

聚丙烯纖維自充填混凝土局部修復鋼筋混凝土柱高溫加載試驗研究

Study the Tests of Loaded Local Repair of Columns Using Self-Compacting Concrete with Polypropylene Exposed 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 E-mail:chichung@abri.gov.tw, 06-2392755#1206

²國立成功大學土木工程學系教授

³內政部建築研究所所長

⁴內政部建築研究所研究員

⁵內政部建築研究所約聘研究員

摘要

鋼筋混凝土建築物可能由於結構設計不當、材料品質不良(如海砂、輻射鋼筋等)、材質劣化、熱脹冷縮、腐蝕老化、不當超載使用、地層下陷、鄰房施工或地震、火災、颱風而受損,若經過適當的修復或補強可繼續使用,然而目前對於結構物修復或補強後受高溫之影響研究很少見。本研究製作2根鋼筋混凝土柱試體,以水泥砂漿及聚丙烯纖維自充填混凝土局部修復,柱斷面尺寸為35 cm×35 cm,高度220 cm,保護層厚度為4 cm,柱兩端為固定,柱加載為設計載重的45%,依據CNS 12514進行耐火試驗,實驗結果發現水泥砂漿修復柱具有4小時防火時效,但在在加熱結束後2分鐘破壞,柱在火災後降溫過程中有可能發生倒塌,造成人員傷亡,值得進一步探討研究。聚丙烯纖維自充填混凝土修復柱於加熱時間3小時58分破壞,具有3小時防火時效,由於保護層混凝土脫落可見箍筋,造成修復柱之防火時效較低,需進一步探討。

關鍵字: 聚丙烯纖維, 自充填混凝土, 水泥砂漿, 火害, 修復

Abstract

Reinforced concrete buildings may often be due to improper design, poor quality materials, material deterioration, thermal expansion and contraction, corrosion aging, improper use of overloading, subsidence, house nearby construction or earthquakes, fires, typhoon damage, if properly repair or reinforcement can continue to use the current literature and more research focuses on restoration techniques and materials aspects of reinforcement, if for repairing or reinforcing structures after the high temperature studies will enable the repair of existing reinforcement technology more perfect. Two reinforced concrete columns with a cross section of 350 x 350 mm and total height of 2200 mm, were repaired with cement mortar and self-compacting concrete mixed with polypropylene fibres and subjected to a subsequent CNS 12514 standard fire exposure to study the effectiveness of repair during heating tests. The experimental results the specimens repaired with cement mortar had four-hour fire endurance, but the specimens repaired with self-compacting concrete mixed with polypropylene fibres had three-hour fire endurance, need further study.

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

一、前言

既有鋼筋混凝土建築物往往可能由於結構設計不當、材料品質不良(如海砂、輻射鋼筋等)、材質劣化、熱脹冷縮、腐蝕老化、不當超載使用、地層下陷、鄰房施工或地震、火災、颱風而受損，若經過適當的修復或補強可繼續使用，目前相關文獻多著重於修復補強技術及材料方面的研究，若能對於結構物修復或補強後受高溫進行研究，將使現有的修復補強技術更加完善。

國內陳舜田等人[1]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[2]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。周逢霖等人[3]探討鋼筋混凝土梁使用鋼板貼片補強後遭受高溫之行為，梁尺寸為30cm×50cm×950cm，補強採用鋼板貼覆於梁底以補強彎矩強度之作法。由試驗結果發現，補強試體之強度隨受熱增高而降低，另補強試體在預載加熱階段中之最大撓度與跨度比遠大於常溫補強試體，且補強試體受熱後之破壞最大撓度與跨度比明顯較常溫之補強試體大，應於設計過程中對此撓度影響詳加考慮。黃獻政[4]探討鋼筋混凝土樓版火害後應用碳纖維複合材料補強效果，其研究成果顯示，補強過之樓版在強度和勁度均高於未補強之樓版，在低補強量(50%以下)時貼片強度可完全發揮，高補強量(70%以上)時因貼片脫離或支承破壞而使貼片無法發揮其強度。陳志弘[5]研究防火版材應用於一般碳纖維補強梁之強度影響，藉以分析防火版材之防火能力，進而探討版材披覆之施工法，做為日後防火版材施工參考依據。

國外 Williams 等人[6]、Chowdhury 等人[7]及 Ahmed 與 Kodur[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。Haddad 等人[9,10]探討受火害鋼筋混凝土單向板及 T 形梁，將受火害較嚴重部份之混凝土敲除，補以 FRP，試驗結果顯示經火害受損試體補強後大致尚能恢復未受火害前之情形。Yaqub 等人[11,12]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、試驗規劃

2.1 試體設計

本研究利用[13]之鋼筋混凝土梁柱接頭試體，如圖 1 所示，該研究在 97 年進行常溫實驗後置放室內 18 個月，再移到戶外放置 33~45 個月，該試體為普通強度混凝土(NC)，並依據 ACI 318-05 第 21 章耐震設計規定及內政部所頒布之建築技術規則有關耐震設計規定製作。將已破壞的梁拆除，模擬既有鋼筋混凝土柱使用後發生劣化或損壞而需進行局部修復，修復材料選用水泥砂漿及聚丙烯纖維自充填混凝土，分別以徒手修復及組模澆置方式修復進行修復，先敲除掉梁柱接頭區的保護層混凝土，再依原柱斷面尺寸及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[14]，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，於試體修復範圍內預先埋設 K-Type 的熱電偶，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。

2.2 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，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，其詳細配比內容，如表 1 所示。聚丙烯纖維 (polypropylene fibres) 使用威肯建材企業有限公司所生產 TECHFIBER。

試體修復時，先將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。本研究以徒手修復及組立模板澆置進行修復。其施作過程簡述如下：

(1) 徒手修復：水泥和砂的比例為 1:2.5，水泥為台灣水泥公司生產之波特蘭水泥第 I 型，柱試體修復時採直立方式，修復前，先將黏性塗層所需之海菜粉（主要成份為甲基纖維素(Methyl Cellulose)），運用在水泥或砂漿中時，可增強水泥與基材的附著性、保水性、工作性，延長工作時間）與水混合調配（海菜粉=0.1kg，水=17kg），修復時，再將水泥（37kg）加入靜置一天之海菜粉水拌合，在進行黏性塗層塗抹前，先將修復區域灑水潤濕。完成黏性塗層塗抹後，將水泥砂漿以鏟刀敷於黏性塗層並以一層層方式敷上每一層待前一層具備足夠支撐強度時再敷上，每一覆蓋層不超過 20mm，最後整平柱試體表面並養護。為評估水泥砂漿 28 天抗壓強度，參考 CNS 1010「水硬性水泥壘料抗壓強度檢驗法」[15]製作 50mm 立方體試體。(2) 組立模板澆置：柱試體修復時，先進行模板組立，在混凝土澆置前，將修復區域灑水潤濕後，同前述方式完成黏性塗層塗抹，為確保纖維均勻分佈於混凝土內，將聚丙烯纖維（本實驗擬添加 900g/m³）與混凝土放入拌合機內拌合 4 至 6 分鐘後，將拌合後混凝土澆置於補強位置。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。

2.3 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500mm，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。

2.4 加溫與加載方法

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491kN、981kN、1472kN、1962kN、2453kN、2747kN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2747kN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。

三、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68~208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。

3.1 耐火爐溫度

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。

3.2 高溫試驗觀察

試體NC1-SCP加熱時間24分時柱東南角隅混凝土產生剝落，43分東南角隅剝落處混凝土有延伸裂縫，172分柱東側混凝土脫落可見箍筋，如圖6(a)所示。238分鐘試體破壞，加熱試驗結束。經16小時冷卻，將爐蓋打開後觀察破壞試體表面現象，既有混凝土表面顏色為淡黃色、粉紅色及灰白色，柱混凝土保護層脫落壓碎、柱主筋壓彎及箍筋斷裂，如圖7(a)所示。試體NC4-CM加熱時間16分時柱角隅混凝土產生裂縫（由修復處開始），28分混凝土脫落，可見箍筋，如圖6(b)所示。試體在加熱結束後2分鐘時破壞，經12小時冷卻，將爐蓋打開後觀察破壞試體表面現象，既有混凝土表面顏色為淡黃色、粉紅色及灰白色，柱角隅混凝土保護層整片脫落壓碎、柱主筋壓彎及箍筋斷裂，如圖7(b)所示。

3.3 試體內部溫度

本試體模擬內柱型態，即柱四面受熱，加熱試驗中由埋設試體內部熱電耦線所量測混凝土及鋼筋溫度之變化，由於熱電耦線部分曝露在加熱爐內，加熱試驗前以陶瓷綿包覆，以免受熱損毀。

試體內部混凝土及軸向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 NC1-SCP 之混凝土溫度變化，如圖 8(a)所示，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 (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，測點 (T5) 在加熱時間 102 分鐘後，溫度上升變快，可能是熱電偶線在加熱爐中燒毀，最後量測溫度為柱表面溫度，測點 (T6) 於試體破壞時溫度為 652°C。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。圖 8(b)為試體 NC4-CM 之混凝土溫度變化，由該圖發現與試體 NC1-SCP 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 (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，升溫遲滯平台現象明顯，測點 (T5) 在加熱時間 191 分鐘後，熱電偶線故障。試體表面測點 (T7) 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，加熱時間 115 分鐘後，熱電偶線燒毀。

2、鋼筋之溫度變化

圖 9 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)。試體 NC1-SCP 之鋼筋溫度變化，如圖 9(a)所示，測點 (T4) 於試體破壞時溫度及 631°C，依 EC2[17]之建議，該處鋼筋之降伏強度將衰減至常溫降伏強度的 10%。測點 (T1、T2、T3) 在加熱時間 102 分鐘後，溫度上升變快，可能是熱電偶線在加熱爐中燒毀，最後量測溫度為柱表面溫度。圖 9(b)為試體 NC4-CM 之鋼筋溫度變化情形，測點 (T1、T2、T3、T4) 於加熱停止時溫度為 694.8°C、381.7°C、766.2°C 及 881.7°C，依 EC2[17]之建議，該處鋼筋之降伏強度將衰減至常溫降伏強度的 9%、72%、8%及 6%。

3.4 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 NC4-CM 在加熱 117 分鐘前，軸向變形呈現伸長現象，加熱 90 分鐘軸向伸長量達到最大為 0.53 mm，之後開始緩慢壓縮，加熱結束時，軸向壓縮量為 9.23 mm。試體 NC1-SCP 在加熱 124 分鐘前，軸向變形呈現伸長現象，加熱 61 分鐘軸向伸長量達到最大為 0.42 mm，之後開始緩慢壓縮，於 238 分鐘破壞，此時軸向壓縮量為 16.1 mm。比較試體 NC4-CM 及 NC1-SCP 在加熱中之軸向變形，在加熱 93 分鐘前，兩者軸向位移變化大約一致，在加熱 183 分鐘後，試體 NC1-SCP 之軸向壓縮量較大。試體 NC4-CM 在加熱結束後 2 分鐘發生破壞，此時軸向壓縮量為 23.5 mm，可能的原因為加熱試驗中從修復處開始產生裂縫，造成柱子混凝土大量脫落，可見箍筋，以致柱核心混凝土及軸向鋼筋溫度偏高，混凝土及主筋強度大幅降低，雖然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，加重內部材料損傷。此現象表示建築結構體在火災後降溫過程中有可能發生倒塌，造成人員傷亡，值得進一步探討研究。

3.5 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)， $h(\text{mm})$ 為試體之初始高度。

本研究試體柱高 $h=2200 \text{ mm}$ ，受熱尺度為 1500 mm ，依 CNS 12514 之規定可求得， $C=15 \text{ mm}$ ， $\frac{dC}{dt}=4.5 \text{ mm}/\text{min}$ ，試體 NC4-CM 未超過最大軸向壓縮量之規定，為 9.23 mm ，具有 4 小時防火時效。試體 NC1-SCP 於加熱 3 小時 58 分破壞，超過最大軸向壓縮量之規定，為 16.1 mm 。

四、結論

本研究經局部修復既有鋼筋混凝土柱，柱試體斷面為 $35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ ，高度 220 cm ，保護層厚度為 4 cm ，柱兩端為固定，加熱試驗時柱端加載為 45% 柱工作的載重，經由耐火性試驗結果與分析，可得到以下結論：

- 1、加熱結束時，柱呈現壓縮變形，試體 NC4-CM 為 9.23 mm ，未超過最大軸向壓縮量之規定，具有 4 小時防火時效。試體 NC1-SCP 於加熱 3 小時 58 分破壞，具 3 小時防火時效。
- 2、試體 NC4-CM 在加熱結束後 2 分鐘破壞，可能是加熱結束時溫度下降，但仍高於近試體中心處溫度，部份熱量仍會往內部傳送，致使內部溫度繼續上升，加重內部材料損傷，即建築結構在火災後降溫過程中有可能發生倒塌，造成人員傷亡，值得進一步探討研究。
- 3、由試體 NC1-SCP 試驗結果發現聚丙烯纖維自充填混凝土局部修復柱，防火時效較低。既有建築物進行局部修復或補強時，修復方式是否影響耐火性能，需進一步探討。

誌謝

本文為內政部建築研究所 102301070000G0045 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。

五、參考文獻

1. 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，臺北 (1990)。
2. 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，臺北 (2000)。
3. 周逢霖、郭詩毅、涂耀賢、林慶元，「鋼筋混凝土樑鋼板貼片補強後再受溫之性能研究」，建築學報，第 63 期，第 115-129 頁 (2008)。
4. 黃獻政，「碳纖維複合材料應用於 RC 樓板火害後補強研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程技術研究所，臺北 (2001)。

- 5.陳志弘，「以防火版材披覆提高碳纖維補強受損梁抗火能力研究」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹 (2001)。
- 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, pp.60-67 (2008).
- 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, pp. 61-68 (2008).
- 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, pp.2201-2211 (2011).
- 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, pp.223-231 (2007).
- 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, pp.1213-1221 (2011).
- 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, pp.694-701 (2011).
- 12.Yaqub, M., and Bailey, C. G., “Repair of fire damaged circular reinforced concrete columns with FRP composites”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp.359-370 (2011).
- 13.李其忠、王天志，「鋼筋混凝土梁柱接頭火害後之行為初探」，內政部建築研究所自行研究計劃成果報告，臺北 (2008)。
- 14.ACI Committee 318, “Building code requirements for structural concrete(ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05),” American Concrete Institute, Michigan, 430 pp. (2005).
- 15.CNS 1010, 「水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法」，經濟部標準檢驗局 (1993)。
- 16.CNS 12514, 「建築物構造部分耐火試驗法」，經濟部標準檢驗局 (2010)。
- 17.Eurocode 2, 1992-1-2: Design of concrete structures—Part1-2： General rules – Structural fire design (2004).

表 1 混凝土配比

	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	聚丙稀纖維	化學添加物
普通混凝土	0.49	185	190	114	76	855	900	—	3.8 (減水劑)
聚丙稀纖維自填充混凝土	0.34	167	253	91	162	798	822	0.9	5.04 (強塑劑)

表 2 試體試驗資料

試體編號	修復方式	測試時之試體 齡期 (天)	修復材料強度 (MPa)	加熱時柱端 加載 (kN)	加熱 時間
NC4-CM	1:2.5	208	36.8	2747	4 小時
NC1-SCP	聚丙稀纖維自 填充混凝土	68	51.5	2747	3 小時 57 分

註：1.柱試體上、下端均為固定端。2.柱鋼筋比：2.8%。



圖1 鋼筋混凝土梁柱接頭試體

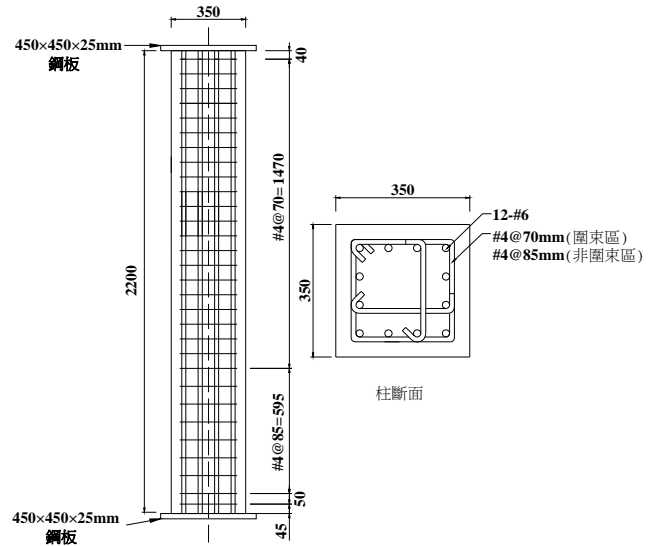


圖2 柱試體配筋立面圖

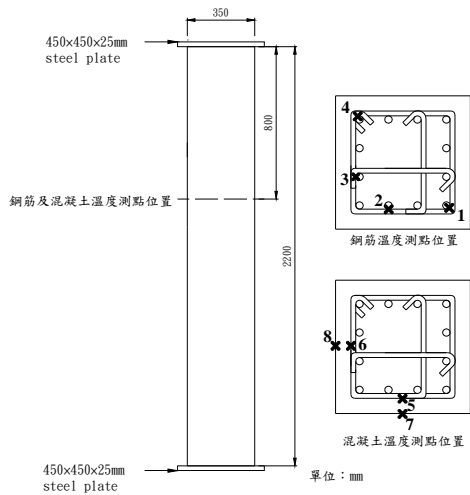


圖3 柱試體內部熱電偶線配置圖



圖4 試體、加載設備與耐火爐裝置

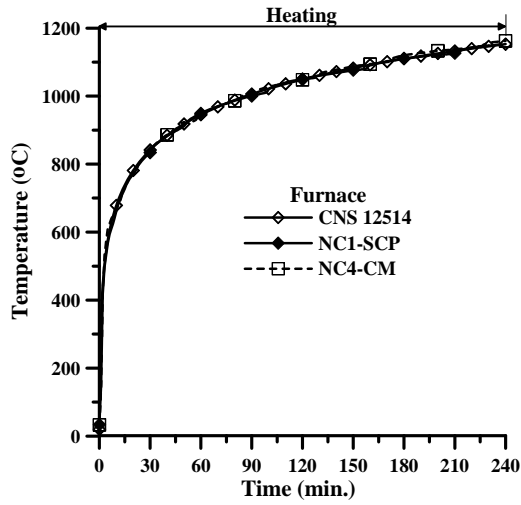


圖5 耐火爐溫度與CNS 12514升溫曲線比較

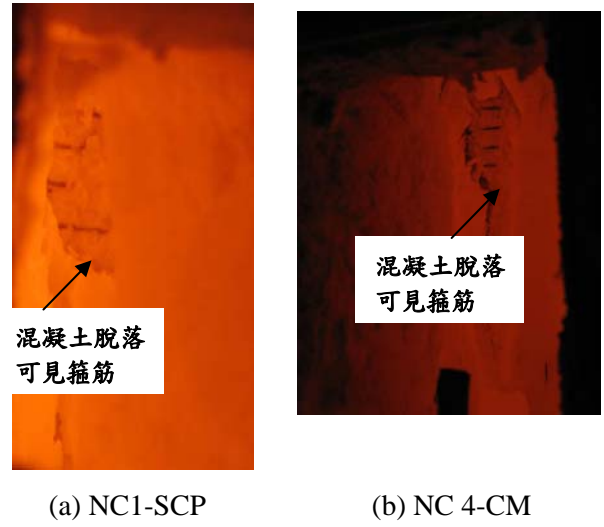
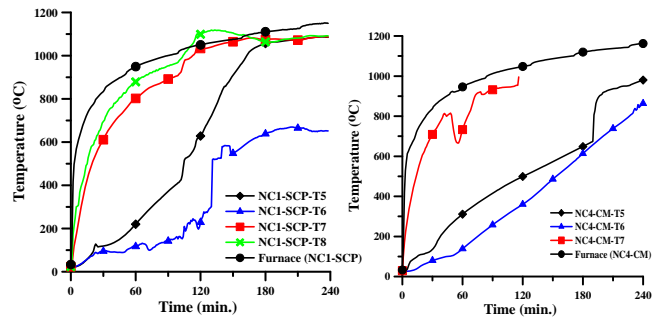


圖6 試體火害中照片



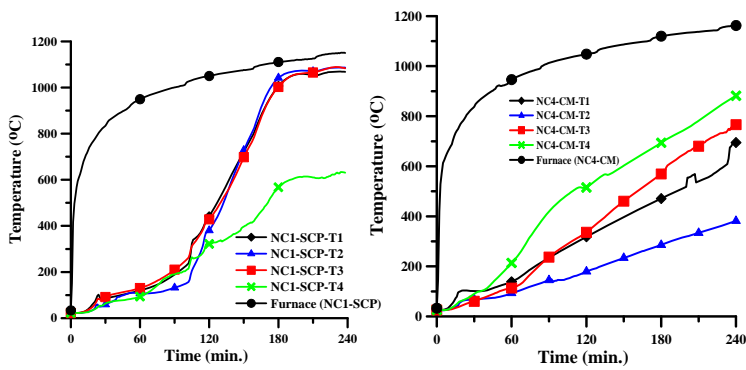
(a) NC1-SCP (b) NC 4-CM

圖7 試體破壞照片



(a) NC1-SCP (b) NC 4-CM

圖8 試體混凝土溫度-時間曲線圖



(a) NC1-SCP (b) NC 4-CM

圖9 試體軸向鋼筋溫度-時間曲線圖

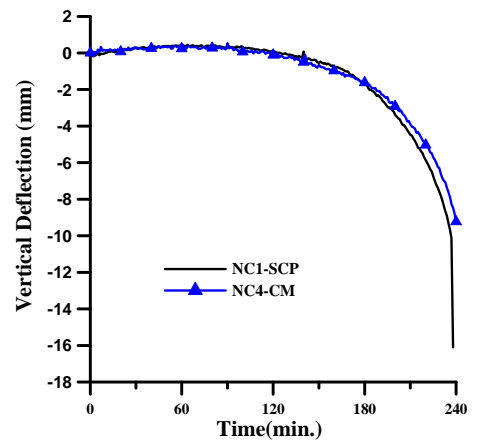


圖10 試體軸向位移-時間圖