

高強度鋼筋及聚丙烯纖維高強度混凝土受高溫後的強度與彈性模數之研究

Study on Strength and Modulus of Elasticity of New RC PP Fiber Concrete and Reinforcement under Elevated Temperature

劉光晏¹ 梁文哲² 王天志³ 吳佳憲⁴

¹ 國立成功大學土木工程系 副教授 E-mail: kyliau@mail.ncku.edu.tw Phone: 0920529851

² 國立成功大學土木工程系 碩士

³ 內政部建築研究所防火實驗中心 研究員

⁴ 亞東預拌混凝土股份有限公司 經理

科技部計畫編號：MOST 106-2625-M-006-022

摘要

使用高強度鋼筋混凝土材料，可達到提升承載能力、縮小構件斷面尺寸、增加室內使用空間、節省材料用量並降低生產成本等優點。新型高強度鋼筋混凝土構造（New RC）為高強度鋼筋與高強度混凝土的組合，依現行台灣的建築環境，New RC 成為改善生活居住品質的優良選項。高強度混凝土雖可提升建築物整體的承載能力，但因其材料內部緻密性高、空隙少，在遇到高溫火害時，構造物表面可能產生爆裂，導致鋼筋裸露並直接受高溫影響，進而危及結構物安全。而在混凝土中添加聚丙烯纖維（PP Fiber）能夠抑制高溫爆裂的發生，本研究製作兩種強度、四種纖維體積比含量的混凝土圓柱試體，並各別加熱到四種目標溫度，再測量其高溫後之抗壓強度與彈性模數。另準備兩種號數的高強度鋼筋，同樣加熱至高溫後測其降伏強度、拉力強度及彈性模數。根據實驗數據之統計及整合，本研究建立高強度材料的力學性質與溫度之關係，以供未來建築物耐火性能設計參考之用。

關鍵字：New RC、高強度鋼筋混凝土、聚丙烯纖維、高溫火害試驗

Abstract

Concrete with a compressive strength of greater than or equal to 55 MPa for 28 days is defined as high-strength concrete. With the development of building materials and environmental needs, engineers gradually increased the strength of materials. The combination of high-strength concrete and high-strength reinforcing bar is “New RC”. If high-strength concrete is heated rapidly, it is prone to burst, causes the protective layer to peel off and rebar to expose, even seriously affect the structural safety. Fortunately, adding polypropylene fibers (PP Fibers) into concrete can reduce the chance of concrete bursting at high temperatures. In order to improve the fire resistance of the material. This study discusses the mechanical properties of the localized polypropylene high-strength concrete at elevated temperature, including compressive strength, modulus of elasticity and peak strain, and establish compressive stress-strain relationships of the localized polypropylene high-strength concrete at elevated temperature. Also, the mechanical relationship of the high-strength reinforcing bar at elevated temperature are also established.

Keywords: New RC, High-Strength Concrete, PP Fiber, Elevated Temperature

一、前言

台灣建築物結構的型式以鋼筋混凝土為主，佔全建物量約有 85%之多，因為鋼筋混凝土兼具多種建築考量上的優點，包括低成本、使用壽命長、容易維護，且國內在使用鋼筋混凝土方面具備豐富的學術研究、工程應用經驗。台灣地狹人稠，再加上都市快速發展，導致都會區出現土地資源不足、人口過於密集等問題，為擴展大眾生活範圍，建築物開始增加樓層數，久而久之，高樓大廈逐漸淘汰老舊低矮建築，成為都市空間規劃的新興做法。在設計高層樓鋼筋混凝土建築時，因為普通混凝土之抗壓強度不足，工程師為讓柱構件能夠承受高軸力，須將柱斷面尺寸放大，此做法雖能達到需要之設計強度，但其缺點是增加材料使用量、減少室內可活動的空間。

而與台灣面臨相同難題的日本，為解決上述工程問題，於 1988 年開始積極推動超高材料強度之 New RC Project[1]，新型高強度鋼筋混凝土 (New RC) 為高強度鋼筋與高強度混凝土的組合，根據 ACI 363R-10[2]，若混凝土 28 天之抗壓強度超過 55MPa 者，將此定義為高強度混凝土 (High-Strength Concrete, HSC)，另根據 ACI 318-05[3]規定，鋼筋降伏強度超過 420MPa 者被定義為高強度鋼筋。日本建設省分別提升混凝土之抗壓強度至 60 MPa(為常用混凝土的 2 倍強度)以及鋼筋之降伏強度達到 685 MPa(為國內常用鋼筋 1.7 倍強度)。從 1995 年開始，日本已能將 RC 材料穩定維持在超高強度的等級，甚至混凝土抗壓強度可高達 140 MPa，隨後，日本的 New RC 建築如雨後春筍般增加，在短暫的 5 年之間，就新建超過 300 棟以上的 New RC 建築。日本因推廣超高層建築搭配高強度 New RC 材料的空間規劃策略，原先擁擠的都市生活逐漸獲得改善，大幅地提升居民的生活環境品質，鑒於日本的發展經驗，台灣也於 2008 年啟動「台灣新型高強度鋼筋混凝土結構系統研發計畫」(Taiwan New RC Project/Group)，致力於開發本土化的高強度材料。

但高強度混凝土卻在防火性能方面存在危險的缺點，由於其材料內部緻密性高、空隙少，遭遇高溫加熱的情況下，因內部水分快速蒸發，當急速上升的蒸汽壓力超過混凝土能夠承受的限度時，就會發生爆裂的情形，甚至保護層會剝落，使鋼筋直接曝露於高溫之中，導致結構物的承載力驟降，嚴重影響建築物的安全。若在混凝土材料中添加聚丙烯纖維 (Polypropylene Fiber, PP Fiber) 則可抑制高溫爆裂現象發生的機率，因為聚丙烯纖維的熔點一般介於 160 至 200°C 之間，只需在混凝土中摻入些微的聚丙烯纖維，經過高溫後，聚丙烯纖維溶化後形成空隙，增加混凝土內部孔隙空間，讓水蒸氣有充足的管道疏通，使蒸汽壓得以下降，進而減少材料爆裂發生的可能性、提升混凝土的耐火性能。

混凝土的最主要性能指標為承載能力，在加入聚丙烯纖維並且受到高溫加熱後，此兩種變因對於本土化高強度混凝土材料的力學性質之影響為本研究主要討論的疑問之一。另外，因 New RC 為高強度混凝土與高強度鋼筋的組合，構件受熱時混凝土內之鋼筋勢必也會受到溫度的影響。高溫過後的高強度鋼筋之力學性質變化，同樣也是本研究主要討論的重點。

二、試驗計畫

2.1 混凝土圓柱試體抗壓強度試驗

混凝土抗壓強度試驗部分，試體為直徑 100mm、高度 200mm 的圓柱試體，分兩種設計抗壓強度，一般強度混凝土（NSC）為 35MPa，高強度混凝土（HSC）為 70MPa。試體內分別摻入不同總體積含量比的聚丙烯纖維（0%、0.1%、0.15%、0.2%），經由高溫電爐以升溫速率 2.5°C/min 加熱至 200°C、400°C、600°C、800°C 後，將試體置於室內自然冷卻，再依 CNS 1232「混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法」之規定進行抗壓試驗。每種條件組合製作四顆試體，其中一顆為高溫試驗時用以量測試體中心溫度，作為整組溫度之標準；另外三顆則是進行抗壓試驗並觀察火害後殘留之材料行為。總計有兩種設計強度、五種目標溫度（除四種高溫試驗，另以常溫試體當作對照組）、四種纖維含量、每種條件組合四顆，共灌製 160 顆圓柱試體。

2.2 鋼筋抗拉強度試驗

鋼筋抗拉強度試驗部分，準備 D25 (#8) 之 SD690 螺紋節鋼筋及 D13 (#4) 之 SD790 竹節鋼筋，鋼筋的長度皆為 60 公分，同樣使用高溫電爐，以升溫速率 5°C/min 加熱至 200°C、400°C、500°C、600°C、700°C、800°C 後，待鋼筋自然冷卻至室溫，以 CNS 2111「金屬材料拉伸試驗法」之標準進行抗拉試驗，而每種條件組合準備三根鋼筋，總計有兩種號數、七種目標溫度，共準備 42 根鋼筋試體。

三、結果與討論

3.1 纖維含量對混凝土力學性質之影響

3.1.1 纖維含量與受不同溫度後之抗壓強度的關係

圖 1 所示為纖維含量與受不同溫度後之抗壓強度的關係。35MPa 混凝土及 70MPa 混凝土在添加聚丙烯纖維後，抗壓強度普遍會有下降的趨勢。其中 35MPa 混凝土唯有纖維體積比 0.1%、溫度 200°C 的試體抗壓強度略比同溫度、纖維體積比 0% 之試體高出 2MPa，其餘任何目標溫度下，含有聚丙烯纖維之試體的抗壓強度皆比無添加纖維試體低。綜觀各溫度下，纖維含量多寡對強度的影響並無一致趨勢，常溫組在 0.1% 以及 0.15% 時，強度沒有明顯折減，而 0.2% 也僅降低約 2.7MPa；200°C 組在 0.1% 時強度略上升，0.15% 與 0.2% 則分別下降約 1.5MPa、3MPa；400°C 組之強度減少量是各溫度中最多的，但也是受纖維含量多寡影響最少的一組，在此溫度組中，各纖維含量皆比無纖維試體少約 6MPa 的強度，但強度減少量最多之試體為 0.15%，此現象也出現在 600°C 與 800°C 的組別。

70MPa 混凝土呈現與 35MPa 混凝土截然不同的結果。在 70MPa 混凝土的常溫組中，添加纖維反倒有利於強度成長，0.1% 的強度提升約 5MPa，雖然 0.15% 比 0% 強度略減，但也只下降不到 0.5MPa，實際上並無明顯變化，0.2% 則微幅上升 1.2MPa；其餘溫度組別則都有相似的趨勢，先是於 0.1% 時下降到低點，接著於 0.15% 達最高點，最後 0.2% 強度再些微下降，其中，200°C、0.1% 之強度減少約 7.6MPa，為全部組合之最。

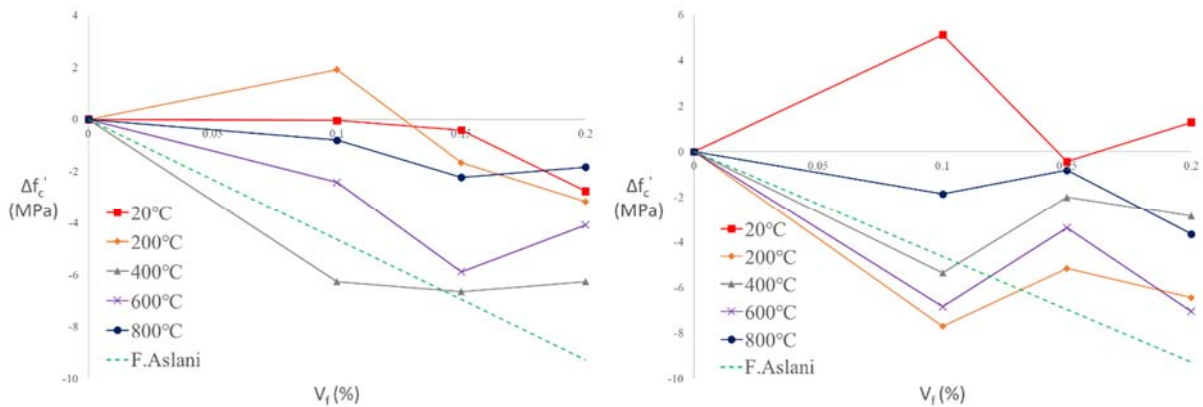


圖 1 混凝土_纖維含量與受不同溫度後之抗壓強度的關係_35MPa(左)、70MPa(右)

3.1.2 纖維含量與受不同溫度後之彈性模數的關係

圖 2 所示為纖維含量與受不同溫度後之彈性模數的關係。35MPa 混凝土的彈性模數於常溫下受纖維含量影響甚鉅，添加 0.1% 纖維之試體比起不加纖維高出約 3.6GPa，然而 0.15% 之試體卻減少 3.6GPa，0.2% 的影響程度則不到 0.6GPa。除在常溫下，其彈性模數受纖維含量之影響較相對有限，折減量幾乎都控制在 2GPa 以內，而且各目標溫度條件下呈現的趨勢皆有所不同，600°C、800°C 組偏向隨著纖維含量的增加，彈性模數也隨著減少，只是減少量非常微小，皆不超過 1GPa；200°C、400°C 組則是在 0.1% 時先下降約 2GPa，接著於 0.15% 稍微回升，最後再下降。以變化的幅度來看，常溫、200°C、400°C 組更勝 600°C、800°C 組，顯示高溫後之混凝土的彈性模數較不易受纖維含量影響，同樣的情形在 70MPa 混凝土的實驗數據中也有出現。

70MPa 混凝土的常溫組與 35MPa 混凝土截然不同。不管是哪種纖維含量，皆會使彈性模數降低，其中又以 1.5% 下降約 5GPa 為甚。反倒是 200°C 組全程提升，同樣也是在 1.5% 時變化值最大，上升約 3GPa。其餘組別的趨勢則跟 35MPa 混凝土 200°C 組相近，變化幅度也皆不超過 2GPa，其中較特殊的是 800°C、0.15% 的條件下，彈性模數會些微增加約 0.5GPa。

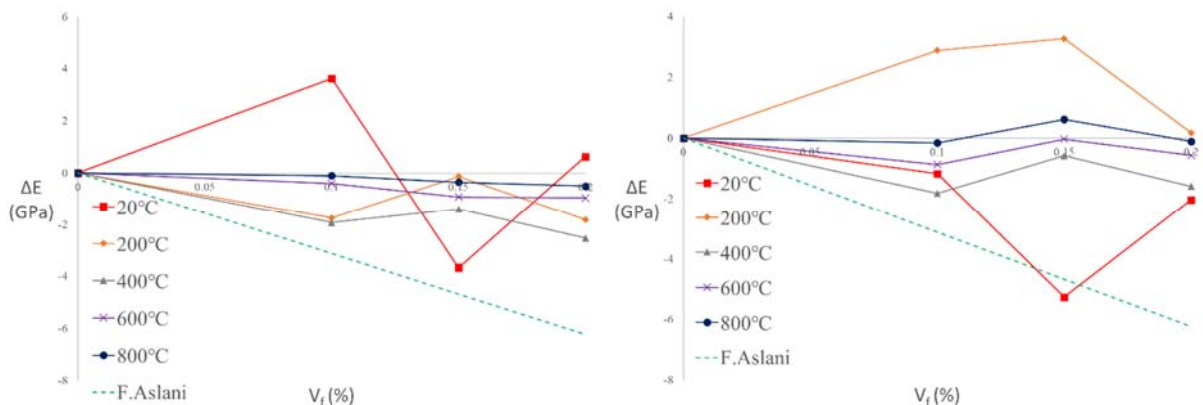


圖 2 混凝土_纖維含量與受不同溫度後之彈性模數的關係_35MPa(左)、70MPa(右)

3.1.3 纖維含量與受不同溫度後之峰值應變的關係

圖 3 所示為纖維含量與受不同溫度後之峰值應變的關係。35MPa 混凝土在常溫、200°C 的條件下，添加纖維對峰值應變產生的影響甚小；在 400°C、600°C 組中，僅 600°C、0.15% 的組合會使峰值應變減少，其餘皆有利於峰值應變，但量都不超過 0.001；雖然 800°C 同樣因纖維含量增加而提升峰值應變，但變化幅度卻遠高於其他溫度，在 0.1% 時上升 0.0015，0.2% 更提升約 0.004。從實驗結果中，顯示加熱到愈高溫度的混凝土試體，對於峰值應變的影響愈劇烈，70MPa 混凝土也能觀察出這現象，但趨勢與 35MPa 混凝土不同。

70MPa 混凝土在常溫以及 200°C 的情況下，添加纖維對峰值應變產生的影響極小，頂多微幅上升；400°C 下，各纖維含量的影響程度則大徑相同；600°C 下，於 0.1% 時的上升量最多，快達 0.0007，然而在纖維含量較多之 0.15%、0.2% 時，對峰值應變影響程度卻如常溫組般地微小；800°C 呈現的趨勢則與其他溫度大不相同，0.1% 時幾乎無任何增減，但在 0.15% 時卻大幅下跌多達 0.0015，而 0.2% 時的縮減量則縮小到 0.0015。

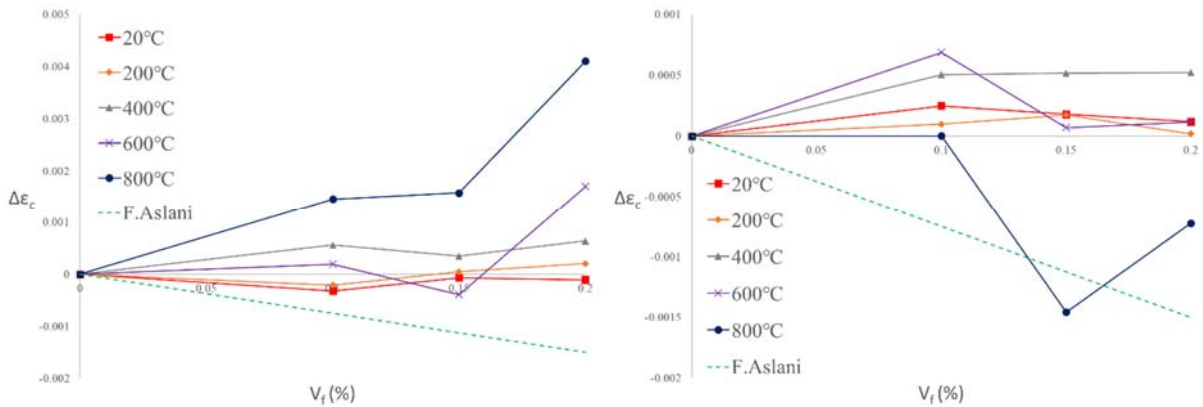


圖 3 混凝土_纖維含量與受不同溫度後之峰值應變的關係_35MPa(左)、70MPa(右)

3.2 溫度對混凝土力學性質之影響

3.2.1 溫度與添加不同纖維含量之抗壓強度的關係

圖 4 所示為溫度與添加不同纖維含量之抗壓強度的關係。35MPa 強度混凝土在任何纖維含量的條件下，抗壓強度受溫度影響的趨勢皆相似。以常溫狀態下之強度作為標準，各纖維含量試體的強度在 200°C 時皆有微幅提升，其中，成長幅度最大的是 0.1% 之試體，強度約為其常溫狀態的 1.13 倍，最小的 0.15% 試體之強度也成長約 0.07 倍。接著抗壓強度就隨著溫度增加而降低，其中含有纖維的試體之強度衰減得較快速，受過 400°C 高溫的試體，0% 與 0.1% 約剩八成的強度，而 0.15% 以及 0.2% 則剩約七成的強度；600°C 組試體中，0% 強度剩約五成，其餘有添加纖維試體剩約四成強度；最後 800°C 的全部試體皆剩不到原有強度的 20%。

70MPa 混凝土在加熱至 200°C 的試體中，纖維含量 0.1% 之強度不增反減，減少約 5% 的強度，其餘像 0% 增加約 14% 的強度，0.15% 與 0.2% 漲幅則分別為 7.5%、3%。在 70MPa 混凝土中可以發現，特別是在 200°C 到 400°C 之間的衰減速率，從斜率可以看出其值高過其他溫差，例如無添加纖維試體，從 200°C 的 1.14 倍到 400°C 只剩 0.67 倍，0.1% 試體強度則從 95% 下降四成到

55%，0.15%與 0.2%也同樣衰減四成，強度只剩約原有的 60%。再高的溫度後，衰減的斜率則較平緩，600°C的試體，無纖維的強度剩 43%，0.1%、0.2%的強度約只剩 3 成，0.15%則還有四成。800°C的全部試體最終約只有 20%原有的強度。

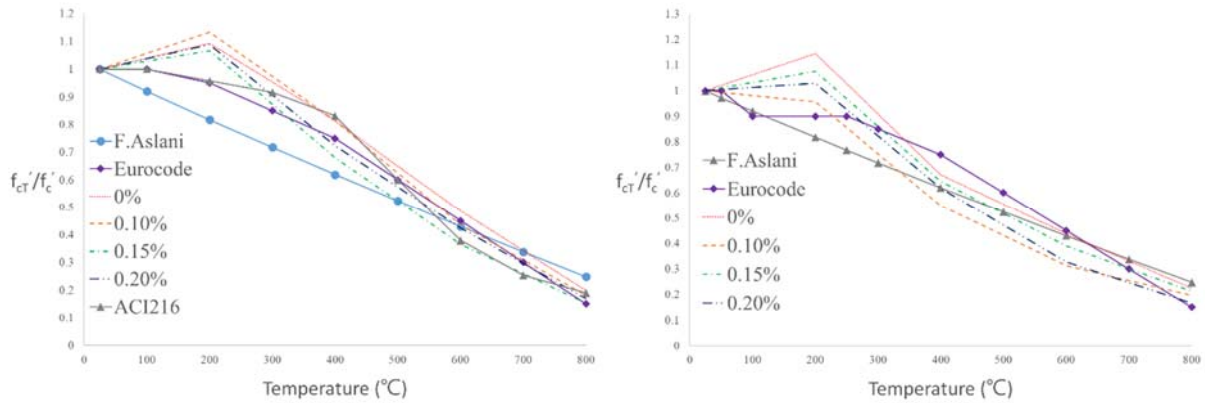


圖 4 混凝土_溫度與添加不同纖維含量之抗壓強度的關係_35MPa(左)、70MPa(右)

3.2.2 溫度與添加不同纖維含量之彈性模數的關係

圖 5 所示為溫度與添加不同纖維含量之彈性模數的關係。35MPa 強度混凝土在加熱過 200°C 後普遍呈現衰減的趨勢，纖維含量 0%、0.1%、0.2%的試體，分別下降至原有的 81%、66%、73%，但 0.15%試體反而比起常溫組高出 16%；加熱至 400°C 的試體中，即使從 200°C 開始的衰減速率為各纖維含量之最，但 0.15%試體仍然是折減比例最少的一組條件，約減少 43%，其餘像 0%試體減少 55%，0.1%、0.2%試體皆減少 67%；然而 0.15%試體之彈性模數快速地衰減，在加熱 600°C 的試體中，其折減比例已與其他組相差不遠，甚至與 0%相同，只剩常溫彈性模數的 13%，0.1%、0.2%也只剩 9%；比起 200°C 到 600°C 之間的衰減速率，600°C 到 800°C 相對緩慢，但各纖維量之彈性模數皆已衰減超過 95%，顯示溫度對於混凝土之彈性模數有著卓越的影響力。

70MPa 混凝土呈現的趨勢也類似於 35MPa 混凝土，加熱到 200°C 的試體中，纖維含量 0.15% 的彈性模數提升約 31%，其餘 0%、0.1%、0.2% 分別下降 20%、5%、12%，雖然有衰減這部分與 35MPa 混凝土相同，但順序卻有差別，35MPa 混凝土中，衰減量多至少依序為 0.1%、0.15%、0%，反觀 70MPa 混凝土，則是無纖維試體折減最多，接著依次才是 0.15%、0.1%；關於衰減速率的變化，以 70MPa 混凝土數據圖上的斜率來看，能夠更容易辨識出，從 200°C 到 400°C 之間衰減最快，隨後愈高溫，其衰減的速率則愈緩慢，從常溫到 800°C，0.15% 纖維含量試體始終維持在所有組別中衰減量最少的，例如加熱過 400°C 的試體，纖維含量 0.15% 仍保有 52% 的強度，其餘試體則剩約 40%，即使加熱過 600°C、800°C，纖維含量 0.15% 試體依然保有原先的 18% 以及 12%，在此兩種目標溫度，0.15% 試體的殘餘強度比例皆比其餘試體高出 5%。

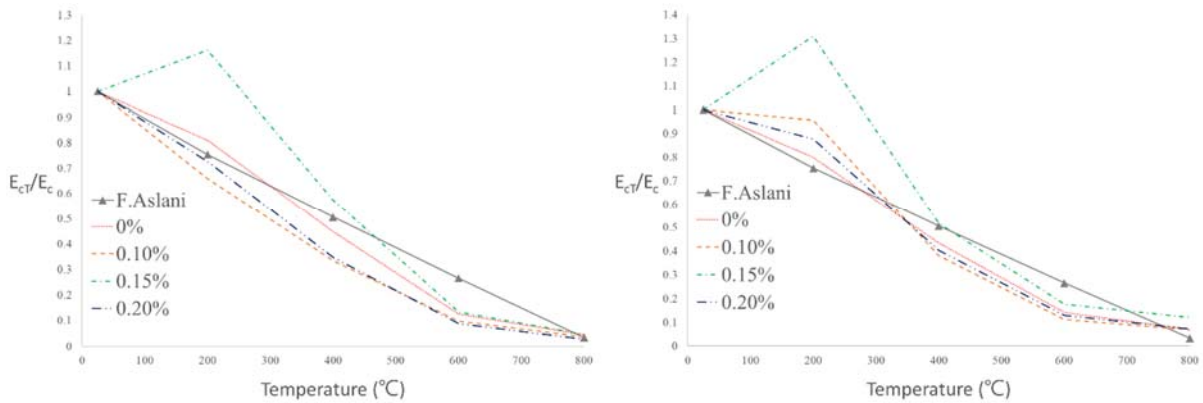


圖 5 混凝土_溫度與添加不同纖維含量之彈性模數的關係_35MPa(左)、70MPa(右)

3.2.3 溫度與添加不同纖維含量之峰值應變的關係

圖 6 所示為溫度與添加不同纖維含量之峰值應變的關係。35MPa 混凝土中，除纖維含量 0.15% 試體以外，其他纖維含量試體峰值應變都隨溫度升高而增加。加熱過 200°C 的試體，0%、0.1% 以及 0.2% 皆分別增加常溫峰值應變的 15%、23% 以及 30%，唯獨 0.15% 試體下降約 30%；加熱過 400°C 的試體，0.1% 試體增加 90%、0.2% 試體增加 82%、0% 試體增加 47%，0.15% 試體則表現得與常溫狀態相同；往後隨著溫度增加，峰值應變成長的幅度也跟著上升，成長最顯著的是 0.2% 試體，在 600°C、800°C 的試驗組中，其峰值應變分別為常溫的 3.6 倍以及 5.8 倍，其次是 0.1% 試體的 3.3 倍、5.1 倍，再來是無纖維試體的 2.7 倍與 3.8 倍，而 0.15% 試體也終於因溫度的增加使得峰值應變上升為常溫的 1.5 倍、5.1 倍。

70MPa 混凝土基本上趨勢與 35MPa 混凝土相同，但各纖維含量試體之峰值應變隨溫度變化之關係較為接近、一致，且成長幅度較少。在加熱過 200°C 的試體中，各纖維含量漲幅介於 10% 至 16% 之間，而加熱過 400°C 的試體，漲幅則介於 65% 至 77%，峰值應變隨溫度增加的倍率從 600°C 組試體開始略微出現差距，0% 以及 0.1% 約為常溫之 3 倍，0.15% 與 0.2% 則約為常溫之 2.8 倍，最終 800°C 組中，無纖維試體獲得最大的成長幅度，約為常溫的 4.1 倍，0.1% 與 0.2% 相當接近，分別為 3.6、3.7 倍，即使是成長最少的 0.15% 試體也提升到 3.3 倍。

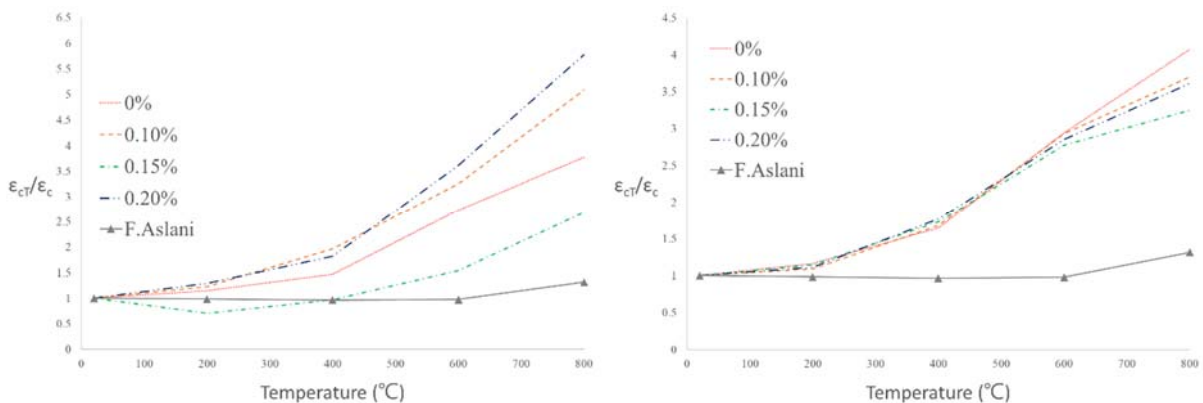


圖 6 混凝土_溫度與添加不同纖維含量之峰值應變的關係_35MPa(左)、70MPa(右)

3.3 混凝土之應力應變曲線

3.3.1 建立力學性質關係

本研究引用 Aslani and Samali[4]，建立含聚丙烯纖維混凝土之應力應變曲線關係：

$$\frac{\sigma_c}{f'_c} = \frac{n \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^n} \quad (1)$$

$$n = n_1 = [1.02 - 1.17(E_{\text{sec}} / E_c)]^{-0.74} \text{ if } \varepsilon_c \leq \varepsilon'_c \quad (2)$$

$$n = n_2 = n_1 + (\lambda + 28 \times \mu) \text{ if } \varepsilon_c > \varepsilon'_c \quad (3)$$

$$\lambda = (135.16 - 0.1744 f'_c)^{-0.46} \quad (4)$$

$$\mu = 0.83 \exp(-911 / f'_c) \quad (5)$$

$$E_{\text{sec}} = f'_c / \varepsilon'_c \quad (6)$$

$$\varepsilon'_c = \left(\frac{f'_c}{E_c} \right) \left(\frac{\psi}{\psi - 1} \right) \quad (7)$$

$$\psi = \frac{f'_c}{17} + 0.8 \quad (8)$$

其中， σ_c 為混凝土之應力， f'_c 為混凝土之抗壓強度， n 為應力應變曲線之形狀因子， ε_c 為混凝土之應變， ε'_c 為混凝土之峰值應變， E_c 為混凝土之彈性模數， E_{sec} 為混凝土之正切彈性模數， λ 以及 μ 為線性方程式之參數， ψ 為峰值應變轉換因子。只需代入抗壓強度以及峰值應變進入上述一系列的公式，即可繪出應力應變預測之曲線。

根據本研究之實驗數據，建立一套以無添加纖維、尚未加熱之混凝土數值為起始點的預測公式。

35MPa：

$$f'_{cf} = f'_c * (-36.429V_f^3 + 8.1068V_f^2 - 0.4542V_f + 1) \quad (9)$$

$$f'_{cT} = f'_{cf} * \begin{cases} 1.0 & , T \leq 200^\circ\text{C} \\ -0.0014T + 1.275 & , T > 200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{cf} = \varepsilon_c * (-238.74V_f^3 + 82.887V_f^2 - 7.253V_f + 1) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{cT} = \varepsilon_{cf} \begin{cases} 1.0 & , T \leq 200^\circ\text{C} \\ 0.0057T - 0.1433 & , T > 200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (12)$$

70MPa :

$$f'_{cf} = f'_c * (190.06V_f^3 - 63.73V_f^2 + 5.2397V_f + 1) \quad (13)$$

$$f'_{cT} = f'_{cf} * \begin{cases} 1.0 & ,T \leq 200^\circ\text{C} \\ -0.0013T + 1.267 & ,T > 200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{cf} = \varepsilon_c * (56.249V_f^3 - 24.507V_f^2 - 2.891V_f + 1) \quad (15)$$

$$\varepsilon_{cT} = \varepsilon_{cf} \begin{cases} 1.0 & ,T \leq 200^\circ\text{C} \\ 0.0044T - 0.1151 & ,T > 200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (16)$$

其中， f'_c 為無添加纖維之混凝土抗壓強度(MPa)， V_f 為纖維含量體積比(%)， f'_{cf} 為添加纖維之混凝土抗壓強度(MPa)， f'_{cT} 為火害後之纖維混凝土抗壓強度(MPa)， ε_c 為無添加纖維之混凝土峰值應變， ε_{cf} 為添加纖維之混凝土峰值應變， ε_{cT} 為火害後之纖維混凝土峰值應變， T 為高溫火害溫度($^\circ\text{C}$)。

3.3.2 應力應變曲線比較

圖 7 所示為應力應變曲線比較，實線為實際之試驗數據，虛線則為預測公式。由於強度較高的試體在達到抗壓強度時，會瞬間碎裂，以致 LVDT 位移感測器無法量測後續應變資料，故圖中部份應力應變曲線會不完整。從全部圖示可以觀察出，預測公式在應力應變曲線上升段的精確度勝過下降段，另外，加熱過愈高溫的試體之應力應變曲線與預測公式愈貼合，顯示高溫後的混凝土之力學性質相對穩定、資料的變異性較小。

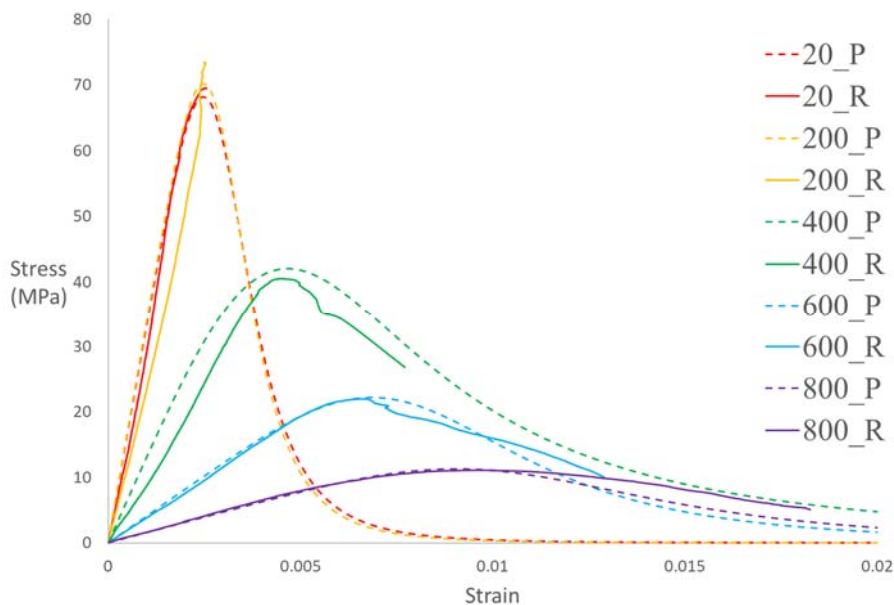


圖 7 70MPa 混凝土_0.2%纖維_各溫度應力應變曲線與預測公式之比較

3.4 溫度對鋼筋力學性質之影響

3.4.1 溫度對殘餘降伏強度之影響

圖 8 所示為溫度與殘餘降伏強度關係。SD790 (#4) 鋼筋在加熱過 200°C、400°C 以及 500°C 後之殘餘降伏強度與常溫之數值並無太大差距，頂多折減約 5% 的強度；從加熱過 600°C 之試體開始，鋼筋降伏強度出現明顯的折減，600°C、700°C、800°C 對應之殘餘降伏強度比例分別為 92%、60%、51%，其中可以發現鋼筋在 600°C 至 700°C 之間折減速率最快。

SD690 (#8) 鋼筋同樣也是在 500°C 之前降伏強度並無明顯變化，甚至還有些許增強，而加熱過 600°C 之試體也僅損失 3% 的強度，與 #4 鋼筋相同之處是 600°C 至 700°C 之間折減速率最快，加熱過 700°C 之試體剩約 70% 的強度，800°C 組則還有 61%，顯示 #8 鋼筋受溫度影響的程度小於 #4 鋼筋。

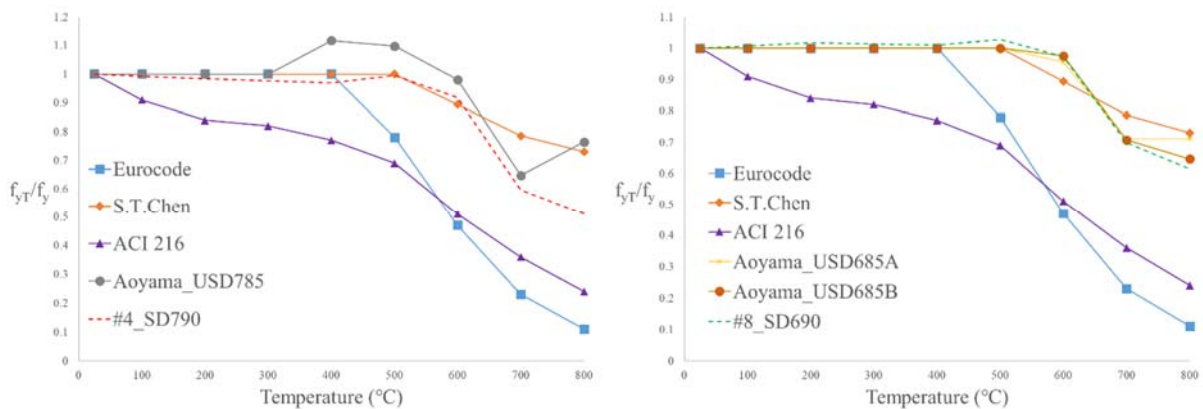


圖 8 鋼筋_降伏強度與溫度之關係_ SD790(#4)(左)、SD690(#8)(右)

3.4.2 溫度對殘餘抗拉強度之影響

圖 9 所示為溫度與殘餘抗拉強度關係。鋼筋受高溫後之抗拉強度折減比例趨勢與降伏強度所呈現的態勢雷同，SD790 (#4) 鋼筋在加熱不超過 500°C 的情況下，每根的抗拉強度皆在常溫下強度的正負 2% 以內，並無太大變化，加熱過 600°C 之試體剩 93% 的強度，700°C 組快速折減到剩 65%，800°C 組則剩約 60%。

SD690 (#8) 鋼筋的抗拉強度衰減曲線也與其降伏強度衰減趨勢類似，基本上，即使加熱到 500°C 後之殘餘強度仍與常溫狀態下無異，600°C 也僅減少 5% 的強度，加熱過 700°C 的試體才能看出明顯的力量衰減，衰減到常溫狀態下之 72%，800°C 則還剩約 65%。另外，從數值也能發現，抗拉強度受高溫影響的程度小於降伏強度，而不管降伏強度還是抗拉強度，SD690 比 SD790 更不易受高溫折減。

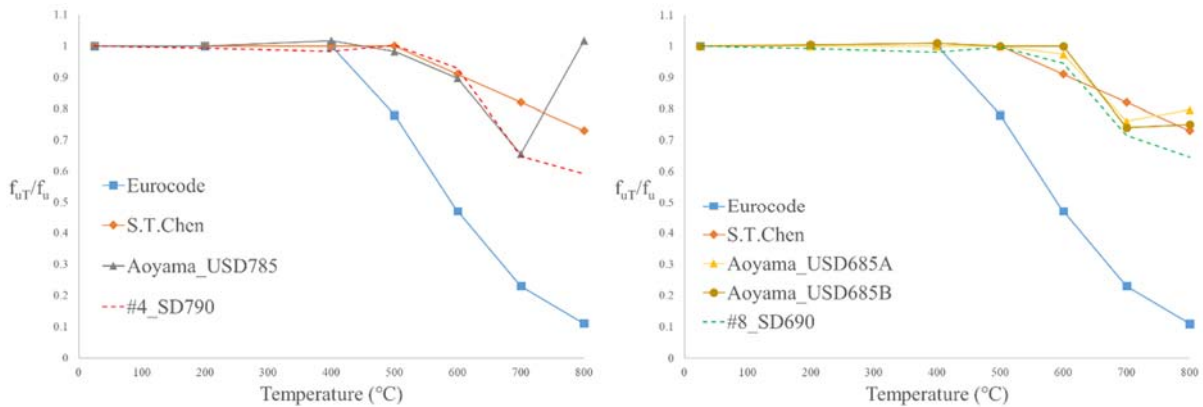


圖 9 鋼筋_抗拉強度與溫度之關係_ SD790(#4)(左)、SD690(#8)(右)

3.4.3 溫度對殘餘抗拉強度與殘餘降伏強度比值之影響

圖 10 所示為溫度對殘餘抗拉強度與殘餘降伏強度比值關係。SD790 (#4) 鋼筋的抗拉強度/降伏強度關係，此比值關係在 600°C 前維持約 1.2 倍，代表 600°C 前，抗拉強度與降伏強度的折減率是相當的，此後比值上升代表抗拉強度折減的比例少於降伏強度，也證明抗拉強度較不受高溫影響。SD690 (#8) 鋼筋大致上與 SD790 (#4) 趨勢相同，600°C 前一直維持穩定的比例關係，700°C 之後的數值上升代表降伏強度衰減速度較快。

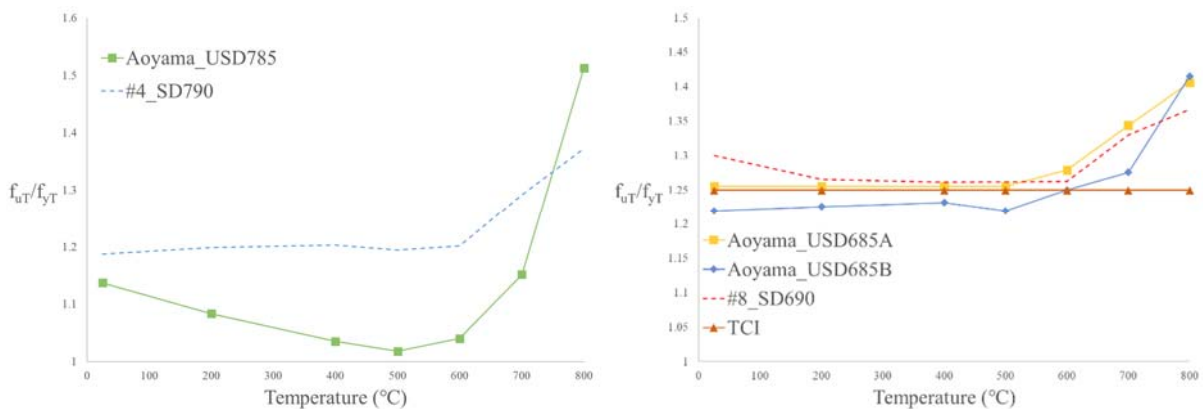


圖 10 鋼筋_抗拉/降伏強度比值與溫度之關係_ SD790(#4)(左)、SD690(#8)(右)

3.4.4 溫度對鋼筋殘餘彈性模數之影響

圖 11 所示為溫度對鋼筋殘餘彈性模數關係。鋼筋之彈性模數最初會隨溫度增加而提升，其中 SD790 (#4) 鋼筋在 400°C 之前與常溫狀態下並無太大差別，加熱過 500°C 與 600°C 的鋼筋，其彈性模數微幅提升約常溫的 15%，加熱過 700°C 後，其彈性模數會達最高點，約為常溫的 1.44 倍，但加熱過 800°C 的鋼筋，其彈性模數僅會剩餘常溫的 58%。

SD690 (#8) 之趨勢則較不固定，雖然 700°C 之前，其彈性模數都是獲得提升的狀態，但卻是在加熱過 400°C、600°C 後無特別影響，反而是 200°C、500°C 後分別增加 51% 以及 24%，不過，與 SD790 (#4) 鋼筋情況相同的是都於加熱過 700°C 後，其彈性模數達到最大值，約為常溫

的 1.88 倍，但因 800°C 組的試體表面受高溫而嚴重脆化，導致在進行抗拉試驗時，數位影像相關法需量測之點位隨著脆化表層因施力而快速伸長的鋼筋剝落，使得無法量測相關應變資料，故表格與圖中皆無 800°C 組的數據。

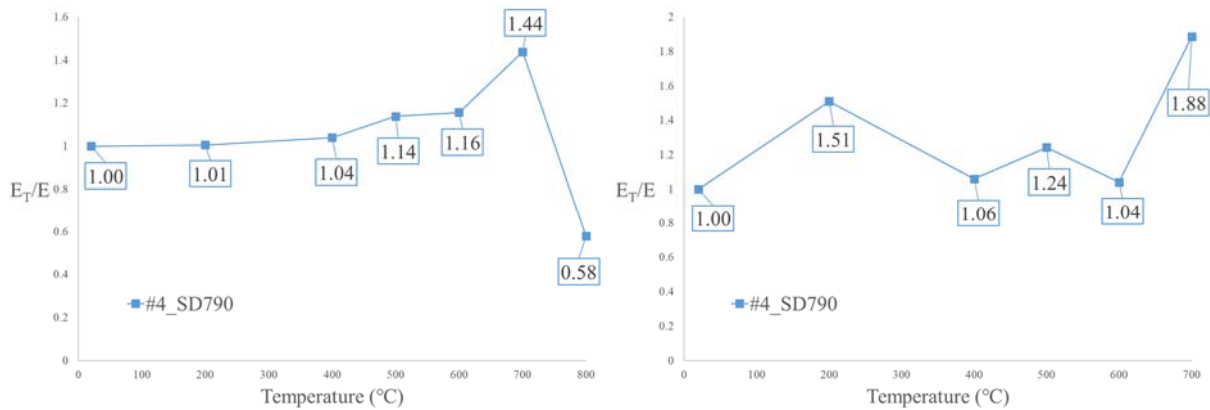


圖 11 鋼筋_彈性模數與溫度之關係_ SD790(#4)(左)、SD690(#8)(右)

3.4.5 鋼筋之應力應變曲線

使用數位影像相關法量測的鋼筋變形數據，搭配萬能材料試驗機量測的荷重數據，以鋼筋的降伏點作為標準對齊，即能繪出鋼筋在整個抗拉試驗過程的應力應變曲線，SD790 (#4) 鋼筋在加熱過各溫度下之應力應變曲線，如圖 12 所示。因 SD790 (#4) 鋼筋較細，高溫後表層脆化剝落的情形較沒有 SD690 (#8) 鋼筋來得嚴重，所以應變資料相對穩定，繪製出的應力應變曲線也較整齊、完整。SD690 (#8) 鋼筋在加熱過各溫度下之應力應變曲線 (圖 12)，因受到高溫後，鋼筋表層脆化，在進行抗拉試驗時，尤其是進入降伏階段，鋼筋快速地被拉長，表層卻因脆化、無法跟上伸長的長度而開裂、剝落，導致應變資料不穩定，甚至 800°C 組無法留下有效的實驗數據。

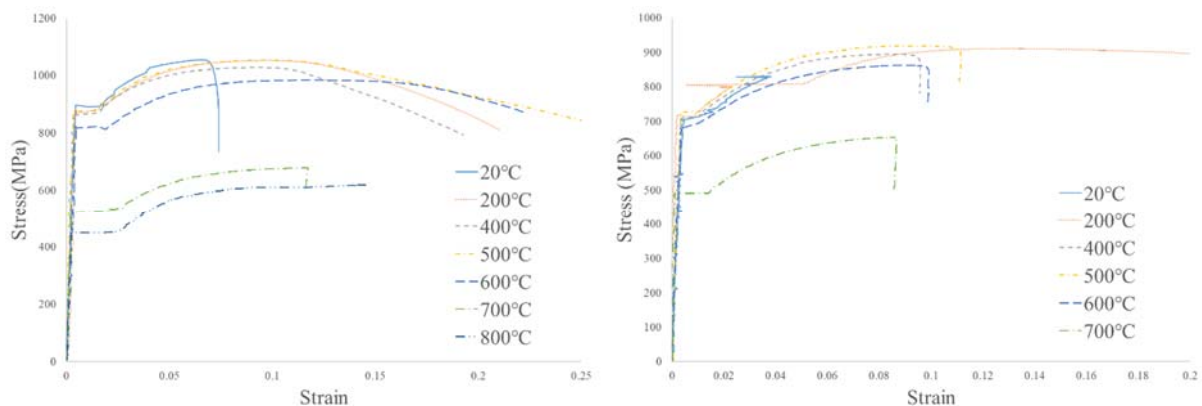


圖 12 鋼筋在各溫度下之應力應變曲線_ SD790(#4)(左)、SD690(#8)(右)

四、結論

1. 35MPa、70MPa 混凝土添加聚丙烯纖維後，抗壓強度會下降，但纖維含量與強度折減量並無固定關係，0.15%纖維含量對強度的影響最少。
2. 35MPa、70MPa 混凝土添加聚丙烯纖維後，常溫下會對彈性模數造成影響，但對於進行高溫火害後之試體則影響不明顯。
3. 35MPa、70MPa 混凝土添加聚丙烯纖維後，400°C以下試體之峰值應變並無太大改變，對於加熱到 800°C之添加纖維試體，35MPa 混凝土峰值應變會上升，70MPa 混凝土反而下降。
4. 35MPa、70MPa 混凝土受高溫後，除 200°C 因卜作嵐反應生成水化產物而微幅提升強度外，抗壓強度隨溫度增加而減少，其中 200°C 至 400°C 衰減速率最快，400°C 後之實驗數據與各文獻經驗值接近。
5. 35MPa、70MPa 混凝土受高溫後，除 200°C、0.15%試體之彈性模數會上升外，其餘試體彈性模數隨溫度增加而減少，其中，70MPa 混凝土受溫度影響程度比 35MPa 混凝土小。
6. 35MPa、70MPa 混凝土受高溫後，峰值應變隨溫度上升而增加，在 800°C前，70MPa 混凝土各纖維含量受溫度影響差異不大。
7. 將本研究之實驗結果與上段預測公式進行應力應變曲線預測比較，發現上升段精確度優於下降段，高溫試體實驗數據與預測曲線較符合。
8. 降伏強度與溫度之關係，500°C前強度變化小，600°C開始隨溫度增加而減少，其中，600°C 至 700°C之間強度折減最快。SD790 (#4) 鋼筋強度折減幅度比 SD690 (#8) 鋼筋大。
9. 抗拉強度與溫度之關係，500°C前強度變化小，600°C開始隨溫度增加而減少，其中，600°C 至 700°C之間強度折減最快。SD790 (#4) 鋼筋強度折減幅度比 SD690 (#8) 鋼筋大。
10. 從抗拉強度與降伏強度比值關係可發現，600°C前，兩種強度折減率相當，700°C開始，降伏強度折減速率大於抗拉強度。
11. 鋼筋彈性模數與溫度之關係，700°C前，彈性模數皆比常溫狀態下高，SD790 (#4) 鋼筋在加熱過 800°C後，彈性模數會大幅衰減。

致謝

本研究得以順利完成，感謝科技部專題研究計畫 (MOST 106-2625-M-006-022) 經費補助，成大土木系黃忠信特聘教授、台北科技大學機械系張敬源助理教授，分別提供高溫電爐及影像量測設備，在此謹申謝忱。

參考文獻

1. 建設省総合技術開発プロジェクト:鉄筋コンクリート造建築物之超軽量化・超高層化技術の開発(New RC)，平成四年度構造性能分科会報告書，(財)国土開發 技術研究センター (1993)。
2. ACI Committee 363R-10, "Report on High-Strength Concrete," American Concrete Institute (2010).
3. ACI Committee 318-05, "Building Code Requirements for Structural Concrete," American Concrete Institute (2004).

4. Farhad Aslani and Bijan Samali, "High Strength Polypropylene Fibre Reinforcement Concrete at High Temperature," *Fire Technology*, 50, 1229–1247 (2014).
5. ACI Committee 216.1-07, "Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies," American Concrete Institute (2007).
6. European Committee, "Eurocode2 : Design of concrete structures – Part1-2 : General rules – Structural fire design," EN 1992-1-2 (2004).
7. Chen B, Liu J, "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures," *Cem Concr Res* 34(6):1065–1069 (2004).
8. Poon CS, Shui ZH, Lam L, "Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperature," *Cem Concr Res* 34(12):2215–2222 (2004).
9. Noumowe A, "Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200°C," *Cem Concr Res* 35:2192–2198 (2005).
10. Peng GF, Yang WW, Zhao J, Liu YF, Bian SH, Zhao LH, "Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures," *Cem Concr Res* 36:723–727 (2006).
11. Suhaendi SL, Horiguchi T. "Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition." *Cem Concr Res* 36:1672–1678 (2006).
12. Behnood A, Ghandehari M, "Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures," *Fire Saf J* 44:1015–1022 (2009).
13. Pliya P, Beaucour AL, Noumowe' A, "Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature," *Constr Build Mater* 25(4):1926–1934 (2011).
14. Xiao J, Falkner H, "On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures," *Fire Saf J* 41:115–121 (2006).
15. 陳舜田、林英俊、楊旻森，「火害後鋼筋混凝土桿件之扭力行為」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，國立台灣工業技術學院營建工程技術系，台北 (1995)。
16. Hiroyuki Aoyama, "Design of Modern Highrise Reinforced Concrete Structures, University of Tokyo," Japan (2001).