

## 冷卻方式對自充填聚丙烯纖維混凝土強度影響之研究

吳崇豪<sup>1</sup> 林喻峰<sup>2</sup> 李其忠<sup>3</sup> 蔡銘儒<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 建國科技大學土木工程系暨土木防災研究所助理教授, chw@ctu.edu.tw

<sup>2</sup> 建國科技大學土木工程系暨土木防災研究所副教授, lyf@ctu.edu.tw

<sup>3</sup> 內政部建築研究所防火實驗中心副研究員, chichung@abri.gov.tw

<sup>4</sup> 內政部建築研究所防火實驗中心主任, ming-ju@abri.gov.tw

### 摘要

本研究針對自充填聚丙烯纖維混凝土，利用高溫電爐進行加熱溫度 200°C、400°C、600°C 及 800°C 的火害試驗，再經由自然冷卻(空氣降溫)及強制冷卻(泡水降溫)的方式，解析自充填聚丙烯纖維混凝土圓柱試體( $\phi$  10cm $\times$ 20cm)經高溫作用後殘餘抗壓強度的變化。試驗結果發現，自充填混凝土試體在進行加熱試驗時有發生爆裂現象，雖經 3 天、5 天及 7 天的烘乾處理，升溫速率由 10°C/min 調降為 5°C/min，仍有部分試體產生爆裂，自充填聚丙烯纖維混凝土則無爆裂現象產生；火害溫度越高，經強制冷卻的兩種混凝土試體，試體表面裂縫的長度及寬度較自然冷卻者長且寬，裂縫集中分布及相互連接的現象較明顯；兩種混凝土試體經強制冷卻後之殘餘抗壓強度折減量有比自然冷卻者多的趨勢。

**關鍵字:** 自充填混凝土，聚丙烯纖維，火害

### 一、前言

自充填混凝土是一種高性能混凝土，簡稱 SCC (Self-Compacting Concrete 或 Self-Consolidating Concrete)，具有自我充填、免振動夯實的施工便利特性，已廣泛被應用於各類土木工程中，SCC 的施工便利性係以高黏滯性的漿體帶動粗骨材流動而成，也使 SCC 凝結硬固後較為緻密，內部聯通的孔隙較少，抗壓強度比一般混凝土高，但在高溫作用時，因孔隙水蒸發形成的孔隙壓力無法經適當排出，容易出現爆裂現象。文獻 [1] 以 1°C/min 的加溫方式於溫度達到 150°C、300°C、450°C 及 600°C 後，持溫 1 小時，探討 SCC 的殘餘抗壓強度、殘餘撓曲強度、殘餘彈性模數及混凝土質量損失等機械及物理性質，結果指出，SCC 較普通混凝土容易發生爆裂，在 150°C 及 300°C 高溫作用後，SCC 的殘餘抗壓強度明顯增加，超過 300°C，SCC 各項機械及物理性質變差。

為避免 SCC 高溫爆裂的發生，國內外普遍以添加纖維於 SCC 的方式來處理，文獻 [2] 針對高性能混凝土添加聚丙烯纖維，在達到 200°C、400°C、600°C 及 800°C 後，採用自然冷卻(空氣降溫)及強制冷卻(泡水降溫)兩種降溫方式探討混凝土殘餘抗壓強度的變化，研究結果指出，經強制冷卻之高性能混凝土殘餘抗壓強度較自然冷卻者低，而添加聚丙烯纖維對高性能混凝土耐火性能有所助益，可減緩高性能混凝土高溫爆裂的現象。

文獻[3]則針對高流動性鋼纖維混凝土圓柱試體加熱至 500°C，探究鋼纖維對混凝土耐火性能的影響，結果顯示，長度與直徑比及鋼纖維含量高的試體，有抑制爆裂的效果，但在高溫下裂縫易沿鋼纖維表面發展，導致升溫速率較高時仍有混凝土爆裂發生。

文獻[4]在高性能混凝土中添加玻璃纖維及輸氣劑，鑽研兩者對混凝土耐火性能的影響，研究結果指出，添加玻璃纖維及輸氣劑可有效防止高性能混凝土產生爆裂，不過須注意輸氣劑用量不可過高。文獻[5]採用鋼管圍束高強度纖維混凝土圓柱試體，以升溫速率 2.5°C/min 加熱至 500°C，量測試體內溫度分佈及加熱後殘餘力學性質，研究結果顯示，有添加聚丙烯纖維的混凝土試體無爆裂現象發生，未添加者均產生嚴重的爆裂。文獻[6]採用添加聚丙烯纖維及鋼纖維來抑制混凝土爆裂，結果指出，聚丙烯纖維含量在 0.013kg/m<sup>3</sup>(體積比 0.015%)，可將爆裂機率從未加纖維之 80% 降至 0%。

文獻[7]探討高強度混凝土(HSC)與高強度纖維混凝土(HSFC)於高溫火害後殘餘抗壓強度的變化，結果顯示，當火害溫度接近 400°C 時，HSC 會發生爆裂，添加碳或鋼纖維(熔點較高的) HSFC，約 800°C 時才發生爆裂，添加聚丙烯纖維(熔點較低)的 HSFC，高溫火害作用時並無爆裂現象產生。文獻[8]針對 SCC 高溫作用後的冷卻方式對其殘餘彈性模數的影響進行研究，結果指出，除在 200°C 時，強制冷卻試體的殘餘彈性模數較自然冷卻者高外，400°C、600°C 及 800°C 時，兩者之殘餘彈性模數相差不大；自然冷卻試體在 400°C 以下和強制冷卻試體在 600°C 以下時，其應力-應變曲線不易出現下降段，係因 SCC 的脆性較大所致；超過 600°C 時，脆性降低且試體在作加壓試驗之前，因高溫作用後存在大量裂縫，應力-應變曲線之下降段趨於平緩。

綜觀上述研究成果可知，SCC 在高溫火害作用下會有產生爆裂的現象，而添加聚丙烯纖維可有效避免 SCC 在高溫時爆裂，惟冷卻方式對添加聚丙烯纖維之 SCC 火害後殘餘抗壓強度的影響，尚未探討，本研究即針對此問題進行研析。

## 二、試驗規劃

為探討自充填聚丙烯纖維混凝土在加熱至不同目標溫度後，經不同的冷卻方式，對混凝土殘餘抗壓抗壓強度的影響，本研究規劃的實驗變數有加熱溫度及冷卻方式，加熱溫度分為 200°C、400°C、600°C 及 800°C 四種，冷卻方式則考量火災時火場中混凝土受消防隊員灑水滅火及未受灑水滅火兩種情境，分別以混凝土試體經自然冷卻(空氣降溫)及強制冷卻(泡水降溫)兩種降溫方式來模擬。

### 2.1 組成材料

自充填聚丙烯纖維混凝土採用之材料包括水、水泥、粗骨材、細骨材、強塑劑及聚丙烯纖維，其基本性質分述如下：

水：一般自來水，符合混凝土拌和水之品質要求。

水泥：台灣水泥公司所生產的普通卜特蘭 I 型水泥，其比重與細度分別為 3.15 及 3400 cm<sup>2</sup>/g。

爐石粉：產自中聯資源公司，其比重與細度分別為 2.9 及 6000 cm<sup>2</sup>/g。

飛灰：台灣電力公司興達港火力發電廠生產之 F 級飛灰，比重為 2.15。

天然骨材：常重骨混凝土之細、粗骨材，分別使用天然河砂及礫石(最大粗骨材粒徑 19 mm)，其物理性質如表 1 所示

強塑劑：採用台灣西卡公司產品 Sikament-1250，符合 CNS 12283 及 CNS 12833 Type II 之規定。

聚丙烯纖維：長度 20mm、等效直徑 0.022mm、融點 160°C、燃點 590°C、無吸水率、比重 0.9g/cm<sup>3</sup>。

表 1 常重粗細骨材基本性質

骨材類型	比重 S.S.D.	吸水率 S.S.D.(%)	乾搗單位重 kg/m <sup>3</sup>	F.M.
粗骨材	2.63	1.17	1532	--
細骨材	2.60	1.25	--	2.7

## 2.2 配比設計

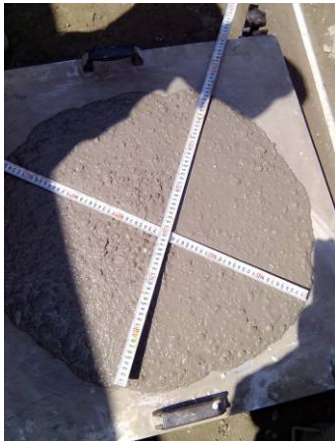
配比設計如表 2 所示，混凝土設計強度為 420kgf/cm<sup>2</sup>，設計坍流度為 65~75cm，粗粒料標稱最大粒徑為 19mm，水膠比為 0.35。

配比設計完成後，進行混凝土的試拌，量測其新拌階段之坍流度(CNS14842「高流動性混凝土坍流度試驗法」)、V 型漏斗時間(CNS14841「自充填混凝土流下性試驗法」)及 U 型試驗填充高度(CNS14840「自充填混凝土障礙通過性試驗法」)，如圖 1 所示。

表 2 自充填混凝土配比表 (kg/m<sup>3</sup>)

種類	水膠比	水泥	爐石	飛灰	水	粗骨材	細骨材	摻劑	PP
自充填混凝土	0.35	356	76	76	178	780	889	8.14	0
自充填聚丙烯纖維 混凝土	0.35	356	76	76	178	780	889	8.14	0.9

\*聚丙烯纖維(PP)添加量為體積的 1%。



(a) 坍流度



(b) V 型漏斗時間



(c) U 型試驗填充高度

圖 1 自充填混凝土新拌性質測試

### 2.3 試體製作

每組混凝土拌合完成，量測其新拌性質，再澆鑄成圓柱試體( $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ )，如圖 2 所示。試體拆模後放置於室內常溫中養護，試驗齡期時取出進行火害試驗前後之抗壓強度試驗。火害試驗時，為確定試體內部溫度已達到預定之試驗溫度，部分試體製作時於中心處理置 K 型熱偶計，用以試驗時量測試體內部溫度，如圖 3 所示。



圖 2 混凝土圓柱試體之製作

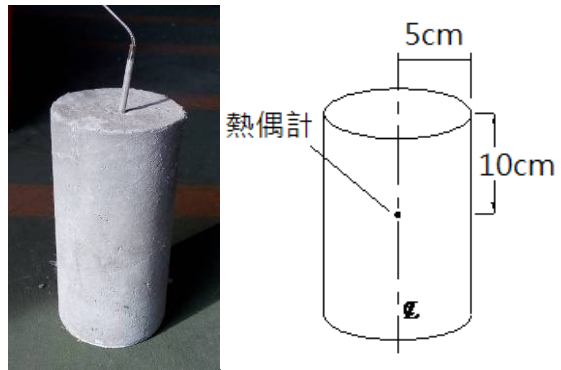


圖 3 圓柱試體熱偶計配置

### 2.4 試驗設備

本研究使用內政部建築研究所防火實驗中心之設備進行試驗，使用的儀器有箱型電熱高溫爐(如圖 4 所示)，爐內淨空間為  $70\text{cm} \times 40\text{cm} \times 40\text{cm}$  (高)，最高加熱溫度為  $1200^\circ\text{C}$ ，最大升溫速率為  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ，加熱中可隨時調整電爐功率，以控制爐內或試體表面之升溫速率。加載設備則使用 100 噸 SHIMADZU 試驗機(如圖 5 所示)進行抗壓強度試驗。



圖 4 電熱高溫爐



圖 5 SHIMADZU 100 噸試驗機

### 2.5 試驗方法

一般火害研究大都參考 CNS 12514[9]或 ASTM E119[10]的標準升溫曲線，由於兩者升溫急速，第 1min 分別需達到  $349^\circ\text{C}$  或  $333^\circ\text{C}$ ，第 5min 時則為  $576^\circ\text{C}$  或  $538^\circ\text{C}$ ，若採用兩升溫曲線進行熱加載，會因升溫速率過快，容易造成混凝土爆裂，為避免此現象發生，

本研究之升溫速率控制在  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (自充填聚丙烯纖維混凝土) 及  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (自充填混凝土)，並在達到目標溫度後持溫 1 小時，試驗前將自充填混凝土試體以  $105^{\circ}\text{C}$  的溫度烘乾後再進行試驗。

每次試驗有 6 支圓柱試體，其中有 1 支試體內部中心點處理有熱偶計(如圖 6 所示)，待其中心點達到試驗目標溫度時，即視該批試體之中心點處均達目標溫度，經持溫 1 小時後停止加熱。試體自加熱完成起 24 小時視為冷卻期間，冷卻方式有自然冷卻(加熱試驗完成後，打開高溫爐讓試體和高溫爐一起降溫，如圖 7 所示)，以及強制冷卻(加熱試驗完成後，立即取出試體並置入常溫冷水槽中降溫 2 小時，如圖 8 所示)。自然冷卻之試體，放置於空氣中冷卻 24 小時後進行抗壓強度試驗；強制冷卻之試體，泡水冷卻 2 小時，再放置於空氣中 22 小時後進行抗壓強度試驗。

火害後抗壓強度試驗前，以肉眼進行裂縫觀測並以色筆標示出裂縫的分布情形，之後依 ASTM C469 之規定進行圓柱試體抗壓強度試驗，如圖 9 所示。



圖 6 加熱試驗時試體配置情形



圖 7 圓柱試體自然冷卻方式



圖 8 圓柱試體強制冷卻方式



圖 9 圓柱試體抗壓試驗

### 三、實驗結果與討論

#### 3.1 坍流度試驗結果

新拌自充填混凝土及自充填聚丙烯纖維混凝土之坍流度分別為 74.5cm 及 54cm，如圖 10 所示。由坍流度試驗結果可知，添加聚丙烯纖維會降低自充填混凝土的工作性，

由於聚丙烯纖維非常細微，拌合時聚丙烯纖維會對自充填混凝土產生增稠作用，使混凝土拌合料的黏稠度增加，流動性變差，導致坍流度降低。由此觀之，聚丙烯纖維用量雖僅有 1%(體積百分比)，亦會影響混凝土的工作性，但相較於一般傳統混凝土，自充填聚丙烯纖維混凝土仍有相當優異的工作性。



(a) 自充填混凝土流度試驗



(b) 自充填聚丙烯纖維混凝土流度試驗

圖 10 流度試驗結果

### 3.2 火害後試體的變化

#### 3.2.1 爆裂現象

本研究之混凝土試體齡期約 2 年半，一直放置於室內陰涼處，無泡水養護，考量試體齡期已久，內部水分應因水化反應而耗盡或乾燥，故嘗試以未經烘乾之試體直接進行加熱試驗，約在溫度達到 300°C 至 400°C 之間，試體內部中心點溫度 100°C 至 200°C 之間，試體產生爆裂(如圖 11 所示)，雖將自充填混凝土試體進行 3 天、5 天及 7 天的烘乾處理，並將升溫速率由 10°C/min 調降為 5°C/min，仍有部分試體產生爆裂，如圖 12 所示，也使 800°C 的火害試驗無法獲得實驗數據。自充填聚丙烯纖維混凝土在無烘乾的情形下，採用升溫速率 10°C/min 進行加熱試驗，達到各目標溫度之加熱過程中均無爆裂現象。



圖 11 自充填混凝土爆裂情形(未烘乾)



圖 12 自充填混凝土爆裂情形(烘乾 7 天)

### 3.2.2 顏色變化

由圖 13 及 14 可知，試體受高溫作用後之表面顏色隨目標溫度增加，顏色由灰色逐漸變為淡灰色再變為淡土黃色，受 600°C 作用的試體表面產生少許白色粉末，800°C 作用者的白色粉末數量更多。根據文獻[11]指出，該白色產物應為氫氧化鈣 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) 或碳酸鈣 ( $\text{CaCO}_3$ )，由於  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  易溶於水，試體內部水分隨著溫度升高而析出在試體表面與  $\text{CO}_2$  作用產生  $\text{CaCO}_3$  所致。

經強制冷卻之試體，外觀顏色較空氣中冷卻者的顏色深，原因應是雖經泡水 2 小時後取出於空氣中涼乾 22 小時，但試體中仍有水分存在，使得試體外觀顏色顯得較深，如圖 15 及圖 16 所示。

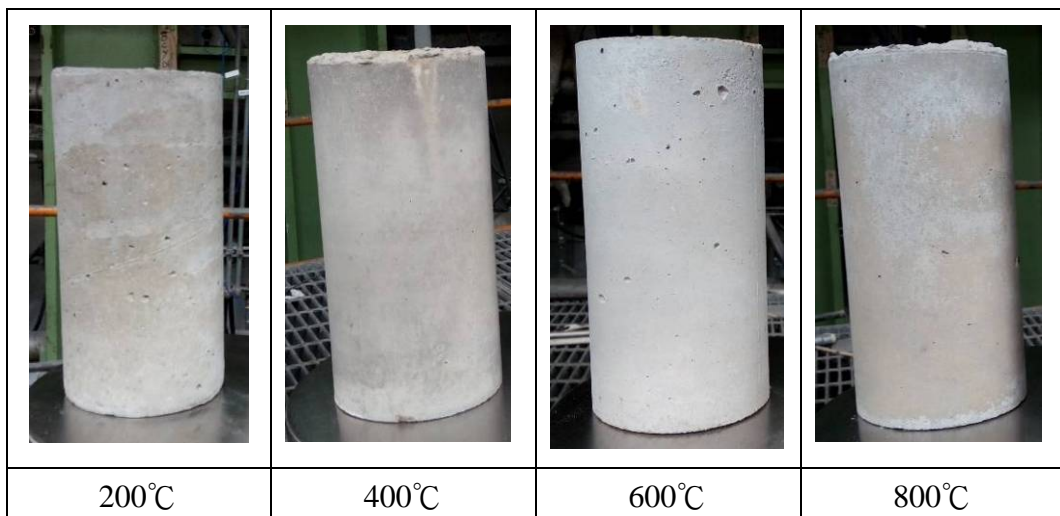


圖 13 自充填聚丙烯纖維混凝土火害後顏色變化(自然冷卻)

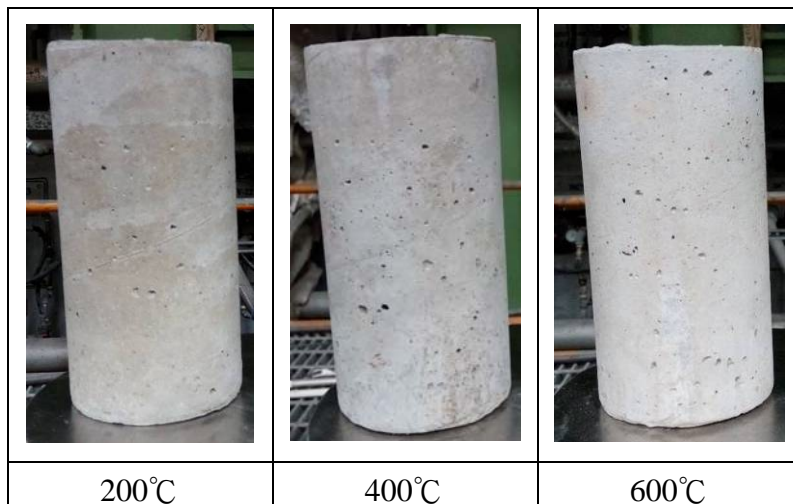


圖 14 自充填混凝土火害後顏色變化(自然冷卻)

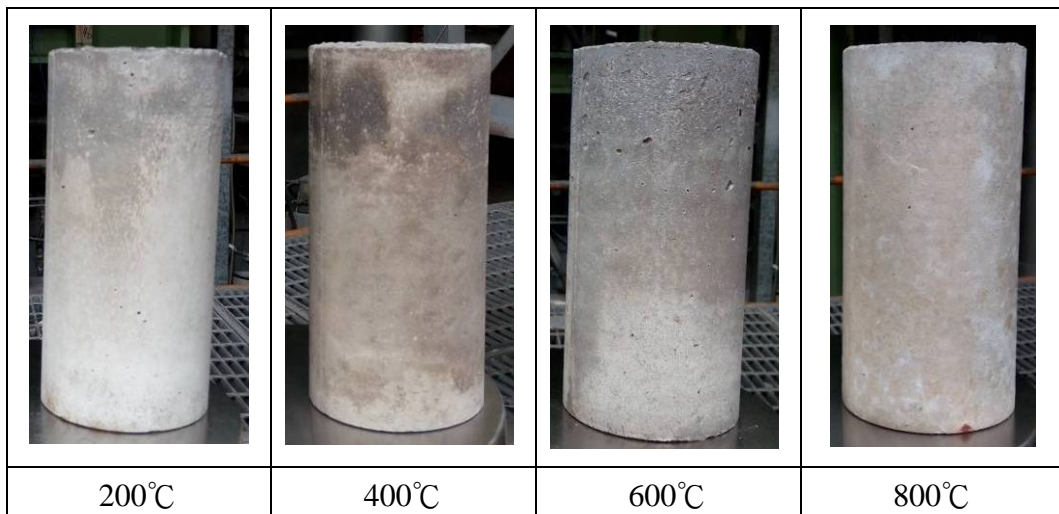


圖 15 自充填聚丙烯纖維混凝土火害後顏色變化(強制冷卻)

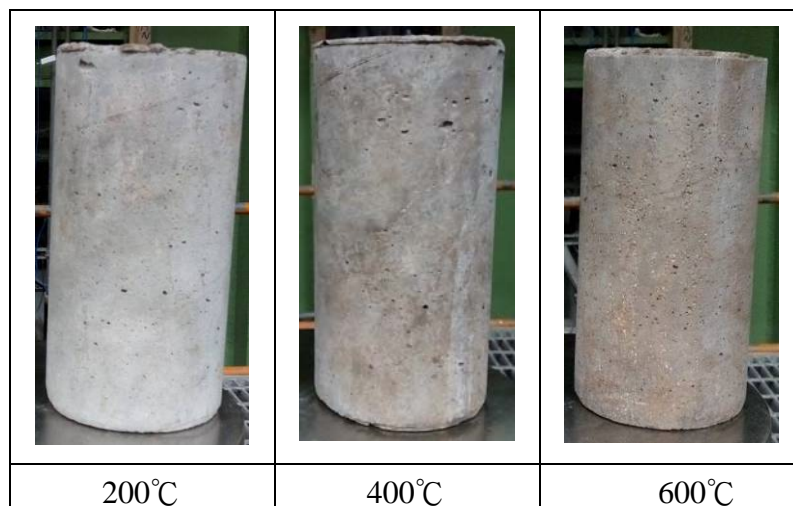


圖 16 自充填混凝土火害後顏色變化(強制冷卻)

### 3.2.3 裂縫發展

以自充填聚丙烯纖維混凝土試體為例，高溫作用後表面裂縫隨目標溫度的增加，裂縫的數量、長度及寬度均隨之增加，溫度越高，強制冷卻者之裂縫發展較自然冷卻者來的顯著，如圖 17 及 18 所示。溫度 200°C 時，兩種冷卻之試體外表未產生裂縫或產生極少數微小裂縫；400°C 時，裂縫數明顯增加，自然冷卻者之裂縫分布較為零散，彼此無連接，強制冷卻者，裂縫有相互連接的趨勢；600°C 時，裂縫數目持續增加，裂縫的長度及寬度也增加，自然冷卻者及強制冷卻者之裂縫分布開始集中並呈現相互連接的現象；800°C 時，裂縫長度及寬度均加大，分布更密集，強制冷卻者尤其顯著。

自充填混凝土試體方面，裂縫亦隨目標溫度的增加而增加，且強制冷卻者的裂縫比自然冷卻者多，惟裂縫數量、長度及寬度的變化並無自充填聚丙烯纖維混凝土來的明顯，如圖 19 及 20 所示。由於聚丙烯纖維在溫度超過 160°C 後即開始融解，融解後留下的孔隙，可讓混凝土用以吸收高溫所形成的熱變形，降低高溫爆裂的機率，而無添加聚



丙烯纖維的自充填混凝土無此機制，其熱變形需靠混凝土本身的強度來抵抗，若其強度可抵抗熱變形，產生的裂縫較少，若其強度無法抵抗熱變形，即造成混凝土的高溫爆裂。

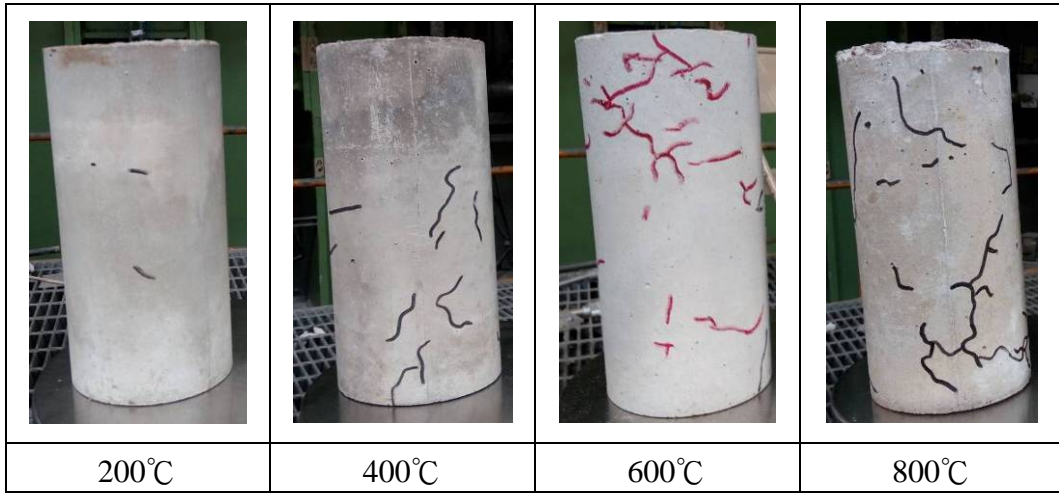


圖 17 自充填聚丙烯纖維混凝土火害後裂縫變化(自然冷卻)

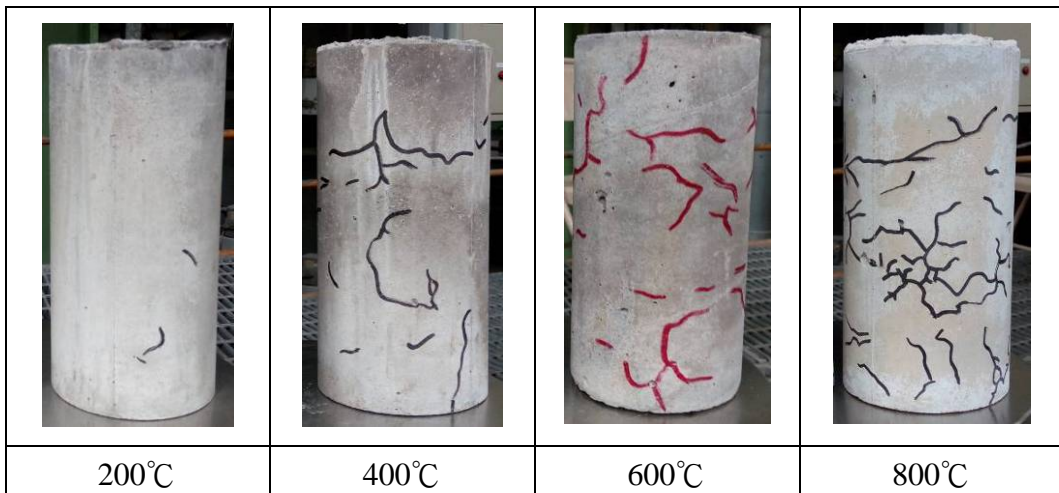


圖 18 聚丙烯纖維自充填混凝土火害後裂縫變化(強制冷卻)

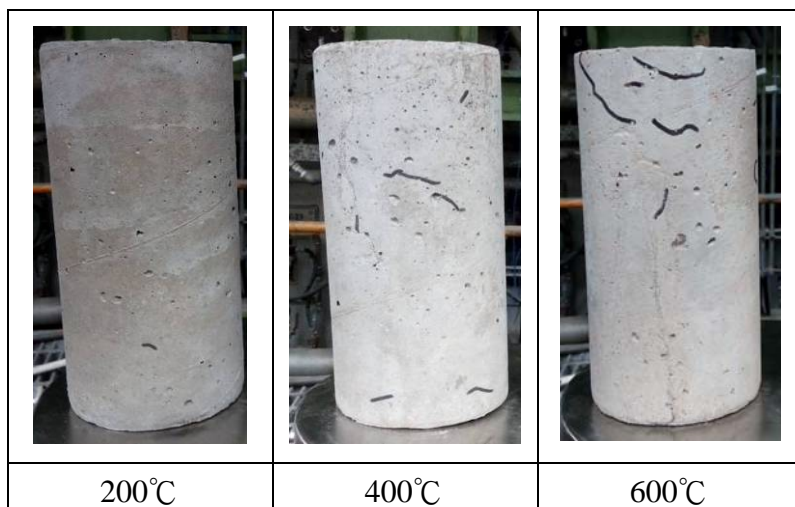


圖 19 自充填混凝土火害後裂縫變化(自然冷卻)

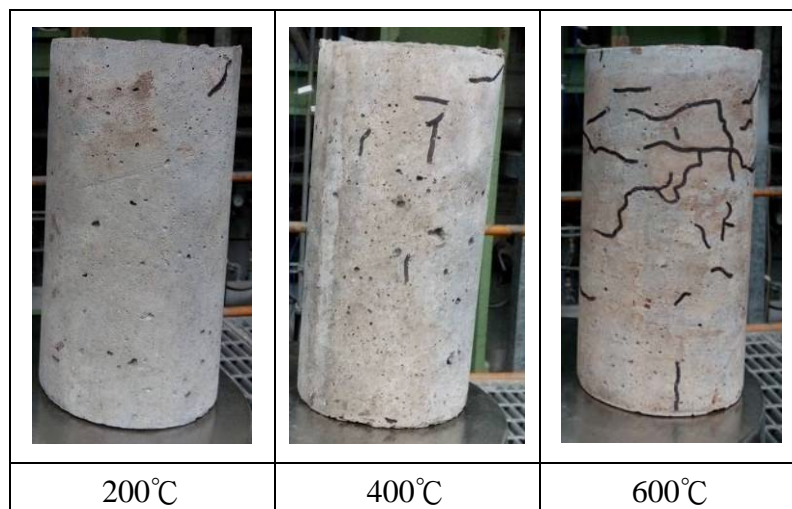


圖 20 自充填混凝土火害後裂縫變化(強制冷卻)

### 3.2.4 殘餘抗壓強度

高溫作用後混凝土試體的抗壓強度與無高溫作用者的抗壓強度之比，視為殘餘抗壓強度，以百分比來表示，自充填聚丙烯纖維混凝土及自充填混凝土之殘餘抗壓強度分析結果如表 3 及圖 21 所示。

以自充填聚丙烯纖維混凝土試體為例，由圖 21 可知，經空氣冷卻者，在 200°C、400°C、600°C 及 800°C 作用後之殘餘抗壓強度分別為 96%、82%、58% 及 28%；經強制冷卻者，在 200°C、400°C、600°C 及 800°C 作用後之殘餘抗壓強度分別為 93%、82%、49% 及 26%，由殘餘抗壓強度折減趨勢可知，強制冷卻者之折減量稍高。

自充填混凝土試體方面，由圖 21 可知，經自然冷卻之試體，在 200°C、400°C 及 600°C 作用後，殘餘抗壓強度分別為 79%、74% 及 69%，如；經強制冷卻之試體，在 200°C、400°C 及 600°C 作用後，殘餘抗壓強度分別為 67%、63% 及 51%，可知其殘餘抗壓強度折減的趨勢與自充填聚丙烯纖維混凝土者相似，亦是強制冷卻者折減情形較嚴重。

比較自充填聚丙烯纖維混凝土及自充填混凝土試體之殘餘抗壓強度折減情形，由圖 21 可知，在溫度 200°C 時，自充填聚丙烯纖維混凝土試體之殘餘抗壓強度折減量比自充填混凝土者小，應是聚丙烯纖維融解後留下孔隙，幫助試體吸收熱變形的能量，減少混凝土裂縫的發展；溫度 400°C 開始，自充填聚丙烯纖維混凝土殘餘抗壓強度折減量大幅增加，600°C 時，兩種混凝土試體之殘餘抗壓強度已逐漸接近，可知隨著溫度的增加，聚丙烯纖維的功能已失去作用，兩種混凝土的殘餘抗壓強度變化趨於一致。

表 3 火害後混凝土試體殘餘強度

混凝土	抗壓強度 $kgf/cm^2$	常溫 抗壓強度	火害後 抗壓強度		殘餘強度 (%)	
			溫度	抗壓強度		
自充填聚丙烯纖維混凝土	417	417	自然 冷卻	200°C	402	96
				400°C	343	82
				600°C	218	52
				800°C	115	28
			強制 冷卻	200°C	386	93
				400°C	342	82
				600°C	204	49
				800°C	107	26
自充填混凝土	475	475	自然 冷卻	200°C	373	79
				400°C	352	74
				600°C	329	69
				800°C	*	*
			強制 冷卻	200°C	320	67
				400°C	301	63
				600°C	244	51
				800°C	*	*

\*：表示無試驗結果。

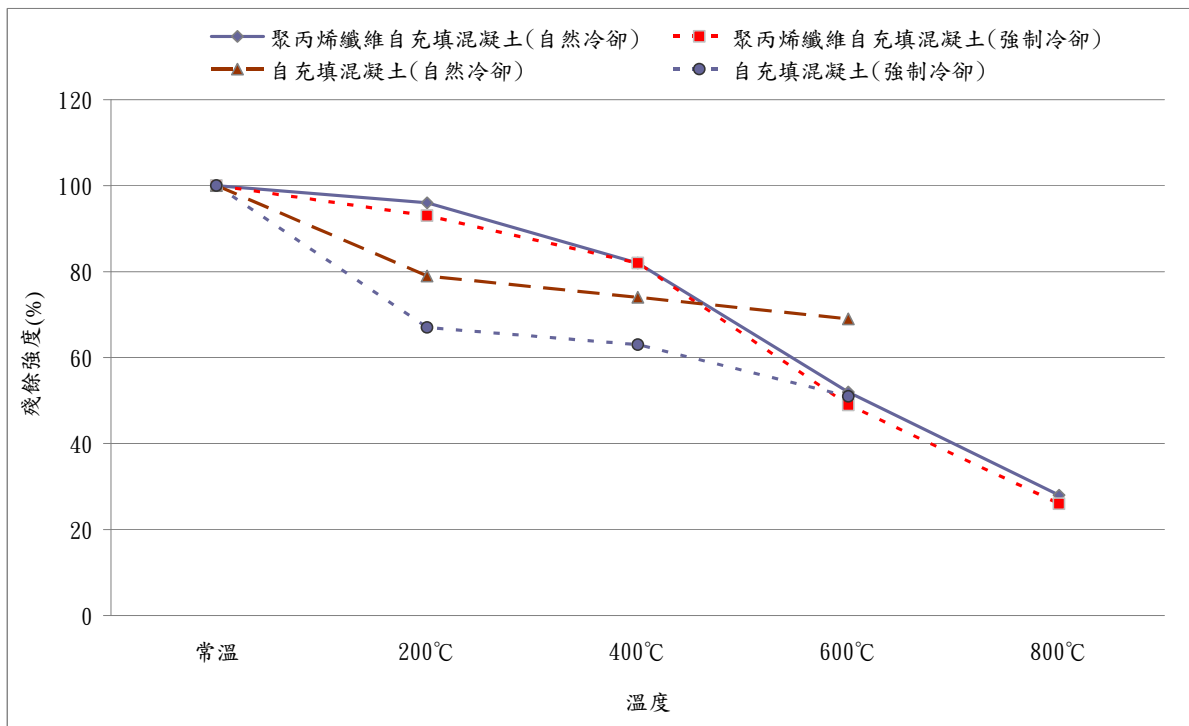


圖 21 混凝土火害後殘餘強度變化

### 3.2.5 混凝土抗壓破壞模式

試體抗壓破壞的模式如圖 22 至圖 25 所示。溫度 200°C 及 400°C 時，兩種混凝土試體在達到極限抗壓強度後隨即破壞，屬於脆性破壞，試體多呈現部分碎裂，有些裂縫有貫穿骨材；600°C 時，兩種混凝土的破壞模式無規律，只有部分呈現脆性破壞，部分脆性破壞不明顯；800°C 時，由於自充填聚丙烯纖維混凝土試體表面有大量裂縫產生，試體抗壓強度變差，抗壓強度試驗時脆性破壞已不明顯。

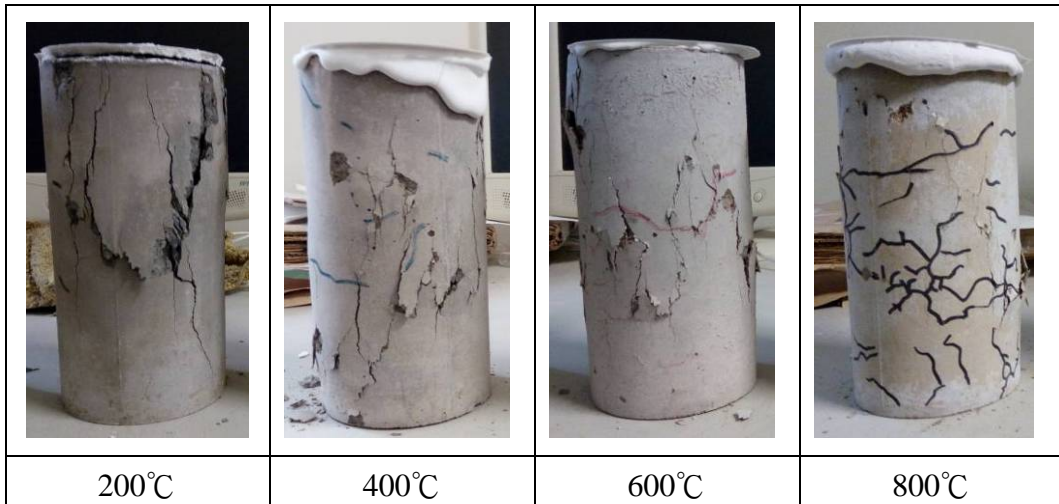


圖 22 聚丙烯纖維自充填混凝土抗壓破壞情形(自然冷卻)

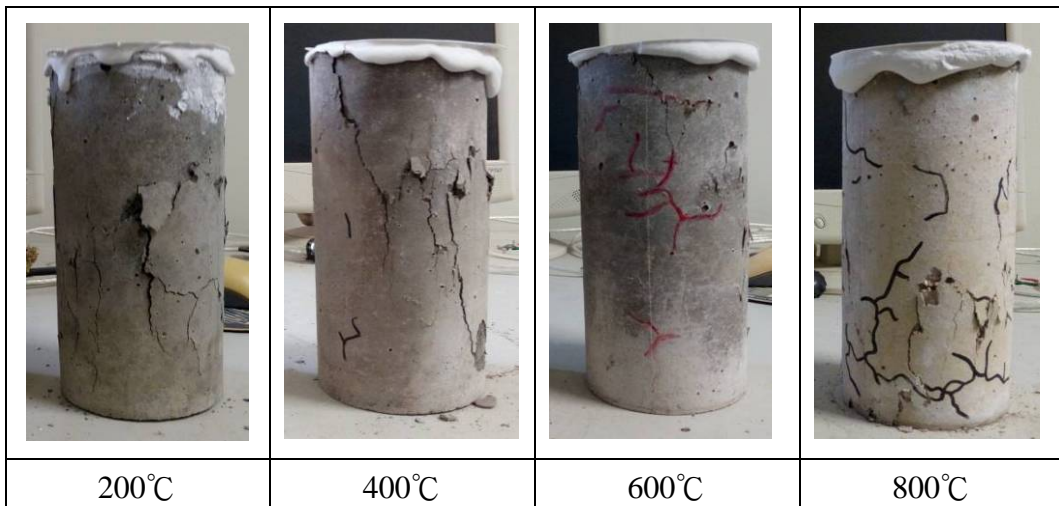


圖 23 聚丙烯纖維自充填混凝土抗壓破壞情形(強制冷卻)

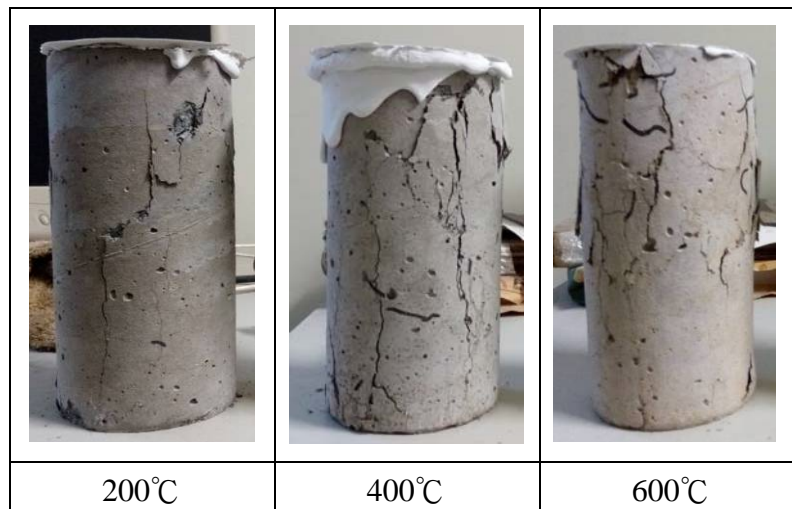


圖 24 自充填混凝土抗壓破壞情形(自然冷卻)

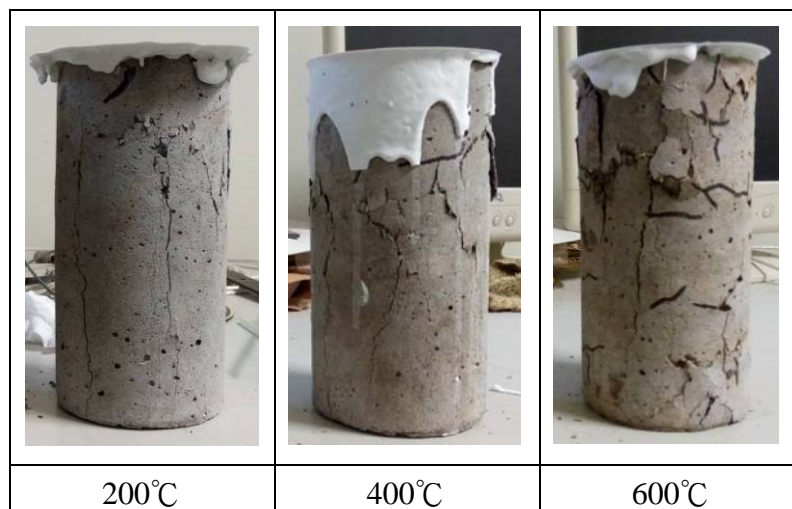


圖 25 自充填混凝土抗壓破壞情形(強制冷卻)

#### 四、結論

本研究製作自充填聚丙烯纖維混凝土圓柱試體，進行 200°C、400°C、600°C 及 800°C 的高溫作用試驗，在試體達到各目標溫度後持溫 1 小時，再利用自然冷卻及強制冷卻兩種方式進行降溫，觀測混凝土試體火害後的顏色變化及裂縫發展，並進行抗壓強度試驗，分析試驗結果所得結論說明如下：

1. 新拌自充填混凝土及自充填聚丙烯纖維混凝土之坍流度分別為 74.5cm 及 54cm，可知添加聚丙烯纖維會降低自充填混凝土的工作性，不過相較於一般傳統混凝土，自充填聚丙烯纖維混凝土仍有相當好的工作性。
2. 自充填混凝土試體經 3 天、5 天及 7 天的烘乾處理，並將升溫速率由 10°C/min 調降為 5°C/min，在進行加熱試驗時仍發生爆裂現象，自充填聚丙烯纖維混凝土無經烘乾，於高溫作用時無爆裂現象產生。

3. 兩種混凝土試體受高溫作用後之表面顏色隨目標溫度增加，顏色由灰色逐漸變為淡灰色再變為淡土黃色，並在 800°C 作用後產生大量的白色粉末氫氧化鈣  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  及碳酸鈣  $\text{CaCO}_3$ 。
4. 混凝土試體表面裂縫隨溫度升高而增加及擴大，經強制冷卻的試體產生的裂縫比自然冷卻者長且寬，分布較為集中。
5. 200°C 時，自充填聚丙烯纖維混凝土試體之殘餘抗壓強度折減量比自充填混凝土者小，400°C 開始，自充填聚丙烯纖維混凝土殘餘抗壓強度折減量增加，600°C 時，兩種試體之殘餘抗壓強度已逐漸趨於一致。
6. 兩種試體在 200°C 時，經強制冷卻者殘餘抗壓強度折減量較大，400°C 開始，自充填聚丙烯纖維試體經兩種冷卻方式之殘餘抗壓強度折減量已趨於相同，自充填混凝土者仍呈現經強制冷卻後的殘餘抗壓強度折減量較大。

#### 誌謝

本文為內政部建築研究所 105301070000G0055 研究計畫之部分研究成果，惠蒙內政部建築研究所提供研究經費與實驗設備，中興大學陳豪吉教授及正修科技大學湯兆緯教授研究團隊支援實驗進行，特此致上誠摯的謝意。

#### 四、參考文獻

- [1] Fares, H., Noumowe, A., Remond.,S., "Self-consolidating concrete subjected to high temperature Mechanical and physicochemical properties," Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 1230-1238, 2009.
- [2] 王天志，「加聚丙烯纖維之高性能混凝土在高溫後之強度恢復」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，1996。
- [3] 鄭吉誠，「高溫下高流動性鋼纖維混凝土爆裂現象研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，1998。
- [4] 江茂利，「玻纖、輸氣劑、輕質骨材對高性能混凝土熱膨脹性質之影響」，國立台灣科技大學營建工程技術研究所碩士論文，1998。
- [5] 陳彥睿，「鋼管圍束高強度纖維混凝土於高溫下力學行為研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，1999。
- [6] 楊金龍，「高強度混合纖維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，2000。
- [7] 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.
- [8] 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)」，內政部建築研究所研究報告，2010。
- [9] CNS 12514，「建築物構造部分耐火試驗法」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗

局，2010。

- [10] ASTM E119, “Standard Tests Methods for Fire Tests of Buildings Construction and Materials,” ASTM, 2008.
- [11] 林銅柱、沈得縣，「高性能混凝土耐火性能之探討」，內政部建築研究所籌備處專題研究計畫成果報告，MOIS-840007，1995。