



# 新世代耐震材料—高流動性應變硬化 鋼纖維混凝土的研發及應用

廖文正／國立臺灣大學土木工程學系副教授

高流動性應變硬化鋼纖維混凝土為近年來台灣大學研發之高韌性新世代耐震材料，其同時擁有自充填混凝土在新拌時的自充填超高流動性，及高性能纖維水泥質複合材料受直拉作用時，呈應變硬化之卓越力學性質。未來台灣在走向使用高強度混凝土的高層鋼筋混凝土建築時，為因應高強度混凝土偏脆性的破壞模式及底層柱將承受極大軸壓的考驗，美國混凝土學會（American Concrete Institute, ACI）於2014年出版的結構混凝土建築規範（ACI 318-14）已要求比台灣現行規範需要更多的橫向鋼筋來確保柱構材的韌性，此項變革將會使未來柱子鋼筋綁紮及澆置施工難度大幅提高；而有梁主筋穿過的梁柱接頭之鋼筋配置將更加複雜而困難。由國家地震工程研究中心相關實尺寸（柱及梁柱接頭）反復載重試驗結果發現，高流動性應變硬化鋼纖維混凝土可有效取代橫向鋼筋，除了柱構材的橫向鋼筋可放大到有效深度的一半外，在梁柱接頭內甚至可以完全不需配置橫向鋼筋。高流動性應變硬化鋼纖維混凝土優異的工程力學行為（高軸力下極限變形容限、高剪力強度、拉力應變韌性、高消能容限等），將有助提昇建物抗震表現、提高材料效率、減少箍筋使用、抑制裂縫生成及增加變形損傷容限，達到永續發展及防災耐震的目標。

## 前言

混凝土為全球應用最廣泛的營建材料，其具有經濟性、耐火性、易塑性、高抗壓性等優點，但其抗張強度卻僅約抗壓強度十分之一，並有脆性破壞及抗張延展性差的先天缺陷。藉由添加纖維來改善混凝土力學質已在近二三十年來普遍應用，並針對應用標的不同，調整添加纖維的數量、材質和種類。添加纖維體積比愈高，相對增加的拉力強度及韌性也愈高；然而，高鋼纖維量的添加，卻同時讓工作性巨幅降低，增加了施工的難度，也相對造成混凝土的不均勻性及硬固品質的不確定性。

為了克服水泥質材料受拉時呈現的低強度脆性破壞，Berard 早就在 1874 年就提出在混凝土中添加纖維的想法，這也是從基本體質上改善水泥質材料的濫觴；但

直至 1960 年初 Romualdi 與 Mandel 成功使用鋼纖維大幅改善混凝土力學性質，才讓鋼纖維混凝土真正受到世界廣泛注意及開始蓬勃發展。接續更有其他學者添加不同類型的纖維（如英國學者 Majumdar 與 Ryder 添加玻璃纖維）及提出纖維混凝土基礎理論分析研究。除了成功帶起纖維混凝土相關研究起飛外，Romualdi 與 Mandel 更以破壞力學的觀點切入纖維混凝土受拉時的應力應變關係；Naaman 在 1972 年時以添加未經表面處理的鋼製短纖，整理出了一系列鋼纖維水泥質複合材料在不同纖維含量下的拉力及變形關係（圖 1）。由於纖維較短、與水泥漿體間握裹較弱，該實驗即便在添加了 3% 體積含量的纖維，仍只呈現應變軟化的行為，但已大幅改善過去水泥質材料受拉初裂即斷裂的脆性破壞樣態。

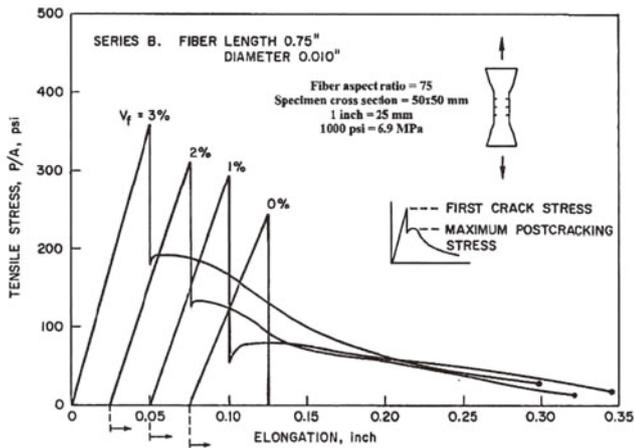


圖 1 Naaman 於 1972 年發表之鋼纖維水泥質複合材料拉力－變形關係圖

### 混凝土也能應變硬化

隨著愈來愈多關於纖維水泥質複合材料受拉行為的討論，〔應變硬化，strain hardening〕這個名詞首度在 1978 年 RILEM Symposium on Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites 由 Kaperkiewickz 提出，用來描述纖維水泥質複合材料的受拉行為：“What is much more important is that the aligned fibers give quite substantial ductility and a kind of strain hardening characteristic to the composite”。至此，纖維混凝土可依受直拉行為不同分為應變軟化及應變硬化二大類。

如圖 2 所示，在受直接拉力作用下，應變軟化纖維混凝土在初裂後雖不至馬上破壞，但其拉力強度卻於初裂後有一陡降，並隨著裂縫增大而緩步降低，即為所謂的應變軟化。相反地，應變硬化纖維混凝土拉力強度在初裂後持續增加，這也意味著初裂裂縫在纖維橋接效應下抗拉強度較其他未開裂部分要高，故會伴隨著多重裂縫產生。

Naaman 於 1996 年提出了藉著添加纖維並最佳化漿體及纖維間的握裹關係，以達到受直接拉力時能呈現類似鋼材般的應變硬化行為。Naaman 更進一步將能呈現直拉應變硬化的力學行為定義為高性能（High Performance），而具受拉力應變硬化的纖維水泥質複合材料，即稱為 High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC)。

雖然纖維的添加有助於提高混凝土抗拉強度及韌性，甚至達到受拉呈現應變硬化的高性能行為，但纖維

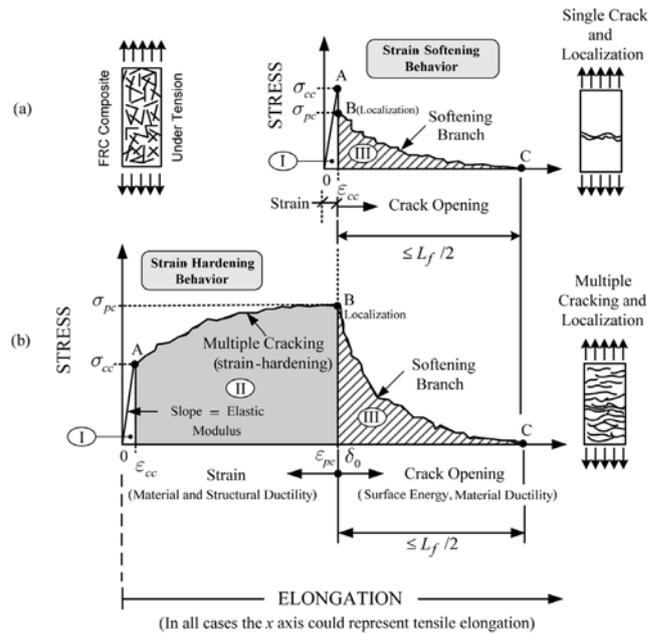


圖 2 受直接拉力，應變軟化及應變硬化纖維水泥質複合材料之應力應變比較

卻也會同時降低混凝土的流動度及工作性，造成施工上的困難及工程品質的降低。

筆者近年來以自充填混凝土為設計基材，透過改善粒料級配及漿體強度，並添加適量鋼纖維，已成功研發一系列針對不同強度需求之高流動性應變硬化鋼纖維混凝土。其鋼纖維（hooked,  $L = 30 \text{ mm}$ , aspect ratio = 80）體積含量為 1.5 到 2.0%，抗壓強度範圍從 35 至 105 MPa，坍流度直徑約為 600 mm。在直拉試驗中，不同於普通混凝土的脆性破壞，也呈現了應變硬化的力學性質，並伴隨著多重裂縫產生。與傳統 HPFRCC 相比，高流動性應變硬化鋼纖維混凝土設計配比中保有了粗粒料，更具經濟性、體積穩定性及廣泛應用於實務工程上的可能性。

### 高流動性應變硬化鋼纖維混凝土配比設計原理

高流動性鋼纖維混凝土之配比主要依據最小孔隙理論，配合堆積觀念，調整漿體性質達到所需之強度及工作度要求。配比設計除了水泥質漿體部分（抗壓強度與工作性）外，纖維量的添加更是硬固後受拉是否能呈現應變硬化的關鍵。台灣本土化配比設計除了以筆者在美國研發相關材料的配比为參考基準，搭配緻密配比理論進行配比改良。緻密配比理論主要是在粒料架構上依序

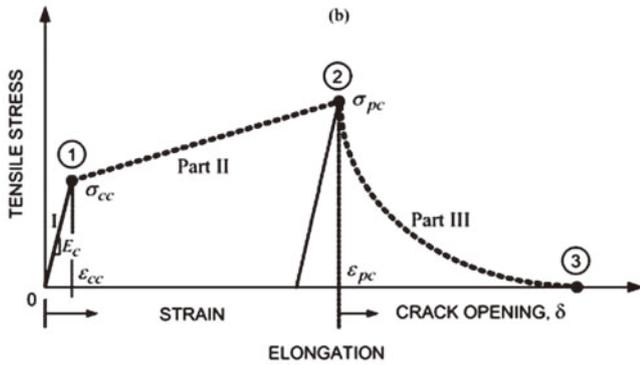


圖 3 受拉應變硬化之應力應變曲線圖

以較小級配顆粒填塞較大級配之孔隙，使粒料顆粒互相填塞堆積，得到最佳化緻密堆積。而鋼纖維的添加是以前其替代粗、細粒料搭配法為基礎，此方式是將鋼纖維以等體積替代粗、細粒料，但保持粗、細粒料相對比率不變（即砂率不變）。

根據過去自充填混凝土相關研究顯示，建議單位粉體量不宜低於 400 kg/m<sup>3</sup>，否則工作性不易達到要求。粗粒料單位用量對工作性具有絕對之影響力，較低之粗粒料含量，增加了粒料間的相對距離，減低摩擦產生之內應力，可有效地增加障礙通過性。粗粒料之大小也是另一重要參數，粗粒料的尺寸應為纖維長度的三分之一，才能確保鋼纖維能將粒料包圍，使得應變硬化行為能完全發展。砂率對工作性也有顯著影響，當砂率小時，容易產生材料析離現象。強塑劑為達成流動性目標之必備摻料。

攸關硬固混凝土力學性質的纖維添加量則取決於受拉應變硬化最小纖維添加量；應變硬化為水泥質纖維複合物受拉時開裂後強度大於初裂強度，受拉應變硬化最小纖維添加量則是欲達到應變硬化，所需要添加的最小纖維量。

當考慮纖維混凝土材料中的纖維是三維隨機分布的狀況下，假定在材料受拉力作用下發生開裂時，裂縫會沿著受力方向發展，並假定開裂面上之纖維斷面為圓形切面，可用下式表示纖維混凝土材料的初始開裂拉力強度，如圖 3 中初裂的點 1。式中以純混凝土極限拉力強度為基礎，再配合水泥砂漿對纖維握裹強度，考慮纖維含量、種類與其分布狀況，求出纖維混凝土材料之初始開裂拉力強度。

$$\sigma_{cc} = \sigma_{mu}(1 - V_f) + \alpha\tau V_f \frac{L}{d}$$

其中：

$\sigma_{cc}$  = 初始開裂拉力強度

$\sigma_{mu}$  = 純混凝土極限拉力強度

$V_f$  = 纖維添加含量

$\alpha$  = 纖維分布狀況、交錯密度影響係數

$\tau$  = 水泥砂漿對纖維握裹強度

$\frac{L}{d}$  = 纖維長徑比（長度／直徑）

推導後開裂拉力強度的假設如下：(1) 裂縫中纖維的破壞為拉拔模式，(2) 沿著裂縫上水泥砂漿的拉力貢獻可忽略，(3) 裂縫垂直於拉伸應力方向。在開裂後，脆性材料的水泥砂漿不提供拉力強度，拉力強度全部由鋼纖維與水泥砂漿間的拉拔行為提供。

後開裂拉力強度主要由水泥砂漿對纖維握裹強度求出，並考慮纖維拉出之行為為特性，如數量、角度與強度等，以及纖維含量、種類與分布狀況。

$$\sigma_{pc} = \lambda\tau \frac{L}{d} V_f$$

其中：

$\sigma_{pc}$  = 後開裂拉力強度

$\lambda$  = 纖維分布狀況、角度、數量、拉出長度影響係數

初始開裂拉力強度與後開裂拉力強度的預測公式很早就被提出來，僅在係數上有些微不同。經由將後開裂拉力強度延伸為開裂極限拉力強度，整個拉力行為從初始開裂後，其拉力強度繼續向上發展，之後達到開裂後期時才達到極限拉力強度。換言之，後開裂拉力強度為其極限拉力強度，所以必須大於等於初始開裂強度；故利用上面兩式進行推導即可得到發展拉力應變硬化行為的關鍵：最小纖維添加量演算公式。

由於

$$\sigma_{pc} \geq \sigma_{cc}$$

代入上列兩式可得：

$$\lambda\tau \frac{L}{d} V_f \geq \sigma_{mu}(1 - V_f) + \alpha\tau V_f \frac{L}{d}$$

最後可得到下式

$$V_f \geq (V_f)_{\text{cri-tension}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{\sigma_{mu}} \frac{L}{d} (\lambda - \alpha)}$$

故可由水泥砂漿對纖維握裹強度、純混凝土極限拉力強度、纖維本身特性，以及添加纖維後的影響因素，來求出最小纖維添加量，便可設計能發展出拉力應變硬化與多重裂縫行為之纖維混凝土。

## 高流動性應變硬化鋼纖維混凝土於台灣 New RC 結構系統的應用

1988 至 1992 年間起日本建設省推行 New RC Project，其將 RC 之鋼筋與混凝土材料強度，分別提升至降伏強度 685 MPa（約為目前國內常用鋼筋強度之 1.7 倍）與抗壓強度 70 MPa（約為目前常用混凝土 3 倍強度）。從 1995 年開始，RC 建築之使用材料強度大幅度提升，直到今日更蓬勃發展，截至 2007 年底，在日本已有超過 500 棟以上使用 New RC 建造的超高層建築物。日本於 2009 年興建完成一棟 59 層 New RC 建築，其最高鋼筋與混凝土材料強度分別採用 685 MPa 與 150 MPa，此證實 New RC 應用於超高層建築之可行性。「台灣新型高強度鋼筋混凝土結構系統研發」(Taiwan New RC 計畫) 研究的主要目標為發展台灣本土化之相關設計，未來以政府為主的都市更新案區域面積達 2,605 公頃，其中 1/3 區域將用於建築物興建，若採用 Taiwan New RC 系統，預期將有效率地提高都市建築的利用效率，減小構件尺寸，增加綠地面積，進而提升都市居住環境品質，並可落實節能減碳與環境永續發展之國家發展基本政策。惟 Taiwan New RC 應用在高層建築上，仍需克服高強度混凝土偏脆性的破壞模式及底層柱將承受極大軸壓的考驗。根據規範，通常以增加箍筋量等來達到設計強度及韌性，但也因此鋼筋綁紮會過於密集繁雜，而造成施工困難。

筆者目前主要研究是應用高流動性應變硬化鋼纖維混凝土於 New RC 結構物構件 (圖 4)，高流動性應變硬化鋼纖維混凝土在新拌時具接近自充填混凝土的工作性，硬固時受直拉作用下則有應變硬化之優異力學表現。未來計畫將其應用於需較大損傷容限的部分或構件，包括耦合剪力梁、梁端塑鉸區、梁柱接頭、高軸力柱、柱塑鉸區，希冀以其高剪力強度、高圍束效益，能直接取代箍筋，簡化斷面配筋設計。

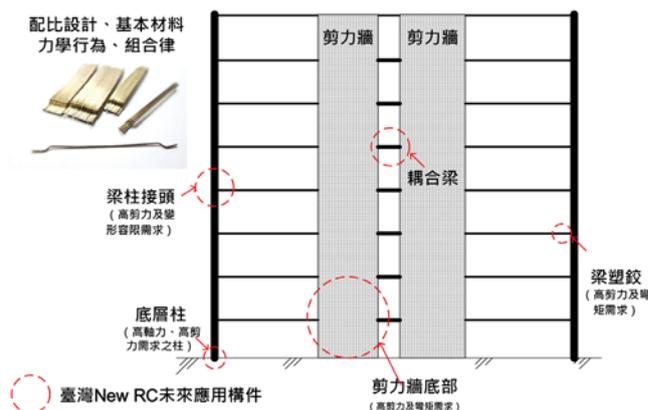


圖 4 高流動性應變硬化鋼纖維混凝土可應用於 New RC 結構物之構件

### 承受高軸壓之底層柱

未來台灣新型高強度鋼筋混凝土應用在高層建築之低樓層柱將承受極大軸力，黃世建 (2013) 發現高強度混凝土在受高軸壓時，所需的圍束箍筋量將近原有規範要求的二倍，甫公布的 ACI318-14 (2014) 也針對高強度混凝土在承受高軸壓時的箍筋需求作了對應的調整；以 23 層樓的底層柱實際設計例可以發現 (圖 5)，和現行規範比起來，以 ACI318-14 設計的底層柱不但需要多 70% 的箍筋，而且每根主筋都需橫向鋼筋以耐震彎鉤鉗定，大幅增加施工難度。

實尺寸柱試體 (600 × 600 × 1800 mm) 於國家地震中心在 MATS (Multi-Axial Testing System, 自由度多功能構件試驗系統) 上進行反復側推試驗，MATS 最高能施予 60 MN 的軸力，並在構件底端進行反復側推，其試驗架構如圖 6 所示。此試驗主要是在雙曲率反復側推位移及高軸壓 (軸力高達  $0.57 A_g f'_c$ ) 同時作用下，評估高強度鋼纖維鋼筋混凝土柱的行為表現，並與高強度鋼

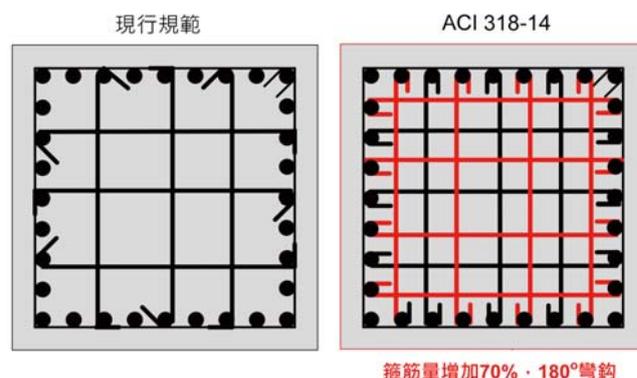


圖 5 現行規範 (左) 及 ACI318-14 (右) 對 23 層樓的底層柱橫向鋼筋配置差異

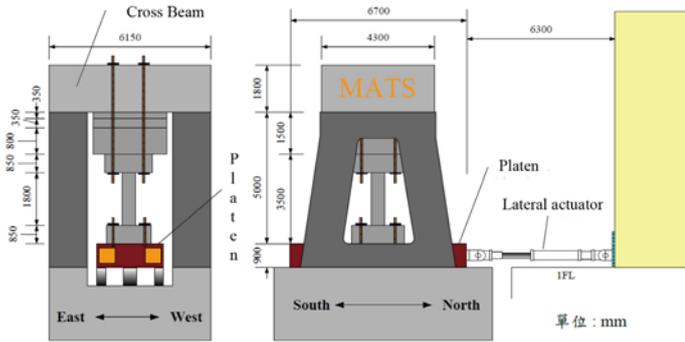


圖 6 實尺寸柱於 MATS 反復側推試驗架構

筋混凝土柱進行比較；除了比較行為差異外，主要是評估以鋼纖維取代箍筋可行性，以放大箍筋間距的方式，探討鋼纖維與箍筋的取代關係，間距最大到規範訂定剪力鋼筋間距最嚴苛的標準（斷面有效深之半， $d/2$ ）。試體設計參數詳見表 1。

本實驗試體之位移能力認定參考 ASCE41-06 (2006)，由試體的遲滯迴圈包絡線，當側力強度進入衰減，側向強度達極限強度的 80% 時，定義此時為試體的目標性能點；耐震韌性能力良好之柱，其位移目標性能點應大於 3.0%。

表 1 底層柱試體設計參數

試體名稱	試體斷面	$\rho_s$ (%)	s (mm)	$V_f$ (%)	$f'_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_{yt}$ (MPa)	$\frac{N}{A_g f'_c}$
S140-0 (ACI 318-11)		1.74	140	0	83.4	685 (#8)	785 (#4)	0.57
S140-1.5		1.74	140	1.5	73	685 (#8)	785 (#4)	0.57
S260-1.5		1.46	260	1.5	72	685 (#8)	785 (#4)	0.43

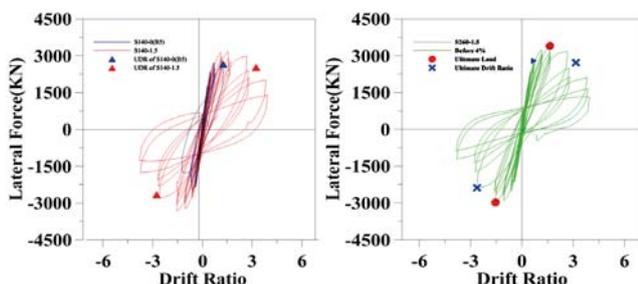


圖 7 S140-0 與 S140-1.5 遲滯迴圈比較 (左) 及 S260-1.5 遲滯迴圈 (右)

由圖 7 實驗結果可以發現，三組試體在側向強度衰減至 80% 極限強度時對應的位移分別為 1.25%，3.23% 及 3.15%；依台灣現行規範及 ACI318-11 圍束設計的高強度鋼筋混凝土試體 S140-0 不符性能要求（若參照 318-14，箍筋間距需從 140 mm 減少至 80 mm），但加入 1.5% 鋼纖維之試體 S140-1.5 可滿足側力衰減 20% 時位移可達 3.0% 之耐震性能標準；另外將箍筋間距放大到  $d/2$  的試體 S260-1.5 也有相同優異的耐震性能。

### 外部梁柱接頭

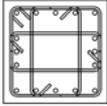
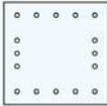
高流動性應變硬化鋼纖維混凝土應用於高強度混凝土梁柱外部接頭之實尺寸試驗，重點為研究添加鋼纖維對高強度混凝土梁柱接頭剪力容量增加與韌性提升。根據 ACI 318-14 規範設計中剪力比之高強度混凝土梁柱接頭試體作為對照組 (LAMV)，並設計接頭部份以體積取代率 1.5% 鋼纖維之高流動性應變硬化鋼纖維混凝土澆置，且不放置任何橫向鋼筋的相同試體 (LAMV\_SF)，二者於接頭處橫向鋼筋配置比較可見圖 8；其試體的梁柱主筋設置等皆與對照組相同以利比較。試體設計參數詳見表 2。

梁柱接頭試體於國家地震中心對試體進行反復側推試驗，其試驗架構如圖 9 所示。先將柱頂的鉸支承裝於 MATS，將試體連同鉸支承之部分鎖於載重平台上，使用螺桿將之鎖於平台孔位上並施加預力。本實驗採制動器推柱不推梁，將試體梁端連接垂直制動器並予以固定，在實驗開始前先施加軸力至預設值，再由側邊之油壓水平制動器施力於試體下方載重平台來進行水平力加載。依照反復側推位移歷程開始施加反復位移側推，量測並計算接頭剪力變形量及梁轉角。



圖 8 LAMV (左) 及 LAMV\_SF (右) 接頭處橫向箍筋配置比較

表 2 外部梁柱接頭試體設計參數

試體名稱	試體斷面 (接頭處)	$\rho_s$ (%)	$V_f$ (%)	$f'_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_{yr}$ (MPa)	$\frac{N}{A_g f'_c}$
LAMV		1.0	0	70	685 (#8)	785 (#4)	0.1
LAMV_SF		0	1.5	70	685 (#8)	無橫向鋼筋	0.1

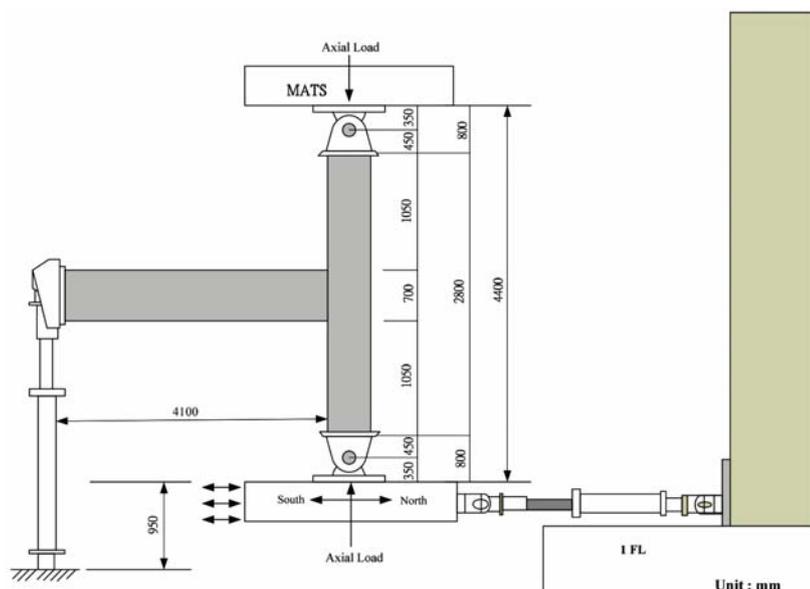


圖 9 外部梁柱接頭於 MATS 反復側推試驗架構

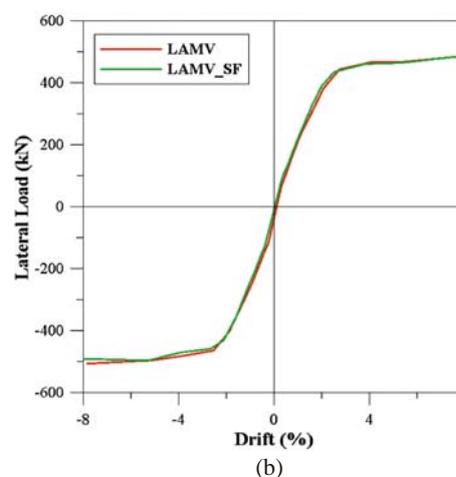
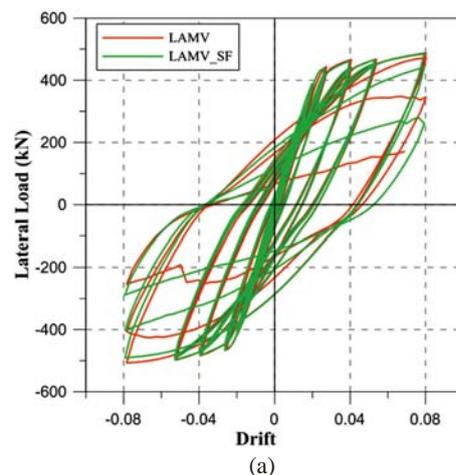


圖 10 LAMV 與 LAMV\_SF (a) 遲滯迴圈及 (b) 包絡線比較

圖 10(a) 及 (b) 分別為 LAMV 與 LAMV\_SF 之遲滯迴圈及包絡線比較圖，從包絡線來看可以發現兩者的初始勁度近乎相同，皆於層間變位角 2% 時進入降伏平台。再觀察遲滯迴圈的部分，單純添加鋼纖維而無配置任何橫向鋼筋的試體 LAMV\_SF 的表現與綁紮緊密橫向鋼筋的試體 LAMV 幾乎一模一樣，迴圈亦相當飽滿，pinching 效應皆不明顯。LAMV 與 LAMV\_SF 最後的破壞模式皆為理想的梁撓曲破壞 (B-type) (圖 11)。此外，相較 LAMV 的裂縫發展狀況，LAMV\_SF 接頭處可見較多重而細微的裂縫，顯見纖維能發揮良好的橋接效應，故在接頭產生裂縫後仍能持續維持剪力強度。

參考規範 ACI 374.1-05 對二支梁柱接頭試體作耐震性能評估，評估指標分別為強度、能量消散及勁度衰減的情形。從評估結果可以看出 LAMV\_SF 即便於接頭處沒有配置任何箍筋，但無論在強度、能量消散及勁度方面皆符合規範要求，於層間變位角 4% 時皆還有持續增

加的趨勢；二者消能情況幾乎一樣，代表鋼纖維取代所有橫向鋼筋仍能提供相同接頭剪力強度，有相同的消能及耐震能力。

## 結論

台灣天然資源有限，混凝土材料的升級發展，是亟需面對的嚴肅課題；除了著重在工程力學行為上，更需進一步思考增加混凝土材料的效益發揮，進而降低生命週期成本。高流動性應變硬化鋼纖維混凝土提供了這樣的可能性：提升混凝土材料的工作性、力學性質、損傷容量及永續指標；而其優良的工作性、抗拉抗剪強度及消能容量，應用在 New RC 構件上，將能進一步簡化配筋設計、縮小構件尺寸。高流動性應變硬化鋼纖維混凝土為極具應用發展潛力的新世代耐震材料，對於台灣混凝土材料和結構的性能全面提昇及降低生命週期成本的永續發展，都將有顯著的助益改善。

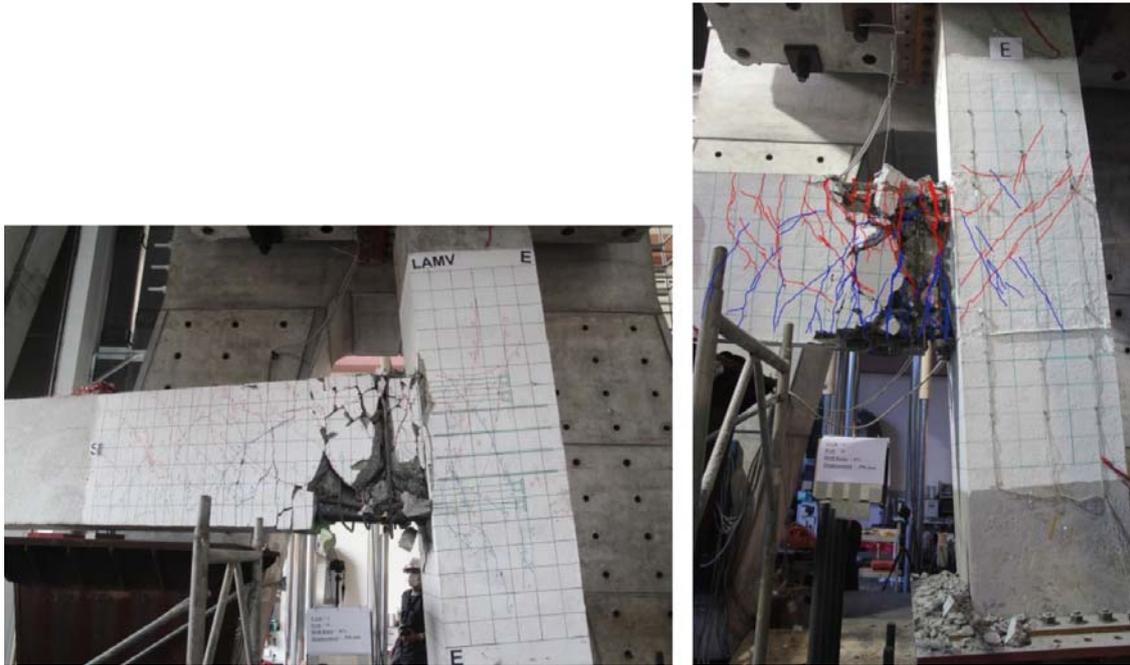


圖 11 LAMV (左) 與 LAMV\_SF (右) 最終破壞狀況

## 誌謝

本文的完成要感謝科技部提供「台灣新型高強度鋼筋混凝土結構研發－子計畫：高拉力強度彎鉤鋼纖維對高強度混凝土柱於圍束性質及變形容限提升研究 (I)」（計畫編號：103-2625-M-002-009-）及「台灣新型高強度鋼筋混凝土結構耐震及使用性能研究－子計畫：開孔 RC 隔間牆之損傷評估研究 (I)」（計畫編號：105-2625-M-002-004-）研發經費，還有財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心提供的人員、設備及支援，特此申謝。

## 參考文獻

1. ACI Innovation Task Group 4, 2007, "Report on Structural Design and Detailing for High-Strength Concrete in Moderate to High Seismic Applications (ITG-4.3R-07)," American Concrete Institute, Farmington Hill, 66 pp.
2. ACI Committee 318, 2014, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 667 pp.
3. Liao, W.-C.; Chao, S.-H.; Park, S.-Y., and Naaman, A.E., 2006, "Self-Consolidating High Performance Fiber Reinforced Concrete (SCHPFRC) – Preliminary Investigation," Technical Report No. UMCEE 06-02, University of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. 68.
4. Liao, W.-C.; Chao, S.-H., and Naaman, A.E., 2010, "Experience with Self-Consolidating High-Performance Fiber-Reinforced Mortar and Concrete," Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete: Research and Applications, ACI Special Publication No. 274, pp. 79-94.
5. Naaman, A. E., and Reinhardt, H. W., 1996, "Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites—HPFRCC," High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2, Proceedings of the Second International RIEM Workshop, Ann Arbor, MI, pp. 1-24
6. Liao, W.-C., and Kuo, Y.-J., 2013, "An Alternative to Improve Compressive Ductility of High Strength Concrete by Adding High Strength Hooked Steel Fibers," The 6th Civil Engineering Conference in Asia Region, Proceeding, 191; 26-32.
7. Liao, W.-C., Perceka, W., Liu, E.-J., 2015, "Compressive Stress-Strain Relationship of High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete," Journal of Advanced Concrete Technology, 13(8), 378-392. 



廖文正副教授目前任教於國立臺灣大學土木系。廖教授自臺大土木系取得學士及碩士學位，2010年於美國密西根大學取得博士學位，旋即返回臺大任教。廖教授的專長包括高性能混凝土、鋼纖維混凝土、鋼筋混凝土學、混凝土結構抗震設計。目前主要研究課題包括高強度鋼纖維混凝土柱圍束效應研究、高強度鋼纖維混凝土梁剪力強度評估、高流動性應變硬化纖維混凝土於底層柱及梁柱接頭應用研究、台灣高強度混凝土彈性模數研究、及鋼筋混凝土設計規範之研討。