

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

Flexural ductile behavior of concrete-filled box columns with tie rods under high axial load

主管單位：內政部建築研究所

陳正誠

黃國倫

Chen, Cheng-Cheng Huang, Guo-Luen

台灣科技大學營建工程系

摘要

本文共完成 9 支填充型箱型鋼柱之反覆載重撓曲試驗，承受 40% 軸向標稱強度之軸力（除了 1 支承受 20%）。鋼材標稱降伏強度為 $3.5\text{tf}/\text{cm}^2$ ，混凝土標稱抗壓強度為 $420\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，皆符合規範。其中 3 支探討高軸力下填充型箱型柱之撓曲韌性行為表現；另外 6 支填充型箱型柱以圍束繫桿來提升柱板寬厚比為 48 及 40 之填充型箱型柱之塑性轉角容量，欲使其能達到至少 3%rad 的塑性轉角容量之要求。根據試驗結果，得到結論敘述如後：(1) 柱板寬厚比為 48 及 40 之無圍束繫桿試體，其彎矩強度實驗值除以理論值結果分別為 1.02 及 1.09，塑性轉角容量分別為 2.92 及 1.31%rad，反而寬厚比為 48 者較佳；(2) 柱板寬厚比為 48 時，圍束繫桿可以將塑性轉角容量由 2.92%rad 提升至 4.21-4.46%rad；(3) 柱板寬厚比為 40 時，圍束繫桿可以將塑性轉角容量由 1.31% 提升至 2.11-3.91%rad。(4) 本文提供一設計圍束繫桿之簡易方法，可供工程實務使用。

關鍵詞：填充型箱型柱、合成柱、鋼骨鋼筋混凝土、柱

Abstract

In this paper, 9 specimens of CFBC with b/t of 40 and 48 were experimented under high axial loading and cyclic flexural loading to investigate the flexural behavior. The nominal yield stress of steel and the nominal compressive strength of in-filled concrete are $3.5\text{ tf}/\text{cm}^2$ and $420\text{ kgf}/\text{cm}^2$, respectively. It is observed that plastic rotation angle capacity is lower than 3% rad for each specimen without equipping tie rods. After reasonable use of tie rods, the plastic rotation angle capacity of CFBC can be improved to at least 3% rad. A simple designation method of tie rods is proposed.

Keywords: concrete-filled box column, composite column, steel reinforced concrete, column

一、前言

填充型箱型柱 (concrete filled box column, 或簡稱 CFBC) 施工容易也比較便宜, 是適合在國內研發、推廣的構材型式。使用填充型箱型柱相當具有經濟上及環保上的優勢, 現行規範對填充型箱型柱構材之規定大部分係參考鋼管混凝土柱構材 (concrete filled tube, 或稱為 CFT) 之研究結果。然而鋼管混凝土柱研究^[1-16]的實驗試體尺寸偏小, 柱寬在 10~35 cm 之間, 且鋼管與箱型柱之製作方式截然不同, 如圖 1 及圖 2 所示, 鋼管混凝土柱使用無縫鋼管或是由兩個槽鋼銲接而成之方形斷面, 填充型箱型柱是使用由四塊鋼板組合而成之箱型柱。故使用填充型箱型柱需要進行相關試驗, 驗證其可行性與可靠性。根據國內 SRC 結構設計規範^[17]規定, 鋼骨材料之降伏強度不宜大於 3.5 tf/cm², 而混凝土抗壓強度也不宜大於 560kgf/cm²; 故本研究的研究預計以 3.5 tf/cm² 等級鋼材, 配合 420 kgf/cm² 級的混凝土製作試體。

填充型箱型柱中淨寬 b 及厚度 t 如圖 2 所示, 柱板寬厚比 (b/t) 越大, 柱板越容易挫屈, 而強度與韌性也會受到很大的影響。根據國內 SRC 規範, 使用 3.5 tf/cm² 等級的鋼材時, 柱板之寬厚比不得大於耐震構材柱板寬厚比的限制 (等於 42); 依照 2010 年陶其駿及蔡煒銘之研究報告顯示軸力愈大會使填充型箱型柱之撓曲韌性愈差, 當柱板寬厚比為 32 時, 軸力 P 與軸向強度 P_{n0} 的比值 (簡稱軸力比) 愈大, 塑性轉角容量愈小, 亦即撓曲韌性容量愈差; 當軸力比為 35% 時, 塑性轉角容量約為 3%; 當軸力比為 50% 時, 塑性轉角容量僅剩不到 2%; 所以即使柱板寬厚比低於規範限制, 當軸力很大時, 填充型箱型柱的撓曲韌性容量仍然會明顯不足。本研究欲探討柱板寬厚比符合及不符合規範限制之兩種情況對高軸力填充型箱型柱構件撓曲韌性之影響。現在工程界已使用填充型箱型柱, 其在施工時必須加上繫桿, 降低箱型柱因混凝土壓力產生之向外變形量, 本文將繫桿作為結構用途, 應可降低柱板厚度需求。2008 年陳正誠等人之研究報告^[18]證明於高寬厚比之短柱構件使用圍束繫桿, 可以有效發展出良好之韌性。2009 年陳正誠等人之研究報告^[19]結果亦顯示, 在寬厚比為 60 之填充型箱型柱中使用繫桿, 可以讓柱發揮出優異的撓曲韌性容量, 即使柱板寬厚比已超過規範之限制 (等於 42) 且接近結實斷面寬厚比限制 (等於 61)。故圍束繫桿對填充型箱型柱軸力行為有莫大的助益, 本研究將繼續研究圍束繫桿對高軸力作用下混凝土箱型柱撓曲行為之影響。

二、柱撓曲行為試驗

2.1 試體設計

由於柱桿件受軸力及撓曲載重至破壞階段, 牽涉到材料與幾何之非線性反應, 行為非常複雜, 因此需採用結構實驗方式探討其行為。本案共製作 9 個填充型箱型柱下方接 H 型鋼梁及內含橫隔板之試體, 試體設計圖如圖 3 所示, 試體列表如表 1 所示, 採用厚度 9 mm 之 ASTM A572 Gr.50 鋼材, 實測降伏強度 F_y 為 4.16 tf/cm², 混凝土圓柱試體平均抗壓強度 f'_c 為 520 tf/cm²; 以 R 開頭的試體稱為 R 系列試體, 代表未加圍束繫桿之試體, 而以 T 開頭的試體則稱為 T 系列試體, 代表有加圍束繫

桿之試體，如圖 5 所示；第一個數值代表試體之箱型柱寬厚比 b/t ，第二個數值代表軸力比 (P/P_{n0}) 之百分比值， P_{n0} 可依照下式計算^[17]：

$$P_{n0} = A_s F_y + 0.85 A_c f'_c \quad (1)$$

其中 A_s 及 A_c 分別為箱型鋼柱及混凝土之斷面積。除了 R40-19 試體之 P/P_{n0} 約為 20% 外，其餘試體之 P/P_{n0} 約為 40%。

R 系列共有三支試體， b/t 分別為 48 及 40，其試體寬度如表 1 所示，斷面如圖 2 所示；此系列試體可探討固定軸壓下，填充型箱型柱之撓曲強度及撓曲延展性。T 系列試體與 R 系列試體雷同，但其在梁柱接頭上方至少一倍柱寬範圍內，使用了圍束繫桿，如圖 4 所示，使用單排配置圍束繫桿，斷面如圖 5 所示。由 2008 年陳正誠等人之研究報告^[18]，已知圍束繫桿間距 S 與試體寬度 D 的比例（簡稱間寬比 S/D ）達到 0.4 以下之試體有優良表現；2009 年陳正誠等人之研究報告^[19] 使用之 S/D 為 0.33，結果顯示在低軸力作用下可以讓柱發揮出優異的撓曲韌性容量；不過 2010 年陶其駿及蔡煒銘之研究報告^[20] 顯示，即使 b/t 為 32（低於規範限制 42），當軸力很大時，填充型箱型柱的撓曲韌性容量仍然會略顯不足。本研究主要是針對高軸力的填充型箱型柱，故本研究針對寬厚比 48 及 40 各設計了三支試體，共六支試體；T 系列試體編號上的最後一個英文字是代表繫桿對混凝土提供之圍束應力強弱，H、M 及 L 分別代表強、中及弱， S/D 為 0.33。T 系列試體能初步探討寬厚比 48 及 40 之填充型箱型柱在高軸力作用下，圍束繫桿所需要對混凝土提供之圍束應力需求

$\sigma_{ct,req}$ 。

2.2 圍束繫桿所能提供之圍束應力計算方法

以下提出考量圍束繫桿所能提供之圍束應力計算方法，由圖 6 假設兩側柱板最多能於 12 倍厚度範圍內能提供良好圍束（SRC 規範^[17]規定 3.5 tf/cm^2 鋼材之 H 型鋼柱斷面翼板肢材寬厚比限制 $\lambda_{pd} = 21/\sqrt{F_{ys}} = 11.2$ ），其餘範圍由圍束繫桿產生拉力來提供圍束應力，若一支圍束繫桿於寬度方向兩側各 12 倍厚度範圍內亦能提供良好圍束，則可知寬度方向使用單支繫桿時之最大柱板寬厚比為 48，若柱板寬厚比超過 48 則以寬度方向使用二支圍束繫桿為佳。本研究以螺桿的極限拉力強度來估計其對混凝土所能提供的最大圍束應力 σ_{ct} 如下式：

$$\sigma_{ct} = \frac{N_t F_{ut} A_{bs}}{S[(N_t D)/(N_t + 1)]} \quad (2)$$

其中 N_t 代表寬度方向使用的繫桿數量， F_{ut} 代表螺牙桿件實際抗拉強度， $A_{bs} = 0.75 A_b$ 代表螺牙桿件有效斷面積， A_b 代表螺牙桿件標稱斷面積；可知寬度方向使用一支及二支繫桿所得的圍束應力如下式：

$$\sigma_{ct} = \begin{cases} \frac{2F_{ut} A_{bs}}{SD}, & \text{for } N_t = 1 \\ \frac{3F_{ut} A_{bs}}{SD}, & \text{for } N_t = 2 \end{cases} \quad (3)$$

若已知對混凝土的圍束需求 $\sigma_{ct,req}$ (由試驗結果各試體塑性轉角容量與圍束應力做圖並迴歸, 得到滿足塑性轉角容量 3% 的圍束應力即為圍束應力需求), 則可由鋼構 LSD 設計規範^[21] 查表 10.3-2 或表 C10.3-2 挑選適當 $\phi F_t A_b$ 以滿足下式:

$$\phi F_t A_b \geq \begin{cases} \frac{1}{2} SD \sigma_{ct,req}, & \text{for } N_t = 1 \\ \frac{1}{3} SD \sigma_{ct,req}, & \text{for } N_t = 2 \end{cases} \quad (4)$$

其中 ϕ 為折減係數, F_t 代表螺牙桿件拉力強度。

2.3 試驗裝置、載重歷程與測計配置

試驗裝置如圖 7 所示。架設試體時以夾具及螺桿將 H 型鋼梁、底板及強力地板夾緊, 每支螺桿施加 60 噸預力, 接著使用鋼板將底板兩側角鋼與試體間的縫隙塞滿, 再以螺桿將試體上方與水平的 200 噸萬能試驗機連接鎖緊並施加預力每支螺桿 29 噸預力^[21]; 試驗時, 先以上方的 600 噸萬能試驗機施加固定軸力 P , 再以水平的 200 噸萬能試驗機施加側向力進行反覆載重撓曲行為試驗。

本文使用之反覆載重位移歷時係採用 AISC2005 之規範^[22] 所建議之位移歷時修改而得, 如圖 8 所示, 致動器所提供之側向位移由側移角乘以試體鋼梁上緣至致動器中心線之高度 (1.95 m) 求得。

量測儀器配置如圖 9 所示, 共安排三個角度計及六個位移計, 其中一個角度計置於試體上方垂直致動器底座處以量測試體上端之角度, 一個角度計置於致動器上面以量測致動器之角度, 最後一個角度計置於鉸接頭上; 水平位移計置於上橫隔板高程處 (致動器之高程) 及鋼梁上翼板處, 如此可以量得柱試體之變形曲線, 另外並架設六支垂直位移計, 以量測軸向變形並可換算不同高程之轉角, 且確保不會變形過大造成危險, 而有加圍束繫桿的試體, 另外在部分螺桿中央貼上應變計, 以估計螺桿提供的圍束應力。

三、試驗結果與討論

由試驗遲滯迴圈之包絡線可直接得到極限彎矩強度 M_{exp} , 並計算出降伏側移角 θ_{yn} 、極限側移角 θ_u 及塑性轉角 θ_p 。 θ_{yn} 之定義為由原點及包絡線上昇段 $0.75 M_n$ 交點連線上 M_n 所對應之側移角, 如圖 10 中 θ_{yn} 所示; θ_u 之定義為包絡線下降段對應於 $0.85 M_{exp}$ 之側移角, 如圖 10 中 θ_u 所示; θ_p 之定義為 θ_u 減去 θ_{yn} 所剩餘之側移角。試驗結果如表 1 所示, 所列結果為正、負側移角之結果取平均。

3.1 不同寬厚比之影響

R48-37、R40-19 及 R40-40 試體彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖分別如圖 11-圖 13 所示。由表 1 可看出試體 R48-37、R40-19 及 R40-40 之 M_{exp}/M_n 為 1.02~1.09, 理論彎矩強度尚屬保守, 而由試體 R40-19 及 R40-40 可看出軸力比由約 18% 增加至 40%, 會使塑性轉角 θ_p 驟降, 此與 2010 年陶其駿及蔡煒銘之研究報告^[20] 結果相符

合；而值得注意的是，軸力比約 40% 時試體 R48-37 的 θ_p 反而比試體 R40-40 增加不少。將 R 系列的結果併同 2009 年陳正誠等人及 2010 年陶其駿及蔡煒銘之研究結果繪成塑性轉角-軸力比分佈圖，如圖 14 所示，寬厚比 32、40 及 48 的數據點分別以「◆」、「▲」及「■」標示，可看出軸力比增加確實會降低塑性轉角容量；由寬厚比 32 的數據點線性回歸，可得到軸力比 P/P_0 不大於 35% 時，塑性轉角容量可達 3% rad 以上；由寬厚比 40 的數據點線性回歸，可得到軸力比 P/P_0 不大於 27% 時，塑性轉角容量可達 3% rad 以上；這也代表寬厚比 40 及 32 的試體分別在軸力比 P/P_0 大於 27% 及 35% 時，塑性轉角容量無法達到 3% rad，但是從國內 SRC 規範對填充型箱型柱柱板寬厚比的規定無法合理預測此結果。

從試驗觀察可知試體 R48-37 及 R40-40 開始發生局部挫屈的層間位移角皆為 1.5% rad，柱板挫屈後變形及內彎矩示意圖如圖 15 所示，類似兩端固定的梁受到均佈載重， δ 為中點變位， M_{48} 及 M_{40} 分別為寬厚比為 40 及 48 之試體受壓側鋼板在單位高度所受的內部彎矩，與 δ/b 成正比，如表 2 所示，於層間位移角 +1.5% 時，R40-40 試體的 δ/b 尚比 R48-37 試體的 δ/b 小，然而層間位移角 -1.5% 時，R40-40 試體的 δ/b 已經比 R48-37 試體的 δ/b 大了，表示 R40-40 試體於受壓側鋼板在單位高度所受的內部彎矩比 R48-37 更大，層間位移角 2% 之後的差距也愈來愈大，所以高軸力作用下，寬厚比為 40 者其塑性轉角容量比寬厚比為 48 者差。而由 2009 年陳正誠等人[錯誤!找不到參照來源。]研究研究結果可知，低軸力作用下，相較於寬厚比為 40 者開始挫屈的層間位移角 (3% rad)，寬厚比為 48 者較早開始挫屈 (層間位移角 2% rad)，即使寬厚比為 40 者挫屈後韌性較差，因為挫屈時機較晚，所以整體上來說，低軸力作用下，寬厚比為 40 者其塑性轉角容量比寬厚比為 48 者好。

3.2 圍束繫桿之影響

以第二章的估算方式計算，得到各試體使用之圍束繫桿所能提供對混凝土的圍束應力如表 1 所示 σ_{ct} 。T 系列試體彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖如圖 16 至圖 21 所示。

由表 1 可看出試體 T48-38-H、T48-39-M 及 T48-34-L 之彎矩強度比 M_{exp}/M_n 為試體 R48-37 之 110% 至 134%，可知加圍束繫桿可為填充型箱型柱增加少許彎矩強度，而塑性轉角 θ_p 為試體 R48-37 之 144% 至 156%，可知加圍束繫桿確實可為填充型箱型柱增加塑性轉角容量，故若使用極限拉力強度能提供的圍束應力達 66 kgf/cm^2 以上之圍束繫桿 (將 T 系列中寬厚比 48 試體之繫桿圍束應力 σ_{ct} 與塑性轉角 θ_p 分佈關係繪圖如圖 22 所示，試體 T48-34-L 由於軸力比較小而不計入考量，且為求保守，故 σ_{ct} 直接取小值當作需求)，則柱板寬厚比為 48 之填充型箱型柱其塑性轉角及撓曲韌性容量應該能達 3% rad。

由表 1 也可看出試體 T40-40-H、T40-41-M 及 T40-40-L 之彎矩強度比 M_{exp}/M_n 為試體 R40-40 之 119% 至 130%，而塑性轉角 θ_p 為試體 R40-40 之 161% 至 297%，可知加圍束繫桿確實可為填充型箱型柱增加塑性轉角容量，故若使用單排配置且使用極

限拉力強度能提供的圍束應力達 58 kgf/cm^2 以上之圍束繫桿(將 T 系列中寬厚比 40 試體之繫桿圍束應力 σ_{ct} 與塑性轉角 θ_p 分佈關係繪圖如圖 23 所示, 做趨勢線與 3% rad 之水平線 θ_p 交叉得到 σ_{ct} 需求), 則柱板寬厚比為 40 之填充型箱型柱其塑性轉角及撓曲韌性容量應能達 3% rad。

綜合含圍束繫桿試體之結果, 可知若使用 3.5 tf/cm^2 降伏強度之鋼材、 420 kgf/cm^2 標稱抗壓強度之混凝土製作填充型箱型柱, 在軸力比約 40% 時, 以本研究目前提供的設計方法配合螺桿的極限強度來設計並配置圍束繫桿, 且繫桿對混凝土所能提供之圍束應力至少與本研究的含繫桿試體相同, 則應該能有不錯的塑性轉角容量。

四、結論與建議

本文之填充混凝土箱型鋼柱係使用標稱降伏強度 3.5 tf/cm^2 之鋼材、標稱抗壓強度 420 kgf/cm^2 之混凝土, 且試體皆承受軸力比約 40% 之高軸力, 基於這些條件下, 由實驗結果可歸納出以下結論與建議:

1. 寬厚比為 40 及 48 之填充型箱型柱試體, 在高軸力作用下, 實驗彎矩強度除以理論彎矩強度皆大於 1; 而塑性轉角容量並未隨寬厚比減少而增加, 反而寬厚比為 48 的表現較好。
2. 建議在軸力比介於 25~35% 時, 寬厚比上限修正為 32, 而在軸力比大於 35% 時, 需要更多研究來確認寬厚比上限。
3. 寬厚比為 40 及 48 之填充型箱型柱試體, 在高軸力作用下, 加上繫桿後彎矩強度稍有提升; 塑性轉角容量分別提升約 220% 及 48%。若圍束繫桿能對混凝土提供圍束應力分別達 58 及 66 kgf/cm^2 以上, 且繫桿之間寬比為 0.33, 則其塑性轉角容量應該能達到 3% rad 以上。
4. 在軸力比介於 25~35% 時且寬厚比介於 40~48 之間時, 或而在軸力比大於 35% 時且寬厚比介於 32~48 之間時, 可以設計配置足夠的圍束繫桿來提升其撓曲韌性容量。

參考文獻

1. Aval, S. B. B., Saadeghvaziri, M. A., Golafshani, A. A., 2002, "(15) Comprehensive Composite Inelastic Fiber Element for Cyclic Analysis of Concrete-Filled Steel Tube Columns," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 128, No. 4, April, 2002.
2. Huang, C.S.; Yeh, Y.K.; Liu, G.Y.; Hu, H.T.; Tsai, K.C.; Weng, Y.T.; Wang, S.H.; and Wu, M.H., 2002, "Axial Load Behavior of Stiffened Concrete-Filled Steel Columns," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 9, pp. 1222-1230, September 1, 2002.

3. Shanmugam, N.E., Lakshmi, B., Uy, B., 2002, "An Analytical Model for Thin-Walled Steel Box Columns with Concrete In-Fill," *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 6, pp. 825-838.
4. Susantha, K. A. S., Ge, H., Usami, T., 2002, "Cyclic Analysis and Capacity Prediction of Concrete-Filled Steel Box Columns," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 2, pp. 195-216.
5. Varma, A. H., Ricles, J. M. , Sause, R., Lu, L. W., 2002, "Experimental Behavior of High Strength Square Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 3, March 1, 2002.
6. Hsu, H.L., Yu, H.L., 2003, "Seismic performance of concrete-filled tubes with restrained plastic hinge zones," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, No. 3, pp. 587-608.
7. Hu, H.T., Huang, C.S., Wu, M.H., Wu, Y.M., 2003, "Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 10, pp. 1322-1329, October 1, 2003.
8. Inai, I., Mukai, A., Kai, M., Tokinoya, H., Fukumoto, T., Mori, K., 2004, "Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Beam Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 2, February 1, 2004.
9. Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S., Nishiyama, I., 2004, "Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 2, February, 2004.
10. Varma, A. H., Ricles, J. M. , Sause, R., Lu, L. W., 2004, "Seismic Behavior and Design of High-Strength Square Concrete-Filled Steel Tube Beam Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 2, February 1, 2004.
11. Lu, F.W., Li, S.P., Li, D.W., Sun, G., 2007, "Flexural Behavior of Concrete Filled Non-Uni-Thickness Walled Rectangular Steel Tube," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, No. 8, pp. 1051-1057.
12. 王勝輝，1998，「加勁鋼管填充混凝土柱之軸向載重行為研究」，碩士論文（指導教授：蔡克銓），國立臺灣大學土木工程系，台北，1998年7月。
13. 傅正堯，1998，「高強度鋼骨混凝土柱之耐震行為」，碩士論文（指導教授：陳誠直），國立交通大學土木工程系，新竹。
14. 黃炯憲、葉勇凱、劉季宇、蔡克銓、王勝輝，1999，「方形加勁鋼管混凝土柱受軸壓行為之探討（一）」，國家地震工程研究中心，報告編號 NCREE-99-019。
15. 孫維隆，2000，「加勁鋼管混凝土柱受軸壓與彎矩之行為研究」，碩士論文（指導教授：蔡克銓），國立臺灣大學土木工程系，台北，2000年7月。
16. 丁英哲，2004，「高強度鋼管混凝土柱強度之實驗探討」，碩士論文（指導教授：呂東苗），國立中興大學土木工程系，台中，2004年6月。
17. 內政部營建署(2006)，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」。

18. 陳正誠、黃國倫，2008，「含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究」，內政部建築研究所委託研究成果報告，GRB 編號：PG9702-0298，內政部研考資訊系統計畫編號：097301070000G1017。
19. 陳正誠、黃國倫，2009，「混凝土箱型鋼柱之撓曲韌性行為研究」，內政部建築研究所委託研究成果報告，GRB 編號：PG9802-0398，內政部研考資訊系統計畫編號：098301070000G1018。
20. 陶其駿、蔡煒銘，2010，「在不同軸力下填充混凝土箱型鋼柱之撓曲行為研究(1/2)」，內政部建築研究所自行研究報告，內政部研考資訊系統計畫編號：099301070000G2035。
21. 內政部營建署(2007)，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範-鋼結構極限設計法規範及解說」。
22. AISC, 2005a, “Seismic Provision for Structural Steel Buildings,” America Institute of Steel Construction

表 1、試體相關參數與試驗結果

Specimen	D mm	d_t mm	Material of tie rods	σ_{ct} kgf/cm ²	M_n tf-m	M_{exp} tf-m	$\frac{M_{exp}}{M_n}$	θ_{yn} % rad	θ_u % rad	θ_p % rad
R48-37	450	-	-	-	150	153	1.02	0.79	3.71	2.92
R40-19	380	-	-	-	101	110	1.08	1.30	5.03	3.73
R40-40	380	-	-	-	100	109	1.09	0.79	2.10	1.31
T48-38-H	450	25	A490	133.31	149	200	1.34	0.74	5.20	4.46
T48-39-M	450	19	A490	66.10	149	174	1.17	0.74	4.94	4.21
T48-34-L	450	13	A490	33.52	150	165	1.10	0.84	5.39	4.55
T40-40-H	380	25	SS400	91.66	100	130	1.30	0.76	4.67	3.91
T40-41-M	380	19	SS400	44.52	99	118	1.19	0.71	3.38	2.66
T40-40-L	380	13	SS400	24.43	100	118	1.19	0.62	2.73	2.11

表 2、試體 R48-40 及 R40-40 變形 δ 及淨寬 b 之比值 δ/b 結果

試體	δ/b at 1.50%	δ/b at -1.50%	δ/b at 2.00%	δ/b at -2.00%
R40-40	0.0177	0.0065	0.0482	0.0231
R48-40	0.0234	0.0064	0.0448	0.0140

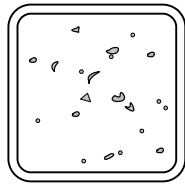


圖 1、鋼管混凝土柱斷面圖

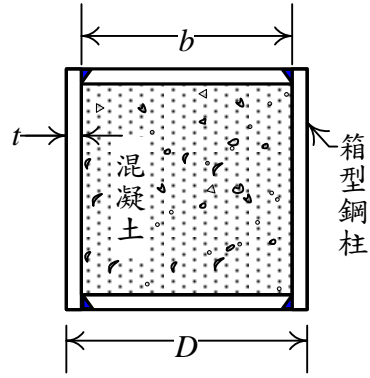


圖 2、填充型箱型柱斷面圖

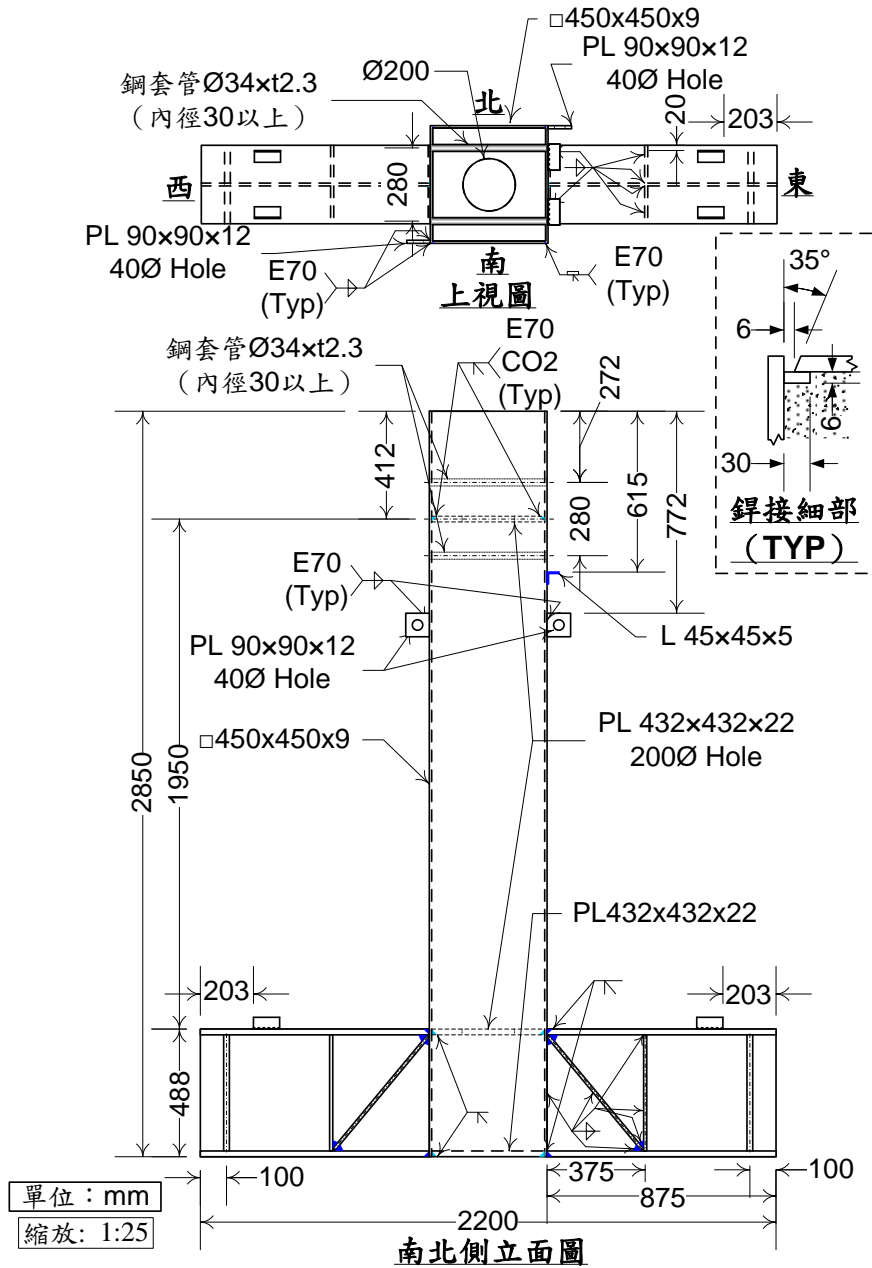


圖 3、試體設計圖 (以 R48-37 為例)

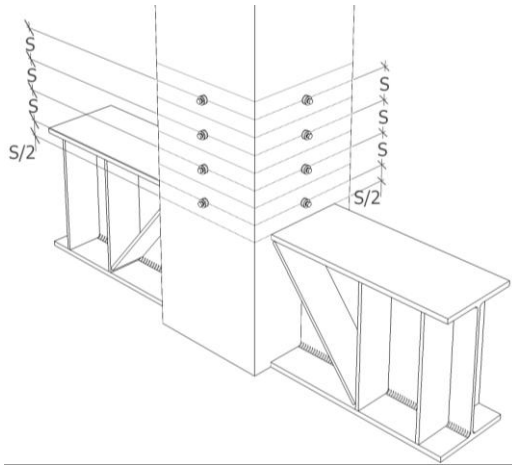


圖 4、T 系列試體示意圖

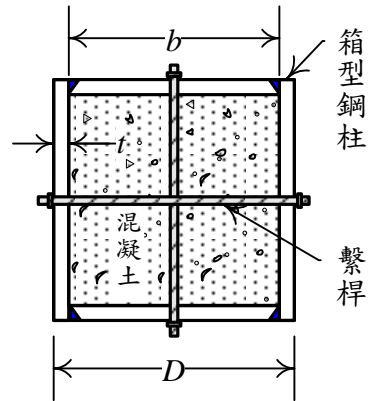


圖 5、單排配置圍束繫桿斷面圖

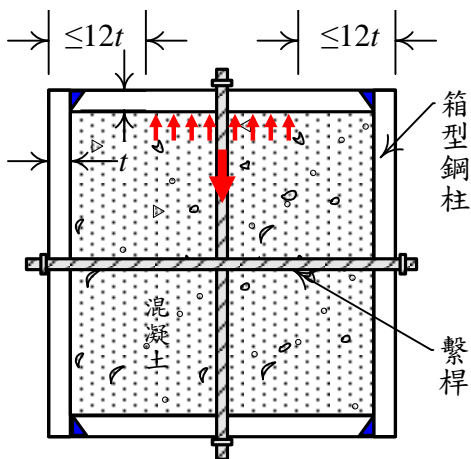


圖 6、單排配置圍束應力示意圖



圖 7、含軸力之撓曲行為試驗裝置

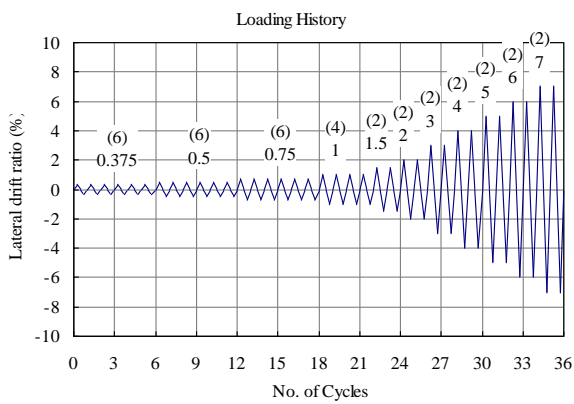


圖 8、反覆載重位移歷時圖

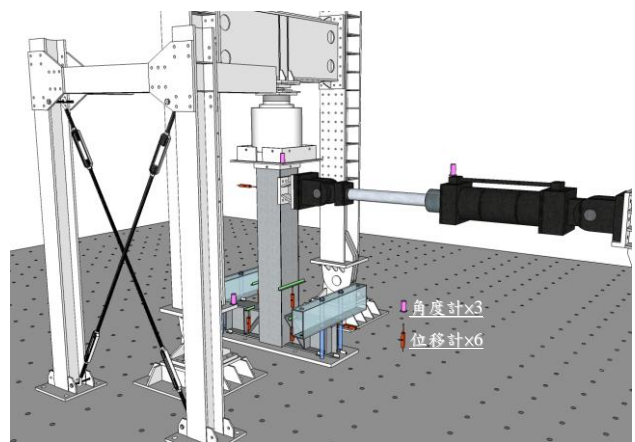


圖 9、量測儀器配置示意圖

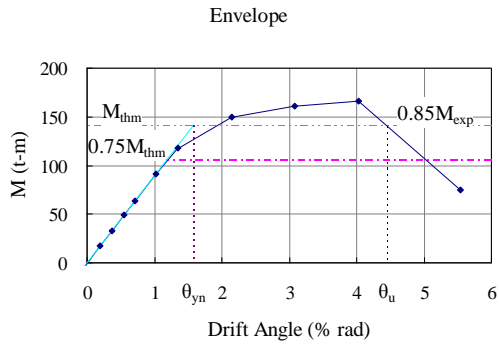


圖 10、降伏側移角 θ_{yn} 、極限側移角 θ_u 定義之說明圖

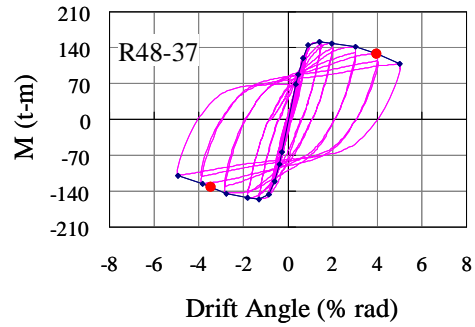


圖 11、R48-37 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

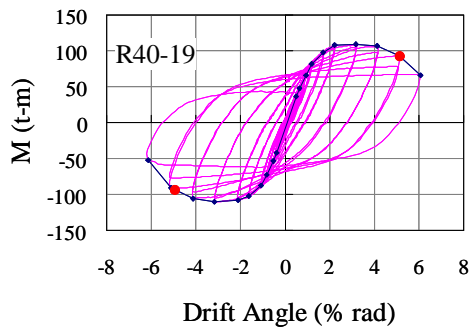


圖 12、R40-19 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

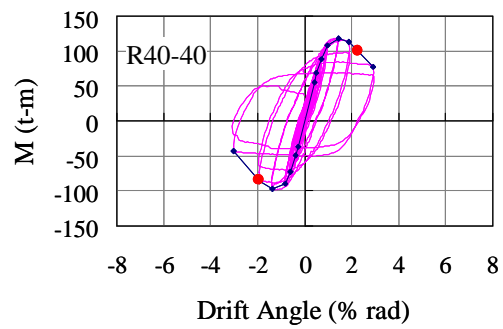


圖 13、R40-40 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

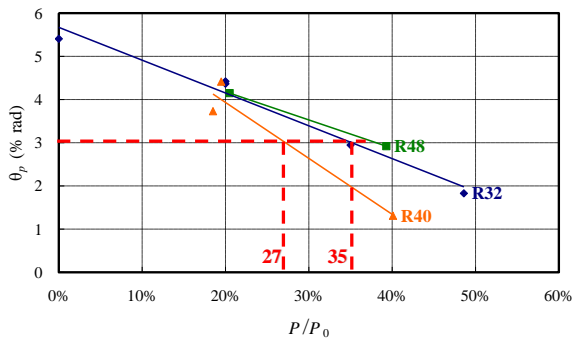


圖 14、R 系列塑性轉角-軸力比分佈圖

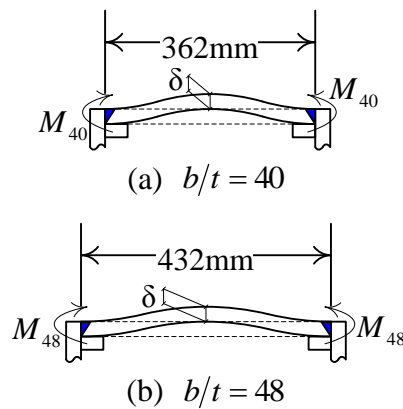


圖 15、柱板挫屈變形及內彎矩示意圖

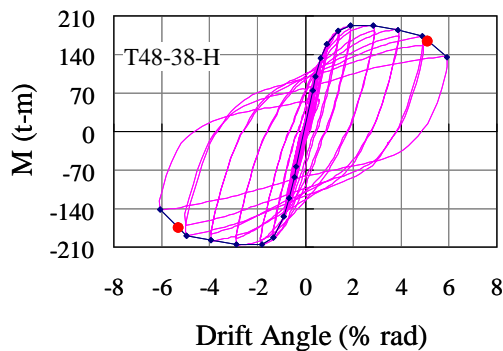


圖 16、T48-38-H 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

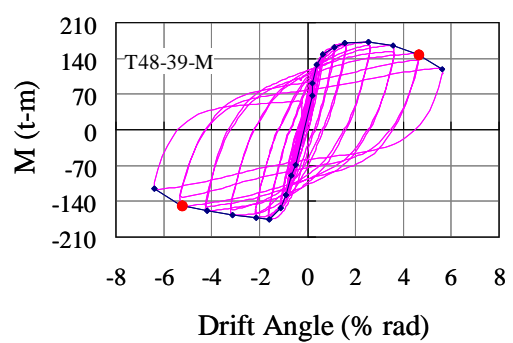


圖 17、T48-39-M 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

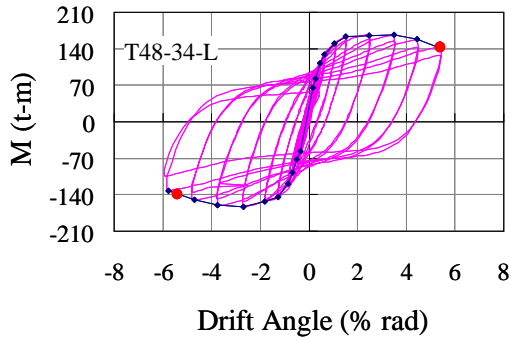


圖 18、T48-34-L 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

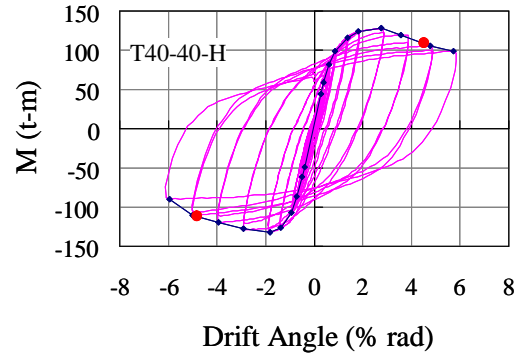


圖 19、T40-40-H 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

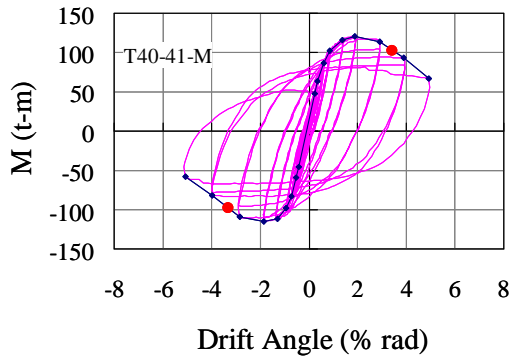


圖 20、T40-41-M 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

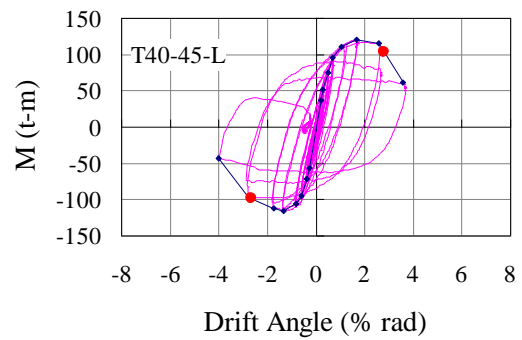


圖 21、T40-40-L 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖

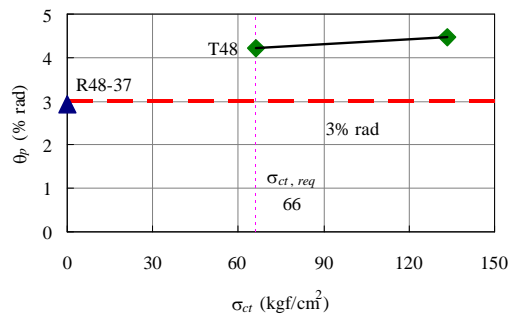


圖 22、T 系列中寬厚比 48 試體之繫桿圍束應力與塑性轉角分佈圖

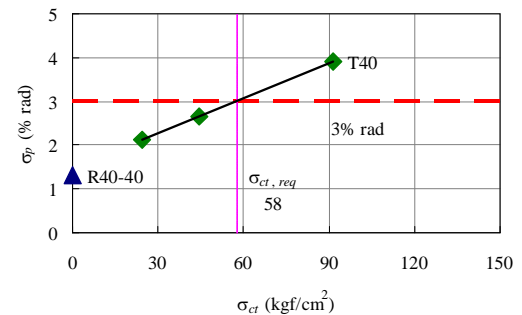


圖 23、T 系列中寬厚比 40 試體之繫桿圍束應力與塑性轉角分佈圖