

## 台灣混凝土學會 2013 年混凝土工程研討會

### 自充填混凝土高溫熱學性質研究

## Thermal Properties of Self-Compacting Concrete at Elevated Temperatures

王天志<sup>1</sup> 何明錦<sup>2</sup> 方一匡<sup>3</sup> 李其忠<sup>4</sup> 蔡銘儒<sup>5</sup>

<sup>1</sup>內政部建築研究所 約聘研究員, 06-2392755#1101, [tcwang@abri.gov.tw](mailto:tcwang@abri.gov.tw)

<sup>2</sup>內政部建築研究所 所長, 02-89127890, [ho@abri.gov.tw](mailto:ho@abri.gov.tw)

<sup>3</sup>國立成功大學土木工程系 教授, 06-2757575#63163, [fanglou@mail.ncku.edu.tw](mailto:fanglou@mail.ncku.edu.tw)

<sup>4</sup>內政部建築研究所 副研究員、國立成功大學土木工程學系博士班研究生,

06-2392755#1206, [chichung@abri.gov.tw](mailto:chichung@abri.gov.tw)

<sup>5</sup>內政部建築研究所 研究員, 06-2392755@1202, [ming-ju@abri.gov.tw](mailto:ming-ju@abri.gov.tw)

### 摘要

現行混凝土材料性質之法規規定均以常溫為設計考量，並未考慮材料於高溫下之性質變化，因混凝土係由多種材料組合而成，在火災升溫過程，其材料熱學性質會有所變化，而此材料熱學性質最終又會影響結構體的承重及變形行為，繼而影響其耐火性能。

本研究針對自充填混凝土以及自充填加聚丙烯纖維混凝土進行試體在高溫下的熱學性質研究，同時製作 1 組普通混凝土以供性質比對。研究內容包括使用熱傳導係數分析儀量測熱傳導係數、使用熱示差掃描分析儀量測比熱以及使用材料熱機械分析儀量測熱膨脹係數，試驗溫度為常溫、100、200、300、400、500、550、600 及 700°C，以探討本土普通混凝土、自充填混凝土以及自充填加聚丙烯纖維混凝土在高溫下之熱學性質差異，並建立其熱學性質資料。

**關鍵字:** 高溫熱學性質，自充填混凝土，聚丙烯纖維

### 一、前言

混凝土材料一般及相對鋼材而言，皆呈現相當良好的耐火性能，而且除在建築外，在其他各種公共工程也都被廣泛的使用。隨著因應各種使用目的而開發的混凝土材料，例如高強度混凝土 (High-strength concrete, HSC)、高性能混凝土 (High-performance concrete, HPC)、自充填混凝土 (Self-compacting concrete, SCC) 等。這些新式混凝土材料因具有特殊性能，如高強度、高流動性、自充填、耐久性等，其使用已越來越廣泛，同時這些材料也必須滿足在建築物使用

上的耐火性能要求。然而，在近期的許多研究顯示，在某些新式混凝土材料，例如高強度混凝土，其耐火性能卻不如一般傳統的混凝土【1、2、3】。

在設計或評估結構系統的耐火性能時，混凝土組成材料的高溫性質係為基本分析資料，而現行混凝土材料性質之法規規定均以常溫為設計考量，並未考慮材料於高溫下之性質變化，因混凝土係由多種材料組合而成，在火災升溫過程，其材料熱學性質會有所變化，而此材料熱學性質最終又會影響結構體的承重及變形行為，繼而影響其耐火性能。

因應耐震要求，鋼筋的排列更加緻密，以及鋼管填充混凝土 SRC，對自充填混凝土之使用也日益增加，但許多文獻【4】顯示 SCC 的耐火性與 HPC、HSC 相似，受火害易爆裂，其耐火性能較低，且其在高溫下的熱學性質資料相對稀少，而國內則更缺乏此類本土化數據。

## 二、研究範圍

混凝土材料熱學性質約在 1970 年代，由 Harmathy 等人進行了一系列普通混凝土的熱學性質研究，而在結構火害工程研究則陸續進行了普通/輕質混凝土、矽質骨材/碳酸鹽骨材混凝土、高強度/高性能混凝土等材料在結構構件柱、樑、版上的結構火害行為研究，在近十幾年來自充填混凝土則有相當多的研究進行。

廣義的說，自充填混凝土為具有「自動充填、免振動之施工便利性」這項「高性能」的 HPC，以往研究報告【3】顯示高性能混凝土在高溫下易爆裂與剝落，添加聚丙烯纖維（polypropylene fibres）可降低此現象，係因聚丙烯纖維的熔點一般在 160~200°C，混凝土加入聚丙烯纖維後，當在高溫時聚丙烯纖維熔化形成多孔隙，提供混凝土內部水分蒸發通道，舒緩混凝土內部壓力，降低爆裂發生機率。但此類自充填混凝土之高溫熱學性質卻相當缺乏，本研究將初步建立自充填混凝土之高溫熱學性質，以提供分析研究所需之本土化基本熱學性質資料。

本研究內容主要包括利用熱傳導分析儀、熱示差分析儀及熱機械分析儀，分別量測材料隨溫度變化的熱傳導性、比熱及熱膨脹，以補充建立本土化自充填混凝土材料隨溫度變化的熱學性質資料，同時製作普通混凝土試體進行試驗對照分析研究。

## 三、試驗計畫

### 3.1 混凝土圓柱試體製作

本研究試體分為普通強度混凝土(NC)、自充填混凝土(SCC)及添加聚丙烯纖維（polypropylene fibres）自充填混凝土(SCCP)共三種，有關新拌自充填混凝土相關性能要求，則分別依據 CNS 14840、14841、14842 規定測試後製作。

三種配比所用之水泥皆為台灣水泥公司生產之波特蘭水泥第 I 型，粗細骨材皆為矽質骨材，詳細配比說明如表 1、2，添加聚丙烯纖維自充填混凝土其纖維使用量依產品建議值添加 800 g/m<sup>3</sup> 於原自充填混凝土配比拌合而成，其纖維性質如表 3。

**表 1 普通混凝土配比 ( $f'_c=280\text{kgf/cm}^2$ )【本研究整理】**

粒料標稱最大粒徑 (mm)	13	(水+膠結料+空氣含量)所佔體積 ( $\text{m}^3$ )	0.334
細粒料細度模數 F.M	2.7	膠結料用量 (kg)	380
細粒料面乾內飽和比重	2.62	粒料所佔體積 ( $\text{m}^3$ )	0.666
粗粒料面乾內飽和比重	2.65	化學添加物 (kg)	3.80
水泥比重	3.15	細粒料所佔體積 ( $\text{m}^3$ )	0.326
空氣含量	1.0 %	細粒料用量 (kg)	855
水膠比	0.49	粗粒料所佔體積 ( $\text{m}^3$ )	0.340
坍度 (cm)	18	粗粒料用量 (kg)	900
用水量 (kg)	185	單位重量 (kg)	2320

**表 2 自充填混凝土配比表 ( $f'_c=350\text{kgf/cm}^2$ )【本研究整理】**

水膠比 W/ (C+P)	各成分的量 ( $\text{kg/m}^3$ )						
	SP	水	水泥	爐石	飛灰	細骨材	粗骨材
0.34	5.04	167	253	91	162	798	822

1.  $V_g = 0.31$ ,  $V_s/V_m = 0.46$ 。 坍度：25.5cm，坍流度：60cm×55.5cm。

**表 3 聚丙烯纖維性質【本研究整理】**

長度	等效直徑	長徑比	比重	吸水性	熔點	燃點	抗酸鹼	彈性模數
20mm	0.022mm	909	0.91	無	160°C	590°C	高	35130 $\text{kgf/cm}^2$

依據前述配比，分批進行三種混凝土 15×30 cm 圓柱試體灌製，自充填混凝土則於灌製前先依規範進行相關性能測試，試驗結果如表 4 所示。同時製作抗壓強度試驗用圓柱試體，以瞭解各配比不同齡期抗壓強度發展。圓柱試體灌製後靜置 1 天，拆模後置放於水中養護 28 天，然後置於通風良好的室內空間，待圓柱試體齡期超過三個月後進行熱學性質試驗。

**表 4 自充填混凝土之自充填性能試驗【本研究整理】**

自充填性	箱型容器之充填高度(mm)	333
流動性	坍流度 (mm)	600 × 555
抗析離性	$V_{75}$ 漏斗流下時間(sec)	9
	500 mm 坍流度到達時間(sec)	4

### 3.2 試驗設備

#### 3.2.1 熱傳導

熱傳導係數為在某溫度梯度下單位時間流經單位面積與單位長度厚材料之間時所傳導的熱功率。本研究採用熱板法技術，其平板加熱源兼溫度感測，並將熱源排列成平面狀，以在更小的空間內與待測試片有更大之接觸面積。試驗時用兩待測樣品將固定功率的平板熱源夾在其中，記錄樣品本身溫度隨時間的變化情形，由時間與溫度變化的關係即可求得樣品的熱傳導係數。

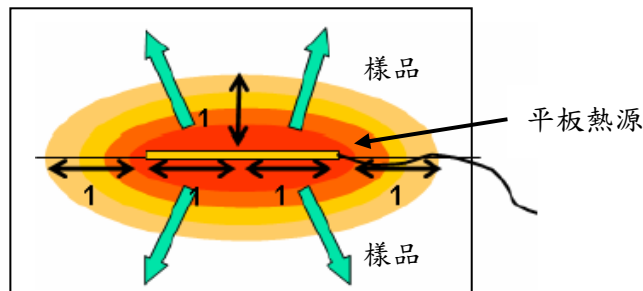


圖 1 熱板法試驗安裝示意圖【5】

本研究熱傳導係數量測設備（圖 2）係依據 ISO22007-2 Transient plane heat source method (TPS)【6】瞬變平面熱源法設計，該測試能涵蓋大多數的材料需求，符合各式樣品如固體材料、粉末、液體、膠狀、膏狀或異向性材料等樣品之熱傳導係數量測。

#### 3.2.2 比熱

比熱是物質之一種重要性質，在熱學上應用極廣。過去雖曾以某物質之溫度升高一度所需之熱量、與同重量之淡水溫度升高一度所需之熱量的比為定義，而近來則以單位重量物質之溫度升高一度所需之熱量數為定義，其單位在物理上為 CGS 制 ( $\text{Cal/g}^\circ\text{C}$ )。在火害分析時，比熱可假設為常數或以時間函數  $t$  所表示的方程式來表示其隨溫度變化之值。

本研究採用在材料比熱性質量測上常用的熱分析方法-熱示差掃描分析儀法 (Differential Scanning Calorimeter, DSC) (設備如圖 3)，係一種利用溫度與熱對流的分析來量測比熱。將樣品和對照組置於具備升降溫控制的加熱爐內，藉由樣品組及對照組在升降溫過程中產生的差異，可量測到當樣品發生熔融、蒸發、結晶、相轉變等物理現象時的溫度，或化學變化時，圖譜中也將會出現吸熱或放熱帶，進而可推測樣品之性質如材料的熔點 ( $T_g, T_m$ ) 與結晶溫度、比熱  $C_p$  及相變化時的能量等。

#### 3.2.3 熱膨脹

熱膨脹是指物體的體積或長度隨溫度升高而增大的物理性質，而熱膨脹係數 (Coefficient of thermal expansion, 簡稱 CTE) 則為物體因受單位熱而膨脹的數值，亦可解釋為物質在熱脹冷縮效應作用之下，幾何特性隨著溫度的變化而發生變化的規律性係數。

本研究採用在材料溫度與尺度變化性質量測上常用的熱分析方法-熱機械分析儀法

(Thermal mechanical analyzer, 簡稱 TMA), TMA 係在非振動壓力下, 測量試樣隨著溫度變化所產生之體積或長度改變, 經由荷重元通過探針於試樣上施加壓力, 同時以加熱爐讓試樣產生溫度變化, 使得試樣產生熱膨脹或軟化等變形反應進而測定熱膨脹係數大小。其力量加載模式包含應力控制與應變控制模式, 加載能力介於 0.001N 至 2N, 溫度量測範圍為室溫至 1000°C, 而升溫速率則介於 2~10°C/min, 降溫速率可達 10°C/min 以上, 整體設備符合 ASTM E831 「Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis」標準【7】, 儀器外觀(如圖 4)。



圖2 熱傳導係數分析儀【本研究拍攝】



圖3 熱示差掃描分析儀 (DSC)【本研究拍攝】



圖4 材料熱機械分析儀【本研究拍攝】

### 3.3 試驗方法

#### 3.3.1 試體取樣

三種混凝土試體分為普通強度混凝土、自充填混凝土及添加聚丙烯纖維自充填混凝土, 配合不同熱學性質試驗設備規格, 從圓柱試體進行試體取樣, 為避免圓柱試體製作時骨材與試體模邊界影響分布, 取樣時僅取圓柱試體中央部位進行切取。試體乾燥情形皆為氣乾狀態。試驗溫度為 20、100、200、300、400、500、550、600 及 700°C。試驗時試體齡期皆為 3 個月以上。每個試驗至少進行 3 組試樣。

- (一) 熱傳導試驗：試樣取規格為 50×50×25 mm, 試體切割面須保持光滑乾淨, 以確保有較佳的探頭接觸效果。
- (二) 比熱試驗：試樣為混凝土磨碎後粉末, 取 10 毫克進行試驗。
- (三) 熱膨脹試驗：試樣規格為 10×10×15 mm。

#### 3.3.2 試驗流程

##### 3.3.2.1 熱傳導試驗

將試樣安裝於 Hot disk 試驗儀中, 並將探頭置於兩試樣中間, 試樣表面需有一定的平整度, 表面粗糙的試樣需經研磨後才能開始測試, 必要時可在試樣上方加壓施重, 減少試樣及探頭之間可能存在的空氣(如圖 5)。先進行常溫下的熱傳導率量測, 然後設定目標溫度後加熱, 達到目標溫度後, 設備會維持一段時間讓試樣各部位確保達到均溫, 此時設備會量測相關數值並計算

其熱傳導率。然後設備再繼續加溫到下一個目標溫度，一直重複進行至 700°C。

### 3.3.2.2 比熱試驗

試驗前先分別進行空白試驗及參考物(對照組)試驗，建立比對數據，再將試樣粉末秤取 10 克，倒入樣品承盤中作為樣品組，然後將樣品承盤(樣品組)擺放在試驗加熱爐內(如圖 6)，為避免影響試驗結果，應使用鑷子夾取承盤。然後將加熱爐設定目標溫度後加熱，達到目標溫度後，讓設備維持一段時間讓試樣各部位確保達到均勻受熱，此時設備會量測相關數值，藉由樣品組及對照組之間的溫度差異，計算其比熱。然後設備再繼續加溫到下一個目標溫度，一直重複進行至 700°C。

### 3.3.2.3 熱膨脹試驗

設定儀器測定模式為膨脹/收縮模式，將試樣安裝於 TMA 試驗儀中的加熱爐，同時將位移探針安置於試樣表面，對試樣施予一定的壓縮荷重，隨著加熱爐開始加熱，透過試樣的熱膨脹，位移探針即可量測並記錄其熱膨脹值，從而計算其熱膨脹率。試樣安裝示意圖如圖 7。

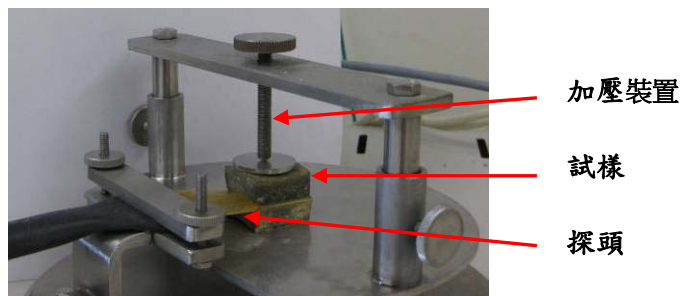


圖 5 熱傳導試驗試樣及探頭安裝圖【本研究拍攝】

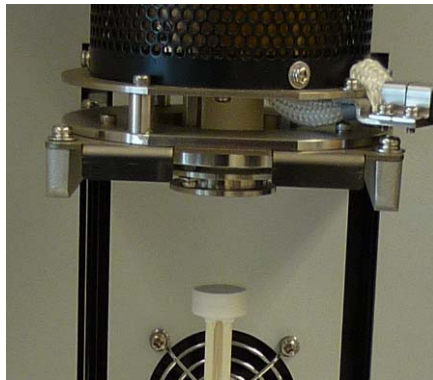


圖 6 DSC 樣品安裝示意圖  
【本研究拍攝】



圖 7 TMA 試樣安裝示意圖  
【本研究拍攝】

## 四 試驗結果討論。

本研究試驗內容目前已完成三種試樣的熱膨脹試驗及其數據分析，其餘熱傳導及比熱試驗仍持續進行中，僅將熱膨脹試驗結果討論如下：

NC、SCC 及 SCCP 三種試樣的線膨脹隨溫度變化的曲線分別如圖 8~10 所示，三種試樣的比較曲線圖則如圖 11 所示。

基本上因為三種試樣的骨材皆為相同來源的矽質骨材，因此就線膨脹隨溫度變化行為的趨

勢是相當一致的。試體從常溫升溫至 100 °C 有著近乎線性的熱膨脹值，且三種試樣的膨脹值相當接近。溫度約在 100~140 °C 時三種試樣的熱膨脹值近乎維持不變，此種現象在以往的研究裡是較為少見，而且此現象在本試驗裡是相當明顯的，推測其原因可能是因為試樣內部水分蒸發帶走較多的熱值，而且水泥漿體在此時有較大的收縮，與骨材的熱膨脹相抵銷，而使試樣膨脹停滯，基本上三種試樣的熱膨脹值在 140 °C 之前是可視為相同的。溫度 140~550 °C 之間，三種試樣開始不同程度但近似穩定的熱膨脹，溫度大於 550 °C 之後，三種試樣熱膨脹迅速增加，一直到溫度達 600 °C 之後，三種試樣熱膨脹呈現不穩定的停滯。三種試樣熱膨脹在溫度大於 550 °C 之後的迅速增加，符合了矽質骨材在溫度 573 °C  $\alpha \rightarrow \beta$  晶相轉換的影響，在試驗曲線中有很明顯的轉折，此現象相當明顯。三種試樣熱膨脹在 600 °C 之後所呈現不穩定的停滯，其原因可能為混凝土內部參與水化作用的水化水被蒸發出來，致使漿體體積收縮，類似在 100 °C 時的行為，此收縮與骨材的熱膨脹相作用後，而使熱膨脹呈現不穩定的現象。

此三種試樣的線膨脹隨溫度變化行為的趨勢雖然相當一致，但其熱膨脹值在 160 °C 之後卻有明顯的差異。三種試樣以 SCC 的熱膨脹值最高，SCCP 最低，在溫度 500 °C 時，NC、SCC 及 SCCP 熱膨脹值分別為 0.5 %、0.7 % 及 0.39 %，在溫度 600 °C 時，NC、SCC 及 SCCP 熱膨脹值分別為 0.94 %、1.22 % 及 0.67 %。會有這樣的差異，其可能原因為 SCC 的緻密性比 NC 高，而 SCCP 因為添加聚丙烯纖維使的在高溫下孔隙增加，降低水分蒸發膨脹力，而使膨脹量變小。有關混凝土添加聚丙烯纖維後對熱膨脹行為的影響，在其他文獻【8】也可見有完全不同的影響性，針對此現象值得後續研究再加以探討。

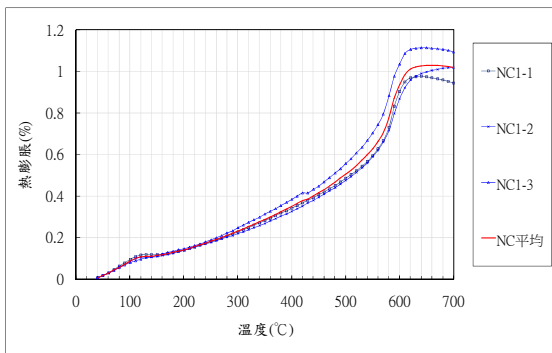


圖 8 普通混凝土熱膨脹曲線圖【本研究整理】

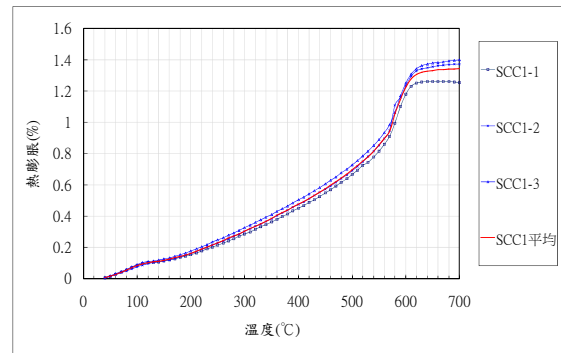


圖 9 自充填混凝土熱膨脹曲線圖【本研究整理】

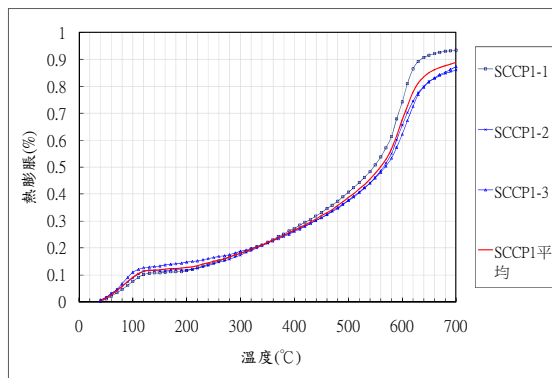


圖 10 添加聚丙烯纖維自充填混凝土熱膨脹曲線圖【本研究整理】

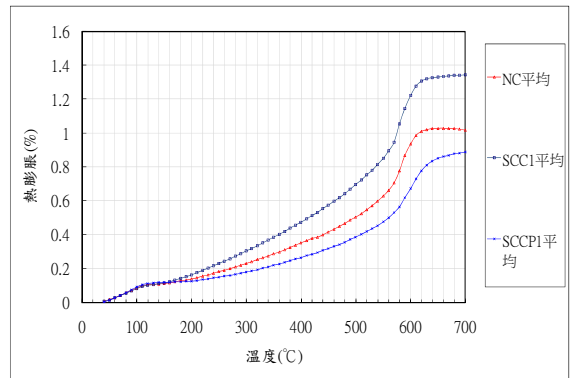


圖 11 混凝土熱膨脹比較曲線圖【本研究整理】

試驗結果與規範及文獻比較如圖 12~14 所示，圖 12 為熱膨脹與 ACI 不同骨材普通混凝土參考曲線比較圖，由圖中可發現 ACI 參考曲線隨溫度變化較為平緩，初期熱膨脹較本試驗高，但在高溫時則漸趨於一致。圖 13、14 則為熱膨脹與參考文獻 8 有關 SCC、HSC 曲線比較圖，由圖中可發現試驗結果與文獻 8 之 SCC 曲線趨勢較為相似，而參考文獻 8 之 HSC 曲線在試驗溫度範圍內之變化則幾乎呈線性增加，且其變化值偏低。

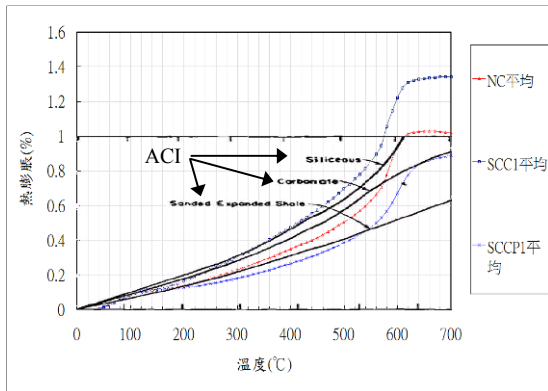


圖12 混凝土熱膨脹與ACI普通混凝土參考值比較曲線圖【本研究整理重繪、9】

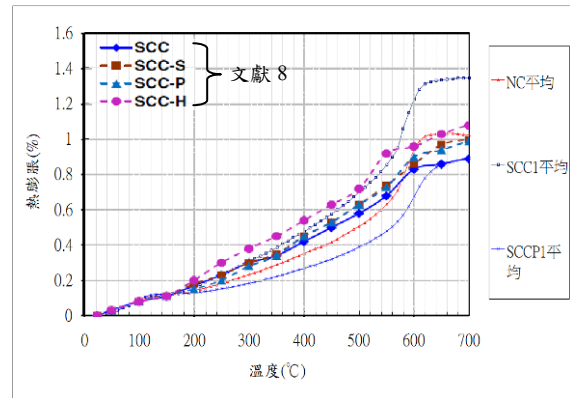


圖13 混凝土熱膨脹與參考文獻SCC值比較曲線圖【本研究整理重繪、8】

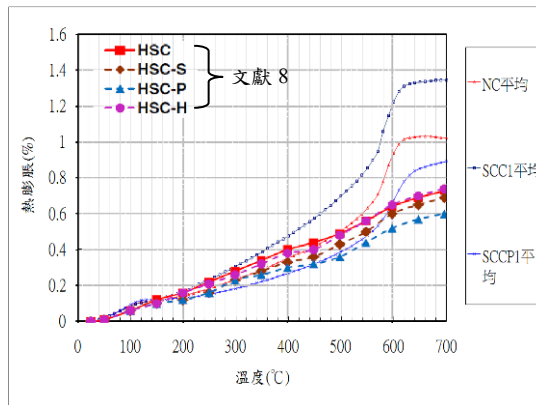


圖 14 混凝土熱膨脹與參考文獻 HSC 值比較曲線圖【本研究整理重繪、8】

圖 15 為試驗結果與文獻 10 有關 HPC 熱膨脹比較圖，圖中可發現文獻裡的熱膨脹曲線與本研究的 SCC 接近，但其熱膨脹係數隨溫度變化則較為平緩，如圖 16 所示。本研究之熱膨脹係數變化行為則與文獻 11 較為相似。自充填混凝土在 100 °C 以前平均熱膨脹係數為  $12.8 * 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，稍高於文獻一般混凝土  $10\sim 12 * 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  的熱膨脹係數；200 ~400 °C 的平均熱膨脹係數為  $15.6 * 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，500 °C 以上溫度，因矽質骨材  $\alpha\rightarrow\beta$  晶相轉變，其熱膨脹係數值變化較大。



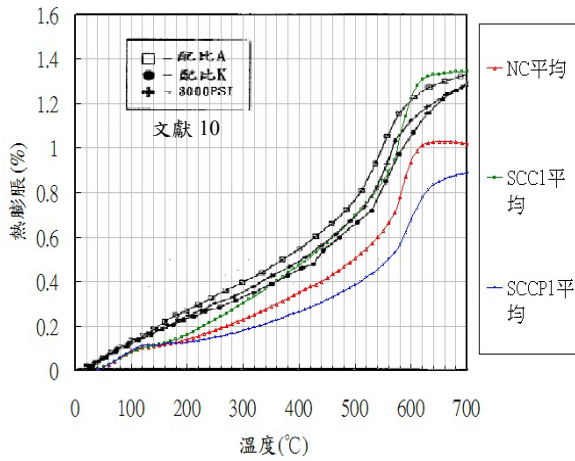


圖15 混凝土熱膨脹與參考文獻HPC值比較曲線圖【本研究整理重繪、10】

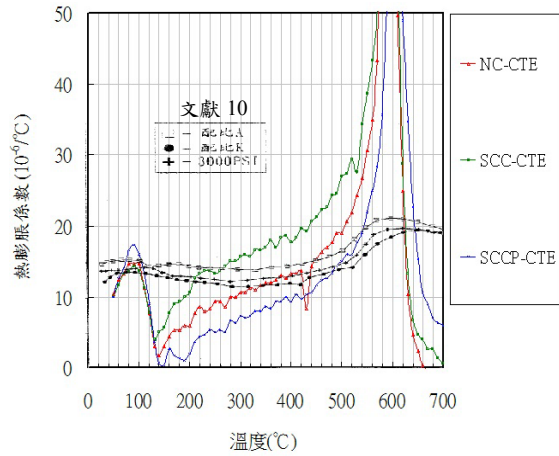


圖16 混凝土熱膨脹係數與參考文獻HPC值比較曲線圖【本研究整理重繪、10】

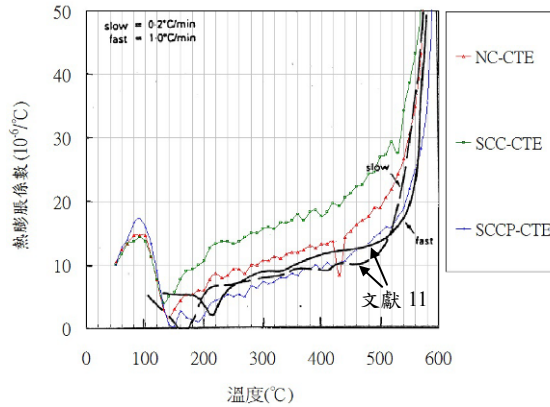


圖 17 混凝土熱膨脹係數與參考文獻值比較曲線圖【本研究整理重繪、11】

## 五、結論與建議

隨著計算機工程的廣泛運用及實尺寸試體試驗費時、費力又費錢的因素，數值模擬在結構火害分析已越來越普遍。數值模擬主要分為兩大部份，溫度場與結構材料力學分析，而材料的基礎熱學性質則與溫度場的分析有很大的關係。本研究初步完成普通、自充填混凝土及添加纖維自充填混凝土的熱膨脹性質試驗，其結論如下：

1. 三種試樣的骨材皆為相同來源的矽質骨材，因此其線性熱膨脹隨溫度變化行為的趨勢相當一致。
2. 三種試樣的線膨脹在 140 °C 以前，可視為相同，但之後則以自充填混凝土值最高、普通混凝土次之，而添加纖維自充填混凝土則為最低。
3. 自充填混凝土在 100 °C 以前平均熱膨脹係數為  $12.8 * 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，200~400 °C 的平均熱膨脹係數為  $15.6 * 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，500 °C 以上溫度，因矽質骨材晶相轉變，其熱膨脹係數值變化較大。
4. 本研究已初步建立本土化材料的自充填混凝土熱膨脹性質可供參考引用。但其試驗結果與文獻資料如 ACI 216 規範建議曲線以及不同種類混凝土如高強度混凝土、自充填混凝土

土及高性能混凝土等相比較，可發現試驗結果趨勢相似，但其數值仍互有差異，值得後續研究進行探討。

## 六、參考文獻

- [1] 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，2003。
- [2] Phan, L.T., "Fire Performance of High-Strength Concrete. A Report of the State-of-the-Art.", Report NISTIR 5934, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [3] Kodur, V.R., Wang, T.C. and Cheng, F.P., "Predicting the Fire Resistance Behaviour of High Strength Concrete Columns.", Cement Concrete Composites, Vol. 26, Issue 2, pp.141-153, (2004).
- [4] 李其忠，「鋼骨鋼筋混凝土構造火害後材料性質之研究-以自充填混凝土為例 (3/5)」，內政部建築研究所自行研究計劃成果報告，台北，(2010)。
- [5] Hot Disk 熱傳導係數分析儀簡易中文操作手冊，先馳精密儀器股份有限公司。
- [6] ISO 22007-2 「Transient plane heat source method (TPS)」。
- [7] ASTM E831 「Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis」。
- [8] Kodur, V.K.R. and Wasim Khaliq, "Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete" Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 23, No. 6, pp. 793-801, (2011).
- [9] ACI Committee 216, "Guide for determining the fire endurance of concrete elements," American Concrete Institute, (1994).
- [10] 莫海龍，「高性能混凝土熱膨脹性質之研究」，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，(1995)。
- [11] Gabriel A. Khoury, Brian N. Grainger and Patrick J.E. Sullivan, "Strain of Concrete During First Heating to 600 °C under Load", Magazine of Concrete Research, Vol. 37, Issue 133, pp.195 -215 (1985).