

高性能混凝土防蝕效能之研究

王和源*

Study on the Anti-Corrosion of High Performance Concrete

H. Y. Wang*

摘 要

國內優生高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)考慮的重點包括安全、經濟、工作、生態及耐久等性能，尤其是在耐久性之考量上，皆要符合美國混凝土學會ACI 318-95允許混凝土添加卜作嵐材料之規範精神。本研究係以本土化材料及應用緻密配比法，添加飛灰、爐石等卜作嵐材料與強塑劑，由水膠比(Water to binder ratio, W/B)與水固比(Water to solid ratio, W/S)等影響HPC中長期耐久性指標，檢測硬固HPC之電阻係數、電量及滲透性等方式，綜合評估HPC之防蝕性能。研究結果指出，由耐久性指標及各種檢測方式可快速又準確的評估及驗證出HPC具有防蝕特性，此顯示HPC可適用於具有腐蝕之慮的海邊及港灣工程或硫酸鹽侵蝕之深基礎工程。

關鍵詞：高性能混凝土、防蝕效能、水固比

ABSTRACT

The local high performance concrete is made to meet five criteria of safety, economy, workability, ecology and durability. Especially, the durability has to conform with the specification of ACI 318-95 in which the addition of pozzolan is allowed in the concrete. In this research, based on the densified mixture design algorithm the concrete was made by local material including fly ash, slag and superplasticizer. The water to binder ratio (W/B) and water to solid ratio (W/S) affect the mid-term and long-term durability. Due to the W/B, W/S, the electrical resistivity, chloride penetration and water permeability, the performance of anti-corrosion of HPC can be tested and confirmed. Therefore, it is helpful for the foundation of offshore structures, and harbor constructions where severe sulfate attack is suspected.

Key words : High Performance Concrete, Anti-Corrosion Efficiency, Water to Solid Ratio (W/S).

一.前言

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。

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

*國立高雄科學技術學院土木系副教授

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering National Kaoshiung Institute of Technology

界」需求的高性能混凝土係改進傳統混凝土(Ordinary portland concrete, OPC)與高強度混凝土(High strength concrete, 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^[1-2]，並能製造出符合優生理念的高性能混凝土。

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。

傳統工程人員對配比的瞭解程度僅止於強度設計理念，只強調強度、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。以往在美國混凝土學會 ACI 318-89 規範，都是以「安全性」為主，「安全性規範」係以「水灰比(Water to cement ratio, W/C)」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、卜作嵐材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」考量，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^[3]。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。

二、HPC優生配比理念

緻密 HPC 配比要求須達到「安全性、耐久

性、工作性、經濟性、生態性」優生準則，其優生配比之邏輯與傳統 ACI 配比方法是不同的^[4]。ACI在控制工作性上係以「用水量」為基準，W/C 的高低直接關係到水泥量的多寡，W/C 低則成多漿系列，一般以「多漿指示出強度高，低漿則強度低」之觀念下，產生以用水量為控制坍度及工作度的錯誤指標。高性能混凝土則以混凝土只要在足夠漿量的條件下達到工作性目標，只有應用最小孔隙，要求級配最佳化及緻密化，並使用卜作嵐材料及強塑劑而達到高工作性。

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 1。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，而不同於 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，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、石膏及鈣矽石反應。並且降低鹼量後，減少對骨材之攻擊性。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 方法計算出水泥強度效益平均為每公斤水泥發揮 $0.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 強度，而優生配比則考量每一公斤水泥至少發揮 $1.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 為主，能充分發揮材料應有之品質^[5]。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

表 1 優生高性能混凝土與傳統混凝土之比較^[3]Table 1 Comparison of Eugenic High Performance Concrete and Traditional Concrete^[3]

		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；中長期強度控制W/B及長期強度限制W/S<0.08。
	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 $\leq 0.08 * (\text{固態材料})$ ；降低水泥用量 $\leq \rho / 1.4$ 混凝土，降低W/B，控制W/C ≥ 0.42 及W/S<0.08；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，小於150mm	適當加水、添加強塑劑、調整級配	緻密級配；控制砂FM>2.8；添加卜作嵐摻料；、添加強塑劑摻料。確保45或60分鐘仍有適宜之工作性。
	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	採用「黃氏緻密配比法」，緻密級配提高水泥強度效率 $>1.4 \text{ kg/cm}^2/\text{kg}$ 水泥；增加施工度；降低生命週期成本。
	生態性	—	—	添加礦粉摻料，提高水泥強度效率，減少水泥用量，降低CO ₂ 排放量，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	加冰水	減少水泥	減少水泥量；添加卜作嵐；降低溫度，減少龜裂。
	塑性收縮	控制環境	減少水泥漿量	減少水泥漿用量。
	坍/坍流度	一般性，小於150mm	250 \pm 20mm	依工程需求，坍度0-280mm/流度0-650mm，45分鐘坍度及坍流度仍俱有初拌之最低要求。
	凝結時間	一般性	初凝較長	依需求控制；控制水泥漿量。
硬 固 混 凝 土	體積穩定性	—	—	控制W/S<0.08，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	控制W/S<0.08，大量使用卜作嵐材料；減少水量；減少水泥量；強化界面弱帶。

再生材料如飛灰、爐石等。

生態性之考量，即將工業廢料以緻密邏輯滲入孔隙及空隙內，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，甚至有助於材質。另外減低水泥量而減少製造排放的二氧化碳，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，避免造成人類未來的浩劫。

三、驗證計劃

本研究採用台灣水泥公司生產之普通卜特蘭第一型水泥，中聯爐石公司提供之水淬爐石粉。台電興達廠生產之F級飛灰及啓欣公司之強塑劑等，以顆粒堆積演譯之最小孔隙法作配比設計，包括不同水膠比(0.32,0.34,0.35,0.45)及材料(ACI控制組，添加爐石與飛灰)。孔隙分佈係以

Autoscan-60 水銀孔隙儀量測，表面透水性質係應用英製 Autoclam 透水儀將試體拆模後，在固定壓力與時間下，所能壓入混凝土表面之水量，將水量除以時間的開平方則為滲透指數，其代表時間與透水量關係，值越大表示越容易透水。混凝土電阻量測係採用 C.N.S.Electronics LTD 生產之 Wenner 四極式直流電阻抗儀，量測混凝土之電阻係數。且參考 ASTM C1202 作氯離子滲透性量測，隨著時間變化其通過之混凝土電流大小換算成電量，依據上述多種方法評估混凝土耐久性之指標。

四、HPC的防蝕效能

4.1 中長期耐久性指標

由於水灰比只能控制混凝土初期強度性質^[6]，而對長期強度深切影響的是水膠比，原因是水膠比較水灰比多考慮卜作嵐材料使用效應。在現有配比規範中對耐久性的保證，最主要的乃規範「含氣量、W/B（水膠比）及氯化物含量」，並未深入考慮物理及化學交互劣化作用的影響^[7]。同時，低水膠比即能使水泥用量相對減少，對多漿所引發病變問題也減低很多。故 ACI 318-95 規範改採耐久性配法則，以低水膠比（即水與水泥及卜作嵐材料之總和之比）製造出高品質低滲透性之混凝土^[8]。另外水固比(W/S)為混凝土用水量重與固體組成材料重之比，由圖 1 顯示在任何水泥漿量系統下，其整理所有水固比參數與電阻之關係^[9]，顯示 W/S 愈低，則隨齡期增長，電阻效益愈佳，尤其是 W/S 小於 0.08 在 28 天齡期時電阻即超過 20k Ω-cm，而 Cavalier 曾指出電阻大於 20k Ω-cm 時較不致於發生腐蝕電流^[10]，因此推論 W/S<0.08 時可增進耐久性之重要指標。

另外，傳統高強度混凝土之 W/C 常低於 0.42，則又有「自體乾縮」的困擾^[4]。又水泥漿量過高亦形成體積穩定的問題，在過去配比設計中，都未充分考慮到。因此以「限制拌和水量及

水泥用量，亦即規定水灰比(W/C)≠水膠比(W/B)，即卜作嵐材料用量(P)≠0，及限制水固比(W/S)小於 0.08 等為中長期持久性的重要指標。

4.2 HPC低孔隙量

硬固混凝土的孔隙原為充滿水而未被水泥水化物填充之空間，依孔隙尺寸可大略分為大部分由水填充的毛細孔隙與尺寸小於 100Å 的膠體孔隙。孔隙結構特徵，主要表現於總孔隙體積、孔隙連通性以及孔隙大小與分佈形態^[11]，水灰比與齡期及早期養護溫度，對硬固水泥漿體的總孔隙體積與孔隙連續性具有相當影響^[12]。水灰比愈大則硬固混凝土之毛細孔隙愈多也增加了大孔的數量，因此總孔隙體積亦愈大。當齡期增加，水化物逐漸成長成並填塞孔隙，大孔轉變成小孔，因此毛細孔隙有細緻化的趨勢且總孔隙量降低。

由於毛細孔隙對漿體的強度及滲透性影響最大，圖 2^[13]顯示低水膠比 3 天齡期混凝土毛細孔體積量皆較水灰比 0.45 之 ACI 混凝土 28 天齡期較少，亦即低水膠比混凝土之早期滲透性就已經小於水灰比 0.45 之 28 天混凝土。圖 3 指出 HPC

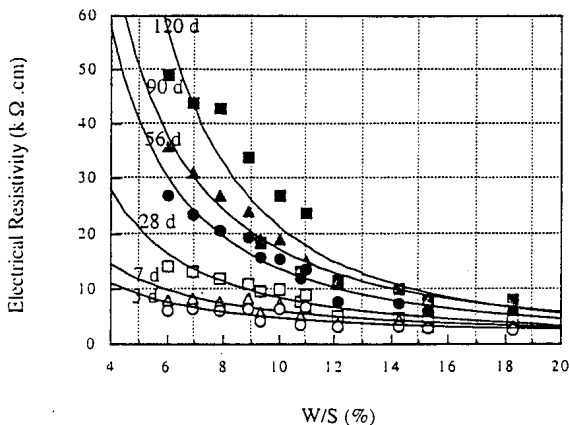


圖 1 混凝土齡期電阻與 W/S 之關係
Fig.1 Relationship among concrete age, electrical resistivity and W/S.

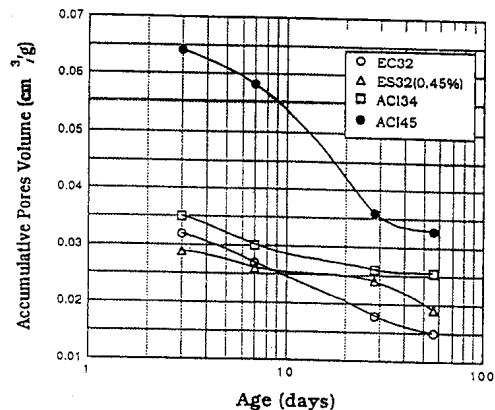


圖 2 混凝土中毛細孔隙體積與齡期之關係
Fig.2 Relationship between capillary porosity and age.

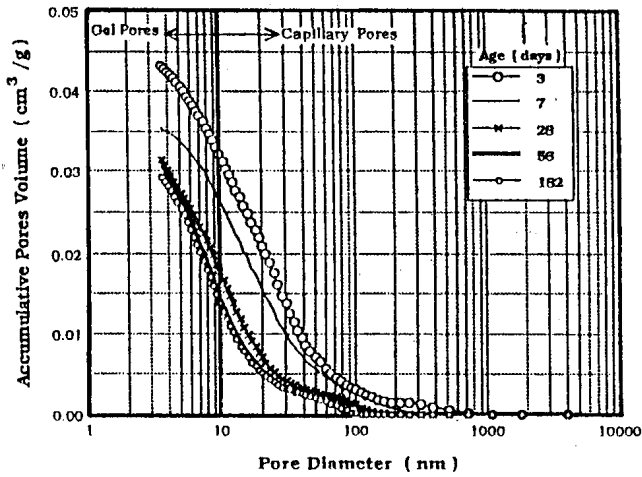


圖 3 HPC 耐久性孔隙直徑與累積孔隙體積關係圖
Fig.3 Relationship among durability, pore diameter and cumulative porosity of HPC .

之總孔隙體積隨齡期的增加而有減少的趨勢，且早期總孔隙體積減少速度比晚期減少速度為快，意謂早期水化速度較快^[14]。

4.3 表面透水性質

混凝土孔隙大小及分佈常影響到水分子及有害物質的滲透路徑，故孔隙愈大或愈多，則易造成高透水值。圖 4 所示，在固定壓力與時間下，所能壓入混凝土表面之水量，而將水量除以時間的開平方則為滲透指數，其代表時間與透水量之關係，值愈大表示愈容易透水^[15]。經量測此種快速量測表面透水試驗結果顯示優生高性能混凝土在添加卜作嵐材料後能消耗混凝土中可溶性的氫氧化鈣，會有效減少總孔隙量，而卜作嵐反應所形成的 C-S-H 膠體更能填充膠體孔隙與毛細孔隙，其低滲透性的緻密效果可抵制外界有害物質之侵入，以致於有增進耐久性的正面效果。

4.4 HPC高電阻係數

混凝土耐久性問題的發生，與混凝土本身電

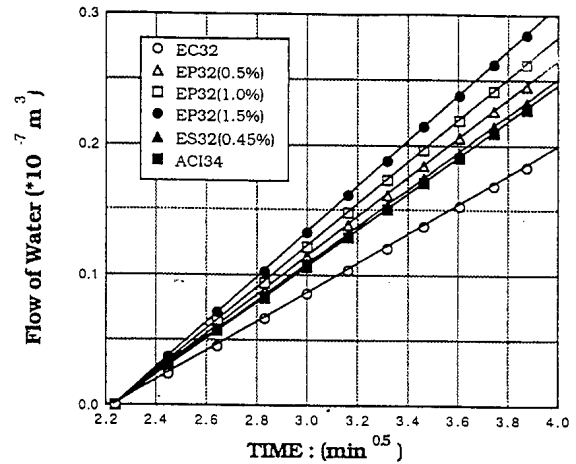


圖 4 HPC 表面透水量與時間平方之關係
Fig.4 Relationship between water permeability and time.

化學性質有密切關係，此乃因混凝土離子的活性及數目與水分子及有害物質的滲透有關。換言之，混凝土之電阻係數愈大，則混凝土耐久性質較佳。

沿海鋼筋混凝土結構物，如預力橋樑、建築物等，常年暴露於高鹽分(NaCl)的潮濕海風及霧氣下，或鋼筋結構物直接暴露於卻冰鹽(CaCl₂)下，而有鋼筋銹蝕問題產生時，則水膠比要降低至 0.4 以下，其目的在避免有害物質之滲入。HPC 係採用低 W/B，少量拌和水及摻加卜作嵐材料，可以有效增加混凝土的電阻係數，見圖 5 所示為降低水量及 W/B 而提昇電阻之效果^[7]，故能防止銹蝕之發生。

且由於骨材本身導電性差，因而混凝土的導電性須依賴內部孔隙水作為電子及離子傳送途徑。而拌和水量增加，即 W/S 提高，相對提供電導通路，阻抗能力因此下降。而圖 6 亦顯示不同水泥漿量比之用水量對電阻之影響^[3]，水泥漿量比愈低，相對用水量愈少，則對電阻表現效益愈佳。顯示水固比的改變對混凝土之電阻值成長速率呈反比。因此，推論用水量減少對阻止離子

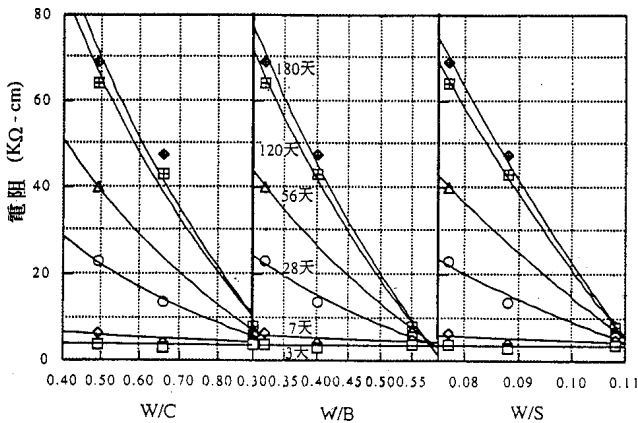


圖 5 W/C、W/B 及 W/S 對電阻係數之影響
Fig.5 Effect of W/C、W/B and W/S on electrical resistivity.

自由移動有絕對幫助，在耐久性上可以 W/S 作控制指標。同時電阻大於 20k Ω·cm 時較不致於發生腐蝕電流；而水泥漿量於 1.5Vv 以內（此時 W/S<0.08），其電阻在 56 天能超越 20k Ω·cm；但高水泥漿量(1.7~1.2Vv)配比雖有添加卜作嵐材料效果仍需要一段時間才可達到 20k Ω·cm 阻抗要求。

4.5 電量性質

由於混凝土的電滲性質與水化程度、膠結料、毛細孔隙量、電阻係數及混凝土中電解質的多寡而有所差異。

參考 ASTM C1202^[16]作氯離子滲透性量測，利用外加直流電壓(60V)，使電解液(NaCl，NaOH)解離產生帶電的陰離子，並加速其對混凝土的滲透，量取隨著時間變化其通過混凝土電流的大小，再計算其電量（庫倫=安培×秒）以作為氯離子滲透性的指標。

圖 7 係不同摻料之高性能混凝土顯示亦有不同程度的電流通過，添加卜作嵐材料的高性能混凝土有較低的電量，亦即氯離子的滲透性較低。同時高性能混凝土具較低水泥量、較小水膠

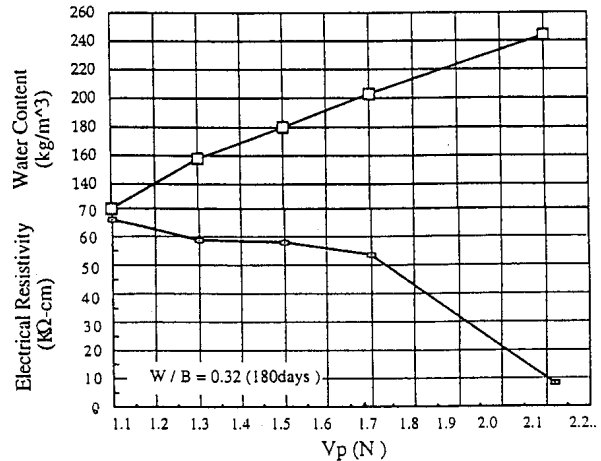


圖 6 水泥漿量及拌和水量對電阻數之影響
Fig.6 Effect of cement paste and water content on electrical resistivity.

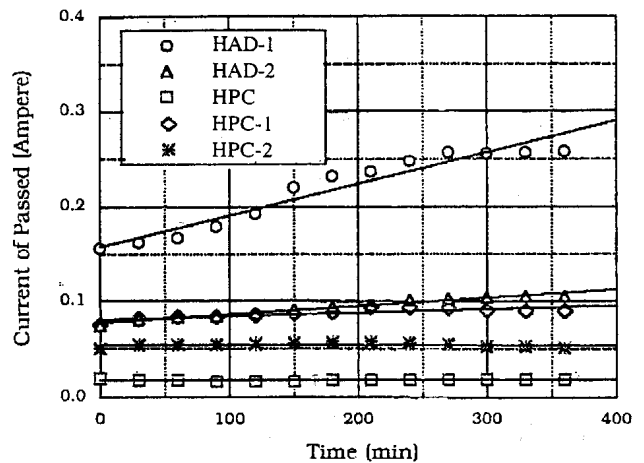


圖 7 不同摻料高性能混凝土之電流與時間關係
Fig.7 Relationship of current and time of HPC with different admixtures.

比及較高的電阻係數時均會減少氯離子滲透時所須的電化學反應，而易增進混凝土的防蝕效能。

五、結論

高性能優生混凝土的配比設計係考慮包括符合安全性、經濟性、工作性、耐久性及生態性的目標，而具有良好的防蝕效能，經由多種驗證可得下列結論：

1. 傳統混凝土係以 W/C 控制強度，而中長期強度可以水膠比(W/B)及水固比(W/S)來作耐久性指標。
2. 考慮耐久性配比法則，低 W/B 或低 W/S (<0.08)，則混凝土孔隙量減少而滲透性降低。
3. HPC 添加卜作嵐材料，反應後可填充孔隙，達到緻密效果，減低表面透水性，可防患有害物質的入侵，增進防蝕效果。
4. 降低水量及 W/B，並摻加卜作嵐材料之 HPC，可有效增加混凝土電阻係數，提昇混凝土的阻抗能力。
5. 以量測通過 HPC 試體電流及時間，而換算成電量，可顯示出添加卜作嵐材料之 HPC 具有較低電量及低氯離子滲透性。

參考文獻

1. 王和源(1997)，「HPC 施工技術與品質之探討」，高性能混凝土之應用研習會，第 5-1~5-18 頁，台中。
2. 王和源（黃兆龍指導）(1994)，「堆積效應對骨材與膠結料複合性質之影響」，博士論文，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北。
3. 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」，中國土木工程學刊，第 9 卷第 4 期，第 1~10 頁。
4. 黃兆龍(1997)，「HPC 之配比設計考慮重點」，高性能混凝土之應用研習會，第 9-1~9-18 頁，台中。
5. 王和源(1997)，「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，台灣營建研究院主辦，第 121~146 頁，高雄。
6. 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。
7. 黃兆龍(1997)，「高性能混凝土之優生設計法」，高性能混凝土研發及推廣研討會論文集，第 91~126 頁，台北。
8. Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318-95, ACI Detroit (1995).
9. 王秋斌（黃兆龍指導）(1997)，「水泥漿量對優生混凝土工程性質之影響」，碩士論文，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北。
10. Cavalier, P. G. and P. R. Vassie, "Investigation and Repair of Reinforcement Corrosion in a Bridge Deck", Proc. Inst of Civil Engineers, Vol. 70, Part1, August pp.460~480, (1981).
11. 黃兆龍，劉俊杰(1990)，「水泥漿體孔隙與工程性質之關係研究」，第五屆全國技術及職業教育研討會論文集，第 1214-1226 頁，台南。
12. Jawed, I., J. Skalny and J. F. Young (1987), "Hydration of Portland Cement", P. Barnes Maryland.
13. 詹宜峰（黃兆龍指導）(1995)，「反覆載重及海洋環境下高性能單筋混凝土樑腐蝕行為之研究」，碩士論文，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北。
14. 王和源，黃兆龍(1995)，「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集，第 187~192 頁，台北。
15. 張家仁（黃兆龍指導）(1996)，「優生混凝土配比與性質之探討」，碩士論文，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北。
16. ASTM C1202-94, Test Method for Electrical Indication of Concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM, PA (1995).