

爐石活性粉混凝土的動態力學性質及耐久性

Mechanical Properties and Durability for Reactive Powder Concrete with Blast Furnace Slag

潘煌鏗¹ 戴毓修² 彭仁柏³ 吳承修³ 蕭力銘⁴

¹ 高雄應用科技大學土木工程系 教授

² 陸軍軍官學校土木工程學系 教授

³ 高雄應用科技大學土木工程系 研究生

⁴ 高雄應用科技大學土木工程系 專題生

摘要

活性粉混凝土使用爐石取代 50% 矽灰，經由適當製程與熱養護使抗壓強度達到 150MPa，鋼纖維含量 0~2%。採用直徑 50mm 的分離式霍普金森法壓桿(SHPB)對活性粉混凝土進行衝擊試驗，應變率範圍為 $10^2/s \sim 10^3/s$ ，並進行耐久性試驗。實驗結果應力-應變曲線隨著應變率增加峰值應力也會增大，在極限強度前之曲線，應力值約略呈線性增加，達到峰值應力後曲線才會有往下降趨勢，且應力-應變曲線也會因為纖維含量增加而提升，因此彈性模數亦隨著提高。添加鋼纖維後能提升活性粉混凝土之能量吸收，在含量 1% 時則有較佳之能量吸收。活性粉混凝土之動態峰值應變則在 0.010~0.015 範圍內。添加鋼纖維後之中性化深度較淺，而基材受中性化影響較嚴重，且隨著加速時間增加，中性化深度也會越深。普通混凝土之電滲量高於爐石活性粉混凝土基材 139 倍，顯示爐石活性粉混凝土比普通混凝土有優異之抵抗氯離子滲透能力。浸泡硫酸鹽後基材與纖維交界處受到侵蝕，造成鋼纖維腐蝕導致抗壓強度下降幅度明顯。添加爐石(HC0)之透水滲透深度比 HA0 還要少 1.45 倍，且添加鋼纖維後滲水深度有很明顯降低。

關鍵字： 爐石、活性粉混凝土、高應變速率、力學性質、滲透深度

Abstract

Durability and material properties subjected to high strain rates for reactive powder concrete containing slag were investigated. Peak stress and its corresponding to strain shown in stress-strain curve of RPC increase with increasing strain rate and steel fiber. Adding steel fibers in RPC can reduce concrete neutralization, but the loss rate of strength promote in sodium sulfate test. Compared with normal concrete, RPC containing slag has a good resistance of chloride permeability. For water depth of permeability, HA0 is with 1.45 times higher compared with HC0.

Keywords: slag, PRC, high strain rate, mechanical properties, permeability depth

一、前言

近年來重大工程使用材料之趨勢朝向「生命週期」作為設計考量，需要一種高強度兼具耐久性能、抗劇烈衝擊性能之工程材料，來提高構造物長久壽命，因此主結構材料之耐久性能必須受到重視。活性粉混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)以去除粗骨材，利用粒徑相當細的石英粉作為填充材，去除材料內部之孔隙，使內部達到相當緻密效果，並添加矽灰，在水化作用下產生卜作嵐反應，可改變混凝土晶體結構中 C-S-H 膠體含量，大幅降低孔隙率，增加膠結材與骨材間之界面粘結能力，使得活性粉混凝土材料性質變得更堅硬、緻密，且在活性粉混凝土中添加適量鋼纖維，可使混凝土抵抗材料直接破壞，阻止破壞裂縫成長，大幅提升混凝土之韌性性質[1]。

國內外活性粉混凝土配比中，膠結材通常使用水泥、矽灰和石英粉，卜作嵐材料主要添加矽灰，而台灣並未生產矽灰，必須仰賴國外進口，成本花費相當高。為使活性粉混凝土能在台灣做為建築構造物的主要材料，最好使用台灣能自行生產之卜作嵐材料來節省成本，較為恰當。

雖然國外也有利用水淬爐石取代部分矽灰來生產活性粉混凝土[2]，但本研究以配比強度 150MPa 做為設計強度，探討添加 1%、2% 鋼纖維及透過高溫養護，進行動態力學及耐久性試驗。動態力學試驗以分離式霍普金森壓桿(SHPB)進行試驗，包括動態應力-應變曲線、彈性係數、衝擊能量 J 、吸收能量等；材料耐久性試驗為加速中性化試驗、抗硫酸鹽試驗、氯離子滲透試驗及透水試驗等，並比較添加與未添加爐石之活性粉混凝土之動態力學性質與耐久性差異性。

二、實驗方法

2.1 材料準備與試體製作

活性粉混凝土使用水泥、石英粉、石英砂、矽灰、水及適量強塑劑，也以爐石取代部分矽灰，並添加鋼纖維拌製而成。水泥為第 II 型卜特蘭水泥，密度為 3.16 g/cm^3 ，平均粒徑約為 $15.8 \mu\text{m}$ ；石英粉粒徑約為 $5\text{-}20 \mu\text{m}$ ，主要在熱處理期間可以激發其活性，幫助 CH 產生 C-S-H 膠體；石英砂粒徑約 $105\text{-}420 \mu\text{m}$ ，密度 2.62 g/cm^3 ， SiO_2 達 97%，硬度在 6~7 之間；矽灰的細度為 $20,000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，粒徑約 $0.1\text{-}0.2 \mu\text{m}$ ；爐石細度為 $611 \text{ m}^2/\text{kg}$ (平均粒徑為 $7.02 \mu\text{m}$) 之水淬爐石粉；強塑劑符合 ASTM TYPE-G 等級；鋼纖維長度 12.0mm，直徑 0.18mm，長徑比(aspect ratio)為 60，比重 7.8，表面經過鍍銅處理成金黃色以防腐蝕，鋼纖維主要使活性粉混凝土具有韌性。

試體使用爐石則含量為取代矽灰 50%，分別添加 0%、1%、2% 體積之鋼纖維，透過 90°C 水養護及 210°C 高溫養護方式製成兩組試體(HA 及 HC)，材料配比如表 1，其中 HA 不含爐石，HC 以爐石取代 50% 矽灰。

2.2 動態力學性質

霍普金森桿(SHPB)試驗可獲得高速載重下混凝土之抗壓強度[3-5]，本研究利用霍普金森桿進行活性粉混凝土的動態衝擊力學試驗，採用 $\Phi 50 \times 25 \text{ mm}$ 圓柱試體，探討試體受 $10^2 \sim 10^3 / \text{s}$ 高應變率下之抗壓強度、衝擊能量 J 、衝擊應變能、彈性係數 E 及衝擊應力-應變全曲線，其中假設試體在撞擊過程中會滿足一維波傳理論，透過兩根彈性壓桿的應變片紀錄入射桿及透射桿應變之隨時間變化曲線訊號，來推導試體受衝擊之應力-應變關係。

表 1 活性粉混凝土材料配比 [kg/m³]

材料	鋼纖維含量	水膠比	水	水泥	矽灰	爐石粉	石英粉	石英砂	強塑劑
HA0	0%	0.23	180	714	216	0	252	944	36
HA1	1%	0.23	180	714	216	0	252	918	36
HA2	2%	0.23	180	714	216	0	252	891	36
HC0	0%	0.23	180	714	108	108	252	973	36
HC1	1%	0.23	180	714	108	108	252	947	36
HC2	2%	0.23	180	714	108	108	252	921	36

2.3 耐久性

2.3.1 加速中性化試驗

使用 $\Phi 50 \times 100$ mm 圓柱試體，浸泡於碳酸氫鈉(NaHCO_3)飽和溶液中，浸泡加速時間為 1 週、4 週、8 週，以 12 小時浸泡碳酸氫鈉水溶液和 12 小時放入烘箱內烘乾之乾濕循環方式(進行加速試驗[6])。

2.3.2 快速氯離子滲透試驗

快速氯離子滲透試驗根據 ASTM C1202-97 和 AASHTO T277-89 規範，製作尺寸 $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 之混凝土圓柱抗壓試體，在要求之齡期量測其內部電荷通過量。因 ASTM C1202 係以直徑為 3.75" (95mm) 之圓柱試體為試驗基準，本試驗使用 100mm 直徑圓柱試體，因此必須修正通過混凝土的電流量。

2.3.3 硫酸鹽試驗

利用兩種抗硫酸鹽試驗方式探討爐石活性粉混凝土之耐久性[7]，根據 CNS1167 (AASHTO-T104)使用硫酸鈉與硫酸鎂之粒料健度試驗法與 ASTM C1012 (CNS14794)水泥砂漿棒浸泡於硫酸鈉溶液之長度變化試驗法進行爐石活性粉混凝土耐久性試驗。

2.3.4 透水試驗

混凝土滲透性可以適當的表示混凝土內部微小孔隙之有害物質通過難易度，會影響耐久性的指標之一，這裡參考 JIS A6101 試驗規範進行透水試驗。

三、結果與討論

3.1 動態力學性質

3.1.1 衝擊抗壓強度

圖 1 為靜態應變率 5×10^{-6} /s 與三種動態應變率之抗壓強度比較，試體在不同應變率作用下，爐石活性粉混凝土(HC)抗壓強度有明顯變化；當應變率範圍(128~255/s)時，試體受撞擊桿撞擊，但試體並未完全破壞完就已進行卸載，試體外表並無明顯損傷，因此試體在此應變率作

用下並沒有產生破壞，此時動態抗壓強度比靜態抗壓強度還低。而隨著應變率增加，添加 1%、2%鋼纖維後之峰值極限應力強度，也會有快速增加趨勢。

圖 2 為衝擊動能與試體衝擊抗壓強度關係，隨著衝擊動能增加，抗壓強度有明顯增加；添加鋼纖維後的抗壓強度也隨著纖維含量增加而有成長。當試體受較高撞擊動能時，基材添加鋼纖維之抗壓強度成長幅度會比撞擊能量低時增加許多，如 HC 材分別受衝擊能量(662~713)J 與 (1194~1302)J，添加 2%纖維量時之強度成長量(和基材比較)分別為 69.4MPa 與 87.3MPa，而 HA 材強度之成長量為 39.2MPa 與 86.7MPa。因此受較高之衝擊能量，添加鋼纖維後之抗壓強度增加幅度會較低衝擊能量時明顯。

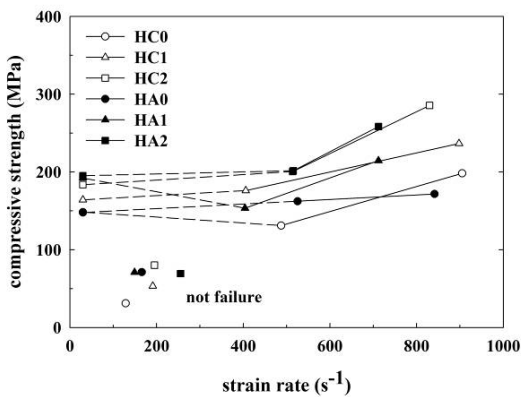


圖1 應變率與衝擊抗壓強度關係

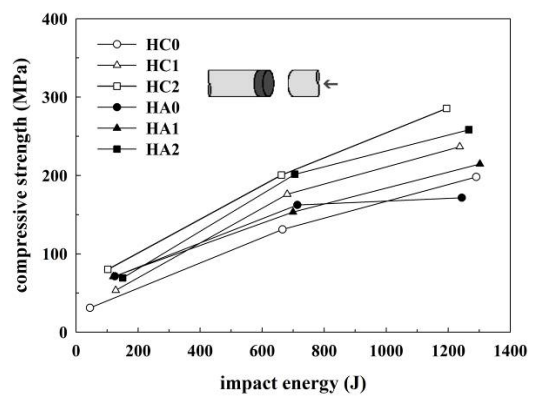


圖2 衝擊動能J與衝擊抗壓強度關係

圖 3 與圖 4 為試體受衝擊能量(662J~ 7130J)與(1194J~1302J)時之動態抗壓強度，衝擊動能(662J~ 7130J)時(圖 3)，HA0 基材之動態抗壓強度較高，而當添加鋼纖維之後，有添加爐石粉之 HC 材則會有較高之動態抗壓強度。當在較高之衝擊動能作用下(圖 4)，添加爐石之 HC 材會比未添加爐石 HA 材有較高之動態抗壓強度。

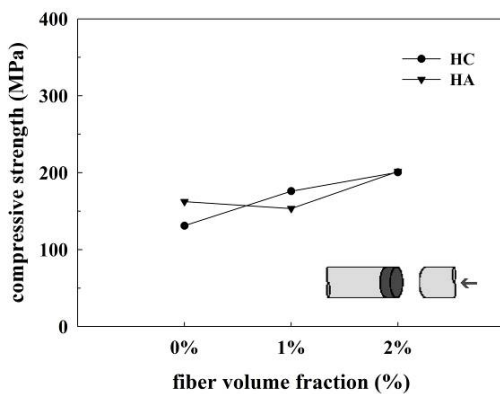


圖3 衝擊動能(662J~7130J)時之抗壓強度

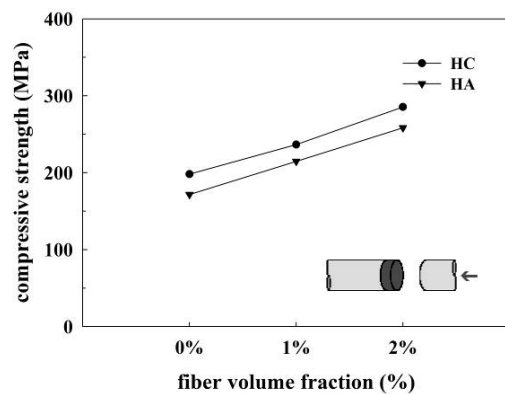


圖4 衝擊動能(1194J~1302J)時之抗壓強度

3.1.2 應力-應變曲線

HA 及 HC 材料之應力-應變曲線如圖 5~圖 10，每組配比以三種應變率進行加載，可看出活性粉混凝土的應力-應變曲線會隨著應變率增加而明顯提升，且極限強度前曲線斜率也會隨著應

變率增加而提升，因此彈性係數 E 值也會隨著提高。

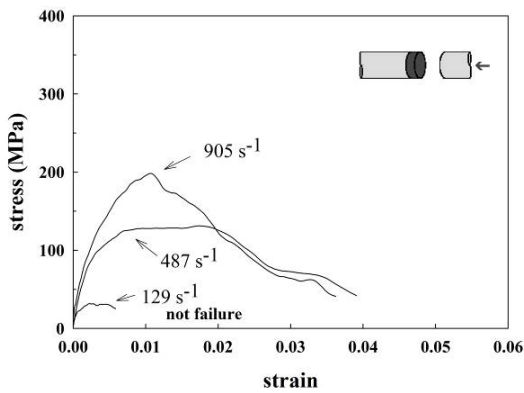


圖5 HC0應力-應變曲線

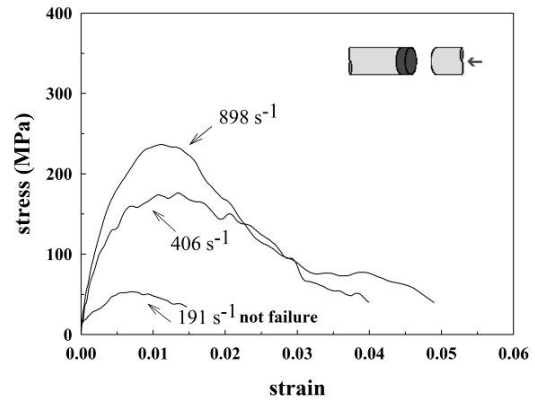


圖6 HC1應力-應變曲線

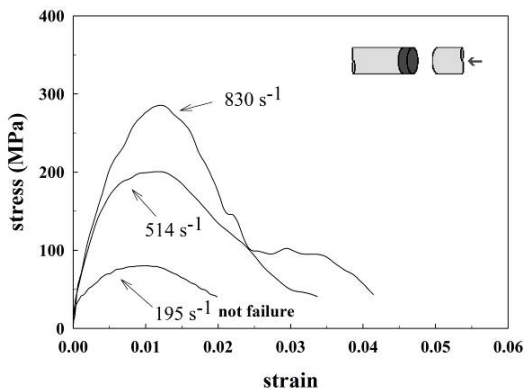


圖7 HC2應力-應變曲線

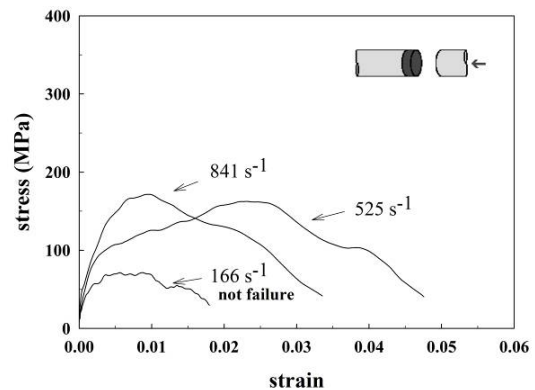


圖8 HA0應力-應變曲線

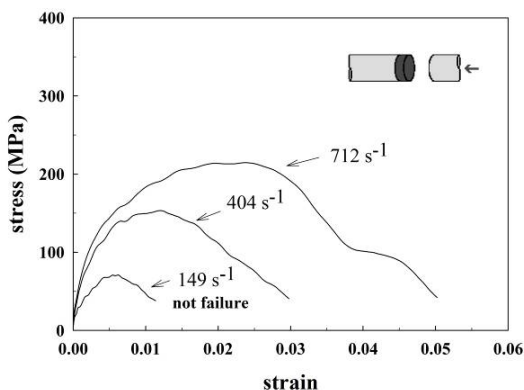


圖9 HA1應力-應變曲線

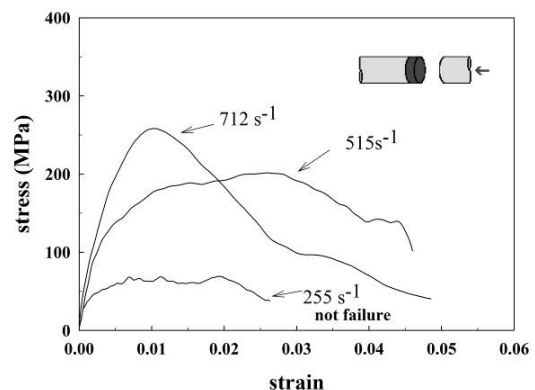


圖10 HA2應力-應變曲線

當進行高應變率試驗時，應力-應變曲線所上升趨勢較高且峰值後曲線會繼續往後延伸，因此曲線包圍面積也較大，得以吸收較多應變能量，所以當應變率較高時，試體吸收能量也會隨著應變率增加而提高，因此透過較高應變率此時可看出峰值應力及峰值應變也會隨著高應變率的增加峰值應力也會增大，並且在極限強度前之曲線，應力值約略呈線性增加，達到峰值應力

後曲線才有往下降趨勢，且應力-應變曲線也會因為纖維含量增加而提升。

當應變率為 128~255/s 時，試體並未破壞之應力-應變曲線有兩個峰值，此現象可能是應力波在試體上進行反覆應力加載與卸載過程之殘留應變所造成的[8]。當應變率 711~904/s 到達峰值點之曲線會有較上凸之趨勢，峰值點應力會較應變率 403~525/s 時高出很多；而應變率 403~525/s 作用下，曲線會到達峰值點會較平緩。

3.1.3 衝擊應變能

HC 及 HA 兩組配比之衝擊應變能隨著衝擊能量 J 增加，抵抗衝擊能量之吸能特性及抵抗變形能力不同，混凝土破壞發展是由裂縫的產生與發展所導致，在裂縫成長過程中是需要能量才會使裂縫開始成長，若裂縫成長受到阻止時，就需要更多能量才會使試體受到破壞，因此爐石活性粉混凝土添加鋼纖維會阻礙試體裂縫產生與擴展，可以使試體在破壞前吸收較多能量。

圖 11 與圖 12 為撞擊桿之衝擊能量 662J~ 7130J 與 1194J ~1302J 時試體吸收能量關係，當添加鋼纖維 1%時會有較佳之能量吸收特性，此纖維量之試體吸收之能量會比基材高；當添加鋼纖維量到達 2%時，吸能特性會比 1%差，但是抵抗之衝擊抗壓強度會隨著纖維含量增加而有所成長。

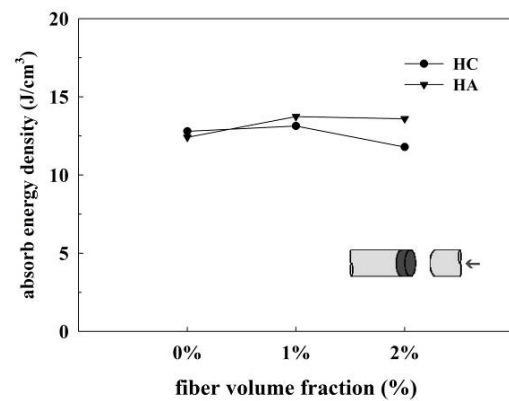
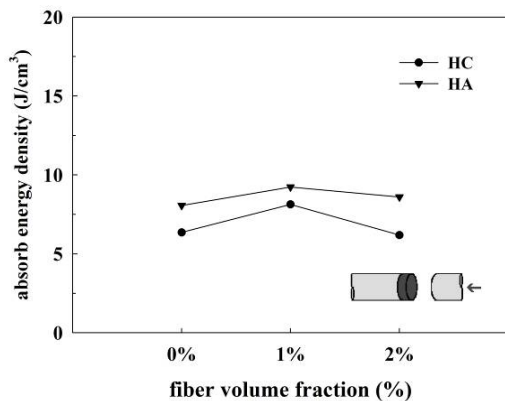


圖 11 衝擊動能(662J~ 7130J)時之吸收能量

圖 12 衝擊動能(1194J~1302J)時之吸收能量

比較 HC 與 HA 材衝擊能量 662J~7130J 時動態吸能特性，可以看出 HA 基材與添加鋼纖維時會有較佳之動態吸能特性(圖 11)，但動態衝擊強度則是 HC 材較高(圖 3)；而當衝擊能量到達 1194J~1302J 時(圖 12)，HC 材之基材會比 HA 吸能效果較好，但 HA 材添加纖維後吸能特性卻高過 HC 材，衝擊抗壓強度 HC 材會高於 HA 材，如圖 6。

3.1.4 峰值應變

圖 13 與 14 為應變率及衝擊動能對峰值應變關係，圖 13 顯示應變率 128~255/s 時之峰值應變較低，當應變率到達 403~525/s 時的峰值應變最大，但應變率為 711~904/s 時，峰值應變又會下降。透過不同衝擊動能進行峰值應變分析(如圖 14)動態動能對峰值應變影響和應變率影響的趨勢相近，當衝擊動能 662J~ 7130J 到 1194J ~1302J 衝擊動能提升時，峰值應變有下降趨勢，且當衝擊動能 1194J~1302J 時，活性粉混凝土之峰值應變在 0.010~0.015 範圍內。

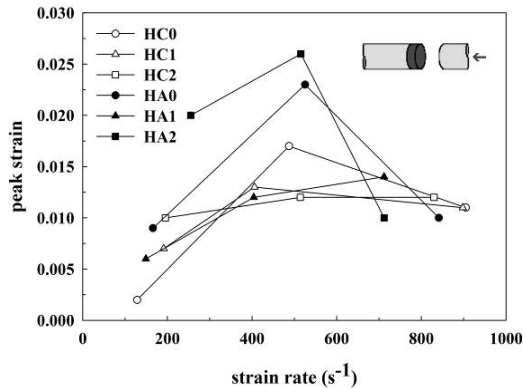


圖 13 應變率對峰值應變關係

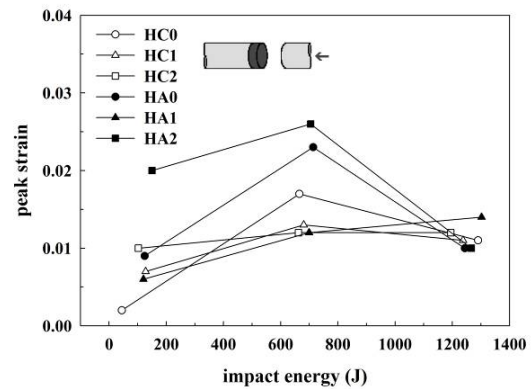


圖 14 衝擊動能對峰值應變關係

3.1.5 衝擊動態彈性係數

圖 15 為應變率與靜態、動態彈性係數關係，當應變率 128~255/s 時，動態彈性模數 E 會有下降趨勢，比靜態彈性模數低，可能為加載後試體未破壞；當應變率提升到 403~525/s 之後，動態彈性模數會因為應變率增加而有提升，且高過於靜態彈性模數 E 值。

圖 16 為鋼纖維含量與動態彈性係數關係，應變率 R1=128~255/s、R2=403~525/s、R3=711~904/s 添加鋼纖維之動態衝擊彈性模數 E，當應變率 128~255/s 時，因試體未受破壞，添加纖維後動態彈性模數 E 值增加幅度不明顯，而應變率提升到 403~525/s 後，添加纖維之動態彈性模數會有明顯增加，有較佳抵抗能力。

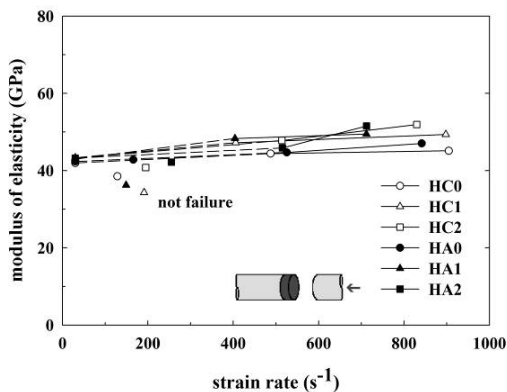


圖 15 應變率對動態彈性係數

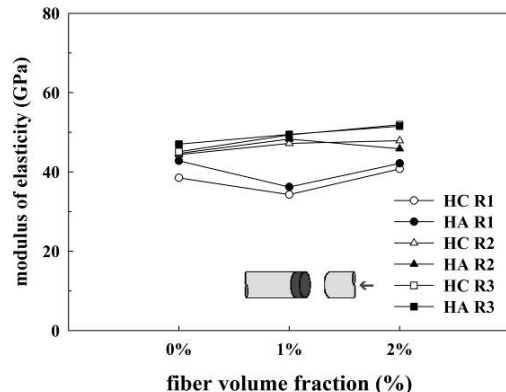


圖 16 鋼纖維含量對動態彈性係數

3.2 耐久性

3.2.1 加速中性化試驗

圖 17 為 HA 及 HC 配比之中性化深度，當加速中性化到 1 週時，HC 材與 HA 材基材與添加鋼纖維試體之中性化深度都為 0 mm；到達 4 週及 8 週時，中性化深度就會出現，但深度並不明顯。添加鋼纖維後之中性化深度較淺，而基材受中性化影響較嚴重，且隨著加速時間增加，

中性化深度也會越深，而 HC 材與 HA 材之中性化差異不大。

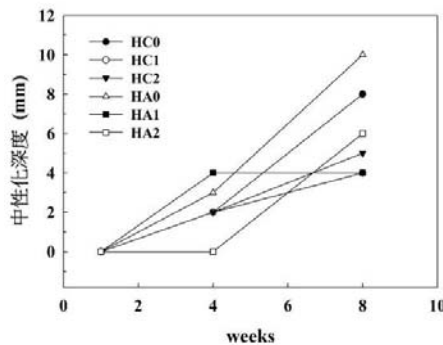


圖 17 中性化深度(1、4、8週)

3.2.2 氯離子滲透試驗

表 2 為氯離子滲透試驗結果，其中 Q_s 為使用 100mm 圓柱試體經修正後之通過總電荷量。HC0 及 HA0 兩組基材 6 小時累積通過之電荷量，皆小於 100 庫侖，評定等級為”可忽略”。而 HC 爐石活性粉混凝土基材通過電荷電滲量都比未添加爐石(HA)之活性粉混凝土還高，但皆屬於有良好之抵抗氯離子滲透性質。因鋼纖維屬於高導電性材料，隨著纖維含量增加而累積通過之電荷量會有增加之趨勢。

表 2 氯離子滲透結果

	HC0	HC1	HC2	HA0	HA1	HA2
電滲量Q(庫侖)	48	164	296	17	47	204
修正值 Q_s (庫侖)	43	148	267	15	42	184
電滲等級	可忽略	-	-	可忽略	-	-

將爐石活性粉混凝土與普通混凝土之氯離子電滲量[9]做比較，由氯離子滲透試驗結果得知，普通混凝土之電滲量高於爐石活性粉混凝土基材 139 倍，顯示爐石活性粉混凝土比普通混凝土有優異之抵抗氯離子滲透能力，因此爐石活性粉混凝土具有更佳之耐久性。

3.2.3 硫酸鹽試驗

表 3 為硫酸鹽(硫酸鈉)試驗之重量損失率及強度折減率結果，HC 及 HA 之重量損失率皆相當低，且添加鋼纖維後均有降低趨勢。將浸泡後試體進行單軸抗壓試驗，抗壓強度有下降趨勢；而添加鋼纖維後抗壓強度下降之幅度最為明顯，這是因為浸泡硫酸鹽後基材與纖維交界處受到侵蝕，造成鋼纖維腐蝕導致強度降低。

表 3 重量損失率與強度折減率

試體編號	HC0	HC1	HC2	HA0	HA1	HA2
重量損失率(%)	2.32%	1.35%	0.93%	0.89%	0.74%	0.83%
循環前抗壓強度	143.9	167	220.3	159.5	209.8	245.7

循環後抗壓強度	134.0	150.3	192.6	147.8	188.9	212.4
折減率(%)	-7.40%	-11.10%	-14.40%	-7.90%	-11.10%	-15.70%

圖 18 所示，混凝土浸泡於硫酸鈉溶液後試體有膨脹現象，隨著浸泡時間越久，膨脹會繼續增加；當添加鋼纖維後膨脹趨勢會降低，因此添加鋼纖維可以抵抗硫酸鈉侵蝕之膨脹現象。HC 材之伸長量比 HA 材有較低的膨脹伸長量，但兩者不會差異太大。普通水泥砂漿作浸泡於硫酸鈉溶液中，其膨脹伸長之變化量會高於活性粉混凝土，添加卜作嵐材料可以有效抵抗硫酸鈉溶液之侵蝕膨脹作用，有效增加混凝土之耐久性。

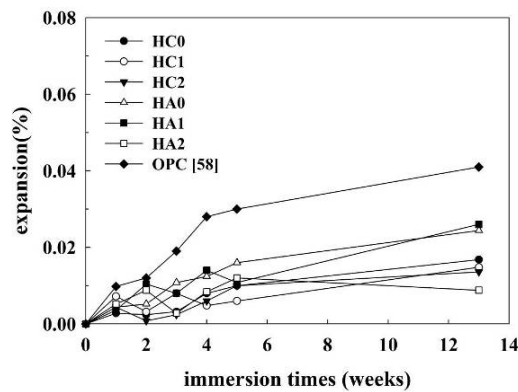


圖18 長度變化情形

3.2.4 透水試驗

在透水試驗之滲透係數均為 0，因此將試體沿中心線劈開，發現 HC0 滲水深度比 HA0 還要少，當添加鋼纖維後滲水深度有很明顯降低趨勢，例如添加 1%鋼纖維時，滲透深度降為 1.23~1.31 公分，HC1 比 HA1 有較佳抵抗水滲透之能力；但纖維添加量到達 2%，HC2 及 HA2 分別滲透深度為 1.72 及 1.08，此時未添加爐石之 HA2 有較低滲透性且比纖維量 1%時滲透深度為低；而 HC2 滲透深度只比 HA2 多 0.64 公分，差異性並不大，兩者添加 2%鋼纖維皆比基材有較佳抵抗水滲透之能力，因此添加鋼纖維後混凝土有明顯增加抵抗滲水能力。

四、結論

本研究選用爐石取代量 50% (HC 配比)和未添加爐石(HA 配比)之活性粉混凝土，透過 210 °C 高溫養護及添加 1%及 2%鋼纖維，獲得動態力學性質與耐久性之試驗結果如下：

1. HC 與 HA 材之動態抗壓強度、吸收能量及動態彈性模數 E，皆會隨著應變率、衝擊能量及鋼纖維含量提高而有所增加；在較高之衝擊動能作用下，添加爐石之 HC 材會比未添加爐石 HA 材有較高之動態抗壓強度。
2. 峰值應力會隨著高應變率增加而增大，在極限強度前之曲線，應力值約略呈線性增加，達到峰值應力後曲線才会有往下降趨勢，且應力-應變曲線也會因為纖維含量增加而提升。
3. 當應變率 128~255/s 時，峰值應變較低；達 403~525/s 時，此時峰值應變增加；應變率為 711~904/s 時，峰值應變又會下降。峰值應變於 0.010~0.015 範圍內。

4. 添加鋼纖維之中性化深度較淺，而基材受中性化影響較嚴重，且隨著加速時間增加，中性化深度也會越深。HC 與 HA 材中性化程度差異不大，表示添加爐石不會影響原有活性粉混凝土中性化抵抗力。
5. 雖然未添加爐石 HA 材會比 HC 材有較好的抵抗氯離子滲透能力，但兩者的抵抗能力評定都很好，且比普通混凝土有較好之抵抗能力。
6. 普通混凝土之電滲量高於爐石活性粉混凝土基材 139 倍，顯示爐石活性粉混凝土比普通混凝土有優異之抵抗氯離子滲透能力。
7. 浸泡硫酸鹽後之添加鋼纖維的抗壓強度下降最為明顯，這是因為浸泡硫酸鹽後基材與纖維交界處受到侵蝕，造成鋼纖維腐蝕導致強度降低。
8. HC 材與 HA 材的抗硫酸鹽健度重量損失率相當低，在浸泡硫酸鈉溶液之長度變化中，添加爐石之 HC 材的長度膨脹變化量較小，可以有效抵抗硫酸鈉溶液之侵蝕膨脹作用，有效增加混凝土之耐久性。
9. HC 材和 HA 材比普通混凝土有較佳之抵抗水滲透能力，而 HC0 滲水深度比 HA0 還要少，當添加鋼纖維後滲水深度有很明顯降低趨勢。

參考文獻

- [1] 彭仁柏、潘煌鏗、戴毓修、蕭力銘、鄭郁潔，2010，爐石活性粉混凝土韌性性質，第十屆結構工程研討會，桃園。
- [2] Halit, Y., Mert, Y.Y., Huseyin, Y., Serdar, A., Selcuk, T., 2010, "Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, Vol.32, pp.639-648.
- [3] Zhang, M., Wu, H.J., Li, Q.M., Huang, F.L., 2009, "Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part I: Experiments", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp.1327-1334.
- [4] Kolsky, H., 1949, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading", *Proc. Phy. Soc.*, B62, pp. 676-700.
- [5] Grote, D. L., Park, S. W. and Zhou, M., 2001, "Dynamic Behavior of Concrete at High Strain Rate and Pressure: I .Experimental Characterization", *International Journal Impact Engineering*, Vol. 25, pp.869-886.
- [6] 曾子彥，2002，以浸泡方式加速混凝土中性化反應之研究，國立成功大學，碩士論文。
- [7] Buenfeld, N.R., Newman, J.B., Page, C.L., 1986, "The resistivity of mortar immersed in sea-water", *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, Part 1, pp.511~524.
- [8] 謝孟翰，1998，超高強高性能混凝土之衝擊力學性質研究，國立台灣大學，碩士論文。
- [9] 何育倫，2008，VAE 粉末對混凝土材料工程性質影響之研究，國立高雄應用科技大學，碩士論文。