

活性粉混凝土板承受衝擊荷重下破壞模式之研究

湯家智^{*} 陳景文^{*} 戴毓修^{**}

^{*}國立成功大學土木工程研究所 ^{**}陸軍軍官學校土木工程學系

摘 要

活性粉混凝土(RPC)為近年來發展出來的新複合材料,優異之材料性質兼顧了高強度及高性能等特性,其主要是透過特殊的配比及養護方式,除了可以大幅提高混凝土之抗壓強度($\sim 200\text{MPa}$),並在添加少量之鋼纖維後,可有效提高抗壓及抗彎強度、耐衝擊性和韌性,而這也使得軍事防護設施及核電廠圍阻體等重要防護性工程對其應用前景有了更多的期待。因此,本研究主要目的在針對活性粉混凝土靶板承受高速衝擊荷重下之動態反應與破壞模式進行探討,並與普通混凝土靶板之破壞模式進行比較。試驗變數包含了不同衝擊速度下靶板的損傷模式分析,以及添加鋼纖維後的影響等。試驗結果顯示活性粉混凝土靶板相較於普通混凝土靶板而言,因強度大幅提升,導致脆性性質相對增加,同時在添加適量之鋼纖維之後,可有效的提升材料之抗衝擊性能。

關鍵詞: 活性粉混凝土、衝擊試驗、鋼纖維

A Studies of the Failure Mode on Reactive Powder Concrete Plates Subjected to Impact Loading

Chia-Chih Tang^{*}, Jing-Wen Chen^{**}, and Yuh-Shiou Tai^{**}

^{*} Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University

^{**} Department of Civil Engineering, ROC Military Academy

ABSTRACT

The reactive powder concrete (RPC), which is a new composite that has been developed in recent years, is a special mixture that has been cured especially to have a higher compressive strength than concrete ($\sim 200\text{MPa}$). Adding a few steel fibers improves its compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength, its impact-resistance and its toughness. It is thus expected to be used to protect military facilities and nuclear power plants. Accordingly, this paper aims to conduct a study by high-velocity impact experiments to assess the resistance of the ultra-high-strength concrete targets subject to impact. Test variables include the impact velocity and amount of steel fibers added. The experimental results show that RPC plate relatively on normal concrete (NC) plate, because of their higher compressive strength, cause fragility nature to increase relatively, but after adding a small amount of steel fiber, the significant improvement impact resistance was observed in target plates.

Keywords: RPC, impact experiments, steel fiber

一、前言

鋼筋混凝土為目前使用在軍事防護結構之主要材料，為維持平日操演、維修所需，並確保其在受攻擊後仍能保存最佳戰力，如何建構一個堅固而且完善的軍事防護結構體，便是需要考量的重大課題。以往軍事防護工程為了顧及抗炸性能及強度需求，均採用高鋼筋量或加大結構體厚度來進行設計，由於配筋較緻密，使得普通混凝土在澆置、搗實上較為困難，以致於拆模後較易發生蜂窩或強度不足等現象。近年來，各項民生設施因大跨度及高樓層的新型結構物不斷的出現，對工程材料的強度、韌性等亦有了更高的要求，世界各國紛紛開發新混凝土材料，尋求改善普通混凝土因施工不易及耐久性不佳的方法，其中以高強度混凝土及高性能混凝土的開發最能有效改善上述問題且應用範圍亦最廣，並在添加少量之鋼纖維，並藉由與水泥或混凝土基材充份混合後，除了可以阻止遲滯裂縫之產生，提高混凝土的抗疲勞強度，增加抵抗磨損的能力外，更可提升抗拉及抗彎強度、耐衝擊性和韌性，因此鋼纖維混凝土的應用受到學術界及工程實務上的重視[1,2]，除了一般民生及公共工程外，在軍事防護工程之應用上亦對其前景充滿期待。

二、文獻回顧

早在 1980 年代，工程師為了提升傳統混凝土之抗壓、抗彎能力以及改善其易脆性能，因此發展出高強度鋼纖維混凝土，較具代表性的如 Lankard[3]於 1985 年研製出高流動性之灌漿鋼纖維混凝土(SIFCON)，此為一種將流動水泥砂漿澆置事先放置於鋼模版中的鋼纖維骨架的高含量鋼纖維混凝土，其纖維體積率一般為 5%~20%，研究結果顯示 SIFCON 因其高含量之鋼纖維，大幅的提高了混凝土的抗壓、抗拉強度，尤其是韌性性質及其吸收能量之能力均較普通混凝土高出約 60 倍之多。1992 年 Hackman 等[4]在研究了具流動性之灌漿鋼纖維網混凝土(SIMCON)，此種混凝土的基材和施工方法與 SIFCON 相同，其中主要之差異在於鋼纖維網是直接將熔融的鐵水用溶抽法成型後分層放置成網，而鋼纖維網的厚度為 13~50mm，實驗結

果顯示當 SIMCON 中鋼纖維之體積率為 SIFCON 的 12%時，其抗彎強度即可達 SIFCON 的 50%，由於所使用的鋼纖維量減少，因而成本大幅降低。另外，1995 年 Richard 等[5]發表所研製的活性粉混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)，同時依其抗壓強度區分為 RPC200 與 RPC800，對於 RPC 強度提昇之原理，主要在透過配比技術改進及養護方式的突破，使得其混凝土之抗壓強度大幅提昇 170~230 MPa，而 RPC800 則添加鋼骨料，並於凝固前施加 50 MPa 之圍壓力後，強度更可達到 800 MPa。雖因其製作技術特殊，在推廣應用上的難度較大，但是仍已為混凝土之研究開啟了新頁。國內對於 RPC200 在擬靜態荷重下相關之研究，在台灣營建研究院與台灣大學的努力下亦已具有相當多的實績，而在衝擊荷重下的研究則不多[6-10]。混凝土承受衝擊荷重之研究，以美國陸軍所進行的一系列的試驗最具系統與規模，並據此提出了一些經驗公式及設計規範，如 TM5-1300 及 TM 5-855-1 [11,12]，可於防護性結構設計時，用於預估不同衝擊及爆震負荷條件下混凝土局部破壞效應，包括貫入深度(penetration depth)、貫穿極限(perforation limit)及痂落極限(scabbing limit)等，如圖 1.所示[13]。較有系統之研究，於 1976 年 Kennedy[14]對混凝土承受衝擊荷重下局部效應之預估模式進行了整理，並且涵蓋了多組試驗之資料的分析。1980 年 Sliter[15]亦針對中、低速度衝擊(27m/s-312m/s)範圍內之試驗資料進行了分析，並將其與經驗公式進行了比較，兩者得到一致性之結果；1988 年 Brandaes[16]針對飛行器撞擊核子反應爐圍阻體結構進行試驗及分析，作為設計核能電廠之依據。1992 年 Hanchak 等[17]利用尖弧形投射體，針對單軸抗壓強度 48MPa 與 140MPa 的鋼筋混凝土靶板(610×610×178 mm)在不同衝擊速度下，探討其殘餘速度的變化與抗貫穿的能力，研究結果顯示當投射體撞擊靶板的速度在 300~1000 m/sec 時，對於兩種不同強度的靶板，殘餘速度的變化僅有 20%之差異，主要原因在於開坑區(crater region)受剪力與張力的作用，故對抗壓強度的提升並不敏感。

對於高強度纖維強化混凝土的研究方面，1996 年 Dancygier 等[18]針對高強度混凝土承受衝擊荷重進行實驗，研究發現由於 HSC(平均

單軸抗壓強度為 95~110 MPa)相較於普通混凝土(平均單軸抗壓強度為 24~35 MPa)而言,對於抗貫穿能力有明顯的提升,但是由於 HSC 具有較高之易碎性(brittleness),導致依據經驗公式所設計之防護結構承受衝擊荷重作用後,在達到破壞條件後,靶板背面痂落之情況較普通混凝土更為嚴重,因此, Dancygier 建議針對 HSC 添加鋼纖維、鋼絲網等強化材料增加 HSC 之韌性與延展性,以抑制裂縫之發展,縮小靶板背面損傷區域。在 1999 年, O'Neil[19]等以一質量為 0.9 kg 之投射體衝擊不同強度的混凝土靶板,實驗結果顯示當混凝土抗壓強度為 157 MPa 時,其貫入深度相較於抗壓強度為 35 MPa 與 104 MPa 的靶板,分別減少了大約 50%與 30%,而隨著鋼纖維的加入,對貫入深度並無顯著的改善,但可以有有效的減少可見的損傷裂縫。2000 年 Luo 等[20]則是針對抗壓強度為 116 MPa 之高性能鋼纖維加勁混凝土以及 72 MPa 之高强度混凝土承受高速衝擊反應進行比較。2005 年 Zhang 等[21]則是針對不同級配,抗壓強度由 45~235 MPa 之靶板進行了衝擊實驗,實驗結果顯示添加鋼纖維可抑制靶體裂縫之延伸及減少背面痂落範圍。

混凝土在衝擊或爆炸等動態荷重下的研究,囿於實驗設備昂貴,實驗過程費時,故國內對此相關的研究仍屬有限,其中邱高祺[22]曾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,加入鋼纖維在高應變率下,材料的韌性變小,而抗壓強度和彈性模數隨著應變率的增加而提升。李志信[8]利用以霍普金森壓桿改良之直接撞擊法探討不同鋼纖維含量對抗壓強度、抗衝擊強度與磨耗性質之影響及活性粉混凝土在不同養護條件下對抗壓強度、抗衝擊強度與磨耗性質之影響,並由試驗結果找出抗壓強度、抗衝擊強度與磨耗性質之間的關係。謝孟翰[9]利用直接撞擊法結合暫態雷射都普勒測速系統,探討活性粉混凝土衝擊力學性質。另外周承劉、李孟佶等[23,24]則利用 MTS 萬能材料試驗機,針對纖維混凝土板在低速衝擊下之破壞模式及貫穿阻抗進行了研究。

由於特殊的軍事工程如雷達站、微波站台、彈藥庫、飛彈基地、機場跑道及戰機掩體等重要設施是以有效支援戰備任務,確保國家

整體安全為著眼,較諸一般營建工程,除需具有前述諸多良好的力學性質外,更需考量抗爆、抗炸的性能,提供適當的防護能力。而傳統混凝土是由不同級配之骨料、水泥與水拌合而成的非均質材料,其中骨材充滿了混凝土的整個體積,並藉由水泥漿體填塞骨材間的空隙,形成連接骨材顆粒的骨架。然而,由於骨材與水泥漿體之基本性質和彈性模數不同,因此在承受外力作用下,混凝土中的骨材與漿體在變形率不一致的情況下,在界面上產生應力集中的現象,導致漿體開裂。而活性粉混凝土是由傳統混凝土所發展出來的超高強混凝土,其在配比技術上遵循了以下之原則:[5-7]

1. 去除粗骨材提高混凝土之均勻性。
2. 透過最佳顆粒配料與凝固前加壓提高混凝土之密實度。
3. 使用熱養護技術以改善微結構。
4. 摻入鋼纖維以提高韌性。

同時,在水化過程中藉由卜作嵐作用增加強度,而矽灰經化學反應後產生大量的矽酸鈣化合物(CHS),此一化合物擁有強大的結合力與其他材料進行膠結,改善水泥的接合力,以提高其緻密性和強度。

因此,本研究將針對普通混凝土與活性粉混凝土在高速衝擊荷重下之動態反應進行探討,試驗變數包含不同衝擊速度下靶板的損傷模式分析以及添加鋼纖維後的影響,研究之結果期能提供軍事工程、核電廠及重要都市建築等結構設計之參考。

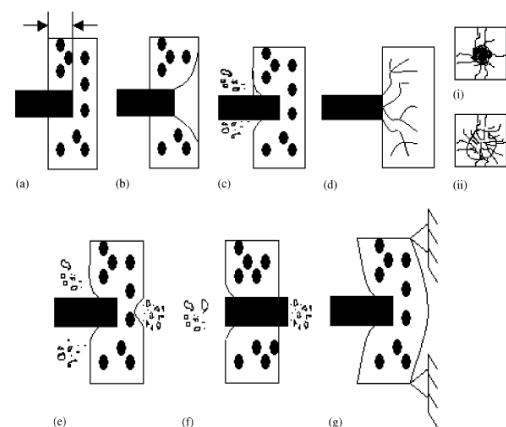


圖 1. 混凝土靶板承受衝擊荷重下破壞效應：
(a)貫入深度, (b)錐形開裂, (c)剝離,
(d)裂縫發生在 (i) 撞擊面, (ii) 背面,
(e)痂落, (f)貫穿, (g)靶板全反應效應[13]。

三、試驗計畫

為了比較普通混凝土與活性粉混凝土靶板在衝擊荷重下之動態反應，本研究區分為兩個部分來進行，首先針對普通混凝土與活性粉混凝土新拌試體進行擬靜態之力學試驗，試驗之項目包含了抗壓、劈裂與抗彎試驗，試驗時依據 ASTM 相關規範求取各組配比試體之抗壓、抗拉、抗彎強度以及韌性指數。其次，在衝擊試驗之部分，係針對不同衝擊速度下兩種靶板的強度性質與損傷模式進行比較與探討。另對活性粉混凝土靶板在不同鋼纖維體積率（0、1%、2%、5%）含量下在不同衝擊速度之局部動態反應進行比較。對於研究過程中使用的混凝土基材、試體製作與養護過程以及實驗設備之架構等分述如下：

3.1 試驗材料

在研究過程中使用之材料包含有水泥、砂灰、石英粉、石英砂及鋼纖維等，同時在低水灰比之情況下，為了降低新拌水泥漿體顆粒間的吸引力與工作度，拌製過程中亦添加了強塑劑，各材料之性質分述如下：

1. 水泥

採用波特蘭二型中度低熱水泥，其具有中度抗硫酸鹽之特性與較低的 C3A 含量，使得水化熱降低，可降低高效性減水劑被 C3A 吸收的量，增加漿體流變性質。

2. 普通混凝土之骨材（碎石及河砂）

對於普通混凝土試體之粗骨材，採用宜蘭南澳溪天然石製成之砂質碎石，最大粒徑為 20 mm，細度模數為 6.56，比重為 2.63。細骨材採用天然河砂最大粒徑為 4.7mm，細度模數 2.41，比重為 2.65。使用前須保持充份乾燥之條件，水氣含量須少於 0.25%。

3. 活性粉混凝土之骨材（石英砂、石英粉、砂灰）

活性粉混凝土試體之骨材分別採用壓碎石英砂，由於石英砂為一非常堅硬的材料，具有完美的漿體骨材介面。石英砂次一級別的水泥的平均粒徑 d_{50} 接近 11~15 μm ，故對於石英砂選擇 d_{50} 為 250 μm ，並且限制使用最大粒徑以不超過 600 μm 為原則。石英粉是活性粉混凝土中必不可少的成分，在熱處理期間可以激發其

活性，而最大的活性是在平均粒徑 5~25 μm 之間得到。在活性粉混凝土中使用的石英粉粒徑約為 10 μm ，其顆粒大小與水泥相當。另一骨材級配使用乾燥非密實砂灰，粒徑的大小為 0.1~0.2 μm ，比表面積為 18~20 m^2/g ，砂灰中 SiO_2 之含量為 90%。所有之級配在使用前須保持充份乾燥之條件，水氣含量須少於 0.1%。

4. 強塑劑

採用日本 Takemoto 竹本油脂所生產之 SSP-104 高效性強塑劑，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，固含量為 30%。

5. 鋼纖維

採用直線型的微細鋼纖維，其長度為 12 mm，直徑為 0.18mm，長徑比為 66.7。

6. 調合水：實驗室之自來水。

3.2 試體製作與養護方式

試體製作共區分為 6 種配比，如表 1 所示，表中 NC 為普通混凝土試體之材料配比，NC-F2 則為在普通混凝土中添加體積率 2% 之鋼纖維配比；RPC 為活性粉混凝土試體之材料組成，RPC-F1 則為在活性粉混凝土中添加體積率 1% 之鋼纖維配比，其目的是為比較活性粉混凝土與普通混凝土添加鋼纖維時，對抵抗衝擊能力的影響。

每一種試體配比分別製作 $\Phi 50 \times 100 \text{ mm}$ 之圓柱試體，進行抗壓與劈裂試驗以及製作 $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ 之長方體試體進行抗彎試驗，灌製後的試體均以保鮮膜覆蓋以防止水分蒸發，並在 24 小時後進行拆模，由鋼模中取出的試體放入 90°C 的恆溫水槽中養護 5 天，即將試體取出置於室溫下，再靜置到養護齡期 28 天後進行各項力學試驗。在灌製混凝土試體的同時，依照衝擊試驗機上鋼製夾具的尺寸灌製靶板試體，其尺寸為 $310 \times 310 \times 50 \text{ mm}$ ，其養護方式與圓柱及長方體試體相同。

3.3 試驗設備架構

在完成試體之製作與養護的工作後，將針對不同配比試體先進行基本力學實驗，以求取抗壓、劈裂強度並計算韌性指數 (toughness index, T.I.)，而後再以不同衝擊速度進行衝擊試驗。試驗設備架構分述如下：

表 1. 混凝土配比

單位：kg/m³

試體編號	w/c	水泥	砂灰	水	粗骨材	天然砂	石英砂	石英粉	鋼纖維	強塑劑
NC-F0	0.44	401	---	178	1119	672	---	---	---	---
NC-F2	0.44	401	---	178	1119	672	---	---	160 (2%)	---
RPC-F0	0.28	720	216	204	---	---	900	252	---	38.8
RPC-F1	0.28	720	216	204	---	---	900	252	80 (1%)	38.8
RPC-F2	0.28	720	216	204	---	---	900	252	160 (2%)	38.8
RPC-F5	0.28	720	216	204	---	---	900	252	400 (5%)	38.8

1. 基本力學實驗

本研究首先針對混凝土 $\Phi 50 \times 100 \text{ mm}$ 圓柱試體以及 $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ 長方體試體進行抗壓、劈裂以及抗彎試驗，試驗設備分別採用 MTS 810-100 噸與 MTS 819-5 噸伺服式油壓試驗機。每組配比皆取 3 個試體進行試驗，試驗數據為其平均值。

在進行抗壓試驗前，先以研磨機將圓柱試體兩面磨平，並於試體圓柱表面中心垂直、水平軸線分別黏貼長度為 10 mm 之應變片，置於 MTS 試驗機上之試體，如圖 2. 所示。本研究為了得到較為穩定的應力-應變曲線，在試驗的過程中採用位移控制，設定加載速率為 0.05 mm/min。加載過程中經由黏貼於試體表面的應變片及與其連接之 TDS 資料記錄器，完整記錄試體受壓歷程中訊號，最後求得各試體的最大抗壓強度與應力-應變曲線。

抗拉強度依據 ASTM C 496 - 96 劈裂試驗求取，試體的尺寸為 $\Phi 50 \times 100 \text{ mm}$ 之圓柱試體，試驗執行的過程中以 7~14 kPa/min 之加載速率進行加壓，直到圓柱試體裂成兩半，並由下式求得混凝土試體的劈裂強度 f_t 。

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

其中 P 為加載負荷； L 與 D 分別為圓柱形試體的長度及直徑。

抗彎試驗是採用 MTS 819-5 噸伺服式油壓試驗機，針對 $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ 之長方形試體，以 ASTM C293-94 單點載重法（center-point

loading）進行抗彎試驗。在試驗過程中取兩平滑面置於簡支承上，設定其加載速率為 0.05 mm/min。另外，對於試體中點撓度由位移計（linear variable differential transducer, LVDT）記錄，在試驗完成後，根據試體中點變位量與加載歷程繪出不同試體之載重-位移曲線，並由下式求得混凝土試體的破裂模數 R 。

$$R = \frac{3PL}{2BH^2} \quad (2)$$

上式中 L 、 B 與 H 分別為長方形試體的長度、寬度及高。

在混凝土中添加鋼纖維，可藉由基材與纖維間的橋接效應，使混凝土在形成裂縫之前會有一連串的弱帶移轉，可以增加混凝土材料的韌性性質，而韌性的增益是顯示鋼纖維混凝土在承受載重過程時，混凝土材料吸收能量能力提升的指標。對於不同試體的韌性指數，本研究依據 ASTM C-018 規範分別計算各組試體 I_5 、 I_{10} 、 I_{30} 的韌性指數值，作為不同試體添加鋼纖維對於混凝土抗斷裂特性提升之比較。本文定義韌性指數 I_5 、 I_{10} 、 I_{30} ，係以抗彎試驗中，載重-中點撓度曲線下初裂強度對應的位移值 δ 為基準，並分別求出 3δ 、 5.5δ 及 15.5δ 所對應於曲線之面積，再除以初裂強度所對應 δ 值下的面積即為韌性指數，如韌性指數 I_5 的詳細計算式如（3）式所示，韌性指數 I_{10} 及 I_{30} 之值計算，如圖 3. 所示[25]。

$$I_5 = \frac{\text{載重-中點撓度曲線下初裂強度值對應 } 3\delta \text{ 值之曲線面積}}{\text{載重-中點撓度曲線下初裂強度值對應位移 } \delta \text{ 值之曲線面積}} \quad (3)$$

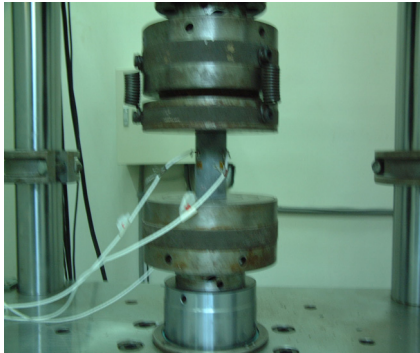


圖 2. 試體進行單軸抗壓試驗。(MTS-100 噸)

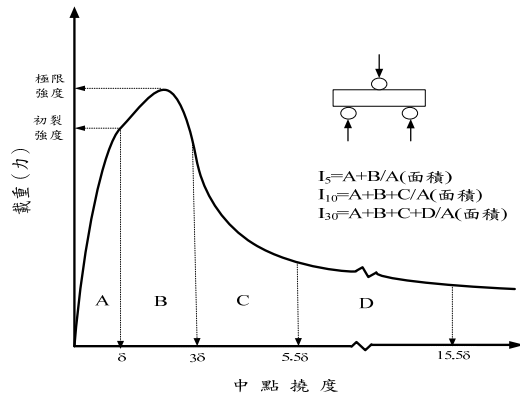


圖 3. 載重-中點撓度曲線計算韌性指數方法[25]。

2. 衝擊試驗架構

在衝擊試驗的部份主要採用高速衝擊氣槍，整體試驗設備之架構如圖 4. 所示，主要由四部份所組成，包含：(a)動力供給系統、(b)中央控制單元、(c)速度量測系統、(d)資料擷取系統。其中動力供給系統提供發射彈丸之動力，而動力的來源主要藉由高壓鋼瓶中之氮氣及壓力控制閥，在設定觸發條件後之瞬間，將高壓鋼瓶中之壓力釋放，同時將槍管中之彈丸推出，高速衝擊靶板，氣槍槍管之口徑為 25.0mm，而推送彈丸達到額定速度所需的壓力，可藉由中央控制單元進行調整。為了量測彈丸的衝擊速度，試驗過程中在槍管出口裝有兩組遮斷式光感測速光柵，兩組光柵之距離為 50mm，分別將其與數位式示波器連接，當彈丸先後穿越兩組光柵時，測速光柵之電壓訊號將升高，而此先後改變的電壓訊號將由示波器紀錄，以計算彈丸通過時間及其速度。對於試驗過程中彈丸可達到的最大速度，視彈丸之質量

而定，本研究在衝擊試驗中採用平頭型鋼彈，如圖 5.(a) 所示，彈丸直徑為 25.0mm，彈體長為 75.0mm，使用材料為 SKH-51 工具鋼，洛氏硬度值(RHC)為 60，而彈體的質量為 0.295kg，為了能夠較為準確的控制彈丸速度，在試驗進行前先對此型彈丸之壓力與速度關係進行校正，校正後之壓力與速度關係如圖 5.(b) 所示。試驗過程中，需將混凝土靶板試體固定於槍管前方之剛性支架上，並經定位確保彈丸飛行方向與試體成 90 度，且能確實擊中試體中心，為避免試體受到衝擊後產生前後移動，剛性支架及試體均以強力螺栓固定，如圖 6. 所示。由於彈丸硬度較高，衝擊後之彈丸在外觀上並無明顯變形與損傷，但為確保衝擊試驗條件之一致性，每次均使用全新的彈丸。對於靶板背面不規則痂落面積之計測，是採用影像分析計測系統，依據影像拍攝解析度值(dpi)，以參考尺規換算封閉區間之面積，圖 7. 所示即為試驗編號 NC-F2-1 痂落面積計測值。

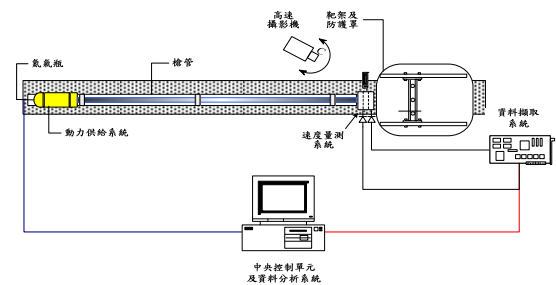


圖 4. 衝擊試驗設備架構。

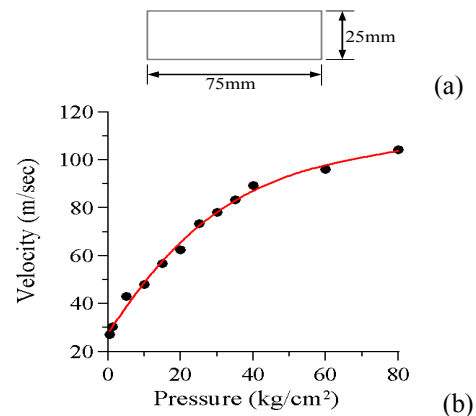


圖 5.(a)平頭型鋼彈幾何尺寸與(b)彈丸衝擊壓力-速度校正圖。

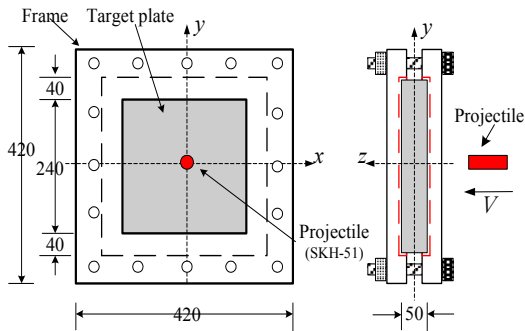


圖 6. 靶板剛性支架示意圖(mm)。

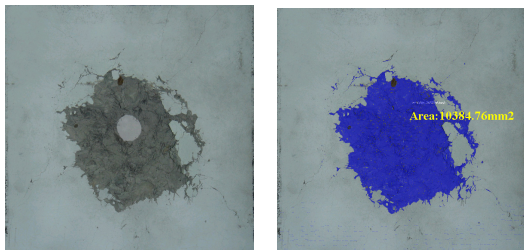


圖 7. 試驗編號 NC-F2-1 痂落面積計測值。

四、結果與討論

依據本研究試驗計劃，將試驗結果區分為擬靜態之基本力學性質試驗以及普通混凝土與活性粉混凝土靶板在不同鋼纖維體積率下之衝擊試驗，分別進行分析比較。

4.1 基本力學性質試驗結果與討論

由表 2 所列出各組混凝土試體在擬靜態試驗條件下之平均抗壓強度、劈裂強度及抗彎強度之結果。以下針對基本力學性質結果進行探討分述如下：

1. 抗壓試驗結果

圖 8. 為各試體之應力-應變關係曲線。由圖 8. 之結果顯示，活性粉混凝土試體的抗壓強度相較於普通混凝土試體約提高 6.4 倍以上。另外根據不同鋼纖維體積率試體的試驗結果顯示 NC-F0 試體的抗壓強度為 25.0MPa，在添加 2% 的鋼纖維後，試體的抗壓強度為 25.2MPa，強度提升之效果並不明顯。對於活性粉混凝土試體當鋼纖維體積率為 0% 時，抗壓強度為 161.9 MPa，增加至 1% 時抗壓強度為 175.6MPa，增

加至 2% 時抗壓強度為 178.3MPa，增加至 5% 時抗壓強度達到 192.8MPa。根據鄭瑞濱[2]之研究，由於活性粉混凝土透過最佳顆粒配料設計，在最佳之矽灰與石英粉的添加量下透過熱養護，除了提高混凝土砂漿之緻密性，亦使鋼纖維與基材之間有較佳的握裹強度。因此，當試體受壓後開裂時，鋼纖維與基材間因具有良好的握裹性產生機械互鎖（mechanical interlocking）的效應，限制了裂縫的擴展，同時此一效應隨著纖維量的增加而愈趨明顯，此亦造成了試體的抗壓強度有所增加。除此之外，由圖 8. 不同試體之應力-應變關係曲線可明顯的看出，不論是 NC 或 RPC 試體，當鋼纖維添加至試體中，對試體的破壞後的韌性性質都有提升，而此一現象將有助於提高材料的應變能，使其成為符合耐衝擊與抗爆震的消能材料。

2. 劈裂試驗結果

劈裂試驗結果如表 2 所示，活性粉混凝土試體的劈裂強度可達普通混凝土的 2~3 倍。其中沒有添加鋼纖維之活性粉混凝土試體，其劈裂強度可達 7.3MPa，當添加鋼纖維含量 1% 時劈裂強度為 13.8MPa，增加至 2% 時劈裂強度為 21.9MPa，增加至 5% 時劈裂強度為 31.6MPa。由本試驗結果顯示，活性粉混凝土試體隨著鋼纖維添加率之增加，其抗拉強度有明顯的增強趨勢。

3. 抗彎試驗與韌性指數結果

抗彎試驗結果如表 2 所示，活性粉混凝土的抗彎行為表現與普通混凝土有甚大差距，活性粉混凝土試體的破裂模數可達普通混凝土的 2~7 倍。其中沒有添加鋼纖維之活性粉混凝土試體，其破裂模數可高達 22.0MPa，當添加鋼纖維含量 1% 時破裂模數為 27.28MPa，增加至 2% 時破裂模數為 35.8MPa，增加至 5% 時破裂模數大幅的提升為 72.8MPa。由本試驗結果顯示，鋼纖維添加於脆性高的活性粉混凝土基材中，將可增加試體抵抗張力裂縫成長及破壞能量的吸收。

圖 9. 為各試體透過抗彎試驗所求得的載重-中點撓度曲線，可看出當試體受載重作用時，在沒有添加鋼纖維的 NC-F0 與 RPC-F0 試體，當外力加載達到極限值時，試體受力點的破壞行為是直接發生開裂、脆斷現象，無法再承載外力作用。因此，其力學性質為一典型的脆性

材料。然而，無論是活性粉混凝土或是普通混凝土試體，當添加鋼纖維且外力加載達到某一值時，試體中點已產生初裂現象，由於受到鋼纖維的橋接效應（bridge effect）使得試體開裂後尚可以持續承載外力作用。表 3.為試體進行抗彎試驗載重-中點撓度對應之承載外力值，由試驗結果顯示活性粉混凝土添加不同之鋼纖維率，當試體中點撓度量達到 3mm 時，RPC-F1 試體尚可承載外力 3.02kN；RPC-F2 試體可承載外力 4.38kN；而 RPC -F5 試體仍可承載外力達 11.84kN，但隨著中點撓度持續增加試體可承載外力的能力則緩和地降低。由圖 9 及表 3 的試驗結果驗證，在活性粉混凝土中添加鋼纖維可使材料的力學性質由高脆性材料轉變為具韌性性質之高強度材料。

本研究依據前述 ASTM C-018 對韌性指數之定義，由圖 9.載重-中點撓度曲線分別計算出不同試體之 I_5 、 I_{10} 及 I_{30} 韌性指數值，如表 4.所示，由韌性指數計算結果顯示，當活性粉混凝土添加鋼纖維， I_5 的韌性指數介於 5.91~7.10 之間， I_{10} 的韌性指數介於 15.23~21.39 之間， I_{30} 的韌性指數介於 22.67~31.33 之間；無添加鋼纖維的活性粉混凝土試體及普通混凝土 I_5 的韌性指數介於 1.0~1.41 之間。由表 4.韌性指數值的分析，在活性粉混凝土中添加鋼纖維可使材料在受外作用產生開裂後之承載強度持續的成長，而不會形成脆斷現象，且大幅提昇材料的韌性行為。另各階段的韌性指數值也隨鋼纖維添加率的增加也有明顯的增加趨勢。

表 2. 傳統混凝土與 RPC 之基本力學試驗結果與抗衝擊性能之比較

試驗編號	混凝土 抗壓強度 (MPa)	混凝土 劈裂強度 (MPa)	混凝土 破裂模數 (MPa)	衝擊速度 (m/sec)	衝擊動能 (J)	損傷模式		
						貫入深度 (mm)	剝落面積 (mm ²)	彈丸最終 狀態
NC-F0-1				27.0	107.5	0.6	10354	PC ^{SD}
NC-F0-2	25.0	2.6	10.6	35.7	188.0	NA	11223	PF ^{HD}
NC-F0-3				56.8	479.1	NA	16300	PF ^{HD}
NC-F2-1				41.7	258.2	5.3	SD	PR
NC-F2-2	25.2	3.1	13.3	56.8	479.1	NA	10385	PF
NC-F2-3				64.1	610.2	NA	9010	PF
RPC-F0-1				34.7	177.6	NA	23520	PC ^{SD}
RPC-F0-2	161.9	7.3	22.0	58.5	504.8	NA	28865	PF ^{HD}
RPC-F0-3				76.0	852.0	NA	NA	PF ^{HD}
RPC-F1-1				58.2	499.6	1.8	14521	PR ^{SD}
RPC-F1-2	175.3 (1.5)	13.8	27.2	76.0	852.0	NA	14202	PC ^{SD}
RPC-F1-3				104.0	1595.4	NA	14409	PC ^{SD}
RPC-F2-1				76.0	852.0	3.4	11619	PR ^{SD}
RPC-F2-2	178.3	21.9	35.8	85.0	1065.7	4.7	14297	PR ^{SD}
RPC-F2-2				104.0	1595.4	5.5	18741	PR ^{SD}
RPC-F5-1				58.3	504.8	1.4	ND	PR ^{SD}
RPC-F5-2	192.8	31.3	72.8	78.1	899.7	2.9	816	PR ^{SD}
RPC-F5-3				104.1	1598.4	4.7	8554	PR ^{SD}

PF: 投射體貫穿; PC: 投射體嵌住; PR: 投射體回彈

NA: 無效無法抵抗; ND: 無損傷; SD: 輕微損傷; HD: 嚴重損傷

表 3. 不同試體之抗彎試驗中點撓度所對應的承載外力強度(kN)

試驗 編號	0.5 mm 撓 度	1 mm 撓 度	2 mm 撓 度	3 mm 撓 度	4 mm 撓 度	5 mm 撓 度	6 mm 撓 度
NC-F0	--	--	--	--	--	--	--
NC-F2	1.76	1.29	--	--	--	--	--
RPC-F0	--	--	--	--	--	--	--
RPC-F1	6.89	6.74	4.14	3.02	2.10	1.35	0.95
RPC-F2	9.03	8.77	7.56	4.38	3.73	2.47	1.72
RPC-F5	11.65	18.69	15.44	11.84	9.11	6.25	4.83

表 4. 不同試體之抗彎試驗韌性指數值

試驗 編號	初裂撓度 δ (mm)	初裂強度 P_{FC} (kN)	極限強度 P_{max} (kN)	I_5	I_{10}	I_{30}
NC-F0	0.121	2.38	2.38	1	--	--
NC-F2	0.118	2.87	3.55	1.24	3.28	--
RPC-F0	0.129	5.86	5.86	1	--	--
RPC-F1	0.124	5.97	7.25	5.91	11.48	22.67
RPC-F2	0.293	7.84	9.54	6.61	12.78	24.23
RPC-F5	0.462	10.13	19.41	7.10	21.39	31.33

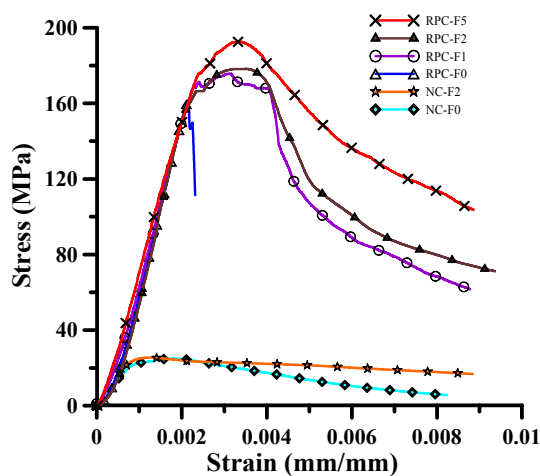


圖 8. 各試體單軸抗壓試驗之應力-應變曲線。

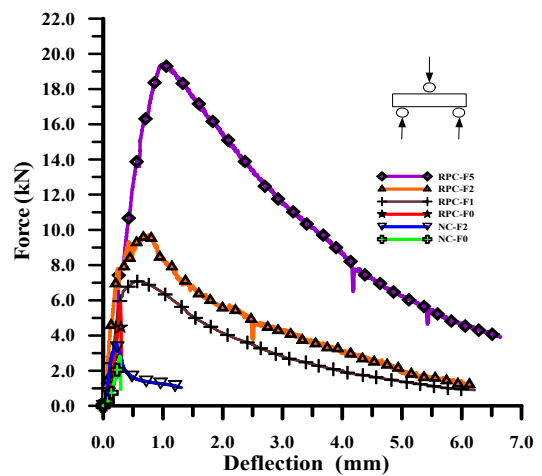


圖 9. 各試體載重-中點撓度曲線。

4.2 衝擊試驗結果與討論

衝擊試驗依前述試驗架構進行，在衝擊速度之決定上主要依據經驗公式[26]，以普通混凝土進行計算，得到痂落厚度下限值後進行測試，在相同條件下觀察衝擊速度變化對不同試體之損傷模式。理論上彈丸撞擊前之動能應等於彈丸撞擊後動能、彈丸變形應變能、彈丸傳遞至靶體之動能、靶體變形應變能及熱能的總和。然而本研究在衝擊過程中彈丸未產生嚴重之變形，同時在忽略熱能散失及靶體振動效應下，混凝土靶體抗衝擊之能力絕大部分取決於靶體吸收能量之能力。

本文探討影響衝擊試驗結果之因素包括鋼纖維添加率與衝擊速度，比較試驗之 6 組配比，為了定量分析普通混凝土與活性粉混凝土試體之抵抗衝擊之能力，本研究利用三個衝擊試驗後局部破壞參數，分別是靶板正面貫入深度、靶板背面痂落面積以及彈丸最終狀態作為參考指標。

1. 鋼纖維添加率之影響

由文獻[16,17]與本研究之力學試驗結果得知，活性粉混凝土之破壞能遠高於普通混凝土，並且隨著鋼纖維添加率之增加而增加。由表 2 試驗結果顯示，在抗壓強度方面，無論是普通混凝土或活性粉混凝土而言，混凝土中鋼纖維添加率的增加對抗壓強度的增加非常有限，影響不大。但在劈裂與抗彎強度方面，沒有添加鋼纖維的混凝土，其劈裂強度與破裂模數的強弱取決於試體受壓時裂縫成長及延伸之速率，當鋼纖維添加混凝土中，試體裂縫的成長受到鋼纖維在混凝土基材間的牽引作用與橋接效應，阻止裂縫之延伸，使得試體裂縫成長需克服破裂面上鋼纖維拉伸或剝離所需增加額外荷重，因此添加鋼纖維的混凝土需要較多的能量才會造成試體的破壞。尤其在活性粉混凝土之劈裂強度與破壞模數更為明顯，兩者均隨鋼纖維添加率之增加而大幅的增加強度，若與普通混凝土相比，其試體的劈裂強度與破裂模數分別提高 4.5~10 倍及 2.0~5.5 倍。

圖 10 為添加 2% 及 5% 鋼纖維含量的活性粉混凝土靶板在不同衝擊速度下彈體貫入深度比較圖，其說明鋼纖維的添加率足以影響活性粉混凝土靶板抗衝擊效果。由衝擊試驗結果觀察，添加 2% 鋼纖維的活性粉混凝土靶板，在衝

擊速度 76.0~104.0m/sec 時彈體貫入深度的範圍為 3.4~5.5mm；添加 5% 鋼纖維的活性粉混凝土靶板，衝擊速度 58.3~104.0m/sec 時彈體貫入深度為 1.4~4.7mm；以兩者在近似衝擊速度條件下比較，可明顯看出彈體貫入深度隨著鋼纖維含量的增加而減少；因此，添加 5% 鋼纖維的活性粉混凝土靶板，在抗衝擊能力方面較含量 2% 的活性粉混凝土靶板為佳。

圖 11 為靶板試體背面在不同衝擊速度下之破壞模式，由圖中照片顯示沒有添加鋼纖維的靶板背面痂落面積與破裂現象都較為嚴重，尤其值得注意地是活性粉混凝土雖具有較高抗壓強度 (161.9MPa)，但其抗衝擊性反而比普通混凝土為差，探討其主要原因是在於活性粉混凝土的強度提升後相對材料的脆性性質亦增加，因此當其承受衝擊荷重時，所造成的破壞模式呈現明顯地脆性破壞，更形成靶板背面痂落面積範圍的擴大，甚至比普通混凝土更為嚴重。由表 2 與圖 11 結果顯示，在相當的衝擊動能作用下 (479.1~504.8J) 分別探討普通混凝土沒有添加鋼纖維的靶板 (NC-F0-3) 與添加 2% 鋼纖維的靶板 (NC-F2-2)，以及活性粉混凝土沒有添加鋼纖維的靶板 (RPC-F0-2) 與添加 1% 鋼纖維的靶板 (RPC-F1-1) 進行損傷範圍與破壞模式比較，無論是普通混凝土或是活性粉混凝土靶板，添加鋼纖維靶板受衝擊後所形成的靶板背面痂落面積分別比沒有添加鋼纖維靶板減少 63.7% 與 49.2%，隨著添加鋼纖維含量增加為 5% 時 (RPC-F5-0)，在上述的衝擊動能範圍作用下，靶板背面外觀上僅形成一道長約 8 cm 的細裂縫，且無其他痂落碎屑產生。因此在活性粉混凝土中添加適量的鋼纖維，藉著鋼纖維與混凝土之間橋接效應的作用抑制基材裂縫之擴展，進而提升了靶板抵抗張力的能力。

2. 衝擊速度之影響

本研究對決定試體的衝擊速度採用兩種模式進行試驗比對，對活性粉混凝土含鋼纖維之靶板採用之衝擊速度在 58.5~104.1m/sec 範圍內進行試驗；對普通混凝土靶板及無鋼纖維含量之活性粉混凝土靶板，採用較低之衝擊速度 27.0~76.0 m/sec 之間進行試驗。由圖 11 及 12 結果顯示，除了活性粉混凝土添加鋼纖維率為 1% 之靶板在不同的衝擊速度變化下，其痂落面積無顯著的變化，對於其他各組靶板痂落面積範圍的擴大，隨著衝擊速度的增加而有明顯增

加的趨勢。此外，對活性粉混凝土沒有添加鋼纖維的靶板 RPC-F0，雖然選擇較低的衝擊速度進行試驗，經由試驗的結果與評估損害模式的三項參考指標分析，其承受衝擊作用下的破壞模式與侵徹行為最為嚴重。

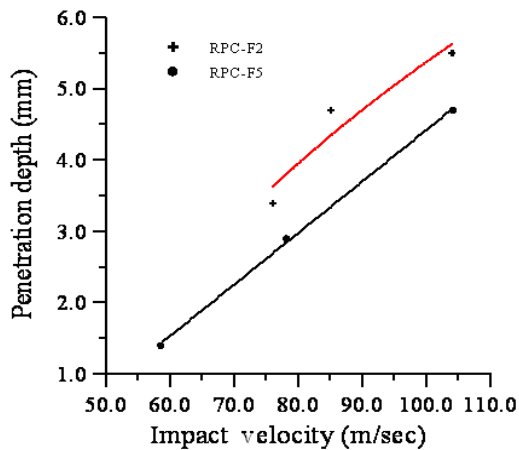


圖 10. 添加鋼纖維之活性粉混凝土靶板在不同衝擊速度下之貫入深度關係圖。

	1	2	3
NC			
Impact velocity	27m/sec	35.7m/sec	56.8m/sec
NC-F2			
Impact velocity	41.7 m/sec	56.8 m/sec	64.1 m/sec
RPC			
Impact velocity	34.7m/sec	58.5m/sec	76m/sec
RPC-F1			
Impact velocity	58.2m/sec	76 m/sec	104 m/sec
RPC-F2			
Impact velocity	76 m/sec	85 m/sec	104 m/sec
RPC-F5			
Impact velocity	58.5 m/sec	78.1 m/sec	104.1 m/sec

圖 11. 靶板試體在不同衝擊速度作用下之破壞模式

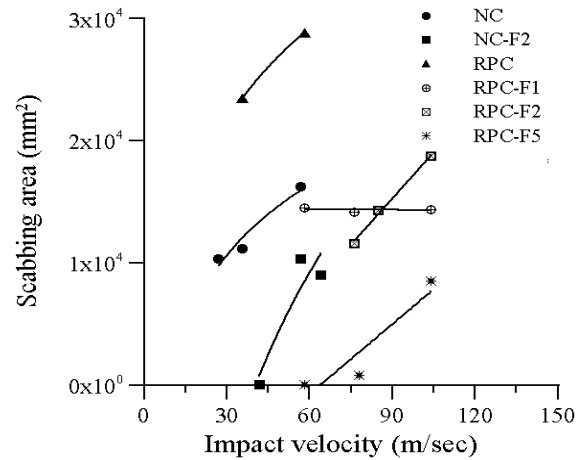


圖 12. 靶板試體在不同衝擊速度下之背面痂落面積比較圖。

五、結論

本研究針對普通混凝土與活性粉混凝土添加不同鋼纖維體積率之試體與靶板，分別進行了一系列的基本力學與衝擊試驗比較與探討，試驗變數包含不同衝擊速度下靶板的損傷模式分析以及添加鋼纖維後的影響，研究之結果期能提供軍事設施、核電廠及重要都市建築等結構設計之參考。根據本研究之實驗結果，可歸納出以下幾點結論：

1. 由一系列之基本力學試驗結果顯示，活性粉混凝土較普通混凝土而言，具有更佳之力學性質，不論是普通混凝土或活性粉混凝土試體，當添加鋼纖維後，對於抗壓強度之增加是非常有限的，但對試體的韌性行為卻是增加許多，且提高材料的應變能，使其成為符合耐衝擊與抗爆震的材料。
2. 由抗彎試驗所求得的載重-位移曲線以及所計算出的韌性指數顯示，在活性粉混凝土中各階段的韌性指數值也隨鋼纖維添加率的增加有明顯的增加趨勢，大幅提昇材料的韌性行為。由活性粉混凝土靶板承受不同衝擊荷重作用下所產生的破壞模式觀察，活性粉混凝土添加鋼纖維含量越高，彈丸的貫入深度與痂落面積也有顯著地減少，此顯示活性粉混凝土試體隨著韌性指數值越大而可獲得較佳的抗貫穿之效能。
3. 對沒有添加鋼纖維的活性粉混凝土靶板而言，雖具有較高的抗壓強度，但其抗衝擊性較普通混凝土靶板為差，主要原因是在於活

性粉混凝土的強度提升後相對的脆性性質亦增加，因此當其承受衝擊時，所展現的破壞模式為明顯地脆性破壞，同時造成靶板背面痂落面積範圍也比普通混凝土更為嚴重。

4. 由衝擊試驗結果顯示，活性粉混凝土試體添加 2%鋼纖維之活性粉混凝土靶板，在衝擊速度 76.0~104.0m/sec 時彈體貫入深度的範圍為 3.4~5.5mm；添加 5%鋼纖維之活性粉混凝土靶板，在相近的衝擊速度作用下彈體貫入深度為 1.4~4.7mm 之間，由試驗結果呈現出彈體貫入靶板深度，隨混凝土添加鋼纖維率的增加而減少；添加 5%鋼纖維的活性粉混凝土靶板，在抗衝擊能力方面較含量 2%的活性粉混凝土靶板為佳。
5. 當靶板承受彈丸衝擊動能在 479.1 J 至 504.8 J 之間時觀察其背面損傷現象，無論是普通混凝土或是活性粉混凝土靶板，有添加鋼纖維的靶板受衝擊後所形成的靶板背面痂落面積分別比沒有添加鋼纖維靶板減少 63.7%與 49.2%的損傷範圍，且隨著添加鋼纖維率增加至 5%時 (RPC-F5-0)，在上述的衝擊動能範圍作用下，靶板背面外觀上僅形成一道長約 8 cm 的細裂縫，且無其他痂落碎屑產生，就整體衝擊試驗程序而言，添加 5%鋼纖維之活性粉混凝土靶板已達到 100%之抗衝擊效能。
6. 由本研究利用衝擊試驗後局部破壞模式的三項參考指標，分別是靶板正面貫入深度、靶板背面痂落面積以及彈丸最終狀態等進行評估分析，在活性粉混凝土試體配比中添加鋼纖維，可有效的減緩對彈丸的衝擊效應與抗貫穿行為，且隨著鋼纖維含量的增加抗衝擊效能更為明顯。

參考文獻

- [1] 宋佩瑄，“纖維混凝土實務”，現代營建雜誌社編印，台北，1991。
- [2] 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博士論文，2003。
- [3] Lankard, D.R., “Slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON): properties and applications,” Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol.42, pp. 277-286, 1985.
- [4] Hackman, L.E., Farrell, M.B., and Dunham, O.O., “Slurry infiltrated mat concrete (SIMCON),” Concrete International: Design & Construction, Vol.14, No.12, pp.52-56, 1992.
- [5] Richard P., and Cheyrezy M., “Composition of reactive powder concretes,” Cement and Concrete Research Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995.
- [6] 苗伯霖，“新型高性能超高強建築材料-活性粉混凝土”，營建知訊，162 期，第 52-60 頁，1996。
- [7] 詹穎雯，“活性粉混凝土簡介”，水利土木科技資訊季刊，創刊號，第 3-8 頁，1998。
- [8] 李志信，“纖維混凝土材料磨耗性質與機理之探討”，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，1998。
- [9] 謝孟翰，“超高強高性能混凝土之衝擊力學性質研究”，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文，1998。
- [10] 柴希文、陳振川、詹穎雯、潘昌林，“超高強高性能混凝土(RPC)的抗炸與抗撞性能之測試與應用研究”，榮民工程公司委託研究成果報告，1999。
- [11] “Structures to Resist the Effects of Accidental Explosion,” TM5-1300, Department of the Army, the Navy, the Air Force, June, 1969.
- [12] “Design & Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects,” Technical Manual TM 5-855-1, Department of the USA Army, 1997.
- [13] Li, Q.M., Reid, S.R., Wen, H.M., and Telford, A.R., “Local impact effects of hard missiles on concrete targets,” International Journal of Impact Engineering, 32(4), pp.224-284, 2005.
- [14] Kennedy, R.P., “A review of procedure for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects,” Nuclear Engineering and Design, 37, pp.183-203, 1976.
- [15] Sliter, C.E., “Assessment of empirical concrete impact formulas,” Journal of Structural Division, ASCE, 106(ST5), pp.1023-1045, 1980.
- [16] Brandaes, K., “Assessment of the response of reinforced concrete structural members to aircraft crash impact loading,” Nuclear Engineering and Design, 101, pp.177-183,

1988

- [17] Hanchak, S.J., Forrestal, M.J., Young, E.R., and Ehergott, J.Q., "Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths," International Journal of Impact Engineering, 12(1), pp. 1-7, 1992.
- [18] Dancygier, A.N., and Yankelevsky, D.Z., "High strength concrete response to hard projectile impact," International Journal of Impact Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 583-599, 1996.
- [19] O'Neil, E.F., Neeley, B.D., and Cargile, J.D., "Tensile properties of very-high-strength concrete for penetration-resistant structures," Shock and Vibration, 6(5), pp.237-245, 1999.
- [20] Luo, X., Sun, W., and Chen, S.Y.N., "Characteristics of high performance steel fiber reinforced concrete subjected to high velocity impact," Cement and Concrete Research, 30, pp. 907-914, 2000.
- [21] Zhang, M.H., Shim, V.P.W., Lu, G., and Chew, C.W., "Resistance of high-strength concrete to projectile impact," International Journal of Impact Engineering 31, pp. 825-841, 2005
- [22] 邱高祺, "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研究所碩士論文, 1992。
- [23] 周承劉, "纖維混凝土板在低速撞擊荷載下之貫穿阻抗研究", 國防大學中正理工學院軍事工程研究所碩士論文, 1998。
- [24] 李孟佶, "鋼筋混凝土板在低速荷載下之貫穿行為研究", 國防大學中正理工學院軍事工程研究所碩士論文, 2001。
- [25] "ASTM C 1018-92 Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete" ASTM standards, part 04.02, Concrete and Aggregates, pp.514-520-6, 1993.
- [26] 施俊豪, "混凝土靶體在衝擊荷重下局部效應之實驗研究", 國科會補助大專學生參與專題研究計畫成果報告, NSC-93-2815-C-145-002-E, 2004。

湯家智等

活性粉混凝土板承受衝擊荷重下破壞模式之研究