

建築防火科技發展計畫(二)協同研究計畫
第3案「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承載力研究」

內政部建築研究所
103 年度 資料蒐集分析報告

內政部建築研究所
建築防火科技發展計畫(二)協同研究計畫
第3案「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承载力研究」
資料蒐集分析報告

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 103 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)

ISBN: 978-986-04-2785-1

內政部建築研究所
建築防火科技發展計畫(二)協同研究計畫
第3案「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承载力研究」
資料蒐集分析報告

主 持 人：何明錦

協同主持人：陳豪吉

研 究 員：湯兆緯

研 究 助 理：彭靖芳、陳冠豪

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 103 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)

目次

目次.....	i
表次.....	iii
圖次.....	iv
摘要.....	vii
ABSTRACT.....	ix
第一章 緒論.....	1
第一節 研究內容.....	1
第二節 研究背景與目的.....	2
第三節 研究之重要性與預期目標.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
第一節 火災溫度之發展行為.....	5
第二節 高層建築物內部材料組成與火災溫度關係.....	12
第三節 火害對於建築結構中混凝土材料之影響.....	22
第四節 火害對於建築結構中鋼骨材料之影響.....	31
第五節 填充型鋼骨混凝土柱於高溫下行為.....	40
第三章 試驗工作.....	45
第一節 研究規劃.....	45
第二節 試體設計.....	45
第三節 試體製作.....	51
第四節 量測儀器設置.....	57
第五節 試驗設置.....	60

第六節 試驗步驟.....	62
第七節 試驗終止條件.....	63
第四章 結果分析與討論.....	65
第一節 填充型箱型鋼柱試體乘載力計算.....	65
第二節 鋼柱受火害後之殘餘承載力試驗結果.....	67
第三節 鋼柱受火害後之殘餘承載力分析結果.....	81
第五章 結論與建議.....	89
第一節 結論.....	89
第二節 建議.....	91
附錄一 內政部建築研究所-學者專家座談會.....	92
附錄二 期初審查委員意見及回應一覽表.....	96
附錄三 期中審查委員意見及回應一覽表.....	99
附錄四 期末審查委員意見及回應一覽表.....	101
參考文獻.....	104

表次

表 2-1 火災發展歷程各階段與基本特性【4】	9
表 2-2 鋼材受熱之變色【9】	17
表 2-3 常見金屬之熔化溫度【9】	18
表 2-4 防火構造之防火時效分類 (資料來源:建築技術規則)	21
表 2-5 中鋼 SN490B 鋼材在各溫度下之楊氏模數折減【17】	36
表 2-6 A572 Gr.50 鋼材在各溫度下之楊氏模數折減【17】	37
表 3-1 試體規劃	47
表 3-2 鋼板之成分	48
表 3-3 鋼板之力學性質	48
表 3-4 竹節鋼筋之力學性質	49
表 3-5 混凝土配比設計表	54
表 4-1 火害試驗數據紀錄表	72
表 4-2 火害後 CFBC 殘餘承載力分析(劉靖國+李其忠法).....	82
表 4-3 火害後 CFBC 殘餘承載力分析(Han+李其忠法)	83
表 4-4 火害後 CFBC 殘餘承載力分析(劉靖國+NIST 法).....	85
表 4-5 火害後 CFBC 殘餘承載力分析(Han+NIST 法)	86
表 4-6 各分析計算法之 CFBC 殘餘承載力結果(tf).....	87

圖次

圖 2-1 燃燒四面體【1】	5
圖 2-2 輻射熱與溫度關係圖【3】	8
圖 2-3 室內火災成長過程時間-溫度曲線【5】	10
圖 2-4 C20 混凝土高溫作用後殘餘抗壓強度【12】	24
圖 2-5 C30 混凝土高溫作用後殘餘抗壓強度【12】	24
圖 2-6 電熱高溫爐升溫曲線與標準升溫曲線比較【14】	26
圖 2-7 SCC 試體火害後殘餘抗壓強度與溫度關係【13】	27
圖 2-8 受高溫冷卻後混凝土抗壓強度隨時間回復之情形【13】	28
圖 2-9 C20 混凝土高溫作用後彈性模數損失情況【12】	29
圖 2-10 C30 混凝土高溫作用後彈性模數損失情況【12】	30
圖 2-11 SCC 試體火害後殘餘彈性模數與溫度關係【13】	31
圖 2-12 CNS 12514 與 ASTM E119 之標準升溫曲線【14, 15】	32
圖 2-13 裸鋼鋼柱溫度分佈圖【17】	33
圖 2-14 SN490B 和 A572 Gr.50 在各溫度下的彈性模數【17】	35
圖 2-15 SN490B 與 A572 Gr.50 之鋼材彈性係數折減趨勢圖【17】	36
圖 2-16 結構用鋼(SN490) 高溫下之降伏強度 F_y 及極限強度 F_u 【18】	38
圖 2-17 SN490B 與 A572 Gr.50 之鋼材降伏強度折減趨勢圖【17】	38
圖 3-1 填充混凝土箱型鋼柱試體之斷面配置參數	46
圖 3-2 箱型鋼柱剖面圖	48
圖 3-3 箱型鋼柱設計圖	49
圖 3-4 箱型鋼柱之組銲及剪力釘詳圖	50

圖 3-5 箱型鋼柱上部端板尺寸及加勁板	50
圖 3-6 箱型鋼柱下部端板尺寸及加勁板	50
圖 3-7 箱型鋼柱之剪力釘鉸製	52
圖 3-8 箱型鋼柱組立成 U 字型	52
圖 3-9 箱型鋼柱組立成 U 字型後之熱電偶線安裝	53
圖 3-10 箱型鋼柱組立完成	53
圖 3-11 箱型鋼柱試體柱面熱電偶測點	54
圖 3-12 混凝土新拌性質測試	55
圖 3-13 箱型鋼柱之混凝土澆置	55
圖 3-14 混凝土之坍度與坍流度之量測	56
圖 3-15 混凝土圓柱試體之製作	56
圖 3-16 箱型鋼柱斷面熱電偶分佈位置圖	57
圖 3-17 箱型鋼柱之熱電偶分佈位置圖	58
圖 3-18 量測柱整體軸向變形量之位移計設置	59
圖 3-20 試體於高溫實驗爐中之安裝示意圖	61
圖 3-21 高溫實驗爐之噴火孔與試體相關位置圖	61
圖 3-22 CNS 12514 標準升溫曲線	63
圖 4-1 自充填混凝土之強度發展趨勢	67
圖 4-2 箱型鋼柱 B2 試驗前之外觀	68
圖 4-3 試體(B1、B2 及 B3)高溫試驗後之外觀	69
圖 4-4 試體 B1 之局部挫屈情形	70
圖 4-5 試體 B2 之局部挫屈情形	70

圖 4-6 試體 B3 之局部挫屈情形(無焊道開裂).....	71
圖 4-7 試體 B1 火害加溫段軸向變形與時間之關係	72
圖 4-8 試體 B2 火害加溫段軸向變形與時間之關係	73
圖 4-9 試體 B3 火害加溫段軸向變形與時間之關係	73
圖 4-10 試體 B1 火害加溫段軸向變形與時間之關係	74
圖 4-11 試體 B2 火害加溫段軸向變形與時間之關係.....	74
圖 4-12 試體 B3 火害加溫段軸向變形與時間之關係	75
圖 4-13 試體火害加溫段軸向變形與時間之比較圖	75
圖 4-14 加溫段爐溫、鋼板與混凝土平均溫度圖(B1).....	76
圖 4-15 加溫段爐溫、鋼板與混凝土平均溫度圖(B2).....	76
圖 4-16 加溫段爐溫、鋼板與混凝土平均溫度圖(B3).....	77
圖 4-17 試體 B1 抗壓軸向變形與軸力之關係	78
圖 4-18 試體 B2 抗壓軸向變形與軸力之關係	79
圖 4-19 試體 B3 抗壓軸向變形與軸力之關係	79
圖 4-20 試體抗壓軸向變形與軸力之關係比較圖	80
圖 4-21 混凝土各溫度火害後之強度比較圖	80
圖 4-22 火害後混凝土之抗壓強度設計曲線(NIST 規範).....	84

摘 要

關鍵詞：自充填混凝土、混凝土箱型鋼柱、防火性能

一、研究緣起

近年來，國內高樓建築普遍採用鋼骨鋼筋混凝土構造，在工程實務上常見內灌自充填混凝土（Self-Compacting Concrete, SCC）之箱型鋼柱。惟 SCC 遭受火災或高溫情況時，是否仍處於安全狀態或符合鋼筋混凝土建築結構耐火性能設計相關規定，值得學界深入探討。本研究即探討火害後含自充填混凝土箱型鋼柱（Concrete Filled Box Column, CFBC）之承载力，俾供國內編撰 CFBC 防火性能規範之參考依據。

二、研究方法及過程

本研究製作實尺寸填充式箱型鋼柱混凝土試體，於箱型鋼管內灌注 SCC，並於箱型鋼管外表面施作防火被覆，於箱型鋼管混凝土柱試體施予固定載重比的軸向壓力後，隨即對試體進行火害試驗。鋼材達平均溫度 400°C、600°C 及 800°C 時停止試驗，待試體冷卻至常溫後，再對試體進行加載試驗，藉以研究內含自充填混凝土箱型鋼柱於火害後之殘餘承载力。

三、重要發現

火害試驗中鋼材之平均溫度分別達 400°C 及 600°C 時，其柱試體尚處於膨脹階段，主要原因為鋼材受熱膨脹所造成。但鋼材均溫達 800°C 時，因材質軟化，彈性模數已經大幅下降，導致柱試體已經呈現壓縮狀態。由試體火害後之殘餘承载力試驗結果可知，試體 400°C 火害後之抗壓軸力較估算之標稱受壓承载力還高，此結果顯示柱試體尚未或輕微受損而已，600°C 火害後之試體抗壓軸力仍較規範估算之箱型鋼柱試體乘力高，約為 400°C 者之 96%。800°C 火害試體之抗壓軸力則較大幅衰退，殘餘承载力約為 400°C 者之 80%，顯然已經受到火害之影響，且顯現出

較脆之性質，柱體破壞則皆為鋼柱產生局部挫屈而破壞。

四、主要建議事項

根據火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之殘餘承载力研究執行過程中之發現，本研究提出下列具體建議。以下分別從立即可行建議及中長期建議加以列舉。

建議一

(建議事項)立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院科技部

火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之試體冷卻方式不同，鋼及混凝土在高溫後之殘餘應力會不同，往後研究中應考慮此項參數之變化。

建議二

(建議事項)長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部建築研究所

實際火災現場多半為強制冷卻，故建議內政部建築研究所防火試驗設備可加置強制冷卻設備，以應未來研究需求。

ABSTRACT

Keywords: Self-Compacting Concrete, Concrete Filled Box Column, Fire Resistance

In recent years, it is common to adopt steel reinforced concrete in Taiwan high-rising buildings. In process of engineering, to see the box column filled with Self-Compacting Concrete (SCC) is really general. But it is worth for academia studying in depth that SCC is subjected to fire, whether it remains security or accords with performance-based design code of reinforced concrete buildings. This study is to investigate the bearing capacity of fire damaged concrete filled box column (CFBC) and to offer the reference of CFBC fire resistance to domestic code edits.

In the study, the full-scale concrete filled box column is fabricated and poured with SCC. The fireproofing also covers its surface. After the box column is applied axial compressive with fixed axial load ratio, the fire damage experiment has been performed immediately. The test is stopped when the average temperature of the steel up to 400°C, 600°C and 800°C. The box column would be reloaded until it was cooled to nature temperature. So that, the residual bearing capacity of fire damaged CFBC could be found out.

In fire damage experiment, when the average temperature of steel in CFBC achieve respectively 400°C and 600°C, the column is still in expansion phase. The mainly reason is caused by the thermal expansion of steel. However, as the average temperature reaches 800°C, the steel softening caused the elastic modulus to drop significantly and led the column to present in a compressed state. The result of residual bearing capacity test shows that the compressive force of column under the 400°C fire damaged is larger than estimated nominal compressive force. It says that the column has not or a little been damaged by the fire. The same result also shows on the test with 600°C which is about 96% of the result with 400°C. The compressive force of column under the 800°C fire damaged is substantial decrease, and the residual

bearing force is about 80% of the result with 400°C. Apparently, the CFBC has been affected by fire damaged in 800°C, and showed the brittle nature. All of the failure of the specimen is due to the localized buckling in steel.

This project comes to the immediate and long-term strategies.

For immediate strategies:

The different cooling ways in the fire damaged CFBC caused different residual stress in steel and concrete. Therefore, the variability of cooling way should be considered in the study in the future.

For long-term strategies:

Most of the actual scene of the fire are forced cooling; therefore, it suggests that Architecture and Building Research Institute can add cooling equipment in fire test equipment to meet the needs of future research.

第一章 緒論

火災可能導致建築結構損壞或倒塌，嚴重危害人員生命安全。柱構件為主要支撐建築物之結構構件，因此柱構件在建築防火設計有其重要性。近年來，國內高樓建築普遍採用鋼骨鋼筋混凝土構造，在工程實務上常見內灌混凝土箱型鋼柱。此種填充式箱型鋼管混凝土柱承受軸向載重與高溫時，因不同材料性質導致強度損失及熱膨脹能力有所差異，此差異現象可能會影響填充式箱型鋼管混凝土柱構件耐火能力。自充填混凝土（Self-Compacting Concrete，SCC）擁有優異的流動性，因而已廣泛應用於高層建築結構。惟 SCC 遭受火災或高溫情況時，是否仍處於安全狀態或符合鋼筋混凝土建築結構耐火性能設計相關規定，仍值得學界深入探討。由於 SCC 具有較緻密的微結構，其高溫爆裂行為較一般混凝土嚴重。鑑此，本研究擬探討火害後含自充填混凝土箱型鋼柱（Concrete Filled Box Column，CFBC）之承载力，俾供國內編撰 CFBC 防火安全規範之參考依據。

第一節 研究內容

一、研究主題

本研究製作實尺寸填充式箱型鋼柱混凝土試體，於箱型鋼管內灌注 SCC，並於箱型鋼管外表面施作防火被覆，此填充式箱型鋼管混凝土柱試體在施予固定載重比的軸向壓力後，隨即對試體進行升溫來模擬遭受火害的情況，並做相關設計與控制，使試體不致在高溫發生破壞，待試體冷卻至常溫後，再對試體進行加載試驗，藉以研究內含自充填混凝土箱型鋼柱於火害後之殘餘承载力。其探討內容如下：

1. 藉由實驗方式與分析方法探討內灌混凝土箱型鋼柱於火害後，其強度與勁度之變化。
2. 探討 CFBC 在高溫下之變形行為(變形與變形速率)與破壞模式。
3. 於 CNS 12514 標準升溫曲線下，噴塗 1 小時防火塗料，進行 3 次試驗，

分別當鋼骨平均溫度達標準臨界溫度或較高溫度時停止加熱，後降溫至常溫時，進行極限載重破壞試驗，以了解其殘餘強度。

二、研究緣起

國內鋼骨鋼筋混凝土（Steel Reinforced Concrete，SRC）建築結構中，常於箱型鋼柱中填充混凝土，藉以增加箱型鋼柱之軸向承载力與側向勁度，進而提升整體建築結構之側向抵抗能力。此種填充式 SRC 柱在受到高溫火害侵襲後，若外表並無明顯的變形或破壞，其火害後的承载力是否仍能符合火害前之原設計標準，一直是工程界與學界在建築物火害後的火場鑑定常遭遇和亟欲解決的問題。國內的建築結構在設計時，其柱梁構件尺寸大部分由地震力或風力控制，故所設計出的構件尺寸也較大。在建築物只受到靜載重和活載重作用的平時或火害前，其柱與梁所受之載重比因而較低。比較建研所防火實驗中心所進行之相關火害實驗與國內外相關研究可知，受到較低載重比的填充式箱型鋼管混凝土柱的耐火時效較長；此外，部分實驗結果顯示，早在柱發生高溫破壞前，其鋼材與混凝土所受之高溫已超過會影響其材質的溫度。由此可知，受到高溫火害後的填充式箱型鋼管混凝土柱，雖然外表無破壞，其內部材質可能已經因曾受過的高溫而改變，進而影響其火害後的殘餘承载力。

第二節 研究背景與目的

一、研究背景

國內高層建築及大型結構工程等已漸採用 SRC 施作，因其具備高強度及高韌性等優點。SRC 構造之設計目標在於有效結合鋼骨(S)與鋼筋混凝土(RC)兩種構造，使它兼具這兩種構造的優點。尤其填充型鋼管柱與箱型柱是承受軸壓力之最有效率斷面，且混凝土亦作為熱沉（Heat Sink）材料。SRC 柱構件可分為包覆型（Concrete-Encased）及填充型（Concrete-Filled），而填充型 SRC 柱又分為鋼管混凝土柱（Concrete-Filled Tubular Column，CFTC）及填充型箱型柱（Concrete Filled Box Column，CFBC）。在標準升溫條件下，CFTC 與 CFBC 之耐火時效與其所承受的軸向荷重有密切關係。惟國內外有關 CFBC 之研究，其實驗試體尺寸偏小，柱寬介於 10~35 cm 之間，且不同型式 CFBC 與 CFTC

之製作方式亦截然不同。由此觀之，在全面推廣使用 SCC 填充 SRC 柱之前，尚須藉由火害試驗更進一步探討其火害後之承载力，以澄清若干疑慮，進而驗證其可行性與可靠性。

二、研究目的

綜前所述，SCC 填充 CFBC 之火害後行為模式仍有待學界深入探討。準此，今年度擬進行系列填充型 SRC 柱之定載升溫火害實驗，其研究成果可作為 SRC 建築物防火安全設計上的重要參考資料及法令規章研修之建議。惟此研究課題涉及層面相當深廣，非一己之力所能獨立完成。爰由學界組成研究團隊共同積極參與建研所 103 年「建築防火科技發展計畫」(二)之第 3 案「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承载力研究」，以探討內灌自充填混凝土 SRC 柱之殘餘承载力，並測析其軸向變形、挫屈行為、使用性極限狀態等之差異。期透過群策群力與分工合作之運作模式，達到事半功倍之效，俾使我國在 SRC 建築物防火研究領域上擠身世界先進國家等級。

第三節 研究之重要性與預期目標

一、本研究之重要性

國內現行法規關於鋼骨鋼筋混凝土材料之規定係訂於建築技術規則建築構造編（民國 96 年 12 月 18 日修正）第七章之第 502 條，其對鋼骨鋼筋混凝土構造設計要求考量強度及使用性兩種極限狀態；其中，強度極限狀態包含：降伏、挫屈、傾倒、疲勞或斷裂等極限狀態，而使用性極限狀態則包含：撓度、側向位移、振動或其他影響正常使用功能之極限狀態。就高溫下（火害中）或火害後之分析與設計考量而言，現行頒佈 SRC 構造設計規範仍亟需後續研究提供斷面尺寸、載重比對填充型箱型柱於火害挫屈行為或破壞模式影響之完整資料數據。由此觀之，透過實尺寸填充自充填混凝土 SRC 柱火害實驗，評估其承重能力，以作為國內編撰 CFBC 與 CFTC 耐火時效規範之參考依據，實為現今防火計畫之重要課題。

二、本研究之預期目標

火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承载力研究

本研究之預期目標如下所列：

1. 建立火害後自充填混凝土箱型鋼柱之極限破壞載重與折減比例。
2. 提供現地進行火害後構件柱承重殘餘能力評估。
3. 完成鋼筋混凝土建築結構耐火性能設計法與評估之驗證。
4. 瞭解自充填混凝土箱型鋼柱火害行為，以做為補充現行鋼筋混凝土結構物耐火性能設計與評估檢證之參考資料。

第二章 文獻回顧

第一節 火災溫度之發展行為

一、燃燒的要素【1,2】

燃燒是一種化學反應，包括燃料快速氧化，並在過程中釋放光熱。任何類型的燃燒要發生，需要一定之條件。這些條件意指可燃物、氧氣（助燃物）、熱能和連鎖反應。此項組合稱為燃燒的四面體，在燃燒過程中，四種條件缺一不可(如圖 2-1)。



圖 2-1 燃燒四面體【1】

(資料來源：陳弘毅*，「火災學」)

1.可燃物 (Fuel 燃料)

所謂可燃物係指能與氧化合引起熱反應之物質，而當其氧化之際，需具有 100Kcal/mole 以上之發熱量，且熱傳導度約在 0.001Kcal/cm sec °C 以下者，始可充當之。可燃物之燃燒因氣體、液體、固體之差異，而有不同之燃燒形態。而在固體、液體、氣體三者之中，由於氣體熱傳導度最小，液體次之，固體熱傳導度最大，所以以氣體較容易燃燒。

2.氧氣 (O₂ 助燃物)

燃燒係可燃物與氧之化合作用，在燃燒過程，氧乃是提供助燃的條件，因此燃燒之際非但不能缺氧，且濃度必須在一定比率之上，通常空氣中氧的含量

為空間內容積之 21%，若空間內氧的濃度低於 15%，則燃燒甚難持續。所以燃燒時只要有足夠的空氣或通風良好狀況，都能給予必要的助燃氧氣。

3.熱能 (Heat)

在此熱能應包含熱度與燃燒點等二個要件。在所有可燃物與氧起燃燒化合物作用，必有熱度存在，亦即必須達到一定溫度，此種供給熱度之物，一般稱為點火源。一般點火源之種類繁多，包括火焰、短路、靜電、火花等，甚至物質之自然發火亦可成為點火源。而燃燒除了剛開始之點火源外，溫度亦必須達到可燃物之燃燒點以上，才可能持續燃燒。熱能之來源，大部分以火焰直接加熱最多，其次還有電熱能、機械能等。而燃燒空間內之溫度除因火源位置不同而有差異外，空間高度是溫度最重要因素，亦即燃燒空間內愈高處溫度愈高，愈接近地板面溫度愈低。

4.連鎖反應 (Chain Reaction)

所謂連鎖反應係指一個現象所發生之結果，再助長了這個現象，使原先的現象因結果的助長而逐漸變大。在燃燒的過程，由於連鎖反應的作用，使得燃燒可以連續不斷地繼續下去。而造成連鎖反應的最主要因素是在於燃燒所產生的氫離子及氫氧離子，助長了連鎖反應的進行。簡單舉例：一般的水要分解成氫離子及氫氧離子需要相當大的熱能才能達成，相反地，燃燒現象上，經常發現有水蒸氣，此水蒸氣係由燃燒時自然產生之氫離子及氫氧離子結合而得，在結合之此時必會釋放出大量熱能，此熱能有助於燃燒之加速，造成燃燒更激烈，而猛烈燃燒必產生更多之氫離子及氫氧離子結合成水蒸氣而釋放出更多熱能，如此循環即可造成火勢迅速擴大燃燒。

二、火災的熱量傳遞方式

火災是指「火」違反正常用途，因燃燒作用而產生獨立延燒之狀態，而在各種物質燃燒之氧化過程中因為物質種類、特性、形狀、數量、擺放及環境之空間、氣溫、風速、濕度.....等因素而異，任何火災燃燒現象、延燒途徑及燃燒結果均不相同，所以火災是複雜性、多變性及難以捉摸性的燃燒現象。內政部消防署對於火災即定義為「違反人的意思或縱火而有滅火必要的燃燒現象。」

火災當中，熱傳是主要項目，具有起火、成長、擴散、衰退及熄滅等作用。而熱傳遞也反應出大量的物理證據可供火災調查人員確認起火處及起火原因。因此對於熱及溫度之區別是很重要的。熱量在具有溫差的物體間傳遞，高溫傳向低溫。溫度是用來測量物體間熱流之關係。而熱則是以能量的形式，用來維持或改變物質的溫度。當熱能傳至某物體，則物體溫度會升高。當熱能傳遞出去，則物體溫度下降。熱傳以三種方式來表示：熱傳導、對流及輻射。【3】

1. 熱傳導 (Thermal Conduction)

熱傳導是發生在固體之間的熱移動，當物體某部分被加熱時，能量即依據物質之溫差及物理性質，由加熱區傳至未加熱區。物理性質為熱傳導係數 thermal conductivity(k)，密度 density(ρ)，熱容量 heat capacity(c)。如果熱傳導係數(k)很高，則物質的熱傳導效率變高。金屬具有較高之熱傳導係數(k)，而塑膠或玻璃具較低之熱傳導係數(k)。其他物理性質(ρ and c)相同，高密度(ρ)物質導熱較低密度物質快。物質具有較高之熱容量(c)，則需要較多之能量來提高溫度。三者合起來一般稱之為熱慣性，並以 k, ρ, c 表示。

2. 熱對流 (Thermal Convection)

熱對流係指熱能藉由高溫之液體或氣體等流體將熱能從熱源向四周環境傳遞。當熱氣流經過物體表面時，熱能藉由氣體對流傳遞至固體。熱能傳遞效率視溫差之變化、熱氣流接觸之表面積及流速而定。熱氣流速愈快，對流傳熱的效率愈大。當居室溫度上升至閃燃階段，對流仍然持續，但熱輻射所佔之熱傳遞比例迅速增加，並成為主導熱傳的重要機制。

3. 熱輻射 (Thermal Radiation)

熱輻射是指熱能藉由電磁波從熱源表面傳遞物體表面，而不需中間介質。輻射能僅藉由光線傳遞，將會因介質的吸收而減弱或阻擋。介質並不一定會阻擋所有的輻射熱。輻射熱傳遞量與絕對溫度四次方成正比。在高溫條件下，些許的溫差就會導致大量輻射熱的傳遞，溫差增加 1 倍，則輻射熱之傳遞增加 16 倍，如圖 2-2 所示。距離也是影響輻射熱傳遞的重要因素。距離加大，則物體單位面積所受之輻射熱同時受到輻射體及距離之影響。

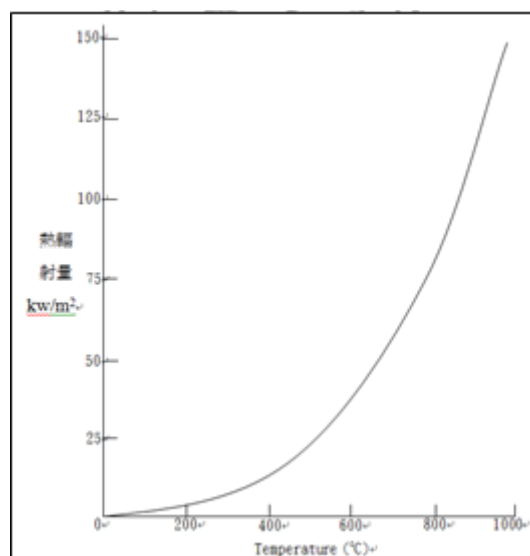


圖 2-2 輻射熱與溫度關係圖【3】

(資料來源：黃育祥^{*}，「以地板縱火燃燒試驗改善火場調查模擬之研究」)

三、建築物室內火災成長趨勢

火災的發展隨著時間分為起火期、成長期、全盛期、衰退期等四個階段，各階段特性如表 2-1 及圖 2-3 所示，由於可燃物特性不同，起火期發生的時間也不同；而火災的成長期會隨著持續時間的延長，如無外界條件干涉，則會有越多的可燃物參與燃燒，火災的溫度、熱釋放率也會不斷增加，當火災發展至一定程度，空間內條件合適，甚至會出現閃燃現象，火災進入全盛期，隨後一段時間內的火災熱釋放率則保持穩定，其最大熱釋放率主要取決於燃料的數量與性質、空間條件等，火災經過一段時間的持續發展後，隨著可燃物數量的減少，火災最終進入衰退期，當燃料全部耗盡後火災隨之熄滅。

表 2-1 火災發展歷程各階段與基本特性【4】

基本特性 火災歷程	經歷時間	室內空氣溫度	火災現象與 燃燒範圍	防火對策	防火目標
起火期	1-10 min	100°C	侷限火源附近	管制火源及使用防焰材料	防止起火
成長期	5-20 min	100-650°C	起火點向四面八方延燒 火焰隨熱氣上升至天花板面	使用耐燃材料避難及引導逃生偵測和初期滅火設備	成長期的耐燃性
閃燃	瞬間	至少 800°C	室內所有可燃物在接近的同一時間著火燃燒	使用防火構件、構造煙控全棟避難、防火設備	防止擴大延燒
全盛期	不一定	通風控制燃燒 600-900°C 燃料控制燃燒 600-1200°C	室內所有可燃物皆燃燒		
衰退期	不一定	約 200-300°C	可燃物燃燒速度漸減少致火勢熄滅	防制二次燃燒煙氣排放及結構穩定性	防止破壞

(資料來源：內政部營建署，「建築材料與建築設備之分類系統」)

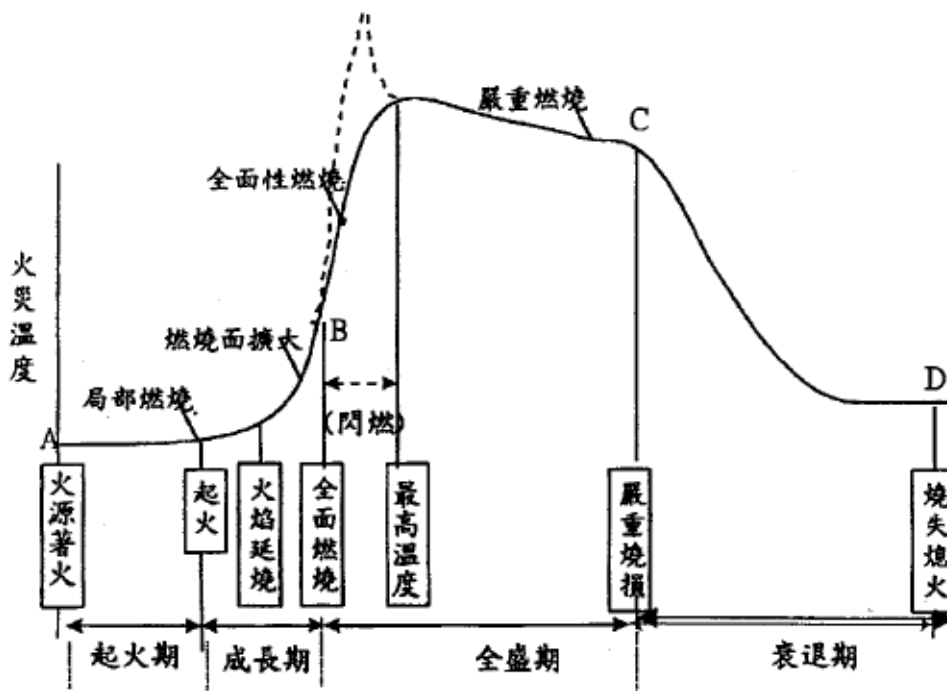


圖 2-3 室內火災成長過程時間-溫度曲線【5】

(資料來源：陳海曙*，「建築防火安全設計學」)

1. 起火期

當物質開始變熱時，會釋放可燃燒的氣體。初期的受熱通常來自一個外部源，例如火柴或火花。受熱也能透過來自另一個火或熱源的傳導、對流或輻射而發生。在某個點，產生的熱會超過被驅散的熱，燃燒自己能夠供給自己所需要的熱而使燃燒繼續。當存在化學反應所需要的成分時，發火 (Ignition) 便會發生。發火係指物質不再需要外部的加熱而有能力從自己產生的熱來維持燃燒。初期火災發展階段非常簡單，係指火的四面體的四種要素全都到位、物質到達它們的發火溫度，且開始起火。在發火階段，火通常非常小且地區受限制。

2. 成長期

發火後，火開始成長。剛開始是小小的火焰，其他易燃物受熱、釋放易燃氣態、發火、將連鎖反應擴散到其他易燃物，導致火勢加大。成長的速度和最終火勢視建築物內部氧氣供應、燃料量、空間大小及內部裝潢材料等因素決定之。在火災成長階段 (Growth)，會發展出明顯的熱捲流。在一個房間內，熱

捲流會抵達天花板且開始側向移動。一個房間內的火可能在成長階段擴大到其他房間和建築物其他部分。視前面列出的因素，這樣的擴展在數秒內就會發生。如仍有大量的空氣，成長階段的火會迅速蔓延，最終達到閃燃（Flash Over）現象後，進入最盛期火災階段。如果空氣受到限制或沒有空氣，火的發展受到通風的控制；亦即，只有在有空氣時火才會成長（亦稱為「通風不足」或「受空氣控制」的火）。

在火的成長階段中，進行燃燒的房間裡可能遭遇的熱與溫度。在成長階段，室內空間溫度高達 500°C 到 600°C，閃燃時室內溫度更可高達 800°C 到 1000°C。

3.全盛期

火災於成長階段後期進入閃燃之後，因燃燒現象劇烈，且放出大量的熱，此時火勢鼎盛，室內持續保持高溫狀態，火災發展至此稱為全盛期（完全發展, Fully Developed），此時建築物受到重大壓力，此時石灰、石膏乃至混凝土可能發生爆裂而剝離。該時期之燃燒可分為通風控制燃燒（Ventilation Controlled）及燃料控制燃燒（Fuel Controlled）兩種。

火要變成完全發展，必須有大量的空氣。在一個結構物內，完全發展階段的速度和範圍受到可進入火場的空氣量的控制或調節，只有在有空氣助長燃燒下，火才會變成完全發展。當建築物的某些部分破損（倒塌、門窗破損等等）且空氣可不受限制進入火場時，受空氣控制的成長階段的火勢會快速變成完全發展階段。一般而言，完全發展階段之火場溫度可達 700°C-1200°C 間。

4.衰退期

為居室火災最盛期後火勢趨小之階段，隨著可燃物的燃燒殆盡，火勢漸轉弱室內溫度開始成直線般下降，地板上呈現殘物燃燒狀態，一直至熄滅為止。由於可燃物量減少，燃燒火勢逐漸變小，火災的發展進入衰退期（Decay），衰退期開始於最盛期溫度降低至 80% 的時候，所以衰退期初期的溫度仍高。溫度在此階段緩慢下降，最後只剩下焦炭餘燼，此情況如任其擱置，可長時間保持高溫，室溫維持在 200°C-300°C 前後，不易下降，若有外來可燃材料的加入，

火場的溫度仍足以再次點燃可燃物，造成復燃。

第二節 高層建築物內部材料組成與火災溫度關係

高層建築物因內部空間大、可燃物多且使用型態複雜，如無良善建築公共安全及消防安全管理，一旦起火，建築內部滅火設施及防火區劃功能的失效，容易造成大面積火災，本節茲就建築物內部材料及物品（木材、混凝土、金屬、塑膠、玻璃、塗料等 6 類）燃燒過程之強弱、物質變化及燒毀程度之影響，研判當時火災現場可能之溫度與狀況。

一、高層建築物之定義

「高層建築物」之定義，綜觀世界各國的界定，通常以一般建築物高度或總樓地板面積區分外，也有以消防隊救災之雲梯車所不能達到的範圍為區分標準。下列為世界各國所謂「高層建築物」之定義：

- 1.美國：高度在 500 英尺（152.4 公尺）以上者。
- 2.日本：法規定義為高度超過 60 公尺者。
- 3.中國：建築規範規定係高度 100 公尺以上者。
- 4.國內：依建築技術規則建築設計施工編第 12 章第 227 條之規定，高層建築物係指高度在 50 公尺或樓層在 16 層以上之建築物。

二、高層建築物火災特性

高層建築物發生火災時，不僅是在起火點的確認、火災擴展狀況的掌握、以及需要救助者狀況的了解等的情報蒐集上，需要相當多的時間。消防活動如消防隊的進入、滅火操作、以及人命救援等也極其困難。因此，在火災防護概念上以自救為出發點，相關法令則強化了各種防火設施與設備的設置規制，而在這些規制下，形成了高層建築物的火災特性。

另由於高層建築物內部空間及使用較一般建築為複雜，因此，高層建築物在火害危險性上較一般建築為高，究其原因主要有下列四點：**【6,7】**

1.火勢蔓延快

高層建築物內部有眾多的樓梯間、升降機管道、電纜管道、風道、排煙道等等垂直管道，如果防火區劃或防火處理不完善，火害發生時，就好像一座高聳的煙囪，成為火勢快速蔓延的途徑。

2.疏散困難

高層建築因具有樓層數多，垂直距離長的特點，疏散避難到地面層或其他安全的場所所需的時間也較長。使用人員密集，於火災發生時，多係於停電狀態，內部漆黑，濃煙嗆鼻，人員驚慌恐懼，互相推擠踐踏，呼天搶地，爭先恐後，往往造成人命傷亡，層數越高，人員越多，疏散時間越長；疏散人流擁擠，火災時因受煙氣之威脅，人之本能恐懼心理及逃生欲望，使人們瞬間集中擠向安全通道。火害發生時，由於各種垂直管道氣壓牽引力大，火焰以及煙氣向上蔓延快速，增加了疏散避難的困難度。多數超高層建築物的垂直逃生主要倚靠樓梯，但由於樓梯逃生至避難層所需時間極多，一旦煙氣竄入，就會嚴重影響避難。

3.撲救困難性高

高層建築物樓層數多，高度甚高，火災發生時，戶外進行搶救相當困難，高層建築之高度，超出雲梯車之界限，消防車幫浦之加壓壓力有限，雲梯愈長，車體愈笨重，操作升梯之時間愈長，操作所需之底面積越大，頂端搖晃愈厲害，射水、搶救愈困難，影響甚鉅。一般均以自救為主要考量，即主要靠室內防火設施並配合消防安全設備，但防火安全設施及設備若設置不完善則有信賴上的問題，因此，高層建築物的火災撲救往往較為困難。

4.火災隱患多

一般高層建築物因空間較多，管道密佈錯綜複雜，為達到使用效能，其大多為複合用途建築物；可燃物多，建築公共安全及消防安全管理不易；例如：設有商業使用的空間、人員密集的表演場、餐廳、辦公大樓，又分租給若干單位使用，使用狀況及安全管理不統一，潛在火災隱患多，一旦起火，容易造成大面積火災，設施規模鉅大化、複雜化，使防災之反應動作時間增加，消防人

員為確認起火點，向火場推進時間變緩，避難與救助所需時間變長，反應時間增加。從國內火害發生實例可知，這類火災發生，火災蔓延、撲救、疏散更為困難，容易造成更大的損失。

三、高層建築物火災與內部材料燒毀程度之影響【8】

1.木材類（板材、角材、圓材）

建築物內部裝修、物品及傢俱等多為木造，木材經熱徐徐加溫後，最初是木質細胞間隙中之水分開始蒸發，其後逐漸開始乾燥，溫度達到 100°C 時，供給的熱全部用於水分的蒸發，此種現象持續至水分全部蒸發為止，待木材的水分完全蒸發後，木材的溫度會持續再上昇，此時木材成分內所含之揮發性物質亦同時蒸發。溫度上升至 160°C 時木材產生熱分解氣體，變成燒焦之褐色（褐化），此時若予引火，即可著火。溫度在 240°C ~ 270°C 時，急劇分解可燃性氣體，若有引火物，即會全面引燃，一般是以 260°C 為木材的引火危險溫度。於 300°C ~ 350°C 之間完全碳化。420°C ~ 470°C 時可使木材自然發火。以上係木材加熱進行碳化成灰之狀況，其過程之各種燃燒現象強弱依序為：變色→燒焦→碳化→剝離→燒失。

(1).碳化（凹凸、溝痕幅度及深度）

木材碳化表面愈粗糙、凹凸愈明顯、龜裂溝痕愈深，燃燒愈強；碳化深度與暴露火流時間未有線性關係而係與熱源大小成性線關係，碳化深度比較可以研判出火流方向。一般木材碳化強弱的判斷要領如下：

- A. 碳化面的凹凸狀況愈厲害，則表示燒得愈強烈。
- B. 形成碳化花紋的溝痕幅度愈寬，則表示燒得愈厲害。
- C. 形成碳化花紋的溝痕深度愈深，則表示燒得愈厲害。

(2).剝離（快速燃燒尚未碳化完畢之碳片濺跳）

木材在焚燒時，或爐灶中之木片燃燒時，會發出霹靂啪啦之爆裂聲並濺跳，此種碳化之剝落狀態，稱為剝離。燃燒愈強烈，剝離之處所愈多愈深愈大，其特徵有：

A. 每一個面積不大，剝離部份的表面粗糙呈鋸齒狀且遍布不一。

B. 剝離之處愈多、愈深、愈大表示燃燒愈強烈。

C. 射水剝離其表面較寬大、平坦、鮮豔、集中。

D. 裂紋之大小和形狀與火流燃燒之速度和密度並無多大相關，是和木材本身材質與木紋生長方向不同而相關。

(3.)燒失

木材著火後，經過碳化、剝離的過程，然後達到燒失（灰化）的階段，火災現場所見之木材有下列幾種之燒失情形：

A. 部分燒失

木材是各種物質中燒毀程度最易顯示比較燃燒強弱者，部分燒失是燒失之程度中最輕微者，故最易推測火流之方向及受熱之強弱，部分燒失愈多，受熱越強，愈接近起火點。其燃燒狀態可分為燒細、燒斷及燒穿等。

B. 大半燒失

木材燃燒經部分燒失過程後，燃燒繼續進行，則呈現大半燒失的現象，燒失範圍多的方向，火勢較強，另經由殘留木材難燃之部分來推定原形之狀態，進而判斷火流之方向及燃燒強弱。

C. 完全燒失

完全燒失乃顯示該處必然經過嚴重之燃燒導致燃燒前可燃物已完全燒失而不復殘留之狀態，欲瞭解燃燒前建築物內部狀況，應詢問相關人員原有結構、物質及形狀，再找尋其他間接證據作為起火狀態之研判依據。

2.混凝土類

混凝土為質地堅硬之不燃性物質，其塗敷層受熱之後因燃燒程度之不同，由輕微而致嚴重將產生變色、龜裂、凸起、剝落及白粉化之現象。

(1).變色

火災時發生之煤屑附著在混凝土將使混凝土變為黑色，此煤屑隨著燃燒之持續而燒失逐漸變為白色，亦即表示混凝土顏色愈白，該處燃燒愈強。

(2).龜裂

混凝土若持續燃燒，塗敷層將產生龜裂現象

(3).凸起

混凝土產生龜裂後，仍持續燃燒，塗敷層將產生凸起現象。

(4).剝落

凸起後再持續燃燒將成凸起部分剝落現象，凸起部分剝落面愈廣者，顯示其燃燒愈強。

(5).白粉化

混凝土若持續長時間受高溫燃燒，將使其本身凝結力減低產生白粉化現象，有此現象表示比較接近起火點。

3.金屬類

金屬原本係不燃性材料，但若受到熱仍會有變色、軟化、彎曲、熔化等變化，而由各該受熱程度的差距，即表示其燃燒的強弱，勘查時得依變色程度、彎曲狀況、甚至熔化情形，推斷受熱方向、延燒途徑及研判起火處所。

(1).變色

金屬類受到燃燒之後，首先呈現黑色煙渣附黏的現象(可能伴隨起泡現象)。若繼續加熱，繼而煙渣量逐漸增加到某種程度時，繼續加熱煙渣則會逐漸燒失。一般除電鍍類於受熱後，先變紅色再變青色，由顏色表示其溫度差外，金屬類幾乎都是燃燒愈強烈，燃燒形態愈呈白色之傾向。而鐵製材料受熱愈強，其氧化腐蝕速度亦愈快，隨時間經過，逐漸變成褐色。表 2-2 為鋼材於各受熱階段溫度之變色狀況。

表 2-2 鋼材受熱之變色【9】

加熱溫度℃	不銹鋼(SUS304)	冷軋鋼板
300℃	一點薄褐色	薄褐色
400℃	一點濃薄褐色	一點濃黃褐色
500℃	薄紅紫色	薄紫色
600℃	紅紫色	暗紫色
700℃	濃紅紫色	近灰色之暗紫色
800℃	紫色	黑紫色
900℃	暗青色	灰色(氧化鐵色)
1000℃	灰色(氧化鐵色)	灰色(氧化鐵色)

(資料來源：內政部消防署，火災原因調查鑑定訓練班第十八期訓練教材)

(2).軟化、彎曲

金屬類受熱即會膨脹，當達到各該金屬之固有溫度時產生軟化。由於受到膨脹、本身自重及荷重的影響，軟化的金屬即會形成彎曲，勘查時可由其軟化彎曲變形程度，推斷燃燒之強弱，但彎曲之方向未必即是受熱之方向。因此研判時只能以彎曲之程度，做為燃燒強弱之比較。

(3).熔化

金屬受熱軟化彎曲，當溫度達該金屬之熔化溫度時即開始熔化，其熔化程度之差異，可顯示出燃燒之強弱及火流方向，但勘查時僅能以相同材質之物品做比較。不同材質之金屬物品其熔化溫度不同，依熔化程度研判火流方向易產生誤判應加以留意。下表 2-3 為一般常見金屬之熔化溫度【9】。

表 2-3 常見金屬之熔化溫度【9】

金屬種類	熔化溫度	金屬種類	熔化溫度
錫	232°C	保險絲	220°C-320°C
鉛	327°C	銀	960°C
鋅	420°C	金	1063°C
鋁	660°C	鐵	1530°C
黃銅	880°C	不銹鋼	1520°C
青銅	922°C	鎢	3400°C
銅	1083°C	鎳	1455°C

另：玻璃熔化溫度為 500°C-600°C，溫度達 250°C-400°C 即破裂。
 一般筋水泥建築火災地板附近最高溫約為 800°C-1000°C。
 木造房屋火災最高溫度約為 1100°C-1200°C。
 短路發生之火花熱約為 2000°C-5000°C。

(資料來源：內政部消防署，火災原因調查鑑定訓練班第十八期訓練教材)

4. 塑膠類 (PVC)

塑膠類之燃燒一般為分解燃燒，其過程係經受熱軟化，進而熔化，而後碳化燒失；燃燒性因組成不同而有相當之差異。

(1) 軟化 (123°C)

塑膠之軟化隨其種類而異，一般聚乙烯約 40°C-50°C 即呈熱變形 (遠較其軟化點為低)，123°C 左右軟化，220°C 左右熔化。

(2) 熔化下滴 (220°C)

軟化之塑膠再進一步加熱時，則逐漸熔化下滴。除非是裝有水或放置地板附近較低位置或是火場邊緣之塑膠，否則多會被溶解或燒失。

(3) 燒失 (200°C-400°C)

塑膠一般均屬可燃物，通常其著火溫度甚低，溫度在 200°C-400°C 之間便產生熱分解。因成溶解狀態產生瓦斯，著火而燒失，由殘存部分及燒失程度

研判受熱之強弱。

5.玻璃類

一般玻璃使用於建築物內主要以玻璃門窗、簡易隔間及裝飾等，而玻璃依其燃燒程度由輕微至嚴重可區分為破裂、碎裂及融凝。

(1).破裂

玻璃受熱會產生黏性變化，當玻璃受熱較小，但仍大於膨脹係數造成異常膨脹，形成表面成貝殼狀破裂，而裂片呈片狀且稜角尖銳（ $250^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ ）。

(2).碎裂

因玻璃表面熱應力大於其抗張應力玻璃呈小碎片且雜有凝塊（ $550^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$ ）。

(3).熔凝

玻璃受熱大於其熔點 600°C ，始溶解而落於窗框或地面。

6.塗料類

一般塗料受熱依其程度可區分為變色、發泡及燒失等。

(1).變色

塗料變色的差距仍然是燃燒強弱的表示，不過塗料的顏色特別多，需先行確認原有顏色，否則難以判斷燃燒型態的強弱。

(2).發泡

塗料發熱後可能產生發泡狀態（並非每種塗料都有起泡現象），可依位置、大小及數量研判燃燒強弱。

(3).燒失

塗料於物體表面長呈薄層狀態，較容易燒失，因此可依剩餘部分來辨別燃燒之強弱。

四、建築物結構的防火時效

世界上大部分高層建築物所採用的軀體構造主要為鋼筋混凝土構造 (RC)、鋼骨構造 (SC) 或鋼骨鋼筋混凝土構造 (SRC)，所用的材料為鋼材與混凝土。外圍由混凝土材料所包覆的鋼筋混凝土構造及鋼骨鋼筋混凝土構造，由於混凝土保護層的隔熱作用，可以減緩材料的升溫與伴隨而來的承載能力折減。鋼骨構造則由於鋼材的高熱傳性，必須另外以隔熱性材料來包覆，以減緩構件鋼材的升溫與伴隨而來的承載能力折減。而耐火被覆材料與各類軀體結構構件整合後所能防護火災的時間長短，就是建築物結構的「防火時效」。

RC 構造之高層建築特點為建造工程造价較 SC 構造及 SRC 構造低廉，另受風力或地震力影響，側向位移十分小，故居住於室內人感覺不明顯，另 RC 構造受火災溫度變化影響較小，故建築結構抗火性為三者中最優；惟 RC 構造建築不能蓋太高，一般 21 層的 RC 建築物，在載重層層累積下，其柱梁斷面需施作非常大，柱子可能會大到 1.5M*1.5M 以上，嚴重影響室內可用空間和隔間，並不經濟，且以現今環保意識抬頭層面看，因混凝土生產過程中會產生許多 CO₂，故使用 RC 建造並不環保。

SC 構造之高層建築特點因鋼結構具有強度高、韌性大、材質均勻、自重輕及良好的抗震等優點，故較 RC 結構而言更符合高層建築高跨徑及耐震之需求，且鋼結構施工機械化度高可於工廠預鑄，現場組裝，施工快速，同樣規模建築物，SC 結構比 RC 結構工期短約 1/3，故可節省模板材料支出，另可建築結構之鋼材可重複使用，符合現今社會環保需求；惟鋼材怕火，一般的鋼材於 650°C 時，其降伏強度將減少 20%~25%，於 725°C 時，鋼材完全軟化，持續的高溫會造成 SC 結構崩解，故需於鋼材表面施作防火保護。且鋼材怕鏽，一產生鏽蝕，強度即開始降低，可於表面油漆隔絕水氣，或使用合金鋼等方式防止鏽蝕產生。

SRC 構造之高層建築物特點為同時擁有 RC 構造與 SC 構造的優點，因 SRC 結構以鋼筋混凝土包構鋼骨，是最安全的柱樑，結構應力均勻分配傳遞，抗震效果最好，且鋼骨外層有鋼筋混凝土包構之故，因此其耐久性及防火性高，目前 SRC 構造運用於高層建築及超高層建築，是一種耐震能力好且安全性極高

的構造方式，地震帶國家(如台灣)非常適用之；惟 SRC 構造施工期較 RC 構造建築物長，且造價較高。

1.建築物防火時效之規定

高層建築物依建築技術規則設計施工編第 69 條規定係為地面 3 層以上建築物，整棟應為防火構造建築物，其主要構造之柱、樑、承重牆壁、樓地板及屋頂應具有一定之防火時效此於建築技術規則設計施工編第 70 條亦有規定如表 2-4 所示。

表 2-4 防火構造之防火時效分類（資料來源:建築技術規則）

層數 主要構造	自頂層起算不超過 4 層之各樓層	自頂層起算超過 4 層至 14 層之各樓層	自頂層起算至第 15 層以上之各樓層
承重牆壁	1hr	1hr	2hr
樑	1hr	2hr	3hr
柱	1hr	2hr	3hr
樓地板	1hr	2hr	2hr
屋頂	0.5hr		
註：1. 屋頂突出物未達計算樓層面積者，其防火時效與頂層同。 2. 本表所指之層數包括地下層數			

(資料來源：建築技術規則)

2.鋼結構之防火被覆技術

一般鋼材在高溫下降伏強度即開始大幅下降，進而影響鋼結構高溫下之結構受力行為，導致鋼構造發生火災時會發生倒塌的危險，故為防止鋼結構建築之火害，規定其主要結構體必須具備足夠之防火時效，一般鋼結構應有防火保護工作，其保護的被覆材料包括：

(1).防火毯：以石綿、礦纖等毯狀成品包覆型鋼。

(2).防火板：以矽酸鈣板、礦纖板或石膏板等防火材料板包覆。

- (3).防火塗料：利用塗料本身遇熱後產生化學變化而膨脹至一定厚度，形成隔熱層。
- (4).防火噴料：以質地輕、隔熱佳的材料直接噴塗於鋼料表面或鋼絲網界面。
- (5).防火覆材：以石膏或水泥等輕質灰漿包覆於鋼料表面。

第三節 火害對於建築結構中混凝土材料之影響

一、火害後對混凝土強度之影響

蔡佐良等人於 1998 年【10】在「火害延時與溫度對混凝土強度之綜合影響—溫時分析法」一文中提到，火害試驗溫度在 200°C 以下時，其殘餘抗壓強度高於基準強度，其主要原因係當混凝土受熱溫度在 105°C 時，混凝土中的毛細孔水及吸附水會因高溫而蒸發，試體產生加速水化反應的效果。在 300°C 試驗之試體殘餘抗壓強度均已呈現下降之現象，最多下降約 14%。其原因是在 250~350°C 之間，試體內之水化物或 C-S-H 膠體的鍵結水將大部份散失，其分子結構間的鍵結力將被破壞，使骨材和水泥漿體之間的裂縫增大，造成強度的降低。在 400°C 試驗之試體，其殘餘抗壓強度下降約 25%；在 500°C 試驗後之試體殘餘抗壓強度下降約 57% 左右。

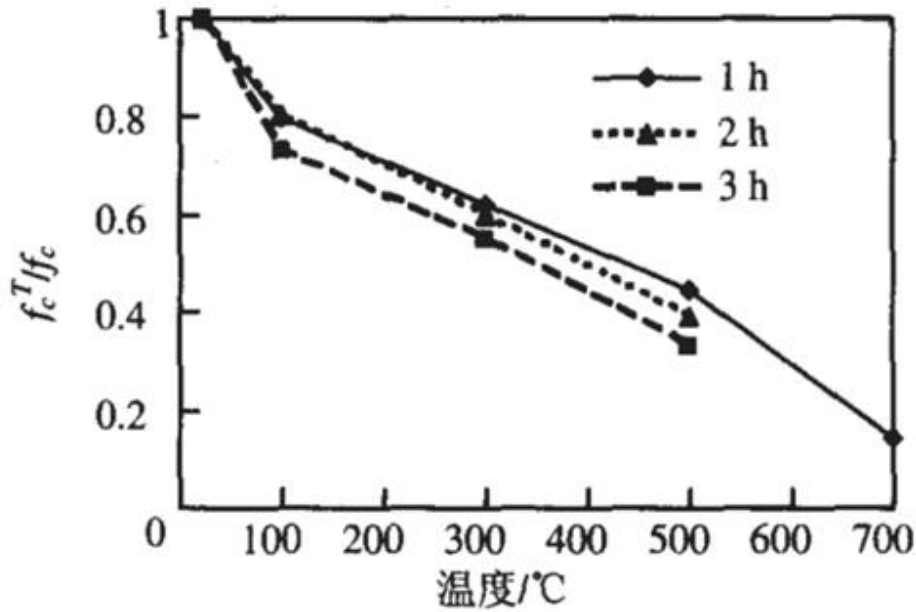
1998 年，楊旻森、陳舜田、沈進發【11】以「軸壓力對混凝土受火害後之力學性質之影響」之研究結果指出，混凝土受火害後之力學性質變化與水灰比及試體尺寸並無明顯之相關性，但隨所受之軸壓力與火害溫度而改變。火害後混凝土之殘餘抗壓強度及彈性模數隨溫度增加而降低，但衰減的趨勢受所施加之軸壓力增加而減緩。另混凝土受火害後殘留抗壓強度隨火害溫度增加而降低，且折減的程度在火害溫度由 500°C 上升至 600°C 時更為嚴重。探究強度折減的原因，概可分述以下來說明：

1. 混凝土受火害時，由於熱能之作用，破壞了水泥漿體之固微結構，使其膠結能力漸失。
2. 混凝土中之骨材受熱時，應變隨溫度上升而增加；反觀水泥漿體，溫度

上升初期，應變亦隨溫度上升而增加，但當溫度超過約 130°C 時，應變反脹為縮，造成水泥漿體與骨材間之界面因脹縮不一致而龜裂，使混凝土之強度降低。

3. 混凝土於受火害過程中由於混凝土之熱傳速率慢，內外之溫差大，使得內外脹縮不和諧而產生裂縫。
4. 火害溫度由 500°C 上升至 600°C 時，強度急遽衰減，其主要原因乃是矽質骨材之 SiO_2 由 α 相轉變為 β 相，體積大為膨脹，混凝土龜裂更為嚴重，使其強度折減更大。
5. 預施軸壓應力混凝土具有較高之殘留抗壓強度，且殘留抗壓強度之衰減隨預施軸壓應力增加而有減緩之趨勢。預施軸壓應力 $0.05f_c$ 以上，受火害 400°C，殘留抗壓強度幾乎未有任何損失；受火害 500°C 之試體殘留抗壓強度幾乎亦都在 90% 以上。

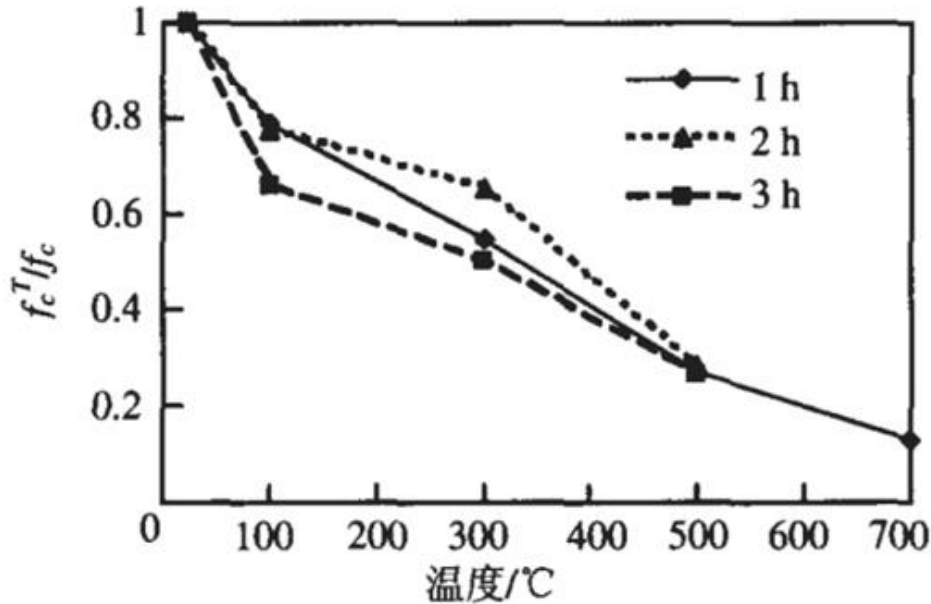
大陸的學者研究亦指出【12】，尺寸 10cm×10cm×30cm 的稜形試體，強度等級分別為 20MPa 和 30MPa (C20 與 C30) 的混凝土試體，受熱溫度分別為 100、300、500、700 °C，受熱時間分別為 1、2、3 小時。達到規定溫度後開始計時至規定受熱時間。取出試體後自來水冷卻 15min，置於室溫下完全冷卻。72h 後測量試體的抗壓強度和彈性模數。其研究成果顯示，溫度至 500°C 時，C20 與 C30 試體平均殘餘抗壓強度分別為標準組之 56%~67% (如圖 2-4) 及 73% (如圖 2-5)。



C20 混凝土高温作用后抗压强度损失情况

圖 2-4 C20 混凝土高温作用後殘餘抗壓強度【12】

(資料來源：賈艷東、田傲霜、張斌、許傳蠱、李季*，「不同時間高溫後混凝土性能的試驗研究」)



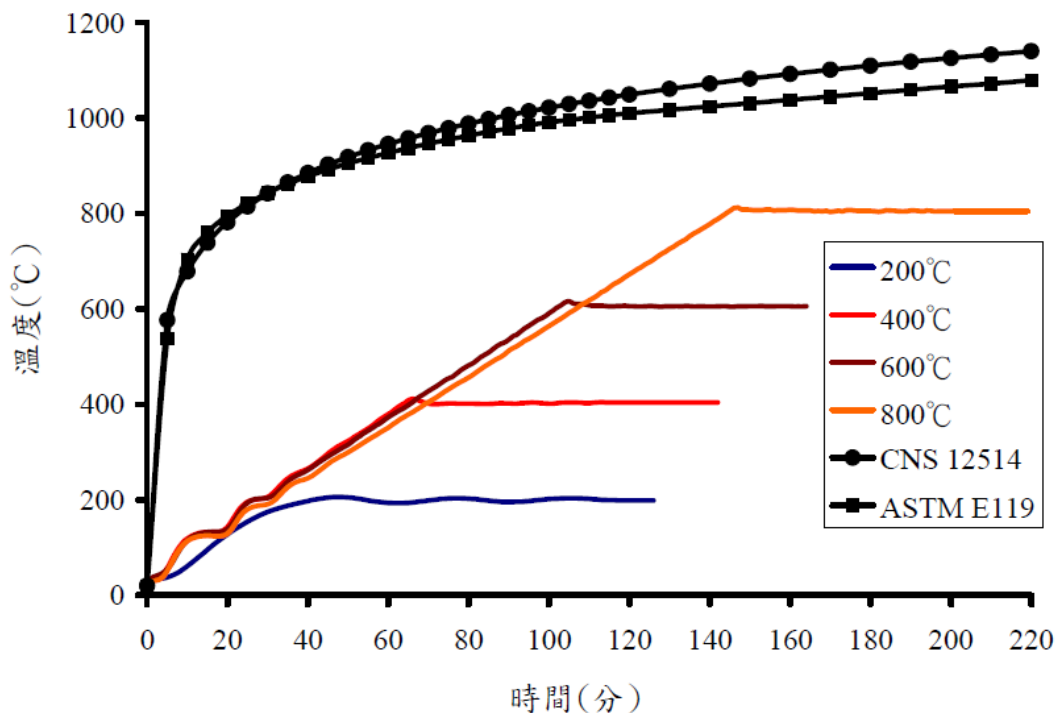
C30 混凝土高温作用后抗压强度损失情况

圖 2-5 C30 混凝土高温作用後殘餘抗壓強度【12】

(資料來源：賈艷東、田傲霜、張斌、許傳蠱、李季*，「不同時間高溫後混凝土性能的試驗研究」)

內政部建築研究所 2010 有關自充填混凝土火害後之研究報告成果指出【13】，當自充填混凝土試體採 15cm×30cm 的標準圓柱試體，在設計抗壓強度為 280kgf/cm² 時，在澆置完成後試體先置於室內無養護條件下約 46 個月後進行加熱，並以 5°C/分進行加熱，當試體內部中心處達到預定之試驗溫度時，持溫 1 小時後即停止加熱。研究中定義試體自加溫完成起 24 小時為冷卻期間依冷卻方式可分為自然冷卻和強制冷卻。所謂自然冷卻為在加熱時間到達時高溫爐停止加熱時，然後將爐門打開讓試體和高溫爐一起降溫。強制冷卻為在加熱時間到達時將試體取出並立即置入常溫冷水槽中降溫 2 小時，而後取出置於通風良好之室內。冷卻期間到達後之養護方式為空氣中養護，即在試體冷卻期間到達後就將其置放於通風良好之室內，一直到靜置時間到達。

本研究之升溫方式與 CNS 12514【14】及 ASTM E119【15】標準升溫曲線比較，如圖 2-6。不論 CNS 12514【14】或 ASTM E119【15】均為急速升溫，第 1 分鐘分別需達到 349°C 或 333°C，第 5 分鐘時則為 576°C 或 538°C。若採用 CNS 12514【14】及 ASTM E119【15】升溫曲線，由於升溫速率過快，易造成混凝土爆裂，以往研究為避免此現象發生需於試驗前先將試體置於溫度 105°C 設備內烘乾再進行加熱試驗，然而本研究試體係在無預先烘乾情形下直接加熱，為避免升溫速率過快，混凝土爆裂影響實驗結果，及參考內政部建築研究所 2008 年自行研究案「鋼筋混凝土梁柱接頭火害後之行為初探」之混凝土梁與柱內部升溫速率約 1 至 5°C/分，本研究加熱實驗之升溫速率採用 5°C/分。



電熱高溫爐升溫曲線與標準升溫曲線比較

圖 2-6 電熱高溫爐升溫曲線與標準升溫曲線比較【14】

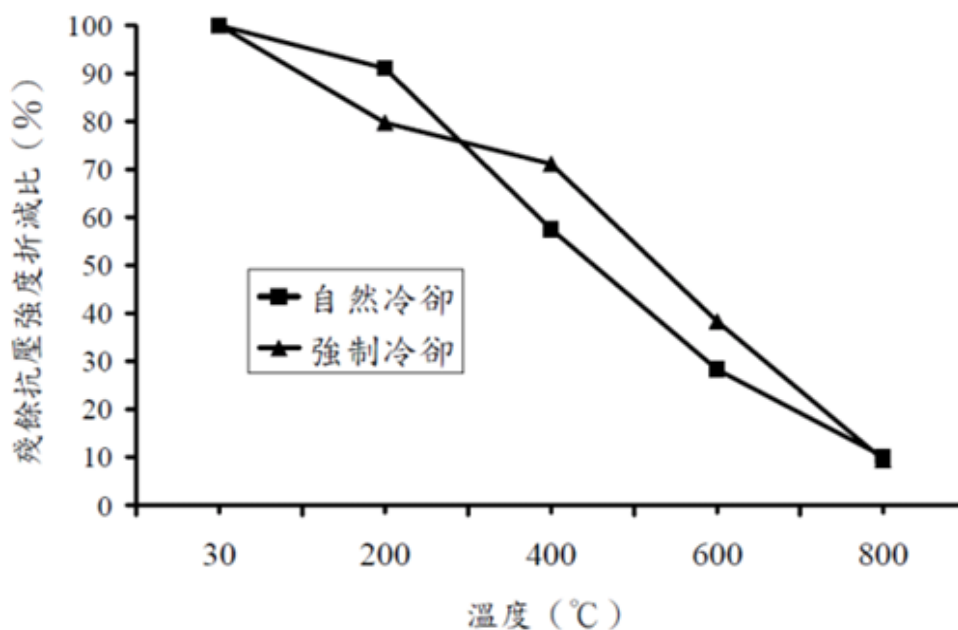
(資料來源：CNS 12514，「建築物構造部分耐火試驗法」)

本研究報告參考張雲妃【16】有關混凝土高溫下物理與化學變化說明殘餘抗壓強度與溫度關係如下(如圖 2-7):

1. 混凝土在加熱 200°C 後，採用自然冷卻與強制冷卻之平均殘餘抗壓強度分別為標準組之 91% 及 79.7%。因為低於 200°C 的溫度，僅能造成非化學結合水的蒸發，如自由水、毛細管水與吸附水等多半在 200°C 前可蒸發完全。由於這些非化學結合水的蒸發並不會改變水泥漿體與骨材的化學組成，因此抗壓強度未有明顯折減。
2. 當溫度升至 400°C 時，除了 C-S-H 膠體內的化學結合水仍在持續脫出之外，硫鋁酸鈣水化物也開始進行脫水反應，使得原本結晶完整的結構破壞，殘餘抗壓強度顯著下降，並開始產生裂縫。採用自然冷卻與強制冷卻之平均殘餘抗壓強度分別為標準組之 57.5% 及 71.1%。
3. 當溫度超過 400°C 時，混凝土表面裂縫明顯且相互連接，水泥水化物中

的氫氧化鈣開始脫水生成氧化鈣，並持續反應至 600°C，而在溫度 500 至 650°C 間，矽質骨材內的二氧化矽發生晶相轉變(由 α 相轉變成 β 相)，體積膨脹，造成骨材結構破壞，以致混凝土強度急遽下降，溫度 600°C 時，自然冷卻與強制冷卻之平均殘餘抗壓強度分別為標準組之 28.3% 及 38.3%。溫度升高至 800°C，自然冷卻與強制冷卻之平均殘餘抗壓強度分別為標準組之 10.2% 及 9.5%。

另從圖 2-7 可發現冷卻方式對混凝土殘餘抗壓強度之影響。溫度 200°C 自然冷卻試體的殘餘抗壓強度較強制冷卻試體高，當溫度升高至 400 至 600°C 時，變成自然冷卻試體的殘餘抗壓強度較強制冷卻低，溫度 800°C 則兩者大約相同。



SCC 試體火害後殘餘抗壓強度與溫度關係

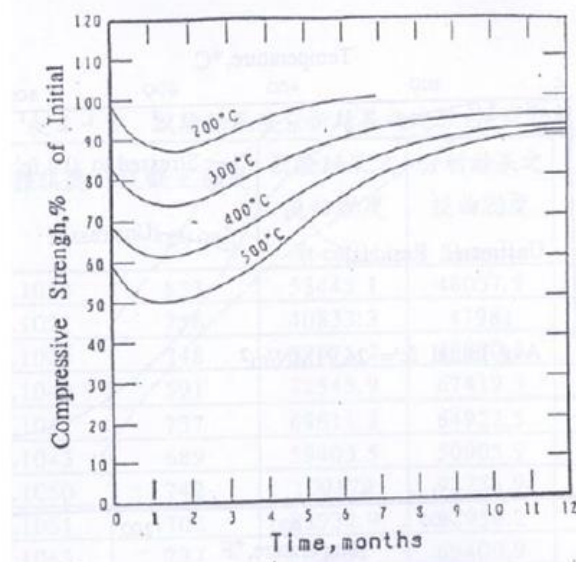
圖 2-7 SCC 試體火害後殘餘抗壓強度與溫度關係【13】

(資料來源：李其忠^{*}，「鋼骨鋼筋混凝土構造火害後材料性質之研究—以自充填混凝土為例 (3/5)」)

混凝土火害後殘餘抗壓強度除與所受溫度密切相關外，亦與火害後置放時間有關，火害後殘餘抗壓強度先下降後恢復，如圖 2-8 所示【13】。200°C 以下

混凝土殘餘抗壓強度恢復較快，400°C 以上則恢復較慢，這是因為混凝土的物化化學變化及介面微裂縫發展在火害結束後的初期仍在繼續，以後逐漸減緩，微裂縫逐步癒合，混凝土殘餘抗壓強度逐漸恢復，當火害溫度超過 400°C，由於微裂縫發展比較充足，可恢復程度減少，且脫水反應與骨材分解反應逐漸趨於穩定，因而混凝土殘餘抗壓強度恢復減緩。在強制冷卻時，混凝土試體可與充分和水接觸，使得原來的化合物在脫水後又重新生成新的水化物，對於高溫形成的微裂縫進行修補，緩和由於高溫造成的破壞，因此，混凝土殘餘抗壓強度得以逐步回升，而且受火溫度愈低，這種回升的趨勢愈高。

當溫度在 200°C 時，自然冷卻試體內部損傷較輕微，其殘餘抗壓強度可以很快恢復，強制冷卻試體的損傷除溫度損傷外，還有表面急速冷卻收縮的損傷，導致火害後殘餘抗壓強度恢復期較長。溫度 400°C 以上，自然冷卻試體受高溫損傷比較嚴重，火害後混凝土損傷仍繼續發展一段時間，強制冷卻試體由於混凝土與水接觸，可新生成一些水化物能有效阻止混凝土強度的繼續下降，其殘餘抗壓強度很快止跌回升。



受高溫及冷卻後混凝土抗壓強度隨時間回復之情形

圖 2-8 受高溫冷卻後混凝土抗壓強度隨時間回復之情形【13】

(資料來源：李其忠^{*}，「鋼骨鋼筋混凝土構造火害後材料性質之研究—以自充填混凝土為例 (3/5)」)

二、火害後對混凝土彈性模數之影響

大陸學者研究火害後對混凝土彈性模數之影響【12】，研究中對火害後混凝土彈性模數定義仍按 ASTM C469-02 未加熱試體之規定，為實測應力—應變曲線上 40% 抗壓強度處之割線斜率。其研究成果顯示，混凝土在高溫作用後，其彈性模數與常溫者之比值，與試體強度之關係大致相同，係隨試驗火害溫度的升高而降低，如圖 2-9 及圖 2-10 所示。溫度 t 在 100°C 以內時，C20 試體抵抗變形能力幾乎無變化，其彈性模數值甚至比常溫下者有所增加；C30 試體彈性模數值則表現為較明顯下降趨勢。混凝土在高溫作用後，強度下降與變形增大係同時發生，使得彈性模數的折損程度更甚於抗壓強度。

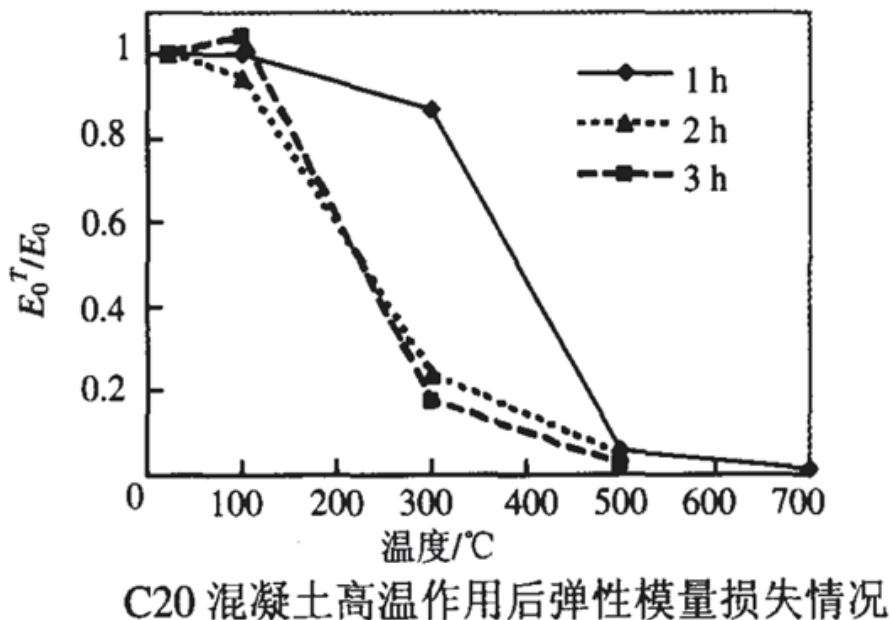
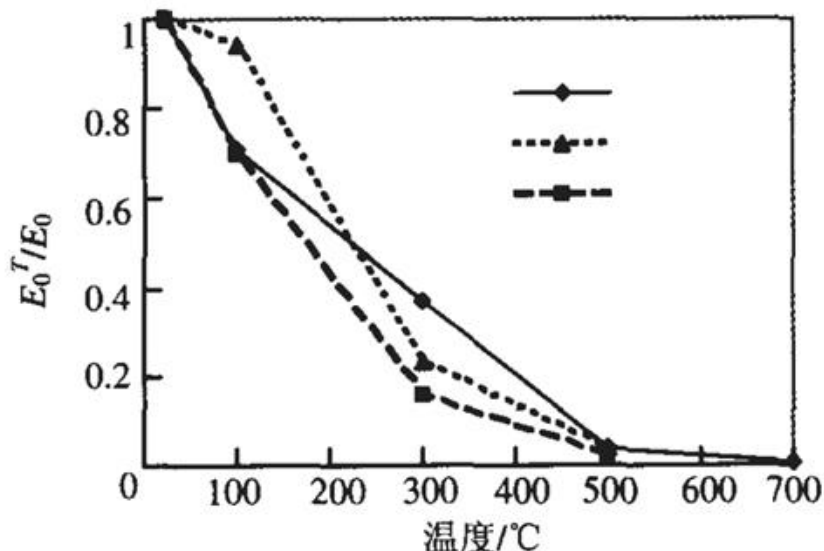


圖 2-9 C20 混凝土高溫作用後彈性模數損失情況【12】

(資料來源：賈艷東、田傲霜、張斌、許傳蠱、李季^{*}，「不同時間高溫后混凝土性能的試驗研究」)



C30 混凝土高温作用后弹性模量损失情况

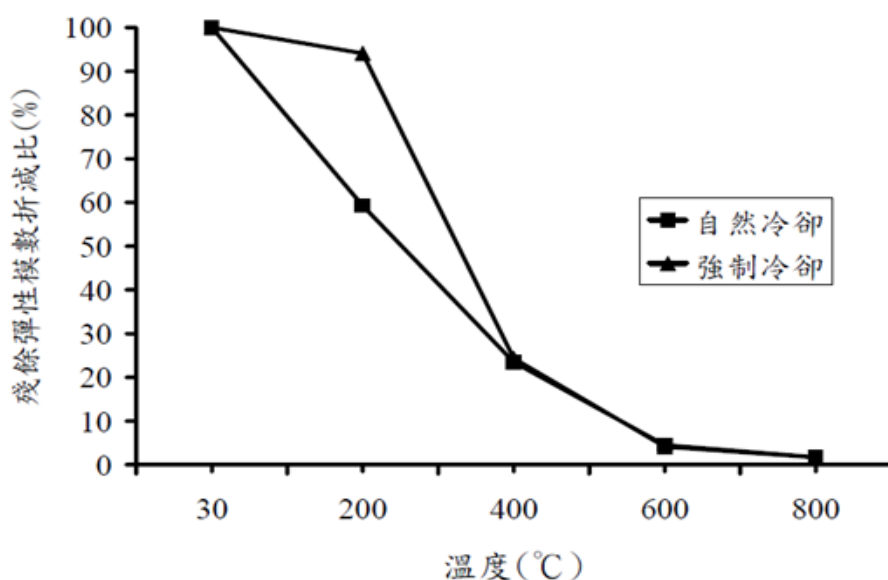
圖 2-10 C30 混凝土高温作用後彈性模數損失情況【12】

(資料來源：賈艷東、田傲霜、張斌、許傳轟、李季*，「不同時間高溫後混凝土性能的試驗研究」)

內政部建築研究所 2010 之研究報告成果【13】則指出(如圖 2-11)，火害溫度 400°C 以上，混凝土的結晶體發生變化和內部損傷的累積，使得試體強度下降與變形迅速增大，殘餘彈性模數大幅度下降。另冷卻方式對混凝土殘餘彈性模數之影響，除溫度在 200°C 時強制冷卻試體的殘餘彈性模數較自然冷卻試體高外，400°C、600°C 及 800°C 之殘餘彈性模數兩者相差不大。

自然冷卻試體在溫度 400°C 以下和強制冷卻試體在溫度 600°C 以下，很難獲得應力—應變曲線之下降段，主要是自充填混凝土的脆性較大，進入下降段後，能量釋放比較突然、集中所致。

當溫度超過 600°C，脆性降低且試體在作加壓試驗之前，因高溫作用已存在大量裂縫，應力—應變曲線之下降段則趨平緩。另混凝土經高溫作用後，因大量裂縫存在，而在加壓初期間出現裂縫閉合、應變快速增加及剛度漸增之上凹曲線。



SCC 試體火害後殘餘彈性模數與溫度關係

圖 2-11 SCC 試體火害後殘餘彈性模數與溫度關係【13】

(資料來源：李其忠^{*}，「鋼骨鋼筋混凝土構造火害後材料性質之研究—以自充填混凝土為例 (3/5)」)

第四節 火害對於建築結構中鋼骨材料之影響

火災可能導致建築結構損壞或倒塌，嚴重危害人員生命安全。柱構件為主要支撐建築物之結構構件，因此柱構件在建築防火設計有其重要性。近年來，國內高樓建築普遍採用鋼骨鋼筋混凝土構造，在工程實務上常見內灌混凝土箱型鋼柱。此種填充式箱型鋼管混凝土柱承受軸向載重與高溫時，因不同材料性質導致強度損失及熱膨脹能力有所差異，此差異現象可能會影響填充式箱型鋼管混凝土柱構件耐火能力。

一、耐火規範對建築結構中鋼骨材料之規定

火場中鋼結構高樓建築的受力行為非常複雜，主要原因之一在於火場中的溫度的高低與延時因環境因素而有甚大的差異，如火場中可燃物的多寡、空氣是否流通等等均會影響火焰燃燒時間與溫度，而為使各國進行火害研究有統一比較的標準，因此國際間通用之標準 ISO、美國 ASTM、英國 BS]規範及日本

JIS 等均訂定標準升溫曲線，各國規範所訂定的標準升溫曲線差異不大，且 BS476 所訂定之標準升溫曲線與 ISO 之標準升溫曲線相同，而國內規範 CNS 12514 亦參照其訂定國內之標準升溫曲線，如圖 2-12。值得注意的是標準升溫曲線無法代表任何單一火場的溫度與火災延時狀況，其目的在於提供不同研究者在不同地區進行試驗時一個相同比較的標準，如圖 2-13 所示裸鋼鋼柱表面溫度分佈曲線，因試驗爐、試體尺寸及加載大小等之影響，使得依據標準升溫曲線所得之結果彼此間差異甚大【17】。

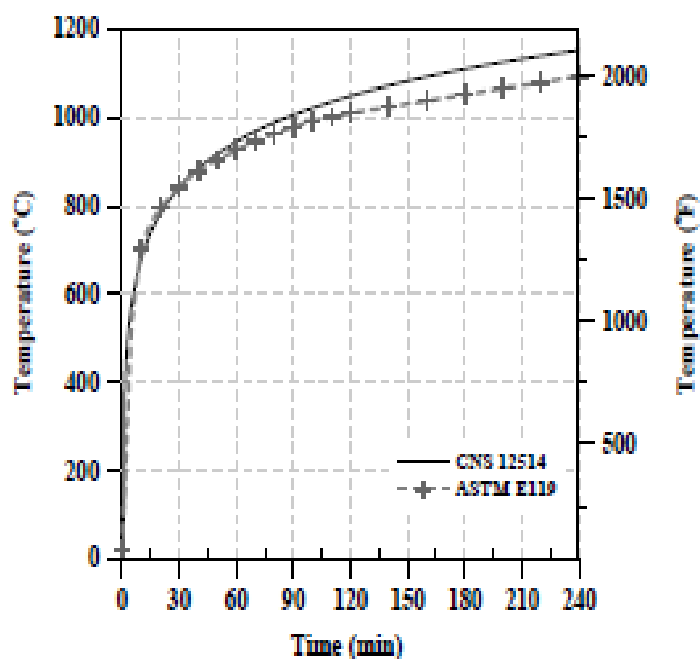


圖 2-12 CNS 12514 與 ASTM E119 之標準升溫曲線【14，15】

(資料來源：CNS 12514，「建築物構造部分耐火試驗法」、ASTM E119, “Standard Tests Methods for Fire Tests of Buildings Construction and Materials.”)

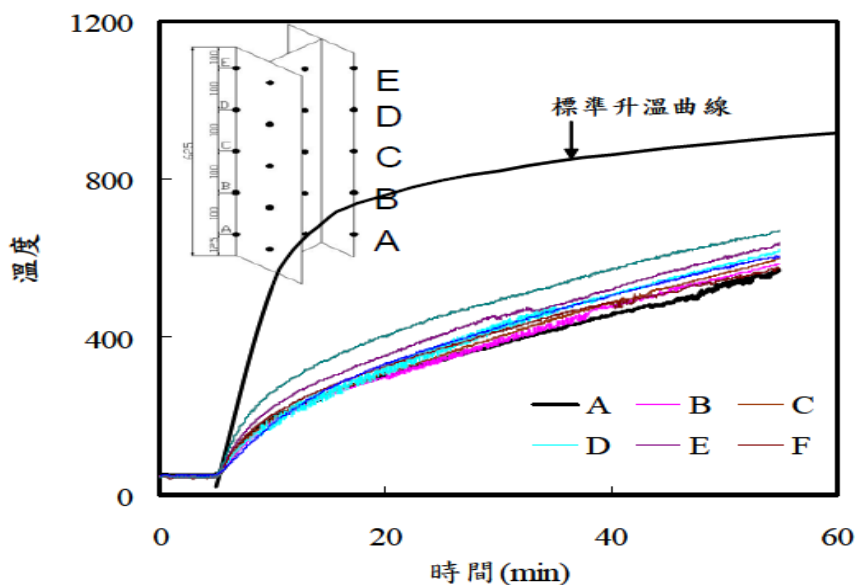


圖 2-13 裸鋼鋼柱溫度分佈圖【17】

(資料來源：阮秋慎^{*}，「鋼結構抗彎接頭高溫下結構行為之數值模擬」)

下列為常見的耐火規範：

1. ISO 834

ISO 834 耐火試驗規範之標準升溫曲線為 $T=345 \log_{10} (8t+1)+20$ ，其中 T 為平均爐內溫度($^{\circ}\text{C}$)、 t 為試驗經過時間(min)；試驗之室內溫度須介於 $10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，初始平均爐溫小於 50°C ；柱試體受熱長度，並無要求；性能基準評定以構件承重能力判別。規定承重柱構造破壞條件為超過最大軸向壓縮量 (C)， $C=h/100(\text{mm})$ ，與超過最大軸向壓縮速率 (dC/dt)， $dC/dt=3h/1000$ (mm/min)，其中 h 為柱試體高度。

2. BS 476

BS 476 耐火試驗規範之標準升溫曲線為 $T=345 \log_{10} (8t+1)+20$ ；試驗開始之室內溫度與爐內溫度須介於 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ ；柱試體受熱長度要求 3 公尺以上；以承重能力規定試體破壞條件為最大軸向壓縮量超過 120 mm 與最大軸向壓縮速率超過 25 mm/min。

3. CNS 12514

我國 CNS 12514 規範主要參考 ISO 834 規範修訂。標準升溫曲線為 $T=345 \log_{10}(8t+1)+20$ ，其中 T 為平均爐內溫度($^{\circ}\text{C}$)、 t 為試驗經過時間(min)；開始試驗前之室內溫度須介於 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，初始平均爐內溫度小於 50°C ；柱試體受熱長度須大於 3 公尺以上；柱試體耐火性能以承重能力判定，其破壞條件為最大軸向壓縮量(C)， $C=h/100$ (mm)，與超過最大軸向壓縮速率(dC/dt)， $dC/dt=3h/1000$ (mm/min)，其中 h 為柱試體高度；柱構件主要承力部分為鋼構造者，耐火性能之破壞條件為鋼材最高溫度超過 550°C 或平均溫度超過 500°C 。

4. ASTM E119

ASTM E119 耐火試驗規範之升溫條件為 5 分鐘爐內平均溫度須達 538°C ，30 分鐘須達到 843°C ，1 小時須達到 927°C ，2 小時須達到 1010°C ，4 小時須達到 1093°C ；開始試驗之室溫介於 $10^{\circ}\text{C}\sim 32^{\circ}\text{C}$ 之間；對於承重柱試體受熱段長度不得小於 2.7 公尺，而無加載具防火被覆鋼柱受熱長度至少 2.4 公尺，且試體各面均需受熱；試體耐火性能為依試驗類別要求，與鋼骨溫度判定構件是否破壞，如鋼材平均溫度超過 538°C 或任一鋼材量測點之溫度超過 649°C ，則試體發生破壞。

5. UL 263

UL 263 規範之標準升溫條件為 5 分鐘須達到 538°C ，10 分鐘須達到 704°C ，30 分鐘須達 843°C ，1 小時須達到 927°C ，2 小時須達到 1010°C ，4 小時須達到 1093°C ；開始試驗之室溫規定為 $10^{\circ}\text{C}\sim 32^{\circ}\text{C}$ ；承重柱試體受熱長度要求大於 2.7 公尺，而未加載具防火被覆之鋼柱受熱長度規定至少 2.4 公尺，且試驗時試體受熱段各面皆須受熱；關於柱試體耐火性能基準評定，乃根據不同試驗分類來要求，但未加載且具防火被覆之鋼柱則要求熱電偶測點溫度超過 649°C 或平均溫度超過 538°C ，即判定試體破壞。

由上述說明得知，ISO 834、BS 476 和 CNS 12514 規範之標準升溫曲線為依公式計算，而 ASTM E119 和 UL 263 規範之標準升溫曲線相同，乃以時間規定爐內溫度，如圖 2-12 所示。

二、鋼材彈性模數在火害後之折減

本文所探討的試體材料主要為建研所實驗所使用的SN490B與A572 Gr.50的鋼材，其中SN490B為本實驗所用，其材料性質是經由中鋼實驗室進行高溫材料試驗所得，分別為SN490B之20°C、100°C、200°C、300°C、400°C、500°C、600°C、700°C及800°C和A572 Gr.50的20°C、350°C、550°C、650°C等各溫度所對應之楊氏彈性模數，其實驗後楊氏彈性模數結果如圖2-14所示，而其彈性模數折減係數結果如圖2-15並整理如表2-5和表2-6【17】。

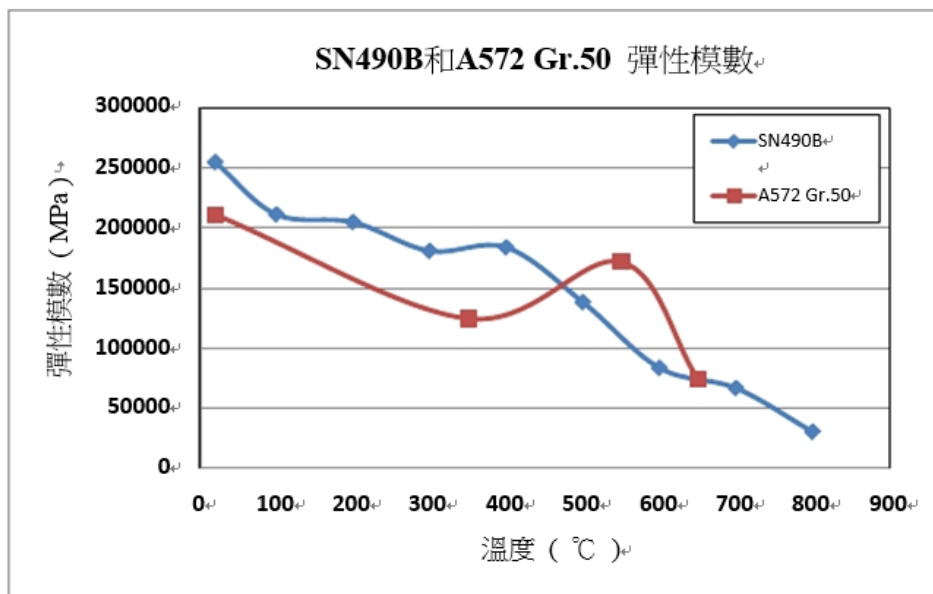


圖 2-14 SN490B 和 A572 Gr.50 在各溫度下的彈性模數【17】

(資料來源：阮秋慎^{*}，「鋼結構抗彎接頭高溫下結構行為之數值模擬」)

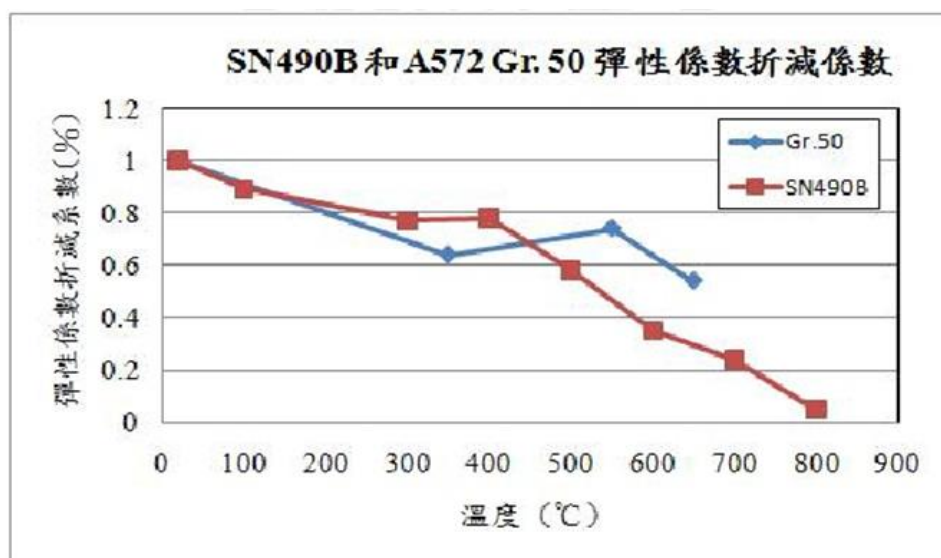


圖 2-15 SN490B 與 A572 Gr.50 之鋼材彈性係數折減趨勢圖【17】

(資料來源：阮秋慎^{*}，「鋼結構抗彎接頭高溫下結構行為之數值模擬」)

表 2-5 中鋼 SN490B 鋼材在各溫度下之楊氏模數折減【17】

	楊氏模數 ⁺ (MPa) ⁺	折減係數 ⁺ (%) ⁺
20 ⁺	213625.00 ⁺	1.00 ⁺
100 ⁺	191142.26 ⁺	0.89 ⁺
300 ⁺	163616.75 ⁺	0.77 ⁺
400 ⁺	166325.14 ⁺	0.78 ⁺
500 ⁺	124919.02 ⁺	0.58 ⁺
600 ⁺	75211.29 ⁺	0.35 ⁺
700 ⁺	51430.15 ⁺	0.24 ⁺
800 ⁺	10282.25 ⁺	0.05 ⁺

(資料來源：阮秋慎^{*}，「鋼結構抗彎接頭高溫下結構行為之數值模擬」)

表 2-6 A572 Gr. 50 鋼材在各溫度下之楊氏模數折減【17】

	楊氏模數 _□ (MPa) _□	折減係數 _□ (%) _□
20 _□	211110.22 _□	1.00 _□
350 _□	124317.23 _□	0.64 _□
550 _□	171665.19 _□	0.74 _□
650 _□	73575.00 _□	0.54 _□

(資料來源：阮秋慎^{*}，「鋼結構抗彎接頭高溫下結構行為之數值模擬」)

由圖可以觀察出 SN490B 鋼材在室溫至 300°C 之間，其楊氏彈性模數之數值隨著溫度升高而遞減，300°C 至 400°C 之間，溫度與鋼材楊氏彈性模數之間的關係曲線則變得較為平緩，超過 400°C 之後，其關係則又呈現隨著溫度而遞減的趨勢；而 A572 Gr. 50 鋼材其在 350°C 之前，其楊氏彈性模數均隨著溫度上升而下降，350°C 至 550°C 之間，溫度與鋼材楊氏彈性模數之間的關係曲線則微上升，但在超過 550°C 之後，其關係則又呈現隨著溫度快速遞減的趨勢。

三、鋼材降伏強度(F_y)與極限強度(F_u)在火害後之折減

鋼材之降伏強度(F_y)、極限強度(F_u)、彈性模數(E)等機械性質受溫度影響甚鉅，一般而言，鋼材之強度及勁度隨溫度之上升而下降，而鋼材之機械性質又為鋼結構構件結構行為之主要影響因素，如拉力構材採用鋼材之降伏強度與極限強度進行設計，受壓構材強度受彈性模數之影響。傳統結構用鋼之降伏強度與極限強度受溫度上升而下降，溫度愈高強度愈低(如圖 2-16 及圖 2-17)【17, 18】。由高溫拉力試驗結果可知，當傳統結構用鋼溫度受熱上昇至 400°C 以上時，降伏強度即開始大幅下降，600°C 時其降伏強度已下降至原有強度的 2/3 以下，而鋼材之極限抗拉強度亦隨著溫度上升至 400°C 後開始大幅下降。

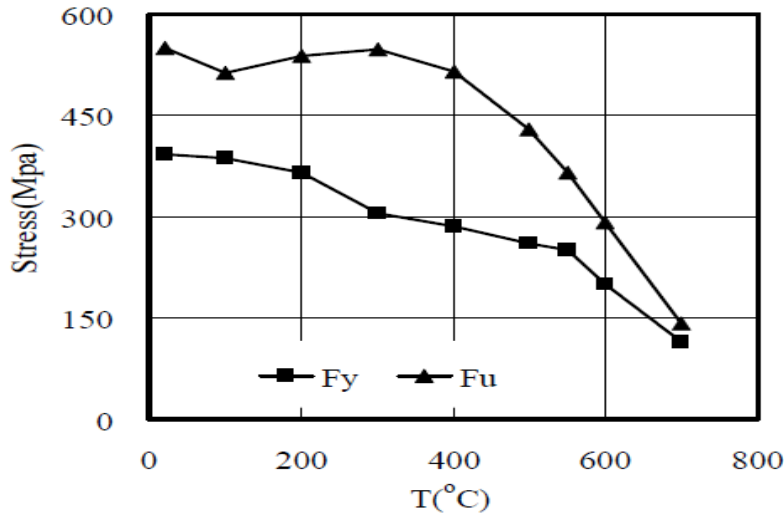


圖 2-16 結構用鋼(SN490) 高溫下之降伏強度 Fy 及極限強度 Fu 【18】

(資料來源：楊國珍、葉禎輝^{*}，「鋼結構火害安全檢測與評估補強」)

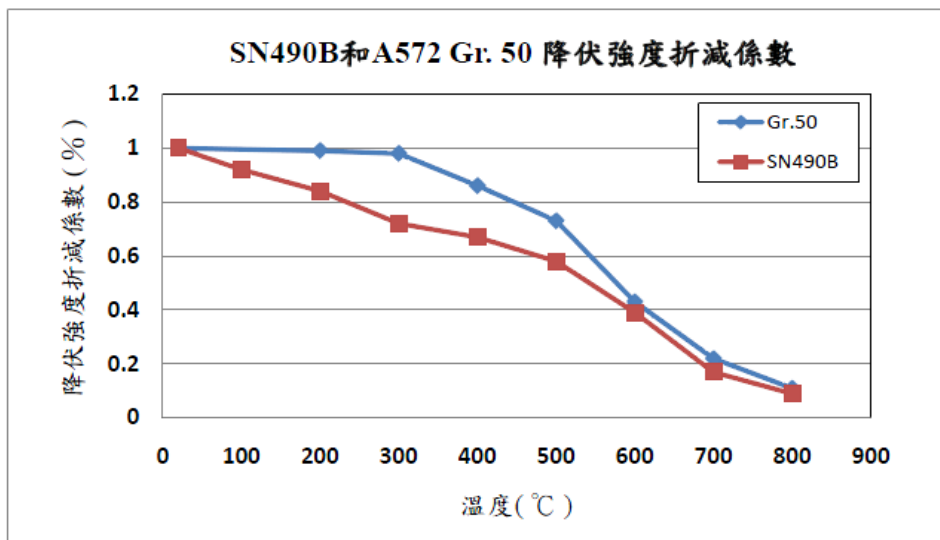


圖 2-17 SN490B 與 A572 Gr.50 之鋼材降伏強度折減趨勢圖 【17】

(資料來源：阮秋慎^{*}，「鋼結構抗彎接頭高溫下結構行為之數值模擬」)

溫度高低對於鋼材強度之影響遠大於火害延燒時間的長短，由於鋼筋在火害高溫下將喪失抗拉強度，因此在 RC 耐火設計中，須具有較一般 RC 設計標準為大之保護層厚度，目的係藉由熱傳距離之增加以降低鋼筋遭受火害之溫度，減少抗拉強度之損失。

雖然火害作用中之鋼筋，幾近喪失抗拉強度，但經退溫後卻能恢復相當之抗拉強度性能【19】，火害高溫 800°C 之鋼筋，火害後經退溫降服抗拉強度可恢復至 83% 原有降服抗拉強度，極限強度可恢復 90% 極限抗拉強度，這項特性與混凝土強度幾乎無法回復之性能大大不同。

鋼筋火害後之降服強度，劉靖國【20】依其折減趨勢建議折減方程式供計算使用，以下列公式表示如下式：

$$f_{yr}=f_y \quad T \leq 500^\circ\text{C} \quad (1.a)$$

$$f_{yr}=(-0.108T+154.217) \times 10^{-2} \times f_y \quad 500^\circ\text{C} < T \leq 750^\circ\text{C} \quad (1.b)$$

$$f_{yr}=(0.196T-73.863) \times 10^{-2} \times f_y \quad 750^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \quad (1.c)$$

$$f_{yr}=0.83 \times f_y \quad 800^\circ\text{C} < T \quad (1.d)$$

式中：

f_{yr} ：火害後鋼筋殘餘降伏強度 (kgf/cm²)

f_y ：常溫鋼筋降伏強度 (kgf/cm²)

T ：火害最高溫度 (°C)

至於鋼筋火害後之極限強度與溫度之關係，如下式：

$$f_{yr}=f_y \quad T \leq 500^\circ\text{C} \quad (2.a)$$

$$f_{yr}=(-0.09T+145) \times 10^{-2} \times f_y \quad 500^\circ\text{C} < T \leq 750^\circ\text{C} \quad (2.b)$$

$$f_{yr}=(0.08T+26) \times 10^{-2} \times f_y \quad 750^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \quad (2.c)$$

$$f_{yr}=0.9 \times f_y \quad 800^\circ\text{C} < T \quad (2.d)$$

式中：

f_{yr} ：火害後鋼筋殘餘降伏強度 (kgf/cm²)

f_y ：常溫鋼筋降伏強度 (kgf/cm²)

T ：火害最高溫度 (°C)

第五節 填充型鋼骨混凝土柱於高溫下行為

文獻資料顯示，高溫作用易導致高強度混凝土發生剝落或爆裂等現象。鑑此，有不少研究探討高溫對高強度混凝土爆裂行為之影響。現今有許多計算 CFTC 耐火時效的方法與規範 (Chinese Code DBJ13-51; National Building Code of Canada; ASCE/SFPE 29-99; ACI 216; AISC Steel Design Guide 19; EN 1994-1-2)，係參酌這一領域主要研究群體的數值模擬與實驗結果。有關填充型鋼骨混凝土柱於高溫下行為之文獻，包括填充型鋼管及箱型混凝土柱，謹列述如下。

Lie 等【21】) 研究混凝土填充鋼管柱之耐火時效，認為影響其火害行為的重要因子為：

鋼管柱之外徑或填充型鋼柱之外側寬度

鋼柱之軸向載重

鋼柱之有效長度

混凝土強度

骨材種類

鋼筋種類及鋼筋比

此外，根據鋼柱耐火時效之試驗結果與上述因子的關係，Lie 等【21】提出鋼柱耐火時效之簡易計算式：

$$R = f_1 \frac{(f'_c + 20)}{(KL - 1000)} D^2 \sqrt{\frac{D}{C}} \quad (3. a)$$

式中，R=耐火時效 (min.)； f'_c =混凝土 28 天齡期之強度 (MPa)；K=鋼柱之有效長度因子；L=鋼柱之未支撐長度 (mm)；D=鋼管柱之外徑或填充型鋼柱之外側寬度 (mm)；C=鋼柱之軸向載重 (kN)； f_1 =常數 (與骨材種類及鋼柱斷面有關)。

Kodur【22】為瞭解鋼管柱灌入不同性質混凝土對耐火時效的影響，以純混凝土、鋼筋混凝土、含鋼纖維高強度混凝土 3 種不同混凝土分別灌製填充型

鋼骨混凝土柱，再進行耐火試驗。經實驗發現，鋼管柱內灌純混凝土的耐火時效最短，而含鋼纖維混凝土鋼管柱的耐火時效為最長者。因此，他建議以含鋼纖維混凝土鋼管柱用於防火安全的建築結構上。

Park 等【23】以實驗、數值分析及參數研究，探討方形鋼管混凝土柱火害行為，以及提出防火時效計算公式如下：

$$R = (1727 - 50.8 \sqrt{\frac{D_c}{10}}) \times \ln\left(\frac{N \times 10^3}{f_{ck} \times A_c}\right) \quad (3. b)$$

式中，R=防火時效(min)； D_c =填充混凝土之寬度(mm)；N=施加载重(kN)， f_{ck} =28 天混凝土抗壓強度(MPa)； A_c =填充混凝土之斷面積(mm²)。

Han 等【24, 25】以 11 支矩形鋼管混凝土柱試體，依據不同之斷面尺寸、防火被覆厚度、偏心位置、加載強度等參數在軸壓下進行耐火試驗，並建立數值模型做比對。渠等之試驗結果顯示，較厚之防火被覆以及較小加載力能延長耐火時效，且使用矩形鋼管混凝土柱較鋼柱減少約 25%~70%的防火被覆厚度，並保守推導相關公式，且成為中國高樓建築規範之參考。同年，亦依照相同方法將 13 支圓形鋼管混凝土柱試體進行耐火試驗。其試驗結果顯示，使用圓形鋼管混凝土柱較鋼柱可減少 50%的防火被覆厚度，同時也依據實驗與分析結果發展相關公式。Han 等又於 2003 年，依照 ISO 834 耐火試驗規範，分別製作 6 支方形及圓形鋼管混凝土柱試體，以進行一系列受軸心及偏心載重試驗，並建構模型進行分析。其結果顯示，除增加試體的韌性行為外，並發現材料強度、延燒時間、鋼骨比、偏心位置與試體之寬度或半徑之比、斷面尺寸等參數對試體的殘餘強度有一定程度的影響；此外，亦依據實驗結果合理推導相關公式如下。

非強制冷卻狀況下之計算方式，如下所示：

$$f_{sy}(T) = f_{sy} \quad \text{for } T \leq 400^\circ\text{C} \quad (4.a)$$

$$f_{sy}(T) = f_{sy} [1 + 2.33 \times 10^{-4} (T-20) - 5.88 \times 10^{-7} (T-20)^2] \quad \text{for } 400^\circ\text{C} < T \quad (4.b)$$

式中：

f_{sy} ：常溫 20°C 時的鋼材降伏抗拉強度 (kgf/cm²)

$f_{sy}(T)$ ：火害溫度 $T^{\circ}\text{C}$ 時的鋼材降伏抗拉強度 (kgf/cm^2)

Han 等【26】以實驗和理論推導公式計算比較方型、圓型鋼管內灌自充填混凝土受軸向載重之變形破壞行為。主要依據 ACI、AISC-LRFD、AIJ、BS5400 和 EC4 等 5 種規範，以計算其預測值，並與實驗結果相互比較。渠等之試驗結果顯示，以方型鋼管內灌混凝土之設計規範，計算方型鋼管內灌混凝土的強度是可行的。

Kim 等【27】進行 20 組未施作防火被覆的方形與圓形鋼管混凝土柱於軸向受力之耐火試驗，以探討載重力之大小、斷面積的尺寸、混凝土的強度、加熱長度等因素對耐火時效的影響。渠等之分析結果顯示，歐洲 EC4 規範及日本 AIJ 規範在耐火時效之預測值與實驗值相當接近，能有效預測試體之耐火時效。

Chung 等【28】以四種不同材料參數之分析與實驗結果作比對，以探討方形鋼管混凝土柱受火害之行為。實驗試體斷面分別為 $300\times 300\text{ mm}$ 與 $350\times 350\text{ mm}$ ，鋼管厚度為 9 mm ，柱高 3500 mm ；混凝土 28 天抗壓強度分別為 27.5 與 37.8 MPa ；承重試體所施加载重之載重比為 $0.34\sim 0.47$ 。實驗結果顯示，分析結果與實驗結果接近；試體受熱乃先產生膨脹變形，再轉為壓縮變形；鋼材因高溫使強度迅速下降，使填充混凝土的支撐能力成為影響耐火時效之關鍵。

Lu 等人【29】以實驗方法與有限元素軟體，探討方形鋼管填充高強度自充填混凝土柱受火害之行為。試體斷面分別為 $150\times 150\text{ mm}$ 與 $200\times 200\text{ mm}$ ，鋼管厚度分別為 5 與 6 mm ，柱高 760 mm ；混凝土 28 天抗壓強度分別為 90 和 99 MPa ；承重試體所施加载重之載重比(施加载重/極限載重)為 $0.17\sim 0.44$ 。試驗結果顯示，承重試體破壞原因為鋼管發生局部挫屈以及填充混凝土碎裂或開裂；以有限元素分析軟體-ABAQUS 可以合理模擬實驗行為，且模擬一般與高強度混凝土之分析模型亦可用於模擬高強度自充填混凝土分析模型。

Espinos 等【30】以有限元素分析軟體，模擬圓形鋼管混凝土柱之行為；分析模型考慮材料介面接觸、混凝土溼度及試體初始不平整等影響因素。分析結果顯示，承重試體於加溫期間之軸向變形可分為四個階段：(1)試體鋼管受火使鋼材溫度迅速增加，而填充混凝土之溫度較鋼材低，故加载端板與混凝土

間產生間隙，且鋼材與混凝土接觸介面產生滑移現象，使軸向載重逐漸轉移至鋼管；(2)當鋼材溫度到達 550°C ，柱試體由原本膨脹位移轉變為壓縮位移，使加載端板與混凝土再度接觸；(3)鋼材因高溫喪失強度，而軸向載重逐漸轉由混凝土承受；(4)雖混凝土具低熱傳導性，但隨著加溫歷時時間增加，使高溫逐漸傳遞至核心混凝土，最後混凝土部分也失去支撐能力，導致試體破壞。

陳誠直等人【31】利用實驗方法和有限元素分析模擬，研究有無防火被覆之承重鉸接組合箱型鋼內灌自充填混凝土柱於火害下之行為；探討有無防火被覆之影響、比較試體斷面溫度分佈、試體強度與勁度之變化、變形行為(變形與變形速率)與破壞模式等，並建立合理之分析模型。由研究結果顯示，具防火被覆試體皆能達到預期之防火時效，而火害後之試體軸向勁度稍為增大且呈線彈性行為；未具防火被覆試體於火害期間持續有混凝土爆裂的聲音，惟因箱型鋼板提供圍束導致試體未立即破壞，直到鋼板局部的鼓起與內部混凝土的碎裂。

陳誠直等【32】藉由試體進行耐火試驗，探討有無剪力釘及施加不同軸向載重之影響；研究結果顯示，試體配置剪力釘僅些微增加耐火時效，但軸向載重大小會明顯影響軸向變形行為及耐火時效。再由有限元素分析模擬試體行為，瞭解試體軸向及橫向變形趨勢。研究成果顯示，分析模型可合理預測試體斷面溫度分佈和軸向變形趨勢，且剪力釘可明顯減少鋼板橫向變形。

對於結構物主要桿件(樑、柱)，我國建築技術規則與日本建築基準法皆有防火時效的規定。如建築物自頂樓向下計算，一至四樓需 1 小時防火時效，五至十四樓需 2 小時防火時效，而自頂樓往下計算十五樓以上則需 3 小時防火時效。防火時效的意義為構件在以上時效內，歷經標準升溫曲線的燒烤下，鋼體本身的溫度不得超過 350°C 。至於設定在 350°C 以下的原因，主要為傳統鋼材溫度達 350°C 時，其降伏強度只為其室溫時降伏強度 F_y 的 $2/3$ (Nippon Steel Corporation. (1992))，而 $2/3F_y$ 為鋼在永久載重下之最大容許應力。因此，在強度需求的考量下，乃設定 350°C 為鋼構規定的容忍限度。然而，在一般火災現場中，通常只需 1 小時之延燒，火場的溫度即可達到 900°C ，故需藉助防火被覆之保護方能使鋼構件的溫度在防火時效內不超過 350°C ，此即為日本建築基本法傳統耐火設計中加熱試驗之測試目的。

內政部建築研究所之相關研究成果，包括陳建忠等人【33】、李鎮宏和蔡銘儒【34】與李鎮宏【35】等研究顯示，以 ABAQUS 有限元素分析火害鋼結構是可行的；或先以 FDS 進行溫度場分析，再將溫度結果輸入至 ABAQUS 依序進行熱傳、結構應力與耦合分析，其分析結果與實驗結果接近。

第三章 試驗工作

第一節 研究規劃

本研究案蒐集國內外有關高溫下鋼材與混凝土基本性質之資料，以及有關高溫下各種混凝土柱、裸鋼柱及 SRC 柱火害行為之研究成果，尤其是自充填混凝土及填充型箱型鋼柱之高溫爆裂相關研究。再將文獻予以歸納整理，從中挑選出重要因子，以供試驗規劃之用。

本研究旨在探討添加 SCC 所灌製箱型鋼柱 (Concrete Filled Box Column, CFBC) 火害後之殘餘承载力，瞭解自充填混凝土箱型鋼柱火害行為，以做為補充現行鋼筋混凝土結構物耐火性能設計與評估檢證之參考資料。研究上，參酌 Eurocode 4 規範提供的表列數據，規劃製作四支實尺寸 CFBC 試體，並填充相同強度之純混凝土，以進行定載升溫之火害實驗，並做相關設計與控制，使試體不致在高溫發生破壞，待試體冷卻至常溫後，再對試體進行加載試驗，藉以研究內含自充填混凝土箱型鋼柱於火害後之殘餘承载力。實尺寸試體分別置入高溫實驗爐中，並參酌現行 Eurocode 4 規範中柱構件的火害設計荷重等級 ($\eta_{fi,t}$)，對其施加固定的載重比 (0.28)，再依標準升溫曲線加熱至設定的實驗終止條件，以觀測各試體的火害行為。並進行火害後之殘餘承载力試驗，測析其受軸變形、挫屈行為等之差異，並與文獻上有關 CFBC 柱試體之火害試驗結果相互比較。

第二節 試體設計

就 CFBC 而言，其柱板淨寬及厚度之寬厚比與其力學行為密切相關。基本上，柱板寬厚比愈大，柱板愈容易挫屈，混凝土的圍束也較差，柱之強度與韌性也會受到很大的影響。本研究參酌 Eurocode 4 所提供填充型 SRC 柱之斷面尺寸要求及其耐火時效表列數據，以規劃 CFBC 試體尺寸。CFBC 試體之斷面配置參數如圖 3-1 所示，其最小斷面尺寸 (b 及 h)、最小鋼筋比 ($A_s/(A_s+A_c)$ ， A_s =鋼筋面積； A_c =混凝土面積)、最小鋼筋軸距 (u_s ，鋼筋中心至鋼板內側之距離) 之配置將依 Eurocode 4 規定 (b 及 h)。

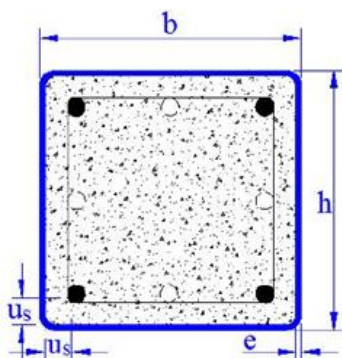


圖 3-1 填充混凝土箱型鋼柱試體之斷面配置參數

(資料來源：本研究整理)

本研究所規劃內灌自充填混凝土箱型鋼柱試體分為控制組與實驗組，控制組試體於常溫下加載，以取得其極限載重；實驗組在施予固定載重比的軸向壓力後，隨即對試體進行升溫來模擬遭受火害的情況。原則上，透過相關設計與控制，使試體不致在高溫發生破壞，待試體冷卻至常溫後，再對試體進行加載試驗，藉以研究內含自充填混凝土箱型鋼柱於火害後之殘餘承载力。有關試體之系列、編號、火害設計荷重等級、火害溫度等資訊，如表 3-1 所示。其中，鋼板採用 SN 490B 等級之鋼材，為目前市面上較普遍使用之鋼材。SRC 柱中所填充之混凝土強度則選用屬中高強度之 420 kgf/cm^2 ，因為目前市面上採內灌自充填混凝土之箱型鋼柱，多半傾向使用高強度混凝土(越高越好)，但強度太高，其自充填能力有限施工不易，故選用屬中高強度之 420 kgf/cm^2 自充填混凝土，應該為未來市場上較可接受之等級。表 3-1 中兩組柱試體之尺寸皆相同，其斷面尺寸定為 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，均採用厚度為 12 mm 之鋼板，如圖 3-2 所示。其選用標準係參考 Eurocode 4 (BS EN 1994-1-2:2005) 規範。此規範為知名的鋼骨鋼筋混凝土複合構造規範，其 Part 1-2 提供完善的結構防火設計規定，如表列數據方法、簡化計算方法及高等計算方法。因此，本研究案乃參酌其表列數據，選用偏保守面之數據規劃填充型 SRC 箱型柱試體尺寸。希望藉由保守面之試驗數據及試驗結果，以探討內灌混凝土 SRC 柱之火害後性能。實驗組柱試體共四支，A1 試體為控制組僅做常溫試驗，B1、B2 及 B3 試體則做火害後之殘餘承载力試驗。柱身鋼板採用 SN 490B 等級之鋼材，其鐵金屬以外之成分如表 3-2 所示，其力學性質如表 3-3 所示。竹節鋼筋方面，其力學性質如表 3-4 所示。實驗組火害設計荷重等級 0.28，係參考國內一般中高樓層

結構物結構設計裡面，結構物總重量除以結構物柱總斷面積之數值而來，即柱之平均承载力係數其數值約在 0.3 左右，故本研究為配合國內現況選用 0.28 設計荷重等級。火害溫度選用則依據 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」之性能基準與判定建議：[若垂直承重構造主要由鋼材部分所支承，則得以無載重方式進行破壞溫度判定。若鋼材溫度最高值超過 550°C 及平均溫度超過 500°C，則視為此試體承重能力失敗]。且參考第二章之文獻收集與分析可知，在火的成長階段中，進行燃燒的房間裡可能遭遇的熱與溫度，室內空間溫度高達 500°C 到 600°C，閃燃時室內溫度則可高達 800°C 到 1000°C。一般而言，完全發展階段之火場溫度可達 700°C-1200°C 間。由以上數據論之，在有披覆之鋼骨鋼筋混凝土複合構造中，一般火災中，其內部鋼材之火害溫度超越 800°C 之機會不大。故本研究選用火害溫度設定為內部鋼材之平均溫度 400°C、600°C 及 800°C。

表 3-1 試體規劃

試體組別	試體編號	火害設計荷重等級 ($\eta_{fi,t}$)	火害溫度 (°C)	鋼材	混凝土強度 (kgf/cm ²)
控制組 (常溫試驗)	A1	-	-	SN 490B	420
實驗組 (火害溫度試驗)	B1	0.28	400	SN 490B	420
	B2	0.28	600	SN 490B	420
	B3	0.28	800	SN 490B	420

(資料來源：本研究整理)

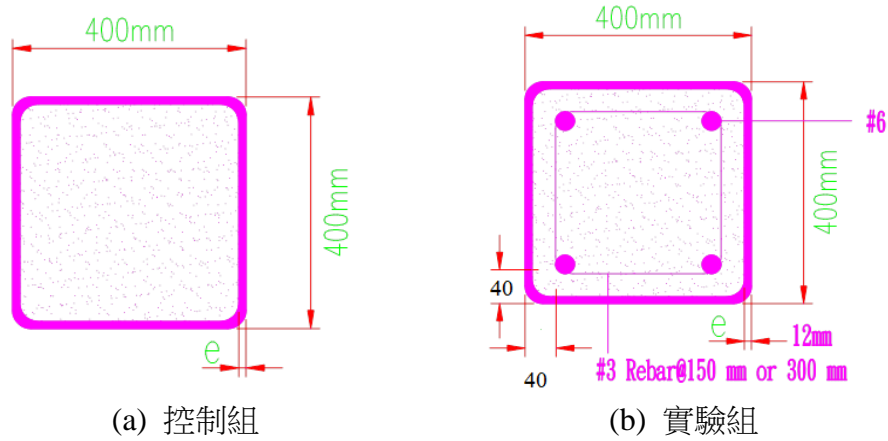


圖 3-2 箱型鋼柱剖面圖

(資料來源：本研究整理)

表 3-2 鋼板之成分

試片編號	成分(%)									
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al
14758	0.17	12.37	0.010	0.06	0.32	-	0.01	0.02	Tr	0.025
14762	0.16	1.41	0.016	0.09	0.35	-	0.01	0.02	Tr	0.027
14158	0.15	1.40	0.017	0.06	0.34	-	0.01	0.02	Tr	0.034
14156	0.15	1.39	0.016	0.05	0.35	-	0.01	0.03	0.01	0.016

註：Tr=符合規範

(資料來源：本研究整理)

表 3-3 鋼板之力學性質

試片編號	降伏點或降伏強度 N/mm ²	抗拉強度 N/mm ²	伸長率 (%)
14758	395	552	23
14762	416	579	21
14158	406	544	22
14156	407	539	23

(資料來源：本研究整理)

表 3-4 竹節鋼筋之力學性質

鋼筋號數	降伏強度 N/mm ²	抗拉強度 N/mm ²	伸長率 (%)	彈性模數 N/mm ²
#3	370	540	28	191942
#6	474	693	21	206561

(資料來源：本研究整理)

至於柱試體之長度，則為 3000 mm，如圖 3-3 所示。兩組箱型柱試體採全滲透銲方式組立，也就是以全滲透開槽銲接組成之箱型柱，採用符合 AWS A5.5E7016-A1 之低氫系耐熱鋼電銲條以潛伏銲方式銲接(SAW)四個柱角隅，如圖 3-4 所示。兩組柱試體內部均銲接剪力釘(圖 3-4)，俾與內部填充之混凝土產生複合作用。試體上部端板尺寸及加勁板，如圖 3-5 所示；試體下端組立基座底板尺寸及加勁板，如圖 3-6 所示。

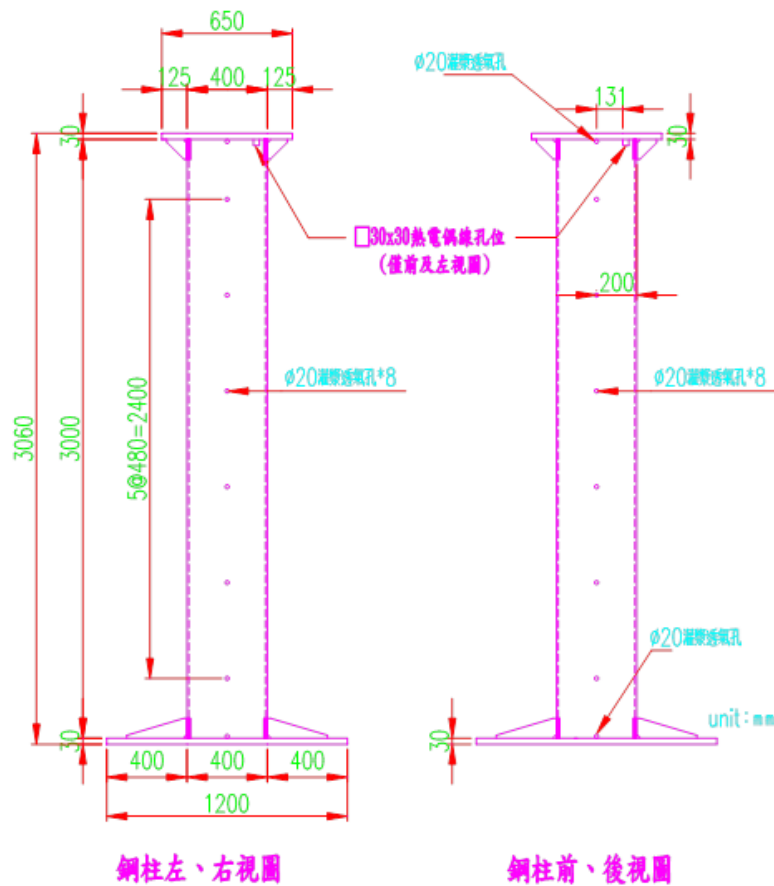


圖 3-3 箱型鋼柱設計圖

(資料來源：本研究整理)

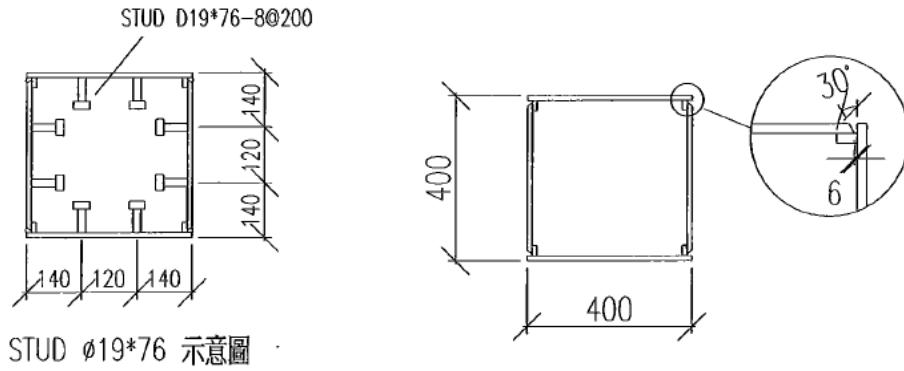


圖 3-4 箱型鋼柱之組銲及剪力釘詳圖

(資料來源：本研究整理)

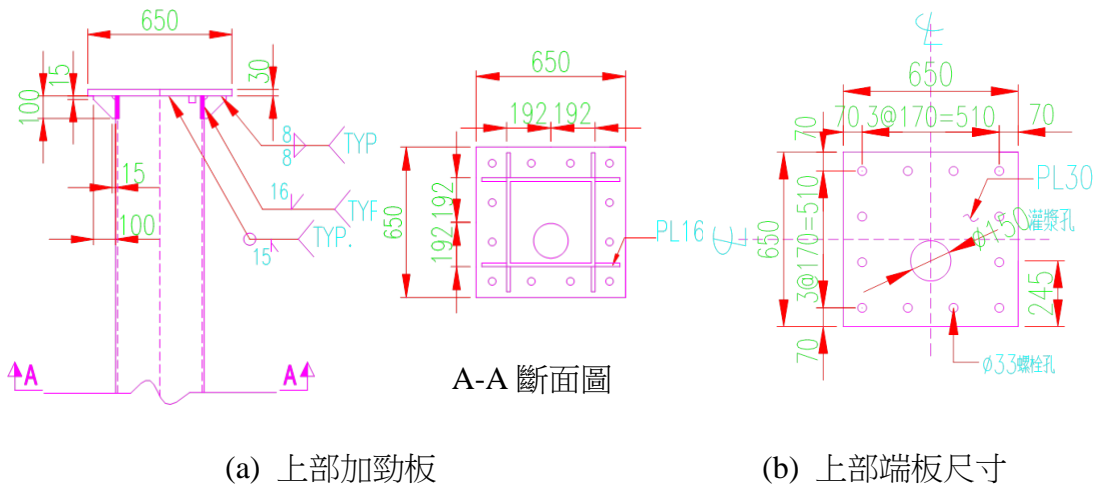


圖 3-5 箱型鋼柱上部端板尺寸及加勁板

(資料來源：本研究整理)

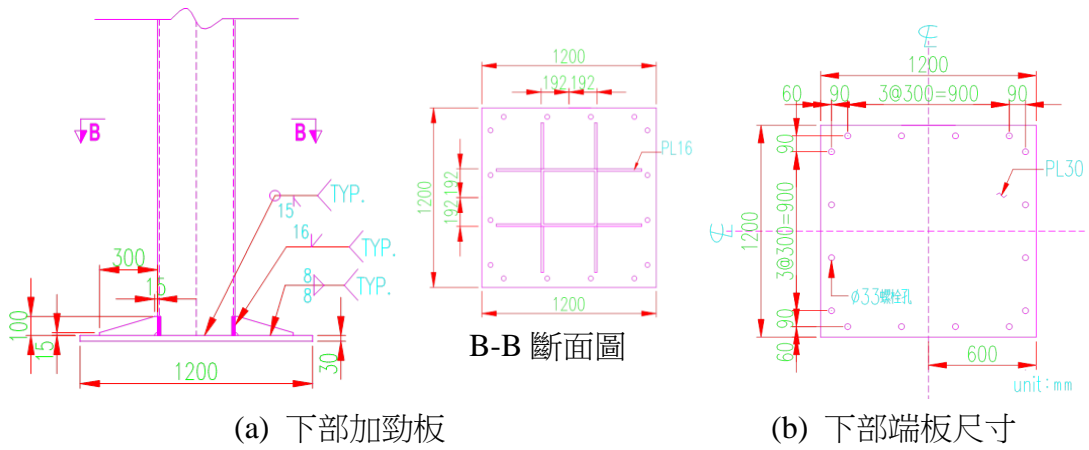


圖 3-6 箱型鋼柱下部端板尺寸及加勁板

(資料來源：本研究整理)

另一方面，柱鋼板上預設直徑 20 mm 的小孔，其目的為使內部混凝土於養護時更容易使水分自試體內蒸發，以避免未來試體於高溫加熱期間產生爆裂的危險。另外，於柱試體再設計兩處熱電偶線孔，方便柱試體內部測點之熱電偶線能順利接上爐外的溫度資料擷取器上。在上端板預留一直徑 150 mm 之灌漿口，為避免灌漿時損害熱偶線，故將其設為偏心。

第三節 試體製作

慎選適宜的鋼構廠家，以製作箱型鋼柱。本研究之箱型柱係委託雄進鋼構廠製作，該廠位於屏東縣新園鄉。有關柱試體之製作程序，詳述如下：

1. 製造圖繪製
2. 放樣
3. 落樣
4. 裁切
5. 加工組合
6. 電銲
7. 開孔
8. 假組立
9. 當柱組立成 U 字型時安裝熱電偶線於柱內
10. 安裝試體柱面之熱電偶測點
11. 進行混凝土灌漿
12. 箱型鋼柱混凝土養護

箱型柱是由鋼板單元組合而成，先於鋼板片上放樣標示出剪力釘之位置，再將其銲置於鋼板，如圖 3-7 所示。剪力釘之數量、長度與間距係按國內業界之慣例設置，其埋設在本研究中並非試驗變數，對試驗結果之影響可忽略。另一方面，於鋼板片上放樣標示出上下端鋼板、加勁板之尺寸。於組裝過程中須輔

火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承载力研究

以固定用點鉸俟構件整體完成鋼板片用料定位後得再施予正式金屬接合之鉸接作業。



圖 3-7 箱型鋼柱之剪力釘鉸製

(資料來源：本研究整理)

當柱組立成 U 字型後 (圖 3-8)，將熱電偶線測點安裝於柱體欲進行量測的點位，如圖 3-9 所示 (熱電偶測點詳述於第四節)。安裝完成後，先進行檢測，以確定能正常傳輸訊號。之後，組立柱側面鋼板於 U 字型上形成一箱型鋼柱，再將其與端板 (頂板及基座底板) 結合，如圖 3-10 所示。接下來，再對試體之全滲透電鉸處進行超音波檢測 (Ultrasonic Testing)，以確保鉸道狀況良好。檢測後，安裝試體柱面欲量測點位的熱電偶測點，如圖 3-11 所示。



圖 3-8 箱型鋼柱組立成 U 字型

(資料來源：本研究整理)

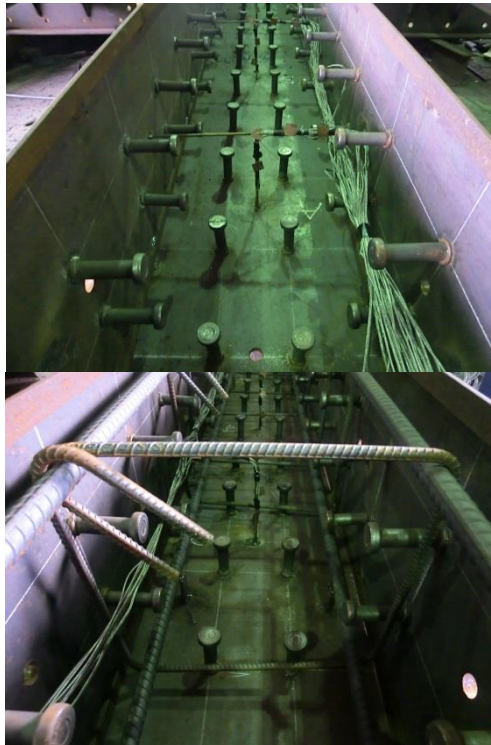


圖 3-9 箱型鋼柱組立成 U 字型後之熱電偶線安裝

(資料來源：本研究整理)



圖 3-10 箱型鋼柱組立完成

(資料來源：本研究整理)



圖 3-11 箱型鋼柱試體柱面熱電偶測點

(資料來源：本研究整理)

箱型鋼柱完成後，即運送至建研所台南防火實驗中心，並施以臨時支撐。控制組之自充填混凝土配比設計如表 3-5 所示，其設計強度為 420 kgf/cm^2 ，而配比目標強度為 520 kgf/cm^2 ，設計坍流度為 $65\sim 75 \text{ cm}$ ，粗粒料標稱最大粒徑為 19 mm ，水膠比為 0.35 。

表 3-5 混凝土配比設計表

組成材料使用量(kg/m^3)						
水泥	爐石	飛灰	水	粗粒料	細粒料	摻劑
356	76	76	178	780	889	8.14

(資料來源：本研究整理)

配比設計完成後，隨即進行混凝土的試拌，並量測其新拌階段之坍流度、V 型漏斗時間及 U 型試驗填充高度如圖 3-12 所示。經試拌確定配比設計能符合自充填混凝土之新拌階段性能需求，隨即進行混凝土的澆置，如圖 3-13 所示。灌注方式採由上方倒入，係利用 5" PVC 塑膠管從頂板之灌漿孔把漿體澆置柱底部，並隨著漿體之上升將 PVC 塑膠管往上提升。在澆置適當高度後，

將 PVC 塑膠管裁短，以方便人員施作。在灌漿時，將控制其澆灌速度，以防熱電偶線脫落。鋼柱試體完成混凝土澆灌作業後，則進行混凝土的養護。另一方面，亦量測混凝土之坍流度，如圖 3-14 所示。此外，製作混凝土圓柱試體（如圖 3-15 所示），並於規劃齡期（7 天、14 天、28 天及火害試驗當天）進行抗壓強度試驗，以作為箱型鋼柱試體加載軸壓載重的依據。



圖 3-12 混凝土新拌性質測試

（資料來源：本研究整理）



圖 3-13 箱型鋼柱之混凝土澆置

（資料來源：本研究整理）



圖 3-14 混凝土之坍度與坍流度之量測

(資料來源：本研究整理)



圖 3-15 混凝土圓柱試體之製作

(資料來源：本研究整理)

第四節 量測儀器設置

一、熱電偶設置

為監控及量測柱試體在定載升溫高溫實驗時的溫度，須在柱試體內外埋設適當數量的熱電偶。本研究使用符合 CNS 5534 規範的熱電偶（使用 0.75 級性能以上及直徑 0.65 mm 之 K 型熱電偶線）量測溫度，且熱電偶的分佈位置與數量亦符合 CNS 12514 之規定。由於 SRC 柱內填充混凝土，為瞭解混凝土核心於實驗過程之溫度變化，將預埋熱電偶於混凝土，其分佈將深入 SRC 柱中心。因此，在製造柱試體時，一併將熱電偶埋設位妥善，其埋設位置如圖 3-16 中的空心圓點及實心圓點（也就是代表熱電偶在柱試體斷面的分佈位置）；空心圓點表混凝土測點，實心圓點表鋼板測點。

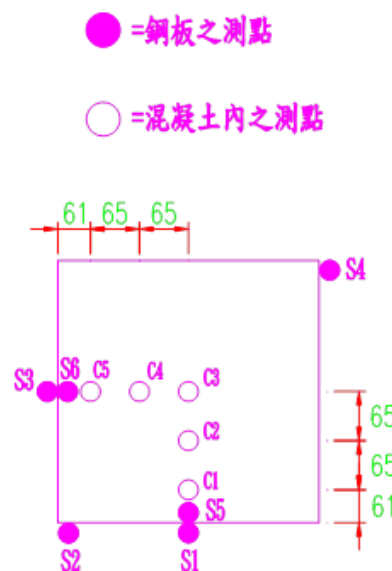


圖 3-16 箱型鋼柱斷面熱電偶分佈位置圖

（資料來源：本研究整理）

依據 CNS 12514，進行熱電偶佈設。受制於實驗設備之限制，試體上、下端距離底板各保留 200 mm 未受熱，試體熱電偶測點分別位於 4 個高度，其中兩處熱電偶測點斷面高度分別位於試體受熱段上、下端部算起 600 mm 處；另兩處高度則平均等分上述測點高度。在每處高度上，箱型鋼柱之鋼板共有 6 個熱電偶測點，2 個為鋼板內側，4 個為鋼板外側；而內部混凝土則規劃 5 個熱電偶測點，故單一斷面的熱電偶測點共有 11 處，整支 CFBC 試體則共有 44

處熱電偶測點。試體熱電偶之配置位置如圖 3-17 所示。柱試體設置於加載設備時，亦將熱電偶線連結到資料擷取器，以測試訊號是否正常。若屬正常，則覆上加溫爐蓋板，並以防火棉將空隙填實，藉以防止實驗過程中高溫氣體自爐內散出而造成人員危險。有關柱試體的變形量測，將參照 CNS 12514 之規定：「對於垂直承重試體，應量測軸向變形量或中心點水平方向變形量」，在柱試體上端與下端各架設一支位移計，用以量測柱試體在定載升溫下之軸向壓縮量與時間的潛變關係。另方面，此柱軸向壓縮量與時間的潛變關係亦可由柱加載設備直接量測之。

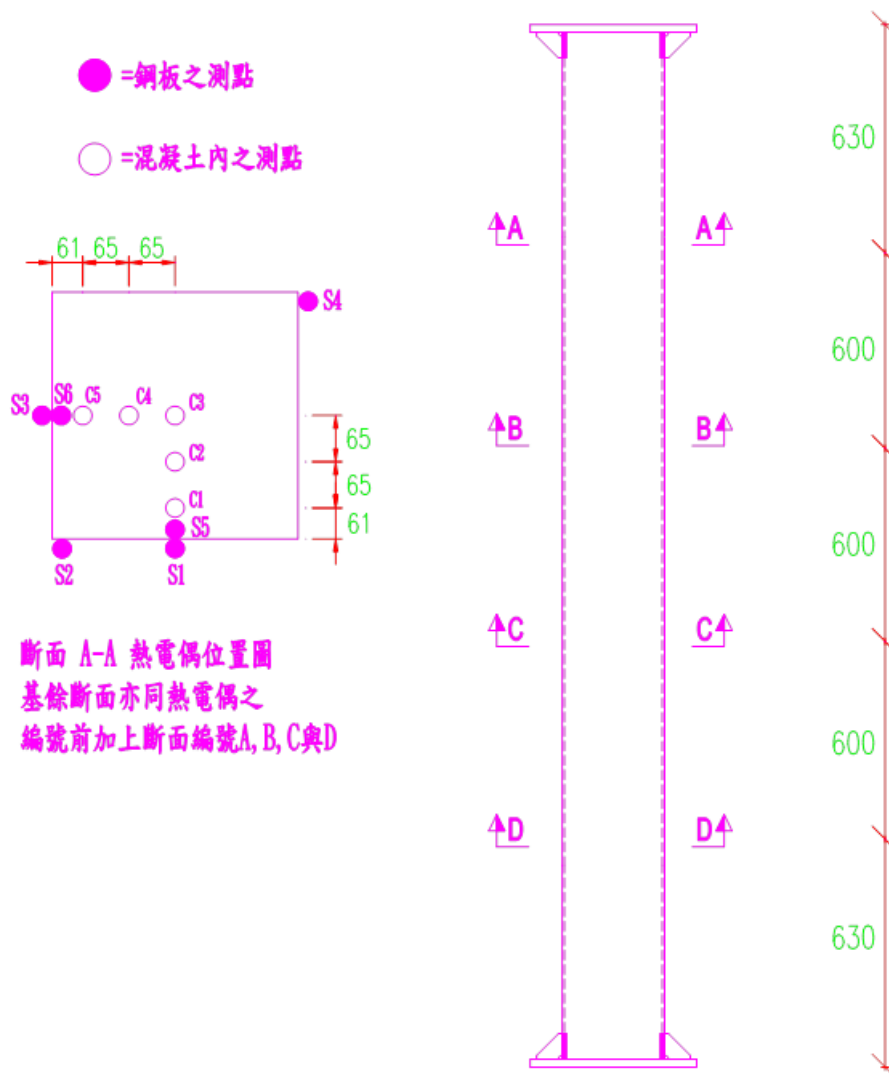


圖 3-17 箱型鋼柱之熱電偶分佈位置圖

(資料來源：本研究整理)

二、位移計設置

根據 CNS 12514 規定，對於垂直承重試體，應量測軸向變形量或中心點水平方向變形量。在軸向變形量方面，由加載設備直接量測柱整體軸向變形量，如圖 3-18 所示。此外，於柱頂端設置電壓式位移計（最大位移 50 mm），於柱底端設置電阻式位移計（最大位移 225 mm），以輔助量測柱軸向變形量。

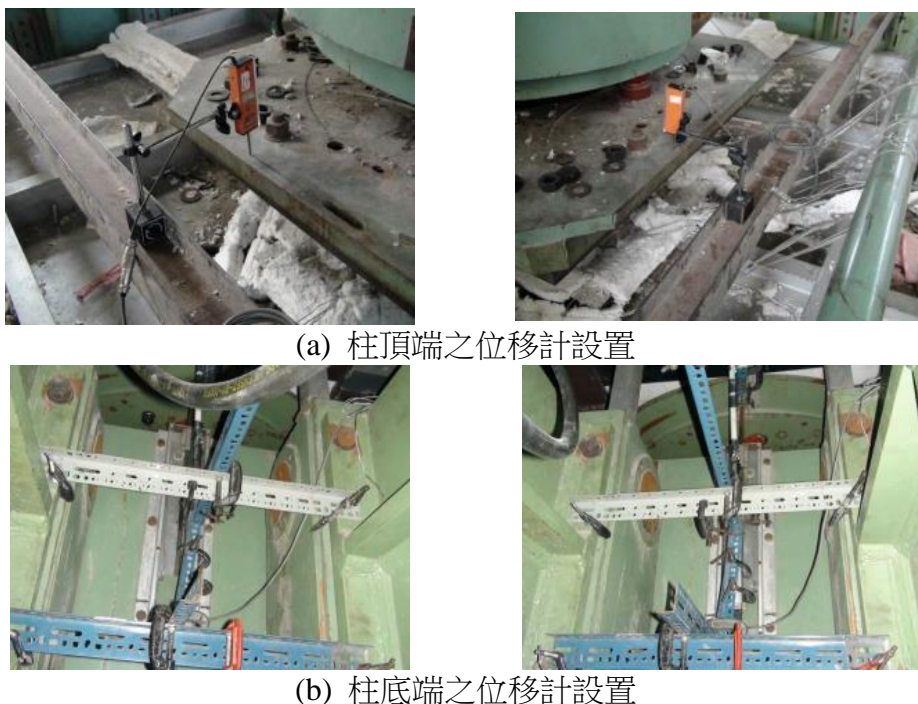


圖 3-18 量測柱整體軸向變形量之位移計設置

（資料來源：本研究整理）

三、防火塗料塗佈

本研究採用國內常使用之防火漆(SIKA 品牌)，進行箱型鋼柱試體表面之防火塗料塗佈，依使用須知，防火時效一小時需塗佈最少 1mm 以上。塗佈完成 14 天後即進行防火塗料膜厚度量測。量測點如圖 3-19 所示，於柱高度上取四個斷面量測，每個斷面共有四面，每面量測 6 點，每根柱共量測 144 點。量測結果防火塗料膜厚度分布在 1.18mm 至 1.56mm 間，符合使用須知之要求。

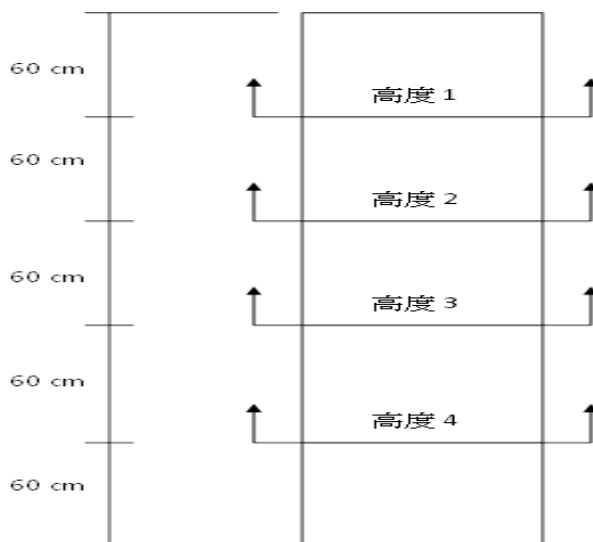


圖 3-19 鋼柱防火塗料膜厚度量測點位置

(資料來源：本研究整理)

第五節 試驗設置

箱型鋼柱試體製造完成後，養護至規劃齡期強度且其含水量達穩定狀態，隨即安排進行定載升溫火害試驗。先以防火棉包覆部分外露於柱身之熱電偶，再將柱試體以天車吊入複合實驗爐中，以進行安裝。安裝示意圖如圖 3-20 所示，試體上方以端板固定於上球座，以模擬鉸支承 (Hinge)；試體下方以端板固定於下球座。下方球座連接 20000 kN 的柱加載設備，可對柱試體進行加載。為監控及量測柱試體在定載升溫高溫實驗時的溫度，須在柱試體內外埋設適當數量的熱電偶。本研究擬使用符合 CNS 5534 規範的熱電偶 (使用 0.75 級性能以上及直徑 0.65 mm 之 K 型熱電偶線) 來量測溫度，且熱電偶的分佈位置與數量亦符合 CNS 12514 之規定。由於 CFBC 內填充混凝土，為瞭解混凝土核心於實驗過程之溫度變化，將預埋熱電偶於混凝土，其分佈將深入柱中心。柱試體設置於加載設備時，亦將熱電偶線連結到資料擷取器，以測試訊號是否正常。若屬正常，則覆上加溫爐蓋板，並以防火棉將空隙填實，藉以防止實驗過程中高溫氣體自爐內散出而造成人員危險。有關爐內噴火孔與試體的相關位置，如圖 3-21 所示。有關柱試體的變形量測，將參照 CNS 12514 之規定：「對於垂直承重試體，應量測軸向變形量或中心點水平方向變形量」，在柱試體上端與下端各架設一支位移計，用以量測柱試體在定載升溫下之軸向壓縮量與時

間的潛變關係。另一方面，此柱軸向壓縮量與時間的潛變關係亦可由柱加載設備直接量測之。

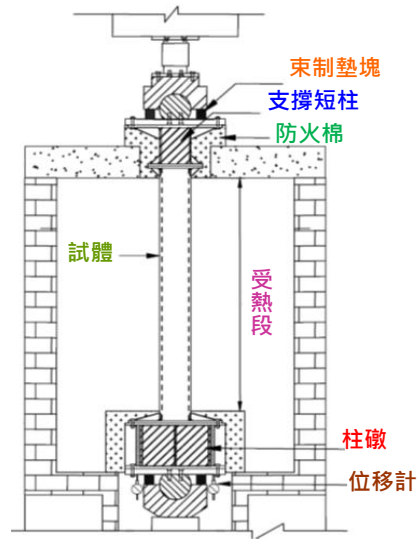


圖 3-20 試體於高溫實驗爐中之安裝示意圖

(資料來源：本研究整理)

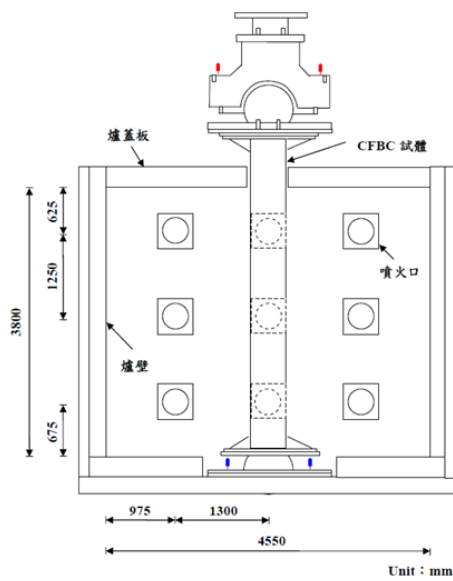


圖 3-21 高溫實驗爐之噴火孔與試體相關位置圖

(資料來源：建研所)

第六節 試驗步驟

為瞭解柱試體的高溫潛變挫屈行為，本研究將對柱試體進行定載升溫的火害實驗，透過相關設計與控制，使試體不致在高溫發生破壞，待試體冷卻至常溫後，再對試體進行加載試驗，藉以研究內含自充填混凝土箱型鋼柱於火害後之殘餘承载力。在規劃的實驗條件下，主要觀測柱試體軸向壓縮變形與時間的關係，並量測柱試體發生挫屈的時間。詳細實驗步驟如下：

- (a). 將柱試體安裝於高溫實驗爐中，並連接溫度與位移量測儀器。
- (b). 施加固定軸向壓力載重。
- (c). 高溫實驗爐依 CNS 12514 溫升曲線加熱，並透過所埋設的熱電偶監測柱試體的溫度，以瞭解柱試體內外之溫差。
- (d). 試體預定之火害溫度後，停止加熱待試體冷卻至常溫後卸載，再重新對試體進行加載試驗。
- (e). 量測柱試體軸向壓縮變形量與時間的關係。
- (f). 依 CNS 12514 所規定的性能基準或試體達到挫屈破壞時機，予以中止實驗。

有關試驗步驟的詳細內容，分述如下。

一、試驗開始前

加熱試驗過程中，維持固定的加載。各試體按規劃之載重比施加载重，其加載之工作載重係依據「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」計算，詳如本章第八節。對於 CFTC 試體，其試驗載重必須在試驗開始前 15 分鐘加載至試體。在加載力量不變時，試體變形不再變化，並記錄軸向變形量。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 10°C~40°C 範圍之內。

二、試驗過程

當溫度依照標準加熱曲線函數開始之際，即視為試驗開始。進行加熱試驗時，爐內之溫度變化應根據 CNS 12514 規定進行控制，其標準升溫曲線如圖 3-22 所示。

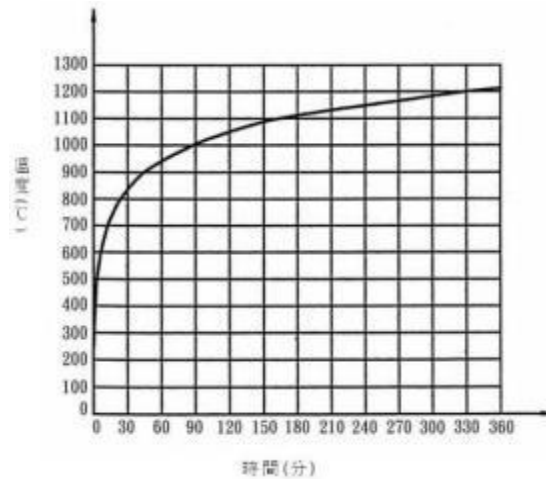


圖 3-22 CNS 12514 標準升溫曲線

(資料來源：CNS 12514)

三、量測與觀察

當試驗開始時，即開始記錄試驗經過時間。在熱電偶量測方面，每隔不超過一分鐘量測一次。至於垂直變形量，視實驗設備狀況，每間隔一段時間進行量測，而變形速率則依垂直變形量推算而得。最後應觀察注意試體是否能於試驗 2 小時後持續支承試驗載重，若否須記錄其試體破壞的時間。試驗結束後，須觀察 CFBC 試體之軸向與水平變形，防火被覆之開裂與變色、軟化...等現象，並詳實記錄之。

第七節 試驗終止條件

依照 CNS 12514 之規定，只要垂直承重構造其量測結果超過下列任一項性能基準，試體即視為承重能力失敗：

最大軸向壓縮量(mm)：

$$C = \frac{h}{100} \quad (3-1)$$

最大軸向壓縮速率(mm/min)：

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} \quad (3-2)$$

式中，h=試體之初始高度 (mm)。

依據 CNS 12514 「建築物構造部分耐火試驗法」，有以下兩種方法進行性能基準與判定：

若垂直承重構造主要由鋼材部分所支承，則得以無載重方式進行破壞溫度判定。若鋼材溫度最高值超過 550°C 及平均溫度超過 500°C，則視為此試體承重能力失敗。

若垂直承重構造以有載重的方式進行加熱試驗，則以最大軸向壓縮量及最大軸向壓縮速率進行判定。若試驗量測結果發現超過上述兩項性能標準，亦視為試體承重能力失敗。

另一方面，試驗時間已達預定時間、人員安全或設備可能遭受破壞，試驗亦須立即停止。此外，試體達到挫屈破壞之際，加載設備之油壓將出現不正常壓降，加載系統亦將自動終止加載。對於本次試驗 CFBC 試體所容許的最大軸向壓縮量不得超過 30.4 mm(試驗時酌量放大至 40 mm)；且最大軸向壓縮速率不得超過 9.1 (mm/min)。

第四章 結果分析與討論

第一節 填充型箱型鋼柱試體乘載力計算

本研究製作四支填充混凝土箱型鋼柱 (Concrete-Filled Box Column, CFBC)，試體係採用四片鋼板組鉸而成，鋼材屬 SN 490B 等級，其厚度為 12 mm。鋼柱斷面尺寸為 400 mm × 400 mm，其長度為 3000 mm。鋼柱之鋼降伏強度經試驗所得如表 3-3 為 $F_{ys}=4.14 \text{ tf/cm}^2$ ；鋼彈性模數 $E_s=2100 \text{ tf/cm}^2$ ；試驗時混凝土強度=520 kgf/cm²。火害試驗進行時，同步進行之混凝土強度監測資料如圖 4-1。本研究依據國內「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」，估算填充型箱型鋼柱試體之設計軸壓承载力。分別計算鋼柱鋼骨部分及混凝土部分設計軸壓承载力，再以承载力疊加法求其總和，其詳細計算過程如下。

1. 一般要求規定

(1) 柱斷面最小尺寸 (B) 之規定

$$B=400 \text{ cm} > 300 \text{ cm} \quad \text{OK}$$

(2) 柱短邊—長邊尺寸比值 (B/H) 之規定

$$B/H=400/400=1.0 > 0.4 \quad \text{OK}$$

(3) 鋼骨斷面不得小於構材全斷面 2% 之規定

$$\frac{A_s}{BH} = \frac{(400 \times 400) - (376 \times 376)}{400 \times 400} = 11.64\% > 2\% \quad \text{OK}$$

(4) 斷面肢材寬厚比之規定

$$\frac{b}{t} = \frac{376}{12} = 31.33 \leq \lambda_{pd} = \sqrt{\frac{3E_s}{F_{ys}}} = \sqrt{\frac{3 \times 2100}{4.14}} = 39 \quad \text{OK}$$

2. 鋼骨部分之標稱受壓承载力 (P_{ns})

$$\text{慣性矩 } I_s = \frac{1}{12} \times 40^3 \times 40 - \frac{1}{12} \times 37.6^3 \times 37.6 = 46773.56 \text{ cm}^4$$

$$\text{鋼柱斷面之有效迴轉半徑 } r_s = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{46773.56}{186.24}} = 15.85 \text{ cm}$$

內灌混凝土箱型鋼柱構材中鋼骨斷面之有效迴轉半徑為

$$r_{\text{eff}} = r_s + \alpha \times \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} = 15.85 + 0.1 \times \sqrt{\frac{40^4/12}{40^2}} = 17 \text{ cm}$$

(填充混凝土箱型鋼柱 $\alpha = 0.1$)

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{F_{ys}}{E_s}} = \frac{1 \times 300}{\pi \times 17} \sqrt{\frac{4.14}{2100}} = 0.2494 < 1.5$$

箱型鋼柱標稱受壓強度計算式

$$P_{ns} = (0.211\lambda_c^3 - 0.57\lambda_c^2 - 0.06\lambda_c + 1)F_{ys}A_s = 734.68 \text{ tf}$$

3. 混凝土部分之標稱受壓承载力 (P_{nrc})

$$P_{nrc} = \phi_e (0.85f'_c A_c + A_r F_{yr}) = 0.85 \times (0.85 \times 520 \times 37.6^2) / 1000 = 531.15 \text{ tf}$$

(因混凝土受到箱型鋼柱良好的圍束，故 ϕ_e 值可以取為 0.85)

4. 填充混凝土箱型鋼柱之標稱受壓承载力 (P_n)

$$P_n = \phi_{cs} P_{ns} + \phi_{crc} P_{nrc} = 0.85 \times 734.68 + 0.75 \times 531.15 = 1022.8 \text{ tf}$$

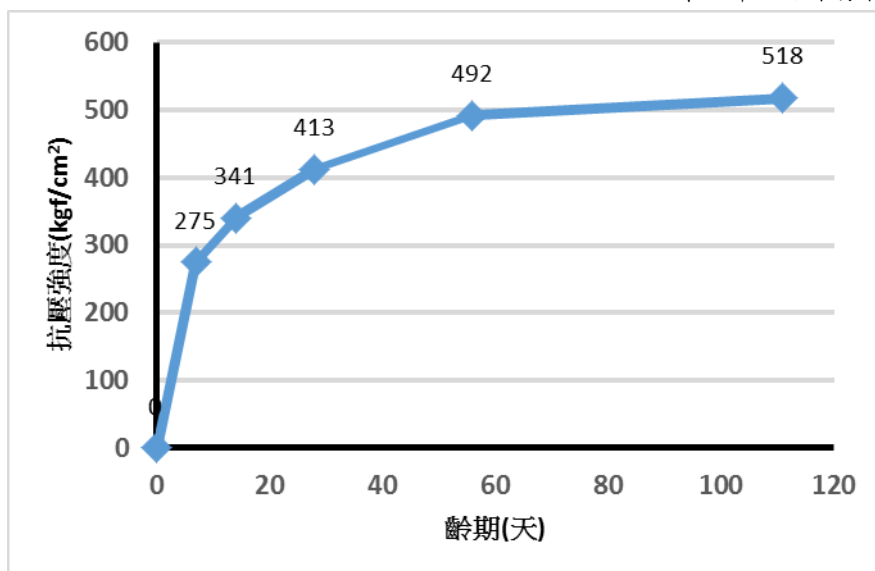


圖 4-1 自充填混凝土之強度發展趨勢

(資料來源：本研究整理)

第二節 鋼柱受火害後之殘餘承载力試驗結果

本研究製作實尺寸填充式箱型鋼柱混凝土試體，於箱型鋼柱內灌注 SCC，箱型鋼柱外表面施作防火漆被覆，並參酌現行 Eurocode 4 規範中柱構件的火害設計荷重等級 (fi,t)，對此填充式箱型鋼柱試體施予固定載重比 (0.28) 的軸向壓力後，隨即對試體進行升溫來模擬遭受火害的情況，依標準升溫曲線加熱至設定的實驗終止條件(鋼板平均溫度達 400°C、600°C 及 800°C)，以觀測各試體的火害行為。保持固定載重比 (0.28) 的軸向壓力，待試體自然冷卻至常溫後，再對試體進行加載試驗，藉以研究內含自充填混凝土箱型鋼柱於火害後之殘餘承载力。

一、箱型鋼柱試體試驗前儀器設置

於試體表面先以防火棉包覆部分外露於柱身之熱電偶，其餘鋼板表面塗佈防火漆。防火漆依生產商技術規範建議，達防火時效一小時需塗佈厚度為 1.0mm 以上，將柱試體鋼板分三次表面塗佈防火漆，最後以膜厚計量測得防火漆厚度分布在 1.18mm 至 1.56mm 間。再將柱試體以天車吊入複合實驗爐中，以進行固定安裝。試體上方以端板固定於上球座，以模擬鉸支承；試體下方以端板固定於下球座。下方球座連接 20000 kN 的柱加載設備，可對柱試體進行

加載，並由加熱爐於試體四周給予加熱模擬火害受熱情形。CFBC 試體加載設備設置完畢後，將熱電偶線連結到資料擷取器，經測試確定訊號正常，再將尚未包覆防火棉之熱電偶線包裹，蓋上加溫爐蓋板，並以防火棉將空隙填實，防止實驗過程中高溫氣體自爐內散出而造成人員危險。最後在加載設備上下之南北端各架設一支位移計，共四支，以紀錄試驗中的軸向變形。箱型鋼柱(B2)試驗前之外觀如圖 4-2 所示。



圖 4-2 箱型鋼柱 B2 試驗前之外觀

(資料來源：本研究整理)

二、箱型鋼柱試體火害試驗步驟

1. 火害試驗前

火害試驗過程中，須維持固定的加載來模擬箱型鋼柱所承受之房屋載重，因此在高溫試驗前，對 CFBC 試體先進行加載，而施加载重為 $0.28P_n$ ，其試驗載重先施加 50T 以固定試體，穩定後鎖上端點螺栓，再繼續加載其餘載重至試體上。在施加载重為 $0.28P_n$ 力量不變時，對試體持壓十分鐘，當試體變形不再變化時記錄其軸向變形量。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 $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 範圍之內進行試驗。

2. 火害試驗過程

持壓穩定後，當溫度依照標準加熱曲線函數開始加熱之際，即視為高溫試驗開始。進行高溫試驗時，爐內之溫度變化應根據 CNS 12514 標準升溫曲線規定進行控制。當試驗進行時同步記錄試驗經過時間，熱電偶量測以每隔十秒量測一次，至於垂直變形量，則視實驗設備狀況，每間隔一段時間進行量測，而變形速率則依垂直變形量推算而得。最後須注意觀察試體是否達到設定溫度，或其他之終止條件，並記錄其試體破壞的時間。試驗結束後，並記錄 CFBC 試體之軸向變形數據，及觀察防火被覆之開裂與變色、軟化…等現象。鋼板內外熱電偶之均溫達到設定溫度(400°C、600°C 及 800°C)即視為試驗終止條件，當溫度達到設定溫度時，隨即關閉爐火並打開爐蓋使試體自然冷卻至常溫後，即可進行加載試驗。試體(B1、B2 及 B3)高溫試驗後之外觀如圖 4-3 所示。由現場檢視可知，三隻試體表面之防火漆皆已燒膨脹且大部分脫落，但柱體表面皆保持平整無挫曲現象，且就受力變形圖研判，柱體應完整並無破壞發生。



圖 4-3 試體(B1、B2 及 B3)高溫試驗後之外觀

(資料來源：本研究整理)

3. 火害後加載試驗過程與終止

當試體自然冷卻至常溫之後，將施加固定軸向壓力載重卸載，並重新自零載重進行加載試驗。在試驗中，若量測結果發現超過最大軸向壓縮量及最大軸

火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承载力研究

向壓縮速率兩項性能標準，及視為試體承重能力失敗。此外，試體達到挫屈破壞之際，加載設備之油壓將出現不正常壓降，加載系統亦將自動終止加載。對於本次試驗 CFBC 試體所容許的最大軸向壓縮量不得超過 30.4 mm(實際設定為 40 mm)；且最大軸向壓縮速率不得超過 9.1 (mm/min)。箱型鋼柱試體火害後承载力試驗結果外觀如圖 4-4 至圖 4-6 所示。



圖 4-4 試體 B1 之局部挫屈情形

(資料來源：本研究整理)



圖 4-5 試體 B2 之局部挫屈情形

(資料來源：本研究整理)



圖 4-6 試體 B3 之局部挫屈情形(無焊道開裂)

(資料來源：本研究整理)

三、箱型鋼柱試體火害後試驗結果與分析

本研究選用火害溫度設定為箱型鋼柱試體鋼材之平均溫度達 400°C 、 600°C 及 800°C 為中止火害時間點。經火害試驗後，箱型鋼柱試體之各項數據紀錄如表 4-1 所示。由表中可知，達設定溫度之火害終止時間分別為 22 分鐘、78 分鐘及 105 分鐘，其終止時鋼板均溫分別為 403°C 、 609°C 及 802°C ，與預設之 400°C 、 600°C 及 800°C 相當接近。終止時混凝土均溫分別為 89°C 、 274°C 及 462°C ，與鋼板均溫相差約 310°C 至 350°C 間。火害試驗終止時柱試體垂直位移分別為 7.9mm 、 11.5mm 及 -1.0mm ，如圖 4-7 至圖 4-9 所示。圖中結果顯示，當火害試驗中鋼材之平均溫度分別達 400°C (B1) 及 600°C (B2) 時，其柱試體尚處於膨脹階段(膨脹為正)，主要原因為鋼材受熱膨脹所造成。但鋼材均溫達 800°C (B3) 時，因材質軟化，彈性模數已經大幅下降，導致柱試體呈現壓縮狀態。溫度終止試體自然冷卻後，因載重持續中，故柱試體垂直壓縮位移分別增加變為 -0.1mm 、 -3.4mm 及 -21.0mm ，如圖 4-10 至圖 12 所示。此結果顯示，B1 試體應該受火害影響不大，其垂直位移幾乎已經回歸至火害前原狀態(-0.1mm)。B3 試體則受火害影響較大，其垂直位移較火害前原狀態增加了 21.0mm 如圖 4-13 所示。

實驗組試體在火害加溫段，爐溫平均溫度、鋼板平均溫度與混凝土平均溫度在不同時間下之關係如圖 4-14 至圖 4-16 所示。

表 4-1 火害試驗數據紀錄表

試體編號	B1	B2	B3
設定終止溫度(°C)	400	600	800
達設定溫度之時間(min)	22	78	105
終止時爐溫均溫(°C)	795	985	1027
終止時鋼板外均溫(°C)	432	622	863
終止時鋼板內均溫(°C)	374	597	741
終止時鋼板均溫(°C)	403	609	802
終止時混凝土均溫(°C)	89	274	462
終止時位移(mm)(膨脹為正)	7.9(-2.0)	11.5(1.6)	-1.0(-10.9)
冷卻後位移(mm)(膨脹為正)	-0.1(-10.0)	-3.4(-13.3)	-21.0(-30.9)

*表中位移以試體受到 $0.28P_n$ 時之位移為基準(0.0)；括號內位移為絕對位移
(資料來源：本研究整理)

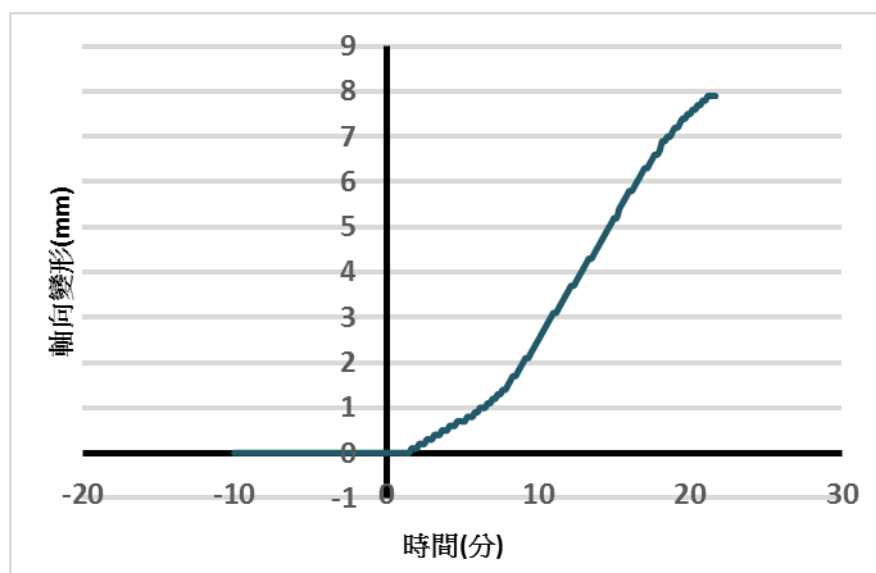


圖 4-7 試體 B1 火害加溫段軸向變形與時間之關係

(資料來源：本研究整理)

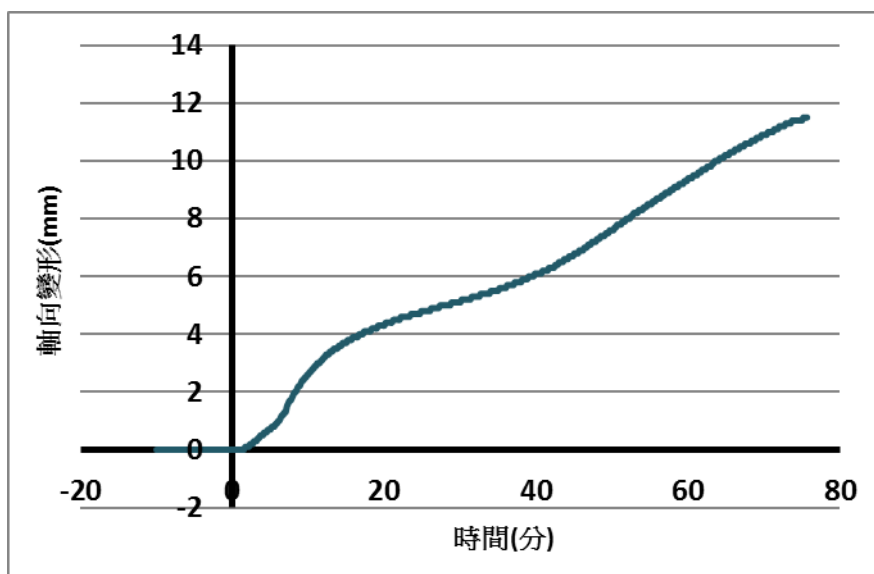


圖 4-8 試體 B2 火害加溫段軸向變形與時間之關係

(資料來源：本研究整理)

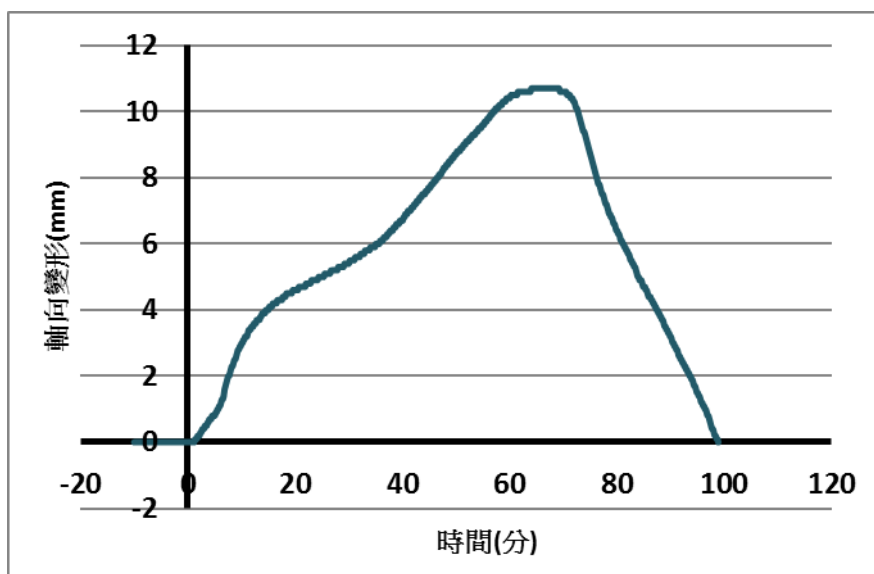


圖 4-9 試體 B3 火害加溫段軸向變形與時間之關係

(資料來源：本研究整理)

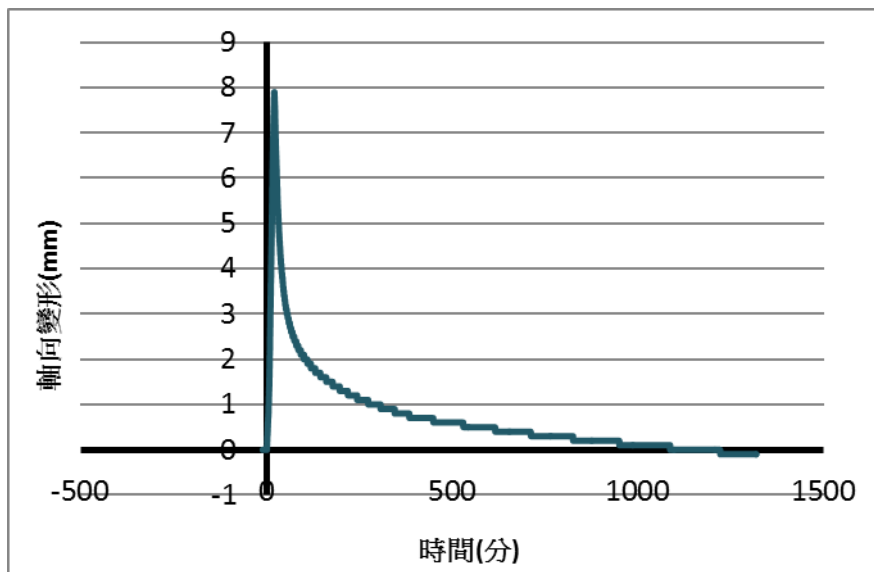


圖 4-10 試體 B1 火害加溫段軸向變形與時間之關係

(資料來源：本研究整理)

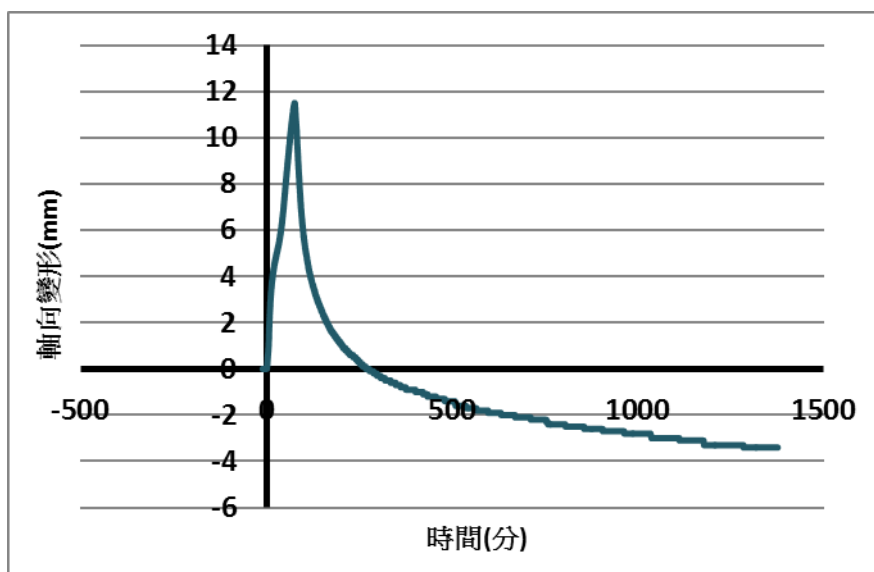


圖 4-11 試體 B2 火害加溫段軸向變形與時間之關係

(資料來源：本研究整理)

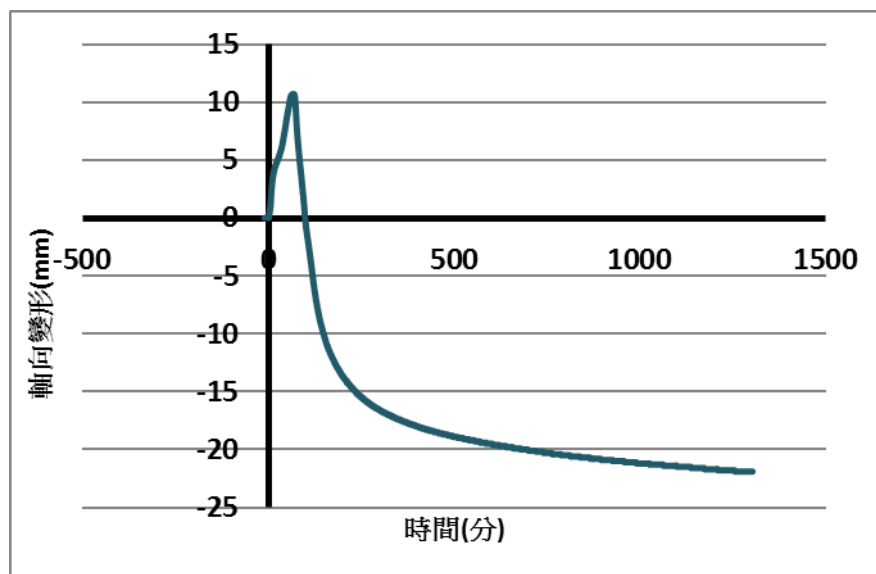


圖 4-12 試體 B3 火害加溫段軸向變形與時間之關係

(資料來源：本研究整理)

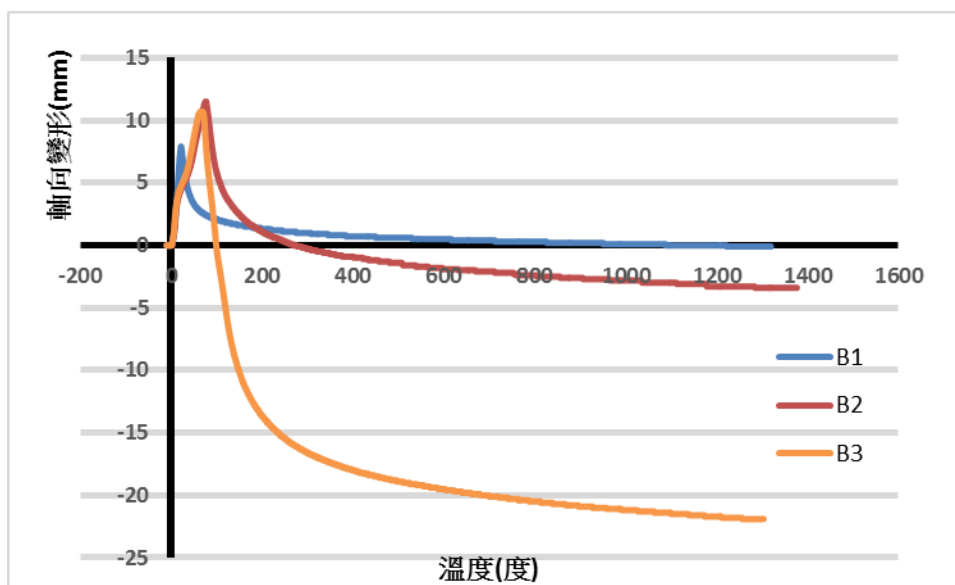


圖 4-13 試體火害加溫段軸向變形與時間之比較圖

(資料來源：本研究整理)

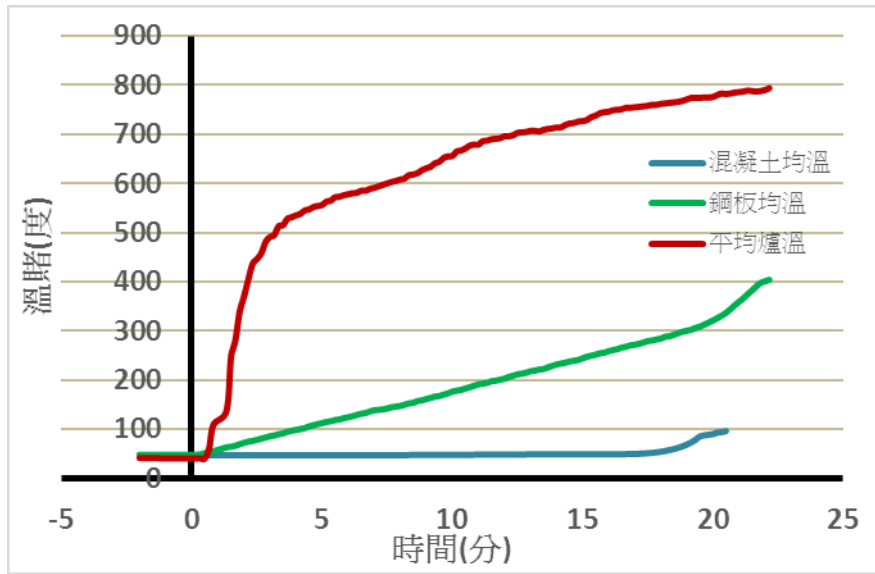


圖 4-14 加溫段爐溫、鋼板與混凝土平均溫度圖(B1)

(資料來源：本研究整理)

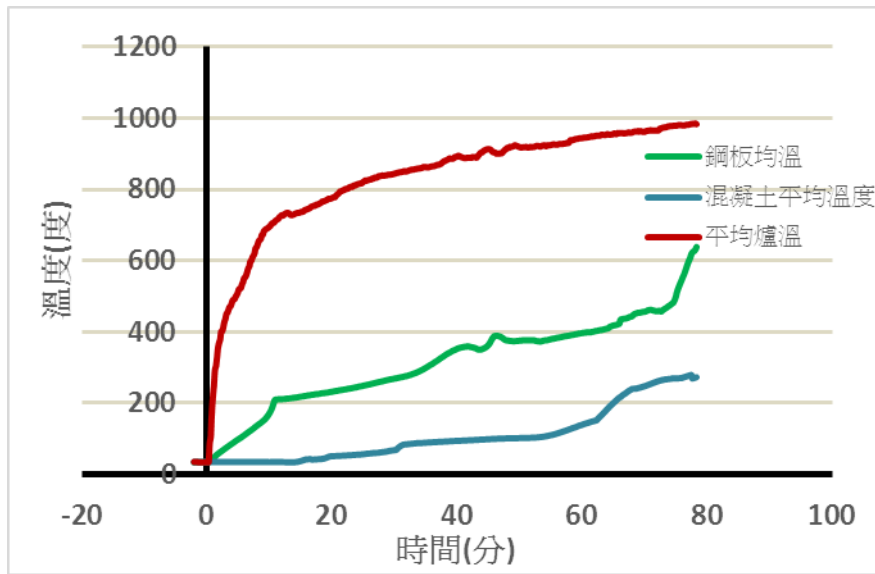


圖 4-15 加溫段爐溫、鋼板與混凝土平均溫度圖(B2)

(資料來源：本研究整理)

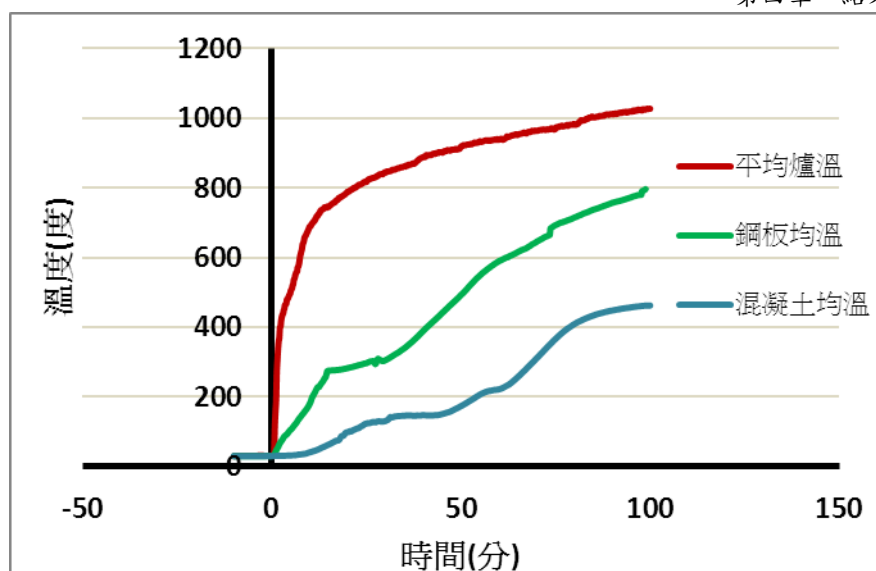


圖 4-16 加溫段爐溫、鋼板與混凝土平均溫度圖(B3)

(資料來源：本研究整理)

試體火害加溫達鋼板預定溫度即關閉火爐，讓試體自然冷卻至常溫之後，將施加固定軸向壓力載重先行卸載，並重新自零載重開始進行加載試驗至破壞為止。試體火害後之殘餘承载力試驗，其抗壓軸向變形與軸力之關係試驗結果如圖 4-17 至圖 4-20 所示。由圖中結果可知，試體 B1 火害後之抗壓軸力可達 1210.2 tf，較本章第一節估算之箱型鋼柱試體承载力(標稱受壓承载力)1022.8 tf 還高，此結果顯示，雖然鋼板平均溫度達 400°C，但依文獻資料可知，其冷卻後強度不至於受損，但此時內部混凝土溫度僅約 90°C，依文獻資料可知，其冷卻後抗壓強度應該會升高，故導致此項試驗結果，另外規範建議值一般皆較保守，會有低估之現象。試體 B2 抗壓軸力較 B1 試體略減達 1161.9 tf，約為 B1 結果之 96%。但還是比第一節規範估算之箱型鋼柱試體承载力高，此時鋼板平均溫度雖達 600°C，依文獻資料可知，其冷卻後強度已經會有小部分受損，但此時內部混凝土溫度約 275°C，承受 200°C 以上溫度火害時間僅約 15 分鐘而已，依文獻資料可知，其冷卻後抗壓強度可能會升高，故其整體殘餘承载力依舊可維持。試體 B3 之抗壓軸力則較大幅衰退，僅可達 969.2tf，此時鋼板平均溫度達 800°C，其冷卻後強度將會有一定程度受損，且此時混凝土承受 200°C 以上溫度火害時間達 40 分鐘，承受 400°C 以上溫度火害時間達 20 分鐘之久，依文獻資料可知，其冷卻後強度將會有相當程度的受損。若以鋼板平均溫度 400°C 之 B1 組為基準，則 B3 組之殘餘承载力僅剩約 80%。

若就圖 4-20 中三支試體之垂直位移探討之，可以發現，B1 及 B2 組在出現極限承载力時，其垂直位移值約在 33mm 左右，但 B3 組之垂直位移值僅約在 25mm 左右，明顯的已經受到火害之影響，顯現出較脆之性質。

就破壞模式觀之(圖 4-4 至 4-6)，試體 B1 及 B2 皆為鋼柱產生局部挫屈而破壞，且發生焊道開裂情形。試體 B3 雖亦為局部挫屈破壞，但無焊道開裂情形發生。

箱型鋼柱火害試驗進行時，本研究亦同步進行混凝土圓柱試體在各溫度火害後之強度比較試驗，混凝土試驗齡期為 110 天(與火害試驗同步)；常溫為 27 度；冷卻方式為自然冷卻，升溫曲線亦與箱型鋼柱火害試驗相同，在加熱溫度到達時持溫一小時，然後將爐門打開讓試體和高溫爐一起降溫。其殘餘強度試驗結果如圖 4-21 所示。由圖中結果可知，混凝土在承受 400°C 火害溫度下，其殘餘抗壓強度反而是升高的，升高最高可達 14% 左右，此結果與一般文獻說明不同，有可能為試體在加熱溫度(爐溫)到達時雖持溫一小時，但試體內部之溫度尚低於 400°C，意即試體之平均溫度尚未到達 400°C，故其殘餘抗壓強度反而是升高的。但 600°C 火害溫度時，混凝土內部平均溫度應該超越 400°C，其殘餘抗壓強度將有折減，其破壞行為呈現脆性現象。這就說明了試體 B3 之抗壓軸力有較大幅衰退的原因，有可能是內部混凝土已經發生脆裂導致柱體破壞，且鋼板雖發生局部挫屈情形。

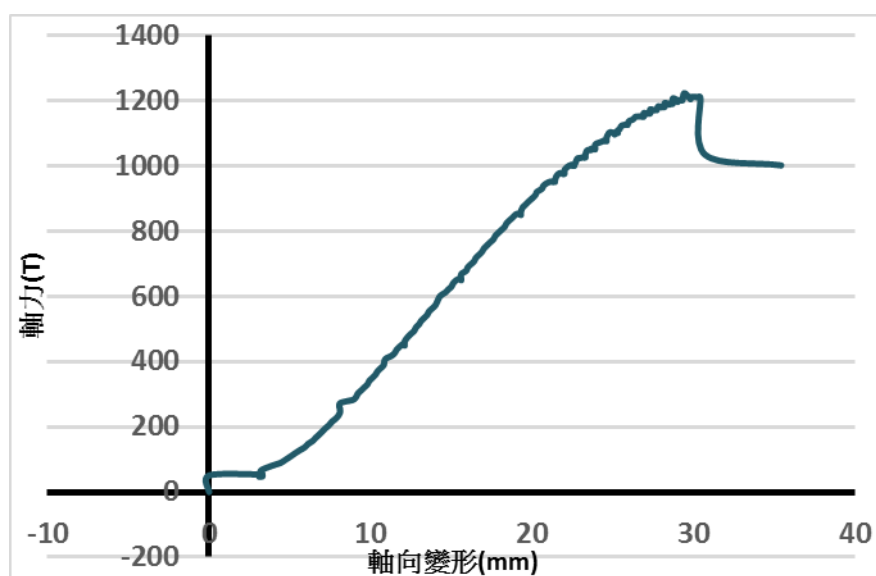


圖 4-17 試體 B1 抗壓軸向變形與軸力之關係

(資料來源：本研究整理)

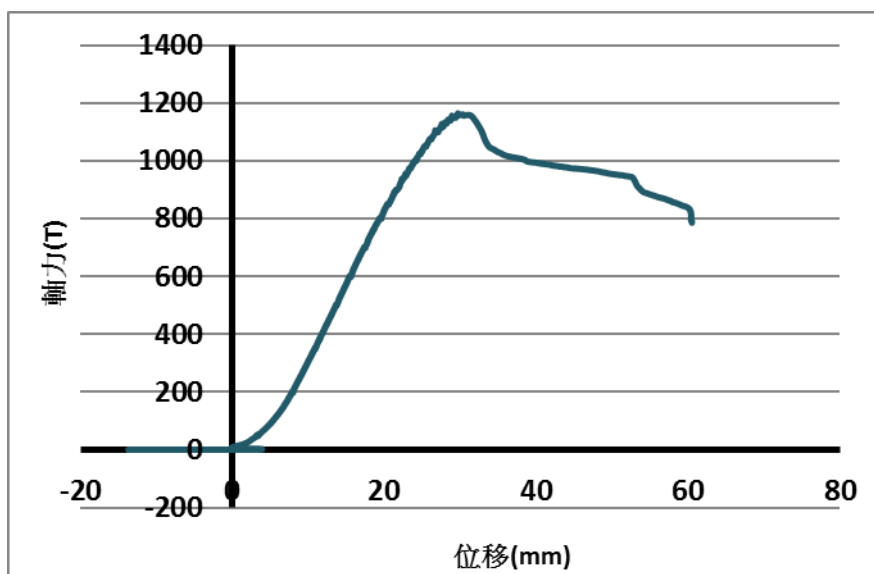


圖 4-18 試體 B2 抗壓軸向變形與軸力之關係

(資料來源：本研究整理)

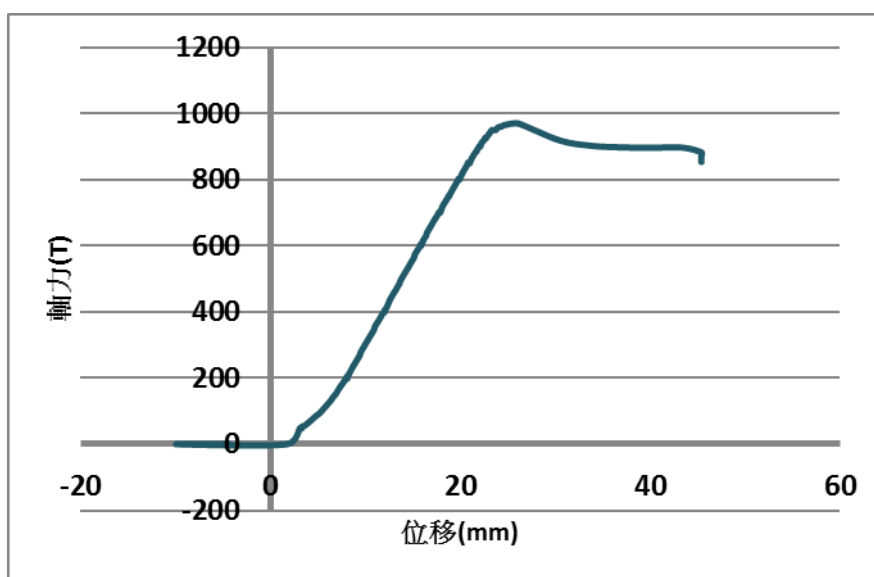


圖 4-19 試體 B3 抗壓軸向變形與軸力之關係

(資料來源：本研究整理)

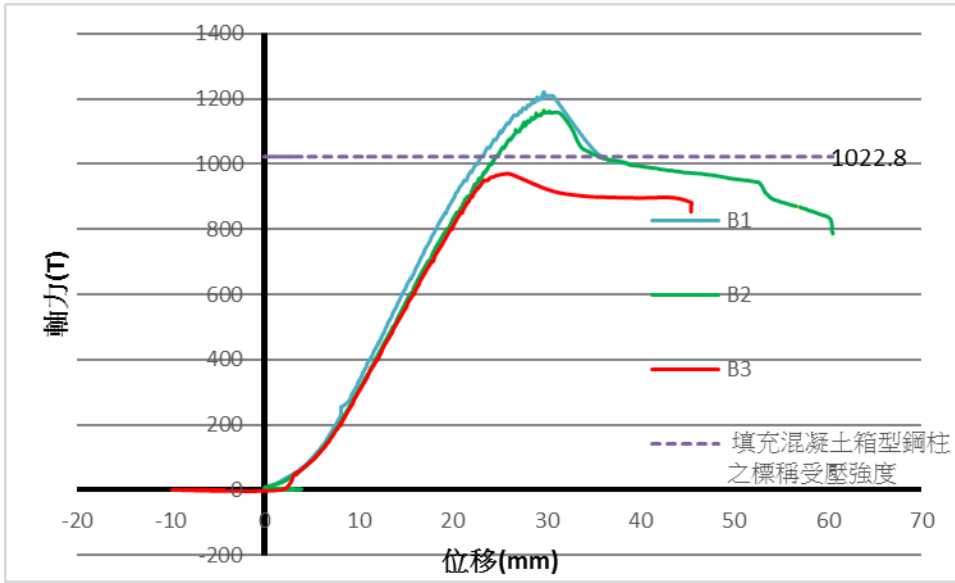


圖 4-20 試體抗壓軸向變形與軸力之關係比較圖

(資料來源：本研究整理)

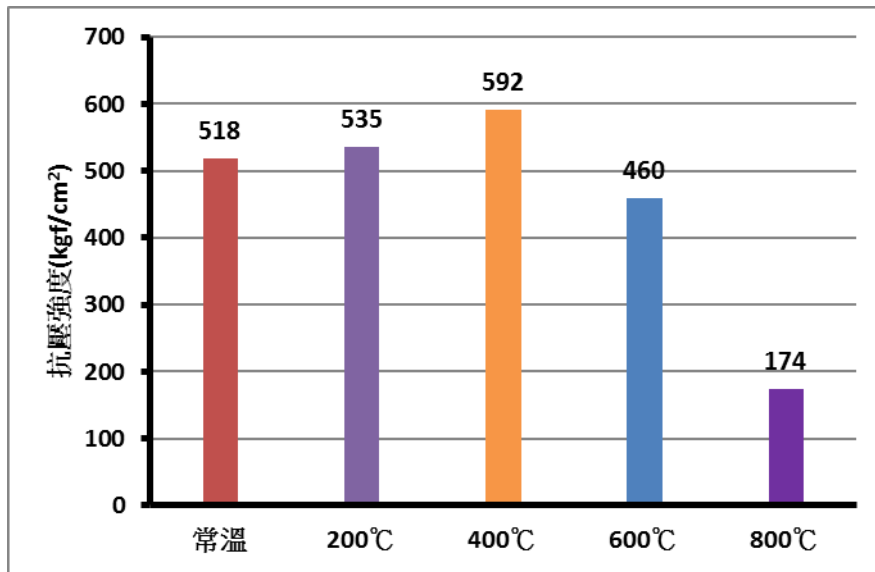


圖 4-21 混凝土各溫度火害後之強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

第三節 鋼柱受火害後之殘餘承載力分析結果

一、 依劉靖國及李其忠建議方法推估 CFBC 殘餘承載力

經最高溫度 400°C 火害後 CFBC 試驗所得，混凝土受溫平均為 89°C，依劉靖國【20】建議折減方程式 $f_{yr} = f_y (T \leq 500^\circ\text{C})$ 可知，火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} 並無折減；鋼材彈性模數則依 Edward 等人【36】實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數不會改變情況下維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；另由李其忠【13】研究成果得知火害後混凝土受溫平均為 89°C 下之殘餘抗壓強度可由圖 2-7 查得，約折減為原有抗壓強度 520 kgf/cm^2 之 95%，故取火害後混凝土之殘餘抗壓強度 f_c' 為 494 kgf/cm^2 。依上述數值採本章第一節「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」公式，估算 CFBC 試體經 400°C 火害後之殘餘承載力為 1003 tf，如表 4-2 所示。

火災階段最高溫度為 600°C 火害時，鋼板受溫平均約 600°C 時，試驗所得之混凝土平均受溫為 274°C 情況下，依劉靖國建議折減方程式 $f_{yr} = (-0.108T + 154.217) \times 10^{-2} \times f_y (500^\circ\text{C} < T \leq 750^\circ\text{C})$ ，計算火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} 折減為 3.7 tf/cm^2 ；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；火害後混凝土殘餘抗壓強度可由圖 2-7 查得約折減為原設計抗壓強度之 81%，即 $f_c' = 421 \text{ kgf/cm}^2$ 。故依上述數據估算 CFBC 試體經 600°C 火害後之殘餘承載力為折減為 883 tf，其殘餘承載力折減率為原標稱受壓承載力之 86%，如表 4-2 所示。

火災階段最高溫度來到 800°C 時，鋼板受溫平均約 800°C，試驗所得混凝土受溫平均為 462°C 情況下，依劉靖國折減趨勢建議折減方程式 $f_{yr} = 0.83 \times f_y (800^\circ\text{C} < T)$ ，計算火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} 折減為 3.4 tf/cm^2 ；鋼材彈性模數則依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數不會改變情況下維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；另由李其忠研究成果得知，火害後混凝土殘餘抗壓強度可由圖 2-7 查出約折減為原設計抗壓強度之 49%，即 $f_c' = 255 \text{ kgf/cm}^2$ 。故依上述估算 CFBC 試體經 800°C 火害後之殘餘承載力折減為 705 tf，其殘餘承載力折減率為原標稱受壓承載力之 69%，如表 4-2 所示。

表 4-2 火害後 CFBC 殘餘承载力分析(劉靖國+李其忠法)

火害溫度 承载力	原設計 常溫 25°C	400°C		600°C		800°C	
	tf	tf	折減率 (%)	tf	折減率 (%)	tf	折減率 (%)
鋼骨部分之極限 承载力 (P_{ns})	735	735	0%	659	10%	600	18%
混凝土部分之極 限承载力 (P_{nrc})	531	505	5%	430	19%	260	51%
CFBC 標稱及殘餘 承载力 (P_n)	1023	1003	2%	883	14%	705	31%
折減率%：1- (火害後之殘餘承载力/原標稱受壓承载力)							

(資料來源：本研究整理)

二、 依 Han 及李其忠建議方法推估 CFBC 殘餘承载力

經火害階段最高溫度到達 400°C 時，鋼板受溫約 400°C，混凝土為 89°C，採用 Han【24，25】建議折減方程式 $f_{sy}(T) = f_{sy}(T \leq 400^\circ\text{C})$ 可知，火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} 並無折減；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；另由李其忠研究成果得知，火害後混凝土殘餘抗壓強度可由圖 2-7 查得，約折減為原設計抗壓強度之 95%， f_c' 為 494 kgf/cm^2 。故依上述估算 CFBC 試體經 400°C 火害後之殘餘承载力仍為 1003 tf，如表 4-3 所示。

火害階段最高溫度為 600°C 時，鋼板受溫約 600°C，混凝土受溫約 274°C 下，採用 Han 建議折減方程式 $f_{sy}(T) = f_{sy} [1 + 2.33 \times 10^{-4}(T-20) - 5.88 \times 10^{-7}(T-20)^2]$ ($400^\circ\text{C} < T$)，計算火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} ，折減為 3.9 tf/cm^2 ；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數不會改變情況下維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；另由李其忠研究成果得知火害後混凝土殘餘抗壓強度可由圖 2-7 查出約折減為原設計抗壓強度之 81%， $f_c' = 421 \text{ kgf/cm}^2$ 。故依上述估算 CFBC 試體經 600°C 火害後之殘餘承载力折減為 912 tf，其殘餘承载力折減率為原標稱受壓承载力之 89%，如表 4-3 所示。

火害階段最高溫度來到 800°C 時，鋼板受溫約 800°C，混凝土受溫 462°C，採用 Han 建議折減方程式 $f_{sy}(T) = f_{sy} [1 + 2.33 \times 10^{-4}(T-20) - 5.88 \times 10^{-7}(T-20)^2]$ ($400^\circ\text{C} < T$)，計算火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} ，折減為 3.4 tf/cm²；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100$ tf/cm²；另由李其忠研究成果得知火害後混凝土殘餘抗壓強度可由圖 2-7 比對得出約折減為原設計抗壓強度之 49%， $f_c' = 255$ kgf/cm²。故依上述估算 CFBC 試體經 800°C 火害後之殘餘承载力為折減為 713 tf，其殘餘承载力折減率為原標稱受壓承载力之 70%，如表 4-3 所示。

表 4-3 火害後 CFBC 殘餘承载力分析(Han+李其忠法)

火害溫度 承载力	原設計 常溫 25°C	400°C		600°C		800°C	
	tf	tf	折減率 (%)	tf	折減率 (%)	tf	折減率 (%)
鋼骨部分之極限 承载力 (P_{ns})	735	735	0%	694	6%	609	17%
混凝土部分之極 限承载力 (P_{nrc})	531	505	5%	430	19%	260	51%
CFBC 標稱及殘 餘承载力 (P_n)	1023	1003	2%	912	11%	713	30%
折減率%：1- (火害後之殘餘承载力/原標稱受壓承载力)							

(資料來源：本研究整理)

三、 依劉靖國及 NIST 規範建議方法推估 CFBC 殘餘承载力

經火害階段最高溫度到達 400°C 時，鋼板受溫約 400°C，混凝土受溫為 89°C 情況下，依劉靖國建議折減方程式 $f_{yr} = f_y (T \leq 500^\circ\text{C})$ 可知，火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} 並無折減；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100$ tf/cm²；由 NIST 規範建議如圖 4-22，查得火害後混凝土殘餘抗壓強度約折減為原設計抗壓強度之 90%， f_c' 為 468 kgf/cm²。故依上述估算 CFBC 試體經 400°C 火害後之殘餘承载力為 983 tf，如表 4-4 所示。

火災階段最高溫度為 600°C 火害時，鋼板受溫約 600°C，混凝土受溫約 274

°C情況下，依劉靖國建議折減方程式 $f_{yr} = (-0.108T + 154.217) \times 10^{-2} \times f_y$ ($500^\circ\text{C} < T \leq 750^\circ\text{C}$)，計算火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} 折減為 3.7 tf/cm^2 ；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；由 NIST 規範得知，火害後混凝土殘餘抗壓強度可由圖 3-22 比對得出，約折減為原設計抗壓強度之 70%，即 $f_c' = 364 \text{ kgf/cm}^2$ 。故依上述估算 CFBC 試體經 600°C 火害後之殘餘承载力折減為 839 tf ，其殘餘承载力折減率為原標稱受壓承载力之 82%，如表 4-4 所示。

火災害階段最高溫度來到 800°C 時，鋼板受溫約 800°C ，混凝土受溫約 464°C 情況下，依劉靖國建議折減方程式 $f_{yr} = 0.83 \times f_y$ ($800^\circ\text{C} < T$) 計算火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} 折減為 3.4 tf/cm^2 ；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；由 NIST 規範得知火害後混凝土殘餘抗壓強度可由圖 2-16 比對得出，約折減為原設計抗壓強度之 50%，即 $f_c' = 260 \text{ kgf/cm}^2$ 。故依上述估算 CFBC 試體經 800°C 火害後之殘餘承载力為折減為 710 tf ，其殘餘承载力折減率為原標稱受壓承载力之 69%，如表 4-4 所示。

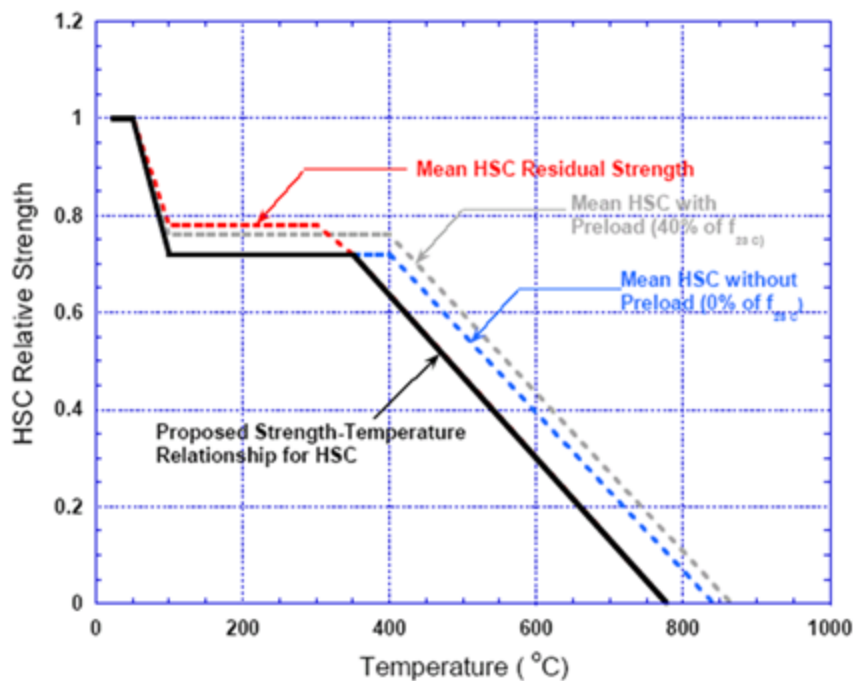


圖 4-22 火害後混凝土之抗壓強度設計曲線(NIST 規範)

(資料來源：美國 NIST 規範)

表 4-4 火害後 CFBC 殘餘承載力分析(劉靖國+NIST 法)

火害溫度 承載力	原設計 常溫 25°C	400°C		600°C		800°C	
	tf	tf	折減率 (%)	tf	折減率 (%)	tf	折減率 (%)
鋼骨部分之極限 承載力 (P_{ns})	735	735	0%	659	10%	600	18%
混凝土部分之極 限承載力 (P_{nrc})	531	478	10%	372	30%	266	50%
CFBC 標稱及殘 餘承載力 (P_n)	1023	983	4%	839	18%	710	31%
折減率%：1- (火害後之殘餘承載力/原標稱受壓承載力)							

(資料來源：本研究整理)

四、 依 Han 及 NIST 規範建議方法推估 CFBC 殘餘承載力

經火災階段最高溫度 400°C 火害後，鋼板受溫約 400°C，混凝土平均為 89°C 情況下，採用 Han 建議折減方程式 $f_{sy}(T) = f_{sy}(T \leq 400^\circ\text{C})$ 可知，火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} 並無折減；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；由 NIST 規範得知，火害後混凝土殘餘抗壓強度由圖 4-22 查得，約折減為原設計抗壓強度之 90%， f_c' 為 468 kgf/cm^2 。故依上述估算 CFBC 試體經 400°C 火害後之殘餘承載力仍為 983 tf，如表 4-5 所示。

火災階段最高溫度為 600°C 火害時，鋼板受溫約 600°C，混凝土受溫約 274°C 情況下，採用 Han*建議折減方程式 $f_{sy}(T) = f_{sy} [1 + 2.33 \times 10^{-4}(T-20) - 5.88 \times 10^{-7}(T-20)^2]$ ($400^\circ\text{C} < T$)，計算火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} ，折減為 3.9 tf/cm^2 ；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ ；由 NIST 規範得知，火害後混凝土殘餘抗壓強度可由圖 4-22 查得約折減為原設計抗壓強度之 70%， $f_c' = 364 \text{ kgf/cm}^2$ 。故依上述估算 CFBC 試體經 600°C 火害後之殘餘承載力折減為 839 tf，其殘餘承載力折減率為原標稱受壓承載力之 82%，如表 4-5 所示。

火害階段最高溫度來到 800°C 時，鋼板受溫約 800°C，混凝土受溫約 462°C 情況下，採用 Han*建議折減方程式 $f_{sy}(T) = f_{sy} [1 + 2.33 \times 10^{-4}(T-20) - 5.88 \times 10^{-7}(T-20)^2]$ ($400^\circ\text{C} < T$)，計算火害後鋼材殘餘降伏強度 F_{ys} ，折減為 3.4 tf/cm²；依 Edward 等人實驗結果，假設火害後鋼材的彈性模數維持原 $E_s = 2100$ tf/cm²；由 NIST 規範得知火害後混凝土殘餘抗壓強度由圖 4-22 查得，約折減為原設計抗壓強度之 50%，即 $f_c' = 260$ kgf/cm²。故依上述估算 CFBC 試體經 800°C 火害後之殘餘承载力折減為 710 tf，其殘餘承载力折減率為原標稱受壓承载力之 69%，如表 4-5 所示。

各式計算方式所得之 CFBC 殘餘承载力彙整如表 4-6 所示。由表中結果可知，就不同文獻所建議之火害後 CFBC 殘餘承载力分析方法所得結果大致相同，在 400°C 火害時，CFBC 殘餘承载力約可維持原標稱受壓承载力之 96% 以上。在 600°C 火害時，CFBC 殘餘承载力則可維持在 82% 至 89% 間。但在 800°C 火害時，CFBC 兩項材料皆明顯受到火害溫度影響，其殘餘承载力僅可維持原標稱受壓承载力之 70% 左右。此分析結果較實際之試驗結果保守。

表 4-5 火害後 CFBC 殘餘承载力分析(Han+NIST 法)

火害溫度 承载力	原設計 常溫 25°C	400°C		600°C		800°C	
	tf	tf	折減率 (%)	tf	折減率 (%)	tf	折減率 (%)
鋼骨部分之極限 承载力 (P_{ns})	735	735	0%	694	6%	600	18%
混凝土部分之極 限承载力 (P_{nrc})	531	478	10%	372	30%	266	50%
CFBC 標稱及殘 餘承载力 (P_n)	1023	983	4%	869	15%	710	31%
折減率%：1- (火害後之殘餘承载力/原標稱受壓承载力)							

(資料來源：本研究整理)

表 4-6 各分析計算法之 CFBC 殘餘承载力結果(tf)

分析方式 火害溫度	劉靖國	Han	劉靖國	Han
	李其忠	李其忠	NIST	NIST
常溫 25°C	1023	1023	1023	1023
400°C	1003 (折減 2%)	1003 (折減 2%)	983 (折減 4%)	983 (折減 4%)
600°C	833 (折減 14%)	912 (折減 11%)	839 (折減 18%)	869 (折減 15%)
800°C	705 折減(31%)	713 (折減 30%)	710 (折減 31%)	710 (折減 31%)

(資料來源：本研究整理)

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究製作實尺寸填充式箱型鋼柱混凝土試體，於箱型鋼管內灌注 SCC，並於箱型鋼管外表面施作防火被覆，此填充式箱型鋼管混凝土柱試體在施予固定載重比的軸向壓力後，隨即對試體進行升溫來模擬遭受火害的情況，並做相關設計與控制，使試體不致在高溫發生破壞，待試體冷卻至常溫後，再對試體進行加載試驗，藉以研究內含自充填混凝土箱型鋼柱於火害後之殘餘承载力。其結論如下：

1. 就文獻收集與分析可知，在火災的成長階段中，進行燃燒的房間室內空間平均溫度達 500°C 到 600°C ，閃燃時室內溫度則可高達 800°C 到 1000°C 。一般而言，完全發展階段之火場溫度可達 700°C - 1200°C 間。由以上數據論之，有披覆之鋼骨鋼筋混凝土複合構造，在一般火災中，其內部鋼材之火害溫度超越 800°C 之機會不大。故本研究選用火害溫度設定為內部鋼材之平均溫度 400°C 、 600°C 及 800°C 進行試驗。
2. 填充混凝土箱型鋼柱鋼材厚度為 12 mm 。鋼柱斷面尺寸為 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ，其長度為 3000 mm 。鋼柱之鋼降伏強度 $F_{ys}=4.14\text{ tf/cm}^2$ ；鋼彈性模數 $E_s=2100\text{ tf/cm}^2$ ；試驗時混凝土強度= 520 kgf/cm^2 。依據國內「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」，估算填充型箱型鋼柱試體之軸壓承载力為 1022.8 tf 。
3. 火害試驗中鋼材之平均溫度分別達 400°C (B1)及 600°C (B2)時，其柱試體尚處於膨脹階段，主要原因為鋼材受熱膨脹所造成。但鋼材均溫達 800°C (B3)時，因材質軟化，彈性模數已經大幅下降，導致柱試體於火害進行至約 100 分鐘時，已經呈現壓縮狀態。
4. 試體火害後在載重持續中自然冷卻，三支柱試體垂直壓縮位移分別增加變為 -0.1 mm 、 -3.4 mm 及 -21.0 mm 。此結果顯示，B1 試體應該受火害影響不大，其垂直位移幾乎已經回歸至火害前原狀態(-0.1 mm)。B3 試體則受火害影響較大，其垂直位移較火害前原狀態增加了 21.0 mm 。

5. 試體火害後之殘餘承载力試驗結果可知，試體 B1 火害後之抗壓軸力可達 1210.2 tf，估算之標稱受壓承载力還高，此結果顯示，雖然鋼板平均溫度達 400°C，但依文獻資料可知，其冷卻後強度不至於受損，但此時內部混凝土溫度僅約 90°C，依文獻資料可知，其冷卻後抗壓強度應該會升高，故導致此項試驗結果。此結果亦說明了規範建議值較保守，會有低估標稱受壓承载力之現象。
6. 試體 B2 抗壓軸力仍較規範估算之箱型鋼柱試體承载力高，約為 B1 結果之 96%。此時鋼板平均溫度達 600°C，其冷卻後強度已經會有小部分受損，但此時內部混凝土溫度平均約 275°C，其冷卻後抗壓強度可能會升高，故其整體殘餘承载力依舊可維持。
7. 試體 B3(鋼板平均溫度 800°C)之抗壓軸力則較大幅衰退，僅可達 969.2tf，若以鋼板平均溫度 400°C 之 B1 組為基準，則 B3 組之殘餘承载力僅剩約 80%，顯然已經受到火害之影響。
8. 就試驗試體之垂直位移探討之，可以發現 B1 及 B2 組在出現極限承载力時，其垂直位移值約在 33mm 左右，但 B3 組之垂直位移值僅約在 25mm 左右，明顯的已經受到火害之影響，顯現出較脆之性質，柱體破壞則皆為鋼柱產生局部挫屈而破壞。
9. 不同文獻所建議之火害後 CFBC 殘餘承载力分析方法所得結果大致相同，在 400°C 火害時，殘餘承载力約可維持原標稱受壓承载力之 96% 以上。在 600°C 火害時，殘餘承载力則可維持在 82%至 89%間。但在 800°C 火害時，其殘餘承载力僅可維持原標稱受壓承载力之 70%左右。此分析結果較實際之試驗結果保守。
10. 綜合以上討論與分析，填充混凝土箱型鋼柱在本研究設定之參數下，遭受火害時其鋼板平均溫度達 600°C 以上時，在冷卻後因為混凝土及鋼板其強度已經受損，故其整體鋼柱殘餘承载力將會下降，相對的，受到火害之影響，整體鋼柱變形行為顯現出較脆之特性。在鋼板平均溫度達 800°C 時，其殘餘承载力尚可維持在約 80%左右，但 800°C 試體

也出現軸向壓縮，此項火害後之變形將會產生殘餘應力於結構中，此現象對建築的功能與使用性應有影響，必須注意。

第二節 建議

根據火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之殘餘承载力研究執行過程中之發現，本研究提出下列具體建議。以下分別從立即可行建議及中長期建議加以列舉。

建議一

(建議事項)立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院科技部

火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之試體冷卻方式不同，鋼及混凝土在高溫後之殘餘應力會不同，往後研究中應考慮此項參數之變化。

建議二

(建議事項)長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部建築研究所

實際火災現場多半為強制冷卻，故建議內政部建築研究所防火試驗設備可加置強制冷卻設備，以應未來研究需求。

附錄一 內政部建築研究所-學者專家座談會

內政部建築研究所

學者專家座談會

專案計畫名稱：103 年度委託研究計畫「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承載力研究」第一次學者專家座談會

審查委員	專家意見內容
黃中和	<ol style="list-style-type: none"> 1. 載重比取 0.28 及鋼板厚度 16mm 或 12mm 取用原因為何?對試驗結果之適用範圍影響，請考慮。 2. 升溫曲線之定義與取用應明確。溫度為試體溫度或火焰加溫可能不同。 3. 試體冷卻方式為何?與實際火災現場可能不同，其影響，請考慮。 4. 混凝土小圓柱與鋼柱內混凝土性質是否相同，請考慮。(養護條件, 加溫試驗)
黃玉麟	<ol style="list-style-type: none"> 1. 純粹鋼板及純粹混凝土之受熱行為資料可能在此研究中有用。 2. 內部混凝土溫度測試方法及數據取得建議設置一致規定，適用於所有試體。
蔡文博	<ol style="list-style-type: none"> 1. 試體加熱時間會影響試體受熱力學行為，建議試體表面可噴塗防火漆，以延長試體加熱時間，提升試體內混凝土對試驗結果之影響。
呂東苗	<ol style="list-style-type: none"> 1. 試體加溫時間(持續)是否有限制，請考慮。 Ex. 加溫至 800°C 是否維持 800°C, 30 分鐘還是達到 800°C 時馬上停止加熱。 2. 試體加載，其上下端之邊界條件，會影響試體之有效長度 (KL)，如果認定是 hinge 支撐，可能與實際設定有些不同。
彭瑞麟	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可以考慮均勻加熱，單面加熱或局部區域加熱等對 SRC 試體乘載力之影響，以模擬火災現場實際情形。 2. 可以考慮自充填混凝土之 SRC 構件實際情況，即混凝土潛變、收縮等與鋼構結合情況在火害前的實際情況。
楊元吉	<ol style="list-style-type: none"> 1. 火災階段從初期→成長期→最盛期→衰退期 4 個階段進行。在到達最盛期有一閃燃現象發生(Hash over)。此現象發生時火場

審查委員	專家意見內容
	<p>溫度達最高，參考金屬熔點，鋁 660°C、銅 1083°C 實務上火災現場（指一般建築物）銅金屬甚少熔化，除非電氣短路，故火災現場溫度因空間內火載量（fire load），開口大小、天花板高度、可燃物性質等而受影響。一般經過一段時間悶燒後，溫度約在 500°C~800°C 左右。</p>
顏聰	<ol style="list-style-type: none"> 1. 混凝土溫度為關鍵因子，需知道鋼板溫度到達 400°C~800°C 時，其混凝土之平均溫度，以瞭解混凝土當時之殘餘強度。 2. 鋼板厚度是否影響整體火害後效果，現取厚度是否合宜，應有分析，較薄影響應較大考慮之。 3. 鋼板與混凝土結合面是否剝離或黏結在一起，將影響分析結果，實際結果可能會偏高。

內政部建築研究所

學者專家座談會

專案計畫名稱：103 年度委託研究計畫「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承載力研究」第二次學者專家座談會

審查委員	專家意見內容
顏聰	1. B3 試體之終止時均溫達 462°C，遠大於 B1 及 B2 者，宜討論說明之。 2. B3 火害後之混凝土溫度達 462°C，會降低其強度，影響火害後 B3 之承載強度，宜納入分析考慮之。
彭瑞麟	1. 可宜考慮不同測試溫度與試體強度間關係。並說明何種破壞模式。 2. 建議切開試驗後試體確認鋼材與內部混凝土失敗情況。
林建宏	1. 試體冷卻時間對混凝土強度之影響建議考慮。
林宜清	1. 在防火被覆功能受損情況下之承載力是否影響，請檢討。 2. 鋼柱火害之降溫速度與殘留應力相關性對承載力之影響如何。
呂東苗	1. 設定終止溫度 400°C、600°C、800°C，與考慮 400°C、600°C、800°C 之延時時間，結論可能會有不同的結果。 2. 經費許可時，可以考慮把破壞後試體切開檢查內部破壞情況，混凝土受損情況或純粹鋼板挫屈。
黃玉麟	1. 火害後是否可以繼續使用，強度只是因素之一，韌性也是重要原因，是否也應研究。 2. 鋼及混凝土在高溫後之殘餘應力可能不同，其互制影響是否可以加以討論。

附錄二 期初審查委員意見及回應一覽表

內政部建築研究所 103 年度「建築防火科技發展計畫」(二) 協同研究計畫第 3 案「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承載力研究」

評選委員發言單及廠商回應一覽表

項次	評選意見	廠商回應
1	服務建議書第 2 頁預期目標 3 與 4 提及完成及補充「RC」結構，請修正。第 8 頁表 4-1-1 有關試體規劃之火害溫度 400、600、800°C 之定義，請詳加說明。	與主辦單位協調後更正之。 CNS 規範中定義鋼柱構造火害溫度至 500°C 為破壞。而混凝土 400°C 為質變溫度。鋼柱在定載升溫下約至 1000°C 則幾近破壞。故設計規劃之火害溫度為 400、600、800°C。其詳細說明將敘述於成果報告中。
2	請與本所 103 度 SRC 委辦案密切整合，以發揮最大研究成果，俾利提出預期目標 2 之具體評估方式或準則。	將依委員建議與建研所 103 度 SRC 委辦案密切整合，於最後計畫書中整合研究成果，並呈現預期目標 2 之具體描述。
3	後續研究之簡報資料，建議以再生紙雙面列印，專家會議儘量以無紙化方式進行。	後續將採用委員之建議做處理並配合進行。
4	定載升溫試驗，其所施加之軸向壓力，主要依混凝土強度而定，服務建議書第 9 頁試體製作測試之自充填混凝土箱型鋼柱，與混凝土試體同時製作，並於 28 天後進行抗壓強度試驗，則如果試體強度不是預期強度，那麼混凝土箱型鋼柱試驗所要施加之軸向壓力是否要依試	研究團隊長期從事於混凝土研究，有保握混凝土強度可達到預期強度。28 天抗壓強度為設計強度，混凝土箱型鋼柱試驗同時，亦會再作混凝土抗壓試驗，所要施加之軸向壓力將依試體當時之抗壓強度計算。

	體之抗壓強度計算？建議將抗壓試體提前製作。	
5	服務建議書第 8 頁表 4-1-1 試體共 4 支，預算編列 3 支，請更正。	與主辦單位協調後更正之。
6	服務建議書第 12 頁研究步驟流程圖，分實驗研究與分析研究 2 道並聯系統，實際上分析研究與實驗結果整理有前後因果關係，請修正此流程圖。	實驗研究主要是對於試驗做一個規劃，並進行試驗達到我們的需求；而分析研究主要需與先前的研究資料做比較，來訂定試驗之參考因子及變數，試驗後再從實驗結果分析整理完成計畫成果，故為並聯系統。
7	火害後 SRC 構造承載力的影響因素甚多，只有少數試體數量是否具有代表性，請加以說明。	本研究以最少數試體，期望獲得較多成果。故必須參酌規範及先前研究成果，試驗參數取較保守面設計來評估結果。如混凝土強度對火害影響較小，故取市場上最常使用之 420 kgf/cm ² 。鋼柱尺寸則取 Eurocode 4 最長耐火時效 3 小時要求之最小值 400 mm，鋼板厚度則取 Eurocode 4 要求之 16mm 以下(取 12 mm)，火害定載升溫時之載重係數，亦參考國內現有結構之實際柱載重，規劃為 0.28，使盡量與現況相吻合。
8	建議依本研究特性與需求，妥為研訂試驗計畫，以利獲得具體的成果及最大效益。	將依委員建議研訂試驗計畫於成果報告中述明。其他補助說明如第 7 項。
9	本研究試驗費用建議妥為編列，以利計畫執行。	與主辦單位協調後，依主辦單位意見更正之。
10	經費編列請依議價決標日起，重新	與主辦單位協調後，依主辦單位意見

	修正研究費之內容。	更正之。
11	本研究試體規劃組數是否能統計出火害後之相關承載力、火害溫度及混凝土強度等因素，另外箱型鋼柱尺寸選用原則及依據為何，亦應進行評估，使能有效代表火害後之承載力分析，以符合計畫需求。	箱型鋼柱尺寸主要是參酌 Eurocode 4 提供的表列數據，再依先前研究成果訂定之。其他補助說明如第 7 項。本研究以最少數試體，期望獲得較多成果。故試驗參數取較保守面設計來評估結果。
12	請說明本研究與本所先前相關研究之差異及關聯性。	建研所先前相關研究主要在探討 SRC 柱耐火時效及火害下之破壞行為。本研究則著重於火害後其殘餘承載力及相關行為探討。
13	有關本研究結果供現行鋼筋混凝土結構物耐火性能設計與評估參考之途徑與方式，請說明。	在現有規範下所設計之含自充填混凝土箱型鋼柱，在火害後之殘餘承載力及相關行為評估，如不同程度火害下，構件是否可修復補強或原狀再使用等，本研究成果將以較保守面提供 SRC 柱火害後之破壞行為，供現行鋼筋混凝土結構物耐火性能設計與評估參考。

附錄三 期中審查委員意見及回應一覽表

內政部建築研究所 103 年度「建築防火科技發展計畫」(二) 協同研究計畫第 3 案「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承載力研究」

期中審查委員意見及回應一覽表

項次	委員意見	廠商回應
1	報告書第 63 頁 Pnrc 之計算，請說明鋼筋承擔部分。	本研究鋼柱內並無配筋。
2	報告書內容未見試驗結果與討論，請於期末報告時補充。	依委員建議將更具體描述於成果報告中。
3	依據 EC4 規定，於試體留有 $\phi 20$ mm 開孔，其實驗後結果將與工程實務上鋼柱表面沒有確實性開孔不同，而且本案鋼板表面還有防火被覆，火害將使混凝土氣化壓力之消散變小，因此試驗結果於工程實務使用時須要修正，如果能提供實驗結果及分析數據供參考則更為理想。	本研究試體之鋼板與第二案是用同一批材料，鋼板表面有孔，是參考規範要求而製作，和國內業界使用不同，未來可加以探討。
4	本研究成果將可提供工程界或業界有關 CFBC 火害後殘餘程度的評估與折減比例。	謝謝委員之正面評論。
5	與第 2 案同，CFBC 灌漿時應注意，不要損及熱電耦，以免影響量測。	混凝土灌漿時，已注意讓灌漿之 PVC 管伸到柱最底下，以避免破壞熱電耦。
6	預估 CFBC 火害前與火害後的極限強度為何，請詳加說明。	依委員建議，將火害後極限強度說明於成果報告中。
7	以 SCC 填充箱型鋼柱 4 支試體 A1 及 B1-B3，試體與另一計畫案相同，惟試	採用常溫試體 A1 試驗之目的是作為對比用。謝謝委員之正面評論。

	驗方法有差別。A1 不做火害試驗，B1-B3 分別加至 400、600、800°C 後，冷卻後再繼續做到破壞為止，以求其極限破壞載重，並與 A1 的結果做比較，目前進度正常。	
8	如果實驗鋼板溫度達 800°C 之機會不高的話，建議降低一些為宜(參考第 45 頁之說明)，如改為 300、500、700°C 等。	謝謝委員之建議。本研究仍維持 400、600、800°C 進行試驗。
9	本研究與第 2 案“火害下內灌混凝土鋼管柱承重能力試驗與分析”一併進行，是否使用同一批試體？	是使用同一批試體。
10	簡報第 31 頁，內部鋼材所指為何？另報告書第 32 頁，完成防火漆包覆柱身(防火設計約 1 小時)之目的為何，請詳加說明。	為符合實際現況，將以防火漆包覆柱身。另為求實驗時鋼板溫度能達 800°C，規劃時只選用 1 小時之防火披覆，以避免實驗過程過久。
11	本研究與湯教授主持之計畫共同製作試驗試體，以純 SCC 柱內灌漿為主，目前進度正常。	謝謝委員之正面評論。
12	目前所採試體雖稱為「實尺寸」，仍與實際之柱尺寸相差甚大，其尺寸效應有進一步探討之需要。因內灌混凝土受火害程度是由外向內遞減，大尺寸柱之柱心部分受害較低，成果應有所不同。	本研究採用小試體較為保守，未來可探討尺寸效應之效果。

附錄四 期末審查委員意見及回應一覽表

內政部建築研究所 103 年度「建築防火科技發展計畫」(二) 協同研究計畫第 3 案「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承載力研究」

期末審查委員意見及回應一覽表

項次	委員意見	廠商回應
1	報告書內容中，部分圖說不清楚，請修正。	將依委員建議重新檢視圖說，並修正於成果報告中。
2	試驗軸壓比採用 0.28 是否有特別之參考來源，請說明。另外，請清楚地定義軸壓載重比。	已經說明於第三章第二節中，但依委員建議將更具體描述於成果報告中。
3	請說明 P_n 是採用 F_{yn} 或 F_{ya} 計算求得，建議採用實際材料強度計算。	將採用委員之建議依實際材料強度計算 P_n 。
4	報告書圖 4-18 有一組 200°C 的試體，請說明其資料之來源。	已經說明於第四章第二節最後一段文字中。
5	本研究實驗規劃與量測結果極具工程參考意義。	謝謝委員之正面評論。
6	本研究指出 800°C 試體在火害後有強度折減之情況，工程師須加注意。但 800°C 試體也出現軸向壓縮的現象，此對建築的功能與使用性應有影響，建議針對此點稍加說明。	將依委員建議，將火害後對建築的功能與使用性影響，說明於成果報告中。
7	本研究是探討箱型鋼柱火害後的殘餘承載力，結構體系由柱、梁、板構成，相關範圍尚有許多課題，建議建研所可另案研究。	謝謝委員之建議。
8	有關殘餘承載力和現行耐震評估的相關性，建議建研所可另案委託研究，尤	謝謝委員之建議。

	其是火害後材料的強度對構件韌性迴圈應有相當程度之影響。	
9	本研究尚無常溫下含自充填混凝土箱型柱之實際強度，現採用標稱值做為折減比例之基準，有高估火害後強度之疑慮，請加以考量。	完成常溫實驗結果後，再評估並做比較於成果報告中。
10	現地火場溫度甚難評估，若無火場溫度，如何預估殘餘強度，請說明。	謝謝委員之意見。若無火場溫度，如何預估殘餘強度，牽涉因子甚多，並非本研究範圍。
11	建議加入火災後箱型柱韌性比，以確保其耐震性能。	火災後箱型柱韌性比評估確實重要，但非本研究範圍。
12	建議補充鋼板及混凝土溫度歷時曲線。	依委員建議，將補充鋼板及混凝土溫度歷時曲線於成果報告中。
13	本研究於火害實驗後，是否有檢查鋼柱之破壞狀況？	火害實驗後鋼柱之破壞狀況已經說明於第四章第二節(二之 2 段)文字中。但將依委員建議，將更詳細之破壞狀況說明於成果報告中。
14	Serviceability 可做後續探討。	謝謝委員之建議。
15	本研究尚缺常溫結果，請儘速完成實驗。	謝謝委員之意見，將儘速完成實驗。
16	請補繪試驗過程各試體之爐溫曲線，與鋼柱表面(防火被覆內)之溫度變化曲線。	依委員建議，將補充爐溫曲線與鋼板及混凝土溫度歷時曲線於成果報告中。
17	本研究實驗之 SRC 柱試體共 4 支，內部充填 SCC，表面有防火被覆，由預期成果顯示，本期結果將提供鋼筋混凝土建築結構之耐火性能設計與評估之依據，要納入如此多之參數，僅用 4 支試	謝謝委員之建議。

	體所得結論要達到實務應用之參考，恐有不足，建議本研究能持續進行。	
18	請在報告書結論3加註試驗發生軸向變形為膨脹或壓縮之時間。	將依委員之建議加註鋼柱膨脹或壓縮之發生時間。
19	請補充資料說明鋼柱內混凝土溫度分佈情形及其抗壓強度，對混凝土斷面強度貢獻之折減情況。	將依委員建議，補充說明鋼柱內混凝土溫度分佈及對混凝土強度之折減情況於成果報告中。
20	報告書第45頁表3-2有關鋼板材料有4種成分，是否表示本研究實驗4支鋼柱不是用同一批材料所製造，請說明。	鋼板材料僅有一批，但取四片式樣進行材料試驗，故有四種結果。
21	有關報告書第五章結論與研究將與本研究之評核相關，請針對預期成果與實驗結果扼要說明，並與承辦單位確認。	將修正於成果報告中，並與承辦單位確認。
22	報告書格式請依照本部規定格式撰寫。	謝謝指正，成果報告書格式將依照規定格式撰寫。
23	請補充火害後箱型鋼柱承重殘餘能力評估方法及防火被覆材料資料(含被覆厚度)。	將補充火害後箱型鋼柱承重殘餘能力評估方法及防火被覆材料資料於成果報告中。
24	請說明報告書第77頁圖4-18混凝土火害後強度如何獲得，及400°C以下較常溫强度高之原因為何？	將再詳細說明圖4-18混凝土火害後強度之試驗結果原因於成果報告中。

參考文獻

- 【1】 陳弘毅，「火災學」，鼎茂圖書，2008年。
- 【2】 內政部消防署，「火災搶救初級班訓練教材」，2013年。
- 【3】 黃育祥，「以地板縱火燃燒試驗改善火場調查模擬之研究」，國立台科技大學建築研究所，博士論文，2010年。
- 【4】 內政部營建署，「建築材料與建築設備之分類系統」，財團法人台灣營建研究中心研究報告，1982年。
- 【5】 陳海曙，「建築防火安全設計學」，茂榮書局，1998年。
- 【6】 行政院災害防救委員會，「高層建築物建築及消防安全管理」，防災辦公室報告，2004年。
- 【7】 陳建忠，「高層建築物火災特性與中間層避難空間設置原則」，建築研究簡訊第59期，2008年。
- 【8】 廖茂為，「火災調查與鑑定實務」，鼎茂圖書，2012年。
- 【9】 內政部消防署，火災原因調查鑑定訓練班第十八期訓練教材，2013年。
- 【10】 蔡佐良，「火害延時與溫度對混凝土強度之綜合影響—溫時分析法」，中華民國第四屆結構工程研討會論文集(一)，第547~554頁，1998年。
- 【11】 楊旻森、陳舜田、沈進發，「軸壓力對混凝土受火害後之力學性質之影響」，中華民國第四屆結構工程研討會論文集(一)，第539~546頁，1998年。
- 【12】 賈艷東、田傲霜、張斌、許傳轟、李季，「不同時間高溫後混凝土性能的試驗研究」，「遼寧工程技術大學學報」，第25卷，第六期，第864-866頁(2006)。
- 【13】 李其忠，「鋼骨鋼筋混凝土構造火害後材料性質之研究—以自充填混凝土為例(3/5)」，內政部建築研究所研究報告，2010。
- 【14】 CNS 12514，「建築物構造部分耐火試驗法」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗局，2010。
- 【15】 ASTM E119, “Standard Tests Methods for Fire Tests of Buildings Construction and Materials,” ASTM, 2008.
- 【16】 張雲妃，「火害後雙軸彎曲鋼筋混凝土柱之試驗與分析」，國立成功大學建築學系博士論文，2006。
- 【17】 阮秋慎，「鋼結構抗彎接頭高溫下結構行為之數值模擬」，國立成功大學，碩士論文，2010年。
- 【18】 楊國珍、葉禎輝，「鋼結構火害安全檢測與評估補強」，鋼結構會刊第15期，2003年。
- 【19】 林英俊，「高強度混凝土梁火害後撓曲行為之研究」，國科會專題研究計畫報告，1992年。
- 【20】 劉靖國，「高強度鋼筋混凝土梁火害後撓曲行為之研究」，國立台灣工業技術學院，碩士論文，1992年。
- 【21】 Lie, T.T. and Kodur, V.K.R. (1996). “Fire Resistance of Steel Columns Filled with Bar-Reinforced Concrete,” ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 1, pp. 30-36.
- 【22】 Kodur, V.K.R., and Sultan, M.A. (1998). “Structural Behavior of High Strength Concrete Columns Exposed to Fire,” International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete, Sherbrooke, QC, pp.217-232.
- 【23】 Park, S. H., Chung, K. S. and Choi, S. M. (2007), “A study on failure

- prediction and design equation of concrete filled square steel tube columns under fire condition”, *Steel Structures*, 7, 183-191.
- 【24】 Han, L. H., Yang, H., and Cheng, S. L. (2002). “Residual strength of concrete filled RHS stub columns after exposure to high temperatures.” *Adv. Struct. Eng.*, 5(2), 123-134.
- 【25】 Han, L.H., Zhao, X.L., Yang, Y.F., and Feng, J.B. (2003), “Experimental study and calculation of the fire resistance of concrete-filled hollow steel columns,” *J Struct Eng, ASCE*;129(3):346–356.
- 【26】 Han, L.H., Yao, G.H., Zhao, X.L. (2005), “Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC).” *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 1241-1269.
- 【27】 Kim, D.K., Choi, S.M., Kim, J.H., Chung, K.S., and Park, S.H. (2005), “Experimental study on fire resistance of concrete-filled steel tube column under constant axial loads,” *Steel Structural*, 5(4), 305-313.
- 【28】 Chung, K., Park, S., Choi, S. (2008), “Material effect for predicting the fire resistance of concrete-filled square steel tube column under constant axial Load”, *Journal of Constructional Steel Research*, 64(12), 1505-1515.
- 【29】 Lu, H., Zhao, X.L., Han, L.H. (2009), “Fire behaviour of high strength self-consolidating concrete filled steel tubular stub columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 1995-2010.
- 【30】 Espinos, A., Romero, M. L. and Hospitaler, A. (2010), “Advanced model for predicting the fire response of concrete filled tubular columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 1030-1046.
- 【31】 陳誠直、趙文成、林政億及吳易宸(2010),「含混凝土箱型鋼柱火害下軸向受力行為之研究」,內政部建築研究所委託研究報告。
- 【32】 陳誠直、林政億、柯宗滕和胡耀光(2012),「包覆填充式箱型鋼管混凝土柱火害行為研究」,內政部建築研究所委託研究報告。
- 【33】 陳建忠、邱耀正(2007),「鋼結構 H 型梁-箱型柱接頭之火害行為研究」,內政部建築研究所研究報告。
- 【34】 李鎮宏、蔡銘儒(2008),「鋼結構梁柱組合火害行為數值分析與驗證研究」,內政部建築研究所自行研究成果報告。
- 【35】 李鎮宏(2009),「火災熱傳遞與鋼結構安全性能評估之分析研究」,內政部建築研究所自行研究成果報告。

建築防火科技發展計畫(二)協同研究計畫

第 3 案「火害後含自充填混凝土箱型鋼柱之承载力研究」

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：何明錦、陳豪吉、湯兆緯、彭靖芳、陳冠豪

出版年月：103 年 12 月

版次：第 1 版

ISBN：978-986-04-2785-1