

台灣混凝土學會 2007 年混凝土工程研討會

鋼筋混凝土梁柱接頭高溫加載行為初探

The Behavior of Loaded Reinforced Concrete Beam-Column Joints Exposed to Fire

李其忠¹ 何明錦² 王天志³ 陳建忠⁴ 蔡銘儒⁵ 方一匡⁶

¹ 內政部建築研究所 副研究員、成功大學土木系博士候選人

² 內政部建築研究所 所長

³ 內政部建築研究所 助理研究員

⁴ 內政部建築研究所 組長

⁵ 內政部建築研究所 研究員

⁶ 國立成功大學土木系 教授

摘要

混凝土建築結構受火害行為非常複雜，要用理論或數值分析相當困難，結果是否正確更受質疑，因此以實體試驗作為正確瞭解其行為及驗證數值分析結果是必要的，但是試驗工作從試體規畫，製作及執行試驗工作相當費時，再加上其所需費用也相當龐大，要大規模實施有其困難，因此使用數值方法分析有其必要性。本研究共製作 10 根梁柱接頭試體，依據 ACI 318-05 第 21 章耐震設計規定及建築技術規則有關耐震設計規定，加熱條件依據 CNS 12514 之升溫曲線實施，探討普通強度混凝土與自充填混凝土受高溫影響。

關鍵字：火害、鋼筋混凝土、梁柱接頭

Abstract

The behavior of structure suffering fire damage is so complex and it is impossible to analysis this behavior by analytical method. Full scale beam-column joint testing is very costly and time consuming. The use of empirical equation from testing and numerical technique is feasible way to investigate the behavior of structure suffering fire damage. 10 Beam-column joint specimens have been studied in this research. According to Chapter 21 in ACI 318-05 ,and the heating curve in CNS 12514, the influences of high temperature on the normal concrete and self-compacting concrete are discussed.

Keywords: fire ,reinforced concrete,beam-column joint

一、前言

建築物在承受火災後，首先面對的問題便是其安全性問題，如果建築物強度嚴重受損，無法經由修復補強的方法，恢復原來的強度，或者修復補強的費用高昂，超過拆除重建的費用，建築物便要面臨拆除重建的命運。台灣位處環太平洋地震帶上，幾乎所有建築物的結構設計都是由地震力產生的水平力所控制，因此在評估建築物在承受火災後，到底還剩下多少強度，其能承受之水平力的能力，便是評估建築物能否經由修復補強的重要指標。依據以往研究成果顯示，混凝土在承受火害後雖然強度急速下降，但是只要不承受很高的溫度，經過適當的再養護可以恢復部份強度，由於混凝土是很好的隔熱材料，如果受火害時間不是很長，通常受很高的溫度都侷限在表面部份，如果將此部份移除後，加以再養護後，將表面部份經過修補或許可以免除拆除的命運，不但可以減少損失，也可以快速復原。

混凝土建築結構受火害行為非常複雜，要用理論或數值分析相當困難，結果是否正確更受質疑，因此以實體試驗作為正確瞭解其行為及驗證數值分析結果是必要的，但是試驗工作從試體規畫，製作及執行試驗工作相當費時，再加上其所需費用也相當龐大，要大規模實施有其困難，因此使用數值方法分析有其必要性。目前使用較成功之分析軟體為加拿大國家防火實驗室所發展，使用於應用軟體 firecam 中，該程式使用簡化之二維度有限差分法，其中有關熱容量、熱傳導係數，水份蒸發量及混凝土應力—應變關係等公式也都是根據試驗資料所得之經驗公式，以避開複雜但未必正確的理論分析。雖然如此但仍然可以得到相當準確的結果。以二維度有限差分法分析單純柱子承受無偏心軸載重尚屬可行，要分析偏心載重，即使是單純的柱子都不可行，更不用說是有梁存在之梁柱組合體，因此採用三維度之有限元素法建立分析模式，所有有關熱容量、熱傳導係數，水份蒸發量及混凝土應力—應變關係等公式仍然採用加拿大國家防火實驗室所發展之經驗公式，但必須調整部份參數，期以試驗資料相符。

目前國內外研究機構加熱爐大多為單獨之柱爐或梁爐，無法進行梁柱構架試驗，以梁柱構架為探討主題之文獻資料相當缺乏，許崇堯[1]曾探討火害後鋼筋握裹衰退及其對梁柱接頭特性影響，不過受限實驗設備僅能先對梁柱接頭加熱後降至室溫再進行加載試驗，並不是同時加熱及加載試驗。鄭復平等[2]利用內政部建築研究所防火實驗中心之梁柱複合爐，進行鋼筋混凝土梁柱組合體火害行為研究，其研究成果顯示，混凝土是很好的隔熱材料，柱體內部的溫度與外部溫度有很大的差異，保護層對鋼筋發揮很大功效，如果沒有承受彎矩下，單純承受軸力時，大尺寸柱子的耐火能力絕對比小尺寸大很多，故由小尺寸的試驗結果要直接應用到實際結構物上，由於尺寸效應有很大的誤差，顯得非常保守。如果柱子承受彎矩，由於在保護層破裂後，鋼筋直接曝露在高溫下，使其抗拉能力降低，柱子的抗火能力急速降低，承受軸力及彎矩之柱子必須特別注意。混凝土柱中的含水量對火害也有相當程度的影響，由於含水量的存在會使混凝土產生爆裂現象發生，因而降低柱子的抗火能力及抵抗水平力的殘餘能力。所以內政部建築研究所已建置完成 2000 噸柱加載及梁 200 噸均佈加載之梁柱加熱複合爐，將可對梁柱構架受高溫時之有關行為進行研究。

二、論文內容

2.1 試驗規劃

2.1.1 試驗設備

本研究使用內政部建築研究所防火實驗中心小型複合高溫爐，其加熱尺度為 120 cm × 120 cm × 120 cm，由兩側各有 2 個噴火孔，共 4 個燃燒機提供熱能，同時使用位於加熱爐上方加載能力為 100 噸之油壓機及位於梁端上方加載能力為 100 噸之油壓機，該兩部油壓機必須能夠獨立控制，分別施加不同的力量，如圖 1 所示。

2.1.2 升溫曲線

本研究採用 CNS 12514 「建築物構造部分耐火試驗法」，所需溫度 $T=345\log_{10}(8t+1) + 20$ ， $t =$ 試驗經過時間（分）。

2.1.3 梁柱接頭試體製作

本研究共製作 10 根梁柱接頭試體，其中 5 根為普通強度混凝土(NC) 梁柱接頭，其餘 5 根為自充填混凝土(SCC)。

1、試體尺寸：

梁柱接頭試體受限加熱爐空間的尺寸及加載設備能力，柱斷面為 35 cm × 35 cm，高度 220 cm，主梁斷面 25 cm × 35 cm，跨度 125 cm，兩端翼梁斷面 25 cm × 35 cm，跨度 42.5 cm，柱與梁保護層厚度均依規範規定為 4 cm，柱端板鋼板尺寸為 45 cm × 45 cm × 2.5 cm，試體及柱端板尺寸如圖 2。

2、鋼筋：

試體配筋如圖 2 所示，柱鋼筋比為 2.8%，撓曲鋼筋採用 12-#6 (SD420 竹節鋼筋， $f_y=4200\text{kgf/cm}^2$)，箍筋為 #4 (SD280 竹節鋼筋， $f_y=2800\text{kgf/cm}^2$)，圍束區箍筋間距 7 cm，非圍束區箍筋間距 9.5 cm，主梁鋼筋比為 1.8%，撓曲鋼筋 6-#5 (SD420 竹節鋼筋， $f_y=4200\text{kgf/cm}^2$)、壓力筋比 1.18%，撓曲鋼筋 4-#5 (SD420 竹節鋼筋， $f_y=4200\text{kgf/cm}^2$)，箍筋為 #3 (SD280 竹節鋼筋， $f_y=2800\text{kgf/cm}^2$)，圍束區箍筋間距 6.5 cm，非圍束區箍筋間距 12 cm。

3、熱電耦線配置

為量測試體內部混凝土及鋼筋之溫度，於加熱試體內預先埋設 K-Type 型式的熱電耦線，其埋設位置為主梁、柱上下端及梁柱接頭內，以量測試體加熱期間混凝土與鋼筋溫度變化及分佈情形，可提供後續數值分析及其他相關研究用，如圖 3~圖 7。

4、應變計配置

由於應變計無法承受高溫，僅在 2 根未加熱試體內鋼筋黏貼應變計，量測鋼筋受力情形，其黏貼位置分別於主梁、柱上下端及梁柱接頭之主筋和箍筋。

5、試體製作

為與實際鋼筋混凝土結構製作一致及避免泌水和析離現象，本計畫梁柱接頭試體係先製作試體支撐架以便柱的鋼筋籠垂直組立、梁的鋼筋籠水平組立，在混凝土澆置時柱為垂直澆置，梁為水平澆置，另實尺寸梁柱接頭要在高溫加載下作試驗，柱兩端必須設置鋼板以

便傳遞載重及做為與加載設備固定之用，此兩片鋼板必須與柱主筋鉸接在一起，鋼板尺寸大於柱斷面尺寸，故只能先鉸一邊，另一端則預留鋼筋孔，等混凝土澆置完成後，鋪設高強度石膏，再將鋼板套上，用電鉸將鋼板和鋼筋鉸接牢固，並將鉸道磨平。試體製作流程簡述如後，(1) 鋼筋籠組立 (2) 應變計、熱電偶線之貼置 (3) 模板組立 (4) 混凝土澆置 (5) 養護及拆模。如圖 8。

由於試驗時軸力加載是依據混凝土強度之需要，隨著每批試體的製作，必須製作 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加載計算依據，及火害混凝土強度評估。

6、試驗條件

- (1) 火害時間：2 小時。
- (2) 柱端加載： $0.2 \times f_c' \times$ 柱斷面 ($b \times h = 35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$) (約 68.6 噸)。
- (3) 梁端加載：不超過 10 噸。
- (4) 探討普通強度混凝土與自充填混凝土受高溫影響。

2.2 鋼筋混凝土柱耐火性能之數值分析模式

2.2.1 數值模擬之假設

由於加載鋼筋混凝土梁柱在高溫下的力學行為相當複雜，在時間非常有限下要完全自行開發有相當的困難度，為避免浪費人力、資源重複發展類似分析程式，因此選擇與加拿大國家防火實驗室合作，依據其現有模擬普通混凝土柱耐火性能之數值分析模式，修正部份材料在高溫下的力學性質，成為本計畫鋼筋混凝土柱耐火性能模擬之數值分析模式。該程式在加拿大國家防火實驗室已經使用很長的時間，應用在分析普通鋼筋混凝土柱耐火性能方面，經過許多驗證均為可行[3]。

基於簡化計算過程，以下的假設條件用於模擬程式中：

- (1) 柱的曲率變化，從柱任一端至柱中段為線性關係。
- (2) 柱任一剖面在變化過程均保持平面。
- (3) 混凝土無張力強度。
- (4) 鋼筋和混凝土間無相對滑移產生。
- (5) 柱在開始加熱前，因其它因素所造成之柱長度的縮減(如乾縮、潛變、受載重之彈性變形等)，均予以忽略。柱之實際試驗長度，以加熱開始時之長度為初始長度。
- (6) 任一元素的強度貢獻值和該元素之爆裂程度有關。
- (7) 當計算出柱之荷重強度小於外加之載重時，則視為柱已破壞。

程式分析過程主要分為三個步驟，首先計算柱所承受之環境溫度，接著計算柱內部溫度，最後計算柱之荷重強度及變形[4]。在計算柱荷重強度時，特別將柱表面混凝土爆裂、剝落所造成的影響，經由簡化的”爆裂係數”而加以考慮。

2.2.2 數值模擬之公式導引

依據 NRCC 現有模擬普通混凝土柱耐火性能之數值分析模式，修正部份材料在高溫下的力學性質，以下公式之導引，乃依據 NRCC 先前之結果[5, 6]引述如後。

1、試驗溫度曲線

在模擬程式中，假設柱是四面均勻加熱，加熱曲線是依據 ASTM E119, Standard test methods for fire tests of building construction and materials，該標準曲線可用以下方程式表示之：

$$T_f^j = 20 + 750 \left[1 - \exp(-3.79553\sqrt{t}) \right] + 170.41\sqrt{t} \quad (1)$$

其中， t 為時間(小時)， T_f^j 為在時間 $t=j\Delta t$ 時之溫度($^{\circ}\text{C}$)。

2、混凝土溫度

混凝土溫度採用有限差分法計算，溫度之傳遞以相鄰元素之熱平衡來計算[7]。分析前，必須先對柱斷面分割成若干小元素，在柱四周表面採用三角元素，而在柱內部則採用正方形元素，如圖 4-1 所示；其中元素 $P_{m,n}$ ，代表其 x 軸座標為 $x=(n-1)\Delta\xi/\sqrt{2}$ ，其 y 軸座標為 $y=(m-1)\Delta\xi/\sqrt{2}$ 。因為對稱及本程式另可適用於矩形斷面分析的關係，故只對四分之一斷面作分析。

3、柱荷重強度計算

(a) 三角形元素轉換成正方形元素

在計算柱之變形、應力及荷重強度時，平行 X、Y 軸，將柱斷面轉換分割成更小之正方形元素，如圖 9 所示。這網格內每一元素之寬度為 $\Delta\xi/2$ 。每一元素之變形、應力及強度，均以該元素之中心點為代表。每一元素中心點之溫度，是以三角形網格元素之溫度計算得之。其計算關係如下：

$$(T_{m,n})_{square} = \left[\frac{T_{(m+1),(n+1)}^j + T_{m,(n+2)}^j}{2} \right]_{triangular} \quad (2)$$

鋼筋溫度則假設等於鋼筋中心位置處之混凝土元素溫度。

(b) 計算加熱過程中的強度之假設

在實驗過程中，柱強度隨加熱時間的增長而減弱，此柱強度可由荷重位移分析(Load deflection analysis)求得。此方法將在實驗中端點條件為固定端之柱，假設成有效長度為 KL ，而端點條件為鉸接之柱，如圖 10 所示。由於製作試體及設備之誤差，載重加載時會有一微小之偏心存在，是無法避免的。因此在計算時，會假設一微小之初始偏心值。經由模擬程式驗證，此偏心值一直到 3 公厘，其對耐火時效之影響仍很小，因此本程式之初始偏心值設定為 0.2 公厘。

柱之曲率變化，假設從鉸接端一直到柱中間高度為線性關係，如圖 10 所示。其關係式如下：

$$Y = \chi \frac{(KL)^2}{12} \quad (3)$$

其中，Y 為柱中間高度之位移， χ 為這個高度之曲率。

對給定任一曲率，且對柱中間高度給定任意位移，則柱之軸向變形會一直變化，直到在柱中間高度之內彎矩等於外加彎矩為止。其中，外加彎矩等於：

載重 * (位移 + 偏心)

利用此方法，可以求得暴露在加熱火燄下，任意時段之荷重 位移曲線，從這個曲線就可以求得任意時段之柱強度。

(c)混凝土之方程式：

每一個混凝土元素的應變則等於該混凝土元素的熱膨脹應變、受壓而造成之軸向變形和因彎矩而造成的應變之總合。

對位於 y 軸右邊之元素而言，其代表式如下：

$$(\varepsilon_c)_R = (-\varepsilon_T)_c + \varepsilon + \frac{x_c}{\rho} \quad (4)$$

對位於 y 軸左邊之元素而言，其代表式如下：

$$(\varepsilon_c)_L = (-\varepsilon_T)_c + \varepsilon - \frac{x_c}{\rho} \quad (5)$$

其中， ε_c 為混凝土元素總應變，其下標 R、L 分別代表元素在 y 軸右邊或左邊， ε_T 為元素的熱膨脹， ε 為元素受壓而造成之軸向變形， x_c 為元素中心點至為元素中心點至 Y 軸之水平距離， ρ 為曲率半徑。

(d)鋼筋之方程式：

鋼筋之應變則用和混凝土相同之考慮計算之。

對位於 y 軸右邊之鋼筋而言，其代表式如下：

$$(\varepsilon_s)_R = (-\varepsilon_T)_s + \varepsilon + \frac{x_s}{\rho} \quad (6)$$

對位於 y 軸左邊之鋼筋而言，其代表式如下：

$$(\varepsilon_s)_L = (-\varepsilon_T)_s + \varepsilon - \frac{x_s}{\rho} \quad (7)$$

每個混凝土及鋼筋元素之應力，則利用相關材料在高溫下之應力應變關係來推導。

(e)計算柱強度之程序：

經由式 4 到式 7 及相關之方程式，可求得柱中間高度之混凝土及鋼筋元素的

應力，並進而求得其軸向荷重及內彎矩。

當柱之荷重強度小於外加之載重時，則視為柱已破壞，此時之加熱時間為該柱之耐火時效。

2.2.3 初步數值分析結果

1、溫度歷時

經該模式模擬柱受四面受熱時，不同火害時間下，柱在不同內部深度之溫度分佈如圖 11 至圖 12 所示，由圖可看出普通混凝土或自充填混凝土柱內溫度測點 1(垂直及水平距柱中心 13cm，即處於柱角隅)溫度較其他柱內部各點高，因兩側受加熱影響之故，柱內溫度測點 2(垂直距柱中心 17cm)則接近柱表面處，其溫度與標準加熱曲線相比較，於加熱時間 60 分時低 150°C，隨加熱時間增加兩者間的溫度差愈小，柱內溫度測點 6(柱中心)，隨加熱時間增加其溫度較其他柱內部各點小，主要是混凝土受熱時，其熱傳導小且屬熱容量大的材料，故溫度緩慢上升。

2、柱軸向及側向變形

柱試驗時之軸向變形及中間點側向變形由數值模擬結果，如圖 13 至圖 14，由圖可看出普通混凝土或自充填混凝土軸向變形行為均隨加熱時間增加軸向熱膨脹變形愈大，分別在加熱時間 140 分鐘及 180 分鐘，軸向熱膨脹變形達到最大，普通混凝土為 14.63 mm、自充填混凝土 16.6 mm，之後由於加熱時間愈長混凝土材料強度受高溫影響所造成折減愈大，致軸向壓縮變形大於軸向熱膨脹變形，所得數值開始變小，最後發生挫曲破壞，此時柱中間點側向變形分別為 0.34088 mm 及 1.361 mm，由圖 14 可發現此挫曲現象，故數值模擬能適當的顯示在試驗過程之柱軸向及側向變形行為。

3、受高溫柱軸向載重折減情形

數值模擬普通強度混凝土及自充填混凝土柱受高溫其軸向載重折減情形如圖 15。由圖可看出柱軸向載重強度隨加熱時間增加而降低，當柱從開始加熱到不能承受荷重而破壞之時間，稱之為耐火時效，本計畫普通強度混凝土及自充填混凝土柱耐火時效，分別為 332 分及 362 分。

三、結論與建議

- 1、本研究梁柱試體養護與齡期均須較多時間，係為避免高溫試驗時混凝土爆裂，造成試驗設備損壞及影響試驗結果，一般如置於 21 至 24°C 之常溫與 30 至 40% 相對濕度的自然環境中須氣乾 13~69 個月（試體相對濕度降低至 61~80%），方可進行高溫加載實驗，目前已完成試體製作及初步柱結構火害數值分析模式，後續將進行梁柱試體加載加熱試驗，以瞭解鋼筋混凝土梁柱接頭火害行為。
- 2、以往研究受限實驗設備僅能探討單一構件（如梁、柱或樓板）受火害行為，而以受火害梁柱接頭為研究對象，屈指可數，今內政部建築研究所已建置完成梁柱複合爐將可對梁柱構架受高溫行為進行研究。
- 3.由數值分析結果：

- (1) 溫度歷時，發現柱受火害時間愈久則內部溫度上升愈高，距離柱中心愈近溫度上升較為緩慢，角隅處之溫度較其他位置高。
- (2) 柱軸向及側向變形，普通混凝土或自充填混凝土軸向變形行為均隨加熱時間增加軸向熱膨脹變形愈大，分別在加熱時間 140 分鐘及 180 分鐘，軸向熱膨脹變形達到最大，普通混凝土為 14.63 mm、自充填混凝土 16.6 mm，之後由於加熱時間愈長混凝土材料強度受高溫影響所造成折減愈大，致軸向壓縮變形大於軸向熱膨脹變形，所得數值開始變小，最後發生挫曲破壞，此時柱中間點側向變形分別為 0.34088 mm 及 1.361 mm，數值模擬能適當的顯示在試驗過程之柱軸向及側向變形行為。
- (3) 受高溫柱軸向載重折減情形，軸向載重強度隨加熱時間增加而降低，本研究普通強度混凝土及自充填混凝土柱耐火時效，分別為 332 分及 362 分。

誌謝

本文為國科會專題研究計畫編號 NSC 94-2218-E-365-001 之部分研究成果，承蒙國科會經費補助，謹致謝忱，並感謝內政部建築研究所防火實驗中心提供完善設備及成功大學土木系方一匡教授於研究期間悉心指導。

四、參考文獻

- [1] 許崇堯，「火害後鋼筋握裹衰退及其對梁柱接頭特性影響之探討」，國立台灣工業技術學院工程技術研究所博士論文，台北(1991)。
- [2] 鄭復平、「鋼筋混凝土梁柱組合體火害行為研究」，內政部建築研究所專題研究計畫成果報告，台北(2003)。
- [3] 王天志，「高性能混凝土柱耐火性能之研究」，國立交通大學土木工程研究所博士論文，新竹(2003)。
- [4] Lie, T.T. and Harmathy, T.Z., "Numerical Procedure to Calculate the Temperature of Protected Steel Columns Exposed to Fire," Fire Study No.28, Division of Building Research, National Research Council of Canada, NRCC12535, Ottawa, pp.39. (1972).
- [5] Lie, T.T. and Irwin, R.J., "Method to Calculate the Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Rectangular Cross Section," ACI Structural Journal, (90) 1, pp.52-60(1993).
- [6] Kodur, V.K.R. and Lie, T.T., "A Computer Program to Calculate the Fire Resistance of Rectangular Reinforced Concrete Columns, Third Canadian Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Ottawa, Canada, pp.11-20 (1996).
- [7] Dusinberre, G.M., Heat Transfer Calculations by Finite Differences, International Textbook Company, Scranton, pp.293 (1961).

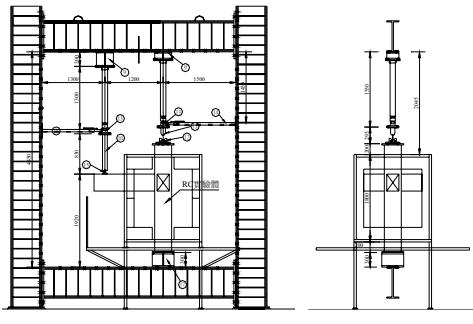


圖 1 試體、加載設備與小型高溫爐裝置

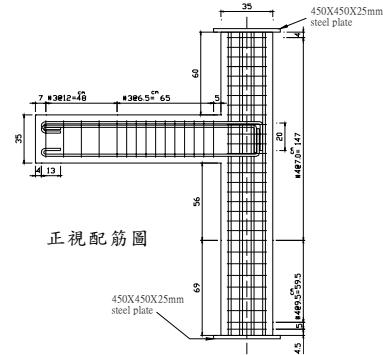


圖 2 梁柱試體配筋立面圖

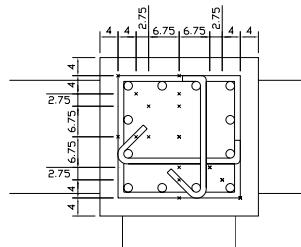


圖 3 柱斷面混凝土熱電偶配置圖

×：熱電偶

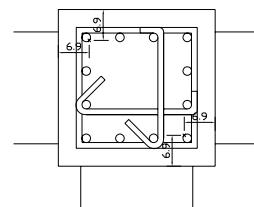


圖 4 柱斷面鋼筋熱電偶配置圖

×：熱電偶

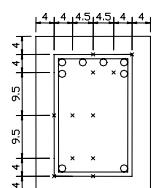


圖 5 主梁斷面混凝土熱電偶配置圖

×：熱電偶

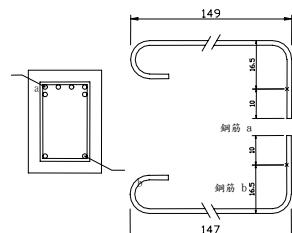


圖 6 主梁鋼筋熱電偶配置圖

×：熱電偶

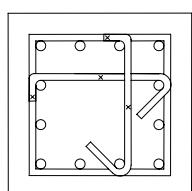


圖 7 梁柱接頭區鋼筋熱電偶配置圖

×：熱電偶



圖 8 梁柱試體安裝於加熱爐內

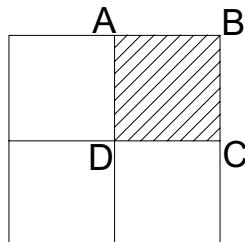
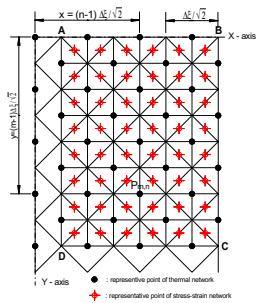


圖 9 溫度及應力-應變分析之網格

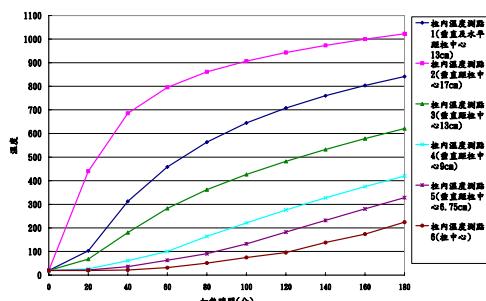


圖 11 NC 柱在不同內部深度之溫度分佈

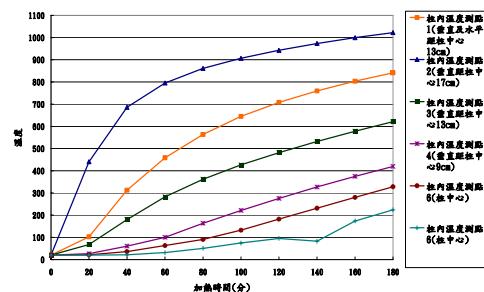


圖 12 SCC 柱在不同內部深度之溫度分佈

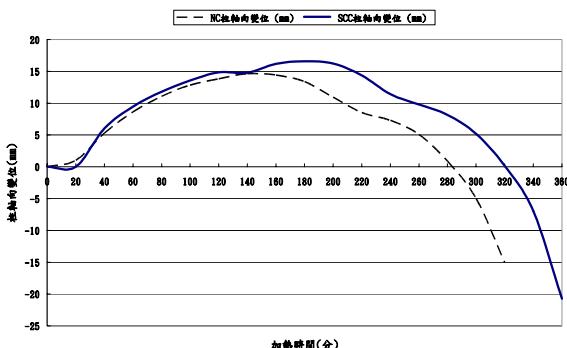


圖 13 柱軸向變形情形

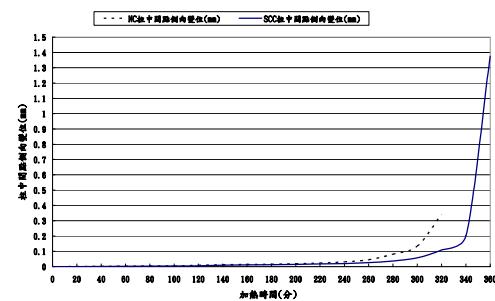


圖 14 柱中間點側向變形情形

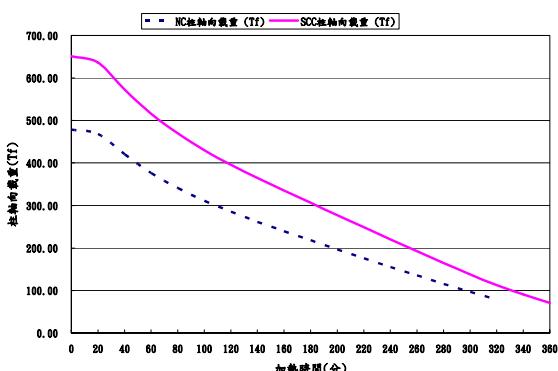


圖 15 柱受高溫之軸向載重折減情形