

## 爐石活性粉混凝土韌性性質

### Toughness Properties of Reactive Powder Concrete Containing Slag

彭仁柏<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup> 戴毓修<sup>3</sup> 蕭力銘<sup>4</sup> 鄭郁潔<sup>4</sup>

<sup>1</sup>高雄應用科技大學土木工程系碩士 (E-mail: [L656865@hotmail.com](mailto:L656865@hotmail.com))

<sup>2</sup>高雄應用科技大學土木工程系教授

<sup>3</sup>陸軍軍官學校土木工程學系教授

<sup>4</sup>高雄應用科技大學土木工程系專題生

#### 摘要

活性粉混凝土(RPC)為具有超高強度之混凝土，膠結材中所使用的卜作嵐材料大多為矽灰，但矽灰在國內並未生產，必須仰賴進口，使得活性粉混凝土的成本較高。因此本文探討爐石粉取代矽灰之活性粉混凝土力學性能，包括抗壓和抗彎強度、應力-應變曲線、韌性指數、應變能和破壞韌性。試驗結果指出，活性粉混凝土的抗壓強度會因爐石取代矽灰越多，抗壓強度有降低的趨勢，10天齡期的100%爐石活性粉混凝土抗壓強度約降低31~33%。經過適當製程和養護方法，爐石取代50%矽灰之活性粉混凝土抗壓強度可達150MPa。爐石活性粉混凝土，可以使用熱養護方式提早達到高強度，28天齡期的抗壓強度和10天比較，強度沒有明顯的增加。添加鋼纖維之爐石活性粉混凝土的抗彎強度、韌性指數、應變能和應力強度因子都有明顯的增加，會隨著鋼纖維含量增加而增加。

關鍵字：活性粉混凝土、爐石、韌性、配比

#### Abstract

Reactive powder concrete (RPC) is an ultra high strength concrete using silica fume as the pozzolanic materials. However, silica fume is pretty expensive and necessary to import from others countries in Taiwan, and this leads to high cost in producing RPC compared with normal concrete. In this study, we investigate mechanical properties of PRC containing blast furnace slag instead of silica fume, including compressive strength, flexural strength, stress-strain curves, toughness index, strain energy and fracture toughness. Results show that, more slag replacing silica fume in RPC causes the less compressive strength, the compressive strength of RPC with 100% slag will cut down 31-33% compared with that of RPC without slag. Undergoing some specific process and curing techniques, the compressive strength in 50% slag replacement of RPC can reach 150MPa. We can shorten the curing time by placing RPC in a hot and humid environment to obtain higher strength early. No obvious compressive strength increments in RPC at 28 days of age are found by comparing with RPC at 10 days. Adding steel fibers into RPC can raise the flexural strength, toughness index, energy absorption and stress intensity factor. With the increasing steel fibers, the toughness properties of RPC also increase.

Keywords: Reactive powder concrete, Slag, Toughness, Mixture proportion

國科會計畫編號：NSC 99-2625-M-151-001

## 一、前言

活性粉混凝土(RPC)為超高強度的混凝土，具有抗壓強度超過 150MPa 以上，初期發展為法國國防工業的需求發展。Richard 和 Cheyrezy [1]提出活性粉混凝土配比設計理念：(1)去除粗骨材增加材料均勻性，並藉由石英砂來取代粗骨材；(2)以高溫養護方式改善活性粉混凝土材料微結構，可增加緻密性及耐久性；(3)利用砂、水泥顆粒及粉料不同最佳化粒料級配堆積方式設計配比，提高混凝土之緻密性；(4)添加鋼纖維提高混凝土之韌性及延展性。鄭瑞濱[2]針對活性粉混凝土添加鋼纖維，添加後之抗彎韌性會因纖維含量增加而提升韌性，活性粉混凝土之韌性已遠超過傳統水泥複合材料。活性粉混凝土之膠結材使用卜作嵐材料大多為矽灰和石英粉，兩者材料皆具有活性特性，在高溫養護作用下會產生加速卜作嵐反應，可改變混凝土微觀結構，使得混凝土試體強度變高。若在活性粉混凝土添加鋼纖維，矽灰將可改善 C-S-H 膠體的含量，降低孔隙率，增加纖維介面黏結的能力，當矽灰含量 20~30%時，鋼纖維粘結效果最佳，使材料具高強度和緻密[3]。

因矽灰在台灣並未生產，若要降低成本，且要活性粉混凝土在台灣構造物普遍廣泛使用，則須由台灣生產之卜作嵐材料來取代矽灰較為恰當。因爐石粉為卜作嵐材料，為鋼鐵生產時之副產品，具有良好的膠結能力，若以適當的方法可激發其水化作用之活性，也會與氫氧化鈣進行「卜作嵐反應」形成類似水化產物 C-S-H 膠體。研究顯示，混凝土中添加爐石粉可以增進對混凝土抵抗硫酸鹽侵蝕之能力[4]。Zhang [5]研究高強度活性粉混凝土中，添加少量飛灰、爐石粉和 4%鋼纖維，可以達到強度 200MPa 的強度目標。Halit [6]研究活性粉混凝土中添加少量的飛灰、爐石粉之力學性能，結果顯示力學性能不會有明顯降低的現象，Halit (2009-2010)[7-8]在活性粉混凝土養護過程中，利用高溫高壓養護方式，添加飛灰、爐石粉的活性混凝土，可有效增加抗壓強度，也可以改善抗彎韌性。

本研究為達到資源再生利用，降低成本效益，節能減碳永續發展之目的，因此將活性粉混凝土中之膠結材矽灰，利用不同含量的爐石粉取代，找出抗壓強度到達 150MPa 之最佳爐石粉與矽灰配比量，探討此配比之應力-應變曲線、抗彎強度、添加纖維後之抗彎韌性指數及臨界應力強度因子。

## 二、試驗計畫

### 2.1 使用之材料

本研究為探討活性粉混凝土利用水淬爐石粉取代矽灰之力學性能，找出目標抗壓強度 150MPa 的爐石取代量配比，探討此配比受抗彎時之韌性性質。所使用材料為第二型波特蘭水泥，石英砂，石英粉(5~25  $\mu$ m)，矽灰(0.1~0.2  $\mu$ m)，水淬爐石粉(細度#6000)及鋼纖維(長 12mm，直徑 0.18mm)等材料。因活性粉混凝土使用低水膠比比，因此拌合時添加強塑劑(SSP-104)，來改善灌置時之工作度，並且可以達到活性粉混凝土緻密的效果。

### 2.2 試驗配比

先參考國內活性粉混凝土相關配比[9-10]，將活性粉混凝土之矽灰利用不同含量水淬爐石取代，爐石取代矽灰比例的試體編號為 A (0%)、B (30%)、C (50%)、D (70%)、E (100%)，配比如表 1，並添加鋼纖維體積含量 0%、1%、2%，纖維含量標記在試體編號後，如編號 A 之試體添加纖維含量 1%標記成 A1，若添加 2%之纖維含量為 A2，其餘類推。將不同爐石含量之配比如做抗壓試驗，並探討齡期 10 天和 28 天之抗壓強度差異性，找出齡期 10 天之抗壓強度可達到目標強度 150MPa 之取代配比，再進行抗壓應力-應變曲線及抗彎韌性試驗和臨界應力強度因子  $K_{IC}$  試驗。

表 1 爐石活性粉混凝土配比表

編號	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
A0	0%	0.23	180	714	216	0	252	944	36
A1	1%	0.23	180	714	216	0	252	918	36
A2	2%	0.23	180	714	216	0	252	891	36
B0	0%	0.23	180	714	151	65	252	962	36
B1	1%	0.23	180	714	151	65	252	936	36
B2	2%	0.23	180	714	151	65	252	910	36
C0	0%	0.23	180	714	108	108	252	973	36
C1	1%	0.23	180	714	108	108	252	947	36
C2	2%	0.23	180	714	108	108	252	921	36
D0	0%	0.25	186	714	65	151	252	940	48
D1	1%	0.25	186	714	65	151	252	914	48
D2	2%	0.25	186	714	65	151	252	888	48
E0	0%	0.28	214	714	0	216	252	892	50
E1	1%	0.28	214	714	0	216	252	866	50
E2	2%	0.28	214	714	0	216	252	840	50

## 2.3 試體養護

活性粉混凝土養護過程利用高溫養護方式，可在短齡期達到較高之強度[2]，可減少養護齡期。本研究將試體灌製完成後，兩天後拆模，進行溫度 90°C、相對溼度 100%，進行熱養護 7 天，試體取出放置室溫下 24 小時後進行力學試驗。

## 2.4 試驗方法

### 2.4.1 流度試驗

為了控制試體之工作度，獲得良好的工作性能，進行流度試驗。試體拌合完成後，依據 ASTM C230M-03 試驗規範，進行流度試驗，量取五次的直徑數據，平均作為流度值。

### 2.4.2 抗壓試驗及應力-應變曲線

抗壓試體為  $\Phi 50 \times 100$  mm 之圓柱試體，每組試體灌製三顆試體，養護齡期為 10 天和 28 天，以 0.03mm/min 速率進行加載直到試體破壞，取三顆抗壓強度的平均值。在找出齡期 10 天之抗壓強度到達 150MPa 之配比後，進行完整的應力-應變曲線量測，因此在圓柱試體裝設軸向伸長計，來量測試體之軸向變形量。

### 2.4.3 纖維混凝土彎曲韌性試驗

本實驗使用 MTS 材料試驗機，參考 ASTM C1609 纖維混凝土抗彎試驗規範，利用三點彎曲方式進行抗彎試驗。活性粉混凝土(RPC)之抗彎韌性，製作 40x40x160mm 抗彎試體，將試體放置於跨距 100mm 彎曲試驗基座上，以位移加載控制方式進行加載，加載速率為 0.06mm/min 加載到撓度 8mm，並在抗彎基座外，跨度中點處放置 LVDT 位移計紀錄試體的撓度，再利用 LVDT 位移計連接連到資料紀錄器上記錄位移時之電壓變化，在進行換算位移撓度。

彎曲試驗的韌性計算參考 ASTM C1609 計算方式，來計算纖維混凝土抗彎之韌性及峰值後之殘餘彎曲強度。韌性的定義為載重-撓度曲線下，初期加載到撓度 2 mm 時之載重-撓度曲線所包圍之面積，並探討 0.5 mm 及 2 mm 時所對應之殘餘應力。因本研究的試體尺寸較小，為了瞭解活性粉混凝土完整之抗彎強度到破裂時之韌性行為，本研究針對試體抗彎撓度 2mm、4mm、6 mm、8 mm 時之韌性和峰值後之殘餘彎曲強度，分析纖維活性粉混凝土韌性行為。

### 2.4.4 破裂韌性試驗

本實驗為求得材料的臨界應力強度因子  $K_{IC}$ ，參考 ASTM E 399 線彈性材料之破裂韌性試驗方法，加載速率為 0.02mm/min，利用中心點抗彎試驗進行試體抗彎試驗。將中心點載重  $P_{max}$  和試體裂縫開口位移，代入下列公式求得臨界應力強度因子

$$K_{IC} = \frac{P_{max} S}{bd^2} f_b \quad (1)$$

其中  $P_{max}$  為抗彎強度， $S$  為跨度， $b$ 、 $d$  分別為試體寬度和高度， $f_b$  為試體幾何形狀修正係數。

$$f_b = \frac{3\alpha^{1/2}[1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)]}{2(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}$$

$\alpha$  為預留裂縫與試體高度的比。

## 三、結果與討論

### 3.1 流度

研究[9]指出，活性粉混凝土添加爐石粉，流度會有變高的趨勢。為了因應活性粉混凝土添加鋼纖維之後，避免有鋼纖維沉澱的現象發生，灌置時需要有良好的工作性，必須控制用水量或強塑劑用量，避免有流度太高的現象發生，本研究的流度值控制在 20~25cm 之間。活性粉混凝土添加鋼纖維後之流度性質如圖 1，結果顯示，在各種爐石取代砂灰之配比，基材添加 1% 鋼纖維後，流度大約會降低 10mm 流度值，若添加 2% 鋼纖維時，流度值會比基材(無鋼纖維)降低 20mm，因此得知鋼纖維含量添加越多的流度會越來越低。

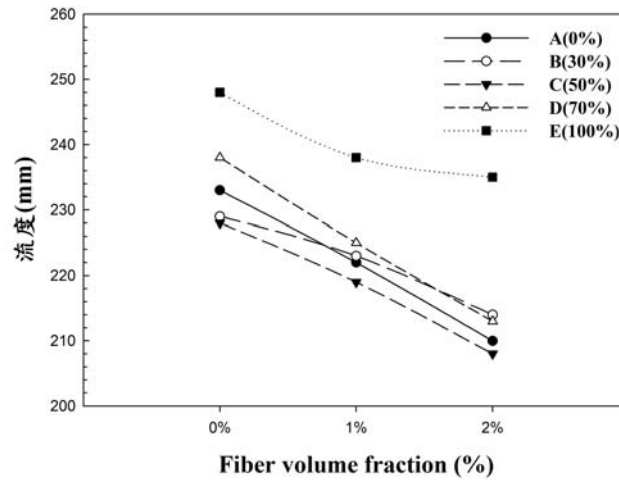


圖 1 活性粉混凝土添加爐石和鋼纖維之流度值

### 3.2 抗壓強度

依據活性粉混凝土原始配比，用水淬爐石粉取代矽灰：A(0%)、B(30%)、C(50%)、D(70%)、E(100%)，並且添加 1%、2%之鋼纖維，比較齡期 10 天之爐石含量對活性粉混凝土抗壓強度的影響，結果如圖 2，而各種配比在齡期 10 天和 28 天的抗壓強度，如圖 3-5 所示。

圖 2 結果顯示，齡期 10 天之水淬爐石取代矽灰含量比例越高，則抗壓強度會逐漸降低，而配比添加 1%和 2%之鋼纖維含量後，抗壓強度都有隨著纖維含量而有增加的趨勢，因此利用水淬爐石粉取代矽灰，對鋼纖維也是有增加握裹的能力，可以阻抗鋼纖維和基材的拉拔破壞，使添加鋼纖維後，抗壓強度會增加。而當活性粉混凝土添加 1%、2%鋼纖維，水淬爐石粉取代矽灰含量 0% (A 材)和 30% (B 材)時，兩者之抗壓強度差異性並不大，尤其是在 2%鋼纖維含量時，兩者抗壓強度幾乎是相同的。將水淬爐石粉 100%完全取代矽灰含量時，基材(E 材)強度會比沒有取代矽灰(A 材)時，強度降低 31.28%；添加 1%鋼纖維含量時，強度會降低 33.43%；當纖維含量為 2%時，強度會降低 30.93%，因此，利用水淬爐石粉完全取代矽灰，活性粉混凝土抗壓強度約會降低 1/3。

鋼纖維含量 0%、1%、2%之齡期 10 天和 28 天的抗壓強度分別為圖 3、4、5，當齡期由 10 天到達齡期 28 天時，各種配比之抗壓強度都有逐漸成長的趨勢。圖 3 為纖維含量 0%時，爐石粉全部取代矽灰(E 材)配比之 28 天抗壓強度增加較多。由圖 5 結果顯示，當利用水淬爐石粉取代矽灰含量 50% (C 材) 時，添加纖維 2%時之抗壓強度會超過 150MPa，因此，選用此配比(C2)作為研究探討活性粉混凝土的韌性行為。

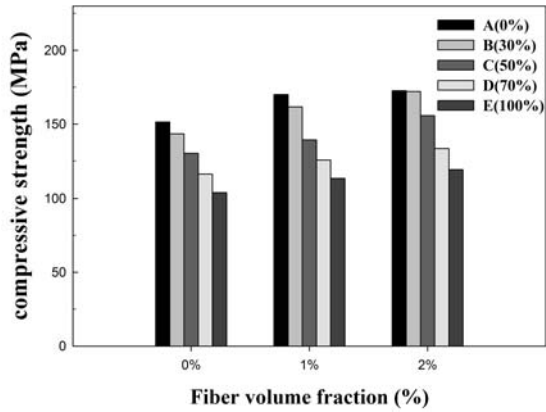


圖 2 爐石含量對抗壓強度影響

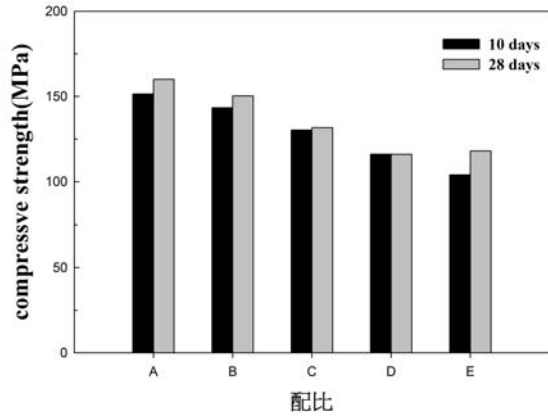


圖 3 鋼纖維含量 0% 之抗壓強度

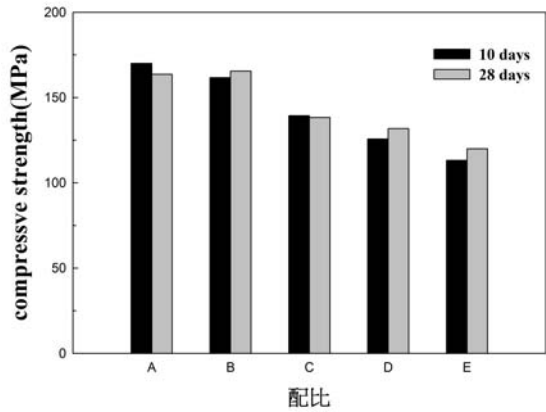


圖 4 鋼纖維含量 1% 之抗壓強度

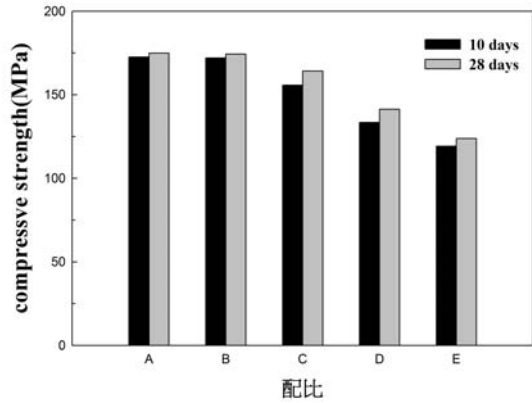


圖 5 鋼纖維含量 2% 之抗壓強度

### 3.3 應力-應變全曲線行為

當纖維含量 2% 且水淬爐石粉取代矽灰含量 50% 時，抗壓強度達到目標強度 150MPa，因此將此配比(C 材)利用 MTS 萬能材料試驗機以應變速率  $5 \times 10^{-6} / \text{sec}$  進行抗壓試驗，分別求得鋼纖維含量 0%、1%、2% 抗壓試驗之應力-應變全曲線圖，如圖 6。由應力-應變圖可以看出活性粉混凝土的抗壓強度和前段(極限強度前)的應力-應變曲線之斜率，會因鋼纖維含量增加而提高；而後半段(極限強度後)應力-應變曲線，在鋼纖維含量 0% 時，會馬上爆裂破壞(圖 7)；在添加 1%、2% 纖維含量時，後半段的應力-應變曲線在到達極限強度後，不會馬上破壞，應力-應變曲線會呈現緩慢的下降，因此當添加鋼纖維含量 1%、2% 時，到達極限強度後會有增韌(toughening)的特徵出現。

添加水淬爐石粉之活性粉混凝土的破壞形態模式和未添加水淬爐石粉之活性粉混凝土相似，在受抗壓過程中內外部會產生微小裂縫，逐漸擴展到整個試體，到達極限強度破壞。當纖維含量 0% 時，因試體較為脆性，到達極限強度後，會直接爆裂破壞；而添加鋼纖維後之破壞，為微小裂縫擴展到整個試體之裂縫，為互相平行的偏斜裂縫形態。

將應力-應變曲線圖中各個不同應變量時所包圍面積，作為試體抗壓時可吸收之能量，亦屬於韌性的指標。由圖 8 各應變量位置計算面積(能量)之結果如表 2，很明顯的發現基材和添加 1%、2% 時有明顯的差異性，當添加纖維量越多，吸收之能量值就越高；且當  $\delta$  (變位量) 增加時，吸收能量也會隨著增加。當應變量為基材破壞點  $\epsilon_1$  時，添加 1% 鋼纖維之吸收能量比基材多 11.07%；當添加 2% 鋼纖維會比 1% 鋼纖維之吸收能量多 12.67%。當應變量到達  $\epsilon_{0.010}$  時，纖維含量 2% 之吸收能量有逐漸增加之趨勢，能量增加可達 1% 纖維含量時之 30%，因此可知當添加鋼纖維後之活性粉混凝土的應變能會有明顯的提升現象。

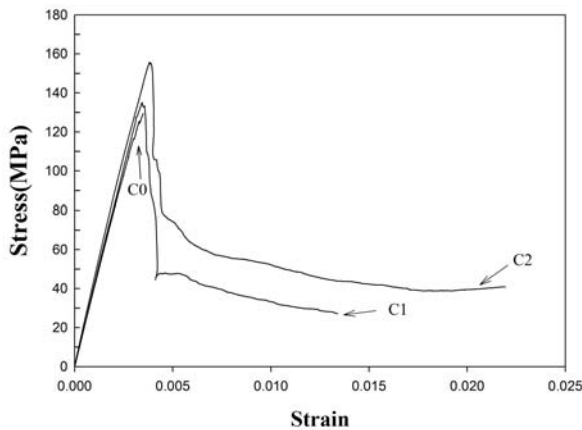


圖 6 C 材之應力-應變曲線圖



圖 7 鋼纖維含量 0% 之 RPC 破壞情形

表 2 試體吸收能量(單位:  $MJ/m^3$ )

	C0	C1	C2
$\epsilon_1$	13.64	15.15	17.07
$\epsilon_{0.005}$		17.81	21.39
$\epsilon_{0.010}$		27.75	36.08
$\epsilon_2$		32.84	44.15
$\epsilon_{0.015}$			47.63
$\epsilon_{0.02}$			57.59
$\epsilon_3$			61.47

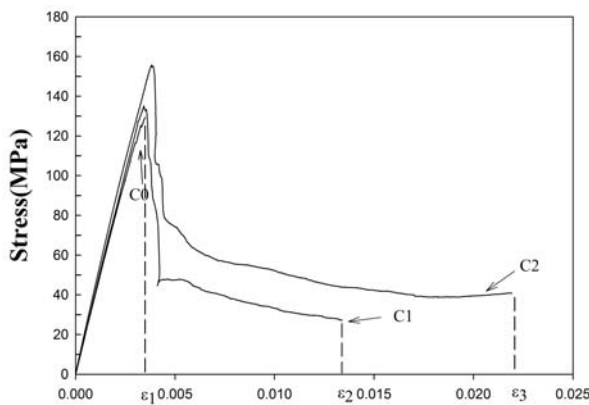


圖 8 C 材之應變能計算

### 3.4 彎曲韌性

活性粉混凝土利用水淬爐石粉取代 50% 砂灰含量(C 材)添加鋼纖維後，可以達到目標抗壓強度 150MPa，對此配比進行抗彎試驗。因活性粉混凝土添加鋼纖維後屬於纖維混凝土，因此利用彎曲試驗來探討纖維活性粉混凝土之韌性性質，分析方法參考 ASTM C1609 規範，規範內使用載重  $P$ -位移  $\delta$  曲線，計算撓度 0-2mm 所圍成的面積來作為韌性，因本研究為小試體，所以分析撓度 2、4、6、8mm 時之韌性及峰值後之殘餘強度，並利用 ASTM E399 線彈性材料之破裂韌性公式來計算臨界應力強度因子  $K_{IC}$ ，來討論纖維活性粉混凝土抗彎時之韌性性能。

### 3.4.1 抗彎強度

利用中心點抗彎試驗結果為表 3 及圖 9，抗彎強度皆隨著添加鋼纖維會有明顯的增加(圖 9)，當基材添加 1%鋼纖維含量時，抗彎強度比未添加多 168.6%，而添加 2%鋼纖維的抗彎強度比 0%纖維含量時多 189.3%。由結果可看出，添加水淬爐石粉之活性粉混凝土在添加鋼纖維後，抗彎強度也會有明顯提升。因此活性粉混凝土添加水淬爐石粉對於鋼纖維的握裹力也有明顯的幫助，可以增加彎曲破壞時纖維拉拔的抵抗能力，所以有較高的抗彎強度，不會像基材具脆性性質，有脆性破壞的情形發生。

### 3.4.2 韌性 T

活性粉混凝土添加 0%、1%、2%鋼纖維的載重-撓度曲線分別為圖 10、11、12，其中每一種配比都顯示 3 個試體的曲線。經計算圖 10-12 之不同纖維含量活性粉混凝土之韌性 T 的結果如表 3，其中  $T_2$  為 0-2mm 時之韌性指數， $T_4$  為 0-4mm 時之韌性指數，其餘類推。

表 3 結果顯示，當撓度為 2mm 時，添加 1%鋼纖維含量時之韌性 T 較纖維含量 0%成長 20.79 kN-mm，而添加 2%之鋼纖維會成長 21.29 kN-mm。當纖維含量 0%之活性粉混凝土(基材)時，韌性值非常的小，似為脆性的材料，而當添加鋼纖維含量 1%和 2%時，載重撓度逐漸增加到達 8mm 時，韌性 T 也都會逐漸增加趨勢。因此韌性指數會隨著添加鋼纖維後會有特別明顯提升的現象，但是活性粉混凝土鋼纖維含量由 1%增加到 2%時，韌性指數的增量卻不明顯。

表 3 不同鋼纖維含量之活性粉混凝土韌性及殘餘強度值

鋼纖維含量	C0 (0%)		C1 (1%)		C2 (2%)	
抗彎強度(MPa)	30.57		82.13		88.44	
撓度	韌性T (kN-mm)	殘餘強度 (MPa)	韌性T (kN-mm)	殘餘強度 (MPa)	韌性T (kN-mm)	殘餘強度 (MPa)
$T_2$	0.182	-	20.97	43.35	21.57	44.26
$T_4$	0.182	-	30.17	15.32	30.59	15.98
$T_6$	0.182	-	33.53	6.83	34.20	7.19
$T_8$	0.182	-	35.18	2.38	36.03	2.64

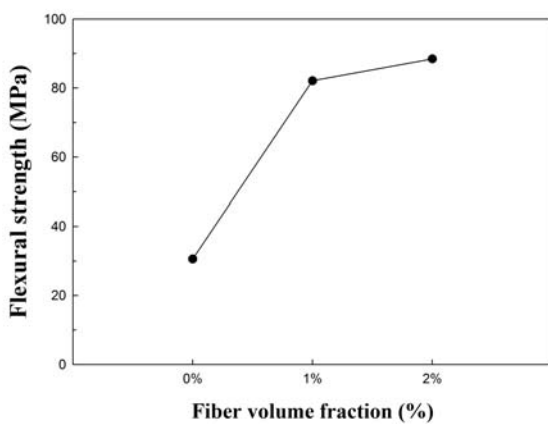


圖 9 鋼纖維 0%、1%、2%之抗彎強度

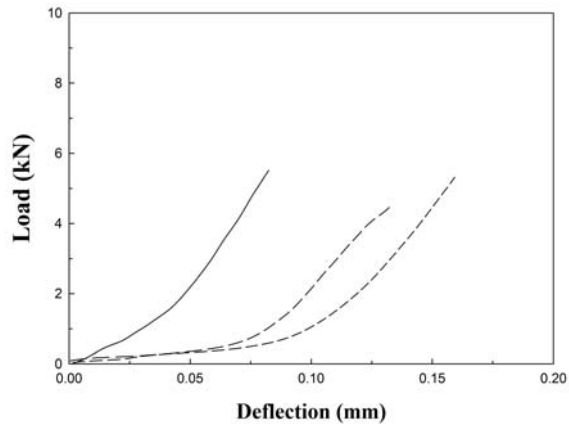


圖 10 鋼纖維含量 0%時之抗彎載重-撓度曲線



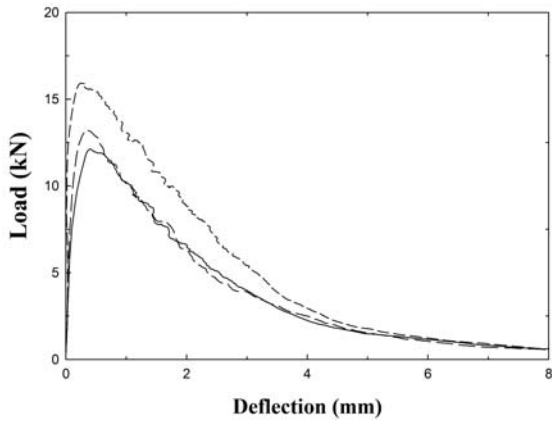


圖 11 鋼纖維含量 1% 時之抗彎載重-撓度曲線

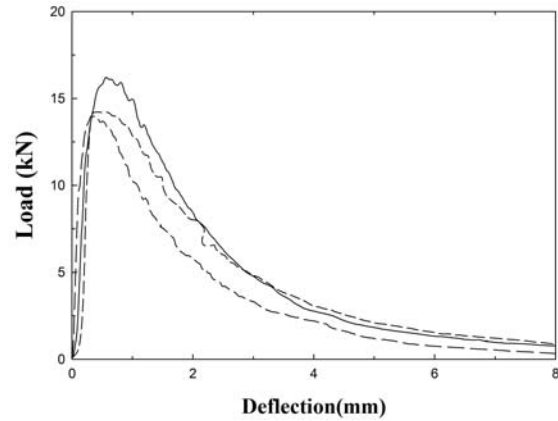


圖 12 鋼纖維含量 2% 時之抗彎載重-撓度曲線

### 3.4.3 臨界應力強度因子 $K_{IC}$

利用破裂韌性試驗及公式(1)計算破裂韌性，結果如表 4 所示，當預裂縫抗彎試體添加 1% 鋼纖維時，抗彎強度比基材(0%鋼纖維)增加 72.45%；當添加 2% 鋼纖維含量時，抗彎強度較 0% 鋼纖維增加 136%。當試體未添加鋼纖維時，試體呈現脆性的狀態，到達破壞點為直接斷裂破壞，試體破壞情況如圖 13；當有預裂縫之抗彎試體添加鋼纖維後，抗彎強度有明顯增加的趨勢，而當鋼纖維添加含量越多，抗彎強度會有明顯增加的趨勢，試體受載重至破壞之情況如圖 14。因此添加鋼纖維可以產生較高的抗彎強度。比較表 3 及表 4 之彎曲強度，添加水淬爐石粉之活性粉混凝土，試體中央有預裂縫之長方形抗彎試體之彎曲強度比沒有預裂縫之抗彎強度還要低。

表 4 指出，當活性粉混凝土添加鋼纖維後，破裂韌性  $K_{IC}$  有明顯的增加趨勢，纖維含量添加越多，破裂韌性就越高。另外，計算鋼纖維含量 0%、1%、2% 之載重與開口位移(P-CMOD)之面積，在添加 2% 鋼纖維時之曲線下的面積為最大值(2.11 kN-mm)，表示吸收外部能量越多，其韌性值也較大；吸收能量會隨著鋼纖維含量降低，而吸收能量也有減少的趨勢，韌性也因此而降低。當鋼纖維 0% 為基材時，吸收之能量相當低(0.17 kN-mm)，此時韌性性質也是最差的，因此，當基材受到抗彎試驗載重時，達到要極限破壞時，試體為直接脆性破壞情況。

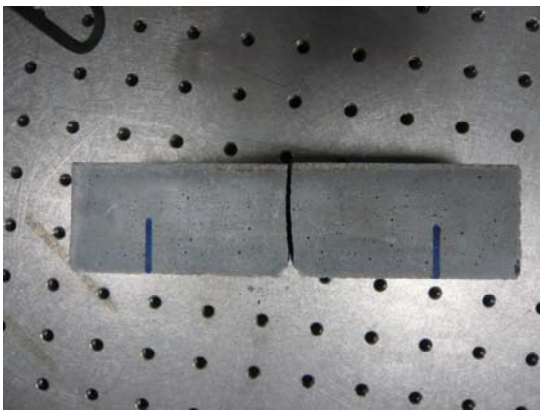


圖 13 鋼纖維含量 0% 試體破壞情形

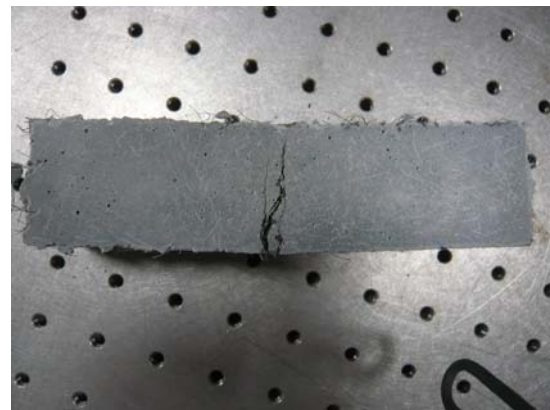


圖 14 鋼纖維含量 2% 試體破壞情形

表 4 破裂韌性試驗之抗彎強度及應力強度因子  $K_{IC}$

鋼纖維含量	C0 (0%)	C1 (1%)	C2 (2%)
抗彎強度(MPa)	24.36	42.01	57.49
破裂韌性 $K_{IC}$ ( $MPa\sqrt{m}$ )	1.08	1.86	2.67
面積(kN-mm)	0.17	1.66	2.11

#### 四、結論

1. 採用爐石取代 50% 砂灰之活性粉混凝土配比再添加 2% 鋼纖維可獲得 150MPa 抗壓強度。
2. 利用水淬爐石取代砂灰之活性粉混凝土的抗壓強度會因爐石取代量增加，導致抗壓強度有降低的趨勢，而齡期 10 天時之爐石完全取代砂灰之抗壓強度約降低 31~33%。
3. 爐石活性粉混凝土，透過熱養護方式可提早達到設計強度，當齡期到達 28 天時，抗壓強度沒有明顯的增加。
4. 添加鋼纖維後之爐石活性粉混凝土的抗彎強度和韌性都有明顯的增加，鋼纖維含量增加越多，抗彎強度和韌性也會增加。
5. 活性粉混凝土添加 1% 及 2% 之鋼纖維後，破裂韌性和吸能特性都會隨著鋼纖維含量增加而顯著的提升。

#### 參考文獻

1. Richard, P., and Cheyrezy, M., "Composition of reactive powder concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp.1501-1511 (1995).
2. 鄭瑞濱, 「活性粉混凝土構件之工程性質研究」, 博士論文, 國立台灣大學土木工程研究所, 台北 (2003)。
3. Chan, Y.W. and Chu, S.H. "Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete", Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.1167-1172 (2004).
4. 黃兆龍, 「卜作嵐混凝土使用手冊」科技圖書出版。
5. Zhang, Y., Sun, W., Liu, S, Jiao, C., Lai, J., "Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors", Cement and Concrete Composites, Vol.30, pp.831-838 (2008).
6. Halit, Y., Huseyin, Y., Anil, S.K., Bulent, B., "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete", Fuel, Vol.87, pp.2401-2407 (2008).
7. Halit, Y., Mert, Y.Y., Serdar, A., Anil, S.K., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", Construction and Building Materials, Vol.23, pp.1223-1231 (2009).
8. Halit, Y., Mert, Y.Y., Huseyin, Y., Serdar, A., Selcuk, T., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag", Cement and Concrete Composites, Vol.32, pp.639-648 (2010).
9. 高進驊, 「含飛灰及爐石粉活性粉混凝土性質及圍束功效之研究」, 碩士論文, 國立台灣科技大學, 台北 (2007)
10. 龔盈年, 「理論模擬高溫活性粉混凝土高速載重應力-應變行為」, 碩士論文, 國立高雄應用科技大學, 高雄(2009)。