

台灣混凝土學會 2013 年混凝土工程研討會

聚丙烯纖維自充填混凝土修復火害鋼筋混凝土柱之研究

Repair of Fire-Damaged Columns Using Self-Compacting Concrete with Polypropylene Fibres Subjected to Fire

李其忠¹ 方一匡² 何明錦³ 蔡銘儒⁴ 王天志⁵

¹內政部建築研究所 副研究員、國立成功大學土木工程學系博士班研究生,
chichung@abri.gov.tw

²國立成功大學土木工程學系教授, fanglou@mail.ncku.edu.tw

³內政部建築研究所 所長, ho@abri.gov.tw

⁴內政部建築研究所 研究員, ming-ju@abri.gov.tw

⁵內政部建築研究所 約聘研究員, tcwang@abri.gov.tw

摘要

鋼筋混凝土建築物於火害後若經過適當的修復或補強可繼續使用，然而目前對於受火害結構物修復或補強後再受高溫之影響如何則不多見。本研究製作 4 根 RC 柱試體，以自充填混凝土及聚丙烯纖維自充填混凝土修復火害後鋼筋混凝土柱，並依據 CNS 12514 進行耐火試驗，實驗結果發現均具有 4 小時防火時效，但是自充填混凝土修復柱，受高溫發生混凝土爆裂，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。並由火害後修復柱殘餘強度試驗結果顯示，柱的殘餘強度與核心混凝土強度、修復材料及受火害柱的加熱面有關。

關鍵字: 聚丙烯纖維，自充填混凝土，火害，修復

Abstract

This paper presents an experimental study on repairing fire-damage concrete columns during and after the elevated temperature environment. Four columns repaired with self-compacting concrete and self-compacting concrete with polypropylene fibres.

The experimental results show that the repairing fire-damage concrete columns, subjected to the CNS 12514 standard fire exposure, had over 4 hours fire rating. Polypropylene fibres repairing columns avoid the concrete spalling. The core of concrete strength, repair materials, and heated faces of columns have significant influence on the residual strength of repairing fire-damage concrete columns.

Keywords: polypropylene fibres, self-compacting concrete, fire, repair

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，英國混凝土學會(The Concrete Society)【1】曾調查遭受火災的混凝土建築物之實際損傷程度與重建使用狀況，於 1978 年提出處理火災後混凝土結構物評估與修補建議，A.K.Tovey【2】等人根據前述資料表示：混凝土建築物火災後多可補強繼續使用，台灣建築物多為鋼筋混凝土造，火災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，目前相關文獻多著重於修復補強技術及材料方面的研究，倘若能於受火災結構物修復補強後再加入受高溫之研究，將使現有的修復補強技術更臻完善，也對修復補強後之結構物於使用年限中之安全性有更清楚的了解。

國內陳舜田等人【3】探討鋼筋混凝土柱受火災後修復問題，將受火災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。試驗結果顯示經火災受損之柱試體（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災前之情形。趙文成等人【4】探討鋼筋混凝土柱受火災後，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災前之強度。林慶元【5】探討鋼筋混凝土結構梁鋼板貼片補強火災後耐火性能，由試驗結果知撓曲側貼覆鋼板對梁之撓曲強度提升十分明顯，可由此法，改善梁之撓曲強度不足現象。鋼板僅貼覆範圍位於梁底最外緣，於本研究中發現試體可能沿拉力鋼筋與混凝土界面產生混凝土劈裂破壞，故建議鋼板除梁底面貼布外亦應延伸到梁腹。超音波法對受高溫侵襲的鋼板貼片補強混凝土作檢測，具有簡便的特性，但受限於主客觀現場環境條件，若能於火災現場直接取樣分析，了解黏結層受損程度，亦可推估殘存的補強效用，材料檢驗的結果，可進一步與超音波法所求得之結果作比較。

國外 Kodur 等人【6-8】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，並進行火災後殘餘強度試驗，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。Haddad 等人【9-10】探討受火災鋼筋混凝土單向板及 T 形梁，將受火災較嚴重部份之混凝土敲除，補以 FRP，試驗結果顯示經火災受損試體補強後大致尚能恢復未受火災前之情形。Yaqub 等人【11-12】則探討受火災鋼筋混凝土方形(20cm×20cm)及圓形(直徑 20cm)柱，將受火災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

本研究將受火災後鋼筋混凝土梁柱接頭試體，如圖 1 所示，拆除已破壞的梁，進行 4 根柱體修復，修復範圍參考 Anderberg【13】建議火災溫度 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，CEB-FIP【14】則建議混凝土溫度超過 300°C 以上須移除置換，陳舜田等人【3】以混凝土溫度達 500°C 時混凝土之殘餘強度約為常溫的 60%，混凝土超過溫度

500°C 以上敲除，綜合前述文獻及評估梁柱接頭試體加熱時間為 3 小時，試體所受火害溫度 800°C 以上超過 60 分鐘，並由試體在保護層位置的熱電偶所測得溫度均超過 500°C，敲除柱體保護層的混凝土，依原柱斷面尺寸修復，修復材料選用自充填混凝土及添加聚丙烯纖維 (polypropylene fibres) 自充填混凝土，以組立模板澆置方式修復。

本研究柱試體斷面為 350 mm×350 mm，高度 2200 mm，保護層厚度依規範規定為 40 mm，柱端鋼板尺寸為 450 mm×450 mm×25 mm，試體配筋係依據 ACI 318-05 第 21 章耐震設計規定設計[15]，柱之主筋採用 12-#6，其鋼筋比為 2.8%，箍筋為 #4，柱端圍束區之箍筋間距為 70 mm，非圍束區之間距為 95 mm，如圖 2 所示。各型號鋼筋均經拉力試驗，#4 與 #6 鋼筋之降伏強度分別為 422 MPa 與 535 MPa。

為量測修復後試體內部混凝土及鋼筋在加熱及冷卻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，其埋設位置為柱加熱範圍中間處斷面，在混凝土埋設 4 個熱電偶，用來量測試體表面與保護層之溫度，在柱主筋埋設 4 個熱電偶，相關細節如圖 3 所示。

2.1.2 試體修復材料與施作

本研究自充填混凝土配比採用受火害鋼筋混凝土梁柱接頭試體之原配比，粗骨材為台灣常見之矽質骨材，水泥為台灣水泥公司生產之波特蘭水泥第 I 型，強塑劑使用佑聲企業股份有限公司之 SUPERPLAST 3000HS，主要成份為羧酸 (polycarboxylic acid) 高分子化合物，混凝土常溫設計抗壓強度為 350kgf/cm²，由國產預拌混凝土廠供應，其詳細配比內容，如表 1 所示。聚丙烯纖維 (polypropylene fibres) 使用 Grace 公司所生產 MicroFiber。

試體修復時，先將火害後鋼筋混凝土梁柱接頭試體破壞的梁拆除，敲除柱體保護層的混凝土，為避免敲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，利用高壓噴水清除，以利修復後新舊混凝土之接合。接著在試體內部埋設 K-Type 型式的熱電偶線。本研究以組立模板澆置自充填混凝土及添加聚丙烯纖維 (polypropylene fibres) 自充填混凝土方式進行修復。其施作過程簡述如下：柱試體修復時採平躺方式，先進行模板組立，並將黏性塗層所需之海菜與水混合調配 (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，進行黏性塗層塗抹。另為確保纖維均勻分佈於混凝土內，將聚丙烯纖維 (本試驗添加 800g/m³) 與混凝土放入拌合機內旋轉 70 次以上後，將拌合後混凝土澆置於修復位置。混凝土澆置後拆模養護，並於試體修復時製作 15 cm 直徑、30 cm 高的圓柱試體，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。

2.1.4 加溫與加載方法

本研究之試驗分成二部分，(1) 試體在高溫中的行為試驗，(2) 試體在火害後的承力行為及殘餘強度試驗。

一、高溫試驗

高溫試驗前將柱墩安裝於耐火爐內，以墊高柱試體，為重複使用，以耐火陶瓷纖維保溫材覆蓋，避免高溫試驗時破壞，影響試驗時安全。試體吊入耐火爐內，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。安裝耐火爐之爐頂蓋板及中隔板，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。

高溫試驗前先將柱的軸力由 491 kN、981 kN、1472 kN、1962 kN、2453 kN、2747 (或 2963) 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 2747 (或 2963) kN 後持壓，此時柱之平均軸壓力為 $0.45f_c' A_g$ ，並穩定 15 分鐘以上，當所有變形達於穩定，開始點火加熱。根據 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」[16]升溫曲線加熱，並記錄所有熱電偶傳送來的溫度資料及位移計傳送來的變形資料。直到柱發生破壞或達 4 小時的預定加熱時間後，停止加熱及利用爐內進行自然冷卻，此時柱端仍維持原加載力量，並持續記錄試體溫度與變形資料。

二、殘餘強度試驗

試體經冷卻 20 小時以上後，解除柱端之載重。將高溫爐蓋移離及重新安裝量測儀器。加載時，依高溫試驗方法，將柱加載至破壞。

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 134~154 天，符合 CNS 12514 試體養護與乾燥規定，該規定如混凝土、水泥砂漿粉刷等濕式施工者需二個月以上，以避免加熱之試驗過程因試體內部濕度過高而發生混凝土爆裂現象，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 之標準加熱曲線進行加熱，本研究 4 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

試體在加熱開始之前 30 分鐘因為爐內溫度快速增加，試體表面部分之溫度梯度較大，導致自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3) 表面混凝土剝落、角隅剝離及混凝土爆裂，其爆裂深度可見箍筋，聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4)，由於添加聚丙烯纖維之故，在加熱試驗中並未發生如自充填混凝土修復試體之混凝土爆裂現象，僅出現垂直向裂縫，前述現象尤以昇溫 10 至 40 分鐘內最為明顯。

當加熱試驗結束並冷卻 20 小時後，將爐蓋打開後觀察火害後試體表面現象，如圖 6 所示，自充填混凝土修復試體 (NC3) 表面顏色為淡黃色及灰白色，柱角隅剝離及粒料劈裂，表面出

現粒料膨脹之咖啡色突出物，裂縫則多為垂直向，柱上端全面性爆裂，聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (SCC4) 表面顏色為淡黃色及灰白色，柱角隅些許剝離，表面出現粒料膨脹之咖啡色突出物，裂縫則多為垂直向，柱體有一側修復的聚丙烯纖維混凝土剝離脫落。

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，發現在加熱、冷卻期間試體內各測點的最高溫度非發生在加熱結束時，反而在冷卻過程中出現，主要係因試體表面溫度在加熱結束時開始下降，但仍高於近中心處溫度，部份熱量仍會往內部傳送，致使內部溫度繼續上升，柱的軸力強度因高溫造成之折減主要在於柱混凝土爆裂，混凝土及主筋強度折減。

試體內部混凝土及軸向鋼筋於加熱及冷卻期間之溫度變化情形，如圖 7 及圖 8 所示。

1、混凝土之溫度變化

圖 7 顯示自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3) 與聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4) 之混凝土溫度升高趨勢大致相同，與其位置有關，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，如保護層測點 (T5、T6)，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，升溫遲滯現象明顯，試體表面測點 (T7、T8) 直接受熱，其溫度梯度大，無出現孔隙水汽化的熱遲滯現象，比爐溫略低，溫度上升趨勢相似，另外部分試體表面測點溫度異常，係因熱電偶埋置試體表面，其訊號易受爐內高溫影響，呈現上下波動，或可能因為澆置混凝土時熱電偶偏離原來位置，導致溫度量測值較低。加熱及冷卻期間試體內的最高溫度不是發生在加熱結束時，而是在冷卻過程中出現，主要因混凝土為熱惰性材料，在加熱結束時試體表面溫度開始下降，但仍高於非加熱面處之溫度，部份熱量仍會往內部傳送，致使試體內部溫度繼續上升。

2、鋼筋之溫度變化

圖 8 為柱軸向鋼筋溫度變化及分佈情形，本研究於柱的四個主筋設置測點，分別為測點 (T1、T2、T3、T4)，角隅主筋測點 T1 及 T4 因受熱為兩側之故，造成溫度偏高。自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3) 與聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4) 於加熱停止時角隅之柱主筋最高溫度分別為 678.5°C、683.4°C、636.4 及 661.5°C，依 EC2 之建議，該處鋼筋之降伏強度將衰減至常溫降伏強度的 9.5%、9%、13% 及 10%，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

本研究試體在加熱及冷卻期間之變位係以開始加熱時為基準點，圖 9 為試體之軸向位移變化，自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3) 在加熱 90 分鐘，NC3 試體軸向變形不明顯，SCC3 則在加熱 60 分鐘時，軸向壓縮量平均分別維持在 0.2 mm 及 0.21 mm，NC3 在 90 分鐘後，軸向壓縮量明顯增加，SCC3 則在 60 分鐘後，平均每分鐘分別增加 0.032 mm 及 0.034 mm，加熱結束時，軸向壓縮量分別為 5.07 mm 及 6.4 mm。聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4) 在加熱 60 分鐘，NC2 試體軸向變形不明顯，軸向壓縮量平均維持在 0.13 mm，60 分鐘後，軸向壓縮量明顯增加，平均每分鐘增加 0.03 mm。加熱結束時，軸向壓縮量為 5.8 mm。SCC4 試體在加熱 73 分鐘，軸向變形呈現膨脹現象，加熱 44 分鐘軸向膨脹量達到最大為 0.33 mm，之後開始緩慢壓

縮，加熱結束時，軸向壓縮量為 7.4 mm。

比較自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3) 及聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4) 加熱中之軸向變形，自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3) 軸向變形分別在加熱時間 51 分及 47 分約略呈現膨脹現象，聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4) 在加熱時間 33 分前 NC2 出現壓縮膨脹現象，SCC4 則在加熱 73 分鐘，軸向變形呈現膨脹現象，此現象與柱所受軸力較大 (0.45fc'Ag)、鋼筋高溫潛變及混凝土再受高溫影響等有關，值得進一步研究。加熱結束時，聚丙烯纖維自充填混凝土修復的 SCC4 軸向壓縮量為最大，達 7.4 mm，其次是自充填混凝土修復的 SCC3 為 6.4 mm。

冷卻階段試體持續壓縮變形，在加熱結束後 2 小時內發生較大軸向壓縮速率，此時自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3) 及聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4) 軸向壓縮量分別達到 13.67 mm、13.17 mm、12.99 mm 及 16.14 mm，較加熱結束時，軸向壓縮量增加 8.6 mm、6.77 mm、7.19 mm 及 8.74 mm，之後隨試體溫度逐漸下降，軸向壓縮速率變緩，於加熱結束後 16 小時，試體軸向壓縮量分別達到 22.67 mm、20.69 mm、20.93 mm 及 24.91 mm，較加熱結束時，軸向壓縮量增加 17.6 mm、14.29 mm、15.13 mm 及 17.51 mm。

比較修復試體在加熱及冷卻階段之軸向變形，聚丙烯纖維自充填混凝土修復的 SCC4 為最大，達 24.91 mm 之軸向壓縮量，自充填混凝土修復的 NC3 其次，為 22.67 mm，以聚丙烯纖維自充填混凝土修復方式會有較大的殘餘軸向壓縮變形。

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，係參考 CNS 12514 第 9 節性能基準與判定規定，柱之承重能力基準要求如下：

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

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

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=2200 mm，受熱尺度為 1500 mm，依 CNS 12514 之規定可求得，C=15 mm， $\frac{dC}{dt}=4.5 \text{ mm}/\text{min}$ ，在加熱結束時，柱呈現壓縮變形，自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3)

及聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4) 分別為 5.07 mm、6.4 mm、5.8 mm 及 7.4 mm，均未超過最大軸向壓縮量之規定，本研究之自充填混凝土及聚丙烯纖維自充填混凝土修復柱均具有 4 小時防火時效。

2.2.6 殘餘強度試驗

修復柱試體在受高溫試驗後 1~2 天即進行殘餘強度試驗，試體破壞模式均為混凝土保護層整片壓碎脫落，靠近柱下端主筋挫屈及箍筋斷裂，導致破壞，如圖 10 及圖 11 所示。圖 12 為修復柱試體加載至破壞過程中軸向變形變化，由該圖發現自充填混凝土修復試體 (NC3、SCC3)

及聚丙烯纖維自充填混凝土修復試體 (NC2、SCC4) 破壞載重分別為 5266 kN、5914 kN、5310 kN 及 5749 kN，對應之軸向位移分別為 23.56 mm、22 mm、21.07 mm 及 20.18 mm，SCC3 的破壞載重為最大，NC3 則為最小。

經由修復柱殘餘強度試驗結果發現，修復柱的破壞載重與核心混凝土強度、修復材料及原來受火害影響的柱加熱面數有關，如 SCC3 與 SCC4 之核心混凝土為自充填混凝土，其未受火害時的常溫抗壓強度較普通混凝土高，所以有較大破壞載重。原受火害 3 面的柱 (SCC3) 破壞載重較原受火害 4 面的柱 (SCC4) 高。以聚丙烯纖維自充填混凝土修復柱 (NC2) 的破壞載重較自充填混凝土修復柱 (NC3) 高。

三、結論

- 1、本研究之自充填混凝土及聚丙烯纖維自充填混凝土修復柱均具有 4 小時防火時效。
- 2、火害後修復柱殘餘強度試驗結果顯示，柱的殘餘強度與核心混凝土強度、修復材料及原來受火害影響的柱加熱面數有關，以聚丙烯纖維自充填混凝土修復柱 (NC2) 的殘餘強度較自充填混凝土修復柱 (NC3) 高。
- 3、藉由添加聚丙烯纖維在自充填混凝土，可降低高溫中混凝土爆裂機率，在加熱試驗中並未發生如自充填混凝土修復試體之混凝土爆裂現象，僅出現垂直向裂縫。
- 4、加熱試驗中試體軸向變形膨脹現象不明顯，大多呈現壓縮情形，與受高軸力、鋼筋高溫潛變及混凝土再受高溫影響等有關，有待更多試驗與分析探討。

誌謝

本文為內政部建築研究所 101301070000G0036 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] The Concrete Society, "Assessment and Repair of Fire Damaged Concrete Structures and Repair by Gunite", Report of a Concrete Society Working Party, London, 28pp, 1978.
- [2] Tovey A.K., "Assessment and Repair of Fire Damaged Concrete Structures-an Update" ACI. Special Publication Sp-92, Evaluation and Repair of Fire Damaged to Concrete, Edited by T.Z.Harmathy, 1986.
- [3] 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。
- [4] 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。
- [5] 林慶元, 「鋼筋混凝土結構梁貼片補強火害後之耐火性能研究」, 內政部建築研究所委託研究報告, 台北, 2003。
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Haddad, R.H. ,Shannag, M.J. and Hamad R.J., “Repair of heat-damaged reinforced concrete T-beams using FRC jackets,” Magazine of Concrete Research, Vol. 59, No. 3, 2007, pp.223-231.
- [10] Haddad, R.H. , AL-Mekhlafy, N. and Ashteyat A.M., “Repair of heat-damaged reinforced concrete slabs using fibrous composite materials,” Construction and Building Materials, Vol. 25, 2011, pp.1213-1221.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [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] CEB-FIP, “Fire design of concrete structures-structural behaviour and assessment, ”, fib Bulletin 46, 2008.
- [15] ACI Committee 318, “Building code requirements for structural concrete(ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05),” *American Concrete Institute*, Michigan, 430 pp. (2005).
- [16] 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。

表 1 混凝土配比 ($f'_c=34.4\text{MPa}$)

水膠比 W/(C+P)	各成分的含量 (kg/m^3)						
	水	水泥	爐石	飛灰	細粒料	粗粒料	化學添加物
0.34	167	253	91	162	798	822	5.04 (強塑劑)

表 2 試體試驗資料

試體編號	核心混凝土型式	原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)	殘餘極限載重 (kN)	加熱時間
NC3	NC	3 面受熱 3 小時	SCC	134	44.8	2747	5266	4 小時
SCC3	SCC	3 面受熱 3 小時	SCC	141	44.8	2963	5914	4 小時
NC2	NC	4 面受熱 3 小時	SCC+PP	148	48.3	2747	5310	4 小時
SCC4	SCC	4 面受熱 3 小時	SCC+PP	154	47.9	2963	5749	4 小時

註：1.柱試體上、下端均為固定端。2.柱鋼筋比：2.8%。



圖1 火害後鋼筋混凝土梁柱接頭試體

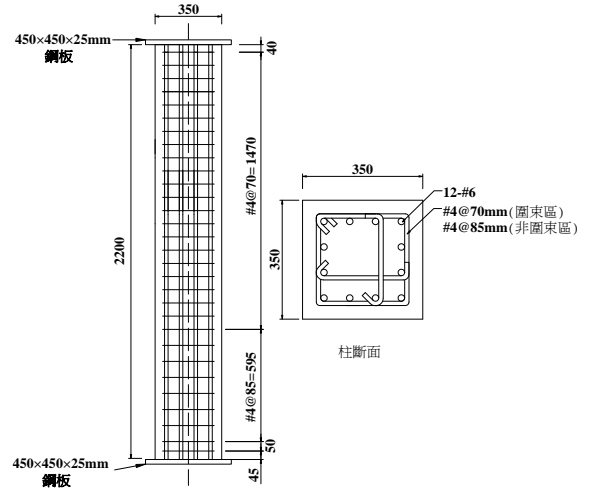


圖2 柱試體配筋立面圖

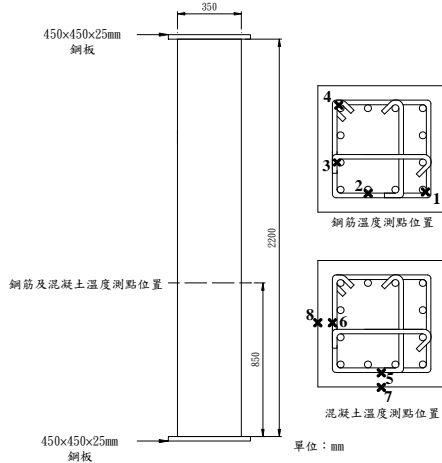


圖3 柱試體內部熱電偶線配置圖

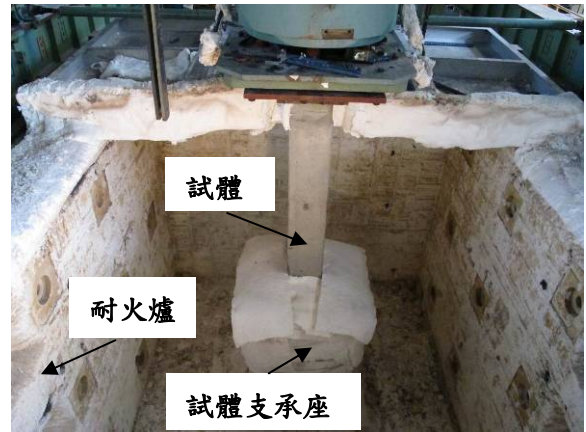


圖4 試體、加載設備與耐火爐裝置

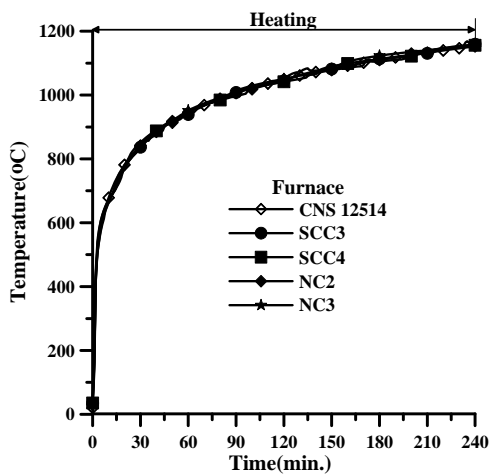


圖5 耐火爐溫度與CNS 12514升溫曲線比較



NC3

SCC4

圖6 試體火害後照片

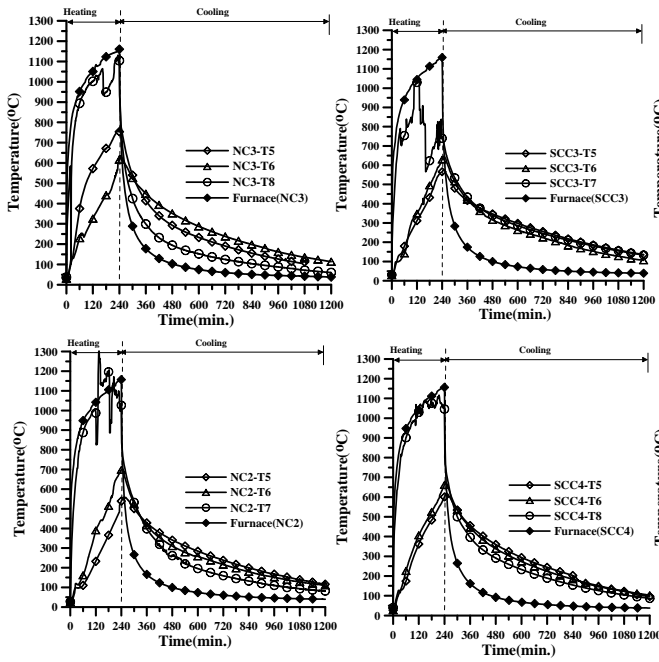


圖7 試體混凝土溫度-時間曲線圖

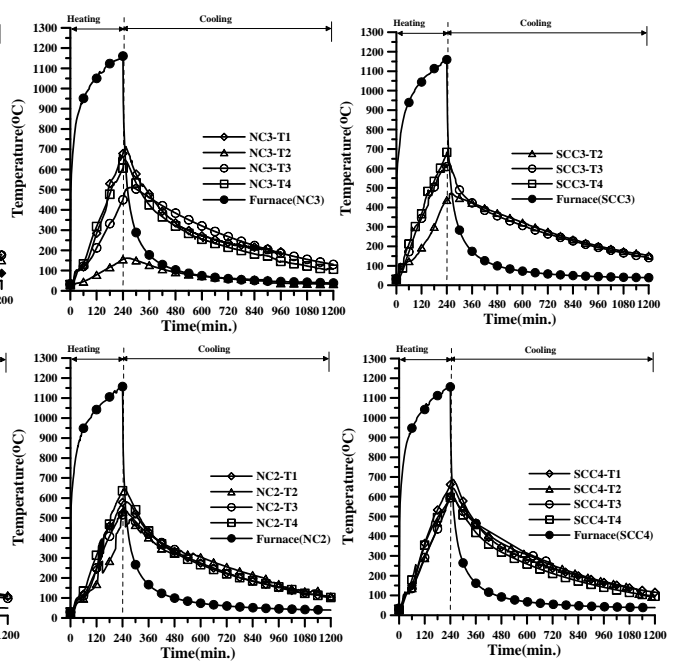


圖8 試體軸向鋼筋溫度-時間曲線圖

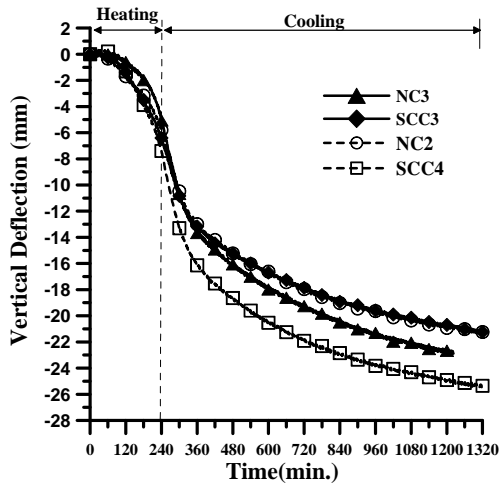
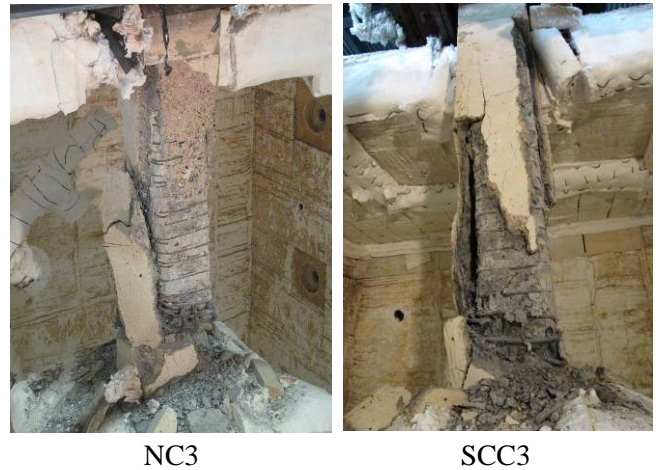


圖9 試體軸向位移-時間圖



NC3

SCC3

圖10 殘餘強度試驗中試體之破壞模式(1)



NC2

SCC4

圖11 殘餘強度試驗中試體之破壞模式(2)

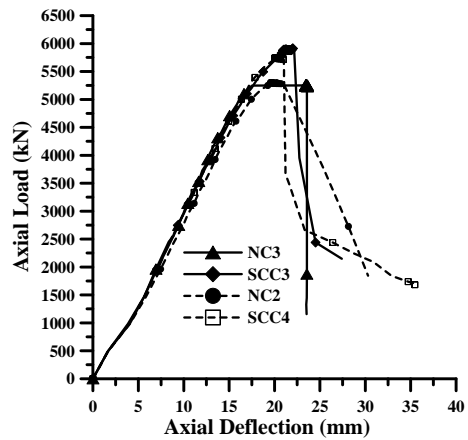


圖12 殘餘強度試驗中柱之載重與軸向位移關係