

## 台灣混凝土學會 2017 年混凝土工程研討會

### 火害修復鋼筋混凝土柱承受偏心載重在高溫中之行為研究

## Repair of Fire-Damaged Reinforced Concrete Columns subjected to Eccentric Load under Fire

李其忠<sup>1</sup> 方一匡<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 內政部建築研究所 副研究員, 06-2392755#1206, chichung@abri.gov.tw

<sup>2</sup> 國立成功大學土木工程學系教授, 06-2757575#63163, fanglou@mail.ncku.edu.tw

### 摘要

鋼筋混凝土結構在火災中具有良好的結構耐火性能，火害後若經過適當的修復或補強可繼續使用。本研究製作 2 根 RC 柱試體，以自充填混凝土修復火害後鋼筋混凝土柱，並依據 CNS 12514-1 進行耐火試驗，探討修復鋼筋混凝土柱受到偏心載重於高溫中的行為。實驗結果發現均具有 3 小時防火時效，且受高溫發生混凝土爆裂，其深度可見箍筋及主筋，但侷限於保護層，箍筋彎鉤角度為 135 度，可有效阻擋或減緩爆裂繼續往柱核心部位發展。加熱試驗中試體軸向變形呈現伸長情形，與受低軸力、鋼筋高溫潛變及混凝土之載重所產生的溫度應變(LITS)有關。

**關鍵字:** 柱，修復，自充填混凝土，火害

### Abstract

This paper presents an experimental study on repairing fire-damage concrete columns subjected to eccentric load under elevated temperature. Two columns repaired with self-compacting concrete. The experimental results show that the repairing fire-damage concrete columns, subjected to the CNS 12514-1 standard fire exposure, had 3 hours fire rating. The columns repaired with SCC material had more and deeper spalling of concrete, the depth can be seen stirrups and the longitudinal reinforcement, but limited to the concrete cover. Stirrel angle of 135 degrees, can effectively block or slow down the spalling to continue to the core of the development of the column. In the fire test, the axial deformation of the specimen shows an elongation, which is related to the load-induced thermal strain (LITS) caused by the low-axis force, the high temperature creep of the steel and the load of the concrete

**Keywords:** Columns, Repair, Self-compacting concrete, Fire

## 一、前言

鋼筋混凝土結構在火災中具有良好的結構耐火性能，台灣建築物多為鋼筋混凝土造，火害中倒塌案例尚未所聞，可考慮利用修復補強而繼續使用，但結構物修復補強後，如再遭受火災或環境處於高溫情況時，是否仍處於安全狀態，值得進一步探討，內政部建築研究所之前已探討修復火害鋼筋混凝土內柱[1,2] (承受軸向壓力，未承受彎矩)，在火害中、後的力學行為。然而，一般建築結構之內柱，除承受軸向壓力外，亦有可能承受彎矩，本研究將延續探討受彎矩作用之修復火害後柱的耐火性能研究，以補充鋼筋混凝土結構物火害後修復補強之耐火實驗資料與分析。

國內李其忠等人[3] 以自充填混凝土及聚丙烯纖維自充填混凝土修復4根受火害後的鋼筋混凝土柱，並依據CNS 12514[4]進行耐火試驗，實驗結果發現4根柱均具有4小時防火時效，但是自充填混凝土修復柱，受高溫時發生混凝土爆裂，其深度可見箍筋，影響柱的耐火性能。聚丙烯纖維自充填混凝土修復柱，則在高溫中無明顯發生混凝土爆裂。由火害後修復柱之殘餘強度試驗結果顯示，柱的殘餘強度與核心混凝土強度有關。陳舜田等人[5]探討鋼筋混凝土柱受火害後修復問題，將受火害較嚴重部份之混凝土敲除，補以添加膨脹劑之混凝土，則原柱體是否可恢復大部份強度及勁度以繼續使用。試驗結果顯示經火害受損之柱試體（三種斷面尺寸20cm、30cm、40cm，長度180cm）補強後之柱構件強度及勁度大致尚能恢復未受火害前之情形。趙文成等人[6]探討鋼筋混凝土柱受火害後，藉以碳纖維與玻璃纖維貼布纏繞方式，外層塗以環氧樹脂固定進行補強，試驗結果得知，補強後之試體皆能恢復未受火害前之強度。

國外 Kodur 等人[7-9]進行具有防火被覆之FRP補強鋼筋混凝土T形梁及矩形梁的耐火性能試驗，探討碳纖維及玻璃纖維複合材料、不同防火被覆材料、梁的束制條件等參數對其防火時效影響，並進行火害後殘餘強度試驗，及提出數值模擬程式評估FRP補強材料受高溫時黏結性降低的影響。Yaqub 等人[10,11]則探討受火害鋼筋混凝土方形(20cm×20cm)及圓形(直徑20cm)柱，將受火害較嚴重部份之混凝土敲除，以不同FRP材料進行補強，補強後柱試體多可恢復大部份強度及勁度。

## 二、論文內容

### 2.1 試驗規劃

#### 2.1.1 試體設計

本研究將受火害後鋼筋混凝土柱試體[12]，其中的2根自充填混凝土試體(SCC1，SCC2)進行修復，如圖1所示，探討修復後柱在有無彎矩作用下之耐火性能，並與未修復前的實驗比較，探討鋼筋混凝土柱在相同載重情況下，修復前後之高溫中後之行為差異。修復範圍參考Anderberg[13]建議火害溫度800°C以上超過60分鐘，保護層混凝土已受損害，須置換新的混凝土，陳舜田等人[5]及Lin等人[14]以混凝土溫度達500°C時混凝土之殘餘強度約為常溫的60%，建議將超過溫度500°C以上的混凝土敲除，綜合前述文獻及評估柱試體加熱時間為150~180分鐘，試體所受火害溫度800°C以上超過60分鐘，依據Anderberg[13]的建議，將保護層混凝土置換新的混凝土，2根試體連同未受火害部分的保護層混凝土一併移除至箍筋約5cm，修復長度400cm，修復方法參考陳舜田等人[5]及Lin等人[14]建議方式，修復材料選用自充填混凝土，依

原柱斷面尺寸以組立模板澆置方式修復。

本研究柱試體斷面為 45 cm×45 cm，高度 430 cm，保護層厚度依規範規定為 4 cm，主筋配置 12-#7，橫箍筋在圍束區為 #4 @100 mm，非圍束區為 #4 @130 mm，如圖 2 所示。各型號鋼筋均經拉力試驗，#4 為 457 MPa 及 659 MPa 和 #7 為 443 MPa 及 654 MPa。

為量測修復後試體內部混凝土及鋼筋在加熱期間之溫度變化及分佈情形，於試體內預先埋設 K-Type 的熱電偶，如圖 3 所示。試體承受高溫時，為模擬建築物在火災時柱受熱，以耐火陶瓷纖維保溫材厚約 50 mm 覆蓋從柱頂端向中心延伸 600 mm，底部向中心延伸 300mm。

### 2.1.2 試體修復材料與施作

本研究自充填混凝土採用台灣水泥公司預拌混凝土廠供應，粗骨材為台灣常見之砂質骨材，最大粒徑為 10 mm，水泥為台灣水泥公司生產之波特蘭水泥第 I 型，常溫設計抗壓強度為 420kgf/cm<sup>2</sup>，其詳細配比內容，如表 1 所示。

試體修復時，使用電動手提鑽及切割機先將火害後鋼筋混凝土柱試體，移除保護層的混凝土，為避免移除保護層後之混凝土表面細砂及灰塵影響新舊混凝土黏結力，先利用空氣壓縮機將移除保護層後之混凝土表面細砂及粉塵去除，再用高壓水槍清除，以利新舊混凝土之接合。接著在試體內部埋設 K-Type 型式的熱電耦線。以組立模板澆置自充填混凝土方式進行修復。其製作過程簡述如下：柱試體修復時，先進行模板組立，由於考慮施工安全性採平躺方式，與實務上柱是直立式不同，有關混凝土修復規定可參考 ACI 546 [15]。將混凝土接著層所需之海菜（主要成份為甲基纖維素(Methyl Cellulose)，運用在水泥或砂漿中時，可增強附著性、保水性及工作性）與水混合調配（海菜=0.1kg，水=17kg）靜置一天，在混凝土澆置前，再將水泥（37kg）加入海菜水拌合，並對試體表面灑水，接著進行混凝土接著層塗抹，將試體移入模板內。混凝土澆置時，在修復位置的試體底部予以震動搗實。混凝土澆置後拆模養護，並於試體修復時製作 15×30cm 的圓柱試體，藉以評估 28 天抗壓強度是否符合要求，在試驗前進行抗壓強度試驗以做為評估加載依據。

### 2.1.3 實驗裝置

本研究使用內政部建築研究所防火試驗中心梁柱複合耐火爐（柱爐區）及 19620kN 加載系統。柱爐區加熱尺寸為 400W×400H×360L（cm），兩側各有 9 個噴火孔，共 18 個燃燒機提供熱能，使用燃料為液化石油瓦斯（LPG），每一個燃燒機配置 UV 火焰監視器，火焰熄火時自動切斷瓦斯供應，即時停止燃燒。並配置瓦斯配管緊急遮斷閥、燃燒器前電磁閥、點火控制器、瓦斯及空氣用壓力指示器等。耐火爐爐溫控制由可程式數值控制器(PLC)，經伺服馬達，控制空氣控制閥的開度，再利用管內空氣壓力，控制燃料瓦斯比例控制閥開度，達成燃料瓦斯與空氣配比的控制。爐內溫度，則經由爐內的熱電偶，回饋至前述之可程式數值控制器內，構成一閉迴路控制，並時使用位於梁柱複合耐火爐下方加載能力為 19620kN，其採用日本油研的伺服電磁式方向閥，控制流量及壓力，及伺服油壓缸作為作動器，油壓缸行程 500 mm，且在柱端上方設置 19620kN 荷重計，以便試驗時控制加載力大小，試體、耐火爐及加載點位置如圖 4 所示。為模擬柱之偏心載重，使用特殊設計的端版，將連接水冷板之孔洞擴大為橢圓孔，南北向加長 50 mm，鎖上水冷板後，力的中心位置即可偏移南北向 50 mm。

### 2.1.4 加溫與加載方法

本研究高溫試驗前將柱試體吊入安裝於耐火爐內，如圖 4 所示，安裝溫度及位移量測儀器，與資料蒐集器聯線。加載試驗前進行圓柱試體抗壓強度試驗，取其平均值作為評估柱加載之依據。安裝耐火爐之爐頂盖板及中隔板，以耐火陶瓷纖維保溫材填補試體與耐火爐體間縫隙，避免高溫試驗時，熱氣洩漏造成人員受傷及量測儀器損壞。

依據 CNS 12514-7「建築物構造構件耐火試驗法—第 7 部：柱特定要求」[16]規定之測試柱耐火性能試驗步驟，高溫試驗前先將柱的軸力由 491 kN、981 kN、1472 kN、1962 kN (或 2943) kN 等階段依序增加，每個階段記錄柱的載重及各位移計之讀數，柱軸力加到 1962 kN (或 2943) kN 後持壓穩定 15 分鐘以上，所有變形達於穩定，開始點火加熱。以 CNS 12514-1「建築物構造構件耐火試驗法—第 1 部：一般要求事項」[17]規定之升溫曲線加熱，每隔一分鐘記錄一次所有熱電耦線傳送來的溫度資料及位移計傳送來的變形資料。直到柱發生破壞後，停止加熱。

## 2.2 試驗結果

本研究試體製作完成後，置放於通風良好之室內養護約 97~104 天，修復材料自充填混凝土抗壓強度與修復前柱核心混凝土強度大約相同，試體試驗資料整理如表 2 所示。

### 2.2.1 耐火爐溫度及爐壓

本研究之高溫試驗依據 CNS 12514-1 之標準加熱曲線進行加熱，本研究 2 支試體在加熱試驗的爐內平均溫度與標準升溫曲線比較，如圖 5 所示，兩者十分接近，符合規範要求。

### 2.2.2 高溫試驗觀察

高溫試驗時藉由耐火爐的視窗，觀察柱試體表面現象，加熱結束後約 16 小時，將爐蓋打開後觀察火害後試體表面現象。

試體 SCC2-SC 在加熱 11 分鐘時柱角隅混凝土爆裂，混凝土持續爆裂至加熱 40 分鐘趨於緩和，部分混凝土脫落可見箍筋，加熱 113 分鐘可見主筋外露，如圖 6(a)所示。188 分鐘試體破壞，試驗結束，由耐火爐視窗發現柱主筋壓彎及箍筋斷裂。經 16 小時冷卻，將爐蓋打開後觀察破壞試體表面現象，混凝土表面顏色為淡黃色、粉紅色及灰白色。柱試體中上段非圍束區有 3 處主筋壓彎挫屈及 5 根箍筋燒斷斷裂，原因為隨著加熱時間的增加，柱核心混凝土強度逐漸降低，最終無法承受載重，核心混凝土壓碎，導致主筋壓彎挫屈及箍筋燒斷斷裂，如圖 6(b)所示。

試體 SCC1-SC 在加熱大約 9 分鐘混凝土開始有掉落聲響，11 至 13 分鐘時柱角隅混凝土爆裂，混凝土持續爆裂至加熱約 37 分鐘趨於緩和，部分混凝土脫落可見箍筋，加熱 42 分鐘可見主筋外露，如圖 7(a)所示。212 分鐘試體破壞，試驗結束，由耐火爐視窗發現柱主筋壓彎及箍筋斷裂。經 16 小時冷卻，將爐蓋打開後觀察破壞試體表面現象，混凝土表面顏色為淡黃色、粉紅色及灰白色，柱試體中上段非圍束區有 4 處主筋壓彎挫屈及 6 根箍筋燒斷斷裂，原因為隨著加熱時間的增加，柱核心混凝土強度逐漸降低，最終無法承受載重，核心混凝土壓碎，導致主筋壓彎挫屈及箍筋燒斷斷裂如圖 7(b)所示。

### 2.2.3 試體內部溫度

本研究模擬內柱型態，即柱四面受熱，加熱試驗中由埋設試體內部熱電偶所量測混凝土及鋼筋溫度之變化，為避免熱電耦線在加熱試驗中損毀，試驗前以陶瓷綿包覆。

試體內部混凝土及鋼筋於加熱期間之溫度變化情形，如圖 8 及圖 9 所示。

#### 1、混凝土之溫度變化

試體 SCC2-SC 之混凝土溫度變化，如圖 8(a)所示，混凝土溫度升高與其位置及斷面內部水份的多少有關，當試體內部溫度到達 110~125°C 左右時，試體內部孔隙水吸熱之相變化會造成升溫遲滯之現象，如測點 (TC2、MC1、MC2、BC1、BC2)，且因溫度梯度小，造成所吸收的熱能較小，致孔隙水汽化之反應時間長，升溫遲滯平台現象明顯，試體表面測點 (TC3、MC3、BC3) 直接受熱，其溫度梯度大，無出現孔隙水汽化的熱遲滯平台現象。另由於混凝土持續爆裂，加熱 30 至 40 分鐘，測點 (TC2、MC1、MC2、BC1、BC2) 溫度上升快速。圖 8(b)為試體 SCC1-SC 之混凝土溫度變化，由該圖發現與試體 SCC2-SC 之混凝土溫度升高趨勢大致相同，當試體內部溫度到達 110~125°C 左右時，試體內部孔隙水吸熱之相變化會造成升溫遲滯之現象，如測點 (TC1、TC2、MC1、MC2、BC1、BC2)，且因溫度梯度小，造成所吸收的熱能較小，致孔隙水汽化之反應時間長，升溫遲滯平台現象明顯，試體表面測點 (TC3、BC3) 直接受熱，其溫度梯度大，無出現孔隙水汽化的熱遲滯平台現象。另由於混凝土持續爆裂，加熱 30 分鐘，測點 (TC1、TC2) 溫度上升快速，其餘測點則分別在 45 至 60 分鐘溫度上升快速。

## 2、鋼筋之溫度變化

圖 9 為柱鋼筋溫度變化及分佈情形，本研究於柱的三個斷面(TS、MS、BS)在主筋與箍筋設置測點。試體 SCC2-SC 之鋼筋溫度變化，如圖 9(a)所示，角隅主筋測點(TS2、TS3、MS2、BS2、BS3)因受熱為兩側，造成溫度偏高之故。由於混凝土爆裂，加熱 37 分鐘造成部分柱鋼筋溫度上升快速，如測點(TS3、MS2、BS2)，加熱 50 分鐘，測點(MS1、BS1) 溫度上升快速。試體破壞時主筋測點溫度為 748°C 至 936°C，依 Eurocode 2 [18]之建議，該處鋼筋之降伏強度將衰減至常溫降伏強度的 5~9%。箍筋溫度最高約為 835°C。圖 9(b)為試體 SCC1-SC 之鋼筋溫度變化情形，角隅主筋測點(TS2、TS3、BS3)因受熱為兩側，造成溫度偏高之故。由於混凝土爆裂，加熱 30 分鐘造成部分柱鋼筋溫度上升快速，如測點(TS2、TS3、BS3)，加熱 40 分鐘，測點(BS4)溫度上升快速。試體破壞時主筋測點溫度為 700°C 至 999°C，依 Eurocode 2 [18]之建議，該處鋼筋之降伏強度將衰減至常溫降伏強度的 4~10%。箍筋溫度最高約為 820°C。由以上各測點溫度的分佈情形觀察，柱的軸力強度因高溫造成之折減主要在於柱角隅混凝土剝落、混凝土及主筋強度折減。

### 2.2.4 試體變位

本研究試體位移以開始加載時為基準起算點，圖 10 為試體加熱中之軸向變形，試體 SCC2-SC 在加熱 186 分鐘前，軸向變形呈現伸長現象，加熱 120 分鐘軸向伸長量達到最大為 4 mm，維持 26 分鐘之後開始緩慢壓縮，於 188 分鐘破壞，此時軸向壓縮量為 35.3 mm。試體 SCC1-SC 在加熱 211 分鐘前，軸向變形呈現伸長現象，加熱 139 分鐘軸向伸長量達到最大為 6.2 mm，維持 58 分鐘之後開始緩慢壓縮，於 212 分鐘破壞，此時軸向壓縮量為 40.6 mm。

比較試體 SCC2-SC 與 SCC1-SC 加熱中之軸向變形，在加熱 45 分鐘前，軸向位移變化兩者大約相同，之後試體 SCC1-SC 伸長較大，最大軸向伸長量相差 2.2 mm，SCC1-SC 維持最大軸向伸長量時間也較長，可能原因為混凝土在高溫中的熱應變主要為自由熱膨脹應變 (free thermal strain) 與載重所產生的溫度應變 (load-induced thermal strain, LITS) 之合 [19]，影響 LITS 的主要因素為溫度和載重比，載重比為施加載重與柱試體標稱強度之比值，隨溫度愈高和載重比愈大，LITS 愈大。加熱初期，隨爐溫的快速提升，柱試體內部溫度升高而產生熱膨脹，柱試體長度跟

著伸長，但由於試體 SCC2-SC 所受軸力（約為  $0.3f_c'Ag$ ）較試體 SCC1-SC（約為  $0.2f_c'Ag$ ）大，導致 LITS 較大，試體 SCC2-SC 軸向位移的伸長比較小，隨著加熱時間的增加，由於混凝土爆裂及微裂縫(micro crack)或大裂縫(macro crack)產生，導致承載斷面減少，LITS 逐漸增加，鋼筋降伏強度及彈性模數也隨著降低，導致柱試體軸向位移轉為壓縮，直到破壞。

### 2.2.5 試體之耐火性能

本研究柱試體之耐火性能及防火時效判定依據 CNS 12514-1「建築物構造構件耐火試驗法—第 1 部:一般要求事項」[17]，該規定之耐火性能分為承重能力 (loadbearing capacity)、遮焰性 (fire integrity) 及阻熱性 (fire insulation)，柱構件僅須考慮其承重能力。柱之承重能力基準要求如下：

$$C \leq \frac{h}{100} (mm) \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} \leq \frac{3h}{1000} (mm/min) \quad (2)$$

式中  $C$  為最大軸向壓縮量 (limiting axial contraction)， $\frac{dC}{dt}$  為最大軸向壓縮速率 (limiting rate of axial contraction)， $h$ (mm) 為試體之初始高度。

本研究試體柱高  $h=4300$  mm，受熱尺度為 3400 mm，依 CNS 12514-1 之規定可求得， $C=34$  mm， $\frac{dC}{dt}=10.2$  mm/min，SCC2-SC 於加熱 188 分鐘破壞，超過最大軸向壓縮量及最大軸向壓縮速率之規定，為 35.3 mm 及 34.5 mm/min，SCC1-SC 於加熱 212 分鐘破壞，超過最大軸向壓縮量及最大軸向壓縮速率之規定，為 40.6 mm 及 44.2 mm/min，試體 SCC2-SC 與 SCC1-SC 具有 3 小時防火時效。

### 三、結論

本研究經自充填混凝土修復火害鋼筋混凝土柱，柱試體斷面為 45 cm×45 cm，高度 430 cm，保護層厚度為 4 cm，柱兩端為固定，加熱試驗時試體 SCC2-SC 及 SCC1-SC 分別於柱端加載 300 噸(偏心距 0 cm)及 200 噸(偏心距 5 cm)，經由 CNS 12514-1 耐火試驗結果與分析，可得到以下結論：

- 1、本研究之自充填混凝土修復試體 SCC2-SC 及 SCC1-SC 具有 3 小時防火時效。
- 2、試體 SCC2-SC 及 SCC1-SC 均發生嚴重混凝土爆裂，爆裂深度可見箍筋及主筋，但均只侷限於保護層，箍筋彎鉤角度為 135 度，可有效阻擋或減緩爆裂繼續往柱核心部位發展。火害後混凝土表面顏色為淡黃色、粉紅色及灰白色。
- 3、試體 SCC2-SC 及 SCC1-SC 破壞模式為柱中上段非圍束區內發生壓力破壞。
- 4、加熱試驗中試體軸向變形呈現伸長情形，與受低軸力、鋼筋高溫潛變及混凝土之載重所產生的溫度應變(LITS)有關。試體 SCC2-SC 所受軸力（約為  $0.3f_c'Ag$ ）較 SCC1-SC（約為  $0.2f_c'Ag$ ）大，導致 LITS 較大，試體 SCC2-SC 軸向位移的伸長比較小，隨著加熱時

間的增加，由於混凝土爆裂及微裂縫(micro crack)或大裂縫(macro crack)產生，導致承載斷面減少，LITS 逐漸增加，鋼筋降伏強度及彈性模數也隨著降低，導致柱試體軸向位移轉為壓縮，直到破壞。

#### 誌謝

本文為內政部建築研究所 104301070000G0037 研究計畫之部分研究成果，感謝內政部建築研究所防火實驗中心提供完善設備。

#### 四、參考文獻

- [1] 李其忠，「自充填混凝土柱火害後補強之研究」，內政部建築研究所自行研究計劃成果報告，台北，2011。
- [2] 李其忠，「聚丙烯纖維自充填混凝土修補火害鋼筋混凝土柱之研究」，內政部建築研究所自行研究計劃成果報告，台北，2012。
- [3] 李其忠、方一匡、何明錦、王天志、蔡銘儒，聚丙烯纖維自充填混凝土修復火害鋼筋混凝土柱在高溫中後之行為研究，中國土木水利工程學刊，26 卷 2 期，p153-163，2014。
- [4] CNS 12514，「建築物構造部分耐火試驗法」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗局，2010。
- [5] 陳舜田等人，「火害後鋼筋混凝土柱之補強研究」，國家科學委員會專題研究計畫報告 NSC78-0410-E011-13，1990。
- [6] 趙文成等人，「鋼筋混凝土柱件火害後修補技術之研究」，MOIS 891003，內政部建築研究所研究計劃成果報告，台北，2000。
- [7] Williams, B. ,Kodur, V. K. R.,Green, M. F. and Bisby, L. A., “ Fire endurance of fiber-reinforced polymer strengthened concrete T-beams, ” ACI Structural Journal, Vol. 105, No. 1, January-February 2008, pp.60-67.
- [8] Chowdhury, E. U. ,Bisby, L. A. , Green, M. F. and Kodur, V. K. R., “ Residual behavior of fire-exposed reinforced concrete beam prestrengthened in flexure with fiber-reinforced polymer sheets, ” Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 12, No. 1, January-February 2008, pp. 61-68.
- [9] Ahmed, A. and Kodur, V. K. R., “ The experimental behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to design fire exposure, ” Engineering Structures, Vol. 33, 2011, pp.2201-2211.
- [10] Yaqub, M. , Bailey, C.G. and Nedwell P., “Axial capacity of post-heated square columns wrapped with FRP composites,” Cement and Concrete Composites, Vol. 33, 2011, pp.694-701.
- [11] Yaqub, M. and Bailey, C.G. , “Repair of fire damaged circular reinforced concrete columns with FRP composites,” Construction and Building Materials, Vol. 25, 2011, pp.359-370.
- [12] 李其忠、方一匡、陳彥霖、王江倫，承受偏心載重鋼筋混凝土柱於高溫下之行為研究，台灣混凝土學會 2015 年混凝土工程研討會，台中，Paper No. K1，2015。
- [13] Anderberg, Y. “ Assessment of fire-damaged concrete structures and the corresponding repair measures, ” Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II -Alexander et al (eds), 2009,

pp.631-636.

- [14] Lin, C. H., Chen, S. T., and Yang, C. A., "Repair of fire-damaged reinforced concrete columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 4, pp. 406-411, 1995.
- [15] ACI Committee 546, "Concrete repair guide (ACI 546R-04)," *American Concrete Institute*, Michigan, 53 pp. (2004).
- [16] CNS12514-7, 「建築物構造構件耐火試驗法—第 7 部：柱特定要求」, 中華民國國家標準, 經濟部標準檢驗局, 2014。
- [17] CNS12514-1, 「建築物構造構件耐火試驗法—第 1 部：一般要求事項」, 中華民國國家標準, 經濟部標準檢驗局, 2014。
- [18] Eurocode 2, 1992-1-2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, 2004.
- [19] Khoury, G. A., Grainger, B. N. and Sullivan, P. J. E., "Strain of concrete during first heating to 600°C under load," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, No. 133, pp.195-215 (1985b).

表 1 混凝土配比 ( $f'_c=41.2\text{MPa}$ )

水膠比 W/(C+P)	各成分的含量 ( $\text{kg/m}^3$ )						
	水	水泥	爐石	飛灰	細粒料	粗粒料(3分石)	化學添加物
0.3	150	260	80	160	925	780	7

表 2 試體試驗資料

試體編號	修復前核心混凝土型式	修復前受火害時間及加熱面	修復材料	測試時之試體齡期 (天)	修復材料強度 (MPa)	加熱時柱端加載 (kN)	偏心距	加熱試驗時間
SCC2-SC	SCC	4 面受熱 150 分鐘	SCC	97	48.6	2943	0 cm	188 分鐘
SCC1-SC	SCC	4 面受熱 180 分鐘	SCC	104	48.5	1962	5 cm	212 分鐘



圖1 火害後鋼筋混凝土柱試體

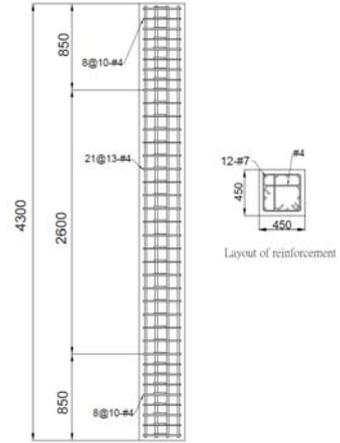


圖2 柱試體配筋立面圖

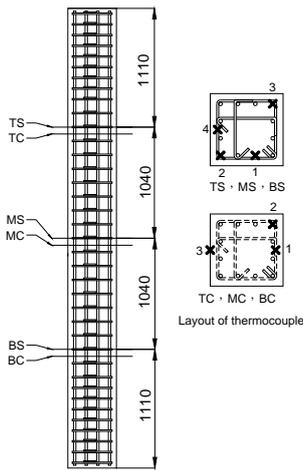


圖3 柱試體內部熱電偶線配置圖



圖4 試體、加載設備與耐火爐裝置

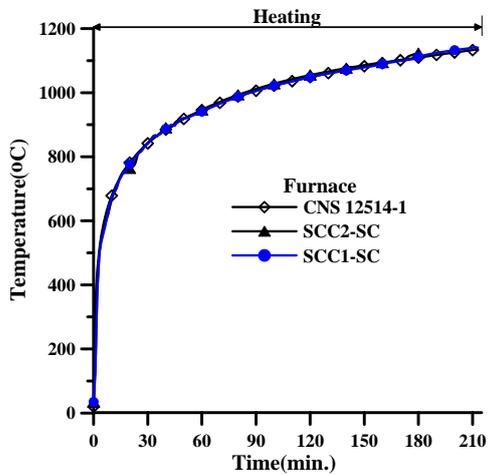


圖5 耐火爐溫度與CNS 12514-1升溫曲線比較



(a)火害中

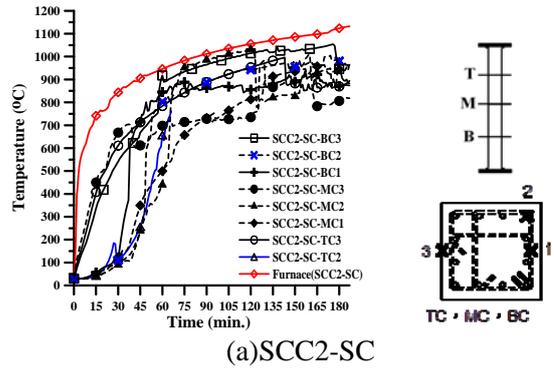


(b)火害後

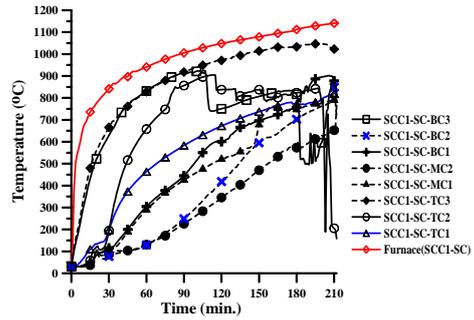
圖6 試體SCC2-SC火害照片



(a) 火害中 (b) 火害後  
圖7 試體 SCC1-SC 火害照片

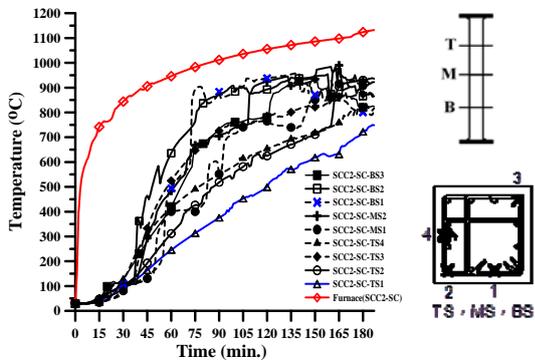


(a) SCC2-SC

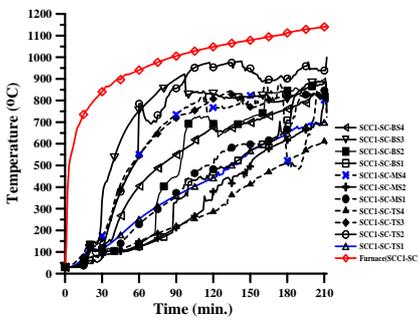


(b) SCC1-SC

圖8 試體混凝土溫度-時間曲線圖



(a) SCC2-SC



(b) SCC1-SC

圖9 試體鋼筋溫度-時間曲線圖

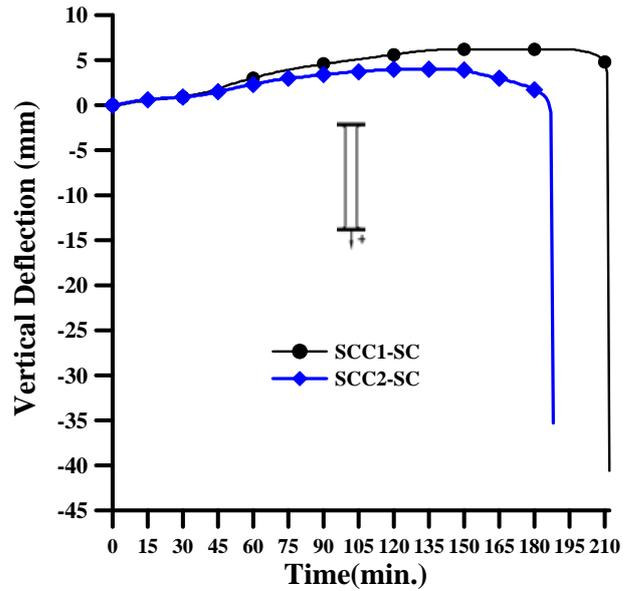


圖10 試體軸向位移-時間圖