

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱 耐震性能驗證研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 104 年 12 月

PG10405-0153

104301070000G0067

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱 耐震性能驗證研究

研究人員：陶其駿

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 104 年 12 月

目次

表次.....	III
圖次.....	V
照片次.....	VII
摘 要.....	IX
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 文獻回顧.....	4
第三節 研究方法	12
第四節 研究目的.....	13
第二章 試體計畫與試驗.....	16
第一節 試體設計	16
第二節 試體製作.....	17
第三節 試驗裝置及加載程序	19
第三章 試驗結果與討論.....	41
第一節 試驗結果與觀察	41
第二節 填充型箱型柱耐震性能討論.....	47
第四章 結論與建議.....	71
第一節 結論.....	71
第二節 建議.....	75
附錄一 鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說第 6.3 節條 文	78

附錄二 研究業務協調會議紀錄.....	80
附錄三 期中審查會議紀錄.....	84
附錄四 期中審查會議審查意見與研究團隊回應	95
附錄五 期末審查會議紀錄.....	99
附錄六 期末審查簡報.....	108
參考書目	118

表次

表 2.1 實驗試體規劃.....	20
表 2.2 混凝土圓柱試體抗壓強度試驗表	21
表 2.3 鋼板拉力試驗表(厚度 22mm).....	23
表 2.4 鋼板拉力試驗表(厚度 14mm)	23
表 2.5 圍束繫桿拉力試驗表.....	23
表 3.1 試體於極限載重、鋼板發生挫屈階段及熱影響區開 裂時機階段之對應軸向應變及載重.....	50
表 3.2 TR 系列圍束繫桿初始斷裂時機之對應軸向應變及 載重	50
表 3.3 本研究試體之應變對照表	51
表 3.4 填充一般混凝土強度箱型柱試驗結果	52
表 3.5 填充高強度混凝土箱型柱試驗結果	53

圖次

圖 1.1 填充型鋼管混凝土柱	14
圖 1.2 無縫鋼管 CFT	14
圖 1.3 填充混凝土箱型鋼柱	14
圖 1.4 矩形 CFBC 圍束	15
圖 1.5 方形 CFBC 圍束	15
圖 2.1 試體斷面示意圖	24
圖 2.2 試體全滲透銲細部示意圖	24
圖 2.3 R1.35 試體之詳細尺寸	25
圖 2.4 R1.5 試體之詳細尺寸	26
圖 2.5 R2.0 試體之詳細尺寸	27
圖 2.6 IR1.35 試體之詳細尺寸	28
圖 2.7 IR1.5 試體之詳細尺寸	29
圖 2.8 IR2.0 試體之詳細尺寸	30
圖 2.9 TR1.5 試體之詳細尺寸	31
圖 2.10 TR2.0 試體之詳細尺寸	32
圖 2.11 短柱試體及試驗裝置示意圖	33
圖 3.1 試體 R 系列軸力與軸向應變圖	62
圖 3.2 試體 R 系列軸向(正規化)載重-應變曲線	62
圖 3.3 試體 R 系列軸力與軸向應變圖(放大前段) ..	63
圖 3.4 試體 IR 系列軸力與軸向應變圖	63
圖 3.5 試體 IR 系列軸向(正規化)載重-應變曲線 ...	64
圖 3.6 試體 IR 系列軸力與軸向應變圖(放大前段) ..	64
圖 3.7 試體 TR 系列軸力與軸向應變圖	65

圖 3.8 試體 TR 系列軸向(正規化)載重-應變曲線 ..	65
圖 3.9 試體 TR 系列軸力與軸向應變圖(放大前段)	66
圖 3.10 TR-R 系列試體比對圖	66
圖 3.11 TR-R 系列試體比對圖(正規化).....	67
圖 3.12 TR2.0-R2.0 試體比對圖(正規化).....	67
圖 3.13 試體 R 系列軸力與軸向應變比對圖(與 102 年).....	68
圖 3.14 試體 R 系列軸力與軸向應變比對圖(正規化)	68
圖 3.15 試體 IR 系列軸力與軸向應變比對圖(與 102 年).....	69
圖 3.16 試體 IR 系列軸力與軸向應變比對圖(正規化)	69
圖 3.17 混凝土貢獻量係數 α 建議值	70
圖 3.18 混凝土材料強度與軸向強度比關係	70
圖 4.1 設置單排螺桿之填充型箱型柱	73

照片次

照片 2.1 鋼板工廠材料挑選	34
照片 2.2 鋼板工廠取樣.....	34
照片 2.3 箱型柱製作銲接	35
照片 2.4 銲道超音波檢驗.....	35
照片 2.5 試體照片-a.....	36
照片 2.6 試體照片-b.....	36
照片 2.7 IR 系列試體內側置入塑膠袋示意圖	37
照片 2.8 灌漿作業示意圖	37
照片 2.9 灌漿作業示意圖	38
照片 2.10 IR 系列試體灌漿預留空間示意圖	38
照片 2.11 混凝土評估試驗示意圖.....	39
照片 2.12 混凝土坍流度示意圖	39
照片 2.13 混凝土留下漏斗時間	40
照片 2.14 混凝土圓柱試體灌漿作業	40
照片 3.1 R1.35 最終破壞照片	54
照片 3.2 R1.5 最終破壞照片	55
照片 3.3 R2.0 最終破壞照片	56
照片 3.4 IR1.35 最終破壞照片	57
照片 3.5 IR1.5 最終破壞照片	58
照片 3.6 IR2.0 最終破壞照片	59
照片 3.7 TR1.5 最終破壞照片	60
照片 3.8 TR2.0 最終破壞照片	61

摘 要

關鍵詞：填充型箱型柱、高強度混凝土、圍束繫桿

一、研究緣起

填充型箱型柱（Concrete-Filled Box Column，簡稱 CFBC）係由 4 片鋼板鉚接組合而成，此種柱構件具有高強度、耐震韌性佳、側向勁度大及施工便利之優點，目前廣泛應用於國內中、高層建築結構系統之使用。由於在地震力作用下，純鋼箱型柱的鋼板，柱鋼板容於承受壓力狀態，容易發生局部挫屈，而導致柱構件韌性受損而提早破壞，因此此種於鋼柱內填充混凝土的填充型箱型柱，其內部的混凝土，可提供箱型鋼柱面板額外的側向支撐，而柱面鋼板亦可提供內部混凝土適當的圍束，如此可延緩柱面鋼板局部挫屈之過早發生，並提升填充型箱型柱的耐震韌性。

惟依據「鋼骨鋼筋混凝土（SRC）構造設計規範」第六章對填充型箱型柱的設計規定，在考量當混凝土強度提高時，其脆性現象將更為明顯，同時目前國內外的相關研究仍然有限，因此規範規定填充型鋼管混凝土柱採用的混凝土抗壓強度，不得大於 $560 \text{ kgf/cm}^2 (8,000 \text{ psi})$ ，否則應以公認合理之試驗，證明其可行性與可靠度。但是，隨著國內對製作高強度混凝土技術之精進，及業界迫切提出協助驗證高強度（ 700 kgf/cm^2 ）混凝土應用實務之需求，以避免所使用混凝土材料，因為陷入建築技術規則或技術規範適用困難之窘境，而必須透過程序繁瑣「建築新技術、新工法、新設備及新材料認可」的機

制。因此，本研究透過使用高強度（700 kgf/cm²）混凝土填充型箱型柱的耐震行為驗證研究，以檢視現行相關規範規定之合理性，及驗證使用限制之可行性。

二、研究方法及過程

本研究共完成 3 個（R、IR 及 TR）系列合計 8 組大尺寸填充高強度混凝土矩形箱型短柱試體之試驗，鋼板為 SN490B（標稱強度 3.3 tf/cm²），混凝土抗壓強度為 700 kgf/cm²（10,000 psi），箱型柱斷面長寬比(H/B)為 1.34、1.5 與 2.0 等 3 種，長邊(H)固定為 590 mm，短邊則規劃不同的寬度尺寸(包括 440、400、300 mm 等 3 種)。針對於國內 SRC 構造或鋼結構設計規範中，於受壓強度計算公式的合理性，採用高強度（700 kgf/cm²）混凝土對矩形箱型柱斷面長寬比(H/B)之使用限制，以及設置圍束繫桿對提升箱型柱耐震性能之有效性等，透過理論分析及結構試驗等方法，進行填充型箱型柱的耐震性能試驗。

三、重要發現

依據本研究實驗結果，獲得相關重要發現說明如下：

- (一)當填充高強度（700 kgf/cm²）混凝土箱型柱的斷面長寬比愈大，因混凝土開裂造成強度下降的幅度，有愈大之趨勢，但不甚明顯。
- (二)當填充型箱型柱使用大於規範規定之高強度混凝土（700 kgf/cm²）時，實驗結果顯示對填充型箱型柱受壓強度之規定計算公式，可能出現高估試體強度的情形，而本研究建議混凝土強度的修正公式，

可合理計算填充型箱型柱的受壓強度。

(三)當填充型箱型鋼柱使用高強度 (700 kgf/cm^2) 混凝土時，柱斷面的長寬比愈小，受壓軸向韌性有愈佳之趨勢。實驗結果顯示填充型箱型柱斷面之長寬比，建議不宜高於 1.4，若超過此限制時，可於柱兩端塑性鉸區，額外配置圍束繫桿，以提升填充箱型柱的耐震韌性。

(四)當填充箱型柱塑性鉸區配置圍束繫桿時，可有效提升填充高強度混凝土 (700 kgf/cm^2) 箱型柱的軸向耐震延展性，並建議圍束繫桿的設計橫向間距應小於最小柱寬 (B)，縱向間距應小於平均柱寬度的 $1/3$ ，可符合相關規範規定的耐震需求。

四、主要建議事項

立即可行建議—本研究建議填充型箱型柱受壓強度計算修正公式，可提供修訂規範規定參採。

主辦機關：內政部營建署、中華民國鋼結構協會

協辦機關：內政部建築研究所

本研究重要發現，當填充型箱型柱使用大於規範規定之高強度混凝土 (700 kgf/cm^2) 時，現行「SRC 構造設計規範」或「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」中，對填充型箱型柱受壓強度計算之規定公式，會有過高估計箱型柱實際受壓強度的情形，可能有不安全的疑慮，而本研究建議混凝土強度修正係數(α)及填充型箱型柱受壓強度計算之修正公式，可立即提供相關構造設計規範修訂之參採。

立即可行建議—本研究建議於柱斷面尺寸之設計規定，
應增列限制填充型箱型柱斷面之長寬比，
不宜高於 1.4。

主辦機關：內政部營建署、中華民國鋼結構協會

協辦機關：內政部建築研究所

對使用高強度混凝土 (700 kgf/cm^2) 填充型箱型柱斷面之長寬比，應限制不宜高於 1.4。當柱斷面之長寬比超過 1.4 時，將可能導致箱型柱撓曲韌性受損，本研究建議可於填充型箱型的塑性鉸區，配置適當的圍束繫桿，可以有效提升填充箱型柱的耐震韌性，此建議可立即提供相關構造設計規範，於增訂填充型箱型柱斷面尺寸限制之參採。

立即可行建議—建議辦理「提升填充型箱型鋼柱耐震性能創新技術研討會」

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：建築師公會、結構工程技師公會、土木技師公會、台灣建築中心

有關填充型箱型柱耐震性能實驗驗證之研究，本所併同究併同其他研究，已累積近 35 組以上箱型柱試體實驗之研究成果，建議可儘速辦理相關研討或推廣活動，以廣納業界對相關規範修正草案之意見，並將本所研發的創新結構技術，提供業界使用。

立即可行建議—建議賡續辦理「在高軸力下使用高強度混凝土填充型箱型柱耐震性能驗證研究」

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各國立大學土木或營建工程研究所

建議未來可再進一步透過理論分析與實驗驗證，探討在高軸力等條件，不利於柱塑性鉸區發展耐震韌性情況下，若使用高強度混凝土之填充型箱型柱，其耐震性能與使用限制，及研提具體可行的強化耐震韌性措施。

ABSTRACT

Key word: Concrete-Filled Rectangle Box Column, High-Strength Concrete, Confinement Tie Rod

1. Purpose

The concrete-filled box column (CFBC) usually welded together by four steel plates that have many property as high strength, great seismic toughness, high lateral stiffness and convenient construction as well as use to be apply on high-rise building. When under seismic force, the plate of steel column easily gets some local buckling that cause column member early to damage. If the steel column is filled with concrete, the concrete can provide lateral support, and the plate of steel column can provide concrete confinement, delaying the occurrence of local buckling of the steel column, the column members to enhance toughness.

According to "steel reinforced concrete (SRC) structure design specifications" Chapter VI of the filled box-column design provides that, in consideration of when the concrete strength increased brittleness phenomenon will become more apparent, At the same time present the relevant researches are still limited, therefore specification of concrete compressive strength of concrete-filled steel tube column uses shall not exceed 560 kgf/cm² (8,000 psi), Otherwise, it should reasonably recognized by experiments to prove its feasibility and reliability. However, with domestic production of sophisticated technology of high-strength concrete, and the industry needs an urgent request for assistance to verify the practical application of high-strength concrete (700 kgf/cm²) to prevent the high-strength concrete material applicable in building technical rules or specifications difficulty dilemma, instead, through a complicated mechanism of the program " Architectural new technology, new method, new equipment and new material approval

system ".

Therefore, this study verified through the use of seismic behavior of high strength (700 kgf/cm²) concrete-filled box column study to review the existing provisions of the relevant specifications rationality and feasibility of using restrictions verification.

2. Method and Steps

In this study, a total of three series (respectively, R, IR and TR specimens) making a total of 8 sets of large-size rectangular high strength concrete-filled box column specimens had been completed, steel adopt SN490B (nominal strength 3.3tf/cm²), concrete compressive strength 700 kgf/cm² (10,000 psi), box-column section aspect ratio (H/B) for the three kinds 1.34, 1.5 and 2.0, the long side (H) is fixed at 590 mm, the short side is planning a different width dimensions (including three kinds of 440, 400, 300 mm, etc.). SRC for domestic construction or steel structure design specification, at a reasonable calculation formula of compressive strength, high strength (700 kgf/cm²) using a rectangular concrete box-column section aspect ratio (H/B) of the limits and set confinement Tied to enhance the effectiveness of seismic performance of the column box, etc., through theoretical analysis and structural testing.

3. Main Finding

According to this research experimental result to show that, sum up several important discoveries and do the following explanation.

- (1) When the cross-section of high-strength concrete-filled (700 kgf/cm²) box column aspect ratio greater, because strength concrete cracking caused the decrease, there is the greater of the trend, but not significant.
- (2) When filled box column is greater than the specification of the use of high-strength concrete (700 kgf/cm²), the experimental results show that the calculation of the provisions filled box column

compression strength of the equation, may have overestimated the strength of specimens, and this study proposes to amend the formula of concrete strength, compressive strength can be reasonably calculated column filled box.

- (3) When CFBC filled with high-strength concrete (700 kgf/cm^2), the aspect ratio of the column cross-section is smaller, there are more good toughness axial compression of the trend. The proposal base on experimental results show that the aspect ratio of filled box column section should not be higher than 1.4, if this limit is exceeded, it should configure additional confinement Tied in the ends of the plastic hinge regions in column, to enhance filling of box column seismic toughness.
- (4) When filled box column plastic hinge zone configuration confinement tied, can effectively enhance the axial seismic ductility of filling high-strength concrete (700 kgf/cm^2), and suggestedd that the design of confinement Tied of the lateral spacing should be less than the minimum column width (B), the longitudinal spacing should be less than 1/3 of the average width of the column, it can meet requirement of the relevant specification.

4. Major suggestion

Short term suggestion—This study proposes to amend the
formula-filled box column compression
strength calculation of, can provide revised
specification of the Senate adopted.

Major Office : Construction and Planning Agency Ministry of the
Interior or Taiwan Institute of Steel Construction
Associate Office : Architecture and Building Research Institute
Ministry of Interior

In this study, key findings, when CFBC using high-strength concrete (700 kgf/cm^2) which is greater than the specification, the current "SRC structure design specifications" or "steel structure

ABSTRACT

building steel structure design specifications" in the filling box column type specified formula to calculate the compressive strength, there will be an overestimation compressive strength of the actual situation, there may be doubts unsafe, but this study suggests concrete strength coefficient (α) and modified formula to calculate the compressive strength, which is available immediately relevant structural design specifications revision of reference adopted.

Short term suggestion—The study recommends the design requirements of the column section size, should be added to limit the aspect ratio of the CFBC, not higher than 1.4.

Major Office : Construction and Planning Agency Ministry of the Interior and Taiwan Institute of Steel Construction

Associate Office : Architecture and Building Research Institute Ministry of Interior

The aspect ratio of CFBC using high-strength concrete (700 kgf/cm²) should be limited to not higher than 1.4. When the aspect ratio more than 1.4, it will likely cause damage to box column flexural toughness, this study suggests that configure the appropriate confinement tie bars in plastic hinge zone, can effectively improve the seismic toughness of CFBC, this proposal can provide structural design specifications immediately, in updating filled box column section size limits mining parameters.

Short term suggestion—Recommend apply " box filled enhance seismic performance of steel column innovative technology seminar"

Major Office : Architecture and Building Research Institute Ministry of Interior.

Associate Office : Architects Association, Structural Engineering Technician Association, Association of Civil

Engineers

Experimental verification of the performance of the study concrete-filled box column, have been accumulated over the past 35 group specimens and research results, it is recommended to handling the relevant seminars or promotional activities to solicit comments of the industry on the draft amendments to the relevant specifications, and this innovative construction techniques developed by ABRI, offers the industry's use.

Short term suggestion—Recommend apply "Using high-strength concrete-filled box column seismic performance validation study at a high axial forces "

Major Office : Architecture and Building Research Institute Ministry of Interior.

Associate Office : Civil Engineering or Construction Engineering Institute national universities

Recommends that the future can be further through theoretical analysis and experimental verification, to explore with high axial force and other conditions, the case is not conducive to the development of seismic column plastic hinge zone toughness, the use of box column filled high-strength concrete, its seismic performance and use restrictions, as well as research to mention concrete and feasible measures to strengthen the seismic resilience.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

臺灣位於環太平洋地震帶，近年來國內外強烈地震頻繁發生，許多橋梁與建築因此而崩塌損壞，其中柱構件的損壞更可能造成整體結構的倒塌。柱結構的強度與耐震韌性直接影響結構在地震力下之安全性，如何提升結構之耐震能力為近年來研究之重點。

國內在高樓建築結構中由於強度需求甚高，若採用傳統鋼筋混凝土結構設計，斷面甚大成本亦提高，故國內多採用鋼骨鋼筋混凝土（Steel Reinforced Concrete，簡稱 SRC）構造，在設計規範中，依柱斷面形式可分為兩種類型：(1)包覆型 SRC 柱與(2)填充型 SRC 柱。填充型 SRC 柱主要分為填充混凝土圓柱及填充混凝土箱型柱（Concrete-Filled Box Column，簡稱 CFBC）兩種，如圖 1.1 所示。

填充混凝土箱型柱是將混凝土直接填充於箱型鋼柱之中，由於不需另外架設模板，故施工性與經濟性均佳，且未來建築物於拆除階段，混凝土與鋼板之回收容易，並可重複使用，可以降低結構、模板等材料的使用量，且防火性能比純箱型柱佳，可以減省防火材料，符合降低經濟發展對環境衝擊的目標，是適合在國內研發、推廣的構材型式，現在已有許多建築物是使用 CFBC 建造而成，且有許多使用 CFBC 的建案正在進行中。

然而，國內現行 SRC 構造設計規範與解說，對鋼管混凝土柱之設計規定，主要是參考美、日等國有關鋼管混凝土（Concrete-Filled Tube，簡稱 CFT）柱之試驗結果，在日本由於營建市場規模較大，規

格品尺寸亦較齊全，因此矩形鋼管斷面，多採無縫鋼管或由兩組槽鋼對銲而成（如圖 1.2 所示）。但是在國內則由於市場規模較小，現成規格品亦少，因此為降低營建成本，並因應建築設計需求之斷面形狀，而採由四塊鋼板組合而成之組合箱型柱之斷面。如圖 1.3 所示，甚少使用無縫鋼管，且 CFT 與 CFBC 因為製程不同，兩者間之結構行為亦應有所差異，故國內應進行本土性填充混凝土箱型鋼柱之實體試驗，藉以瞭解其破壞模式之差異性，其驗證規範所訂耐震性能之有效性。

國內外已進行不少有關填充型鋼管混凝土柱的研究。近年來國內部分有呂東苗、蔡克銓、黃炯憲等人，國外主要有 Sakino、Susantha 等人，也發表了不少期刊論文。這些論文有些是探討梁柱樑件的行為，有些則專注於短柱軸向行為的研究。目前所收集到的論文中，2008 年以前，有關方形短柱載重實驗的試體尺寸都不大，柱寬在 120~323 mm 之間，而柱板厚度在 2~9 mm 之間，而斷面型式大部分使用無縫鋼管或是由兩個槽鋼銲接而成之方形斷面，這些實驗試體的尺寸偏小。且對於填充型箱型柱，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。

2012 年陳正誠等人進行 CFBC 短柱軸向加載試驗之有限元素分析，發現 CFBC 內部混凝土圍束機制的描述及模擬，無法使用 Mander 等 RC 構件的圍束模型，由分析結果推論，矩形 CFBC 的圍束效果(如圖 1.4)，可能不如方形 CFBC(如圖 1.5)。

經與業界詢問 CFBC 的使用率日益普及，矩形 CFBC 斷面長度與寬度的比值(簡稱長寬比)大多小於 1.5，但有時基於建築用途的考量，長寬比會大於 1.5，甚至達到 3。由於斷面的長寬比過大，將導致柱板無法提供混凝土足夠的圍束，因此 CFBC 柱軸向強度與韌性不如預期，2013 年黃少暉之碩士論文有測試 CFBC 斷面長寬比不同的試體，

其研究成果發現當長寬比越大，短柱試體的殘餘強度越低，此現象將影響 CFBC 撓曲行為甚鉅。本所 2013 年陶其駿自行研究「矩形填充混凝土箱型短柱耐震行為之研究」之研究成果，已針對長寬比介於 1.5 至 2 的 CFBC 試體進行軸向加載試驗，其研究發現當 CFBC 斷面長寬比小於 2.0 時，SRC 構造設計規範之設計公式，仍可有效估計矩形 CFBC 斷面的軸向強度，且偏保守，但是，在長寬比為 1.7 至 2.0 時，當斷面強度達 P_{peak} 後，混凝土強度驟降情形非常明顯，導致矩形 CFBC 斷面之軸向韌性，無法有效發揮，仍有安全之虞。整體柱斷面強度急遽下降之原因，主要為混凝土強度驟降所造成。2014 年黃國倫與陶其駿自行研究「矩形填充混凝土箱型鋼柱耐震能力提升研究」亦針對長寬比介於 1 至 2.5，鋼材標稱降伏強度 $3.3tf/cm^2$ 及混凝土標稱抗壓強度 $420kgf/cm^2$ 的 CFBC 試體進行軸向加載試驗以及低軸力下撓曲行為試驗，研究發現長寬比大於 1.4 的矩形 CFBC 塑性轉角容量明顯低於規範要求值 3% rad，故建議 CFBC 長寬比應限制至少低於 1.4；同時亦已確認適當設計圍束繫桿可有效提升軸向韌性及塑性轉角容量達到規範要求，甚至更好，縱向間距建議採平均柱寬度的 1/3，並建議長寬比小於 2 之 CFBC，只需單排配置圍束繫桿，長寬比不小於 2 之 CFBC，應雙排配置圍束繫桿。

現階段國內 SRC 構造設計規範(內政部營建署，2006)之規定，混凝土抗壓強度上限為 $560kgf/cm^2$ (8000psi)，但由於近年來國內外朝向高強度混凝土趨勢發展，也有能力量產高強度混凝土，且由國內業界得知許多 CFBC 結構建築，已大量使用高強度混凝土，20 層以下、20 至 30 層及 30 層以上之常用混凝土設計強度分別為 420 至 490、490 至 560 及 560 至 700 kgf/cm^2 甚至更高，故混凝土強度對長寬比限制之影響，急需進行試驗研究確認之。

第二節 文獻回顧

有關本研究收集之相關文獻資料，說明如下：

1. 方形加勁鋼管混凝土柱受軸壓行為之探討(黃炯憲等，1999)

此研究旨在探討寬厚比 70 以上之薄鋼管填充混凝土柱，使用不同加勁方式之短柱行為，並提出八角形箍筋的加勁方式。此研究之實驗分二次進行，第一次實驗為 18 支鋼管混凝土柱試體，2 支純混凝土柱，探討主要參數為：鋼管寬厚比（分別為 70、100、150）、加勁方式（分別為縱向平行管壁加勁板，縱向垂直管壁加勁板，八角形箍筋加勁）。第二次實驗為 9 支鋼管混凝土柱試體，特別針對柱寬厚比為 70 且為八角形加勁之方形斷面進行研究，探討參數為：箍筋間距與箍筋斷面。

實驗結果顯示：（1）利用有效圍束與分區圍束觀念，可得到八角形加勁強度與韌性之指標性參數；（2）八角形加勁對韌性與極限強度有良好幫助；（3）軸向垂直加勁板對提高鋼板挫曲強度與勁度有相當幫助；（4）圓形斷面行為較佳。

2. 加勁鋼管混凝土柱受軸壓與彎矩之行為研究(孫維隆，2000)

此研究係以試驗方式，討論加勁與未加勁鋼管填充混凝土柱，在同時承受軸力與彎矩作用下，有關二者強度、勁度及韌性之行為。此試驗共製作 21 支試體，探討試驗參數為加勁箍筋間距，對照組為未加勁之方形及圓形斷面。試驗可分為偏心單軸加力試驗與固定軸力、四點彎矩試驗。

試驗結果顯示，在軸壓強度方面，八角形加勁方式，能明顯提升方形鋼管對核心混凝土的圍束作用，延緩鋼板挫屈，對極限軸壓強度及韌性方面有顯著的提升。另在不同軸力下承受彎矩方面，八角形加勁方式對極限彎矩強度及韌性上均有良好幫助，且

效果隨著加勁箍筋間距越密越佳，試驗結果與各規範比較顯示，各規範之極限彎矩強度值均趨於保守。

3. 鋼管混凝土構材研究之回顧(黃炯憲等，1998)

研究所蒐集之論文，大多出自英文期刊及國際研討會，依論文性質大致分幾類：(1)一般性論述；(2)構材各種試驗；(3)構材行為模型；(4)構材設計；(5)接頭；(6)其他。分述如下：

- (1) 一般性論述：主要是針對「鋼骨鋼筋混凝土」與「鋼管混凝土柱」構件之一般行為做論述。
- (2) 構材之各種試驗：在此研究中，共收集了 20 多篇以構材試驗為主之論文，由於鋼管混凝土主要應用於柱的構築，故大多試驗均考慮軸力之影響，且鋼管混凝土是由鋼管及混凝土構成，試驗主要之設計參數主要為構材斷面形狀、寬厚比、鋼管及混凝土強度比、加勁與否、混凝土填充高度等等。
- (3) 構材之行為模型：與鋼管混凝土構材行為模型之相關研究論文共計 13 篇，依其模擬方法或對象，可概略歸納為：a.以 FEM 分析構材之力學特性；b.探討構材斷面的力學行為；c.構材中混凝土的特性模擬；d.根據材料力學理論分析構材力學特性；e.根據實驗數據迴歸構材的特性曲線。
- (4) 構材之設計：收錄有關鋼管混凝土柱構件設計規範之相關文章大略可分為二類，一類為各國鋼管混凝土柱構件設計規範現況之介紹，另一類則多為研究者經由實驗或數值分析之結果，對構件之某些行為的設計公式，提出修正與建議。
- (5) 接頭：在現行研究中，鋼管混凝土柱與鋼梁之接合方式，可概分成兩大類，一為外壁接合型，鋼梁直接或透過橫隔板接合在鋼管混凝土柱之外壁。另一為穿透埋入型，鋼梁之接合端銲接鋼筋或剪力釘，並使之埋入混凝土中或鋼梁之翼板、

腹版或整個斷面，穿透鋼管混凝土。

(6) 其他：收錄有關填充混凝土柱之抗火性能研究，及外包 FRP 加勁纖維複合材料之混凝土柱的力學行為。

4. 高強度鋼管混凝土柱強度之實驗探討(丁英哲，2004)

AISC-LRFD 3rd 規範針對鋼管混凝土(CFT)柱的設計規定，係使用轉換係數，將混凝土轉換成等值之鋼骨，再利用一般鋼柱的挫屈強度設計公式，計算鋼管混凝土柱之設計挫屈載重；惟 LRFD 規範規定，常重混凝土之抗壓強度，必須介於 3 ksi (21 MPa) 至 8 ksi (55 MPa)之間。但隨科技進步，混凝土抗壓強度已有顯著提升，此研究利用純軸壓試驗探討高強度鋼管混凝土柱($8 \leq f'_c \leq 12$ ksi)是否仍然適用於 LRFD 規範。此試驗總共製作 22 支 CFT 試體，其混凝土強度分別為 $f'_c = 4、9、10、12$ ksi。

試驗結果顯示，LRFD 之 CFT 公式不僅適用於高強度鋼管混凝土柱($8 \leq f'_c \leq 12$ ksi)，且 LRFD 之 CFT 設計公式，在估計 CFT 柱之軸壓強度是偏向保守的。

5. Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns(Sakino, K., et. al., 2004)

此研究計畫主要為探討混凝土填充鋼管柱的行為研究，釐清鋼管和填充的混凝土兩者之間的諧和與相互作用，並研討 CFT 柱載重變形關係的方法。總共製造與測試了 114 支試體，其中包含了比對填充型鋼管混凝土柱的空心鋼管柱。主要的設計參數為：鋼管斷面形狀、鋼管抗拉強度、鋼管斷面寬厚比、及混凝土抗壓強度。在此文獻中，亦有根據試驗結果，而建立一套可以評估圓形與矩形 CFT 柱軸向極限抗壓承載能力的設計公式。

6. Cyclic Analysis and Capacity Prediction of Concrete-Filled Steel Box Columns (Susantha, K. A. S., et. al., 2002)

近年來，內灌混凝土之填充型箱型柱，於建築結構已經廣為使用。此研究係探討加勁的厚壁及薄壁箱型鋼管混凝土柱之反覆載重彈塑性分析及容量預測，並提供以纖維分析方法，決定內填充混凝土鋼柱極限狀態之解析流程。本研究使用新的破壞準則，來決定強度以及韌性之預測，為使用於有加勁的薄壁及厚壁柱，研究修正最近發展的圍束混凝土單調應力-應變關係。為使用反覆載重分析，此研究使用一個簡單的反覆載重準則。鋼的材料非線性係使用 Nagoya 大學發展的修正兩面模型來描述。跟既有實驗結果比較，發現這些預測結果令人滿意。此研究提供之分析方法，可估計二次彎矩的效應及短期與長期的反應。

7. 含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究(陳正誠，2008)

根據國內 SRC 構造設計規範之規定，當混凝土之抗壓強度大於 560 kgf/cm^2 ，須依公認合理之試驗證明其可行性及可靠度。此研究係以實驗方式，探討含高強度混凝土箱型鋼柱受軸向受力行為研究。此試驗總共製作 27 支試體，其中 18 支柱試體寬度 500mm、9 支柱試體寬度 410 mm，並考量乾縮、剪力釘、圍束繫桿，探討參數為混凝土之抗壓強度、寬厚比，進行填充混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究。

實驗結果顯示：（1）對於混凝土強度為 6000psi 之 CFBC 短柱構件，規範強度公式 $P_{n0} = A_s F_y + 0.85 A_c f'_c$ 可合理估計強度；對於混凝土強度為 10000psi 之 CFBC 短柱構件，建議計算強度公式改採 $P_{n0} = A_s F_y + 0.8 A_c f'_c$ ，方能合理預估強度。（2）乾縮確實可能會降低其強度，但強度不一定隨乾縮量之增加而降低， B/t 對乾縮的忍受程度，有明顯的影響， B/t 愈小，忍受程度愈高。（3）剪力釘確實會稍微提高有乾縮 CFBC 短柱之強度，但對於韌性則不一定有幫助。（4） B/t 為 48 之情況下，混凝土強度為 6000psi 之 CFBC 短柱構件使用圍束繫桿，於 S/B 不大於 0.4 時，可以有效發展出良

好之韌性。(5) B/t 為 48 之情況下，混凝土強度為 10000psi 之 CFBC 短柱構件使用圍束繫桿，於 S/B 不大於 0.2 時，亦可有效發展出良好之韌性。

8. 混凝土箱型柱之撓曲韌性行為研究 (陳正誠，2009)

根據國內 SRC 結構設計規範，使用 3.5 tf/cm^2 等級之鋼材時，柱板之寬厚比 (b/t) 不得大於 42；且工程師基於強柱弱梁之考量，採用結實斷面寬厚比限制 (b/t 為 61)，使得箱型柱板厚度太薄，無法使用電熱熔渣銲銲接柱內橫隔板。此研究係以實驗方式，探討填充型箱型柱之軸壓及撓曲行為試驗，並發展新的柱內橫隔板銲接細節。此試驗總共製作 20 支試體，其中 7 支含圍束繫桿，內橫隔板銲接方式不同之試體有 3 支。試驗主要參數有柱鋼板寬厚比 (32、40、48、60)、內橫隔板銲接方式、剪力釘及圍束繫桿所提供的圍束力。

實驗結果顯示：(1) 新的箱型柱內橫隔板銲接細節及製作方式，尚可符合耐震需求。(2) 箱型柱柱板寬厚比介於 40~60 間之試體，其塑性層間轉角，皆能符合規範 3% 之規定。(3) 剪力釘可以增加彎矩強度及撓曲韌性容量，但增量有限。(4) 圍束繫桿可以提升混凝土的圍束效果，且對箱型柱柱板抵抗局部挫屈有幫助。

9. 填充高強度混凝土箱型鋼柱之撓曲韌性行為研究 (陳正誠，2010)

此研究探討柱板寬厚比放寬至結實斷面寬厚比限制 (等於 61)，對構件撓曲韌性之影響，規劃 10 支試體，寬厚比範圍介於 32 至 60 之間的填充混凝土箱型柱，進行撓曲行為試驗。且工程界施工時已使用於填充箱型柱的防爆繫桿，以避免箱型柱因灌築混凝土所產生的側壓，而造成柱板向外變形，實驗結果顯示經由適當的設計，繫桿可作為結構之用途，並降低柱板的厚度需求。

實驗結果顯示：(1) 寬厚比為 60 之試體，於實驗中提早產生局

部挫屈，導致無法發揮預期之理論彎矩強度。(2)寬厚比為 48 之試體，若圍束繫桿所提供的圍束應力達 66.2 kgf/cm^2 ，且繫桿之間寬比為 0.33，則有良好的韌性行為。(3)寬厚比為 60 之試體，若使用單排圍束繫桿所提供的圍束應力達 135 kgf/cm^2 以上，或雙排圍束繫桿所提供的圍束應力達 86 kgf/cm^2 以上，且繫桿之間寬比為 0.33，則有良好的撓曲韌性容量行為。

10. 在不同軸力下填充混凝土箱型鋼柱之撓曲行為研究 (陶其駿、蔡煒銘，2010)

該研究共完成 6 支填充型箱型鋼柱之反覆載重撓曲試驗，皆承受介於 0~50%軸向標稱強度之軸力。鋼材標稱降伏強度為 3.5 tf/cm^2 ，混凝土標稱抗壓強度為 280 kgf/cm^2 ，皆符合規範建議。考量到試驗機容量限制，其中 1 支填充型箱型柱柱寬 38 cm，另外 5 支填充型箱型柱柱寬為 31 cm，使其能達到預定的軸力比（軸力除以軸向標稱強度），若要求塑性轉角容量至少 3% rad，可藉著塑性轉角容量-軸力分佈圖回歸出所能容許的軸力比上限。根據試驗結果，得到寬厚比 32 的試體在軸力比大於 31%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。

11. 含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計 (陳正誠、黃國倫，2011)

該研究共完成 9 支填充型箱型鋼柱之反覆載重撓曲試驗，其中一支承受 20%軸向標稱強度之軸力，其餘皆承受 40%軸向標稱強度之軸力。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 kgf/cm^2 ，皆符合規範建議。其中 3 支填充型箱型柱探討高軸力下填充型箱型柱之撓曲韌性行為表現。另外 6 支填充型箱型柱以圍束繫桿來提升柱板寬厚比為 48 及 40 之填充型箱型柱之

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

塑性轉角容量，使其能達到至少 3%rad 的塑性轉角容量，探討在高軸力作用下圍束繫桿提升填充型箱型柱韌性行為之效果。根據試驗結果，得到結論敘述如後：（1）柱板寬厚比為 48 及 40 之無圍束繫桿試體，其彎矩強度實驗值除以理論值結果分別為 1.02 及 1.09，塑性轉角容量分別為 2.92 及 1.31%rad，反而寬厚比為 48 者較佳；（2）柱板寬厚比為 48 時，圍束繫桿可以將塑性轉角容量由 2.92%rad 提升至 4.21-4.46%rad；（3）柱板寬厚比為 40 時，圍束繫桿可以將塑性轉角容量由 1.31%提升至 2.11-3.91%rad。（4）本文提供一設計圍束繫桿之簡易方法，可供工程實務使用。

12. 填充混凝土箱型鋼柱受軸向力之實驗研究(吳明昌，2012)

進行本土性填充混凝土箱型鋼柱之實體試驗，瞭解填充混凝土箱型鋼柱軸向受力行為、破壞模式；並規劃 3 系列不同尺寸柱試體軸力載重試驗，其中柱寬 750 mm 試體為目前世界上最大之填充混凝土箱型鋼柱試體，探討尺寸效應，驗證規範所訂標稱受壓強度之有效性，提供國內工程界運用與相關規範修訂之參考。

實驗結果顯示：(1) 柱寬 300 mm 試體平均強度比為 111.2%，柱寬 500 mm 試體平均強度比為 103.7%，皆大於 100%，規範建議之標稱強度計算方式合宜。柱寬 750 mm 試體平均強度比為 90.5%，規範使用之標稱強度計算方式偏不保守。(2) 針對國內特殊性使用，由四片鋼板銲接組合而成之填充混凝土箱型鋼柱，此研究進行本土性填充混凝土箱型鋼柱之實體試驗，驗證規範所訂標稱強度計算方式，於柱寬度 500mm 以下，尚屬合宜。(3) 由不同尺寸箱型柱試體強度比之分佈圖可看出，對相同寬厚比之箱型柱，當柱寬度越大，強度比越低，強度比趨勢向下，尺寸效應有明顯影響。

13. 超高強度鋼材填充型箱型柱之軸向行為(黃少暉，2013)

該研究針對超高強度填充型箱型混凝土柱製作 18 個試體進

行實驗，鋼板使用之標稱強度為 5.6 tf/cm^2 之 HT690 鋼材，混凝土抗壓強度為 560 kgf/cm^2 及 700 kgf/cm^2 兩種，箱型柱斷面寬度介於 255 至 480mm 之間，鋼板厚度為 8、10 及 15mm 等三種，長寬比為 1.0、1.3、1.9 等三種，肢材寬厚比則介於 24 至 48 共 5 種，其探討之參數為試體斷面強度、肢材寬厚比的影響、軸向延展性、局部挫屈變形及內部填充混凝土之行為。研究結果顯示：(1)填充型箱型柱在發展出最大強度後，強度將快速下降，此現象為內部混凝土強度急遽下降導致，肢材寬厚比愈大，試體強度下降幅度越大；(2)當 5.6 tf/cm^2 級之箱型鋼柱搭配 560 kgf/cm^2 級以上之混凝土時，AISC 規範之設計公式會出現高估強度的現象；(3)斷面長寬比越大的箱型鋼柱，在拱效應的作用之下，內部圍束混凝土的行為越差，此現象在弱軸承受彎矩時將會更加顯著。

第三節 研究方法

本案研究方法為：(1) 相關文獻之蒐集與分析；(2) 大尺寸短柱試體之軸向行為實驗；(3) 試驗結果之分析與探討；(4) 檢討現行規範無限制 CFBC 柱長寬比之合理性與(5) 撰寫報告。

1. 相關文獻之蒐集與分析

蒐集並整理國內外相關文獻，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，可作為規範檢討的參考或補充資料。

2. 大尺寸短柱試體之軸向行為實驗

本研究需驗證混凝土強度對長寬比限制之影響，採用實驗之方式，探討其結構行為，且因填充混凝土箱型鋼柱受軸力至破壞階段，涉及到材料與幾何之非線性反應，其行為非常複雜，無法單由理論分析得到合理之結果。本研究將進行填充混凝土箱型鋼柱試體之軸力行為試驗，不同尺寸柱試體將受到不同軸力之載重，可得到軸力-應變之試驗曲線及填充混凝土箱型鋼柱試體之破壞模式。

3. 試驗結果之分析與探討

藉由試驗結果之分析，探討試體混凝土抗壓強度，對 CFBC 試體斷面長寬比之影響。

4. 檢討現行規範無限制 CFBC 柱長寬比之合理性

目前國內現行 SRC 規範尚未針對 CFBC 柱斷面長寬比，做任何限制，擬藉由試驗結果與討論，檢討現行規範無限制 CFBC 柱長寬比(H/B)之合理性。

5. 撰寫報告

本研究包含兩次報告之撰寫，第一次為期中報告，目的在說明本案之執行進度；第二次為期末報告，目的在說明本案之研究成果。

第四節 研究目的

本研究預計針對內灌混凝土之矩形填充混凝土箱型柱進行研究，預期目標包括：（一）以柱軸向強度需求的觀念出發，並藉由理論分析及結構試驗等方法，探討高強度混凝土矩形 CFBC 短柱承受軸向載重之行為，檢討規範於軸向標稱強度計算的合理性；（二）檢討設計規範中，混凝土強度使用規定上限 560kgf/cm^2 (8,000psi)時，於矩形 CFBC 柱斷面長寬比之使用限制；（三）探討當混凝土強度使用超過規定上限 560kgf/cm^2 (即 10,000psi/ 700kgf/cm^2)時，矩形 CFBC 柱斷面長寬比之使用限制，是否適用。回饋檢視現有相關實驗研究成果之可信度，提供國內工程界運用與相關規範修訂之參考。



圖 1.1 填充型鋼管混凝土柱

(資料來源：陳正誠等人，2008)

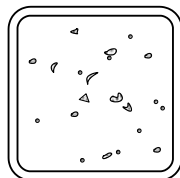


圖 1.2 無縫鋼管 CFT

(資料來源：陳正誠等人，2008)

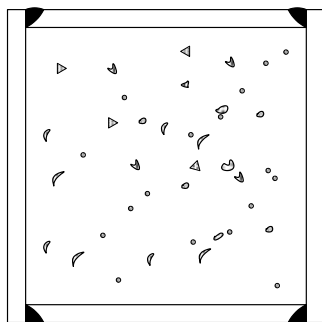


圖 1.3 填充混凝土箱型鋼柱

(資料來源：陳正誠等人，2008)

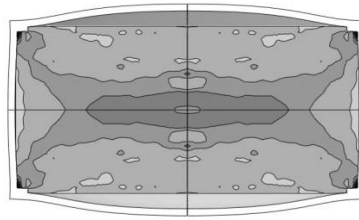


圖 1.4 矩形 CFBC 圍束

(資料來源：陳正誠等人，2012)

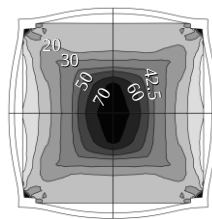


圖 1.5 方形 CFBC 圍束

(資料來源：陳正誠等人，2012)

第二章 試體計畫與試驗

第一節 試體設計

本研究針對高強度填充型箱型短柱進行試驗，主要探討的參數為柱斷面長寬比(H/B)及圍束繫桿之設置，短柱試體長邊固定為 590 mm，短邊則規劃不同尺寸(包括 440、400 及 300 mm 等)共 8 支填充混凝土箱型柱試體，其斷面如圖 2.1 所示，受軸力載重試驗，觀察其受力行為、破壞模式、斷面強度、軸向韌性。8 支試體分為 R、IR 及 TR 等 3 個系列，試體概要如表 2.1 所示。由於本研究係針對短柱，故試體長度採用 3 倍長邊柱寬 (3H)，柱寬 H 如圖 2.1 所示。

填充型箱型短柱依鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範規定，填充型鋼管混凝土柱耐震設計鋼骨斷面肢材寬厚比上限 λ_{pd} ，計算公式如下：

$$\lambda_{pd} = \sqrt{\frac{3E_s}{F_{ys}}} \quad (\text{式 2.1})$$

其中， E_s 為鋼骨之彈性模數、 F_{ys} 為鋼骨規定之降伏應力。

本研究柱試體柱板，採用 SN490B 系列鋼板（標稱降伏強度 3.3 tf/cm²），長邊寬厚比 (b_h/t) 則符合規範規定，固定為 40，其中 b_h 及 t 分別為長邊柱寬度及柱板厚度，如圖 2.1 所示，其餘鋼板採用 A572 Gr.50 系列鋼板（標稱降伏強度 3.3 tf/cm²）；混凝土標稱抗壓強度為 0.70 tf/cm²。

所有試體係利用全滲透鐸將 4 片鋼板組合成箱型柱，並以全滲透鐸在頂部及底部鐸上頂板及底板，全滲透鐸細部示意圖如圖 2.2 所示。試體直接由上往下灌漿，依柱試體斷面長寬比、設置握裹隔離層以及增設圍束繫桿與否。所有試體之詳細尺寸如圖 2.3 至圖 2.10 所示；R 系列為矩形斷面 CFBC 試體，共 3 支試體，依斷面長寬比 1.35、1.5 及 2.0 分別設定為 R1.35、R1.5 及 R2.0 試體；IR 系列為參考 R 系列試體，於試體上部加鐸多片垂直加勁板，並於箱型鋼柱內側使用廢機

油及超大塑膠袋塗佈，以隔絕內部混凝土與鋼板之間的摩擦，且混凝土只灌注到試體上表面下方約 16 cm 處，即不再灌注，使實驗時僅有箱型鋼柱受到垂直軸力作用，用以觀察 R 系列試體的箱型鋼柱柱板對軸力的圍束貢獻量；TR 系列為參考 R 系列試體，於試體斷面長邊中間加裝等間距螺桿，螺桿材質為 A490 鋼材與 A325 鋼材或同等級鋼材，螺桿直徑(ϕ_{tr})為 16mm，間距為 165mm。各短柱試體之軸向標稱強度 P_{n0} 如表 2-1 所示，係依鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說規定，對矩形受壓強度之計算公式如下：

$$P_{n0} = 0.85f'_c A_c + A_s F_{ys} \quad (\text{式 2.2})$$

其中， A_c 為混凝土斷面積， f'_c 為混凝土抗壓強度， A_s 為箱型鋼柱斷面積， F_{ys} 為鋼材標稱降伏應力。

1998 年傅正堯進行高強度鋼骨混凝土柱之耐震行為研究，提出剪力釘對撓曲強度與韌性沒有明顯的影響。1999 年美國華盛頓大學 Roeder 教授進行鋼管混凝土柱合成行為之研究，敘及填充型圓柱不配置剪力釘即具有合成效應。

2008 年陳正誠等人進行含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究，在考量混凝土乾縮情形下，使用剪力釘對試體強度有一定之幫助，強度比 (P_{max}/P_n) 大約提高 3 至 4%，其中 P_{max} 為試體之最大試驗強度；國內常見 CFBC 建築案例，因有實務上之顧慮，包括混凝土乾縮影響，及大尺寸工程構件混凝土圍束不如試驗室小尺寸 CFBC 柱試體，大尺寸工程構件混凝土澆置可能有材料漸離的問題，業界顧慮合成效應，尚配置剪力釘，惟本研究為撙節經費之考量，不考量乾縮，不探討剪力釘效應。

第二節 試體製作

於 104 年 7 月 17 日自桃園市觀音區鋼板工廠取樣本研究試體之

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

鋼板材料，如照片 2.1 至照片 2.4 所示。

本研究各系列試體外觀情形，如照片 2.5 及照片 2.6 所示。TR 系列之試體於斷面長向邊設有開槽孔，並加裝等間距螺桿，螺桿材質為 A490 鋼材或同等級鋼材，螺桿直徑(φ_{tr})為 19mm，間距為 195mm，於試體高度的中間段兩根螺桿上黏貼應變計，當箱型短柱試體承受軸壓力作用時，可量測螺桿所提供鋼板圍束的力量，以利理論分析計算。而 IR 系列於試體上部加鉸多片垂直向加勁板，並於箱型鋼柱內側使用廢機油及超大塑膠袋塗佈如照片 2.7 所示，以隔絕內部混凝土與鋼板之間的摩擦。

試體於 104 年 9 月 8 日執行灌漿作業，如照片 2.8 及照片 2.9 所示，其中比較特別需注意的是 IR 系列之試體，混凝土只灌注到試體上表面下方約 16 cm 處，即不再灌注，使實驗時僅有箱型鋼柱受到垂直軸力作用，如照片 2.10 所示。

預拌車於 104 年 9 月 8 日到達本中心大型力學實驗室後，即進行混凝土坍度試驗(照片 2.11 及照片 2.13 所示)，以確保混凝土品質於適當範圍內，後則進行混凝土圓柱試體灌漿作業，如照片 2.14 所示。因混凝土灌於箱型短柱試體後，無法充分加以養護，因此本研究將混凝土圓柱試體拆模後，即利用保鮮膜將圓柱試體包覆，以此模擬混凝土於箱型鋼柱內之情況，做為後續實驗與理論分析間之參考依據。

圓柱試體為 28 天、30 天分別進行抗壓試驗，其詳細資料如表 2.2 所示。其中由於 28 天圓柱試體為濕養，強度較強；而 30 天之圓柱試體為了符合試體內混凝土之乾養環境，因此其圓柱試體為乾養。而本研究之試體鋼板及圍束繫桿亦經由拉力試驗得到其材料性質，如表 2.3 至表 2.5 所示。

第三節 試驗裝置及加載程序

試體上、下方設有頂板及底板，頂板有預留圓孔及 4 個小氣孔以供試體灌漿之用，圓孔鋼板保留至實驗時再蓋回，讓軸壓應力較能平均分佈，以免有應力傳遞之問題，試驗裝置如圖 2.11 所示。箱型鋼柱的應變採用單軸應變計量測，又分為軸向及橫向二種，分別量測箱型鋼柱四個角落之軸向應變量，及箱型鋼柱四面中心之橫向應變量，如遇有圍束繫桿，則向上改貼至 2 個圍束繫桿的中間；位移計則是量測軸向總變形量，除以試體全高以求得平均應變；加載方式為軸向加載，軸向變形增加至平均應變為 0.04 時或試體強度低於最大強度一半時，即終止載重試驗。

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

表 2.1 實驗試體規劃（資料來源：本研究製作）

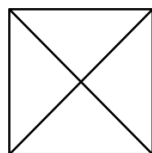
項目	試體 編號	F_y (tf/cm ²)	f'_c (kgf/cm ²)	H (cm)	B (cm)	H/B	t (cm)	P_{n0} (tf)	ϕ_{tr} (mm)	備註
1	R1.35	3.3	700	59	44	1.34	1.4	2304	-	
2	R1.5	3.3	700	59	40	1.5	1.4	2133	-	
3	R2.0	3.3	700	59	30	2.0	1.4	1706	-	
4	IR1.35	3.3	700	59	44	1.34	1.4	926	-	
5	IR1.5	3.3	700	59	40	1.5	1.4	889	-	
6	IR2.0	3.3	700	59	30	2.0	1.4	796	-	
7	TR1.5	3.3	700	59	40	1.5	1.4	2133	16	A490
8	TR2.0	3.3	700	59	30	2.0	1.4	1706	16	A325

第二章 試體計畫與試驗

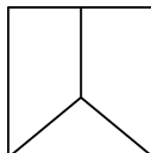
表 2.2 混凝土圓柱試體抗壓強度試驗表（資料來源：本研究製作）

	齡期	最大強度	抗壓強度	抗壓強度	直徑	高寬比	修正係數	破壞	抗壓強度	平均抗壓強度	平均抗壓強度
	天	kgf	kgf/mm ²	psi	cm			形態	kgf/cm ²	psi	kgf/cm ²
2015/10/6	28	83586	7.39	10511.237	12.00	2	-	A	739	10734.073	754.67
2015/10/6	28	88737	7.82	11122.851	12.02	2	-	B	782		
2015/10/6	28	84202	7.40	10525.460	12.04	2	-	A	740		
2015/10/6	28	133833	7.53	10710.367	15.04	2	-	B	753		
2015/10/6	28	136557	7.72	10980.615	15.01	2	-	C	772		
2015/10/6	28	135356	7.64	10553.908	15.02	2	-	A	742		
2015/10/8	30	83416	7.41	10866.827	11.97	2	-	A	764	10772.003	757.333
2015/10/8	30	86756	7.66	10895.274	12.01	2	-	A	766		
2015/10/8	30	83757	7.42	10553.908	11.99	2	-	A	742		

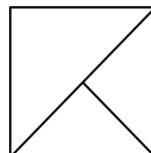
(A)



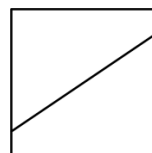
(B)



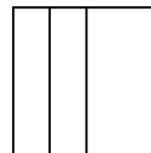
(C)



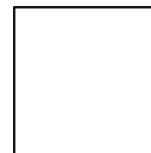
(D)



(E)



(F)



第三章 試驗結果與討論

表 2.3 鋼板拉力試驗表(厚度 22mm) (資料來源：本研究製作)

樣品名稱	降伏點			抗拉強度			降伏比
	ksi	N/mm ²	tf/cm ²	ksi	N/mm ²	tf/cm ²	%
t22-1	57	394	4.02	77	534	5.45	74
t22-2	57	396	4.38	78	536	5.47	74
t22-3	57	394	4.02	77	533	5.44	74

表 2.4 鋼板拉力試驗表(厚度 14mm) (資料來源：本研究製作)

樣品名稱	降伏點			抗拉強度			降伏比
	ksi	N/mm ²	tf/cm ²	ksi	N/mm ²	tf/cm ²	%
t14-1	57	391	3.99	78	540	5.51	72
t14-2	58	403	4.11	78	539	5.50	75
t14-3	60	414	4.22	79	548	5.59	76
t14-4	58	399	4.07	78	539	5.50	74
t14-5	58	403	4.11	78	541	5.52	74
t14-6	56	386	3.94	78	540	5.51	71

表 2.5 圍束繫桿拉力試驗表 (資料來源：本研究製作)

樣品名稱	降伏點			抗拉強度			降伏比	斷面縮率
	ksi	N/mm ²	tf/cm ²	ksi	N/mm ²	tf/cm ²	%	%
A325-1	122	841	8.58	153	1055	10.76	80	43
A325-2	123	848	8.65	154	1062	10.83	80	43
A325-3	127	876	8.93	154	1062	10.83	82	47
A490-1	151	1041	10.62	158	1089	11.11	96	57
A490-2	162	1117	11.39	170	1172	11.95	95	59
A490-3	161	1110	11.32	168	1158	11.81	96	58

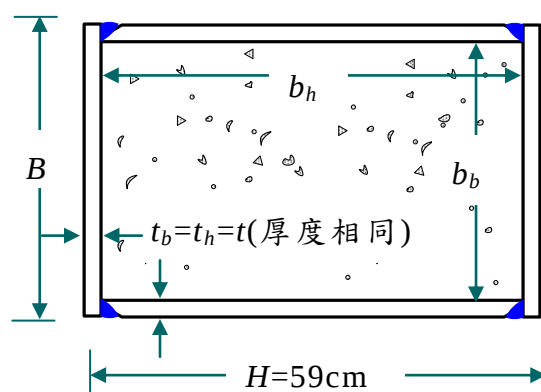


圖 2.1 試體斷面示意圖

(資料來源：2013 陶其駿研究製作[15])

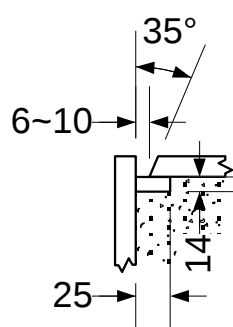


圖 2.2 試體全滲透銲細部示意圖(單位：mm)

(資料來源：2013 陶其駿研究製作[15])

第三章 試驗結果與討論

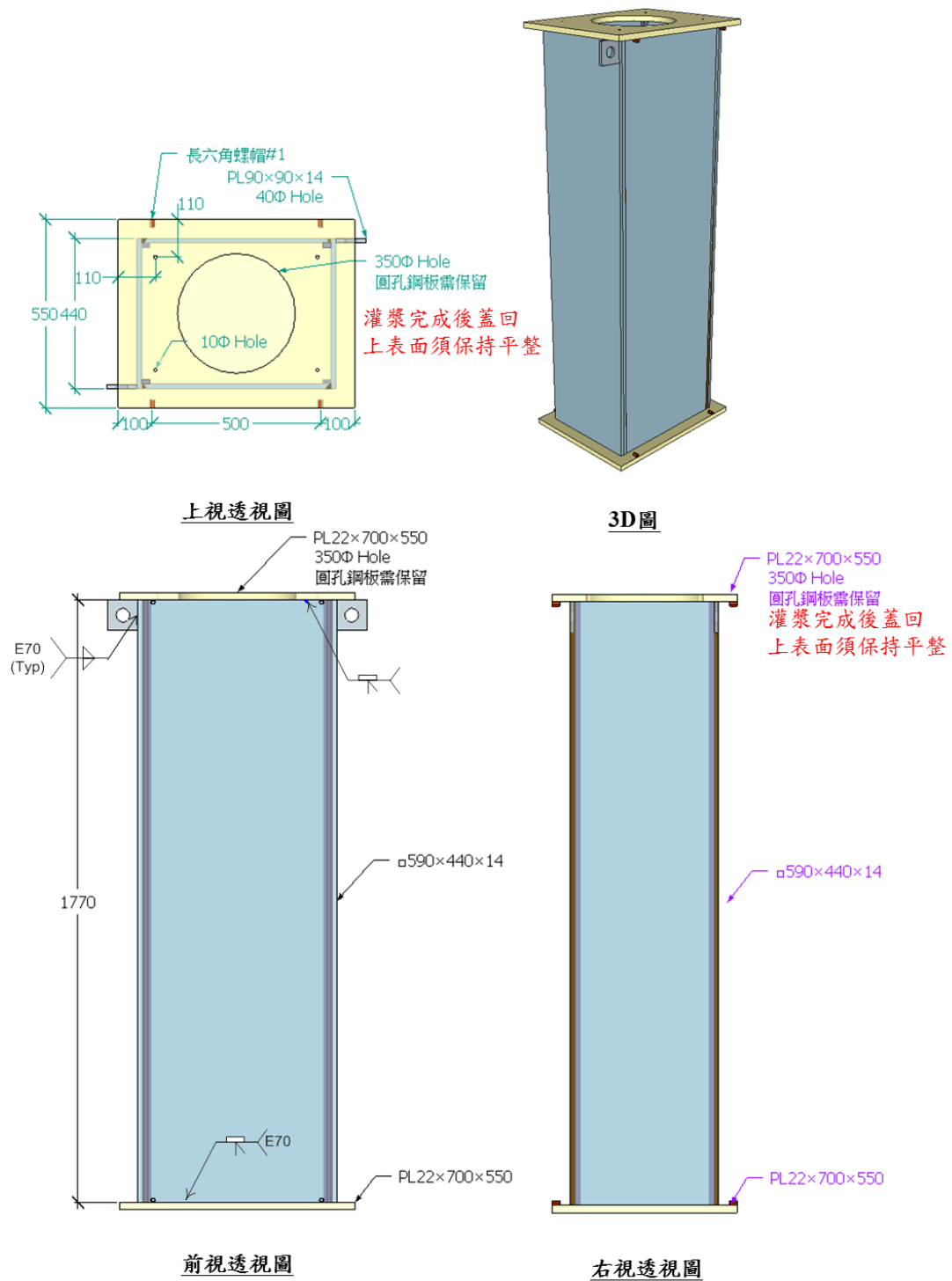


圖 2.3 R1.35 試體之詳細尺寸
(資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

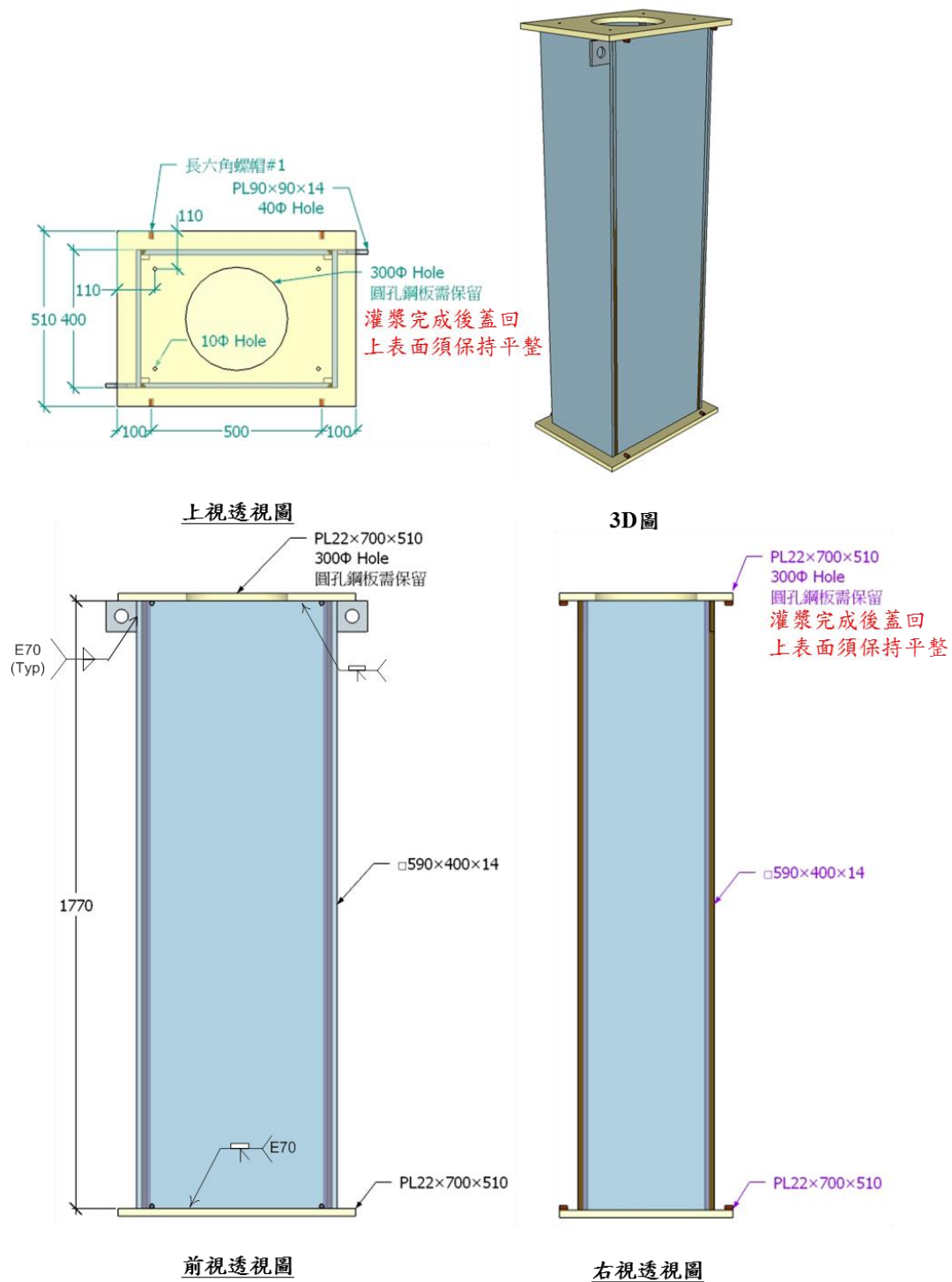


圖 2.4 R1.5 試體之詳細尺寸

(資料來源：本研究製作)

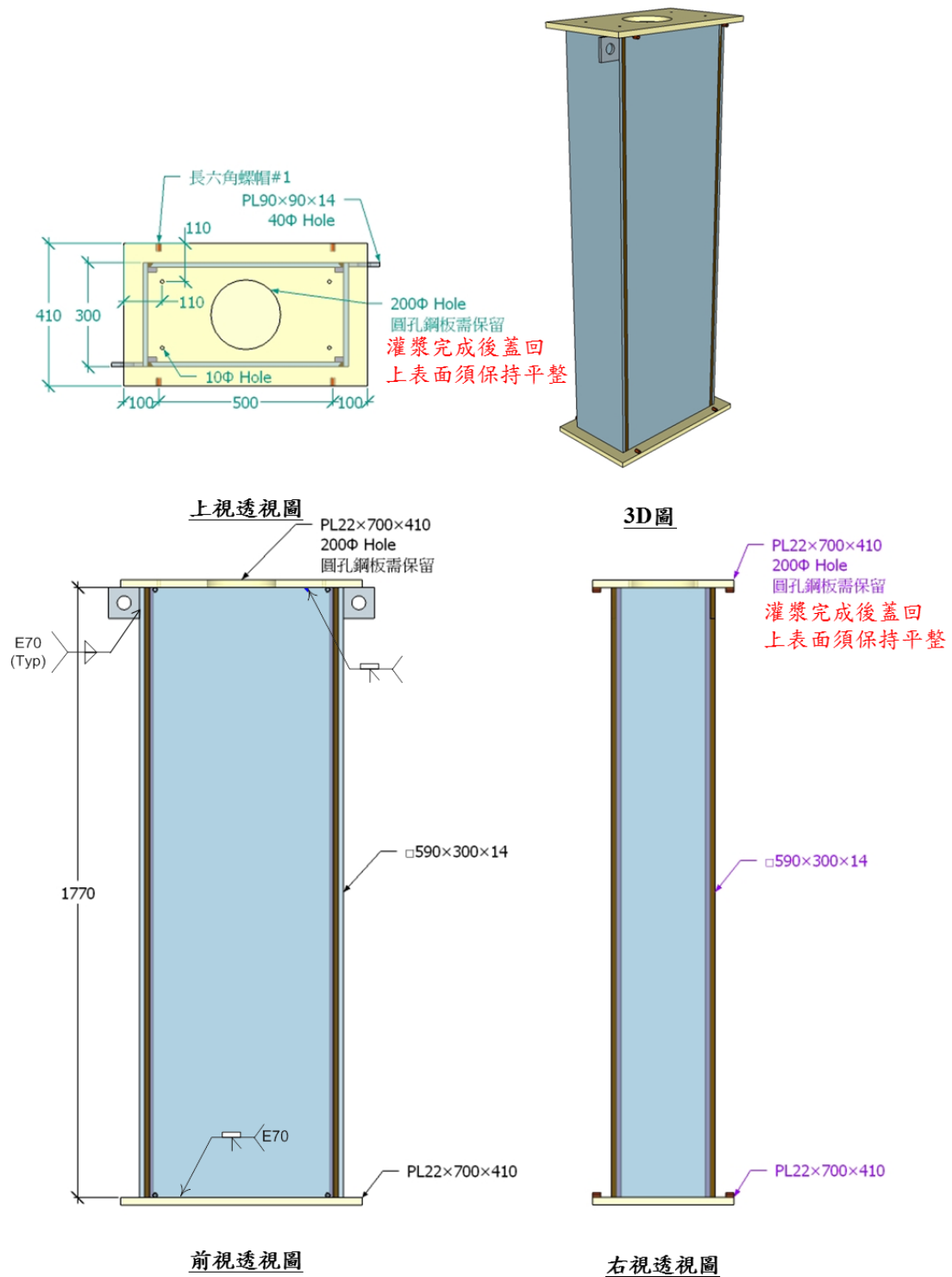


圖 2.5 R2.0 試體之詳細尺寸
(資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

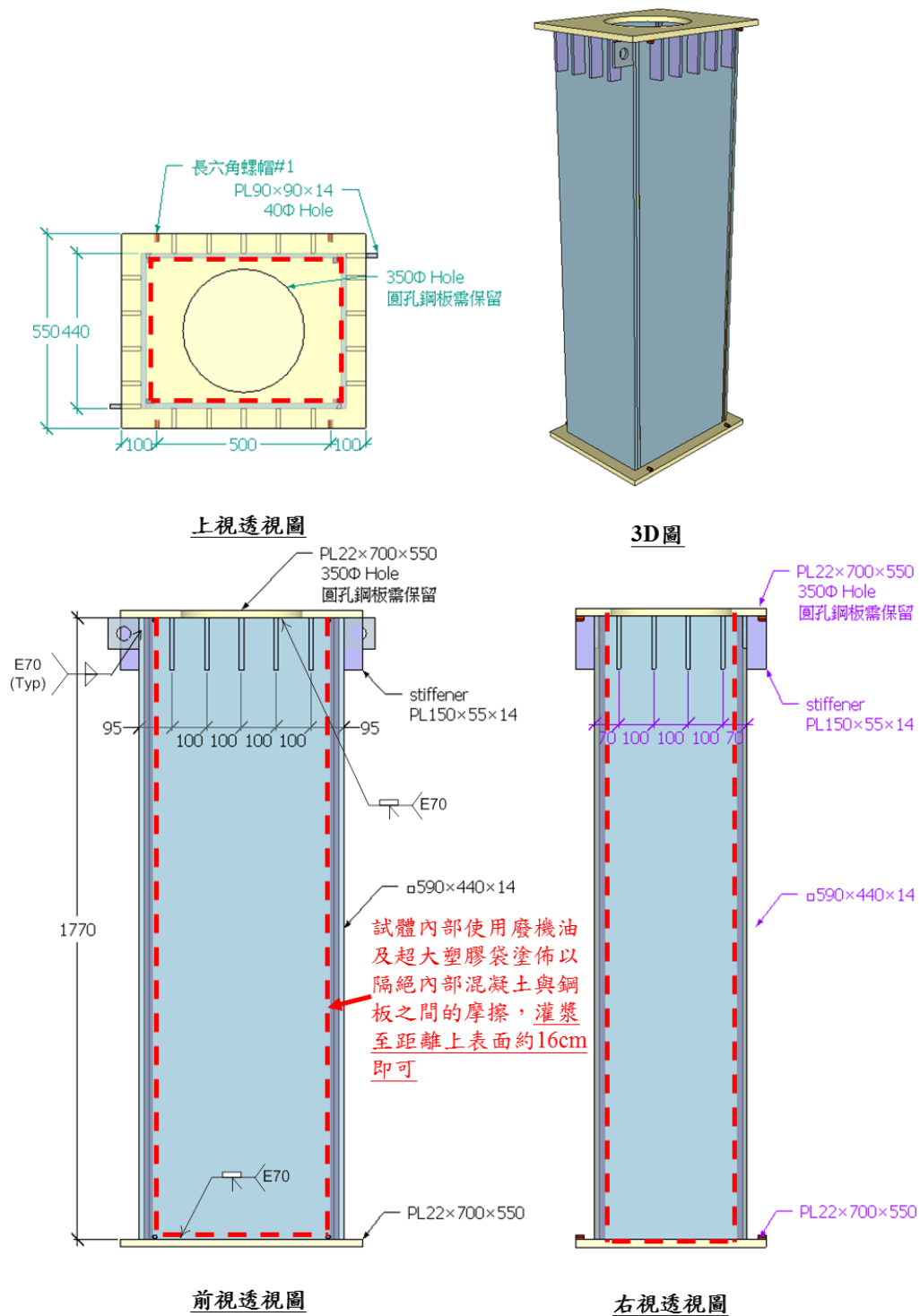


圖 2.6 IR1.35 試體之詳細尺寸
(資料來源：本研究製作)

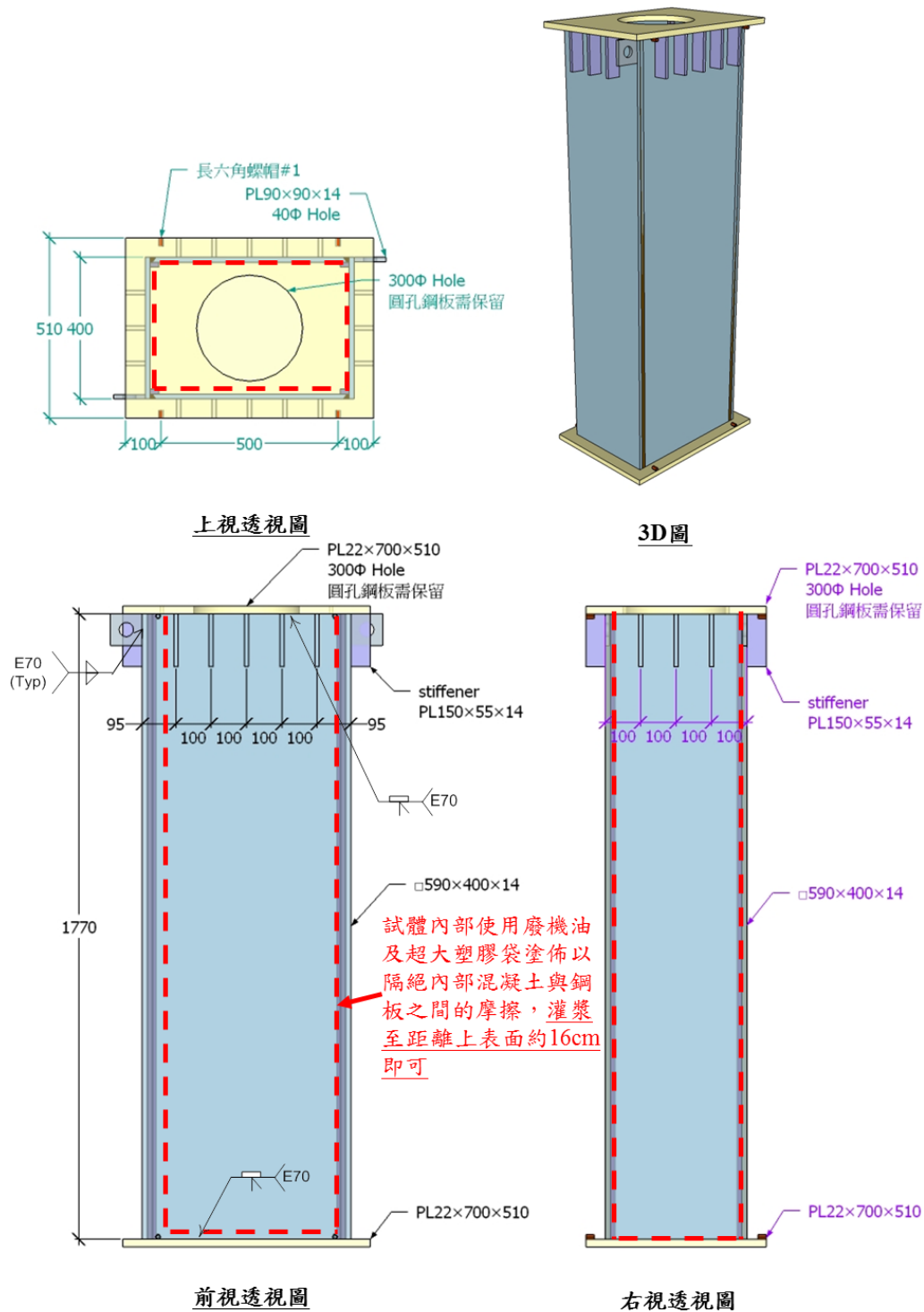


圖 2.7 IR1.5 試體之詳細尺寸
(資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

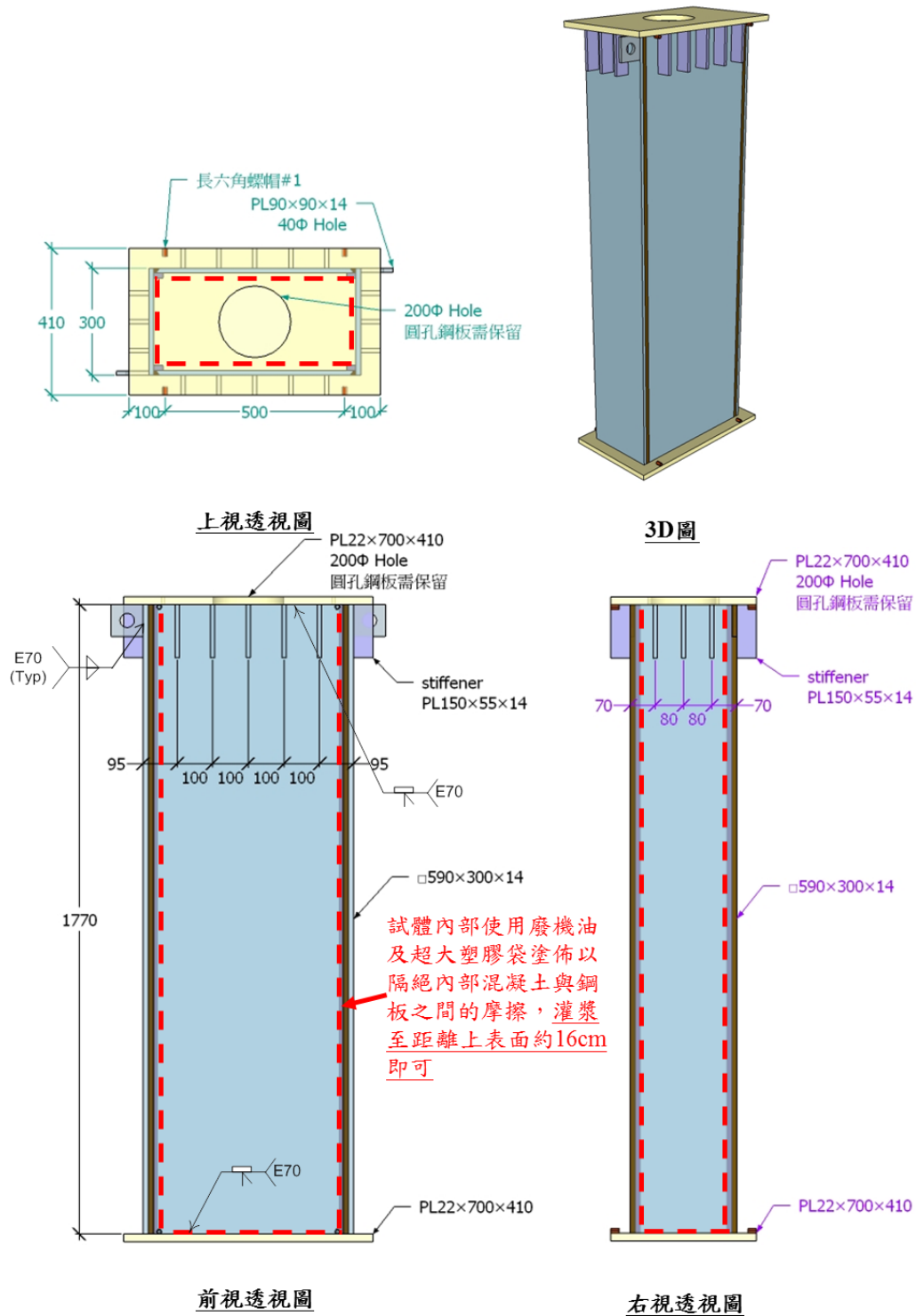


圖 2.8 IR2.0 試體之詳細尺寸
(資料來源：本研究製作)

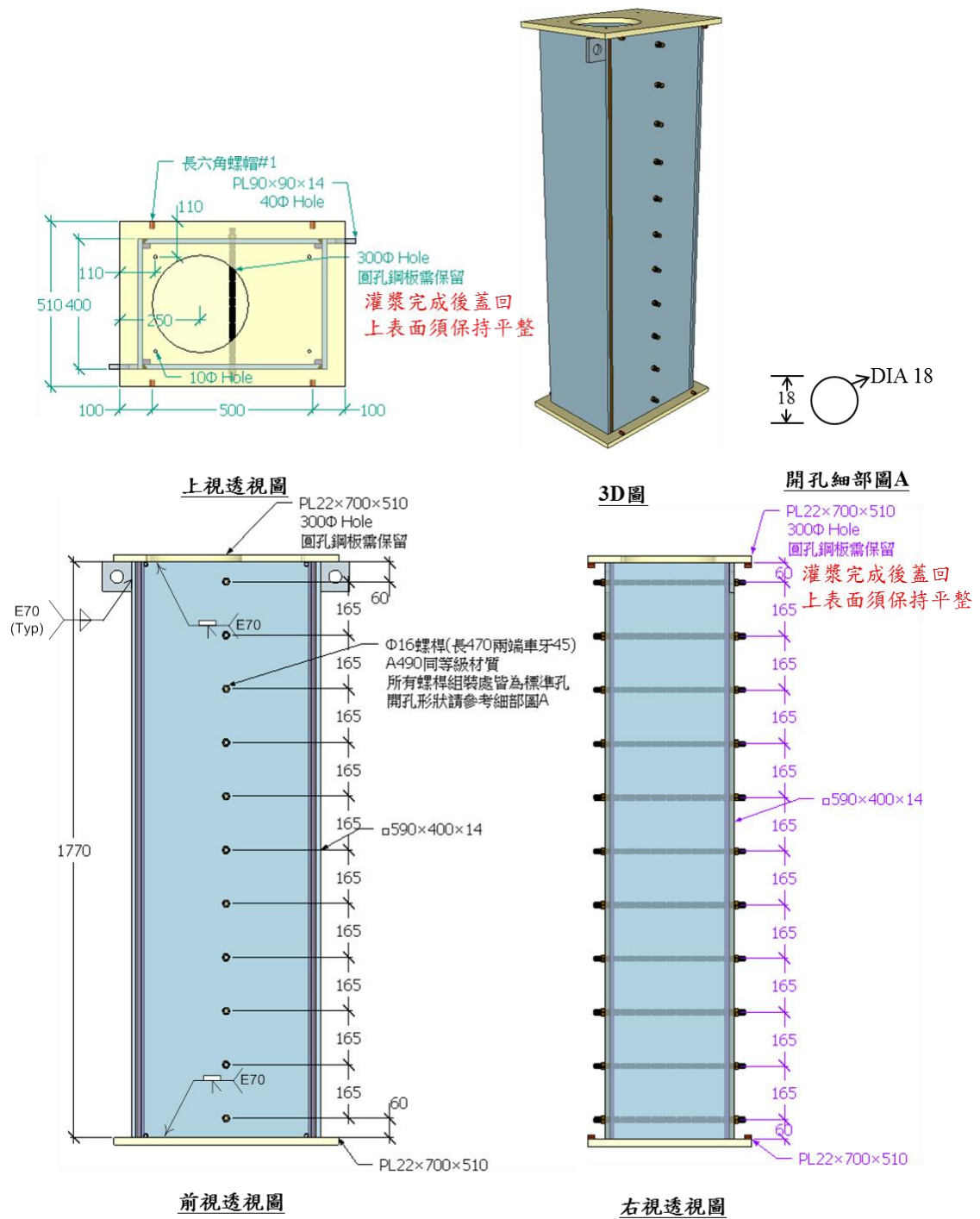


圖 2.9 TR1.5 試體之詳細尺寸

(資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

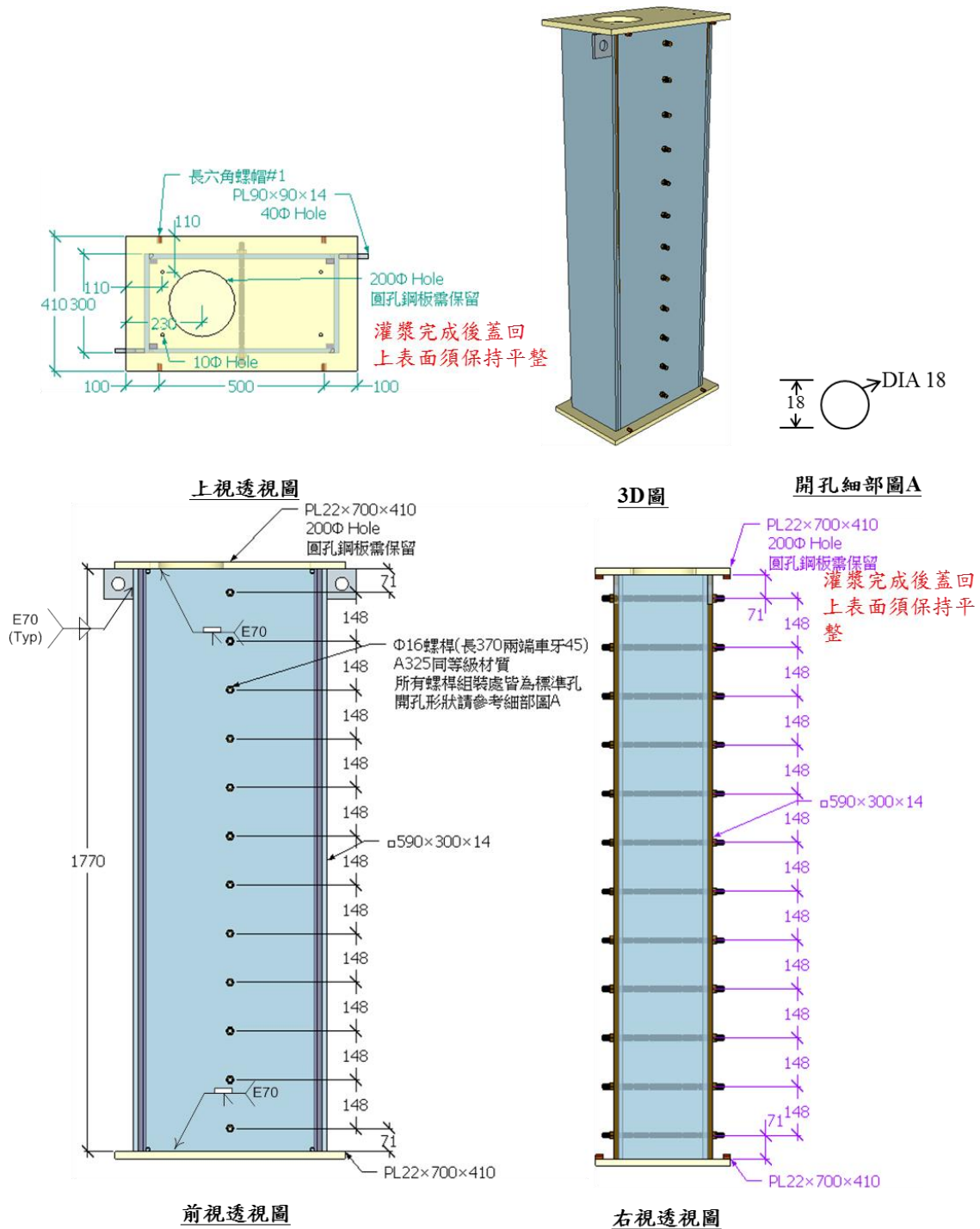


圖 2.10 TR2.0 試體之詳細尺寸
(資料來源：本研究製作)

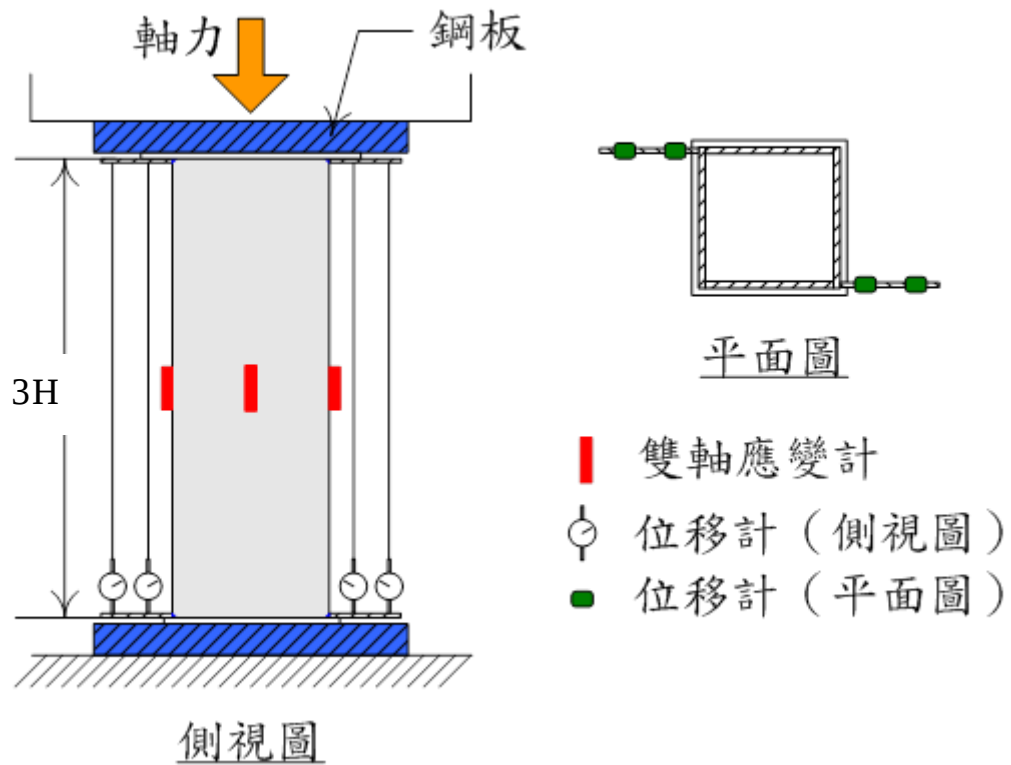


圖 2.11 短柱試體及試驗裝置示意圖

(資料來源：[14])

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究



照片 2.1 鋼板工廠材料挑選
(資料來源：本研究製作)



照片 2.2 鋼板工廠取樣
(資料來源：本研究製作)



照片 2.3 箱型柱製作銲接
(資料來源：本研究製作)



照片 2.4 銲道超音波檢驗
(資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究



照片 2.5 試體照片-a
(資料來源：本研究製作)



照片 2.6 試體照片-b
(資料來源：本研究製作)



照片 2.7 IR 系列試體內側置入塑膠袋示意圖
(資料來源：本研究製作)



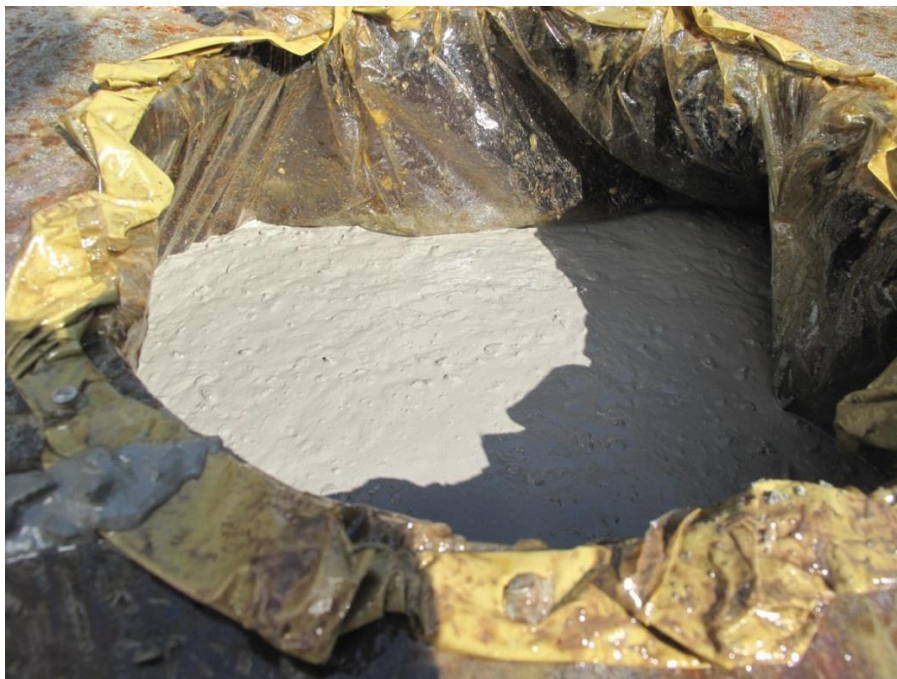
照片 2.8 灌漿作業示意圖
(資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究



照片 2.9 灌漿作業示意圖

(資料來源：本研究製作)



照片 2.10 IR 系列試體灌漿預留空間示意圖

(資料來源：本研究製作)



照片 2.11 混凝土評估試驗示意圖
(資料來源：本研究製作)



照片 2.12 混凝土坍流度示意圖
(資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究



照片 2.13 混凝土留下漏斗時間
(資料來源：本研究製作)



照片 2.14 混凝土圓柱試體灌漿作業
(資料來源：本研究製作)

第三章 試驗結果與討論

第一節 試驗結果與觀察

本研究之試體高度皆相同，因此每個系列之加載應變率亦相同，而應變率分為三段做加載，第一段為應變率 1.77mm/min ，軸向位移為 0mm 至 17.7mm ；第二段為應變率 3.54mm/min ，軸向位移為 17.7mm 至 35.4mm ；第三段為應變率 7.08mm/min ，軸向位移為 3.54mm 至實驗結束。本節將大略論述各試體於實驗過程中所觀察到之情況與試體於重要轉折點所紀錄之事項。

R1.35 試體

當加載應變率在第一段時，試體西側於軸向位移 7.65mm 時產生交叉降伏線；當加載應變率在第二段，軸向位移達 18mm 時，在東側上方約 35cm 處產生挫屈，當軸向位移 29mm 時於北側上方約 30cm 處產生挫屈，南側下方 40cm 及東側下方亦產生挫屈，而於軸向位移達 30mm 時，北側下方 40cm 處產生第二處挫屈；當加載應變率達第三段，軸向位移在 83mm 時，西南側角落熱影響曲開裂，軸向位移 91.5mm 時西北角落熱影響區開裂。試體最大強度為 2675tf ，最大軸向位移達到 97.11mm ，強度下降 50% 以上，試驗結束破壞最終照片如照片 3.1 所示。

R1.5 試體

當加載應變率在第一段時，試體西側於軸向位移 7.08mm 時產生交叉降伏線，當軸向位移 11mm 時於西側上方約 30cm 處產生挫屈，當軸向位移 14mm 時於南側上方約 35cm 處產生挫屈；當加載應變率在第二段，軸向位移達 23mm 時，在東側上方約 35cm 處產生挫屈；當加載應變率達第三段，軸向位移在 40mm 時，西北側角落熱影響曲開裂，軸向位移在 47mm 時，東北側角落熱影響曲開裂，軸向位移在

48mm 時，西南側和東南側角落熱影響曲開裂。試體最大強度為 2426.65tf，最大軸向位移達到 47.33mm，強度下降 50% 以上，試驗結束破壞最終照片如照片 3.2 所示。

R2.0 試體

當加載應變率在第一段時，試體西側於軸向位移 6.8mm 時產生水平降伏線，當軸向位移 8.5mm 時南、北側產生斜向降伏線，然而當軸向位移 13mm 時東、西側上方出現挫屈；當加載應變率在第二段，軸向位移為 18.2mm 時，南側上方 40cm 處出現挫屈；當加載應變率達第三段，軸向位移為 58mm 時東北、西南側角落熱影響區產生開裂。試體最大強度為 2044tf，最大軸向位移達到 60.74mm，強度下降 50% 以上，試驗結束破壞最終照片如照片 3.3 所示。

IR1.35 試體

當加載應變率在第一段時，試體西側於軸向位移 6.25mm 時產生水平降伏線，當軸向位移 8mm 時於西側上、下方產生斜向降伏線，當軸向位移 12.04mm 時於西側下方產生挫屈；當加載應變率在第二段，軸向位移達 18.04mm 時於南側下方產生挫屈，；當加載應變率達第三段，軸向位移在 55mm 時，北西側角落熱影響曲開裂，軸向位移在 63mm 時，東南側角落熱影響曲開裂。試體最大強度為 1096.31tf，最大軸向位移達到 64.32mm，強度下降 50% 以上，試驗結束破壞最終照片如照片 3.4 所示。

IR1.5 試體

當加載應變率在第一段時，試體北側於軸向位移 6.53mm 時產生水平降伏線，當軸向位移 8.29mm 時於東側中間產生斜向降伏線，當軸向位移 11.16mm 時於西側下方產生挫屈；當加載應變率在第二段，軸向位移達 18.04mm 時於南側下方產生挫屈，軸向位移在 11.43mm 時於東側下方產生挫屈，軸向位移在 20.5mm 時於北側下方產生挫屈；當加載應變率達第三段，軸向位移在 59.96mm 時，東南側角落熱影響

曲開裂，軸向位移在 63mm 時，西南側角落熱影響曲開裂。試體最大強度為 1020.65tf，最大軸向位移達到 77.08mm，強度下降 50%以上，試驗結束破壞最終照片如照片 3.5 所示。

IR2.0 試體

當加載應變率在第一段時，試體西側於軸向位移 6.34mm 時產生水平降伏線，當軸向位移 8.91mm 時於東側上方產生斜向降伏線，當軸向位移 11.5mm 時於西側下方產生挫屈，當軸向位移 12.8mm 時於東側下方產生挫屈；當加載應變率在第二段，軸向位移達 31.04mm 時於南側下方產生挫屈，軸向位移在 34.0mm 時於北側下方產生挫屈；當加載應變率達第三段，軸向位移在 78.13mm 時，東南側角落熱影響曲開裂，軸向位移在 80.13mm 時，東北側角落熱影響曲開裂，軸向位移在 87.15mm 時，西南側角落熱影響曲開裂，軸向位移在 91.17mm 時，西北側角落熱影響曲開裂。試體最大強度為 944.53tf，最大軸向位移達到 125.67mm，強度下降 50%以上，試驗結束破壞最終照片如照片 3.6 所示。

TR1.5 試體

當加載應變率在第一段時，軸向位移 7.41mm 時西側上方產生斜向降伏線，8.27mm 時東、北側中間產生斜向降伏線，9.05mm 時西側出現交叉降伏線；當加載應變率在第二段，軸向位移為 15.8mm 時西側及東側中上方出現挫屈，軸向位移為 19.8mm 時北側與南側及東側上方出現挫屈，22mm 第 2 根圍束繫桿斷裂於試體裡面，導致強度下降，33.5mm 西側中上方第 1 根圍束繫桿斷裂；當加載應變率達第三段，軸向位移在 39mm 時東側上方第 2 個圍束繫桿斷裂，40.5mm 西南側角落熱影響區產生開裂。試體最大強度為 2216.34tf，最大軸向位移達到 54.57mm，強度下降 50%以上，試驗結束破壞最終照片如照片 3.7 所示。

TR2.0 試體

當加載應變率在第一段時，軸向位移 6.76mm 時西側均勻產生水平降伏線，7.93mm 時東、西側產生斜向降伏線；當加載應變率在第二段，軸向位移為 21mm 時西側中間出現挫屈，25mm 西側第 6 根圍束繫桿斷裂，27mm 東側中間出現挫屈，29mm 東側第 8、9 根圍束繫桿斷裂；當加載應變率達第三段，68mm 西北側角落熱影響區產生開裂。試體最大強度為 1962.06tf，最大軸向位移達到 75.95mm，強度下降 50%以上，試驗結束後可觀察到當鋼板產生嚴重挫屈，使圍束繫桿無法承擔而受彎剪作用與拉伸作用而斷裂，試驗結束破壞最終照片如照片 3.8 所示。

以下將針對本研究各系列試體之試驗結果進行詳細論述。其試驗後之詳細結果及相關應變對照表如表 3.1 至表 3.3 所示。

R 系列

R 系列之試體應變-載重曲線如圖 3.1 所示，其正規化如圖 3.2 所示。實驗結果將描述如下，由圖 3.1 中可以得知 R 系列試體發展至最大強度後，試體強度迅速下降，其原因為混凝土強度急遽下降所致，隨著試體斷面長寬比越大，強度下降幅度及殘餘強度平台約略較大及低。R 系列試體放大前段之應變-載重曲線圖如圖 3.3 所示，其 ε_{peak} 介於 0.00390 至 0.00457 之間，如表 3.1 所示。各試體達最大強度後，會有明顯的強度下降趨勢，表示短柱內混凝土有嚴重碎裂使強度遞減，各試體之強度下降至一區段後，由於鋼板之圍束效應使力量趨於平緩，提高試體的韌性，亦可能使力量在提升。而當位移持續增加，局部挫屈之變形越來越嚴重，使試體於角落銲道處產生應力集中並在熱影響區產生開裂現象，使試體之強度急遽下降，各試體之開裂時間對應之應變如表 3.1 所示。而各試體皆為強度低於最大強度之 50% 時，結束試驗。

IR 系列

IR 系列之試體應變-載重曲線如圖 3.4 所示，其正規化如圖 3.5 所示。IR 系列皆為無握裹作用之填充混凝土箱型矩形試體。於圖 3.4 中可以看到試體之最大強度依斷面之長寬比越小而強度越大，IR 系列試體放大前段之應變-載重曲線圖如圖 3.6 所示，試體達最大強度所對應之 ε_{peak} 介於 0.00303 至 0.00348 之間。當試體達最大強度後有明顯之強度下降趨勢，由於 IR 系列僅由外圍鋼板傳遞力量，因此其強度較 R 系列之試體小。當試體強度下降時可以發現鋼板開始產生挫屈變形，其對應之應變如表 3.1 所示，而 IR2.0 試體可以明顯看到當強度下降後，有明顯之強度回升趨勢，其由於鋼板與混凝土之間無握裹，當試體鋼板受軸向壓力時使之挫屈變形而強度下降，直到鋼板開始擠

壓內部之混凝土使強度逐漸回升。隨著應變持續增加，鋼板挫屈越來越明顯，試體之強度開始下降，待試體之強度逐漸降至試體最大強度之 50%時，試驗結束。

TR 系列

TR 系列之試體應變-載重曲線如圖 3.7 所示，其正規化如圖 3.8 所示。此系列之試體斷面尺寸皆與 R 系列試體相同，惟其於長向開槽形孔並裝置圍束繫桿，以增加長向之圍束效果，其與 R 系列之比較將於後續作詳細探討。於圖 3.10 中亦可觀察看到試體之最大強度依斷面之長寬比越小而強度越大，TR 系列試體放大前段之應變-載重曲線圖如圖 3.9 所示，試體達最大強度所對應之 ε_{peak} 介於 0.00378 至 0.00408 之間。當試體達最大強度後，其強度雖有下降之趨勢，但由於有圍束繫桿之圍束效應，使其比較於 R 系列之強度下降較為緩慢。當應變持續增加後，可以觀察到鋼板明顯挫屈變形，而位於鋼板嚴重挫屈的位置由於其側向變形過大，造成圍束繫桿受彎曲剪力及拉伸作用，使得圍束繫桿於後期產生斷裂現象，在圍束繫桿斷裂後，即可觀察到試體強度逐漸下降，TR 系列之試體實驗亦當試體強度達最大強度之 50%時，試驗結束。

第二節 填充型箱型柱耐震性能討論

本節將探討歷年蒐集資料之圍束繫桿與混凝土強度之比較。比較 R 系列與 TR 系列試體之受壓載重-應變行為，其試體應變-載重曲線如圖 3.10 所示，其正規化如圖 3.11 及圖 3.12 所示。由圖 3.10 中可以看到 R 系列試體最大強度皆大於 TR 系列試體，且斷面長寬比越小強度差異越大。由圖 3.12 中可以觀察出 TR2.0 試體由於裝置圍束繫桿，使鋼板變形後為其所圍束，因此於試體達最大強度後，其強度下降速率較緩慢，達到有效的圍束效果，提升短柱試體之韌性，由試驗結果顯示，圍束繫桿仍可顯著提升填充高強度混凝土箱型柱試體的軸向延展性，但圍束繫桿是否影響試體軸向強度之發揮，尚待進一步試驗結果之分析。

在美國 AISC、ACI 及臺灣 SRC 規範對於軸向桿件強度的設計要求中，包含了鋼骨、鋼筋與混凝土的貢獻，其中計算填充型箱型柱設計承壓強度之計算公式如式 2.2。將混凝土圓柱試體及鋼板之拉力試片試驗結果代入公式，可以得到實際的規範計算值 P_{a0} ，將試體的試驗結果 P_{peak} 除上 P_{a0} 後可得到各試體的強度比。經綜合彙整相關研究資料，其中柯人文(2012)所製作 AA 系列 7 組試體內部填充 $0.4tf/cm^2$ 及混凝土並使用 $3.5tf/cm^2$ 鋼材；陶其駿(2012)所製作 R 系列 3 組及 TR 系列 3 組試體內部填充 $0.28tf/cm^2$ 及混凝土並使用 $3.5tf/cm^2$ 鋼材，將上述實驗資料整理於表 3.4 中。 P_{peak}/P_{a0} 值介於 1.02 至 1.10 之間，平均值為 1.06、變異係數僅為 0.027，這些數據顯示規範的強度計算值可以與試驗結果吻合，式 3.1 可以合理的估計填充型箱型柱的斷面強度。

然而比較本研究與陶其駿(2012)R 系列試體，填充 $700kgf/cm^2$ 與 $350 kgf/cm^2$ 混凝土之受壓載重-應變行為，其試體應變-載重曲線如圖 3.13 所示，其正規化如圖 3.14 所示。由圖 3.13 中可以觀察出填充高強度混凝土箱型柱試體有較高之極限強度，但其軸向延展性較低。

使用 3.3 tf/cm^2 級鋼柱，填充 700 kgf/cm^2 級混凝土，受壓強度計算公式與試驗結果比值，介於 0.99 至 1.04，顯示規範強度計算公式仍有高估強度的情形，應予適當修正。

根據柯人文(2012)及黃少暉(2013)曾建議當混凝土強度為 1000psi 時，將混凝土貢獻量 $0.85A_c f'_c$ 改為 $0.75A_c f'_c$ ，其觀點為使用高強度混凝土，在鋼材未達降伏時混凝土已達其極限強度，此時疊加法可能會出現高估實際強度的情形發生，若欲將規範之設計強度調整至與此研究之試體強度相符合，應該將式 2.2 中之混凝土貢獻量 $0.85A_c f'_c$ 改為 $0.8A_c f'_c$ ，故本成果報告採用 $0.8A_c f'_c$ 來計算混凝土貢獻量，於是式 2.2 改為：

$$(P_{a0})_m = A_s F_y + 0.8A_c f'_c \quad (\text{式 3.1})$$

將柯人文(2012)所製作 AB 系列 4 組試體內部填充 0.7 tf/cm^2 及混凝土並使用 3.5 tf/cm^2 鋼材以及本研究所製作 R 系列 3 組及 TR 系列 2 組試體內部填充 0.7 tf/cm^2 及混凝土並使用 3.5 tf/cm^2 鋼材計算試驗結果 P_{peak} 除上 $(P_{a0})_m$ 之強度比，整理於表 3.5 中。其 P_{peak}/P_{a0} 值介於 0.91 至 1.02 之間，平均值為 0.9867、變異係數為 0.0382； $P_{peak}/(P_{a0})_m$ 值介於 0.94 至 1.07 之間，平均值為 1.0178、變異係數僅為 0.0372，除了 TR1.5 試體之外，式 3.1 所計算之強度值能夠保守估算試體之實際強度。推測 TR1.5 試體在混凝土澆灌過程中，在繫桿之間有些微空隙，在澆置混凝土過程中無法立即判斷瑕疵，導致最大強度 P_{peak} 偏低，檢視 TR1.5 試體的試驗完成後之狀況，並無發現銲道瑕疵。於是基於上述觀點，判斷內部填充的混凝土有弱點，使得 TR1.5 試體最大強度 P_{peak} 偏低。

因此本研究建議填充混凝土箱型柱採用一般強度 560 kgf/cm^2 (8000psi) 及高強度混凝土 700 kgf/cm^2 (10000psi) 在計算承壓強度時，混凝土貢獻量 $\alpha A_c f'_c$ 分別採用 $\alpha = 0.85$ 及 0.8 ，混凝土強度介於 700 kgf/cm^2 與 560 kgf/cm^2 之 α 值採線性內插計算，如圖 3.17。對於混

土強度超過 8000psi 之 α 值計算公式為：

$$P_{a0} = \alpha A_c f'_c + A_s F_y \quad (\text{式 3.2})$$

$$\alpha = 0.85 - 0.05 \frac{(f'_c - 560)}{140}, (f'_c \text{ in } kgf/cm^2) \quad (\text{式 3.3})$$

$$560 \leq f'_c \leq 700 \text{ } kgf/cm^2$$

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

表 3.1 試體於極限載重、鋼板發生挫屈階段及熱影響區開裂時機階段之對應軸向應變及載重(資料來源:本研究製作)

試體編號	極限載重狀態			觀察到鋼板發生挫屈			熱影響區開裂時機	
	軸向應變 ε_{peak}	載重 $P_{max}(tf)$	計算強度 $P_n(tf)$	P_{max}/P_n (%)	軸向應變	載重 (tf)	軸向應變	載重 (tf)
R1.35	0.00390	2674	2635	102%	0.00630	1808	0.04389	1644
R1.5	0.00457	2426	2444	99%	0.00720	1626	0.02067	1371
R2.0	0.00342	2044	1968	104%	0.00394	1919	0.03011	1011
IR1.35	0.00325	1096	1142	96%	0.00370	1071	0.03151	738
IR1.5	0.00303	1020	1096	93%	0.00408	961	0.03469	606
IR2.0	0.00348	944	982	96%	0.00429	901	0.04460	729
TR1.5	0.00408	2215	2444	91%	0.00560	2123	0.02008	1509
TR2.0	0.00378	1962	1968	100%	0.00946	1514	0.03635	1115

表 3.2 TR 系列圍束繫桿初始斷裂時機之對應軸向應變及載重

(資料來源:本研究製作)

試體編號	圍束繫桿斷裂時機	
	軸向應變	載重(tf)
TR1.5	0.008718	1943
TR2.0	0.011042	1476

表 3.3 本研究試體之應變對照表（資料來源：本研究製作）

試體編號	ε_{bk}	ε_r	ε_{fr}	ε_{rb}	$\varepsilon_{0.85}$	$\varepsilon_{0.8}$	$\varepsilon_{0.75}$	$\varepsilon_{0.7}$
R1.35	0.00630	0.010	0.04389	-	0.0045	0.0045	0.0048	0.0056
R1.5	0.00720	0.010	0.02067	-	0.0054	0.0055	0.0055	0.0061
R2.0	0.00394	0.010	0.03011	-	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040
IR1.35	0.00370	0.010	0.03151	-	0.0130	0.0193	0.0248	0.0292
IR1.5	0.00408	0.010	0.03469	-	0.0179	0.0232	0.0276	0.0318
IR2.0	0.00429	0.006	0.04460	-	0.0395	0.0442	0.0456	0.0000
TR1.5	0.00560	0.010	0.02008	0.00872	0.0104	0.0156	0.0183	0.0197
TR2.0	0.00946	0.010	0.03635	0.01104	0.0060	0.0071	0.0117	0.0140

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

表 3.4 填充一般混凝土強度箱型柱試驗結果（資料來源：本研究製作）

試體編號	F_{ya} (tf/cm ²)	f'_{ca} (tf/cm ²)	A_s (cm ²)	A_c (cm ²)	P_{a0} (tf)	P_{max} (tf)	$\frac{P_{max}}{P_{a0}}$
R1	3.81	318.4	269	2091	1592	1693	1.06
R2	3.81	318.4	255	1810	1463	1598	1.09
R3	3.81	318.4	241	1529	1333	1452	1.09
TR1	3.81	318.4	269	2091	1592	1734	1.09
TR2	3.81	318.4	255	1810	1463	1590	1.09
TR3	3.81	318.4	241	1529	1333	1463	1.10
AA24	3.65	428	252	1429	1440	1562	1.08
AA32	3.86	428	191	1490	1279	1300	1.02
AA40	3.86	428	234	2266	1728	1821	1.05
AA48a	3.976	428	196	2304	1618	1657	1.02
AA48b	3.976	428	196	2304	1618	1704	1.05
AA60a	4.272	470	87	1282	884	912	1.03
AA60b	4.272	470	87	1282	884	915	1.04
						平均值	1.06
						變異係數	0.027

註：深色欄位為[13]

表 3.5 填充高強度混凝土箱型柱試驗結果 (資料來源：本研究製作)

試體編號	F_{ya} (tf/cm ²)	f'_{ca} (tf/cm ²)	A_s (cm ²)	A_c (cm ²)	P_{a0} (tf)	$(P_{a0})_m$ (tf)	P_{max} (tf)	$\frac{P_{max}}{P_{a0}}$	$\frac{P_{max}}{(P_{a0})_m}$
R1.35	4.07	758	281	2315	2635	2547	2674.44	1.02	1.05
R1.5	4.07	758	269	2091	2444	2365	2425.78	0.99	1.03
R2.0	4.07	758	241	1529	1968	1910	2043.84	1.04	1.07
TR1.5	4.07	758	269	2091	2444	2365	2215.38	0.91	0.94
TR2.0	4.07	758	241	1529	1968	1910	1961.75	1.00	1.03
AB24	3.65	740	1429	252	1819	1766	1858.308	1.02	1.05
AB32	3.86	740	1490	191	1675	1620	1638.124	0.98	1.01
AB40	3.86	740	2266	234	2329	2245	2248.726	0.97	1.00
AB48	3.98	740	2304	196	2229	2144	2110.092	0.95	0.98
							平均值	0.9867	1.0178
							變異係數	0.0382	0.0372

註：深色欄位為[13]

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究



(a) 東側



(b) 西側



(c) 南側



(d) 北側

照片 3.1 R1.35 最終破壞照片（資料來源：本研究製作）



(a) 東側



(b) 西側



(c) 南側



(d) 北側

照片 3.2 R1.5 最終破壞照片（資料來源：本研究製作）

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究



(a) 東側



(b) 西側



(c) 南側



(d) 北側

照片 3.3 R2.0 最終破壞照片（資料來源：本研究製作）



(a) 東側



(b) 西側



(c) 南側



(d) 北側

照片 3.4 IR1.35 最終破壞照片（資料來源：本研究製作）

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究



(a) 東側



(b) 西側



(c) 南側



(d) 北側

照片 3.5 IR1.5 最終破壞照片（資料來源：本研究製作）



(a) 東側



(b) 西側



(c) 南側



(d) 北側

照片 3.6 IR2.0 最終破壞照片 (資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究



(a) 東側



(b) 西側



(c) 南側



(d) 北側

照片 3.7 TR1.5 最終破壞照片（資料來源：本研究製作）



(a) 東側



(b) 西側



(c) 南側



(d) 北側

照片 3.8 TR2.0 最終破壞照片 (資料來源：本研究製作)

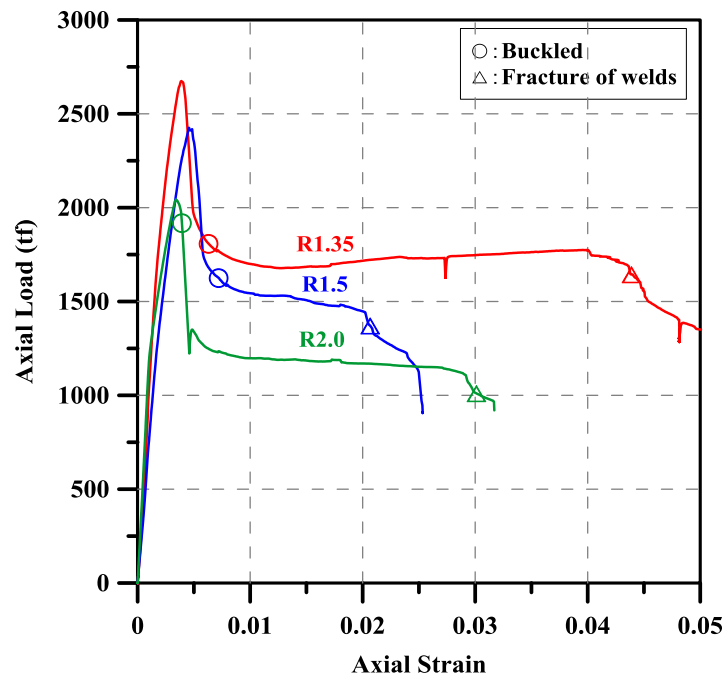


圖 3.1 試體 R 系列軸力與軸向應變圖

(資料來源：本研究製作)

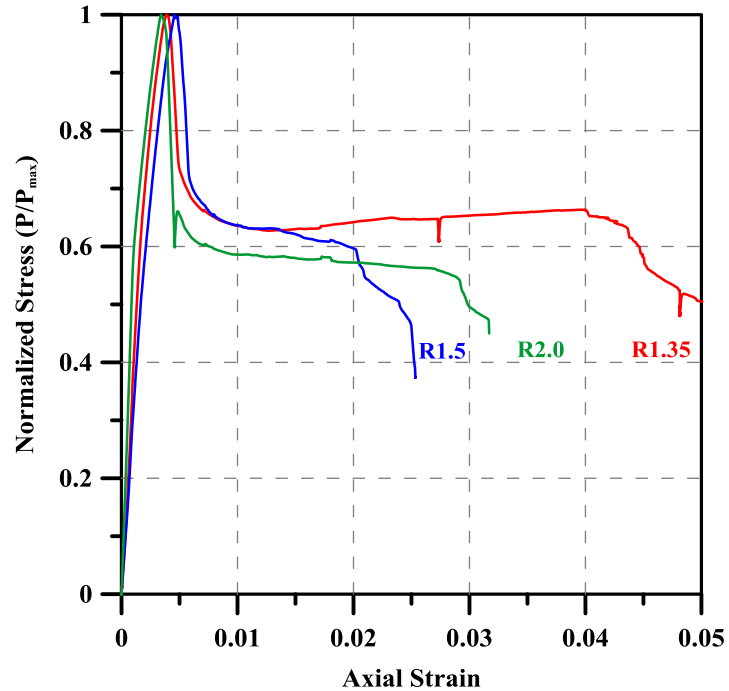


圖 3.2 試體 R 系列軸向(正規化)載重-應變曲線

(資料來源：本研究製作)

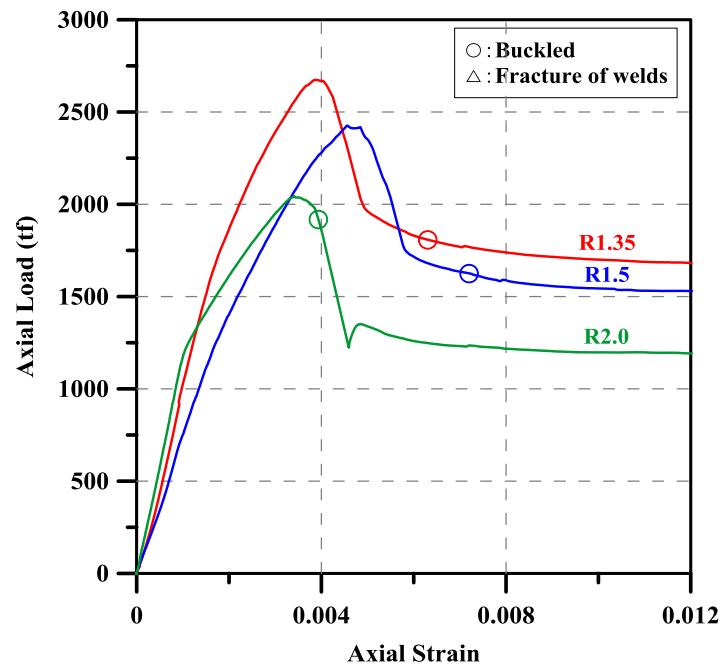


圖 3.3 試體 R 系列軸力與軸向應變圖(放大前段)

(資料來源：本研究製作)

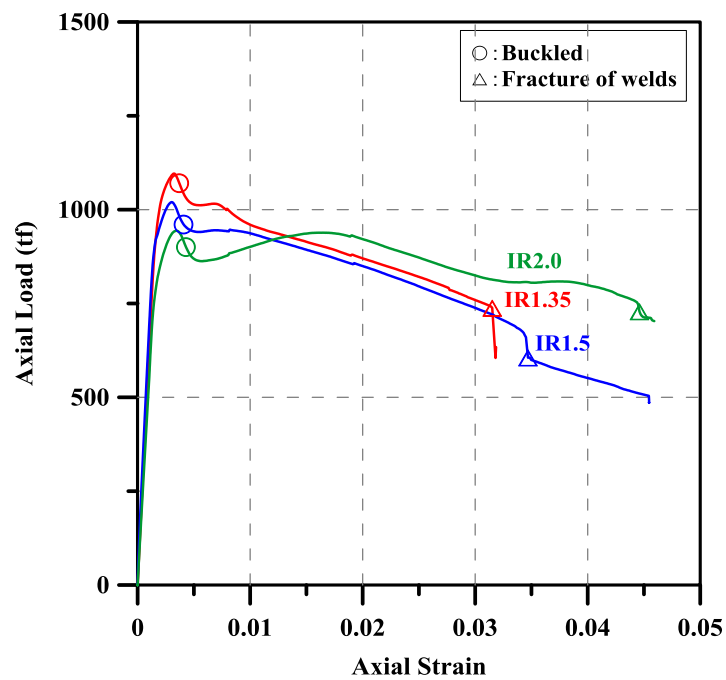


圖 3.4 試體 IR 系列軸力與軸向應變圖

(資料來源：本研究製作)

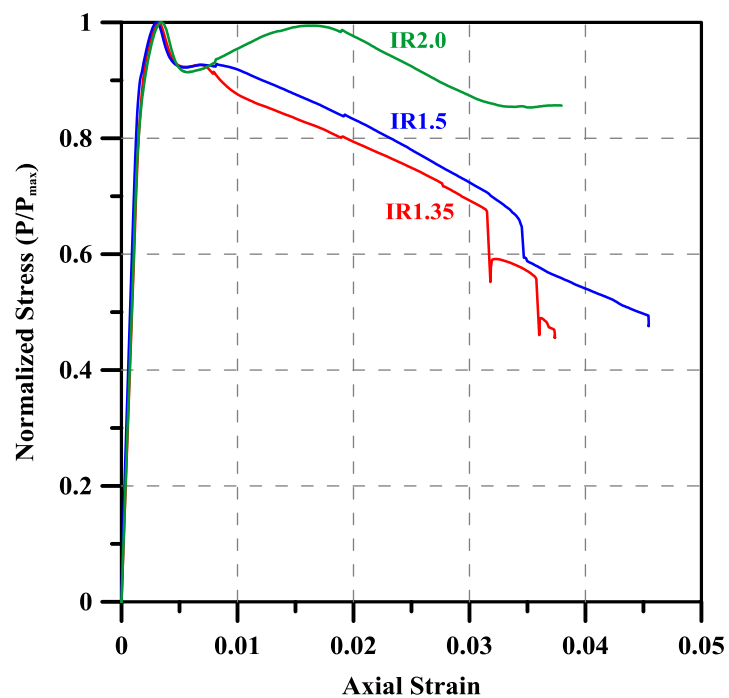


圖 3.5 試體 IR 系列軸向(正規化)載重-應變曲線
(資料來源：本研究製作)

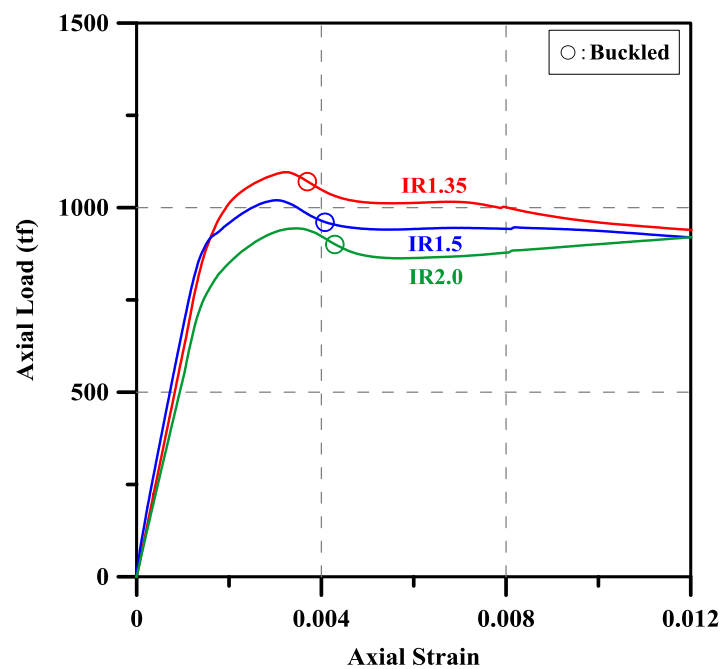


圖 3.6 試體 IR 系列軸力與軸向應變圖(放大前段)
(資料來源：本研究製作)

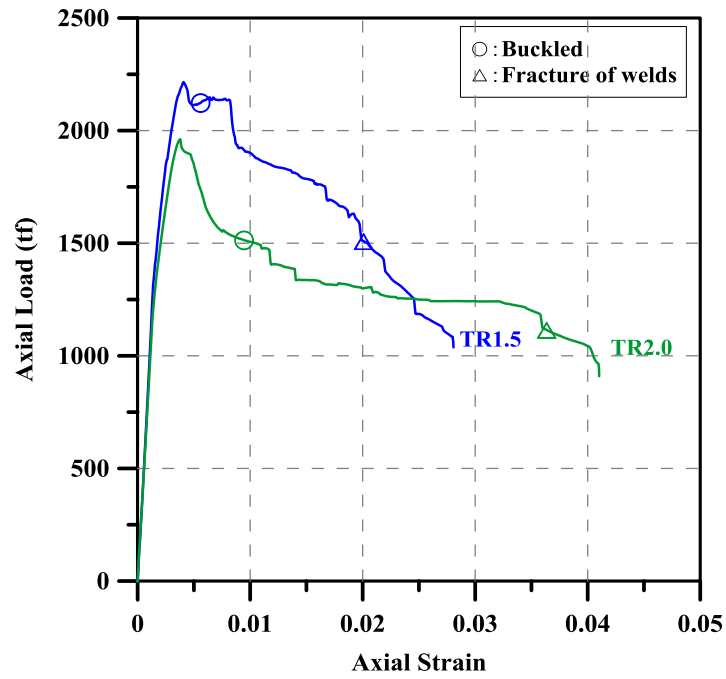


圖 3.7 試體 TR 系列軸力與軸向應變圖

(資料來源：本研究製作)

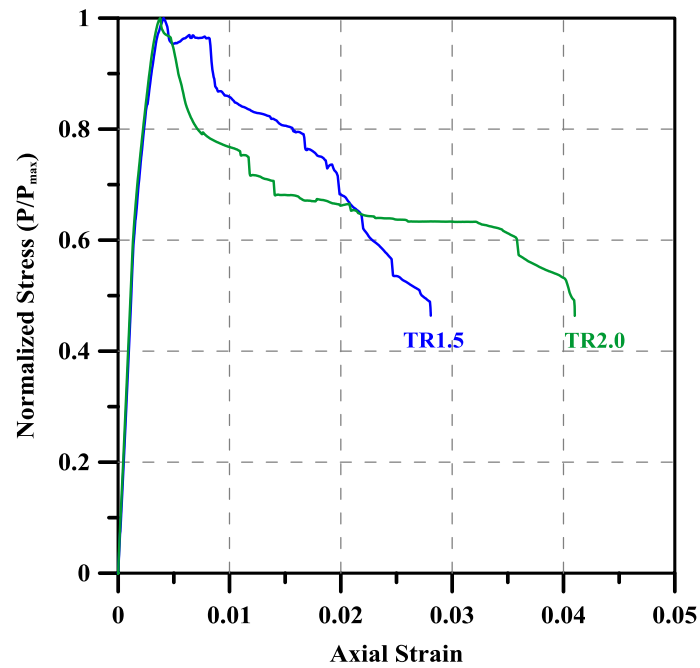


圖 3.8 試體 TR 系列軸向(正規化)載重-應變曲線

(資料來源：本研究製作)

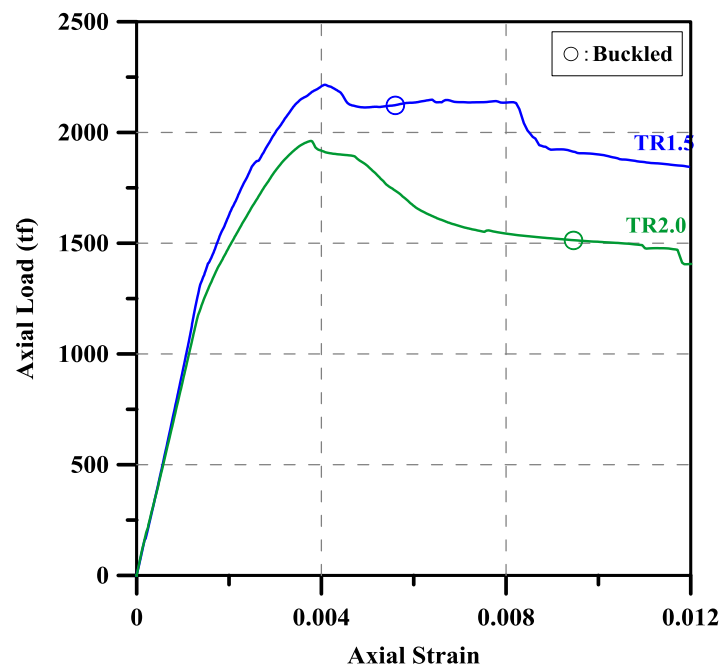


圖 3.9 試體 TR 系列軸力與軸向應變圖(放大前段)

(資料來源：本研究製作)

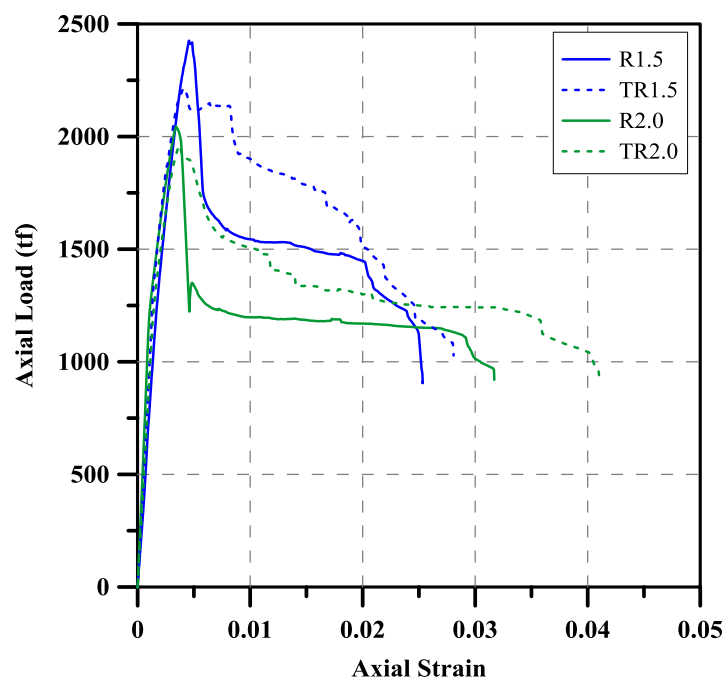


圖 3.10 TR-R 系列試體比對圖

(資料來源：本研究製作)

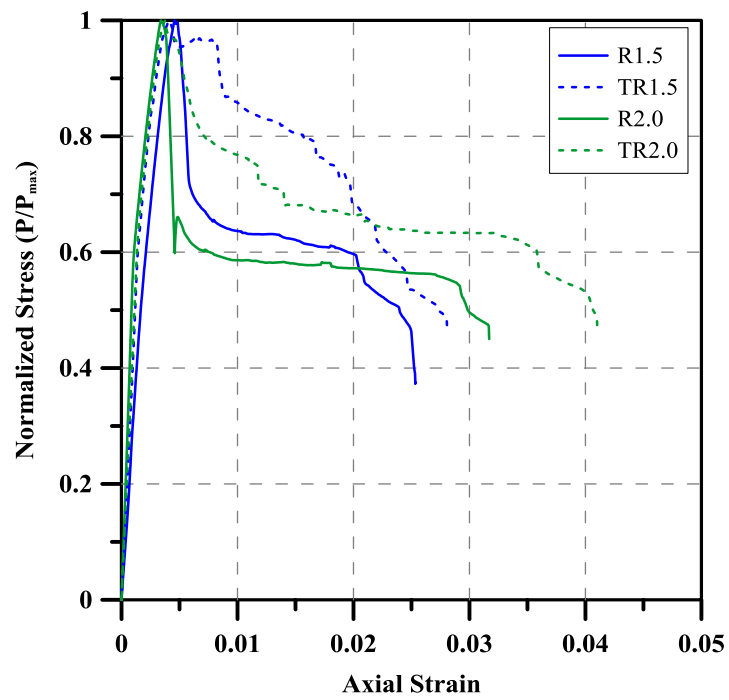


圖 3. 11 TR-R 系列試體比對圖(正規化)

(資料來源：本研究製作)

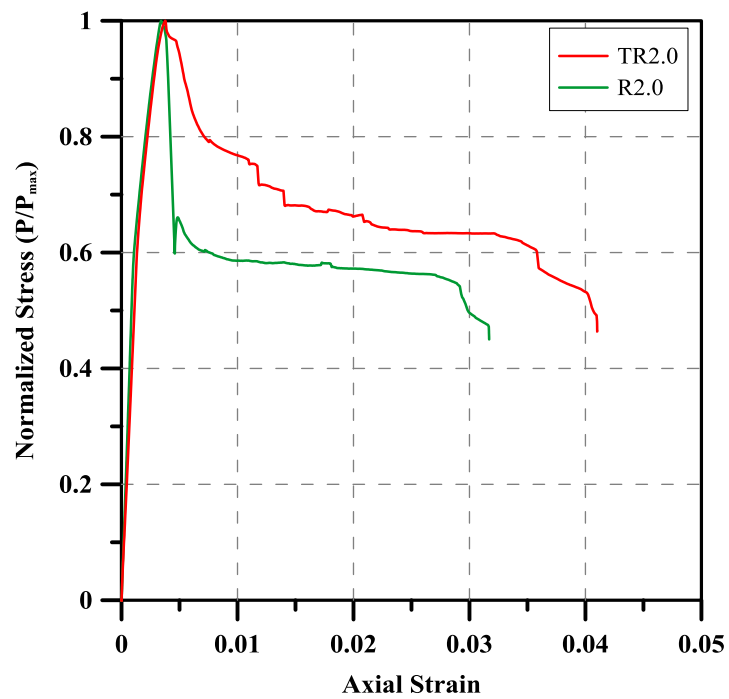


圖 3. 12 TR2.0-R2.0 試體比對圖(正規化)

(資料來源：本研究製作)

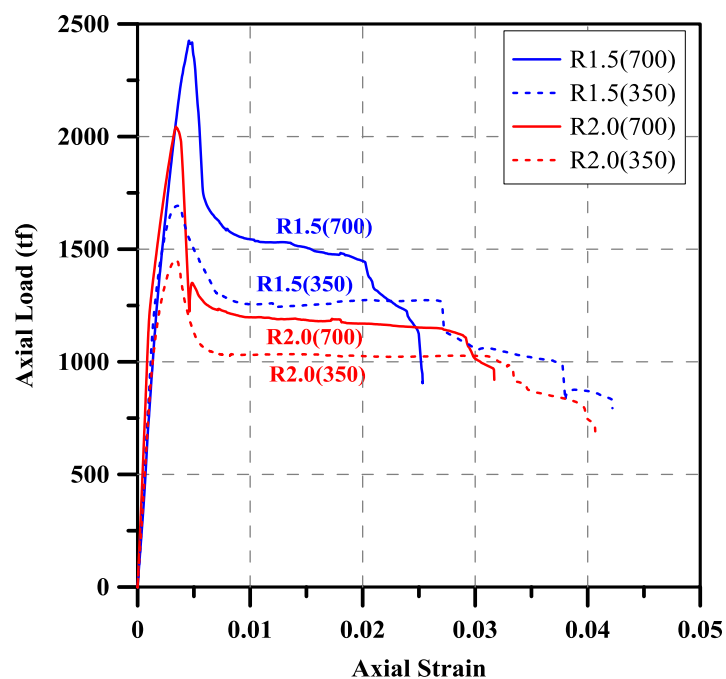


圖 3.13 試體 R 系列軸力與軸向應變比對圖(與 102 年)

(資料來源：本研究製作)

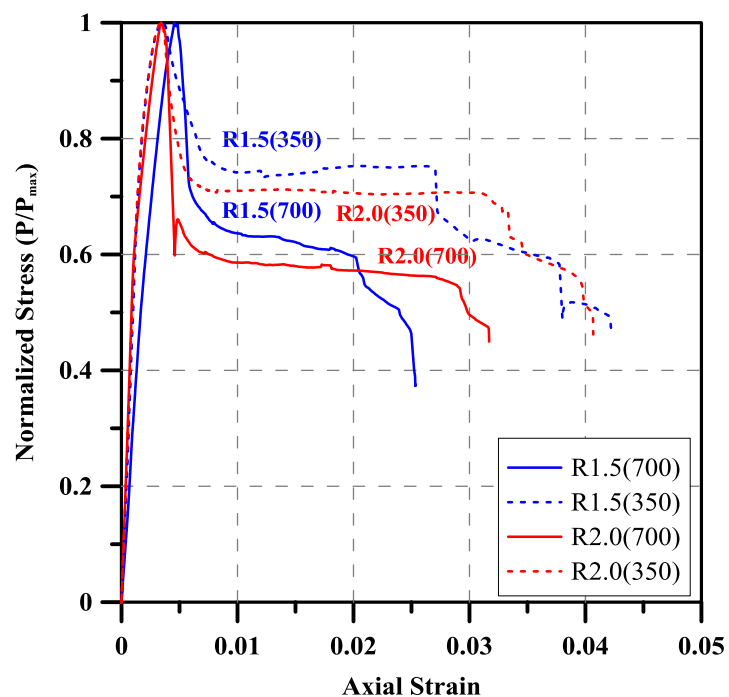


圖 3.14 試體 R 系列軸力與軸向應變比對圖(正規化)

(資料來源：本研究製作)

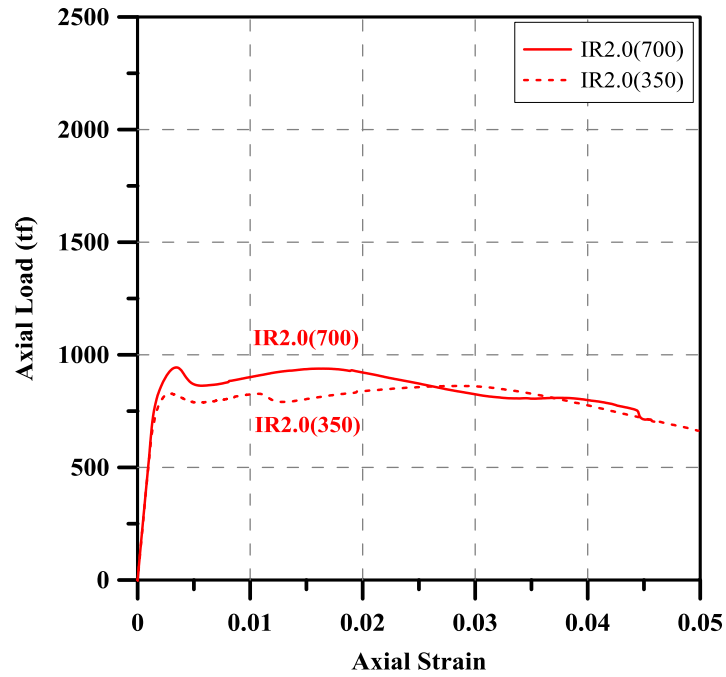


圖 3.15 試體 IR 系列軸力與軸向應變比對圖(與 102 年)

(資料來源：本研究製作)

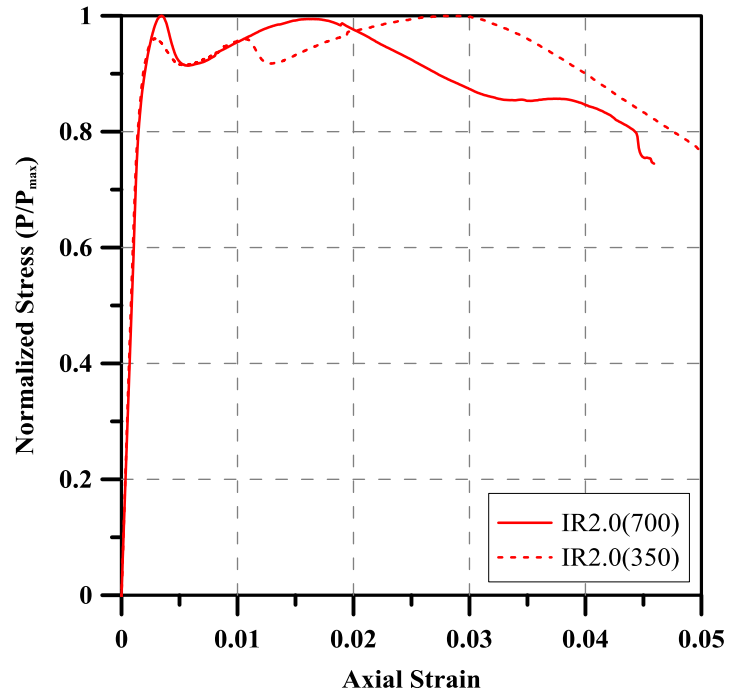


圖 3.16 試體 IR 系列軸力與軸向應變比對圖(正規化)

(資料來源：本研究製作)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

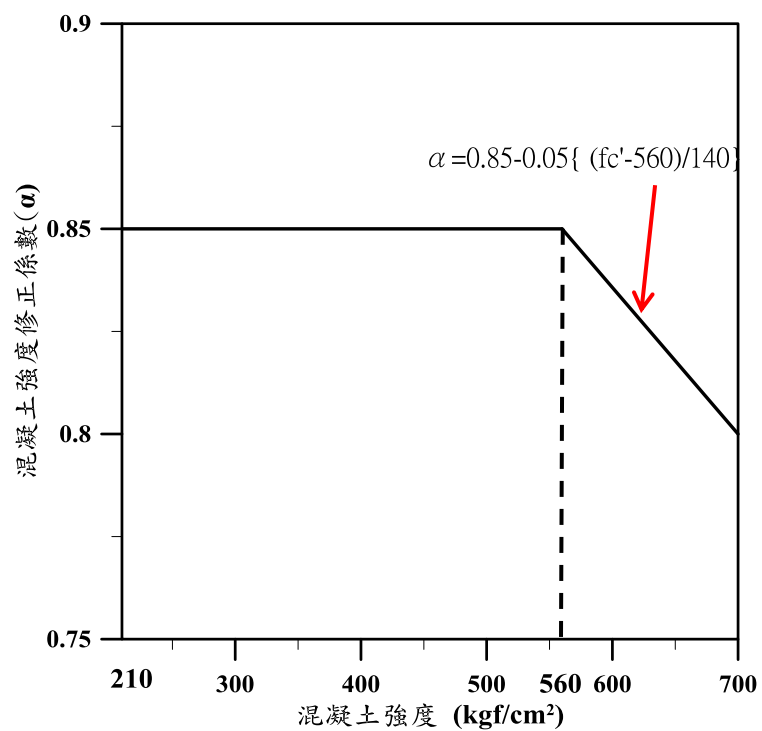


圖 3.17 混凝土強度修正係數 α 建議值
(資料來源：本研究製作)

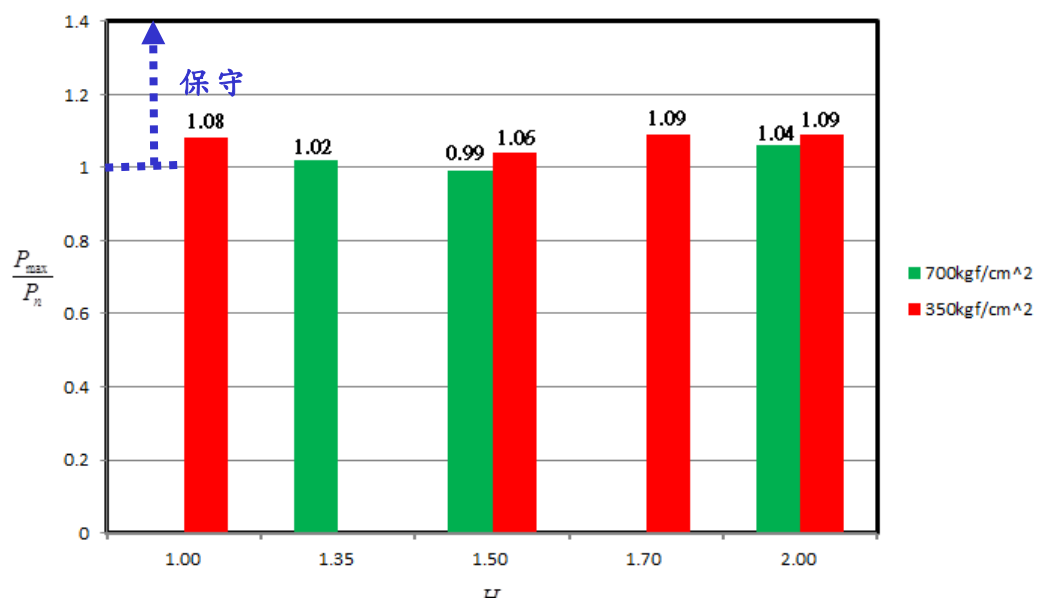


圖 3.18 混凝土材料強度與軸向強度比關係
(資料來源：本研究製作)

第四章 結論與建議

第一節 結論

本研究共完成 3 個 (R、IR 及 TR) 系列合計 8 組大尺寸填充高強度混凝土矩形箱型短柱試體之試驗，鋼板為 SN490B (標稱強度 3.3tf/cm²)，混凝土抗壓強度為 700 kgf/cm² (10,000 psi)，箱型柱斷面長寬比(H/B)為 1.34、1.5 與 2.0 等 3 種，長邊(H)固定為 590 mm，短邊則規劃不同的寬度尺寸(包括 440、400、300 mm 等 3 種)。針對於國內 SRC 構造或鋼結構設計規範中，於受壓強度計算公式的合理性，採用高強度混凝土 (700 kgf/cm²) 對矩形箱型柱斷面長寬比(H/B)之使用限制，以及設置圍束繫桿對提升箱型柱耐震性能之有效性等進行探討，併同先前研究 11 組試體實驗結果[13]分析，歸納結論如以下：

1. 當填充高強度混凝土 (700 kgf/cm²) 箱型柱 (R 系列試體) 在發展至最大強度後，試體強度開始迅速下降，原因為混凝土開裂造成強度急遽下降所致，實驗結果顯示：填充型箱型柱斷面之長寬比愈大，強度下降幅度有愈大之趨勢，但不甚明顯。
2. 當填充型箱型柱中之鋼骨，使用符合規範規定降伏應力之鋼材，而填充大於規範規定之高強度混凝土 (10,000 psi 或 700 kgf/cm²) 時，實驗結果顯示：國內現行「SRC 構造設計規範」或「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」中，對填充型箱型柱受壓強度之計算公式，會出現高估試體強度的情形，規範規定應予適當之折減修正，例如：本研究實驗發現，現行設計規範所規定受壓標稱強度與試驗實際強度之比值，介於 0.99 至 1.04 之間。因此本研究建議當混凝土強度為 700 kgf/cm² 時，混凝土強度修正係數(α)，應由 0.85 修正為 0.8，且當混凝土強度介於 560 kgf/cm² (8,000 psi)

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

至 700 kgf/cm^2 (10,000 psi) 之間時，可採用本研究建議混凝土強度修正係數(α)之公式，可合理估算填充型箱型柱的受壓強度。

$$P_{ao} = \alpha A_t f'_c + A_s F_y \quad (\text{式 4.1})$$

$$\text{其中, } \alpha = 0.85 - 0.05 \frac{f'_c - 560}{140} \quad (\text{式 4.2})$$

$$560 \leq f'_c \leq 700 \text{ kgf/cm}^2$$

3. 實驗結果顯示，填充型箱型鋼柱斷面長寬比介於 1.34 至 2.0 時，若填充 700 kgf/cm^2 ($10,000 \text{ psi}$) 級混凝土，當柱斷面長寬比愈小，受壓軸向韌性有愈佳之趨勢。因此，填充型箱型柱鋼骨之肢材，其寬厚比除應符合 SRC 構造設計規範第 3.4 節之規定外，柱斷面之長寬比不宜高於 1.39 [17]，但建議取 1.4。若填充型箱型柱斷面之長寬比超過此限制時，可於填充型箱型鋼柱上下兩端之塑性鉸區，採取配置圍束繫桿之對策，以提升填充箱型柱的耐震韌性。

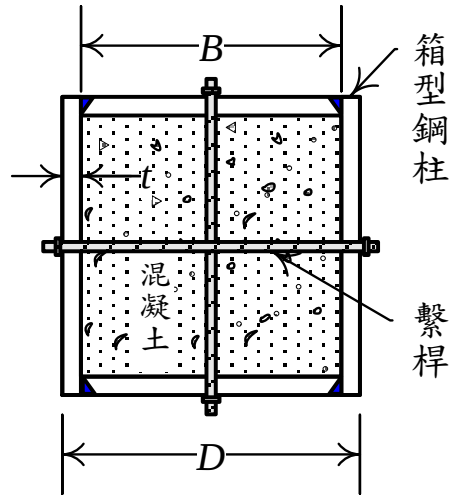


圖 4.1 設置單排螺桿之填充型箱型柱
(資料來源：[17])

4. 經比較填充型箱型柱 R 系列（未設置圍束繫桿）與 TR 系列（設置圍束繫桿）試體之受壓載重與應變行為，並由試驗結果顯示：當填充型箱型柱斷面長寬比介於 1.0 至 2.0 時，TR 系列（設置圍束繫桿）試體軸向受壓韌性之發揮，明顯優於 R 系列試體；亦即圍

束繫桿於柱塑性鉸區之設置，可有效提升填充高強度混凝土（700 kgf/cm²）箱型柱的軸向耐震延展性，亦適用於先前研究[17]建議圍束繫桿之設計公式，並建議圍束繫桿之橫向間距應不大於最小柱寬（B），縱向間距應不大於平均柱寬度的 1/3，柱塑性鉸區長度至少為 1 倍的平均柱寬度，將可確保柱構件之強度及韌性，符合相關構造設計規範之耐震需求。

第二節 建議

立即可行建議—本研究所建議填充型箱型柱受壓強度計算之修正公式，可提供修訂規範規定之參採。

主辦機關：內政部營建署、中華民國鋼結構協會

協辦機關：內政部建築研究所

本研究重要發現，當填充型箱型柱使用大於規範規定之高强度混凝土（ 700 kgf/cm^2 ）時，現行「SRC 構造設計規範」或「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」中，對填充型箱型柱受壓強度計算之規定公式，會有過高估計箱型柱實際受壓強度的情形，而可能有不安全的疑慮，因此本研究建議規範規定受壓強度的計算公式，應予適當修正與折減，本研究建議混凝土強度修正係數(α)及填充型箱型柱受壓強度計算之修正公式(式 4.1 及 4.2)，可立即提供相關構造設計規範修訂之參採。

立即可行建議—本研究建議於柱斷面尺寸之設計規定，應增列限制填充型箱型柱斷面之長寬比，不宜高於 1.4。

主辦機關：內政部營建署、中華民國鋼結構協會

協辦機關：內政部建築研究所

填充型箱型柱鋼骨之肢材，其寬厚比（ b/t ）除應符合 SRC 構造設計規範之規定外，對使用高强度混凝土（ 700 kgf/cm^2 ）填充型箱型柱斷面之長寬比，應限制不宜高於 1.4。當填充型箱型柱斷面之長寬比超過 1.4 之限制時，將可能導致填充型箱型柱撓曲韌性受損，因此建議可於填充型箱型的塑性鉸區，採取配置圍束繫桿之對策，可以有效提升填充箱型柱的軸向與撓曲耐震韌性，此建議可立即提供 SRC 構造或鋼構造建築物鋼結構設計規範於增訂填充型箱型柱斷面尺寸限制規定之參採。

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

立即可行建議－建議辦理「提升填充型箱型鋼柱耐震性能創新技術研討會」

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：建築師公會、結構工程技師公會、土木技師公會、台灣建築中心

有關填充型箱型柱耐震性能實驗驗證之研究，本所併同究併同其他研究，已累積近 35 組以上填充型箱型柱試體實驗之研究成果，故建議可儘速辦理相關研討或推廣活動，以廣納業界對本研究建議相關規範修正草案之意見，做為擬訂最終修訂規範規定條文草案之依據，以及將本所研發之創新結構技術，提供業界使用。

立即可行建議－建議賡續辦理「在高軸力下使用高強度混凝土填充型箱型柱耐震性能驗證研究」

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各國立大學土木或營建工程研究所

建議未來可再進一步透過實驗驗證，探討在高軸力等不利於柱塑性鉸區發展耐震韌性之情況下，若使用高強度混凝土之填充型箱型柱，其耐震性能與使用限制，以及可能於填充型箱型柱的塑鉸區，所建議可行的強化耐震韌性措施。

附錄一 鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說

附錄一 鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說第 6.3 節

第六章 受軸壓力作用之構材

6.1 適用範圍

本章適用於僅受軸壓力作用之包覆型鋼骨鋼筋混凝土構材與鋼管混凝土構材之設計。對於同時受軸力與彎矩共同作用之鋼骨鋼筋混凝土構材，其設計應符合第七章之規定。

...

6.3 一般要求

1. 鋼骨鋼筋混凝土柱中之鋼骨斷面積不得少於構材全斷面積之 2%。若鋼骨斷面積少於構材全斷面積之 2%，則應依內政部所定之「混凝土結構設計規範」之規定設計。
2. 鋼骨鋼筋混凝土柱中之鋼筋混凝土，其主筋、箍筋及混凝土保護層均應符合第 4.3、4.4 及 4.5 節之規定。
3. 鋼骨鋼筋混凝土柱中之鋼骨斷面肢材寬厚比，應符合 3.4 節表 3.4-2 與 3.4-3 中 λ_p 之規定。
4. 鋼骨鋼筋混凝土柱中之鋼骨其規定降伏應力不宜大於 3,520 kgf/cm²，鋼筋之規定降伏應力不宜大於 5,600 kgf/cm²，混凝土規定抗壓強度 f_c' 不宜小於 210 kgf/cm²。
5. 包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱若需採用規定抗壓強度 f_c' 大於 420 kgf/cm² 之混凝土時，或填充型鋼管混凝土柱採用抗壓強度 f_c' 大於 560 kgf/cm² 之混凝土時，應以公認合理之試驗證明其可行性與可靠度。

解說：有關 SRC 柱斷面最小鋼骨比之限制，美國 AISC-LRFD 之規定為 4% [11]，而日本 AIJ-SRC 規範則僅要求不得小於 0.8%

[10]。此兩種不同的規定各有特色，AISC 之規定可以使 SRC 構造中之鋼骨發揮較大之貢獻，並有助於縮小柱斷面之尺寸。AIJ 之規定則賦予設計者較大的自由選擇空間。我國 SRC 規範採用最小鋼骨比為 2 % 之限制主要係在上述兩者之間取一折衷值[21]。

在 SRC 柱採用高強度的混凝土方面，本節之限制主要考量當混凝土強度提高時，其脆性的現象將更為明顯，同時目前國內外的相關研究仍然有限。惟若有公認合理的試驗證明其可行性與可靠度，且在實際施工時亦能確保混凝土之品質，則混凝土之強度限制應可考慮酌予放寬。

附錄二 研究業務協調會議紀錄

一、時間：104 年 2 月 10 日(星期二)下午 2 時正

二、地點：本所簡報室

三、主席：何所長明錦

記錄：王天志、黃國倫、陶其駿、

羅時麒、張乃修

四、出席人員：詳簽到簿

五、主席致詞：(略)

六、研究案主持人簡報：(略)

七、發言要點：

(一)「箱型鋼管混凝土柱偏心載重防火性能研究」案：

1. 本案研究題目討論偏心載重，在實務上建築結構柱是否常見產生偏心載重，是在那些配置或情況下會產生？請於報告內容補充說明，以加強研究之重要性。
2. 本案研究偏心載重之主要試驗參數，施加载重（P）、彎矩（M）及偏心距（e），其彼此間相關性及選擇之考量，請補充敘明。
3. 預期遭遇困難中提到柱試體側向位移之量測設備及技術，請於執行過程中，將最終所採用之量測設備及技術詳加介紹，以供後續此類研究試驗參考。

(二)「矩形填充高強度混凝土箱型鋼柱低軸力下撓曲耐震行為研究」案：

1. 建議再確認填充混凝土箱型鋼柱較常用之混凝

土標稱強度範圍，以及其與樓層數之關係。

2. 請再與業界詢問實際結構分析結果，填充混凝土箱型鋼柱較常出現軸力與軸向標稱強度之比率範圍。
3. 本研究內容應以解決國內工程實務問題為首要考量，且成果應有明確可行之建議，請在現有經費許可範圍內，審慎規劃試驗參數及試體數量，若發生現有經費無法規劃足夠之試體數量以呈現明確之研究成果及建議，可考慮與其它相關之研究案併案研究。
4. 請注意試驗排程問題。

(三)「填充高強度混凝土矩形箱型短柱耐震行為研究」案：

1. 本研究簡報內容於設計參數與試體規劃表，仍見計算試體斷面尺寸數字不正確之情形，請配合於試體型態與尺寸定案時，統籌調整修正。
2. 後續於試體製作施工階段，請留意控制高強度混凝土之實際強度，能儘量接近於試體規劃之設計強度。
3. 請再強化本研究於協助解決工程應用問題所在之敘述，以及未來研究成果將呈現於那部設計技術規範之修訂建議。
4. 材料實驗中心於填充混凝土箱型鋼柱之研究雖已有績效，惟仍請能審慎檢視本研究規劃試體之設計參數與數量，並考量於年度預算之容許額度內辦理。

(四)「建築能源資訊智慧化推廣效益評估之研究」案：

1. 請蒐集建築能源資訊的各類揭露方式，如智慧電表、可視化顯示器、手持式行動裝置等。
2. 建築節能程度之比較，視比較對象而定，如同一建築物用電現況和歷史用電量相比，或和同類建築物平均用電量相比，亦可導入雲端計算各類建築物之節電排序，以鼓勵居住者節約能源。
3. 有關建築能源資訊智慧化如何展示，建議可依成本多寡規劃不同能源資訊智慧化裝置之配套模式，以供使用者參考；至於裝置成本之願付價格問卷，則可搭配特定回收年限條件設計。
4. 提供不同能源資訊態樣會影響節能認知及行為，本研究所指推廣效益，究係指實際節電效益，或是節能認知等其他效益，建議妥予定義。
5. 關於使用者經驗研究，可能涉及各類使用者，如居住者、管理者、專家、資訊提供者等，本研究之使用者對象，請予以釐清；並建議選擇有實際裝設能源資訊之建築案例，進行使用者經驗調查。

(五)「公立托育中心規劃設計基準之研究」案：

1. 建議以建築為著力點，參採衛福部於幼教與幼稚之相關規定及研究成果，就國內實質需要提出公立托育中心應具備之合理規模、配置與設施設備等，以期研究成果能落實於法規及現行評鑑制度。

2. 建議可將色彩、照明、感受及教學方式等影響建築空間需求之因素納入檢討分析。
3. 參考北歐國家之規定與案例時，應評估於國內之適用情形。
4. 建議可將國中、小空餘教室活化再利用之政策與相關研究成果納入探討。

八、會議結論：

- (一) 自行研究所需試體之設計、製作及發包，請確實依本所內部控制要求的時限，如質如期完成。
- (二) 請參考與會同仁之寶貴意見，並請納入研究內容參採修正，使研究成果更為豐富完整。

九、散會：（下午 4 時 10 分）

附錄三 期中審查會議紀錄

本所 104 年度自行研究「建築物矩形填充高強度混凝土箱型鋼柱低軸力下撓曲耐震性能驗證研究」、「建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究」及「圓箍筋對鋼筋混凝土圓柱韌性影響之研究」等 3 案期中審查會議紀錄

一、時 間：104 年 8 月 7 日（星期五）上午 9 時 30 分

二、地 點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 3 會議室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 15 樓)

三、主持人：陳組長建忠 記錄：黃國倫、陶其駿、
李台光

四、出席人員：如簽到單

五、主席致詞(略)

六、業務單位報告：(略)

七、計畫主持人簡報：(略)

八、綜合討論(依研究計畫序)：

(一)「建築物矩形填充高強度混凝土箱型鋼柱低軸力下撓曲耐震性能驗證研究」案

李技師英傑：

1. 建請就以下議題提出相關規範之修正建議：

(1) 矩形填充高強度混凝土箱型柱斷面長寬比

限制值。

(2) 當長寬比超過限制值時，建議之圍束對策。

(3) 當未有公認合理之試驗證明可行時，對長寬比是否應有使用限制？

2. 因設計實務需求，會將兩支鄰近之柱結合，致超出 RC 規範規定上限 1:2.5，亦將造成分析力量與韌性比無法達成的問題，是否需對此進行規範？

林教授秉如：

1. 期中報告預期目標與研究目的應互相配合。
2. 宜再說明清楚試驗混凝土強度。

胡技術總監銘煌：

1. 在國內超高層建築已普遍採用矩形填充高強度混凝土箱型鋼柱，因此在低軸力下撓曲耐震性能之研究，甚有需要，惟本研究案國內外資料繁多，且屬於一系列研究的一部分，因此若研究成果能並列，顯示不同狀況的趨勢，可供實務界更多助益。
2. 若先有計算資訊能與試驗結果做比對，其研究內容將更有價值，可參考如 RC 柱之受壓控制、受拉控制及平衡控制等機制。

高教授健章：

1. 因應國內 CFBC 斷面之長寬比趨大，以及內填混凝土強度趨強等趨勢，本研究案設計符合此現況之大型試體，進行在低軸力下撓曲行為試驗，探討諸項參數限制，甚具實用參考價值。
2. 本研究案試體製作採預拌混凝土及壓力泵送，建

議試體灌注前，預拌車需急轉 2 至 3 轉，使其攪拌均勻，經泵送車壓力泵送前段混凝土應廢棄不用，以利均勻性。

張協理敬昌：

期末若依據研究成果提出寬厚比、長寬比等設計限制及強度計算方式以供工程設計使用時，建議以公式方式表示，並將混凝土強度 f'_c 納入公式的考慮參數，更能符合規範制定或修正的格式。

陳技師正平：

1. 期中報告第 27 頁混凝土抗壓強度 tf/cm^2 應為 kg/cm^2 。
2. 鋼板寬厚比 40 小於 λ_{pd} (為 43)，似偏向不保守。
3. 灌漿壓力是否會減少繫桿圍束效果？
4. 對於大長寬比斷面之柱，一般實務梁都接在一側(有偏心)，對安全性影響甚大，建議在結論中提醒讀者。

廖教授文義：

1. 文獻收集相當豐富完整，並給予適當整理，可供實務參考。
2. 試體規劃完整，試驗目的明確，本研究案結果可為將來規範修改之參考。
3. 建議期末報告撰寫，應整合所內歷年相關研究。

中華民國土木技師公會全國聯合會 林主委增吉：

1. 初步結論尚未提出使用高強度混凝土時長寬比限制。
2. 於初步建議中提出使用一般強度混凝土時，全斷面長寬比限制在 1.5。但超過 1.5 為建築配置需

求，請建議如何處理。

3. 建議提出規範修正草案。
4. 符合預期成果需求。

中華民國全國建築師公會 陳建築師鵬欽：

1. 本研究案矩形箱型柱，是否僅有由 4 片鋼板銲接接合之型式？可否由 2 片 L 型或 U 型加 1 片鋼板組合而成？
2. 如建築需求長寬比需大於 1.5 時，箱型柱可否銲成日字型(即 2 個箱型柱組合)？
3. 日本因高強度混凝土發展，已能興建 50 至 60 層 RC 建築，故 SRC 結構相對較少人使用，CFBC 是否可歸類於鋼構造？

陳組長建忠：

本研究案實驗投入人力及費用均相當龐大，請務實把目標及成果以所、組及本部的施政、業務需要為導向，例如把成果實驗數據在 open data 呈現等方式。

計畫主持人回應（黃助理研究員國倫）：

1. 未來建議規範修正草案時，擬建議 2 個長寬比限制(A 和 B，且 $A < B$)，容許超過限制 A 時使用圍束繫桿等方式增強其韌性，但不容許超過限制 B。
2. 灌漿壓力對 CFBC 構件行為影響，並非今年度之研究範疇，宜由另案進行研究。
3. 本研究案試體採用寬厚比為 40，因與規範限制接近，且與本所近年研究許多試體一致，較易相互比較得到結論。

4. CFBC 構件因無鋼筋，不建議採用 SRC 規範強度疊加法計算其彎矩強度。本研究案於試體規劃時，即採用鋼結構規範合成構材章節建議完全合成方式，進行理論彎矩強度推估，其推導過程已於期中報告附錄二介紹。

(二)「建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究」案

李技師英傑：

1. 請提出泵送混凝土的泵送壓力限制，泵送壓力是否會造成箱型柱的銲道破壞？
2. 柱內混凝土強度是否會受混凝土收縮影響？

林教授秉如：

1. 宜說明清楚有否探討混凝土抗壓強度對 CFBC 斷面長寬比之影響。
2. 理論分析困難，但仍請就現有理論之差異加以說明。

胡技術總監銘煌：

1. 實務上普遍採用矩形填充高強度混凝土箱型柱，因此其相關實驗研究極有價值，以短柱作為實驗，可避開長柱之效應影響，屬於系列研究的一部分，因此研究成果如能併列顯示不同狀況的趨勢，可供實務界更多的幫助。
2. 若先有計算資訊，以資 CFBC 試驗結果做比對，此研究成果更有價值。

高教授健章：

1. 呼應國內矩形 CFBC 之現況與使用趨勢，製作 8

支短柱試體進行軸向載重試驗，本研究案具實用價值。

2. 試體使用混凝土應力求均勻性，以方便相互比較，以免導入材料不均勻之問題。

張協理敬昌：

1. CFBC 混凝土強度愈高，試體強度與標稱強度比值愈小，顯示強度疊加的方式在高強度混凝土箱型柱的適用性較差。
2. 建議研究成果將混凝土強度視為參數，以提供不同強度計算公式、長寬比限制及圍束繫桿需求建議。

陳技師正平：

1. IR 系列似未考慮混凝土受壓對鋼柱產生外推及橫向圍束拉力之影響。
2. 大長寬比之柱一般應用均為梁接於一側(有偏心)，建議在結論中提醒讀者。
3. 灌漿對繫桿產生拉力，是否會降低繫桿之效果。

廖教授文義：

1. 文獻收集並整理完整，可供工程實務參考，為本研究案優點之一。
2. 試體及試驗規劃完整，預期本研究案試驗結果可為未來規範修改及工程實務參考。
3. 後續期末報告撰寫，宜整合所內歷年相關研究。

中華民國土木技師公會全國聯合會 林主委增吉：

1. 全斷面長寬比若超出 1.4，應如何處理？請提出建議，以利實務界使用參考。
2. 符合預期成果需求。

中華民國全國建築師公會 陳建築師鵬欽：

1. 本研究案矩形箱型柱是否僅有 4 片鋼板銲接接合 1 種方式？可否 2 片 L 型或 U 型加 1 片鋼板？
2. 如建築需求長寬比需大於 1.5 時，可否箱型柱銲成日字型(即 2 個箱型柱組合)？
3. 日本因高強度混凝土發展，已能興建 50 至 60 層 RC 建築，故 SRC 結構相對較少人使用，CFBC 是否可歸類於鋼構造？
4. 以上意見僅供參考。

陳組長建忠：

本研究案實驗投入人力及費用均相當龐大，請務實把目標及成果以所、組及本部的施政、業務需要為導向，例如把成果實驗數據在 open data 呈現等方式。

計畫主持人回應（陶研究員其駿）：

1. 本研究案對 IR 系列試體於內部混凝土與箱型柱板之間，設置有握裹隔離層，降低摩擦力傳遞之作法，目前已有相關研究可尋，且實際混凝土與鋼板一起受壓，混凝土會受波松效應而膨脹，鋼板受軸力與橫向軸拉，在雙軸應力作用下強度會較低，鋼板應力變形之行為較差。然而在 IR 試體中，混凝土沒有受壓，挫屈會延後，試體鋼骨行為高估，混凝土得到應力變形是低估的，研究成果會偏保守。
2. 本研究案以矩形 CFBC 斷面長寬比為變數，探討 CFBC 使用高強度混凝土(10,000psi)之行為，並驗證規範計算軸力之公式，以經費及人力之考量，

暫不加入混凝土強度作為變數，未來仍有待更進一步之探討。

3. 高強度混凝土於工程上應用有使強度偏不保守之情況，故本研究案目的並非放寬規範對混凝土強度上限，而是以實驗結果驗證後，修正規範對混凝土強度上限規定及軸向強度計算公式，使業界能有所依循且結果偏保守。

(三)「圓箍筋對鋼筋混凝土圓柱韌性影響之研究」案

李技師英傑：

1. 鋼筋冷彎的弧度是否有規定？弧度太小會造成鋼筋外緣破裂，弧度太大又會造成施工的不便。
2. 使用柱組合繫筋，是否有水平長度的規定？亦即主筋長度多少時，需加組合繫筋才能達到圍束的效果？

林教授秉如：

1. 說明大尺寸圓柱尺寸使用範圍。
2. 未來研究可否提高混凝土強度？

胡技術總監銘煌：

1. 鋼筋混凝土圓柱配置箍筋之捆綁方式，對韌性影響是實務界最有爭議的，一般認為以採用螺箍筋為主。惟若柱太大，只靠螺箍筋是不夠的；若採用圓箍筋及繫筋，考慮 ACI 2014 搭接彎鉤與繫筋勾住箍筋加主筋可能效果最好。以上謹提供參考。

高教授健章：

1. 製作 8 支圓形柱進行撓曲行為試驗，探討不同繫筋配置方式之利弊，以供工程實務界參考，具實用價值。
2. 繫筋配置方式需考慮實務施工性，試驗室試體製作較接近預鑄構件之作法，與工地場鑄綁筋困難度不同，此點應加考量。

張協理敬昌：

1. 依據目前規範，RC 圓柱並無設置繫筋要求，但大尺寸的 RC 圓柱如未配置繫筋，工程判斷上其韌性未必比方柱好。建議從研究成果探討繫筋之必要性，並提供相關設計建議。(註：橋柱軸力較小，建築圓柱則可能為高軸力。)

陳技師正平：

1. 本研究案對繫筋彎鉤僅一側鉤住主筋之研究，對實務應用非常有助益。
2. 圓箍大小之曲率不同，建議納入考量。
3. 後續研究建議對長方形柱及有搭接之柱進行研究。

廖教授文義：

1. 文獻收集及整理完善，可為工程實務參考。
2. 研究試體、試驗步驟明確可行，研究成果可為未來規範修正參考及可供工程實務參考。
3. 後續期末報告撰寫，宜整理歷年研究綜合編寫。

中華民國土木技師公會全國聯合會 林主委增吉：

1. 初步結論與建議尚未提出。
2. 符合預期成果需求。
3. 比較 R1、R2 與 S33、S17 及 D33，總圍束力提升效果不大，則會失去經濟效益，請加說明。

中華民國全國建築師公會 陳建築師鵬欽：

1. 無論圓箍筋或矩形箍筋，現在日本發展高強度混凝土，以多採用閉合式銲接，且配合預鑄構造，即箍筋採用 Power Ring(パワーリング)，甚少採用傳統箍筋，施工、組合耗費太多人力且成效不佳。
2. 是否後續研究可朝此方向進展？

陳組長建忠：

1. 本研究案實驗投入人力及費用均相當龐大，請務實把目標及成果以所、組及本部的施政、業務需要為導向，例如把成果實驗數據在 open data 呈現等方式。

計畫主持人回應（李研究員台光）：

1. 組合繫筋的安裝係由柱之對邊往柱內插入，主筋淨間距只要滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，施工相當方便。此外，依據美國混凝土學會(ACI)最新版設計規範(ACI 318M-14)的規定，承受高軸力的 RC 柱，基本上所有的主筋均需被繫筋勾住，更能顯現組合繫筋

的優越性及發展潛力。

2. 現行 RC 設計規範並無圓箍筋及繫筋之相關規定，本研究案將依據研究成果，提出 RC 圓柱箍筋與繫筋設計與施工相關條文之建議，使國內工程實務界有所依循。
3. 本研究案試體設計主要的參數為繫筋形式、繫筋圍束力比與側向載重方向，圓箍筋、繫筋總圍束力維持固定，以探討各設計參數對於 RC 圓柱撓曲韌性之影響。

九、結論：

- (一) 本次會議 3 案期中報告，經審查結果原則通過。請詳實記載與會審查委員及出席代表意見，並請計畫主持人參採，於期末審查時作適當回應。
- (二) 請計畫主持人掌握研究時程，並請留意成果報告格式，以符規定。

十、散會(中午 12 時 10 分)

附錄四 期中審查會議審查意見與研究團隊回應

「建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究」案
期中審查會議審查意見與研究團隊回應：

委員名單	審查意見	研究團隊回應
李技師英傑	1. 請提出泵送混凝土的泵送壓力限制，泵送壓力是否會造成箱型柱的鐸道破壞？ 2. 柱內混凝土強度是否會受混凝土收縮影響？	1. 若設計者能確實依鋼結構設計規範設計，施工者按鋼結構施工規範進行施工與查核，箱型鋼柱理應不致於先發生鐸道之破壞。而於混凝土泵送過程或柱內混凝土於凝結前，因為流體態之混凝土，將對鋼柱面板產生側向壓力，若未於事前進行適當之防制措施，將可能導致鋼柱柱面板發生面外挫屈之破壞，其主因與泵送混凝土時，箱型柱內灌築混凝土之淨高度有關，其他如泵送壓力或非預期因素均有可能，設計者應可由基本流體力學觀念計算瞭解，或沿鋼柱高度方向，均勻設置防爆繫桿。 2. 由於本研究短柱試體，於柱內混凝土達設計強度齡期後，即進行受壓載重之破壞試驗，所以無法反應混凝土收縮之影響，事實上也難以僅藉由少數短柱試體試驗釐清。但有關混凝土乾縮與剪力釘之影響，可參見本所今(104)年度委託研究「填充混凝土箱型鋼柱撓曲合成行為研究」之實驗觀察。
林教授秉如	1. 宜說明清楚有否探討混凝土抗壓強度對 CFBC 斷面長寬比之影響。 2. 理論分析困難，但仍請就現有理論之差異加以說明。	1. 本研究團隊分別於 102 及 103 年，已著進行 CFBC 斷面長寬比對短柱受壓載重之影響，短柱試體混凝土抗壓強度為 $280 \text{ kgf/cm}^2 (4,000 \text{ psi})$，鋼材為 A572 Gr.50；因限於研究經費限制，今年度係進行混凝土

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

		抗壓強度為 700 kgf/cm²(10,000 psi)之短柱試體試驗，故本研究將以 280 及 kgf/cm²(4,000 psi)等兩種混凝土抗壓強度，以探討對 CFBC 斷面長寬比之影響。 2. 本研究將就短柱受壓強度計算公式進行理論與驗證結果分析。
胡技術總監銘煌	1. 實務上普遍採用矩形填充高強度混凝土箱型柱，因此其相關實驗研究極有價值，以短柱作為實驗，可避開長柱之效應影響，屬於系列研究的一部分，因此研究成果如能併列顯示不同狀況的趨勢，可供實務界更多的幫助。 2. 若先有計算資訊，以資 CFBC 試驗結果做比對，此研究成果更有價值。	1. 實務上已常見以高強度混凝土(10,000 psi 以上)填充箱型鋼柱之工程案例，爾後仍將視實際需要，規劃系列性具實用價值之短柱實驗研究，本研究後續成果報告，儘可能再併同或參考其他填充型箱型鋼柱之實驗成果，以供實務界使用。 2. 本研究將依材料試驗結果，納於 CFBC 短柱試體受壓強度之計算，並與實驗結果比對，以瞭解強度計算公式之合理性。
高教授健章	1. 呼應國內矩形 CFBC 之現況與使用趨勢，製作 8 支短柱試體進行軸向載重試驗，本研究案具實用價值。 2. 試體使用混凝土應力求均勻性，以方便相互比較，以免導入材料不均勻之問題。	1. 感謝委員不吝指教。 2. 本研究所規劃 8 組 CFBC 短柱試體，其混凝土均取自同一台預拌混凝土車，試體頂部也留設透氣孔，避免澆製瑕疵，以降低材料與試體整體不均勻之問題。
張協理敬昌	1. CFBC 混凝土強度愈高，試體強度與標稱強度比值愈小，顯示強度疊加的方式在高強度混凝土箱型柱的適用性較差。	1. 當 CFBC 混凝土材料之強度愈高，其延展性也差，以既有其他學者的研究顯示，試體實驗強度與計算標稱強度比值將愈小，亦有可能偏不保守，因此必須藉由實驗驗證之方式，以檢核既有由強度疊加法

附錄四 期中審查會議審查意見與研究團隊回應

	2. 建議研究成果將混凝土強度視為參數，以提供不同強度計算公式、長寬比限制及圍束繫桿需求建議。	計算之強度公式，在高強度混凝土填充型箱型柱的合理性，或進行可靠性之修正。 2. 本研究圍限於研究經費與人力之限制，特別選定於混凝土抗壓強度為 $700 \text{ kgf/cm}^2 (10,000 \text{ psi})$ 之短柱試體試驗，以探討對 CFBC 斷面長寬比之影響。
陳技師正平	1. IR 系列似未考慮混凝土受壓對鋼柱產生外推及橫向圍束拉力之影響。 2. 大長寬比之柱一般應用均為梁接於一側(有偏心)，建議在結論中提醒讀者。 3. 灌漿對繫桿產生拉力，是否會降低繫桿之效果。	1. IR 系列試體僅鋼骨承受軸向壓力，混凝土僅提供鋼骨斷面及肢材之側向支撐，試體製作為避免軸力由鋼骨傳遞到混凝土，於鋼骨與混凝土之間，設置握裹隔離層。因此，所獲得鋼骨受壓力載重之應力-應變行為，無法反應因混凝土受壓產生側向膨脹，對鋼柱造成外推力量(鋼骨橫向圍束拉力)之影響，因此將可能高估鋼骨受壓力載重之行為，進而間接低估混凝土應力-應變之行為，這是訂定規範於 CFBC 之強度下界時，可被接受的(偏保守)。
廖委員文義	1. 文獻收集並整理完整，可供工程實務參考，為本研究案優點之一。 2. 試體及試驗規劃完整，預期本研究案試驗結果可為未來規範修改及工程實務參考。 3. 後續期末報告撰寫，宜整合所內歷年相關研究。	1. 感謝委員不吝指教。 2. 感謝委員不吝指教，本研究亦將朝可提供相關規範修改，或工程實務參考。 3. 本研究將視後續時限，儘可能把歷年 CFBC 相關短柱研究成果，納於成果報告以供業界使用。
中華民國土木技師公會全國聯合會 林主委增吉	1. 全斷面長寬比若超出 1.4，應如何處理？請提出建議，以利實務界使用參考。	1. 本研究團隊分別於 102 及 103 年研究結果顯示，當矩形 CFBC 斷面長寬比超過 1.39 時，設計者可在柱可能發生之塑鉸區，採用韌性強化措施，

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

	2. 符合預期成果需求。	例如：本研究團隊所建議配置圍束繫桿，配置範圍(由梁柱基面起算)為柱寬度的平均值，繫桿縱向間距為三分之一的平均柱寬，繫桿橫向間距應小於最小柱寬。 2. 感謝委員不吝指教。
中華民國全國建築師公會 陳建築師鵬欽	1. 本研究案矩形箱型柱是否僅有 4 片鋼板銲接接合 1 種方式？可否 2 片 L 型或 U 型加 1 片鋼板？ 2. 如建築需求長寬比需大於 1.5 時，可否箱型柱銲成日字型(即 2 個箱型柱組合)？ 3. 日本因高強度混凝土發展，已能興建 50 至 60 層 RC 建築，故 SRC 結構相對較少人使用，CFBC 是否可歸類於鋼構造？	1. 本研究所探討之矩形填充型箱型柱，係由 4 片鋼板銲接組合而成，至其他由 2 片 L 型，或 U 型加 1 片鋼板組合箱型斷面之創新構想，或許可提供相關研究團隊進行後續研究之參考。 2. 本研究目前建議設計者，可在柱可能發生之塑鉸區，採用配置圍束繫桿之韌性強化措施；至於，箱型柱鋼骨斷面採日字型之構想，或許也可提供後續研究之參考。 3. CFBC，目前在國內可歸類為 SRC 構造之「填充型鋼管混凝土柱」，亦可歸類為鋼構造之「合成構材」。
陳組長建忠	本研究案實驗投入人力及費用均相當龐大，請務實把目標及成果以所、組及本部的施政、業務需要為導向，例如把成果實驗數據在 open data 呈現等方式。	本研究後續務實將相關具可行性與可靠度之研究成果，採以符合業界實務需求之最佳方式，呈現相關研究成果。

附錄五 期末審查會議紀錄

本所 104 年度自行研究「建築物矩形填充高強度混凝土箱型鋼柱低軸力下撓曲耐震性能驗證研究」、「建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究」及「圓箍筋對鋼筋混凝土圓柱韌性影響之研究」等 3 案期末審查會議紀錄

一、時 間：104 年 11 月 26 日（星期四）上午 9 時 30 分

二、地 點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 3 會議室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 15 樓)

三、主持人：陳組長建忠 記錄：黃國倫、陶其駿、
李台光

四、出席人員：如簽到單

五、簡報內容：略。

六、綜合討論意見：

（一）「建築物矩形填充高強度混凝土箱型鋼柱低軸力下撓曲耐震性能驗證研究」案

胡技術總監銘煌：

1. 本研究為 CFBC 撓曲耐震性能驗證，試驗結果應可與前期資料比較及驗證。
2. 柱之耐震性能，與柱內混凝土受圍束狀況關係密切，並與鋼柱斷面長寬比有關，若柱耐震性能不足，已提供使用圍束繫桿之對策，可增加其耐震性能，且已提出設計方法，提供工程師參採，惟

建議不宜硬性限制柱斷面之長寬比。

3. 本研究建議除圍束繫桿可採單排或雙排之配置外，應提供較詳細之設計公式，讓工程師自行設計且配置使用數量。
4. 混凝土抗壓強度越來越大是世界趨勢，因此不宜硬性規定只能使用較低之混凝土抗壓強度。

張協理敬昌：

1. 依據美國 AISC 規範之規定，填充箱型柱斷面之撓曲強度，需考慮斷面是否為合成斷面，如為合成斷面，標稱強度為塑性應力分佈，但須檢討鋼骨與混凝土間水平剪力傳遞需求，後續試驗結果探討時，應增列相關之說明。
2. 試驗結果顯示，填充高強度混凝土試體之撓曲塑性轉角容量，較填充一般混凝土的試體大，與一般認知不同，建議增列相關討論與說明。(或許與鋼材強度之匹配有關，亦可能與中性軸深度有關。)

陳技師正平：

1. 本研究試驗條件為低軸力，惟柱斷面長寬比大的柱大多位於外柱，而因地震力造成外柱承受之軸力較大，建議後續研究可考量以柱斷面長寬比較大，且承受高軸力者為優先探討之對象。
2. 建議宜強調繫桿車牙後，所可能減少繫桿有效斷面積之影響。
3. 地震後，實務上無法觀察柱內部混凝土之損壞，故建議在應用上，宜採偏保守之考量。

4. 繫桿配置寬度，建議採各邊分別考量，較符合實際。
5. 實際載重應力，係藉由梁進入柱板，再傳入柱內混凝土，建議可考慮此部分之影響。
6. 實務上長寬比較大之柱斷面，梁與柱連接時有偏心，應在成果報告中提醒讀者注意偏心之影響。

中華民國土木技師公會全國聯合會 林技師增吉：

1. 結論與建議尚未提出完整內容。
2. 尚未提出規範如何修正之具體建議。

陳組長建忠：

目前規範規定混凝土設計強度上限為 560 kgf/cm²，但實務上混凝土強度的確有使用超過 700 kgf/cm²，宜提具其正負面影響及改善建議。

張董事長宏成(書面意見)：

1. 本研究具工程實務參考價值，並可提供國內工程實務參考。
2. 本研究探討高強度混凝土 ($f'_c=700$ kg/cm²) 於 CFBC 之適用性，而目前國內工程界已有使用 f'_c 為 15,000 psi 之施工案例，建議後續年度可再規劃探討其可靠度。
3. 建築物有愈蓋愈高之趨勢，因此柱於承受高軸壓狀態之檢討，其需求將愈為迫切，建議後續年度宜再進行相關之研究。

計畫主持人回應（黃助理研究員國倫）：

1. 未來於研提規範修正草案之建議時，擬採以 2 個斷面長寬比之限制(例如：A 和 B，且 $A < B$)，容許當超過限制 A 時，可採使用圍束繫桿等方式，以增強其韌性，但不得超過 B 之限制。
2. 設計使用圍束繫桿的參數有 2 個，第 1 個是柱板肢材寬厚比，第 2 個是柱斷面長寬比，可各邊分開設計之。
3. 對於在高軸力下，矩形填充高強度混凝土箱型柱之撓曲耐震性能，以及填充超高強度混凝土矩形箱型柱之撓曲耐震性能等議題，擬列為後續研究課題之規劃。

(二)「建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究」案

胡技術總監銘煌：

1. 本研究為 CFBC 短柱之耐震性能驗證，係以高強度混凝土為主之驗證研究，對本研究之建議與前案類似。
2. 因 CFBC 斷面外圍已有鋼板，因此配置繫桿對軸向韌性之幫助較大，對整體強度之影響可能有限。

張協理敬昌：

1. 採用內灌高強度混凝土之箱型柱，係對於高層建築較經濟的選項，但其力學行為及耐震安全之確認，甚為重要，實務上高強度混凝土之抗壓強度達 13,000 psi 以上，故建議後續年度可再針對填

充更高強度混凝土的力學行為，以及對應的設計方法，進行相關之研究，其中高強度鋼板之使用，亦可納為後續年度研究之參數。

2. IR 系列試體之試驗結果，在鋼骨挫屈後，後期強度有拉昇現象，如果是混凝土之貢獻(鋼板及混凝土之間仍有摩擦力)，則簡單疊加的理論，在後期可能不適用。
3. 針對實務應用需求，建議對柱受壓強度之計算公式，提供修正草案。
4. 由本研究期末報告照片 3.1 顯示，鋼材為韓國鋼材，建議將材質報告書併入成果報告。

陳技師正平：

1. 本研究均以單層試驗，在高樓應用時，載重由梁傳入柱皮，再進入柱內混凝土，此現象與研究試體之加載傳力方式，略有差異，且實驗均在理想條件下進行。
2. 強震後，柱內部混凝土之損壞無法觀察，建議於實務應用上，宜採偏保守之使用對策。
3. 實務上，在基板底通常以水泥砂漿填塞，其強度如何與上部柱載重配合，宜在成果報告提醒注意此問題。
4. 建議柱斷面長寬比限制，宜偏保守。

中華民國土木技師公會全國聯合會 林技師增吉：

1. 結論與建議尚未提出完整內容。
2. 建議規範如何修正，尚未提出具體事項。

陳組長建忠：

以試體驗證的結果，討論規範的公式或數值，結果是保守或不保守？其意義為何？後續要如何操作？

張董事長宏成(書面意見)：

1. 本研究成果具實務應用價值，可提供國內工程實務參考。
2. 本研究探討高強度混凝土($f'_c=700 \text{ kgf/cm}^2$)於CFBC之適用性，而國內工程界已有使用 f'_c 為15,000 psi之施工案例，建議後續年度可再進行相關探討。
3. 本研究期末報告第20頁，TR1.5及TR2.0螺桿直徑 mm，與第31頁 mm不同，請再檢視與確認。

計畫主持人回應(陶研究員其駿)：

1. 使用超高強度混凝土或高強度鋼板填充型箱型柱耐震性能驗證，將納為後續年度研究課題之規劃。
2. 在撰寫成果報告時，將審慎以偏保守的角度，對CFBC斷面長寬比之限制，提供具體建議。
3. 由試驗結果可知，規範建議之軸向強度計算公式，無法合理且保守地估計矩形填充高強度混凝土箱型短柱軸向強度，本研究將於成果報告，提出軸向強度計算公式之修正建議。

(三)「圓箍筋對鋼筋混凝土圓柱韌性影響之研究」案

胡技術總監銘煌：

1. 本研究請強化 2014 年版 ACI 318 規範規定之說明，並應遵守外圈 90 度彎鉤搭接 15 公分，並緊繞主筋之規定，搭接長度應配合主筋間距，以不小於 15 公分為原則。
2. 繫筋圍束貢獻對與圓柱的韌性發展息息相關，採 180 度彎鉤中間搭接是配合施工需求，其搭接最小長度，應予說明。

張協理敬昌：

1. 日本文獻圓柱試體淨高與直徑之比值為 3.5，而本研究為 1.4，試驗強度易受邊界條件影響，故試驗強度與標稱強度之比較，將可能不客觀，但不同試體於參數間之比較，仍有實質意義。
2. 未來於整理試驗成果，並提出繫筋設置之建議時，其最大間距限制除可比照矩形柱規定之方式外，建議將圓柱尺寸(曲率)納入考慮，以反應尺寸效應。

陳技師正平：

1. 圓箍筋之疊接部分，有一端未鉤住主筋，其彎鉤是否為標準彎鉤？
2. 大柱與小柱之行為，是否相同(例如：尺寸效應影響)？

中華民國土木技師公會全國聯合會 林技師增吉：

1. 本研究討論與建議尚未提出。
2. 本研究對規範之修正建議，尚未提出。

陳組長建忠：

1. 本研究試體製作廠商製作時間比預期較長，請評估此種圓箍筋施工之困難度。
2. 建議依每日施工人員進出情形，彙整統計此種施工之方式其工料製作資料，以評估施工之難易度。而本項建議係於研究期中審查會議時，即已提出建議，宜請補充。

張董事長宏成(書面意見)：

1. 本研究具工程實務之參考價值。
2. 由於試體試驗結果尚未完成，期待研究結果能提供業界參考。

計畫主持人回應（李研究員台光）：

1. 本研究的重點在於探討 RC 圓形柱不同繫筋配置方式(十字形及井字形)、載重方向及繫筋圍束力比之撓曲行為，因此圓箍筋除 90 度彎鉤的直線延伸長度，採用 6 倍繫筋直徑外，餘皆依據 ACI 318-14 規範之規定設計，至本研究組合繫筋符合規範搭接最小長度之規定，將於成果報告書補充說明。
2. 本研究試體製作時間，原規劃為 80 個日曆天，但因承包廠商施工、備料等因素延宕，致使需 105 個日曆天始完成，未來可依據此經驗調整採購試體製作期程。另本研究成果報告書將補充圓

箍筋及組合繫筋施工人時分析資料，俾利評估建議工法之施工難易度。

3. 有關圓柱尺寸(曲率)對於圍束混凝土效果之影響，將採維持試體尺寸及縱向鋼筋量原則，調整研究試體主筋配置，規劃後續實驗研究。

七、結論：

- (一) 本次會議 3 案期末報告，經徵詢與會審查委員及出席代表意見後，原則同意通過。
- (二) 請詳實記載與會審查委員及出席代表意見，並請計畫主持人參採，並請依本所規定格式提交成果報告，注意文字圖表之智慧財產權。如有引述相關資料，應註明資料來源；對於成果報告之結論與建議事項內容，須考量應為具體可行。

八、散會(中午 12 時 10 分)

附錄六 期末審查簡報

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

報告人：陶其駿

研究緣起

- 鋼管混凝土柱(CFT)：在日本此斷面型式，大部分使用無縫鋼管，或是由兩個槽鋼銲接而成之方形斷面。
- 填充型箱型柱(CFBC)：國內主要藉由四塊鋼板組合而成之組合型箱型柱。

簡報內容

- 研究緣起
- 研究目的
- 文獻回顧
- 試體規劃
- 試驗結果
- 結論與建議

內政部建築研究所
Architectural and Building Research Institute,
Ministry of the Interior

研究緣起(續)

- CFT與CFBC因為製作過程不同，所以CFBC與CFT的行為，應不盡相同。
- 鋼骨斷面之寬厚比(b/t)：依照國內SRC構造設計規範的規定，SRC構材內鋼骨肢材寬厚比限制，係以純鋼骨構造放寬1.5倍。此為對柱斷面幾何形狀之少數限制。

表 3-4-3 填充型鋼管混凝土柱之鋼骨斷面設計寬厚比限制

鋼材種類	λ_{pl}	λ_y
S5400、SM400 鋼 ASTM A572 Gr.50	$\sqrt{E}/F_u$	61
S5400、SM400 鋼 ASTM A572 Gr.50	$\sqrt{E}/F_u$	72
S5400、SM400 鋼 ASTM A572 Gr.50	$\sqrt{E}/F_u$	109
S5400、SM400 鋼 ASTM A572 Gr.50	$\sqrt{E}/F_u$	159

內政部建築研究所
Architectural and Building Research Institute,
Ministry of the Interior

研究緣起(續)

- 國內CFBC斷面應用現況
 - 矩形CFBC斷面長寬比(H/B)
 - 無法避免出現非矩形柱之斷面，但H/B大多小於2.0。
 - 因斷面長寬比過大，可能導致柱斷面於長方向之鋼板，於極限強度到達後，無法提供混凝土足夠的**圍束**，因此SRC柱**軸向強度與韌性**之發揮，將可能不如預期。
 - 「矩形」填充箱型柱之鋼骨斷面長寬比(H/B)，宜有適當之使用限制。
 - 規範§6.3規定，填充型鋼管混凝土柱採用抗壓強度 f'_c 大於560 kgf/cm²(8,000 psi)之混凝土，應以公認合理之試驗，證明其可行性與可靠度，但實務多未經試驗驗證而直接使用。

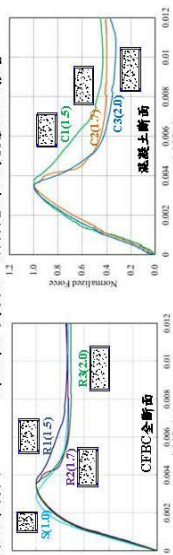
研究目的

- 以柱之軸向強度與韌性需求著眼，藉由理論分析及結構試驗等方法，探討**高強度混凝土(700 kgf/cm²)**矩形CFBC短柱受壓載重變位之行為
- 檢討國內相關構造設計規範，於短柱**受壓強度計算公式**的合理性。

$$P_0 = A_g F_y + 0.85 A_c f'_c$$
- 檢討國內相關構造設計規範，於採用**高強度混凝土**對矩形CFBC斷面**長寬比(H/B)**之使用限制。

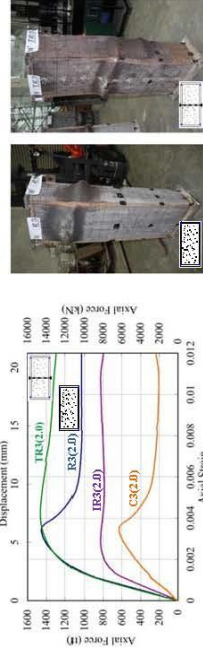
文獻回顧

- 陶其駿(2013)「**矩形CFBC短柱耐震行為之研究**」
 - 當CFBC斷面H/B小於2.0時，設計規範對受壓力作用柱強度的計算公式，仍可合理估計矩形CFBC斷面的實際強度，且偏保守。
 - 當CFBC斷面載重達 P_{peak} 後，整體柱斷面強度急速下降，其原因為混凝土碎裂，造成試體混凝土強度驟降。
 - CFBC斷面H/B為1.7至2.0時，當CFBC斷面強度達 P_{peak} 後，混凝土強度驟降之情形非常明顯，致短柱軸向韌性無法有效發揮，試驗結果顯示：CFBC斷面軸向韌性，明顯受斷面長寬比之影響。



文獻回顧(續)

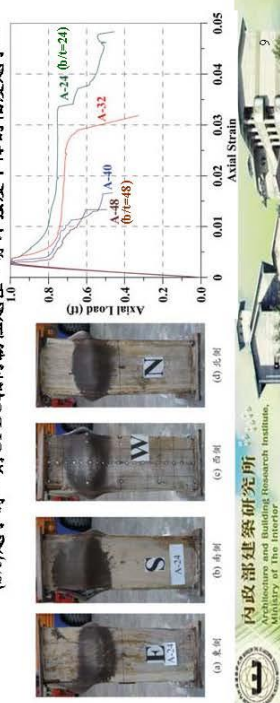
- 陶其駿(2013)「**矩形CFBC短柱耐震行為之研究**」(續)
 - 圖表資料可有效提升矩形CFBC試體之軸向韌性，但是對受壓強度之貢獻，影響有限。
 - 圖表資料對矩形CFBC試體軸向韌性之貢獻，明顯優於受軸力與彎矩共同作用試體之變角容量。



文獻回顧(續)

黃少暉(2013)「超高強度鋼材CFBC之軸向行為」

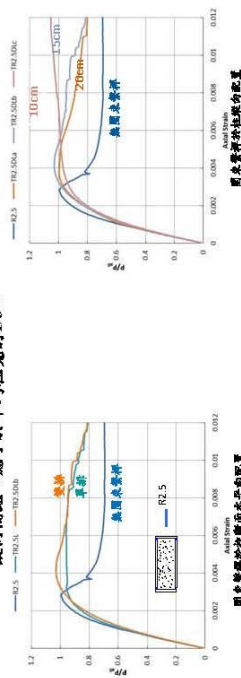
- 若採用超高強度鋼材(HIT690)與混凝土(560、700 kgf/cm²)，於設計規範對受壓強度之計算公式，將有高位CFBC斷面受壓計算強度的疑慮。
- 當鋼材強度在整體柱斷面強度的貢獻比例估越大，且斷面寬厚比(b/t)越小時，則CFBC軸向韌性越佳，亦即強度下降的幅度越小。



文獻回顧(續)

黃國倫、陶其駿(2014)

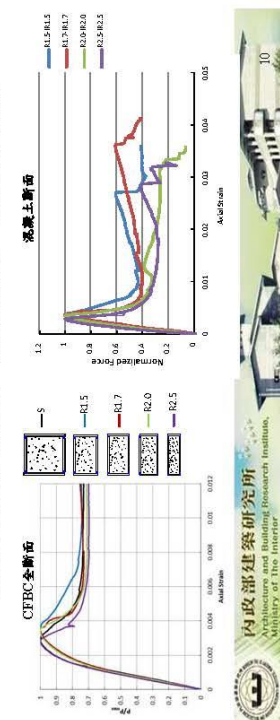
- 受壓載重柱若設置剪力釘，對柱軸向強度及韌性並無明顯幫助。
- 採用圓束繫桿可明顯提升矩形CFBC之韌性。
- 長寬比大於2.0時，圓束繫桿於橫向，應採用雙排配置，且圓束繫桿設計縱向間距，應小於平均柱寬的1/3。



文獻回顧(續)

黃國倫、陶其駿(2014)

- 當CFBC斷面H/B為2.5時，柱受壓強度於規範之計算公式，將偏不保守。
- 柱斷面H/B越大，強度遽下越明顯，為混凝土強度驟降所造成。
- 建議長寬比上限為1.39，若鋼柱斷面長寬比超過此限制時，建議於可能產生型變處之型變區，配置圓束繫桿，以提升型變韌性。



研究內容

103年於研究案審查委員建議：

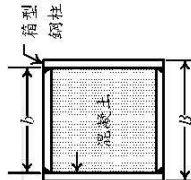
- 國內業界設計建造CFBC之結構系統，已採用**高強度混凝土(>700 kgf/cm²)**
 - 20層以下之常用設計強度：420至490 kgf/cm²
 - 20至30層之常用設計強度：490至560 kgf/cm²
 - 30層以上之常用設計強度：560至700 kgf/cm²甚至更高
- 建議利用試驗驗證及探討**高強度混凝土(700 kgf/cm²)**於矩形CFBC斷面**長寬比**之使用限制。

研究內容(續)

依SRC設計規範規定：

- $b/t \leq \lambda_{pd}$
- $\lambda_{pd} = \sqrt{\frac{3E}{f_y}}$
- b/t ：鋼骨斷面寬厚比
- λ_{pd} ：耐震設計斷面鋼骨材寬厚比限制

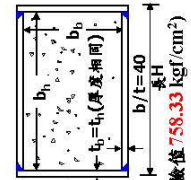
若採用SN490B鋼材(降伏強度 3.3 tf/cm²)，則 λ_{pd} 約為 42。



研究內容(續)

試體設計

- 設計參數：
 - 鋼骨斷面長寬比 H/B 、圓束繫桿
- 固定參數：
 - 長向寬厚比 (b_y/t_y)：30.43 (<42)
 - 混凝土材料強度 (f'_c)：700 kgf/cm²(實驗值 758.33 kgf/cm²)
 - 鋼板降伏強度 (F_y)：3.3 tf/cm²(實驗值 4.07 tf/cm²)
 - 鋼骨斷面長邊：H=59 cm
 - 鋼骨斷面板厚：t=1.4 cm
- 3個系列試體：
 - R系列 (CFBC, $H/B=1.35, 1.5, 2.0$)
 - IR系列 (有握裹隔離，只壓鋼部分, $H/B=1.35, 1.5, 2.0$)
 - TR系列 (有圓束繫桿, $H/B=1.5, 2.0$)

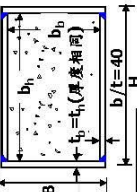


研究內容(續)

試體設計

試體編號	F_y tf/cm ²	f'_c kgf/cm ²	H cm	B cm	H/B	t_b cm	P_{n0} tf	Φ_{TR} mm	備註
R1.35	3.3	700	59	44	1.34	1.4	2304	-	-
R1.5	3.3	700	59	40	1.5	1.4	2133	-	-
R2.0	3.3	700	59	30	2.0	1.4	1706	-	-
IR1.35	3.3	700	59	44	1.34	1.4	926	-	-
IR1.5	3.3	700	59	40	1.5	1.4	889	-	-
IR2.0	3.3	700	59	30	2.0	1.4	796	-	-
TR1.5	3.3	700	59	40	1.5	1.4	2133	16	A490
TR2.0	3.3	700	59	30	2.0	1.4	1706	16	A325

$P_{n0} = A_s F_y + 0.85 A_c f'_c$
 $P_{n0} = A_s F_y + 0.8 A_c f'_c$



受柱板圓束混凝土的軸力-位移行為

利用強度(載重)疊加之觀念

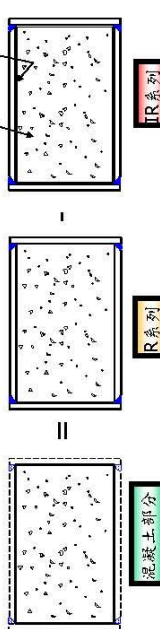
混凝土僅提供柱板的側向支撐
不承受軸力

結核力破壞

混凝土部分

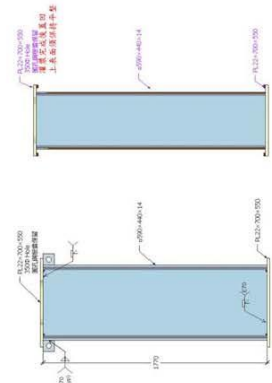
R系列

IR系列



研究內容(續)

- 預計探討內容
 - R系列
 - 探討長寬比(H/B)對軸力比(P_{max}/P_n)的影響。
 - R及IR系列
 - 於CFBC受軸壓行為，探討受箱型柱鋼板對混凝土的圈束貢獻。
 - TR及R系列
 - 探討圈束繫桿對提升CFBC軸向強度與韌性的影響。



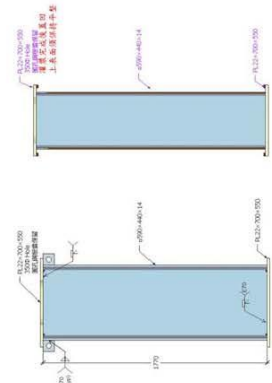
內政部建築研究所
National Institute of Building Research
Ministry of the Interior

17

研究內容(續)

Specimen Geometry

- R系列-以R1.35試體為例



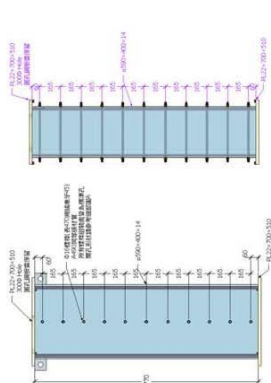
內政部建築研究所
National Institute of Building Research
Ministry of the Interior

18

研究內容(續)

Specimen Geometry

- IR系列-以IR1.35試體為例



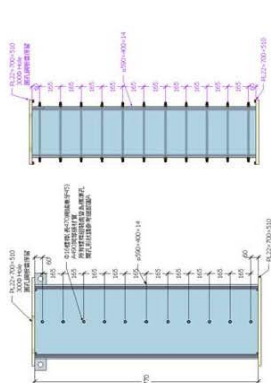
內政部建築研究所
National Institute of Building Research
Ministry of the Interior

19

研究內容(續)

Specimen Geometry

- TR系列-以TR1.5為例

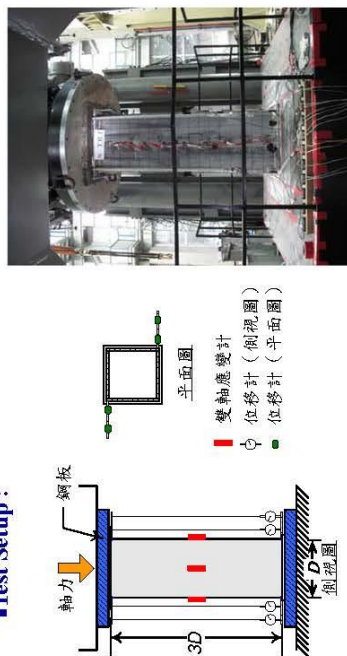


內政部建築研究所
National Institute of Building Research
Ministry of the Interior

20

研究内容(續)

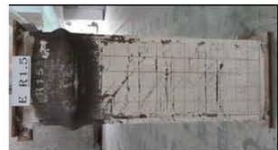
Test Setup :



R系列試體



R1.35(E)



R1.5(E)



R2.0(E)



R系列試體



R1.35(N)



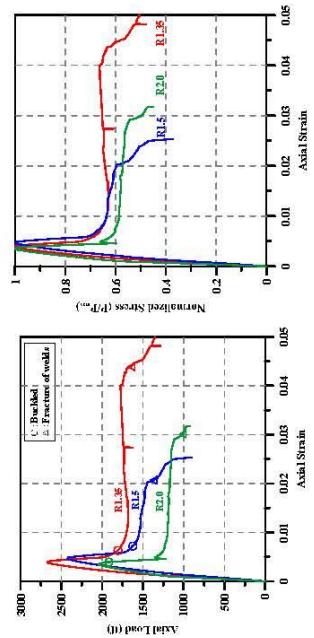
R1.5(N)



R2.0(N)

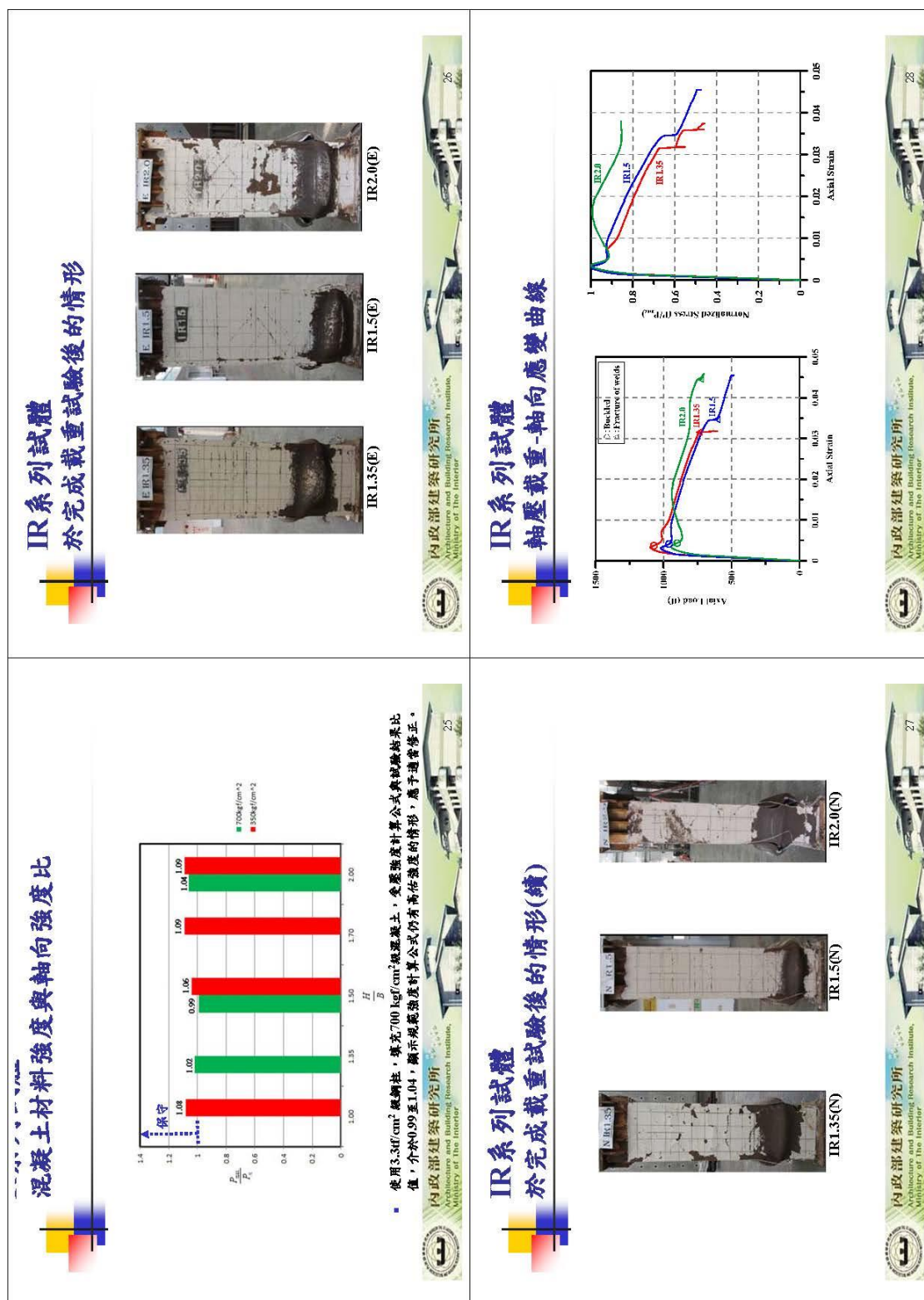


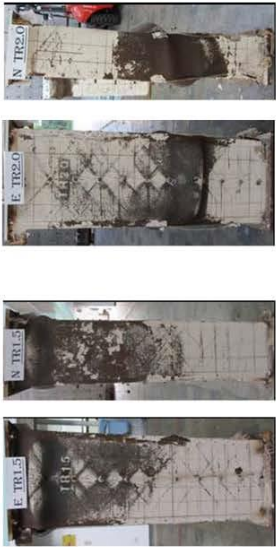
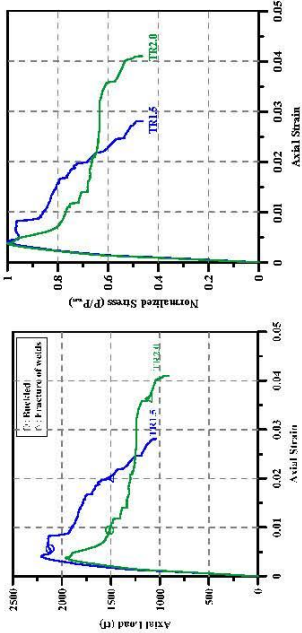
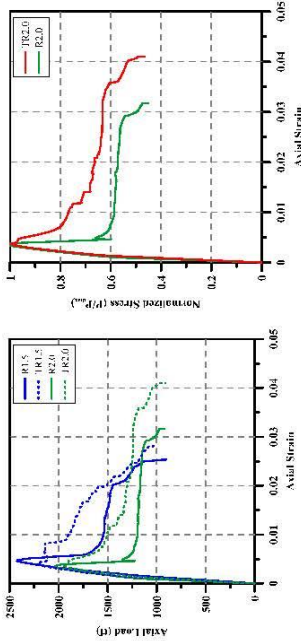
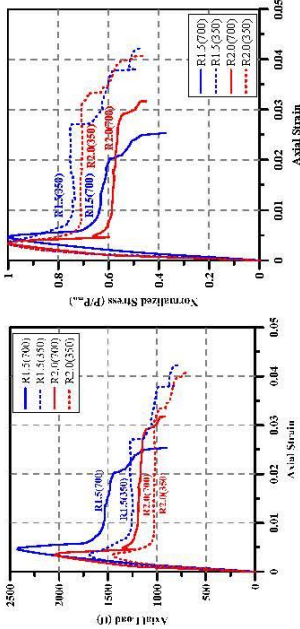
R系列試體
軸壓載重-軸向應變曲線



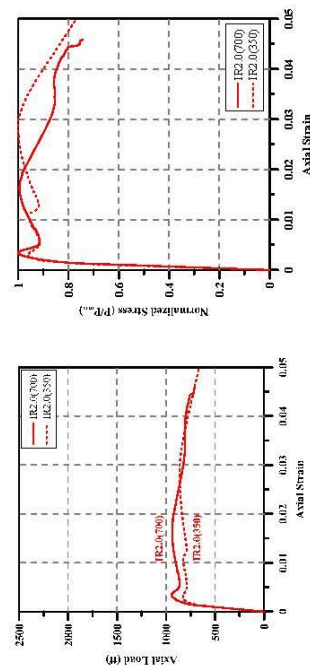
R系列試體發展至最大強度後，試體強度迅速下降，原因為混凝土強度急速下降所致，隨著試體斷面寬寬比越大，強度下降幅度及殘餘強度平台的降幅大及低。





TR系列試體 於完成載重試驗後的情形   內政部建築研究所 National Center for Building Research Ministry of the Interior 29	TR系列試體 軸壓載重-軸向應變曲線   內政部建築研究所 National Center for Building Research Ministry of the Interior 30
R系列與TR系列試體 軸壓載重-軸向應變曲線   內政部建築研究所 National Center for Building Research Ministry of the Interior 31	R系列試體(700與350 kgf/cm²) 軸壓載重-軸向應變曲線   內政部建築研究所 National Center for Building Research Ministry of the Interior 32

IR系列試體(700與350 kgf/cm²) 軸壓載重-軸向應變曲線



結論與建議(續)

- 比較R系列與TR系列試體之受壓載重-應變行為，由試驗結果顯示：圓束繫桿仍可顯著提升填充高強度混凝土箱型柱試體的軸向延展性，但圓束繫桿是否影響試體軸向強度之發揮，尚待進一步試驗結果之分析。
- 建議填充700 kgf/cm²級混凝土之矩形箱型鋼柱，其長寬比使用上限仍可為1.39，若鋼柱斷面長寬比超過此限制時，建議於可能產生塑鉸處之塑鉸區，規定採用韌性確保之強化措施，例如：配置圓束繫桿。

結論與建議

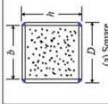
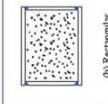
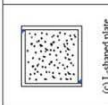
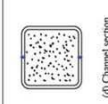
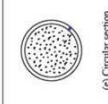
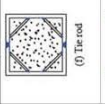
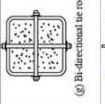
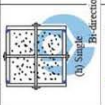
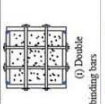
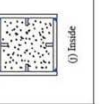
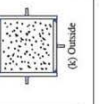
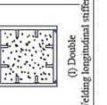
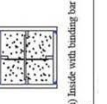
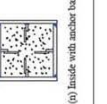
- R系列試體發展至最大強度後，試體強度迅速下降，原因為混凝土強度急速下降所致，隨著試體斷面長寬比越大，強度下降幅度的略較大，不甚明顯。
- 使用3.3tf/cm²級箱型鋼柱，填充700 kgf/cm²級混凝土時，規範之受壓強度計算公式與試驗結果比值，介於0.99至1.04之間，顯示規範對強度計算公式，仍會出現高估強度的情形，應予適當修正。

簡報完畢 敬請指教





填充型箱型柱試體文獻資料



內政部建築研究所
National Institute of Building Research
Ministry of the Interior



參考書目

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. 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。
7. 陳正誠、黃國倫、柯人文，「含高強度混凝土箱型鋼柱之軸向受力行為研究」，內政部建築研究所委託研究成果報告，2008年。
8. 陳正誠、黃國倫、柯人文，「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，2009年。
9. 陳正誠、黃國倫、蔡宜樺、柯人文，「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，2010年。

- 10.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。
- 11.陳正誠、黃國倫(2011)，「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，GRB 編號：PG10001-0230，內政部研考資訊系統計畫編號：100301070000G1025，2011 年 12 月。
- 12.吳明昌(2012)，「填充混凝土箱型鋼柱受軸向力之實驗研究」，內政部研究所研究報告，GRB 編號：PG10105-0159，內政部研考資訊系統計畫編號：101301070000G0041。
- 13.柯人文(2012)，「填充混凝土箱型鋼柱之短柱軸向行為」，博士論文(指導教授：陳正誠)，國立臺灣科技大學營建工程系，台北，2012 年 7 月。
- 14.黃少暉，2013，「超高強度鋼材填充型箱型柱之軸向行為」，碩士論文(指導教授：陳正誠)，國立臺灣科技大學營建工程系，台北，2013 年 7 月。
- 15.陶其駿，2013，「矩形填充混凝土箱型短柱耐震行為之研究」，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：102301070000G0037。
- 16.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。
- 17.黃國倫、陶其駿，2014，「矩形填充混凝土箱型鋼柱耐震能力提升研究」，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：103301070000G0064。
- 18.黃國倫，2015，「建築物矩形填充高強度混凝土箱型鋼柱低軸力下撓曲耐震性能驗證研究」，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：104301070000G0061。
- 19.ACI Committee 318, 2002, "Building Code Requirements for

- Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99),” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
20. AISC, 2005, “Specification for Structure Steel Buildings”, American Institute of Steel Construction, Inc.
21. AISC, 2005a, “Seismic Provision for Structural Steel Buildings,” America Institute of Steel Construction
22. Chen, C.C., Ko, J.W., Huang, G.L., and Chang, Y.M. (2012), "Local Buckling and Concrete Confinement of Concrete-Filled Box Columns under Axial Load", Journal of Constructional Steel Research, Volume 78, Issue 1, Pages 8-21.
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, pp. 95-104.
25. 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.
26. Charles W. Roeder, Brad Cameron, and Colin B. Brown, May, 1999, “Composite Action in Concrete Filled Tubes,” Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.477-484.

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

建築物矩形填充高強度混凝土箱型短柱耐震性能驗證研究

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：陶其駿

出版年月：104 年 12 月

版次：第一版

ISBN：