

微鋼纖維對超高性能混凝土拉力行為之研究
The Effect of Micro-Steel Fiber on the Tensile Behaviors of Ultra High Performance Concrete

黃建暉¹、李明輝^{2*}、賴怡君³、戴毓修⁴、潘煌鏗⁵

Jian-Ye Huang¹ Ming-Hui Lee^{2*} Yi-Chun Lai³ Yuh-Shiou Tai⁴ Huang Hsing Pan⁵

¹高雄科技大學土木工程與防災 碩士班研究生

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

^{2*}陸軍軍官學校土木工程系教授

Professor, Department of Civil Engineering, R.O.C. Military Academy

*Corresponding author: g990406@gmail.com

³陸軍軍官學校土木工程系講師

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

⁴ HiPer Fiber 責任有限公司工程師

Chief Technical Officer, HiPer Fiber LLC, USA

⁵國立高雄科技大學土木工程系教授

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

摘要

本研究主要探討超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)添加不同體積含量之微鋼纖維(直徑0.175mm, 長度12.5mm)後, 對力學行為的影響。實驗的過程分別針對立方試體與狗骨頭形狀試體進行抗壓與直接拉伸試驗。拆模後進行72小時熱養護, 所有試體在七天的抗壓強度均大於150MPa。研究顯示隨著纖維體積含量的增加, 限制了微裂縫的擴展進而導致抗壓強度提升, 然而, 效果並不顯著, 因為更多的能量的損耗將反映在裂縫擴展過程中纖維拔出的階段。為此, 利用MTS伺服液壓試驗機進行直接拉伸試驗, 得到UHPC的材料拉伸應力-應變曲線。利用應力應變曲線擷取重要的材料性能參數, 計算材料吸收應變能, 藉以評估材料韌性行為。試驗結果顯示, 初始開裂強度、極限拉伸強度及其對應之應變量會隨鋼纖維含量增加而提升, 以添加3%鋼纖維含量之UHPC整體表現較佳; 觀察試體破壞模式, 能夠看到多重裂縫的形成與分佈狀態, 也顯示材料會因應力重分配能夠吸收更多能量, 提高材料韌性。

關鍵詞: 超高性能混凝土、直接拉伸、應力應變曲線、應變能

壹、前言

超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)是新一代的建築材料，其出色的力學與耐久性能，使得UHPC已經廣泛地被使用在新一代的建築結構中[1-4]。UHPC不僅具有非常高的抗壓和抗拉強度，在韌性與吸能性質等亦十分出色。Sritharan等[5]的研究證明了UHPC能夠達到172-225 MPa的抗壓強度。與普通混凝土或高性能混凝土(HPC)相比，UHPC抗壓強度的增加可歸因於透過緻密顆粒堆積和特殊粉體材料的選擇，以及控制混合採用極低的水灰比等因素[6-9]。不同於一般混凝土使用粗細骨料UHPC配比以顆粒直徑500-70微米的石英砂為骨材，降低了粗、細粒料所致的不均勻性，也減輕了受力過程中在骨材與漿體介面的應力集中。

在UHPC（不含纖維）上進行直接拉伸強度得出的平均拉伸強度值為7-10 MPa [10-11]。日本[12]提出的平均抗拉強度值為5 MPa，而法國的SETRA/AFGC建議的設計抗彎強度的平均抗拉強度值分別為8 MPa。另一方面，對於添加了鋼纖維的UHPC的抗拉強度值能顯著的增加，約在7-15 MPa的範圍內[13]。

在UHPC中加入鋼纖維能有效提升抗拉強度。其中，所添加鋼纖維形狀，長度與直徑及體積率等都會影響UHPC在抗壓及抗拉時的強度[14]。Wu等[15]的研究指出在固定強塑劑量下，添加體積率3%的鋼纖維可有效提升UHPC抗壓與撓曲強度，但是較高的鋼纖維摻量將降低新鮮UHPC的工作性能。Yoo等[16]對鋼纖維0.5%、1%、1.5%及2%等含量進行研究，同時考慮形狀(直線、彎鉤及螺旋狀)與長徑比(65、97.5及100)對撓曲強度之影響，研究結果指出使用1%，長徑比為100的螺旋狀鋼纖維可得到較好之撓曲強度。Wille等[17-18]研究直線型、彎鉤型及螺旋狀鋼纖維對UHPC拉伸行為之影響，結果顯示添加1.5%彎鉤型或螺旋狀之鋼纖維，其抗拉強度可達13MPa，對應之應變量為0.6%，相較於添加直線型鋼纖維時，抗拉強度與應變能力分別增加了60%與300%。

鑒於在相同體積含量下，改變鋼纖維尺寸會影響所添加的纖維總數，為了更大化的促進纖維在UHPC基材內的分布，本研究使用0.175 mm較小直徑的微纖維進行直接拉伸試驗，探討1%、2%與3%鋼纖維含量對材料拉伸性能之影響，同時，透過實驗所獲得的拉伸應力-應變曲線探討鋼纖維含量對UHPC韌性行為之影響。

貳、實驗方法

2.1 配比設計

在混凝土中加入高強度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的構成材料包含波特蘭一型水泥，粒徑約11-15 μ m；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；非緻密矽灰，粒徑小於0.2 μ m；構成UHPC的骨架為石英砂，所使用的砂的粒徑介於104 μ m到250 μ m。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

材料混合的過程使用容量 8 升小型水泥砂漿拌合機進行。將所有乾料置於容器中使用低速進行充分攪拌，以確保材料均勻分散，其次將水與強塑劑充分混和後，緩慢加入攪拌容器中，約 3-5 分鐘後，材料將逐漸產生反應，使用相同混合速度繼續攪拌 5 分鐘使材料呈現泥漿狀。依據不同的體積含量逐漸加入鋼纖維，為了使鋼纖維能被均勻分散於漿體中以發揮其抑制裂縫的功能，加入鋼纖維後繼續拌合 5-7 分鐘，其後將漿體澆鑄於試體模中，並以塑膠模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，並以 90°C 熱水養護 72 小時，完成後將試體取出放置於室溫下直到 28 天後進行試驗。

參、試驗方法

3.1抗壓試驗

抗壓實驗利用全自動抗壓試驗機(如圖2)，依據ASTM C109 [19]，對50mm×50mm×50mm立方體進行加壓直到試體破壞所得最大抗壓強度，加載速度控制在 0.6 ± 0.2 N/mm²/s。每一組試體進行三個試體的試驗，並依試驗結果計算平均強度與標準差。



圖 2 全自動抗壓試驗機

3.2抗拉試驗

直接拉伸試驗使用MTS 819伺服液壓試驗機進行(如圖3)，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(如圖3)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(如圖3)所量測，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。

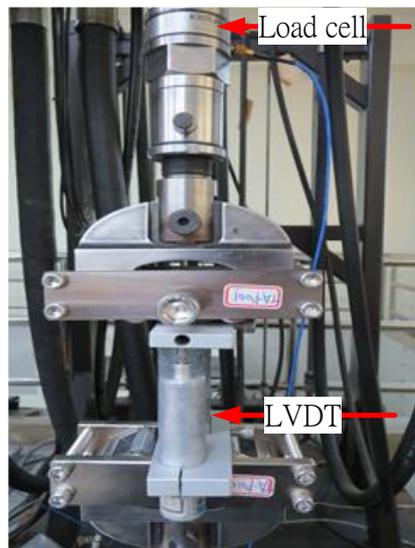


圖3 MTS 819伺服液壓試驗機

由於直接拉伸試驗所得到之應力-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 4 所示, 計算公式可參考式(1) [20]。

$$EA = \int_0^{\delta_i} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

其中, δ_i 為 95%PCS 所對應之變形量。

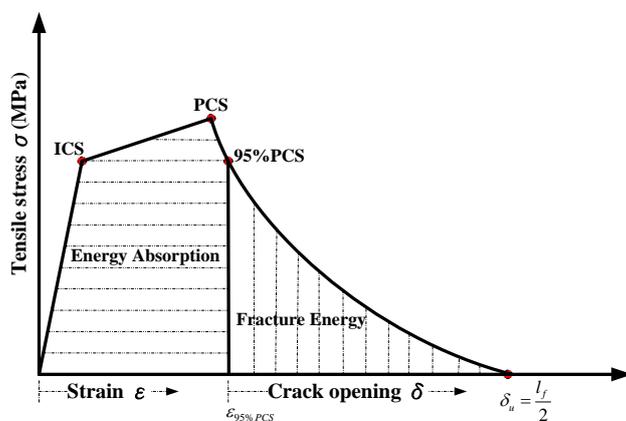


圖 4 典型 UHPC 拉伸應力應變曲線材料特性示意圖

肆、實驗結果與討論

4.1 抗壓試驗結果

為了確保本次實驗所製作之試體符合超高性能混凝土抗壓強度大於150MPa之要求, 同時製作了50mm×50mm×50mm立方試體, 在相同條件下進行養護, 並於UHPC試體的齡期為7天時進行抗壓試驗。所測得之抗壓強度如圖5所示。對於鋼纖維體積含量1%之A試體, 平均抗壓強度可達162MPa, 標準差為5.2。對於鋼纖維體積含量2%與3%的B與C試體, 平均抗壓強度分別為172MPa與174MPa, 標準差分別為5.6和1.3, 其抗壓強度有增加之趨勢, 然而增益的比例僅6.2%和7.4%。導致強度增加的因素主要在於鋼纖維對於微裂縫的橋接(bridging)限制了柏松效應所致的試體的側向變形, 而此一效應隨著纖維含量增加而增加, 故導致了抗壓強度增加。

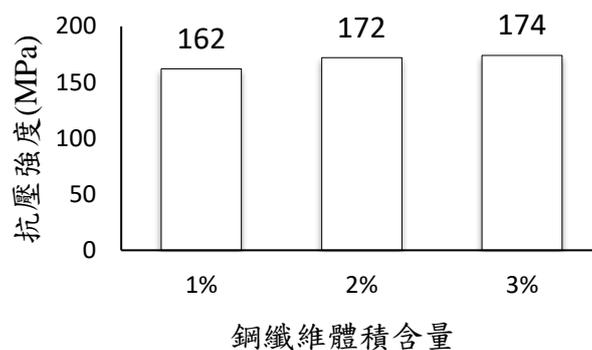


圖 5 不同鋼纖維含量試體 7 天抗壓強度

4.2 抗拉試驗結果

直接拉伸試驗之結果如圖 6 及表 2 所示。圖 6 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 6 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 5.4 MPa，2% 之 B 試體的初始開裂強度為 7.6 MPa，增加 40.7%；3% 之 C 試體的初始開裂強度為 9.9 MPa，相較於 A 增加 83.3%。對於極限張力強度，1% A 試體為 6.7 MPa，2% 的 B 試體與 3% 的 C 試體分別增加 73.1% 與 103%，達到 11.6 MPa 與 13.6 MPa。顯示了本研究使用的微鋼纖維強化 UHPC，在拉伸行為的表現方面，與文獻[12]使用 0.3×30 mm 的螺旋型纖維或是光滑直纖維有一致性的結果。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 7 所示。從圖 7 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。

表 2:UHPC 材料拉伸行為參數

	A(1%)	B(2%)	C(3%)
ICS(MPa)	5.4	7.6	9.9
PCS(MPa)	6.7	11.6	13.6
95%PCS(MPa)	6.4	11.0	12.9
PS (%)	0.6	0.2	0.5
EA(KJ/m ³)	46	83	103

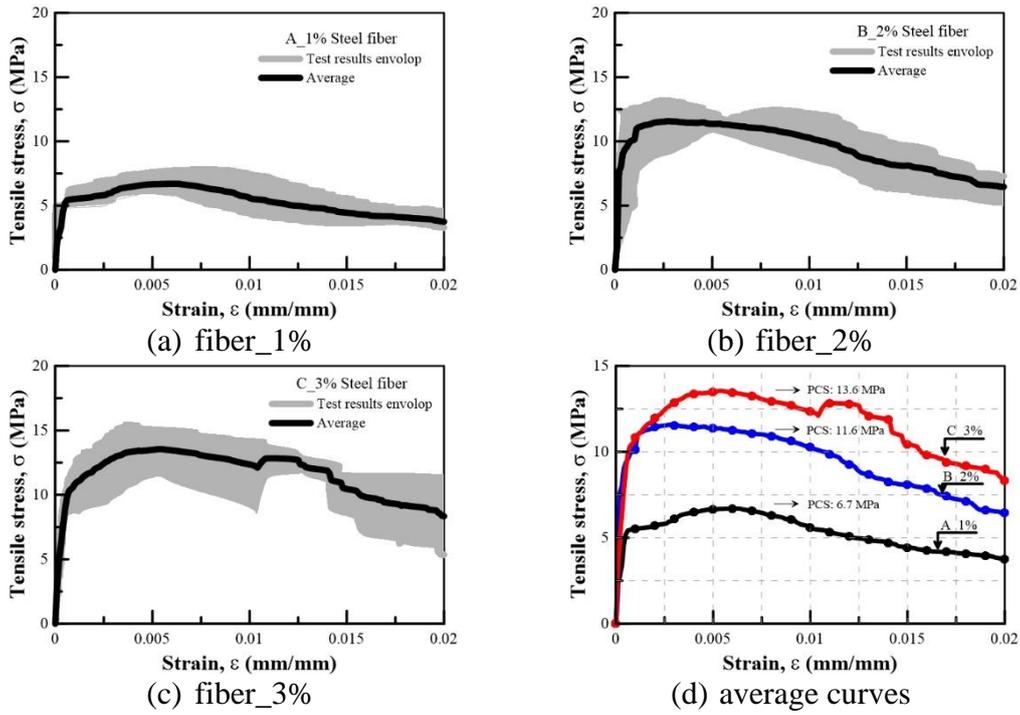


圖 6 不同鋼纖維含量直接拉伸應力-應變曲線



圖 7 不同鋼纖維含量試體破壞模式

伍、結論

本研究主要透過實驗探討微鋼纖維含量(1%、2%與3%)對 UHPC 抗壓與拉伸力學行為。由抗壓試驗結果顯示，抗壓強度隨著鋼纖維含量增加而增強。主要由於纖維對試體受力過程中側向變形的圍束效應，導致抗壓強度的增加。在拉伸試驗方面，本研究使用 MTS 伺服式油壓試驗機進行直接拉伸實驗，實驗結果顯示試體受力過程中，初始開裂強度、極限拉伸強度及對應之應變量隨鋼纖維含量增加而提升。鋼纖維添加量2%與3%時，當材料進入塑性階段也明顯應變硬化階段，尤以當纖維含量增加至3%，試驗結果包含初始開裂強度、極限張力強度與吸能性質等均有顯著的差異。同時，透過對試體破壞模式的觀察可以看到多重裂縫的形成與分佈狀態，顯示了材料的利用應力的重分配能吸收更多能量及更有效率。

參考文獻

- [1]. Akhnoukh, Amin K., and Chelsea Buckhalter. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials* 15.
- [2]. El-Tawil, S., Tai, Y. S., Belcher II, J. A., & Rogers, D. (2020). Open-Recipe Ultra-High-Performance Concrete: Busting the cost myth. *Concrete International*. 33-38..
- [3]. Zhou, M., Lu, W., Song, J., & Lee, G. C. (2018). Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering. *Construction and Building Materials*, 186, 1256-1267..
- [4]. Rebentrost, Mark, Gavin Wight, and E. Fehling. (2008). Experience and applications of ultra-high performance concrete in Asia. 2nd international symposium on ultra high performance concrete. Vol. 10.
- [5]. Sritharan, S., Bristow, B.J., and Perry, V.H. (2003). Characterizing an Ultra High Performance Material for Bridge Applications Under Extreme Loads, 3rd International Symposium on High Performance Concrete, PCI, Orlando, Florida.
- [6]. Lequesne, R.D., Setkit, M., Kopczynski, C., Ferzli, J., Cheng, M.Y., Parra- Montesinos, G., and Wight, J.K. (2011). Implementation of high-performance fiber reinforced concrete coupling beams in high-rise core-wall structures, ACI Special Publication, SP-280, 94-105.
- [7]. Lequesne, R.D., Setkit, M., Parra-Montesinos, G.J., and Wight, J.K. (2009). Seismic detailing and behavior of coupling beams incorporating high-performance fiber reinforced concrete, Antoine E. Naaman Symposium Four decades of progress in prestressed concrete, fiber reinforced concrete, and thin laminate composites, SP-272, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 14, 205-222.
- [8]. Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S., and Koh, K.T. (2011). Tensile behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, 172-184.
- [9]. Acker P., Behloul, M., (2004). Ductal Technology, A Large Spectrum of Properties, A Wide Range of Applications, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- [10]. Buitelaar, P., (2004). Heavy Reinforced Ultra High Performance Concrete, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- [11]. Dallaire, E., Aitcin, P.C., and Lachemi, M. (1998), High Performance Powder, *Civil Engineering*, ABI/INFORM Global.48.
- [12]. JSCE Guidelines for Concrete No. 9 , (2006). Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft), Research of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Japan Society of Civil Engineers (JSCE).
- [13]. Association Française de Génie Civil (AFGC)/ Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA), Bétons fibres à ultra-hautes performances, (2002). Recommendations provisoires, Janvier.
- [14]. Zemei W., Caijum S., and Kamal H.K., (2019). Investigation of Mechanical Properties and Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete. Influence of Steel Fiber Content and Shape, *Composites Part B*, Vol. 174, 1-12.
- [15]. Wu Z., Shi C., He W., and Wu I., (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete, *Constr. Building Mater*, Vol. 103, 8-14.
- [16]. Yoo D.Y., Kim S., Park G.J., Park J.J., and Kim S. W., (2017). Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high performance fiber reinforced cement composites, *Compos Struct*, Vol. 174, 375-388.

- [17]. Wille K., Naaman AE., EI-Tawil S., and Parra-Montesinos G.J., (2012) .Ultra- high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, *Mater Struct* Vol. 45(3), 309-324.
- [18]. Hassan A.M.T, Jones S.W., Mahumd G.H. (2012). Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), *Construction and Building Materials*. Vol. (37), 1-9.
- [19]. ASTM C109/C109M-16a Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), (2016). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [20]. N.T. Tran, and D.J. Kim, (2019). Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads, *Cement and Concrete Composites*, Vol.78, 132-145.