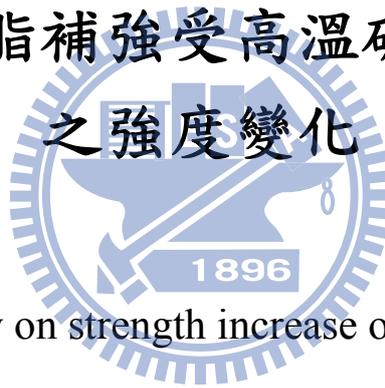


國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

以環氧樹脂補強受高溫破壞混凝土  
之強度變化



The effect of epoxy on strength increase of concrete subjected  
to elevated temperatures

研究生：李璧昫

指導教授：鄭復平 博士

中華民國 九十九年 二月

# 以環氧樹脂補強受高溫破壞混凝土之強度變化

研究生：李璧昫

Student : Bi-Yun Li

指導教授：鄭復平 博士

Advisor : Dr. Fu-Ping Cheng

國立交通大學  
土木工程研究所  
碩士論文

A Thesis  
Submitted to Department of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in  
Civil Engineering

February 2010  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年二月

# 以環氧樹脂補強受高溫破壞混凝土之強度變化

研究生：李璧昫

指導教授：鄭復平 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 摘 要

鋼筋混凝土建物火災損壞範圍集中在表層，因此混凝土高溫火害後補強相當重要，在不同冷卻方式不同養護條件下，試以環氧樹脂補強，探討其殘餘強度及補強效果。

本研究探討以普通混凝土與高強度混凝土兩種材料，在加溫時承受兩種目標溫度（600°C、800°C），冷卻時以不同冷卻方式（急速冷卻及自然冷卻），兩種再養護方法（滯水再養護及空氣再養護）與不同再養護齡期（7、28、60、90 天），分別以環氧樹脂補強後成效進行比較。

結果發現，目標溫度 600°C 的試體補強效果較 800°C 的試體佳，可讓試體達到原強度的七成以上，但目標溫度 800°C 的試體補強效果就不盡理想，而且高溫火害後再養護時間越長，由於混凝土之自癒性，使環氧樹脂難以以真空方試灌入裂縫，補強成效因而折減。

關鍵字：混凝土、殘餘強度、環氧樹脂、補強、高溫損害

# The effect of epoxy on strength increase of concrete subjected to elevated temperatures

Student : Bi-Yun Li

Advisor : Dr. Fu-Ping Cheng

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The strength of reinforce concrete buildings decreased after exposed to high temperatures. Most damages of concrete are on the surface only. It is important to repair the cracks in concrete. The effect different cooling methods and curing conditions were explored. The residual strength and repair effect were studied after repaired by epoxy.

This study is devoted to investigate the effect of epoxy on strength increase of concrete after fired. The major experimental parameters include high temperatures ( $600^{\circ}\text{C}$ ,  $800^{\circ}\text{C}$ ), cooling methods (natural cooling, rapid cooling), re-curing methods (air curing, water curing), re-curing times (7, 28, 60, 90 days), and the strength of concretes ( $280\text{ kgf/cm}^2$ ,  $560\text{ kgf/cm}^2$ ).

Results show that the epoxy restored the compressive strength of concrete after exposed  $600^{\circ}\text{C}$  can be greater than 70%. But concrete can recover only 10% of its strength for specimens after exposed  $800^{\circ}\text{C}$  temperature.

Key words: concrete, residual strength, epoxy, repair, high temperature damage

## 誌 謝

本研究期間承蒙恩師 鄭復平博士悉心指導、在學習上的督促以及待人處事的道理，特致由衷地感謝與敬意。論文口試期間承蒙中興大學教授 林建宏博士、交通大學教授 趙文成博士、交通大學教授 洪士林博士惠賜卓見，修正本文不足和錯誤之處，使本文更臻完整，特此由衷感謝。



研究所求學期間，感謝所上諸多師長之教誨及指導，深感獲益良多，同窗稚展、超倫、信達、書豪、嘉軒於試驗階段的幫助，及好友霈琳、家宇、乃慈、傑焄在研究所生活中的陪伴與協助，及材料試驗室林進賢先生的指教，使本論文得以順利進行，在此一併致謝。

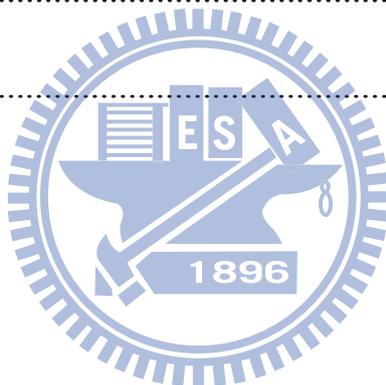
最後，感謝父母親辛勤地付出和關心，兄姐的疼愛及照顧，僅以本論文獻給我的家人、恩師、長輩以及朋友，願他們共享這份喜悅。

# 目錄

|                           | 頁次       |
|---------------------------|----------|
| 摘要.....                   | II       |
| 誌謝.....                   | IV       |
| 目錄.....                   | V        |
| 表目錄.....                  | VIII     |
| 圖目錄.....                  | IX       |
| <b>第一章 緒論</b> .....       | <b>1</b> |
| 1-1 研究動機.....             | 1        |
| 1-2 研究目的與範圍.....          | 2        |
| 1-3 研究方法.....             | 3        |
| 1-4 研究內容.....             | 4        |
| <b>第二章 文獻回顧</b> .....     | <b>5</b> |
| 2-1 水泥漿體之材料性質.....        | 5        |
| 2-1-1 水泥成分及其水化性質.....     | 5        |
| 2-1-2 水泥漿體與水泥砂漿受熱之變化..... | 6        |
| 2-2 粒料之熱學性質.....          | 7        |
| 2-2-1 粒料之物理性質.....        | 7        |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2-2-2 高溫下粒料之體積變化 .....     | 8  |
| 2-3 混凝土高溫作用下之性質 .....      | 9  |
| 2-3-1 混凝土高溫作用下之殘餘強度 .....  | 9  |
| 2-3-2 混凝土高溫作用下之孔隙變化 .....  | 10 |
| 2-3-3 混凝土高溫作用下之外觀變化 .....  | 10 |
| 2-3-4 混凝土高溫作用下之爆裂現象 .....  | 11 |
| 2-4 環氧樹脂之應用 .....          | 12 |
| 2-5 裂縫補強 .....             | 15 |
| <b>第三章 試驗材料與試驗計劃</b> ..... | 16 |
| 3-1 實驗變數 .....             | 16 |
| 3-2 試體製作及試驗設備 .....        | 18 |
| 3-2-1 試體製作 .....           | 18 |
| 3-2-2 試驗設備 .....           | 19 |
| 3-3 試驗方法 .....             | 20 |
| 3-3-1 試體準備 .....           | 20 |
| 3-3-2 試體加溫與冷卻 .....        | 21 |
| 3-3-3 試體加溫後之冷卻及再養護 .....   | 21 |
| 3-3-4 試體以環氧樹脂補強 .....      | 22 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第四章 試驗結果與分析 .....                | 23 |
| 4-1 混凝土試體受高溫作用後之外觀變化 .....       | 23 |
| 4-2 混凝土試體火害後再養護對其殘餘強度影響 .....    | 25 |
| 4-3 混凝土試體火害後再養護並以環氧樹脂補強之外觀變化.... | 27 |
| 4-4 混凝土試體火害後再養護並以環氧樹脂補強之殘餘強度.... | 28 |
| 第五章 結論與建議 .....                  | 41 |
| 5-1 結論 .....                     | 41 |
| 5-2 建議 .....                     | 42 |
| 參考文獻.....                        | 44 |



# 表目錄

|                                 | 頁次 |
|---------------------------------|----|
| 表 2-1 各種不同岩石之線性熱膨脹係數.....       | 48 |
| 表 2-2 不同岩石 1:6 混凝土之熱膨脹係數.....   | 48 |
| 表 2-3 不同岩石之比重.....              | 49 |
| 表 2-4 高強度混凝土配比及其抗壓強度.....       | 49 |
| 表 2-5 高性能混凝土配比.....             | 49 |
| 表 2-6 國內常用植筋膠種類.....            | 50 |
| 表 2-7 碳纖維與玻璃纖維補強火害後試體之殘餘強度..... | 50 |
| 表 2-8 環氧樹脂補強裂縫效果.....           | 51 |
| 表 3-1 本試驗試體分類(實驗組).....         | 52 |
| 表 3-2 本試驗試體分類(對照組).....         | 53 |
| 表 3-3 本試驗一般強度混凝土試體配比.....       | 53 |
| 表 3-4 本試驗高強度混凝土試體配比.....        | 54 |
| 表 3-5 建築物之防火時效.....             | 54 |
| 表 4-1 高強度混凝土之補強強度 (%).....      | 55 |
| 表 4-2 普通強度混凝土之補強強度 (%).....     | 55 |

# 圖目錄

頁次

|        |                                 |    |
|--------|---------------------------------|----|
| 圖 2-1  | 受高溫後混凝土殘餘強度百分比.....             | 56 |
| 圖 2-2  | 受到高溫普通混凝土及高強度混凝土降溫前後之殘餘強度.....  | 56 |
| 圖 2-3  | 受高溫混凝土以常溫及噴水兩種冷卻方式之殘餘強度.....    | 57 |
| 圖 2-4  | 混凝土受高溫 600°C 前後之孔隙體積.....       | 57 |
| 圖 2-5  | 600°C 高溫前後混凝土之孔隙直徑及其累計所占體積..... | 58 |
| 圖 2-6  | 混凝土受高溫 800°C 前後之孔隙率.....        | 59 |
| 圖 2-7  | 800°C 高溫前後混凝土之孔隙直徑及其累計所占體積..... | 59 |
| 圖 2-8  | 800°C 高溫前後混凝土之強度.....           | 60 |
| 圖 2-9  | 混凝土版構件高溫後爆裂機率與含水率關係.....        | 60 |
| 圖 2-10 | 鋼筋混凝土柱鋼板貼片補強示意圖.....            | 61 |
| 圖 2-11 | 鋼筋混凝土梁中央鋼板貼片補強示意圖.....          | 61 |
| 圖 2-12 | 破壞型式示意圖.....                    | 62 |
| 圖 2-13 | 遞增壓力注射工法.....                   | 62 |
| 圖 4-1  | 高強度混凝土滯水再養護對照組之殘餘強度.....        | 64 |
| 圖 4-2  | 普通強度混凝土滯水再養護對照組之殘餘強度.....       | 64 |
| 圖 4-3  | 高強度混凝土受 800°C 後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂  |    |

|        |   |    |
|--------|---|----|
|        | 補強之殘餘強度.....                                    | 65 |
| 圖 4-4  | 高強度混凝土受 800°C 後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂<br>補強之殘餘強度.....  | 65 |
| 圖 4-5  | 高強度混凝土受 600°C 後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂<br>補強之殘餘強度.....  | 66 |
| 圖 4-6  | 高強度混凝土受 600°C 後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂<br>補強之殘餘強度.....  | 66 |
| 圖 4-7  | 普通強度混凝土受 800°C 後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹<br>脂補強之殘餘強度..... | 67 |
| 圖 4-8  | 普通強度混凝土受 800°C 後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹<br>脂補強之殘餘強度..... | 67 |
| 圖 4-9  | 普通強度混凝土受 800°C 後自然冷卻空氣再養護後以環氧樹<br>脂補強之殘餘強度..... | 68 |
| 圖 4-10 | 普通強度混凝土受 600°C 後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹<br>脂補強之殘餘強度..... | 68 |
| 圖 4-11 | 普通強度混凝土受 600°C 後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹<br>脂補強之殘餘強度..... | 69 |
| 圖 4-12 | 普通強度混凝土受 600°C 後自然冷卻空氣再養護後以環氧樹<br>脂補強之殘餘強度..... | 69 |

# 照片目錄

頁次

|         |                                 |    |
|---------|---------------------------------|----|
| 照片 2-1  | 裂縫補強 D1 CUBE 試體模具 .....         | 70 |
| 照片 2-2  | 裂縫補強 D2 CUBE 試體模具 .....         | 70 |
| 照片 3-1  | 高溫爐 .....                       | 71 |
| 照片 3-2  | 烘箱 .....                        | 71 |
| 照片 3-3  | 環氧樹脂灌入儀 .....                   | 72 |
| 照片 3-4  | 萬能試驗機 .....                     | 72 |
| 照片 3-5  | 待補強混凝土試體放入環氧樹脂灌入儀之真空槽 .....     | 73 |
| 照片 4-1  | 混凝土試體加溫至 800°C 後顏色改變 .....      | 74 |
| 照片 4-2  | 混凝土試體加溫至 600°C 後顏色改變 .....      | 74 |
| 照片 4-3  | 高強度混凝土加溫至 800°C 後斷面顏色 .....     | 75 |
| 照片 4-4  | 普通強度混凝土加溫至 800°C 後斷面顏色 .....    | 75 |
| 照片 4-5  | 高強度混凝土加溫至 600°C 後斷面顏色 .....     | 76 |
| 照片 4-6  | 普通強度混凝土加溫至 600°C 後斷面顏色 .....    | 76 |
| 照片 4-7  | 高強度混凝土試體加溫至 800°C 後急速冷卻頂面 ..... | 77 |
| 照片 4-8  | 高強度混凝土試體加溫至 800°C 後急速冷卻側面 ..... | 77 |
| 照片 4-9  | 高強度混凝土試體加溫至 800°C 後自然冷卻頂面 ..... | 78 |
| 照片 4-10 | 高強度混凝土試體加溫至 800°C 後自然冷卻側面 ..... | 78 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 照片 4-11 | 高強度混凝土試體加溫至 600°C 後急速冷卻頂面.....                   | 79 |
| 照片 4-12 | 高強度混凝土試體加溫至 600°C 後急速冷卻側面.....                   | 79 |
| 照片 4-13 | 高強度混凝土試體加溫至 600°C 後自然冷卻頂面.....                   | 80 |
| 照片 4-14 | 高強度混凝土試體加溫至 600°C 後自然冷卻側面.....                   | 80 |
| 照片 4-15 | 普通強度混凝土試體加溫至 800°C 後急速冷卻頂面.....                  | 81 |
| 照片 4-16 | 普通強度混凝土試體加溫至 800°C 後急速冷卻側面.....                  | 81 |
| 照片 4-17 | 普通強度混凝土試體加溫至 800°C 後自然冷卻頂面.....                  | 82 |
| 照片 4-18 | 普通強度混凝土試體加溫至 800°C 後自然冷卻側面.....                  | 82 |
| 照片 4-19 | 普通強度混凝土試體加溫至 600°C 後急速冷卻頂面.....                  | 83 |
| 照片 4-20 | 普通強度混凝土試體加溫至 600°C 後急速冷卻側面.....                  | 83 |
| 照片 4-21 | 普通強度混凝土試體加溫至 600°C 後自然冷卻頂面.....                  | 84 |
| 照片 4-22 | 普通強度混凝土試體加溫至 600°C 後自然冷卻側面.....                  | 84 |
| 照片 4-23 | 未經滯水再養護試體灌入環氧樹脂後之外觀.....                         | 85 |
| 照片 4-24 | 經滯水再養護試體灌入環氧樹脂後之外觀.....                          | 85 |
| 照片 4-25 | 高強度混凝土試體加熱至 800°C 急速冷卻並以環氧樹脂補<br>強經抗壓試驗後之外觀..... | 86 |
| 照片 4-26 | 高強度混凝土試體加熱至 800°C 自然冷卻並以環氧樹脂補<br>強經抗壓試驗後之外觀..... | 86 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 照片 4-27 | 高強度混凝土試體加熱至 600°C 急速冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀..... | 87 |
| 照片 4-28 | 高強度混凝土試體加熱至 600°C 自然冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀..... | 87 |
| 照片 4-29 | 普通混凝土試體加熱至 800°C 急速冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀.....  | 88 |
| 照片 4-30 | 普通混凝土試體加熱至 800°C 自然冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀.....  | 88 |
| 照片 4-31 | 普通混凝土試體加熱至 600°C 急速冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀.....  | 89 |
| 照片 4-32 | 普通混凝土試體加熱至 600°C 自然冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀.....  | 89 |
| 照片 4-33 | 高強度混凝土試體破壞形態.....                            | 90 |
| 照片 4-34 | 普通強度混凝土試體破壞形態.....                           | 90 |

# 第一章 緒論

## 1-1 研究動機

近年來台灣地區人口快速增長，寶島的土地卻無法隨時間而增加，導致山林過度開發，在重大風災地震來臨時，造成嚴重的災難頻傳。在環保意識抬頭、環評、水保的要求漸趨嚴格，人們漸漸的懷疑起人定勝天的道理，隨著大自然一次次的反撲，可想見人們將會漸漸放棄危險的居住區域，集中於相對安全的都會區，隨著時代進步，人口的過度集中造成可以利用的土地越來越少，高層建物成為市場的主流，由於混凝土建材相對便宜，除超高樓層使用鋼結構材料外，絕大多數高層樓房都是使用鋼筋混凝土為建材。

熱鬧繁華的居住地點可以帶來許多的便利，也因都會區的繁榮吸引多數人口的聚集，許多優點的背後也相對的衍生出不少的問題。就如同此論文所要談論的火災災害，在人口聚集過度集中的地方，將帶來更加大的危害。

由於混凝土為優良隔熱材料，可以有效的隔開火源，所以一般來說火災發生時僅有部分樓層受損，且火災損壞範圍集中在表層，以往在災後的處理方式只能消極的將整體建物拆除，但是現今高樓林立，

拆除整體建物造成的財物損失絕非過去所能比擬。火害房屋建築物結構的破壞維修，在土木將會是一大課題，而若能研發有效且經濟的火害補強方式將可節省大量的社會成本。

環氧樹脂為熱固型樹脂，當主劑與硬化劑依定比例混合後，交鏈硬化成強力接著劑，其具有調配容易、塑形容易、不透水等特性，現今在土木方面已用於構造物接著、修補、防水、防蝕等用途，本研究將嘗試以負壓方式將環氧樹脂注入混凝土內部提升混凝土之強度，根據不同情形進行火害後混凝土強度之增強作業，比較注入環氧樹脂前後混凝土強度差異。

## 1-2 研究目的與範圍



混凝土受火害後除其材料物理性質變化外，也造成其內部產生許多裂縫，本試驗嘗試以負壓方式灌入環氧樹脂以修補試體裂縫，增強其強度，並針對產生裂縫的諸多變數進行探討，實務上，火災發生時，現場消防隊員通常以強力水柱急速滅火，造成結構物溫度急遽變化，與一般火害實驗自然置於空氣中之降溫條件截然不同。再者，根據以往研究指出，火害後給予混凝土濕治再養護，將可回復部分強度。故以上述二變數為基礎，本研究將探討以急速冷卻及自然冷卻兩種冷卻方式，滯水再養護及空氣再養護兩種再養護方法所帶來的混凝土強度

差異，分別以環氧樹脂補強後成效進行比較，本研究範圍如下述幾種：

1. 比較混凝土受到不同溫度下以環氧樹脂增強強度回復變化。
2. 比較混凝土在不同降溫方式下以環氧樹脂增強強度回復變化。
3. 比較滯水再養護及空氣再養護之混凝土以環氧樹脂增強強度回復變化。
4. 比較不同再養護時間下以環氧樹脂增強強度回復變化。
5. 比較不同強度混凝土以環氧樹脂增強強度回復變化。

### 1-3 研究方法



以符合規範所制定之強度、坍度、流度之新拌混凝土製作直徑 10 公分高度 20 公分之圓柱試體，放置水中養護至養護齡期完成後，取出試體以烘箱維持  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  持續烘乾一週，以免試體於高溫爐中加熱時爆裂。

本試驗試體普通強度混凝土設計強度為  $280\text{ kgf/cm}^2$ 、高強度混凝土設計強度為  $560\text{ kgf/cm}^2$ ，實驗溫度為高溫爐爐溫達  $600^{\circ}\text{C}$ 、 $800^{\circ}\text{C}$  兩種溫度，達到目標溫度後分為自然降溫及急速降溫兩種降溫方式，降溫一日後又分為空氣再養護、持續泡水再養護兩種再養護方式，再

養護齡期分為 7、28、60、90 天四種齡期，再養護完成之後以環氧樹脂灌入儀將環氧樹脂以負壓灌入毀損的試體中，觀察各情況之下試體回復強度的變化。

## 1-4 研究內容

本論文將各研究方法與試驗目的，所求取的內容分類排列成下列章節：論文中第一章為緒論，文中將簡述其研究動機、研究目的與研究中所探討的範圍、研究的試驗方法簡述；第二章為文獻回顧，針對混凝土各材料之材料性質的文獻結果加以探討彙整，論文中 2-1 為水泥漿體之材料性質分析，2-2 為粒料之熱學性質分析，2-3 探討混凝土高溫作用下性質之變化，2-4 為有關環氧樹脂的各項文獻，在不同環境、溫度的探討，2-5 為非火害裂縫補強的方法與成效；本文中第三章為試驗材料與試驗計劃，3-1 將說明各實驗中所定立的各項變數，3-2 敘述試驗規畫中試體的製作及試驗中所需要的儀器設備，3-3 說明試驗方法與詳細的試驗步驟；論文中的第四章為試驗結果與試驗數據分析討論，4-1 說明混凝土試體受高溫作用後之外觀變化，4-2 敘述混凝土試體火害後再養護對其殘餘強度影響，4-3 為混凝土試體火害後再養護並以環氧樹脂增強之殘餘強度；第五章為結論與建議。

## 第二章 文獻回顧

本研究以普通強度混凝土及高強度混凝土之火害後以環氧樹脂補強為主題，進行研究前，首先將探討混凝土及環氧樹脂各材料特性、力學性質及其熱學反應，以根據各種材料性質進行整體實驗規劃。

### 2-1 水泥漿體之材料性質

#### 2-1-1 水泥成分及其水化性質



水泥的生產原料又稱「生料」為石灰岩（主要成分  $\text{CaCO}_3$ ）與黏土礦物（主要成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，及  $\text{SiO}_2$ ），經過磨細混合均勻組成，「生料」以高溫燒結成「熟料」，再加入石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，簡寫為  $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ ）加以研磨及可製成水泥。卜特蘭水泥的主要成分為矽酸三鈣（ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，簡寫為  $\text{C}_3\text{S}$ ）、矽酸二鈣（ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，簡寫為  $\text{C}_2\text{S}$ ）、鋁酸三鈣（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，簡寫為  $\text{C}_3\text{A}$ ）、鋁鐵酸四鈣（ $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，簡寫為  $\text{C}_4\text{AF}$ ），標準 I 型普通卜特蘭水泥成分為  $\text{C}_3\text{S}:50\%$ 、 $\text{C}_2\text{S}:25\%$ 、 $\text{C}_3\text{A}:12\%$ 、 $\text{C}_4\text{AF}:8\%$ 、 $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2:5\%$ ，由於 I 型水泥最為便宜，除特殊需求外，國內絕大數工程皆使用 I 型普通卜特蘭水泥，本試驗亦採

用之。

當水泥加水後產生水化反應形成各種水化產物， $C_3S$  及  $C_2S$  為混凝土強度主要來源， $C_3S$  對初期強度有較大貢獻，但後強度成長較慢，由於其初期強度成長快速，水化物排列組合較差，不利混凝土緻密性及耐久性，而  $C_2S$  初期強度成長有限，後期強度成長迅速，為混凝土主要水化熱來源，其水化膠體逐漸填滿水化空間，有利混凝土體積穩定性。 $C_3S$  及  $C_3A$  為混凝土水化熱主要來源，而  $C_2S$  放熱最少。

## 2-1-2 水泥漿體與水泥砂漿受熱之變化



水泥與水產生水化作用後形成水化產物分別為鈣矽水化物（C-S-H）及氫氧化鈣（C-H），水泥漿體受熱時其性質主要受到水份改變及漿體分解與熔合之影響，通常水泥漿體受熱溫度在 $105^{\circ}\text{C}$ 以內會使毛細水及膠孔水蒸發、而受熱溫度 $105^{\circ}\text{C}\sim 440^{\circ}\text{C}$ 時C-S-H結晶水分解、受熱溫度 $440^{\circ}\text{C}\sim 580^{\circ}\text{C}$ 則C-H結晶水分解、水泥漿體在受熱溫度 $580^{\circ}\text{C}\sim 1007^{\circ}\text{C}$ 時 $\text{CaCO}_3$ 分解，並逐漸重新燒結成水泥熟料，再生化學變化而重具鍵結力。

## 2-2 粒料之熱學性質

粒料因其所含成分而分為矽質粒料（又稱酸性粒料，Siliceous Aggregate）及鈣質粒料（又稱鹼性粒料，Carbonate Aggregate），矽質粒料主要由石英岩、石英片岩和片狀砂岩組成，鈣質粒料主要由石灰岩、雲母組成，粒料熱學性質因其分類而有所不同。

### 2-2-1 粒料之物理性質



粒料因種類之不同其膨脹係數亦相異，如表2-1【1】所示，台灣最常見的粒料為安山岩、砂岩及石灰岩，見表所知其熱膨脹係數分別為 $4.1\sim 10.3 (10^{-6} / ^\circ\text{C})$ 、 $4.3\sim 13.9 (10^{-6} / ^\circ\text{C})$ 、 $0.9\sim 12.2 (10^{-6} / ^\circ\text{C})$ 。

在混凝土的組成中，大部分為粗細粒料及卜作嵐材料，因此採用不同種類之粒料製作試體，其混凝土的熱膨脹係數也受粒料所影響控制，造成混凝土將有不同的熱膨脹係數，如表2-2【2】所示，其中，經由水中養護的混凝土其熱膨脹係數低於在空氣中養護之混凝土。

由於岩石的孔隙不同，造成不同的比重，一般岩石比重介於2.6~2.7之間，各種岩石的比重值如表2-3【3】所示，岩石比重值越低比表面積質就越大、孔隙就越多，而孔隙多的岩石在遇高溫時較不

易因膨脹造成強度損失，反之，比重較大的岩石遇高溫時，由於沒有多餘孔隙可供膨脹，易造成裂縫甚至爆裂及強度下降的現象。

## 2-2-2 高溫下粒料之體積變化

粒料因成份之不同可分為矽質粒料及鈣質粒料，矽質粒料又稱酸性粒料，鈣質粒料又稱鹼性粒料，由文獻【4】、【5】、【6】得知此二類粒料在高溫下之主要性質如下：

### 1. 矽質粒料：

矽質粒料平均熱膨脹係數約為 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，石英加熱至 $500^{\circ}\text{C}$ 時，產生約2.8%之體積膨脹，石英加熱至 $573^{\circ}\text{C}$ 時，會由 $\alpha$ 相轉變為 $\beta$ 相，石英加熱至 $573^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ 體積膨脹不再增加，在 $900^{\circ}\text{C}$ 以上時，大量氣體分解產生不規則之體積變化。

### 2. 鈣質粒料：

鈣質粒料平均熱膨脹係數約為 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，若黑雲母含量較高，則在 $650^{\circ}\text{C}$ 以上有較高之熱膨脹係數，若白雲母含量較高，在 $900^{\circ}\text{C}$ 以上，會有收縮現象發生，當溫度達 $700^{\circ}\text{C}$ 以上， $\text{CaCO}_3$ 分解為氧化鈣及二氧化碳。

## 2-3 混凝土高溫作用下之性質

### 2-3-1 混凝土高溫作用下之殘餘強度

普通強度混凝土具有良好的耐火性，但高強度混凝土於高溫中易產生爆裂行為，因此其耐火性受到質疑，文獻【7】得知混凝土試體加熱至1200°C時，普通強度混凝土及高強度混凝土折減方式十分相似，高溫中混凝土折減方式分為三階段(如圖2-1)，溫度20°C~400°C時，高強度混凝土強度幾乎沒有損失，而普通強度混凝土有少部分的損失；溫度400°C~800°C時，混凝土結晶水脫水，高強度混凝土及普通強度混凝土皆有大量強度損失；800°C以上各試體折減情形逐漸平緩。在文獻【8】中研究不同強度試體在受高溫之後，放置於一般空氣中冷卻至室溫，比較降溫前後試體殘餘強度，觀測得知降溫後試體抗壓強度較降溫前低，其中高強度混凝土受溫400°C以下時，降溫前後強度並無明顯差異，甚至有時降溫後之殘餘強度超過降溫前之殘餘強度，(如圖2-2)。而文獻【8】、【9】中分別使用常溫及噴水兩種冷卻方式探討混凝土高溫後之殘餘強度，結果發現噴水冷卻較常溫冷卻的殘餘強度更低，如圖2-3【8】所示。

### 2-3-2 混凝土高溫作用下之孔隙變化

文獻【7】當中，分別以三種配比的混凝土製作直徑10 cm高20 cm之圓柱試體，試體配比及其抗壓強度（如表2-4），此文獻以灌入水銀的方式量測混凝土受高溫600°C前後之孔隙體積，圖2-4結果發現普通強度混凝土高溫前後孔隙體積皆為高強度混凝土的2倍以上，但由圖2-5得知高溫後之高強度混凝土以直徑大於1.3 $\mu\text{m}$ 的大孔隙居多，經由評估發現高溫後強度混凝土耐久性損失及滲透率提高皆比普通強度混凝土多。文獻【10】中則是分別以四種配比的混凝土製作10×10×10(cm)試體，其試體配比（如表2-5），同樣以灌入水銀的方式量測混凝土受高溫800°C前後之孔隙體積，圖2-6當中高強度混凝土於高溫前後的孔隙比差距較普通強度混凝土多，且圖2-7中也同樣發現高強度混凝土高溫後以大孔隙占總孔隙的絕大部分，由圖2-8發現高溫後普通強度混凝土之殘餘強度百分比大於高強度混凝土。

### 2-3-3 混凝土高溫作用下之外觀變化

混凝土受高溫作用後，外觀變化分為顏色及裂縫兩種，文獻【4】

可知試體受高溫後顏色由灰逐漸轉深灰再變成淡土黃色，而當溫度達到800°C時試體表面會析出CaCO<sub>3</sub>所組成的白色粉末，在高溫作用之下由於試體內部與表面溫度差異，試體斷面呈現同心圓顏色，越接近試體中心呈現深灰色，而越接近表面呈現淡黃色，試體顏色變化為永久性不隨空氣養護或是水養護而改變。

在裂縫發展方面，造成混凝土在高溫下形成裂縫的原因有二，一為水泥砂漿受熱收縮而粗粒料受熱膨脹，兩者膨脹係數相差近兩倍，使試體加溫及降溫過程中脹縮不諧和，試體內部產生熱應力，當此熱應力大於混凝土抗拉強度，試體因此產生裂縫；另一原因由文獻【9】可知混凝土砂漿中C-H-C-S-H組織在高溫中產生顆粒化且極度鬆軟，造成試體在高溫下裂縫持續增大。



#### 2-3-4 混凝土高溫作用下之爆裂現象

混凝土受到高溫時可能產生表層剝離、角部開裂等破裂形式，嚴重時發生爆裂現象，通常混凝土發生爆裂現象的溫度範圍是300~600°C，而高強度混凝土爆裂的發生機率遠大於普通強度混凝土，導致這個現象的因素可分為內部及外部兩種，內部因素包含混凝土水灰比、摻料、含水率、滲透性、試體形狀；外因素包含升溫速率、熱應力、

外部荷載。文獻【11】使用板構材進行火害試驗，提出混凝土含水率提高時，高溫下爆裂機率增加（如圖2-9），其中高強度混凝土在飽和狀態時爆裂機率达100%，普通強度混凝土不產生爆裂，文獻【12】研究發現水灰比大於0.32，相對溼度小於75~80%時，高強度混凝土爆裂的危險性降低；國際上現行標準升溫曲線包含ISO 834、DIN 4102、ASTM E119和BS 476，這些升溫方式非常容易造成爆裂發生，文獻【13】提出實驗發現，與無加載升溫相比，恆溫加載和恆載升溫情況較容易發生爆裂。

## 2-4 環氧樹脂之應用



環氧樹脂是由一種高分子化合物，由主劑與硬化劑結合組成，主劑與硬化劑原為液態，兩劑混合後逐漸硬化為固體。環氧樹脂首先於1930年，由瑞士Pierre Castan 和美國Greenlee 完成，1933年德國Schlack 首創了由雙酚A 合成的環氧樹脂。1936年德國Castan 製成了低熔點的雙酚A 與環氧氯丙烷合成較高分子量的環氧樹脂。1946年美國Greenlee 開始大量生產環氧氯丙烷，而在次年，即開始工業化生產環氧樹脂。

環氧樹脂因具有優異的接著性、耐溶劑性、電氣絕緣性、加工性、

機械強度等特性被廣泛應用於各項領域中，目前於營建工程上環氧樹脂被用於一般結構物補強之黏著或填充材料。文獻【14】中使用鋼板貼片補強，利用環氧樹脂黏著鋼板於結構需要補強部位（如圖2-10、圖2-11），其中鋼板與混凝土接合面空隙因環氧樹脂注入的方式不同可分為灌注法與壓注工法兩種，國內現以灌注法居多，此工法係鋼板由工廠加工裁切製成所需要的尺寸，利用螺栓將鋼板固定於構材，螺栓位置應避開鋼筋，利用墊片使鋼板與混凝土接合面間保持約3mm~6mm 間隙，再由預留孔隙注入環氧樹脂至溢出上方導氣孔為止，使鋼板與混凝土構材斷面形成一體達到斷面補強效果。文獻【15】中混凝土結構物植筋補強以樹脂材料作為植筋膠（如表2-6），混凝土底材之強度較高時，鋼筋之抗拉能力相對較高，但底材強度高低將不會影響其拉拔後之破壞模式。此外，植筋深度較淺時(4 cm)，破壞方式由混凝土強度控制；植入深度較深時(6 cm 或8 cm)，破壞方式由植筋膠及鋼筋來控制。經本研究結果顯示，鋼筋埋入樹脂系維修材料之拉拔力遠高於水泥系之維修材料。文獻【16】當中以碳纖維或玻璃纖維貼布纏繞火害後混凝土試體，外層以環氧樹脂固定，借以修復火害後混凝土試體，其試驗結果（如表2-7），結果發現修復後試體皆能達到原始強度以上，且碳纖維圍束效果優於玻璃纖維效果。

經由環氧樹脂補強之結構由要注意的是環氧樹脂不耐高溫，其黏

著力隨受溫溫度及延燒時間的增加而減少，環氧樹脂受溫後殘餘強度隨其累積熱能增加而減少，文獻【14】中以環氧樹脂黏結鋼板之混凝土試體，經過加溫試驗指出當黏結層受較低溫度或處於常溫狀態，例如 $100^{\circ}\text{C}$ 以下，試體強度為 $3.1$ 至 $2.36\text{MPa}$ 之間，試體破壞類型主要為混凝土材料破裂（圖2-12，第I型），顯示黏結層殘餘強度仍大於混凝土抗拉強度，此時黏結層發揮作用，黏結應力可經由黏結層有效傳遞至混凝土，試體破壞面在混凝土；黏結層受溫 $150^{\circ}\text{C}$ 時，試體強度為 $1.43$ 到 $2.67\text{MPa}$ ，除了混凝土破壞為主要型式外，另伴隨混凝土與黏結層之界面破壞（圖2-12，第III型）及黏結層材料破裂（圖2-12，第II型），顯示此時黏結層殘餘強度已臨界於混凝土抗拉強度；黏結層受溫 $200^{\circ}\text{C}$ 並伴隨有1小時以上較長的受溫延燒時，試體強度驟降至 $0.81$ 到 $0.9\text{MPa}$ ，此主要的破壞型式大多為混凝土與黏結層之界面破壞（圖2-12，第III型）、黏結層與鋼板黏結界面破壞（圖2-12，第IV型）並伴隨黏結層材料破裂（圖2-12，第II型），顯示此時大部份試體之黏結層殘餘強度已低於混凝土抗拉強度。由此研究可推測，由環氧樹脂補強後之構件，受溫後無法維持原先補強效果，因此補強之後應搭配防火材料為佳。

## 2-5 裂縫補強

在文獻【14】、【16】中以鋼板貼附，或是以纖維材料纏繞混凝土試體皆是提供外加圍束力，無法加強內部混凝土的強度，混凝土本身幾乎無法提供補強後試體強度。而實際上針對混凝土裂縫補強的研究如下，文獻【17】當中澆置混凝土試體時以鋼板置入模具（如照片2-1、2-2）內製成試體表面之人工裂縫，再將環氧樹脂塗布於裂縫中，待環氧樹脂硬固後進行抗壓試驗，結果顯示如表2-8，補強後試體大致能恢復試體原強度的二到三成。實務上，環氧樹脂已被接受用於注入裂縫補強，文獻【18】當中提到之裂縫注入環氧樹脂工法，主要用於裂縫處，採高壓方式將環氧樹脂注入裂縫中，使結構物內部不會因為裂縫延伸而繼續破壞，以增加服務年限，所謂高壓方式如圖2-13【19】，活篩端給予大約 $2 \text{ kg/cm}^2$ 的壓力，將針管中環氧樹脂注入裂縫，但由於針管注入法較適合混凝土表面且規則的裂縫，故在本試驗當中不以此方法注入環氧樹脂。

## 第三章 試驗材料與試驗計劃

本研究旨在探討混凝土加熱至不同目標溫度後，以不同冷卻方式、再養護方式及再養護齡期，再以環氧樹脂進行火害補強，探討其成效及結果。

### 3-1 實驗變數

本研究之實驗變數有加熱溫度、冷卻方式、再養護方式、再養護齡期、混凝土強度五個變數。



#### 1. 加熱溫度

根據以往文獻【4】、【7】、【8】、【9】顯示，一般強度混凝土加熱溫度低於  $600^{\circ}\text{C}$  時，殘餘強度可接近五成，若泡水再養護一個月強度可恢復至六成，因此可預見  $600^{\circ}\text{C}$  以下加熱溫度使用補強效果有限，且與實際火災溫度相差甚遠；而文獻指出當火災超過  $800^{\circ}\text{C}$  時，混凝土殘餘強度不到二成，極可能在進行補強之前，已對結構物造成立即性的損壞，且混凝土隔熱效果良好，損害部分大多侷限於表面，要使混凝土構件內部超過  $800^{\circ}\text{C}$  必須要許久的延時，探討高溫  $800^{\circ}\text{C}$  以上的火害補強失去其實用意義，基於以上原因，本研

究高溫火害下混凝土補強溫度變數僅分為 600°C 及 800°C 兩種討論。

## 2. 冷卻方式

為模擬實際火災中強力水柱下混凝土急速降溫，與未噴水區混凝土自然降溫的差異性質，本試驗冷卻方式分為加熱完成後直接將試體置入水中的急速冷卻，以及加熱完成後將試體置於空氣中直到試體溫度與室溫一致的自然冷卻兩種冷卻方式。

## 3. 再養護方式



混凝土受高溫之後如經過泡水再養護混凝土將產生再水化作用，恢復部分強度，因此本試驗考慮兩種再養護方式，一種為滯水再養護，其程序為試體降溫一日待試體達到常溫後，將試體置於水中持續泡水養護，直至試驗預定齡期結束；另一種方式為空氣再養護，其程序為試體降溫一日後置於空氣中直至試驗預定齡期結束。

## 4. 再養護齡期

根據以往文獻【4】顯示，再養護齡期初期強度會持續降低，隨後開始增強，大致 3 個月以後試體回復強度趨近穩定，故本研究齡期選擇 7、28、60、90 天四種。

依上述變數本研究試體實驗組（如表 3-1）分類；另外為與補強後試體強度作為比較，對照組分別如下，（1）未經高溫損害之試體面乾內飽和抗壓強度：此試驗強度視為試體原始強度，本試驗所敘述試體之殘餘強度百分比皆以此強度作為比較基準（2）加溫後自然冷卻與急速冷卻無再養護之試體抗壓強度：此試驗強度為火害後之即時強度，用於判定試體再養護成效之基準（3）加溫後自然冷卻與急速冷卻以水再養護 90 天之試體抗壓強度：此試驗強度為火害後經由再養後達到極限穩定之強度，用於判定試體經由補強後成效之基準，本試驗對照組（如表 3-2）。普通強度混凝土共 30 組試體，每組試體 4 顆標準試體，全實驗共使用 120 顆標準試體，高強度混凝土不考慮自然降溫空氣冷卻及再養護齡期 7 天共使用 76 顆標準試體。

## 3-2 試體製作及試驗設備

### 3-2-1 試體製作

本試驗以普通強度混凝土（配比如表 3-3）、高強度混凝土（配比如表 3-4），製作直徑 10 cm 高度 20 cm 圓柱試體，試體的製作分三層

搗實，以 3/8"搗棒均勻搗實每層各 25 下，填模完成後，將模頂刮平，待 24 小時後拆模放入飽和氫氧化鈣水當中進行養護。

### 3-2-2 試驗設備

#### 1. 高溫爐：

本試驗加溫方式以詠欣有限公司 Yeong Shin 可程式控制高溫爐，可設定 2 組升溫程式，一組升溫程式可設定 8 段線性升溫段（參閱照片 3-1）。

#### 2. 烘箱：為以免試體在試驗加溫階段產生爆裂現象，試體試驗之前以本設備(照片 3-2)設定 $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 持續烘乾一週，。

#### 3. 環氧樹脂灌入儀：

由本研究室設計委外製作，(如照片 3-3、圖 3-1)儀器共有兩槽，左槽為環氧樹脂放置槽，用於儲存環氧樹脂，右槽為真空槽，內部存放待試驗之試體，可抽為真空並外接壓力表顯示負壓大小，環氧樹脂放置槽、真空槽兩槽之間以單向閥連接，真空槽又以單向閥連接幫浦提供負壓，環氧樹脂放置槽下方、真空槽下方以及真空槽連結幫浦之管線下方都各設有一組清洗開關閥，用於試驗結束後環氧樹脂以及清洗液之排出。

4. 萬能試驗機：抗壓試驗由 Shimadzu 公司 100 噸材料試驗機(參閱照片 3-4)進行試體抗壓強度試驗。

### 3-3 試驗方法

#### 3-3-1 試體準備

本試驗當中試體拆模作業完成之後，將試體置入飽和氫氧化鈣水溶液進行養護作業，養護完成後由養護池取出試體表面以乾布拭乾視為面乾內飽和，接著除對照組中之原始試體強度直接進行抗壓作業外，其餘組別之試體由於許多研究指出，新拌混凝土孔隙內水分過高，升溫時孔隙壓力加大容易造成爆裂，然而現實中火害建物如興建年代久遠混凝土內之多於游離水大多早已蒸發，升溫後不應有爆裂情形，為模擬真實情況，且預防試體爆裂損害設備、無法繼續進行試驗，試驗前試體先以烘箱維持  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  持續烘乾一週後，待冷卻至室溫，再行加溫步驟。

### 3-3-2 試體加溫與冷卻

本研究以爐溫 600°C、800°C 為目標控制溫度，升溫速率 7.5°C/min，爐溫達至目標溫度後，持溫 3 小時，模擬建築技術規則中建築物之防火時效（如表 3-5）。本研究試體加溫後分為急速冷卻及自然冷卻，急速冷卻是於爐溫達到目標溫度持溫三小時後，打開高溫爐門並以工具將試體夾入水槽中急速降溫，自然冷卻是於爐溫達到目標溫度持溫三小時後，將高溫爐門開啟使熱空氣與室內空氣自然對流，達到降溫效果。由於高溫燒去混凝土上的標記不利試驗辨識，試體急速冷卻後二小時將試體拿出水中晾乾，以便隔日標記，自然冷卻的試體待試體冷卻後進行標記，降溫作業後 24 小時進行再養護。

### 3-3-3 試體加溫後之冷卻及再養護

本試驗再養護分為水養護及空氣養護，水養護是將試體置入水槽，使試體內水泥可進行再水化作用，回復部分強度；空氣養護是將試體直接暴露於大氣中，不作任何養護動作，只吸收空氣中之水分，以模擬現行火害建物之狀況，直至要灌入環氧樹脂補強時，再將試體取出使用，完成再養護之試體，由於孔隙中有許多殘餘水分，不利環氧樹

脂灌入，故先放至空氣中 24 小時晾乾再以烘箱維持  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  持續烘乾 2 天以蒸發孔隙自由水，烘乾作業後進行灌入環氧樹脂。

### 3-3-4 試體以環氧樹脂補強

環氧樹脂補強試體工作，首先將各管線開關閥關閉，再將環氧樹脂放入環氧樹脂放置槽。待補強混凝土試體放入真空槽(如照片3-5)，隨後關閉環氧樹脂放置槽及真空槽之頂蓋，接著開啟真空幫浦至真空槽管線單向開關閥，啟動真空幫浦，將真空槽空氣抽出形成負壓，待真空壓力表顯示真空槽內壓力達到負壓 $0.5\text{ kg/cm}^2$ 後關閉馬達，並關閉真空槽至真空幫浦之間的單向閥開關，接著開啟環氧樹脂放置槽及真空槽連接管開關閥利用負壓抽取環氧樹脂放置槽內之環氧樹脂至真空槽中並吸入試體中，直至負壓消失後，打開真空槽頂蓋取出試體。試體取出後，分別打開環氧樹脂放置槽、真空槽以及真空槽與真空馬達之間管線下方之清潔單向開關閥，排除剩餘環氧樹脂，待環氧樹脂排除後，將各管線開關閥關閉，再將清洗藥劑放入環氧樹脂放置槽，同樣以上述負壓步驟進行三次，將環氧樹脂灌入儀各管線清洗以保持暢通、避免堵塞，補強作業7天後進行抗壓試驗，比較補強前後強度之改變。

## 第四章 試驗結果與分析

### 4-1 混凝土試體受高溫作用後之外觀變化

由文獻【4】得知，高性能混凝土試體若未經烘乾直接置入高溫爐加溫，約在 430°C 時試體產生爆裂，而文獻【11】中也說明，對於高性能混凝土，隨著含水率增高，其爆裂頻率增加，為避免爆裂現象發生，本試驗試體均先以 105±5°C 烘乾 7 天後才進行高溫加熱。本試驗試體受高溫作用後之外觀變化分為顏色及裂縫二種，其詳細結果下述如下：



#### 1. 顏色變化

本試驗以高溫 600°C 及 800°C 進行火害試驗，在高溫作用之下，試體表面形呈白色粉狀固體，其中受溫 800°C 之試體粉末多於 600°C 時，經文獻【4】得知其白色粉末為  $\text{CaCO}_3$ ，清除表面粉末之後，在高溫 800°C 之下，混凝土呈獻深褐色，如照片 4-1，而在高溫 600°C 之下，混凝土呈現灰褐色，如照片 4-2，若將試體進行抗壓作業，將試驗後之試體從中間切開，由於承受高溫時混凝土溫度由外往內遞減，受溫不同呈現不同顏色，斷面呈現同心圓狀，圓心處顏

色為接近試體原色的深灰色，試體越外緣越接近表面的火害後顏色，經由表面及斷面觀察，由照片 4-3~4-6 之火害後混凝土試體斷面圖可知火害後試體顏色變化，與混凝土強度沒有顯著的關係，火害 800°C 試體與火害 600°C 試體相較斷面圓心處 800°C 試體深灰色範圍較少。

## 2. 裂縫變化

本研究在加熱升溫速率與目標溫度沿時維持一定的原則下，高溫下混凝土的裂縫變化，可以就混凝土強度、加熱目標溫度與加熱後混凝土冷卻方法三大原因探討：

### (1) 混凝土強度對裂縫的影響

高強度混凝土較一般強度混凝土緻密，因此加熱後，可以提供粒料及水泥等成分膨脹的孔隙較少，故較容易造成混凝土試體開裂。在目標溫度 800°C、加熱完成後自然冷卻的情況下，高強度混凝土(照片 4-9、4-10)呈現密集的網狀裂縫，以試體上視圖觀察發現裂縫大致呈放射狀網格，而最小裂縫間之距離約 2 mm；普通強度混凝土(照片 4-18、4-19)，明顯發現裂縫間距較為寬鬆，裂縫數量也較少，最小裂縫間之距離約為 6 mm，且其裂縫寬度較高強度混凝土試體的裂縫細。

(2) 加熱目標溫度對混凝土裂縫影響：

本試驗加熱目標溫度分為 600°C 及 800°C 兩種，600°C 自然冷卻之下，普通強度混凝土(照片 4-21、4-22)呈現細微的裂縫，高強度混凝土(照片 4-13、4-14)呈現明顯的網狀裂縫；而在目標溫度 800°C 自然冷卻之下，普通強度混凝土(照片 4-17、4-18)與高強度混凝土(照片 4-9、4-10)均比目標溫度 600°C 自然冷卻時(照片 4-21、4-22 與照片 4-13、4-14)，形成了更加密集且明顯的網狀裂縫。

(3) 混凝土加熱後冷卻方式對混凝土裂縫影響

本研究中，混凝土加熱後冷卻方式分為自然冷卻及急速冷卻，自然冷卻下，試體由高溫慢慢降至室溫，裂縫寬度較細，急速冷卻下(照片 4-7、4-8、4-11、4-12、4-15、4-16、4-19、4-20)，試體表面由高溫快速冷卻，由於試體內外溫差極大，形成較大的裂縫。

## 4-2 混凝土試體火害後再養護對其殘餘強度影響

本研究對照組試體分為高強度混凝土、普通強度混凝土兩種討論，以試體原始強度對試驗強度進行正規化，計算試體殘餘強度百分比，

其試驗結果如下：

### 1. 高強度混凝土

如圖 4-1 所示，試體受高溫  $800^{\circ}\text{C}$  後，急速冷卻未再養護之殘餘強度為 10.8%，若急速冷卻後以滯水再養護 90 天其殘餘強度為 15.4%；自然冷卻未再養護之殘餘強度為 16.9%，若自然冷卻後以滯水再養護 90 天其殘餘強度為 18.4%。試體受高溫  $600^{\circ}\text{C}$  後，急速冷卻未再養護之殘餘強度為 31.7%，若急速冷卻後以滯水再養護 90 天其殘餘強度為 50.7%；自然冷卻未再養護之殘餘強度為 34%，若自然冷卻後以滯水再養護 90 天其殘餘強度為 56%。

### 2. 普通強度混凝土

如圖 4-2 所示，試體受高溫  $800^{\circ}\text{C}$  後，急速冷卻未再養護之殘餘強度為 18.4%，若急速冷卻後以滯水再養護 90 天其殘餘強度為 20.8%；自然冷卻未再養護之殘餘強度為 34.8%，若自然冷卻後以滯水再養護 90 天其殘餘強度為 34.3%。試體受高溫  $600^{\circ}\text{C}$  後，急速冷卻未再養護之殘餘強度為 45.9%，若急速冷卻後以滯水再養護 90 天其殘餘強度為 49.3%；自然冷卻未再養護之殘餘強度為 54.2%，若自然冷卻後以滯水再養護 90 天其殘餘強度為 58.3%。

由以上試驗結果得知高強度混凝土火害後殘餘強度百分比損失較普通強度混凝土多，火害後急速冷卻的混凝土殘餘強度百分比損失較自然冷卻混凝土多，進行再養護作業後試體強度有微幅提升，其中火害溫度 600°C 試體提升強度較 800°C 多。

### 4-3 混凝土試體火害後再養護並以環氧樹脂補強之外觀變化

以環氧樹脂灌入試體，外觀會依再養護方式呈現兩種樣貌，未經滯水再養護的試體(照片 4-23)，由於表面經過高溫加熱，會殘留些許  $\text{CaCO}_3$  粉末，在使用環氧樹脂補強材料補強時，環氧樹脂會和  $\text{CaCO}_3$  粉末混合附著在試體表面，故試體表面顏色會摻雜白色的花紋；然而經過滯水再養護的試體(照片 4-24)，因表面  $\text{CaCO}_3$  粉末經再養護時會被養護水所溶解，在進行補強之時，環氧樹脂會單獨包覆試體，未摻雜  $\text{CaCO}_3$  粉末，表面顏色相對均勻。以環氧樹脂補強之試體抗壓之後外觀(如照片 4-25~4-32)，高強度混凝土在 800°C 高溫下，無論以何種冷卻方式，以環氧樹脂補強之試體抗壓外觀皆為柱狀破壞，在 600°C 高溫下，急速冷卻試體抗壓外觀近似圍束破壞，由試體底部向上產生直向裂縫，自然冷卻試體抗壓外觀為柱狀破壞；普通強度混凝土 800°C 高溫下，急速冷卻試體以環氧樹脂補強後抗壓外觀仍為柱狀，

而自然冷卻試體以環氧樹脂補強後抗壓外觀猶如圍束作用下造成之挫屈破壞，在 600°C 高溫下，試體抗壓外觀接近一般未受火害試體之柱狀破壞。由照片 4-33、4-34 所示，本試驗高強度混凝土及普通強度混凝土未受火害試體之破壞模試皆為柱狀破壞，由此可推論柱狀破壞試體為混凝土破壞控制、圍束破壞試體為環氧樹脂破壞控制。

#### 4-4 混凝土試體火害後再養護並以環氧樹脂補強之殘餘強度

本試驗當中，混凝土經不同高溫火害之後，以不同方式再養護，再以環氧樹脂補強試體，試體之殘餘強度因其實驗條件而有所不同，以下分為四大主題探討其實驗結果：

##### 1. 高強度混凝土受溫 800°C

###### (1) 急速冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 800°C 後，急速冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-3），虛線部分為本試驗對照組，分別代表高強度混凝土受高溫 800°C 後，急速冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 10.8%，以及高強度混凝土受高溫 800°C 後，急速冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原

始試體強度的 15.4%。而本組試驗對照組有二，其一為高強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 25.4%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 14.6%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 10%；另一對照組為高強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 23.1%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 12.3%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 7.7%。

## (2) 自然冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 800°C 後，自然冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-4），本試驗對照組如下，高強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 16.9%；高強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 18.4%。而本組試驗對照組如下，高強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 26.9%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 10%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 8.4%；

高強度混凝土受溫  $800^{\circ}\text{C}$  後，自然冷卻並且滯水再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 32.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 15.7%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 14.2%；另一對照組為高強度混凝土受溫  $800^{\circ}\text{C}$  後，自然冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 25.5%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 8.6%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 7.1%。

整體而言高強度混凝土受高溫  $800^{\circ}\text{C}$  後即使以環氧樹脂補強，其殘餘強度僅達原強度約三成左右，由環氧樹脂增強強度大約為原強度的一成。

## 2. 高強度混凝土受溫 $600^{\circ}\text{C}$

### (1) 急速冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫  $600^{\circ}\text{C}$  後，急速冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-5），高強度混凝土受高溫  $600^{\circ}\text{C}$  後，急速冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 31.7%；高強度混凝土受高溫  $600^{\circ}\text{C}$  後，急速冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 50.7%。本組試驗對照組有二，

其一為高強度混凝土受溫 600°C 後，急速冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 96.1%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 64.4%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 45.4%；另一對照組為高強度混凝土受溫 600°C 後，急速冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 52.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 20.9%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 1.9%。

## (2) 自然冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 600°C 後，自然冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-5），本試驗對照組如下，高強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 34%；高強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 56%。而本組試驗對照組如下，高強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 67.5%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 33.5%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 11.5%；高強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 60 天護再以環氧

樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 67.3%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 33.3%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 11.3%；另一對照組為高強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 73%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 39%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 17%。

由以上結果發現，高強度混凝土受高溫 600°C 後以環氧樹脂補強，其殘餘強度皆達原強度五成以上，補強效果相當不錯，由環氧樹脂增強強度為原強度一至四成，且隨著再養護天數增加，補強效果有遞減情況發生。

### 3. 普通強度混凝土受溫 800°C

#### (1) 急速冷卻滯水再養護

普通強度混凝土在受溫 800°C 後，急速冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-7），本試驗對照組，分別為普通強度混凝土受高溫 800°C 後，急速冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 18.4%，以及普通強度混凝土受高溫 800°C 後，急速冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度

的 20.8%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 28.9%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 10.5%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 8.1%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 23.5%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 5.1%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 2.7%；另一對照組為普通強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 25.5%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 7.1%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 4.7%。

## (2) 自然冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 800°C 後，自然冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-8），本試驗對照組如下，普通強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 34.8%；普通強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 34.3%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 800°C 後，

自然冷卻並且滯水再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 46.8%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 12%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 12.5%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 41.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 6.8%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 7.3%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 40%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 5.2%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 5.7%；另一對照組為普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 32.8%，本數據殘餘強度甚至低於對照組數據，視為實驗誤差所致。

### (3) 自然冷卻空氣再養護

普通強度混凝土在受溫 800°C 後，自然冷卻並給與空氣再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-9），本試驗對照組如下，普通強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 34.8%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土

土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 46.8%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 12%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 44.9%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 10.1%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 41.2%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 6.4%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 41.7%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 6.9%。

整體而言普通強度混凝土受高溫 800°C 後即使以環氧樹脂補強，其殘餘強度僅達原強度約四成左右，其中以環氧樹脂增加試體強度皆於一成上下，且隨著再養護天數增加，補強效果有遞減情況發生。

#### 4. 普通強度混凝土受溫 600°C

##### (1) 急速冷卻滯水再養護

普通強度混凝土在受溫 600°C 後，急速冷卻並給與滯水再養護再以

環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-10），普通強度混凝土受高溫 600℃ 後，急速冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 45.9%；普通強度混凝土受高溫 600℃ 後，急速冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 49.3%。本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 600℃ 後，急速冷卻並且滯水再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 75%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 29.1%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 25.7%；普通強度混凝土受溫 600℃ 後，急速冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 63.7%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 17.8%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 14.4%；普通強度混凝土受溫 600℃ 後，急速冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 49.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 3.7%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，僅提升原強度的 0.3%。

## (2) 自然冷卻滯水再養護

普通強度混凝土在受溫 600℃ 後，自然冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-11），本試驗對照組如下，普通強

度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 54.2%；普通強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 58.3%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 80.3%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 26.1%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 22%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 79.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 25.4%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 21.3%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 67.4%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 13.2%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 9.1%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 77.4%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 23.2%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 19.1%。

### (3) 自然冷卻空氣再養護

普通強度混凝土在受溫 600°C 後，自然冷卻並給與空氣再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4-12），本試驗對照組如下，普通強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 54.2%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且空氣再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 65%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 10.8%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且空氣再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 69%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 14.8%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度低於對照組數據視為試驗誤差。

由以上結果發現，普通強度混凝土受高溫 600°C 後以環氧樹脂補強，其殘餘強度皆達原強度六成以上，補強效果相當不錯，其中由環氧樹脂所提升的強度為原強度的一至三成，且隨著再養護天數增加，補強效果有遞減情況發生。

經由以上分析可得知環氧樹脂在 800°C 火害混凝土之補強效果有

限，補強後仍不能達其適用性，探究原因應是 800°C 火害之後，混凝土開裂過大，環氧樹脂無法有效接合混凝土碎塊，導致其強度提升不如預期；相較之下混凝土受高溫 600°C 後以環氧樹脂補強的補強成效相當不錯，值得探討與發展。

本研究當中大部分數據（圖 4-3~圖 4-12）顯示隨著再養護時間的增加，以環氧樹脂補強後試體殘餘強度逐漸遞減，探究其因素，由文獻【4】可知，混凝土火害後再養護，可使試體中水泥再水化，提升試體強度，經由本試驗成果，隨養護時間的增加試體補強後之殘餘強度越低，此結果即可能是因再養護造成裂縫修補，阻礙環氧樹脂灌入內部所致，以上結果可知在火害早期補強效果較佳。

為何在受溫 800°C 時，空氣養護試體強度較滯水養護試體強度多，但是受溫 600°C 時空氣養護試體強度卻較滯水養護試體強度少？探究原因，試體經高溫後表面沉積大量  $\text{CaCO}_3$  粉末，滯水再養護將試體表面粉末溶解，環氧樹脂補強時容易進入試體內，相較之下，空氣再養護試體表面仍殘留  $\text{CaCO}_3$  粉末，環氧樹脂補強時不易進入試體內，受溫 800°C 時由於環氧樹脂補強效果有限，所以空氣再養護試體強度與滯水再養護試體強度相差不多，受溫 600°C 時由於環氧樹脂補強效果佳，明顯拉開兩組試體的差距。整體而言空氣再養護試體強度曲線

圖（圖 4-9、圖 4-12）較不連貫，是由於試體表面所殘留之  $\text{CaCO}_3$  粉末經由搬運而掉落，粉末掉落的多寡影響試驗強度所致。



## 第五章 結論與建議

### 5-1 結論

本試驗試以負壓方式將環氧樹脂灌入火害後混凝土試體，探討不同試體強度、受溫溫度、冷卻方式、再養護方式以及再養護時間等因素，對於補強後殘餘強度影響，經由試驗之後得知結論如下。

1. 環氧樹脂增強效果對於高強度混凝土優於普通混凝土增強效果。
2. 受溫 600°C 混凝土補強效果優於受溫 800°C 混凝土補強效果。
3. 以本試驗中再養護時間皆為 28 天的試體探討，高強度混凝土試體急速冷卻後以環氧樹脂補強提升殘餘強度的效果優於自然冷卻的試體；而普通強度混凝土試體自然冷卻後以環氧樹脂補強提升殘餘強度的效果優於急速冷卻的試體。
4. 自然冷卻試體由於試體表面殘留  $\text{CaCO}_3$  粉末，以環氧樹脂注入裂縫時受到阻礙，由於試體表面粉末多寡不一致，故試驗結果較不具連貫性。
5. 隨著再養護時間的增加，試體再水化作用使裂縫逐漸修補，以環氧樹脂注入裂縫時受到阻礙，故提升殘餘強度的效果變差，因此，火害之後早期進行補強效果較佳。

## 5-2 建議

根據本研究結論，提供下述幾種建議：

1. 本試驗結果發現火害早期之裂縫補強較具效果，建議往後研究可針對混凝土火害早期裂縫發展與補強效果進行交叉比較，以確認最佳火害補強時間。
2. 本試驗於環氧樹脂補強後一週即進行抗壓試驗，建議往後研究可在補強後測試不同補強後齡期之試體，長期觀測混凝土之強度發展進行比較。
3. 本試驗自然冷卻空氣在養護的試體，由於表面殘留大量  $\text{CaCO}_3$  粉末，導致試驗結果不連貫，因此建議往後混凝土試體火害後於進行補強之前，應先設法清除表面之  $\text{CaCO}_3$  粉末，減少試驗變因。
4. 本試驗中並未對高強度混凝土火害早期(7天)進行補強試驗，但由於試驗研究結果得知，混凝土裂縫補強在火害早期進行較具效果，因此建議往後研究可針對火害早期的高強度混凝土進行補強試驗。

5. 文獻【14】【16】當中以貼覆鋼板、碳纖維、玻璃纖維進行結構補強，其中混凝土本身無法提供強度，建議以本試驗方法配合貼覆補強工法提供混凝土本身強度。
6. 本試驗以負壓  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  灌入環氧樹脂，建議可以嘗試以更大的負壓進行試驗，以增強補強效果。
7. 嘗試以不同強度的樹脂進行補強，比對其補強效果。



## 參考文獻

1. R. Rhoades and R. C. Mielenz, Petrography of concrete aggre, J. Amer. Concr. Inst, 42, pp. 581-600 (June 1946).
2. 林炳炎, “火, 火, 火, 混凝土的耐火性及熱性質”, 營建世界, 1986。
3. Neville, A.M., “Properties of Concrete” fourth edition.
4. 許修豪, 「不同冷卻再養護方式對混凝土承受高溫後殘餘強度及恢復狀況之影響」, 國立交通大學碩士論文, 1999。
5. 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」, 國立交通大學碩士論文, 1997。
6. 廖侶翔, 「混凝土添加不同熱學性能之材料工程性質探討」, 國立交通大學碩士論文, 2009。
7. Chan, Y. N.; Peng, G. F.; and Anson, M., “Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures,” Cement and Concrete Composites, Vol.21, 1999, pp.23-27.

8. Li, Yihai; Guangdong Electric Design Institution, Civil Department  
Franssen, Jean-Marc; University of Liege, Department of Structural  
Engineering, “Residual compressive strength of concrete after fire,”  
ACI Structural and Materials Journals, 14-Jul 2009, M-20009-005.R1.
9. Husem, M., “The effects of high temperature on compressive and  
flexural strengths” ,Fire Safety Journal, Vol. 41, No. 2, March 2006,  
pp.155-163.
- 10.Chan, Y. N.; Luo , X.;and Sun, W. ,“Compressive strength and pore  
structure of high-performance concrete after exposure to high  
temperature up to 800°C”, Cement and Concrete Research, 2000, pp  
247–251.
- 11.Chan, Y. N.; Peng , G.F.;and Anson , M., “Fire Behavior of  
High-Performance Concrete Made with Silica Fume at Various  
Moisture Contents”, ACI Materials Journal, May-June 1999,  
pp.405-411.
- 12.Yngve Anderberg,“Spalling Phenomena of HPC and OC”, NIST  
Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete, Feb 13-14,  
1997.

13. Fu Yu-fang; Wong Yuk-lung; Poon Chi-sun; and Tang Chun-an, "Literature Review of Study on Mechanism of Explosive Spalling in Concrete at Elevated Temperatures", Journal of Building Materials, Vol.9, Jun, 2006.
14. 郭詩毅, 「鋼板貼片用環氧樹脂受溫後黏結性質變化之研究」, 國立台灣科技大學博士論文, 2004。
15. 陳清華, 「鋼板貼片用環氧樹脂受溫後黏結性質變化之研究」, 國立中央大學碩士論文, 2001。
16. 趙文成, 「鋼筋混凝土柱構件火害後修補技術之研究」, 內政部建築研究所, 1999。
17. Camille A. Issa ; Pauls Debs, "Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete", Construction and Building Materials , Vol.21, 2007, pp157-163.
18. 何明錦、吳傳威、彭添富、蕭興台、王淑娟、鄒本駿、楊慕忠, 「鋼筋混凝土建築物之修復補強技術彙編」, 內政部建築研究所, 1999。
19. 田心工程有限公司, 「混凝土結構物補強」。
20. 建築技術規則, 內政部營建署, 2009年8月。

21. Faris Ali, "Is High Strength Concrete More Susceptible to Explosive Spalling than Normal Strength Concrete Fire", *Fire and Materials*, Vol.26, 2002, pp127–130.
22. Andre Lee, "Thermal and Viscoelastic Property of Epoxy–Clay and Hybrid Inorganic–Organic Epoxy Nanocomposites", 1999.
23. A.Noumowé; H.Carré; A.Daoud; and H.Toutanji, "High-Strength Self-Compacting Concrete Exposed to Fire Test", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006.
24. Kosmas K. Sideris, "Mechanical Characteristics of Self-Consolidating Concretes Exposed to Elevated Temperatures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007.
25. D.R.Morgan, "Compatibility of concrete repair materials and systems", *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No.1, pp. 51-61, 1996.
26. 周逢霖、郭詩毅、涂耀賢、林慶元，「鋼筋混凝土樑鋼板貼片補強後再受溫之性能研究」，中華民國建築學會「建築學報」第 63 期，115~129 頁，2008 年 3 月。
27. 中國國家標準 1230、1232，經濟部標準檢驗局，2005 年 2 月。

表2-1 各種不同岩石之線性熱膨脹係數，【1】

| Rock type                                | $10^{-6} / ^\circ\text{C}$ | $10^{-6} / ^\circ\text{F}$ |
|--|----------------------------|----------------------------|
| Granite (花崗岩)                            | 1.8-11.9                   | 1.0-6.6                    |
| Diorite, andesite (閃綠岩、安山岩)              | 4.1-10.3                   | 2.3-5.7                    |
| Gabbro, basalt, diabase<br>(斑輝岩、玄武岩、輝綠岩) | 3.6-9.7                    | 2.0-5.4                    |
| Sandstone (砂岩)                           | 4.3-13.9                   | 2.4-7.7                    |
| Dolomite (白雲石)                           | 6.7-8.6                    | 3.7-4.8                    |
| Limestone (石灰岩)                          | 0.9-12.2                   | 0.5-6.8                    |
| Chert (角岩)                               | 7.3-13.1                   | 4.1-7.3                    |
| Marble (大理岩)                             | 1.1-16.0                   | 0.6-8.9                    |

表2-2 不同岩石1:6混凝土之熱膨脹係數，【2】

| 骨材種類  | 空氣中養護混凝土                   |                            | 水中養護混凝土                    |                            |
|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|       | $10^{-6} / ^\circ\text{C}$ | $10^{-6} / ^\circ\text{F}$ | $10^{-6} / ^\circ\text{C}$ | $10^{-6} / ^\circ\text{F}$ |
| 砂礫    | 13.1                       | 7.3                        | 12.2                       | 6.8                        |
| 花崗岩   | 9.5                        | 5.3                        | 8.6                        | 4.8                        |
| 砂岩    | 12.8                       | 7.1                        | 12.2                       | 6.8                        |
| 粗粒玄武岩 | 9.5                        | 5.3                        | 8.5                        | 4.7                        |
| 砂岩    | 11.7                       | 6.5                        | 10.1                       | 5.6                        |
| 石灰岩   | 7.4                        | 4.1                        | 6.1                        | 3.4                        |
| 卜特蘭石  | 7.4                        | 4.1                        | 6.1                        | 3.4                        |
| 高爐爐渣  | 10.6                       | 5.9                        | 9.2                        | 5.1                        |
| 泡沫爐渣  | 12.1                       | 6.7                        | 9.2                        | 5.1                        |

表2-3 不同岩石之比重，【3】

| Rock group     | Average specific gravity | Range of specific gravity |
|----------------|--------------------------|---------------------------|
| Basalt (玄武岩)   | 2.80                     | 2.6-3.0                   |
| Flint          | 2.54                     | 2.4-2.6                   |
| Granite(花崗岩)   | 2.69                     | 2.6-3.0                   |
| Gritstone(粗砂石) | 2.69                     | 2.6-2.9                   |
| Hornfels       | 2.82                     | 2.7-3.0                   |
| Limestone(石灰岩) | 2.66                     | 2.5-2.8                   |
| Porphyry(斑岩)   | 2.73                     | 2.6-2.9                   |
| Quartzite(石英岩) | 2.62                     | 2.6-2.7                   |

表2-4 高強度混凝土配比及其抗壓強度，【7】

| Type  | w/c  | 配比(kg/m <sup>3</sup> ) |       |       |     |     | 抗壓強度(MPa) |     |
|-------|------|------------------------|-------|-------|-----|-----|-----------|-----|
|       |      | 水泥                     | 粗粒料   |       | 細粒料 | 水   | 28天       | 90天 |
|       |      |                        | 20 mm | 10 mm |     |     |           |     |
| NSC   | 0.60 | 350                    | 835   | 420   | 440 | 210 | 39        | 47  |
| HSC-1 | 0.35 | 550                    | 785   | 393   | 478 | 190 | 76        | 84  |
| HSC-2 | 0.28 | 550                    | 872   | 436   | 433 | 152 | 94        | 118 |

表2-5 高性能混凝土配比，【10】

| Series | Cement | Water | Sand  | Coarse aggregate (mm) |         | Silica fume | Fly ash | Steel fiber | Polymer fiber | Superplasticizer (mL/m <sup>3</sup> ) |
|--------|--------|-------|-------|-----------------------|---------|-------------|---------|-------------|---------------|---------------------------------------|
|        |        |       |       | (10 mm)               | (20 mm) |             |         |             |               |                                       |
| NC     | 262.5  | 210.0 | 588.8 | 418.7                 | 832.5   | /           | 87.5    | /           | /             | /                                     |
| HPC-1  | 357.5  | 176.0 | 542.7 | 385.9                 | 767.4   | 55.0        | 137.5   | /           | /             | 9,000                                 |
| HPC-2  | 357.5  | 176.0 | 542.7 | 385.9                 | 767.4   | 55.0        | 137.5   | 78.0        | /             | 9,000                                 |
| HPC-3  | 357.5  | 176.0 | 542.7 | 385.9                 | 767.4   | 55.0        | 137.5   | /           | 1.82          | 9,000                                 |

表2-6 國內常用植筋膠種類，【15】

| 植筋膠種類             | K 膠 <sup>c</sup> | H 膠 <sup>c</sup> | F 膠 <sup>c</sup> | U 膠  | D 膠   |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------|-------|
| 製造國家              | 台灣               | 瑞士               | 德國               | 德國   | 德國、英國 |
| 強度排名              | 晚期高              | 強度最高             | 早期高              | 晚期高  | 早期高   |
| 主要成分              | 樹脂               | 樹脂水泥             | 環氧樹脂             | 環氧樹脂 | 樹脂    |
| 膠凝時間 <sup>a</sup> | 4                | 6                | 6                | 6    | 8     |
| 養護時間 <sup>b</sup> | 45               | 50               | 45               | 45   | 45    |
| 容量(ml)            | 345              | 345              | 345              | 345  | 345   |
| 單價(元)             | 250              | 400              | 350              | 350  | 410   |
| 施工難易度             | 易                | 極易               | 難                | 難    | 中     |
| 混合均勻性             | 極差               | 佳                | 差                | 差    | 中     |

註：a. 膠凝時間以室溫 20℃為主，單位為 min。

b. 養護時間以室溫 20℃為主，單位為 min。

c. 試驗所選用的材料。

表2-7 碳纖維與玻璃纖維補強火害後試體之殘餘強度，【16】

| 延燒溫度           | 常溫     | 840℃   | 925℃   | 980℃   | 1010℃  | 1030℃  | 1050℃  |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 火害後殘餘強度(%)     | 100    | 28.32  | 17.85  | 15.86  | 10.48  | 7.59   | 7.15   |
| 碳纖維補強後殘餘強度(%)  | 201.22 | 161.75 | 145.77 | 139.44 | 132.17 | 128.73 | 124.82 |
| 玻璃纖維補強後殘餘強度(%) | 160.24 | 147.98 | 132.01 | 128.52 | 113.44 | 109.04 | 107.83 |

表2-8 環氧樹脂補強裂縫效果，【17】

| Cube type    | 強度損失(%) | Compressive strength status of cube |
|--------------|---------|-------------------------------------|
| 原始強度         | 0       | -                                   |
| D1 試體        | 40.93   | Not acceptable                      |
| D2 試體        | 32.71   | Not acceptable                      |
| D1 試體+環氧樹脂補強 | 11.25   | Acceptable                          |
| D2 試體+環氧樹脂補強 | 8.23    | Acceptable                          |



表3-1 本試驗試體分類(實驗組)

| 實驗組   |      |       |          |         |        |
|-------|------|-------|----------|---------|--------|
| 高溫溫度  | 冷卻方式 | 再養護方式 | 再養護時間(天) | 普通強度混凝土 | 高強度混凝土 |
| 600°C | 自然冷卻 | 滯水再養護 | 7        | ∨       |        |
|       |      |       | 28       | ∨       | ∨      |
|       |      |       | 60       | ∨       | ∨      |
|       |      |       | 90       | ∨       | ∨      |
|       |      | 空氣再養護 | 7        | NA      | NA     |
|       |      |       | 28       | ∨       | NA     |
|       |      |       | 60       | ∨       | NA     |
|       |      |       | 90       | ∨       | NA     |
|       | 急速冷卻 | 滯水再養護 | 7        | ∨       | NA     |
|       |      |       | 28       | ∨       | ∨      |
|       |      |       | 60       | NA      | NA     |
|       |      |       | 90       | ∨       | ∨      |
| 800°C | 自然冷卻 | 滯水再養護 | 7        | ∨       | NA     |
|       |      |       | 28       | ∨       | ∨      |
|       |      |       | 60       | ∨       | ∨      |
|       |      |       | 90       | ∨       | ∨      |
|       |      | 空氣再養護 | 7        | ∨       | NA     |
|       |      |       | 28       | ∨       | NA     |
|       |      |       | 60       | ∨       | NA     |
|       |      |       | 90       | ∨       | NA     |
|       | 急速冷卻 | 滯水再養護 | 7        | ∨       | NA     |
|       |      |       | 28       | ∨       | ∨      |
|       |      |       | 60       | NA      | NA     |
|       |      |       | 90       | ∨       | ∨      |

註：∨表示本試驗之試體

表3-2 本試驗試體分類(對照組)

| 對照組    |      |          |             |        |
|--------|------|----------|-------------|--------|
| 高溫溫度   | 冷卻方式 | 再養護方式    | 普通強度<br>混凝土 | 高強度混凝土 |
| 試體原始強度 |      |          | ✓           | ✓      |
| 600°C  | 自然冷卻 | 無        | ✓           | ✓      |
|        |      | 滯水再養護90天 | ✓           | ✓      |
|        | 急速冷卻 | 無        | ✓           | ✓      |
|        |      | 滯水再養護90天 | ✓           | ✓      |
| 800°C  | 自然冷卻 | 無        | ✓           | ✓      |
|        |      | 滯水再養護90天 | ✓           | ✓      |
|        | 急速冷卻 | 無        | ✓           | ✓      |
|        |      | 滯水再養護90天 | ✓           | ✓      |

註：✓表示本試驗之試體

表3-3 本試驗一般強度混凝土試體配比

|                 |                         |                         |       |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| 工程設計強度 $f_c'$   | 280 kgf/cm <sup>2</sup> | 1896 坍度                 | 15cm  |
| 水膠比             | 0.485                   | 粒料標稱最大粒徑                | 20 mm |
| 細粒料細度模數 FM      | 2.9                     | 細粒料面乾內飽和比重              | 2.65  |
| 粗粒料面乾內飽和比重      | 2.65                    | 水泥比重                    | 3.15  |
| 水泥廠牌            | I 型水泥                   | 空氣含量                    | 2.0%  |
| 細粒料率(S/A)       |                         | 47.8 %                  |       |
| 水+膠結體+空氣含量 所占體積 |                         | 0.344 m <sup>3</sup>    |       |
| 粒料所占體積          |                         | 0.656 m <sup>3</sup>    |       |
| 細粒料所占體積         |                         | 0.314 m <sup>3</sup>    |       |
| 粗粒料所占體積         |                         | 0.342 m <sup>3</sup>    |       |
| 用水量             |                         | 194kg                   |       |
| 膠結料用量           |                         | 400 kg                  |       |
| 化學摻料            |                         | 1A                      |       |
| 細粒料用量           |                         | 831 kg                  |       |
| 粗粒料用量           |                         | 907 kg                  |       |
| 單位體積            |                         | 1 m <sup>3</sup>        |       |
| 單位重量            |                         | 2332 kg/ m <sup>3</sup> |       |

表3-4 本試驗高強度混凝土試體配比

|                 |                       |                         |       |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|-------|
| 工程設計強度 $f_c'$   | 560kg/cm <sup>2</sup> | 坍度                      | 15cm  |
| 水膠比             | 0.298                 | 粒料標稱最大粒徑                | 20 mm |
| 細粒料細度模數 FM      | 2.7                   | 細粒料面乾內飽和比重              | 2.65  |
| 粗粒料面乾內飽和比重      | 2.65                  | 水泥比重                    | 3.15  |
| 水泥廠牌            | I 型水泥                 | 空氣含量                    | 3.0%  |
| 細粒料率(S/A)       |                       | 43 %                    |       |
| 水+膠結體+空氣含量 所占體積 |                       | 0.402 m <sup>3</sup>    |       |
| 粒料所占體積          |                       | 0.598 m <sup>3</sup>    |       |
| 細粒料所占體積         |                       | 0.257 m <sup>3</sup>    |       |
| 粗粒料所占體積         |                       | 0.341 m <sup>3</sup>    |       |
| 用水量             |                       | 170 kg                  |       |
| 膠結料用量           |                       | 570 kg                  |       |
| 化學摻料            |                       | A301                    |       |
| 細粒料用量           |                       | 681 kg                  |       |
| 粗粒料用量           |                       | 903 kg                  |       |
| 單位體積            |                       | 1 m <sup>3</sup>        |       |
| 單位重量            |                       | 2324 kg/ m <sup>3</sup> |       |

表 3-5 建築物之防火時效，【20】

| 主要構造部位   |        | 層數       |          | 自頂層起算<br>不超過四層<br>之各樓層 | 自頂層起算超過<br>第四層至第十四<br>層之各樓層 | 自頂層起算第<br>十五層以上之<br>各樓層 |
|--|--------|----------|----------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
|  |        | 承重牆      | 非承<br>重牆 |                        |                             |                         |
| 牆  | 外<br>牆 | 承重牆      |          | 一小時                    | 一小時                         | 二小時                     |
|  |        | 非承<br>重牆 | 防火帶以內部分  | 一小時                    | 一小時                         | 一小時                     |
|  |        |          | 防火帶以外部分  | 半小時                    | 半小時                         | 半小時                     |
|  | 內<br>牆 | 分間牆      |          | 一小時                    | 一小時                         | 一小時                     |
|  |        | 梁        |          | 一小時                    | 二小時                         | 三小時                     |
|  |        | 柱        |          | 一小時                    | 二小時                         | 三小時                     |
|  |        | 樓地板      |          | 一小時                    | 二小時                         | 二小時                     |
|  |        | 屋頂       |          | 半小時                    |                             |                         |
| (一) 屋頂突出物未達計算樓層面積者，其防火時效應與頂層同。<br>(二) 本表所指之層數包括地下層數。 |        |          |          |                        |                             |                         |

表4-1 高強度混凝土之補強強度 (%)

| 實驗條件                     | 再養護天數 |      |      |      | 未養護<br>未補強 | 水養護<br>90天<br>未補強 |
|--------------------------|-------|------|------|------|------------|-------------------|
|                          | 7     | 28   | 60   | 90   |            |                   |
| 800°C 急冷滯水再養護+環<br>氧樹脂補強 | NA    | 25.4 | NA   | 23.1 | 10.8       | 15.4              |
| 800°C 自冷滯水再養護+環<br>氧樹脂補強 | NA    | 26.9 | 32.6 | 25.5 | 16.9       | 18.4              |
| 600°C 急冷滯水再養護+環<br>氧樹脂補強 | NA    | 96.1 | NA   | 52.6 | 31.7       | 50.7              |
| 600°C 自冷滯水再養護+環<br>氧樹脂補強 | NA    | 67.5 | 67.3 | 73   | 34         | 56.0              |

表4-2 普通強度混凝土之補強強度 (%)

| 試驗條件                     | 再養護天數 |      |      |      | 未補強<br>未養護 | 水養護<br>90天<br>未補強 |
|--------------------------|-------|------|------|------|------------|-------------------|
|                          | 7     | 28   | 60   | 90   |            |                   |
| 800°C 急冷滯水再養護+環<br>氧樹脂補強 | 28.9  | 23.5 | NA   | 25.5 | 18.4       | 20.8              |
| 800°C 自冷滯水再養護+環<br>氧樹脂補強 | 46.8  | 41.6 | 40   | 32.8 | 34.8       | 34.3              |
| 800°C 自冷空氣再養護+環<br>氧樹脂補強 | 46.8  | 44.9 | 41.2 | 41.7 | 34.8       | NA                |
| 600°C 急冷滯水再養護+環<br>氧樹脂補強 | 75    | 63.7 | NA   | 49.6 | 45.9       | 49.3              |
| 600°C 自冷滯水再養護+環<br>氧樹脂補強 | 80.3  | 79.6 | 67.4 | 77.4 | 54.2       | 58.3              |
| 600°C 自冷空氣再養護+環<br>氧樹脂補強 | NA    | 65   | 69   | 40.2 | 54.2       | NA                |

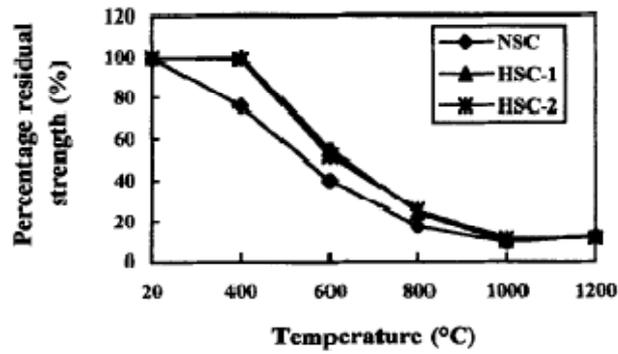


圖2-1 受高溫後混凝土殘餘強度百分比，【7】

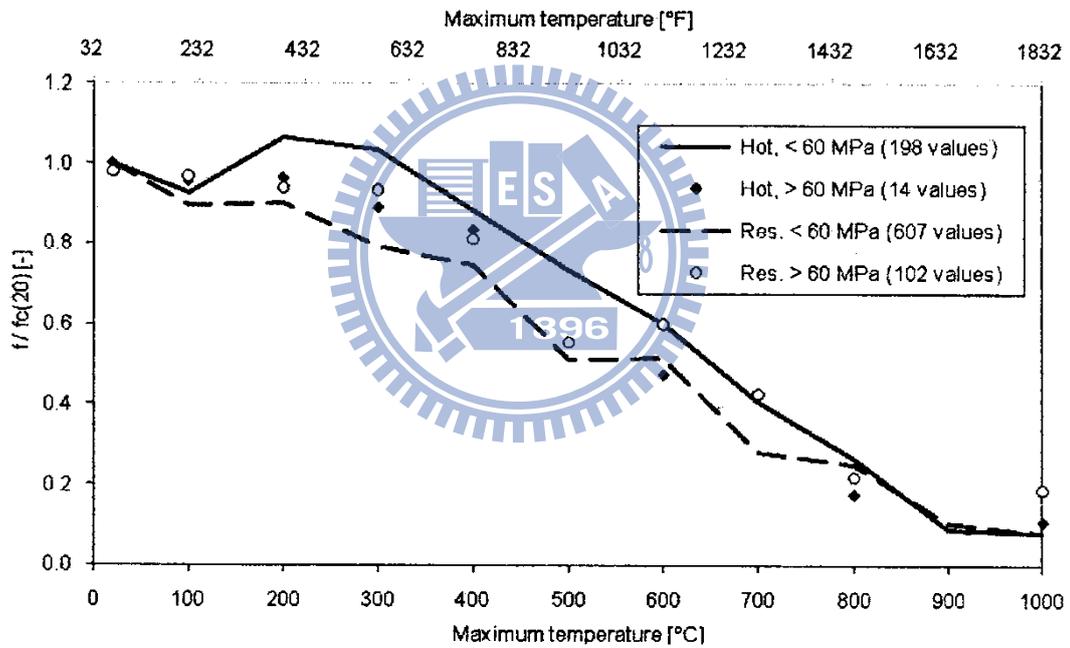


圖2-2 受到高溫普通混凝土及高強度混凝土降溫前後之殘餘強度，【8】

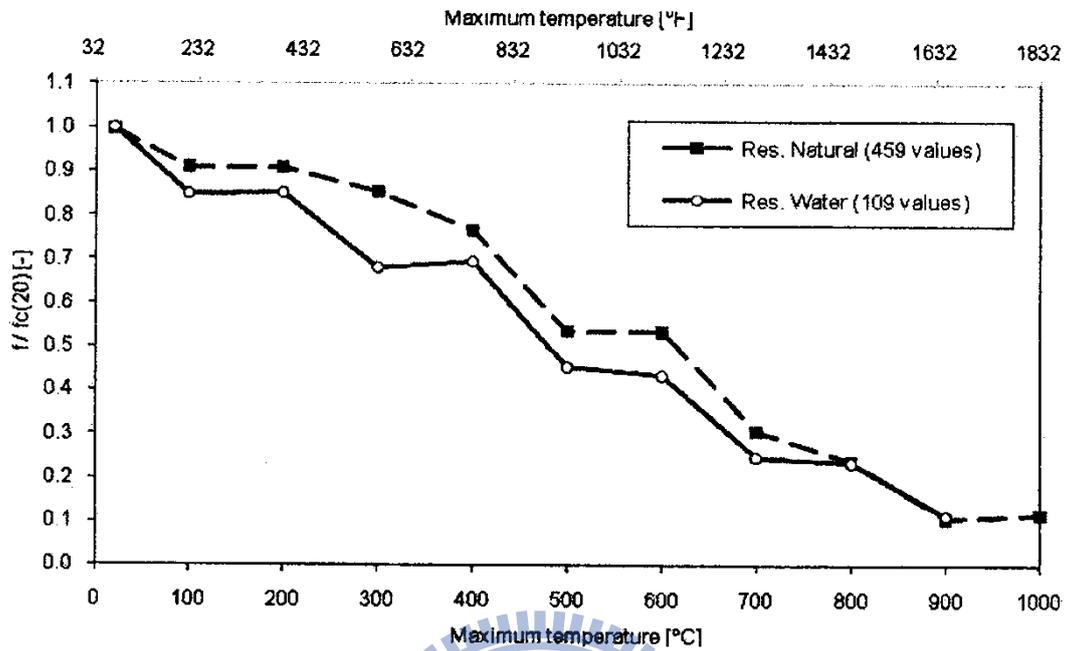


Fig. 11-Residual strength for different cooling regimes.

圖2-3 受高溫混凝土以常溫及噴水兩種冷卻方式之殘餘強度，【8】

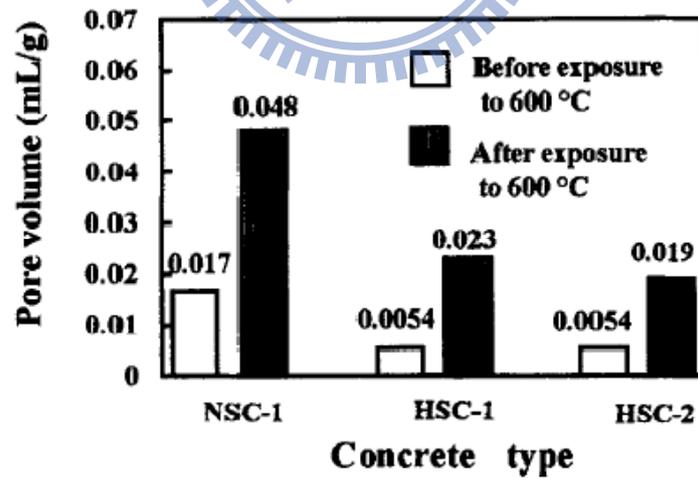
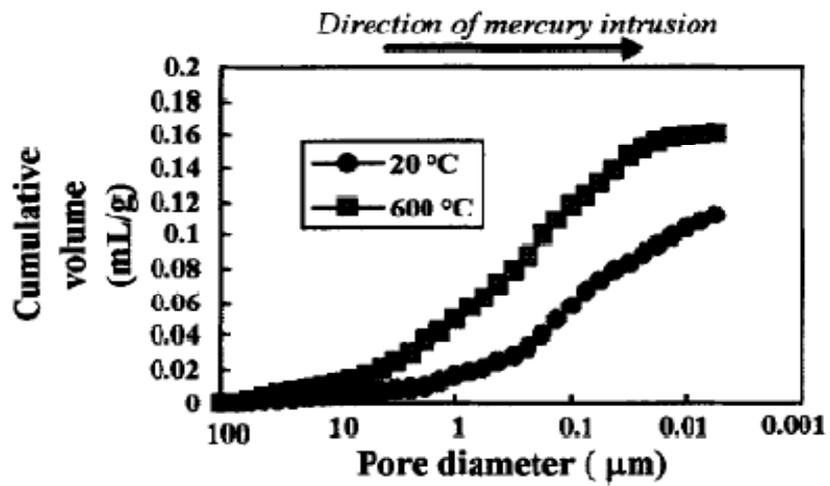
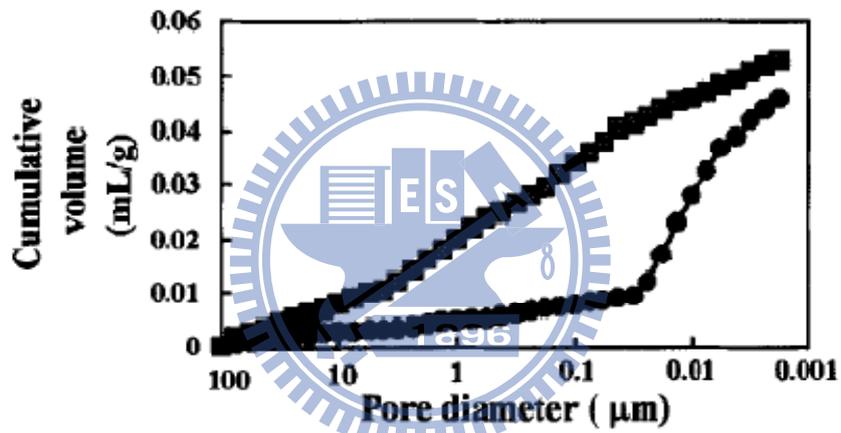


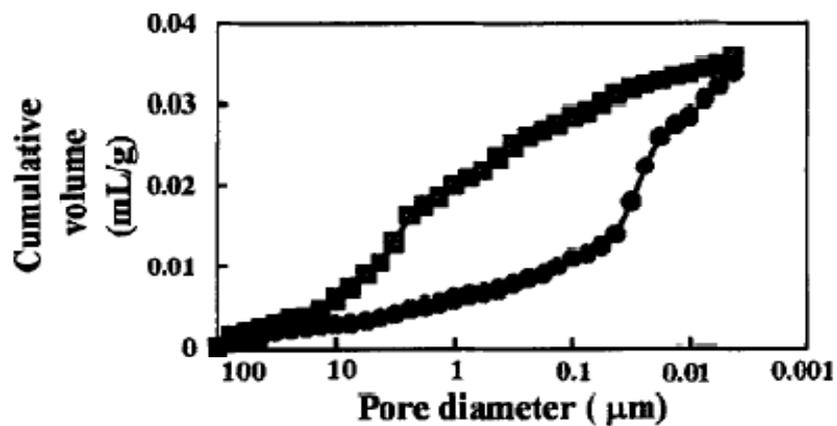
圖2-4 混凝土受高溫600°C前後之孔隙體積，【7】



(a) NSC



(b) HSC-1



(c) HSC-2

圖2-5 600°C 高溫前後混凝土之孔隙直徑及其累計所占體積，【7】

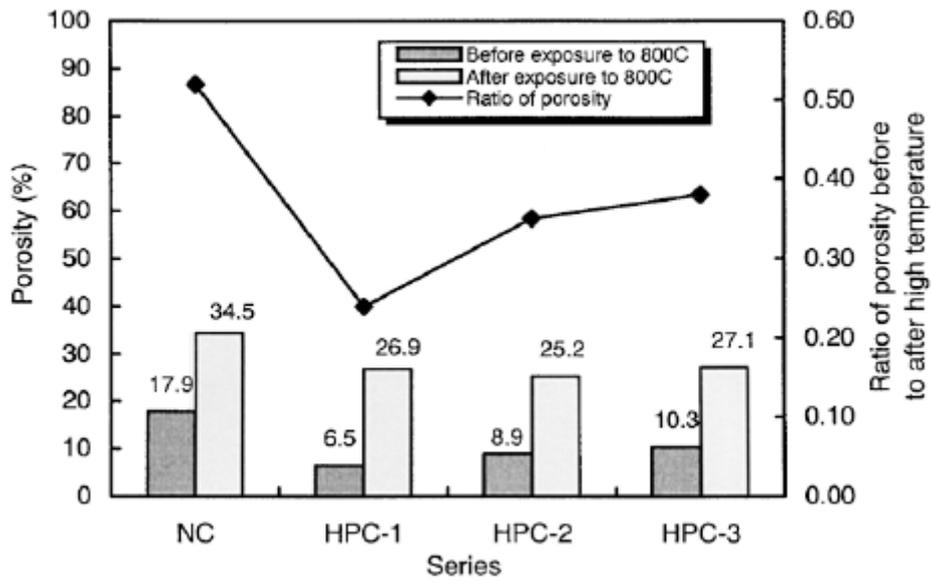


圖2-6 混凝土受高溫800°C前後之孔隙率，【10】

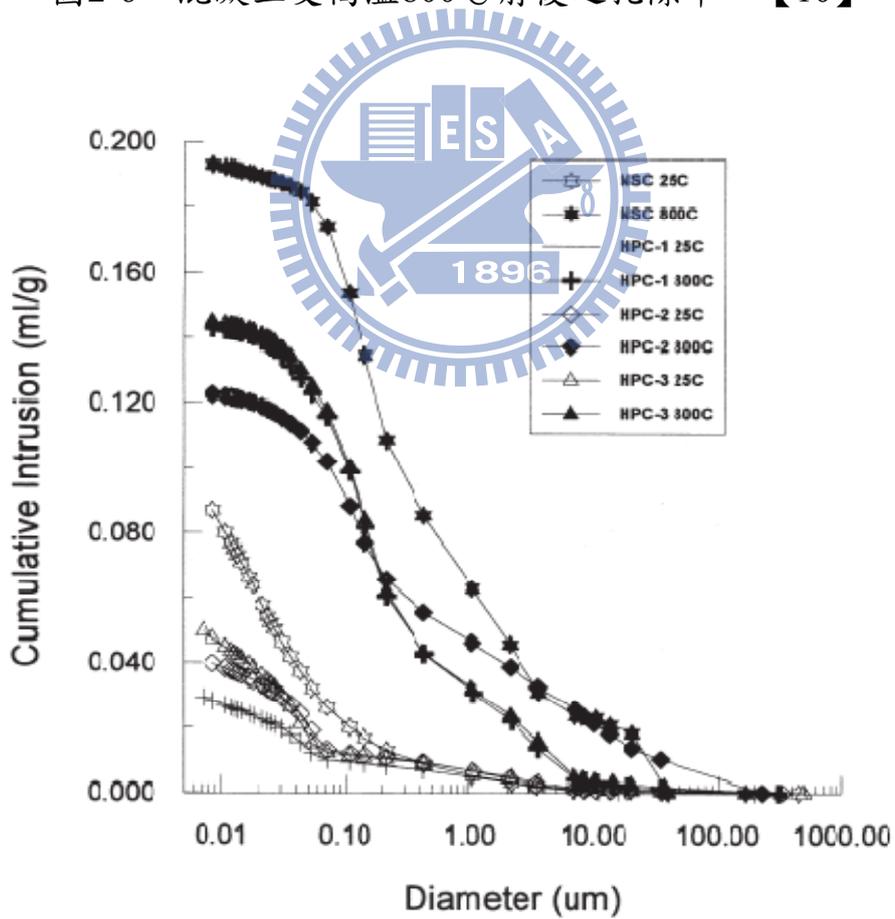


圖2-7 800°C 高溫前後混凝土之孔隙直徑及其累計所占體積，【10】

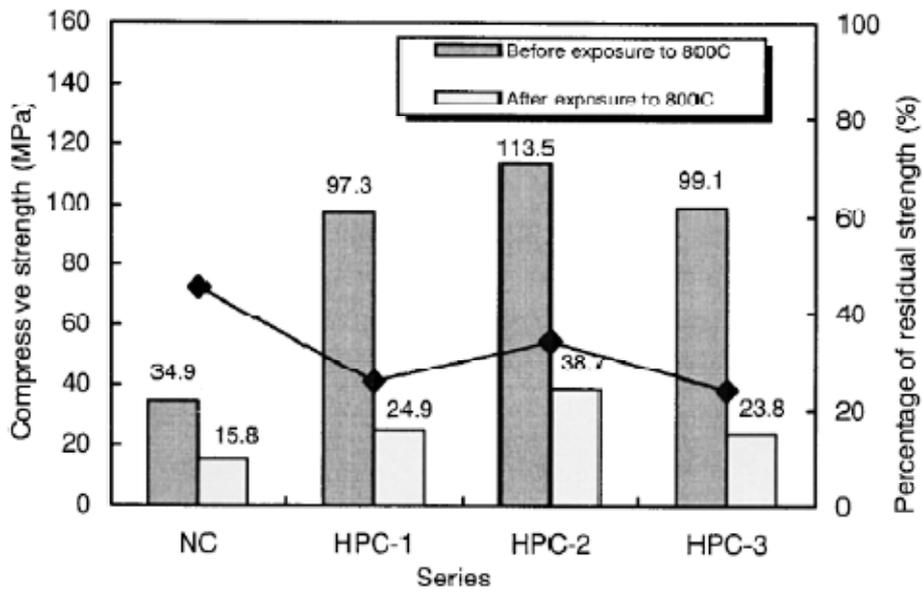


圖2-8 800°C 高溫前後混凝土之強度，【10】

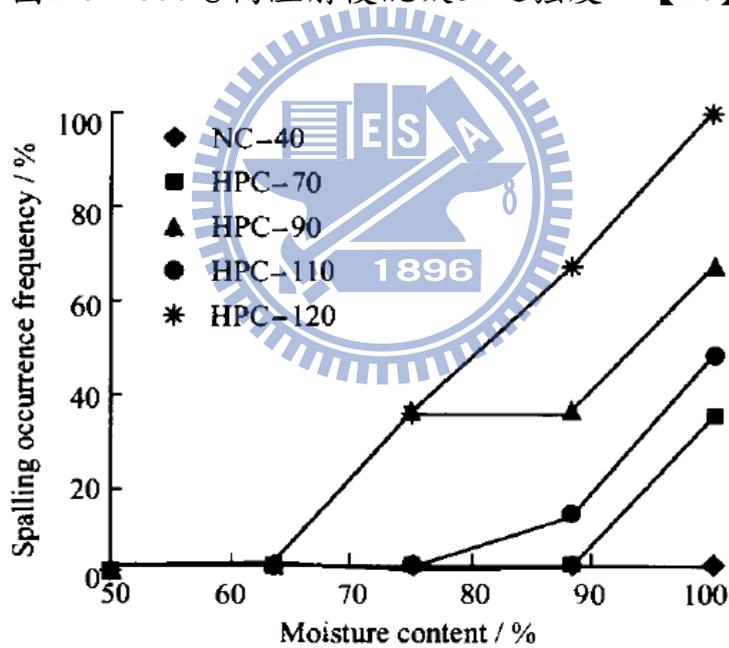


圖2-9 混凝土版構件高溫後爆裂機率與含水率關係，【11】

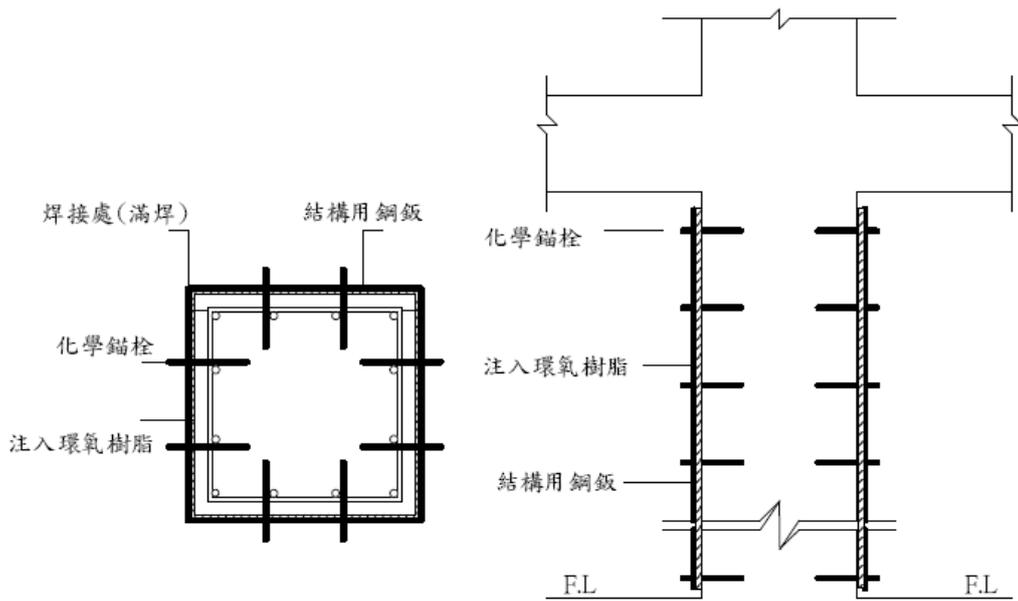


圖2-10 鋼筋混凝土柱鋼板貼片補強示意圖，【14】

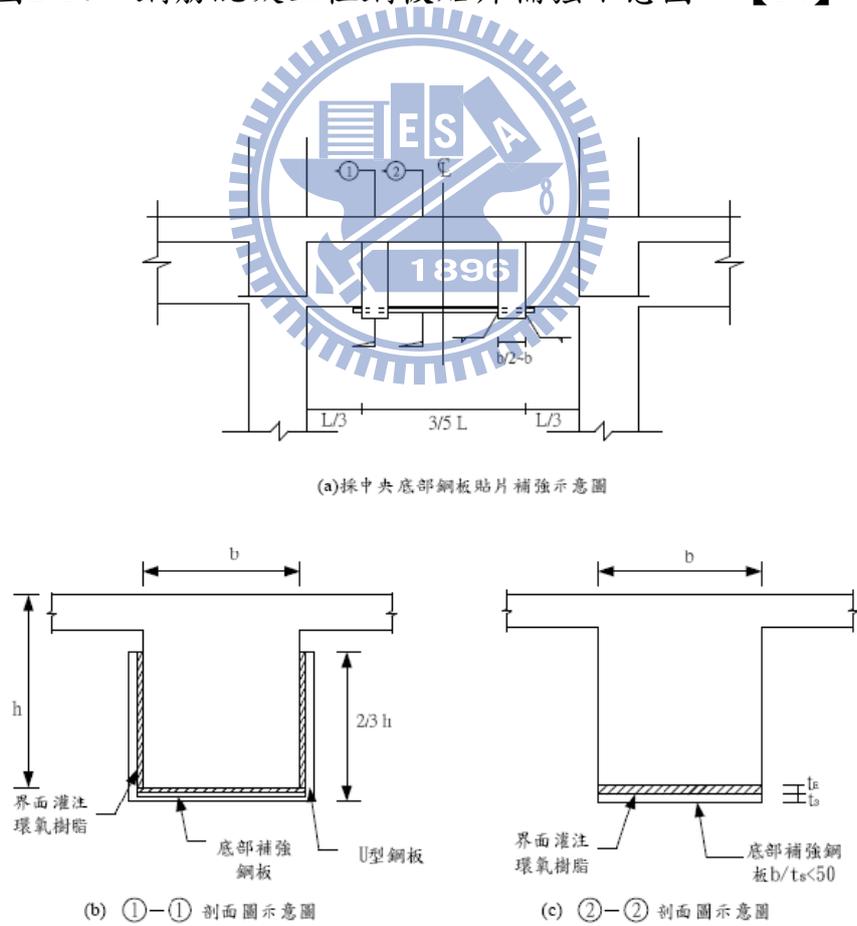


圖2-11 鋼筋混凝土梁中央鋼板貼片補強示意圖，【14】

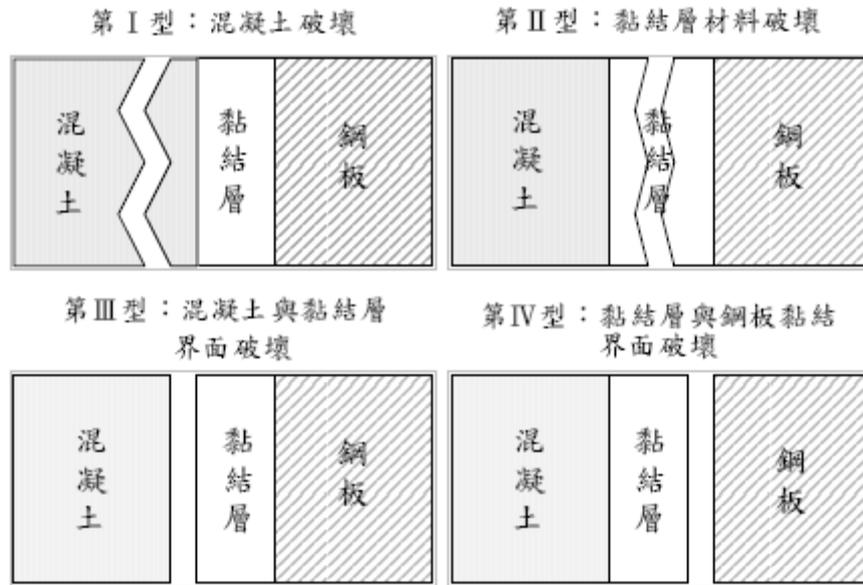


圖2-12 破壞型式示意圖，【14】

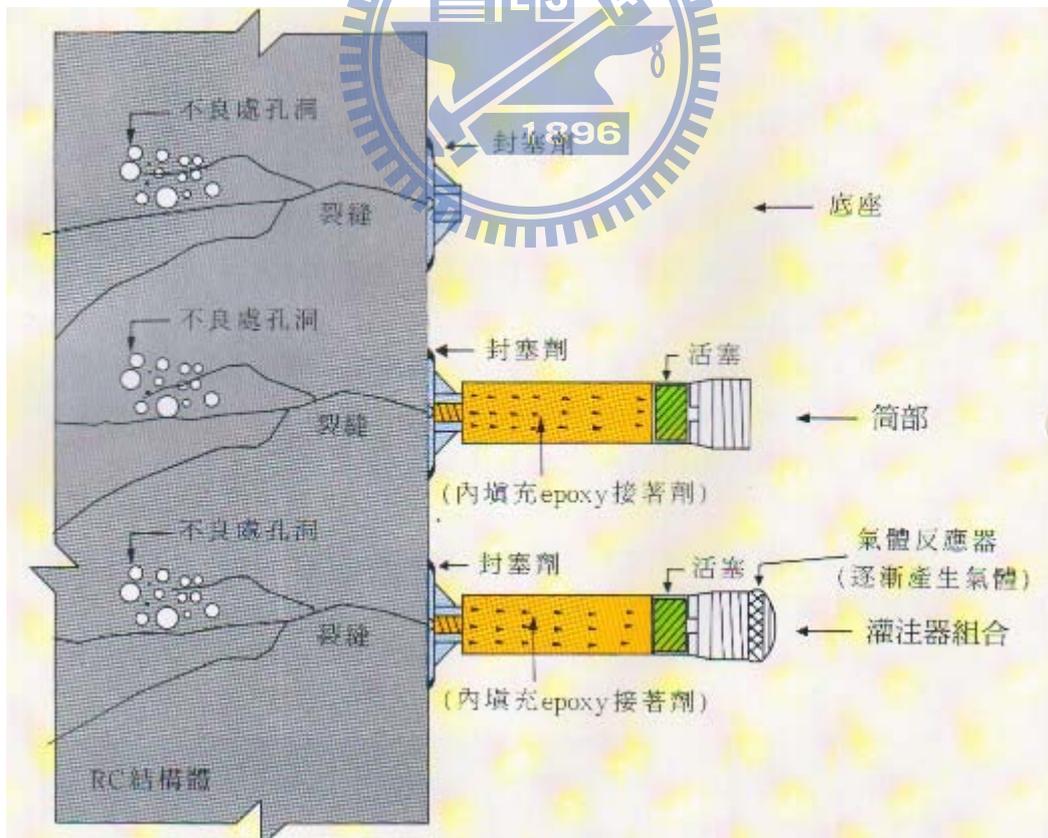


圖2-13 遞增壓力注射工法，【19】

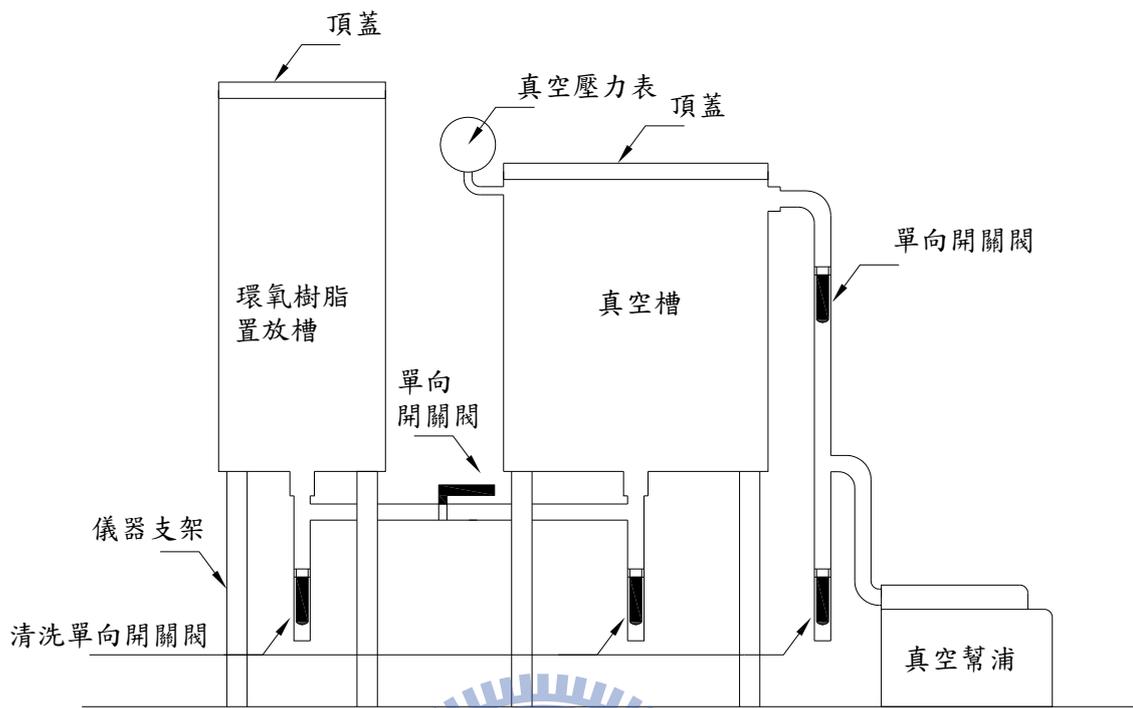


圖 3-1 環氧樹脂灌入儀設計示意圖



高強度混凝土對照組之殘餘強度

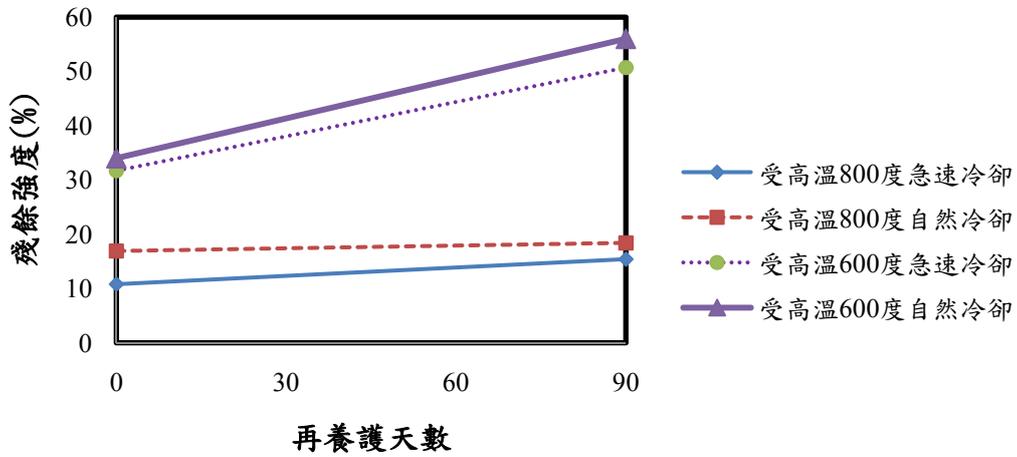


圖4-1 高強度混凝土滯水再養護對照組之殘餘強度

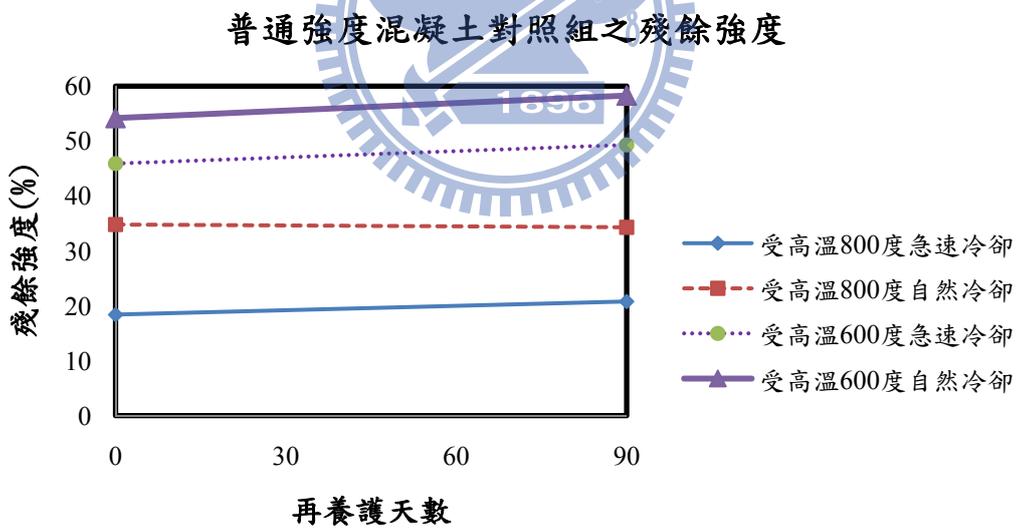


圖4-2 普通強度混凝土滯水再養護對照組之殘餘強度

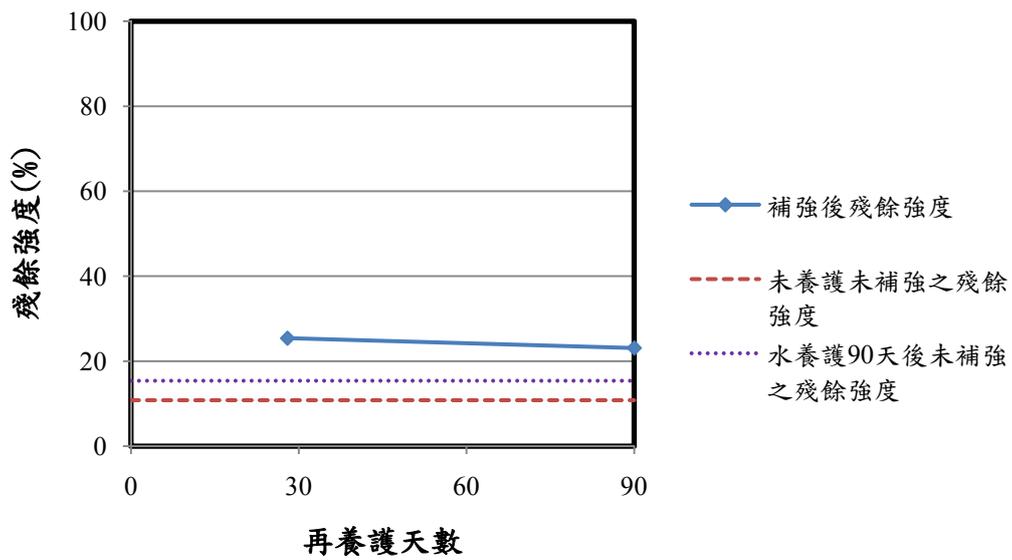


圖4-3 高強度混凝土受800°C後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

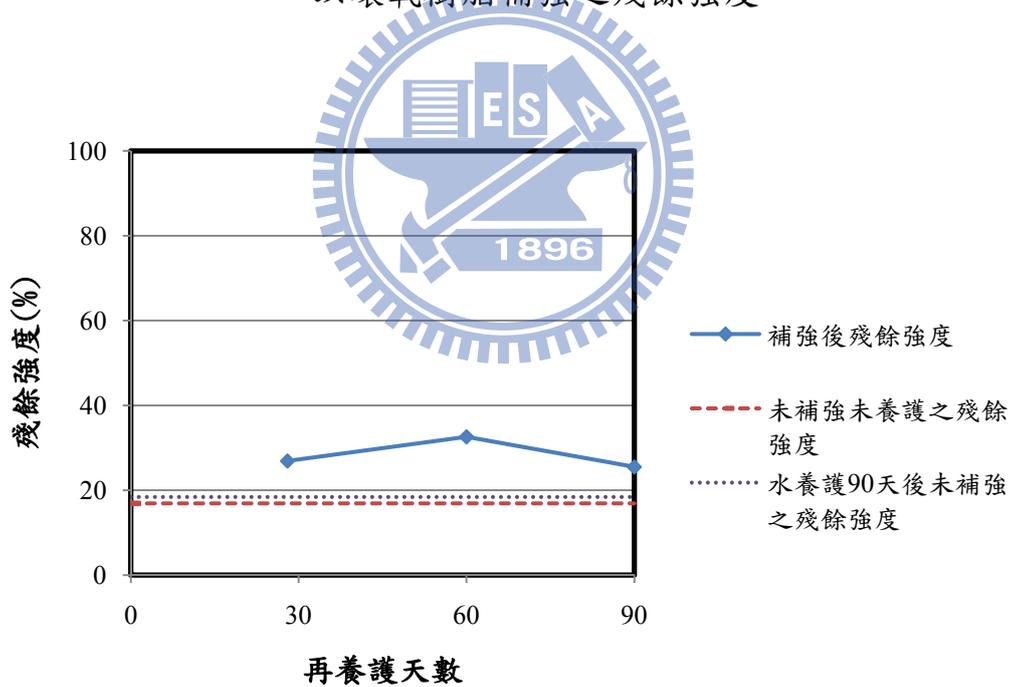


圖4-4 高強度混凝土受800°C後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

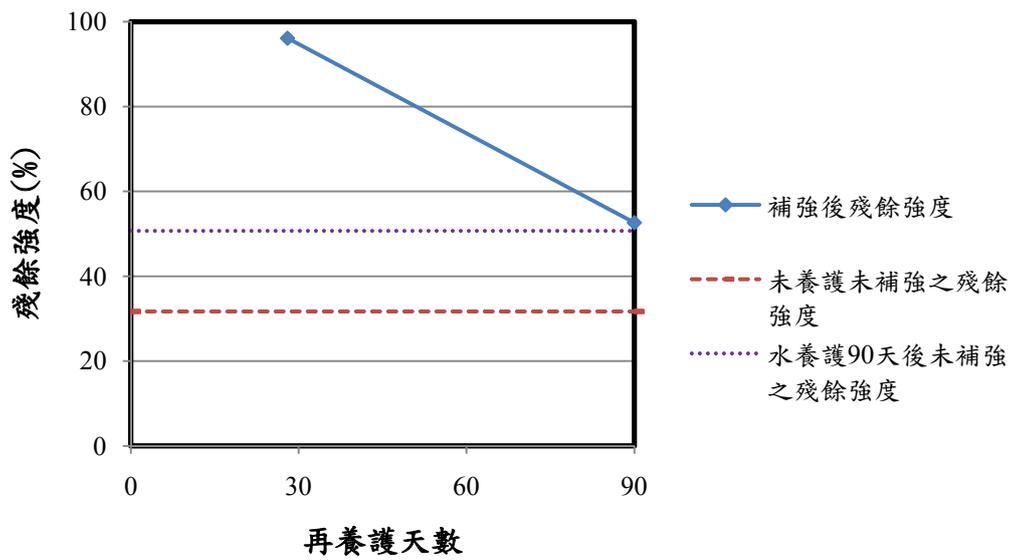


圖4-5 高強度混凝土受600°C後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

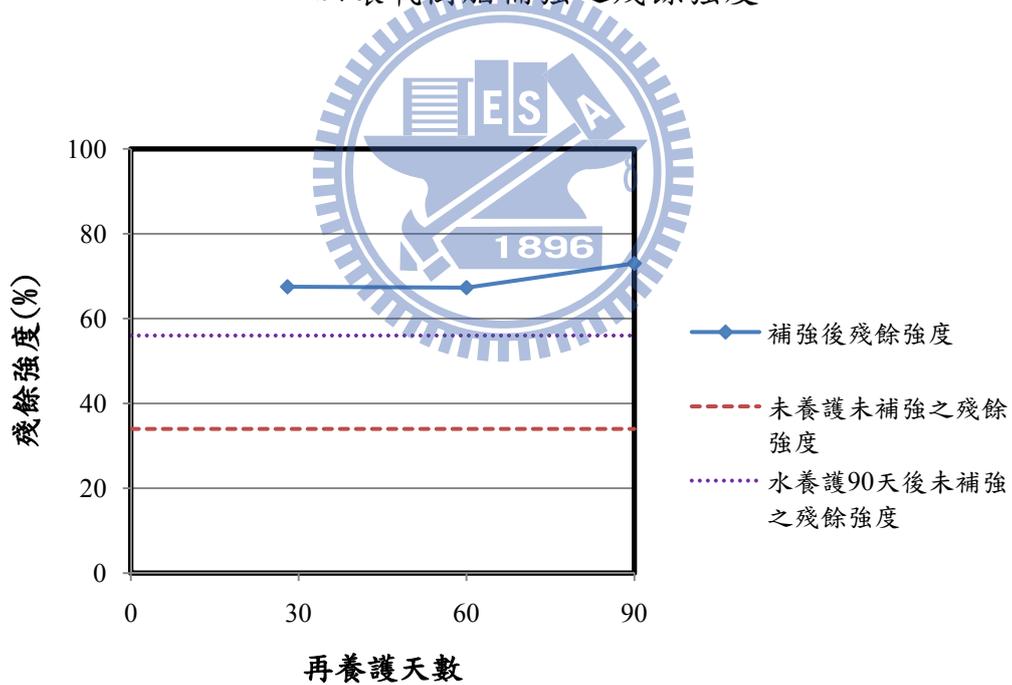


圖4-6 高強度混凝土受600°C後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

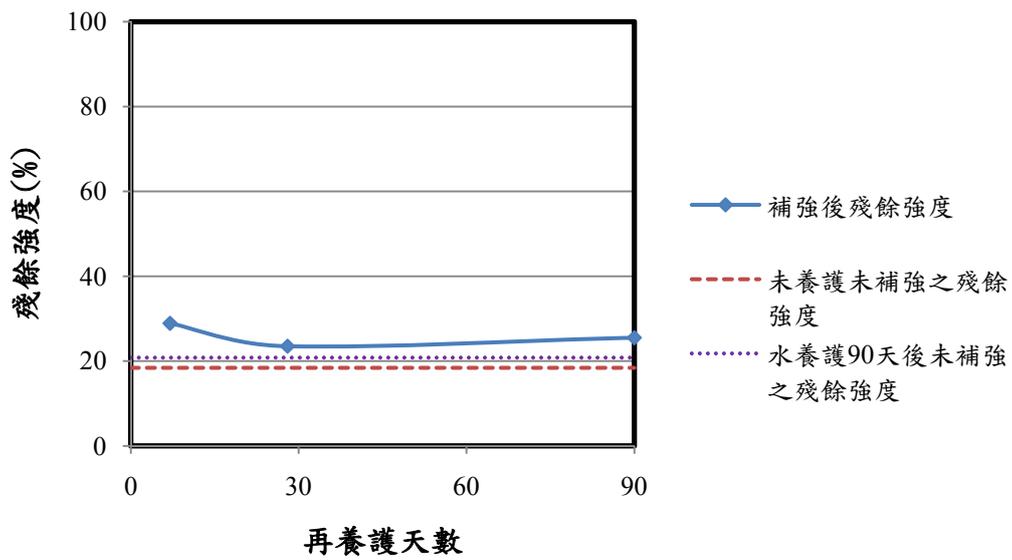


圖4-7 普通強度混凝土受800°C後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

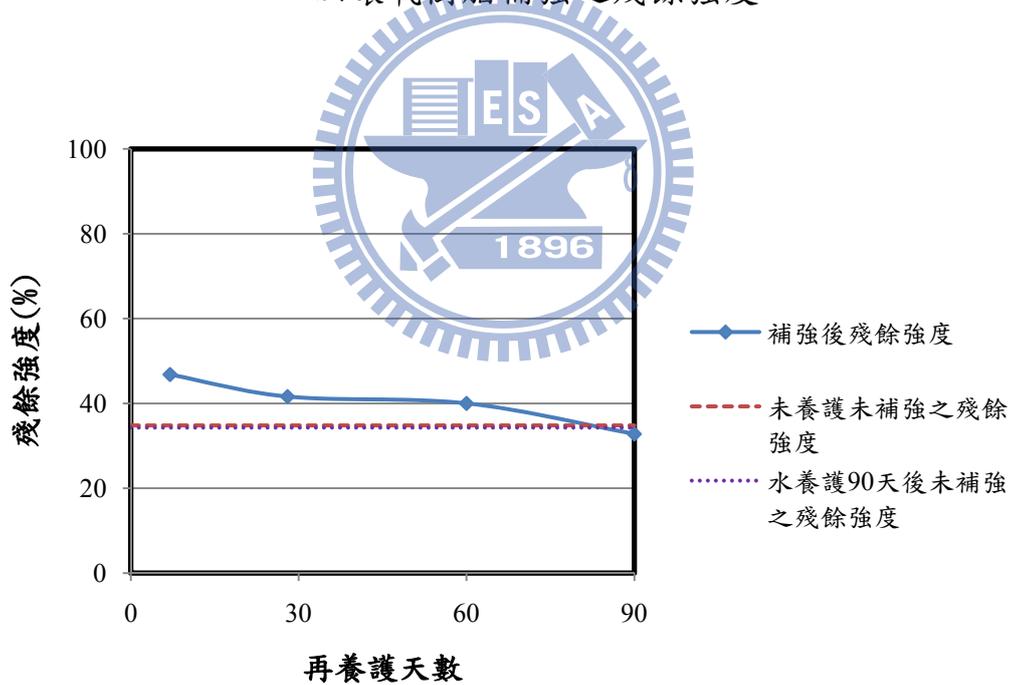


圖4-8 普通強度混凝土受800°C後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

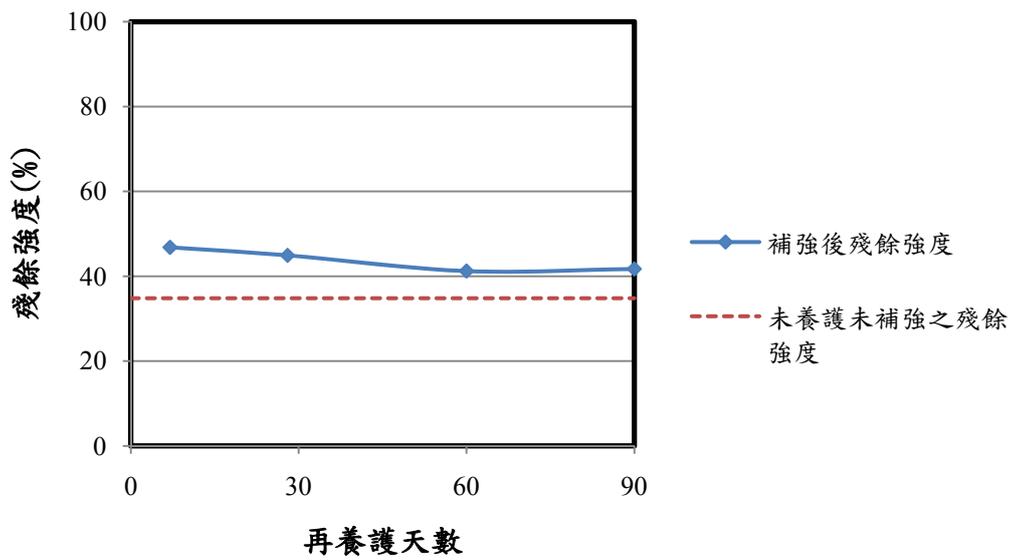


圖4-9 普通強度混凝土受800°C後自然冷卻空氣再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

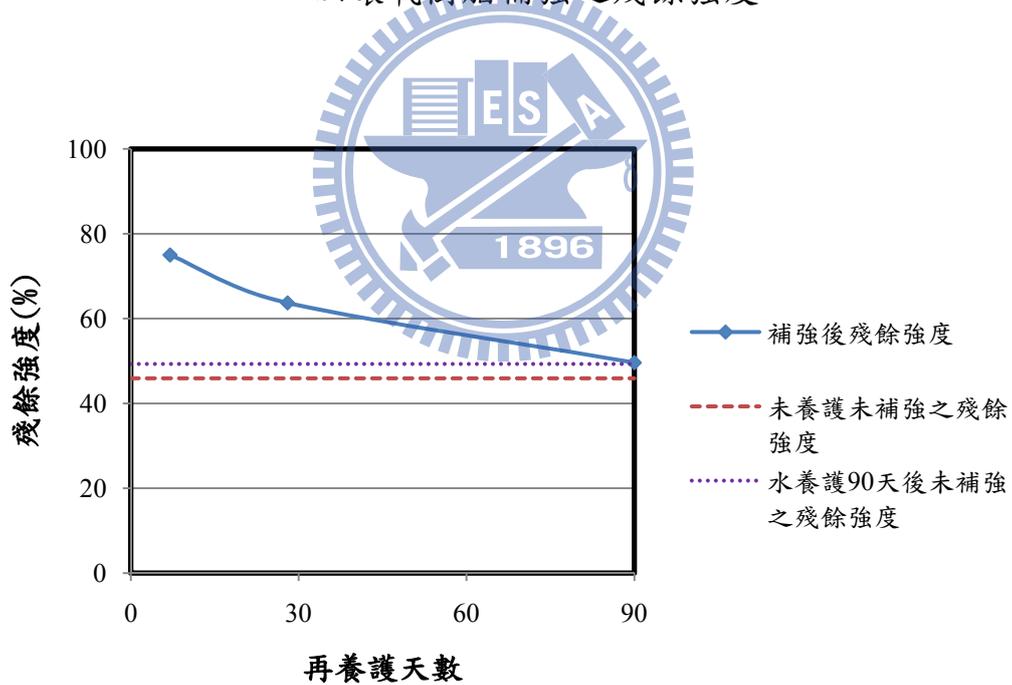


圖4-10 普通強度混凝土受600°C後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

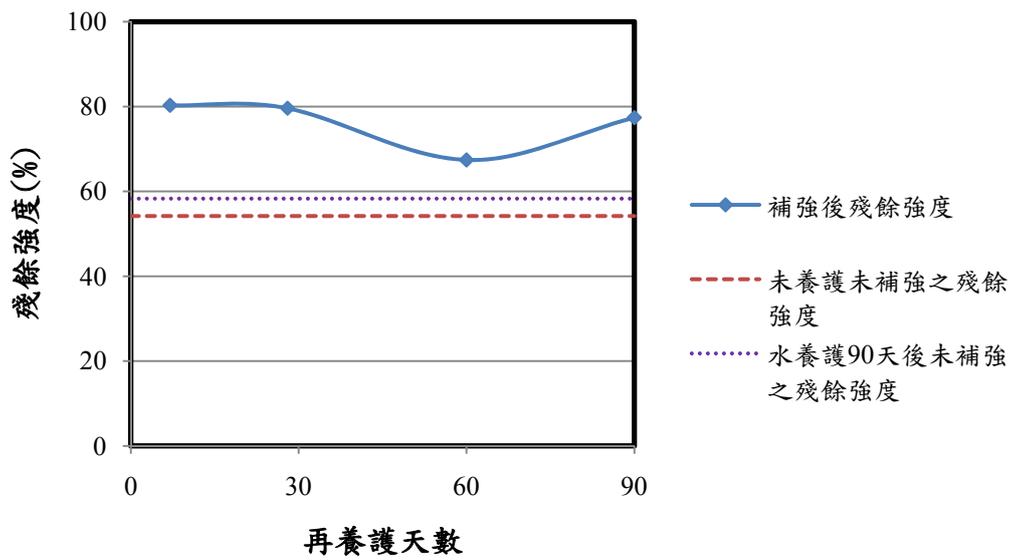


圖4-11 普通強度混凝土受600°C後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

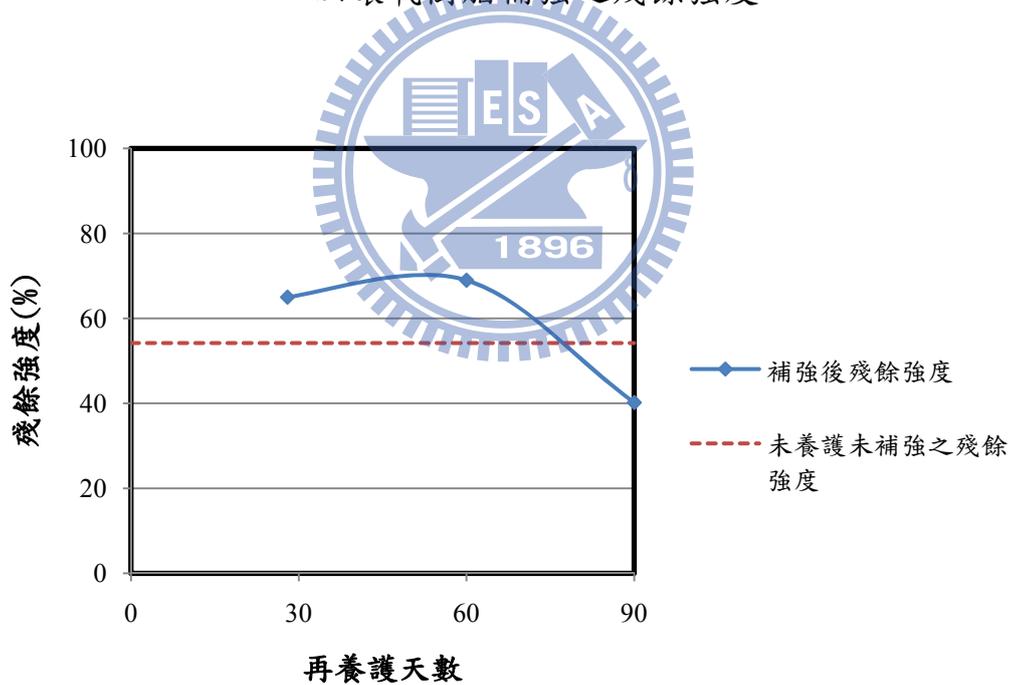


圖4-12 普通強度混凝土受600°C後自然冷卻空氣再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度



照片2-1 裂縫補強D1 cube試體模具，【17】



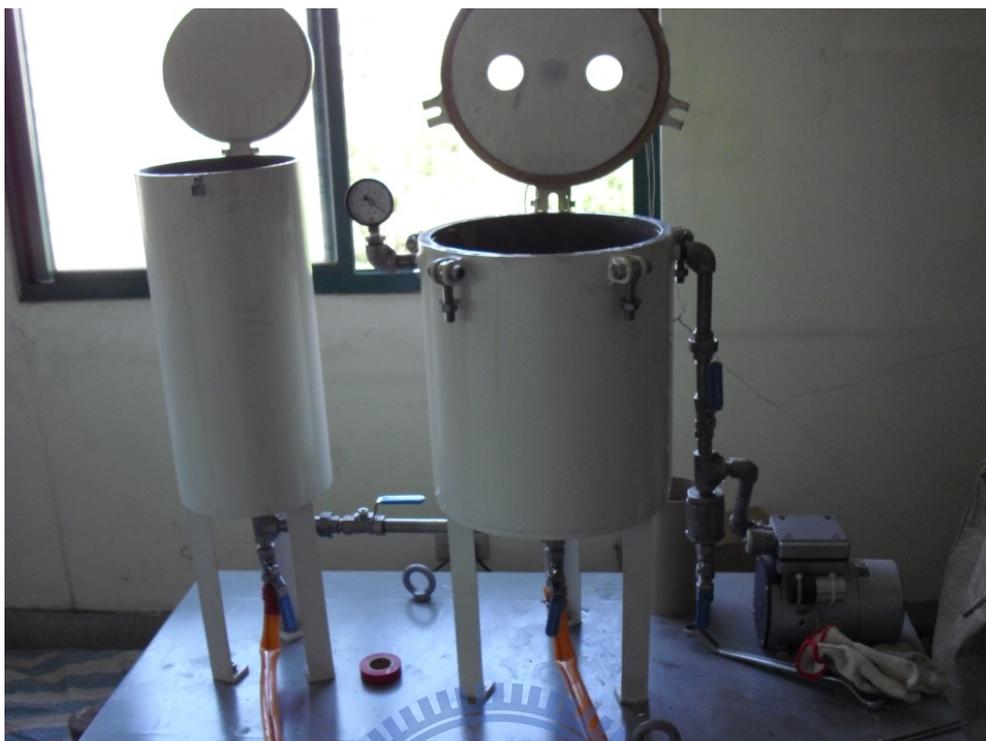
照片2-2 裂縫補強D2 cube試體模具，【17】



照片3-1 高溫爐



照片3-2 烘箱



照片3-3 環氧樹脂灌入儀

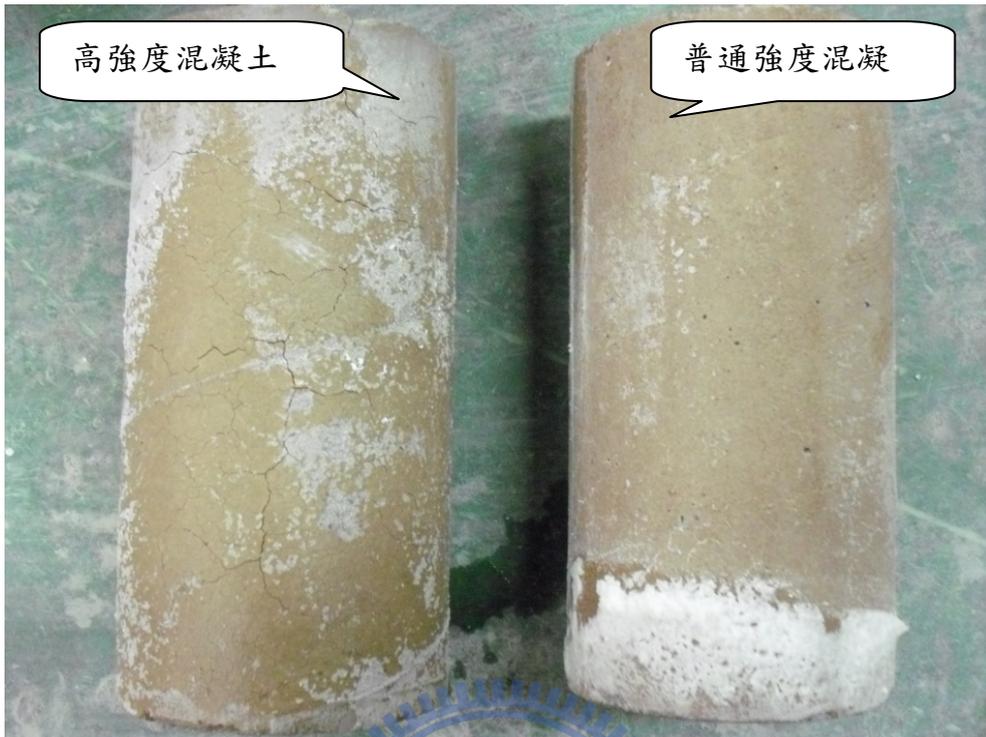


照片3-4 萬能試驗機

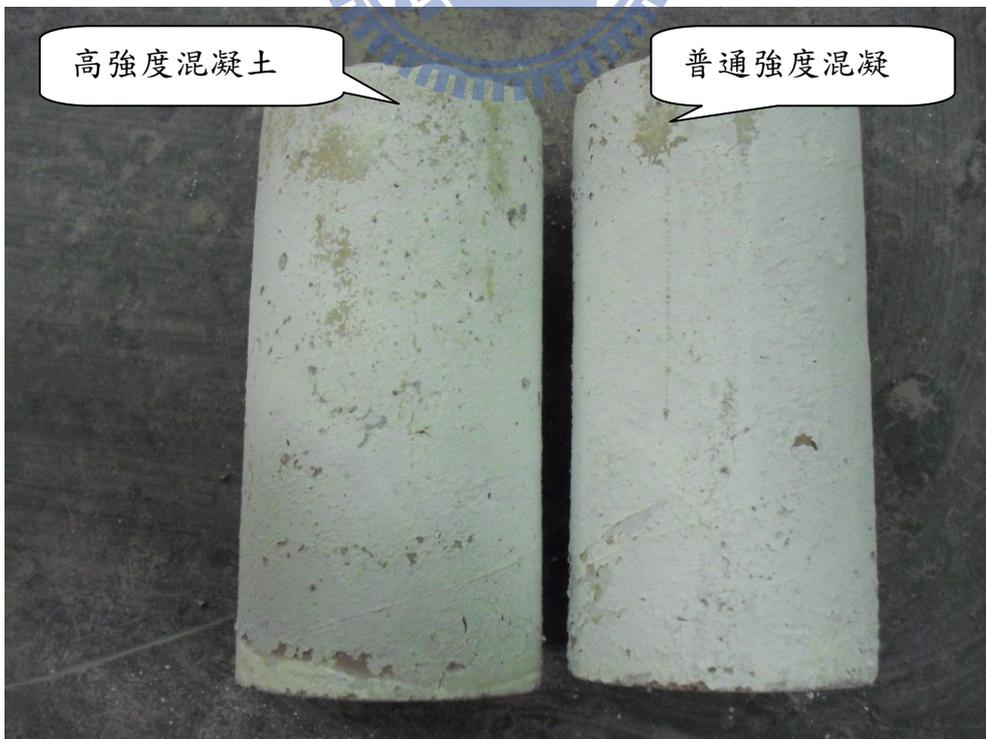


照片3-5 待補強混凝土試體放入環氧樹脂灌入儀之真空槽

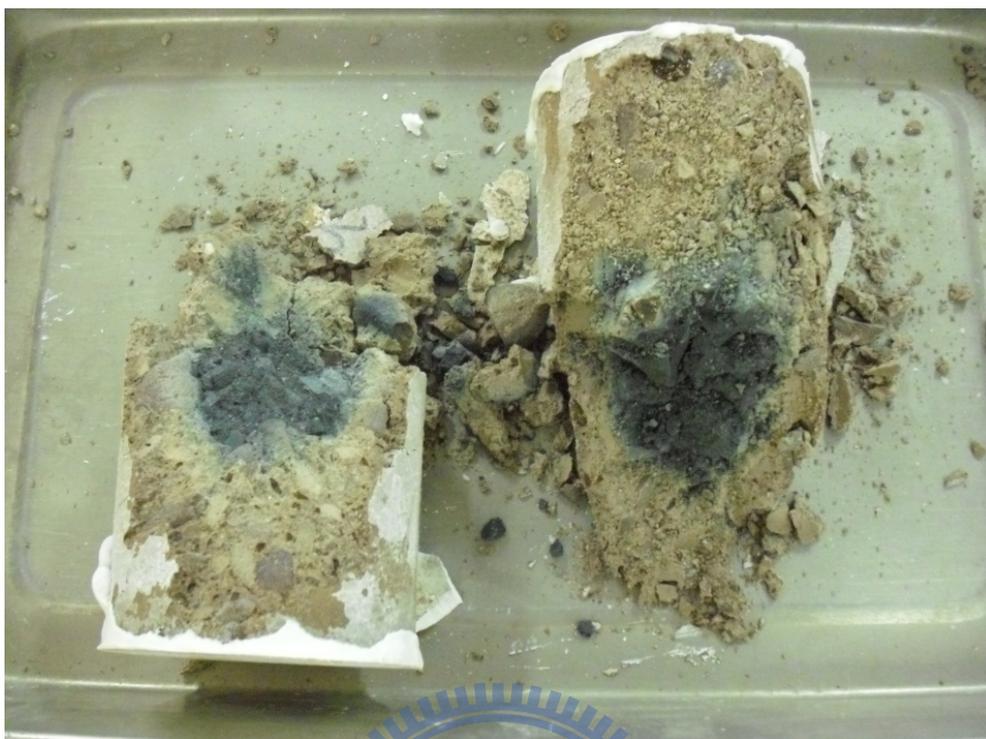




照片4-1 混凝土試體加溫至800°C後顏色改變



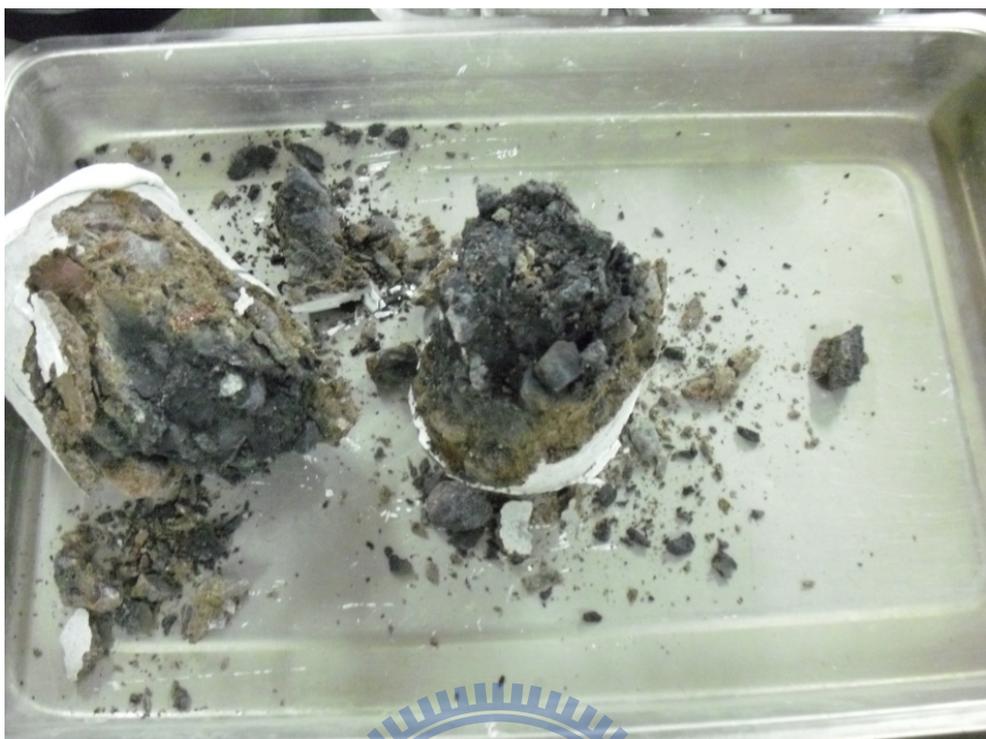
照片4-2 混凝土試體加溫至600°C後顏色改變



照片4-3 高強度混凝土加溫至800°C後斷面顏色



照片4-4 普通強度混凝土加溫至800°C後斷面顏色



照片4-5 高強度混凝土加溫至600°C後斷面顏色



照片4-6 普通強度混凝土加溫至600°C後斷面顏色



照片4-7 高強度混凝土試體加溫至800°C後急速冷卻頂面



照片4-8 高強度混凝土試體加溫至800°C後急速冷卻側面



照片4-9 高強度混凝土試體加溫至800°C後自然冷卻頂面



照片4-10 高強度混凝土試體加溫至800°C後自然冷卻側面



照片4-11 高強度混凝土試體加溫至600°C後急速冷卻頂面



照片4-12 高強度混凝土試體加溫至600°C後急速冷卻側面



照片4-13 高強度混凝土試體加溫至600°C後自然冷卻頂面



照片4-14 高強度混凝土試體加溫至600°C後自然冷卻側面



照片4-15 普通強度混凝土試體加溫至800°C後急速冷卻頂面



照片4-16 普通強度混凝土試體加溫至800°C後急速冷卻側面



照片4-17 普通強度混凝土試體加溫至800°C後自然冷卻頂面



照片4-18 普通強度混凝土試體加溫至800°C後自然冷卻側面



照片4-19 普通強度混凝土試體加溫至600°C後急速冷卻頂面



照片4-20 普通強度混凝土試體加溫至600°C後急速冷卻側面



照片4-21 普通強度混凝土試體加溫至600°C後自然冷卻頂面



照片4-22 普通強度混凝土試體加溫至600°C後自然冷卻側面



照片4-23 未經滯水再養護試體灌入環氧樹脂後之外觀



照片4-24 經滯水再養護試體灌入環氧樹脂後之外觀



照片4-25 高強度混凝土試體加熱至800°C急速冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀



照片4-26 高強度混凝土試體加熱至800°C自然冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀



照片4-27 高強度混凝土試體加熱至600°C急速冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀



照片4-28 高強度混凝土試體加熱至600°C自然冷卻並以環氧樹脂補強經抗壓試驗後之外觀



照片4-29 普通混凝土試體加熱至800°C急速冷卻並以環氧樹脂補強  
經抗壓試驗後之外觀



照片4-30 普通混凝土試體加熱至800°C自然冷卻並以環氧樹脂補強  
經抗壓試驗後之外觀



照片4-31 普通混凝土試體加熱至600°C急速冷卻並以環氧樹脂補強  
經抗壓試驗後之外觀



照片4-32 普通混凝土試體加熱至600°C自然冷卻並以環氧樹脂補強  
經抗壓試驗後之外觀



照片4-33 高強度混凝土試體破壞形態



照片4-34 普通強度混凝土試體破壞形態