

# 新型高強度混凝土高溫爆裂行為研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



PG10603-0319

## 新型高強度混凝土高溫爆裂行為研究

研究主持人：王天志

研究期程：中華民國 106 年 1 月至 106 年 12 月

### 內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



MINISTRY OF THE INTERIOR  
RESEARCH PROJECT REPORT

The Spalling Behavior of New High Strength  
Concrete under High Temperature

BY

TIEN CHIH WANG

DECEMBER, 2017



## 目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	IX
第一章 緒論 .....	1
第一節 研究緣起與背景 .....	1
第二節 研究目的.....	3
第三節 研究方法.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
第一節 混凝土材料高溫性質變化.....	5
第二節 混凝土高溫爆裂機制 .....	11
第三節 影響混凝土爆裂的因素及防制.....	14
第四節 相關研究文獻.....	17
第三章 混凝土高溫爆裂行為實驗.....	21
第一節 實驗規劃.....	21
第二節 試體規劃設計與製作 .....	21
第三節 實驗設備.....	36
第四節 實驗步驟.....	37
第四章 實驗結果與討論 .....	41
第一節 圓柱試體高溫爆裂行為 .....	41
第二節 板試體高溫爆裂行為 .....	49

第五章 結論與建議.....	65
第一節 結論.....	65
第二節 建議.....	66
參考書目.....	67
附錄1 歷次會議紀錄與回應.....	69
附錄2 量測元件技術資料.....	73

## 表次

表 3-1 試體規劃 .....	22
表 3-2 試體代號 .....	22
表 3-3 70 MPa等級混凝土之配比 .....	26
表 3-4 70 MPa等級新拌混凝土性質 .....	26
表 3-5 70 MPa等級混凝土之強度發展.....	26
表 3-6 聚丙烯纖維材料性質 .....	27
表 3-7 SD785 鋼筋機械性質標準.....	27
表 3-8 SD785 鋼筋拉伸試驗實測值.....	27
表 4-1 圓柱試體加熱後外觀情形 .....	45
表 4-2 板試體S00 加熱過程現象紀錄.....	56
表 4-3 板試體S10 加熱過程現象紀錄.....	63



## 圖次

圖 1-1 New RC的材料強度應用範圍 .....	2
圖 2-1 骨材與水泥漿體之熱應變圖 .....	7
圖 2-2 混凝土比熱 .....	8
圖 2-3 Eurocode 2 (1995) 及Ellingwood等人 (1980) 所提出的 混凝土熱傳導係數k與溫度之關係 .....	9
圖 2-4 ACI 216 (1994) 混凝土熱傳導係數與溫度之關係....	10
圖 2-5 Eurocode 2 (2010) 與T. T. Lie (1991) 建議的熱容比與溫 度之比較.....	11
圖 2-6 蒸氣壓爆裂機制示意圖 .....	12
圖 2-7 熱應力爆裂機制示意圖 .....	13
圖 2-8 骨材與水泥漿體界裂縫示意圖 .....	14
圖 2-9 骨材與水泥漿體界裂縫示意圖 .....	17
圖 2-10 升溫速率與爆裂時混凝土溫度關係圖.....	18
圖 2-11 試體含水量及預應力與混凝土發生爆裂關係圖 .....	18
圖 3-1 圓柱試體及內部熱電偶 (TC1 ~ 3) 佈設示意圖.....	23
圖 3-2 板試體及量測配置示意圖 .....	24
圖 3-3 SD 785 鋼筋拉伸試驗 .....	28
圖 3-4 SD 785 (D13) 鋼筋拉伸試驗 .....	28

圖 3-5 板試體模板製作.....	29
圖 3-6 板試體量測元件佈設(熱電偶及壓力管).....	29
圖 3-7 圓柱試體紙模及熱電偶.....	30
圖 3-8 試體灌製前場地佈設.....	30
圖 3-9 新拌混凝土流動性測試儀具(箱型試驗及V漏斗).....	31
圖 3-10 新拌混凝土坍流度.....	31
圖 3-11 圓柱試體製作情形.....	32
圖 3-12 板試體澆灌情形.....	32
圖 3-13 抗壓強度圓柱試體端部磨平處理.....	33
圖 3-14 板試體製作完成.....	33
圖 3-15 壓力感測元件.....	34
圖 3-16 HIH-4000 濕度感測元件.....	35
圖 3-17 濕度和壓力量測系統.....	35
圖 3-18 小型多功能耐火試驗爐設備圖.....	36
圖 3-19 CNS 12514-1 標準升溫曲線.....	38
圖 4-1 試體(4種纖維含量,相對濕度10%)實驗前狀態...	42
圖 4-2 試體四周以鐵絲網防止爆裂損壞試驗爐.....	42
圖 4-3 圓柱試體加熱過程情形.....	43
圖 4-4 試體(4種纖維含量,相對濕度10%)實驗後狀態....	43

圖 4-5 試體 (4 種纖維含量, 相對濕度 100、75 %) 實驗前狀態	44
圖 4-6 試體 (4 種纖維含量, 相對濕度 100、75 %) 實驗後狀態	44
圖 4-7 試體 00W (纖維含量 0 %, 相對濕度 100 %) 實驗後狀態	45
圖 4-8 試體 (相對濕度 10 %) 爐內加熱升溫曲線 .....	46
圖 4-9 試體 (相對濕度 100、75 %) 爐內加熱升溫曲線.....	46
圖 4-10 試體 (相對濕度 10 %) 內部升溫曲線 .....	47
圖 4-11 試體 (相對濕度 75 %) 內部升溫曲線 .....	47
圖 4-12 試體 (相對濕度 100 %) 內部升溫曲線 .....	48
圖 4-13 試體S00 爐內加熱升溫曲線 .....	50
圖 4-14 試體S00 內部升溫曲線 .....	50
圖 4-15 試體S00 內部相對濕度變化曲線.....	51
圖 4-16 試體S00 內部壓力變化曲線 .....	51
圖 4-17 試體S00 試驗前非曝火面及量測配置 .....	52
圖 4-18 試體S00 試驗前曝火面 .....	52
圖 4-19 試體S00 試驗中非曝火面情形.....	53
圖 4-20 試體S00 試驗中曝火面爆裂嚴重, 鋼筋外露 (加熱時間 35 分鐘時) .....	53
圖 4-21 試體S00 試驗後, 爐內佈滿爆裂剝落的混凝土碎塊...	54
圖 4-22 試體S00 試驗後非曝火面 .....	54

圖 4-23 試體S00 試驗後曝火面 .....	55
圖 4-24 試體S00 試驗後曝火面爆裂範圍及深度 (平視圖) ...	55
圖 4-25 試體S00 試驗後曝火面爆裂範圍及深度 (立體圖) ...	56
圖 4-26 試體S10 爐內加熱升溫曲線 .....	58
圖 4-27 試體S10 內部升溫曲線 .....	59
圖 4-28 試體S10 內部相對濕度變化曲線.....	59
圖 4-29 試體S10 內部壓力變化曲線 .....	60
圖 4-30 試體S10 試驗前非曝火面及量測配置 .....	60
圖 4-31 試體S10 試驗前曝火面 .....	61
圖 4-32 試體S10 試驗中非曝火面情形.....	61
圖 4-33 試體S10 試驗中曝火面無爆裂情形 (加熱時間 50 分鐘時) .....	62
圖 4-34 試體S10 試驗後非曝火面 .....	62
圖 4-35 試體S10 試驗後曝火面 .....	63

# 摘要

關鍵詞：新型高強度混凝土、高溫、爆裂

## 一、研究緣起

鋼筋混凝土構造建築，隨著各種使用目的需求，所用混凝土形式也不斷的被開發出來，新型鋼筋混凝土構造為高強度混凝土與高強度鋼筋的組合，台灣都市土地面積狹小，若能運用更高強度的建築材料，將可節省材料使用量與土地使用面積，但其所用之超高強度混凝土的高溫爆裂行為仍須進行了解及控制改善。

新型鋼筋混凝土構造的常溫力學性能，國內已有部分研究成果，已完成高強度材料之研發。但在很多的文獻中指出，高強度混凝土遭遇火災快速升溫時，會產生爆裂剝落，進而使結構在火場中鋼筋提早暴露於高溫下而軟化，同時混凝土斷面減少，亦會使結構承載能力下降，最終導致結構喪失承載力及完整性。國內對於 50 MPa 抗壓強度左右的混凝土高溫性能已進行過一系列研究，但對於使用更高強度的混凝土則仍相當缺乏，以往的研究成果，如添加聚丙烯纖維的用量等，是否可適用？有待進行實驗驗證。

## 二、研究方法與過程

本研究藉由進行蒐集和彙整國內外相關混凝土爆裂防制規範與文獻，瞭解影響爆裂的原理與機制，參考文獻以往的防制方式及國內的用法，進行圓柱試體及板試體的設計、製作與高溫試驗，圓柱試體主要作為探討不同聚丙烯纖維含量及含水量對爆裂行為之影響，施以 CNS 標準升溫速率的加熱，觀察圓柱試體的內部溫度分布及爆裂情形。另外製作板試體，內部佈設蒸氣壓力量測元件、相對濕度量測元件及測溫線，施以單面加熱，以觀測試體內部蒸氣壓力、相對濕度、溫度及受熱表面爆裂情形，提供評估後續大型構件耐火試驗時可行之改善機制，以推動新型高強度混凝土的應用。

## 三、重要發現

本案藉由文獻回顧及圓柱與板試體試驗結果彙整分析，可得到以下重要發現：

1. 由文獻回顧彙整分析，影響混凝土爆裂因素眾多，並不限於材料本質，與構

- 件特性也有關係，且研究結論之再現性仍有很大的差異，因此對於國內新型高強度鋼筋混凝土系統之推動，其本土化的高溫性能值得進行驗證研究。
2. 針對圓柱試體探討添加不同含量聚丙烯纖維及含水量對其高溫爆裂之影響，在 4 種纖維含量，3 種相對濕度，依 CNS 12514-1 的快速升溫加熱，僅有無添加纖維、相對濕度 100 % 的圓柱試體發生爆裂，另外 11 種條件組合之試體，皆無發生爆裂的現象。對照板試體之試驗結果，於本研究條件下，試體內部相對濕度對爆裂的影響不明顯，但添加纖維對爆裂卻有很明顯的改善。
  3. 兩種不同聚丙烯纖維含量的超高強度混凝土進行依據 CNS 12514-1 高溫試驗加熱，無添加纖維的試體因發生嚴重爆裂，其加熱過程混凝土內部的溫升較快速、水分的遷移也較早發生，另外內部壓力則因爆裂造成壓力不易累積，其值則反而較低。在爆裂行為上，兩試體有截然不同的反應，在試體的內部相對濕度程度相近下，無添加纖維的試體很早就開始爆裂且情形嚴重，而添加纖維的試體卻完全沒有爆裂發生，本案添加纖維的抗爆裂效果明顯。
  4. 本案針對新型高強度混凝土進行高溫爆裂行為探討，可發現添加聚丙烯纖維對抗爆裂有明顯效果，但對纖維添加量尚未進行完整研究，部分文獻亦提到添加過多的纖維，可能反而造成混凝土拌合及澆製不易，恐造成混凝土品質下降；另外，聚丙烯纖維高溫融化，對於混凝土高溫後的力學性質之影響，仍須進行後續的研究驗證。

#### 四、主要建議事項

立即可行建議 - 實尺寸新型高強度鋼筋混凝土柱構件耐火性能

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

新型高強度鋼筋混凝土（New RC）結構系統，所用混凝土及鋼筋強度遠大於現行所用材料，可減少構件斷面積，但超高強度混凝土存在脆性高和耐火性能較差的缺點，當遭受火災高溫時會發生嚴重的爆裂現象，造成構件承載面積的減少，而鋼筋失去保護層，直接暴露在高溫下，更導致結構的承載力急遽降低，甚而造成結構崩塌。本研究圓柱及板試體實驗結果顯示添加聚丙烯纖維對爆裂有明顯的改善效果，值得持續針對結構主要承重的柱構件進行耐火性能，以確認可行之改善爆裂方式。

**ABSTRACT**

Keywords : New High Strength Concrete, High Temperature, Spalling

Reinforced concrete construction can have various purposes, the use of concrete materials have been constantly developed. Nowadays, the new reinforced concrete structure is a combination of high strength concrete and high strength steel. Due to the small urban land area in Taiwan, it is preferred to use more high-strength materials which can save material and land. However, the spalling behavior of the ultra-high strength concrete under high-temperature must be well understood and controlled.

In this study, the cylinder and slab tests under high temperature were performed to evaluate the major effects of different polypropylene fiber content and water content on the spalling behavior, and also to provide follow-up assessment improvement of the practicable mechanism of fire-resistance test on large components.

The result of this study shows that the influence of relative humidity inside the test pieces on spalling was not obvious, but the addition of fiber had a significant improvement on preventing spalling.

The main suggestions :

The ultra-high strength concrete used in the New RC structure system has the weakness of brittleness and poor fire-resistance. When subjected to high temperature, severe spalling phenomenon will occur, resulting in the reduction of load carrying area and the losses of reinforcement protective cover, and led to the bearing capacity of the structure decreased rapidly, or even cause the structural collapse. The results of this study show that the addition of polypropylene fiber has a significant improvement on spalling performance and it is worthwhile to continue the research of fire-resistance of column members subject to high temperature.



# 第一章 緒論

## 第一節 研究緣起與背景

依循著環境的變遷與人類對混凝土工程的實際需求，混凝土產業科學的發展不斷的演進，不論是在材料面（水泥、粗細骨材、化學摻料、纖維）、料源管制或是生產管理，均有不小的改善進化。而混凝土種類也隨各種使用目的需求，不斷的被開發出來，例如高強度混凝土（HSC）、高性能混凝土（HPC）及自充填混凝土（SSC）等，而在提高混凝土材料強度，以提升承載能力，減少構件斷面積，則一直是材料開發的目標之一，也符合推動節能減碳、環境永續發展的國際趨勢。新型高強度鋼筋混凝土構造（New RC）為高強度混凝土與高強度鋼筋的組合，台灣都市土地面積狹小，若能運用更高強度的建築材料，將可節省材料使用量與土地使用面積。

依據 ACI 363R-10 的定義，混凝土 28 天規定抗壓強度大於或等於 55 MPa（約等於 8000 psi）者，稱為高強度混凝土。而國內住宅常用的混凝土抗壓強度為 3000~5000 psi，對於抗壓強度 6000 psi 以上者，則普遍就稱為高強度混凝土。事實上，國內混凝土預拌廠對於生產 6000~8000 psi 的混凝土，已有相當的經驗且品控良好，這個等級的混凝土材料性質，國內也已有相當多的研究。惟對於更高強度的混凝土，則多採專案辦理，從產製、運輸、澆灌及材料特性，均需經公認合理之試驗證明其可行性與可靠度，方可使用，且僅多見使用於鋼骨鋼筋混凝土的內灌混凝土使用，例如高雄東帝士 85 大樓、臺北 101 大樓，已使用抗壓強度達 10000 psi 的混凝土，另外最近的臺北南山廣場大樓，樓高 272 公尺，更已使用抗壓強度高達 12000 psi 等級的混凝土，完工後將成為國內第三高樓。

國內有關新型高強度鋼筋混凝土的發展，主要由台灣混凝土學會所屬之「高強度鋼筋混凝土技術委員會」結合產、官、學、研各界，進行「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），有關高強度材料的開發，混凝土抗壓強度目標值在 10000~15000 psi（70~100 MPa），在鋼筋方面設定主筋降伏強度 $f_y$ 為大於等於 685 MPa（約等於 7000 kgf/cm<sup>2</sup>），而箍筋降伏強度 $f_y$ 為大於等於 785 MPa（約等於 8000 kgf/cm<sup>2</sup>），New RC 的材料強度應用範圍如圖 1-1 所示。而目前的發展在鋼筋方面，已達設定目標值，在混凝土方面，

如同前面所述，已可穩定產製抗壓強度達 12000 psi；在抗壓強度 15000 psi 方面，若能使用高品質粒料，則應可進行穩定產製。

有鑒於前述 New RC 的混凝土材料研發抗壓強度高達 10000~15000 psi，但由本所多年來之火害研究經驗及很多的文獻顯示，此類超高強度混凝土存在脆性高和耐火性能較差的缺點，當其遭受火災高溫時會發生嚴重的爆裂現象，除了直接造成構件承載面積的減少，嚴重的爆裂還會使鋼筋完全失去防火的保護層，而直接暴露在高溫下，導致工程結構的承載力急遽降低，嚴重者有可能造成結構的崩塌。此種新型高強度混凝土在高溫環境下的爆裂問題，令設計者及使用者感到擔憂，從而限制了其推廣應用。

國內對於 50 MPa 抗壓強度左右的混凝土高溫性能，包括材料和構件已進行過一系列研究，但對於使用更高強度的混凝土則仍相當缺乏，以往的研究成果，如添加聚丙烯纖維的用量等，是否可適用？值得進行實驗來驗證及探討。

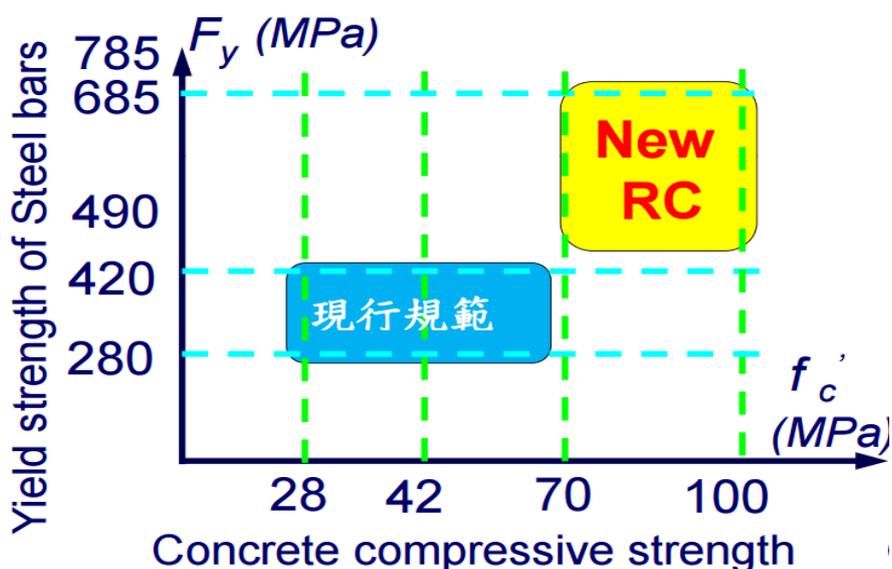


圖 1-1 New RC 的材料強度應用範圍

(資料來源：New RC 結構設計與施工技術研討會簡報資料)

## 第二節 研究目的

對於混凝土的普通印象，都是認為其為優良的耐火材，不用保護就具有耐火時效，在我國建築技術規則也明列鋼筋混凝土構造當具有足夠的保護層時，即具有相對應的耐火時效。但依據相關文獻研究表明，對於高緻密、高強度混凝土，遭受火災高溫侵襲時，其實存在有很高的混凝土爆裂的風險，而建築技術規則對此現象並未有任何預防改善規定，也無任何使用上的警語。目前在研究文獻資料已有相當多的報告提出疑慮及相應可能的改善方法，但在標準方面，僅於 Eurocode 2 (2010) ” Design of concrete structure - Part 1-2: general rules - structural fire design” ，針對有高爆裂風險的混凝土之防制規範。因此本研究擬對於此類新型高強度混凝土進行爆裂行為研究，探討添加不同含量聚丙烯纖維及含水量對其高溫爆裂之影響。本研究擬蒐集彙整相關超高強度混凝土爆裂之研究資料，規劃設計混凝土圓柱試體及板試體，進行實驗研究了解不同聚丙烯纖維含量及含水量之影響，以及板試體受高溫影響時內部溫度及蒸氣壓力之分布情形，以了解影響爆裂的因素，最後將實驗結果作為國內未來相關規範防制爆裂規定之參考資料。

## 第三節 研究方法

首先，本研究進行蒐集和彙整國內外相關混凝土爆裂防制規範與文獻，瞭解影響爆裂的原理與機制，參考文獻以往的防制方式及國內的用法，進行圓柱試體及板試體的設計與製作，圓柱試體主要作為探討不同聚丙烯纖維含量及含水量之影響，施以 CNS 標準升溫速率的加熱，觀察圓柱試體的內部溫度分布及爆裂情形。另外製作板試體，內部佈設蒸氣壓力量測元件、相對濕度量測元件及測溫線，施以單面加熱，以觀測試體內部蒸氣壓力、相對濕度、溫度及受熱表面爆裂情形，提供評估後續大型構件耐火試驗時可行之改善機制，以推動新型高強度混凝土的應用。



## 第二章 文獻回顧

發展 New RC，運用高強度材料（混凝土、鋼筋），雖可提高單位斷面積的承載效率，減少構件尺寸，增加結構有效的使用面積，但因其混凝土微觀結構緻密，遭遇高溫火害易產生爆裂而造成結構物的承載安全，更因其單位斷面積承載效率高，任何的斷面縮減，代表有很高比率的承重能力喪失，其影響比普通混凝土更為巨大。

火害對混凝土結構物的影響，早於二十世紀初即開始對混凝土及鋼筋材料受火害之影響進行一系列的研究。試驗對象包括骨材、砂漿、混凝土及鋼筋，試驗目的則包括材料受火害後之化學及物理力學等性質，之後各研究陸續又完成了材料在火害下及同時加載下的性質變化，到二十世紀中期，研究已逐漸朝向構件耐火性能之研究，且已有相當的成果。受火害普通混凝土材料的基本物、化性及力學特性已頗為完備，但隨著各種使用目的因應而生的特殊混凝土，配比變化大，尤其混凝土高溫行為受原料不同種類、產地會有不同反應，因此針對國內本土化材料高溫性能仍須加以驗證，方能確保安全使用。

### 第一節 混凝土材料高溫性質變化

一、混凝土高溫下的化學反應綜合如下（沈進發等，1991；沈進發等，1993；Khoury, 1992）：

- (1) 溫度達 105 °C 時，混凝土中的毛細孔及吸附水逐漸散失。
- (2) 溫度達 200 °C 時，CSH 膠體開始失去鍵結水，混凝土內部發生化學變化。
- (3) 溫度在 250 °C 至 350 °C 之間，混凝土內含  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的水化物內之鍵結水，將大部分喪失。而 CSH 膠體的鍵結水也會喪失約 20 %。
- (4) 溫度在 400 °C 至 700 °C 之間，CSH 膠體內保有的 80 % 鍵結水，將在此階段完全分解。但在 500 °C 左右，漿體中的水分已分解殆盡。
- (5) 溫度在 440 °C 至 580 °C 之間，水泥漿體中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  開始分解，但

該反應為可逆。另外，矽質骨材約在 573 °C 時， $\text{SiO}_2$  會由  $\alpha$  相轉成  $\beta$  相，

由於熱震動能量的增加，使體積產生約 0.4 % 的熱膨脹量。

(6) 溫度達 750 °C 時，石灰質骨材中的碳酸鈣開始分解，釋放出二氧化碳，該高溫吸熱產生的生石灰 ( $\text{CaO}$ )，在冷卻後吸收空氣中的水氣會產生體積膨脹，可能造成混凝土的再次龜裂。

(7) 溫度在 800 °C 至 1000 °C 之間，水泥的水化物將再被重新燒結成  $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_4\text{AF}$  等水泥主要成分。

(8) 溫度達 1425 °C，剩餘水泥水化物，可能進一步溶解生成  $\text{C}_3\text{S}$ 。

## 二、混凝土的熱膨脹係數

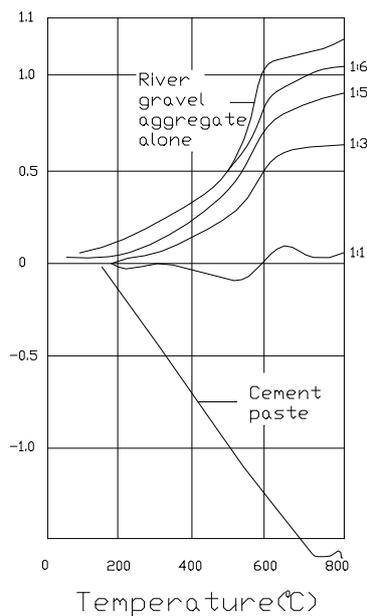
混凝土之熱膨脹係數，隨著含水量、水灰比及混凝土之材齡而變。由於水泥砂漿和骨材間之熱膨脹係數不同，故熱膨脹係數約為其二者之合成，且為拌合骨材數量及骨材熱膨脹係數的函數。另外此係數亦包含了熱膨脹與乾縮之相互影響。不同骨材混凝土的熱膨脹係數如下 (European Committee, 1995)：

矽質骨材混凝土 : 0.000018 / °C

碳酸岩骨材混凝土: 0.000012 / °C

## 三、混凝土的體積變化

混凝土受熱的潛應變及瞬間應變有密切的相關性。混凝土的體積變化包含水泥漿體與骨材之共同影響，且體積變化隨溫度變化及有無加載而有明顯的不同。一般骨材其體積均隨溫度增高而膨脹；但水泥漿體在較低溫時，體積變化亦隨溫度升高而膨脹，但約在 150 °C 以上時，體積變化改脹為縮，如圖 2-1。在此腫脹縮不和諧情況下，骨材與水泥漿體界面間會產生脹縮差異之內張應力，當此應力超過極限時，界面即產生破裂或使原有裂縫再擴大延伸。



**圖 2-1 骨材與水泥漿體之熱應變圖**

(資料來源：Rixom 等人，1986)

#### 四、混凝土的比熱

比熱是表示混凝土之熱容量，混凝土之比熱受骨材礦物之影響較小，而與孔隙、水灰比，含水量及溫度等的關係較密切。混凝土的含水量增加時比熱亦隨之增加，且溫度升高時，比熱亦隨之升高。文獻（European Committee, 1995）歸納近期成果，提供參考分析使用之混凝土比熱，如圖 2-2 所示。

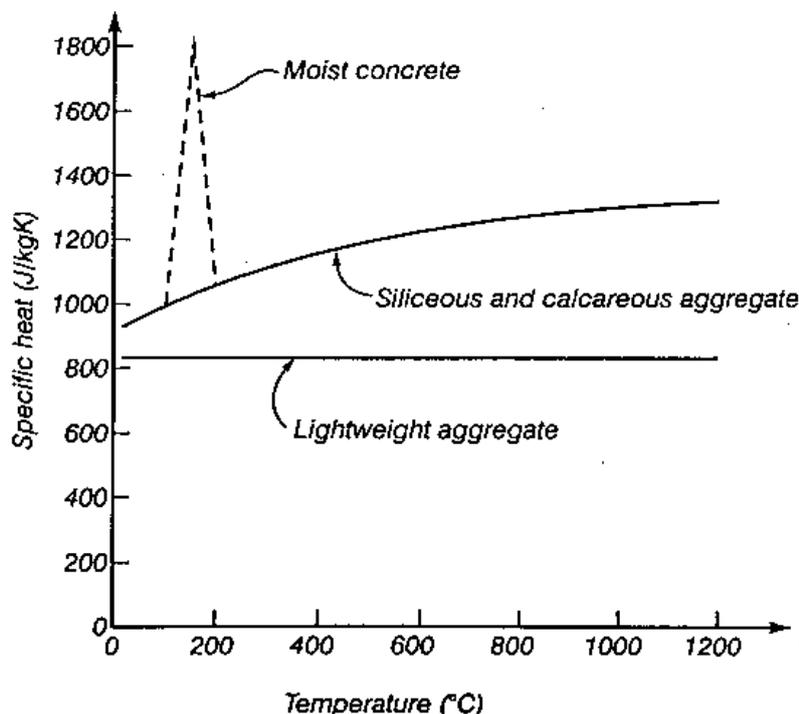


圖 2-2 混凝土比熱

(資料來源：European Committee, 1995)

### 五、混凝土的熱傳遞

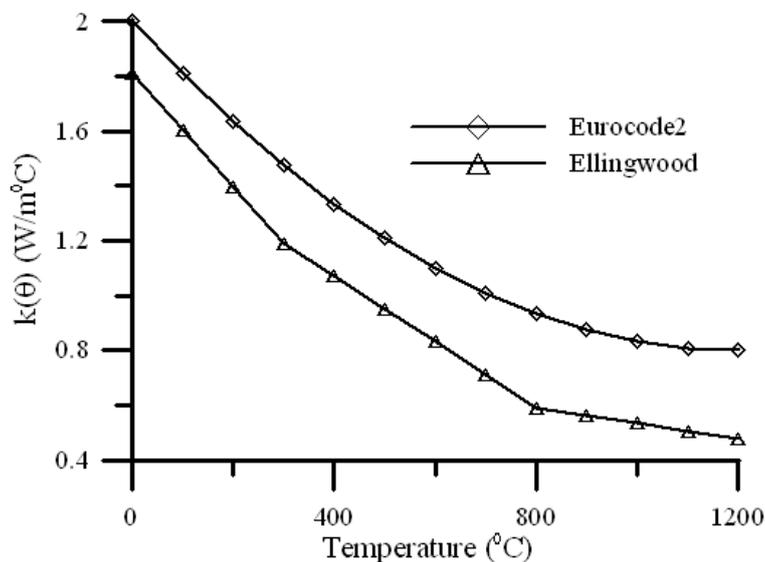
熱傳遞方式，主要有輻射、對流及傳導三種方式。熱傳遞時往往是三種方式同時進行，將熱由高溫處傳至低溫處，在低溫時是以傳導及對流為主，而在高溫則以輻射為主。影響混凝土的熱傳導率之主要因素有骨材礦物性質、硬固水泥漿體、孔隙量、飽和度及環境溫度等因數。一般言之在低溫時，混凝土有較高的熱傳係數，但當溫度達 100 °C 以上時，孔隙水逐漸蒸發，骨材與硬固水泥漿體間，因熱應變不諧和而產生微裂縫，增長熱傳導的路徑，傳導能力減弱，熱傳係數逐漸下降，當溫度約達 800 °C 以上時，熱傳係數逐漸穩定，因此時主要以輻射方式傳熱，使的傳熱能力維持穩定。混凝土熱傳係數如下：

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (2-1)$$

其中

- $\alpha$  : 熱擴散係數 (heat diffusivity)
- $k$  : 熱傳導係數 (thermal conductivity) ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )
- $\rho$  : 密度 (density) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $c$  : 比熱 (specific heat) ( $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )
- $\rho c$  : 熱容比 (specific heat capacity) ( $\text{J}/\text{m}^3^{\circ}\text{C}$ )

Eurocode 2 (2010) 所建議的熱傳導係數  $k$  及 Ellingwood 等人 (1980) 所提出的熱傳導係數  $k$  如圖 2-3 所示，另外 ACI 216 (1994) 所提供的混凝土熱傳導係數如圖 2-4 所示。



**圖 2-3 Eurocode 2 (1995) 及 Ellingwood 等人 (1980) 所提出的混凝土熱傳導係數  $k$  與溫度之關係**

(資料來源：Eurocode 2 (1995) 及 Ellingwood 等人 (1980))

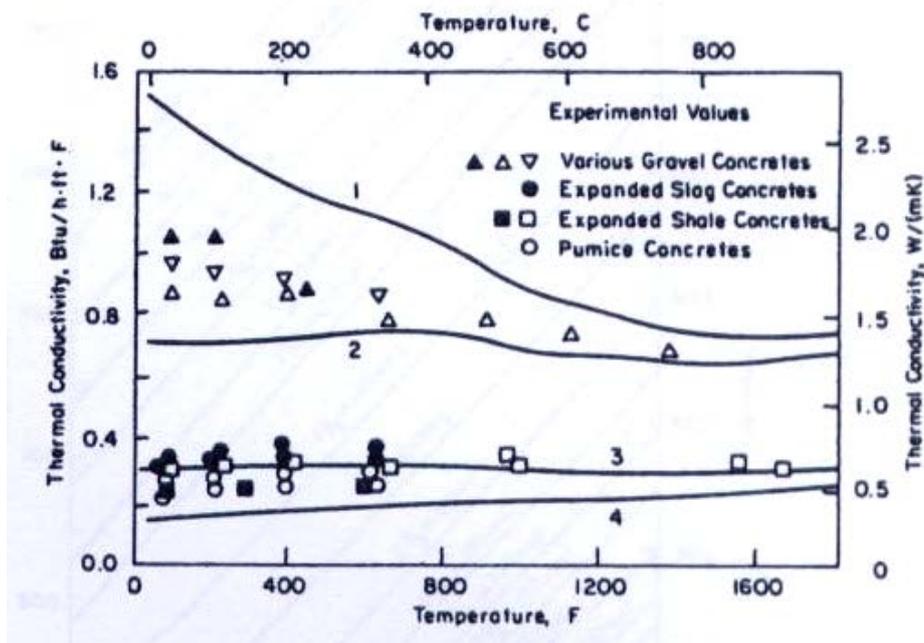


圖 2-4 ACI 216 (1994) 混凝土熱傳導係數與溫度之關係

(資料來源：ACI 216 (1994))

#### 六、混凝土的熱容比

Eurocode 2 (2010) 及 T.T. Lie 等人 (1991) 所提出兩種不同之熱容比與溫度之變化如圖 2-5 所示，其中 T.T. Lie 等人 (1991) 所建議的熱容比一開始為線性上升，直至 200 °C 之後皆保持一個平台，在 500 °C 左右有一突峰，但 Eurocode 2 (2010) 所建議的熱容比呈現微幅上升的趨勢，在 100 °C-200 °C 時比熱 c 會有一尖峰值 2750 J/kg°C，在 600 °C 以後兩者建議的熱容比趨近相同。

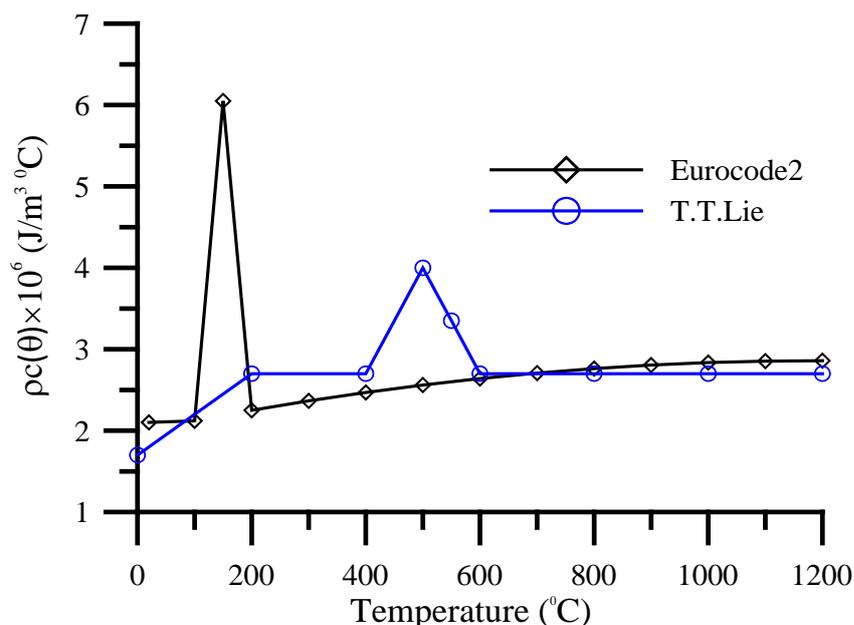


圖 2-5 Eurocode 2 (2010) 與 T.T.Lie (1991) 建議的熱容比與溫度之比較

(資料來源：Eurocode 2 (2010) 與 T.T.Lie (1991))

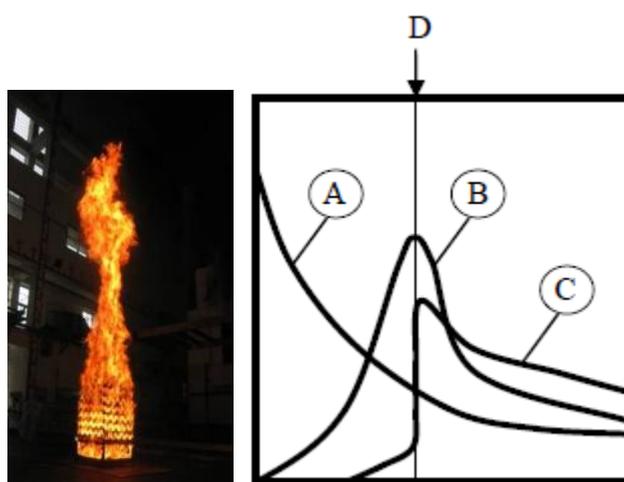
## 第二節 混凝土高溫爆裂機制

高溫爆裂是指升溫過程中，在無法預期、沒有徵兆的情況下，表面混凝土從構件本體爆炸成碎塊的現象，與一般力學試驗表面混凝土係逐步的從表面剝落的行為不同，因此爆裂行為為高度不可預測，其位置、時間及爆裂深度皆不確定且程度不一。由於高溫下混凝土爆裂的複雜性，對於其爆裂機制也仍多處推論及持續研究中，尚未達成一致的共識。綜合文獻資料，目前關於混凝土高溫爆裂機制和引發因素，研究者主要從孔隙水（汽）壓力和熱應力等方面進行探討，並歸納為三種理論，包括蒸氣壓爆裂機制、熱應力爆裂機制及熱開裂機制。

### 壹、蒸氣壓爆裂機制

長期以來，高含水率與低滲透性（高緻密）所產生的孔隙水（汽）壓力，是最早被認為是混凝土爆裂的主要原因，這種孔隙水（汽）壓力是由於孔隙內物質（空氣、自由水、化合物）受熱變化引起的蒸汽壓所致。Harmarthy (1965) 提出“飽和含水帶（moisture clog）”的概念，此係由於混凝土內部水氣受熱移動而形成飽和含水帶，造成混凝土孔隙壓力上升產生爆裂現象。混凝土受火時，熱量

傳遞到混凝土內部，自由水、吸附水以及與鍵結脫離的結晶水，都會因溫度升高蒸發而形成水蒸汽，產生蒸氣壓力，由於混凝土屬熱惰性材料，致使混凝土表裏不同深度產生溫度梯度，溫度較高區域的蒸汽壓高於低處的蒸汽壓，於是又另外產生壓力梯度，此壓力梯度下水蒸汽會通過毛細孔分別向內、向外遷移，向外遷移的蒸汽會溢散到大氣，而向內遷移的水蒸汽遇冷會再次冷凝，直到某一較冷區域孔隙內水氣趨於飽和，形成具有較高液壓，水氣無法穿透的區域（飽和含水帶），由於高強度混凝土的高緻密低滲透性，水分遷移受阻，造成蒸汽壓累積，當蒸汽壓力大於混凝土弱面的抗拉強度時，就會產生爆裂現象。



A：溫度分布曲線

B：蒸汽壓力曲線

C：水分分布曲線

D：飽和含水帶

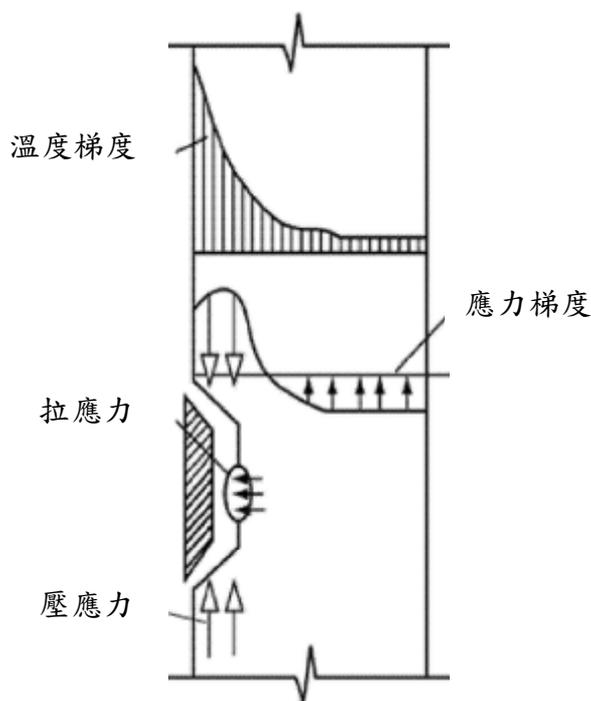
**圖 2-6 蒸氣壓爆裂機制示意圖**

(資料來源：本研究重繪，Harmarthy 1965)

### 貳、熱應力爆裂機制

熱應力爆裂機制認為混凝土的熱惰性，導致混凝土遭受火災高溫條件下，混凝土內部熱量傳導不均勻，巨大的溫差產生很大的溫度梯度，混凝土被加熱的外表面層，其熱膨脹會受到內部相連較低溫度混凝土的束制而在介面產生高應力，

另外混凝土內部粗骨材受熱膨脹、矽質骨材在  $573^{\circ}\text{C}$  時的晶相轉變，也都會產生內應力，當此內應力超過混凝土抗拉強度時便造成混凝土的爆裂。混凝土材料熱膨脹受到束制是高溫爆裂產生的要素之一，另外材料的非均質性加劇了材料內部熱應力分布的非均勻性，也是造成混凝土材料熱破裂的一個重要因素。



**圖 2-7 熱應力爆裂機制示意圖**

(資料來源：Anderberg Y., 1997)

### 參、熱開裂爆裂機制

熱開裂爆裂機制認為，混凝土為非均質多相複合材料，即使在外界無荷載或束制下，單純受到快速升溫加熱作用下，當周圍環境溫度不斷升高時，也會由水化物分解致使混凝土水泥基質材脫水收縮開裂，骨材卻是產生熱膨脹，骨材和水泥漿體間熱變形不諧和，導致兩者介面間開裂（開裂路徑沿骨料周邊發展），爆裂即是這些裂紋擴展，最終貫通的外在表面。此機制主要著眼在骨材和水泥漿體間局部熱變形不諧和所導致的裂縫開展。

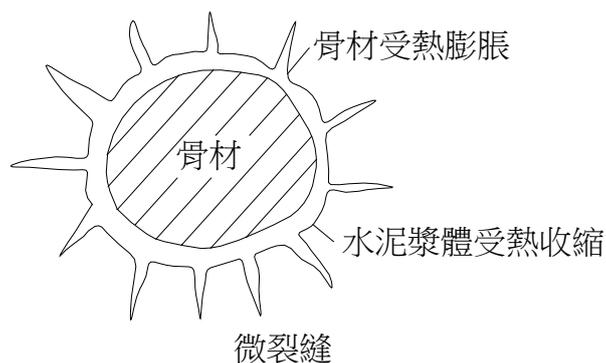


圖 2-8 骨材與水泥漿體界裂縫示意圖

(資料來源：重繪，Rixom 等人，1986)

### 第三節 影響混凝土爆裂的因素及防制

爆裂是混凝土在遭受火災高溫侵襲下最為猛烈的一種破裂現象，另外還有表面層剝落和結構角隅開裂剝離等程度較輕的破裂現象。依本所經驗及文獻資料顯示，通常混凝土發生爆裂的溫度範圍約在 250 ~ 400 °C 之間(指混凝土內部溫度，非表面溫度)，而高強度混凝土發生爆裂的機率遠高於普通混凝土。依照前節爆裂機制的原理所示，會影響爆裂的主要因素為混凝土內部高溫度梯度及內部水分受高溫後的變化行為所致，因此會影響上述兩種現象的皆為影響爆裂的可能因素，可概分為內在本質因素及外在因素兩大類來說明，前者包括混凝土骨材、配比、含水率、抗壓強度、滲透性和幾何形狀，後者則包括載重大小、升溫速率和高溫變形束制。

#### 壹、內在本質因素

混凝土含水率及低滲透性為蒸氣壓產生的主要因素，混凝土爆裂機率隨含水率的增加而提高。Chan (1999) 等的實驗結果顯示，當混凝土處於飽和濕潤狀態時，高強度混凝土的爆裂機率幾乎是百分之百。Anderberg (1997) 研究指出，當水灰比大於 0.32，混凝土相對濕度小於 75 ~ 80 % 時，可降低高強度混凝土爆裂的風險會降低。混凝土為非均質多相複合材料，各個影響爆裂的因素間也多彼此相互關聯，例如為提高混凝土強度，調整配比，採用低水灰比、添加摻料(矽灰等活性粉末)，在提供強度的同時，也提高了混凝土的緻密性，提高爆裂的風險。試體幾何形狀對爆裂機率也略有影響，一般在幾何形狀上有較不連續的外觀，

其角隅處的爆裂情形風險會較高。

## 貳、外在因素

有很多的文獻研究顯示，在快速地升溫速率條件下（以標準建築火災升溫速率，初期可達每分鐘 100 °C 以上），高強度混凝土發生爆裂的機率會提高，主因為快速升溫造成混凝土內外有很高的溫度梯度，造成內外混凝土熱膨脹速率不一致，介面產生高應力，從而產生爆裂。另外，混凝土受熱膨脹，當構件處於束制情況，限制構件熱膨脹伸長，即會在構件內部產生高應力，當表面層混凝土內部拉應力大於其抗拉強度，就會產生爆裂。而構件若於使用階段，其又承受較高的使用載重時，結合構件熱變形受束制產生的內應力，也加劇爆裂行為的產生。因此外部因素的影響可概括為熱應力的快速增加，及和外部荷重/變形束制的結合導致了混凝土爆裂。

## 參、混凝土爆裂的防制措施

藉由前述的混凝土爆裂機制及影響因素，可綜整出爆裂主要取決於本身的含水量、滲透性，另一方面取決於升溫速率（溫度梯度），因此其防治方法可朝降低內部蒸氣壓及減緩外部升溫速率來進行，而減緩外部升溫速率係採外部加工方式，如鋼構造防火被覆的概念。

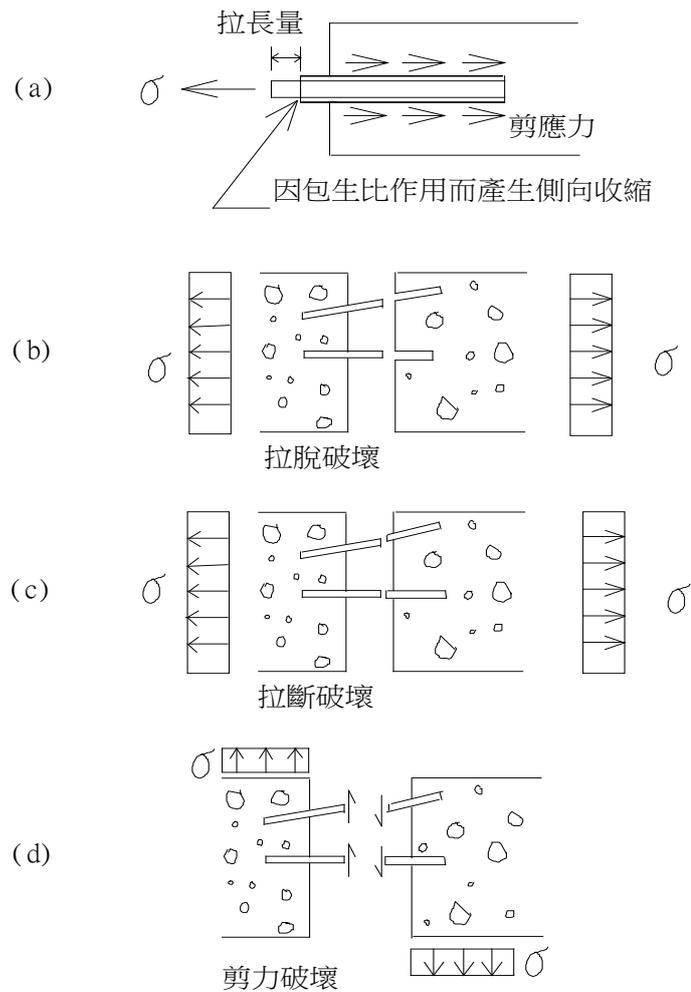
由很多的文獻成果顯示，提供混凝土高溫下的滲透性，可以降低孔隙水汽化後的蒸氣壓力，而具有低熔點的聚丙烯纖維（polypropylene fiber, P.P. fiber）為有效的解決方式之一，其在常溫時可增加混凝土的抗裂效能，當在高溫時，聚丙烯纖維約在 160 ~ 170 °C 之間熔化，形成微小孔隙，又若纖維能有效均勻拌合分布在混凝土內，則微小孔隙能形成有效的洩壓通道網絡，為膨脹的孔隙水提供空間，降低蒸氣壓力的上升速率。如這些洩壓通道形成通達表面的微小裂縫，更能提高滲透性，導引蒸氣壓快速地向外排出，有效的降低混凝土爆裂的風險。

鋼結構的防火措施包括塗防火漆、防火被覆及封防火板材，這些外加措施能夠在一定的防火時效內，抵擋火災高溫的侵襲，減緩火災熱傳速度或隔斷熱源，進而達到延長結構維持承重能力的時間，同樣的手法，亦可應用到高強度混凝土結構，但此法會增加建築成本。

#### 肆、 聚丙烯纖維混凝土

聚丙烯纖維為一種聚合物，依據應用上的需求，製成不同的產品形式，工程上使用的一般分類有單絲型纖維、纖維束、纖維網以及纖維加強筋等，纖維長度不等，亦可做成混合長度搭配使用。傳統上，添加纖維係為改善其工程性質，聚丙烯纖維加入脆性的混凝土或水泥漿中，除了為提供較高的抗拉、抗撓等強度外，另一重要因素係纖維可當作裂縫阻止物 (Crack Arrestor)，使得材料內因局部應力集中所生裂縫或原已存在之裂縫，其傳播 (Propagation) 受到阻止而變鈍。纖維和混凝土間之應力傳遞，係藉著纖維界面之剪應力與纖維之拉應力為之，如圖 2-9a 所示。混凝土破壞前，纖維混凝土所承受之拉力係由混凝土與纖維共同負擔；當混凝土開裂後，外界作用力即由母體 (Matrix) 經纖維表面的剪力變形 (Shear Deformation) 而傳遞至鄰近的纖維上。當纖維所受之拉應力大於纖維臨界容許剪應力，纖維即被拉脫 (Pullout)，如圖 2-9b。此外，當混凝土破裂後，纖維受拉過長時，因包生比作用致其側向體積收縮，導致握裹力減少亦會加速拉脫破壞(圖 2-9a)。纖維混凝土之另外一種破壞機構為混凝土破裂後，由於纖維含量少於臨界纖維體積 (Critical Fiber Volume) 而致纖維遭受拉斷破壞，如圖 2-9c。此種破壞現象發生時，纖維所受應力雖低於臨界容許剪力強度，但卻超過纖維之抗拉強度。纖維混凝土之纖維亦會因剪力作用而破壞，如圖 2-9d，此因纖維之長寬比 (Aspect Ratio) 甚大，其抗剪面積小，對改善混凝土抗剪能力之貢獻不大。

混凝土加纖維以後，對抗壓強度、抗撓強度及坍度都有某種程度的影響。含纖體積比增加，抗壓強度亦增加，但增至某一最大值後，強度緩緩下降。雖然抗撓強度隨纖維含量之增加而增大，但其強度增加率卻有漸緩的趨勢。另外添加纖維會減損新拌混凝土的坍度，造成工作性降低，可使用減水劑 (強塑劑) 來改善提高工作性。聚丙烯纖維從早期探討不同纖維形式配比對混凝土的工程性質之影響，近期則被借重其在混凝土高溫抗爆裂的防制使用上。



**圖 2-9 骨材與水泥漿體界裂縫示意圖**

(資料來源：王天志，2003)

#### 第四節 相關研究文獻

Meyer-Ottens (1972)，歸納升溫速率影響爆裂的因素，如圖 2-10 所示。

Zhukov, V. V. (1994)，歸納試體含水量及施加應力與混凝土發生爆裂的關係，如圖 2-11 所示。

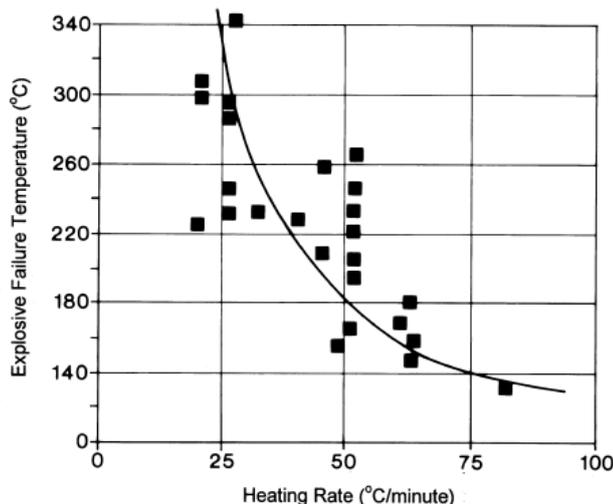


圖 2-10 升溫速率與爆裂時混凝土溫度關係圖

(資料來源：Meyer-Ottens，1972)

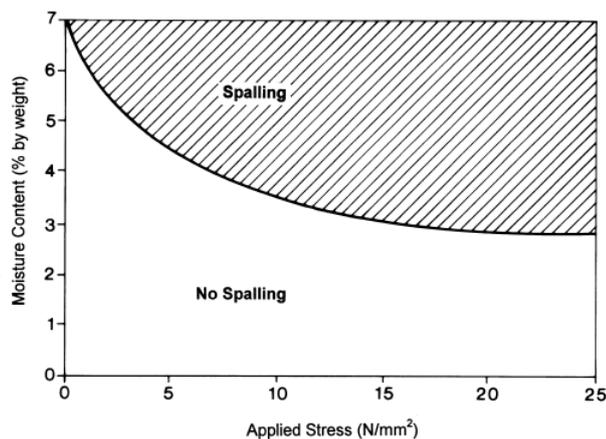


圖 2-11 試體含水量及預應力與混凝土發生爆裂關係圖

(資料來源：Zhukov, V. V.，1994)

Phan (1996) 等人針對不同強度混凝土 (混凝土齡期 400 天，試驗時抗壓強度為 47 ~ 100 MPa)，探討纖維量、升溫速率等變數的影響，結果顯示混凝土水灰比降低 (降低滲透性)，其爆裂機率會提高；聚丙烯纖維含量達 1.5 kg/m<sup>3</sup> 以上時，可有效降低蒸汽壓，避免爆裂發生；另外指出爆裂除了因為蒸汽壓的增加，混凝土熱膨脹也會提高爆裂機率。

Chan (1999) 等人針對不同強度混凝土 ( $f_c'$  為 47 ~ 128 MPa) 結果顯示一般強度混凝土含水量  $\leq 88\%$ ，無爆裂發生，超高強度混凝土含水量  $\leq 63\%$ ，才能有效抑制爆裂的發生。

陳振川（2000）針對抗壓強度約 60 MPa 的混凝土進行添加不同纖維的爆裂行為探討，結果表明添加少量聚丙烯纖維（ $0.13 \text{ kg/m}^3$ ）混凝土即無爆裂產生，與未添加聚丙烯纖維混凝土比較，兩者在試體內外溫度差異不大，但在孔隙壓力則有降低，因此孔隙壓力應為造成爆裂的主因之一。

王天志（2003）進行高性能混凝土（HPC）柱的耐火性能研究，探討不同骨材種類（矽質和碳酸鹽骨材）、纖維種類（聚丙烯纖維和鋼纖維）對耐火性能的影響，HPC 柱經 ISO 834 標準升溫曲線加熱後的結果顯示添加聚丙烯纖維（ $0.9 \text{ kg/m}^3$ ）可明顯改善爆裂行為，但添加鋼纖維（ $42 \text{ kg/m}^3$ ）改善效果不明顯。

董香軍（2006）進行纖維高性能混凝土（ $f_c'$  約為 55 ~ 65 MPa）高溫明火力學與爆裂性能研究，研究結果指出，純添加鋼纖維不但不能抑制混凝土的火災爆裂，而且隨其摻量的增加，爆裂有加劇的趨勢；而合成纖維對抑制高性能混凝土火災爆裂則具有非常出色的表現，證明了爆裂是源於蒸氣壓的機制。

梅本宗宏（2006）等人對於 100、120、150 MPa 三種強度進行混凝土爆裂的探討，結果顯示需要添加直徑  $48 \mu\text{m}$  以下、長度 10 mm 以上且體積比為 0.2 % 用量的聚丙烯纖維，才能防止混凝土的爆裂。

Bostrom（2007）等人針對抗壓強度在 73 ~ 107 MPa 高強度混凝土進行高溫試驗，結果顯示添加聚丙烯纖維可明顯減緩爆裂發生。

李其忠（2012）針對遭受火害後的混凝土柱構件利用一般 SCC 混凝土及添加聚丙烯纖維 SCC 混凝土進行表面處理修復，修復後再次進行火害試驗，研究結果顯示使用一般 SCC 混凝土修復的柱表面，發生爆裂且深度可達箍筋，影響柱的耐火性能；而使用聚丙烯纖維 SCC 混凝土修復的柱，再次受火害則無明顯爆裂發生。

Peng（2015）等人針對抗壓強度 85.5 ~ 125.8 MPa 的超高強度混凝土添加鋼纖維（ $0 \sim 120 \text{ kg/m}^3$ ），結果顯示高用量的鋼纖維（ $\geq 95 \text{ kg/m}^3$ ）能有效抑制爆裂。另外當試驗時含水量  $\leq 63\%$ ，能有效抑制爆裂的發生。

Busra（2016）等人進行抗壓強度 100 ~ 120 MPa 的超高強度混凝土添加聚丙烯纖維（0.2 % 體積比），結果顯示就可達到耐火效果，添加過多反而使強度、工作性下降且不經濟。

綜整眾多有關混凝土爆裂的研究文獻，對於混凝土爆裂機制及影響原因，以多有探討，但各文獻間的結論卻也仍有部分出入。雖然對於爆裂的危害，在很多的文獻或相關協會團體報告內均有提出警示，但明列在法規內要求的卻仍少見，目前文獻裡僅見 Eurocode 2 (2010) “Design of concrete structure – Part 1-2: general rules – structural fire design” 對混凝土爆裂防制有提出對策。

- 對保護層為 40~50 mm，可使用保護層、輕質骨材或埋入保護鋼板。
- 限制含水量小於質量的 3 %。
- 對抗壓強度介於 67~95 MPa，矽灰含量建議小於 6 % 的水泥重量。
- 對矽灰含量大於 6 % 的水泥重量，則須額外考量。
  - 使用鋼絲網
  - 須經測試通過
  - 使用超過 2 kg/m<sup>3</sup> 聚丙烯纖維

## 第三章 混凝土高溫爆裂行為實驗

### 第一節 實驗規劃

基於前述文獻回顧的爆裂機制、影響因素及防治方式，本研究旨在探討新型鋼筋混凝土結構系統所用超高強度混凝土加不同含量聚丙烯纖維及含水量對其高溫爆裂之影響，規劃高強度混凝土圓柱試體及混凝土板，進行高溫實驗研究了解其高溫爆裂之行為及抑制與改善可行方式。

本研究規劃設計及製作試體，圓柱試體抗壓強度至少為 70 MPa，纖維含量體積比（0、0.1、0.15 及 0.2%）的高流動性混凝土，試驗前不同烘乾程度（含水量），以 CNS 12514-1 標準升溫速率進行高溫爆裂試驗，試驗時紀錄試體內部溫度變化情形及觀察試體發生爆裂時之內部溫度。另外板試體在一般環境下養護後進行 CNS 12514-1 標準升溫速率進行加熱試驗，試驗時記錄板內部距加熱面不同高度的混凝土溫度、蒸汽壓力、相對濕度的變化行為及試驗後破壞模式觀察分析，最後將研究成果供後續其他實尺寸試體耐火試驗製作時參考引用。

### 第二節 試體規劃設計與製作

#### 壹、試體規劃設計

規劃製作抗壓強度至少為 70 MPa，100 \* 200 mm 圓柱試體，以 CNS 12514-1 標準升溫速率進行高溫爆裂試驗的觀察，以探討不同含量聚丙烯纖維及含水量對其高溫爆裂之影響。實驗變數為聚丙烯纖維含量：0、0.1、0.15 及 0.2%（體積比），相對濕度：10、75、100%。每批進行爆裂試驗圓柱試體會搭配埋設有熱電偶測溫線的試體，同時觀測爆裂發生時間和混凝土試體內部溫度分布情形之關係。

另外為觀測試體受熱過程，混凝土內部溫度變化、水分遷移及蒸氣壓力等隨加熱時間的變化行為，考量試驗量測元件不耐高溫影響，規劃製作板狀試體，以利於非加熱面佈設量測元件，板混凝土抗壓強度為 70 MPa，聚丙烯纖維含量分別為 0 及 0.1%（體積比），試體內部埋設相對濕度量測元件、蒸汽壓力量測元件及熱電偶測溫線，加熱時則依照 CNS 12514-1 標準升溫曲線加熱 1 小時，試驗中觀察內部溫度變化、水分遷移及蒸氣壓力等隨加熱時間的變化，同時觀測爆裂

發生時間，試驗後則量測表面爆裂深度、範圍及分布位置等資訊，以供爆裂行為研討。

綜整相關試驗條件，如表 3-1 試體規劃，表 3-2 為試體代號說明；試體製作尺寸及量測元件佈設等詳圖如圖 3-1 及 3-2 所示。

**表 3-1 試體規劃**

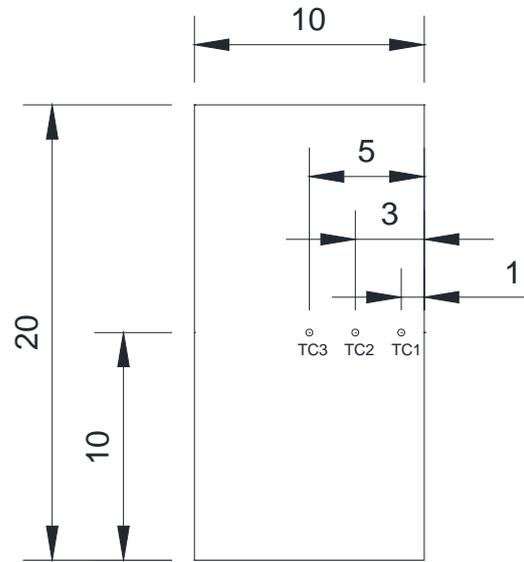
試體種類	尺寸 cm	抗壓強度 MPa	鋼筋抗拉強度 MPa	纖維含量 % 體積比	相對濕度 %	加熱速率	量測觀察項目
圓柱試體	10 × 20	70	-	0 0.1 0.15 0.2	10 75 100	依 CNS 12514-1 標準加熱曲線	爆裂時間 爆裂程度 溫度分布
板試體	140 × 155 板厚 15	70	785 等級	0 0.1	依試驗時實際含水量	依 CNS 12514-1 標準加熱曲線	相對濕度 蒸汽壓力 爆裂時間 爆裂程度 溫度分布

(資料來源：本研究整理)

**表 3-2 試體代號**

試體種類	纖維含量 % 體積比	纖維含量 代號	相對濕度 %	相對濕度 代號	試體代號說明
圓柱試體	0	00	10 75 100	D	00D：纖維含量 0%，含水量 10% 10H：纖維含量 0.1%，含水量 75% 20W：纖維含量 0.2%，含水量 100%
	0.1	10		H	
	0.15	15		W	
	0.2	20			
板試體	0	-	-	-	S00
	0.1	-	-	-	S10

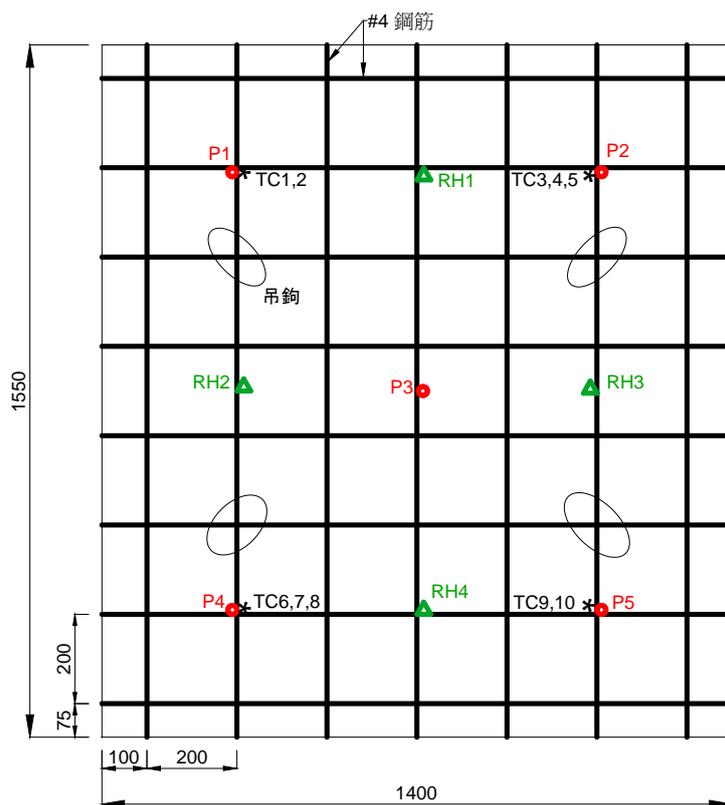
(資料來源：本研究整理)



單位：cm

**圖 3-1 圓柱試體及內部熱電偶 (TC1 ~ 3) 佈設示意圖**

(資料來源：本研究整理)



單位：mm

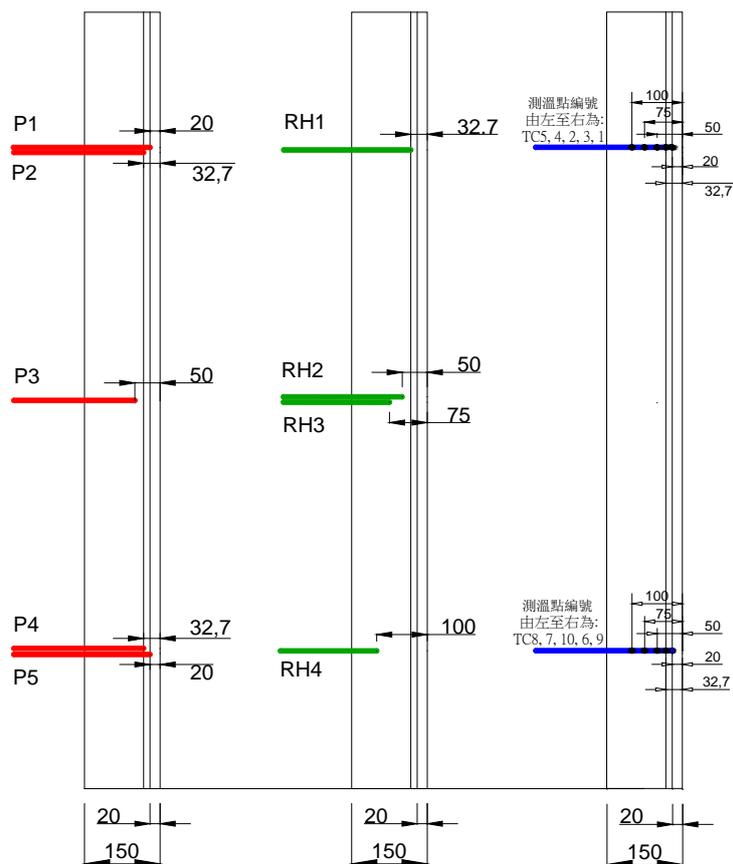


圖 3-2 板試體及量測配置示意圖

(資料來源：本研究整理)

## 貳、試體製作

圓柱試體製作程序如下：

圓柱試體尺寸為直徑 10 cm，高度為 20 cm，採用混凝土試體製作專用紙模，針對須量測試體內部溫度的試體部分，澆灌前先設置熱電偶測溫線定位安裝，包括徑向及高度位置，定位後再進行澆灌。製作圓柱試體時，無埋置熱電偶線的試體分三層澆灌，每層並予以搗實；有埋置熱電偶線的試體，則分兩層，第一層先澆灌至熱電偶高度處，搗實後繼續澆灌至試體模高度，搗實則保持位於熱電偶高度之上，避免碰觸熱電偶線，以免量測點偏移。

板試體製作程序如下：

1. 設計圖繪製。
2. 依設計圖釘製木模。
3. 依設計圖佈設高強度鋼筋 SD785 等級，保護層為 2 cm。
4. 安裝內部熱電偶至預定量測位置。
5. 安裝內部蒸氣壓力管（管頭預處理，避免灌漿時堵塞）至預定量測位置。
6. 安裝內部相對濕度預留孔（使用小木棒）至預定量測位置。
7. 預留吊裝用吊環。
8. 混凝土灌漿作業，須留意各量測點，勿擾動造成移位，同時製作抗壓強度用圓柱試體。
9. 進行混凝土養護。

本研究圓柱試體及板試體之混凝土 28 天抗壓強度均採 70 MPa 等級。經與混凝土預拌場討論設計配比，試拌後所採用之配比如表 3-3 所示，新拌混凝土之工作性如表 3-4，抗壓強度發展則如表 3-5 所示。添加聚丙烯纖維前混凝土為高流動性混凝土，預定設計坍度為 25 cm，粗粒料標稱最大粒徑為 10 mm，70 MPa 等級水灰比為 0.33，聚丙烯纖維為固利麗公司生產，纖維性質如表 3-6 所示。

本次所用配比與其他文獻資料部分相似，膠結料約 550 公斤，但水膠比略高，

且未使用飛灰料，而砂的用量也略高，粗骨材同樣採用 10 mm 以下的粒料，參照預拌廠的配比考量，骨材本身的強度(來源)為影響強度發展的一個主因。

**表 3-3 70 MPa 等級混凝土之配比**

組成材料使用量(kg/m <sup>3</sup> )					
水泥	爐石	水	粗粒料	細粒料	摻劑
290	240	173	745	920	2.8
註： 1.水灰比 W/B=0.33 2. 設計坍度 25 cm 3. 試體 28 天設計抗壓強度為 700 kgf/cm <sup>2</sup> 4. 聚丙烯纖維含量： 0、0.1、0.15 及 0.2 % (體積比) 0、0.9、1.35、1.8 kg/m <sup>3</sup> (重量)					

(資料來源：本研究整理)

**表 3-4 70 MPa 等級新拌混凝土性質**

		規定值	實測值
箱型試驗充填高度 (mm)		300 以上 (R2 障礙)	320
流動性	坍流度 (mm)	600~700	620 × 645
黏稠性	漏斗流下時間(sec)	7~20	12
	坍流度到達 500 mm 所需時間(sec)	3~15	5

(資料來源：本研究整理)

**表 3-5 70 MPa 等級混凝土之強度發展**

7 天 (kgf/cm <sup>2</sup> )		30 天 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
505	平均 551	717	平均 721
596		724	

(資料來源：本研究整理)

**表 3-6 聚丙烯纖維材料性質**

直徑	長度	長徑比	熔點	極限延伸率	抗拉強度	密度
30 $\mu\text{m}$	12 ~ 19 mm	516.6	167 $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 30 %	70 ksi	0.9 $\text{g}/\text{cm}^3$

(資料來源：本研究整理)

板試體內設有鋼筋，其保護層為 2 cm，鋼筋雙向間距皆為 20 cm，鋼筋抗拉強度採用 SD785 等級，為日本 TTK 公司進口之鋼筋，依照中華民國國家標準 CNS 2111「金屬材料拉伸試驗法」與 CNS 2112「金屬材料拉伸試驗試片」進行鋼筋拉伸試驗。鋼筋之機械性質標準如表 3-7 所示，在試驗前，將鋼筋裁切至適當長度，並使用 100 噸萬能試驗機進行試驗，以應變增加率之方式測定鋼筋抗拉強度。測試結果如表 3-8，鋼筋拉伸試驗如圖 3-3，應力應變曲線如圖 3-4。

**表 3-7 SD785 鋼筋機械性質標準**

機械性質				
降伏強度 $\text{N}/\text{mm}^2$	抗拉強度 $\text{N}/\text{mm}^2$	試片	伸長率 %	彎曲角度
785 以上	930 以上	2 號 14A 號	母材 8 以上 焊接處 5 以上	母材 180 $^{\circ}$

(資料來源：本研究整理)

**表 3-8 SD785 鋼筋拉伸試驗實測值**

機械性質與項目			降伏強度 (MPa)
鋼種	稱號	編號	
SD 785	D13	1	876.17
		2	885.22
		3	-
		平均	880.70

(資料來源：本研究整理)



圖 3-3 SD 785 鋼筋拉伸試驗

(資料來源：本研究整理)

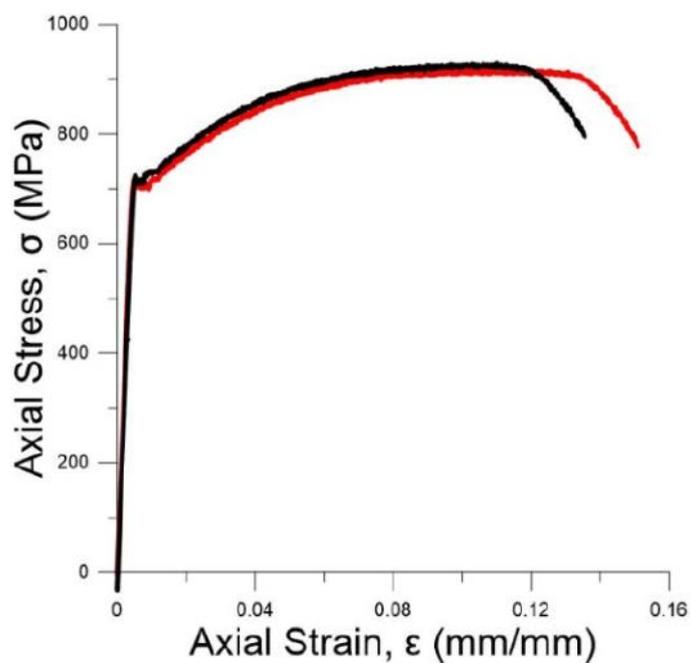


圖 3-4 SD 785 (D13) 鋼筋拉伸試驗

(資料來源：本研究整理)

依照前述試體製作過程，相關模板釘製、量測元件埋設、灌製等作業如相片所示。



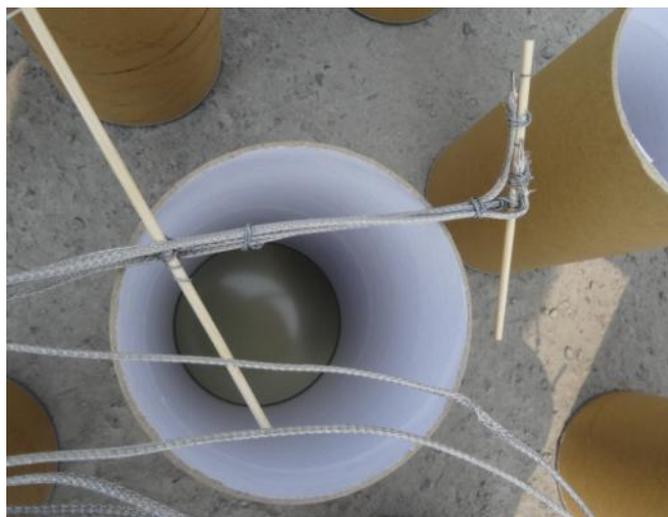
**圖 3-5 板試體模板製作**

(資料來源：本研究整理)



**圖 3-6 板試體量測元件佈設(熱電偶及壓力管)**

(資料來源：本研究整理)



**圖 3-7 圓柱試體紙模及熱電偶**

(資料來源：本研究整理)



**圖 3-8 試體灌製前場地佈設**

(資料來源：本研究整理)



**圖 3-9 新拌混凝土流動性測試儀具（箱型試驗及V漏斗）**

（資料來源：本研究整理）



**圖 3-10 新拌混凝土坍流度**

（資料來源：本研究整理）



**圖 3-11 圓柱試體製作情形**

(資料來源：本研究整理)



**圖 3-12 板試體澆灌情形**

(資料來源：本研究整理)



**圖 3-13 抗壓強度圓柱試體端部磨平處理**

(資料來源：本研究整理)



**圖 3-14 板試體製作完成**

(資料來源：本研究整理)

### 參、量測元件

本研究於圓柱試體，主要量測溫度分布，因此所用量測元件為熱電偶測溫線，型號為K-type，線徑為0.5 mm。而對於版試體，除了量測溫度分佈外，還量測蒸汽壓力及水分變化，所用量測元件為壓力計及濕度計。量測壓力部分，預埋入混

凝土的為採樣管，外徑為3.6 mm，內徑為1 mm，材質為不鏽鋼。將蒸氣壓力採樣導引至非曝火面外與壓力計連接量測，壓力計壓力量測範圍為0 ~ 40 bar。



圖 3-15 壓力感測元件

(資料來源：本研究整理)

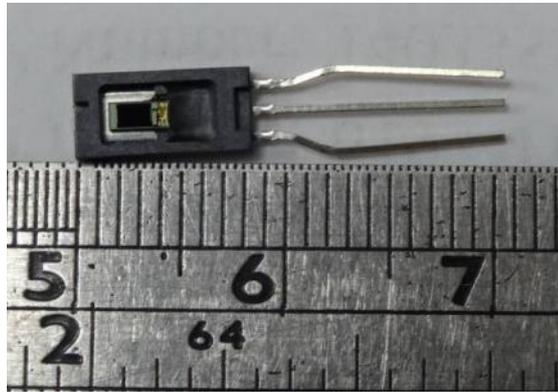
板試體水分變化量測用的濕度計，因需要置入混凝土內部量測，在選用及試驗設計上考慮較多，主要考慮有元件多不耐高溫及不適於新拌混凝土澆製包覆，因此於試體製作時先以直徑相仿的小木棒預埋，混凝土凝固後，再將小木棒鑽除留出孔洞，最後再將濕度感測元件置入孔洞，並將洞口密封，隔絕孔洞與大氣流通，以量測混凝土之濕度。另外，考量元件大小、經費與適用性，選用之濕度元件規格如下，取其輸出電壓與 %RH 的比值接近線性容易使用，工作溫度範圍寬廣，響應時間快等優點：

- ◎ 感應器類型：電容式感應器
- ◎ 濕度範圍：0 ~ 100 %RH
- ◎ 電源、電流：DC4 V ~ 5.8 V、200 uA
- ◎ 精度：±3.5 %RH
- ◎ 響應時間：5 s
- ◎ 輸出電壓與%RH 的比值近線性
- ◎ Voltage output (1st order curve fit)：

$$V_{OUT}=(V_{SUPPLY})(0.0062(\text{sensor RH}) + 0.16), \text{ typical at } 25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

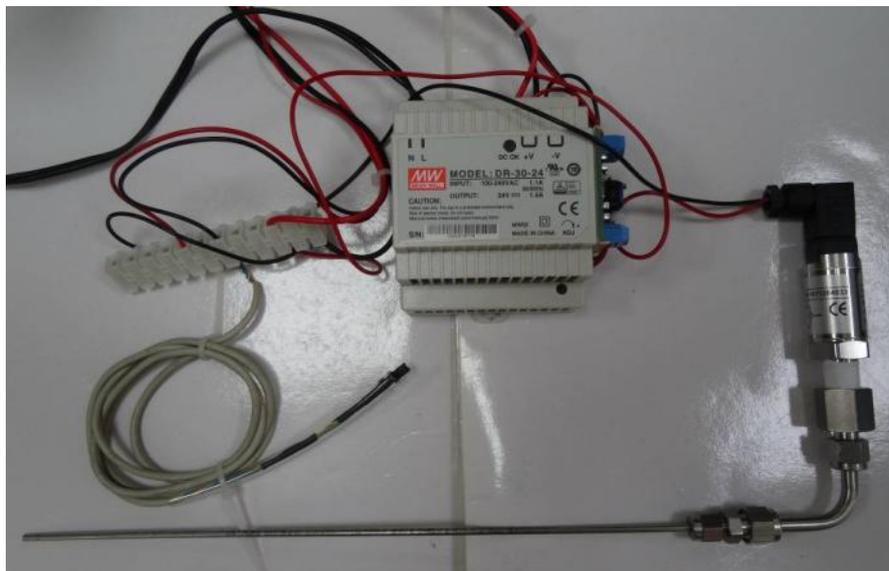
◎ 工作溫度：-40 ~ 85 °C

因濕度元件工作溫度範圍最高也只好到 85 C，考量混凝土內部升溫較慢，且濕度元件埋入深度不同，因此所受溫度影響時間也不同，在元件因高溫失效前，應仍可量測到內部濕度隨加熱過程的變化。



**圖 3-16 HIH-4000 濕度感測元件**

(資料來源：本研究整理)



**圖 3-17 濕度和壓力量測系統**

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 實驗設備

本研究實驗包含兩類進行，第一類為針對圓柱試體，第二類為針對板試體。圓柱試體含水量使用烘箱進行調節，達到預定含水量後再進行高溫試驗。板試體及圓柱試體試驗利用本所防火實驗中心之小型多功能耐火試驗爐進行加熱試驗，如圖 3-18 所示，爐內淨空間為 120 cm × 120 cm × 115 cm(高)；加溫設備以數位控制方式，模擬 CNS 12514-1 標準升溫曲線之升溫速率及溫度，並藉由加溫爐兩側之噴火孔以雙向對流形式使爐內溫度均勻分佈，同時利用噴火孔之空氣進氣及排氣風門來進行爐壓控制。試驗時將爐頂蓋版卸除，改將板試體覆蓋上去，試驗時板試體下方為曝火面，進行加熱及爆裂行為觀測。



**圖 3-18 小型多功能耐火試驗爐設備圖**

(資料來源：本研究整理)

## 第四節 實驗步驟

為瞭解新型高強度混凝土高溫爆裂行為，及考量多數量測元件不適用於高溫環境下，本研究實驗分成兩類實驗進行，第一類為針對圓柱試體，進行探討添加不同含量聚丙烯纖維及含水量對其高溫爆裂之影響，第二類為針對板試體，進行探討不同含量聚丙烯纖維的超高強度混凝土受高溫內部蒸汽壓力及水分遷移之變化，試驗後並觀測其受熱面之爆裂情形及程度。詳細實驗步驟如下：

### 壹、圓柱試體高溫試驗

本項探討添加不同含量聚丙烯纖維及含水量對其高溫爆裂之影響，不同含量纖維已於試體澆製時添加，不同含水量之調控，100 %面乾飽和試體則將試體浸入水中使其吸水飽和，直至試驗前才取出試驗。10 %乾燥試體則將試體置入 105 °C 烘箱烘乾，直至試驗前才取出試驗，而 75 % 乾燥試體，則於烘乾過程持續以埋入的相對濕度量測元件進行量測，紀錄其內部相對濕度變化，待達到所需相對濕度則停止烘乾，並以密封袋保存。進行高溫試驗時，以 CNS 12514-1 標準升溫速率加熱，加熱過程記錄爐溫及試體內部不同徑向位置的溫度變化，並觀測紀錄試體爆裂發生的時間，以與當下的混凝土溫度進行比對。

### 貳、板試體高溫試驗

本項主要探討兩種不同聚丙烯纖維含量的超高強度混凝土的抗爆裂性及其加熱過程混凝土內部的蒸汽壓力及水分遷移之變化行為，兩種試體聚丙烯纖維含量分別為 0 及 0.1 % 體積比，兩試體養護及置放的環境皆相同，試驗時會量測記錄其初始內部相對濕度狀態。其高溫試驗加熱係依據 CNS 12514-1 規定，加熱試驗步驟如下所示：

#### 1. 試驗開始前

於試驗開始前 5 分鐘內，記錄熱電偶之初始值，並檢查一致性；此外，爐內溫度需小於 50 °C 及室內氣溫須在 25±15 °C 範圍之內。

#### 2. 試驗過程

試驗開始之際，試體內部初始平均溫度和非加熱面溫度須與初始室內溫度相差 5 °C 範圍內，並依標準加熱溫度-時間曲線進行加熱試驗，其加熱函數為

$$T=345\log_{10}(8t+1)+20$$

式中 T = 平均爐內溫度 (°C)

t = 實驗經過時間 (分)

依函數式可得標準加溫曲線—時間曲線 (以下簡稱標準曲線), 如圖 3-12 所示。實驗溫度時間曲線許可差 (de) 如下列數值所規定。但對於含有大量可燃物質、材料之試體, 若確認可燃成分突然著火燃燒以致平均爐內溫度增加異常情形不超過 10 分鐘, 得不受此限。

- (1)  $5 < t < 10$      $de \leq 15\%$
- (2)  $10 < t \leq 30$      $de = 15 - 0.5(t - 10)\%$
- (3)  $30 < t \leq 60$      $de = 5 - 0.083(t - 30)\%$
- (4)  $60 < t$      $de = 2.5\%$

式中,  $de = \frac{A - A_s}{A_s} \times 100$

A = 實際實驗平均溫度-時間曲線以下面積 (°C, 分)

A<sub>s</sub> = 標準加熱溫度-時間曲線以下面積 (°C, 分)

面積計算方法, 在 (1) 之間隔不超過 1 分鐘, 在 (2)、(3)、(4) 之間隔不超過 5 分鐘情形下將面積相加合計。

在實驗初期 10 分鐘以後之任何時間, 任一爐內溫度熱電偶所測得溫度與標準曲線對應溫度不得大於 ±100 °C, 對於含有顯著數量可燃材料之試體, 當超出偏差可清楚地被鑑定為是由明顯數量的可燃材料突然引燃增加了平均爐內溫度, 超出許可差時間不得持續超過 10 min。本研究預定加熱時間為 1 小時。

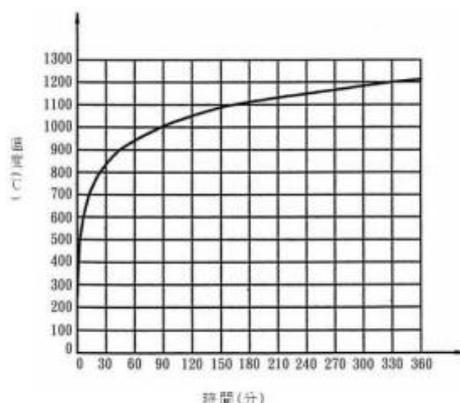


圖 3-19 CNS 12514-1 標準升溫曲線

(資料來源: CNS 12514-1)

### 3. 量測與觀察

試體在整個試驗中之溫度、蒸氣壓力和含水量變化須加以記錄；所有量測數據在試驗期間應每隔不超過 1 分鐘即量測一次，試驗過程觀察及記錄試體曝火面爆裂情形及發生時間點，試驗結束後，須觀察並記錄試體曝火面之爆裂範圍及程度，以與量測之試體內部溫度、蒸氣壓力和相對濕度之關係進行探討。



## 第四章 實驗結果與討論

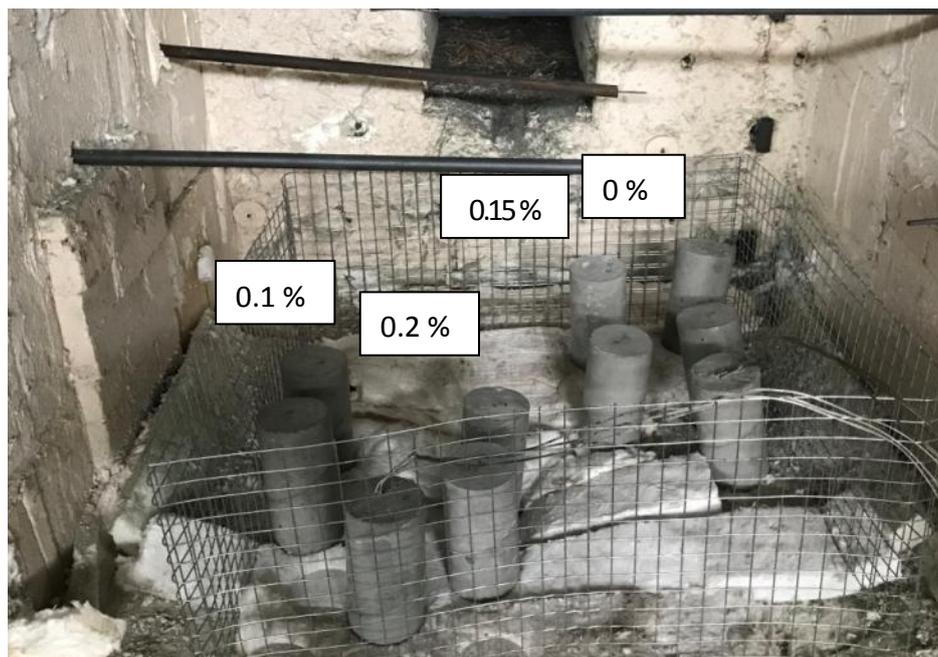
新型高強度混凝土，係為國內混凝土研發的新課題之一，各種面向包括材料研發、構件行為研究、結構分析、結構耐震、設計與施工、材料檢驗及相關各種法規的制修訂，皆為需要完整研討。另外，此等超高強度的混凝土及鋼筋材料，其高溫下的性能更是後續推廣上不可或缺的一環。本研究圓柱試體及板試體高溫爆裂行為實驗結果與討論，依序詳述如下。

### 第一節 圓柱試體高溫爆裂行為

圓柱試體依第三章試體規劃澆灌製作完成後，先以濕置養護 28 天後，再依試驗所需相對濕度進行調濕。相對溼度 100 % 試體為持續濕置，直至試驗前才取出置入高溫試驗爐。相對溼度 0 % 試體為將濕置試體取出置入 105 % 烘箱，直至試驗前一天取出靜置冷卻至常溫後進行試驗。而相對溼度 75 % 試體為將濕置試體取出置入 105 % 烘箱，則需每隔一段時間量測其相對濕度，待其達到 75 % 時則取出烘箱，待試體稍微冷卻後放入密封袋保存，並於試驗前才置入高溫試驗爐。

圓柱試體高溫爆裂行為依第三章第四節實驗步驟進行，高溫試驗時，以 CNS 12514-1 標準升溫速率加熱，加熱過程記錄爐溫及試體內部不同徑向位置的溫度變化，並觀測紀錄試體爆裂發生的時間，以與當下的混凝土溫度進行比對。試體實驗分兩次進行，持續烘乾的試體試驗前相對濕度實際值為 10 %，另兩組試體相對濕度則為 75 % 及 100 %。

兩次試驗過程的爐內升溫曲線、試體內部溫度曲線及試驗前、後試體外觀，則分別如圖 4-1~12 及表 4-1 所示。



**圖 4-1 試體 (4 種纖維含量, 相對濕度 10 %) 實驗前狀態**

(資料來源：本研究整理)



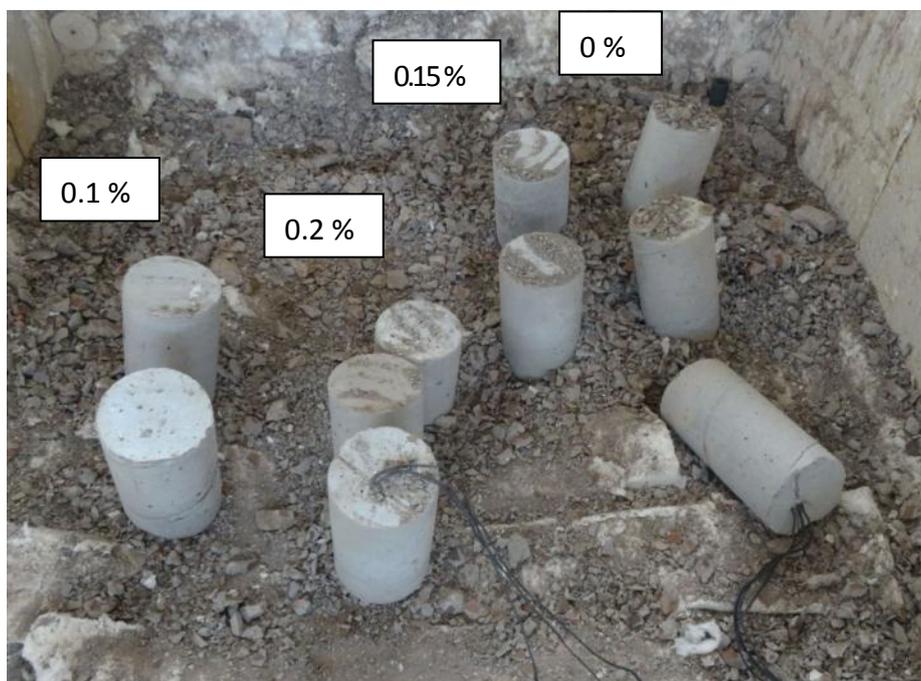
**圖 4-2 試體四周以鐵絲網防止爆裂損壞試驗爐**

(資料來源：本研究整理)



**圖 4-3 圓柱試體加熱過程情形**

(資料來源：本研究整理)



**圖 4-4 試體 (4 種纖維含量，相對濕度 10 %) 實驗後狀態**

(資料來源：本研究整理)

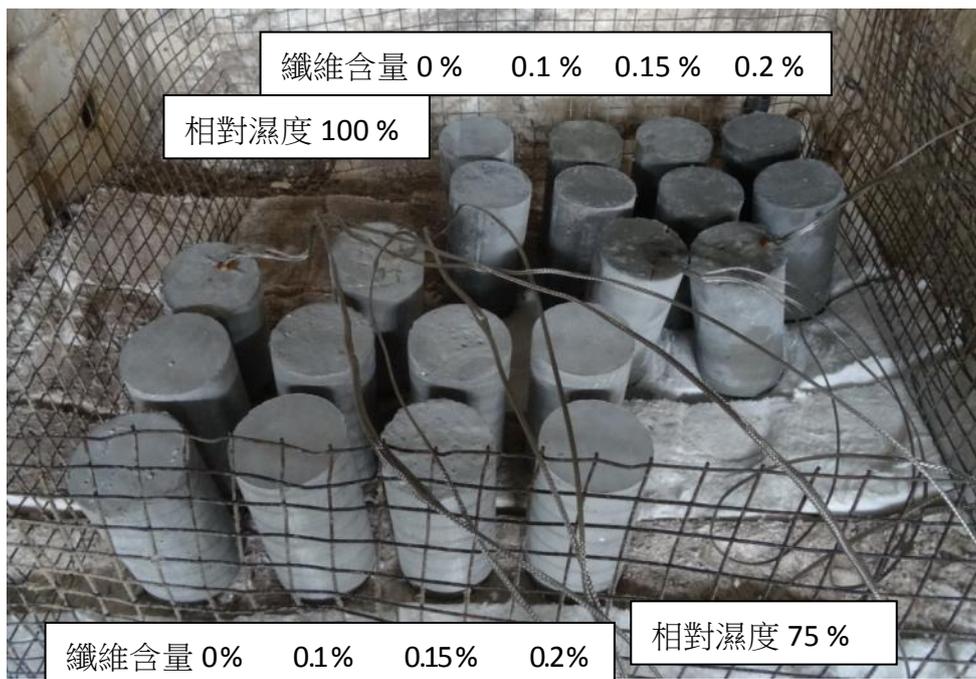


圖 4-5 試體（4 種纖維含量，相對濕度 100、75 %）實驗前狀態

（資料來源：本研究整理）

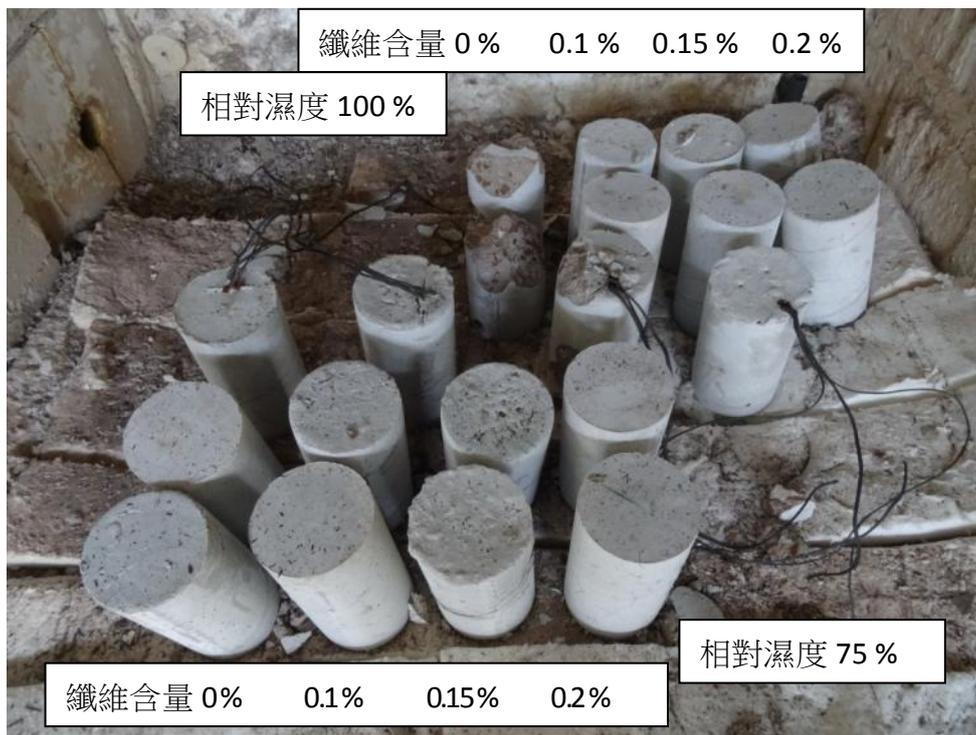


圖 4-6 試體（4 種纖維含量，相對濕度 100、75 %）實驗後狀態

（資料來源：本研究整理）



圖 4-7 試體 00W (纖維含量 0 %，相對濕度 100 %) 實驗後狀態

(資料來源：本研究整理)

表 4-1 圓柱試體加熱後外觀情形

相對濕度	纖維含量			
	0 %	0.1 %	0.15 %	0.2 %
10 %				
75 %				
100 %				

(資料來源：本研究整理)

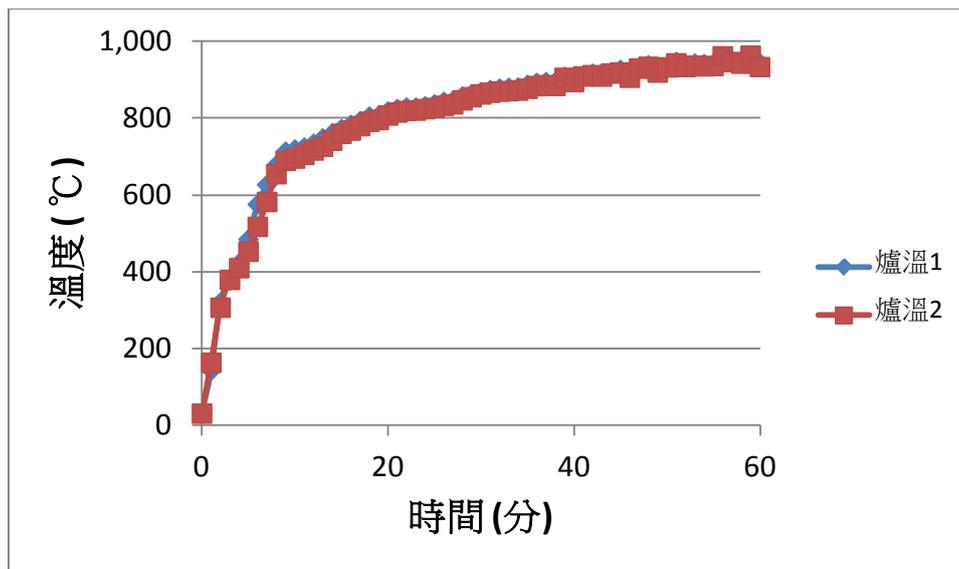


圖 4-8 試體 (相對濕度 10 %) 爐內加熱升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

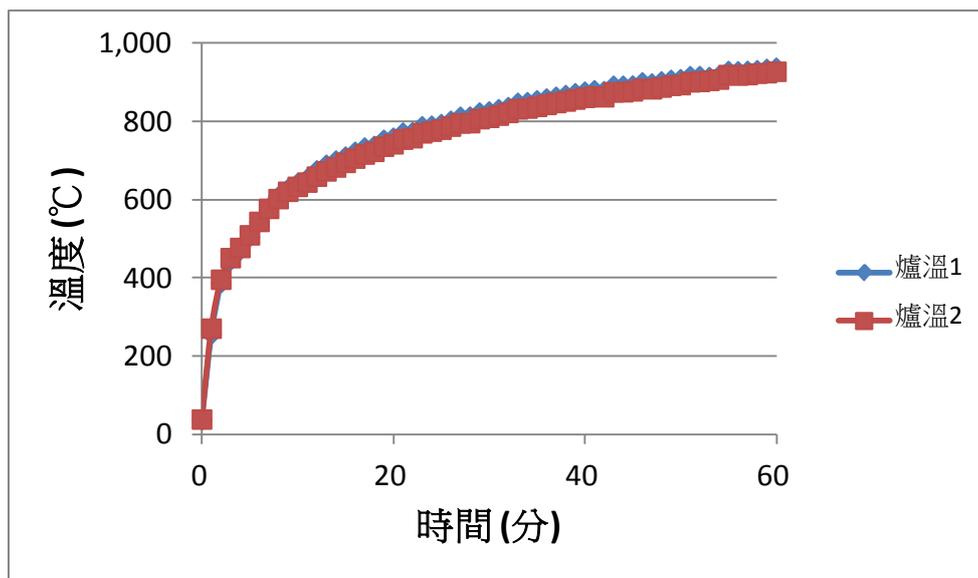


圖 4-9 試體 (相對濕度 100、75 %) 爐內加熱升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

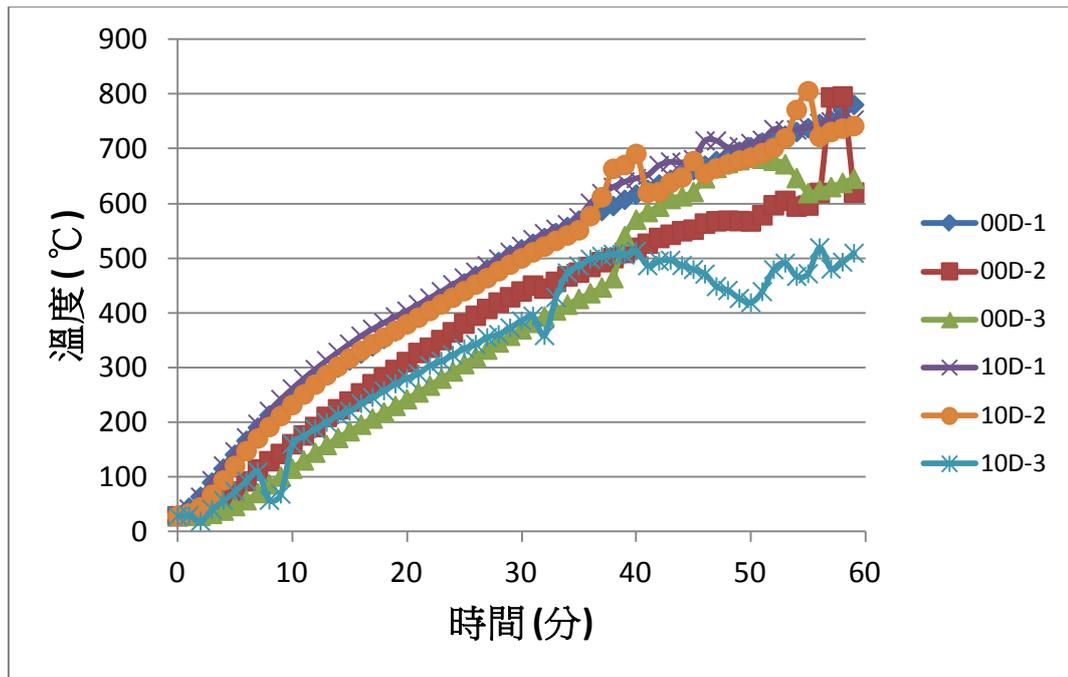


圖 4-10 試體 (相對濕度 10 %) 內部升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

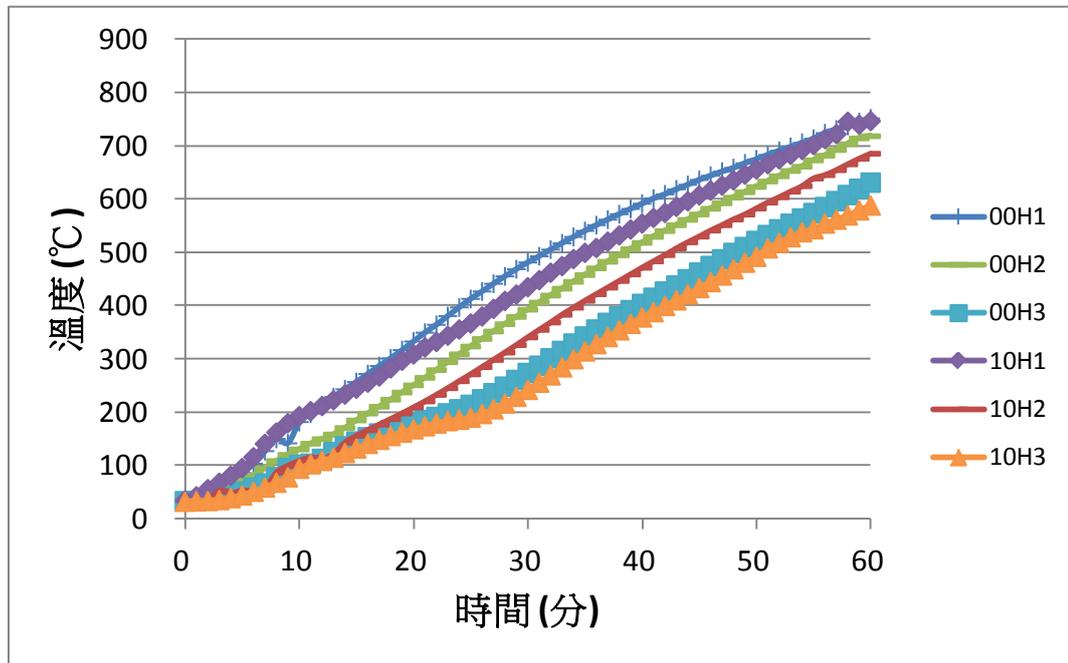


圖 4-11 試體 (相對濕度 75 %) 內部升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

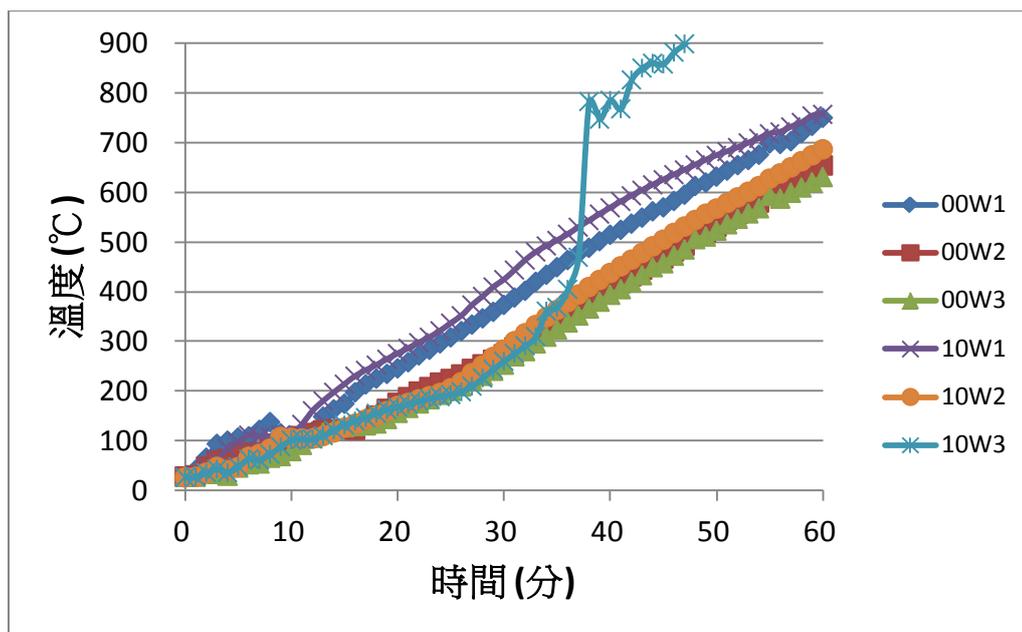


圖 4-12 試體 (相對濕度 100 %) 內部升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

針對圓柱試體探討添加不同含量聚丙烯纖維及含水量對其高溫爆裂之影響，實驗結果如以上圖表所示。對於各種不同條件之試驗有頗為令人意外的結果，總的來說，如表 4-1 所示，在 4 種纖維含量，3 種相對濕度的條件下，在依 CNS 12514-1 的快速升溫加熱下，僅有無添加纖維、相對濕度 100 % 的圓柱試體發生爆裂，另外的 11 種條件組合之圓柱試體，皆無發生爆裂的現象。對照後續板試體之試驗結果，於本研究條件下，試體內部相對濕度對爆裂的影響不明顯，但添加纖維對爆裂卻有很明顯的改善，於本試驗有添加纖維的試體，全部無爆裂發生，即使在高相對濕度條件下。

圓柱試體加熱過程內部升溫曲線如圖 4-10~12 所示，3 種相對濕度的試體內部溫度，有類似的升溫過程，因加熱為快速升溫，且試體尺度較小為 10 \* 20 公分，試體內部約加熱開始 2~3 分鐘溫度已開始上升，最終試體靠近表面 1 公分處的溫度均約在 750 °C 左右 (爐溫為 945 °C)，與爐溫溫差約 200 °C，而試體中心點溫度則約在 600~650 °C 之間，與爐溫溫差約 300~350 °C。

試體初始相對濕度的差異對升溫的影響，由 3 種相對濕度的試體內部溫度可以看出，相對濕度 10 % 的試體其升溫是一路的隨爐溫一直上升，而相對濕度 75 及 100 % 的試體，在升溫到 100 °C 時，有在文獻上常見的持溫段，因試體內部較多的水分吸收大量的熱，造成溫度的持平，而此溫度的持平現象，相對濕度 100 % 的試體又比相對濕度 75 % 的試體來的明顯且時間較長。

所有試體只有無添加纖維、相對濕度 100 % 的圓柱試體發生爆裂，試驗觀察爆裂發生約在 14~16 分鐘時發生，對照該組試體的升溫曲線，爆裂發生時的溫度約在試體內部水分吸熱接近完成，試體已開始從 100 °C 再往上增加，此時內部蒸氣壓增加，造成試體的爆裂。

## 第二節 板試體高溫爆裂行為

本項主要探討兩種不同聚丙烯纖維含量 0 及 0.1 % 體積比的超高強度混凝土的抗爆裂性及其加熱過程混凝土內部的蒸汽壓力及水分遷移之變化行為。

板試體依第三章第二節試體規劃澆灌製作完成，1 週後拆除模板，直接置放於地板上存放，於大氣中養護直至試驗，兩試體養護及置放的環境皆相同。因試體係為直接置放於地板，因此其水分僅有上表面可自由散失，使試體內部仍有較高的相對濕度，試驗前量測記錄其內部初始相對濕度。高溫爆裂行為依第三章第四節實驗步驟進行，高溫試驗時，以 CNS 12514-1 標準升溫速率加熱，加熱過程紀錄高溫爐溫及試體內部距曝火面不同高度位置的溫度變化、蒸氣壓力和相對濕度變化及試體非曝火面的現象變化。

### 壹、板試體 S00

試驗前試體 S00 量測其內部初始相對濕度，約在 86~97 %。加熱過程高溫爐溫及試體內部距曝火面不同高度位置的溫度變化、蒸氣壓力和相對濕度變化及試體加熱前後情形如圖 4-13~25 及表 4-2 所示。

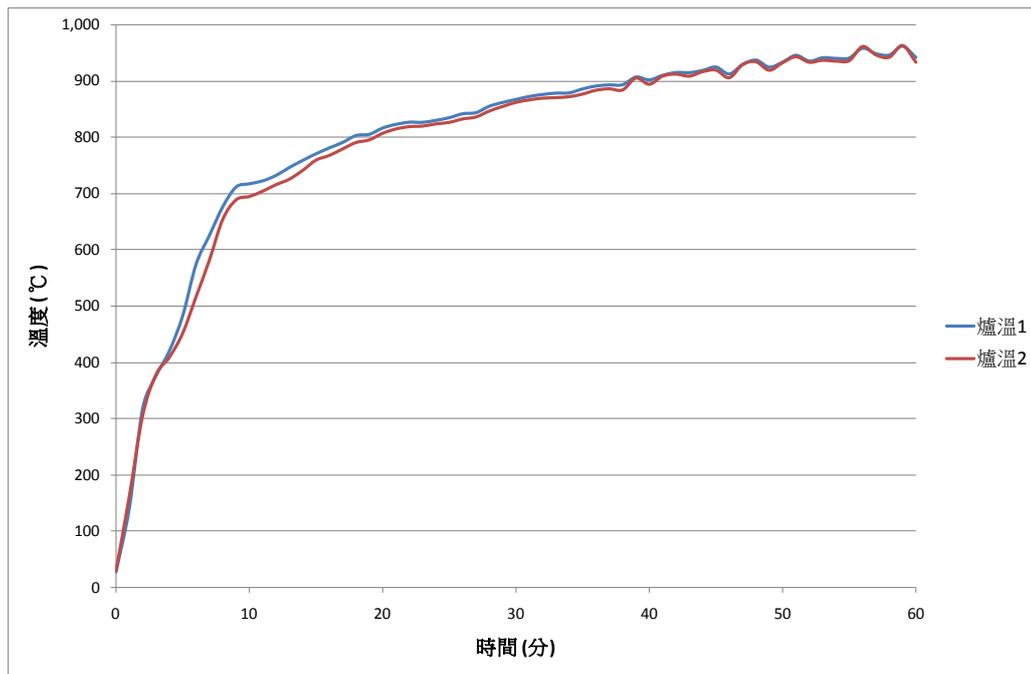


圖 4-13 試體S00 爐內加熱升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

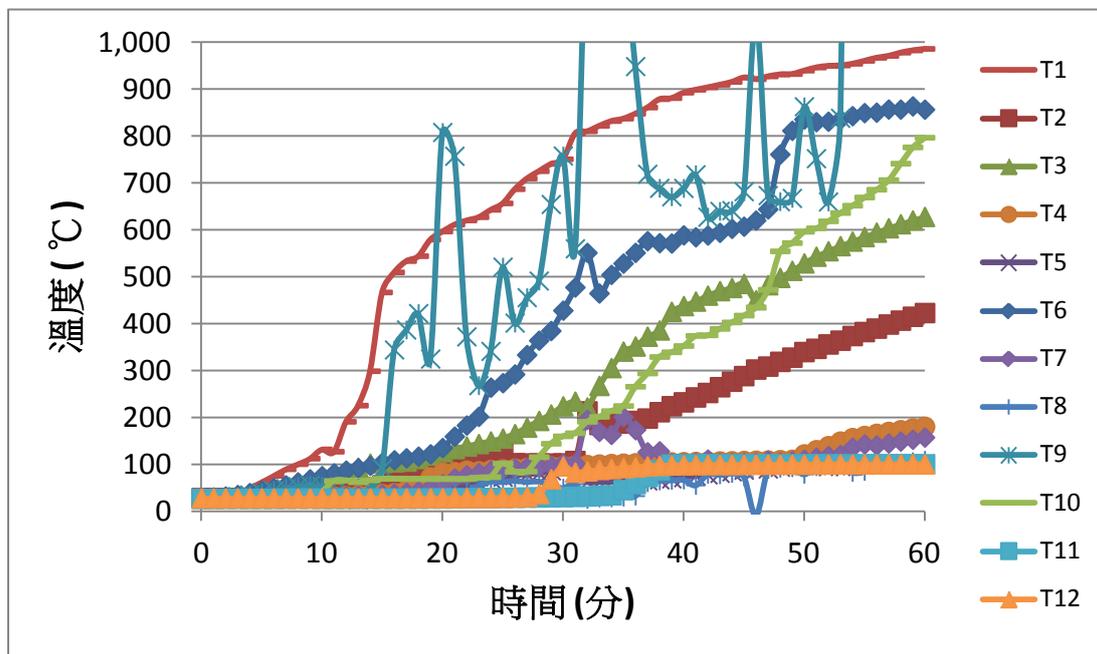


圖 4-14 試體S00 內部升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

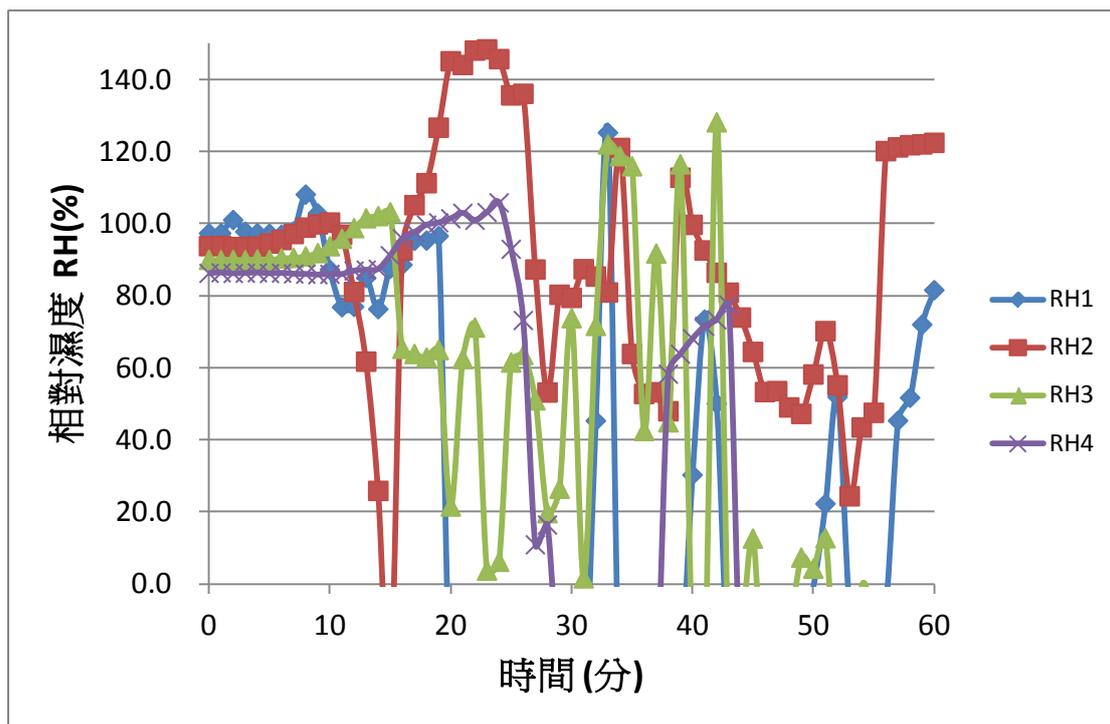


圖 4-15 試體S00 內部相對濕度變化曲線

(資料來源：本研究整理)

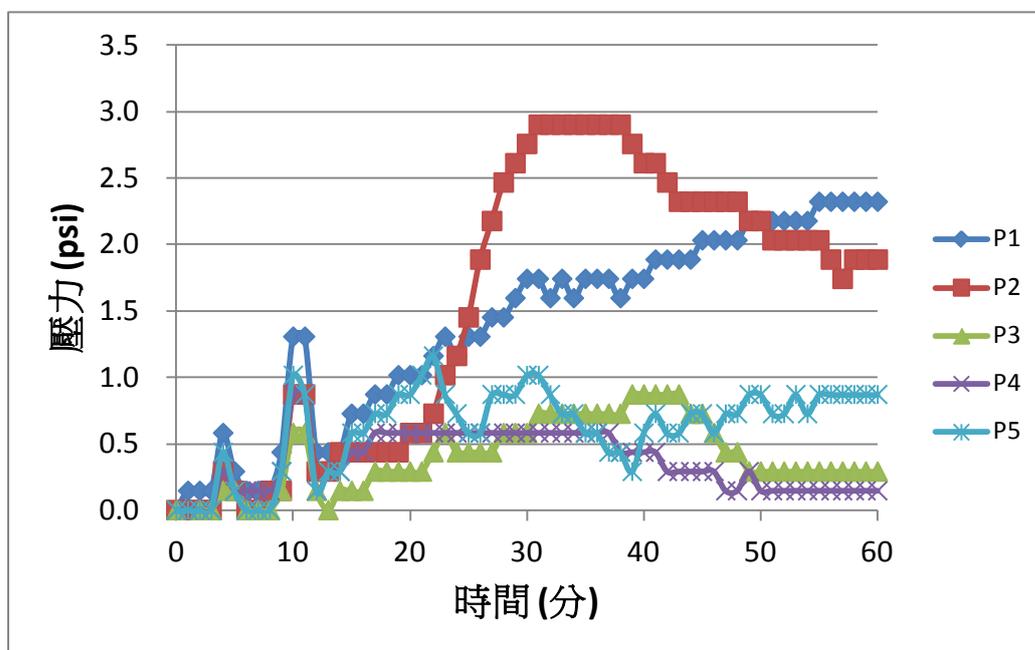


圖 4-16 試體S00 內部壓力變化曲線

(資料來源：本研究整理)



**圖 4-17 試體S00 試驗前非曝火面及量測配置**

(資料來源：本研究整理)



**圖 4-18 試體S00 試驗前曝火面**

(資料來源：本研究整理)



圖 4-19 試體S00 試驗中非曝火面情形

(資料來源：本研究整理)

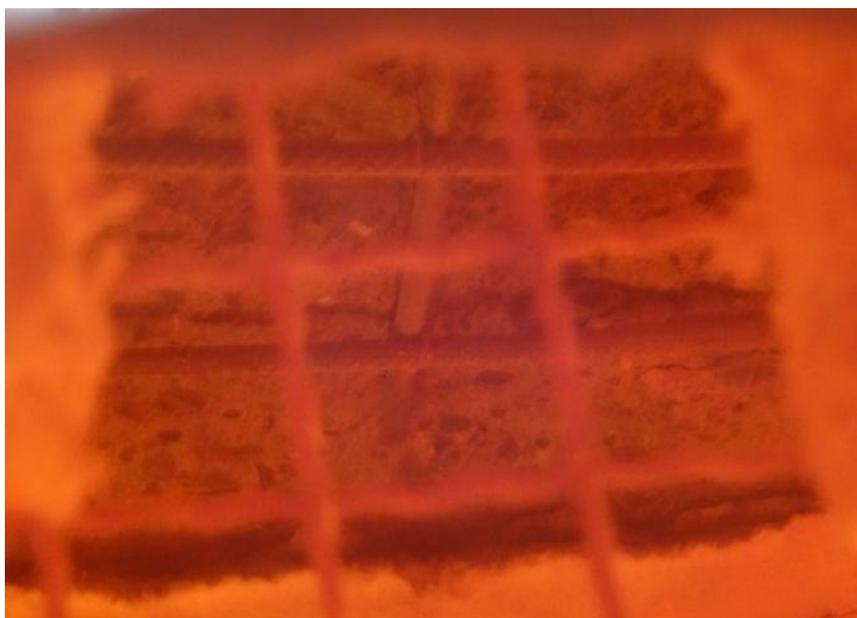


圖 4-20 試體S00 試驗中曝火面爆裂嚴重，鋼筋外露（加熱時間 35 分鐘時）

(資料來源：本研究整理)



**圖 4-21 試體S00 試驗後，爐內佈滿爆裂剝落的混凝土碎塊**

(資料來源：本研究整理)



**圖 4-22 試體S00 試驗後非曝火面**

(資料來源：本研究整理)



圖 4-23 試體S00 試驗後曝火面

(資料來源：本研究整理)

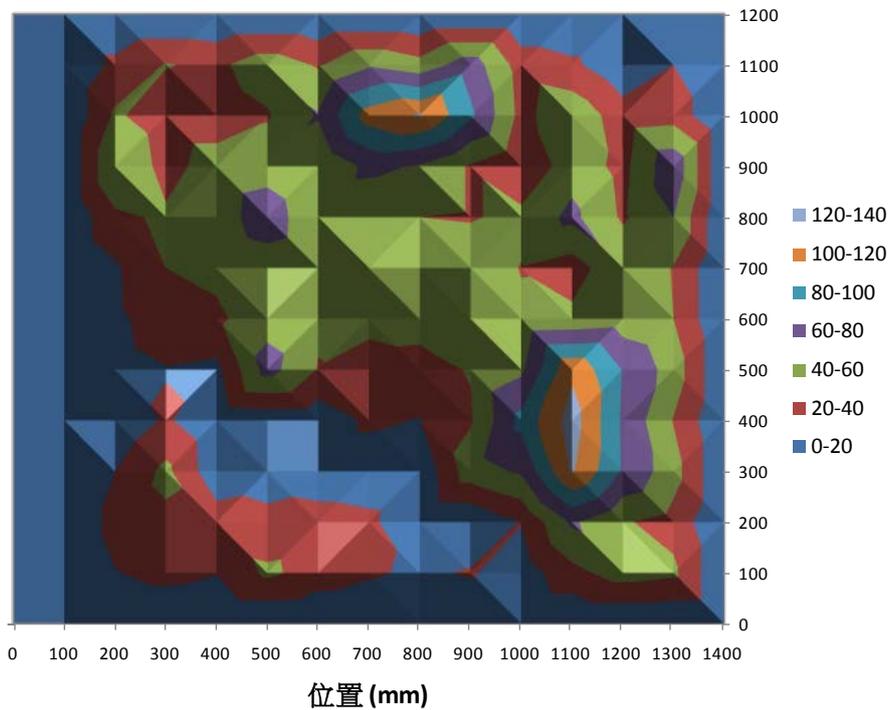


圖 4-24 試體S00 試驗後曝火面爆裂範圍及深度 (平視圖)

(資料來源：本研究整理)

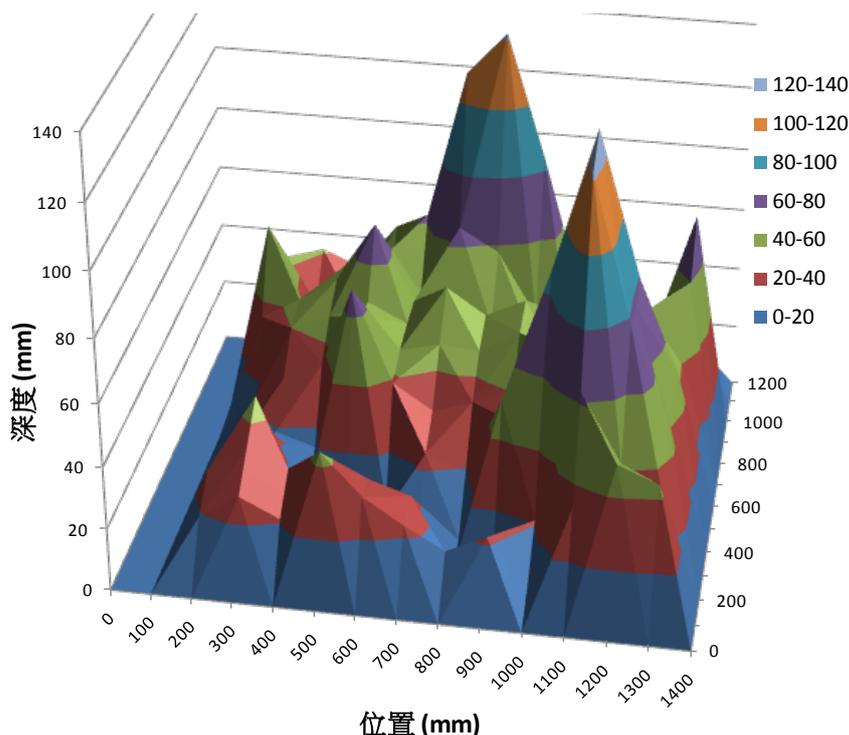


圖 4-25 試體S00 試驗後曝火面爆裂範圍及深度 (立體圖)

(資料來源：本研究整理)

表 4-2 板試體S00 加熱過程現象紀錄

時間 (分)	加熱過程現象
0	點火，加熱試驗開始
5	爐內試體曝火面開始有爆裂剝落發生
10	爐內試體曝火面有猛烈的爆裂剝落發生
15	試體非曝火面，壓力計 P5 及吊勾邊開始有水分滲出
18	試體東南角開裂且有水汽冒出
20	爐內試體曝火面已可見鋼筋露出
25	試體非曝火面，水分從量測元件處及裂縫處滲出
30	爐內試體曝火面爆裂剝落持續發生
45	爐內試體曝火面鋼筋已變紅
52	爐內試體曝火面爆裂剝落減緩，部分爆裂產生的水汽由試體非曝火面衝出
60	熄火，加熱試驗結束

(資料來源：本研究整理)

板試體 S00 的試驗結果及試驗觀察如以上圖表所示。爐溫依循 CNS 12514-1 快速升溫，板試體內部溫度約從加熱開始 5 分鐘後開始上升，但因試體曝火面此時也開始有爆裂剝落發生，開始從表面往試體內部爆裂，造成試體內部溫度的量測有較大的變異發生，但仍有趨勢可供觀察。試驗結束時，試體保護層下方溫度平均約在 900 °C，照對試體保護幾乎皆已剝落，此所受溫度等同爐溫，且鋼筋幾乎全部已直接曝火。另試體內部距曝火面 10 公分處溫度平均約為 104 °C，而試體非曝火面表面溫度則保持在 100 °C。

由圖 4-15 觀察可知試體內部水分的遷移情形，其內部初始相對濕度，約在 86~97 %，因試體曝火面從加熱開始 5 分鐘後開始有爆裂剝落發生，造成距試體表面 3.27 公分 (RH1) 及 5 公分 (RH2) 處的相對濕度量測元件也約在 5 分鐘後開始上升直至相對濕度達 100 %，RH1 約在 8 分鐘後開始下降，代表此處的飽和水分已開始往更內側的混凝土移動，而 RH2 則約在 10 分鐘後開始下降，距試體表面 7.5 公分的 RH3，約在 7 分鐘相對濕度開始上升，上升速率較 RH1 及 RH2 緩慢，約在 15 分鐘達到最大值並開始下降，距試體表面 10 公分的 RH4，約在 14 分鐘相對濕度開始上升，上升速率同樣較 RH1 及 RH2 緩慢，約在 24 分鐘達到最大值並開始下降。而從試體非曝火面表面觀察，水分從加熱 15 分鐘後開始滲出，此時間約為 RH3 達到最大值時，但因水分係從預埋元件邊滲出，因此表面水分的出現較早，而試體內部此時水分的遷移，約已達試體厚度的一半，並持續往非曝火面遷移。加熱時間 25 分鐘之後的量測元件，因試體內部溫度多已超過 85 °C，高過相對濕度元件的最高工作溫度範圍，元件可能已損壞，後續的數值因此不予參考。

由圖 4-16 觀察可知試體內部壓力的變化情形，試體內部壓力在約 5 分鐘時有一突起，然後快速下降，對照試體曝火面從加熱開始 5 分鐘後開始有爆裂剝落發生，推測應為表面爆裂造成壓力的下降，另外從試體內部溫度分布可知，此時溫度尚未超過 100 °C，此壓力的來源推測部分可能為內部水分進入探測管內擠壓造成。壓力在約 10 分鐘時又有一快速突起，然後快速下降，此時試體曝火面

有猛烈爆裂的影響。因試體曝火表面持續不斷的爆裂剝落，造成試體壓力的累積不易，試驗過程壓力最大值約為 3 psi。

試驗後觀察試體曝火面爆裂剝落嚴重，如圖 4-20~25 所示。整個曝火區域均有程度不同的爆裂剝落，保護層幾乎全部有剝落，超過 3/4 的面積爆裂到保護層後方，剝落深度超過 3 公分以上，約有 10 % 的面積甚至爆裂深度超過 10 公分，最深處達 13 公分，對照試體厚度 15 公分，幾乎已快貫穿試體，因此在加熱後期的部分爆裂，其爆裂氣體甚至從試體非曝火表面竄出。

## 貳、板試體 S10

試驗前試體 S10 量測其內部初始相對濕度，約在 86~90 %。加熱過程高溫爐爐溫及試體內部距曝火面不同高度位置的溫度變化、蒸氣壓力和相對濕度變化及試體加熱前後情形如圖 4-26~35 及表 4-3 所示。

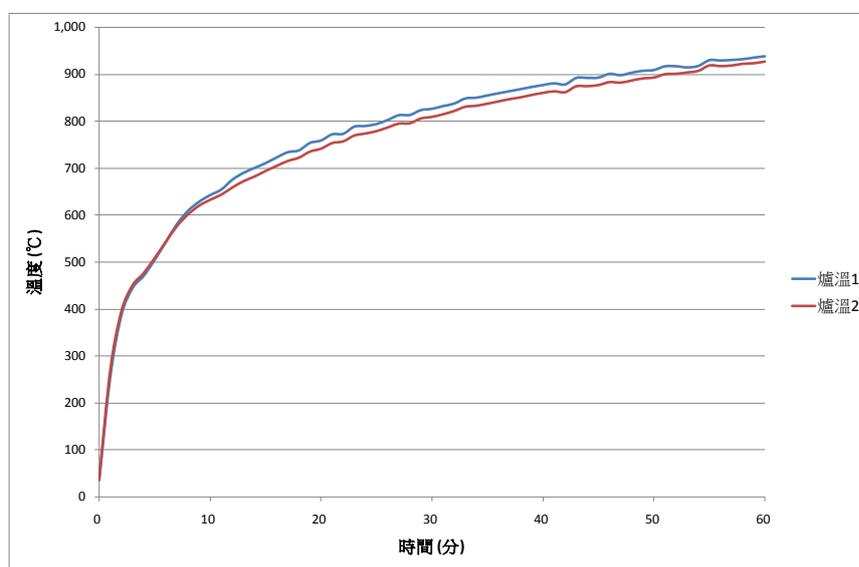


圖 4-26 試體S10 爐內加熱升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

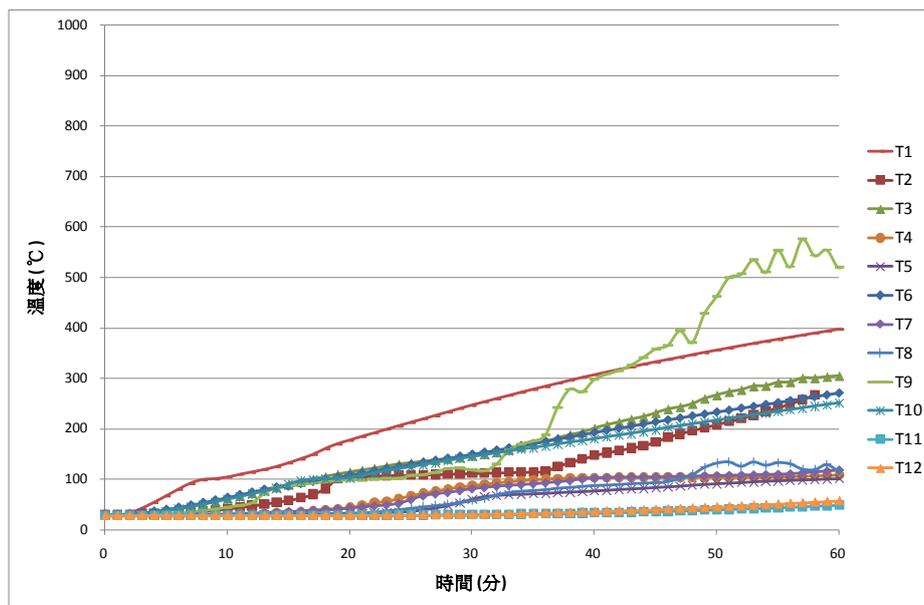


圖 4-27 試體S10 內部升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

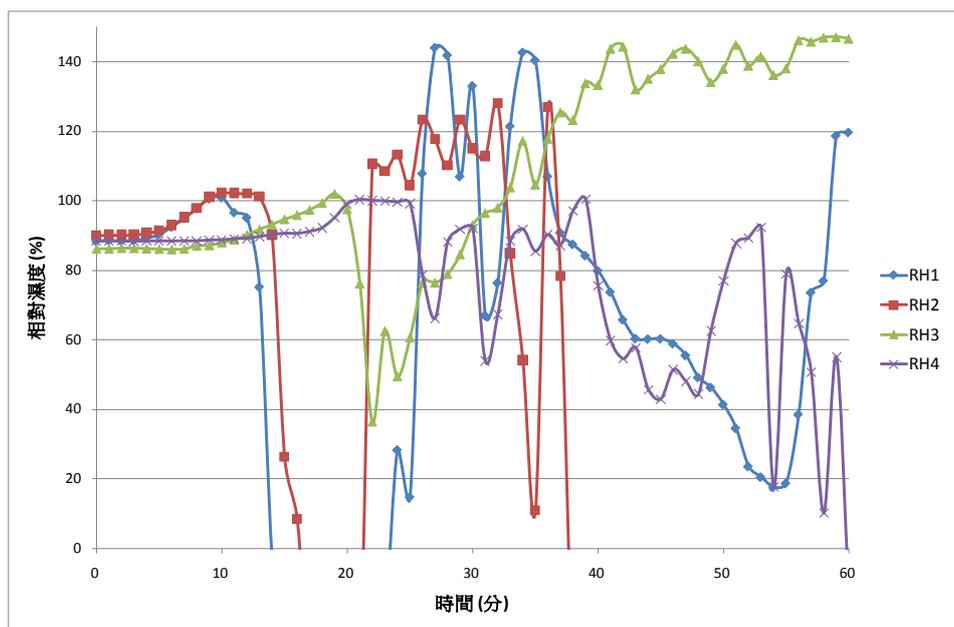


圖 4-28 試體S10 內部相對濕度變化曲線

(資料來源：本研究整理)

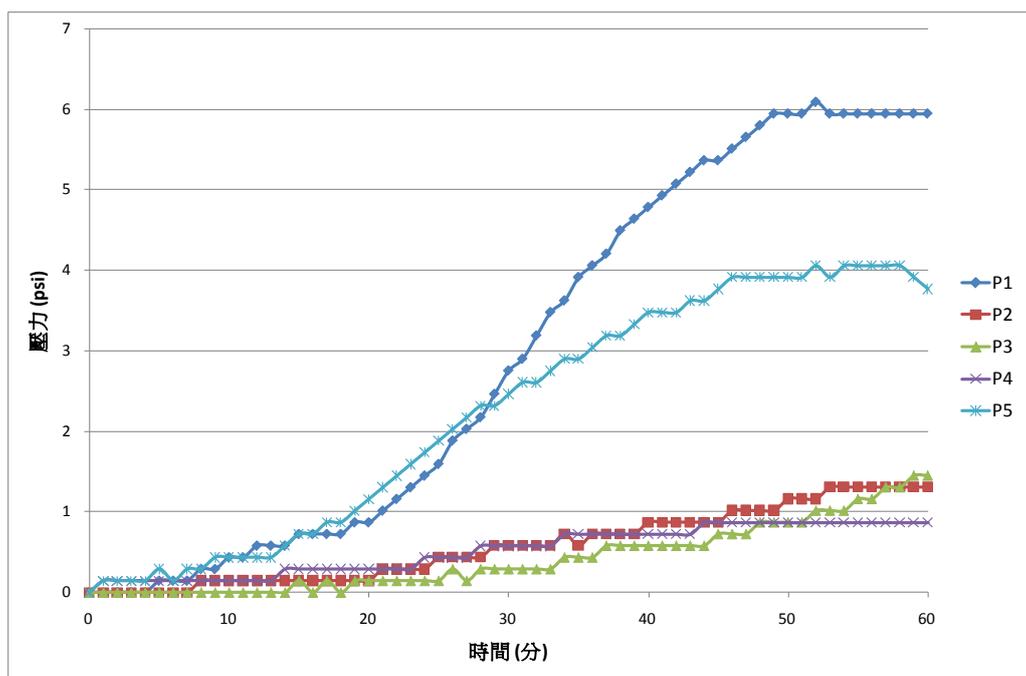


圖 4-29 試體S10 內部壓力變化曲線

(資料來源：本研究整理)



圖 4-30 試體S10 試驗前非曝火面及量測配置

(資料來源：本研究整理)



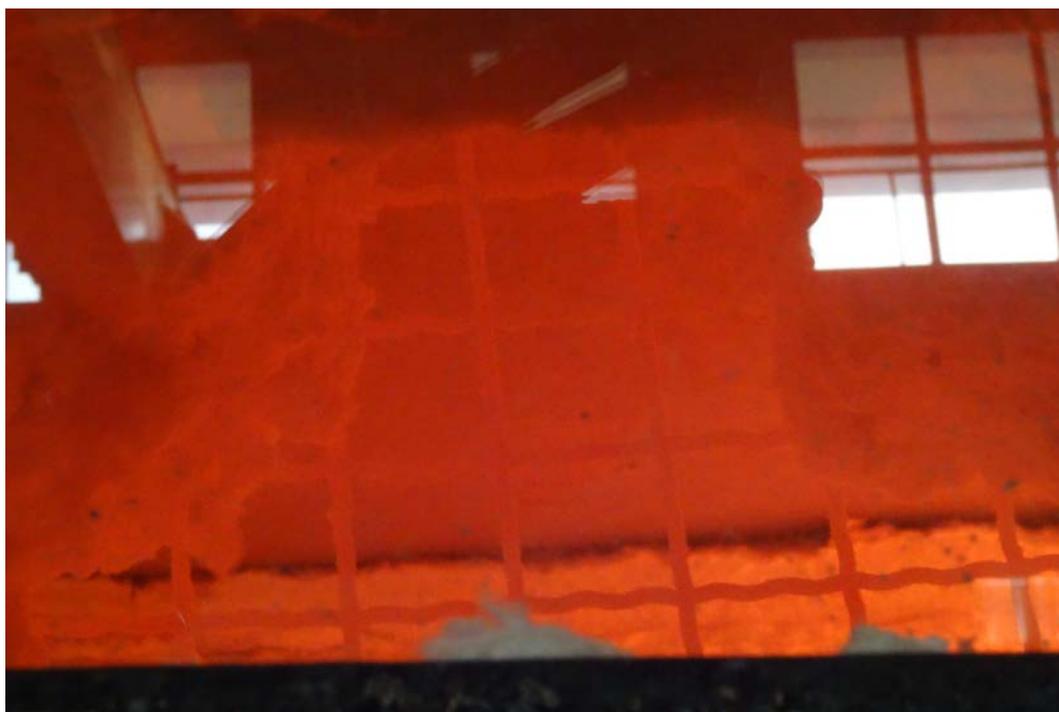
**圖 4-31 試體S10 試驗前曝火面**

(資料來源：本研究整理)



**圖 4-32 試體S10 試驗中非曝火面情形**

(資料來源：本研究整理)



**圖 4-33 試體S10 試驗中曝火面無爆裂情形（加熱時間 50 分鐘時）**

（資料來源：本研究整理）



**圖 4-34 試體S10 試驗後非曝火面**

（資料來源：本研究整理）



**圖 4-35 試體S10 試驗後曝火面**

(資料來源：本研究整理)

**表 4-3 板試體S10 加熱過程現象紀錄**

時間 (分)	加熱過程現象
0	點火，加熱試驗開始
22	試體非曝火面壓力計邊開始有少許滲水
30	試體非曝火面相對濕度計邊開始有少許滲水
~	至熄火前，非曝火面水汽皆為從量測元件、吊鈎旁滲出
60	熄火，加熱試驗結束，試體曝火面無爆裂剝落發生

(資料來源：本研究整理)

板試體 S10 的試驗結果及試驗觀察如以上圖表所示。爐溫依循 CNS 12514-1 快速升溫，板試體內部溫度約從加熱開始 3 分鐘後開始上升，但因試體曝火面無爆裂剝落發生，試體內部溫度的上升趨勢隨爐溫上升而增加。到試驗結束，試體

曝火面完整無任何爆裂剝落發生，試體內部距曝火面 10 公分處溫度平均約為 108 °C，而試體非曝火面表面溫度則保持僅在約 55 °C。

由圖 4-28 觀察可知試體內部水分的遷移情形，其內部初始相對濕度，約在 86~90%，加熱開始後，距試體表面 3.27 公分 (RH1) 及 5 公分 (RH2) 處的相對濕度量測元件同樣也約在 5 分鐘後開始上升直至相對濕度達 100%，RH1 約在 10 分鐘後開始下降，代表此處的飽和水分已開始往更內側的混凝土移動，而 RH2 則約在 13 分鐘後開始下降，距試體表面 7.5 公分的 RH3，約在 7 分鐘相對濕度開始上升，上升速率較 RH1 及 RH2 緩慢，約在 19 分鐘達到最大值並開始下降，距試體表面 10 公分的 RH4，約在 19 分鐘相對濕度開始明顯上升，上升速率同樣較 RH1 及 RH2 緩慢，約在 25 分鐘達到最大值並開始下降。而從試體非曝火面表面觀察，水分從加熱 22 分鐘後才開始滲出，水分同樣係從預埋元件邊滲出，而試體內部此時水分的遷移，約已達試體 2/3 的厚度，並持續往非曝火面遷移。加熱時間 25 分鐘之後的量測元件，同樣因試體內部溫度多已超過 85 °C，高過相對濕度元件的最高工作溫度範圍，元件可能已損壞，後續的數值因此不予參考。

由圖 4-29 觀察可知試體內部壓力的變化情形，因試體曝火表面試驗全程無爆裂剝落，試體內部壓力得以隨爐溫上升持續緩慢增加，試驗過程保護層位置處的壓力最大值約為 6 psi。

試驗後觀察試體曝火面完全無爆裂剝落，僅有細微的龜裂紋，並無過大的裂痕產生，而且試體非曝火面也無龜裂發生，如圖 4-33~35 所示。

## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

本研究進行圓柱試體及板試體的設計與製作，圓柱試體主要作為探討不同聚丙烯纖維含量及含水量之影響，施以 CNS 標準升溫速率的加熱，觀察圓柱試體的內部溫度分布及爆裂情形。板試體內部佈設蒸氣壓力量測元件、相對濕度量測元件及測溫線，施以單面加熱，以觀測試體內部蒸氣壓力、相對濕度、溫度及受熱表面爆裂情形，其圓柱試體及板試體的結論分述如下。

#### 壹、圓柱試體

針對圓柱試體探討添加不同含量聚丙烯纖維及含水量對其高溫爆裂之影響，其結果總括來說，在 4 種纖維含量，3 種相對濕度的條件下，依 CNS 12514-1 的快速升溫加熱，僅有無添加纖維、相對濕度 100 % 的圓柱試體發生爆裂，另外的 11 種條件組合之圓柱試體，皆無發生爆裂的現象。對照板試體之試驗結果，於本研究條件下，試體內部相對濕度對爆裂的影響不明顯，但添加纖維對爆裂卻有很明顯的改善，於本試驗有添加纖維的試體，全部無爆裂發生，即使在高相對濕度條件下。

#### 貳、板試體

兩種不同聚丙烯纖維含量（0%及 0.1%體積比）的超高強度混凝土的抗爆裂性及其加熱過程混凝土內部的蒸汽壓力及水分遷移之變化行為，試驗前兩試體養護及置放的環境皆相同，試驗前其初始內部相對濕度狀態相近，進行依據 CNS 12514-1 高溫試驗加熱後，其結果比較說明如下。

板試體 S00 因曝火面有爆裂剝落發生，其試體內部整體溫度的上升較沒有爆裂剝落發生的板試體 S10 來的快，試驗結束時，非曝火表面的溫度 S00 約在 100 °C 左右，試體 S10 僅約 55 °C，同時爆裂發生超過保護層的試體 S00，其鋼筋均裸露在爐溫中，對火災時的承重能力會有嚴重影響。

在試體內部水分的遷移情形，整體而言，板試體 S00 同樣因受到爆裂影響，溫度的熱趨效應較明顯，使的水分的遷移較板試體 S10 來的快，其非曝火表面的滲水比較早出現，且整個加熱過程的水分滲出量，也是以板試體 S00 滲出較多。

在試體內部壓力變化情形，與其他文獻比較，本次實驗所量的的壓力值均為微量的變化值，僅有 psi 的量值變化，遠小於文獻最大可達 MPa 的量值，因壓力的產生受到多重因素的影響，包括含水量、溫度梯度、壓力傳遞路徑、裂縫等。板試體 S00 在試體爆裂過程，可觀察到伴隨有兩次突波的現象，另因加熱初始即開始有爆裂發生，因此壓力的累積不易，因此試驗過程的最大壓力值反低於無爆裂發生的板試體 S10。

在爆裂行為上，兩個試體有截然不同的反應，以巨觀的實驗結果來看，因兩試體的內部相對濕度程度相近，僅在有無添加聚丙烯纖維的差異下，無添加纖維的試體 S00 很早就開始爆裂，最終的爆裂剝落損壞情形嚴重，而反觀添加 0.1 % 纖維的試體 S10 卻完全沒有爆裂發生，添加纖維的抗爆裂效果明顯。

## 第二節 建議

立即可行建議 - 實尺寸新型高強度鋼筋混凝土柱構件耐火性能

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

新型高強度鋼筋混凝土 (New RC) 結構系統，所用混凝土及鋼筋強度遠大於現行所用材料，可減少構件斷面積，但超高強度混凝土存在脆性高和耐火性能較差的缺點，當遭受火災高溫時會發生嚴重的爆裂現象，造成構件承載面積的減少，而鋼筋失去保護層，直接暴露在高溫下，更導致結構的承載力急遽降低，甚而造成結構崩塌。本研究圓柱及板試體實驗結果顯示添加聚丙烯纖維對爆裂有明顯的改善效果，值得持續針對結構主要承重的柱構件進行耐火性能，以確認可行之改善爆裂方式。

## 參考書目

- ACI Committee 363, (2010) “ 363R-10Report on High-Strength Concrete,” American Concrete Institute.
- Anderberg, Y., (1997) ”Spalling phenomenal of HPC and OC .” Proceedings of International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete ( NIST Special Publication 919 ) , Gaithersburg, NIST, 69 – 73.
- Bostrom, L., Jansson, R., (2007) ,” Experimental study of the influence of polypropylene fibres on material properties and fire spalling of concrete.”
- Busra A., Nabi, Y. and Nihat, K. (2016) ,” Usability of Raw Rice Husk Instead of Polypropylene Fibers in High-Strength Concrete under High Temperature.” Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 28, Issue 1.
- Chan, Y. N., Peng, G. F., Anson, M., (1999) .”Fire behavior of high-performance concrete made with silica fume at various moisture contents.” ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 3, 405 - 411.
- Ellingwood, B., and Shaver, J. R., (1980) “ Effects of fire reinforced concrete members,” Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST11, November , pp. 2151-2166.
- Eurocode 2. (2010) ” Design of concrete structure – Part 1-2: general rules – structural fire design”
- European Committee, (1995) “ Eurocode 2 : Design of concrete structures - Part 1-2 : General rules - Structural fire design,” ENV 1992-1-2.
- Harmarthy, T. Z., (1965) .”Effect of moisture on the fire endurance of building elements .” Philadelphia, ASTM publication STP, 74 – 95.
- Khoury , G. A. (1992) ,”Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment ,” Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 161, pp.291-309.
- Meyer-Ottens, C., (1972) ,”The question of spalling of concrete structural elements of standard concrete under fire loading”, PhD Thesis, Technical University of Braunschweig, Germany.

Peng, G.F., Zhao, J., (2015) .” Modeling of Moisture Distribution Evolution in High-Performance Concrete under Fire Exposure.” Key Engineering Materials, Vols. 629-630, 279-283.

Phan, L. T., (1996) ,” Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art”, NISTIR 5934.

Rixom M.R. & Mailvaganan, N.P., (1986), ”Chemical admixtures for concrete”, E, & F.N. Spon, London, 2<sup>nd</sup> edition, p.306.

Zhukov, V. V., (1994) ,”Forecast of a brittle failure of concrete by fire”, Scientific Research Institute for concrete and reinforced concrete, Moscow.

王天志 (2003), 「高性能混凝土柱耐火性能之研究」, 國立交通大學土木博士論文。

內政部營建署(2012), 「最新建築技術規則」, 詹氏書局。

中華民國國家標準 CNS 12514-1 (2014), 「建築物構造構件耐火試驗法-第 1 部：一般要求事項」, 經濟部標準檢驗局。

李其忠 (2012), 「聚丙烯纖維自充填混凝土修補火害鋼筋混凝土柱之研究」, 內政部建築研究所自行研究報告。

沈進發、陳舜田、林尚賢 (1991), 「以X射線繞射試驗法推測混凝土受火害程度之研究」, NSC 80-0410-E011-08, 國科會專題研究計劃報告, 台北。

沈進發、陳舜田、張郁慧 (1993), 「火害延時對混凝土材料性質之影響」, NSC 82-0410-E011-079, 國科會專題研究計劃報告, 台北。

梅本宗宏、局田繁美(2006), 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性能に関する研究, 戸田建設技術研究報告第 32 號。

陳振川 (2000), 「纖維混凝土高溫爆裂行為與對策」, 高性能混凝土及防火策略研討會, 成大防火安全研究中心主辦。

董香軍 (2006), 「纖維高性能混凝土高溫、明火力學與爆裂性能研究」, 大連理工大學博士論文。

## 附錄 1 歷次會議紀錄與回應

### (一) 期初審查會議紀錄與回應

審查意見	研究回應
請多蒐集國內、外有關混凝土爆裂文獻，整合今年研究成果，彙整混凝土爆裂原因及改善方法，以供相關建築規定或業界參考。	相關文獻業已蒐集整理於報告第二章，實驗成果、爆裂原因及改善方法探討及建議，詳報告第五章。
本案研究題目不夠明確，請修正為「新型高強度混凝土高溫爆裂行為研究」。	研究題目已配合修正。

### (二) 期中審查會議紀錄與回應

審查委員	審查意見	研究回應
王科長鵬智	本研究所採用之實驗應符合相關國家標準之規定，試驗設備也應符合。	本研究將依 CNS 12514-1 標準要求進行。
吳科長明郎	簡報第 15 頁，Eurocode 2(2010)引用之文獻，其中「使用超過 2 kg/m <sup>3</sup> 聚丙烯纖維」有無上限資料。	感謝委員意見，該文獻無上限的說明，但參考其他文獻，過高的含量，可能反而造成其他工程性質的下降。
	建議說明所探討之混凝土預拌方式及預拌廠為何，確立產品控制在一致性條件下進行。	因本研究超高強度混凝土的產製，非屬常見之產品，因此經尋找後某廠商願無償配合提供拌合及澆灌，但廠商希望資訊不公開。另外該廠產製均依 ISO 9001 要求進行，具有一致性的品管。
曾榮譽理事長順正	是否同時做抗壓測試，以瞭解火害後結構體的安全性。	本研究著重在爆裂行為探討，且試體加熱後有爆裂可能，暫不探討其殘餘強度。

鄭教授復平	含水量如何控制？	試體先泡水飽和後，利用烘箱乾燥，並隨時以相對濕度元件量測確認其含水量。
	板厚度與含水飽和區之關係是否足夠？	經參考文獻試體設計，板厚度應仍可供觀察含水飽和區之現象。
	圓柱試體加熱速度是否可以提高？	感謝委員意見，本研究將改用 CNS 12514-1 標準加熱速率。
	板之非受熱面是否要量水汽流動量及壓力？	實驗規劃主要量測試體內部，表面則以觀察滲水出現時間及水量為主。
	壓力管使用，如何確保與量測儀器的一致？	實驗前均會先予以測試確保一致。
	高拉力鋼高溫的特性及損失。	本研究著重在爆裂行為探討，力學部分擬於後續研究進行。
湯教授兆緯	本研究報告書第二章文獻回顧內容相當充實，對混凝土高溫爆裂行為機制已詳盡描述。可增加混凝土內部蒸氣壓力量測之資料，再歸納出本研究採用方法之主要考量。	謝謝指教，將持續補充相關文獻資料及補充說明研究方法的採用。
	本研究圓柱試體之 28 天抗壓強度採 70 MPa 等級，版試體 28 天抗壓強度則採 70 和 100 MPa 兩種等級。所採用之配比設計(包含骨材、參料等特性)與一般混凝土不同之處，請說明。	因配合預拌廠因素，本案暫以 70 MPa 等級進行，其配比資料說明於第三章。
	版試體及量測配置示意圖中顯示，試體內部埋設相對溼度量測元件、蒸氣壓力量測元件之代號未於本文中說明，請補充說明。	感謝委員建議，已於第三章補充說明。
	完整的試驗結果分析與討論尚未提出，請於期末報告時補充。	相關內容，已補充於期末報告書。

蔡組長綽芳	有關試驗試體的製作及排程，請主持人注意管控，以使能如期如質完成研究成果。	感謝組長建議，將注意管控完成。
-------	--------------------------------------	-----------------

(三) 期末審查會議紀錄與回應

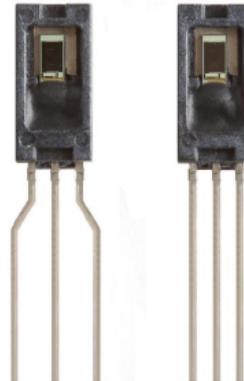
審查委員	審查意見	研究回應
吳科長明郎	已依期中審查意見調整或說明，本案無意見。	感謝委員肯定與支持
曾榮譽理事長順正	能否建議聚丙烯最佳的含量。	本案以纖維有效性為主，最佳含量待後續研究。
	能否以影像顯示高溫下，混凝土內水蒸氣的流向。	目前所收集文獻上，尚未有此類觀測方式。
張建築師尚文	目前已就高強度混凝土之纖維、水氣等相關各種變因，試驗得出影響火災時混凝土爆裂之主要原因，相當重要。	感謝委員肯定與支持
	未來可考慮加載狀況或者 RC、SRC 之情形，展開系列研究之成果用以評估超高樓火害造成建築倒塌之潛在風險。	承載構件耐火性，擬於後續規劃研究。
鄭教授復平	超高強度混凝土多利用於柱子，一般柱子尺寸都很大。溫度梯度及氣壓與柱尺寸有關，建議如果可能提高圓柱試體尺寸。	尺寸效應會影響結果，後續擬規劃實尺寸研究。
	用板研究水分移動及壓力變化與柱子有不同，建議如果可能可提高厚度。	感謝委員建議，依試驗結果，本案已可觀察到內部變化情形，但增高厚度，應可有更佳的觀察過程。
	報告中未敘述使用之感測元件 sensor 位置或平均值。	感謝委員建議，已於第三章補充說明。
張教授大鵬	建議將報告中所有” kg/cm <sup>2</sup> ” 單位改為” kgf/cm <sup>2</sup> ”，同時” MPa ”之” P ”應為大寫字母。	感謝委員建議，將修正單位表示方式。
	書面報告之部分重要圖形仍須以彩	將依委員意見印製。

	色印製。	
	此份研究報告執行完成，誠屬不容易，予以高度肯定，建議報告中加註”在 NewRC 中，使用聚丙烯纖維之優劣點評估與建議”，作為未來實驗應用之重要參考。	感謝委員建議，已於摘要補充說明。
湯教授兆緯	板試體及量測配置示意圖中，已配置試體內部埋設相對溼度量測元件、蒸氣壓力量測元件及熱電偶測溫線，但相對濕度量測元件及蒸氣壓力量測元件之代號未於本文中說明，請補充說明。	感謝委員建議，已於第三章補充說明。
	試體 S00 與試體 S10 之內部壓力變化趨勢有所不同，請分析其原因。	其主因為試體 S00 從試驗一開始到結束前，一直有爆裂發生，致使其壓力趨勢不同。
	混凝土內部蒸氣壓力之量測值，可與文獻資料做一比較。	感謝委員建議，將參酌進行比較分析。
劉教授光晏	對於 NewRC 混凝土材料高溫後的力學性質，如強度、勁度等的折減，建議後續規劃加以研究，以供 NewRC 建築火害後結構或耐震評估等使用。	高溫後力學性質為重要資料，擬於後續規劃研究。
中華民國全國建築師公會(李振境建築師)	本案研究符合預期成果需求。	感謝委員肯定與支持
蔡組長綽芳	建議將試驗結果，有關溫度及爆裂以時間軸作更深入的比較，可供未來火場避難逃生及救災安全參考。	感謝主席建議，將參酌進行比較分析。
	NewRC 混凝土材料高溫後的力學性質，會影響災後繼續使用的結構耐震，建議可繼續加以研究。	高溫後力學性質為重要資料，擬於後續規劃研究。

## 附錄 2 量測元件技術資料

### 壹、溼度量測元件

**Honeywell**



## HIH-4000 Series Humidity Sensors

#### DESCRIPTION

The HIH-4000 Series Humidity Sensors are designed specifically for high volume OEM (Original Equipment Manufacturer) users.

Direct input to a controller or other device is made possible by this sensor's near linear voltage output. With a typical current draw of only 200  $\mu$ A, the HIH-4000 Series is often ideally suited for low drain, battery operated systems.

Tight sensor interchangeability reduces or eliminates OEM production calibration costs. Individual sensor calibration data is available.

#### FEATURES

- Molded thermoset plastic housing
- Near linear voltage output vs % RH
- Laser trimmed interchangeability
- Low power design
- Enhanced accuracy
- Fast response time
- Stable, low drift performance
- Chemically resistant

The HIH-4000 Series delivers instrumentation-quality RH (Relative Humidity) sensing performance in a competitively priced, solderable SIP (Single In-line Package).

Available in two lead spacing configurations, the RH sensor is a laser trimmed, thermoset polymer capacitive sensing element with on-chip integrated signal conditioning.

The sensing element's multilayer construction provides excellent resistance to most application hazards such as wetting, dust, dirt, oils and common environmental chemicals.

#### POTENTIAL APPLICATIONS

- Refrigeration equipment
- HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) equipment
- Medical equipment
- Drying
- Metrology
- Battery-powered systems
- OEM assemblies

## HIH-4000 Series

**Table 1. Performance Specifications (At 5 Vdc supply and 25 °C [77 °F] unless otherwise noted.)**

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Specific Note
Interchangeability (first order curve)	–	–	–	–	–
0% RH to 59% RH	-5	–	5	% RH	–
60% RH to 100% RH	-8	–	8	% RH	–
Accuracy (best fit straight line)	-3.5	–	+3.5	% RH	1
Hysteresis	–	3	–	% RH	–
Repeatability	–	±0.5	–	% RH	–
Settling time	–	–	70	ms	–
Response time (1/e in slow moving air)	–	5	–	s	–
Stability (at 50% RH)	–	1.2	–	% RH	–
Voltage supply	4	–	5.8	Vdc	2
Current supply	–	200	500	µA	–
Voltage output (1 <sup>st</sup> order curve fit)	$V_{OUT} = (V_{SUPPLY})(0.0062(\text{sensor RH}) + 0.16)$ , typical at 25 °C				
Temperature compensation	True RH = (Sensor RH)/(1.0546 – 0.00216T), T in °C				
Output voltage temperature, coefficient at 50% RH, 5 V	–	-4	–	mV/°C	–
Operating temperature	-40[-40]	See Figure 1.	85[185]	°C[°F]	–
Operating humidity	0	See Figure 1.	100	% RH	3
Storage temperature	-50[-58]	–	125[257]	°C[°F]	–
Storage humidity	See Figure 2.			% RH	3

**Specific Notes:**

1. Can only be achieved with the supplied slope and offset.  
For HIH-4000-003 and HIH-4000-004 catalog listings only.
2. Device is calibrated at 5 Vdc and 25 °C.
3. Non-condensing environment.

**General Notes:**

- Sensor is ratiometric to supply voltage.
- Extended exposure to ≥90% RH causes a reversible shift of 3% RH.
- Sensor is light sensitive. For best performance, shield sensor from bright light.

**FACTORY CALIBRATION DATA**

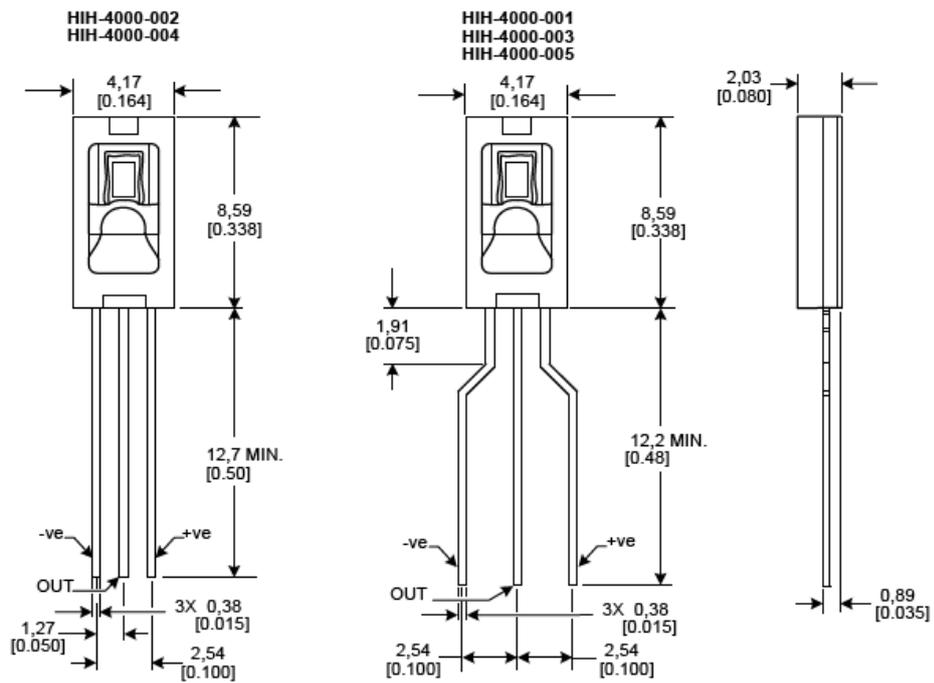
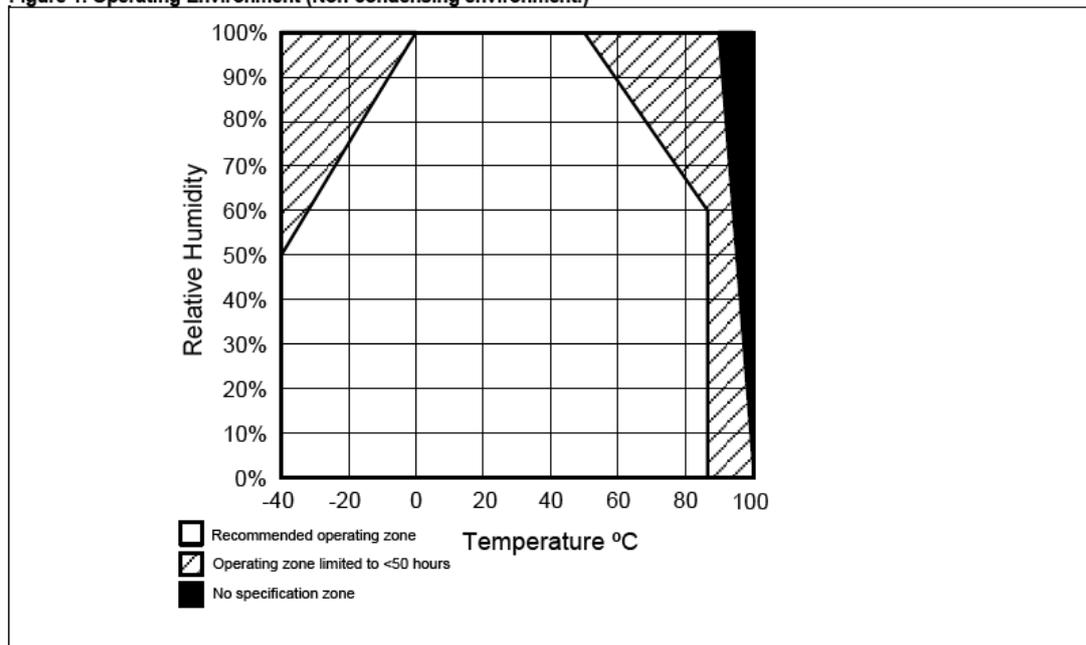
HIH-4000 Sensors may be ordered with a calibration and data printout. See Table 2 and the order guide on the back page.

**Table 2. Example Data Printout**

Model	HIH-4000-003
Channel	92
Wafer	030996M
MRP	337313
Calculated values at 5 V	
V <sub>OUT</sub> at 0% RH	0.826 V
V <sub>OUT</sub> at 75.3% RH	3.198 V
Linear output for 3.5% RH accuracy at 25 °C	
Zero offset	0.826 V
Slope	31.483 mV/%RH
RH	(V <sub>OUT</sub> - zero offset)/slope (V <sub>OUT</sub> - 0.826)/0.0315
Ratiometric response for 0% RH to 100% RH	
V <sub>OUT</sub>	V <sub>SUPPLY</sub> (0.1652 to 0.7952)



Figure 1. Operating Environment (Non-condensing environment.)



## 貳、壓力量測元件

### GP -D / GP-C OEM pressure transducers

#### ■ 特色

- 抗腐蝕性不銹鋼設計
- 絕對壓力量測範圍：1, 2, 4, 6, 10, 16, 25, 40, bar...
- 相對壓力量測範圍：1, 2.5, 4, 6, 10, 16, 25, 40, 60, 100, 160, 250, 400 bar...
- 溫度補償
- 壓力範圍-1~400BAR適合大量採購OEM
- 採用雷射焊接技術
- 3倍過載壓力 5倍破裂壓力
- 適合於高速震動環境
- EMC抗干擾防護 (內部抗突波，短路保護)



#### ■ 技術資料

- |               |                                    |
|---------------|------------------------------------|
| • 精度          | ±0.5% F.S. (Option: 0.25% F.S.)    |
| • 溫度飄移        | < 0.5% F.S.                        |
| • 誤差值         | < 0.5% F.S.                        |
| • 飄移量         | < 0.25% F.S./Year                  |
| • 零點輸出        | 4mA, 0V, 0.5V                      |
| • 高點輸出        | 20mA, 10V, 5V                      |
| • 過載壓力        | 3xF.S.                             |
| • 破壞壓力        | 5xF.S.                             |
| • 保護等級        | DIN43650 IP65<br>Cable Outlet IP68 |
| • 反應時間        | < 1 msec                           |
| • 震動率         | 10 ~ 2050Hz, 20 sinusoidal, 3axes  |
| • 溫度線性數位補償    | -40 ~ 100°C, 0.5hr soaks at Temp   |
| • 溫度飄移        | 100ppm/C (0 ~ 60°C)                |
| • 介質溫度        | -40 ~ 100°C                        |
| • 儲存溫度        | -40 ~ 100°C                        |
| • 儲存溼度        | < 95% RH (non-condensign)          |
| • 電源          | DC 10 ~ 30 VDC                     |
| • EMC 抗干擾等級保護 | 80 MHz ~ 1 GHz                     |
| • 接液材質        | 304 L stainless steel 不銹鋼          |
| • 壓力連接牙口      | 1/4" PT 外牙                         |

#### ■ 應用範圍

機械及設備 OEM設計  
自動化產業  
恆壓變頻系統  
空氣壓縮機械  
工業引擎、泵浦  
冷凍空調  
噴霧系統  
運輸裝置及製冷系統