

箱型鋼管混凝土柱之防火性能驗證技術研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 102 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)

PG10202-0011

箱型鋼管混凝土柱之防火性能驗證技術研究

受委託者：國立交通大學

研究主持人：陳誠直 教授

研究員：林政億

研究助理：謝哲民 王信賢

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 102 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 研究目的.....	2
第三節 研究方法.....	2
第二章 規範與文獻回顧.....	3
第一節 耐火試驗.....	3
第二節 設計規範與防火規定.....	4
第三節 火害填充型合成柱.....	7
第四節 防火時效計算公式.....	11
第三章 填充型箱型鋼柱火害實驗.....	13
第一節 試驗規劃.....	13
第二節 試體規劃設計與製作.....	13
第三節 實驗設備與設置.....	22
第四節 實驗步驟.....	23
第四章 實驗結果與討論.....	25
第一節 實驗結果.....	25
第二節 參數影響.....	57
第五章 填充型箱型鋼柱於火害下之有限元素分析.....	61
第一節 有限元素分析模型.....	61
第二節 有限元素分析結果與討論.....	68
第六章 填充型箱型鋼柱防火評估.....	75
第一節 耐火性能影響參數.....	75
第二節 填充型箱型鋼柱防火時效評估公式.....	76
第七章 結論與建議.....	81
第一節 結論.....	81

第二節 建議	82
附錄一 填充型合成柱試體強度計算	83
附錄二 審查意見與答覆	87
參考書目	101

表次

表 2-1 建築物防火構造應具有之防火時效	5
表 2-2 填充型合成柱防火時效規定	7
表 2-3 內灌混凝土箱型鋼柱研究成果	11
表 3-1 試體規劃	14
表 3-2 試體內灌混凝土之配比	20
表 4-1 試體標稱強度與施加载重	25
表 4-2 試驗結果	56
表 5-1 A572 Gr. 50 之鋼材高溫下力學性質折減係數	63
表 5-2 試體測點與分析溫度比較	69
表 5-2 試體測點溫度與分析溫度比較(續)	70
表 6-1 鋼管混凝土柱防火時效評估公式計算結果	76
表 6-2 填充型箱型鋼柱耐火性能合格時間	77
表 A-1 填充型合成柱試體預估強度	83

圖次

圖 2-1 標準升溫曲線	4
圖 3-1 箱型鋼柱斷面設計圖	15
圖 3-2 填充型箱型鋼柱斷面主筋配置示意圖	15
圖 3-3 填充型箱型鋼柱箍筋及柱板透氣孔配置示意圖	16
圖 3-4 填充型箱型鋼柱試體端部設計圖	17
圖 3-5 試體組裝之 U 字形與鋼筋籠示意圖	19
圖 3-6 箱型鋼柱試體	19
圖 3-7 填充型箱型鋼柱試體之溫度測點分佈	21
圖 3-8 試體內部熱電偶之安裝	22
圖 3-9 實驗試體設置示意圖	23
圖 4-1 試體 B5N-.6 爐內升溫曲線	27
圖 4-2 試體 B5N-.6 定載加溫階段之軸向變形-時間關係	27
圖 4-3 試體 B5N-.6 之鋼骨測點溫度-時間關係	28
圖 4-4 試體 B5N-.6 之混凝土測點溫度-時間關係	28
圖 4-5 試體 B5N-.6 耐火試驗後之外觀	29
圖 4-6 試體 B5N-.6 局部挫屈	29
圖 4-7 試體 B6N-.3 爐內升溫曲線	31
圖 4-8 試體 B6N-.3 定載加溫階段之軸向變形-時間關係	31
圖 4-9 試體 B6N-.3 之鋼骨測點溫度-時間關係	32
圖 4-10 試體 B6N-.3 耐火試驗後之外觀	32
圖 4-11 試體 B6N-.3 局部挫屈	33
圖 4-12 試體 B6N-.5 爐內升溫曲線	34
圖 4-13 試體 B6N-.5 定載加溫階段之軸向變形-時間關係	35
圖 4-14 試體 B6N-.5 之鋼骨測點溫度-時間關係	35
圖 4-15 試體 B6N-.5 耐火試驗後之外觀	36
圖 4-16 試體 B6N-.5 局部挫屈	36
圖 4-17 試體 B4R-.2 爐內升溫曲線	38
圖 4-18 試體 B4R-.2 定載加溫階段之軸向變形-時間關係	38

圖 4-19 試體 B4R-.2 之鋼骨測點溫度-時間關係	39
圖 4-20 試體 B4R-.2 之混凝土測點溫度-時間關係	39
圖 4-21 試體 B4R-.2 之鋼筋測點溫度-時間關係	40
圖 4-22 試體 B4R-.2 耐火試驗後之外觀	40
圖 4-23 試體 B4R-.2 局部挫屈	41
圖 4-24 試體 B4R-.2 耐火試驗後柱板表面剝離情況	41
圖 4-25 試體 B4R-.5 爐內升溫曲線	43
圖 4-26 試體 B4R-.5 定載加溫階段之軸向變形-時間關係	43
圖 4-27 試體 B4R-.5 之鋼骨測點溫度-時間關係	44
圖 4-28 試體 B4R-.5 之混凝土測點溫度-時間關係	44
圖 4-29 試體 B4R-.5 之鋼筋測點溫度-時間關係	45
圖 4-30 試體 B4R-.5 耐火試驗後之外觀	45
圖 4-31 試體 B4R-.5 局部挫屈	46
圖 4-32 B5R 與 B6R 系列試體定載加溫階段之軸向變形-時間關係	47
圖 4-33 試體 B5R-.3 之鋼骨測點溫度-時間關係	48
圖 4-34 試體 B5R-.3 之混凝土測點溫度-時間關係	48
圖 4-35 試體 B5R-.3 之鋼筋測點溫度-時間關係	49
圖 4-36 試體 B6Ra-.3 之鋼骨測點溫度-時間關係	49
圖 4-37 試體 B6Ra-.3 之混凝土測點溫度-時間關係	50
圖 4-38 試體 B6Ra-.3 之鋼筋測點溫度-時間關係	50
圖 4-39 試體 B6Rb-.4 之鋼骨測點溫度-時間關係	51
圖 4-40 試體 B6Rb-.4 之混凝土測點溫度-時間關係	51
圖 4-41 試體 B6Rb-.4 之鋼筋測點溫度-時間關係	52
圖 4-42 試體 B5R-.3 耐火試驗後之外觀	52
圖 4-43 試體 B5R-.3 局部挫屈	53
圖 4-44 試體 B6Ra-.3 耐火試驗後之外觀	53
圖 4-45 試體 B6Ra-.3 局部挫屈	54
圖 4-46 試體 B6Rb-.4 耐火試驗後之外觀	54
圖 4-47 試體 B6Rb-.4 局部挫屈	55
圖 4-48 試體於不同載重比之軸向變形-時間關係	57

圖 4-49 不同斷面尺寸之軸向變形—時間關係	58
圖 4-50 試體有無配筋之軸向變形與時間關係圖	59
圖 5-1 Eurocode 4-高溫下鋼材熱性質	64
圖 5-2 Eurocode 4-高溫下混凝土應力應變關係	64
圖 5-3 Eurocode 4-高溫下混凝土熱性質	65
圖 5-4 填充型箱型鋼柱模型	66
圖 5-5 分析模型之溫度測點設置示意圖	67
圖 5-5 分析模型之溫度測點示意圖(續)	68
圖 5-6 分析模型斷面溫度分佈	70
圖 5-7 分析模型斷面測點溫度	71
圖 5-8 分析與實驗之軸向變形-時間關係	73
圖 5-9 分析模型之軸向變形-時間關係	73
圖 5-10 模型於不同載重比之軸向變形-時間關係	74
圖 6-1 耐火性能合格時間與 P/P_c 之關係	78
圖 6-2 耐火性能合格時間與 $P/(P_c+P_r)$ 之關係	79
圖 6-3 耐火性能合格時間與 $P/(P_s+P_c+P_r)$ 之關係	79
圖 6-4 實驗結果與防火時效評估公式計算結果	80

摘要

關鍵詞：火害、填充型箱型鋼柱、防火時效

一、研究緣起

建築構件若不能在持續高溫中仍具有承載能力，可能導致建築損壞或倒塌，而設計規範則須制定相關防火設計規定，使達需求之防火時效。我國雖已制定建築構件耐火要求，但對於中高層建築普遍採用之填充型銲接組合箱型鋼柱之防火性能設計仍然不明確，且缺乏完整之火害設計準則及耐火性能之評估方法。因此本研究將探討填充型箱型鋼柱火害下之行為、影響參數與耐火性能，以提出其防火時效之評估方法。

二、研究方法與過程

首先為彙整填充型箱型鋼柱火害下研究成果，再依前期成果規劃 8 支填充型銲接組合箱型鋼柱試體；以耐火試驗及有限元素分析方法，研究內灌混凝土箱型鋼柱與內含鋼筋混凝土箱型鋼柱於不同軸向載重之火害行為，並深入探討填充型箱型鋼柱之耐火性能影響參數及其影響程度；最後，基於前期研究成果與本研究結果，提出填充型箱型鋼柱耐火性能建議。

三、重要發現

箱型鋼柱內填充純混凝土或鋼筋混凝土試體，於試驗達最大伸長變形後皆發出爆裂聲，推測為混凝土因溫度與濕度差異而產生爆裂現象。施加之軸向載重大小會影響軸向變形(伸長、壓縮)與趨勢，進而影響填充型箱型鋼柱構件之耐火性能，但斷面尺寸與內含鋼筋之影響則較為不顯著。有限元素分析可合理預估試體溫度及軸向變形趨勢，且亦發現軸向載重大小相較斷面尺寸和有無配置縱向主筋更為影響填充型箱型鋼柱之耐火性能。參考 Eurocode 規範設計填充型箱型鋼柱試體，僅部分試體符合規定之防火時效。另外，鋼管混凝土柱防火時效公式無法適用於評估填充型箱型鋼柱之防火時效，因此本研究提出可合理評估填充型箱型鋼柱防火時效公式，耐火性能主要與施加载重和鋼筋混凝土承載能力之比值有關。

四、主要建議事項

1. 建議一

內含鋼筋混凝土箱型鋼柱火害行為研究：立即可行之建議

主辦機關：行政院國家科學委員會

協辦機關：內政部建築研究所

主要影響填充型合成柱構之耐火性能參數為施加载重大小、斷面尺寸及箱型鋼柱內填充之混凝土等；由本研究實驗與分析成果發現，內含鋼筋混凝土箱型鋼柱之耐火性能較佳，且有配置縱向主筋相較斷面尺寸對防火時效為更顯著之影響參數，因此深入探討火害下內含鋼筋混凝土箱型鋼柱於不同鋼筋比、保護層厚度與箍筋間距之影響將有其必要性。

2. 建議二

內灌混凝土箱型鋼柱防火性能設計：中長期性建議

主辦機關：行政院國家科學委員會

協辦機關：內政部建築研究所

建築結構的設計與建造需滿足各種安全需求，如強度、穩定、使用性等的需求，其中防火性能設計亦為建築結構安全需求必須考量之重要因素。針對廣泛應用於國內中高樓層建築物之填充型箱型鋼柱，內政部建築研究所已進行多年的防火性能研究，獲得諸多防火時效與火害中的結構行為，故建立內灌混凝土箱型鋼柱之防火性能設計有其必要性。

Abstract

Keywords: fire, filled composite column, fire resistance

Structures will be damaged or collapsed when structural members lose their load-carrying capacities at elevated temperatures. Fire resistance design is needed to regulate structures having minimum fire resistance. Although fire resistance design has been enforced in the building codes, there is a lack for performance-based fire resistance design and prediction of fire resistance. In this study, behavior, fire resistance, and effects of the variables of the concrete filled box columns (CFBCs) are investigated to propose evaluation of the fire resistance.

This study explored the research results from literatures and, accordingly, designed eight CFBC specimens. Experiment and finite element analyses were conducted to investigate the behavior of the CFBC specimens, with or without reinforcement, under fire, and to explore the effects of the variables on the fire behavior. Finally, a recommendation of fire resistance of the CFBCs was proposed on the basis of the test results of previous research and this study.

The test results showed that a noise of bursting was heard during the test when the CFBC specimens reached maximum axial elongation. It is speculated that the noise was caused by the concrete burst resulting from the difference of temperature and humidity. The magnitude of the applied axial load significant influenced the axial deformation and behavior of the specimens, and, further, the fire resistance. However, the dimension of the cross section of the specimens and reinforcement had little effects. Finite element analysis could reasonably predict the temperature distribution and trend of the axial deformation of the specimens. Analysis results indicated that the magnitude of the applied load was a major variable affecting the fire resistance. Only some of the specimens designed in accordance with Eurocode reached the code specified fire resistance. Moreover, the fire resistance formulas used for the concrete filled tube columns were not suitable to evaluate the fire resistance of the CFBCs. Therefore, a fire resistance formula was proposed to access the fire resistance of the CFBCs. The fire resistance of the CFBCs mainly related to the ratio of applied axial load to the load-carrying capacities of the reinforced concrete.

According to these research results, the following suggestions are proposed.

For immediate strategy:

The fire behavior of the concrete filled box columns with reinforcement should be studied. The CFBC specimens with reinforcement had slightly better behavior the specimens without reinforcement. Therefore, the research is needed to further investigate the effects of amount of the reinforcement, concrete cover, and spacing of the lateral tie on the fire behavior.

For long-term strategy:

Performance-based fire resistance design is needed to be established for domestic building structures. A performance-based fire resistance design is to state the safety goals and to design the structures to fulfill the requirements. Based on many research results conducted by the ABRI, it is necessary to establish the performance-based fire resistance design for the CFBCs.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

國內中高層建築普遍採用內灌混凝土箱型鋼柱(Concrete Filled Box Column, CFBC),其常溫下因結合鋼材與混凝土之優點且兩材料間之互制,進而提升CFBC構件整體強度、勁度及載重支撐能力等。CFBC構件於火災環境下,鋼材具較佳熱傳導性,易受高溫影響材料強度損失,而混凝土低熱傳導及高熱容量特性使耐火性較鋼材佳;溫度的改變使熱性質不同之兩材料導致柱構件結構行為更為複雜,鑒於結構防火安全設計考量將有其探討及瞭解內灌混凝土箱型鋼柱火害下結構行為之必要性。

針對填充型合成構件防火性能設計之規定、試驗及相關研究,目前國外已有相當程度之成果;構件防火設計規範,如歐洲 Eurocode (2005)與美國 AISC (2010)等規範已增加火災高溫下之結構設計章節,並制定高溫下材料性質;耐火試驗方法,如 ISO 834、BS 476、ASTM E119 及 UL 263 等規定構件進行耐火試驗。然而,國內雖已有相關防火規定及研究成果,如建築物構造部分耐火試驗法(CNS 12514)、建築技術規則、建築物構造防火性能驗證手冊及相關研究成果及研究報告等,但對填充型合成柱構件之規定仍甚為缺乏,故本研究將針對國內採用之CFBC構件於火害下之行為深入探討。

填充型合成柱構件包括鋼管混凝土柱(Concrete Filled Tubular Column, CFTC),斷面形狀普遍為圓形、方形及矩形等,鋼管柱多為冷軋和熱成形製作,鋼管內之填充可為純混凝土或鋼筋混凝土等;國內採用之CFBC有別於CFTC,箱型鋼柱為四片鋼板銲接組合而成,且鋼材厚度相對較厚,因此箱型鋼柱承重比例較內灌混凝土大。另外,由無防火被覆之承重CFTC受高溫研究成果(Kodur 1998 與 Espinos et al. 2010)顯示,定載加溫試驗初期,鋼材溫度相較混凝土高,熱膨脹行為使鋼管承受大部分載重;當鋼材因高溫而強度損失,則載重轉由混凝土承受,而混凝土也因低熱傳導性和高熱容量特性將延續鋼管混凝土柱構件耐火性能。然而CFBC研究(陳誠直等人 2010, 2012)顯示,試驗初期之高溫使鋼材強度損失行為與CFTC接近,但當載重逐漸轉由內灌混凝土承受時,因較大之載重使混凝土無法承受,此火害行為異於CFTC。再者,國外防火設計規範雖已針對

CFTC 制定一套設計準則及防火時效評估公式，但可能無法適用及準確預估 CFBC 之防火時效，且國內結構設計規範也無建立 CFBC 防火設計準則，亦無防火時效評估公式之相關研究，故本研究將深入研究填充型箱型鋼柱火害行為、探討影響耐火性能之參數及蒐集相關研究成果，建立適用於填充型箱型鋼柱之火害性能設計準則及防火時效評估公式。

第二節 研究目的

本研究主要研究目的為考量各種影響合成柱構件耐火性能之參數，以高溫試驗、有限元素分析及彙整相關研究成果，提出適用於填充型箱型鋼柱之火害性能設計準則與防火時效評估公式。

第三節 研究方法

首先，本研究進行蒐集和彙整國內外相關設計規範與文獻，瞭解影響填充型合成柱構件耐火性能之參數與防火時效公式。再以實驗方法探討填充型箱型鋼柱受火害高溫影響之斷面溫度分佈、軸向變形、破壞模式及防火時效等；試體依不同斷面尺寸、軸向載重及有、無配置縱向主筋等為主要研究參數，進行設計與製作。利用有限元素分析模擬試體行為，與實驗結果驗證及比對，以建立正確分析模型，深入探討 CFBC 耐火性能之影響參數。最後，基於相關文獻研究成果、本研究實驗及有限元素分析結果，提出填充型箱型鋼柱之防火性能設計建議及防火時效評估公式。

第二章 規範與文獻回顧

本章節為回顧及彙整填充型合成柱構件之火害行為及防火性能。國內外研究學者於模擬建築構件曝露在火災環境下之研究，普遍參照 ASTM E119 (2000)或 ISO 834 (1987)進行火害試驗，及利用有限差分或有限元素分析計算試體溫度與軸向變形等。由鋼管混凝土柱構件受火害之文獻得知，鋼管內填充可為純混凝土、鋼筋混凝土及纖維混凝土等，斷面形狀以圓形、方形和矩形為主，斷面尺寸介於 100 mm 至 700 mm 之間，試體高度約為 400 mm 至 5200 mm 之間。藉由實驗及分析方法探討試體斷面溫度分佈、軸向變形行為、破壞模式、耐火性能及兩材料介面間之行為影響等，再依研究成果提出鋼管混凝土柱之防火時效計算公式。

第一節 耐火試驗

壹、ASTM E119

ASTM E119 為規定建築構件於火場下之試驗方法，以確定構件耐火性能，火場升溫條件為 5 分鐘爐內平均溫度須達 538°C，30 分鐘須達到 843°C，1 小時須達到 927°C，2 小時須達到 1010°C，4 小時須達到 1093°C，如圖 2-1 所示；開始試驗之室溫介於 10°C~32°C 之間；柱構件曝露於火場下，試體兩端邊界條件為頂端鉸支承，底端未限定，另依加載情況分為加載及無加載具防火被覆試體。對於加載試體，受火面可為非四面受熱，且受熱段長度不得小於 2.7 公尺；無規定試體需量測溫度；耐火性能為依耐火需求規定。對於無加載具防火被覆鋼柱試體，其各面須受火且長度至少 2.4 公尺；試體於試驗期間不須施加载重，但規定須量測試體溫度。耐火性能除依耐火需求規定外，若鋼材平均溫度超過 538°C 或任一鋼材量測點之溫度超過 649°C，則試體判定破壞。

貳、ISO 834

ISO 834 (1999)為判定構件於標準火場下耐火性能之試驗方法，其規定包括試驗設備、標準升溫曲線、溫度量測裝置、試驗條件、試驗步驟及性能判定等。國內 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」(2010)主要參考 ISO 834 修訂。

於承重柱構件開始試驗前，室內溫度須介於 10~40°C，初始平均爐內溫度小於 50°C；試體施加载重，其邊界束制條件依實際邊界條件模擬，受熱長度須大於 3 公尺以上。試驗開始時爐內溫度依標準升溫曲線加熱， $T = 345 \times \log_{10}(8t + 1) + 20$ ，如圖 2-1 所示；且試體須量測溫度及變形。耐火性能判定以軸向壓縮量(C)及軸向壓縮速率(dC/dt)限制， $C = h/100$ (mm)； $dC/dt = 3h/1000$ (mm/min)，其中 h 為柱試體高度。另外，對於支承垂直載重構造之主要承力部分為鋼構造者，得以無加載條件進行加熱試驗；當鋼材最高溫度超過 550°C 或平均溫度超過 500°C，視為承重能力失敗。

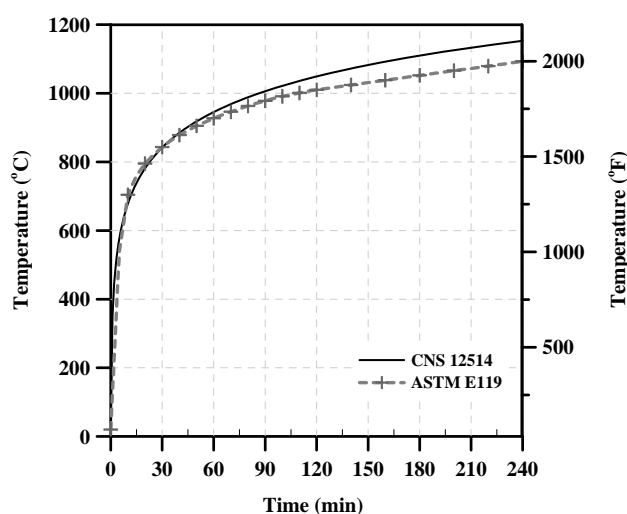


圖 2-1 標準升溫曲線

(資料來源：本研究彙整)

第二節 設計規範與防火規定

壹、建築技術規則

「建築技術規則」(2012)為我國建築設計和施工之依據，而填充型合成柱構件之設計與施工規定於建築構造篇第七章鋼骨鋼筋混凝土構造，第 496 條至 520 條。柱構件之防火設計為參考建築設計施工篇之第三章：建築物之防火，第 70 條至 73 條規定。第 70 條為規定防火構造柱、樑、承重牆壁、樓地板及屋頂應具有之防火時效，如表 2-1 所示；第 71 條為規定樑、柱構件具有三小時以上防火時效之條件；第 72 條為規定牆壁、樑、柱、樓地板構件具有二小時以上防火時

效之；第 73 條為規定牆壁、樑、柱、樓地板構件具有一小時以上防火時效之條件。

表 2-1 建築物防火構造應具有之防火時效

主要構造部分	自頂層算起不超過四層之各樓層	自頂層算起超過第四層至第十四層之各樓層	自頂層算起第十五層以上之各樓層
承重牆壁	1 小時	1 小時	2 小時
梁	1 小時	2 小時	3 小時
柱	1 小時	2 小時	3 小時
樓地板	1 小時	2 小時	2 小時

(資料來源：建築技術規則)

貳、鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說

根據我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」(2011)設計填充型箱型鋼柱；試體斷面鋼骨比須大於全斷面積之 2%，且斷面最小尺寸不得小於 30 cm，及其與斷面另一垂直方向尺寸之比值不得小於 0.4。對於鋼骨斷面之寬厚比(b/t)規定，耐震設計與結實斷面之肢材寬厚比之上限分別為 $\lambda_{pd} = \sqrt{3E_s / F_{ys}}$ 及 $\lambda_p = 61$ ；對於銲接組合箱型柱之相鄰鋼板間，其銲接須沿柱之全長採全滲透銲接。在計算合成柱試體之設計受壓強度乃採「強度疊加法」，如公式(2-1)所示。

$$\phi_c P_n = \phi_{cs} P_{ns} + \phi_{crc} P_{nrc} \quad (2-1)$$

其中 ϕ_{cs} 為鋼骨部分強度折減係數(0.85)， P_{ns} 為鋼骨部份標稱受壓強度， ϕ_{crc} 為鋼筋混凝土部份之強度折減係數(填充型鋼管混凝土柱為 0.75)， P_{nrc} 為鋼筋混凝土部份標稱受壓強度。

參、歐洲規範(Eurocode 4, EC 4)

Eurocode 4 (EN 1994-1-1)規範規定鋼骨材料須符合 S235 至 S460 等級，而普通混凝土強度介於 C20/25 至 C50/60 等級之間。以簡易模式計算受壓合成柱構件之規定與限制須符合，如：鋼骨貢獻比(δ)介於 0.2 至 0.9 之間， $\delta = (A_a f_{yd}) / N_{pl,Rd}$ ；

斷面寬厚比上限值 $(b/t)_{\max} = 52\sqrt{235/f_y}$ ；構件斷面尺寸限制為 $0.2 \leq$ 斷面寬深比 $(b/h) \leq 5.0$ ；細長比 $(\bar{\lambda})$ 小於等於 2， $\bar{\lambda} = \sqrt{N_{pl,Rk} / N_{cr}}$ ；其中 A_a 為鋼骨斷面積， f_{yd} 為鋼骨降伏強度之設計值， f_y 為鋼骨降伏強度， $N_{pl,Rd}$ 及 $N_{pl,Rk}$ 為受壓合成斷面之塑性抵抗強度， N_{cr} 為彈性臨界強度。對於受軸壓合成柱構件之設計強度須符合公式(2-2)及(2-3)。

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1.0 \quad (2-2)$$

N_{Ed} 為設計受壓強度

χ 為考慮挫屈影響之折減係數，依照 EN 1993-1-1 規定計算

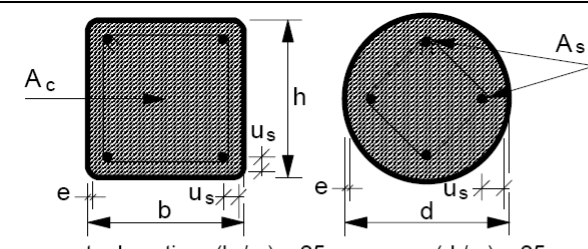
$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0.85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (2-3)$$

A_c 為混凝土斷面積； f_{cd} 為混凝土圓柱抗壓強度之設計值

A_s 為鋼筋斷面積； f_{sd} 為鋼筋降伏強度之設計值

根據 Eurocode 4 (EN 1994-1-2) 受壓合成柱構件於火場下之計算方法為查表法(tabulated data)、簡易計算法(simple calculation models)及進階計算法(advanced calculation models)。對於填充型合成柱以查表法設計，則須符合加載載重($\eta_{fi,t}$)、斷面尺寸、鋼板厚度、鋼筋比($A_s/A_c + A_s$)及最小主筋保護層厚度(u_s)等規定；其中， u_s 為主筋中心至混凝土表面之距離。表 2-2 為試體為達不同防火時效等級之最小需求限制，加載載重比分為 0.28、0.47 及 0.66；若試體具 1 小時防火時效，則合成柱內部除填充混凝土外，須配置鋼筋且配筋量隨載重增加而增多。

表 2-2 填充型合成柱防火時效規定

 steel section: $(b/e) \geq 25$ or $(d/e) \geq 25$		Standard Fire Resistance				
		R30	R60	R90	R120	R180
1	Minimum cross-sectional dimensions for load level $\eta_{fi,t} \leq 0,28$					
1.1	Minimum dimensions h and b or minimum diameter d [mm]	160	200	220	260	400
1.2	Minimum ratio of reinforcement $A_s / (A_c + A_s)$ in (%)	0	1,5	3,0	6,0	6,0
1.3	Minimum axis distance of reinforcing bars u_s [mm]	-	30	40	50	60
2	Minimum cross-sectional dimensions for load level $\eta_{fi,t} \leq 0,47$					
2.1	Minimum dimensions h and b or minimum diameter d [mm]	260	260	400	450	500
2.2	Minimum ratio of reinforcement $A_s / (A_c + A_s)$ in (%)	0	3,0	6,0	6,0	6,0
2.3	Minimum axis distance of reinforcing bars u_s [mm]	-	30	40	50	60
3	Minimum cross-sectional dimensions for load level $\eta_{fi,t} \leq 0,66$					
3.1	Minimum dimensions h and b or minimum diameter d [mm]	260	450	550	-	-
3.2	Minimum ratio of reinforcement $A_s / (A_c + A_s)$ in (%)	3,0	6,0	6,0	-	-
3.3	Minimum axis distance of reinforcing bars u_s [mm]	25	30	40	-	-

(資料來源：Eurocode 4, EN 1994-1-2)

肆、ECCS-Technical Committee 3

歐洲鋼結構協會 European Convention for Constructional Steelwork-Technical Committee 3 (ECCS- Technical Committee 3) (1988)規定受集中載重合成柱於標準火場之耐火性能，並建議試體斷面溫度、常溫下與火場下試體載重支撐能力之計算方法。填充型合成柱斷面為方形及圓形，構件耐火性能可採建議之計算方法計算或參考 ECCS 附錄 C 查圖表。ECCS 附錄 C 規定方形試體之混凝土強度介於 C20 至 C40 等級，鋼骨為 S400 等級，挫屈長度介於 1 m 至 4.5 m 之間，鋼柱內須配置 8 根主筋且鋼筋比須介於 1 至 4%，最大主筋保護層厚度為 30 mm 或 1/8 試體斷面尺寸；依不同防火時效(60、90 及 120 分鐘)查圖得知，試體達規定防火時效所需之承載挫屈載重及挫屈長度。

第三節 火害填充型合成柱

填充型合成柱可為方形、圓形或矩形銲接組合箱型鋼柱或鋼管柱內填充純混

凝土或鋼筋混凝土等，其於火害下與本研究相關之重要文獻簡述如下。

Chung 等人(2008)藉由規範與學者建議之不同材料模型，利用數值分析探討火害方形鋼管混凝土柱受軸向載重之行為。數值分析乃先以二維熱傳數值分析，計算試體斷面溫度，再以非線性應力分析計算試體軸向變形行為，並比較四種鋼與混凝土模型造成之影響。研究結果顯示，採用 Eurocode 規範建議高溫材料性質之分析較能合理模擬實驗結果；承重試體受熱先膨脹變形後壓縮變形；鋼材因高溫強度迅速降低，使混凝土支撐能力成為影響試體耐火性能之關鍵。

Espinos 等人(2010)以有限元素分析軟體-ABAQUS 建立 3-D 模型，模擬火害圓形鋼管混凝土柱之行為。分析結果與實驗比對，再進行參數研究，最後根據 Eurocode 4 簡易計算模式，計算試體有效耐火性能。由承重試體於火害下之軸向變形-時間關係與載重比-時間關係得知，試體於加溫歷時期間可分成四個階段：(1) 鋼管受火表面溫度迅速增加，而內灌混凝土之溫度較鋼材低，因此加載端板與混凝土間產生間隙，且鋼材與混凝土接觸介面產生滑移現象，使軸向載重逐漸轉移至鋼管；(2) 鋼材到達臨界溫度 550°C ，柱試體由原本膨脹位移轉變為壓縮位移，使加載端板與混凝土再度接觸；(3) 鋼材因高溫喪失強度，而軸向載重逐漸轉由混凝土承受；(4) 雖混凝土具低熱傳導性，但隨著加溫歷時時間增加，使高溫逐漸傳遞至核心混凝土，最後混凝土部分也失去支撐能力，使試體破壞。

Espinos 等人(2012)探討 Eurocode 4 規範對火害合成構件所建議之三種防火設計方法，但 EC 4 規範之簡易計算法並無針對填充型合成柱構件之材料等值溫度，提供明確計算方法，因此作者利用有限元素分析，建立合理的溫度計算方式，再根據 EC 4 簡易計算方法，提出圓形鋼管混凝土柱之防火設計計算範例。

Han 等人(2003)以實驗研究有無防火被覆之方形和矩形鋼管混凝土柱受軸向或偏心載重下之火害行為，並建立試體火害後殘餘強度計算公式。由研究結果得知，影響柱構件耐火性能與判定之參數包括：鋼材極限溫度、斷面尺寸、加載型式和防火被覆厚度；當試體之鋼材溫度達 $500^{\circ}\text{C}\sim 786^{\circ}\text{C}$ ，其已無載重支撐能力；試體斷面尺寸越大，則構件抵抗火害能力較好；試體受偏心載重之耐火性能較受純軸向載重來得低；較厚的防火被覆，能增加耐火性能。

Kim 等人(2005)以實驗方法探討圓及方形鋼管混凝土柱受軸力及火害下之行

為，並比較歐洲及日本規範計算之防火時效。由研究結果發現，規範預估之防火時效與實驗接近，且試體施加軸向載重大小、斷面尺寸、混凝土強度及受熱段長度會對耐火性能造成影響。

Kodur (1998)以實驗研究不同混凝土影響鋼管混凝土柱之耐火性能，其混凝土分別為普通強度混凝土、高強度混凝土和含鋼纖維高強度混凝土。實驗結果顯示，承重試體於加溫初期，鋼材溫度相較混凝土高，因此鋼管承受大部分載重；當鋼材因高溫而強度損失，則載重轉由混凝土承受；而混凝土低熱傳導性和高熱容量特性將延續鋼管混凝土柱構件耐火性能。灌入不同型式之混凝土會影響柱構件之耐火性能，其由高至低依序為灌入含鋼纖維高強度混凝土、灌入普通強度混凝土、灌入高強度混凝土；在相同溫度下，高強度混凝土相對普通強度混凝土更容易產生開裂破壞，但加入鋼纖維會降低高強度混凝土發生爆裂現象，以延長柱構件之耐火性能。

Kodur (2007)為回顧和彙整相關文獻，提出混凝土灌入圓形和方形鋼柱之防火設計建議，並比較空心型鋼柱於空心處設置三種不同型式混凝土之耐火性能，如灌入純混凝土(Plain concrete, PC)、設置鋼筋混凝土(Bar-reinforced concrete, RC)和灌入含鋼纖維混凝土(Steel fiber-reinforced concrete, FC)。由實驗和分析結果得知，灌入純混凝土和含鋼纖維混凝土，試體破壞原因為混凝土開裂，而設置鋼筋混凝土試體破壞原因為鋼筋降伏；影響合成柱試體耐火性能由高至低依序為設置鋼筋混凝土、灌入含鋼纖維混凝土和灌入純混凝土。對於試體斷面形狀之影響，相同斷面積之柱構件，圓形斷面較方形更具耐火性能。

Lie 與 Chabot (1992)藉由 44 支圓及方形鋼管內填充純混凝土柱試體進行耐火試驗，探討斷面大小、鋼管厚度、柱試體有效長度、混凝土強度、混凝土之骨材種類及載重對耐火性能之影響。實驗結果發現，試體於試驗初期階段，鋼管產生熱膨脹變形，其載重主要由鋼管承受；隨後鋼管溫度劇增使強度驟減，軸向載重轉由核心混凝土支撐；試體破壞為鋼管挫屈或混凝土受壓破壞造成。

Lie 與 Irwin (1995)以實驗及計算公式探討鋼管混凝土柱，藉由升溫溫曲線及軸向變形以評估防火時效。比較後發現，實驗結果與計算結果相近，因此作者認為研究結果可評估方形鋼管混凝土柱之防火時效。

Lu 等人(2009)利用實驗方法和有限元素軟體分析，進行火害方形鋼管灌入高強度自充填混凝土柱構件之研究。由研究結果得知，試體於高溫火害中失去載重支撐能力，原因為外圍鋼管局部挫屈以及內灌混凝土碎裂或開裂；以有限元素分析軟體 ABAQUS 可以合理模擬實驗行為，且模擬一般和高強度混凝土之分析模型，也可用於模擬高強度自充填混凝土分析模型。

楊國珍等人(2011)研究箱型鋼柱之柱板銲接型式影響試體於火害高溫下之行為。試體之箱型鋼柱板分別以全滲透與部分滲透銲接組合，藉由軸壓及不同溫度探討銲接型式對試體行為及破壞模式之影響。由常溫試驗結果發現，柱板採全滲透銲接相較採部分滲透銲之試體極限強度高；在高溫試驗部分，採全滲透銲接試體之耐火性能較佳；然而，柱板採部分滲透銲接試體表現較差之原因為柱板因軸壓發生局部挫屈進而發生銲道開裂。

何明錦等人(2012)以兩支有配置剪力釘之內灌混凝土箱型鋼柱試體，探討全滲透及半滲透銲對耐火性能的影響。由實驗結果得知，試體承受 0.28 倍設計強度之軸向載用下，鋼板銲接型式僅些微影響試體耐火性能，但並不顯著。

陳誠直等人(2010)藉由大尺寸試體，以實驗方法和有限元素分析模擬，研究有無防火被覆之承重銲接組合箱型鋼內灌自充填混凝土柱於火害下之行為；探討有無防火被覆之影響、比較試體斷面溫度分佈、試體強度與勁度之變化、變形行為(變形與變形速率)與破壞模式等，並建立合理之分析模型。由研究結果顯示，具防火被覆試體皆能達到預期之防火時效，而火害後之試體軸向勁度稍為增大且呈線彈性行為；未具防火被覆試體於火害期間持續有混凝土爆裂的聲音，惟因箱型鋼板提供圍束導致試體未立即破壞，直到鋼板局部的鼓起與內部混凝土的碎裂。

陳誠直等人(2012)以四支試體之耐火試驗和有限元素分析模擬，探討內灌混凝土箱型鋼柱於有無配置剪力釘及施加不同軸向載重之高溫下行為。研究成果顯示，施加不同軸向載重明顯影響軸向變形行為及耐火性能；剪力釘可略微增加試體耐火性能。破壞模式為試體被壓縮、鋼板發生多處局部面外凸起、及內部混凝土碎裂。以有限元素分析模擬試體於加載下且高溫下之行為，可合理的計算試體斷面於各時間歷時的溫度分佈，並準確的預測試體軸向變形趨勢。

對於國內較常採用之內灌混凝土箱型鋼柱為以四片鋼板銲接組合而成，並於箱型鋼內部灌入純混凝土，因此根據上述國內學者研究火害內灌混凝土箱型鋼柱之成果，彙整如表 2-3 所示。

表 2-3 內灌混凝土箱型鋼柱研究成果

文獻	斷面尺寸 B×t (mm)	f'_c (kgf/cm ²)	載重比	防火 被覆	剪力釘	耐火性能 合格時間 (min)
A	□500×22 ¹	524	0.23	—	有	55
	□500×22 ²	524	0.23	—	有	51
B	□500×22 ¹	609	0.64	2 hrs	—	177
	□500×22 ¹	673	0.64	2 hrs	—	120+
	□500×22 ¹	673	0.36	—	—	41
C	□400×19 ¹	515	0.60	—	—	26
	□400×19 ¹	515	0.30	—	—	42
	□400×19 ¹	515	0.60	—	有	31
	□400×19 ¹	515	0.30	—	有	45

備註：
 1. “A”、“B”及“C”分別為何明錦等人(2012)、陳誠直等人(2010、2012)研究
 2. “¹”及“²”為箱型鋼柱板分別採全滲透及半滲透接合
 3. 載重比為施加载重(P)除以合成柱標稱強度(P_n)

(資料來源：本研究彙整)

第四節 防火時效計算公式

Harada (2004)介紹日本 Building Standards Law of Japan 之建築構件耐火性能設計及規定，以探討鋼筋混凝土柱之防火設計；此外，作者也於文中討論 Association of New Urban Housing Technology 所建議之圓形和矩形鋼管混凝土防火時效公式。矩形鋼管混凝土防火時效公式，如公式(2-4)所示。

$$\frac{P}{A_c F_c} = (3.06 \times 10^{-3} \times F_c^{1.735} \times t + 1)^{-0.225} \quad (2-4)$$

其中，P 為施加载重，A_c 為混凝土斷面積(mm²)，F_c 為混凝土強度(MPa)，t 為時間(min)。

Kodur (1999)以實驗和數值分析分別探討高溫下圓形及方形鋼管內填充純混

凝土、鋼筋混凝土及添加纖維混凝土柱之行為，再以數值分析進行影響耐火性能之參數研究，提出防火時效預估公式，如公式(2-5)所示。

$$R = f \frac{(f'_c + 20)}{(KL - 1000)} D^2 \sqrt{\frac{D}{C}} \quad (2-5)$$

其中，R 為防火時效(min)， f'_c 為 28 天混凝土強度(MPa)，D 為柱斷面尺寸(mm)，C 為柱構件施加之載重(kN)，K 為有效長度因子，L 為未支撐柱長(mm)，f 為鋼管內填充物和骨材影響係數(方形鋼管柱內填充矽質骨材之混凝土，f 為 0.06；方形鋼管柱內填充碳酸質骨材之混凝土，f 為 0.07)。另外，對於方形鋼管內填充純混凝土柱之公式使用限制為 $R \leq 120 \text{ min}$ ， $20 \leq f'_c \leq 40 \text{ MPa}$ ， $140 \leq D \leq 305 \text{ mm}$ ， $C \leq 1.0$ time factored compressive resistance of the concrete core according to CAN/CSA-S16.1-M94， $2000 \leq KL \leq 4000 \text{ mm}$ 。

Park 等人(2007)以實驗和數值分析探討方形鋼管混凝土柱於火害環境下之行為，再依研究結果提出防火時效計算公式(2-6)，並與相關公式比較。由研究結果得知，數值分析可以合理計算試體斷面溫度和變形能力；較大的斷面與低載重比會增加方形鋼管混凝土柱之耐火性能。作者提出公式：

$$t = (172.7 - 50.8 \sqrt{\frac{D_c}{10}}) \times \ln\left(\frac{N \times 10^3}{f_{ck} \times A_c}\right) \quad (2-6)$$

其中，t 為防火時效(min)， D_c 為填充混凝土之寬度(mm)，N 為施加载重(kN)， f_{ck} 為 28 天混凝土抗壓強度(MPa)， A_c 為填充混凝土之斷面積(mm^2)。

第三章 填充型箱型鋼柱火害實驗

第一節 試驗規劃

鋼管混凝土柱構件受火災高溫影響，使其結構行為異於常溫下之行為；為瞭解合成柱構件於火害下之行為，研究學者普遍採 ISO 834 或 ASTM E119 耐火試驗方法進行火害實驗，故本研究將參照 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」之相關規定進行填充型箱型鋼柱火害試驗。

第二節 試體規劃設計與製作

壹、試體規劃設計

實驗試體規劃主要參考文獻研究成果與相關設計規範建議等，以提出適用於填充型箱型鋼柱之火害性能設計準則與防火時效評估公式。由國內外相關研究成果得知，主要影響填充型合成柱構件耐火性能之參數為斷面大小、施加载重、受火段長度、混凝土強度及鋼管內填充物等。再者，根據我國「建築技術規則」第 70 條規定得知，柱構造依不同樓層規定防火時效須為 1 至 3 小時，但由國內學者(陳誠直等人 2010 及 2012、何明錦等人 2012)研究成果顯示，無噴塗防火被覆之承重箱型鋼管混凝土柱防火時效未滿 1 小時，如表 2-3 所示。為使填充型合成柱構件具 1 小時以上之防火時效，除了裝設防火材之外，亦可依照 EC4 及 ECCS-T.C.3 規範規定於箱型鋼柱內設置鋼筋，即為箱型鋼柱內填充鋼筋混凝土。試體主筋及箍筋主要參考 Eurocode 規範設計。考量國內相關研究成果，共規劃 8 支試體，如表 3-1 所示。試體參數為斷面大小、施加载重及箱型鋼內有無配置縱向主筋。試體編號 B4、B5 及 B6 分別為試體斷面 400、500 及 600 mm，編號 R、Ra 與 Rb 分別為箱型鋼柱內配置 8-#8、8-#9 與 16-#9 竹節鋼筋，編號 N 為箱型鋼柱內填充純混凝土，編號 .2、.3、.4、.5 和 .6 為施加载重與試體標稱強度之比值(載重比)。

試體設計主要參考我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」及歐洲規範(Eurocode)規範等，並考量實驗設備容量之限制等。試體鋼骨部分採用 A572 Grade 50 規格鋼材，箱型鋼柱乃由 4 片厚 19 mm×長 3060 之鋼板以全滲透開槽銲接組

合；開槽型式為單斜槽，開槽角度為 35 度，根部間隙為 7 mm，並於接合間隙處裝設背墊板，如圖 3-1 所示。

試體箱型鋼柱內分別為填充純混凝土及鋼筋混凝土。於箱型鋼柱內有配置縱向主筋之試體，鋼筋採 CNS 560「鋼筋混凝土用鋼筋」規定之竹節鋼筋，再依據 EC 4 規定配置與設計。B4R 與 B5R 系列試體皆採 8 根 8 號竹節鋼筋，鋼筋比 (A_s/A_c+A_s) 分別為 3% 和 1.9%，而試體 B6Ra-.3 及 B6Rb-.4 分別採 8 根和 16 根 9 號竹節鋼筋，鋼筋比分別為 1.6% 與 3.2%。試體之箍筋皆採 3 號竹節鋼筋，配置於柱試體之間距分別為兩端採 200 mm 與中間段為 350 mm，如圖 3-2 與圖 3-3 所示。另外，為考量試體灌漿時內部空氣排除及高溫下混凝土水汽遷移等因素，於柱板各面縱向預設數個直徑 20 mm 透氣孔；而箱型鋼柱內灌之混凝土採自充填混凝土。試體其它細部設計，如圖 3-4 所示。

表 3-1 試體規劃

試體編號	斷面尺寸 B×H×t (mm)	縱向主筋	橫向箍筋	施加載重比
B4R-.2	□400×400×19	8-#8	#3@350	0.2
B4R-.5	□400×400×19	8-#8	#3@350	0.5
B5N-.6	□500×500×19	—	—	0.6
B5R-.3	□500×500×19	8-#8	#3@350	0.3
B6N-.3	□600×600×19	—	—	0.3
B6N-.5	□600×600×19	—	—	0.5
B6Ra-.3	□600×600×19	8-#9	#3@350	0.3
B6Rb-.4	□600×600×19	16-#9	#3@350	0.4
備註： 橫向箍筋間距為柱試體中間段之間距(mm)				

(資料來源：本研究整理)

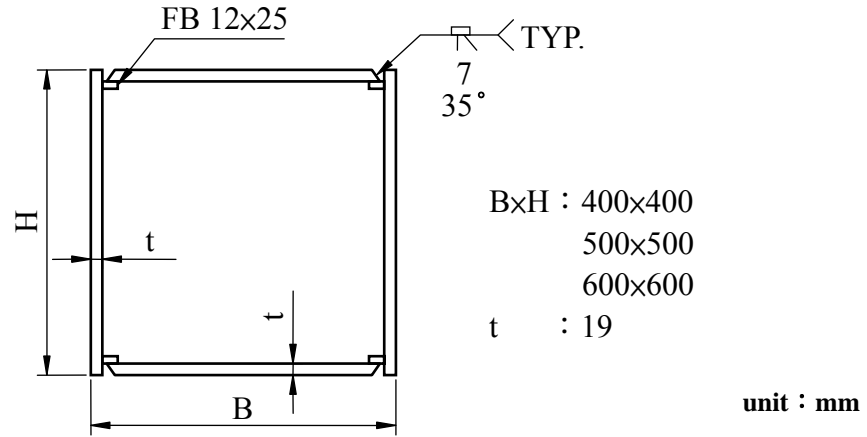
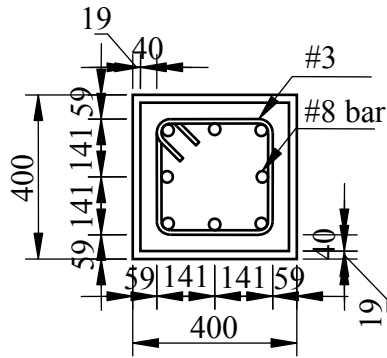


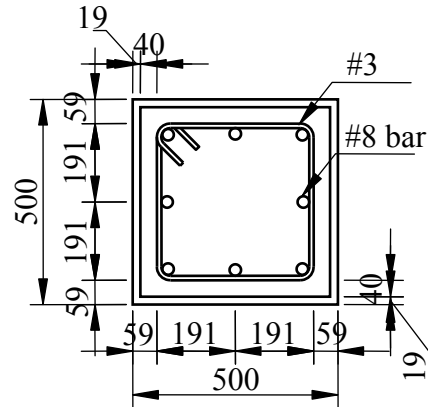
圖 3-1 箱型鋼柱斷面設計圖

(資料來源：本研究整理)

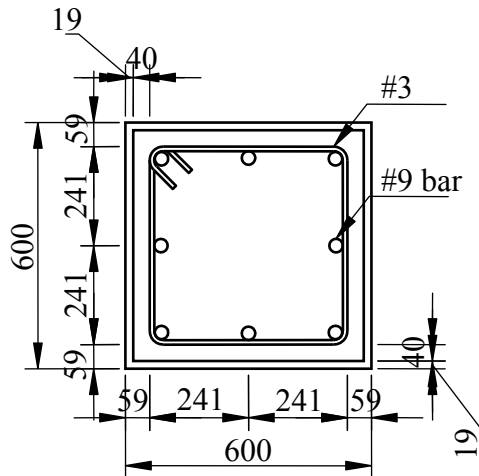
(a) B4R 系列



(b) B5R-.3



(c) B6Ra-.3



(d) B6Rb-.4

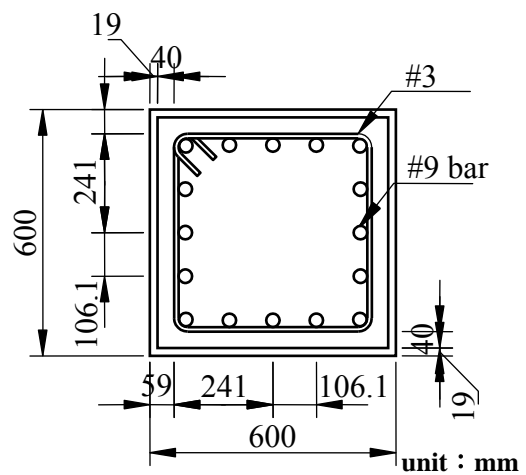


圖 3-2 填充型箱型鋼柱斷面主筋配置示意圖

(資料來源：本研究整理)

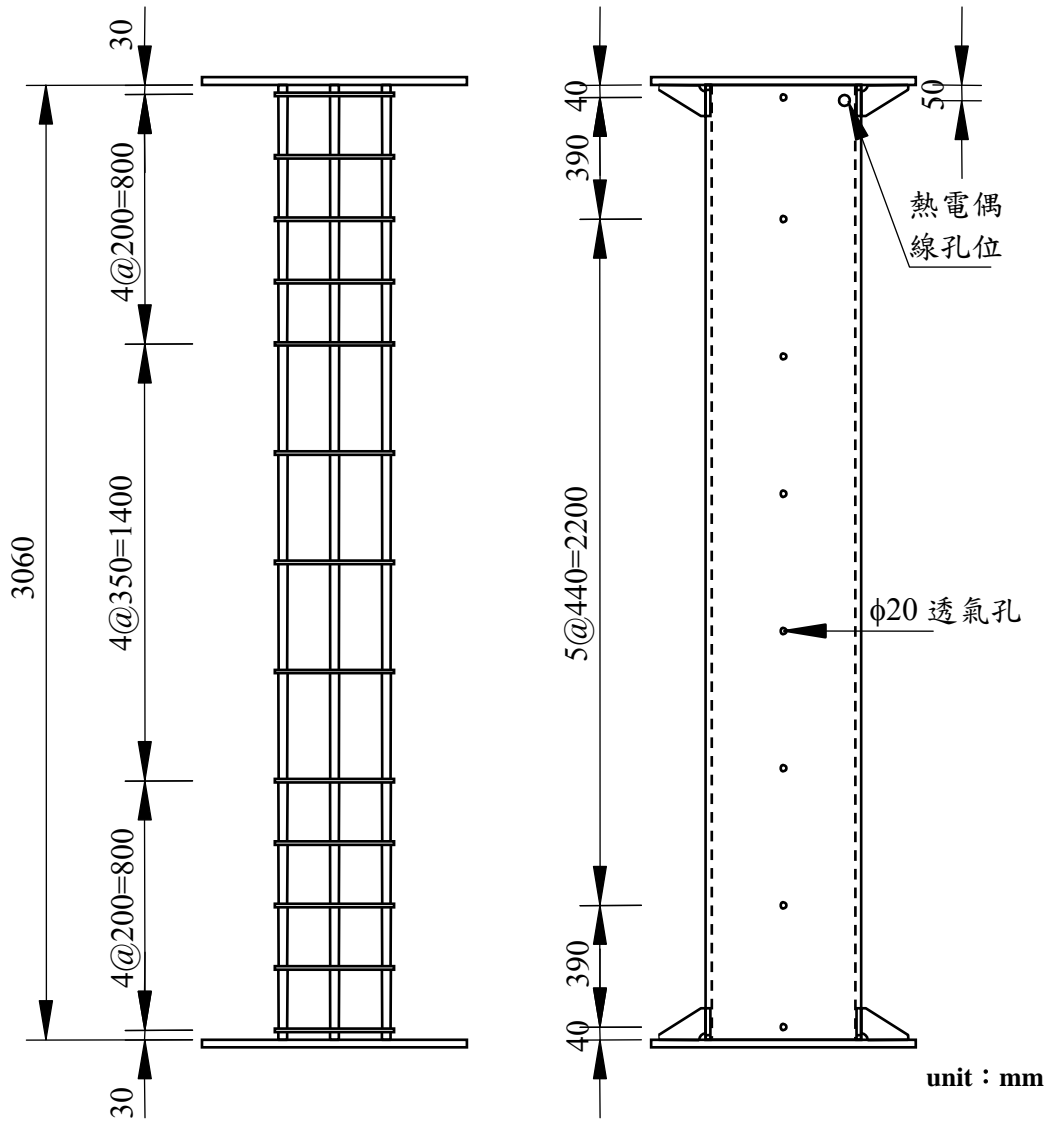
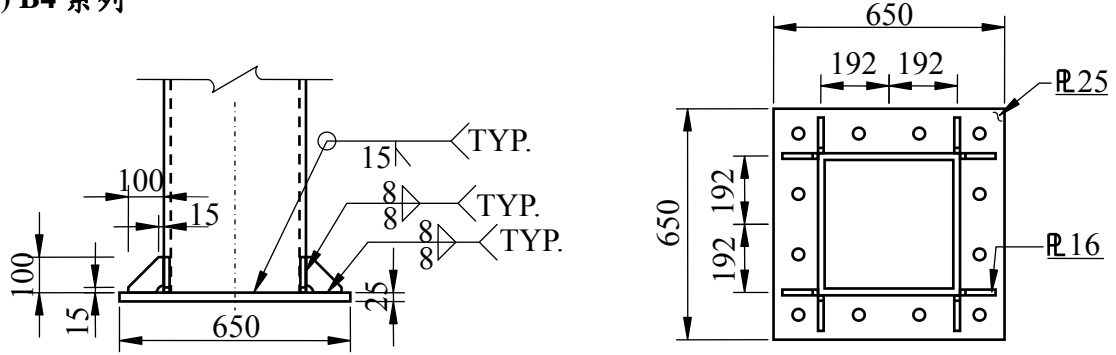


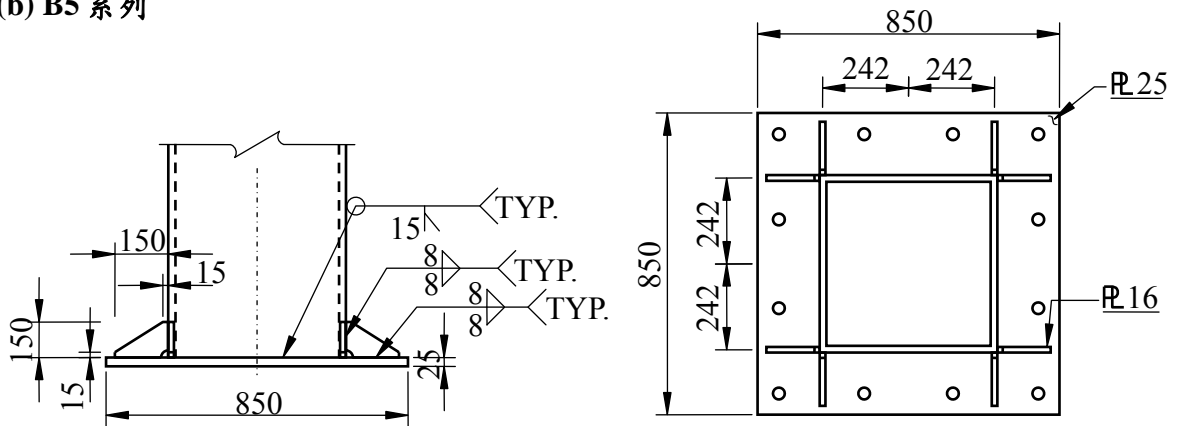
圖 3-3 填充型箱型鋼柱箍筋及柱板透氣孔配置示意圖

(資料來源：本研究整理)

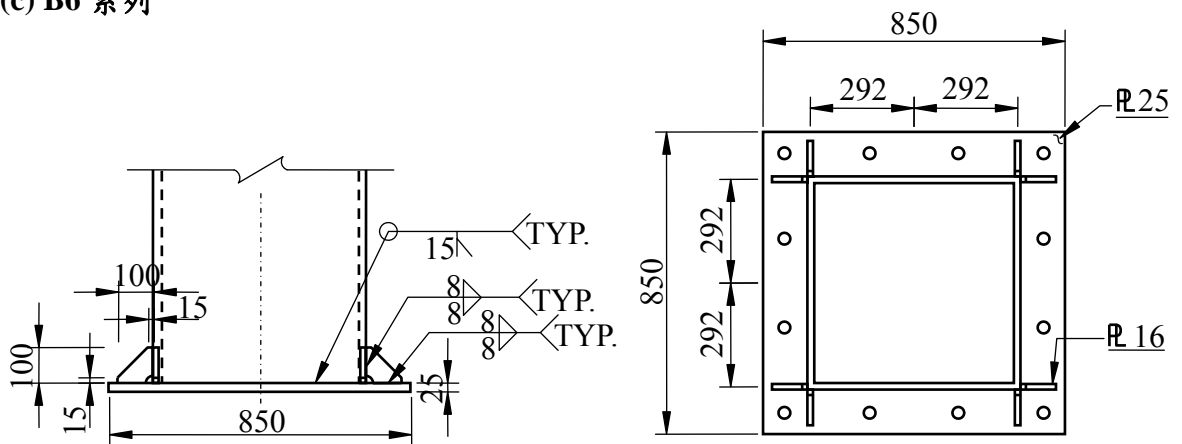
(a) B4 系列



(b) B5 系列



(c) B6 系列



unit : mm

圖 3-4 填充型箱型鋼柱試體端部設計圖

(資料來源：本研究整理)

貳、試體製作

試體製作程序如下：

1. 依設計圖裁切鋼板、鑽孔及開槽。
2. 裁切主筋及製作箍筋，組裝鋼筋籠。
3. 柱板及兩端端板以銲接接合固定成 U 字形。
4. 安裝熱電偶至預定量測位置。
5. 鋼筋籠吊裝至試體 U 字形內。
6. 柱體組裝銲接施工。
7. 混凝土灌漿作業。
8. 混凝土養護
9. 安裝柱面熱電偶測點

試體由鋼鐵廠依設計圖樣進行製作組裝，試體分為箱型鋼柱內有、無配置縱向主筋。對於有配置縱向主筋試體之製作程序為依照上述 1 至 9 步驟，而無配置縱向主筋試體為步驟 1、3 至 9。以主筋和箍筋綁紮組裝鋼筋籠，再將 3 面柱板與兩端端板接合成 U 字形，即分別進行安裝各部位之熱電偶測點，如圖 3-5 所示；鋼筋籠吊裝至 U 字形試體內，將預先安裝完成之熱電偶線分別經由試體頂端柱板預留孔延伸出試體外，確定各測點訊號正常，再進行試體柱板和其它肢材之銲接作業，如圖 3-6 所示。試體柱板全滲透銲接處皆利用超音波檢測確保銲道無缺陷，再進行混凝土灌漿作業。

本研究試體箱型鋼柱板之鋼骨材料採 A572 Grade 50 等級，降伏強度為 3.98 tf/cm²，抗拉強度為 5.36 tf/cm²。內灌混凝土採自充填混凝土，28 天之標準圓柱試體抗壓強度約為 528 kgf/cm²，混凝土配比於表 3-2 所示。對於有配置縱向主筋試體，B4 與 B5 系列試體之主筋(8 號竹節鋼筋)降伏強度為 5280 kgf/cm²，而 B6 系列試體主筋(9 號竹節鋼筋)降伏強度為 5120 kgf/cm²。



圖 3-5 試體組裝之 U 字形與鋼筋籠示意圖

(資料來源：本研究整理)



圖 3-6 箱型鋼柱試體

(資料來源：本研究整理)

表 3-2 試體內灌混凝土之配比

每 1 m ³ 混凝土配比用量(kg)						
水泥	爐石	飛灰	水	附加劑	細骨材	粗骨材
329	66	44	175	7.03	992	780
備註： 1. 設計空氣含量為 1.5% 2. 骨材最大粒徑為 19 mm 3. 水膠比為 0.397						

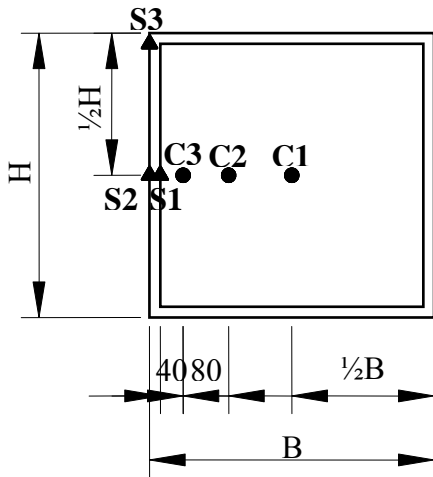
(資料來源：本研究整理)

參、熱電偶測點分佈

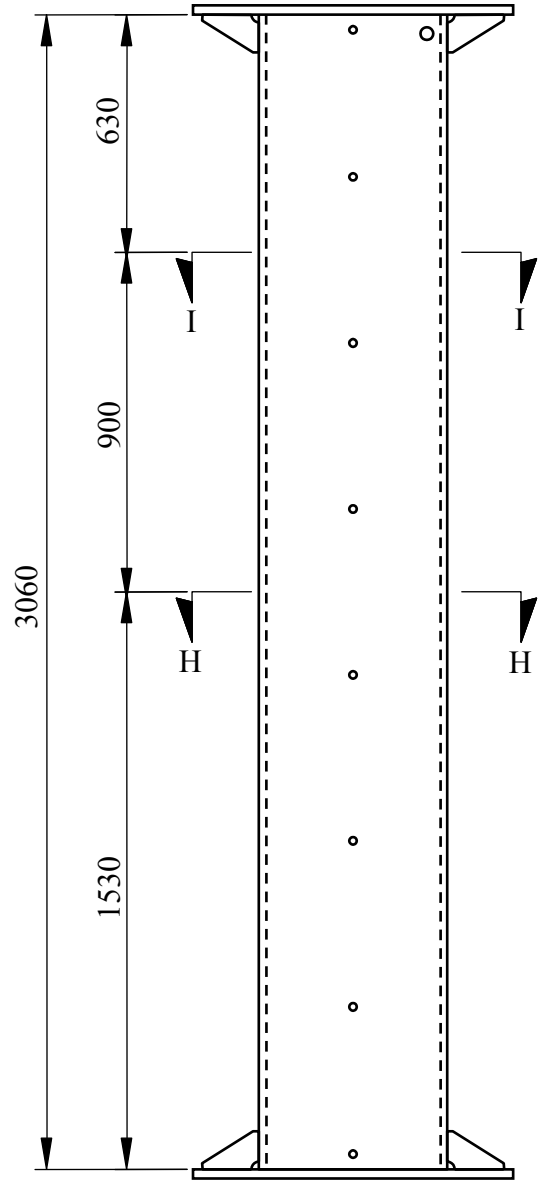
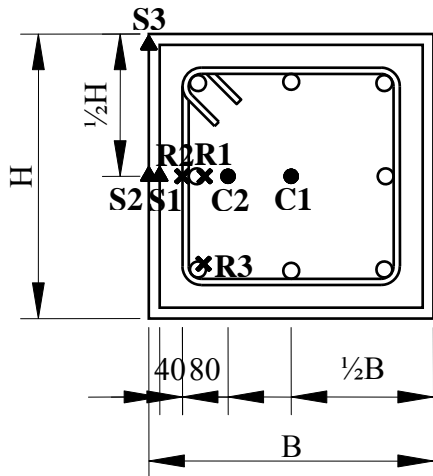
結構構件於火場下之構件溫度會影響其結構行為，而為瞭解及探討試體溫度分佈及行為影響，本研究將參照我國 CNS 12514 規定與相關文獻建議，規劃試體溫度測點位置與數量，以量測不同位置之溫度；溫度測點將採用 0.75 級性能以上及直徑 0.65 mm 之 K 型熱電偶，分別位於試體受熱段(2800 mm)之 2 個斷面高度設置熱電偶測點。

由鋼骨、鋼筋及混凝土組合而成之試體，使溫度測點分佈主要依不同材料及距試體之深度區分。所有試體之鋼骨測點皆於柱板中間寬度及箱型鋼角隅處設置為 3 個測點；對於有配置縱向主筋試體，鋼筋測點於主筋及箍筋設置 3 個測點，混凝土測點於距混凝土表面至中心處分別設置 2 至 3 個測點，如 B4R 及 B5R 系列試體為距混凝土表面 120 mm 及中心處設置，而 B6R 系列為距混凝土表面 120、200 mm 及中心處設置；無配置縱向主筋試體之混凝土測點則設置 3 至 4 個測點。詳細試體溫度測點分佈，如圖 3-7 所示；實際試體內部熱電偶安裝樣式，如圖 3-8 所示。

(a) 無配置縱向主筋試體



(b) 有配置縱向主筋試體



▲鋼骨測點；×鋼筋測點；●混凝土測點

unit : mm

圖 3-7 填充型箱型鋼柱試體之溫度測點分佈

(資料來源：本研究整理)

(a) 有配置鋼筋試體



(b) 無配置鋼筋試體



圖 3-8 試體內部熱電偶之安裝

(資料來源：本研究整理)

第三節 實驗設備與設置

實驗試體於內政部建築研究所防火實驗中心之複合耐火爐進行火害試驗；複合耐火爐之加載設備具 2000 噸加載能力，行程為 500 mm，加載介面以萬向球座設計，轉角可達 15° 以上，亦可選擇無旋轉之固定座方式連接；加溫設備以數位控制方式，模擬 CNS 12514 標準升溫曲線之升溫速率及溫度，並藉由加溫爐東、西兩側之噴火孔以雙向對流形式使爐內溫度均勻分佈。

試體混凝土經養護並安裝表面鋼骨測點後，於加載設備頂端及底端分別加裝支撐短柱和柱墩，再將試體吊裝至複合耐火爐內；試體兩端利用螺栓分別與柱墩及支撐短柱連接固定，再以防火棉包覆加溫爐內預定不受火處；最後熱電偶線與資料擷取器連接、蓋上加溫爐頂端爐蓋板，及架設量測試體軸向變形之位移計，如圖 3-9 所示。

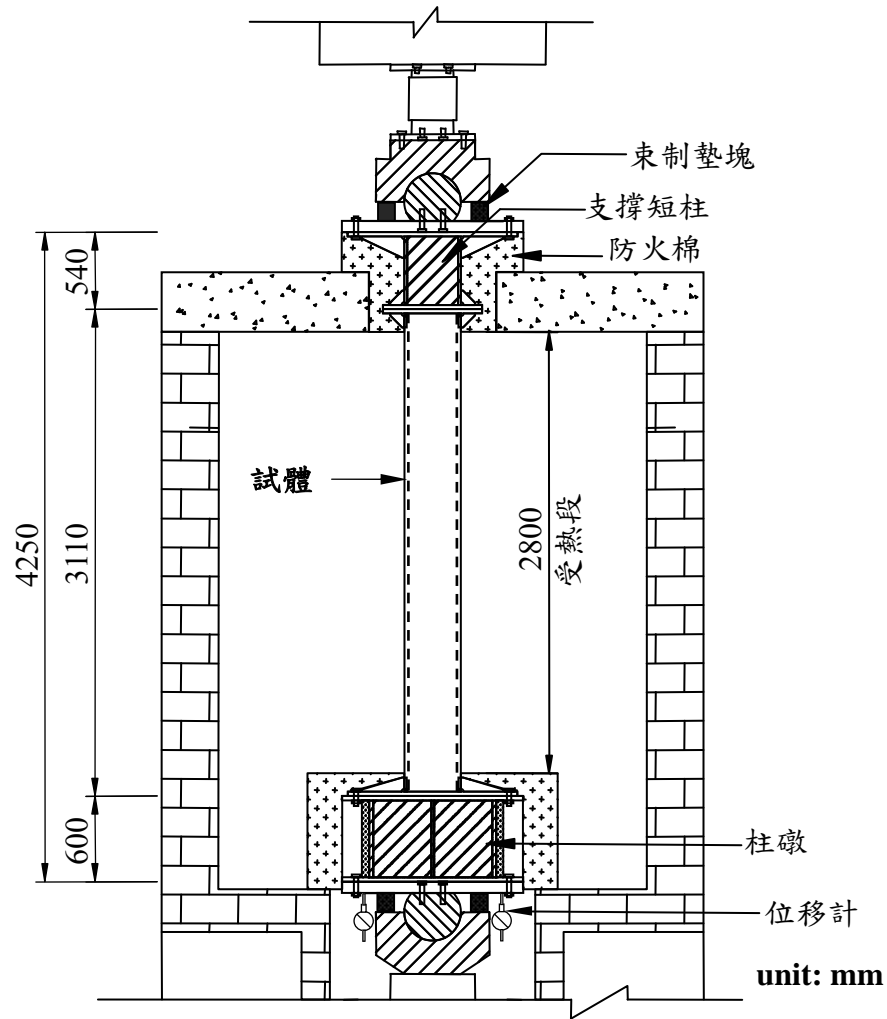


圖 3-9 實驗試體設置示意圖

(資料來源：本研究整理)

第四節 實驗步驟

根據 CNS 12514 規定，試驗步驟如下所示：

1. 試驗開始前

試驗開始前分兩部分規定，一為溫度要求，其室內溫度須在 10~40°C 範圍內，爐內溫度須小於 50°C，且熱電偶之初始值須持續記錄並檢查一致性；另一為試體加載，加載載重須於試驗開始前 15 分鐘加載至試體，保持加載不變直至試體變形不再增加，並記錄軸向變形量。

2. 試驗過程

試驗開始之際，試體內部初始平均溫度和非加熱面溫度須與初始室內溫度相差 5°C 範圍內，並依標準加熱溫度-時間曲線進行加熱試驗，其加熱函數為 $T = 345 \times \log_{10}(8t + 1) + 20$ ，如圖 2-1 所示。加熱試驗過程中須維持固定載重，試體加载之載重依據「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」計算，並考量試驗之容量。

3. 量測與觀察

試體在整個試驗中之溫度和變形須加以記錄；對於所有固定之熱電偶在試驗期間應每隔不超過 1 分鐘即量測一次；試體垂直或柱中心之水平變形量依量測設備狀況，每間隔一段時間進行量測，變形速率將以實驗之變形量推算而得。試驗結束後，須觀察試體之變形模式並詳實記錄之。

4. 試驗終止

根據規定，試驗終止條件包括：(1) 試體達到性能基準指標，或試驗時間已達預定時間；(2) 因人員安全或設備可能遭受破壞之因素。

垂直承重構造之性能基準判定，最大軸向壓縮量(mm)： $C = h / 100$ (mm)；最大軸向壓縮速率(mm/min)： $dC / dt = 3h / 1000$ (mm/min)，其中 h 為試體初始高度。

第四章 實驗結果與討論

實驗為依照 CNS 12514 規定進行柱構件耐火性能試驗，試驗步驟分為兩階段，第一為加載階段，施加軸向載重並持壓 15 分鐘，直至試體變形不再增加為止；各試體施加之軸向載重，如表 4-1 所示。第二為定載加溫階段，定額軸向載重持壓，加溫爐內依標準升溫與時間關係加溫，直至試體無承重能力，判定試體破壞。另外，因實驗時程關係，於進行試體 B4R-.2、B4R-.5、B5N-.6、B6N-.3 與 B6N-.5 試驗時之混凝土抗壓強度約為 564.3 kgf/cm²；而進行試體 B5R-.3、B6Ra-.3 及 B6Rb-.4 試驗時混凝土抗壓強度約為 602.9 kgf/cm²。

表 4-1 試體標稱強度與施加载重

試體編號	f'_c (kgf/cm ²)	主筋	箍筋	試體標稱強度 (tf)	施加载重 (tf)
B4R-.2	564.3	8-#8	#3	1796.2	360
B4R-.5	564.3	8-#8	#3	1796.2	906
B5N-.6	564.3	—	—	2276.5	1366
B5R-.3	602.9	8-#8	#3	2500.3	750
B6N-.3	564.3	—	—	3001.5	901
B6N-.5	564.3	—	—	3001.5	1501
B6Ra-.3	602.9	8-#9	#3	3292.1	988
B6Rb-.4	602.9	16-#9	#3	3494.7	1398

(資料來源：本研究整理)

第一節 實驗結果

本研究探討箱型鋼柱內填充純混凝土與鋼筋混凝土試體受定載高溫之斷面溫度、變形行為、耐火性能合格時間與破壞模式，並探討施加载重、斷面尺寸與有無配置縱向主筋對填充型合成柱耐火性能之影響；實驗結果如下所述。

壹、箱型鋼柱內填充純混凝土試體

試體 B5N-.6

實驗開始時試體平均溫度約為 45.6°C，試體施加之軸向載重為 1366 噸。圖 4-1 為加溫爐內平均升溫曲線；圖 4-2 為試體於定載加溫階段之變形與時間關係；

圖 4-3 與 4-4 分別為試體於定載加溫試驗之鋼骨測點與混凝土測點溫度，其中圖 4-4 之 H 斷面 C1、C2 及 C3 測點，與 I 斷面 C1 測點於試驗 26 分鐘後損壞。

當定載加溫試驗進行 10 分鐘時，試體軸向伸長變形量已達 3 mm，此為試體第一次最大熱膨脹伸長變形，其爐內平均溫度約為 664°C，試體箱型鋼骨表面平均溫度約為 185.3°C，箱型鋼骨內側(與混凝土交界處)之溫度約為 123.6°C，距試體表面 59mm 之混凝土測點溫度約為 52.5°C，而距試體表面 139 mm 及斷面中心混凝土平均溫度仍 47°C。待試體發生第一次最大伸長變形後，隨即呈現微幅壓縮之趨勢，而試驗進行 13 分鐘，試體又轉變為膨脹伸長變形，並於試驗 17 分鐘時達到第二次最大伸長變形(2.89 mm)；在甫達第二次伸長變形最大量時，爐內溫度約為 752°C，表面鋼骨平均溫度約為 322.8°C，內側鋼骨平均溫度約為 200.3°C，而混凝土測點溫度分別為 84.3°C、46.3°C 及 46.8°C。試驗期間，試體於加溫 25 分鐘時出現微小異聲，隨後於試驗 26 分鐘，試體發出巨大聲響，試體 B5N-6 達 CNS12514 性能基準之最大軸向壓縮速率(9.18 mm/min)之規定，終止試驗；此時，爐內溫度約為 826.5°C，試體鋼骨表面平均溫度約為 487°C，鋼骨內側平均溫度(與混凝土交界)約為 324°C。

火害實驗後，此試體挫屈的情況並不明顯，且箱型鋼柱板間之銲道未發生開裂現象，如圖 4-5 及圖 4-6。對於試體各面柱板局部挫屈處之凸起量介於 2.5 至 19 mm，以東面與西面柱板局部挫屈之凸起較為明顯，分別為 19 mm 與 14.5 mm。

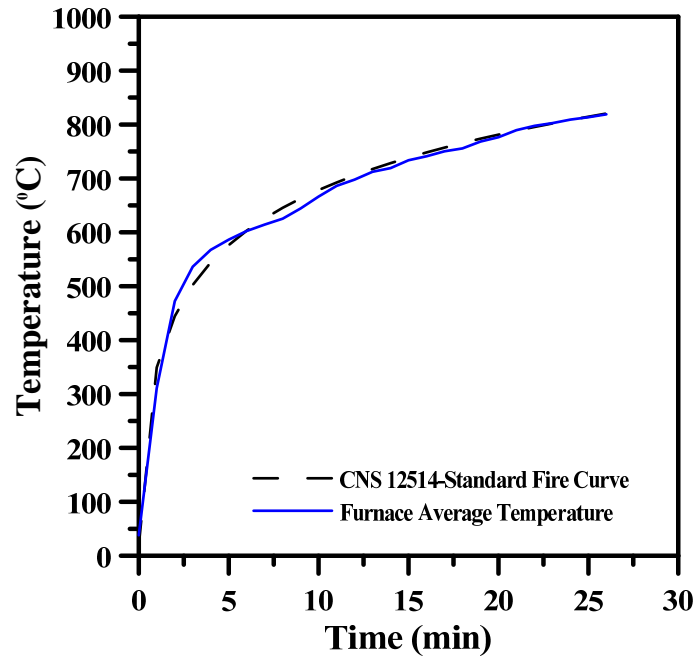


圖 4-1 試體 B5N-.6 爐內升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

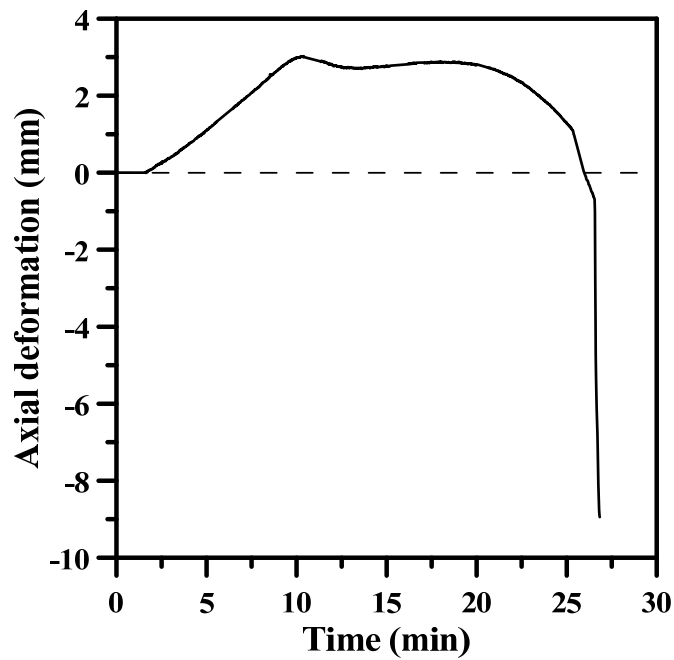


圖 4-2 試體 B5N-.6 定載加溫階段之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

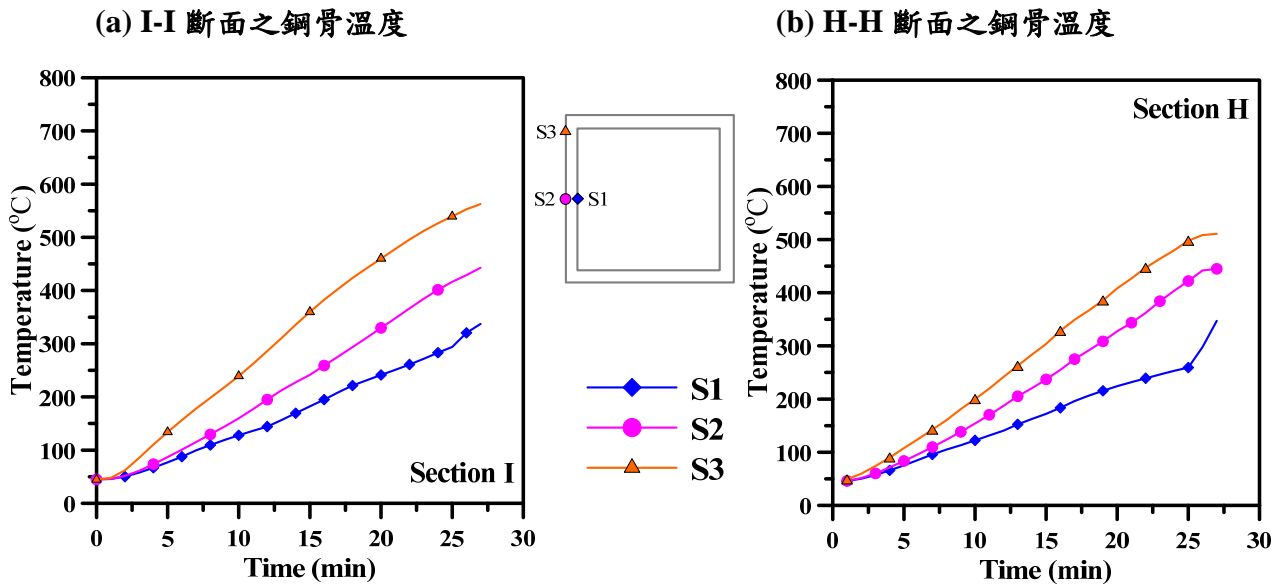


圖 4-3 試體 B5N-.6 之鋼骨測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

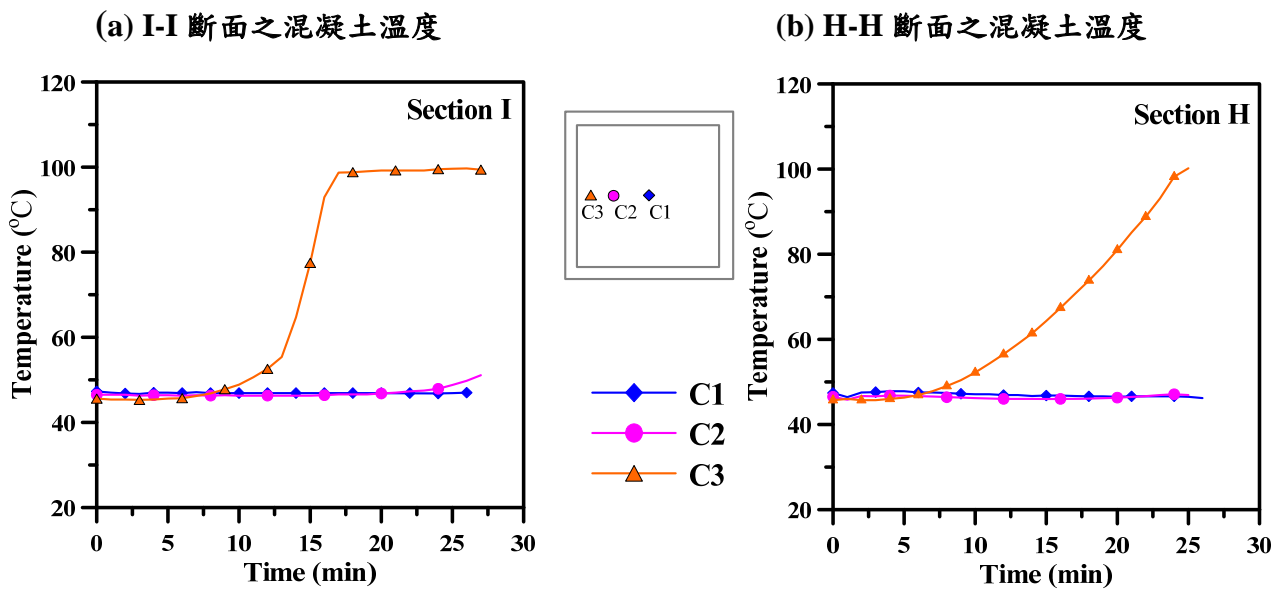


圖 4-4 試體 B5N-.6 之混凝土測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

(a) 西面與南面



(b) 東面與南面



圖 4-5 試體 B5N-6 耐火試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-6 試體 B5N-6 局部挫屈

(資料來源：本研究整理)

試體 B6N-3

箱型鋼柱內填充純混凝土之試體 B6N-3 施加軸向載重 901 噸，試驗時初始平均溫度為 32.3°C。對於試體各測點溫度，其鋼骨 IS1 測點因訊號異常，故未予

討論，而混凝土測點溫度於試驗 10 分鐘後因無規律性異常跳動，認定為訊號異常，亦不予討論。

試驗開始後，隨著加溫爐內溫度上升，試體之變形也開始膨脹伸長，其加溫爐內平均升溫曲線，如圖 4-7 所示。當試驗 23 分鐘，試體達最大伸長變形，變形量為 8.90 mm，此時加溫爐內平均溫度為 804°C，鋼表面平均溫度為 467°C，鋼骨內側與混凝土交界處之鋼骨平均溫度為 154°C；試體達最大伸長量後，試體變形行為從伸長變形轉為壓縮變形，研判其原因為鋼骨溫度已超過 400°C，鋼骨強度逐漸下降，使試體承载力逐漸無法支撐原先施加之載重。試體加熱 26 分鐘開始，發出砰一聲異響，之後持續有微小聲響發出，聲音如低鳴雷聲般斷斷續續出現，直至加熱 35 分鐘聲響逐漸變大至加溫 38 分鐘發出巨大聲響；當發出巨大聲響後，試體壓縮速率開始增加，最終達終止試驗之指標。試體於定載加溫階段之軸向變形與時間關係，如圖 4-8 所示；試體鋼骨測點溫度與時間關係，如圖 4-9 所示。試體 B6N-.3 總計進行定載加溫試驗約 43 分鐘，其於加溫 42 分鐘時達 CNS 12514 規定之最大軸向壓縮速率破壞準則，因此判定試體已失去承重能力；此時加溫爐內平均溫度為 894°C，鋼表面平均溫度為 633°C，鋼骨內側與混凝土交界處之鋼骨平均溫度為 508°C。

當試驗終止並待爐內溫度回復至室溫，便進入加溫爐內觀察試體 B6N-.3 火害後之變形情況；試體 B6N-.3 四面柱板皆有局部挫屈變形，局部挫屈變形位置主要集中於柱試體上半部，且柱板挫屈處皆呈面外凸起，如圖 4-10 及圖 4-11 所示。各面柱板局部挫屈之凸起量約為 60 至 100 mm，而最大凸起量為 102 mm 位於西面柱板距試體底部端板 2190mm 處。另外，試體 B6N-.3 於火害後並無發現柱板間之銲道開裂情形，惟柱板鋼表面因高溫延燒 40 餘分鐘，鋼表層略有剝離之現象產生；對於柱板透氣孔則由原先的圓形，變形為扁平橢圓狀。

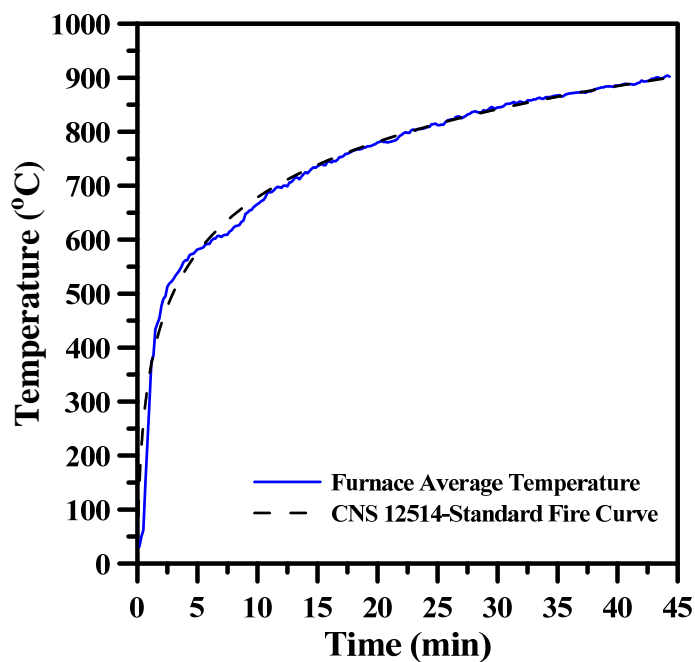


圖 4-7 試體 B6N-.3 爐內升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

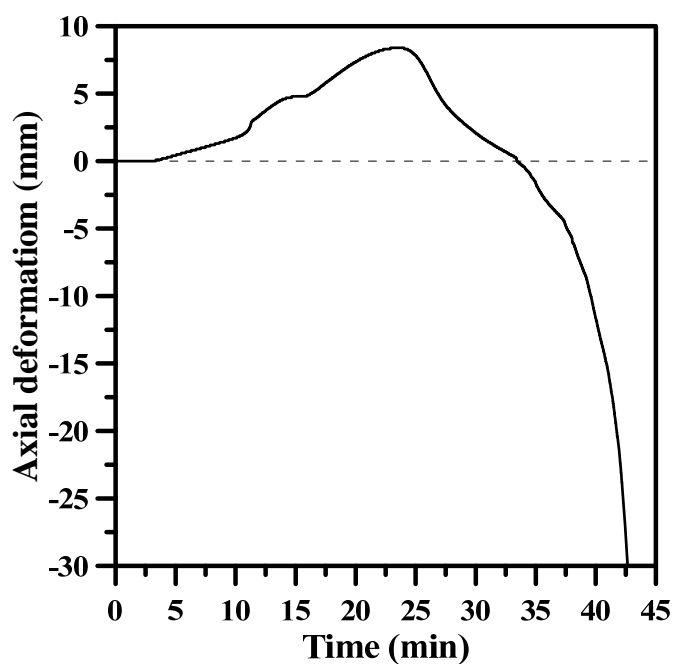


圖 4-8 試體 B6N-.3 定載加溫階段之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

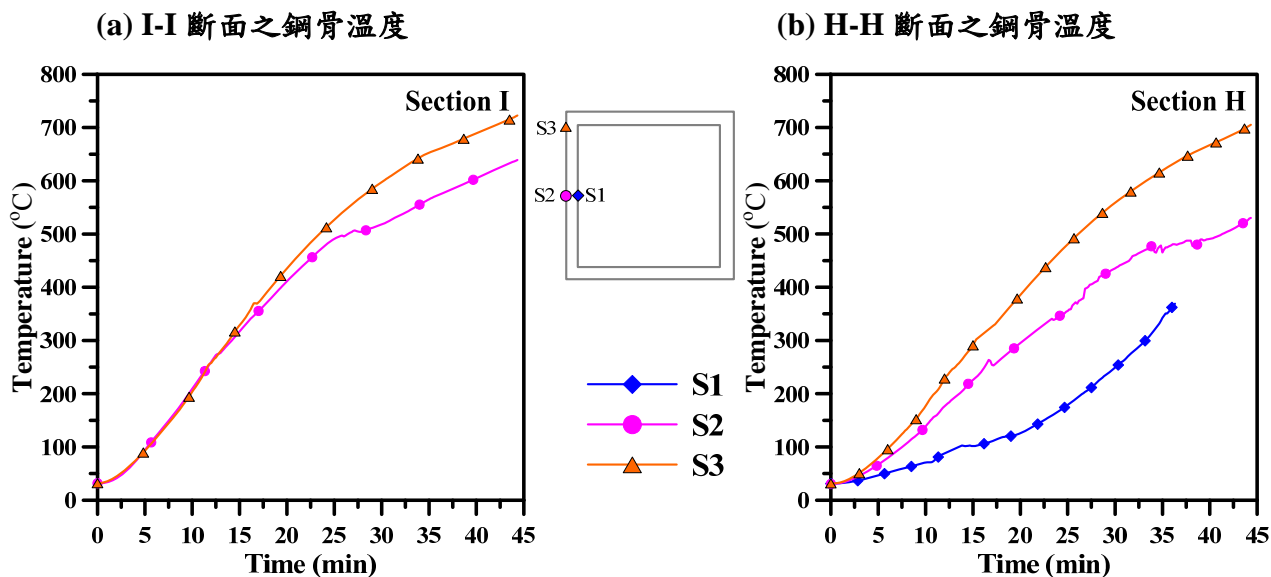


圖 4-9 試體 B6N-.3 之鋼骨測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

(a) 南面



(b) 西面與南面



圖 4-10 試體 B6N-.3 耐火試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)

(a) 西面與南面



(b) 東面與北面

**圖 4-11 試體 B6N-3 局部挫屈**

(資料來源：本研究整理)

試體 B6N-.5

試體 B6N-.5 於試驗時之平均溫度約為 31.2°C ，其施加 1501 噸軸向載重；定載加溫期間，因混凝土測點訊號均於試驗開始 10 分鐘後出現異常，故不予討論，而其加溫爐內升溫曲線，如圖 4-12 所示。

試驗初期，本試體與前述試體相同為因加溫爐內溫度逐漸升溫，使得產生膨脹伸長變形行為；於試驗 11 分鐘時，試體達第一次最大伸長量 1.62 mm，此時加溫爐內平均溫度為 693°C ，鋼表面平均溫度為 203°C ，鋼骨內側與混凝土交界處之鋼骨平均溫度為 75°C ；隨後試體由伸長變形轉成壓縮變形，直至加溫 14 分鐘後，再轉變成伸長變形，此時試體仍處於膨脹狀態，惟伸長量略降至 1.38 mm。

試體於加熱 20 分鐘時達到第二次最大伸長變形(1.71 mm)，此時加溫爐內平均溫度為 782°C ，鋼表面平均溫度為 382°C ，鋼骨內側與混凝土交界處之鋼骨平均溫度為 118°C ；當試體到達第二次最大伸長量後，亦因鋼骨表面溫度已接近 400°C ，導致箱型鋼柱承載能力降低，故試體呈現壓縮變形行為，如圖 4-13 所示；試體鋼骨測點溫度與時間關係，如圖 4-14 所示。然而，試體於加溫 22 分鐘開始

有異聲響出現，聲音如悶雷般斷斷續續出現，直至加溫 31 分鐘加溫爐內發出巨大聲響，爾後試體壓縮速率劇增，使達終止試驗之最大軸向壓縮速率大於 9.18 mm/min 指標；試驗終止時加溫爐內平均溫度為 849°C，鋼表面平均溫度為 550°C，鋼骨內側與混凝土交界處之鋼骨平均溫度為 439°C。

由試體火害後觀察發現，試體 B6N-.5 四面柱板皆有局部挫屈變形的情况產生，挫屈處皆呈面外凸起且位處接近柱板透氣孔處，如圖 4-15 及圖 4-16 所示。柱板各處凸起量約介於 40 至 60 mm，其最大凸起變形為位於南面柱板距試體底部端板 2190 mm 處。試體火害後亦無發現任何銲道及透氣孔開裂之情况，惟靠近凸起處之透氣孔略呈現扁平橢圓狀。

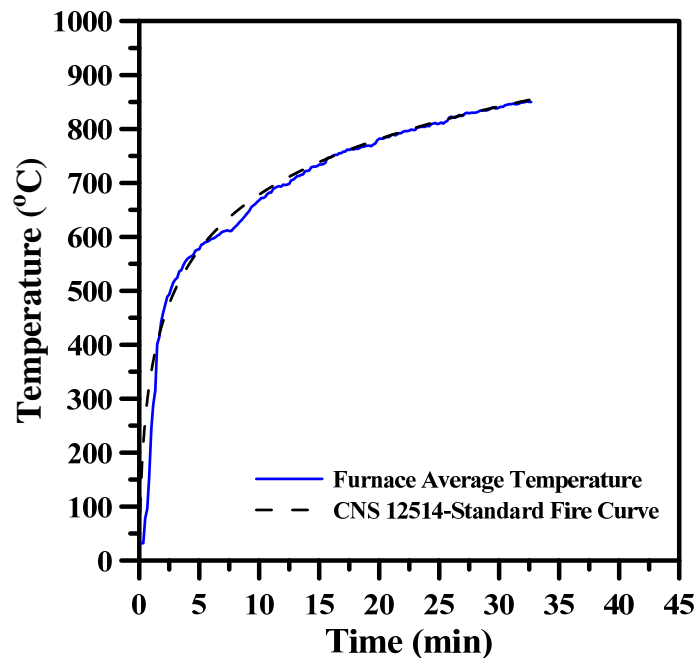


圖 4-12 試體 B6N-.5 爐內升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

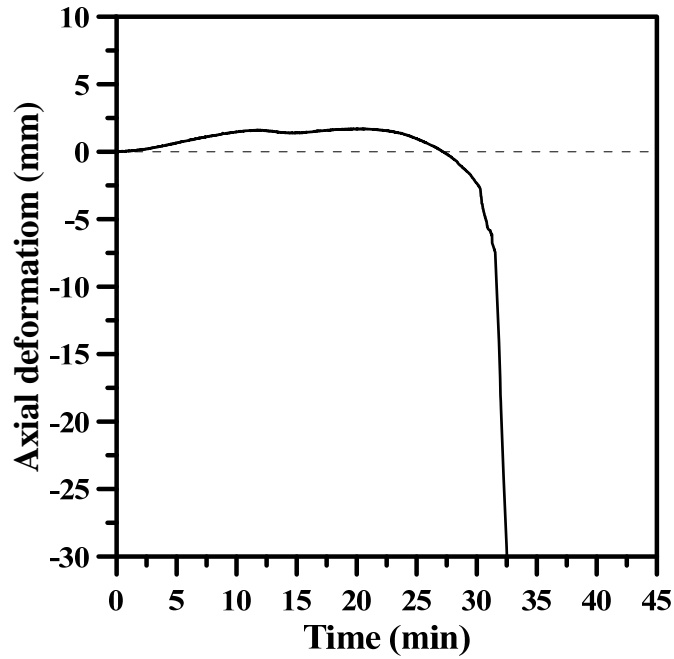


圖 4-13 試體 B6N-.5 定載加溫階段之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

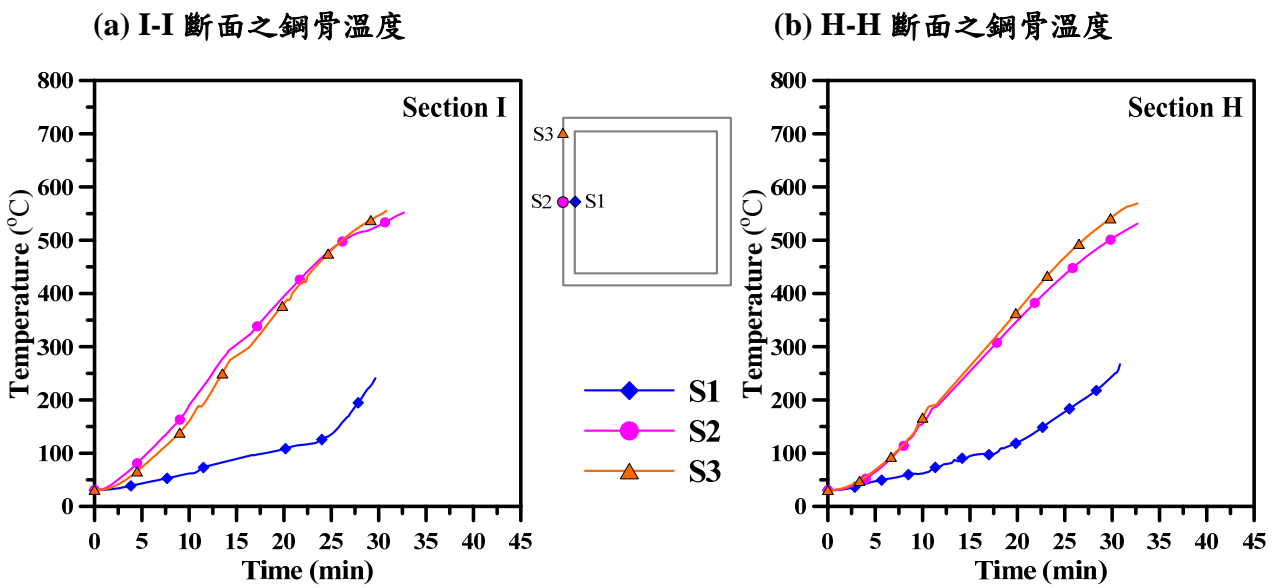


圖 4-14 試體 B6N-.5 之鋼骨測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

(a) 南面



(b) 西面與南面

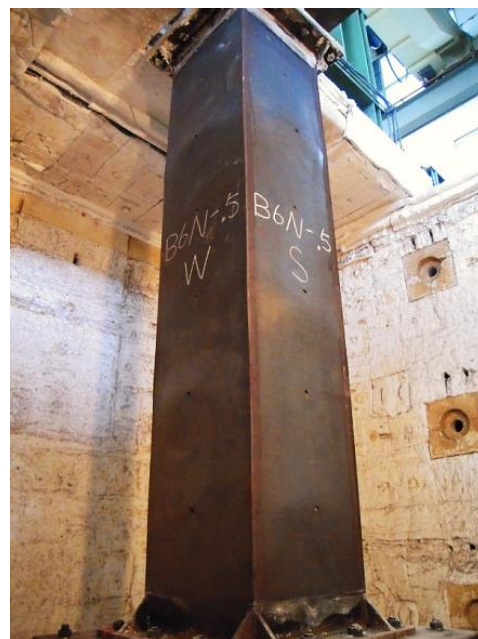


圖 4-15 試體 B6N-.5 耐火試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)

(a) 東面與南面



(b) 西面與南面



圖 4-16 試體 B6N-.5 局部挫屈

(資料來源：本研究整理)

貳、箱型鋼柱內填充鋼筋混凝土試體

試體 B4R-.2

試驗開始時試體平均溫度約 33.6°C，而施加之定額軸向載重為 360 噸，再依前述試驗步驟進行實驗。加溫爐內平均升溫曲線，如圖 4-17 所示；試體於定載加溫階段之軸向變形與時間關係，如圖 4-18；因試體各測點溫度於試驗進行約為 50 分鐘後，鋼骨、混凝土及鋼筋測點溫度呈現不規則陡升等原因，故判定溫度測點故障，如圖 4-19 至圖 4-21 所示。

當定載加溫試驗進行 28 分鐘時，試體軸向伸長量達 17.2 mm(最大熱膨脹伸長)，此時爐內平均溫度約為 831°C，鋼骨表面平均溫度為 526°C，鋼骨內側之柱板平均溫度(與混凝土交界)為 349°C，距試體表面 59 mm 之箍筋(R2)平均溫度約為 83°C，距表面 75 mm 之主筋 R1 與 R3 測點平均溫度分別約為 54°C 及 78°C，距表面 139 mm(C2)為 35°C，而中心混凝土溫度仍為初始溫度。隨後試體軸向變形行為即呈現壓縮變形之趨勢，而於試驗 62 分鐘之試體壓縮變形轉為趨緩；試體軸向變形由伸長轉變為壓縮至壓縮變形趨緩期間，皆有大小不等的異聲從試體發響。試驗進行約 85 分鐘後，試體軸向壓縮變形速率漸增，直至試驗 162 分鐘時達規定之最大軸向壓縮速率 9.18 (mm/min)，故判定此時試體破壞。試體 B4R-.2 於試驗後期雖因內部鋼筋混凝土可承受載重，但試體溫度逐漸升高而鋼筋混凝土強度逐漸降低，因此造成緩降之壓縮變形行為，此緩降壓縮變形行為延長柱構件耐火性能合格時間，並達「建築技術規則」規定二小時以上防火時效。

由圖 4-22 試體試驗後之外觀觀察發現，試體各面柱板中段不同位置處產生明顯地局部挫屈變形(中段凸起量介於 60 至 92.5 mm 之間)，且鋼骨表面亦有剝離現象，但試體銲道處皆無開裂的現象，如圖 4-23 及圖 4-24 所示。

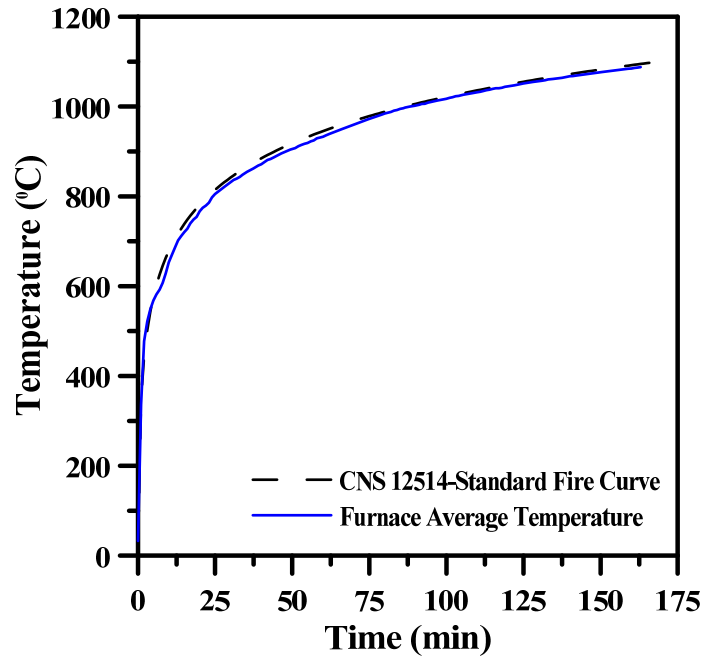


圖 4-17 試體 B4R-.2 爐內升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

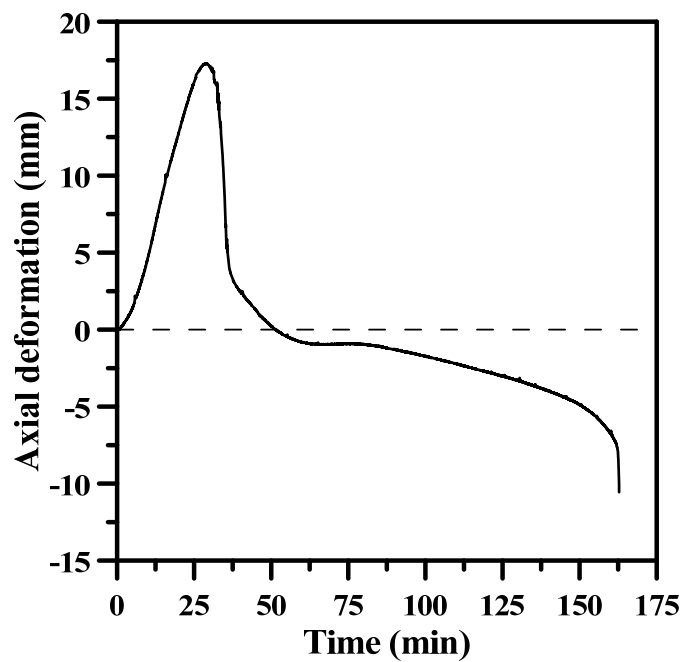


圖 4-18 試體 B4R-.2 定載加溫階段之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

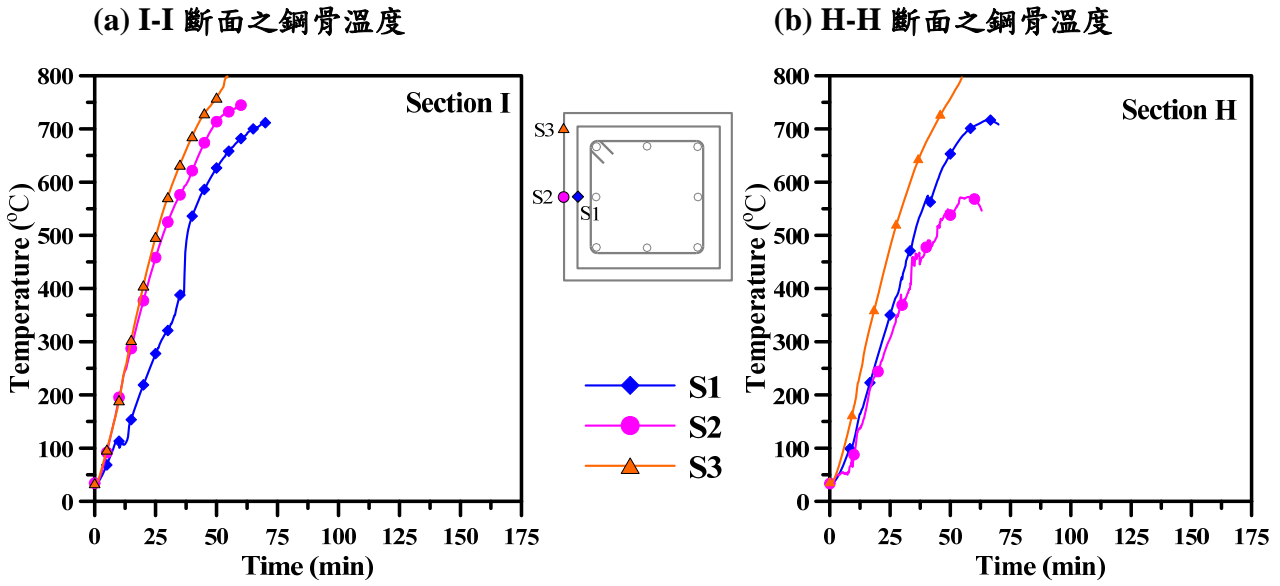


圖 4-19 試體 B4R-.2 之鋼骨測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

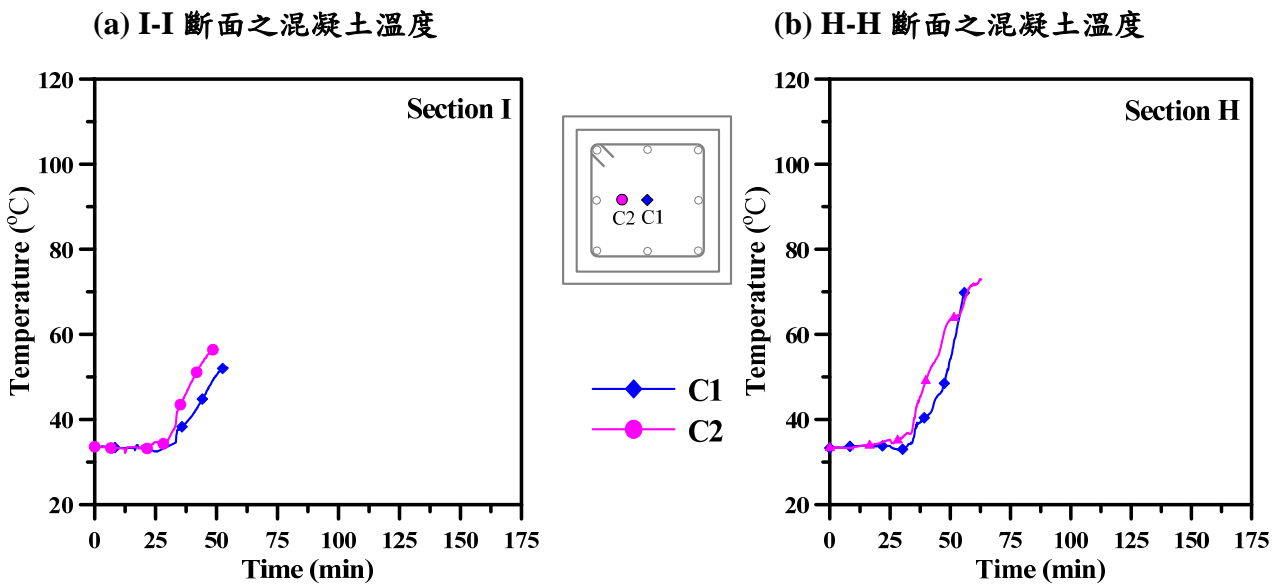


圖 4-20 試體 B4R-.2 之混凝土測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

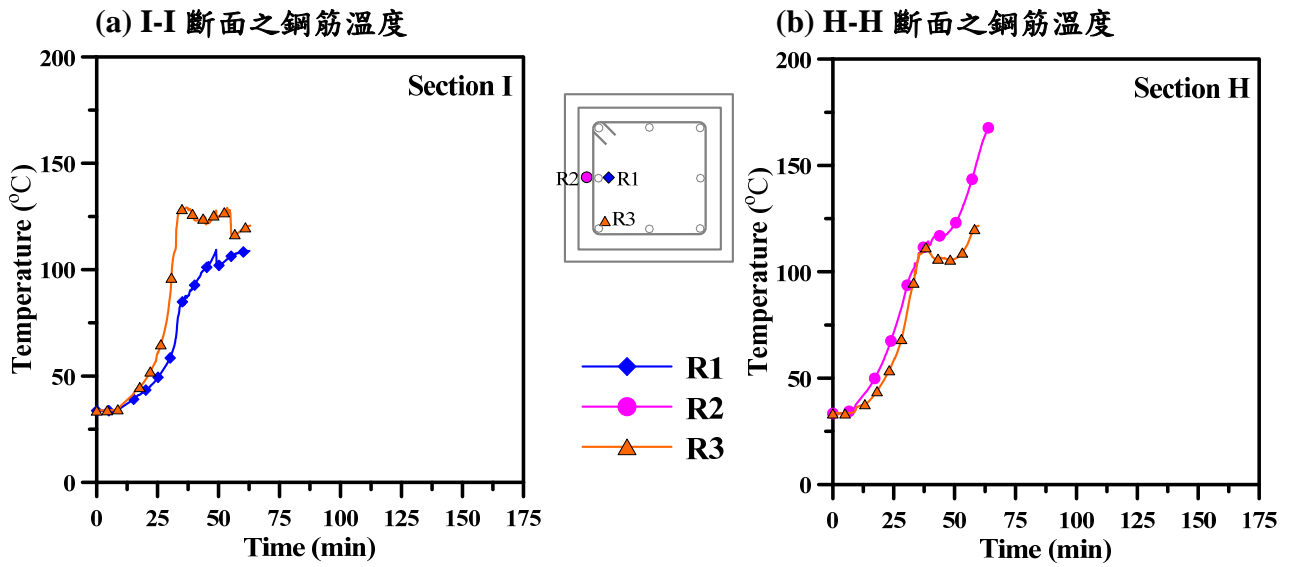


圖 4-21 試體 B4R-.2 之鋼筋測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

(a) 東面與南面



(b) 西面與南面



圖 4-22 試體 B4R-.2 耐火試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-23 試體 B4R-.2 局部挫屈

(資料來源：本研究整理)



圖 4-24 試體 B4R-.2 耐火試驗後柱板表面剝離情況

(資料來源：本研究整理)

試體 B4R-.5

待確認熱電偶各溫度測點及位移計訊號正常後，即進行加載階段試驗，其施加 906 噸軸向載重至試體與持壓 15 分鐘，便進行定載加溫試驗。定載加溫試驗開始前之試體平均溫度約為 43°C；試驗開始後，加溫爐內溫度隨著標準升溫曲線增溫，使試體因高溫影響產生軸向膨脹伸長變形，如圖 4-25 與圖 4-26 所示。試驗 20 分鐘，爐內溫度約為 784°C，此時試體達最大伸長量 8.11 mm，鋼表面平均溫度約為 389°C，鋼骨內側與混凝土交界處之鋼骨平均溫度為 224°C，鋼筋平均溫度為 54°C，距試體表面 139 mm 及試體中心之混凝土平均溫度皆為 44°C；試體達最大伸長量後，因鋼骨溫度已接近 400°C，鋼骨強度下降，導致試體軸向變形從原本的膨脹伸長轉為壓縮變形。另外，試體鋼骨測點溫度與時間關係，如圖 4-27 所示；試體混凝土測點溫度與時間關係，如圖 4-28 所示；試體鋼筋測點溫度與時間關係，如圖 4-29 所示，而鋼筋 IR2 測點因訊號異常，故未於圖中顯示。

加熱 28 分鐘時，試體於加溫爐內初次發出聲響，聲響模式為砰一聲，此時伸長量已降至 4.06 mm，試體仍持續為壓縮變形狀態；加熱 30 分鐘時，爐內發出轟一巨大聲響，爾後試體壓縮速率開始急速增加。於 32 分鐘發出低沉雷鳴聲，且試體達性能基準最大軸向壓縮速率大於 9.18 mm/min 上限之規定，終止試驗；此時加溫爐內平均溫度為 859°C，鋼表面平均溫度為 583°C，鋼骨內側與混凝土交界處之鋼骨平均溫度為 411°C，鋼筋平均溫度為 67°C，距鋼骨內側 120 mm 及試體中心之混凝土平均溫度為 49°C 及 47°C。

試驗終止後，開啟爐蓋板與中隔板待爐內溫度回到室溫，進入加溫爐內觀察試體 B4R-.5 火害後之變形。觀察發現四面柱板均有局部挫屈變形之情況產生，挫屈變形皆為面外凸起，而挫屈位置主要集中於柱子上半部，如圖 4-30 及圖 4-31 所示；東面柱板距試體底部端版 2190 mm 處，產生最大凸起量為 68 mm。火害後，試體 B4R-.5 並無發現任何銲道及透氣孔開裂之情形，但透氣孔略呈扁平橢圓狀。

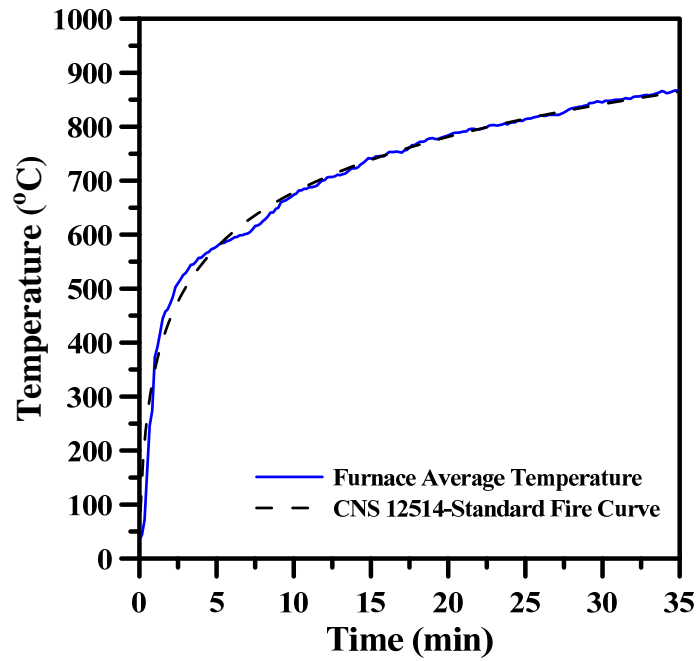


圖 4-25 試體 B4R-.5 爐內升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

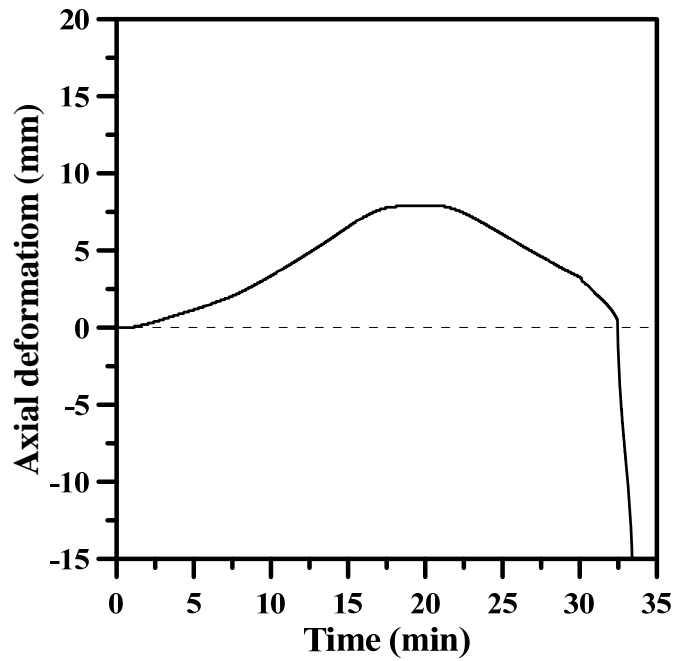


圖 4-26 試體 B4R-.5 定載加溫階段之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

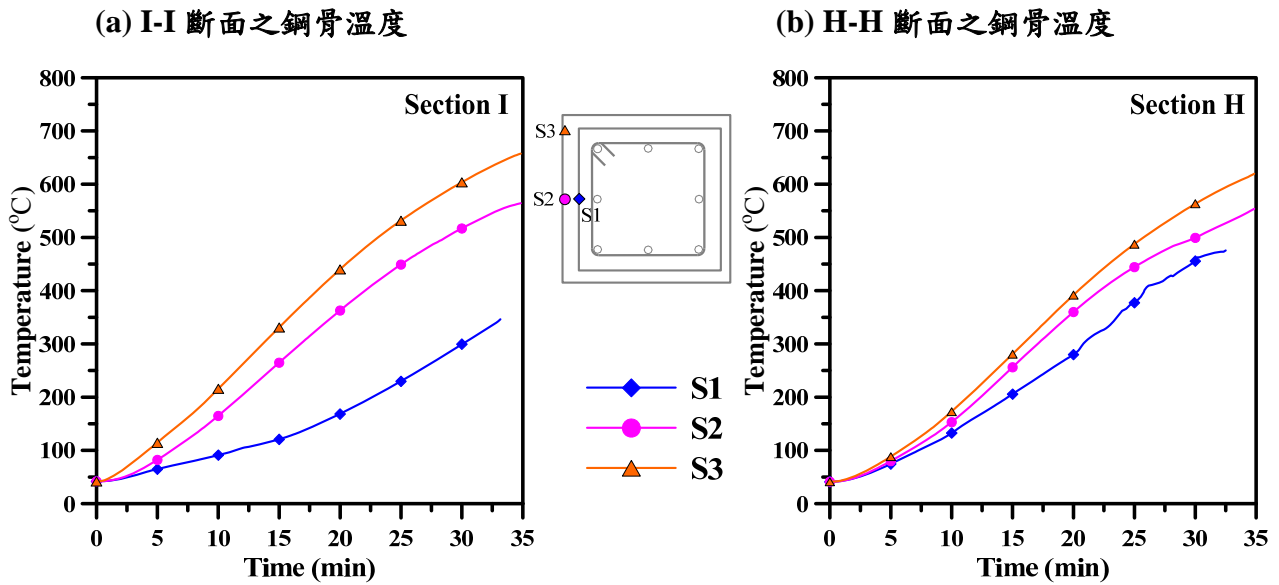


圖 4-27 試體 B4R-.5 之鋼骨測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

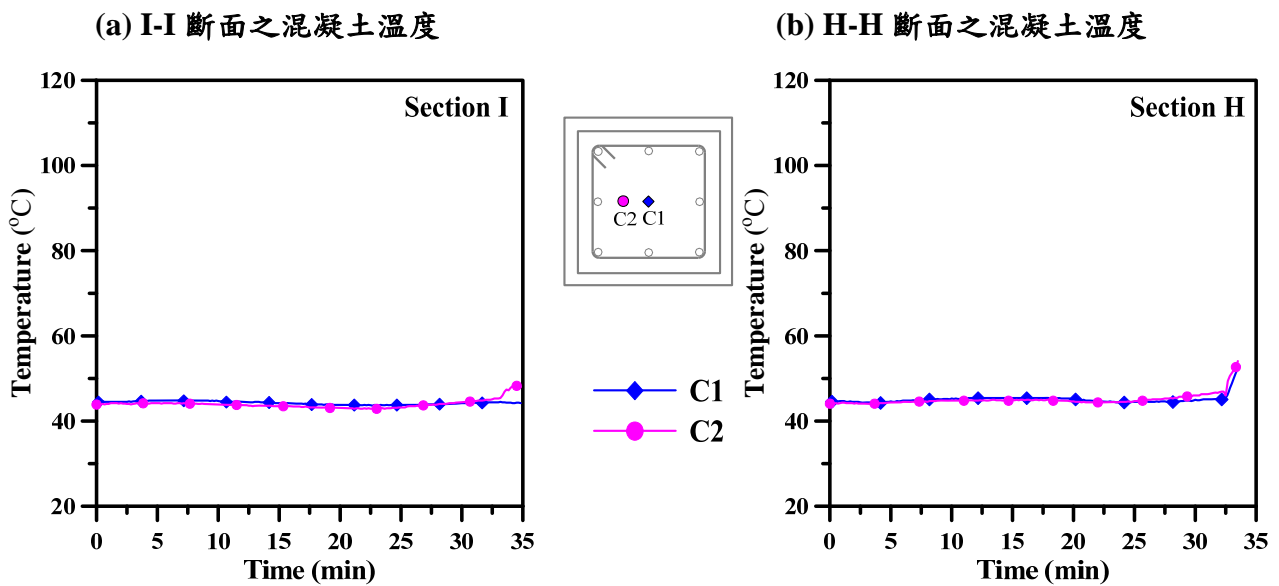


圖 4-28 試體 B4R-.5 之混凝土測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

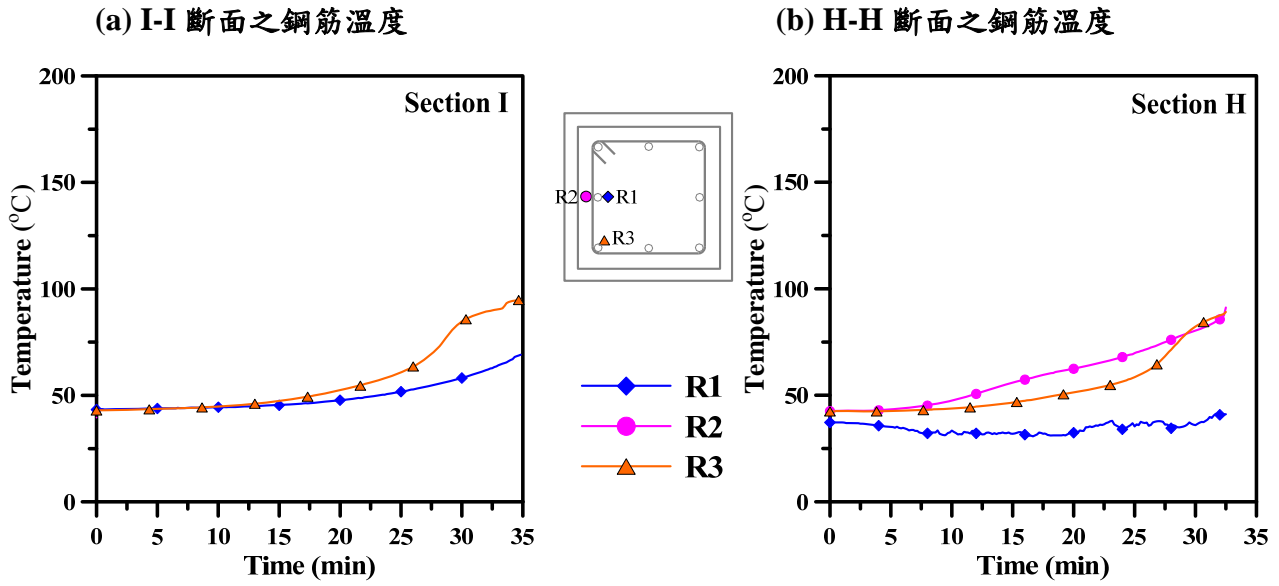


圖 4-29 試體 B4R-.5 之鋼筋測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

(a) 南面



(b) 東面與南面



圖 4-30 試體 B4R-.5 耐火試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)

(a) 東面與北面



(b) 西面與南面



圖 4-31 試體 B4R-5 局部挫屈

(資料來源：本研究整理)

試體 B5R-.3、B6Ra-.3、B6Rb-.4

試體 B5R-.3、B6Ra-.3 及 B6Rb-.4 均為箱型鋼柱內含鋼筋混凝土(鋼筋比分別為 1.9%、1.6%及 3.2%)，施加载重為 0.3 及 0.4 倍試體標稱強度，各試體部分熱電偶測點於試驗過程中出現訊號異常，經判斷為測點故障，故未納入討論。

定載加溫試驗初期，試體箱型鋼骨受熱產生膨脹伸長變形行為；加熱 10 分鐘三支試體軸向伸長變形行為並無太大差異。試體 B5Rb-.4 因施加較大軸向載重使試體最大軸向伸長量僅 2.03 mm，且達最大伸長量後產生熱膨脹伸長與載重壓縮相持抵抗現象，此現象持續時間約 11 分鐘左右。試體 B5R-.3 及 B6Ra-.3 達最大伸長(10.76 mm 及 7.36 mm)後遂轉入壓縮變形階段，並無熱膨脹伸長與載重壓縮抗衡之現象發生，如圖 4-32 所示。另外，試體 B5R-.3、B6Ra-.3 及 B6Rb-.4 與其他試體相同，當箱型鋼骨表面平均溫度超過 400°C (各試體測點溫度如圖 4-33 至圖 4-41 所示)，則鋼骨強度下降導致試體軸向變形從原本的膨脹伸長轉為壓縮變形。試體變形進入壓縮階段後，加溫爐內陸續發出爆裂聲響(約於試驗加熱後 30 分鐘)；另外，各試體軸向壓縮變形速率相較於壓縮階段前期有明顯趨緩

之勢，研判其原因為內部混凝土雖產生爆裂，而鋼筋混凝土可維持其部分強度，使試體仍有承載能力不導致試體突然破壞。

試體 B5R-.3、B6Ra-.3 及 B6Rb-.4 達破壞準則之耐火性能合格時間分別為 74、61 及 53 分鐘。由試體火害後變形觀察發現，各試體四面柱板皆有局部挫屈變形且為面外凸起，且靠近凸起處之透氣孔呈現扁平橢圓形狀變形，與試體鋼骨表面略有剝離之現象產生，如圖 4-42 至圖 4-47 所示。

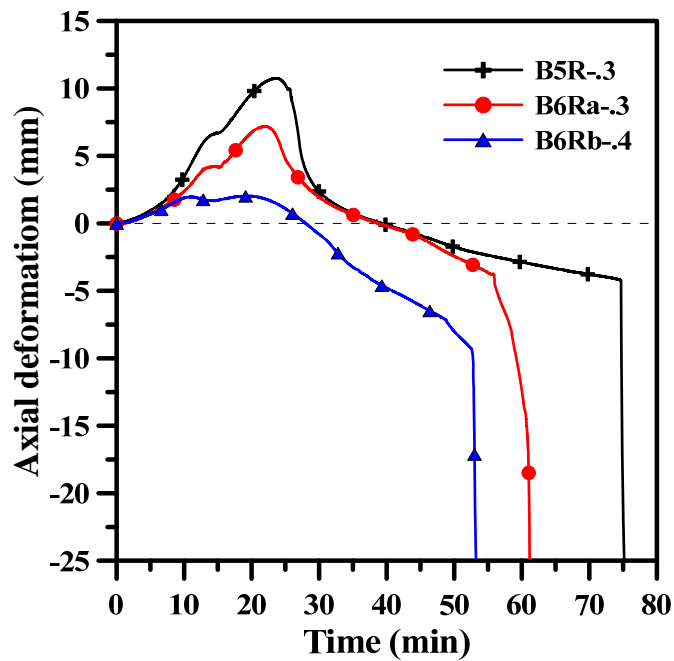


圖 4-32 B5R 與 B6R 系列試體定載加溫階段之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

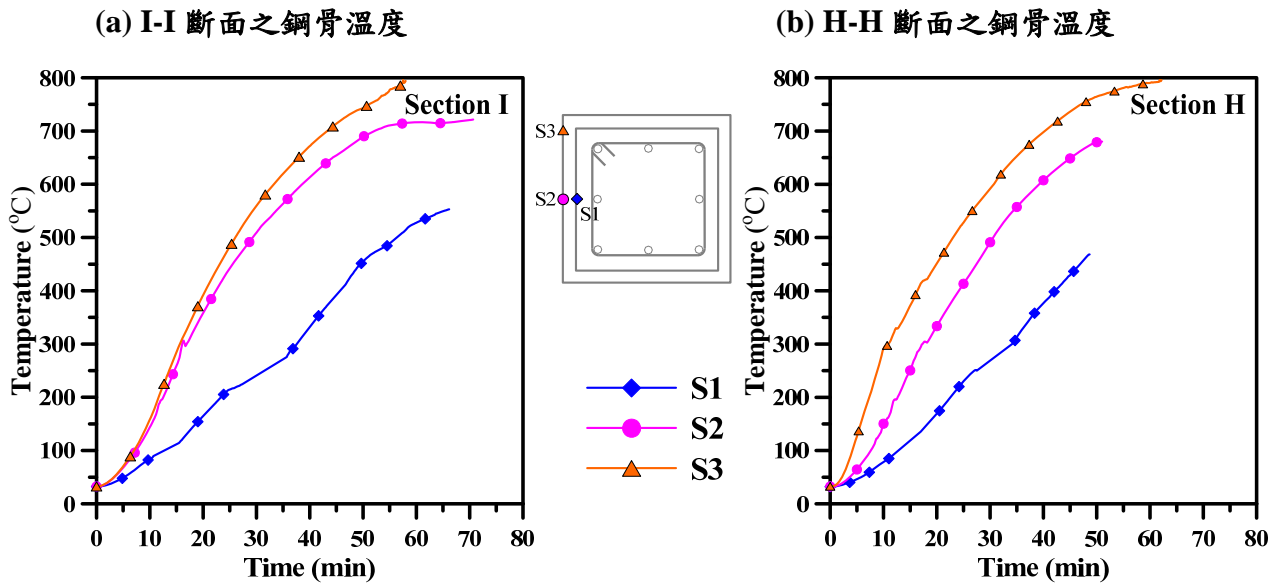


圖 4-33 試體 B5R-3 之鋼骨測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

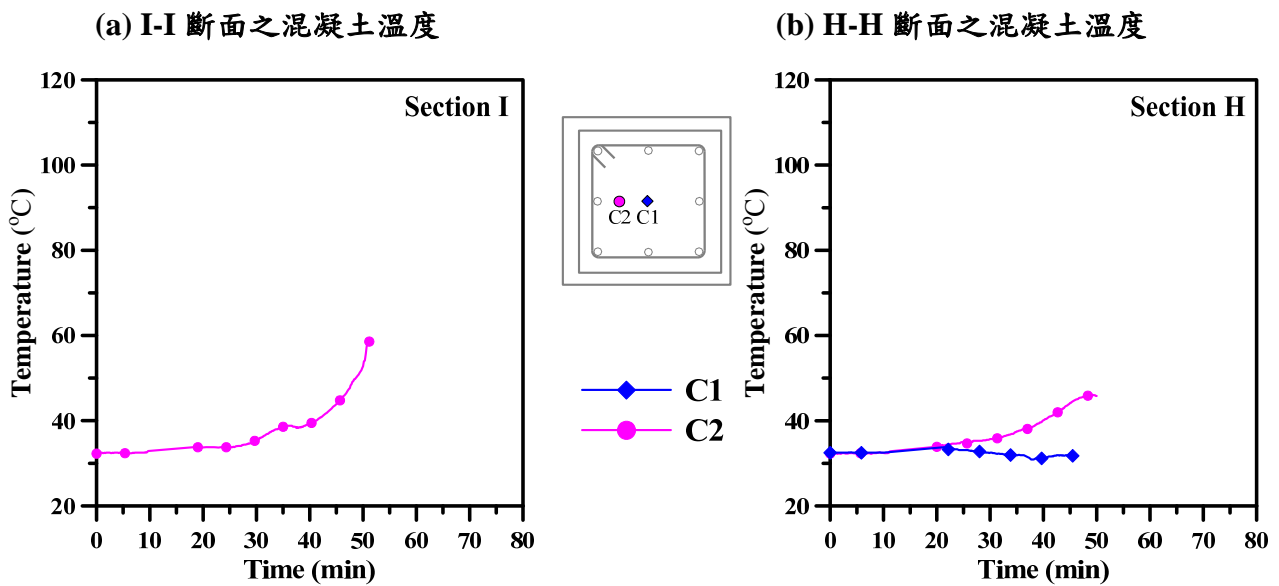


圖 4-34 試體 B5R-3 之混凝土測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

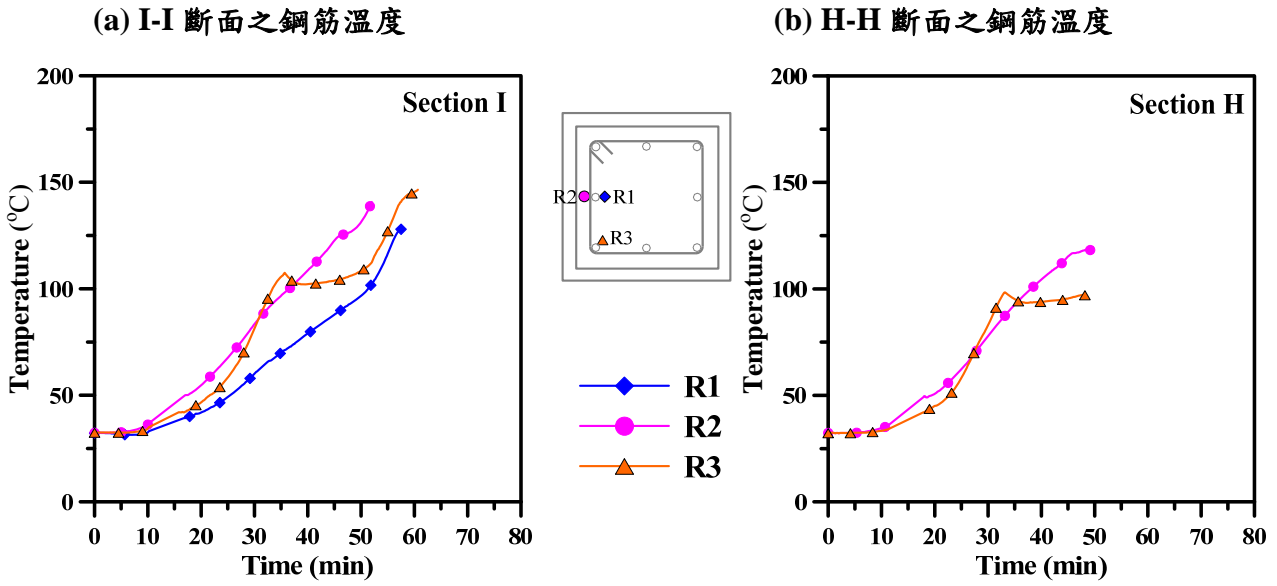


圖 4-35 試體 B5R-.3 之鋼筋測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

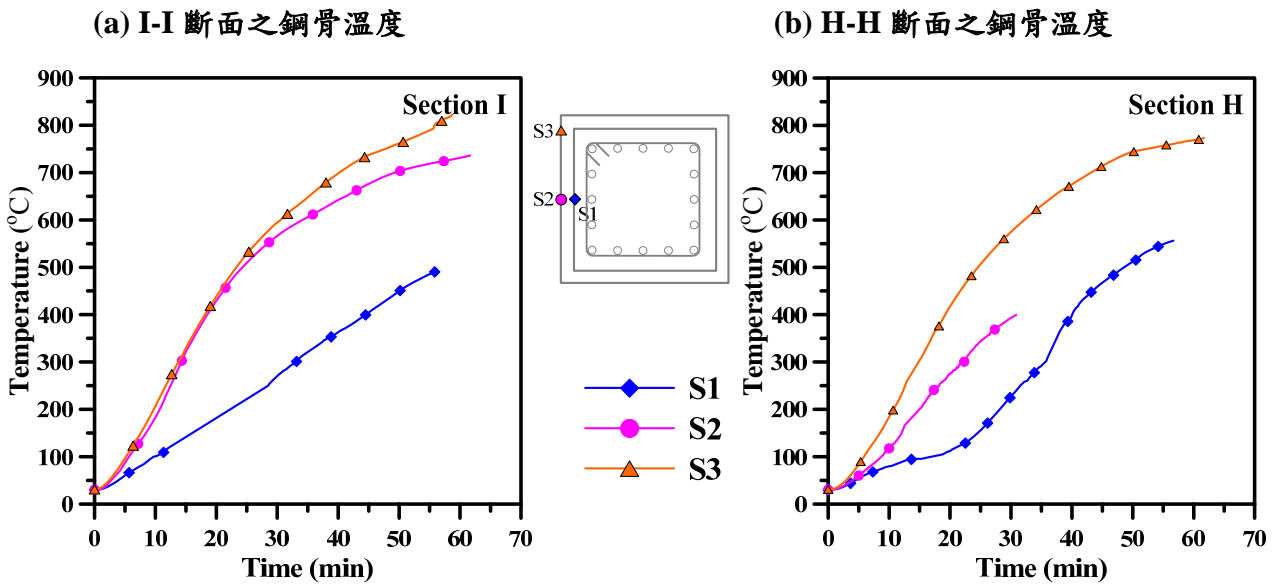


圖 4-36 試體 B6Ra-.3 之鋼骨測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

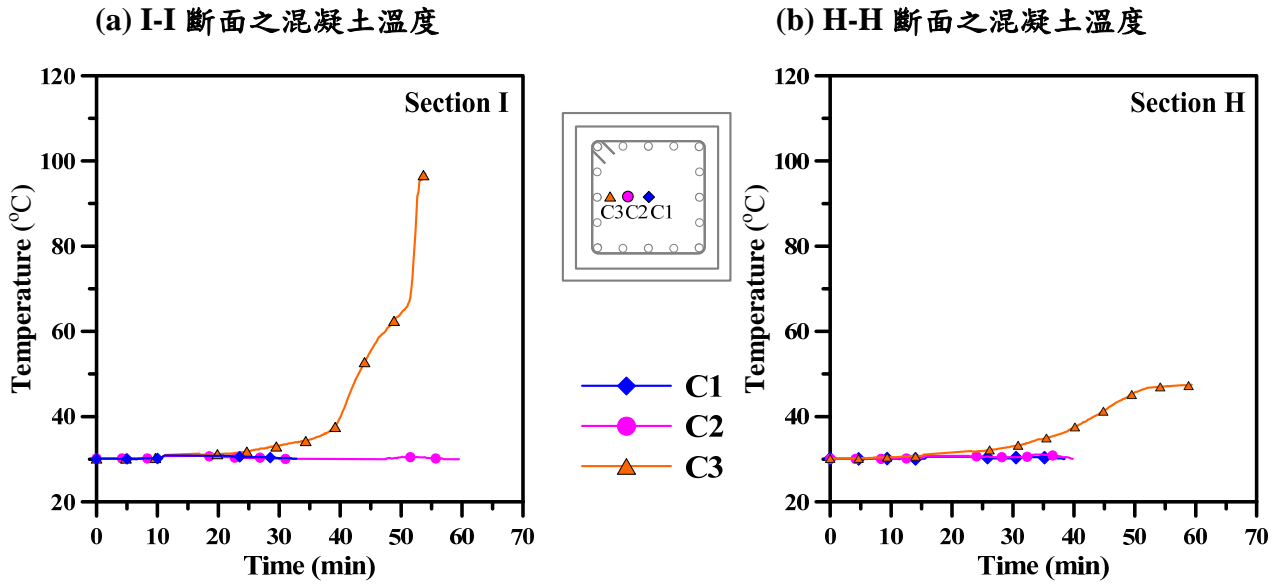


圖 4-37 試體 B6Ra-.3 之混凝土測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

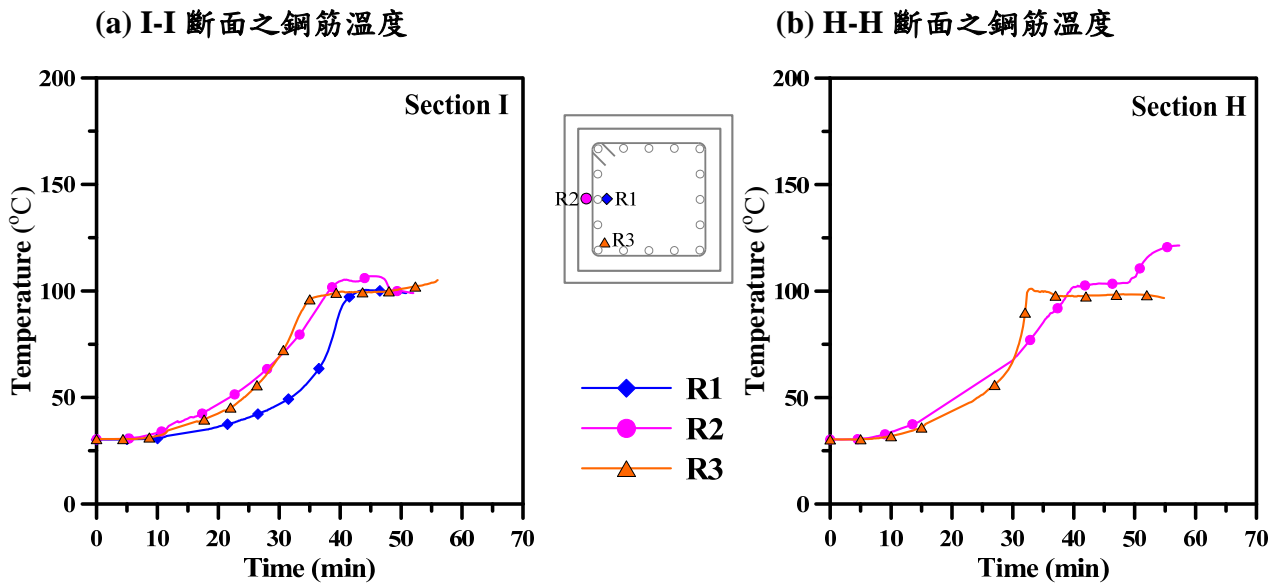


圖 4-38 試體 B6Ra-.3 之鋼筋測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

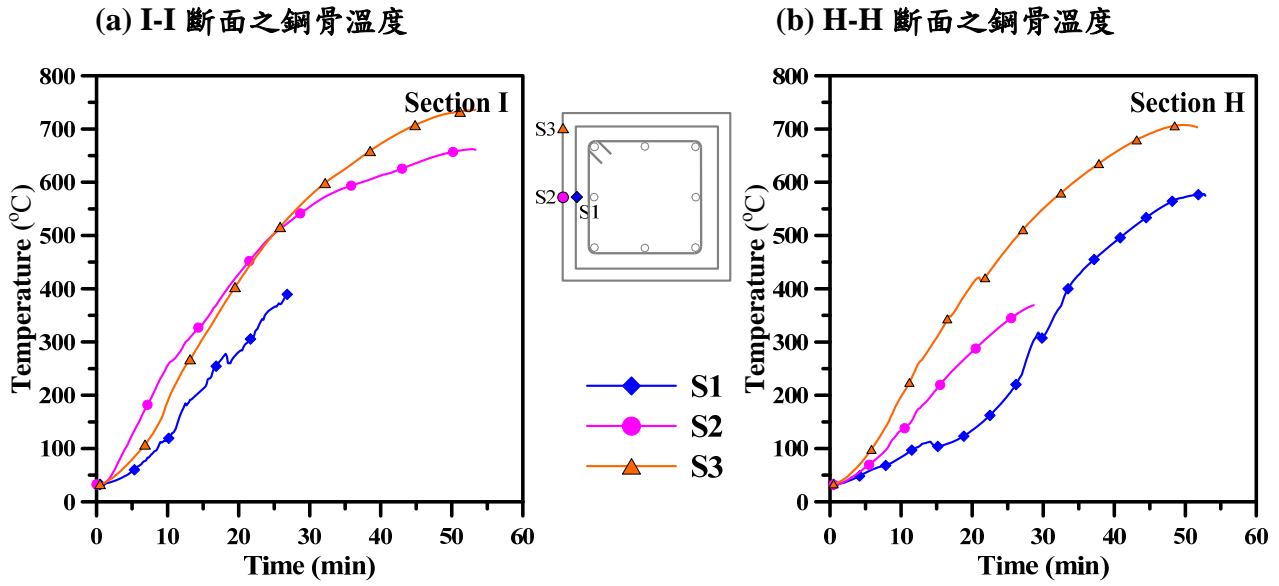


圖 4-39 試體 B6Rb-4 之鋼骨測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

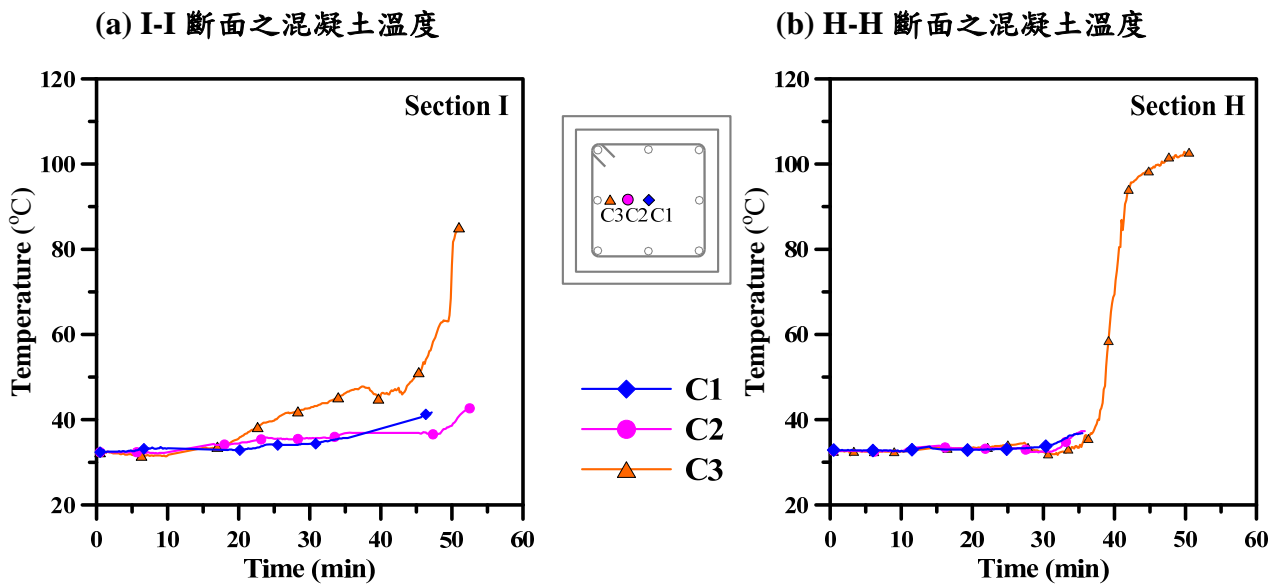


圖 4-40 試體 B6Rb-4 之混凝土測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

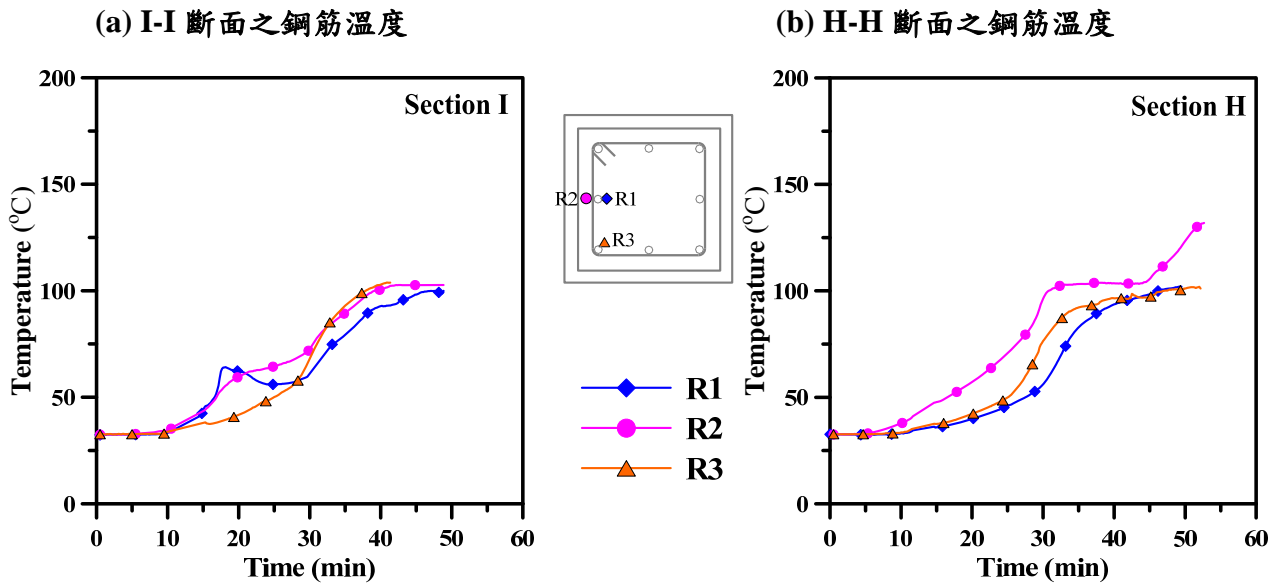


圖 4-41 試體 B6Rb-4 之鋼筋測點溫度-時間關係

(資料來源：本研究整理)

(a) 南面



(b) 東面與北面



圖 4-42 試體 B5R-.3 耐火試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)

(a) 西面與南面



(b) 東面與北面



圖 4-43 試體 B5R-3 局部挫屈

(資料來源：本研究整理)

(a) 南面



(b) 西面與北面



圖 4-44 試體 B6Ra-3 耐火試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)

(a) 東面與南面



(b) 西面與北面



圖 4-45 試體 B6Ra-.3 局部挫屈

(資料來源：本研究整理)

(a) 南面



(b) 東面與北面



圖 4-46 試體 B6Rb-.4 耐火試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)

(a) 西面與南面



(b) 東面與北面

**圖 4-47 試體 B6Rb-.4 局部挫屈**

(資料來源：本研究整理)

總結以上八支試體試驗行為與結果，有配置縱向鋼筋 R 系列試體於達最大伸長量後，試體進入壓縮變形階段，壓縮速率相較於無配置縱向鋼筋者來的緩慢，可能原因為內部混凝土雖有爆裂情況，但核心鋼筋混凝土仍可提供部分強度，而不會導致試體壓縮變形突然驟增。對於施加較大載重之試體 B6Rb-.4、B4R-.5、B6N-.5 及 B5N-.6，試體最大伸長量相較於施加载重較小者少，且試體於膨脹伸長變形階段會產生伸長與壓縮變形相互抗衡之行為，其持續時間約為 5 至 11 分鐘不等，爾後試體才進入壓縮變形階段；施加小載重之試體 B4R-.2 及 B6N-.3 則無此變形抗衡現象，其試體經膨脹伸長變形後隨即轉為壓縮階段。

試體達破壞判定皆為超過最大壓縮速率 9.18 mm/min，無配置縱向鋼筋者之破壞模式為鋼骨局部挫屈與內灌混凝土碎裂導致試體失去承載能力；有配置縱向鋼筋者亦為鋼骨局部挫屈與內部混凝土部分爆裂，但尚有圍束區之鋼筋混凝土提供承載能力，直至混凝土破裂區域逐漸擴大，試體最終失去承載能力，詳細實驗記錄與試驗結果之比較，如表 4-2 所示。另外，符合 Eurocode 規範規定設計之 B5 與 B6 系列試體，有部分試體之耐火性能合格時間無法達 EC 4 查表法規定之防火時效。

表 4-2 試驗結果

	B4R-.2	B4R-.5	B5N-.6	B5R-.3	B6N-.3	B6N-.5	B6Ra-.3	B6Rb-.4
施加载重(tf)	360	906	1366	750	901	1501	988	1398
有無配置縱向主筋(鋼筋比)	有 (3.0%)	有 (3.0%)	無	有 (1.9%)	無	無	有 (1.6%)	有 (3.2%)
耐火性能合格時間(min)	161	33	26	74	42	31	61	53
防火時效	2 小時	未達 1 小時	未達 1 小時	1 小時	未達 1 小時	未達 1 小時	1 小時	未達 1 小時
試體最大伸長量(mm)	17.00	8.02	3.10	10.76	8.90	1.71	7.36	2.03
達最大伸長量之時間(分:秒)	27:00	20:00	16:00	23:40	23:05	20:24	21:48	19:42
達最大伸長量之鋼骨表面平均溫度(°C)	480	389	326	446	467	382	463	410
試體初次發出聲響時間(分)	30	28	25	25	26	22	26	22
試體膨脹與壓縮量相平衡之持續時間(分)	—	5	10	—	—	10	—	11
試體達性能指標時鋼骨表面平均溫度(°C)	*	583	483	*	633	550	790	698
試體達性能指標時鋼骨內側平均溫度(°C)	*	411	309	738	508	439	*	522
試體達性能指標時箍筋平均溫度(°C)	*	67	—	超過 120	—	—	超過 120	102
試體達性能指標時試體中心混凝土平均溫度(°C)	*	49	47	*	*	*	*	87
備註： *為測點溫度異常 防火時效為參照 CNS 12514 規定判定								

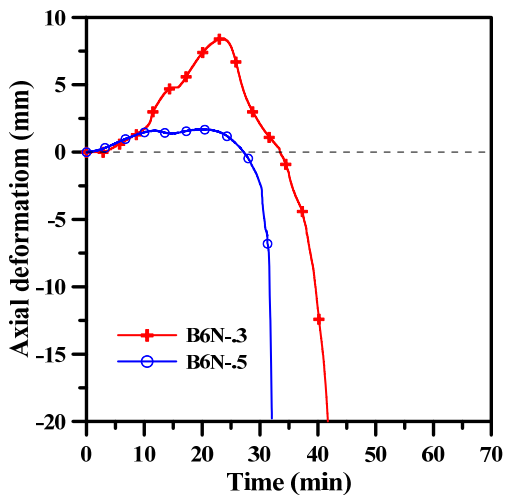
(資料來源：本研究整理)

第二節 參數影響

壹、載重比影響

無配置縱向主筋試體 B6N-.3 與 B6N-.5 為分別施加 0.3 倍及 0.5 倍試體標稱強度之軸向載重，最大伸長量與耐火性能合格時間依序分別為 8.90 mm、42 分鐘與 1.71 mm、31 分鐘，如圖 4-48 所示。施加較小載重之試體，產生膨脹伸長量較大，且當試體達最大伸長量後，即進入壓縮階段，而施加較大載重之試體雖膨脹伸長量較小，但發生熱膨脹伸長與載重壓縮變形相持之狀態，爾後壓縮變形與小載重試體雷同。有配置縱向主筋試體 B6Ra-.3 及 B6Rb-.4 於膨脹變形階段，與無配置縱向主筋試體之變形行為並無太大的差異，如受較大載重試體將產生較小膨脹伸長變形量與發生伸長與壓縮變形相互抵抗現象。綜合前述試體發現，不論試體內部有無配置縱向鋼筋，軸向載重大小不僅直接影響著試體膨脹伸長變形行為，且對試體耐火性能亦有相當影響；施加較小的載重比可以明顯地增加試體最大伸長量與提升耐火性能。

(a) 無配置鋼筋



(b) 有配置鋼筋

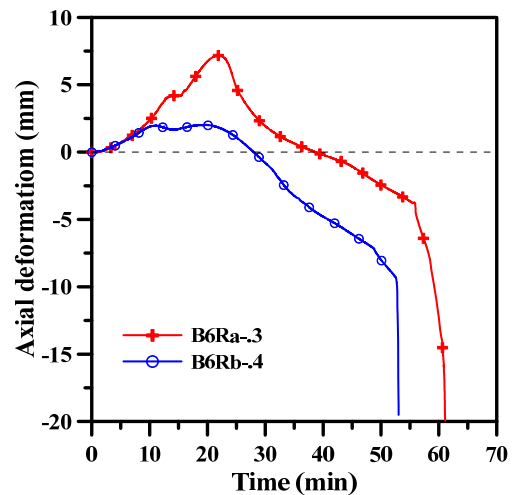


圖 4-48 試體於不同載重比之軸向變形—時間關係

(資料來源：本研究整理)

貳、斷面尺寸影響

試體 B5R-.3 與 B6Ra-.3 分別為斷面尺寸 500x500 mm 與 600x600 mm；兩試體達最大膨脹伸長量之時間差異不大，但較大斷面試體其最大伸長量較少且耐火性能合格時間較短，如圖 4-49 所示。主要原因為試體 B5R-.3 比 B6Ra-.3 有較多量的縱向主筋，且兩試體雖皆施加 0.3 倍試體標稱強度之載重，但較大斷面試體施加相對較大之載重，而當箱型鋼柱因高溫損失承載能力，且內填充混凝土若無法持續提供承載能力，則將造成較大斷面試體無法有較佳的耐火性能。於本研究試體之範圍，斷面尺寸於耐火性能之影響並不明顯。

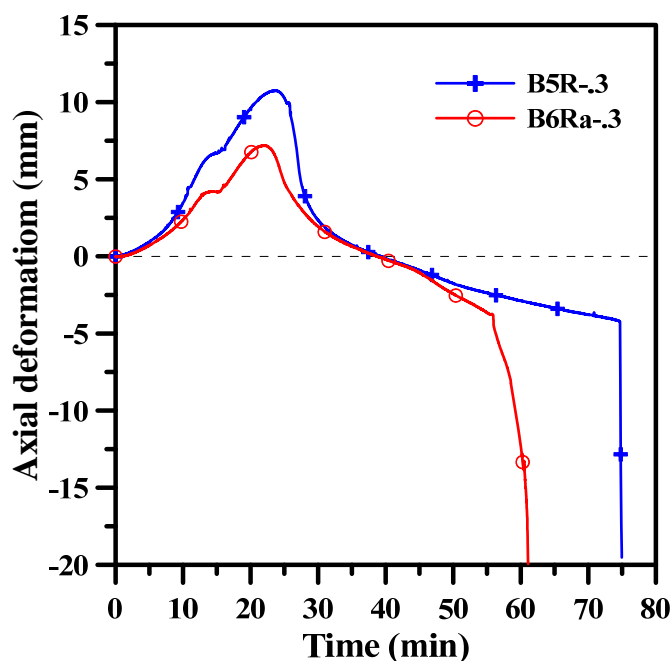


圖 4-49 不同斷面尺寸之軸向變形—時間關係

(資料來源：本研究整理)

參、有無配置縱向主筋

試體 B6N-.3 與 B6Ra-.3 為相同斷面大小且皆施加 0.3 倍試體標稱強度之載重，惟前者為內灌混凝土箱型鋼柱，後者為內填充鋼筋混凝土箱型鋼柱(鋼筋比 1.6%)，其軸向位移曲線與時間關係圖，如圖 4-50 所示。

試驗前期(膨脹階段)，有、無配置縱向主筋試體之膨脹伸長變形行為，與達

最大伸長量和其時間之差異不大。然於壓縮階段(試驗 28 分鐘)有配置縱向主筋試體壓縮變形速率相較配置縱向主筋試體為緩降，而無配置縱向主筋試體之壓縮速率則無趨緩反而有逐漸增加之趨勢，判斷其原因可能為有配置縱向主筋試體之核心鋼筋混凝土可提供部分承載能力，而無配置縱向主筋試體當混凝土爆裂，其內灌混凝土無法支撐軸向載重。因此配置縱向主筋可以減緩試體壓縮變形速率並藉此延長試體耐火性能合格時間，但對於試體膨脹伸長變形之行為較無影響。

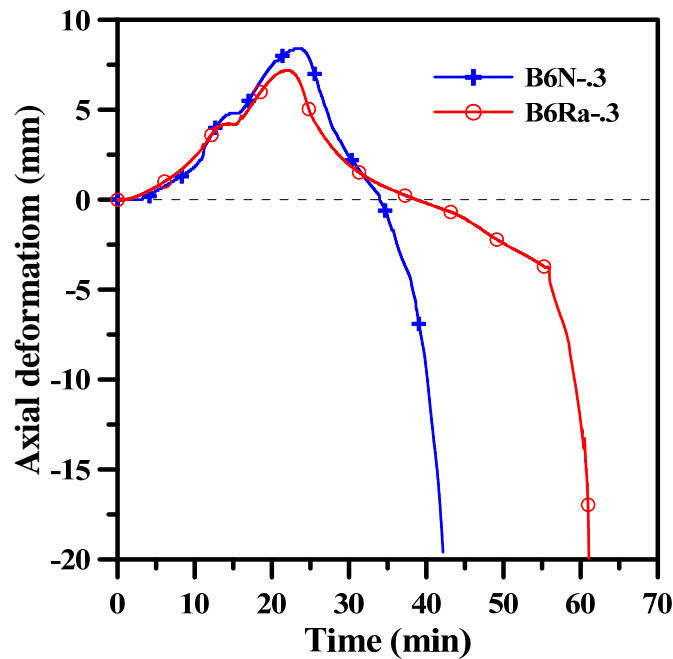


圖 4-50 試體有無配筋之軸向變形與時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

第五章 填充型箱型鋼柱於火害下之有限元素分析

ABAQUS 為利用有限元素法求解之電腦輔助工程分析軟體，能解決一般結構力學問題，更能模擬熱傳導與熱力耦合等相關工程問題，因此本研究除了以火害實驗探討承重箱型鋼柱內填充鋼筋混凝土或混凝土於火害下行為外，將利用有限元素軟體 ABAQUS 模擬試體行為，以瞭解試體斷面溫度分佈情形及軸向變形趨勢等，進而探討影響耐火性能之參數研究。另外，為建立正確分析模型，模型之分析結果須與實驗結果比對，以取得正確分析結果。

模擬試體承受定額軸向載重並處於火害升溫環境下，則須先定義分析基本假設、建立分析模型、輸入試體各肢材之材料性質等，再設定試體模型邊界條件與各部件間之接觸型式，最後將模型網格化以分別進行熱傳分析、非線性應力分析及接續性耦合分析。由前期分析研究成果(陳誠直等人 2010 及 2012)得知，試體溫度、材料性質及各部位材料接觸型式會對分析模型之軸向變形行為及趨勢造成影響，其中以材料性質甚具影響，且模型各部件之材料性質，應考慮不同溫度下之力學性質與熱性質等，因此本研究分析模擬與設定為參考相關文獻成果與規範建議。

第一節 有限元素分析模型

壹、基本假設

1. 假設加溫爐內溫度均勻分佈。
2. 假設混凝土無含水率之影響
3. 忽略混凝土內部水份汽化對溫度之影響。
4. 假設混凝土不因高溫產生開裂或爆裂現象。
5. 忽略箱型鋼柱於製作或銲接過程中產生殘留應力之影響。
6. 假設試體箱型鋼與混凝土間之接觸為無握裹。
7. 假設鋼筋籠與混凝土間之接觸採嵌入區域約束型式。

貳、分析模型之邊界

為使分析模擬趨近於實際試驗情況，分析模型之邊界設定可分為柱兩端支承邊界、載重施加邊界與溫度等。

1. 支承邊界設定

以實際試體於加溫爐中之支承情況，模擬試體頂端設置為固定支承，底端為可上、下移動支承，但不能旋轉之。

2. 載重邊界設定

試體之載重乃由加溫爐底端加載設備由下往上，以均佈載重形式將載重施加至試體，因此分析模型之載重將依據各實驗試體加載大小，以均佈載重形式輸入於模型底端端板，其力量方向朝上。

3. 接觸與模型邊界設定

試體由箱型鋼、混凝土及鋼筋籠部分組合而成，箱型鋼柱與混凝土間之接觸設定為無握裹硬接觸，而鋼筋與混凝土間採嵌入約束型式。

4. 溫度邊界設定

以實驗前試體溫度設為分析模型之初始溫度，再根據加溫爐量測之平均爐溫，輸入至模型受熱段表面；為模擬加溫爐出火口將溫度傳遞至試體之行為，模型受熱段表面考慮熱對流與熱輻射之影響。

參、材料性質

分析模型依實驗試體建立，其各部件之材料性質為參考相關文獻及規範建議之力學性質及熱性質。力學性質為降伏強度、彈性模數、極限拉力強度與抗壓強度等，而熱性質為比熱、熱傳導與熱膨脹等。

1. 鋼骨材料性質

箱型鋼骨採 A572 Gr. 50，力學性質依常溫下鋼骨拉力試驗結果，再以莊有清(2004)研究不同溫度下鋼材拉伸試驗成果修正設定；與 Eurocode 4 規範之鋼材高溫力學折減係數之比較，如表 5-1 所示，有些許差異。熱性質因無文獻資料則參考 Eurocode 4 規範建議，如圖 5-1 所示。

2. 鋼筋材料性質

實驗試體 B4R 系列、B5R-3 及 B6R 系列為箱型鋼柱內填充鋼筋混凝土，箍筋皆使用 3 號竹節鋼筋，而主筋分別依序採用 8 號、8 號及 9 號竹節鋼筋。鋼筋之力學性質為依實際拉力試驗結果，再根據 Eurocode 4 規範規定修正；熱性質採用 Eurocode 4 規範建議。Eurocode 4 規範規定，鋼筋之高溫力學折減係數與熱性質，可採用鋼骨材料之建議數據，如表 5-1 與圖 5-1 所示。

3. 混凝土材料性質

內填充混凝土會因配比、含水率及模型簡化分析等因素影響，使分析模型採用之混凝土性質難以確定；參考陳誠直等人(2010, 2011, 2012)分析成果，本研究混凝土力學性質乃以試體試驗時混凝土抗壓強度，再利用 Eurocode 4 規範規定修正。熱性質則採 Eurocode 4 規範規定。關於 Eurocode 4 規定混凝土高溫下之應力-應變關係，如公式(5-1)及圖 5-2 所示； $\sigma_{c,\theta}$ 與 $\varepsilon_{c,\theta}$ 為溫度 θ 下之混凝土應力與應變， $\varepsilon_{cu,\theta}$ 為溫度 θ 下之混凝土抗壓應變。Eurocode 4 規定混凝土之熱性質，如圖 5-3 所示。

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \left[3 \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right) / \left\{ 2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right)^3 \right\} \right] \quad (5-1)$$

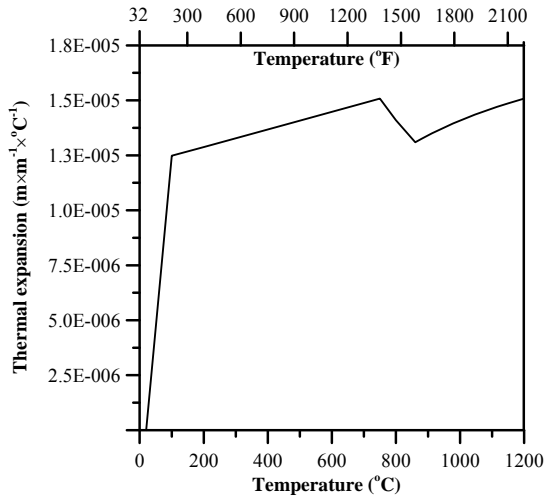
表 5-1 A572 Gr. 50 之鋼材高溫下力學性質折減係數

溫度(°C)	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$		$k_{y,\theta} = f_{ay,\theta} / f_{ay}$		$k_{u,\theta} = f_{au,\theta} / f_{ay}$	
	Gr. 50	EC4	Gr. 50	EC4	Gr. 50	EC4
25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30	1.25
100	0.96	1.00	0.98	1.00	1.39	1.25
200	0.92	0.90	0.96	1.00	1.48	1.25
300	0.82	0.80	0.77	1.00	1.21	1.25
400	0.85	0.70	0.70	1.00	0.95	1.00
500	0.68	0.60	0.63	0.78	0.57	0.78
600	0.58	0.31	0.39	0.47	0.28	0.47
700	0.40	0.13	0.20	0.23	—	0.23

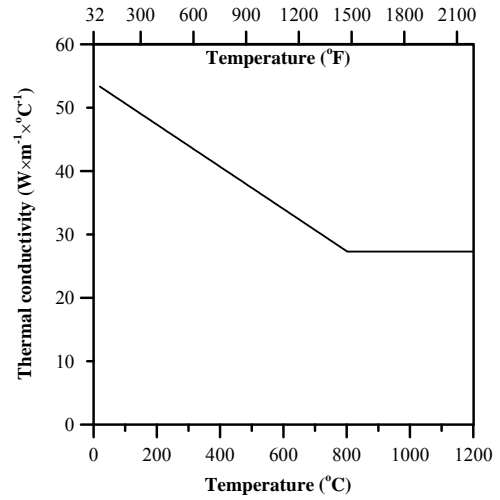
備註： $k_{E,\theta}$ 為相對於 E_a 之切線模數折減係數
 $k_{y,\theta}$ 為相對於 f_{ay} 之降伏強度折減係數
 $k_{u,\theta}$ 為相對於 f_{ay} 之極限張力折減係數
 Gr. 50 和 EC4 分別為參考莊有清(2004)與 Eurocode 4 之建議

(資料來源：本研究整理)

(a) 鋼材熱膨脹性質



(b) 鋼材熱傳導性質



(c) 鋼材比熱性質

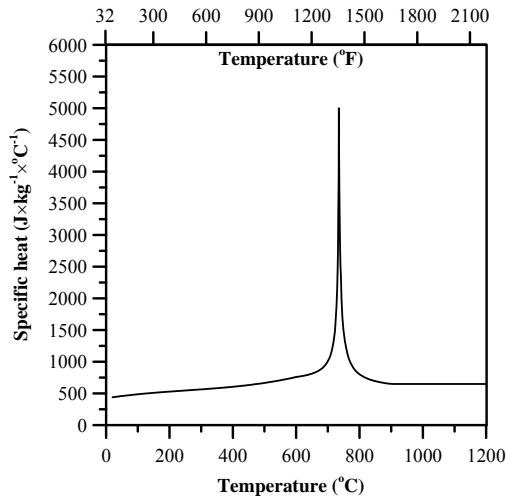


圖 5-1 Eurocode 4-高溫下鋼材熱性質

(資料來源：本研究整理)

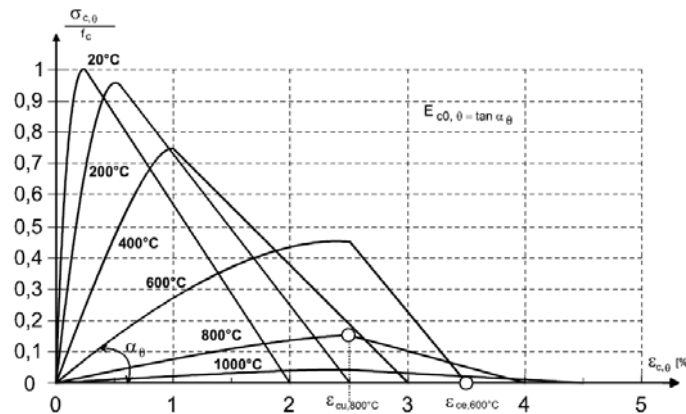
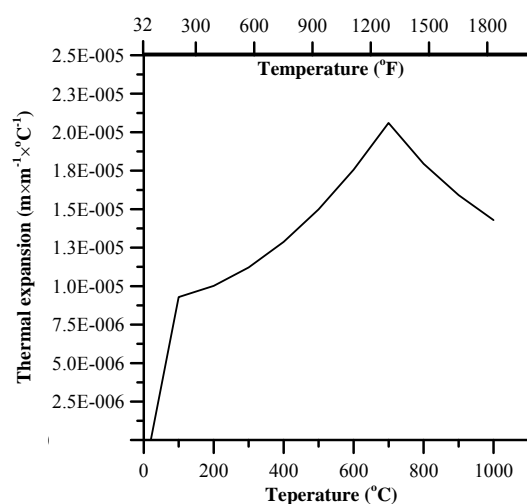


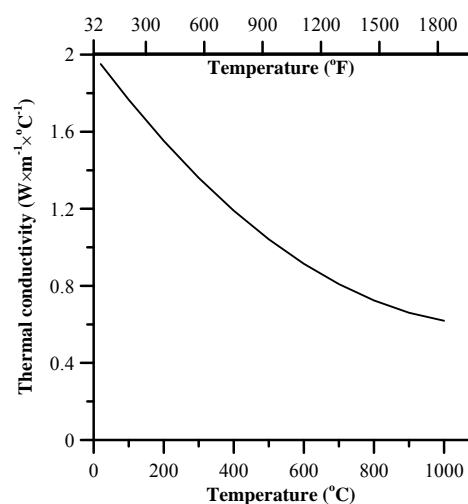
圖 5-2 Eurocode 4-高溫下混凝土應力應變關係

(資料來源：Eurocode 4)

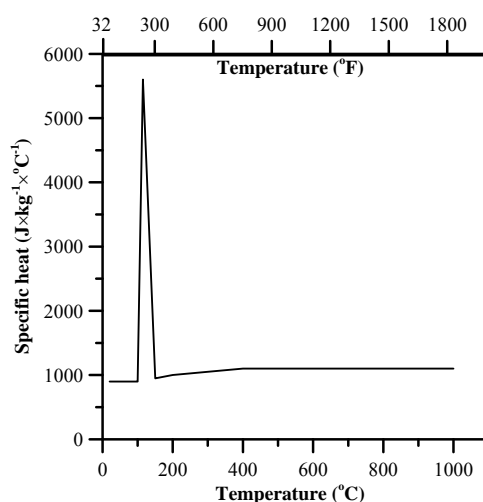
(a) 混凝土熱膨脹性質



(b) 混凝土熱傳導性質



(c) 混凝土比熱性質

**圖 5-3 Eurocode 4-高溫下混凝土熱性質**

(資料來源：本研究整理)

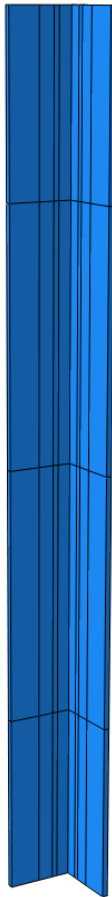
肆、分析模型及元素

模型採三維建立，由箱型鋼柱、鋼筋籠及混凝土各部件組裝配置；箱型鋼柱與混凝土是以三維實體形態建模，而主筋與箍筋部件為三維桁架形態建立鋼筋籠模型。分析模型依實際試體之對稱性，採 1/4 斷面建模以增加分析效率，如圖 5-4 所示；對於 1/4 斷面模型之溫度量測位置，如圖 5-5 所示。

在執行不同分析方法(熱傳分析、非線性應力分析及接續性耦合分析)，分析模型須選擇適當的分析元素。對於熱傳分析，箱型鋼柱和混凝土部件使用 DC3D8

元素，鋼筋籠(主筋和箍筋)部件使用 DC1D2 元素；DC3D8 為三維元素(C3)，每個元素有八個節點(D8)，而第一個字母“D”代表溫度分析；DC1D2 為溫度分析之一維元素，每個元素有兩個節點。非線性應力及接續性耦合分析，箱型鋼柱和混凝土部件使用 C3D8R 元素，主筋和箍筋部件使用 T3D2 元素；C3D8R 元素為三維具八個節點之元素，而 T3D2 元素則為三維兩個節點之元素。

(a) 箱型鋼柱模型



(b) 鋼筋籠模型



(c) 混凝土柱模型

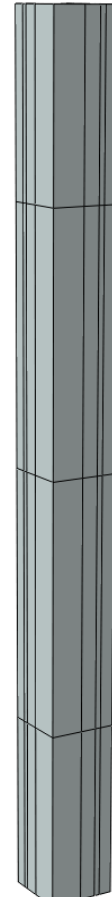


圖 5-4 填充型箱型鋼柱模型

(資料來源：本研究整理)

(a) 箱型鋼柱內填充混凝土

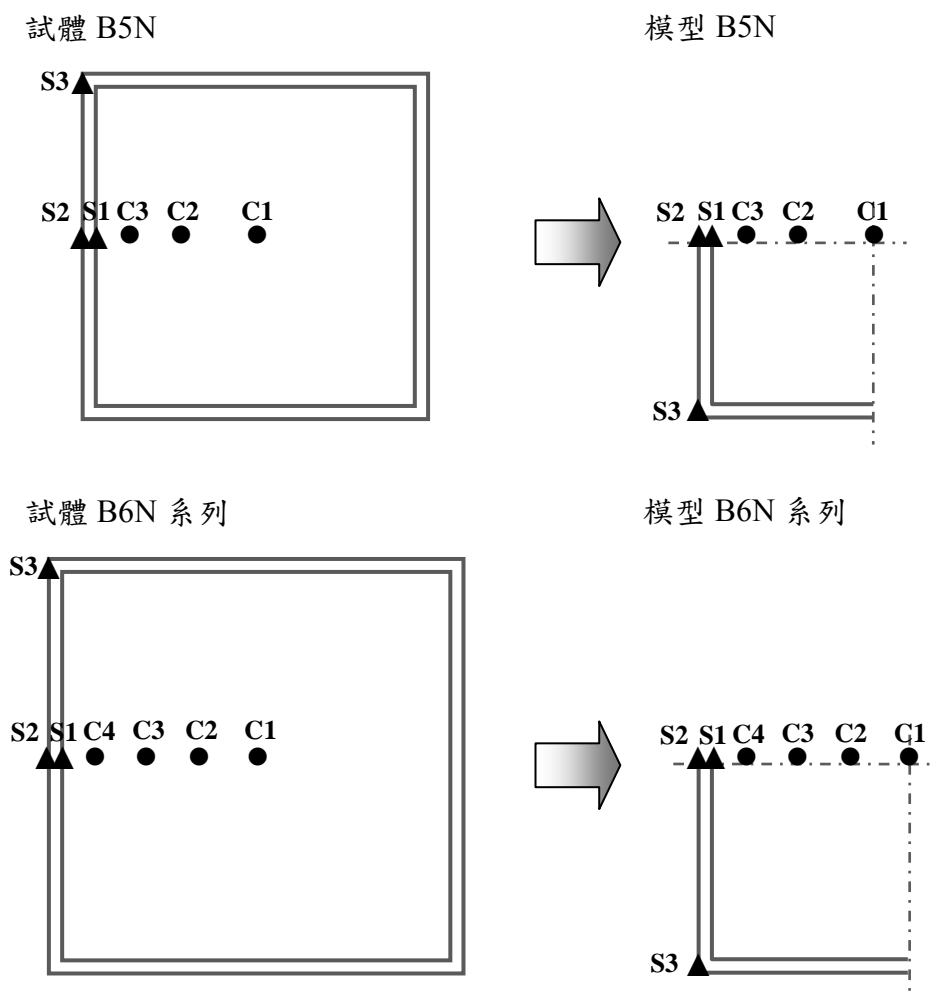


圖 5-5 分析模型之溫度測點設置示意圖

(資料來源：本研究整理)

(b)箱型鋼柱內填充鋼筋混凝土

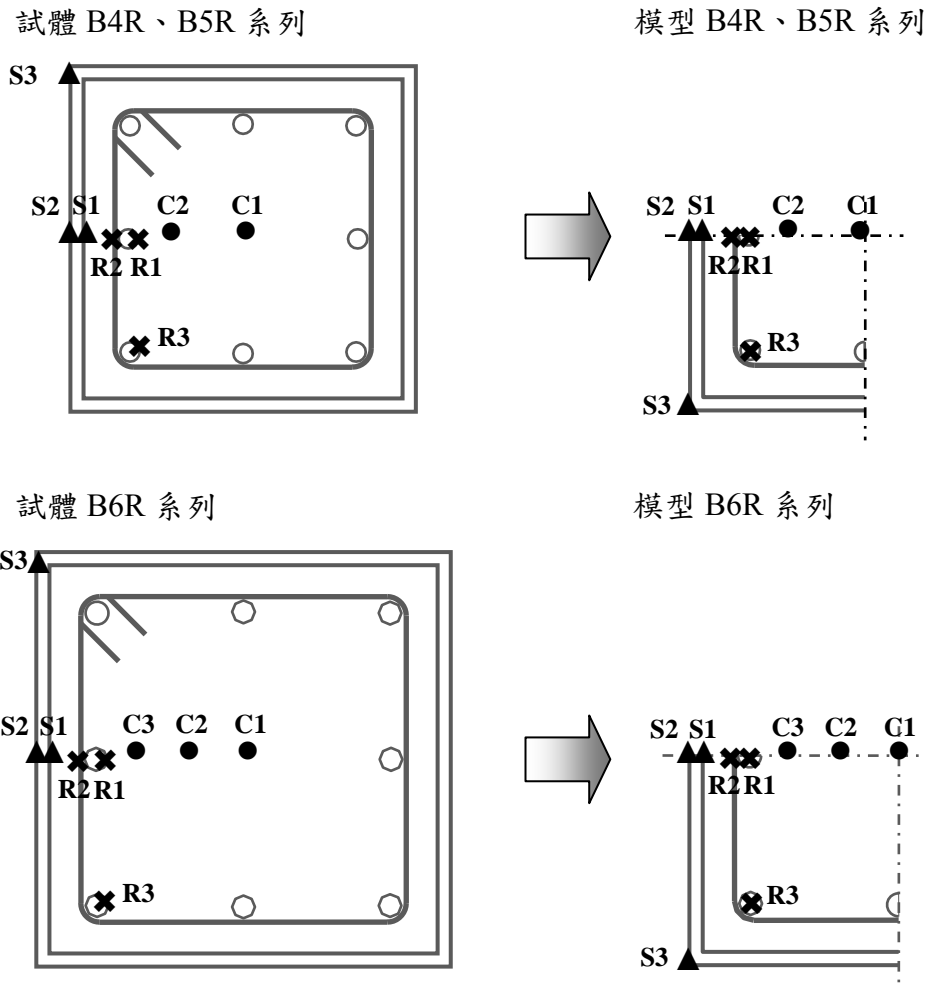


圖 5-5 分析模型之溫度測點示意圖(續)

(資料來源：本研究整理)

第二節 有限元素分析結果與討論

壹、溫度分佈

實驗加溫爐藉由東西兩側共 18 個噴火孔，以雙向對流型式使爐內溫度均勻分佈，而分析模型考慮以熱幅射與熱對流型式，模擬爐內均勻分佈之溫度傳遞至試體表面。各分析模型依實驗室溫及平均爐內升溫溫度，分別設定模型之初始溫度及受熱面升溫情況，並假設模型箱型鋼、混凝土和鋼筋籠部件間採熱傳導型式傳遞相互間之溫度。

表 5-2 實驗與分析結果顯示，無配置縱向主筋模型 B5N-.6 與有配置 8-#8 主筋模型 B4R-.5 於加熱 5 至 25 分鐘，模型各測點溫度與實驗結果接近，僅 S1 測

點與實驗溫度差異高達 88°C，可能原因為分析模型不考慮混凝土含水汽化影響測點溫度。對於分析模型 B4R-.5，鋼筋 R2 測點溫度相較 R1 與 R3 高之原因為 R2 測點距受熱表面近，而 R3 溫度較 R1 高之原因為 R3 位於角隅處，且實驗測點溫度亦有相同結果，因此分析模型之熱傳分析可合理預估試體斷面溫度。對於模型各部件角隅處之溫度，其模型箱型鋼表面溫度相較角隅處溫度低，且模型之混凝土或鋼筋籠亦為相同現象，如圖 5-6 所示。

模型 B4R-.5、B5N-.6 及 B6N-.3 於加熱 25 分鐘之爐內溫度約為 800°C，鋼表面溫度約為 440°C，此時箱型鋼骨降伏強度折減約為常溫之 0.7 倍；距模型表面 59 mm 之鋼筋或混凝土溫度分別為 79°C(R2)、84°C(C3)與 73°C(C4)，其溫度低於 100°C 之材料強度與常溫時之強度接近，如圖 5-7 所示；因此分析模型之溫度會隨著爐內升溫而模型溫度漸增，且模型各部件之材料將隨溫度增加而強度折減。

表 5-2 試體測點與分析溫度比較

無配置縱向主筋試體(B5N-.6)										
測點 (°C)	5 min		10 min		15 min		20 min		25 min	
	Test	FEM	Test	FEM	Test	FEM	Test	FEM	Test	FEM
C1	47.4	45.6	47.0	45.6	46.8	45.6	46.6	45.6	46.8	45.6
C2	46.6	45.6	46.3	45.6	46.2	45.8	46.5	46.2	47.8	47.1
C3	45.9	46.5	50.3	52.5	70.0	63.0	89.7	74.6	99.9	84.5
S1	74.6	94.1	123.6	140.6	175.4	223.3	231.2	319.6	275.3	400.5
S2	83.0	101.0	154.1	152.5	236.2	236.5	325.6	334.7	416.5	416.6
S3	117.5	124.2	216.4	197.2	327.9	302.4	431.9	401.5	516.9	482.0

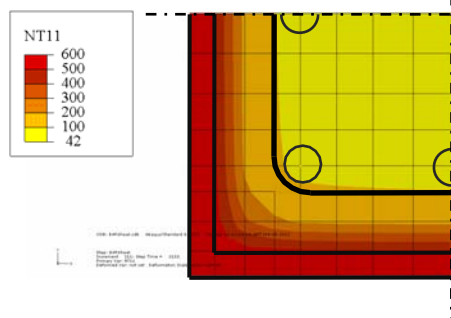
(資料來源：本研究整理)

表 5-2 試體測點溫度與分析溫度比較(續)

有配置縱向主筋試體(B4R-.5)										
測點 (°C)	5 min		10 min		15 min		20 min		25 min	
	Test	FEM	Test	FEM	Test	FEM	Test	FEM	Test	FEM
C1	44.7	42.2	45.0	42.2	44.8	42.2	44.5	42.2	44.2	42.2
C2	44.3	42.2	44.4	42.2	44.3	42.3	43.9	42.7	44.0	43.6
R1	43.9	42.3	44.5	43.1	45.4	45.4	47.8	49.6	51.8	54.8
R2	43.5	43.0	47.5	48.3	56.0	57.8	62.5	69.4	69.8	79.3
R3	43.2	42.3	44.3	43.8	47.0	48.1	52.0	55.3	59.7	63.9
S1	69.9	88.1	112.1	134.6	163.4	211.6	224.4	312.8	303.8	392.3
S2	81.2	94.3	159.1	146.6	260.6	224.5	361.5	327.8	446.8	407.8
S3	101.5	116.0	194.5	188.5	306.1	288.4	416.1	391.8	509.6	469.0

(資料來源：本研究整理)

**(a) 有鋼筋模型 B4R-.5
加熱 35 分鐘**



**(b) 無鋼筋模型 B5N-.6
加熱 26 分鐘**

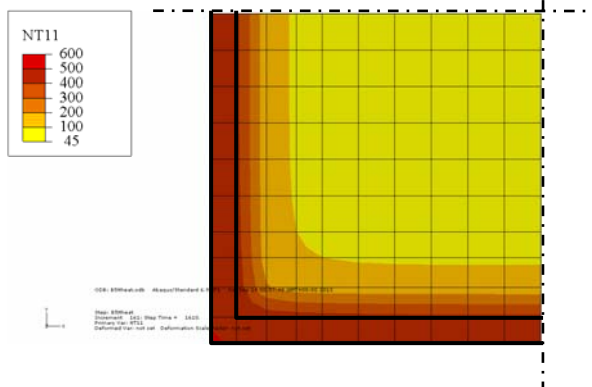


圖 5-6 分析模型斷面溫度分佈

(資料來源：本研究整理)

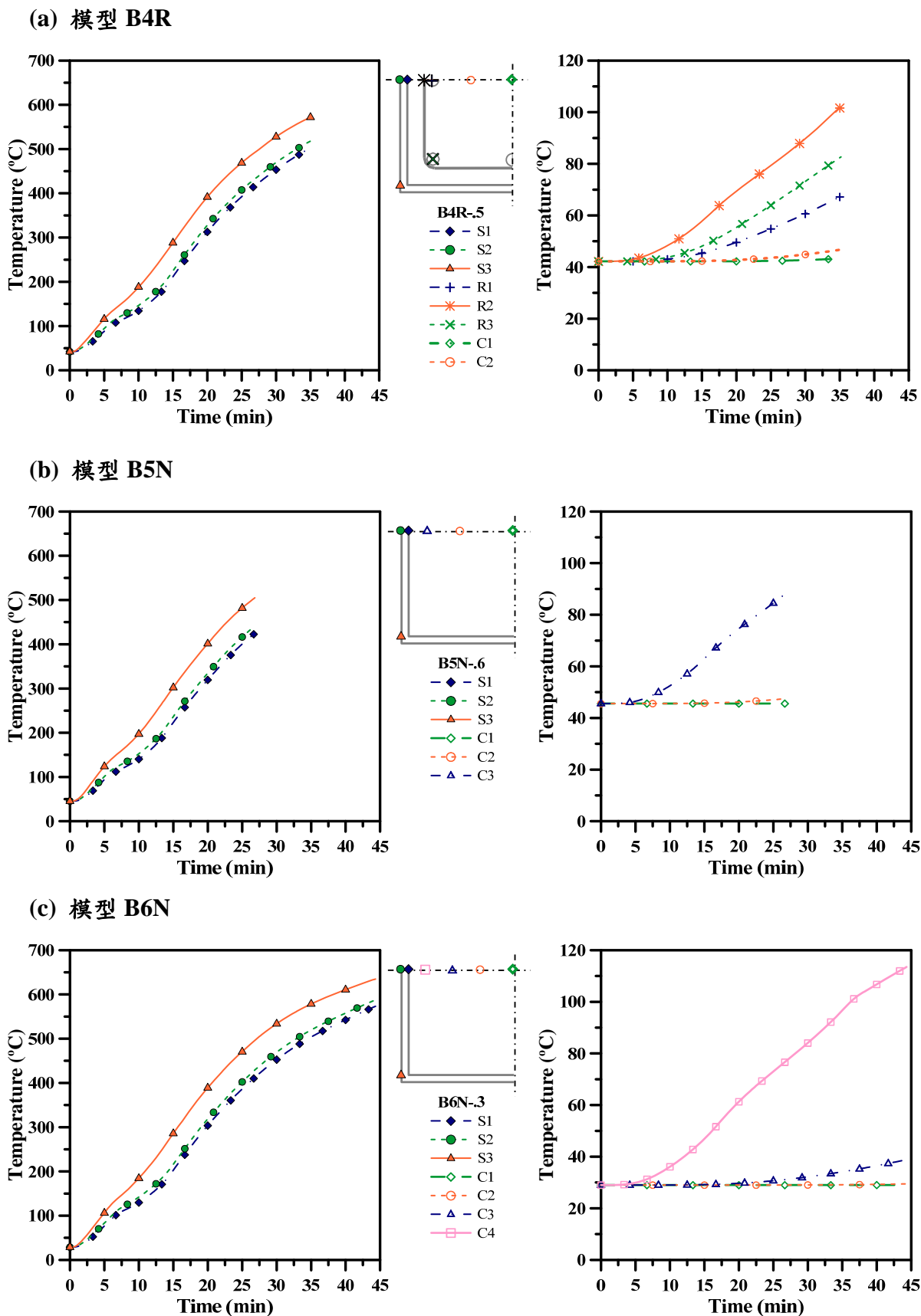


圖 5-7 分析模型斷面測點溫度

(資料來源：本研究整理)

貳、軸向變形

以有限元素分析軟體模擬定載加溫試驗，因模型處於加溫環境，使表面高溫會往內部低溫處傳遞，且模型各部件材料因溫度升高造成合成柱模型發生軸向伸長變形，而此變形趨勢與實驗結果接近；當伸長變形達最大後，模型之軸向變形轉變為壓縮變形趨勢，此趨勢亦與實驗結果相同，如圖 5-8 所示；因此有限元素分析模型可合理模擬試體於定載加溫試驗之軸向變形趨勢。

對於有、無配置縱向主筋模型於加溫初期，模型軸向變形皆為伸長變形趨勢，且當達最大伸長變形後，模型變形行為亦皆轉變為壓縮變形；然而於加溫後期，有配置縱向主筋模型之軸向壓縮變形曲線相對無配筋模型為緩降，其主要原因為當箱型鋼柱因高溫使鋼骨強度驟降，軸向載重將轉由箱型鋼內填充物承受，而內填充鋼筋混凝土模型可略微承受施加之軸向載重，並增加耐火性能。另外，模型 B4R-2 由壓縮變形再轉變為些微伸長變形趨勢之原因為分析模型無考慮混凝土因高溫發生開裂或爆裂現象，且模型內部鋼筋混凝土溫度仍不高，使其可承受軸向載重，如圖 5-9 所示。

由陳誠直等人(2011, 2012)研究成果與本研究實驗結果顯示，較大斷面之試體有較佳之耐火性能，但比較模型內部有、無配置縱向主筋之分析結果發現，模型承受相同載重比，小斷面有配置縱向主筋模型於伸長變形階段之時間相較大斷面無配置縱向主筋模型之時間略長，且小斷面有配置縱向主筋模型伸長變形量較大，其實驗試體亦顯示相同結果；當分析模型處壓縮變形階段，小斷面有配置縱向主筋模型之壓縮變形趨勢相較大斷面無配置縱向主筋模型為緩降，而實驗試體之耐火性能合格時間亦為小斷面有配置縱向主筋試體較佳。因此有、無配置縱向主筋之參數對耐火性能影響程度，相較斷面尺寸參數之影響更為顯著。

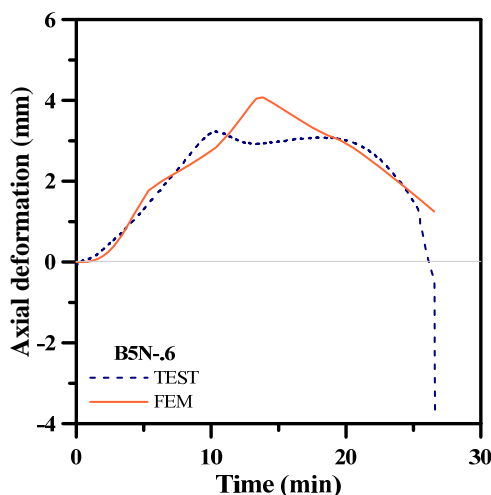
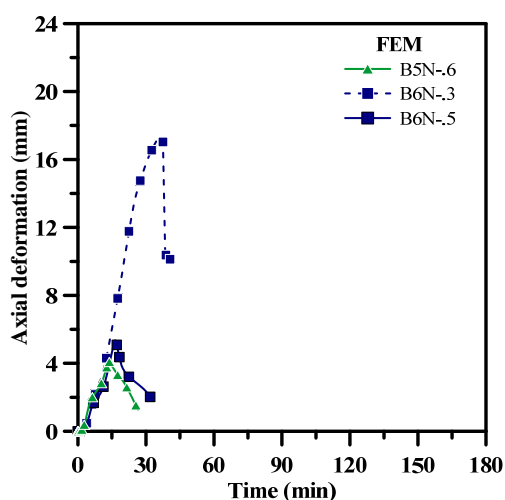


圖 5-8 分析與實驗之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

(a) 無配置縱向主筋模型



(b) 有配置縱向主筋模型

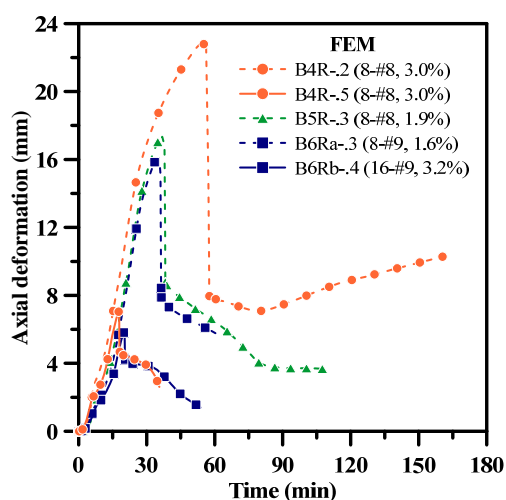


圖 5-9 分析模型之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

參、載重比影響

試體施加之軸向載重會對柱構件耐火性能造成影響，如 Kodur (1998)、Park (2007)與陳誠直等人(2012)等研究。本研究以不同軸向載重大小施加於分析模型，探討內灌混凝土箱型鋼柱於定載加溫下之耐火性能與行為；其中，分析模型採 B6N 試體，假設模型初始溫度為 31°C，採 CNS12514 規定之 1 小時升溫條件以

模擬爐內加熱情形，施加之軸向載重分別為 0.3、0.4 與 0.5 倍標稱強度。

由模型施加 0.3、0.4 與 0.5 倍標稱強度之分析結果發現，模型受熱產生伸長變形，當達最大伸長變形後即轉變為壓縮變形趨勢；加熱 5 分鐘後，受較小載重模型之伸長變形速率較大載重模型快；0.3 倍載重模型於加熱 36.5 分鐘達最大伸長變形 17.3 mm，0.4 倍載重於 24.9 分鐘發生最大伸長變形 11.7 mm，0.5 倍於 16.5 分鐘到達最大伸長變形量 5.4 mm，如圖 5-10 所示。當模型轉變為壓縮變形時，小載重模型之軸向變形呈陡降再緩降趨勢，而受大載重模型為緩降趨勢，其陡降變形趨勢之原因為箱型鋼柱與內灌混凝土膨脹變形差異造成，而緩降變形趨勢為箱型鋼柱與混凝土一同承受軸向載重，且溫度逐漸傳遞至模型內部使混凝土強度降低。受小載重試體會產生較大之伸長變形，且其於伸長變形階段之時間亦較長；於加溫後期，混凝土部分將承受軸向載重，其載重大小會影響模型壓縮變形行為與耐火性能，因此火害下模型承受之軸向載重大小會對構件伸長變形及壓縮變形趨勢造成影響。

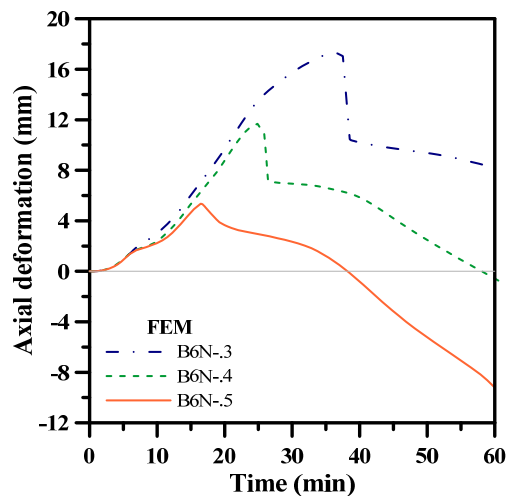


圖 5-10 模型於不同載重比之軸向變形-時間關係

(資料來源：本研究整理)

第六章 填充型箱型鋼柱防火評估

第一節 耐火性能影響參數

填充型合成柱構件為純混凝土柱或鋼筋混凝土柱之外側以鋼骨包覆組合而成；其構件防火設計於國外規範已制定相關設計限制條文，如 AISC、Eurocode、ECCS-T. C. 3 等規範；為使構件達規定之防火時效，規範採以規定構件材料種類和強度、鋼骨厚度、施加载重大小、斷面尺寸、有無配置縱向主筋、鋼筋比、鋼筋保護層厚度等限制條文；例如，具 1 小時防火時效之填充型柱構件內部須配置鋼筋，而其詳細規定與設計限制可參考第二章第四節 Eurocode 4 之查表法所示。除此之外，國外研究學者亦已提出鋼管混凝土柱(CFTC)之防火時效評估公式，以供設計者能快速估算柱構件之防火時間，如公式(2-4)至公式(2-6)；由公式(2-4)至公式(2-6)發現，混凝土抗壓強度、斷面尺寸、施加载重大小，或試體填充之混凝土強度與施加载重的比值等會影響 CFTC 耐火性能。

國內中高樓層建築普遍採用之內灌混凝土箱型鋼柱(CFBC)亦屬填充型合成柱構件，然其火害行為於比較文獻 Kodur (1998)、Espinosa et al. (2010)與陳誠直等人(2010, 2012)等研究成果發現 CFBC 火害行為異於 CFTC，故國外學者提出防火時效評估公式於評估 CFBC 防火時間將存在適用性之疑慮。針對國外學者提出之公式，計算 CFBC 防火時間並與其實驗結果比對，如表 6-1 所示。由計算結果顯示，CFTC 防火時效評估公式僅公式(2-6)與陳誠直等人(2012)研究低載重比 CFBC 試體之耐火性能合格時間接近；差異較大之原因為 CFBC 不符合公式規定之使用限制條件(如，斷面尺寸、混凝土強度)、試體施加载重大小相較試體內灌混凝土部分之強度大，以及 CFBC 試體混凝土部分無法承受加載之載重等，使內灌混凝土部分無法延續合成柱構件耐火性能，因此國外研究學者提出之防火時效預估公式不適用於我國內灌混凝土箱型鋼柱防火時間預測。

總結而言，主要影響內填充混凝土鋼柱耐火性能之參數為施加载重、斷面尺寸和混凝土抗壓強度等，而內填充鋼筋混凝土鋼柱耐火性能影響參數除了與內填混凝土鋼柱相同之外，尚需考量鋼筋比與鋼筋保護層厚度等參數。

表 6-1 鋼管混凝土柱防火時效評估公式計算結果

文獻	斷面尺寸 B×t (mm)	時間(min)			
		實驗結果	Harada (2004) ^a	Kodur (1999) ^b	Park et al. (2007) ^c
何明錦等 (2012)	500×22	55	10.2	167	130
	500×22	51	10.2	167	130
陳誠直等 (2010)	500×22	41	1.4	151	75
陳誠直等 (2012)	400×19	26	-0.3	66	-50
	400×19	42	1.1	93	42
	400×19	31	-0.3	66	-50
	400×19	45	1.1	93	42
備註： 1. “a”為採公式(2-4)計算 2. “b”為採公式(2-5)計算 3. “c”為依照採公式(2-6)計算					

(資料來源：本研究整理)

第二節 填充型箱型鋼柱防火時效評估公式

由前節得知，鋼管混凝土柱之防火時效評估公式不適用於內灌混凝土箱型鋼柱防火時間預測，因此本研究將彙整國內相關研究成果並參考前章節所述之耐火性能影響參數，以建立填充型箱型鋼柱防火時效評估公式。

壹、填充型箱型鋼柱研究成果

目前國內對於火害下填充型箱型鋼柱研究已有相當程度之成果，探討防火時效之研究可參考陳誠直等人(2010)、何明錦等人(2012)、陳誠直等人(2012)與本研究等，如表 2-3 與表 6-2 所示，共有 15 支試體。由研究成果顯示，內灌混凝土箱型鋼柱承受約 0.23 倍至 0.6 倍構件標稱強度之軸向載重，以載重比之參數對耐火性能影響最為顯著，而箱型鋼柱板銲接型式、斷面尺寸、箱型鋼柱內有配置剪力釘亦會影響柱構件之耐火性能。

表 6-2 填充型箱型鋼柱耐火性能合格時間

文獻	試體編號	斷面尺寸 B×t (mm)	f'_c (kgf/cm ²)	載重比	剪力釘	耐火性能 合格時間 (min)
本研究	B4R-.2 ²	400×19	564	0.2	—	161
	B4R-.5 ²	400×19	564	0.5	—	33
	B5N-.6 ¹	500×19	564	0.6	—	26
	B5R-.3 ²	500×19	603	0.3	—	74
	B6N-.3 ¹	600×19	564	0.3	—	42
	B6N-.5 ¹	600×19	564	0.5	—	31
	B6Ra-.3 ²	600×19	603	0.3	—	61
	B6Rb-.4 ²	600×19	603	0.4	—	53
何明錦等 (2012)	CP1 ¹	500×22	524	0.23	有	55
	PP1 ¹	500×22	524	0.23	有	51
陳誠直等 (2010)	CFBC-3 ¹	500×22	673	0.36	—	41
陳誠直等 (2012)	LR0.6-B ¹	400×19	515	0.60	—	26
	LR0.3-B ¹	400×19	515	0.30	—	42
	LR0.6-A ¹	400×19	515	0.60	有	31
	LR0.3-A ¹	400×19	515	0.30	有	45
備註：						
1. “1”及“2”分別為箱型鋼柱內填充純混凝土與鋼筋混凝土						
2. 載重比為施加载重(P)除以合成柱標稱強度(P _n)						

(資料來源：本研究整理)

貳、填充型箱型鋼柱防火時效評估公式

如前所述，影響填充型箱型鋼柱耐火性能之參數，如斷面尺寸、混凝土強度、縱向鋼筋與其降伏強度、鋼骨及其降伏強度與施加载重。故進一步探討施加载重與各材料承載能力的比值。圖 6-1 至圖 6-3 為 15 支試體施加载重與各承載能力的比值-耐火性能合格時間之關係。其中，P 為施加载重； P_c 為混凝土承載能力 (tf)， $P_c = 0.85f'_c A_c$ ， f'_c 為混凝土抗壓強度(kgf/cm²)， A_c 為內填充混凝土斷面(cm²)； P_r 為縱向主筋之承載能力(tf)， $P_r = f_{yr} A_r$ ， f_{yr} 為縱向鋼筋降伏強度(kgf/cm²)， A_r 為縱向鋼筋斷面(cm²)； P_s 為鋼骨之承載能力(tf)， $P_s = f_{ys} A_s$ ， f_{ys} 為鋼骨降伏強度(kgf/cm²)， A_s 為鋼骨斷面(cm²)。此三圖顯示耐火性能合格時間與 P/P_c 及

$P/(P_s+P_c+P_r)$ 無一致的關係，惟耐火性能合格時間與 $P/(P_c+P_r)$ 之關係顯示，影響耐火性能之參數有斷面尺寸、縱向主筋、混凝土強度、鋼筋降伏強度與施加载重，但與鋼骨之承載能力無關。此可由實驗過程驗證，當鋼柱溫度高而喪失承載能力時柱之耐火性能實為混凝土與縱向鋼筋貢獻。

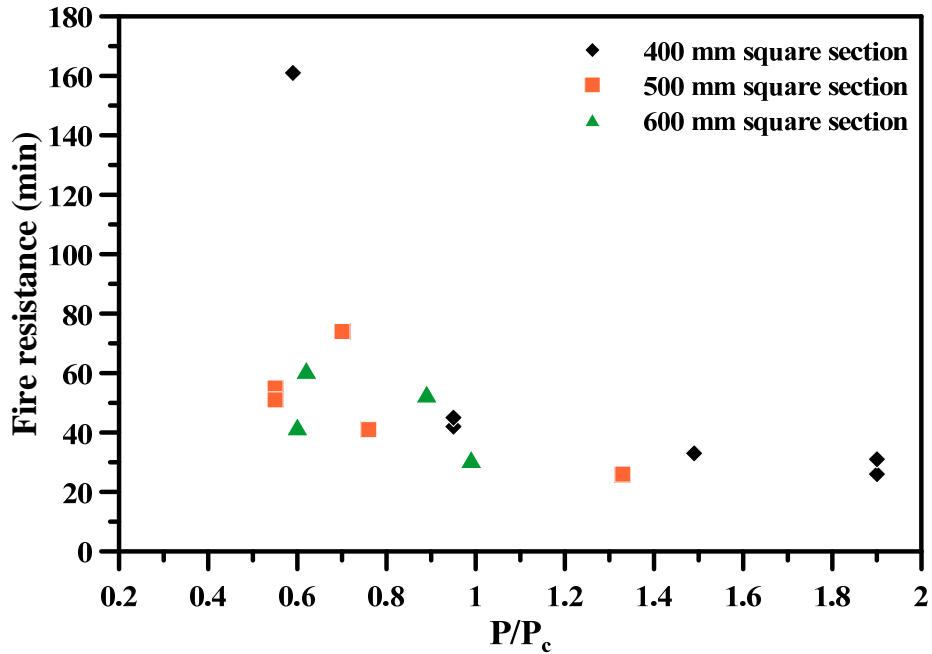


圖 6-1 耐火性能合格時間與 P/P_c 之關係

(資料來源：本研究整理)

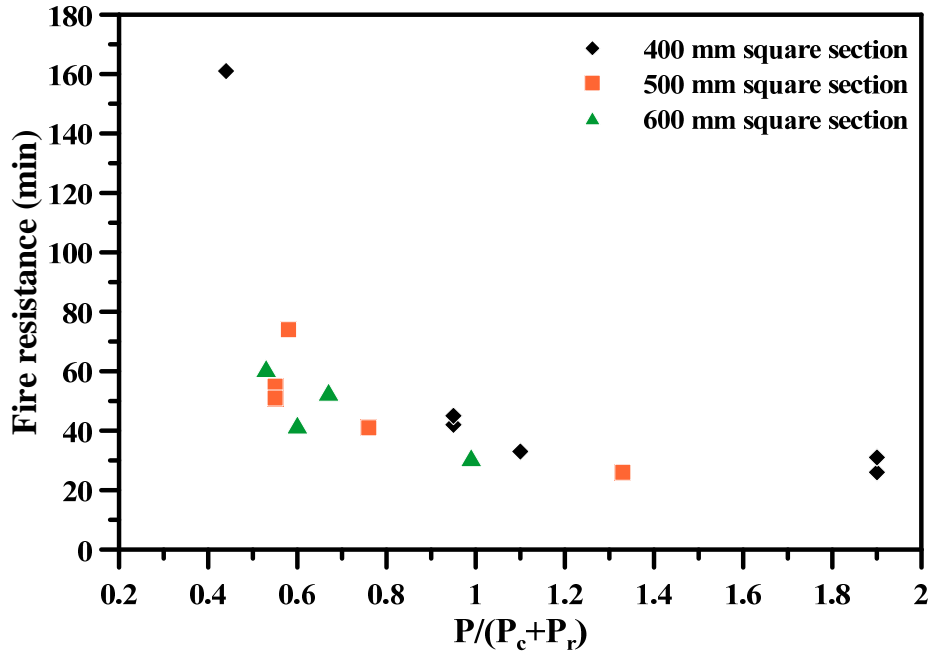


圖 6-2 耐火性能合格時間與 $P/(P_c+P_r)$ 之關係

(資料來源：本研究整理)

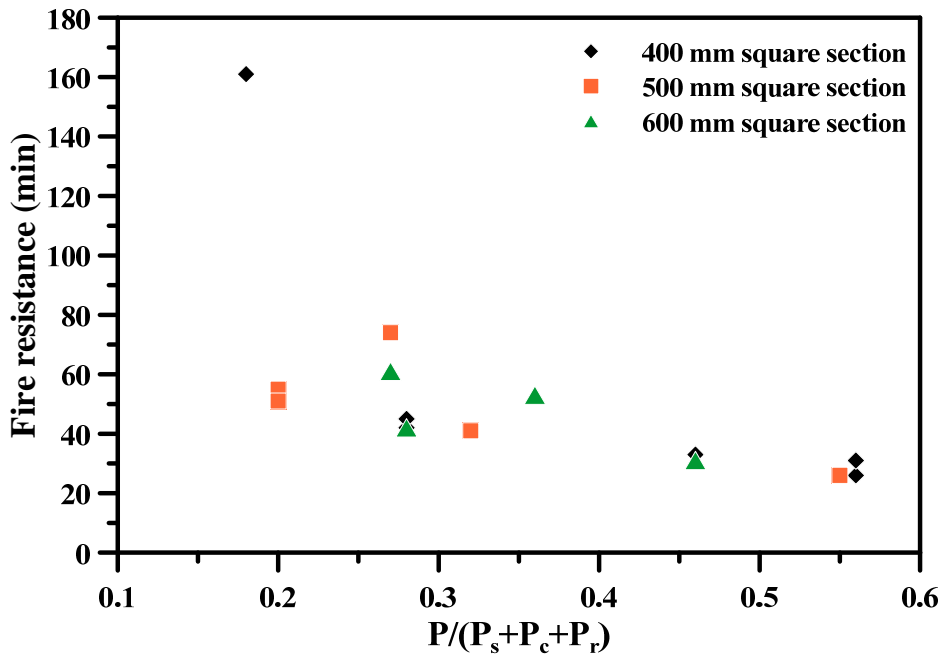


圖 6-3 耐火性能合格時間與 $P/(P_s+P_c+P_r)$ 之關係

(資料來源：本研究整理)

防火時效評估公式

圖 6-4 為基於實驗成果以曲線擬合方法所得之曲線，其曲線以數學運算式子表達為公式(6-1)。基於耐火性能合格時間之預估須為保守，故公式(6-1)之計算結果為實驗值之下限值；其中 α 為 $P/(0.85f'_cA_c + f_{yr}A_r)$ 。

$$t = 0.07\alpha^{-9} + 44e^{-0.4\alpha} \quad (6-1)$$

使用限制如下：

1. 箱型鋼骨採 A572 Gr. 50；內灌混凝土採自充填混凝土。
2. 斷面大小 400 mm~600 mm
3. 混凝土強度 500~700 kgf/cm²
4. 合成柱之受熱段長度 2800 ~3100 mm

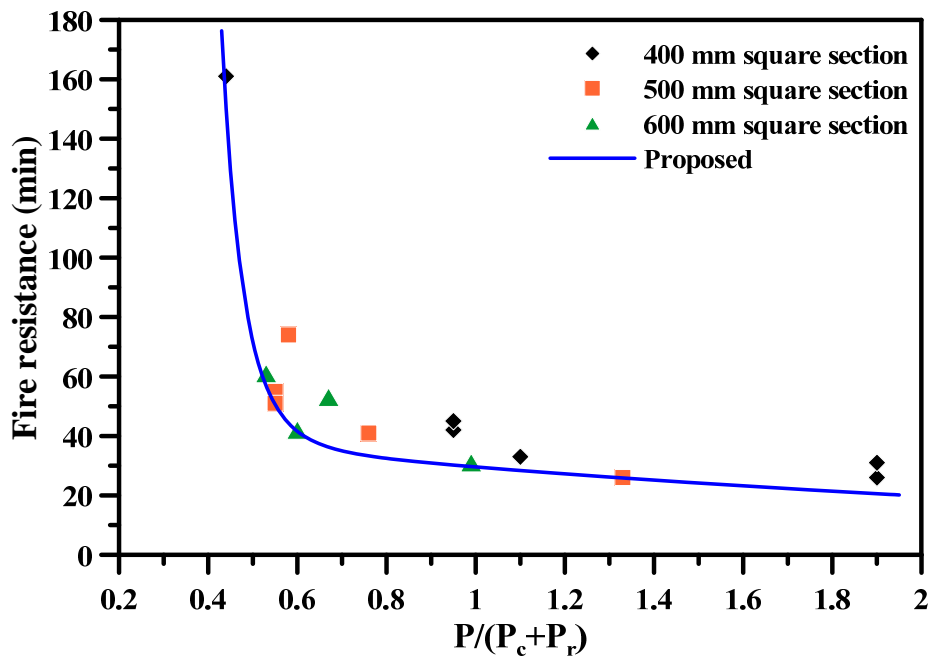


圖 6-4 實驗結果與防火時效評估公式計算結果

(資料來源：本研究整理)

第七章 結論與建議

第一節 結論

以實驗與有限元素分析方法，探討填充型箱型鋼柱於定載加溫下之行為與耐火性能，主要研究參數為軸向載重大小、斷面尺寸、有無配置縱向主筋；並基於相關研究成果與本研究實驗結果，提出填充型箱型鋼柱防火時效評估公式。綜合本研究結果提出以下結論。

1. 箱型鋼柱內填充(鋼筋)混凝土在火害初期因外部鋼骨受熱，而發生膨脹伸長變形，使載重大多由鋼骨來承擔；當鋼骨溫度到達約 400°C ，試體之鋼骨降伏強度折減為常溫下強度 70%，試體呈現壓縮變形且混凝土發現爆裂現象，致使試體失去承載能力，而有配置縱向主筋試體因鋼筋混凝土使其承載能力較內灌混凝土試體佳。
2. 有配置縱向主筋試體雖於定載加溫過程中會發生內部混凝土爆裂現象，但核心處之鋼筋混凝土仍可維持部分強度，試體不致突然失去承載能力，因而減緩試體壓縮速率，並增加耐火性能合格時間。
3. 試體承受較大載重於試驗初期產生熱膨脹伸長變形，隨後發生膨脹伸長與載重造成壓縮變形相互抵抗之行為，最大伸長變形量小，而異於施加小載重試體會產生較大伸長變形；大載重試體壓縮變形時之速率較為快，因此施加载重大小重要的影響變形行為與耐火性能。
4. 依照 Eurocode 規範設計之 30 分與 1 小時防火時效等級試體之實驗結果顯示，內灌混凝土箱型鋼柱可達 30 分鐘防火時效；惟試體 B5N-6 因承受超過規定之軸向載重使之未達需求。含鋼筋混凝土箱型鋼柱試體僅部分達規定防火時效，因此若試體承受之載重超過 0.3 倍標稱強度即無法達 1 小時防火時效。
5. 以有限元素分析方法可合理預估試體於各加溫歷時之斷面溫度分佈情形與試體軸向變形趨勢。溫度將隨距分析模型表面深度增加而遞減，且因內部混凝土為低熱傳導性材料，使溫度遞減程度驟增，但模型各部件角隅處溫度會比相同距表面深度位置之溫度為高。
6. 由分析結果發現，影響填充型箱型鋼柱耐火性能參數之影響程度依序為軸向

載重大小、有無配置縱向主筋與斷面尺寸。

7. 鋼管混凝土柱防火時效評估公式無法適用於預估我國普遍採用之內灌混凝土箱型鋼柱防火時間，而本研究依相關研究成果建立填充型箱型鋼柱防火時效評估公式可合理評估其防火時間。
8. 國內普遍採用之內灌混凝土箱型鋼柱於一般設計載重下應噴塗防火被覆使達「建築技術規則」規定之防火時效。

第二節 建議

1. 建議一

內含鋼筋混凝土箱型鋼柱火害行為研究：立即可行之建議

主辦機關：行政院國家科學委員會

協辦機關：內政部建築研究所

主要影響填充型合成柱構之耐火性能參數為施加载重大小、斷面尺寸及箱型鋼柱內填充物等；由本研究實驗與分析成果發現，內含鋼筋混凝土箱型鋼柱之耐火性能較佳，且有配置縱向主筋相較斷面尺寸對耐火性能為更顯著之影響參數，因此深入探討火害下內含鋼筋混凝土箱型鋼柱於不同鋼筋比、保護層厚度與箍筋間距之影響將有其必要性。

2. 建議二

內灌混凝土箱型鋼柱防火性能設計：中長期性建議

主辦機關：行政院國家科學委員會

協辦機關：內政部建築研究所

建築結構的設計與建造需滿足各種安全需求，如強度、穩定、使用性等的需求，其中防火性能設計亦為建築結構安全需求必須考量之重要因素。針對廣泛應用於國內中高樓層建築物之填充型箱型鋼柱，內政部建築研究所已進行多年的防火性能研究，獲得諸多防火時效與火害中的結構行為，故建立內灌混凝土箱型鋼柱之防火性能設計有其必要性。

附錄一 填充型合成柱試體強度計算

本研究試體為填充型合成柱構件，分別為箱型鋼柱內填充純混凝土及鋼筋混凝土，其參考我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」，以強度疊加法預估受軸壓力之試體受壓強度。合成柱試體分為 B4R、B5R(N)及 B6R(N)系列，斷面尺寸(H×B×tw×tf)依序為 400×400×19×19、500×500×19×19 及 600×600×19×19 mm，試體長度(L)為 3.06 m；其中，編號 R 為試體內填充鋼筋混凝土，編號 N 為試體內填充純混凝土。試體鋼材實際降伏強度(F_{ys})為 3.98 tf/cm²，彈性模數(E_s)為 2100 tf/cm²；#8 與#9 竹節鋼筋實際降伏強度(F_{yr})分別為 5.28 tf/cm² 和 5.12 tf/cm²；試體 B4R 系列、B5N-.6、B6N 系列於試驗時混凝土抗壓強度(f'_c)為 564.3 kgf/cm²，試體 B5R-.3、B6R 系列於試驗時混凝土抗壓強度 602.9 kgf/cm²。各試體標稱強度，如表 A-1 所示；有、無配置縱向主筋試體強度計算範例如下述。

表 A-1 填充型合成柱試體預估強度

編號	主筋	箍筋	標稱強度(tf)
B4R-.2	8-#8	#3	1796.2
B4R-.5	8-#8	#3	1796.2
B5N-.6	—	—	2276.5
B5R-.3	8-#8	#3	2500.3
B6N-.3	—	—	3001.5
B6N-.5	—	—	3001.5
B6Ra-.3	8-#9	#3	3292.1
B6Rb-.4	16-#9	#3	3494.7

(資料來源：本研究整理)

無配置縱向主筋試體(B5N-.6)

1. 一般要求

(a) 柱斷面最小尺寸(B)規定

$$B=50 \text{ cm} > 30 \text{ cm} \quad \text{OK}$$

(b) 柱短邊-長邊尺寸比值(B/H)規定

$$B/H=50/50=1.0 > 0.4 \quad \text{OK}$$

(c) 鋼骨斷面積不得小於構材全斷面之 2%

$$\frac{A_s}{BH} = \frac{(50 \times 50) - (46.2 \times 46.2)}{50 \times 50} = 14.6\% \geq 2\% \quad \text{OK}$$

(d) 斷面肢材寬厚比

$$\frac{b}{t} = 24.32 \leq \lambda_{pd} = \sqrt{\frac{3E_s}{F_{ys}}} = 39.77 \quad \text{OK}$$

2. 鋼骨部分之標稱受壓強度

$$\text{箱型鋼斷面積 } A_s = 365.6 \text{ cm}^2; \text{ 慣性矩 } I_s = \frac{50^4}{12} - \frac{46.2^4}{12} = 141180.5 \text{ cm}^4$$

$$\text{箱型鋼之迴轉半徑 } r_s = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{141180.5}{365.6}} = 19.7 \text{ cm}$$

$$\text{箱型鋼之有效迴轉半徑 } r_{\text{eff}} = r_s + \alpha \times \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} = 21.1; \text{ 填充型鋼管混凝土柱 } \alpha = 0.1$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{F_{ys}}{E_s}} = \frac{1 \times 306}{\pi \times 21.1} \sqrt{\frac{3.98}{2100}} = 0.2 < 1.5$$

$$\text{箱型鋼柱標稱受壓強度 } P_{ns} = (0.21\lambda_c^3 - 0.57\lambda_c^2 - 0.06\lambda_c + 1)F_{ys}A_s = 1406.3 \text{ tf}$$

3. RC 部分標稱受壓強度

$$A_c = 2134.4 \text{ cm}^2; \text{ 混凝土受到箱型鋼良好圍束, } \phi_e = 0.85$$

$$P_{\text{nrc}} = \phi_e (0.85f'_c A_c + A_r F_{yr}) = 870.2 \text{ tf}$$

4. 內灌混凝土箱型鋼柱設計受壓強度

$$\text{鋼骨部分之強度折減係數 } \phi_{cs} = 0.85; \text{ 混凝土部分強度折減係數 } \phi_{\text{crc}} = 0.75$$

$$\phi_c P_n = \phi_{cs} P_{ns} + \phi_{\text{crc}} P_{\text{nrc}} = 0.85 \times 1406.3 + 0.75 \times 870.2 = 1848 \text{ tf}$$

有配置縱向主筋試體(B5R-.3)

1. 鋼骨部分之標稱受壓強度

$$\text{箱型鋼斷面積 } A_s = 365.6 \text{ cm}^2; \text{ 慣性矩 } I_s = \frac{50^4}{12} - \frac{46.2^4}{12} = 141180.5 \text{ cm}^4$$

$$\text{箱型鋼之迴轉半徑 } r_s = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{141180.5}{365.6}} = 19.7 \text{ cm}$$

$$\text{箱型鋼之有效迴轉半徑 } r_{\text{eff}} = r_s + \alpha \times \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} = 21.1; \text{ 填充型鋼管混凝土柱 } \alpha = 0.1$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{F_{ys}}{E_s}} = \frac{1 \times 306}{\pi \times 21.1} \sqrt{\frac{3.98}{2100}} = 0.2 < 1.5$$

$$\text{箱型鋼柱標稱受壓強度 } P_{ns} = (0.21\lambda_c^3 - 0.57\lambda_c^2 - 0.06\lambda_c + 1)F_{ys}A_s = 1406.3 \text{ tf}$$

2. RC 部分標稱受壓強度

$$A_r = 40.52 \text{ cm}^2; A_c = 2093.9 \text{ cm}^2 (\text{扣除 } A_r)$$

混凝土受到箱型鋼良好圍束， $\phi_e = 0.85$

$$P_{nrc} = \phi_e (0.85f'_c A_c + A_r F_{yr}) = 1093.9 \text{ tf}$$

3. 內灌混凝土箱型鋼柱設計受壓強度

鋼骨部分之強度折減係數 $\phi_{cs} = 0.85$ ；混凝土部分強度折減係數 $\phi_{crc} = 0.75$

$$\phi_c P_n = \phi_{cs} P_{ns} + \phi_{crc} P_{nrc} = 0.85 \times 1406.3 + 0.75 \times 1093.9 = 2016 \text{ tf}$$

附錄二 審查意見與答覆

壹、期初審查意見與答覆

會議日期：102 年 1 月 24 日，上午 9 時 30 分

地點：內政部建築研究所討論室(一)

新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

審查委員意見	答覆
1. 研究團隊學經歷豐富，但請說明主要研究人員曾參與之相關火害研究計畫及研究能力。	1. 主持人曾主持過 4 年相關鋼骨鋼筋混凝土構件火害研究，研究員為博士研究生，曾參與 3 年相關火害研究，於實驗與分析研究能力皆可勝任本研究。
2. 本研究計畫和前 2 年的研究有何差異或不同，請說明。	2. 本研究計畫實驗試體規劃將補足前 2 年欠缺之試體設計參數。主要預期成果為建立內灌混凝土箱型鋼柱防火時效評估公式，為以前所無。
3. 試驗規劃每種試體僅進行 1 支，由於混凝土澆置變異性較大，試驗結果是否會有誤差，是否 1 根試驗結果足以得到可用的數據？是否有對照組試驗？	3. 礙於研究經費與時程，無法有相同設計參數之試體作為對照組，混凝土之澆置將為一次施作，以降低其強度變異性於火害下耐火性能之影響。因純鋼筋混凝土柱與有防火被覆內灌混凝土箱型鋼柱之防火性能明確，故不採為對照組。
4. 試驗終止條件是否會受到混凝土爆裂的影響。	4. 試驗終止條件為壓縮量與壓縮速率。混凝土之爆裂因受箱型鋼柱圍束而不致立即造成試體的破壞，惟混凝土爆裂量大時，將影響試體柱之承载力而造成壓縮量過大，導致終止試驗。
5. 有限元素分析模型請再詳細說明。	5. 有限元素分析模型內混凝土與鋼板性質，將考慮溫度影響之應力-應變關係、熱膨脹、比熱與傳導。分析部分考慮熱傳分析、非線性應力分析與接續性耦合分析。

<p>6. 研究成果是否可能如國外建議公式，提出本土化使用公式。</p>	<p>6. 研究成果預期提出本土化內灌混凝土箱型鋼柱之防火時效評估公式。</p>
<p>7. 規劃試驗強度 350kg/cm^2 足夠否？有無被覆？載重比 0.3 及 0.6 可否含適定範圍？</p>	<p>7. 試體混凝土強度之設計將參考已有文獻之資料而補足欠缺的，試體將不考慮防火被覆，並依實際工程載重比 0.3 與 0.6 為適當之比值，至於試體混凝土內是否含鋼筋將進一步探討。</p>
<p>8. 實際柱之受力應含 bending，是否有影響其防火時效？</p>	<p>8. 柱承受彎矩將影響耐火性能，本研究將針對純軸力之試體進行實驗。</p>
<p>9. 箱型與鋼管(矩形)有何差異，請詳細述明，至於鋼板厚度所謂厚與薄其界限及影響性請述明。</p>	<p>9. 國內常用之箱型鋼柱承載力較鋼管為大，箱型鋼柱由 4 片鋼板銲接組成，其厚薄並無明確界定，但其承載力有明顯差異，在防火性能上亦有所不同。</p>
<p>10. 試體規劃請說明規劃依據、目的及所要探討項目。</p>	<p>10. 試體規劃將參考文獻所提試體尺寸，並補足欠缺的參數，目的為依據試驗結果提出防火時效評估公式並建立影響耐火性能之參數。</p>
<p>11. 服務建議書第 9 頁(表 1)規劃 8 支試體，其與前期(2010 至 2012)研究試體規劃差異性為何？其型式尺寸與業界採用者是否相符？請說明。</p>	<p>11. 規劃之 8 支試體將再修正，以不重複文獻內之試體為原則，設計上並將考量實務常用且試驗設備能力許可下之試體尺寸。</p>

貳、期中審查意見與答覆

會議日期：102 年 7 月 10 日，下午 2 時 30 分

地點：內政部建築研究所 15F 第三會議室

新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

委員	審查委員意見	答覆
陳委員正平	<ol style="list-style-type: none"> 1. 試體是否可研究有無剪力釘之影響。 2. 防火時效一併納入火害後結構物是否仍可使用之探討，若只管防火時效可符合，而不能繼續使用，則拆除之代價太高。 3. 鋼筋與端板間是否有銲接，其影響為何，力量是否可傳遞至鋼筋。 4. ASTM E119 或 CNS 12514 只管溫度，不論火害延時，即判定失敗，是否合宜。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 試體有無剪力釘之影響，可參考陳誠直等人(2012)之研究成果 2. 火害後結構物是否仍可使用之探討，待後續研究進行。 3. 因考慮到箱型鋼柱受熱後伸長之影響，鋼筋與端板未銲接，空隙僅有 0.5 cm，於軸壓力量傳遞應無問題 (文獻可見相同做法)。 4. 規範對於垂直承重柱構件於火害下之破壞判定，為依據最大軸向壓縮量與最大軸向壓縮速率。
邱委員昌平	<ol style="list-style-type: none"> 1. 箱型鋼柱內填 RC 及純混凝土合成柱，在國內已普遍應用於高樓建築結構，故其防火性能之試驗驗證很有必要。 2. 本研究之相關研究文獻、理論計算、試驗參數及試體材料選用等已完成，期中之成果符合預期需求。 3. 銲道之提早破壞也有可能，故無主筋混凝土填充合成柱之試驗過程請注意部分混凝土圍束提早喪失之可能現象。 4. 實務上 CFBC 及 CFT 仍有防火被覆，才允許無鋼筋之設計，否則仍宜有最小主筋比 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教。 2. 銘謝指教。 3. 試體鋼板銲接採全滲透銲，並經超音波檢驗合格，且先期研究案之實驗皆無發生銲道破壞。試驗時將注意混凝土的爆裂時機。 4. 試體不施作防火被覆，主要探討防火被覆失效後之防火行為與時效，且前期研究已有防火被覆試體。

	之要求。建議 1 至 2 支試體擬宜有防火被覆。	
鄭委員復平	<ol style="list-style-type: none"> 1. 爆裂為鋼管填充混凝土柱重要因素，鋼板挖洞無法反應事實。 2. 建議熱電偶在鋼板內角隅設置一測點。 3. 鋼板厚度與柱尺寸比例應該會影響其耐火能力。 4. 鋼管柱多用於高樓，防火時效 3 小時，根據以往試驗無防火被覆試體防火時效小於 1 小時，應考量有防火被覆試體。 5. 分析之假設需加無含水率影響。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教。 2. 前期研究有該測點，已知其升溫趨勢。目前試體已製作完成，後續研究將予納入。 3. 鋼板厚度與柱斷面尺寸之比值會影響耐火能力，礙於經費，尚待後續之研究。 4. 先期研究成果得知，噴塗規定厚度之防火被覆可符合法規要求之防火時效。 5. 已加入於有限元素分析章節。
林委員宜清	<ol style="list-style-type: none"> 1. 防火時效與斷面尺寸有關，國內箱型鋼柱 CFBC 大都應用在高樓，為考量耐震需求，通常斷面較大，是否納入分析考慮。 2. 請依實際可能之載重比進行探討。 3. 依規劃之較小斷面試體，如何延伸試驗結果至較大 CFBC 斷面之防火時效，請考慮。 4. 熱電偶之安裝與配線保護須注意對溫度量測干擾。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 將於分析探討大斷面於耐火性能之影響。 2. 遵照委員意見辦理。 3. 較大斷面之實驗因設備容量不足無法施作，將以分析探討之。 4. 銘謝指教。
顏委員聰	<ol style="list-style-type: none"> 1. 國外防火規範對 CFTC 制定之設計準則與防火時效評估公式，何以無法適用或評估 CFBC 之防火時效，請說明。 2. 研究成果擬提出本土化內灌混凝土箱型鋼柱之防火時效，其與國外規範建議(如，EC 4、ECCS 等)是否有差別？產生差異的基本原因為 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 陳誠直等人(2012)研究顯示，相關學者提出防火時效評估公式之計算結果與部分 CFBC 試體之耐火性能合格時間有甚大差異，其原因為 CFTC 鋼管厚度普遍較 CFBC 小很多。 2. CFBC 之耐火性能將異於國外 CFT，其原因為 CFT 因鋼管軸壓承载力小，受火害行為異於

	<p>何？</p> <p>3. CFBC 試體之混凝土強度高達 515 kgf/cm²，其水灰比可能甚小，高溫下產生爆炸之可能性不小，試驗時宜注意防範。</p>	<p>CFBC 鋼柱較大之承载力。</p> <p>3. 銘謝指教。</p>
林委員克強	<p>1. 防火時效與鋼筋混凝土之鋼筋比的關係預期為何？是否有最少鋼筋比限制。</p> <p>2. 箱型鋼柱四片鋼板組合銲接方法為何？請詳細說明。</p> <p>3. 鋼筋(主筋)是否與柱構件施力端板銲接，若無銲接如何確認火害後力量可傳遞至鋼筋混凝土部分。</p> <p>4. 請說明分析時鋼筋混凝土材料如何假設。</p> <p>5. 附錄一中之 Es 建議使用規範規定值 2100 tf/cm²。</p>	<p>1. Eurocode 對特定之防火時效有最少鋼筋比之規定，且顯示鋼筋越多防火時效越長。</p> <p>2. 試體四片鋼板組合銲接方法採氣體遮護金屬電弧銲接。</p> <p>3. 因考慮到箱型鋼柱受熱後伸長之影響，鋼筋與端板未銲接，空隙僅有 0.5 cm，於軸壓力量傳遞應無問題(文獻可見相同做法)。</p> <p>4. 分析之鋼筋混凝土材料模擬將敘述於第五章節。</p> <p>5. 銘謝指教。</p>
曾技師慶祥	<p>1. 依第三項預期成果，研究最後仍是要反應規範的修改建議，請具體說明建議構想，預期對現有規範有多大程度影響。</p>	<p>1. 對現有規範的修改建議，將視研究成果提出適切的建議。</p>

參、期末審查意見與答覆

會議日期：102 年 11 月 05 日，下午 2 時 30 分

地點：內政部建築研究所 13F 簡報室

新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

委員	審查委員意見	答覆
王教授仲宇	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建議更深入探討 CFBC、CFTC 二者行為差異之主要原因，是否和銲道位置有關，尤其是否和應力集中或銲接裂縫之存在有關？ 2. ABAQUS 分析中是否可再考慮混凝土之劣化損傷模型及鋼板之大變形分析，以期可作到後半部之軟化行為分析。 3. Shear Stud 是否有變形或斷裂之情形？ 4. 國外之 CFTC 試體是否有局部挫屈行為？我國是否在 CFBC 中段加上外部之 Hoop Stiffener 防止 Local buckling 以增加防火延時。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. CFBC 與 CFTC 行為上的差異主要原因為鋼管承载力所佔柱強度之比值相較於箱型鋼柱為小，CFBC 試體並無銲道的破壞。 2. 研究分析已考慮兩因素，分析模型後期主要為混凝土提供強度，但因無考量其爆裂影響，故軸向變形行為與實驗有差異，而其趨勢與實驗相同。 3. 陳誠直等人(2012)之研究成果，顯示剪力釘無斷裂且變形不明顯。 4. CFTC 試體有局部挫屈行為。於 CFBC 外部加上 Hoop Stiffener 應可防止局部挫屈，惟較為不經濟，有待後續之研究。
林委員克強	<ol style="list-style-type: none"> 1. 國內常採用箱型柱內灌混凝土柱，故本研究成果對國內制定箱型內灌混凝土柱之防火時效公式有相當高的助益。 2. 本研究所建議之防火時效評估公式與鋼骨箱型柱之斷面積或鋼板厚度無關，則國內常用 CFBC 之應用如何考量？ 3. 有限元素分析是否能獲得防火時效？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教。 2. 建議 CFBC 應依鋼構噴塗防火被覆。 3. 實驗試體耐火性能合格時間之判定依據軸向壓縮量與壓縮速率之時間，而有限元素分析計算無法以前述方法判定，尚需合理假設判定方法。 4. 載重比為試體施加軸力與試體軸壓標稱強度之比值，軸壓標稱強度參考國內 SRC 規範計算。

	<p>4. 請說明載重比之定義。Pn 是否含鋼骨箱型柱部份。</p>	
邱委員昌平	<ol style="list-style-type: none"> 1. 計畫名稱不宜用鋼管二字，宜為方型組合型鋼(Built-up Box Column)，使與另案之市售方型鋼管(Tube)有所區分(文後又稱填充型合成柱)。 2. 八支試體做火害實驗，工作繁重，另外一章 FEM 之分析及第六章之防火評估，獲得之結果有相當之參考價值。 3. 在升溫階段比較混凝土溫度量測點 C1 與 C2，兩者皆不高且相近，但缺少近箍筋處之測點，稍可惜。 4. 試驗結果之防火時效四字，宜為防火失效時間(依 ISO 834 規範兩個失效判定，請參考另一報告書(林建宏、湯兆緯)第 19 頁)。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依據國內鋼骨鋼筋混凝土規範，CFBC 和 CFTC 皆屬填充型鋼管混凝土柱；且因委託計畫合約，計畫名稱不宜變更。本研究試體鋼骨部分乃以鋼板銲接組成箱形斷面，為與 CFTC 區別，故以填充型箱型鋼柱或內灌混凝土箱型鋼柱稱之。 2. 銘謝指教。 3. 銘謝指教，後續研究將注意。 4. CNS12514「建築物構造部分耐火試驗法」：防火時效等級分為 30 分鐘、1 小時、2 小時等。試體之防火時效判定，須以試體各項耐火性能合格時間均能達到該等級時間者，始為合格防火時效。試驗結果將稱為耐火性能合格時間。
曾技師慶祥	<ol style="list-style-type: none"> 1. 第 67 頁，公式 6-1 為實驗結果之下限值，十分保守且受限於本研究試驗參數及尺度所限範圍內，距實際應用或規範引用仍有差距，有何具體較合理可行建議？ 2. 繫桿常用於箱型鋼管混凝土柱，請問可否將此也納入防火時效參數？ 3. 具體對規範的修改建議為何？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 將再考量國內有限之試體，定訂參數之適用範圍。 2. 繫桿有其效用，其於耐火性能之影響有待後續進行研究。 3. 建議 CFBC 構件應噴塗防火被覆使達建築技術規定之防火時效。
顏教授聰	<ol style="list-style-type: none"> 1. 研究成果大致上符合計畫之預期要求。 2. CFBC 之防火時效，依研究結果，載重比為最重要之影響因子，而主筋之配置及斷面尺寸亦為安全因子。但表 6-2 所示(圖 6-1~6-3)，斷面 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教。 2. 因混凝土為熱惰性材料，於低載重比時，箱型鋼柱內填充混凝土若可承受軸向載重時，則能提供柱構件之耐火性能。

	<p>400x400 mm 加置主筋之 CFBC，其防火時效在載重比 0.2-0.3 時，防火時效特別大，為其他載重比(0.4-0.6)者之 3-5 倍，宜檢視試驗資料，並從物理與力學角度加以討論。</p> <p>3. 式 (6-1) 之適用範圍涵蓋 CFBC 內含 RC 及純混凝土者，惟由圖 6-1~6-3 可看出，其防火時效 (t) 與 $P/(P_c+P_r)$ 之相關性不甚理想，宜考慮將兩種內含材料條件分別建議其預測公式。</p>	<p>3. 本研究建議公式可廣泛地適用於有無鋼筋，若無鋼筋則 $P_r=0$。</p>
<p>鄭教授復平</p>	<p>1. 鋼板表面溫度與爐溫相差很多，數值分析可能用爐溫，造成差別很大。</p> <p>2. 鋼管挫屈應該是混凝土爆裂造成，建議鋼管多打細孔。</p> <p>3. 火害時鋼板失效，因此其厚度與尺寸有很大關係，建議予以限制。</p> <p>4. 為防止爆裂，建議加密箍筋以增加其圍壓。</p>	<p>1. 數值分析採爐內平均溫度加溫於鋼板上，並考量熱對流、幅射影響。</p> <p>2. 銘謝指教。</p> <p>3. 試體之耐火性能與鋼板寬厚比之關係，因試體數量有限，難以訂定量化之影響。</p> <p>4. 試體鋼筋配置主要參考 Euro-code 規定設計，加密箍筋之方式有待後續之研究。</p>
<p>業務單位</p>	<p>1. 本案試體尺寸不盡符合 Eurocode 規定，是否能與該規範條例式設計比對，請研究團隊卓予考量。</p> <p>2. 由於國內填充混凝土箱型鋼柱之鋼板尺寸設計係基於耐震需求，其板厚尺寸與 Eurocode 規定不盡相同。</p>	<p>1. 試體將比對 Eurocode 設計規定。</p> <p>2. 試體斷面尺寸 500 與 600 mm 之板厚符合 Eurocode 規定。</p>

肆、工作會議

會議日期：102 年 4 月 10 日，下午 2 時 30 分

地點：內政部建築研究所討論室(一)

新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

主持人：陳誠直 教授

與會人員：林建宏組長；李鎮宏副研究員；相關人員：陳柏端及吳崇豪

專家學者意見	答覆
1. 混凝土強度會影響耐火時效，是否提高規劃試體之內灌混凝土強度，使試體可能達到 1 小時耐火能力。	1. 由文獻得知混凝土強度會影響耐火性能，但相較載重比造成之影響為不明顯，且較高強度混凝土於高溫下，會因緻密性、含水率及溫度梯度，使混凝土較易發生爆裂。
2. 試體施加之定額軸向載重明顯影響合成柱構件之耐火能力，降低施加载重是否可行。	2. 國內研究成果顯示，研究所採用之載重比已為上、下界限，若再降低施加载重則為不妥。
3. 目前台灣有採用箱型鋼柱內灌純混凝土，而無內填充鋼筋混凝土。部分試體規劃為箱型鋼內填充鋼筋混凝土，增加鋼筋可否有效提升耐火能力。	3. 國外已有鋼管柱內填充純混凝土或鋼筋混凝土之研究，而內填充鋼筋混凝土之耐火能力皆比純混凝土佳。
4. 對於斷面 300x300 mm 試體，斷面小且以四片鋼板銲接組合，其銲接量可能較不經濟。是否能將較小斷面試體規劃成較大斷面以符合實務。	4. 銘謝指教。
5. 本研究主要目的為內灌混凝土箱型鋼柱之火害性能設計準則與防火時效評估公式；試體主要依研究目的規劃，而大斷面試體費用較高，請盡可能依研究需求及經費限制，規劃多組試體。	5. 本研究規劃試體斷面大小將參考實務常用尺寸，符合國內「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」設計要求，並依研究目的規劃多組無噴塗防火被覆試體。

<p>6. 降低箱型鋼的厚度可降低試體費用，能否符合設計規範要求，以及對耐火能力是否有影響。</p>	<p>6. 由文獻成果得知，鋼管厚度對耐火能力影響較小，試體設計將考慮之。</p>
<p>7. 箱型鋼管混凝土柱本身具有一定防火時效，而噴塗較規定少之防火被覆厚度，並達到規定耐火時效，是否可行。</p>	<p>7. 雖箱型鋼管混凝土柱本身具有一定耐火能力，若噴塗較規定少之防火被覆厚度，試體可能達要求之防火時效，但噴塗均勻厚度較難控制，且實際噴塗厚度大多超過需求厚度，噴塗方式似乎不易達成。</p>

伍、第一次專家學者諮詢座談會

會議日期：102 年 04 月 19 日，下午 2 時 30 分

地點：內政部建築研究所，防火實驗中心會議室

臺南市歸仁區六甲里中正南路一段 2502 號

專家學者	審查意見	答覆
鍾委員興陽	<ol style="list-style-type: none"> 1. 研究團隊報告中所提之箱型柱內加入鋼筋，以提昇防火時效的做法，在國內工程業界屬於較創新做法。雖然歐規已有類似做法，但我國施工法與歐洲不同，故研究成果應可為國內工程業界參考，及有助於建立本土內灌混凝土箱型鋼柱的防火時效公式。 2. 研究團隊將進行 8 支試體火害實驗，由於實驗時程緊，所內同仁應給予最大協助，以利實驗進行。 3. 可討論鋼筋與柱板之距離對防火時效之影響。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教，將依研究成果提出建議。 2. 銘謝指教，將與防火實驗中心密切配合及完成火害實驗。 3. 依據 Eurocode 規定，防火時效愈長的設計，鋼筋與柱板之距離愈大。報告內將引用 Eurocode 規範討論其關係。
賴委員啟銘	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究進度符合預期，試體規劃合宜。 2. 本期試驗規劃除了考量相互間比較之外，亦可考量與前期成果之間的比較。 3. 填充混凝土時亦應注意澆灌後品質。 4. 數值模擬部分，可利用結構體表面之實驗溫度作為邊界條件，符合實際且簡化模擬工作。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教。 2. 試體的規劃將引用前期研究成果，並相互比較之。 3. 銘謝指教。 4. 銘謝指教，數值模擬將依此法簡化模擬。
方委員一匡	<ol style="list-style-type: none"> 1. 計劃主持人已執行建研所補助研究計劃在相關領域從事四年的研究，有良好的執行 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教。 2. 銘謝指教。 3. 銘謝指教，本研究將盡力達成預

	<p>計劃能力。</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 預期成果及效益在建立箱型鋼管混凝土柱性能設計與驗證技術，目標合理。 3. 目前已是四月中旬，期中報告時間為本年六月底，期末報告提出之時間為本年十月中旬，可供執行本計劃之時間太過緊迫。 4. 試體規劃中的主要影響參數之一為載重比，請根據鋼管與混凝土所分擔軸力之差異，國內現有法規對柱之防火時效要求，合理規劃本期試體之尺寸及載重比，以符合工程實務之需。 	<p>期成果。</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. 試體規劃將考量依工程實務常用斷面尺寸與載重比設計。
<p>陳委員純森</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鋼管與混凝土是否同時受力，與混凝土之乾縮冷縮有關，實驗室之做法與實際之澆灌是否一致，可予討論說明。 2. 耐震鋼之箱型鋼柱，很難耐火。研究報告得予區隔說明。如 SNB、SNC、STK 與 A572 等。 3. 國外的研究報告建議不包覆防火被覆可以滿足防火時效。建議討論水淬之行為。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教，混凝土澆灌儘可能符合實際情況。 2. 銘謝指教，本研究鋼骨採 A572 Gr. 50。 3. 高溫之鋼骨突然受水使溫度驟降，此水淬行為會對鋼材造成影響，待後續研究進行探討。

陸、第二次專家學者諮詢座談會

會議日期：102 年 12 月 09 日，下午 2 時 30 分

地點：內政部建築研究所，防火實驗中心會議室

臺南市歸仁區六甲里中正南路一段 2502 號

專家學者	審查意見	答覆
賴教授啟銘	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫實驗規劃完善，成果優良，本人對於計畫成果持正面肯定。 2. CFBC 除了可作為高樓結構需求外，同時具備提升防火安全之效，推廣潛力相當大，值得貴所持續投注心力。 3. 業界對於箱型鋼柱板採全滲透及半滲透接合方式尚有不同見解，建議貴所來年研究課題可予規劃探討。 4. 業界對於 CFBC 常採方灌注混凝土，灌注方式亦會影響完成後 RC 品質，進而影響耐火成效，建議貴所來年研究課題可予規劃探討。 5. 文獻中鋼管混凝土柱防火時效評估公式無法適用於預估我國普遍採用之內灌混凝土箱型鋼柱，建議貴所來年研究課題可予規劃探討。 6. 溫度測點 S1 與 S2 於實驗時間 60 min 發現，鋼板與 RC 間尚有熱傳，表示 RC 熱容尚未使用完畢，若增加 RC 熱傳導係數且再增加熱容，似乎可再提升防火時效，此課題可列入來年研究。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教。 2. 銘謝指教。 3. 已有研究成果：楊國珍(2011)，銲接型式對高溫下軸向受力鋼柱破壞模式之影響，內政部建築研究所委託研究報告。 4. 銘謝指教。 5. 銘謝指教。 6. 銘謝指教。

<p>鍾教授興陽</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究之成果已建立本國之內灌混凝土箱型鋼柱防火時效之評估公式，對日後工程界與學界之應用有相當大的助益。 2. 本研究亦建立數值模型，可供日後的火害實驗做更好的評估。 3. 本研究能在短時間內完成多組試體實驗，又建立數值模型實屬不易，值得贊許。 4. 斷面尺寸之影響值得再做深入探討。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銘謝指教。 2. 銘謝指教。 3. 銘謝指教。 4. 實驗結果顯示，填充型箱型鋼柱之斷面尺寸於耐火性能之影響較為不顯著。
<p>方教授一匡</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究參數之一為施加载重比，請說明在常溫設計條件下，一般之施加载重比是多少？ 2. 本研究所用之鋼板厚度均為 19 mm，實務上為使用不同鋼板厚度是否會得到相同結果，有待進一步探討，以利未來設計規範(或準則)訂定之參考。 3. 請將本期防火時效與純鋼柱之情況(鋼板厚度接近)，加以比較有助於探討此種鋼管混凝土柱防火時效特性。 4. 本研究之成果充實，有助於未來業界在設計此類型鋼柱防火性能之參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 載重比將因建築物之柱構件位置(內柱、外柱)與樓層位置而不同，其值可能約為 0.4 至 0.5。 2. 由鋼管混凝土相關文獻得知，鋼板厚度對柱構件之耐火性能影響甚微；陳誠直等人(2010)之試體鋼板厚度為 22 mm，其耐火性能與本研究相同斷面尺寸之比較發現，鋼板厚度影響耐火性能之程度較小。 3. 箱型鋼內填充之混凝土可提供柱板側向支撐，且混凝土為熱惰性材料，因此填充型箱型鋼柱之耐火性能應較箱型鋼柱佳。 4. 銘謝指教。

參考書目

- ABAQUS (2000). “ABAQUS/Explicit User’s Manual.” Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Version 6.1.
- AISC (2010). “Specification for Structural Steel Buildings.” ANSI/AISC 360-10, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- ASTM E119 (2000). “Standard test methods for fire tests of building construction and materials.” American Society for Testing and Materials.
- BS 476 (1987). “Fire tests on building materials and structures, Part 20, Method of determination of the fire resistance of elements of construction (general principles).” BS 476-20:1987, British Standards Institution, London.
- BS 476 (1987). “Fire tests on building materials and structures, Part 21, Method for determination of the fire resistance of load bearing elements of construction.” BS 476-21:1987, British Standards Institution, London.
- Chung, K., Park, S., Choi, S. (2008). “Material effect for predicting the fire resistance of concrete-filled square steel tube column under constant axial Load.” *Journal of Constructional Steel Research*, 64(12), 1505-1515.
- ECCS-Technical Committee 3-Fire Safety of Steel Structures (1988). “Calculation of the fire resistance of centrally loaded composite steel-concrete columns exposed to the standard fire.” ECCS Publication-Calculation of the fire resistance of composite structures.
- Espinos, A., Romero, M. L. and Hospitaler, A. (2010). “Advanced model for predicting the fire response of concrete filled tubular columns.” *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 1030-1046.
- Eurocode 4. (2004). “Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1, General rules and rules for buildings.” Eurocode 4 DD ENV 1994-1-1 : 2004, British Standards Institution, London.
- Eurocode 4. (2005). “Design of composite steel and concrete structures, Part 1.2, General rules-structural fire design.” Eurocode 4 DD ENV 1994-1-2 : 2005, British Standards Institution, London.

- Han, L. H., Yang, Y. F., Xu, L. (2003). "An experimental study and calculation on the fire resistance of concrete-filled SHS and RHS columns." *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 427-452.
- Harada K. (2004) "Actual state of the codes on fire design." Proceedings of the workshop, Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?, Milan, Italy, 11-20.
- Han, L. H., Yang, Y. F., Xu, L. (2003). "An experimental study and calculation on the fire resistance of concrete-filled SHS and RHS columns." *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 427-452.
- ISO. (1999). "Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements." International Standard ISO 834, Geneva.
- Kodur, V. K. R. (1998). "Performance of high strength concrete-filled steel columns exposed to fire." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25, 975-981.
- Kodur, V. K. R. (1999). "Performance-based fire resistance design of concrete-filled steel columns." *Journal of Constructional Steel Research*, 51, 21-36.
- Kodur, V. K. R. (2007). "Guidelines for fire resistant design of concrete-filled steel HSS columns-state-of-the-art and research needs." *Steel Structures*, 7, 173-182.
- Lie, T. T. and Chabot, M. (1992). "Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with plain concrete." Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Internal Report No. 611.
- Lie, T. T. and Irwin, R. J. (1995). "Fire resistance of rectangular steel columns filled with bar-reinforced concrete." *Journal of Structural Engineering*, 121(5), 797-805.
- Lu, H., Zhao, X.-L., Han, L.-H. (2009). "Fire behaviour of high strength self-consolidating concrete filled steel tubular stub columns." *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 1995-2010.
- Park, S. H., Chung, K. S. and Choi, S. M. (2007). "A study on failure prediction and design equation of concrete filled square steel tube columns under fire condition." *Steel Structures*, 7, 183-191.
- UL 263 (2003). "Fire Tests of building construction and materials." Underwriters

Laboratories Inc.

內政部營建署(2011)，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計與解說」。

內政部營建署(2012)，「最新建築技術規則」，詹氏書局。

中華民國國家標準 CNS 12514 (2010)，「建築物構造部分耐火試驗法」，經濟部標準檢驗局。

莊有清(2004)，「鋼材在高溫環境下之行為探討」，國立成功大學土木工程學系碩士論文，邱耀正指導。

陳誠直、趙文成、林政億及吳易宸(2010)，「含混凝土箱型鋼柱火害下軸向受力行為之研究」，內政部建築研究所委託研究報告。

陳誠直、林家毅、黃政勳和林政億(2011)，「鋼骨鋼筋混凝土高溫材料性質之研究」，內政部建築研究所委託研究報告。

陳誠直、林政億、柯宗滕和胡耀光(2012)，「包覆填充式箱型鋼管混凝土柱火害行為研究」，內政部建築研究所委託研究報告。

楊國珍、林南交、楊方傑、王星堯、許書豪與許瓊芳(2011)，「銲接型式對高溫下軸向受力鋼柱對破壞模式之影響」，內政部建築研究所委託研究報告。

何明錦、湯兆緯、涂耀賢、洪志評與劉得弘(2012)，「銲接工法對鋼骨鋼筋混凝土柱火害行為之研究」，內政部建築研究所研究報告。

箱型鋼管混凝土柱之防火性能驗證技術研究

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3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：陳誠直

出版年月：102年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-03-9449-8 (平裝)

ISBN : 978-986-03-9449-8