

活性粉混凝土在不同應變速率下的應力-應變行為

戴毓修¹ 郭昱廷² 潘煌鏗³

¹陸軍軍官學校土木工程學系 副教授

²高雄應用科技大學土木工程系 碩士生

³高雄應用科技大學土木工程系 教授

摘要

活性粉混凝土摻入體積 1%、2%和 3%的鋼纖維，採用直徑 50mm 的分離式霍普金森法壓桿，對鋼纖維混凝土試體進行衝擊加載試驗，試驗的應變率範圍從 $10^2/s$ ~ $10^3/s$ ，獲得不同應變率下試體的動態應力-應變歷程曲線。實驗結果顯示衝擊動態加載下，除了在低應變率 341/s 衝擊的鋼纖維 3% 試體未達到破壞前就已經卸載，導致動態強度比擬靜態強度低外，抗壓強度會隨著應變率增加而增強，且鋼纖維混凝土在達到應力峰值後的韌性也會有所提升。另外，隨著應變率增加而活性粉混凝土吸收的能量越多，顯示在應力-應變反應的破壞強度越高，因而破壞應變也越大。

關鍵詞：應變率，衝擊試驗，分離式霍普金森，鋼纖維混凝土

Abstract

Reaction powder concrete (RPC) with 1 to 3 % volume fraction of steel fibers was tested by $\Phi 50\text{mm}$ spilt-Hopkinson pressure bar (SHPB) to examine its impact stress-strain behavior, where applied strain rate is at $10^2/s$ ~ $10^3/s$. Experimental results show that the compressive strength and the toughness of RPC increase if the applied strains increase unless the lower strain rate at 341/s applied to 3% steel fiber of RPC which dynamic compressive strength is even lower than the static strength. As the applied strains increase, from the stress-strain curves of RPC, the peak strength and the fracture strain also increase because of the more energy absorption.

Keywords: strain rate, impact test, spilt-Hopkinson test, fiber reinforced concrete.

一、前言

鋼纖維高強混凝土具抗衝擊、抗爆炸等優良的動力性能。以建築領域到重要的工程領域(如核電廠、碉堡、大型水庫大壩、飛機場跑道等)都有廣泛的應用。鋼纖維高強混凝土衝擊加載下力學性能的試驗研究，可獲得其動態條件下的特性的應力-應變全歷程曲線，因此具有重要的理論意義和軍事、民用價值。Lindholm [1]曾歸納了動力試驗的狀況如圖 1 所示，對於一般擬靜態試驗應變速率範圍約在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 之間，地震所引發範圍約 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，而此對於一般擬靜態試驗一般採用油壓式或電磁荷重試驗機進行，然而衝擊或爆炸所產生的應變率似在 $10^0 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 或更高，對此範圍應變率下一般油壓或電磁區動方式無法有效達到實驗加載方式，故多使用落重式試驗(drop weight impact tester)和氣動式衝擊試驗機進行。

分離式霍普金森壓桿(spilt-Hopkinson pressure bar, SHPB)即屬於氣動式衝擊試驗機，此設備最早是由 Hopkinson 在 1914 年提出，當初僅能測量衝擊荷重下的脈衝波形，1949 年 Kolsky [2]將桿狀分成兩節，並將試體放置其中，而這設備可用於量測到衝擊荷重下應力-應變的關係，此試驗方法簡單，使得 SHPB 在半世紀以來廣泛的被應用於材料的動態性質試驗。

在系統研究混凝土動態力學性能 20 多年，為發展方面的研究，歐美等國家已先後建起了 $\Phi 51\text{mm}$ 、 $\Phi 76\text{mm}$ 、 $\Phi 100\text{mm}$ 的 SHPB 試驗裝置。Tedsco *et al* [3]等利用 $\Phi 51\text{mm}$ SHPB 裝置對混凝土進行動態試驗，認為混凝土是應變率敏感材料，而且應變率有臨界值，超過該值，材料強度對應變率非常敏感，強度隨應變率呈線性增長；而 Rose *et al* [4]同樣利用 SHPB 針對 $\Phi 51\text{mm} \times 51\text{mm}$ 之圓柱混凝土試體，在不同齡期跟不同養護方式，對應變率為 $10^0 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 之範圍進行研究。本文採用 $\Phi 50\text{mm}$ 分離式霍普金森壓桿針對鋼纖維活性粉混凝土(RPC)之動態特性進行研究。

二、SHPB 試驗設備及分析

SHPB 試驗設備之配置如圖 2 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 ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_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 $\epsilon_i + \epsilon_r = \epsilon_t$ ，因此得到試體應力 σ_s 、應變 ϵ_s 及應變率 $\dot{\epsilon}_s$ 分別為下列方程式：

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

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

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

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/m³。

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 ANSI TYPY 工具鋼密度為 7800 kgf/m³，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 120Ω，訊號上升時間約 0.89 μs，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。

三、試體準備與實驗步驟

3.1 材料之使用

本研究為探討鋼纖維混凝土之動態特性，材料使用了 ASTM II 型波特蘭水泥；石英砂 (105~420μm)；石英粉(5~25μm)；矽灰(0.1~0.2μm)；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，拌和添加了強塑劑，其化學成分為丙烯酸接枝聚合陰離子型高分子界面活性劑，試體配比如表 1 所示，各組試體之差異為鋼纖維體積率含量 0%、1%、2%、3%的變化，分別給予 SCF0、SCF1、SCF2 及 SCF3 的編號。

3.2 試體養護與擬靜態力學試驗

活性粉混凝土養護過程中以高溫養護方式可在七天內強度即可達到最高峰之強度[6]，可有效節省時間，因此在試體灌置在 $50\Phi \times 100\text{mm}$ 、 $50\Phi \times 25\text{mm}$ 鋼模完成後，兩天後拆模進行溫度 90°C ，相對溼度 100% 的水中養護 7 天，試體拿出放置室溫下 24 小時後進行靜、動態力學實驗測試。

擬靜態力學試驗僅抗壓試驗，抗壓試體為 $50\Phi \times 100\text{mm}$ 的圓柱試體，每一組取五顆試體進行抗壓，依據 CNS 1232 之規定以 1 mm/min 之加載速率進行加壓，直到試體破壞為止。

四、結果與討論

4.1 加載至破壞所需時間

對於各組試體在擬靜態和動態下力學破壞所需時間如表 2 所示，SHPB 高應變速率 $3 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3/\text{s}$ 範圍等應變速率下，顯示破壞所需時間會隨著應變速率增加而減少。在擬靜態應變速率 $5.5 \times 10^{-5}/\text{s}$ 時，0% 及 1%、2%、3% 破壞所需時間仍需 2.9~3.9 分鐘，高應變速率 $3 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3/\text{s}$ 等範圍更縮到 $0.53 \sim 1.32\ \mu$ 秒在這是由於應變速率增加使得加壓速度增快，試體需在短時間內吸收極大的能量，造成試體破壞時間縮短，如表 3 所示。

當 RPC 鋼纖維體積含量增加時，對於破壞所需時間亦有增加效果，但在 3% 時間則會縮短，這是由於當 3% 時，RPC 材料的拌合水泥砂漿量少，鋼纖維對整體混凝土強度增加不多，使得 RPC 基複合材料內部空隙增多會影響材料強度，因此所需破壞時間將會縮短。

4.2 加載至破壞所需時間

SHPB 高應變速率 $3 \times 10^2/\text{s} \sim 1 \times 10^3/\text{s}$ 範圍等應變速率下，顯示破壞所需時間會隨著應變速率增加而減少。在擬靜態應變速率 $5.5 \times 10^{-5}/\text{s}$ 時，0% 及 1%、2%、3% 破壞所需時間仍需 2.9~3.9 分鐘，高應變速率 $3 \times 10^2/\text{s} \sim 1 \times 10^3/\text{s}$ 等範圍更縮到 $0.53 \sim 1.32\ \mu$ 秒，這是由於應變速率增加使得加壓速度增快，試體需在短時間內吸收極大的能量，造成試體破壞時間縮短，如表 3 所示。

當 RPC 鋼纖維體積含量增加時，對於破壞所需時間亦有增加效果，但在 3% 時，時間則會縮短，這是由於當 3% 時，RPC 材料的拌合水泥砂漿量少，鋼纖維對整體混凝土強度增加不多，使得 RPC 基複合材料內部空隙增多會影響材料強度，因此所需破壞時間將會縮短。

4.3 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，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。所

有的動態試驗資料如圖 6~10 及表 3 所示，其中圖 6 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、及應變率之計算。

表 3 和圖 7~10 分別為 SCF0、SCF1、SCF2、SCF3 在不同衝擊速度下，所得到的不圖應變率試體的應力-應變歷程曲線，由於表中發現低應變率衝擊速度下，3%鋼纖維應變率 341/s 的動態的強度較擬靜態的強度還低，且衝擊後的試體表面完好無可見損傷，其所對應的應力-應變曲線關係出現明顯的應變硬化，如圖 10 所示，是由於試體未達到極限破壞就先卸除加載的原因。

以總試驗結果得知，隨著撞擊桿撞擊速度增加，試體的應變率會隨著升高，試體由完好到破裂發展，材料的極限強度也會隨著逐漸增大；試體中最大應力小於 156.88 MPa，試體保持表面完正無損傷，最大應力 167.16 MPa~237.75MPa 範圍時試體產生破裂。試體衝擊破壞強度都大於最大應力擬靜態的強度，其中低應變率與靜態抗壓強度接近。應變率增加時，峰值應力則快速增加，從圖 7、圖 8 鋼纖維 0%、1% 應力-應變看出變速率從 $3 \times 10^2/s \sim 8 \times 10^2/s$ 前段應力-應變曲線會隨著應變速率增加而增加，前段動態彈性模數也相對增加，這主要是鋼纖維混凝土應變率硬化之現象，根據 Bischoff 等[7]的研究，當加載速度高到一定程度時，裂縫擴展速度夠快，則加載過程中可達到平衡的狀態，在 877/s、830/s 應力-應變曲線下降的趨勢，在 1099/s、1056/s 時應力-應變曲線下降的趨勢幅度較大。由圖 9 在鋼纖維 2% 應變速率 274/s 後段的應力-應變曲線上升幅度較大外，之後隨著速率增加應力-應變曲線隨著上升，在圖 10 鋼纖維 3% 各應變速率增加應力-應變曲線會隨著上升，在 876/s 和 978/s 應力-應變曲線增加幅度不大，但從整體看出鋼纖維含量增加曲線幅度會隨著增加。

並將圖 7~圖 10 中不同應變速率下應力-應變曲線最大應力所對應的應變，由圖得知應變皆隨著應變速率的增加而增加，由其在 SHPB 高速衝擊下更是明顯，在 3% 時的應變量的幅度最大，在加載過程中試體快破壞時的變形量會變大。

在 SHPB 衝擊速度下，主要受一維衝擊壓縮，動態破壞的形式一般是以多點裂縫的擴展，主要是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，形成多點微裂紋會同時起裂，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 0% 破壞而得到驗證。

當應變率越高到 877/s，混凝土破壞的試體尺寸會越小，如圖 11 所示，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，所以表現在 RPC 的應力應變的反應上，破壞強度越高，因而破壞應變也越大，相對的，1%、2% 及 3% 之鋼纖維體積含量的破壞形式如圖 12、13、14 所示，當添加纖維含量會提高強度，當破壞後的混凝土也因鋼纖維的加入讓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而耐衝擊的原因，因此混凝土破壞的試體尺寸會越大。

五、結論

本試驗利用 SHPB 針對不同鋼纖維之超高強鋼纖維混凝土(RPC)做力學試驗，實驗項目包含了混凝土的抗壓試驗和 SHPB 衝擊試驗，研究結論如下：

1. 試驗結果顯示活性粉混凝土較傳統混凝土具有更佳的力學特性，加入鋼纖維後，除了抗壓強度會增強，由載重位移曲線歷程顯示更具有極佳的韌性。
2. 在低應變率衝擊下，鋼纖維 3% 的含量應變率 341/s 試體未達到破壞前，就已經卸載所以導致動態強度比擬靜態低。
3. 衝擊實驗的結果則是利用 SHPB 在不同衝擊速度下纖維體機率的實驗而得到，混凝土是一種應變率敏感性材料，由試驗得出隨應變率增加而吸收的能量也越多，所以表現在 RPC 的應力-應變的反應上，破壞強度越高，因而破壞應變也越大。

六、參考文獻

- [1] Lindholm, U.S., "Techniques in Metals Research," Vo.5, Part 1, Interscience, New York (1971).
- [2] Kolsk, H., "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading," Proc. Phy. Soc., B62, pp. 676-700 (1949).
- [3] Tedsco, J.W., Allen, R.C., and Hughes, M.L., "Load Rate Effects on Concrete Compressive Strenght," Proceedings of the sixth Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures, Florida, pp.194-197 (1993).
- [4] Ross, C.A., Tedsco, J.W, and Kuennen, S.T, "Effects of Strain Rate on Concret Strength," ACI Materials Journal, Vol. 92(1), pp. 37-47 (1995).
- [5] 謝孟翰,「超高強高性能混凝土之衝擊力學性質研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所，民國 87 年
- [6] 吳建興,「活性粉混凝土補強混凝土構件與耐久性能之測試研究」，碩士論文，國立朝陽科技大學土木工程研究所，民國 92 年
- [7] Bischoff, P.H., and Perry, SH., "Impact Behavior of Plain Concrete Loaded in Uniaxial Compression," Journal of Engineering Mechanicas, Vol. 121, pp. 685-693 (1995).

表 1 RPC 配比表 (kg/m³)

| 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) |
|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| SCF0 | 0.19 | 180 | 714 | 216 | 252 | 944 | 36 | 0 % |
| SCF1 | 0.19 | 180 | 714 | 216 | 252 | 918 | 36 | 1 % |
| SCF2 | 0.19 | 180 | 714 | 216 | 252 | 891 | 36 | 2 % |
| SCF3 | 0.19 | 180 | 714 | 216 | 252 | 865 | 36 | 3 % |

表 2 RPC 破壞時間

| 鋼纖維體積量 應變速率 | | 0 % | 1 % | 2 % | 3 % |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------|------------|-----------|
| | | $5.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ | 時間(分) | 2.9~3.5 | 3.2~3.4 |
| $\sim 300 \text{ s}^{-1}$ | 時間(μsec) | 0.71~0.73 | 0.76~0.77 | 1.07~1.09 | 1.31~1.32 |
| $\sim 600 \text{ s}^{-1}$ | 時間(μsec) | 1.94~1.96 | 0.64~0.65 | 0.87~0.89 | 0.83~0.84 |
| $\sim 800 \text{ s}^{-1}$ | 時間(μsec) | 0.53~0.53 | 0.53~0.54 | 0.54~0.55 | 0.55~0.57 |
| $\sim 1000 \text{ s}^{-1}$ | 時間(μsec) | 0.72~0.73 | 0.56~0.58 | 0.58~0.59~ | 0.66~0.68 |

表 3 SHPB 擬靜態與動態力學試驗結果

| 編號 | 流度 (cm) | 平均靜態強度 (MPa) | 衝擊速度 (m/s) | 動態抗壓強度 (MPa) | 應變率 (s^{-1}) | 試體破壞情 況 |
|------|------------|-----------------|---------------|-----------------|----------------------------|------------|
| SCF0 | 24.3 | 148.18 | 10.2 | 167.16 | 339 | 破碎 |
| | | | 19.9 | 221.62 | 778 | 破碎 |
| | | | 24.0 | 220.29 | 877 | 破碎 |
| | | | 28.6 | 202.66 | 1099 | 破碎 |
| SCF1 | 23.2 | 153.27 | 11.6 | 175.56 | 197 | 破裂 |
| | | | 22.6 | 195.51 | 595 | 破裂 |
| | | | 24.2 | 204.16 | 830 | 破碎 |
| | | | 28.5 | 150.17 | 1056 | 破碎 |
| SCF2 | 21.6 | 191.72 | 13.1 | 196.26 | 274 | 小破裂 |
| | | | 20.2 | 153.69 | 554 | 破裂 |
| | | | 24.2 | 210.19 | 804 | 破裂 |
| | | | 28.3 | 228.99 | 1039 | 破碎 |
| SCF3 | 20.4 | 174.63 | 12.6 | 156.88 | 341 | 表面完好 |
| | | | 21.1 | 187.02 | 663) | 破裂 |
| | | | 23.8 | 243.71 | 876 | 破裂 |
| | | | 26.6 | 237.75 | 978 | 破碎 |

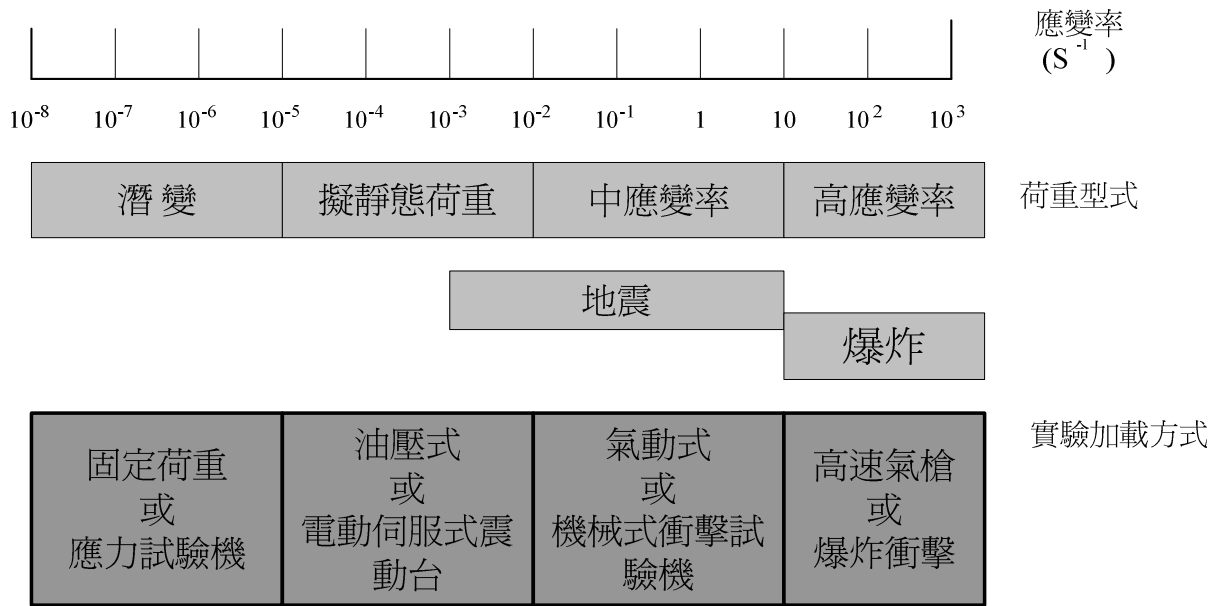


圖 1 材料在不同荷重下之應變率及試驗方法

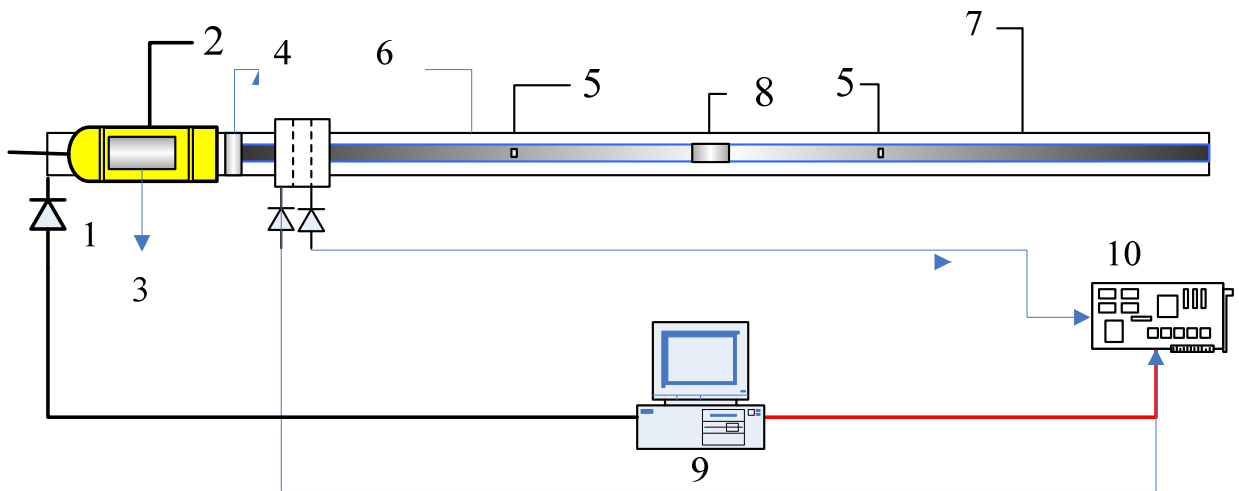


圖 2 SHPB 實驗設備裝置

- 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3 RPC纖維含量0%破壞情形

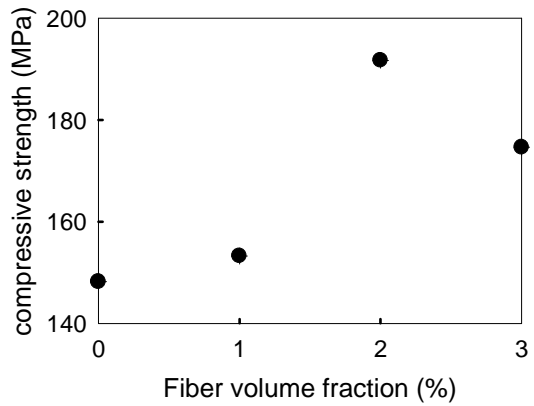


圖4 試體擬靜態下不同鋼纖維體積含量

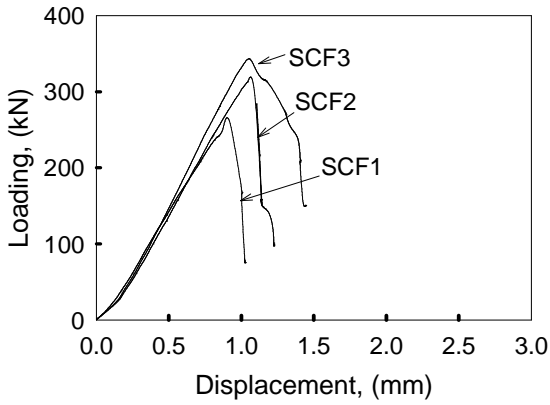


圖5 抗壓試驗載重位移歷程

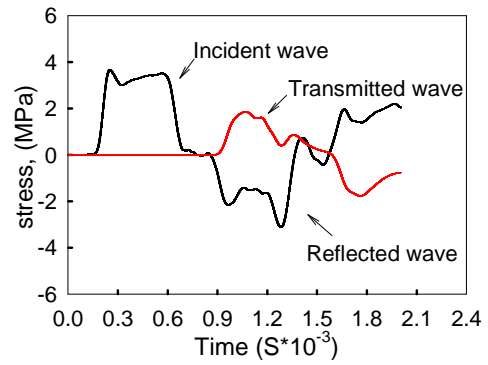


圖6 入射桿與輸出桿上量測之應變訊號

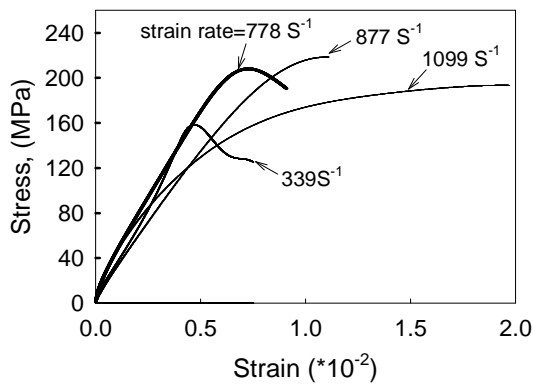


圖7 不同應變率下試體(0%)應力-應變行為

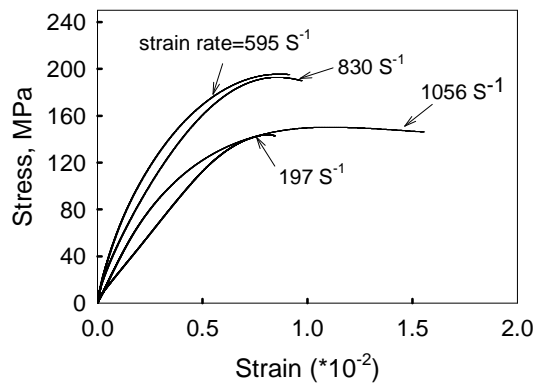


圖8 不同應變率下試體(1%)應力-應變行為

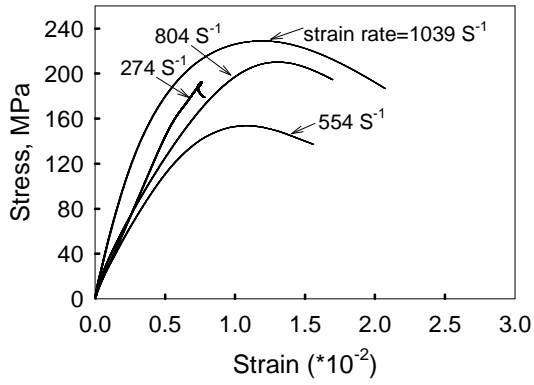


圖 9 不同應變率下試體(2%)應力-應變行為

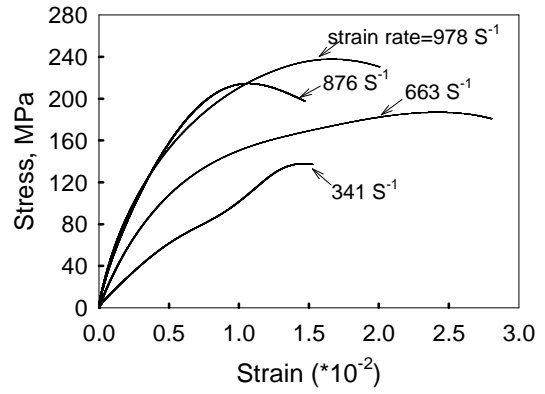


圖 10 不同應變率下試體(3%)應力-應變行為



圖 11 877/s 應變速率之破壞情形(0%)



圖 12 1056/s 應變速率之破壞情形(1%)



圖 13 1039/s 應變速率之破壞情形(2%)



圖 14 978/s 應變速率之破壞情形(3%)