

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高強度鋼筋用於梁剪力筋之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC90-2211-E-009-034-

執行期間：90年08月01日至91年10月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系

計畫主持人：趙文成

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 19 日

高強度鋼筋用於梁剪力筋之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC 90-2211-E-009-034

執行期間：2001/08/01 ~ 2002/10/31

計畫主持人：趙文成

計畫參與人員：謝熒倫

1-1 前言

混凝土材料的改良對於結構體性能的提升有密切關聯。近年來各國學者專家相繼投入研究，以探求新一代的優質混凝土，而自充填混凝土（Self-Compacting Concrete）（以下簡稱 SCC）即是新近研究發展成功的材料。對於此種新興材料，經過學者多年來的研究，在力學性質研究上已獲得豐碩的成果，而在構件行為方面則尚未有完整的研究。

台灣處地震帶，地震頻繁，如 921 集集大地震使數千人喪命及數萬樓房倒塌，其所造成的損失難以估計，所以結構物的耐震與安全更形重要。在現行規範中，強柱弱梁的觀念被大量使用都是希望在災害發生時能有足夠的預警性，避免人員財產的重大損失。也因此梁構件的延展性是工程師們關心的課題之一。現行 ACI 規範規定接頭、柱、及梁內須配置圍束箍筋，而此等圍束箍筋量之規定係根據一般箍筋強度在 60ksi 以下所作研究結果而得，然而亦發現使用愈高強度之橫向箍筋圍束效果愈佳。而高強度混凝土構件欲達相同之延展性所須圍束箍筋則愈多，因此可以使用高強度箍筋以避免箍筋量之需求增加。

為探討自充填混凝土梁使用高強度箍筋後之剪力強度與韌性，本研究擬利用試驗之方法，探討下列變數對梁之剪力強度與韌性進行研究，（1）混凝土種類＝一般混凝土，自充填混凝土，（2） $f_c=280, 630\text{kgf/cm}^2$ ，（3） $a/d=1, 2, 3, 4$ ，（4）箍筋間距＝11cm，13cm，15cm，無箍筋配置（5）拉力鋼筋量 $\rho=0.017, 0.045, 0.064$ ；壓力鋼筋量 $\rho'=0, 0.025, 0.032$ 。

1-2 研究動機

營建工程中使用 SCC 者愈來愈多，但 SCC 乃屬較新的材料，使用於建築物後，對行為之影響仍付之如闕，其與一般傳統混凝土建築結構的結構行為差異尚未明朗，且相關研究並不多。所以本研究製作一系列自充填混凝土與普通混凝土梁，探討兩者剪力行為之差異。

高樓構件中最常見問題之一是鋼筋擁擠造成混凝土灌漿不易，此以梁柱接頭附近為甚，主要原因是圍束箍筋量要求甚多。由於 ACI 規範中規定傳統剪力筋設計降伏強度不得超過 60ksi，本研究擬於自充填混凝土與普通混凝土梁中使用日本工業標準 JIS G 3137（細徑異形 PC 鋼棒）降伏強度 185ksi（13000kgf/cm²）之箍筋，探討其圍束效果及延展性。

1-3 研究目的與方法

本研究預期完成之工作項目包括自充填混凝土梁斷面之剪力強度、斷面延展

性之評估，確實了解斷面之剪力行爲，並探討自充填混凝土與普通混凝土梁剪力行爲差異，以提供工程界參考，使其設計時有所依據。了解高拉力剪力筋之適用性，解決高樓施工時因鋼筋過度擁擠而造成不良品質混凝土。

根據以上目的，本試驗製作一系列自充填混凝土與普通混凝土梁，探討其使用日本工業標準 JIS G 3137 (細徑異形 PC 鋼棒) 降伏強度 185ksi (13000kgf/cm²) 之箍筋下之剪力行爲，探討之變數包括混凝土強度、軸向鋼筋量、剪跨比、橫向鋼筋量。探討項目包括：

- (1)、剪力開裂強度 V_{cr} 及極限剪力強度 V_n ，以試驗結果與 ACI 算法比較，探討 ACI 算法在自充填混凝土與高強度箍筋使用下之適用性。
- (2)、由載重-變位關係，討論自充填混凝土與普通混凝土梁在高強度箍筋使用下之構件延展性變化情形。
- (3)、剪力筋對剪力強度貢獻的有效程度。
- (4)、分析混凝土強度對梁剪力強度之影響。
- (5)、評估剪力跨距與梁剪力強度之關係。

實驗時以交通大學大型結構實驗室 1000KN 之 MTS 油壓制動器

(Actuator) 進行三點彎曲 (Three Points Bending) 單向靜力加載實驗，並於試體跨度中央設置線性變化位移感應計 (LVDT) 以量測梁中央之最大變形。實驗之進行採位移控制 (Stroke Control)，以便獲取極限載重後之各項實驗資料及韌性發揮情況，實驗取 LVDT 之讀數作為梁中央量測位移值，行程速率控制為 0.02mm/sec。

2. 試驗計畫

2-1 試體規劃

本試驗製作 15 組自充填混凝土梁試體，並製作 4 組一般普通混凝土梁試體與之比較。試體斷面尺寸為 18cm × 30cm 之矩形斷面梁，斷面配筋如【圖 3-1】，試驗時以交通大學大型結構實驗室 1000KN 之 MTS 油壓制動器 (Actuator) 進行三點彎曲 (Three Points Bending) 單向靜力加載實驗，試驗裝置示意圖如【圖 1-1】，所有試體皆設計為剪力破壞，探討之變數包括混凝土強度、軸向鋼筋量、剪力箍筋量、剪跨比 a/d 等，探討各變數對自充填混凝土與一般普通混凝土梁構件剪力行爲之影響。相關試體規劃簡述如下：

(a)、試體編號：

本試驗試體編號□□□-□，第一個□所放字母為“S”或“O”，其中“S”表示自充填混凝土，“O”表示一般普通混凝土；第二個□所放字母為“N”或“H”，其中“N”表示中低強度，“H”表示高強度；第三個□所放字母為“N”或“W”，其中“N”表示無箍筋配置，“W”表示配置箍筋；最後□所放字母為 1、2、3、3a、3b、4 分別表示剪跨比 a/d 值。

(b)、混凝土強度：

使用自充填混凝土與一般普通混凝土，並各設計 4000psi (280kgf/cm²) 及 9000psi (630kgf/cm²) 兩種不同強度，以瞭解混凝土強度改變對梁之延展性及剪力行爲的影響。於進行梁試體製作之同時製作 12 個 10cm x20cm^h 之圓柱試體，於梁加載試驗當天測定其抗壓強度。

(c)、拉力筋量：

中低強度混凝土梁無箍筋配置設計 $\rho = 0.017$ ，有配置箍筋設計 $\rho = 0.0447$ ；高強度混凝土梁無箍筋配置設計 $\rho = 0.017$ ，有配置箍筋設計 $\rho = 0.0645$ 。

(d)、高強度箍筋 (ULBON)：

ULBON 的製造須符合日本工業標準 JIS G 3137 (細徑異形 PC 鋼棒)，降伏點 (0.2% proof stress) 爲 1300kgf/cm² (185.7ksi)。ULBON 之楊氏係數爲 2.0×10^6 kgf/cm² (29000ksi)。

(e)、剪力筋間距：

根據 ACI 規範規定非預力混凝土垂直肋筋及鋼線用作剪力鋼筋時期間距不得超過 $d/2$ 或 60cm。本試驗箍筋間距取 11cm，然而，爲探討箍筋間距加大對梁剪力強度與延展性的影響，在自充填混凝土梁剪跨比 $a/d=3$ 中增加兩組間距分別爲 $0.6d=13$ cm 及 $0.7d=15$ cm 比較分析。

(f)、壓力鋼筋量：

兩系列梁以設計有壓力鋼筋及無壓力鋼筋來進行試驗。中低強度混凝土梁有配置箍筋設計 $\rho' = 0.0251$ ，高強度混凝土梁有配置箍筋設計 $\rho' = 0.0322$ 。

(g)、剪跨比：

由於混凝土梁的抗剪強度隨著跨深比值減少而增加，即梁的型式愈趨近於短梁時，其剪力承載能力可比中長梁來得大。故本研究分別規劃跨深比 a/d 爲 1、2、3、4 比值來模擬梁試體於深梁、短梁及中長梁的剪力及撓曲行爲。

2-2 試驗材料

(a) 混凝土

拌製試體所用的混凝土分自充填混凝土與一般普通混凝土，其中自充填混凝土添加飛灰、爐石、碳酸鈣粉及強塑劑，採用的配比參考以前的研究成果及試拌決定。

本試驗拌製之自充填混凝土在配比與工作性滿足 SCC 之要求，即設計坍流度值規定爲 55 ~ 65cm，V 形漏斗流下試驗，通過時間 7 ~ 20 秒，U 形填充高度試驗，充填高度應達 30cm，澆置前全量通過坍流度、V 漏斗流速、U 型箱充填試驗才能稱爲 SCC。

水泥：採用台灣水泥公司生產之 I 型(普通)水泥。

爐石：永勁公司生產之水淬爐石，比重 2.94。

飛灰：台中興達火力發電廠生產之飛灰，比重 2.17。

碳酸鈣粉：蘭紀實業 HS-303，比重 2.7，細度 5500~6000cm²/g。

粗粒料：台中烏溪所產之礫石，最大粒徑 20mm，乾比重 2.6、吸水率 1.07%。

細粒料：粗砂：台中烏溪所產之碎石砂，乾比重 2.65、吸水率 1.44%，細度模數 3.0。

細砂：台中烏溪所產之河砂，乾比重 2.65、吸水率 1.44%，細度模數 1.78。

強塑劑：興農：LCL-100

(b) 鋼材

1、縱向鋼筋：# 7、# 8、# 9，降伏強度 $f_y=4200\text{kgf/cm}^2$ ，依尺寸在工廠剪裁彎製成所需之 90 度錨定彎鉤後，再運至實驗。

2、高強度箍筋 (ULBON)：記號 SBPD 1275/1420 U6.4，由日本進口，在工廠依 ACI 規範彎折鋼筋以符合最小彎曲直徑及鋼筋末端延伸長度之矩形標準箍筋，出廠開立試驗證明。ULBON 的製造須符合日本工業標準 JIS G 3137 (細徑異形 PC 鋼棒)，降伏點 (0.2% proof stress) 為 13000kgf/cm^2 (185.7ksi)。

以上各鋼材均採同一批進貨，以確保材料性質穩定。

2-3 試體製作

本試驗之所有梁試體皆在實驗室自行灌製完成，試體製作過程如下：

(a) 骨材準備：

因製作自充填高性能混凝土對骨材需要挑選，因此全部粗骨材先用清水清洗乾淨、去除污泥雜質後，放於儲筒備用，爲了控制混凝土中的含水量，所有的粗、細骨材均處理成面乾內飽和 (S.S.D)，並免粗、細骨材呈現偏濕或偏乾的現象。

(b) 鋼筋組立：

將縱向筋與箍筋先放置於適當位置，以粉筆標定位置後，以細鐵絲逐次綁紮每一個箍筋。

(c) 貼應變計：

爲量測箍筋在載重過程中之受力情形，每根箍筋皆貼應變計，位置如【照片 3-3】所示；此外，爲得知拉力筋受力情形，每根拉力筋之中點亦貼應變計。

(d) 模板組立並放置鋼筋籠：

爲顧及防水性皆使用防水夾板、首先將模板依規劃之尺寸裁製成設計之大小，再用角材組立固定，並於模板內層表面塗上一層薄薄的脫模油，以利日後拆模。將原先規劃之保護層厚度的水泥墊塊定位，最後再將已組立完妥並貼好應變計之鋼筋籠放置於水泥墊塊上。

(e) 試體澆置：

依照配比將混凝土材料倒入拌合機內，攪拌均勻後，分層分區澆置於模板內，每層均以振動棒振實；SCC 澆置前須全量通過坍流度、V 漏斗流速、U 型箱充填試驗，不須施加任何震動搗實，完全藉由自身之充填性能填充至鋼筋間隙及模板之各角落。澆置過程中，取樣製作 12 個 10cmx20cm 圓柱試體，以求得梁加載試驗時混凝土之實際抗壓強度。

(f) 拆模養護：

澆置 48 小時後即行拆模，將試體（包括圓柱試體），以透明帆布覆蓋，並經常膠水養護之。

2-4 實驗裝置

實驗時以交通大學大型結構實驗室 1000KN 之 MTS 油壓制動器（Actuator）進行三點彎曲（Three Points Bending）單向靜力加載實驗，並於試體跨度中央設置線性變化位移感應計（LVDT）以梁測梁中央之最大變形。實驗之進行採位移控制（Stroke Control），以便獲取極限載重後之各項實驗資料及韌性發揮情況，實驗取 LVDT 之讀數作為梁中央量測位移值，行程速率控制為 0.02mm/sec。

3. 試驗結果與分析

3-1 剪力行爲

3-1-1 RC 梁的開裂行爲

剪力對彈性均質梁的影響，非常接近無鋼筋純混凝土梁，當荷重稍增，拉應力最大處發生龜裂並隨即破裂。而有抗拉鋼筋時，則鋼筋可承受更大之荷重。剪力隨荷重增加而遞增，故剪力大之區域，斜拉力亦大為增加，尤其在靠近支承處，軸向拉力鋼筋為置於抵抗力最有效之處，對斜拉力不具抵抗作用。故斜拉力在與拉力方向垂直之方向上龜裂稱為斜裂縫（diagonal crack），與垂向撓曲裂縫（vertical flexural crack）有別，後者發生在彎矩大之區域，而前者為在剪力大之區域發生。

在無腹筋抵抗斜拉力之梁，其裂縫可延伸很遠，一般會造成結構體之損害；而對於含剪力筋之 RC 梁，在梁沒有形成裂縫前，剪力筋所能提供的抗剪強度是非常有限的，斜裂縫形成後，剪力筋可以促使梁之內力沿著裂縫方向做重新分配，因此 RC 梁之剪力鋼筋對梁而言有下列三個主要功能：

承擔部分剪力，避免梁發生突然的、脆性的破壞。

限制裂縫之發展而保有骨材之內鎖力（aggregate interlock）。

繫住拉力筋以提高其綴縫容量（dowel capacity）。

在試驗過程中觀察得知，當載重施加後，首先於梁垮度中央形成垂直的撓曲裂

縫，隨著載重的增加裂縫擴大分佈到載重點附近，當 RC 梁剪跨內斷面之斜拉應力超過混凝土之破裂模數 f_r 時，於剪跨內形成剪力裂縫，其裂縫形式隨拉力筋量、剪力跨度、撓曲裂縫位置等不同而有所不同。

剪力裂縫出現後，剪力筋之應變計讀數會突然的增加很多，表示當剪力裂縫發生後，原本由混凝土所承擔的剪力一部份將轉移給剪力鋼筋承擔，因剪力筋促使梁之內力重新分配，使得剪力強度增加，剪力裂縫較為細密且分散，隨著力量的增加剪力裂縫的數目及寬度也不斷增加，但不論剪力裂縫數目多寡，其中必定有一兩條裂縫明顯較寬，形成主要裂縫，此主要裂縫由剪跨中央向加載點及支承點延伸，最後造成梁試體的破壞。由試體破壞的情況可得知，所有試體之主要裂縫由支承點傾斜延伸至加載點，穿過剪跨內所有之剪力筋。

3-2 剪力破壞模式

鋼筋混凝土梁之剪力破壞可依 a/d 的變化可分為四種類型：

(1) $a/d \leq 1$ 深梁 (deep beams)

深梁在斜張裂縫發生後其行為近似一壓力拱，如圖 4-2 所示。深梁之剪力破壞來自於壓力拱之破壞，常見之壓力拱破壞有五種狀態。如圖 4-3 所示。

錨錠破壞－支承附近張力筋滑動

壓碎－支承處混凝土被壓碎

撓曲破壞－拱頂混凝土被壓碎

拱肋破壞－張力裂縫

拱肋破壞－拱肋混凝土壓碎

深梁破壞前承受之剪力遠大於斜張裂縫形成時之剪力。

(2) $1 < a/d < 2.5$ 短梁 (short beams)

梁在載重下，會於梁腰部位先形成傾斜裂縫，而垂直的撓曲裂縫也隨後發生。隨著載重增加，該斜裂縫將會往兩側發展。最後的破壞模式可分為兩種：

a、剪拉破壞 (shear-tension failure)：

由於剪力及彎矩的聯合作用，除了主要的斜裂縫及撓曲裂縫出現之外，亦陸續出現次要裂縫。如果次要裂縫沿著拉力筋方向延伸，將造成拉力筋與周圍混凝土的握裹失敗而造成破壞，此種破壞模式稱為剪張破壞。

b、剪壓破壞 (shear-compression failure)：

斜裂縫隨著載重增加往壓力區延伸。由於斜裂縫上方未開裂之壓力區混凝土承受逐漸增大的壓力，一但超過混凝土所能抵抗之壓應力，便造成混凝土壓碎破壞，其破壞型式稱為剪壓破壞。

(3) $2.5 < a/d < 6$ 中等長度梁 (intermediate beams)

首先在梁底產生了多條垂直撓曲裂縫，隨著載重增加，斜裂縫向上延伸並通過壓力區貫穿整個梁斷面形成破壞，稱之為對角張力破壞 (diagonal tension failure) 或斜張破壞。倘若剪力筋到達極限強度被拉斷而破壞則稱為剪力筋斷裂破壞。

(4) $a/d > 6$ 長梁 (long beams)

破壞之原因為張力鋼筋降伏後混凝土被壓碎之彎曲破壞。而撓曲破壞前可能已發生傾斜裂縫，但非破壞之主因。由試驗中各試體的破壞模式，含 Ulbon 腹筋之 RC 梁為剪壓破壞；無配置腹筋之 RC 梁為剪張破壞。

4. 結論

經對使用高杜力剪力筋(High Tensile Steel ULBON)之自充填混凝土及傳統混凝土梁做剪力試驗，變數包括混凝土強度、軸向鋼筋量、剪力箱筋量、剪跨深比等，所得結果分析可作成下列結論：

- 1、經對自充填混凝土及一般普通混凝土 RC 梁進行剪力試驗，並觀察其開裂、破壞過程後發現，兩系列梁的裂縫發展與破壞過程相當近似。
- 2、自充填混凝土傾斜破裂剪力 V_{cr} 實驗值與 ACI 規範預測值之比率介於 1.01~1.4 之間，平均值為 1.16；極限剪力強度試驗值平均為 ACI 計算值的 1.08 倍，所以 ACI 分析尚可適用於自充填混凝土梁在高強度箍筋使用下的分析。
- 3、剪力鋼筋量的多寡對 V_{cr} 影響並不顯著，SCC 梁與 OPC 梁的 V_{cr} 值變異性也不大， V_{cr} 隨混凝土強度增加而增加， a/d 減小則 V_{cr} 略有增加。 V_u 則隨 a/d 減小呈現大幅的增加。
- 4、剪力鋼筋有足夠的握裹是剪力筋能達到極限強度所必須的條件，由試體破壞時 ULBON 腹筋之應變可知，除了剪壓破壞造成壓力區混凝土壓碎而使剪力筋失去握裹外，在剪力跨度中間區之 ULBON 剪力筋應變可達降伏應變以上，換言之，Ulbon 腹筋具有足夠的握裹使梁達到設計的剪力強度。由於 Ulbon 剪力筋強度高且延展性佳，因此在梁破壞瞬間 Ulbon 不會突然斷裂，使得載重能力不致於突然的降低。
- 5、混凝土強度對剪跨深比 $a/d=2, 3$ 之梁，無論是否配置高拉力箍筋，並不會明顯影響其韌性大小。
- 6、剪跨深比 r_w 對韌性的影響：無論有、無配置高扭力箍筋，剪跨深比 $a/d=3$ 的韌性指數均優於 $a/d=2$ ，且在高強度自充填混凝土配置高扭力箍筋梁剪跨深比 $a/d=3$ 亦大於 $a/d=4$ 。
- 7、剪力鋼筋比 r_w 對剪力韌性的影響：剪跨深比 $a/d=2, 3$ 之梁，均隨剪力鋼筋比 r_w 增加而增加。對於 $a/d=3$ 的梁剪力筋比 r_w ，由 0.0022 增加到 0.003，其剪力韌性指數增加了 11%，也就是說剪力筋間距由 0.5 倍的有效深度放寬到 0.7 倍的有效深度，剪力韌性會下降 11%。
- 8、能量吸收率隨著 a/d 比值增加而增加：這表示剪力筋能有效提高極限載重的能力；其次，隨著 a/d 比值增加，使得達最高荷重後，

曲線下降的斜率小而緩和。其中當梁 $a/d=2$ 時，使用箍筋在中低強度混凝土梁的效果會優於高強度混凝土梁約 16%，而 $a/d=3$ 時，混凝土強度高低卻不影響其效果。

- 9、傳統混凝土與 SCC 梁韌性的比較:在具有相同混凝土強度、縱向鋼筋比、剪力箍筋比、剪跨深比的自充填混凝土梁與一般傳統混凝土梁，以自充填混凝土梁韌性表現較佳。
- 10、本試驗下，高扭力箍筋(High Tensile Steel ULBON·)適用性得以肯定，另一方面因為降伏強度為傳統箍筋 3-4 倍，因此，ULBON 的使用可減少 1/2 箍筋量，避免配筋過密，增進混凝土澆置工作性，進而大幅提升工程品質，並可使材料之使用降低，節省成本。
- 11、ACI 規範限制剪力鋼筋設計降伏強度不得大於 60ksi 之規定應可適度放寬。