

# 反覆載重下高性能混凝土樑抗蝕效能之研究

黃兆龍<sup>1</sup> 陳建成<sup>2</sup>

## The Anti-Corrosion Effect of High Performance Concrete Beam Under Cyclic Loading

C. L. Hwang<sup>1</sup>, J. C. Chen<sup>2</sup>

### 摘要

本研究採用符合最新美國ACI 318-95 規範，採用耐蝕性具低水膠比且高流動性之高性能混凝土為材料，探討一般鋼筋混凝土與預力混凝土，添加不同摻料在人工海水環境下，經歷反覆載重後，內部鋼材腐蝕行為，更佐以SEM晶相分析瞭解材料內部構造之改變，期能瞭解高性能混凝土中鋼材腐蝕之機理及比較與傳統鋼筋混凝土之差異點。研究結果顯示，添加卜作嵐材料之高性能混凝土比一般傳統混凝土具有高達數倍之電阻係數，且顯示出混凝土用水量與電阻係數有反比關連性。預力鋼纖維高性能混凝土在反覆載重下較一般鋼筋混凝土有較小之變位及裂縫寬度，其鋼材電位變化較小。依田口式分析其S/N比較小得知鋼纖維高性能混凝土具有較佳的抗蝕效應。本研究發現HPC應用卜作嵐材料對受壓構件是有絕對功能的，然而對張力構材，無論何種混凝土，只要裂縫一發生腐蝕均無可倖免，而此現象更顯示用電位量測方法太過保守，而且ACI之設計觀念對張力構件不恰當必須修正。

關鍵詞：高性能混凝土，人工海水，反覆載重，腐蝕速率，卜作嵐材料，鋼纖維，S/N比

### ABSTRACT

The high performance concrete (HPC) with corrosion resistance, low W/B ratio, high flowability and made according to the newest ACI Code 318-95 was used to study the corrosion behavior of the embedded steel in ordinary reinforced concrete (RC) beams and prestressed concrete beams under cyclic loading in artificial sea water environment. With the aid of SEM micrograph, the corrosion mechanism of steel embedded in high performance concrete was also studied to compare the difference between HPC and conventional concrete under the same circumstances. The results show that HPC with the addition of pozzolans has higher resistivity than that of ordinary concrete. It leads to the conclusion that there is an inverse-proportional relationship between the water content and resistivity. High performance prestressed fiber concrete (HPFC) under cyclic loading possesses smaller deflection, crack width and steel potential than those of ordinary reinforced concrete beam. According to the smaller S/N ratio analyzed by Taguchi

1. 國立台灣工業技術學院營建系教授

Professor, Dept. of Construction Engineering, National Taiwan Institute of Technology

2. 國立台灣工業技術學院營建系博士生

Ph. D. Candidate, Dept. of Construction Institute, National Taiwan Institute of Technology

method, high performance steel fiber concrete has better corrosion resistance. It is discovered in this research that the application of pozzolanic materials in HPC is useful for the compressive concrete member. The corrosion will always accompanies with the cracks existing in any tensile concrete member. The results indicated that it will be improper to have this phenomenon measured by steel potential and to use the ACI Building code for tensile concrete member.

Key Words: High performance concrete (HPC), artificial sea water, cyclic loading, corrosion rate, pozzolanic materials, steel fiber, S/N ratio

## 一、前言

高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)在國內 80 年代屬於新發展的土木材料，其性質是可特別加以設計的；若以高流動及高品質為特性，則其優異的新拌及硬固特性可改善目前結構物施工不當造成蜂窩或加水劣化的困擾，預期將造成國內混凝土施工一大變革<sup>[1]</sup>。由於現今

國內的研發成功及於高雄 85 國際廣場摩天大樓現場施築的成功<sup>[1]</sup>，其應用於公路橋樑及高層結構之榮景應可期。

目前國內 HPC 要求具有高工作性(slump =25cm)，高強度( $f_c' > 560 \text{ kg/cm}^2$ )外，理論上應具有高耐久性(包括低滲透性、低潛變乾縮等行為)，而國內在考量高經濟性能前提外，其實更應針對其腐蝕特性之防護效果作一探討。本文即

表 1 NSC,HSC,HPC 之比較<sup>[3,4,5]</sup>  
Table 1 Comparation with NSC,HSC and HPC

性質		傳統混凝土 (ACI 318-95)	高強度混凝土	高性能混凝土(優生)
定義	強度(psi)	3000-6000	> 6000	適合低中高強度之混凝土
使	坍度(cm)	2.5 ~ 10	~ 10	0 ~ 27
用	水泥	細度 $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 7 天強度 4000psi	細度 $3500-4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 7 天強度 4000psi	細度 $3500-4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 7 天強度 4000psi
材	卜作嵐 材料	除耐久性考量外，一般不限定使用	取代部份水泥及砂，用量約 5-20%水泥重，視設計需要而定	取代部份水泥及砂，用量視設計需要而定(ACI 318-95)
料	骨材	砂之 FM2.3-3.1 粗骨材 FM5.5-7.5	$D_{max} 3/8" \sim 3/4"$ $F.M = 3.0 \pm 0.1$	砂之 $FM > 3.0 \pm 0.1$ 粗骨材 $D8/3" \sim 1/2"$
配	化學摻料	-	ASTM Type A,D 或 F,G	ASTM Type A,D 或 F,G 型
比	水灰比	0.4-0.7	0.30 ~ 0.40	水灰比控制早期強度 水膠比控制長期性質
	砂/石(%)	視 $D_{max}$ 而定	30 ~ 50	依緻密程度及孔隙率
	水泥用量	$> 320(\text{kg}/\text{m}^3)$	390 ~ 600	$f_c' / 20$
	工作性	一般	不佳	依需要(可為流動化)
	應用場合	一般營建工程	高層建築柱及橋樑之主構造 橋面板等需耐磨性者 預鑄混凝土等需高早期強度者	任何土木、建築工程
	施工狀況	失去輸氣量；一般 養護作業。	稠度甚硬和粘：注意必須迅速搗實，並且要充分振動，寧可超振動；養護作業特別重要。	強制式拌和機設備，強調拌和程序，可製造流動混凝土，利用泵送機泵送，達到免振動免搗實，施工時必須注模板的設計以防止爆模，養護作業非常重要。

對採用依緻密配比設計理念<sup>[3,4]</sup>製作高性能鋼纖維混凝土樑(High Performance Fiber Reinforced Concrete Beam, HPFC)，探討其基本特性外，並以承受反覆載重下，研究在海洋環境下，對鋼材的防蝕特性，並探討比較 ACI 配比設計中耐久性考量，是否真正能達到保護鋼材之目的，以提供選用高性能混凝土之參考。

## 二、HPC 基本性質及對腐蝕抑制行為之特性

高性能混凝土與一般混凝土一樣都是由粗細骨材、水泥漿、摻料(含卜作嵐材料及減水劑)所組成，但材料選用則較一般混凝土更為嚴謹，例如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，透過要求端末品質的高性能混凝土，藉由程序化及標準化的品管作業，落實品質控制。

高性能混凝土與傳統混凝土之比較簡列如表 1 所示，可瞭解在使用地點、材料選擇(水泥、卜作嵐材料、骨材、摻料)上二者之不同、而在配比差異上，高性能混凝土要求用水量較低，添加飛灰與強塑劑以增加工作性並且以防止析離之現象。表 2<sup>[5]</sup>分別國內外 HPC 之配比資料，然而截至目前為止，國內對於 HPC 之耐久特性仍無相關之研究，為能提供爾後設計施工參考，仍有需進一步研究。

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同外，理論上都須俱有陽極、陰極、電導通路、電流及電解溶液等電化學反應之五大要件，欠缺任一要項，則腐蝕將無法進行。當腐蝕反應中氫氧化鐵的沈澱作用往往需藉由水分及氧氣擴散作用而產生反應，當氧化作用反應後，其產生的體積膨脹，造成混凝土的

壓力，若水份及氧氣繼續供應，則銹蝕產物的膨脹壓力致使混凝土脹裂而產生惡性循環。此一反應若在混凝土無裂縫產生常需時甚久，且因此銹蝕產物便形成氧氣、水份之障礙，常造成鋼筋電位隨時間而變化的結果。所以 ACI 318-95 規範中考量以低水膠比(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，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 3 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，ACI 即考慮加強混凝土品質，而為了改善低水膠比混凝土的低工作性問題，往往需要添加化學摻料，而以目前本土施工條件及習性而言，現場品管人員對摻料的特性及使用並非完全瞭解，常造成施工缺陷，諸如泌水或蜂窩等現象經常可見於工地，發展高性能混凝土成為改善混凝土品質的重要策略，以減少鋼筋受侵蝕之機率。然而高性能混凝土是否能夠完全避免鋼筋腐蝕也是值得探討的。

## 三、試驗計劃

### 3.1 HPC 配比設計之理念

本文中採用高強度及高流動性之 HPC，要求具有耐久性的特性，故除了顧及新拌混凝土的高工作性及 28 天的強度外，追求高耐久性指標如滲透係數低，減少海水之侵蝕(氯離子及硫酸鹽)及裂縫寬度，配比設計依據「緻密配比法」<sup>[3]</sup>，基本設計理念為：

- (1)材料採用最大堆積密度以減少水泥用量及增進工作性。

表 2 各種優生混凝土之配比及基本性質<sup>[5]</sup>

國 家		加拿大			法國			日本			中華民國		
		1992	1993	1989	1994	1992	1993	1993	1994	1995	1993	1994	1995
固體 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥	168	228	365	425	500	451	516	520	528	520	445	271~408
	飛灰	-	-	95	-	-	-	-	-	-	133	89~100	0~138
	爐石粉	320	183	-	-	-	-	-	-	-	23	15~22	0~26
	砂灰	54	45	-	45	30	-	-	-	-	-	-	-
比率 **	細骨材	730	800	810	810	700	745	802	855	720	805	755	708~798
	粗骨材	1110	1115	1110	1100	1030	801	855	920	870	888	885~998	682~873
	砂 / 石比 (s/a)	0.40	0.42	0.42	0.42	0.39	0.42	0.51	0.5	0.44	0.48	0.46	0.44
	骨材 / 水泥 (a/c)	10.9	8.4	5.3	4.5	3.6	3.9	-	3.3	3.1	3.2	3.7	3.9~6.2
液體 (kg/m <sup>3</sup> )	水	128	131	129	128	135	165	162	170	185	175	154	122~171
	強塑劑 (% 水泥重量)	13 (7.7)	12 (5.3)	13 (3.6)	14 (2.8)	14 (4.2)	11.25 (1.6)	5.2 (1.6)	6.86 (1.1)	5.2 (1.3)	9.7 (1.1)	9.7 (2.3)	13~18 (2.5~4.7)
	緩凝劑	-	-	-	-	1.8	4.5	-	-	-	-	-	-
	總重量	2500	2509	2527	2404	2479	2403	-	2400	2353	2375	2408	2384~2443
比率 *	水灰比 (w/c)	0.84	0.57	0.35	0.3	0.28	0.4	0.31	0.34	0.36	0.35	0.35	0.42
	水膠比 [ w/b=w/(c+p) ]	0.26	0.31	0.31	0.27	-	0.4	-	0.34	0.36	0.35	0.35~0.36	0.28
	坍度 (mm)	-	-	-	-	250	-	220	240	260	280	260	270
	45min 坍度 (mm)	210	220	170	180	-	-	-	-	-	264	230	230
新拌	坍流度	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	530~650
	含氣量	-	-	-	-	4.4	-	4	-	-	0.7	-	-
	溫度 (°C)	-	-	-	-	22	-	-	-	-	36	-	-
	強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	7d 28d	1140	1050	900	1100	-	-	-	-	470	-	-
硬面	91d	1260	1210	1110	1180	897	870	-	-	-	560	500~800	570~750
	Aitcin and Neville	Larrard	Okamura	黃兆龍、張大鵬	黃光龍								

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

\*\* D<sub>max</sub>≤16mm ; s/a=wt of sand/wt of total/agg ; a/c=wt of total agg/wt of cement

## 反覆載重下高性能混凝土樑抗蝕效能之研究

表 3 海洋混凝土病變原因及特徵之檢核表  
 Table 3 Check List of the Degradation of Marine Concrete

(2)應用卜作嵐材料以強化界面強度及調整工作性及黏度。

(3)使用界面活性劑以減少拌和水量及增進工作性。

混凝土本質上屬多孔及脆性的多相複合材料，由填充之骨材及粘結的水泥漿所組構而成。而骨材在混凝土內佔最大的比例（約 80% 體積比），以混凝土之最佳級配與最大單位重原理得到最小孔隙，進而調配混凝土使之達到高強度混凝土(HSC)配比設計的要求，在國內已經成熟<sup>[3]</sup>，並且有實例可尋<sup>[2,4,5]</sup>，因為顆粒組構堆積型式愈緻密，接觸點愈多，孔隙越小，則密度愈大，可得較高之勁度，強度亦較高，因此採用緻密配比法<sup>[3]</sup>，以骨材最大單位重觀念，採最佳級配組合，構成混凝土的密實骨架，僅留下最小的間隙，由較昂貴的水泥漿填補並以飛灰取代粗砂，以增加工作性及混凝土界面強度；除水灰比是影響新拌混凝土工作性的主要變數外，再利用強塑劑(Superplasticizer)來調整混凝土之稠度，形成工作性良好且經濟性佳之高強度（安全性）混凝土，至於耐久性及生態性質則仍有待印證<sup>[5]</sup>。

### 3.1.1 試驗變數

本研究係以 ACI318-95 配比耐久性考量，暴露於嚴酷侵蝕環境之要求，採 W/B=0.4 之混凝土設計，並比較 HPC 製作之 200 × 26 × 22cm 之樑（如圖 1 所示），混凝土材料中添加飛灰、爐石及鋼纖維等摻料，其中以未添加者為控制組，嘗試利用田口式實驗法則<sup>[6]</sup>找出最佳防蝕組合，變數如表 4 所示。

### 3.1.2 試驗方法

#### 1. 材料基本性質測定及配比之決定

將材料洗淨後分批儲存，並測定其基本性質

表 4 試驗變數表

Table 4 Experimental Parameters

	W/C	W/B	卜作嵐摻料	鋼纖維
一般混凝土 OPC	0.4	0.4	NO	NO
	0.4	0.34	Fly Ash	NO
	0.4	0.34	Slag	Yes
高性能混凝土 P-HPC	0.35	0.35	NO	NO
	0.35	0.27	Fly Ash	NO
	0.35	0.27	Slag	Yes
	0.35	0.27	Fly Ash	NO

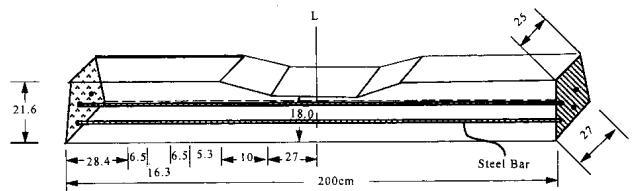


圖 1 高性能混凝土樑示意圖

Fig. 1 The Schematic Drawing of Concrete Beam

以為配比設計之資料，依 ACI 傳統配比法及 HPC 紹密配比方法，設計 W/B=0.4(一般混凝土，RC) 及 W/B=0.35(HPC) 混凝土，表 5 顯示配比設計的資料，分別測定其新拌性質及抗壓強度使之符合基本需求，並檢視材料基本工程性質（抗彎試驗參考 ASTM C78；超音波量測依 ASTM C597 及電阻係數以四極式 Wenner 儀量測）。

#### 2. RC 及 HPC 樑之反覆載重試驗

本試驗主要探討撓曲張力下之腐蝕行爲，以瞭解撓曲裂縫是否仍對高性能混凝土中鋼筋有害。樑試體養護 28 天後應用 100T MTS 動態試驗機下，加載  $\sigma = 0.5 f_c$  荷重循環 100 萬次，記錄其載重與應變之關係，並於加載前後進行相關之電化學性質測。

#### 3. 鋼筋混凝土樑之電化學性質試驗

主要瞭解樑之電化學變化，做為評估腐蝕行

為之參考。

#### a. 鋼筋電位變化

參考 ASTM C816 規定，以飽和甘汞電極 (SCE) 為參考電極，利用數位式三用電錶定期量測鋼筋之電位變化。

#### b. AC 阻抗分析

本試驗 AC 阻抗分析儀係採用英國 Sycopel 之 TFA 2000 四極式阻抗分析設備，掃描頻率範圍為  $10\text{mHz} \sim 100\text{KHz}$ ，在反覆載重試驗前後，將鋼筋混凝土樑浸泡人工海水穩定後，以石墨片為輔助電極；飽和甘汞電極為參考電極量測所得 Nyquist Plot、Bode Plot 以求其腐蝕速率及相關腐蝕之性質。

#### 4. 混凝土微觀性質量測

將混凝土反覆載重前後之試體取樣，以為 SEM 晶相分析及氯離子滴定量測 (ASTM C114) 酸溶法處理之試樣<sup>[7]</sup>。

## 四、結果與分析

### 4.1 混凝土基本特性分析

#### 4.1.1 新拌混凝土工作性

傳統混凝土之工作性常不敷施工所需，因此在澆置過程中，若振動不足非常容易產生蜂窩，而振動過度或擅自加水，混凝土易產生泌水之現象，為改善此類缺失，並且期望減少工人之數量及減少施工機械磨損，發展出高流動化混凝土是必要的，高性能混凝土即採用適當的化學摻料以控制其工作性（坍度），使其能達到  $230 \sim 250\text{mm}$  的要求（傳統要求  $100\text{mm}$ ），並且不致產生泌水現象，表 5 為經採用緻密配比法<sup>[3]</sup>調配之高性能混凝土均可達此要求，而一般混凝土添加爐石組其坍度 ( $250\text{mm}$ ) 比添加爐石鋼纖維組 ( $130\text{mm}$ ) 提

高將近一倍。另外一般混凝土設計在台灣炎熱之天氣下，初凝時間過短，將降低工作性造成施工困難，甚至添加強塑劑也在 60 分鐘內消失，因此為達到高性能混凝土在 45min 後仍有  $230\text{mm}$  之坍度的標準，本試驗採用之具有緩凝效果之高性能緩凝型強塑劑，以免混凝土坍度損失過快，失去其工作性。然而使用強塑劑亦不宜過量，以免造成終凝時間過長及析離現象，而影響其強度。如此控制下，試驗結果顯示 45 分鐘後仍然保有良好之坍度，且其終凝時間亦不超過 24 小時，且早期強度均滿足要求。

#### 4.1.2 硬固混凝土基本性質

##### (1) 混凝土圓柱抗壓強度分析

本研究比較水灰比為 0.4 之傳統一般坍度混凝土及設計  $8000\text{psi}(560\text{kg/cm}^2)$  高強度及高流動化之高性能混凝土，不同齡期之圓柱抗壓強度結果如表 5 所示，雖然水灰（膠）比相同，但一般混凝土之強度約為  $450 \sim 480\text{kg/cm}^2$  略低於 HPC 之抗壓結果，其彈性模數 (E 值) 約為  $22 \sim 31\text{GPa}$  之間，與依建築技術規則及 ACI 估計公式所得（約  $34 \sim 36\text{GPa}$ ）略有差異，但單以 HPC 而言，除了添加鋼纖維組外，其他組差異性較少。而鋼纖維組在試驗時，當試體到達極限強度時，因鋼纖之吸能作用，雖抗壓強度逐漸減低，但應變持續增大，仍具有相當之強度，試體不易斷裂為其特殊之優點。

##### (2) 抗彎強度

裂縫為造成鋼筋腐蝕最主要原因，混凝土除具有較高的抗壓強度（孔隙少）外，在抗彎強度的增加亦可提高保護鋼筋之能力，通常混凝土破裂模數為之函數。使用破裂模數  $f_r$  來表示混凝土之抗拉強度時，可以以下式預測混凝土之抗拉強度。

表 5 混凝土配比及基本性質  
Table 5 The Test Results of Concrete Properties

試 體 變 數		W/C	水 W	水泥 C	細骨材 FA	粗骨材 CA	爐石 S	飛灰 FA	鋼纖維 SF	SP	W/S *	坍度 mm	單位重 Kg/m <sup>3</sup>	E 值 Kg/m <sup>2</sup>	超音波預測抗壓強度值 6Kg/m <sup>2</sup>	28 天抗壓強度 Kg/cm <sup>2</sup>
RC	控制組(RCC)	0.4	193	482	899	899	-	-	-	4.8	9.21	90	2345	-	457	449
	爐石組(RCS)		193	482	809	899	90	-	-	9.6	9.39	230	2360	-	473	473
	爐石鋼纖組(RCSF)		193	482	809	899	90	-	58.88	9.6	9.30	130	2380	-	493	482
P-HPC	控制組(HC)	0.35	172	493	889	889	-	-	-	1.7	7.81	240	2398	2.2	400	429
	爐石組(HS)	0.35	168	480	848	816	150	-	-	7.2	7.76	270	2433	29	585	578
	飛灰組(HA)	0.35	166	474	830	799	-	146	-	13.04	8.13	280	2380	31	579	630
	爐石鋼纖組(HSF)	0.35	167	476	842	810	143	-	59	11.9	7.86	240	2455	24	573	597

$$* \text{W/S : water-solid ratio (水固比)} = \frac{\text{W}}{\text{C} + \text{P} + \text{A}}$$

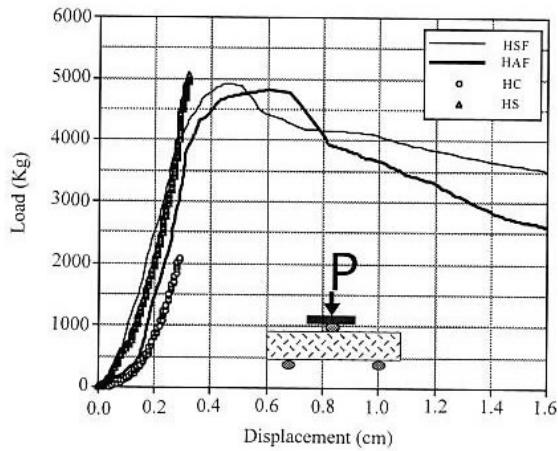


圖 2 添加及未添加鋼纖維 HPC 樑抗彎試驗之載重變位圖

Fig. 2 The P-Δ Curve of HPC Beams with and without Steel Fiber

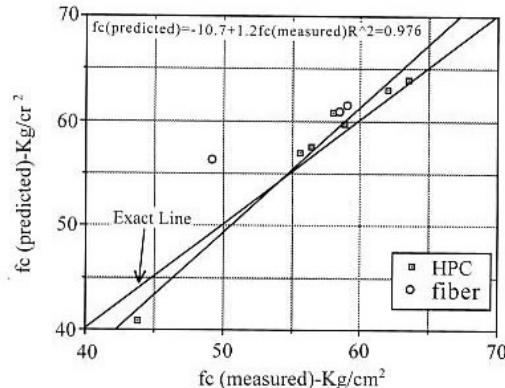


圖 3 添加及未添加鋼纖維 HPC 以超音波評估抗壓強度與量測強度之關係

Fig. 3 The Comparison of Compressive Strength by Ultrasonic Velocity Prediction and Measured for HPC with / without Steel Fiber

$$fr=3.2 \text{ fc' kg/cm}^2 \quad (1)$$

當  $210\text{kg/cm}^2 < \text{fc}' < 840\text{kg/cm}^2$  時

若試體內未添加鋼纖，當混凝土進行三點載重變曲試驗到達極限彎矩時，裂縫產生會立即蔓延造成斷裂二半，且斷面平整。而添加鋼纖之試體，因有鋼纖維作用，並且隨著試驗之進行，可聽見鋼纖維被拉脫之聲音，開裂之裂縫甚至可達 2.5 公分，中央點之垂直位移可達 1.5 公分以上，

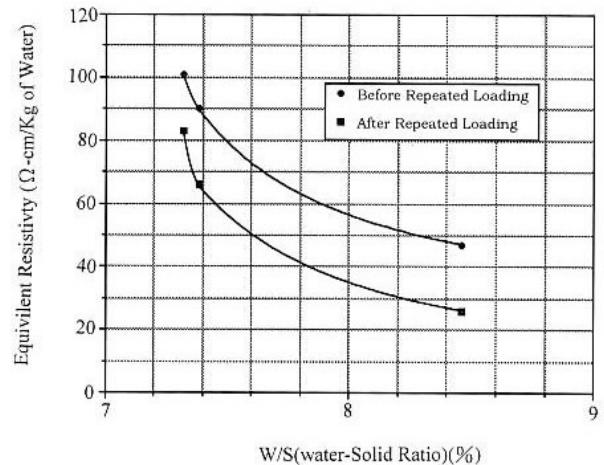
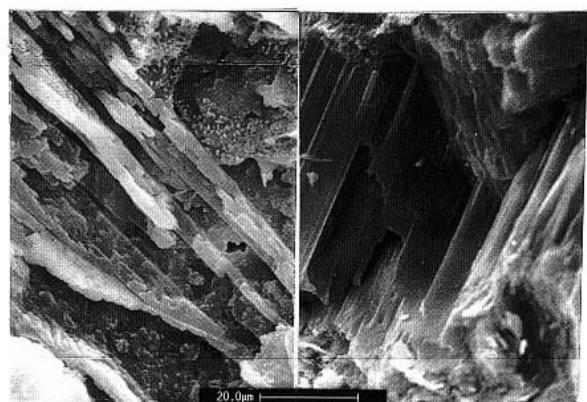


圖 4 混凝土當量電阻係數與水固比之關係

Fig. 4 The relationship between W/S Ratio and Equivalent Resistivity of Concrete



(1) 控制組 (2)飛灰組

圖 5 添加飛灰及控制組 HPC 之 SEM 晶相圖  
Fig. 5 The SEM Micrography of HPC with Fly Ash and Control Set

此時試體仍連結成一體未完全斷裂，若以應變能考慮，則添加鋼纖維之試體（圖 2 中之 HSF 及 HAF 組），其應變能較其它組試體（未添加纖維之 HC 及 HS）大數倍以上，如圖 2 所示，可知鋼纖維在抗彎強度之效果，相對的提高應變能吸收之潛力，由此可推論添加鋼纖維可減少因超載所致混凝土裂縫加大加寬之現象，增加其抗蝕性，然而因局部裂縫之產生是否也會造成局部銹蝕現象仍值得進一步探討的。

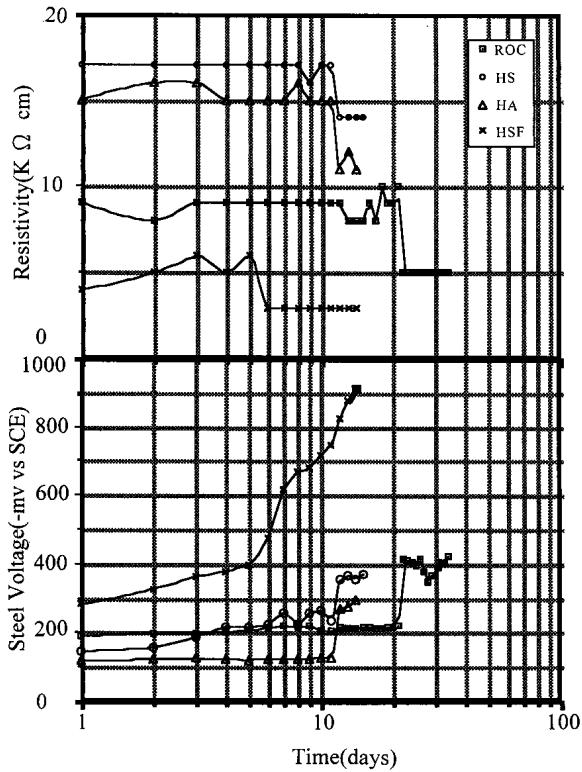


圖 6 浸泡人工海水中鋼筋電位及電阻係數變化關係圖

Fig. 6 The Relationship of Steel Voltage and Resistivity of HPC Immersed in Artificial Sea Water

#### 4.1.3 超音波波速

研究期間為了建立非破壞檢測資訊，以使能在現場進行品質保證工作，亦進行超音波量測之試驗。利用超音波評估混凝土強度時，超音波經過材料時，可能經由界面與直線兩種途徑，對混凝土而言，一般皆是沿界面傳遞，但若混凝土內含有鋼纖時，則導致超音波經由較短路徑及較緻密之材料傳遞有高估之現象。由超音波之量測及實際抗壓強度之迴歸公式如下：

$$f'_c \text{ (預測)} = -10.7 + 1.2 f'_c \text{ (量測)} \quad \dots\dots(2)$$

式中  $f'_c$  單位為  $\text{kg/cm}^2$

由表 5 及圖 3 顯示實際抗壓強度值與超音波

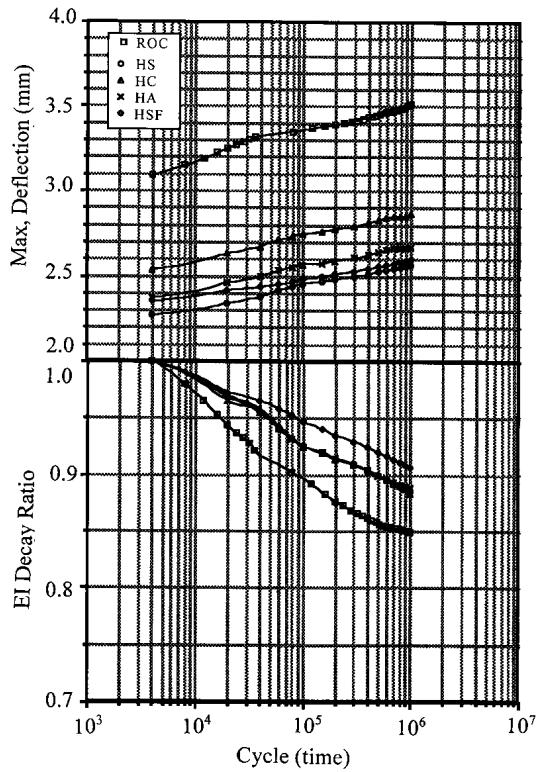


圖 7 HPC 樑反覆載重試驗之 EI 衰減及最大變位之關係

Fig. 7 The Change of EI Ratio and Max. Difflection of HPC Beams under Fatigue Test.

量測之預測值相當之接近，此結果指出利用超音波來評估品質均勻性較高之 HPC 有較高的準確性，顯示以超音波來評估 HPC 俱有其未來實用性，表 5 中亦顯示一般混凝土（RC 組）之預測值亦相當近，主要仍因一般 RC 組也是採用最小孔隙法進行配比設計，其均勻性亦甚佳。

#### 4.2 鋼筋混凝土腐蝕之行爲

##### 4.2.1 混凝土之電阻性質

耐久性考量之混凝土配比要求低水灰（膠）比、強度高、孔隙較少且小，俾能阻止有害物質入侵。若混凝土電阻係數愈大，理論上將對鋼筋腐蝕電流有較佳之抑制作用，混凝土之電阻係數

## 反覆載重下高性能混凝土樑抗蝕效能之研究

表 6 HPC 樑反覆載重下腐蝕行爲量測結果  
Table 6 Summary to the Results of HPC Beam under Cyclic Loading

試體	反覆 載重	Cl <sup>-</sup>	電阻	鋼筋	AC交流阻抗量測		腐蝕狀況		反覆載重 最大位移
		濃度	係數	電位	R <sub>p</sub> 值	腐蝕速率			
		ppm	K <sub>ω</sub> * cm	mV	Ω cm <sup>2</sup>	mm/yr	電位判斷	實際狀況	
RCC	前	36	9.7	-219	15	2.11	未腐蝕	-	-
	後	80	4.9	-413	6	5.76	腐蝕	鏽斑	
RCS	前	26	14.9	-223	50	0.63	可能腐蝕	-	-
	後	71	7.5	-402	26	1.58	腐蝕	鏽斑	
RCSF	前	35	3.3	-117	43	0.74	未腐蝕	-	-
	後	53	2.6	-321	23	1.38	腐蝕	鏽斑	
HC	前	26	4	-130	130	0.24	未腐蝕	-	-
	後	61	3	-387	14	2.28	腐蝕	鏽斑	
HS	前	9	16.8	-234	180	0.17	可能腐蝕	-	-
	後	67	13.9	-354	30	1.04	腐蝕	鏽斑	
HA	前	17	14.8	-125	150	0.21	未腐蝕	-	2.67
	後	63	11.4	-267	21	1.45	可能腐蝕	鏽斑	
HSF	前	-	4.8	-237	1300	0.02	未腐蝕	-	-
	後	-	3.6	-375	1200	0.022	腐蝕	少許鏽斑	

大小主要取決於水化物及孔隙結構與其溶液之性質，水灰（膠）比低而水化完全之混凝土相對其電阻係數較大，混凝土中電流藉由離子的移動而通過孔隙，而移動的難易程度決定了混凝土的導電度下，電阻係數取決於本身組織之緻密性及其孔隙水之組成。本文特量測混凝土電阻供設計者參考，其中高性能混凝土即針對增加緻密性及減少用水量，以使混凝土電阻增加，圖 4 為單位用水量之混凝土電阻係數與水固比(W/S)之關係，水固比係水與水以外之其他固體物質之比值，仍是混凝土中含水量之指標值，在一般文獻中並未提及，然而本研究發覺有相當好之關係及重要性。當水固比愈大（表示用水量愈多，致使組織較鬆散），水在混凝土中形成連續孔洞，使電流容易流通而降低混凝土的阻抗，另一方面，此亦說明在 ACI 規範中以 W/C 或 W/B 控制耐久性問題，會出現盲點。當 W/C 或 W/B 小於 0.4 時，其用水量不是固定，表 5 可看出即使 W/C

固定，其用水量的差異所產生之變化，水份造成混凝土的電阻減少的原因應是可理解的。圖 5 為比較控制組與添加飛灰 SEM 晶相圖，由圖中組織緻密情形顯示卜作嵐之效應，不論是一般混凝土或是高性能混凝土，添加飛灰(HA)或爐石(HS)皆有較緻密之組織，相對印證其電阻係數較大。圖 6 之上圖中以高性能爐石組(HS)之電阻為最高，而飛灰組(HA)次之。鋼纖爐石組(HSF)最低，係由於混凝土內有導電之鋼纖維，造成電阻係數大幅降低，如 HSF 組；因此以混凝土電阻性質來評估鋼纖混凝土鋼筋腐蝕的行為時應特別注意，圖 6 所示之電阻係數為連續量測所得之數據，電阻係數隨載重歷程及浸泡人工海水之時間而變，當裂縫產生而導致混凝土電阻係數降低，顯示出短路現象，此也將造成較高之腐蝕速率。

### 4.2.2 混凝土電阻係數與鋼筋電位之關係

除了上述添加礦物摻料將使得混凝土形成

表 7 傳統混凝土與高性能混凝土田口式品質評估

Table 7 The Quality Evaluation to Anti-Corrosion Performance of Traditional Concrete and HPC

	W/C	摻料	鋼纖維	裂縫 (mm)	腐蝕速率 (mpy)	氯離子(ppm)	
						腐蝕試驗前	腐蝕試驗
OPC 1*	0.4	No	No	3.28	6.87	121	780
	0.4	Yes	No	1.81	2.50	128	379
	0.4	Yes	Yes	2.78	10.65	113	528
OPC 2	0.4	No	No	3.50	5.76	36	80
	0.4	Yes	No	3.26	1.58	26	71
	0.4	Yes	Yes	3.39	1.38	35	53
P-HPC	0.35	No	No	2.87	2.28	26	61
	0.35	Yes	No	2.57	1.04	9	67
	0.35	Yes	Yes	2.67	1.04	17	63
	0.35	Yes	No	2.13	1.45	10	56
S/N(db)***	裂縫	腐蝕速率	氯離子含量				
OPC 1	-16.33	-27.70	-48.20	-62.46			
OPC 2	-15.36	-15.70	-35.08	-41.54			
P-HPC	-14.23	-9.73	-30.59	-41.85			

\*：文獻 8 : \*\*：S/N = -10 log Y<sub>i</sub><sup>2</sup>

較緻密之組織，使得其電阻較高外，若以化學觀點來探討，由於使用卜作嵐材料需利用氫氧化鈣(Ch, C=CaO; H=H<sub>2</sub>O)做觸媒，形成卜作嵐反應，因而消耗了 CH 含量，相對的由 CH 所提供的氫氧根離子濃度亦降低，因氫氧根離子其當量導電度甚高( $\gamma_{OH^-}=198.6$ )，所以添加卜作嵐材料之混凝土因消耗更多之 CH，氫氧根離子下降幅度較大，混凝土電阻係數大於一般混凝土，此外可由氯離子濃度看出，氯離子濃度較低之混凝土，其電阻係數亦較高如表 6 所示。

圖 6 之下圖為傳統混凝土與高性能混凝土於浸泡海水後鋼筋電位與混凝土電阻之關係，顯示鋼筋電位隨著浸泡天數增加而降低(縱座標為負值)，此乃由於海水中氯離子逐漸侵入致鋼材表面之鈍態膜逐漸水解；鋼材開始腐蝕，使得電位下降。而混凝土電阻係數增加趨於穩定，乃是因混凝土齡期 56 天以上，水化作用較完全。當

裂縫產生後鋼筋電位急劇下降，圖 6 不論電阻係數及電位均會有明顯之改變。其中以添加飛灰高性能混凝土(HA)之鋼筋電位根據 ASTM876 規定判定仍在未腐蝕之階段(<-300mv)，但在實驗後將所有試體檢視其鋼筋表面發現有腐蝕現象發生，故以電位量測來判定腐蝕現象會有差異現象，尤以添加鋼纖維後因其導電度增加，且會從鋼纖維先犧牲而產生電位較低情況但也都有腐蝕產生，此結果顯示無論一般或高性能混凝土只要裂縫一產生則腐蝕反應即進行，也指出現行 ACI 有關耐蝕之規範只對受壓構材有效，但對受張構材則無法防止，必須以其他方式加以防止腐蝕，不得不慎。

#### 4.3 反覆載重下樑行為與鋼材腐蝕之關係

混凝土構造物在設計之初，即允許有裂縫之存在，在海域環境之下為避免造成鋼材疲勞腐蝕，

必須控制裂縫成長速率及大小。當承受反覆載重時，鋼材與混凝土之鍵結力將隨著疲勞次數增加而逐漸減小，樑之撓度亦將隨著疲勞次數之增加而增大，由圖 7 可說明樑之疲勞次數與撓度之關係，其中以添加鋼纖維之 HPC 之撓度為最小，比較圖 6 之電位與電阻之關係，可以發覺鋼纖維在混凝土中有犧牲自己的作用，而一般混凝土(RCC)之撓度為最大。由表 6 及表 7 中之腐蝕速率得到與裂縫寬度之密切關係，而對於預力樑之撓度較鋼筋混凝土為低。

由樑 EI 值之衰減亦可判斷在反覆載重下樑勁度(EI)之衰減，將隨著疲勞次數之增加而衰減，見圖 7 所示。但在混凝土內加入鋼纖維，則 EI 比值衰減較慢，在同樣之疲勞次數下，添加鋼纖之混凝土將較其他組有較高之 EI 比值，在承受了一百萬次之反覆載重後，仍保有較佳之殘餘強度，如圖 7 所示。但當混凝土一開裂後，無論是使用何種礦物摻料或是否使用鋼纖，隨著腐蝕因子不斷侵入，鋼材鈍態膜破壞，使其電位迅速下降，另外因腐蝕產物之產生，而阻礙電流之通過而增加阻抗，導致鋼材電位將有上下起伏之現象。在混凝土電阻係數方面，因裂縫使得混凝土有效厚度減少及保護作用消失，如此於混凝土產生裂縫處，電阻係數大為減低。此點說明 ACI 規範設計之耐久性之結構物在裂縫未發生前均可抑制或延遲腐蝕反應之產生，但在裂縫一開裂後，則鋼筋不再受混凝土之保護，而腐蝕電流隨之增加。

本研究利用交流阻抗法於構件裂縫產生前後，評估其鋼材之腐蝕行為，結果顯示混凝土裂縫一旦產生即無法保護鋼材之作用，如表 6 所示在混凝土開裂前浸泡海水中，添加卜作嵐材料之混凝土抗蝕效果非常好。預力混凝土與一般鋼筋混凝土之腐蝕行為類似，在開裂後之 Rp 值降低，腐蝕速率迅速增加。高性能混凝土雖然在未

承受載重前皆遠較一般鋼筋混凝土樑為優，但開裂後，混凝土已不能再保護鋼材其腐蝕速率均有上升之趨勢，但預力混凝土由於鋼材預力之作用導致混凝土裂縫寬度較小，其腐蝕嚴重性低於一般鋼筋混凝土，可見混凝土裂縫大小控制腐蝕速率。其中以添加鋼纖維組之 Rp 值最大，證明減少裂縫寬度及深度可使有害物質侵蝕鋼筋之機率降低，但無法倅免。

#### 4.4 HPC 抗蝕效能綜合評估

綜合以上分析；HPC 無論在基本工程性質，或是在裂縫抑制乃至於對鋼筋的保護均優於一般傳統混凝土，尤其是以預力型態之 HPFC 之抗蝕效果為最佳，如表 7 所示，表中列出針對水灰比，摻料及鋼纖維等不同變數，利用田口式品質控制方式<sup>[6]</sup>，將得到之結果視為品質控制之對象，而在本研究中，變化不同水灰比，摻料及鋼纖維，分析表 3 中以混凝土品質，裂縫及氯離子為影響鋼材腐蝕最主要因子，期望以損失函數(L(y))描述 HPC 之抗蝕效能：

$$L(y) = K(y-m)^2 \quad (3)$$

其中 k 為係數，m 為期望值，而 y 為試驗結果；期望使這些因子降至最低（最佳狀況為裂縫寬度及氯離子含量等於零，就是期望使腐蝕速率降低），可使損失數據具有最小特性為 m=0，故其損失函數可改寫為

$$L(y)=Ky^2 \quad (4)$$

而經由直交表列出本試驗變數。表 7 所示為 L4(2)<sup>3</sup>之直交表，而將試驗結果 yi 列於第 5,6,7,8 行，再利用平方和之 S/N 比(Source Noise Ratio)之期望函數來評估試驗結果與期望值之差異程度，企圖找出最佳耐蝕的策略及方法；

$$S/N(\text{db})=-10 \log[(Y_{\text{ave}}^2)] \quad (5)$$

比較得到結果列於表 7 中，在裂縫寬度抑制方面，以預力 HPC 樑之效果最佳(-14.23db,S/N 愈接近零愈佳)，顯示高性能混凝土對於裂縫抑制及抗蝕性均優於傳統混凝土；尤其是混凝土中氯離子含量分析，更可印證卜作嵐材料對氯離子含量之抑制效果，而腐蝕速率之 S/N 比評估則有 -9.73db 為各組最高；為普通混凝土(-27.7db)之 2.6 倍，顯示 HPFC 預力樑具較佳之抗蝕效能，如圖 8 所示。

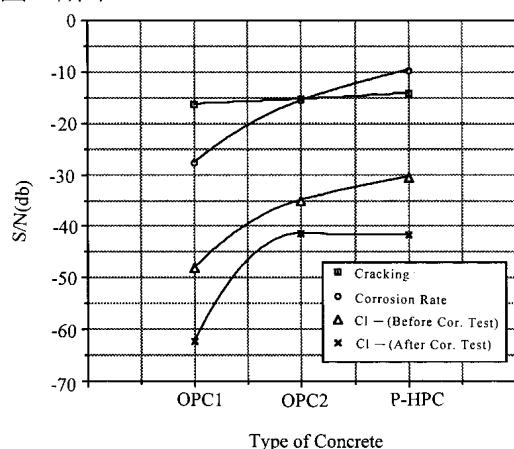


圖 8 傳統混凝土與高性能混凝土防蝕效能之 S/N 比之評估

Fig. 8 The Evaluation to S/N Ratio of OPC and HPC.

## 五、結論與建議

綜合本研究結果整理如表 6 所顯示，高性能混凝土之組織結構較一般混凝土緻密，具有優異的基本工程性質，對有害物的侵蝕亦有較佳之抵抗性，綜合本研究可得到以下之結論：

- 1.混凝土未開裂前，HPC 做有良好的工程性質，對鋼筋提供較佳之保護作用。
- 2.HPC 的品質均勻以超音波量測可得到準確結果，可作為非破壞性檢測品質評估之工具。
- 3.混凝土電阻係數與混凝土用水量有密切關係，當用水量愈多則其電阻係數愈低，此關係亦顯示 ACI 318 規範中以水灰（膠）比控制其耐久性可能出現盲點，而致使同一水灰（膠）

比而其保護鋼筋之程度不同。

- 4.HPC 具較緻密的組織結構，使用水量較少，電阻係數較傳統混凝土高將近 1 倍以上。
- 5.混凝土開裂後無論是一般混凝土或 HPC 腐蝕反應均將發生，顯示 ACI 規範耐久性考量對有裂縫產生之構件應施以其他之防蝕規定。
- 6.添加鋼纖維可抑制混凝土裂縫之擴大，減少有害物質之入侵，而且有類似犧牲陽極保護鋼筋的功能。
- 7.由研究結果之 S/N 分析顯示：HPFC 為一般 ACI 耐久性考量之 2.6 倍顯示，具有較佳之抗蝕性能，是值得再進一步推廣應用。

## 六、建 議

- 1.添加鋼纖維混凝土電阻及超音波量測有偏低現象應加以修正。
- 2.混凝土裂縫抑制有必要更深一層的研究，以保護鋼筋。
- 3.無論何種品質之混凝土，一旦裂縫產生對腐蝕之抑制均會失效，應有更進一步之研究來探討防蝕之技術。

## 致 謝

本文感謝國立台灣大學材研所陳立業教授及國立台灣工業技術學院化工所黃炳照教授之指導，並感謝國科會部份經費之補助(NSC:83-0410-E011-032)。

## 參 考 文 獻

- 1.Chern, J. C., C. L. Hwang and T. H. Tsai, "Research and Development of HPC in Taiwan," Concrete Internation, ACI, Detroit (1995).
- 2.高性能混凝土研發實務研討會論文輯，王和源及黃兆龍主編，國立高雄工商專科學校 (1996)。
- 3.黃兆龍、劉俊杰、李隆盛、林豐益，「高性能

混凝土緻密配比與早期性質研究」，土木水利  
期刊，第八卷第二期(1996)。

- 4.Hwang, C. L., "Basic Material Properties and Mixture Proportion of High Performance Concrete," International Workshop on Civil Infrastructural System-Application of Intelligent Systems and Advanced Materials on Bridge Systems, Taiwan, pp. 207-224 (1994).
- 5.黃兆龍，「優生混凝土在高層建築之應用案例」，高性能材料研討會論文輯，黃兆龍主編，國立台灣工業技術學院(1995)。
- 6.劉克琪，「實驗設計與田口式品質工程」，華泰書局(1994)，台北 pp.77~147。
- 7.黃兆龍，混凝土中氯離子含量檢測技術，ISBN 957-705-052-2，詹氏書局，第 26~38 頁，(1995)。
- 8.鄭棟元，「反覆載重下預力及單筋樑應力腐蝕之研究」，碩士論文，國立台灣工業技術學院，台北(1993)。