

超高性能混凝土動態拉伸力學行為研究

許元融¹ 潘煌錕² 賴怡君³ 李明輝⁴

¹高雄科技大學土木工程與防災 碩士班研究生

²國立高雄科技大學土木工程系教授

³陸軍軍官學校土木工程系講師

⁴國立屏東科技大學土木工程系教授

摘 要

超高性能混凝土 (ultra high performance concrete, UHPC) 是具有卓越力學性能的混凝土材料，利用粉狀摻料之緻密性與超低之用水量，使 UHPC 之材料分子間有更強的鍵結，並反應於提升力學性能上。相比於傳統混凝土，UHPC 除了具有極高的抗壓強度外，搭配適當的纖維使用，其抗拉性能與抗彎性能均能突破傳統混凝土之限制，同時亦能兼具高韌性與高耐久性等特色。雖已知纖維對 UHPC 性質影響甚鉅，但纖維對 UHPC 之動態力學性質相關研究有限。因此，本研究擬以鋼纖維對 UHPC 動態拉伸性質之影響進行探討，採用同款不同含量之鋼纖維（直徑 0.2mm，長度 13mm），設計體積比為 1%、1.5%、2% 之 UHPC 材料，以 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 、 $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 、 $1.43 s^{-1}$ 三種不同應變率進行動態直接拉伸試驗。藉由動態拉伸應力-應變曲線可觀察到不同應變率對 UHPC 造成之力學性能差異，並探討鋼纖維含量對 UHPC 於擬靜態與中速直接拉伸荷載下之抗拉性能變化，據以了解鋼纖維含量對 UHPC 之動態性質影響。由試驗結果顯示，鋼纖維含量與 UHPC 動態抗拉強度呈現正相關性，且隨著應變率的提升，動態抗拉強度呈正向發展的趨勢，其中以添加鋼纖維體積比 2% 之 UHPC 材料試體於 $1.43 s^{-1}$ 應變率作用下整體表現較為明顯。

關鍵字：超高性能混凝土、鋼纖維、直接拉伸、應力-應變曲線

Research on Dynamic Tensile Mechanical Behavior of Ultra-High Performance Concrete

Yuan-Rung Shiu¹ Huang Hsing Pan² Yi-Chun Lai³ Ming-Hui Lee⁴

¹ Graduate student, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Sciences and Technology

² Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³ Lecturer, Department of Civil Engineering, R.O.C. Military Academy

⁴ Professor, Department of Civil Engineering, National Pingtung University of Science and Technology

ABSTRACT

Ultra-high performance concrete (UHPC) is a concrete material with excellent mechanical properties. The compactness of powder admixtures and ultra-low water consumption render UHPC material molecules to have stronger bonds and greater mechanical properties. Relative to traditional concrete, UHPC has extremely high compressive strength. When UHPC is used appropriately with steel fibers, its tensile and flexural properties can exceed the limitations of traditional concrete, resulting in high toughness and high durability. This study investigates the effect of steel fibers on the dynamic tensile properties of UHPC. The same type of steel fibers (0.2 mm in diameter and 13 mm in length) with different contents were used. The volume ratios of UHPC materials were designed to be 1%, 1.5%, and 2%, respectively. Dynamic direct tensile tests were conducted at three different strain rates, namely $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$, $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$, and $1.43 s^{-1}$. The difference in mechanical properties of UHPC caused by different strain rates was observed through the dynamic tensile stress-strain curve. The effect of steel fiber content on the tensile properties of UHPC under low-speed and medium-speed direct tensile loads was also discussed to understand the effect of steel fiber content on the dynamic properties of UHPC. The test results revealed a positive correlation between steel fiber content and the dynamic tensile strength of UHPC. Following the increase in strain rate, the dynamic tensile strength showed a positive trend. The overall dynamic direct tensile performance of the UHPC specimen was particularly apparent with a 2% steel fiber volume ratio and at a strain rate of $1.43 s^{-1}$.

Keywords: ultra-high performance concrete, steel fiber, direct tension, stress-strain curve

一、前言

超高性能混凝土 (ultra high performance concrete, UHPC) 是先進的水泥複合材料，具有優異的抗壓強度與耐久性[1-5]。由於此材料具强度高、抗腐蝕及低熱傳導率等特性，其優異的性能，使UHPC通常用於軍用或防護結構的建築物如地下指揮所、坑道、碉堡、戰甲車掩體，惟軍事設施工程之防護能力要求較高，因此要能承受高應變率的衝擊和爆炸載荷[6-8]，有必要了解對UHPC動態行為的認識，以促進其應用和發展。

動態載荷種類，包括地震、衝擊和爆炸載荷，加載速度從低到高等[9]，在Qingliang Yu[9]的文獻中說明了應變率區域劃分和相對應的加載裝置。目前許多研究顯示，UHPC在動態衝擊載荷下，與常規靜態和擬靜態載荷作用有明顯不同的反應行為，顯見應變率效應是使動態力學不同於擬靜態條件的重要原因。此外，材料受動態載重作

用下所呈現出強度、裂紋擴展速度和能量吸收能力等均會受到加載速率的影響。

應變率對水泥基複合材料的性能也有極大的影響。Abrams 於 1917 年提出了混凝土應變率敏感性，發現在較高的加載率下抗壓強度會隨之增加[10]。另外，蔡營寬等人以SHPB進行動態試驗[11]，結果顯示，無機聚合的混凝土抗壓強度和抗衝擊性能，均會隨著應變率的增加而提升，Faizul Mohee [12]歸納許多研究文獻也得到了相似的結果，發現混凝土的抗壓強度和抗拉強度均隨應變速率的增加而增加，並觀察到應變速率對混凝土抗拉強度的影響幾乎是抗壓強度的四倍。Bi Sun等[13]對一般混凝土進行不同應變率之直接拉伸試驗，觀察到隨著應變率的增加，混凝土試體的抗拉強度和彈性模量越大。另一方面，Gianluca Cusatis利用CSL(Confinement Shear Lattice)模型模擬不同應變率對混凝土破裂行為的影響，發現應變率高於 $10^{-1} s^{-1}$ 時，應將慣性力(inertia forces)造成的影

響列入考量。R.John等[14]使用分離式霍普金森桿進行動態測試，觀察到混凝土的劈裂抗拉強度取決於尺寸和速率，經由實驗得到每秒 70 的應變速率下，動態強度與準靜態強度之比值約為 4.5。

然而，UHPC 動態之研究多以施加不同應變率之衝擊試驗與擬靜態之實驗結果進行比較，因受限於實驗設備與應變率加載之方式，對 UHPC 的動態拉伸力學行為著墨較少，相關研究有限。另一方面，鋼纖維對 UHPC 力學性質的提升有極大的貢獻，但在動態加載下的影響情形則有待商榷。因此，本次研究主要以不同含量鋼纖維的 UHPC 來研究在不同應變率下實施拉伸試驗的性能影響，試驗中將利用 MTS 819 伺服液壓試驗機，針對具不同含量鋼纖維的 UHPC 試體在擬靜態及動態軸向拉伸下的力學行為進行研究，進而分析其應力-應變曲線及試體破壞狀況，探討不同鋼纖維含量的 UHPC 在動態抗拉下所表現出的拉伸力學性質及行為。

二、試驗規劃

2-1 實驗材料

本次實驗使用的試體材料有波特蘭一型水泥 (11~15 μm)；石英砂 (150~250 μm)，是一種堅硬、耐磨、化學性能穩定的矽酸鹽礦物，用來構成 UHPC；矽灰，粒徑約為 0.1~0.2 μm ；水和水淬爐石粉，本研究使用爐石粉取代 50% 的水泥，不但減低了水泥的使用量，對於介面性質也有所改善，此材料的保水性可以使介面處水灰比降低，因其結構微小，可以填充於孔隙中，提高緻密性，可有效改善介面結構；此外為了改善流度，添加了強塑劑，本研究使用聚羧酸基高效減水劑；鋼纖維加入混凝土中可以增加抗拉能力，本次使用的是平直型鋼纖維，長度為 13mm，直徑 0.2mm，長徑比為 65，原料為冷拔鋼絲，使用的是鋼絲切斷法，此生產方法可使鋼纖維強度達 1000-2000MPa，本研究分別針對具鋼纖維體積比 1%、1.5% 及 2% 的 UHPC 試體進行一系列試驗，並分別編號 F1、F2 及 F3 作為識別，混合比例如表 1 所示。

表 1 UHPC 材料配比

成份	F1	F2	F3
卜特蘭 I 型水泥		0.5	
爐石粉		0.5	
矽灰		0.25	
石英砂 # 4	0.462	0.462	0.450
水		0.19	
強塑劑		0.015	
鋼纖維*	1%	1.5%	2%

* 鋼纖維用量為混合物體積比

2-2 試體準備與養護條件

本研究使用容量 8 升水泥砂漿拌合機進行混合，實驗過程均在實驗室內執行，執行順序如下：(1)首先將所有粉料及石英砂放置於拌合容器中，使用低速實施拌合五分鐘，讓材料能夠均勻分散，由於濕度與靜電都有可能使這些細微的粉料形成塊狀，故藉由前五分鐘與石英砂的拌合來減少結塊的現象產生；(2)將水與強塑劑混和均勻後，平順地加入拌合容器中，約 5-6 分鐘後，材料逐漸產生反應，持續使用相同混合速度繼續拌合 8 分鐘，此時材料會呈現具流動性的漿體；(3)依據不同的混合物體積分數加入鋼纖維，並持續以同樣速率拌合 5 分鐘，使鋼纖維在漿體中能夠平均分佈。(4)UHPC 漿體完成拌合之後依 ASTM 1437 [15] 進行流度試驗，測量其流度，後續將三種不同混合物個別澆鑄 3 個 50 毫米正方形抗壓試體及 3 個直接拉伸試體，此動作於五分鐘內完成，並使用保鮮膜覆蓋試體，避免因水分喪失，導致試體表面乾縮；(5)澆鑄完成後於室溫下放置 48 小時之後拆模，並將試體放入 90°C 熱水中養護 72 小時，完成後將於室溫下放置 28 天實施試驗。

三、試驗方法

3-1 流度試驗

本試驗參考 ASTM C1437-20[15] 規範針對 UHPC 實施流度試驗，澆鑄於試體模之前先針對拌合後的 UHPC 漿體進行流度試驗，將漿體注入於錐形模具如圖 1 所示 [15]，由於需比較不同配比的流度，因此在注入漿體的過程中均自然注入，且擴散時間以 2 分鐘為標準，最後以卷尺量測漿體擴散的直徑如圖 2 所示 [16]，以上之統一作法為確保各配比的 UHPC 混合物具有良好的一致性與工作性能。

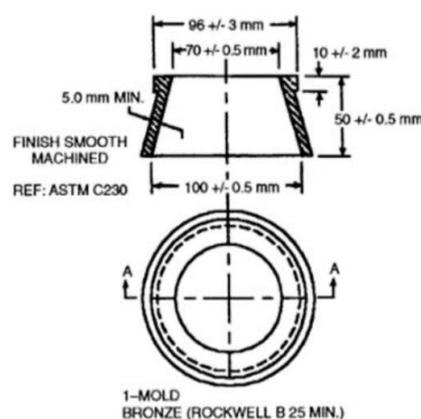


圖 1 流度試驗 [15]

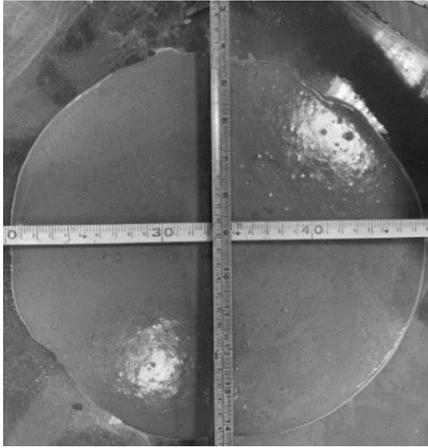


圖 2 流度量測示意圖[16]

3-2 抗壓試驗

本試驗是依據 ASTM C109/C109M-20b [17]的規範來執行，抗壓實驗為全自動抗壓試驗機 如圖 3 使用 20 MPa/min 的加載速率對 7 天與 28 天的 50mm×50mm×50mm 立方試體進行加壓直至試體破壞所得最大抗壓強度。每一組配比進行三個立方體的抗壓試驗，並依試驗結果計算平均強度與標準差。



圖 3 SUMMIT KH-2000 抗壓試驗機

3-3 動態抗拉試驗

為了比較不同試體在不同應變率下的動態特性，動態拉伸試驗使用 MTS 819 伺服液壓試驗機進行如圖 4，此一試驗機之最大出力為 50kN，拉伸過程中試體的變形歷程是透過在試體上架設之位移計如圖 5 所量測，而非採用引伸桿之位移歷程實施應變計算，因為儀器勁度與夾持邊界效應的影響，會使彈塑性階段的變形量有所誤差。

由於大多數的材料屬於應變敏感性材料，表示材料承受的應變率越快，對於變形的抵抗力也越大。目前，用來評估材料動態力學性能的方法並無明確的試驗標準。油壓式高速拉伸試驗機是較為普遍應用的試驗方法。而 MTS 819 伺服液壓試驗機由於機械性能及油源補償的限制，一般用於擬靜態的材料試驗，但在高壓氮氣輔助及伺

服閥增益之情況下，可用於進行應變率 $2 \times 10^2 s^{-1}$ 水準以下之力學性能測試。

因此本試驗將使用 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 、 $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 、 $1.43 s^{-1}$ 三種應變率，分別模擬靜態及中應變率，應變率定義範圍如圖 6 [9]，並個別用 S1、S2、S3 表示之。而拉伸過程中，主要藉由 LVDT 位移計量測變形過程，另外為了避免儀器勁度與夾持邊界效應影響彈塑性之變形量，故由資料擷取器讀取試體受力及變形量，其應力之計算公式可參考式(1)，應變計算可參考公式(2)，再利用式(1)及式(2)之計算繪製張力應力-應變曲線，因此，直接拉伸試驗所得到的應力-應變曲線，可以直接用來比較 UHPC 在鋼纖維強化後的行為，本研究主要擷取應力-應變曲線中的初始開裂強度(Initial Cracking Strength, ICS)、極限拉伸強度(Peak Cracking Strength, PCS) 及對應之應變量(Peak Strain, PS)等數值。另外為了呈現材料吸收能量(Energy Absorption, 簡稱 EA)最佳的纖維效應，本研究將加載至裂紋完成局部化後的階段，取應力下降至 95%PCS 為界，如圖 7 所示，計算公式可參考式(3) [18]。



圖 4 MTS 819 伺服液壓試驗機

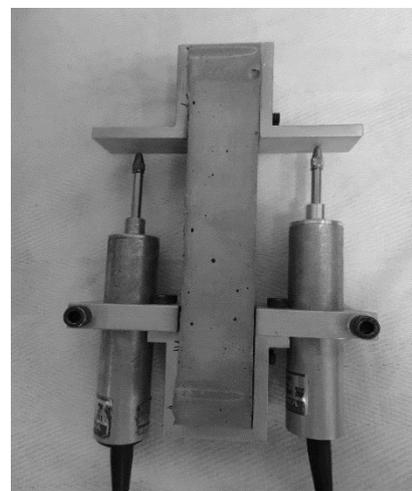


圖 5 位移計架設實況

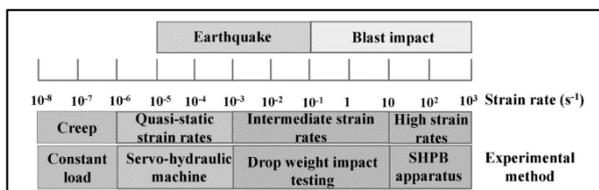


圖 6 材料在不同荷重下之應變率及試驗方法[9]

應力 σ 計算式如下：

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (1)$$

其中 P 為試體受力荷載重，單位為 N；A 為試體截面積，單位為 mm^2 。

應變 ϵ 計算式如下：

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \dots \dots \dots (2)$$

其中 δ 為試體變形量，單位為 mm； L_0 為試體標具長度 (gauge length)，單位為 mm。

材料吸收能量 EA 計算式如下：

$$EA = \int_0^{\delta_i} \sigma d\epsilon \dots \dots \dots (3)$$

其中， δ_i 為 95%PCS 所對應之變形量。

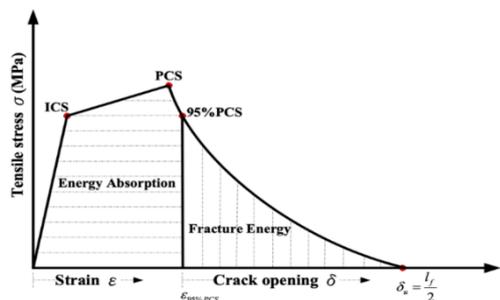


圖 7 典型 UHPC 拉伸應力應變曲線材料特性示意圖

四、實驗結果與討論

4-1 流度

每一組混合物的流度試驗結果如圖所示。試驗是依據 ASTM 1437- 20 [15] 規範進行測量，圖 8 表示在試驗時測量漿體流度的階段，由於擴散所需的時間會受漿體稠度與鋼纖維含量等因素影響，為了比較，在實驗中均以兩分鐘為標準，並量測兩個垂直直徑並計算平均值。添加 1% 鋼纖維之漿體的流度為 255mm，隨著體積比增加為 1.5% 時，漿體流度為 245mm，下降 3.9%。對於鋼纖維體積比 2% 的漿體，流度下降 11.7%，為 225mm。因為鋼纖維含量的增加會使漿體稠度增加導致流動性降低。

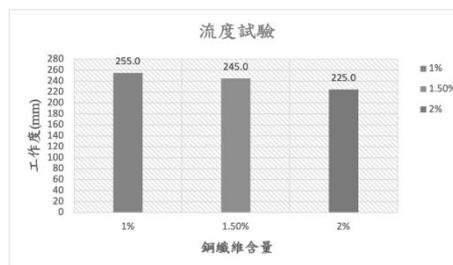
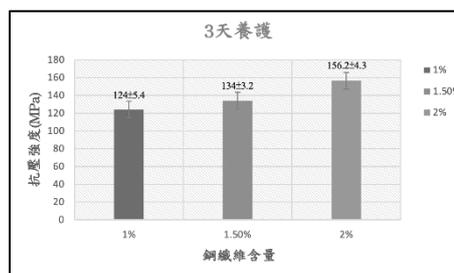


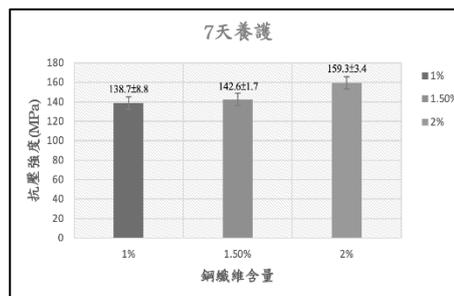
圖 8 流度

4-2 抗壓強度

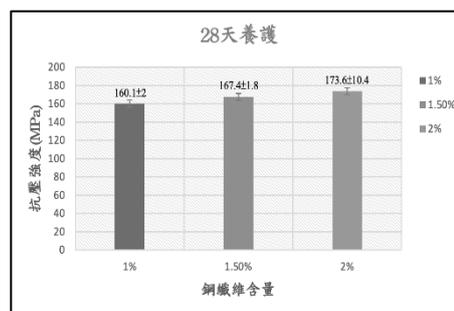
不同鋼纖維含量之 UHPC 試體抗壓強度如圖 9 所示，分別將 3 天、7 天及 28 天的三個試體實施試驗，根據圖 7 的結果顯示，UHPC 的抗壓強度會隨著鋼纖維含量的增加而增強，當纖維含量由 1% 增加到 1.5% 時，強度增加約 8%，當纖維含量由 1.5% 增加到 2% 時，強度增加約 16.5%。表示混凝土的抗壓強度的增加，和鋼纖維的分布與限制裂紋發展的作用有關。



(a) 3 天抗壓強度



(b) 7 天抗壓強度



(c) 28 天抗壓強度

圖 9 不同鋼纖維含量試體在不同養護天數下之抗壓強度

4-3 開裂與破壞行為

圖 10 為不同鋼纖維配比 UHPC 試體在不同應變率拉伸作用下的開裂行為，UHPC 試體開裂後，鋼纖維在裂紋附近產生橋接效應[19]，UHPC 透過鋼纖維阻止裂紋擴展的作用而增加承載能力[20]，應力會透過裂紋傳遞到基體，當鋼纖維產生硬化現象時，傳遞出來的應力會高於初始開裂強度，導致產生更多裂紋與應變硬化的特徵。由於纖維的數量隨著配比增加，在正常的分布狀況下，試體在承受拉力荷載時，能呈現出多重裂紋開裂的破壞行為，此外，隨著應變率的提升，裂紋開裂的狀態也明顯增加。

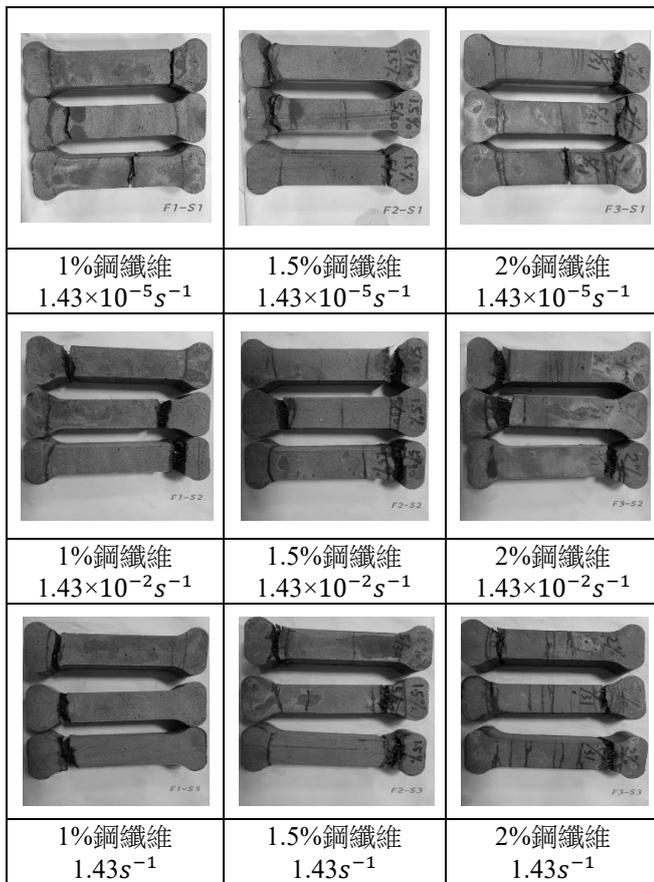


圖 10 開裂行為

4-4 動態抗拉試驗結果

由圖 11 中表示對於不同鋼纖維配比的試體，在相同應變率拉伸作用下所呈現出來的應力-應變曲線，鋼纖維含量越高，向上偏移的趨勢也越加明顯，而 0%試體由於沒有添加鋼纖維導致延展性不佳，故受到拉伸時直接斷裂，在此做為參考值，其他相關數據如表 2 顯示，應變率為 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時，1%試體的初始開裂強度為 6.97 MPa，1.5%試體的初始開裂強度為 6.5 MPa，減少 6.7%；2%之 C 試體的初始開裂強度為 8.0 MPa，相較於 1%試體增加 14.7%。對於極限張力強度，1%試體為 7.71 MPa，1.5%試體與 2%試體分別增加 11.6%與 22.8%，達到 8.61 MPa 與

9.47 MPa。吸收能量分別為 22.5 kJ/m³、45.4 kJ/m³，及 43.8 kJ/m³。

當應變率為 $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 時，1%試體的初始開裂強度為 7.17 MPa，1.5%試體的初始開裂強度為 9.08 MPa，增加 26.6%；2%之 C 試體的初始開裂強度為 9.44 MPa，相較於 1%試體增加 31.6%。對於極限張力強度，1%試體為 8.69 MPa，1.5%試體與 2%試體分別增加 18.5%與 47.2%，達到 10.3 MPa 與 12.8 MPa。吸收能量分別為 46.6 kJ/m³、56 kJ/m³，及 61.3 kJ/m³。

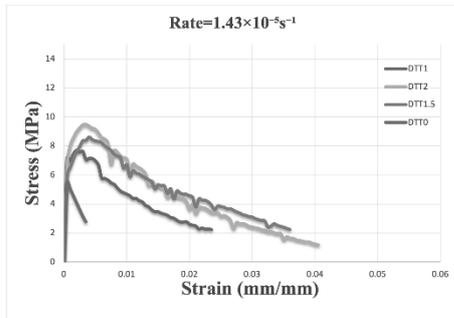
最後應變率為 $1.43 s^{-1}$ 時，1%試體的初始開裂強度為 7.99 MPa，1.5%試體的初始開裂強度為 9.14 MPa，增加 14.3%；2%之 C 試體的初始開裂強度為 11.55 MPa，相較於 1%試體增加 44.5%。對於極限張力強度，1%試體為 8.35 MPa，1.5%試體與 2%試體分別增加 32.6%與 70.2%，達到 11.08 MPa 與 14.22 MPa。吸收能量分別為 31.2 kJ/m³、51.3 kJ/m³，及 83.7 kJ/m³。由以上分析可發現，在相同的應變率作用下，鋼纖維含量越高，應力-應變曲線向上偏移的趨勢也越加明顯，初始開裂強度、極限張力強度及吸收能量也隨之增加，表示鋼纖維含量增加時，整體的拉伸性能會隨之提升。

圖 12 表示相同鋼纖維配比的試體，在不同應變率拉伸作用下所呈現出來的應力-應變曲線，隨著應變率提升，所受的應力明顯增加，曲線隨之向上偏移，相關數據如表 3 顯示，鋼纖維含量為 1%，應變率為 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時，初始開裂強度為 6.97 MPa， $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 時的初始開裂強度為 7.17 MPa，增加 2.8%； $1.43 s^{-1}$ 時之初始開裂強度為 7.99 MPa，相較於 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時增加 14.6%。對於極限張力強度，應變率為 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時為 7.71 MPa， $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 與 $1.43 s^{-1}$ 時分別增加 12.7%與增加 8.3%，達到 8.69 MPa 與 8.35 MPa。吸收能量分別為 22.5 kJ/m³、46.6 kJ/m³，及 31.2 kJ/m³。

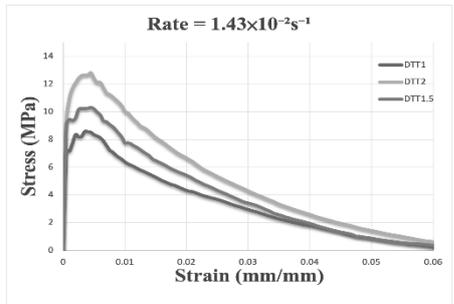
當鋼纖維含量為 1.5%，應變率為 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時，初始開裂強度為 6.5 MPa， $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 時的初始開裂強度為 9.08 MPa，增加 39.6%； $1.43 s^{-1}$ 時之初始開裂強度為 9.44 MPa，相較於 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時增加 45.2%。對於極限張力強度，應變率為 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時為 8.61 MPa， $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 與 $1.43 s^{-1}$ 時分別增加 19.6%與增加 28.6%，達到 10.3 MPa 與 11.08 MPa。吸收能量分別為 45.4 kJ/m³、56.0 kJ/m³，及 51.3 kJ/m³。

最後當鋼纖維含量為 2%，應變率為 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時，初始開裂強度為 8.0 MPa， $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 時的初始開裂強度為 9.44 MPa，增加 18%； $1.43 s^{-1}$ 時之初始開裂強度為 11.55 MPa，相較於 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時增加 44.3%。對於極限張力強度，應變率為 $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$ 時為 9.47 MPa， $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$ 與 $1.43 s^{-1}$ 時分別增加 35.1%與增加 50.1%，達到 12.8 MPa 與 14.22 MPa。吸收能量分別為 43.8 kJ/m³、61.3 kJ/m³，及 83.7 kJ/m³。由以上分析可發現，相同鋼纖

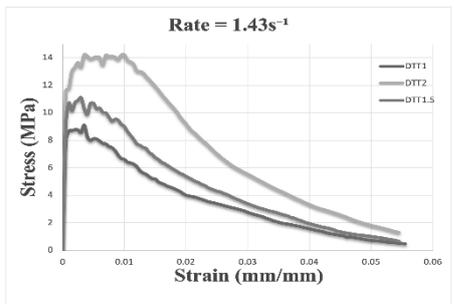
維含量試體在不同應變率作用下，初始開裂強度、極限張力強度隨著應變率提升而增加，說明 Abrams 提出混凝土的應變率敏感性使在較高的加載率下抗壓強度會隨之增加的理論[10]是正確的，此外，2%之試體吸收能量也隨應變率呈正向發展，除 1%、1.5%試體可能因鋼纖維分布不均或拉伸試驗過程導致誤差。



(a)Rate- $1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$

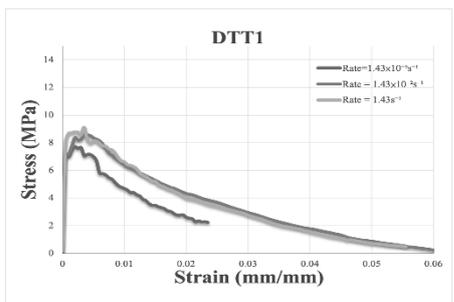


(b)Rate- $1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$

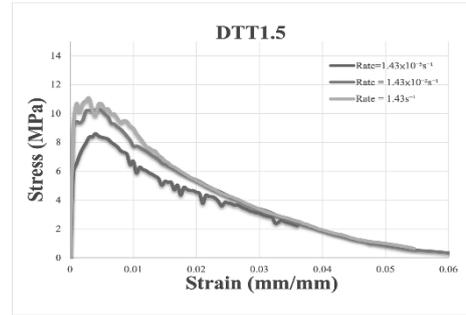


(c)Rate- $1.43 s^{-1}$

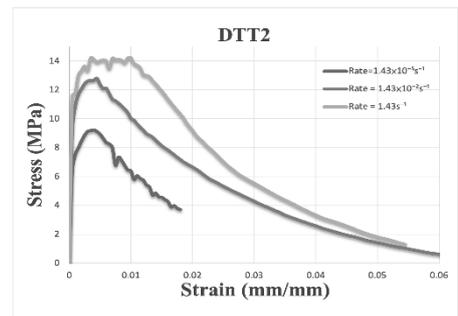
圖 11 不同鋼纖維含量在相同應變率拉伸下應力-應變曲線



(a)fiber-1%



(b)fiber-1.5%



(c)fiber-2%

圖 12 相同鋼纖維含量在不同應變率下拉伸應力-應變曲線

表 2 不同鋼纖維含量在相同應變率拉伸下應力-應變曲線行為參數表

應變率	$1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$		
鋼纖維含量	1%	1.5%	2%
ICS(MPa)	6.97	6.5	8.0
PCS(MPa)	7.71	8.61	9.47
95%PCS(MPa)	7.32	8.18	8.99
PS (%)	0.002	0.004	0.0035
EA(KJ/m ³)	22.5	45.4	43.8
應變率	$1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$		
鋼纖維含量	1%	1.5%	2%
ICS(MPa)	7.17	9.08	9.44
PCS(MPa)	8.69	10.3	12.8
95%PCS(MPa)	8.26	9.79	12.16
PS (%)	0.0035	0.0045	0.0045
EA(KJ/m ³)	46.6	56	61.3
應變率	$1.43 s^{-1}$		
鋼纖維含量	1%	1.5%	2%
ICS(MPa)	7.99	9.14	11.55
PCS(MPa)	8.35	11.08	14.22
95%PCS(MPa)	7.93	10.53	13.51
PS (%)	0.0035	0.003	0.0035
EA(KJ/m ³)	31.2	51.3	83.7

參考文獻

表 3 相同鋼纖維含量在不同應變率下
拉伸應力-應變曲線行為參數表

鋼纖維含量	1%		
應變率	$1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$	$1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$	$1.43 s^{-1}$
ICS(MPa)	6.97	7.17	7.99
PCS(MPa)	7.71	8.69	8.35
95%PCS (MPa)	7.32	8.26	7.93
PS (%)	0.002	0.0035	0.0035
EA(KJ/m ³)	22.5	46.6	31.2
鋼纖維含量	1.5%		
應變率	$1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$	$1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$	$1.43 s^{-1}$
ICS(MPa)	6.5	9.08	9.14
PCS(MPa)	8.61	10.3	11.08
95%PCS (MPa)	8.18	9.79	10.53
PS (%)	0.004	0.0045	0.003
EA(KJ/m ³)	45.4	56	51.3
鋼纖維含量	2%		
應變率	$1.43 \times 10^{-5} s^{-1}$	$1.43 \times 10^{-2} s^{-1}$	$1.43 s^{-1}$
ICS(MPa)	8.0	9.44	11.55
PCS(MPa)	9.47	12.8	14.22
95%PCS (MPa)	8.99	12.16	13.51
PS (%)	0.0035	0.0045	0.0035
EA(KJ/m ³)	43.8	61.3	83.7

五、結論

本研究利用直接拉伸試驗方法進行了擬靜態及動態應變率對不同含量鋼纖維 UHPC 的拉伸實驗，可以歸納以下的結論：

- (一) 實驗中 UHPC 的抗壓強度、抗拉性質隨著鋼纖維含量的增加而受影響，另外 UHPC 的工作度則依鋼纖維的增加而降低。
- (二) UHPC 試體的裂紋隨著鋼纖維的添加及應變率的增加而增加，因鋼纖維能限制裂紋擴張且其橋接效應能使應力往週邊傳遞，生成更多裂紋，此外，應變率的增加使初始開裂強度隨之提升，除了造成更多裂紋外也顯現應變硬化的特徵。
- (三) 部分試體裂紋呈現不如預期，其可能原因為鋼纖維分布不均，導致拉伸試驗時，試體容易在頭尾部斷裂。
- (四) 隨著應變率的持續增加，應力-應變曲線向上偏移之趨勢越加明顯，達到極限張力峰值後曲線仍向後延伸，表示試體吸收能量的能力增加，抗拉性能也進而提升。

1. W.Wang, J.Liu, F.Agostini, C.A.Davy, F.Skoczylas, D.Corve z, "Durability of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC) under progressive aging," Cement Concr.Res. 55, pp.1-13, 2014.
2. D.Y.Yoo, N.Banthia, "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: a review," Cement Concr.Compos. 73, pp.267-280, 2016.
3. R.Yu, L.vanBeers, P.Spiesz, H.J.H.Brouwers, "Impact resistance of a sustainable ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC) under pendulum impact loadings," Construct. Build.Mater. 107, pp.203-215, 2016.
4. F.U.A.Shaikh, S.Luhar, H.S.Arel, I.Luhar, "Performance evaluation of Ultrahigh performance fibre reinforced concrete - a review," Construct.Build.Mater. 232, 2020.
5. D.Wang, C.Shi, Z.Wu, J.Xiao, Z.Huang, Z.Fang, "A review on ultra high performance concrete : Part II. Hydration, microstructure and properties," Construct.Build.Mater. 96, pp.368-377, 2015.
6. P.P.Li, Q.L.Yu, "Responses and post-impact properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete under pendulum impact," Compos.Struct. 208, pp.806-815, 2019.
7. P.P.Li, H.J.H.Brouwers, Q.Yu, "Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance," Int.J.Impact Eng. 136, 2020.
8. Y.Y.Y.Cao, Q.L.Yu, H.J.H.Brouwers, W.Chen, "Predicting the rate effects on hooked-end fiber pullout performance from Ultra-High Performance Concrete (UHPC)," Cement.Concr.Res. 120, pp.164-175, 2019.
9. Y.Qingliang, Z.Weitan, S.Caijun, "Research progress on the dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete under high strain rates," Cement Concr. Compos. 124, 2021.
10. D.A.Abrams, "Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete," ASTM J. 17(2), pp.70-78, 1917.
11. 蔡營寬、李宏輝、劉宇倫、鄭大偉、李有豐、吳嘉偉，"無機聚合複合材料之抗衝擊力學性能試驗研究"，土木水利，第四十七卷，第二期，第41-49頁，2020。
12. F.M.Mohee, "The effects of strain rate on concrete strength under dynamic impact load," Journal of Bangladesh Electronics Society, Vol.16, No.1-2, pp.83-90, 2016.
13. B.Sun, R.Chen, Y.Ping, Z.Zhu, N.Wu, "Study on Axial Tensile Strain Rate Effect on Concrete Based on

- Experimental Investigation and Numerical Simulation,”*Materials*, Vol.15(15),5164,2022.
- 14.R.John,T.Antoun,A.M.Rajendran,“Effect of strain rate and size on tensile strength of concrete,”*In Shock compression of condensed matter–Elsevier*.1991,pp.501-504,1992.
- 15.ASTM C1437-20,“Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar,”ASTM International West Conshohocken,PA,pp.1-2,2020.
- 16.黃建擘，(2021)，“超高性能鋼纖維混凝土在不同試驗方法下的拉伸行為”，碩士論文，國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技研究所，高雄，臺灣。
- 17.ASTM C109/C109M-20b,“Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens),”ASTM International West Conshohocken,PA,pp. 1-12,2021.
- 18.N . V . Tue, .Ma,M.Orgass,“ Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC”.
Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete,Kassel,Germany, 112 (10),pp.93–100,2008.
- 19.L.Hussein,L.Amleh,“Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members,”*Construction and Building Materials*, Vol. 93, No.15, pp.1105-1116,2015.
- 20.J.Gao,W.Sun,K.Morino,“Mechanical properties of steel fiber-reinforced,high-strength,lightweight concrete,”
Cement and Concrete Composites,Vol.19,No.4,pp.307-313,1997.