

主講人簡歷

姓 名：王天志

服務單位：內政部建築研究所 安全防災組 防火實驗中心

職 稱：約聘研究員

聯絡電話：06-2392755#1101

傳 真：06-2392701

電子信箱：tcwang@abri.gov.tw

學 歷：國立交通大學土木系博士

經 歷：內政部建築研究所 約聘研究員

主要著作：

1. Fu-Ping Cheng, V.K.R. Kodur, Tien-Chih Wang, “Stress-Strain Curves for High Strength Concrete at Elevated Temperatures”, Journal of Material in Civil Engineering, ASCE, Feb. 2004.
2. V. K. R. Kodur , T. C. Wang and F. P. Cheng, “Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns”, Cement and Concrete Composites , Volume 26, Issue 2 , Feb. 2004.
3. 王天志，李其忠，陳誠直，何明錦，蔡銘儒(2014)，「內填充鋼筋混凝土箱型鋼柱高溫加載試驗研究」，中華民國第十二屆結構工程研討會暨第二屆地震工程研討會。
4. 王天志(2013)，「自充填混凝土高溫熱學性質之研究」，內政部建築研究所自行研究報告。
5. 李其忠、方一匡、王天志、陳建忠、蔡銘儒（2012），「鋼筋混凝土梁—邊柱接頭在高溫中後之行為研究」，中國土木工程學刊第二十四卷第一期。
6. 何明錦、王天志、謝煒東（2010），「細水霧設備應用於建築物室內停車空間火災防護可行性研究」，中華民國建築學會建築學報74 期增刊(技術專刊)。
7. 王天志、何明錦、陳建忠、蔡銘儒、何永貴（2007），「乾式變壓器燃燒試驗法之建置」，電機月刊第17卷第4期。

含剪力釘箱型鋼管混凝土柱火害後性質研究

王天志¹

關鍵字：鋼管混凝土柱、剪力釘、火害後性質

填充混凝土箱型鋼柱（concrete-filled box column，簡稱CFBC）外部柱板既可作為模板，又可提供混凝土圍束，改善其塑性和韌性；混凝土則提供柱板之側向支撐，提升構材之強度與韌性，故相當具有經濟上及環保上的優勢，適合在國內研發、推廣的構材型式。

CFBC 於火災環境下，鋼材具高熱傳導性，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，吸收鋼板的溫度，減緩其溫度上昇；而高溫冷卻後，鋼板的力學性質及內部混凝土高溫後的強度變化，另外鋼板殘餘變形是否仍能提供內部混凝土圍束效應以及整體結構高溫後之殘餘承載力，實關係高溫後構件是否仍能繼續使用或需補強？因此，CFBC 火害後之性質有必要加以研究了解。

國內的建築結構在設計時，構件尺寸多由地震力控制，故設計出的構件尺寸也較大，使柱所受之載重比因而較低。由本所近期研究成果（陳誠直，2013）顯示，低載重比的填充式箱型鋼管混凝土柱的耐火時效可大幅提升，但此低載重比的研究案例仍偏低，故本研究一方面將驗證該研究成果在低載重比之預測值。

研究結果顯示箱型鋼管混凝土柱於高溫下之耐火時效不如規劃之預期，顯示所參考之文獻耐火時效公式之適用性，值得進一步探討修正，以提升該公式之準確性，同時需深入研究火害後的相關性質行為。

¹內政部建築研究所安全防災組防火實驗中心 約聘研究員

Keywords : concrete-filled column, shear stud, character of specimen after fire

In recent years, concrete filled steel box columns (CFBC) are usually used in engineering practice. When filled composite columns are subjected to axial compression at elevated temperatures, different material properties will cause discrepancy in strength degradation and thermal expansion of the materials. Even the column doesn't collapse during fire, the residual strength is a main concern performance. To evaluate the member needed to repair or replace? This work investigates effects with/without shear stud on the character of CFBC after fire.

This study explored the research results from literatures and, accordingly, designed two CFBC specimens. Experiment was conducted to investigate the behavior of the CFBC specimens, with or without shear stud on the behavior after fire. Additionally, the test results also can re-exam the suitability of the reference design equation for the low-ratio loading cases.

The test results showed that the existence of shear stud doesn't has evidence effect on the fire resistance. After high temperature, the tensile strength of steel plate decrease about 10.2 % compare to room temperature, it probably decrease the residual strength of column. But the residual compressive strength of concrete doesn't show any decrease. These two specimens were failue during the 1 hr heating test, it shows the shorter fire resistance compare with the design.

壹、緒 論

一、研究動機與目的

填充混凝土箱型鋼柱 (concrete-filled box column, 簡稱 CFBC) 柱板既可作為模板之功能, 降低營建材料使用量, 又可提供混凝土圍束, 改善其塑性和韌性; 混凝土則提供箱型鋼柱柱板之側向支撐, 避免或延緩鋼板發生局部挫屈, 提升構材之強度與韌性, 故相當具有經濟上及環保上的優勢, 適合在國內研發、推廣的構材型式。

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, 吸收鋼板的溫度, 減緩其溫度上昇, 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; 而高溫自然冷卻後, 鋼板的力學性質能相當程度的恢復, 而內部混凝土則依受火害時間長短, 影響其高溫後的強度變化, 另外在高溫後, 鋼板殘餘變形是否仍能提供內部混凝土圍束效應, 以及整體結構高溫後之殘餘承载力, 實關係高溫後構件是否仍能提供支撐載重的能力, 又或者構件該如何補強? 因此, CFBC 火害後之性質有必要加以研究了解。

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 (1999)、BS 476 (1987)、ASTM E119 (2000) 及 UL 263 (2003) 等規定構件進行耐火試驗。而國內亦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 (2010)、建築技術規則 (2012)、建築物構造防火性能驗證手冊 (2005) 等, 近幾年來相關研究成果及研究報告也陸續有學者發表。但在此類型構件逐漸能經由適當的設計, 於火災高溫下持續承擔荷重而不造成倒塌, 則後續所要面對的就是其殘餘強度的性能如何? 此部分的研究仍甚為缺乏, 故本研究將參考文獻, 依所建議的 CFBC 耐火設計,

驗證該研究成果在低載重比之預測值，另一方面探討剪力釘對火害後鋼板之圍束效應的影響等。



貳、研究內容

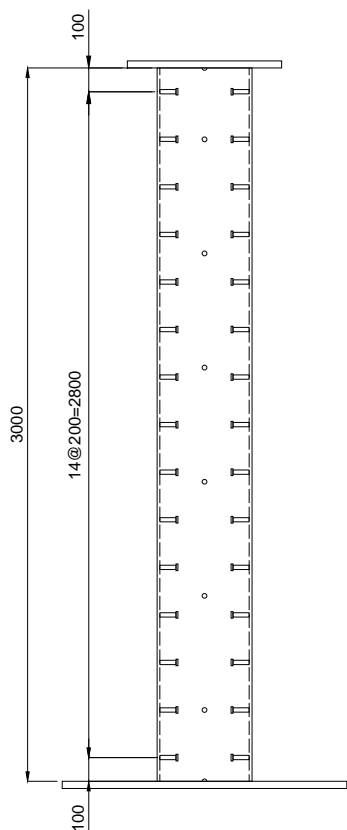
研究進行蒐集和彙整國內外相關設計規範與文獻，瞭解影響填充型鋼管混凝土柱構件火害後性能之參數，參考鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範進行設計與製作，試體分有、無配置剪力釘為主要研究參數。再以實驗方法探討填充型箱型鋼柱在火害高溫過程之斷面溫度分佈、軸向變形，俟其冷卻後，進行鋼板拆除，觀察混凝土完整性及鋼板與混凝土之間圍束情形，同時進行混凝土鑽心及鋼板抗拉強度試驗試片之擷取，探討其火害後的殘餘強度等性質。

試體參照本所 102 年度委託研究計畫成果，規畫在低載重比、無防火被覆、無添加鋼筋下，能達到 1 小時防火時效之箱型鋼管混凝土柱試體，各分為有、無含剪力釘形式。加熱試驗時施加 0.28 設計載重，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加熱 1 小時或至試體破壞，然後俟其冷卻後予以進行各項性質觀察及實驗，試體編號如表 1 所示。

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」。試體鋼骨部分採用 SN 490B 規格鋼材，其降伏強度為 406 N/mm^2 ，抗拉強度為 553.5 N/mm^2 ，伸長率為 22.25%，箱型鋼柱乃由 4 片厚 12 mm×長 3000 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。鋼柱內均為填充高流動性純混凝土。柱試體尺寸、斷面圖、試體製作及熱電偶位置圖分別如圖 1~圖 4 所示。內灌混凝土採高流動性混凝土，設計坍流度為 65~75 cm，粗粒料標稱最大粒徑為 19 mm，水膠比為 0.35，28 天之標準圓柱試體抗壓強度約為 434 kgf/cm^2 ，試驗前抗壓強度則為 503 kg/cm^2 。

表 1 試體規劃

	試體編號	斷面尺寸 B×H×t (mm)	施加载重比
	SRC	400×400×12	0.28
	SSRC		0.28
備註：柱常溫承载力由 SRC 設計規範計算(資料來源：本研究整理)			



單位：mm

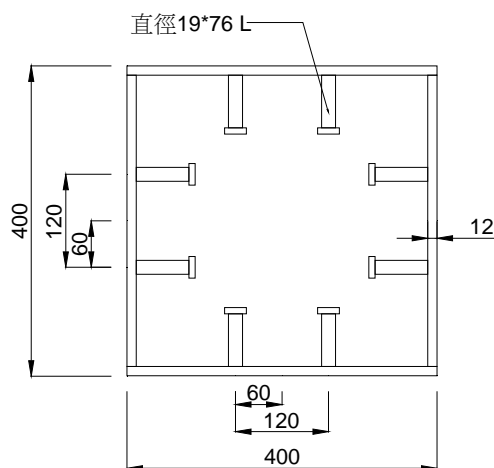


圖 1 柱試體尺寸(資料來源：本研究整理)

圖 2 試體斷面圖(資料來源：本研究整理)

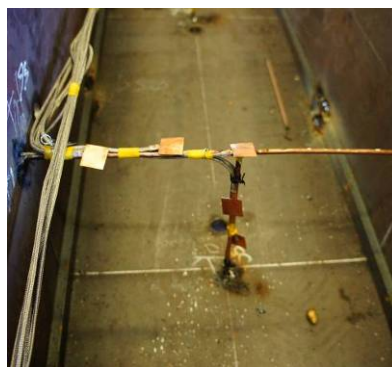


圖 3 剪力釘及熱電偶 (資料來源：本研究拍攝)

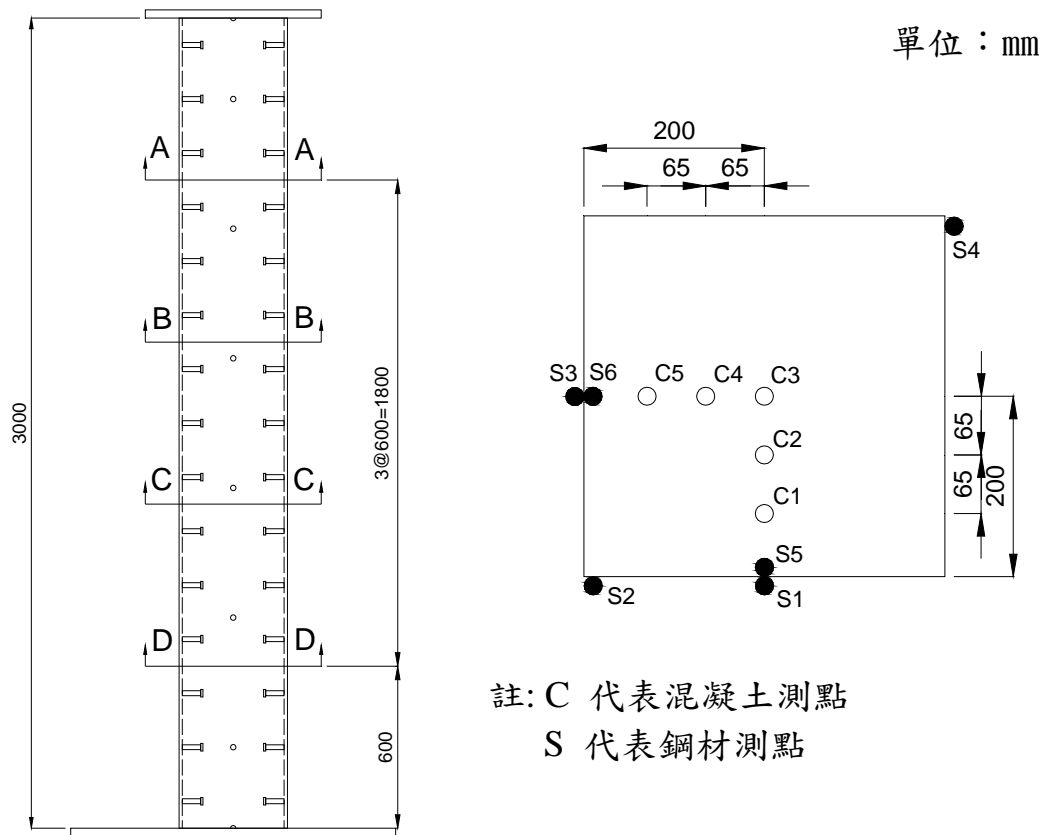


圖 4 填充型箱型鋼柱試體之溫度測點分佈(資料來源：本研究整理)

參、研究發現

依據試驗前混凝土抗壓強度 503 kg/cm^2 ，計算得鋼柱設計受壓強度為 1017 噸，取 0.28 倍鋼柱設計受壓強度得試驗載重為 285 噸，此載重於加熱試驗過程前 15 分鐘完成加載，並在加熱試驗過程中保持荷重不變，加熱試驗後兩支試體外觀則如圖 5 所示。試驗結果兩支試體分別於加熱過程 56 分鐘(SRC)及 50 分鐘(SSRC)時破壞，未能達到原先設定之 1 小時加熱。相關試驗量測數據討論如後。

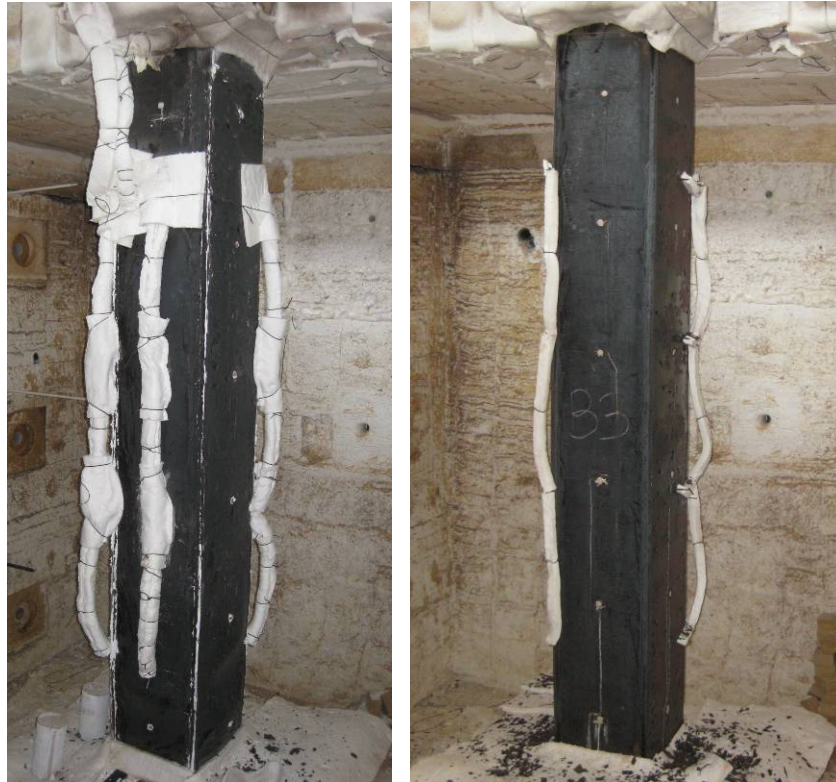


圖 5 試體加熱後情形 (左:SRC; 右:SSRC) (資料來源：本研究拍攝)

加熱試驗過程斷面各測點溫度隨時間變化歷程，如圖 6 及圖 7 所示。SRC 試體溫度歷程在試驗時間約 18~28 分鐘間，有異常上升現象，對比爐內加熱溫度並未有此現象，推測可能原因為測溫信號受到干擾所致。SRC 試體鋼板溫度分布有較大發散，但整體來看，鋼板溫度隨爐內加熱開始上升，在 100 °C 附近並未見其他研究常有之溫度平台，且試驗過程均未有異常聲響出現，推測試體內部水氣移動及蒸發有較順暢的通道，降低混凝土爆裂的現象發生。鋼板溫度隨爐溫持續上升，至試體破壞時鋼板最高溫度約在 750~800 °C 之間，此時爐溫約 900 °C。試體內部混凝土溫度則約在 16 分鐘後才開始緩慢上升，混凝土的溫升反應就有明顯的溫度平台出現，溫度上升至 100 °C 之後幾乎保持不變，代表內部水氣至試驗結束仍未完成移動或完全蒸發。SSRC 溫度歷程與 SRC 試體相似，試體上下兩斷面溫度稍微偏低，可能受邊界加熱及本身導熱影響，

中間斷面溫度在試驗結束時約在 800~850 °C。整體來看，SSRC 試體鋼板溫度比 SRC 試體略高一些，但兩者在試驗結束時之溫度，皆代表鋼板強度已降低至無法提供承載之能力，載重幾乎都移轉至混凝土承受。另外在混凝土溫度兩者最高溫幾乎都只有 100 °C 左右，依照多數文獻混凝土在 100 °C 高溫後強度幾乎不變，甚至有提高現象，但對照試體未能達 1 小時加熱時間，柱構件承載計算仍值得進一步探討研究。

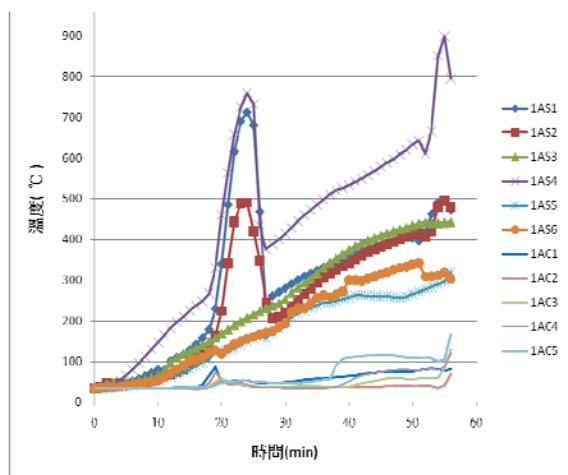


圖 6 SRC 試體斷面溫度時間曲線圖

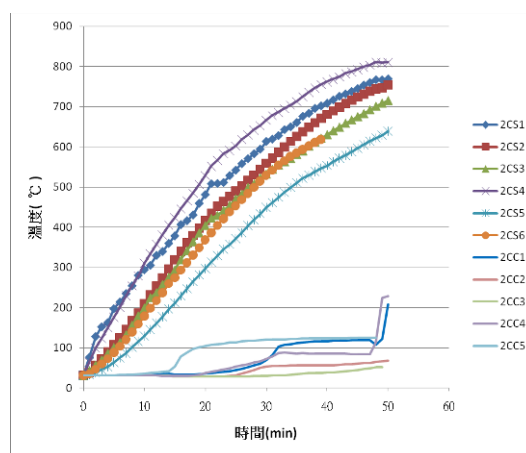


圖 7 SSRC 試體斷面溫度時間曲線圖

(資料來源：本研究整理)

加熱試驗過程試體軸向變形如圖 8 所示。試驗開始爐內溫度依標準曲線加熱，試體軸向變形約 2 分鐘後開始有明顯隨溫度上升而產生膨脹變形，初期 10 分鐘兩試體軸向變形幾乎一致，SRC 試體至加溫 24 分鐘達最大膨脹變形為 12.55 mm，此時平均爐溫為 796 °C，鋼板溫度約 600 °C；SSRC 試體則於加溫 27 分鐘達最大膨脹變形為 12.02 mm，此時平均爐溫約為 820 °C，鋼板溫度則約 600~650 °C。過最大膨脹伸長量後試體直接轉為壓縮，但在此壓縮階段兩試體之行為反應有很大不同，SRC 試體較快速反向壓縮至原長度，之後則緩慢壓縮，其壓縮速率保持穩定，直至 56 分鐘試體徒然破壞；而 SSRC 試體過最大壓縮量後則呈現稍微緩慢壓縮，壓縮至原長度後速率則開始加速，直至 50 分鐘試體破壞。

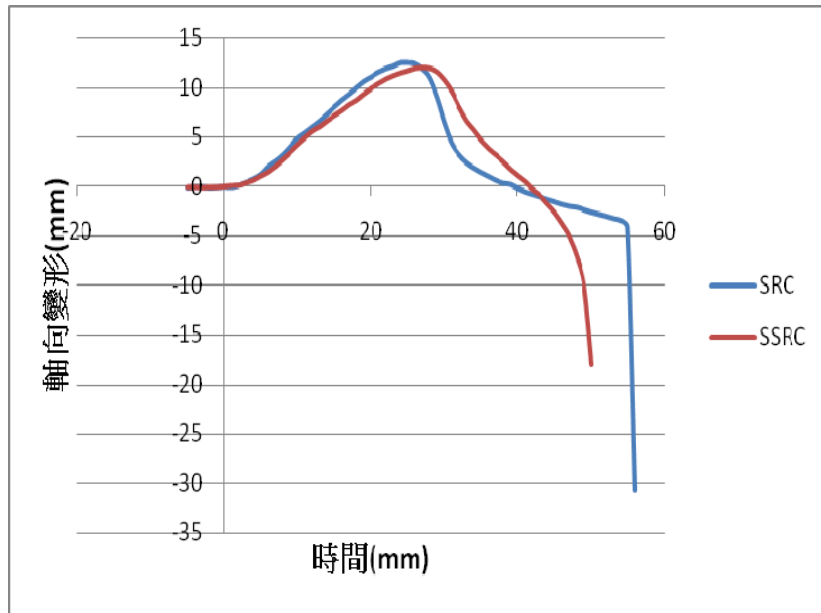


圖 8 SRC 及 SSRC 試體軸向變形-時間曲線圖

(資料來源：本研究整理)

因為兩支試體皆於 1 小時加熱過程內破壞，未能達到原訂的耐火時效，無法進行火害後殘餘強度試驗，因此對於加熱冷卻後試體鋼板裁切及混凝土鑽心取樣，以盡可能多了解相關影響因素。試驗後試體內部情形如圖 9 所示。



圖 9 試體試驗後內部混凝土情形 (資料來源：本研究拍攝)

由加熱曲線可知試驗最高爐溫約為 900°C ，而兩次試驗各斷面鋼板溫度則約介於 $750\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，試驗後於柱試體中段擷取鋼板後製作抗拉試片(圖 10)，試驗結果其降伏強度為 326.6 N/mm^2 ，抗拉強度為 497.2 N/mm^2 ，

伸長率為 25.3 %，試驗後抗拉試片如圖 11 所示。加熱後鋼板力學性質雖仍符合 CNS 13812 裡有關 SN 490B 數值之範圍，但鋼板降伏強度與常溫值相較有明顯的下降約 19.6 %，而抗壓強度則約下降 10.2 %，伸長率則約增加 13.6 %。由抗拉試驗結果可發現，SN 490B 鋼材在受高溫後，其力學性質無法恢復常溫的強度性質，勢必會降低 CFBC 鋼柱火害後之軸向抗壓強度。



圖 10 試驗後鋼板取樣
(資料來源：本研究拍攝)



圖 11 鋼板試驗後情形

另外由兩次試驗各斷面內部混凝土溫度則僅約為 100 °C，試驗後同樣於柱試體中段鑽心（如圖 12 所示）製作混凝土抗壓試體。加熱試驗後混凝土抗壓強度平均約為 484 kg/cm²，約為試驗前強度的 96%。



圖 12 混凝土鑽心取樣 (資料來源：本研究拍攝)

兩支試體加熱試驗後 4 個面向外觀如圖 13 及 14 所示。觀察試體軸向有極輕微彎曲變形，破壞主要仍由壓縮變形造成。試體表面鋼板有局

部挫屈突起，藉由突起處透氣孔觀察，可發現該處混凝土有壓碎情形。而剪力釘對試體鋼板之挫屈突起有些微抑制效果。

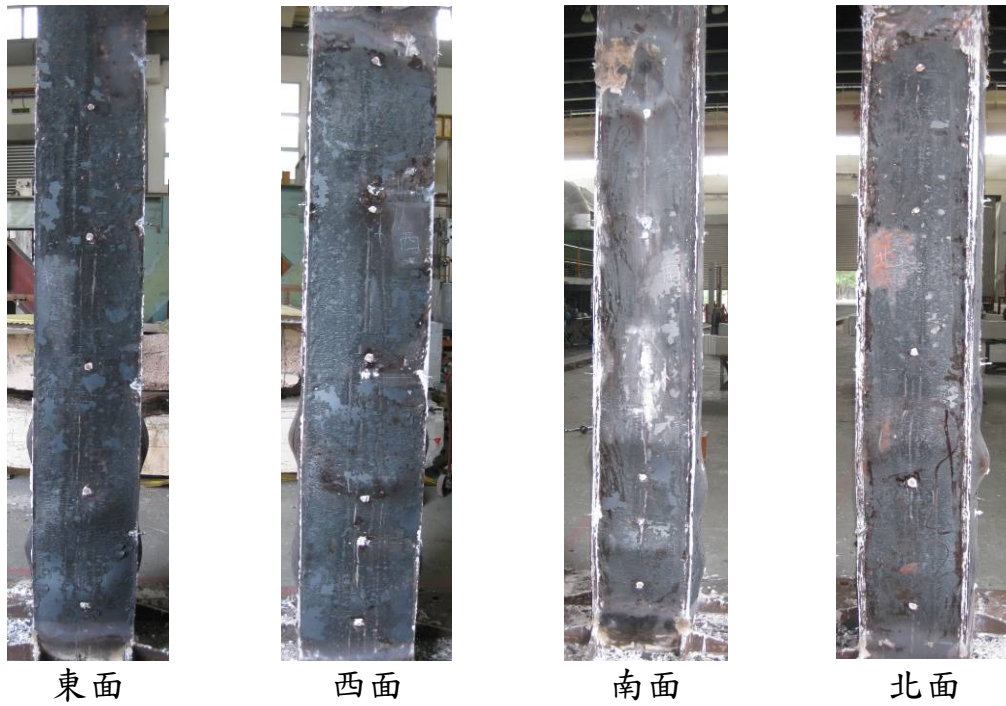


圖 13 SRC 試體試驗後外觀（資料來源：本研究拍攝）

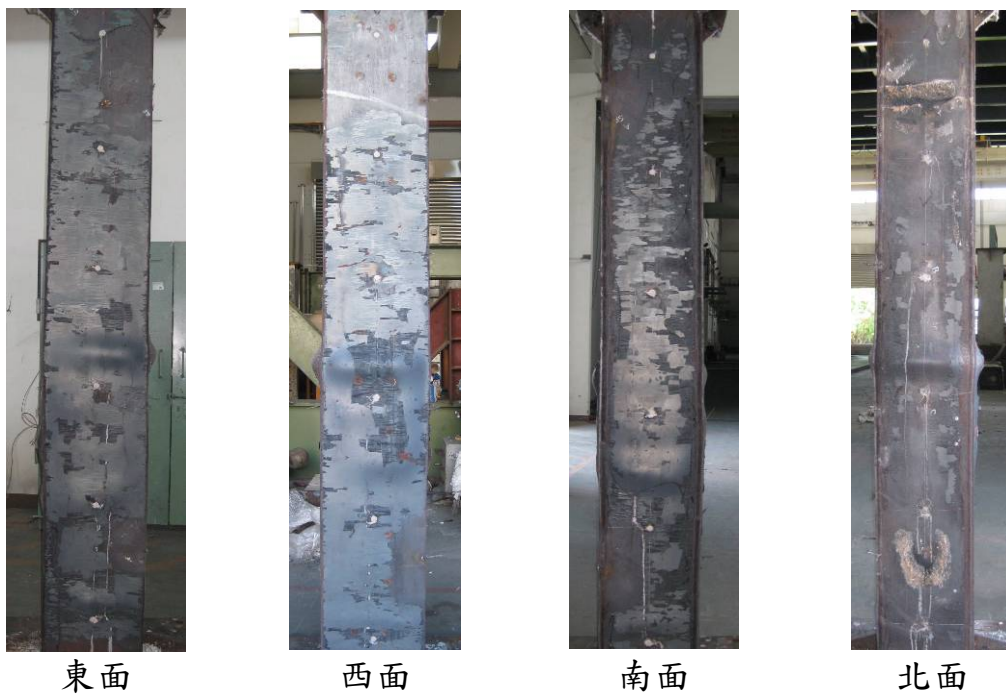


圖 14 SSRC 試體試驗後外觀（資料來源：本研究拍攝）

肆、結 論

1. 本次研究的兩支試體原規畫在施加0.28倍設計載重下能承受1小時加熱，但試驗結果分別在50分及56分鐘即破壞，其可能原因約可歸納出以下兩點：(1) 混凝土抗壓強度的高估，在柱試體強度計算時，混凝土抗壓強度係由與柱試體製作時同時澆灌的抗壓試體，此試體則置於水中養護1個月後再改置於空氣中直至試驗進行，所以此試體之強度發展可能會高於箱型鋼管柱內混凝土之強度，造成在計算柱試體強度時高估了混凝土所能提供的承載。；(2) 試體規劃設計所參考的試體耐火時效計算公式文獻資料，其係多由內含鋼筋的箱型鋼柱試驗資料所推導而出，雖然該公式適用範圍未排除箱型鋼柱內灌純混凝土之適用，但本研究結果顯示該公式對於內灌純混凝土之耐火時效估算，值得進一步探討其適用性。
2. 依據文獻（陳誠直，2012）顯示，含剪力釘箱型鋼管混凝土柱高強度混凝土，相較無剪力釘試體可略增加耐火時效，但本研究顯示相反結果，且從相關溫度分布、火害後材料強度試驗分析，發現有無剪力釘對箱型鋼管混凝土柱的耐火時效之影響不明顯。
3. 加熱冷卻後鋼板力學性質雖仍符合CNS 13812裡有關SN 490B數值之範圍，但鋼板降伏強度與常溫值相較有明顯的下降約19.6%，而抗壓強度則約下降10.2%，伸長率則約增加13.6%。由結果可發現SN 490B鋼材在受高溫後，其力學性質無法恢復常溫的強度性質，勢必會降低CFBC鋼柱火害後之軸向抗壓強度。
4. 內部混凝土加熱冷卻後（所受溫度僅約100℃），試驗後混凝土（鑽心取自試體內部）抗壓強度試驗結果約為試驗前強度的96%，未有明顯下降，但此係與有養護的圓柱試體抗壓值進行比較，因此若與試體內部試驗前強度相較，其比值有可能未見下降或略微上升。意即混凝土強度在此加熱時間內，火害後其強度應無明顯下降而導致柱試體之破壞。

伍、參考文獻

1. 陳誠直、林政億、謝哲民和王信賢(2013)，「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。
2. 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.
3. AISC (2010). “Specification for Structural Steel Buildings.” ANSI/AISC 360-10, American Institute of Steel Construction, Chicago.
4. ISO. (1999). “Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements.” International Standard ISO 834, Geneva.
5. 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.
6. 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.
7. ASTM E119 (2000). “Standard test methods for fire tests of building construction and materials.” American Society for Testing and Materials.
8. UL 263 (2003). “Fire Tests of building construction and materials.” Underwriters Laboratories Inc.
9. 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。
10. 內政部營建署(2012)，「最新建築技術規則」，詹氏書局。
11. 內政部建築研究所(2005)，「建築物構造防火性能驗證技術手冊」。
12. 內政部營建署(2011)，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計與解說」。
13. 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。