

高強度混凝土高溫下變形特性

王天志

內政部建築研究所

摘要

本研究探討高強度混凝土在高溫下之變形行為特性。針對高強度混凝土在不同的軸壓下，承受穩定、持續的升溫直至試體破壞為止，了解試體在不同軸壓下隨溫度升高之軸向變形行為，其中軸壓力為零的試驗條件亦即代表高強度混凝土的熱膨脹性質。試體種類包括使用不同粗骨材，矽質骨材及碳酸鹽類骨材；有、無添加鋼纖維。試體 28 天抗壓強度介於 74.4~83.9MPa (10791~12169psi)。試體製作包括不同齡期抗壓強度試驗用的 15×30 公分圓柱試體及做軸向變形試驗用 10×10×400 公分方柱試體。最終試驗溫度(至試體破壞)，除零軸壓為設定加至 800°C，其餘依所加軸壓力而不同，30%軸壓力溫度約 750~800°C，45%軸壓力溫度約 550~600°C，而 60%軸壓力則只能升至 350~380°C 左右，試體即已破壞。由試驗結果可發現所施加軸壓力大小對混凝土高溫下的變形有相當大的影響，因此對於結構物遭受火害時，其結構變形的分析，需加以考慮結構當時所負荷的載重大小。

關鍵詞：高強度混凝土、軸壓力、高溫軸向變形、熱膨脹

Abstract

This report describes results of an experimental program on the deformation properties of high strength concrete (HSC) at elevated temperatures. The effects of high temperature on strength, modulus of elasticity and stress-strain relationship of high strength concrete were investigated. Axial deformation tests at transient temperature of vary stress levels for four types of HSC. The variables considered in the experimental study included concrete strength, type of aggregate, and the addition of steel fibers.

The results of the experiment indicate that the axial deformations depend, to a high degree, on the level of the stress to which the specimens are subjected and the type of aggregate. The thermal expansion of HSC made with siliceous aggregate is greater than that HSC made with carbonate aggregate below 780oC, and opposite above 780oC. The effect of addition of steel fiber on thermal expansion is not significant. While on the axial deformation tests under loading, the present of steel fibers is improves the ductility of plain HSC.

Keywords: high strength concrete, axial compression, axial deformation at elevated temperature, thermal expansion

一、前言

地球環境日益惡化，氣候異常，而建築相關產業所產生的環境影響佔有相當大的比例。因此如何減少結構體工程的建材使用量，使結構最佳化、建築輕量化、建材回收再利用以及延長建築使用壽命等，這些永續建築的目標是目前產業關注發展的方向。近些年來，因應超高樓建築的需求，高強度混凝土的重要性，以及使用量日益增加。高強度混凝土比普通混凝土有更高的強度、更佳的耐久性，使其更符合永續建築的要求。一般對高強度混凝土的定義為圓柱試體 28 天抗壓強度須大於 45MPa，而其常使用的場所有橋樑、海岸結構、超高樓等。

伴隨著高強度混凝土在各種建築上越來越廣泛的使用，對這類混凝土在某些嚴苛的條件下之行為也就更為關心，例如火災。特別是當遭遇火災之類快速升溫時會產生爆裂剝落的情形，更令設計者及使用者對結構承重能力及完整性感到擔心[1, 2, 3]。除此之外，在很多有關耐火試驗的文獻中指出高強度混凝土與普通混凝土之火害行為有很大的差異[4, 5, 6, 7]。

為了要了解、改善，甚至預測高強度混凝土結構構件在高溫下的行為，此種材料在高溫下的熱學性質有必要先予以建立。在這些熱學性質之中的材料軸向熱膨脹性質，對構件在高溫時的熱膨脹變形而造成的位移及相應而產生各種力，是一相當重要的計算依據。

本研究進行四種不同形式的高強度混凝土，隨溫度升高而變化的軸向變形之研究。本案試體規劃包括純混凝土及添加鋼纖維的高強度混凝土試體，以改善高強度混凝土易爆裂的缺點，同時增進試體的延展性[2, 5, 8]。另外試體粗骨材種類則包括矽質與碳酸鹽骨材，文獻資料顯示這兩類骨材對耐火性能及膨脹變形有很大的影響。

二、研究目的

結構構件被設計為在各種不同環境條件下，皆須符合服務性及安全性的極限狀態。在各種嚴苛環境條件下，火災是一種很常見的災害，而在建築設計規則裡，也規範了安全的建築結構須有足夠的耐火時效。構件的耐火性能主要跟其材料的熱學性質、力學性質及變形行為有關。因此材料的變形行為是為計算構件耐火性能之重要基本資料之一。

本研究內容包括有無添加鋼纖維、不同粗骨材種類（矽質、碳酸鹽）及加熱過程對試體施加不同軸壓力（0%、30%、45% 和 60%的 28 天常溫抗壓強度），各型式混凝土試體承受相同加熱曲線時之軸向變形行為。加熱曲線的升溫速率為 2°C/min。所用試體 28 天抗壓強度範圍為 75~84MPa。

三、實驗規劃

（一）試體

研究包括四種形式的高強度混凝土試體，有無添加鋼纖維、不同粗骨材種類（矽質、碳酸鹽）。試體尺寸為 100 mm x 100 mm x 400 mm 的角柱形，共分四批不同的配比澆灌製作，分別編為 TWN1、TWN2、TWN3 和 TWN4。TWN1 為採用碳酸鹽骨材，TWN2 為採用矽質骨材，TWN3、4 骨材分別與 TWN1、2 相同，但都多添加了鋼纖維在內。試體 28 天抗壓強度範圍為 75~84MPa。所有試體都使用普通波特蘭水泥，細骨材皆為矽質砂。另外為改善工作度，都有添加強塑劑和緩凝劑。

鋼纖維外型為波浪狀，材質為軟碳鋼，長度為 50mm，等效直徑為 0.9mm，形狀比為 57，抗拉強度約為 960MPa，其外觀如圖 1 所示。波浪狀的外型能產生較強的機械鍵結力，以提高混凝土的抗剪力強度。

強塑劑的添加方式，一半先於預拌廠區添加，另一半於現場澆灌前再予以添加。四批試體的配比詳如表 1 所示。

每一批次所製作的試體，包括：

1. 10 個斷面為 100mm×100mm，高度為 400mm 的角柱形試體，供軸向變型研究用。
2. 10 個 150mm×300mm 圓柱試體，供不同齡期抗壓強度使用。

另外為量測試體內部溫度，角柱試體內均埋設有 2 條測溫線，1 條位於試體中心點，另 1 條位於中間高度、距試體表面 25mm 處。試體澆製 1 天後拆模並放置於水中養護 7 天，之後存放於室溫 20°C、相對濕度 50% 的環境中直至試驗。四批圓柱試體的 7、28、91 天抗壓強度分別詳列於表 1。

表 1 試體配比

試體		TWN 1	TWN 2	TWN 3	TWN 4
水泥	(kg/cu. m)	501	499.5	496.5	505
粗骨材	(kg/cu. m)	1100	1118.5	1100	1100.5
細骨材	(kg/cu. m)	841.5	827	835	805
矽灰	(kg/cu. m)	45.4	45.4	45.4	45.4
水	(kg/cu. m)	123	109.5	114.5	120
鋼纖維	(kg/cu. m)	0	0	42	42
減水/緩凝劑	(ml)	1453	1453	1453	1453
強塑劑	(L)	9.4	9.4	9.4	11.75
水膠比		0.25	0.22	0.23	0.25
抗壓強度 (MPa)	7 days	67.8	60.5	64.3	72.1
	28 days	75.5	74.5	74.4	83.9
	91 days	79	78.3	81.4	85.5

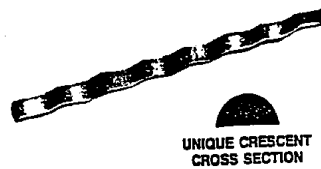


圖 1 鋼纖維外觀

(二) 試驗設備

設備是由一閉迴路伺服控制的 200 噸油壓系統、加載反力框架和電熱高溫爐所組成，圖 2 為整個設備的外觀。在試體的上下兩端使用兩個鎳合金的圓柱鐵塊，用來傳遞載重與克服高溫的影響；這 2 個鐵塊分別置於試體的上下兩端，上端鐵塊的下方焊有兩根量測桿，下端鐵塊則於上方焊有兩根量測桿，量測桿的頂端皆伸出高溫爐外，這 4 根量測桿用來量測對應試體上下兩端的位移變形，變形量則由 4 個 LVDT 來量測。在試體與高溫爐電熱線間用 1 孔狀保護網來保護電熱線，避免因試體非預期的爆裂造成損壞。

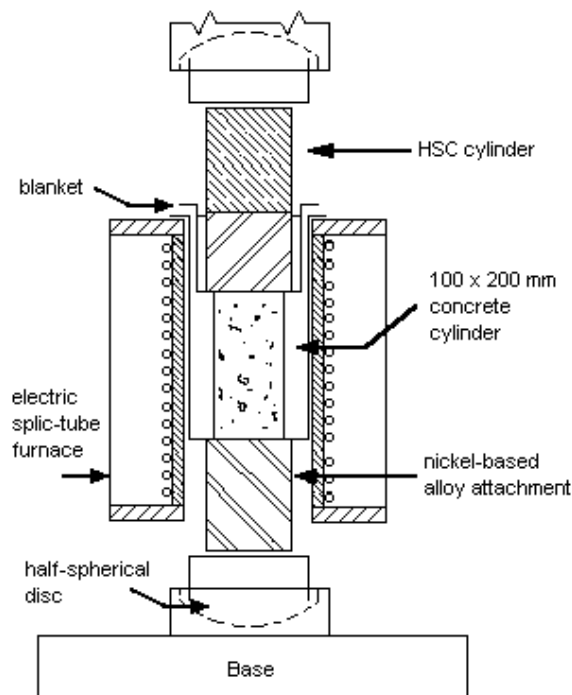


圖 2 試驗設備安裝示意圖

(三) 實驗程序

本研究試體熱變形行為是利用齡期至少 6 個月以上的角柱形試體，以降低加熱過程反造成試體加速水化的影響，此現象在齡期較短的試體上影響特別大。實驗加熱為固定速率持續升溫。實驗前須先求得該批次試體的抗壓強度，以作為施加預壓力的基準。

在開始加熱前，試體分別先施加常溫時抗壓強度的 0%, 30%, 45% 和 60% 的軸壓力，並且保持此壓力約 30 分鐘後才開始加熱，以消除因加載所造成的彈性變形影響。加熱時以 2°C/min 的速率加熱，加熱過程軸壓力需隨時調節，保持在原定軸壓力直至試體破壞。

實驗過程軸壓力固定、升溫速率固定，主要量測試體上下兩端的軸向變形量及試體內部 2 測溫點的溫度值。

四、實驗結果與討論

本研究 4 種形式的高強度混凝土試體，在各種實驗條件下的熱變形行為實驗結果分別如圖 3 到圖 6 所示。試體軸壓力為零的實驗條件，意即代表為混凝土試體的熱膨脹行為。圖 7 至圖 10 則為不同批次試體受相同軸壓力條件下之熱變形行為比較圖。

(一) 軸壓力的影響

由圖 3 至圖 6 的實驗結果，可發現試體軸向變形量和軸壓力大小有相當大的關係，軸壓力為零的試體，其軸向變形量隨溫度升高持續增加，直至實驗停止。而另 3 種軸壓力條件的試體，其軸向變形在 100°C 以前，只有小幅增加或幾乎保持不變，之後隨者溫度升高，軸向變形反而開始縮減。縮減幅度隨軸壓力增加，有很明顯的增加。且其變形極限值隨軸壓力增加而減少，代表試體因變形而可吸收的能量亦減少。

(二) 熱膨脹性質

圖 7 為軸壓力為零的實驗條件，其結果可顯示試體的熱膨脹性質。由圖可發現在 800°C 之前，矽質骨材試體的熱膨脹值大於碳酸鹽骨材試體。對矽質骨材試體而言，在 300°C 之前，其熱膨脹幾乎保持線性，300°C 之後，膨脹速率增加，直至 700°C 左右，膨脹速率開始減緩。而碳酸鹽骨材試體則約在 400°C 以前約保持線性增加，但在 400°C 以後，則幾乎以指數模式持續增加。在 650°C 時，兩種骨材的熱膨脹值差距最大，約為 2.3×10^{-3} ，而在約 780°C，兩者的熱膨脹值則為相同。矽質骨材在約 500°C 時有一急速的熱膨脹現象，其可能原因為矽質骨材內石英質由 α 相轉變為 β 相，而造成體積急速變大。而碳酸鹽骨材試體後期軸向變形急速增加，可能是由於骨材因高溫裂解，而使體積變大所致[10,11]。而純混凝土與有添加鋼纖維混凝土的熱膨脹性質，在此實驗結果則差異不大。

(三) 骨材種類與鋼纖維的影響

由圖 8 到圖 10，可發現所有批次試體在有軸壓力的條件下，其軸向變形曲線非常相似。在相同比率的軸壓力下，碳酸鹽骨材試體的延展性比矽質骨材試體要來的好。另外，有添加鋼纖維的試體，其延展性有明顯的改善，且試驗結果試體完整性較佳，驗證添加鋼纖維可有效改善高強度混凝土的爆裂現象。使用碳酸鹽骨材及添加鋼纖維，對實驗結果試體的延展性有明顯改善，亦表示對高強度混凝土的耐火性能有相當的助益。

以往結構構件的耐火性能驗證，需藉助實尺寸構件進行耐火試驗，此法費時、費工、花費又高。近年來，在實體耐火試驗外，各界也積極建立數值模擬來計算構件的耐火時效，藉由材料在高溫下的各種熱學、力學性質資料逐漸的建構完備，數值模擬的準確度也大幅的提升，逐漸的成為構件耐火性能先期評估的利用工具之一，可大幅縮短評估時間與成本。

本研究的高強度混凝土材料受持續加熱過程的軸向熱變形行為資料，可提供數值模擬對結構框架各構件，當受不同區域加熱時，各構件間因熱變形行為而彼此相互造成各種形式內應力的產生，此結構的熱變形會嚴重影響框架的應力重分布，過大的變形甚至會大大降低其耐火時效，而造成結構的倒塌。

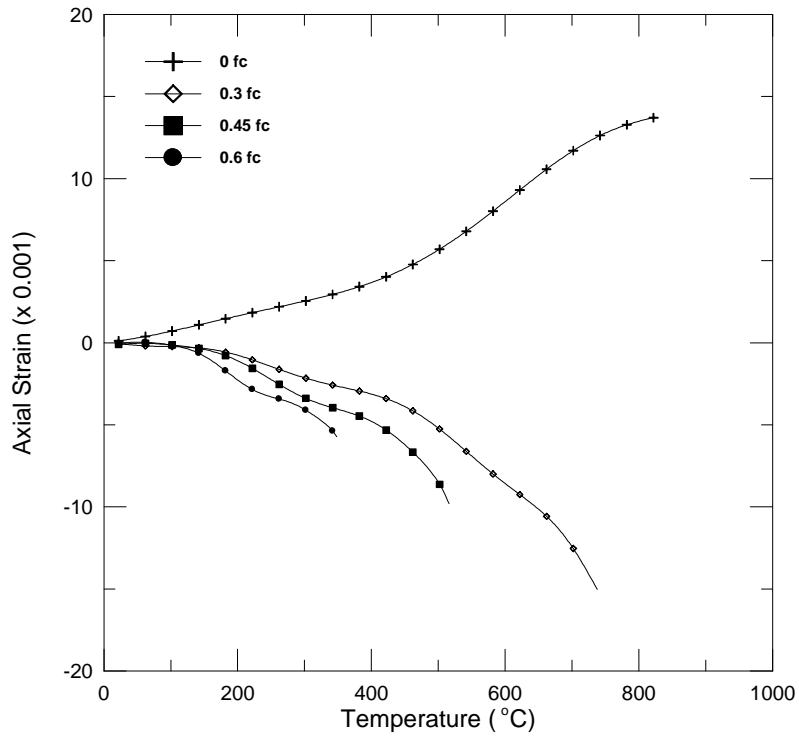


圖 3 砂質骨材高強度混凝土軸向變形在不同軸壓力下隨溫度變化曲線

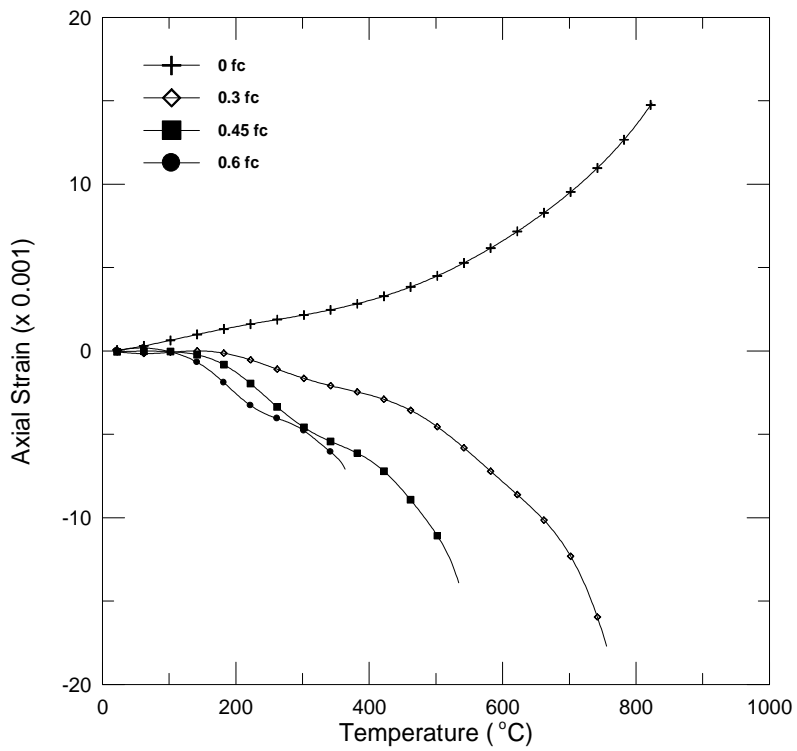


圖 4 砂質骨材鋼纖維高強度混凝土軸向變形在不同軸壓力下隨溫度變化曲線

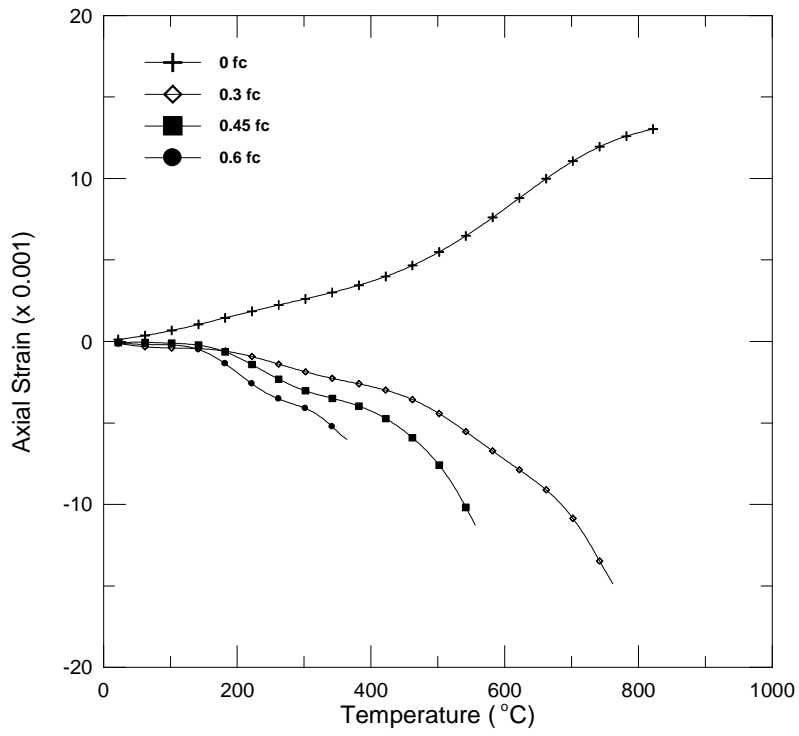


圖 5 碳酸鹽骨材高強度混凝土軸向變形在不同軸壓力下隨溫度變化曲線

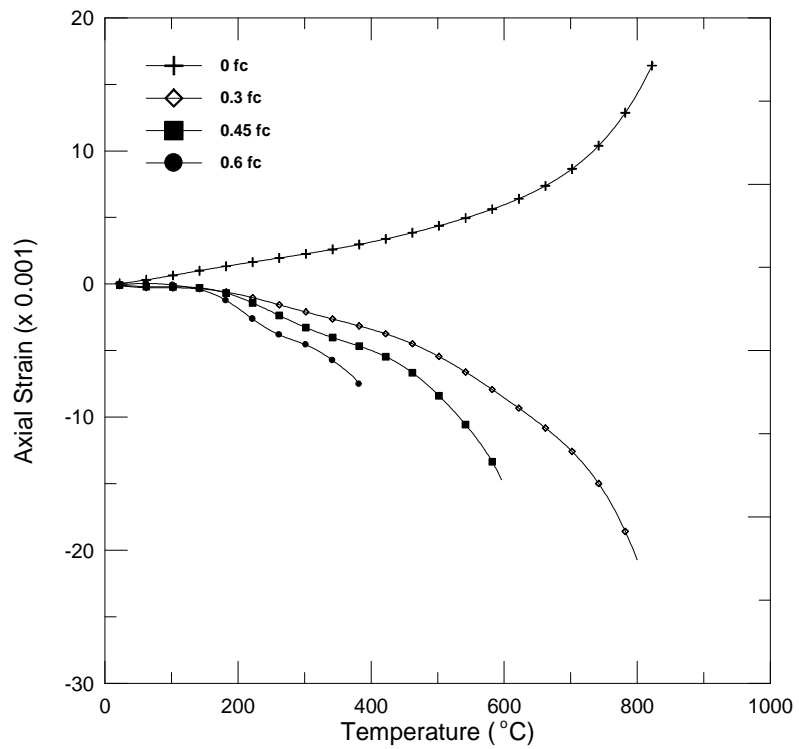


圖 6 碳酸鹽骨材鋼纖維高強度混凝土軸向變形在不同軸壓力下隨溫度變化曲線

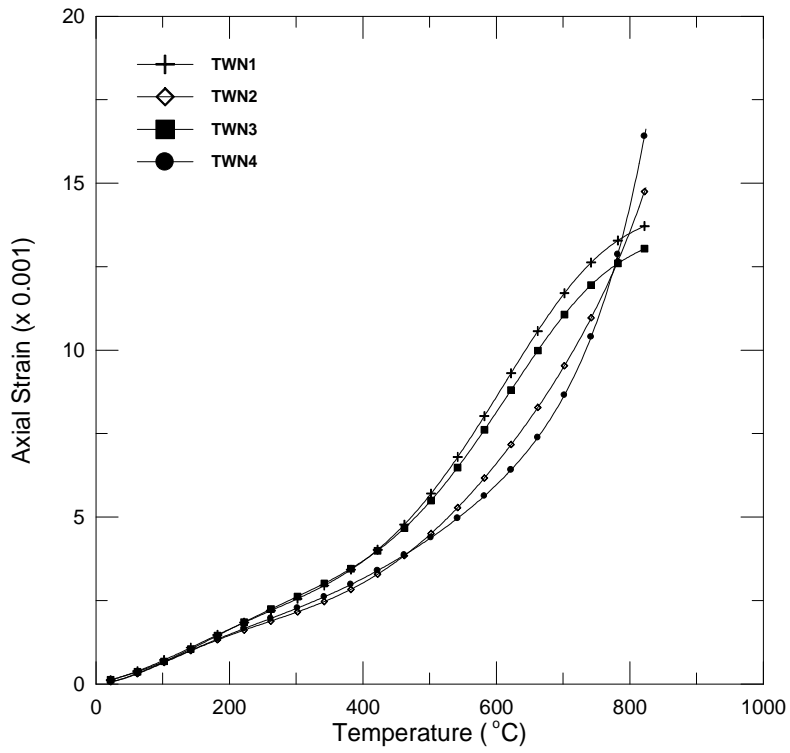


圖 7 高強度混凝土熱膨脹隨溫度變化曲線

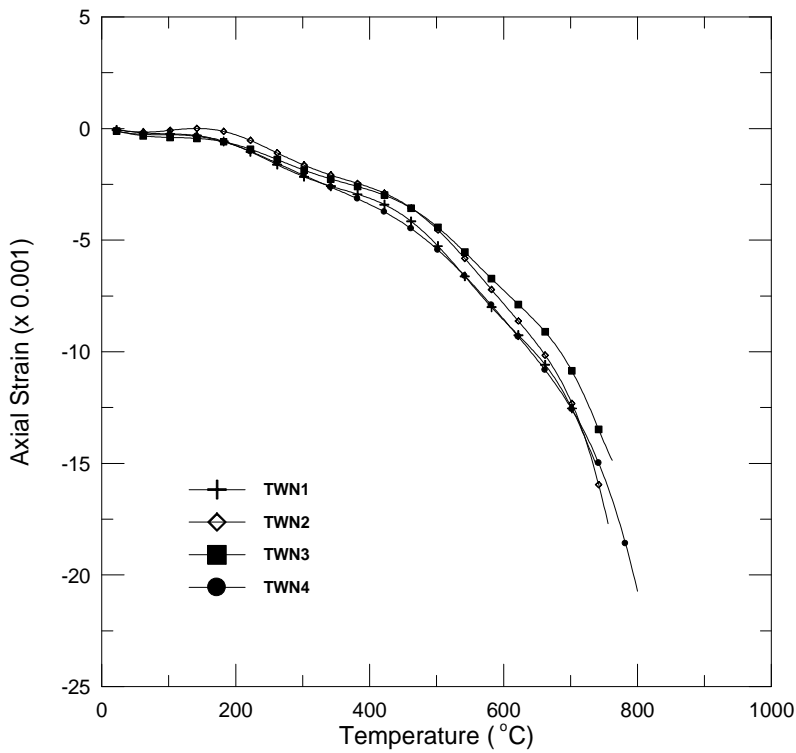


圖 8 高強度混凝土施加 30% 軸壓力時軸向變形隨溫度變化曲線

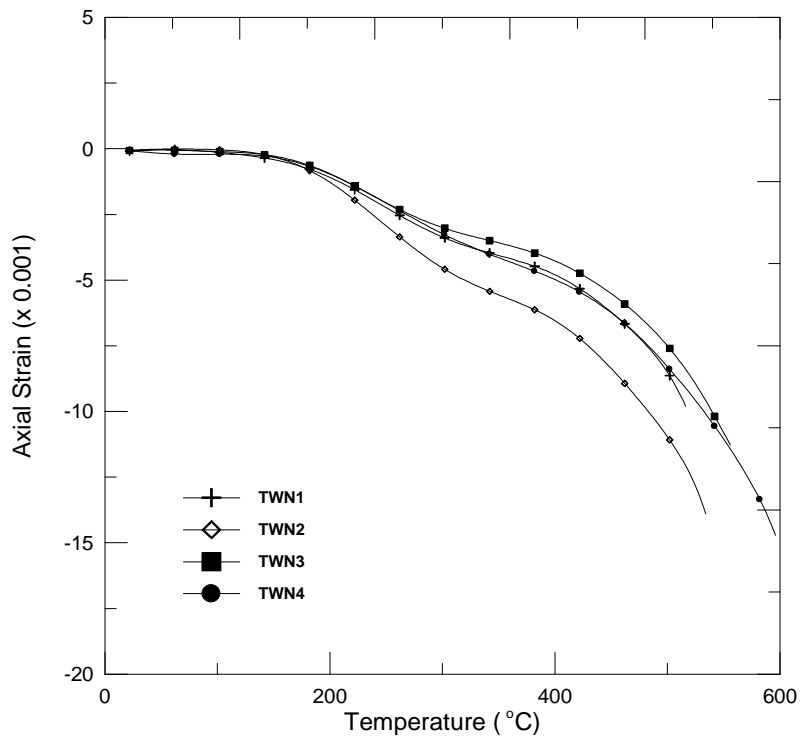


圖 9 高強度混凝土施加 45% 軸壓力時軸向變形隨溫度變化曲線

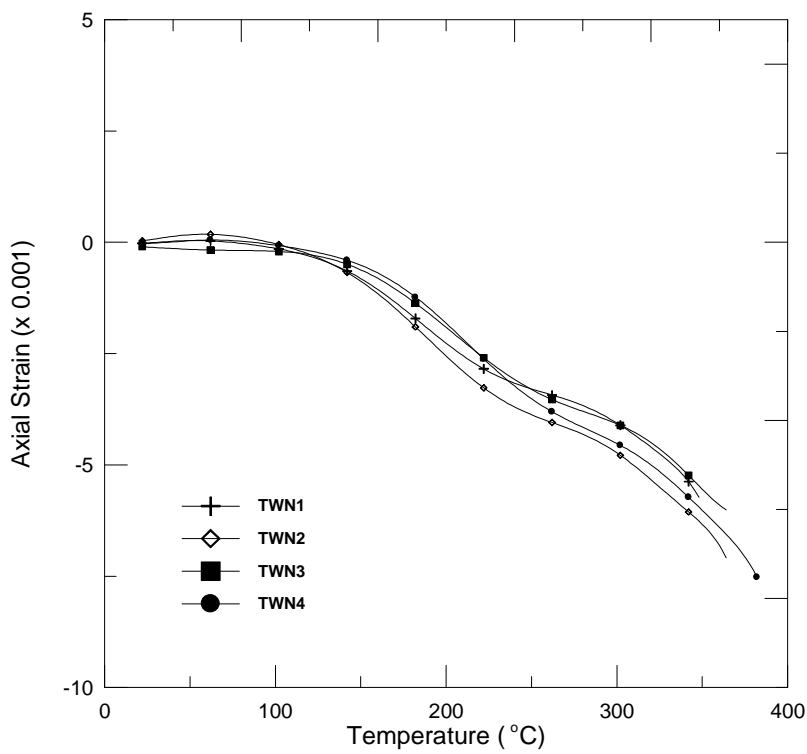


圖 10 高強度混凝土施加 60% 軸壓力時軸向變形隨溫度變化曲線

五、結論

混凝土材料的熱變形性質，主要受水泥漿體與骨材的影響，另外也跟水泥種類、水膠比和齡期有關。在本研究中，因試驗過程試體並未予以密封，所以此高溫軸向變形實驗結果同時包含了熱乾縮的效應。由本研究的實驗結果，可歸納為以下的結論：

- (一) 試體的熱膨脹現象，一般情形為隨溫度上升而增加，但其增加量與溫度值為非線性的關係。
- (二) 不同種類的粗骨材對熱變形行為有很大的影響。在溫度 800°C 以前，矽質骨材試體的熱膨脹大於碳酸鹽骨材試體。
- (三) 試體所施加的軸壓力對其熱變形的影響非常大。隨著所施加軸壓力的增加，軸向變形就越早轉變為收縮，且其收縮值也跟著加大。另外也降低試體的極限變形值，意即降低其延展性。
- (四) 有無添加鋼纖維對熱變形行為之影響，在此研究之結果差異並不大，但對試體完整性及其延展性，則有明顯的改善。
- (五) 綜合實驗結果，高強度混凝土使用碳酸鹽粗骨材及添加鋼纖維，能對試體的耐火性能有所提升。

六、參考文獻

1. Castillo, C. and Durrani, A.J. (1990). "Effect of transient high temperature on high-strength concrete." *ACI Materials Journal*, Title No.87-M7, January-February, 47-53.
2. Diederichs, U., Jumppanen, U.M. and Penttala, V. (1989). "Behavior of high strength concrete at high temperatures." Report No. 92, pp. 76, *Helsinki University of Technology*, Helsinki, Finland.
3. Kodur, V.K.R. and McGrath, R. (2001). "Performance of high strength concrete columns under severe fire conditions." *Proceedings Third International Conference on Concrete under Severe Conditions*, Vancouver, BC, Canada, 254-268.
4. Fukujiro, F., Furumura, T., Takeo, A., Yasuji, S. and Shinohara (1993). "Mechanical properties of high strength concrete at high temperatures." *Report of Research Laboratory of Engineering Materials*, Tokyo Institute of Technology, Japan.
5. Hsu, L.S. and Hsu, C.T. (1994). "Stress-strain behavior of steel-fiber high-strength concrete under compression." *ACI Structural Journal*, Title No.91-S44, V.91, No.4, July-August, 448-457.
6. Khoury, G.A. (1992). "Compressive strength of concrete at high temperatures." *Magazine of*

Concrete Research, 291-306.

7. Lankard, D.R., Birkimer, D.L., Fondfriest, F.F. and Synder, M.J. (1971). "Effects of moisture content on the structure properties of portland cement concrete exposed to temperatures up to 500°F." *Temperature and Concrete*, SP-25, *American Concrete Institute*, Detroit, 59-102.
8. Lie, T.T. and Kodur, V.K.R. (1996). "Thermal and mechanical properties of steel-fiber-reinforced concrete at elevated temperatures." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, 511-517.
9. Marechal, J.C., (1970), "Fluade du beton en fonction de la temperature", *Annales de l'Institut Technique du Batiment et Travaux Publiques*, 23(266), pp. 3-24.
10. Anderberg, Y. and Thelandersson, S., (1973), "Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures, 1, general discussion and critical review of literature", Lund Institute of Technology, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Bulletin 34, pp. 59.
11. Anderberg, Y. and Thelandersson, S., (1976), "Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures, 2, general discussion and critical review of literature", Lund Institute of Technology, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Bulletin 34, pp. 59.