

# 飛灰增進混凝土結構耐久性之研究

王和源\*、黃兆龍\*\*

## Improvement of Concrete Durability by Adding Fly Ash

H. Y. Wang\*, C. L. Hwang\*\*

### 摘要

國內混凝土因耐久性劣化而衍生的工程品質問題日趨嚴重，如「海砂屋」、「帽樑裂縫」……等。有鑑於此，本研究擬針對影響混凝土耐久性的重要基因，透過病理學優生理念，使得混凝土有較佳的「生命週期」，分析運用本土卜作嵐材料抑制混凝土受物化作用之病變與對策。結果顯示適當的運用飛灰可提昇混凝土的耐久性，降低氫氧化鈣(CH)含量，有效減少總孔隙量，減低滲透係數，具良好的防水性能。而孔隙結構緻密，使得飛灰水泥砂漿能抑制鹼—矽反應，消耗氫氧化鈣，減少硫酸鹽侵蝕，控制混凝土中鋼筋的腐蝕機率，並能提昇混凝土之晚期強度。

關鍵詞：飛灰、卜作嵐材料、混凝土、耐久性。

### ABSTRACT

The quality of the local concrete structures is easily getting worse because of the durability problem; such as "Sea-sand house", "Nut Beam Crack" and so on. This research is to study the crucial material factors affecting to concrete durability based on the eugenic idea of pathology for improving structure life. The pozzolanic material used to control the problems caused by the chemical effect and its related strategy for better concrete will be discussed, too. The result indicates that proper usage of fly ash can improve the durability of concrete, decrease the CH content to minimize the total voids amount, lower permeability coefficient for better water-proof property. Furthermore, the dense structure of voids can help fly ash concrete control alkali reaction, consume CH and minimize the sulfate attack for less corrosion possibility of steels used in concrete and for better ultimate strength. Therefore it is meaningfully needed for high performance concrete.

Key words: Fly ash, pozzolanic material, concrete, durability.

---

\* 國立高雄科學技術學院土木系副教授

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

\*\* 國立台灣科技大學營建系教授

Professor, Dept. of Construction Engineering National Taiwan University of Science and Technology

## 一、前言

混凝土為具有耐久性良好之營建材料，然而近年來混凝土構造物因耐久性問題而衍生劣化案例有增多的趨勢，以致於降低長期使用性質。若依水泥水化時間來看，混凝土應該是恆久永續成長的，然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，以致於滲透性差。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<sup>(1)</sup>。

而防患混凝土病變及提昇耐久性之品管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等。近年來國內外正積極推動高性能混凝土之研發及應用<sup>(2,3)</sup>，國內並以「飛灰取代砂」應用於高雄 85 層超高大樓鋼柱內之高性能混凝土 (High Performance Concrete, HPC)，對於新拌的工作度、黏滯性與強度、經濟性、耐久性與生態性均有良好的貢獻<sup>(4)</sup>。本研究係闡述適當的將飛灰應用於混凝土材料而增進耐久性及達到抑制混凝土病變之功效。

## 二、試驗材料與方法

本研究採用台灣水泥公司生產之普通卜特蘭第一型 (IS) 水泥，添加台電興達電廠之不同含量 F 級飛灰 (0%, 5%, 10%, 20%) 及其他比較用摻料，其性質見表 1 所示。試驗材料分別進行化學成分、pH 值及有害物質測定。根據美國混凝土學會 (ACI 318-95) 規範選定設計強度 3000psi (W/B=0.6) 及 6000 psi (W/B=0.4) 之  $\phi 12 \times 24\text{cm}$ 、 $\phi 5 \times 10\text{cm}$  混凝土

表 1 使用水泥及摻料之化學成分及物理性質  
Table 1 Chemical content and physical property of cement and admixture used.

試驗項目	水泥		飛灰	爐石	
	CNS 61	台泥	興達	中聯	
化學成分 (%)	SiO <sub>2</sub> (S)	-	22.01	53.8	33.46
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (A)	-	5.57	3.48	15.74
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (F)	-	3.44	3.09	0.56
	S + A + F	-	31	90	50
	CaO		62.80	4.7	38.81
	MgO	Max:6.0	2.59	0.56	7.65
	SO <sub>3</sub>	Max:3.0	2.08	-	1.96
	f-CaO	-	1.05	-	-
	TiO <sub>2</sub>	-	0.52		-
	Na <sub>2</sub> O	-	0.40	1.5	-
	K <sub>2</sub> O	-	0.78	0.23	
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.045	1.25	-
	燒失量	Max:3.0	0.51	0.43	0.10
	不溶殘渣	Max:0.75	0.08	3.32	-
	C <sub>3</sub> S	-	40.10	-	-
	C <sub>2</sub> S	-	32.80	-	
C <sub>3</sub> A	-	8.90	-	-	
C <sub>4</sub> AF	-	10.5	-	-	
物理性質	細度 (cm <sup>2</sup> /g)	Min:2800	2970	2790	3988
	比重	-	3.15	2.19	2.88
	初凝 (Vicat)	>45	10.5	-	-
	時間 (分)		(W/C: 0.47)		
	終凝 (Vicat) 時間 (分)	<375	335	-	-

圓柱試體進行抗壓試驗與透水試驗。試體在養護 28 天後，在不同使用環境下，進行混凝土氫氧化鈣 (CH) 含量、電阻量測以及不同齡期之抗壓強度試驗。氫氧化鈣含量係以化學滴定法利用 HCl 滴定之用量以推算 CH 含量之方法，即滴定 H<sup>+</sup> 值，間接得知 Ca<sup>++</sup> 之莫耳數值。而電阻量測係將添加飛灰之混凝土試體以四極式電阻量測，利用高絕緣電阻歐姆計，在兩電極上外加一固定電場於兩銅片上，銅片與混凝土面塗上一層導電墨使混凝土面與銅片緊密接觸，以減少誤差。量測之電阻 R，乘以 A/L，即可得混凝土的電阻係數。而氫離

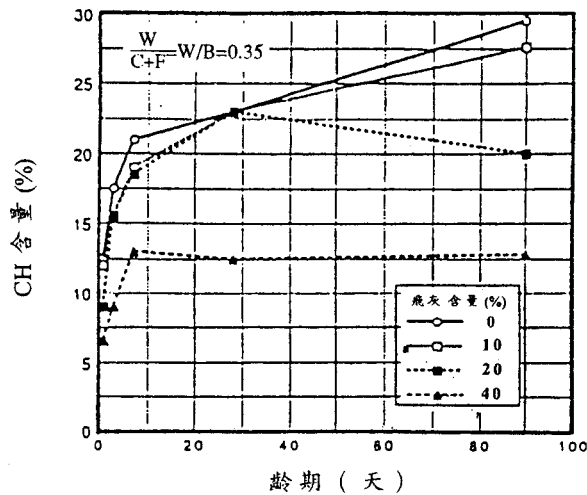


圖 1 不同飛灰含量水泥漿之 CH 含量變化。  
Fig. 1 Different CH content in cement paste with different fly ash amount.

子含量檢測係依水溶性氯離子含量方法測試。同時以不同含量飛灰添加於地磚底之水泥砂漿內，量測經過長期的養護後「黑斑」出現率。硫酸鹽侵蝕則添加不同飛灰含量水泥砂漿棒浸泡於 10% 硫酸鎂(MgSO<sub>4</sub>)溶液，經一個月後作膨脹量之量測比較。

### 三、結果與討論

針對飛灰的運用可有效抑制混凝土之各種物理與化學性病變，對增進混凝土的耐久性有相當的貢獻，其添加有幾個目的：(1)減少因使用高水泥用量所產生的高水化熱、高乾縮量及成本的增加；(2)利用卜作嵐反應使得骨材／水泥漿界面泌水所造成的氫氧化鈣堆積層受到交換作用而形成俱膠結性之物質，進而改善界面強度<sup>(5)</sup>及水密性質。添加飛灰於混凝土進而驗證下列效果。

#### 1. 降低氫氧化鈣(CH)含量

飛灰為工業副產品，為卜作嵐材料的一種，若適當地添加於混凝土中可使混凝土孔隙細化，增加水密性，可降低各類離子之擴散係數，提高抗

硫酸鹽侵蝕之能力及抑制鹼－骨材反應，對於改善混凝土長期性質甚有助益，原因是卜作嵐材料消耗混凝土中易溶性的「氫氧化鈣」，因此能有效減少總孔隙量，如圖 1 如示，飛灰含量越高則 CH 含量越低<sup>(6)</sup>。而卜作嵐反應所形成的鈣－矽－水化物 (C-S-H 膠體) 更能填充膠體孔隙與毛細管孔，使得孔隙變得不連續且其分佈狀況由大孔至小孔區間，卜作嵐材料對混凝土中的微裂縫有特殊的「自癒性」<sup>(7)</sup>。因為卜作嵐材料可有效改善混凝土緻密程度，此顯示外界有害物質欲侵入混凝土內部的路徑較不添加卜作嵐材料者來的容易，因此添加卜作嵐材料後的混凝土其抗化學性（如 CO<sub>2</sub>，Cl<sup>-</sup>，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等）較傳統配比的混凝土為佳。而含有卜作嵐材料的混凝土其內部氯離子含量較低，此可能是因混凝土內部孔隙較密且不連續進而阻礙了氯離子(Cl<sup>-</sup>)的擴散，這結果對混凝土內部的鋼筋無疑是提供了一層保障。再者，因卜作嵐材料屬惰性膠結材料，其效應貢獻在長齡期時才趨明顯，因此長期耐久性之正面貢獻是可以確定的<sup>(8)</sup>。

#### 2. 減低滲透係數

硬固混凝土之滲透性為混凝土抗化學物侵蝕之耐久性之指標。在水化後混凝土大孔隙之體積與其不透水性及強度成負性關係。基本上有害物質在混凝土傳輸的行為，可分濃度差所引起的擴散現象及因壓力差而降低水分子移動的滲透現象。擴散難易的程度以離子擴散係數表示，而滲透的難易則以透水係數表示。

一般混凝土之 pH 值接近 12，因此受酸鹽(pH < 7)作用之影響較小，然而若 CH 被溶出，則 C-S-H 有可能被侵蝕。如圖 2 所示混凝土水中養護 28 天後，以 6m 壓力水頭進行透水試驗之結果<sup>(9)</sup>，顯示出透水係數隨水頭加壓時間之延長而漸趨穩定，約 2 天後其透水係數達到穩定值。因大孔隙已被大

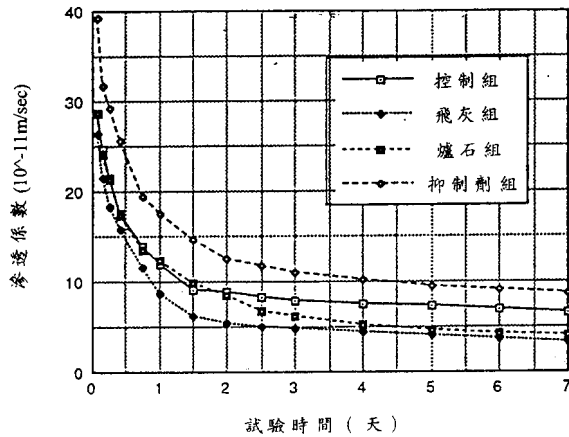


圖 2 飛灰混凝土滲透係數與時間之關係。(W/(C+F)=W/B=0.6)

Fig. 2 Relationship between time and permeability coefficient. (W/(C+F)=W/B=0.6)

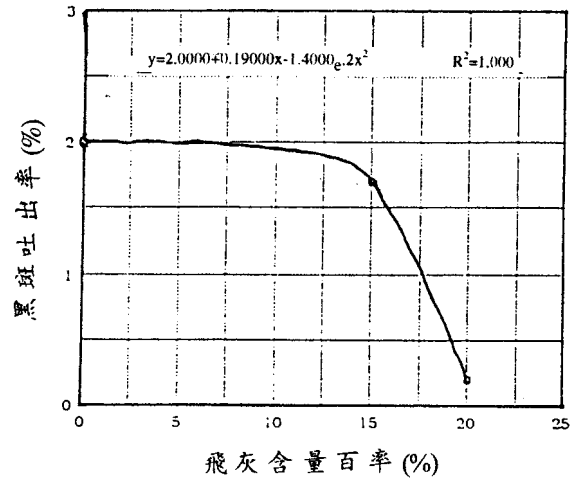


圖 4 飛灰含量抑制地磚黑斑吐出率。

Fig. 4 Occurrence of tile stain controlled by fly ash content.

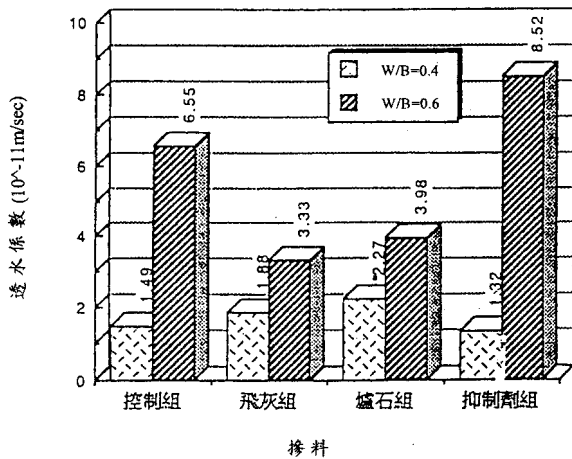


圖 3 添加不同摻料對混凝土透水係數之影響。

Fig. 3 Influence of different admixture on concrete permeability coefficient.

部分水化產物所填塞。由圖 3 顯示高水膠比時(W/B=0.6)，純混凝土之透水係數較低約為 6.55~8.76 × 10<sup>-11</sup>m/sec。添加飛灰摻料之混凝土，其透水係數有較大之改進（約 2 倍以下），顯示添加飛灰對高水灰比混凝土所造成之泌水有改善之效益，同時隨著齡期的增加孔隙結構漸緻密而減低滲透機會，並較其他添加材料如爐石、腐蝕抑制劑等有較佳封孔的效果，因此對長期而言，添加飛灰對混凝土

土耐久性有正面貢獻。但對低水膠比(W/B = 0.4)則效果有限。換言之，低 W/B 本身即俱有良好之防水性能。

### 3. 抑制鹼-矽反應

經過 1 年的長期驗證，如圖 4 所示，添加 20% 水泥量的飛灰，可有效抑制地磚黑斑之鹼-矽反應加以印證<sup>(10)</sup>。

混合飛灰水泥之所以能減低鹼-骨材反應膨脹，是因飛灰與氫氧化鈣及鹼事先反應使水化物矽含量增加，其 C-S-H 膠體之鈣/矽(C/S)比低。而 C/S 比低則比表面積大，有能力吸收較多鹼離子，經由電子排斥作用，阻止鹼離子流動，使鹼離子隨卜作嵐反應而減少擴散。除了 C-S-H 膠體結構對鹼離子的化學束縛力外，C-S-H 膠體亦可使水泥砂漿孔隙結構緻密；使得飛灰水泥能抑制鹼-骨材反應產生<sup>(11)</sup>。

台灣地區的骨材對鹼反應的敏感度較高<sup>(12)</sup>，尤其在環保嚴格要求下，水泥的鹼量將隨之提高，也激發原有惰性的骨材，此種反應主要基因為水泥及骨材二者，水泥提供鹼來源，骨材提供受侵蝕標的。如果減少水泥用量則減少鹼源或相對的

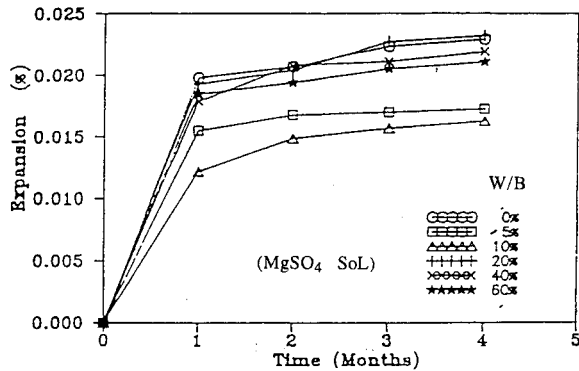


圖 5 飛灰水泥砂漿浸泡硫酸鎂溶液長度變化。  
Fig. 5 Variation on the length of mortar bar with fly ash added and merged in

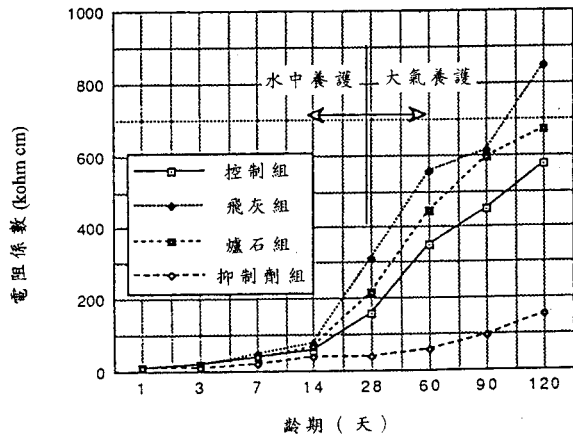


圖 6 飛灰混凝土電阻係數與齡期關係。  
Fig. 6 Relationship between resistivity coefficient and age of concrete with fly ash added.

採用更活性的飛灰及矽石等卜作嵐材料來吸收鹼質，減少骨材量也可減少誘源，卜作嵐材料取代砂可滿足此項要求。另外媒介為水，如果減少水量或降低水膠比可減少擴散作用，亦可滿足此狀況<sup>(13)</sup>。

#### 4. 減少硫酸鹽侵蝕

硫酸鹽侵蝕最大的因素是水泥漿中的硫鋁酸鈣水化物氫氧化鈣被外來硫酸離子侵蝕，產生表面

粉化現象，故主基因為水膠比、水泥及水。如果減少水泥用量，及降低水膠比而減低水的擴散速率均可控制其侵蝕程度。當然如果能添加飛灰則該卜作嵐材料將優先消耗氫氧化鈣，減少硫酸鹽攻擊面，則即使有硫酸離子侵入也不會結合成石膏或鈣矽石產生膨脹反應作用，當可控制此種侵蝕，在 ACI318 中有關耐久性控制中即有此規定<sup>(14)</sup>。圖 5 為添加不同飛灰含量水泥砂漿棒浸泡 10% 之硫酸鎂溶液之試驗，顯示一個月後各水泥砂漿棒之膨脹量漸趨緩和，而飛灰水泥砂漿棒之膨脹量皆小於純水泥砂漿棒，其中以添加飛灰 5% 及 10% 之膨脹量最小<sup>(11)</sup>。

#### 5. 控制混凝土中鋼筋的腐蝕

腐蝕必須透過「外在惡因」，滿足陰極、陽極、水分、氧氣、電路等五大條件才會產生，在混凝土設計上依 ACI318 有關腐蝕的防止方法係透過總氯離子及水膠比降低或加入卜作嵐材料來達成，但一般所擔心如此會增加碳化深度。事實上此與加入卜作嵐材料之量有關，也與具有逆向消長之水密特性有關， $[Cl^-]/[OH^-]$  的控制也很重要。同時除非產生結構裂縫，否則水密性是防止腐蝕最重要的策略<sup>(8)</sup>。因此設計低水膠比、低透水性的混凝土有助於腐蝕防治，採用卜作嵐材料對封孔有特殊的效果<sup>(15)</sup>。可減低透水性及水膠比，更重要的可減少用水量，阻止裂縫發生。圖 6 係添加飛灰於混凝土內不同齡期之電阻係數，隨著齡期的增加，更能突顯封孔的效果<sup>(9)</sup>。同時與控制組及添加腐蝕抑制劑比較，顯示飛灰的應用可提高電阻係數，印證卜作嵐材料在晚期需利用 CH 作為觸媒產生卜作嵐反應，因而消耗 CH 含量。另由圖 7 係以 8.9% 鋁酸三鈣( $C_3A$ )之水泥拌和之混凝土，量測其電阻係數及氯離子濃度顯示電阻係數越高時則氯離子濃度越低，可直接減低鋼筋腐蝕的機率而增進混凝土耐久性。

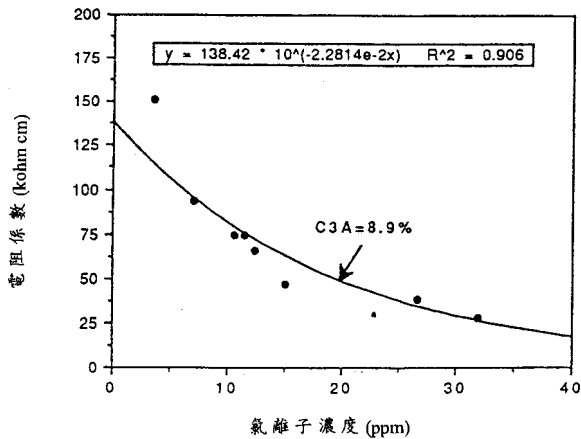


圖 7 混凝土電阻係數與氯離子濃度之關係。  
Fig. 7 Relationship between resistivity coefficient and chloride concentration.

## 6. 提昇晚期強度

水膠比是影響長期強度主要因素之一。正常狀況下，水膠比愈高其長期強度愈低，主要係高水膠比時水泥顆粒及卜作嵐材料周圍存有過多之游離離子，致使顆粒間距增大，當水化產物無法完全消耗水份及填塞孔隙，則多餘水份所佔體積形成大孔隙，孔隙為長期強度降低因素。

飛灰加入對高性能混凝土抗壓強度之影響。基本上早期強度增加率因飛灰添加而較緩慢，但 56 天以後強度發展有較佳之趨勢，此似乎說明「卜作嵐反應」在晚期才會發揮，且添加飛灰比例應有最佳值，圖 8 所示高雄 85 層國際廣場超高建築鋼柱內所用以 20% 飛灰取代砂之高性能混凝土 56 天齡期之抗壓強度，顯示經過適量的添加卜作嵐材料、強塑劑及本土化材料，可得到高強度高工作性混凝土，而強度的增進直接提昇混凝土本身之耐久性。

## 四、結 論

1. 飛灰含量越高，可消耗混凝土中易溶性的「氫氧化鈣」越多，而減少孔隙量，增加水密性。

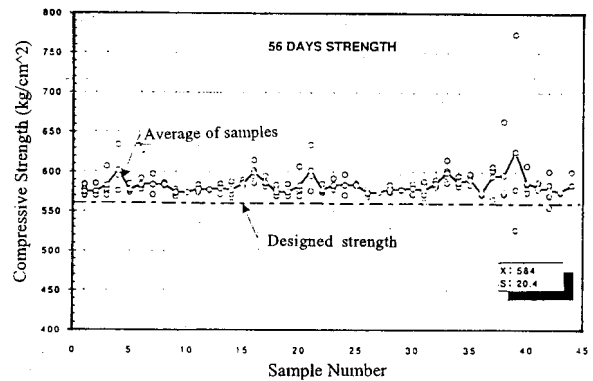


圖 8 添加飛灰之高性能混凝土強度變化。  
Fig. 8 Variation on strength of HPC with the addition of fly ash.

2. 高水膠比(W/B=0.6)之飛灰混凝土較純混凝土有較低的滲透係數，直接增進混凝土之耐久性。
3. 添加飛灰 20% 於水泥砂漿，因飛灰與 CH 反應使水化物矽含量增加，使鈣／矽比低，減少鹼離子的化學束縛力，可抑制地磚「黑斑」之鹼—矽反應。
4. 飛灰水泥砂漿可減少硫酸鹽侵蝕，尤以 W/B 為 5% 及 10% 時膨脹量最小，顯示飛灰添加可優先消耗氫氧化鈣，使混凝土更緻密。
5. 對於鋼筋混凝土之腐蝕機率，以飛灰混凝土之電阻係數成長率較添加其他摻料及純混凝土為高，易阻斷有害物質的滲透。
6. 卜作嵐反應的發揮使飛灰混凝土晚期結構更緻密，增加混凝土強度及耐久性。

## 五、參考文獻

1. 王和源(1997)，「如何運用飛灰提高耐久性」，如何使用飛灰提昇混凝土品質研討會，pp. 121 ~ 146，高雄。
2. 陳振川、黃兆龍、沈進發、林志棟、方一匡，「高性能混凝土規劃與推動研究」，內政部建築研究所專題研究計劃成果報告，八十三年六月，126 頁。
3. Chern, J. C. and Hwang, C. L. (1995) "Development of High-Performance Concrete in Taiwan", ACI Con-

- crete Internation.
4. 王和源、黃兆龍(1996)，「高性能混凝土使用於超高層建築效益分析」，高性能混凝土研討會，pp. 149~168，台北。
  5. Hwang, C. L. and C. Y. Lin. (1986) "Strength Development of Blended Blast-Furnace Slag-Cement Mortars," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 8, No. 3, Taiwan. pp. 233 ~ 239.
  6. 王和源、黃兆龍(1992)，「飛灰抑制海砂混凝土材料惡化之效應」，台灣地區飛灰混凝土應用研討會(一)專輯，pp. 2-1 ~ 2-23，中壢。
  7. 黃兆龍、陳廷芳(1994)，「高性能混凝土反覆載重下腐蝕行為之研究」，碩士論文，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所。
  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、張大鵬、邱英嘉(1992)，「鋼筋混凝土性質影響腐蝕行為之研究」，碩士論文，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所。
  10. 王和源、劉俊杰、黃兆龍(1994)，「地磚黑斑病變及防範之研究」，建築學報，第11期，pp. 1 ~ 12。
  11. 王櫻茂、田永銘(1992)，「飛灰混凝土之耐久性研究」，台灣地區飛灰混凝土應用研討會(一)專輯，pp. 9-1~9-24，中壢。
  12. 王櫻茂、楊宏儀(1989)，「台灣地區骨材反應特性之研究」，國科會專題研究報告。
  13. 黃兆龍(1994)，「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」，國立高雄工商專校，pp. 83 ~ 124。
  14. ACI 318, (1980) *Building Code for Reinforced Concrete (ACI 318-89)*, American Concrete Institute, Detroit, Mich.
  15. Mehta, P. K., and J. M. Moteriro, (1993) *Concrete-Structure, Properties, and Materials*, nd Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.