

87—研（九）

港灣環境下高性能結構體之 性質研究（一）

全程計畫：自 86 年 7 月至 89 年 6 月

本年度計畫：自 86 年 7 月至 87 年 6 月

執行單位：港工材料組

計畫主持人：林維明

共同主持人：饒 正

協同主持人：張道光

研究人員：羅建明 陳正義 何火木

李昭明 王培源 林隆貞

（港灣技術研究所）

呂振龍（英銓實業有限公司）

江天裕（新瑞實業有限公司）

摘 要

由於海洋環境下鋼筋混凝土容易發生腐蝕破壞。高性能混凝土兼具安全、耐久、工作、經濟及環保等優越材料特性，在國內已有許多海域平台、跨海大橋及碼頭結構物應用實例。本研究針對本土化中強度高性能混凝土之應用研究。執行工作包括選用較佳之配比，製作試體將試體置於港研所之曝露試驗場，每隔兩小時用海水噴曬。然後，每半年取出試體進行各項物理化學及力學性質測試，預定曝露時間三年。研究成果預期可評估與推廣高性能混凝土在港灣工程上之應用。

在配比設計方面，使用強度 4000psi、5000psi 及 6000psi 以飛灰及爐石取代部份水泥，而在 4000psi 方面又選用一般混凝土及飛灰取代部份細砂兩種配比，這些配比都是受海水乾濕循環反應的，並有一組受自來水乾濕循環作用以做參考對比用。在養生方面，採用 7 天及 28 天養生室養生兩種，試體包括製作測試抗彎強度的樑、耐磨耗阻抗之板及測定抗壓強度、超音波波速、電阻係數、氯離子擴散及吸水性之圓柱體以及大型試體。目前試體已製作完成，但僅有 28 天之數據。

根據 28 天之測試數據顯示高性能混凝土具有坍度及坍流度高之工作性，抗壓及抗彎强度高，電阻係數高表示其耐腐蝕性能強，使用價廉之飛灰及爐石替代部份水泥，因此具經濟性及環保之生態性，其耐磨性亦佳，長期之耐久性有待繼續測試。

高性能混凝土自料源、製程及成品整個過程中都經過仔細的品質管制，目的在滿足依設計者之設計理想和使用工程品質所需求。基本上這些管制作業都必須參考 ISO 9002 及 14001 規定，透過「計畫—執行—檢核—修正」品質保證技術過程，以確保品質的均勻一致性和穩定性，滿足營建工程品質優良之需求。因此是一種適用於港灣環境下之優良營建新材料，值得深入研發與推廣應用。

ABSTRACT

Reinforced concrete structures are easily corroded and fractured in the marine environment. High performance concrete (HPC) has excellent characteristics of safety, durability, workability, economy and environmental conservation etc. There are many practical example of HPC application in offshore platform, cross-sea bridge and wharf around the world. The scope of this research point to median strength of HPC with local materials. The executing items include selecting the better mix proportion; manufacturing test samples. The seawater spray over the test samples twenty minutes at an interval of two hours. And these samples are taken for executing durable properties every half years. The marine exposure period is three years. The test results of this research are expected to evaluate and promote the application of HPC for harbor engineering construction.

There are six kinds of mix proportion by using fly ash and slag in substitution for cement partly of design strength with 4,000psi , 5,000psi and 6,000psi and two mix proportion of design strength 4,000psi with normal concrete and fly ash in substitution for sand partly. These mix proportion are under dry-wet cycle of seawater , and another one is 4,000psi HPC with dry-wet cycle of pure water. For curing , there are two types of 7days and 28 days with control temperature and humidity in the curing room. The test samples include beams for flexural strength test ; plates for abrasion resistance ; and cylinders for compression test , ultrasonic pulse velocity , resistivity , diffusion rate of Cl^- , and water absorption etc. and massive concrete samples for durable test. These test samples are manufactured already and only 28 days testing data now. It is shown the HPC has excellent characteristics of high slump loss , slump flow and flowing time , the workability is better , the compression and flexural strength are higher , the concrete resistivity are higher. They are manufactured with cheap price of fly ash and slag. Therefore the products is economic and environmental protection. Also their abrasion

resistance is excellent and lower water absorption . Their durable proportion will be check continually.

High Performance Concrete is under the process of 「 plan-do-check-advise 」 cycle of quality assurance. It is a better new construction materials suitable for harbor engineering construction usage.

港灣環境下高性能結構體之 性質研究（一）

目 錄

	頁數
摘要（中文）-----	I
摘要（英文）-----	II
目錄-----	IV
表目錄-----	VI
圖目錄-----	VIII
照片目錄-----	X II
壹、前言-----	1
一、研究動機-----	1
二、研究目的-----	1
三、實施方法-----	1
四、預期成果-----	2
貳、文獻回顧-----	3
一、研究背景-----	3
二、高性能混凝土之定義及特性-----	4
三、卜作嵐材料對混凝土性質之影響-----	6
四、高性能混凝土之配比設計-----	14
五、結構混凝土品質追蹤及資料之回饋-----	19

六、混凝土電阻性質之影響參數 -----	23
七、超音波測試之原理 -----	25
八、氯離子在混凝土中之擴散模式 -----	25
九、混凝土之吸水特性 -----	26
參、試驗計畫與測試結果分析 -----	27
一、試驗計畫規劃 -----	27
二、試驗材料 -----	29
三、試驗設備與方法 -----	29
四、HPC 之拌製 -----	34
五、測試結果分析 -----	34
肆、高性能混凝土應用之標準規範 -----	41
一、建立標準規範之迫切性 -----	41
二、使用卜作嵐材料之動機 -----	42
三、混凝土之使用材料在品質檢驗上應注意要點 ---	43
四、預拌混凝土廠在製作混凝土應注意事項 -----	48
伍、結論與建議 -----	53
一、結論 -----	53
二、建議 -----	54
陸、參考文獻 -----	55
柒、附錄 高性能混凝土特別條款及說明（草案） -----	121

表 目 錄

表 1	添加飛灰及強塑劑水泥漿體之凝結時間比較（水灰比=0.47）-----	63
表 2	平均中性化深度 -----	64
表 3	有害因子對海洋混凝土可能造成之影響性 -----	66
表 4	高性能混凝土與其他混凝土之比較 -----	65
表 5	配比設計工程環境及材料基本資料 -----	66
表 6	高性能混凝土配比指標值（適用於臺灣潮濕及鹽害之環境） -----	66
表 7	高性能混凝土配比設計範例 -----	66
表 8	國內外學者對混凝土電阻性質相關研究之彙整 -----	67
表 9	混凝土電阻與其中鋼筋腐蝕活性之關係 -----	68
表 10	超音波速與混凝土品質優劣之關係 -----	68
表 11	氯離子之擴散係數與混凝土之滲透性之關係 -----	68
表 12	混凝土吸水性與混凝土品質之關係 -----	68
表 13	混凝土配比設計數據 -----	69
表 14	卜特蘭 I 型水泥之物理及化學性質 -----	70
表 15	粗細骨材基本性質 -----	71
表 16	粗骨材級配 -----	71
表 17	細骨材級配 -----	71
表 18	飛灰、爐石之物化性質 -----	72
表 19	強塑劑基本性質 -----	72
表 20	新拌混凝土工作性測試結果 -----	73
表 21	高性能混凝土抗壓及抗彎強度測試結果 -----	73
表 22	高性能混凝土耐磨、超音波速及電阻測試結果 -----	74

表 23	各國國家標準規範要求飛灰之化學和物理性質-----	75
表 24	配比設計所需之骨材性質-----	76
表 25	混凝土拌和水品質檢驗標準-----	76

圖 目 錄

圖 1	飛灰在混凝土工程應用策略及其特性	77
圖 2	新拌高性能混凝土坍度變化範例	77
圖 3	新拌高性能混凝土坍流度變化範例	78
圖 4	一般及飛灰混凝土之泌水量	78
圖 5	添加 0.5%強塑劑後對飛灰水泥漿體泌水性之影響	79
圖 6	飛灰燒失量對新拌混凝土泌水量之影響	79
圖 7	含飛灰等卜作嵐材料混凝土摻加輸氣劑對其空氣含量之影響	80
圖 8	飛灰燒失量對混凝土含氣量之影響	80
圖 9	飛灰/一般混凝土中溫度變化	81
圖 10	混凝土斷面大小對飛灰混凝土溫度上升之影響性	81
圖 11	混凝土消波塊之中心位置處的溫度發展情形	82
圖 12	摻加卜作嵐材料的巨積混凝土中心處之溫度歷時變化及垂向剖面上之最大溫度變化特性	82
圖 13	飛灰混凝土與一般混凝土之凝結時間比較	83
圖 14	不同飛灰含量對混凝土強度發展之影響性	83
圖 15	飛灰細度對抗壓強度之影響性	84
圖 16	養護溫度對飛灰混凝土強度之影響性	84
圖 17	高壓蒸氣養護對飛灰水泥砂漿體強度之影響性	85
圖 18	飛灰混凝土之透水性與其齡期之關係	85
圖 19	飛灰混凝土氯離子之擴散係數與齡期之關係	86
圖 20	取代 30%水泥之飛灰混凝土浸泡於 Na_2SO_4 溶液下各種試體之體積膨脹速率比較	86
圖 21	飛灰混凝土之鹼性骨材反應測試結果	87

圖 22	使用飛灰混凝土耐鹼性骨材反應膨脹結果	87
圖 23	飛灰混凝土之應力應變關係	88
圖 24	飛灰混凝土之彈性模數	88
圖 25	飛灰混凝土之潛變	89
圖 26	混凝土經 91 天濕氣養生後之潛變	89
圖 27	卜作嵐混凝土之乾縮與自生收縮	90
圖 28	高鈣飛灰混凝土乾縮量	90
圖 29	7 天水中養生後之乾縮量	91
圖 30	混凝土中性化深度與水灰比之關係	91
圖 31	各種環境下混凝土中性化與抗壓強度之影響	92
圖 32	各種水泥用量及養生時間對混凝土中性化之影響	92
圖 33	混凝土之耐磨耗測試結果 ⁽²⁸⁾	93
圖 34	混凝土中鋼筋之總量腐蝕量 (W/C=0.43 曝露在 3%NaCl 溶液下)	93
圖 35	水泥砂漿棒浸泡於 H ₂ SO ₄ 溶液中下之重量損失變化圖	94
圖 36	最大骨材粒徑與乾搗骨材體積比之關係	95
圖 37	在相同之坍度下，粗細骨材比與膠結料之關係	95
圖 38	最大骨材粒徑對混凝土強度效率的影響	96
圖 39	ACI 混凝土配比設計流程圖	96
圖 40	不同最大骨材粒徑坍度及輸氣量條件下，建議之混凝土拌和所需 用水量	97
圖 41	無試拌及混凝土配比資料可尋時之設計強度與容許最大 W/C 及 W/B (漿量體積固定) 之關係	97
圖 42	混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕有關文獻比較	98
圖 43	混凝土水灰比與電阻性質之關係	98

圖 44	混凝土與水泥砂漿之電阻性質比較圖	99
圖 45	混凝土齡期與電阻性質之關係	99
圖 46	相對濕度與混凝土電阻性質之關係	100
圖 47	混凝土之溫度與電阻性質關係 ^(47,56)	100
圖 48	混凝土的摻料效應對電阻性質及鋼筋電位的關係	101
圖 49	港灣環境下高性能結構體之性質研究計畫流程圖	102
圖 50	美國混凝土學會 (ACI) 配比設計流程圖	103
圖 51	高性能混凝土海洋曝露之平面佈置圖	104
圖 52	旋轉板式磨損試驗機	105
圖 53	四極式電阻量測儀示意圖	106
圖 54	混凝土超音波量測示意圖	107
圖 55	氯離子擴散試驗裝置示意圖	108
圖 56	HPC 之拌和程序	108
圖 57	水泥、飛灰及爐石之粒徑過篩概率分析圖	109
圖 58	水泥、飛灰、爐石之粒徑密度分佈圖	109
圖 59	飛灰細骨材混和量與單位重之關係	110
圖 60	粗、細骨材混和量與單位重之關係	110
圖 61	高爐石取代水泥用量之最佳比例	110
圖 62	化學摻料吸附於水泥表面的模式	111
圖 63	化學摻料之分散作用	111
圖 64	各種配比混凝土抗壓強度發展	112
圖 65	各種配比混凝土抗彎強度發展	112
圖 66	各種配混凝土之磨損深度比較	113
圖 67	各種配比混凝土超音波速比較	113

圖 68	各種配比混凝土電阻之比較 -----	114
圖 69	混凝土材料品質檢驗流程-----	115
圖 70	高性能混凝土施工檢驗作業程序-----	116

照 片 目 錄

照片 1	拌製樑、板及圓柱試體	117
照片 2	拌製大型試體	117
照片 3	HPC 坍度量測	118
照片 4	HPC 坍流度量測	118
照片 5	一般混凝土坍度量測	119
照片 6	試體置於海洋曝露試驗場	119
照片 7	曝露試驗試體上編號	120
照片 8	海洋曝露試驗場	120

壹、前言

一、研究動機

高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC）之發展為應用基礎水泥化學所研製之材料，製作時需經過品質保證技術，確保品質之一致性與穩定性，滿足營建工程品質之需求，以達到高流動性；高強度及高耐久性之訴求，現已為世界各國混凝土工程界重要的研發與應用課題。為加速國內 HPC 之研發與應用，在行政院國科會及中華民國結構工程學會等單位之督導下，凝聚產、官、學、研之整合力量，已自民國 81 開始展開研發與應用之工作。工程實例如：遠東企業 42 層大樓；高雄東帝士與建台 85 層大樓及南二高一座公路橋樑等，都是利用 HPC 施工成功的。另外，中油防爆牆結構，海洋生物博物館及東家創世紀工程等新工程陸續被採用。期盼在 21 世紀來臨前，能發展出適合本土化建設需求之高品質之高性能混凝土。

港灣 RC 結構物因常年處在海洋環境下，因此遭致鋼筋腐蝕與混凝土劣化的情形特別嚴重。高性能混凝土兼具有安全性、耐久性、工作性、經濟性及環保性等優越的工程材料特性。在國外已有許多海域平台、跨海大橋及碼頭結構物應用實例。以往的研究測試結果以及實際應用實例已證實積極推動 HPC 在港灣工程上應用確實有其必要性，為提昇國內港灣工程混凝土科技的技術水準，因此激起本研究計畫之擬定。

二、研究目的

本研究主要目的為應用高性能混凝土配比設計觀念，選用適當的材料，瞭解各種不同組成材料變化下 HPC 之坍度，坍流度及強度之發展及應用 ISO 9000 認證制度建立本土化品質系統，以利提昇國內混凝土工程品質之水平。

三、實施方法

1. 探討高性能混凝土之配比設計，以達到材料分佈之均勻性。
2. 進行 HPC 之試拌及量測其坍度、坍流度及強度等發展特性。

- 3.選用較佳之配比，製作試体進行海洋曝露試驗。
- 4.在適當的齡期下，取出試体進行各項物理性、化學性及力學性質之測試。
- 5.設定海洋曝露試驗時間三年。
- 6.檢討及研究高性能混凝土在港灣環境下應用相關規範之修訂。

四、預期成果

- 1.推廣高性能混凝土技術在港灣工程上之應用。
- 2.本研究所進行的海洋曝露試驗之測試結果，可供研擬施工規範及建立資料庫提供相當有利的詮釋數據。
- 3.檢討及研擬高性能混凝土結構體在港灣環境下應用相關之配比、施工技術及品質檢驗等各方面之規範。

貳、文獻回顧

一、研究背景

在海洋環境下的鋼筋混凝土結構物，由於許多混凝土本身的問題，如混凝土施工不良，配比不當，外力超過容許範圍，受海洋環境物理和化學的侵蝕問題的影響，使混凝土有過高的滲透性或產生裂縫，而使有害性物質容易侵入混凝土內部，在經由各種因素的交互作用和惡性循環，使混凝土產生新裂縫，並加速舊裂縫之延伸，擴大海洋環境侵蝕的現象，進而使率離子更容易侵入混凝土結構體，而破壞鋼筋表面的鈍態保護膜，使鋼筋發生腐蝕，因而減少結構物的使用年限，尤其臺灣四面環海，在高溫高濕的腐蝕環境下，混凝土腐蝕問題更為顯著。

高性能混凝土具有高流動性與高品質之特性。其高流動性可使混凝土施工具有不需島實，可自動澆置與減少施工噪音優點；廣泛的自流特性能減少混凝土之輸配及可流通至狹窄之鋼筋間距中或斷面上，達到充分填充效果。高性能混凝土除了顯現在硬固後之高品質性質外，在施工階段亦可發現其具有減少骨材析離與泌水現象之優越性。

高性能混凝土科技研發，在許多先進國家均以投入相當大的心力，目前技術已近成熟，並達實用階段。這幾年來，國內混凝土本土化的研究發展上也大有收穫。在國外之海洋結構物使用高性能混凝土於海域混凝土平台與跨海大橋等都具有優越的耐久性能。

其次是近年來國內營建工人短缺，使得勞力密集的營建生產，不論質與量，或時效與成本的控制，均面臨空前的挑戰，各項工程品質有日漸低落之虞。因此，營建自動化是營建業充實自己，提昇競爭力與達成外界的希望是必行之路。高性能混凝土之應用可切合營建自動化之功能。

高性能混凝土安全性、耐久性、工作性、經濟性及環保性等優越的工程材料特性。未來在土木工程上勢必扮演著非常重要的角色。基於為提昇港灣工程混凝土科技的研發與應用水準，需徹底瞭解此種新材料所製作之結構體在港灣環境下所具有之耐

久特性，以利推廣應用，因此決定執行本研究計畫。

二、高性能混凝土之定義及特性

高性能混凝土為近年來國內、外混凝土工程界致力研發與應用之新型混凝土技術，各發展國家對 HPC 有不同的解釋與定義。中華民國結構工程學會高性能混凝土委員會對高性能混凝土之定義為使用 $10\text{cm}\phi \times 20\text{cm}$ 圓柱型試體之單軸抗壓強度大於 560kgf/cm^2 (8000 psi) 之混凝土，其坍度 $25 \pm 2\text{cm}$ ，每立方公尺混凝土所用水泥 $\leq 450\text{kg}$ ，水膠比在 0.2 至 0.45 之間。使用材料含水泥、水、粗細骨材、強塑劑及礦物摻料等^(1,2)。

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

(一) 安全性

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

(二) 耐久性

臺灣地區為海洋環境及潮濕區域，混凝土及結構體受鹽害及體積穩定性等耐久性的問題必須特別加以重視，以減少發生劣化之機率。因耐久性問題直接與水的流動有關，所以必須限制拌合水量在 170kg/m^3 以下，或降低水膠比 (W/B)，使其孔隙減少可阻礙水的移動。添加卜作嵐材料及降低用水量常係控制降低孔隙的最佳策略。添加卜作嵐調整適度水膠比 (W/B)，可消耗其中所含易溶性物質，

提昇施工後組成材料在混凝土結構體內分佈之均勻性及穩定性，可增大結構混凝土之電阻（ $20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ ），降低率離子之滲透電量（ < 2000 庫倫），因此可提高水密性，對耐久性有相當大的貢獻。在混凝土中添加卜作嵐材料必須事先確認對耐久性的要求標準。

（三）工作性

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

（四）經濟性

考慮高性能混凝土之經濟性，不能一味地減少水泥用量，而係以提高「水泥強度效益」為主要之依據，水泥強度效益至少應達到每公斤水泥有 1.4kgf/m^2 之抗壓強度之標準。且為確保其品質，在相同設計下，水膠比（W/B）必須確保不變，且需降低用水量。如以卜作嵐材料可直接取代部份水泥或部份砂，然而取代不當或過量使用將會造成早期強度嚴重不足之現象。另外考慮骨材顆粒堆積更為密實不但可減少骨材間的空隙，且可減少水泥用量能達到經濟性的訴求。

（五）生態性

混凝土的應用考慮生態性的觀念在過去並不受重視，然而自從 1990 年起保護地球自然資源的觀念下，混凝土設計必須達到生態保護的目標，其最簡單的方法是必須減少使用可能會在製程中排放大量二氧化碳而造成嚴重溫室效

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

三、卜作嵐對混凝土性質之影響

ACI 318-95 將過去多年來所應用水灰比與強度之關係改以水膠比取代。主要是認定摻加適量卜作嵐材料對混凝土之耐久性有利，並規定卜作嵐用量不得為零且限制水固比小於 0.08 為新的趨勢。規範中並規定空氣含量、水膠比、硫酸鹽或氯化物含量等之限制。有關飛灰等卜作嵐材料影響混凝土之性質可概述如下：

飛灰用於混凝土主要是因飛灰之卜作嵐反應可獲致較高之晚期強度。飛灰以下列三種方式摻進混凝土中：（1）取代部份水泥；（2）取代部份砂；及（3）取代部份水泥及砂。正確的使用除可降低成本外，亦可改善混凝土之品質如圖 1 所示⁽³⁾，其影響性概述如下：

（一）對新拌混凝土性質的影響

1. 增加工作性

坍度是工作性之量測指標。粒徑小及本質上是玻璃球體中空的飛灰，通常影響水泥砂漿的流動性，造成對某一程度的工作度下，其需求量比等量的純水泥漿體較為減少。

混凝土之工作性主要是受到漿體之體積、水灰比、水膠比、水固比、骨材級配和形狀等因素之影響，當混凝土摻加飛灰時，會使其漿體之體積增大。故若採用比重為 2.368 之一定質量的飛灰，則其漿體體積將比同質量之水泥超出約 30%。

以同等強度為基準之飛灰混凝土，其所替代水泥之飛灰部份，可能代替部份細骨材；因此在漿體骨材比（Paste Aggregate Ratio）方面有較大之增加量。充分的漿體佔滿空隙，在骨材顆粒間形成包裹和潤滑作用，使混凝土具有較佳的黏性及塑性（Cohesion and Plasticity）混凝土中加入飛灰，除初凝時間稍微加長外，對於坍度損失速率不會造成影響。飛灰對混凝土坍度影響之機理主要有四項：（1）飛灰為圓球狀顆粒，具有類似「軸承作用」可增大混凝土的坍度；（2）飛灰含多孔未完全燃燒的碳粒，具吸附水性，使其坍度減低；中空飛灰的比重較水泥低，細度較細，若以相同重量取代水泥，混凝土中的顆粒會增加，而相對地累積組表面積會增大而使其坍度降低；（4）飛灰含可燒失之碳粒子物質，會降低輸氣劑的輸氣效果，使其坍度降低。

混凝土中使用飛灰對其坍度之影響，係由上述四個變數合成之結果。由於飛灰之粒徑（0.04-10 cm）細及為圓球形狀可潤滑混凝土的其他組成料，因而使其工作性提高，故摻加飛灰之高性能混凝土的坍度可達 23-28cm；而其坍流度為 40-75cm，如圖 2 及圖 3 所示⁽⁴⁾。

2.減少泌水現象

一般水泥料能抑制泌水之能力係以其保水能力為評估依據，而其機理可藉界面化學理論加以詮釋。「泌水」為水泥與水拌合後浮出水之現象。而「保水性」為自顆粒表面的電雙層中之吸附與擴散層所保有之水量之特性。故其能力為電雙層吸附水分的能力。因此拌合水就是電雙層內所保有之水分加上泌水量的總和。若以界面化學觀點而言，評估保水能力最好的指標即是界達（Zeta）電位。其為位於固態相顆粒表面電雙層中之吸附層與擴散層界面處的電位。

新拌混凝土若有發生泌水及析離現象時，水分易浮於混凝土表面，混凝土底部則因師水而使其黏著度過高，因而降低其工作性，且泌水及析離對硬固混凝土的強度發展有極大的影響。因此需特別注意。泌水現象的產生係由於漿體之拌合水量大於漿體水化或吸附所需的用水量，其

機理為漿體在拌合後，若拌合水過多則會形成一固態/液態相之懸浮體，由於固態之漿體顆粒表面與水接觸後會形成電雙層，而其中包含著表面吸附層和擴散層，因此除吸附水層和擴散水層所需水分外，多餘的水分由於其比重較固相材料輕，因此會有往上浮的現象，而在固態相之顆粒沈澱時經由顆粒相互吸引之凝聚結構網間隙中析出而產生泌水現象。

適當比例的飛灰可減少用水量，並增加混凝土之黏性與塑性，而減少泌水；同時飛灰彌補細骨材細料之不足，能阻斷水泥漿體內泌水通路。圖 4⁽⁵⁾及圖 5⁽⁶⁾示飛灰取代量欲高則其泌水量將隨之遞減，尤其是隨強塑劑之增加而遞減之現象更為明顯。而在相同的用水量下，若使用的飛灰中含有位完全燃燒的碳粒，則其燒失量較高，具有吸附拌合水的作用，則其吸水容量較大，因此在使用中、高燒失量的飛灰混凝土，其泌水量較少。如圖 6 所示⁽⁷⁾。

3.減少空氣含量

含飛灰之混凝土因飛灰料較水泥為細的影響，會降低混凝土空氣含量如圖 7 所示⁽⁸⁾，高性能混凝土可能因摻加之飛灰之含碳量多寡而影響其空氣含量，飛灰含量愈高，則其空氣含量將愈低，如圖 8 所示⁽⁷⁾。

4.降低水化熱

飛灰對巨積混凝土之最大貢獻就是可降低水化熱所引起之混凝土溫度差所示⁽⁹⁾。飛灰之早期水化熱僅為水泥之 15-35%⁽¹⁰⁾，飛灰取代水泥不僅可使水泥用量減少，且可延緩水泥的水化反應及降低水化熱量。而混凝土體積大小也對其有散熱之影響性如圖 10 所示⁽¹¹⁾。圖 11 為量測混凝土消波塊（2m × 2m × 2m）中心點處之溫度變化特性⁽¹²⁾。由該圖可發現摻加飛灰及爐石等卜作嵐材料降低巨積混凝土中之溫度；另外不摻飛灰之試體在 35 小時內即達到量高溫度，添加飛灰之混凝土的最高溫度則遲至 40-50 小時才發生。而圖 12 為摻加飛灰或高爐石材料於深度 4.5 公尺，體積 144-212m³的巨積混凝土基礎內之中心處

之溫度變化及剖面上最大溫度變化⁽¹³⁾，由這些圖可發現飛灰及爐石等卜作嵐材料確實可降低水化熱造成混凝土體內溫度差之發展，其主因為水泥量減少及飛灰與爐石發揮卜作嵐反應之綜合表現。

5. 延展凝結時間

添加飛灰極強塑劑水泥漿體之凝結時間測定結果如表 1 所示⁽⁶⁾。由表中可之隨著飛灰取代量之增加，初凝及終凝均相對應的延長，甚至有緩凝現象，甚至因為卜特蘭水泥遇水時，其中之 C, A 成分立即起水化作用而形成硫酸鋁鈣之產物並釋放熱量，主成分 C, S 和 C, S 接著逐漸發生水化作用形成 $C-S-H$ 膠體和 $Ca(OH)_2$ 產物，同時釋放熱量。當有飛灰存在時，則飛灰的活性物 SiO_2 和矽鋁玻璃質化合物與水及水泥水化反應所生成的 $Ca(OH)_2$ 發生卜作嵐反應而形成 $C-S-H$ 膠體。卜作嵐反應速率比水泥水化反應慢，故含飛灰混凝土具有緩凝效果。此外飛灰之硫酸鹽和鹼含量較低，也會使凝結時間延後。而添加強塑劑，在低飛灰取代量時，計量之多寡對凝結時間尚無多大的影響，但高取代量則將隨計量之增加而有更加緩凝之現象出現。氧化鈣含量多的 C 級飛灰混凝土（ CaO 為 20.1%）與卜特蘭 I 型混凝土上情況比較其凝結時間縮短很多，然而與卜特蘭 III 型水泥比較，則其差異性並不大如圖 13 所示⁽¹⁴⁾。在臺灣所使用的 F 級飛灰是具有緩凝效果的。

（二）對硬固混凝土性質之影響

1. 增加晚期強度

摻用飛灰之混凝土，如果取代量過大而未調整水膠比時，則其初期強度會偏低，晚期強度卻相當的偏高。其機理為含飛灰之水泥的水化反應初期純為卜特蘭水泥之水化作用，直到其水化產物 $Ca(OH)_2$ 之濃度增高後，再加上水泥水化過程中之熱能以達到卜作嵐反應所需條件，飛灰才開始進行卜作嵐反應，因此在飛灰取代量較多而其水泥量較減之情況下，其早期強度就會較為降低，然而若採用適當之取代量，則由於卜作嵐反應的效果，將使其晚期強度超過不含飛灰試體之強度。但在高取代量之情況下，

由於 Ca(OH)_2 來源受減，故有些飛灰顆粒未能進行卜作嵐反應，是故則其強度就較差如圖 14 所示⁽¹⁵⁾。較細的飛灰，其表面積將增大且其活性的矽鋁玻璃質亦增多，而因為不利於化學反應的未燃碳減少，因此對促進水泥的水化與飛灰之卜作嵐反應相當有利，可增加其 C-S-H 膠體含量，是故其晚期強度均較高如圖 15 所示⁽¹⁶⁾。另外像提高養護環境的溫度亦有利於促進卜作嵐反應如圖 16⁽¹⁷⁾及圖 17⁽⁶⁾所示，其強度將相對地提高。

根據測試結果可發現含飛灰之水泥漿體，其抗拉及抗彎強度如同抗壓強度在相同之齡期與水灰比下，其早期強度（齡期為 28 天以下）隨著飛灰含量之增加而減少；晚期強度（齡期為 56 天及 90 天）則隨著飛灰含量之增加而遞增，同時，含粒徑通過 300 篩之飛灰試體，其強度較未含飛灰之純水泥試體為高。

2. 增加水密性

水密性對混凝土之耐久性相當重要。混凝土中有害物質的傳送行為包括擴散和滲透現象。滲透現象主要是藉其水流動之壓力差，而擴散現象則為整個流體系統的離子交換及吸收離子之鍵結能力表現，因此其主要趨動力為濃度差。高性能混凝土中之飛灰與水泥水化反應產物所含可溶性之氫氧化鈣反應生成不溶性的矽酸鈣水化物（C-S-H）膠體堵塞水路，因而會增加其水密性、降低其滲透性；水化完成後，其總孔隙率降低，且由原來的大孔隙轉為小孔隙，所以離子不易進入，又 HPC 的水泥漿體中之鈣、鋁及矽離子較水泥漿體為多，其擴散速率則較小，能抑制氯離子之擴散。另外因卜作嵐反應消耗漿體中所含之 Ca(OH)_2 而使其鹼性離子減少，故會降低與氯離子交換之能力如圖 18 所示⁽¹⁸⁾為飛灰混凝土的透水係數，隨齡期之增加而降低；圖 19 為氯離子擴散係數之試驗結果，顯示飛灰混凝土具有抑制氯離子之侵蝕能力⁽¹⁸⁾。

3. 增加耐硫酸鹽侵蝕能力

硫酸鹽侵蝕進入混凝土中會與其中水泥所含之鋁酸鹽起化學反應而生成硫鋁酸鈣水化物而造成混凝土之列

化現象。但反應生成之 C-S-H 膠體，則會增加混凝土之水密性、減少漿體間之孔隙，改變晶相，使其中所含 Ca(OH)_2 數量減少，因此增強其抗硫酸鹽之能力。採用 V 型（抗硫酸鹽水泥， C_3A 含量較低），或 I、II 型水泥添加適量飛灰均具有極佳之抗硫酸鹽侵蝕效果。圖 20 是取代水泥 30% 之飛灰混凝土浸泡 2.1% 硫酸那溶液中，歷經 27.4 年後之體積膨脹百分比，與使用 I 型水泥不摻飛灰之混凝土比較可發現具有相當顯著的抑制效果⁽¹⁹⁾。

4. 增加耐鹼性骨材反應之能力

某些含有大量矽質骨材會與水泥中過量的鹼性鹽類起反應形成鹼性反應膨脹混凝土發生破裂現象。添加適量的飛灰於混凝土中，則其非結晶矽可先與水泥中之鹼鹽起反應，因而可減少鹼性骨材反應之機率，圖 21⁽¹⁸⁾ 及圖 22⁽²⁰⁾ 顯示添加飛灰之混凝土具有抑制鹼性骨材反應膨脹之能力。

飛灰混凝土能降低鹼性骨材反應膨脹是因為飛灰與氫氧化鈣反應其矽酸鈣水化物中之矽含量提增，其 C-S-H 膠體之 C/S 比較低，因此其比表面積較大，而有能力可吸收較多的鹼離子，經由電子排斥作用，阻止鹼離子之流動，使得鹼離子隨著卜作嵐反應而減少擴散現象。除了 C-S-H 膠體結構對鹼離子所具有的化學束縛力外，C-S-H 膠體亦可使水泥砂漿之孔隙結構更為緻密；而使得飛灰具有抑制鹼性骨材反應發生之能力。

5. 彈性模數略增

如圖 23⁽²¹⁾ 及圖 24⁽²²⁾ 所示飛灰混凝土之彈性模數較一般混凝土略微增高但差異性不大。飛灰取代水泥之混凝土的抗壓強度較大，故彈性模數略高。在骨材細度偏高或偏低之配比中亦連帶使其彈性模數變低，動彈性模數比靜彈性模數值偏高，動彈性模數與靜彈性模數之比值會隨抗壓強度增加而遞減。

6. 體積穩定性佳

如圖 25 所示飛灰混凝土中含 20% 飛灰情況下之潛變

比較一般混凝土為低，但含 30 及 50%者，其潛變量則較高⁽¹⁵⁾。而圖 26 示經過 91 天之濕氣養護後，結果發現其潛變量均較低，且降低量在 20-45%⁽²³⁾。

圖 27 所示為混凝土自生收縮與乾縮，一般而言，飛灰混凝土之體積穩定性能較佳⁽²⁴⁾。圖 28 是 20%飛灰取代量之乾縮量較一般混凝土為小。但 30 及 50%情況則相反⁽¹⁵⁾。加拿大礦業與資源研究中心（CANMET）曾研究 11 種加拿大的飛灰，測試結果發現飛灰混凝土與普通混凝土乾縮量相當接近，如圖 29 所示⁽²³⁾。

7.降低混凝土中性化之深度

混凝土受大氣中二氧化碳侵入而發生中性化之速率，依水泥型態、所處環境條件、養護條件、水灰比、水膠比及混凝土之為結構等各種參數之性質而異。如圖 30⁽²⁵⁾可發現混凝土之深度成正比。表 2 示 15 年中性化之測試結果⁽²⁶⁾，其試驗參數包括養護時間室內或室外之曝露環境含飛灰 30%與不含者及水泥加飛灰的各種單位重等條件，結果發現飛灰混凝土必須有較長齡期的養護使水泥及飛灰能充分的發展其水化反應，圖 31 為各種不同環境下混凝土所產生之中性化深度與其抗壓強度之關係⁽²⁶⁾，而圖 32 為不同水泥用量及養生時間下對混凝土發生中性化之影響⁽²⁷⁾。由以上資料可發現長期之養生可降低中性化之深度，因為長期之水化反應將使得水泥漿體內有較高的 pH 值，卜作嵐反應則是將氫氧化鈣轉化成 C-S-H 膠體。而飛灰混凝土的中性化與其齡期、水灰比（W/C）、水膠比（W/B）、養護時間、飛灰取代水泥量、大氣中二氧化碳含量等參數都有不同程度的影響性。因此即使是在卜作嵐反應用掉一部份氫氧化鈣之後，水泥漿體內之水溶液仍處於過飽和狀態。故卜作嵐材料在正常用量情況下並不會使混凝土之 pH 值降低。相反的，卜作嵐反應所生成之 C-S-H 會填充漿體之孔隙使其水密性提高，因此可以有效地抑制由二氧化碳所引起的中性化問題或其他有害物質之侵入所造成之腐蝕與劣化現象。

8.耐磨耗與沖蝕能力略低

通常耐磨耗能力與其抗壓強度成正比，同理在一坍度下，耐沖蝕可隨水泥含量及強度增加而遞增。圖 33 示 F 級飛灰混凝土與一般混凝土之耐磨性相近，而 C 級則較佳⁽²⁸⁾。一般而言飛灰混凝土之耐磨性比普通混凝土略低點⁽²⁹⁻³¹⁾，除非調整初期設計強度。

9.耐蝕能力強

腐蝕必須透過「外在因素」，滿足陰極、陽極、水分、氧氣、電路等五大條件才可能會產生，在混凝土設計上依 ACI 318 有關防止腐蝕之策略，係透過降低總氯離子含量及降低水灰比（W/C）或水膠比（W/B）以達到加入卜作嵐材料也是一種有效的方法。但一般所擔心的是可能會增加碳化深度，事實上此與加入卜作嵐材料之量有關，也與有逆向消長之水密性有關，控制混凝土體內孔隙水溶液的 $[Cl^-]/[OH^-] < 0.6$ 是很重要的策略。事實上除非產生結構裂縫，否則控制水密性是防止腐蝕最重要的策略。因此設計低水膠比（W/B）、低透水性的高性能混凝土可減低透水性，減低水膠比。更重要的可減少用水量而阻止混凝土裂縫之發生。

圖 34 為鋼筋混凝土（W/C=0.43）曝露在 0.3%NaCl 下，其中鋼筋之腐蝕量之測試結果，由圖中可發現加飛灰之混凝土的腐蝕速率的最低⁽³²⁾。表 3 示飛灰混凝土在海洋環境有害因子可能之影響性。透水性為海洋混凝土耐久性最主要之影響因素。然而飛灰對海洋環境下混凝土耐久性具有很大的貢獻，而其行為有待更深入之研究。

10.耐酸蝕作用

通常混凝土 pH 值維持在 11-13 之間，因此具鹼性環境一旦受到酸性作用下將與其中之氫離子中和。由於該作用激烈，可能使骨材顆粒間結合力喪失而分解。圖 35 為添加不同飛灰含量之水泥砂漿在四個月時，其重硫酸溶液的試驗結果⁽⁶⁾，純水泥砂漿浸泡於 2%之硫酸溶液以達 41.49%，可見其受到中和作用損害之嚴重；含飛灰之水泥砂漿 5%及 10%者也在三個月後相繼產生剝落，但不如純水泥砂漿剝離嚴重；飛灰含量 20%，40%及 60%者，重

量變化持續穩定，其外觀並明顯剝落現象。飛灰水泥砂漿由於卜作嵐反應逐漸消耗掉其中所含水化物氫氧化鈣，使其鹼性濃度降低；中和作用較不激烈，尤其是高飛灰含量之水泥砂漿；因此其抗酸蝕的能力頗佳。

四、高性能混凝土之配比設計

(一) HPC 配比重點

混凝土配比設計是在選定材料（水泥、水、骨材）及摻料（化學及礦物摻料）後，決定其使用量，以滿足混凝土在工作性、安全性、耐久性及經濟性之要求。一般混凝土僅為水泥、水及骨材等三種材料所組成的，較易找出其配比模式，例如 ACI 混凝土配比設計之模式。但高性能混凝土除上述三種材料外，另含化學摻料及礦物摻料。現階段尚無配比模式可循。如何製作能符合性能要求的混凝土，主要取決於配比的成敗與否，故其粗、細骨材之比例，膠結料含量（水泥加飛灰等卜作嵐材料之數量）、摻料等組成材料的使用對混凝土的組織結構及力學行為均有相當大的影響。任何一種組成材料的品質控制不當，都會造成不良的混凝土拌合性質或無法達到預期的性能要求，以下列舉一些 HPC 配比之重點。

1. 水灰比（ W/C ）及水膠比（ W/B ）：HPC 之早期強度主要取決於 W/C ，而長期強度則主要取決水膠比（ W/B ），而坍度和用水量及減水摻料有相當密切的關係，特別是在高流動化的混凝土通常是在 $W/B=0.23 \sim 0.40$ 之間，其與強度成反比之關係，因此水灰比及水膠比為配比上重要考慮因素。
2. 水泥用量：高強度混凝土的水泥用量最好是由試拌決定。一般而言，範圍約為 $f_c'/20\text{kg}$ （即水泥效益強度為每 kg 水泥具有 $f_c'/20$ 之強度）水泥用量太高通常容易產生乾縮現象，現可使用卜作嵐材料取代，可增加 HPC 之體積穩定性、耐久性、經濟性及安全性。所以水泥與卜作嵐材料用量亦為配比之重點。
3. 骨材配比

- (1) 細骨材：由於細度模數在 2.5 以下的砂，會使混凝土之稠度增加，以致黏度太大而很難加以搗實。細度模數約 3.0 的砂具有最好的工作性及較高之抗壓強度。圖 36 示砂之細度模數愈大，則所需之乾搗粗骨材體積愈少，此時砂與粗骨材比（S/A）值就會較大⁽³³⁾。圖 37 示在相同的坍度條件下，砂石比值與所需之膠結料（binder）之數量成反比，是故所需之膠結料量減少，則可減少其發生乾縮龜裂現象機率和降低經濟成本⁽³⁴⁾。
- (2) 粗骨材：由於粗骨材之粒徑愈小，則其砂石比就有愈大的趨勢，相對地可縮減所需膠結料數量，而站在考量水泥用量和水灰比情況下所產生的抗壓強度為高之條件下，則粗骨材的最大粒徑應維持在 3/8" ~ 1/2" 之間。而不同混凝土設計強度時，使用不同的最大骨材粒徑，會顯示不同的水泥強度效率，如圖 38 所示混凝土強度愈高且使用的粗骨材最大粒徑愈小時，則可獲得較佳水泥效益強度，強度在 7,000psi 之粗骨材最大粒徑約為 3/8" ~ 1/2" ⁽³⁵⁾。
- (3) 骨材配比之最佳化：基於以上砂石比與膠結料之經濟效益和最大骨材粒徑與水泥的強度效率，因此高性能混凝土所使用之粗骨材最大粒徑（Dmax）介於 3/8" ~ 1/2"，而細骨材之細度模數應 ≥ 3.0 為佳，且從近年來 HPC 文獻資料中顯示出砂石比值應在 40 ~ 45% 左右為佳⁽³⁴⁾，實際上應由骨材之級配及其最大比重上著手。

(二) 配比設計方式

目前高強度混凝土之配比設計有 ACI 211-4R 之文獻可參考⁽³⁶⁾，國內則普遍以「最緻密配比法」⁽³⁷⁾，或「表面積理論」⁽³⁸⁾等之半分析法配合試驗來發展高強度 HPC 配比設計法。高雄市東帝士 52 層大樓（T & C Tower）鋼柱中之 HPC 即是緻密配比法調配比出來的。表 4 為國內之 HPC 配比範例⁽³⁹⁻⁴¹⁾。一般高強度混凝土配比常以高水泥量及低水膠比為訴求。然而對達到相同目標強度之不同配比之高

性能混凝土仍須採用較低水泥量之配比為宜^(42,43)，其目的混凝土電阻為控制長期之耐定性之指標。

高性能混凝土使用材料之配比方式與傳統混凝土略有差異。基本上指導綱要參考美國混凝土學會 ACI 211.1 之規範或緻密配比法則。ACI 配比設計方式現以受全世界混凝土工程界的廣泛認同，ACI 所列之混凝土配比設計觀念流程如圖 39 所示⁽¹⁰⁾。高性能混凝土所需修正的的配比概念如下：

1. 配比應有資料：

在配比設計前必須確認材料基本資料，環境限制及設計指標，如表 5 及表 6 所示。

2. 配比設計：

(1) 估算拌合水含量

根據所給骨材粒徑（依鋼筋最密間距及設計強度而定）及標定的坍度數據，查圖 40 所示之拌合水量，如超出範圍則以外差法求解，決定拌合所需用水量出值（ W_w ）。查核 W_w 如果小於 170kg/m^3 ，則以原始 W_w 為拌合水量，如大於 170kg/m^3 ，則採用 $W_w=170\text{kg/m}^3$ 。不足之水量以減水劑或高性能減水劑之減水效率（ R_i ），求出化學摻料添加量或（ W_{wRA} 或 W_{SP} ）。化學摻料之添加量 W_{wRA} 或 W_{SP} 之計算係以每 1 百分率添加化學摻料的減水效率百分率（ R_i ），除以（ W_w-170 ）/ W_w 所得之百分率乘以膠結料之重量（ W_b ）即為所得。

(2) 估算飛灰與卜特蘭水泥之需求量

依據設計強度（ f_c' ）之要求可查圖 41 而獲得 W/B 數據。使用標定之水膠比及估算所需用水量（ W_w ）之數據，計算所需膠結料數量（ W_b ）係指水泥加上卜作嵐材料之總和，而由已選定的飛灰在總膠結料中之比率（ W_f/W_b ），則可計算水泥及飛灰之需求用量。當然如果以飛灰取代部份水泥，

則飛灰有一部份在細骨材中扣除。早期強度亦可以水灰比估算。

(3) 估算粗骨材用量

由骨材之最大粒徑與細砂之細度模數 (FM)，兩個參數依圖 36 內外插法求得每單位體積混凝土所需乾搗骨材之體積比，再乘以骨材之乾搗單位重即可求得單位體積混凝土所需之粗骨材用量。

(4) 估算細骨材含量

由依單位體積混凝土扣除其他組成材料數量，即可求得細骨材體積含量。

(5) 試拌調整

試拌必須依中國國家標準 CNS 規範備料及在實驗室或工地測試，同時依 CNS 11151 進行單位重及產量測試，依 CNS 1176 測量工作度（坍度及坍流度），及在標準養護狀況下，適當齡期之硬固混凝土式體之抗壓強度。依美國材料及試驗標準 ASTM 1202 檢測氯離子滲透電量，經過多次試拌確認能滿足需求之工作度、強度及耐久性標準。由最終所選定之配比數量，並在施工前細心的評估，以確保能達到預期之現場性能，才可應用到現場上。

(6) 範例

表 7 為高性能混凝土配比設計範例，為採用緻密配比法所或得知設計資料。目前使用於工程上，成效良好。

(三) 配比確認

高性能混凝土之組成材料的配合比例需依據試拌及模擬試驗的結果加以確認，以確保新拌及硬固混凝土的特性。高性能混凝土生產廠商，在試拌期間應建立均勻性及

穩定性之測試數據，並建立統計品質資訊。

1. 均勻性試驗須委託學術單位協助進行，同批次之混凝土至少須有三十個試體，檢測其品質平均值及變異值，其變異係數應小於 5%。檢測項目包括坍度、坍流度、溫度、單位重及抗壓強度（有耐久性需求時必須量測氯離子滲透電量）。
2. 穩定性試驗則為針對不同批次之混凝土，進行同第 1 項之均勻性檢測，最後比較二批次混凝土均勻性試驗所或結果之平均值及誤差值，評估其穩定性，二批次混凝土品質平均值之誤差率不得大於 5%。
3. 配比設計必須審慎評估使用，不同卜作嵐材料取代量之特性，每個條件之強度之歷時變化曲線應製圖表示。為了滿足規範的需求，可繪出不同取代量之曲線，據此可供選定最佳取代比率。所調配的配比應該使用建議施工材料加以試作，施工前應評估該配比之性能。良好混凝土組成材料，經過嚴密之材料管制及製程管制則可獲得所需求之性能。

（四）高性能混凝土施工實務

1. 卜作嵐材料取代的配比設計，可能造成較低早期強度，在設計時應參考圖 41 或所製作試體齡期與強度相關之圖形，選擇較低之水膠比（W/B）以滿足設計之強度需求。
2. 配比審查應注意季節性影響，受季節炎熱之設計與冬季寒冷不同。冬季施工時，必須有充分養護時間，供新拌高性能混凝土可以獲得足夠的強度及應有之工程品質。
3. 高性能混凝土拌合時必須注意均勻性由於添加飛灰後會造成較高之黏性，除非有強剪力之拌合機，否則應增加拌合時間。
4. 高性能混凝土有較佳之施工性，其震動能量可適度地降低。
5. 高性能混凝土施工時較黏著，終飾不可過度，以免有剝皮

的現象。

6.高性能混凝土必須加強養護工作，以防止早期強度不足，而產生塑性龜裂。

7.高性能混凝土施工後，應定期記錄施工中所產生的現象，並加以詳細分析，以作為品質追蹤所需之資料參考。

五、結構混凝土品質追蹤及資料之回饋

（一）高性能混凝土之品質管制

高性能混凝土之品質管制，應包括「材料管制」、「配比管制」、「產製與施工管制」「結構品質驗證」等四方面。

1.材料管制

標準之混凝土品質，建立在合乎標準之材料，所以配比設計前應有詳細之料源資訊及品管之實驗。所以各材料生產廠商要求應有 ISO 9001 之國際認證，目的在建立廠商對材料應負的責任。尤其穩定性不佳的飛灰的材料管制，獲得符合之混泥統材料為基本要求。工程主辦單位應要求廠商配合學術單位進行料源調查，輸送與儲存等管制，並作必要之試驗，以確保材料供應量及品質之穩定。材料管制必須製作品質管制圖及書面報告，此為「料源管制」之重要內容。

2.配比管制

高性能混凝土之配比設計應按規定進行，視實際曝露狀況、施工狀況及混凝土試拌結果。配比一經確認，則其成分必須嚴格管制，如須修正，應備妥書面資料，經原受託學術單位之核可。

3.產製與施工管制

高性能混凝土在產製與施工中，應採取有效的管制措施，以確保高性能混凝土的最後品質確實可符合設計上

之要求。高性能混凝土產製時，其混凝土拌合場必須經過 ISO 9001 國際認證，而且直接電腦儲存及列印，俾能製作生產品管圖，而施工之品質管制應有新拌混凝土之坍度、坍流度、單位量之資訊，其內應涵蓋混凝土之產製、輸送、澆鑄、養護、修飾及試驗等作業。所有作業過程之內涵必須詳細記錄。受託學術單位應負責獨立審查工作。

4. 結構品質驗證

工程主辦單位應按品質管制計畫，委託學術單位辦理所需之試驗。若經核可，得採用簡便、非破壞性評估或加速之試驗方法，提早獲取品質資訊，以便早期適時控制混凝土品質。該等資料均應作成管制圖及書面報告。工程主辦單位亦需針對結構物品質，以非破壞檢測技術檢測，並將評估結果繪製成結構體品質等值圖。並且以電阻計量測結構物之電阻以確保結構混凝土之 56 天電阻超過 $20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ ，其檢測結果亦可繪製成等電阻圖，以供評估結構體之品質。

5. 品質記錄及評估

工程主辦單位應委託學術單位，隨時蒐集高性能混凝土施工中各項品質管制資料，繪製管制圖，並做評估，發現有異常現象時，應立即分析原因，及採取必要措施。

各項品質資料應妥善編號，建檔保存，並編碼索引，工程師得隨時查閱或抄錄。工程驗收後，品管資料及資訊，應繼續保存至少兩年，或按合約規定辦理。

(二) 混凝土結構品質驗證

1. 為確保高性能混凝土工程品質，使能符合設計要求，因此在工程進行中，工程師必須負責對材料及施工成品之驗證，為承包商仍須對混凝土工程結構品質負全部責任。雖經檢驗，但未能及時發現之缺點，於日後才發現時，仍應予以拒收，或由工程主辦單位負責進行必要之處置或予以敲除處理。

2. 高性能混凝土品質檢驗工作在確保製程之正確性，然而品

質合格與否之認定基準，建立在結構物混凝土品質之均勻性及穩定性和符合設計圖說。執行檢驗業務之機構或人員、檢驗費用之負擔者，以及其他有關檢驗事項應按合約之規定。若未明確規定時，可委託學術單位辦理。

- (1) 核對承包商所提出之擬用材料，其品質是否符合規範之規定。
- (2) 核對承包商施工所提供之配比設計，確認是否符合工程圖說之要求，及滿足「耐久性、安全性、工作性、經濟性及生態性」之準則。
- (3) 工程進行中，自拌合場或存料堆中，抽取材料樣品，核對是否符合標準規範之規定及生產統計資料之正確性及穩定性。
- (4) 高性能混凝土強度試驗

a. 工地混凝土取樣

根據 CNS 1174 「新拌混凝土取樣法」之規定取樣。每一樣品應隨機選取自不同之拌合批次。並應避免於當場經選擇後取樣，但可於高性能混凝土澆鑄前，隨機預先選定將取樣之拌合批次號碼，並按照所選定號碼取樣。工程師認為有需要時，可於懷疑之處增加取樣評估。

b. 取樣數量

以同一結構體連續澆鑄之混凝土為一批，一批數量在 100m^3 以下者，取樣製作二組試體，大於 100m^3 者，每增 100m^3 應增加一組試體。同一組試體應由同一預拌車取樣製作。如工程師認為承包商之經驗不足時，或有品管不當之疑慮時，可提經任務小組，要求每一預拌車均加以取樣。

c. 試體之製作及養護

由取樣所得每一批混凝土樣品製作 $15\phi \times$

30cm，或 $10\phi \times 20\text{cm}$ 圓柱試體 9 個，按 CNS 1231「工地混凝土試體之製作及養護法」之規定辦理，過程中任何變動，均應詳實記載。

d. 抗壓強度試驗

圓柱試體之抗壓強度試驗，按 CNS 1232「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」之規定，二個試體於七天齡期時，進行抗壓強度試驗，以提供早期強度參考資料。另六個試體分別於 28 天及 56 天齡期時，進行抗壓強度試驗，於規定齡期之三個月試體強度之平均值為該次試驗及果。若有跡象顯示其值有誤時，需以另一備用試體之檢驗值取代。若可用試體其僅二個時，則以二個平均值為該次之檢驗結果，若試體量不足二個，則該組檢驗結果應予全部捨棄。

e. 試驗齡期

早強混凝土，或非以 28 天齡期及 56 天強度設計之混凝土，應按合約所規定之齡期進行試驗，並增加該齡期需有三個試體。

(三) 其他檢驗業務

當工程師認為需要時，得提請高性能混凝土任務小組之核可，增加下列檢驗項目：

1. 監督混凝土之拌合及輸送作業。
2. 覆核每次進場之水泥、粒料、摻料，或其他材料之出廠報告，或監督試驗室試驗及現場人員，檢視上述材料是否合乎標準規範之規定。
3. 增加混凝土檢驗頻率，以確保結構體混凝土符合規範。
4. 其他特殊性能需要之試驗或檢查。

(四) 增加之檢驗業務

- 1.應承包商之要求，變更材料或配比，因此所需增加之試驗與檢查。
- 2.材料或混凝土，因試驗或檢查結果不符合規範要求，而需增加之額外試驗或檢查工作。

(五) 施工完成之結構體，應執行如下之結構體檢查

- 1.外型尺寸檢查。
- 2.平面性檢查。
- 3.外觀檢查。
- 4.結構體電阻檢查。
- 5.其他與高性能混凝土設計特性有關之結構檢查。

高性能混凝土工程品質經由工程主辦及相關單位定期的進行上述品質管制及品質保證之追蹤考核工作並建立完整的資料庫，將可提供爾後工程在設計上應用之參考。

六、混凝土電阻性質之影響參數

混凝土導電性能與其微結構其孔隙內電解質溶液之成份與濃度有關，電解質中離子的活性與數量為決定混凝土導電性質良窳之參數，即決定混凝土的電阻性質。 Buenfeld 等人⁽⁴⁶⁾之研究結果顯示暴露於海水中之混凝土電阻係數較一般混凝土情況有增加的趨勢，此係因高活性的霰石（Aragonite）/氫氧化鎂（Brucite）之產物的生成發展及大孔隙之減少而小孔隙增加之現象出現。 Hope 等人之研究結果發現，Cl⁻及O₂之侵入會影響到混凝土之電阻係數及鋼筋之腐蝕⁽⁴⁷⁾。 Young 則認為由於極化效應（Polarizing effects），混凝土中電流通至鋼筋提供高電阻的環境⁽⁴⁸⁾。混凝土的電阻係數並沒有一個標準值，主要原因為混凝土之電阻對環境條件的敏感，且由於配比不同或量測方法有異，導致各學者研究提出之電阻係數差異性頗大。 Young 認為乾燥的混凝土電阻係數為 $10^{12} \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，而潮濕時為 $10^5 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ⁽⁴⁹⁾，而 Buenfeld 等人則認為乾燥的混凝土之電阻係數為 $10^3 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，而潮濕時為 $5 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，雖然二者之研究結果差異高達 10000 倍，但仍可發現其電阻

性質對判斷混凝土性質仍具有相當地重要性，尤其是應用於腐蝕反應上，由圖 42^(46,49)可發現雖然學者對電阻係數與鋼筋腐蝕的建議值有一些差異，然而可發現當電阻係數大於 $20\text{k}\Omega\text{-cm}$ 則鋼筋皆不致於發生腐蝕。表 8^(46,49-57)為彙整國內外學者以不同量測技術所得混凝土電阻性質之結論，影響混凝土電阻係數之因素有水泥含量、含水量、鹼鹽含量、氯離子、氫氧根離子、水化程度、溫度、濕度、齡期及孔隙結構等參數，其影響性概述如下：

1. 水灰比：水灰比可決定混凝土微結構與空隙內水溶液的離子濃度，故與混凝土的電阻性質有密切關連。由圖 43⁽⁵⁶⁾可之低水灰比 ($W/C=0.4$) 比高水灰比 ($W/C=0.6$) 有較大的電阻係數，其原因為孔隙中的水及鹼鹽之滲透使混凝土整體性的電氣阻抗降低，而腐蝕電流藉由離子的自由移動通過混凝土孔隙，故水灰比比比較高時，則其腐蝕反應將較易進行。如圖 44 所示⁽⁵⁶⁾當水灰比自 0.7 降至 0.5 時，水泥砂漿的電阻係數約增大一倍，然而混凝土僅略增而已，若以水灰比 0.5 而言，水泥砂漿的電阻約為混凝土電阻的三倍，由此可發現水泥砂漿的電阻性質對水灰比的敏感程度遠超過混凝土。
2. 齡期：由圖 45 所示可發現，電阻係數隨著齡期增加而遞增⁽⁵⁶⁾，其原因應為混凝土或水泥砂漿內部之孔隙粒徑及孔隙率隨著其水化生成物 C-S-H 膠體的成長與填塞作用而日漸減小，因而使得電導通路變長或受阻，使提高電阻係數。
3. 相對濕度：一般而言相對濕度高，則其電阻係數將較低，當相對濕度自 100% 降到 18% 其電阻係數即從 $7 \times 10^3\text{k}\Omega\text{-cm}$ 增至 $6 \times 10^5\text{k}\Omega\text{-cm}$ 如圖 46 所示⁽⁵⁸⁾。顯現相對濕度與混凝土電阻係數有成反比之趨勢。
4. 腐蝕：由於腐蝕是一種電化學反應，故腐蝕的難易程度便與電阻係數的高低成正比關係，電阻係數愈高表示離子較不易游離導電，因此較不利於腐蝕反應的進行，若混凝土的電阻係數超過 $(50-70) \times 10^3\text{k}\Omega\text{-cm}$ ，則混凝土內的鋼筋應不會發生腐蝕⁽⁵⁸⁾，Brian, Vassie 與 Taylor Woodrow 等學者則分別以 $8.57\text{k}\Omega\text{-cm}$ 、 $12\text{k}\Omega\text{-cm}$ 、 $20\text{k}\Omega\text{-cm}$ 等較低電阻係數值作為判斷不可能發生腐蝕之指標，如圖 42^(46,49)所示。
5. 溫度：溫度對混凝土電阻而言為負面效應，當溫度上升時，則其

電阻係數反而減少如圖 47 所示^(47,56)，其原因乃混凝土內電流藉離子的自由移動而通過孔隙，故離子游離的難易程度決定混凝土的導電度，當溫度升高時，分子擴散的活化能增加，擴散係數亦變大，因此加速離子游離的速率，使其更能順利地通過孔隙。

6. 摻料：由圖 48⁽⁵⁶⁾可發現飛灰混凝土之電阻係數成長率較純混凝土高，且其鋼筋電位下降率亦較低，由此可印證飛灰混凝土在鋼筋防蝕性能之正面意義。

根據學者所提出之混凝土電阻與其中所含鋼筋之活性程度之關係如表 9 所示⁽⁵⁹⁾，可供測試作定期評估之參考。

七、超音波測試之原理

超音波測試之原理為利用音波在不同物體中之傳遞速度的差異性以供判斷以物體內部的狀況。對一無限大均質性及等熱之彈性介質下，其超音波速為

$$V = (KE_s / \rho)^{1/2} \quad ;$$
$$K = (1 - \nu) / \{ (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu) \} \dots\dots\dots(1)$$

式中 V 為超音波速 (km/sec) ； E_s 為動彈性模數 (KN/mm²) ；

ρ 為物體之密度 (kg/m³) 而 ν 為動柏松比。

由於使用天然骨材所拌製之混凝土其密度與柏松比之變異性很小。因此由上式可知超音波速與混凝土有直接的關係，因此其測試結果可供工作為評估混凝土品質好壞之參考數據。美國 ASTM 曾製訂超音波之波速與混凝土品質優劣之相關性如表 10 所示。

八、氯離子在混凝土中之擴散模式

鋼筋混凝土中之鋼筋發生腐蝕主要是由於受到侵蝕性的鹽類破壞其周界之混凝土所能提供之鹼性保護所致，其中又以氯離子作用最為強烈，氯離子侵入混凝土之程度會依結構物所處位置不同而異，一般而言當依結構物曝露於飛沫地區，則氯離子之侵入狀況最為嚴重，主因為飛沫帶具有海水乾濕反覆作用，在潮濕狀況下，因毛細管作用，大量的氯離子和水會侵入混凝土結構體中，

然而當乾燥時則水分被蒸發掉，只剩氯離子留在混凝土中，而造成混凝土表面或內部存留大量的氯離子。而根據最近有關混凝土中氯離子滲透情形之研究結果顯示實際侵入之氯離子濃度與其滲透度之關係，可應用 Fick 第二擴散定律，表示如下式⁽⁶⁰⁾：

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

式中：Erf 為誤差函數（Error function），其定義為

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

C_0 ：混凝土表面起使之氯離子濃度（ppm）

$C_{(x,t)}$ ：任何時間，任何深度下之氯離子濃度（ppm）

X ：深度（cm）

t ：時間（sec）

D ：氯離子擴散係數（cm²/sec）

根據英國混凝土學會所做之研究指出氯離子之擴散係數與混凝土之滲透性之關係如表 11 所示⁽⁶¹⁾。

九、混凝土之吸水性

由於混凝土為多孔性之材料，一旦置於水中，水將填充其孔隙，可據此研判混凝土之緻密性。混凝土在早期混凝土之吸水性會影響到晚期之性能發展。因此英國 Taywood 工程公司英國 BS 1881 規範中都有依混凝土之吸水性評估其品質優劣之參考數據如表 12 可供研究參考^(62,63)。前者係以混凝土表面侵水後其侵入之速率⁽⁶²⁾，而後者係以其吸水後和標準試體之偏差值計算⁽⁶³⁾。試體均需先烘乾 72 小時候置於乾燥箱中冷卻一日後才取出進行測試的⁽⁶¹⁾。

參、試驗計畫與測試結果分析

一、試驗計畫規劃

本研究探討港灣環境下高性能混凝土結構體之性質，其研究計畫流程如圖 49 所示。概述如下：

(一) 配比設計

本研究採用美國混凝土統學會 (ACI) 之配比設計方式進行組成材料之配比數據之計算，設計之基本原則之流程如圖 50 所示，為比較不同之混凝土型態例如飛灰取代部份細砂，而爐石取代部份水泥，或是兩種卜作嵐材料均取代部份水泥和一般未填加卜作嵐材料所製作之混凝土其長期耐海水作用之特性，另外比較不同設計強度所製作之高性能混凝土之耐海水特性。這些試體都是放置在海水乾濕循環之曝露環境條件下。因此列出此五種製作混凝土之配比數據如表 13 所示。

- (1) 設計強度 $f_c' = 4,000\text{psi}$ (飛灰取代部份細砂，爐石取代部份水泥)
- (2) 設計強度 $f_c' = 4,000\text{psi}$ (飛灰及爐石取代部份水泥)
- (3) 設計強度 $f_c' = 5,000\text{psi}$ (飛灰及爐石取代部份水泥)
- (4) 設計強度 $f_c' = 6,000\text{psi}$ (飛灰及爐石取代部份水泥)
- (5) 設計強度 $f_c' = 4,000\text{psi}$ (一般混凝土)

(二) 齡期

本研究計畫預計測試時間為三年，為利於比較硬固混

凝土之各種性質之發展。因此預定在齡期為 7 天、14 天、28 天、56 天、90 天、180 天、1 年、1.5 年、2 年及 2.5 年分別進行各項試驗。

(三) 養生

由於混凝土之養治條件對其硬固後之性質影響很大，因此本計畫考慮兩種條件即在養生室恆溫恆濕控制下養生 28 天。及在養生室恆溫恆濕控制下養生 7 天，然後放在大氣中養生 21 天等兩種情況。

(四) 試體數量

上述六種配比，兩種養生條件及八(或九)種齡期下，在規定之齡期下均取三個試體之測試結果之平均值。因此每種配比所製作之試體數量分別為：

- 1.樑 ($15^{cm} \times 15^{cm} \times 53^{cm}$) 54 個，為測試抗彎強度發展特性。
- 2.板 ($30^{cm} \times 30^{cm} \times 5^{cm}$) 48 個，為測試耐磨耗阻抗能力用。
- 3.圓柱體 ($15^{cm} \phi \times 30^{cm}$) 51 個，為測試抗壓強度用。
- 4.圓柱體 ($7.5^{cm} \phi \times 15^{cm}$) 20 個，為測定氯離子擴散及吸水性之耐久性測試用。
- 5.大試體 ($150^{cm} \times 200^{cm} \times 50^{cm}$) 一個，為測試巨積混凝土之抗壓強度及非破壞性檢測用。

(五) 海水乾濕循環方式

為加速混凝土試體劣化之速率，因此本研究將製作之試體置於本所海水循環水槽附近的空地上，每 2 小時抽海水，每一次噴灑試體 20 分鐘，以利混凝土試體受乾濕循環反應，而加速試體劣化之速率，可供評估試體之耐久性。試體進行海洋曝露試驗之置放位置平面佈置如圖 51 所示。

二、試驗材料

1.水泥

本研究採用之普通水泥，係購自市面上台灣水泥公司生產之水泥（台泥），經檢驗符合 ASTM 卜特蘭 I 型水泥規格。其基本物化性質如表 14 所示。

2.粗細骨材

粗、細骨材係採用大甲溪之碎石及天然河砂，粗細骨材均經過清洗、烘乾等程序，然後進行比重、吸水率、單位重、過篩分析等試驗，作為配比設計之基本資料，詳見表 15 至 17 所示。

3.爐石

採用中聯爐石公司所生產之水淬爐石粉，其物理及化學性質測定結果如表 18 所示。

4.飛灰

採用台電公司台中火力發電廠之 F 級飛灰，其物理及化學性質測定結果如表 18 所示。

5.強塑劑

採用 CON-MIX 化學摻料公司所生產之強塑劑產品為 Super-100FH 高性能水泥添加劑，其基本性質符合 ASTM C494 G 型規格，其基本性質如表 19 所示。

三、試驗設備及方法

本研究所引用之試驗規範、試驗設備及方法概述如下：

（一）試驗材料物性實驗

1.水泥、飛灰、及爐石之比重試驗：依 ASTM C188 規範規定應用李氏瓶測定。

2.骨材篩分析試驗：依 ASTM C33 之規定利用振動篩試驗求

得粗細骨材粒徑級配分佈及細度模數值。

- 3.骨材之比重與吸水率試驗：依 ASTM C127（或 CNS 488）及 ASTM 128（或 CNS 487）規定利用天平及烘乾箱等進行量測。
- 4.粗細骨材單位體積重量試驗：依 ASTM C29（或 CNS 1166）「粒料空隙檢驗法」，CNS 1166「粒料單位重之檢驗法」規定使用鐵桶、搗棒、天平及燒杯等試驗設備進行測試。
- 5.粗細骨材乾搗單位重試驗：利用 CNS 1166「粒料單位重之檢驗法」之規定將粒料在烘乾箱內烘乾後秤重。測定各固體材料（粗、細骨材及飛灰），在不同的混和量下之乾搗單位重，可繪出各種混和比例與單位重之關係曲線，進而求得最大之乾搗單位重及最佳骨材級配並計算其孔隙率。

（二）混凝土性質試驗

- 1.坍度、坍流度試驗：依 ASTM C143 或 CNS 1176「混凝土稠度檢驗法」之規定使用坍度儀及量尺、馬錶等進行測試。
- 2.抗壓強度試驗：依 ASTM C39 或 CNS 1232「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」利用 200 噸抗壓試驗機進行測試。
- 3.抗彎強度試驗：依 CNS 1234「混凝土抗彎強度試驗法（中心點戴重法）」利用 100 噸萬能試驗機進行測試。
- 4.耐磨耗測試：依 ASTM C779-89a「水平混凝土表面耐磨標準試驗法」利用旋轉板磨損試驗機（圖 52）進行測試，其執行之程序為：
 - （1）測試期間先耐磨 5 分鐘以利清除表面上雜物。
 - （2）測量酒精至 0.025mm。
 - （3）放置測微尺架子（micrometer bridge）使得第 2 組讀數線與第一組測量交叉成直角，測試期間此架子

應置於同一位置，因此在量測前必須先標定位置。

(4) 測試期間為 30 分鐘，必要時可延長至 60 分鐘。

(5) 記錄每次表面磨損試驗之深度。

5. 混凝土電阻特性之測試

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

本研究採用英國 Colebrand Limited 公司所出產的 Resistivity Logger，如圖 53 所示，可供量測混凝土之電阻係數作為判斷混凝土緻密性之指標。

6. 超音波試驗

本研究使用英國 CNS 儀器公司之 PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) 超音波測定儀。主要包括時間顯示器及脈波發射器和接收器。其應用於混凝土強烈檢測之原理為利用脈波發射器，將超音波脈波傳入混凝土中利用接收器量測脈波在其內部之傳遞時間，再依據脈波的傳遞路徑計算脈波速度。

試驗進行時，依其發射器接收器位置分為直接法，半直接法及間接法三種，如圖 54 所示其中以前二方法可得到較令人滿意的結果。故本研究是應用直接法求出速度後，再根據混凝土試體密度及彈性模數之數據，以判斷混凝土品質及均勻穩定程度。

7. 氯離子擴散試驗

本研究使用如圖 55 所示之試驗裝置進行測試硬固混凝土試體之擴散試驗，其測試之工作概述如下：

(1) 試驗準備

a.試片準備：將養護齡期達 28 天以上之試體取出，以切割機截取 7.5cm，厚約 0.5-1.0cm 之薄片，並用研磨機平整。

b.將試體片置於如圖 55 所示之擴散試體裝置之位置上。

c.容器室內左側添加 1000ml 之蒸餾水，而右側則加入 1000ml 之 1 當量濃度（N）之 NaCl 溶液進行擴散試驗。

d.擴散時間達 14 天、40 天、50 天、80 天時，自蒸餾水槽中取出 10ml 溶液，再填加純蒸餾水 10ml 入蒸餾水槽中。

e.將取出之溶液以硝酸銀法滴定氯離子濃度，試驗原理及方法如下：

①原理：於中性或為鹼性溶液中，以硝酸銀滴定氯鹽，用鉻酸鉀當指示劑，在紅色硝酸銀形成之前，氯化銀已沈澱。

②試劑：

（i）鉻酸鉀指示劑：取 5 公克之 K_2CrO_4 容於少許蒸餾水中，加入 $AgNO_3$ 溶液直至產生紅色沈澱物，靜置 12 小時，過濾後，再用蒸餾水將之稀釋至 0.1 公升。

（ii）標準硝酸銀滴定液為 0.0141N，以 2.395g $AgNO_3$ 溶於蒸餾水中，稀釋 1000ml，貯存於棕色瓶中。

（iii）去干擾之特殊試劑有酚酞指示劑及過氧化氫（ H_2O_2 ）30%。

③試驗步驟：

（i）準備水樣：取 10ml 溶液，加入 30ml 蒸餾水稀釋，若水樣含有硫化物，亞硫酸

鹽或硫代硫酸鹽，則加入 1ml H_2O_2 將之攪拌 1 分鐘。

(ii) 以 H_2SO_4 滴定或 NaOH 調水樣，當 pH 值介於 7-10 之間加入 1ml K_2CrO_4 指示劑。用 AgNO_3 滴至出現紅棕色。取 100ml 蒸餾水做空白試驗，一般消耗量約為 0.2-0.3ml。

④計算：

$$\text{mg Cl-}/\text{l} = \frac{(A - B) \times N \times 35450}{\text{水樣體積}(40\text{ml})} \dots\dots\dots (3)$$

式中 A=水樣之滴定用量 (ml)
B=空白試驗之滴定用量 (ml)
N= AgNO_3 之當量濃度 (0.0141N)

(2) 擴散係數之計算

在時間為 t，第 n 次取量，共累積氯離子擴散量 $Q_t(\text{mg})$ 和 $Q_{mt}(\text{mole})$ 計算如下式：

$$Q_t = \frac{V_1}{1000} C_n + \frac{V_2}{1000} \sum_{i=1}^{n-1} C_i \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_{mt} = \frac{Q_t}{1000} \div \text{原子量} \dots\dots\dots (5)$$

其中： V_1 ：容器內溶液之數量 (ml)
 V_2 ：每次取出測量濃度之數量 (ml)
 C_i ：各階段取出溶液之 Cl 濃度 (ppm)
 C_n ：第 n 次取出溶液之 Cl 濃度 (ppm)

以累積氯離子擴散量 Q_{mt} 為縱座標，時間 t (小時) 為橫座標繪圖，由測試數據進行迴歸分析可得到 Q_{mt} 與 t 關係曲線之斜率，則擴散係數 D (cm^2/sec) 可由下列決定：

$$D = \frac{\Delta Qmt \text{ (mole)}}{\Delta t \text{ (sec)}} \div A \text{ (cm}^2\text{)} \times \frac{d \text{ (cm)}}{\Delta C \text{ (mole / cm}^3\text{)}} \dots$$

..... (6)

其中 d：試片厚度。

A：擴散之斷面積。

ΔC ：兩側溶液濃度差。

8. 吸水性試驗

本研究採用英國 BS 1881 之規範，將一定齡期下之試體取出後先烘乾 72 小時，置於乾燥室中冷卻一天後取出立即浸泡水中 30 分鐘量測其吸水速率，以利評估各種不同配比耐海水之持久性。

四、HPC 之拌製

為使大量的混凝土拌製工作順利，本研究先經實驗室試拌後，再由英詮實業公司之預拌工場製作後，由拌合車自臺中縣大里市運至本所製作。

照片 1 至照片 8 為本研究拌合及製作試體與坍度與坍流度量測等現況照片。拌製時，首先使骨材處理成飽和或濕潤狀態後，先進行粗、細骨材拌合，然後將水泥與爐石加入攪拌均勻，再將強塑劑與拌合水混和液倒入均勻攪拌，最後則將飛灰加入攪拌。其中潤濕骨材及飛灰後加之步驟為使強塑劑能達到最大之效用，強塑劑之添加必須相當小心，不可過量以防止泌水現象，若發生析離泌水時，可酌量加入少量之飛灰或水泥以抑制其析離泌水現象，避免因析離、泌水所導致工作度及強度之不良影響，整個拌合流程如圖 56 所示。

五、測試結果分析

(一) 高性能混凝土組成材料之物化特性

一般而言，高性能混凝土之使用材料除粗、細骨材、水泥及水外，常常還添加一些卜作嵐材料（爐石及飛灰）及化學摻料（強塑劑），本研究配比所使用的摻料有中聯爐石、台電飛灰及 CON-MIX 強塑劑。物理化學特性概述如

下：

1.比重

水泥、飛灰及爐石之比重值如表 14 及表 18 所示，水泥及卜作嵐材料皆以 ASTM C188 規定採用李氏比重瓶進行試驗的。由表中可之飛灰之比重為 2.3，而砂之比重為 2.62（表 15），所以在同等重量的取代下將有較多體積的飛灰，而以飛灰比重（2.3）、爐石比重（2.87）部份取代水泥比重（3.18）也會有較多之飛灰及爐石用量。

2.細度和粒徑分析

經細度試驗發現在卜作嵐材料當中爐石之比表面積為 $4488 \text{ cm}^2 / \text{g}$ 較飛灰 $3,110 \text{ cm}^2 / \text{g}$ 為高（表 18 所示），應用雷射粒徑粉末分析結果如圖 57 所示，可爐石粒徑較飛灰及水泥為細，但其粒徑分佈範圍較水泥顆粒廣，且由粒徑分佈曲線可發現飛灰的粒徑也較水泥細，而根據圖 58 之粒徑密度分佈曲線可發現水泥顆粒分佈之均勻性較高，而飛灰之粒徑分佈情形與爐石相當類似。

3.材料之最佳化組成

本研究 HPC 配比，需先瞭解骨材、水泥及卜作嵐材料之基本性質，並以最小孔隙法之顆粒堆積理念，使得顆粒間障礙活化能降低，且考慮最佳級配及最小孔隙之原則下，得到最大之堆積密度。因而飛灰取代砂得到細骨材最大單位重關係圖，如圖 59 所示，即以 12%飛灰取代砂量的單位重最大，其相對孔隙為最少。粗、細骨材之比例如圖 60 所示，即細骨材與總骨材比例以 60%為最佳。本研究採用最大單位重之取代量，而爐石則以 5%取代水泥量作為設計基準，如圖 61。骨材之性質如 15 所示，細骨材之 FM 為 2.715，粗骨材之最大粒徑為 10mm。

（二）配比設計

本研究之配比設計採用 ACI 配比法設計法考慮水固比 < 0.08 ，水灰比 > 0.42 ，水膠比在 0.3-0.35 範圍，拌合水量 $< 170 \text{ kg/m}^3$ ，水泥強度效益以 20psi/kg 為目標。因此控制添

加飛灰 130 kg/m^3 ，爐石量為 80 kg/m^3 ，控制用水量在 160 kg/m^3 ，並要求新拌混凝土之坍度為 $250 \pm 20\text{mm}$ ，坍流度大於 500mm ，所得配比結果如表 13 所示。比較工程設計強度 4000psi 情況之 HPC 與一般混凝土之配比數量大約相近，然而其水泥用量約為一般混凝土之 65%，而以卜作嵐材料取代部份之水泥，而卜作嵐材料為工業廢料，大量使用不僅減少水泥用量而減少製造排放二氧化碳對環境生態之保護及降低溫室效應有很大的幫助；而且以最廉價的本土廢棄材料再生，充分達到經濟性之考量，而且若以水泥強度效益而言，一般混凝土約為 10.33psi/kg ，而高性能混凝土可達到 $16-18\text{psi/kg}$ ，及考量每一公斤的水泥能充分發揮其應有之品質。因此以此配比而言，HPC 確實有經濟與生態性之考量。

(三) 產製過程

經由配比計算後所得之材料數量必須先進行小型試拌，在拌合過程中應注意下列事項：

- 1.應先將粗細骨材調整至面乾內飽和或是些許的濕潤，在試驗過程中骨材的含水量影響相當大，若能正確求出含水量加以控制則能提高拌合效益。
- 2.應注意材料之先後順序，由於水泥中 C_3A 會與水或強塑劑先行起快速的反應，而影響強塑劑使用成效，因此應先加入部份水與水泥反應後，再將強塑劑與剩餘的水加入拌合。
- 3.在實驗室中發現若將飛灰最後置入拌合則效果較佳，由於飛灰細度較細且同等重量下體積較大，在初期之保水率較高，若先行加入拌合則會將大量的水及強塑劑吸附而影響拌合時之效益。

除了各個材料之特性及添加程序對拌合製程有相當之影響外，拌合設備及能量也會影響拌合之結果，唯有均勻且確實的拌合過程才能達到品質之要求。

依據試拌後所量測的各種新拌性質來觀察是否要調整

配比，若是當坍度及坍流度不符合設計要求時，可在添加強塑劑予以調整，但添加時必須注意用量及水灰比之改變，若是使用量過多則會造成泌水及析離之現象，反而降低會混凝土之品質，其次外在環境的溫度也會影響強塑劑使用的成效因此不可不慎。若是有些許泌水的現象，則可適當的添加少許飛灰以改善其泌水現象。在比較高水膠比的配比中可發現常會因為黏稠度不夠而無法達到坍流度的要求，此時可以適當的提高飛灰比例或改變最大骨材粒徑加以改善。

若經由試拌後沒有問題則可進行大量拌合，大量拌合時仍須注意外在環境溫度與試拌時外在溫度的改變及拌合機能量和效益均應事先瞭解。如此才能獲得品質較佳之混凝土，一般而言大量拌合時可降低強塑劑之使用劑量，但能降低多少需試拌和設備及拌合數量而定。

（四）強塑劑對新拌混凝土行為影響性之探討

一般而言，混凝土的用水量愈高，則其工作度愈佳，此將有利於施工；但相對的，材料固化後，卻會產生較多孔隙而使其強度和緻密性較差。若加入強塑劑於混凝土中，由於其分子聚集性功能，會吸附於水泥顆粒表面上，促使水泥漿體發生分散，如圖 62 所示。故可降低所需水量而得到高強度和高緻密性的混凝土材料。

化學摻料的組成爲高分子量之陰離子界面活性劑，若加入於混凝土中，將會降低周圍水之凝聚力，其碳氫鏈上連接之負離子吸附在水泥顆粒表面時，也會使得水泥顆粒表面呈現負電荷，造成水泥顆粒由於同性電荷排斥而分散（圖 63），而增加水泥漿體之流動性。

化學摻料的添加，尤其是強塑劑的應用，使得混凝土無論在工作性、耐久性或經濟性等方面可能達到高性能的表現。但混凝土所使用的化學摻料種類與成分相當複雜，HPC 中所添加的強塑劑只是其中的一種而已。即使同樣是強塑劑，其種類、組成、分子量大小、所含鹽類或添加時間均有差異，這些特性會對混凝土材料性質造成不同的影響性。故在工程應用上，工程師必須獲取正確之強塑劑技

術資訊，做好材料品管與測試，才可確保具有高品質的水平。

（五）高性能混凝土之工作性

1. 坍度及坍流度

新拌混凝土性質是影響選擇混凝土澆置振動及修飾方法與機械設備的重要因素，同時工作性之表現對日後硬固之混凝土影響甚大，因此 HPC 之工作性最好能使混凝土成塑性態或是液態狀，而使混凝土能輕易的填充至模板之各角落。一般對工作性的要求是以坍度及坍流度為依據，因此兩者之要求分別為 $250 \pm 20\text{mm}$ 及 500mm 以上。當坍度及坍流度較小時，則其流送阻力將受減，因此為使混凝土施工順利，一般均要求坍度及坍流度要大為施工施工原則，在本研究中各種配比均以能達到上述坍度及坍流度標準為目標，且用控制水量控制在 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 以內，實驗結果如表 20 所示，由此結果可發現 HPC 之坍度及坍流度均能符合要求，且這些數據是預拌車經過 1 小時行程後到達港研所試驗室之測試結果。因此對於現場施工可以相當地符合施工上之要求。而由表 20 可發現一般混凝土及飛灰取代細砂之混凝土情況，其坍度在 20-22 而坍流度在 $35 \times 40\text{cm}$ 範圍，其工作性遠不如高性能混凝土。

（六）高性能混凝土抗壓及抗彎強度之發展

混凝土的抗壓強度受組成材料，施工材料、施工品質及配比方法等諸多因素之影響。本研究拌製之混凝土，其坍度及坍流度均符合要求，且避免產出泌水現象。因其將會使水泥漿產生凝集作用，並在骨材下方聚積水份產生類似層狀沉澱之組織結構而形成相當多的連續孔隙，造成強度折減。但在拌製 HPC 時，若配比不當或為達到坍度及坍流度要求而添加過多的強塑劑，使得骨材顆粒表面擴散層之水大量地釋出，促使膠結料顆粒產生凝集現象而沉澱於水之下方將降低界面鍵結力，且泌水所產生之孔隙路徑將造成毛細管現象產生很多微裂縫，使強度大為降低。

本研究針對各種配比混凝土齡期 7 天及 28 天進行抗壓

及抗彎測試，其所得之數據如表 21 所示並繪製如圖 64 及圖 65 所示。原則上水膠比為 0.35，0.32 及 0.30 之設計強度分別為 280，350 及 420 kgf/cm^2 ，由圖中可發現在 28 天均能達到設計強度。根據測試結果可以發現高性能混凝土之抗壓及抗彎強度亦較一般混凝土為高。

(七) 高性能混凝土之耐磨耗性能分析

港灣結構體常年置於海洋中，因此容易受到海水之衝擊，因此耐磨性能相當重要。根據本研究初步測試的一些數據如表 22 所示，並將此結果繪製如圖 66 所示，發現高性能混凝土之耐磨性能確實比一般混凝土要好，長期性能有待繼續觀測。

(八) 高性能混凝土之超音波速度及電阻測試結果分析

一般抗壓強度愈高，則超音波速愈高，由初步測試資料（表 22 及圖 67）顯示高性能混凝土的超音波速較一般混凝土為高，而 28 天養生室養生者也較 7 天養生室者為高。此現象與抗壓強度測試結果相當符合。而在電阻測試結果（表 22 及圖 68）顯示高性能混凝土及 28 天養生室養生之情況之電阻係數較大，此顯示與其較具緻密性的為結構有關。

肆、高性能混凝土應用之標準規範

一、建立標準規範之迫切性

臺灣混凝土工程界近年來，由於飛灰、爐石粉、化學添加劑的普及應用以及泵送車的輸送澆注作業，無論在品質與技術方面，都有很大提昇，在過去幾年，混凝土預拌廠如雨後春筍般的迅速成長，而在民國 82 年以後，經濟景氣持續低迷之情況下。於此惡劣的環境競爭下，飛灰、爐石粉、化學添加劑剛好是預拌混凝土業界的三件寶物。因為製造混凝土及輸送澆注的施工方法的改變，當然會收到很多正面作用，但同時也出現不少負面的影響。因此經常可在報章中看現有關混凝土填加飛灰及爐石粉會降低混凝土品質的文章，甚至政府機構亦發文通告相關單位嚴禁填加飛灰。

1995 年美國混凝土學會將 ACI 318 混凝土規範由強度設計法改成耐久性設計法，其中重大的改變是將以往的飛灰及爐石等卜作嵐材料在使用上之束限條件除掉。其考慮的原因是認為採用飛灰等卜作嵐材料可以增加耐久性，有利於結構物混凝土的長期品質。回顧國內飛灰及爐石的使用歷程，如同美國的傳統保守心態，雖然早在 1956 年起國內各大水庫之混凝土都比照美國懇務局的觀念採用大量的飛灰等卜作嵐材料以利減低水泥水化熱所發生混凝土龜裂問題，然而飛灰材料一直被誤認及誤用，尤其 1995 年 ACI 318-95 結構混凝土規範正面的否定嚴禁使用卜作嵐材料的想法。使得混凝土工程界開始重視究竟應該如何添加飛灰及爐石粉以及在施工上應注意的相關規範，才能使負面影響降至最小的限度，且可提高混凝土品質和降低材料成本。行政院環保署為因應國際環保之觀念，正確回收飛灰材料曾於 1996 年 11 月 5 日頒佈將飛灰列為一般廢棄物可在利用之類別，在公共工程混凝土之使用材料上又增加一項重要的資源，可有效地抒解材料不足之壓力。然而公共工程品質要求一向是非常嚴謹的。飛灰材料必須是良好品質，否則不應該隨便添入混凝土中，所以如何定出在應用上之標準規範，以提高品質為一項重要的工作。行政院公共工程委員會因此召開多次的「推廣飛灰之正確使用」座談會，並於 87 年 5 月底完成「公共工程混凝土使用飛灰要點」研究⁽⁴⁶⁾，廣納產關學之寶貴意見，以保證飛灰在混凝土中使用後，能達到應有結構物之安全

性、耐久性、工作性、經濟性及生態性。使飛灰材料的正確使用提供一個有利之引導方針。中華民國結構工程學會高性能混凝土委員會與中國土木工程學會混凝土委員會曾合作於 1996 年底，製訂高性能混凝土特別條款及說明（草案），並經國內外專家學者研討修正，詳如附錄一所示，這些條款是應用「計畫—執行—檢核—修正」過程之觀念，正進行數項工程實務測試中，其成果將回饋至新版本之條款上，其主要目標為提昇國內混凝土工程之品質。

二、使用卜作嵐材料之動機

高性能混凝土使用大量的卜作嵐材料取代部份細砂或水泥，首先必須瞭解飛灰、爐石粉兩者本身都不具有膠結性，不能單獨在混泥統中使用，必須與水泥配合使用才可發揮膠結性，而飛灰或爐石粉單獨和水泥配合使用時，各有其優缺點存在。例如，飛灰為圓球型較易拌合均勻，工作性佳，浮水少，緻密性高，故其龜裂現象較少，但 28 天前的強度成長較慢，中性化速度也較快，飛灰品質的變異性較大、工作度較不亦控制，而且有效鹼含量有實際為偏高等，然而這些飛灰優點可供改善添加爐石之缺點，而其缺點則可藉添加爐石加以改善使用，可使其優缺點達到互補功效。兩者填加混凝土中之使用動機可列如下列數項：

- 1.降低混凝土製造成本，增加利潤。
- 2.改善新鮮混凝土工作度之需要，以利泵送。
 - a.採用碎石砂或 FM 較高的天然砂時，可用飛灰取代部份細粒料。
 - b.採用高強度混凝土時，可用飛灰、爐石取代部份水泥。
 - c.採用低強度混凝土時，可用飛灰取代部份細粒料。
- 3.受施工環境影響及配合工程設計需要，用以改善混凝土品質及增加耐久性等。
 - a.地下結構物、港灣工程、化學工廠、污水處理廠、酸雨較多地區等，可添加飛灰、爐石取代Ⅱ型或Ⅴ型水泥。
 - b.以鹼性骨材反應地區時，可添加飛灰、爐石取代低鹼水泥。
 - c.巨積混凝土可大量添加飛灰、爐石取代Ⅱ型或Ⅳ型或超低水合熱水泥。
 - d.添加飛灰或爐石取代矽灰與部份水泥，可製造水密性混凝土。

- 4.配合新工程技術、設計新材料之需要，用以節省工程建造成本、縮短工期。
 - a.混凝土重力壩、道路鋪築等，以滾壓混凝土施工時，可大量添加飛灰或爐石取代部份水泥。
 - b.無法搗實之結構物以高流動化或高性能混凝土施工時，可大量添加飛灰或爐石取代部份水泥、細砂料等。
- 5.為維護環保並使國家資源完全利用，減少浪費社會成本之需要，應添加飛灰或爐石取代部份水泥、細砂料等。
- 6.其他因飛灰、爐石粉取代大量水泥時，可延緩混凝土凝結時間，故亦可取代一般緩凝劑使用。

三、混凝土之使用材料在品質檢驗上應注意要點

1.水泥

每批水泥進入預拌混凝土工廠時，應要求原廠商提供試驗檢驗合格之有關憑證（包括化學分析、物理性之試驗），且定期或非定期於預拌廠中之水泥倉庫抽樣試驗以資校核瞭解其水泥品質，並定期於每一水泥倉庫執行清倉，避免倉庫壁面的風化水泥淤積，而影響水泥之品質。

有關卜特蘭水泥之物理性質標準規定及化學成分標準規定在 CNS 61 有詳細的述明，水泥之採樣及試驗應依下列方法進行：

- a.採樣：依 CNS 784〔水硬性水泥之採樣法〕。
- b.化學成分分析：依 CNS 1078〔卜特蘭水泥化學分析法〕。
- c.空氣含量：依 CNS 787〔水硬性水泥壩料之空氣含量檢驗法〕。
- d.強度：依 CNS 1010〔水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法〕。
- e.假凝結：依 CNS 3458〔卜特蘭水泥假凝結檢驗法(水泥漿法)〕。
- f.細度，用氣透儀測定：依 CNS 2924〔卜特蘭水泥細度檢驗法(氣透儀法)〕或使用濁度計測定：依 CNS 9747 卜特蘭水泥細度檢驗法(濁度計法)〕。
- g.水化熱：依 CNS 2248〔卜特蘭水泥水合熱試驗法〕。
- h.熱壓膨脹：依 CNS 1258〔卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗法〕。
- i.凝結時間，用吉爾摩氏針測定：依 CNS 785〔水硬性水泥凝結

時間檢驗法(吉爾摩氏針法)]或使用費開氏針法測定:依 CNS 786〔水硬性水泥凝結時間檢驗法(費開氏針法)〕。

- j. 硫酸鹽膨脹:依 CNS 9746〔卜特蘭水泥壩料暴露於硫酸鹽中之潛在檢驗法〕。
- k. 壩料之硫酸鈣含量:依 CNS 9745〔水硬性卜特蘭水泥壩料中硫酸鈣含量之檢驗法〕。
- l. 最佳 SO_3 含量:依 CNS 3656〔卜特蘭水泥之三氧化硫最佳含量檢驗法〕。

選擇水泥品質優劣可使用,水泥砂漿立方試體強度(CNS 1010)為參考條件。對 I 型水泥而言,3 天強度宜接近 200kgf/cm^2 以上較佳,7 天強度宜接近 300kgf/cm^2 以上,28 天強度宜接近 400kgf/cm^2 以上。如 C_3A 成分大於 10%以上時,水泥細度最好不要超過 $3600\text{cm}^2/\text{g}$ 較佳。若 C_3A 成分小於 6%以下時,水泥細度可偏高,且可配合高細度爐石粉大量使用,較無其他負面影響,同時,水泥的過程中,時高的添加不宜有讓混凝土發生假凝結現象,以防止更多的裂縫出現。

2. 飛灰

為火力發電廠之副產品,應選定優良品質飛灰。生產飛灰廠或處理飛灰廠應取得 ISO 9002 國際認證,飛灰之處理應符合環保署「事業廢棄物貯存清除及處理方法及設施標準」之規定。製造飛灰混凝土之拌合廠亦應取得 ISO 9001 之國際認證,以確保拌合之品質及均勻性質。應依下列原則控制其品質:

- a. 飛灰品質需符合 CNS 3036(卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煅燒卜作嵐摻和物)之規定。
- b. 飛灰生產廠及處理廠應定期依中國國家標準 CNS 10896 之規定檢驗飛灰品質。飛灰經常性的檢測包括燒失量、細度及比重,並應整理統計表,製作平均值及變異值分佈圖。飛灰出廠時應出具料源證明及出料單並檢附品質報告書。
- c. 飛灰貯存、取樣及試驗均應依據中國國家標準 CNS 3036 及 CNS 10896 之規定,其稱量累積誤差應在 $\pm 1\%$ 範圍內。
- d. 添加飛灰需註明係取代部份水泥、取代部份細骨材、或同時部份取代水泥及細骨材。

- e. 飛灰之使用，當取代部份水泥時，飛灰品質應符合 CNS 11271（卜特蘭飛灰水泥用飛灰）；取代部份細骨材時，飛灰品質應符合 CNS 3036（卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐摻和物）之規定。
- f. 飛灰於使用前應有可靠試驗資料，以作為配比設計之依據。並應進行試拌試驗，認證其性能之可靠性。
- g. 施工所使用之飛灰，應與選用配比設計時所使用的生產或處理飛灰相同，否則應重新試拌。
- h. 飛灰生產廠或處理廠應通過 ISO 9002 認證或半年內申請通過 ISO 9002 認證，以作為核可其被使用之最基本條件。
- i. 品質資料稽核工作應委託學術單位進行。飛灰生產廠或處理廠均應其被依據 CNS 11271 或 3036 所檢驗飛灰品質資料，製作統計圖表，以供品質資料稽核之參考數據。
- j. 飛灰個別採樣後，直接進行全部要求的相關試驗，且每一採樣僅代表 400 公噸以內的批量。飛灰燒失量、細度和比重等之試驗數據與前十次之試驗結果的平均值之差異均需小於 5%。

Mehta 曾建議因為控制礦物摻料之卜作嵐及水泥化學的行為是其礦物組成而非其化學組成。因此若規範中過分強調化學組成則可能會對卜作嵐混凝土應用上將構成一大障礙。制定合乎要求的新施工及加速試驗準則，可以充分了解有關水化水泥漿微結構預期達到的性能要求是迫切需要的。有許多國家已製訂飛灰混凝土應用之相關規範，並有一些學者做過比較及評論。表 23⁽⁶⁴⁾ 列出各國所製訂之標準規範，顯示均對飛灰的品質有一些限制，雖然寬嚴尺度不同，但是基本精神是一致的。就是希望能確保飛灰加入混凝土後不致有害混凝土早期及晚期的強度品質。

由於煤源、機組不同且受環保因素之影響及未經二次處理，故飛灰品質變異頗大，飛灰燒失量不宜超過 12%，愈低愈好，尤其是添加輸氣劑或高性能減水劑之輸氣混凝土、高流動化混凝土時，燒失量最好不宜超過 6%，否則新拌混凝土品質就很難操控。飛灰亦不能含有油脂或過細的煤煙，否則混凝土澆注後，表面會出現更多的浮油或浮黑現象。飛灰細度愈細，活性愈大，留篩量（濕篩法 45um 篩）最好能小於 20% 下較佳，比表面積能大

於 4000cm²/g 以上最佳，比重愈大愈好，大於 2.10 以上較佳。

3. 爐石粉

爐石粉為水淬爐渣精研磨而成之粉末，依其活性指數分為三級 80、100、120 級，又依細度可為 4000、6000、8000 級，目前台灣市面水準一般為 80-100 級，細度為 4000 級。影響爐石粉品質為爐石粉細度及爐渣的鹽基度、燒失量、玻璃質等。一般而言，鹽基度愈大愈好，最好在 1.75 以上較佳，玻璃質不得低於 95%，最好 98% 以上較佳，燒失量不得超過 1.0%（CNS 規定 3% 以內），最好低於 0.3% 較佳。

一般選擇爐石粉品質以細度和活性指數為指標，依目前臺灣氣候及水泥的成分、細度及使用化學添加劑之習慣而言，爐石粉的細度宜在 3800-4700cm²/g 較佳，夏天氣溫較高，爐石粉細度宜偏高，混凝土龜裂機會較少，冬天氣溫較低，爐石粉細度宜偏高，混凝土早期強度才不至於降得太低。以同批爐渣而言，研磨的爐石粉細度愈低則活性指數會偏低，混凝土早期強度較低，則爐石粉添加量不宜過多，細度高則活性指數會偏高，混凝土早期強度較高，則爐石粉添加量可較高。細度 6000 級以上爐石粉，通常是應用在超低水合熱水泥（水泥成分小於 30%）及高性能混凝土的高添加量工程較多或水泥製品等用途。

有關使用於混凝土及水泥砂漿中作為膠結性材料之水淬高爐爐渣粉之物理及化學性質需求，在中國國家標準 CNS 12549 中有詳細規範。而符合比標準之水淬爐渣粉，可與卜特蘭水泥混合達到符合 CNS 3654 所規定之高爐水泥；或可做為混凝土及水泥砂漿用摻加物，其採樣及試驗應依下列方法進行：

- a. 採樣：依 CNS 784〔水硬性水泥之採樣法〕之規定。
- b. 基準水泥：所使用之水泥應合乎 CNS 61〔卜特蘭水泥〕之規定。
- c. 試體製作：依 CNS 1010〔水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法〕製作試體。
- d. 強度測試：依 CNS 1010 測試 7 天及 28 天之抗壓強度。
- e. 水淬爐渣粉活性指數試驗：水淬爐渣粉活性指數為以卜特蘭水泥壩料與相關壩料之抗壓強度計算求得；而壩料的組成成分為水淬爐渣粉與卜特蘭水泥，其質量配比为 50：50。

活性指數 (%) = (SP/P) × 100

SP=水淬爐渣粉水泥壩料之抗壓強度平均值， kgf/cm²

P=基準水泥壩料之抗壓強度平均值， kgf/cm²

SP是這一批水淬爐渣粉水泥壩料抗壓強度之結果， P則是同一天製作的基準水泥壩料抗壓強度之結果，或是最近連續五次基準水泥壩料強度的平均值。

f.比重：依 CNS 11272〔水硬性水泥密度試驗法〕。

g.細度：依 CNS 11273〔水硬性水泥以試驗篩 0.045mm CNS 386 師篩試驗法〕或依 CNS 2924〔卜特蘭水泥細度檢驗法〕（氣透儀法）。

h.壩料空氣含量：依 CNS 787〔水硬性水泥壩料之空氣含量檢驗法〕，其中以水淬爐渣粉 350g 代替水泥，並以適當之水淬爐渣粉比重計算。

i.硫化物含量（ S ）：依 CNS 1078〔卜特蘭水泥化學分析法〕。

j.硫酸鹽含量（以 SO₃表示）：依 CNS 1078〔卜特蘭水泥化學分析法〕。

k.總鹼鹽含量：（ Na₂O+0.658K₂O ）：依 CNS〔卜特蘭水泥化學分析法〕。

l.氯鹽含量（ Cl ）：依 CNS 1078〔卜特蘭水泥化學分析法〕。

5.骨材

混凝土使用的天然骨材及碎石料，一般要求必須「淨潔、堅硬、耐久，且不含有害物之塵埃、泥土及有機物等，和適當的顆粒形狀」。據此原則選材的原則可歸納如下：

(1) 表面淨潔

骨材的淨潔度，指塵埃、細泥及黏土成分較少，以免影響工作性，進而增加水泥用量，長期不利於鍵結強度。避免含有機物，以免影響水泥之凝結及強度之發展。避免表面受污染而影響骨材與漿體之鍵結強度。當然不可含過量之氯化物，否則易造成鋼筋腐蝕。

(2) 材質堅硬

避免使用過軟之岩石及孔隙的母岩，如軟質砂岩、軟質凝灰岩、風化岩石；避免含過軟過多柔弱的平面，如水成岩、頁岩等具有積層弱面之岩石。

(3) 形狀適當

避免使用扁平狀細長狀和條形的顆粒，換言之宜避免使用含片岩、片麻岩、粘板岩等之母岩，製程中必須適當之處理，以避免形成片狀之顆粒。

針對上述的條件，似乎採用斜坡的骨材，才會獲得較佳之品質，因為斜坡具有自然淘選級配作用，又顆粒程圓滑形狀。然而事實上很難有理想之骨材，一般僅能由河川或路上開採的石材加工處理。

表 24 所示為一般骨材所需之性質及其在混凝土配比設計上的重要性。可供規範品質檢驗之參考⁽⁶⁵⁾。

6. 拌和水

混凝土拌和水的品質檢驗方法，主要在中國國家標準 CNS 1237 及 CNS 5858 規範中，英國標準 BS 3148 中亦有規定，基本檢驗項目包括「酸性」與「鹼性」，「固體總量」及「無機物」，和「氯離子含量」測定，如表 25 所示⁽⁶⁵⁾。「酸性與鹼性」的檢驗主要測定 pH 值。故體總量及無機物則以烘乾方式定量。而氯離子含量是以滴定方法定量測定。不過如 BS 3148 規範會要求採用適當的水泥，再以有疑問的水和蒸餾水製作砂漿式樣進行凝結時間和抗壓強度的對比。如果與蒸餾水所作試件進行比較凝結時間變化不超過 30 分鐘，強度下降也不超過 20%，這種水就被認為是合格的。此外，美國經常用的一種標準式要求 7 天和 28 天強度至少應該是飲用水所作對比試驗的 90%。但是相應的混凝土性質也應該加以檢查，如果氯離子含量過多，則可能造成鋼筋生鏽膨脹而使混凝土結構喪失耐久性，因此必需確保這些混凝土長期性質不受有害之影響，而不應只關心滿足規範要求，應更要關心長期使用性能。如果懷疑供水源的適用性，則應該尋求另外的供水來源。而有關拌和水量之測定，除了審定配比以外，可以 BS 1881 規定之「水洗分析法」加以篩分。

四、預拌混凝土廠在製作混凝土上應注意事項

(一) 管理上應注意之事項

對製作優良品質的混凝土而言，預拌廠的管理工作是

相當重要，尤其添加飛灰、爐石粉、化學添加劑的預拌廠，更需特別小心，應注意下列事項：

1.膠結料的進料管理

業者曾經發生過非飛灰料壓送進入水泥倉儲中，而造成混凝土澆鑄後不會凝固需全部再清除掉的事件，可能原因是人為失誤。為避免類似案件再發生，各料倉的進料進口處必須上鎖並註明材料名稱，且運送材料的散裝車須加封封條，以防止其他掉包之問題發生。

2.膠結材料分開計量

有添加飛灰或爐石的預拌廠務須將其水泥分開計量較為安全，除可減少因累積計量磅秤落差所造成添加量不準確因素外，尚可縮短計量時間，而提高工作效率。

3.材料拌和均勻性問題

各預拌廠因拌和鼓之機型不一樣，所需拌和時間亦未盡相同，且僅採用單一水泥縮須知最佳拌和時間與添加飛灰、爐石等卜作嵐材料後所需時間亦需要做調整。調整的時間多寡需經均勻性試驗後才可判定最佳之拌合時間，唯 CNS 規範內容偏向於單一水泥的要求，對添加飛灰、爐石之拌合而言是已夠嚴格的。故混凝土澆置後，就比較容易發生泌水及強度較不穩定現象，為測底瞭解二種以上膠結料是否拌合均勻，除注意 CNS 規範之規定外，更應在追蹤水泥漿體單位質量或膠結料比重的均勻性試驗。

4.機動性調整配比

預拌廠因粗細骨材級配有變化，化學添加劑類型、成分或飛灰的品質改變時，則混凝土配比必須再作適當的調整。尤其是飛灰的燒失量與細度不穩定時，對混凝土的工作影響最大，對添加輸氣劑的混凝土添加高性能減水劑的拘性能混凝土是很難控制的。為避免這些困難發生，飛灰的燒失量以不得超過 6%較佳。同時為增加混凝土之穩定性，於預拌廠進料時所採用配比的輸氣劑或高性能減水

劑之用量，不得固定，應作機動性之調整，才能獲得品質均一的高性能混凝土。

（二）施工應注意事項

混凝土在現場施工品質上應注意下列事項：

1. 骨材與漿體分離混凝土表面大量泌水

通常發生於混凝土坍度超過 22 公分以上，或添加過量之高性能減水劑之情況。高性能混凝土如有添加大量的飛灰，而飛灰燒失量變化又很大且高性能減水劑用量不跟隨飛灰品質調整時，則會產生大量泌水及材料析離現象，嚴重者還會出現混凝土龜裂現象。改善之策略為飛灰燒失量大於 6% 以上者盡量少用，否則比需適時地調整高性能減水劑。

2. 坍度急速下降

添加飛灰取代部份水泥時，因單位體積混凝土的水泥用量較低，故其坍度損失應該較少才好，但有些特殊狀況卻常發生坍度急速下降，推測其原因大概是：

- （1）添加高性能減水劑之混凝土，有部份高性能減水劑被飛灰的碳顆粒表面所吸著住而減少其應該發揮之功效。
- （2）添加輸氣劑之混凝土，有部份輸氣劑已被飛灰的碳顆粒吸著住，而減少其功效，因此降低含空氣量、減少水泥漿體，致使坍度急速下降。
- （3）其他如水泥溫度太高或水泥有假凝結現象時，以會發生坍度急速下的異常狀況。

3. 空氣含量偏多或偏少

混凝土若添加飛灰，但飛灰燒失量不穩定時，輸氣劑添加量如未做適當調整，則混凝土空氣含量就很難加以控制，常有偏多或偏少現象。

4.凝結時間過長

混凝土添加飛灰或爐石粉愈多則其凝結時間愈久，尤其冬天寒流來襲，氣溫低於 10 ℃，高添加量之飛灰或爐石粉，其混凝土凝結時間甚至超過 12 小時以上之現象出去，在施工時不可不注意，因此拆模時間需延後。

5.混凝土早期強度低

添加飛灰之混凝土在澆置完成的最初 24 小時內之早期強度成長與一般水泥比較有明顯的降低現象出現。如應用滑動磨板施工時，應配合大氣之氣溫作適當的調整其添加量，並至預先製作試體，先行檢驗 24 小時內各時段強度成長之情形，以配合滑動模板的移模速度。

6.泌水及龜裂問題

目前混凝土施工最大的缺點是泌水較快及較多，且龜裂機會率亦多。其原因除與混凝土坍度、砂石之級配有關外，也略受添加飛灰及爐石之影響。改善之策略為添加適量輸氣高性能減水劑為確保混凝土品質及兼顧維持工程進度下，需經常對混凝土性質影響因素探討，並進而解決施工疑難問題。諸如「混凝土生產與澆置量供需分析與檢討」、「混凝土溫度控制檢討」、「混凝土坍度損失檢討」、「混凝土減水緩凝劑超添加量對混凝土坍度、強度等品質影響與應用」、「混凝土高強度減水劑之應用解決施工問題」以及「混凝土長期強度發展率之探討」等俾可對工程品質提供最佳之解決方針。圖 69 及圖 70 列出高性能混凝土材料品質及施工檢驗作業程序可供監工單位作為查核之參考⁽⁶⁶⁾。

伍、結論與建議

根據本研究結果，可得出下列結論與建議事項：

一、結論

- 1.高性能混凝土主要強調全面品質保證，並且由最初始的「料源管制」，做到混凝土預拌廠及輸送廠商之「製程管制」，到結構體之「成品管制」，所有階段都是由產、官、學、研等通力合作，將「科學」研發的成果綜合管理「藝術」，協助施工技術之提昇，達到安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性之要求，使結構物品質受到全面之保障。此為提高品質保證確保結構安全性之良策。
- 2.高性能混凝土由於使用廉價之工業產品飛灰及高爐石替代價格高之水泥，因此可以使水泥發揮其強度效益，相當具有經濟性，且可解決電廠及煉鋼廠將這些工業副產品拋棄所造成工業污染之生態性問題。
- 3.高性能混凝土由於填加強塑劑可以分散水泥顆粒間之聚簇結構。因此將使顆粒表面電雙層中除了吸附層與擴散層所保有之水分外，會釋出多餘的含水量，是故增加漿體之流動性。因此其坍度及坍流度都較大，而坍度流動時間亦較長。因此易於填充至鋼筋密集的樑柱接頭之處，而且在施工上可減少泌水與析離現象，
- 4.高性能混凝土由於填加飛灰及爐石等卜作嵐材料，因其具有卜作嵐反應，會與水泥水化物氫氧化鈣反應而生成具緻密性的矽酸鈣水化物，因此可以減少混凝土中之孔隙體積，使結構體更為緻密，故其抗壓強度、抗彎強度及耐磨性均較佳。
- 5.由於高性能混凝土使用強塑劑及飛灰、爐石等卜作嵐材料，其卜作嵐反應之生成物矽酸鈣水化物膠體可填充孔隙。因此使得混凝土結構體中之孔隙率降低，所以腐蝕因子包括水分、氧氣及氯化物等不易入侵，且體內之氫氧化鈣數量也相對地較為減少，因此結構體的耐鋼筋腐蝕及混凝土劣化的能力將更為提高，此可由電阻係數之量測數據中獲得證實。

- 6.曝露在海洋環境下之混凝土施工規範不僅需要所製作出來的混凝土結構體之長期性能表現可達到兼顧安全及耐久，且在工程成本上要求經濟、施工的工作性佳，使用材料能做最有效的利用且兼顧環保生態性，高性能混凝土是最能夠符合這些施工規範的一種最新研發之新材料，值得深入研發與應用。
- 7.高性能混凝土自料源、製程及成品整個過程中都經過仔細的品質管制，其目的在滿足依設計者之設計理想和使用對工程品質的需求，基本上這些管制作業都必須參考 ISO 9002 及 14001 之規定，透過「計畫—執行—檢核—修正」品質保證技術過程，以確保品質的均勻一致性和穩定性，滿足營建工程品質優良之需求的。

二、建議

- 1.目前國內預拌廠中之人員素質及部份老舊設備，未能符合 HPC 生產之需，最好能予汰舊換新，至於人員之素質、觀念及態度方面則需加強訓練及改正，方能有助於整體品質之提昇。
- 2.為提昇 HPC 在廠拌之品質，因此有關料源之穩定性及品質控制是不可忽略的工作，HPC 講究整體性之材料組合，因此若稍有疏失，則將造成無法達成所需之性能，因此必需經過相當嚴謹之全面品質保證，以確保設計之品質，附錄中所列高性能混凝土特別條款（草案）可供應用參考。
- 3.目前 HPC 之各種性質如耐久性、耐火性、潛變、乾縮等資料仍然缺乏，因此須以長期研究觀測，已建立完整之資料。
- 4.現今國內 HPC 剛起步，因此必須以有系統、有計畫的制訂一套完整之施工規劃及檢測制度，以應未來之需。附錄中所列高性能混凝土特別條款（草案）仍須進行一些工程實務測試後才能定出完整之施行細則。

陸、參考文獻

- 1.黃兆龍，「HPC 使用於高雄東帝士 85 層大樓整合規劃」，高性能混凝土研討會論文，pp.147-160（1993）。
- 2.陳振川，「高性能混凝土之定義與特性」，結構工程，第九卷，第一期，pp.5-6（1994）。
- 3.黃兆龍，「飛灰混凝土發展與應用趨勢」，如何使用飛灰以提昇混凝土品質研討會論文集，臺灣營建研究院及台電公司主辦，pp.27-64（1997）。
- 4.黃兆龍，「高性能混凝土水化動力模式分析（I）」，國科會研究報告編號 NSC 85-2211-E-011-006，（1996）。
- 5.Malhotra, V. M. and Ramezani-pour, A. A., "Fly Ash in Concrete", CANMET, pp.60(1994).
- 6.黃兆龍、林仁益等，「含飛灰及化學添加劑對普通水泥水化機理及巨微觀性質之研究」，台電公司 80 年度研發報告（1991）。
- 7.李釗，「飛灰燒失量對飛灰混凝土性質之影響」，台電公司 80 年度研發報告（1991）。
- 8.Virtanen, J., "Freeze-thaw Resistance of Concrete Containing Slag, Fly Ash and Silica Fume", In Proc. 1st Inter. Conf. On the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete SP-79, ACI pp.923-942(1983).
- 9.Compton F. R., and Macnis, C., "Field Trial of Fly Ash Concrete. Ontario Hydro." Research News.(Jan/Mar.):18-21(1952).
10. ACI Committee 211 1-81 "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete" ACI Manual of Concrete Practice No.211 pp.1-81(1984).
11. Williams, J. T., and Owens, P. L., "The Implications of a Selected Grade of UK Pulverized Fly Ash on the Engineering Design and Use in Structural

- Concrete ” , In Proc. Inter. Symp. on the Use of PFA in Concrete, Univ. of Leeds, UK, pp.301-313(1982).
12. 陳振川, 「煤灰爲築堤材料之試驗研究報告」, 台大及台電環保處 79 年研發報告, (1990)。
 13. Bamforth, P. B., “ In-Situ Measurement of the Effect of Partial Portland Cement Replacement Using either Fly Ash or Slag on the Performance of Mass Concrete, Proc. Of the Institute of Civil Engineers 69, pp. 777-800(1980).”
 14. Ramakrishnan, V. et. al, “ Performance Characteristics of Concrete Containing Fly Ash ” , in Proc. Of Symposium on Fly Ash Incorporation in Hydrated Cement Systems, Ed. By S. Diamond, Materials Research Society, Boston. MA. pp.233-243(1981).
 15. Yuan, R.L., and Cook, J.E., “ Study of a Class C Fly Ash Concrete ” . in Proc., 1st Intern. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-products in Concrete, Montebello, PQ, July 31-Aug. 5, Edited by V.M. Malhotra. American Concrete Institute, Detroit, MI, Special Publication SP-79, pp.307-319(1983).
 16. Joshi, R.C., “ Effect of Coarse Fraction(+#325)of Fly Ash on Concrete Properties ” , in Proc. , 5th Intern. Symposium on Fly Ash Utilization, Reno, NV, Mar. U.S. Department of the Environment, Washington, DC, DOD/METC/82-52, pp.77-85, (1982).
 17. Ravina, D., “ Efficient Utilization of Coarse and Fine Fly Ash in Precast Concrete by Incorporating Thermal Curing ” . Journal of the American Concrete Institute, 78:194-200(1981).
 18. 王櫻茂, 「飛灰水泥對結構混凝土滲透性及耐久性影響之研究報告」, 台電公司 80 年度研發專題報告 (1991)。
 19. Helmuth, R. “ Fly Ash in Cement and Concrete ” , Portland Cement Association, pp.30 (1987).
 20. Stark, D., “ Alkali-silica Reactivity in the Rocky Mountain Region ”, in Pro., Fourth Intern. Cont. on the Effects of Alkalies in Cement and Concrete,

- pp.235-243, June 4-7 1978, Purdue University, and Publication No. CE-MAT-1-78. West Lafayette. Ind., Purdue University Press, 376 pp.(1978).
21. Lane, R. O., and Best, J.F., " Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete " , Concrete International, 4(7), pp.81-92 (1982).
 22. Ghosh, R.S., and Timusk, J. " Creep of Fly Ash Concrete " , Journal of the American Concrete Institute, 78. Pp.351-357(1981).
 23. Carrette, G.G., and Malhotra, V.M. " Characterization of Canadian Fly Ashes and Their Relative Performance in Concrete " , Energy, Mines, Mines and Resources Canada, Ottawa, ON. CANMET Report 86-6E(1986).
 24. Elfert, R.J., " Bureau of Reclamation Experiences with Fly Ash and Other Pozzolans in Concrete " , Proc 3rd Intern. Ash Utilization Symposium, Pittsburgh, PA, Mar. 13-14, Bureau of Mines, Washington, DC. Information Circular IC 8640, pp.80-93(1973).
 25. Tsukayama, R., Nagataki, S., and Abe , H., " Long Term Experiments on the Neutrlization of Concrete Mixed with Fly Ash and Corrosion of Reinforcement " ,Proc. 7th Intern. Congress on Chemistry of Cement, Paris, France, Editions Septima, Paris, France, Sub-Theme VII-ICCC(1980).
 26. Nagataki, S., Ohga, H., and Kim, E.K., " Effect of Curing Conditions of the Carbonation of Concrete with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement in Long Term Tests " , in Proceedings, 2nd CANMET/ACI International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Spain, Apr. 21-25, Edited by V.M. Malhotra. American Concrete Institute , Detroit, MI, Special Publication SP-91, pp.521-540(1986).
 27. Ho, D.W.S., and Lewis, R.K., " Carbonation of concrete Incorporating Fly Ash or a Chemical Admixture " , in Proc 1st Intern. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-products in Concrete, Montebello, PQ, July 31-Aug, 5 Edited by V.M. Malhotra. American Concrete Institute, Detroit, MI, Special Publication SP-79, pp.333-346(1983).
 28. Carrasquillo, P., " Durability of Concrete Containing Fly Ash for Use in

- Highway Applications ", in proc., Katharine and Bryant Mather Intern, Conf. on Concrete Durability, Atlanta, GA, Apr. 27-May 1 , Edite by J.M. Scanslon. American Concrete Insitute, Detroit, MI, Special Publication SP-100, Vol.1, pp.843-861(1987).
29. Naik, T.R., Singh, S.S., and Hossein, M.M., " Abrasion Resistance of High-Volume Fly Ash Concrete Systems " , Electric Power Research Institute , Palo Alto, CA, EPRI Report(1992).
 30. Liu, T.C., " Maintenance and Preservation of Concrete Structures ", Report 3 :Abrasion-Erosion Resistance of Concrete. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, Technical Report C-78-4, pp.129(1980).
 31. Abdun-Nur, E.A., " Fly Ash in Concrete: An Evalution " , Highway Research Board, Washington, DC, Highway Research bulletin 284(1961).
 32. Berke, N.S., Scali, M.J., Regan, J.C., and Shen, D.F., " Long-Term Corrosion Resistance of Steel in Silica Fume and/or Fly Ash Containing Concrete " , in Proc., 2nd CNMET/ACI Intern. Conf. on the Durability of Concrete, Montreal, PQ, Aug. 4-9, Edited by V.M. Malhotra, American Concrete Insitiute, Detroit, MI, Special Publication, SP-126, Vol. 1 , pp.393-422(1991).
 33. Building Code Requirements for Structure Concrete, (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95), ACI , Detroit, (1995).
 34. 黃兆龍, 「高性能混凝土組成模式推演及損傷力學研究」, 國科會研究報告編號 CNS 83-0410-E011-014 , pp.3 (1994) 。
 35. 葉基棟, 彭耀南, 陳清泉, 黃兆龍等, 「高強度混凝土設計及施工準則初步研究」, 內政部建研所報告, 台北 (1991) 。
 36. ACI 211.4R, " Guide for Selecting Properties for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash " , ACI, Detroit (1993).
 37. 王和源, 蔡聰誠, 林豐益, 黃兆龍, 「 T & C Tower 高性能混凝土配比與骨材堆積關係」, 飛灰及爐石混凝土應用研討會, 中央大學, 第 13-28 頁 (1994) 。

38. 顏聰，詹文宗，「以表面積理論探討高強度混凝土配合設計法」，國立中興大學土木工程研究所碩士論文，（1988）。
39. Aitcin, P.C. and A. Neville, "High Performance Concrete Demystified", ACI Concrete International, 15(1), ACI, Detroit pp.21-26(1993).
40. 黃兆龍，「由高雄 85 層 T & W Tower 論 HPC 材料選擇及性能」，高性能混凝土研發及應用研討會，第 83-124 頁。
41. 沈得縣，張文溢，「含飛灰高性能混凝土配比設計之技術」，如何使用飛灰以提昇混凝土品質研討會，pp.93-120（1997）。
42. 黃兆龍，「高強度混凝土施工及品質管制」，高強度混凝土概論，高強度混凝土研討會論文集，財團法人臺灣營建研究中心（1988）。
43. Johansen, V. and P.J. Andersen, "Particle Packing and Concrete Properties", Materials Science of Concrete II, Edited by J. Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, pp.111-147(1989).
44. Building Code Requirements for Structural Concrete ACI 318-89(1989) ACI 318-95 ACI Detroit (1995).
45. 黃兆龍，「公共工程混凝土使用飛灰注意要點」，行政院公共工程委員會委託專案研究計畫，pp.148（1998）。
46. Buenfeld, N. R., J. B. Newman and C. L. Page, "The Resistivity of Mortar Immersed in Sea-Water", Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp.511-524 (1986).
47. Brain B. Hope and K. C. Ip. Alan, "Corrosion of Steel in Concrete Made with Slag Cement", ACI Materials Journal, pp.525-530 (1987).
48. Mindess, S and J. F. Young, "Concrete", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1981).
49. Cavalier, P. G. and P. R. Vassie, "Investigation and Repair of Reinforcement Corrosion in a Bridge Deck", Proc. Inst. Of Civil Engineers, Vol. 70, Part 1, pp.460-480 (1981).
50. Brain B. Hope and K. Ip. Alan, "Corrosion and Electrical Impedance in

- Concrete ” , Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp.525-534 (1985).
51. Alonse, C., C. Andrade, and J. A. Gonzalez, “ Relation between Resistivity and Corrosion Rate of Reinforcements in Carbonation Mortar Made with Several Cement Types ” , Cement and Concrete Research, Vol. 8, pp.687-698 (1988).
 52. Hansson, I. L. H. and C. M. Hansson. “ Electrical Resistivity Measurements of Portland Cement Based Materials ” , Cement and Concrete Research, Vol. 13, pp.675-683 (1983).
 53. Brain B. Hope and K. C. Ip. Alan, “ Corrosion of Steel in Concrete Made with Slag Cement ” , ACI Materials Journal, pp.525-530 (1987).
 54. Makeides A. C., “ Some Electrochemical Methods in Corrosion Research ” , Corrosion, 18 (1962).
 55. 彭耀南，趙文成，「海砂用於生產混凝土可行性研究」，內政部建築研究所籌備處專題研究計畫期末報告（1991）。
 56. 邱英嘉，（黃兆龍，張大鵬指導），「鋼筋混凝土性質影響腐蝕行為之研究」，碩士論文，國立臺灣工業技術學院營建工程技術研究所，（1992）。
 57. 陳廷芳，（黃兆龍指導），「高性能混凝土樑反覆載種下腐蝕行為研究」，碩士論文，國立臺灣工業技術學院營建工程研究所，（1994）。
 58. Gjfrv O. E., Vennesland, f, and El-Busaidy, A. H. S., “ Electrical Resistivity of Concrete in the Ocean ” , Paper OTC>2830, Offshore Technology Conference, (1977).
 59. Langford, P. and Broomfield. J “ Monitoring the Corrosionof reinforcing steel ” , Construction Repair. NO.2 palladian puol. Pp.33-36, 1987.
 60. Taylor Woodrow Research Laboratories, “ Concrete in the Oceans-Marine Durability Survey of Tongul Sands Tower ” , Tech. Report No.5 CIRIA/UEG Cement and Concrete Association, Department of Energy London, 1980 pp.86.

61. The Concrete Society, " Permeability of Concrete and Its Control " , Technical Report, pp.56., 1985.
62. Taywood Engineering Ltd. Australia, Correspondence to MBT (Singapore) Pte Ltd. Jan., 1993.
63. British Standard Institution, " Method of Testing Concrete " Part 5 , London, BS1881: Part 5 1970.
64. 顏聰, 「飛灰混凝土之工程性質」, 正確使用飛灰以提昇混凝土品質研討會, 臺灣營建研究中心, pp.105-150 , 1996 。
65. 黃兆龍, 「混凝土性質與行為」, 詹氏書局, pp.113 , 1997 。
66. 林維明, 饒正, 張道光, 「新建工程之品質提昇研究」, 港灣技術研究所, 86-研(11)研究報告, pp.101-102 , 1997 。

表 1 添加飛灰及強塑劑水泥漿體之凝結時間比較（水灰比=0.47）（6）

單位：時：分

強塑劑(%)	0										0.25										0.5									
	0	5	20	40	60	80	0	5	20	40	60	80	0	5	20	40	60	80	0	5	20	40	60	80	0	5	20	40	60	80
飛灰量 (%)	0																													
初凝	4:37	4:51	4:58	6:17	7:38	12:00	4:56	4:53	5:25	6:23	8:42	12:45	4:59	5:15	6:00	6:57	10:01	14:47												
終凝	8:22	8:32	8:34	9:52	11:16	17:08	8:02	8:00	9:09	9:46	12:46	18:45	8:00	8:26	9:02	9:52	13:41	23:27												
初凝延緩時間	-	0:14	0:21	1:40	3:01	7:23	0:19	0:16	0:48	1:46	4:05	8:08	0:22	0:38	1:23	2:20	5:24	10:10												
終凝延緩時間	-	0:10	0:12	1:30	2:54	8:46	-0:22	-0:22	0:47	1:24	4:24	10:23	-0:22	0:04	0:40	1:30	5:19	15:05												

強塑劑為符合 ASTM C494-82 對化學摻料之效能分類之 F 型高性能減水劑之規範

表2 平均中性化深度⁽²⁶⁾

水泥單位重 C+F (kg/m ³)	飛灰含量 F/(C+F) (%)	材齡 (年) Age (years)	平均中性化深度 (mm)					
			室 外 *				室 內 *	
			1天	7天	28天	91天	7天	91天
250	0	2	6.4	3.9	3.4	3.9	7.9	5.2
		5	7.0	5.3	5.9	5.7	13.6	11.7
		10	8.6	6.5	7.0	7.4	18.2	15.2
		15	10.7	7.3	7.6	7.7	22.1	18.3
	30	2	8.9	6.4	5.9	6.2	11.1	7.9
		5	13.1	10.3	10.4	10.8	21.0	16.5
		10	14.1	11.0	11.5	11.8	28.4	21.8
		15	14.9	13.3	12.7	14.6	34.5	27.6
290	0	2	5.0	1.9	2.3	2.7	6.1	4.1
		5	4.3	2.0	2.2	3.5	9.2	6.4
		10	4.1	2.0	2.1	3.8	11.4	10.2
		15	3.7	2.2	4.4	5.4	14.6	13.4
	30	2	6.7	5.1	5.5	4.1	9.3	6.6
		5	7.1	5.9	5.5	5.6	14.5	10.3
		10	7.3	7.0	6.0	5.7	20.2	15.7
		15	9.9	8.2	6.3	6.6	22.3	19.0
330	0	2	0.9	0.2	0.1	0.5	2.2	1.4
		5	2.7	1.2	1.6	1.5	5.7	5.0
		10	1.6	0.8	1.2	1.1	6.2	4.4
		15	0.6	0.2	1.0	1.8	9.0	7.9
	30	2	2.8	1.6	2.1	1.6	5.7	3.8
		5	5.7	2.8	4.6	4.6	10.2	9.4
		10	3.6	2.0	2.3	2.0	12.8	9.8
		15	3.0	2.2	3.3	3.6	15.2	13.9

* 初始水中養護時間

表 4 高性能混凝土與其他混凝土之比較 (39-41)

國 家	年 代	普 通 混 凝 土	高 流 動 混 凝 土	高 強 度 混 凝 土		高 性 能 混 凝 土	
				國 外	國 內	國 外	國 內
固 體 (kg/m ³)	水	1993	1982	1975~1989	1990	1984~1994	1992~1994
	卜作嵐材料	300~350	321~322	315~505	343~585	315~516	271~585
	細 骨 材	-	-	30~173	30~340	30~374	59~340
	粗 骨 材 **	790	856~861	577~745	524~1086	630~840	524~1086
比 率 **	粗 骨 材 **	1050	1042~1047	1030~1140	625~1098	801~1121	625~1098
	細粗骨材比 (S/a)	-	-	-	0.37~0.55	0.3~0.51	0.44~0.5
液 體 (kg/m ³)	粗骨材水泥比 (w/c)	-	-	-	-	3.3~10.9	3.1~6.2
	水	170~175	146~147	130~195	115~199	127~195	122~199
	強 塑 劑 (% wt of cement)	-	6~7***	5.9~15.7	2.1~20	5.9~22.5	5.2~18
	緩 凝 劑	-	-	1.8~4.5	-	0.9~4.5	-
比 率 *	總重量 (kg/m ³)	2365	2372~2383	2382~2481	2372~2479	2372~2527	2353~2443
	水 灰 比 W/C	0.5~0.65	0.47	0.25~0.37	0.23~0.54	0.28~0.57	0.34~0.42
	水 膠 比 W/B=W/(C+P)	-	-	0.25~0.37	0.23~0.54	0.26~0.35	0.23~0.54
新 拌	坍 度 (cm)	9	23	-	-	20~25	24~28
	坍 度 45min (cm)	-	-	-	-	11~22	23~26.4
	Air (%)	1~3	-	-	-	1.2~4.4	0.7
	溫 度 (°C)	-	-	-	-	23~25	36
硬 固	強 度 kg/cm ²	7 天	-	-	-	378~1100	470
		28 天	-	520~1190	501~910	650~1350	518~910
		91 天	-	790~1450	-	790~1450	-

* w/c=(Water+Liquid Admixture)/Cement; w/b=(Water+Liquid Admixture)/(Cement+pozzolan)

** D_{max} ≤ 16mm; a=wt of total/agg; w/c=wt of total agg/wt of cement

*** 外加劑為水溶液，但它們之比例是以混凝土固體重量之百分比表示。

表3 有害因子對海洋混凝土可能造成之影響性

侵蝕型態	飛灰之影響	條件
乾濕循環反應	無	若配比及養治條件均充分之情況下
凍融循環反應	無	若配比、輸氣及養治條件均充分情況下
硫酸鹽侵蝕	使用低鈣飛灰可加以改善	-
鹼性骨材反應	膨脹量降低	-
鋼筋腐蝕	無	若配比與養治條件均充分之情況下
透水性	後期已改善	若配比與養治條件均充分之情況下
鎂鹽侵蝕	未知	-

表5 配比設計工程環境及材料基本資料

1.工程特性：連續壁、柱內灌漿、樓板、牆板或樑	2.結構物所處位置：分為都市、鄉村、工業、海邊及鹽害環境
3.需求之設計強度 (f'_c) (變異值)	4.骨材最大粒徑、細度模數及吸水率
5.水泥、飛灰及骨材之比重與單位重	6.空氣含量需求
7.坍度及坍流度	8.其他品質要求

表6 高性能混凝土配比指標值 (適用於臺灣潮濕及鹽害之環境)

項目	指標值	項目	指標值
W/C	> 0.42	拌和水量	< 170 kg/m ³
W/B	依 f'_c	水泥量	< $f'_c/1.4$
W/S	< 0.07	氯離子滲透電量	< 2000 庫侖

表7 高性能混凝土配比設計範例⁽⁴⁵⁾

工程名稱	設計強度 Kg/cm ²	W/C	W/B	W/S (%)	配 比 (Kg/m ³)						工 作 性	
					砂	石	膠結料	飛灰	水	強塑劑	坍度 (mm)	坍流度 (mm)
工程範例 (1)	280 (28天)	0.64	0.36	7.5	910	810	317	142	157	11.5	230±20	500±50
工程範例 (2)	350 (28天)	0.59	0.34	7.5	890	820	347	142	157	12.5	230±20	500±50
工程範例 (3)	560 (28天)	0.44	0.32	6.8	871	967	374	97	145	12	250±20	600±50

表 8 國內外學者對混凝土電阻性質相關研究之彙整 (46,49-57)

研究者 (年代)[文獻]	試驗方法	試驗 變數	結 論
Hansson (1983)	DC電阻法	電極有效面積 / 電極間距	- 電阻係數以抗硫水泥 > 高強水泥 > 普通波特蘭水泥 - 電阻係數在添加流化微材料則隨齡期增加而增加 - 孔隙體積毛細管孔分佈及膠體孔可由低溫微熱測得
Brian & Alan (1985)	1KHZ電阻器 充電	電阻間距 溫度	- 電阻在 6.5-8.5 kΩ cm 由可能轉為非常不可能腐蝕 - 混凝土電阻係數與溫度成負效應關係 - 飽和混凝土電阻與 W/C 成反比而部份飽和混凝土反之
Buenfeld, Newman & Page (1986)	不銹鋼電極 之電阻電池	水泥種類 石灰水 水灰比 摻料	- 潮濕混凝土電阻係數約 5kΩ cm, 如半導體 - 通乾混凝土電阻係數約 10⁸kΩ cm, 如良好絕緣體 - 混凝土電阻的溫度係數為 0.025/°C - 暴露海水環境, 電阻增加
Brian & Alan (1987)	阻抗器量 測AC電阻	溫度 濕度 齡期	- 在考量磁石含量下隨含量增加混凝土電阻提高 - 添加磁石的混凝土電阻係數比普通卜特蘭混凝土升倍 - 存條件有較大敏感性 - 氫離子和氯的使用為混凝土電阻係數的直接函數
Alonso, Andrade & Gonzalez (1988)	極化電阻法	水泥種類 飛灰水泥	- 建立 i_{corr} 與電阻之關係為斜率 -1 之直線 - 當鋼筋為鈍態時不受混凝土電阻之影響 - 當鋼筋為活性時, 混凝土電阻影響鋼筋腐蝕 - 鋼筋腐蝕之混凝土電阻臨界值為 50-100KΩ cm
Schiessl (1988)	四極式大地 電阻探測	-	- 四極式大地電阻探測所得電阻係數為大約值 - 埋置混凝土內金屬片與導線易因本身腐蝕而影響結果 - 電位與電阻之關係因鋼筋為活性或鈍化而異
Sharp, Figg & Leeming (1988)	四極式大地 電阻探測	水泥種類 保護層 裂縫種類	- 建立混凝土電阻與鋼筋腐蝕可能性及腐蝕速率之關係 - 電阻必須考慮到表面接觸效應及電極直徑, 插入深度, 間距及接觸液體方能提供正確資料預測腐蝕行為
Pathmanaban (1990)	四極式探測 二極式電 阻顯示器	-	- 不透水混凝土電阻超過 100KΩ cm, 品質差者低於 1KΩ cm - 影響因素混凝土內之化學含量孔隙尺寸分佈及種類 - 欲建立 R/R_i 為腐蝕指標
彭耀南 趙文成 (1991)	二極式電 阻顯示器	水泥種類 河砂 海砂	- 建立電阻與時間, 氫離子, 電位之關係 - 電阻與氫離子濃度成正比 - 電阻與水泥含量成正比, 而與水泥種類無明顯差異
黃兆龍 邱英嘉 (1992)	高絕緣電阻 歐姆計	水灰比 摻料種類 齡期 脈波速度	- 水灰比愈低混凝土電阻係數愈高 - 添加飛灰、磁石之混凝土電阻係數愈高 28天以前混凝土電阻係數與齡期成正比 - 混凝土電阻係數與脈波速度成正比
黃兆龍 陳廷芳 (1994)	四極式大地 電阻探測	水灰比 摻料種類 反覆載重	- 水灰比愈低混凝土電阻係數愈高 - 添加飛灰、磁石之混凝土電阻係數愈高 - 在海水中裝設的產生導致電阻係數下降

表 9 混凝土電阻與其中鋼筋腐蝕活性之關係⁽⁵⁹⁾

混凝土電阻 ($\times 10^3 \text{ ohm} \cdot \text{cm}$)	鋼筋腐蝕活性程度
< 5	非常高
5-10	高
10-20	低/中等
> 20	低

表 10 超音波波速與混凝土品質優劣之關係

超音波波速 (km/sec)	混凝土品質
< 2.5	不良
2.5-3.0	中等
> 3.0	優良

表 11 氯離子擴散係數與混凝土之滲透性之關係⁽⁶¹⁾

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

表 12 混凝土吸水性與混凝土品質之關係^(62,63)

混凝土品質	Taywood Eng ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$)	BS 1881(%)
好	< 0.1	< 3
平均	0.1-0.2	3-5
不良	> 0.2	> 5

表 13 混凝土試體配比設計數據

編號	工程設計強度 (f_c')		混凝土 型態	配比數量 (kg/m ³)								水膠比 (W/B)	水固比 (W/S)	水灰比 (W/C)	水泥強度效益 (psi/kg)
	psi	kgf/cm ²		石子	砂	水泥	飛灰	爐石	水	強塑劑	總量				
1	4000	280	飛灰取代砂	1124	627	330	80	60	165	4	2390	0.42	0.074	0.5	12.12
2	4000	280	HPC	899	825	250	130	80	160	9.2	2353.2	0.35	0.073	0.64	16.0
3	5000	350	HPC	873	818	290	130	80	160	10.0	2361	0.32	0.073	0.55	17.24
4	6000	420	HPC	847	812	330	130	80	160	10.8	2369.8	0.30	0.072	0.48	18.18
5	4000	280	一般	894	834	387			205	---	2320	0.53	0.097	0.53	10.33

表 14 卜特蘭 I 型水泥之物理及化學性質

性 質			成 分
物 理 性 質	比 重 (25°C)		3.18
	停 留 在 #325 量 (%)		7.0
	細 度 (Blaine) (cm ² /g)		3,300
	抗壓 強度 (psi)	3 天	3,481
		7 天	5,534
		28 天	7,183
	凝結時間 (min)	初 凝	140
		終 凝	280
	水化熱 (Cal./g.)	7 天	78.49
		28 天	88.74
假 凝 結 (%)		8.71	
化 學 成 份 (%)	燒 失 量		0.72
	不 溶 物		0.12
	SiO ₂		21.03
	Al ₂ O ₃		5.40
	Fe ₂ O ₃		3.22
	CaO		63.78
	MgO		2.73
	SO ₃		2.03
	Na ₂ O		0.20
	K ₂ O		0.74
	游 離 CaO		0.54
	C ₃ S		50.95
	C ₂ S		21.86
	C ₁ A		8.86
	C ₄ AF		9.80

• 本資料由台泥公司提供

表 15 粗細骨材基本性質

物 理 性 質	粗骨材	細骨材
比重 (SSD)	2.63	2.62
吸水率 (%)	1.41	1.68
最大粒徑 (mm)	10.0	4.75
細度模數	-	2.71
單位重 (kg / m^3)	1471	1738

表 16 粗骨材級配

篩 號	過篩百分比 (%)	CNS1240 要求過篩百分比 (%)
1/2"	100	100
3/8"	100	85-100
NO.4	20	10-30
NO.8	5	0-10
NO.16	0	0-5

表 17 細骨材級配

篩 號	過篩百分比 (%)	CNS1240 要求過篩百分比 (%)
3/8"	100	100
NO.4	98.1	95-100
NO.8	85	80-100
NO.16	67.3	50-85
NO.30	42.2	25-60
NO.50	21.6	10-30
NO.100	5.4	2-10
底盤	0	-

表 18 飛灰、爐石之物化性質

化學成分 (%)	爐石		飛灰	
	SiO_2	34.61	SiO_2	49.69
	Al_2O_3	13.77	Al_2O_3	27.8
	Fe_2O_3	0.29	Fe_2O_3	5.23
	CaO	41.41	CaO	6.27
	MgO	7.5	MgO	1.63
	SO_3	1.85	SO_3	0.79
	K_2O	0.38	K_2O	1.1
	Na_2O	0.14	Na_2O	0.2
	鹽基度	1.81	鹽基度	0.23
	燒失量 (%)	-	燒失量 (%)	5.02
	細度 (cm^2/g)	4488	細度 (cm^2/g)	3110
物理性質	留#325 篩 (%)	5	留#325 篩 (%)	15
	活性指數 (%)	76.0(7 天)	活性指數 (%)	-
	比重	2.87	比重	2.3

表 19 強塑劑基本性質

化學物歸類	磺酸石腦油精、甲醛濃縮物之鈉鹽
比重	0.72
SO_4 含量 (%)	2.46
固溶物含量 (%)	92.48
pH 值	8.8
氯離子含量 (ppm)	80
顏色	淡褐色
規範	ASTM 494 G-Type

表 20 新拌混凝土工作性測試結果

性質 配比	設計強度 (psi)	種類	坍度 (cm)	坍流度 (cm)
A	4000	飛灰取代砂	22	38×40
B	4000	HPC	27	62×64
C	5000	HPC	26	57×51
D	4000	OPC	20	35×36
E	6000	HPC	27	60×58

表 21 各種配比混凝土抗壓及抗彎強度測試結果

強度 齡期 配比		A		B		C		D		E		備註
		A0	A7	B0	B7	C0	C7	D0	D7	E0	E7	
抗壓強度 (kg/cm ²)	7 天	152	152	241	241	251	251	197	197	347	347	
	28 天	288	281	407	378	422	395	314	307	528	486	
抗彎強度 (kg/cm ²)	14 天	34	30	42	40	44	42	36	35	44	43	
	28 天	48	43	61	57	62	59	50	48	63	59	

說明： A0、B0、C0、D0、E0 均為 28 天養生室養治

A7、B7、C7、D7、E7 均為 7 天養生室養治，21 天大氣養治

表 22 各種配比混凝土之耐磨、超音波速及電阻測試結果

強度 齡期 配比		A		B		C		D		E		備註
		A0	A7	B0	B7	C0	C7	D0	D7	E0	E7	
30 分鐘之磨損深度 (mm)	28 天	0.6	0.62	0.58	0.61	0.55	0.57	0.63	0.62	0.53	0.55	
	7 天	3.818	3.818	3.968	3.968	3.998	3.998	3.943	3.943	4.100	4.100	
超音波速 (km/sec)	28 天	4.151	4.149	4.307	4.182	4.311	4.201	4.211	4.136	4.336	4.296	
	7 天	12.0	12.0	13.2	13.2	20.3	20.3	12.6	12.6	21.9	21.9	
電阻 (kΩ.cm)	28 天	16.7	16.1	18.9	18.0	25.5	23.4	17.0	15.7	25.5	21.6	
	7 天											

表 23 各國國家標準規範要求飛灰之化學和物理性質 (64)

	澳大利亞	加拿大		印度	日本	英國	美國				蘇俄	西德	中華民國																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
							ASTM C618-80	聯邦政府 Federal SS-C-17605	北達克塔 公路局 N.D.Hgw Dept				C 類	F 類	CNS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
		C 類	F 類													C 類	F 類	CNS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1. 化學性質	A.S. 1129	CAN3-A23.5-M82	F 類	I.S. 3812 Pn. 1 & 2	J.I.S. A6201	B.S. 3892 Pn. 1 & 2					40.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
																SiO ₂ % (最小值)	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ % (最小值)	CaO % (最大值)	MgO % (最大值)	SO ₃ % (最大值)	有效鹼 (以Na ₂ O計) % (最大值)	燒失量 % (最大值)	含水量 % (最大值)	細度：保留45µm篩量 % (最大值)	比表面積m ² /g (最小值)	熱壓膨脹率 % (最大值)	下作與活性指數：水泥混合28天， %控制組 (最小值)	與石灰混合7天強度MPa ² (最小值)	需水量 % 控制組 (最大值)	乾縮率 % (最大值)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
																															50.0	70.0	45.0	35.0	5.0*	5.0	5.0	1.5*	6.0	12.0	3.0	0.8	75	85	5.5	105	0.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
																																																5.0*	5.0	4.0	12.0	3.0	3.0	0.8	75	75	5.5	105	0.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
																																																												5.0*	5.0	5.0	1.5*	6.0	12.0	3.0	3.0	0.8	75	75	5.5	105	0.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
																																																																										5.0*	5.0	4.0	12.0	3.0	3.0	0.8	75	75	5.5	105	0.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2. 物理性質																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											

*任意要求：** ≥ 50，平均值 ± 10 磅磅 40 μm；*** ≥ 2000，平均值 ± 500。

表 24 配比設計所需之骨材性質⁽⁶⁵⁾

性質	要求性能特徵	範圍	ASTM 檢測規範	CNS 檢測規範
形狀和紋理	形狀愈近圓球狀，所需水泥漿體愈少，因此同一漿體條件下，其工作度可獲改善，表面紋理愈平整光滑，則需漿量愈少，或同一漿量下或工作度愈佳，但表面粗糙會有較佳之機械互制作用，而提高初期強度，但對極限強度則無明顯之差異。		C295 C3398	
級配	級配考慮的條件為在達到工作度「最佳化」及水泥漿體用量「經濟化」。理論上達到經濟用漿量的策略為：1. 在結構體空間許可下儘量採用最大粒徑的級配骨材，如此可以縮小單位重量之表面積(S)及孔隙空間(Vv)。2. 適當摻加細粒可以增加黏滯性及防止骨材的析離。3. 採用圓形且光滑的骨材，如此可減少凸凹多角的表面，而減少表面積(S)，節省用漿量。通常分析最經濟用漿量的工具為「篩分析」，透過篩分析可以獲得最大骨材尺寸(D _{max})，顆粒分佈曲線(級配)及細度模數(FM)的資料。	細骨材FM之要求 ^a 2.3~3.1 (±0.20)	C117 C136	468
容積比重	容積比重(BSG)為配比設計計算體積—重量關係時之重要依據	2.4~2.9	C127 C128	488
單位重	單位重為骨材單位體積之重量，其體積係包括骨材實體積、骨材內孔隙、及骨材與骨材間之空隙。	1200~1750 kg/m ³	C29	1163
吸水率及含水量	吸水率(AC)及含水量(MC)為骨材影響混凝土品質的最大關鍵所在，因AC隨骨材風化狀況、裂隙多寡、孔隙多少、骨材種類及成分而異。同一來源之骨材常有相當大之差異。MC則隨風速、溫度、濕度狀況而異，同一堆骨材，上層與下層間就有明顯的差別。若是AC及MC沒有適當瞭解及控制，則經常會改變原有配比的用水量，進而改變水灰比(w/c)，影響混凝土強度性質。	粗骨材 1~6% 細骨材 3~8%	C70 C127 C128 C566	488 487

a. 優生高性能混凝土建議砂之FM=2.8~3.1，以減少骨材表面潤滑漿的需求性，增進工作性。

表 25 混凝土拌和水品質檢驗標準⁽⁶⁵⁾

基本檢驗項目	檢測方法	標準規範
酸性與鹼性	1. 酚酞或甲基橙指示劑 2. pH測定儀 3. 比色法	CNS 1237
固體總量與有機物	烘乾(100℃)再以132℃烘1小時。	CNS 1237
氯離子	滴定法	CNS 5858
水質性能認定試驗	1. 凝結時間相差不超過30分鐘。 2. 抗壓強度應為飲用水之90%以上。	BS 3148 CNS 1010 CNS 785 CNS 786

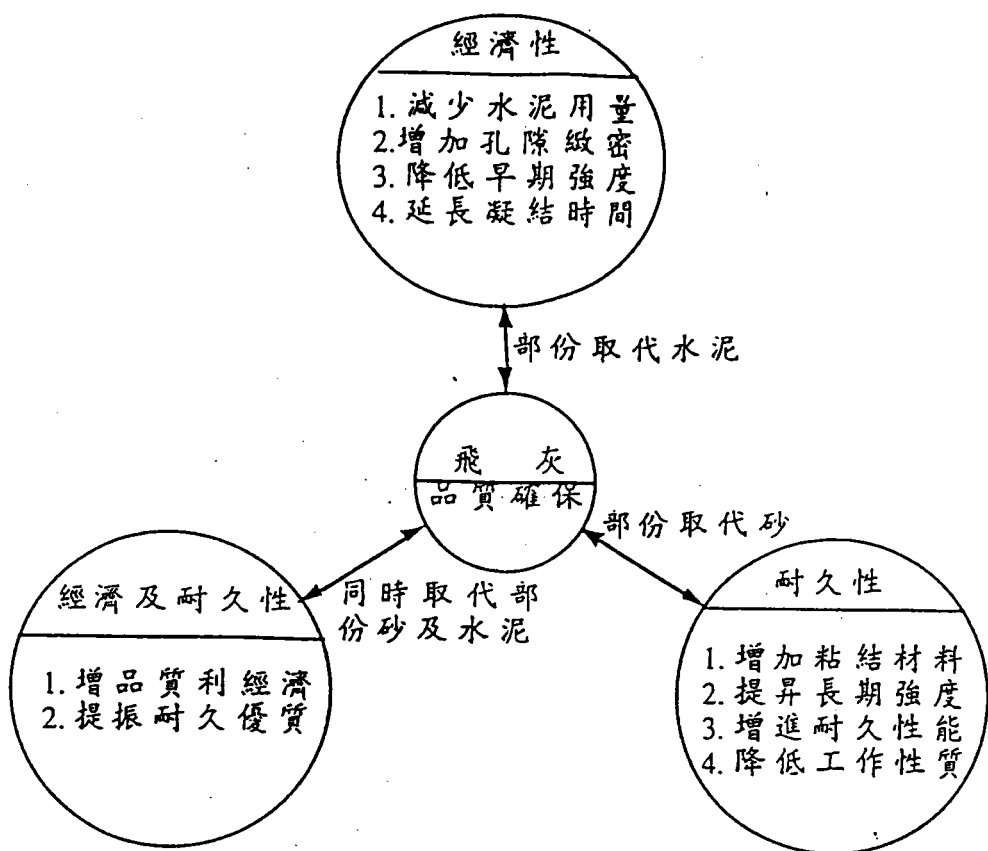


圖 1 飛灰在混凝土工程應用策略及其特性⁽³⁾

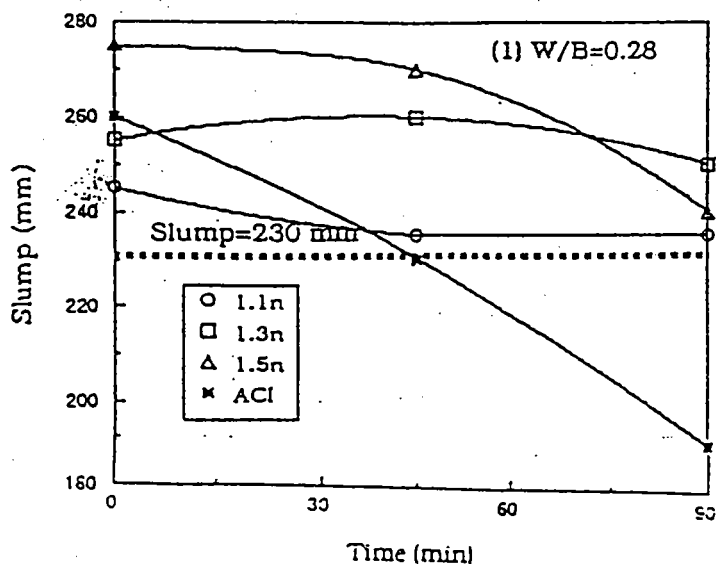


圖 2 新拌高性能混凝土坍度變化範例⁽⁴⁾

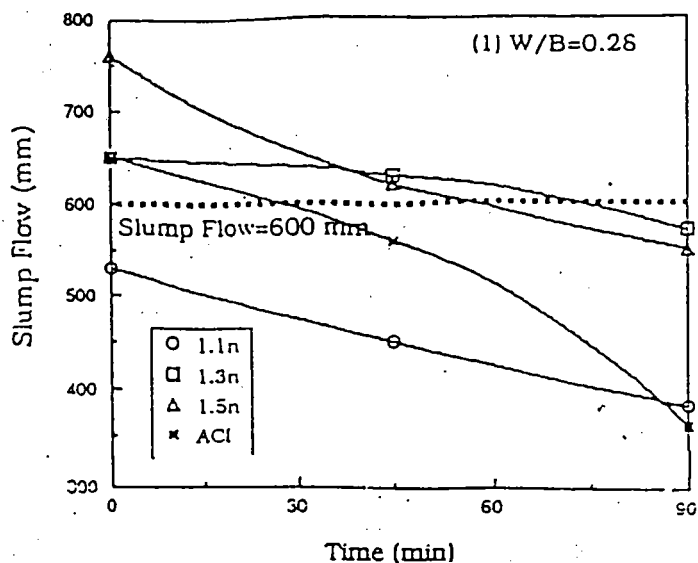


圖 3 新拌高性能混凝土坍流度變化範例⁽⁴⁾

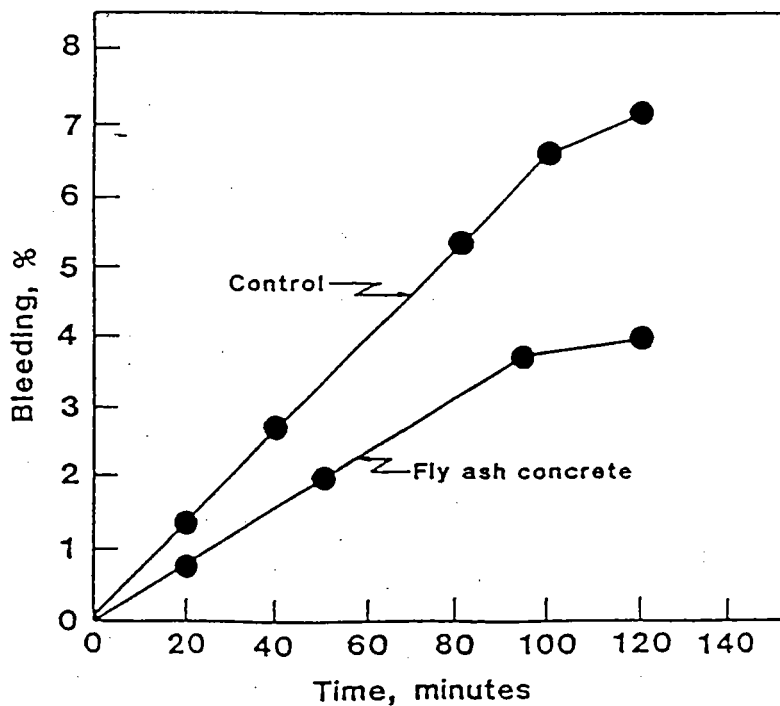


圖 4 一般及飛灰混凝土之泌水量⁽⁵⁾

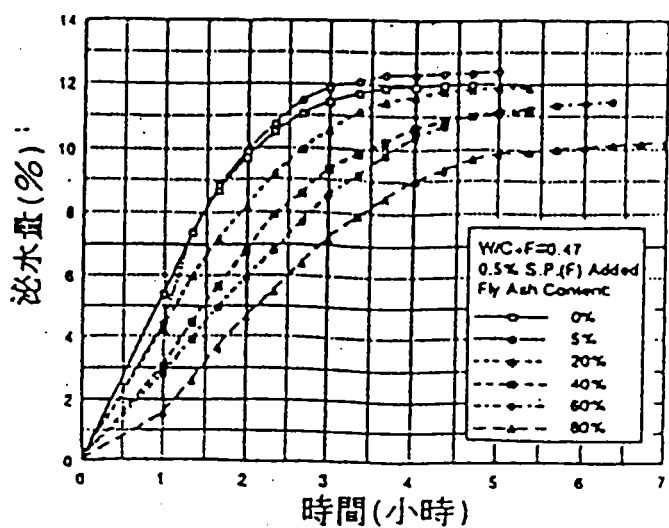


圖 5 添加 0.5%強塑劑後對飛灰水泥漿體泌水性之影響⁽⁶⁾

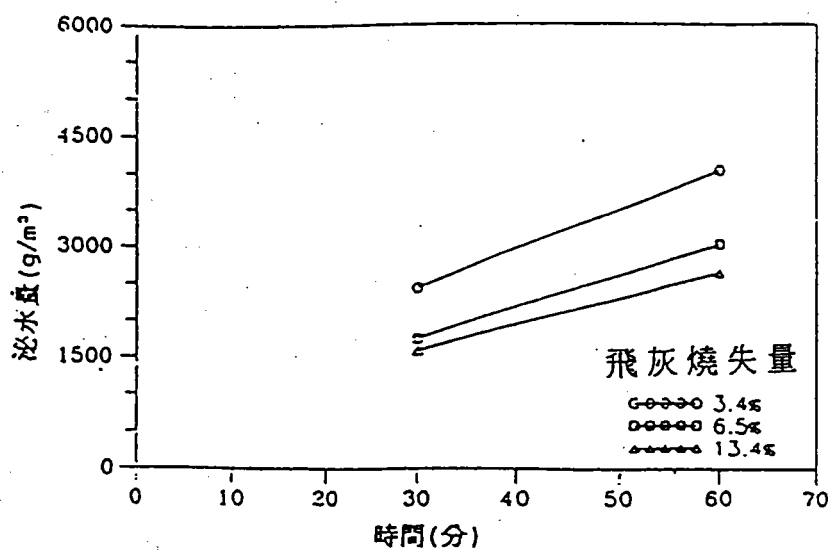


圖 6 飛灰燒失量對新拌混凝土泌水量之影響⁽⁷⁾

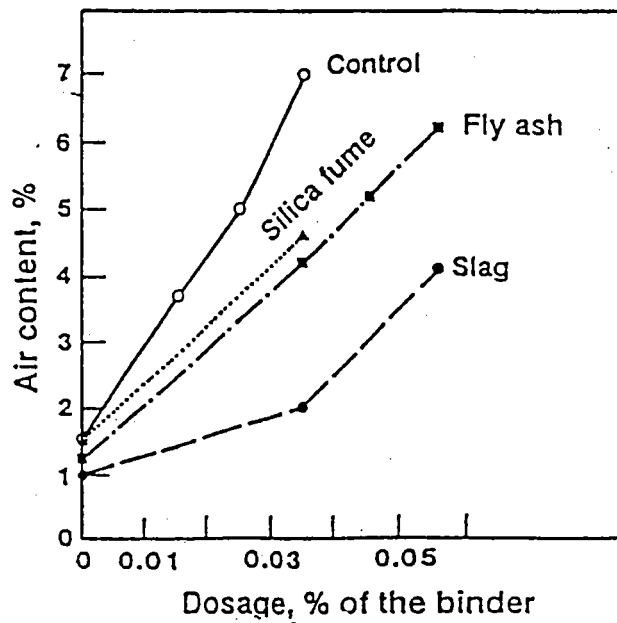


圖 7 含飛灰等卜作嵐材料混凝土摻加輸氣劑
對其空氣含量之影響⁽⁸⁾

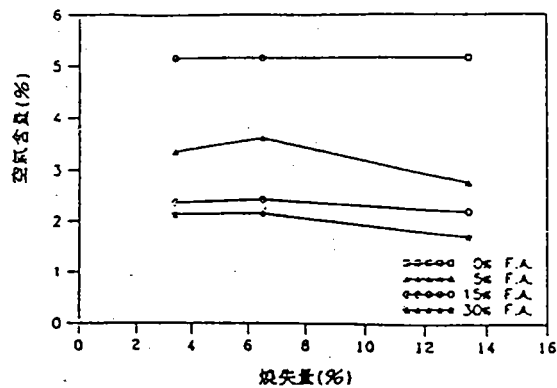


圖 8 飛灰燒失量對混凝土含氣量之影響⁽⁷⁾

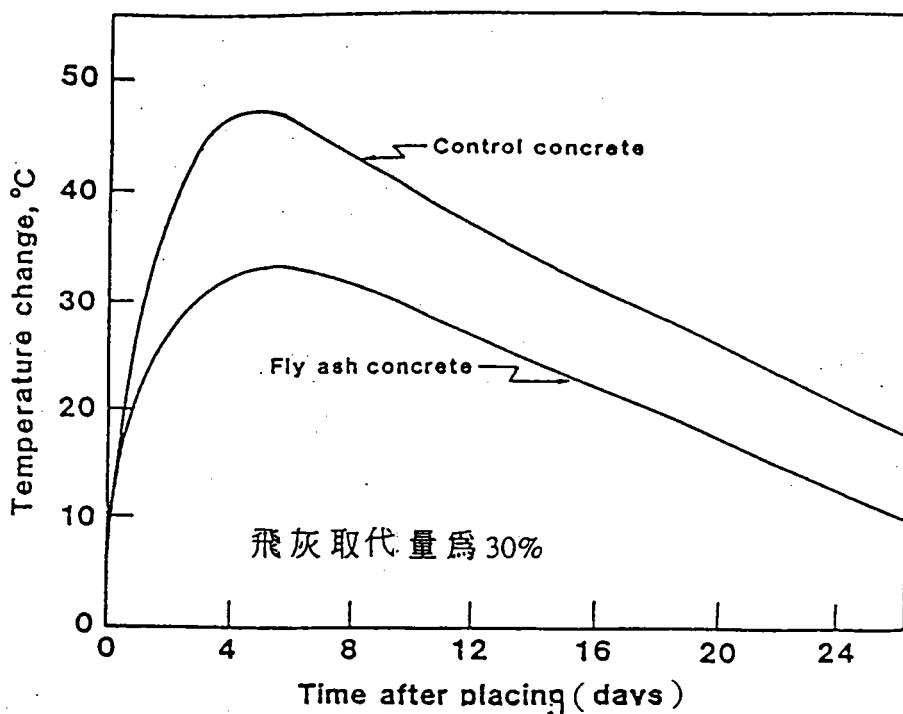


圖9 飛灰/一般混凝土中溫度變化⁽⁹⁾

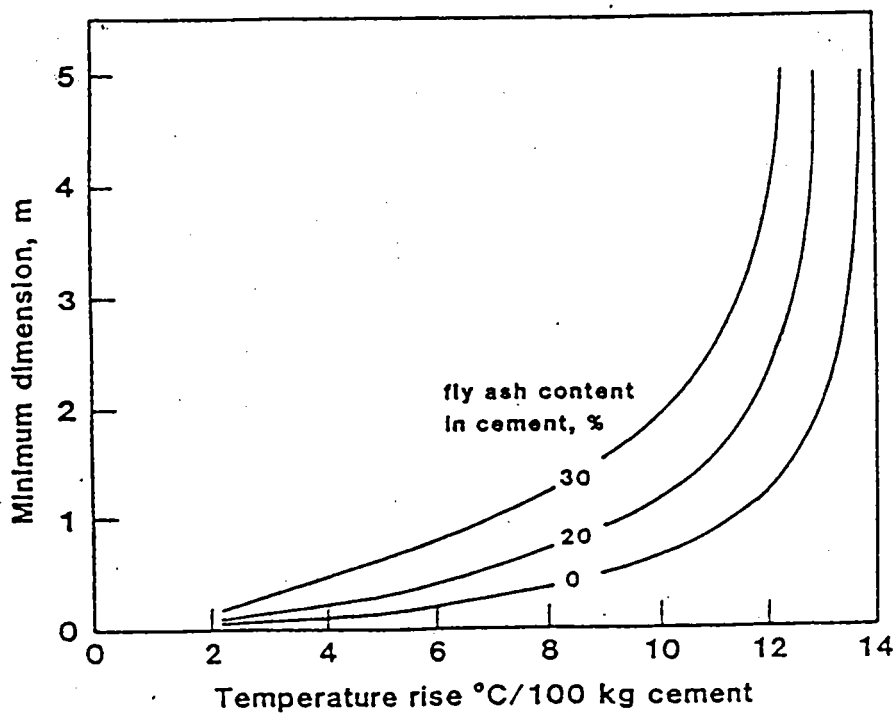


圖10 混凝土斷面大小對飛灰混凝土溫度上升之影響性⁽¹¹⁾

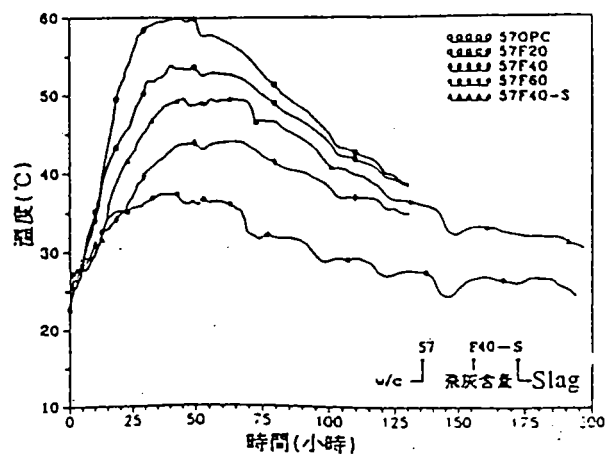
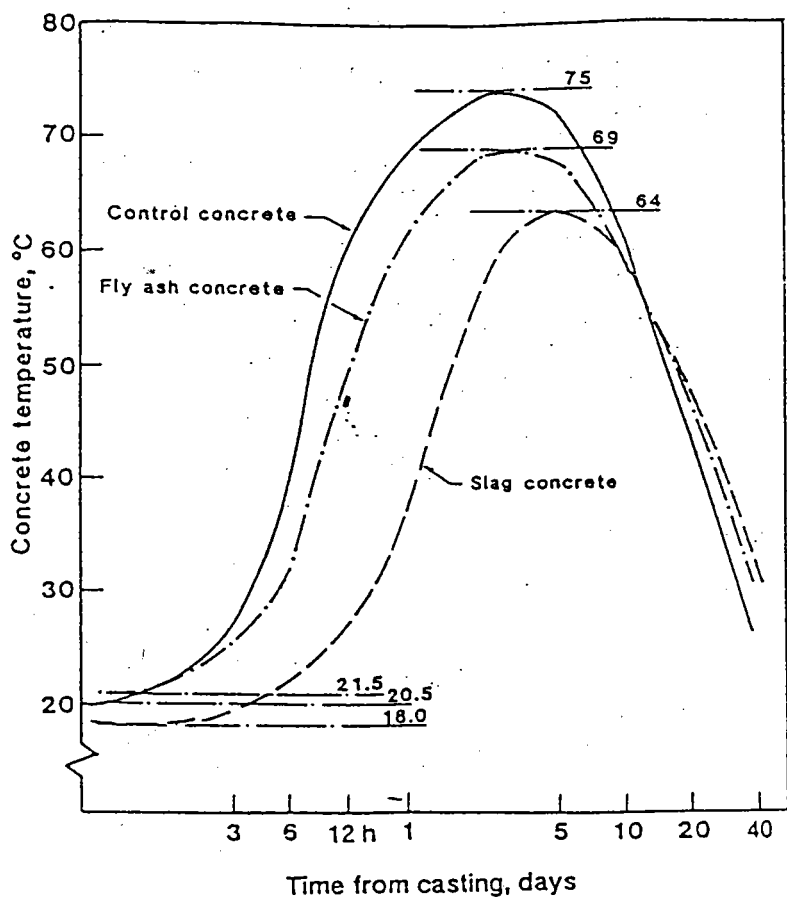
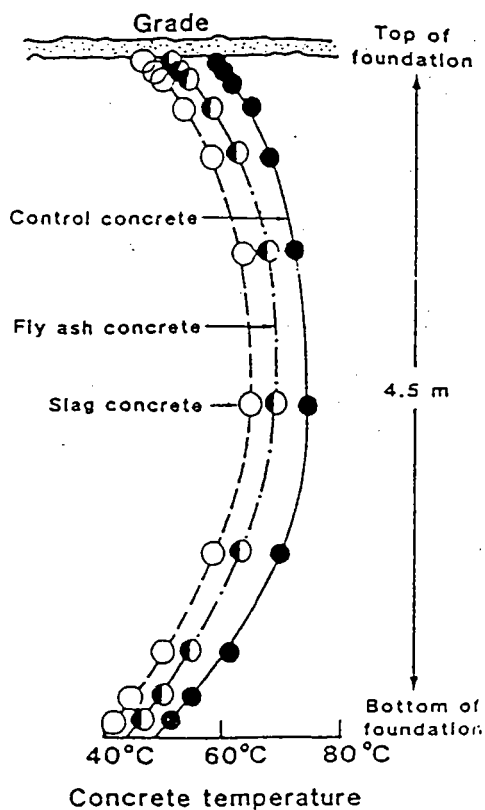


圖 11 混凝土消波塊之中心位置處的溫度發展情形⁽¹²⁾



(a) 中心處之混凝土溫度



(b) 垂向剖面之最大溫度

圖 12 摻加卜作嵐材料的巨積混凝土中心處之溫度歷時變化及垂向剖面上之最大溫度變化特性⁽¹³⁾

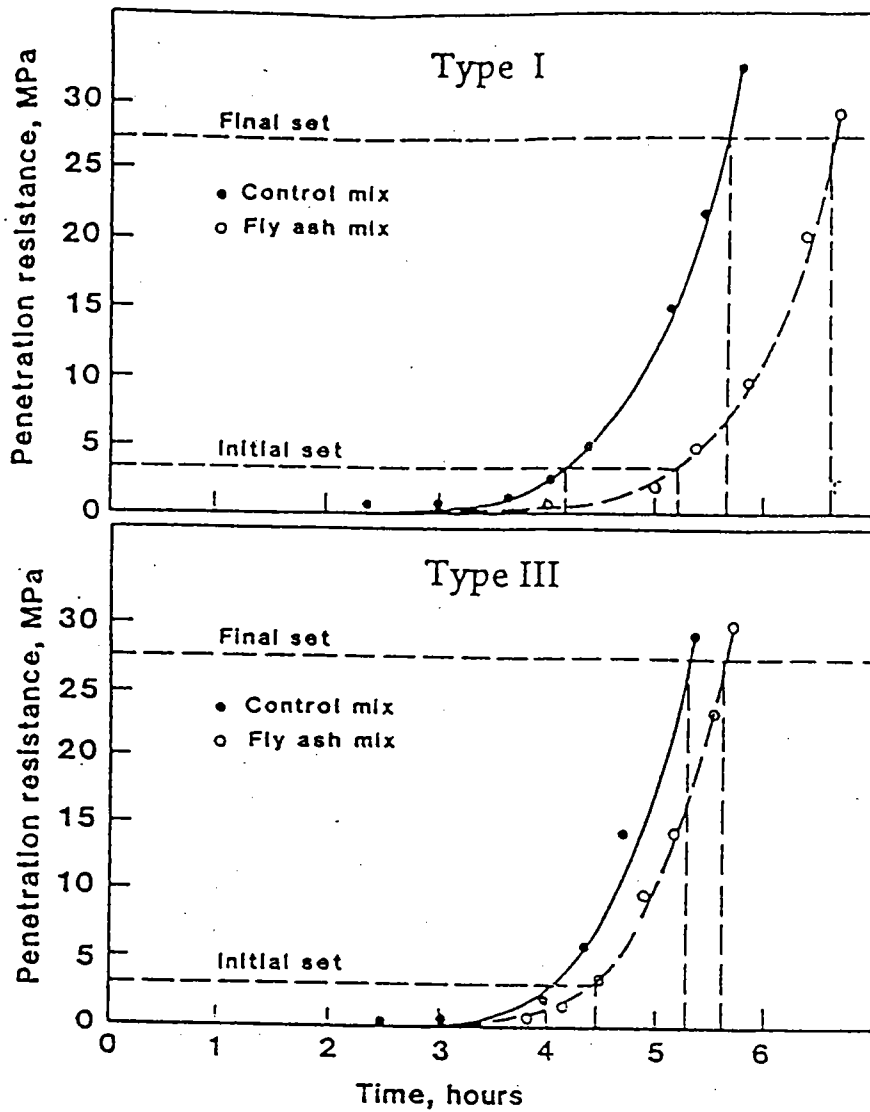


圖 13 飛灰混凝土與一般混凝土之凝結時間比較⁽¹⁴⁾

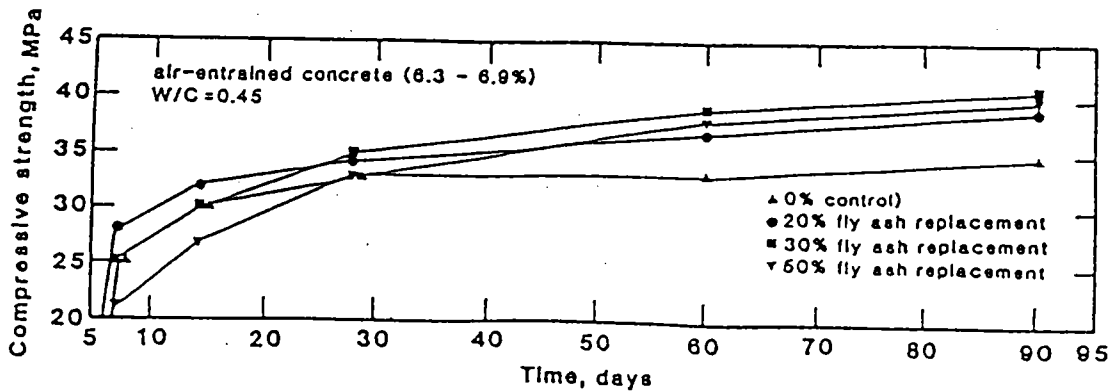


圖 14 不同飛灰含量對混凝土強度發展之影響性⁽¹⁵⁾

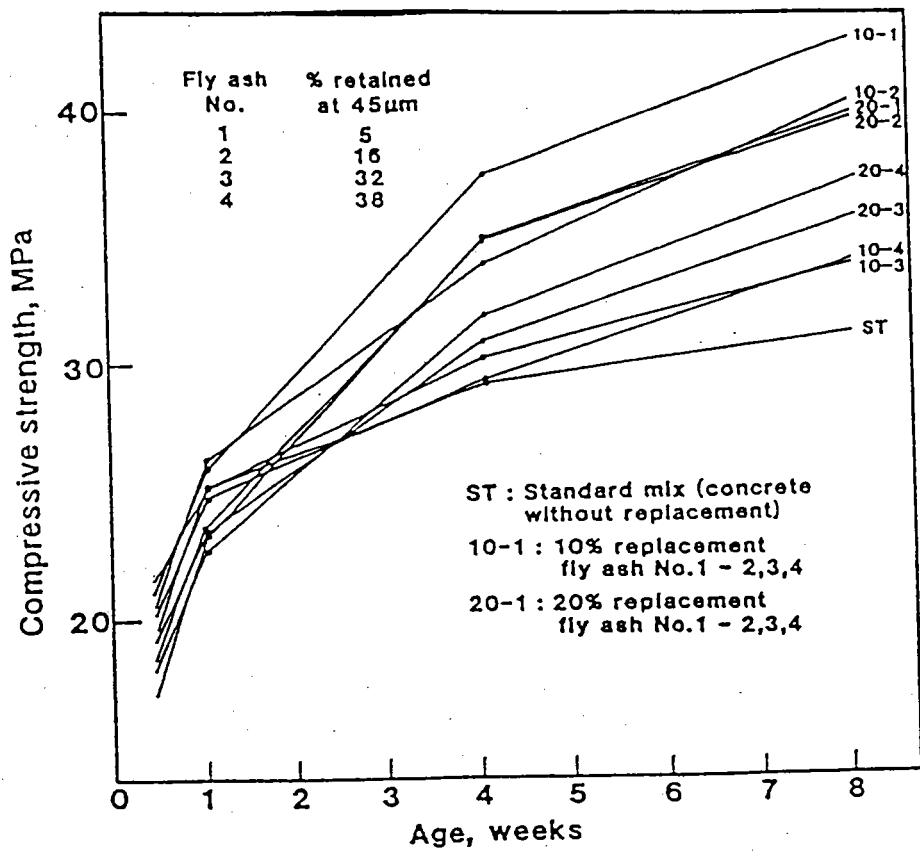


圖 15 飛灰細度對抗壓強度之影響性⁽¹⁶⁾

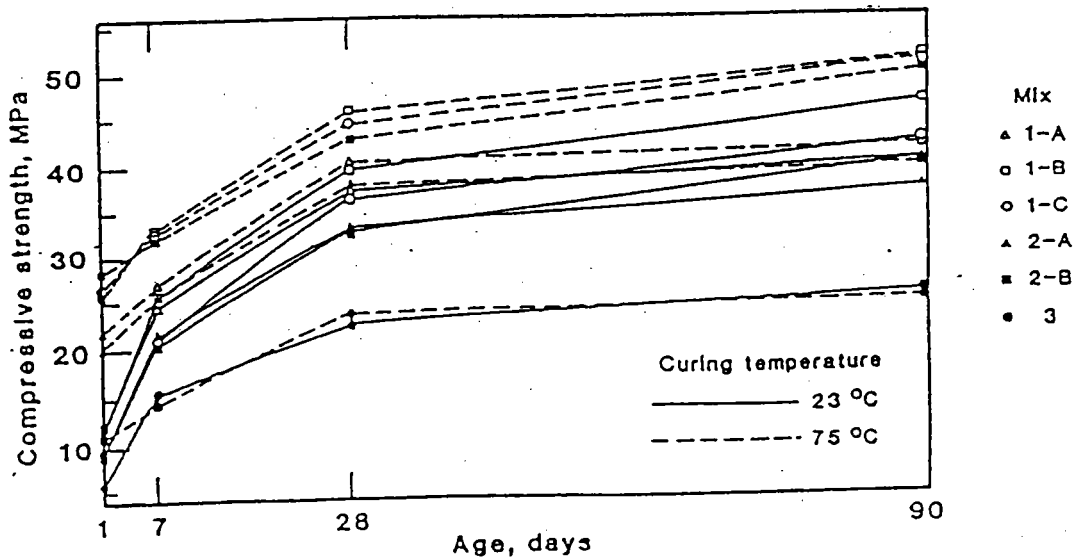


圖 16 養護溫度對飛灰混凝土強度之影響性⁽¹⁷⁾

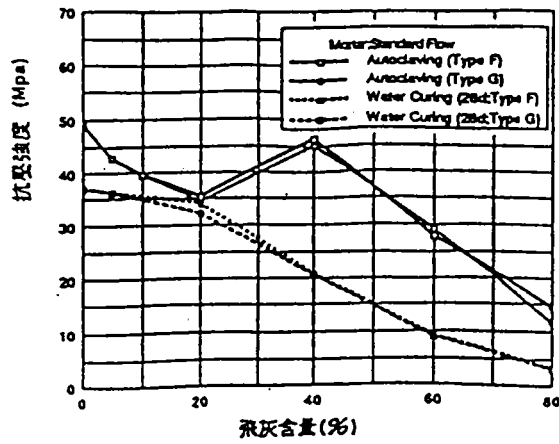


圖 17 高壓蒸氣養護對飛灰水泥
砂漿體強度之影響性⁽⁶⁾

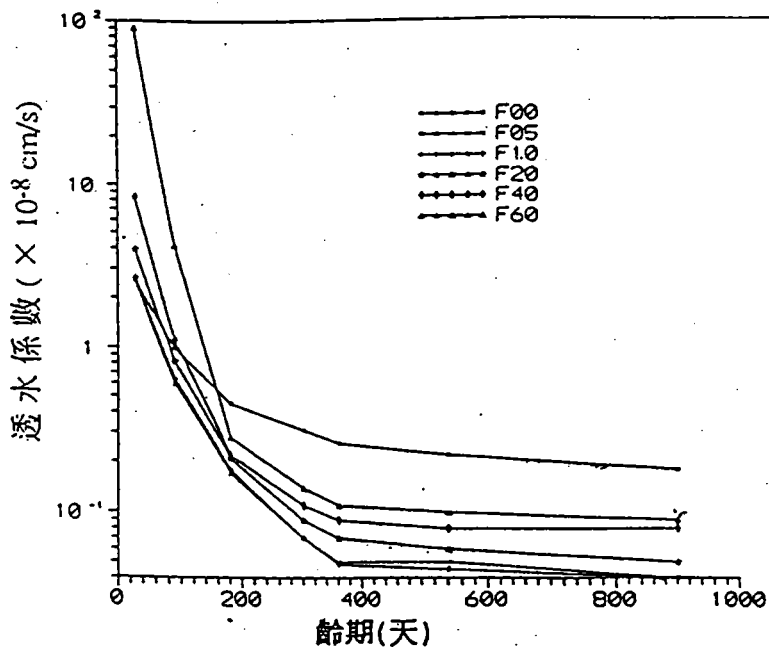


圖 18 飛灰混凝土之透水性與其齡期之關係⁽⁸⁾

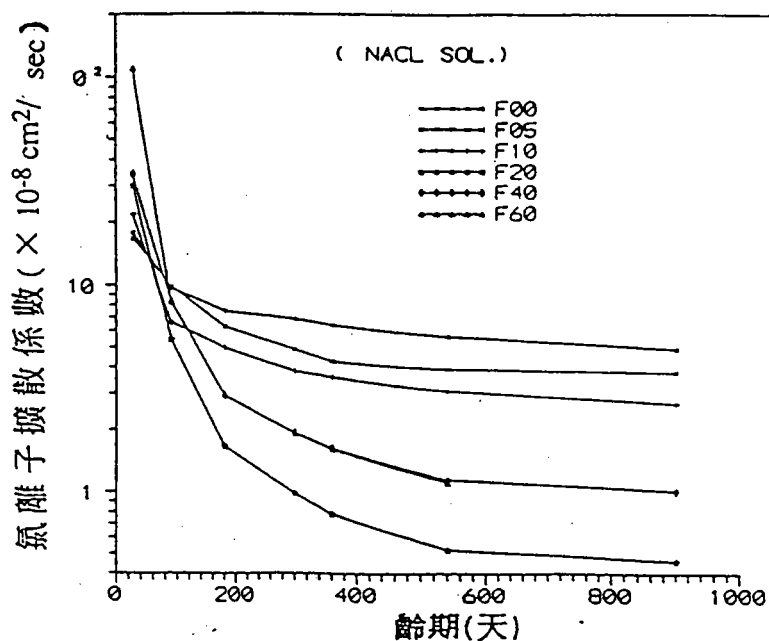


圖 19 飛灰混凝土氯離子之擴散係數與齡期之關係⁽¹⁸⁾

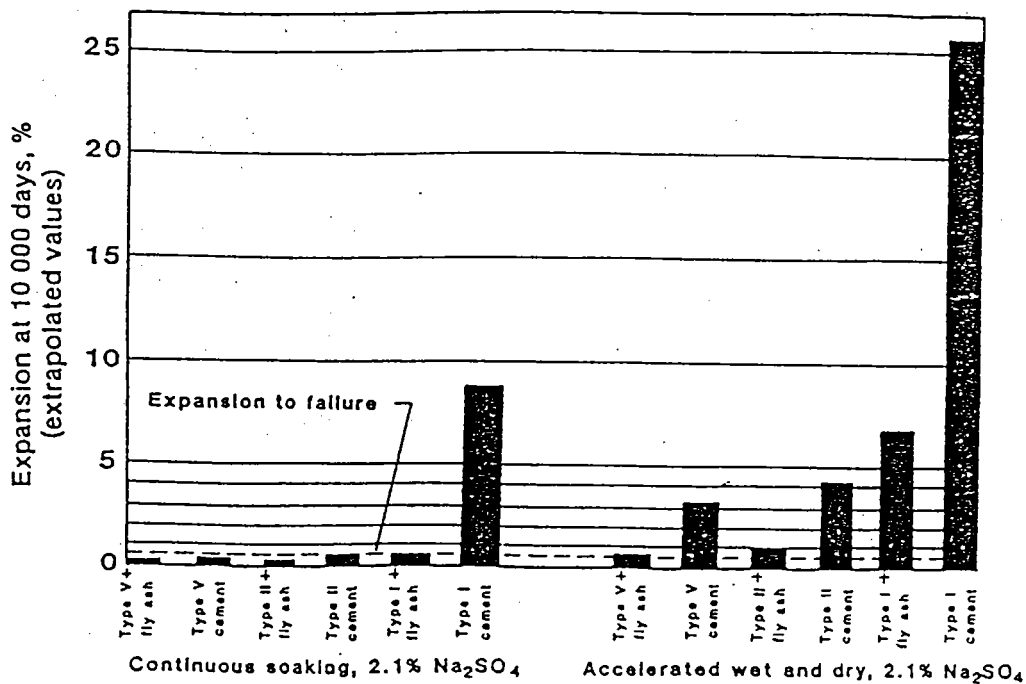


圖 20 取代 30%水泥之飛灰混凝土浸泡於 Na_2SO_4 溶液下
各種試體之體積膨脹速率比較⁽¹⁹⁾

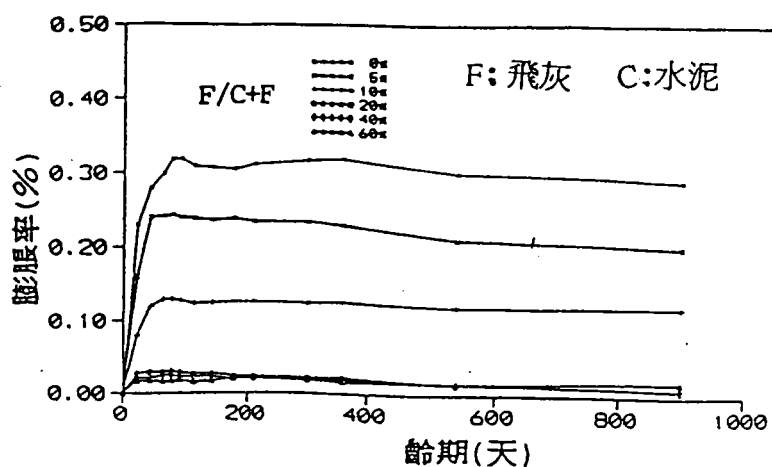


圖 21 飛灰混凝土之鹼性骨材反應測試結果⁽¹⁸⁾

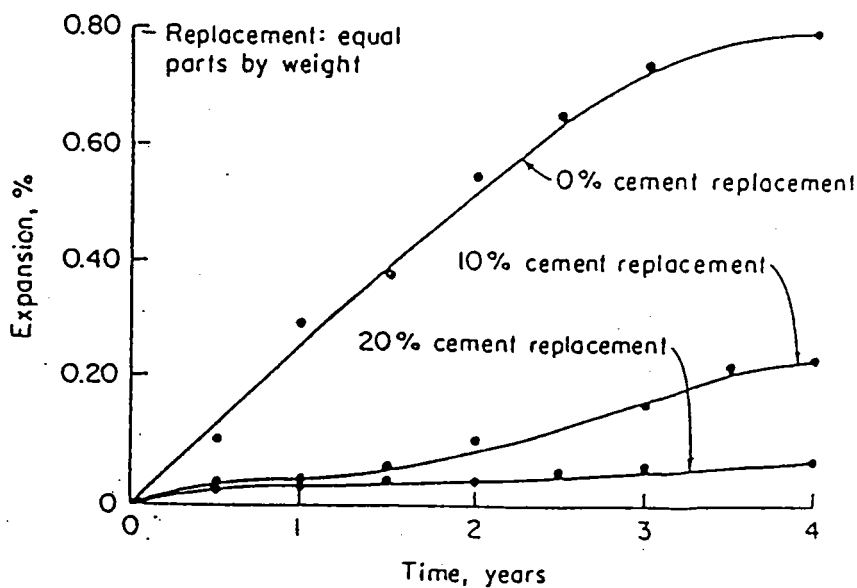


圖 22 使用飛灰混凝土耐鹼性骨材反應膨脹結果⁽²⁰⁾

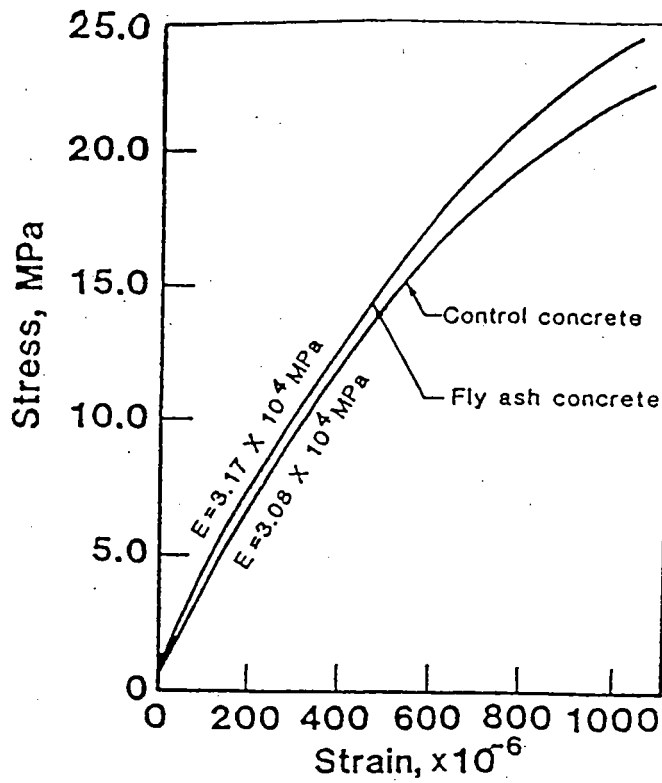


圖 23 飛灰混凝土之應力應變關係⁽²¹⁾

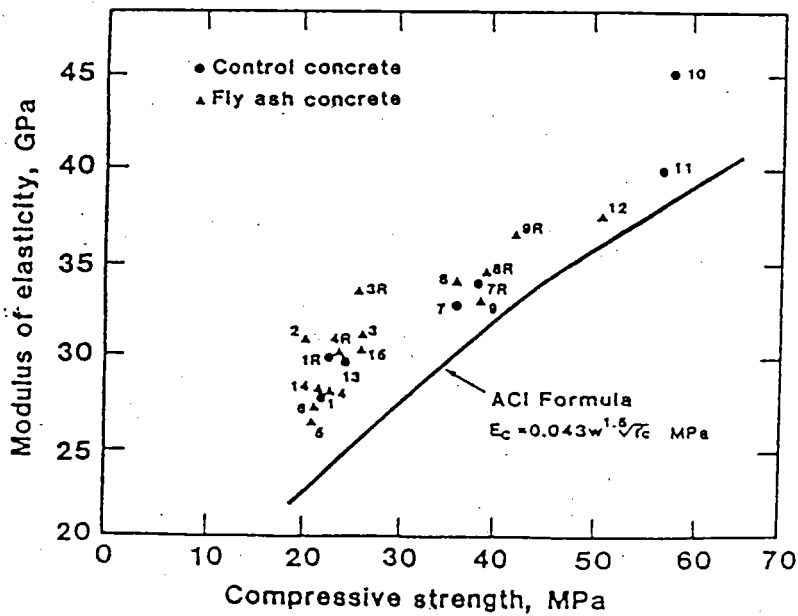


圖 24 飛灰混凝土之彈性模數⁽²²⁾

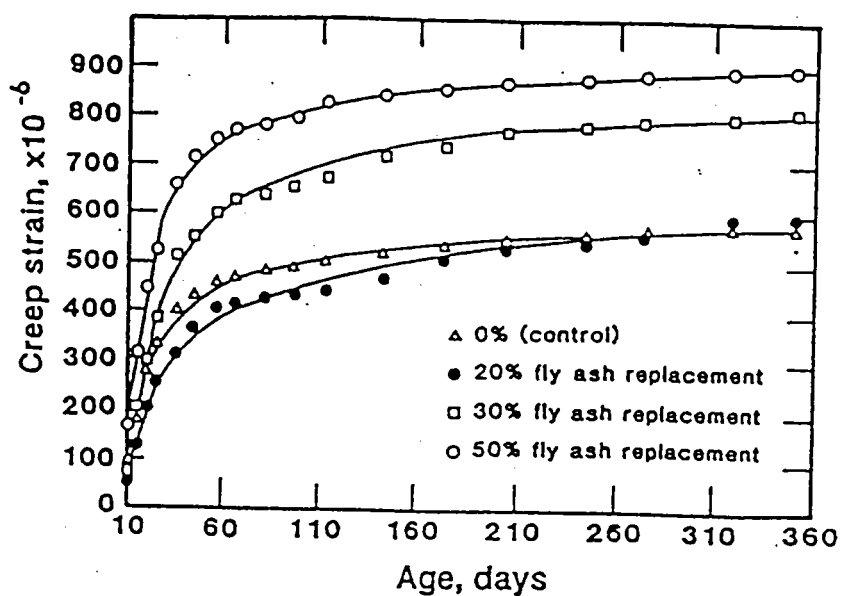


圖 25 飛灰混凝土之潛變⁽¹⁵⁾

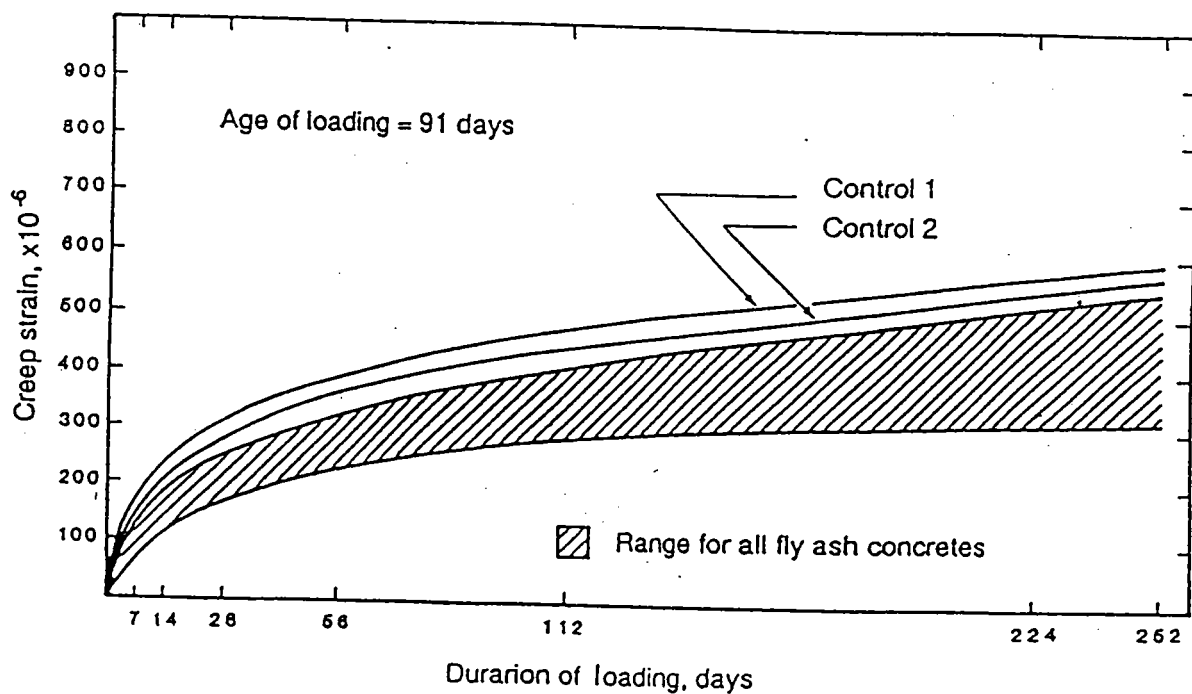


圖 26 混凝土經 91 天濕氣養生後之潛變⁽²⁵⁾

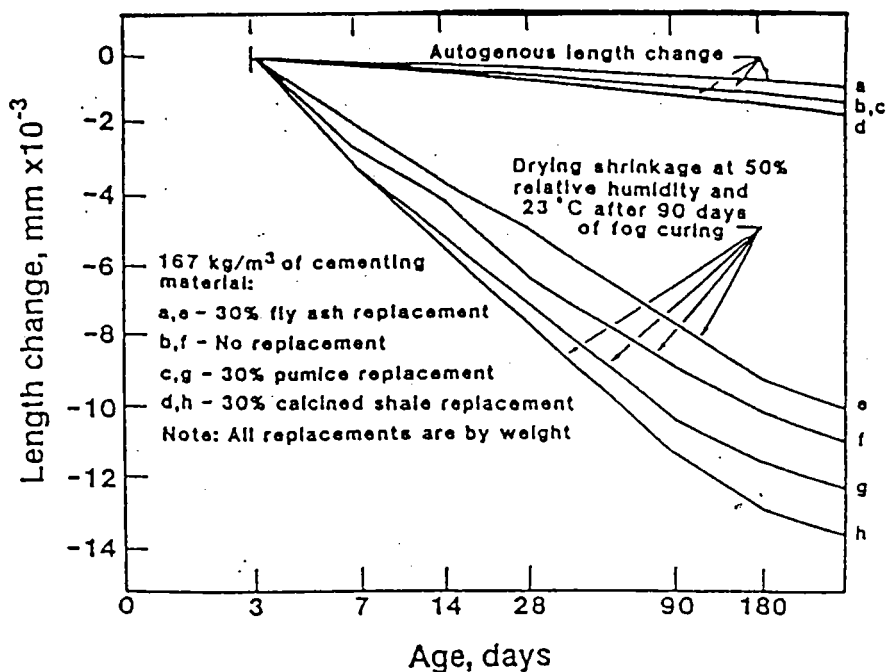


圖 27 卜作嵐混凝土之乾縮與自生收縮⁽²⁴⁾

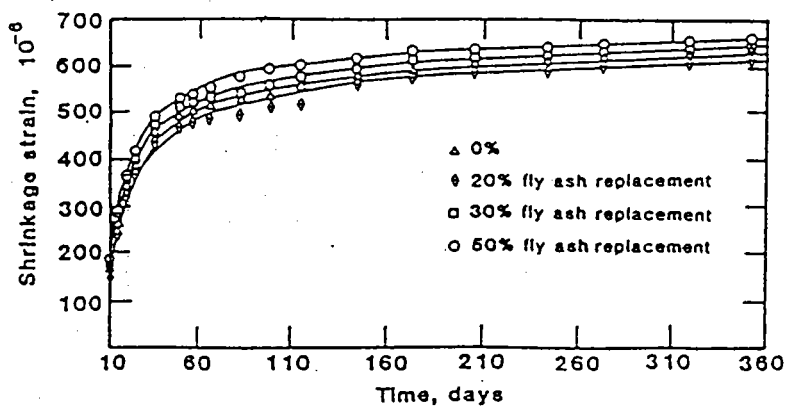


圖 28 高鈣飛灰混凝土乾縮量⁽¹⁵⁾

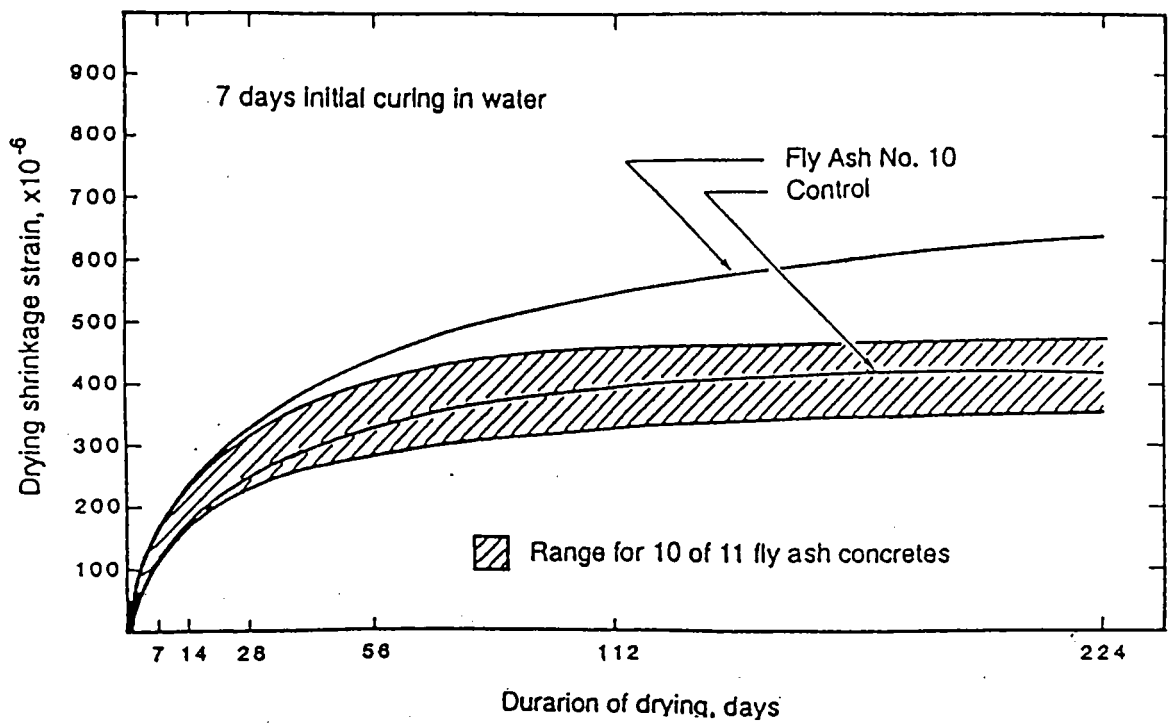


圖 29 7 天水中養生後之乾縮量⁽²³⁾

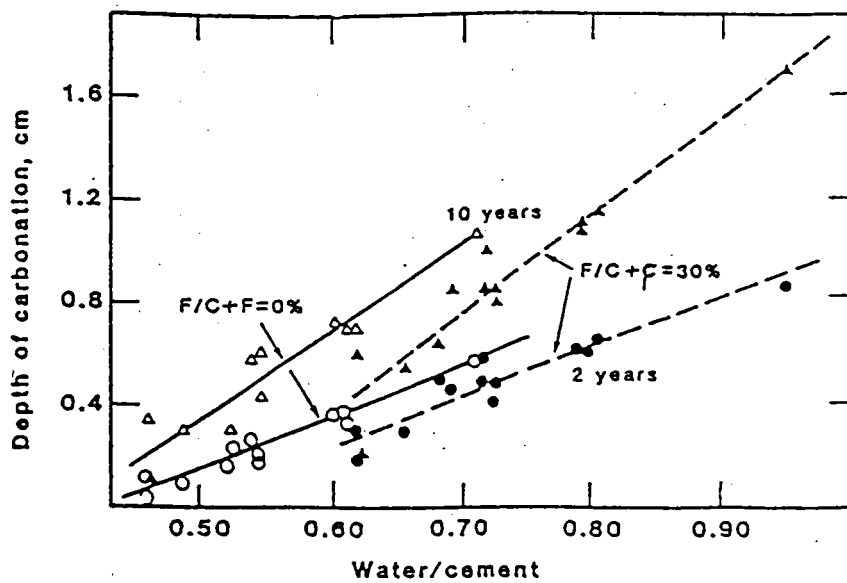


圖 30 混凝土中性化深度與水灰比之關係⁽²⁵⁾

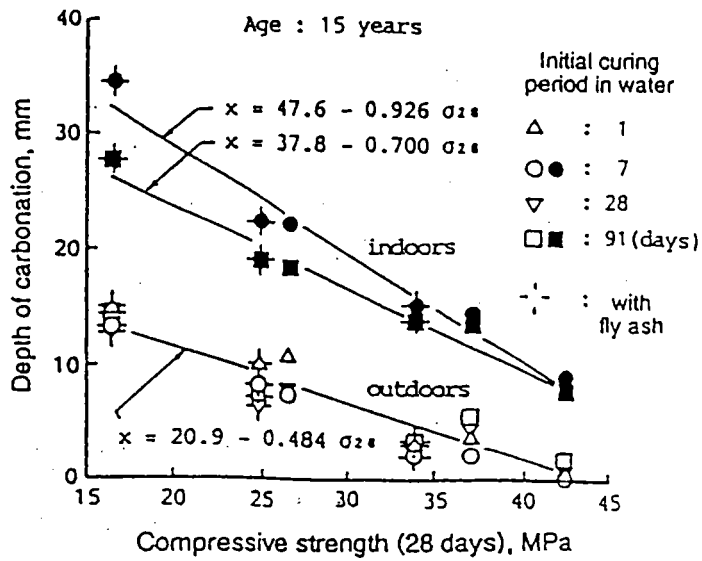


圖 31 各種環境下混凝土中性化與抗壓強度之影響⁽²⁶⁾

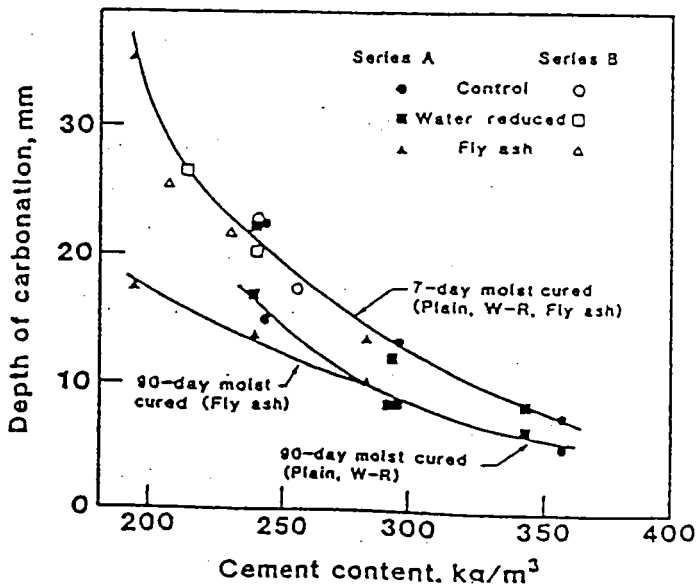


圖 32 各種水泥用量及養生時間對混凝土中性化之影響⁽²⁷⁾

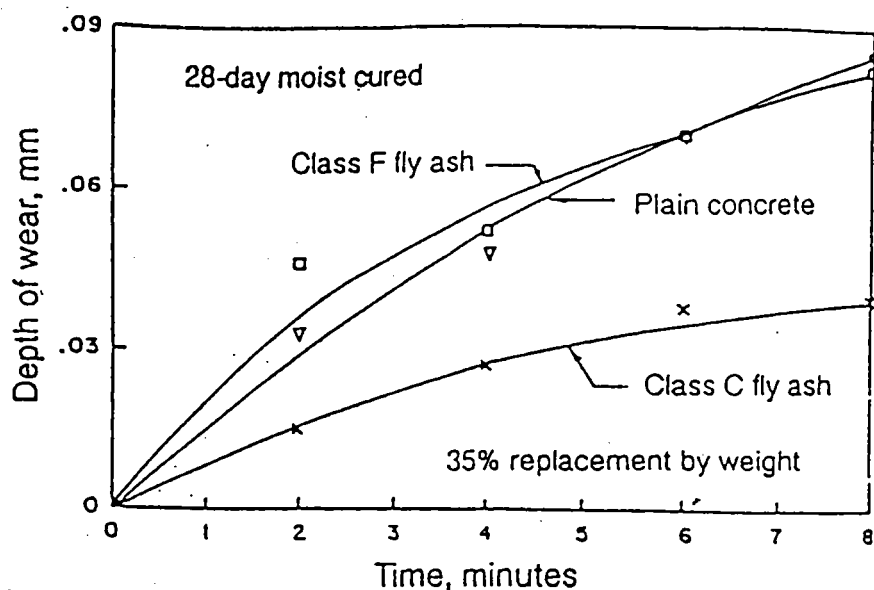


圖 33 混凝土之耐磨耗測試結果⁽²⁸⁾

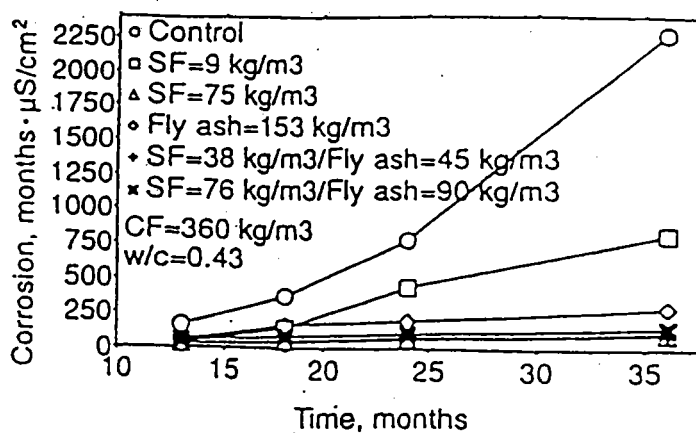


圖 34 混凝土中鋼筋之總量腐蝕量
(W/C=0.43 曝露在 3%NaCl 溶液下)⁽³²⁾

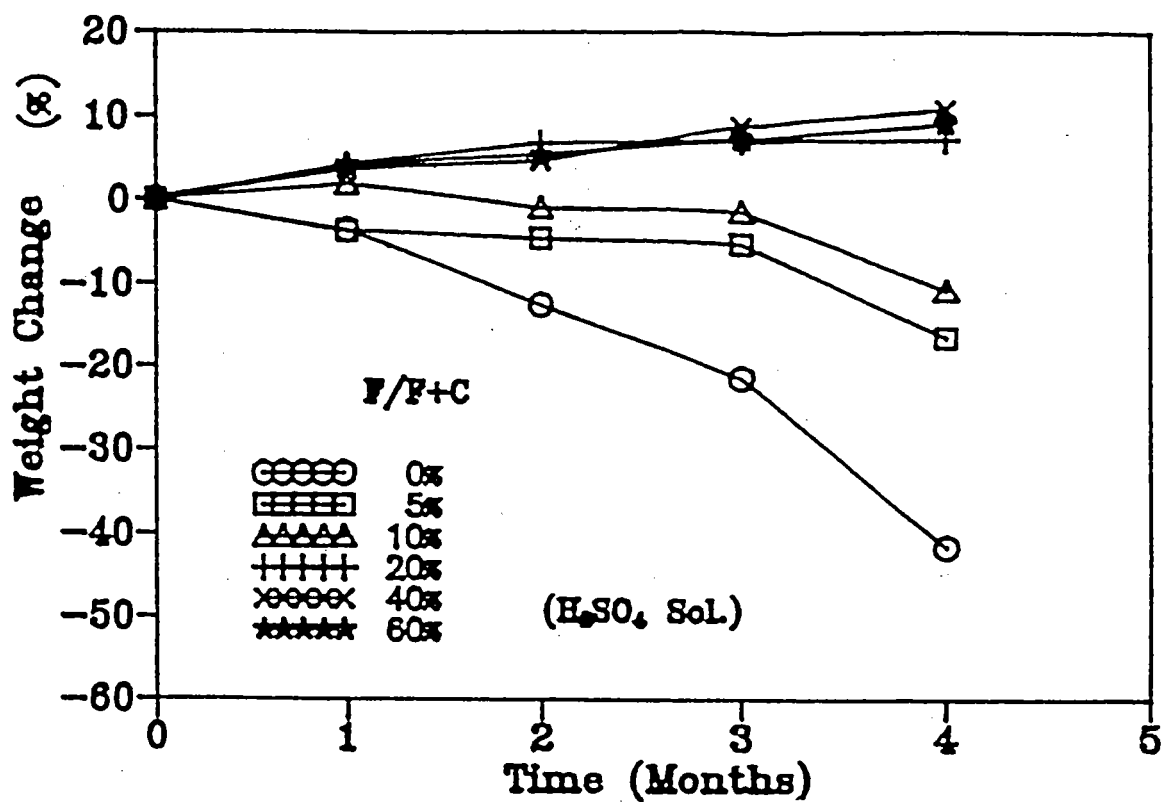


圖 35 水泥砂漿棒浸泡於 H_2SO_4 溶液中下之重量損失變化圖⁽⁶⁾

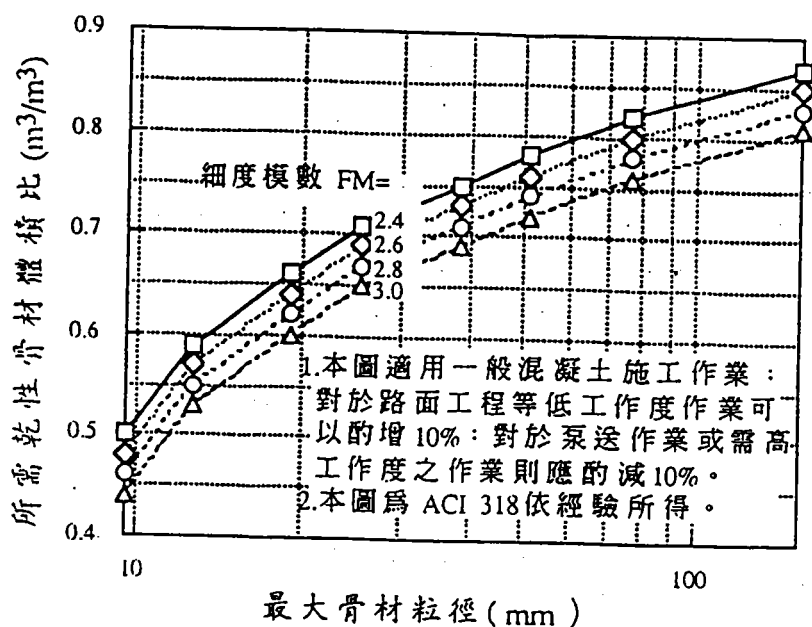


圖 36 最大骨材粒徑與乾摻骨材體積比之關係⁽³³⁾

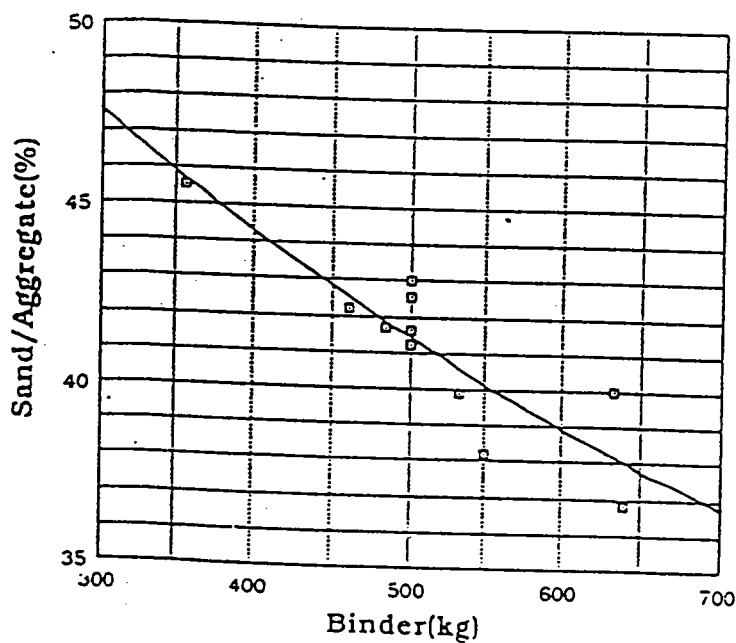


圖 37 在相同之坍度下，粗細骨材比與膠結料之關係⁽³⁴⁾

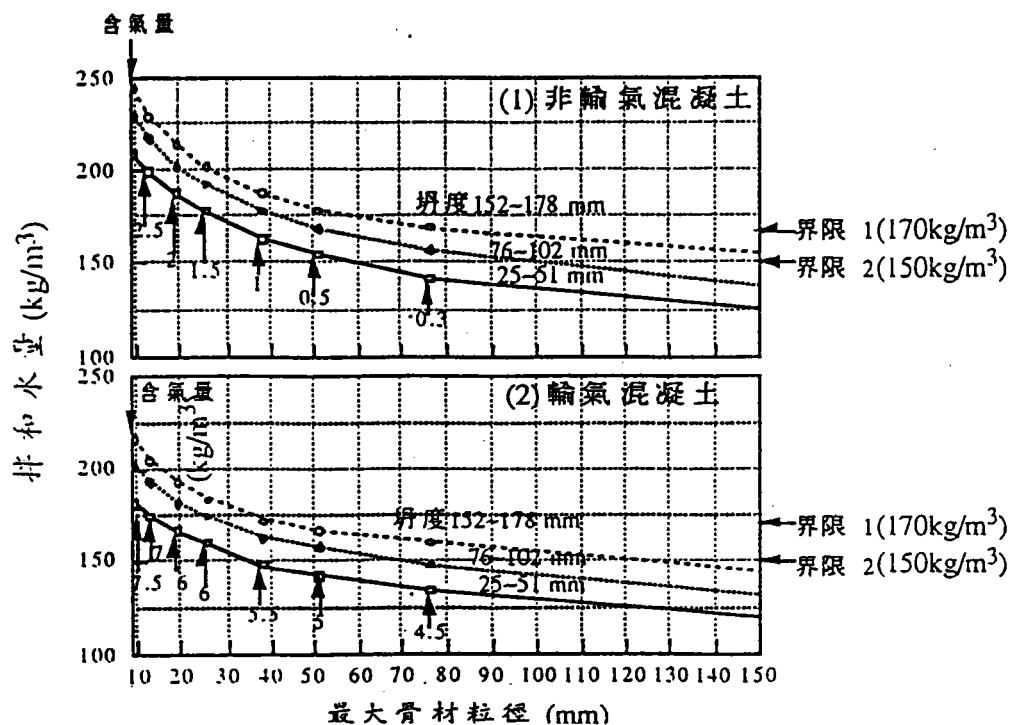


圖 40 不同最大骨材粒徑坍度及輸氣量條件下，建議之混凝土拌和所需用水量⁽¹⁰⁾

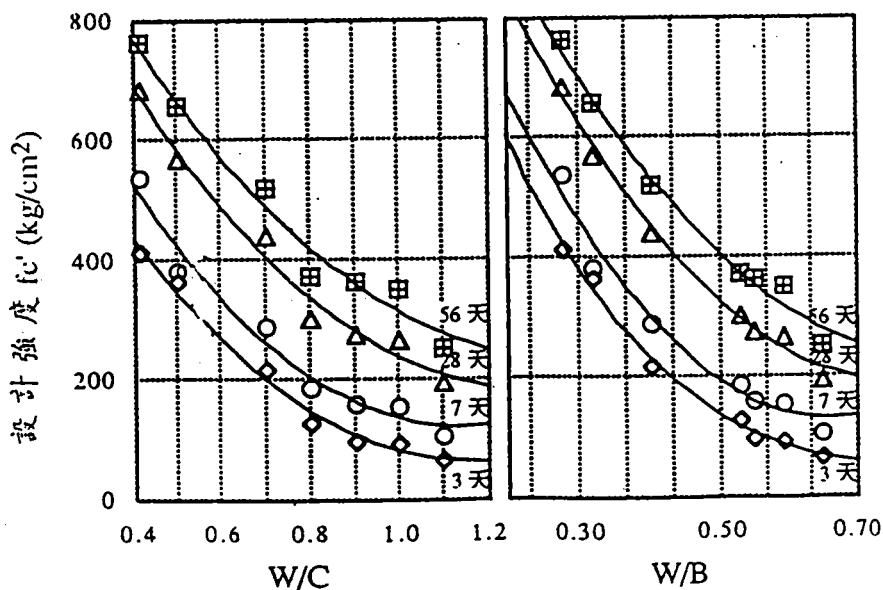


圖 41 無試拌及混凝土配比資料可尋時之設計強度與容許最大 W/C 及 W/B (漿量體積固定) 之關係⁽¹⁰⁾

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

圖 42 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕有關文獻比較^(46,49)

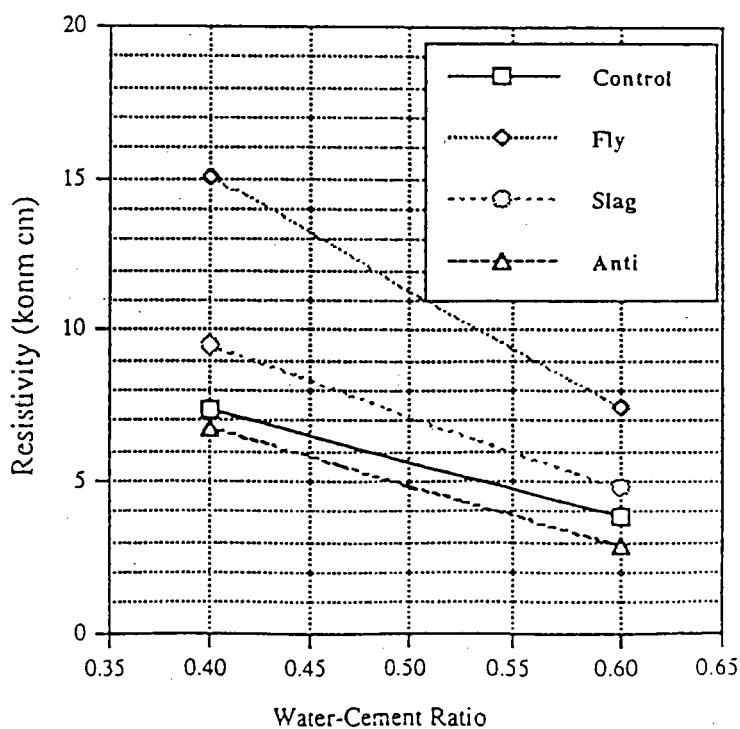


圖 43 混凝土水灰比與電阻性質之關係⁽⁵⁶⁾

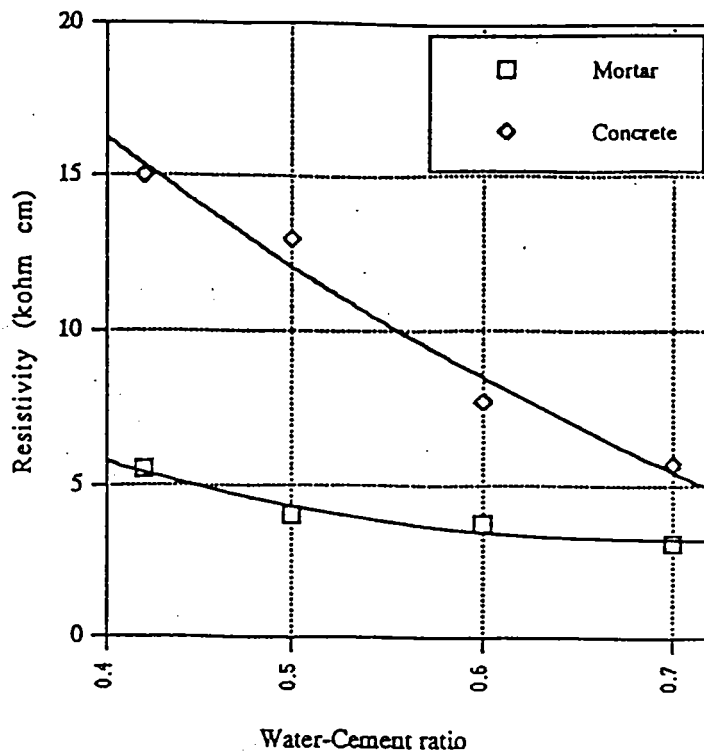


圖 44 混凝土與水泥砂漿之電阻性質比較圖 (56)

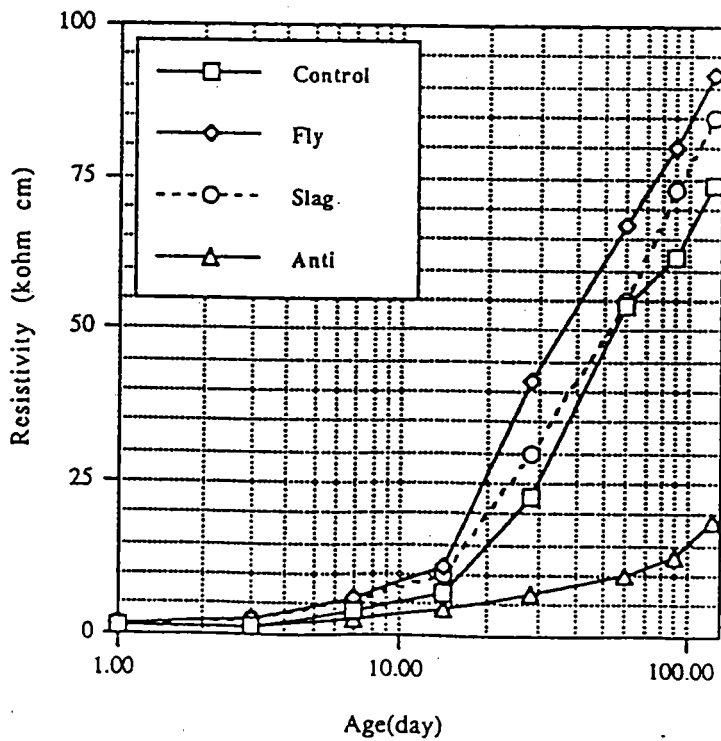


圖 45 混凝土齡期與電阻性質之關係 (56)

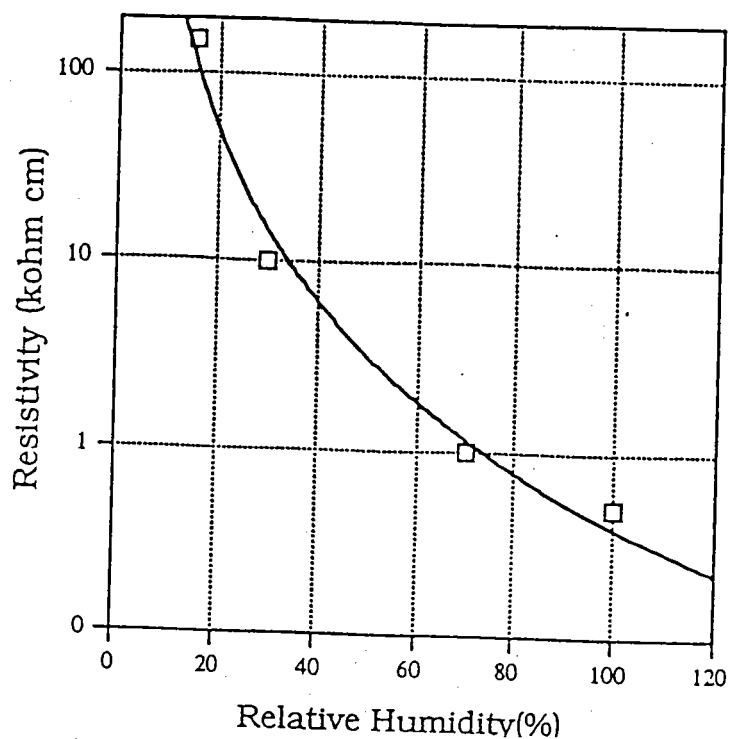


圖 46 相對濕度與混凝土電阻性質之關係⁽⁵⁸⁾

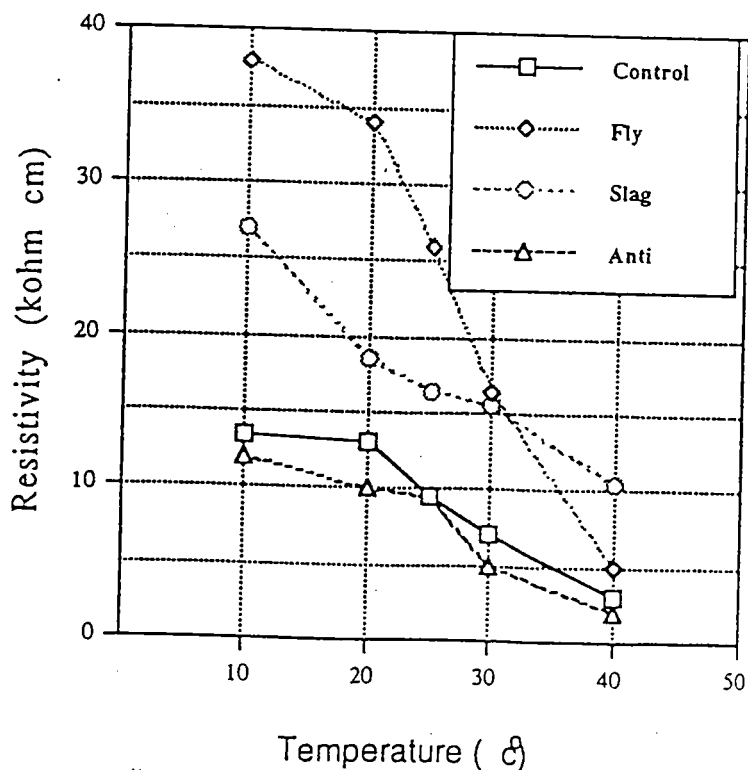


圖 47 混凝土之溫度與電阻性質關係^(47,56)

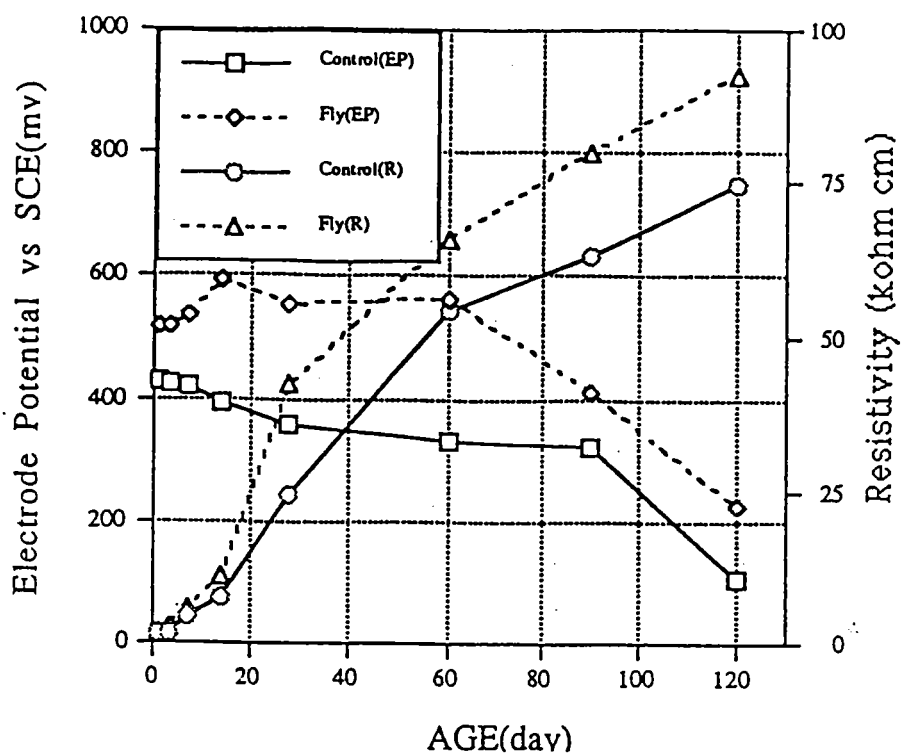


圖 48 混凝土的摻料效應對電阻性質及鋼筋電位的關係⁽⁵⁶⁾

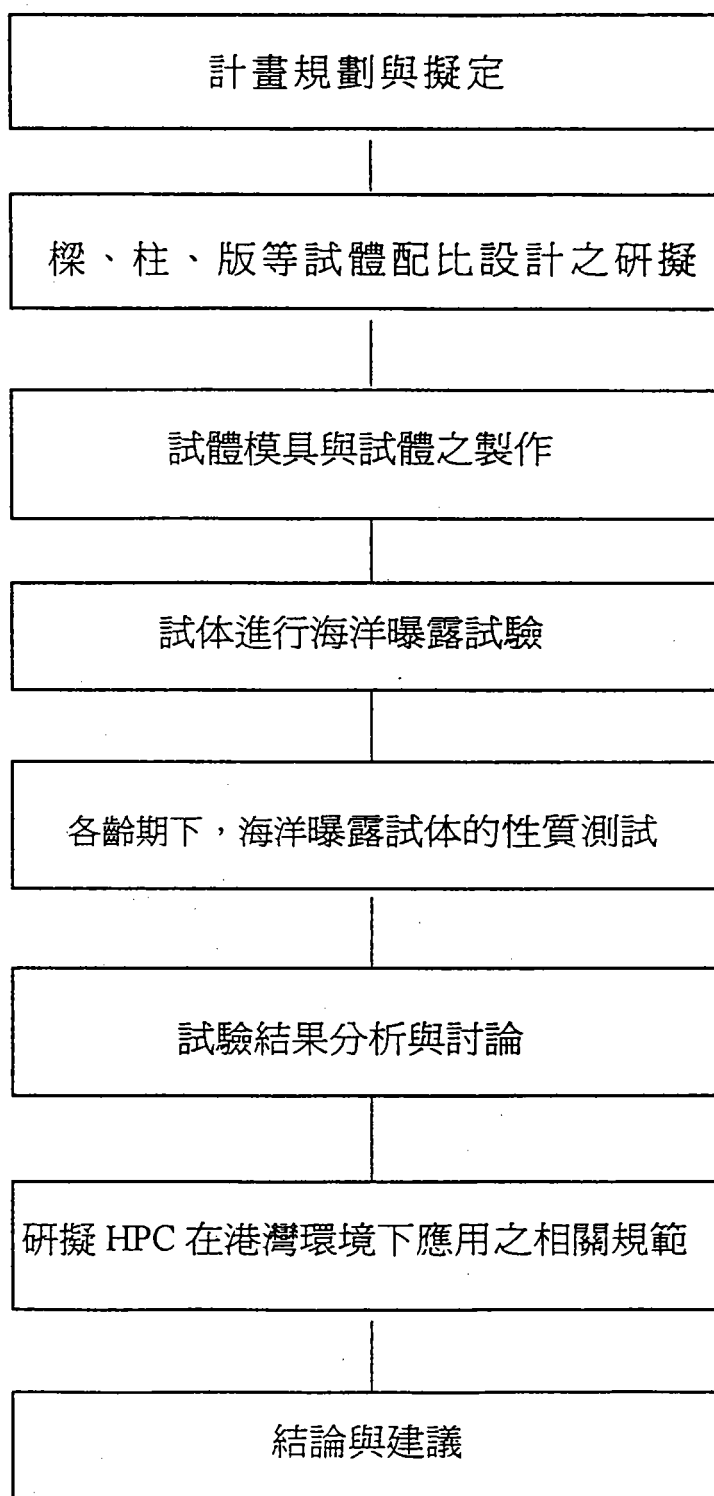


圖 49 港灣環境下高性能結構體之性質研究計畫流程圖

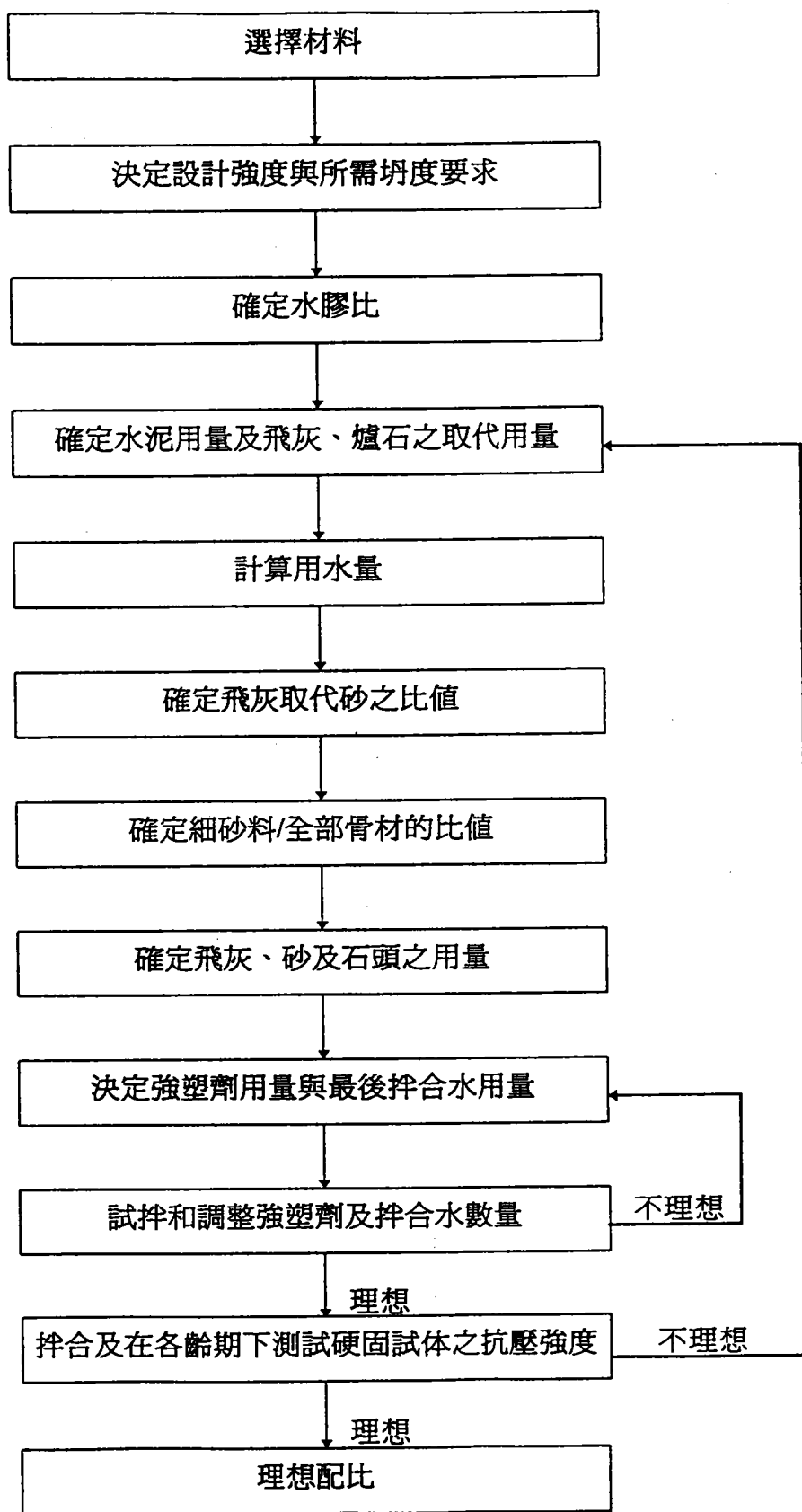
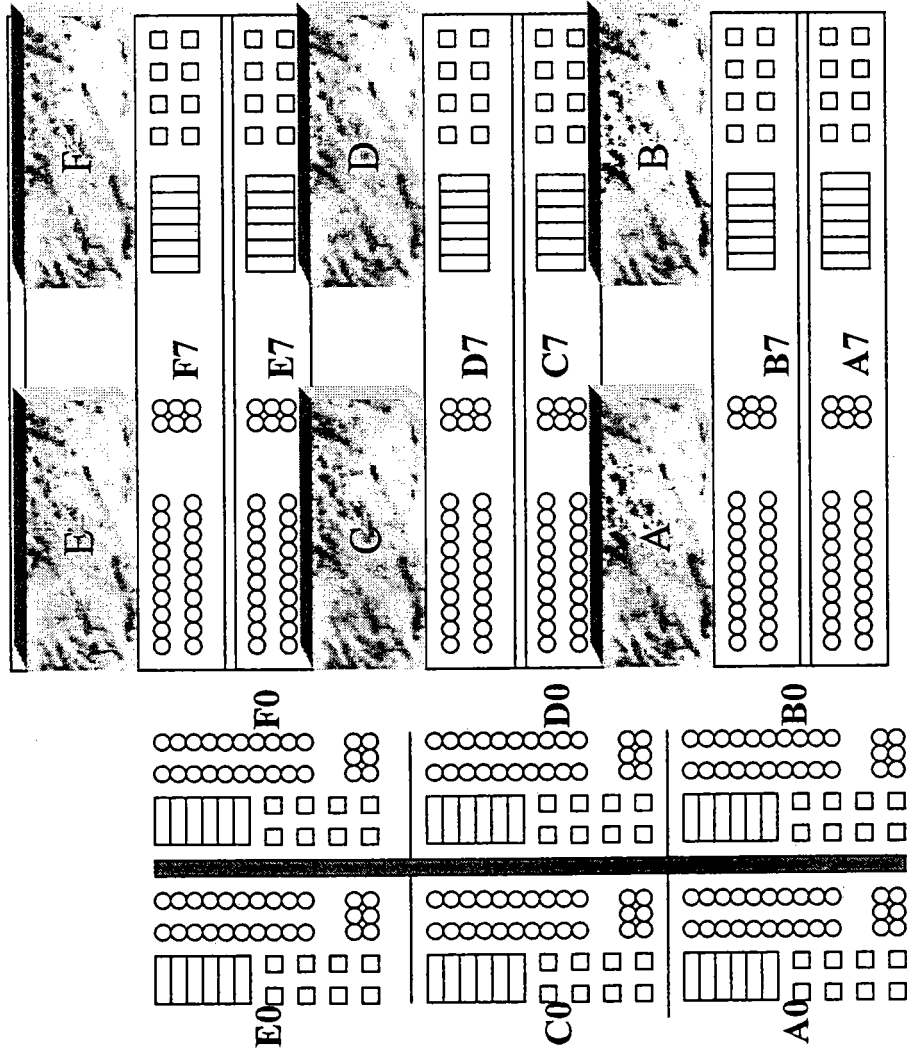
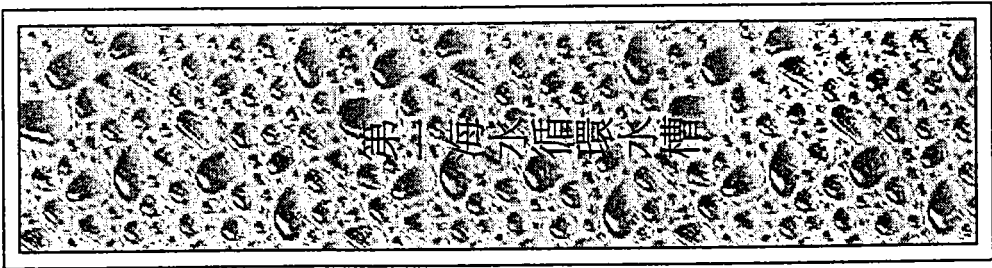


圖 50 美國混凝土學會（ACI）配比設計流程圖



說明:

一.ABCDEF為實際灌置大試體

尺寸:1.5m×2.0m×0.5m

二.A7~F7為7天養生室後大氣養生21天

三.A0~F0為28天養生室養生

圖51 高性能混凝土海洋曝露試驗平面佈置圖

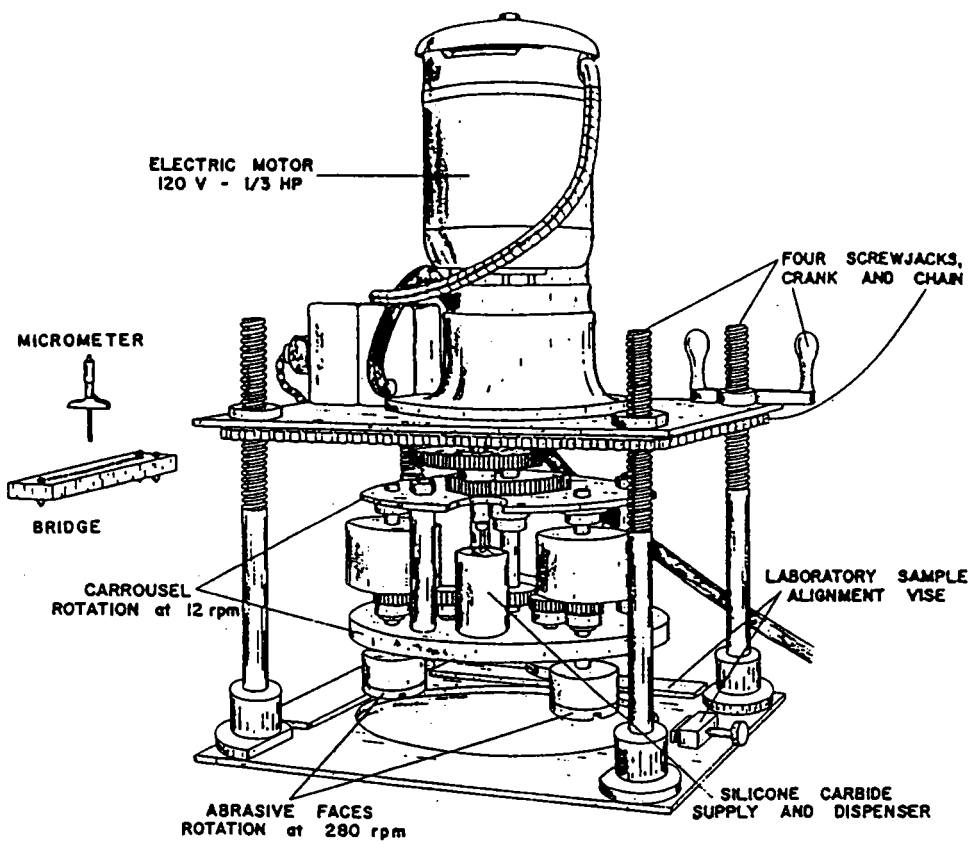
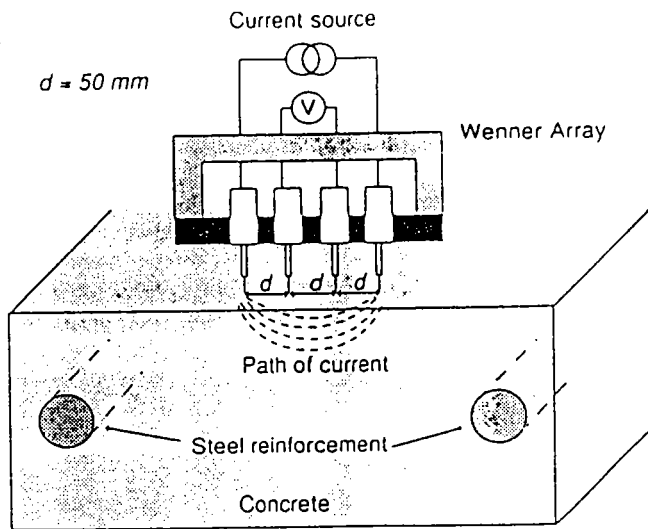
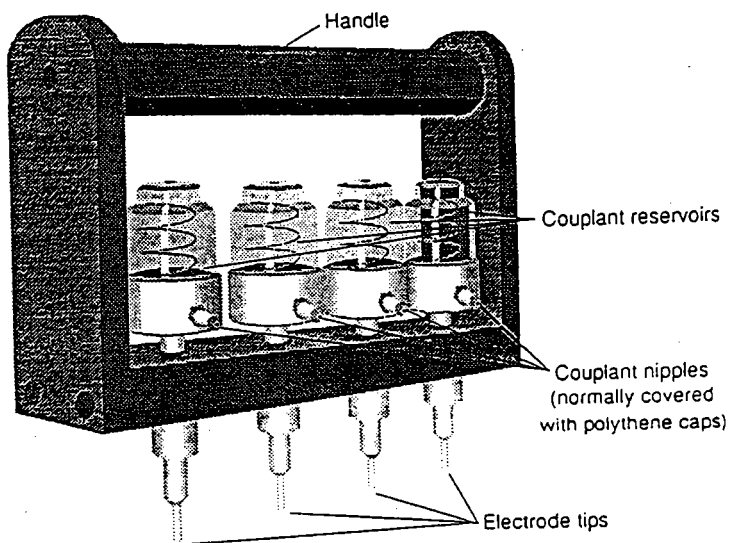


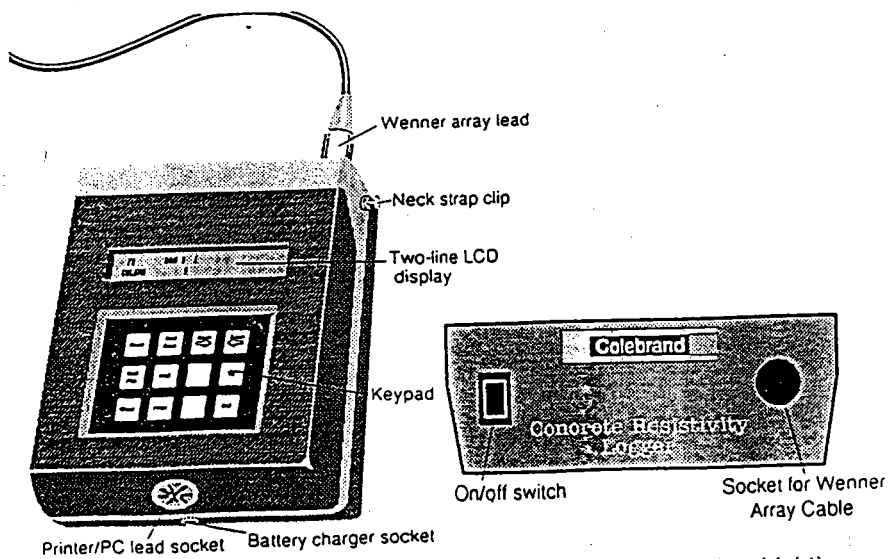
圖 52 旋轉板式磨損試驗機



The theory behind the Resistivity Logger

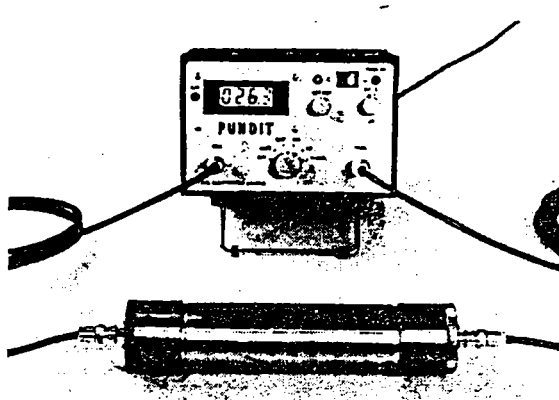
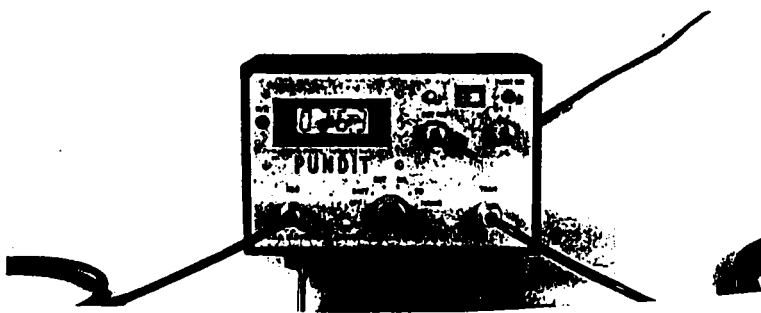


The Wenner array; the electrical connection is at the rear of the unit

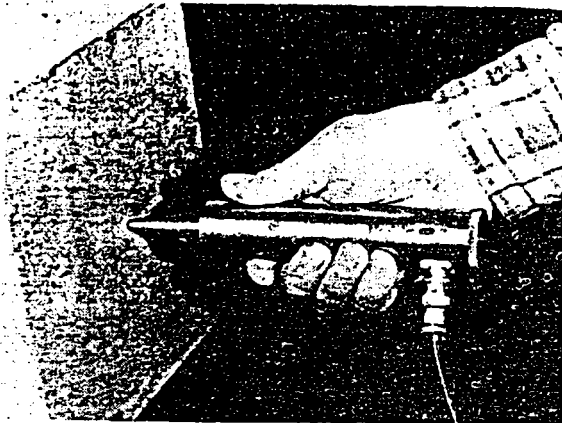


The Data Logger from the front and below (left) and top view (right)

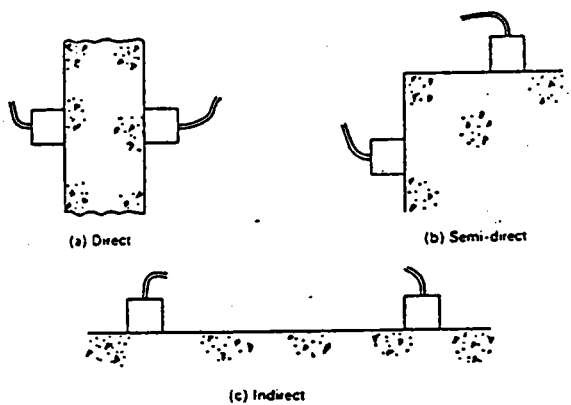
圖 53 四極式電阻量測儀示意圖



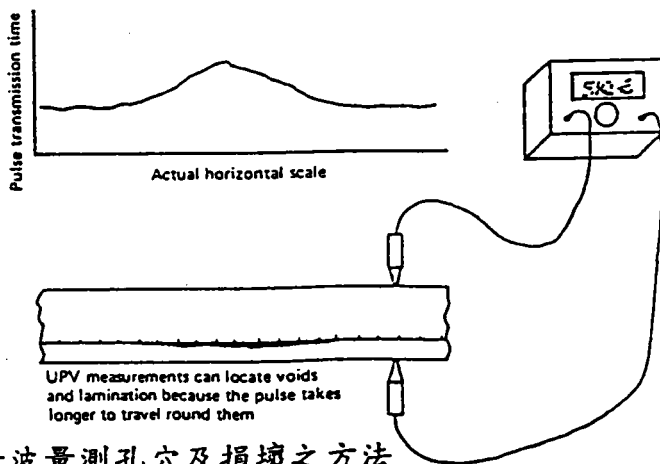
超音波儀器校正



點觸式探頭



現場試驗方法



超音波量測孔穴及損壞之方法

圖 54 混凝土超音波量測示意圖

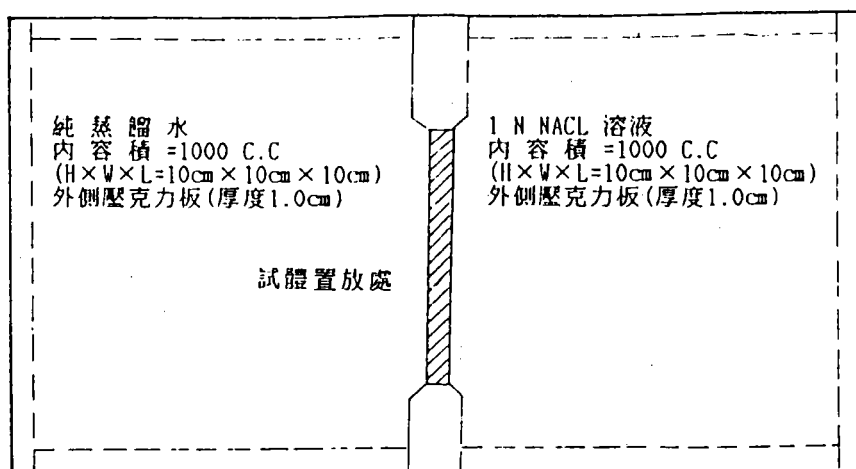


圖 55 氯離子擴散試驗裝置示意圖

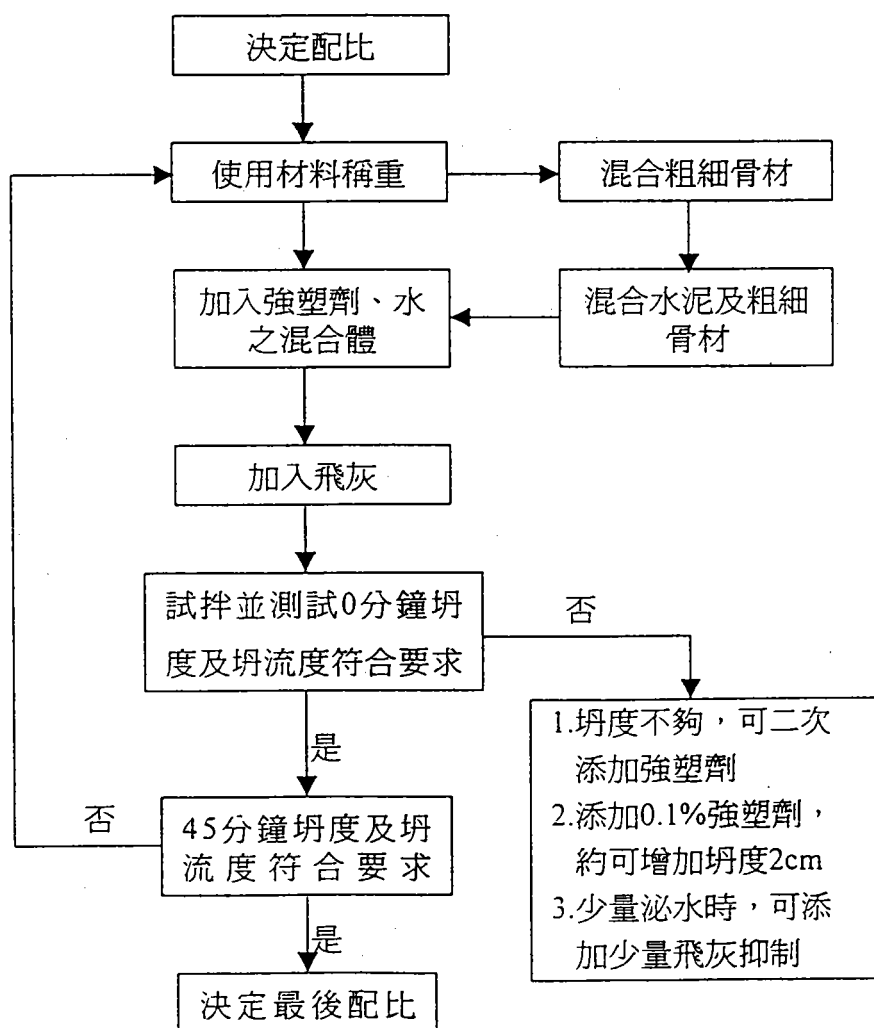


圖 56 HPC 之拌和程序

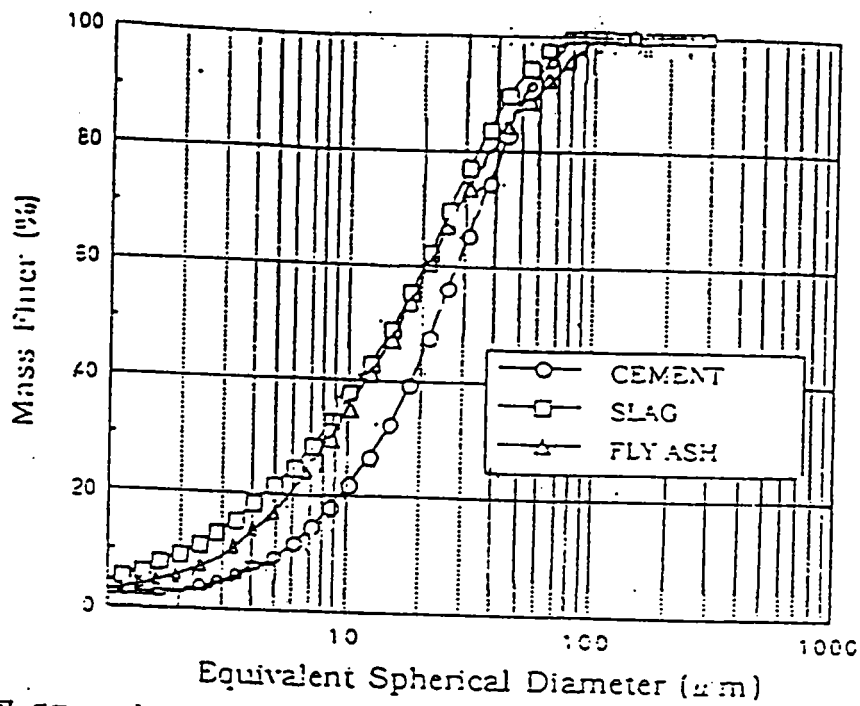


圖 57 水泥、飛灰及爐石之粒徑過篩概率分析圖

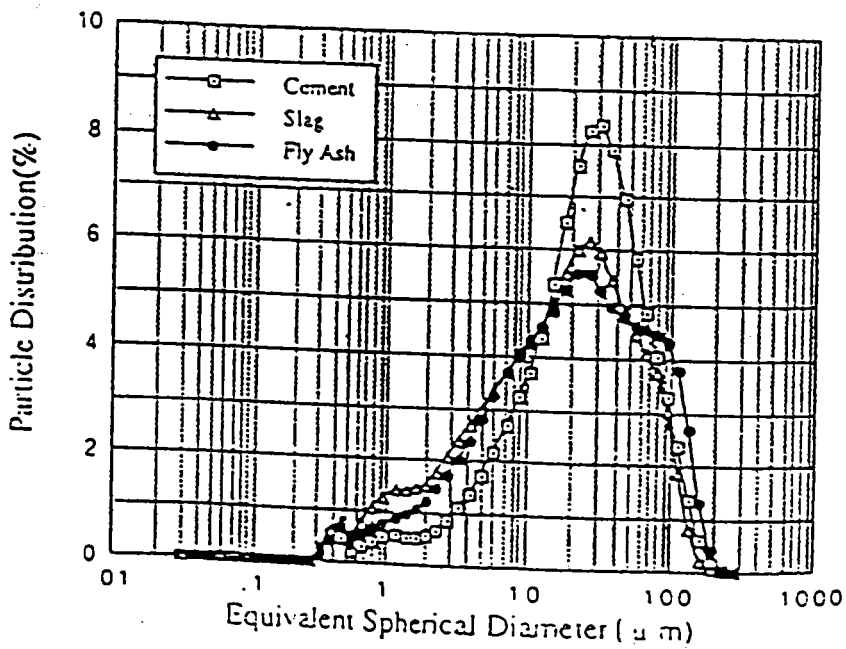


圖 58 水泥、飛灰、爐石之粒徑密度分佈圖

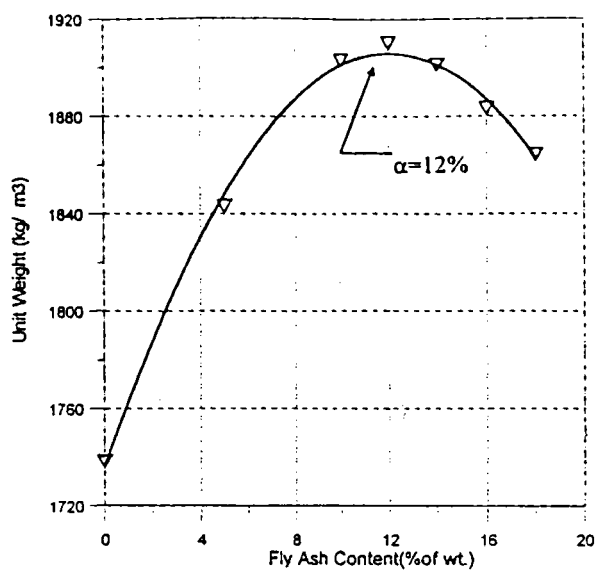


圖 59 飛灰細骨材混和量與單位重之關係

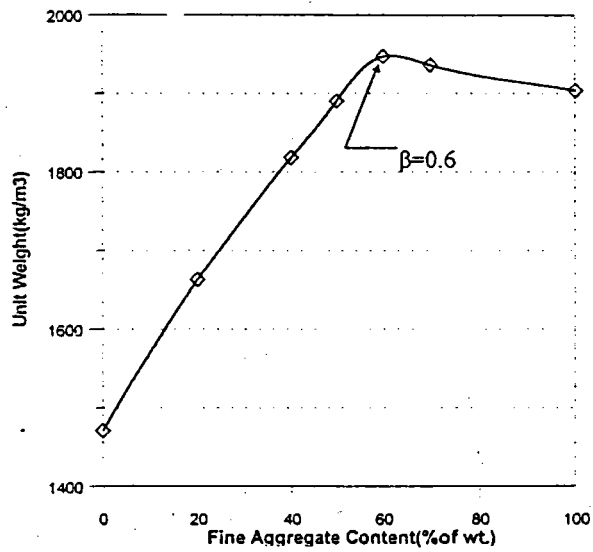


圖 60 粗、細骨材混和量與單位重之關係

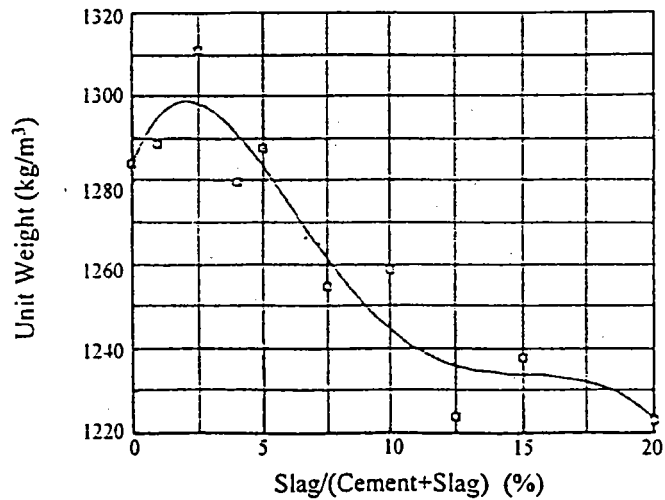


圖 61 高爐石取代水泥用量之最佳比例

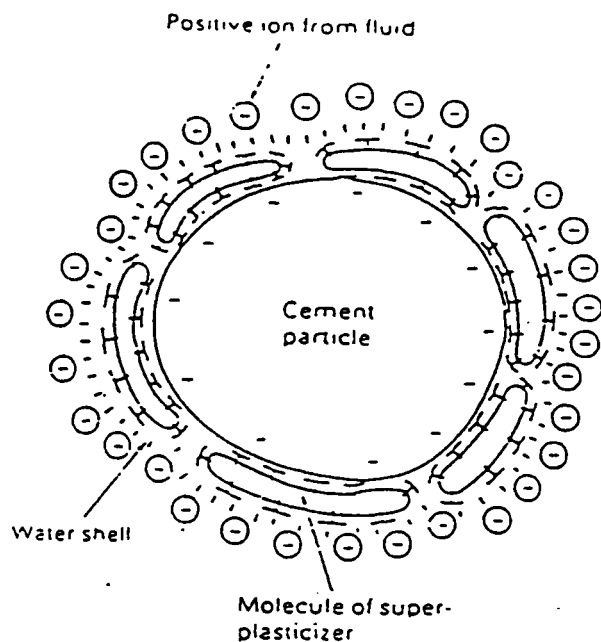
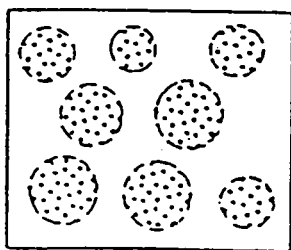
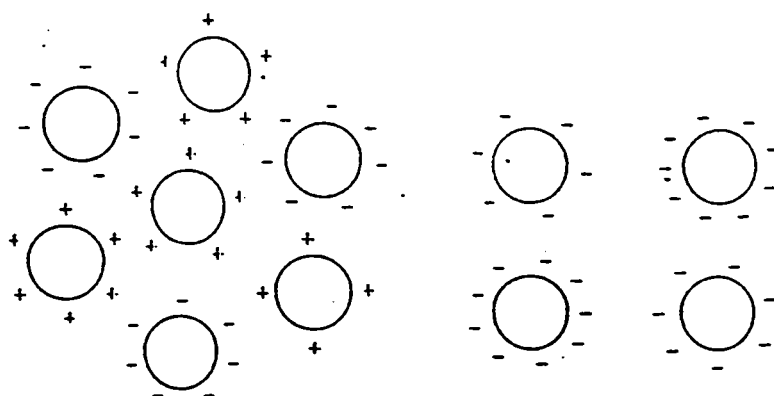
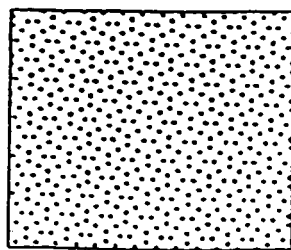


圖 62 化學摻料吸附於水泥表面的模式



(a) 絮凝之膠體



(b) 分散之膠體

圖 63 化學摻料之分散作用

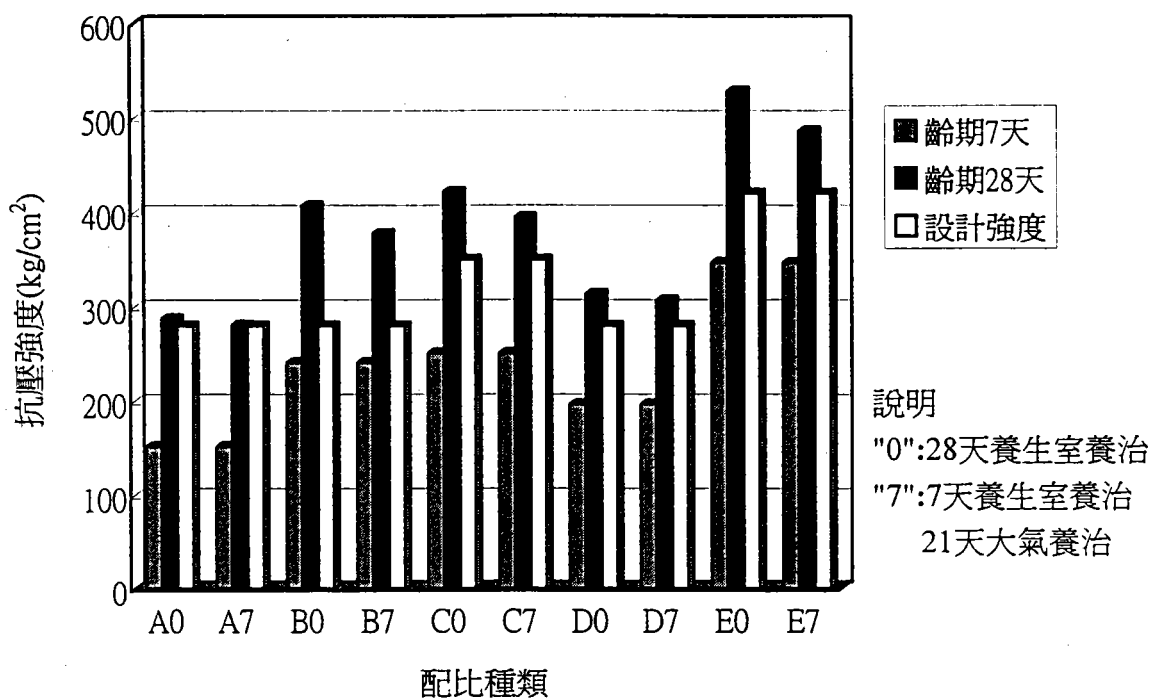


圖64 各種配比混凝土抗壓強度發展

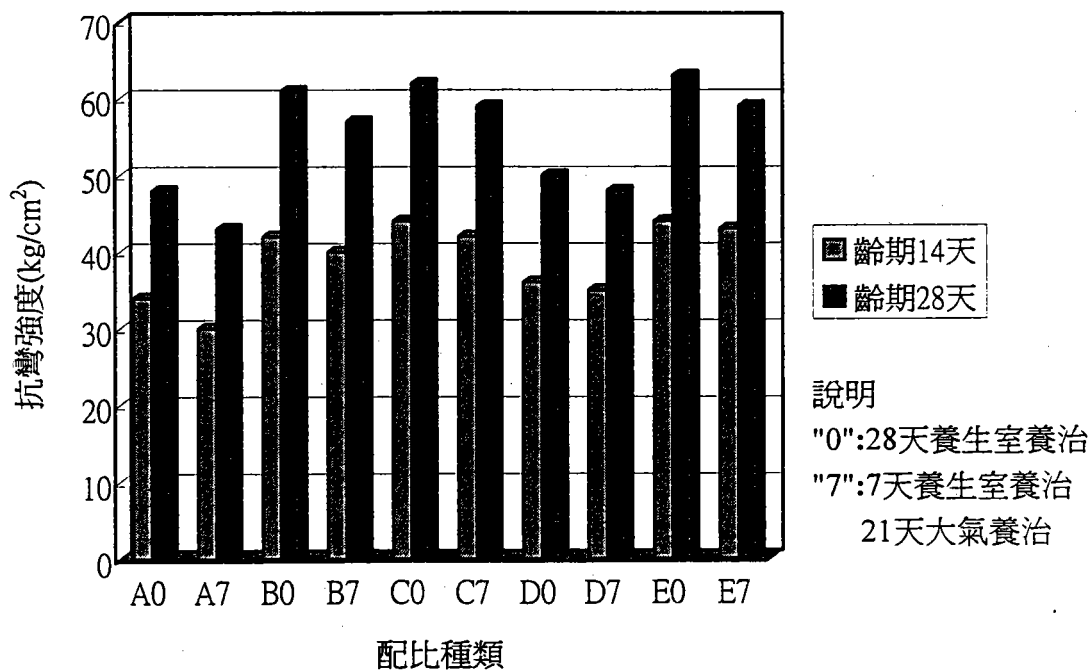


圖65 各種配比混凝土抗彎強度發展

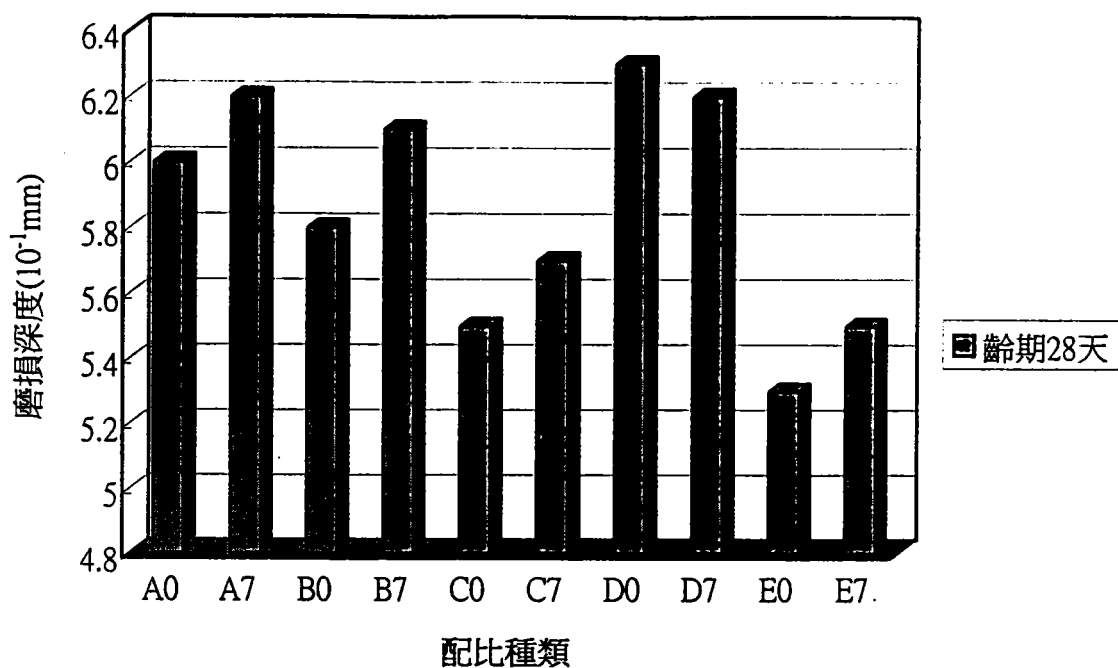


圖66 各種配比混凝土之磨損比較

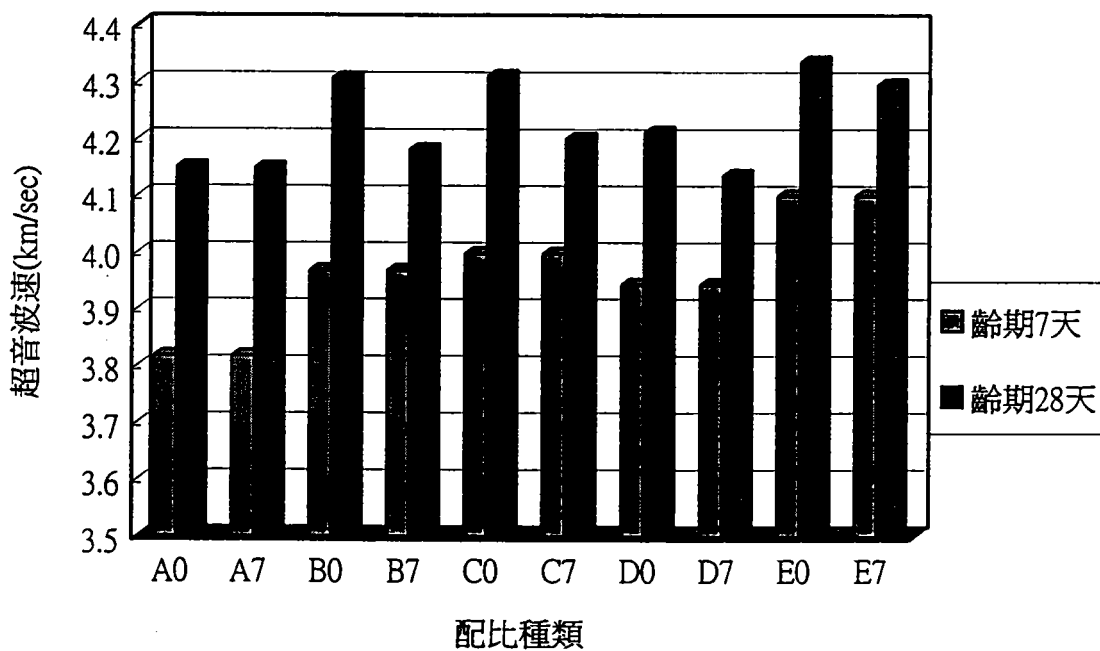


圖67 各種配比混凝土之超音波速比較

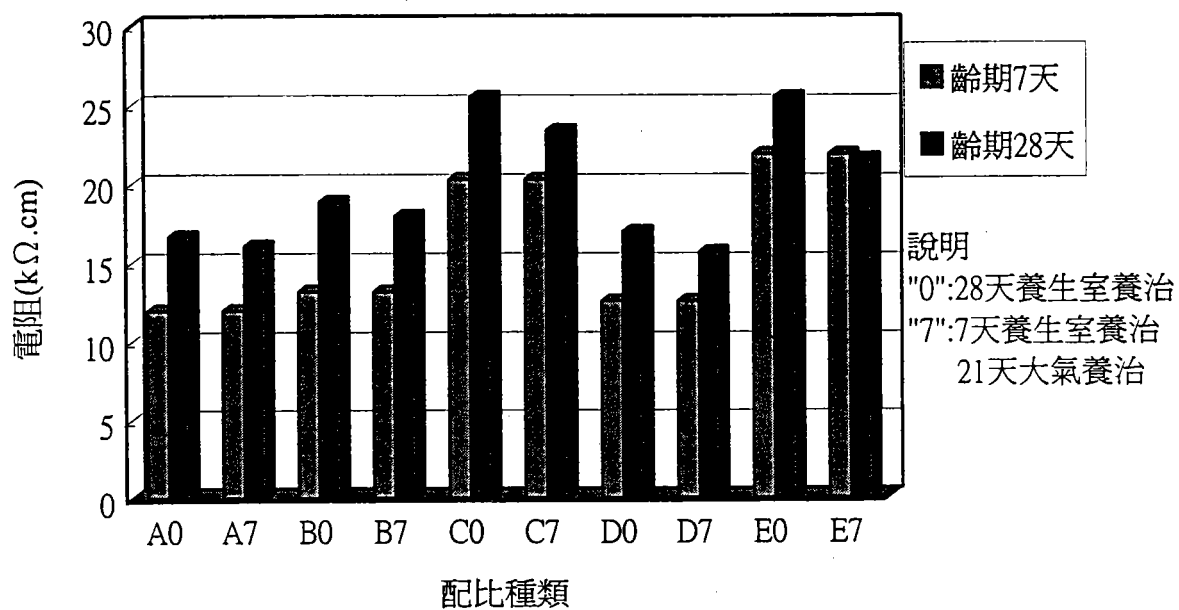


圖68 各種配比混凝土電阻之比較圖

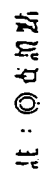


圖 69 混凝土材料品質檢驗流程 (66)

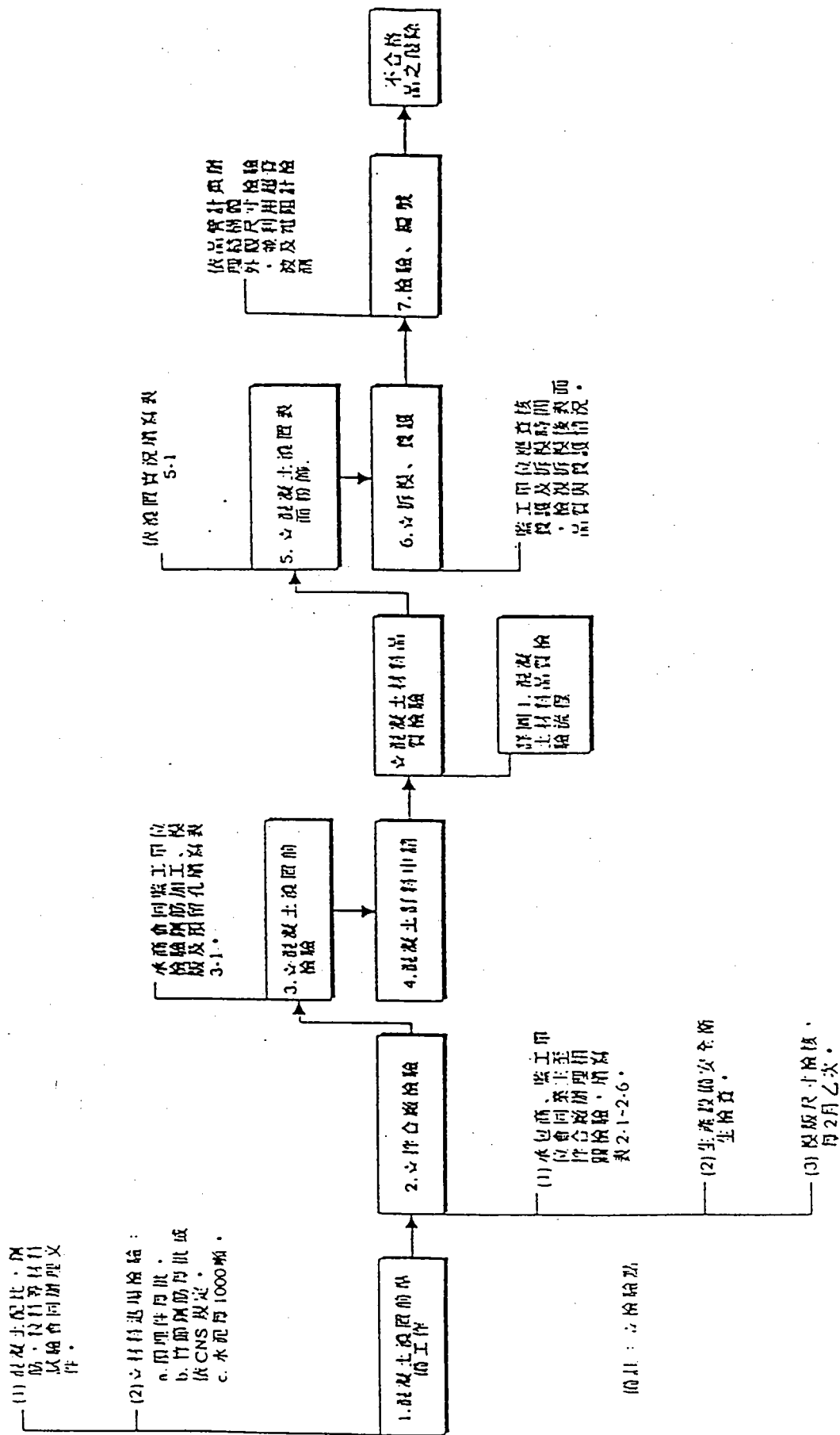


圖 70 高性能混凝土施工檢驗作業程序 (66)



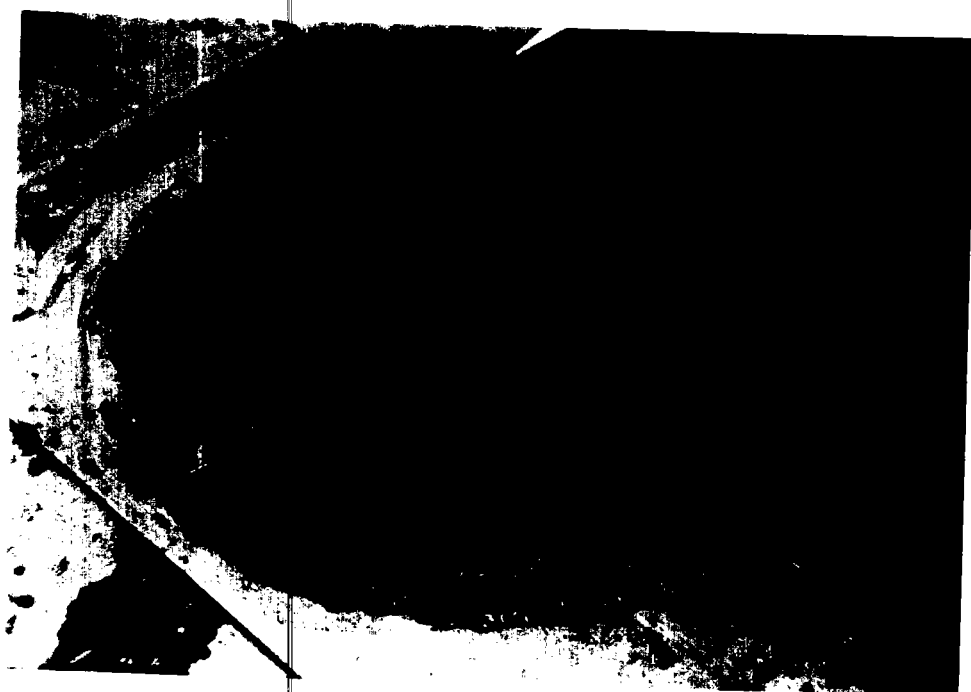
照片 1 拌製樑、板及圓柱試體



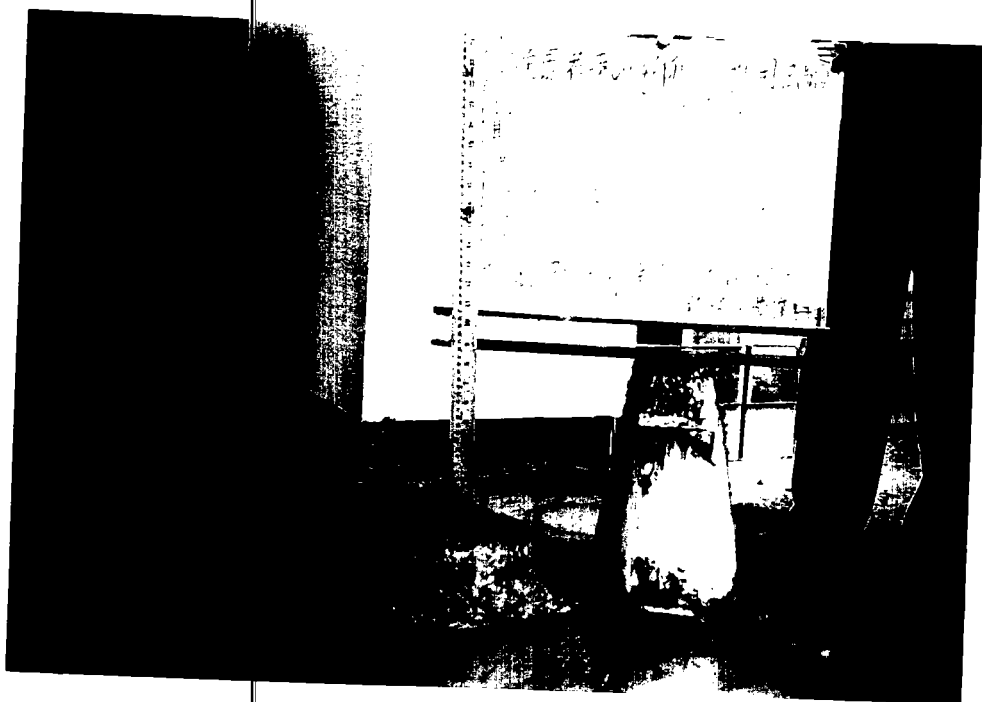
照片 2 拌製大型試體



照片 3 HPC 坍度量測



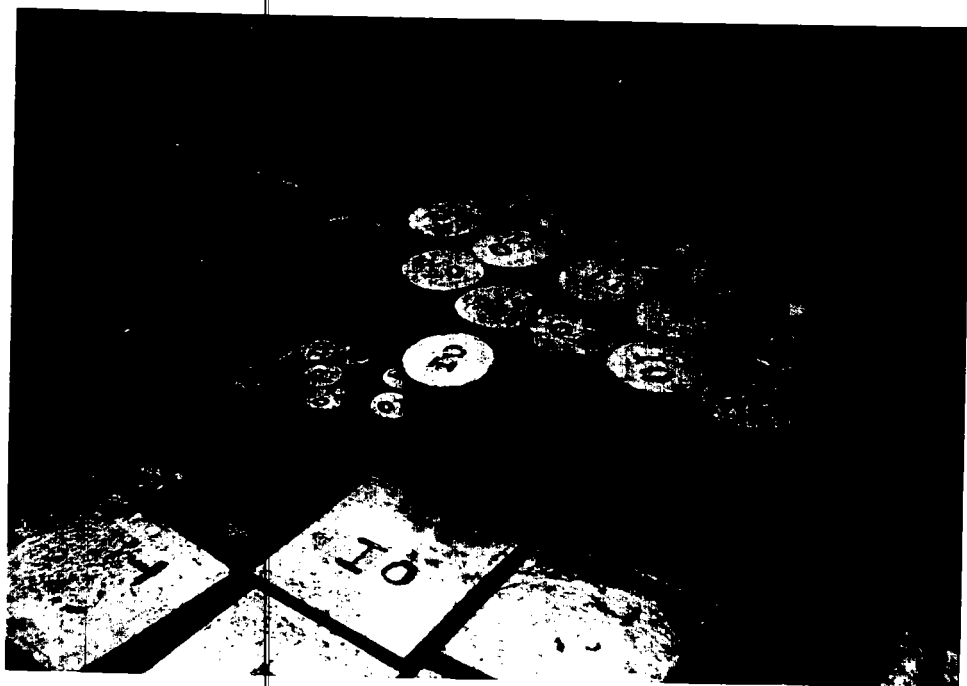
照片 4 HPC 坍流度量測



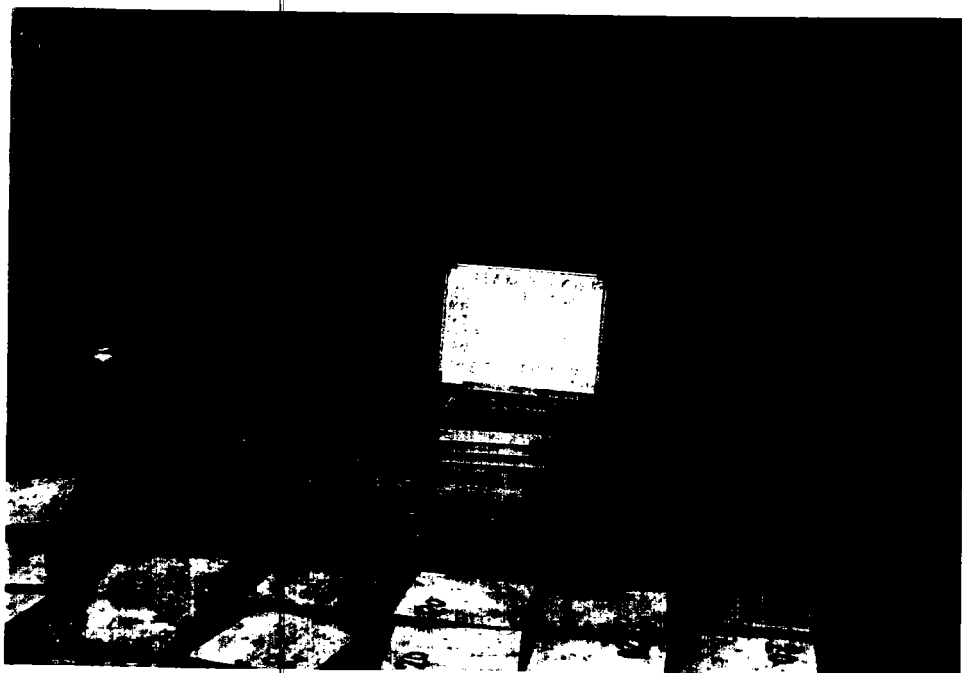
照片 5 一般混凝土坍度量測



照片 6 試体置於海洋曝露試驗場



照片 7 曝露試驗試体上編號



照片 8 海洋曝露試驗場

柒、附錄：高性能混凝土特別條款(草案)

1996/12/16 修正

1997/8/1 再修正

(本條款正進行工程實務測試中)

一、一般說明

1-1 定義：

高性能混凝土係混凝土經過品質保證技術，確保品質一致性及穩定性，滿足營建工程優良品質之需求。

1-2 概論：

本「高性能混凝土特別條款」係依據美國混凝土學會 ACI318-95「結構混凝土」精神及內涵所補充，在使混凝土由規劃設計及配比時即能考量耐久性及確保最終結構體混凝土品質。內容包括高性能混凝土之材料、配比及試拌、產製及品質檢驗、澆鑄、養護及脫模、品質管制、品質檢驗及驗收等。

1-3 本特別條款定訂之目的在確保高性能混凝土澆鑄之結構物品質，免除蜂窩、泌水及析離等問題，使達到「安全性、耐久性、經濟性、工作性及生態性」之準則。

二、高性能混凝土材料

2-1 通則

2-1-1 高性能混凝土使用之材料包括水泥、粗細粒料、拌和用水及摻料，因各成分材料品質及組成比例對混凝土性能影響甚大，故須嚴加管制使符合本章及其他各章相關之規定。

2-1-2 除另有規定外，高性能混凝土製造商必須於施工前二個月，進行「料源管制」工作，建立成分材料品質管制資料，並應於施工期間確保各組成材料之來源及品質之穩定性。

2-1-3 施工所使用之組成材料應與配比設計時所用材料相同。

2-2 水泥

2-2-1 水泥除細度及強度另有規定外，須符合下列規範：

- (1)CNS 61 卜特蘭水泥
- (2)CNS 3654 卜特蘭高爐水泥
- (3)CNS 11270 卜特蘭飛灰水泥

2-2-2 高性能混凝土使用水泥之細度值至少應為 $3300\text{cm}^2/\text{g}$ 以上。

2-3 粒料

2-3-1 高性能混凝土之粒料除標稱最大粒徑外，須符合 CNS1240(混凝土粒料)之規定。

2-3-2 粗細粒料應視為不同成分材料，各尺寸粗粒料以及二種以上含混合粗粒料，均需符合粒料之級配規定。

2-3-3 混合之粗細粒料級配，以達到最小空隙率為要求。

2-4 水

2-4-1 高性能混凝土「拌和用水」須為潔淨，所含各種油脂、酸、鹼、鹽類、有機物或其他有害於混凝土或鋼筋之物質，不得達到有害程度。

2-4-2 高性能混凝土「拌和用水質」之檢驗應按 CNS 1237 「混凝土用水品質試驗法」之規定。

2-4-3 拌和用水之含氯量或其他淨化添加物之量，對混凝土性能之影響性應加檢測，其氯離子含量不得超過 1000ppm。

2-4-4 混凝土拌合用水之品質如有疑問時，應加檢驗，其標準必須至少符合下列條件：

1.按 CNS 1010 「水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法」之規定進行強度試驗，其抗壓試體之 7 天及 28 天抗壓強度至少需使用符合第 2-4-1 節之「水」所做同種抗壓試體強度的 90%。強度試驗之比較除「拌和水」不同外，其他條件應完全相同。

2.按 CNS 786「水硬性水泥凝結時間檢驗法」之規定，進行「凝結時間」試驗，其凝結時間與控制組（使用符合第 2-4-1 節規定之水）試樣凝結時間之差異不早於 1 小時及晚於 1.5 小時。

3. 摻有氯離子物質時，其 56 天混凝土圓柱試體以四極式電阻計量測之電阻至少確保 $20K\Omega - cm$ 。
4. 與其他材料不產生互斥性之影響。

2-5 摻料

- 2-5-1 高性能混凝土為符合 1-3 節之要求，應添加卜作嵐及減水摻料，其他摻料之添加以能達混凝土特殊性能要求，且對其他性質無妨害為原則。
- 2-5-2 摻料使用時，須符合下列規範：
 1. CNS 12283「混凝土化學摻料」。
 2. CNS 3036「卜特蘭水泥混凝土用飛灰或天然卜作嵐摻和物」。
 3. CNS 11271「卜特蘭飛灰水泥用飛灰」。
 4. CNS 12549「混凝土及水泥壩料用水淬高爐石粉」。
 5. CNS 3091「混凝土用輸氣附加劑」。
 6. CNS 12892「鋼纖維混凝土用鋼纖維」。
- 2-5-3 各種摻料於使用前，應有可靠資料以為配比設計之依據。必要時應進行驗證，測試其性能符合 2-5-2 節規範之規定。
- 2-5-4 施工中所使用之摻料應與配比設計時所使用之摻料相同，如有變更必須重新加以驗證。
- 2-5-5 除本規範之規定外，使用摻料時，應參照產品使用說明書之規定。
- 2-5-6 各種摻料除應按第 2-7 節(材料之儲存)規定妥為儲存外，並應注意其有效期限，超過規定期限者不得使用。

2-6 材料之特別管制

- 2-6-1 為防止高性能混凝土內鋼材腐蝕，在混凝土配比設計過程中即應針對配比材料，包括水、粒料、水泥及摻料，計算混凝土中氯離子含量，並且在齡期 28 天至 56 天之硬固混凝土鑽心取樣本，測定其氯離子含量，二次測試值均應低於表 2-6-1 所規定之最大氯離子許可含量。

表 2-6-1 高性能混凝土內防止鋼材腐蝕之最大氯離子許可含量

購 材 種 類		混凝土中最大水溶性氯離子(Cl^{-})含量	
		水泥重量(%)	每立方重量(kg/m ³)
預 力 混 凝 土		0.06	0.15
鋼筋混凝土	曝露於含氯化物之環境	0.15	0.30
	經常保持乾燥	1.00	0.6
	其他狀況	0.30	

2-6-2 高性能混凝土中含有鋁質或鍍鋅金屬埋設物，或接觸永久性金屬模板，除非能提供為工程師認可之保護措施，否則應比照表 2-6-1 中預力混凝土之規定，限制氯離子含量。

2-7 材料之儲存

2-7-1 任何材料應妥為儲存，若有受損壞、污染或變質者均不得使用。

2-7-2 水泥須用氣密容器儲存，若為袋裝時並應儲存於不受氣候影響之倉庫或場所，且其地板面至少應高出地面 300mm，以防受潮或污染。

2-7-3 袋裝水泥儲存堆置之高度應在 10 袋以下，以免重壓硬化。

2-7-4 取用儲存中之水泥，若發現有結硬塊現象時，應加判斷若係水泥已有水化現象，則應予廢棄不得再用。唯經確認其硬化僅係因重壓所致，使用時甚易將之分散，且符合本章第 2.2 節水泥之規定，並經工程師確認後，仍可打散使用。

2-7-5 混合粒料堆積儲存時應防止其過度析離，並避免不同尺寸粒料或與其他物料摻混。使用前須在預拌混凝土廠粒料進料處取樣試驗，以測定其級配與清潔度是否符合規定。

2-7-6 粒料之堆放場應排水良好，以免粒料上下層含水量相差太大。

2-7-7 摻料之儲存須防止污染、蒸發、損壞或對性質有不良影響之溫度變化。如為懸浮或不穩定液體狀態者，使用時應以適當設備攪拌均勻。

三、高性能混凝土配比及試拌

3.1 通則

高性能混凝土之配比設計，應確保澆鑄時不得有析離及泌水現象，硬化後其規定齡期（一般為 56 天）之強度須符合設計之規定抗壓強度 f'_c （以下簡稱規定強度）之要求，並具良好耐久性。混凝土必須於施工前至少二個月進行品質保證資料的建立，及進行結構物施工可行性評估，事先訂定嚴謹之施工計劃書。

3-2 耐久性

高性能混凝土配比務必符合耐久性之規定。

- 3-2-1 混凝土配比應採用水膠比，即拌和水與膠結料之比率。其中拌和水包括 2-4 項之水及 2-5-2 之 1 項「高性能減水劑」或「減水劑」，而膠結料包括 2-2 項之水泥及 2-5-2 之 2, 3, 4 項卜作嵐材料在內，卜作嵐材料指飛灰、爐石粉或其他類似卜作嵐材料。
- 3-2-2 混凝土配比應採用低水量及低水泥漿量之配比邏輯。
 - 1. 拌和用水量限制不得大於 0.08 乘以水泥、卜作嵐摻料及粒料等固態材料重量之總和。
 - 2. 水泥量限制不大於 $0.7 \times f'_c$ 。（ kg/cm^2 ）。
- 3-2-3 高性能混凝土配比的水灰比應大 0.42。
- 3-2-4 高性能混凝土配比必須使 56 天電阻大於 $20\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ 。
- 3-2-5 混凝土配比應符合施工環境，良好之體積穩定性及較低之乾縮量，即儘可能採用較低之水泥漿量，且水固比應小於 0.08。水固比指水與固態材料，包括水泥、粒料、卜作嵐材料等重量之比價。
- 3-2-6 混凝土配比應使混凝土具良好之施工性，以防鋒窩及冷縫之產生，混凝土按施工者之需求，其工作坍度可由 0mm 高至 270mm，工作坍度容許變異值為 $\pm 120\text{mm}$ ，而坍流度可由 203mm 大至 700mm，其容許變異值為 $\pm 100\text{mm}$ 。
- 3-2-7 暴露海域環境之混凝土，其水膠比應低於 0.4，氯離子電滲之電流量應小於 1000 庫倫，並且確保足夠保護層厚度。

3-3 強度

高性能混凝土之規定強度，除本規節另有規定外，係指按 CNS 1230（混凝土試體在實驗室製作及養護法）或 CNS 1231（工地混凝土試體之製作及養護法）之規定製作試體，並按 CNS 1232（混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法）之規定進行抗壓強度試驗。

3-3-1 高性能混凝土早期強度（28 天前）以水膠比控制，但水灰比應大於 0.42。

3-3-2 高性能混凝土 56 強度應以水膠比來控制。水膠比與抗壓強度之關係應在試驗室依 3-1 規定按施工所用混凝土材料拌和而求得。

3-4 工作性

3-4-1 高性能混凝土之工作性以坍度及坍流度表示之。設計坍度按施工需求可由 0 至 270mm，設計坍流度可由 203mm 至 700mm，產製 45 分鐘後之坍度及坍流度不得小於初拌時之最低要求。高性能混凝土在低坍度及低坍流度時，亦需確保良好的施工性及結構品質。

3-4-2 任何連續五次拌和，新拌混凝土之坍度及坍流度試驗中，可容許有一次拌和混凝土之坍度及坍流度，超過規定上下限最大值分別達 20mm 及 100mm。坍度測定應按照 CNS 1176（卜特蘭水泥混凝土坍度試驗法）之規定。坍流度測定則為坍度測定時量測坍下擴散之直徑，量測時間以 90 秒鐘為限。

3-4-3 為確保高性能混凝土的適當工作特性或可泵送性，工程師得要求其他更精密之試驗法，以計量混凝土之工作特性。

3-5 其他性能

3-5-1 高性能混凝土之配比應使用本地之材料，達到最低生產成本，採用過量之卜作嵐摻料，確保生態性需求。

3-5-2 高性能混凝土的性能可依需要而定，可要求「強度」、「流動性」、「自填性」、「免搗實」、「透水性」、「耐侯性」、「韌性」、「彈性模數」、「乾縮及潛變量」、「抗剪力」、「抗彎強度」等一項或多項性能，而此等特質將影響配比之決定。

3-6 粒料之配合

3-6-1 粗粒料之標稱最大粒徑，當規定強度小於 630kg/m^2 時，宜為 19-25mm；規定強度大於 630kg/m^2 時，宜為 9.5mm-19mm，但均不得大於下列規定之值。

- (1) 模板間距之 $1/5$ 。
- (2) 混凝土版厚之 $1/3$ 。
- (3) 鋼筋、套管等最小淨間距之 $3/4$ 。

3-6-2 細粒料之細度模數應採用 2.8-3.2 範圍之粗砂，其量測方法應依第 2-3-1 節所述之規範決定。

3-6-3 粗細粒料應以乾搗重決定級配的合宜性，並據此決定粒料之最小空隙量及需求漿量。

3-7 摻料之選用

高性能混凝土使用之摻料包括卜作嵐材料、化學摻料及鋼纖維，添加摻料之目的在達成最低「拌和水量」及「用漿量」，保持設計之工作性、安全性、經濟性及生態性要求下，確保耐久性品質。

3-7-1 使用摻料時應有可信之試驗報告或原製造廠之使用說明書，並具有品質保證統計資料，以證明該摻料之性能可靠。

3-7-2 摻料對混凝土性質之任何影響，應在配比設計中加以考慮，並作適當調整，若對混凝土其他性質有不良影響時，不得使用。

3-7-3 摻料與混凝土其他材料之相容性必須在施工前二個月進行測試及修正，摻料廠商亦須提供統計分佈曲線以供驗證。

3-7-4 摻料之配比用量須依據試拌結果及現場結構物模擬施工可行性檢測時決定之。

3-7-5 液態摻料應按 2.5 節（混凝土化學摻料）之規定，其用量應視為拌和水之一部分，於配比設計中加以調整。

3-8 高性能混凝土配比設計

3-8-1 高性能混凝土之各種材料配比須詳細計算，並將試拌結果一併提交工程師認可，確保混凝土之耐久性、安全性、工作性、經濟性及生態性準則。

1. 混凝土須具良好工作性，使混凝土易於澆鑄施工，不產生泌

水及析離，避免結構混凝土產生蜂窩。

2. 混凝土耐久性應符合第 3.2 節之要求。

3. 混凝土 28 天、56 天或指定齡期之抗壓強度應大於規定齡期之強度。其配比設計強度依據試拌階段所建立的標準偏差值（ S ）加以計算，即依 $f'_{cr} = f'_{c'} + 1.33s$ 或 $f_{cr}' = f'_{c'} + 2.33s - 35$ ，選取其較大值為抗壓強度依據。

4. 混凝土配比設計應妥善使用卜作嵐及減水摻料，以使每公斤水泥所發揮之強度提高。

5. 混凝土配比設計應提高材料效益，減少廢料產生，採取再生回收材料。

3-8-2 高性能混凝土配比設計可依一般經驗公式計算配比材料，其設計原則必須滿足 3-2 至 3-7 節所規定之事項及 3-8-1 之準則。

3-8-3 高性能混凝土配比設計如無其他配比方法可尋，可參考「緻密配比」法則，基本步驟如下：

1. 分析基本材料性質，並且調配各材料間之比率

$(\alpha_i = \frac{W_i}{\sum W_i})$ ，以獲得最大單位量為主。

2. 計算空隙量 $V_v = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{\gamma_i}$ ，式中 W_i 及 γ_i 分別為第 i 材料之重量及比重。

3. 設定水泥漿量：參照 3-2 及 3-3 節之規定及 $f'_{c'}$ ，依混凝土重量概估最大水量及水泥量，最後選定水泥漿量 $V_p = KV_v$ 。K 為空隙量之倍數，即 V_p/V_v 。

4. 決定粒料用量： $V_s = 1 - V_p$ ，由 1 項各材料之比率求取粒料量。

5. 決定各材料用量： $W_i = \frac{V_s}{\frac{1}{\gamma_i} + \frac{\alpha_i}{1 - \alpha_i} \cdot \frac{1}{\gamma_i}}$ 。

6. 決定減水劑用量：由減水劑之減水率及用水量和作工性，求出減水劑用量。

3-9 配比試拌

3-9-1 高性能混凝土之材料配合比例須依據試拌及模擬試驗的結果加以確認，以確保新拌及硬固混凝土的特性。

3-9-2 高性能混凝土生產廠商，在試拌期間應建立均勻性及穩定性之測試數據，並建立統計品管資訊。

1. 均勻性試驗須委託獨立檢測單位，或學術研究單位進行，同批次混凝土至少三十個試體，檢測其品質平均值及變異值，其變異係數應小於 5%。檢測項目包括坍度、坍流度、溫度、空氣含量、單位重及抗壓強度。

2. 穩定性試驗則為針對不同批次混凝土，進行同 1 項之均勻性檢測，最後比較二批次混凝土均勻性試驗所獲結果之平均值及誤差值，評估其穩定性，平均值之誤差率不得大於 5%。

3-10 量產模擬試驗

高性能混凝土的配比經確認後，對大型工程而言，業主可要求進行「模擬試驗」，以驗證施工機具的合宜性及配合度，並訓練施工人員，學習高性能混凝土施工突發狀況應變能力，確實保證結構體混凝土之品質，並根據計劃－執行－檢核－修正（PDCA）方法，建立檢核表及完整之品保計劃書。

3-11 配比核定

3-11-1 混凝土經二個月以上的規劃，配比試拌後，應將此等資料彙整成配比計劃書，提出經工程師及專家學者群之透明化評估，經核定後方得實際施工使用。核定之標準須符合耐久性、安全性（強度）、工作度、經濟性、生態性及特殊要求之性能。

3-11-2 配比現場使用後，如有調整配比之需要時，應重新評估新配比之適用性，並將具體之品質管制結果彙整，提出供工程師及專家學者群評核之。

四、高性能混凝土產製及品質檢驗

4-1 通則

- 4-1-1 高性能混凝土之產製，應以適當之設備，按規定配比標準及程序精確配料，並且均勻混合。混凝土均應以強制式等級以上之混凝土拌和機拌和。拌和之混凝土品質應依 3-9 節之規定確認所拌出混凝土之均勻性及穩定性。
- 4-1-2 預拌混凝土之產製除依本章之規定外，並應符合 CNS 3090（預拌混凝土）之規定。若採用體積計量，並連續拌和方式之混凝土產製方法，則按 ASTM C685（以體積配料且連續性拌和之混凝土產製）之規定。

4-2 材料計量

- 4-2-1 除拌和用水及液態摻料外，混凝土材料均須以重量計量。但特殊情況經工程師許可者方得以體積計量。
- 4-2-2 計量裝置
- (1) 材料計量裝置之準確度應為其裝置容量之 $\pm 0.4\%$ 。
 - (2) 拌和現場應準備標準砝碼（或重量塊），供隨時校核計量裝置所需。
- 4-2-3 材料計量之許可差（公差）如表 4-2-3。

表 4.2.3 材料計量之許可差

材料	水泥	水	粒料	化學摻料	礦物摻料	鋼纖維
公差 (%)	± 1	± 1	± 2	± 1	± 3	± 1

註：1.粒料之表面含水量應視為拌和水之一部份。

2.用於溶解或稀釋摻料之水及液態摻料，應視為混凝土拌和水之一部份。

4-3 拌和管制

- 4-3-1 高性能混凝土之拌和機，其機種必須使混凝土在規定拌和時間內，達到均勻之性能，並個符合下列規範之規定：
- 1.拌和機宜以強拌式及水平雙軸拌和機為宜。
 - 2.拌和機性能之確認應以其所產製之混凝土符合 CNS 3090

(預拌混凝土)均勻性規定。其辦法依 3-9-2 節第 1 項規定辦理。

4-3-2 拌和機內之攪拌輪葉磨損率達原有高度之 10%，應即更換之。

4-3-3 高性能混凝土之拌和應按以下之規定。

(1) 配料計量

1. 每次配料應以所用拌和機額定拌和量為限。
2. 水泥、拌和水、粒料及各種摻料，必須各自單獨計量。惟粒料亦可累計合併計量。
3. 粒料及水之計量，應針對粒料表面含水量之變化及液態摻料之添加，作精確調整與控制。

(2) 材料之混合

1. 計量後之各粒料，礦物摻料及水泥可直接置入拌和機，亦可將水泥先置入聚料斗內，再置入拌和機內拌和。惟拌和水除少許早於乾料先加入外，其餘部份水與液態摻料應待上述材料置入拌和機後，再按規定注入。若有特殊需要時，拌和程序另定之，並經工程師核可，基本要求為滿足 3.9.2 節均勻性之規定。
2. 在重新進料前，應將拌和機內所有拌和物清除。
3. 進料時，攪拌輪葉應維持旋轉狀態。

(3) 拌和時間

1. 混凝土之拌和時間，應自乾料全都進入拌和機時起算。
2. 拌和水及液態摻料，應在規定拌和時間的前 1/4 時段內添加完畢。
3. 拌和時間應按施工模擬試驗之決定，以能均勻拌和為主。

4-4 化學摻料使用之管制

4-4-1 化學摻料必須依原廠說明書之規定，於使用前溶解成水溶液或加以稀釋。溶解及稀釋之水量應計入拌和水中。若採二次

或多次添加時，其添加方式可另定，經過驗證後由工程師核可。

4-4-2 不同類型之摻料，宜分別加入拌和機中，不得混合後加入。

4-4-3 緩凝摻料須於拌和水加入後 1 分鐘內加入，且在規定拌和時間的前 1/4 時段內，添加完畢。

4-5 新拌混凝土之品質管制

4-5-1 高性能混凝土應於拌和過程中，進行製程品管，對性質有不符合要求或懷疑者，應按規定方法進行試驗，以確保新拌混凝土之品質。

4-5-2 完成拌和之混凝土於出廠前，必須進行品管試驗，其項目包括：坍度、坍流度、溫度、含氣量、單位重，及其他工程師依需要指定之測試項目。

4-5-3 高性能混凝土出廠時，應檢附送貨單，單內應填寫送貨車號、各材料之用量、規定坍度及坍流度、規定強度、摻料、出廠坍度及坍流度、溫度、含氣量、及單位重、工程名稱、送達地點、出廠時間等資料，若有工程師建廠代表在場應由其簽證。

4-6 炎熱天候之防護

4-6-1 炎熱氣溫下，混凝土可能發生坍度及坍流度嚴重損失、瞬凝或冷縫等，故於拌和前，應冷卻拌和材料，或以搗碎之冰屑代替全部或一部份之拌和水，冰屑須於拌和時完全融化，以使混凝土澆鑄時之溫度不超過 32°C。

4-6-2 炎熱高溫下輸送混凝土時，應對輸送機具進行遮陰設置，如預拌車之車筒、泵送機之管線等，採取降溫措施，以減少坍度及坍流度損失。

4-7 高性能混凝土工地品管試驗

4-7-1 按規定取樣所得之工地混凝土，應按其性能之需求，進行所須之品管試驗，若須進行本節所規定以外之試驗項目，工程師應指示其試驗頻率、試驗方法及合格標準，以為品管試驗執行之依據。

4-7-2 坍度與坍流度試驗

高性能混凝土以預拌混凝土車運送至工地，每車均應測定其坍度與坍流度，坍度試驗按 CNS 1176「混凝土坍度試驗法」之規定進行。坍流度試驗係量測坍度後，量測混凝土坍下擴散之直徑，其擴散時間以 90 秒鐘為限。

4-7-3 溫度量測

每一取樣檢驗之混凝土樣品，均應量測其溫度。混凝土溫度應低於 32°C ，溫度不符規定時，應予以拒收。

4-7-4 空氣含量試驗

若工程師指定進行本項試驗，則按 CNS 9661「新拌混凝土的空氣含量試驗法（壓力法）」或 CNS 9662「新拌混凝土的空氣含量檢驗法（容積法）」之規定，測定混凝土檢驗樣品之空氣含量。

4-7-5 單位重試驗

若工程師認為有必要，應按 CNS 11151「混凝土單位重，拌和體積及含氣量（壓力）試驗法」之規定測定混凝土單位重量。

4-7-6 強度試驗

高性能混凝土之抗壓強度試驗，應依 8-3-4「高性能混凝土強度試驗」規定測試。

4-8 不符合規定之處置

4-8-1 經工地現場品質管試驗，判定品質或性能不符合規定應予拒收之混凝土，應由工程師監督棄置於指定地點或加以清洗回收，其污水應加以處理並可能回收，以防環境污染。

4-8-2 混凝土施工澆鑄過程中，若發現任何不符合規定之作業或情況，工程師應立即予以糾正，若無法矯正使之符合要求者，應立即勒令停止施工，並採取適當之補救措施。

4-8-3 若施工不符合規定之操作，或某種情況之影響無法立即判定者，於施工完成後，應將施工當時，不符合情況報請原設計者或召開討論會，聘請具公信力之機構及學者群，進行施工品質評估，評定其影響情況，以採取適當之補救措施。

五、高性能混凝土澆鑄

5-1 通則

高性能混凝土澆鑄應注意澆鑄程序與方式，避免材料析離、泌水、產生蜂窩、與冷縫之現象。

- 5-1-1 混凝土澆鑄，包括混凝土注入模內、整平及使混凝土在適當環境下，獲致良好之品質。
- 5-1-2 高性能混凝土自拌和與輸送，至澆鑄點應連貫作業，不得中途停頓，且必須在混凝土坍度及坍流度符合最低要求值前完成澆鑄工作。
- 5-1-3 高性能混凝土之澆鑄順序，應妥為規畫，並經工程師認可，以防止模板所受載重不均衡，而產生爆模問題，確保施工安全。

5-2 澆鑄前之準備

- 5-2-1 高性能混凝土澆鑄前，應查驗模板、鋼筋及埋設物，並經工程師確認已按規定裝設妥當。
- 5-2-2 應清除模板或其他澆鑄面上之殘留雜物。新舊界面之乳沫應用強力噴水機械，清除至淨潔面為止。
- 5-2-3 模板面上應塗裝脫模劑。
- 5-2-4 以上各項準備工作完成時，須經工程師檢查認可後，方可澆鑄混凝土。

5-3 澆鑄

- 5-3-1 澆鑄前承包商應擬訂「高性能混凝土澆鑄計畫」，澆鑄計畫應對所有影響施工品質因素詳加考慮，以確保施工之品質及安全。澆鑄計劃時，應詳細考慮施工中，可能遭遇之一切困難，並預謀解決之方法，內容至少包括下列各項：

- 1.澆鑄區之範圍及劃分
- 2.澆鑄順序
- 3.澆鑄機具及數量
- 4.工地佈置及人員配置
- 5.特殊及突發問題之處理

6. 養護方法

7. 終飾及修補

- 5-3-2 高性能混凝土澆鑄，應儘可能卸置於最終位置上，以免因再移動，或流動而造成材料析離。
- 5-3-3 高性能混凝土如要求具高流動性（工作度）時，混凝土澆鑄後，以不搗實為原則，以免材料析離。其他任何引起材料析離之動作亦應避免。
- 5-3-4 混凝土之澆鑄，應一次完成澆鑄工作，以免形成冷縫。

六、高性能混凝土養護及脫模

6-1 養護

- 6-1-1 高性能混凝土之養護應依如下列規定辦理。
- 6-1-2 高性能混凝土澆鑄後，既立即加以養護，養護方法包括水養護及護模養護。
- 6-1-3 高性能混凝土脫模後，其灑水工作須持續七日以上，維持混凝土表面濕潤狀態。

6-2 脫模

- 6-2-1 脫模前，應先確認混凝土之抗壓強度，並注意不致有衝擊及偏壓等作用下，才進行其他作業。
- 6-2-2 所有完成的表面，需有一個均勻及緊密的外觀，表面必須為平滑，且不可有不規律和過多之氣洞，其他表面之蜂窩現象不超過 1%，且最大孔洞直徑不超過 6mm。

七、高性能混凝土品質管制

7-1 通則

- 7-1-1 本章所規定之「品質管制」，係指承包商為達成規範之品質要求，所需辦理之品質管理措施。
- 7-1-2 相對於一般混凝土，高性能混凝土之品質應確保結構體混凝土品質與設計品質一致，故品質管制之要求標準，依據 CNS 14001 規定，由「料源管制」、「製程管制」至「成品管制」之系列管制確保混凝土結構物品質。

7-1-3 為確保為性能混凝土品質，符合工程合約之要求，高性能混凝土施工期間，承包商須按「品質管制計畫」，執行管制，並依照「計劃－執行－管制－修正」(PDCA)管制制度，進行修正強化工作，確保原計劃之可行性。承包商應對高性能混凝土所使用各項材料，配比設計、拌和、運送、澆鑄和養護等作業施行品質管制。品質管制得由承包商自行辦理，或委託具高性能混凝土品質管制能力之相關學術機構，或工程顧問公司代辦。

7-2 高性能混凝土品質管制計畫書

7-2-1 承包商應擬訂「高性能混凝土品質管制計畫書」，並經「高性能混凝土任務小組」核可後據以執行。「高性能混凝土任務小組」，由參與計劃之業主代表、設計師、施工廠商、材料供應商、委託代辦品質保證之顧問公司，及研究高性能混凝土之學術單位組成。「高性能混凝土品質管制計畫書」應隨時開會檢討，有任何更動時，亦須經任務小組書面核可。

7-2-2 高性能混凝土品質管制計畫書，至少應包括下列項目：

- (1) 品質管制組織、人員名冊與其職掌。
- (2) 品質管制之作業程序。
- (3) 試驗設備與校正作業。
- (4) 試驗項目、方法與頻率。
- (5) 品質管制檔案之建立與統計分析。
- (6) 品質管制資訊之傳遞流程。

7-3 高性能混凝土品質管制範圍

高性能混凝土之品質管制，應包括「材料管制」、「配比管制」、「產製與施工管制」、及「結構品質驗證」等四方面。

7-3-1 材料管制

高性能混凝土材料管制在獲得符合第二章所規定之混凝土材料為基本要求。承包商應進行料源調查，輸送與儲存等管制，並作必要之試驗，以確保材料供應及品質之穩定。材料管制必須制作品質管制圖及書面報告，此為「料源管制」之重要內容。

7-3-2 配比管制

高性能混凝土之配比設計應按第三章（高性能混凝土配比及試拌）規定進行，視實際施工狀況及混凝土試拌結果，隨時檢討配比，使之確保「耐久性、安全性、工作性、經濟性及生態性」準則，並適當作修正，修正應備妥書面資料，經任務小組核可。

7-3-3 產製與施工管制

高性能混凝土產製與施工中，選採取有效管制措施，以確保高性能混凝土最後品質，符合設計要求。高性能混凝土產製與施工之品質管制，應涵蓋混凝土之產製、輸送、澆鑄、養護、修飾及試驗等作業。

7-3-4 結構品質驗證

承包商應按品質管制計畫，辦理所需之試驗，若經任務小組核可，得採用簡便、非破壞性評估，或加速之試驗方法，提早獲取品質資訊，以便早期適時控制混凝土品質。該等資料均作成管制圖及書面報告。承包商亦須針對結構物品價，以非破壞檢測技術檢測，並將評估結果繪製成結構體品質等值圖，並且以電阻計量測結構物，確保結構混凝土 56 天電阻超過 $20\text{ k}\Omega - \text{cm}$ ，其檢測結果亦繪製成等電阻圖。

7-4 高性能混凝土品質管制制度

7-4-1 凡對高性能混凝土品質有影響之任何作業，均應建立書面之品質管制程序，並使之制度化。

7-4-2 品質管制程序中，應詳細規定適用範圍、人員職責、引用文件、規範、執行方法及步驟、檢驗項目、合格標準、表格填寫及保管等。

7-5 品管人員及訓練

7-5-1 品質管制之作業人員，須經訓練合格，或經過高性能混凝土專案計畫之訓練合格者。

7-5-2 品管人員之訓練，得委託有關高性能混凝土研發及品質管制之學術單位或專業機構代辦。

7-6 品管紀錄及評估

- 7-6-1 承包商應隨時蒐集高性能混凝土施工各項品質管制資料，繪製管制圖，並在評估，發現有異常現象時，應立即分析原因，及採取必要措施，從速報告工程師，並送經任務小組核可。
- 7-6-2 各項品質資料應妥善編號，建構保存，並編碼索引，工程師得隨時查閱或抄錄。工程驗收後，品管資料及資訊，應繼續保存至少兩年，或按合約規定辦理。

八、高性能混凝土結構品質驗證

8-1 通則

- 8-1-1 為確保為性能混凝土工程品質，能符合設計要求，工程進行中，工程師必須負責對材料及施工成品之檢驗，唯承包商仍須對混凝土工程結構品質負全都責任。
- 8-1-2 雖經檢驗，但未能及時發現之缺點，於日後才發現時，仍應予以拒收，或由承包商負責，進行必要之處置，或予以敲除處理。
- 8-1-3 高性能凝土品質檢驗工作在確保製程之正確性，然而品質合格與否之認定基準，建立在結構物混凝土品質之均勻性及穩定性和符合設計圖說。

8-2 檢驗機構及費用

- 8-2-1 執行檢驗業務之機構或人員、檢驗費用之負擔者、以及其他有關檢驗事項應按合約之規定。若未明確規定時，可由工程師指派專人負責，或委託經其認可之公立機構辦理。第 8-3 及 8-4 節所規定檢驗之費用由業主負價；第 8-5 節所規定增加檢驗之費用由承包商負擔。
- 8-2-2 檢驗機構（或人員）應按檢測標準執行以下各節所示之檢驗項目。

8-3 檢驗

- 8-3-1 核對承包商所提出之擬用材料，其品質是否符合規範之規定。

8-3-2 核對承包商所提供之配比設計，確認是否符合工程圖說之要求及滿足「耐久性、安全性、工作性、經濟性及生態性」之準則。

8-3-3 工程進行中，自拌和廠或存料堆中，抽取材料樣品，核對是否符合標準規範之規定。

8-3-4 高性能混凝土強度試驗

(1) 工地混凝土取樣

按 CNS 1174「新拌混凝土取樣法」之規定取樣。每一樣品應隨機選自不同之拌和批次。並應避免於當場經選擇後取樣，但可於高性能混凝土澆鑄前，隨機預先選定將取樣之拌和批次號碼，並按照所定號碼取樣。工程師認為有需要時，可於懷疑之處增加取樣評估之。

(2) 取樣數量

以同一結構體連續澆鑄之混凝土為一批，一批數量在 100m^3 以下者，取樣製作二組試體，大於 100m^3 者，每增 100m^3 應增加一組試體。同組試體應由同一預拌車取樣製作。如工程師認為承包商之經驗不足時，或有品管不當之虞慮時，可提經任務小組，要求每一預拌車均取樣。

(3) 試體之製作及養護

由取樣所得每一批混凝土樣品製作 $15\phi \times 30\text{cm}$ ，或 $10\phi \times 20\text{cm}$ 圓柱試體 9 個，按 CNS 1231「工地混凝土試體之製作及養護法」之規定辦理，過程中任何變動，均應詳實記載。

(4) 抗壓強度試驗

圓柱試體之抗壓強度試驗，按 CNS 1232「混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法」之規定，二個試體於七天齡期時，進行抗壓強度試驗，以提供早期強度參考資料。另六個試體分別於 28 天及 56 天齡期時，進行抗壓強度試驗，於規定齡期之三個試體強度之平均值為該次試驗之結果。若有跡象顯示其值有誤時，以另一備用

試體之檢驗值取代。若可用試體強度僅二個時，則以二個之平均值為該次之檢驗結果，若不足二個，該組檢驗結果應予全部捨棄。

(5) 特殊試驗齡期

早強混凝土，或非以 28 天齡期及 56 天強度設計之混凝土，應按合約所規定之齡期進行試驗，並增加該齡期三個試體。

8-4 其他檢驗業務

當工程師認為需要時，得提請高性能混凝土任務小組核可，增加下列檢驗：

- 8-4-1 監督混凝土之拌和及輸送作業。
- 8-4-2 覆核每次進場之水泥、粒料、摻料，或其他材料之出廠報告，或監督試驗室試驗及現場人員，檢視上述材料是否符合標準規價之規定。
- 8-4-3 增加混凝土檢驗頻率，以確保結構體混凝土符合規範。
- 8-4-4 其他特殊性能需要之試驗或檢查。

8-5 增加之檢驗業務

- 8-5-1 應承包商之請求，變更材料或配比，因此所需增加之試驗與檢查。
- 8-5-2 材料或混凝土，因試驗或檢查結果不符合規範要求，而須增加之額外試驗或檢查工作。

九、驗收

9-1 施工完成之結構體，應執行如下之結構體檢查。

- 9-1-1 外形尺寸檢查。
- 9-1-2 平面性檢查。
- 9-1-3 外觀檢查。
- 9-1-4 結構體電阻檢查。
- 9-1-5 其他與高性能混凝土設計特性有關之結構檢查。

十、參考文獻

- 10-1 ACI 363-84 , State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete , American Concrete Institute , Detroit(1984) .
- 10-2 葉基棟，彭耀南，陳清泉，黃兆龍，高強度混凝土設計及施工準則初步研究，內政部建築研究所籌備處專題研究計劃成果報告(1990)。
- 10-3 ACI 211-93 , “Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash” , ACI Material Journals 5-6 , pp.272-283 (1993) .
- 10-4 Hwang , C.L. “Basic Material Properties and Mixture Proportion of High Performance Concrete” , 國際公共工程學術研討會 , pp.207-223 , 台北 (1993) 。
- 10-5 高性能混凝土施工規範(草案)，中華民國結構工程學會(1994)。
- 10-6 ACI 318-95 , Building Code Requirements for Structural Concrete , ACI , Detroit (1995) .
- 10-7 黃兆龍，陳澄興，壬和源，江奇成，洪盟峰，「 HPC 軌道版製造規範草案」，預鑄軌道版自動化生產技術研發，內政部營建署八十四年度營建自動化專案計劃(1995)。
- 10-8 Hwang , C. L. , J. J. Lin , L. S. Lee and F. Y. Lin , “Densified Mixture Design Algorithm and Early Properties of High Performance Concrete , Journal of the Chinese Civil and Hydraulic Engineering , Vol. 8 , No. 2 , pp.207-219 (1996) .
- 10-9 黃兆龍，陳建成，江明英，郭金祥，「拌合水量對混凝土工程性質之影響」，中國土木水利工程學刊已接受(1997)。