

包覆填充型箱型柱橫向鋼筋配置方式 之軸向強度與韌性

The Effectiveness of Transverse Steel Bar Details on Axial Behavior of Concrete Filled and Encased Steel Box column

主管單位：內政部建築研究所

陳正誠¹

周佳希¹

吳品達¹

Cheng-Cheng Chen¹

Chia-his Chou¹

Pin-Da Wu¹

¹ 國立台灣科技大學營建工程研究所

摘要

關鍵詞：包覆填充型箱型柱、鋼骨鋼筋混凝土柱、包覆型 SRC 柱、填充型箱型柱

一、研究緣起

由於箱型柱具有優異的力學性能，台灣高樓結構大多使用箱型柱或填充型箱型柱(即箱型柱內填充混凝土)。但是考慮到防禦火害，工程師常在箱型柱外增設約 100mm 的混凝土當作防火層。有的工程師將這層混凝土兼作結構用途，並配置縱向主筋及橫向鋼筋，成為所謂的「包覆填充型箱型柱」。

由於鋼梁會接到鋼柱面，因此縱向主筋往往只能配置在柱角隅處，且橫向鋼筋除了外圍箍筋外，繫筋也會受到鋼柱的阻撓而無法直通柱斷面。鋼柱的阻撓使得包覆填充型箱型柱外圍混凝土的圍束常無法滿足規範的要求。為了解決這個問題，工程師提出一些變通的作法，有些作法在學理上不甚合理，有些作法處於灰色地帶，對結構安全帶來疑慮。

為了確保包覆填充型箱型柱之結構安全性，以大尺寸柱試體軸向載重試驗，來評估、測試常見橫向鋼筋配置細部，對鋼柱外側混凝土的圍束效果。此外開發出可能之替代方案，並以大尺寸柱試體軸向載重試驗的方式驗證這些替代方案的可行性。研究成果一方面可以提供工程界結構細部設計與施工之參考，一方面也可以提供相關規範未來修改之參考。此外，試驗數據還可用以評估各種橫向鋼筋型式與細部，在包覆填充型箱型柱撓曲韌性發展之潛能，並據以研提後續研究發展之方向與課題。

二、研究方法及過程

本研究案之研究工作包括文獻資料蒐集與整理、試體設計、試體製作、材料機械性質試驗、軸向載重試驗及數據收集、實驗數據整理及分析、理論模型評估、報告與期刊論文撰寫以及提出建議等步驟。採用的研究方法包括：1.文獻資料收集與整理；2.短柱試體之軸向載重實驗；3.鋼板、箍筋及混凝土基本材料實驗；4.規範條文適用性評估；5.舉辦專家座談會。

三、重要發現

T3 試體的延展性不比 T4 試體差，顯示接力式繫筋的概念相當具有可行性。T5 試體在強度

降到 75%時之延展性，與 T4 試體之延展性接近，顯示 T5 橫向箍筋之配置方式具有可行性。

四、主要建議事項

建議一：

鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範解說之修改：立即可行建議

主辦機關：內政部營建署

本計畫研究結果顯示角隅繫筋的功能無法取代一般繫筋，另外接力式繫筋具有可行性，建議在鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範中第「4.3.5 柱之箍筋」之解說中補充說明之。

建議二：

推動「填充型箱型柱內剪力釘之需求探討」研究計畫：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

專家座談會、期中審查會議及期末審查會議時，工程實務人員之討論中，可發現箱型柱與混凝土間是否需要設置剪力釘，還有需要設置多少剪力釘，困擾著工程師們。這個問題無法在本研究案中探討，建議建研所將「箱型柱與混凝土間是否需要配置剪力釘」列為短期內推動之研究課題。

建議三：

推動「包覆填充型箱型柱接力式繫筋之撓曲韌性」研究計畫：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

T3 試體接力式繫筋的概念相當具有可行性，應該進行撓曲延展性試驗，進一步探討其可行性。

ABSTRACT

Keywords: concrete filled and encased column, SRC column, steel reinforced concrete column, encased box column, concrete filled box column.

Box column and concrete filled box column are widely used in Taiwan in high-rise buildings. However, for the purpose of fire resistance, a layer of concrete, which usually has a thickness of 100 mm, encasing the box columns is often provided. This layer of concrete basically is not considered having structural function. Some engineers thicken the concrete, provide longitudinal steel bar, and provide transverse steel bars to make the concrete wrapping around the box column having structural function. This type of column section is named as concrete filled and encased box column. However, this type of column is likely to have problem confining out-skirt concrete sufficiently to provide enough ductility to the column. In this study, several types of transverse steel bar pattern are investigated to obtain more information about the ductility that these steel bar patterns can provide. In addition, new type of transverse steel bar pattern will be developed in this study. Large scale short column specimens will be fabricated and tested by applying axial load to study the ductility of the different transverse steel bar pattern can develop.

壹、 研究緣起

由於箱型柱具有優異的力學性能，台灣高樓結構大多使用箱型柱或填充型箱型柱(即箱型柱內填充混凝土)。但是考慮到防禦火害，工程師常在箱型柱外增設約 100mm 的混凝土當作防火層。有的工程師會將這層混凝土兼作結構用途，並配置縱向主筋及橫向鋼筋，成為所謂的「包覆填充型箱型柱」。

由於鋼梁會接到鋼柱面，因此縱向主筋往往只能配置在柱角隅處，且橫向鋼筋除了外圍箍筋外，繫筋也會受到鋼柱的阻撓而無法直通柱斷面。鋼柱的阻撓使得包覆填充型箱型柱外圍混凝土的圍束常無法滿足規範的要求。為了解決這個問題，工程師提出一些變通的作法，有些作法在學理上不甚合理，有些作法處於灰色地帶，對結構安全帶來疑慮。

為了確保包覆填充型箱型柱之結構安全性，以大尺寸柱試體軸向載重試驗，來評估、測試常見橫向鋼筋配置細部，對鋼柱外側混凝土的圍束效果。此外開發出可能之替代方案，並以大尺寸柱試體軸向載重試驗的方式驗證這些替代方案的可行性。研究成果一方面可以提供工程界結構細部設計與施工之參考，一方面也可以提供相關規範未來修改之參考。此外，試驗數據還可用以評估各種橫向鋼筋型式與細部，在包覆填充型箱型柱撓曲韌性發展之潛能，並據以研提後續研究發展之方向與課題。

貳、 研究背景

由於箱型柱具有優異的力學性能，台灣高樓鋼結構大多使用箱型柱或填充型箱型柱(即箱型柱內填充混凝土)。但是考慮到防禦火害，工程師常在箱型柱外增設約 100 mm 的混凝土當作防火層，並配置溫度鋼筋或點銲鋼絲網，如圖 2.1 所示。桿件設計時，通常不考慮防火層混凝土及點銲鋼絲網對桿件強度的可能貢獻。這樣的作法似乎有點浪費材料，因此有將這層混凝土防火層兼作結構用途的構想，通常將混凝土層加厚至 150 mm 或更高，並配置縱向主筋如圖 2.2 所示。

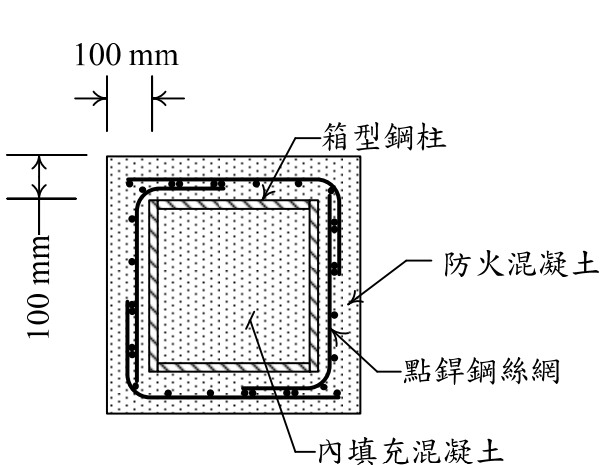


圖 2.1 具防火混凝土之填充型箱型柱

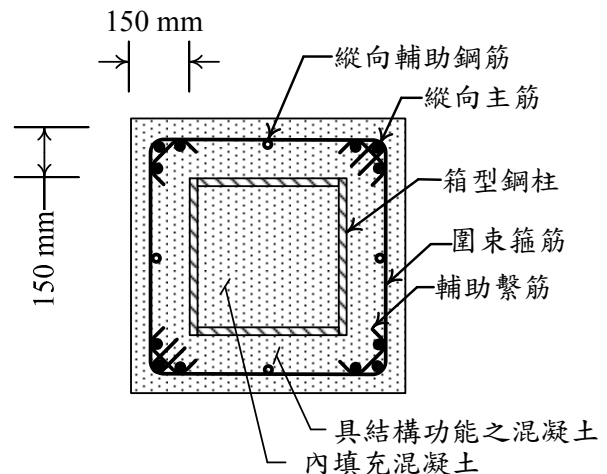


圖 2.2 典型包覆填充型箱型方柱

通常使用包覆填充型箱型柱的構架，會使用純鋼梁或含有鋼骨 H 斷面的包覆型 SRC 梁，由於鋼梁及 SRC 梁需要接到包覆填充型箱型柱中之箱型柱，因此縱向主筋必須避開梁的位置，而

往往只能配置在柱角隅處。如圖 2.2 所示斷面即在柱的每個角隅配置 3 支縱向主筋，而其餘的部位則不配置主筋。另一方面，橫向鋼筋除了外圍箍筋外，繫筋會受到箱型柱的阻撓而無法直通柱斷面，這對箱型柱外圍混凝土（如圖 2.3 中虛線所標示之範圍）的圍束有不利的影响。為了解決這個問題，工程師提出一些變通的作法，有些無法充分滿足規範的要求，有些作法在學理上不甚合理，對結構安全帶來疑慮。

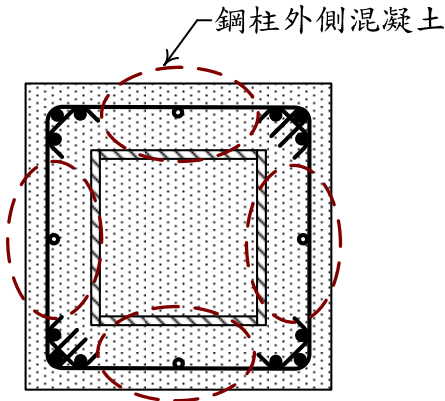


圖 2.3 箱型柱需外圍束之混凝土

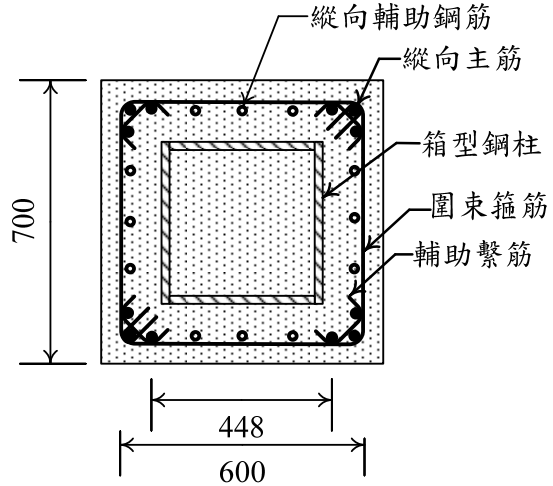


圖 2.4 輔助繫筋間距過大之情形

包覆填充型箱型柱斷面通常很大。以方柱為例，包覆填充型箱型柱邊長通常不小於箱型柱邊長加上 300 mm，而方形箱型柱邊長通常不小於 400 mm，因此整個包覆填充型箱型柱的邊長通常不小於 700 mm。若斷面為 700×700 mm 的柱每個角隅配置 3 支縱向主筋，此時主筋與主筋的距離可達 448 mm，如圖 2.4 所示，大於耐震規範所規定之 150mm。若在柱中央位置配置 3 支 #6 縱向輔助主筋（如圖 2.4），此時主筋（包括輔助主筋）的淨間距低於 150 mm，可以合乎規範對主筋淨間距的規定。橫向鋼筋部分，除了外圍之圍束箍筋外，角隅通常會配置一支補助繫筋，此時圍束鋼筋兩支腳（或稱為「肢」）之距離為 600 mm，兩支補助繫筋之最近距離為 448 mm，皆大於規範容許之 350 mm。有些結構物在設計時即忽略規範這項要求。

為了滿足規範的要求，一個可能的作法是拉開角隅主筋的距離，讓補助繫筋的距離不大於 350 mm，如圖 2.5 所示。這樣表面上似乎可以滿足規範的要求，但是實際上規範談到 350 mm 容許距離時指的是箍筋或繫筋的距離，而不是補助繫筋的距離，這產生疑慮，應該加以釐清。

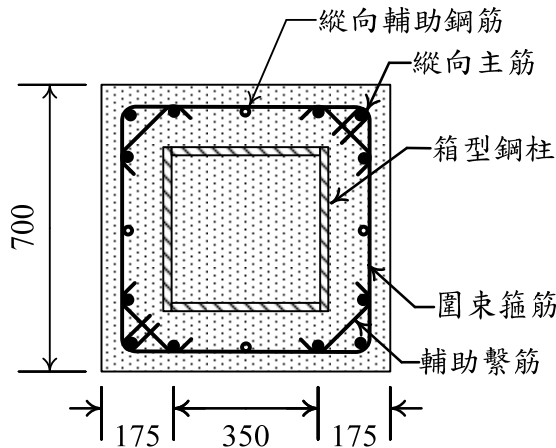
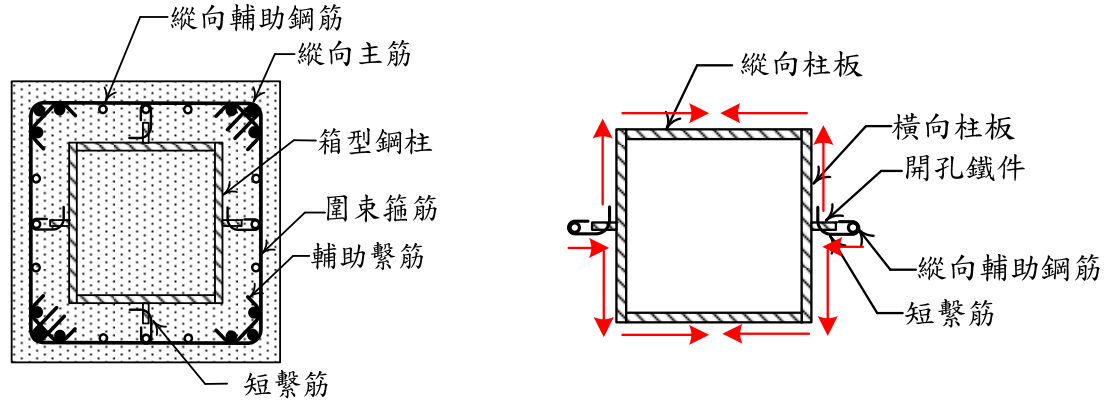


圖 2.5 輔助繫筋距離為 350mm 之情形

圖 2.5 的情況一方面是否合乎規範要求還有疑慮，另一方面由於主筋的距離只有 350 mm，鋼梁的寬度受到限制，基本上翼板寬度只能達到 300 mm。一個可能解決這個問題的作法是，銲接一塊有開孔的鐵件在箱型柱上，並使用一短繫筋連結開孔鐵件及補助縱向鋼筋，如圖 2.6(a)所示。圍束混凝土所需之圍束力，經過短繫筋、箱型柱橫向柱板、箱型柱縱向柱板、箱型柱橫向柱板、短繫筋的路徑來傳達，如圖 2.6(b)所示，簡稱此種繫筋為「接力式繫筋」。相較於傳統繫筋，「接力式繫筋」具有一個比較間接的傳力路徑，其勁度在箱型柱橫向柱板傳遞時會偏低，且受到柱板的寬度及厚度的影響，其有效性亦受到質疑。



(a) 使用接力式繫筋之斷面示意

(b) 輔助繫筋間距過大之情形

圖 2.6 使用「接力式繫筋」之情形

上述幾種可能的作法，都無法很明確的被認定合乎規範的要求，而是處於模糊地帶。繫筋的有效性對柱的韌性有明顯的影響，這些處於模糊地帶的作法應該要進一步評估其有效性。此外，其他比較明確且學理上比較合理的作法，也應該被開發出來，在上述作法無法滿足需求時，能夠有替代方案可供選擇。

參、 研究方法及過程

本研究案研究方法包括：(1) 文獻資料收集與整理；(2) 短柱試體之軸向載重實驗；(3) 鋼板、箍筋及混凝土基本材料實驗；(4) 規範條文適用性評估；(5) 舉辦專家座談會；(6) 報告及期刊論文之撰寫。

本研究係以包覆填充型箱型柱橫向鋼筋配置方式為主，由於柱桿件在破壞時，不論鋼材、鋼筋或混凝土都進入非彈性階段，試體有顯著的材料非線性行為。此外，箱型柱柱板在軸向應變下會有局部挫屈的現象，這是一種幾何非線性行為。當試體牽涉到顯著的材料以及幾何非線性的情況時，理論分析及數值模擬無法充分掌握其行為，尤其是韌性行為。因此，採用結構試驗的方式進行之。此外，為了降低尺寸效應的影響，採用大尺寸試體軸向載重試驗的方式進行研究。

肆、 文獻回顧

包覆填充型箱型柱強度與韌性之優劣往往與其混凝土受圍束之有效性。過去研究指出，箍筋之圍束能有效防止主筋挫屈且能為核心混凝土產生圍壓，大大提升其抗壓強度與韌性。因此，眾多學者紛紛投入圍束效應之研究，企圖找出不同圍束方式與圍束力大小對韌性之影響。以下為圍

束效應研究之相關文獻回顧：

陳正誠、柯人文[10]研究填充混凝土箱型柱的軸向行為，並探討斷面強度、寬厚比的影響、軸向延展性、及局部挫屈變形等。共設計 42 支大尺寸方型箱型鋼柱之短柱試體，以不同斷面寬度、鋼板厚度及寬厚比為參數，並完成軸向載重試驗。試驗結果顯示填充混凝土箱型柱在發展出最大強度後，會出現強度急速下降的現象，造成的主要因素為混凝土強度的急速下降。斷面寬厚比越大，下降的速度越快，下降的幅度也越大。AISC 規範之標稱強度計算公式可以合理與保守的估計 345 MPa 箱型鋼柱搭配 40 MPa 混凝土的強度，但若混凝土改為 70 MPa 時，會有高估強度的現象。當使用 450 MPa 箱型鋼柱時，無論搭配何種強度混凝土，AISC 規範標稱強度公式均有高估強度的疑慮。當填充混凝土箱型鋼柱配置繫桿時，對於斷面強度及軸向延展性均有正面的提升。當斷面寬厚比越高時，乾縮造成強度降低的影響越嚴重。

翁正強、顏聖益、林俊昌[11]等人針對包覆型 SRC 柱中，混凝土受到鋼骨圍束之行為進行理論模式研究。此研究以鋼骨翼板寬度為參數，提出數種 SRC 柱中鋼骨對混凝土的圍束模式，並加以分析求得較為合理之 SRC 柱圍束箍筋用量之計算公式。研究結果顯示，當考慮鋼骨翼板對混凝土產生圍束效應時，所需之圍束箍筋用量將可獲得合理的放寬，如圖 4.1(a)、(b)所示。

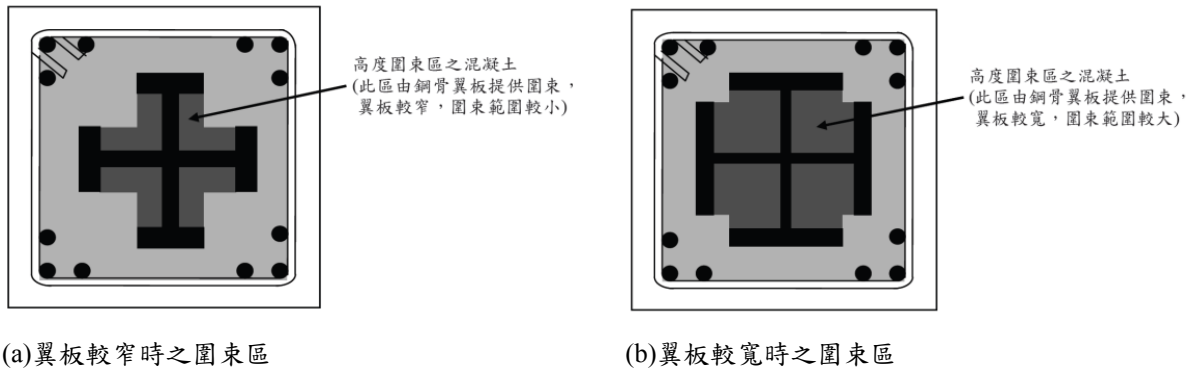


圖 4.1 鋼骨翼板之圍束區

翁正強、李讓[12]針對 SRC 翼板寬度作為主要參數，來探討鋼骨翼板對於混凝土圍束效應之影響。共試驗 20 支包覆型 SRC 短柱之軸向抗壓試驗，實驗結果顯示鋼骨翼板寬度確實能提供混凝土良好之圍束效果。由實驗結果發現，鋼骨也能為 SRC 柱之軸力強度有所貢獻，使得混凝土所需承擔之軸壓力相對減少。綜合上述兩點，翁正強博士提出了一套 SRC 柱圍束箍筋用量之耐震設計方法，如下式所示。該法同時考量鋼骨用量以及鋼骨翼板寬度對 SRC 柱之影響，使得 SRC 柱圍束箍筋用量能合理的放寬，增加經濟性以及施工性。

SRC 柱之矩形閉合箍筋之總斷面積 (A_{sh}) 不得小於下列兩式之規定：

$$A_{sh} = 0.3sh_c \left(\frac{f'_c}{F_{yh}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \left[1 - \frac{P_s + P_{hcc}}{(P_n)_u} \right] \quad (4-1)$$

及

$$A_{sh} = 0.09sh_c \left(\frac{f'_c}{F_{yh}} \right) \left[1 - \frac{P_s + P_{hcc}}{(P_n)_u} \right] \quad (4-2)$$

上式中 $\left[1 - \frac{P_s + P_{hcc}}{(P_n)_u} \right]$ 為此研究建議之「箍筋用量折減係數」，其中 $(P_n)_u$ 為 SRC 柱之軸

向受壓強度、 P_s 為鋼骨之軸向受壓強度、 P_{hcc} 為高圍束區混凝土之軸向受壓強度，式(4-1)及式(4-2)已納入 2011 年內政部建築研究所所發布之鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範中。

陳正誠、沈家豪[13]研究以包覆型 SRC 柱箍筋配置量為參數，探討當包覆型 SRC 柱箍在強軸與弱軸彎曲的情況下，箍筋對受壓混凝土提供圍束之應力、提供柱抗剪之能力，並觀察當試體達到極限狀態時強度衰減之程度。共規劃九組試體，柱頂以油壓千斤頂給予軸壓力，水平側則利用水平 MTS 給予反覆載重，以模擬 SRC 柱受到地震力之作用。研究結果顯示，當 SRC 柱之鋼骨斷面不是雙向對稱斷面時，SRC 柱之箍筋需求量具有方向性，強軸彎矩與弱軸彎矩所需之箍筋量應該不同；並提出國內 SRC 規範規定之柱箍筋需求量偏保守；並建議該研究的箍筋需求量計算方式，可以考慮到鋼骨的不對稱性、鋼骨翼板寬度、鋼骨深度以及柱軸力的影響，箍筋需求量也可降低到合理的範圍。

陳正誠、黃氏秋水[14]則以不同的箍筋配置量討論 SRC 柱之耐震行為，並且考慮鋼骨的圍束效果去折減箍筋的使用量，進而達到施工便利性與整體的經濟性，其中提及當考慮鋼骨翼板提供圍束效應，實際上需要箍筋來圍束的混凝土並非整塊核心混凝土。沈家豪[12]則延續前述之研究但改變軸力與箍筋量，探討箍筋量對於包覆型 SRC 柱塑性轉角容量的影響，研究成果顯示，前述研究對於強軸彎矩時箍筋使用量之建議過於保守，應可再加以修正使工程應用上更為經濟，圖 4.2 顯示前述研究之試體設計。

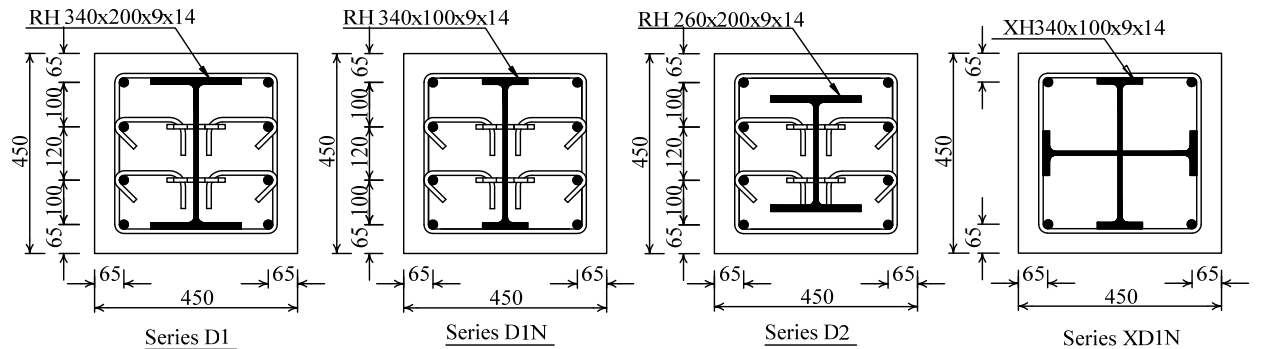


圖 4.2 參考書目[12、13]試體斷面示意圖

伍、載重-位移曲線數據修正方法

本研究 T 系列試體在測試區觀測試體兩側各裝置兩支位移計共四支，試驗過程中為避免混凝土嚴重剝落而撞擊到位移計，所以在試體受軸壓載重至極限載重過後降至極限載重之 70%~80%左右時，視情況將位移計取下，以 T4-1 試體為例，測試區之載重-位移曲線，如圖 5.1 所示。爾後將試體繼續加載至極限載重之 50%左右而停止試驗，MATS 儀器量測所得之載重-位移曲線 (T4-1)，如圖 5.2 所示。MATS 量測得到的位移，為整個系統之變形，包括試體全長之變形、機台之變形以及試體與機台傳力過程間試驗裝置的變形。測試區的軸向變形，在混凝土剝落前以位移計測得之數據 (圖 5.1) 比較可靠，在混凝土剝落後，位移計讀數受到混凝土剝落的干擾而失真，此時以 MATS 量測所得位移經過修正後所得之位移比較可靠。本研究採用李台光[18]

使用的方法，建構完整的載重-位移曲線，敘述如後。

MATS 量測得到的位移為整個系統的位移。設定試體測試區之勁度為 K_A 、整個系統之勁度為 K_B 以及試體與機台傳力過程間試驗裝置的勁度 K_{LS} 。計算 K_A 、 K_B 、 K_{LS} 時與計算強度 P_0 有關，計算 P_0 時使用實測材料強度並根據 (5-1) 式計算之。

$$P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_s F_y + A_{sr} F_{sr} \quad (5-1)$$

其中， A_s 為鋼骨部分之斷面積， A_{sr} 為鋼筋部分之斷面積， $(A_g - A_{st})$ 為混凝土部分之斷面積， F_y 為鋼骨之實測降伏強度， F_{sr} 為鋼筋之實測降伏強度， f'_c 為混凝土之實測抗壓強度。

在達到最大載重前，試體測試區之勁度 K_A ，乃取測試區載重-位移曲線(圖 5.1)上昇段 20% P_0 至 70% P_0 間，數據點線性回歸所得之斜率。整個系統之勁度 K_B ，乃是 MATS 載重-位移曲線(圖 5.2)上昇段 20% P_0 至 70% P_0 間，數據點線性回歸所得之斜率。機台加上傳力過程間試驗裝置的勁度 K_{LS} ，與試體全長之勁度 $K_A/3$ 之串聯及等於全系統之勁度 K_B 。由此可以建立 3 者之關係如式(5-2)及(5-3)。

$$\frac{1}{K_B} = \frac{3}{K_A} + \frac{1}{K_{LS}} \quad (5-2)$$

$$K_{LS} = \frac{K_A K_B}{K_A - 3K_B} \quad (5-3)$$

以 T4-1 試體為例說明數據修正方式。在試體載重達到混凝土剝落時對應之載重 $P_{\delta_{spall}}$ 之前，使用測試區位移計測得的曲線，如圖 5.1 之 Curve A。在加載歷程超過 $P_{\delta_{spall}}$ 之後，取 MATS 測得之曲線，如圖 5.2 之 Curve B，並將 Curve B 平移讓 Curve B 與 Curve A 頭尾相接，如圖 5.3 之 Curve A 加上 Shifted Curve B (藍線)。在試體強度下降時，試體非測試區及機台加上試驗裝置之變形會改變(即變形減小或位移回彈)，變形量 δ' 可依式(5-4)計算之。回彈之變形要由測試區吸收，因此 Curve B 中之變形量應該根據式(5-5)修正之。修正後之 Shifted Curve B 曲線，如圖 5.3 中之 Shifted & Corrected Curve B 所示。

$$\delta' = 2 \times \frac{(P - P_{\delta_{spall}})}{K_A} + \frac{(P - P_{\delta_{spall}})}{K_{LS}} \quad (5-4)$$

$$\delta = \delta_{spall} + \left[\delta_B - (\delta_B)_{spall} \right] - \delta' \quad (5-5)$$

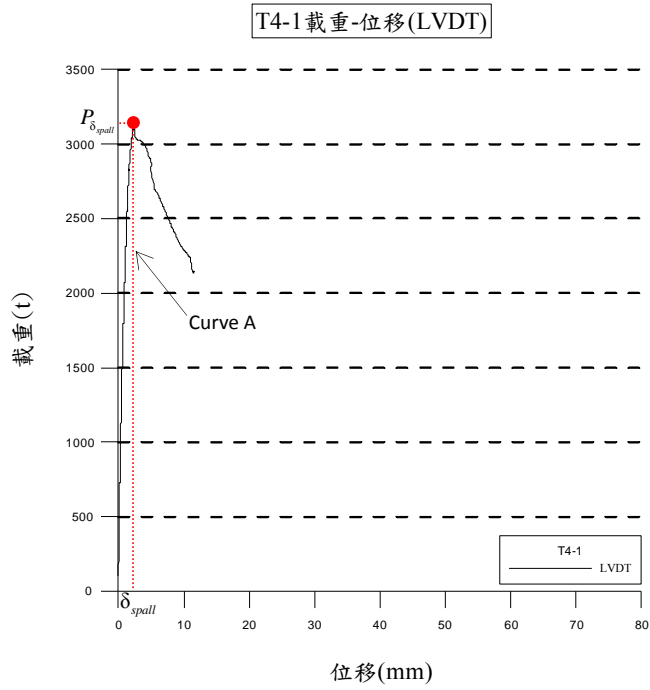


圖 5.1 T4-1 位移計量測所得測試區之載重-位移曲線

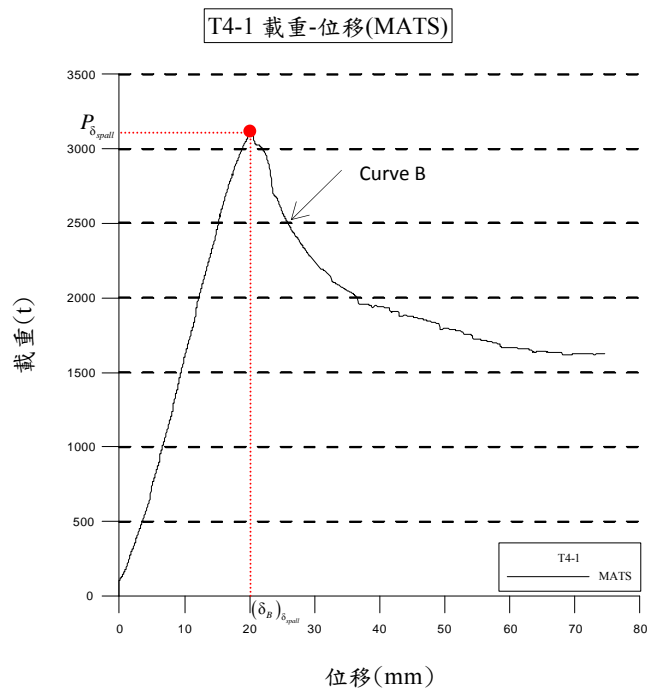


圖 5.2 MATS 儀器量測所得整體之載重-位移曲線

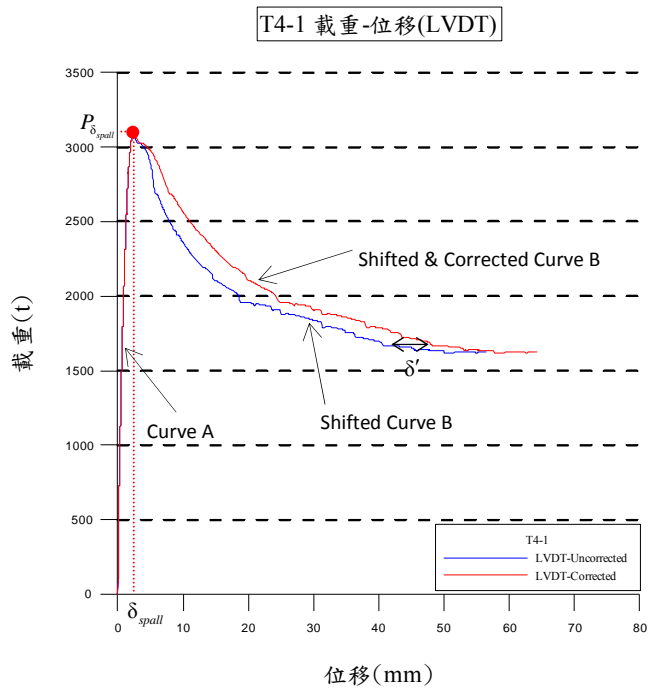


圖 5.3 修正前後測試區之載重-位移曲線

陸、 試體設計製作及計畫

本研究規劃大尺寸方形短柱試體進行軸向載重試驗。短柱試體包括 5 種包覆填充型箱型柱試體各 2 支，稱之為 T 系列試體，此外還有 1 種填充型箱型柱試體 2 支，稱之為 CR 系列試體，共 12 支試體，本研究最重要的參數為橫向鋼筋的型式，故本研究維持各試體圍束力大致相同，以比較各型式之有效性，試體橫向鋼筋型式及參數列於表 6.1。

1. T 系列試體

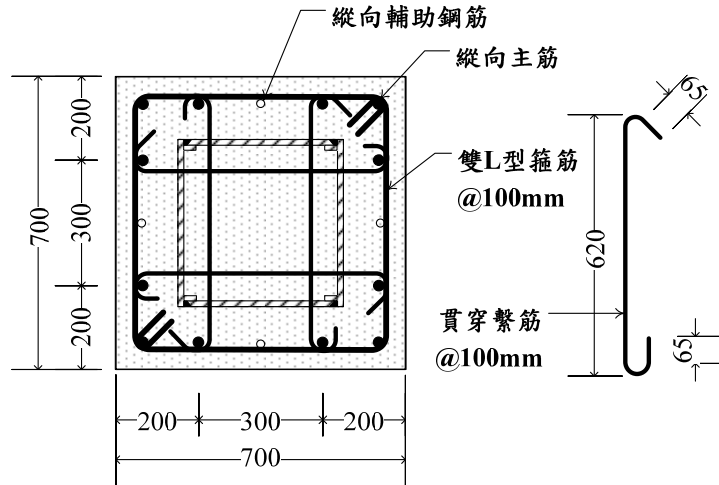
T 系列以配置 5 種不同形式之橫向鋼筋，分別為 T1、T2、T3、T4 及 T5 試體，T2 及 T3 試體為目前實際工程界使用過者，而為了釐清規範間距之要求，且讓最後結果有較直接的比較性，故將 T1 與 T2 之斷面尺寸及間距一致，在同樣符合混凝土工程設計規範第十五章耐震設計 15.5.4.2 節中提及之間距（繫筋或閉合箍筋相鄰肢之中心距）要求下，T1 試體配置繫筋，而 T2 試體則配置角隅繫筋，如圖 6.1(a)、(b)所示；T3 試體為使用接力式繫筋方式配置，如圖 6.1(c)所示。除了上述 3 種工程實務有使用的橫向鋼筋細部外，並開發兩種新的橫向鋼筋細部，稱為 T4 及 T5。T4 試體將鋼骨箱型柱開孔並將繫筋貫穿鋼骨箱型柱，以提供明確的繫筋功能，如圖 6.1 (d)所示；T5 試體則以使用中空混凝土柱之概念，使柱板側混凝土自我圍束，如圖 6.1 (e)所示。

2. CR 系列試體

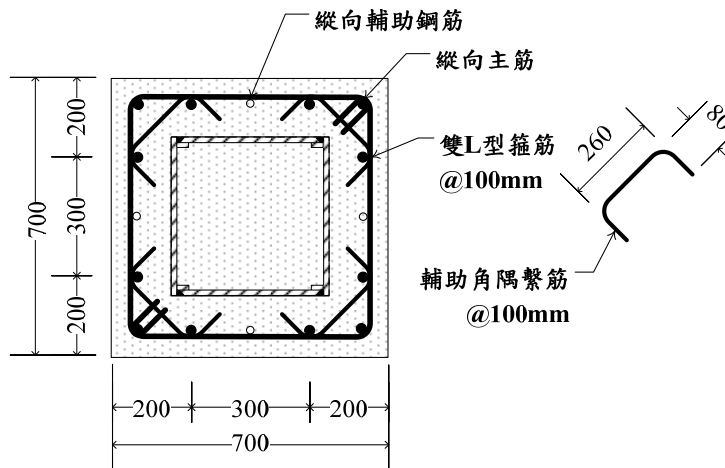
此外為了試驗數據分析的目的，進行柱斷面中填充型箱型柱之載重試驗，並稱之為 CR 試體，如圖 6.1 (f)所示。包覆填充型試體的強度扣除 CR 試體的強度，即可得到外圍混凝土的強度。

表 6.1 各柱試體編號與測試區橫向鋼筋配置情形

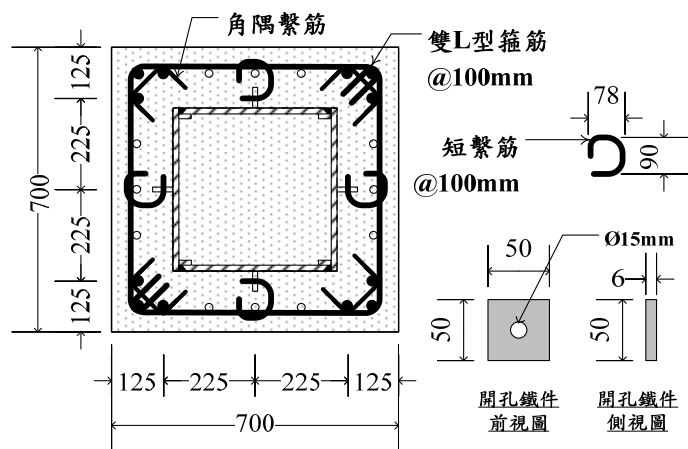
名稱	橫向鋼筋配置	計算有效圍束筋	圍束力	輔助縱筋
			(tf)	
T1	雙 L 型箍筋 1-SD420W#3 貫繫 4-SD280W#3	雙 L 型箍筋 1-SD420W#3 貫繫 2-SD280W#3	9.94	#6
T2	雙 L 型箍筋 1-SD420W#4 角繫 4-SD280W#3	雙 L 型箍筋 1-SD420W#4	10.7	#6
T3	雙 L 型箍筋 1-SD280W#4 短繫 4-SD280W#4 角繫 4-SD280W#3	雙 L 型箍筋 1-SD280W#4 短繫 1-SD280W#4	10.7	#6
T4	雙 L 型箍筋 1-SD280W#4 貫繫 2-SD280W#4 角繫 4-SD280W#3	雙 L 型箍筋 1-SD280W#4 貫繫 1-SD280W#4	10.7	#6
T5	雙 L 型箍筋 1-SD420W#3 搭接式繫筋 8-SD280W#3 短繫 4-SD280W#3	雙 L 型箍筋 1-SD420W#3 搭接式繫筋 2-SD280W#3	9.94	SD420#6 SD280#5



(a) T1 試體

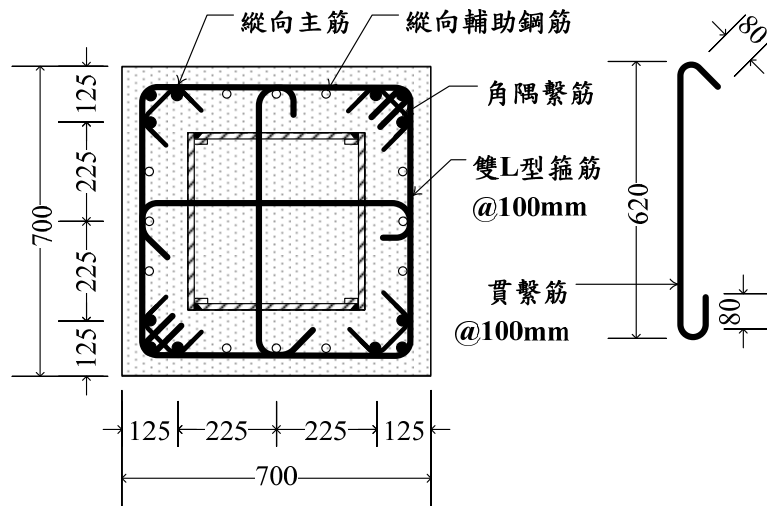


(b) T2 試體

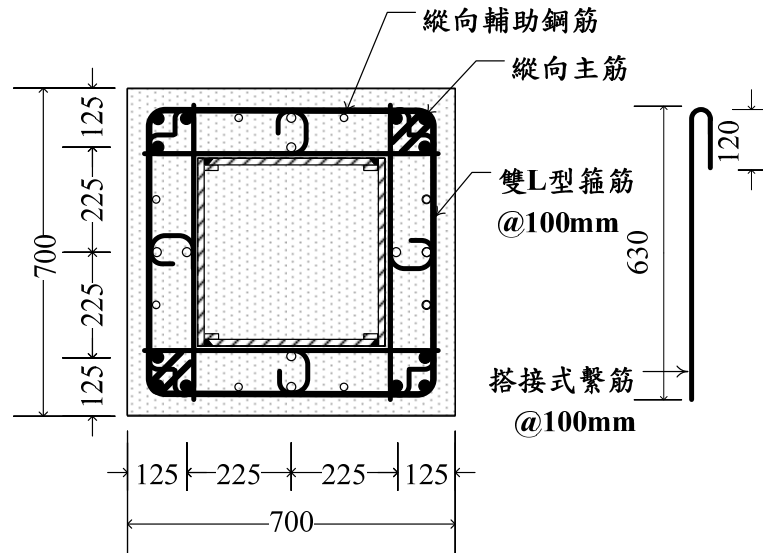


(c) T3 試體

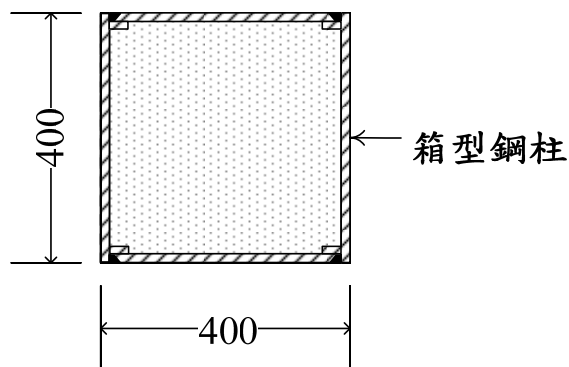
圖 6.1 試體斷面圖(單位: mm)



(d) T4 試體



(e) T5 試體



(f) CR 試體

圖 6.1(續) 試體斷面圖 (單位：mm)

柒、 實驗結果與討論(強度與韌性)

將第四章第三節所得各試體之測試區載重-應變曲線，對各試體極限載重做正規化，再將每組 2 支試體之正規化載重-應變曲線取平均，得到代表各組試體測試區之正規化載重-應變曲線。表 7.1 及 7.2 分別為 CR 系列試體及 T 系列試體之試驗強度 P_{exp} 、依標稱材料強度得之標稱強度 P_{n0} 、依實際材料強度得之計算強度 P_{a0} 、 $\alpha = P_{exp}/P_{n0}$ 及 $\beta = P_{exp}/P_{a0}$ 等數值。表 7.3 為 CR 試體在最大載重時之對應應變，表 7.4 為 T 系列試體在所選擇強度之軸向應變。

T1 與 T2 試體之斷面尺寸及主筋間距一致，T1 為合乎規範規定之繫筋或閉合箍筋相鄰肢之中心距，T2 則採用角隅補助繫筋來取代繫筋，以滿足規範上述的要求。T1 與 T2 的直接比較，可以用來評估 T2 作法的可行性。圖 7.1(a)及 7.1(b)所示分別為 T1 與 T2 試體正規化載重-應變曲線，圖 7.2 為 T1 及 T2 試體之平均正規化載重-應變曲線。由表 7.2，T1 及 T2 之 β 平均值分別為 1.04 及 1.10，顯示兩者皆有發揮預期之強度。由圖 7.2 可發現 T1 試體之載重-應變曲線基本上都在 T2 試體之上，T1 試體之延展性顯然比 T2 試體佳。由表 7.4 亦可發現 T1 試體之 $\epsilon_{75\%,avg}$ 為 0.027，比 T2 試體之 0.018 高出 50%，這也顯示 T1 試體之韌性顯然比 T2 試體為佳。由上述數據之比較，可以發現 T2 試體之橫向鋼筋配置方式無法達到規範要求之效果，因此 T2 之橫向鋼筋配置方式不合乎規範之要求。

T3 與 T4 試體之斷面尺寸及主筋間距一致，T3 為接力式繫筋，T4 則採用為貫繫筋，閉合箍筋及繫筋間相鄰肢之中心距之最大值為 300 mm，皆滿足規範不大於 350mm 的要求。T3 與 T4 的直接比較，可以用來評估 T3 作法的可行性。圖 7.1(c)及 7.1(d) 所示分別為 T3 與 T4 試體正規化載重-應變曲線，圖 7.3 為 T3 及 T4 試體之平均正規化載重-應變曲線。由表 7.2，T3 及 T4 之 β 平均值分別為 1.05 及 1.09，顯示兩者皆有發揮預期之強度。由圖 7.3 可發現 T3 試體之載重-應變曲線，在通過最大強度後強度衰減比 T 稍 4 快，但由表 7.4 發現 T3 試體之 $\epsilon_{75\%,avg}$ 為 0.0223，比 T4 試體之 0.0194 高出 15%。T3 試體試驗後短繫筋彎鉤有被拉開的現象，顯示短繫筋有發揮其圍束之效果。綜合上述，T3 試體表現基本上可視為與 T4 相近，顯示 T3 試體所使用之接力式繫筋可以發揮所需之混凝土圍束效果。T 系列試體內之箱型柱寬度為 400mm，柱板厚度為 14mm，柱板寬厚比為 26.6，柱板寬厚比小於 26.6 者應該都可以有類似或更加的效果。另一方面，由圖 7.1(c)及 7.1(d)可發現發現，T3 兩個試體的差異性還滿可觀的。由上述數據之比較，初步印證接力式繫筋之可行性，不過往後宜以柱撓曲試驗進一步確認其適用範圍。

T4 與 T5 試體之斷面尺寸及主筋間距一致，T4 為貫繫筋與角隅繫筋，T5 則採用中空混凝土柱的概念配置橫向鋼筋。T4 與 T5 的直接比較，可以用來評估 T5 作法的可行性。圖 7.1(d)及 7.1(e)所示分別為 T4 與 T5 試體正規化載重-應變曲線，圖 7.3 為 T4 及 T5 試體之平均正規化載重-應變曲線。由表 7.2，T4 及 T5 之 β 平均值皆為 1.09，顯示兩者皆有發揮預期之強度。由圖 7.3 可發現 T5 試體之載重-應變曲線，在過最大強度後韌性發展較 T4 好，強度降至 75%時之韌性也較 T4 佳。但也發現當強度降至 65%時強度衰減加速，衰減速度比 T5 試體快。觀察試驗後之試體，發現側繫筋直線端有向內滑動的現象，初步判斷這很可能是試體強度加速衰減的原因。由於強度加

速衰減發生在應變 0.03 附近，此時應變量已經是 10 倍的未圍束混凝土壓碎應變（0.003），對柱撓曲性能的影響已經減小很多。T5 試體橫向箍筋型式的可行性尚有一些疑慮，宜進行柱撓曲試驗進一步探討其可行性。

T1 與 T4 試體之斷面尺寸一致且皆使用貫繫筋，主要的差異在圍束鋼筋肢之距離，T1 為 150mm-300mm-150mm，而 T4 為 300mm-300mm，T1 試體圍束鋼筋較均勻分布。由表 7.2，T1 及 T4 之 β 平均值分別為 1.04 及 1.09，顯示兩者皆有發揮預期之強度。由圖 7.4 可發現 T1 試體之載重-應變曲線在應變達到 0.042 之前，基本上都在 T4 試體之上，T1 試體之韌性基本上比 T4 試體佳。由表 7.4 亦可發現 T1 試體之 $\varepsilon_{75\%,avg}$ 為 0.0266，比 T4 試體之 0.0194 高出 37%，這也顯示

T1 試體之韌性顯然比 T4 試體為佳，同時也顯示圍束鋼筋較均勻分配可以得到較佳之韌性。

本計畫研究結果顯示角隅繫筋的功能無法取代一般繫筋，另外接力式繫筋具有可行性，建議在鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範[9]中第「4.3.5 柱之箍筋」之解說中補充說明之，如圖 7.5 所示之示意圖。

表 7.1 CR 系列試體之強度

試體名稱	P_{exp} (tf)	P_{n0} (tf)	P_{a0} (tf)	$\frac{P_{exp}}{P_{n0}}$ --	$\frac{P_{exp}}{P_{a0}}$ --
CR-1	1350	1086	1305	1.24	1.03
CR-2	1293	1086	1305	1.19	0.99

表 7.2 T 系列試體之強度

試體名稱	P_{exp}	P_{n0}	P_{a0}	$\alpha = \frac{P_{exp}}{P_{n0}}$		$\beta = \frac{P_{exp}}{P_{a0}}$	
	(tf)	(tf)	(tf)	單一試體	平均	單一試體	平均
T1-1	2908	2140	2793	1.36	1.36	1.04	1.04
T1-2	2892		2793	1.35		1.04	
T2-1	3037		2793	1.42	1.43	1.09	1.10
T2-2	3090		2893	1.44		1.11	
T3-1	2944	2248	2893	1.31	1.35	1.02	1.05
T3-2	3093		2893	1.38		1.07	
T4-1	3106		2893	1.38	1.41	1.07	1.09
T4-2	3221		2915	1.43		1.11	
T5-1	3229		2915	1.44	1.42	1.11	1.09
T5-2	3123		2793	1.39		1.07	

註： P_{exp} 為試驗所得之試驗強度

P_{n0} 使用材料標稱強度計算之標稱強度

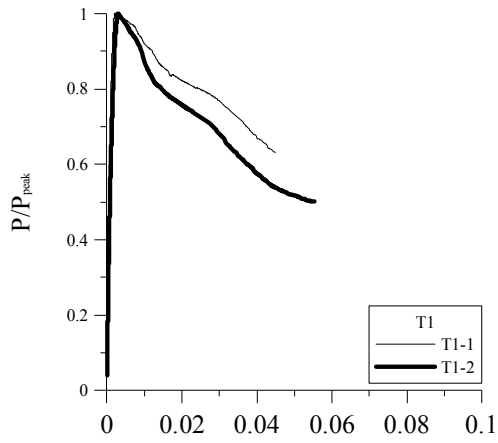
P_{a0} 使用材料實際強度計算之實際強度

表 7.3 CR 系列試體在最大載重時之軸向應變

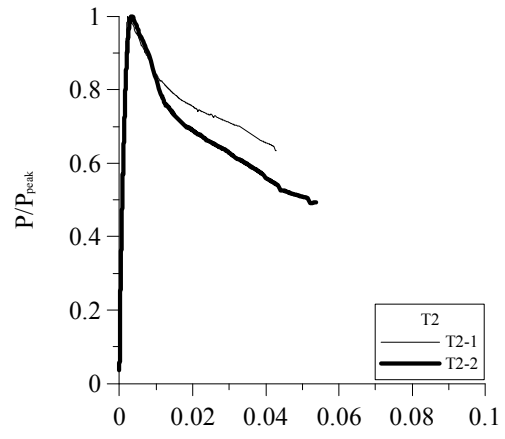
試體名稱	P_{peak}	ϵ_{peak}	$\epsilon_{peak,avg}$
	(tf)	--	--
CR-1	1350	0.0033	0.003
CR-2	1293	0.0027	

表 7.4 T 系列試體在所選擇強度之軸向應變

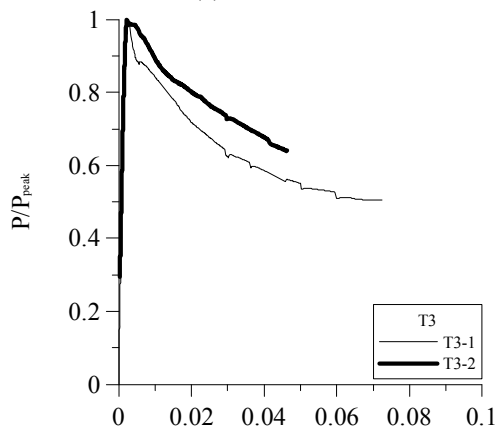
試體名稱	ϵ_{peak}	$\epsilon_{peak,avg}$	$\epsilon_{75\%}$	$\epsilon_{75\%,avg}$
T1-1	0.0021	0.0025	0.0320	0.0266
T1-2	0.0029		0.0212	
T2-1	0.0023	0.0028	0.0207	0.0172
T2-2	0.0032		0.0136	
T3-1	0.0026	0.0024	0.0171	0.0223
T3-2	0.0022		0.0274	
T4-1	0.0033	0.0032	0.0206	0.0194
T4-2	0.0031		0.0181	
T5-1	0.0030	0.0029	0.0182	0.0203
T5-2	0.0028		0.0224	



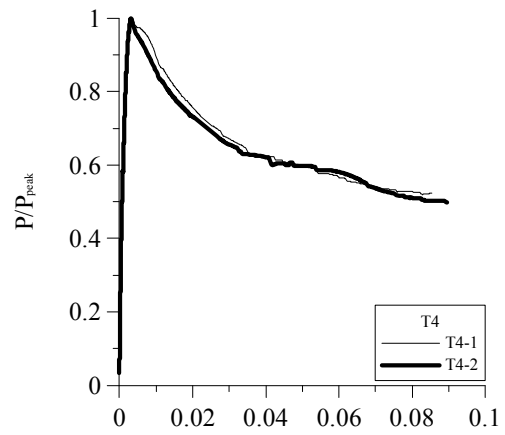
應變
(a) T1 試體



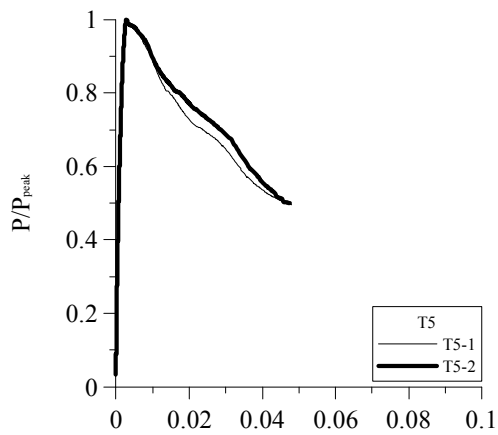
應變
(b) T2 試體



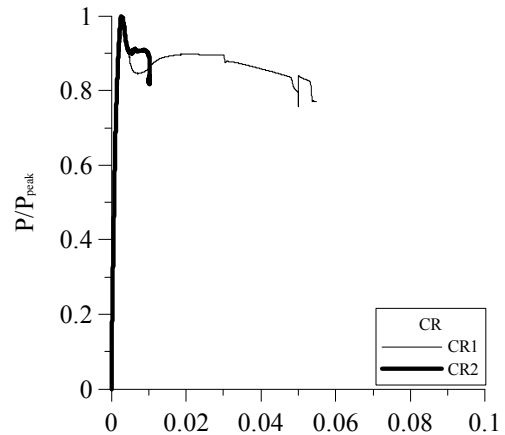
應變
(c) T3 試體



應變
(d) T4 試體



應變
(e) T5 試體



應變
(f) CR 試體

圖 7.1 T 系列和 CR 系列測試區正規化載重-應變曲線

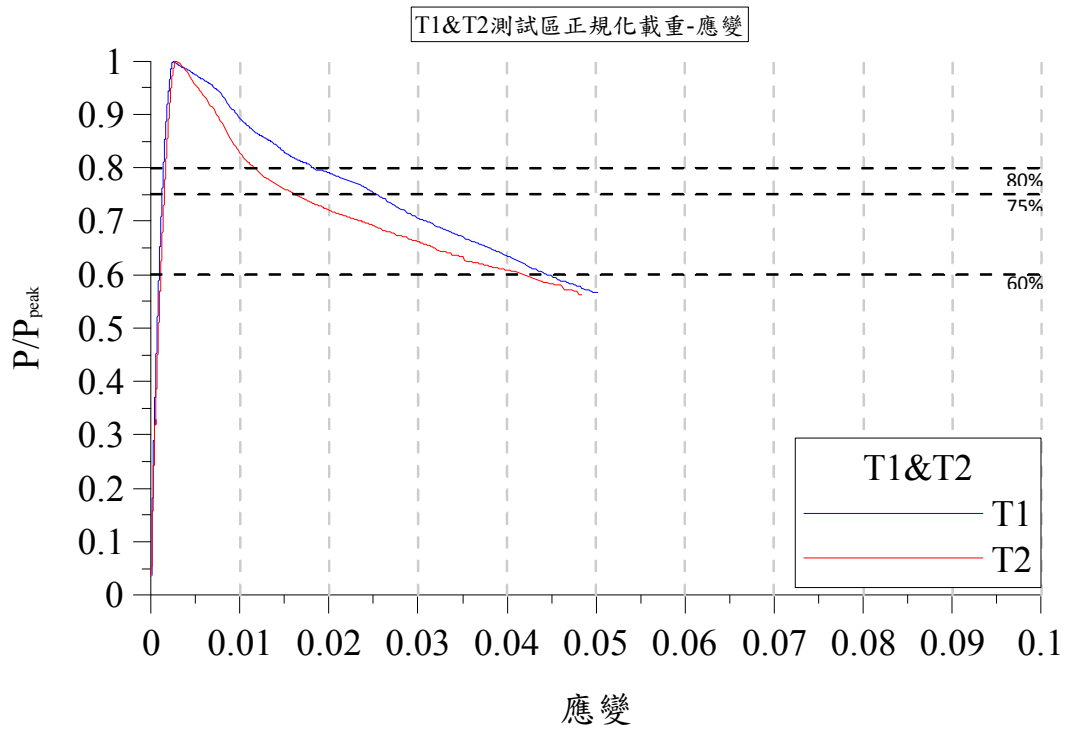


圖 7.2 T1 和 T2 測試區正規化載重-應變曲線

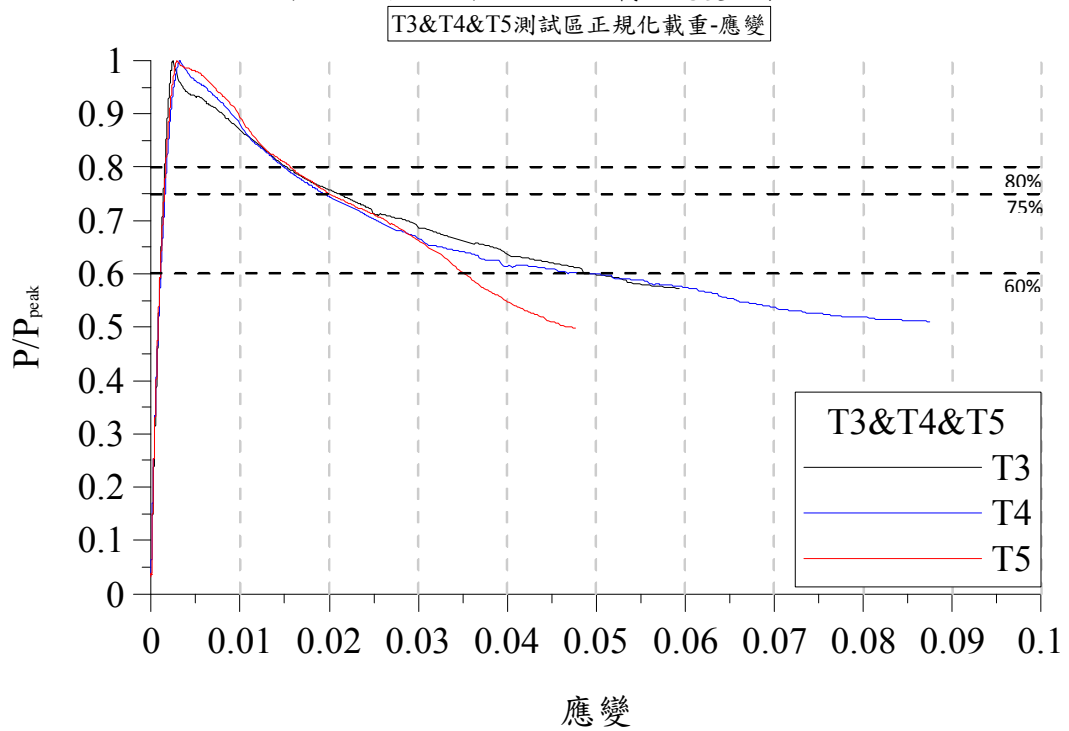


圖 7.3 T3、T4 和 T5 測試區正規化載重-應變曲線

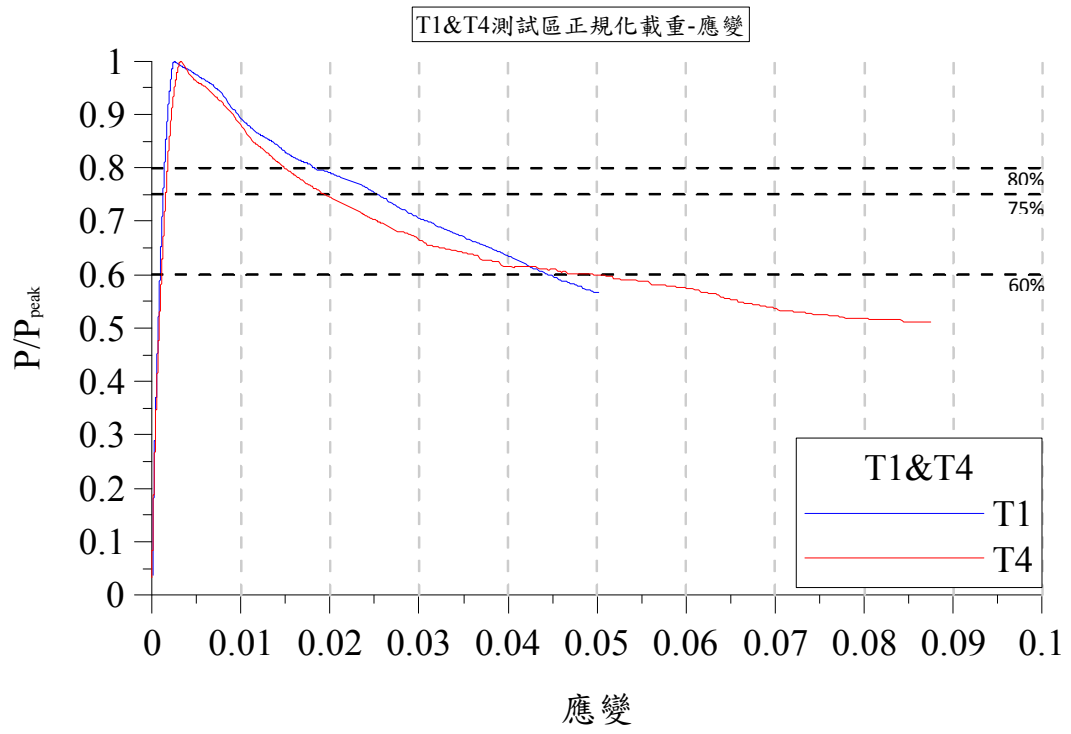


圖 7.4 T1 和 T4 測試區正規化載重-應變曲線

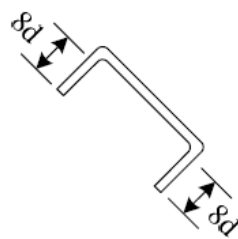
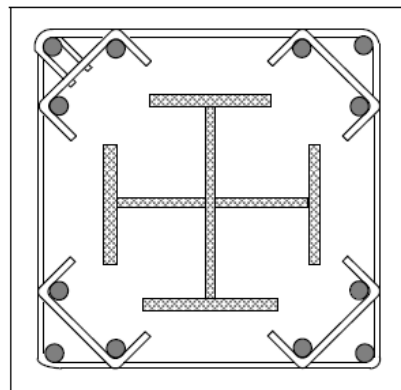


圖 7.5 SRC 設計規範 4.3.5 柱之箍筋示意圖

捌、 結論與建議

結論：

本研究完成 6 種型式 12 個試體的載重試驗、開 1 次專家座談會，並完成期中簡報及期末簡報。根據試驗結果、斷面強度分析結果、專家座談會專家之建議、期中及期末簡報審查委員之意見，彙整成本研究之結論如後。試驗試體中，T1 與 T2 橫向鋼筋之配置有相似性，可以直接比較；T3、T4 及 T5 試體之橫向鋼筋配置也具有相似性，可以直接比較。

1. 所有 T 系列試體之試驗強度皆大於以材料實際強度計算所得之計算強度，所有試體皆充分發揮其強度，塑性應力分布及強度疊加的概念可以合理評估試體的強度。
2. T2 試體的延展性明顯比 T1 試體差，顯示輔助角隅繫筋之功能與一般繫筋不同，不能取代一般繫筋，T2 試體繫筋之配置方式應視為不合乎規範的要求。
3. T3 試體的延展性不比 T4 試體差，顯示接力式繫筋的概念相當具有可行性，撓曲延展性試驗可以進一步確認其可行性。
4. T5 試體在強度降到 75% 時之延展性，與 T4 試體之延展性接近，顯示 T5 橫向箍筋之配置方式具有可行性，不過在較大的變形量強度下降較快，應該進行撓曲延展性試驗，進一步探討其可行性。
5. SRC 桿件是否需要使用剪力釘，以及如何設計剪力釘，一直困擾工程實務上之結構設計工程師，建議另案探討剪力釘之需要性與設計方法。

建議：

建議一：

鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範解說之修改：立即可行建議

主辦機關：內政部營建署

本計畫研究結果顯示角隅繫筋的功能無法取代一般繫筋，另外接力式繫筋具有可行性，建議在鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範中第「4.3.5 柱之箍筋」之解說中補充說明之。

建議二：

推動「填充型箱型柱內剪力釘之需求探討」研究計畫：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

專家座談會、期中審查會議及期末審查會議時，工程實務人員之討論中，可發現箱型柱與混凝土間是否需要設置剪力釘，還有需要設置多少剪力釘，困擾著工程師們。這個問題無法在本研究案中探討，建議建研所將「箱型柱與混凝土間是否需要配置剪力釘」列為短期內推動之研究課題。

建議三：

推動「包覆填充型箱型柱接力式繫筋之撓曲韌性」研究計畫：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

T3 試體接力式繫筋的概念相當具有可行性，應該進行撓曲延展性試驗，進一步探討其可行性。

玖、 參考書目

- [1] ACI Committee 318, 2011, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary (ACI 318R-11)," Farmington Hills (MI): American Concrete Institute, 2011.
- [2] American Institute of Steel Construction (AISC), 2010, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," ANSI/AISC 341-10, AISC Inc., Chicago (IL), March 9, 2010.
- [3] American Institute of Steel Construction (AISC), LRFD, 2005, Load and Resistance Factor Design Specification.
- [4] Chen, C.C., Ko, J.W., Huang, G.L., Chang, Y.M., 2012, "Local Buckling and Concrete Confinement of Concrete-Filled Box Columns under Axial Load," Journal of Constructional Steel Research, Accepted 7 June 2012.
- [5] Hoang T.T.T., Seismic Behavior of Steel Reinforced Concrete Columns with Axial Compressive Force, NTUST Master Thesis (陳正誠教授指導), 2009.
- [6] James M. Ricles and Shannon D. Paboojian, "Seismic performance of steel-encased composite columns," Journal of Structural Engineering, 1994.
- [7] Sakino, K., Nakahara, H., 2004, Morino, S., and Nishiyama, I., "Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns," Journal of Structural Engineering, vol. 130, pp. 180-188, 2004.
- [8] Uy, B., 2001, "Strength of short concrete filled high strength steel box columns," Journal of Constructional Steel Research, vol. 57, pp. 113-134, 2001.
- [9] 內政部營建署, 「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」, 2011。
- [10] 柯人文, 2012, 「填充混凝土箱型鋼柱之短柱軸向行為」, 博士論文(陳正誠教授指導), 國立台灣科技大學, 2012。
- [11] 翁正強、顏聖益、林俊昌(1998), 「包覆型 SRC 柱鋼骨對混凝土圍束箍筋量之影響」, 中國土木水利工程學刊, 第十卷, 第二期, 193-204 頁。
- [12] 李讓, 2005, 「鋼骨鋼筋混凝土柱圍束鋼筋量之試驗與耐震設計」, 碩士論文(翁正強教授指導), 國立臺灣交通大學土木工程研究所。
- [13] 沈家豪, 2010, 「鋼骨鋼筋混凝土柱塑性轉角容量之研究」, 碩士論文(陳正誠教授指導), 國立臺灣科技大學。
- [14] 陳正誠、黃氏秋水, 2009, 「含軸向鋼骨鋼筋混凝土柱之耐震行為」, 碩士論文(陳正誠教授指導), 國立臺灣科技大學。
- [15] 陳正誠、黃國倫、柯人文, 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, 計畫編號: 983G1018, 內政部建築研究所, 2009 年 12 月。
- [16] 陳正誠、黃國倫、蔡宜樺、柯人文, 2010, 「填充高強度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, 計畫編號: 993G1021, 內政部建築研究所, 2010 年 12 月。
- [17] 陳正誠、詹鎧慎, 2010, 「含軸壓力包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱之撓曲行為」, 碩士論文(陳正誠教授指導), 國立臺灣科技大學。

[18] Lee, T.K., Chen, C.C., Pan, A.D.E., Hsiue, K.Y., Tsai, W.M., Hwa, K., Experimental evaluation of large circular RC columns under pure compression