

## 內填充鋼筋混凝土箱型鋼柱高溫加載試驗研究

### Study the Tests of Loaded Reinforced Concrete-filled Box Columns Exposed to Fire

王天志<sup>1</sup> 陳誠直<sup>2</sup> 李其忠<sup>3</sup> 何明錦<sup>4</sup> 蔡銘儒<sup>5</sup>

<sup>1</sup>內政部建築研究所約聘研究員 E-mail:tcwang@abri.gov.tw , 06-2392755#1101

<sup>2</sup>國立交通大學土木工程學系教授

<sup>3</sup>內政部建築研究所副研究員

<sup>4</sup>內政部建築研究所所長

<sup>5</sup>內政部建築研究所研究員

#### 摘要

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。我國目前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。由文獻資料顯示，無噴塗防火被覆之承重箱型鋼管混凝土柱防火時效未能滿足 1 小時之要求。為使無噴塗防火被覆填充型合成柱構件具 1 小時以上之防火時效，依照 Eurocode 4 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。探討箱型鋼柱內有無配置縱向主筋對其高溫載重行為之影響。試驗時柱加載設計載重的 30%，依據 CNS 12514 進行耐火試驗，實驗結果發現內灌純混凝土鋼柱於加熱時間 42 分即破壞，未能符合 1 小時防火時效，而有配置縱向主筋的鋼柱可延長至 61 分鐘才破壞，較無縱向主筋的鋼柱大幅提升約 45% 的防火時效。

關鍵字：鋼筋混凝土，箱型鋼柱，高溫

#### Abstract

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. In this study, experiment was conducted to investigate the effect of the existence of reinforcement on the fire resistance of the concrete filled box columns (CFBCs).

Some research results from literatures showed the fire resistance of the CFBC, filled concrete, was less than 1 hour. In this study, the axial load was applied 30% of the design load, the test results showed that the fire resistance of specimen without reinforcement only reached 42 minutes; the fire resistance of specimen with reinforcement can reached 61 minutes. It is substantially increase the fire resistance about 45%.

The CFBC specimens with reinforcement had 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.

Keywords: Reinforced concrete, Box column, high temperature

## 一、前言

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) [1]與美國 AISC (2010) [2]等規範；耐火試驗方法，如 ISO 834[3]、BS 476[4]、ASTM E119[5]及 UL 263[6]等規定。然而，國內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 [7]與 Espinos et al. [8])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 [9-10])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。故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，再以實驗方法探討有、無配置縱向主筋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。

## 二、試驗計畫

### 2.1 試體規劃設計

由相關研究成果得知，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，由陳誠直等人 2010 及 2012 [9-10]、何明錦等人 2012[11]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。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，試體規劃如表 2-1 所示，另外製作箱型鋼柱內無設置鋼筋之對照組試體。

試體箱型鋼柱內分別為填充純混凝土及鋼筋混凝土，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」[12]及歐洲規範(Eurocode)規範等。箱型鋼柱乃由 4 片厚 19 mmx長 3060 之鋼板以全滲透開槽銲接組合，如圖 2-1 所示。箱型鋼柱板之鋼骨材料採 A572 Grade 50 等級，降伏強度為 3.98 tf/cm<sup>2</sup>，抗拉強度為 5.36 tf/cm<sup>2</sup>。內灌混凝土 28 天之標準圓柱試體抗壓

強度約為  $528 \text{ kgf/cm}^2$ ，混凝土配比於表 2-2 所示。對於有配置縱向主筋試體 B6Ra-.3，試體主筋 (8 根 9 號竹節鋼筋)，鋼筋比為 1.6%，降伏強度為  $5120 \text{ kgf/cm}^2$ ；箍筋採 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 2-2、2-3 所示。

表 2-1 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
B6N-.3	□600×600×19	—	—	0.3
B6Ra-.3	□600×600×19	8-#9	#3@350	0.3
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)

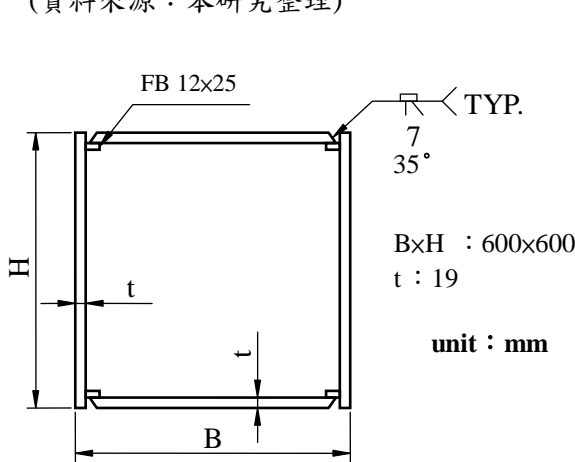


圖 2-1 箱型鋼柱斷面設計圖  
(資料來源：本研究整理)

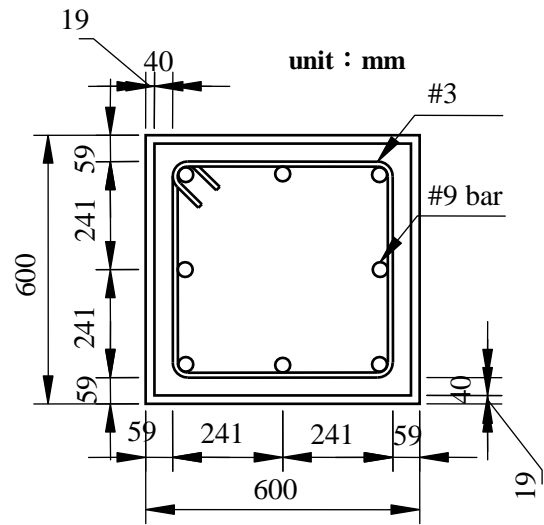
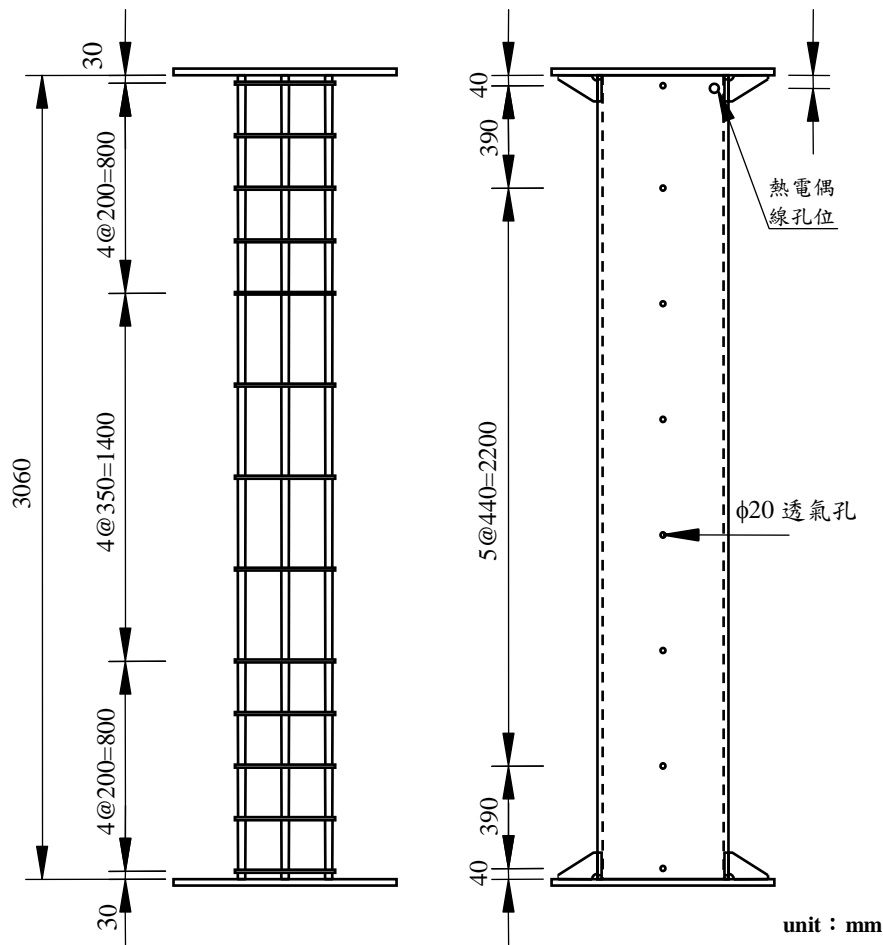


圖 2-2 填充型箱型鋼柱斷面主筋配置示意圖  
(資料來源：本研究整理)

表 2-2 試體內灌混凝土之配比

每 1 m <sup>3</sup> 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)



圖

2-3 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)

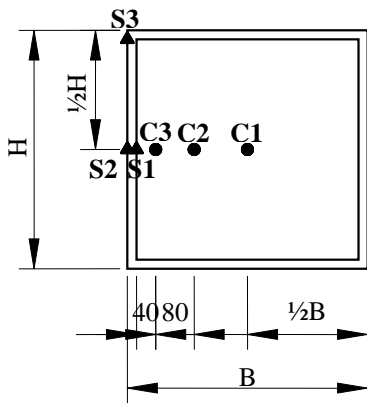
## 2.2 熱電偶測點分佈

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[13]規定與相關文獻建議，規劃試體溫度測點位置與數量，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。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 120 mm 及中心處設置 2 個測點；無配置縱向主筋試體之混凝土測點則設置 3 個測點。詳細試體溫度測點分佈，如圖 2-4 所示。

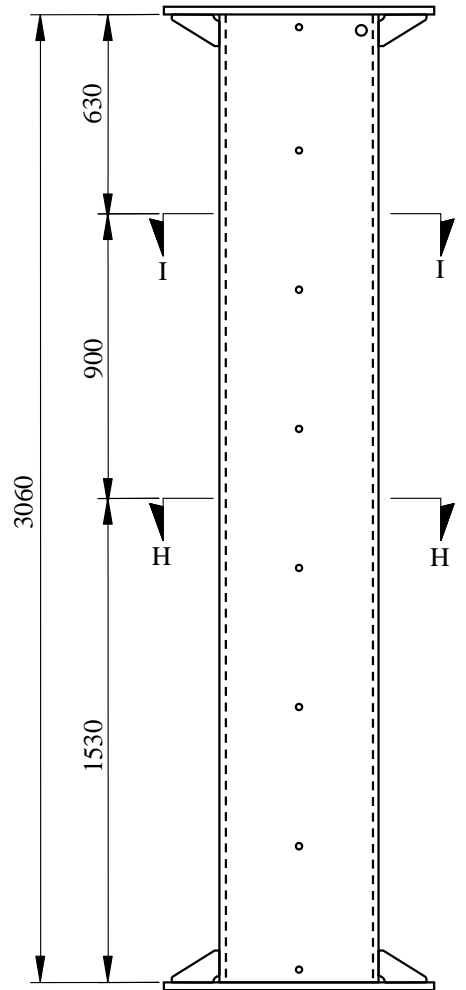
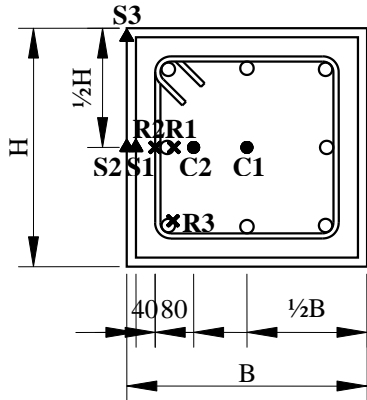
## 2.3 實驗步驟

實驗依 CNS 12514 規定進行，試體載重須於加熱試驗開始前 15 分鐘加載，加熱試驗過程中維持固定載重，加載之載重依據「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」計算。試驗過程紀錄試體的溫度和變形；試驗結束後，觀察試體之變形模式。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；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。

(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 2-4 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)

### 三、結果與討論

實驗時各試體施加之軸向載重及混凝土抗壓強度，如表 3-1 所示。

表 3-1 試體標稱強度與施加载重

試體編號	$f'_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	主筋	箍筋	試體標稱強度(tf)	施加载重(tf)
B6N-.3	564.3	—	—	3001.5	901
B6Ra-.3	602.9	8-#9	#3	3292.1	988

(資料來源：本研究整理)

#### 3.1 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，實驗結果如下所述。

##### 3.1.1 箱型鋼柱內填充純混凝土試體 B6N-.3

試驗開始後，隨著爐溫上升，試體之變形也開始膨脹伸長，爐內平均升溫曲線如圖 3-1 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試驗載重。試體加熱 38 分鐘後，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 3-2 所示；試體鋼骨溫度與時間關係，如圖 3-3 所示。試體總計進行定載加溫試驗約 43 分鐘，其於加溫 42 分鐘時達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。

試體火害後之變形情況，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 3-4 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，試體於火害後並無發現柱板間之銲道開裂情形。

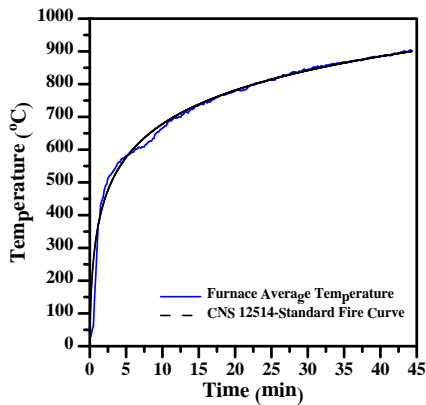


圖3-1 試體B6N-.3爐內升溫曲線  
(資料來源：本研究整理)

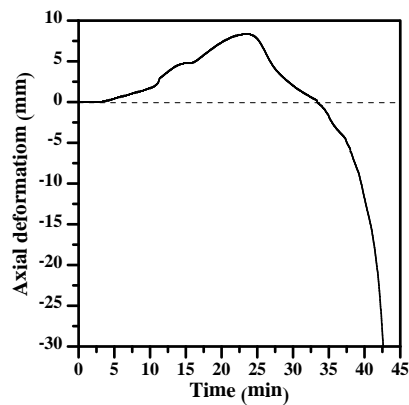
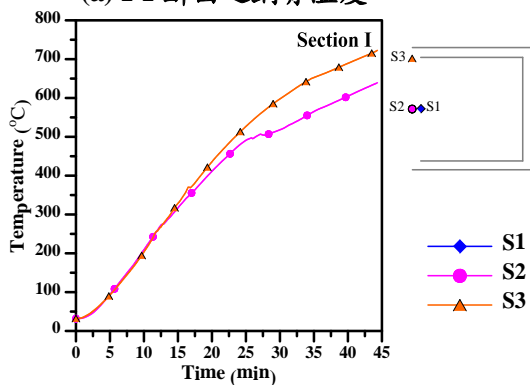
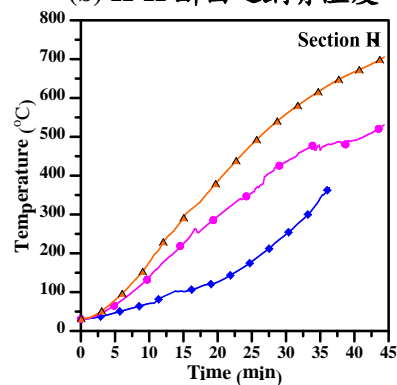


圖3-2 試體B6N-.3定載加溫階段之軸向變形-時間關係 (資料來源：本研究整理)



(a) I-I 斷面之鋼骨溫度



(b) H-H 斷面之鋼骨溫度

圖 3-3 試體 B6N-.3 之鋼骨測點溫度-時間關係(資料來源：本研究整理)



圖 3-4 試體 B6N-3 耐火試驗後之外觀及局部挫屈(資料來源：本研究整理)

### 3.1.2 箱型鋼柱內填充鋼筋混凝土試體 B6Ra-.3

試驗初期試體箱型鋼骨受熱產生膨脹伸長變形行為，試體在達最大伸長 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 3-5 所示。當箱型鋼骨表面平均溫度超過 400°C (各測點溫度如圖 3-6 至圖 3-8 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，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。

試體達破壞準則之耐火性能合格時間為 61 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 3-9 所示。

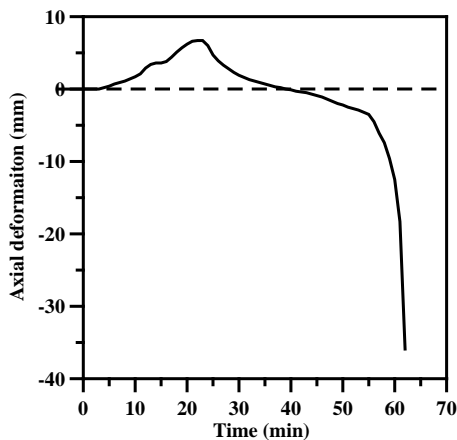


圖 3-5 試體 B6Ra-3 定載加溫階段之軸向變形-時間關係 (資料來源：本研究整理)

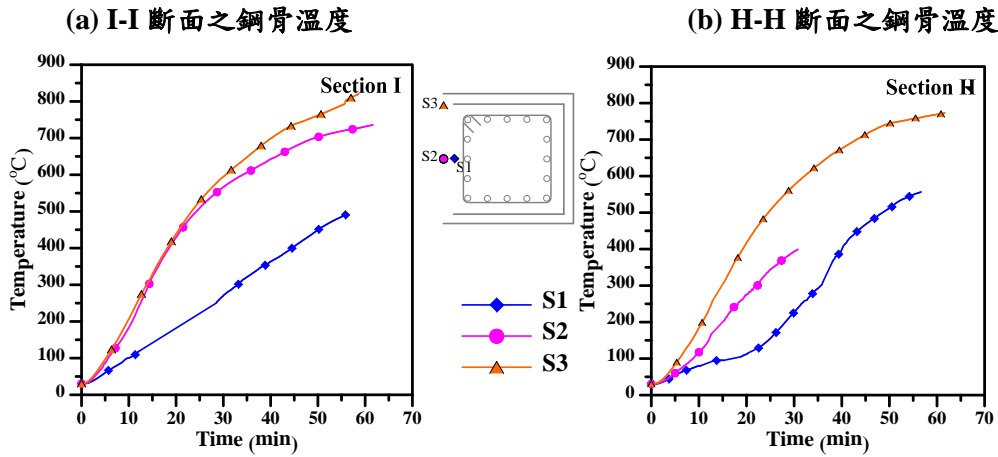


圖 3-6 試體 B6Ra-.3 之鋼骨測點溫度-時間關係(資料來源：本研究整理)

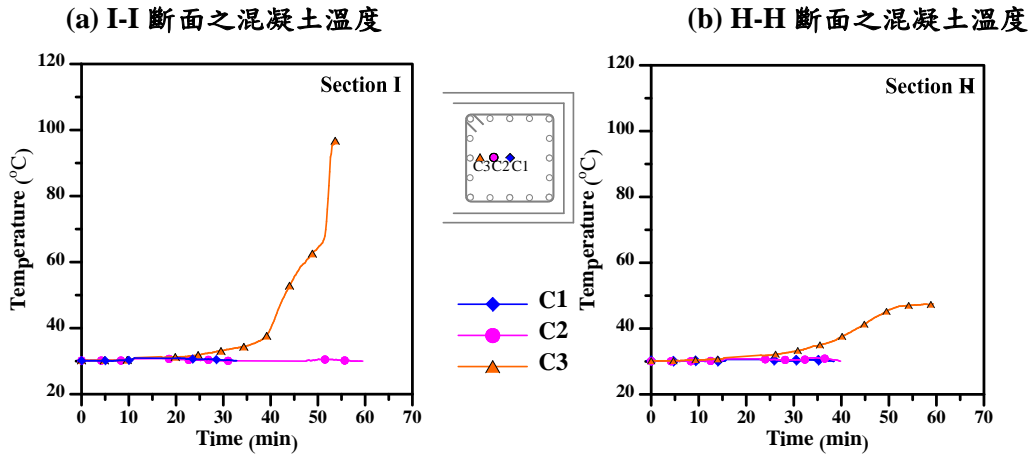


圖 3-7 試體 B6Ra-.3 之混凝土測點溫度-時間關係(資料來源：本研究整理)

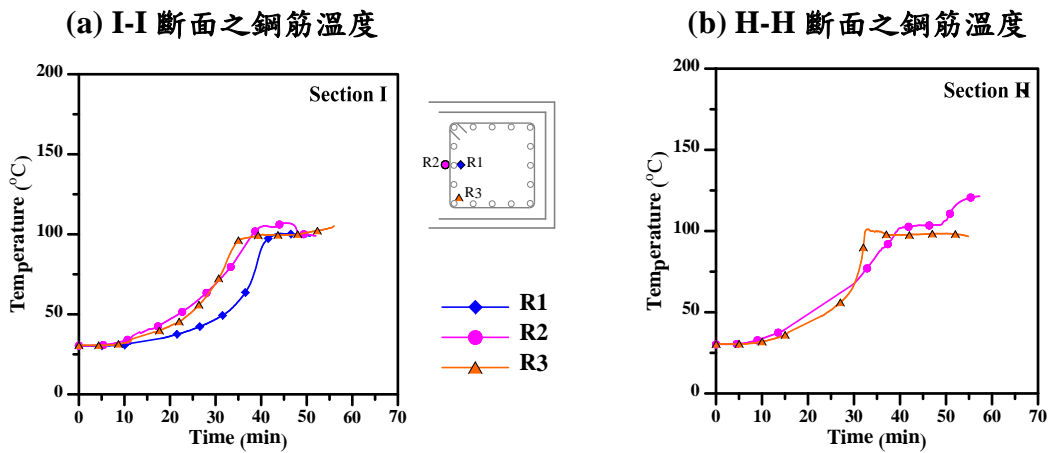


圖 3-8 試體 B6Ra-.3 之鋼筋測點溫度-時間關係(資料來源：本研究整理)





圖 3-9 試體 B6Ra-3 耐火試驗後之外觀及局部挫屈(資料來源：本研究整理)

### 3.2 結果討論

試體 B6N-.3 (內灌混凝土) 與 B6Ra-.3 (內填充鋼筋混凝土) 為相同斷面大小且皆施加 0.3 倍試體標稱強度之載重，其軸向位移曲線與時間關係圖，如圖 3-10 所示。

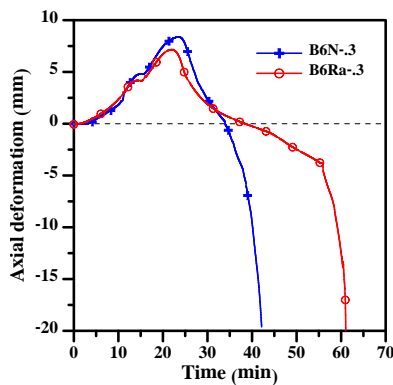


圖 3-10 試體有無配筋之軸向變形與時間關係圖(資料來源：本研究整理)

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。兩支試體達破壞判定皆為超過最大壓縮速率 9.18 mm/min，最終之破壞模式皆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。

#### 四、結論

本研究探討有無配置縱向主筋填充型箱型鋼柱於定載加溫下之行為與耐火性能，研究成果總結如下。

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，其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，使其承載能力較內灌純混凝土試體佳。

依照 Eurocode 規範設計之試體實驗結果顯示，內灌純混凝土箱型鋼柱防火時效未達 1 小時。但含鋼筋混凝土箱型鋼柱試體，在承受之載重不超過 0.3 倍標稱強度時，可達 1 小時防火時效。

#### 參考文獻

1. Eurocode 4. "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 (2005).
2. AISC "Specification for Structural Steel Buildings." ANSI/AISC 360-10, American Institute of Steel Construction, Chicago (2010).
3. ISO. "Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements." International Standard ISO 834, Geneva (1999).
4. BS 476 "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 (1987).
5. ASTM E119 "Standard test methods for fire tests of building construction and materials." American Society for Testing and Materials (2000).
6. UL 263 "Fire Tests of building construction and materials." Underwriters Laboratories Inc. (2003).
7. Kodur, V. K. R. "Performance of high strength concrete-filled steel columns exposed to fire." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.25, pp.975-981 (1998).
8. Espinos, A., Romero, M. L. and Hospitaler, A. "Advanced model for predicting the fire response of concrete filled tubular columns." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.66, pp.1030-1046 (2010).
9. 陳誠直、趙文成、林政億及吳易宸，「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(2010)。
10. 陳誠直、林政億、柯宗勝和胡耀光，「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(2012)。
11. 何明錦、湯兆緯、涂耀賢、洪志評與劉得弘，「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(2012)。
12. 內政部營建署，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計與解說」(2011)。
13. 中華民國國家標準 CNS 12514，「建築物構造部分耐火試驗法」，經濟部標準檢驗局(2010)。