

高性能混凝土之應用研習會講義

目 錄

1.拌合水對 HPC 工程性質之影響.....	1-1
2.強塑劑添加時間對 HPC 工作性之影響.....	2-1
3.化學摻料在 HPC 工程之應用.....	3-1
4.卜作嵐材料對 HPC 性質之影響.....	4-1
5.HPC 施工技術與品管之探討.....	5-1
6.HPC 之施工與品質.....	6-1
7.HPC 拌合技術及新拌性質.....	7-1
8.HPC 工程性質.....	8-1
9.HPC 之配比設計考慮重點.....	9-1
10.粗骨材性質對 HPC 強度及彈性性質的影響.....	10-1
11.HPC 在港灣工程上應用之展望.....	11-1

拌合水對優生混凝土工程性質之影響

黃兆龍* 陳建成** 郭金祥**

關鍵字：拌合水量，水固比，電阻係數，人工海水，反覆載重。

摘 要

混凝土材料之發展已從病理學觀念進入優生學的時代，混凝土具有應有之基本需求外，藉由配比設計技術的改進，並因應外在的環境侵蝕，而發展具更高耐久的混凝土；因此本文在闡述由混凝土病理機構的瞭解，設計優生混凝土，比較其與傳統混凝土，在拌合水量，W/C，W/B 或水固比(W/S)與基本工程性質，及混凝土電阻係數之相互關係，並在人工海水及反覆載重環境下，單筋混凝土樑裂縫對鋼筋腐蝕行為之影響，並說明規範對鋼筋混凝土構件耐久性之合宜性。

壹、前 言

混凝土是非常好用的營建材料，主要是因為它俱有適當的可塑性^(1,2)，傳統混凝土用水量及水泥量較高，容易滋生泌水及析離或蜂窩現象，品質不佳；砂石未洗淨，有污泥摻入，影響混凝土材料界面強度，或坍度過低施工過程造成品質控制困難等，藉由程序化及標準化的品質製作，落實品質控制。使混凝土的利用能夠達到安全，經濟及耐久的要求，但是文獻中甚多提及耐久性與水有密切關係^(1,2,3)，然而在配比設計的時候竟沒有把用水量當做耐久性主要考慮基因^(3,4)，而傳統只以降低W/C為主要考慮耐久性方式，間接用強度來決定混凝土耐久性好與壞，而且亦忽略骨材存在的事實^⑤，這對整體品質是值得質疑的。ACI 318-95 的結構混凝土規範雖然有比較融通考慮到水膠比W/B⁽⁴⁾，容許適量採用卜作嵐材料

* 國立台灣工業技術學院營建工程系教授

** 國立台灣工業技術學院營建工程系研究所博士生，碩士

這些觀念在以往是不可能，規範中可看出雖然ACI 318-95 最新的規範容許飛灰、爐石及其他卜作嵐材料的，可是這些材的使用是否就可保障結構物的耐久性，也是值得質疑的⁽⁵⁾。而如何由安全前提下，顧及鋼筋混凝土結構物的經久耐用，應如何從事後的補救，進而其弊病防患於未然，由病症機理的瞭解，在設計之初即將病因消弭於材料選擇及施工階段，降低至最低甚至淘汰，使其經濟上的壽命成本能達較重新建造成本及維修費用來得低，而達到綠色的混凝土資源。

貳、混凝土耐久性的病因

在瞭解混凝土病症問題，文獻中一般將其分成物理性及化學性的病因來分析，其目的爲了使問題單純化，實際上鋼筋結構物所有顯現之病症均是物理、化學相互作用的結果，很難歸究於單一原因，而學者了針對某一類病症系統化的研究，而強行分開理化學間相互之影響，如捷運帽裂縫問題，常是有材料的因素如塑性收縮與力學上的問題兩方面的爭議，而解決力學上的問題（？）但是材料方面衍生的問題是否是鋼鈑覆蓋起來就能相安無事（？），所以其針對混凝土耐久性的問題其實是相當複雜的，若要將所有因素均加以考量則其影響層面可能牽涉甚廣，而目前學者也只能將其分類，選擇重要因素加以研究，如表一所示，表中可以觀察出鋼筋混凝土耐久性病理基因，可以從材料，施工層面來分析如下。

一、水的基因

水在混凝土中扮演的角色，在水化作用上是提供強度主要基因，但是不適當的用水，亦是造成爾後病變的主要來源－孔隙，另外在耐久性方面：所有水泥混凝土的劣化都直接與水的進出有關，見表一所示，物理上水的移動造成乾燥收縮及潮濕膨脹的反應作用，導致逐漸崩解破壞；泌水現象及析離的發生都與用水量過高有關，此將弱化顆粒之界面，產生強度裂弱點。在化學上透過水的溶解、析晶的反應也會產生收縮、劣化及膨脹的作用，造成混凝土的持續性破壞裂解。可知水的影響性甚大，而控制拌合水的策略可以如下的策略：

1. 控制水的進入－堵塞通道，降低水灰比，減少孔隙。

2. 減少水的存在—減少水的基因，降低拌和水量，惟須落實確保適當工作性，現階段減水劑及強塑劑的開發，低水量而可工作的混凝土已是可能的，此可免除泌水的產生。

二、水泥的基因

由表一可以觀察出，水泥的水化產物中氫氧化鈣是容易產生溶解、結晶等問題的，如何減少水泥用量是直接有助於減少耐久性的問題，另外的策略是增加消耗氫氧化鈣的物質，如工業廢料、稻殼灰、飛灰、爐石、矽灰等卜作嵐材料⁷⁾。近來因環保要求愈嚴格的前提下，水泥製造過程中回收粉塵中，含有相當量之鹼性物質，對骨材可能產生侵蝕作用。另外水泥用量高均被認為對品質有好處，但往往在獲得較高強度後，爾後所產生的收縮行為及化學侵蝕是導致微裂縫亦是造成耐久問題原因之一；所以削減水泥是必要的過程，惟如何控制是值得深思的。

三、骨材的基因

骨材對混凝土的影響在於顆粒的大小、級配及邊界。顆粒大的界面少，鍵結性不利，混凝土易從界面破壞，顆粒小的骨材，則混凝土水泥用量將增加，則可能又造成水泥量大的問題⁸⁾。控制級配的方式，或緻密配比是決定顆粒太大或太小困擾的秘方⁹⁾。界面問題牽涉到骨材表面狀況，水泥用量，用水量等共同問題。界面強化改善的方法，除了降低水灰比外，最重要的莫過使泌水不發生，或利用物質加以改善及強化。泌水的減少最直接的就是減少用水量，而改善或強化界面的方法可添加會參與卜作嵐持續反應的飛灰、爐石等材料了，這些卜作嵐反應可抑賴鹼性觸媒的作用，此刻消耗水化產物在界面鹼性堆積物而強化了界面。另外，可減少骨材表面鹼質所造成鹼骨材反應⁸⁾。

四、鋼筋的基因

鋼筋在混凝土中會受保護而完美無銹，然而若在設計、施工過程及使用不當造成混凝土劣化，成為鋼筋被侵蝕的主要原因^(3,4)，鋼筋混凝土內鋼筋的腐蝕機理與一般金屬腐蝕反應除了環境因素不外，理論上須具陽極、陰極、電導通路、電流及電溶液等電化學反應之五大要件

，欠缺任一要項則腐蝕反應無法進行，當腐蝕反應中鋼筋生銹體積會膨脹6-7倍，導致混凝土保護層將被推開、脹裂或整體剝落。此時若水份及氧氣續供應，則銹蝕產物的膨脹應力致使混凝土脹裂而產惡性循環。所以ACI 318-95規範中考量以低水膠比W/B（即水與水泥、卜作嵐材料之總和之比）製造之高品質低滲透性之混凝土⁽⁴⁾。以阻止腐蝕反應之進行，此即為耐久性考量之精神。然而影響混凝土中鋼筋腐蝕的因素包括組成材料，設計施工規範以及外在環境，由表二顯示海洋環境下混凝土病變原因及發生問題特徵均有密切的相關性，尤其以環境因素為主要肇因，如裂縫、氯離子等因素，故為預防環境中有害因子的入侵，發展優生混凝土改善品質的重要策略，而保護鋼筋更重要是使結構物沒有裂縫產生，這對需抗張及韌性結構物是非困難的，因此確實保混凝土品質及降低裂縫產生機率是保障鋼筋免於腐蝕的重要方法。

參、優生混凝土的衍生

混凝土病理學的瞭解是解決混凝土問題的策略，從「頭痛醫頭，腳痛醫腳」的方式演進，到由生理學的觀點來探討混凝土強化方法，高流動性混凝土及高性能混凝土的產生也是混凝土生理學上的重大成就。1993年由生理學觀念昇華到混凝土優生學觀念⁽⁹⁾。所謂「混凝土優生學」(Eugenic)就是在混凝土設計之初即深思熟慮混凝土可能的病症，一一以材料之間的「生剋的道理」，化阻力為助力，並且使其能長期性緩慢成長，即使有裂縫產生也可自行癒合。這樣的考量方法與傳統混凝土觀念是不完全一致的，考慮點是圖一 中五個圈的交集，而非傳統單圈或部份交集觀念的⁽¹⁰⁾。

本研究要針對ACI 318-95耐久性要求設計的混凝土比較根據緻密配比法，設計添加不同摻料混凝土，試驗變數如表三所示。而優生混凝土的配比方法係先由孔隙著手，配出最少孔隙(V_v)後再據以計算出主要材料（骨材及礦物摻料）之含量。最後將剩餘之空間填入水泥漿，混凝土只要在足夠漿量的條件下，即可達到工作性，及水泥漿量最小的方法包括控制V_v 最小，當然最有效的即要求級配最佳化及緻密化。另一方法即為控制S表面積最小，另外骨材表面積漿體厚度關係潤滑，借重表面潤滑技術（強塑劑）可以突破骨材阻礙的能障，而獲較薄之厚

度；測定其基本工程性質，並製作 $12 \times 20 \times 80$ cm 之單筋混凝土樑在人工海水及反覆載重條件下，鋼筋在開裂前後的腐蝕行為其試驗流程如圖二所示。

肆、優生混凝土抗蝕行為特性

任何一本有關混凝土耐久性的論著^(1,2,3)，都會指出水在混凝土中的移動對耐久性會有不利的影響，用水量愈多愈容易孳生問題，也愈要注意耐久性的問題。文獻中都指出W/C愈低透性愈低^(1,2,3)，然而對混凝土而言，用水量愈少，水泥漿愈少，其滲透性會愈低，進一步言之，如果結構體混凝土含水量愈少，或結構體愈緻密就不會有泌水、析晶（白華）及其他耐久性的問題發生。所以，水是一個耐久性最大的問題，對耐久性有非常大的影響，然而其影響程度如何是值得探討的。就以下用水量針對混凝土對工程性質及耐久性的影響予以探討：

一、混凝土用水量工程性質之影響。

從圖三超音波波速圖，可見同W/B下，水泥漿愈高及用水泥量愈多，偵測到超音波波速改變之時間較早，以往的經驗顯示相應晶體成長的時間也是比較早^(11,12)，換言之，水泥漿用量多，水化反應較快，然而後期超音波慢慢降低，此暗示自生乾縮或內部缺陷隨水泥漿量增大而有劣化之現象，由表四可以看出如果W/C愈近0.42或更低則圖三之100 hr以後波速折減愈快。這些事實顯示出耐久性問題，在傳統觀念採用W/C之作法是有待進一步探討的。W/B固定下，水泥漿量(V_p)較少時，則有愈高的後續超音波波速，在此必須強調的是因為內部的變化所致，很可能是因為產生骨材界面裂縫及漿體乾裂所造成。

圖四顯示出同一W/B，水泥漿量愈多，W/C愈小時，見表四，則3天之強度會愈高，然而7天以後則含有卜作嵐材料之混凝土有逐漸增加之趨勢，56天均超過56 Mpa 設計要求，而到了180天以後，有設計相同之W/B條件下之組合可達到72 Mpa 以上，遠超過原來設計56 Mpa 之標準，所以早期(3天以內)之強度由W/C及水泥量控制，中期(大於3天)強度則以W/B為主要控制基準。在此說明混凝土強度並非只依賴骨材，而係組合骨材、水泥漿及界面強度隨時間的綜合表現。用水量愈多時，

漿量反應較好，但系統緻密性不佳時，強度反會降低。圖五顯示W/C，W/B及W/S(水固比)對強度之影響性，事實上混凝土的強度以W/C、W/B及W/S來表示都有非常好的關係，然而強度關係只要以W/C及W/B表示已足夠。

二、混凝土用水量對其耐久性之影響

爲了瞭解長期性質，當然利用長期性觀測是最直接的；然而古典研究已經指出比較快速的評估方法也是可行的^(1,2,3)，耐久性最主要的物理、化學變化都與離子移動有關^(1,2,3,5)，因此有必要針對離子移動的難易程度來加以判別，其中以電阻係數⁽¹⁾或氯離子滲透率⁽²⁾來評估耐久性最好不過的。由圖六可看出混凝土電阻係數與水泥漿量的關係，拌合水量愈大，非常明顯的其相應電阻係數愈低，表示水分子在混凝土中與離子一起移動，其現象類似水的滲透一般。當W/S較低時，明顯隨齡期電阻會增加，電阻增加率非常快，然而當W/S高到0.108，基本上混凝土電阻是不變的，即使到180天電阻仍低於10 kW-cm下，見表四之ACI組及control組。因爲用水量影響混凝土中電荷移動較大，由圖七可看出來傳統ACI配比方法工作度由用水量決定，不同強度混凝土用水量是一樣的，此刻傳統配比由W/C及W/B所表現的電阻值均呈水平線，換言之，傳統配比以W/C及W/B在同一工作度要求下無法看出電阻的差異，這並非是正確的，但如果以W/S表示，則很明顯看出沒有添加卜作嵐材料之控制組幾乎是一個點，見表四所示之ACI及control組，對於應用緻密配比的混凝土在採用卜作嵐材料的狀況而言，W/S則會隨水泥漿量改變而變化見表四HPC組，所以由W/S可看出不同處。

表四之ACI組並沒有添加任何卜作嵐材料，其W/C=W/B，由數據顯示其電阻係數不隨齡期大量成長，其他HPC組部都以數倍的速度成長。所以用ACI 318-89傳統「強度設計法」之W/C或用ACI 318-95「耐久性設計法」之W/B而言要很小心，因爲強度相同，用水量不同時所表現之W/S不同時，電阻會不同；而相同W/S時，如果沒有添加卜作嵐材料（即W/C=W/B），或用水量過高時，混凝土電阻係數會較小，甚至不會隨時間而成長，這樣對長期品質是沒有好處的，在此說明以W/C ≠ W/B及W/S爲束制條件可表現耐久性之合宜性。

四、混凝土裂縫與鋼筋腐蝕速率之關係

混凝土裂縫可能肇始於物理或化學的因素，而在規範中亦容許有裂縫之產生，而相較於其他有關鋼筋耐腐蝕的規範，更要求限制裂縫控制。根據國外設計規範及有關試驗資料，混凝土最大裂縫寬度的控制臨界值大致為：(1) 無侵蝕介質、無防滲要求，0.3mm；(2) 輕微侵蝕、無防滲要求，0.2mm；(3) 嚴重侵蝕、有防滲要求，0.1mm；如圖八所示；以裸鋼筋鋼筋混凝土樑為例，當裂縫的寬度愈大則腐蝕速率愈大，而鋼筋表面的被覆狀況，在鋼筋混凝土腐蝕速率上的評估，可知熱浸鍍鋅鋼筋的腐蝕速比裸鋼筋的腐蝕速率大，實際上是鋅犧牲陽極的作用而保護鋼筋；圖中可瞭解混凝土開裂後雖未達到規範之臨界裂縫寬度，無論混凝土使用何種摻料改善品質，腐蝕因子均可經由直通路徑(裂縫)到達鋼筋表面而無法發揮阻斷作用。此亦顯示ACI規範中對於耐久性要求，除針對材料特別加以限制，亦應針對不同的構件，尤其是針對有裂縫存在之張力構材，應施以防蝕措施之要求以增加結構物在惡劣環境中之使用壽命。

伍、結論與建議

鋼筋混凝土耐久性問題，隨工程的重要性及暴露環境日益惡化受到重視，因其牽涉層面甚廣，導致從不同角度均有其病因機構，而為了簡化問題僅能把重要基因加以分析之結果如表四所示，並提出以下結論及建議：

- 一、鋼筋混凝土的耐久問題為全面性的，裂縫與混凝土本身品質將主導鋼筋的抗蝕行為；混凝土電阻係數可作為耐久性品質之指標。
- 二、傳統以W/C控制混凝土強度是正確的，而針對混凝土長期強度而W/B（卜作嵐材料使用較多）則具有較佳的詮釋。
- 三、ACI 規範中的耐久配比設計(W/C，W/B低)控制對混凝土品質具有正面效益，但若從W/S角度來要求則顯示混凝土電阻係數與氯離子滲透係數具較佳之相關性。
- 四、就材料而言，依ACI 規範設計之混凝土以提供鋼筋的抗蝕保護，一旦裂縫寬度大於0.3mm，則混凝土很難阻止有害物之侵蝕，此亦建議規範中有裂縫存在之構件，必須有其它防蝕之措施。

參考文獻

1. Mindess, S. and J. F. Young, Concrete, Prentice-Hall, Englewood Cliff, N. J. (1981).
2. Mehta, P. K., Concrete-Structure, Properties and Materials, Prentice-Hall Englewood Cliff, NJ (1986).
3. Kosmatra, S. H., and W. C. Panarese, Design and Control of Concrete Mixtures, 13th ed, Portland Cement Association (1988).
4. Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-95, ACI Detroit (1995).
5. 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」, 中國土木水利學刊, (已接受)。
6. 黃兆龍, 蘇南, 「台灣主要河川粗骨材資源、岩性及巨觀工程性質之探討」中國土木水利季刊, 第16卷, 第二期, 第61-76頁(1988)。
7. 黃兆龍, 劉俊杰, 李隆盛, 林豐益, 「高性能混凝土緻密配比法及早期性能研究」, 土木水利學刊第八卷第一期(1994)。
8. 王櫻茂, 楊宏儀, 以普蜀蘭混合材料防制鹼-骨材反應, 國科會專題研究報告(1990)。
9. 黃兆龍, 「高性能混凝土材料基本性質」, HPC 高性能混凝土配合營建自動化-建築工程的發展與應用研討會(1995)。
10. 黃兆龍, 由高雄85層T & C Tower 論HPC 材料選擇及性能, 高性能混凝土(HPC)研發及應用研討會論文輯, 國立高雄工專高專科學校 83-124頁(1994)。
11. Hwang, C. L. and D. H. Shen, "A Study of the Hydration Mechanism of Portland Cement," National Science Council, Vol.12, No.4, pp.275-283 (1988).
12. Hwang, C. L., and D. H. Shen, "The Effects of Blast-Furnace Slag and Fly Ash on the Hydration of Portland Cement," Cement and Concrete Research, Vol.21, pp.410-425 (1991).

表一 混凝土物理與化學性劣化種類、基因、控制變數及劣化機理

劣化種類		材料基因*		需控制變數*(愈多愈重要)										劣化機理說明		劣化機理**
				P	A	R	w/c	W	C	f _a	V _p	p	sp			
物理性劣化	表面磨耗	√		√				*	*	*					表面抗剪力不足，造成表面被剪破壞。	剪應力>剪力強度。 水份喪失：毛細管張力、表面能量改變。
	磨損、沖蝕、穴蝕	√		√				*	*	*					乾燥時表面收縮，造成表面裂縫；潮濕時表面膨脹，造成內部裂縫。	
	體積變化	√		√				*	*	*					孔隙中鹽類結晶產生晶壓。	
	變化的	√		√				*	*	*					設計不當或偷工減料，損及強度，另外路面不平整及接頭高程差過大。	
	結構	√		√				*	*	*					在特定載重下反覆之次數過多，因而被剪破壞。	
劣化	載重	√		√				*	*	*					水結冰體積膨脹9%，造成冰鏡或壓力，使混凝土分離。	支配膨脹的因素：1.水力定律(Powers)；2.冰分離(Powers)；3.中孔卻水(Litvan)；4.滲透性。 骨材與水泥漿體差異膨脹係數及水泥漿遇熱乾縮作用：水泥漿體水化物的高溫分解作用。 氫氧化鈣被溶解而造成孔隙：氫氧化鈣被溶解而與其它有害物質結合。
	凍融作用	√	√	√				*	*	*					四步驟： 1. $\text{SO}_4^{2-}(\text{I}) \rightarrow$ 滲透 SO_4^{2-} (水泥)； 2. $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow$ 溶解 $\text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$ ； 3. $\text{SO}_4^{2-} + \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$ 析晶 $\rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_2$ ； 4. $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_2 + 2\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_2 + 16\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 。 1. 鹼分解並溶解活性矽或碳酸鹽之骨材； 2. 形成含水矽酸鹼玻璃 $\text{S-N/K H} \rightarrow \text{N/K-S-H}$ ；碳酸與氫氧化鈣結晶； 3. 玻璃或水形成溶膠滯留侵蝕周圍。	
	火害	√	√	√				*	*	*					1. $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$ ； 2. $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_2 + 6\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Ca}^{2+} + 2\text{SHn} + 6\text{H}^+$ 。	
	某端溫度	√		√				*	*	*					1. 陽極反應： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$ ； 2. 陰極反應： $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH})^-$ ； 3. 沈澱作用： $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2(\text{OH})^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ ； 4. 氧化生鏽： $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。	
	鋼筋腐蝕	√	√	√				*	*	*						
化學性劣化	溶解和析晶	√		√				*	*	*					1. 陽極反應： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$ ； 2. 陰極反應： $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH})^-$ ； 3. 沈澱作用： $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2(\text{OH})^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ ； 4. 氧化生鏽： $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。	
	硫酸鹽侵蝕	√		√				*	*	*					1. 陽極反應： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$ ； 2. 陰極反應： $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH})^-$ ； 3. 沈澱作用： $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2(\text{OH})^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ ； 4. 氧化生鏽： $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。	
	鹼骨材反應	√		√				*	*	*					1. 陽極反應： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$ ； 2. 陰極反應： $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH})^-$ ； 3. 沈澱作用： $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2(\text{OH})^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ ； 4. 氧化生鏽： $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。	
	酸和鹼作用	√		√				*	*	*					1. 陽極反應： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$ ； 2. 陰極反應： $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH})^-$ ； 3. 沈澱作用： $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2(\text{OH})^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ ； 4. 氧化生鏽： $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。	
	鋼筋腐蝕	√	√	√				*	*	*						

* P, A, R: 分別表示水、水泥、骨材及鋼筋。

* w/c: 水灰比, W: 用水量, C: 水泥量, P: 水灰比, sp: 強型劑, ac: 骨材 / 水泥比, air: 空氣含量。

** 混凝土用水泥化學簡寫符號: C-CaO, S-SiO₂, H-H₂O, A-Al₂O₃, S-SiO₂。

· 拌合水對產生混凝土劣化之影響 ·
· 黃光龍 羅建威 鄭金祥 ·

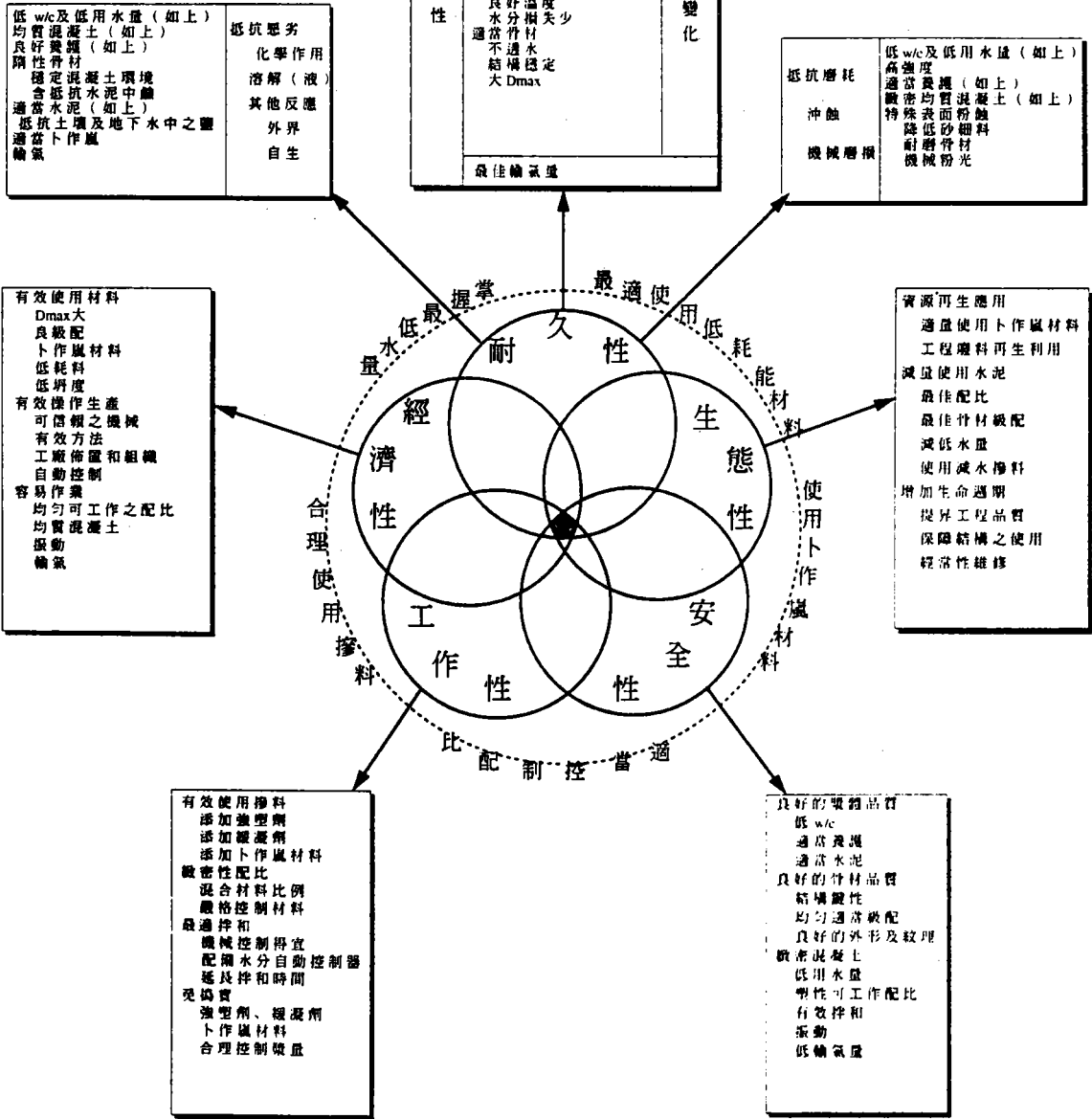
~ 1-10 ~

表三 主要試驗變數表

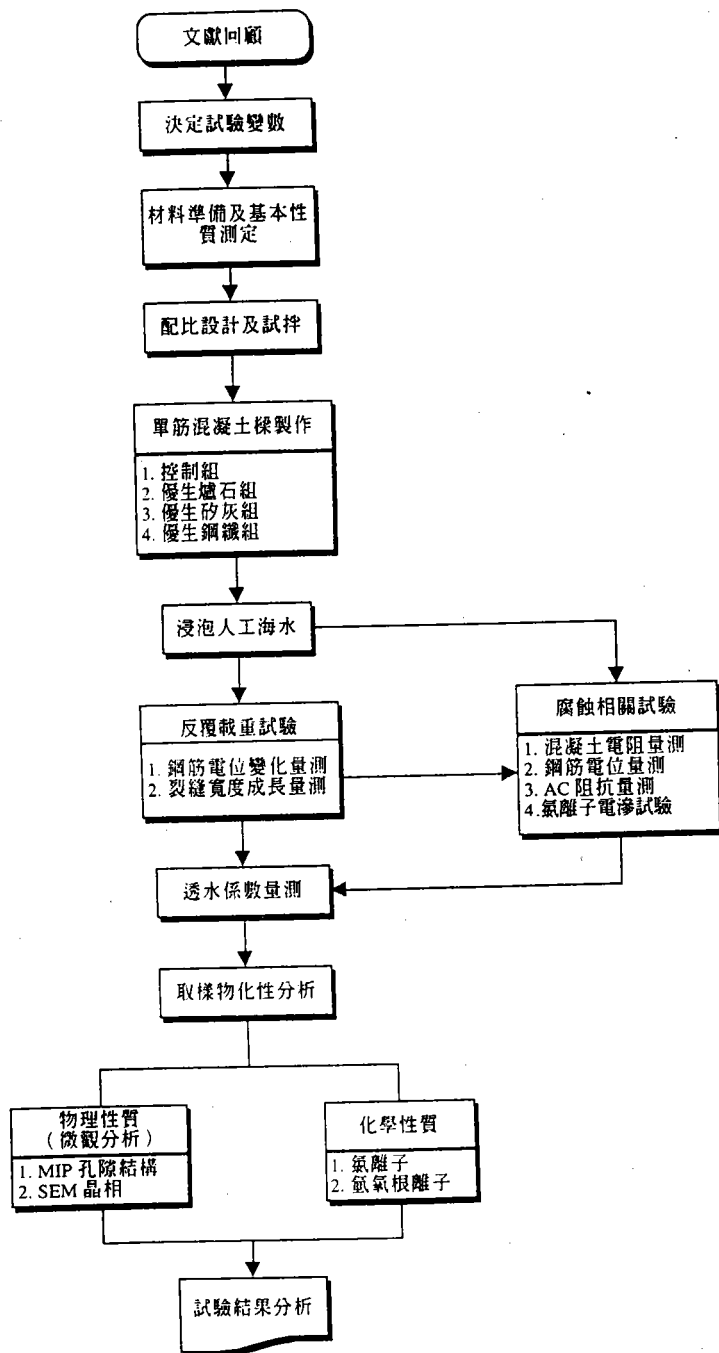
試體種類	水膠比	鋼筋處理	摻料
控制組 (Control)	0.28,0.32,0.4	裸鋼筋(V)， 熱浸渡鋅(Z)	
優生爐石組 (EC-Slag)	0.28,0.32,0.4	裸鋼筋(V)， 熱浸渡鋅(Z)	爐石，飛灰
優生矽灰組 (EC-Silica)	0.28,0.32,0.4	裸鋼筋(V)， 熱浸渡鋅(Z)	矽灰，飛灰
優生鋼纖維組 (EC-Steel Fiber)	0.28,0.32,0.4	裸鋼筋(V)， 熱浸渡鋅(Z)	爐石，飛灰， 鋼纖維(F)

表四 基本混凝土材料工程性質

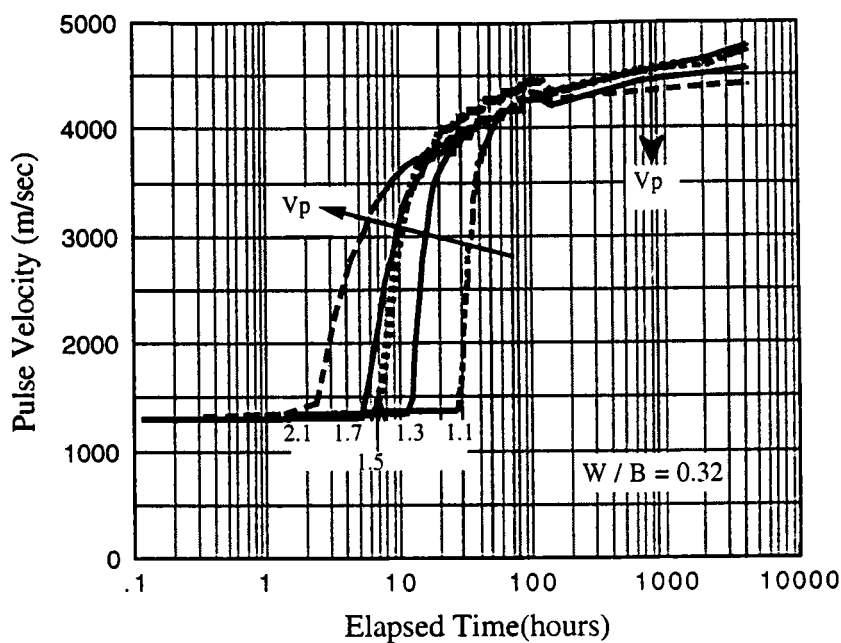
#	配 比 稀 別	N	用水量 (kg/m ³)	W/C	W/B	W/S (%)	坍 度 (坍流度)	超音波速 (m/sec)		抗壓強度 (MPa)						電 阻 (kΩ-cm)						氯離子 滲透 (Coulombs)
								IS	FS	3d	7d	28d	56d	120d	3d	28d	90d	120d	180d			
1	HPC	1.1	123	0.56	0.32	6.75	255 (580)	1342	1502	20	33	48	57	72	4	21	46	-	66	-	-	
		1.3	158	0.50	0.32	7.80	250 (640)	1328	3635	29	39	54	62	72	4	16	42	-	58	-	-	
		1.5	180	0.47	0.32	8.88	270 (740)	1324	2272	35	46	60	62	72	4	15	41	-	57	-	-	
		1.7	203	0.44	0.32	10.00	280 (750)	1298	2817	40	48	64	70	73	4	13	40	-	52	-	-	
2	ACI	2.1	244	0.34	0.32	11.47	85 (200)	1383	2988	42	45	60	62	72	4	6	8	-	9	-	-	
3	HPC	1.2	126	0.43	0.28	7.17	270 (645)	1342	2505	33	44	62	64	80	4	21	58	-	75	-	-	
		1.5	158	0.50	0.32	7.80	250 (640)	1328	3635	29	39	54	62	72	4	16	42	-	58	-	-	
		1.8	183	0.67	0.40	8.91	215 (580)	1333	1396	23	29	45	54	65	4	13	35	-	48	-	-	
		1.9	196	0.28	0.28	8.84	70 (360)	-	-	55	61	67	80	86	4	7	9	9	-	4383	-	-
4	Control	1.3	196	0.32	0.32	8.90	70 (360)	-	-	34	45	51	57	61	4	7	8	9	-	5308	-	-
196	0.40		0.40	8.99	75 (400)	-	-	29	34	39	44	44	4	6	8	8	-	9709	-	-		
145	0.42		0.28	7.11	250 (650)	-	-	46	55	81	85	88	5	20	90	119	-	-	-	-	-	
155	0.49		0.32	7.74	240 (660)	-	-	37	43	62	74	79	5	14	86	103	-	196	-	-	-	
5	EC-Slag	6	180	0.65	0.40	8.81	240 (620)	-	-	20	23	35	50	59	4	14	82	99	-	-	-	-
138	0.42		0.28	7.07	235 (630)	-	-	46	53	80	84	88	6	35	115	130	-	-	-	-	-	
154	0.49		0.32	7.70	230 (620)	-	-	41	44	62	76	87	5	31	110	122	-	392	-	-	-	
180	0.65		0.40	8.79	240 (620)	-	-	18	23	35	47	53	5	24	96	100	-	-	-	-	-	
7	EC-Steel Fiber	133	0.44	0.28	6.95	220 (600)	-	-	36	47	65	80	87	4	14	22	23	-	-	-	-	-
		149	0.51	0.32	7.57	210 (590)	-	-	35	43	60	76	80	4	17	22	16	-	1800	-	-	-
		174	0.69	0.40	8.52	200 (580)	-	-	19	23	36	42	47	4	13	22	21	-	-	-	-	-



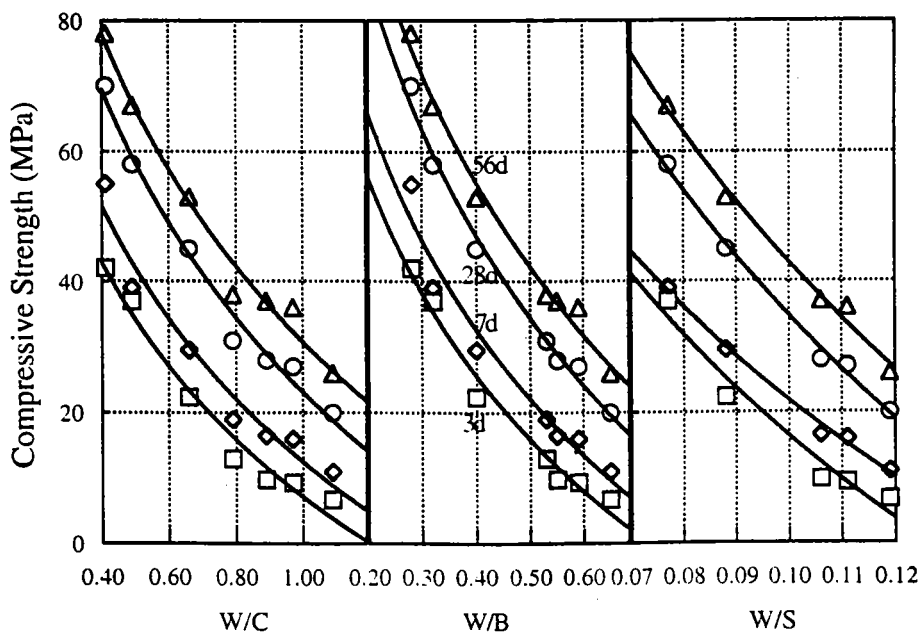
圖一 優生混凝土應考慮「安全性、耐久性、經濟性、工作性、生態性、」之架構



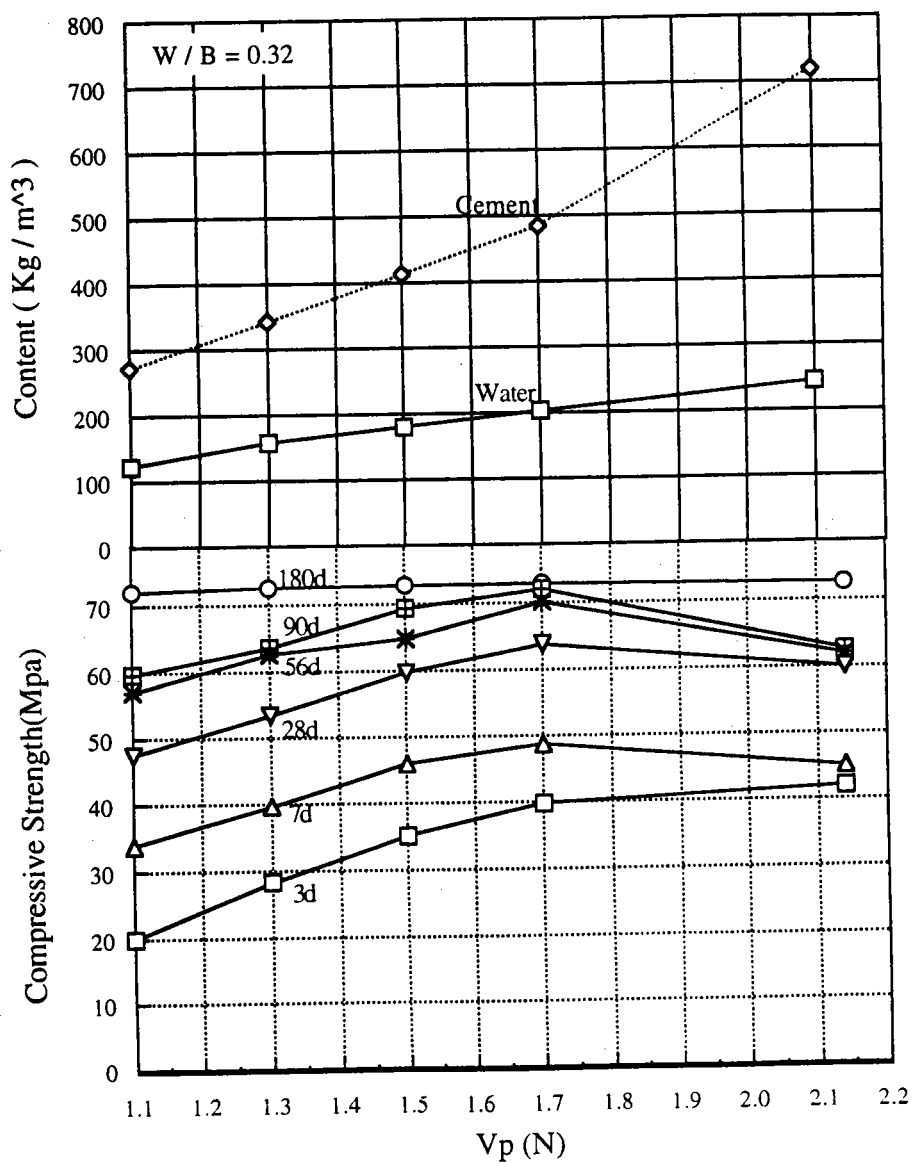
圖二 試驗計畫流程圖



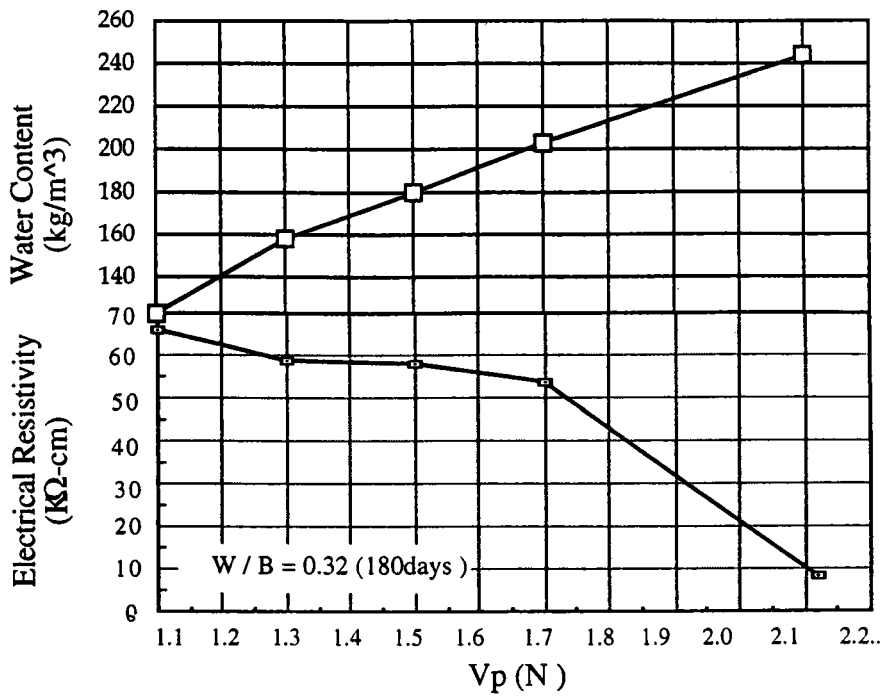
圖三 水泥漿量對超音波速之影響



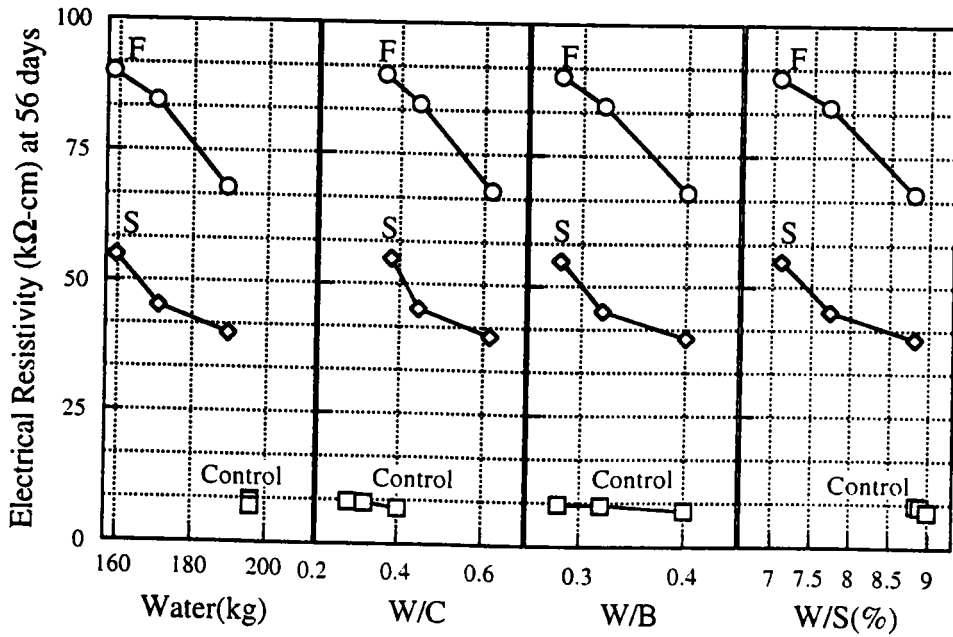
圖五 W/C , W/B 及 W/S 對抗壓強度之影響



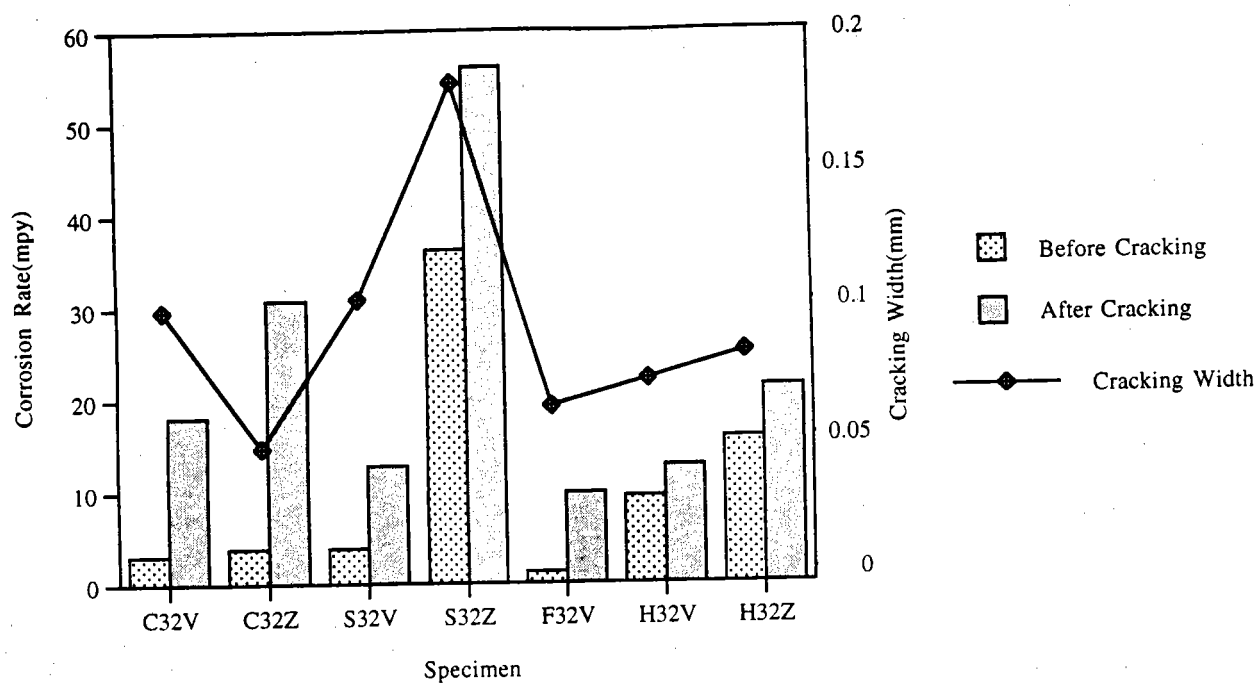
圖四 水泥漿量對抗壓強度之影響



圖六 水泥漿量及拌和水量對電阻係數之影響



圖七 用水量，W/C，W/B及W/S與電阻之關係



圖八 優生混凝土單筋樑裂縫寬度與腐蝕速率之關係

強塑劑添加時間對高性能混凝土工作性之影響

陳聖達* 邱志堅** 許貫中***

關鍵詞：高性能混凝土、吸附、工作性

摘 要

強塑劑的添加，是造成高性能混凝土（HPC）高流動性，高強度主因之一，而強塑劑之劑量及添加時間，則決定 HPC 效果之發揮。本研究選用磺化萘甲醛聚合物強塑劑來探討其在水泥粒子上之吸附行為，以及強塑劑添加時間對 HPC 工作性之影響。研究結果顯示，強塑劑在水泥粒子上之吸附行為遵守 Langmuin 單層等溫吸附模式，其飽合吸附量隨添加時間的增加而減少，而平衡常數則隨添加時間的延遲而呈現先減後增的趨勢。隨著強塑劑之延遲添加，水泥漿流度以及混凝土的坍度均呈現先增後減的趨勢，在延遲 2min 添加時有最最佳之流動性；而添加時間若在 10min 之後，則流動性明顯下降。此發現與文獻⁽¹⁾結果相符；而 HPC 工作性的變化則與強塑劑在水泥粒子上的吸附行為有相當大的關聯性。

壹、前 言

高性能混凝土(High Performance Concrete，HPC)為混凝土中適當添加礦物摻料，如矽灰、爐石、飛灰，與化學摻料，如界面活性劑、樹脂、強塑劑等，經過適當配比設計，以達到高流動性(工作性)與高強度等優越性能的材料，而得以實際應用於超高層建築、高速公路、長跨度橋樑或核能廠結構體等⁽¹⁻³⁾。由於其優越的特性，HPC 的研發近年來深受土木建築業的矚目。

* 國立台灣師範大學化學研究所研究生

** 國立台灣師範大學化學系專題生

***國立台灣師範大學化學研究所教授

本研究採用 F type 強塑劑，其主要成份為磺化萘甲醛聚合物 (Sulfonated Naphthalene Formaldehyde Condensates , SNF)，此類強塑劑之原料最早只作為普通減水劑，但在最近幾年才發展成為強塑劑或高程度減水劑，其分子結構如圖 1，為一磺化萘甲醛結構單元重覆聯結，其聚合度 n 值一般約在 10，即分子量約為 2000⁽⁴⁾。SNF 可大量加入混凝土中，使工作性大幅之增加；或在相同工作度下，能夠減少水灰比而無輸氣之不良現象，故廣為美、日以及國內所使用。商業上的產品為黑褐色水溶液，固含量為 40~45wt%。通常強塑劑為帶負電之離子化合物，當吸附在水泥表面上後，由於負離子彼此相斥而造成水泥粒子的分散，因而大幅度提高混凝土的工作性⁽⁵⁾。

一些研究結果顯示⁽⁶⁻¹⁰⁾強塑劑的種類、分子量、用量、添加時間、水灰比、水泥或骨材特性與種類、和溫度等因素，都會影響強塑劑在水泥表面的吸附行為，進而影響混凝土的分散性，流度或坍度。其中關於添加時間方面，Chiocchio 與 Paolini⁽¹¹⁾進行兩種強塑劑（磺化萘甲醛聚合物與磺化美耐皿甲醛聚合物）在水泥漿的吸附行為研究，發現強塑劑的延遲添加可以得到更佳的流動性，且建議適當的添加時間應在水泥水化作用的潛伏期(Dormant Period)之前；Hewlett⁽¹²⁾則發現在 5~50 min 的延遲添加時間內，混凝土的坍度會隨著強塑劑添加時間的延遲而降低；Kasami 等人⁽¹³⁾的研究結果顯示某些強塑劑的延遲添加可使混凝土保持一定的坍度。

儘管對於強塑劑在水泥表面的吸附行為有多人的研究，但是其中的機理、強塑劑的吸附狀態至今尚無定論。本文主要在於探討強塑劑添加時間對高性能混凝土工作性之影響，尋找出較適當的添加時間；但首先進行強塑劑在水泥表面的吸附行為研究，以作為學理基礎。

貳、吸附模式

強塑劑為帶陰離子的分子，在水泥表面形成單層吸附後，由於分子彼此間的排斥，很難再形成第二層，故強塑劑在水泥表面的吸附應為單層吸附，而遵循 Langmuir 等溫吸附模式⁽¹⁰⁾。

Langmuir 等溫吸附模式，係假設(1)價電點 (points of valency) 位於吸附劑表面，且每一位置可吸附一個分子，亦即被吸附層為單層分子厚度，(2)

分子之存在，並不影響其它位置之吸附效應(14)。

吸附的過程可由下列方程式表示：

$$\text{被吸附分子 (游離態)} + \text{吸附位置} = \text{分子 (被吸附態)} \quad (1)$$

吸附速率正比於分子的濃度[C]，和吸附劑上未被分子佔據的吸附位置的比例 $(1-\theta)$ ，如式 (2)所示：

$$\text{吸附速率} = k_1[C](1-\theta) \quad (2)$$

而脫附速率則正比於吸附劑上被分子佔據的吸附位置比例 θ

$$\text{脫附速率} = k_2 \theta \quad (3)$$

當達到吸附平衡時，即吸附速率等於脫附速率，可導得下式：

$$1/\theta = B/M = 1 + 1/K[C]_{eq} \quad (4)$$

或者

$$1/M = 1/B + 1/B \cdot K[C]_{eq} \quad (5)$$

其中 B 為吸附劑的飽和吸附量，M 為吸附量，K 為平衡常數($= k_1/k_2$)。B 和 K 值可經由 $1/M$ 對 $1/[C]_{eq}$ 的圖上斜率及截距推算求得。

參、研究材料及方法

一、材料

(一) 水泥：使用波特蘭第一型水泥。

(二) 骨材：採用符合 ASTM-C33 的濁水溪骨材，粗骨材其吸水率為 0.93%，細骨材吸水率為 2.13%。

(三). 強塑劑：為 F type 強塑劑，其主成份為磺化萘甲醛聚合物，固含量為 41.7 wt%。

二、方法

(一) 吸附實驗：

以 300、600、1200、1800 ppm 之 SNF 溶液 100 ml 分別加入水泥膠體(1 g 水泥加入 500 ml 水)中，並持續攪拌，不同濃度的強塑劑水溶液分別在水泥膠體攪拌 0~60 分鐘後加入。強塑劑水溶液在加入後每隔一段時間取樣約 5 ml 用注射過濾器快速過濾。加入水泥膠體混合後的強塑劑初濃度分別為 50、100、200 與 300 ppm。利用 UV 光譜儀測量樣品在波長 230 nm 的吸收度，經由檢量線計算即可測出強塑劑、水泥膠體溶液中強塑劑的濃度⁽⁶⁾。

(二) 水泥漿流動度測試：

依表 1 之配比，拌製水泥漿，再隨不同延遲添加時間，加入強塑劑拌製，依據 ASTM-C 230，以振動台測其流動度之變化。

(三) 混凝土坍度實驗：

依表 2 之配比拌製混凝土，再隨不同延遲添加時間，加入強塑劑拌製，依據 ASTM-C143 測其坍度之變化。

肆、結果與討論

圖 2 為強塑劑在水泥顆粒上的吸附實驗所得實驗數據，再依公式(5)得到吸附量的倒數對平衡時 SP 濃度的倒數關係圖。在圖上實驗點都很靠近迴歸之理論直線，顯示 SNF 在水泥顆粒上的吸附符合 Langmuin 單層等溫吸附模式，此與 Cunningham 等人的研究結果相同⁽¹⁰⁾。再由圖中的斜率和截距，求出不同延遲添加時間下的飽和吸附量和平衡常數（見表 3）。表 3 顯示隨延遲添加時間的增加，由於水泥顆粒表面逐漸被水化產物覆蓋，致使吸附位置減少，因而 SNF 在水泥顆粒上的飽和吸附量呈下降趨勢。而隨延遲添加時間的增加，SNF 在水泥顆粒上的吸附平衡常數則呈現先遽降再緩升的現象，推測此現

象亦與水泥在水化過程中表面狀態改變有關。

圖 3 為強塑劑飽和吸附量與延遲添加時間的關係圖。圖中顯示在添加時間 10 min 處有一轉折點，在 0-10 min 內飽和吸附量很快下降，而在 10 min 以後則下降幅度趨緩。飽和吸附量代表水泥顆粒表面所有的吸附位置均為強塑劑分子所吸附時的吸附量，由圖可知水泥的吸附位置的數目隨著水化程度的增加而減少。水泥的主要成分為矽酸三鈣、矽酸二鈣、鋁酸三鈣和鋁鐵酸四鈣。一旦水泥與水接觸，便產生水化作用而放出熱量。早期的水化作用以矽酸三鈣和鋁酸三鈣為主，在反應過程中將有兩個放熱尖峰產生⁽¹⁵⁾。第一放熱尖峰發生於 0~15 分鐘，在這一階段水泥成分溶解於水中，然後進行反應，致使水泥表面帶有鈣離子和鋁離子產生的正電荷，此時有利於強塑劑的吸附，其吸附行為應屬化學吸附；隨著反應時間的增長，水化物逐漸生成，水泥表面正電荷數目漸減，使得強塑劑飽和吸附量隨之降低。第二放熱尖峰約於 4~8 小時產生，此時水化產物如鈣礬石與 CSH 膠體已經形成而且包覆於水泥表面，由於表面正電荷銳減，它與強塑劑的吸附行為應轉變為物理吸附，因此圖 3 中曲線的轉折點應可視為這種轉變的現象。

圖 4~5 分為相同水灰比 ($w/c=0.25$)，不同 SNF 劑量 ($sp/w=0.25, 0.5$ wt%； $w/c=0.25$) 與不同水灰比 ($w/c=0.25, 0.3$ ； $sp/w=0.25$ wt%) 下水泥漿流度與強塑劑延遲添加時間關係圖。此二圖均顯示在添加時間約 10 min 時有一轉折點，尤其添加時間在前 5min 時水泥漿呈現較高流度，而流度最佳值約在 2 min 處，而在大於 10 min 的延遲添加，其流度值均呈明顯下降。此外，較高 SNF 劑量下，隨添加時間的延遲，流度下降率較低強塑劑劑量為低（見圖 4）。在 Chiochio 和 Paolini 的研究結果⁽¹¹⁾也顯示強塑劑的添加時間若在水泥水化作用的潛伏期之前(即 15 min 以前)，水泥漿便會有較理想的流動性或工作度。

圖 6 為混凝土坍度與強塑劑延遲添加時間關係圖。隨著添加時間的延遲，混凝土坍度呈現先增後減的趨勢。坍度在 10 min 以前的添加保有較大的數值，而在 15 min 以後的添加則坍度大幅減低。另外，較高強塑劑劑量的延遲添加混凝土坍度下降率較低⁽¹³⁾，故此延遲添加方式可改善 HPC 之坍度損失問題；而較低劑量的強塑劑延遲添加，其坍度隨延遲時間的增加而遞減；故若能在適當的延遲時間加入強塑劑，應可適度維持混凝土所需之坍度。

綜合圖 3~6 的結果，在 10~15 min 的延遲添加時間時各圖均呈現出個轉折點，顯示水泥漿流度、混凝土工作性的變化與強塑劑在水泥粒子上的水化 / 吸附行為有相當大的關聯性。強塑劑的添加時間應在水泥水化作用第一階段完成之前，亦即第二階段潛伏期之前(即 15 min 以前)⁽¹¹⁾，此時水泥顆粒表面呈現對強塑劑化學吸附，使得水泥漿或混凝土便會有較理想的流動性或工

作度。若添加時間過遲，水泥顆粒表面對強塑劑的吸附將逐漸轉為物理吸附，致使強塑劑效能無法預期般的促進混凝土的工作度。

伍、結 論

- 一、強塑劑在水泥顆粒上的吸附行為，符合 Langmuin 單層等溫吸附模式。
- 二、強塑劑的飽合吸附量隨添加時間的增加而減少，而平衡常數則隨添加時間的延遲而呈現先減後增的趨勢。此應與水泥在水化過程中其表面狀態改變有關。
- 三、在 10~15 min 的延遲添加時間時，強塑劑的飽合吸附量、水泥漿流度、以及混凝土坍度均呈現一轉折點，顯示三者間存在著相當大的關聯性。
- 四、強塑劑的適當添加時間應在水泥水化作用第一階段完成之前，此時混凝土便會有較理想的流動性或工作度。較高強塑劑劑量的延遲添加將使混凝土坍度下降率較低，此延遲添加方式可改善 HPC 之坍度損失問題。

陸、致 謝

感謝啓欣公司提供強塑劑，雲林技術學院營建系蘇南教授允以借用設備及器材，以及國科會經費補助（計畫編號 NSC84-2211-E-0003-0001）。

參考文獻

1. 陳振川, "高性能混凝土規劃與推動", 高性能混凝土研發與應用研討會, 高雄, (1994), 1-44.
2. P.C. Aitcin and B. Miao, "How to Make High-Performance Concrete", Proceedings of the 2nd Seminar on High-Performance Concrete, Taipei, Taiwan, ROC, (1992), 9-23.
3. F. de Larrard, "French Bridges in High-Performance Concrete", Proceedings of the 3rd Seminar on High-Performance Concrete, Taipei, Taiwan, ROC, (1993), 1-11.
4. M. R. Rixom and N. P. Mailvaganam, Chemical Admixtures for Concrete, E. & F. N. Spon, New York, 1986.
5. P.C. Kreijger, "Plasticizers and Dispersing Admixtures", Proceedings of the International Congress on Admixtures, London, England, (1980), 1-16.
6. P.J. Andersen, D.M. Roy and J. M. Gaidis, "The Effect of Adsorption of Superplasticizers on the Surface of Cement", Cem. Concr. Res., 17, (1987), 805-813.
7. P. J. Andersen and D.M. Roy, "The Effect of Superplasticizer Molecular Weight on its Adsorption and Dispersion of Cement", Cem. Concr. Res., 18, (1988), 980-986.
8. H. Uchikawa, S. Hanehara, T. Shirasaka and D. Sawaki, "Effect of Admixture on Hydration of Cement, Adsorptive Behavior of Admixture and Fluidity and Setting of Fresh Cement Paste", Cem. Concr. Res., 22, (1992), 1115-29.
9. V. S. Ramachandran, R. F. Feldman and J. J. Beaudoin, Concrete Science, London, England, 1981.
10. J. C. Cunningham, B.L. Dury and T. Gregory, "Adsorption Characteristics of Sulphonated Melamine Formaldehyde Condensates by High Performance Size Exclusion Chromatography", Cem. Concr. Res., 19, (1989), 919-926.

11. G. Chiocchio and A. E. Paolini, "Optimum Time for Adding Superplasticizers to Portland Cement Pastes", Cem. Concr. Res., 15, (1985), 901-908.
12. P. C. Hewlett, "Experiences in the Use of Superplasticizers in England", in Superplasticizers in Concrete, SP-62, 1979, 101-122.
13. H. Kasami, T. Ikeda and S. Yamane, "On Workability and Pumpability of Superplasticized Concrete -- Experience in Japan", in Superplasticizers in Concrete, SP-62, 1979, 67-85.
14. R. G. Mortimer, Physical Chemistry, The Benjamin /Cummings Publishing Company, Redwood, California, 1993.
15. S. Mindess and J. F. Young, Concrete, Prentice-Hall, New Jersey, 1981.

表一 水泥漿之組成配比。

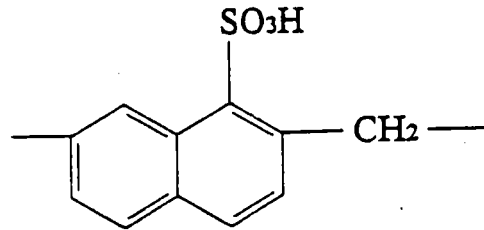
水灰比	0.25		0.3
SP/C%	0.25	0.5	0.25
水泥 g	1100	1100	1100
水 g	275	275	330
摻料 g	6.44	12.88	6.44

表二 混凝土之組成配比。

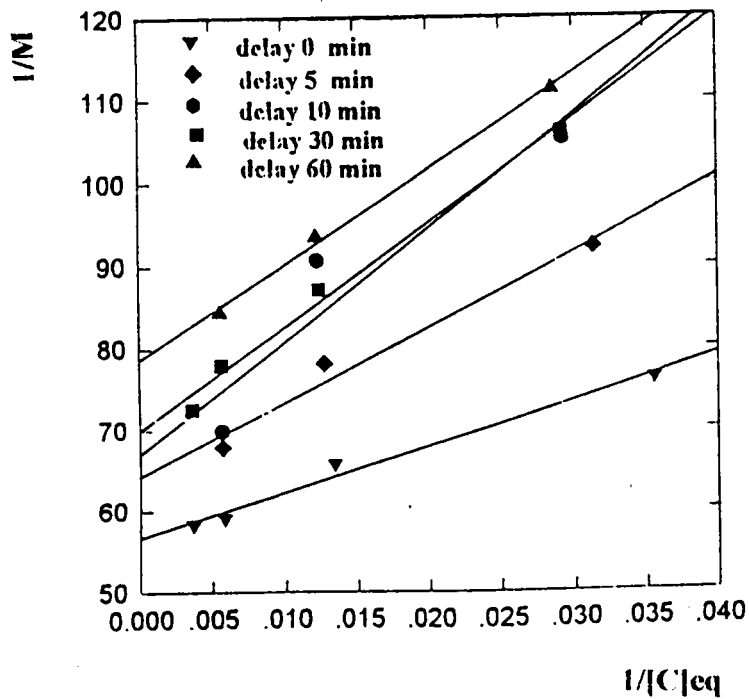
水灰比	0.3		
SP/C%	0.5	1	2
水泥 kg	6.43	6.43	6.43
粗骨材 kg	7.27	7.27	7.27
細骨材 kg	8.77	8.77	8.77
水 kg	2.17	2.17	2.17
摻料 g	75	150.6	301

表三 強塑劑飽和吸附量與平衡常數。

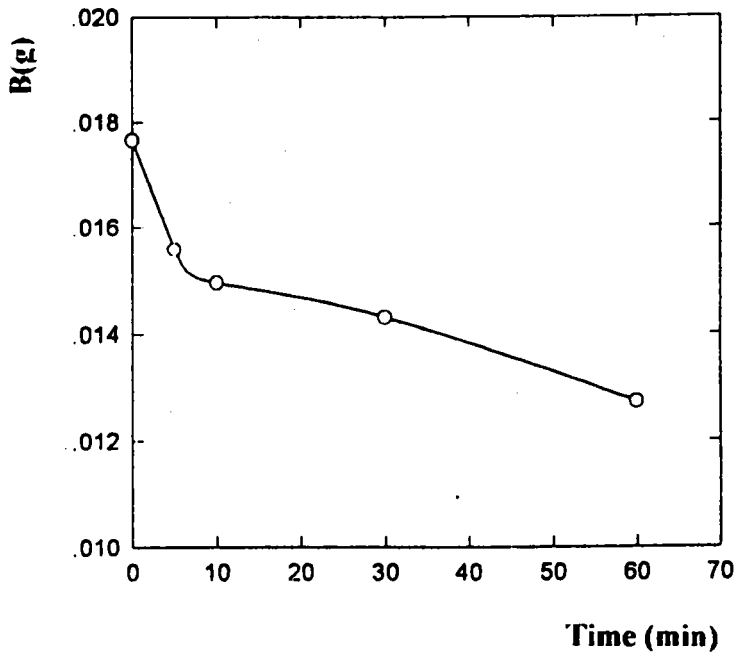
延遲加入時間(min)	飽和吸附量 B(g)	平衡常數 K
1	0.0177	0.0101
5	0.0156	0.0705
10	0.0149	0.0486
30	0.0143	0.0553
60	0.0127	0.0680



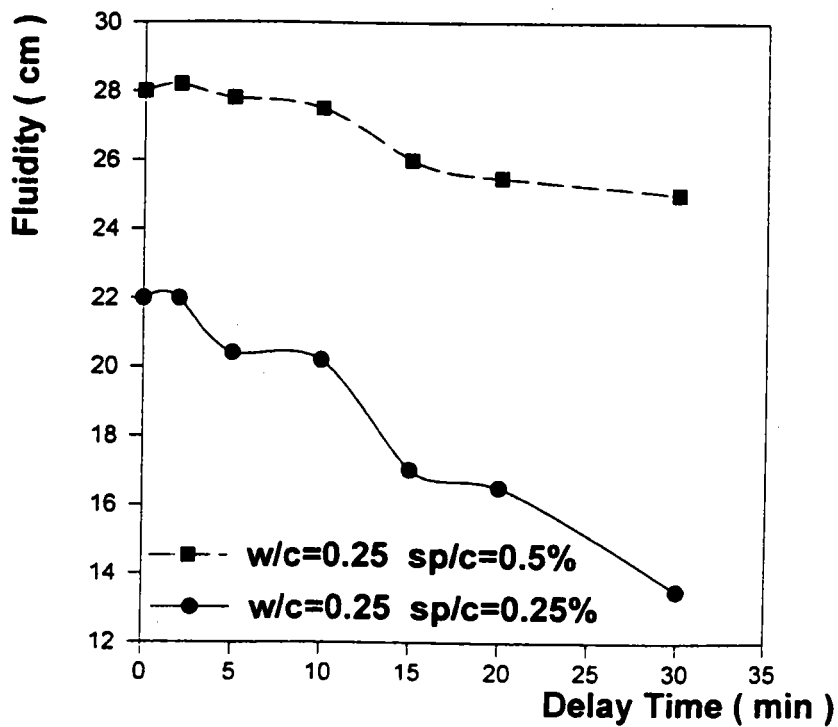
圖一 磺化萘甲醛分子結構示意圖。



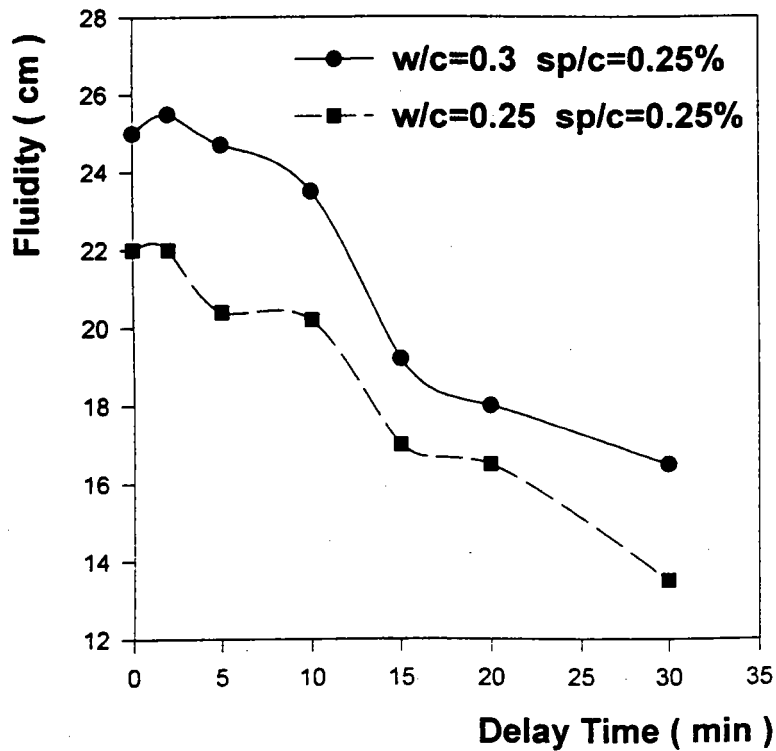
圖二 強塑劑吸附量的倒數($1/M$)與平衡時強塑劑濃度的倒數 ($1/[C]_{eq}$)的關係圖。



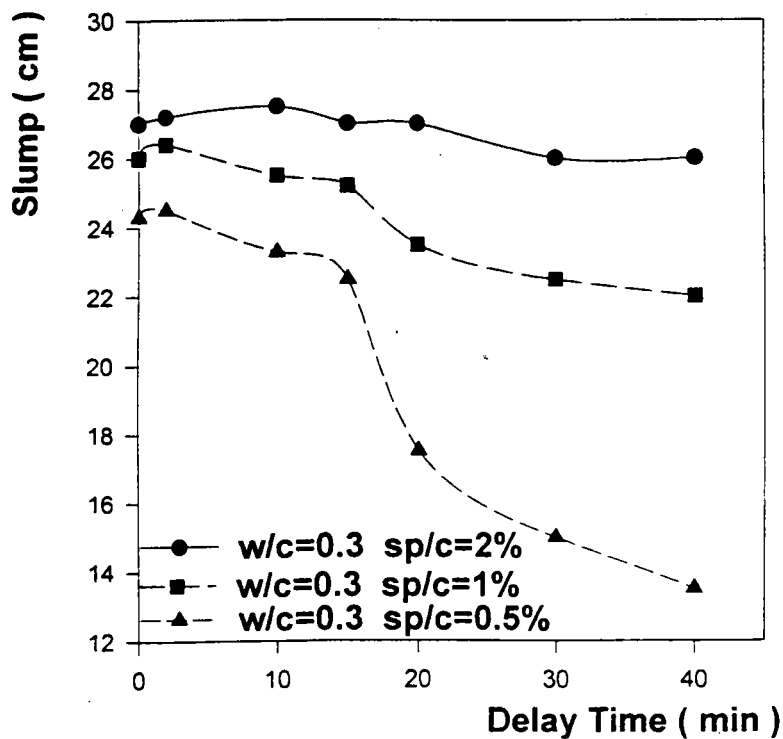
圖三 強塑劑飽和吸附量(B)與延遲添加時間的關係圖。



圖四 不同強塑劑劑量下水泥漿流度與延遲添加時間關係圖。



圖五 不同水灰比下水泥漿流度與延遲添加時間關係圖。



圖六 混凝土坍度與延遲添加時間關係圖。

化學摻料在高性能混凝土工程之應用

Chemical Admixture Used On High Performance Concrete

周文宗*

壹、前言

在近 10 年來的混凝土材料技術領域裡，由於高性能混凝土工程技術觀念的突破及應用，使得傳統混凝土的製配生產技術遭受重大的衝擊和挑戰。如何產製出低乾縮、高體積穩定性、低水灰比高流動化及耐久性、高強度、高抗滲等優質混凝土，已不再是傳統混凝土配比設計所能滿足的，而礦物摻料的添加（如爐石粉、飛灰、矽灰等卜作嵐材料）其所產生技術參數的變化，更是多樣而複雜，使得混凝土以傳統觀念來設計目標強度需求時，往往會有尷尬問題產生（如既要低水灰比，又要高流動化、不離析、低乾縮，則傳統混凝土在水泥及水量的使用控制上，就會產生矛盾...），而化學摻料正確適當之使用，就能提供此一特殊工程目標之需求。其「小而省」的微量或少量添加，使得混凝土材料性質得以滿足工程師設計之需要，堪稱“小兵立大功”！其優越之性質，已成為高性能混凝土製配中，不可或缺的重要原料之一。

貳、化學摻料種類及基本物性和應用範圍

一、化學摻料種類及基本物性隨著混凝土工程不同設計之需要，約可概分為：

（一）減水劑系：即減低每立方米混凝土單位用水量，以達降低水灰

* 啓欣股份有限公司董事長
四川華西混凝土外加劑有限公司董事長
HI CON CONCRETE ADMIXTURE USA INC. 董事長
中國混凝土外加劑學會

比後之強度設計需求或以減水手段來達到降低單位水泥用量之成本考量。減水劑系成品中又分普通減水劑型（塑化劑）及高性能減水劑型（強塑劑或超塑化劑）二種，而其衍生物又可根據工程需要變性為：早強型或緩凝型等，其應用之普遍和廣泛，幾乎已成為當今商品混凝土摻料主流，其應用之機理，在本章後述。

- (二)調凝劑系：即根據工程特殊需求，利用與水泥水化作用關係之化學產品來改變水泥水化進行速率，而達到速凝或緩凝效果（如超早強或防凍劑應用在冰天雪地的路面修補工程等）。
- (三)輸氣劑系：即以產品本身經充份拌合後所產生之均勻氣泡，充填於混凝土成品中，以達到改善混凝土工作性或增加抗凍融之效能。
- (四)膨脹劑：即利用可催化 C_3A 之化合物或可快速產生體積膨脹的水泥系產品在與水泥/水接觸後，即產生一定體積的膨脹來抵消混凝土因冷接縫所產生之收縮，其應用於預應力灌漿或基礎錨栓螺孔等工程。
- (五)發泡劑：比輸氣劑略大之規則或不規則氣泡應用在混凝土或砂漿上，其使用範圍一般用於屋頂隔熱層或部份輕骨材工程中。
- (六)其他：如防水劑、阻銹劑、脫模劑、電離子絮凝劑、抑制 AAR 摻料等，將視其性質之不同，而提供混凝土不同品質的材料行為。

二、化學摻料按其主要功能，共可分為六大類：

- (一)改善新拌混凝土(或砂漿、水泥漿)和易性或流變性能的化學摻料，如一般減水劑、輸氣劑及高性能減水劑(強塑劑)等。
- (二)調節新拌混凝土(或砂漿、水泥漿)凝結時間或硬化速度的化學摻料，如早強劑、緩凝劑、速凝劑等。
- (三)調節新拌混凝土(或砂漿、水泥漿)空氣含量的化學摻料，如輸氣劑、發泡劑、消泡劑等。
- (四)改善新拌混凝土(或砂漿、水泥漿)物理力學性質的化學摻料，如膨脹劑、抗凍劑、輸氣劑等。
- (五)增強新拌混凝土(或砂漿、水泥漿)鋼筋抗腐蝕的化學摻料，如阻銹劑、抗腐蝕抑制劑等。

(六)其他能提供新拌混凝土(或砂漿、水泥漿)特殊性能的化學摻料，如著色劑、抗 AAR 摻料等。

三、按化學摻料成份及性能分類，計可分為二大類：

- (一)無機類：包含各種無機鹽類或一些金屬單體或少量的氫氧化物等，這些物質一般應用於發泡劑、調凝劑、防凍劑、著色劑等。
- (二)有機類：此項物質為所有化學摻料之大宗，其中大部份為界面化學活性劑，有陰離子型、陽離子型、非離子型，以及高分子界面活性劑等，有一些屬高聚合物產品，在一定條件下也可作為摻料使用。

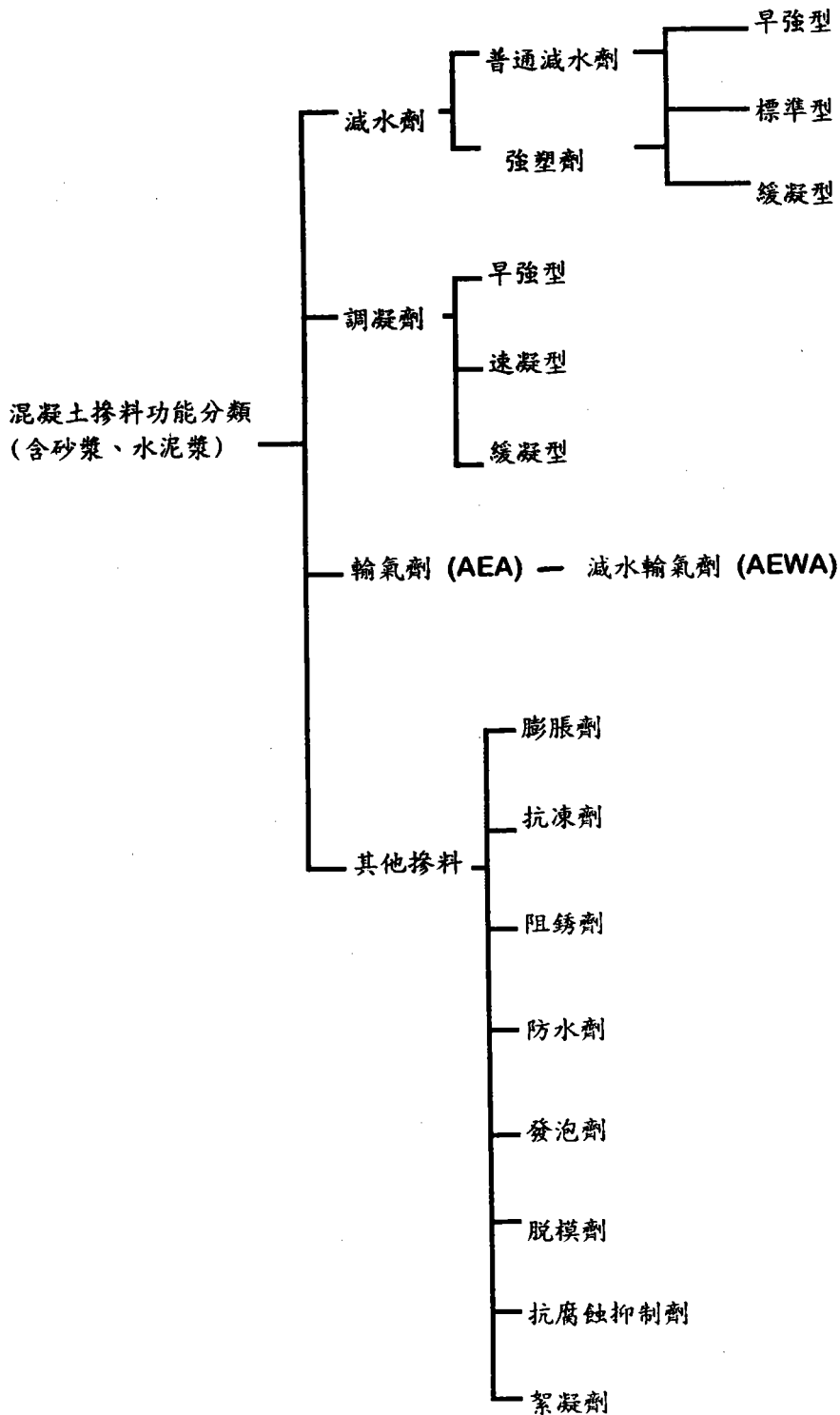
四、按工程需求化學摻料適用範圍，大致可概分為：

- (一)在鋼筋密集的預應力混凝土工程中，可使用強塑劑來改善混凝土施工和易性及坍度或提高早期強度，以達工程切線之要求。
- (二)在要求高強度、高流動化、低水灰比條件下之特殊工程，可使用強塑劑達到要求。
- (三)夏季滑模施工、大壩等巨積混凝土工程，可使用緩凝劑或強塑劑緩凝型以降低水泥水化反應的散熱速度，減少塑性龜裂的發生。
- (四)港工或水工混凝土可適當選用輸氣劑或減水緩凝劑或強塑劑緩凝型，可提高混凝土拌合和易性及硬化後的耐久性。
- (五)在大型設備基礎螺栓孔灌漿、或混凝土補償冷接縫之收縮等，均可使用適當之膨脹劑或無收縮灌漿材料。
- (六)在預鑄構件部分，若有為改善脫模強度或節省蒸氣養生或工時管理成本時，可考慮使用強塑劑早強型等。
- (七)在噴凝土或或防水堵漏工程中，可選用速凝劑，快速止水或凝結。

參、商品預拌混凝土常用化學摻料

由於國內混凝土工程使用預拌混凝土之普及率幾已達 100%，由傳統路邊鼓式拌合機和著計量以畚箕為單位的簡易配比混凝土，進而至精密電腦計量操作的商品混凝土自動攪拌作業系統，其化學摻料在微量添

混凝土化學摻料性能分類表



加下，藉著其特性發揮，已成為混凝土材料家族中(水泥、水、石、砂、摻料)重要的一員。

商品預拌混凝土由於受限於運輸距離對水泥水化速率之時間影響，其使用化學摻料之種類，已有特定之範圍。一般普遍使用的計有：

- 一、輸氣劑或減水輸氣劑：在天氣溫差變化大的地區或國家一般採用此類型化學摻料，以增加混凝土耐久性或抗凍融性。由於台灣屬亞熱帶地區，四季溫差變化不大，本產品除特殊工程外，在國內較少使用。
- 二、減水劑、緩凝劑或減水緩凝劑：在國內消費習慣上，對製造預拌混凝土廠家而言，甚少採用單純緩凝劑或減水劑。一般普遍採用減水和緩凝混合的減水緩凝劑較多，其理由是使用單純的減水劑，雖可降低水泥用量而帶來效益，但其混凝土硬化時間可能因此而提前，其早凝效果在嚴重的都會塞車中，將對混凝土品質造成不良影響。另外，使用單純的緩凝劑，若非特殊工程要求(如 LNG 工程等)，其緩凝時間長時延展，亦不符實際現場之需要。因此，在 ASTM C494 化學摻料劑型選擇中，大都會採用 A.B 混合型，從而成為 D TYPE 的減水緩凝劑。其一方面藉混凝土之緩凝時間可有效延長運輸距離、拓展商機外，也因減水效果帶來降低水泥用量的成本效益。
- 三、強塑劑的應用：強塑劑的應用是繼減水劑(A TYPE)及減水緩凝劑(D TYPE)之後，所相對延伸開發出來的科技產品，其效能可大大超越普通減水劑型 (A TYPE)之減水率達 400~700%之多。因此，視其需求功能而有了高性能減水劑(F TYPE)與高性能減水緩凝劑(G TYPE)之分。併合礦物摻料的技術有效應用，已成為當今高性能混凝土材料技術的主流。

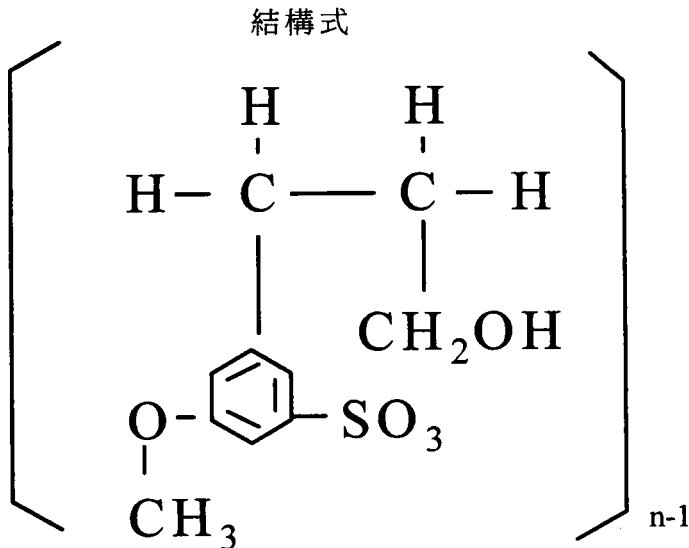
肆、強塑劑在商品混凝土之應用

一、強塑劑化學成份

較多學者認為強塑劑減水機理，其本身並不與水泥起化學反應生成新的水化產物，而是只起表面物理化學作用。因此，強塑劑本身是不會提高混凝土的強度，但是藉著界面化學把水泥絮凝電荷離子分散的理論，從而改變混凝土的行為，使水泥的水化過程及形成結構產生所需要之變化，而達到工程設計的要求。因此，強塑劑的減水機理或緩凝效果或品質穩定性等，所產生之總成效益，遂成為工程師們在選用之前，必須加以深思熟慮的。

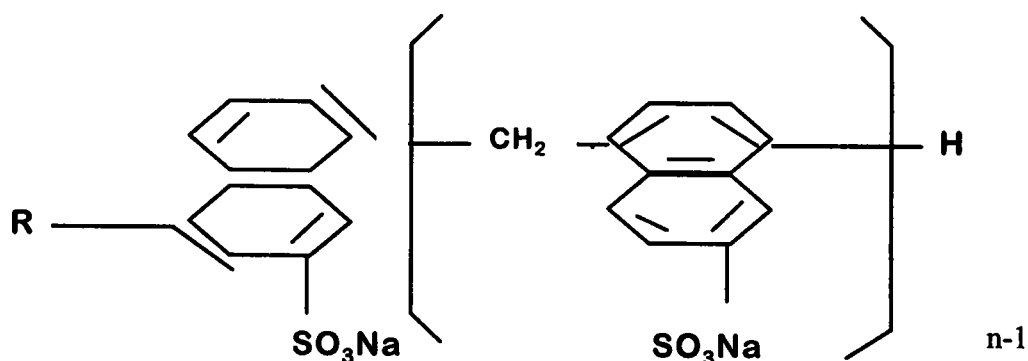
一般強塑劑化學成份，概分為：

- (一)變性木質素磺酸鹽類 (Modified Salts of Ligninsulfonates.; 簡稱MLS)



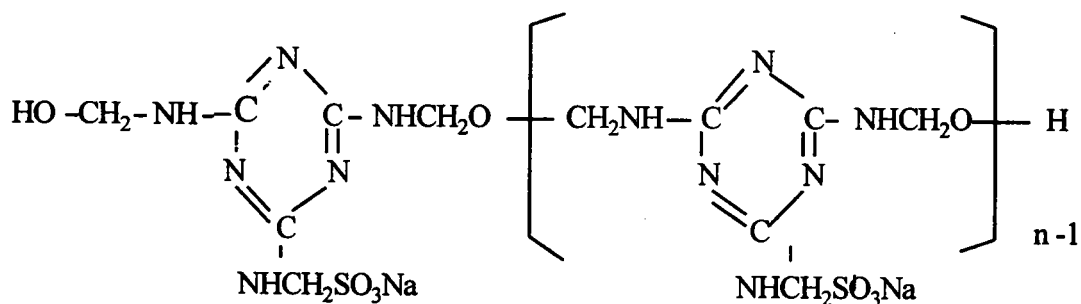
本項產品為生產紙漿或纖維漿的廢液，經生物發酵(Fermentation)再經中性化(Precipitation)析晶過濾所得產品。

(二) 萘磺酸甲醛縮合物 (簡稱 NFC ; Naphthalene Sulfonated Formaldehyde Condensates)



本項產品為芳香族磺酸鹽醛類縮合物，主要以萘磺化後與甲醛縮合而得的產品。

(三) 三聚氰胺與甲醛樹脂縮合物 (簡稱 MFC ; Melamine Sulfonated Formaldehyde Condensates)



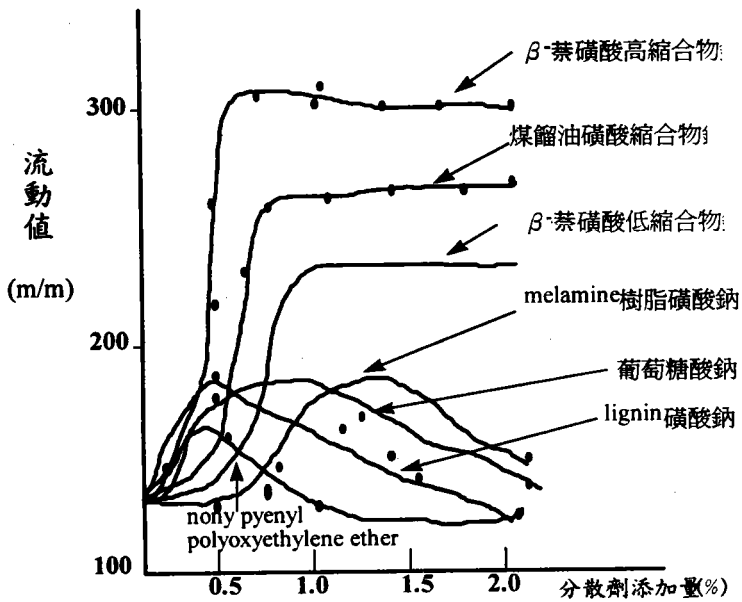
本項產品以三聚氰胺與甲醛經樹脂化(Resinification)聚合而得的產品。

(四) 其他酯類衍生物或可符合 ASTM C494 TYPE F.G. 要求者

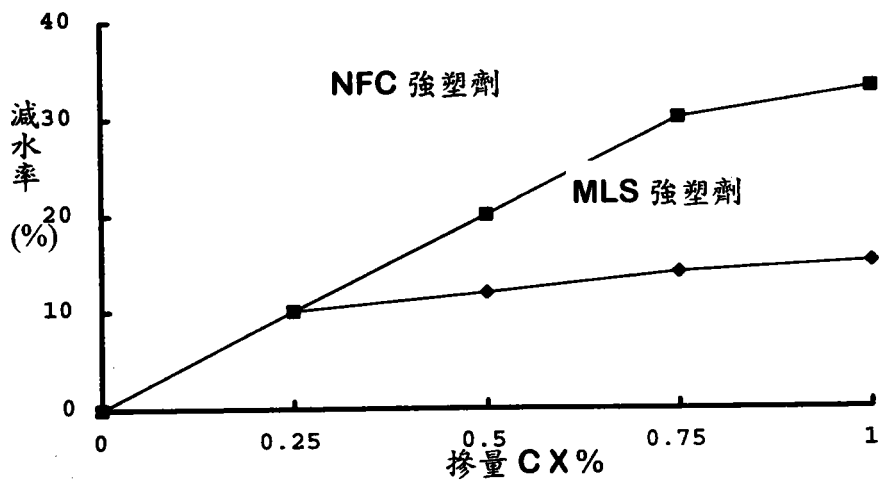
二、強塑劑的性能表現：

強塑劑的經典之作從 ACI 出版的 SP62、SP68、SP119 都清楚的記載著強塑劑不同種類之各項效能展現，如：

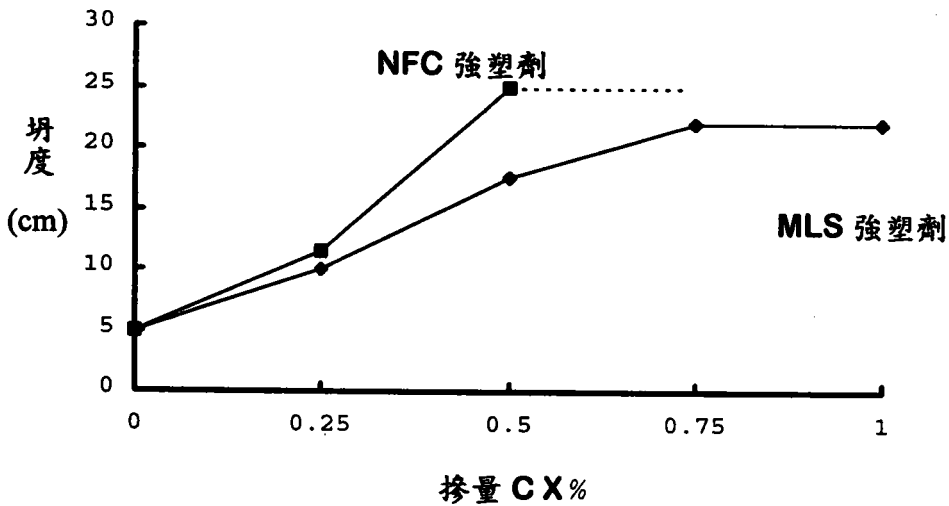
(一)對水泥分散的效果



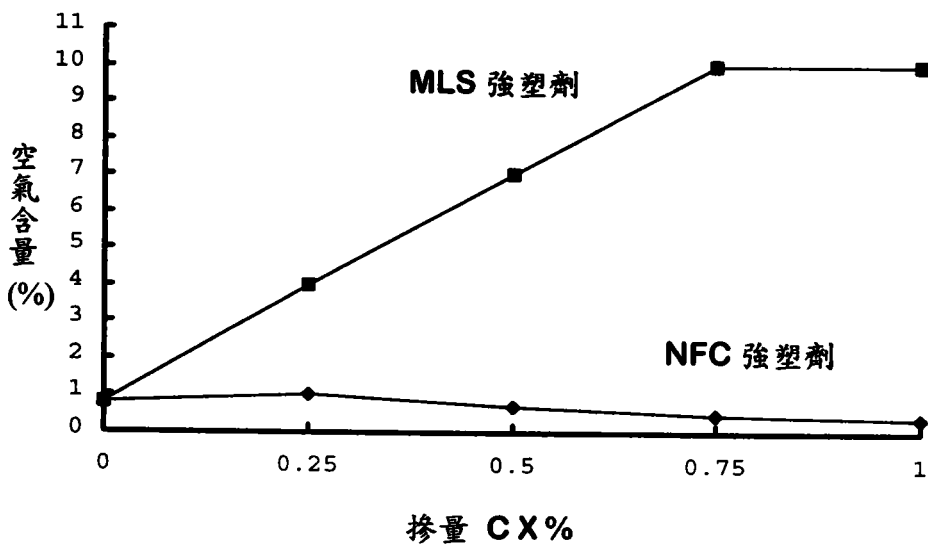
(二)不同劑型在減水效果上之比較



(三) 對新拌混凝土坍度效益表現

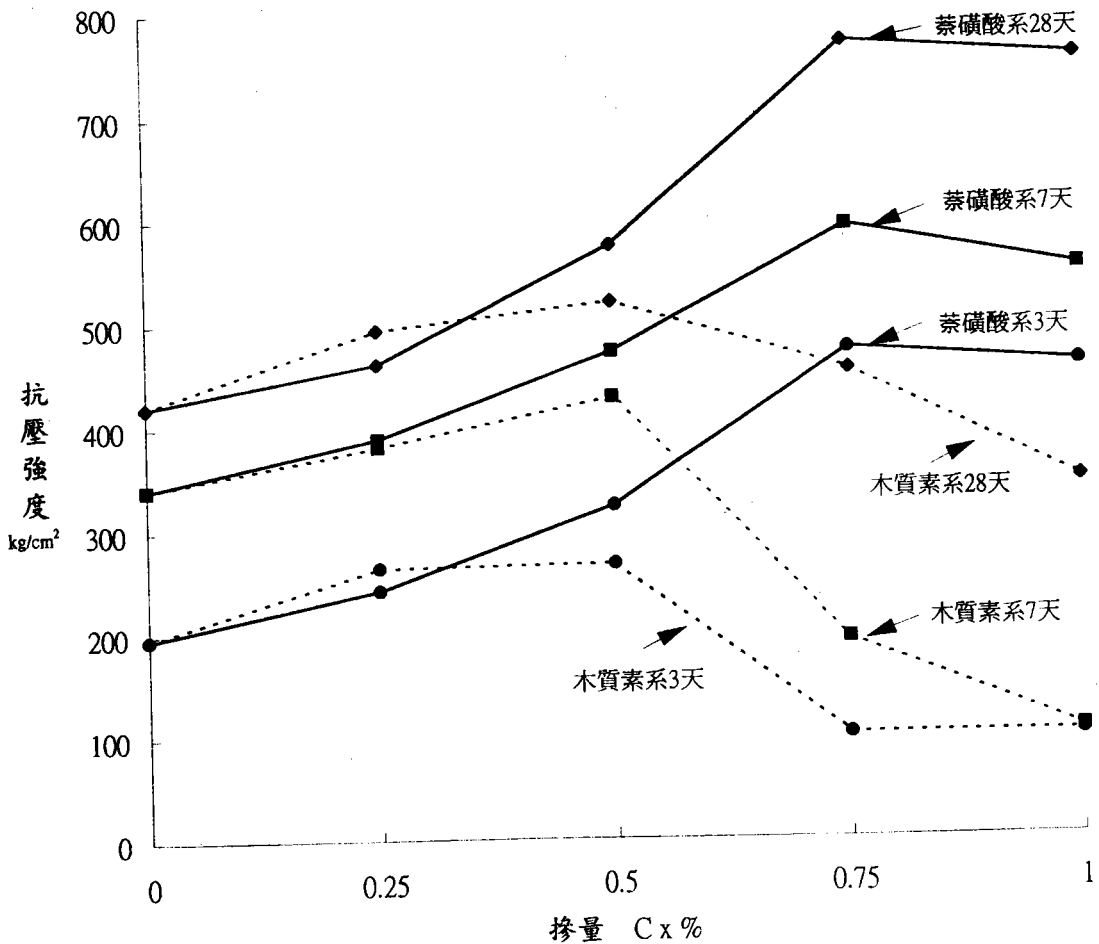


(四) 新拌混凝土中不同劑型之含氣量比較



(五)在相同坍度下不同劑型的強塑劑對強度品質之表現

化學摻料	添加量(%)	水灰比(%)	減水率(%)	坍度(cm)	空氣含量(%)	抗 壓 強 度		
						3天	7天	28天
基準組	0.00	39.0	0	5.7	0.8	192	343	424
萘磺酸系 (S/A=36.3%)	0.25	35.0	10	5.7	1.1	241	388	460
	0.50	31.0	20	4.7	1.3	322	471	574
	0.75	27.3	30	11.2	1.6	472	591	768
	1.00	26.0	33	4.4	1.7	457	550	753
木質素系 (S/A=34.3%)	0.25	35.0	10	4.6	3.1	263	380	493
	0.5	34.0	12	7.1	7.2	266	427	519
	0.75	32.9	15	9.1	8.6	不凝	192	452
	1	32.7	16	6.4	10.0	不凝	不凝	345



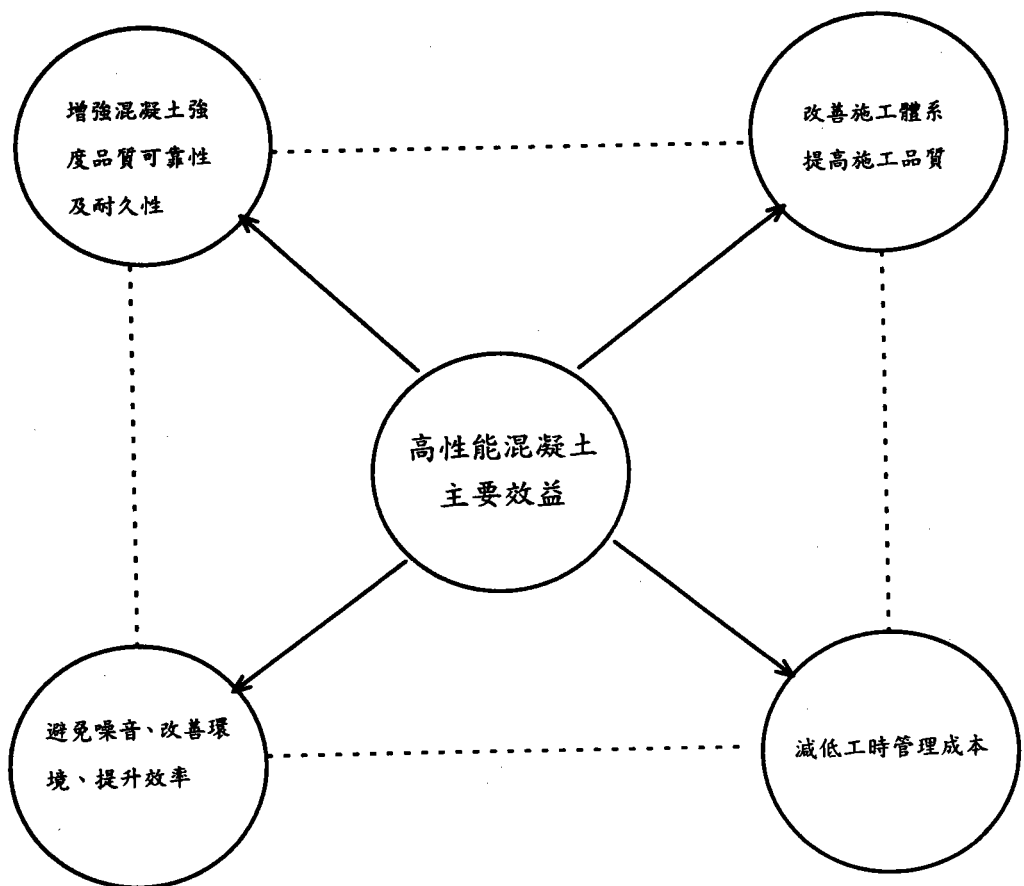
ASTM C494 — 82 對化學摻料之效能分類

摻料種類 物 性	A 型 減水劑	B 型 緩凝劑	C 型 早強劑	D 型 減水緩凝劑	E 型 減水早強劑	F 型 高性能減水劑	G 型 高性能減水 緩凝劑
用水量，最大值 (佔基準混凝土用水量%)	95	—	—	95	95	88	88
凝結時間，允許與基準混 凝土之差 (時：分)							
初凝	— 早 1:00 及 後 1:30 以內	後 1:00 以上 後 3:30 以內	早 1:00 以上 早 3:30 以內	後 1:00 以上 後 3:30 以內	早 1:00 以上 早 3:30 以內	— 早 1:00 及 後 1:30 以內	後 1:00 以上 後 3:30 以內
終凝	— 早 1:00 以上 及後 1:30 以內	— 後 3:30 以內	早 1:00 以上 —	— 後 3:30 以內	早 1:00 以上 —	— 早 1:00 及 後 1:30 以內	— 後 3:30 以內
抗壓強度，最小值 (佔基準混凝土強度%)(²)							
1 天	—	—	—	—	—	140	125
3 天	110	90	125	110	125	125	125
7 天	110	90	100	110	110	115	115
28 天	110	90	100	110	110	110	110
6 個月	100	90	90	100	100	100	100
1 年	100	90	90	100	100	100	100
抗彎強度，最小值 (佔基準混凝土強度%)(²)							
3 天	100	90	110	100	110	110	110
7 天	100	90	100	100	100	100	100
28 天	100	90	90	100	100	100	100
長度變化，最大收縮量 (兩規定可選用其一)(³)							
佔基準混凝土變化量%	135	135	135	135	135	135	135
超基準混凝土增加量	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
相對耐久性係數(⁴)最小值	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80

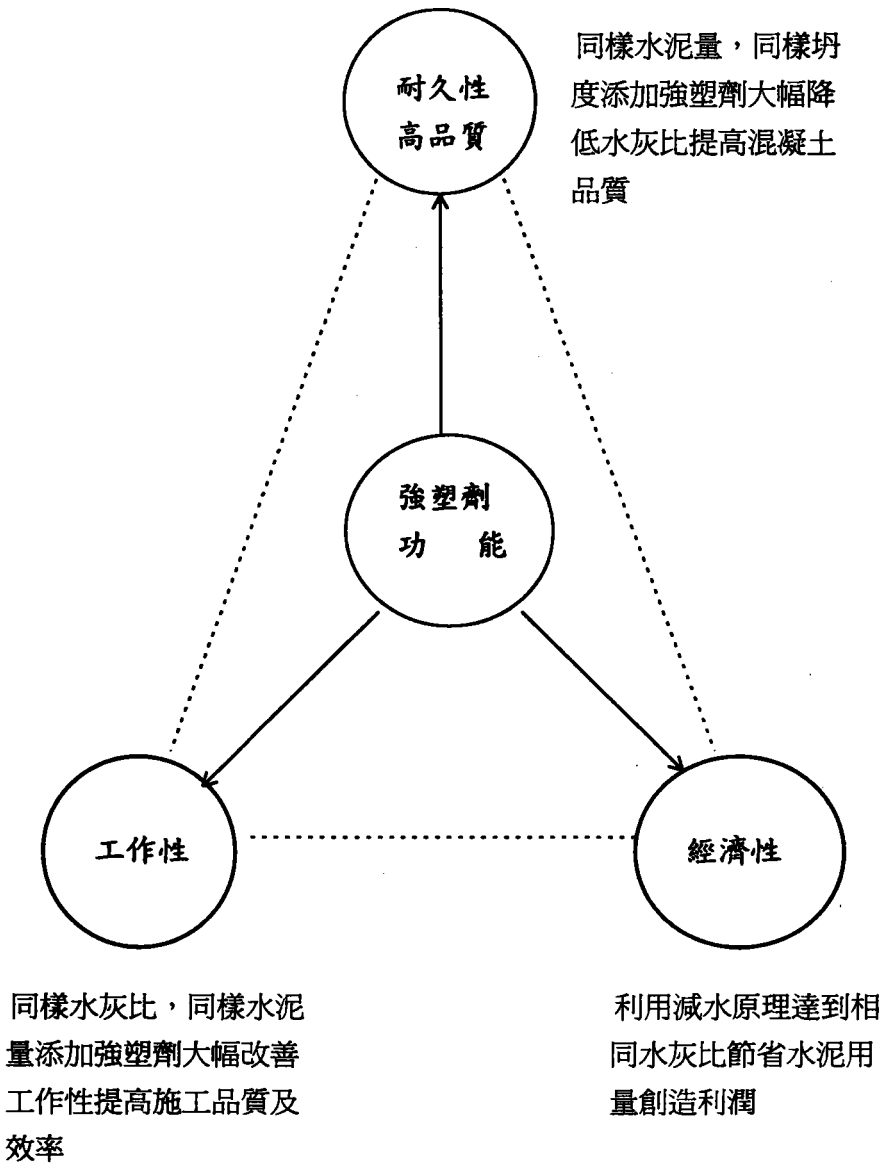
伍、強塑劑在高性能混凝土之應用

由材料成本觀點來看，高性能混凝土在初始的製造費用，確實比一般普通混凝土造價為高但其久長經濟性效益，卻可以從以下幾方面體現出來：1.改善施工性能。2.提高早期強度。3.提高結構物耐久性，延長壽命。4.降低施工費用，節省工時。5.提高力學性能，減少構件尺寸和斷面等。對整個混凝土建築土木工程而言，高性能混凝土是具經濟性、長久性和前瞻性的新材料(如圖)。而強塑劑在高性能混凝土效益表現上佔有重要地位，有加以詳述之必要。

使用高性能混凝土之效益



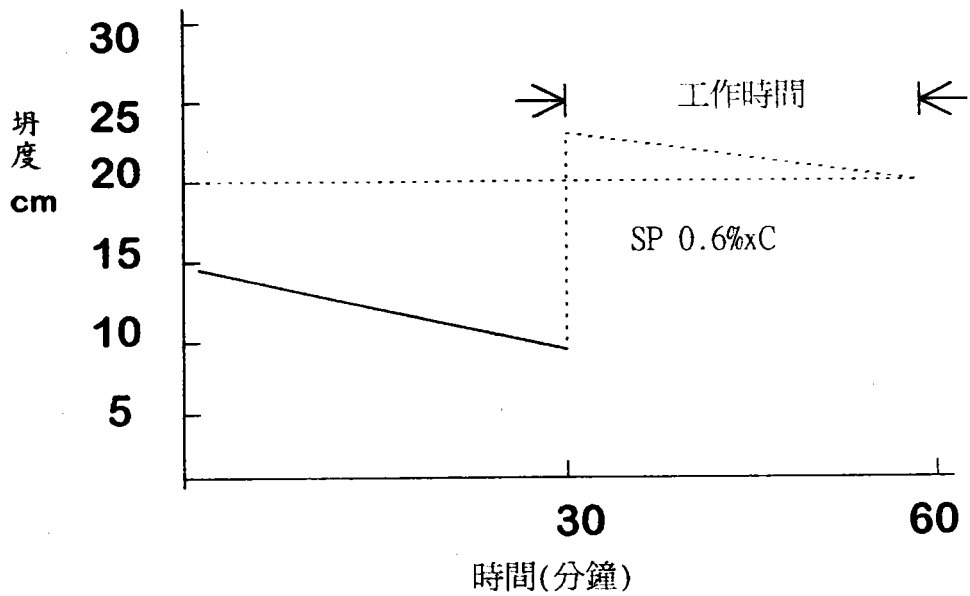
一、強塑劑之功能性歸納可分為三大功能



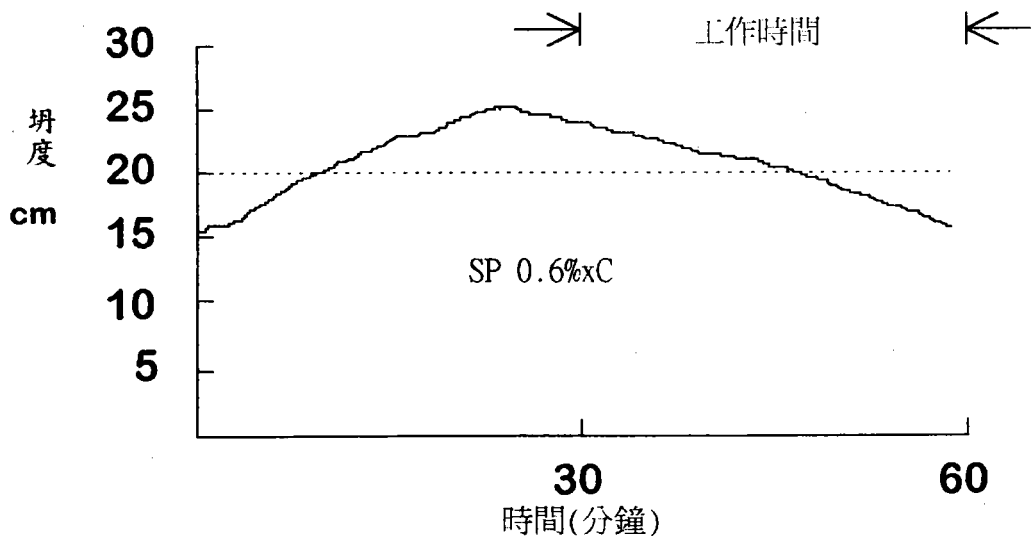
在強塑劑三大功能中，可視需要做單一或多種功能交互使用，然而在使用過程中，由於大量減水或減掉部份水泥或增加過高的分散流動效應將使得混凝土可能產生過多而不必要的沁水或其他不良物理外觀，因此在添加礦物摻料時，砂石比的細粒料調整時應予以考慮，以克服此一問題之產生。

二、強塑劑在控制坍度損失上之應用法則

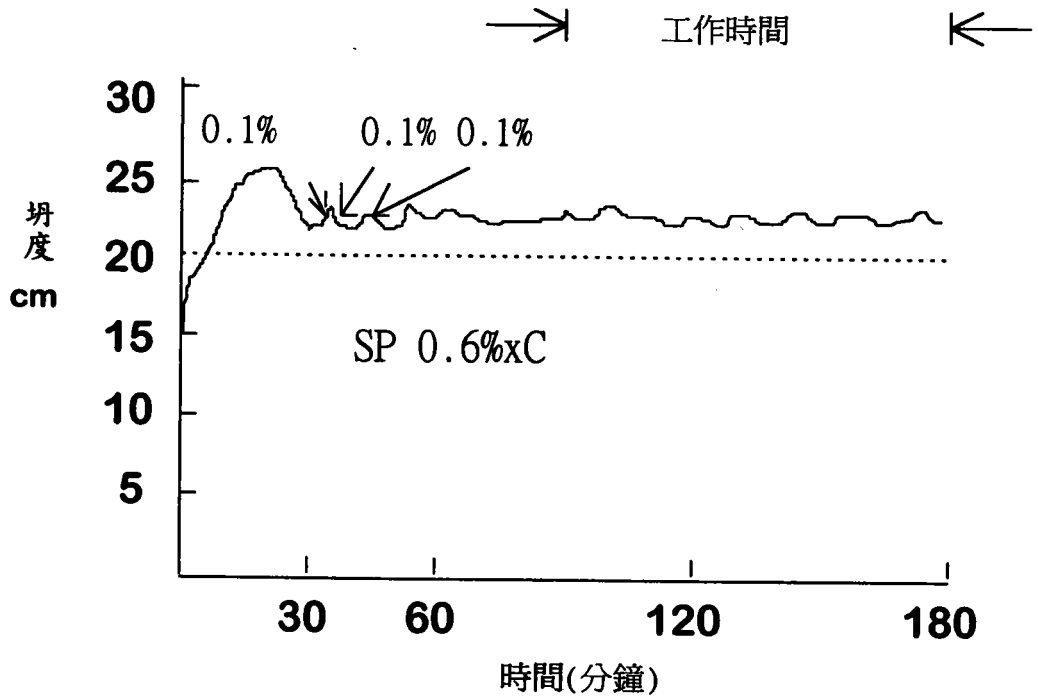
(一)現場添加方式



(二)拌合場出發前添加方式



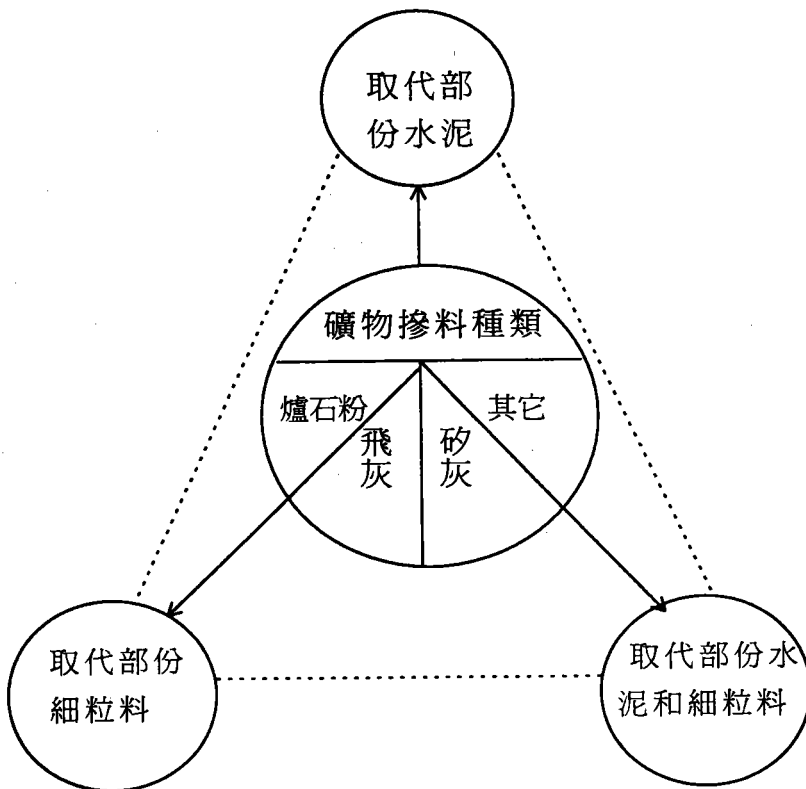
(三)重覆添加方式



三、礦物摻料在高性能混凝土之互動關係

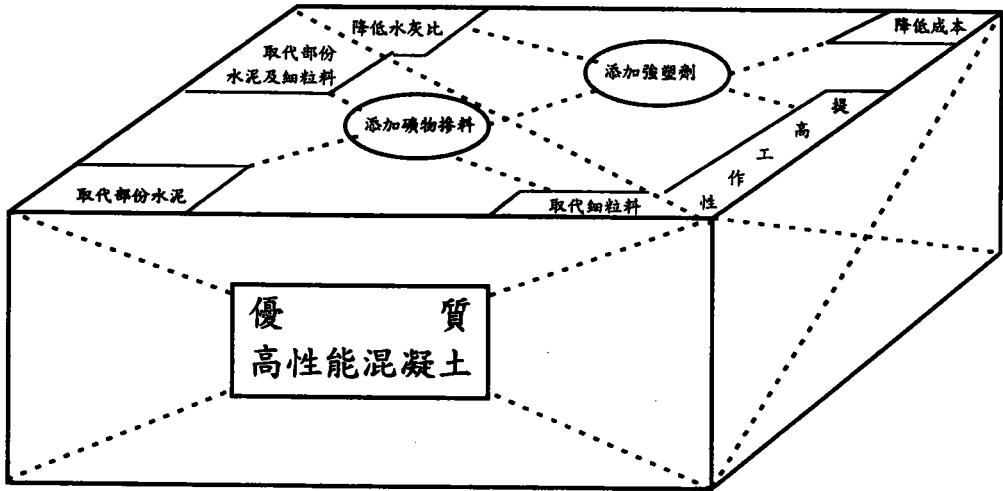
爲了降低因過多水泥用量所產生的過高水化熱、大量的乾縮等富貴水泥病。從微觀或環保觀念來看，良好的礦物摻料所產生的卜作嵐反應或資源再利用功能，已是高性能混凝土不可或缺之重要材料之一。

而礦物摻料歸納其功能，也可概分以下三大項

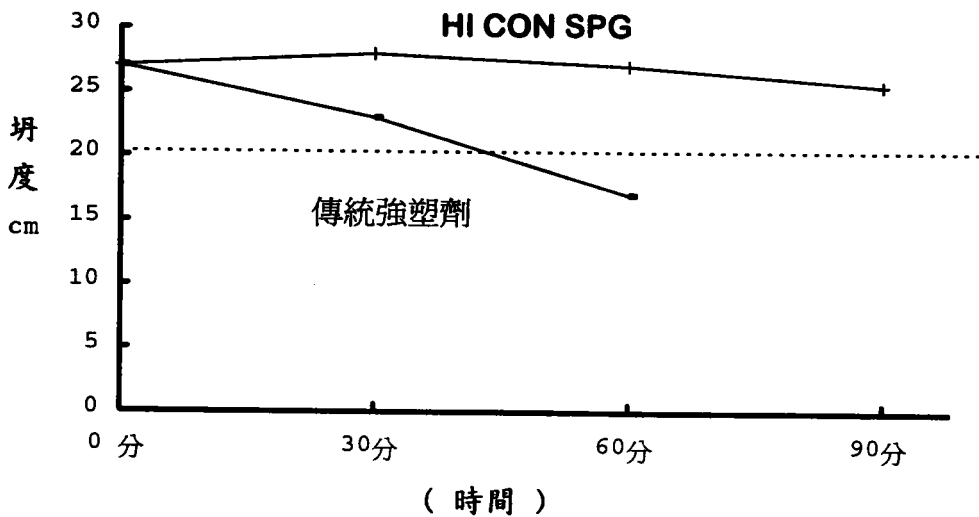


由於不同礦物摻料其特性表現也不一，添加在混凝土時也將改變混凝土新拌行爲，應將特別加以注意及品控。

四、強塑劑併合礦物摻料在高性能混凝土之技術應用



利用不同礦物摻料對水排斥及吸附現象，來加強對水泥水化過程的有效物理干預，再加上適當新型強塑劑（Slump Retention Superplasticizer）的應用，在特定時間內抑制水化反應速率，進而使高性能混凝土的坍度表現得以滿足在長時運輸及高揚程泵送特殊工程之需要。



陸、結 論

高性能混凝土由於材料組成及配合比計算較傳統混凝土複雜，雖然在近幾年的急速萌芽和發展過程中，仍不免遭受一些品質和長期耐久性的質疑，然而把一些傳統混凝土令人頭痛的問題，諸如過大的水化熱、急劇的乾縮、不良的工作性等，至少已在高性能混凝土中獲得解決。而化學摻料的添加，特別是強塑劑的應用，無論在安全性、耐久性、工作性，甚或經濟性的表現上，都給高性能混凝土品質標誌上，立下一個安全的保證。但對國內礦物摻料的品質不穩定(如飛灰)，進而影響強塑劑的功能發揮，對混凝土工程師而言，是應該加以統計和挑剔的。在必要的條件下加大安全的應用參數，才可確保高性能混凝土品質。

另外附帶一提的是，目前預拌市場的競價削價惡夢連連，等高性能混凝土普遍應用時，一種需要嚴謹而層層把關的高科技混凝土材料，是提升所有預拌品質的產製、研發、銷售條件，進而造福後代，還是.....我們應予以深思。

參考文獻

1. Concrete Chemical Admixture Summarization By Lu Chang etc.
2. Performance & Application of Concrete Admixture By Sui Lun Jun.
3. Theory & Tech Application of Concrete Admixture By Chang Kun Lun
4. Concrete Admixture Handbook Properties, Science , By V .S. Ramachandran & Technology
5. Guide and Application of Concrete Admixture By Hwan Da Learn
6. Experiences with Superplasticizers Application By Dr. Hattori

- 化學摻料在高性能混凝土工程之應用 -
- 周文宗 -

波索蘭材料對高性能混凝土（HPC）性質之影響

彭耀南* 吳東昇**

關鍵詞：高性能混凝土、波索蘭反應、飛灰、早強、波索蘭材料、抗壓強度

摘 要

高性能混凝土基本上仍由水泥、粗、細骨材（粒料）及摻料所組成，惟其性能比傳統混凝土優異，其中原因很多且會產生交互影響，但還是有一系統及機理可循。本文從國內、外有關高性能混凝土之相關文獻及成果中歸納出主要影響機理並評估各材料及配比之優劣，再據以設計出一配比進行模擬實驗。實驗結果顯示添加波索蘭摻料之高性能混凝土用傳統3000 psi混凝土之水泥量可拌出坍度達23cm，抗壓强度高於8500 psi之高性能混凝土。且澆灌24小時後抗壓強度即高於2100 psi，此對企求早強效能之橋樑節塊推進工法、滑動模板工程與預鑄工程非常適用，另對現今營建工程常於澆灌混凝土隔日其強度仍低即拆側模或於直上層樓板上堆置鋼筋等重物而引致混凝土之微龜裂及其他品質劣化方面更具貢獻性，故可進一步研發以供業界使用以提昇工程品質及節省自然資源。

壹、前 言

樓層日漸高層化，欠缺良好強度及工作度之普通混凝土已無法滿足結構設計上之需求；故高強度混凝土因應而生，然為求高強度及良好工作性，傳統上以增加水泥用量來達成，但水泥用量劇增不但增加高成本且會產生水化熱及乾縮、潛變量高...等缺點。如要克服此缺點，就得減少用水量，其結果又會使工作性變差，實難兩全其美；有鑑於此，

* 國立交通大學土木工程研究所教授

** 中國工商專校建築科副教授

具高強度及工作性度之高性能混凝土 (High Performance Concrete ; H.P.C)，遂成從事此方面專家學者戮力追求之目標^(1,2)。近年來美、日、加、法、德、奧....等國投入許多人力、物力從事此方面之研發，且技術已趨成熟階段，我國亦於民國 82 年 3 月，經中華民國結構工程學會理監事會議決議通過成立『高性能混凝土委員會』以發展高性能混凝土科技⁽³⁾。兩年來各大專院校已獲得許多成果。

高性能混凝土仍屬混凝土之一種，基本上係由水泥、粗、細骨材（粒料）及摻料所組成，ACI 對高性能混凝土的配比設計觀念係以工作性、強度、耐久性及經濟性之順序來考量⁽²⁾。中華民國結構工程學會之高性能混凝土委員會依據 HPC 之特性則另有定義⁽⁴⁾。

可能因高性能混凝土乃為改善高強度混凝土（定義為抗壓強度大於 6000 psi）不良性之衍生產物，因此大部分人於觀念上都認為高性能混凝土即為優良性能之高強度混凝土^(5,6)；但以此作為高性能混凝土之全部觀念有失偏狹。因工程情況及要求條件不同時，對高性能混凝土之需求亦會產生程度上之差異；意即高強度並非高性能混凝土之必要條件。基於此觀念，較周延之高性能混凝土定義應指：在相同成本條件下或符合使用者要求之性能，無論在新拌或硬固階段，其性能皆比傳統混凝土為佳即可稱之。

貳、高性能混凝土使用之材料及反應機理應用

二十餘年前即有將高性能混凝土應用於水塔、橋樑及建築物上之成功案例，見表一⁽¹⁾。另從表二、三知其配比中之基材仍以水泥、水及粗、細骨材為主，但是配比模式、骨材強度、粒徑和用水量則有別於傳統混凝土；此外，摻料是高性能混凝土中必備且最重要之材。茲分述如下：

一、高性能混凝土摻料種類

(一)波索蘭材料：含爐石（高爐熟料）、飛灰、矽灰及稻殼灰及天然波索蘭材等，前三種使用者眾，於配比設計中有人只選其一摻用，亦有同時使用兩種甚而三種皆摻之情況。但稻殼灰及天然波索蘭材則較少人用。

(二)化學藥劑：強塑劑、緩凝劑、減水劑、及輸氣劑。

二、水泥種類及用量

高性能混凝土所採用之水泥種類各國雖稍有差異但仍以波特蘭水泥 Type I 為多，細度則要求比一般者細。從表一~三 中可知水泥用量，大致可歸納為以下兩種情況，如每 1M^3 混凝土水泥用量為 425- 530kg 時，則多半配合 40 - 70kg 之矽灰或稻殼灰摻料；如水泥用量為 350kg 左右時則多半配合 100kg 以上之飛灰或爐石。

三、骨材影響

骨材在混凝土中雖扮演填充材角色,但就高性能混凝土常要求之經濟性、工作性、耐久性及強度卻息息相關，例如，粗骨材粒徑愈大則愈經濟，但是粗細配比不當會影響工作度，間接則導致蜂巢現象及孔隙變大，強度自然差；如採用會產生鹼-碳酸鹽類反應或健康差之骨材則對耐久性及強度影響甚劇。又骨材之吸水率、形狀、表面紋理、潔淨度亦對工作性及強度會有所影響，惟因一般常用之粗骨材吸水率皆小於 3 %，又台灣骨材已日漸枯竭，圓形天然骨材更是少見，故混凝土預拌廠也只能選用貨源較穩定較經濟潔淨（雖含許多破碎過程產生之石粉但基本上少有污染物）之碎石，基於此，在拌合高性能混凝土選用粗骨材時骨材之吸水率、形狀、表面紋理、潔淨度常被列為較次要之考量因素。從國內外文獻瞭解，每 1M^3 高性能混凝土所用之粗骨材量約 980 -1150kg 與普通混凝土差不多，但是細骨材用量則視波索蘭摻料使用量之多寡及使用者之配比觀念而異；國內部份學者採以摻料取代細骨材之配比觀念則其細骨材用量約 550 - 750kg/ M^3 ，歐洲則用 700 - 800kg/ M^3 。至於級配方面因文獻中很少有篩分析資料，故無法作歸納分析，惟有學者認為高性能混凝土所用之膠結材較多，故骨材間漿量足裕，細骨材顆粒限制較小，但細度模數 (FM) 為 3.0 的粗砂總表面積較小，較不會與量大顆粒小之膠結材爭水分⁽⁷⁾，對工作性及表面粉刷有所助益。另因同體積情況下，砂之總表面積比粗骨材大，故細度及吸水性對混凝土之總用水量之影響亦比粗骨材為大應列為選用之重點考慮。

四、綜合以上高性能混凝土之文獻資料及材料特質可歸納出其配比策略及原理：

(一)新拌階段

1.良好工作性策略：

添加強塑劑、減水劑或輸氣劑等化學藥劑及適量之水。骨材級配要佳，粗骨材最粗粒徑不要超過 $3 / 4"$ ，細骨材宜選用細度模數 (FM) 約 3 者；及利

用飛灰、矽灰等圓形顆粒之球承特質以增漿體之流動性。

2. 不泌水、骨料不析離策略：

漿量需足夠，添加飛灰及稻殼灰可減少泌水。添加強塑劑、減水劑或輸氣劑等化學藥劑，使用水量少至無水可泌。

3. 水泥用量比傳統混凝土省策略：

最佳骨材級配使其間孔隙率最小；添加強塑劑使水泥及骨材表面產生因電斥性，如此一來會使水泥顆粒不致結團而均佈於骨材間，且骨材表層漿體厚度也會變薄，水泥用量自然可減至最少。如再添加飛灰及稻殼灰等波索蘭材料以增漿體量，並利用波索蘭反應使水泥發揮最大效能，水泥用量自然可比傳統混凝土省。

4. 坍度損失少，工作延時策略：

以選擇品質穩定之 G 或 F Type 強塑劑摻用最為方便可行，目前台灣較大之強塑劑供應商，皆有能力提供拌合 45 分鐘後坍度損失在 3cm 以下之藥劑；另添加稻殼灰、飛灰使水泥用量減少對工作延時有不錯之效果。

(二) 硬固階段

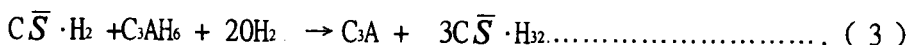
1. 具早強性能策略：

用細顆粒或早強水泥，但會增加成本及引起乾縮龜裂之缺失；添加飛灰、稻殼灰、矽灰、游離石灰 (CaO) 或在強塑劑中加入促使飛灰及早產生波索蘭反應之化學元素。強塑劑之分散作用使水泥分佈更均勻及顆粒表面更加暴露，促使早期水化作用更快更完全。

2. 強度高、彈性模數高、韌性高、水密性及耐久性 (耐磨、耐風化、耐化學侵蝕及耐高溫性等) 俱佳策略：

基本上強度、彈性模數、水密性及耐久性有一致之關係性，即強度高之混凝土其彈性模數、水密性及耐久性亦佳，但並不一定成等比關係，尤其是彈性模數，因高性能混凝土為求高工作性會選用較細、較少之粗骨材，以致其彈性模數比一般高強度混凝土差，而彈性模數於結構設計上屬一非常重要之條件，故在級配設計上仍應將此列為主要設計因子；以材料之物理行為言，密實堅硬之物多屬脆性材質，其韌性相對皆差。要求強度高且韌性俱佳之混凝土難度很高，只能求一最佳之平衡值做配比設計，但觀念上應遵循粗骨材需硬、需多 (每 1 m³ 混凝土粗骨材量宜在 990kg 以上)，因而造成之坍度損失可以增加強塑劑劑量補償。至於韌性則以添加稻殼灰、飛灰、高分子聚合物或其它韌性材料補

強。耐久性方面，因混凝土化學侵蝕以硫酸鹽 (MgSO_4 及 Na_2SO_4) 侵蝕為主，其反應機理如下：



由 (1)、(2) 式產生之 $\text{C}\bar{\text{S}} \cdot \text{H}_2$ 體積比 CH 大 2 倍，如又與 C_3A 之水化物 C_3AH_6 發生反應產生 $3\text{C}\bar{\text{S}} \cdot \text{H}_2$ 如 (3) 式，體積又會膨脹 2 倍，導致水化固體龜裂，當然外物則易由此裂縫侵入而使耐久性變差，故防治策略有二：其一為藉波索蘭反應先消耗掉 CH，使硫酸鹽無法與 CH 發生反應，自然不會生成 $\text{C}\bar{\text{S}} \cdot \text{H}_2$ ；另一為減少 C_3A 之水化生成物 C_3AH_6 ，即用 C_3A 含量低之水泥，兩種方法以前者較為方便有效；高緻密性以利用波索蘭反應機理將漿體中之氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 轉化為 C-S-H 膠體來填滿膠體間之孔隙最為有效。

3. 不龜裂，乾縮及潛變量少策略：

除控制前述之龜裂、體積變化因素外以減少水泥用量及用水量最為有效。

※ C = CaO A = Al_2O_3 S = SiO_2 M = MgO H = H_2O
N = Na₂O $\bar{\text{S}}$ = SO_3 CH = $\text{Ca}(\text{OH})_2$ C-S-H = C-S-H 膠體

參、配比設計

由前述分析瞭解，高性能混凝土配比基本上應以波索蘭材料、強塑劑或減水劑做為控制基材；以最佳骨材堆積獲致最少漿體量以減少水泥用量及防止乾縮、潛變及龜裂。波索蘭材料則採用稻殼灰及飛灰，而不採用矽灰及爐石，其理由如下：

一、稻殼灰有三大優點：與水泥漿一接觸即發生波索蘭反應及水化熱低之特質，此

不但可獲得早強效能且無一般採用早強劑時水化熱高之缺點，另可讓混凝土強度持續發展至 90 天後，對終期強度極有貢獻⁽⁸⁾。

二、飛灰：經濟、增加膠體量、俱球承效應可增加工作性、顆粒小可取代部份用砂不但可使骨材堆積更緻密，且因填塞微孔可改善骨材表面之弱界面區，間接會提高強度及水密性。

三、不採用矽灰之理由：一為在台灣矽灰因全仰賴進口，每公斤約 22-25 元，比其它波索蘭材料貴故不符經濟原則；另據文獻⁽⁹⁾矽灰混凝土耐高溫性不佳，當燒溫至 300 °C 會有爆裂情形。

四、不採用爐石之理由：高爐爐石之成份依 CaO - SiO_2 - Al_2O_3 三相座標圖分類偏於 C_2S 區⁽¹⁰⁾，當其直接浸泡在水中時，除非有外來之氫氧化鈣或硫酸鹽侵蝕，否則多半不會產生明顯之反應⁽¹¹⁾且低水泥用量時較易產生骨料析離；據文獻⁽¹²⁾實驗結果顯示，添加爐石混凝土試體受 600 °C 燒溫解熱回復後會產生崩解現象，摻飛灰者則情況良好。

五、決定每 1M³ 高性能混凝土所用水泥用量採用 450 kg 以下；稻殼灰為水泥用量之 10- 20 % ；飛灰為水泥用量之 20- 60 % 。

六、設計程序：

- A. 決定膠結材用量：450- 500 kg (水泥用量 + 稻殼灰用量 + 飛灰用量)。
- B. 決定水膠比 (0.35- 0.45)。
- C. 計算出膠體量。
- D. 計算出骨材量。
- E. 以坍度值 $25 \pm 2\text{cm}$ 為基準，試拌方式調整強塑劑添加量。
- F. 由骨材篩分析及最佳堆積試驗資料決定粗、細骨材比 (細骨材：粗骨材 $\cong 4 : 6$)。

肆、添加稻殼灰-飛灰高性能砂漿及混凝土 (R - F HPC) 分析與檢討

一、影響新拌效能之因素：

儘管依表六所示之混凝土之水膠比很低 (約 0.4)，但只要控制得當其坍度可達 20cm 以上。惟拌合時發現其敏感度很高，如控制稍有差池即產生兩極化之結果，此亦表示日後如預拌廠欲依此配比進行生產時，在品控方面必須非常嚴謹，相對設備及管理成本亦比傳統為高。

另由實驗得知，用水量、拌合下料順序及拌合各階段拌合機拌合角度影響拌合效能最大。分述如下：

- (一)用水量：於實驗室拌合時每次拌合 24 個 $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 試體，用水量約 29kg，在該配比乾、濕臨界需水量時，調整 1 / 250 之水量就可將一混凝土由近零坍度轉變成 24cm 之高坍度。
- (二)拌合下料順序：依 ASTM 傳統混凝土拌料方式係將所有材料先行乾拌均勻後再加水拌合。理論上如不加強塑劑時，水泥完全水化水需 0.28，加上孔隙水約需 0.14，故基本總用水量最少需 0.42，但本配比 (粗、細骨材皆以完全烘乾處理而非外乾內飽和狀態) 水膠比約只 0.4，故屬低用水量狀況，如依上 ASTM 規定拌合將導致結團之狀況，另有文獻言：先拌合 2- 3 分後再添加強塑劑效果最佳，有此論者，以化學反應理論推論是為合理；依實驗結果所知，先行造漿後再將粗骨材置入比將所有材料先行乾拌均勻後再加水拌合之傳統拌料方式效果佳，而造漿過程需將設計之強塑劑用量與水一次拌勻後全部倒入拌合機中，不可倒一半量或 2 / 3 量俟倒入水泥及飛灰、稻殼灰等膠結料後再將剩餘水分次加入，否則亦會產生結團情形；在此情況下雖可再加水或強塑劑打散結團部份，不過如採加水模式俟結團變勻之同時泌水骨料析離亦隨之而生其硬固後耐久性及強度當然會變差，如採加強塑劑模式其硬固後耐久性及強度雖不致有太大影響但因多用強塑劑之故除了會增加成本外黏滯性 (Viscosity) 亦會變大而使工做性變得較差。
- (三)拌合機拌合傾角：雖然實驗用之拌合機符合 ASTM 標準，但因屬小型 (一次拌合量約 0.05M^3)、簡易拌合槳型，其拌合效能比不上一般新型預拌廠所採用之平盤強制式拌合機，故拌合時除應保持機軸、拌合槳及筒壁之潔淨外並應隨各階段拌合漿料之情況，調整拌合機之角度，方能獲致最佳拌合效果，否則雖然相同配比其拌合所得結果卻差異極大。

二、水泥用量之影響

以本實驗所用骨材級配，最少漿體量約 0.35，坍度控制為 23cm，如將減少之

水泥量以飛灰補足，則除每 M^3 混凝土用量 250kg 水泥組外，其它配比組之終期強度則無明顯差異，意即除前 3 天之強度發展，水泥用量 250kg 組比不上 350kg 組外，其後並無太大差別，亦即摻波索蘭材料及強塑劑組其水泥用量 275 - 350 kg/m^3 時強度發展及終期強度差異不大；但未添加摻劑組雖然水泥量高達 350 kg/m^3 非但無早強效能，其終期強度甚至不如 250 kg/m^3 摻劑組，見圖一；此亦可證明飛灰對強度之貢獻不比水泥差，用稻殼灰補填飛灰早期強度之缺失可行，惟稻殼灰量應考慮總膠料之鈣矽比，即水泥之鈣含量與稻殼灰加飛灰中矽含量三者之關係。經實驗證明稻殼灰量應用水泥量之 8-15 % 為宜。使用量太多相對水泥量或飛灰量必然減少之情況下，不但不經濟且會使水化機能衰減，早強效能及整體強度發展亦受嚴重影響。

三、強塑劑劑量、稻殼灰灰量之影響

經輔以水泥用量:砂用量 = 1: 2.75， $W/C = 0.5$ ，強塑劑量採添加水泥用量之 0%、1.14%、2%，不加稻殼灰與飛灰。實驗結果顯示：對流度稍有影響但對強度卻無明顯影響，見圖二。強度發展方面，添加強塑劑組與未添加強塑劑組相同，且於齡期 28 天後強度即不再發展，此顯示如採相同水灰比且不加其它波索蘭材料時，增加強塑劑劑量只對工作性有所助益，對強度言並無貢獻。但如飛灰及水泥定量，稻殼灰量用水泥用量之 5%、10%、15% 及 20%，強塑劑劑量用 1.14%、2% 及 2.5% 進行交互實驗結果如下，見圖三~六：

- (一) 稻殼灰量用 5%， $W/B = 0.41 \sim 0.39$ 時，則 S.P 用量低於 1% 時，早強效能稍差，且用水量及強塑劑量會明顯影響終期強度，即用水量愈多，強度愈差，S.P 2% 比 1% 終期強度高約 $90 kg/cm^2$ ，但劑量增至 2.5% 時，除會改變低水膠比組 ($W/B = 0.37$ 組) 之流度外，終期強度並不比 S.P 用 2% 組高，故如欲採用添加 5% 稻殼灰量者，則 W/B 宜用 0.39，S.P 用 2%，才能獲致最佳效能。
- (二) 如稻殼灰量用 10%，S.P 用量 1%， $W/B = 0.41$ 組雖然終期強度與 $W/B = 0.40$ 組相近，但卻無 $W/B = 0.40$ 組之早強效能。而 W/B 低於 0.40 時，除非 S.P 用量加至 2.5% 以上，否則會太乾致工作度極差，故添加 10% 稻殼灰量者，如考慮高工作度、早強、終期强度高及經濟性之最佳效能，宜採用 $W/B = 0.40$ ，S.P 用 1% 之配比。又無論何種配比或添加多少劑量之強塑劑，在強度發展過程中皆有某階段強度發展快後會停頓一段時間，然後再發展之現象。
- (三) 如稻殼灰量用 15%， $W/B = 0.40$ 組，S.P 用 1% 或 2% 皆可獲致良好之流

度， $W/B = 0.38$ 組，S.P 則必須用 2% 以上才有好的工作度。強度發展方面，齡期 3 天時，強度即發展至 300 kg/cm^2 左右，故具早強效能。惟其終期強度與添加 10% 稻殼灰量組相差不多，故就經濟性評量其效能不如 10% 稻殼灰量組。

(四) 添加 20% 稻殼灰量組與 10% 組比較，可發現 20% 稻殼灰量組其 14 天強度只達 10% 組 7 天強度，且 3 天強度只達 245 kg/cm^2 左右，早強效能稍差，強度發展方面，硬固後即成穩定發展，齡期 28- 56 天時，強度增加較為明顯，強度發展過程不似添加稻殼灰 5 及 10% 組般會有某階段強度發展快後，停頓一段時間，然後再發展之現象。當稻殼灰添加至 20% 時，水膠比之高低及強塑劑添加量之多寡，對終期強度之影響即不太明顯。

伍、結論與建議

- 一、強塑劑及波索蘭材料是製造高性能混凝土必要之材。
- 二、高性能混凝土拌合過程比普通混凝土敏感，故在品質控制上技術性較高。
- 三、拌料程序影響坍度甚巨，需先行造漿再放粗骨材，否則會徒增水泥或強塑劑用量，不然只得增加用水量，如此將無法獲致高強度、高性能。
- 四、為求最少用水量仍有良好之工作性，粗骨材宜較普通混凝土細（最大粒徑應小於 $3/4"$ ）細骨材宜較普通混凝土粗（ $FM \approx 3.0$ ）。
- 五、因抗壓強度 8000 psi 以下係由漿體控制，以上則由骨材控制，故如抗壓強度要求在 8000 psi 以上時，骨材強度宜慎選，試驗結果頭前溪石無法達 10000 psi，大安、大漢、裡港等溪石可用。
- 六、如每 M^3 混凝土水泥用量控制在 300kg 以下， W/B 在 0.39 以下，則強塑劑用量在 10kg 以下時，欲獲致 23 cm 以上之坍度較難，劑量用 16 kg 以上時則非常容易，惟目前 G Type 強塑劑市價約 26 元，如多用 6 kg，成本約增 156 元，此倒不如增加水泥量。
- 七、稻殼灰用量以不超過水泥用量之 15% 為度，超過所增強度有限，不符經濟效益。
- 八、混凝土中添加稻殼灰及飛灰其經濟性、工作性、早期強度及終期強度皆符高性能混凝土之要求，固非常值得推展至實務界。
- 九、混用多種波索蘭材與水泥水化之微觀結構及反應機理、物化性需再深入研究，尤其再加入矽灰或爐石後之彈性模數及其他效能方面。

十、漿體比、骨材堆積孔隙、骨材尺寸及表面紋理、級配等，彼此間之相互關係及反應機理需再深入探討。

參考文獻

1. Aitcin, P. C., and A. Neville, High Performance Concrete Demystified, ACI Concrete International, 15(1), ACI, Detroit pp.21-26, 1993。
2. Kosmatka, S. H., and W. C. Panarese, Design and Control of Concrete Mixtures, 13th ed, Portland Cement Association, 1988。
3. 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。
4. 陳振川, 高性能混凝土規劃與推動, 高性能混凝土 (HPC) 研發及應用研討會論文輯, PP.3-4, 1994。
5. ACI 363, The State of the art Report on High Strength Concrete, American Concrete Institute, ACI J. Proceedings, pp.364-411, 1984。
6. ACI 211.4R., Guide for Selecting Properties for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash, ACI Material J., 5- 6, PP. 272- 283, 1993。
7. 王和源, 蔡聰誠, 林豐益及黃兆龍, T & Tower 高性能混凝土配比與骨材堆積關係, 飛灰及爐石應用研討會, 中央大學, PP.13-28, 1994。
8. 吳東昇, 稻殼灰物化性分析及最適燒結狀況對水泥水化特性之影響, 崇德書局, 1989。
9. Sellevold, E. J., Condensed Silica Fume in Concrete : A World Review. International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete Montreal, may 4-5, 1987。
10. Lea, F. M., 「The Chemistry of Cement and Concrete」, 3rd Edition, Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 1970。
11. Mehta, P. K., and P. M. Monteiro, 「Concrete, Structure, Properties, and Materials」 2nd ed., Prentice Hall Englewood Cliffs, 1993。
12. 朱金元, 含波索蘭材料水泥漿體/砂漿高溫延時與解熱回復性質之研究, 台灣工業技術學院營建工程技術研究所碩士論文, 1994。

表一 典型高性能混凝土配比表⁽¹⁾

Mixture		1	2	3	4	5
Cement *	kg/ m ³	505	451	500	315	513
Fly Ash	kg/ m ³	60	-	-	-	-
Slag	kg/ m ³	-	-	-	137	-
Silica fume	kg/ m ³	-	-	30	36	43
Water	kg/ m ³	195	165	135	145	130
Fine aggregate	kg/ m ³	630	745	700	745	685
Coarse aggregate	kg/ m ³	1030	1030	1100	1130	1080
Superplasticizer	L / m ³	-	11.25	14	5.9	15.7
Water Reducer	m L / m ³	975	-	-	-	-
Retarder	m L / m ³	-	4.5	1.8	-	-
W/B=(c+p)		0.35	0.37	0.27	0.31	0.25
f'c at 28 day	(kg/cm ²)	65	80	93	83	119
f'c at 91 day	(kg/cm ²)	79	87	107	93	125
1- Water Tower Place, Chicago(1975)		4 - Scotia Plaza, Toronto(1987)				
2- Joigny Bridge, France(1989)		5 - Two Union Square, Seattle(1988)				
3- La Laurenticenne Building, Montreal(1984)						

表二 歐洲、加拿大高性能混凝土配比表

Mixture		Germa			France		Canada					
		B85	B100	B125	1989	1993	1984	1987	1993 【1】			
Cement	kg/ m ³	455	450	450	451	1080	500	315	450*	168*	228*	365*
Fly Ash	kg/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95
Slag	kg/ m ³	-	-	-	-	-	-	137	-	320	183	-
Silica	kg/ m ³	30	45	45	-	334	30	-	-	54	45	-
Water	kg/ m ³	163	138	128	165	167	135	145	127	128	131	129
Fine	kg/ m ³	798	831	840	745	813	700	745	815	730	800	810
Coarse	kg/ m ³	918	937	1008	1030	-	1100	1130	1100	1100	1100	1115
Superplasticizer	L	6.8	16.9	22.5	11.25	52	14	5.9	15.3	13	12	13
Air	(%)	1.9	1.5	1.6	-	-	-	-	-	-	-	-
W/B=(c+p)		0.35	0.31	0.30	0.40	0.15	0.27	0.3	0.31	0.26	0.31	0.31
Slump	(cm)	-	-	-	-	-	-	-	11	21	22	17
f'c at	(kg/cm2)	-	-	-	-	2380	-	-	990	1140	1050	900
f'c at	(kg/cm2)	960	1100	1350	800	-	930	830	-	-	-	-
f'c at	(kg/cm2)	-	-	-	870	-	1070	930	1090	1260	1210	1110
Author		Held & Kanig			De Larrard		Aitcin & Neville					

* Cement ASTM TYPE II ; W/B=(Water + Liquid Admixture) / (Cement + Pozzolans)

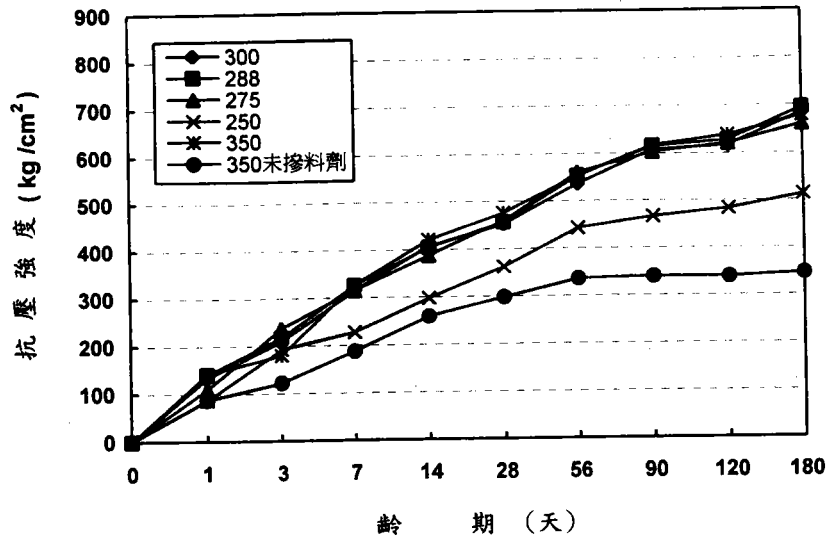
表三 美國高性能混凝土配比表

Mixture		1981						1987		1989 [7]		
Cement	kg/ m ³	392	356	410	356	428	356	377	237	362	297	297
Fly Ash	kg/ m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74	37
Rice Husk Ash	kg/ m ³	-	36	-	54	-	72	-	102	-	-	37
Water	kg/ m ³	128	128	128	128	128	128	150	143	192	181	192
Fine aggregate	kg/ m ³	786	786	786	786	786	786	676	717	742	730	724
Coarse	kg/ m ³	1062	1060	1044	1044	1026	1026	1206	1206	1092	1104	1115
Air	(%)	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.5	1.2	-	-	-
W/B=(c+p)		0.326	0.326	0.312	0.312	0.299	0.299	0.398	0.42	0.53	0.488	0.512
Slump	(cm)	20	22.5	24	17.5	22.5	20	9.5	1.3	-	-	-
f'c at 3 day	(kg/cm ²)	457	426	477	457	467	477	-	-	121	91	106
f'c at 7 day	(kg/cm ²)	568	568	609	609	629	660	316	331	205	167	177
f'c at 28 day	(kg/cm ²)	660	782	670	812	711	812	412	445	339	284	303
f'c at 56 day	(kg/cm ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	406	366	416
f'c at 360 day	(kg/cm ²)	812	873	812	934	822	934	-	-	-	-	-
Author		Manmohan & Mehta						Mehta				

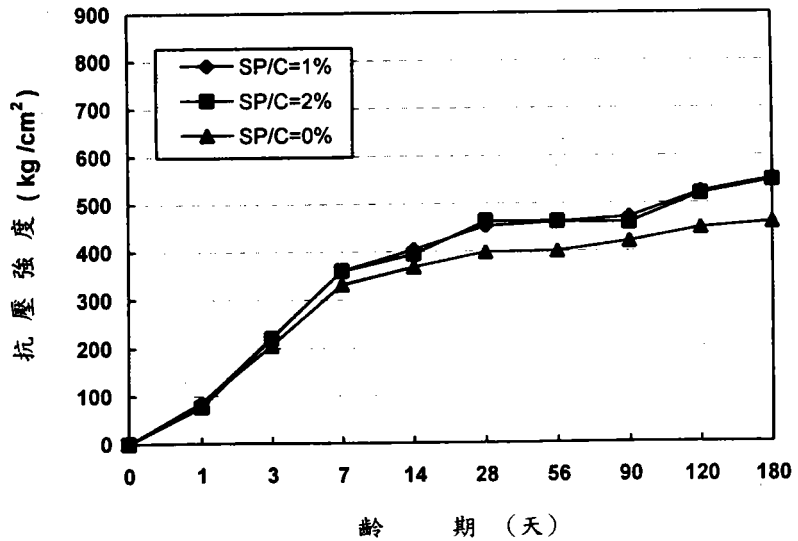
* All mixtures contained a constant amount of a superplasticizer in order to obtain high consistency.

表四 混凝土配比變數表

Mixture		1	2	3	4	5	6
Cement *	kg/ m ³	350	350	300	288	275	250
Fly Ash	kg/ m ³	0	105	76	144	137.5	160
Rice Husk Ash	kg/ m ³	0	35	30.5	24	27.5	25
Water	kg/ m ³	198	194	187	182	178	178
Fine aggregate	kg/ m ³	714	590	666	637	661	657
Coarse aggregate	kg/ m ³	1092	1040	1040	1040	1040	1040
Superplasticizer	L / m ³	0	8.35	9	9	9	9.5
W/B=(c+p)		0.57	0.4	0.46	0.4	0.4	0.41
Slump	(cm)	22.5	24	25	23.5	21.5	23.5
f'c at 28 day	(kg/cm ²)	298	475	452	456	459	362
f'c at 180 day	(kg/cm ²)	346	678	684	694	660	513
1- 表列用水量包括強塑劑中所含之58 % 含水量。							
2- 含氣量約 1.6 % 略去，不列入混凝土總體積計算。							

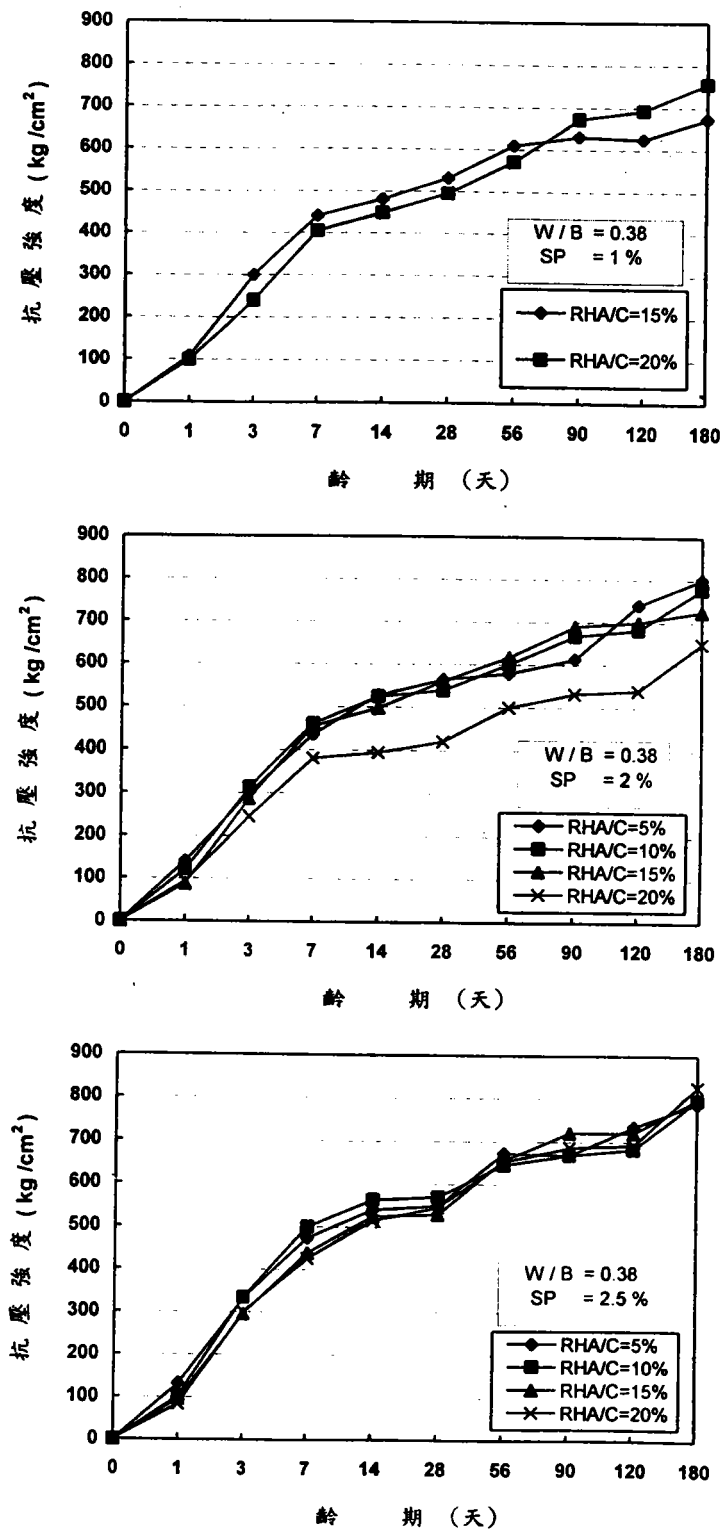


圖一 不同水泥用量高性能混凝土抗壓強度

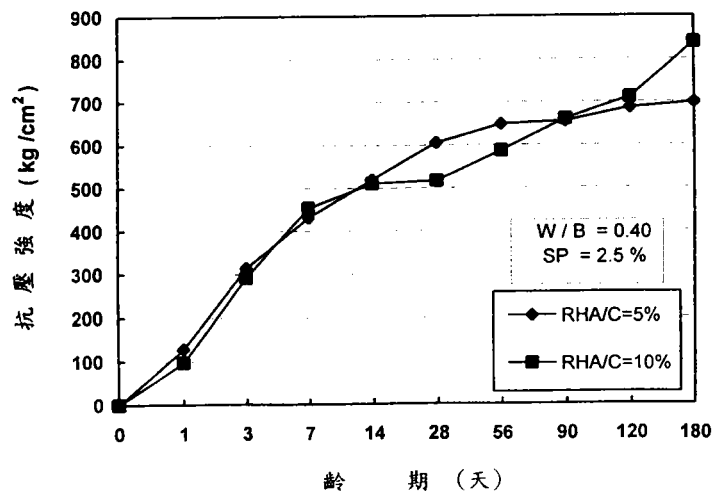
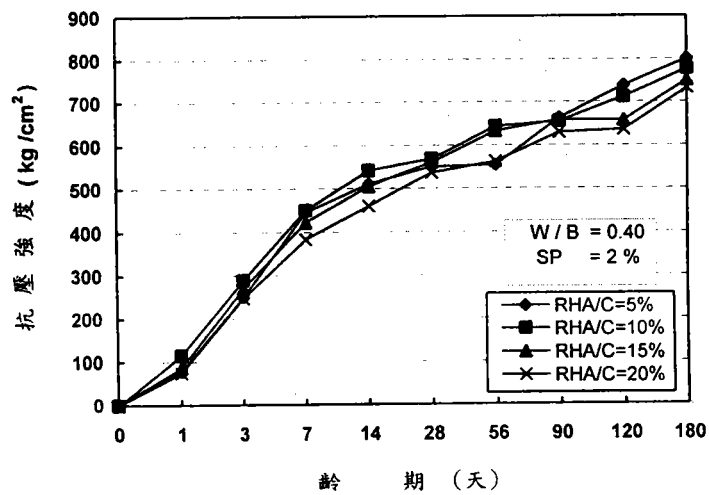
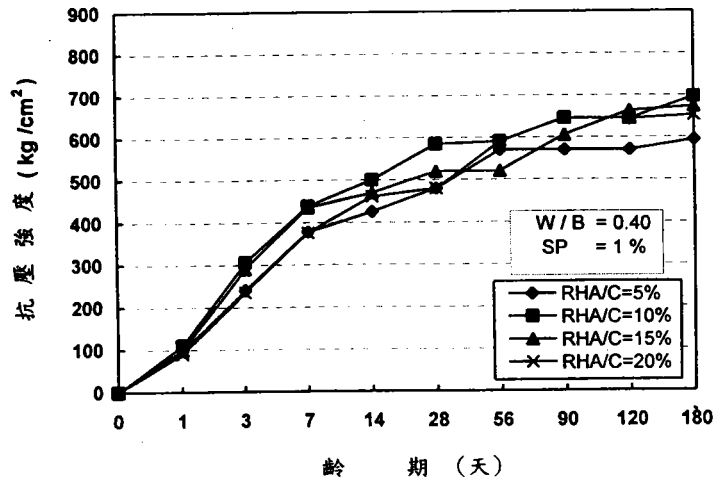


圖二 不同強塑劑量高性能混凝土抗壓強度

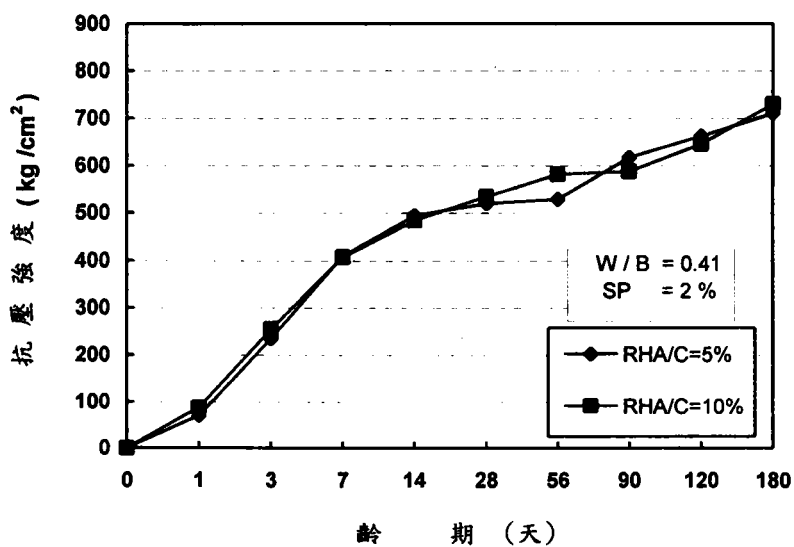
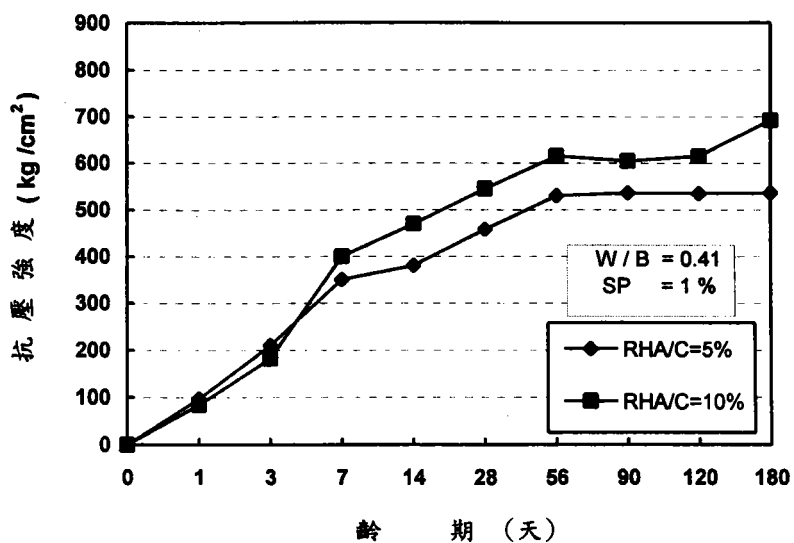
- 波索蘭材料對高性能混凝土 (HPC) 性質之影響 -
 - 彭耀南 吳東昇 -



圖三 W/B=0.38 不同波索蘭材及強塑劑量抗壓強度



圖四 W/B=0.40 不同波索蘭材及強塑劑量抗壓強度



圖五 W/B=0.41 不同波索蘭材及強塑劑量抗壓強度

- 波索蘭材料對高性能混凝土（HPC）性質之影響 -
- 彭耀南 吳東昇 -

HPC 施工技術與品管之探討

王和源*

關鍵詞：高性能混凝土，施工技術，品質系統

摘 要

國內高性能混凝土經由「產官學」界共同合作研發，業已成功的灌注在高雄85 國際廣場之鋼柱內，並已正在推廣應用中。本文針對HPC 高耐久性設計考量、HPC 施工管理的技術，由科學化的管理控制、運用五種生產的手段互相配合而成，如參與成員的協調合作、完善的施工規劃方法、適當的材料選擇、施工機械及管理技術與經濟的成本費用。進而建立完整的品質保證系統如建立自主品管制度及品質驗證與計劃等作一闡述，期能提供港灣結構物及海域橋樑工程等需要高耐久性考量的高性能混凝土設計與施工之參考。

壹、前 言

台灣屬於海域環境及溫度異常地區，混凝土設計上的耐久性考量卻常遭忽略。以致於造成傳統混凝土弊病可見的品質低落問題，直接影響到使用者的生命財產安全。

尤其中華民國台灣省未來擬規劃成為亞太營運中心及加入GATT 及WTO 等國際組織，對國內營建工程必然產生衝擊，原有之保護措施將消去，政府此刻更應起示範帶領作用，提昇技術與品質，否則經濟大餅將被外國人蠶食鯨吞，更有必要發展及推廣國內大宗的混凝土產業技術⁰。

* 國立高雄工商專科學校土木科副教授

所幸經過產官學界的通力合作，國內於83年終於針對國內工程界的需要而開發成功，具可「高流動性、高強度」之高性能混凝土，並且順利於85年4月9日完成全國最高而世界排名第五之「高雄85國際廣場大廈」的鋼柱中灌注8000 psi，坍度230 ~ 270 mm，流度500 ~ 700 mm之高性能混凝土艱鉅的挑戰工作，此種混凝土的成功開發，更肯定國人的能力，並且重拾工程界的信心，是學術理論與實務整合成功的例子。

此種滿足「業主、設計者、材料供應商、施工者、品質控制者、主管建築單位、使用者及學界」需求的高性能混凝土，兼具「安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性」的特性。同時目前亦已漸成共識，如何推廣應用於國內工程已是刻不容緩之事。本文即針對高雄85層T & C Tower及中殼防爆牆所使用高性能混凝土之施工技術與品管作有系統之介紹，並由高耐久性的設計理念說明HPC在港灣工程結構物及海域橋樑工程的適用性，期能全面提昇HPC之品質保證系統以及施工技術的層次，進而開創國內高性能混凝土高品質水準及高耐久性的最終目標。

貳、高性能混凝土的高耐久性考量

國內混凝土因耐久性劣化而衍生的工程問題日益嚴重，如「海砂屋」，「海砂橋」「捷運帽樑」「澎湖大橋」—等都是在很短時間就產生龜裂現象^②，造成長期混凝土的耐久性問題，這種結果與原設計意旨是相違背的。若依水泥水化時間來看，混凝土應該是恆久永續成長的，曾經80年混凝土經分析後其水化熱仍在進行，故歐洲百年以上的混凝土依然完美無恙。而影響混凝土為何不能長期持續穩固發展且耐久的原因，乃因混凝土本身為一多孔多相複合體，且受到結構行為、時間轉變及材料老化之影響均會使得混凝土長期性質（強度、勁度、耐久性）逐漸衰減。同時，傳統高強度混凝土採富配比設計方式，使得用水量及水泥用量有增多現象，致使混凝土產生潛變和乾縮問題，易造成滲透性差。當外界溫濕度改變或惡劣環境侵蝕時，容易產生差異變形或引起差異應力而造成表面剝落、析晶及龜裂等病變，不僅影響觀瞻甚至將降低使用年限^③。

因此混凝土耐久性主要決定於水及混凝土本身的滲透性。而混凝土的滲透性則取決於其本身的孔隙結構（尺寸及連續性）。同時與混凝土之組

成材料、水灰比、澆置、搗實及養護有密切關係。水灰比越低，水化時間愈長，其硬化後的孔隙總體積與孔隙尺寸以及滲透係數則愈小。

而防患混凝土病變及提昇耐久性之品質策略包括選用適當材料、考慮耐久性基因、應用飛灰等卜作嵐材料、採用緻密配比設計法則，確實品質管制及養護過程等措施，以減少劣化現象發生，降低有害物質侵入。近年來國內外正積極推動高性能混凝土之研發及應用。高性能混凝土(HPC)係改進傳統混凝土(OPC)與高強度混凝土(HSC)之缺點，考量以「低水灰比及水膠比」、「適量的水泥」、「顆粒堆積」、「最大單位重」、「最少孔隙」、「卜作嵐反應」等作最適當的配比設計，並能製造出符合優生理念之安全性、經濟性、工作性及生態性之高性能混凝土如圖一所示⁽⁴⁾。

耐久性基因對混凝土而言是非常重要的，由典型文獻可以了解水泥用的愈多或水用的愈多都將造成離子快速移動，而對長期品質有不良影響⁽⁵⁾。水泥水化所釋放出來氫氧化鈣對長期耐久性之影響；包括硫酸鹽侵蝕、石膏膨脹反應、溶解、析晶等，造成物質移動而有害混凝土。提高耐久性的方式是把用水量減少⁽⁶⁾，自然強度會愈高。從水固比(W/S)來看，水固比愈小表示混凝土整體孔隙小，緻密性愈高，比重愈大，強度應該可提高，耐久性也會因水的移動受阻而提昇，另外水泥量的減少可以降低水泥的水化熱問題及降低體積變化。

傳統工程人員對配比的瞭解程度僅止於強度設計理念，只分別強調強度、工作性，疏少考慮耐久性，以致配比過於乾稠施工困難，造成加水，品質劣化，或過於多量水泥以致產生嚴重乾裂現象，以往在ACI 318-89 規範，都是以「安全性」為主，「安全性規範」係以「水灰比(W/C)」來做考量，很多建築物在施工完成後沒有幾年便產生劣化、腐蝕、滲水、白華或龜裂的產生，此種皆為混凝土欠缺耐久性設計所產生之「老年病」。

高性能混凝土配比原則係以適當的漿量為基準，更重要的是應用化學摻料、卜作嵐摻料來造成高耐久性的設計方法，所以高性能混凝土採用「低用水量」及「低水泥量」的配比設計，其配比的準確性及拌和的均勻性倍感重要。近年來ACI 318-95 規範亦大幅修正，即規定「結構混凝土」要有「耐久性」，故以水膠比(W/B)來做代表，是以水和膠結料的比例來規範強度以獲取耐久性為目的⁽⁸⁾。同時對於大型構造物應作長期的監控措施以建立耐久性數據，進而累積經驗追蹤混凝土品質，以作為回饋設計之用。

以港灣工程結構物為例，耐久性設計上須考慮的因素，第一是防止海水中硫酸鹽與水泥產生鈣釩石膨脹反應，海水中氯鹽對混凝土的滲透侵蝕及劣化反應，海水中鹽類的結晶劣化反應。第二是海浪沖擊的崩解作用。第三則是防止混凝土中龜裂所產生鋼筋銹蝕的膨脹反應^(9,10)。因此設計材料重點包括1. 滲透性要低，如降低水灰比至0.45以下，使用卜作嵐材料等，2. 用水量要低，藉以減少泌水、析離、弱界面等缺點，然必須克服工作性問題。3. 水泥用量適宜，減少富貴病的龜裂及減低鹼骨材反應基因。4. 施工品質要佳，避免有害物質容易侵入，造成混凝土的劣化困擾。另外在海域橋樑工程方面，經歷澎湖跨海大橋的經驗⁽¹¹⁾，工程人員深感防蝕技術重要及觀念的欠缺，除了配比設計須作考量外，採用水密性之優生混凝土，其中添加卜作嵐材料有助於裂縫之癒合作用，同時可添加高分子纖維以增加韌性，方可達到高耐久性的最終效果。

參、HPC 施工技術與管理

高性能混凝土為能達到高耐久性的效果必須有完整的施工技術與管理。HPC 之生產必須透過團隊合作方式將理想化成實際，規劃出工程施行上所需之系統程序，儘量選擇可以利用的所有生產手段，巧妙地加以靈活運用，並以科學化的工程管理控制達成新速實簡的預期目標⁽¹²⁾，而所謂的生產手段係指5M，亦即人(Men)、方法(Methods)、材料(Materials)、機械(Mechines)、資金(Money)。運用上述五種生產手段(5M)以達到五個目標(5R)，包括適當的產品、良好的品質、足夠的數量、快速的時間及便宜的價格。以高雄85國際廣場應用HPC之現場施工管理為例，即應用下列五種生產手段而圓滿完成的。

一、成員的協調合作

生產高性能混凝土係所有參與規劃、設計、生產施工、監督及使用人員應負之責任，並非只和材料生產者有關。每一參與施工過程的群體必須適當付出其責任，以確保HPC有良好性能，在生產前至少須有六個月的時間去建立品質保證的觀念，參與人員必須先共同努力完成品保計劃，並且

生產施工作業配合人員皆能經過「教育訓練」，以讓所有參與者建立品質的共識。

二、完善的施工規劃方法

高性能混凝土在使用前必須先作好整體的品管計畫，於施工前半年即須建立全面「品質保證」的觀念及制度，圖一係高性能混凝土的技術應用。

同時管制計畫須明確，主要內容包括各類工作完成的日程、查核點，並事先探討應列為檢討之項目，擬定座談會，探討策略方案，以為後續修正及進度控制之用。以建立預拌廠之量化修正數據⁽¹⁾。本階段的目的，在透過反覆演練建立配比及品保至上的共識外，另外也瞭解環境變異，材料變化的影響，培養及建立應變處置能力⁽²⁾。

為能探討實際施工作業中可能產生之疑難點以進行分析，須在實際現場施工前作品質驗證試驗如筒型試驗工作，間接分析出預拌混凝土之生產能力。當試驗評估完成後，即可進行量產原型試驗，以進一步瞭解施工上的問題點，並據此建立查核表，作為現場施工之指南。

此部分須與學術單位建教合作共同討論訂定以建立團隊共識並發掘可能之問題點⁽³⁾。

至於工地HPC 澆置及量產時，須事前做完善規劃包括進度計劃、時程計劃、人員計劃及混凝土的品管計劃。在施工作業上，當氣候季節性改變、料源、材料品質的更動都會造成混凝土性質的變異，適當的修正及量化修正資料在施工程量產前都必須加以製訂，此階段必須建立完整數據及資訊⁽⁴⁾。

而在HPC 澆注完成後有必要針對結構體混凝土與筒形試驗、原型試驗之HPC 試體以非破壞性檢測技術評估實際之性能，作為監控及供國內設計者之參考，且於現場按裝計測儀器，進行長期監測，並回饋修正用⁽⁵⁾。

三、適當的材料選擇

高性能混凝土之材料其實與傳統材料無異，只是強調品質最佳化的理念，在材料的選用上更慎重而已，且屬於本土化材料應用。

(一) 水泥

高性能混凝土之水泥用量在低水灰比條件下必須考慮減水，基本上水泥用量不超過 400 kg/m^3 ，否則將會面臨增加成本、水化熱過高、乾縮及潛變過大的問題。通常若無特殊需要，採用第一型水泥即可。而且為減少變異宜固定使用同一廠牌水泥並作長期物化性質的品質追蹤工作，應檢查水泥廠前後試驗報告之差異，如水泥砂漿立方體強度、細度、成份、停留 0.045 mm 篩之百分比、燒失量(LOI)、總鹼量等性質，使水泥達到要求之品質。

(二) 骨材

由於目前國內採用之骨材多屬河川之砂石，經水流長距離淘選、搬運，表面不潔物已較少。一般HPC 使用甚多之膠結料，故宜採用粗砂（即FM 稍大），以避免因細質砂而影響到用水量使混凝土稠度增加造成太黏而無法泵送之缺點。又粗骨材 / 砂漿界面之高握裹強度要求，故粗骨材最大粒徑被認為以不超過 20 mm ，質地堅硬為適宜。預拌廠之品管人員須嚴密的做好品檢工作，且統計其變異性，並視需要製訂品質計劃及做為量產時配比微調的依據⁽⁴⁾。

(三) 拌和水

高性能混凝土所用之拌合水經檢測須潔淨不含各種油脂、酸、鹽類、有機物或其他有害物質。原則上「凡是可以喝的水皆可當拌合水」。一般要求拌合水及品質對凝結時間及抗壓強度不可有過度的影響。同時高性能混凝土因考慮耐久性關係，水中所含氯化物不得超過 200 ppm ，若考慮高膠結用量所導致之水化熱問題及避免引起溫度龜裂，則拌合水宜採用冰水或飲水機之涼水（溫度約 10°C ）以獲致較良好之初期水化效果，俾產生緻密之水泥漿體基體組織防止水化產生之高溫及過大的坍度損失，而有益於混凝土極限強度⁽⁵⁾。

(四) 液狀摻料

依據ACI 建築規範，降低用水量將嚴重影響新拌混凝土工作性，甚至

無法充分均勻拌合、澆置及搗實，故必須使用減水劑類型的表面活性劑。使用摻料前品質之認定、強度效益和水泥及卜作嵐材料間之共容性、減水量、凝結時間、工作性、劑量及摻加時機等性質均應以試拌方式加以測試。

高性能混凝土可添加符合ASTM C494 相關性質標準之G型或F型之強塑劑(SP)，添加適當之劑量而不產生浮水及析離為加SP之重點，若水灰比愈低或添加飛灰時，因為飛灰顆粒較細且易吸水，此時就應添加強塑劑，其用量悉視現場拌合時與新拌混凝土稠度而定，蓋若驟然加太多，則易生浮水；太少則效果不彰無法獲流動效果。影響強塑劑用量的因素頗多，且有些為交互影響如國內氣溫較高，強塑劑的效益在短期間即消逝，宜配合減水劑等混合使用，且使用時應控制混凝土溫度不超過27°C為準，以使強塑劑能確保應有之功能。故建議最佳劑量以試拌為主，輔以廠商說明書及拌合時之目視，經驗判斷為宜。品牌的選擇須考慮其主要成份及減水與緩凝效果，以滿足添加後混凝土特性能符合工程要求標準。

(五) 卜作嵐材料

國內高性能混凝土所用較經濟之卜作嵐材料包括飛灰及水淬高爐石粉，可降低水化熱及減低成本，且產生卜作嵐反應使界面泌水所造成之氫氧化鈣堆積層受到交換作用形成膠結物，進而改善強度及水密性。HPC使用取代砂係基於可改善混凝土性質、增加耐久性及減少環境污染有效利用資源等考慮。可提供低水泥用量時不足之漿量，及混凝土適度的粘稠性，國內電廠之燃煤原料不同燃燒程度不一，且品質隨季節變化，以致於品質仍不穩定故其篩選工作相當重要。一般較簡易快速方法測試其燒失量(≤8%)。添加飛灰可改善混凝土的泌水現象及減小孔隙結構，改善耐久性，在使用上係將不同比例飛灰與粗砂混合後求其最大單位重，一般為粗砂的15~20%時可獲得細骨材之最大單位重。由於爐石屬半膠結性材料，適量的使用可發揮與水泥相同的強度，及降低水化熱。惟須考慮其細度、活性及斥水性，並使用品質控制穩定性佳的料源，且若久置於空氣中，易吸收潮氣而結塊，拌合時宜事前檢視以使品質均勻。在此應用上係取代水泥約佔有5%左右，過量的爐石含量則水化後期可能易產生泌水現象，造成表面粉化或起砂缺陷。

四、施工機械及管理技術

高性能混凝土常具有高流動化性質，須以泵送施工，而泵浦管線之設立無論是直立主管之位置及每層水平管之安排皆須經過仔細設計。在不妨礙機動原則下，儘量使用最少彎頭及最短之管線，因管線越長泵浦車需要推送的壓力越大，則愈有塞管之可能。同時混凝土經長距離之高壓輸送，因管壁磨擦必定產生熱量且損失漿量，故 HPC 須為合格的新拌性質且無骨材析離現象，否則當送抵管尾進入結構體時，可能變成流動性欠佳之混凝土，造成壓力迅速增加。同時輸送較脆弱處會爆管，或與柱接頭螺絲無法承受強度大之拉拔力而脫落⁽⁴⁾。

由於 HPC 之品質管制作業必須相當謹慎，因此每次灌漿澆置前皆須有很完整之規畫。一般項目如下：澆注之混凝土數量、順序與方向、換管過程、施工便道、人員安排、開始拌合時間、混凝土總數、泵送車安排、混凝土車進場方向、等待區域、廢料之清理方式等。完善之事前準備和明確之分工，可保證澆置作業順利進行，凡事按既定計畫操作、有突發狀況也可依事先安排好之程序加以處理。而在預拌混凝土廠則依據泵送速度、車程、運送量考量作 HPC 的出貨控制，按固定時間到達，以免發生供料不順或太多之情形。同時泵送車應有固定之維修保養，對於受磨損之零件應有足夠之備料，並應隨時備有相同泵送能力之泵送車緊急支援，期使意外發生後的損失減至最小。

而每次生產及灌注高性能混凝土後，各項資料皆須填寫完整並妥善存檔，包括(1)電腦操作手記錄；(2)澆置記錄；(3)車輛記錄；(4)其它如試體試驗記錄。每一澆置工作使用之車數，皆須記錄清楚⁽⁴⁾。同時每次澆置後相關人員須做開會檢討修正。

五、經濟的成本費用

結構物從構想開始至使用結束，構成所謂結構物的「生命週期(Life Cycle)」，就業主 / 使用者之立場而言，其在使用和維護上長期累積的費用，可能遠大於初期投入之營建成本。因此，論及總工程造价應以使用年限成本為根據，不僅需考慮到工程初期之營建成本，尚須視及爾後之使用及維護成本。

HPC 應用的經濟性，在材料方面如使用低水泥量，可節省水泥成本、減少大氣因生產水泥產生之 CO₂ 而破壞臭氧層；使用飛灰、爐石則可使廢料再生利用而有效處理環保問題。如果使用 HPC 於超高層之鋼柱內則可節省結構費用，例如高雄 85 國際廣場使用強度為 56 Mpa 之 HPC 時則可節省將近五分之一（約 8000 公噸）的用鋼量。其次因 HPC 免搗實、高流動的極佳工作度，免除輸送灌置混凝土時所需的人員、設備、機具以及增加硬固混凝土的高強度、高體積穩定性、長期的高耐久性而相對增加結構勁度等對整個「生命週期成本 (Life Cycle Cost)」的節省則有相當之優點⁽⁹⁾。

肆、HPC 品質保證系統

一、建立自主品管的制度

(一) 品管計劃：高性能混凝土別強調「端末混凝土性能符合設計預期之標準」，並且滿足「安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性」五大準則，所以必須在施工前三個月至六個月間即建立全面「品質保證」的觀念及制度，參與工作人員必須事先完成「高性能混凝土品質保證計劃書」所要之製程品質、環境保護理念⁽⁹⁾。

承包商應擬訂品質管制計畫書，經業主工程師核可後實施，同時品質管制計畫書應隨時開會檢討，而且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。

整體品管計劃建立後，接著透過討論協調方式建立產官學合作之共識觀念，並將可能之品質共識點及日程表確定下來。管制計劃主要內容包括各類工作完成的日程，查核點，並事先探討應列為檢討之項目，擬定座談會，探討策略方案，以為後續修正及進度控制之用。

(二) 組織系統：生產 HPC 之預拌廠須設有 (1) 指揮人員總管一切事務 (2) 控制室操作員以利 HPC 生產與操作 (3) 車輛調度員以掌控預拌車 (4) 廠內品管人員以作 HPC 出廠前之檢驗以及 (5) 現場試驗人員作現場的 HPC 性質試驗。同時須建立完善的試驗室對各類材料進行分析研究，另外品管工

作需專人操作以排除人為誤差的可能性⁽⁴⁾。

(三) 設備器具：預拌廠須具有各種硬體設備，並能妥善處理廢棄混凝土或污水等環保問題，同時要列出材料項目試驗頻率，依據自主能力及經濟考量，須添購器具並有自行試驗能力，可訓練品管人員對材料作完整的品質檢驗，同時須靠精度較高的儀器輔助拌合，藉以減少人為操作時所產生的誤差，如電流表、水分計、計量器等。

(四) 人員訓練：收集相關研討會資料，或聘請研究HPC 的學者專家作專題演講或授課亦為良策。至於品管相關人員則須作定期或不定期的教育訓練，如生產 HPC 前各所屬配合人員行前教育、現場品管人員如何每車檢驗坍度、流度、溫度及灌製試體以確保漿後結構體的品質，並建立通訊網路掌控HPC 到達工地的時間。

二、品質驗證與計劃

由於 HPC 係相當敏感的新研發材料，因而在混凝土的品管計劃即須更為詳實謹慎，整個品管工作由料源至實際施工皆須進行全面的品質管制。

(一) 材料品管

由於HPC 所要求為低水化熱及低乾縮量，故在設計時儘量要求低水泥量及低水灰比，而藉SP 之添加，達到混凝土之坍度、流度及均勻性要求。故基本上，乃是一種非常經濟的材料而能表現出甚佳的混凝土性質。在估算成本時更須考慮到品管費用。如果在生產過程品管稍有瑕疵，生產之HPC 即會有問題。因此必須擬定所須管制的材料試項目如表一所示⁽⁴⁾，而品管人員更須確實按照頻率試驗做成管制表，方可確保品質的良好。同時為能達到材料品質之長期穩定性，宜將所有材料及試驗項目、地點、頻率、試驗者及成果作整理。擬訂出一個完整之「品質試驗及管制計劃」為不同或缺的工作，並可藉此提昇其強度。各種使用材料的管制，如水泥溫度及品牌、砂的的細度、骨材含泥量、存量、冰水溫度、SP 進廠時間等均須作完善的品質管制，以提供高性能混凝土的應用需求⁽⁴⁾。

(二) 預拌廠管制

預拌廠本身之軟硬體設施是否完善，包括健全的品管組織、完整的設

備，品管人員的培育以及各種試驗資料品管圖表的建立等，在設備上骨材之輸送帶是否做加蓋保護等，水泥運送以卡車經由管線吸送入密封室的儲存內，預拌混凝土廠之水泥是置放於拌合塔及水泥桶內，並於拌合塔需水泥時經由拌合塔及水泥桶頂部之連管輸入拌合塔骨材、水及摻料進行拌合作業。為便利各種材料之輸入，如水泥、水、骨材、飛灰、爐石、藥劑皆須具有獨立的拌合塔頂儲料倉，並能正確的由中央系統電腦控制之自動計量系統作正確的稱重。拌合機械的功能以水平軸式之拌合機較為理想。且因 HPC 所用粗骨材最大粒徑約為 10 mm 左右，為使拌合能均勻，拌合前葉片間隙如超過 15 mm 就必須重新調整。同時在拌合品質的控制上須考慮到計量系統的定期校正，以避免計量系統落差或精度超過規範容許範圍，而影響 HPC 材料之特性。並以不同時間的拌合功率試驗其均勻度，選出最佳時間做為控制基準，並記錄拌合時與拌合葉片使用電流大小，如骨材含水量做成相關值以做為日後量產的標準依據，因此預拌廠須建立涵蓋設備與材料之 HPC 生產流程查核表，如表二所示，隨時逐項查核各項資訊數據，以作為出貨及修正之參考⁽⁴⁴⁾。

（三）出貨控制

經過嚴格的材料品管及均勻拌合後，對於出貨控制仍須做好品質保證，如車輛調撥、專用拌合車及離廠前工作度之檢查，並須填寫 HPC 出廠品質記錄表。由於 HPC 拌合時間較長，以致預拌廠每小時最大出貨量減少，而此 HPC 係高坍流度，考慮到路上交通問題發生之處理、出車狀況等之控制，必須隨時做適當的出貨控制，萬一預拌車等待時間太久可能造成過度坍度損失時可藉酌量再次添加 SP，而將坍度放大。務必配合現場之澆注速率，適時的將 HPC 順利的運送到達工地。

（四）工地現場品管

現場澆鑄仍須有高性能的整體品管規劃，包括 HPC 灌注進度計劃、HPC 灌裝作業流程、灌注時程計劃及人員計劃等。當預拌混凝土送到工地時，依預定計劃之方向進出及等候，記錄拌合車到達工地之相關資料，每車並由品管人員取樣進行新拌性質之測試是否符合要求，包括坍度、流度、溫度、含氣量、試體抽樣等皆詳細記錄於白板及記錄表上，同時做好泵送品管計劃，泵送管檢查、泵送順序安排、泵送速度管制、泵送壓力管制及記錄表填寫、管線潤滑控制，如有異狀強度之試體，必須保留觀察其

他如砂漿與廢料回收計劃，現場人員配置計劃，澆置量的決定均須規劃完善並適時予於修正及調整⁽¹⁴⁾。

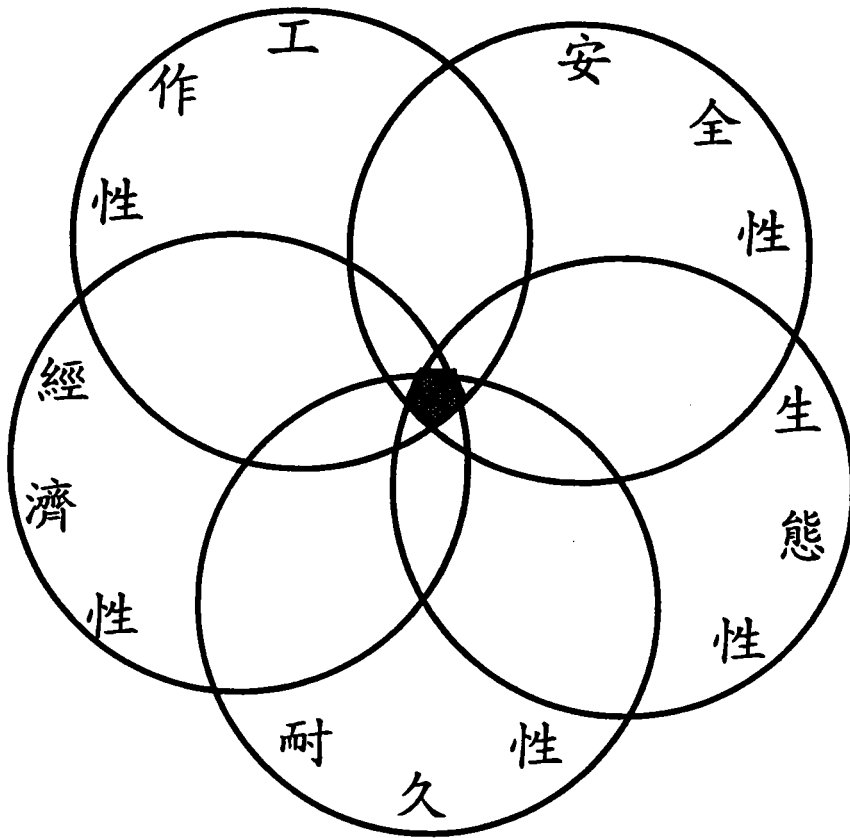
伍、結論與建議

國內以本土化材料研發的高性能混凝土已有成功的案例可循，整個研發與施工的作業，均須透過嚴謹的品質管制工作，所有參與者不斷的協商，隨時以計劃、執行、查核、修正作回饋參考，終能突破傳統施工技術之屏障，建立國人對高性能混凝土的品質信心。同時為達到業主需求之性能，必須兼顧耐久、安全、工作、經濟及環保的設計理念，並作好品質保證的措施。尤其是對於台灣四面環海，海域結構物甚易受到海水侵蝕、海浪沖擊及鋼筋銹蝕等影響，因此在設計港灣工程混凝土結構物時必須考量高耐久之高性能混凝土設計，施工時更要落實品質保證制度，以確保混凝土的品質水準。

參考文獻

1. 黃兆龍，「高性能混凝土在公共工程上之應用」，近代營建技術系列研討會，NO.5 (1996)。
2. 王和源，黃兆龍，「高性能混凝土防蝕耐久性初步評估」，八十四年度防蝕學會年會論文輯，中華民國防蝕工程學會，第187-201頁，台灣，台北(1995)。
3. 王和源，「如何運用飛灰提高耐久性」，如何使用飛灰以提昇混凝土品質研討會，台灣營建研究院，第121-146頁，台灣高雄(1997)。
4. 黃兆龍，「優生混凝土的理念及材料設計」，高性能混凝土之研發實務研討會，王和源與黃兆龍主編，第1-38頁，台灣高雄(1996)。
5. Kosmatra, S. H., and W. C. Panarese, Design and Control of Concrete Mixtures, 13th ed., Portland Cement Association (1988).
6. Mindess, S. and J. F. Young, Concrete, Prentice-Hall, Englewood Cliff, N. J. (1981).
7. Mehta, P. K., Concrete-Structure, Properties and Materials, Prentice-Hall Englewood Cliff, N. J. (1986).
8. 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」，中國土木水利學刊，已接受(1997)。
9. 黃兆龍，「優生混凝土的未來展望」，高性能混凝土研發實務研討會，王和源與黃兆龍主編，第155-165頁，台灣高雄(1996)。
10. 黃兆龍，「高性能混凝土在港灣工程上之應用」，港灣報導季刊，第三十二期，第351-352頁(1995)。
11. 黃兆龍，林維明，「海域混凝土鋼筋腐蝕之研究－澎湖跨海大橋初步診斷」，省交通處港灣技術研究所(1987)。
12. 王和源，「T & C Tower HPC 整體成效評估」，高性能混凝土研發實務研討會，王和源與黃兆龍主編，第131-154頁，台灣高雄(1996)。
13. 黃兆龍，「高雄85層T & C Tower 論HPC 材料選擇及性能」，高性能混凝土(HPC)研發及應用研討會，黃兆龍主編，第83-124頁，台灣高雄(1994)。

14. 陳光卿，王和源，「HPC 的品質技術成效」，高性能混凝土研發實務研討會，王和源與黃兆龍主編，第83-103頁，台灣高雄(1996)。
15. Chern, J. C. C. L. Hwang, T. H. Tsai, "Research and Development of HPC in Taiwan", ACI Concrete International, Vol.17, No.10, pp.71-76 (1995).



圖一 優生混凝土考慮安全性、工作性、經濟性、耐久性、及生態性
五大準則的交集點(實心點)

表一 材料檢驗項目及頻率

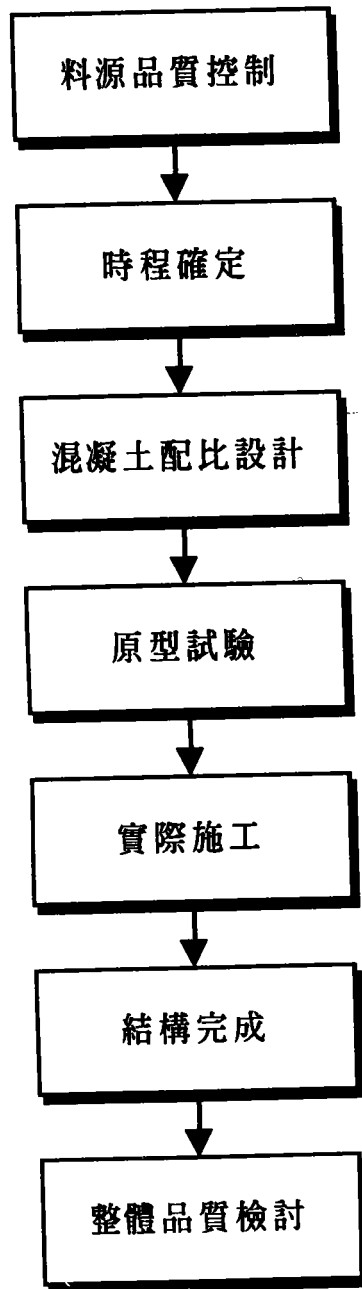
材料	編號	項 目	頻率
細骨材	1	篩分析 (FM)、含水量	每天
	2	比重、吸水率	每批
	3	含泥量、有機物	每月
	4	氯離子、硫酸鹽含量	每月
粗骨材	1	篩分析	每天
	2	比重、吸水率	每批
	3	洛杉磯磨損試驗	二個月
	4	硫酸鈉健度試驗	二個月
	5	含泥量	每週
	6	有機不潔物、易碎顆粒、扁平率、氯離子	每月
水	1	總固體量 (TS)	每月
	2	pH 值 (酸鹼度)	每月
	3	硬度	每月
	4	氯離子、硫酸根	每月
水泥	1	物理試驗	二個月
	2	化學成份分析	二個月
其它	1	飛灰燒失量、細度、比重	二個月
	2	爐石細度、比重	二個月
	3	化學摻料比重、pH 值	每批

表二 HPC 生產流程查核表

日期：

NO	項 目	正常者打 √	備 註
1	細骨材之 F.M.		
2	細骨材之含水量、吸水率		
3	骨材之含泥量（通過 #200 篩者）		
4	水泥之物理、化學性質		
5	爐石粉之細度、活性指數		
6	飛灰細度（#325 篩 10% 以下）燒失量		
7	S.P. 之存放期限、品質、沉澱情形		
8	配比之校閱，S/A 之調整		
9	計量系統，校正		
10	拌合鼓內葉片之間隙		
11	拌合時材料投入順序		
12	拌合時間		
13	電流錶拌合穩定時之電阻數據		
14	預拌車之桶內殘留物清出		
15	裝料時之目測		
16	隨氣候條件改變而修正配比		
17			
18			

主管 _____ 複核 _____ 檢驗者 _____



圖二 高性能混凝土的技術應用

高性能混凝土之施工與品質

顏 聰*

關鍵詞：高性能混凝土，施工，品管

摘 要

高性能混凝土是世界上各先進國家已廣泛使用的混凝土材料，其所擁有的優越工作性、耐久性及生態性等更適合於台灣地區之應用。為使合宜製作完成的高性能混凝土，能恰當有效地應用到結構體上，本文一方面從拌合、澆置、夯實、養護、模板等項目論析其於施作上特點，及與普通混凝土者差異之處；另一方面也針對各項施工所需的品質考量和試驗品管等提出建議，以供業界參考。

壹、前 言

混凝土是二十世紀中人類使用於營建工程上最多的材料。早期，由於混凝土的價格低廉、材料取得容易、也易於製造使用、乃造成一種錯覺，認為它是低科技產品，而忽略了對其技術研發應有的重視。其後在研究工作者發現了這種材料在工程營建上的潛力與重要性，而要掌握、改善其性能時，才發覺其中潛存著相當多繁深的學問，與原先人們對它的認知有一段不小的落差。此可從混凝土由選材、配比、產製到施工養護，其整個過程在在牽涉到物理、化學、力學乃至於管理等可見一斑。所幸，經過學者專家的不斷努力，已使混凝土的科技水準持續提升，逐漸有效的服務人類。而從六十年代初至今，在歐美先進國家的研究投入下，已使混凝土技術進入了另一個歷史性的新階段，成功研發出新一代的混凝土材料：高性能混凝土（HPC）。高流動性是 HPC 最具代表性的特

* 國立中興大學土木系教授

質，而高強度、體積穩定性及耐久性等則是 HPC 常被同時列出的特性⁽¹⁻³⁾。由於 HPC 擁有促進環保與節約能源、改善工程品質、節省勞力及增進施工技術等優點，歐美國家紛紛將它列入有關規範內，並且在重大的公共工程上廣泛使用^(3, 4)，在我國今後的工程建設走向高品質化之際，它必將成為營建上的主要建材。

基本上，高性能混凝土所使用的材料與傳統混凝土者無異，不同的是對於材料品質的嚴謹度要求較高而已，例如為了減少水泥用量而提高細骨材的細度模數，必須使用強塑劑以降低水灰比等。所有材料的選用應該都指向一個相同的目標，就是製造出品質良好的高性能混凝土，如此將需要在選料之外，同時考量混凝土配比以及拌製技術，亦即在 HPC 的製作上，如何有效的施工以獲取適當的品質。

高性能混凝土的施工，本質上與傳統混凝土相似，包含選料、計量、拌合、輸送、澆置、夯實到養護。由於 HPC 有高強度、免搗實（高流動性）、高耐久性、體積穩定性等優越性能的要求，除了須要有良質的材料，適當的配比外，還須配合以理想的拌製施工作業，才能製作出符合品質要求的 HPC。本文即基於此標的，從 HPC 的施工論析其特點以及對應的品質管制要項。

貳、高性能混凝土施工之特色

雖然高性能混凝土的各項施工作業，如拌合、澆置、養護等大致上與普通混凝土相同，有關的施工中注意事項都可互通使用，但是為了迎合 HPC 要求的高強度、高流動性、體積穩定性及高耐久性等特質，必須在一些細節上作必要的調整，例如採用拌合效率較好的攪拌機，進料順序與拌合時間的考慮，澆置方式及夯實的施作考量等。以下即就各施工項目分別討論其特點。

一、HPC 之拌合

完成各項混合料的選取和計量工作後，就要開始混凝土的拌合。基本上，不論是 HPC 或一般混凝土，其拌合的目的應該一樣，都是在獲得充分拌合的均勻性混凝土，以使其性質符合新拌或硬固混凝土的工作性、力性或結構性需求。

就 HPC 而言，由於大都使用相當數量的水泥系材料，包含水泥、飛灰、爐石粉等，採用的水灰比通常較低、拌合水量較少，雖然藉助強塑劑來產生工作性，但是其粘滯性頗大，又在細粒材料偏高的情形下，要達成均勻的攪拌效果並不容易。

考慮前述特點，對 HPC 的均勻拌合需要有兩個基本條件，其一是採用攪拌功能較好的強制式拌合機，例如水平雙軸式強制拌合機。另一為攪拌時間必須加長，一般高強度 HPC 的拌合時間至少須 120 秒，可參酌攪拌設備的效率，以試拌來測定適宜的拌合時間。美國 ASTM C-94 對混凝土的最短攪拌時間建議如表一。要注意的是，攪拌時間也不可過長，否則可能因水分蒸發而降低工作度。

除了上述基本要件外，混凝土拌合時的進料順序，也可能影響拌合效果。美國 ACI 363 對高強度混凝土的拌合即建議⁽⁵⁾：先加水 10% 於拌合鼓，之後隨固體材料均勻投入鼓中時添加 80% 水分，最後加入剩餘的 10% 控制其工作度需求。事實上，也有研究指出⁽⁶⁾，先將粗細骨材與水泥系材料乾拌後，再加入水與摻劑拌合時，可獲得更好的攪拌效果。至於強塑劑的摻加時機，也會影響 HPC 的工作性，應小心為之。

對於 HPC 的工程實務拌合，一如一般混凝土，應可有下列三種拌合方式：（1）中心拌合式，即在預拌廠完成拌合工作後，由攪動式卡車運到工地。（2）途拌式，即在預拌廠完成混合料計量後倒入拌合車，在運送途中完成攪拌工作。（3）分拌式，即將混合料在預拌廠先稍加攪拌約 30 秒，之後利用攪拌車在運送途中繼續完成拌合工作。由於 HPC 的品質要求較高，因此目前大都採用第（1）種拌合方式。

二、運送與澆置

在預拌廠拌製的混凝土，通常都以攪拌車運送到工地使用。在工地範圍內設場生產的預拌混凝土，也可能利用輸送帶(belt conveyors)傳送到工地。在工地現場往往需要由泵(pumps)作水平或高程的輸送。對高性能混凝土的輸送而言，由於輸送帶通常是以露天方式作業，輸送過程中的水分蒸發量，恐怕會影響及混凝土稠度，較不適用於 HPC。

利用攪拌車輸送 HPC 時，由於其流動性大、水灰比低，應注意下列問題：

- (1) HPC 的流動性很大時，在行車過程中遇有加速、轉彎或緊急煞車時，可能引起駕駛操作上的困擾，應讓司機事先瞭解，預為警惕，小心駕駛。
- (2) HPC 的水灰比大都相當低，對水量的變化極為敏感，故於雨天或洗車後，必須將鼓內水分確實排出，以免影響混凝土的稠度，甚至於強度。

由於 HPC 的流動性好又具有粘滯性，骨材最大粒徑也較小，使用於泵送施工上不易析離且容易泵送，故 HPC 相當適合以泵方式輸送，只要小心避免輸送管有過多的彎曲，且須繼續作業以防停泵後難以再啟動。

在 HPC 的澆置方面，以其坍度大、流動性佳的特性，澆置工作先天上已比普通混凝土容易。至於免搗實 HPC，則使混凝土澆置更能達到理想的境界，不僅可製作出擁有耐久性、可信度高的混凝土構造物，還能節省施工勞力、降低夯實噪音、引發營建作業流程的變革⁽⁷⁾，這種免搗實 HPC，如圖一所示，早在約十年前即由日本發展成功⁽⁸⁾，並迅速被世界各國接受。除了免搗實 HPC 外，一般 HPC 雖有大坍度與大流度，仍須輔以振動處理，以使混凝土得以均勻的擴散，填滿模板空間。

三、夯實與養護

混凝土澆置後的夯實工作，是現階段混凝土施工的必要步驟之一。高性能混凝土中除了免搗實 HPC 外，一般仍需要藉助振動夯實以有效澆置，並提高混凝土緻密度。不良或不足的夯實容易在混凝土內留下孔隙（見圖二），無法達到設計的要求。

最近的研究指出⁽⁹⁾，以振動棒對坍度達 25cm 的 HPC 進行單點及雙點夯實處理時，由其鑽心試體（位置如圖三、四）的抗壓強度測析結果發現，如圖五、六所示，振動夯實對 HPC 的強度仍有其增進效益，過度的振動作用也會引起析離而不利於強度，而且振動棒的夯實效果仍依棒的功能，只能在某一範圍內有效發揮。

混凝土的強度及耐久性的發展來自於水泥的水化反應，為保證水化作用的持續進行，養護時的水分供應是必要條件，一旦混凝土內的水分流失到相對濕度低於 80% 以下，其水化反應將告停止⁽¹⁰⁾，強度就無法再增大，這種養護條件與強度發展的關係可由圖七看出。

基於以上討論可知，水灰比偏低的高強度 HPC 在養護上要特別考量濕度的供給，浸水、噴水或灑水的濕養護法應比護膜養護法有利，因為後者只能保護內部的水分不向外蒸發，外表的水分也同樣無法進入土體內，對水灰比低於 0.42 的 HPC 就有形成內部過分乾燥而發生乾縮開裂的危險性⁽¹⁰⁾。對於工地上的 HPC 養護，因而建議採用覆蓋濕布或噴霧的濕養護法，而且養護時間至少在澆置後持續二十四小時。

四、模板與支撐

澆置在模板上的高性能混凝土，由於其坍度大、流動性佳，且能在 45 分鐘內維持著良好的流動性，對模板間接縫的密合度要高以防漏漿，另一方面，該流動性也會對垂直模板產生較大的側壓力。故使用於 HPC 施工上的模板，其密合度及堅牢性都要提高，以免發生爆模危險。

現行於混凝土工程施工現場的混凝土灌漿路徑，大致上如圖八所示，有五種常見的方式。研究指出^(11,12)，對任一特定的灌漿路徑，基於影響面的效應，會在載重施加過程中，於某一模板下的支撐部位產生最大的支撐反力，引起該區支撐的挫屈變形，致使該處上端的模板沈陷。此時未乾固的混凝土漿體，將移向該沈陷點，嚴重時甚至於有發生支撐系統倒塌的危險。由於 HPC 在 45 分鐘內的流動性還相當大，日後在大區域水平模板上的灌漿澆置施工，可能採用由一點或一面繼續灌注混凝土於模板上，讓混凝土自動向外擴散，佈滿模板面的方式，對於前述由灌漿引起支撐反力放大，進而挫屈變形以致於模板沈陷的現象，在 HPC 灌漿施工時，將更須小心處理，以防其大流動性造成模板支撐系統更易於倒塌的後果。

參、重要之施工品質考量

相對於普通混凝土製作上的要求，高性能混凝土在強度和工作性的一般需求外，還須擁有某些高性能，其中以高流動性、高耐久性及

經濟性等最具特色與重要性。為達成上述目的，必須從材料、配比、施作及品管等各方面加以考量。

一、材料之選用與處理

高性能混凝土的混合材料大致上與傳統的混凝土相同，主要包含水泥、水及骨材，而礦物摻料和強塑劑則為必須加入的新材料。對於這些材料的選取與使用，各有其特殊之處，簡要討論於后：

(一)水泥

高性能混凝土的水泥含量一般而言較高，結構體內由水化熱引起的溫度上升，或有提高的可能。但是由 Cook 等的研究結果⁽¹³⁾，如圖 9 所示，卻指出並不一定如此。此因一方面，HPC 的水灰比甚低，較少的水分未使全部水泥都能完全水化；再者，強塑劑也會減緩水化反應速率。因此 HPC 仍可一樣的採用波特蘭第一型水泥，只須注意水泥性質的穩定性，特別是水泥中 C₃S 含量、細度、燒失量及石膏含量的穩定，以保證混凝土的品質。

(二)骨材

混凝土中骨材所佔的體積比例最大，一般在 60~80%，對於其工作性及強度都有舉足輕重的影響，尤其是混凝土強度超過 60Mpa（約 9000 psi）者。為滿足高性能混凝土的工作性（流動性）、強度及耐久性等的要求，對粗細骨材的選用最須注意的是清潔性，不得有損害界面粘結強度的有害物質，如土粉、灰塵等的覆蓋。此外還要考慮其粒形、強度、級配等性質。

高強度 HPC 所採用的粗骨材，需有足夠的強度外，基於強化骨材／水泥漿體界面強度的目的，依 ACI 建議⁽¹³⁾，必須採用較小的最大粒徑，如圖 10 所示，通常是小於 3/4 吋（19mm），而以 1/2 吋~3/8 吋居多。至於細骨材部份，由於 HPC 所含有的細顆粒膠結性材料甚多，骨材間的漿量已足夠，砂的細度模數（FM）可放大到約 3.0，建議採用 2.8~3.2。如此將可因粗砂的表面積小，在混凝土內不會與膠結料等爭用水分，有利於其工作性。

(三)化學摻劑

應用於混凝土內的化學摻劑有多種，如輸氣劑、減水劑、早強劑、緩凝劑等，對具有高流動性、大坍度的高性能混凝土而言，主要是基於

強塑劑 (SP) 的開發應用有以致之。強塑劑是一種人工合成的高分子聚合物，可經由消除水泥顆粒表面的靜電，來提高漿體的流動性，減水能力高達 15~40%；且因其緩凝作用不大，可大量使用，一般用量在水泥重量的 0.5~2.0%，以 3%為上限。

對於強塑劑或其他摻劑的選用，必須注意其品質的認定，以及其與水泥，波索蘭材料等的相容性，此可由試拌後的工作性定之。強塑劑的效能在氣溫較高的環境下，可能在短時間內消失，因此使用上可考慮配合一般減水劑或緩凝型減水劑混合應用之。至於混凝土溫度則以控制在 27℃ 以下為準，俾使強塑劑得以發揮應有的功效。

(四)礦物摻料

高性能混凝土中常用的礦物摻料有飛灰、爐石粉及矽灰、爐石粉及矽灰，都屬於工業的副產品；稻穀灰也有使用的實例。飛灰和爐石粉的細度與波特蘭水泥者相近或稍大，矽灰的細度則高出甚多，達約 $20,000\text{m}^2/\text{kg}$ 。上述各項材料都屬於波索蘭材料 (pozzolans)，在產生波索蘭反應後可有助於混凝土的晚期強度，如圖十一所示。這種反應產生的膠體對水泥漿體和界面有填充作用，可改善其界面強度，水密性及耐久性⁽¹⁴⁾。摻用這類礦物料以取代部份水泥，除了可有效的改善混凝土工作性外，也可因水泥的減少以及波索反應的延緩，而降低水化熱的釋放速率。

應用各項礦物摻料於 HPC 上時，最須考量的是摻料的性質穩定性問題。就飛灰而言，本質上分成 C 級（鈣質含量較高）及 F 級兩類，我國 CNS-3036 和美國 ASTM C-618 規範都對飛灰的性質要求作了規定，但因其品質亟受煤源和灰塵收集設備的影響，在選用時須特別注意其細度、燒失量、波索蘭反應活性及與其他材料的相容性^(15, 16)。對於爐石粉的應用，由於具有較高的水硬性，其用以取代水泥的比例可以比飛灰高，最大達約 80%；選用上除了注意其細度和化學反應活性外，也要控制材料的穩定性，以免影響混凝土品質。至於矽灰，其產品品質較為穩定，但因供需關係造成價格高昂，使用上只對抗壓強度需要超過 100MPa 的混凝土才考慮採用之，否則運用飛灰或爐石粉即可滿足要求。

二、配比之掌握

高性能混凝土的配比設計類似於傳統混凝土，目的在針對各項選定

的材料，決定其適當用量以滿足混凝土的工作性、強度、耐久性乃至於經濟性的要求。比較而言，普通混凝土已經有相當完整可循的配比方法⁽¹⁷⁾，HPC 則還欠缺一致的方法。原因是 HPC 中必須摻加的化學摻劑及礦物摻料，目前尚無固定的配比模式，而且各項混合材料性能的變化對 HPC 性質的影響較大，也較為敏感。因此 HPC 配比的求得，還停留於透過試誤法決定的方式。

由於混凝土配比對 HPC 製作的成敗具有決定性的影響，各項材料條件和考慮因子的決定更為重要，他們都將間接影響到 HPC 的新拌和硬化性質，值得進一步討論如后：

(一)工作性

現階段國內對 HPC 工作性的要求準則仍以坍度為準，即在新拌之初，坍度須達 $250 \pm 20\text{mm}$ ，45 分鐘以後還能維持在 230mm 的坍度⁽¹⁸⁾。另外常同時輔以坍流度 (slump flow) 的量測，最好達 600mm，並無泌水或析離現象發生。基本上，HPC 的澆置施工以不夯實為原則，遇有工作性不良情形，則夯實工作仍有其必要性，但須防範過度夯實，以免造成析離現象。

(二)水灰比與水泥用量

水灰比在 HPC 的考慮上須注意其實用定義，其中水應包含強塑劑（液態）內的水分，而灰則應指水泥系材料的總和，即水泥和所有礦物摻料。水灰比（或稱水膠比）是決定普通混凝土強度的主要因子，如圖 12⁽¹⁹⁾所示，該等關係也大致上適用於 HPC，只是在礦物料含量比例增大時，其早期及晚期強度將有變化的可能，應加以調整。

一般 HPC 的水泥用量有較大的傾向，為使水泥的強度效益能盡量發揮，應尋找最佳的水泥用量，圖十三可配合圖十作最有利的選擇。以往高強度 HPC 須採用高水泥含量 ($400 \sim 550 \text{ kg/m}^3$) 的做法，目前已重新調整，一致的認定是水泥含量應降低到 400 kg/m^3 以下，如此將可使水泥效益發揮到 $20 \sim 25 \text{ psi/kg}$ ($140 \text{ KPa/kg} \sim 180 \text{ KPa/kg}$)。

(三)骨材用量

混凝土內的水泥漿須足以包裹骨材表面，並產生必要的工作性。由於細骨材的表面積遠大於同重量的粗骨材，為減少 HPC 中水泥漿的用量，細骨材的用量應儘量減少，而且其粒徑也不可太細（前文已論及 $\text{FM}=2.8 \sim 3.2$ ）。但因細骨材用量太少時，將導致工作性的降低，所以其用

量的原則為工作性允許的範圍內，儘可能的減少細骨材用量。

粗骨材是混凝土的主體構架，佔相當大的體積比例。由於其勁度（彈性模數）較大，含量愈高時可使混凝土的勁度提高，降低受力下的變形，如撓度、潛變等。但因粗骨材用量的多寡會影響到混凝土的工作性，尤其是 HPC 要求的工作性很高，其用量因而須同時兼顧到混凝土勁度和施工性。表二為美國混凝土學會建議的粗骨材最佳用量⁽¹⁷⁾，可作為配比設計上的參考。

三、工地施作之管理

雖然高性能混凝土擁有比普通混凝土優越的工作性，比較容易施工，但是該優點是奠基在完善的材料選用、理想的配比，以及週延的施工管理上。

由於 HPC 的水灰比偏低，膠結料的含量偏高，在高性能的要求下，對於骨材性質的嚴謹度也有較大的限制，稍有品質上的變異就可能造成混凝土性質的變化，無法達到設計上的品質需求。這種顧慮在整個工程作業過程中的最後階段，即工地施作部份尤為重要，因為微小的施工差錯就可能引起失敗。例如施工場地及機具設備的準備工作須完善，以縮短施工時間，否則可能因施工延緩導致水分過分蒸發，引起混凝土坍度損失。又如因運送時太長，使混凝土送達工地後由於坍度太小將無法施工，這種情形或許可藉由加入少量強塑劑以提高坍度，如圖十四所示⁽²⁰⁾。

從上述論析可知，HPC 是一種敏感度高的材料，使用在工地時，除了對於混合料的性質穩定須確實掌握外，從拌合、運送到澆置、養護等工作，都須有完善的計畫，並於工地上確實執行，才能確保高品質。

四、試驗與品質控制

高性能混凝土的品質較高，對於其各項性質的評定，如工作性、強度等，雖然大都沿用傳統混凝土的相關試驗法，但是基於其特殊性，仍有加以調整的必要。以工作性為例，坍度試驗法是最簡單而通用的方法，不過增加了坍流度（slump flow）的試驗。對高流動性的免搗實 HPC，Okamura 等人⁽⁷⁾也提出了如圖十五的試驗法。在抗壓強度試驗方面，由於 HPC 的骨材最大粒徑較小（約 1/2"），強度卻可能相當高，試驗已有

改用 $\phi 4" \times 8"$ 圓柱體的趨勢，其與 $\phi 6" \times 12"$ 圓柱體強度的換算，可參考圖 16。對於強度超過 10000psi (69MPa) 的高強度混凝土，進行抗壓試驗時，試體的蓋平已不適於採用熱熔性的硫磺，最好是利用試體磨平機將兩端面磨平，並須使兩面與試體軸線垂直，如此才能獲得具有代表性的強度測值。

由試驗結果資料可應用統計方法進行品質管制，以找出品質變動的因素，作為改善的依據。美國 ACI 214 委員會對混凝土抗壓強度的品質管制⁽²¹⁾，即建議依強度平均值繪成三個品質控制圖，如圖十七所示。其中(a)圖又稱個別品質圖，圖上各點為每次抽樣所得抗壓強度（三個試體之平均值），可用以隨時觀察出抗壓強度的變化情形及低於指定強度的次數。對於只有下限要求及容許不合格機率的混凝土而言，其敏感性較低，通常需配合其他控制圖合併使用。(b)圖為強度移動平均圖，圖上每一點代表前五次抽樣結果的平均值，有較平坦的曲線，一般用以指示季節性變化或施工程序變化。若平均值超過上下限之界限時，即須檢討是否由於品質變異或施工技術等因素所造成。(c)圖為差值移動平均圖，圖上每一點代表前十組強度的差值平均值。這種控制圖對強度變異的敏感性較高，當平均值一有變化時，圖上曲線會有明顯的斜度變化出現，該變化（上揚或下沈）都表示強度已發生變化。

肆、結 論

高性能混凝土為歐、美、日本等先進國家，應用得相當廣泛的混凝土材料，其可行性、安全性、經濟性及耐久性等已無庸置疑。我國也在 HPC 方面急起直追，積極研究開發，期能結合學術研究與工程實務，落實應用到營建工程上。

為在合宜製造出 HPC 後，能有效應用到工程結構體上，必須在材料選用、適當的配比外，配合以理想的拌製和施工作業。本文因而從拌合、澆置、夯實、養護、模板等項目，先討論 HPC 施作上的特點，指出其與傳統混凝土之間的重要差異之處，然後相對於各項施工論及其品質上的考量與掌控法，對於工地施作及試驗品管也有廣泛的析論，希望能對 HPC 的施工法及品質控制，提供可資參考的意見。

參考文獻

1. Stephan, D. E., "High-Performance Concrete", Proc. International Workshop on HPC, Bangkok, Thailand, 11. 1994.
2. 岡材甫, 「高性能混凝土」, 技報堂, 東京, 1993 年 6 月。
3. Chern, J. C., Hwang, C. L., Tsai, T. H., "Research and Development of HPC in Taiwan", ACI Concrete International, Vol. 17, No.10, Oct. 1995, pp.71-76.
4. CEB/FIP, "Application of High Performance Concrete", 1994.
5. ACI 363, State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI, 1994.
6. 陳泓圻, 「低水泥量高性能混凝土配比之研究」, 國立中興大學土木工程研究所碩士論文, 1995 年 6 月。
7. Okamura, H and Ozawa, K., "Self-Compactable High Performance Concrete in Japan", Preliminary Publication, International Workshop on HPC, Bangkok, Thailand, 11, 1994.
8. Ozawa, K., Kunishima, M. and Okamura, H., "High Performance Concrete based on the durability of concrete structures", Proc. of the 2nd East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Chiang-Mai, 1989.
9. 顏聰, 林宜清, 黃玉麟, 陳豪吉, 「高性能混凝土自動化澆置技術及品質保證系統之建立」, 內政部建研所專題計畫研究成果報告, 編號 MOIS 85004, 1996 年 7 月。
10. Mindess, S. and Young, J. F., "Concrete", Prentice Hall, Engle Wood Cliff, N. J., 1981, pp. 302-310.
11. 顏聰, 彭瑞麟, 陳惠發等, 「鋼管鷹架之應用及其模板支撐破壞模式之探討」, 營建知訊第 158 期, 台灣營建研究中心, 1996 年 3 月, 第 13-22 頁。
12. 黃玉麟, 顏聰, 林雍智, 陳惠發, 「混凝土灌漿作業對鋼管支撐架之荷重問題」, 中國土木水利工程學刊, 第八卷第二期, 1996 年, 第 281-286 頁。
13. ACI 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI 1984.

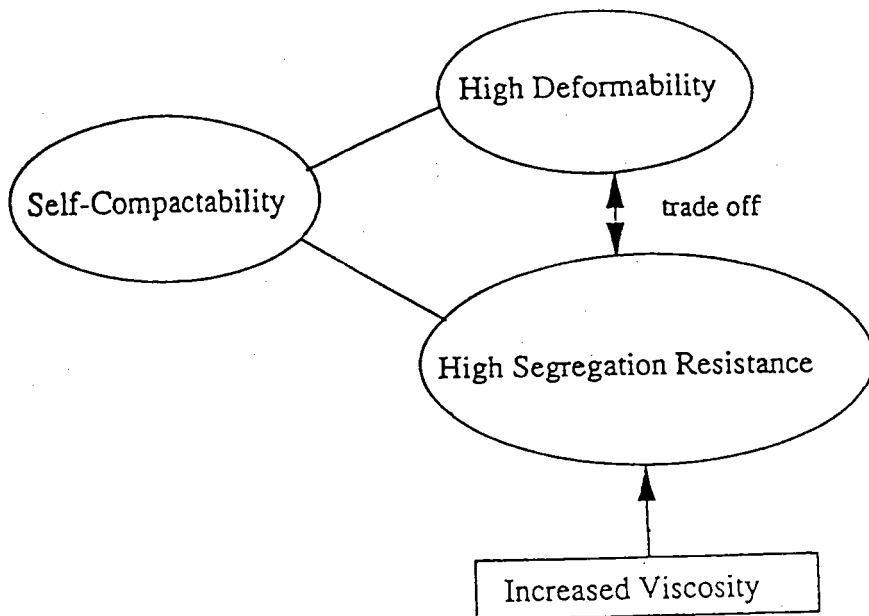
14. Mehta, P. K., "Pozzolanic and Cementitious Byproducts as Mineral Admixtures for Concrete-A Critical Review", Fly Ash, Silica Fume, Slay Other Mineral By-Products in concrete, ACE SP-79, Vol. pp. 1-46 Detroit, 1983。
15. 顏聰, 「飛灰混凝土之工程性質」, 正確使用飛灰以提升混凝土品質研討會, 台灣營建研究中心, 1996年12月, 第105-150頁。
16. Blanks., R. F., "The use of portland-pozzolan cement by the Bureau of Reclamation", ACI, Journal, V.46, May 1960.
17. ACI Committee 211.1, "Selecting Proportions of Normal, Heavyweight and Mass Concrete", ACI, Detroit, 1991.
18. 陳振川, 「高性能混凝土規劃與推動」, HPC 研發及應用研討會, 高雄工專, 1994年11月, 第1-44頁。
19. Neville, A. M., and Brooks, J. J., "Concrete Technology", Longman Edition, 1990, p.438.
20. Malhotra, V. M., "Superplasticizers: Their Effect on Fresh and Hardened Concrete", CANMET Report 79-31, Canadian Center for Mineral and Energy Fechnology, Ottawa, 1979, p.23.
21. ACI Committee 214, "Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete", ACI, Detroit, 1989.

表一 美國準 ASTM C-94 對最小攪拌時間之規定

Capacity of mixer		Mixing time,
m ³	yd ³	min
0.8	up to 1	1
1.5	2	1 $\frac{1}{4}$
2.3	3	1 $\frac{1}{2}$
3.1	4	1 $\frac{3}{4}$
3.8	5	2
4.6	6	2 $\frac{1}{4}$
7.6	10	3 $\frac{1}{4}$

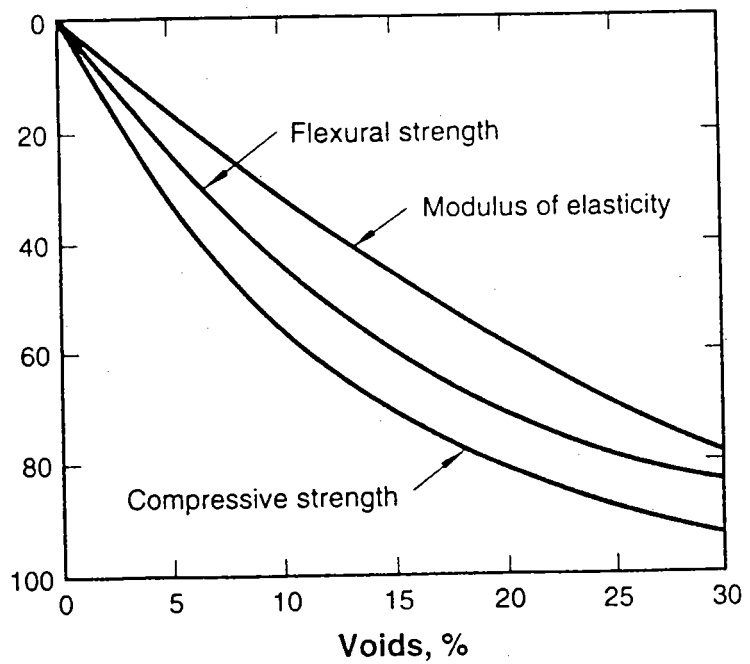
表二 高性能混凝土單位體積中粗骨材之用量

Maximum size of aggregate, in.	Volume of dry-rodded coarse aggregate† per unit volume of concrete for different fineness moduli of sand			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
1	0.71	0.69	0.67	0.65
1-1/2	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.80	0.78	0.76
6	0.87	0.85	0.83	0.81

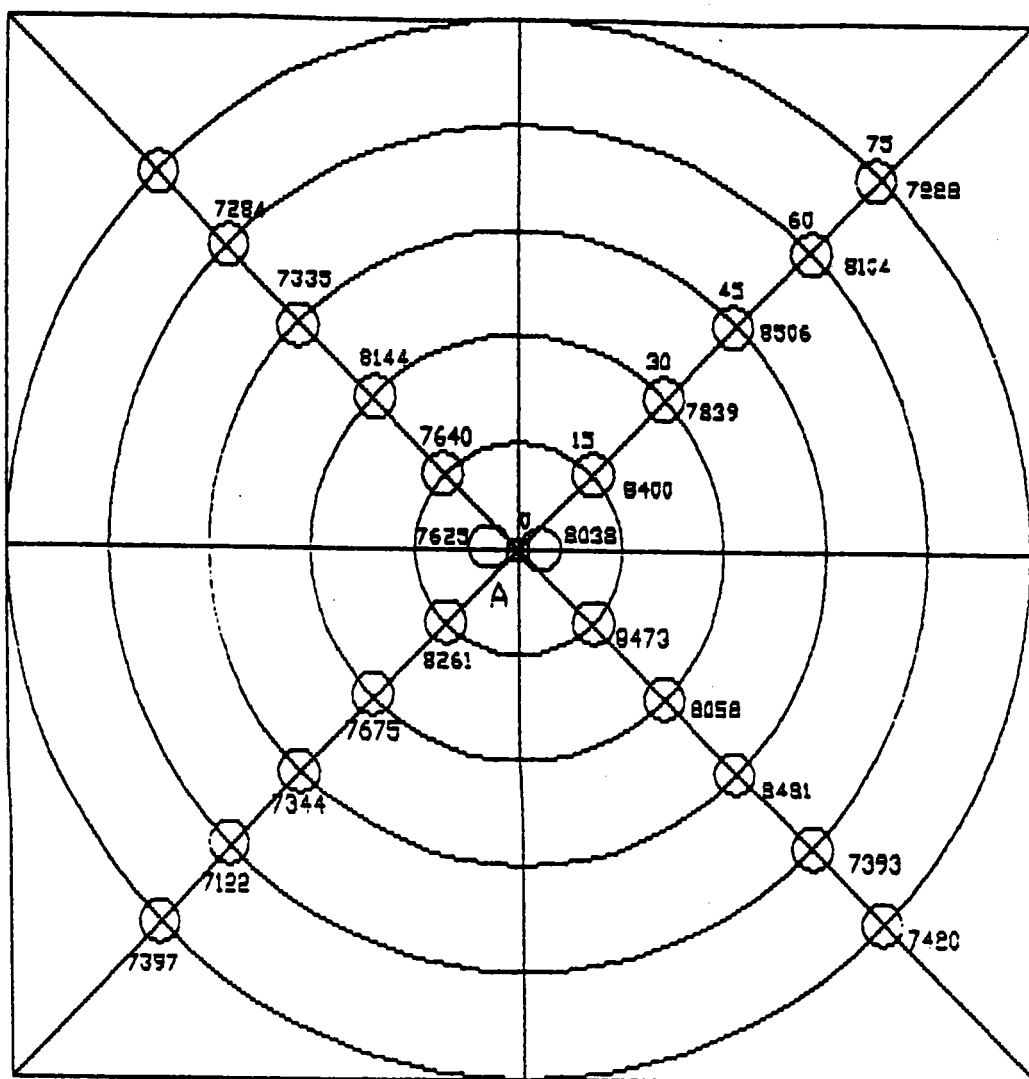


圖一 增加水泥漿粘滯性對免搗實性之效果

Reduction in concrete properties, %



圖二 不良搗實對混凝土品質之影響

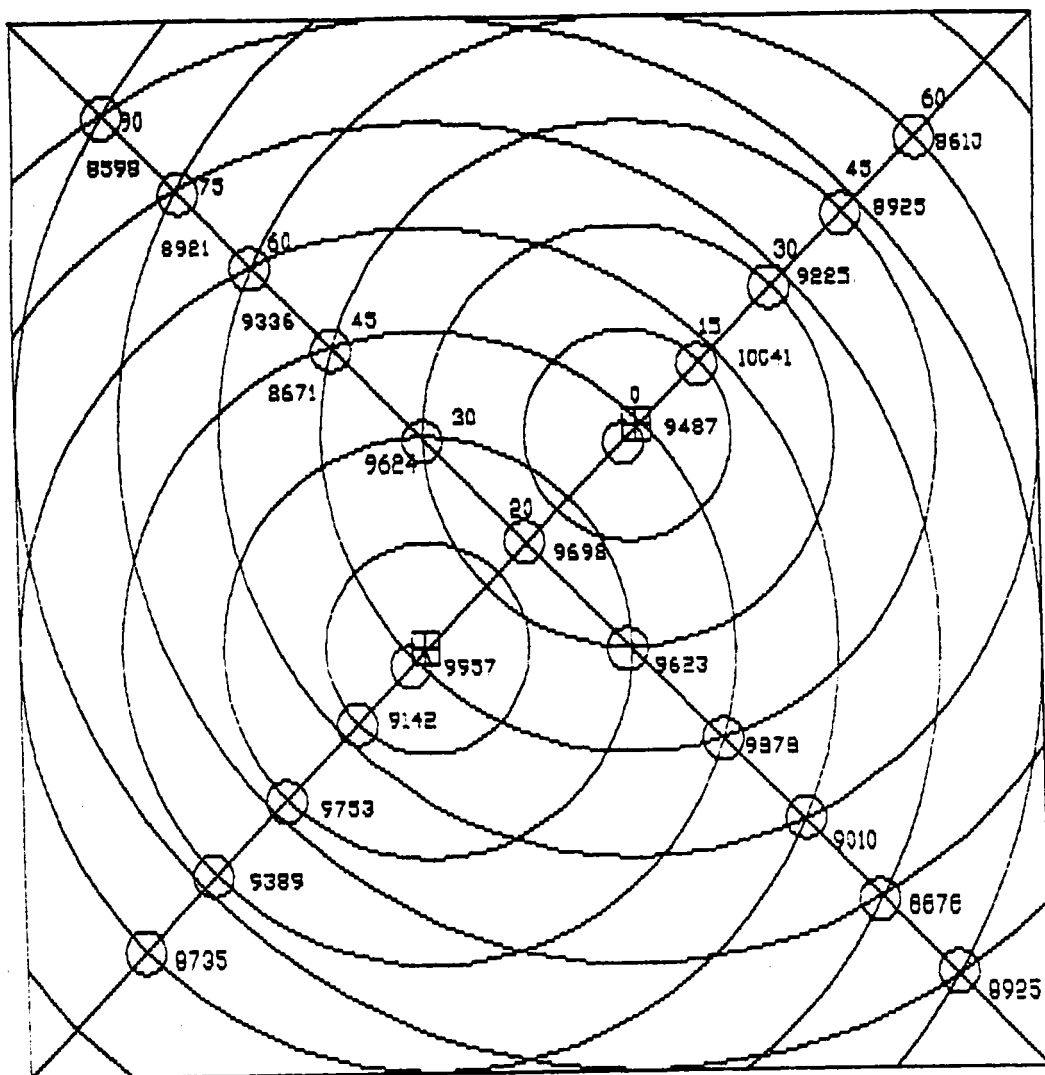


試體尺寸:150*150*20cm

□:振動點A(t=180sec)

○:鑽心點(強度單位:psi)

圖三 單點振動鑽心位置及抗壓強度示意圖

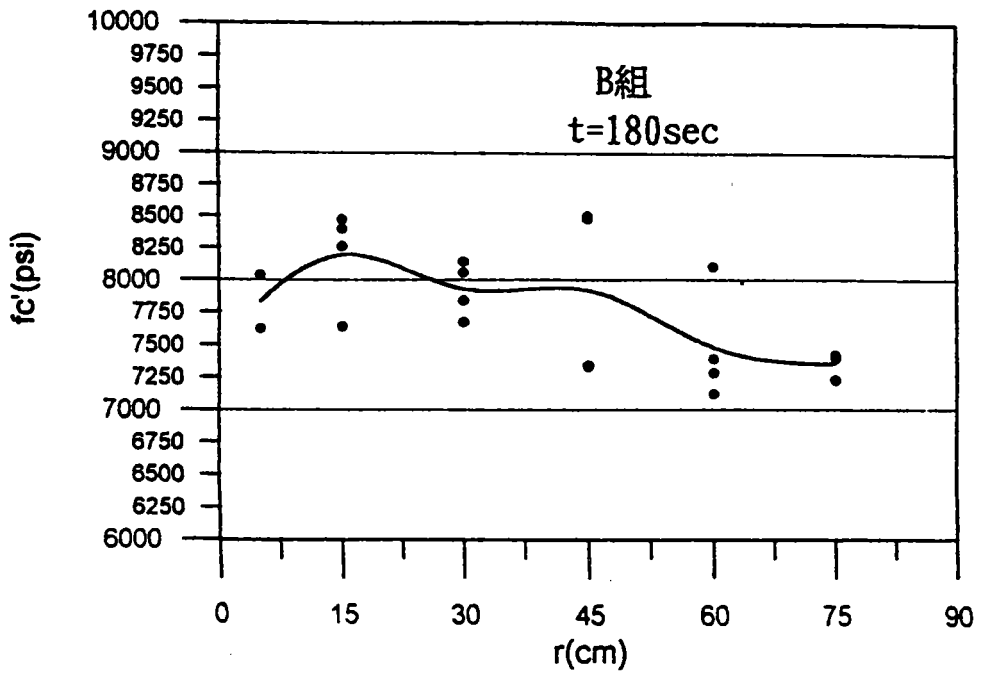


試體尺寸:150*150*20cm

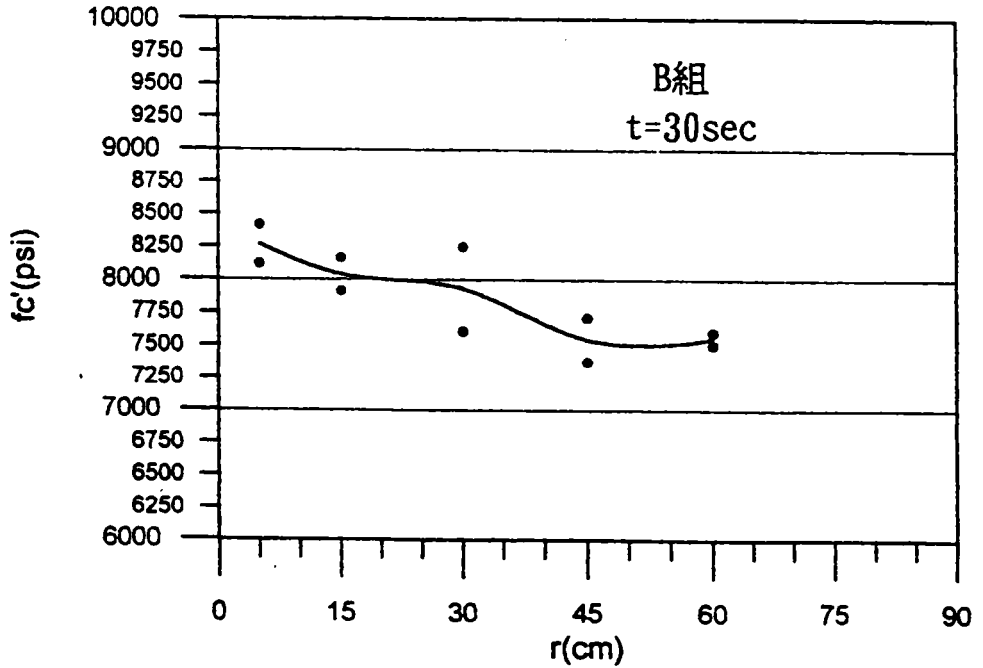
□:振動點(t=30sec)

○:鑽心點(強度單位:psi)

圖四 多點振動鑽心位置及抗壓強度示意圖

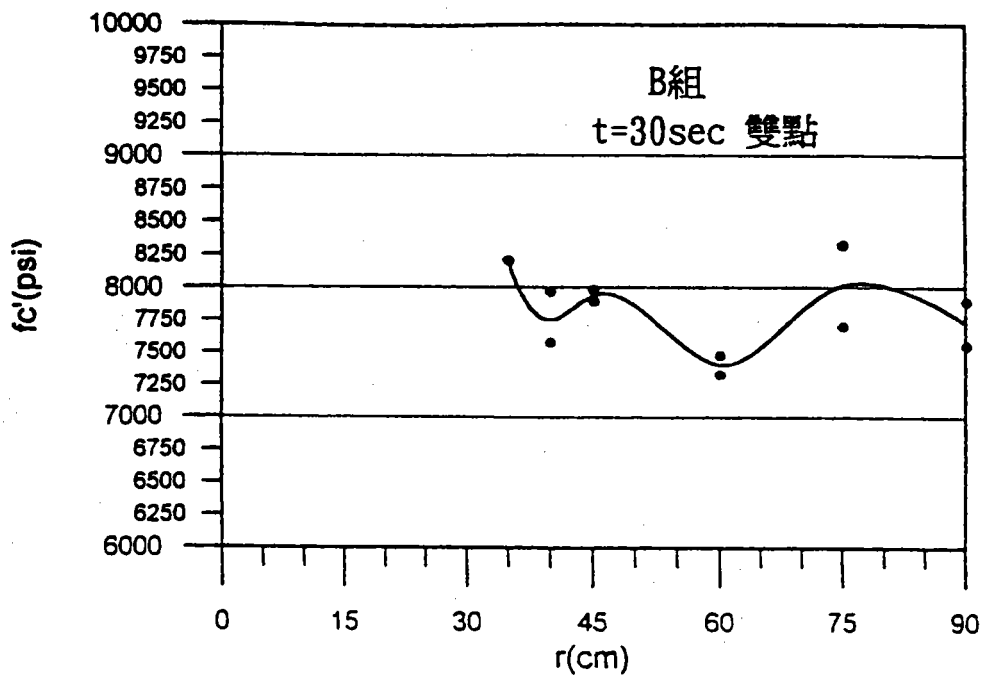


(a)

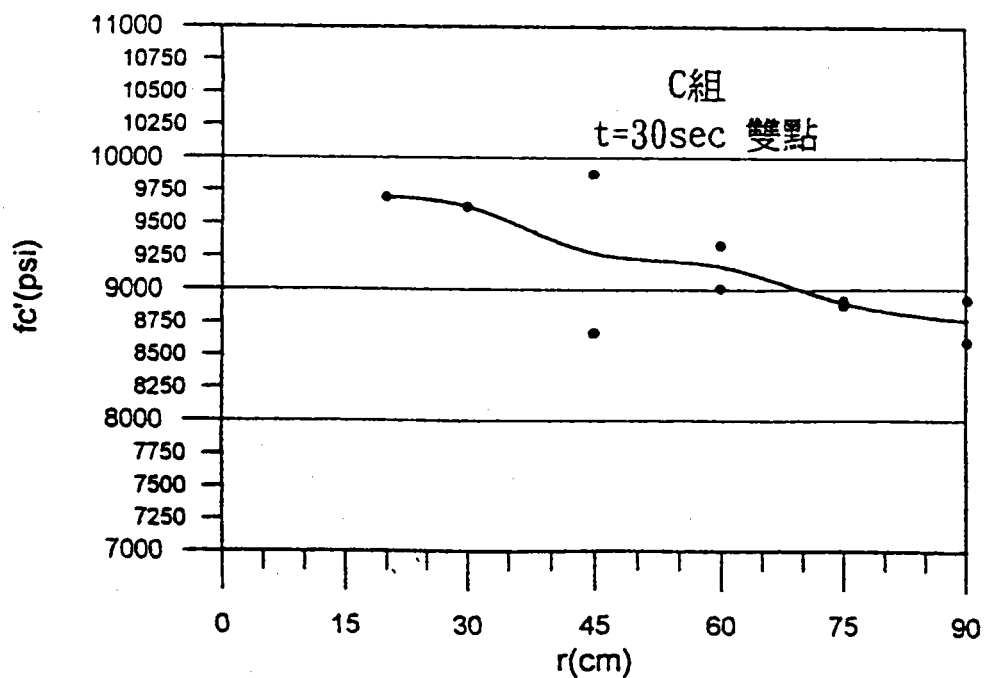


(b)

圖五 單點振動抗壓強度與振動點距離關係圖

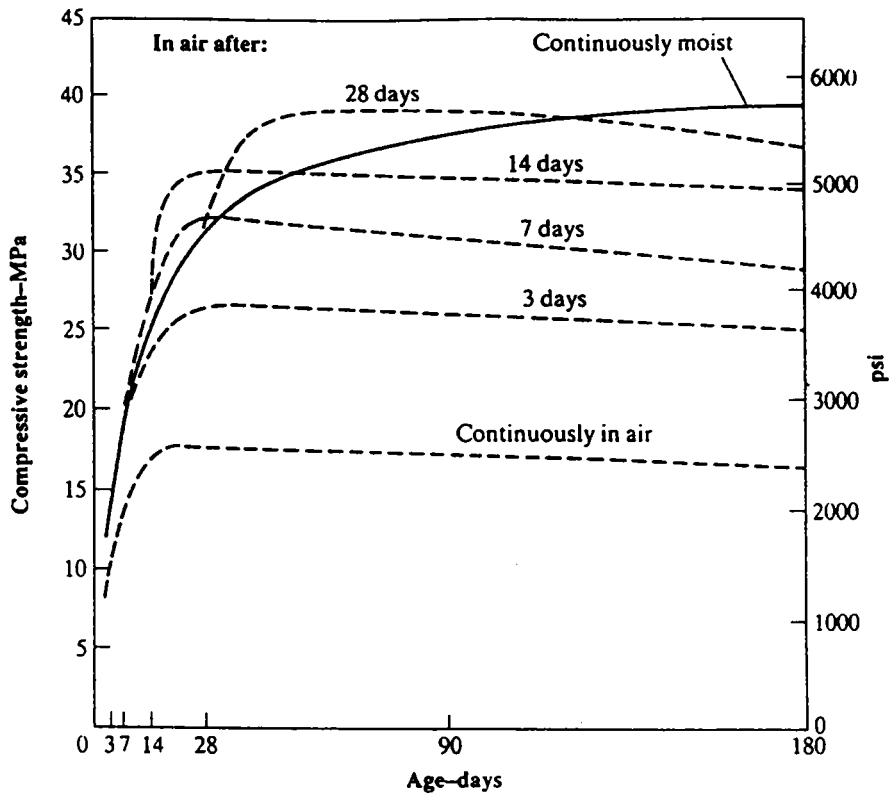


(a)

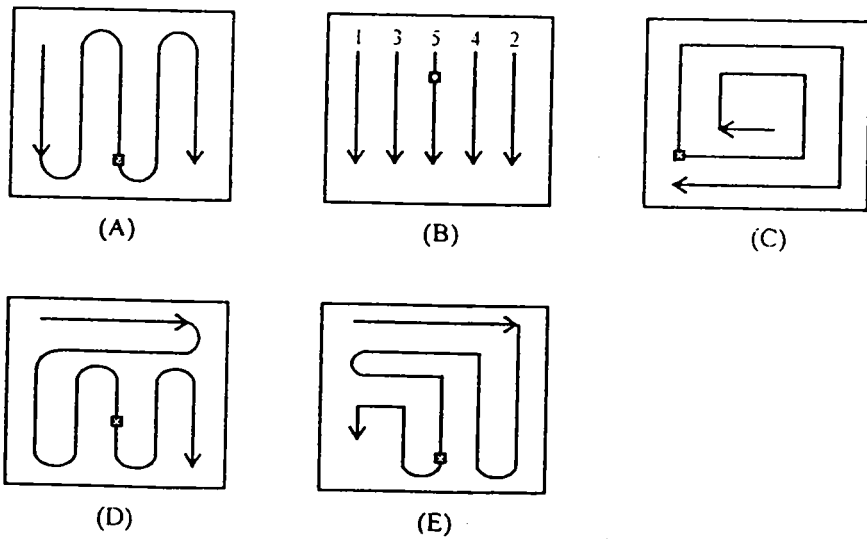


(b)

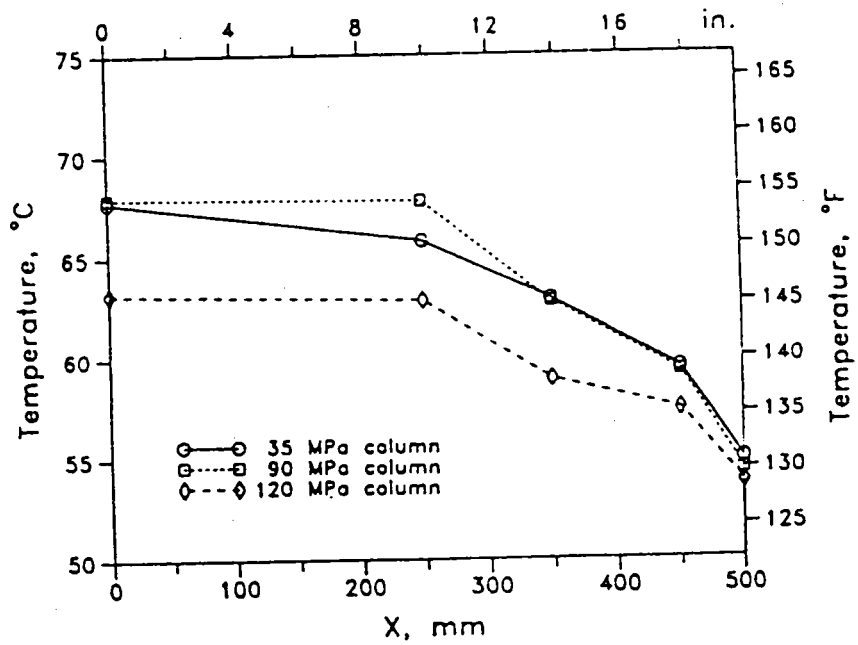
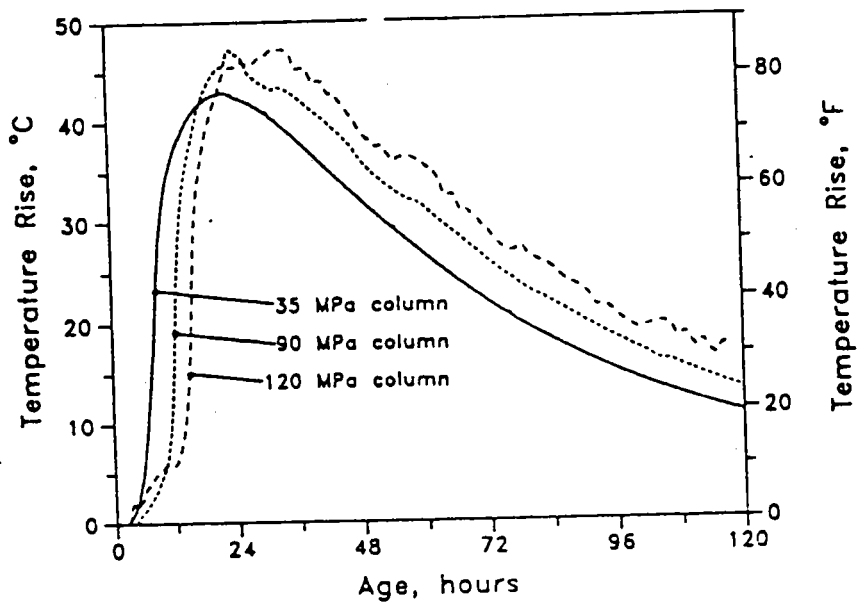
圖六 雙點振動抗壓強度與振動點距離關係圖



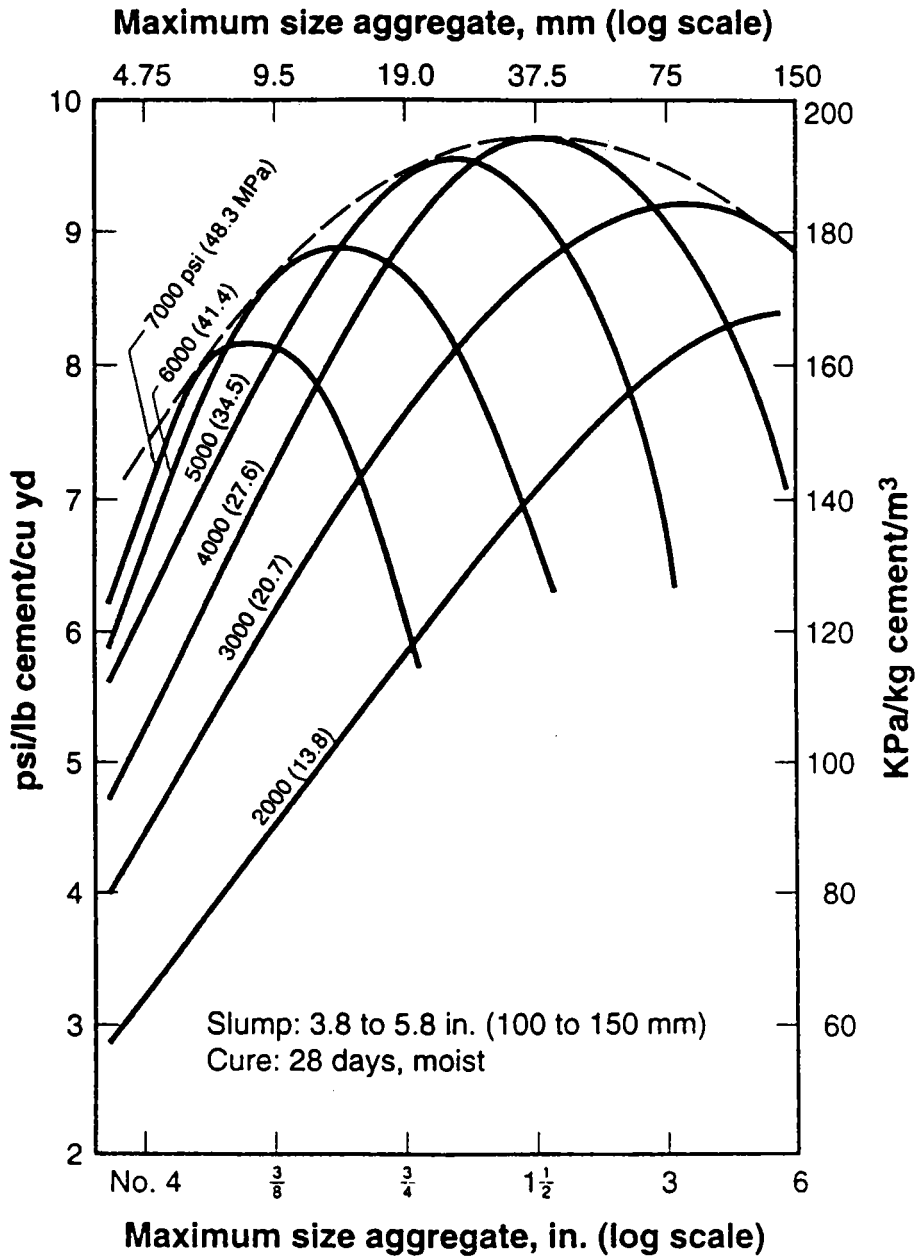
圖七 養護條件對混凝土強度之影響



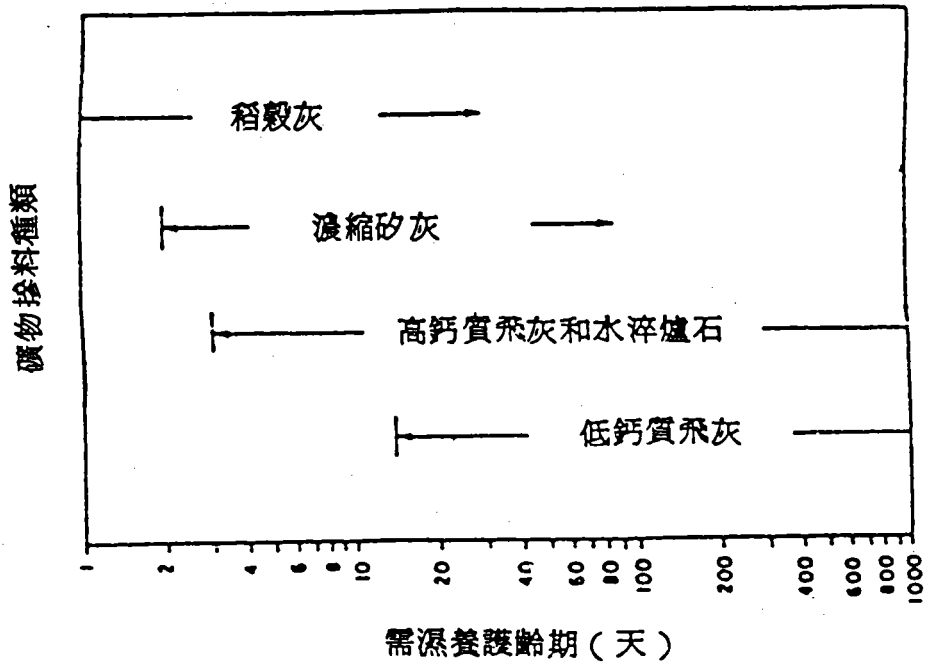
圖八 不同混凝土澆灌路徑之示意圖



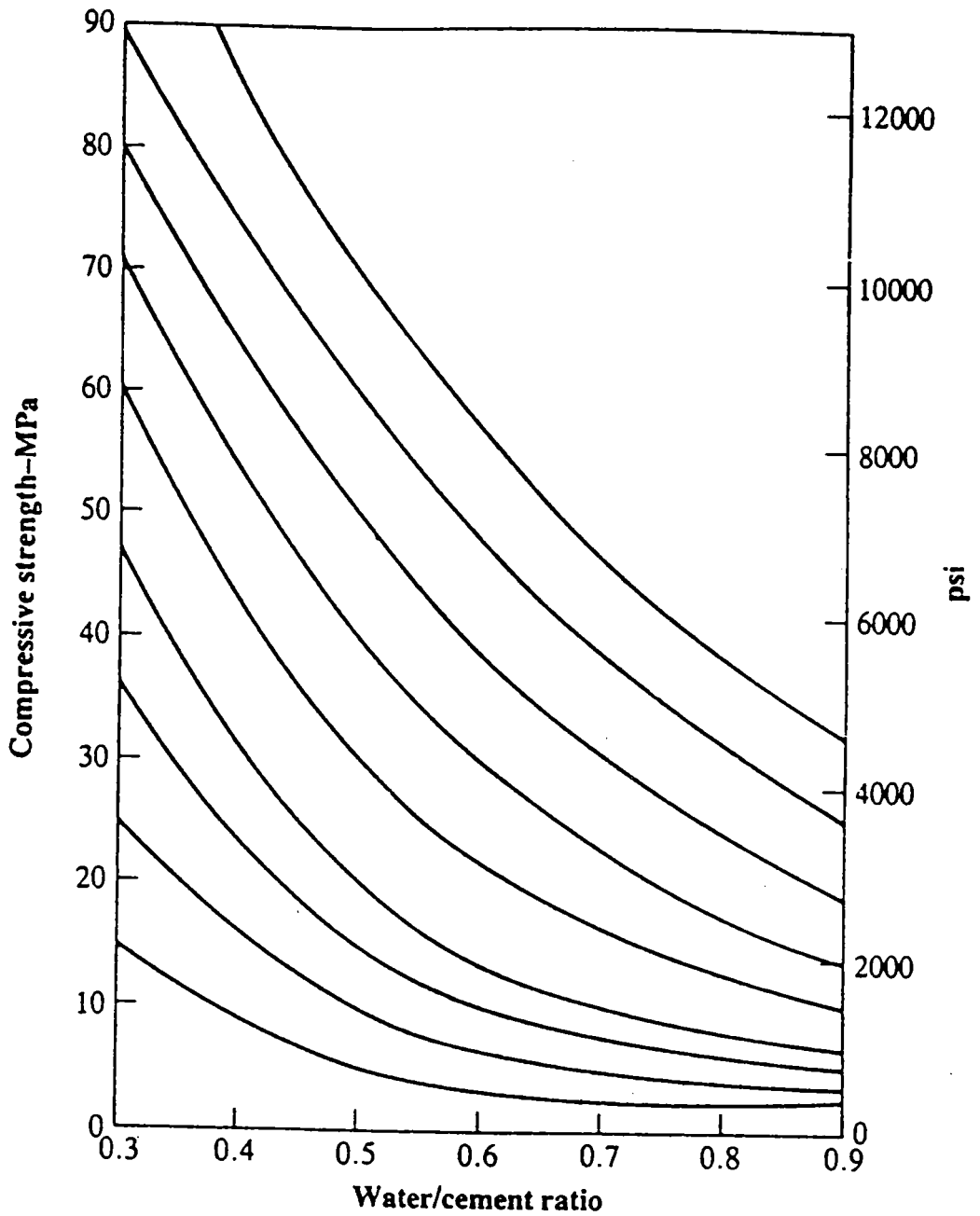
圖九 1X1X2m 實體柱內高性能混凝土昇溫曲線



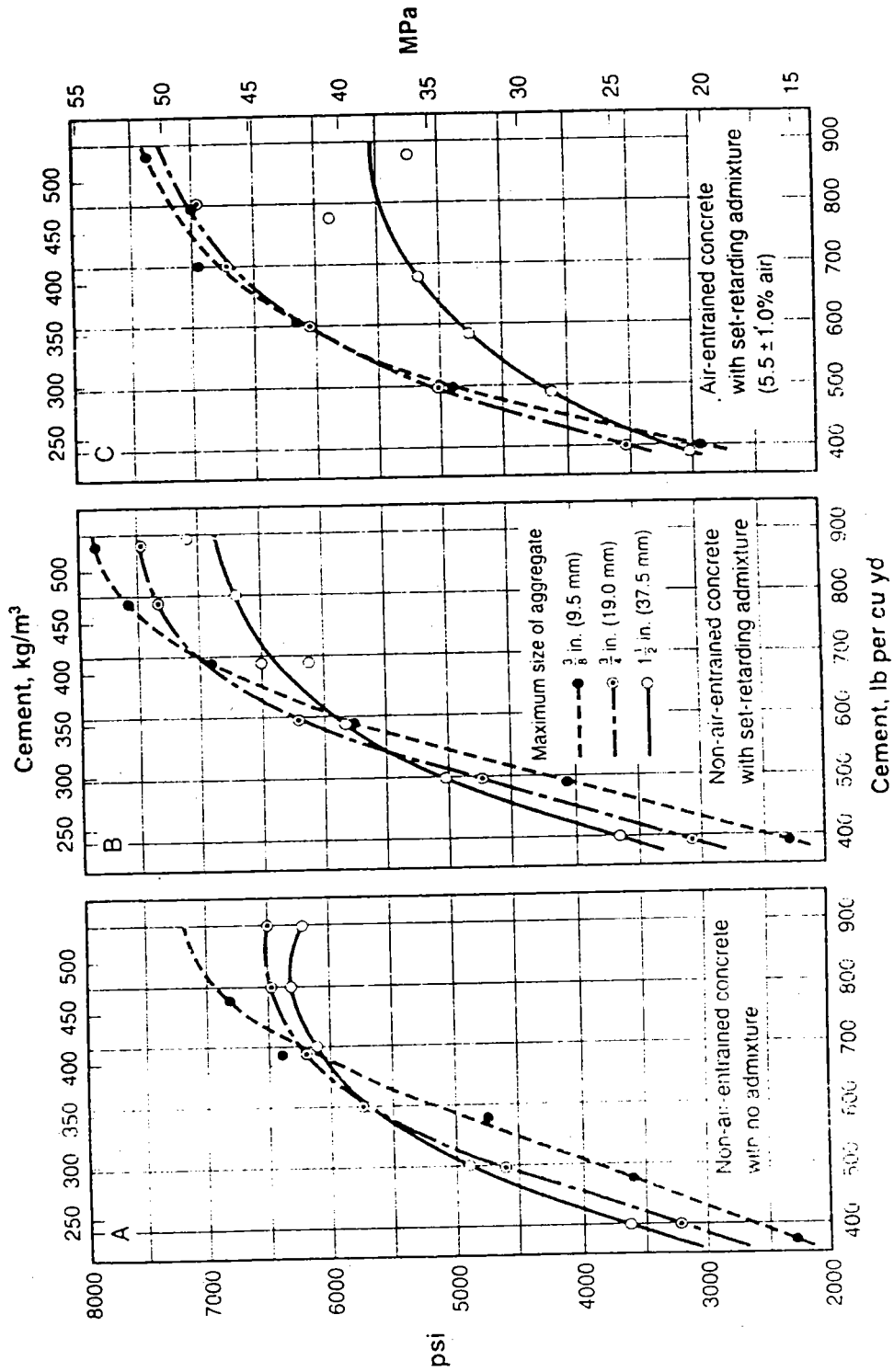
圖十 水泥效益與粗骨材最大粒徑之關係



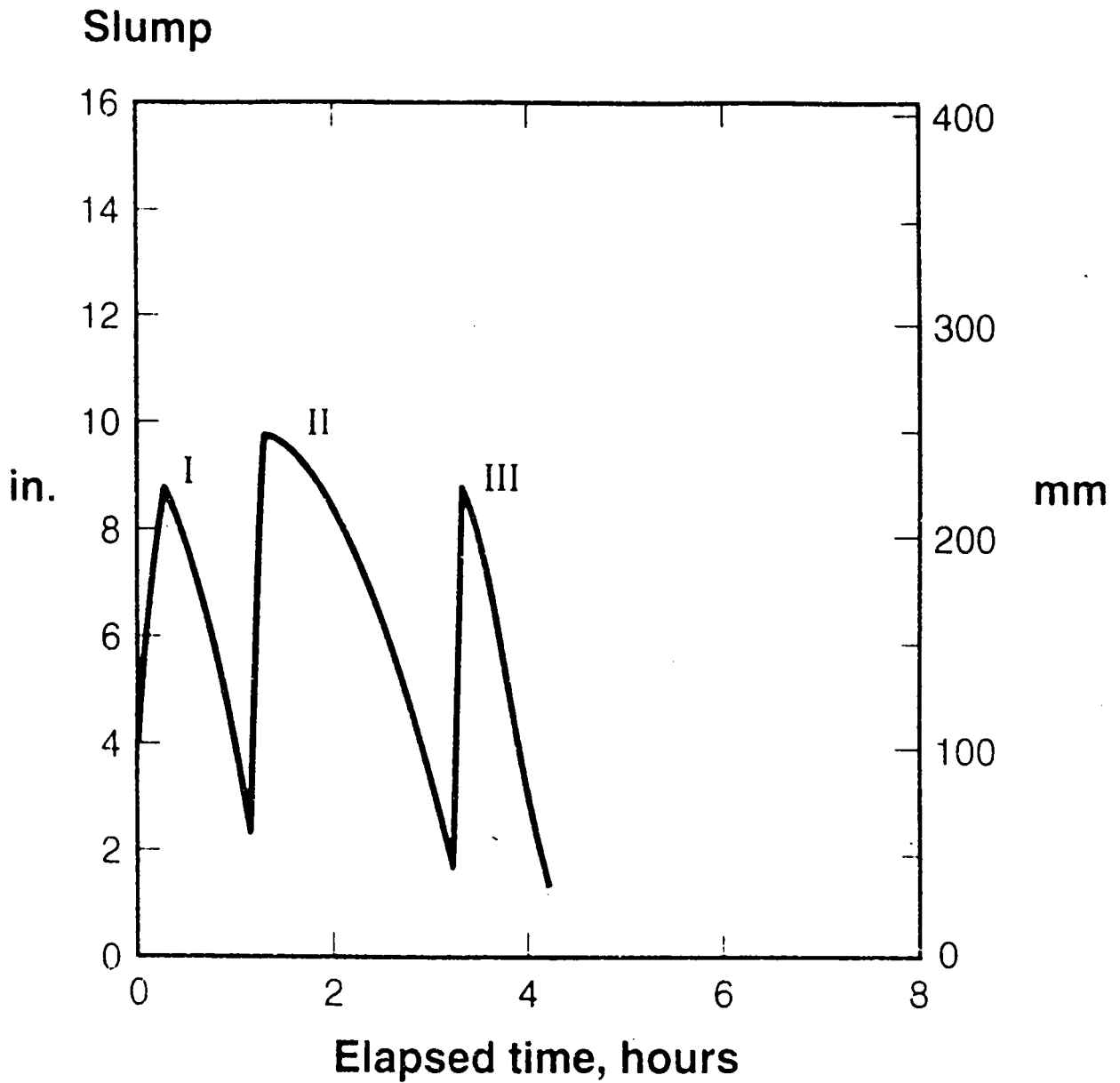
圖十一 不同礦物摻料強度產生之齡期



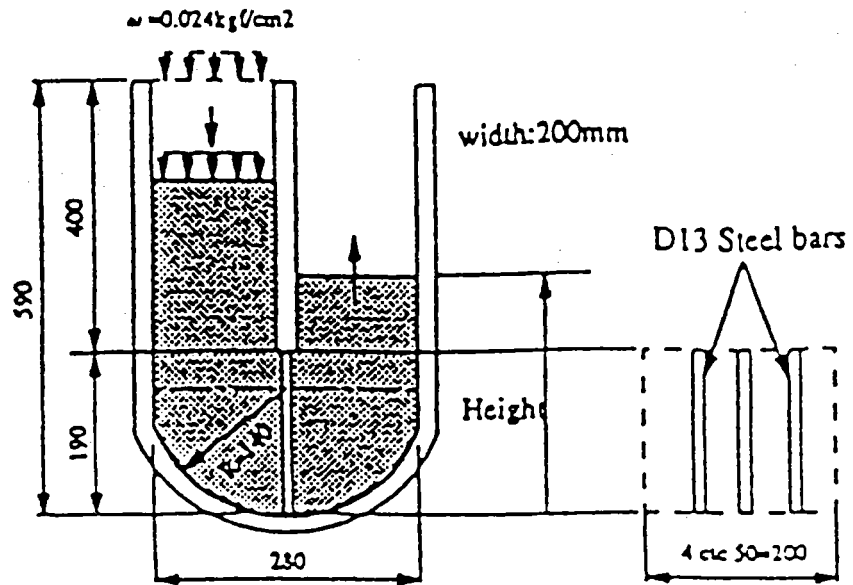
圖十二 高性能混凝土強度與水灰比之關係



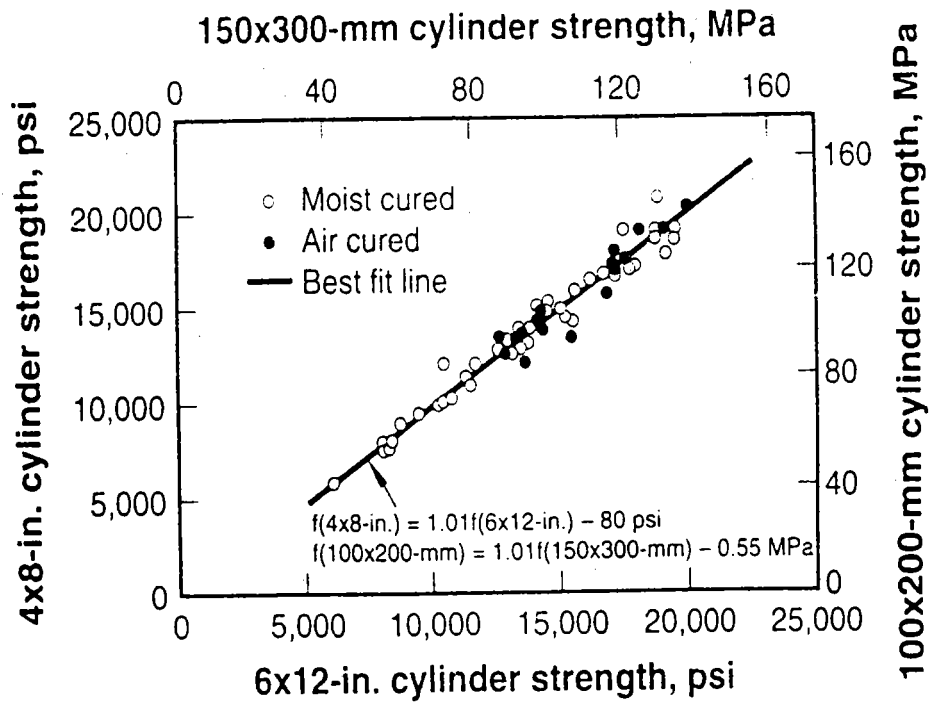
圖十三 水泥用量對混凝土抗壓強度之影響



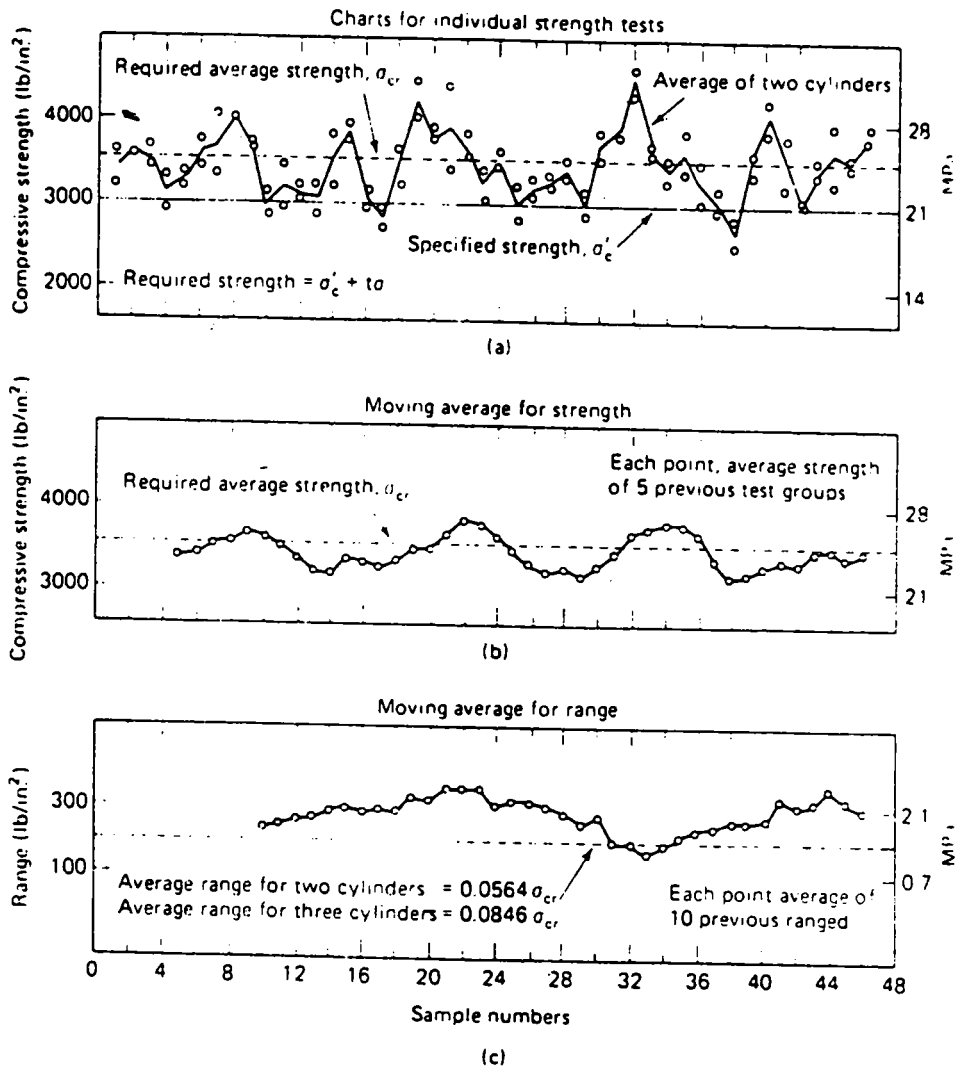
圖十四 強塑劑之加入對混凝土坍度之提昇



圖十五 免搗實 HPC 之試驗設備



圖十六 不同尺寸試體抗壓強度之間的關係



圖十七 混凝土品質控制

- 高性能混凝土之施工與品質 -
- 顏 聰 -

高性能混凝土拌合技術與新拌性質

劉俊杰* 童尙仁** 黃兆龍***

關鍵詞：優生高性能混凝土、ISO 14000、新拌性質

摘 要

傳統混凝土配比理念偏重「設計強度」及「工作性」，而優生高性能混凝土（EC/HPC）除此之外，則又另行考量「耐久性」及「經濟性」，並於材料設計階段，即力求日後病變基因的減少，並走向符合 ISO 14000 環保路徑，惟「安全、好作、耐久、經濟、生態」等五項性能之確切獲得，有賴正確拌合技術，故本文針對 HPC 之拌合前預備、拌合產製、及新拌性質進行探討，以期共同提倡優生混凝土在耐久性結構物及港灣工程上之應用推廣。

壹、前 言

工程材料之研發與應用，須不斷力求更新、變化材料原有性質，以提昇效能，使設計者更有創意空間，拌合者好拌、均勻、品質優良，使用者能獲取經濟、強固、耐久之材料性能。而優生 / 高性能混凝土（Eugenic/High Performance Concrete，EC/HPC）為一種最終品質符合原設計理想又經久耐用的材料，是最新的國際混凝土科技，及國內新近熱門的研發材料，也是一種學術研究與實務應用極為接近的建材科技，適合於 ISO 14000 地球環保及國內混凝土新科技開發的目標^(1,2)。

* 中華工學院土木工程研究所副教授

** 中華工學院土木工程研究所研究生

*** 國立臺灣工業技術學院營建工程系教授

HPC之開發，其理念基本上仍源自傳統混凝土，但其研發工作，通盤考慮安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性等五大性能之兼顧，如圖一所示，考量「天人合一」、「生剋機理」、「物盡其用」、「重視人性」及「自然保育」的理想，超脫傳統混凝土所注重「病理觀念」之局限，並藉現代混凝土科技，及對「材料生剋互制機理」之瞭解，透過基因控制，以研發具有「優生理念」的現代化混凝土，而有別於前階段及現階段國際間，以「安全性、工作性」為研發主流的混凝土，以達普遍地提高臺灣地區混凝土工作性、經濟性、耐久性、及工程品質的目標⁽¹⁻⁴⁾。故本文之主要目的在基於以上理念，討論HPC之拌合技術，以確保優生理念所設計之HPC，能以合理正確的產出，並展現部份HPC新拌性質之研發成果，以分享國人。

貳、拌合前預備工作

一、材料性質檢測

高品質HPC之拌合及產製，有賴料源及品管工作之配合，除級配需符合CNS 1240 之要求外，含泥量及細度模數，亦須加以適當追蹤、控制，以確認材料品質。此外，預拌廠在每日拌合前，應對砂之表面含水率，按一般常規一天至少測定二次以上，並將此數值設定於表面水補正裝置上。若粗細骨材表面含水率在0.5%以內之補正工作，由操作員操作補正即可。因為若一立方混凝土之用砂量為800kg，則0.5%之表面水將產生4Kg/M³ 之水量誤差，以坍度換算則有1.5~2.0cm之變動。操作員要作0.5%以上之補正時，應與品管人員聯繫，以檢討表一所示之內容，有那方面之問題須加以克服。又因HPC基本上常使用強塑劑及礦物摻料，故對細骨材表面水量之調整，極為敏感，故須妥慎精細檢測並調整之^(1,5)。

二、材料計量

一般預拌混凝土材料之計量規範，對於實際計量之動態計量誤差，規定各材料必須為（1）水泥、飛灰及水在±1%以內（2）骨材在±2%以內（3）摻料在±3%以內。因預拌廠材料之計量誤差，對混凝土材料拌合後之性能，如坍度及強度及品質之變動均有影響。一般由於混凝土

之坍度值決定於其單位用水量，故水之計量誤差若為1%，將導致混凝土坍度誤差至少0.4cm，若為HPC則將會有更敏感之影響，故砂之計量誤差值若為1%，將導致坍度誤差 $\pm 0.2\text{cm}$ ，因此水之計量誤差若超過2%時，混凝土之坍度誤差約1cm以上⁽⁵⁾。可見混凝土坍度與坍流度值單位用水量之關係密切，故對高品質要求之HPC，在拌合之前材料計量及含水量修正之工作更不可輕忽，方能拌製成優良品質之HPC。

此外，因EC/HPC亦講究「生態性」，即減量使用水泥，以充分發揮材料效益；又因水泥與水之單位用量，對混凝土強度影響很大，若水泥計量誤差為1%，以28天強度而言，將使混凝土產生 $\pm 8.2\text{kgf/cm}^2$ 之強度差，水量誤差1%，則使混凝土強度差為 $\pm 6.8\text{kgf/cm}^2$ ⁽⁵⁾。此皆顯示「水灰比會影響混凝土強度」之Abrams定則，故水及水泥若有超過設定值2%之計量誤差時，即會使混凝土達到強度變動偏差 15kgf/cm^2 左右，如超過此範圍，例如 $\pm 3\%$ 時即演變為強度標準差約 $20\sim 25\text{kgf/cm}^2$ ，而不利於HPC之品管工作。故HPC材料之計量，不宜超過規定之容許公差，因其不僅對混凝土之「新拌特性」、「安全性」、「經濟性」等會有不利影響，亦會影響「耐久性」、「透水性」及「生態性」等其他性能，且有害HPC之品質均勻性及品管工作，故應在所允許之計量公差範圍內，不可超過，以確保HPC應有之品質。

以HPC而言，材料之計量允許公差如下⁽⁶⁾：

- 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法碼（或重量塊），以供隨時校核計量裝置。
- 3、材料計量之許可差（公差）如表二所示。

材料不當的超量置入，除造成經濟損失外，並對混凝土之品管控制有不良影響，其可能發生原因略舉如下：（1）計量機械損壞（2）計量槽下部排出口橡皮磨損；和（3）作業開始前，計量器未校正歸零⁽⁵⁾。

因此應確實的進行檢查保養工作，計量及拌合設備一般規定半年檢查一次，以保持機器處於正常狀態，使產品能符合CNS 3090均勻性規定，方能確保優生HPC之產製，並能充份發揮材料特性。

參、HPC之拌合產製

一、HPC之試拌

HPC在實驗室之小型試拌，除注意前述所稱合格器材之預備，及計量誤差之減少外，過程中應注意下列事項^(1.6.7)：

- (一)應先將粗、細骨材調整至面乾內飽和，或是些許的溼潤狀態，在試驗過程中，因骨材含水量對HPC性能之影響相當大，若能正確控制其含水量，則能提高試拌之精確度，以減少誤差，趨近真實^(1.7)。
- (二)拌合設備之轉速及容量，會影響拌合結果，唯有均勻且確實的拌合才能顯現HPC之材料特性及要求，故拌合設備宜用多軸強制式或水平雙軸拌合機為之，以使混凝土各項材料，在槽內產生扭攪、搓練、跳躍、流動、擴散等運動，使之充份拌合，以發揮材料最高效益，並產生均勻性⁽¹⁾。
- (三)實驗室試拌後，量測各種新拌性質，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，可再加強塑劑，予以調整工作性，但添加時必須注意用量及水灰比之改變，若是過當，則會造成泌水及析離之現象，反而降低了混凝土之品質⁽¹⁾。
- (四)在較高水膠比的配比中，常會因黏稠度不夠，而無法達到高流動性坍流度的要求，此時可以適度的提高卜作嵐材料比例，增加砂率，減少細度模數，或改變最大骨材粒徑，來改善HPC之坍流特性^(1.7)。
- (五)大量試拌時，須注意實驗現場外在環境溫、濕度的改變，並對拌合機能量和效率，事先加以了解，對實驗誤差加以防範、控制，方能正確測試出HPC之材料特性^(1.5)。

(六)拌合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合機後，再按規定注入，在重新進料前，應將原有拌合物全部卸出，若有特殊需要時，拌合程序則可另定之⁽⁶⁾。

(七)拌合水及液態摻料，應在規定拌合時間的頭1/4時段內添加完畢，拌合時間應考量HPC材料之新拌塑態均勻性，並進行試驗以驗證之⁽⁶⁾。

二、HPC之拌合

拌合即指混凝土材料加水拌合，而成為混凝土之作業，混凝土之品質依據拌合之優劣決定其成敗，拌合完善即可發揮良好之品質。拌合能量及時間不足時，則無法獲得均勻之HPC，因此品質極可能無法達到規範要求的性能。混凝土係粗細骨材與水泥漿體黏結固化而成，故應使水泥漿體及礦物、化學添加劑等，能均勻遍佈於骨材料周圍，不然HPC之性能無法充份發揮。所以混凝土之產製，應以適當之設備，按規定配比標準及程序，精確配料，並均勻拌合，方能獲得所需之性能。故高性能混凝土，應儘量以多軸強制式或水平雙軸拌合機拌合之，以輸入適當能量，促進HPC材料經濟效能之充份發揮^(1.5)。

一般混凝土材料拌合常規為「材料投入拌合機時，應以全部材料適時均勻投入為原則。而適當之材料順序，依據拌合機之形式、骨材種類及粒徑、單位用水量、單位水泥用量、摻料用量、骨材材料之種類而異」。材料投入拌合機之次序，攸關HPC各材料性能及其經濟效益之充份發揮，並對HPC拌合效率，新拌及硬固性能有所影響。依據研究結果顯示如圖二所示，若水泥（C），砂（S），細骨材（G），水（W）同時輸入，並一次拌合，或加入「C+W」後，再投入「S+G」並分兩段拌合者，其抗壓強度較高。換言之，首先配製水泥漿或水泥砂漿拌合均勻後，再加粗骨材分兩段拌合；或「C+S+G+W」同時加入後，分一段拌合，此兩種材料投入方式及拌合方法有較好之成果^(1.5)。

有關HPC拌合均勻性試驗，可參照CNS 3090，亦可參考日本JIS A119，該試驗方法認為如果水泥砂漿之單位容積質量差在0.8%以下，單位粗骨材量之差5%以下，則可以認為混凝土材料「均勻拌合」⁽⁵⁾。

以美、日較具規模預拌廠對拌合時間之檢討，可知拌合時間於普通混凝土應在45秒以上，低坍度時應60秒以上，不然會有拌合不均勻之現象。如果是可傾式拌合機則須延長上述拌合時間，故依據拌合機之種類，同一HPC配比之拌合時間各有不同。另一方面拌合時間如果太久，骨材容易碎裂，有時產生分離現象，會增加微細粉量，且延長時間降低產能，並且對HPC之工作性，無正面之幫助，故操作員應遵守拌合時間之作業要求，不可爲了倉促交貨，而縮短拌合時間，以致造成不均勻之混凝土，如此則無法產製HPC，對於使用多量礦粉摻料之HPC，尤應測試拌合之均勻性，以訂定適當之拌合時間。

肆、高性能混凝土之新拌特性

美國混凝土學會 ACI 之混凝土配比設計法，以拌合水量作爲控制混凝土坍度要件。在此前題下，當要求較高工作性時，拌合水及水泥用量將會提高。而高性能混凝土，是以最小孔隙緻密配比法，來計算材料用量，其精神是企望採用最少的粘結漿量，使粗細骨材的堆積，不僅能達到最高密度，並能促進 HPC 之工作性，且加入高性能減水摻料，使新拌混凝土中之各種粒料，較易延剪力切面滑移，以減少流動時之阻力而提高工作性。HPC 新拌特性與硬固性質之影響基因，如表三所示。

HPC 之新拌特性，必須具備高流動化，而無泌水與析離現象產生，且使粗細骨材等固態材料，彼此間能緊密的堆積，此有賴正確的拌合技術，使 HPC 中粒料、粉料、摻料，能均勻充份拌合，以造就 HPC 有較佳的工作性，及較低的坍度損失率。並且此配比邏輯在高雄 85 層 T&C TOWER 超高大樓現場筒型試驗，實地驗證新拌特性，拌合後 120 分鐘之坍度，仍然大 23cm，換言之，坍度損失率比傳統混凝土低很多。

本文依 ASTM C143-78 坍度試驗法，量測 HPC 拌合後 0 分鐘與 45 分鐘之坍度及坍流度，並以自行發展之流變性量測儀測定新拌 HPC 之流變行爲，以介紹在正確且充份拌合下之 HPC 新拌性質：

一、坍度流度

由圖三所示，為高性能混凝土坍度流變與時間之關係，圖中顯示 0 分鐘與 45 分鐘之坍度，均能達到 $250\pm 20\text{mm}$ 之坍度設計，而其流度值亦高達 $600\pm 50\text{ mm}$ 左右。因高性能混凝土除了添加高性能界面活性劑（SP）外，另有一大特色，就是採用飛灰、爐石等卜作嵐材料，經適當的配比與拌製，而達到 HPC 坍度與流度之穩定性，與一般強塑化混凝土之坍度損失率比較可看出，HPC 可工作持續性要較強塑化混凝土為佳，因此若與傳統混凝土比較，高性能混凝土更具備有良好之可工作性。

二、黏滯性

圖四顯示隨著添加強塑劑（Superplasticizers）量的增加，漿體粘滯性愈小，圖五為添加劑量對粘滯性的時間效應，可明顯看出添加 SP 可降低漿體粘滯性，並可在一適當時間內維持其工作性，原因為 SP 具有分散顆粒的作用，其分子被水泥顆粒表面吸附，若使水泥顆粒面上產生副電荷，導致水泥極性顆粒間產生電子相斥。但 SP 用量若太少，則不能達到所要求之工作性，用量過多則易使混凝土產生泌水及析離現象，而降低混凝土之強度。

三、泌水之影響

HPC 材料具有高流動化，容易施工，且設計規範要求不得有泌水析離之缺陷，以提高 HPC 均質特性，此乃有鑑於台灣傳統混凝土配比材料常因施工困難，而有額外加水的情況，非常容意產生骨材析離及泌水現象，除了造成品質不均勻外，亦導致強度折減，由圖六所示，當泌水 4 % 時，其強度折減將達 18 % 左右，因此說明 HPC 與其他混凝土一樣，如果品質不佳，則其造成對強度折損之影響將更鉅，不得不慎，推究其原因乃是泌水造成孔隙弱界面的增加，及漿體骨材界面鍵結力降低，因此造成混凝土承受載重後，將由該弱界面滑移破壞。為此採用少漿量的緻密配比法，則相對之總體拌合水量亦較少，其泌水基因減低。故針對臺灣傳統工人施工習性而言，坍度 25cm 以上之混凝土，應可以杜絕現場因施工困難而加水引起之品質劣化困擾，而具有提昇混凝土耐久性品質之功能。

四、HPC 之流變性

流動化 HPC 企求之流變性質如表四所示。由自製之流變儀量測新拌 HPC 的流變性質，圖七所示分別為水膠比為 0.28、0.32、0.4 時，新拌高性能混凝土之流動性質，顯示 W/B 愈低其所需降伏值愈高，但和文獻資料比較（如圖八）可知，在相同水灰比條件下 HPC 之剪應力值遠較傳統混凝土值為低，並且 HPC 之流變性質具有復硬性，復硬性係由於顆粒吸引力鍵結的關係，造成剪力遞減現象，當結構破壞力大於結構破壞鍵結力時，在同一速率下減速曲線的剪力會小於加速曲線的剪力，這種現象說明 HPC 在泵送時，最初必須以較慢的速率泵送，當突破最大降伏值時，泵送車便可以較小的泵送壓力即可將混凝土輕易地輸送。

圖九所示為 HPC 與傳統混凝土 28 天抗壓強度發展比較，證實 HPC 因具備良好的工作性，使混凝土具有良好之均勻性，證明優異的新拌性質更能保障混凝土強度品質之提升。

伍、結 論

- 一、HPC 之拌合特性，與材料性質、材料配比及拌合技術有關，在提高工作性及輸送性的原則下，應謹慎選擇材料配比，如採用低水泥量，並適當調合飛灰、爐石、高性能減水劑，可使坍度損失率減低，延長可施工時間，並配合適當拌合技術，即可較佳保障 HPC 之產製。
- 二、HPC 充份的運用材料特性及適當配比邏輯，可提高新拌混凝土之可工作性，並將其可工作時間的持續性提高，HPC 的早期強度，並不因坍度穩定性的提高，而有所影響，反而因緻密配比理念，而有較佳的早期性能。
- 三、產製 HPC 可促進混凝土之可施工性，間接避免工人在工地加水的惡習，並保障混凝土的品質，HPC 之材料品質甚為重要，如有泌水將造成強度損失，強度損失率可達 18%，不可不慎。惟在正確配比設計及適當拌合狀況下，HPC 具有良好之新拌及強度發展特性。

誌 謝

本文得以順利完成，得感謝黃教授兆龍多年之栽培，及臺灣工技學院營建材料研究室諸多同仁，及學弟朱惕之鼎力相助，特此一併銘謝。

參考文獻

1. 劉俊杰 (黃兆龍教授指導), 「高性能混凝土緻密充填配比法及早期性質演繹」, 國立台灣工業技術學院博士論文, (1995)。
2. 劉俊杰、黃兆龍, 「優生混凝土初期工程性質」, 高性能材料研討會論文輯, pp177~200, (1995)。
3. Mindess, S., and J.F. Young, Concrete, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., PP194~197, (1981)。
4. Mindess, S., and J.F. Young, Concrete, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., PP194~197, (1981)。
5. 黃兆龍、蔡明谷「預拌混凝土問題集錦」, 詹氏書局, PP98~108, (1994)。
6. 沈進發、黃兆龍等, 「HPC施工規範之研訂」, 結構工程學會研究報告, pp37~38, (1994)。
7. 黃兆龍、劉俊杰、朱惕之, 「高性能混凝土新拌性質之探討」, 第十屆全國技職教育研討會, PP177~186, (1995)。
8. Powers, T.C., The Properties of Fresh Concrete, John Wiley Sons, Inc. pp246~287 (1968)。
9. Chern, J.C., C.L. Hwang, and T.H. Tsai, "Research and Development of HPC in Taiwan", ACI : Concrete International, Vol. 17. No10, pp71~76 (1995)。

表一 預拌混凝土流動性不符之原因探討表^(1,2,3)

流動性不符	原因探討
配方出錯	1.廠拌與試拌之機械系統誤差 2.設定錯誤 3.計量誤差
摻料不符	1.摻料濃度不均 2.投入時機不宜 3.計量誤差
整體評估	1.骨材表面水設定值不符 2.計量精度過大 3.骨材粒徑差異 4.拌合機拌合不均 5.水泥或骨材溫度過高

表二 材料之計量之許可差^(3,8)

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

註1、粒料之表面含水量應視為拌合水之一部份。

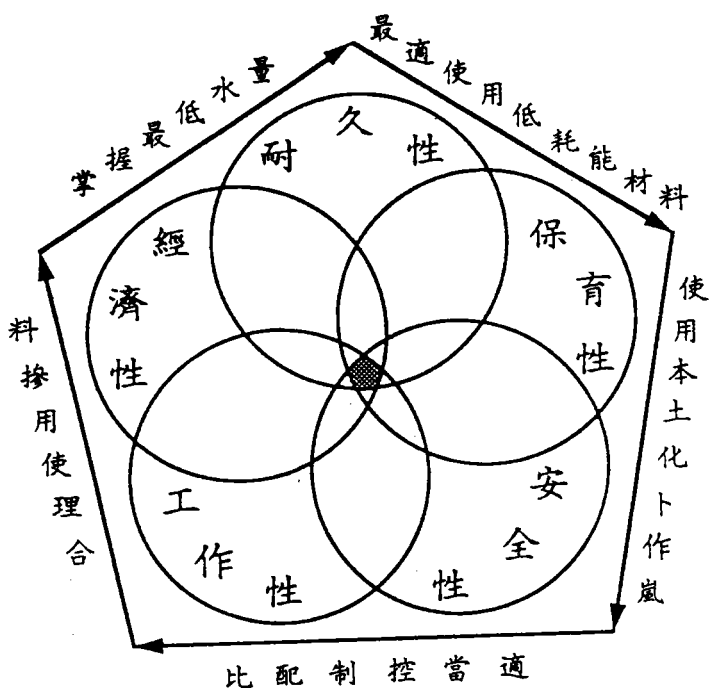
2、用於溶解或稀釋摻料之水及液態摻料，應視為混凝土拌合用水之一部份。

表三 HPC新拌與硬固性質之影響基因^(1.2.4)

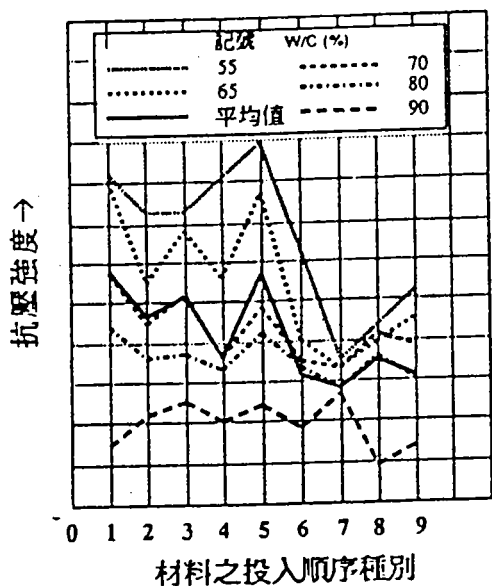
影響基因	新拌性質之影響	硬固性質之影響
孔隙率	孔隙的增加在水灰比固定在可以增加漿體體積，提高混凝土工作性	孔隙增加降低硬固混凝土強度，提高滲透性，降低耐久性，但對抗凍融能力提高
用水量	提高用水量能增加新拌混凝土之工作度，但過多的水會造成泌水及析離	用水量增加降低硬固混凝土強度，因為水常是破壞之介質，且因水份的增加而使體積變化增大
水灰比	水灰比提高工作性提高	水灰比提高，空隙增加，強度降低
水泥用量	用漿量提高增加工作度，但水化熱提高	使硬固混凝土產生較大乾縮、潛變量
骨材級配	適當的骨材級配，可以改變混凝土稠度	對混凝土強度有影響
骨材表面狀況	光滑表面之骨材能提供較佳之工作性	粗糙表面之骨材能提供較佳之鍵結強度
外加劑	使用表活性劑能增加工作度，並適當減少水之用量	過量的藥劑易造成泌水、析離而降低混凝土強度
摻料	適當使用波索蘭材料能改變混凝土稠度，並降低水化熱	增加水密性，提高耐久性 及強度，但而注意使用量

表四 流動HPC企求之流變性質 (1.4.5)

	施工需要	企求行為	待提昇技術面	相對流變性
流動性 (Mobility)	運送及澆置時良好之流動性與泵送性	1. 初始流動抗力小 2. 流動期間抗力小 3. 流動變形時，無內部斷裂	1. 界面潤滑 2. 流質性 3. 柔塑性	1. 漿體界面層 2. $\eta \downarrow, \tau_0 \downarrow, (c, \phi) \downarrow$ 3. $\varepsilon_y \uparrow, c \uparrow$
安定性 (Stability)	運輸及操作過程之均質性	1. 保水能力大 2. 漿體抵抗骨材相對移動的能力大	1. 避免泌水 2. 避免析離	1. $c \uparrow$ 2. $c \uparrow$ $\eta \uparrow$
密實性 (Compability)	澆置 / 搗實過程能獲致最大密度	1. 內部抗力小 2. 表面抗力小	1. 內部摩擦小 2. 黏結力	1. $\tau \uparrow$ 2. $E_{cf} \downarrow, \sigma_{cf} \downarrow$
修飾性 (Finishability)	修飾容易	適當比例有黏結力之漿量	1. 柔塑性 2. 避免泌水	1. $\varepsilon_y \uparrow$ 2. $c \uparrow$

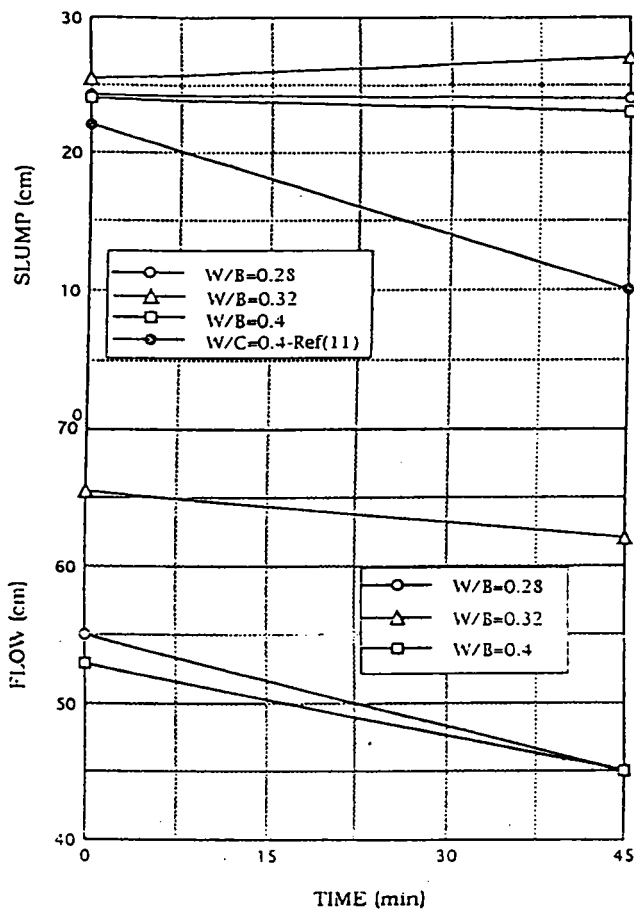


圖一 HPC之研發理念^(1,2,3)

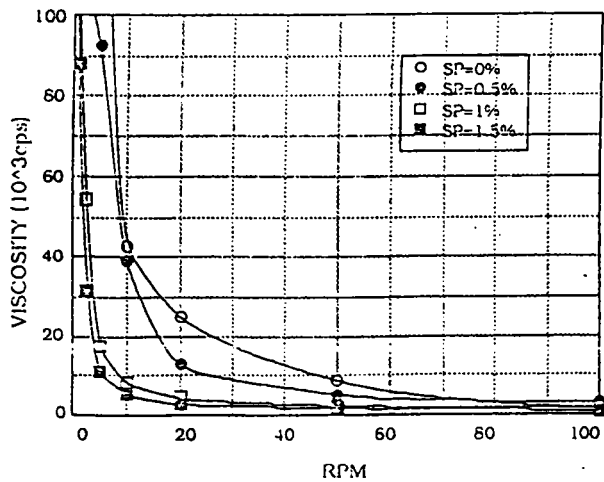


使用水量：水泥重量比
55,65,70,80,90%五類
使用拌合機：安治川鐵工場製
混練時間：90秒
次要9種分析實施狀態
(1):(C+W)30"+(S+G)60"-----=90(秒)
(2):(C+W)30"+(S)30"+(G)30"-----=90(秒)
(3):(C+W+S)45"+(G)45"-----=90(秒)
(4):(C+S+G)45"+(W)45"-----=90(秒)
(5):(C+S+G+W)90"-----=90(秒)
(6):(C+S)30"+(W)30"+(G)30"-----=90(秒)
(7):(C+S)30"+(G)30"+(W)30"-----=90(秒)
(8):(G+C+W)45"+(S)45"-----=90(秒)
(9):(G+C+W)30"+(S)60"-----=90(秒)
C · W · S · G:水泥 · 水 · 砂 · 石子
C · W · S · G:秒
() :同時投入

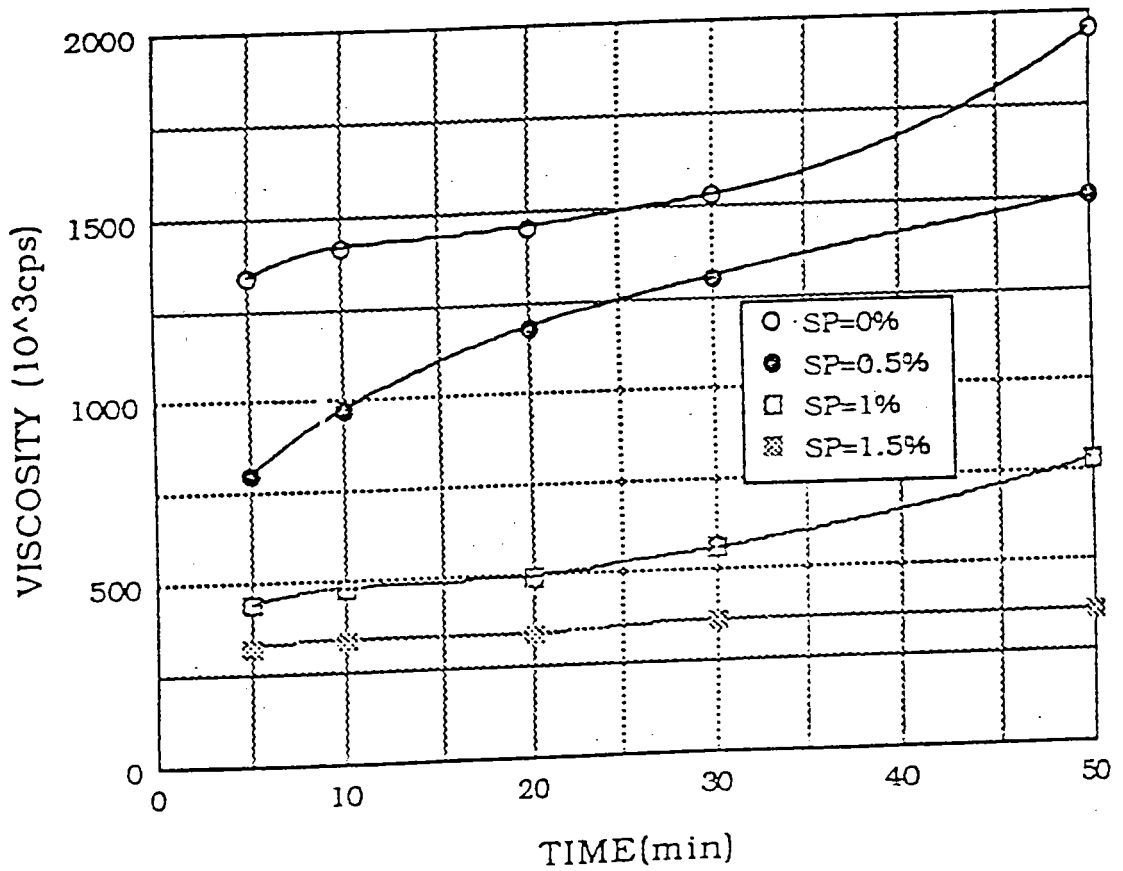
圖二 材料投入順序與抗壓強度之關係⁽⁵⁾



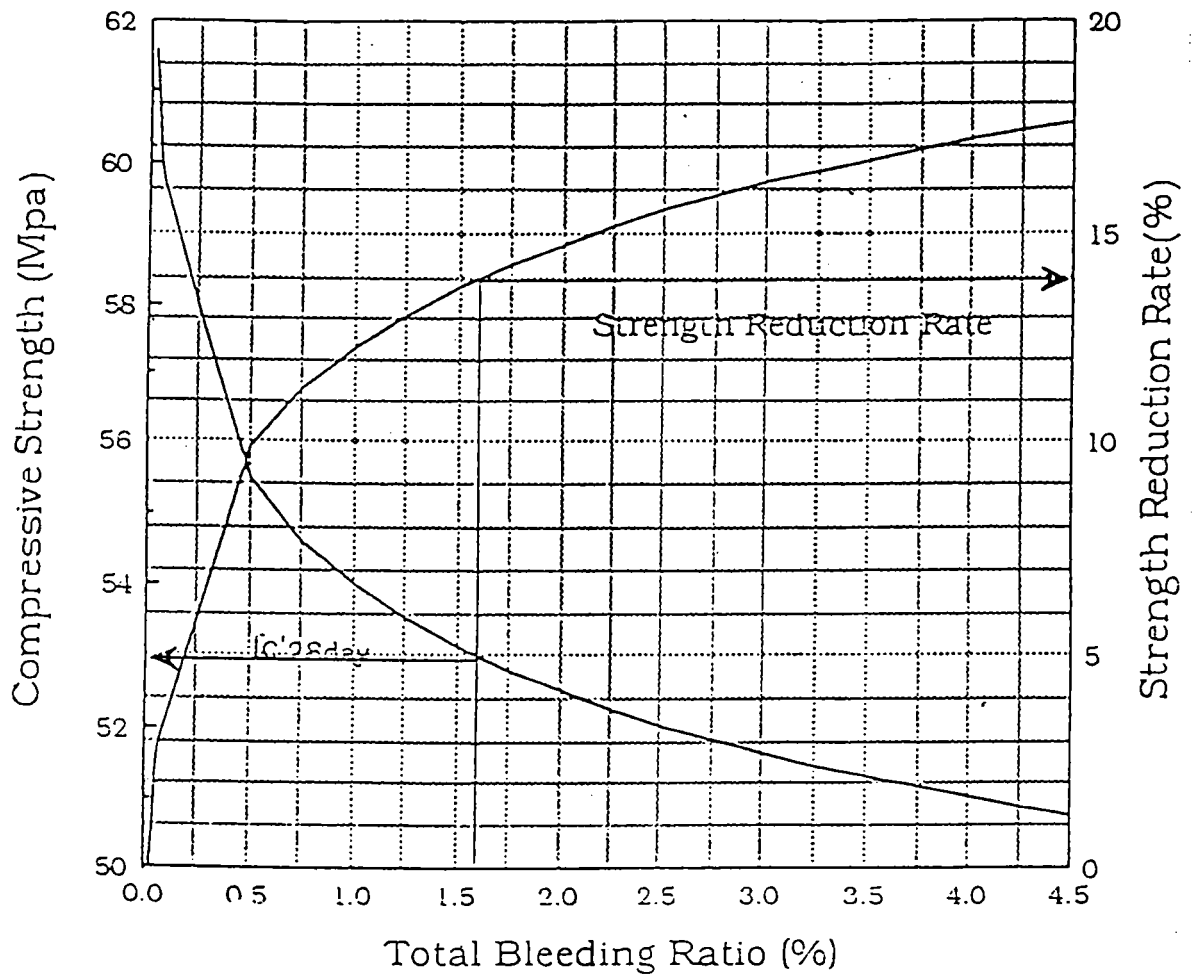
圖三 HPC坍度、流度與時間之關係⁽⁷⁾



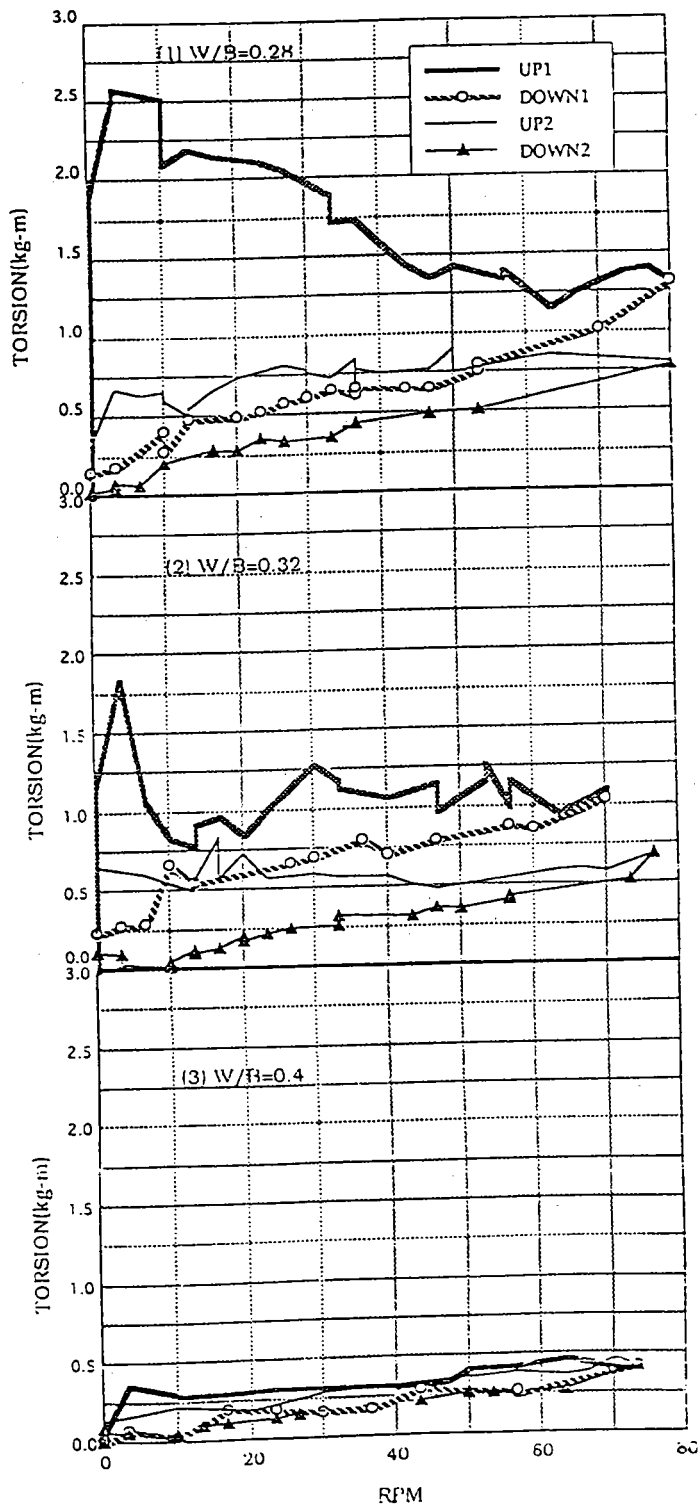
圖四 添加強塑劑對漿體粘滯性之影響⁽⁷⁾



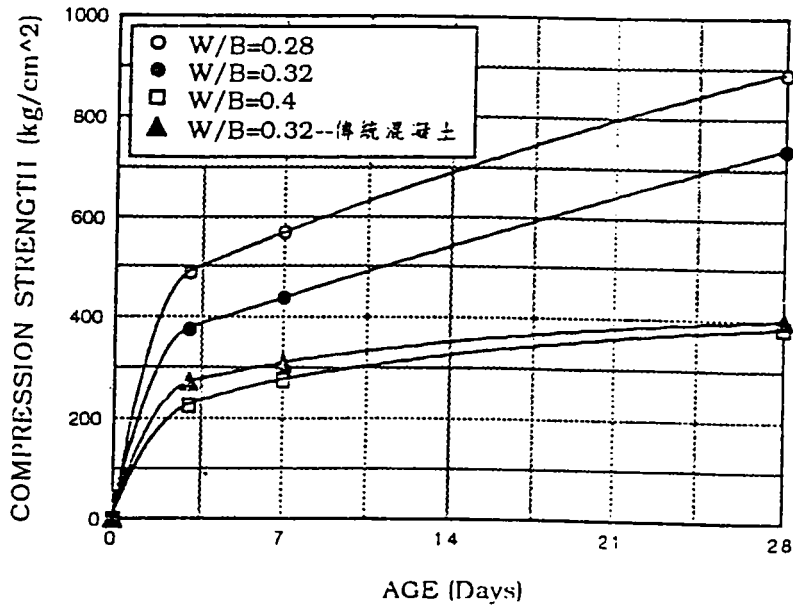
圖五 添加強塑劑對漿體粘滯性之時間效應⁽⁷⁾



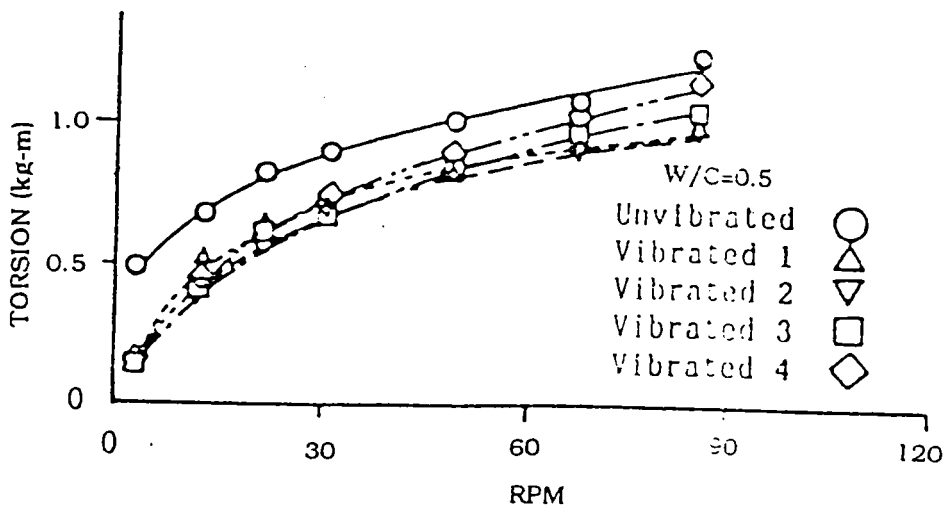
圖六 泌水對HPC之抗壓強度之影響⁽¹⁾



圖七 HPC流動性質⁽⁷⁾



圖九 HPC抗壓強度發展曲線⁽⁷⁾



圖八 文獻中HPC流變性質⁽⁷⁾

- 高性能混凝土拌合技術與新拌性質 -
- 劉俊杰 董尚仁 黃兆龍 -

高性能混凝土之工程性質

李隆盛* 黃兆龍**

關鍵字：緻密配比法，高性能混凝土，膠結料，強塑劑，破裂韌度

摘 要

本研究以緻密配比法設計不同配比之高性能混凝土新拌性質方面坍度、坍流度可達($250 \pm 20 \text{ mm}$; $600 \pm 50 \text{ mm}$) 由結果顯示高流動化之高性能混凝土其工作性受膠結料、水膠比及強塑劑用量等之交互影響，在硬固性質方面抗壓強度皆可達設計標準且隨齡期增加而增加其水泥強度效益較一般高強度為佳，且尖峰強度所對應之應變較一般或高強度混凝土為高，顯示其韌性較一般混凝土為優，劈裂強度及抗彎強度與ACI 363 高強度混凝土較近似，而破裂韌度方面，在加載解載過程中尖峰荷載後曲線的衰減較平緩不會急劇劣化，顯示高性能混凝土在吸能阻裂方面有不錯的表現。

壹、前 言

傳統混凝土的強度、工作性受水泥量及用水量所支配，一般認為水泥用量越多其強度也會較高，在工作性的考量下導致一般高強度混凝土通常會採用較高之水泥量形成富配比，除了經濟性及環保生態外，更會衍生乾縮及潛變的問題⁽¹⁾，因此本研究依緻密配比理論⁽²⁾，以本土化材料研製高工作性（坍度 $250 \pm 20 \text{ mm}$ ）及高強度（ $\geq 55 \text{ Mpa}$, 8000 psi ）之高性能混凝土（High Performance Concrete），除降低水量及水泥用量外，並提高骨

* 華夏工商專科學校講師

** 國立台灣工業技術學院教授

材及卜作嵐材料用量，另外以化學摻料來改善工作性，運用材料特性來提升混凝土品質，企望達到合乎經濟性、生態性及符合工程安全耐久需求之優生設計高性能混凝土。

高性能混凝土依據文獻可以為高流動化、高剛性、高強度、水密性等混凝土⁽³⁾，以高性能混凝土施工規範對高強度混凝土而言，為一種免搗實之混凝土⁽⁴⁾，換言之，高性能混凝土是一種特別考慮營建施工品質需求的混凝土，無論如何設計，其最終品質必須是性能高的⁽⁵⁾，因此在設計階段就必須考量組成材料之基本性能及其互制互利性，而高性能混凝土除了早期安全強度及高流動性外，也必須是考慮到耐久性，美觀性及經濟性的，否則一味只注意強度及工作性要求，則會淪為一般高強度混凝土常使用較多量的水泥，對經濟性及耐久性將有不利之影響，因此如何設計經濟、耐久、生態性的高性能混凝土是非常重要的。

所以高性能混凝土的設計在材料選擇上更形重要，有必要對個別組成材料深入瞭解才能有效掌握材性，另外必須以本土化材料為前提，強調本國環境為主的條件下，探討高性能混凝土組成材料需求性質。

混凝土強度不論是否為高性能混凝土，其強度主要由水泥漿、骨材及水泥漿 / 骨材界面鍵結強度三者所支配^(6,7)。影響水泥漿強度的主要因素為水灰比及齡期，在高性能混凝土基本要求低用水量及「免搗實」的原則，必須添加強塑劑或減水劑等表面活性劑的策略，以促使水灰比低及稠度大的混凝土變成高流動化混凝土。一般骨材的強度均可超過 420 kg/cm^2 ，故通常只重視骨材的表面狀況，尤其是微糙度；水泥漿 / 骨材的界面通常是混凝土最弱的一環，若不加以注意則可能影響到混凝土的強度，一般降低水灰比可增加界面的互制力外，通常以卜作嵐材取代部份砂或水泥，及以其它界面活性劑藉由離子交換的方式，而轉化界面大量的氫氧化鈣形成與水泥膠結水化物類似之物質，達到界面強化的效應⁽⁵⁾。

貳 驗證計劃

本研究探討依緻密配比⁽⁸⁾所設計出不同配比之高流動化高性能混凝土，表一為本研究配比之變數，針對不同配比來探討新拌及硬固間之關係。

一、配比設計方法

按表一之變數，經緻密配比公式計算各配比⁽²⁾。

$$\text{混合材料比例 } \alpha_j = \frac{W_i}{W_j} \text{ ----- (4)}$$

$$\text{計算空隙量 } V_v = 1 - \frac{W_i}{\gamma_i} \text{ ----- (5)}$$

$$\text{設定水泥漿量 } V_p = K, V_v = K, n \text{ ----- (6)}$$

$$\text{骨材用量 } V_a = 1 - V_p \text{ ----- (7)}$$

$$\text{各種材料配比 } W_i = \frac{V_j}{\frac{1}{\gamma_i} + \frac{\alpha_j}{1 - \alpha_j} \frac{1}{\gamma_j}} \text{ ----- (8)}$$

配比資料如表二所示。

二、試驗方法

- (一) 坍度試驗：依ASTM C143 或CNS 1176 「混凝土稠度檢驗法」規定實施之。
- (二) 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」實施之。
- (三) 抗彎強度試驗：依ASTM C78 之規定，試驗尺寸為15 cm × 15 cm × 53 cm，以三分點荷重法，求抗彎強度。
- (四) 彈性模數及波松比量測：以變位計測定軸向變位，並以應變計同時測定其橫向及縱向之應變以求得其靜態之彈性模數及波松比，同時進行動彈性模數測定以供參考。
- (五) 破裂韌度試驗：依據國際岩石力學學會建議對圓柱試體進行山型缺口切製，再由三點彎曲試驗來測出材料的破裂韌度。

參、結果分析

一、高性能混凝土配比模式

本研究配比乃依據充填配比理念，簡言之即大顆粒間之空隙由較小顆粒來填充，小顆粒間之空隙由更小之顆粒來填充，而水泥所扮演的角色是粘結料亦是填充材，在優生配比理念中水泥著重在填充材料，主要能將材料固結及滿足需求之工作性即可，因此在可能範圍儘量降低水泥用量，另一方面大量使用卜作嵐材料（飛灰、爐石），藉由材料之充填及軸承效應改善工作性，再者藉由卜作嵐反應確保在較低水泥用量下，仍具有需求之強度。因此在降低水泥用量的前提下，用水量相對地應儘量減少，藉由適當的使用化學摻料（減水劑、強塑劑），來改善工作性的問題，所以優生混凝土之配比理念，是以工作性與強度並重，經濟、耐久、生態性等全方位考量為最高目標。

二、高性能混凝土之新拌性質

本研究中不同配比之混凝土對於水膠比 $(W/B) \leq 0.4$ 之優生混凝土其工作性均可達到坍度 $(250 \pm 20\text{mm})$ 流度 $(600 \pm 50\text{mm})$ 之要求，惟 W/B 較高之配比與目標有些許差距，究其原因是混凝土要達到流動化，其新拌性質需具備適當之粘稠度，藉由強塑劑及卜作嵐材料軸承效應及保水、斥水行為來達到需求之工作性，當 W/B 增加時，以充填配比法設計之混凝土其真正之水灰比 W/C 已變得相當高，通常 $W/B=0.5$ 其 $W/C \geq 0.78$ ，因此漿體變得比較稀，因此沒有足夠之粘稠度導致坍流度無法達到目標，因此要達到流動化之目標除了需有適當之用水量外，更受強塑劑、卜作嵐材料用量所左右，由試驗結果發現，優生混凝土之工作性受到強塑劑濃度及卜作嵐材料與水泥用量比之交互影響，不同漿量不同水膠比之混凝土配比其強塑劑濃度與卜作嵐材料含量關係如圖一所示，由圖中發現曲線所涵蓋之範圍，其工作性均可達到工作性之目標而落於曲線外之點（配比）無法達到高流動化之目標，顯示材料間之互制行為影響混凝土性質甚巨。

三、高性能混凝土之硬固行為

本研究對於不同配比之高性能混凝土進行相關之力學性能測試，包括抗壓、劈裂、抗彎、破裂韌度等試驗，結果如下分述之：

(一)抗壓強度

各種不同配比之高性能混凝土其28天抗壓強度皆可達到設計強度，且隨齡期持續成長如圖二所示，且較長齡期之抗壓強度已成長至28天抗壓強度的1.5-2倍如圖三所示，而抗壓強度與（水灰比、水膠比、水固比）之關係如圖四所示，由圖中顯示較早齡期之試體，其抗壓強度與水膠比之相關性較差，究其原因乃是高性能混凝土採用較低的水泥量，較高的卜作嵐材料，因此其早期強度受水泥含量的影響較大。在水泥強度效率方面一年齡期的高性能混凝土每公斤水泥可發揮0.25~0.28 Mpa 的強度如圖五所示，在彈性模數方面，HPC 之彈性模數隨強度增加而有增加之趨勢如圖六，強度、尖峰應變、彈性模數其相互關係如圖7所示。

(二)劈裂強度

高性能混凝土之劈裂強度隨齡期增加而增加，本研究劈裂強度之測試齡期最長為28天如圖八所示，而劈裂強度與抗壓強度間之關係如圖九所示，圖中顯示高性能混凝土劈裂強度與抗壓強度間有不錯之相關性，但與ACI-318及ACI 363之預測公式相比較則有偏低之現象，只有高性能混凝土控制組試體（不加任何卜作嵐材料）與ACI 318較接近，若不考慮配比只考慮劈裂強度與抗壓強度之關係則相關性 $r^2 = 0.838$ 如圖十所示，若與其他學者之預測公式比較，HPC 劈裂強度與抗壓強度之關係趨勢近似，但部份亦是偏低，顯示劈裂強度與水泥用量有明顯的關係如圖十一所示。

(三)抗彎強度

不同配比之高性能混凝土其抗彎強度與抗壓強度關係如圖十二所示，圖中顯示高性能混凝土其抗彎強度與抗壓強度之關係介於ACI 318與ACI 363之間而以控制組較接近ACI 363，與其他高強度比較控制組亦較接近，而由圖十三載重與位移之關係圖顯示控制組試體其變位較小，勁度較大，而HPC則變位較大，抗彎強度比控制組稍低，但是就韌性而言則HPC優於控制組，究其原因乃是本研究之抗彎試驗只測試28天，對於HPC試體而言其卜作嵐反應尚未完全發揮，因此較長齡期之抗彎強度尚需進一步探討。

(四)破裂韌度

本研究HPC 之破裂韌度試驗依國際岩石力學學會 (ISRM) 建議方法進行測試，試驗齡期分別為7, 14, 28 天，試驗結果顯示HPC 完整荷載位移關係隨齡期增加而增加如圖十四 ~十六所示，尖峰荷載後其P-D曲線大都能維持緩慢下降之趨勢，即當達最大載重後仍能在相當之應變內承受相應之載重，不會如一般混凝土僅能承受很小的變形即驟然破壞，因此推論HPC 較一般混凝土有較佳之韌性。

肆、結 論

- 一、以緻密配比法設計之高性能混凝土，藉由材料的互制、互利特性可達到高流動化及高強度之目標。
- 二、藉由卜作嵐反應及堆積效應高性能混凝土強度隨齡期增長而增加。
- 三、高性能混凝土之水泥強度效益一年齡期之試體可達0.25 ~ 0.28 Mpa 。
- 四、高性能混凝土之劈裂強度及抗彎強度與ACI 363 之預測公式近似。
- 五、由破裂韌度試驗顯示高性能混凝土較一般混凝土為佳。

參考文獻

1. Kosmatka, s. H., and W. C. Panarese, "Design and Control of Concrete Mixtures, 13th Ed., Portland Cement Association.
2. Hwang, C. L., L. L. Lee, F. Y. Lin, J. J. Liu, "Densified Mixture Design Algorithm and Early Properties of High Performance Concrete", Journal of the Chinese Institute of Civil Hydraulic Engineering, Vol.8, No.2, pp.217~229 (1996).
3. Aitcin, P. C., and A., Neville, "High Performance Concrete Demystified", ACI Concrete International, 15(1), ACI, Detroit pp.21~26 (1993).
4. 高性能混凝土委員會，高性能混凝土施工規範研究組，「高性能混凝土施工規範之研訂研究報告」，中華民國結構工程學會(1994)。
5. 黃兆龍，「由高雄85層T & C Tower 論 HPC 材料選擇及性能」，高性能混凝土研發及應用研討會，pp.83~109，台灣，高雄(1994)。
6. Mindess, S., and J. F. Young, Concrete, Prentice Hall, Englewood Cliffs. N. J. (1981).
7. Popovics S., "The Slump Test Is Useless-Or Is It?", Concrete International, Sept. (1994).

表一 高性能混凝土試驗項目及變數一覽表

材料變數	高性能混凝土 I										高性能混凝土 II								
	試驗項目	C26	C29	C34	C45	S28	S32	SH32	S40	S50	F28	F32	F40	1.1n	1.2n	1.3n	1.4n	1.5n	1.6n
抗壓強度		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
超音波量測		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

備註：* 1.1n, 1.3n 1.5n (W/B=0.28, 0.32, 0.4); 1.2n, 1.4n, 1.6n, (W/B=0.32);

控制組 (C 字母) 及高性能混凝土 I (Vp=1.3n).

* 超音波量測齡期最長為 56 天。

符合說明：C 26

水膠比 (0.26, 0.28, 0.29, 0.5)

試體種類：C = 控制組

S = 高性能 - 礫石

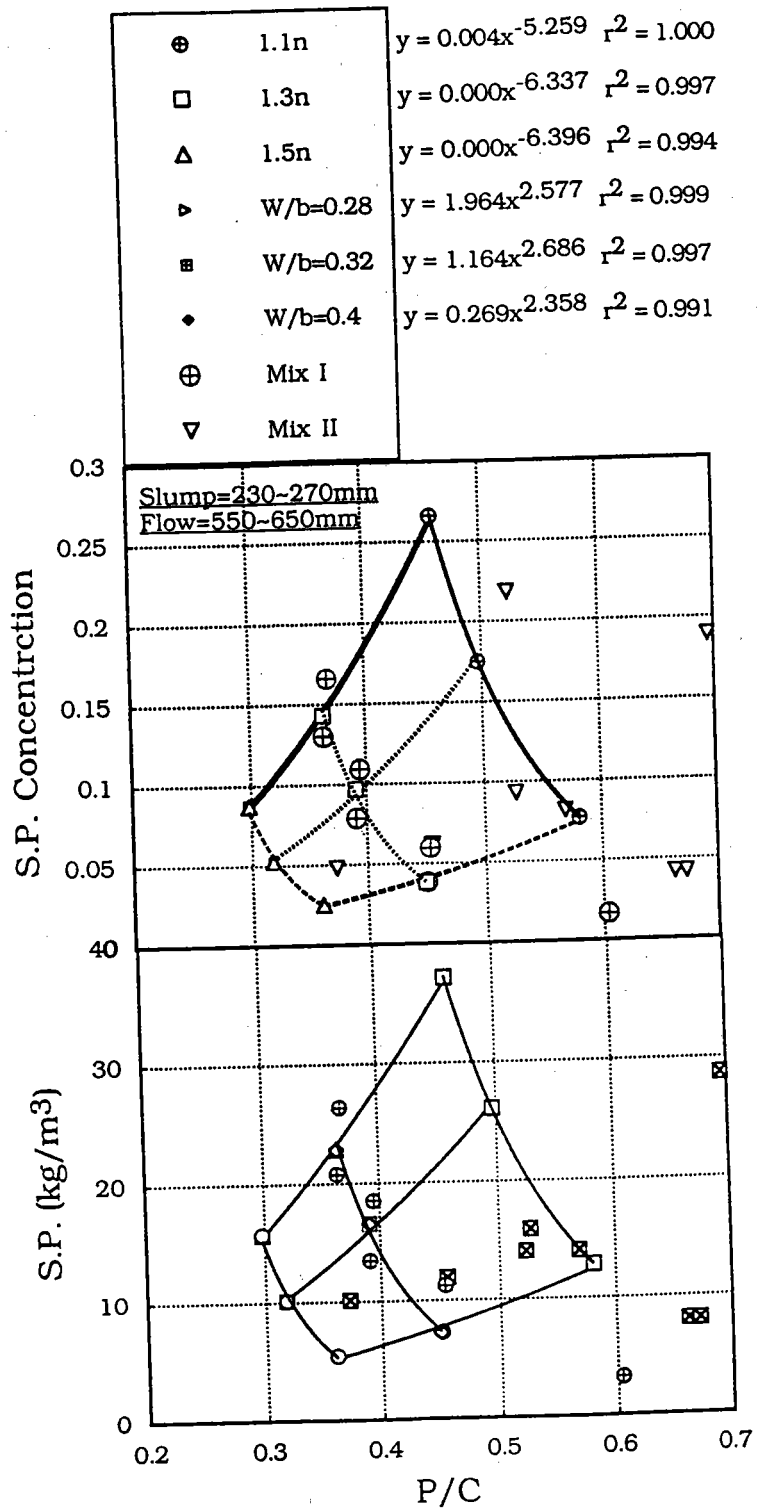
F = 高性能 - 矽灰

H = 高性能 - 鋼纖維

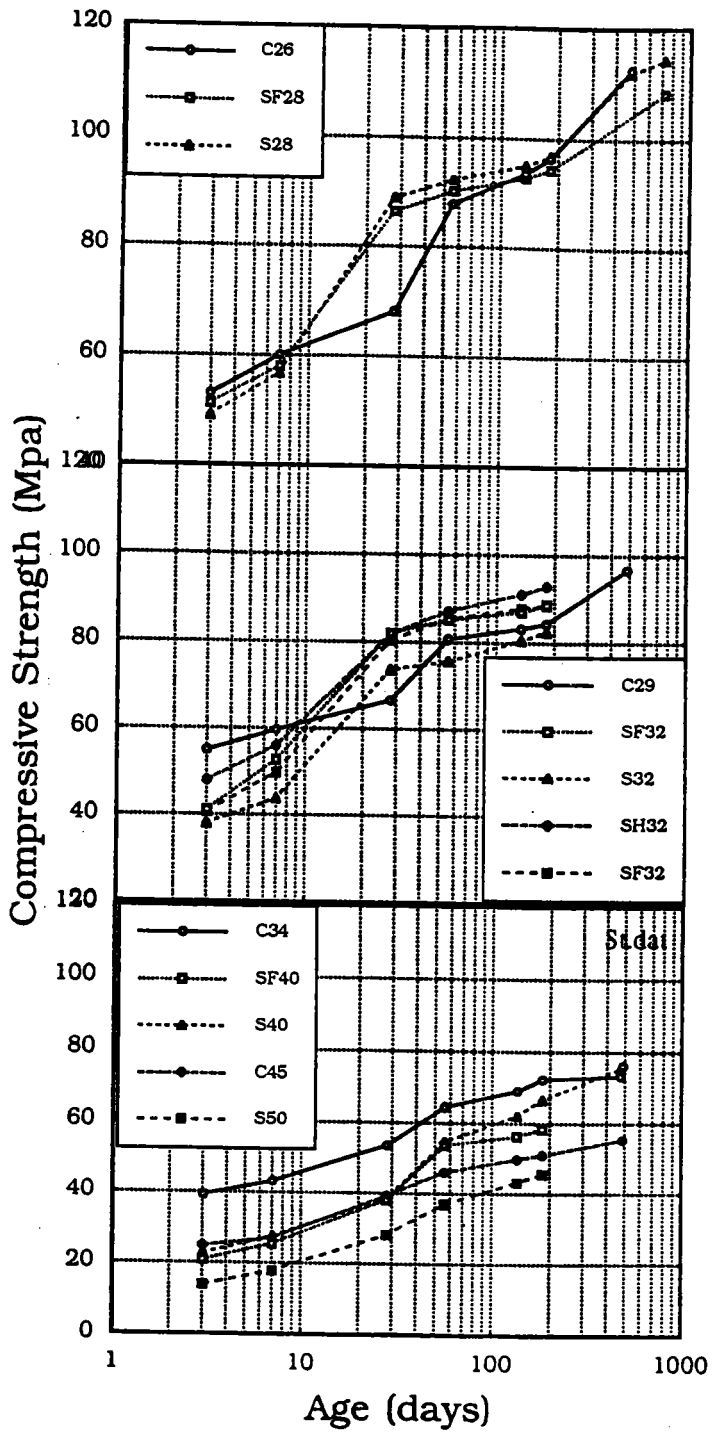
表二 材料配比

試體編號		V _p	W/C	W/B*	W/S*	Binder (B)			Aggregate (A)			Water (W)		Unit Weight
						Cement	Slag	Fly Ash	Coarse	Sand	Fiber	Water	S.P.	
高性能 I	C26	1.3	0.26	0.26	0.072	648	-	-	753	925	-	149	19.1	2494
	C29	1.3	0.29	0.29	0.078	616	-	-	753	925	-	168	10.9	2473
	C34	1.3	0.34	0.34	0.086	569	-	-	753	925	-	188	6.0	2441
	C45	1.3	0.45	0.45	0.092	450	-	-	788	967	-	199	3.5	2408
	S28	1.3	0.38	0.28	0.070	418	22	130	824	880	-	139	20.8	2447
	S32	1.3	0.44	0.32	0.073	384	20	130	824	880	-	157	13.5	2422
	S40	1.3	0.58	0.40	0.087	327	17	130	824	880	-	183	7.3	2369
	S50	1.3	0.80	0.50	0.090	243	13	134	857	916	-	192	3.2	2358
	F28	1.3	0.38	0.28	0.069	413	-	130	824	880	-	132	26.4	2440
	F32	1.3	0.45	0.32	0.076	380	-	130	824	880	-	151	18.5	2417
高性能 II	F40	1.3	0.58	0.40	0.087	325	-	130	824	880	-	177	11.3	2364
	H32	1.3	0.44	0.32	0.076	384	-	129	825	916	35	154	16.2	2446
	S32	1.2	0.42	0.32	0.067	364	19	141	942	801	-	140	12.7	2420
	S32	1.4	0.41	0.32	0.079	434	23	132	882	750	-	163	13.0	2397
	S32	1.6	0.39	0.32	0.089	497	26	123	822	699	-	187	6.2	2360
	S28	1.1	0.41	0.28	0.061	341	18	139	873	928	-	102	37.2	2494
	S32	1.1	0.48	0.32	0.066	312	16	139	873	928	-	123	26.1	2473
	S40	1.1	0.63	0.40	0.078	262	14	139	873	928	-	153	12.9	2441
	S28	1.3	0.38	0.28	0.071	419	22	130	819	871	-	137	22.8	2408
	S32	1.3	0.45	0.32	0.077	385	20	130	819	871	-	155	16.6	2434
高性能 II	S40	1.3	0.58	0.40	0.088	328	17	130	819	871	-	183	7.23	2355
	S28	1.5	0.36	0.28	0.081	496	26	122	765	813	-	164	15.8	2369
	S32	1.5	0.42	0.32	0.088	457	24	122	765	813	-	183	10.2	2358
	S40	1.5	0.54	0.40	0.10	394	21	122	765	813	-	209	5.4	2329

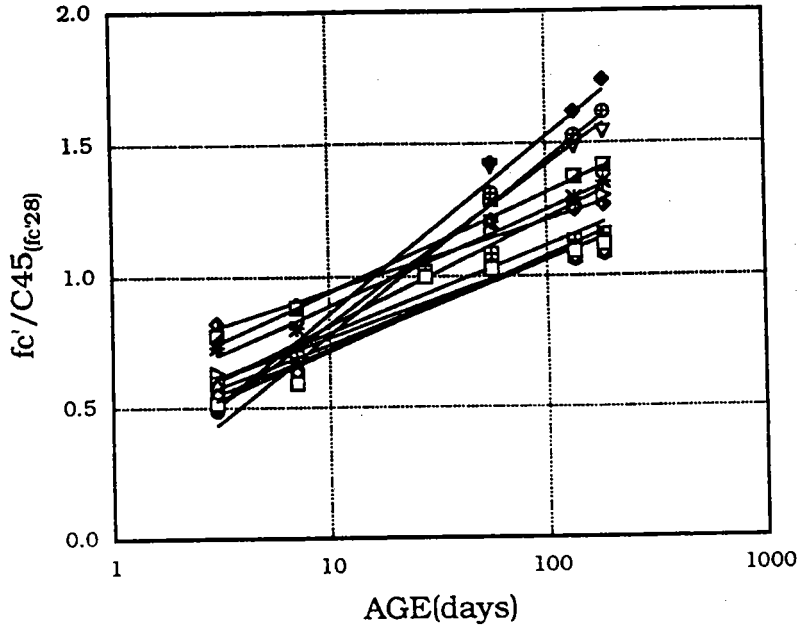
* W/B 及 W/S 分別表水膠比 ($W/B = W/(C + P)$)，P 為卜作嵐材料)，及水固比 ($W/S = W/(C + P + A)$)



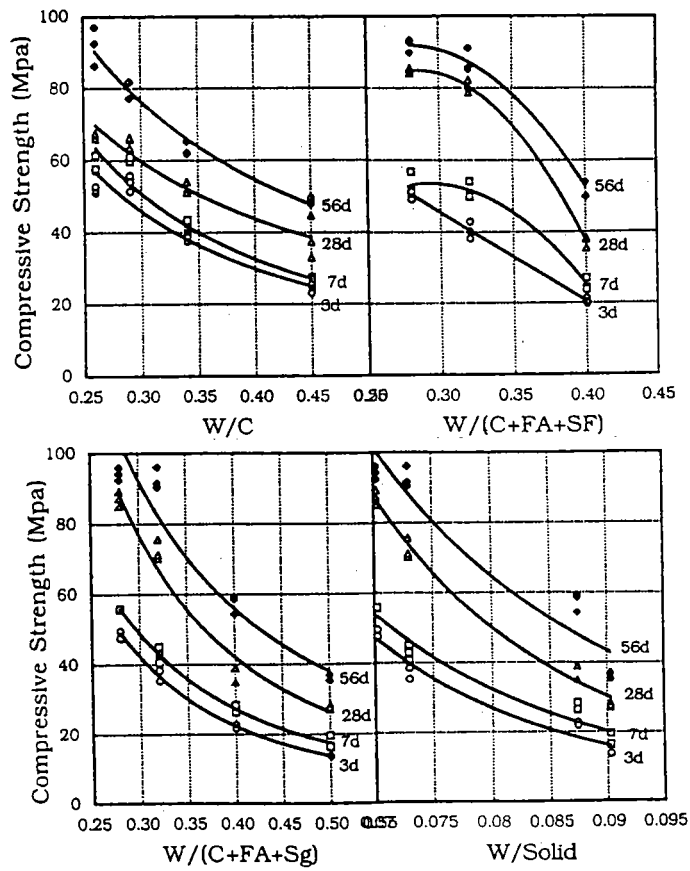
圖一 強塑劑、卜作嵐材料用量與工作性之關係圖



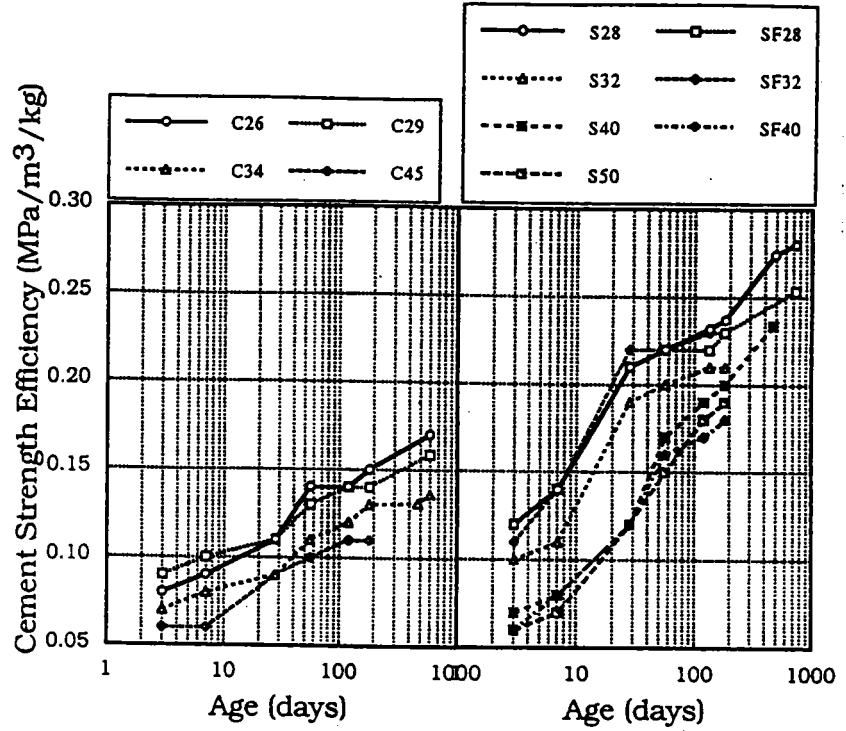
圖二 HPC 抗壓強度發展示意圖



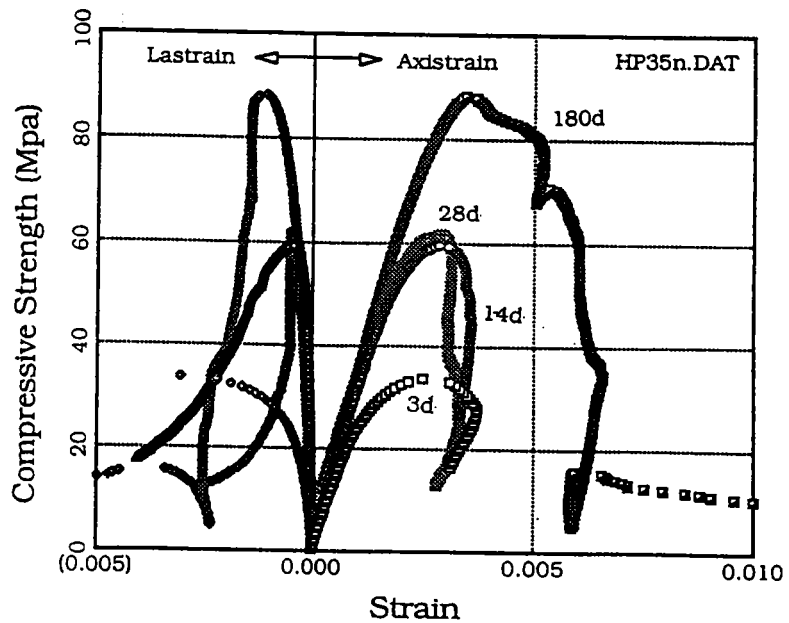
圖三 抗壓強度與 28 天設計強度比較示意圖



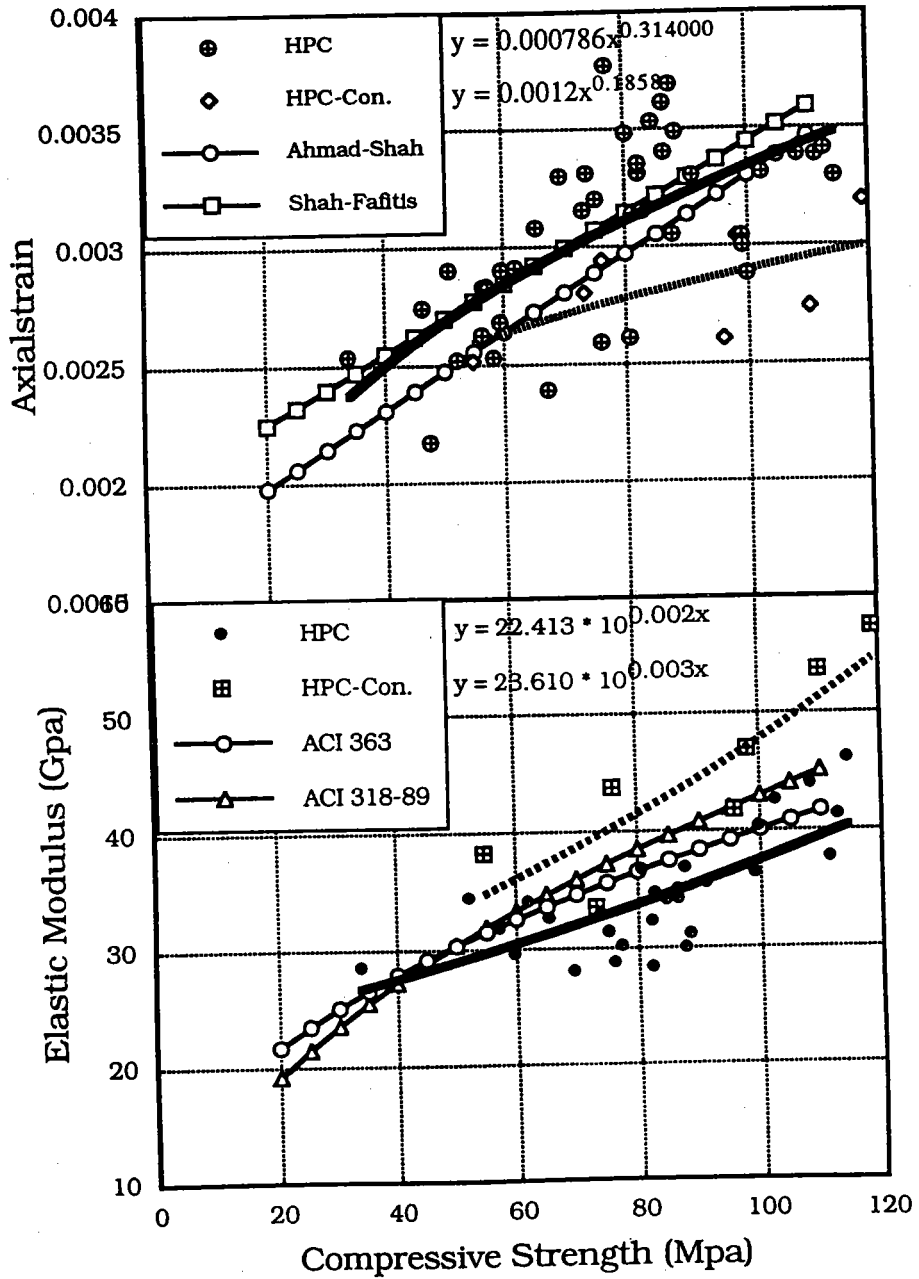
圖四 抗壓強度與水灰比、水膠比、水固比關係圖



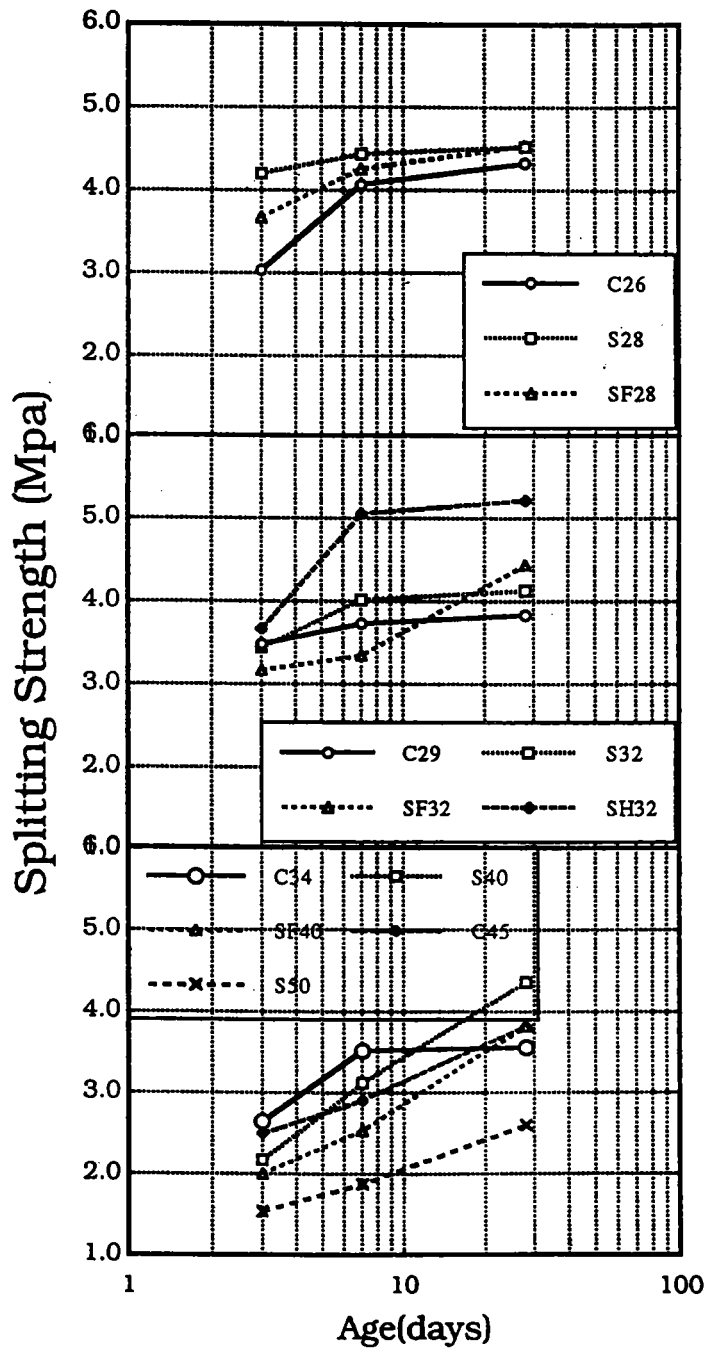
圖五 HPC 水泥強度發展效率示意圖



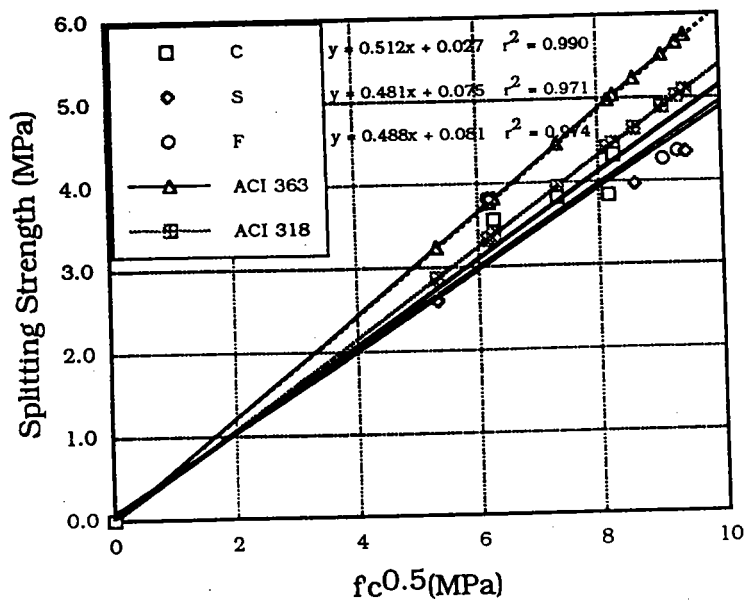
圖六 不同齡期 HPC 應力應變行為之關係



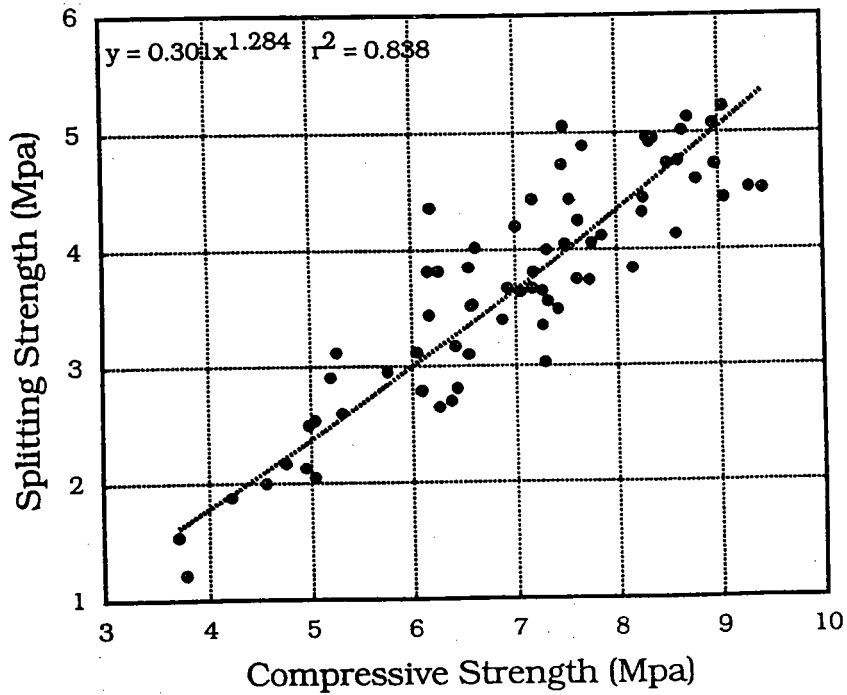
圖七 HPC 抗壓強度、尖峰應變、彈性模數之關係



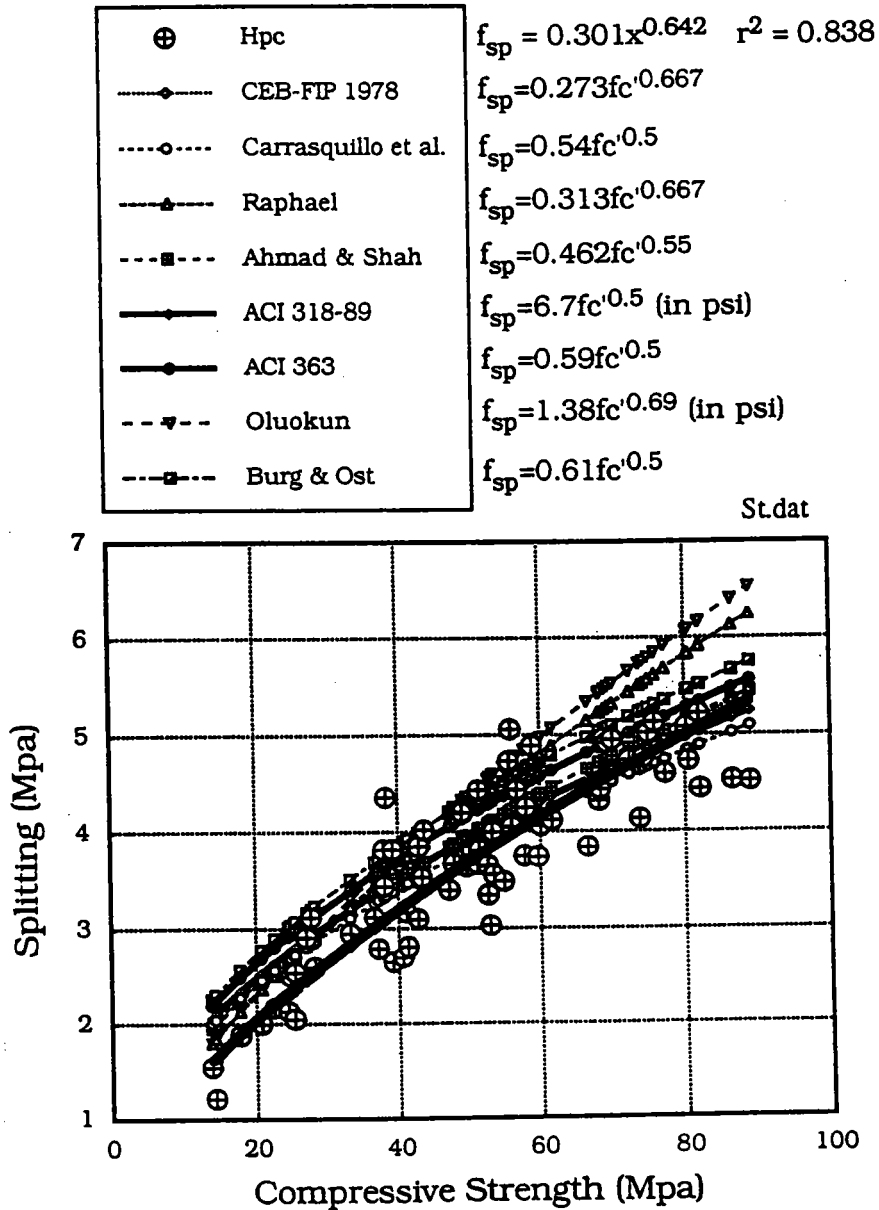
圖八 劈裂強度發展示意圖



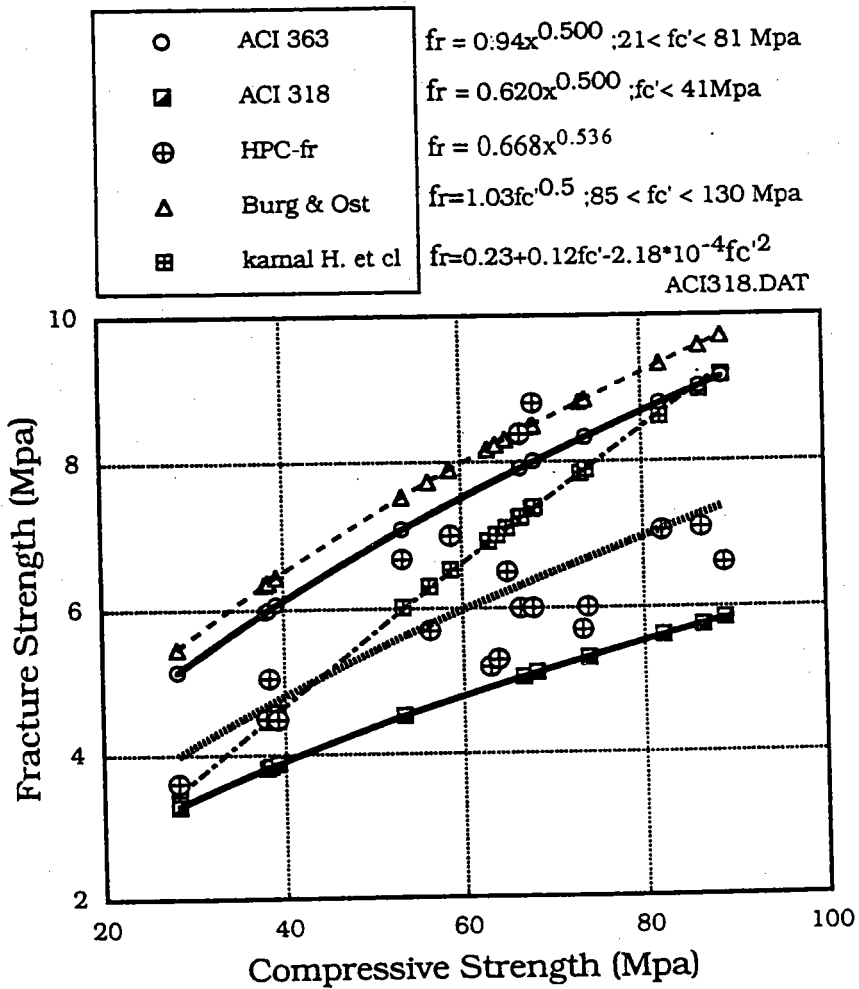
圖九 不同配比 HPC 劈裂強度與抗壓強度之關係



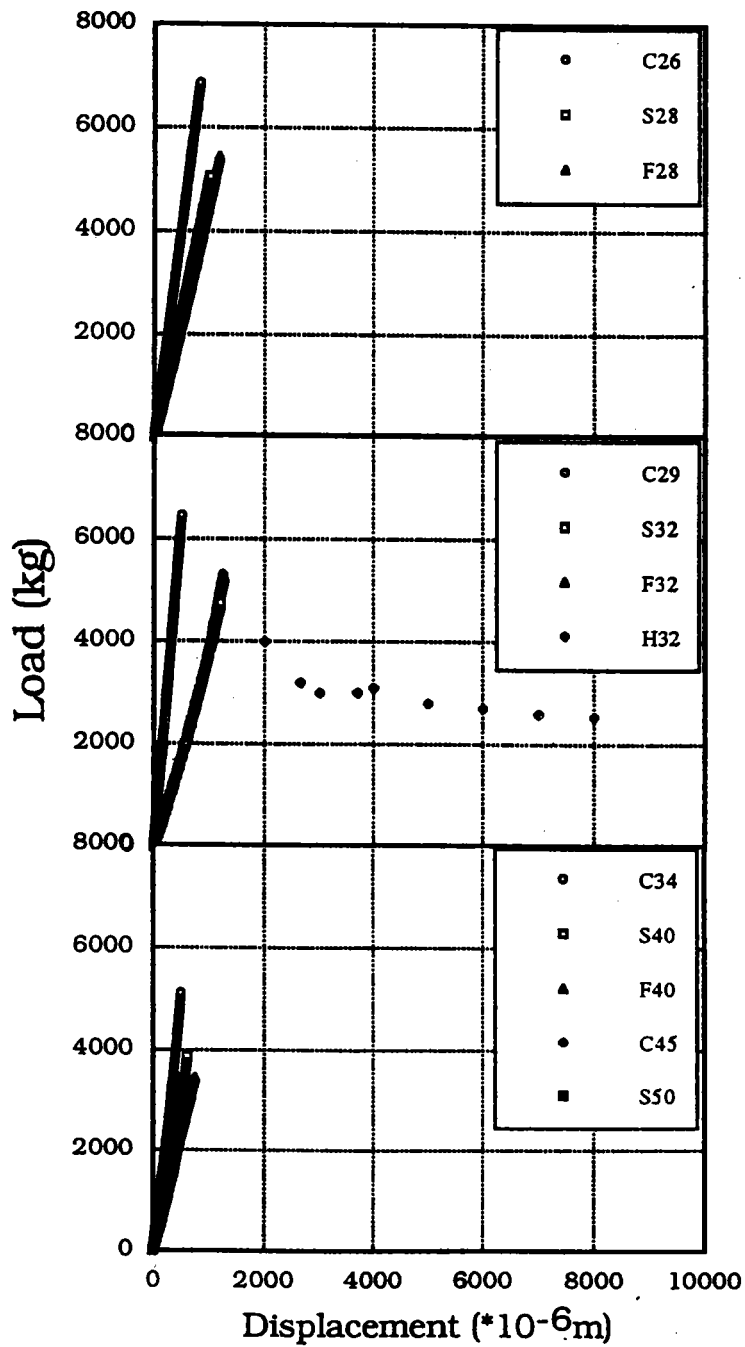
圖十 劈裂強度與抗壓強度之關係



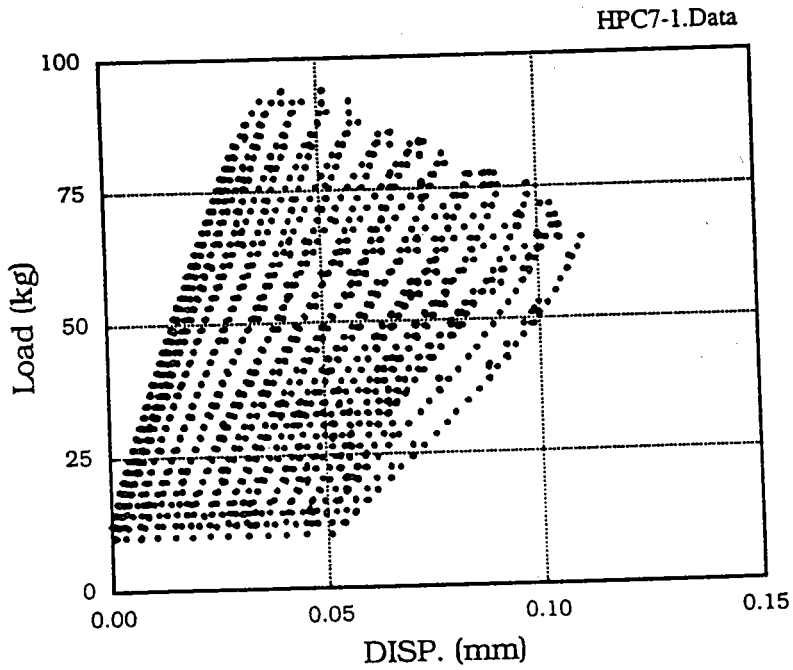
圖十一 HPC 劈裂強度與其他預測公式比較圖



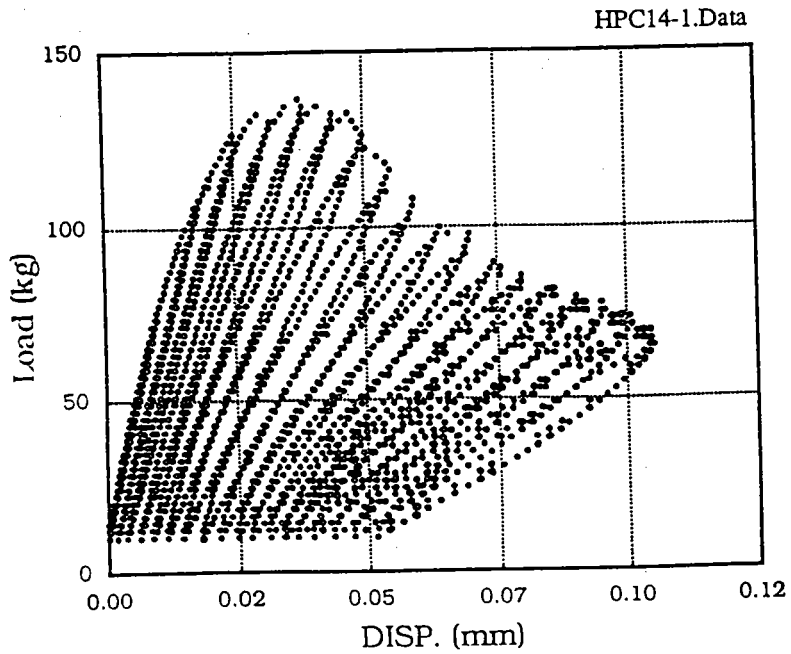
圖十二 抗彎強度與抗壓強度關係圖



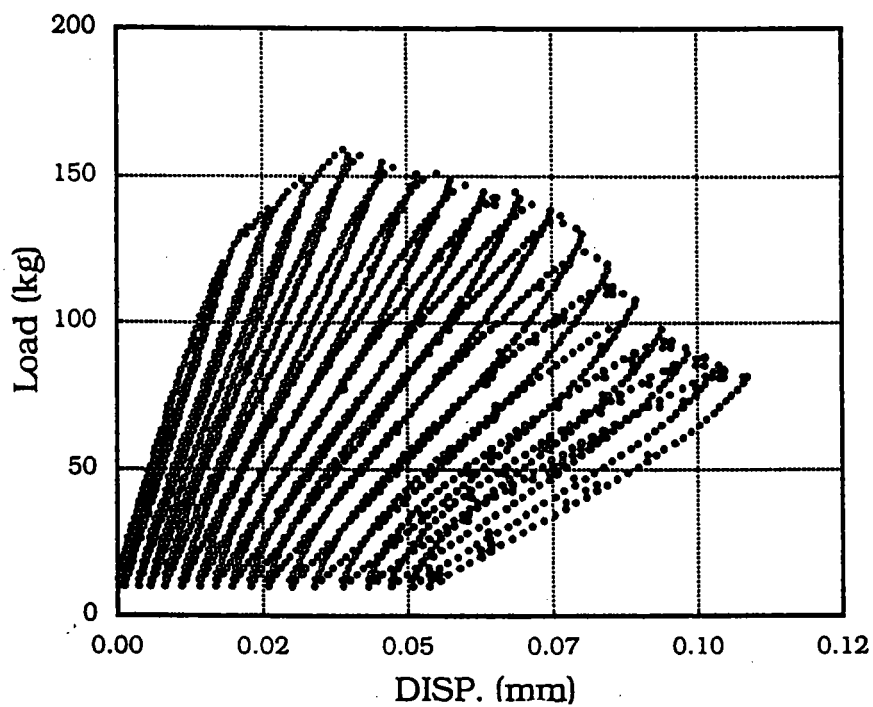
圖十三 HPC 抗彎強度 P- Δ 示意圖



圖十四 HPC 破裂韌度示意圖(齡期 7 天)



圖十五 HPC 破裂韌度示意圖(齡期 14 天)



圖十六 HPC 破裂韌度示意圖(齡期 28 天)

HPC 之配比設計考慮重點

黃兆龍*

關鍵詞：安全性、耐久性、工作性、經濟性、生態性

摘 要

本文藉由傳統混凝土配比設計的觀念，詮釋HPC 配比設計應考慮之重點。無論HPC 之強度高低，HPC 要求品質保證，都應考慮「安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性」的優生準則。

壹、前 言

高性能混凝土(HPC) 的研發及推廣，在行政院國科會、內政部建研所有系統的推動下⁽¹⁾，HPC 的研發蔓延各大專院校，自1994 年高雄85 國際廣場成功澆置完成最高坍度及坍流度記錄之混凝土後，國人對HPC 之信心倍增⁽²⁾。1996 年行政院科技顧問組及結構學會高性能混凝土委員會的積極推動下，高性能混凝土的觀念漸趨成熟⁽³⁾，然而HPC 之定義及觀念在既有的引導下，有被曲解為「高流動性，又是高強度的混凝土」，事實上，HPC 強調的是高性能的目標為主，隱含有「保險、永恆、人性、節能、翠綠」之意，在此有必要透過配比考量，加以澄清，進而保障HPC 能被正確應用。

貳、傳統HPC 配比考慮重點及潛存問題

傳統的配比設計流程如圖一所示，基本上即如一般混凝土配比，沿襲ACI 211 規範，決定的重點為「安全性、經濟性、耐久性」，見圖二所示。

* 國立台灣工業技術學院營建系所教授
結構學會高性能混凝土委員會主任委員
營建材料資訊室主持人 (<http://140.118.5.47>)

常，配比設計開宗明義第一條，即由施工狀況決定坍度，再由坍度及骨材特性，決定「水拌和量」(W_w)。接著，由安全性及耐久性選擇(W/C) (ACI 318-89)或水膠比(W/B) (ACI 318-95)⁽⁴⁾。而由此水泥量(W_c) 或膠結料(W_b) 即被計算出，如公式(1)及(2)所示。

$$W_c = \frac{W_w}{W_c} \dots\dots\dots(1)$$

$$W_b = \frac{W_w}{W_b} \dots\dots\dots(2)$$

如果設計者欠缺強塑劑的觀念，通常會利用大量的「水」來調稀混凝土，以致混凝土非常容易產生泌水及析離的問題。又如果是高強度的設計，則 W/C 或 W/B 會較低，按公式(1)及(2)可見， W_c 及 W_b 將是非常大，如此的水泥漿會過量，造成早期坍度可以達到，但是將有非常高的水化熱外，又有非常黏的混凝土產生。在1小時後，坍度損失將非常大，以致1小時後無法施工的問題產生。而且依Design and Control of Concrete Mixtures一書明白指出⁽⁵⁾，拌和水量過大會有以下之缺失：1. 降低抗壓及抗彎強度；2. 提高滲透性，降低水密性及增大吸水率；3. 減低抗風化能力；4. 降低澆置層及鋼筋與混凝土之界面鍵結力；5. 增加乾濕體積變化；6. 增加乾縮裂縫機率。

另外，高強度下， W/C 常低於0.42，則又有「自體乾縮」的困擾⁽⁶⁾。又水泥漿量過高，在任何文獻中都顯示出體積穩定性是不良的。這些問題，在過去配比設計中，都未充分考慮到，譬如表一所顯示的為在1990年，台灣地區發展高強度混凝土的例子，由表中可見水泥用量幾乎接近500 kg/m³，而 W/C 均大於0.42，即自體乾縮裂縫之產生率甚高。 W/S 均非常小，表示固態材料掌握整體混凝土強度，1990年代這些混凝土工作性都是非常差的混凝土。

1991年台北「遠東企業中心」採用高流動性又高強度混凝土，配比設計 $f'c = 42$ Mpa（即6000 psi），坍度原始設計為180 ~ 200 mm，最後採用240 ~ 280 mm，以控制氣泡含量，工作性純粹以強塑劑及水泥漿的用量，把混凝土坍度表現出來，表二中最後3至5欄為「遠企中心」當初的配比，也

可以瞭解漿量過大及W/C低於0.42的問題。國內學術界1992~1996年所發展的配比，均以兼具高強度及高流動性為主，以致水泥量過大，坍度損失過大，甚至彈性模數下降之虞。

參、HPC 緻密配比考慮重點

緻密配比之發展沿自1985年之「人行道磚改善研究」，基本上配比設計之考慮，兼顧「安全性、耐久性、工作性、經濟性及生態性」之準則⁽³⁾，見圖一及表三所示。

一、緻密HPC 配比設計準則

(一) 安全性

對一個結構設計者來講，一般追求的是安全性，傳統混凝土安全性係建立在實驗室內。而實驗室做的試體品質，不一定等於結構體的品質，因為如果以實驗室品質來認定，則偷換試體或假造數據的機率提高，而施工標準所講的安全性，指試體的安全性外，亦指結構體的安全性。安全性絕不是好高騖遠的高出原來設計強度很多，而是滿足「設計者需求」的最低強度，此刻之強度應符合規範要求，即 $f'_{cr} = f'_c + 1.34S$ 或 $f'_{cr} = f'_c + 2.33S - 35$ (kg/cm²)，這種強度仍建立在統計品質上面。所以配比設計上即將品質認證的理念事先加以考慮，而且安全性未必一定特高強度，只是設計時，必須滿足設計之需求強度即可。安全性係以水膠比(W/B)來控制(ACI 318-95)，而非以水灰比(W/C) (ACI 318-89)⁽⁴⁾。

(二) 耐久性

混凝土不只要求強度而已，然而以往在ACI 318-89規範裡，都是以「安全性」掛帥，「安全性規範」係以「水灰比(W/C)」來考量耐久性的防護；而ACI 318-95規範「結構混凝土」中特別以水膠比(W/B)來規範耐久性，也就是新的混凝土規範仍是「耐久性規範」，是以水和膠結料的比例來規範強度，以獲取耐久性為目的。新規範容許使用水泥以外的材料，像卜作嵐、飛灰、爐石、稻殼灰、矽灰、跟其他火山灰材料。經過10年來大

量數據顯示，添加飛灰、爐石等卜作嵐材料俱有阻滲及抗蝕功能，而實際結構物顯示也是這樣的結論。很多人擔心「中性化」問題，其實這不是問題，因為中和化跟緻密特性相比，是小巫見大巫的，實際量測結果亦證明此觀點。高耐久性主要強調W/B要低，用水量亦要低，自然電阻愈高，氯離子滲透率降低，這是非常重要的策略之一，此與傳統的觀念是不同的⁽⁷⁾。

由以往耐久性之物理學及化學之觀點上，限制水量及水泥量，是非常重要的⁽⁸⁾。依據W/S（水固比）的理念而言，應小於0.08，換言之，拌和用水量應小於178 kg/m³ 混凝土。而水泥量則每公斤應發揮0.14 kg/cm²/kg 水泥，所以應以「f'c/0.14」來加以限制。W/C必須大於0.42以防「自體乾縮」裂縫的產生，此點也束制水泥量應小於423 kg/m³。混凝土電阻係數應大於20 kW-cm，以增加防蝕及防滲透之能力⁽⁷⁾。

（三）工作性

高流動性特別是針對台灣耐震結構設計之鋼筋密集處，如果混凝土太乾稠，則蜂窩必然發生⁽⁶⁾，而失去設計假設之均勻性，更失去耐震之效用。因此希望混凝土能非常容易流動，而填充模板各個角隅。當然未必每種混凝土都要高流動性，而是因時、因地、因需求性而致宜，不過對目前大宗建築物來講，高流動性混凝土還是必要的，因為可以縮短工期及簡化施工作業等。高工作特性包括容易施工、沒有析離、容易粉光、或後續的處理簡易。假設工作性非常好，自然工人不會在工地加水，泵送車的人員不會在泵送車上加水，一旦不會加水，品質就能夠獲得比較大的保障。

（四）經濟性

假如混凝土一味要求高流動性及高工作性，而沒有顧及添加摻料所造成的成本增加問題，即沒有很好的經濟性，如此在國內低價搶標的環境下，就無法使得品質受到保障，因此有必要探討出一個經濟性混凝土，這樣才能滿足業主跟審計單位的需求了。高性能混凝土的經濟性建立在高水泥效率（每公斤至少0.14 kg/cm²），高生命週期，易施工之低生產成本上面。

（五）生態性

混凝土的製造不僅應利用組成材達到結構材料的強度，也要考慮到生態性的問題。如果使用比較高的強度，則能夠縮小結構的尺寸，材料自

重減小，那麼基礎的承載力可以也相對縮小，所有包括石頭、砂、水泥等材料都可以有效運用。能按照ACI 318-95「結構混凝土」的規範，充分利用卜作嵐材料，包括電力公司所生產的飛灰，中鋼生產之爐石，或農業生產的稻殼，無形中可使原來這些可能是污染的物質轉變成資源，如此可以有效的減少砂石料的需求，從長期來講是有利的。另外，減少一公斤水泥，可減少一 m^3 的二氧化碳，相對可減少溫室效應，則大氣溫度的上升速度可減緩，可確保我們下一代子孫生存環境⁽³⁾。

二、緻密HPC 配比設計觀念

緻密HPC 配比為達到「安全性、耐久性、工作性、經濟性、生態性」優生準則，故又稱為「優生混凝土配比」，其優生配比之邏輯與傳統ACI 配比方法是不同的，見表三所示。ACI 在控制工作性上係以「用水量」為基準，所以W/C的高與低，直接關係到水泥量的多寡，W/C低則成多漿系列，W/C高則形成為較低漿系列，所以「多漿指示出强度高，低漿則強度低」之觀念，就是一般人所認知的，而以用水量為控制坍度及工作度的觀念下，如果規範容許坍度過低，則施工人員容易加水而形成強度降低，或嚴重泌水及析離，如果容許坍度較大，且只許可以用水量為控制基準，則可能因濃度不大的水泥漿量太多，而造成嚴重泌水及析離，這些結果使得優生混凝土必須在低用水量下，達到工作度的目標。此種方法只有求助「最小孔隙(W)」了，見圖三，並以W為指標值，使混凝土只要在足夠漿量的條件下，達到工作性下，最小孔隙的示意如圖三所示。使得水量最小的方法包括控制W最小，當然最有效的即要求級配最佳化及緻密化。另一方法即為控制骨材表面積(S)最小，這方面抑賴最大粒徑，粒徑愈大則表面積愈小，另外t厚度關係潤滑性，借重表面潤滑技術可以突破骨材的阻礙，而獲較薄之厚度。

ACI 安全性基本上與優生混凝土相同，係以W/C為指標，但是優生混凝土特別加上W/B為控制中長期強度的方法，其長期性質則以W/S為控制點，見表3^(3,7)。優生混凝土的安全性是以骨材傳遞力量為主，即在沒有漿量的狀況下，本身即可自承而呈一安息角狀，不會塌陷，因不同ACI 係以漿體為支承主軸。

耐久性之考量，ACI 主要以W/C為主，而優生配比則以W/B及W/S，及控

制「減少水量以減少水的通道(Pc)，限制水泥用量以減少氫氧化鈣的產量，可藉以減緩白華、析晶、石膏及鈣氫石反應(SA)。並且降低鹼量後，減少對骨材之攻擊性(AAR)。增加水密性及電阻係數，減少有害物質之滲透及電子的移動。增加卜作嵐用量以使在裂縫產生下，能自動「癒合」，並且使混凝土均勻穩定；另使之長期強度能永續成長。

經濟上的考量，一般ACI 配比法是不考慮的，所以ACI 方法計算出的水泥強度效益平均為每kg 水泥發揮 0.7 kg/cm^2 強度，而優生配比則考量每一kg 水泥至少發揮 1.4 kg/cm^2 為主，能充分發揮材料應有之品質。理論上以楊氏係數來估計，理論上水泥可以發揮到(1/10~1/5) E 的值，換言之，即無缺陷漿體應可達 $21,000 \text{ kg/cm}^2$ 以上，目前一般混凝土最高可達 $2100 \sim 1400 \text{ kg/cm}^2$ ，顯示強度的表現在邏輯上或有不周延處。應用水泥水化之特性，使用緩慢晶體成長的原理，可以使晶體形成之缺陷降低，對水泥漿而言，孔隙率可以降低，並且轉化有害之鹼性物質(CH，KH，NH) 形成有益膠體，如此而達到強度效益，相對的可降低最昂貴之水泥使用量，另外控制經濟性的方法是採用最廉優之本土化材料，及再生材料。

生態性之考量，ACI 是不列入的，優生混凝土配比，則將工業廢料以緻密邏輯入孔隙及空隙內，使用生剋之物化特性，有效固化工業廢料非但不傷本體材質，甚至有助材質。另外減少水泥量而減少製造排放的二氧化碳(CO₂)，對生態保護，溫度效應的減低有甚大之助益。另透過生命週期的延長，降低損壞大自然的速率，避免人類成為地球「癌細胞」的悲情。

三、緻密配比方法

優生混凝土的緻密配比方法，係先由孔隙著手，配出最少孔隙後，再據以計算出主要材料，骨材及礦物摻料之含量。最後將剩餘之空間填入水泥漿，其配比流程如圖四⁽⁹⁾。

(一) 緻密配料

最小孔隙的量測可以混合料配方的方式，將各種材相互配出最佳之比例。

$$\alpha_i = \frac{W_i}{W_j} \dots\dots\dots(3)$$

式中 a_i 為材料 i 之最佳單位重量百分比， $i \in [1, n]$ 。

W_i ， W_j 為 混合材料 i 及 j 之單位重， i 及 $j \in [1, n]$ 。

(二) 決定孔隙率

孔隙率的計算係將 W_i 材料組合後，除以各材料密度之 γ_i ，則可算出孔隙率。

$$V_v = 1 - \frac{W_i}{\gamma_i} \dots\dots\dots(4)$$

(三) 設定漿量體積 (V_p)

$$V_p = n W = W + S_t \dots\dots\dots(5)$$

$$\therefore t = \frac{1}{S} (n-1) V_v \dots\dots\dots(6)$$

式中 n 至少須大於 1，才能有水泥漿來潤滑骨材 (圖三之 $S't$)。

(四) 計算骨材之體積 (V_a)

$$V_a = 1 - V_p \dots\dots\dots(7)$$

(五) 計算各材料之用量

$$W_j = \frac{V_j}{\frac{1}{\gamma_i} + \frac{\alpha_i}{1 - \alpha_i} \frac{1}{\gamma_i}} \dots\dots\dots(8)$$

如此可以繪出同一強度及工作性需求之配比，如圖 4 所示。

(六) 配比材料選擇之準則

配比選定必須依以下束制條件：

$$W_c \leq f_c' / 1.4 \text{ kg/m}^3 \text{ 混凝土；}$$

$$W_c \leq 423 \text{ kg/m}^3 \text{ 混凝土；}$$

$W_w \leq 178 \text{ kg/m}^3$ 混凝土；和

$W/S < 0.08$ 依據耐久性及強度之要求。

(七)試 拌

雖然依準則所決定之級配有許多組，但仍然必須經由試拌決定什麼組別最佳。才能根據拌和機，施工技術，經濟性來選擇採用的配比。基本上，不同水泥漿量都可以達到相同初始坍度及坍流度，然而水泥漿量愈大，則45分鐘後效果會拆減，見圖五所示，而強度則隨漿量之減少，單位重愈大，相對亦愈大，見圖六所示。

肆、結 論

HPC 之配比設計隨著國內幾次成功的經驗，印證「適當漿量，且漿量愈少耐久性愈佳」的效果。國內配比的觀念隨著ACI 318-95「結構混凝土」的觀念及HPC 混凝土緻密配比的思維改變，並佐以國外內HPC 科研成果，推出之優生思考理念，著重「安全性、耐久性、工作性、經濟性、及生態性」的準則要求，此將是21世紀配比之主流，值得重視。

參考文獻

1. 陳振川，黃兆龍，沈進發，林志棟，方一匡(1994)，「高性能混凝土規劃與推動研究」，內政部建築研究所成果報告。
2. Chern, J. C., C. L. Hwang, and T. H. Tsai (1995), Research and Development of HPC in Taiwan, ACI Concrete International, Oct.
3. 黃兆龍，「優生混凝土設計及施工」，高性能材料研討會論文輯，黃兆龍主編，第107-137頁，台北(1995)。
4. Building Code Requirements for Reinforced Concrete. (ACI 318-89) and Structure Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-83), ACI , Detroit.
5. Kosmatka, S. H. and Panarese, W. C. (1988), Design and Control of Concrete Mixtures, 13rd, Ed., Portland Cement Association, Skokie, IL.
6. 黃兆龍(1996)，「高性能混凝土在公共工程上之應用」，近代營建技術系列研討會，NO.5。
7. 黃兆龍，陳建成，江明英，郭金祥(1997)，「拌合水量對混凝土工程性質之影響」，中國土木水利學刊。
8. 黃兆龍(1995)，「混凝土耐久性基因及控制設計」，空間雜誌建築技術增刊8號，pp.158-165。
9. 黃兆龍、劉俊杰、李隆盛、林豐益(1996)，「高性能混凝土緻密配比與早期性質研究」，土木水利期刊，第八卷第一期。

表一 國內大專院校所發展出之典型高性能混凝土配比+

單位材料 編號	工業技術學院		成功大學		中興大學	交通大學	高雄工專
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)
W/C	0.30	-	0.28	0.25	0.32	-	0.30
W/B*	0.31	0.38~0.54	0.28	0.24	0.32	0.23~0.35	0.26
W/S*	0.08	-	0.06	0.06	0.08	-	0.06
水泥 (kg/m ³)	585	343~468	500	570	578	425~510	475
飛灰 (kg/m ³)	131	0~142	-	-	-	75~340	59
砂灰 (kg/m ³)	-	-	-	30	-	-	-
水 (kg/m ³)	178	159~199	140	144	185	115~300	142
最大粗骨材粒徑 (in)	1/2	1/2	3/4	3/8	3/8	1/2	3/8
粗骨材用量 (kg/m ³)	984	1065~1086	853	627	880	625~890	641
粗骨材來源	大安溪	大安溪	老濃溪	里港溪	-	大安溪	高屏溪
細骨材用量 (kg/m ³)	524	568~1086	853	627	880	625~890	641
S.P. 用量百分比 (相對於水泥重量)	1.6	0~1	0~4	0.7~1.0	1.5%	0.5~2	1.9
28 天抗壓強度 (psi)	9000~13000	7160~9830	9800	11000~13000	8350~9290	8000~13000	8300

* S 為總膠結材料之重量，包括水泥及卜作嵐材料，S 為固態材料重量，包括 B 及骨材 A

+ 中華民國七十九年前所收集

表二 各種優生混凝土之配比及基本性質

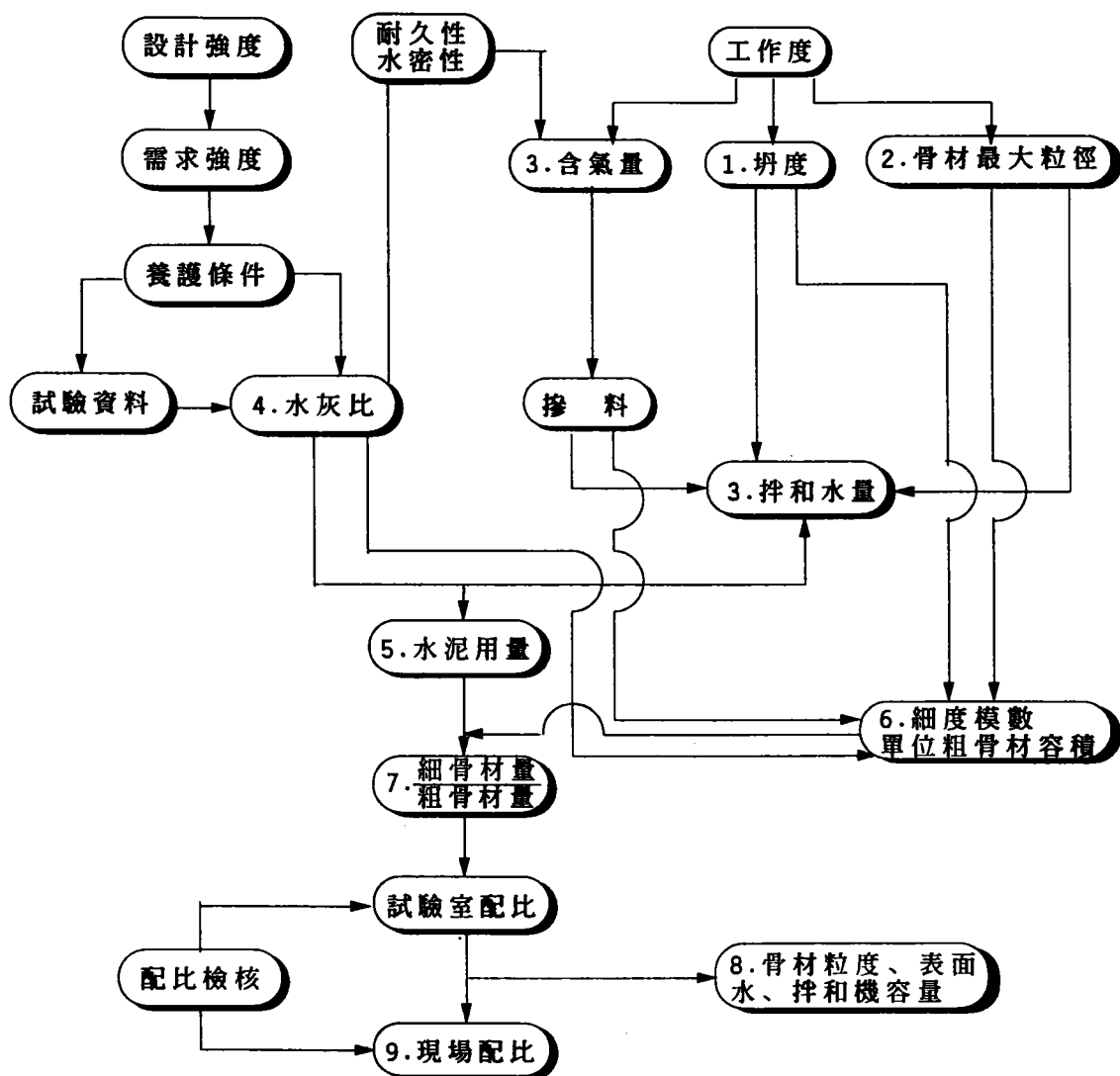
國 家	西 德				加 拿 大				美 國				中 華 民 國			
	B85	B100	B125	1984	1987	1992	1993	1995	1988	1992	1989	1993	1994	1992	1993	1994
水 泥	435	430	450	500	315	450	168	228	365	425	500	505	513	327	451	1080
飛 灰	-	-	-	-	-	-	-	-	95	-	-	-	-	-	-	-
燄 石 粉	-	-	-	-	-	-	-	-	320	183	-	-	-	-	-	-
砂 灰	30	45	-	30	-	-	-	-	45	30	-	-	-	-	-	-
細 骨 材	798	831	840	700	745	815	800	810	810	700	630	685	742	745	813	802
粗 骨 材 **	918	937	1008	1100	1130	1100	1110	1115	1110	1100	1030	1080	1121	1030	1030	801
(s/a)	0.47	0.47	0.45	0.39	0.40	0.43	0.40	0.42	0.42	0.42	0.39	0.38	0.39	0.30	0.42	1
(a/c)	3.8	3.9	4.1	3.6	5.9	4.3	10.9	8.4	5.3	4.5	3.6	3.3	3.4	4.2	3.9	0.8
水	163	138	128	135	145	127	128	131	129	128	135	195	130	141	165	167
液 體	6.8	16.9	22.5	14	5.9	15.3	13	12	13	14	14	-	15.7	7.3	11.25	52
(% wt of cement)	(1.5)	(3.8)	(5)	(2.8)	(1.9)	(3.4)	(7.7)	(5.3)	(3.6)	(3.3)	(2.8)	-	(3.06)	-	(4.2)	(4.8)
總 重 量	1.6	1.8	1.8	1.8	0.9	-	-	-	-	-	1.8	0.98	-	-	4.5	-
w/c	2372	2420	2495	2481	2479	2507	2500	2527	2404	2479	2420	2451	-	2400	2353	2375
w/b=w/(c+p)	0.37	0.34	0.33	0.3	0.48	0.31	0.84	0.57	0.35	0.3	0.28	0.39	0.28	0.43	0.4	0.20
w/s	0.35	0.31	0.30	0.27	0.30	0.31	0.26	0.31	0.31	0.27	-	0.35	0.26	0.32	0.4	0.15
坍 度 (mm)	0.077	0.08	0.064	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.078	0.089	0.073
坍 度 45min (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	250	-	-	200	-	-
Air	1.9	1.5	1.6	-	-	110	210	220	170	180	-	-	-	-	-	-
溫 度 (°C)	25	24	23	-	-	-	-	-	-	-	4.4	-	-	1.2	-	-
濕 度	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	23	-	-
濕 度 (kg/cm²)	690	1100	1350	930	830	-	-	-	-	-	854	650	1190	742	800	-
作 者	Held and Kanig	1070	930	1090	1260	1210	1110	1180	897	-	-	-	-	870	-	-
	Alican and Neville	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	De Larrard	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Okamura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	黃兆龍、張大鵬	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	黃兆龍	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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

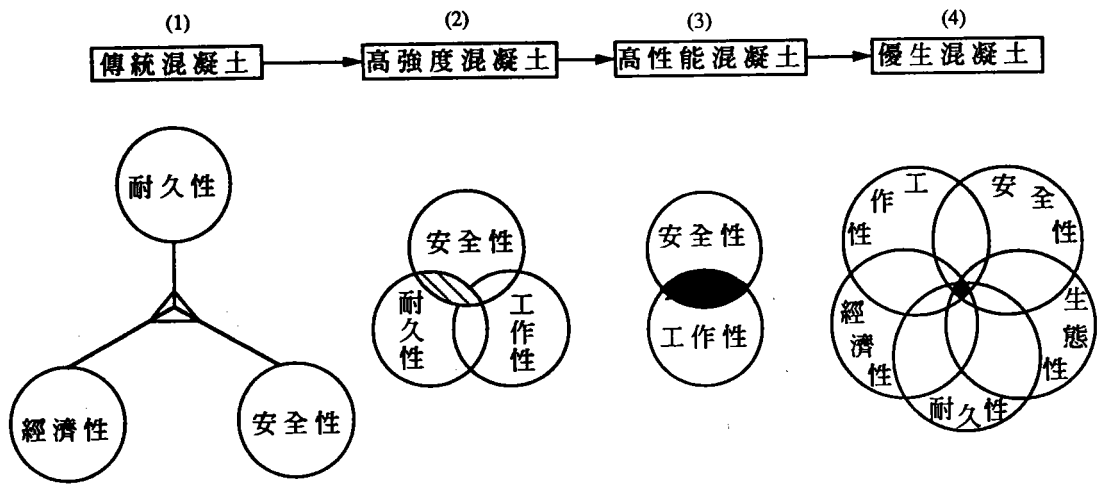
** D_{max} ≤ 16 mm; s/a = wt of sand/wt of total agg; a/c = wt of total agg/wt of cement

表三 優生混凝土與傳統混凝土之比較

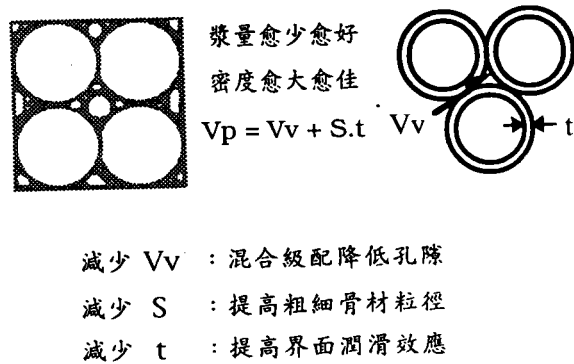
		傳統 / 高強度混凝土	高性能混凝土	優生混凝土
配 比 設 計 準 則	安全性	控制 W/C 水泥強度效率低	控制 W/C	早期強度控制 W/C 中期強度控制 W/B 長期強度控制 W/S
	耐久性	降低 W/C 添加卜作嵐材料 增加水密性	降低 W/C 添加卜作嵐材料 增加水密性	降低用水量 $\leq 178 \text{ kg/m}^3$ 混凝土，降低 水泥用量 $\leq f_c/1.4 \text{ kg/m}^3$ 混凝土，降低 W/B，控制 W/C ≥ 0.42 ，添加卜作嵐 材料，增加電阻係數 ($20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$) 增加水密性，增強裂縫自愈功能
	工作性	增加水量 調整級配	適當加水 添加強塑劑 調整級配	緻密級配 添加礦粉摻料 添加減水摻料
	經濟性	採用良好級配 添加水 飛灰取代部份水泥	採用良好級配 減少施工成本	提高水泥強度效率 增加施工度
	生態性	—	—	添加礦粉摻料，提高水泥強度效率 ，減水水泥用量，利用再生固體廢 料，增加工程品質，延長生命週期
新 拌 混 凝 土	溫度上昇	—	減少水泥	減少水泥 添加礦粉摻料
	塑性收縮	控制環境	減少水泥漿量	減少水泥漿用量
	坍 / 流度	一般性	可控制 $250 \pm 20 \text{ mm}$	依工程需求 $0\sim 280 \text{ mm} / 0\sim 650 \text{ mm}$
	凝結時間	一般	初凝較長	依需求控制
	抗壓強度	W/C	W/B	W/C (<28 天)，W/B (28~56 天)，W/S (>56 天)
硬 固 混 凝 土	體積穩定性	—	—	控制低 W/B，低水泥量，低用水量 ，孔隙少收縮少，骨材多體積穩定
	長期耐久性	降低 W/C，採卜作嵐 材料	大量應用卜作嵐 材料，降低 W/B	低 W/S，大量用卜作嵐材料，強化 界面弱帶



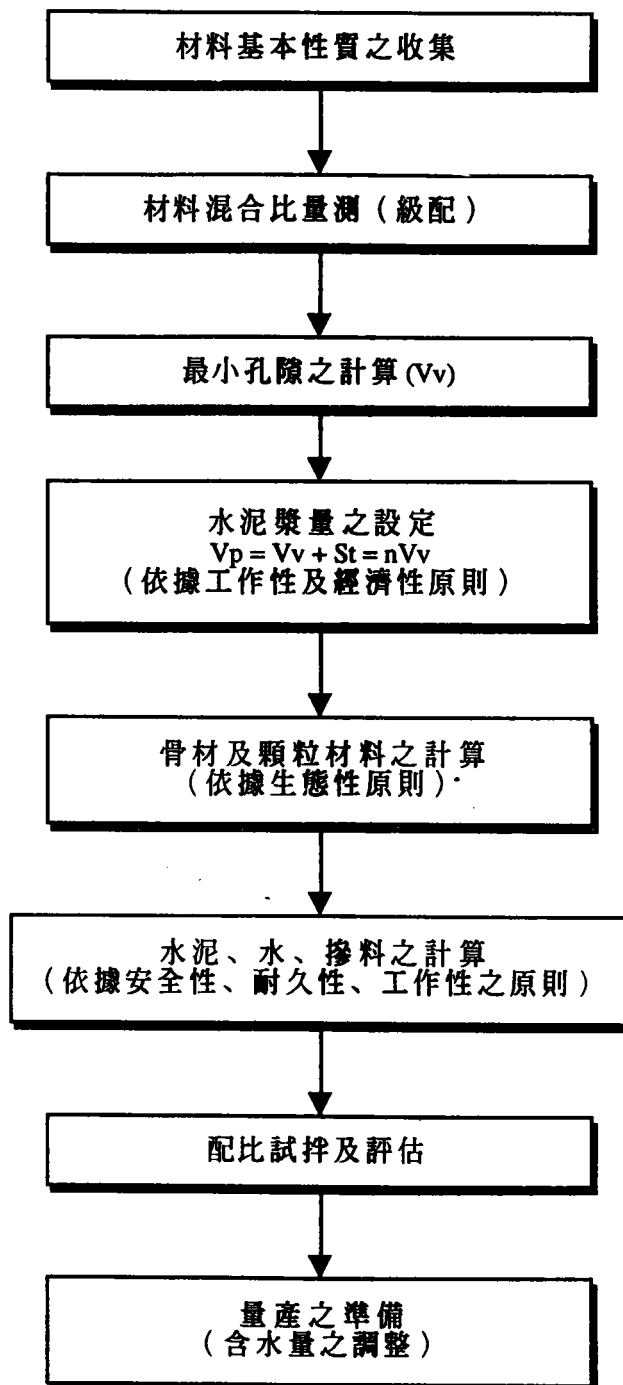
圖一 傳統 ACI 混凝土及 HPC 配比設計流程圖



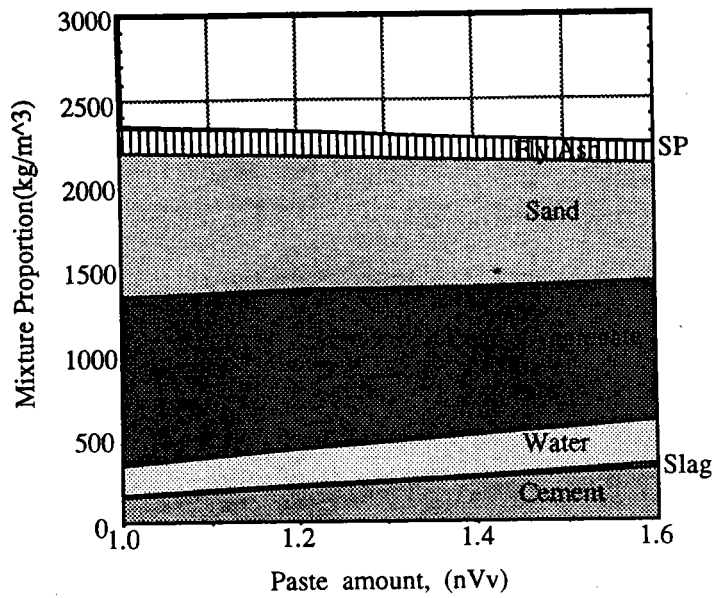
圖二 混凝土觀念及訴求點



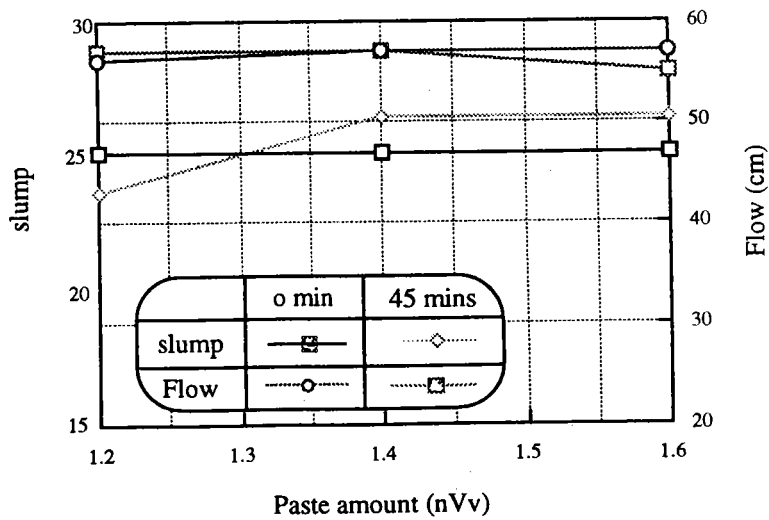
圖三 優生 PHC 要求 V_p 最小的達成方式



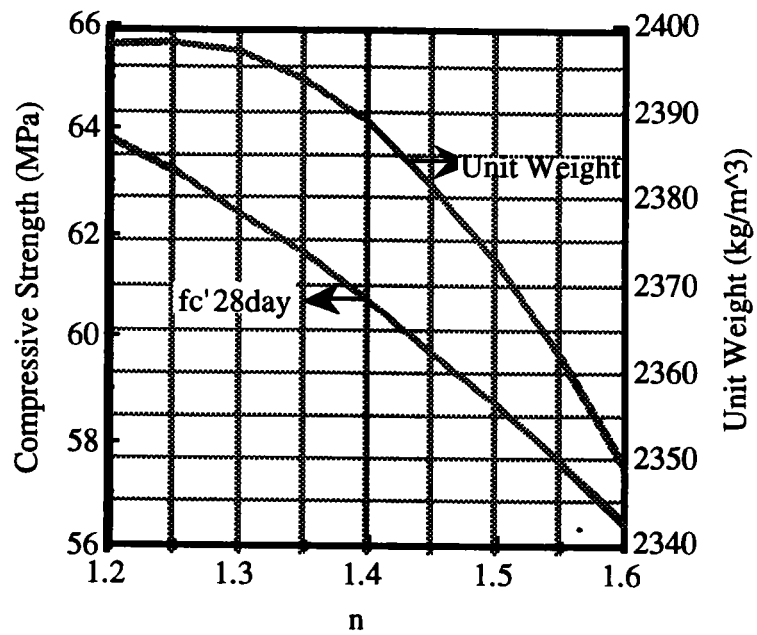
圖四 優生 HPC 緻密配比流程圖



圖五 水灰比 0.28 配比下漿量體積與各材料組成及累積單位重之關係圖



圖六 漿量與坍度及流度變化之關係



圖七 漿量與單位重及抗壓強度之關係

- HPC 之配比設計考慮重點 -
- 黃兆龍 -

粗骨材性質對高性能混凝土強度與彈性性質的影響

張大鵬^{*} 林秉如^{**} 莊福昌^{***} 林黃欽^{****}

關鍵詞：粗骨材、抗壓強度、彈性係數

摘 要

粗骨材性質對高強度混凝土行為影響很大，傳統上，均以粗骨材磨耗率、硬度、健性等間接方式的試驗方法估算粗骨材的強度，除了上述之外，本研究利用粗骨材堆積體之抗壓強度的方法，針對各粗骨材間之強度、勁度的不同，在適當振動高度與振動次數下，求不同粗骨材堆積體在抗壓情況下，粗骨材堆積體之變位情形，用以判定粗骨材強度，此外尚利用最小孔隙比觀念，分別探討四種典型不同粗骨材級配對混凝土抗壓強度及彈性係數的影響，期能對高性能混凝土基本力學性質，有更深一層之瞭解，更有效利用有限砂石資源。

壹、前 言

1960 年代，在混凝土科技領域中研發的學者與業界，發展出具有劃時代意義的高強度混凝土(High Strength Concrete, HSC)，在往後的一、二十年內，曾經大量地應用 HPC 在各項工程施工上，其中包括美國西雅圖(Seattle)之 Two Union Square Building 內，部份結構構件之混凝土強度更高達 120 MPa (1220 kg/cm^2 , 17500 psi)⁽¹⁾；高性能混凝土(High Performace Concrete, HPC)則發展於 1990 年

* 國立台灣工業技術學院營建系暨研究所教授

** 國立台灣工業技術學院營建系暨研究所研究生

***前國立台灣工業技術學院營建系暨研究所研究生

代，有別於一般的 HSC，傳統上，HSC 强度高，但工作度欠佳，無法應用於須有良好流動性之混凝土工程，特別是耐震設計下，結構物中鋼筋密佈的區域，使混凝土的澆置更形困難，另一方面，HPC 則具備有良好流動性、高體積穩定性、耐久性、高水密性與低收縮性等優點，其強度可調整為高強度或中強度，所以 HPC 不僅將 HSC 應用範圍更推廣，更使將混凝土製作技術提高，使以較低的成本，可承受較多的載重，可減小桿件尺寸，桿件靜重縮小，相對空間加大，骨材使用量減少，是近年來國內、外產、官、學界致力研究開發之新型混凝土製造技術，目前國內已有典型的高性能混凝土配比成果發表與實際工程應用之案例，例如現今興建中的高雄 85 層 T C Tower⁽²⁾。因此，日後國內高性能混凝土之研發，將可邁向本土化及產業化，大量應用於營建工程，改善國內現有工程品質，全面提昇營建施工技術，以減少日後我國加入世界貿易組織(WTO)國內營造市場開放後所帶來的衝擊與競爭，使國內營造業能在國內外之營造市場仍佔有一席之地。

高性能混凝土由粗細骨材、水泥漿及摻料所組成，可視為多種晶相的合成材料，材料選擇及配比設計為構成高性能混凝土性質的關鍵。混凝土可簡易分成二個組成相：水泥砂漿和粗骨材，故混凝土之工程特性和此二相間的鍵結有密切關係。高性能混凝土中骨材在混凝土混合物內佔最大的比例，約佔混凝土體積的 60% ~ 70%，粗骨材佔全部骨材體積之 60% ~ 70%，因此粗骨材性質對高性能混凝土強度、工作性、耐久性等工程特性之影響相當大。影響 HPC 強度與彈性性質的粗骨材物化性質相當多，基本上，可歸納為下列兩項：

1. 粗骨材組成成份，所影響的粗骨材工程性質包括抗壓強度、吸水率與比重、粗骨材粒狀與紋理等。
2. 粗骨材粒徑與級配。

本文中將探討上述兩項粗骨材性質對 HPC 強度與彈性性質之影響作討論，期能對高性能混凝土基本力學性質，有更深一層之瞭解，以能更有效地應用國內有限砂石資源。

貳、粗骨材組成成份與影響

一、粗骨材組成成份與分類

HPC 所使用的粗骨材主要取自於地球表面的岩石，美國地質學會 (American Geological Institute) 將岩石分為：火成岩 (Igneous rocks)、沈積岩 (Sedimentary rocks)、變質岩 (Metamorphic rocks) 三種，主要的工程性質如下：

(一)火成岩：

高溫岩漿侵入地殼內部深處而緩慢凝結的岩石，謂之深成火成岩 (Intrusive rock)，具有良好的結晶，其晶粒大於 5 mm，如花崗岩 (Granite)、正長岩 (Syenite) 等，而高溫岩漿噴至地面急速的岩石，謂之噴出火成岩 (Extrusive rock)，其結晶不佳且具有玻璃質，晶粒在於 1~5 mm 之間，例如玄武岩 (Basalt)、凝灰岩 (Tuff)、安山岩 (Andesite) 等，火成岩化學成份複雜，含有 O、Si、Al、Fe、Ca、Mg、K、Na、H 等九種主要化學元素，所形成的化合物中，以 SiO_2 的含量最多，其次為 Al_2O_3 ；當高溫岩漿中含有足夠的矽質礦物時，冷卻過程中，先形成長石 (Feldspars)、雲母 (Mica)、角閃石 (Hornblende) 後，矽質礦物會結晶形成石英 (Quartz)，因此，火成岩依據其二氧化矽 (SiO_2) 的成份可分為酸性、中性及鹼性等三種，如表一所示。

火成岩的晶粒大小與 SiO_2 的含量決定粗骨材是否容易與波特蘭水泥中含有 K_2O 、 Na_2O 等之鹼成份發生化學反應，生成類似水玻璃之物，此反應物吸水後膨脹，導致混凝土發生破裂、崩潰等現象稱之為鹼骨材反應 (Alkali Aggregate Reaction, AAR)⁽¹⁾。水泥中於 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量小於 0.6 % (低鹼水泥) 時，將不引起危害，若超過 0.6 % (高鹼水泥) 時，便產生大量的膨脹現象，混凝土強度大受影響，晶粒大小與 SiO_2 含量對鹼骨材反應的影響如圖一、圖二所示。想降低鹼骨材反應，就得減低水泥中之鹼含量，不管是砂或水泥，鹼量不超過 3 kg/m^3 。若無法得到低鹼水泥，則可加入火山灰摻合料，取代部份高鹼水泥，或可利用 25%~30% 石灰石來稀釋活性骨材，以降低混凝土因鹼骨材反應所產生的膨脹。

(二)沉積岩：

沉積岩係由破碎岩石或其它物質(如火山灰、有機物等)經沉積壓縮固結成層而成，依其分解方式與壓密固結過程，可將沉積岩分為三類：

1. 沉積物非固結之機械式沉積岩：

由礦物及碎石屑以機械式所累積組成，基本上係以岩石粒徑大小區分其類別，例如碎石(Gravel)、砂(Sand)、沉泥(Silt)、粘土(Clay)等，碎石與粗砂大都為岩石的碎屑，細砂與沉泥大部份為礦物晶粒，粘土則主要為礦物晶粒。

2. 沉積物化學式固結後之機械式沉積岩：

由礦物及碎石屑以化學方式膠結後以機械式累積而成，例如砂岩(Sandstone)、石英岩(Quartzite)、硬砂岩(Graywacke)等，砂岩與石英岩均為由砂粒大小的細岩石顆粒所組成，假如岩石破裂時係沿著砂晶粒邊緣開裂，則稱此類岩石為砂岩，如果岩石主要由石英晶粒組成，且破裂時係穿過晶粒本身而開裂，則稱此類岩石為石英岩，石英岩可能為沉積岩或變質岩，砂岩晶粒間的膠結材料可能為蛋白石(Opal)(矽膠體)、方解石(Calcite)、白雲石(Dolomite)、粘土、氫氧化鐵(Iron hydroxide)等，硬砂岩為一種特殊的砂岩，此種岩石係由粘土、頁岩、板岩所組成的沉積基材中，混雜著具稜角狀砂粒大小的碎岩石屑所壓結而成。

3. 化學式之固結與沉積：

主要係由石英質沉積岩以化學方式固結後沉積而成，例如燧石(Chert)及打火石(Flint)，燧石的晶粒較細，岩體本身可能為具孔隙狀或密實狀，黑色或灰色的密實狀的燧石極為堅硬，一般稱為打火石，燧石主要由結晶極差的石英、石髓(Chalcedony)及蛋白石三者所組成。

石灰岩類(Limestone)為一種常見的碳酸鹽沉積岩，包括含方解石(Calcite)主要礦物的石灰岩，以及含白雲石(Dolomite)礦物的白雲岩(Dolomite)，兩者均含有不同比例的碳酸鹽礦物及相當數量的粘土、砂等非碳酸鹽礦物。

由於沉積岩組成成份及沉積方式的差異極大，其形狀、紋理、孔隙、強度、健性等性質有相當大的不同，其化學成份不若火成岩般有意義，一般以岩石比重及晶粒大小加以區分；另一方面，在高壓力形成的沉積岩之密度及強度較高，在低壓力下所形成的沉積岩則較具多孔隙與低強度，部份抗壓強度低於 100 MPa 的石灰岩及砂岩並不適合於製造高強度混凝土，與火成岩相比，沉積岩含有較多的不純礦物，較易影響及混凝土的耐久性⁽¹⁾。

(三)變質岩：

係火成岩或沉成岩經壓力、熱力、水蒸氣與二氧化碳等變化所引起的化學作用，而改變原有的紋理、晶體結構與礦物組成，例如大理石 (Marble)、石英岩 (Quartzite)、片岩 (Schist)、千枚岩 (Phyllite)、片麻岩 (Gneiss) 等，大部份的變質岩緊密但經常成片狀，某些千枚岩容易與波特蘭水泥中的 K_2O ， Na_2O 等鹼成份發生化學反應。

地球表面地殼內約有 95%火成岩，5%沉積岩，極小部份的變質岩，沉積岩中約有 4%板岩，0.75%砂岩及 0.25%石灰岩，但地球表面上的陸路面積中，火成岩僅佔 25%表面積，沉成岩則佔 75%表面積，因此，混凝土所使用的粗細骨材大多數為沉積岩以及火成岩，河川砂石大多為安山岩 (Andesite)、石英岩 (Quartzite)、砂岩 (Sandstone) 等進行風化分解，經流水研磨成圓狀顆粒，與水泥漿體界面鍵結情形良好。

二、粗骨材強度

用作粗骨材的岩石強度表示方式有抗壓、抗拉、剪力及彎曲等強度，也可利用點荷重試驗值表示，其中以抗壓強度之權重遠大於其他強度。骨材因其組成不同有不同強度之變化。一般骨材含水狀態會影響岩石孔隙與裂紋水壓，影響骨材強度，如易碎之砂岩，當含飽和水時，會喪失約 15 % 的強度⁽³⁾。對尺寸效應來說，試體尺寸越大，則缺陷產生或裂縫的機率越高，破壞機率高，強度相對降低，依 Henri 研究 Kanyenea 之砂岩，發現試體大小對抗壓強度無很大影響⁽⁴⁾。骨材中之礦物組成若抗風化力小，則易使內部膠結的碳酸鈣物質溶解，所產生之玻璃質遇水時易吸水膨脹或流失，使結構疏鬆，易崩解使強度低至 0.98

MPa (10 kg/cm^2) 以下。孔隙率越高，透水係數越高，強度低。若結晶顆粒越少，強度越高，透水係數低。

粗骨材之抗壓強度，傳統上，均以磨耗率、硬度、健性等間接式的試驗方法加以估算，或以不同性質粗骨材加入混凝土試體中，由混凝土試體的抗壓強度中，評估其內的粗骨材的強度，直接量測骨材強度方法，計有下列三種：

(一) 取立方體岩石試體或圓柱岩石試體直接進行抗壓試驗：

須由巨塊岩石中割取立方體試體或用鑽心方式鑽取圓柱試體進行抗壓實驗，此方法用來量測粗骨材強度時雖然極為直接可靠，唯處理上極不容易，而且國內混凝土所用粗骨材亦大都均非單一岩石材料所構成，運至砂石場之高性能混凝土之粗骨材均為小於 2~cm 之不規則形狀顆粒，在已經成為碎石情況下，不易鑑定其原有的成份性質，更無法鋸成立方體進行傳統之直接抗壓試驗，瞭解粗骨材之抗壓強度。

(二) 利用體平均應力 (Volumetric average stress) 求平均抗壓強度：

利用顆粒力學中體積平均應力觀念⁽⁵⁾，求得單顆粗骨材受抗壓實驗時的體平均抗壓強度 $\bar{\sigma}_{22}$ 如下：

$$\bar{\sigma}_{22} = \frac{1}{V} Ph \dots \dots \dots (1)$$

式中 V 為單顆粒粗骨材的體積，P 為抗壓實驗時的破壞載重，h 為單顆粒抗壓時的高度。

(三) 粗骨材堆積體抗壓強度⁽⁶⁾：

針對粗骨材堆積體中各粗骨材間之強度，勁度的不同，在適當振動高度與振動次數下，求得不同粗骨材堆積體的最緊密堆積後，進行抗壓試驗，記錄荷重的載重能力，並量取粗骨材堆積體之變位情形，來做評估不同粗骨間之抗載能力，以判定粗骨材強度，典型的試驗示意圖與結果如圖三、圖四所示。

三、吸水量及比重

骨材中多少有些孔隙，水會因吸附作用包含於顆粒之中，所以骨材含水量因儲存方式、氣候而異；而骨材吸水率依骨材風化程度、裂縫多寡、孔隙大小、礦物分等而異，一般深成火成岩(Intrusive rock)的孔隙率可達 2%，緊密的沉積岩可達 5%，對非常稀鬆多孔的砂岩或石灰岩，其孔隙率可達 10 ~ 40% [1]；骨材內含水狀態可分為：(1)絕對乾燥狀態(OD)，(2)氣乾狀態(AD)，(3)面乾飽和狀態(SSD)，(4)濕潤狀態(Wet)。當一般粗骨材之吸水率小於 3%時，表示骨材質地堅硬，孔隙率小，台灣大部份河川的粗骨材吸水率均小於 3%^(7,8)。骨材比重可分為真比重(True specific gravity)、視比重(Apparent)、乾燥容積比重(Dry bulk)、面乾飽和比重四種，一般在混凝土配比設計中，乃依面乾飽和比重計算所需之水泥、粗、細骨材重量，常重組骨材之面乾飽和比重約 2.55 ~ 2.70，骨材比重大者，吸水率小、孔隙小、質地堅硬緻密，故耐久性較佳，一般混凝土內粗骨材的單位重約為 1300 ~ 1750 kg/m³。

四、骨材粒形與紋理

骨材的粒形及表面紋理對新拌混凝土的工作度及早期強度影響較大，但對硬固混凝土晚期強度之影響較不明顯^(1,9)。一般採用圓形且光滑紋理之骨材，可減少拌合漿體及阻力，相對地因骨材-水泥漿體的鍵結力弱，對早期強度有不利影響。碎石骨材呈角狀表面粗糙時，則骨材間移動阻力大，須有足夠多漿量，骨材·水泥漿體鍵結良好，產生強度佳之混凝土。碎石骨材(粗糙多角形)之高抗壓強度及所製成之混凝土抗剪力均比圓形卵石骨材佳，此乃因碎石骨材有較強之鍵結強度。

五、典型粗骨材工程性質及對 HPC 的影響⁽¹⁰⁾

不同性質粗骨材對混凝土的影響如圖四所示，典型粗骨材性質如表二所示，混凝土配比如表三所示，依此配比所拌製的 HPC 對抗壓強度及彈性係數的影響如圖五所示，混凝土抗壓強度與彈性係數之關係如表四所示。

參、粗骨材粒徑與級配對 HPC 強度之影響

一、粗骨材最大粒徑的影響

Aitcin 及 Neville⁽¹²⁾發現最大碎石骨材尺寸(Maximum size of crushed aggregate, MSA)大於 20mm 之粗骨材，可用於製造抗壓強度在 60 MPa 至 100 MPa 間之高性能混凝土，但如要製造抗壓強度在 100 MPa 以上者，MSA 值不可超過 10 mm 或 12 mm。而 Mehta 及 Aitcin⁽¹³⁾提出若骨材最大粒徑在 10mm 到 15mm 之間，會減低骨材顆粒內部缺陷之影響，而對抗壓強度有所提高。因此，使用於高性能混凝土之最佳最大骨材尺寸(MSA)約為 10mm 左右，但 MSA 為 20mm 左右之碎石骨材亦可用於製造抗壓強度在 60 MPa 至 100 MPa 間之高性能混凝土，MSA 值越小，所需花費之石材壓碎成本越高，對一般混凝土而言，小粒粗骨材比大粒粗骨材需更多之水泥及拌合水，在一固定水灰比下，水泥用量隨粗骨材粒徑增加而減少，對於高性能混凝土而言，在一固定水灰比下，較小之最大骨材尺寸粗骨材具有較高強度，但其最佳最大骨材尺寸則取決於水泥漿體、粗骨材和水泥界面、骨材強度等三者間相對強度，對一固定用量之水泥，將有一個能產生最佳工作度及最高抗壓強度之最佳最大骨材尺寸；另一方面，混凝土之張力破裂面均緣起於粗骨材和水泥界面，而鮮少發生於細骨材和水泥界面，由於高性能混凝土所用粗骨材最大骨材尺寸已減小至 10 mm，由最高抗壓強度考量及最佳張力破裂面考量所得之最佳最大骨材尺寸兩者間之平衡點，需視國內砂石料生產環境及粗骨材工程性質而定。

二、粗骨材級配的影響

HPC 使用的骨材級配指粗骨材顆粒尺寸分佈情形，影響 HPC 水泥漿用量及混凝土工作度。粗骨材最理想級配是大顆粒骨材和小顆粒骨材間能夠均勻分佈，使細顆粒能完全填補在大顆粒間的空隙，此種骨材級配可使粗細骨材的單位重達到最高，亦骨材堆積的孔隙最小，只要使用最少水泥漿，而能完全填充粗細骨材堆積間的孔隙，及提供足夠包裹骨材表面積之漿量，則 HPC 強度高且經濟。典型的不同級配對 HPC 抗壓強度及彈性係數的影響如圖六、圖七所示。

肆、結 論

粗骨材的各項性質，例如顆粒整體形狀、最大粒徑大小、表面紋理、礦物成份、骨材強度、比重、內部孔隙結構、孔隙率、吸水率、含水量、健性、顆粒級配等因素，均對 HPC 的強度與彈性性質產生影響，由本文就上述幾項主要因素的說明與討論中，可歸納出下列的結論：

- 一、粗骨材中，活性矽顆粒大小及 SiO_2 的含量決定粗骨材是否於水泥中之鹼成份產生鹼骨材反應（AAR），導致體積膨脹現象，降低混凝土強度，一般採用低鹼水泥〔 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 含量小於0.6%〕來克服，若無法取得低鹼水泥，亦可在混凝土配比中加入火山灰摻料來解決。
- 二、骨材的孔隙率，是骨材重要性質之一，由其對骨材強度，吸水率及透水性等作用而影響到新拌及硬化混凝土的性質，然而直接量測孔隙率較為不易，實用上改採其量測相對性質吸水率。一般來說，沉積岩的吸水率最高，由於風化較嚴重。
- 三、骨材含有孔隙，故其比重值因孔隙含水狀態而變，配合設計時，通常使用面乾飽和比重。一般骨材比重大者，吸水率小、孔隙小、質地堅硬緻密，故耐久性較佳。
- 四、圓形光滑骨材可減少拌合時之阻力，工作性較佳，但因骨材－水泥漿體的鍵結力弱，對早期強度有不利影響，碎石粗糙骨材，則骨材間移動阻力大，須有足夠多漿量，骨材－水泥漿體鍵結良好，產生強度較佳之混凝土。
- 五、強度佳的粗骨材混凝土應力－應變曲線起始揚氏係數較大，但其抗壓強度不一定最高，基本上粗骨材衝擊值、壓碎值、磨損率等性質較優越者，混凝土抗壓强度高。
- 六、高性能混凝土之最佳最大骨材尺寸（M S A）約為10mm左右，但M S A為20mm左右之碎石骨材亦可用於製造抗壓強度在60Mpa至100Mpa間之高性能混凝土。然而高性能凝土最佳最大骨材粒徑，尚

須考量工作度、張力破裂面、國內砂石料生產環境及粗骨材工程性質...等之因素而定。

七、粗骨材最理想配是細顆粒能完全填補在大顆粒間的空隙，此種骨材級配可使粗細骨材單位重達到最高，只要使用最少水泥漿足夠包裹骨材表面積之漿量，則H P C強度高且經濟。

伍、參考文獻

1. Mehta, P. K. and P. J. M. Monteiro, "Concrete Structure, Properties and Materials", 2nd Ed., 1993, Prentice Hall.
2. 黃兆龍, 「 HPC 使用於高雄東帝士 85 層高樓整合規劃」, 高性能混凝土研討會論文, pp. 147-160 (1993)。
3. Goodman, R. E., "Introduction to Rock Mechanics," 虹橋書局, 1983。
4. Henri, S. S., "Aspect of the Size-Strength Relationship of Unjointed Rock," 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 501-510。
5. Chang, Ta-Peng and Neng-Koon Su, "stimation of Coarse Aggregate Strength in High-Strength Concrete, "ACI Materials Journal, Jan/Feb., pp. 1-9 (1996)。
6. 莊福昌, 「高性能混凝土粗骨材特性之探討」, 國立台灣工業技術學院碩士論文 (1995) (指導教授 張大鵬)。
7. 經濟部中央地質調查所, 「臺灣地區陸上砂石資源調查與研究報告」, 71 年 6 月。
8. 黃兆龍、蘇南, 「臺灣北中部主要河川粗骨材微觀結構·巨觀性質及其混凝土抗壓品質研究」, 碩士論文, 國立臺灣工業技術學院, 臺北, 76 年 6 月。
9. Neville, A. M., "Properties of Concrete," Fourth Edition, Longman Group Limited, 1995.
10. Giaccio, G., C. Rocco, D. Violini, J. Zappitelli, and R. Zerbino, "High-Strength Concrete Incorporating Different Coarse Aggregates," ACI Materials Journal, pp. 242-246, May-June 1992.
11. Mindess, S. and Francis Young, "Concrete" .Prentice Hall, NJ, 1981.
12. Aitcin, P.-C. and A. Neville, "High-Performance Concrete Demystified," Concrete International, Vol. 15, No.1, January 1993, pp. 21-26.
13. Mehta, P.K. and Aitcin, P.C., "Principles Underlying Production of High-Performance Concrete, "Cement, Concrete and Aggregate, CCAGDP, Vol. 12, Winter 1990, pp. 70-78.

14. Shah, S.P. and S.H Ahmad, "Structrual Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete," ACI Journal, pp. 92-119 (1984).
15. Carrasquillo, "Microcracking and Engineering Properties of High-strength Concrete, "Department Report No. 81-1, Structural Engineering Department, Cornell University, Ithaca, New York, pp. 254 (1981).
16. CEB-FIP Model Code 1990, Frist Predraft 1988, Bulletine information, No. 190(a) and (b), July (1988).
17. Revised Norwegian Standard NS 3473, Proposal 12(1985).
18. Ahmad, S.H., "Properties of Confined Concrete Subjected to Static and Dynamic Loading," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicage Circle(1981).

表一 火成岩性質分類 ⁽¹⁾

分 類	SiO ₂ 含量 (%)	岩石名稱
酸性 (Acid)	> 65	花崗石、流紋岩(Rhyolite)
中性(Intermediate)	55 ~ 65	安山石、正長岩、閃長岩(Diorite)
鹼性(Basic)	< 55	玄武岩、輝長岩(Gabbro)、 橄欖岩 (Peridotite)

表二 典型粗骨材性質 ⁽¹⁰⁾

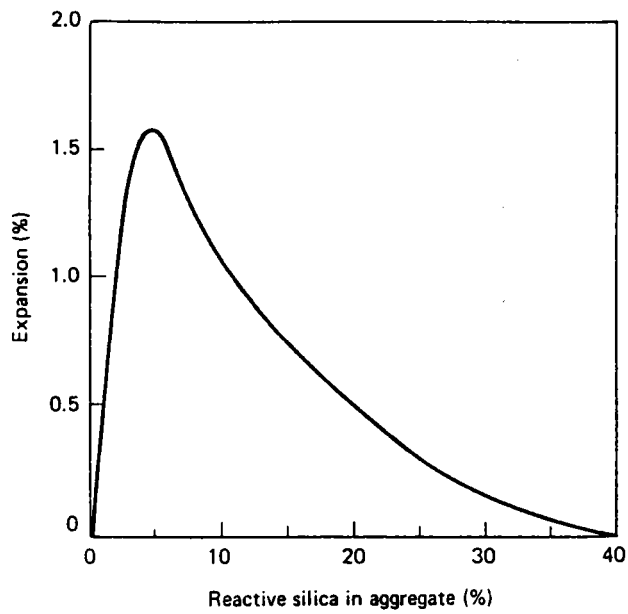
項 目	玄武岩	花崗岩	石灰岩
抗壓強度(MPa)	160	114	70
撓曲強度(MPa)	35.4	15.5	16.7
彈性係數(GPa)	90.0	52.0	85.0
比重	2.93	2.66	2.70
吸水率 (%)	1.00	0.80	1.69

表三 配比資料與新拌混凝土性質 ⁽¹⁰⁾

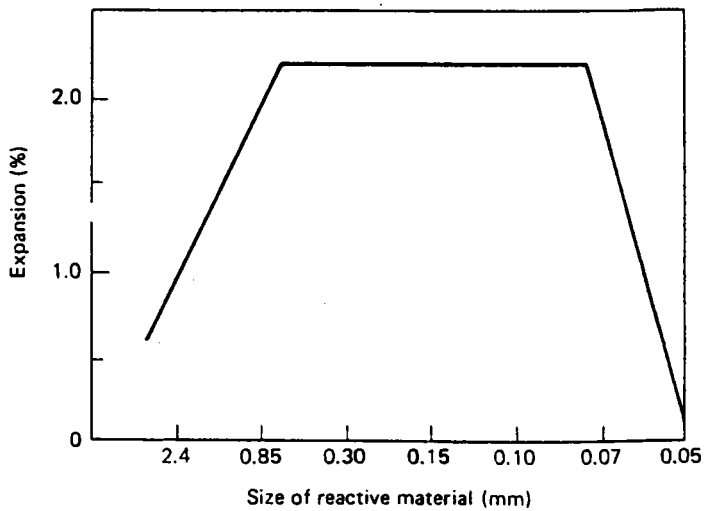
項 目	B-HSC	G-HSC	L-HSC
水 (kg/m ³)	162		
水泥 (kg/m ³)	540		
細骨材 (kg/m ³)	676		
粗骨材 (kg/m ³)	1150	1040	1055
強塑劑 (%)	2.5	2.5	2.5
坍度 (mm)	> 220	> 220	> 220
空氣含量(%)	2.4	2.2	2.4
單位重 (kg/m ³)	2500	2390	2440
溫度 (C°)	21.5	20	22

表四 高強度混凝土之彈性模數與抗壓強度之關係

名稱	年代	公式	單位	文獻
Carrasquillo	1981	$E_c = 3.32(\sqrt{f'_c}) + 6.9$	f'_c : Mpa E_c : Gpa	[15]
Ahnad	1981	$E_c = 26W^{1.5}(\sqrt{f'_c})$	psi	[18]
Shah	1984	$E_c = W^{2.5}(\sqrt{f'_c})^{6.5}$	f'_c , E_c : psi W: lb/in ³	[14]
NS 3473	1985	$E_c = 9.5(\sqrt{f'_c})^{0.3}$	f'_c : Mpa E_c : Gpa	[17]
CEB	1988	$E_c = 10(f'_c + 8)^{1/3}$	f'_c : Mpa E_c : Gpa	[16]

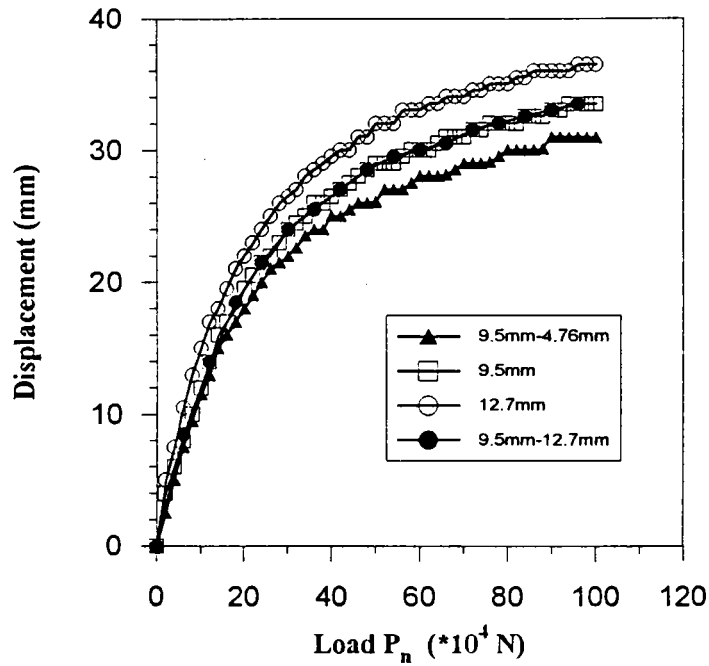


圖一 粗骨材活性矽含量對鹼骨材反應的影響⁽¹¹⁾

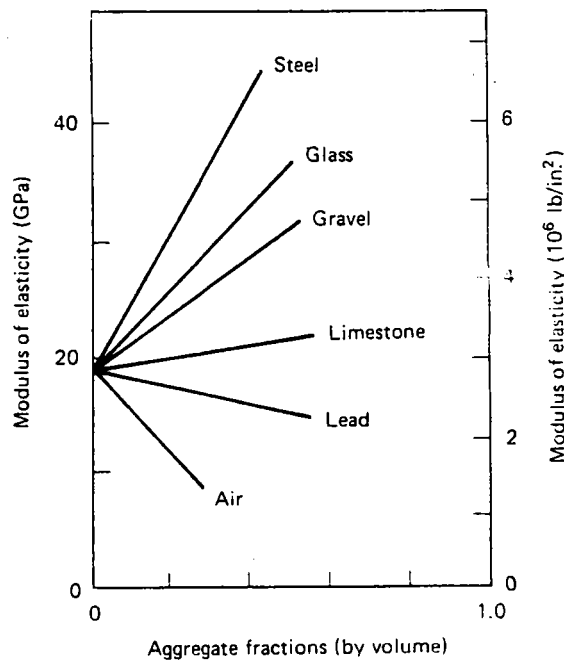


圖二 粗骨材活性矽顆粒尺寸對鹼骨材反應之影響⁽¹¹⁾

- 粗骨材性質對高性能混凝土強度與彈性性質的影響 -
 - 張大鵬 林秉如 莊福昌 林黃欽 -

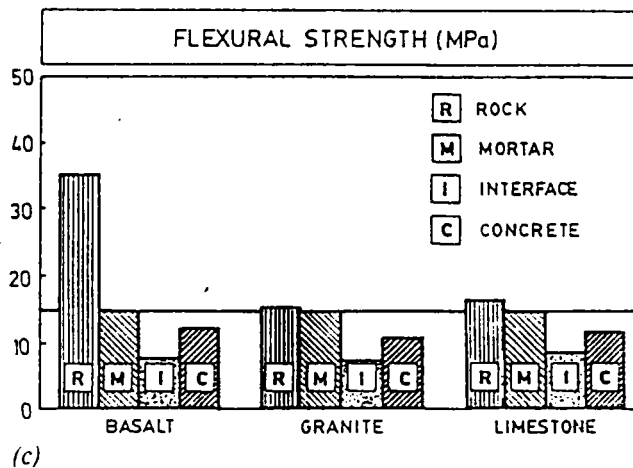
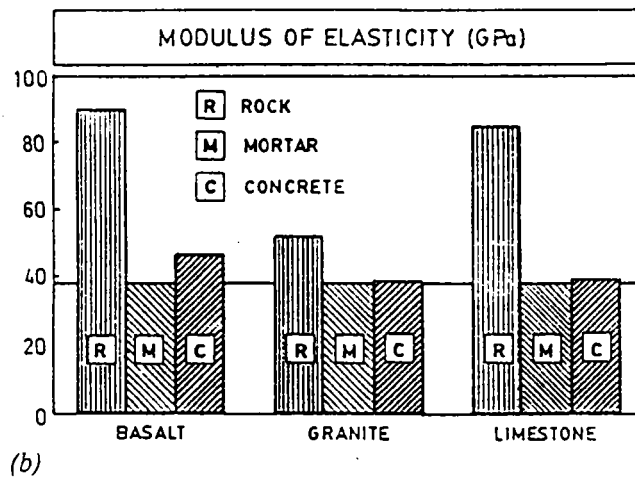
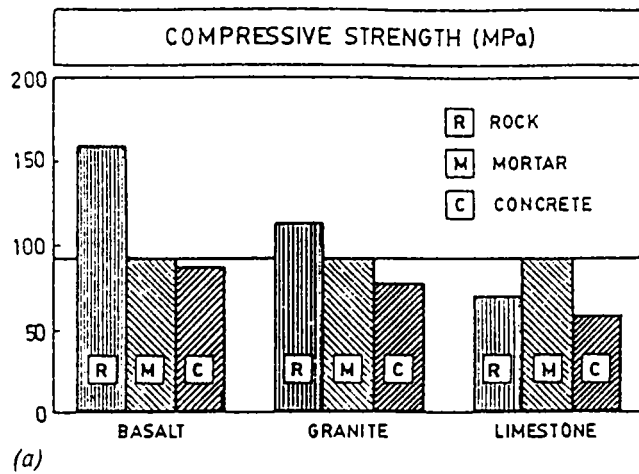


圖三 四種不同粗骨材級配之載重與位移關係⁽⁶⁾



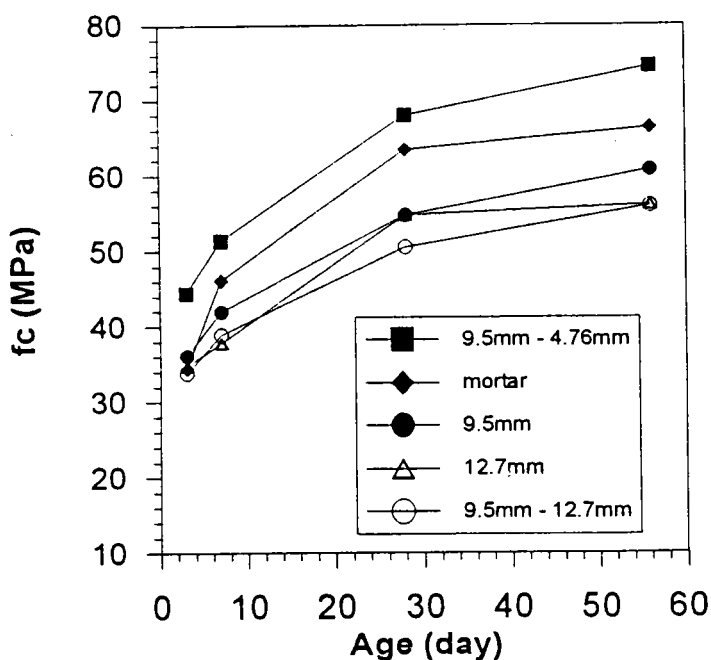
圖四 不同粗骨材性質與含量對混凝土彈性係數之影響⁽¹¹⁾

- 粗骨材性質對高性能混凝土強度與彈性性質的影響 -
 - 張大鵬 林秉如 莊福昌 林黃欽 -

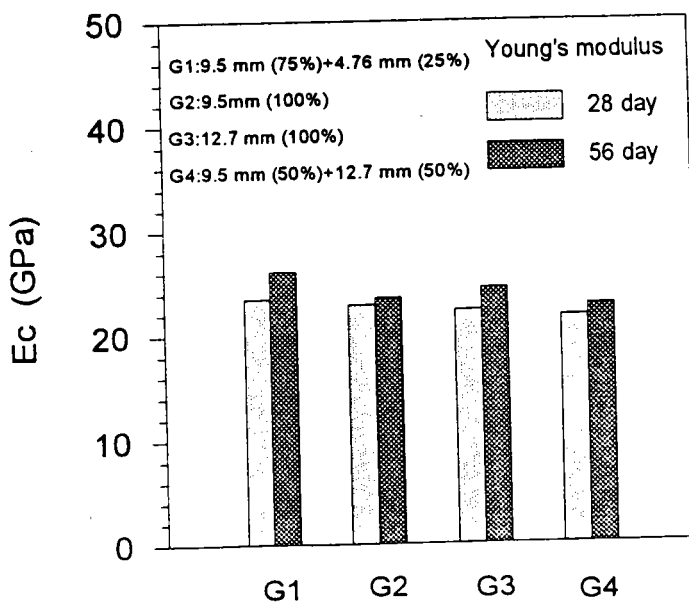


圖五 三種不同骨材性質對混凝土強度與彈性係數之影響⁽¹⁰⁾

- 粗骨材性質對高性能混凝土強度與彈性性質的影響 -
 - 張大鵬 林秉如 莊福昌 林黃欽 -



圖六 四種不同骨材級配對混凝土抗壓強度的影響⁽⁶⁾



圖七 四種不同粗骨材級配對彈性係數之影響⁽⁶⁾

高性能混凝土在港灣工程上應用之展望

林維明* 黃兆龍** 彭耀南*** 饒 正****

關鍵詞：高性能混凝土，港灣工程

摘 要

本文之目的在說明港灣及海域混凝土結構物設計需求，高性能混凝土(HFC)在此方面國外的應用實例及港灣技術研究所正執行港灣HFC研究計畫之構想並提出對HFC將來在國內之港灣工程方面應用之展望。

壹、前 言

港灣結構物由於常年處在海洋環境下，其各部位的暴露條件不同，因此所受侵蝕亦異。圖一為海洋混凝土破壞示意圖⁽¹⁾。任一港灣結構物受多種劣化因子之加乘作用可能會加速腐蝕作用之進行。由於各地域性之天氣、大氣及海水污染條件不同，可能會對各港灣RC 結構物造成不同程度的腐蝕特性。

一般對海洋環境下混凝土結構物之設計規範均依據強度需求再加上規定保護層厚度及水灰比以滿足耐久性需求。如表一所示⁽¹⁻⁴⁾。各地環境不同所訂定的標準亦未盡相同。另外海洋環境亦因潮汐與潑濺區，大氣區及海中區等而有區別。

大多數預拌混凝土製廠商都熟悉「性能混凝土」觀念，即規範中訂定最低之混凝土強度，而由混凝土製造廠自行作配比設計。然而最近

* 台灣省政府交通處港灣技術研究所研究員

** 國立台灣工業技術學院營建工程系教授

*** 國立交通大學土木工程研究所教授

**** 台灣省政府交通處港灣技術研究所副研究員兼組長

「高性能混凝土」在工程界上耳聞，美國混凝土學會在1992年成HPC 特別委員會將之定義為

混凝土達到特殊性能與均勻性需求，僅使用傳統性之組成材料，正常之拌合、澆置與養護措施。包含提高下列性能之需求。

- (1) 易於澆置、施工而無析離、泌水現象
- (2) 長期力學性能
- (3) 早期強度
- (4) 韌性
- (5) 體積穩定性
- (6) 在使用環境下之使用壽命長

概言之，高性能混凝土為一道地的混凝土，預期可在一特別應用上提供優越的性能，而其應用上不一定需要達到高強度。表二示 一些高性能混凝土之代表性特性⁽⁵⁾。在一工程計畫可能有表二所列多種性質需求。例如高層建築需混凝土具有高強度與彈性模數，泵送性及澆置不凝固。而港灣工程則需具耐磨耗，氯離子侵蝕等之需求。

結構設計者與施工技術人員需有此種新材料的性質與行為資訊以利正確使用。現在美國、加拿大、澳大利亞、挪威、日本、意大利、法國及國內均有許多研究計畫在積極推動中，本文擬剖析現有之技術在港灣工程上之應用及研究方向。以期可將此令人振奮的新施工技術引進至國內港灣工程界上應用。

貳、港灣鋼筋混凝土結構物設計需求

如圖二所示⁽⁶⁾，鋼筋混凝土中鋼筋的混凝土保護層，由於材質上無法達到均勻性。因此可能有些地方具多孔性，因此結構體外界的氧氣、二氧化碳、氯化物及水份容易侵入至鋼筋處而形成電化學反應造成鋼筋表皮的鈍態膜被破壞，混凝土電阻下降。因此如圖三所示⁽⁶⁾，氯化物、二氧化碳、水及氧氣為主要的腐蝕因子。而港灣結構物因置於海水中，這些因子最容易侵入而引起耐久性問題。

耐久性可定義為結構物，使用期間內在滿意的安全性條件下，其使用材料可維持其物性及力學性能的能力。結構物受外界之海水、氯離子及硫酸鹽之侵蝕與其物性、化性及力學性變化密切關聯。這些侵略性因子可能同時作用或持續進行，很難單獨分開考慮某一項而忽略另一項，因此耐久性問題相當複雜。耐久性最重要的影響因素為水和氣體之侵入速率。此主要依結構體之孔隙率，尤其是水泥漿或骨材的透水性能。

傳統上都是以抗壓強度作評估混凝土之品質與性能之依據。然而在海洋環境下，由於鋼筋腐蝕及混凝土剝落所造成結構物耐久性差之問題比起強度所引起的問題更為普遍。因此曝露在海洋環境下之混凝土規範不僅需具高強度，而最重要的是其耐久性要高。因此混凝土耐久性不僅需量測其抗壓強度，而其他力學及耐久性質亦需量測。一般常用之測試方法如下列三種：

一、吸水率測試

在潮汐及潑濺區，氯離子侵入新拌混凝土可能靠對海水之吸水能力，因此吸水率為耐久性之重要指標，Taywood 工程公司建議評估混凝土品質優劣之標準如表三所示⁽⁷⁾。

二、快速氯離子滲透測試

此為評估混凝土電阻與氯離子侵入機率之相關性，根據美國州道路及運輸協會 AASHTO T277 試驗規範，評估混凝土電阻量與氯離子侵入機率之相關性如表四所示⁽⁸⁾。

三、透水試驗

此為混凝土耐久性的重要指標，可根據美國墾務局或Taywood 工程公司評估標準如表5所示⁽⁹⁾。對於海洋環境下鋼筋混凝土結構物之設計規範各國均定有規範，參考文獻1列有各國規範之概述。ACI 規範中要求保護層度之混凝土強度高，水泥用量ACI 及FIP 分別定為 356 及 400 kg/m³ 以上，而澳大利亞則除潮汐區為 400 kg/m³，其他地區為 330 kg/m³。設計年限超過 60 年之規範要求更嚴。例如在雪梨一過港隧道其混凝土之水膠比為 0.38，抗壓強度為 400 kgf/cm²，乾縮最大龜裂量為 0.1mm。而港灣環境下鋼筋混凝土岸壁之水膠比及抗壓強度同上。而最少水泥用量為 300 kg/m³。早期強度在拌合 20 小時後為 70 kgf/cm²，最大之快速氯離子滲透測定值為 1,000 庫倫。

考慮鋼筋混凝土中之鋼筋，因為氯離子侵入所造成之腐蝕是決定在海洋環境下鋼筋混凝土結構物耐久性的最重要因素。最有效的防制措施為有足夠的混凝土保護層和混凝土品質佳，因此設計與施工規範必須要求具有透水性低之混凝土，則可延緩水、氧氣及氯離子等腐蝕因子侵至鋼筋之處。除外可增加混凝土之電阻而能降低混凝土中鋼筋之腐蝕速率。卜作嵐材料如矽灰、高爐石水泥和飛灰等已經有相當多之文獻報導可降低混凝土之透水性。高性能混凝土就是使用卜作嵐材料與化學摻料如強塑劑等。高性能混凝土已普遍在混凝土業界引起廣泛之興趣，應用於高樓建築物，海域平台、港灣碼頭，核能與橋樑工程及預力混凝土，其優越點如下：

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

由高性能混凝土與一般混凝土之微結構比較，可發現一些有趣的結果，概述如下：

- (1) HPC 含有顆粒大小介於 0.02~1mm 之矽灰較一般水泥之粒徑介於 1~80mm 更為較細小。因此水泥漿之孔隙可被填充而降低其透水性。如圖四及圖五之微觀照片可發現其孔隙量少且緻密⁽¹⁰⁾。
- (2) 矽灰所含氧化矽與在水泥水化期間的游離之石灰起反應生成緻密性及不定型的矽酸鈣水化物(C-S-H)，填充結構體中殘留之空隙，使得水泥漿與骨材之介面變薄、孔隙率降低。此介面在一般混凝土常發生龜裂而有破壞面（圖六），此種卜作嵐反應可確保耐久性高。
- (3) 摻加強塑劑後，則可使水泥顆粒由聚結而分散，例如，W/C 可自 0.56 降低至 0.26，另外 HPC 結構體之水泥漿體比普通水泥漿體更為緻密。
- (4) 混凝土結構物在大氣已受二氧化碳作用而發生，中性化反應會使混凝土保護層厚度中之酸鹼度（pH 值）自 12.8 降至 9.0 而無法保護鋼筋，圖 7 示⁽¹¹⁾。各種不同水灰比下，中性化深度與材齡之關係，可由圖中可發現 HPC 之中性化速率較一般混凝土情況為低。

- (5) 根據壓汞孔隙儀可以發現一般混凝土之孔隙體積約為 HPC 之兩倍，如圖八所示⁽¹⁰⁾。
- (6) 比較表六及表七⁽¹⁰⁾ 可發現高性能混凝土之微裂縫與一般混凝土情況小很多。

參、HPC 在港灣與海域工程上國外應用實例

表八⁽¹²⁾列出HPC 在各種結構物上應用之形態，可增進的工作性質及實例，而表九⁽¹³⁾ 示在港灣及海域工程上國外應用實例，圖九~十一^(12,14) 為HPC 在橋樑及海域平台應用之範例。在北海混凝土平台自1973年至1995年共有27座。水深自70公尺至345公尺。例如圖十一之 Heidrum 張力腳平台就是建在345公尺水深之處。其挑戰性及需求如表十⁽¹⁴⁾ 所示。北海之混凝土能保持持久性是保持如表十一所示之十大重要法則⁽¹⁵⁾。其所使用之滑動模板施工如圖十二 所示⁽¹⁴⁾，現已改進使用HPC 高流動性泵送方法加以改善。

噴凝土常用於隧道工程，長時間輸送和工作會影響新拌及硬固混凝土之性質。使用HPC 之水泥水化控制系統可以使噴凝土在拌合72小時以上後仍未喪失其新拌及硬固特性，係因加入0.5-2% 之穩定劑使之停止水化，而加入3-6% 之加速劑使之開始水化加以控制，最新之發展為使用鋼纖維替代鋼筋，直接加於噴凝土中對於隧道之內襯工程相當實用。以下概述在亞太地區HPC 在港灣及海域工程應用之實例以供參考。

一、澳大利亞

(一) 雪梨機場第三跑道之海堤

雪梨機場2.4km 跑道延伸至Botany 灣，其中一半長度之工程建造一9.5km 長，4~5.5m 高之RC 擋土牆。海堤部份有8700塊預力混凝土檔土板，混凝土總面積量為30,650m²，設計年限為100年。規範指定使用矽灰和迅速氯離子滲透值需小於1000庫倫，使用10% 矽灰與單位重為340 kg/m³之普通水泥拌合最為經濟有效，氯離子滲透之測試結果顯示其品質

優良，無任一失敗案例。而電阻測試結果均超過20,000 歐姆，公分，顯示其腐蝕活性可忽略。

(二)西澳大利亞，花園島之橋樑修理工程

此島為上有海軍防護設施，使用跨海橋樑與大陸聯接。其設施有兩個混凝土碼頭在1980 年代期間內發現這些結構物顯示係因鋼筋腐蝕造成嚴重之劣化，曾試過使用各種修理方式效果不佳。後來在1990 經過Fremantle 港務局核定使用高性能混凝土，其所使用之配比及性能如表十二所示⁽¹⁶⁾。

(三)西澳大利亞花園島之小魚港碼頭

表十三列出預鑄混凝土之配比及性能結果，顯示與使用普通水泥有明顯的差異性⁽¹⁶⁾。

(四)Cairns 雜貨碼頭

1993 年7 月工程顧問公司曾定出混凝土吸水規範必須小於0.08 mm/min1/2。其配比原先由矽灰供應商提供，混凝土供應商考慮高品質及價錢合理而加入部份當地產料飛灰，經過多次測試獲取最佳工作度、性能及經費等各方面之考量而選用如表十四所示之配比，其所訂吸水率標準可能在某些地區使用當地材料不一定可達到⁽¹⁶⁾。

(五)外海混凝土平台

有兩個外海混凝土平台在Bass 海峽建造，規定在塔上之混凝土之氯離子擴散係數必須小於 $0.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ ，六種配比之性能測試結果如表十五所示⁽¹⁶⁾。

(六)Barney Point 橋樑

澳大利亞道路運輸局 (RTA) 以其規範 B80/2/0 為此橋之施工規範，如果可以達到吸水率和抗壓強度要求，其配比可自定。由於吸水試驗並非澳大利亞之國家標準，因此在詮釋試驗結果會產生問題，而快速氯離子滲透試驗在美國已有規範，B80/2/0 亦明定一般混凝土暴露海洋環境下需濕氣養生14 天，高爐水泥為21 天，在基樁冠牆和柱子方面廠商曾提出以矽灰替代高爐水泥以減少濕養時間，雖然性能較佳，但不被業主接受。各種配比如表十六所示，由於當時RTA 尚無判斷此配比之經驗，今日已認知 HPC

中摻矽灰可縮短養生時間（表十七）⁽¹⁶⁾。

二、香港

在1980 年代初葉，香港的混凝土結構物發生耐久性問題，由於受海洋環境的氯離子侵蝕，鋼筋發生銹蝕及混凝土剝落。混凝土中性化也是問題，因此許多建築物都很嚴重。後來貨櫃碼頭的鋼筋腐蝕需花費大筆經費用陰極防蝕加以修護。由此背景，因此需HPC 在惡劣環境下應用。顧問公司開始規範標定耐久性之方法。在香港最大的問題是碎石品質不佳。要達到初始坍度為50-70mm，若使用之水泥質單位重在 440 kg/m^3 所需用水量約為 180 m^3 ，即使規定低水灰比亦如是，而飛灰在香港當地可取得，但其品質不佳，因此混凝土之透水性較高，除非配比上作一些修正，表十八列出海洋結構物使用之HPC 配比範例⁽¹⁶⁾。以下列舉兩個工程案例。

（一）香港貨櫃碼頭

表十九列出此碼頭耐久性之規範，如表20 使用10% 矽灰可達吸水率要求⁽¹⁶⁾。然而加飛灰情況則很難達到吸水率之規範，表二十一示另一測試結果⁽¹⁶⁾，發現摻加矽灰之情況之吸水率可達標準，然而無法達到快速氯離子滲透標準1,000 庫倫。

（二）Tsing Ma 橋

HPC 在耐久性相當重要的性能需求考量下之結構設計其使用量急速增加。例如在香港之Tsing Ma 橋，此橋為一吊橋。需抗拒最惡劣之天候條件包括颱風及氯離子造成鋼筋腐蝕。因此在合約上規定最重要的部份是必須對此結構進行氯離子擴散試驗。如表二十二所示⁽¹⁷⁾。

（三）印尼

最近在印尼有HPC 之測試工作，表二十三為 初始結果⁽¹⁶⁾，原來相當失望，直到認知是骨材不良所致。在耐硫酸鹽測試發現由於骨材不良、混凝土迅速劣化、耐久性試驗發現摻矽灰及低水灰比之HPC 具有優良之耐久特性。當地最大的問題是骨材具多孔性。因此發展真正之HPC 是迫切需要的。

(四) 馬來西亞

表二十四列出 Kuala Lumpur 地方在1993 使用之混凝土配比⁽¹⁶⁾，可發現HPC 之耐久性比一般混凝土有很大的改善，然而仍需繼續改良配比。

(五) 新加坡地下工程

在新加坡地下鐵工程發現有些地方氯離子和硫酸鹽濃度很高，且其pH 值非常低，比起海洋環境條件更為嚴重，因此在地下工程必須特別注意混凝土之耐久性。一般混凝土地下室之防水工程都使用防水膜，1990 年 MBT 引進混凝土摻加矽灰、減水劑和強塑劑作防水曾在 Ngee Ann 市中心使用過，爾後其使用量已超過200 個結構物。根據測試發現摻加7.5% 矽灰之HPC，其透水率為 3.5×10^{-14} m/sec。

肆、港灣技術研究所執行港灣HPC 研究之構想

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，再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和加速舊裂縫之延伸，擴大海洋環境侵蝕的現象，進而使氯離子更易侵入混凝土，破壞鋼筋表面的純態保護膜，使鋼筋發生腐蝕，因而減少結構物的使用年限⁽¹⁸⁾。尤其台灣四面環海，且地處亞熱帶，在高溫與高濕的腐蝕環境下，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。其高流動性使混凝土施工具有不需搗實，可自動澆置與減少施工噪音優點，廣泛的自流性能減少混凝土之輸配以及可以流通至狹窄鋼筋間距或斷面，達到充分填充。其高品質特性除顯現於硬固後之性質，在施工階段可顯現其具有減少骨材析離與泌水現象之優點。高性能混凝土科技研發，在許多先進國家均已投入相當大的心力，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獲。其次是近年來國內營建勞工

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，均面臨了空前的挑戰，各項工程品質乃有日漸低落之虞。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期望之必行之路。高性能混凝土之使用可切合營建自動化之功能。

由於高性能混凝土(HPC)在國外如海域鑽油平台橋樑及碼頭等結構物都曾使用過，而且耐久性表現相當良好，國內在HPC應用上如遠企中心及高雄東雲建台大樓等均有相當的成效，然而在海域工程上之應用實例並不多。而其所使用之材料參數包括水灰比、化學摻料（強塑劑、加速劑、穩定劑、緩凝劑）、卜特蘭材料（飛灰，矽灰高爐水泥）、水泥型態及骨材之粒徑等。其用量之多寡對混凝土之耐久性具有正面或負面之影響相當的重要。此方面之性質在一般普通混凝土均有研討過，但是對於海洋HPC特性如何必須詳加探討。一般港灣工程設計單位仍偏重於中低強度的設計，而目前國內外之HPC研究仍以高強度為主。為能滿足及改善國內混凝土品質，開發中強度以下之HPC仍為當務之急，而HPC之物化性質為HPC研發工作最重要的部份，尤其在中強度以下之HPC文獻資料及研究成果相當缺乏。為此，本研究所目前已開始進行研究並將配合國科會研究群計畫以三年時間完成本土化中強度高性能混凝土基本性質之研究。前二年主要瞭解中強度高性能混凝土物化性質，第三年將以往研究成果建立資料庫做為日後推廣應用的參考。

本研究採卜特蘭第一型水泥，添加通過300號篩之F級飛灰及水淬爐石粉。參考ACI 318-95、ACI 363及ACI 211.4R及先導性研究成果，選定強度高於 560 kg/cm^2 以上及一般中強度($=420 \text{ kg/cm}^2$)之混凝土配比，製作試體曝露於海水中，然後每半年取出試體進各項試驗，以建立本土HPC之耐久性模型。本研究所所研擬之基本研究與向國科會申請之研究計畫之研究流程如圖十三及十四所示。

第一年之研究工作：

首先回顧國內外在港灣環境下HPC耐久性相關之研究及工程實務之資料作一完善之整理，然後找出組成材料與海水之互制關係，並以最小孔隙比的觀念，建立最佳之配比。並以此配比製作各種試體，並對試體的材料特性加以驗定以供對比，然後將測試之HPC試體置放於海洋曝露試驗

水槽中，浸泡時間為二年，預計每半年取樣一次。

第二年之研究工作：

自海洋曝露試驗水槽中取出試體進行透水試驗及試體之外觀描繪其劣化跡象，並自試體中取樣進行SEM/EDS，XRD、化學滴定分析，以利初步瞭解受海水而發生腐蝕之可能生成物之微結構外貌及其化學組成份，同時量測氫氧化鈣含量、水化程度及矽酸鹽／鋁酸鹽之聚合度及聚矽陰離子長度及孔隙結構，另外作鑽心取樣作抗壓強度、非破壞之超音波及試驗鍾測定其表面強度、測定鋼筋之保護層厚度、腐蝕電位及腐蝕速率及混凝土電阻和氯離子侵入試體之擴散特性等，另外亦需取海水樣品進行海水成份分析。

第三年之研究工作：

延續第二年之工作，再取兩次試樣，進行類似第二年所作相同之試驗，然後將兩年之測試結果，整理建立港灣HPC試體之氯離子擴散模式、透水性模式、巨微觀特性及評估腐蝕速率及生命週期，研究成果將有益於各港務局在混凝土工程之設計與施工之有力依據。

伍、結論與建議

根據本文之剖析可發現高性能混凝土具有優越的耐久的工程材料特性。在國外港灣與海域工程已有不少應用實例，為提升國內港灣混凝土工程科技的技術水準，展望港灣工程界能多予支持，將此技術推廣至實際工程應用，以確保其具有經濟、安全、實用與耐久等優良之品質保證。

陸、致 謝

本文之完成得感謝友懋國際有限公司王健志經理提供一些寶貴資料，及培頓企業公司陳吉祥總經理提供許多寶貴建議。

柒、參考文獻

1. 林維明 "海洋混凝土結構物耐久性之檢討"，海洋混凝土工程研討會資料彙刊，港灣技術研究所專刊第38號，民國76年10月。
2. American Concrete Institute, "Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures", ACI 357R-84, ACI Manual of Concrete Practice, Part 4 : Bridges, Substructures, Sanitary, and Other Special Structures, 1990.
3. CEB-FIP "Recommendation for the Design and Construction of Concrete Sea Structures, 1987.
4. Standards Association of Australia, "Australian Standard 3600-Concrete Structures", Standards House, Australia, 1988.
5. T. C. Holland "High Performance Concrete" in High Performance concrete with Speciality Admixtures pp.25-27 1997.
6. 林維明等，1991.06，"港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究"，港灣技術研究所79研(9)研究報告。
7. Taywood Engineering Limited, Australia, Correspondence to MBT (Singapore) Pte Ltd., January 1993.
8. Mobasher, B., & Mitchell, T.M., "Laboratory Experience with the Rapid Chloride Permeability Test", ACI publication SP-108, Permeability of Concrete, 1988.
9. "Permeability of Concrete and its Control", The Concrete Society (UK), London, 1985.
10. M. Moranville-Regourd "Microstructure of High Performance Concrete", High Performance Concrete, Ed. Yves Malier Publ. E & FN Spon, London, pp.5-13, 1992.
11. Grandet, J. "Durability of High Performance Concrete in Relation to External Chemical Attack" *ibid*, pp.25-30.

12. Malier, Y. "Introduction", *ibid*, pp.1-12.
13. CEB-FIP "Application of High Performance Concrete" CEB-FIP Bulletin Information #222, Nov.1994 pp.53-60.
14. Haug A. K. "Concrete Technology, the Key to Current Concrete Platform Concepts" ACI-SP-149 pp.63-80.
15. Moksnes J., "Oil and Gas Concrete Platform in the North Sea-Reflection on Two Decades of Experience", in *Proc. of International Experience with Durability of Concrete in Marine Environment*, University of California, Berkeley, California, 1989.
16. Papworth, F "Corrosion Resistance of High Performance Concrete" *ibid* of Ref.5, 1997.
17. Allen, C. "Microsilica-A Suitable Performance Enhancer for Hong Kong Concrete" *ibid*, 1997.
18. Fidjestol, P, et al (1987) *Factors Affecting the Design for Corrosion Protection in Concrete Offshore and Marine Structures* Concrete in the Ocean Tech., Rep. No.14, Dept. of Energy., London.

表一 海洋 RC 結構物設計規範⁽¹⁻⁴⁾

曝露區	ACI 357R-84			FIP-1987			AS.3600-1988		
	W/C	t	σ	W/C	t	σ	W/C	t	σ
海水中	0.45	50	352	0.45	75	306	0.55	45	400
潮汐區	0.40	50	422	0.40	75	408	0.45	50	500
大氣區	0.40	37	422	0.40	75	408	0.55	45	400

說明：W/C：水灰比

t：混凝土保護層厚度 (mm)

σ ：28 天抗壓強度 (kgf/cm²)

表二 高性能混凝土代表性性質⁽⁵⁾

(1) 極限強度高	· 流動混凝土，坍度 >8" 而不析離
· 28 或 56 天之抗壓強度為 6,000~10,000psi	· 降低泵送壓力
· 56 天之抗壓強度為 10,000~18,000psi	· 易於修飾
(2) 早期強度度高 (18~24 小時)	· 自行凝固
· 抗壓強度 2,500~4,000psi	(6) 在冷天可澆置性
· 抗彎強度 400~600psi	· 可調整正常凝結時間
(3) 彈性模數	· 加速強度發展
· >6,500,000psi	· 低溫凍融保護
(4) 耐久性	(7) 在熱天可澆置性
· 防制混凝土內鋼筋之腐蝕	· 保持一般坍度之時間較長
· 防制其他嚴酷服務環境下之化學性侵蝕	· 控制水化時間，避免速凝
(5) 工作性、泵送性及修飾性佳	(8) 控制水化
· 坍度：250 ± 20mm(0 分鐘) 230mm(45 分鐘)	· 依計畫條件需求可延長或縮短凝結時間

表三 混凝土品質與其吸水率之相關性⁽⁷⁾

混凝土品質	吸水率 (mm/min ^{0.3})
好	< 0.1
可接受	0.1~0.2
不良	> 0.2

表四 混凝土電阻與氯離子侵入機率相關性⁽⁸⁾

電荷 (庫倫)	氯離子侵入機率
> 4,000	高
2,000~4,000	中等
1,000~2,000	低
100~1,000	非常低
< 100	可忽略

表五 混凝土透水性與其透水係數之關係⁽⁹⁾

混凝土滲透性	透水係數 (m/sec)
低	$< 1 \times 10^{-12}$
平均	$1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-10}$
高	$> 1 \times 10^{-10}$

表六 HPC 微裂縫密度⁽¹⁰⁾

混凝土強度	龜裂 (n cm ⁻¹)	介面 (n cm ⁻¹)	水泥漿體 (n cm ⁻¹)
76 MPa	0~0.02	1.45~1.50	1.35~0.40
110 MPa	0.04~0.07	0.20~1.00	0.06~0.25

表七 一般混凝土龜裂密度⁽¹⁰⁾

試樣	微裂 (n cm ⁻¹)		介面 (n cm ⁻¹)		水泥漿體 (n cm ⁻¹)	
	外側	中心	外側	中心	外側	中心
1	0.13	0.02	2.15	1.80	0.85	0.60
2	0.20	0.09	1.55	2.05	0.45	0.25
3	0.06	0.00	3.25	1.55	1.35	0.30

水泥單位重 400 kg/m³, W/C=0.36

表八 HPC 應用之形態，增進之工作性質及實例

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

F: 法國 N: 挪威 USA: 美國 CAN: 加拿大 JAN: 日本

表九 使用 HPC 施工之代表性範例⁽¹³⁾

工程計劃	地點	施工時間	使用 HPC 理由	混凝土性能組成及品質	設計考慮及規範
橋柱修理 (場鑄)	Hokuriko 高速鐵路 (日本, 海岸區)	1991	磨耗量低, 增加耐久性	指定強度 80MPa	
挪威大多數公路結構及橋樑維修	挪威	自 1989 年起至今	耐久性, 耐海洋環境下氯離子之侵蝕	水膠比 0.4 及使用矽灰	NS 3473 挪威公路規範 process code 2"/1989
乾船塢岸壁維修	葡萄牙 Setubal	1991	耐久性	74MPa (平均強度) 107MPa (最高值) 水膠比 0.35	葡萄牙規範 (REPAP) 及 CEB-FIP
海岸碼頭嵌板	澳大利亞雪梨機場	1993	耐久性, 抗氯離子侵蝕	40MPa, 混凝土摻矽灰	海洋環境
液化天然氣槽	日本橫濱	1993	耐久性	水灰比 0.3, 指定強度為 60MPa	日本土木學會高性能混凝土規範
石油浮式生產平台	挪威北海 Troll-Floater	1993/94	減少尺寸及重量, 耐氯離子之侵蝕	設計強度 75MPa 水膠比 0.38 5% 矽灰混凝土 43,000m ³	NS 3473
浮式平台	法國在 Marseille 地區建造	1994/95	易於澆置, 強度高, 耐久性	需要強度 70MPa	大的預力浮式駁船 (200m 長)
石油生產張力腳平台	挪威北海 Heidrum 浮體	1993/95	浮力相對龐厚 使用壽命長	75MPa (平均強度) 水膠比 0.36 坍度 200-220mm 空氣含量 3-5% 密度 1940kg/m ³ 混凝土用量 65,000m ³	NS 3473 水深 350m
輕質骨材混凝土浮式橋樑	挪威 Bergsfysundet	1990/92	減輕七個浮筒重量, 總長度 835m	使用 LC-55 級水泥 水膠比 0.40 密度 1920kg/m ³ 混凝土用量 4500m ³	NS 3473
浮式橋樑	挪威 Salhus 橋	1993/94	減輕 10 個浮箱重, 總長度 1245 公尺	平均強度 70MPa 單位重 1900kg/m ³ Leca 骨材, 混凝土用量 9 仟立方	輕質混凝土浮箱連接於吊橋
外海平台	紐芬蘭 Hibernia 外海平台	1994/95	-	水膠比 0.34 矽灰 8.5% 坍度 21cm 水泥用量 165,000m ³	NS3473 重力式基座結構, 直徑 108m, 高 111m
外海石油平台 / 動力基礎結構	挪威北海 Draugen	1990/93	耐水靜壓力, 波浪及風負荷, 使用壽命	平均強度 80MPa 水膠比 0.4~0.42 坍度 22~25cm 水泥用量 80,000m ³	NS3473 水深 251m
外海天然氣平台	挪威北海 Troll 重力式平台	1992/95	同上	平均強度 82MPa 水膠比 0.38~0.40 坍度 24~26cm 水泥用量 224,000m ³	NS3473 水深 303m
外海天然氣平台 / 重力基礎結構	挪威北海 Sleipner	1991/93	同上	平均強度 78MPa 水膠比 0.4~0.42 水泥用量 75,000m ³	NS3473 水深 83m
浮式海域平台基礎	挪威北海 Heidrum	1993/94	強度	平均強度 83MPa 水膠比 <0.43	NS3473

表十 北海混凝土結構物之挑戰與需⁽¹⁴⁾

性 質	挑 戰	需 求
強度	指定混凝土等級一般混凝土(c) 1970s:45 to 55 MPa 1980s:55 to 70 MPa 1990s:80 to 100 MPa	抗壓強度 抗拉強度 現場強度
耐久性	腐蝕與化學侵蝕 水侵入 15mm 最大為 25mm 抗凍融 (潑灑區)	健全的組成料 低滲透性($<1 \times 10^{-13}$ m/sec) W/C(水中 0.45, 潮汐區 0.4) 水泥含量(350kg/m ³) 足夠之保護層厚度(最少 50mm) 輪氣劑(3-5%)
混凝土等級 與彈性模數	C60-70 Ec:3,5-3,5 GPa C75 Ec:3,0-4,0 GPa LC60 Ec:2,0-2,5 GPa	彈性模數, 應力應變關係
單位重	C80-90:2450kg/m ³ LC75:2250kg/m ³ LC65:1950kg/m ³	混凝土密度, 現場單位重
可施工性	鋼筋密集與埋設, 活動模板 高生產速率與最新泵送系統 低單位重混凝土之輸送系統 高壓混凝土泵送一般混凝土 混凝土 70°C, 耐高溫溫度梯 度為 1°C / cm, 巨積混凝土	工作性高 (坍度 > 22 公分) 無泌水或析離 可調整與預測凝結時間, 反振動 品質及材質一致性 控制拌合和配比 高泵送性 混凝土溫度 水化熱

表十一 北海耐久性混凝土十大重要的法則⁽¹⁵⁾

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

表十二 花園島修理之配比⁽¹⁶⁾

配比與性質	砂灰混凝土	一般混凝土
水泥單位重 (kg/m ³)	400	400
砂灰 (kg/m ³)	40	-
Rhebuild 561(ml/m ³)	3520	-
水膠比 (kg/m ³)	0.41	0.43
初始坍度 (mm)	45	80
30 分鐘後坍度 (mm)	25	15
AASHTO 277 (Coulombs)	880	3640
7 天抗壓強度	67	58
28 天抗壓強度	79	68

表十三 花園島小漁碼頭配比⁽¹⁶⁾

配比與性質	OPC	SA70/30	SA70/30+10%
OPC Type A (kg/m ³)	435	308	278
GGBFS (kg/m ³)	-	132	119
CSF (kg/m ³)	-	-	44
Water/Binder	0.4	0.39	0.39
Compressive Strength 28 Day (MPa)	57.5	65	76.5
AASHTO 277 (Coulombs)	4000	2000-4000	100-1000
Test (mm/min ^{0.5})	0.15	0.12	0.10

表十四 澳大利亞 Cairns 雜貨碼頭配比⁽¹⁶⁾

配比與性質	試拌 A	試拌 B	決定之配比
Cement (kg/m ³)	400	300	295
Slag (kg/m ³)	300	100	-
Fly Ash (kg/m ³)	-	-	75
Silica Fume (kg/m ³)	40	40	30
Water/Binder	0.32	0.32	0.33
Slump (mm)	-	-	120-140
Comp.Strength (MPa)			
1 day	-	-	151
7 day	-	-	65
Shrinkage (microstrain)	-	-	95
Tensile Strength (MPa)	-	-	532
TEST (mm/min ^{0.3})	0.06	0.07	0.07
Estimate chloride diffusion (10 ⁻¹³ m ² /s)	4	2	-

表十五 外海混凝土平性能測試結果⁽¹⁶⁾

配比	ASTM (Coulombs)		Shrinkage (Microstrain)	TEL Chloride Pen. (m ³ /sec)		Compressive Strength (MPa)			
See Note 1 配比 *	28 day	56 day	8 week	28 day	56 day	1 day	3 day	7 day	28 day
Q-25% slag	970	610	750	10	2	10	31	45	67
Q-35% slag	1030	640	770	4.5	0.45	6	25	38	65
T-fly ash	1270	1030	670	8	2	14	37	50	68
T-slag	1330	870	700	6.5	0.5	10	30	45	70
T low FA 7% CSF	1110	820	650	8.5	1.5	17	42	54	75
T low FA 9% CSF	1430	nl	nl	4	6.5	15	41	54	75

* 除特別指明外所有配比含 5% 矽灰，水膠比 0.35，坍度約為 11 cm

表十六 Barney Point 橋之配比⁽¹¹⁾

配比與性質	High Slag Blend	Silica Fume Mix	Type A Steam Cure	Type A Wet Cure	Curing Compound
Cement (kg/m ³)	184	340	480	390	430
Slag (kg/m ³)	276	-	-	-	-
Silica Fume (kg/m ³)	-	40	-	-	-
Total Cementitious (kg/m ³)	460	380	480	390	430
Water/Binder	0.39	0.4	0.36	0.46	0.42
Shrinkage (microstrain)	440	441		453	451
28 days compressive (MPa)	53	78	65	52.5	53
RTA Sorptivity (mm) curing Steam overnight	-	-	17	-	-
7 days wet, 21 days dry	-	0	-	20	-
21 day wet, 7 days dry	-	-	-	-	12

表十七 RTA 養生需求⁽¹⁶⁾

Mix Design	Wet Curing Period for B1/B2 Exposure
Silica Fume	3 Days
OPC Type A	7 Days
Slag Cement	14 Days

表十八 香港之海洋結構物使用 HPC 之配比⁽¹⁶⁾

配比與性質	Typical Mixing	Equivalent Cost Silica Fume + Fly Ash
Cement (kg/m ³)	410	300
Fly Ash (kg/m ³)		100
Silica Fume (kg/m ³)		15
Water/Binder	0.44	0.46
Compressive Strength 28 days (Mpa)	68.5	63
Water Permeability (m/sec)	22.3×10^{-11}	2.95×10^{-11}
AASHTO 277 (Coluombs)	5089	2289

表十九 香港貨櫃碼頭耐久性規範⁽¹⁶⁾

7 day TEST (mm/min ^{0.5})	0.07
28 days Chloride diffusion (m ³ /sec)	0.5×10^{-12}
Slump	
initial (mm)	120
at 50 mins (% initial slump)	± 15%
Bleed	
1 hour (% mixing water)	0.5%
max (% mixing water)	1.5%

表二十 香港貨櫃碼頭 HPC 使用性能⁽¹⁶⁾

配比與性質	A0	A5	A10	B10	C10
Cement (kg/m ³)	400	400	400	300	240
Fly Ash (kg/m ³)	-	-	-	100	160
Silica Fume (kg/m ³)	-	20	40	30	30
Water (l/m ³)	200	200	200	200	200
TEST (mm/min ^{0.5})	0.13	0.095	0.055	0.11	0.12

表二十一 香港 9 號貨櫃碼頭 HPC 測試結果⁽¹⁶⁾

Cement (kg/m ³)	400	340
Fly Ash (kg/m ³)	-	70
Silica Fume (kg/m ³)	40	30
Water (l/m ³)	165	165
Slump		-
Initial (mm)	210	200
90 min (mm)	165	130
TEST 14 days (mm/min ^{0.5})	0.065	0.075
AASHTO 277 42 days (Coulombs)	369	616
Chloride Diffusion (m ² /sec)	2.5 * 10 ⁻¹²	3.5 * 10 ⁻¹²

表二十二 混凝土性質測試⁽¹⁷⁾

配比與性質	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5
Cement (kgs/m ³)	410	300	300	330	330
PFA (kgs/m ³)	-	100	100	110	110
CSF (kgs/m ³)	-	15	22.5	16.5	25
Water (kg/m ³)	160	190	190	200	200
Plasticiser (l/m ³)	-	2.49	2.54	2.74	2.79
Superplasticiser (l/m ³)	3.43	3.14	4.28	4.00	4.00
W/(C+F+S)	0.39	0.46	0.45	0.44	0.43
Slump (mm)	210	190	190	200	200
3 days Compressive (N/mm ²)	50.0	38.0	37.0	45.0	39.5
7 days Compressive (N/mm ²)	53.0	47.5	42.5	50.0	46.0
28 days Compressive (N/mm ²)	68.5	63.0	59.0	65.5	65.5
60 days Compressive (N/mm ²)	69.5	75.0	68.0	70.5	71.0
Water Permeability 28 days (m/second * 10 ⁻¹¹)	22.3	2.95	4.42	4.02	1.69
Rapid Chloride Permeability (Coulombs)	5089	2289	1779	2012	1538

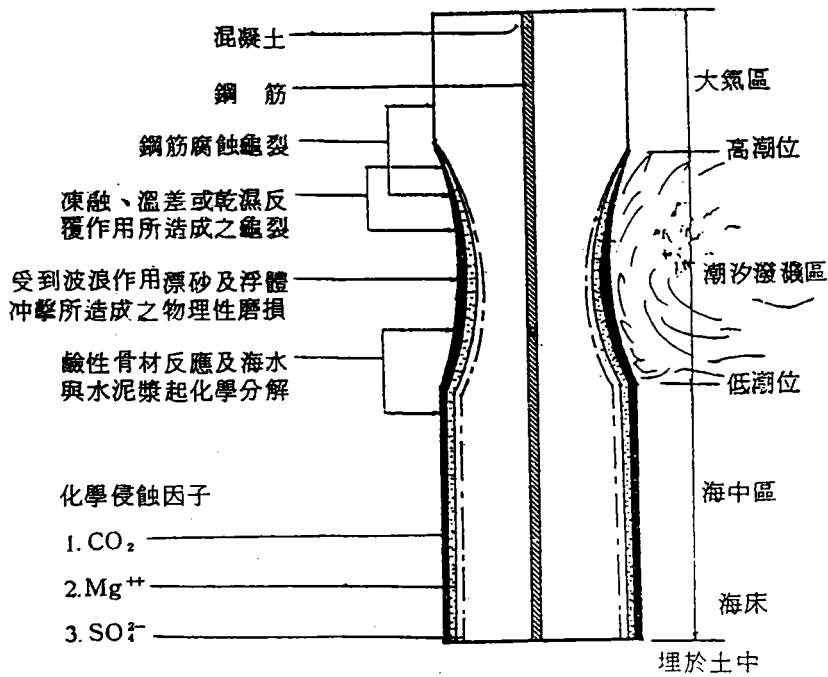
表二十三 印尼 HPC 試驗結果⁽¹⁶⁾

配比與性質	OPC	CSF
Cement (kg/m ³)	500	500
Silica Fume (kg/m ³)	-	40
Water (l/m ³)	160	160
Slump (mm)	110	120
AASHTO 277 (Coulombs)	1686	625
TEST (mm/min ^{0.5})	0.15	0.135
Water Permeability (m/sec)	5 * 10 ⁻¹¹	24 * 10 ⁻¹¹

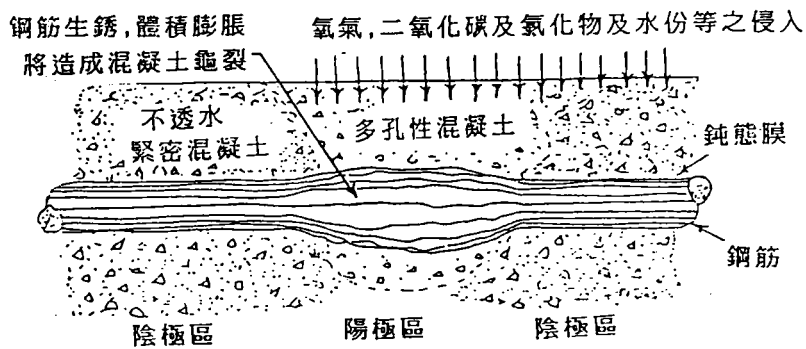
表二十四 馬來西亞 Kuala Lumpur 碼頭配比⁽¹⁶⁾

配比與性質	300 kg Series			350 kg Series			400 kg Series		
	OPC	CSF 5%	CSF 10%	OPC	CSF 5%	CSF 10%	OPC	CSF 5%	CSF 10%
Cement (kg/m ³)	300	285	270	350	332.5	315	400	380	360
Silica Fume (kg/m ³)	0	15	30	0	17.5	35	0	20	40
28 days Compressive (MPa)	50.5	55.0	58.5	62.5	64.0	67.0	75.5	83.5	84.5
AASHTO 277 (Coulombs)	6160	5190	1860	4320	3150	1050	3580	2420	1110
120 days Water Perm. (m/sec)	0.14	0.38	0.11	0.13	0.14	0.09	0.10	0.10	0.09

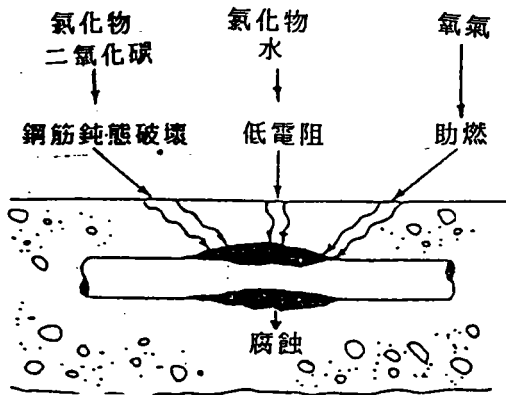
OPC: 普通水泥混凝土 CSF: 摻加矽灰之混凝土



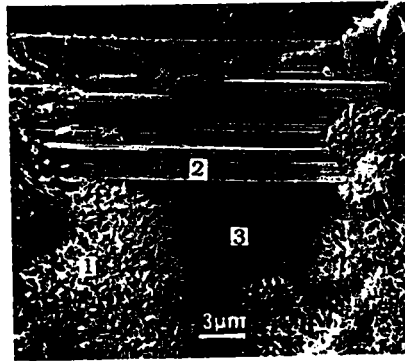
圖一 海洋混凝土破壞示意圖⁽¹⁾



圖二 鋼筋混凝土中巨大電池模式⁽⁶⁾



圖三 混凝土主要腐蝕因子⁽⁶⁾



水灰比 0.5
 符號說明
 1. C-S-H
 2. $\text{Ca}(\text{OH})_2$
 3. 毛細孔

圖四 卜特蘭水泥漿微觀照片⁽¹⁰⁾

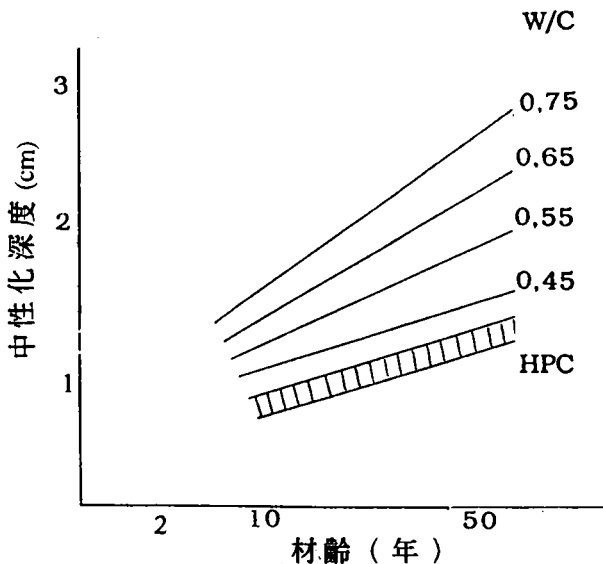


符號說明
 1. $\text{Ca}(\text{OH})_2$
 2. C-S-H

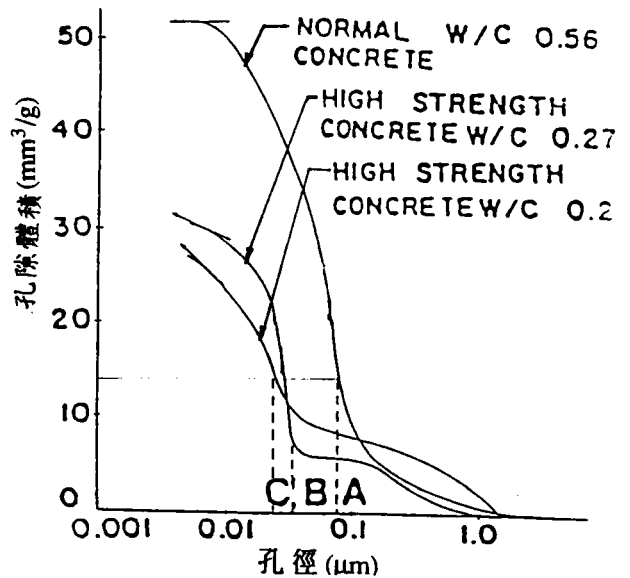
圖五 砂灰水泥漿微觀照片⁽¹⁰⁾



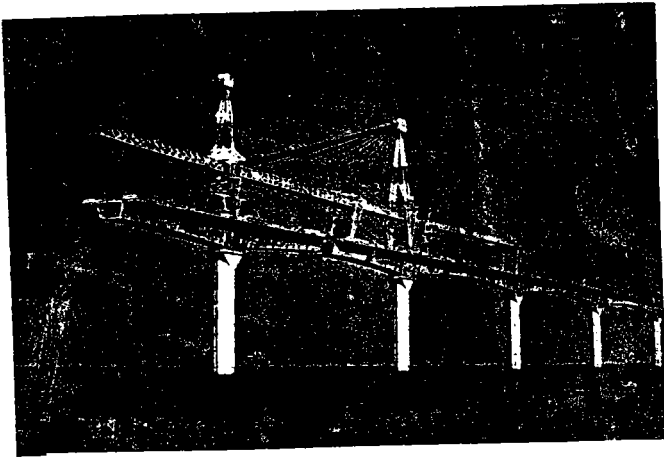
符號說明：G：骨材 C：水泥
 圖六 一般混凝土沿骨材與水泥漿介面發生龜裂現象⁽¹⁰⁾



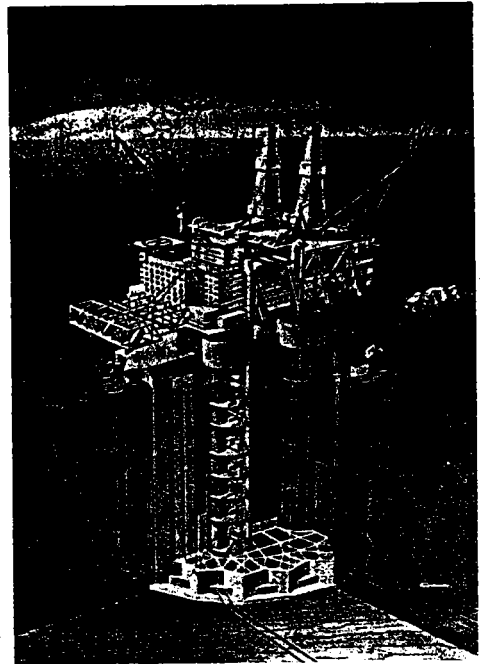
圖七 混凝土中性化深度與材齡之相關



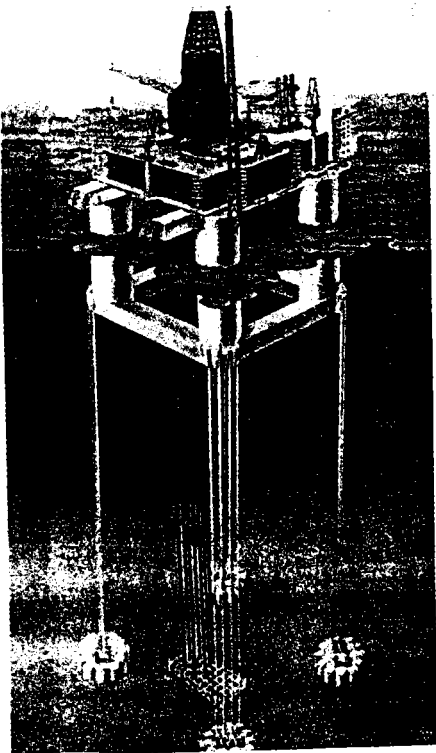
圖八 混凝土孔隙結構與水灰比之關係⁽¹⁰⁾



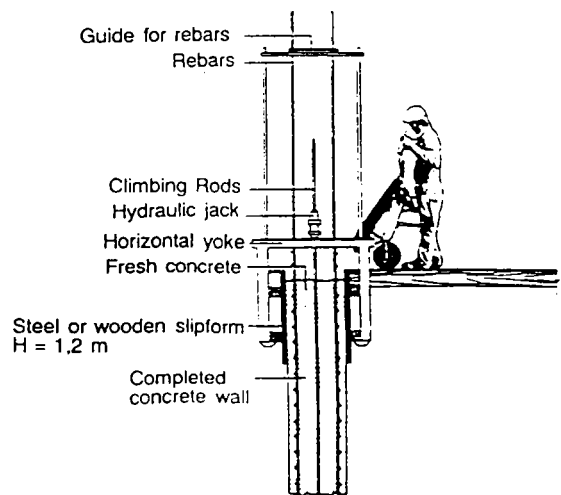
圖九 法國 Ile de Re 橋⁽¹²⁾



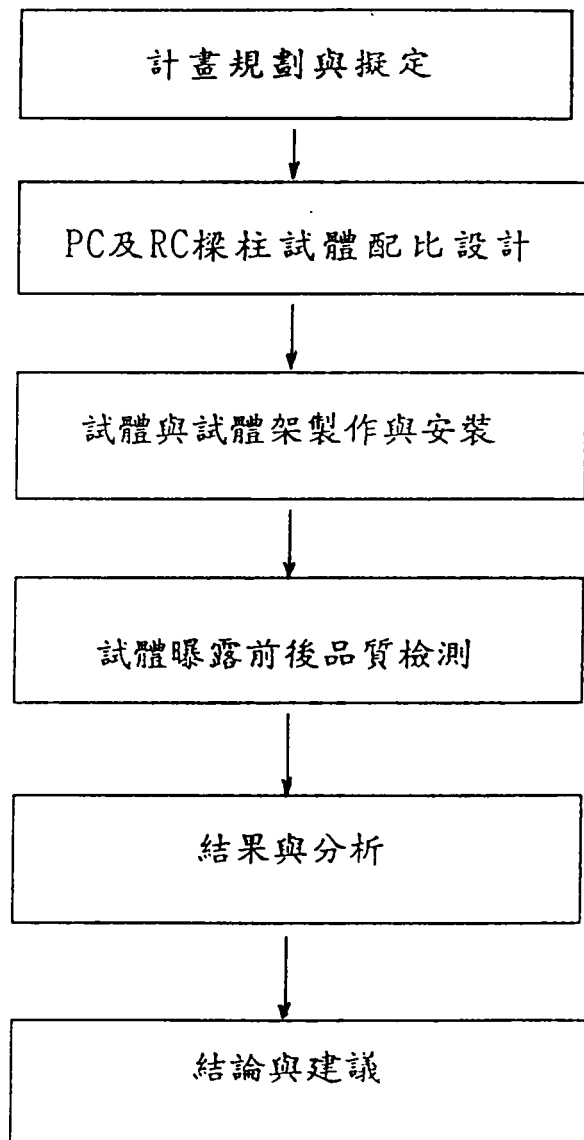
圖十 Hibernic 重力式平台⁽¹⁴⁾



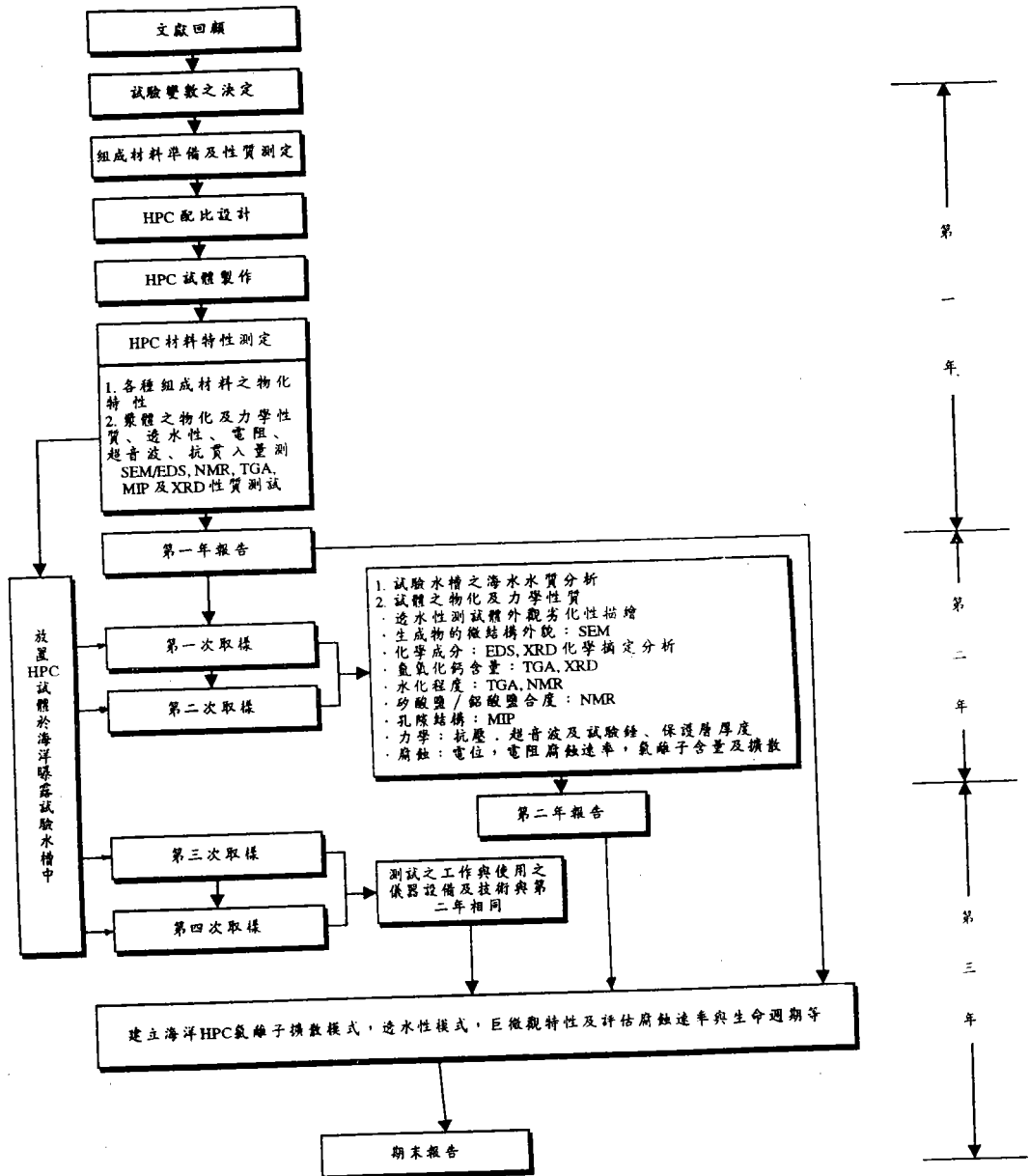
圖十一 Heidrun 張力腳平台⁽¹⁴⁾



圖十二 活動模皮施工⁽¹⁴⁾



圖十三 港灣環境下 HPC 性能
研究試驗計畫流程圖



圖十四 HPC 耐久性研究試驗計畫流圖