

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之 撓曲行為與設計

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 100 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

PG10001-0230

100301070000G1025

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之 撓曲行為與設計

受委託者：國立台灣科技大學營建系

研究主持人：陳正誠

協同主持人：黃國倫

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 100 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘 要.....	IX
第一章 緒 論.....	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究方法及進度說明	5
第二章 專家座談與試體設計.....	13
第一節 專家座談會	13
第二節 試體設計及試驗裝置	14
第三節 測計配置與載重歷程	17
第三章 柱撓曲行為試驗.....	29
第一節 試體製作	29
第二節 試驗觀察	30
第四章 試驗結果與討論.....	48
第一節 不同寬厚比之影響	48
第二節 軸力-彎矩互制曲線.....	50
第三節 圍束繫桿之影響	50
第五章 結論與建議.....	63
第一節 結論	63
第二節 建議	66
附錄一 專家座談會會議紀錄.....	69

附錄二 期中、期末審查會議審查意見回應表.....	119
附錄三 填充型箱型柱軸力-彎矩互制曲線分析方式.....	127
參考書目.....	139

表次

表 1-1	預定之研究進度	8
表 2-1	實驗試體規劃	19
表 3-1	圍束繫桿棒狀試片平均降伏強度及極限強度	34
表 3-2	試體裂縫位置及裂縫長度列表	34
表 4-1	試體試驗拉力、推力包絡線結果列表	53
表 4-2	試體 R48-40 及 R40-40 變形 δ 及淨寬 b 之比值 δ/b 結果	53

圖次

圖 1-1 CFT	9
圖 1-2 填充型箱型柱	9
圖 1-3 填充型箱型柱軸力與塑性轉角之關係圖	9
圖 1-4 使用繫桿之填充型箱型柱	10
圖 1-5 研究流程圖	11
圖 2-1 含軸力之撓曲行為試驗裝置示意圖	20
圖 2-2 含軸力之撓曲行為試驗裝置照片	21
圖 2-3 試體斷面示意圖	22
圖 2-4 R 系列試體設計圖 (以 R48-40 為例)	23
圖 2-5 T 系列試體示意圖	24
圖 2-6 含圍束繫桿短柱試體試驗裝置示意圖	24
圖 2-7 加圍束繫桿試體軸力-軸向應變曲線圖	25
圖 2-8 圍束繫桿圍束應力示意圖	25
圖 2-9 量測儀器配置示意圖	26
圖 2-10 反覆載重位移歷時圖	27
圖 3-1 混凝土應力-應變曲線圖	35
圖 3-2 R48-40 試體在側移角 1.5%時局部挫屈	35
圖 3-3 R48-40 試體在側移角 5%時受壓柱板沿縱向開裂	36
圖 3-4 R40-20 試體在側移角 0.75%時出現降伏線	37
圖 3-5 R40-20 試體在側移角 3%時局部挫屈	37
圖 3-6 R40-20 試體在側移角 6%時受壓柱板沿縱向開裂	38
圖 3-7 R40-40 試體在側移角 1.5%時局部挫屈	38
圖 3-8 R40-40 試體在側移角 3%時受壓柱板沿縱向開裂	39
圖 3-9 T48-40-H 試體在側移角 2%時出現降伏線及局部	

	挫屈	40
圖 3-10	T48-40-H 試體在側移角 5% 時受壓柱板沿縱向開裂	40
圖 3-11	T48-40-M 試體在側移角 1% 時局部挫屈	41
圖 3-12	T48-40-M 試體在側移角 6% 時受壓縱裂、受拉橫裂	41
圖 3-13	T48-40-L 試體在側移角 1.5% 時出現降伏線	42
圖 3-14	T48-40-L 試體在側移角 1.5% 時局部挫屈	42
圖 3-15	T48-40-L 試體在側移角 6% 時受拉橫裂	43
圖 3-16	T40-40-H 試體在側移角 0.5% 時出現降伏線	43
圖 3-17	T40-40-H 試體在側移角 2% 時局部挫屈	44
圖 3-18	T40-40-H 試體在側移角 6% 時受拉柱板沿橫向開裂	44
圖 3-19	T40-40-M 試體在側移角 1.5% 時局部挫屈	45
圖 3-20	T40-40-M 試體在側移角 5% 時受壓柱板沿縱向開裂	45
圖 3-21	T40-40-L 試體在側移角 0.75% 時局部挫屈	46
圖 3-22	T40-40-L 試體在側移角 4% 時北面螺桿斷掉	46
圖 3-23	T40-40-L 試體在側移角 4% 時局部挫屈處開裂	47
圖 4-1	降伏側移角 θ_{yn} 、極限側移角 θ_u 定義之說明圖	54
圖 4-2	R48-40 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖	54
圖 4-3	R40-20 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖	55
圖 4-4	R40-40 彎矩-側移角遲滯迴圈圖	55
圖 4-5	塑性轉角-軸力比分佈圖	56
圖 4-6	柱板挫屈後變形及內彎矩示意圖	56
圖 4-7	柱板寬厚比為 48 之軸力-彎矩互制曲線圖	57
圖 4-8	柱板寬厚比為 40 之軸力-彎矩互制曲線圖	57
圖 4-9	T48-40-H 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖	58
圖 4-10	T48-40-M 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖	58
圖 4-11	T48-40-L 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖	59
圖 4-12	T40-40-H 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖	59

圖 4-13	T40-40-M 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖	60
圖 4-14	T40-40-L 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖.....	60
圖 4-15	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.....	61
圖 4-16	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.....	61

摘 要

關鍵詞：填充型箱型柱、合成柱、鋼骨鋼筋混凝土、柱

一、研究緣起

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。根據國內 SRC 結構設計規範規定, 鋼骨材料之降伏強度不宜大於 3.5 tf/cm^2 , 而混凝土抗壓強度也不宜大於 560 kgf/cm^2 ; 故本研究的研究預計以 3.5 tf/cm^2 等級鋼材, 配合 420 kgf/cm^2 級的混凝土製作試體。填充型箱型柱中柱板之寬厚比影響構材的行為很大。寬厚比越大, 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/cm^2 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, 軸力與軸向強度的比值 (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, 避免箱型柱因混凝土壓力向外變形, 可以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「含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究」之研究報告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「混凝土箱型鋼柱之撓曲韌性行為研究」之

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

研究報告結果亦顯示，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、研究方法及過程

本研究案之研究工作包括資料蒐集與整理、試體設計、試體製作、柱之撓曲行為試驗、材料機械性質試驗、實驗數據整理與分析、相關規範條文之檢討以及報告與期刊論文撰寫等步驟。採用的研究方法敘述如下：1. 文獻之收集與整理；2. 柱試體之撓曲行為實驗；3. 鋼板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

藉由二次專家座談會，本研究規劃之試體設計及試驗裝置應屬可行；此案提出之圍束繫桿設計方法能使工程師簡易且快速的設計圍束繫桿；有些建案在一樓的柱子會承受很大的軸力，有些案子一樓柱之軸力有可能達到軸向標稱強度的 40~50%，此研究案在實務上將有所助益；填充型箱型柱可配合高強度鋼板，應可有效減少材料使用量，建議此課題於未來可另案研究探討之；防爆拉桿設計所需考慮的因素與圍束繫桿不同，建議另案研究探討之；剪力釘對於填充型箱型柱的必要性不在本案研究範圍內，過去已有研究發現其實不需配置剪力釘即可有不錯的合成效果，建議另案深入探討之；建議另案深入研究「高軸力作用下填充型箱型柱柱板寬厚比對塑性轉角容量之影響」。

基於箱型柱鋼板之標稱降伏強度 3.5 tf/cm^2 、 420 kgf/cm^2 標稱抗

壓強度混凝土、箱型柱以全滲透銲接製作以及高軸力作用（承受軸力約為軸向強度 40%）之條件下，藉由撓曲行為試驗結果，可知寬厚比為 40 及 48 之填充型箱型柱試體，其彎矩強度比（實驗彎矩強度除以理論彎矩強度）皆不小於 1（1.03~1.09），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（2.92% rad）；建議在軸力比（軸力除以軸向強度）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。加上圍束繫桿後，其彎矩強度比相較於未加繫桿時，提升約 15%。寬厚比為 48 及 40 之填充型箱型柱試體，若塑性轉角容量要能達到 3% rad 以上，依照本研究設計圍束繫桿的方法設計，則分別需使用能提供圍束應力達 66 及 58 kgf/cm² 以上之圍束繫桿，且繫桿之間寬比為 0.33，方能達成塑性轉角容量的目標。依據本研究結果，在軸力比介於 25~35%時且寬厚比介於 40~48 之間時，或在軸力比大於 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。

四、主要建議事項

本研究進行含混凝土箱型柱在高軸力下之撓曲行為試驗提出下列具體建議。

建議一

進行高軸力作用下填充型箱型柱柱板寬厚比對塑性轉角容量之影響：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

依照文獻以及本研究之結果顯示軸力愈大會使填充型箱型柱之撓曲韌性愈差，甚至嚴重不足；當柱板寬厚比為 40 時，塑性轉角容量隨著軸力比增加而降低，且比柱板寬厚比為 32 時更明顯，另外，

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

當柱板寬厚比為 48 時，塑性轉角容量隨著軸力比增加而降低的幅度反而比柱板寬厚比為 32 及 40 時不明顯，所以有可能可以分成二類型或更多類型，此部分需要更多實驗或是有限元素分析研究來探討之。

建議二

進行圍束繫桿在高軸力高強度混凝土箱型柱之耐震行為研究：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

至今尚未有使用高軸力高強度混凝土之填充型箱型柱撓曲行為研究，建議再增加圍束繫桿之後續研究以提出合理之耐震斷面 b/t 限制，以因應不同混凝土標稱強度之情況。

建議三

推動含繫桿混凝土箱型柱軸向及撓曲之防火行為研究：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

由 97 年度研究案專家座談會之內容可知，含混凝土箱型柱防火被覆之需求比鋼結構低，值得研究與推廣。

建議四

於鋼骨鋼筋混凝土規範第 3.4 節增加限制：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

當箱型柱鋼板之標稱降伏強度為 3.5 tf/cm^2 時，含混凝土箱型柱之軸力不得超過軸向強度之 25%；在軸力介於軸向強度之 25~35% 時，寬厚比上限應下修為 32。若配置經過合理設計的圍束繫桿，且有相關文獻或研究佐證，則可適當放寬柱板寬厚比限制，放寬幅度可依據相關文獻或研究之結果來決定。

建議五

舉辦含混凝土箱型柱及相關研究課題之成果發表會：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

CFBC 結構系統為比傳統結構系統更安全、經濟、環保的新世代結構系統，可舉辦研討會將與工程實務有關之發現推廣至工程界。

ABSTRACT

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

Use of concrete-filled hollow sections for columns has many advantages. First, the mechanical properties of concrete can be enhanced by the confinement provided by steel box. Second, the inward buckling of the steel box can be prevented by the concrete core. Third, no formwork is required. As a result, these columns possess extra strength and extra stiffness in a fairly economical and environment friendly way.

Based on the size and fabrication method of the cross section, concrete-filled hollow sections can be differentiated as concrete-filled tubes (CFTs) and concrete-filled box columns (CFBCs). For square sections as an example, the width of CFT seldom exceed 406 mm (16 in.), however, the width of CFB seldom smaller than 500 mm. In addition, CFTs use so called structural tubing which has gradual transition without welds at the corners of the section. Nevertheless, CFBCs use box sections which are fabricated by welding four pieces of steel plates at section corners. Box sections are already used extensively in Taiwan.

This project will try to clarify the flexural behavior of CFBC columns with high axial loading, which is around 40% of axial strength. The research works for this project include: (1) collating researches, (2) designing specimens, (3) fabricating specimens, (4) finishing experiments for materials and CFBC columns, (5) evaluating reasonability of rules from codes, and (6) holding two symposiums.

From two symposiums, design parameters in this project are supported. It is also concluded that the results of this project will be very useful in practice because there are some columns in some

buildings sustaining high axial loading, which is around 40% to 50% of the axial strength. The design method of confinement tie rods proposed by this project is simple and friendly for engineers to follow.

From the test results of this project, it is observed that the plastic rotation angle capacity will decrease significantly as the axial loading increases. For b/t of 32 and 40, the phenomenon becomes more serious when b/t increases. But the phenomenon is not serious when b/t is 48. It looks like there are at least two kind of categories for CFBC with high axial loading. In case we desire that CFBC with high axial loading can perform the plastic rotation angle capacity larger than 3% rad, confinement tie rods with confinement stress of 66 and 58 kgf/cm^2 should be equipped within the range of plastic hinges of CFBC with b/t of 48 and 40, respectively. It is suggested that the arrangement of confinement tie rods should follow the way in this project.

第一章 緒 論

第一節 研究緣起與背景

一、研究緣起

面對全球環境變遷，二氧化碳氣體排放過多等環境保護難題，各個領域需要共同來關心與努力，降低經濟發展對環境所產生的衝擊，而建築結構領域也應該要有所作為。藉由新構材之研發與推廣，可以對降低環境衝擊有所助益。填充型箱型柱（concrete filled box column，或簡稱 CFBC）比較容易施工也比較便宜，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，然而鋼管與箱型柱之製作方式截然不同，需要進行相關試驗驗證其可行性與可靠性。

本研究預計針對填充型箱型柱進行研究，預期目標包括：（1）求取材料之基本力學性質；（2）經由填充型箱型柱試體之撓曲行為實驗，提昇國內對填充混凝土箱型柱行為之認識，並評估其在工程實務應用的可行性；（3）根據實驗及數據分析之成果，評估現行規範之適用性，必要時提出修改之建議；（4）藉由研究成果之發表，引導建築構造走向材料減量、營建廢棄物減量、節能及環保之永續發展目標。

二、研究背景

填充型箱型柱有很多優點：（1）箱型柱之製作比圓柱容易且便宜許多；（2）相較於填充型圓柱，填充型箱型柱之梁柱接頭比較便宜且容易施工；（3）若使用高強度混凝土，回收再利用時可用以生產較高強度之再生混凝土；（4）混凝土回收比其他種類構材方便，只要切開箱型柱，混凝土就可以很快取出，比含鋼筋之桿件方便很多；（5）不必使用模板，降低營建材料使用量；（6）由 2009 年李玉生、楊國珍之研究案「高溫下含混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究」可看出含混凝土箱型鋼柱之防火性能甚優，可以節省防火材料；（7）箱型柱提供混凝土圍束，混凝土則提供箱型柱柱板之側向支撐，可以提升構材之強度與韌性；（8）以相同的強度來說，比起 RC 柱或鋼結構柱子（H 型鋼或純箱型鋼柱），使用填充混凝土箱型柱可降低結構材料使用量。顯然使用 CFBC 不但可以降低結構材料的使用量，還可以減少防火被覆、模版等營建材料之使用量。

國內外曾進行不少有關填充型鋼管混凝土柱的研究。近年來國內有翁正強、陳誠直、蔡克銓、黃炯憲、胡宣德等人，國外 2000 年以後主要有 Sakino、Inai、Ricles、Mirza、Varma 等人，也發表了不少期刊論文。這些論文有些是探討梁柱桿件的行為，有些則專注於短柱軸向行為的研究。近年來在研究短柱軸向行為的論文（Sakino 等人，2004；Hu 等人，2003；Huang 等人，2002；丁英哲，2004；王勝輝，1998；孫維隆，2000；黃炯憲等人，1998 及 1999）中，以 Sakino et al.（2004）總共完成 114 個試體（包括圓形及方形斷面）並據以建立分析模式之研究最為完整；在研究撓曲行為的論文（Aval 等人，2002；Ge 等人，1994；Hsu 等人，2003；Inai 等人，2004；Lu 等人，2007；Shanmugam 等人，2002；Susantha 等人，2002；Varma 等人，2002 及 2004；孫維隆，2000；傅正堯，1998）中，以 Varma 等人（2002

及 2004) 總共完成 16 個試體 (方形斷面) 並與 AISC-LRFD、ACI、AIJ、Euro Code 4 規範比較之研究較為完整。防火相關文獻則有 Yang 等人 (2008)。但是目前所收集到的論文中, 實驗的 CFT 試體尺寸都不大, 柱寬在 120~323mm 之間, 而柱板厚度在 2~9mm 之間, 而斷面型式大部分使用無縫鋼管 (如圖 1-1a) 或是由兩個槽鋼銲接而成之方形斷面 (如圖 1-1b)。這些實驗試體的尺寸偏小, 國內也甚少使用無縫鋼管或槽鋼組成之箱型斷面, 國內使用的主要是由四塊鋼板組合而成之填充型箱型柱 (如圖 1-2 所示)。目前對於填充型箱型柱, 有些工程師只認定混凝土所提供之勁度, 而忽略混凝土所提供之強度, 相當可惜。

現階段推廣填充型箱型柱, 在材料方面應以現有能夠量產者為優先考慮。國內目前可以量產的結構用鋼以 3.5 tf/cm² 等級 (A572 Gr.50、A992、SM490、SN490B、SN490C) 為主, 中鋼也有量產 4.2 tf/cm² 級鋼板 (SM570) 的能力, 但是使用量小的鋼板尺寸很難取得。國內目前已經有能力量產 840 kgf/cm² 級的混凝土, 混凝土材料之取得相對的比較容易。但是, 根據國內 SRC 規範 (內政部營建署, 2006) 之規定, 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。當混凝土抗壓強度大於 560kgf/cm² 時, 需要依公認合理之試驗證明其可行性與可靠度。有鑑於此, 本研究的研究預計以 3.5 tf/cm² 等級鋼材, 配合 420 kgf/cm² 級的混凝土為主。

填充型箱型柱中柱板之寬厚比 (b/t) 影響構材的行為很大。 b/t 越大, 柱板越容易挫屈, 混凝土的圍束也較差, 而強度與韌性也會受到很大的影響。根據國內之 SRC 結構設計規範, 耐震構材柱板寬厚比的限制為 $\sqrt{3E_s/F_y}$, 使用 3.5 tf/cm² 等級的鋼材時, 柱板之 b/t 不得大於 42, Varma et al. (2002) 的研究顯示, 當 b/t 等於 48 時桿件之撓曲延展性不佳, 當 b/t 等於 32 時桿件之撓曲延展性改善很多, 由此可判

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

斷國內 SRC 規範的規定在合理範圍。台灣處於地震帶，填充型箱型柱基本上都要符合耐震的要求，因此柱板的 b/t 宜控制在 42 以下；然而規範對填充型箱型柱柱板寬厚比之限制與軸力大小無關，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，如圖 1-3 所示，當柱板寬厚比為 32 時，軸力 (P) 與軸向強度 (P_0) 的比值 (P/P_0 ，簡稱軸力比) 愈大，塑性轉角容量 (θ_p) 愈小，亦即撓曲韌性容量愈差；當 P/P_0 為 35% 時， θ_p 約為 3%；當 P/P_0 為 50% 時， θ_p 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略顯不足。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，故本研究規劃了 b/t 為 40 及 48 的箱型柱進行高軸力作用下之撓曲行為試驗。

填充型箱型柱之合成效應的程度有多高？傅正堯 (1998) 的研究顯示，剪力釘對填充型箱型柱的撓曲強度與韌性沒有明顯的影響。此外美國華盛頓大學 Roeder 教授的研究結果也發現，未配置剪力釘之填充型圓柱之合成效應頗佳。因此，剪力釘對填充型鋼柱合成效應的影響已經有比較明確的結論，本研究不再對此進行研究。

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，避免箱型柱因混凝土壓力向外變形，如圖 1-4(a) 所示，可以將繫桿作為結構用途，如圖 1-4(b) 所示，應可降低柱板厚度需求。2008 年陳正誠等人「含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究」之研究報告證明於高 b/t 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「混凝土箱型鋼柱之撓曲韌性行為研究」之研究報告結果亦顯示，在 b/t 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 λ_{pd} (等

於 42) 且接近結實斷面寬厚比限制 λ_p (等於 61)。2010 年陳正誠等人「填充高強度混凝土箱型鋼柱之撓曲韌性行為研究」之研究報告並提出繫桿設計方法之初步建議。不過此二研究案試體僅承受低軸力 (P/P_0 約為 15~20%)，高軸力的情況仍需要試驗來驗證。因此，本研究將繼續研究圍束繫桿對填充高強度混凝土箱型鋼柱撓曲韌性之影響。

針對上述主要的課題進行研究，可以進一步釐清填充型箱型柱應用之可行性及可靠性，讓工程師可以更合理而安全的使用此種構材，以降低建築結構建設對環境的衝擊。

第二節 研究方法及進度說明

本研究案研究方法包括：(1) 文獻之收集與整理；(2) 柱試體之撓曲行為實驗；(3) 鋼板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，邀請產、官、學各界參與討論，檢視所研擬機制的可行性及周延性；(6) 報告及期刊論文之撰寫。流程如圖 1-5 所示，本研究預定之進度表如表 1-1 所示。採用的研究方法及進度說明敘述如後。

一、文獻之收集與整理

收集、整理相關文獻，一方面避免本研究之內容與現有成果重複，另一方面所收集之資料可作為分析模型建立及規範檢討的參考或補充資料。

二、柱試體之撓曲行為實驗

由於柱桿件受固定軸力及變化彎矩至破壞階段，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。實驗採用柱試體之撓曲行為試驗，柱試體將同時受到固定軸力及反覆彎矩載重，可得到軸力-彎矩互制之下，柱試體的耐震能力。

三、鋼板及混凝土基本材料實驗

求取材料之基本應力-應變關係曲線。基本材料包括混凝土及各種厚度的鋼板，混凝土量測受壓情況之應力-應變曲線，鋼板則量測受拉情況之應力-應變曲線。

四、規範條文適用性評估

規範條文應該要符合安全結構設計的精神，根據實驗及分析結果檢討規範的適用性，必要時提出修改建議，以利後續之推廣工作。首先檢核填充混凝土箱型柱在高軸力作用下，其柱板寬厚比的規定是否合理，其次檢核採用圍束繫桿時，如何配置圍束繫桿構材行為才可以被接受，再則檢討梁柱之撓曲強度是否適合採用規範之規定計算之。

五、舉辦專家座談會

本研究規劃兩次專家座談會，邀請產、官、學各界參與討論，檢視所研擬機制的可行性及周延性。為發揮專家座談會的效果，第一次專家座談安排在試體設計階段舉辦，討論試驗規

劃及試體設計細節。第二次專家座談安排在柱試體撓曲行為試驗之前舉辦，討論實驗加載與量測計畫，以及數據分析、模型建立之細節。由於填充型箱型柱撓曲試驗之研究已經邁進第三年，於試驗規劃、實驗儀器配置及數據分析方面，皆有累積許多經驗，故本研究團隊將試驗規劃、試驗裝置及量測儀器配置合併至第一次專家座談會，並將第二次專家座談會延後至試驗結果出爐時，邀集專家學者共同討論研究成果。會議紀錄、簽到單及座談會簡報內容附在附錄一。

六、報告及期刊論文之撰寫

本研究包含兩次報告之撰寫，第一次為期中報告（期中審查之審查意見回應表附在附錄二），在執行第 5 個月時說明本案之執行進度。第二次為期末報告，在執行第 11 個月時完成本案之研究報告。本研究將於繳交研究成果報告之一個月內，向中華民國建築學報或其他具有國內 TSSCI 同等水準以上之學報（刊）投稿，並副知內政部建築研究所。

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

表 1-1 預定之研究進度

月次	第一月	第二月	第三月	第四月	第五月	第六月	第七月	第八月	第九月	第十月	第十一月	備註
工作項目												
資料搜集及整理	■											
試體設計	■											
試體製作與養護			■									
柱撓曲行為試驗					■							
材料機械性質試驗					■							
試驗數據整理分析					■							
相關規範條文檢討							■					
專家座談會		■			■							
報告及期刊論文撰寫					■							
期中報告					※							6/30
期末報告									※			10/15
研究進度百分比	10	20	25	30	50	60	70	80	85	95	100	
預定查核點	第 1 季：無											
	第 2 季：期中報告											
	第 3 季：期末報告											
<p>說明：1 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定，預定研究進度以粗線表示其起訖日期。</p> <p>2 預定研究進度百分比一欄，係為配合追蹤考核作業所設計。請以每一小格粗組線為一分，統計求得本計畫之總分，再將各月份工作項目之累積得分(與之前各月加總)除以總分，即為各月份之預定進度。</p> <p>3 科技計畫請註明查核點，作為每一季所預定完成工作項目之查核依據。</p>												

(資料來源：本研究製作)

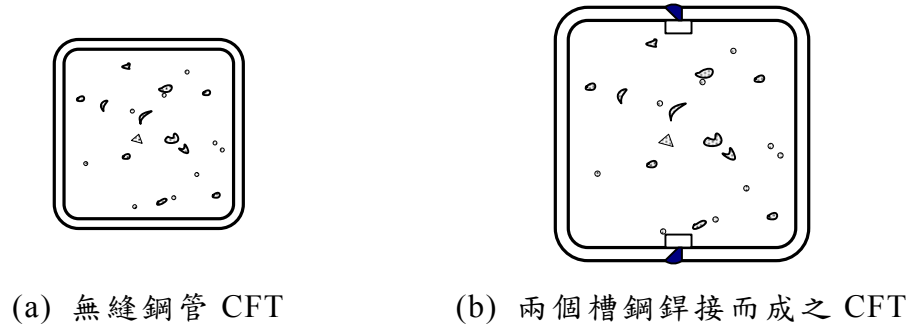


圖 1-1 CFT

(資料來源：本研究製作)

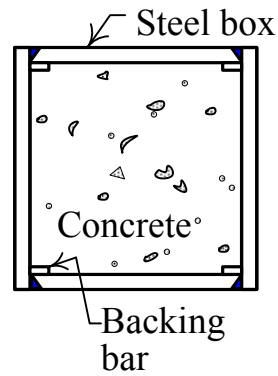


圖 1-2 填充型箱型柱

(資料來源：本研究製作)

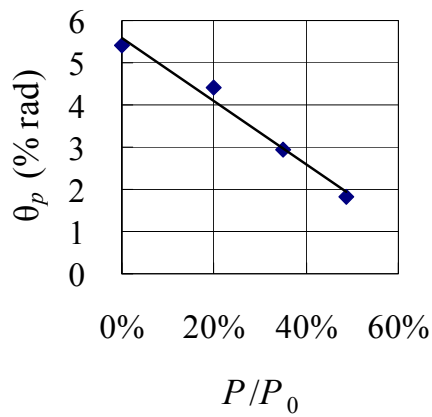


圖 1-3 填充型箱型柱軸力與塑性轉角之關係圖

(資料來源：陶其駿及蔡煒銘，2010)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

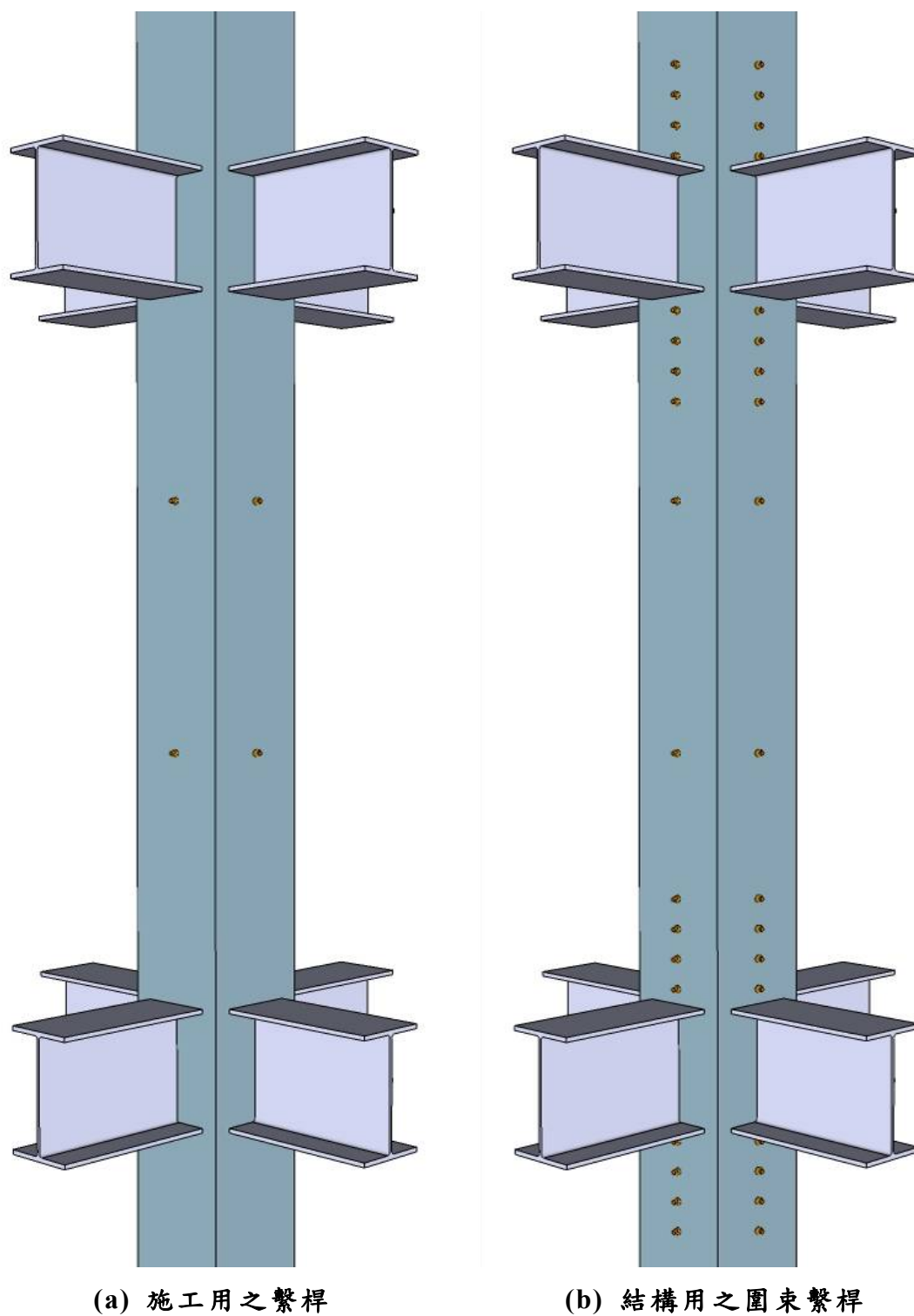


圖 1-4 使用繫桿之填充型箱型柱

(資料來源：本研究製作)

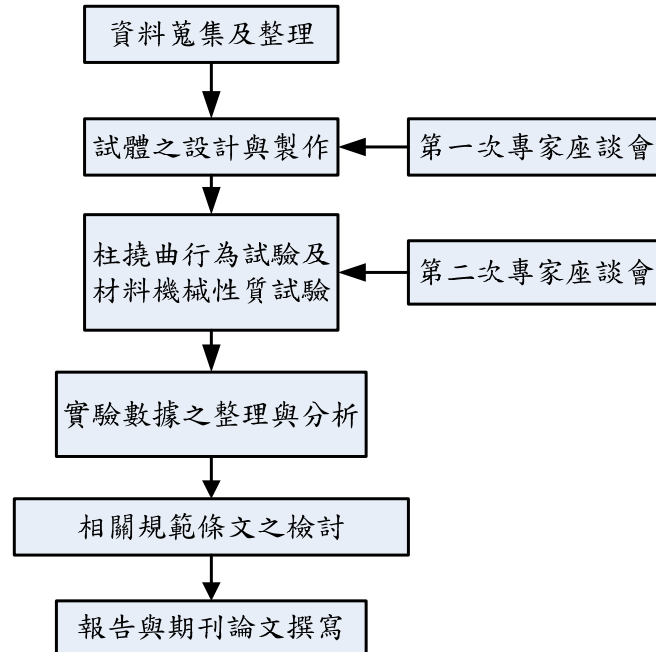


圖 1-5 研究流程圖

(資料來源：本研究製作)

第二章 專家座談與試體設計

本研究計畫之大方向為 CFBC 結構系統之研發與推廣，今年度著眼於填充混凝土箱型柱在高軸力作用下之撓曲行為試驗研究，故本章將扼要說明專家座談會之討論結果、說明試體設計、量測儀器之配置及試驗相關載重歷程。

第一節 專家座談會

本研究計畫以專家座談會邀請產、官、學各界專家諮詢討論，檢視所研擬機制的可行性及周延性。本研究計畫規劃兩次專家座談會，由於填充型箱型柱撓曲試驗之研究已經邁進第三年，於試驗規劃、實驗儀器配置及數據分析方面，皆有累積許多經驗，為發揮專家座談會的效果，故本研究團隊將試驗規劃、試驗裝置及量測儀器配置合併至第一次專家座談會，並將第二次專家座談會延後至試驗結果出爐時，邀集專家學者共同討論研究成果。目前二次專家座談會皆已完成（會議紀錄、簽到單及座談會簡報內容則附在附錄一），綜合結論彙整如下：

1. 此案提出之圍束繫桿設計方法能使工程師簡易且快速的設計圍束繫桿。
2. 有些建案在一樓的柱子會承受很大的軸力，有些案子一樓柱之軸力有可能達到軸向標稱強度的 40~50%，此研究案在實務上將有所助益。
3. 填充型箱型柱可配合高強度鋼板，應可有效減少材料使用量，建議此課題於未來可另案研究探討之。

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

4. 防爆拉桿設計所需考慮的因素與圍束繫桿不同，建議另案研究探討之。
5. 剪力釘對於填充型箱型柱的必要性不在本案研究範圍內，過去已有研究發現其實不需配置剪力釘即可有不錯的合成效果，建議另案深入探討之。
6. 建議另案深入研究「高軸力作用下填充型箱型柱柱板寬厚比對塑性轉角容量之影響」。

第二節 試體設計及試驗裝置

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。本案共規劃 9 個試體，試體設計列表如表 2-1 所示，鋼板採用 ASTM A572 Gr.50 鋼材，標稱降伏強度為 3.5 tf/cm^2 ，混凝土標稱抗壓強度為 420 tf/cm^2 ，在固定軸力 P 作用下進行撓曲反覆載重試驗，軸力 P 與軸向標稱強度 P_{n0} 之比例如表 2-1 所示， P_{n0} 可依照下式計算：

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

其中 A_s 為箱型鋼柱斷面積， F_y 為箱型鋼柱標稱降伏應力， A_c 為混凝土斷面積， f'_c 為混凝土抗壓強度。除了 R40-20 試體之 P/P_{n0} 約為 20% 外，其餘試體之 P/P_{n0} 約為 40%。試體可分成 R 及 T 等 2 個系列，皆為撓曲行為試驗之試體（試驗裝置如圖 2-1 及圖 2-2 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 200 噸萬能試驗機連接鎖緊並施加預力每支螺桿 29 噸預力；試驗時，先以上方的 600 噸萬能試驗機施加 40% 軸向強度

之固定軸力 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。

1. R 系列

R 系列試體為填充型箱型柱下方接 H 型鋼梁及橫隔板之試體，共有三支試體，寬厚比分別為 48 及 40，其試體尺寸如表 2-1 及圖 2-4 所示，斷面如圖 2-3(a) 所示，填充型箱型柱試體東、西面下方接 H 型鋼梁，與實際情形較相近；試體編號上的第一個數值為寬厚比，第二個數值為軸力與軸向強度之百分比值。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。

2. T 系列

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 2-5 所示，斷面如圖 2-3(b) 所示，2008 年陳正誠等人「含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究」之研究報告，已探討 3.5 tf/cm^2 鋼材及 420 kgf/cm^2 混凝土之填充型箱型柱使用圍束繫桿的影響，其試驗裝置如圖 2-6 所示，試驗結果如圖 2-7 所示，其中 AA-48 為未加圍束繫桿之試體，2/10、3/10、4/10、5/10 及 6/10 分別代表圍束繫桿間距與試體寬度的比例（簡稱間寬比）0.2、0.3、0.4、0.5 及 0.6 之試體，可知間寬比達到 0.4 以下之試體有優良表現。2009 年陳正誠等人「混凝土箱型鋼柱之撓曲韌性行為研究」之研究報告，使用 3.5 tf/cm^2 鋼材及 420 kgf/cm^2 混凝土之填充型箱型柱，在 b/t 為 48 及 60 之填充型箱型柱中使用繫桿，間寬比為 0.33，結果亦顯示，在低軸力作用下可以讓柱發揮出優異的撓曲韌性容量，即使柱板寬厚比已遠超過規範之限制 λ_{pd} （等於 42）且接近結實斷面寬厚比限制 λ_p （等於 61）；不過依照 2010 年陶其駿及蔡煒銘之研究報告顯示，即使柱板寬厚比為 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，而本研究主要是

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

針對高軸力的填充型箱型柱，故本研究不考慮寬厚比 60 的情況，針對寬厚比 48 及 40 各設計了三支試體，共六支試體；試體編號上的第一個數值為寬厚比，第二個數值為軸力與軸向強度之百分比值，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；所有 T 系列試體寬度方向皆使用單支圍束繫桿，斷面如圖 2-3(b)所示，3D 示意圖如圖 2-5 所示，間寬比為 0.33。試體 T48-40-H、T48-40-M 及 T48-40-L 能初步探討寬厚比 48 之填充型箱型柱在高軸力作用下 ($P/P_{n0} \doteq 40\%$)，圍束繫桿所需要對混凝土提供之圍束應力需求 $\sigma_{ct,req}$ ；試體 T40-40-H、T40-40-M 及 T40-40-L 能初步探討寬厚比 40 之填充高強度混凝土箱型柱在高軸力作用下 ($P/P_{n0} \doteq 40\%$)，圍束繫桿所需要對混凝土提供之圍束應力需求 $\sigma_{ct,req}$ 。

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 2-8 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， $A_{bs} = 0.75A_b$ 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 設計規範查表 10.3-2 或表 C10.3-2 挑選適當 $\phi F_t A_b$ 如下式：

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

其中 ϕ 為折減係數， F_t 代表螺牙桿件拉力強度。

第三節 測計配置與載重歷程

1. 測計配置

量測儀器配置如圖 2-9 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。

2. 載重歷程

本研究使用之反覆載重位移歷時係採用 AISC2005 之規範所建議

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

之位移歷時，致動器所提供之側向位移由層間位移角乘以試體鋼梁上緣至致動器中心線之高度求得，如圖 2-10 所示。

表 2-1 實驗試體規劃

(9) 系列	試體 編號	D	t	b/t	P	S/D	d_t	F_{ut}
		mm	mm		P_{n0}		mm	tf/cm ²
R	R48-40	450	9	48	40%	-	-	-
	R40-20	380	9	40.22	20%	-	-	-
(3)	R40-40	380	9	40.22	40%	-	-	-
T	T48-40-H	450	9	48	40%	0.33	25	10.5
	T48-40-M	450	9	48	40%	0.33	19	10.5
	T48-40-L	450	9	48	40%	0.33	13	10.5
(6)	T40-40-H	380	9	40.22	40%	0.32	25	4.1
	T40-40-M	380	9	40.22	40%	0.32	19	4.1
	T40-40-L	380	9	40.22	40%	0.32	13	4.1

(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

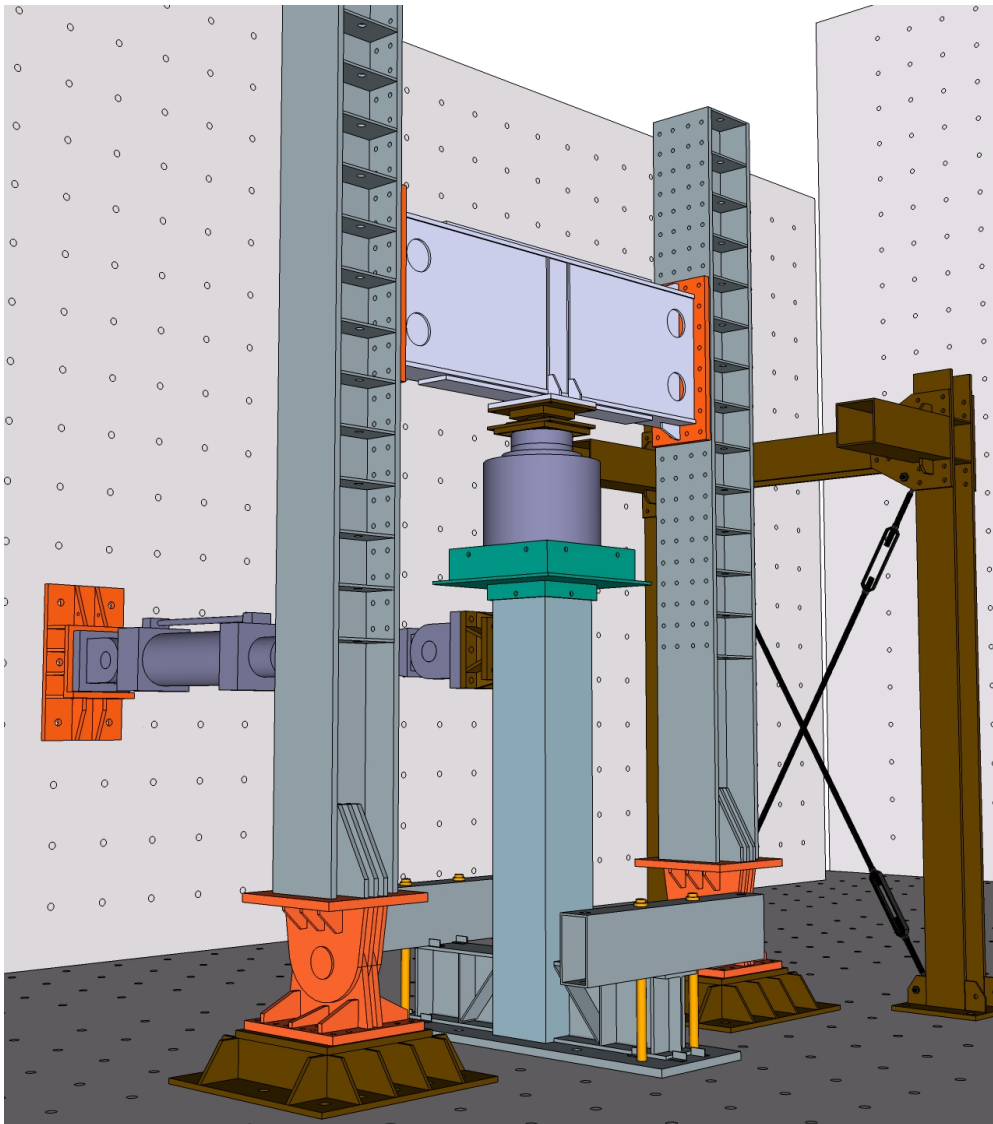


圖 2-1 含軸力之撓曲行為試驗裝置示意圖

(資料來源：本研究製作)



圖 2-2 含軸力之撓曲行為試驗裝置照片

(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

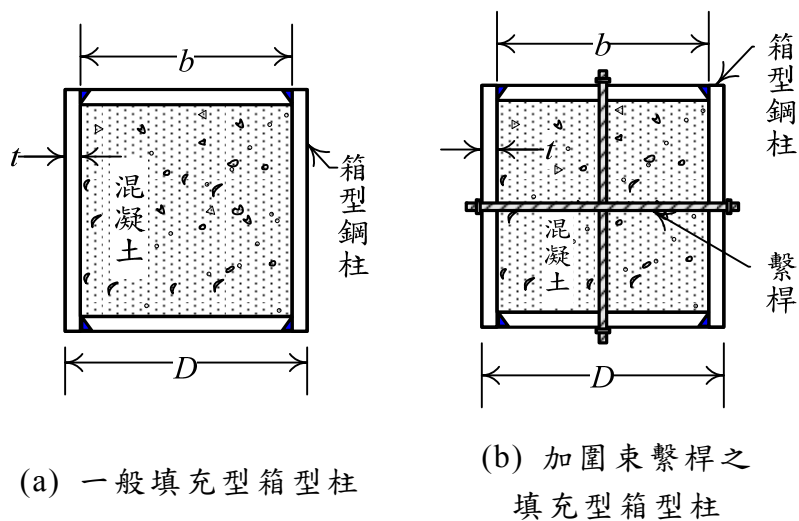


圖 2-3 試體斷面示意圖

(資料來源：本研究製作)

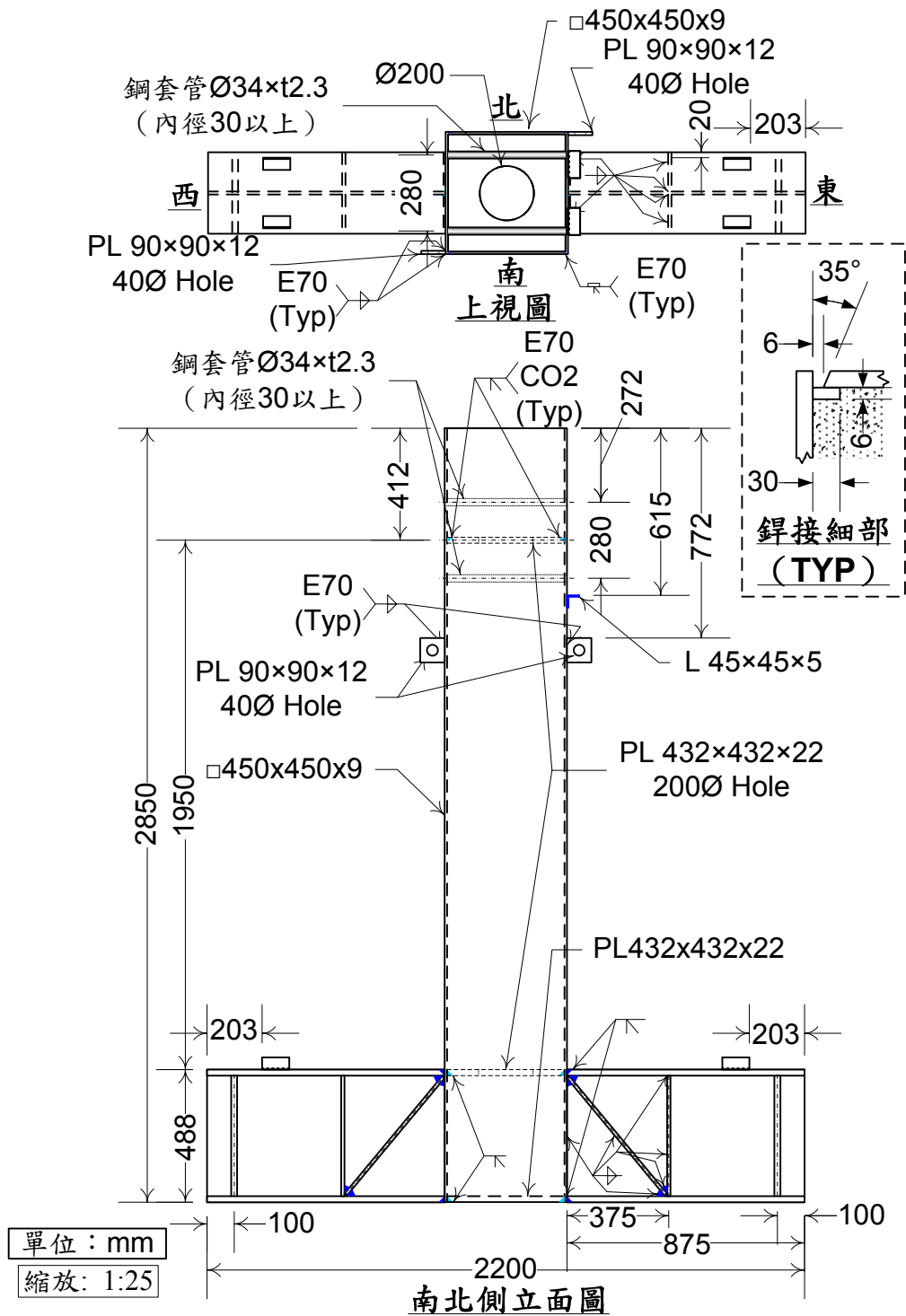


圖 2-4 R 系列試體設計圖 (以 R48-40 為例)

(資料來源: 本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

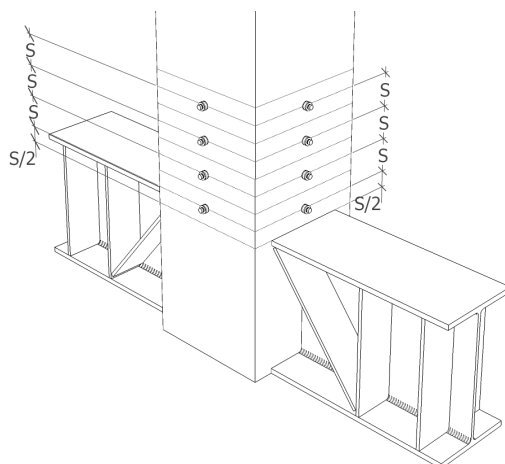


圖 2-5 T 系列試體示意圖

(資料來源：本研究製作)

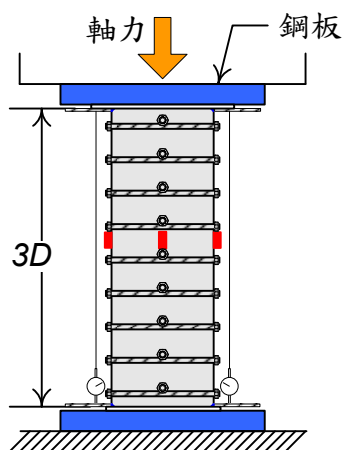


圖 2-6 含圓束繫桿短柱試體試驗裝置示意圖

(資料來源：陳正誠等人，2008)

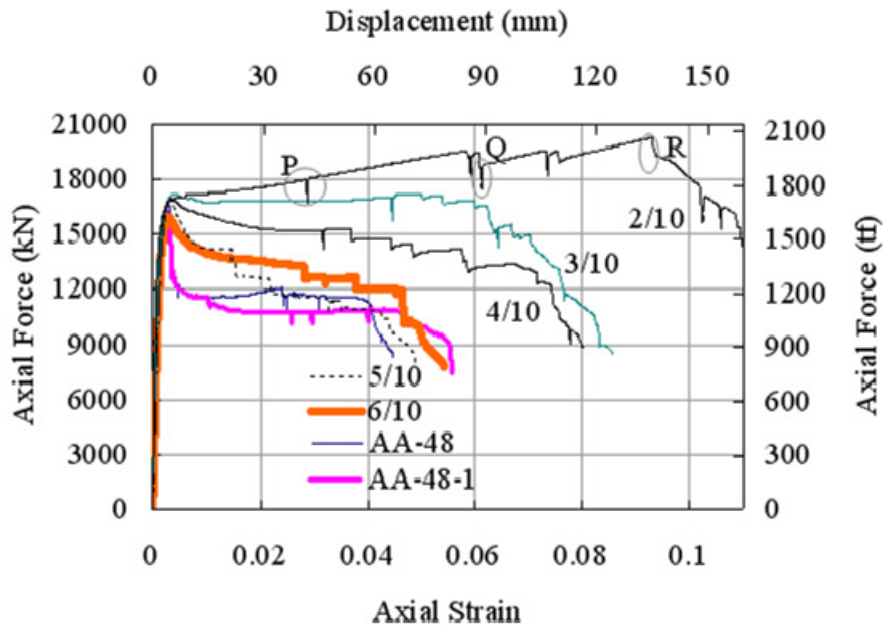


圖 2-7 加圍束繫桿試體軸力-軸向應變曲線圖

(資料來源：陳正誠等人，2008)

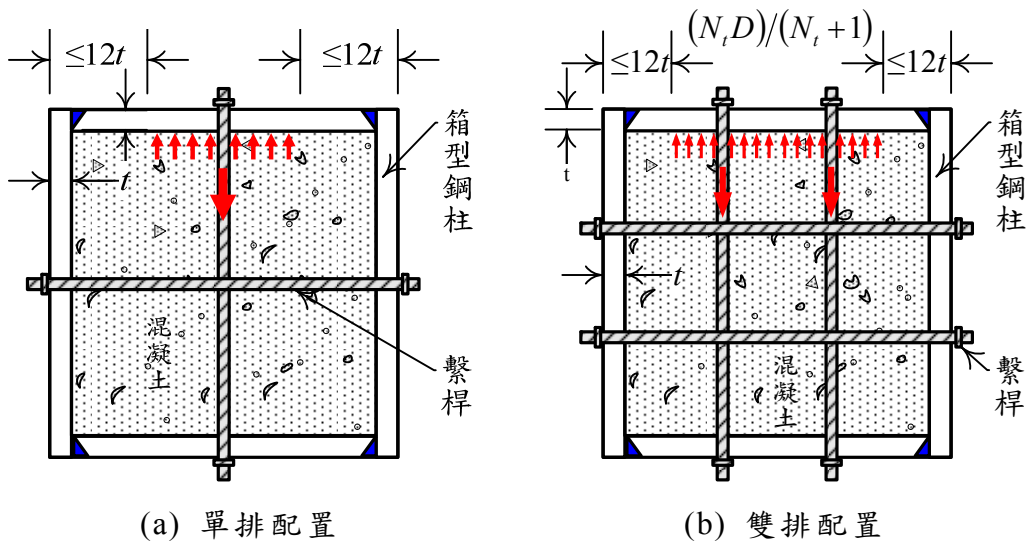


圖 2-8 圍束繫桿圍束應力示意圖

(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

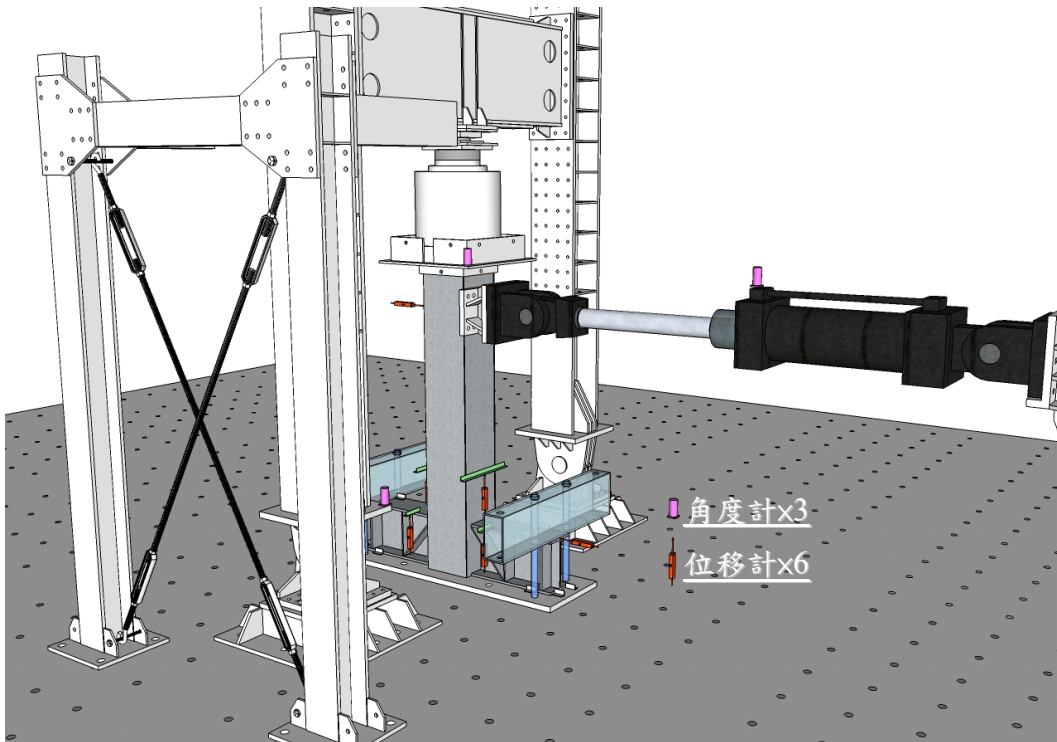


圖 2-9 量測儀器配置示意圖

(資料來源：本研究製作)

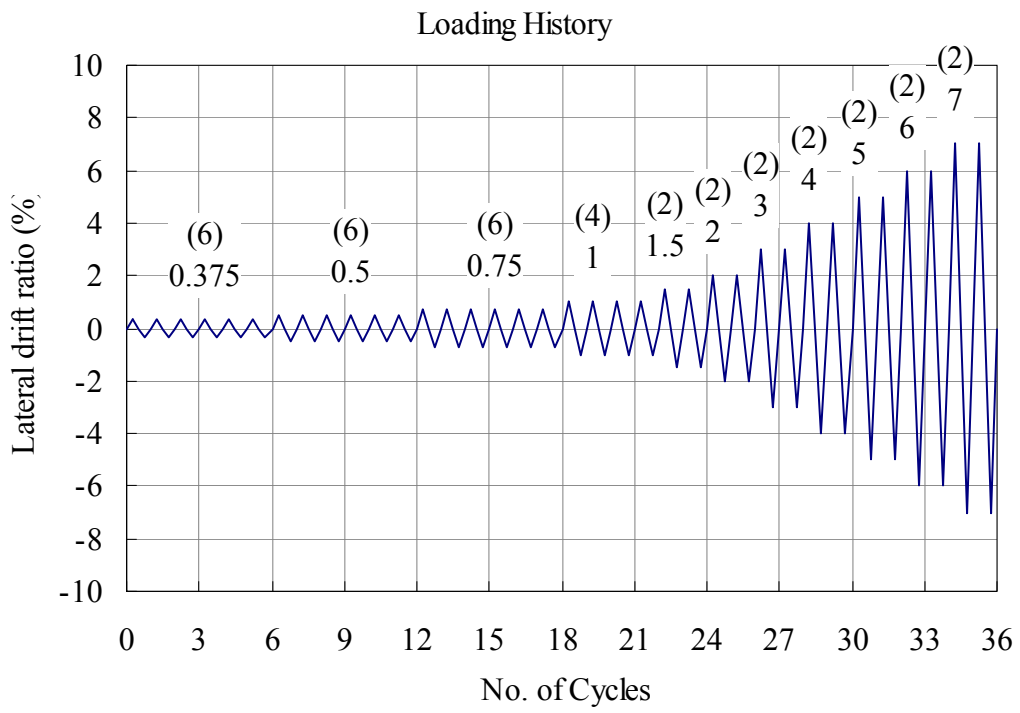


圖 2-10 反覆載重位移歷時圖

(資料來源：本研究製作)

第三章 柱撓曲行為試驗

本章主要係介紹試體之製作以及試驗過程之試體觀察。

第一節 試體製作

試體之製作係利用全滲透鐸將四片鋼板組合成箱型柱，並以全滲透鐸在頂部及底部鐸上內橫隔板，鐸接時採用 E70XX 系列鐸材施鐸，CO2 鐸條規格為 AWS E71T-1C，上橫隔板及鋼梁上翼板處之橫隔板有預留圓孔以供試體灌漿之用，如圖 2-4 裡的上視圖所示，完成箱型柱製作之後，再鐸接鋼梁上去，如圖 2-4 裡的立面圖所示。灌漿時將幫浦車之泵送管插入箱型柱內穿過橫隔板之預留圓孔直至試體最下方，一邊泵送一邊緩緩抽出泵送管，直至填滿混凝土至柱頂部上緣切齊，待試驗前時，再用高強度石膏填滿乾縮造成之空隙並將軸力加載鋼板蓋上以確保整支箱型柱內填滿無間隙。

柱板使用 9 mm 厚之 ASTM A572Gr.50 鋼材，平均實測降伏強度分別為 4.156 tf/cm^2 ，平均實測極限強度分別為 5.21 tf/cm^2 。

箱型柱內填充之混凝土抗壓強度為 420 kg/cm^2 (6000 psi) 等級，製作之圓柱試體採用保鮮膜包覆全身，以符合實際情況（箱型柱內混凝土無法養護），混凝土材料試驗隨試驗之進行每週壓 3 個圓柱試體求取平均抗壓強度，由於變化不大，取全部平均抗壓強度得抗壓強度 520 kg/cm^2 。另外，本研究也特別利用應變環測試混凝土圓柱試體，並繪製混凝土應力-應變曲線如圖 3-1 所示。

圍束繫桿使用直徑 13、19 及 25 mm 之 ASTM A490 及 JIS SS400 鋼材，實測降伏強度及實測極限強度如表 3-1 所示，其中 $f_{y,0.002}$ 為 0.002

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

斜距法求得之降伏強度， f_u 為極限強度。

第二節 試驗觀察

本節將試驗完畢之試體裂縫位置及裂縫長度列表如表 3-2 所示，其中 E、W、S 及 N 代表東、西、南及北，接在後面的數字代表裂縫長度，單位為公分，例如試體 T48-40-H 西南角落 (SW) 之縱裂縫觀察為 S16，代表其南面縱裂縫長度為 16 公分；西南角落 (SW) 之橫裂縫觀察為 S1W4，代表橫裂縫出現於南面及西面，橫裂縫長度為南面 1 公分西面 4 公分。本節並依照各系列試體介紹試驗過程中試體之變化情形。

一、 R 系列

R48-40 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 1.5% 時，試體塑鉸區之南及北面接連出現局部挫屈，如圖 3-2 所示，同時，試體達到最大強度；在側移角達 5% 時，試體受撓曲壓力側嚴重局部挫屈，柱板沿著銲道旁邊開裂，如圖 3-3 所示，開裂位置為圖 3-4 中路徑 (2)，強度已經下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

R40-20 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 0.75% 時，試體南及北面開始出現降伏線，如圖 3-5 所示；在側移角達 1% 時，試體東及西面開始出現降伏線；在側移角達 3% 時，試體塑鉸區之南及北面接連出現局部挫屈，如圖 3-6 所示，同時，試體達到最大強度；在側移角達 6% 時，試體受撓曲壓力側嚴重局部挫屈，柱板沿著銲道旁邊開裂，如圖 3-7 所示，開裂位置為圖 3-4 中路徑 (1)，因強度已經下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

R40-40 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 1.5%時，試體塑鉸區之南及北面接連出現局部挫屈，如圖 3-8所示，同時，試體達到最大強度；在側移角達 3%時，試體受撓曲壓力側嚴重局部挫屈，柱板沿著銲道旁邊開裂，如圖 3-9所示，開裂位置為圖 3-4中路徑(1)，強度下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

二、 T 系列

T48-40-H 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 2%時，試體塑鉸區之南及北面接連出現降伏線及局部挫屈，如圖 3-10所示；在側移角達 3%時，試體達到最大強度；在側移角達 5%時，試體受撓曲壓力側嚴重局部挫屈，柱板沿著銲道旁邊開裂，如圖 3-11所示，開裂位置為圖 3-4中路徑(1)；在側移角達 6%時，強度下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

T48-40-M 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 1%時，試體東面之柱中間先出現局部挫屈，如圖 3-12所示，但是是在柱中間而非塑鉸區；在側移角達 1.5%時，試體塑鉸區之東面先出現局部挫屈；在側移角達 3%時，試體達到最大強度；在側移角達 6%第一迴圈時，試體北面柱板因受撓曲壓應力嚴重局部挫屈而沿著兩側銲道旁邊縱向開裂，如圖 3-13(a)所示，開裂位置為圖 3-4中路徑(2)，且南面承受撓曲拉應力導致兩側銲道旁邊於局部挫屈處拉裂，出現橫向及縱向裂縫，但縱向裂縫開裂不大，如圖 3-13(b)所示，開裂位置為圖 3-4中路徑(1)，強度已經下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

T48-40-L 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 1.5%時，試體北面開始出現降伏線，如圖 3-14所示，同時，試體塑鉸區之南面出現局部挫屈，如圖 3-15所示；在側移角達 4%時，試體達

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

到最大強度；在側移角達 6%第一迴圈時，試體受撓曲拉應力側於局部挫屈處沿著銲道旁邊橫向拉裂，如圖 3-16所示，強度已經下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

T40-40-H 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 0.5%時，試體北面開始出現降伏線，如圖 3-17所示；在側移角達 2%時，試體塑鉸區之南面出現局部挫屈，如圖 3-18所示；在側移角達 3%時，試體達到最大強度；在側移角達 6%第一迴圈時，試體南面柱板因受撓曲壓應力嚴重局部挫屈而沿著兩側銲道旁邊縱向開裂，如圖 3-19所示，開裂位置為圖 3-4中路徑(1)；在側移角達 6%第一迴圈時，強度已經下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

T40-40-M 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 1.5%時，試體塑鉸區之南面出現局部挫屈，如圖 3-20所示；同時，試體達到最大強度；在側移角達 5%第一迴圈時，試體受撓曲壓應力側於局部挫屈處壓裂產生縱向裂縫，如圖 3-21所示，開裂位置為圖 3-4中路徑(1)；同時，強度已經下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

T40-40-L 試體在加軸力前，試體即有局部出現空心；在側移角達 0.75%時，試體塑鉸區之北面出現局部挫屈，如圖 3-22所示；在側移角達 2%時，試體達到最大強度；在側移角達 4%第一迴圈時，受撓曲壓應力側（北面）最下方螺桿斷掉，如圖 3-23所示，接著換南面柱板受撓曲壓應力時則因嚴重局部挫屈而於西南角落沿著銲道旁邊及柱內橫隔板的位置附近開裂，如圖 3-24所示，開裂位置為圖 3-4中路徑(1)；同時，強度已經下降低於最大強度之 85%，做完此迴圈即試驗停止。

整體上來看，T 系列因為加了圍束繫桿，會使箱型柱塑性鉸區的局部挫屈範圍，被拘束到最下面二層繫桿之間，因此而減少了挫屈長

度，以板挫屈的觀點來看，這會提高板的挫屈強度。原本未使用繫桿的填充型箱型柱，其破壞模式係在局部挫屈範圍內的角落，沿著鉸道旁邊開裂，開裂位置大部分為圖 3-4 中路徑(1)，由於挫屈範圍被限制住，T 系列的開裂範圍也因此被限制住，故破壞模式與未使用繫桿的有所不同。

表 3-1 圓束繫桿棒狀試片平均降伏強度及極限強度

圓棒編號	圓棒材質	測試區	圓棒直徑	$f_{y,0.002}$	f_u
		圓棒直徑		tf/cm ²	tf/cm ²
		mm	mm		
D25	A490	19	25	11.91	12.71
D19	A490	16	19	3.90	10.91
D13	A490	13	13	9.73	11.82
D25	SS400	19	25	4.24	4.90
D19	SS400	16	19	3.09	4.12
D13	SS400	13	13	3.65	4.83

(資料來源：本研究製作)

表 3-2 試體裂縫位置及裂縫長度列表

Specimen	NE (unit: cm)		NW (unit: cm)		SE (unit: cm)		SW (unit: cm)	
	縱裂 ¹	橫裂 ²	縱裂 ¹	橫裂 ²	縱裂 ¹	橫裂 ²	縱裂 ¹	橫裂 ²
R48-40			W9					
R40-20	N10		N10		S12 E2		S17W2	
R40-40	N15		N14		S16		S16	
T48-40-H	N16 N1E4		N17 N1W3		S14		S16 S1W4	
T48-40-M		E1	W12 N2W3		S8 S1E3		S14 S3W4	
T48-40-L	N8 N4E7		W1		S8 S1E3		W10S5 W2	
T40-40-H	N6				S13		S14 W2	
T40-40-M	N20 N1E2		N20 W1N1		S13		S20	
T40-40-L	N10E7		N20		E6		S16	

註： 1 挫屈後受壓側沿銲道開裂

2 受拉力側柱板受拉開裂

(資料來源：本研究製作)

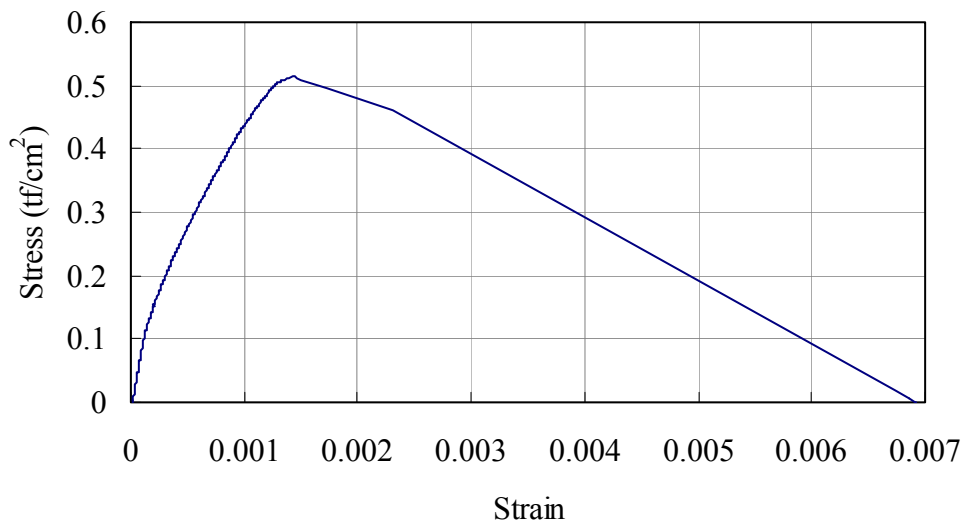


圖 3-1 混凝土應力-應變曲線圖

(資料來源：本研究製作)



圖 3-2 R48-40 試體在側移角 1.5%時局部挫屈

(資料來源：本研究製作)

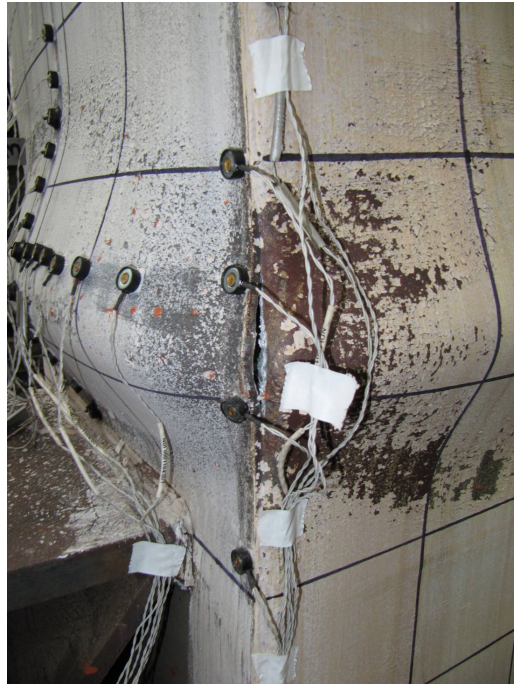


圖 3-3 R48-40 試體在側移角 5% 時受壓柱板沿縱向開裂

(資料來源：本研究製作)

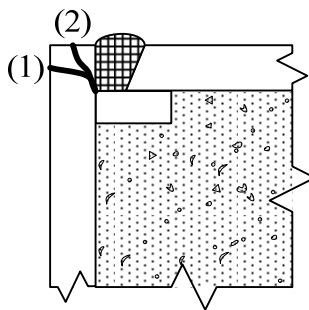


圖 3-4 試體受壓柱板沿縱向開裂斷面示意圖

(資料來源：本研究製作)

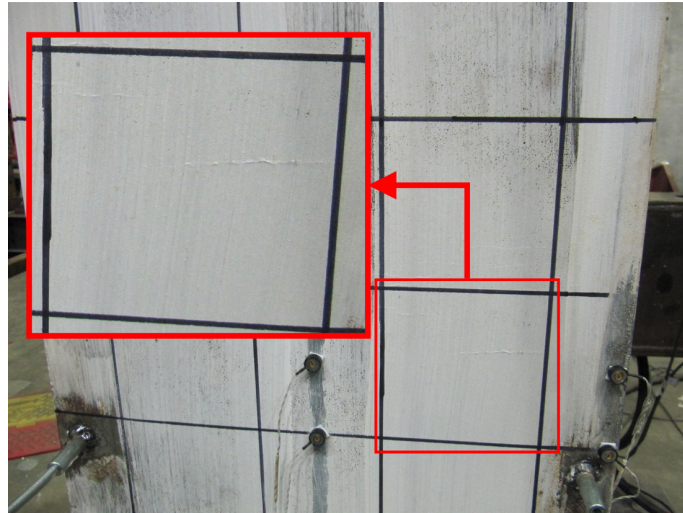


圖 3-5 R40-20 試體在側移角 0.75%時出現降伏線

(資料來源：本研究製作)



圖 3-6 R40-20 試體在側移角 3%時局部挫屈

(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計



圖 3-7 R40-20 試體在側移角 6%時受壓柱板沿縱向開裂

(資料來源：本研究製作)



圖 3-8 R40-40 試體在側移角 1.5%時局部挫屈

(資料來源：本研究製作)

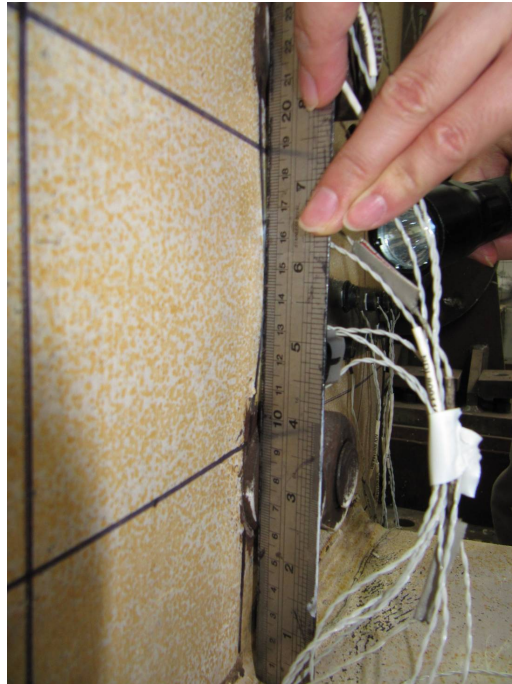


圖 3-9 R40-40 試體在側移角 3%時受壓柱板沿縱向開裂

(資料來源：本研究製作)



(a) 降伏線



(b) 局部挫屈

圖 3-10 T48-40-H 試體在側移角 2% 時出現降伏線及局部挫屈

(資料來源：本研究製作)



圖 3-11 T48-40-H 試體在側移角 5% 時受壓柱板沿縱向開裂

(資料來源：本研究製作)



圖 3-12 T48-40-M 試體在側移角 1% 時局部挫屈

(資料來源：本研究製作)



(a) 撓曲壓應力側縱向開裂 (b) 撓曲拉應力側橫、縱向開裂
圖 3-13 T48-40-M 試體在側移角 6% 時受壓縱裂、受拉橫裂

(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

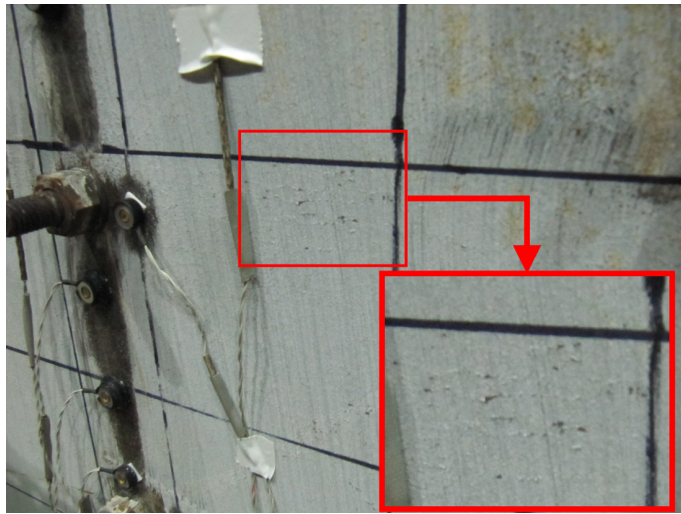


圖 3-14 T48-40-L 試體在側移角 1.5%時出現降伏線

(資料來源：本研究製作)



圖 3-15 T48-40-L 試體在側移角 1.5%時局部挫屈

(資料來源：本研究製作)



圖 3-16 T48-40-L 試體在側移角 6%時受拉橫裂

(資料來源：本研究製作)

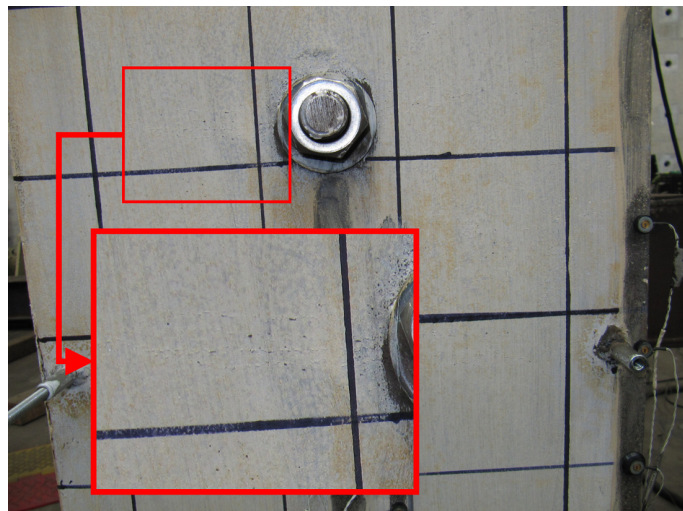


圖 3-17 T40-40-H 試體在側移角 0.5%時出現降伏線

(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計



圖 3-18 T40-40-H 試體在側移角 2%時局部挫屈

(資料來源：本研究製作)



圖 3-19 T40-40-H 試體在側移角 6%時受拉柱板沿橫向開裂

(資料來源：本研究製作)

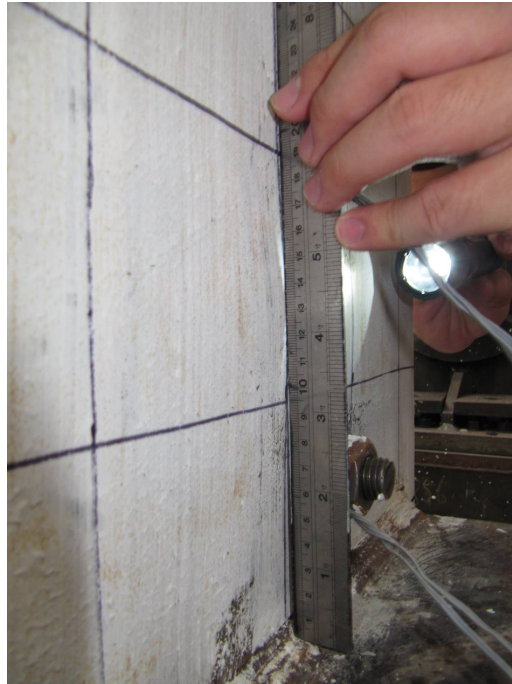


圖 3-20 T40-40-M 試體在側移角 1.5% 時局部挫屈
(資料來源：本研究製作)

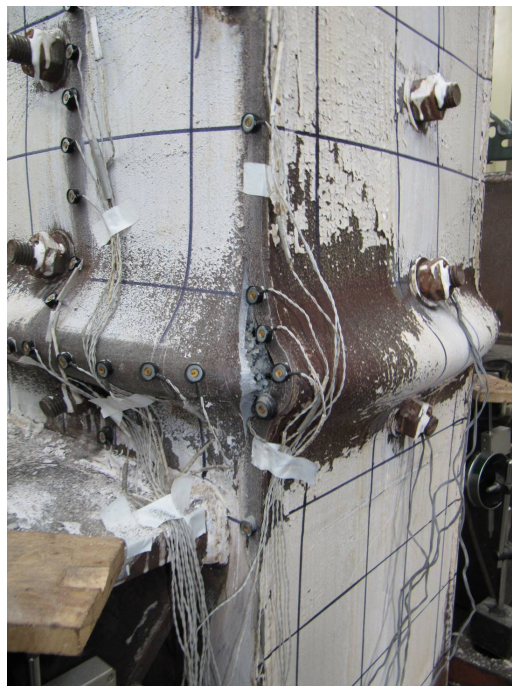


圖 3-21 T40-40-M 試體在側移角 5% 時受壓柱板沿縱向開裂
(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

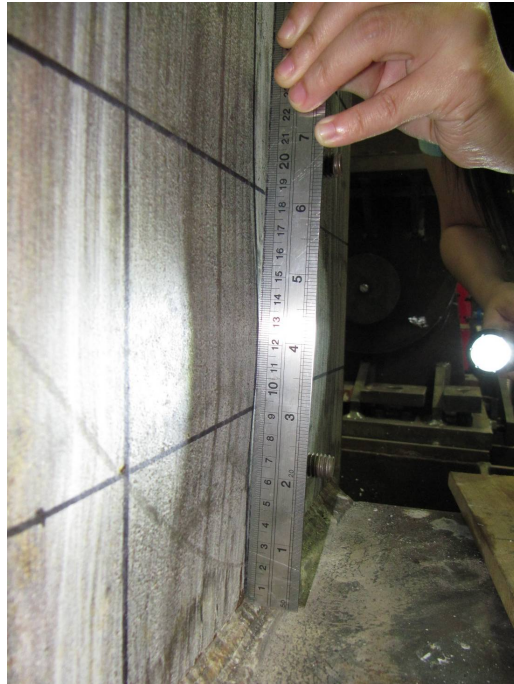


圖 3-22 T40-40-L 試體在側移角 0.75% 時局部挫屈
(資料來源：本研究製作)



圖 3-23 T40-40-L 試體在側移角 4% 時北面螺桿斷掉
(資料來源：本研究製作)



圖 3-24 T40-40-L 試體在側移角 4%時局部挫屈處開裂

(資料來源：本研究製作)

第四章 試驗結果與討論

本研究報告總共完成 9 支試體，各試體之材料試驗強度 (F_{ya} 、 f'_{ca})、試體理論彎矩強度 M_n (對於鋼材採用完全塑性之應力-應變曲線來推導，可參考附錄二)、試驗彎矩強度 M_{exp} 、降伏側移角 θ_{yn} 、極限側移角 θ_u 、塑性轉角 θ_p 及韌性 μ 詳列於表 4-1 (包括致動器施加拉力、推力時之結果以及平均值，例如 M_{exp+} 為致動器施加推力時之試驗彎矩強度， M_{exp-} 為致動器施加拉力時之試驗彎矩強度，而 M_{exp} 為平均試驗彎矩強度)；其中混凝土材料試驗強度 f'_{ca} 係由混凝土圓柱試體壓力試驗的結果取平均求得；降伏側移角 θ_{yn} 之定義為由原點及第一迴圈包絡線上昇段 75% 理論彎矩強度 ($0.75M_n$) 交點連線上理論彎矩強度 M_n 所對應之側移角，如圖 4-1 所示；極限側移角 θ_u 之定義為第一迴圈包絡線下降段對應於 85% 試驗彎矩強度 ($0.85M_{exp}$) 之側移角，如圖 4-1 第四象限所示之 θ_u ，若第一迴圈包絡線下降段並未低於 $0.85M_{exp}$ ，則取為最後之側移角，如圖 4-1 所示第一象限所示之 θ_u ；塑性轉角 θ_p 之定義為極限側移角 θ_u 減去降伏側移角 θ_{yn} 所剩餘之側移角；韌性 μ 之定義為極限側移角 θ_u 除以降伏側移角 θ_{yn} 之比值。本章各節係介紹各試驗參數之試體行為比較與討論。

第一節 不同寬厚比之影響

台灣處於地震帶，填充型箱型柱基本上都要符合耐震的要求，因此柱板的 b/t 宜控制在 42 以下；然而 SRC 規範對填充型箱型柱之寬厚比規定並未提及軸力，本研究利用 R 系列試體來探討高軸力作用下不同柱板寬厚比對構件撓曲韌性之影響。

R48-40 試體為柱板寬厚比 48，承受約 39%標稱軸向強度之軸力 583tf，彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖如圖 4-2所示。R40-20 試體為柱板寬厚比 40，承受約 18.5%標稱軸向強度之軸力 210tf，彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖如圖 4-3所示。R40-40 試體為柱板寬厚比 40，承受約 40%標稱軸向強度之軸力 455tf，彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖如圖 4-4所示。由表 4-1可看出試體 R48-40、R40-20 及 R40-40 之 M_{exp}/M_n 分別為 1.03、1.08 及 1.09，所有試體之理論彎矩強度尚屬保守，而平均塑性轉角 θ_p 分別為 2.92、3.73 及 1.31%rad，由試體 R40-20 及 R40-40 可看出軸力比由約 18%增加至 40%，會使 θ_p 驟降，此與 2010 年陶其駿及蔡煒銘之研究報告結果相符合；而值得注意的是，軸力比約 40%時試體 R48-40 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 4-5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 的試體在軸力比 P/P_0 大於 27%時，塑性轉角容量無法達到 3% rad，寬厚比 32 的試體在軸力比 P/P_0 大於 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 R48-40 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 4-6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

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

成正比，如表 4-2 所示，於層間位移角 +1.5% 時，R40-40 試體的 δ/b 尚比 R48-40 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 R48-40 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 R48-40 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[9]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。

第二節 軸力-彎矩互制曲線

由試驗結果與理論計算之軸力-彎矩互制曲線比較，可判斷理論計算軸力-彎矩互制曲線之合理性及誤差大小，進而可知設計結果是否偏保守、偏安全。

試體柱板寬厚比為 48 及 40 之軸力-彎矩互制曲線圖分別如圖 4-7 及圖 4-8 所示，其中曲線 EPP 為鋼材使用完美彈塑性 (elastic-perfect plastic) 之應力-應變曲線推導來之軸力-彎矩互制曲線，而曲線 FP 則是採用完全塑性 (fully plastic) 之應力-應變曲線來推導。由圖 4-7 及圖 4-8 可看出對於柱板寬厚比 40 及 48 之試體預測結果偏保守。

第三節 圍束繫桿之影響

以本研究第二章第二節的估算方式計算，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 4-1 所示，其彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖如圖 4-9 至圖 4-14 所示。

由表 4-1 可看出試體 T48-40-H、T48-40-M 及 T48-40-L 之彎矩強度比 M_{exp}/M_n 為試體 R48-40 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 分別為試體 R48-40 之 144% 至 156%，撓曲韌性 μ 分別為試體 R48-40 之 111% 至 160%，可知加圍束繫桿確實可為填充型箱型柱增加塑性轉角及撓曲韌性容量，故使用降伏強度 3.5 tf/cm^2 等級之鋼材、 420 kgf/cm^2 標稱抗壓強度之混凝土、柱板寬厚比為 48 之填充型箱型柱，在軸力比約 40% 時，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 4-15 所示，試體 T48-40-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），且繫桿之間寬比為 0.33，則其塑性轉角及撓曲韌性容量應該能達 3% rad。

由表 4-1 也可看出試體 T40-40-H、T40-40-M 及 T40-40-L 之彎矩強度比 M_{exp}/M_n 分別為試體 R40-40 之 119% 至 130%，而塑性轉角 θ_p 分別為試體 R40-40 之 161% 至 297%，撓曲韌性 μ 分別為試體 R40-40 之 165% 至 227%，可知加圍束繫桿確實可為填充型箱型柱增加塑性轉角及撓曲韌性容量，故使用降伏強度 3.5 tf/cm^2 等級之鋼材、 420 kgf/cm^2 標稱抗壓強度之混凝土、柱板寬厚比為 40 之填充型箱型柱，在軸力比約 40% 時，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 4-16 所示，做趨勢線與 3% rad 之水平線 θ_p 交叉得到 σ_{ct} 需求），且繫桿之間寬比為 0.33，則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

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

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及撓曲韌性容量。

表 4-1 試體試驗拉力、推力包絡線結果列表

Specimen	F_{ya}	f'_{ca}	P/P_n	σ_{ct}	M_n	M_{exp+}	M_{exp-}	M_{exp}	M_{exp}	θ_{yn+}	θ_{yn-}	θ_{yn}	θ_{u+}	θ_{u-}	θ_u	θ_{p+}	θ_{p-}	θ_p	μ_+	μ_-	μ
	tf/cm ²	kgf/cm ²			kgf/cm ²	Tf-m	tf-m	tf-m	tf-m	M_n	%rad			%rad			%rad				
R48-40	4.156	519.8	36.7%	-	150	151	-156	153	1.02	0.83	-0.75	0.79	3.95	-3.47	3.71	3.12	-2.73	2.92	4.74	4.61	4.68
R40-20	4.156	519.8	18.5%	-	101	109	-111	110	1.08	1.47	-1.14	1.30	5.14	-4.93	5.03	3.68	-3.79	3.73	3.50	4.33	3.92
R40-40	4.156	519.8	40.1%	-	100	119	-98	109	1.09	0.73	-0.85	0.79	2.24	-1.97	2.10	1.51	-1.12	1.31	3.07	2.31	2.69
T48-40-H	4.156	519.8	38.3%	133.31	149	193	-206	200	1.34	0.65	-0.84	0.74	5.13	-5.27	5.20	4.49	-4.44	4.46	7.92	6.30	7.11
T48-40-M	4.156	519.8	39.3%	66.10	149	172	-176	174	1.17	0.42	-1.05	0.74	4.67	-5.22	4.94	4.25	-4.17	4.21	11.12	4.96	8.04
T48-40-L	4.156	519.8	34.4%	33.52	150	167	-163	165	1.10	0.61	-1.08	0.84	5.39	-5.40	5.39	4.79	-4.31	4.55	8.90	4.98	6.94
T40-40-H	4.156	519.8	40.1%	91.66	100	128	-131	130	1.30	0.74	-0.79	0.76	4.54	-4.80	4.67	3.81	-4.01	3.91	6.16	6.06	6.11
T40-40-M	4.156	519.8	41.0%	44.52	99	121	-115	118	1.19	0.57	-0.86	0.71	3.45	-3.31	3.38	2.88	-2.45	2.66	6.03	3.86	4.95
T40-40-L	4.156	519.8	39.7%	24.43	100	121	-116	118	1.19	0.67	-0.57	0.62	2.81	-2.65	2.73	2.14	-2.08	2.11	4.20	4.63	4.41

(資料來源：本研究製作)

表 4-2 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	δ/b	δ/b	δ/b
	at 1.50%	at -1.50%	at 2.00%	at -2.00%
R40-40	0.0177	0.0065	0.0482	0.0231
R48-40	0.0234	0.0064	0.0448	0.0140

(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

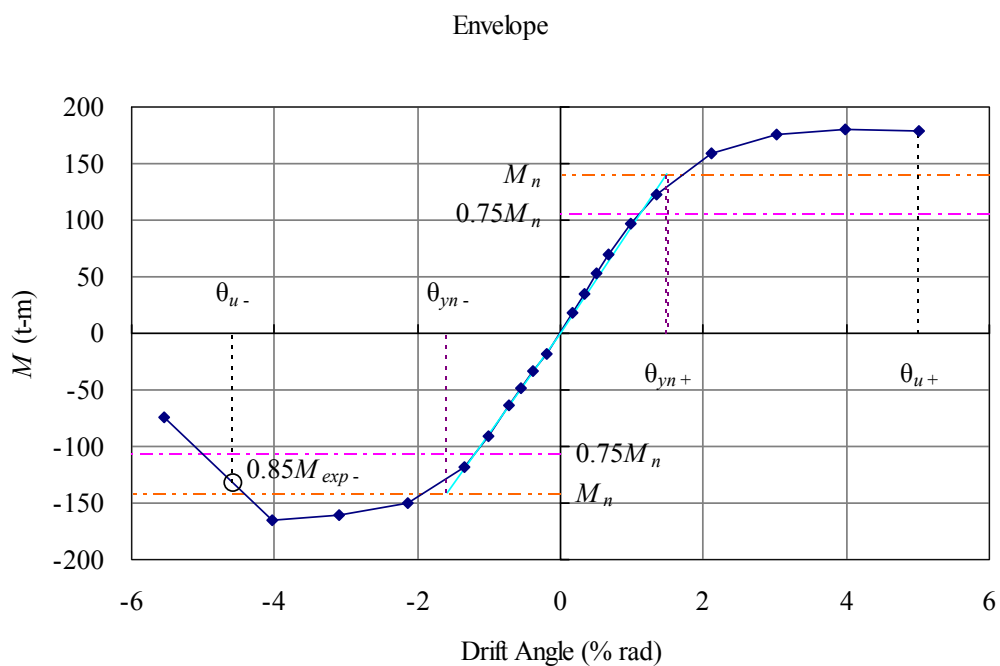


圖 4-1 降伏側移角 θ_{yn} 、極限側移角 θ_u 定義之說明圖
(資料來源：陳正誠等人，2010)

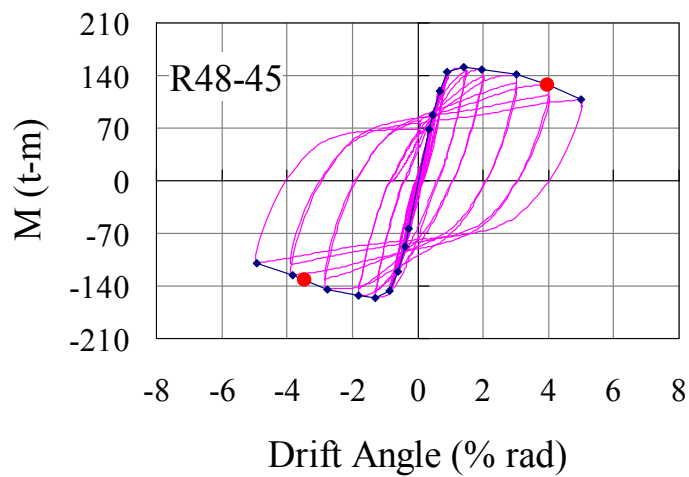


圖 4-2 R48-40 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖
(資料來源：本研究製作)

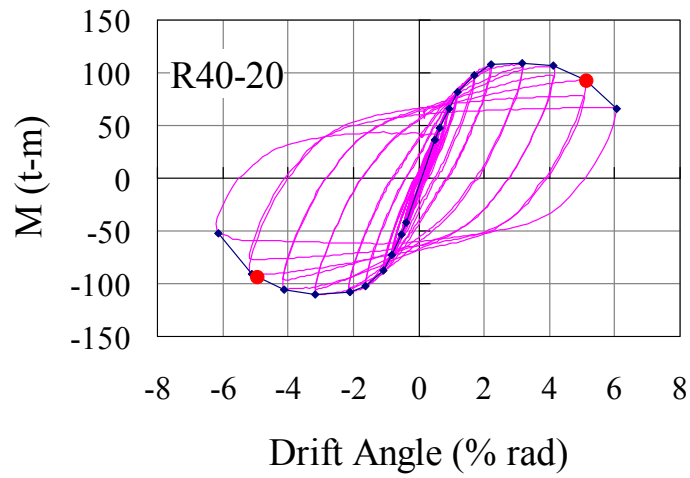


圖 4-3 R40-20 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖
(資料來源：本研究製作)

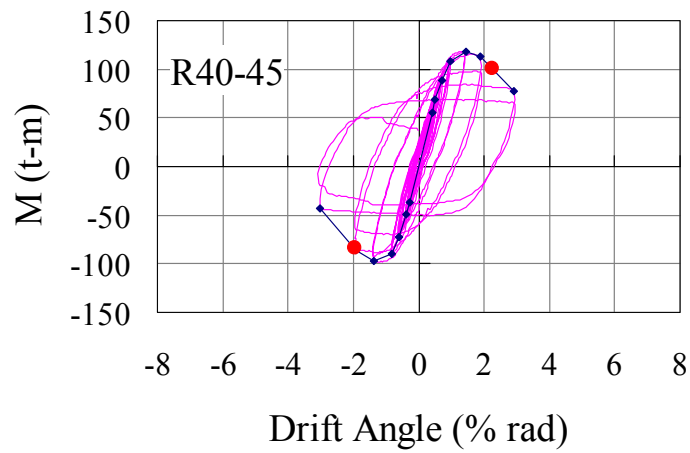


圖 4-4 R40-40 彎矩-側移角遲滯迴圈圖
(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

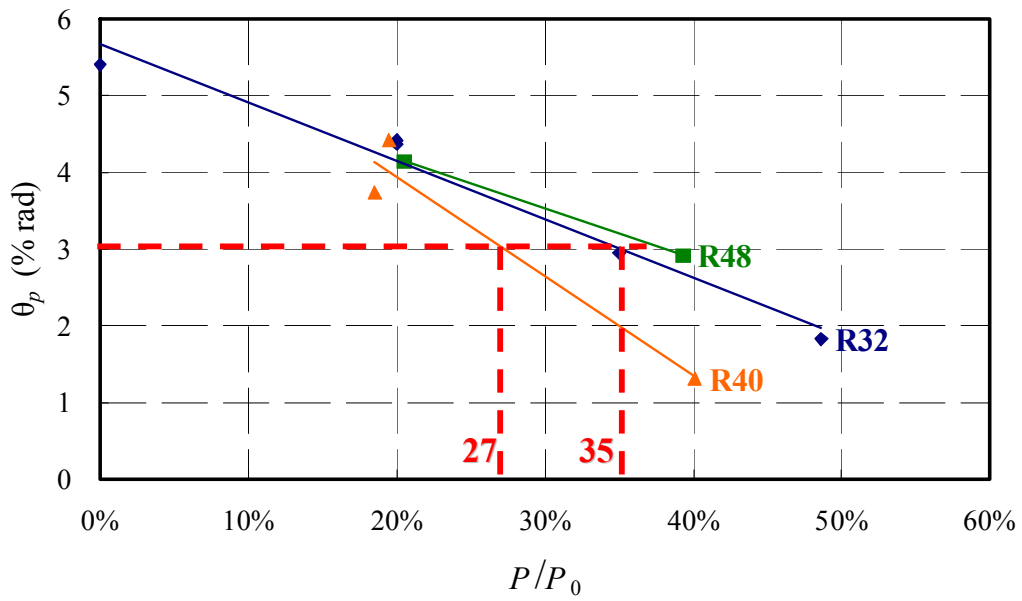


圖 4-5 塑性轉角-軸力比分佈圖

(資料來源：本研究製作)

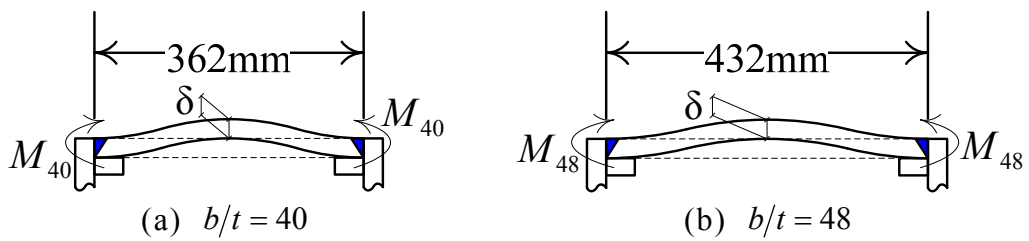


圖 4-6 柱板挫屈後變形及內彎矩示意圖

(資料來源：本研究製作)

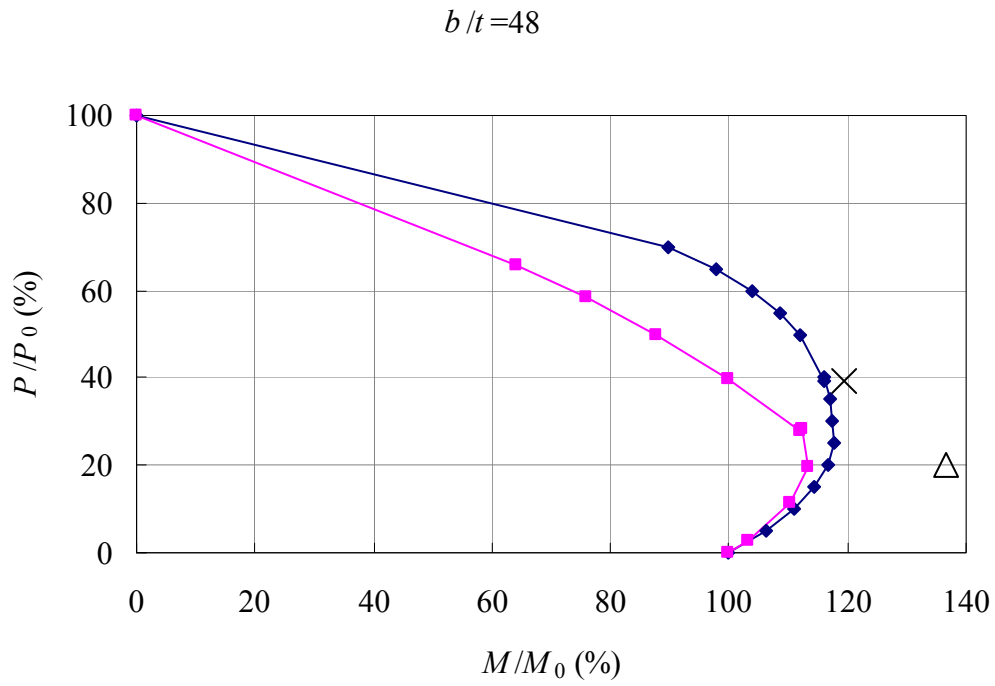


圖 4-7 柱板寬厚比為 48 之軸力-彎矩互制曲線圖
(資料來源：本研究製作)

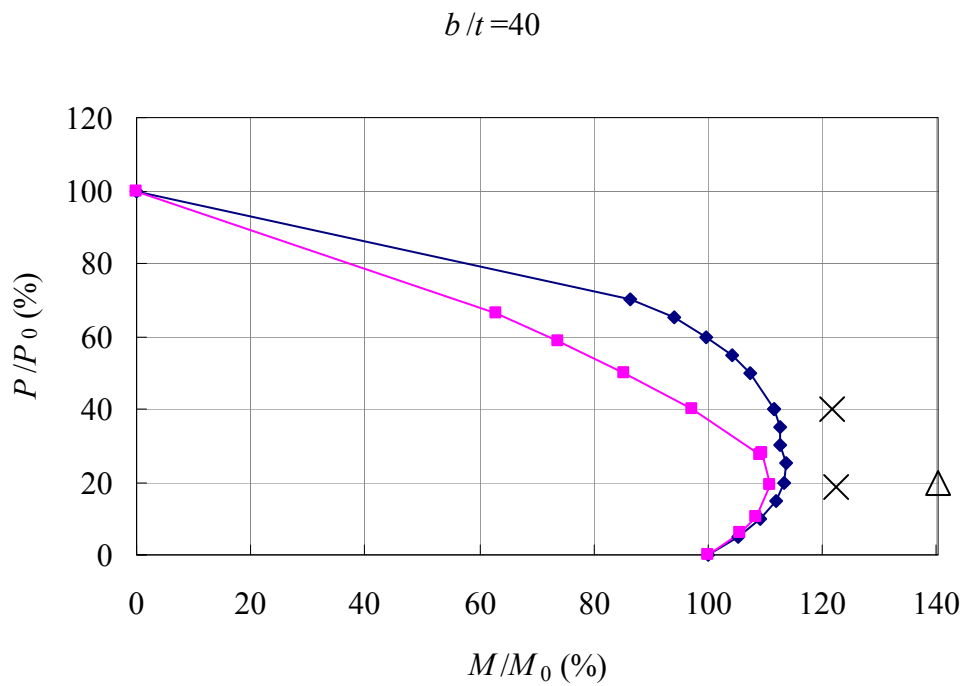


圖 4-8 柱板寬厚比為 40 之軸力-彎矩互制曲線圖
(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

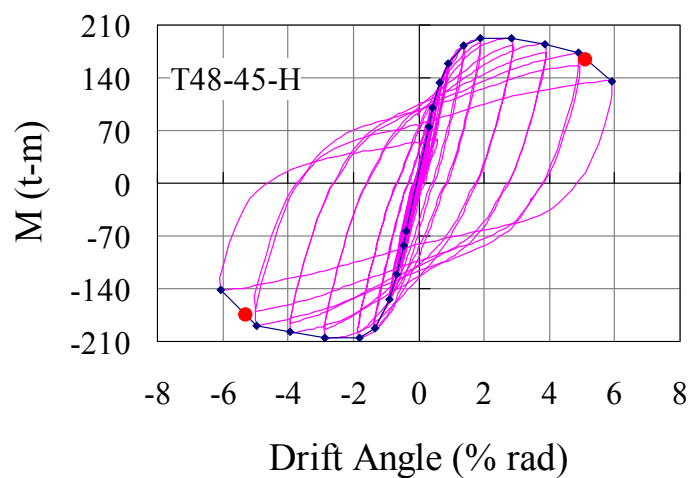


圖 4-9 T48-40-H 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖
(資料來源：本研究製作)

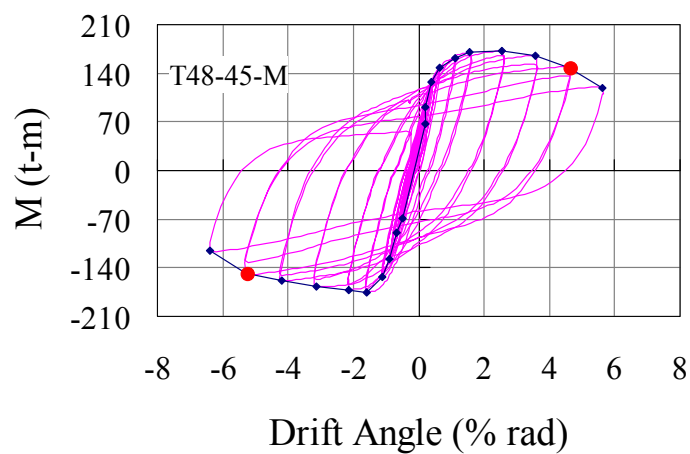


圖 4-10 T48-40-M 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖
(資料來源：本研究製作)

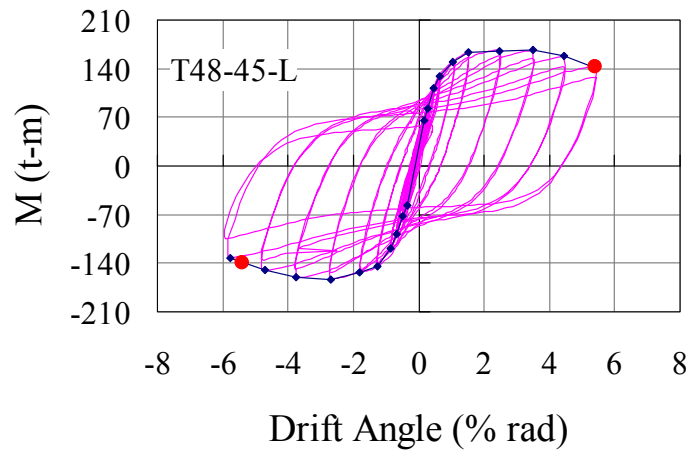


圖 4-11 T48-40-L 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖
(資料來源：本研究製作)

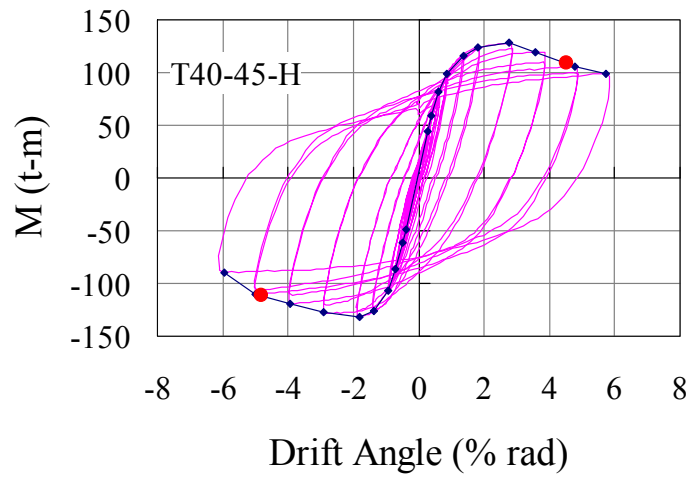


圖 4-12 T40-40-H 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖
(資料來源：本研究製作)

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

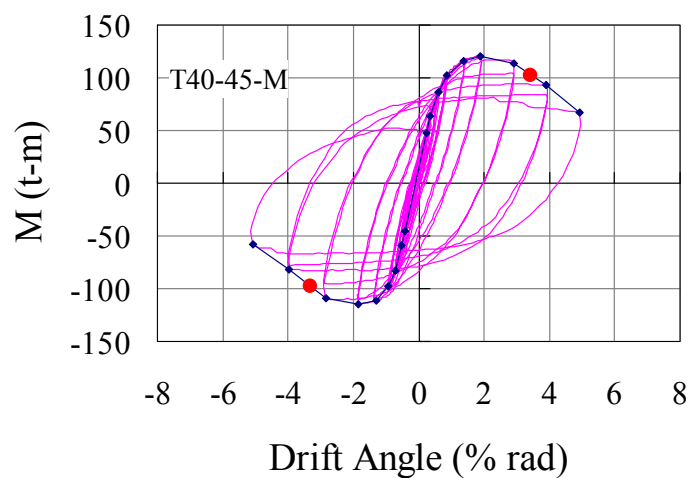


圖 4-13 T40-40-M 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖
(資料來源：本研究製作)

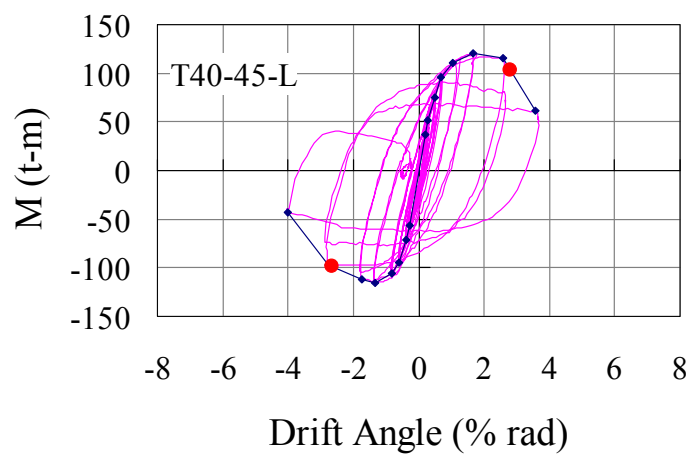


圖 4-14 T40-40-L 彎矩-側移角遲滯迴圈及包絡線圖
(資料來源：本研究製作)

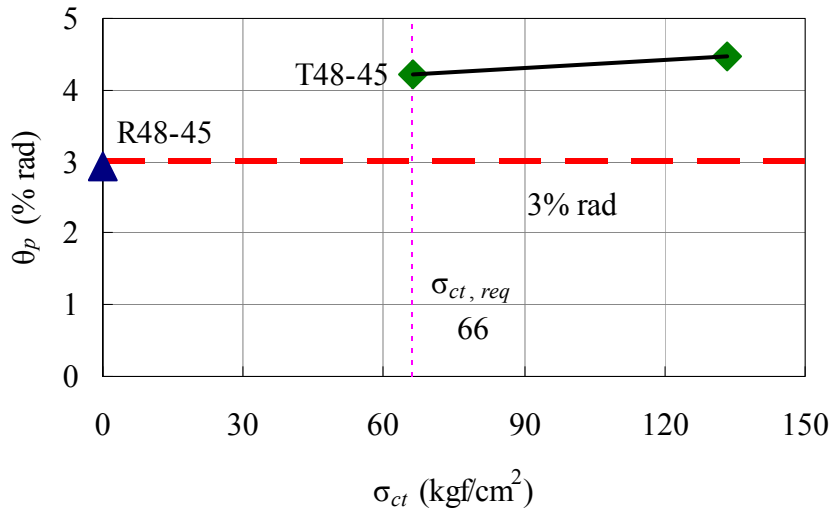


圖 4-15 T 系列中寬厚比 48 試體之繫桿圍束應力與塑性轉角分佈圖
(資料來源：本研究製作)

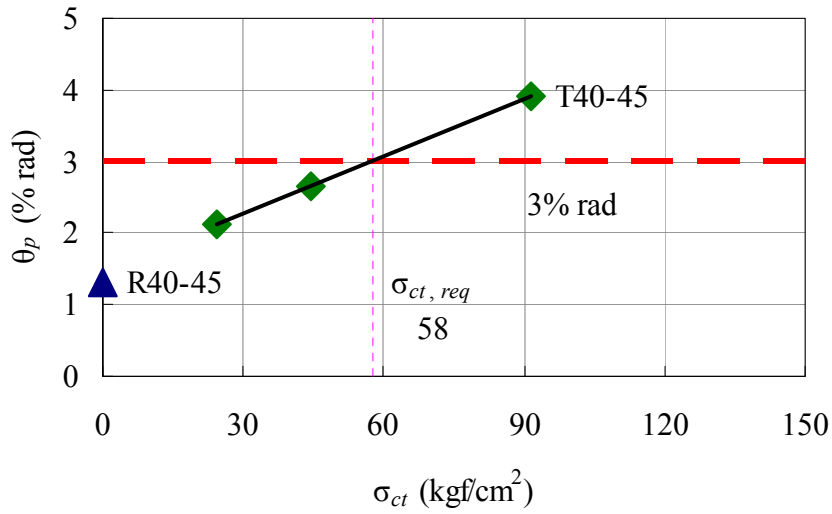


圖 4-16 T 系列中寬厚比 40 試體之繫桿圍束應力與塑性轉角分佈圖
(資料來源：本研究製作)

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究利用二次專家座談會廣納專家意見，歸納出以下結論：

1. 此案提出之圍束繫桿設計方法能使工程師簡易且快速的設計圍束繫桿。
2. 有些建案在一樓的柱子會承受很大的軸力，有些案子一樓柱之軸力有可能達到軸向標稱強度的 40~50%，此研究案在實務上將有所助益。
3. 填充型箱型柱可配合高強度鋼板，應可有效減少材料使用量，建議此課題於未來可另案研究探討之。
4. 防爆拉桿設計所需考慮的因素與圍束繫桿不同，建議另案研究探討之。
5. 剪力釘對於填充型箱型柱的必要性不在本案研究範圍內，過去已有研究發現其實不需配置剪力釘即可有不錯的合成效果，建議另案深入探討之。
6. 建議另案深入研究「高軸力作用下填充型箱型柱柱板寬厚比對塑性轉角容量之影響」。

另外，基於箱型柱鋼板之標稱降伏強度 3.5 tf/cm^2 、 420 kgf/cm^2 標稱抗壓強度混凝土、箱型柱以全滲透銲接製作以及高軸力作用(承受軸力約為軸向強度 40%)之條件下，由實驗結果可歸納出以下結論：

1. 不含繫桿、寬厚比為 40 及 48 之填充型箱型柱試體，在高軸力作用下，其彎矩強度比（實驗彎矩強度除以理論彎矩

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

強度)皆不小於 1 (1.03~1.09)，隨寬厚比減少而增加，但增幅不大。

2. 不含繫桿、寬厚比為 40 及 48 之填充型箱型柱試體，在高軸力作用下，其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 (2.92% rad)。
3. 寬厚比 40 的試體在軸力比大於 27% 時，塑性轉角容量無法達到 3% rad，寬厚比 32 的試體在軸力比大於 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。
4. 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。整體來說，軸力對填充型箱型柱撓曲韌性之影響，需要另案進行一系列實驗或合理的有限元素分析研究，以使 SRC 規範對填充型箱型柱寬厚比規定之修訂有較為明確的依據。
5. 含繫桿、寬厚比為 40 及 48 之填充型箱型柱試體，在高軸力作用下，其彎矩強度比相較於未加繫桿時，提升約 15%，因其增幅不大，且為求保守，建議計算其彎矩強度時，不必考慮繫桿對混凝土提供之圍束效果。
6. 寬厚比為 48 之填充型箱型柱試體加上繫桿後，在高軸力作用下，其塑性轉角容量提升約 48%。若圍束繫桿能對混凝土提供圍束應力達 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。
7. 寬厚比為 40 之填充型箱型柱試體加上繫桿後，在高軸力作用下，其塑性轉角容量提升約 220%，隨計算的圍束應力增加而大幅增加，若圍束繫桿能對混凝土提供圍束應力達

58 kgf/cm² 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。

8. 依據本研究結果，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。

第二節 建議

建議一

立即可行建議：高軸力作用下填充型箱型柱柱板寬厚比對塑性轉角容量之影響

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

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，軸力與軸向強度的比值(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略顯不足；本研究又證實當柱板寬厚比為 40 時，塑性轉角容量隨著軸力比增加而降低，且比柱板寬厚比為 32 時更明顯，另外，當柱板寬厚比為 48 時，塑性轉角容量隨著軸力比增加而降低的幅度反而比柱板寬厚比為 32 及 40 時不明顯，所以有可能可以分成二類型或更多類型，此部分需要更多實驗或是有限元素分析研究來探討之。

建議二

立即可行建議：進行圍束繫桿在高軸力高強度混凝土箱型柱之耐震行為研究

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

經本年度研究試驗證明，標稱降伏強度 3.5 tf/cm^2 鋼板之填充型箱型柱構件，在使用 420 kgf/cm^2 標稱抗壓強度混凝土之條件下，

若要確保良好之撓曲韌性，又要使用超過規範規定之柱板寬厚比（對 3.5 tf/cm^2 鋼板為 42），建議以本文計算螺桿圍束應力之計算方式，可使用能提供的圍束應力達 36 kgf/cm^2 以上之圍束繫桿，應能將柱板寬厚比放寬到結實斷面寬厚比（對 3.5 tf/cm^2 鋼板為 61）。至今尚未有使用高軸力高強度混凝土之填充型箱型柱撓曲行為研究，建議再增加圍束繫桿之後續研究以提出合理之耐震斷面 b/t 限制，以因應不同混凝土標稱強度之情況。

建議三

立即可行建議：推動含繫桿混凝土箱型柱撓曲之防火行為研究

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

由 97 年度研究案專家座談會之內容可知，混凝土之耐火性能比鋼材優良，當含混凝土箱型柱受到火害時，即使箱型柱喪失承載能力，內部之混凝土仍可具有一定之承載能力，故其防火被覆之需求比鋼結構低，值得研究與推廣。

建議四

中長期建議：於鋼骨鋼筋混凝土規範第 3.4 節增加限制

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

當箱型柱鋼板之標稱降伏強度為 3.5 tf/cm^2 時，含混凝土箱型柱之軸力不得超過軸向強度之 25%；在軸力介於軸向強度之 25~35% 時，寬厚比上限應下修為 32。若配置經過合理設計的圍束繫桿，且有相關文獻或研究佐證，則可適當放寬柱板寬厚比限制，放寬幅度可依據相關文獻或研究之結果來決定。

建議五

中長期建議：舉辦含混凝土箱型柱及相關研究課題之成果發表會

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

主辦機關：內政部建築研究所、營建署

協辦機關：中華民國結構工程學會

CFBC 結構系統為比傳統結構系統更安全、更經濟、更環保的新世代結構系統，本研究及後續相關研究對於建築技術有一定程度的助益，可舉辦研討會將與工程實務有關之研究發現推廣至工程界。

附錄一 專家座談會會議紀錄

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計 第一次專家座談會會議紀錄

會議時間：一百年七月七日（星期四）上午 10:00~12:00

會議地點：台灣科技大學工程二館 E2-222 會議室

主持人：陳正誠教授

記錄：黃國倫博士後研究員

出席委員：永峻工程顧問公司 張敬昌協理、曾慶正結構技師事務所 曾慶正技師、蔡東和結構工程技師事務所 蔡東和總經理、聯邦工程顧問股份有限公司 蘇晴茂總經理(依單位筆劃排序)以及【內政部建築研究所】李台光博士、陳柏端博士

列席人員：國立台灣科技大學營建工程系 黃國倫博士後研究、蔡宜樺博士後研究、柯人文博士候選人

會議議程：

1. 主持人進行簡報，簡報講義如附件。
2. 座談與討論
3. 散會

座談內容概要：

一、永峻工程顧問公司 張敬昌協理

1. 目前此案提出之圍束繫桿設計方法能使工程師簡易且快速的設計圍束繫桿。

二、曾慶正結構技師事務所 曾慶正技師：

1. 實驗時試體在軸力及彎矩反覆作用下，應考慮二次效應修正軸力及彎矩。

三、蔡東和結構工程技師事務所 蔡東和總經理：

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

1. 有些建案在一樓的柱子會承受很大的軸力，此研究案在實務上將有所助益。
2. 填充型箱型柱可配合高強度鋼板，應可有效減少材料使用量。

四、聯邦工程顧問股份有限公司 蘇晴茂總經理：

1. 一樓柱承受之軸力通常較大，有些案子一樓柱之軸力有可能達到軸向標稱強度的 40~50%。
2. 圍束繫桿係由施工用之防爆拉桿演變而來，建議也對防爆拉桿提出一些設計方法建議，以供業界參考使用。

五、台科大 陳正誠教授：

1. 對於承受低軸力作用的填充型箱型柱，則在柱可能產生塑鉸的位置（如一樓柱底或是頂樓柱頂），加裝適當設計的圍束繫桿，可以提升其撓曲韌性容量，是值得應用於實務的方法。
2. 待高軸力作用下撓曲反覆載重試驗完成，數據分析也完成之後，應能對圍束繫桿提出更完整之簡易設計方法。
3. 本研究於實驗時之量測儀器配置可用來修正二次效應之影響。
4. 使用高強度鋼板之填充型箱型柱，目前礙於高強度鋼板尚未量產，且實驗用鋼量相對於業界較少，鋼板很難取得，故僅完成一些軸向行為研究，建議此課題於未來可另案研究探討之。
5. 由於防爆拉桿設計所需考慮的因素與圍束繫桿不同，建議另案研究探討之。

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計
第一次專家座談會簽到單

會議時間：一〇一〇年七月七日（星期四）上午 10：00~12：00

會議地點：台灣科技大學工程二館 2 樓-E2-221 會議室

主持人：陳正誠 教授（簽到：陳正誠）

出席委員簽到：

出席單位與人員	簽到
台聯工程顧問股份有限公司 柯鎮洋總經理	
永峻工程顧問公司 張敬昌協理	張敬昌
曾慶正結構技師事務所 曾慶正技師	曾慶正
蔡東和結構工程技師事務所 蔡東和總經理	蔡東和
聯邦工程顧問股份有限公司 蘇晴茂總經理	蘇晴茂

(依公司筆劃排序)

列席人員簽到：

列席人員單位	列席單位與人員簽到	
內政部建築研究所	李台光	
	陳柏瑞	
國立台灣科技大學營建工程系	黃國偏	蔡宜樺

含繫桿填充型箱型柱 高軸力下之撓曲行為與設計 第一次專家座談會

執行單位：台灣科技大學/
生態與防災工程研究中心

計畫主持人：陳正誠 教授

協同主持人：黃國倫 博士

2011/07/07

1

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法
- ✓ 試驗裝置及量測儀器
- ✓ 試體設計
- ✓ 加載歷程

2

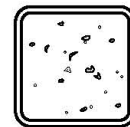
研究緣起與背景

- 施工性與經濟性：填充型**箱型柱** > 填充型圓柱
以填充型箱型柱為研究主題
- 內灌混凝土填充型箱型柱之優點
 - 箱型柱及**梁柱接頭**之**施工容易**且經濟
 - **混凝土回收容易**，可用以生產再生混凝土
 - **不必使用模板**
 - **降低結構材料使用量**，降低環境衝擊

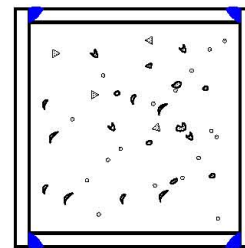
3

CFT vs CFBC

- 填充型鋼管混凝土柱
(Concrete-Filled Tube, CFT)
- 填充型箱型柱
(Concrete-Filled Box Column, CFBC)
- CFT文獻試體尺寸偏小：
 - 柱寬**120~323mm**之間，
柱板厚度**2~9mm**之間。
- CFT文獻較多，
但行為與CFBC不盡相同
- CFBC試驗結果
近年國內建研所已經獲致一些成果
但仍需要進一步探討，以利推廣



無縫鋼管CFT



填充型箱型柱
(陳正誠等人)

4

SRC結構設計規範

□ 材料

- 鋼骨材料之降伏強度不宜大於 3.5 tf/cm^2
- 混凝土之抗壓強度不宜大於 560 kgf/cm^2

□ 使用 3.5 tf/cm^2 等級的鋼材時，耐震構材柱板寬厚比 $b/t \leq 42$

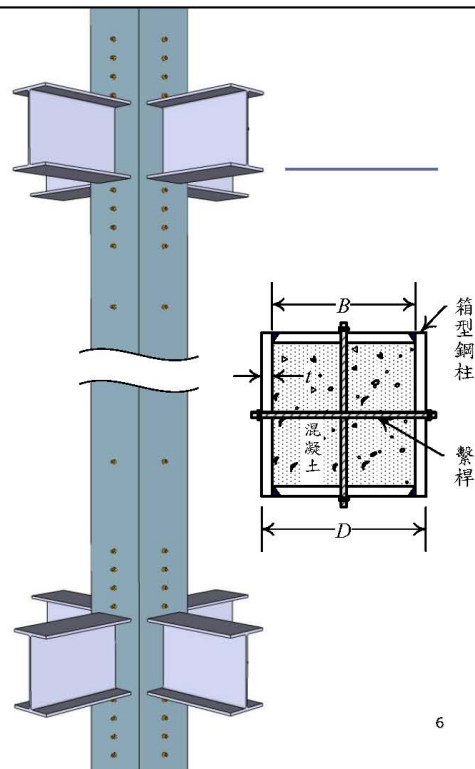
□ 本研究計畫

- 以 3.5 tf/cm^2 等級鋼材，配合 420 kgf/cm^2 級的混凝土
- 寬厚比 $b/t = 40, 48$

5

圍束繫桿

- 業界已使用填充型箱型柱在施工時必須加上繫桿
→ 避免柱板因混凝土壓力向外變形
- 在塑鉸區加上少許繫桿
→ 結構用途之圍束繫桿
- 陳正誠等人，2008~2010已證明圍束繫桿可行



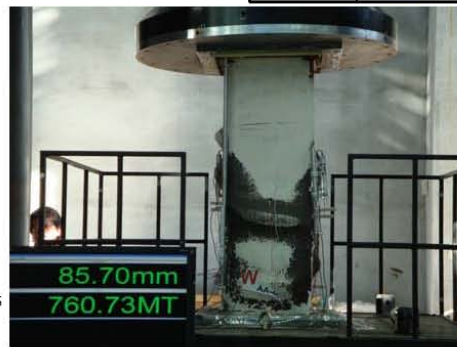
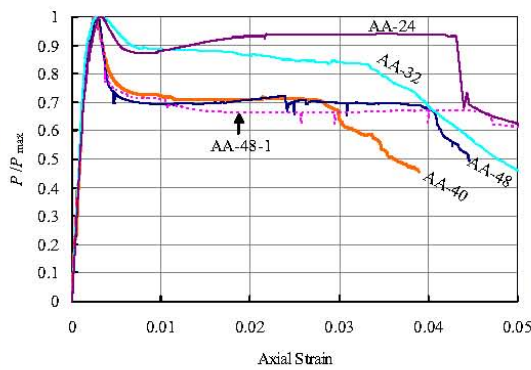
6

含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究

陳正誠等人，2008

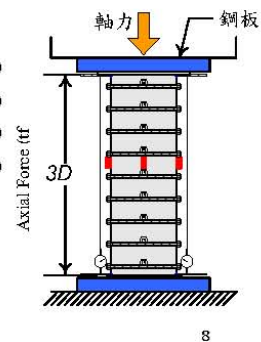
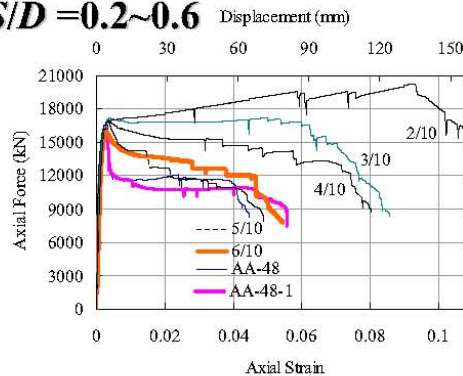
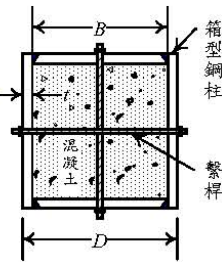
- 3.5 tf/cm²等級鋼材，420kgf/cm²等級混凝土
- 寬厚比 $b/t = 24, 32, 40, 48$
- 計算強度 $P_0 = A_s F_{ya} + 0.85 A_c f_{ca}'$

試體編號	P_{max}/P_0
AA-48	1.04
AA-48-1	1.01
AA-40	1.04
AA-32	1.00
AA-24	1.07



圍束繫桿

- 3.5 tf/cm²級的鋼板
- 420 kgf/cm²級的混凝土
- A490等級的螺桿 $\phi 19$
- 間寬比 $S/D = 0.2 \sim 0.6$

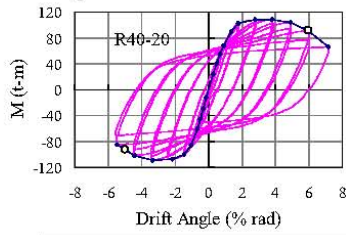


混凝土箱型鋼柱之撓曲韌性行為研究

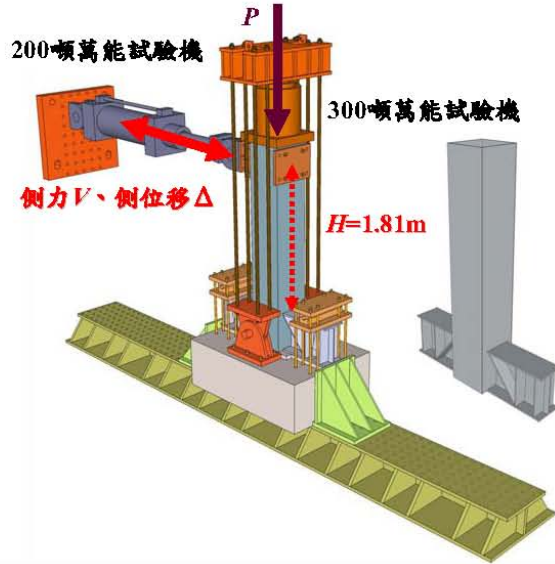
陳正誠等人，2009

- 3.5 tf/cm²等級鋼材
- 420 kgf/cm²級的混凝土

- $P/P_0 \approx 20\%$

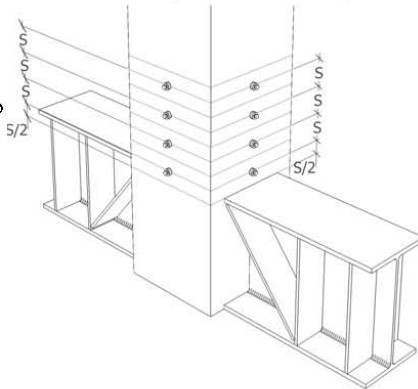
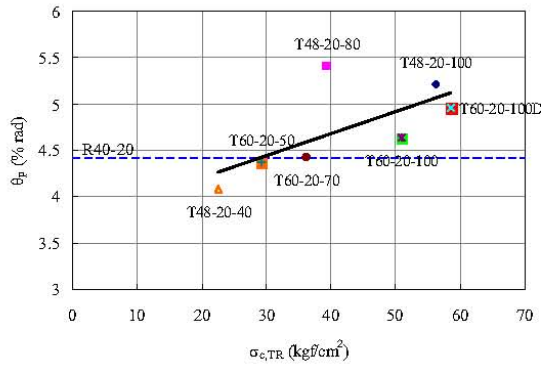
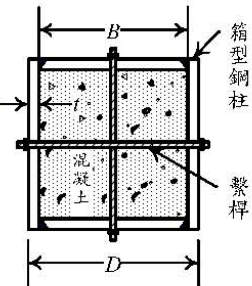


b/t	$\frac{M_{exp}}{M}$	θ_u % rad	θ_p % rad
60	1.15	4.62	3.57
48	1.21	5.23	4.15
40	1.26	5.47	4.42



圍束繫桿

- 3.5 tf/cm²級的鋼板
- 420 kgf/cm²級的混凝土
- A490等級的螺桿φ19
- 間寬比 S/D 約為0.33



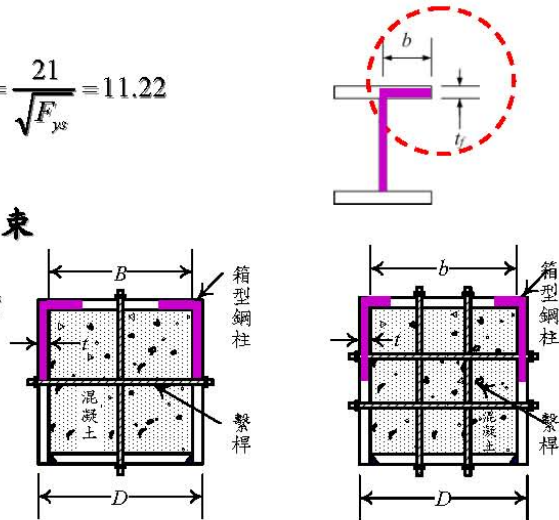
圍束繫桿提供之圍束應力 σ_{ct} (1/2)

□ SRC規範

- H型鋼柱斷面
肢材寬厚比限制 $\lambda_{pd} = \frac{21}{\sqrt{F_{ys}}} = 11.22$

- 兩側鋼板提供有效圍束
之最大範圍
 $11.2t + 0.5t = 11.7t \approx 12t$

- $b/t \leq 48 \rightarrow$ 單排
- $b/t > 48 \rightarrow$ 雙排



11

圍束繫桿提供之圍束應力 σ_{ct} (2/2)

□ 圍束繫桿之圍束應力

$$\sigma_{ct} = \frac{N_t F_t A_b}{S[(N_t D)/(N_t + 1)]} = \begin{cases} \frac{2F_t A_b}{SD} & \text{單排} \\ \frac{3F_t A_b}{SD} & \text{雙排} \end{cases}$$

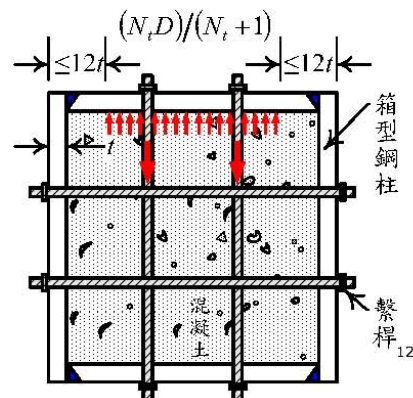
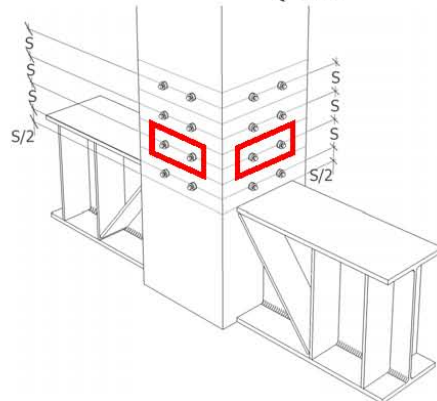
其中

N_t = 柱斷面單方向螺牙桿件數量

$F_t = 0.75 F_u$

F_u = 螺牙桿件拉力強度

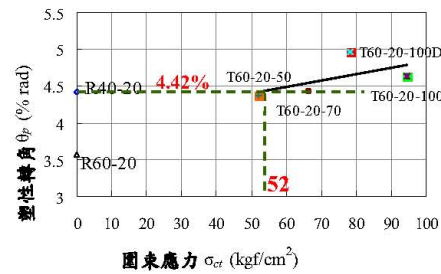
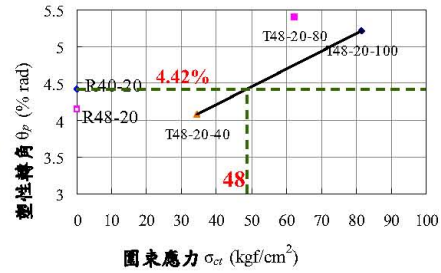
A_b = 螺牙桿件標稱斷面積



12

圍束繫桿設計方法 初步建議(1/2)

- $f_y = 3.5 \text{ tf/cm}^2$
- $f'_c = 420 \text{ kgf/cm}^2$
 - 42 < $b/t \leq 48 \rightarrow$ 單排
 - 48 < $b/t \leq 60 \rightarrow$ 雙排
- 在柱塑性鉸區
(柱頂以下及
柱底以上1.5D範圍)
配置 $S \leq D/3$ 之繫桿



f'_c	$\sigma_{ct,req}$
kgf/cm ²	kgf/cm ²
420	52

13

圍束繫桿設計方法 初步建議(2/2)

- 單排圍束繫桿之圍束應力

$$\sigma_{ct} = \frac{2F_t A_b}{SD} \geq \sigma_{ct,req} \Rightarrow \phi F_t A_b \geq \frac{1}{2} SD \sigma_{ct,req}$$

- 雙排圍束繫桿之圍束應力

$$\sigma_{ct} = \frac{3F_t A_b}{SD} \geq \sigma_{ct,req} \Rightarrow \phi F_t A_b \geq \frac{1}{3} SD \sigma_{ct,req}$$

- 由鋼構LSD設計規範查
表10.3-2挑選適當 $\phi F_t A_b$
(或表C10.3-2)

f'_c	$\sigma_{ct,req}$
kgf/cm ²	kgf/cm ²
420	52



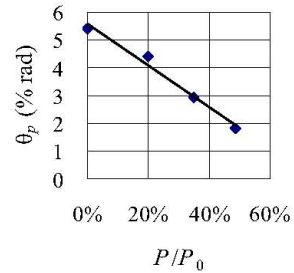
14

在不同軸力下填充混凝土箱型鋼柱之撓曲行為研究(1/2)

陶其駿、蔡煒銘，2010

□ 柱板寬厚比為32之填充型箱型柱

□ 在高軸力作用下
塑性轉角容量 θ_p 明顯下降



Specimen	D mm	t mm	b/t	F_y tf/cm ²	f'_c tf/cm ²	$\frac{P}{P_0}$	M tf-m	M_{exp} tf-m	$\frac{M_{exp}}{M}$	θ_p % rad
R32-00	310	9	32.4	4.08	0.327	0%	55.4	67	1.21	5.41
R32-20	310	9	32.4	4.08	0.300	20%	57.5	69	1.21	4.42
R32-35	310	9	32.4	4.08	0.308	35%	56.4	68	1.20	2.95
R32-50	310	9	32.4	4.08	0.322	49%	54.3	65	1.19	1.83

研究方法

□ 文獻之收集與整理

■ 避免重複

□ 柱試體之撓曲行為實驗

□ 基本材料實驗

■ 混凝土受壓、鋼板及螺桿受拉之應力-應變曲線

□ 規範條文適用性評估

□ 舉辦專家座談會

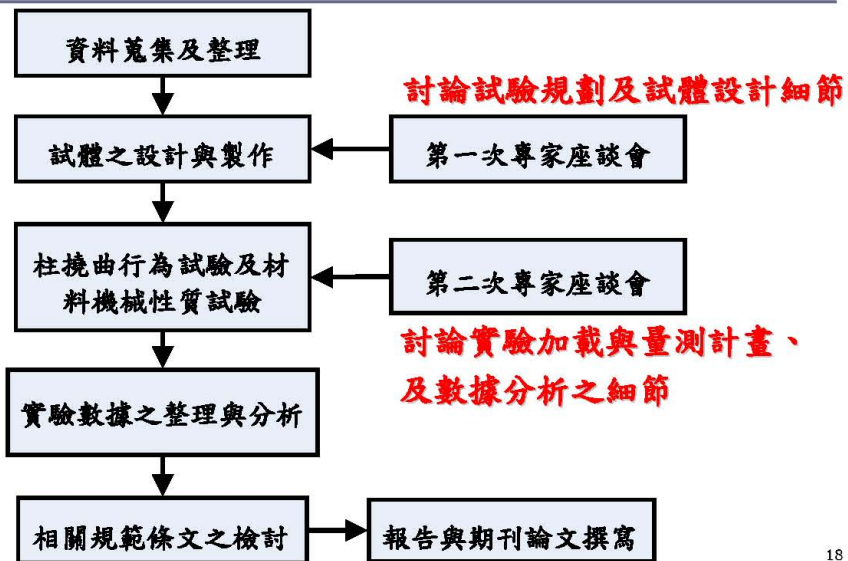
□ 報告及期刊論文之撰寫

規範條文適用性評估

- 評估高軸力作用下填充型箱型柱之適用性
- 評估高軸力作用下耐震構材柱板寬厚比規定的合理性
- 以圍束繫桿來提升韌性
 - 評估其可行性
 - 提出設計方法之建議

17

研究流程圖



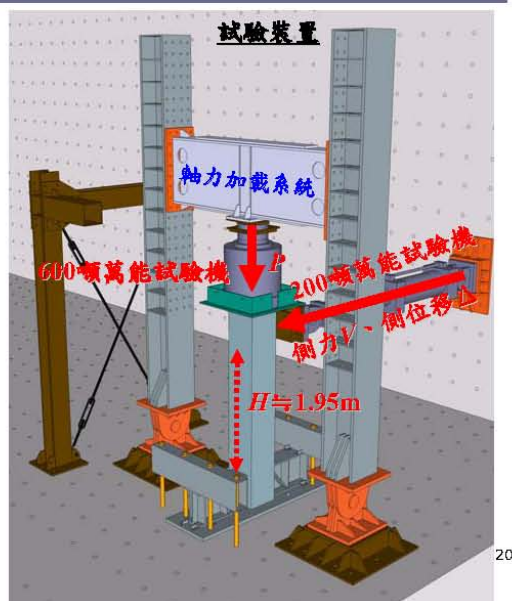
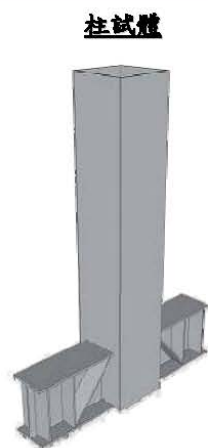
18

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法
- ✓ 試驗裝置及量測儀器
- ✓ 試體設計
- ✓ 加載歷程

19

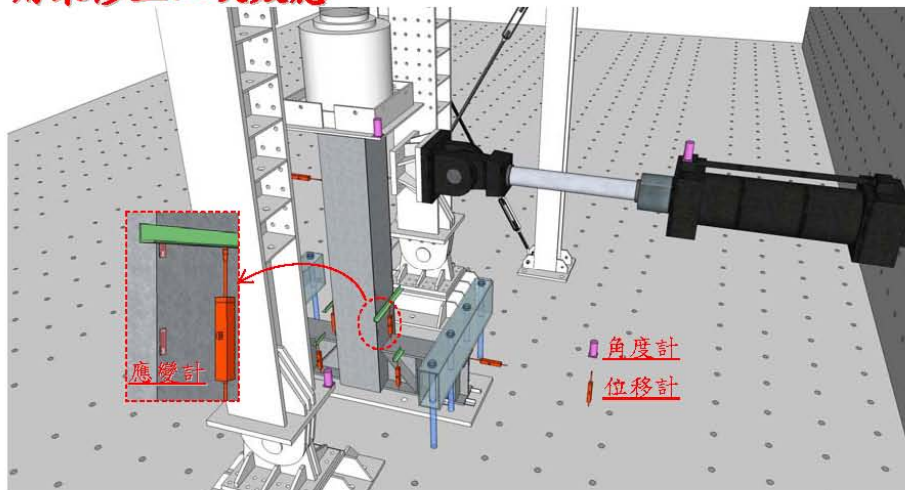
柱試體之撓曲反覆載重實驗



20

撓曲反覆載重實驗之量測儀器配置

用來修正二次效應



21

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法
- ✓ 試驗裝置及量測儀器
- ✓ **試體設計**
- ✓ 加載歷程

22

柱試體之反覆載重實驗

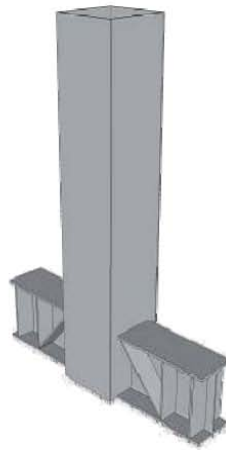
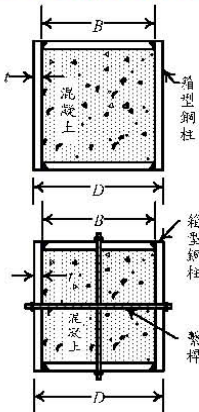
□ 預計進行8支柱試體之反覆載重試驗

□ 約3.5 tf/cm²等級鋼材
約420 kgf/cm²級的混凝土

□ $P/P_{n0} \cong 45\%$

□ R系列，2支

□ T系列，6支



23



24

試體規劃 **共8支柱試體**

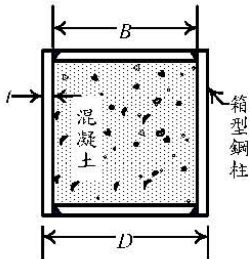
	Specimen	D	t	b	F_y	f_c	P	P	S	S	d_t	材質
		mm	mm	t	tf/cm ²	tf/cm ²	tf	P_0	D	mm	mm	
R	R48-45	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	-	-	-	-
	R40-45	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	-	-	-	-
T	T48-45-H	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	25	A490
	T48-45-M	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	19	A490
	T48-45-L	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	13	A490
	T40-45-H	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	25	SS400
	T40-45-M	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	19	SS400
	T40-45-L	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	13	SS400

25

R系列
2支

$\Rightarrow \lambda_{pd}$

- $b/t=40, 48$
- $D=38\sim 45\text{cm}$
- $t=9\text{mm}$



箱型鋼柱

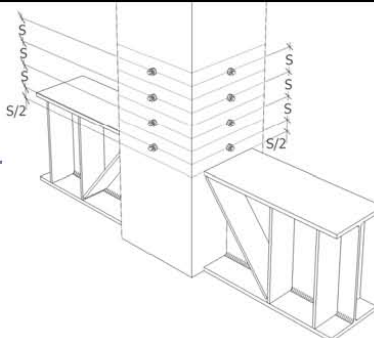
Specimen	D	t	b	F_{ya}	f_{ca}	P	P
	mm	mm	t	tf/cm ²	tf/cm ²	tf	P_0
R48-45	450	9	48	3.5	0.42	550	45%
R40-45	380	9	40	3.5	0.42	421	45%

26

T系列 6支

- $b/t=40, 48$
- $S/D \approx 0.33$
- 單排繫桿

材質	F_{ut} tf/cm ²
A490	10.5
SS400	4.10



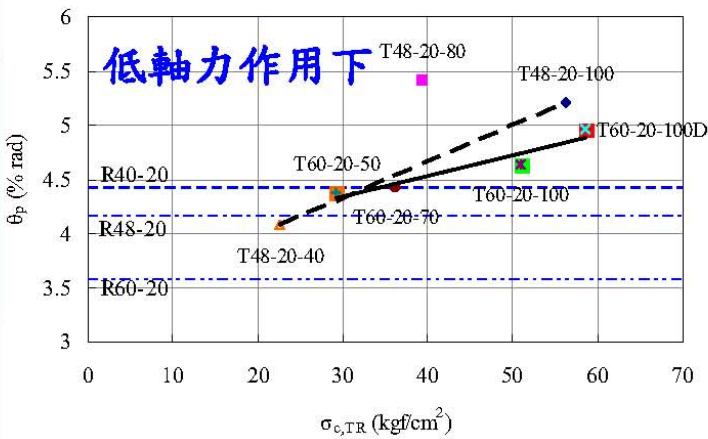
Specimen	D mm	t mm	b t	F_y tf/cm ²	f_c tf/cm ²	P tf	P/P_0	S D	S mm	d_t mm	材質	圍束力
T48-45-H	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	25	A490	大
T48-45-M	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	19	A490	中
T48-45-L	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	13	A490	小
T40-45-H	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	25	SS400	大
T40-45-M	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	19	SS400	中
T40-45-L	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	13	SS400	小

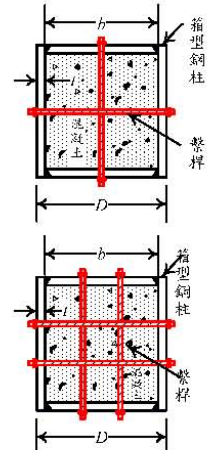
?

27

圍束應力 σ_{ct} VS 塑性轉角 θ_p

低軸力作用下





高軸力作用下也需要迴歸出圍束應力需求

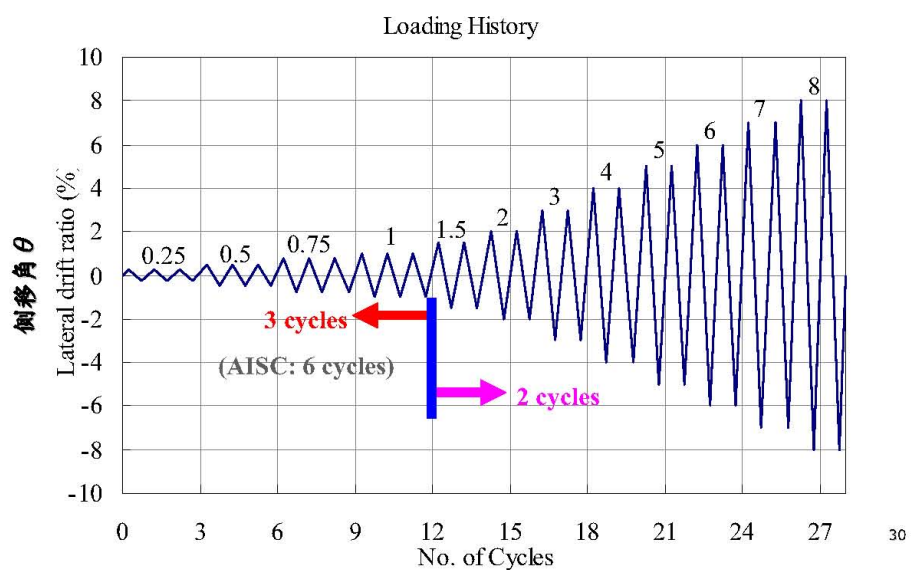
28

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法
- ✓ 試驗裝置及量測儀器
- ✓ 試體設計
- ✓ 加載歷程

29

加載歷程 (參考AISC2005)



謝謝聆聽！敬請指教！

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計 第二次專家座談會會議紀錄

會議時間：一百年十一月三十日（星期三）下午 2:00~3:30

會議地點：台灣科技大學國際大樓 IB707 會議室

主持人：陳正誠教授

記錄：黃國倫博士後研究員

出席委員：中國鋼鐵結構股份有限公司 蔡武松經理、台北市結構技師工會 陳正平技師、台聯工程顧問股份有限公司 柯鎮洋總經理、永峻工程顧問公司 鍾俊宏協理、國立交通大學土木工程學系 陳誠直教授、理成工業股份有限公司 梁文德副總經理（依單位筆劃排序）以及【內政部建築研究所】陶其駿主任、李台光博士、陳柏端博士、詹鎰慎研發替代役

列席人員：黃國倫博士後研究、蔡宛昀碩士生

會議議程：

1. 主持人進行簡報，簡報講義如附件。
2. 座談與討論
3. 散會

座談內容概要：

六、中國鋼鐵結構股份有限公司 蔡武松經理：

1. 本案試體內部並未使用剪力釘，實際彎矩強度已經比計算彎矩強度還保守，但是業界使用填充型箱型柱時，常在箱型柱內部使用大量剪力釘，是否可以建議工程界使用填充型箱型柱時不需使用剪力釘。

七、台北市結構技師工會 陳正平技師：

1. 圍束繫桿具有剪力釘的效果，對合成效應有一定的幫助，且能有效提升填充型箱型柱的撓曲韌性容量。

八、台聯工程顧問股份有限公司 柯鎮洋總經理：

1. 一樓內柱有些軸力會超過 $0.25P_0$ ，本案的研究成果對工程實務有很大的幫助。

九、永峻工程顧問公司 鍾俊宏協理：

1. 本案建議單排與雙排圍束繫桿的柱板寬厚比界限為 48，而實務上用單排與雙排防爆拉桿的柱板寬厚比界限比 48 還小，建議單排與雙排圍束繫桿的柱板寬厚比界限也可再小一些。

十、國立交通大學土木工程學系 陳誠直教授：

1. R48-40 比 R40-40 韌性好可能是尺寸效應的影響，或是因為挫屈時角落兩側鋼板都向外挫屈，寬厚比較小時應力集中的影響較大。
2. R48-40 比 R40-40 韌性好，表示後續仍有需要多做些試驗來釐清填充型箱型柱有較大柱板寬厚比在高軸力作用下能提供多少塑性轉角容量。

十一、理成工業股份有限公司 梁文德副總經理：

1. 業界使用防爆拉桿也配置得很密，建議未來對防爆拉桿能有所研究讓業界有依據可循。
2. 業界常在箱型柱內部使用大量剪力釘，有時會配置得很密，增加很多成本，且讓人對箱型柱內剪力釘在柱內灌漿時會否造成混凝土粒料分離這件事有疑慮，若不使用剪力釘即可達到完全合成效果，可減少業界成本，將來回收也較容易。

十二、台科大 陳正誠教授：

1. 剪力釘對於填充型箱型柱的必要性不在本案研究範圍內，過去已有研究發現其實不需配置剪力釘即可有不錯的合成效果，建議另案深入探討之。
2. 本案寬厚比為 48 之試體使用單排圍束繫桿及增加

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

塑性轉角容量有顯著的效果，爰建議單排及雙排圍束繫桿之寬厚比界線仍維持 48 即可，工程師可自行調降。

3. 建議另案深入研究「高軸力作用下填充型箱型柱柱板寬厚比對塑性轉角容量之影響」及「填充型箱型柱防爆拉桿之設計」。

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計
第二次專家座談會簽到單

會議時間：一百年十一月三十日（星期三）下午 2：00~3：30

會議地點：台灣科技大學國際大樓 IB707 會議室

主持人：陳正誠 教授（簽到：陳正誠）

出席委員簽到：

出席單位與人員	簽到
大彥工程顧問股份有限公司 張宏成總經理	
中國鋼鐵結構股份有限公司 蔡武松經理	<u>蔡武松</u>
台北市結構技師工會 陳正平技師	<u>陳正平</u>
台聯工程顧問股份有限公司 柯鎮洋總經理	<u>柯鎮洋</u>
永峻工程顧問公司 鍾俊宏協理	<u>鍾俊宏</u>
國立交通大學土木工程學系 陳誠直教授	<u>陳誠直</u>
理成工業股份有限公司 梁文德副總經理	<u>梁文德</u>
蔡東和結構工程技師事務所 蔡東和總經理	

(依公司筆劃排序)

列席人員簽到：

列席人員單位	列席單位與人員簽到		
內政部建築研究所	<u>陶其取</u>	<u>陳柏端</u>	<u>詹鏡楨</u>
			<u>李台光</u>
國立台灣科技大學營建工程系	<u>蔡冠時</u>	<u>黃國倫</u>	

含繫桿填充型箱型柱 高軸力下之撓曲行為與設計 第二次專家座談會簡報

執行單位：台灣科技大學/
生態與防災工程研究中心

計畫主持人：陳正誠 教授

協同主持人：黃國倫 博士 2011/11/30

1

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法及進度說明
- ✓ 試體設計及撓曲試驗
- ✓ 專家座談會
- ✓ 試驗結果
- ✓ 結論與建議

2

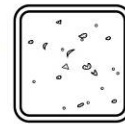
研究緣起與背景

- 施工性與經濟性：填充型**箱型柱** > 填充型圓柱
以填充型箱型柱為研究主題
- 內灌混凝土填充型箱型柱之優點
 - 箱型柱及**梁柱接頭**之**施工容易**且經濟
 - **混凝土回收容易**，可用以生產再生混凝土
 - **不必使用模板**
 - **降低結構材料使用量**，降低環境衝擊

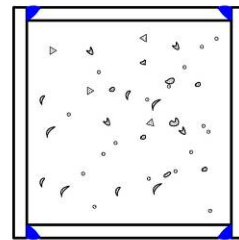
3

CFT vs CFBC

- 填充型鋼管混凝土柱
(Concrete-Filled Tube, CFT)
- 填充型箱型柱
(Concrete-Filled Box Column, CFBC)
- CFT文獻試體尺寸偏小：
 - 柱寬**120~323mm**之間，
柱板厚度**2~9mm**之間。
- CFT文獻較多，
但行為與CFBC不盡相同
- CFBC試驗結果
近年國內建研所已經獲致一些成果
但仍需要進一步探討，以利推廣



無縫鋼管CFT



填充型箱型柱
(陳正誠等人)

4

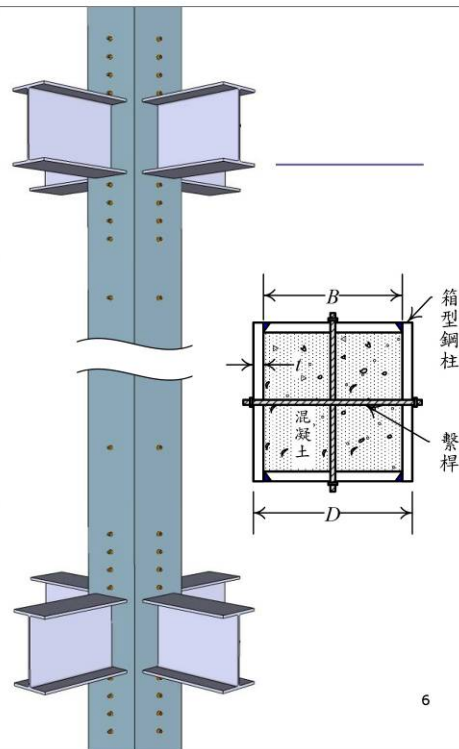
SRC結構設計規範

- 材料
 - 鋼骨材料之降伏強度不宜大於**3.5 tf/cm²**
 - 混凝土之抗壓強度不宜大於**560 kgf/cm²**
- 使用**3.5 tf/cm²**等級的鋼材時，耐震構材柱板寬厚比 **$b/t \leq 42$**
- 本研究計畫
 - 以**3.5 tf/cm²**等級鋼材，配合**420 kgf/cm²**級的混凝土
 - 寬厚比 **$b/t = 40, 48$**
 - 不加剪力釘

5

圍束繫桿

- 業界已使用填充型箱型柱在施工時必須加上繫桿
→ 避免柱板因混凝土壓力向外變形
- 在塑鉸區加上少許繫桿
→ 結構用途之**圍束繫桿**
- 陳正誠等人，2008~2010已證明圍束繫桿可行

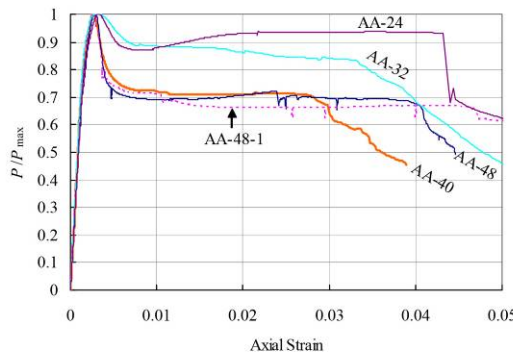


6

含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究 陳正誠等人，2008

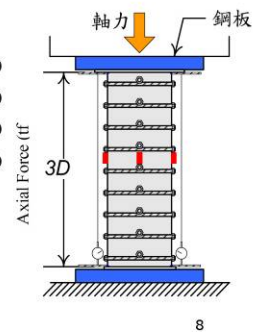
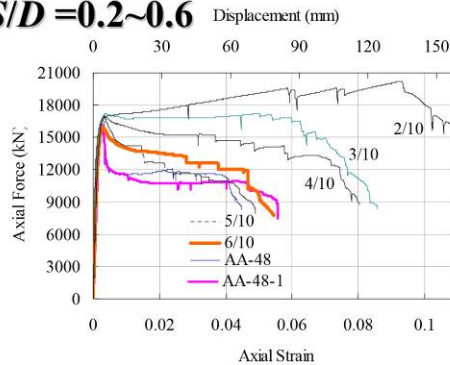
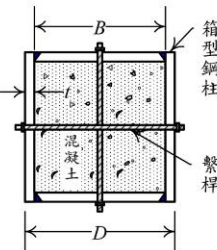
- 3.5 tf/cm²等級鋼材，420kgf/cm²等級混凝土
- 寬厚比 $b/t = 24, 32, 40, 48$
- 計算強度 $P_0 = A_s F_{ya} + 0.85 A_c f_{ca}'$

試體 編號	P_{max}/P_0
AA-48	1.04
AA-48-1	1.01
AA-40	1.04
AA-32	1.00
AA-24	1.07



圍束繫桿

- 3.5 tf/cm²級的鋼板
- 420 kgf/cm²級的混凝土
- A490等級的螺桿 $\phi 19$
- 間寬比 $S/D = 0.2 \sim 0.6$

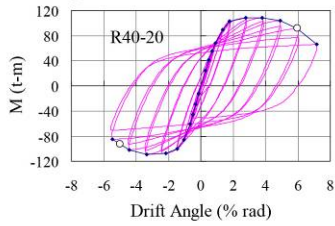


混凝土箱型鋼柱之撓曲韌性行為研究

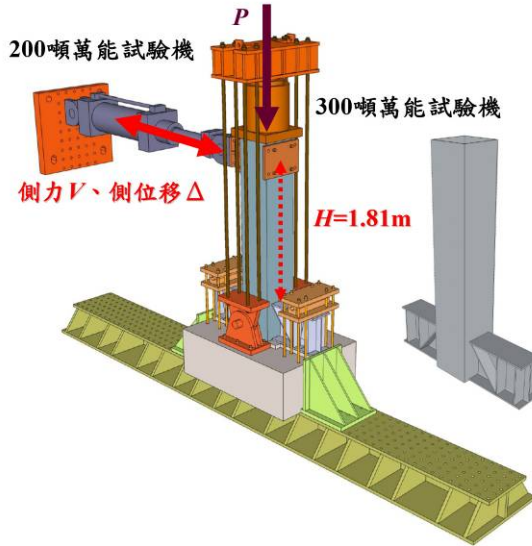
陳正誠等人，2009

- 3.5 tf/cm²等級鋼材
- 420 kgf/cm²級的混凝土

- $P/P_0 \approx 20\%$

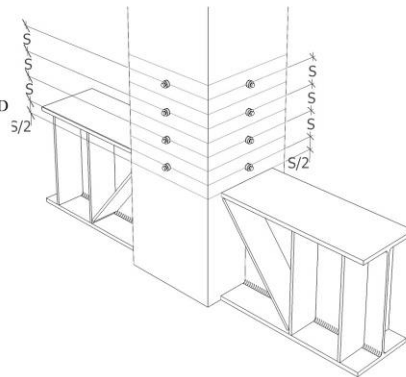
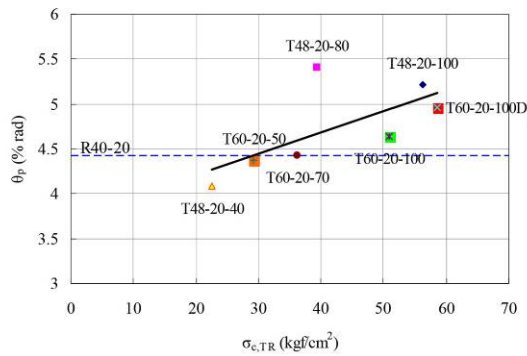
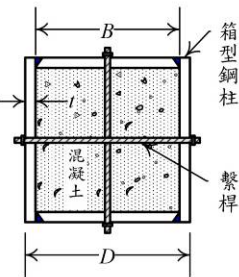


b/t	$\frac{M_{exp}}{M}$	θ_u % rad	θ_p % rad
60	1.15	4.62	3.57
48	1.21	5.23	4.15
40	1.26	5.47	4.42



圍束繫桿

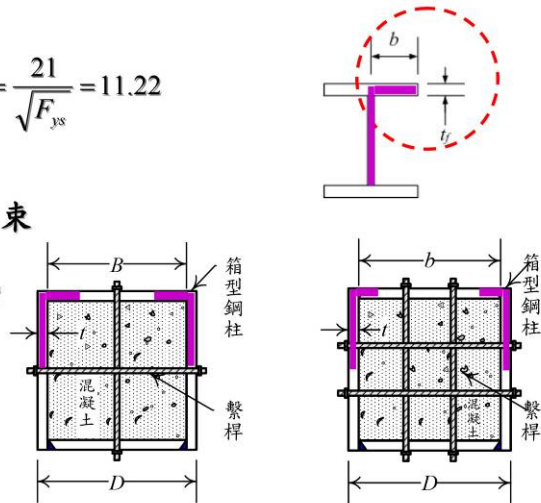
- 3.5 tf/cm²級的鋼板
- 420 kgf/cm²級的混凝土
- A490等級的螺桿φ19
- 間寬比 S/D 約為0.33



圍束繫桿提供之圍束應力 σ_{ct} (1/2)

□ SRC規範

- H型鋼柱斷面 肢材寬厚比限制 $\lambda_{pd} = \frac{21}{\sqrt{F_{ys}}} = 11.22$
- 兩側鋼板提供有效圍束之最大範圍 $11.2t + 0.5t = 11.7t \approx 12t$
- $b/t \leq 48 \rightarrow$ 單排
- $b/t > 48 \rightarrow$ 雙排



11

圍束繫桿提供之圍束應力 σ_{ct} (2/2)

□ 圍束繫桿之圍束應力

$$\sigma_{ct} = \frac{N_t F_{ut} A_e}{S[(N_t D)/(N_t + 1)]} = \begin{cases} \frac{2F_{ut} A_e}{SD} & \text{單排} \\ \frac{3F_{ut} A_e}{SD} & \text{雙排} \end{cases}$$

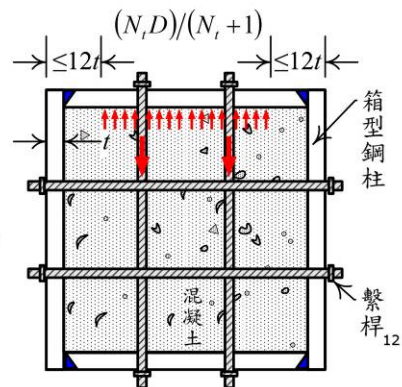
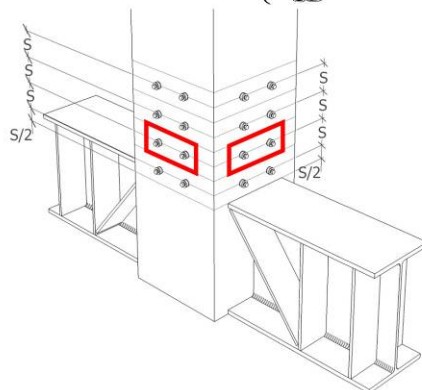
其中

N_t = 柱斷面單方向螺桿數量

F_{ut} = 螺桿實際抗拉強度

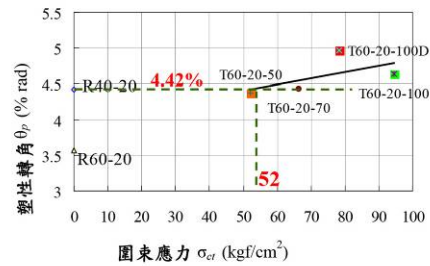
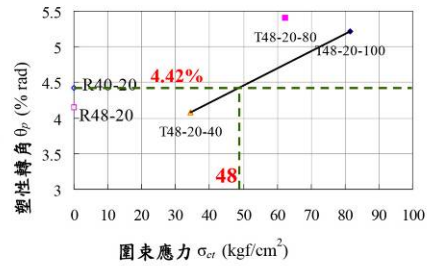
$A_e = 0.75 A_b$

A_b = 螺桿標稱斷面積



圍束繫桿設計方法 初步建議(1/2)

- $f_y = 3.5 \text{ tf/cm}^2$
- $f'_c = 420 \text{ kgf/cm}^2$
 - 42 < $b/t \leq 48 \rightarrow$ 單排
 - 48 < $b/t \leq 60 \rightarrow$ 雙排
- $P/P_0 \doteq 20\%$
- 在柱塑性鉸區
(柱頂以下及
柱底以上1.5D範圍)
配置 $S \leq D/3$ 之繫桿



f'_c	$\sigma_{ct,req}$
kgf/cm ²	kgf/cm ²
420	52

13

圍束繫桿設計方法 初步建議(2/2)

- 單排圍束繫桿之圍束應力

$$\phi F_t A_b \geq \frac{1}{2} SD \sigma_{ct,req}$$

- 雙排圍束繫桿之圍束應力

$$\phi F_t A_b \geq \frac{1}{3} SD \sigma_{ct,req}$$

- 由鋼構LSD設計規範查
表10.3-2挑選適當 $\phi F_t A_b$
(或表C10.3-2)

f'_c	$\sigma_{ct,req}$
kgf/cm ²	kgf/cm ²
420	52

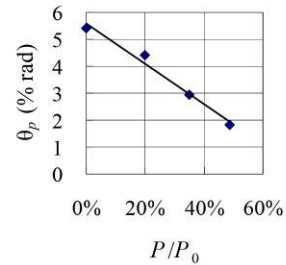


14

在不同軸力下填充混凝土箱型鋼柱 之撓曲行為研究(1/2)

陶其駿、蔡煒銘，2010

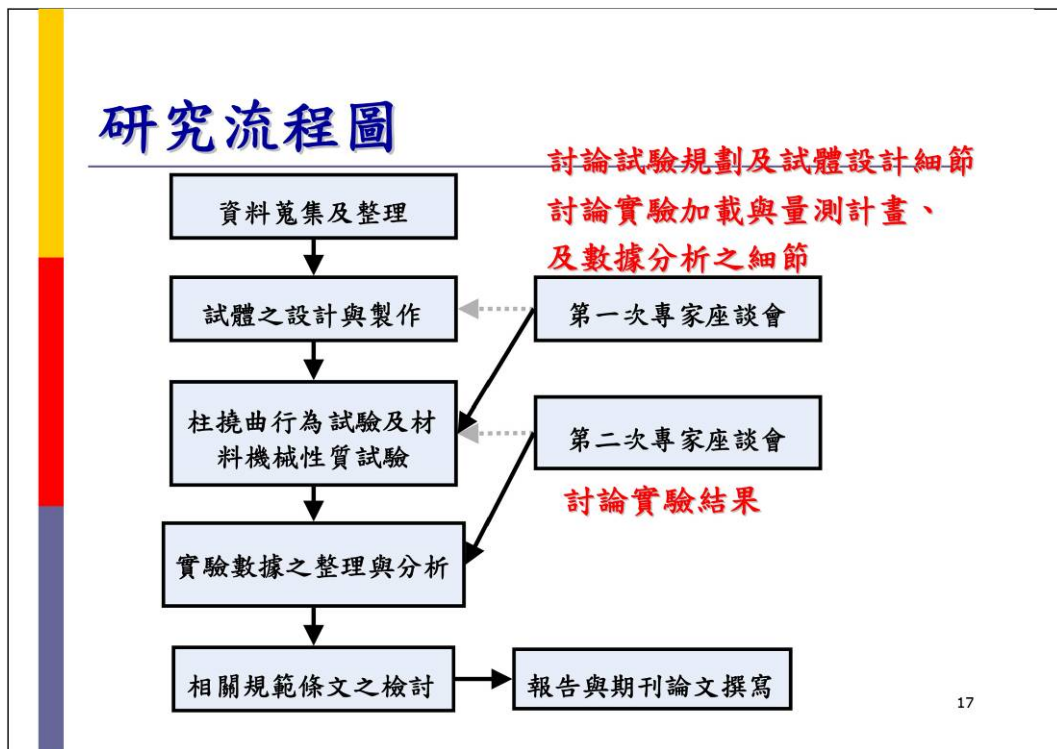
- 柱板寬厚比為32之填充型箱型柱
- 在高軸力作用下
塑性轉角容量 θ_p 明顯下降



Specimen	D mm	t mm	b/t	F_y tf/cm ²	f'_c tf/cm ²	$\frac{P}{P_0}$	M tf-m	M_{exp} tf-m	$\frac{M_{exp}}{M}$	θ_p % rad
R32-00	310	9	32.4	4.08	0.327	0%	55.4	67	1.21	5.41
R32-20	310	9	32.4	4.08	0.300	20%	57.5	69	1.21	4.42
R32-35	310	9	32.4	4.08	0.308	35%	56.4	68	1.20	2.95
R32-50	310	9	32.4	4.08	0.322	49%	54.3	65	1.19	1.83

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法及進度說明
- ✓ 試體設計及撓曲試驗
- ✓ 專家座談會
- ✓ 試驗結果
- ✓ 結論與建議



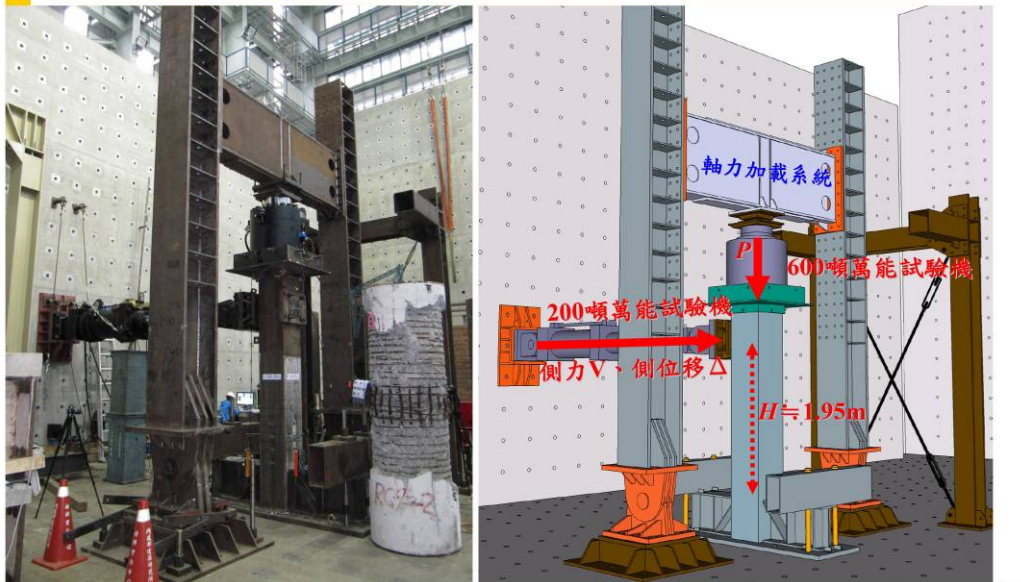
- ### 研究方法
- ✓ 文獻之收集與整理
 - ✓ 柱試體之撓曲行為實驗
 - ✓ 基本材料實驗
 - ✓ 規範條文適用性評估
 - 舉辦專家座談會
 - 第二次專家座談會(預計在11月底舉辦)
 - 報告及期刊論文之撰寫
- 18

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法及進度說明
- ✓ 試體設計及撓曲試驗
- ✓ 專家座談會
- ✓ 試驗結果
- ✓ 結論與建議

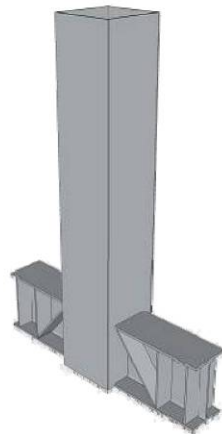
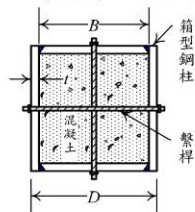
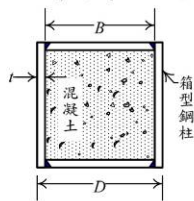
19

柱試體之撓曲反覆載重實驗



柱試體之反覆載重實驗

- 進行9支柱試體之反覆載重試驗
- 約3.5 tf/cm²等級鋼材
約420 kgf/cm²級的混凝土
- $P/P_{n0} \cong 45\%$
- $t=9\text{mm}$, $D=38, 45\text{cm}$
- R系列, 3支 T系列, 6支



21

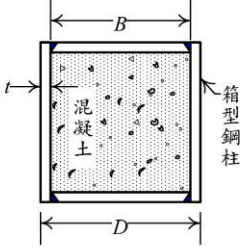
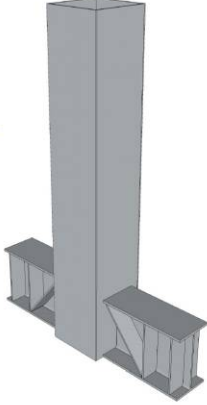


22

R系列

3支 λ_{pd}

- $b/t=40, 48$
- $D=38\sim 45\text{cm}$
- $t=9\text{mm}$

Specimen	D mm	t mm	$\frac{b}{t}$	F_y tf/cm ²	f_c tf/cm ²	P P_0
R48-45	450	9	48	3.5	0.42	45%
R40-20	380	9	40	3.5	0.42	20%
R40-45	380	9	40	3.5	0.42	45%

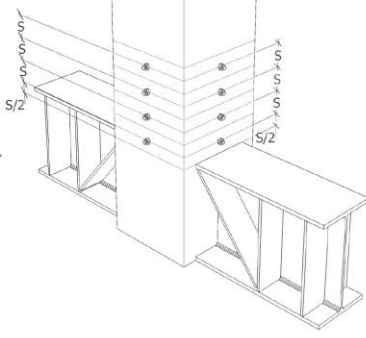
23

T系列

6支 迴歸出圍束應力需求

- $b/t=40, 48$
- $S/D \approx 0.33$
- 單排繫桿

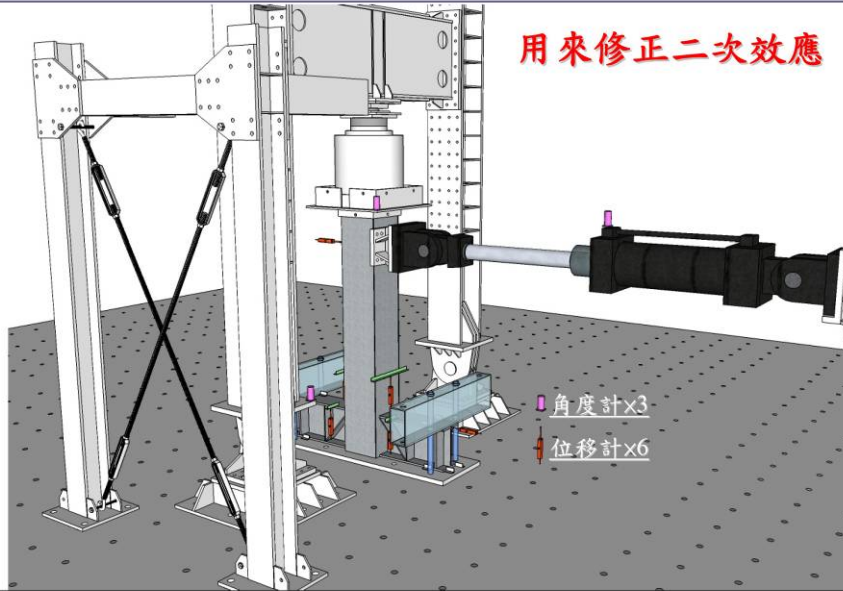
材質	F_{ut} tf/cm ²
A490	10.5
SS400	4.10



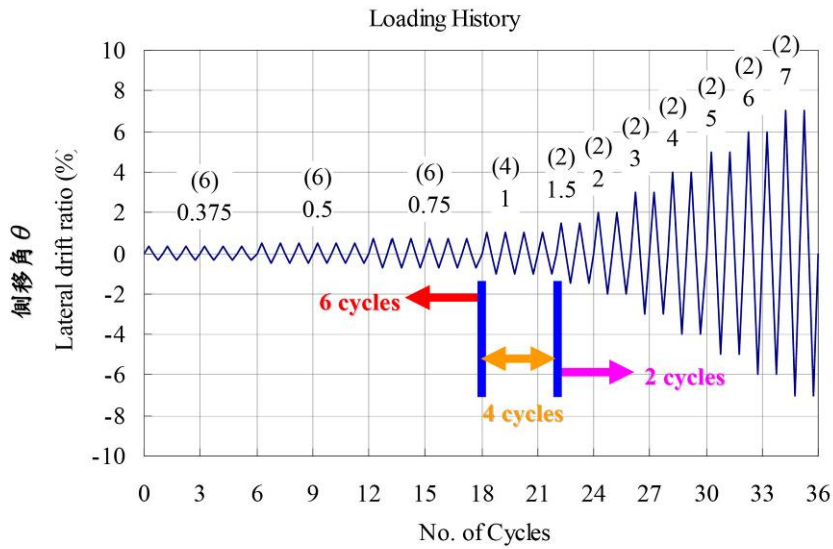
Specimen	D mm	t mm	$\frac{b}{t}$	F_y tf/cm ²	f_c tf/cm ²	P tf	P P_0	$\frac{S}{D}$	S mm	d_t mm	材質	圍束力
T48-45-H	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	25	A490	大
T48-45-M	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	19	A490	中
T48-45-L	450	9	48	3.5	0.42	550	45%	0.33	150	13	A490	小
T40-45-H	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	25	SS400	大
T40-45-M	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	19	SS400	中
T40-45-L	380	9	40	3.5	0.42	421	45%	0.32	120	13	SS400	小

24

撓曲反覆載重實驗之量測儀器配置



加載歷程 (參考AISC2005)



大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法及進度說明
- ✓ 試體設計及撓曲試驗
- ✓ 專家座談會
- ✓ 試驗結果
- ✓ 結論與建議

27

專家座談會

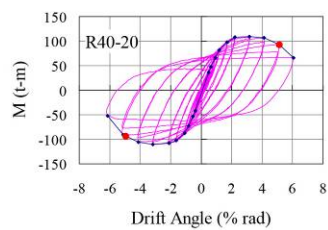
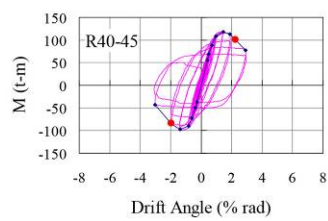
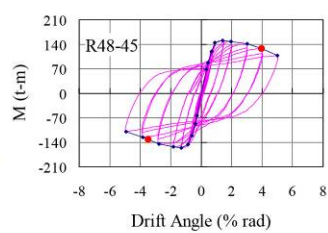
- 第一次專家座談會的綜合結論如下
 - 提出之圍束繫桿設計方法能簡易快速地設計圍束繫桿
 - 有些建案在一樓的柱子會承受很大的軸力，此研究案在實務上將有所助益
 - 填充型箱型柱可配合高強度鋼板，建議此課題於未來可另案研究探討之
 - 防爆拉桿設計所需考慮的因素與圍束繫桿不同，建議另案研究探討之

28

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法及進度說明
- ✓ 試體設計及撓曲試驗
- ✓ 專家座談會
- ✓ 試驗結果
- ✓ 結論與建議

29



試驗觀察：R系列

觀察	Drift (%)		
	R48-45	R40-20	R40-45
局部挫屈	1.5	3	1.5
縱向開裂	5	6	3

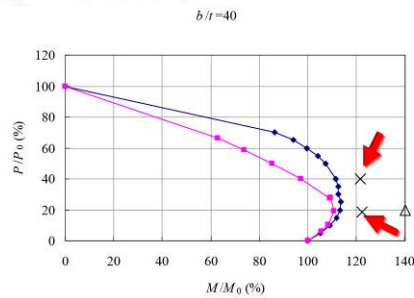
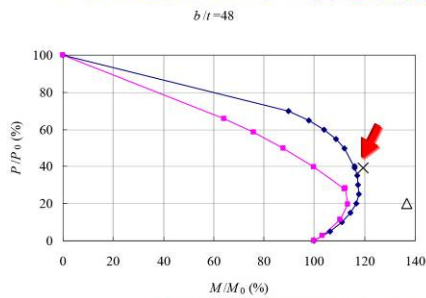


R40-45

31

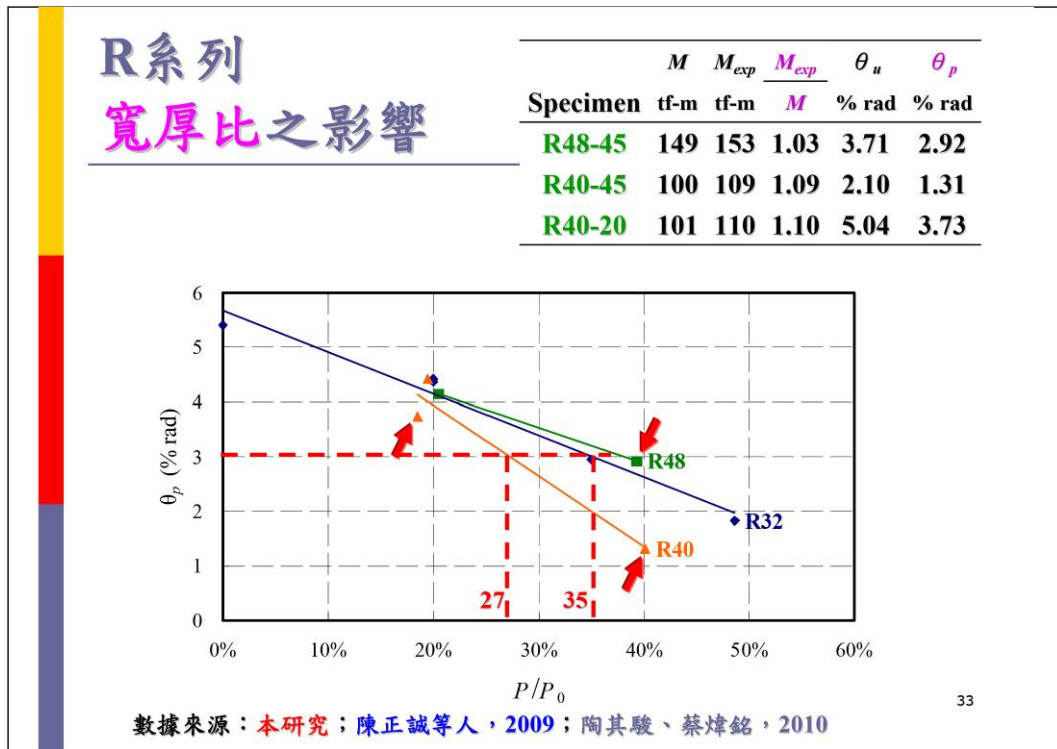
R系列 P-M互制曲線（彎矩強度估算）

- 鋼結構極限設計法規範ch9合成構材-完全合成
 - 塑性應力分佈 & 彈性應力分佈 → 皆偏保守



數據來源：本研究；陳正誠等人，2009

32

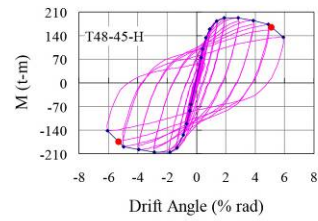
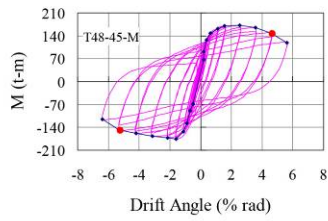
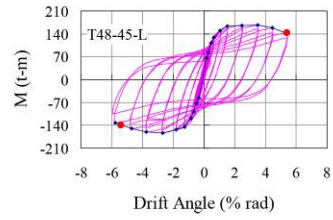
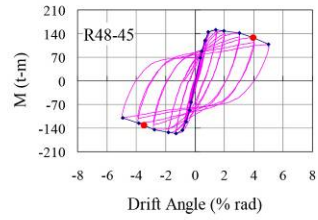


33

- ### 國內SRC規範 柱板寬厚比規定的合理性
- 國內SRC規範柱板寬厚比規定
 - 只跟 F_y 以及 E_s 有關
- $$\frac{b}{t} \geq \sqrt{\frac{3E_s}{F_y}}$$
- 由陶其駿、蔡煒銘，2010以及本研究結果得知
 - 柱板寬厚比規定應考量軸力大小
 - 目前實驗數據仍不足夠
建議另案研究如何修訂柱板寬厚比規定
 - $<0.25P_0$ 軸力 → 現行SRC規範寬厚比規定
 - $0.25P_0 \sim 0.35P_0$ 軸力 → 建議 $b/t \leq 32$ ，或加裝圍束繫桿
 - $>0.35P_0$ 軸力 → 建議加裝圍束繫桿

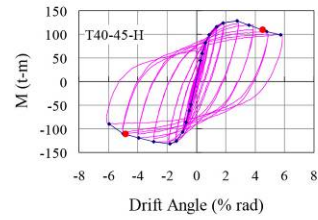
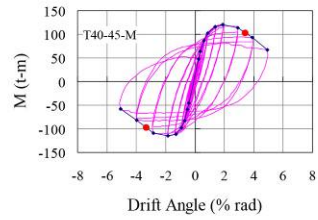
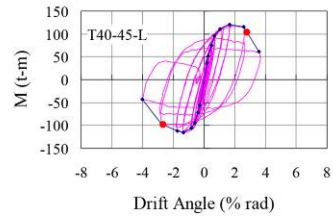
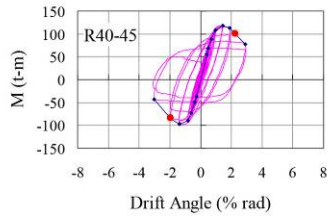
34

T系列-T48 vs R48



35

T系列-T40 vs R40



36

試驗觀察： R系列與T系列比較

觀察	Drift (%)			
	R48-45	T48-45-L	T48-45-M	T48-45-H
局部挫屈	1.5	1.5	2	2
縱向開裂	5	6	6	6
橫向開裂	-	6	6	6



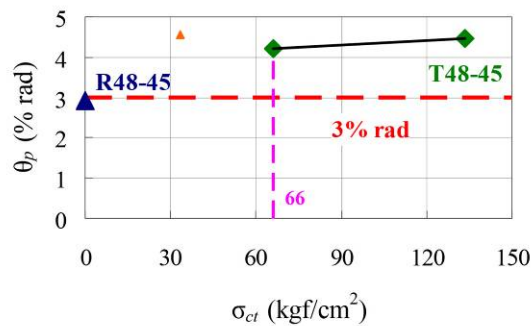
R40-45

觀察	Drift (%)			
	R40-45	T40-45-L	T40-45-M	T40-45-H
局部挫屈	1.5	1.5	1.5	2
縱向開裂	3	4	5	6
橫向開裂	-	-	5	6

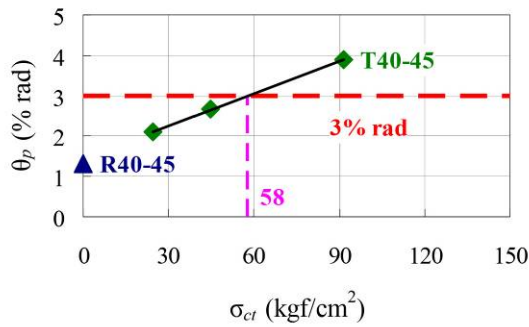


T40-45-H 37

Specimen	$\frac{P}{P_{n0}}$	σ_{ct} kgf/cm ²	$\frac{M_{exp}}{M}$	θ_u % rad	θ_p % rad	$\frac{\theta_p}{\theta_{p,R}}$
T48-45-H	39%	133.31	1.34	5.20	4.46	1.53
T48-45-M	39%	66.10	1.17	4.95	4.21	1.44
T48-45-L	34%	33.52	1.10	5.40	4.55	1.56
R48-45	39%	-	1.03	3.71	2.92	-



Specimen	$\frac{P}{P_{n0}}$	σ_{ct} kgf/cm ²	$\frac{M_{exp}}{M}$	θ_u % rad	θ_p % rad	$\theta_{p,R}$
T40-45-H	40%	91.66	1.30	4.67	3.91	2.98
T40-45-M	41%	44.52	1.19	3.38	2.66	2.03
T40-45-L	41%	24.43	1.19	2.73	2.11	1.61
R40-45	40%	-	1.09	2.10	1.31	-



39

圍束繫桿設計方法 初步建議(1/2)

- $f_y=3.5 \text{ tf/cm}^2$
- $f'_c=420 \text{ kgf/cm}^2$
 - 42 < $b/t \leq 48 \rightarrow$ 單排
 - 48 < $b/t \leq 60 \rightarrow$ 雙排
- 在柱塑性鉸區
(柱頂以下及
柱底以上1.5D範圍)
配置 $S \leq D/3$ 之繫桿

$\frac{P}{P_0}$	$\frac{b}{t}$	$\sigma_{ct,req}$ kgf/cm ²
20%	40~60	52
40%	~48	66

40

圍束繫桿設計方法 初步建議(2/2)

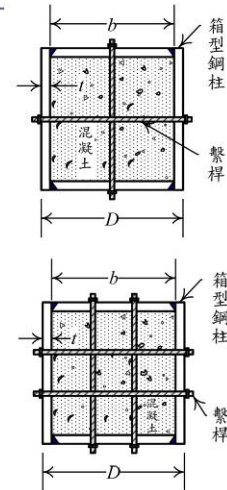
- 單排圍束繫桿之圍束應力

$$\phi F_t A_b \geq \frac{1}{2} SD \sigma_{ct, req}$$

- 雙排圍束繫桿之圍束應力

$$\phi F_t A_b \geq \frac{1}{3} SD \sigma_{ct, req}$$

- 由鋼構LSD設計規範查
表10.3-2挑選適當 $\phi F_t A_b$
(或表C10.3-2)



41

大綱：

- ✓ 研究緣起與背景
- ✓ 研究方法及進度說明
- ✓ 試體設計及撓曲試驗
- ✓ 專家座談會
- ✓ 試驗結果
- ✓ 結論與建議

42

結論與建議(1/4)

- 本研究所有的試體箱型柱角落全部採用全滲透銲接
鋼板 $F_y \cong 3.5 \text{ tf/cm}^2$ ，混凝土 $f'_c \cong 420 \text{ kgf/cm}^2$ ，皆承受約 $0.4P_0$ 軸力（除了一支試體承受約 $0.2P_0$ 軸力）
- $b/t = 40, 48$ 之彎矩強度比 M_{exp}/M
 - 皆大於1 (1.03~1.09)
 - 大致隨 b/t 減少而增加，增幅不大
- $b/t = 40, 48$ 之塑性轉角容量 θ_p
 - 不隨 b/t 減少而增加，反而寬厚比為48的表現較好 (2.92% rad)
 - 都小於3% rad

43

結論與建議(2/4)

- $b/t = 40$ 及 48 加繫桿後
彎矩強度比 M_{exp}/M 提升約15%
為求保守，建議不必考慮繫桿提供之圍束效果
- $b/t = 40$ 及 48 使用圍束繫桿
可以明顯提升填充型箱型柱之塑性轉角容量 θ_p
 - $b/t = 40$ 加繫桿後
塑性轉角容量 θ_p 提升約120%(61~197%)
 - $b/t = 48$ 加繫桿後
塑性轉角容量 θ_p 提升約48%(44~53%)

44

結論與建議(3/4)

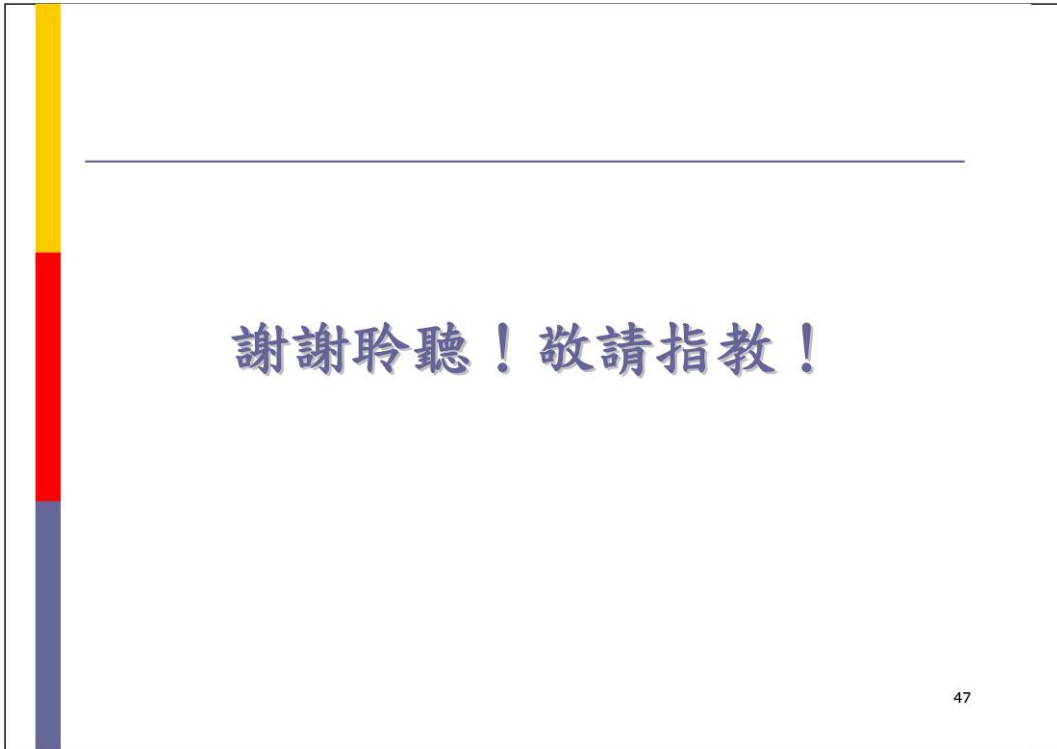
- 本研究團隊已建議過一套圍束繫桿初步設計方法
 - 圍束繫桿加裝在柱塑鉸區一倍柱寬 D 範圍內
 - 繫桿間距 S 與柱寬 D 之比值 (S/D) 約為**0.33**
 - 利用柱板寬厚比決定使用單排或雙排圍束繫桿
 - $b/t \leq 48$ → 單排
 - $48 < b/t \leq 60$ → 雙排
 - 利用圍束繫桿對混凝土提供之圍束應力需求 $\sigma_{ct,req}$ 反求所需之圍束繫桿直徑與材質
 - $P/P_0 = 20\%$ 的圍束應力需求可保守地取為 **52 kgf/cm² ($b/t \leq 60$)**
 - $P/P_0 = 40\%$ 的圍束應力需求可保守地取為 **66 kgf/cm² ($b/t \leq 48$)**

45

結論與建議(4/4)

- 建議未來可另案進行
 - **軸力對混凝土箱型柱柱板寬厚比之影響研究**
軸力對不同寬厚比填充型箱型柱之影響，
需要另案進行一系列實驗或有限元素分析之研究，
使填充型箱型柱寬厚比規定之修訂有較為明確的依據
(若使用有限元素分析，必須先與實驗相互驗證)
 - $< 0.25P_0$ 軸力 → 現行SRC規範寬厚比規定
 - $0.25P_0 \sim 0.35P_0$ 軸力 → 建議 $b/t \leq 32$ ，或加裝圍束繫桿
 - $> 0.35P_0$ 軸力 → 建議加裝圍束繫桿

46



附錄二 期中、期末審查會議審查意見回應表

附錄二 期中、期末審查會議審查意見回應表

附錄二 期中、期末審查會議審查意見回應表

「含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計」期中審查：
 謝謝委員的意見，委員意見之回應列表如下。

審查委員意見	執行單位回應
甘總工程師錫滢	
(1) 採用含繫桿增加填充型箱型柱之撓曲韌性容量，在實務上簡單可行，本研究案對將來實際應用有價值。	感謝委員的支持。
(2) 柱僅承受軸力之情形不多，如能考慮彎矩與軸力共同作用才較有實用價值，故本案應予肯定。	感謝委員的支持。
王技師亭復	
(1) 本研究案尚未見完成試體製作的報告，究竟採用 ASTM A572 Gr. 50 或 CNS SN490B，亦尚未見柱撓曲試驗部分成果，進度宜予追趕。	試體製作係採用 ASTM A572 Gr. 50 鋼材。本研究團隊已加快腳步完成試驗，目前試驗結果之分析已幾近完成。
(2) 試體設計最好仍先以數值模擬分析，俟能預期達到希望的成果，再予選用製作。	由於數值模擬並不在本研究範圍內，且由於填充型箱型柱撓曲試驗之研究已經邁進第三年，於試驗規劃、實驗儀器配置及數據分析方面，皆有累積許多經驗，故本研究團隊已完成試驗，試驗結果與預期大致相同。
(3) 有關以後 SRC 中鋼構材 b/t 大小，耐震構材斷面部分是否修訂仍宜參考 AISC-05-Seismic provision 的規定，則本研究案之繫桿可予加入此 b/t 的貢獻因子。	建議 SRC 規範對於填充型箱型柱寬厚比之規定可考量軸力之影響，目前實驗數據尚不足以推論出如何考量軸力之影響，建議另案進行研究。
高教授健章	

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

<p>(1) 依報告書圖 2.1 試驗裝置，軸壓油壓機之軸力並非一般結構分析之柱軸力，此柱軸應力應為油壓機頂出軸力之垂直向分力，因此分析時需做此修正，且其彎矩亦需修正。</p>	<p>本研究有修正二次效應造成的影響。</p>
<p>(2) 進度有些落後，需加速進行。</p>	<p>本研究團隊已加快腳步完成試驗，目前試驗結果之分析已幾近完成。</p>
<p>曾技師慶祥</p>	
<p>(1) 本案實際進度與設計進度似乎有落差：專家座談會規劃有 2 次，分別在第 2 月及第 5 月，但第 1 次座談會實際上卻於 7 月 7 日上午舉行。</p>	<p>由於填充型箱型柱撓曲試驗之研究已經邁進第三年，於試驗規劃、實驗儀器配置及數據分析方面，皆有累積許多經驗，故本研究團隊將試驗規劃、試驗裝置及量測儀器配置合併至第一次專家座談會，並將第二次專家座談會延後至試驗結果出爐時，邀集專家學者共同討論研究成果。</p>
<p>(2) 報告書中第 6 頁進度說明與第 8 頁預定進度明顯落後，試體製作與養護應已完成。</p>	<p>本研究團隊已加快腳步完成試驗，目前試驗結果之分析已幾近完成。</p>
<p>石建築師正義</p>	
<p>(1) 本案文獻收集頗為豐富。</p>	<p>感謝委員的支持。</p>
<p>(2) 繫桿最小間距(如邊距、間距等)，與外力兩者之間的關係建議在本實驗中有所交待。</p>	<p>圍束繫桿配置與螺栓接合不同，並無最小間距及最小邊距之問題，建議依照本研究之配置方式來配置繫桿即可。建議圍束繫桿間距與試體寬度的比例採用約 0.33，距離梁翼板的邊距採用間距的一半。</p>
<p>(3) 報告書第 51 頁參考書目建議依建研所規定加以編號。</p>	<p>遵照委員意見辦理，已加上編號。</p>
<p>陳教授誠直</p>	
<p>(1) 建議定義報告書中所書之高軸力與低軸力。</p>	<p>建議軸力不小於軸向標稱強度的 30% 時為高軸力，低於軸向標稱強度的 30% 時為低軸力。</p>

附錄二 期中、期末審查會議審查意見回應表

(2) 繫桿對低軸力填充型箱型柱之撓曲行為與韌性有助益，建議補充繫桿設計細節之推導。	已補充於期末報告第二章第二節。
(3) 箱型柱試體之製作建議補充銲接符號，註明開槽銲之細節。	將遵照委員意見辦理。
(4) 試體構架施加側向力時將偏移，柱軸力與側向力需修正。	本研究有修正二次效應造成的影響。
鍾教授立來	
(1) 除了圍束繫桿之設計外，請補充施工用繫桿之設計，讓成果更為完整。	施工用繫桿不在本研究之範圍內，建議另案進行研究探討之。
(2) 軸力比 $P/P_0 \approx 40\%$ ，相當於多少樓層。	造成軸力比達 40% 的原因可能是立面不連續，某一層的柱子數量較少，所需承擔的軸力變大所造成，較無法以樓層數來估算。
(3) 請補充附錄與本文之連結。	期中報告第二章第一節的 B 小節已有提及附錄。而期末報告也有各附錄之連結。
(4) 有尺寸效應否？研究成果能否推廣至其他尺寸。	尺寸效應的影響建議另案進行研究探討之。

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

「含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計」期末審查：
 謝謝委員的意見，委員意見之回應列表如下。

審查委員意見	執行單位回應
王技師亭復	
(1) 經本研究案的研究，由實驗證實圍束繫桿確實對於填充型箱型柱之撓曲韌性容量有幫助，本報告尚稱完整，進度亦合於預定進度。	感謝委員支持。
(2) 進行加軸力之反覆荷重時(圖 2-1、2-6、2-9 及 2-10)，於側力加載時，如何使上方 600 噸萬能試驗機底部(或鋼板)與試體頂部(或鋼板)保持平行。	600 噸萬能試驗機底部與試體頂部之間有採用轉接帽，將 600 噸萬能試驗機底部與試體頂部卡住。
(3) 本報告內符號 t ，應為繫桿垂直方向之柱寬板厚，因此圖 2-8 之 t 標示應標示於柱寬板上。又第 16 頁公式中，如何已知圍束需求 $\sigma_{ct,req}$ 應予說明。	將於圖 2-8 二方向柱板都標示 t 。由實驗結果推求圍束應力需求之方法於第四章第三節中已有說明，並於第二章第二節增加說明「圍束應力需求係由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」。
(4) 試體均在加軸力前即有局部空心，宜予避免，另於破壞時到底是銲道先開裂或板先挫屈所致，或繫桿先斷掉，銲道開裂？並於報告中說明銲條規格。	箱型柱內部混凝土在硬化過程中會自體收縮，雖能控制自體收縮量，但無法使自體收縮量為零；而試驗觀察已有說明破壞順序；於第三章第一節增加銲條規格之說明「CO2 銲條規格為 AWS E71T-1C」。
(5) θ_{yn} 的求法採 $0.75M_n$ 之依據為何？此關係到塑鉸 θ_p 及韌性 M 之大小，影響塑性性能的判定甚大。	根據 $0.75M_n$ 來定義 θ_{yn} 為研究者常用的方法之一。亦有使用 $0.60M_n$ 來定義 θ_{yn} 的作法，不過兩者對 θ_p 容量的大小影響非常有限，且使用 $0.75M_n$ 來定義 θ_{yn} 會得到稍微保守的 θ_p 容量，因此還是以 $0.75M_n$ 來定義 θ_{yn} 較為穩當。

附錄二 期中、期末審查會議審查意見回應表

石建築師正義	
(1) 第 XII 與 62 頁中，以第 62 頁為例，建議三倒數第二行「...故其防火被覆之需求比鋼結構低，具有較優越的經濟效益...」，建議在無量化數據下，取消「具有較優越經濟效益」一詞。	遵照委員意見辦理。
(2) 就含混凝土箱型柱與純鋼骨箱型柱兩者的工程費用相比較時，應考慮因素尚有工期、材料等因素，因此比較經濟效益時，除非在 97 年度研究案專家座談會中有量化數據，否則下此判斷較不適宜。	遵照委員意見辦理。
陳技師正平	
(1) 本研究可取代剪力釘且效果更佳，符合工程實務需求，建議儘可能納入規範。	感謝委員支持。
(2) 以墊板取代墊圈效果，應可更佳。	墊板比墊圈厚，可能會有防火被覆不足的問題，建議另案研究之。
(3) 柱板鐸道建議採全滲透開槽鐸。	本研究試體柱板鐸道皆採用全滲透開槽鐸。
(4) 是否有專利的問題？	目前尚未有專利問題。
曾技師慶祥	
(1) 圓形柱的圍束效果應比方形柱佳，惟施工性稍差，圓管的挫屈與方形管有所不同，是否需加繫桿？	圓形柱不在本案的研究範圍之內，建議另案研究之。
(2) 箱型鋼柱試體鐸接方式為何？是否為全長全滲透鐸？加繫桿之後，有無可能改用部分滲透鐸，亦即透過計算做適當的鐸道設計。	本研究試體柱板鐸道皆採用全滲透開槽鐸，建議另案研究是否需要全長全滲透鐸。

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

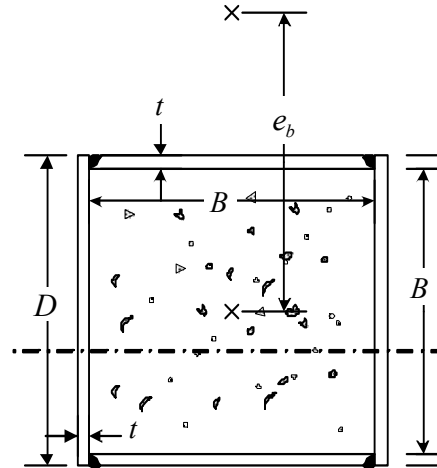
<p>(3) 相關設計規範何時可頒佈實施？</p>	<p>未加繫桿的部分，目前實驗數據尚不足夠，僅能確認目前國內SRC規範對填充型箱型柱在高軸力下的寬厚比規定有改善空間；加繫桿的部分，目前僅可提供設計準則，無法預知何時可將研究成果納入規範中</p>
<p>鍾教授立來</p>	
<p>(1) 內灌混凝土填充型箱型柱優點之一為混凝土回收容易，今增加繫桿，會影響此優點否？</p>	<p>加上繫桿的確會影響混凝土回收的優點，但比RC構件的混凝土回收仍然算是相對簡單。</p>
<p>(2) 對於常用之柱構材，表列繫桿之設計結果，供工程師參考。</p>	<p>不在本計畫範圍，建議另案研究之。</p>
<p>(3) 雖然施工用繫桿並非本研究之課題，後續之研究若能一併考量，可有助於本研究成果之推廣。</p>	<p>建議另案研究之。</p>

附錄三 填充型箱型柱軸力-彎矩互制曲線分析方式

附錄三 填充型箱型柱軸力-彎矩互制曲線分析方式

一、材料參數：

邊長設為 D ，鋼板斷面厚度為 t ，混凝土強度為 f'_c ，正方形箱型柱之彈性模數為 E_s ，鋼板降伏強度為 f_y ，偏心距為 e 。

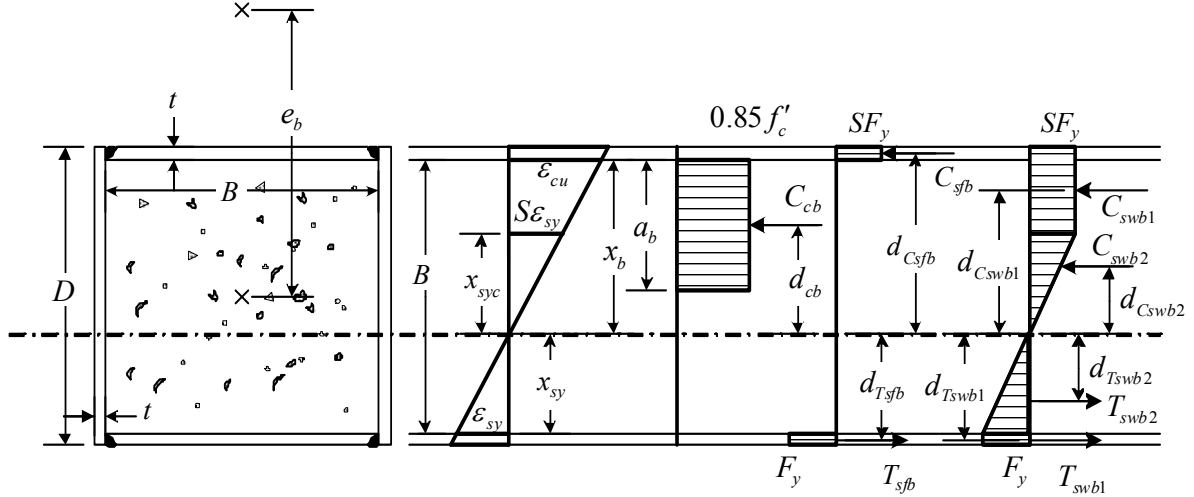


二、分析前之基本假設：

1. 平面橫斷面在彎曲後仍保持平面；因此應變從中性軸呈線性變化。
2. 箱型柱鋼板應力-應變曲線為完美彈塑性。
3. 在張力區即中性軸以下之區域混凝土不提供力量，拉力由鋼版提供。
4. 混凝土破壞時，即壓碎時之應變為 $\epsilon_c=0.003$ 。
5. 混凝土破壞之應力分佈使用矩形惠特尼方塊分析。

三、計算斷面軸力 P 、彎矩 M 及偏心距 e

(1) 計算平衡破壞 P_b 、 M_b 及 e_b



$$x_b = B \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sy}}$$

$$a = \beta_1 x_{n0}$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05(f'_c - 280)/70, 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (f'_c \text{ in kgf/cm}^2)$$

$$x_{sy} = B - x_b, \quad x_{syc} = Sx_{sy}, \quad S = \left[0.698 + 0.073 \left(\frac{D}{t} \right)^2 \times \frac{F_y}{E_s} \right]^{-1} \leq 1.00$$

$$C_{cb} = 0.85f'_c B a_b, \quad \text{-----} \quad d_{cb} = x_b \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \right)$$

$$T_{sfb} = F_y B t, \quad \text{-----} \quad d_{Tsfb} = x_{sy} + \frac{t}{2}$$

$$C_{sfb} = SF_y B t = ST_{sfb}, \quad \text{-----} \quad d_{Csfb} = x_b + \frac{t}{2}$$

$$T_{swb1} = 2F_y t^2, \quad \text{-----} \quad d_{Tswb1} = x_{sy} + \frac{t}{2}$$

$$C_{swb1} = 2tSF_y (t + x_b - x_{syc}), \quad \text{-----} \quad d_{Cswb1} = x_b - (t + x_b - x_{syc})/2$$

$$T_{swb2} = F_y t x_{sy}, \quad \text{-----} \quad d_{Tswb2} = 2x_{sy}/3$$

$$C_{swb2} = SF_y t x_{syc} = SF_y t S x_{sy} = S^2 T_{swb2}, \quad \text{-----} \quad d_{Cswb2} = 2x_{syc}/3$$

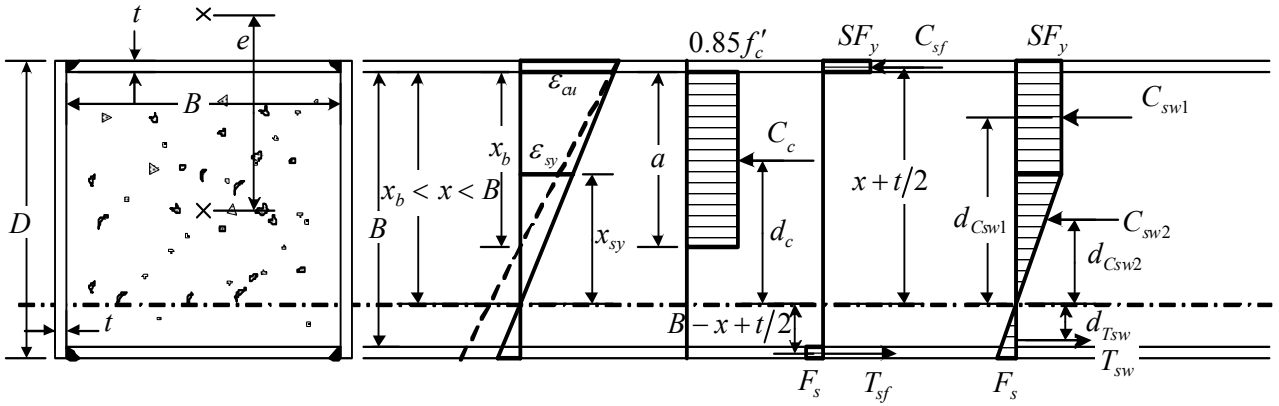
$$P_b = C_{cb} - T_{sfb} + C_{sfb} - T_{swb1} + C_{swb1} - T_{swb2} + C_{swb2}$$

$$= C_{cb} - T_{sfb}(1-S) - T_{swb1} + C_{swb1} - T_{swb2}(1-S^2)$$

附錄三 填充型箱型柱軸力-彎矩互制曲線分析方式

$$\begin{aligned}
 P_b \left(e_b + x_b - \frac{B}{2} \right) &= M_{CL} \\
 &= C_{cb} d_{cb} + T_{sfb} d_{Tsfb} + C_{sfb} d_{Csfb} + T_{swb1} d_{Tswb1} + C_{swb1} d_{Cswb1} + T_{swb2} d_{Tswb2} + C_{swb2} d_{Cswb2} \\
 &= 0.85 f'_c B \beta_1 x_b^2 \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \right) + F_y B t \left[B - x_b (1 - S) + \frac{t}{2} (1 + S) \right] \\
 &\quad + T_{swb1} d_{Tswb1} + C_{swb1} d_{swb1} + T_{swb2} d_{Tswb2} + C_{swb2} d_{Cswb2} \\
 e_b &= \frac{M_{CL}}{P_b} - \left(x_b - \frac{B}{2} \right) \\
 M_b &= P_b e_b
 \end{aligned}$$

(2) 計算壓力控制破壞 P 、 M 及 e



$$\begin{aligned}
 a &= \beta_1 x_{n0} \\
 \beta_1 &= 0.85 - 0.05(f'_c - 280)/70, \quad 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (f'_c \text{ in kgf/cm}^2) \\
 x_{syc} &= \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{cu}} xS, \quad S = \left[0.698 + 0.073 \left(\frac{D}{t} \right)^2 \times \frac{F_y}{E_s} \right]^{-1} \leq 1.00 \\
 C_c &= 0.85 f'_c B \beta_1 x = 0.85 f'_c B a, \quad \text{-----} \quad d_{Cc} = x \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \right) \\
 T_{sf} &= \frac{d_{Tsf}}{x_{syc}} SF_y B t, \quad \text{-----} \quad d_{Tsf} = B - x + \frac{t}{2} \\
 C_{sf} &= SF_y B t, \quad \text{-----} \quad d_{Csf} = x + \frac{t}{2} \\
 C_{sw1} &= 2t SF_y (t + x - x_{syc}), \quad \text{-----} \quad d_{Csw1} = x_{syc} + \frac{1}{2} (t + x - x_{syc}) \\
 T_{sw2} &= \frac{(B - x + t)^2}{x_{syc}} F_y t, \quad \text{-----} \quad d_{Tsw2} = \frac{2}{3} (B - x + t)
 \end{aligned}$$

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

$$C_{sw2} = tSF_y x_{syc}, \quad \text{-----} \quad d_{Csw2} = \frac{2}{3} x_{syc}$$

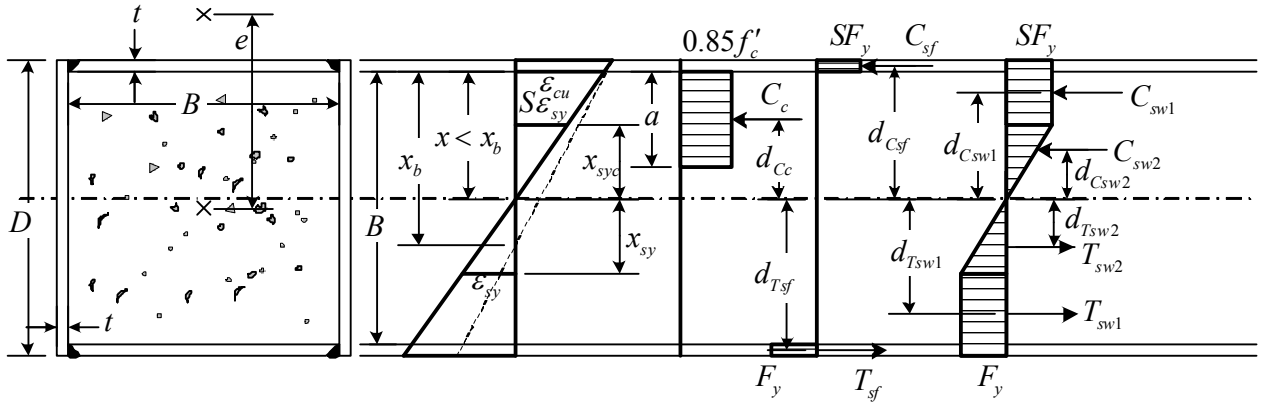
$$P = C_c + C_{sf} + C_{sw1} + C_{sw2} - T_{sf} - T_{sw2}, \quad \text{-----} \quad d_p = \left(x - \frac{B}{2}\right) + e$$

$$P \left(e + x - \frac{B}{2}\right) = C_c d_{Cc} + T_{sf} d_{Tsf} + C_{sf} d_{Csf} + C_{sw1} d_{Csw1} + T_{sw2} d_{Tsw2} + C_{sw2} d_{Csw2} = M_{CL}$$

$$e = \frac{M_{CL}}{P} - \left(x - \frac{B}{2}\right)$$

$$M = Pe$$

(3) 計算拉力控制破壞 P 、 M 及 e



$$a = \beta_1 x$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05(f'_c - 280)/70, \quad 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (f'_c \text{ in kgf/cm}^2)$$

$$x_{sy} = \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{cu}} x, \quad x_{syc} = Sx_{sy}, \quad S = \left[0.698 + 0.073 \left(\frac{D}{t}\right)^2 \times \frac{F_y}{E_s}\right]^{-1} \leq 1.00$$

$$C_c = 0.85 f'_c B \beta_1 x = 0.85 f'_c B a, \quad \text{-----} \quad d_{Cc} = x \left(1 - \frac{\beta_1}{2}\right)$$

$$T_{sf} = F_y B t, \quad \text{-----} \quad d_{Tsf} = B - x + \frac{t}{2}$$

$$C_{sf} = SF_y B t = ST_{sf}, \quad \text{-----} \quad d_{Csf} = x + \frac{t}{2}$$

$$T_{sw1} = 2tF_y (B - x - x_{sy} + t), \quad \text{-----} \quad d_{Tsw1} = x_{sy} + \frac{1}{2} (B - x - x_{sy} + t)$$

$$C_{sw1} = 2tSF_y (t + x - x_{syc}), \quad \text{-----} \quad d_{Csw1} = x_{syc} + \frac{1}{2} (t + x - x_{syc})$$

$$T_{sw2} = tF_y x_{sy}, \quad \text{-----} \quad d_{Tsw2} = \frac{2}{3} x_{sy}$$

附錄三 填充型箱型柱軸力-彎矩互制曲線分析方式

$$C_{sw2} = tSF_y x_{syc} = S^2 T_{sw2}, \quad \text{-----} \quad d_{Csw2} = \frac{2}{3} x_{syc}$$

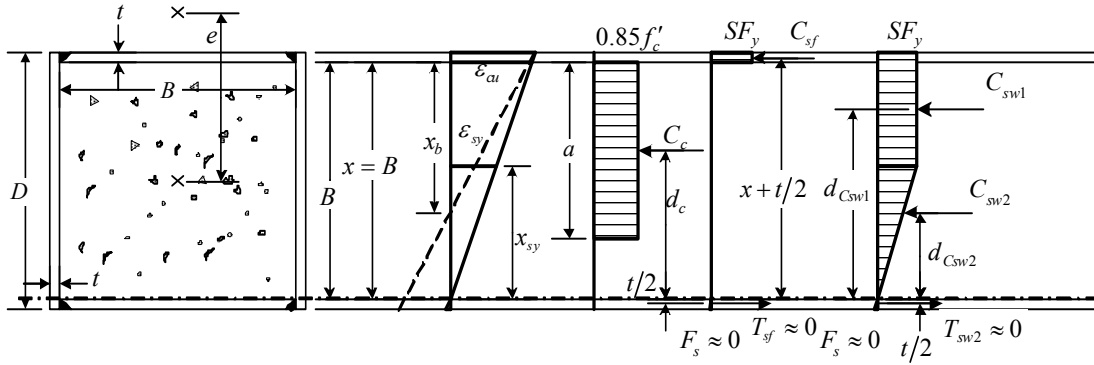
$$P = C_c + C_{sf} + C_{sw1} + C_{sw2} - T_{sf} - T_{sw1} - T_{sw2}$$

$$M_{CL} = C_c d_{C_c} + T_{sf} d_{T_{sf}} + C_{sf} d_{C_{sf}} + T_{sw1} d_{T_{sw1}} + C_{sw1} d_{C_{sw1}} + (C_{sw2} + T_{sw2}) d_{sw2}$$

$$e = \frac{M_{CL}}{P} - \left(x - \frac{B}{2} \right)$$

$$M = Pe = M_{CL} - P \left(x - \frac{B}{2} \right)$$

(4) 計算純軸力破壞 $P (M=0)$



$$C_c = 0.85 f'_c B \beta_1 x = 0.85 f'_c B a$$

$$T_{sf} = 0$$

$$C_{sf} = SF_y B t = S T_{sf}$$

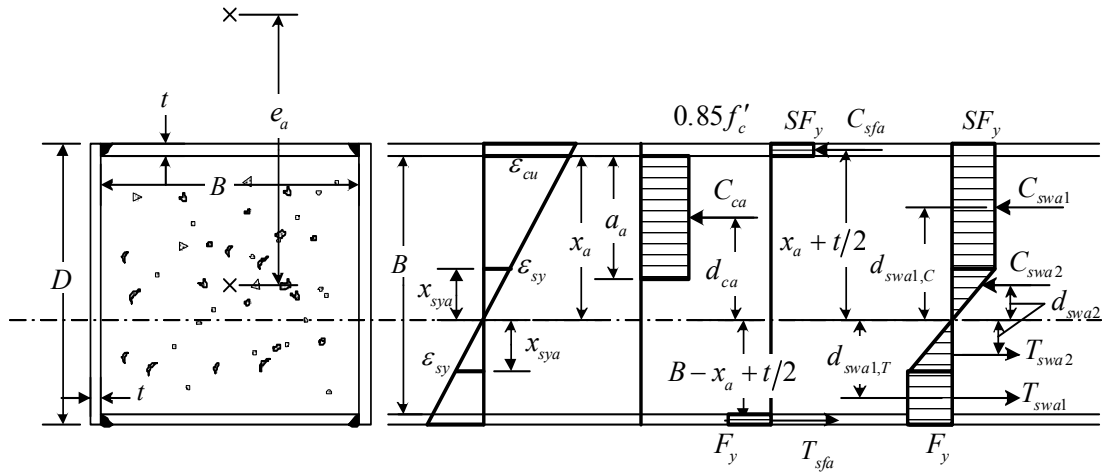
$$T_{sw1} = 0$$

$$C_{sw1} = 2 S F_y t$$

$$C_{sw2} = t S F_y x_{syc} / 2$$

$$P = C_c + C_{sf} + C_{sw1} + C_{sw2} - T_{sf} - T_{sw1} - T_{sw2}$$

(5) 計算純彎矩破壞 $M (P=0)$



$$a = \beta_1 x_{n0}$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05(f'_c - 280)/70, \quad 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (f'_c \text{ in kgf/cm}^2)$$

$$x_{sy} = x_{n0} \frac{\epsilon_{sy}}{\epsilon_{cu}}, \quad x_{sy,c} = S x_{n0} \frac{\epsilon_{sy}}{\epsilon_{cu}} = S x_{sy}, \quad S = \left[0.698 + 0.073 \left(\frac{D}{t} \right)^2 \times \frac{F_y}{E_s} \right]^{-1} \leq 1.00$$

$$C_c = 0.85 f'_c B \beta_1 x_{n0}, \quad \text{-----} \quad d_{Cc} = x_{n0} \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \right)$$

$$T_{sf} = F_y B t, \quad \text{-----} \quad d_{Tsf} = B - x_{n0} + \frac{t}{2}$$

$$C_{sf} = SF_y B t, \quad \text{-----} \quad d_{Csf} = x_{n0} + \frac{t}{2}$$

$$T_{sw1} = 2F_y t (B - x_{n0} - x_{sy} + t), \quad \text{-----} \quad d_{Tsw1} = x_{sy} + \frac{1}{2} (B - x_{n0} - x_{sy} + t)$$

$$C_{sw1} = 2SF_y t (t + x_{n0} - x_{sy,c}), \quad \text{-----} \quad d_{Csw1} = x_{sy,c} + \frac{1}{2} (x_{n0} - x_{sy,c} + t)$$

$$T_{sw2} = F_y t x_{sy}, \quad \text{-----} \quad d_{Tsw2} = \frac{2}{3} x_{sy}$$

$$C_{sw2} = SF_y t x_{sy,c}, \quad \text{-----} \quad d_{Csw2} = \frac{2}{3} x_{sy,c}$$

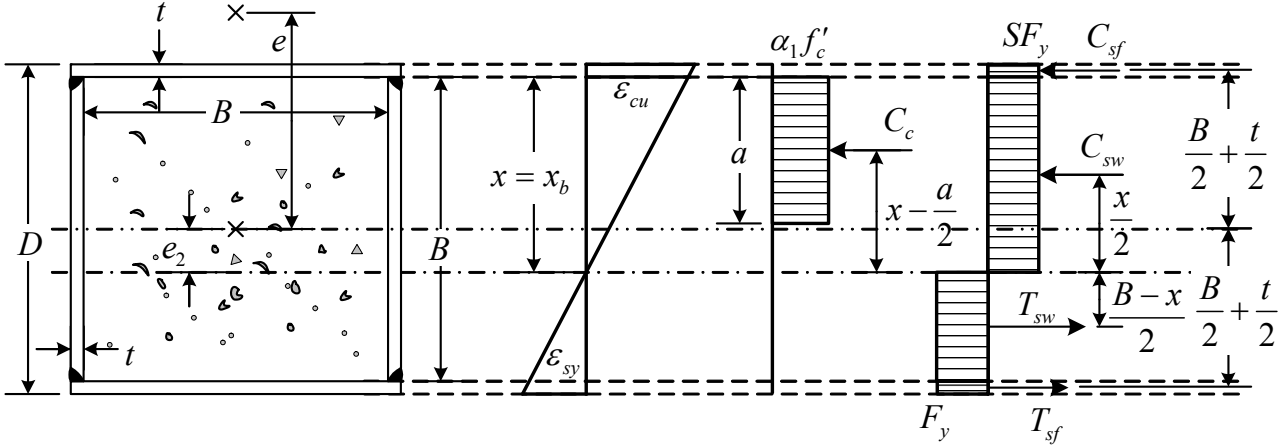
$$\Sigma F = 0 = C_c + C_{sf} + C_{sw1} + C_{sw2} - T_{sf} - T_{sw1} - T_{sw2}$$

$$\Rightarrow x_{n0} = \frac{B(3 - S) + 2t(1 - S)}{\frac{0.85 f'_c B \beta_1}{F_y t} + 2(1 + S) + \frac{\epsilon_{sy}}{\epsilon_{cu}} (1 - S)}$$

$$M_{n0} = C_c d_{Cc} + T_{sf} d_{Tsf} + C_{sf} d_{Csf} + C_{sw1} d_{Csw1} + T_{sw1} d_{Tsw1} + C_{sw2} d_{Csw2} + T_{sw2} d_{Tsw2}$$

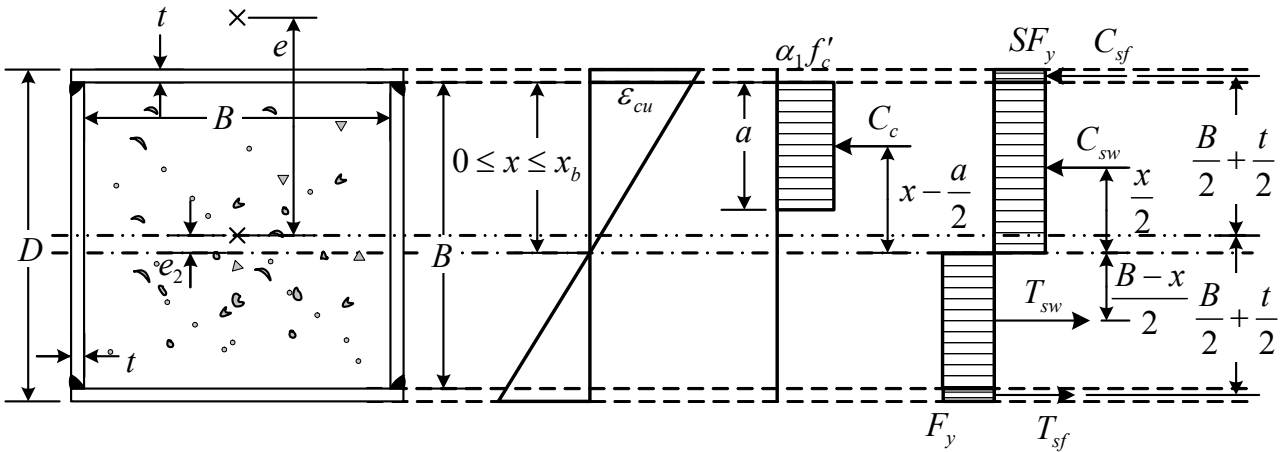
Use "fully plastic" for steel box column

Derive x_b (Balanced Control)



$$x_b = B \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sy}}$$

1. Derive M for $0 \leq x \leq x_b$ (Tension Control)



$$a = \beta_1 x,$$

$$\alpha_1 = 0.85$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05(f'_c - 280)/70, 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (f'_c \text{ in kgf/cm}^2)$$

$$S = \left[0.698 + 0.073 \left(\frac{D}{t} \right)^2 \times \frac{F_y}{E_s} \right]^{-1} \leq 1.00$$

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

$$C_c = \alpha_1 f'_c B \beta_1 x, \quad C_{sf} = SF_y Dt, \quad T_{sf} = F_y Dt, \quad C_{sw} = 2t SF_y x, \quad T_{sw} = 2t F_y (B - x),$$

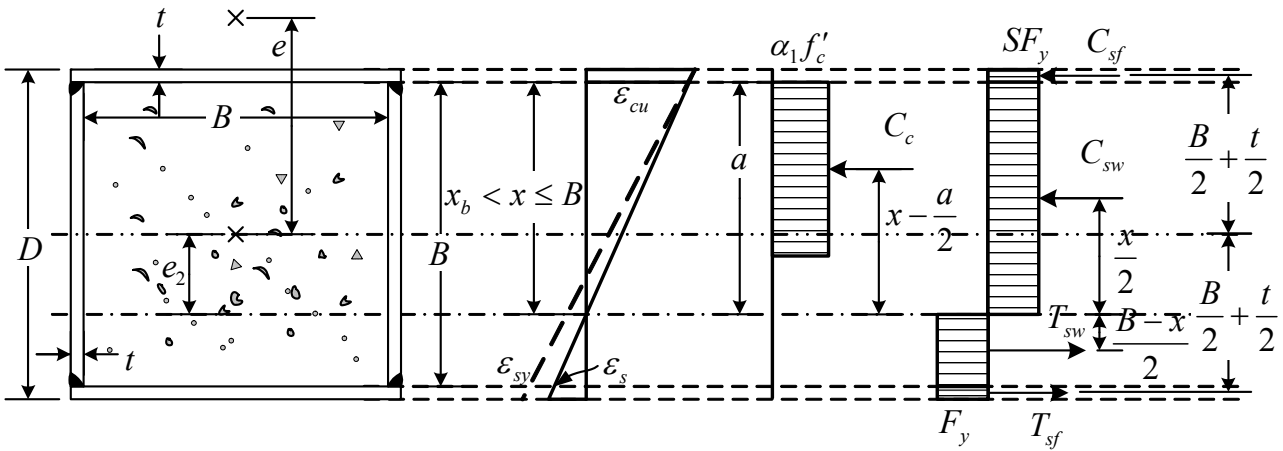
$$e_2 = x - \frac{B}{2}$$

$$P = C_c + C_{sf} + C_{sw} - T_{sf} - T_{sw} \Rightarrow x = \frac{\frac{P}{F_y t} - D(S-1) + 2B}{\frac{\alpha_1 f'_c B \beta_1}{F_y t} + 2(S+1)} \Rightarrow C_c, C_{sf}, C_{sw}, T_{sf}, T_{sw}$$

$$M = C_c \left(x - \frac{a}{2} - e_2 \right) + C_{sf} \left(\frac{B}{2} + \frac{t}{2} \right) + T_{sf} \left(\frac{B}{2} + \frac{t}{2} \right) + C_{sw} \left(\frac{x}{2} - e_2 \right) + T_{sw} \left(\frac{B-x}{2} + e_2 \right)$$

$$e = \frac{M}{P}$$

2. Derive M for $x_b \leq x \leq B$ (Compression Control)



$$a = \beta_1 x,$$

$$\alpha_1 = 0.85$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05(f'_c - 280)/70, \quad 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (f'_c \text{ in kgf/cm}^2)$$

$$\varepsilon_s = \frac{B-x}{x} \varepsilon_{cu}, \quad S = \left[0.698 + 0.073 \left(\frac{D}{t} \right)^2 \times \frac{F_y}{E_s} \right]^{-1} \leq 1.00$$

$$C_c = \alpha_1 f'_c B \beta_1 x, \quad C_{sf} = SF_y Dt, \quad T_{sf} = F_y Dt, \quad C_{sw} = 2t SF_y x, \quad T_{sw} = 2t F_y (B - x),$$

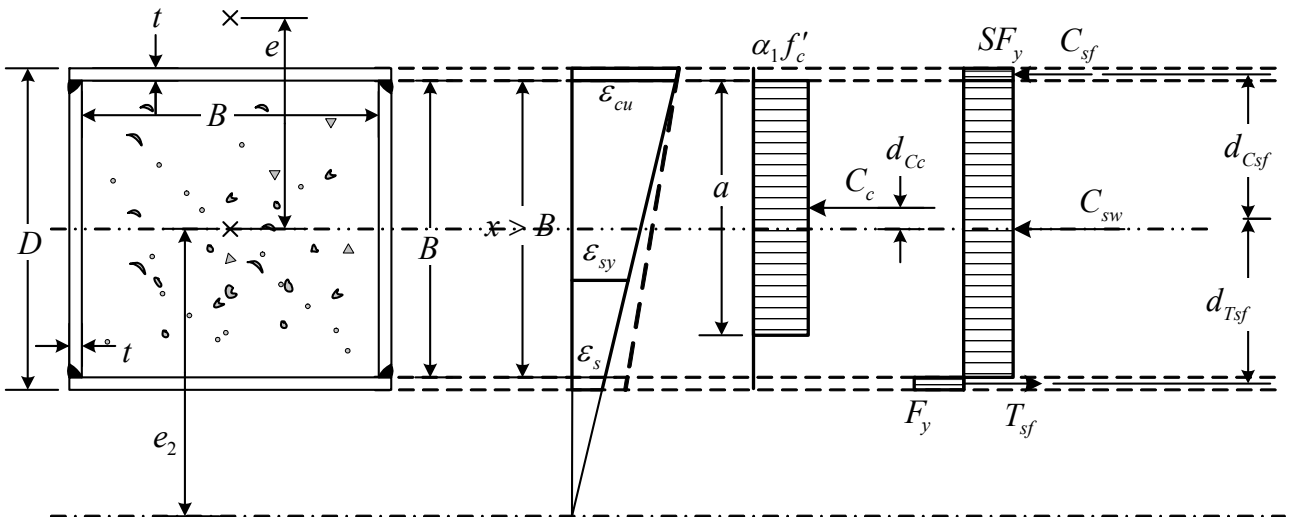
$$e_2 = x - \frac{B}{2}$$

$$P = C_c + C_{sf} + C_{sw} - T_{sf} - T_{sw} \Rightarrow x = \frac{\frac{P}{F_y t} - D(S-1) + 2B}{\frac{\alpha_1 f'_c B \beta_1}{F_y t} + 2(S+1)} \Rightarrow C_c, C_{sf}, C_{sw}, T_{sf}, T_{sw}$$

$$M = C_c \left(x - \frac{a}{2} - e_2 \right) + C_{sf} \left(\frac{B}{2} + \frac{t}{2} \right) + T_{sf} \left(\frac{B}{2} + \frac{t}{2} \right) + C_{sw} \left(\frac{x}{2} - e_2 \right) + T_{sw} \left(\frac{B-x}{2} + e_2 \right)$$

$$e = \frac{M}{P}$$

3. Derive M for $x > B$



$$a = \min(\beta_1 x, B),$$

$$\alpha_1 = 0.85$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05(f'_c - 280)/70, 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (f'_c \text{ in kgf/cm}^2)$$

$$\varepsilon_s = -\frac{B-x}{x} \varepsilon_{cu}, \quad S = \left[0.698 + 0.073 \left(\frac{D}{t} \right)^2 \times \frac{F_y}{E_s} \right]^{-1} \leq 1.00$$

$$C_c = \alpha_1 f'_c B \beta_1 x, \quad C_{sf} = SF_y D t, \quad T_{sf} = F_y D t, \quad C_{sw} = 2t B S F_y, \quad e_2 = x - \frac{B}{2}$$

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

$$P = C_c + C_{sf} + C_{sw} - T_{sf} \Rightarrow x = \frac{P + F_y t [D(1-S) - 2BS]}{\alpha_1 f'_c B \beta_1} \Rightarrow C_c, C_{sf}, C_{sw}, T_{sf}$$

$$M = C_c \left(\frac{B}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_{sf} \left(\frac{B}{2} + \frac{t}{2} \right) + T_{sf} \left(\frac{B}{2} + \frac{t}{2} \right), \quad e = \frac{M}{P}$$

參考書目

中文部分

1. 內政部營建署，2006，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 黃炯憲、鍾立來、葉勇凱、葉錦勳、盧煉元、劉季宇，1998，「鋼管混凝土構材研究之回顧」，國家地震工程研究中心，報告編號 NCREE-98-012。
8. 陳正誠、黃國倫，2008，「含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力的行為研究」，內政部建築研究所委託研究報告，GRB 編號：PG9702-0298，內政部研考資訊系統計畫編號：097301070000G1017，2008年12月。

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

9. 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報告，GRB 編號：PG9802-0398，內政部研考資訊系統計畫編號：098301070000G1018，2009年12月。
10. 陳正誠、黃國倫、蔡宜樺，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報告，GRB 編號：PG9902-0224，內政部研考資訊系統計畫編號：099301070000G1021，2010年12月。
11. 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，內政部建築研究所，2010年12月。

英文部分

12. ACI Committee 318, 2002, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
13. AISC, 2005, "Specification for Structure Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, Inc.
14. AISC, 2005a, "Seismic Provision for Structural Steel Buildings," America Institute of Steel Construction
15. Aval, S. B. B., Saadeghvaziri, M. A., Golafshani, A. A., 2002, "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.
16. BSI, Eurocode 4 : Design of Composite Steel and Concrete Structures, 1994
 17. Ge, H.B., Usami, T., 1994, "Strength Analysis of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Box Columns," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 30, No. 3, pp. 259-281.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. 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.
 22. 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.

23. 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.
24. Sakino, K., and Sun, Y., 1994, "Stress-strain curve of concrete confined by rectilinear hoop," *Journal of Structural and Construction Engineering, Transactions of AIJ*, 461, 95-104.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Yang, H., Han, L.H., Wang, Y.C., 2008, "Effects of Heating and Loading Histories on Post-Fire Cooling Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubular Columns," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, No. 5, pp. 556-570.

含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：陳正誠、黃國倫

出版年月：100 年 12 月

版次：第一版

ISBN：ISBN 978-986-03-0673-6