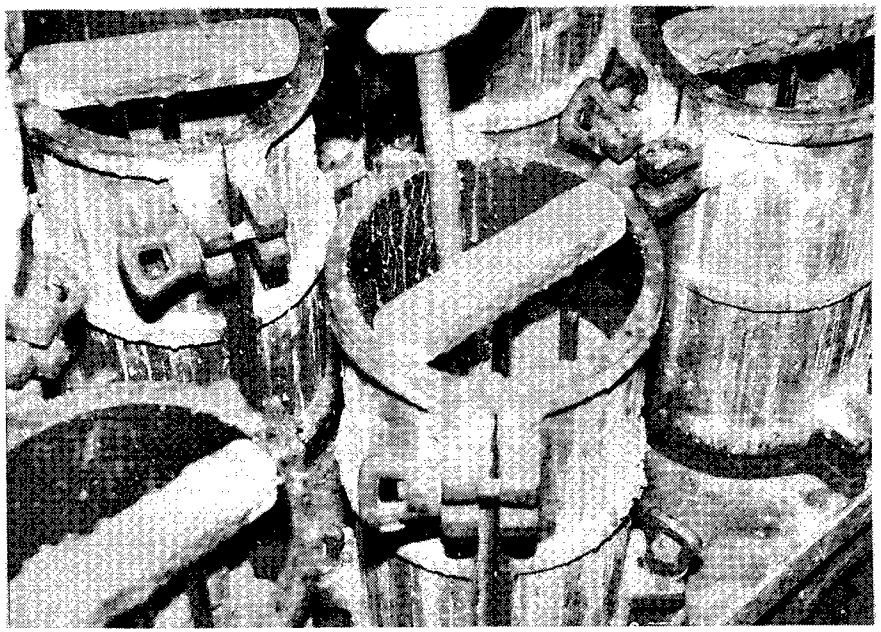


圖3-6　試體內埋入鋼筋灌製之情形

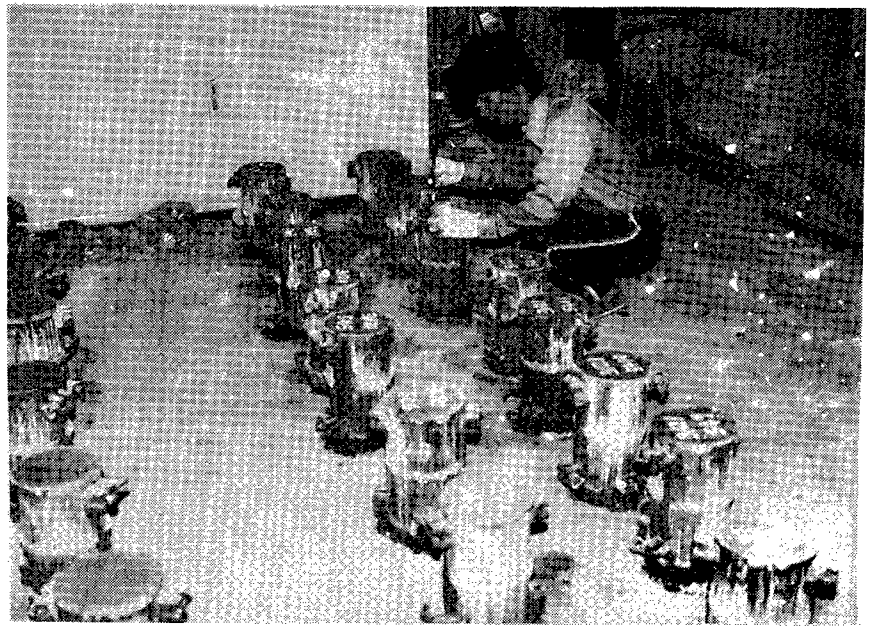


圖3-7　試體編號情形

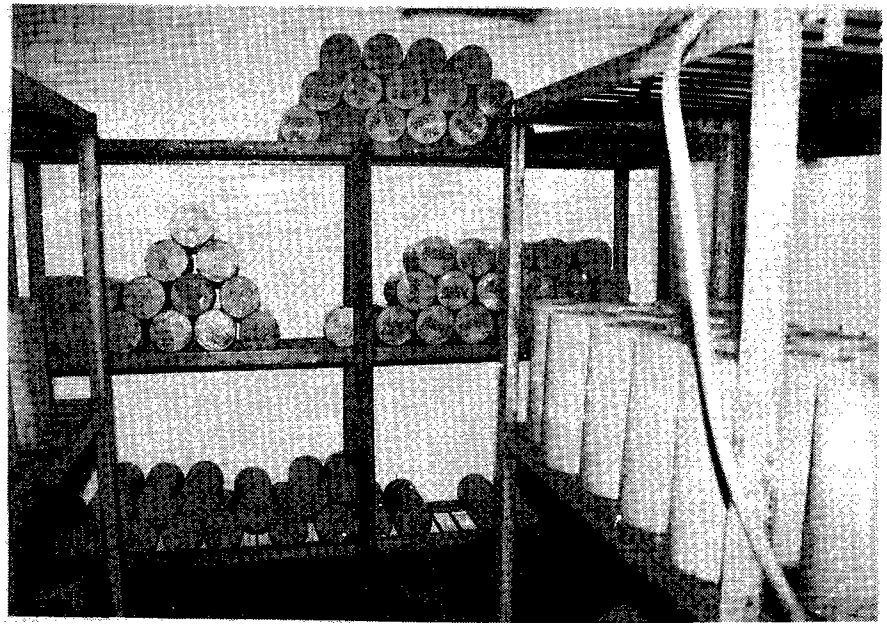


圖3-8　試體置於養生室養生情形

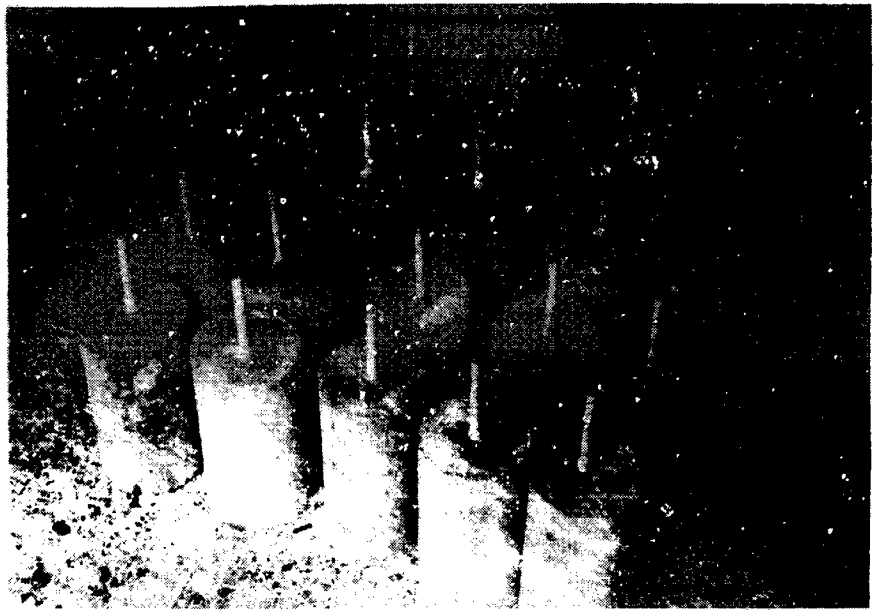


圖3-9　加速試驗用之小試體

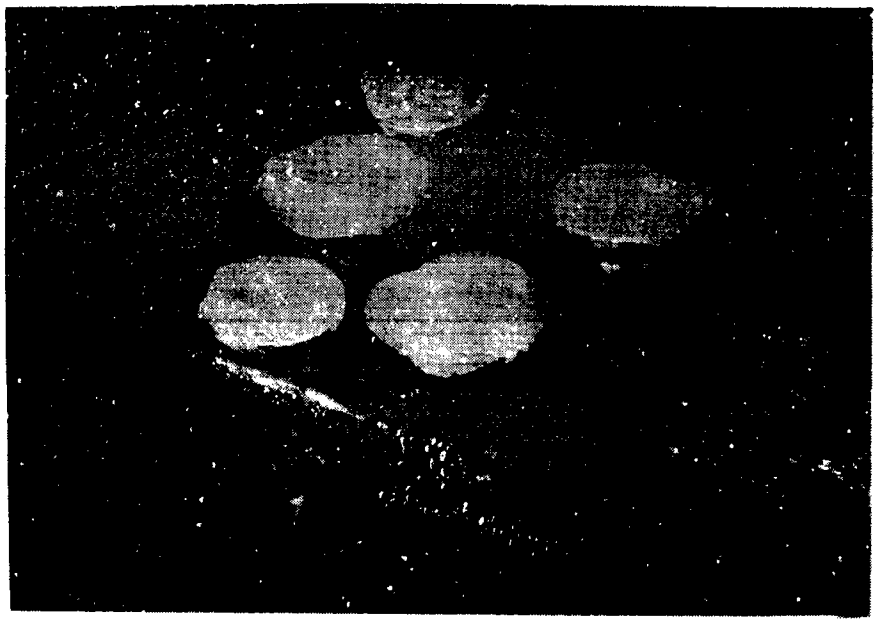


圖3-10　試體之蓋平(做抗壓强度用)

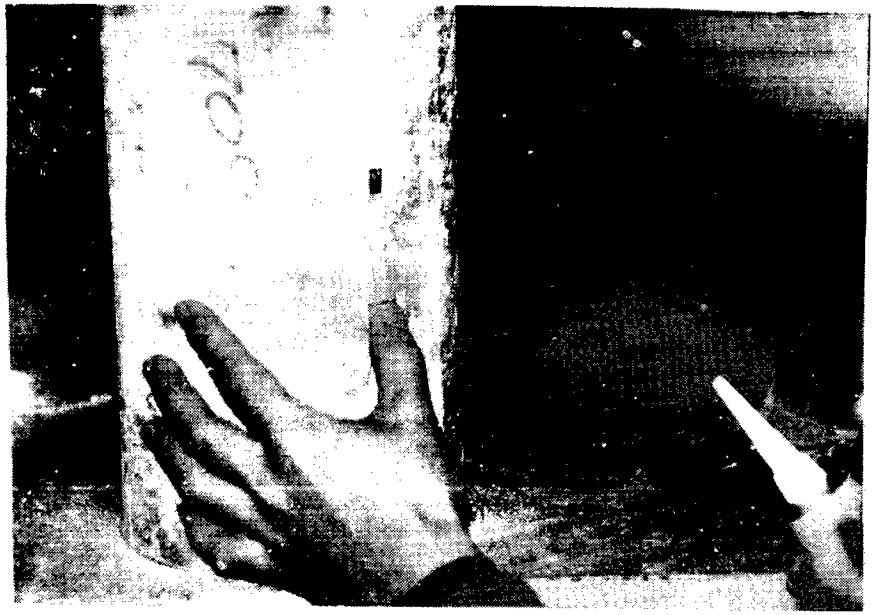


圖3-11　貼應變計於抗壓試體上

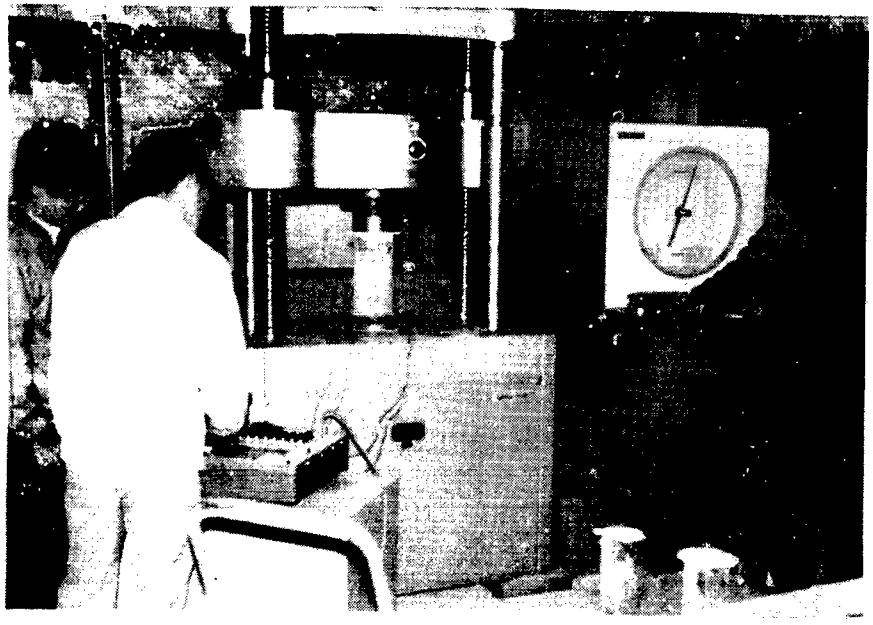


圖3-12　試體做抗壓强度試驗情形

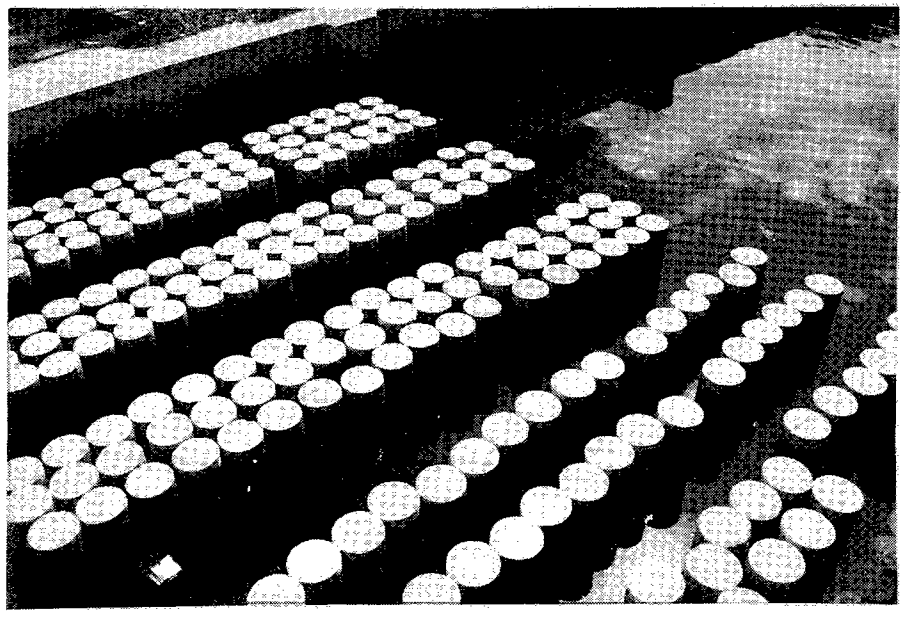


圖3-13　試體擺置於海水循環水槽內之情形

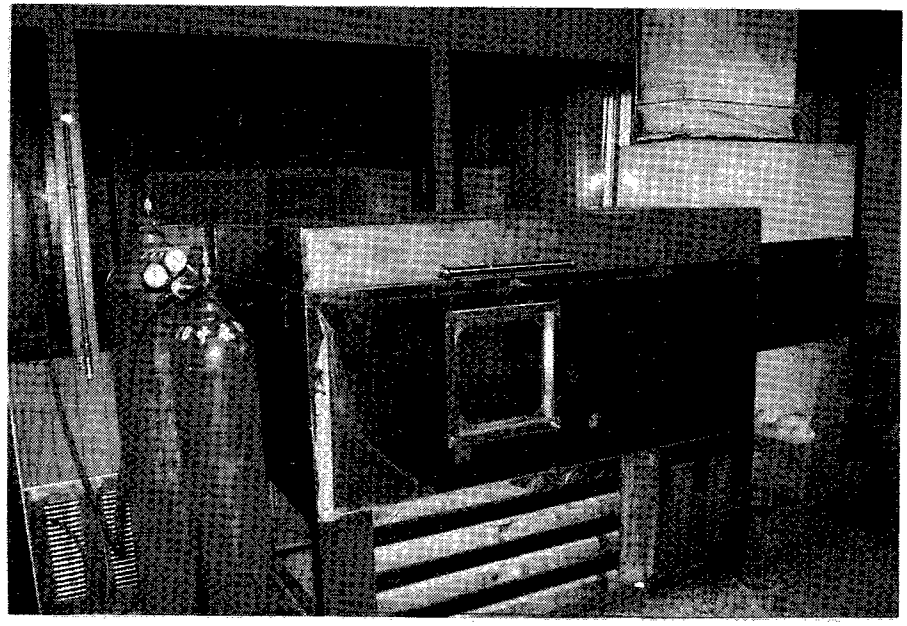


圖3-15　加速(乾濕循環)試驗儀器

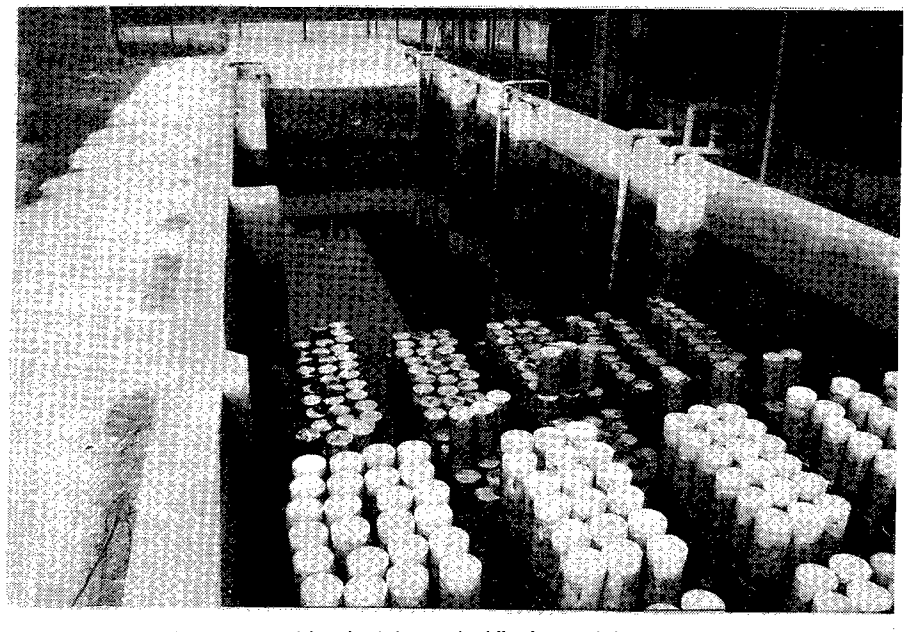


圖3-14　海水循環水槽之全景

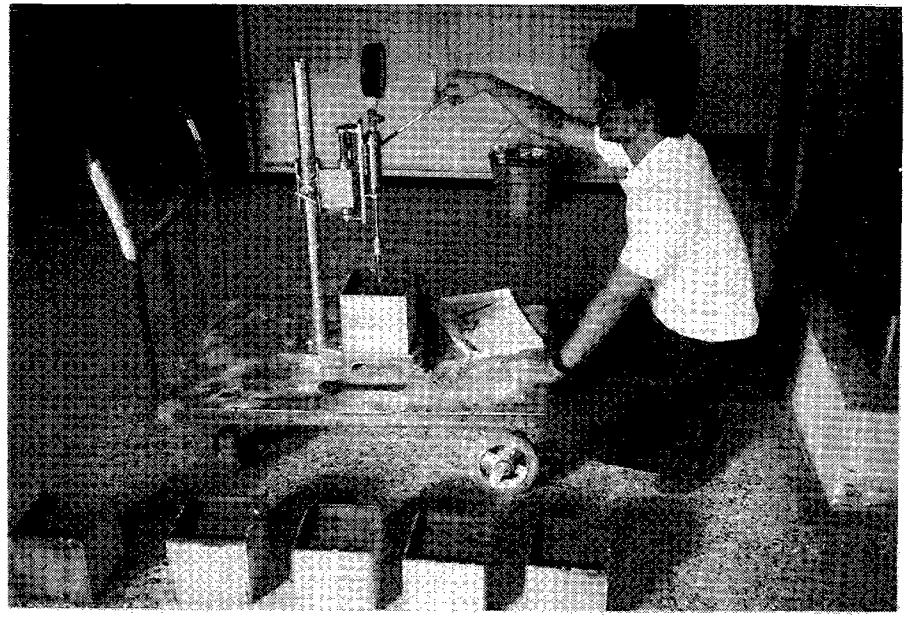


圖3-16　貫入試驗之情形

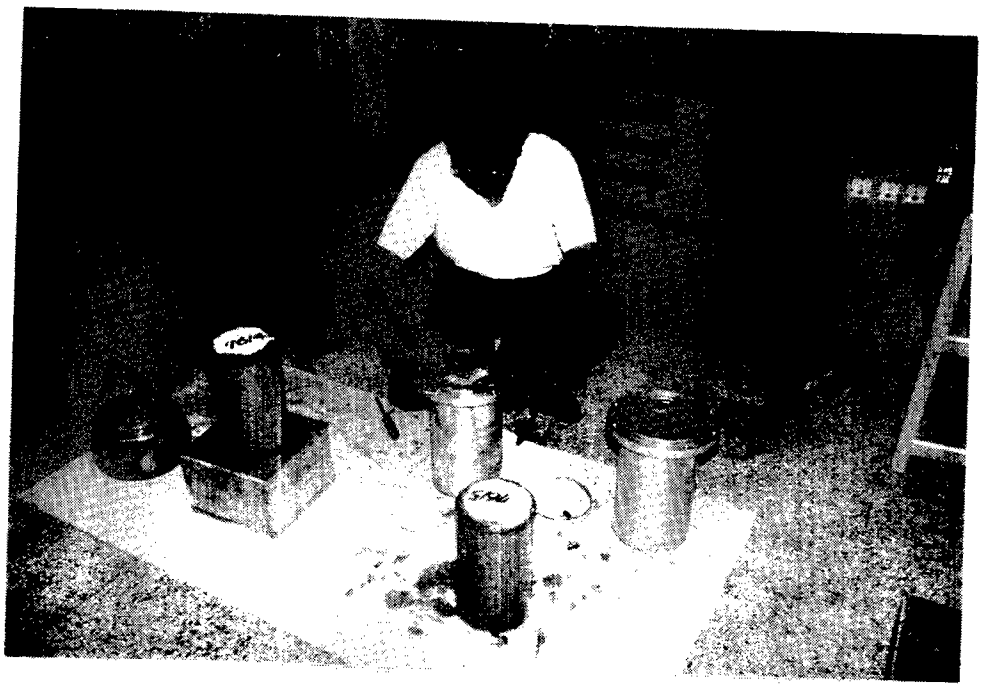


圖3－17　試體做透水試驗時用石臘及松香灌入試體模內之情形

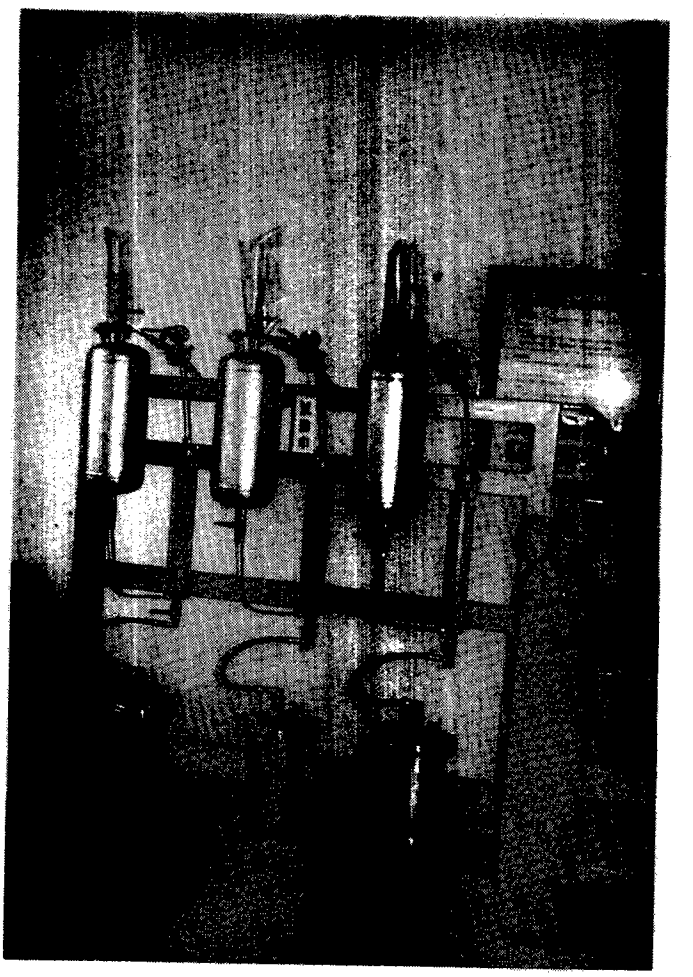


圖3－18　透水試驗設備

第四章　實驗室試驗

一、透水試驗

㈠ 試驗目的

本試驗目的，在求添加不同配比的高爐熟料後各種爐石混凝土之透水特性。由於高爐熟料成份中，氧化矽(SiO_2)含量多，故添加於混凝土中，將由於波索蘭反應與混凝土中的氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)結合而形成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　減少，則水也就無法將一些有害物引入混凝土中。

㈡ 試驗步驟及量測方法

1.試驗設備

本試驗所採用之設備爲美墾務局型(如圖3-18)具有三組試體容器直徑爲17 公分，適合15ϕ ×30cm之試體，連接三組儲水槽及三個量筒，量筒內徑爲30mm，其側緣備一量尺，精度 1 mm，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，使本試驗爲定水頭透水試驗法。

2.試驗前準備

⑴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爲一不透水面。

⑵先灌水後排氣，使連接試體之各管路中無氣泡存在。

⑶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)：

$$V = Ki \cdots\cdots (式\ 4-1)$$

$$Q = Av \cdots\cdots (式\ 4-2)$$

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

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

$$i = p/r \div L \cdots\cdots (式\ 4-5)$$

$$* K = \frac{\frac{\pi}{4} D_1^2 \Delta h\ rL}{\frac{\pi}{4} D_2^2 p\ \Delta t} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \cdot \frac{\Delta h\ rL}{p(t_2 - t_1)} \cdots\cdots (式\ 4-6)$$

式中：

K ：滲透係數

D_1 ：量筒之直徑(30mm)

D_2 ：試體之直徑(150mm)

P ：試驗氣壓(採用5kg/cm²)

Δh ：量筒之水位差距

r ：水之密度

L ：試體長度(300mm)

Δt　：試驗時間差距

將已知各量代入式(4－6)，可得：

$$K = 2.4 \times 10^{-4} \Delta h/\Delta t \cdots\cdots (式4-7)$$

㈢試驗結果檢討

本試驗選定二種水灰比(0.5，0.7)及添加四種不同爐石含量（0％，40％，60％，80％）以製作混凝土，總計八種配比，每種配比製作三個試體進行透水試驗，材齡選定28天，56天，90天，180天分別試驗，其結果列表於4-1～4-2，並將其繪圖於圖4-1～4-6。

由本試驗結果可看出，添加爐石於低水灰比之混凝土之滲透係數較之高水灰比小，顯見添加爐石於較低水灰比混凝土之滲透係數低是可肯定的，另由圖4-5可見，添加40％及80％爐石含量於低水灰比混凝土在56天之後，其滲透係數趨於穩定（而在60％爐石含量之情況變動較大），而由圖4-6可見高水灰比情況在90天齡期時，其滲透係數才漸趨於穩定。

表4-1　爐石混凝土之透水試驗結果(水灰比0.5)

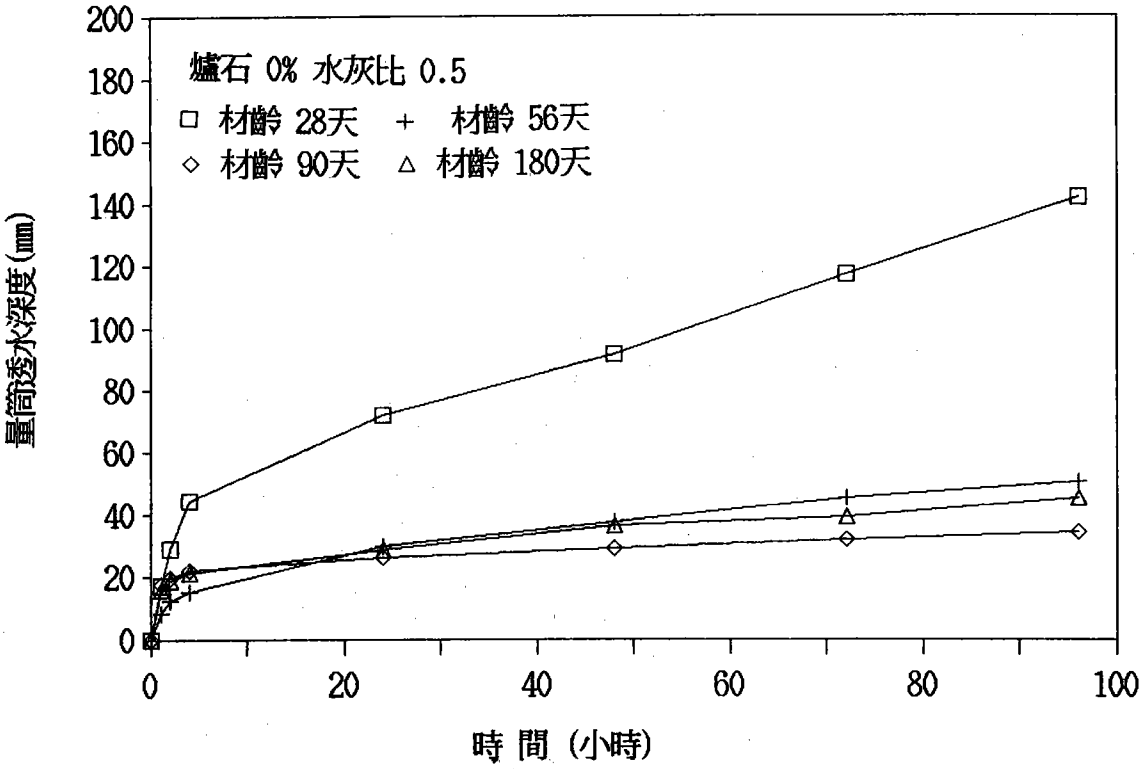
量筒透水深度(mm) 序號 / 時間	A50	B50	C50	D50	A54	B54	C54	D54	A56	B56	C56	D56	A58	B58	C58	D58
0(小時)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1(小時)	17.6	8.5	17.7	16.3	29.3	10.3	21.7	16.0	6.6	16.3	19.7	26.5	11.0	5.6	10.3	16.5
2(小時)	29.0	12.5	20.0	19.0	42.3	14.6	23.7	20.0	9.0	23.6	21.0	29.0	14.0	9.3	12.3	18.0
4(小時)	44.7	15.5	22.3	21.3	52.0	17.3	26.0	22.3	12.0	31.0	23.0	31.5	16.6	13.6	15.3	19.5
1(天)	72.0	30.0	26.3	28.7	97.3	28.0	32.0	26.7	20.6	74.0	31.3	35.5	32.0	23.0	23.7	23.5
2(天)	91.7	37.5	29.3	36.3	134.6	32.0	37.3	30.7	30.0	107.6	35.3	38.5	45.3	32.4	30.7	28.0
3(天)	117.3	45.5	32.0	39.3	178.0	38.6	40.0	32.0	66.0	127.0	38.0	40.5	55.6	40.0	36.7	31.5
4(天)	142.3	50.5	34.3	45.3	196.6	40.6	41.7	33.0	73.3	163.0	41.3	42.0	67.3	47.0	42.3	33.0
透水係數(m/sec)	9.86×10^{-11}	3.51×10^{-11}	2.38×10^{-11}	3.15×10^{-11}	1.36×10^{-10}	2.82×10^{-11}	2.90×10^{-11}	2.29×10^{-11}	5.08×10^{-11}	1.13×10^{-10}	2.87×10^{-11}	2.92×10^{-11}	4.65×10^{-11}	3.26×10^{-11}	2.94×10^{-11}	2.29×10^{-11}

序號說明：①首字A、B、C、D分別表示材齡28、56、90、180(天)。
②"5"表示水灰比0.5。
③尾字0、4、6、8分別表示，爐石替代水泥用量比例爲0%、40%、60%、80%

表4-2　爐石混凝土之透水試驗結果(水灰比0.7)

量筒透水深度(mm) ＼ 序號 / 時間	A70	B70	C70	D70	A74	B74	C74	D74	A76	B76	C76	D76	A78	B78	C78	D78
0(小時)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1(小時)	14.6	22.0	20.0	7.7	23.0	20.0	16.3	11.3	24.0	51.3	14.0	6.7	15.6	17.7	15.0	8.5
2(小時)	20.3	32.6	27.0	11.7	35.6	31.7	20.7	17.0	35.3	68.7	19.6	9.7	29.3	24.3	18.5	13.0
4(小時)	25.3	39.0	35.3	15.7	53.6	49.3	34.3	24.3	51.6	88.3	23.0	12.3	44.6	31.0	20.5	16.5
1(天)	55.3	59.0	78.0	36.3	101.6	95.3	57.7	40.0	136.3	178.0	64.0	21.3	140.3	96.6	71.0	41.0
2(天)	74.3	72.6	109.7	49.7	155.6	120.0	82.0	57.3	218.6	230.0	92.0	29.0	201.6	131.3	107.5	61.5
3(天)	92.6	86.0	134.0	60.7	202.0	155.7	105.0	67.7	278.6	276.7	114.7	35.3	263.6	151.0	138.0	79.5
4(天)	114.6	98.0	152.7	68.0	228.6	181.0	119.7	80.3	326.0	320.6	134.7	40.0	288.3	166.6	164.5	99.5
透水係數(m/sec)	7.94×10^{-11}	6.81×10^{-11}	1.06×10^{-10}	4.72×10^{-11}	1.58×10^{-10}	1.26×10^{-10}	8.31×10^{-11}	5.58×10^{-11}	2.26×10^{-10}	2.22×10^{-10}	9.35×10^{-11}	2.78×10^{-11}	2.00×10^{-10}	1.16×10^{-10}	1.14×10^{-10}	6.91×10^{-11}

序號說明：①首字A、B、C、D分別表示材齡28、56、90、180(天)。
②"7"表示水灰比0.7。
③尾字0、4、6、8分別表示，爐石替代水泥用量比例爲0％、40％、60％、80％



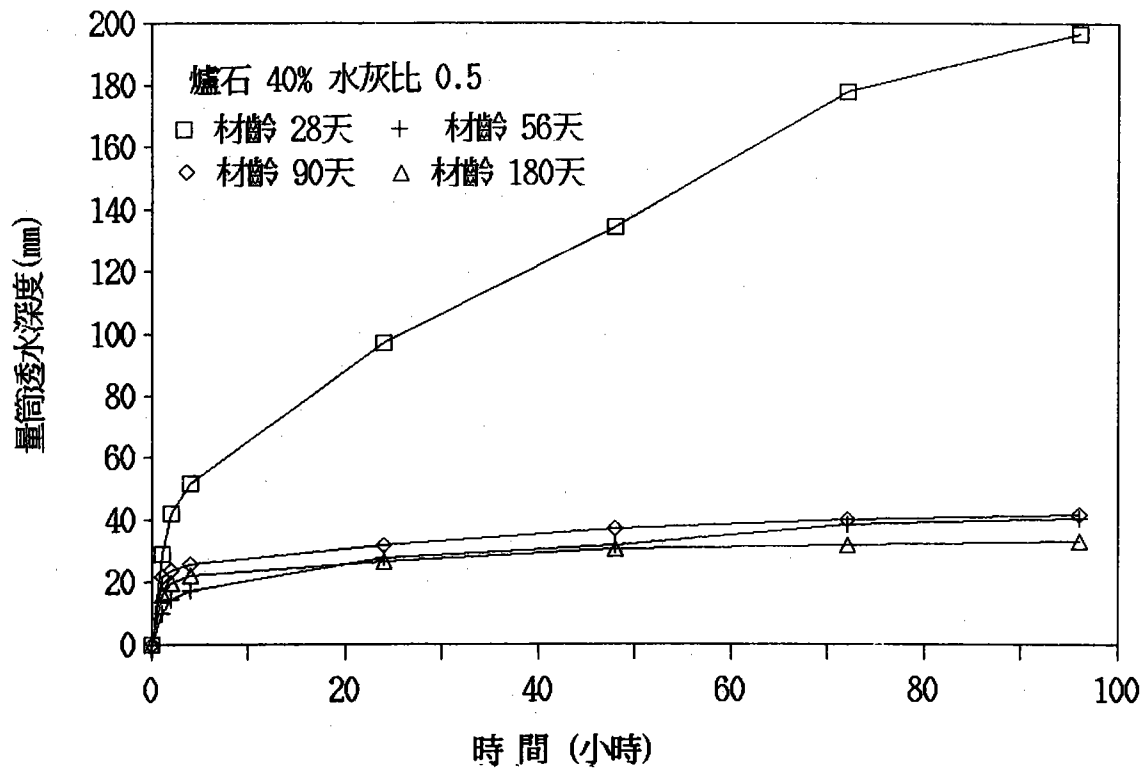
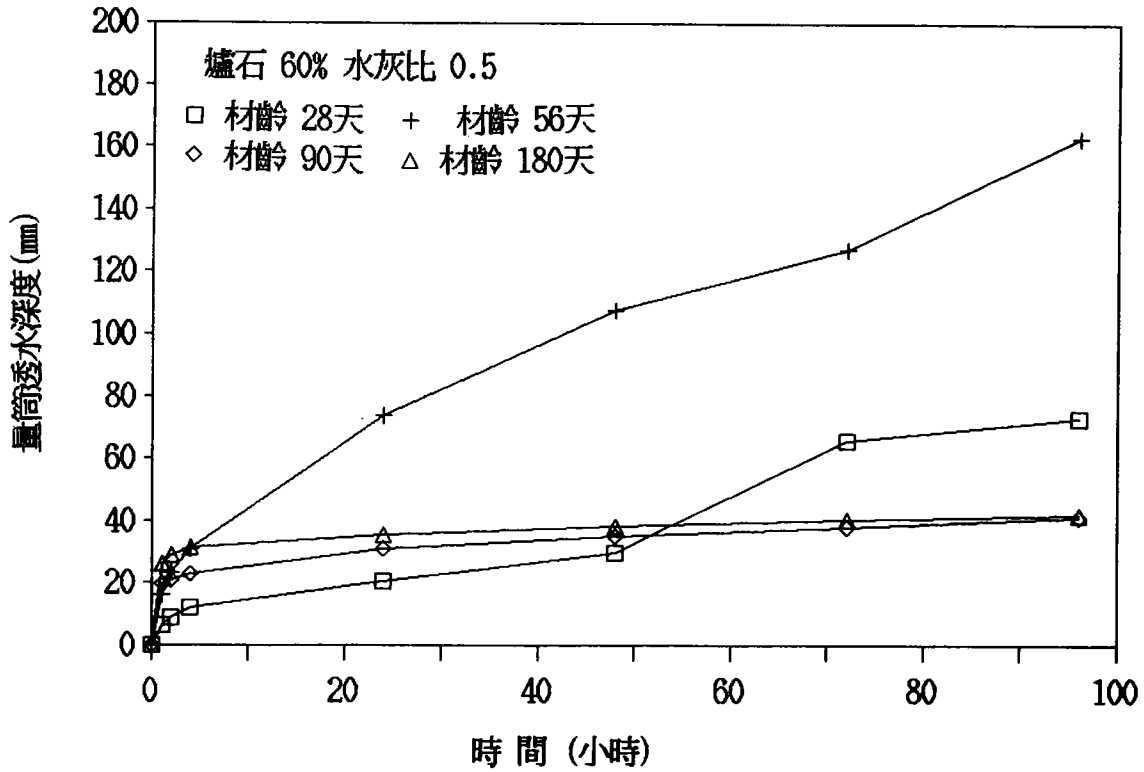


圖4-1 水灰比0.5爐石含量0％及40％四種不同齡期混凝土其量筒深度與時間關係



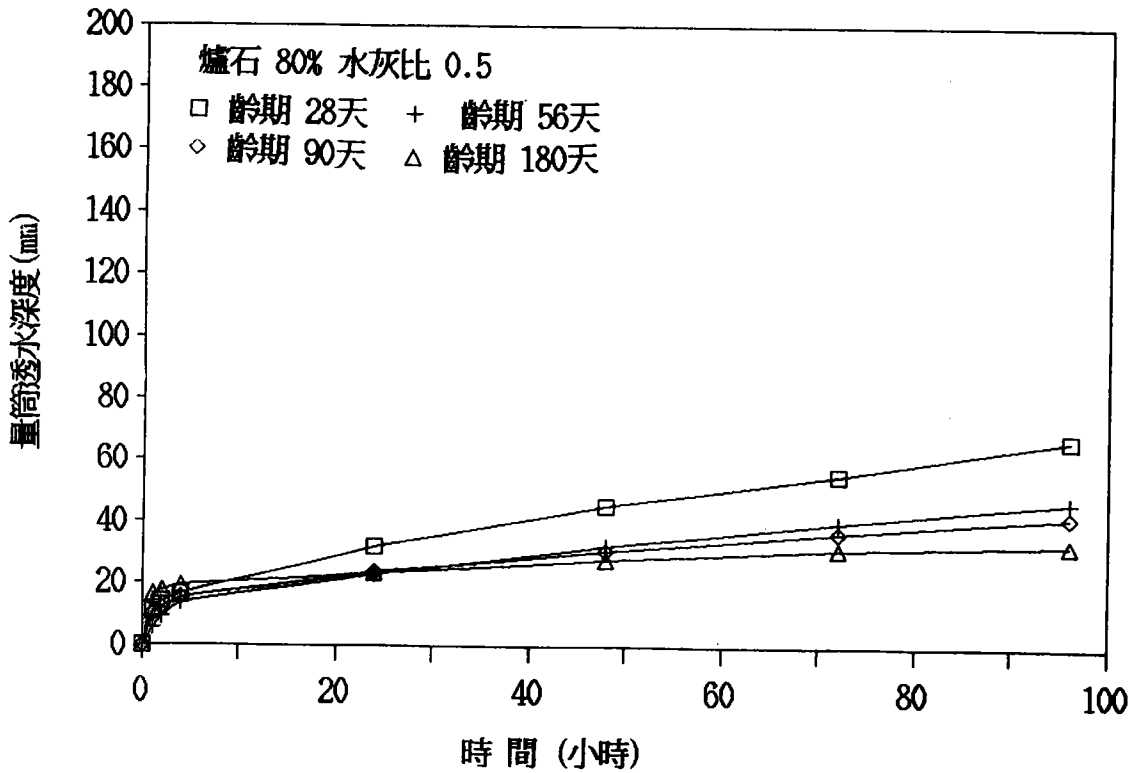
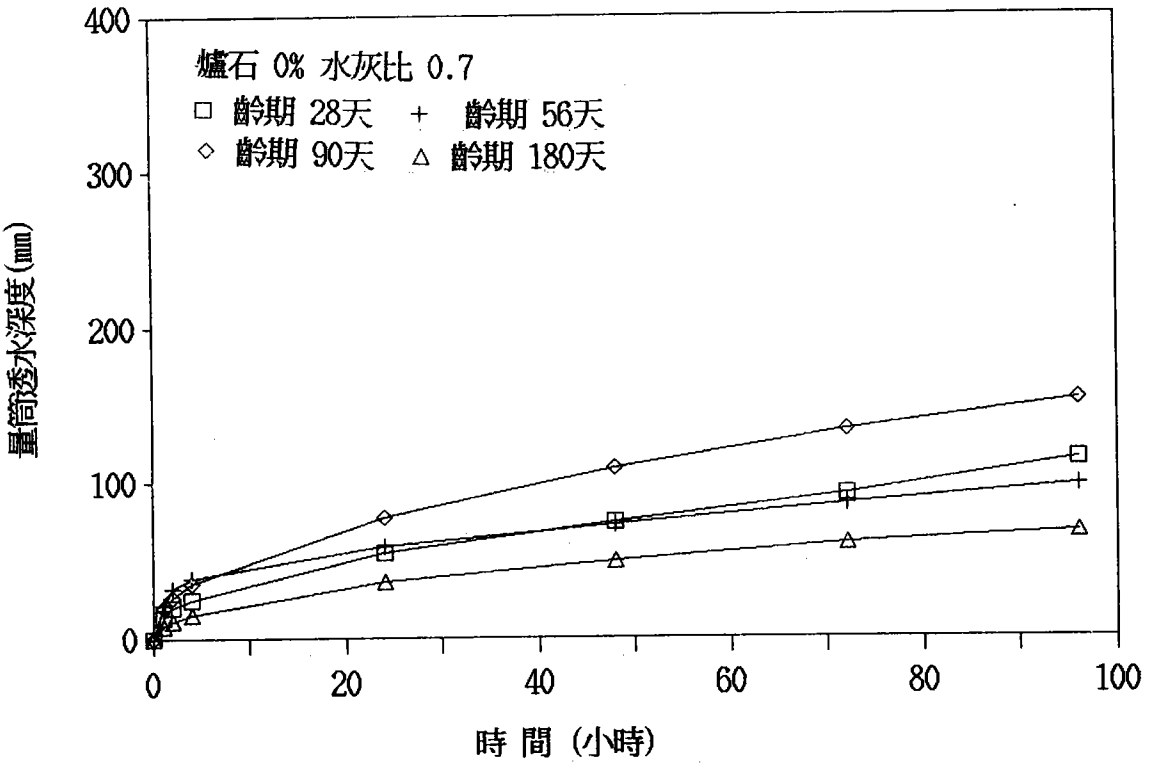


圖4-2 水灰比0.5爐石含量60%及80%四種不同齡期混凝土其量筒深度與時間關係



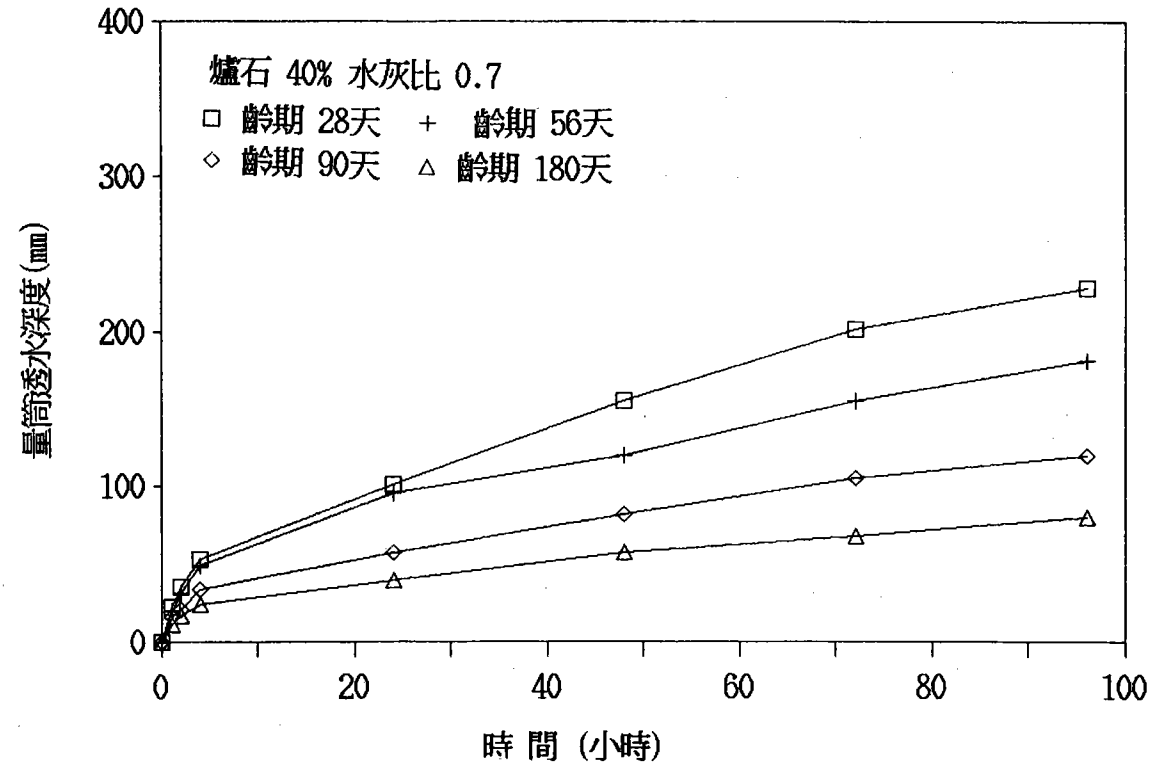
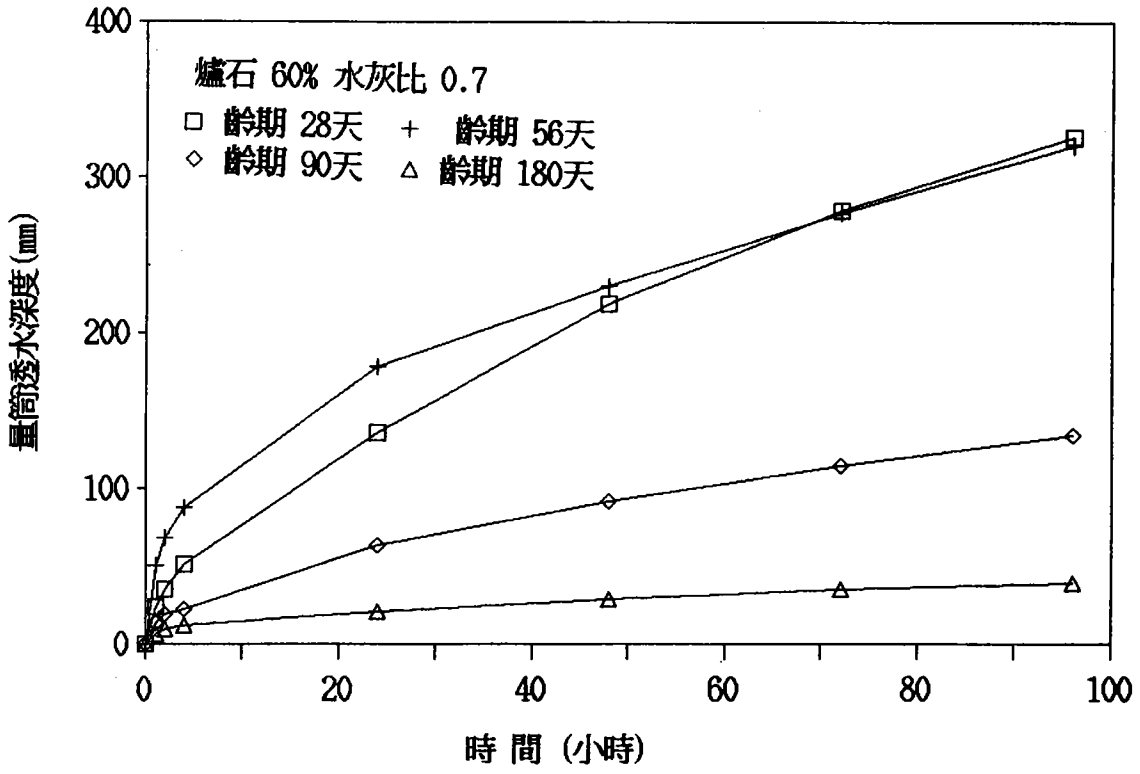


圖4-3 水灰比0.7爐石含量0％及40％四種不同齡期混凝土其量筒深度與時間關係



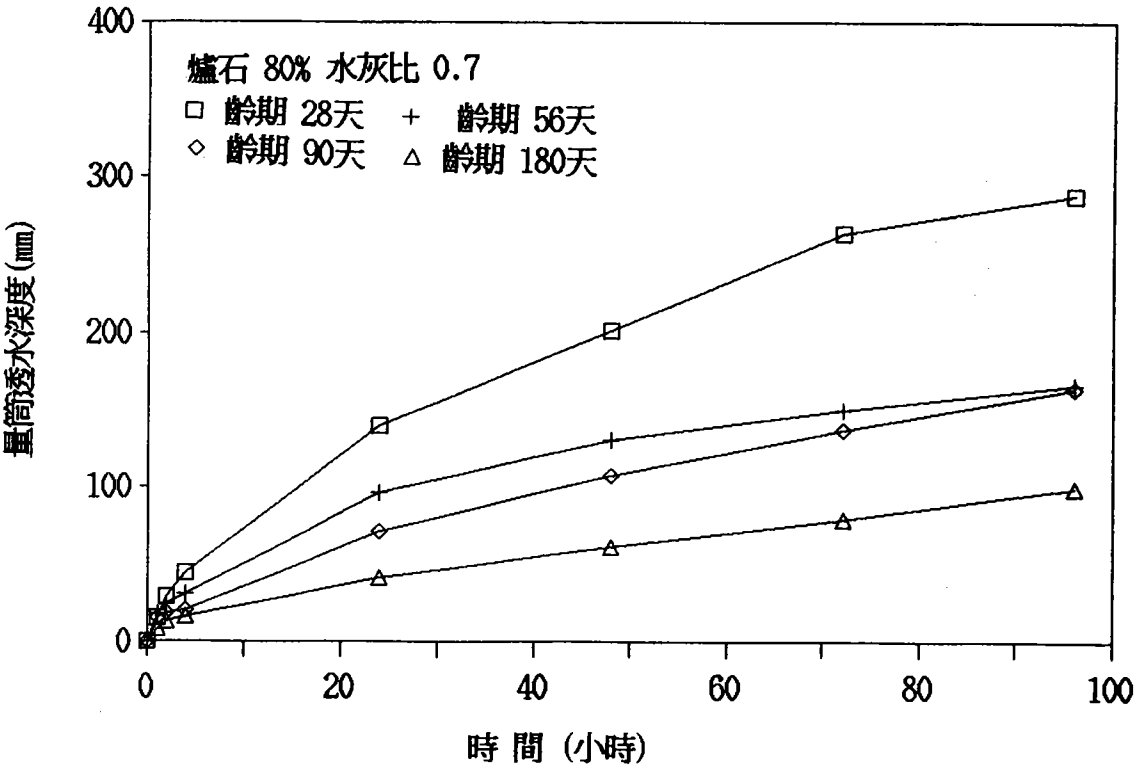


圖4-4　水灰比0.7爐石含量60％及80％四種不同齡期混凝土其量筒深度與時間關係

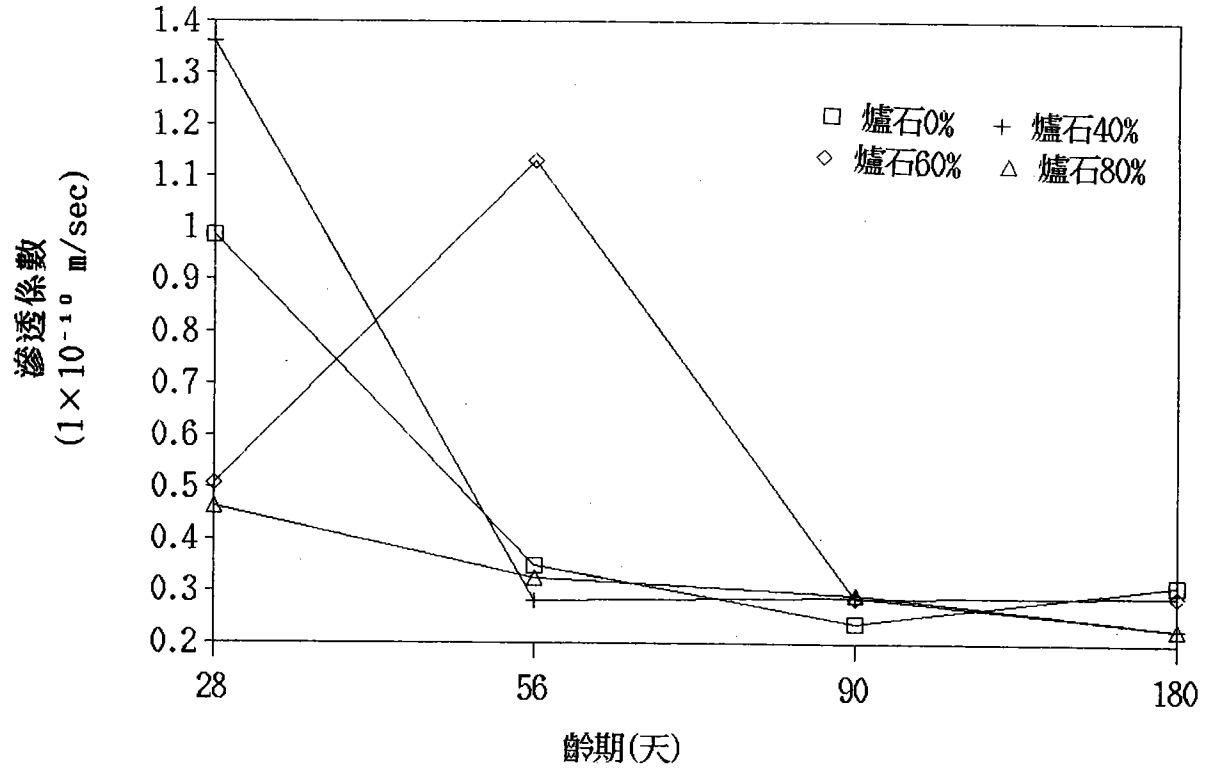


圖4-5　水灰比0.5，添加不等爐石含量其滲透係數變化情形

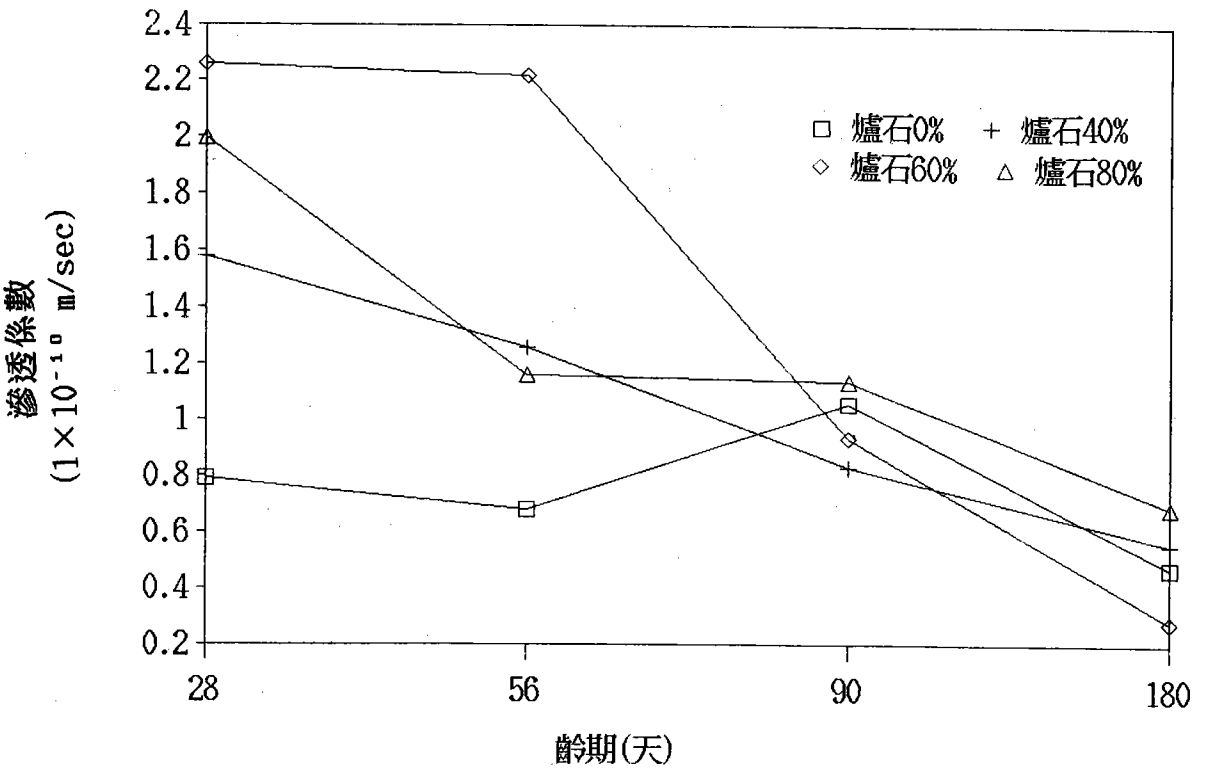


圖4-6　水灰比0.7，添加不等爐石含量其滲透係數變化情形

二、抗壓試驗、彈性係數試驗

㈠試驗目的：

混凝土爲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，爲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。本試驗擬以水泥添加不同比例之爐石粉對混凝土抗壓强度及彈性係數之影響程度，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) 抗壓强度試驗係按ASTM C 39－72規範進行試驗，試驗設備主要爲萬能試驗機，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。其中上壓具爲三半球形一凹一凸之組合，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，標準轉速盤可以作爲標準荷重速率之準則，其設定值如表4－3所列，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 469－65 規範進行試驗，爲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

2. 試驗準備

適齡之試體自蒸氣養護室取出後，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。

抗壓强度試驗之進行參照ASTM C39規範，彈性係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爲準。

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，油壓每至讀數爲 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4－3所示。

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

4. 計算

(1) 抗壓强度 $\alpha = P/A$

式中 P＝破壞時抗壓荷重(萬能試驗機上讀數)

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

(2) 彈性係數及柏松比之推算，依據試驗所得縱橫二向之應力應變曲線，利用下列二式求之，但正割模數之上界壓力採用極限抗壓强

表 4-3 100T 萬能試驗機之試驗荷重速率表 (ASTM)

名稱	噸數	5 T	10 T	25 T	50 T	100 T
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	10φ×20cm	673 — —	336 600 840	135 240 337	67 120 167	34 60 86
	15φ×30cm	— — —	770 — —	308 540 770	154 270 385	77 135 193
劈裂	10φ×20cm	222 333 444	111 166 222	44 67 89	22 33 44	11 17 22
	15φ×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	10φ×20cm	——	600	240	120	60
	15φ×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×(")	—	—	—	—

度的⅓，如圖4－7所示。

$$\text{彈性係數 } E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000500}$$

$$\text{柏松比 } \mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.000500}$$

式中：S_2 ＝ 相對於⅓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

ε_1 ＝ 0.000500

ε_{t2} ＝ 由壓力 S_2 造成之橫向應變量

ε_{t1} ＝ 由壓力 S_1 造成之橫向應變量

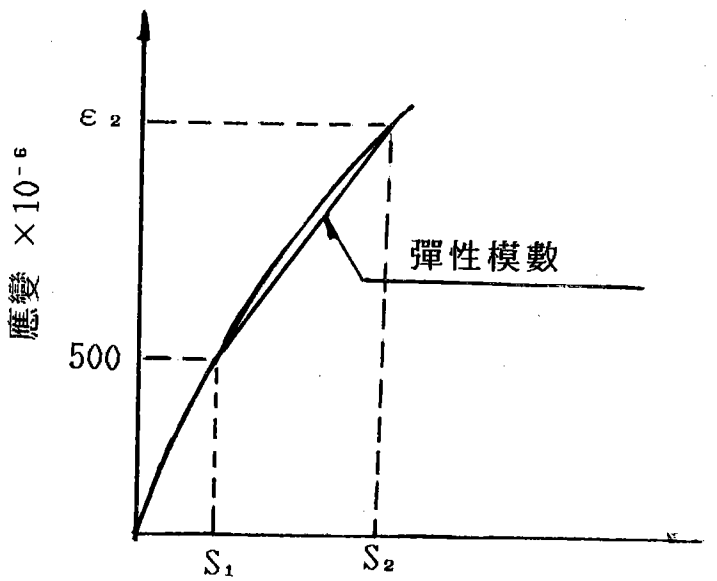


圖4-7　混凝土應力應變圖

㈢試驗結果及檢討

1. 試驗結果：

本試驗進行7天、14天、28天、56天、90天、180天抗壓强度，彈性係數及柏松比其數據如表4-4、4-5及圖4-7至圖4-10所示。

2. 試驗結果檢討：

⑴爐石混凝土水灰比0.5及0.7時，其早期抗壓强度（齡期7天、14天）均較普通混凝土之强度爲低。

⑵齡期28天時，水灰比0.5，爐石添加量爲40%之爐石混凝之抗壓强度已較普通混凝土之强度爲高。水灰比0.5爐石添加量爲60%，和水灰比0.7爐石添加量爲40%、60%之爐石混凝土强度非常接近於普通混凝土之强度。但爐石添加量爲80%時，不論水灰比爲0.5或0.7均較普通混凝土低。

⑶齡期56天、90天、180天時，水灰比0.5及0.7，爐石添加量爲40%、60%時之抗壓强度均已高出普通混凝土之强度，顯見爐石混凝土之內部水化作用已較完全、承受抗壓之能力優於普通混凝土，但爐石添加量爲80%，則抗壓强度低於普通混凝土，根據凝結試驗結果顯示，爐石添加量爲80%時，其初凝、終凝時間均需相當長時間，可能爲其抗壓强度較低之原因。

⑷彈性模數與抗壓强度略成正比關係，即抗壓强度愈高，則彈性係數值相對較大，惟圖4-11中，當爐石混凝土水灰比爲0.5，爐石添加量爲80%，齡期90天時，其彈性模數較同樣配比，不同齡期之彈性模數高出甚多，可能爲試驗之誤差。

⑸本試驗亦測混凝土之柏松比、相同配比、齡期、每三個爲一組之平均數據在0.19～0.22間，單一試體之值則在0.17～0.25間，與抗壓强度並無成絕對的正比關係。

表4-4 爐石混凝土抗壓强度試驗結果(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

註：每一數據係三個試體之平均數

表4-5 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/cm²	柏松比	彈性模數 kg/cm²	柏松比	彈性模數 kg/cm²	柏松比	彈性模數 kg/cm²	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

註：每一數據係三個試體之平均數

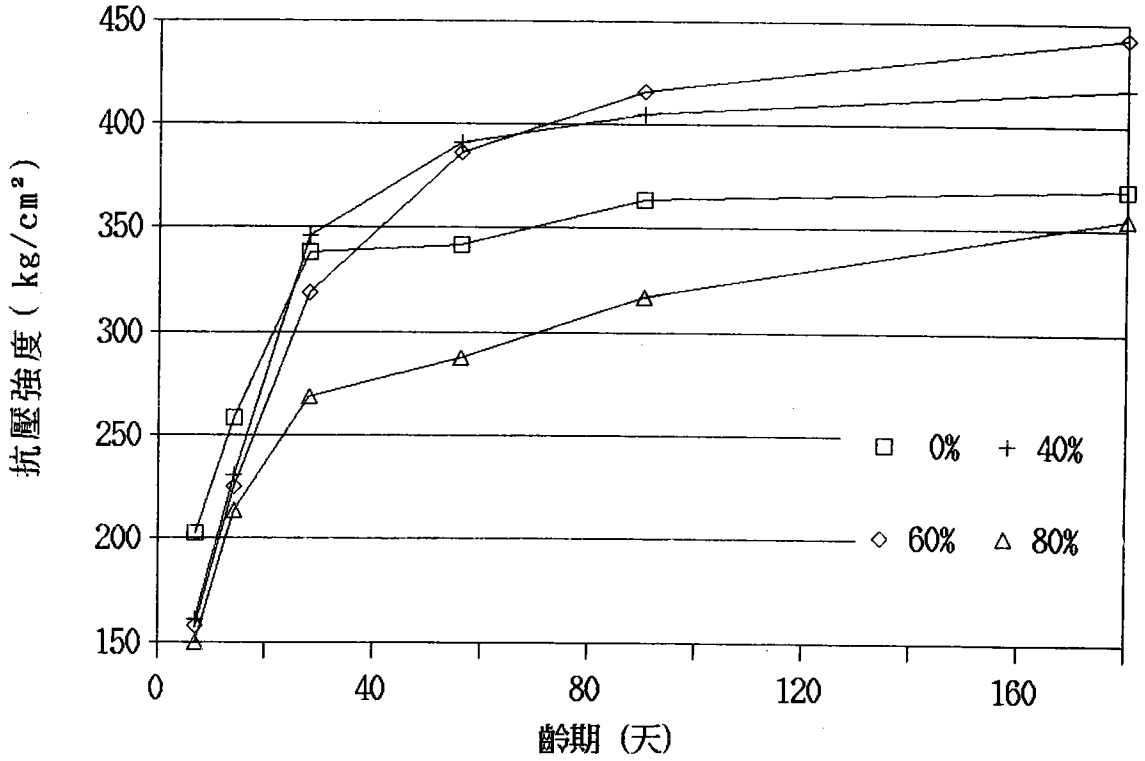


圖4-8　水灰比0.5含不同爐石比例之混凝土抗壓強度與齡期之關係

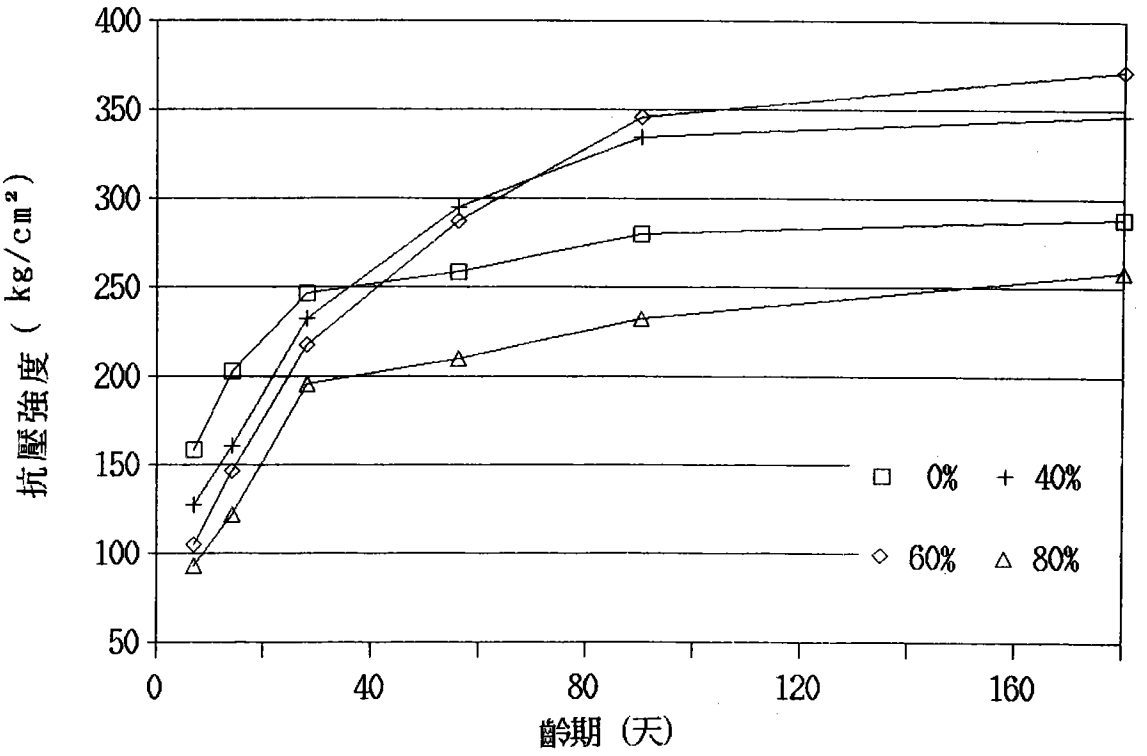


圖4-9　水灰比0.7含不同爐石比例之混凝土抗壓強度與齡期之關係

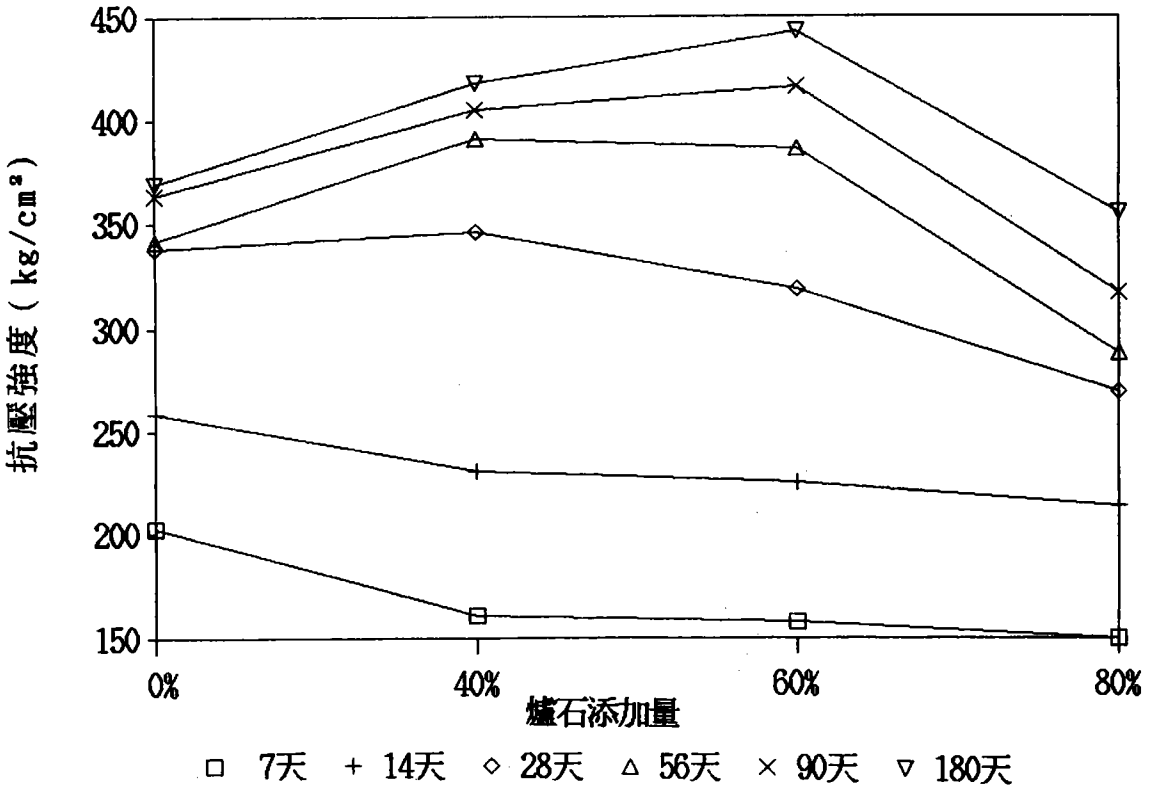


圖4-10 水灰比0.5含不同爐石比例之混凝土抗壓強度發展比較

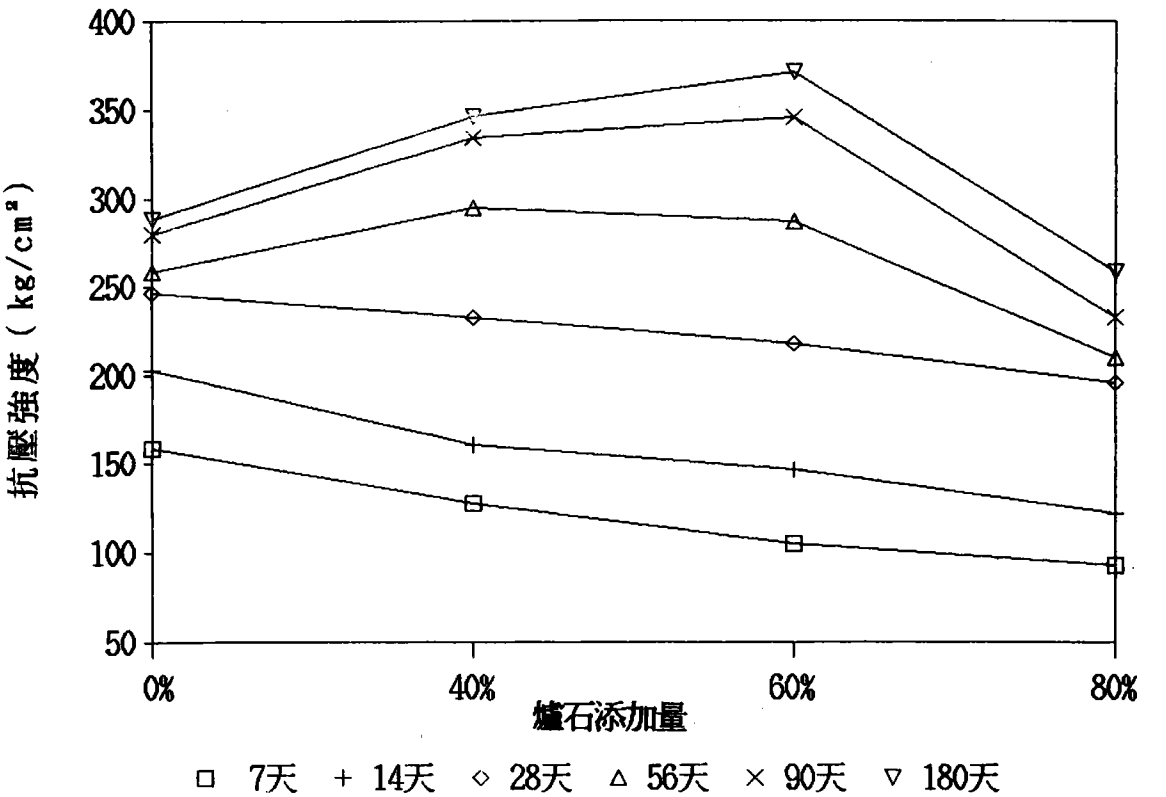


圖4-11 水灰比0.7含不同爐石比例之混凝土抗壓強度發展比較

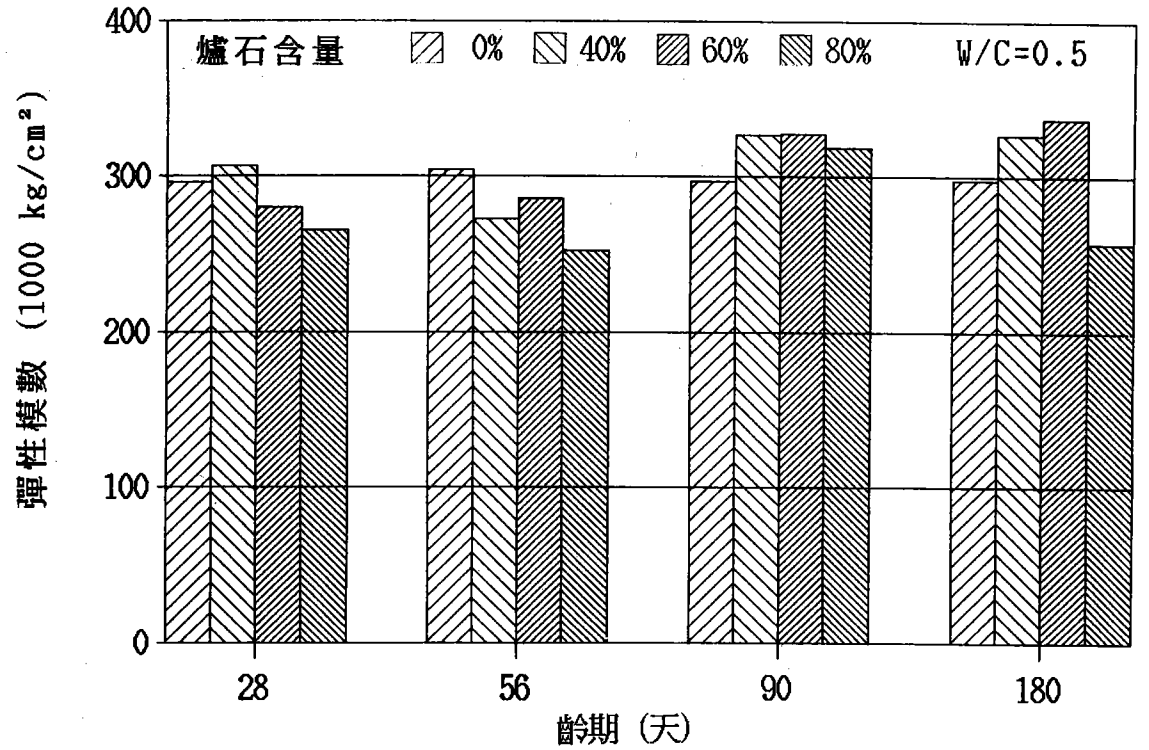


圖4-12　水灰比0.5含不同爐石比例之混凝土彈性係數與齡期之關係

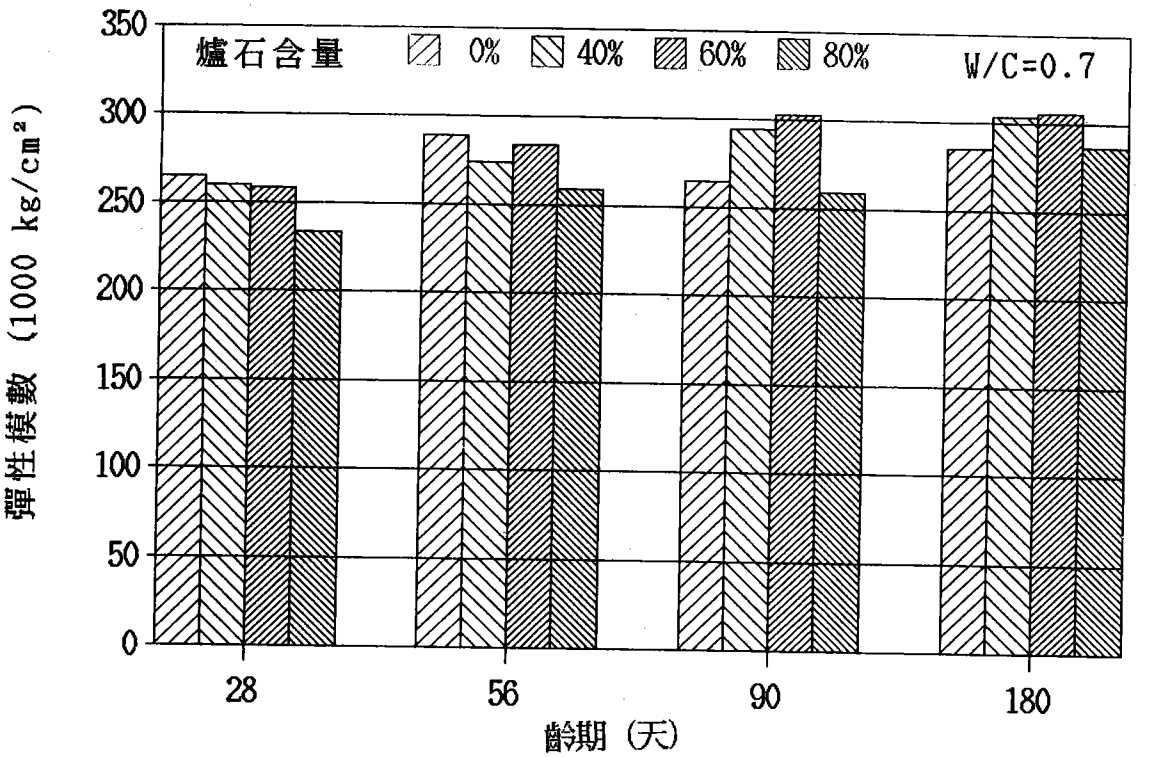


圖4-13　水灰比0.7含不同爐石比例之混凝土彈性係數與齡期之關係

三、凝結時間試驗

㈠試驗目的

本試驗之目的，在求爐石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。

㈡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

⑴試驗設備爲貫入壓力計，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 $\frac{1}{40}$ in.^{2} 共 6 個。

⑵容器採用夾板製木模，邊長及高至少爲 5 in.，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，充份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

⑴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3-16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。

⑵貫入壓力計在10 ± 2 秒內，漸漸加壓使貫入桿貫入 1 $\pm\frac{1}{16}$ in.，讀取貫入總力。

⑶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½ in.。

⑷試驗室之室溫爲25 ℃ ± 5 ℃。

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)以凝結時間爲橫座標，貫入壓力爲縱座標，作成二次迴歸曲線，如圖4-13、4-14，量取貫入壓力爲500PSi之凝結時間爲初凝時間，及貫入壓力爲4,000PSi之凝結時間爲終凝時間。

(4)相對初、終凝時間

以純水泥之相對凝結時間爲 1 。爐石水泥之凝結時間除以純水泥之凝結時間爲相對凝結時間。

$$T_n = \frac{t_n}{t_0}$$

$n = 0$ ，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

㈢試驗結果與檢討

1. 試驗結果

各類爐石水泥之凝結時間與貫入壓力結果如表4-6，初凝、終凝時間如表4-7，初凝、終凝相對時間如表4-8。

2. 試驗結果檢討

(1)爐石含量越多則初凝與終凝時間越拉長。

(2)水灰比0.7之凝結時間較水灰比0.5之凝結時間長，初凝時間延長數十分鐘至數小時，終凝時間延長數小時。

(3)爐石含量80%之初凝時間較純水泥情況增加40%，約延長 2 小時；終凝時間增加130%，約延長 7 ～12小時。

(4)爐石含量40%時與純水泥比較，初凝時間僅增加 2 ～ 4 %，終凝時間增加約10%，故以爐石取代水泥量在40%以下，對凝結時間之影響不大。

表4-6 爐石水泥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4-7 爐石水泥初凝、終凝時間

單位：小時

水灰比	凝結時間 初凝/終凝 爐石含量	0%	40%	60%	80%
0.5	初凝	4.56	4.65	6.19	6.33
	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4-8 爐石水泥初凝、終凝相對時間

水灰比	凝結時間 初凝/終凝 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

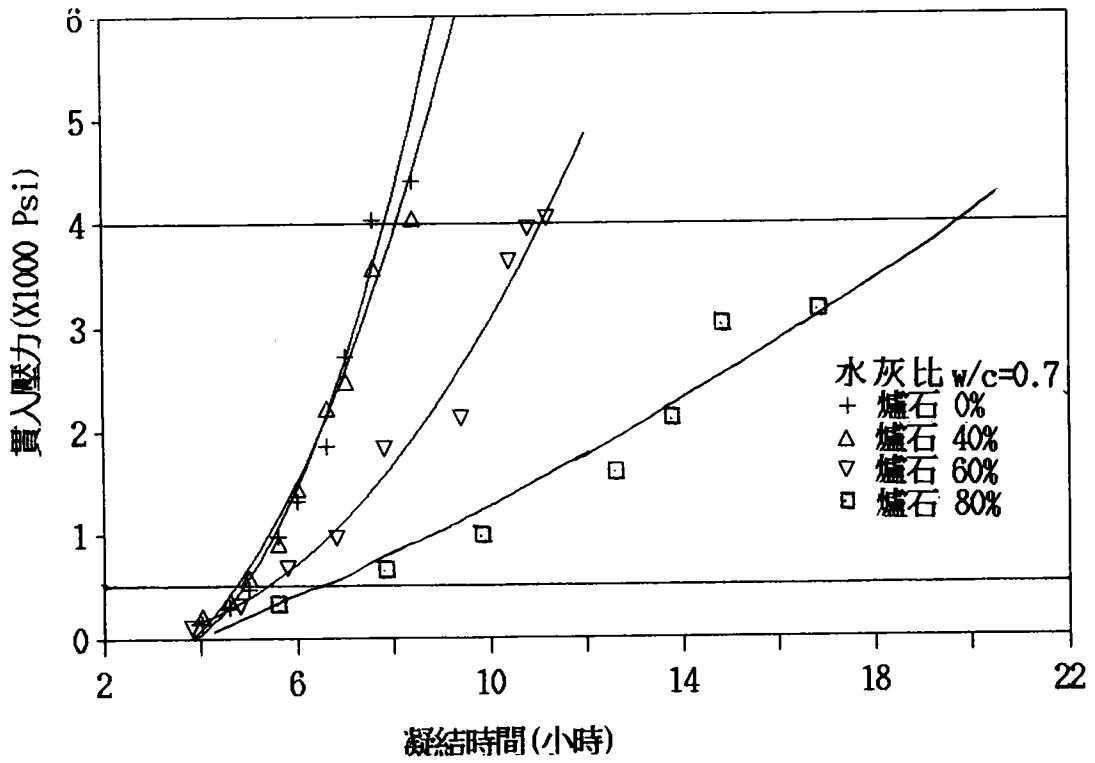


圖4-14　水灰比0.7含不同爐石比例之凝結時間曲線圖

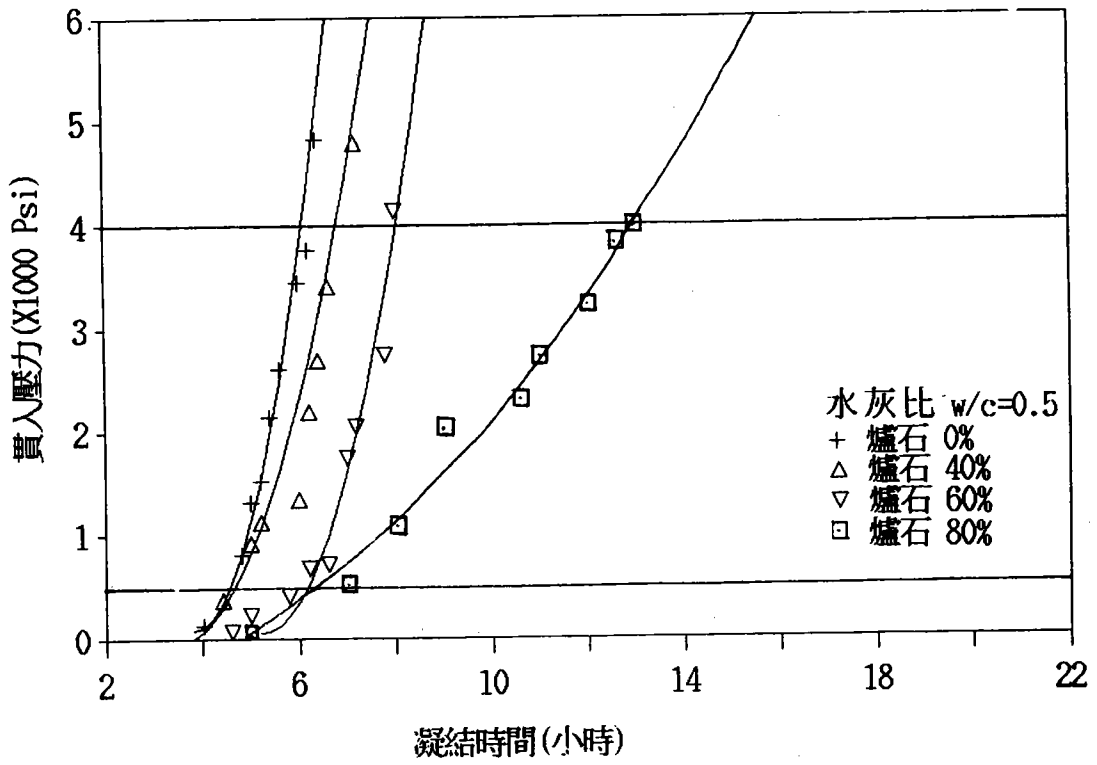


圖4-15　水灰比0.5含不同爐石比例之凝結時間曲線圖

四、短期加速試驗

㈠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，不外乎是結構體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？

㈡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爲 ϕ 10×20 cm之混凝土圓柱試體，於試體之中央即 5 cm處埋置有一支鋼筋（10mm ϕ）。試體於灌製靜置一日後，隨即拆模並將試體置於養生室（23±0.7℃）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）

⑴採用台中港區內之天然海水，對試體進行全程之噴掃潤濕。

⑵每一乾濕循環週期定爲 7 天。

⑶溫度50℃，相對濕度 0 %下，試體乾燥 4 天。

⑷溫度20℃，相對濕度100%下，試體潤濕 3 天。

2. 試驗步驟：

⑴將試體從養生室取出置於乾濕循環設備內。

⑵調整設備溫度至50℃，相對濕度爲 0 %，乾燥時間爲 4 天。

⑶於乾燥時間完畢後，將設備溫度調整至溫度爲20℃，相對濕度爲100%，潤濕時間爲 3 天。

⑷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。

⑸將試體再置入乾濕循環設備內，重覆步驟⑵～⑷之過程，直到量測之鋼筋腐蝕電位值＜-350mV時，即停止試驗。

⑹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）

㈢結果與討論：

本試驗所製作之混凝土試體，依其材質設計共選定二種水灰比及添加四種不同爐石含量配比，總計八種不同配比之試體。每一種配比製作三個試體，進行短期加速（乾濕循環）試驗。各項分析結果如下：

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。量測鋼筋腐蝕電位之目的即在印證混凝土內之鋼筋是否已發生腐蝕情形。

實際電位量測數據列於表4-9及表4-10。圖4-16至圖4-21分別爲水灰比0.5及0.7含不同爐石摻料比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係。

圖4-16至圖4-18爲三組相同材質之試體內鋼筋腐蝕電位值與循環週期之關係。其試體爲水灰比0.5含不同爐石比例之試體。圖4-16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-200mV±50mV，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4-22(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4-22(D)所示。不

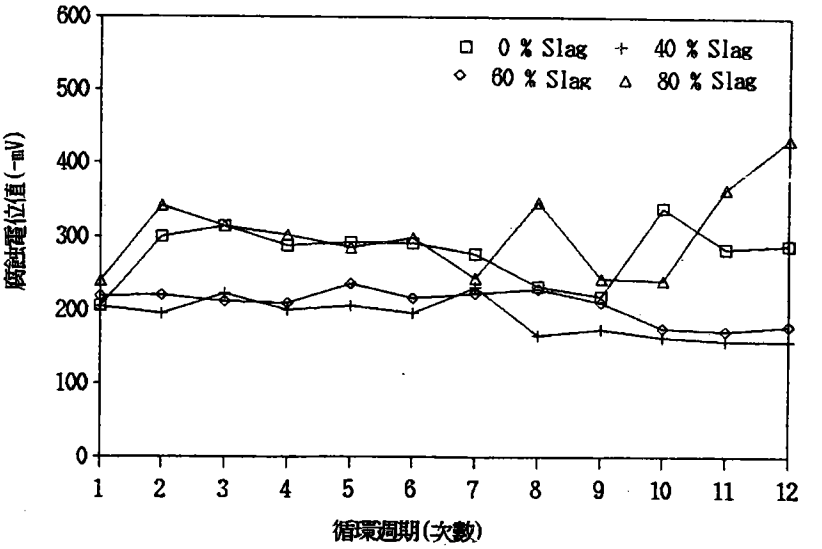


圖4-16　水灰比0.5含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係(第一組試體)

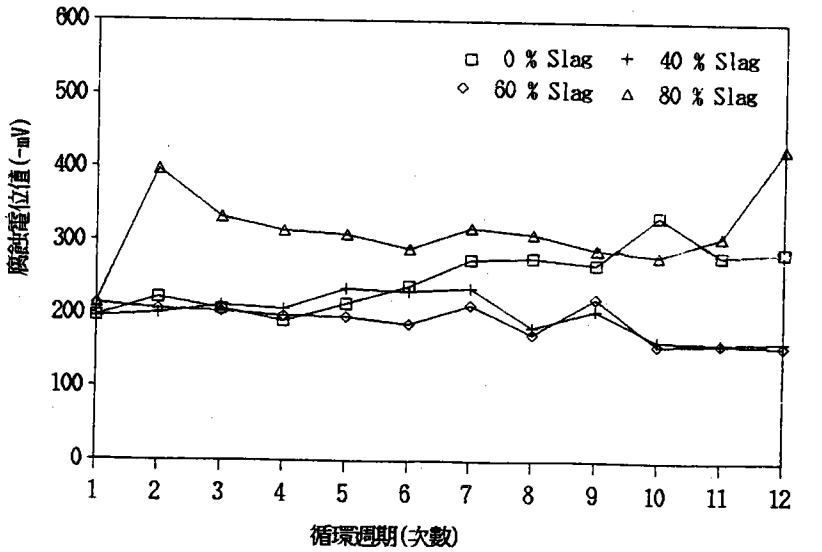


圖4-17　水灰比0.5含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係(第二組試體)

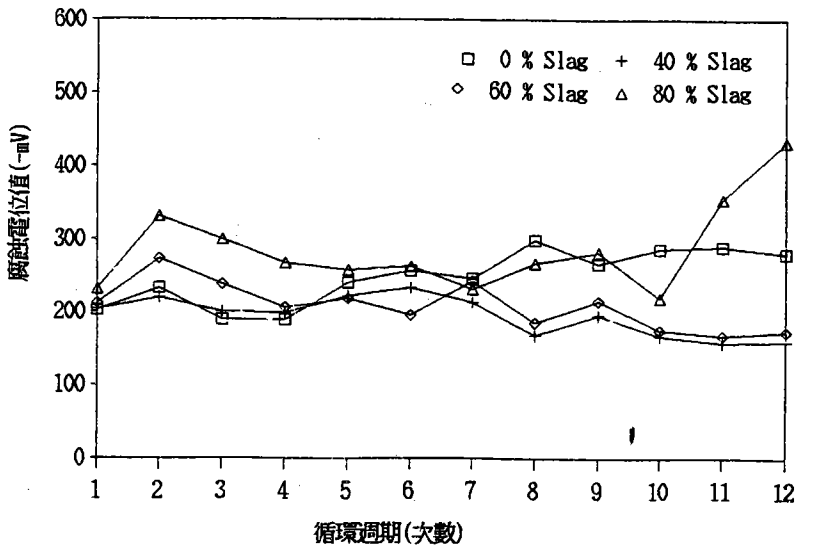


圖4-18　水灰比0.5含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係(第三組試體)

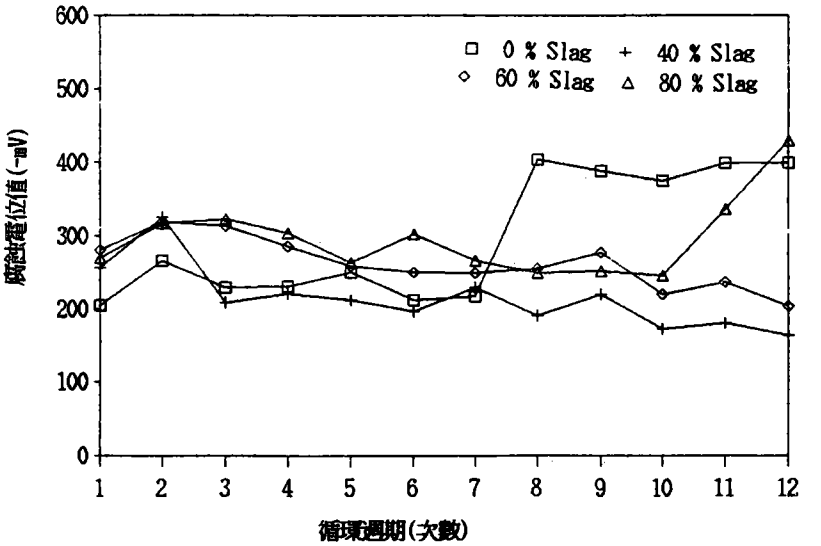


圖4-19 水灰比0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係(第一組試體)

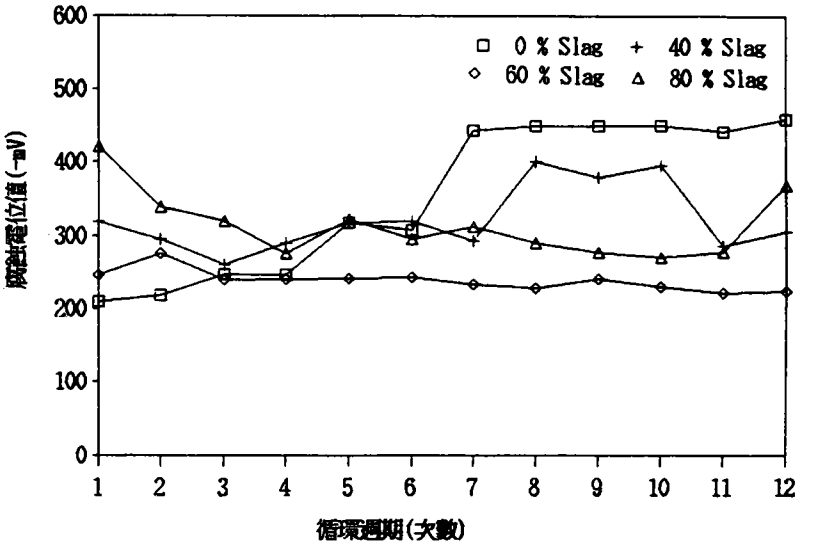


圖4-20 水灰比0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係(第二組試體)

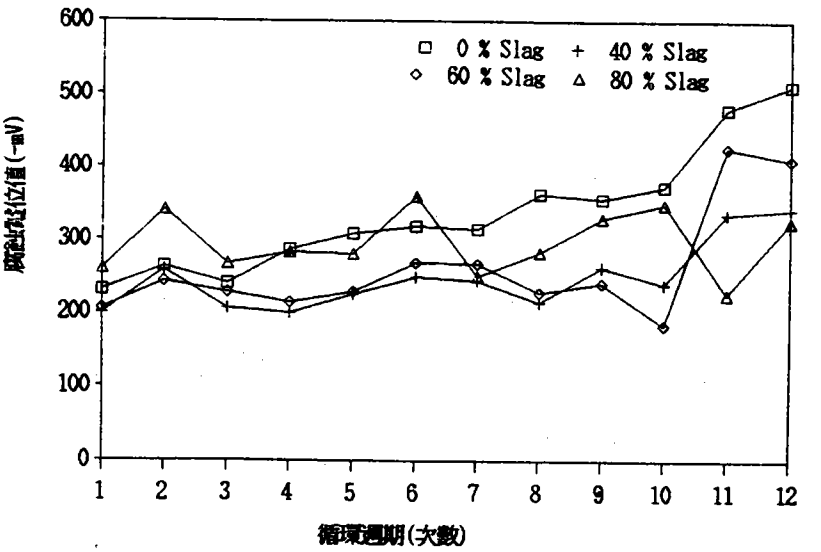


圖4-21 水灰比0.7含不同爐石比例之鋼筋腐蝕電位值與乾濕循環週期之關係(第三組試體)

含爐石之試體其鋼筋腐蝕電位值分佈有偏高的現象（亦即電位值比含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4-22(A)所示。

圖4-17、圖4-18爲同一試驗材質（W/C=0.5含不同爐石比例），編號爲第二組及第三組之試體之鋼筋腐蝕電位值與循環週期之關係圖。在圖4-17及圖4-18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-200mV±50mV附近，試體內之鋼筋顯然亦未發現腐蝕現象。不含爐石及80％爐石試體之鋼筋腐蝕電位值分佈情形與第一組試體所測得結果大略相同。

圖4-19至圖4-21顯示水灰比0.7含不同爐石比例之三組相同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（諸如强度低，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爲-400mV±50mV，顯示試體內之鋼筋已有發生腐蝕的現象，而含40％，60％及80％爐石之試體其鋼筋腐蝕電位值仍然未達小於-350mV之腐蝕臨界值，即鋼筋尙未發生腐蝕。在第12次循環週期時，不含爐石之試體其鋼筋腐蝕電位值已達-450mV±50mV，含80％爐石之試體之鋼筋腐蝕電位值亦達350mV±50mV，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4-23(A)所示。含80％爐石之試體也有發生腐蝕現象，如圖4-23(D)所示。而含40％及60％爐石之試體，其鋼筋表面尙完好，沒有銹蝕發生，如圖4-23(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)本來就很容易發生腐蝕，但從本試驗結果發現，水灰比0.7添加了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

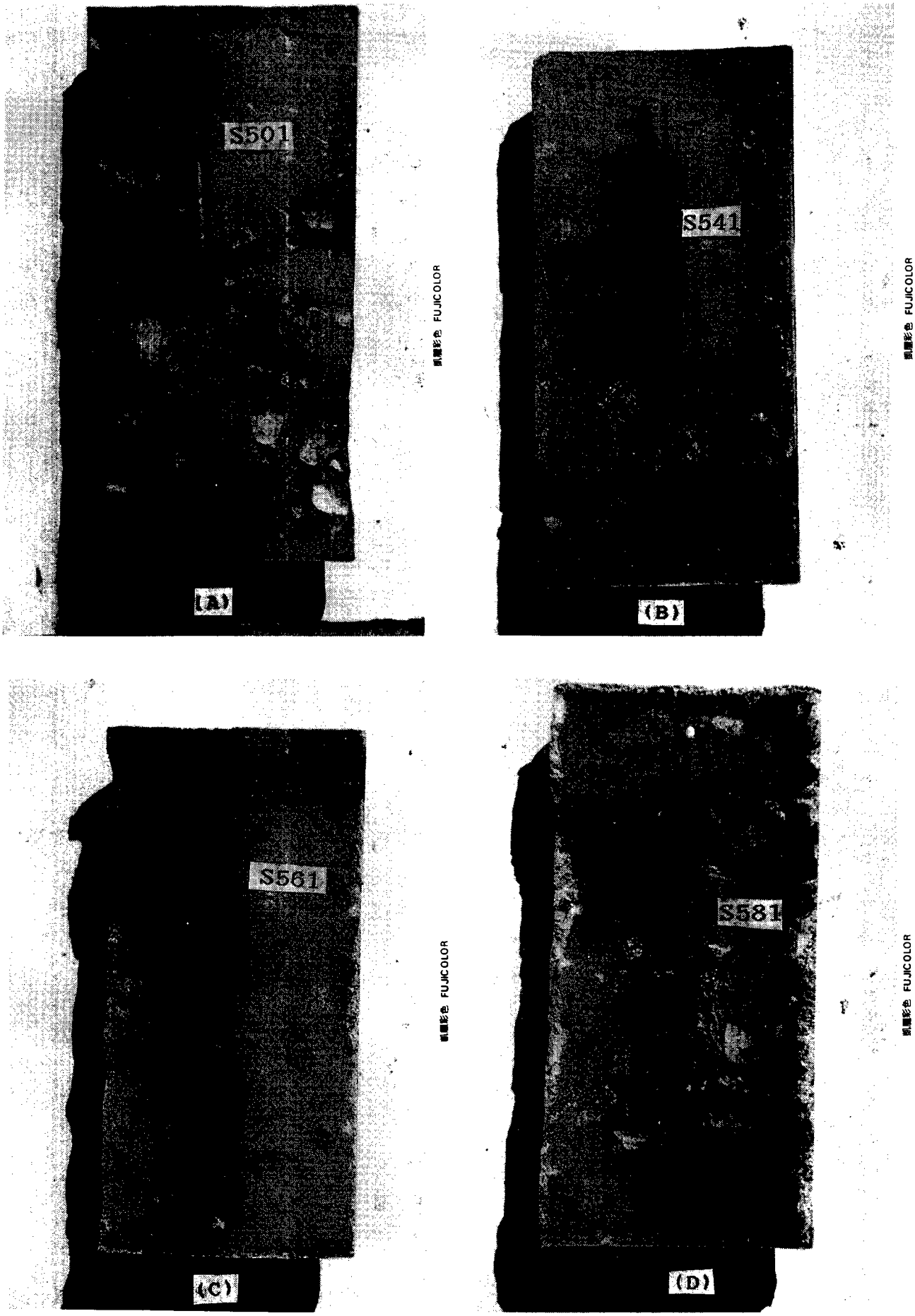
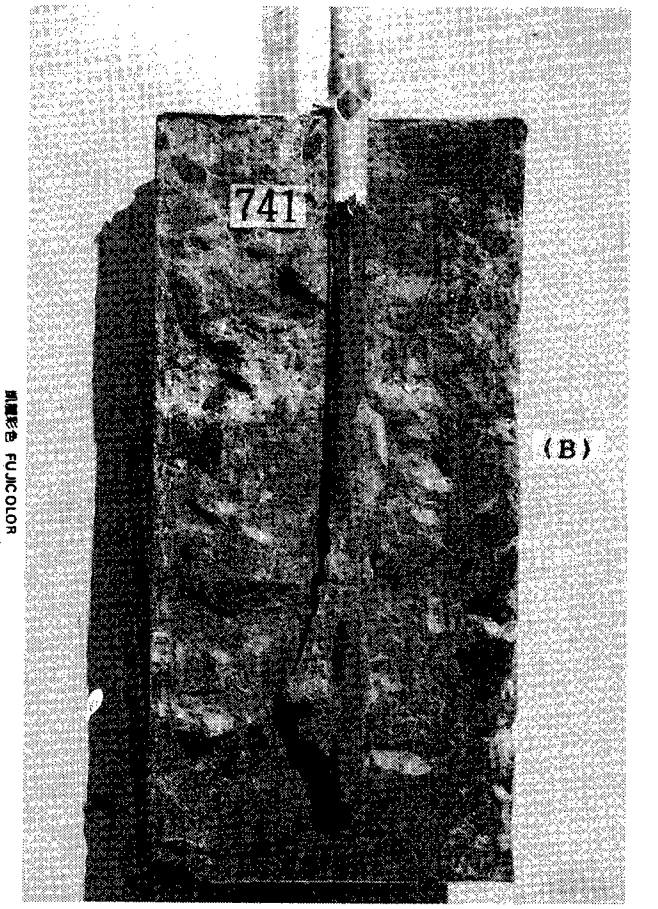


圖4-22　水灰比0.5試體經劈裂後檢視鋼筋腐蝕狀況之照片



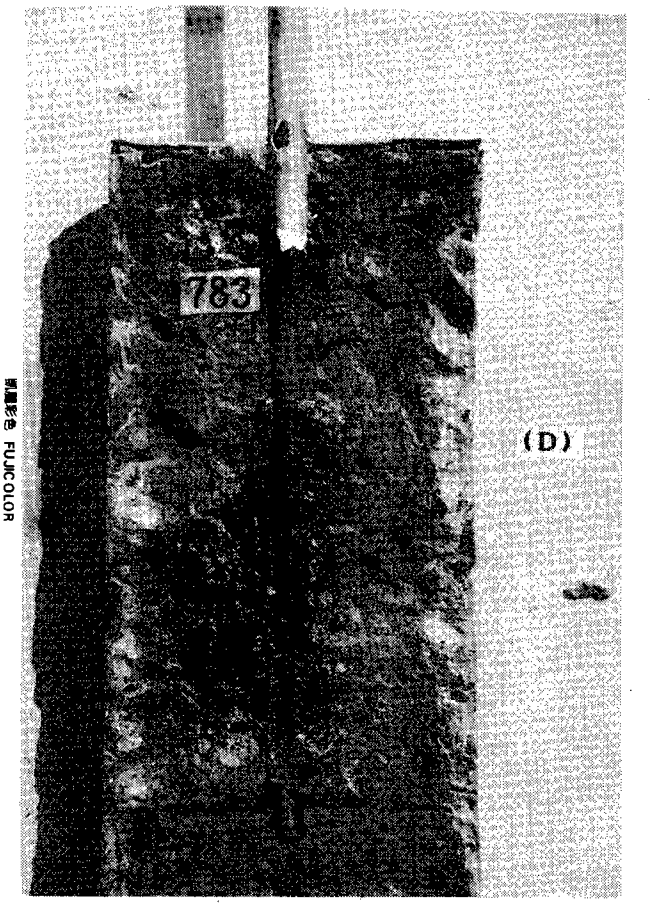


圖4-23　水灰比0.7試體經劈裂後檢視鋼筋腐蝕狀況之照片

果較好。

2. 化學成份分析：

將經過12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1 cm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 mμ之粒徑），此即爲化學分析之試樣。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爲Cl^-及$SO_3^=$。Cl^-是造成鋼筋發生腐蝕主要之因素，$SO_3^=$會使混凝土內形成結晶物質（諸如鈣矾石等）造成體積膨脹致使混凝土發生龜裂。

化學成份分析結果分別列於表4-11及表4-12，而圖4-24至圖4-27則爲混凝土內化學成份含量與深度關係圖。由圖4-24至圖4-25可見，水灰比愈低，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。

而由圖4-26至圖4-27中，發現水灰比0.5爐石含量爲40%及60%之試體，其$SO_3^=$含量均甚低，約爲水泥重0.20%以內，而不含爐石之試體則約爲0.6～0.8%之間。因此可見添加爐石之試體內，$SO_3^=$含量有明顯降低。此現象已印證了添加爐石粉之混凝土具有抗硫酸塩類之優點。

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試驗。分析結果如表4-13所示。

由表4-13發現，經過12次循環週期之加速惡化後，各種配比試體

表4-11 水灰比0.5試體內化學成份含量與深度關係

爐石含量(%)	試體深度(從底面算起)(mm)	Cl^-含量(%)	$SO^{3=}$含量(%)
0	0 —— 10	2.49	0.780
	10 —— 20	2.38	0.576
	20 —— 30	2.33	0.656
	30 —— 40	3.62	0.649
	40 —— 50	2.64	0.660
40	0 —— 10	2.01	0.036
	10 —— 20	1.94	0.057
	20 —— 30	2.96	0.082
	30 —— 40	2.62	0.196
	40 —— 50	3.12	0.123
60	0 —— 10	3.09	0.072
	10 —— 20	2.52	0.052
	20 —— 30	3.36	0.165
	30 —— 40	2.44	0.103
	40 —— 50	2.74	0.067
80	0 —— 10	2.83	0.514
	10 —— 20	2.87	0.257
	20 —— 30	2.83	0.195
	30 —— 40	2.86	0.205
	40 —— 50	3.26	0.216

表4-12 水灰比0.7試體內化學成份含量與深度關係

爐石含量(%)	試體深度(從底面算起)(mm)	Cl^-含量(%)	$SO_3^{=}$含量(%)
0	0 —— 10	2.43	0.367
	10 —— 20	2.42	0.524
	20 —— 30	2.59	0.431
	30 —— 40	2.53	0.329
	40 —— 50	2.86	0.483
40	0 —— 10	2.87	0.338
	10 —— 20	3.65	0.288
	20 —— 30	2.61	0.082
	30 —— 40	2.54	0.339
	40 —— 50	2.32	0.154
60	0 —— 10	2.69	0.403
	10 —— 20	2.55	0.414
	20 —— 30	3.28	0.445
	30 —— 40	2.87	0.310
	40 —— 50	2.97	0.352
80	0 —— 10	3.34	0.176
	10 —— 20	3.27	0.683
	20 —— 30	3.10	0.393
	30 —— 40	2.62	0.414
	40 —— 50	2.68	0.393

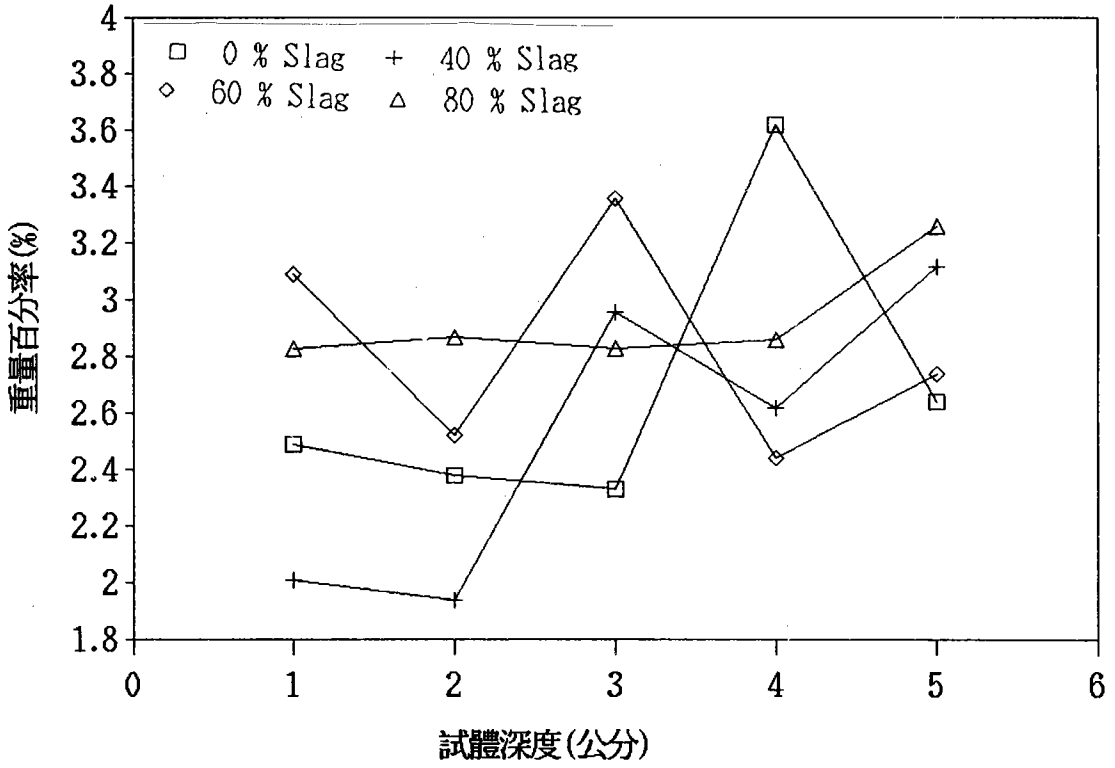


圖4-24　水灰比0.5試體Cl^-含量與深度關係

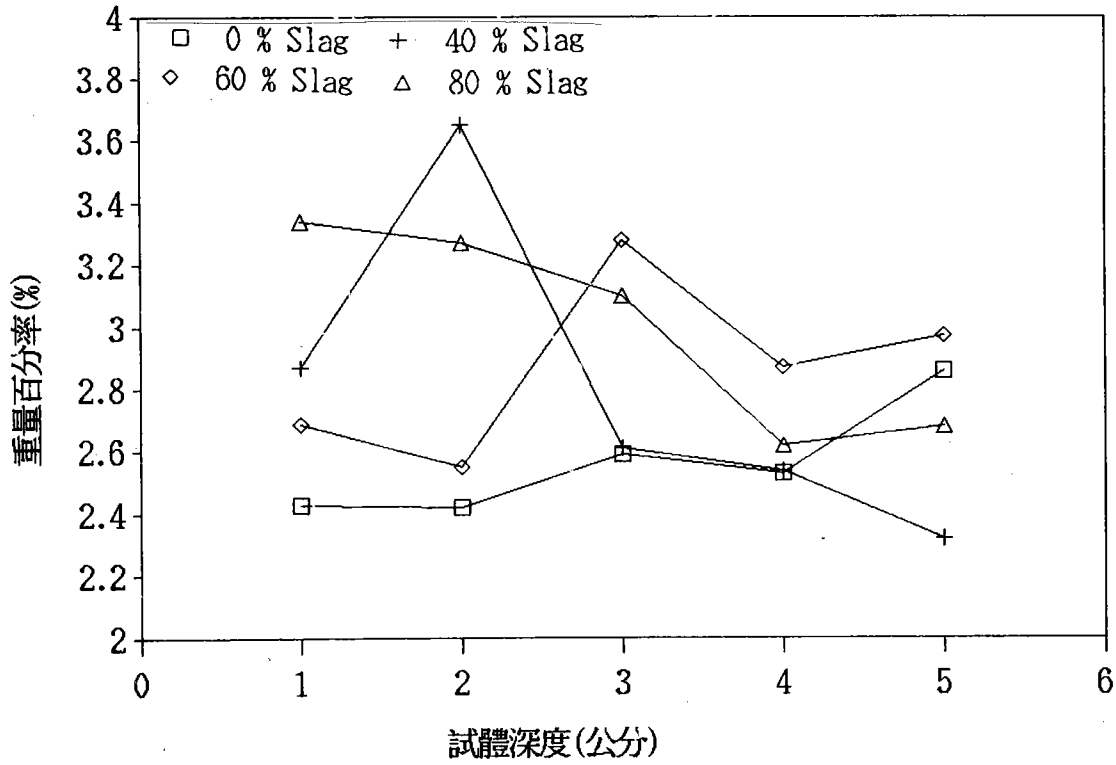


圖4-25　水灰比0.7試體Cl^-含量與深度關係

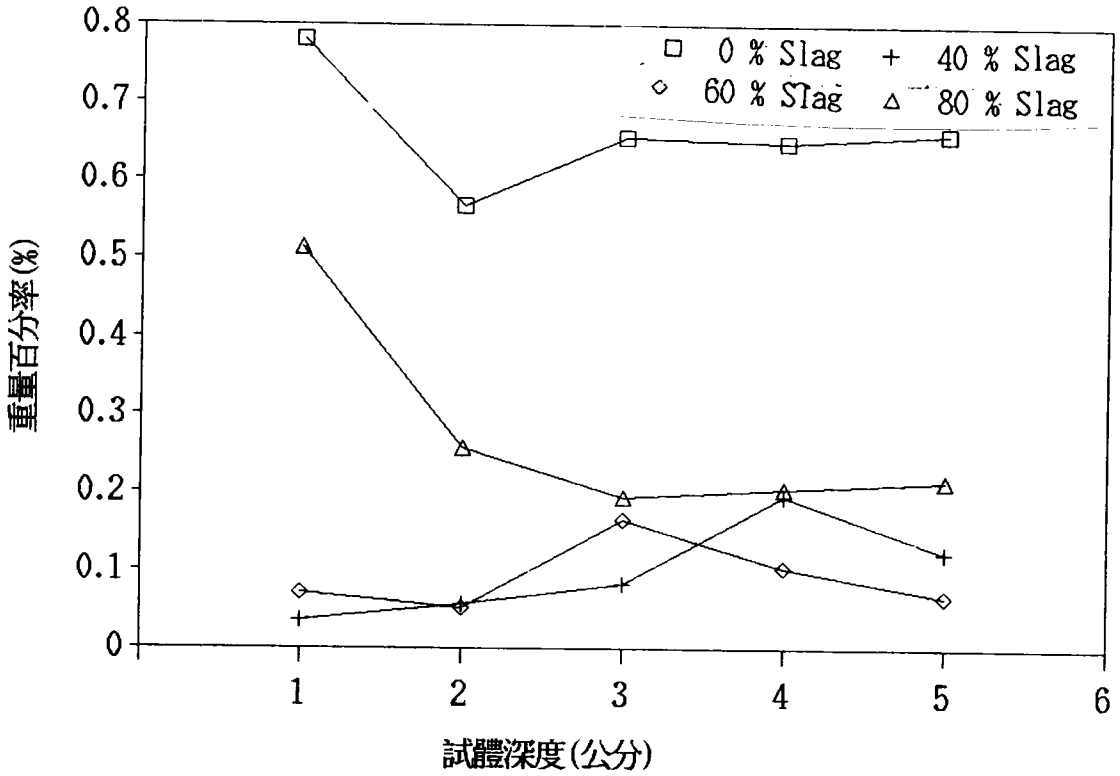


圖4-26　水灰比0.5試體$SO_3^{=}$含量與深度關係

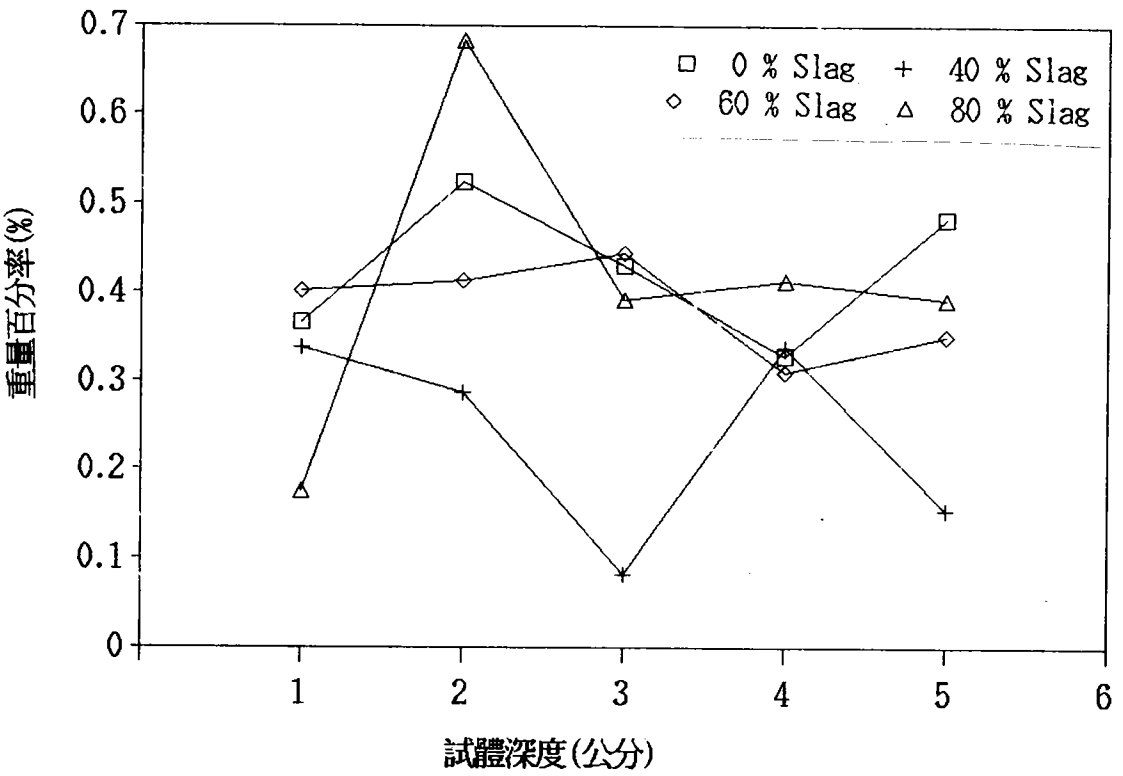


圖4-27　水灰比0.7試體$SO_3^{=}$含量與深度關係

之抗壓强均明顯下降。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，其抗壓强度約降爲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，其抗壓强度約降爲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。

表4-13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4-13 爐石混凝土抗壓強度、彈性係數與柏松比

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/cm²	彈性模數 kg/cm²	柏松比	抗壓強度 kg/cm²	彈性模數 kg/cm²	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

第五章　結論與建議

根據文獻回顧，國外學者對於高爐水泥已作相當多之研究。且亦肯定其具有透水性低，水密性高，抗硫酸塩，後期强度高及緩凝等優越性能。因此美、日、英、德……等先進國家都普遍地在海洋工程上使用。

國內中鋼公司已委託學術界作過不少研究，積極在推展，不但對工程之耐久性有所幫助，且具節約能源、資源再利用及防止環境污染等功效。本研究作填加不同爐石水泥量於混凝土中之基本材料性質，短期加速及長期實際曝露於海水中之各項試驗，瞭解其特性。

根據本研究，所獲得之初步結論可歸納如下所述：

1. 水灰比0.5情況下，填加40%及80%之爐石量之混凝土，在180天之透水係數均爲2.29×10^{-11} m/sec，而60%則爲2.92×10^{-11} m/sec，因此可見高爐石水泥混凝土具有良好之水密度性，而在高水灰比(0.7)情況下，則填加40及80%，在180天時分別爲5.58×10^{-11} m/sec及6.91×10^{-11} m/sec，而60%則爲2.78×10^{-11} m/sec，可見水密性效果較差。
2. 爐石水泥混凝土早期强度(齡期7天及14天)均較普通混凝土之强度爲低，然而晚期强度(齡期56天後)填加爐石量爲40%及60%情況下，則較高，但填加80%則較低。
3. 水灰比0.5，爐石填加量爲60%在齡期180天，可得較高之混凝土强度爲426kg/cm²。
4. 彈性模數與抗壓强度略成正比關係，即抗壓强度愈高，則彈性模數值相對地提高，例如在水灰比0.5爐石含量60%，齡期180天情況下，之彈性模數爲3.37×10^{5} kg/cm²。
5. 在相同配比及齡期之情況下，每三個混凝土試體之平均柏松比爲0.19～0.22，而單一試體則爲0.17～0.25，與抗壓强度關係性不大。
6. 爐石含量80%之初凝時間較不含爐石情況約增加40%，即約延長

2 小時；終凝時間增加130%，即約延長 7 ～12小時。

7. 爐石含量40%與不含爐石情況比較，初凝時間僅增加 2 ～ 4 %，終凝時間約增加10%，故以爐石取代水泥量在40%以下，對凝結時間之影響性不大。

8. 爐石含量越多，則初凝與終凝時間就越拉長。

9. 水灰比0.7之凝結時間較水灰比0.5之凝結時間爲長，初凝時間可延長數十分至數小時，而終凝時間則延長數小時。

10 水灰比0.5填加爐石量40，60及80%和不含爐石等情況下，經過12次之乾濕循環作用下其鋼筋腐蝕電位值之範圍分別爲158～236，158～238，215～433及197～335(-mV)，可見含40%及60%之爐石量之防蝕效果較佳。

11 水灰比0.7，填加爐石量40，60及80%和不含爐石之情況下經過12次乾濕反覆循環作用下，其鋼筋之腐蝕電位範圍分別爲197～401，183～426，245～430及205～513(-mV)，顯見含40及60%之爐石量之防蝕效果亦較佳，同時亦發現在此高水灰比情況即使加80%爐石量，其腐蝕電位亦較不含爐石者爲低。

12 經過12次之乾濕循環作用發現水灰比0.5，含爐石量爲40、60及80%和不含爐石等情況下之試體中氯化物含量分別爲水泥重量之1.94～3.12，2.52～3.36，2.83～3.26及2.49～3.62%，顯見40%及60%之氯化物含量較不含爐石量爲低。而在水灰比0.7情況下則氯化物含量分別爲2.32－3.65，2.55－3.28，2.62－3.34及2.42－2.86%，而且發現含爐石試體內層之氯化物含量有較表層爲低之趨勢。

13 經過12次乾濕循環作用後發現水灰比0.5，含爐石量爲40、60及80%和不含爐石等之試體中含硫酸塩量分別爲水泥重之0.036－0.196，0.052－0.165，0.195－0.514及0.66－0.78%而水灰比0.7情況下則分別爲0.082－0.339，0.310－0.445,0.176－0.414及0.329－0.524%，顯見填加爐石之試體其硫酸塩含量有顯著降

低，足證具有抗硫酸塩侵蝕之優點。

14 經過12個乾濕循環作用後發現水灰比0.5，含爐石量及不含爐石之試體抗壓强度分別降爲28天齡期之60～62%及58%，而水灰比0.7情況下則爲66～75%及69%，顯見混凝土强度明顯地下降。

15 經過12個乾濕循環作用後，發現水灰比0.5，含爐石量及不含爐石之試體的彈性模數分別降爲28天齡期的66～69%及69%，而水灰比　0.7情況則爲66～72%及72%，可見混凝土之彈性模數有明顯地下降。然而柏松比之增減，範圍在水灰比0.5情況下不含爐石爲＋10%，含爐石爲－5%～＋10%，而水灰比0.7情況下則分別爲10%及－10%～＋21%，變化之範圍並不大。

16 長期曝露試驗製作240個試體，於民國79年5月置於本所之海水循環水槽之潮汐帶範圍，每年觀測一次預計觀測五年，將進行抗壓、透水、彈性模數、腐蝕電位、氯化物滲透及硫酸塩侵入之各項試驗，其成果將逐年報告。