

直接拉伸及雙向壓孔試驗對 UHPC 張力行為之比較

黃建暉^{1*}、潘煌鏗²、李明輝³

^{1*}高雄科技大學土木工程與防災碩士班 研究生 J108241134@nkust.edu.tw

²國立高雄科技大學土木工程系 教授 pam@nkust.edu.tw

³陸軍軍官學校土木工程系 教授 g990406@gmail.com

摘要

超高性能混凝土(UHPC)具有優異之力學性質，抗壓與抗張能力高出一般混凝土數倍，在設計上考慮其張力行為有其重要性。本研究利用直接拉伸試驗與雙向壓孔試驗針對不同鋼纖維含量之 UHPC 進行拉伸試驗。實驗結果指出，試體受力後，外觀裂紋破壞、裂縫的形成與分佈狀態會隨著鋼纖維添加量增加而產生更多細微裂紋，顯示有較多鋼纖維含量的 UHPC 會因應力重分配能夠吸收更多能量，可提高材料之韌性；由材料的張力應力-應變曲線可獲得材料的開裂強度與極限拉伸強度所對應之應變量，並計算材料的吸收應變能，藉以評估比較不同試驗方式對材料之韌性行為，試驗結果顯示鋼纖維含量 1%時，各項材料行為參數以雙向壓孔大於直接拉伸試驗；當纖維含量 2%及 3%時，以直接拉伸皆高於雙向壓孔試驗。

關鍵字：超高性能混凝土、直接拉伸試驗、雙向壓孔試驗、破壞模式、應力應變曲線、應變能

一、前言

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)，在低水灰比條件下，藉由添加不同種類纖維材料，可有效提升其力學性能，再以高溫高壓方法養護，其抗壓強度可達 150 至 810 MPa，約為傳統混凝土的 3-16 倍。透過鋼纖維的添加，UHPC 的延展性和能量吸收通常是高性能混凝土(HPC)的 300 倍，能有效提升鋼筋混凝土結構物的耐久性，亦顯著改善對於長期反覆荷載造成的疲勞行為，得以減少日後修繕、保養等費用，有助於降低工程生命週期成本[1-4]。

UHPC 除有良好的抗壓強度外，在成分中添加鋼纖維相較於其他的粉料及膠結料之提供基材硬固特性，有改善其脆性性質、有效提升抗拉強度，使其具有良好延展性[5-6]。這些功能主要來自於鋼纖維的有效地橋接效應和限制裂縫擴展所致。此外，鋼纖維的形狀、長度、直徑與體積含量等都會影響 UHPC 在抗壓及抗拉時的強度[7]；Wu 等 [8]的研究指出，在固定強塑劑量下，添加 3%鋼纖維可有效提升混凝土抗壓與撓曲強度，但是較高的鋼纖維摻量將降低新拌 UHPC 的工作性能。

目前超高性能混凝土，大多採用直接拉伸以獲得材料張力性質，此試驗特性在於可以直接獲得 UHPC 的拉伸強度、延展性以及破壞性能。但此試驗存在一些侷限性和困難，其中困難點包括難以確保軸向以外的自由度被完全拘束，且測試裝置較為複雜。在標距

長度內形成的局部裂紋，以及裂紋形成的不一致，導致試驗過程中出現許多變因，進而影響試驗結果。

雙向壓孔試驗由 Chen [9] 所提出，其主要是利用以小面積圓柱對試體上下平面施壓，在上下壓孔(Punches)正下方形成圓錐形的破裂面，兩端面破裂面隨載重施加相互靠近並徑向推動周圍的材料形成張力破壞。雙向壓孔試驗之裂紋形成在最弱的環向平面，而這也利於觀察纖維的橋接效應。同時，本試驗相對是較容易且可靠的試驗方式，因此逐漸被用於纖維強化水泥質材料拉伸性質的測試[10-12]。

本研究使用添加直徑 0.175 mm 之微鋼纖維 UHPC 試體進行上述兩種張力試驗，探討 1%、2% 與 3% 鋼纖維含量對材料拉伸性能之影響；同時，透過所獲得之拉伸應力-應變曲線比較拉伸試驗方法之韌性行為。

二、實驗方法

2.1 配比設計

在混凝土中添加鋼纖維以增加抗拉能力是普遍方法之一，本研究使用的鋼纖維長度為 12.5mm，直徑 0.175mm，長徑比(Aspect Ratio)為 71.4，單根纖維的抗拉強度大於 2000 MPa，如圖 1 所示。添加的鋼纖維體積比分別為 1%、2% 及 3%。此外，UHPC 的構成材料包含卜特蘭一型水泥，粒徑約 11-15 μm ；為了降低水泥使用量，使用爐石粉取代 50% 的水泥，其優點可降低水化熱，同時因其粒徑小於水泥顆粒，除了與水泥共同作用形成水化產物之外，也用於填充料以填充顆粒間的孔隙；非緻密砂灰，粒徑小於 0.2 μm ；構成 UHPC 的骨架為石英砂，所使用的砂的粒徑介於 104 μm 到 250 μm 。由於 UHPC 要達到超高強度的目標，需控制拌合水量低於 0.25，為此，要獲得良好的工作性能，強塑劑是混合過程中必要的外加劑，本研究使用聚羧酸基高效減水劑。控制砂與二元水泥(水泥+爐石粉)的比值為 1:1 對於改善工作度與降低硬固 UHPC 的自體收縮具有重要的意義，本研究對於砂的用量為水泥用量的 1.03 倍，並根據鋼纖維摻量進行調整，混合比例如表 1 所示：



圖 1 鋼纖維外觀與尺寸

表 1:UHPC 材料配比

編號	A	B	C
水泥	0.5		
爐石粉	0.5		
矽灰	0.25		
石英砂(粗)	0.413	0.401	0.389
石英砂(細)	0.619	0.602	0.584
水	0.2		
強塑劑	0.04		
鋼纖維*	1%	2%	3%
水灰比	0.23		
*鋼纖維為體積分數			

2.2 試體準備與養護條件

混和水泥、爐石粉、矽灰、粗細石英砂等粉料置於攪拌容器中混合並使用低速檔位攪拌 5-8 分鐘使粉料均勻混合後，將所需的強塑劑與水之混合溶液緩緩倒入，並繼續以低速進行攪拌，大約 10-15 分鐘後，將逐漸出現流動性。此時將拌合機的轉速提高並持續攪拌 2-7 分鐘直至漿體均勻呈現糊狀，再逐漸放入鋼纖維，為了使纖維的分布更加均勻，攪拌時間約 5 到 10 分鐘，其後將漿體澆鑄於試體模中，並以保鮮膜覆蓋表面以防止表面水分迅速喪失形成裂縫。為了加速 UHPC 早期強度的發展，試體於澆鑄 2 天後拆模，將試體放入恆溫養護池中，在 90°C 高溫養護 72 小時後取出置於室溫下，待澆灌 7 天後以抗壓試驗機，進行立方體抗壓試驗確認標稱強度；並於到達 28 天齡期時，將部分 $\phi 50 \times 100$ mm 圓柱試體切割成 $\phi 50 \times 50$ mm 之試體，並將所有圓柱試體利用磨平機將圓柱試體上下面磨平，以利進行雙向壓孔試驗；狗骨頭試體進行直接做拉伸試驗。

三、試驗方法

3.1 直接拉伸試驗

本研究直接拉伸試驗使用 MTS 819 伺服液壓試驗機進行(如圖 2)，此一試驗機之最大出力為 50kN。試體受力歷程使用 Kistler 9351B 壓電式測力規進行量測，拉伸過程中試體的變形歷程是透過在試體上架設之 LVDT 位移計所量測(如圖 3)，而非直接採用引伸桿之位移歷程進行應變之計算，因為該行程包含了儀器勁度與夾持邊界效應之影響，將高估彈塑性階段之變形量，為了穩定量測試體受力與變形量，加載速率設定為 0.002mm/s，由資料擷取器讀取試體受力與變形量，再進一步繪製材料張力應力應變曲線。



圖 2 MTS 819 伺服液壓試驗機



圖 3 直接拉伸架設實況

3.2 雙向壓孔試驗

本研究使用 MTS 萬能油壓試驗機進行試驗(如圖 4)，加載速率為 0.004mm/s。加載過程中，利用 MTS 之荷重規進行量測，訊號直接進入資料紀錄器中。藉由試體變形採用環向伸長計量測(如圖 5)。試體正中間用鏈條環繞並連接至伸長計待固定後進行，試驗過程中，荷載與變形歷程訊號同步傳回資料擷取器中，設定的取樣率是 2Hz；試驗受力情形(如圖 6) [9]。



圖 4 MTS 萬能油壓試驗機



圖 5 環向應變計量測

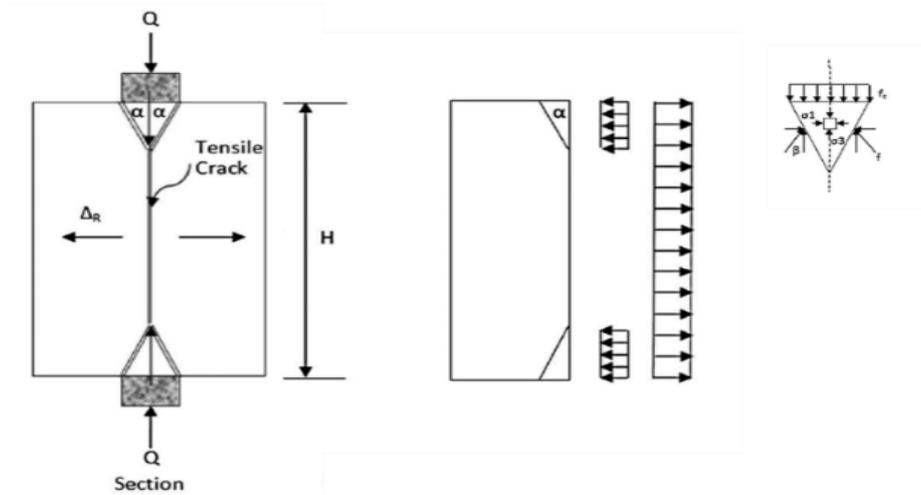


圖 6 試驗受力情形

本研究雙向壓孔試驗採用圓柱試體直徑 5 公分且高度不得超過 5 公分，通過沖頭對圓柱試體上下平面施壓。在兩端沖頭(Punches)承壓處形成圓錐形的破裂面，受壓過程中兩個圓錐體相互靠近，在徑向平面上會產生均勻的拉伸應力裂紋，受力行為。此係式是根據 Chen [9]之塑性理論和多拉伸裂紋破壞機理之假設計算所得出，其等效拉伸應力表示如下：

$$\frac{Q}{\pi a^2} = \frac{1 - \sin\varphi}{\sin\alpha \cos(\alpha + \varphi)} \frac{F_c}{2} + \tan(\alpha + \varphi) \left(\frac{bH}{a^2} - \cot\alpha \right) F_t \quad (1)$$

其中， Q 為施加之載重， F_t 為抗張強度， F_c 為抗壓強度， a 為沖頭之半徑， b 為試體之半徑， H 為試體之高度， α 為椎體(Cone)的角度， φ 為內摩擦角(Internal friction angle)。經過合理假設，滿足 $\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = 0$ ， $\alpha = 10^\circ$ 的情況下，簡化後材料張應力及環向張應變公式如式

(2)及式(3)：

$$\sigma_t \approx \frac{Q}{\pi(1.2bH - a^2)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\delta}{2\pi b} \quad (3)$$

其中， σ_t 為橫向張應力， ε_t 為試體中心處橫向張應變， δ 為試體中心處橫向伸長量。

由於直接拉伸與雙向壓孔試驗所得到之應力-應變曲線，將可以直接用於比較 UHPC 在鋼纖維強化後的行為，除了可以觀察拉伸強度、基材微裂縫形成到裂縫局部化之間的應力趨勢，透過積分亦可以評估材料所呈現之韌性性質，由於高韌性是超高性能混凝土追求的目標之一。為了將前述性質進行量化分析，本研究將擷取幾項重要的材料性能參數，包括初始開裂強度(Initial Cracking Strength, ICS)、極限拉伸強度(Peak Cracking Strength, PCS) 及對應之應變量(Peak Strain, PS)，初始開裂強度(ICS)是指材料受拉伸時機剛出現裂縫時的應力值，此時應力-應變曲線將產生勁度的變化。由於纖維開始作用限制裂縫的擴展，試體中的應力將重新分配。此時，應力仍將持續上升，同時，許多的微小裂縫將逐漸形成，此為一應變硬化的階段，直至上升至最大應力值，即極限拉伸強度(PCS)，之後材料開始應力軟化，曲線下之面積稱為韌性容量(Ductility Capacity)，韌性代表材料在塑性變形和斷裂過程中吸收能量的能力，為材料在破裂前所能吸收的能量與體積的比值。一般而言，在應力應變曲線中，當材料試體開始加載直到極限拉伸強度後，此區間曲線下面積，稱為材料吸收能量(Energy Absorption，簡稱 EA)，為了最佳的呈現纖維的效應，本研究將觀察加載至微裂縫完成局部化後的階段，取應力下降至 95%PCS 為界(如圖 7)，計算公式可參考式(4) [13]。

$$EA = \int_0^{\delta_i} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

其中， δ_i 為 95%PCS 所對應之變形量。

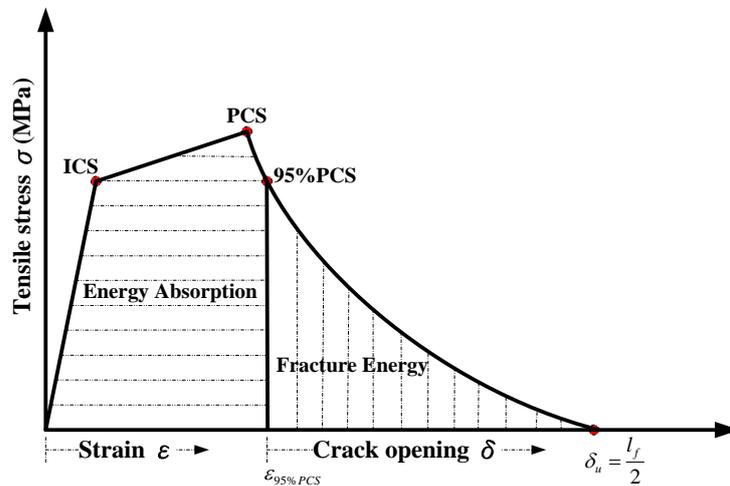


圖 7 典型 UHPC 拉伸應力應變曲線材料特性示意圖

四、實驗結果與討論

4.1 直接拉伸試驗結果

4.1.1 外觀裂紋模式

鋼纖維含量 1% 之試體細微裂紋較少，隨著纖維含量增加 2% 及 3%，不僅能夠明顯地看到細微的裂紋有逐漸增長的趨勢，且試體斷裂點逐漸往中間移動，此現象是由於基材開裂後，纖維的橋接效應限制了裂紋進一步的擴展，並透過應力的重分配，不斷的形成新的裂紋，此一機制將有利於變形過程中能量的吸收(如圖 8)。

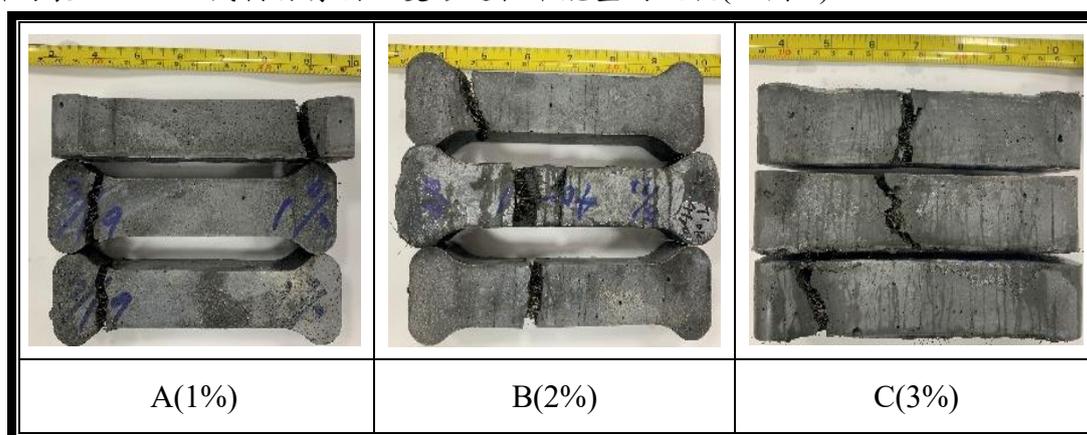


圖 8 直接拉伸試驗試體外觀裂紋模式

4.1.2 材料抗張行為

本研究進行的直接拉伸試驗之結果如圖 9 表 2 所示。圖 9 中應力-應變曲線下所涵蓋的面積越大即表徵材料具有較佳的韌性，由圖 9 中對於 A、B 與 C 組的試驗結果顯示，隨著鋼纖維的含量增加，整體的拉伸性能均有顯著的提升。對於 1% 之 A 試體的初始開裂強度為 5.41 MPa，2% 之 B 試體的初始開裂強度為 7.62 MPa，增加 40.7%；3% 之 C 試體的初始開裂強度為 9.85 MPa，相較於 A 增加 83.3%。對於極限張力強度，1%A 試體為 6.70 MPa，2% 的 B 試體與 3% 的 C 試體分別增加 73.1% 與 103%，達到 11.57 MPa 與 13.55 MPa。然而，由於纖維的數量更多，在確定有良好的分散的狀況下，試體在承受拉力時將能呈現出多重裂縫開裂的破壞模式，如圖 8 所示。從圖 8 觀察，鋼纖維含量 1% 之試體細微裂紋較少，隨著纖維含量增加 2% 及 3%，可以明顯地看到細微的裂紋。由於基材開裂後，纖維的橋接效應限制了裂紋進一步的擴展，並透過應力的重分配，不斷的形成新的裂紋，此一機制將有利於變形過程中能量的吸收。對於 3 組試體的吸能性質分別為 46 kJ/m³、83 kJ/m³，及 103 kJ/m³，與鋼纖維含量成正成長趨勢。

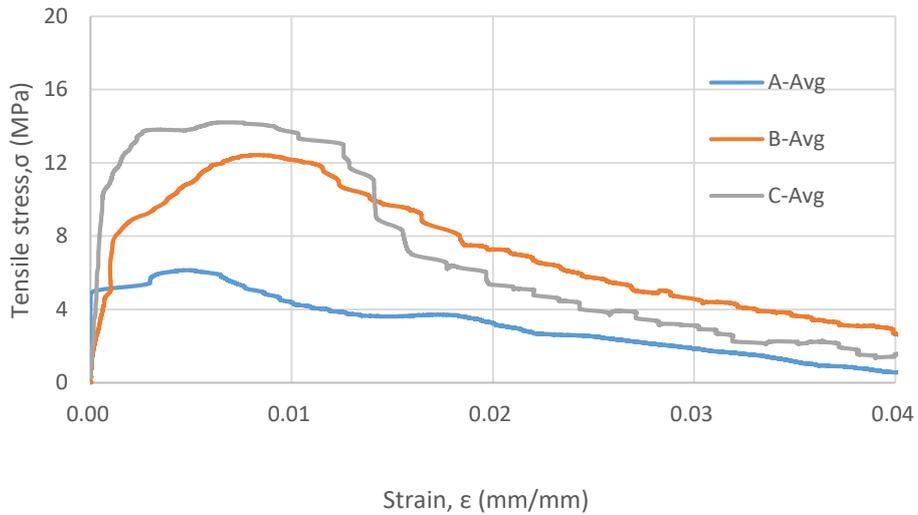


圖 9 直接拉伸應力應變圖

表 2:UHPC 直接拉伸材料行為參數

	A(1%)	B(2%)	C(3%)
ICS (MPa)	5.41	7.62	9.85
PCS (MPa)	6.70	11.57	13.55
95%PCS (MPa)	6.36	10.99	12.87
PS (%)	0.006	0.002	0.005
EA (KJ/m ³)	46	83	103

4.2 雙向壓孔試驗結果

4.2.1 外觀裂紋模式

透過檢視試體的裂紋可以得知，裂紋面有許多凹凸不規則狀，顯示破壞前有許多小裂縫存在，此現象為裂縫受鋼纖維阻擋造成的橋阻裂縫(crack bridging)，許多的小裂縫會由受壓區逐漸往外擴散。經觀察，添加鋼纖維量僅 1%時，試體出現一條主要明顯裂痕，軸向的垂直面表面產生多個微細紋，而非由單一裂縫決定；添加 2%鋼纖維體積量時試體出現一樣一道主要裂痕，多增添了些許小裂痕，之間夾角約為 108°；而添加鋼纖維體積率為 3%時，產生的裂紋多且多分布於主要開裂之裂縫旁，顯示有逐漸集中之趨勢(如圖 10)。

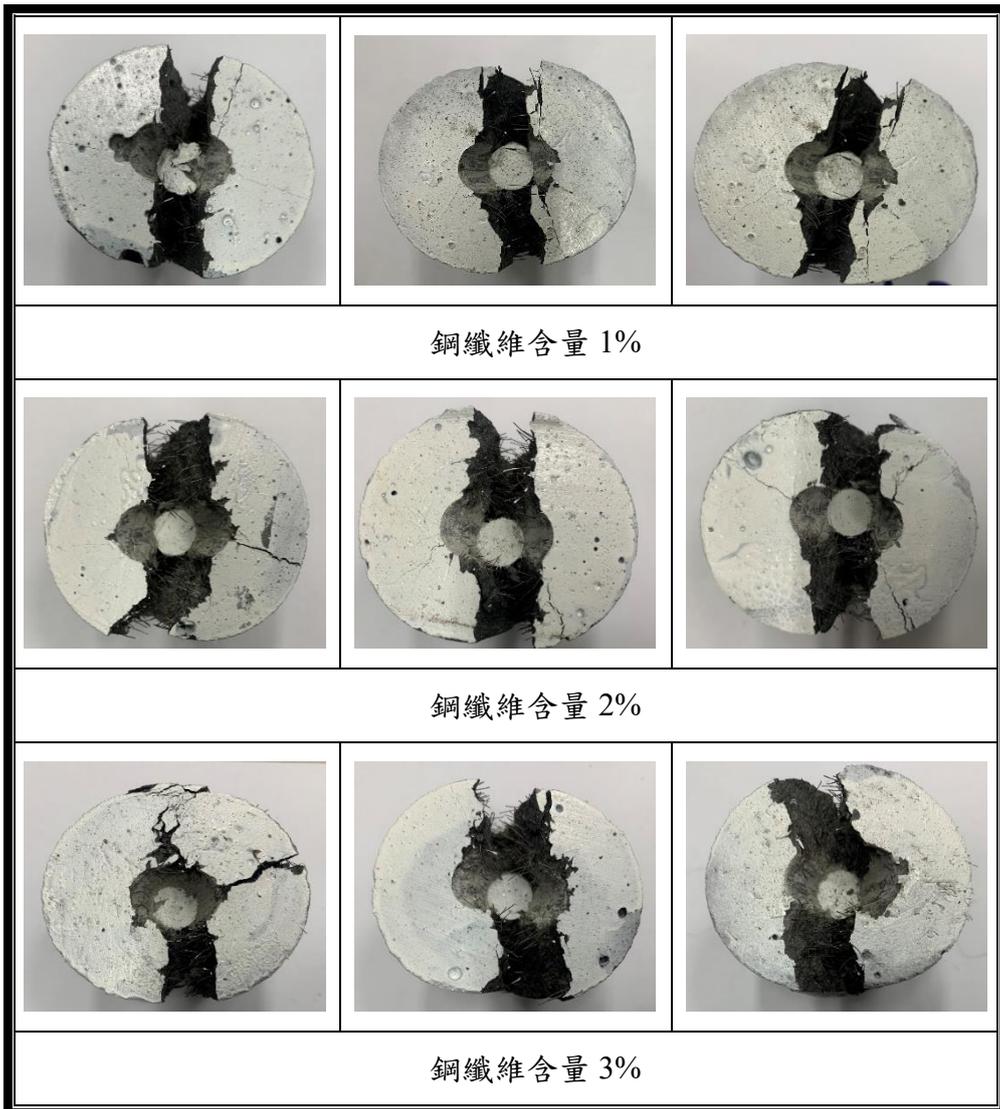


圖 10 雙向壓孔試驗試體外觀裂紋模式

4.2.2 材料抗張行為

圖 11 及表 3 中可以觀察到，隨著鋼纖維的添加量增加，整體曲線都有增長且向右偏移的趨勢，曲線下面積(能量)也有明顯的差異，延展性及韌性也都受鋼纖維的影響。應變硬化現象隨著鋼纖維含量的增加，效果越趨明顯；從極限強度開始下降有逐漸趨緩跡象，以鋼纖維含量 3% 最為顯著。從分析資料中擷取環向應變 0.01 前，各配比平均其數據後得到之應力-應變曲線。獲得各材料之初始開裂強度(ICS)、極限抗張強度(PCS)及對應之應變量(PS)，並透過積分程式得到吸收能量(EA)，綜整(如表 3)，從表中可以直接觀察到，參數皆隨著鋼纖維含量增加而提升：初始開裂強度分別是 10.10、10.42 及 9.04 MPa，表示鋼纖維含量能提升 UHPC 的彈性能力；極限強度分別是 10.14、11.13 及 12.44 MPa。而極限強度所對應之應變量分別為 1.4、2.1 及 3.8 mm，

材料受力過程中的吸收能量分別為 13.65、22.4 及 45.05 (KJ/m³)，表中可觀察到數值呈正成長趨勢，因此可知，添加鋼纖維含量能夠提升材料抗張性質，以滿足設計強度。

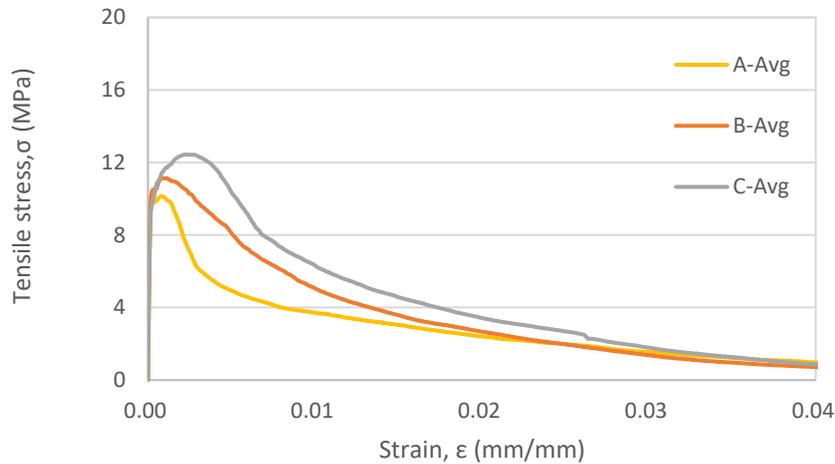


圖 11 雙向壓孔應力應變圖

表 3:UHPC 雙向壓孔材料行為參數

	A(1%)	B(2%)	C(3%)
ICS(MPa)	10.10	10.42	9.04
PCS(MPa)	10.14	11.13	12.44
95%PCS(MPa)	9.63	10.57	11.81
PS (%)	0.0014	0.0021	0.0038
EA(KJ/m ³)	13.65	22.4	45.05

4.3 兩者試驗結果比較

鋼纖維含量 1%時，UHPC 在二種試驗方法所得結果(如圖 12 及表 4)所示，擷取應變量 0.04 mm，並放大其應力-應變曲線，從圖中找出材料參數並以表格呈現，由(表 4)中可以更直接的觀察到，雙向壓孔大部分重要參數都高於直接拉伸試驗，初始開裂強度 10.10 就比 5.41 MPa 高出 86%，應力應變圖上顯示雙向壓孔試驗在進入初始開裂前之曲線斜率較大；極限強度數值為 10.14 及 6.70 MPa，數值提高了 51%，然而極限強度所對應之應變量(PS)分別是 0.0014 mm 與 0.006 mm，數值降低了 77%，從比例限度到極限強度之應變應化階段所經歷之應變量以直接拉伸優於雙向壓孔試驗；95%極限張力(95%PCS)強度為 9.63 MPa 及 6.36 MPa，同樣提高了 51%，利用所對應之應變量，透過積分程式得到吸收能量(EA)分別為 13.65 及 46 KJ/m³ 雙向壓孔較直接拉伸試驗足足降低

了 71%，過了極限強度後隨即進入應變軟化階段，雙向壓孔之應變軟化現象較為明顯，也因為如此其吸收能較直接拉伸試驗差。

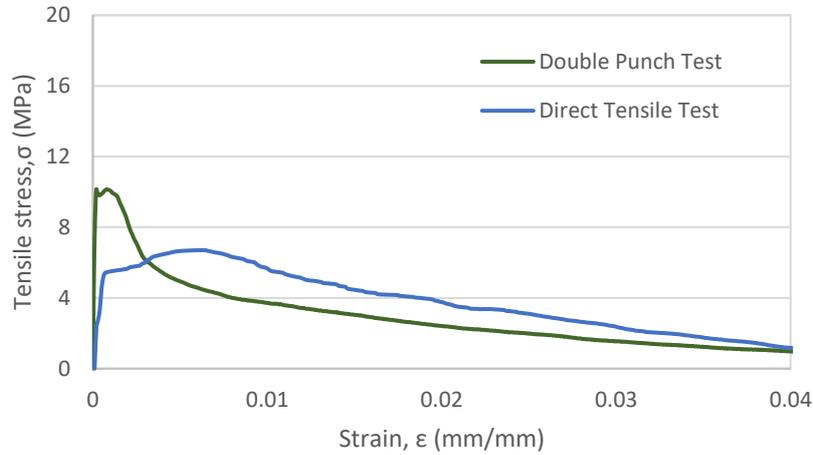


圖 12 鋼纖維含量 1%張力曲線圖

鋼纖維含量 2%時，UHPC 在二種試驗方法所得結果(如圖 13 及表 4)所示，擷取應變量 0.04 mm，並放大其應力-應變曲線，從圖中找出材料參數並以表格呈現，由(表 4)中可以更直接的觀察到，雙向壓孔大部分重要參數皆低於直接拉伸試驗，初始開裂強度 10.42 就比 7.62 MPa 提高了 36%，應力應變曲線顯示雙向壓孔試驗在進入初始開裂前之曲線斜率較大；極限強度數值為 11.13 及 11.57 MPa，數值降低了 4%，然而極限強度所對應之應變量(PS)分別是 0.0021 mm 與 0.002 mm，數值提高了 5%，從比例限度到極限強度之應變硬化階段所經歷之應變量差距不大；95%極限張力(95%PCS)強度為 10.57MPa 及 10.99 MPa，同樣提高了 51%，利用所對應之應變量，透過積分程式得到吸收能量(EA)分別為 22.4 及 83 KJ/m³ 雙向壓孔較直接拉伸試驗降低了 74%，過了極限強度後隨即進入應變軟化階段，雙向壓孔之應變軟化現象較為明顯，下降幅度大，也因為如此其曲線下所涵蓋之面積較小，顯示吸收能較直接拉伸試驗差。

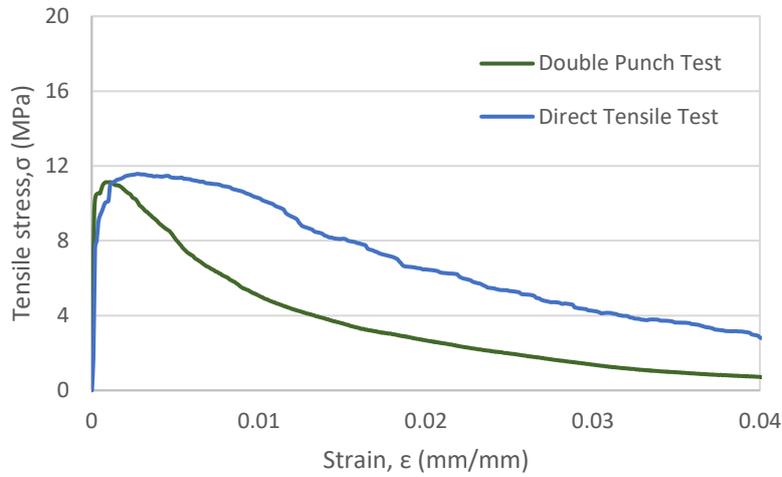


圖 13 鋼纖維含量 2%張力曲線圖

鋼纖維含量 3%時，UHPC 在二種試驗方法所得結果(如圖 14 及表 4)所示，擷取應變量 0.04 mm，並放大其應力-應變曲線，從圖中找出材料參數並以表格呈現，由(表 4)中可以更直接的觀察到，雙向壓孔大部分重要參數皆低於直接拉伸試驗，初始開裂強度 9.04 就比 9.85 MPa 降低了 9%，應力應變曲線顯示雙向壓孔試驗在進入初始開裂前之曲線斜率較大；極限強度數值為 12.44 及 13.55 MPa，數值降低了 9%，然而極限強度所對應之應變量(PS)分別是 0.0038 mm 與 0.005 mm，數值降低了 24%；95%極限張力(95%PCS)強度為 11.81 及 12.87 MPa，降低 9%，利用所對應之應變量，透過積分程式得到吸收能量(EA)分別為 45.05 及 103 KJ/m³ 雙向壓孔較直接拉伸試驗降低了 74%，過了極限強度後隨即進入應變軟化階段，雙向壓孔之應變軟化現象較為明顯，下降幅度大，也因為如此其曲線下所涵蓋之面積較小，顯示吸收能較直接拉伸試驗差。

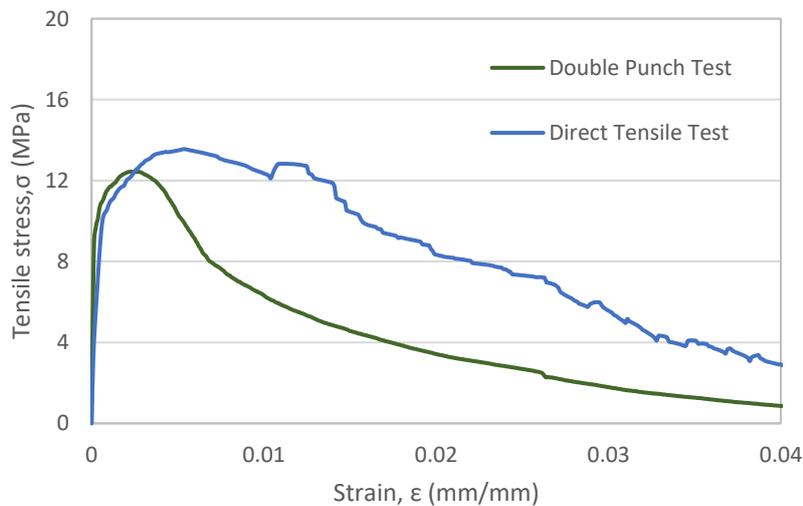


圖 14 鋼纖維含量 3%張力曲線圖

表 4:UHPC 兩種試驗材料行為參數

纖維含量	1%		2%		3%	
	雙向壓孔	直接拉伸	雙向壓孔	直接拉伸	雙向壓孔	直接拉伸
ICS(MPa)	10.10	5.41	10.42	7.62	9.04	9.85
PCS(MPa)	10.14	6.70	11.13	11.57	12.44	13.55
95%PCS(MPa)	9.63	6.36	10.57	10.99	11.81	12.87
PS (%)	0.0014	0.006	0.0021	0.002	0.0038	0.005
EA(KJ/m ³)	13.65	46	22.4	83	45.05	103

五、結論

本研究以 DTT 與 DPT 對 UHPC 進行張力試驗，由兩種試驗方式在荷載持續作用下，可得相近試驗結果：

- (1) 混凝土內部及表面會形成裂縫或微裂紋，而添加鋼纖維後，即可與混凝土間形成橋接作用及彎鉤效應，產生力學阻力並傳遞應力來緩和裂縫尖端的應力集中，進而抑止裂縫發展或裂縫數量的減少，避免形成較大之局部應變。
- (2) 各項硬固性質之試驗結果，可發現試體破壞模式皆不會產生爆炸性或脆性破壞，而破壞後依然保有一定強度及韌性。
- (3) 鋼纖維添加量 2%與 3%時，當材料進入塑性階段皆有明顯應變硬化階段，尤以 3%纖維含量最為明顯。

由兩種試驗方式獲得之材料應力應變曲線中，其材料行為參數有明顯差異之處：

- (1) 以 DTT 為基準，DPT 與 DTT 比值如下：當鋼纖維含量 1%時，DPT 之初始開裂強度、極限強度明顯高於 DTT；鋼纖維含量 2%時，DPT 之初始開裂強度高於 DTT 36%、極限強度降低 4%；鋼纖維含量 3%時，DPT 之初始開裂強度較 DTT 降低 9%、極限強度降低 9%。吸收能量(EA)則以 DPT 明顯低於 DTT，尤以鋼纖維 2%、3%時，降低 74%最顯著。
- (2) 試體破壞模式可以看到多重裂縫形成分佈狀態，顯示材料利用應力重分配能吸收更多能量，以直接拉伸最為顯著。

六、參考文獻

- [1] Mathews, M.S., Somayaji, S., and Ambedkar, G.S.B., “ Effects of Fly Ash on Strength and Durability of Hydraulic Structures with Various Grades of Cement and Concrete,” Special Publication, Vol. 199, No. 08, pp. 127-146, 2001.
- [2] Rasheed, A., Usman, M. , Farooq, H., and Hanif , A., “ Effect of Super-plasticizer Dosages on Fresh State Properties and Early-Age Strength of Concrete,” Materials Science and Engineering, Vol. 431, No. 06, pp. 69-77, 2018.
- [3] Richard, P., Cheyrezy. M., “ Composition of reactive powder concretes,” Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 07, pp. 1501-1511, 1995.
- [4] 洪崇展等編著，新世代多功能性混凝土材料-高性能纖維混凝土，土木水利，44 卷，1 期，第 33-51 頁，2017。
- [5] Eric, D., Aitcin, P.C., Mohamed, L., “High-Performance Powder,” Civil Engineering; New York , Vol. 68, No. 01, pp. 48-51, 1995.
- [6] Ceroni, F., Cosenza, E., Gaetano, M., Pecce, M., “Durability Issues of FRP Rebars in Reinforced Concrete Members,” Cement and Concrete Composites , Vol. 28, No. 10, pp. 857-868, 2006.
- [7] Kusumawardaningsih, Y., Fehling, E., Ismail, M., Aboubakr, A. A. M., “Tensile Strength Behavior of UHPC and UHPFRC,” Procedia Engineering , Vol. 125, No. 5, pp. 1081-1086, 2015.
- [8] Wu , Z., Shi, C. and Khayat, K. H., “Investigation of Mechanical Properties and Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete. Influence of Steel Fiber Content and Shape, ” Composites Part B: Engineering, Vol. 174, pp.1-12, 2019.
- [9] Chen, W. F., “Double punch test for tensile strength of concrete,” Journal of Materials, Vol. 07, pp.148-154, 1972.
- [10] Le, A.H., “ Evaluation of the Splitting Tensile Strength of Ultra-High Performance Concrete,” RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Vol.30, pp. 1149-1160, 2020.
- [11] Chen, W. F., “Double punch test for tensile strength of concrete,” PB224770/AS (NTIS), Lehigh Preserve Institutional Repository, Vol.70, No.18, 1969.
- [12] Aire, C., Carmona, S., Aguado, A., and Molin, C., “Double-Punch Test of Fiber-Reinforced Concrete : Effect of Specimen Origin and Size,” American Concrete Institute Materials Journal, Vol.112, No.21, pp.199-208, 2015.
- [13] Tue, N.V., Ma, J., Orgass, M., “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, Vol.112 ,No.10, pp.93–100, 2008.