

# 活性粉混凝土高溫作用後動態力學行為與破壞模式

戴毓修<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup> 龔盈年<sup>2</sup> 蔡季霖<sup>2</sup> 陳瑞宏<sup>1</sup> 魏廷杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>陸軍軍官學校土木工程學系

<sup>2</sup>國立高雄應用科技大學土木工程系

## 摘要

當結構物受地震或受砲彈衝擊下，有可能因火災而伴隨高溫，在承受高溫後的結構物力學性質會有一定程度的折減。本研究希望藉由對高溫作用後之活性粉混凝土在動態荷重之應力-應變行為進行研究。主要是針對  $\phi 50 \times 25 \text{mm}$  之活性粉混凝土，進行常溫及  $200^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$  高溫加熱後之試體進行研究。試驗結果顯示，活性粉混凝土受不同高溫作用後，溫度在  $200^\circ\text{C}$  到  $400^\circ\text{C}$  範圍內，抗壓強度有明顯提升，之後隨作用溫度的增加抗壓強度下降，峰值應變於每立方 2 公斤氣體壓力下之應變增加幅度最大，而隨著壓力公斤數提高，作用溫度增加峰值應變提升並不顯著，彈性模數隨著溫度增加而逐漸降低，而在應變速率部份，割線彈性模數隨著應變速率增加而上升，而初始彈性模數則變化不大。

本研究將針對具有不同纖維含量之活性粉混凝土在高溫作用後之力學行為進行試驗研究，並提出高溫作用後活性粉混凝土之動態力學性質，研究結果將可提供工程應用與設計之參考。

**關鍵詞：**高溫、活性粉混凝土、衝擊試驗、分離式霍普金森

## 1. 前言

纖維混凝土 (fiber reinforced concrete, FRC) 是近代迅速發展之新興複合材料，以水泥砂漿或混凝土為基材，並藉由添加金屬纖維、合成纖維或天然有機纖維，可使混凝土的抗拉強度、抗彎強度、與抗衝擊能力等大幅度提高[1]。其中，發展最快且應用最廣的是鋼纖維混凝土，其次是合成纖維和玻璃纖維混凝土。隨著混凝土研究與應用技術的進步，特別是高性能減水劑的發明，使得高性能混凝土 (high-performance concrete, HPC) 蓬勃發展。與普通混凝土相比，高性能混凝土的優點在於透過配比技術之改

良，使得其材料內部的緻密性與微觀結構得到大幅的改善，進而具有高強度、高工作度和高耐久性等優越之性能[2]。另一種特殊混凝土，活性粉混凝土 (reactive powder concrete, RPC)，是一種高性能水泥基複合材料，具有高強度、高韌性及抗磨損等特性，可用於重要設施及軍事工程上[3]。然而，對於鋼筋混凝土結構而言，除了承受靜態與動態荷載之外，亦會承受因火災而伴隨產生的溫度荷載。在持續的高溫作用下，混凝土內部由於水分蒸發、水泥漿體失水收縮、骨材受熱膨脹破裂、砂漿與粗骨材之熱變形量不一致等因素，導致強度折減，或因持續高溫導致混凝土爆裂。因此，瞭解活性

粉混凝土在高溫作用後力學行為尤其重要。

近年來已有不少學者針對高強度混凝土在高溫後力學性質進行研究[4-14]，並指出鋼纖維高強度混凝土(steel reinforced high strength concrete, SFHSC) 在高溫作用後強度折減趨勢與普通混凝土(normal strength concrete, NSC)類似，然而，由於鋼纖維的導熱係數非常高，可以減少混凝土內外溫差，降低高溫對混凝土劣化行為的影響，並在一定程度上可改善混凝土的高溫力學性能。除此之外，亦有研究[4]指出在高強度混凝土中添加混合纖維(聚丙烯纖維與鋼纖維)，可以降低其在高溫下發生爆裂的機率，有助於提昇高強度混凝土之耐火性質。對於活性粉混凝土在高溫下力學性質之研究，鄭慶鴻[15]曾透過實驗之觀察，提出利用添加高鋁水泥與改變製程技術來抑制活性粉混凝土在高溫下爆裂的方法。林淑蘭[16]與陳佑松[17]亦探討了活性粉混凝土對火害之影響，結果顯示添加鋼纖維之活性粉混凝土經高溫 200°C 及 300°C 延燒 2 小時後，使得活性粉混凝土之抗壓強度增加，其中 RPC 在添加鋼纖維體積含量 1% 中，分別增加 61.9% 與 21.3%；添加鋼纖維含量 2% 時，分別上升 16.9% 與 1.4%，當溫度達 400°C 以上延燒 2 小時，則會導致試體爆裂。

有關高溫動態力學試驗研究，在國內外已有不少研究，但大部分都只針對單一方面做探討，在 1998 年，Lennon [18] 透過新技術應用於高溫高應變率或普金森桿(split-hopkinson pressure bar, SHPB)，透過紅外線加熱至鈮金屬，加熱溫度範圍從 27°C~800°C，並做動態力學試驗，應變速率為  $4 \times 10^{-3}$ /s，探討應力-應變曲線關係。在 1993 年邱高祺[19]探討鋼纖維混凝土與普通混凝土在高溫及高應變率的情況下之抗壓強度、彈性模數、韌性指數等基本力學行為，並比較其相互間的差異，試驗結果顯示，在

高溫的狀況下，材料的抗壓強度是以攝氏 250 度為分界點而有不同的變化，在室溫至攝氏 250 度之間，抗壓強度隨溫度升高而增加，溫度超過攝氏 250 度，則隨溫度升高而降低；彈性模數則隨溫度升高而降低，至於韌性指數則須視應變率之高低，而在不同的溫度範圍有不同的變化。

然而綜觀過去之研究，針對鋼纖維混凝土在高溫下動態力學行為之研究並不多。本研究將針對具有不同纖維含量之活性粉混凝土在高溫作用後之力學行為進行試驗研究，並提出高溫作用後活性粉混凝土之動態力學性質，研究結果將可提供工程應用與設計之參考。

## 2. 實驗計畫與方法

### 2.1 試驗規劃與流程

本研究為了探討 RPC 在高溫作用後動態力學行為，並探討其破壞模式，共製作了 160 個  $\phi 50 \times 100$ mm 之混凝土圓柱試體，所使用的材料為波特蘭 II 型水泥；石英砂 (105~420 $\mu$ m)；石英粉 (5~25 $\mu$ m)；矽灰 (0.1~0.2 $\mu$ m)；及鋼纖維(長 12mm，直徑 0.18mm)等材料，此外為了改善低水灰比下的工作度，拌和過程中添加了強塑劑，其化學成分為丙烯酸共聚物之陰離子型高分子介面活性劑，試體配比如表 1 所示。

表中各組試體之差異在於鋼纖維含量的變化，對於含有 0%、1%、2%、3% 鋼纖維的試體，分別給予 RPCF0、RPCF1、RPCF2 及 RPCF3 的編號。此外，根據 Richard [20] 的研究，活性粉混凝土在水化的過程中若施以 90°C 的熱處理，將顯著的加速混凝土中火山灰效應的進行，並能有效改善水化物的微結構。對此，鄭瑞濱[21]的研究結果亦指出活性粉混凝土若能透過熱養護程序，可將 28 天齡期時的強度提早於 7 天達到，可大幅的節省時間成本。因此本研究將灌製後的

試體在 2 天後進行拆模，即以相對濕度 100%、溫度 90°C 之條件進行養護 7 天。試驗溫度規劃 7 組溫度：200°C、300°C、400°C、500°C、600°C、700°C 和 800°C，由於無添加鋼纖維之爆裂機率較高，故 RPCF0 最高溫度設為 600°C。每組 5 顆試體進行試驗。為確定試體內部溫度已達到預訂溫度，製作時於試體中心處預埋一 K 型熱偶計，用以監控混凝土內部溫度變化之歷程。

由於 RPC 之緻密性非常高，同時透過高溫熱水養護後，試體內部含有大量的水份，為了避免試體在加熱過程中，高溫使水汽化後之孔隙壓力過大而造成試體爆裂，加熱前先利用熱烘箱在 110°C 下，烘乾 7 天以上，使試體內部所含水分降至最低，而後再放置於高溫爐內加熱，當試體加熱至目標溫度後即停止加熱，並將試體留置爐內自然冷卻，隔日取出即進行動態力學試驗。

## 2.2 升溫模式

本研究所使用之加熱設備為爐內空間為 300W×300H×300D(mm) 之箱型電熱高溫爐，高溫爐之最高溫度為 1204°C，最大升溫速率可達 30°C/min，為了避免升溫速率過快導致溫差過大進而高溫爆裂，升溫速率採用 2°C/min，同時為了確保爐內試體受熱條件一致，每增加 200°C 後恆溫 30 分鐘，再加熱至目標溫度後(200°C、300°C、400°C、500°C、600°C、700°C、800°C)，恆溫 30 分鐘即停止加熱。

## 2.3 動態力學試驗設備及分析

SHPB 試驗設備之配置如圖 1 所示，設備全長 10m，主要由控制器及資料擷取系統，動力供給系統、測速系統、撞擊桿、入射桿、透射桿及緩衝系統等部份所組成。其中控制系統發射撞擊桿由高壓鋼瓶內填充

氣體之壓力及發射撞擊桿之用。動力系統由空壓機及高壓鋼瓶及槍管組成，主要用於儲存發射撞擊桿達到預定的氣體壓力速度及引導撞擊桿加速之用；入射桿和透射桿在黏貼應變計後，連接惠斯電橋(Wheastone bridge)、訊號放大器與數位式高速示波器後，在撞擊桿撞擊入射桿後裝產生一維入射波到達試體後產生反射波和透射波。

假設試體在撞擊過程中保持一維波傳應力狀態，通過應變片等可紀錄入射桿、透射桿中應變隨時間變化的曲線，也就得到試體兩端的應力、應變隨時間變化的過程，在經過簡單計算，可以反算試體材料的應力應變關係曲線。測試紀錄的入射、反射和透射脈衝分別用  $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_t$  表示。假設試件內的應力都相等，根據一維波傳理論假設作用於試體兩端之應力是相同且均勻分佈時，則  $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$ ，因此得到試體應力  $\sigma_s$ 、應變  $\varepsilon_s$  及應變率  $\dot{\varepsilon}_s$  分別為下列方程式：

$$\sigma_s = \frac{A}{A_0} E \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = -\frac{2C}{l_s} \int_0^1 \varepsilon_r dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = -\frac{2C}{l_s} \dot{\varepsilon}_r \quad (3)$$

式中， $E$  為入射桿透射桿彈性模量， $A$  為透射桿端直徑， $A_0$  為試體直徑， $C$  為試體彈性縱波波速， $l_s$  為試體長度。

對於各彈性桿之性質如下所述：

### 1. 撞擊桿

本研究所採用之桿徑為 50mm，桿長採用 500 mm，彈性模數為 212.8 GPa，材料之密度為 7830 kgf/m<sup>3</sup>。

## 2. 入射桿與透射桿

入射桿與透射桿同樣為 50mm 之鋼值圓桿，桿長為 1600mm，材料為 ANSITYPY 工具鋼密度為  $7800 \text{ kgf/m}^3$ ，彈性模數為 212.8 GPa。

## 3. 應變片

在使用應變片進行暫態應變脈衝訊號量測，主要要使用較小的箔式應變片量測上高頻的應變脈衝應變時，應變片所反應之應變量為其基長(gage length)範圍內應變量的平均值。因此為了降低誤差，本研究採用 KYOWA 所生產的應變片，基長為 5 mm，電阻為  $120\Omega$ ，訊號上升時間約  $0.89 \mu\text{s}$ ，符合試驗研究所需。此外，實驗中的 DVS 三芯導線有良好的包覆，可隔絕外部雜訊，可讓實驗中由於撞擊桿及發及飛行過程中產生較大的爆音和雜訊，完整紀錄量測到應變脈衝。

## 3. 結果分析與討論

### 3.1 破壞形態

在 SHPB 動態力學試驗中，活性粉混凝土在無添加鋼纖維時，當撞擊桿速率越高，所產生之碎塊愈小，而隨著鋼纖維含量增加，由於鋼纖維之橋接作用，試體在高速衝擊之下，使得碎塊比無添加鋼纖維時還大，RPCF3 之破壞型態如圖 3~圖 6 所示。

試驗中，試體主要受一維衝擊壓縮，動態破壞的形式一般以多點裂縫擴展，主要因為主裂縫的擴展使其周圍的應力得到了鬆弛，這樣就抑制了周圍微小裂縫的擴展，使得主導破壞機制為斷裂多點，因此衝擊能量被試體內部大量的微裂縫和弱面吸收，造成多點微裂紋同時起裂，這些微裂縫和弱面開裂，貫穿、削弱材料的強度，直到破壞，這可以用 RPCF0 破壞而得到驗證。當子彈速度高達  $30\text{m/s}$ ，混凝土破壞的試體尺寸會越小，這解釋裂縫和弱面越多，開裂的微裂縫和弱面的尺寸越小，吸收的能量也越多，相

對的，當添加鋼纖維含量會提高強度，破壞後的活性粉混凝土也因鋼纖維的加入提高整體的強度和韌性，破壞的形式也因鋼纖維含量的增加後耐衝擊的原因，裂紋較小，RPC 混凝土破壞的試體尺寸會越大。

### 3.2 高溫動態力學試驗

對於動態試驗之混凝土力學試驗，本研究採用分離式霍普金森壓桿在不同衝擊速度下進行，實驗時每一組準備 4 個在不同的壓力下進行衝擊試驗，對於不同每立方公斤氣體壓力下，分別給予 P2、P4、P6 及 P8 的編號，並以根據一維波傳理論，當兩桿同軸撞擊時，桿內會產生一矩形應力方波，而方波的波長是撞擊桿的兩倍，而應力與撞擊速度間的關係是  $\sigma = \rho CV/2$ 。桿上實驗資料均是透過數位示波器進行紀錄，取樣率為 100MHz。其中圖 7 為入射桿與透射桿量測到的波形，其三個波形為入射波(incident wave)、反射波(reflected wave)和透射波(transmitted-wave)，分析三波之歷時反應進行分離後，帶入(1)-(3)式進行各組應力、應變、及應變率及衝擊速度之計算。在各壓力下衝擊速度與應變率如表 2~表 5 所示，在 P2 壓力下，撞擊桿之平均衝擊速度約為  $12\text{m/s}$ ，而試體之應變率為  $300/\text{s}$ ；在 P4 壓力下，撞擊桿之平均衝擊速度約為  $18\text{m/s}$ ，而試體之應變率為  $600/\text{s}$ ；在 P6 壓力下，撞擊桿之平均衝擊速度約為  $24\text{m/s}$ ，而試體之應變率為  $800/\text{s}$ ；在 P8 壓力下，撞擊桿之平均衝擊速度約為  $30\text{m/s}$ ，而試體之應變率為  $1000/\text{s}$ 。

### 3.3 高溫後動態應力-應變曲線特性

RPC 在高溫後之動態應力-應變曲線如圖 8~23 所示，對於不同鋼纖維含量之活性粉混凝土，溫度在  $200^\circ\text{C}$  到  $400^\circ\text{C}$  範圍內，抗壓強度有明顯提升，之後隨作用溫度的增

加抗壓強度降低，而峰值應變隨溫度增加有提升趨勢，到溫度 700°C 時趨緩，彈性模數則隨著作用溫度增加而遞減。

### 3.4 抗壓強度

對於活性粉混凝土在不同高溫作用後，抗壓強度之變化如表 2~表 5，抗壓強度在作用溫度於 200°C 到 400°C 強度有明顯提昇趨勢，而隨著鋼纖維體積含量增加，強度也有些許提升，但添加至 3% 時強度提升並不明顯，而抗壓強度隨著衝擊桿之衝擊速度提升，強度有增加趨勢，當氣體壓力達每立方 8 公斤時強度增加趨緩。

### 3.5 峰值應變

活性粉混凝土在高溫作用後，經由試驗結果如表 2~表 5，隨著作用溫度提高，峰值應變於每立方 2 公斤氣體壓力下應變增加幅度最大，而隨著壓力公斤數提高，作用溫度增加峰值應變提升並不明顯，在不同作用溫度下，隨著鋼纖維含量增加峰值應變，也有增加之趨勢；而隨著不同衝擊桿之速度提升，在常溫情況下，峰值應變有增長趨勢，其於作用溫度無明顯變化。

### 3.6 彈性模數

活性粉混凝土受高溫作用後，其彈性模數仍依據 ASTM C469 規定求得，其定義為：實測應力-應變曲線上 40% 抗壓強度與  $5 \times 10^{-5}$  所對應之應力之割線模數。經由試驗

- [1] 張孝全，「纖維在混凝土上的應用」，台灣人纖工業會刊，第 13 卷 2 期，頁 55-61(2000)。
- [2] 許哲嘉，「高性能混凝土之研究」，國立交通大學材料科學與工程研究所碩士論文(1995)。
- [3] Dugat, J., and Roux, N., "Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes", Vol. 29, pp. 233-240 (1996).
- [4] Chan, Y. N., Peng, G. F., and Anson, M.,

結果如表 2~表 5，可看出活性粉混凝土之受到不同高溫作用後，在動態力學試驗中，彈性模數隨著溫度增加而逐漸降低，而在應變速率部份，割線彈性模數隨著應變速率增加而上升，而初始彈性模數則變化不大，Bischoff[22]提出應變率之割線模數隨應變率的增加而上升，而初始彈性模數則不受應變率之影響，另外邱高棋[19]認為在高應變率的外力作用下，因作用時間極短，無法尋求最佳途徑，只好就近向較強之界面或骨材顆粒延伸，導致彈性模數有稍微增加之趨勢。

## 4. 結論

本試驗利用 SHPB 針對不同高溫作用後活性粉混凝土(RPC)做力學試，研究結論如下：

1. 活性粉混凝土受不同高溫作用後，溫度在 200°C 到 400°C 範圍內，抗壓強度有明顯提升，之後隨作用溫度的增加抗壓強度下降。
2. 峰值應變於每立方 2 公斤氣體壓力下之應變增加幅度最大，而隨著壓力公斤數提高，作用溫度增加峰值應變提升並不顯著。
3. 活性粉混凝土之受到不同高溫作用後，在動態力學試驗中，彈性模數隨著溫度增加而逐漸降低，而在應變速率部份，割線彈性模數隨著應變速率增加而上升，而初始彈性模數則變化不大。

## 參考文獻

- “Residual and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperature”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, pp. 23-27 (1999).
- [5] Reis, B.C., Tadeu, A.J.B., and Rodrigues, C., “High-temperature compressive strength of steel fiber high-strength concrete”, *J. Material in Civil Engineering*, Vol.13(3), pp. 230-234 (2001).

- [6] Chen, B., and Liu, J., “Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1065-1069 (2004).
- [7] Li, M., Chung, X. Q., and Wei, S., “Mechanical properties of high-strength concrete after fire”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1001-1005 (2004).
- [8] Poon, C. S., Shui, Z. H., and Lam, L., “Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperature”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 2215-2222 (2004).
- [9] Georgli, B., and Tsakiridis, P. E., “Microstructure of fire-damaged concrete. a case study”, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 27, pp. 255-259 (2005).
- [10] Husem, M., “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete”, *Fire Safety Journal*, Vol. 41, pp. 155-163 (2006).
- [11] Lau, A., and Anson, M., “Effect of high temperatures on high performance steel fiber reinforced concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1698-1707 (2006).
- [12] Lea, F. M., “Cement research retrospect and prospect”, Proc. 4th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, pp. 5-8, Washington, DC (1960).
- [13] Arioiz, O. “Effects of elevated temperatures on properties of concrete”, *Fire Safety Journal*, Vol. 42, pp. 516-522 (2007).
- [14] Sideris, K. K., Manita, P., and Chaniotakis, E., “Performance of thermally damaged fiber reinforced concretes”, *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.1232-1239 (2009).
- [15] 鄭慶鴻，「活性粉混凝土於高溫下行為研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文(2001)。
- [16] 林淑蘭，「活性粉混凝土補強混凝土構件對火害與凍融之測試研究」，朝陽科技大學營建工程碩士論文(2005)。
- [17] 陳佑松，「活性粉混凝土補強混凝土構件在火害和凍融循環之耐久性研究」，朝陽科技大學營建工程碩士論文(2005)。
- [18] Lennon A.M., and Ramesh K.T., “A technique for measuring the dynamic behavior of materials at high temperatures”, *International Journal of Plasticity*, Vol. 14(12), pp. 1279-1292 (1998).
- [19] 邱高棋，鋼纖維混凝土在高溫高應變率下的力學行為，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文(1993)。
- [20] Richard, P., and Cheyrezy, M., “Composition of reactive powder concretes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 1501-1511 (1995).
- [21] 鄭瑞濱，「活性粉混凝土構件之工程性質研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文(2003)。
- [22] Bischoff, P.H. and Perry, S.H. “Compressive Behaviour of Concrete at High Strain Rates”, *Materials and Structures*, Vol.24 (144), pp. 425-450 (1991).

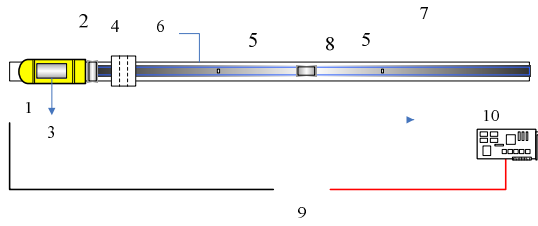


圖 1. SHPB 實驗設備裝置

- 1：高壓氮器； 2：撞擊桿引導槍； 3：撞擊桿； 4：測速裝置； 5：應變計； 6：入射桿
- 7：透射桿； 8：試體； 9：數位示波器；
- 10：控制器及資料擷取、分析系統

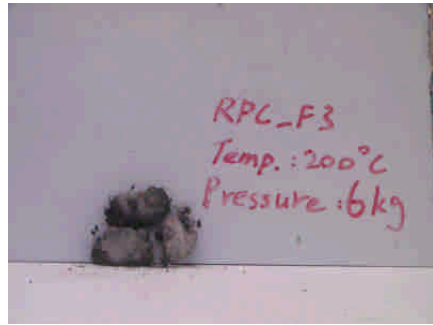


圖 5. RPCF3-T200-P6 破壞情形



圖 3. RPCF3-T200-P2 破壞情形

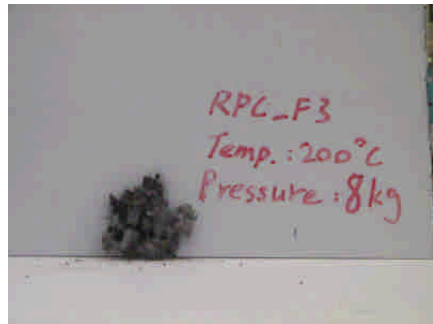


圖 6. RPCF3-T200-P8 破壞情形

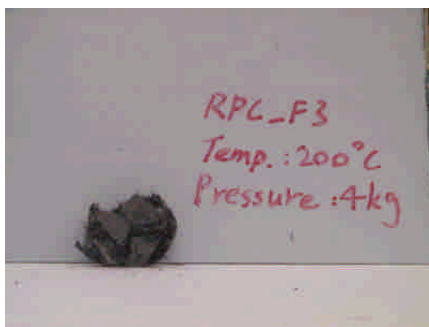


圖 4. RPCF3-T200-P4 破壞情形

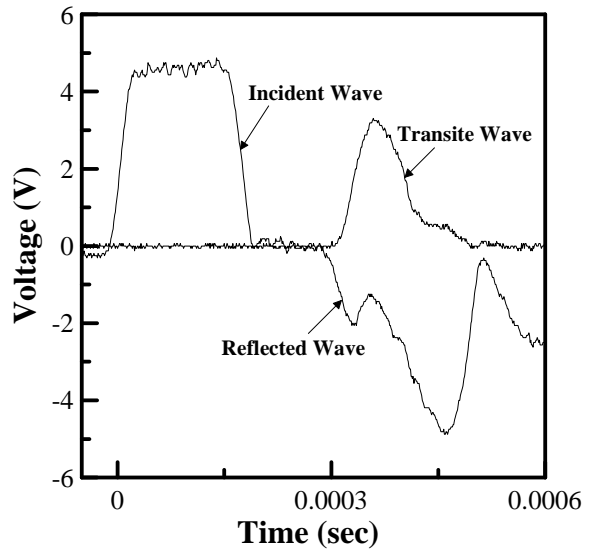


圖 7. 入射桿與輸出桿上量測之應變訊號

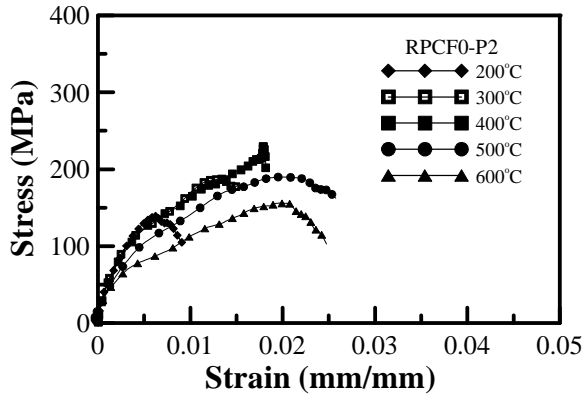


圖 8. RPCF0 在 P2 之應力-應變曲線

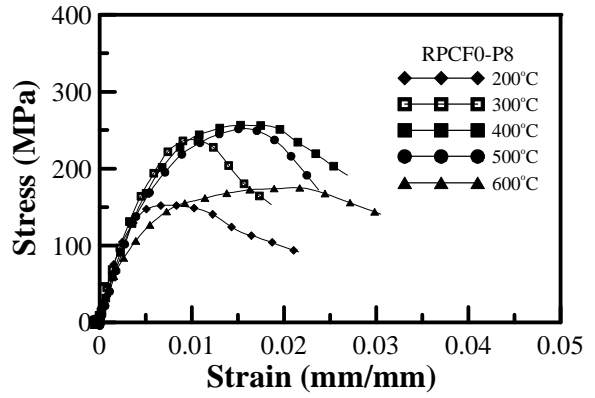


圖 11. RPCF0 在 P8 之應力-應變曲線

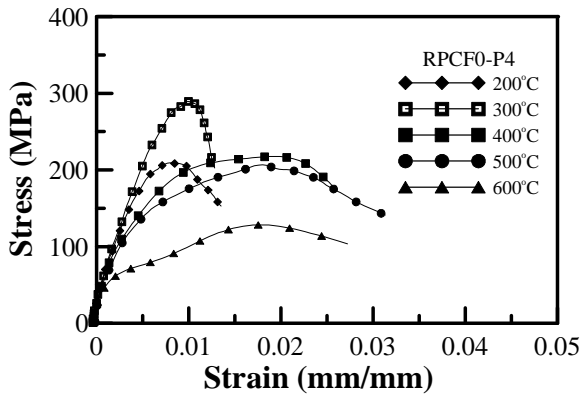


圖 9. RPCF0 在 P4 之應力-應變曲線

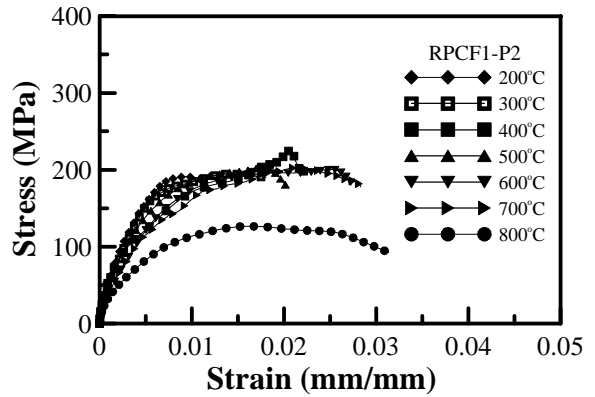


圖 12. RPCF1 在 P2 之應力-應變曲線

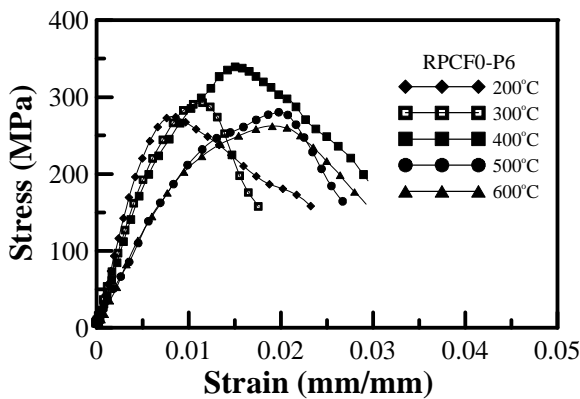


圖 10. RPCF0 在 P6 之應力-應變曲線

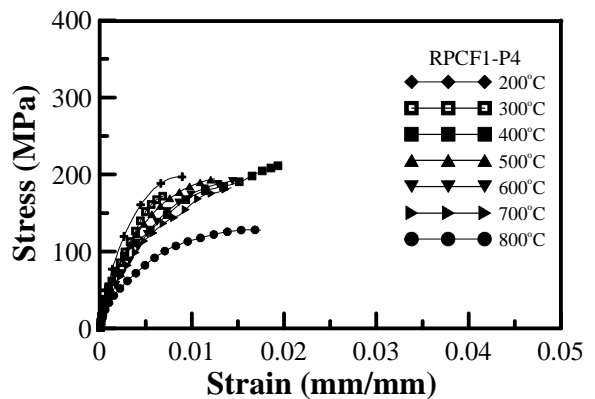


圖 13. RPCF1 在 P4 之應力-應變曲線



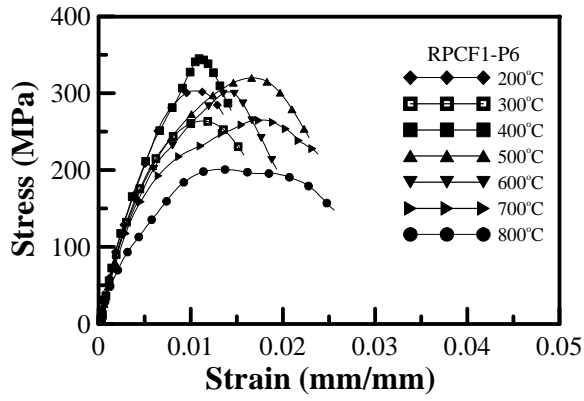


圖 14. RPCF1 在 P6 之應力-應變曲線

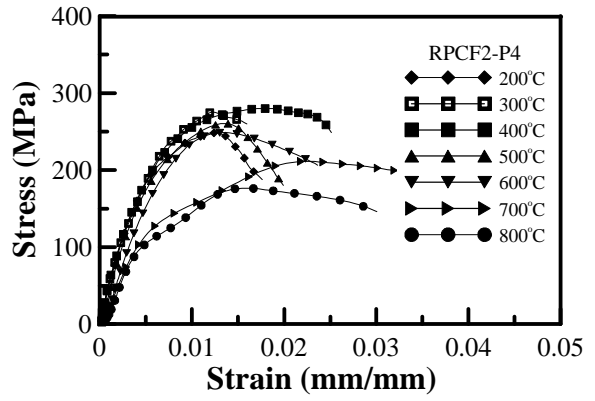


圖 17. RPCF2 在 P4 之應力-應變曲線

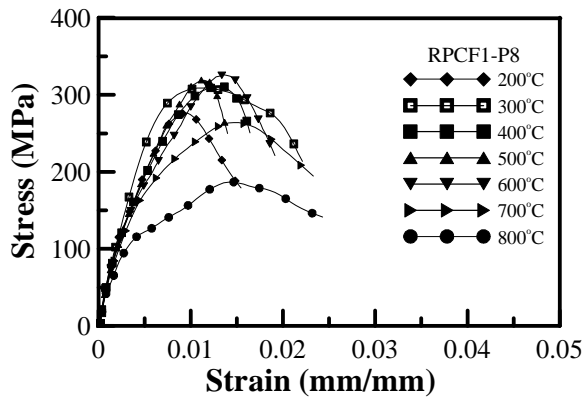


圖 15. RPCF1 在 P8 之應力-應變曲線

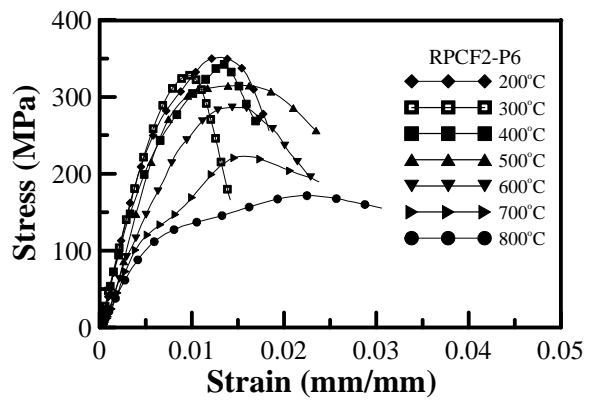


圖 18. RPCF2 在 P6 之應力-應變曲線

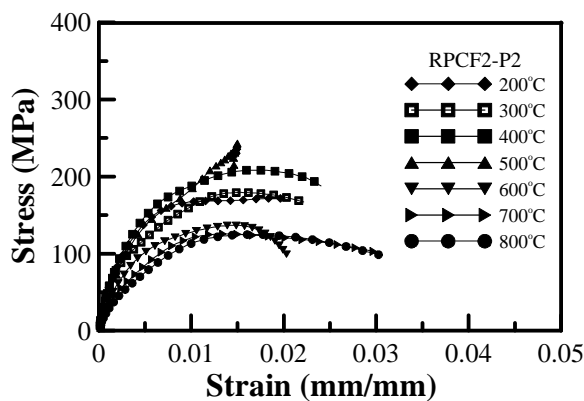


圖 16. RPCF2 在 P2 之應力-應變曲線

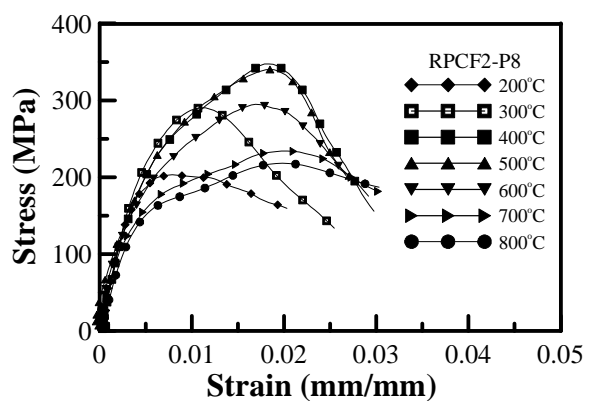


圖 19. RPCF2 在 P8 之應力-應變曲線

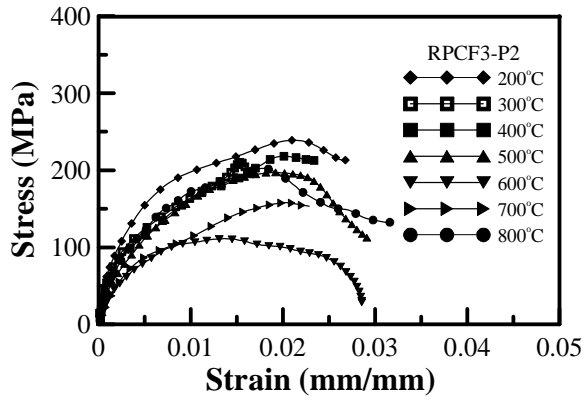


圖 20.RPCF3 在 P2 之應力-應變曲線

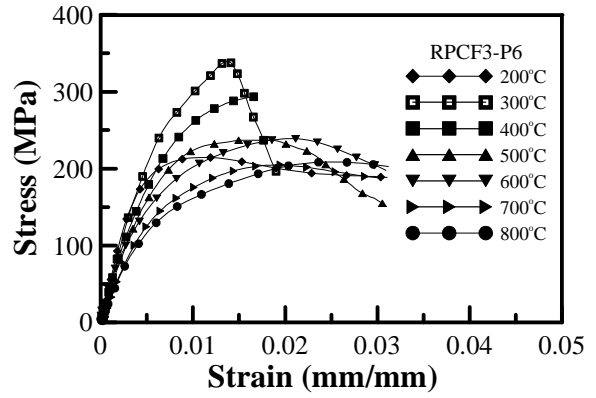


圖 22.RPCF3 在 P6 之應力-應變曲線

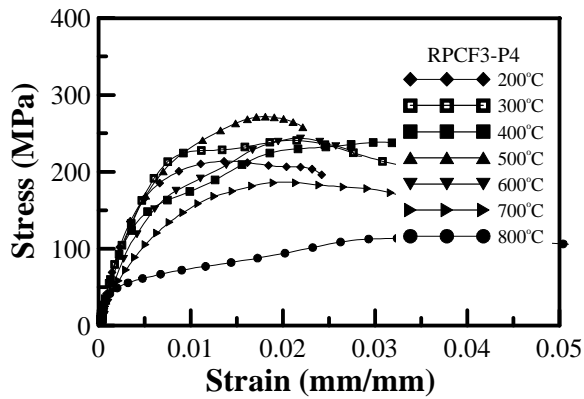


圖 21.RPCF3 在 P4 之應力-應變曲線

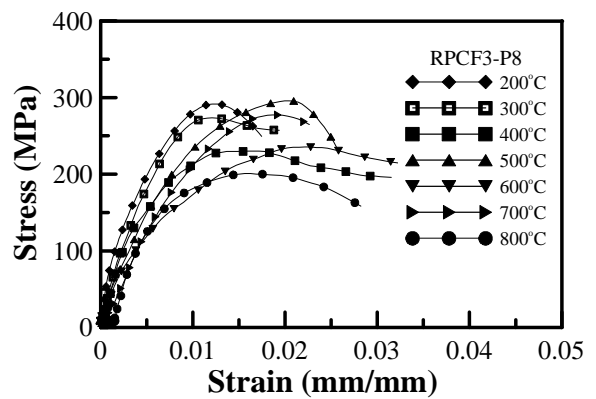


圖 23.RPCF3 在 P8 之應力-應變曲線

1. RPC 配比表 (kg/m<sup>3</sup>)

試體編號	水膠比	水	水泥	矽灰	石英粉	石英砂	強塑劑	鋼纖維(體積)
RPCF0	0.19	180	714	216	252	944	36	0 %
RPCF1	0.19	180	714	216	252	918	36	1 %
RPCF2	0.19	180	714	216	252	891	36	2 %
RPCF3	0.19	180	714	216	252	865	36	3 %

表 2. RPCF0 高溫動態力學性質

溫度 (°C)	壓力 (kg/m <sup>3</sup> )	峰值應力 (MPa)	峰值應變	楊氏係數 (GPa)	衝擊速度 (m/s)	應變率 (1/s)
200	2	137.46	0.006	44.99	□ 12m/s	□ 300/s
300	2	186.03	0.013	39.60		
400	2	227.63	0.018	31.91		
500	2	188.30	0.019	26.24		
600	2	154.32	0.020	23.79		
200	4	206.97	0.008	47.49	□ 18m/s	□ 600/s
300	4	287.04	0.010	44.40		
400	4	214.58	0.018	41.68		
500	4	204.33	0.018	37.48		
600	4	126.21	0.018	31.53		
200	6	268.31	0.008	50.10	□ 24m/s	□ 800/s
300	6	286.49	0.011	41.67		
400	6	332.95	0.015	38.27		
500	6	274.15	0.020	24.16		
600	6	256.07	0.018	24.98		
200	8	152.49	0.007	58.84	□ 30m/s	□ 1000/s
300	8	237.80	0.009	49.65		
400	8	256.54	0.015	42.94		
500	8	252.29	0.015	40.86		
600	8	175.22	0.020	41.16		

表 3. RPCF1 高溫動態力學性質

溫度 (°C)	壓力 (kg/m <sup>3</sup> )	峰值應力 (MPa)	峰值應變	楊氏係數 (GPa)	衝擊速度 (m/s)	應變率 (1/s)
200	2	191.07	0.009	46.39	□ 12m/s	□ 300/s
300	2	194.98	0.014	41.24		
400	2	224.30	0.021	37.99		
500	2	202.95	0.018	38.97		
600	2	200.29	0.025	28.64		
700	2	202.65	0.022	27.48		
800	2	126.71	0.016	24.13		
200	4	237.08	0.011	45.41	□ 18m/s	□ 600/s
300	4	263.98	0.013	36.62		
400	4	253.79	0.015	39.32		
500	4	243.14	0.017	25.49		
600	4	262.72	0.016	27.99		
700	4	227.84	0.020	25.72		
800	4	170.94	0.016	19.83		
200	6	300.03	0.011	52.96	□ 24m/s	□ 800/s
300	6	272.49	0.011	51.35		
400	6	341.77	0.010	51.45		
500	6	316.63	0.016	46.17		
600	6	298.64	0.014	45.66		
700	6	261.75	0.017	44.47		
800	6	197.23	0.012	34.44		
200	8	272.78	0.009	57.10	□ 30m/s	□ 1000/s
300	8	305.43	0.011	56.80		
400	8	307.49	0.013	50.47		
500	8	315.49	0.011	48.43		
600	8	322.25	0.013	48.41		
700	8	260.64	0.015	46.73		
800	8	183.45	0.014	41.11		

表 4. RPCF2 高溫動態力學性質

溫度 (°C)	壓力 (kg/m <sup>3</sup> )	峰值應力 (MPa)	峰值應變	楊氏係數 (GPa)	衝擊速度 (m/s)	應變率 (1/s)
200	2	165.30	0.018	46.89	□ 12m/s	□ 300/s
300	2	172.78	0.015	43.54		
400	2	201.79	0.017	42.93		
500	2	236.54	0.015	33.32		
600	2	130.11	0.014	29.57		
700	2	119.06	0.013	22.68		
800	2	118.32	0.016	17.40		
200	4	244.28	0.012	49.10	□ 18m/s	□ 600/s
300	4	270.98	0.012	48.83		
400	4	276.01	0.017	48.64		
500	4	256.41	0.013	43.49		
600	4	244.68	0.013	33.24		
700	4	207.41	0.022	26.18		
800	4	172.57	0.016	24.84		
200	6	346.50	0.013	54.14	□ 24m/s	□ 800/s
300	6	323.20	0.010	53.20		
400	6	328.28	0.013	49.74		
500	6	310.57	0.011	39.07		
600	6	281.63	0.014	31.55		
700	6	217.83	0.015	27.66		
800	6	166.76	0.022	23.17		
200	8	194.82	0.008	56.88	□ 30m/s	□ 1000/s
300	8	282.19	0.011	54.27		
400	8	339.40	0.018	48.49		
500	8	331.39	0.018	50.88		
600	8	286.70	0.017	52.12		
700	8	226.08	0.020	50.00		
800	8	213.67	0.019	40.70		

表 5. RPCF3 高溫動態力學性質

溫度 (°C)	壓力 (kg/m <sup>3</sup> )	峰值應力 (MPa)	峰值應變	楊氏係數 (GPa)	衝擊速度 (m/s)	應變率 (1/s)
200	2	234.85	0.021	49.70	□ 12m/s	□ 300/s
300	2	206.34	0.015	43.90		
400	2	214.37	0.020	36.49		
500	2	198.47	0.018	34.82		
600	2	193.13	0.019	27.50		
700	2	107.06	0.013	26.76		
800	2	153.91	0.020	22.55		
200	4	205.60	0.014	51.40	□ 18m/s	□ 600/s
300	4	232.58	0.020	45.16		
400	4	230.31	0.030	43.25		
500	4	263.44	0.017	40.37		
600	4	235.37	0.021	31.97		
700	4	178.20	0.019	23.47		
800	4	105.04	0.031	22.75		
200	6	210.86	0.011	56.99	□ 24m/s	□ 800/s
300	6	335.58	0.013	47.77		
400	6	292.75	0.019	41.52		
500	6	233.36	0.015	38.39		
600	6	235.28	0.020	39.70		
700	6	200.99	0.019	30.00		
800	6	204.71	0.023	27.77		
200	8	285.76	0.012	65.69	□ 30m/s	□ 1000/s
300	8	267.67	0.012	46.36		
400	8	224.38	0.016	47.18		
500	8	289.76	0.020	32.76		
600	8	229.52	0.022	28.34		
700	8	271.23	0.018	26.14		
800	8	194.76	0.015	26.14		

## DYNAMIC MECHANICS BEHAVIOR AND FAILURE MODES OF REACTIVE POWDER CONCRETE AFTER ELEVATED TEMPERATURE

Yuh-Shiou Tai<sup>1</sup> Huang Hsing Pan<sup>2</sup> Ying Nien Kung<sup>2</sup> Chi Lin Tsai<sup>2</sup>  
Rei Hung Chen<sup>1</sup> Tin Jei Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering ROC Military Academy Kaohsiung, Taiwan 83000,  
R.O.C.

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering Kaohsiung University of Applied Sciences Kaohsiung,  
Taiwan 80778, R.O.C.

### ABSTRACT

When the buildings are under earthquakes and the impact of projectile that may induce the fire, high temperature due to the fire will cause a certain decrease of mechanical properties to the building. This research is to investigate the stress-strain relationship of RPC in the dynamic loading after elevated temperature. The cylinder specimens of RPC with  $\phi 50 \times 25$  mm were examined at the room temperature and after  $200^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ . Results show that the residual compressive strength of RPC after heating  $200^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$  will increase obviously, but decrease dramatically when the temperature was heated after  $400^{\circ}\text{C}$ . The residual peak strains have a clear increase under  $2\text{kg}/\text{m}^3$  pressure, however, the peak strain does not clearly change when the temperature and the pressure increase. The residual elastic modulus will decrease by the temperature increasing. In the part of strain rate, the residual elastic modulus will rise by the strain rate increasing, and the initial elastic modulus does not clearly change. This research is to investigate the different fiber volumes of RPC and bring up dynamic mechanic property in the mechanic behavior after elevated temperature. Those formulae can be as the reference for the industrial applications and design.

**Keywords:** elevated temperature, reactive powder concrete, impact test, spilt-Hopkinson

