



無機聚合複合材料之 抗衝擊力學性能試驗研究

蔡營寬／國防大學理工學院環境資訊及工程學系 助理教授

李宏輝／國防大學理工學院環境資訊及工程學系 副教授

劉宇倫／國立臺北科技大學資源工程研究所 碩士生

鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

李有豐／國立臺北科技大學土木工程系 教授

吳嘉偉／國防大學理工學院軍事工程研究所 碩士生

無機聚合材料因其製程簡單且具低二氧化碳排放之特性，近年來隨著節能減碳的環保意識攀升，已逐步穩定地發展。根據國內外針對無機聚合材料相關研究，顯見其在多項工程應用領域上極具發展潛力，為新一代之綠色環保再生材料。本文之目的，在於探討無機聚合材料之動態力學特性，以評估於軍事防護工程之可行性。其中，材料之製作以水淬高爐爐石粉（GGBS）作為無機聚合水泥之粉體原料，添加矽灰（Silica fume）、矽灰石（Wollastonite）、耐鹼玻璃纖維（Alkali-resistant glass fiber）、玻璃粉（Glass powder）及細粒料（Fine aggregate），與鹼性溶液（Alkaline solution）混合製成無機聚合砂漿試體，分別進行工作性與物性試驗（包括流度、硬化時間、線收縮率及孔隙率等）、基本力學性能試驗（抗壓試驗），及動態力學性能試驗（分離式霍普金森壓桿撞擊試驗），以探討無機聚合材料之衝擊力學特性。本研究中衝擊試驗所得之應變率範圍介於 200S-1 至 388S-1，試驗結果顯示，隨著應變率之提升，動態強度因子亦隨之增加，破壞產狀隨應力加載率之提升，破壞產狀從半破碎至半粉碎破壞，而當應變率較高時，試體吸收及消散能量之能力增加，抗衝擊性能亦進而提升。研究成果可供國軍建物防爆震設計之參考，並進一步評估以無機聚合材料取代傳統水泥應用於軍事設施工程及其潛在領域之可能，期能達到二氧化碳排放減量及資源再利用之目的。

前言

隨著環保意識抬頭，無機聚合材料因具低二氧化碳排放、可固化有害重金屬、耐久性佳及材料相容性佳等優點，已逐漸受到重視並穩定地發展^[1]。然而，目前仍著重於基礎理論與應用之探索階段，具有一定規模之工程實例相當有限。由於此類材料具早期強度高、常溫硬化、抗腐蝕及低熱傳導率等特性，應用於軍事設施工程如地下指揮所、坑道、機堡、水庫及機場跑道搶修

等有其發展潛力，惟軍事設施工程之防護能力要求較高，結構物受爆震波作用後常在表面形成坑洞及疤落（Spalling），在背後則產生痂落（Scabbing）及飛出物（Fragment），結構碎片飛出將嚴重威脅室內裝備及人員安全，因此，材料之動態力學特性（如：抗衝擊及抗炸性能等），為防護工程材料選用的考量重點之一。傳統上，常以改善混凝土材料特性，例如：高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC）及超高性能混凝土

土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) 等；或添加其他材料補強為主，例如：鋼纖維補強混凝土 (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC) 及碳纖維補強混凝土 (Carbon Fiber Reinforced Concrete, CFRC) 等，以降低爆炸衝擊背面所產生的破壞。此外，隨日益複雜的恐怖攻擊型態、意外爆炸及戰事威脅等，目前國內外有關無機聚合材料結構物於爆炸荷載下之力學行為及破壞模式之研究仍相當有限，因此，為利評估無機聚合材料應用於軍事防護工程之可行性，首應探討無機聚合材料之動態力學特性。

由於混凝土結構物承受高速撞擊及爆炸荷載之力學反應與作用過程非常複雜，爆炸與衝擊對結構物之力學行為常非受單一之作用影響，再加上混凝土為非均質且脆性之複合材料，較難進行精確的解析分析，多經由撞擊試驗及爆炸試驗所取得的數據與數值模擬分析，相互驗證比較其結果。過去研究成果顯示，無機聚合混凝土之基本物性與力學試驗，多以探討基本物性為主，如比重、乾縮率、水化熱、吸水率、坍度及初、終凝時間等，力學試驗則主要探討抗壓強度及抗彎強度。以 SHPB 進行動態試驗之結果顯示，無機聚合混凝土之抗壓強度、硬度等抗衝擊性能，將隨著應變率的增加而提升^[2,3]。

本文參考國內外相關研究方法，評估無機聚合混凝土應用於軍事防護工程之可行性，針對其抗衝擊與抗爆震之能力進行基本力學試驗及動態力學試驗等試驗研究。

材料製備及實驗方法

本文以無機聚合技術為基礎，製作基本力學特性試驗所需試體，進行抗壓試驗、霍普金森氏壓桿撞擊試驗等，探討無機聚合材料構件之力學行為及破壞模式，以評估應用於軍事防護工程之可行性。

無機聚合材料之製備

實驗材料

本研究使用之水淬高爐爐石粉係由中聯資源股份有限公司 (CHC Resources Corporation) 所提供，符合 ASTM C989 之規範。其中位徑 (D_{50}) 為 $12.0 \mu\text{m}$ 。矽灰石由呈松企業股份有限公司 (Charles Star Enterprise Co., LTD) 所提供，外觀為白色纖維狀，中位徑 (D_{50}) 為 44

μm 。矽灰由埃肯有限公司 (National Blue Star (Group) Co., Ltd.) 所提供，其粒徑 80% 以上小於 $1 \mu\text{m}$ 。水淬高爐爐石粉、矽灰石與矽灰之化學成分如表 1 所示。此外，本研究中使用之玻璃粉，其中位徑為 $100 \mu\text{m}$ 。耐鹼玻璃纖維為華立企業股份有限公司 (Wah Lee Industrial Co., Ltd.) 所提供，其耐鹼玻璃纖維平均長度約 25mm 。細粒料為一般天然砂，係由力泰建設企業股份有限公司 (Lihtai Construction Enterprise Co., Ltd.) 所提供。經過計算後之細度模數 (Fineness modulus) 為 2.94，其中位徑 (d_{50}) 約為 1.0mm 。最後利用氫氧化鈉、矽酸鈉與鋁酸鈉混合配製成不同氫氧化鈉濃度、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 莫耳比與 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 莫耳比之鹼性溶液。

表 1 水淬高爐爐石粉、矽灰石與矽灰之化學成分表

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Others	L.O.I
爐石粉	57.4	27.4	10.8	0.3	0.6	1.2	1.3	1.1
矽灰石	37.5	58.1	2.3	-	0.8	-	1.3	-
矽灰	0.3	96.8	2.2	0.6	-	-	0.1	-

工作性及基本物性試驗試體製作及流程

砂漿 (Mortar) 試驗中，先將水淬高爐爐石粉、矽灰與耐鹼玻璃纖維進行預混拌 2 分鐘，再加入鹼性溶液混拌 3 分鐘，最後加入矽灰石與細粒料以製成無機聚合砂漿。同時在混拌完成之後，將無機聚合砂漿依照 ASTM C403 與 ASTM C23 之規範進行硬化時間試驗 (Setting time) 與流度試驗 (Slump flow)。並將漿體灌入 $50 \text{mm} \times 50 \text{mm} \times 50 \text{mm}$ 的方形模具與 $25 \text{mm} \times 25 \text{mm} \times 285 \text{mm}$ 的模具中，以進行抗壓強度、收縮試驗、超音波傳導速率 (Ultrasonic pulse velocity) 與物理性質試驗。在抗壓強度測試中，係將 $50 \text{mm} \times 50 \text{mm} \times 50 \text{mm}$ 的方形試體在環境溫度下養護，在 4 小時、1 天、7 天與 28 天之養護齡期 (Curing time) 下依照 ASTM C109 規範進行抗壓試驗。收縮試驗中則是將 $25 \text{mm} \times 25 \text{mm} \times 285 \text{mm}$ 之試體置於相對濕度 $> 60\%$ 之環境下，依照 ASTM C157 之規範測定其線收縮率。超音波傳導試驗係使用攜帶式超音波測定儀 (Portable ultrasonic non-destructive tester) (Pundit plus) 進行量測，透過測得無機聚合砂漿試體之超音波傳導速度，以了解試體之緻密程度。物理性質試驗則是參照 ASTM C20 之規範，測得試體之孔隙率及吸水率。無機聚合砂漿試驗流程如圖 1 所示。

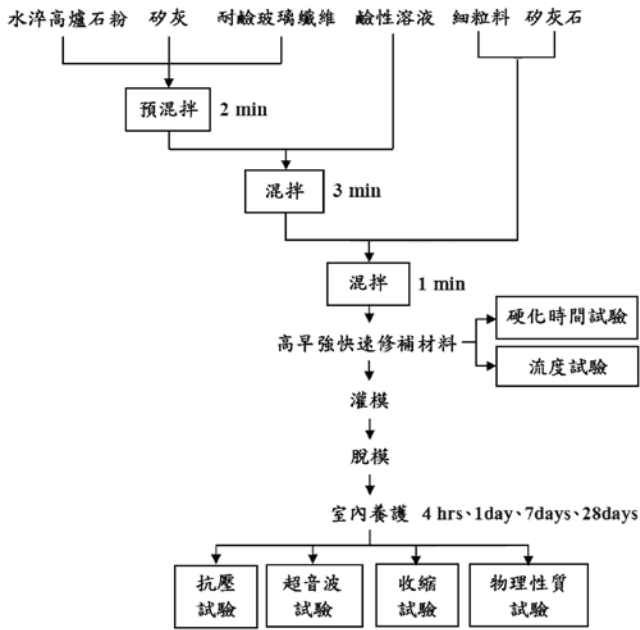


圖 1 無機聚合砂漿試驗流程圖

撞擊試驗試體製作

本研究使用分離式霍普金森壓桿撞擊試驗之試體設計尺寸為 $\phi 4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ (D × H)，長徑比為 1 : 1，如圖 2 所示。抗衝擊試驗試體配方及鹼性溶液配比分別如表 2 及表 3 所示，其中，RGP-50 為本研究標準配方試體，作為配方及製程調整之對照組；試體 RGP-W5G5，以玻璃粉取代 RGP-50 中矽灰石重量比之 50% 製成；試體 RGP-50-BF，其試體配方及鹼性溶液配比與 RGP-50 相同，惟其耐鹼玻璃纖維係於粉體與鹼性溶

液預混拌後始添加(濕拌)。試體總數量計 15 顆 (RGP-50 : 3 顆 ; RGP-W5G5 : 6 顆 ; RGP-50-BF : 6 顆)。

基本力學性質與物性試驗

本實驗以半自動控制抗壓試驗機 (50-A22A03) 進行測定，如圖 3 所示。將無機聚合漿料灌入 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 之方形模具，每組參數製作 5 個試體後，於 4 小時、1 天、7 天及 28 天室溫養護後進行抗壓試驗。其抗壓強度測試依照 CNS 1232 (混凝土圓柱試體抗壓強度試驗法)。



圖 3 半自動控制抗壓試驗機

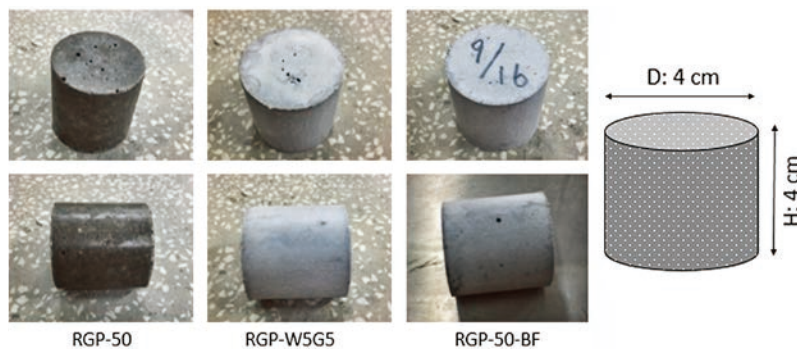


圖 2 分離式霍普金森壓桿撞擊試驗試體尺寸示意圖

表 2 抗衝擊試驗試體配比

試體	爐石粉 (wt%)	矽灰石 (wt%)	玻璃粉 (wt%)	抗鹼玻璃纖維 (wt%)	矽灰 (wt%)	L/B	B:S
RGP-50	100	10	0	2	1	0.55	1:1.2
RGP-W5G5	100	5	5	2	1	0.55	1:1.2
RGP-50-BF*	100	10	0	2	1	0.55	1:1.2

表 3 抗衝擊試驗試體鹼性溶液配比

NaOH 濃度 (M)	SiO ₂ /Na ₂ O 莫爾比	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ 莫爾比
10	1.28	50

*註:耐鹼玻璃纖維於粉體與鹼性溶液混拌後添加(濕拌)

分離式霍普金森桿衝擊試驗

分離式霍普金森壓桿試驗之目的，可用以探討應變率對於材料抗衝擊性能，文獻亦顯示無機聚合材料之抗壓強度、變形性 (Deformation properties) 及衝擊韌性 (Impact toughness) 等，均隨著應變率增加而提升^[4-6]，由於分離式霍普金森壓桿 (Split Hopkinson Pressure Bar，簡稱 SHPB) 已被廣泛應用於材料在高速撞擊速度下之行為。

SHPB 係利用高壓氣體將撞擊桿以一定速度射出，如圖 4 所示，使其與輸入桿撞擊而產生應力波，根據一維應力波傳播的條件，入射波以波速 $C_e = \sqrt{E/\rho}$ 向前傳播 (E 及 ρ 分別為介質的彈性模數與密度)，經過 L/C_e 的時間 (L 為輸入桿的長度) 傳至輸入桿與試體的界面，由於輸入桿與試體兩者波阻抗不同，故應力波傳遞至界面時將產生反射波及透射波，透射波即進入試體與輸出桿之界面，同時產生透反射。但由於試體較薄，其應力波在試體中來回一次的時間僅需 $2L_s/C_s$ (L_s 及 C_s 分別為試體的長度及波傳速度)，通常只需幾微秒之歷時，即完成數次的透反射，此時試體及桿兩端面的應力應變可達到一致，再利用訊號放大器及示波器將入射、反射及透射波記錄下來，即可得到試體的應力、應變及應變率的關係^[7]。

一維波傳理論

以 SHPB 進行材料動態力學試驗時，假設試體在撞擊過程中滿足一維波傳理論，透過黏貼於入射桿及透射桿上之應變計，紀錄應變歷時資料，進而推導試

體於衝擊荷載下之應-應變關係。基本假設條件如下：

- (1) 應力波在導桿的傳遞行為，應符合一維波傳理論。
- (2) 試體的應力場與應變場，是均勻且僅沿長軸向發生。
- (3) 忽略試體徑向的慣性效應 (Inertia effect)。
- (4) 忽略試體和輸入及輸出桿間界面之摩擦效應 (Effect of radial inertial)。

SHPB 試驗中，應力在桿件內部傳導時係以彈性波的方式進行，依作用方向區分為縱向波及橫向波，其中縱向波是平行質點運動方向進行，所產生的應變為拉伸或壓縮，而橫向波則是垂直質點運動方向，所產生的應變為剪切應變，在 SHPB 試驗中係根據彈性桿的質點縱向位移，依一維波傳理論逐一計算材料之應變、應變率與應力，對於側向應變的影響則予以忽略。

假設一材料截面積為 A ，縱向彈性係數為 E 之均勻細長桿，取其中心線為 x 軸，來探討彈性波在桿內傳導的情況。此時在圓桿中取任一微小單元，長度為 dx ，如圖 5 所示，在 S_1 處的應變為 $\partial u_1/\partial x$ ， S_2 處之應變為 $\partial u_2/\partial x$ ，假設材料受外力作用滿足虎克定律及牛頓運動定律，兩截面 S_1 及 S_2 相對於各應變所產生的合力對此微小單元造成的運動方程式則可以下式表示^[7]：

$$\varepsilon(t) = -\frac{C_e}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_e}{L_s} \varepsilon_r \quad (2)$$

$$\sigma_{avg}(t) = \frac{A_e E_e}{A_s} \varepsilon_r(t) \quad (3)$$

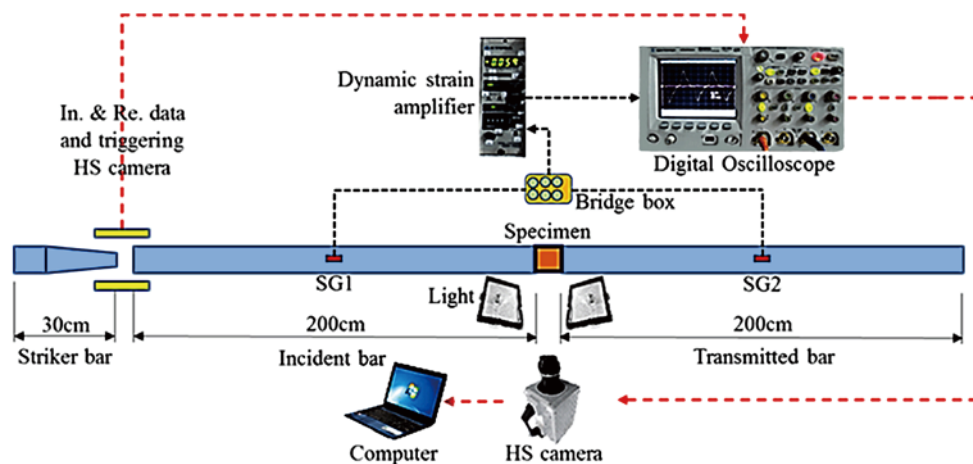


圖 4 SHPB 裝置及測試系統圖^[7]

若採用上述式 (1) ~ 式 (3) 分別計算試體之應變、應變率及平均應力時，因僅考慮單一應變歷時，故此分析方法稱為「單波法 (One-wave method)」，此法與三波法 (Three-wave method) 在計算上略有差異，如表 4 所示。

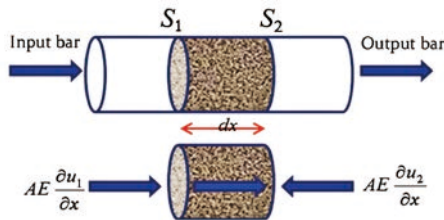


圖 5 一維縱向應力波之傳遞^[7]

表 4 單波法與三波法比較表^[7]

	單波法 (One-wave method)	三波法 (Three-wave method)
應力 (Stress)	$\sigma_{avg}(t) = \frac{A_s E_s}{A_s} \epsilon_r(t)$	$\sigma_{avg}(t) = \frac{A_s E_s}{2A_s} (\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t)$
應變 (Strain)	$\epsilon(t) = -\frac{C_s}{L_s} \int_0^t \epsilon_r dt$	$\epsilon(t) = -\frac{C_s}{L_s} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt$
應變率 (Strain rate)	$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C_s}{L_s} \dot{\epsilon}_r$	$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{C_s}{L_s} (\dot{\epsilon}_i - \dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_t)$

試驗結果與討論

基本物性試驗結果

本研究之先導研究發現，以水淬高爐爐石粉作為無機聚合水泥之粉體原料，添加矽灰、矽灰石、耐鹼玻璃纖維及細粒料，與鹼性溶液混合製成無機聚合高強度複合材料，能夠有效增加其抗壓強度並改善其收縮性質。並透過調整灰砂比 (B/S) 與水灰比 (L/B)，使其養護齡期四小時之抗壓強度達到 36.7 MPa、養護齡期 28 天之線收縮率減少為 0.36%，同時具備適當之流動性質。透過調整鹼性溶液之 SiO₂/Al₂O₃ 莫爾比為 50 時，能夠使無機聚合砂漿之初凝時間由 14 分鐘延長為 19 分鐘、流度由 200 mm 增加為 210 mm、養護齡期四小時之抗壓強度由 36.7 MPa 提升為 38.7 MPa 及 0.35% 之線收縮率。

由於矽灰石本身為纖維狀，與鹼性溶液拌合後會增加漿體黏度，故本研究以 5 wt.% 之玻璃粉 (中位徑：100 μm) 取代矽灰石，以提升漿體之流動性，經坍度試驗後，結果顯示流度由 210 mm 提升為 215 mm。然而玻璃粉之添加，會造成其部分與鹼性溶液反應，溶解

出更多的矽離子使硬化時間下降，而無法達到理想的抗收縮效果。因此，若以抗收縮性為考量時，建議仍以矽灰石作為添加劑較為合適。

此外，本研究期透過以耐鹼玻璃纖維與細粒料同時添加拌合之方式，使纖維均勻分散並增加流動性。然而，由於混拌時間不足，且漿體之黏度較高，使纖維無法有效的分散，並降低其流動性，同時抗收縮效果也降低。因此，以工作性之流度為考量時，纖維於加入鹼性溶液預混拌前添加，將具有更佳的分散效果。硬化時間及流度試驗結果如表 5 所示。

表 5 硬化時間及流度比較表

試體	T (°C)	初凝時間 (min)	終凝時間 (min)	流度 (mm)
RGP-50	28.3	19	24	210
RGP-W5G5	28.1	18	22	215
RGP-50-BF	27.5	20	25	195

其中，抗衝擊試驗試體 (RGP-50、RGP-W5G5 及 RGP-50-BF) 於不同齡期之線收縮率如圖 6 所示，試驗結果顯示，於養護齡期前期階段之線收縮率增加率較高，約於齡期第四天後增加率轉為趨緩，並以試體 RGP-50 之抗收縮性較佳。

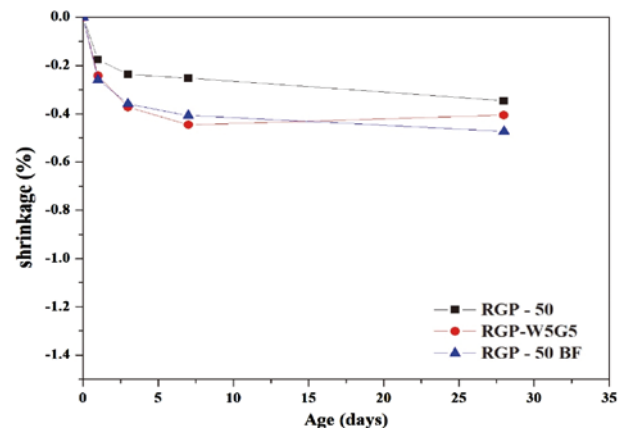


圖 6 不同齡期之線收縮率關係圖

靜態抗壓強度

本實驗分別以抗衝擊試驗試體 (RGP-50、RGP-W5G5 及 RGP-50-BF) 及抗炸試驗試體 (RGP) 之相同配比，製作抗壓試驗試體，進行不同齡期之抗壓試驗。試驗結果顯示，RGP-50 於 4 小時齡期之抗壓強度為 38 MPa，抗壓強度隨齡期增長而增加，於 28 天齡期強度可達到 121 MPa，與 RGP-W5G5 及 RGP-50-BF

相比，具有較高之抗壓強度，然而其抗壓強度之差異不大，約為 5%。各試體於不同齡期之抗壓強度如圖 7 所示。試體在養護齡期為 4 小時與 1 天之抗壓強度有明顯提升，但對於養護齡期為 7 天與 28 天強度發展並無太大影響。其原因為隨著混拌時間與混拌速度的增加，增加了溶出的矽、鋁膠體數量，同時提升漿體的均勻度，使得試體能夠在較早的養護齡期下便能夠有良好的強度發展。

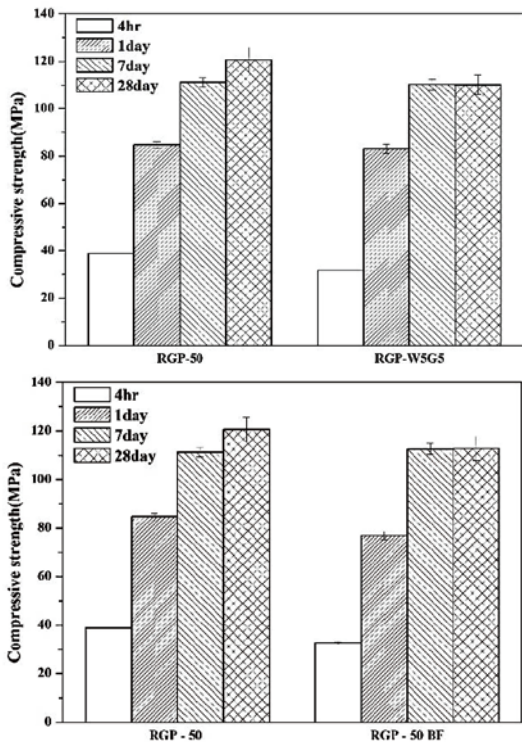


圖 7 各試體不同齡期之抗壓強度比較圖

動態力學特性

動態應力－應變曲線

一般而言，分離式霍普金森壓桿試驗之應變率介於 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ ，透過撞擊腔壓之調整，可獲得材料在不同應變率條件下之動態抗壓強度。圖 8 為各試體動態抗壓強度與設定撞擊腔壓之關係圖，當撞擊腔壓由 0.9 kgf/cm^2 增加至 1.1 kgf/cm^2 時，結果顯示試體 RGP-50 及 RGP-W5G5，衝擊抗壓強度亦隨之增加，而 RGP-50-BF 之動態抗壓強度則未隨撞擊腔壓增加而顯現相同增加之趨勢。

隨撞擊腔壓之增加，觀察應力－應變曲線圖（如圖 9 所示），RGP-W5G5 之應變率由 200 s^{-1} 增加至 381 s^{-1} ，動態抗壓強度由 187 MPa 增加至 290 MPa ，增加率達 55%。此外，除應變率有明顯提升外，整體

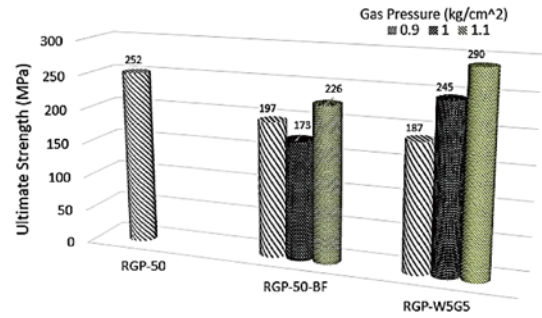


圖 8 衝擊抗壓強度與設定撞擊腔壓之關係圖

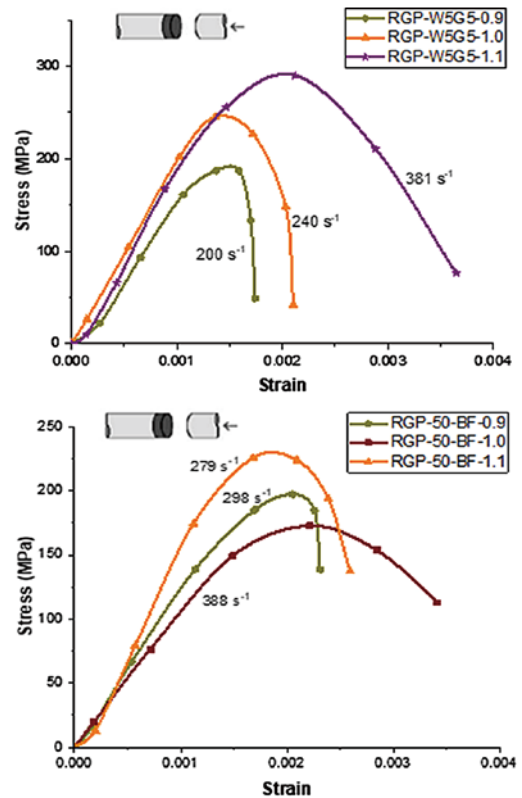


圖 9 不同應變率下之應力應變曲線圖

曲線有向上偏移之趨勢，動態抗壓強度增加且彈性係數亦隨之提高。隨著應變率持續增加，曲線向上偏移之趨勢愈加明顯，達到動態抗壓強度時之應變值亦隨之增加，在強度峰值後之曲線仍向後延伸，曲線下包圍的面積增加，顯示當應變率較高時，試體吸收及消散能量之能力亦進而提高。然而，由 RGP-50-BF 之應力－應變曲線圖，發現與前述試體（RGP-W5G5）試驗結果迥異之現象，其原因為，在此試體之製備過程中，其耐鹼玻璃纖維之添加時機，係於粉體與鹼性溶液預混拌後始加入，因漿體具有水分使得耐鹼玻璃纖維於第二次混拌中分布不均，造成各試體之變異性過大，後續將規劃增加第二次混拌時間，以提升耐鹼玻璃纖維之分布性，確保試體之品質一致性。

試體破壞與裂縫發展過程

觀察無機聚合材料試體破壞與裂縫發展過程，當試體 RGP-50 受到快速加載時，軸向裂縫從試體端面開始產生，並由中間延伸發展，約於 484 μs 時產生軸向裂縫，此時無明顯環向裂縫、膨脹或側向變形產生。於 1034 μs 時縱向裂縫數量明顯增加，同時亦有剪力裂縫產生，裂縫快速發展，環向應變隨之遽增，試體呈現環狀擴張破壞，此時試體完全破壞並呈半粉碎狀，如圖 10 所示，此時動態抗壓強度為 252 MPa。試體 RGP-50-BF 之破壞與裂縫發展過程與 RGP-50 相似，約在 533 μs 時產生軸向裂縫且無明顯環向裂縫，此時試體末端與透射桿端接觸面局部區域已呈現部分破碎，試體於 817 μs 時呈現環狀擴張破壞，此時試體完全破壞並呈半粉碎狀，如圖 11 所示，動態抗壓強度為 197 MPa。試體 RGP-W5G5 之裂縫發展過程，約 134 μs 時斜向裂縫（約 45°）剪力裂縫自試體之背撞面開始發展，並於約 617 μs 時呈現環狀擴張破壞，此時試體完全破壞並呈半破碎狀，如圖 12 所示，然其破碎程度較前兩者為輕，動態抗壓強度為 187 MPa。破壞產狀隨著應力加載率提升，破壞產狀從半破碎至半粉碎破壞，各試體撞擊後破壞產狀如圖 13 至圖 15。

動態增強因子

分離式霍普金森桿撞擊試驗中，試體於高加載率之衝擊荷載下產生之壓應力峰值為動態抗壓強度，其與准靜態抗壓強度之比值，即為動態增強因子（Dynamic Increase Factor, DIF）。此參數在國外設計規範如 CEB^[8] 及 UFC^[9] 中已提出不同混凝土材料之建議參考值，據以量化材料於高加載率下之力學行為，可應用於結構於衝擊荷載下反應特性之設計、分析與評估。

本試驗中，當撞擊腔壓設定為 0.9 kgf/cm²，各試體准靜態強度及動態增強因子關係如圖 16 所示，結果顯示三種材料配比之准靜態抗壓強度介於 115 MPa 至 121 MPa，差異率僅約 5%；衝擊抗壓強度則介於 187 MPa 至 252 MPa，差異率約 35%；而動態強度因子分別為 1.7、1.84 及 2.08。顯示隨著應變率之提升，動態強度因子亦隨之增加，其中，以 RGP-50 之動態強度增益率最大。

由於 SHPB 試驗無法精準地控制加載率，本研究中衝擊試驗所得之應變率範圍介於 200 s⁻¹ 至 388 s⁻¹。文獻研究結果顯示，類混凝土脆性材料之 DIF 值介於 10 s⁻¹ 至 30 s⁻¹ 或 66 s⁻¹ 時，由於有效試驗數據之缺乏，在對數圖中可假設為線性比例關係^[10]，而動態抗

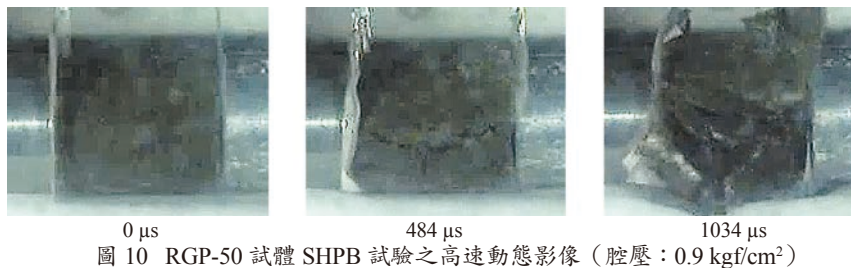


圖 10 RGP-50 試體 SHPB 試驗之高速動態影像（腔壓：0.9 kgf/cm²）

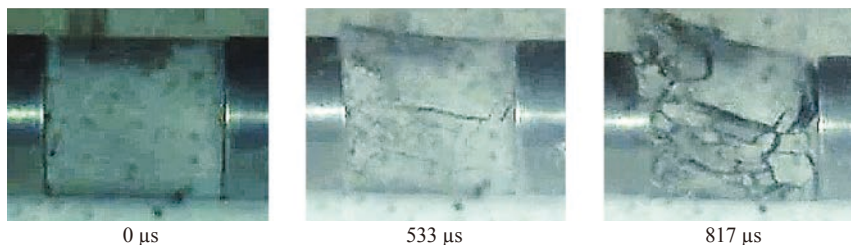


圖 11 RGP-50-BF 試體 SHPB 試驗之高速動態影像（腔壓：0.9 kgf/cm²）

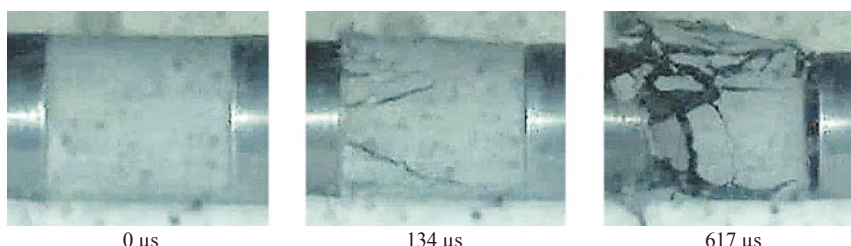


圖 12 RGP-W5G5 試體 SHPB 試驗之高速動態影像（腔壓：0.9 kgf/cm²）

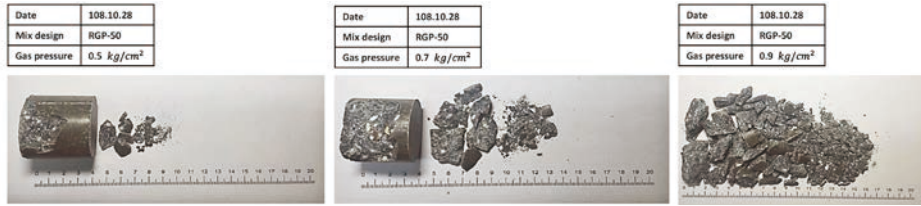


圖 13 RGP-50 試體撞擊後破壞產狀

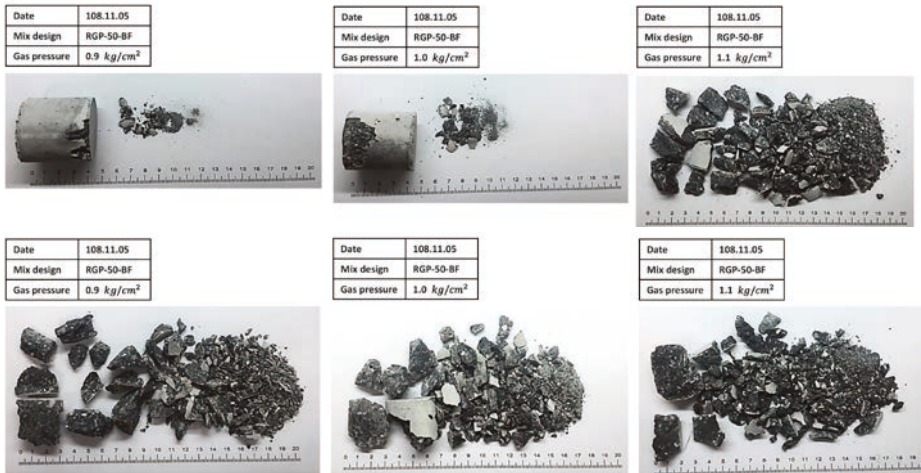


圖 14 RGP-50-BF 試體撞擊後破壞產狀



圖 15 RGP-W5G5 試體撞擊後破壞產狀

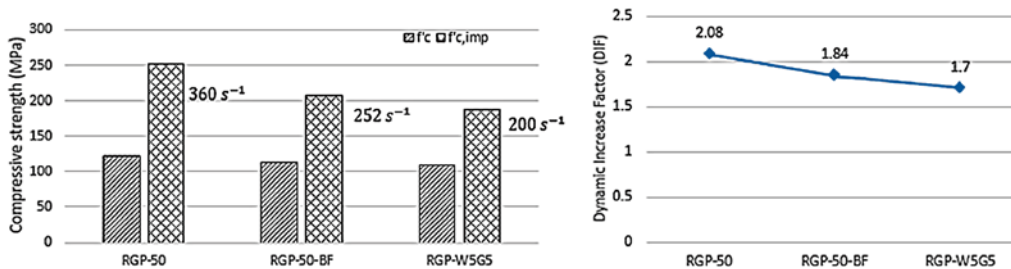


圖 16 各試體准靜態強度及動態增強因子關係圖

壓強度之應變率敏感度，則在當應變率大於 30 s^{-1} 或 66 s^{-1} 時開始突顯，曲線斜率轉為陡峭，動態強度因子增益率提升^[3]。因無機聚合材料具有類混凝土之材料脆

性，本研究使用卜特蘭混凝土（Ordinary Portland Cement concrete, OPC）之動態增強因子預測公式，以比較無機聚合材料動態增強因子之應變率敏感度，如下式表示^[8]：

$$DIF f'_c = f'_{impact} / f'_c = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{co})^{0.014} \quad \dot{\epsilon} \leq 30s^{-1} \quad (4)$$

$$DIF f'_c = f'_{impact} / f'_c = 0.012 (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{co})^{1/3} \quad \dot{\epsilon} > 30s^{-1} \quad (5)$$

其中， f'_{impact} 為動態抗壓強度； f'_c 為平均准靜態抗壓強度； $\dot{\epsilon}$ 為應變率，單位為 s^{-1} ； $\dot{\epsilon}_{co}$ 為應變率參考值 ($30 \times 10^{-6} s^{-1}$)。

影響混凝土動態增強因子應變率敏感度之因素包括准靜態抗壓強度、粗骨材之粒徑、水灰比、養護齡期、養護環境溫度、濕度、試體尺寸效應及儀器限制等。一般而言，准靜態抗壓強度較低之混凝土試體，將具有較高之動態增強因子應變率敏感度。本研究試驗數據與前述 OPC 強度增強因子預測公式之比較分析如圖 17 所示，結果顯示，RGP-50 及 RGP-W5G5 之有效資料點均落於曲線之下，而 RGP-50-BF 之有效資料點均落於曲線之上，顯示 RGP-50-BF 動態增強因子之應變率敏感度高於 OPC 材料。

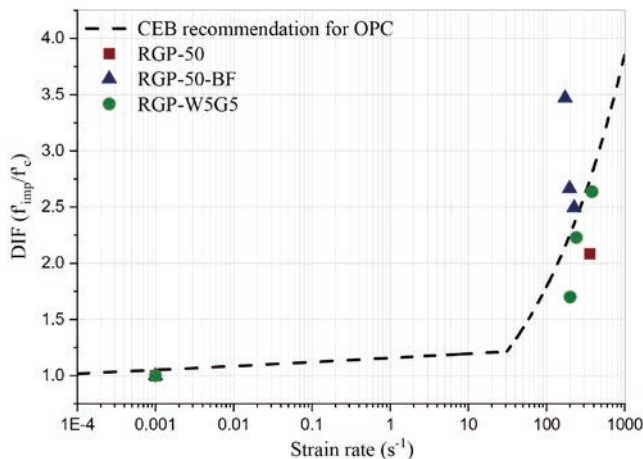


圖 17 各試體准靜態強度及動態增強因子關係圖

結論

本研究以水淬高爐爐石粉作為無機聚合材料之粉體原料，添加矽灰、矽灰石、耐鹼玻璃纖維、玻璃粉及細粒料，與鹼性溶液混合製成無機聚合砂漿試體，分別進行工作性與物性試驗（包括坍流度、硬度、線收縮率及孔隙率等）、基本力學性能試驗（抗壓試驗），及動態力學性能試驗，探討無機聚合複合材料之衝擊力學特性。根據試驗結果，主要發現如下：

1. 當灰砂比 (B/S) 為 1:1.2，水灰比 (L/B) 為 0.55 時，其養護齡期四小時之抗壓強度可達 36.7 MPa、養護齡期 28 天之線收縮率減少為 0.36%，同時具備適當之流動性質。

2. 當鹼性溶液之 SiO_2/Al_2O_3 莫爾比為 50 時，初凝時間由 14 分鐘延長為 19 分鐘、流度由 200 mm 增加為 210 mm、養護齡期四小時之抗壓強度由 36.7 MPa 提升為 38.7 MPa 及 0.35% 之線收縮率。
3. 玻璃粉之添加，將造成其部分與鹼性溶液反應，溶解出更多的矽離子使硬化時間下降，而無法達到理想的抗收縮效果。因此，以矽灰石作為抗收縮劑較為合適。
4. 隨著應變率持續增加，應力-應變曲線向上偏移之趨勢愈加明顯，且達到強度峰值後之曲線仍向後延伸，顯示試體吸收及消散能量之能力增加，抗衝擊性能亦進而提升。
5. 無機聚合材料試體於衝擊荷載下之破壞與裂縫發展過程，軸向裂縫從試體端面開始產生，並由中間延伸發展，破壞產狀隨著應力加載率提升，破壞產狀從半破碎至半粉碎破壞。

誌謝

本研究由科計部專題研究計畫 MOST 108-2221-E-606-001-MY2 補助支持，特此誌謝。

參考文獻

1. 戴于盛 (2013), 「無機聚合綠色水泥之應用開發研究」, 碩士論文, 國立臺北科技大學資源工程研究所, 台北, 臺灣。
2. 潘煌鐸、戴毓修、彭仁柏、吳承修、蕭力銘 (2011), 「爐石活性粉混凝土的動態力學性質及耐久性」, 台灣混凝土學會 2011 年混凝土工程研討會, 台南, 臺灣。
3. Khan, M.Z.N., Hao, H., Hao, Y., and Shaikh, F.U.A. (2018), "Experimental evaluation of quasi-static and dynamic compressive properties of ambient-cured high-strength plain and fiber reinforced geopolymer composites." *Construction and Building Materials*, Vol. 166, pp. 482-499.
4. 李夕兵、古德生 (1994), 「岩石衝擊動力學」, 中南工業大學出版社, 長沙, 中國。
5. Parry, D.J., Dixon, P.R., Hodson, S., and Al-Maliky, N. (1994), "Stress equilibrium effects within Hopkinson bar specimens." *Journal de Physique III*, Vol. 4, pp. 107-112.
6. Subhash, G. and Ravichandran, G. (2000), "Split-Hopkinson pressure bar testing of ceramics." *Mechanical Testing and Evaluation*, Vol. 8, pp. 497-504.
7. 林維仁 (2014), 「分離式霍普金森壓桿試驗之應變量測及其應用於脆性材料適用性探討」, 碩士論文, 國防大學理工學院環境資訊及工程學系, 桃園, 臺灣。
8. CEB Comite Euro-International Du Beton, CEB-fib model code for concrete structures 2010. Telford, 2013.
9. UFC 3-340-02, Structures to resist the effects of accidental explosions, Department of defense, USA, 2008.
10. Ross, C.A., Jerome, D.M., Tedesco, J.W., and Hughes, M.L. (1996), "Moisture and strain rate effects on concrete strength." *ACI Mater J*, Vol. 93, pp. 293-300.