

高溫作用後鋼纖維活性粉混凝土應力-應變行為-試驗研究

Examination Study of Stress-Strain Curve of Steel Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete after Elevated Temperature

戴毓修¹ 潘煌鏗² 龔盈年³

¹陸軍軍官學校土木工程學系副教授

²國立高雄應用科技大學土木工程系教授

³國立成功大學土木工程博士生

摘要

當結構物承受地震或衝擊荷重時，有可能因火災而伴隨高溫。對於承受高溫後的結構物，力學性質會有一定程度的折減，有鑑於此，本研究藉由對高溫作用後之活性粉混凝土在擬靜態荷重之應力-應變行為進行研究。主要是針對 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ 之活性粉混凝土，在常溫及 $200^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 高溫加熱後之圓柱試體進行高溫試驗及力學試驗。結果顯示活性粉混凝土在加熱至 $200^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 後，抗壓強度會提升，但在 300°C 之後會隨著溫度增加，抗壓強度也隨之下降；峰值應變在 200°C 時隨著溫度升高而逐漸增加，尤其在 $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 間的應變增加的速率最快，而在 500°C 之後則趨於緩和；彈性模數會隨著溫度上升迅速折減，當溫度超過 600°C 高溫作用後，折減幅度逐漸趨緩。此外，本研究亦將試驗結果進行迴歸，得出高溫後的力學性能公式，期能提供工程應用與設計之參考。

關鍵字：高溫、活性粉混凝土、應力-應變曲線

Abstract

When the buildings are under the earthquakes or the impact of a projectile that may induce the fire, high temperature due to the fire will cause a certain decrease of mechanical properties to the building. This research is to investigate the stress-strain relationship of RPC in the quasi-static loading after elevated temperature. The cylinder specimens of RPC with $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ were examined at the room temperature and after $200^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$. Results show that the residual compressive strength of RPC after heating $200^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ will increase compared with that at room temperature, but, then, decrease dramatically when the temperature was heated after 300°C . The residual peak strains of RPC also first increase up to $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$, and then gradually decrease after 500°C . Meanwhile, the residual Young elastic modulus will reduce when the temperature raise. Through the regression analysis of the study result, we propose the mechanical properties of RPC after elevated temperature, and these formulae provide a reference for the industrial applications and design.

Keywords: elevated temperature, reactive powder concrete, stress-strain curve.

一、前言

纖維混凝土(fiber reinforced concrete, FRC)是近代迅速發展之新興複合材料，以水泥砂漿或混凝土為基材，並藉由添加金屬纖維、合成纖維或天然有機纖維，可使混凝土的抗拉強度、抗彎強度、與抗衝擊能力等大幅度提高 [1]。其中，發展最快且應用最廣的是鋼纖維混凝土，其次是合成纖維和玻璃纖維混凝土。隨著混凝土研究與應用技術的進步，特別是高效減水劑的發明，使得高性能混凝土(high-performance concrete, HPC)蓬勃發展。與普通混凝土相比，高性能混凝土的優點在於透過配比技術之改良，使得其材料內部的緻密性與微觀結構得到大幅的改善，進而具有高強度、高工作度和高耐久性等優越之性能[2]。活性粉混凝土(reactive powder concrete, RPC)，是 Richard 等[3-4]所研發成功的一種具鋼纖維的超高性能水泥基複合材料，其主要是去除粗骨材，採用最大粒徑為 $400\mu\text{m}$ 的石英砂，增加了材料的均勻性，同時透過最佳粒徑配料及凝固過程中加壓，提高混凝土的密實度，使得微裂縫和孔隙等缺陷大幅降低，同時，抗壓強度和耐久性亦大幅度地提升高，成為一種強度和性能都十分優異的新型水泥基複合材料 [3-6]。

對於一般鋼筋混凝土結構而言，除了承受靜態與動態荷載外，有時亦會承受因火災而伴隨產生的溫度荷載。在持續的高溫作用下，混凝土內部由於水分蒸發、水泥漿體失水收縮、骨材受熱膨脹破裂、砂漿與粗骨材之熱變形量不一致等因素，導致強度折減，或因持續高溫導致混凝土爆裂。因此，瞭解活性粉混凝土在高溫作用後力學行為尤其重要。近年來已有不少學者針對高強度混凝土在高溫後力學性質進行研究 [7-17]，並指出鋼纖維高強度混凝土(steel fiber reinforced high strength concrete, SFHSC) 在高溫作用後強度折減趨勢與普通混凝土(normal strength concrete, NSC)類似，然而，由於鋼纖維的導熱係數非常高，可以減少混凝土內外溫差，降低高溫對混凝土劣化行為的影響，並在一定程度上可改善混凝土的高溫力學性能。除此之外，亦有研究[7]指出在高強度混凝土中添加混合纖維(聚丙烯纖維與鋼纖維)，可以降低其在高溫下發生爆裂的機率，有助於提昇高強度混凝土之耐火性質。對於活性粉混凝土在高溫下力學性質之研究，鄭慶鴻[18]曾透過實驗之觀察，提出利用添加高鋁水泥與改變製程技術來抑制活性粉混凝土在高溫下爆裂的方法。林淑蘭[19]與陳佑松[20]亦探討了活性粉混凝土對火災之影響，結果顯示添加鋼纖維之活性粉混凝土經高溫 200°C 及 300°C 延燒 2 小時後，活性粉混凝土之抗壓強度增加，其中添加鋼纖維體積 1%含量的 RPC，分別增加 61.9%與 21.3%；添加鋼纖維含量 2%時，則分別上升 16.9%與 1.4%，當溫度達 400°C 以上延燒 2 小時，則會導致試體爆裂。

本研究將針對具有不同纖維含量之活性粉混凝土在高溫作用後之力學行為進行試驗研究，本研究亦將試驗結果進行迴歸，得出高溫後的力學性能公式，可提供工程應用與設計之參考。

二、實驗計畫與方法

2.1 試驗規劃與流程

本研究為了得到 RPC 在高溫作用後的應力-應變曲線，同時探討其殘留強度與變形性能，共規劃並製作了 120 個 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 混凝土圓柱試體。試體製作使用的材料為波特蘭 II 型水泥，石英砂($105 \sim 420\mu\text{m}$)，石英粉($5 \sim 25\mu\text{m}$)，矽灰($0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$)，及鋼纖維(長 12mm，直徑 0.18mm)等材料。為改善低水灰比的工作度，拌和過程中添加強塑劑，其化學成分為丙烯酸共聚物之陰離子

型高分子介面活性劑，試體配比如表 1 所示。表中各組試體差異在於鋼纖維含量，對含有 1%、2%、3%鋼纖維的試體，分別給予介質含量 $c_1=0.01$ 、 0.02 、 0.03 編號。根據 Richard [3-4] 的研究，活性粉混凝土在水化的過程中若施以 90°C 的熱處理，將顯著加速混凝土中火山灰效應的進行，並能有效改善水化物的微結構。對此，鄭瑞濱[21]研究結果亦指出活性粉混凝土若能透過熱養護程序，可將 28 天齡期時的強度提早於 7 天達到，可大幅的節省時間成本。因此本研究將灌製後的試體在 2 天後進行拆模，以相對濕度 100%、溫度 90°C 條件進行養護 7 天，之後將試體分別置於高溫環境中，本研究共規劃 8 組試驗溫度，分別為 200°C 、 300°C 、 400°C 、 500°C 、 600°C 、 700°C 及 800°C ，同時為了比較試體在不同溫度下的力學特性，將常溫(25°C)的試體作為控制組，每組 5 顆試體進行單軸抗壓試驗。為確定試體內部溫度已達到預定溫度，製作時於試體中心處預埋一 K 型熱偶計，用以監控混凝土內部溫度歷程。

由於 RPC 緻密性非常高，透過高溫熱水養護後，試體內部含有大量水分，為避免試體在加熱過程中，高溫使水汽化後之孔隙壓力過大而造成試體爆裂，加熱前先利用烘箱在 110°C 下，烘乾 7 天以上，使試體內部所含水分降至最低，而後再放置於高溫爐內加熱。當試體加熱至目標溫度後即停止加熱，並將試體留置爐內自然冷卻，隔日取出並在試體兩端加裝伸長計並進行試驗。

2.2 升溫模式

本研究所使用加熱設備為爐內空間 $300\text{W}\times 300\text{H}\times 300\text{D}(\text{mm})$ 之箱型電熱高溫爐，高溫爐之最高溫度為 1204°C ，最大升溫速率可達 $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。對於一般火害試驗採用 ASTM E119 之標準升溫曲線以模擬實際情況，本研究在試驗之初亦曾嘗試採用相同升溫模式，以使試驗之結果在符合規範要求之情況下更具參考性。然而，在實際加熱的過程中，當升溫至 $400^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 後，試體均會爆裂，究其原因推測是由於 RPC 試體之緻密性較一般混凝土更佳，在初期預溫階段仍無法將試體內部之自由水充分排除，是以在高溫時，蒸氣會導致試體之爆裂，本研究為了瞭解混凝土受火災高溫後之力學特性，避免因升溫速率過快導致溫差應力過大進而高溫爆裂，故參考 Chang[22]之升溫模式，將升溫速率放慢，採用 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。為確保爐內試體受熱條件一致，每增加 200°C 後恆溫 30 分鐘，再加熱至目標溫度後(200°C 、 300°C 、 400°C 、 500°C 、 600°C 、 700°C 、 800°C)，恆溫 30 分鐘後停止加熱。

2.3 靜態力學試驗設備

對於高溫作用後活性粉混凝土之單軸抗壓試驗，本研究使用 1000kN MTS 萬能材料試驗機，採用位移控制，加載速率為 $0.03\text{mm}/\text{min}$ ，以量測活性粉混凝土受壓應力-應變全曲線。力學試驗設備與數據處理流程如圖 1 所示。

由於混凝土為一脆性材料，當加載達到破壞強度後，不同之破壞模式常造成伸長計量測軸向變形的困難，故參考 Mansur [23]在 1995 年提出的方法，透過修正試驗設備柔度與邊界效應(end-zone effect)之影響，再與伸長計在試體所量測之實際變形量進行比較，藉以得到試體破壞後之後半段曲線，如圖 1 的應力-應變圖所示。

三、結果分析與討論

3.1 外觀特徵與顏色變化

高溫作用後的混凝土，由於化學變化導致外觀產生明顯顏色變化，且高強度鋼纖維混凝土在升降溫過程中，鋼纖維經歷了膨脹與收縮，由於其熱膨脹係數與混凝土有所差異，使得鋼纖維和混凝土連接處產生裂縫。在混凝土表層，鋼纖維在較高溫度作用下會導致其產生氧化作用，產生的黑色碳元素將滲透到混凝土漿體中，因此添加鋼纖維之混凝土顏色偏暗[17]。

RPC 高溫試驗之結果如圖 2 所示，在 200°C 時，外觀顏色與特徵和常溫的混凝土相同；到達 300°C 時，RPC 試體顏色呈灰黃色；而在 400°C 時開始產生較細微之裂縫，顏色偏灰褐色；當溫度到達 500°C 時，此時混凝土產生化學變化，混凝土內的鍵結水遭受到破壞且裂縫有增加趨勢；到 600°C 時，試體表面裂縫寬度增大，此時試體顏色呈暗灰色；當溫度到達 700°C~800°C 時，混凝土外表層產生脆化且有較多孔洞與大裂縫。試驗中，不同配比之混凝土受高溫作用後的外觀並無明顯差別，只是鋼纖維含量較多的 RPC 在高溫(約 700°C)作用後的表面顏色比較偏向暗褐色而已。

3.2 抗壓強度

活性粉混凝土在不同高溫作用後，抗壓強度變化如表 2 與圖 3 所示，為了方便比較，將高溫後殘留抗壓強度試驗值除以常溫下之強度。由圖中試驗結果顯示，試體加熱初期強度會提升，隨著作用溫度持續增加抗壓強度有明顯下降趨勢。對 $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 試體在受 200°C 高溫作用後強度分別上升為 23.6%、3.83%和 6.67%；受到 300°C 作用時強度則分別上升為 21.65%、3.69%與 17.04%。究其原因在高溫時可加速卜作嵐反應，增加水化產物，減少混凝土孔隙率及孔隙大小，根據 Cheyrezy [5]等學者研究亦證實，活性粉混凝土經由 250°C 加熱養護其卜作嵐反應可達 100%，強度上升。相較於 $c_1=0.01$ 與 0.02 試體， $c_1=0.03$ 試體在 300°C 時之抗壓強度比 200°C 時之抗壓強度，有明顯上升趨勢，由於在高溫時，比熱的不同，在漿體與鋼纖維間有裂縫產生，但添加鋼纖維的加入可阻止裂縫擴大及集中，所以添加鋼纖維可在一定程度上提高混凝土相對殘餘抗壓強度。當 RPC 受到 500°C 高溫作用後， $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 強度分別降低 28.25%、27.9%與 17.9%，其抗壓強度都有降低之趨勢。主要是因為在 500°C 時骨材和水泥漿體之間的膨脹和收縮不協調，造成更多裂縫使得強度降低。試體在 600°C 左右時，由於混凝土內部晶相轉變，體積膨脹導致 C-S-H 膠體及 CH 膠體分解，試體平均強度分別降低約 38%。700°C 時， $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 強度分別降低 41.32%、58.88%與 50.97%，試體強度折減為原來的一半，且因熱膨脹因素使混凝土表面造成更多裂縫。在 800°C 時， $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 強度分別降低 81.62%、77.43%與 76.51%殘留強度只剩 20%，原因在於高溫(如 600°C)混凝土的架構被破壞殆盡，強度損失已經很嚴重。

對於不同鋼纖維含量活性粉混凝土在高溫作用後，強度比試驗結果之迴歸表示如下：

$$f'_{cr} / f'_c = \begin{cases} 0.946 + 2.855 \times 10^{-3} T - 8.375 \times 10^{-6} T^2 + 4.648 \times 10^{-9} T^3 & , V_f = 0.01 \\ 1.059 + 1.053 \times 10^{-3} T - 4.223 \times 10^{-6} T^2 + 2.066 \times 10^{-9} T^3 & , V_f = 0.02 \\ 0.984 + 9.782 \times 10^{-3} T - 3.923 \times 10^{-6} T^2 + 1.919 \times 10^{-9} T^3 & , V_f = 0.03 \end{cases} \quad , 25^\circ < T \leq 800^\circ \text{C} \quad (1)$$

式中 f_c' 、 f_{cT}' 分別為常溫與高溫後混凝土抗壓強度， T 為試體溫度(°C)， V_f 為纖維體積含量。式(1)中對於不同體積含量公式之判定係數 R^2 分別為 0.93、0.94 與 0.94，顯示模擬程度相當良好。此外，為了與普通混凝土耐火性質進行比較，本研究將與 Chang [22] 之試驗結果繪於圖 3，從圖中可明顯看出，經由高溫作用後之活性粉混凝土抗壓強度比普通混凝土要高，顯示活性粉混凝土之高溫力學性質較普通混凝土要好。

3.3 峰值應變

活性粉混凝土在高溫作用後，峰值應變與常溫下比之試驗結果如圖 4 所示，從表 2 或圖 4 可看出， $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 試體在受 200°C 高溫作用後峰值應變分別上升為 15.38%、7.5% 和 5.13%；受到 300°C 作用後，活性粉混凝土峰值應變則分別上升為 38.46%、25% 與 46.15%。混凝土在 200°C 以內之加熱後之峰值應變大致相同，當溫度超過 200°C 時，峰值應變開始隨著溫度升高而增加。受到 500°C 作用時， $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 後峰值應變分別增加 97.43%、122.5% 與 102.56%，試體之峰值應變增加為常溫之一倍。在 $400^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$ 間，由於高溫作用造成更多裂縫，促使強度降低，峰值應變快速增大。受到 700°C 作用時， $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 後峰值應變分別增加 146.15%、175% 與 182.05%，試體峰值應變已超過常溫約 3 倍以上。在 $600^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$ 間，由於高溫作用促使裂縫繼續拓展且寬度增加，故峰值應變持續增加。試體在受 800°C 高溫作用後 $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 峰值應變分別上升 120.51%、112.5% 與 138.46%，峰值應變比 700°C 要來得低。主要是在超過 700°C 之高溫作用後，裂縫多且連續，隨著作用溫度增加，峰值應變趨向平緩且稍微降低。

不同鋼纖維含量混凝土的峰值應變經迴歸分析後，表示如下：

$$\varepsilon_{cT}/\varepsilon_0 = \begin{cases} 1.043 - 1.483 \times 10^{-3} T + 1.142 \times 10^{-5} T^2 - 9.544 \times 10^{-9} T^3, & V_f = 0.01 \\ 1.129 - 4.177 \times 10^{-3} T + 2.154 \times 10^{-5} T^2 - 1.826 \times 10^{-8} T^3, & V_f = 0.02 \\ 1.066 - 3.012 \times 10^{-3} T + 1.788 \times 10^{-5} T^2 - 1.476 \times 10^{-8} T^3, & V_f = 0.03 \end{cases}, 25^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中， ε_0 、 ε_{cT} 分別為常溫與高溫後抗壓強度所對應的峰值應變。對於不同纖維體積含量，式(2)之判定係數 R^2 各為 0.92、0.92 及 0.9。經由與 Chang [22] 所提之高溫作用後普通混凝土峰值應變之試驗做比較，高溫作用後之活性粉混凝土峰值應變比值在 500°C 前比普通混凝土還高，但當加熱超過 500°C 後，峰值應變比值比普通混凝土要低，可看出鋼纖維的加入有利於抑制混凝土內部裂縫的產生與擴張。

3.4 彈性模數

活性粉混凝土受高溫作用後，其彈性模數依據 ASTM C469 規定求得，其定義為：實測應力-應變曲線上 40% 抗壓強度與應變 5×10^{-5} 所對應之應力之割線模數斜率。經由試驗結果，從表 2 或圖 5 看出，隨著溫度上升，彈性模數迅速折減，當溫度在超過 600°C 高溫作用後，折減幅度逐漸趨緩。 $c_1=0.01$ 、 0.02 及 0.03 試體在受 200°C 高溫作用後彈性模數分別下降為 1.97%、4.39% 和 1.87%；受到 300°C 作用時彈性模數則分別降低為 25.67%、27.98% 與 33.51%，平均減少約

30%。在 200°C~300°C 時，由於高溫作用後，使得強度降低，峰值應變增大，造成彈性模數降低。試體在受 400°C 高溫作用後 $c_1=0.01$ 、0.02 及 0.03 彈性模數分別下降 41.70%、55.82%與 60.83%；受到 500°C 作用時， $c_1=0.01$ 、0.02 及 0.03 彈性模數分別降低 70.27%、70.62%與 67.73%，試體彈性模數降低為常溫約 70%左右。在 400°C~500°C 間，隨著高溫作用，強度折減較大且變形增大，此時彈性模數折減幅度較快。試體在受 600°C 高溫作用後 $c_1=0.01$ 、0.02 及 0.03 彈性模數分別下降 75.15%、77.81%與 79.44%，殘留彈性模數約剩餘為 22%。受到 700°C 作用時， $c_1=0.01$ 、0.02 及 0.03 彈性模數分別降低 82.37%、83.38%與 85.12%，試體殘留彈性模數只剩 15%。在 600°C~700°C 間，由於高溫作用使材料性質改變加上鋼纖維軟化，彈性模數降低高達八成以上。試體在受 800°C 高溫作用後 $c_1=0.01$ 、0.02 及 0.03 彈性模數分別降低 91.66%、89.72%與 86.49%，殘留彈性模數約為 10%。

經迴歸分析後，不同鋼纖維含量混凝土可用下式表示：

$$E_{cT}/E_c = \begin{cases} 1.011 + 7.21 \times 10^{-4}T - 6.797 \times 10^{-6}T^2 + 5.626 \times 10^{-9}T^3, & V_f = 0.01 \\ 1.026 + 4.181 \times 10^{-4}T - 6.564 \times 10^{-6}T^2 + 5.832 \times 10^{-9}T^3, & V_f = 0.02 \\ 1.043 - 2.258 \times 10^{-5}T - 5.487 \times 10^{-6}T^2 + 5.2 \times 10^{-9}T^3, & V_f = 0.03 \end{cases}, 25^\circ < T \leq 800^\circ C \quad (3)$$

式中 E_{cT} 、 E_c ：各為常溫與高溫後之彈性模數。式(3)之判定係數 R^2 各為 0.97、0.97 與 0.96。

如圖 5 所示，經與 Chang [22]所提之高溫作用後普通混凝土彈性模數試驗比較，高溫作用後之活性粉混凝土彈性模數比值比普通混凝土比值要來得高，故活性粉混凝土之韌性比普通混凝土還好。

四、結論

受到 200°C~800°C 高溫作用後之活性粉混凝土應力-應變曲線試驗與迴歸結果，得到結論如下：

1. RPC 殘留抗壓強度與常溫之比值，當加熱至 200°C ~ 300°C 時，殘留抗壓強度會提升，而後隨著作用溫度提升，殘留抗壓強度也隨之下降；在體積含量為 1%時，當 200°C~400°C 時，抗壓強度值比常溫要高，當溫度超過 500°C 時，抗壓強度開始下降；而體積含量為 2%及 3%時，在 200°C~300°C 時，抗壓強度亦有明顯增加，當溫度在 400°C 後，抗壓強度則隨作用溫度升高而降低。
2. 峰值應變在 200°C 時隨著溫度升高而逐漸增加；在 400°C~500°C 間，應變增加的速率最快，而後趨於緩和。在常溫到 200°C 時，峰值應變隨著鋼纖維體積含量增加並不明顯；當溫度超過 200°C，峰值應變大致上隨著體積含量增加而上升，在 800°C 時，整體之峰值應變明顯下降。
3. 活性粉混凝土彈性模數隨著溫度上升迅速折減，當溫度在超過 600°C 後，折減幅度逐漸趨緩；鋼纖維含量對於彈性模數影響，隨著體積含量增加，彈性模數在 300°C、400°C 有降低趨勢外，其餘溫度都有上升現象。

五、參考文獻

- [1] 張孝全，「纖維在混凝土上的應用」，台灣人纖工業會刊，第十三卷，第七期，第 55-61 頁 (2000)。
- [2] 許哲嘉，「高性能混凝土之研究」，國立交通大學材料科學與工程研究所碩士論文，新竹 (1995)。
- [3] Richard, P., “Reactive powder concrete with high ductility and 200MPa~800MPa compressive strength,” *ACI SP*, Vol. 144, pp.507- 518 (1994).
- [4] Richard, P., and Cheyrezy, M., “Composition of reactive powder concretes,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 1501-1511 (1995).
- [5] Cheyrezy, M., Maret, V., and Frouin, L. “Microstructural Analysis of RPC,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp.1491-1500 (1995).
- [6] Zanni, H., Cheyrezy, M., Maret, V., Philippot, S., and Nieto, P., “Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using ^{29}Si NMR,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp.93-100 (1996).
- [7] Chan, Y. N., Peng, G. F., and Anson, M., “Residual and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperature,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, pp. 23-27 (1999).
- [8] Reis, B.C., Tadeu, A.J.B., and Rodrigues, C., “High-temperature compressive strength of steel fiber high-strength concrete,” *J. Material in Civil Engineering*, Vol. 13, No. 3 ,pp. 230-234 (2001).
- [9] Chen, B., and Liu, J., “Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1065-1069 (2004).
- [10] Li, M., Chung, X. Q., and Wei, S., “Mechanical properties of high-strength concrete after fire,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1001-1005 (2004).
- [11] Poon, C. S., Shui, Z. H., and Lam, L., “Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperature,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 2215-2222 (2004).
- [12] Georgli, B., and Tsakiridis, P. E., “Microstructure of fire-damaged concrete. a case study,” *Cement and Concrete Composite*, Vol. 27, pp. 255-259 (2005).
- [13] Husem, M., “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete,” *Fire Safety Journal*, Vol. 41, pp. 155-163 (2006).
- [14] Lau, A., and Anson, M., “Effect of high temperatures on high performance steel fiber reinforced concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1698-1707 (2006).
- [15] Lea, F. M., “Cement research retrospect and prospect,” *Proc. 4th International Symp. On the Chemistry of Cement*, pp. 5–8, Washington, DC (1960).
- [16] Arioz, O., “Effects of elevated temperatures on properties of concrete,” *Fire Safety Journal*, Vol.

- 42, pp. 516-522 (2007).
- [17] Sideris, K. K., Manita, P., and Chaniotakis, E., "Performance of thermally damaged fiber reinforced concretes," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 1232-1239 (2009).
- [18] 鄭慶鴻，「活性粉混凝土於高溫下行為研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，台北 (2001)。
- [19] 林淑蘭，「活性粉混凝土補強混凝土構件對火害與凍融之測試研究」，朝陽科技大學營建工程碩士論文，台中 (2005)。
- [20] 陳佑松，「活性粉混凝土補強混凝土構件在火害和凍融循環之耐久性研究」，朝陽科技大學營建工程碩士論文，台中 (2005)。
- [21] 鄭瑞濱，「活性粉混凝土構件之工程性質研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，台北(2003)。
- [22] Chang, Y. F., Chen, Y. H., Sheu, M. S., and Yao, G. C., "Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1999-2005 (2006).
- [23] Mansur, M. A., Wee, T. H., and Chin, M. S., "Derivation of the complete stress-strain curves for concrete in compression," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 47, No. 173, pp. 285-290 (1995).

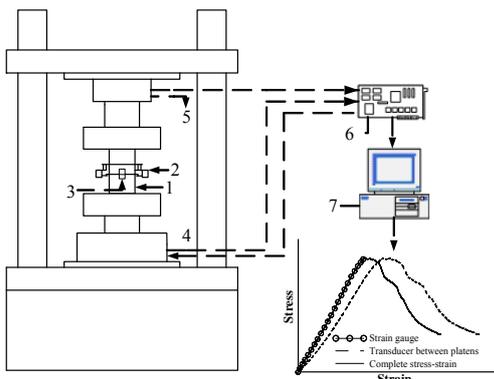


圖 1 MTS 數據處理流程圖

- 1: 試體; 2: 伸長計; 3: 應變計; 4: 驅動軸; 5: 荷重計;
6: 控制器; 7: 資料擷取、分析系統

Concrete Color	Temperature	Characteristic
Buff	300 °C	Softening
Black Through Gray to Buff	700 °C	Powdered, light colored, dehydrated paste Deep Cracking
	600 °C	Popouts over chert or quartz aggregate particles
Pink to Red	500 °C	Surface followed by breaking off of thin shells at corner and edges
	400 °C	Spalling and decrepitation
Normal	300 °C	Surface cracking
	25 °C	None

圖 2 高溫作用後 RPC 表面特徵與顏色

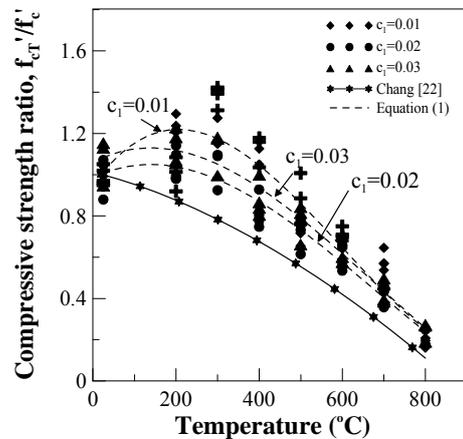


圖 3 高溫後鋼纖維混凝土抗壓強度

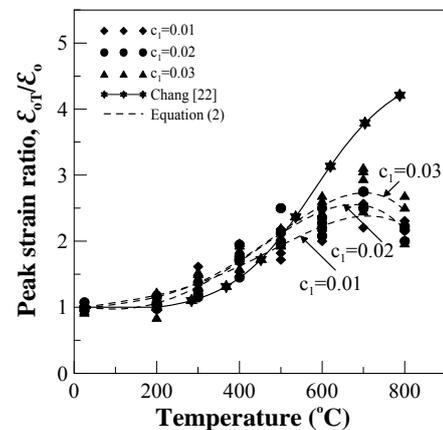


圖 4 高溫後鋼纖維混凝土峰值應變

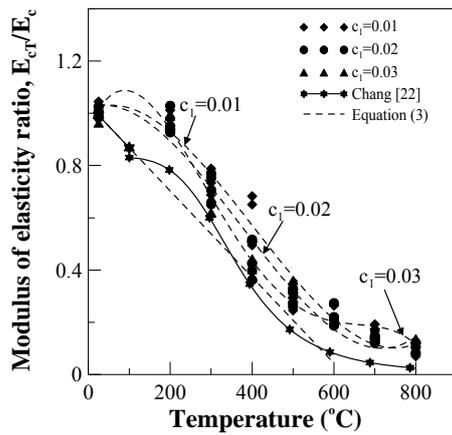


圖 5 高溫後鋼纖維混凝土彈性模數

表 1 RPC 配比表 (kg/m³)

試體編號	水膠比	水	水泥	矽灰	石英粉	石英砂	強塑劑	鋼纖維 (體積)
$c_1=0.01$	0.19	180	714	216	252	918	36	1 %
$c_1=0.02$	0.19	180	714	216	252	891	36	2 %
$c_1=0.03$	0.19	180	714	216	252	865	36	3 %

表 2 高溫作用後 RPC 高溫力學性質

	抗壓強度 (MPa)			彈性模數 (GPa)			峰值應變 (%)			外觀特徵與顏色變化
	$c_1=0.01$	$c_1=0.02$	$c_1=0.03$	$c_1=0.01$	$c_1=0.02$	$c_1=0.03$	$c_1=0.01$	$c_1=0.02$	$c_1=0.03$	
25°C	150.41 (1.0)*	168.50 (1.0)	156.53 (1.0)	43.05 (1.0)	45.61 (1.0)	46.11 (1.0)	0.39 (1.0)	0.40 (1.0)	0.39 (1.0)	外觀顏色深灰
200°C	185.90 (1.24)	174.96 (1.04)	166.97 (1.07)	42.20 (0.98)	43.61 (0.96)	45.25 (0.98)	0.45 (1.15)	0.43 (1.08)	0.41 (1.05)	外觀與常溫同，色稍白
300°C	182.98 (1.22)	174.71 (1.04)	183.21 (1.17)	32.00 (0.74)	32.85 (0.72)	30.66 (0.66)	0.54 (1.38)	0.50 (1.25)	0.57 (1.46)	外觀產生微細裂縫，色呈灰黃
400°C	174.80 (1.16)	137.24 (0.81)	140.35 (0.9)	25.10 (0.58)	20.15 (0.44)	18.06 (0.39)	0.63 (1.62)	0.69 (1.73)	0.72 (1.85)	外觀微細裂縫漸增，色呈淡褐
500°C	107.92 (0.72)	121.49 (0.72)	128.45 (0.82)	12.80 (0.3)	13.40 (0.29)	14.88 (0.32)	0.77 (1.97)	0.89 (2.22)	0.79 (2.03)	外觀微細裂縫寬度增加，色呈暗褐
600°C	95.37 (0.63)	101.20 (0.6)	95.92 (0.61)	10.70 (0.25)	10.12 (0.22)	9.48 (0.21)	0.81 (2.08)	0.91 (2.28)	0.95 (2.44)	外觀有大孔洞產生，色呈暗灰
700°C	87.34 (0.58)	69.28 (0.41)	76.75 (0.49)	7.59 (0.18)	6.21 (0.14)	6.86 (0.15)	0.96 (2.46)	1.1 (2.75)	1.1 (2.82)	外表層脆化，色呈灰白
800°C	27.65 (0.18)	38.026 (0.22)	36.77 (0.23)	3.59 (0.08)	4.69 (0.10)	6.23 (0.14)	0.86 (2.21)	0.85 (2.13)	0.93 (2.38)	外觀許多小孔洞與大裂縫產生，色呈淡紅

* 括弧內之數值為高溫作用後與常溫之比值