

# 鋼骨鋼筋混凝土高溫材料性質之研究

## 內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 100 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)

100301070000G1002

## 鋼骨鋼筋混凝土高溫材料性質之研究

受委託者：國立交通大學

研究主持人：陳誠直 教授

協同主持人：趙文成 教授

研究助理：林家毅 黃政勳 林政億

## 內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 100 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

表次.....	III
圖次.....	V
摘 要.....	VII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景 .....	1
第二節 研究目的.....	1
第三節 研究方法.....	2
第四節 規範與文獻回顧 .....	2
第二章 鋼材與混凝土材料之高溫性質 .....	11
第一節 材料高溫試驗方法 .....	11
第二節 鋼材高溫性質 .....	13
第三節 混凝土高溫性質 .....	20
第三章 鋼骨鋼筋混凝土柱斷面溫度分佈之實驗 .....	35
第一節 試驗規劃.....	35
第二節 試體規劃.....	36
第三節 實驗裝置.....	45
第四節 實驗步驟.....	46
第四章 實驗結果與討論 .....	49
第一節 高溫試驗各測點溫度歷時 .....	49
第二節 高溫試驗時各試體軸向變形及柱端相對總轉角 .....	81

第三節	高溫試驗後各試體破壞模式 .....	83
第四節	不同混凝土強度溫度歷時比較 .....	88
第五節	不同斷面形狀溫度歷時比較 .....	91
第六節	不同受火面溫度歷時比較 .....	94
第五章	斷面溫度分佈之熱傳分析模式 .....	97
第一節	熱傳分析之驗證 .....	97
第二節	鋼骨鋼筋混凝土柱之熱傳分析 .....	102
第三節	實尺寸與縮尺寸 SRC 柱斷面溫度分佈之比較 .....	119
第六章	結論與建議 .....	121
第一節	結論.....	121
第二節	建議.....	122
附錄一	審查意見與答覆 .....	124
附錄二	結構耗能概論 .....	139
參考書目	.....	141

## 表次

表 1-1 承重柱耐火規定與評定 .....	3
表 2-1 比較 SN 490B、SM400、A572 Gr.50 與 Eurocode 3 之鋼材受溫度影響力學性質折減係數 .....	14
表 2-2 Eurocode 4 高溫下混凝土抗壓強度折減與對應之應變.....	21
表 2-3 高溫下混凝土之力學性質折減係數 .....	23
表 3-1 試體規劃 .....	37
表 4-1 試體 SN4 試驗結果 .....	52
表 4-2 試體 SN4 各測點溫度歷時 .....	53
表 4-3 試體 CN4 試驗結果 .....	56
表 4-4 試體 CN4 各測點溫度歷時 .....	57
表 4-5 試體 SN3 試驗結果 .....	60
表 4-6 試體 SN3 各測點溫度歷時 .....	61
表 4-7 試體 CN2 試驗結果 .....	64
表 4-8 試體 CN2 各測點溫度歷時 .....	65
表 4-9 試體 SH4 試驗結果 .....	68
表 4-10 試體 SH4 各測點溫度歷時 .....	69
表 4-11 試體 CH4 試驗結果 .....	72
表 4-12 試體 CH4 各測點溫度歷時 .....	73
表 4-13 試體 SH3 試驗結果 .....	76
表 4-14 試體 SH3 各測點溫度歷時 .....	77
表 4-15 試體 CH2 試驗結果 .....	80
表 4-16 試體 CH2 各測點溫度歷時 .....	81
表 4-17 高溫試驗時各試體軸向變形及柱端相對總轉角 .....	82





## 圖次

圖 1-1 軸壓力 0.2 高性能混凝土試體中心升溫曲線之影響 .....	6
圖 2-1 示差掃描熱量分析儀(DSC) .....	11
圖 2-2 Eurocode 3 高溫下鋼材之力學性質折減係數.....	15
圖 2-3 Eurocode 3 高溫下鋼材之應力應變關係.....	15
圖 2-4 Eurocode 2 高溫下熱軋鋼筋之應力應變關係.....	16
圖 2-5 高溫下鋼材之熱傳導係數比較.....	17
圖 2-6 高溫下鋼材之比熱 .....	18
圖 2-7 高溫下鋼材之熱伸長比較.....	20
圖 2-8 Eurocode 4 高溫下混凝土之抗壓強度折減係數.....	21
圖 2-9 Li and Purkiss 高溫下混凝土之彈性模數折減係數.....	24
圖 2-10 Eurocode 2 高溫下混凝土之力學性質折減係數.....	24
圖 2-11 Eurocode 4 高溫下混凝土之熱傳導係數上下限.....	25
圖 2-12 高溫下普通混凝土之熱傳導係數.....	27
圖 2-13 Eurocode 2 高溫下混凝土之熱傳導係數.....	28
圖 2-14 Kodur 高溫下高強度混凝土之熱傳係數比較.....	28
圖 2-15 Eurocode 4 高溫下混凝土之比熱.....	29
圖 2-16 高溫下高強度混凝土之熱容量比較.....	32
圖 2-17 Kodur 高溫下高強度混凝土之熱膨脹係數.....	34
圖 3-1 柱受火面示意圖 .....	36
圖 3-2 鋼骨設計圖 .....	38
圖 3-3 鋼骨鋼筋混凝土柱斷面示意圖 .....	38
圖 3-4 鋼柱設計圖 .....	39
圖 3-5 箍筋配置圖 .....	39
圖 3-6 方形 SRC 邊柱熱電偶線配置圖 .....	40
圖 3-7 方形 SRC 中間柱熱電偶線配置圖 .....	41
圖 3-8 圓形 SRC 邊柱熱電偶線配置圖 .....	42
圖 3-9 圓形 SRC 中間柱熱電偶線配置圖 .....	43



圖 3-10 柱試體施工照片 .....	44
圖 3-11 小型複合高溫爐 .....	45
圖 3-12 試驗設置示意圖 .....	45
圖 3-13 柱頂端位移計架設 .....	46
圖 3-14 標準加熱溫度-時間曲線 .....	47
圖 4-1 試體 SN4 測點溫度歷時 .....	51
圖 4-2 試體 CN4 測點溫度歷時 .....	55
圖 4-3 試體 SN3 測點溫度歷時 .....	59
圖 4-4 試體 CN2 測點溫度歷時 .....	63
圖 4-5 試體 SH4 測點溫度歷時 .....	67
圖 4-6 試體 CH4 測點溫度歷時 .....	71
圖 4-7 試體 SH3 測點溫度歷時 .....	75
圖 4-8 試體 CH2 測點溫度歷時 .....	79
圖 4-9 試體 SN4 與試體 SH4 高溫試驗後外觀變化 .....	84
圖 4-10 試體 CN4 與試體 CH4 高溫試驗後外觀變化 .....	86
圖 4-11 試體 SN3 與試體 SH3 高溫試驗後外觀變化 .....	87
圖 4-12 試體 CN2 與試體 CH2 高溫試驗後外觀變化 .....	88
圖 4-13 試體 SH4 與 SN4 測點溫度歷時比較 .....	91
圖 4-14 試體 SN4 與 CN4 測點溫度歷時比較 .....	93
圖 4-15 試體 SH4 與 SH3 測點溫度歷時比較 .....	96
圖 5-1 四面受火之有限元素分析模型 .....	98
圖 5-2 三面受火之有限元素分析模型 .....	99
圖 5-3 分析四面受火試體加溫一小時之斷面溫度分佈 .....	100
圖 5-4 分析三面受火之試體加溫一小時斷面溫度分佈 .....	100
圖 5-5 四面受火試體試驗值與分析值比較 .....	101
圖 5-6 三面受火試體試驗值與分析值比較 .....	102

## 摘要

關鍵詞：鋼骨鋼筋混凝土、火害、溫度分佈

### 一、研究緣起

鋼骨鋼筋混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)結構結合鋼與鋼筋混凝土的優點，包覆型SRC構造因有混凝土包覆是為良好之防火被覆。結構材料於高溫下將折減其力學性質，構件斷面溫度分佈將影響火害中構件之行為，深入探討SRC構件於高溫下斷面溫度分佈與行為有其必要性。

### 二、研究方法與過程

本研究首先將進行收集鋼材與混凝土材料之高溫熱性質試驗，包括熱傳導、比熱、熱膨脹等試驗。鋼骨鋼筋混凝土柱之斷面溫度分佈將進行8支柱試體實驗，參考相關規範進行試驗。實驗參數包括不同斷面形狀(方型與圓形)、受熱面以及混凝土強度。再者，利用有限元素分析軟體ABAQUS，模擬柱試體斷面溫度分佈情形，並與實驗數據比對，以確立分析模型的正確性。

### 三、重要發現

圓形柱相對於方型柱於高溫試驗中皆產生嚴重地爆裂行為，推測柱斷面形狀對混凝土結構之耐火性能有重要地影響。較高強度之混凝土柱試體有較高的升溫趨勢，但影響並不顯著。不同受火面影響柱試體斷面溫度之分佈，試體會因不均勻之溫度分佈使柱試體膨脹產生撓曲現象。鋼骨於高溫試驗過程中皆較鄰近之混凝土測點溫度高，可知包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱中心升溫主要由鋼骨傳入熱能，影響斷面溫度之分佈。此外，在混凝土保護層未剝落或爆裂的情況下，本研究之有限元素熱傳分析模型能合理預測斷面溫度分佈趨勢。

### 四、主要建議事項

建議一

實尺寸包覆十字鋼骨之鋼筋混凝土柱高溫耐火性能研究:立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院國家科學委員會

鋼骨鋼筋混凝土柱之耐火性能國內鮮少有實尺寸研究成果，本研究僅進行縮小尺寸試體之試驗，斷面溫度分佈是否受到尺寸效應的影響尚未十分明朗，故可就本次實驗規劃進一步一系列實驗探討其行為，如載重比、偏心載重、保護層厚度、鋼骨比等參數了解其耐火性能。

### 建議二

實尺寸鋼骨鋼筋混凝土柱之火害殘餘強度之研究：長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院國家科學委員會

台灣屬環太平洋火山地震帶，能夠抵抗地震力是設計的重要考量，柱構件承受火災後，強度大減，到底還保有多少抵抗地震力的能力是建築物決定拆除或補強的重要因素，可進行相關殘餘強度之數值模擬與實驗作探討。

### 建議三

營建材料高溫材料熱學性質之研究：長期性建議

主辦機關：行政院國家科學委員會

協辦機關：內政部建築研究所

台灣的結構物多屬混凝土及鋼兩種材料，此兩種材料受火災高溫破壞後，其熱學性質如熱傳導係數及比熱係數均隨著溫度上升而改變，而這兩種熱學性質對火害中結構物之溫度場分佈有著決定性影響，國內對高溫材料熱學性質的研究只有少數零星的研究，未累積足夠多的數據。未來可參考本研究所提出之建議，進行一系列常用鋼材及混凝土之高溫材料熱性質試驗，建立本土之高溫材料熱學性質公式，有助了解火害中之結構行為。



## 第一章 緒論

### 第一節 研究緣起與背景

內政部消防署統計資料顯示，民國98年台灣地區一年發生2621件火災，造成413人傷亡與7億6千多萬的財物損失，由以上數據可知，火災對於生命財產造成相當嚴重的傷害，因此，應當正視結構於火害下之行為。近一、二十年來大型建築結構務遭受火害之案例不少，美國911事件世貿大樓之倒塌肇因於大火，與國內東帝士大樓之嚴重火害，使人們再次關注構造的耐火能力。

鋼骨鋼筋混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)結構因優良的行為已逐漸受到重視及採用，SRC結構為複合結構，結合鋼骨(Steel, S)與鋼筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)兩種材料，結合鋼與鋼筋混凝土的優點。鋼骨可增加構件之韌性，而鋼骨受混凝土包覆，延緩鋼骨因受壓而產生挫屈行為。SRC構件勁度較純鋼骨大，可有效增加建築物之側向勁度，降低建築物側向位移；相同設計強度下，使用SRC柱可減小構件之斷面，增加可用空間。包覆鋼骨的混凝土亦可為良好之防火被覆。此外，永續發展為目前國內外政府之重要政策，建築產業消耗了大量的能源，並產生了許多的營建廢物與排放了大量的二氧化碳。建築產業於永續性扮演了重要的角色。由研究指出包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱有最小的二氧化碳排放量且耗能最少，而最有利於永續性，詳可見於附錄二。

結構材料於高溫下將折減其強度，構件於無法承受荷重時可能造成建築局部或整體崩塌。包覆型SRC構造因有混凝土包覆於鋼骨與鋼筋外，其防火時效除考慮鋼筋保護層外亦需考慮鋼骨的保護層，況且於火場溫度場之分佈差異與斷面溫度分佈將影響火害中之結構行為，深入探討SRC柱構件高溫下之行為有其必要性。

### 第二節 研究目的

本研究目的主要探討鋼骨鋼筋混凝土柱於火害中斷面溫度分佈之行為，研究內容包括：(1) 鋼骨鋼筋混凝土柱在不同斷面(方型與圓形)、受熱面、混凝土強度之斷面溫度分佈；(2) 進行鋼材、混凝土等材料之熱傳導、比熱等高溫熱性質

研究；(3) 建議本研究中相關材料測試方法，供國內測試標準研擬之參考依據。

### 第三節 研究方法

鋼骨鋼筋混凝土柱之斷面溫度分佈擬進行8支SRC柱試體高溫實驗，參考規範設計試體，模擬火災高溫情境依照我國CNS12514「建築物構造部份耐火試驗法」相關規定進行試驗研究，試體設計則依造我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」設計。

再者，本研究利用有限元素分析軟體ABAQUS，模擬鋼骨鋼筋混凝土柱構件受軸向載重與實驗加溫爐之加溫曲線，探討試體火害中之斷面溫度分佈情形，並與實驗量測溫度數據比對，確立分析模型的正確性，以發展SRC構件火害中之熱傳評估模式。

### 第四節 規範與文獻回顧

耐火試驗國內外已有相關的規範，並有諸多文獻研究，以下對主要規範與重要相關文獻簡述之。

#### 壹、國內外耐火試驗規範

對於軸向柱構件之耐火試驗規範，包括 ISO 834 (International Organization for Standardization)、英國標準 BS 476 (British Standards Institution) 及美國 UL 263 (Underwriters Laboratories Inc.)。我國耐火試驗為 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」。

#### ISO 834 與 CNS 12514 規範

國際標準組織 ISO 834 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(°C)、t 為試驗經過時間(min)；柱試體受熱長度，並無要求。對於柱之性能基準評定以構件承重能力判別，其規定承重構造破壞條件為超過最大軸向壓縮量(C)， $C = h/100$  (mm)；與超過最大軸向壓縮速率(dC/dt)， $dC/dt = 3h/100C$  (mm/min)。

我國 CNS 12514 規範主要參考 ISO 834 規範修訂。對於上述各項規定，除柱

試體受熱長度至少 3 公尺之規定與 ISO 834 規範不同，其餘皆相同。

### BS 476 規範

BS 476 規範之標準升溫曲線為  $T = 345\log_{10}(8t+1)+20$ ；柱試體受熱長度要求至少 3 公尺；以承重能力規定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。

### UL 263 規範

UL 263 規範之加熱條件要求 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。對於試體受熱長度要求柱長至少 2.7 公尺，而具防火被覆之柱長至少 2.4 公尺。關於性能基準評定，其柱試體乃根據不同試驗分類來要求；但具防火被覆之柱試體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。

相關耐火規定與評定之比較如表 1-1 所示。由表 1-1 得知試體受熱長度，僅 ISO 834 規範無要求；載重試驗破壞基準，僅 UL 263 規範以有、無防火被覆之試體分別規定。

表 1-1 承重柱耐火規定與評定

	CNS 12514	ISO 834	BS 476	UL 263
試體受熱長度	≥ 3 m	無要求	≥ 3 m	≥ 2.7 m (具防火被覆之柱長 ≥ 2.4 m)
載重試驗破壞基準	(1) 最大軸向壓縮量超過 h/100 (2) 最大軸向壓縮速率超過 3h/1000	(1) 最大軸向壓縮量超過 h/100 (2) 最大軸向壓縮速率超過 3h/1000	(1) 最大軸向壓縮量超過 120 mm (2) 最大軸向壓縮速率超過 25 mm/min	以不同試驗分類要求。 (具防火被覆試體採熱電偶測點溫度超過 649°C 或平均溫度超過 538°C)

(資料來源：本研究整理)

## 貳、鋼骨鋼筋混凝土規範

我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」(SRC 規範)適用範圍是以鋼骨鋼筋混凝土為主所建造的一般建築物，

對於鋼骨比規定，一般要求若試體斷面鋼骨比大於全斷面積之 2%，則參照 SRC 規範設計；反之，小於 2%，則依據「混凝土工程設計規範與解說」設計試體。對於包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱之鋼骨斷面肢材寬厚比(b/t)規定，塑性設計斷面須小於規範 3.4.3 表規定  $\lambda_{pd}$ ，主筋、箍筋、混凝土保護層厚度均應符合規範第 4.3、4.4 及 4.5 節之規定，鋼骨規定降伏強度不宜大於 3520 kgf/cm<sup>2</sup>，鋼筋降伏強度不宜大於 5600 kgf/cm<sup>2</sup>，混凝土規定抗壓強度不宜小於 210 kgf/cm<sup>2</sup>。

對於柱試體設計受壓強度  $\phi_c P_n$  採用「強度疊加法」， $\phi_c P_n = \phi_{cs} P_{ns} + \phi_{crc} P_{nrc}$ ；其中  $\phi_{cs}$  為鋼骨部分強度折減係數(0.85)； $P_{ns}$  為鋼骨部份標稱受壓強度； $\phi_{crc}$  為鋼筋混凝土部份之強度折減係數(包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱為橫箍為 0.65，螺箍筋為 0.7)； $P_{nrc}$  為鋼筋混凝土部份標稱受壓強度。

## 參、高溫材料性質實驗

Arioz (2007) 探討混凝土於高溫下的物理變化。混凝土試體暴露於 200~1200°C 高溫後，測定重量損失與抗壓強度試驗。高溫後混凝土表面，600°C 時表面裂縫為肉眼可見，並且隨著溫度上升到 1000°C 裂縫趨明顯。混凝土受到 1200°C 高溫後完全地分解。升溫時重量緩慢地減少一直持續到 800°C，在超過 800°C 時試體重量急速減少。由實驗結果可知，水灰比和骨材種類對混凝土重量損失的影響並不明顯，矽質骨材混凝土之相對強度受溫度影響較顯著。

Kodur (2010) 等人探討 ASCE 與 Eurocode 高溫下鋼材之力學與熱學推估公式，並與其他文獻之實驗數據互相比較其力學與熱學性質。結果顯示，低於 700°C 時美國(ASCE)與歐洲規範(Eurocode 3)高溫熱性質相差不大，但高於 700°C 則有顯著的差異。另指出高溫下鋼材潛變對於構件耐火性有顯著的影響，且 Eurocode 3 由於考慮的高溫潛變的影響，故 Eurocode 高溫下應力應變曲線較 ASCE 符合鋼材高溫之行為。



Kodur (2003)以矽質與石灰質骨材之高強度混凝土試體進行高溫材料熱性質試驗，包括熱傳導、比熱、熱膨脹與燒失量。實驗參數包含骨材種類和鋼纖維的添加量，並利用實驗數據得到高溫熱性質公式。其中熱傳導係數將隨溫度升高遞減；比熱則是超過 600°C 會有顯著變化；熱膨脹隨溫度升高而遞增；實驗結果顯示加入鋼纖維對於混凝土之高溫熱性質沒有明顯影響，但骨材種類對混凝土高溫熱性質有顯著影響，此外石灰質骨材 HSC 柱表現出較矽質骨材 HSC 較佳之耐火性。

林銅柱(1995)於「高性能混凝土耐火性能之探討」探討過以下實驗，混凝土試體在管狀爐加溫過程中受軸向壓力試體與未受軸向壓力試體，在加溫過程中有其差別如圖 1-1 所示，在溫度 800 °C 及軸壓力  $0.2f_c'$  時，試體中心升溫曲線比未施加壓力之試體有偏高的趨勢，且在試體中心達到最高溫度時所需加溫延時有縮短的現象。文獻推測施加軸向壓力，混凝土會因壓密作用使混凝土的熱傳導速率有增快的趨勢，可知混凝土加載與否會影響其熱傳性質。

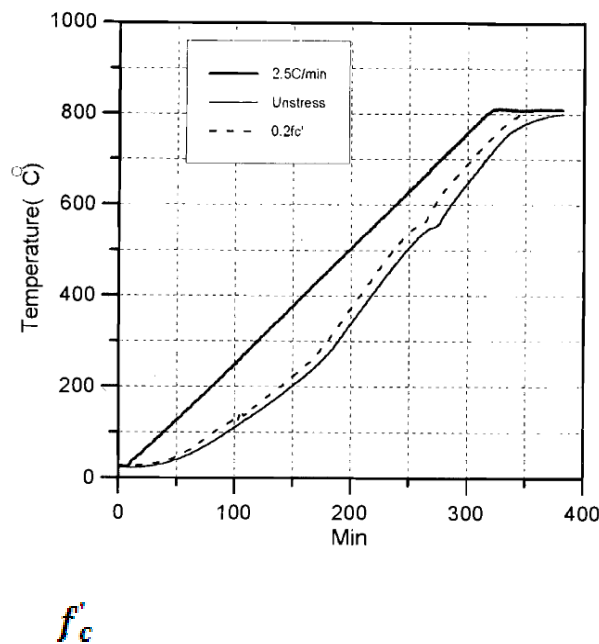


圖 1-1 軸壓力 0.2

高性能混凝土試體中心升溫曲線之影響

(資料來源：林銅柱 1995)

陳舜田、沈進發等人(1999)參考國外火災後安全評估文獻並整理台科大歷年火災相關研究，提出火災後混凝土結構物安全評估程序，其中將評估模式分為初勘、複勘與結構安全鑑定三階段。初勘主要內容為混凝土受高溫後外觀變化，包括混凝土表面顏色變化、混凝土表面裂縫與爆裂情況、混凝土剝落及鋼筋外露情況用以初步判斷混凝土結構物的安全性。

危時秀(2003)探討普通混凝土之熱傳性質，實驗參數為粗骨材含量、水灰比及含水量。其中粗骨材用量有三種：正常用量、相對於正常用量增加 20%、增加 40%。水灰比變化有兩種  $w/c=0.4$ 、 $w/c=0.5$ 。以及試體三種含水量：烘乾、氣乾、飽和。試驗所使用的試體為長方形試體。以單面加熱進行熱傳試驗，升溫速率為  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，加熱溫度分別由常溫  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  至爐溫  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。實驗量測溫度配合傅立葉熱傳導公式求得熱傳導係數。結果顯示增加粗骨材含量與含水量會增加熱傳導係數，增加水灰比則會降低熱傳導係數。

#### **肆、火災下柱構件溫度分析**

Lie (1994) 以有限差分法計算圓形柱的斷面溫度分佈、軸向變形能力和防火時效，將圓柱以徑向分層的方式，根據能量守恆並代入石灰質骨材混凝土及鋼材之高溫熱性質，並考慮混凝土內部水分對斷面溫度之影響。分析模擬結果和實驗量測數據作比較，得到吻合的結果。

Huang 等人(2008)以數值分析模擬包覆 I 型 SRC 柱斷面溫度分佈，試體以 ISO 834 升溫曲線四面受火，使用 SAFIR 進行斷面 2 維斷面溫度分佈預測，鋼材與混凝土的熱性質採用 Eurocode 4，溫度分佈分析結果大致與實驗結果吻合。

Yu 等人(2007)以實驗與分析研究 SRC 柱構件火災下行爲，發展出一個程序用以預測斷面的溫度分佈與極限強度，結合有限元素及有限差分法分析溫度分佈，實驗測得的溫度大致與分析值吻合。

徐瑞祥等人(2004)以有限差分法之熱傳導理論，模擬受火災後之混凝土梁斷面溫度分佈；引入熱傳學中塊狀系統(Lumped system)觀念分析，能合理和偏安全的計算應用於各種火場升溫、不同火災延時和不同受火面之計算試體斷面溫度分

佈。

張雲妃(2006)以有限差分近似值代換熱傳方程式偏導數，再利用 Peaceman & Rachford 提出的交替方向隱含法進行求解，可預測鋼筋混凝土斷面在同一時刻、四面環境溫度不一致之條件下各點溫度，與火害後最高溫度。文中鋼筋混凝土柱假設鋼筋量多寡對柱斷面的溫度分佈並無影響，因此在分析鋼筋混凝土內部溫度分佈時將構件視為純混凝土構造。

賴政忠(2006)以有限分析軟體 ANSYS 模擬鋼筋混凝土梁柱試體斷面溫度分佈，採用 ISO 834 標準升溫曲線四面受火，高溫熱傳係數及比熱分別採用 Ellinwood 與 Lin 的建議值及 Eurocode 2 與文獻數據比較，結果顯示以 ANSYS 輸入 Eurocode 2 的熱性質建議值可得到可靠的斷面溫度分佈。

黃彰斌(2006)以數值分析模擬鋼筋混凝土梁受火害時之溫度分佈與殘餘強度，分析主要採用熱傳學塊狀系統的概念，將斷面分割成塊狀單元，這些塊狀單元假設為均溫沒有溫度梯度存在，以單元中心點之溫度及力學性質代表該單元，引入初始條件與邊界條件後，將火害延時 2 小時及 3 小時梁斷面溫度和同尺寸純混凝土 Lin and Abrams (1985)實驗比較，3 面受火梁的溫度分佈分析結果大致與實驗結果吻合。

楊華等人(2010)以有限元素分析模擬矩形鋼管混凝土柱於四面和單面火害下之溫度場分析，由研究成果得知 單面受火將影響構件力學行為，其可分為材料損傷所引起偏心效應與熱膨脹變形產生撓曲行為，此兩種行為皆會造成試體耐火能力降低。對於材料損傷引起偏心效應乃因斷面溫度呈單對稱型式，使試體強度折減也呈單對稱，造成斷面合力中心偏移，進而形成附加偏心距；對於熱膨脹產生撓度變形為受火面之材料熱膨脹變形較非受火面大，不一致之熱膨脹能力將造成試體產生撓度變形。

### **伍、火害下柱構件實驗**

Ellobody 與 Young (2010)建立非線性三維有限元素模型來分析 SRC 柱受火害下之行為，非線性高溫材料性質之變化考慮鋼材、混凝土、縱向及橫向鋼筋，並分別以不同斷面尺寸、型鋼斷面、粗骨材、載重比為實驗參數，進行加載柱之火

害試驗，以有限元素分析模型可精準預測柱火害下之行為。結果顯示減少細長比或增加內部斷面鋼骨面積可延長 SRC 柱之防火時效，而位移於火害下之歷時關係與混凝土粗骨材有關。並將分析結果與 Eurocode 4 做比較，結果顯示 Eurocode 4 預測之防火時效較保守。

Huang (2008) 等人以數值分析研究包覆 I 型 SRC 柱之防火時效，探討斷面尺寸和載重比對於柱防火時效之影響，分成 4 組方形斷面來探討，每一組分別承受四種載重比：0.2、0.3、0.4 和 0.5。數值分析結果顯示高載重比下，斷面尺寸小柱耐火性能較差，為了確保分析模型可靠性，進行實驗佐證。斷面溫度分佈和結構行為的分析結果和實驗一致。柱防火時效經由 Eurocode 4 Part 1.2 來預測，結果顯示 Eurocode 4 和有限元素分析結果相當吻合。

Mao 與 Kodur (2011) 等人實驗 CES (concrete encased steel) 柱之耐火性能，實驗參數考慮柱尺寸大小、受火面、載重比、載重偏心。結果顯示柱試體於 3 面受火較 4 面受火有較高之防火時效；載重比、載重偏心對也有顯著地影響。對照實驗結果及 Eurocode 4、ASCE29 及 Zheng 與 Han (2006) 提出的防火時效公式，結果顯示現行規範並不保守。

Raut and Kodur (2011) 等人以實驗研究 6 支 RC 柱之防火時效，實驗參數包含混凝土強度、升溫曲線、載重比和聚合纖維添加量。分析與實驗結果用於比較高強度混凝土(HSC)柱和普通強度混凝土(NSC)柱之耐火性能；實驗結果顯示 HSC 柱表現較 NSC 柱低之防火時效，並指出添加聚合纖維於混凝土內有助減少柱試體之爆裂行為提升防火時效。

林草英(2000) 研究雙 H 型鋼骨鋼筋混凝土柱火害後之強度評估，在不同混凝土強度、保護層厚度及火害時程下，柱體內部斷面溫度分佈情況，探討對殘餘強度之影響。試驗結果顯示保護層厚度與火害時程對柱體殘餘強度有密切關係，混凝土強度對其強度折減所造成的差異較小。

王天志(2002)以實尺寸高性能混凝土柱進行火害試驗，探討高性能混凝土柱於高溫下的力學性質與熱學性質。發現偏心載重無法模擬實際火場建築物的行為，且混凝土含水量越高，越容易發生爆裂，降低柱之防火時效。文獻並建立數

值分析模型，預測高性能混凝土柱之防火時效。





## 第二章 鋼材與混凝土材料之高溫性質

### 第一節 材料高溫試驗方法

火害中斷面溫度之分佈與材料之熱傳導係數及比熱有重大關聯，回顧國外文獻與規範中，鋼材與混凝土高溫材料性質相關測試方法。

材料之熱傳導係數、比熱等試驗儀器主要使用示差掃描熱量分析儀(Differential Scanning Calorimeter, DSC)以及 Hot Disk 熱傳導分析儀。示差掃描熱量分析儀，如圖 2-1 所示，可量測試料反應型態(相變化)作為判斷材料的熔解溫度、熔解熱、玻璃轉移溫度、結晶化、硬化、比熱測量、酸化氧化誘導時間等材料特性的依據。可量測之溫度範圍在 $-170^{\circ}\text{C}\sim 725^{\circ}\text{C}$ 之間。

Hot Disk 熱傳導分析儀則採用先進的瞬變平面熱源法(Transient Plane Source Method)，可在數秒內完成熱傳導率(Thermal Conductivity)、熱擴散率(Thermal Diffusivity)和比熱(Heat Capacity)的測試，且不會受到接觸電阻的影響。其量測範圍為 $0.005\sim 500\text{W/mK}$ ，量測溫度範圍為 $10\text{K}\sim 1000\text{K}$  ( $-196^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$ )。



圖 2-1 示差掃描熱量分析儀(DSC)

(資料來源：先馳精密儀器股份有限公司)

#### 壹、混凝土材料高溫性質試驗

熱傳導與比熱為混凝土高溫下重要性質，試驗方法可參考 ISO/TR 15655



(2003)內所述。在高溫時混凝土將有化學性質與物理性質改變，如水氣損失、脫水、脫碳、晶相改變等。此些變化將對混凝土於高溫下的熱性質與機械性質有極大的影響，故在試驗上以暫態加熱狀態(Transient heating condition)較適合的。

### 混凝土比熱

因混凝土為熱的不良導體，ISO/TR15655 建議試驗時加熱速率在 0.5 °C/min，到 10 °C/min 的範圍，且最高溫度為 1000°C。

在國際標準上比熱的測定採示差掃描熱量分析儀(Differential scanning calorimeter, DSC)，ISO 11357-1 (2009)內有詳細說明，然限制其應用到約 500°C 的溫度。比熱測試於實驗室的試驗方法則主要有日本與瑞典的研究文獻。

### 混凝土熱傳導

下列的國家標準可以用於試驗混凝土的熱傳導，各項加熱方法皆基於穩態的加熱狀態(Steady state heating condition)：BS 1902-5.5、BS 1902-5.8、JIS A1412-1、JIS A1412-2、JIS A1412-3、ISO 8301、ISO 8302 等。

熱傳導於實驗室的試驗為以瞬變平面熱源法(Transient Plane Source, TPS)測定，其方法將導電材料(鎳)作為探頭夾置於兩個樣品之間，置於加熱爐內量測樣品的熱傳導，惟目前此法僅能應用在穩態加熱狀態。

## 貳、鋼材材料高溫性質試驗

金屬材料熱性質之試驗建議於 ISO /TR 15655 標準，加熱速率一般為 1 °C/min 至 50 °C/min，鋼材最高溫度為 1200 °C。

### 比熱

對於比熱的測定並無國際標準，但可參考 ISO /TR 11357-1 內以示差掃描熱量分析儀(DSC)測定。

實驗室的試驗一般採示差掃描熱量分析儀(DSC)測定，對於鋼材在暫態加熱狀態下加熱速率最高為 10 °C/min。惟鋼材在轉變溫度約 720 °C 以上則不適用。另外試驗方法為 potential drop calorimeter，可用在鋼材溫度高達 1300 °C，相似於電絕熱(electrical adiabatic)的技術，亦以加熱速率 3 °C/min，用以測定鋼材的比

熱。雖然標準尚未建立，但試驗方法已行之多年，可作為制定標準的基礎。

## 熱傳導

熱傳導的國際標準有 ISO 8301 與 ISO 8302，兩者皆為試驗穩態下的熱性質，實驗室的測定方法則可引用文獻，以量測暫態加熱狀態下的熱傳導。

## 第二節 鋼材高溫性質

### 壹、高溫下鋼材之力學性質

鋼材之力學性質包括了降伏強度、抗拉強度、彈性模數以及應力應變曲線等。鋼材的優點為兼具高強度與韌性，缺點是耐火性能不佳，當鋼材溫度到達 500°C 時，彈性模數降為室溫下的六成，溫度到達 600°C 時，降伏強度大幅下降至室溫的一半以下，可見高溫對於鋼材影響相當大。

依據 Eurocode 3 之規定，受溫度影響下鋼材力學性質之彈性模數、降伏強度與極限張力強度等，與常溫下力學性質之比值為折減係數。對於國內 SN490B 鋼材和 Eurocode 3 規定之鋼材受溫度影響力學性質之折減係數，如表 2-1 與圖 2-2 所示。其中 SN490B 鋼材之力學性質，採用林子賓(2006)針對各溫度下 SN490B 鋼材應力-應變關係之材料試驗數據。A572 Grade 50 則是依據莊有清(2003)之試驗數據。SM400 則是依據簡承宏(2005)之試驗數據。

由表 2-1 與圖 2-2 得知，鋼材溫度在達 500°C 之後，折減係數之折減量增加；鋼材溫度於 800°C 後，折減係數小於 0.1，且曲線斜率減緩。

表 2-1 比較 SN 490B、SM400、A572 Gr.50 與 Eurocode 3 之鋼材受溫度影響力學性質折減係數

溫度 (°C)	$k_{E,T} = \frac{E_{a,T}}{E_a}$				$k_{y,T} = \frac{f_{ay,T}}{f_{ay}}$				$k_{u,T} = \frac{f_{au,T}}{f_{ay}}$			
	EC 3	SN 490B	A572 Grade 50	SM400	EC 3	SN 490B	A572 Grade 50	SM400 (0.2%offset)	EC 3	SN 490B	A572 Grade 50	SM400
20	1.00	1.00	1.000	1.00	1.00	1.00	1.000	1.00	1.25	1.52	1.304	–
100	1.00	0.83	–	–	1.00	0.92	–	–	1.25	1.37	–	–
200	0.90	0.80	0.916	0.94	1.00	0.84	0.956	1.00	1.25	1.46	1.482	–
300	0.80	0.71	0.824	0.89	1.00	0.72	0.772	0.71	1.25	1.48	1.477	–
400	0.70	0.72	0.853	0.72	1.00	0.67	0.696	0.65	1.00	1.32	1.211	–
500	0.60	0.54	0.675	0.57	0.78	0.58	0.631	0.56	0.78	0.92	0.948	–
600	0.31	0.33	0.575	0.37	0.47	0.39	0.389	0.33	0.47	0.48	0.567	–
700	0.13	0.26	0.400	0.24	0.23	0.17	0.201	0.16	0.23	0.20	0.281	–
800	0.09	0.12	–	0.05	0.11	0.09	–	0.08	0.11	0.15	–	–
900	0.0675	–	–	–	0.06	–	–	–	0.06	–	–	–
1000	0.0450	–	–	–	0.04	–	–	–	0.04	–	–	–
1100	0.0225	–	–	–	0.02	–	–	–	0.02	–	–	–

$k_{E,T}$

註：相對於  $E_a$  之切線模數折減係數。



為相對於 $f_{ay}$ 之極限張力折減係數。

EC 3 為 Eurocode 3 建議鋼材受溫影響之力學性質折減係數。

SN 490B 為依據林子賓(2006)之試驗數據。A572 Grade 50 為依據莊有清(2003)之試驗數據。SM 400 為依據簡承宏(2005)之試驗數據。

(資料來源：本研究整理)

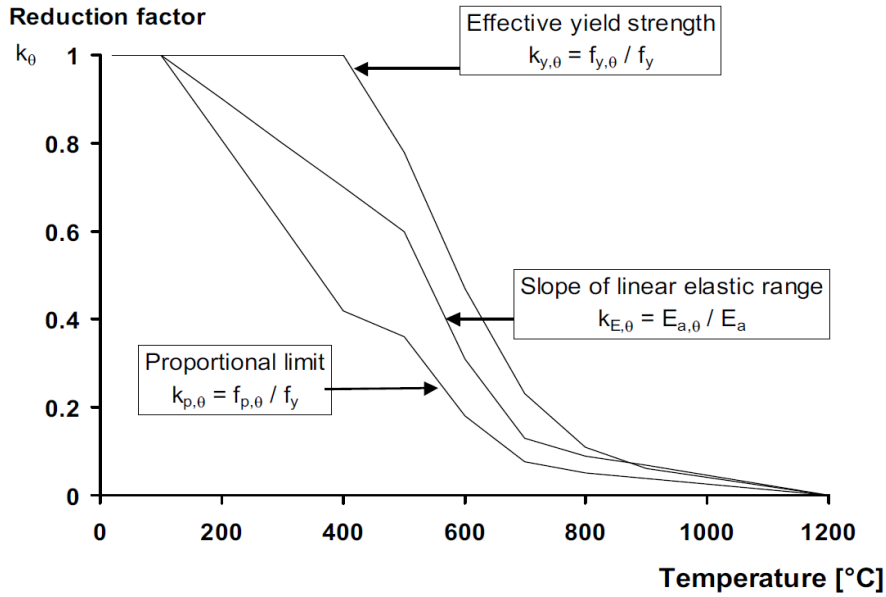


圖 2-2 Eurocode 3 高溫下鋼材之力學性質折減係數

(資料來源：Eurocode 3)

鋼材在高溫下之應力應變關係有歐洲規範可比對，Eurocode 3 高溫下之鋼材強度與變形性質在每分鐘 2 至 50K 加熱速率之情形下所得之應力應變關係，如圖 2-3 所示。

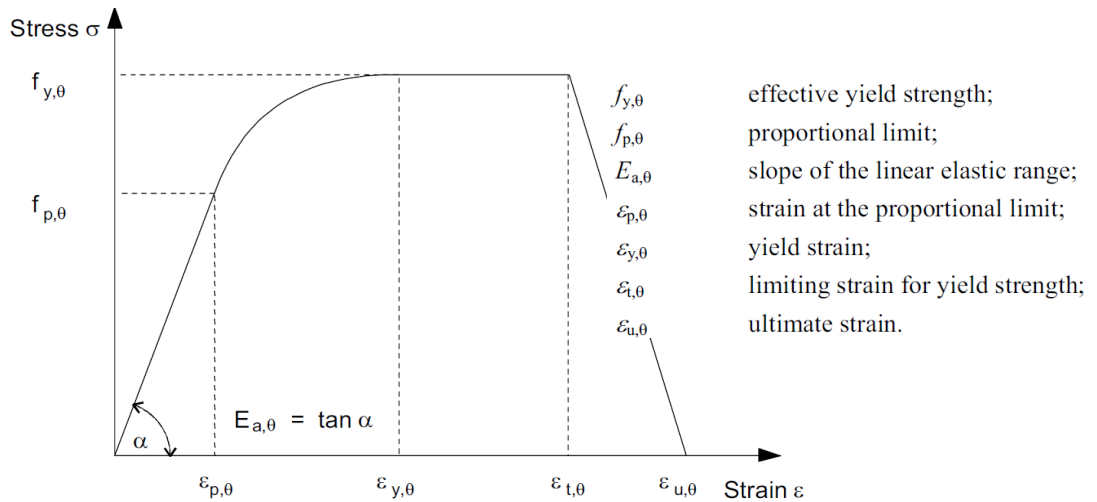


圖 2-3 Eurocode 3 高溫下鋼材之應力應變關係

(資料來源：Eurocode 3)

Eurocode 2 於熱軋鋼筋在高溫下之應力應變關係如圖 2-4 所示。

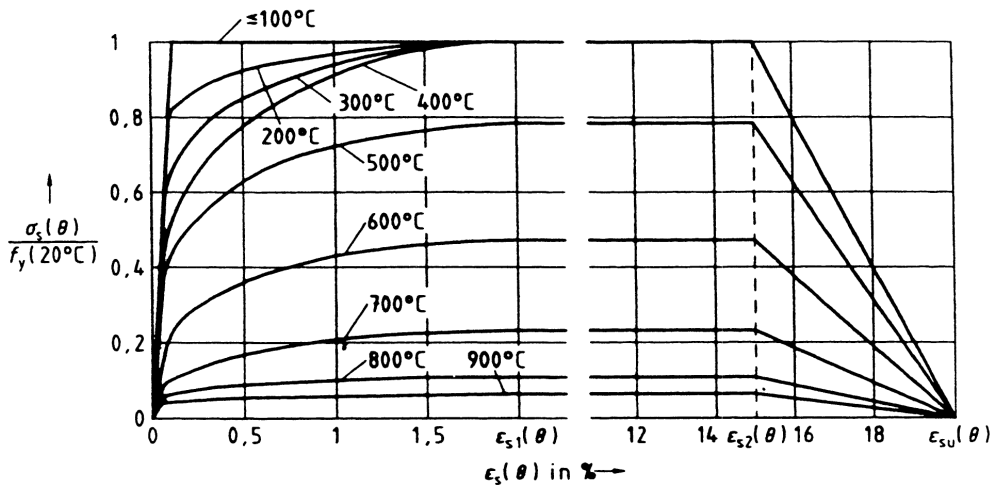


圖 2-4 Eurocode 2 高溫下熱軋鋼筋之應力應變關係

(資料來源：Eurocode 2)

### 貳、熱傳導

熱傳導(Thermal conductivity)為物質傳導熱能之性能，而隨溫度變化，其熱傳導也隨之不同，如圖 2-5 所示。Eurocode 3 訂出鋼材熱傳導係數(W/m °C)，如公式(2-1)至(2-2)所示。

$$20 \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad k_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T \quad (2-1)$$

$$800 \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad k_s = 27.3 \quad (2-2)$$

美國土木工程師學會 ASCE (1992)於鋼材隨溫度變化下熱傳導係數之建議公式，如公式(2-3)至(2-4)所示。

$$20 \leq T \leq 900^\circ\text{C} \quad k_s = -0.022T + 48 \quad (2-3)$$

$$900 \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad k_s = 28.2 \quad (2-4)$$

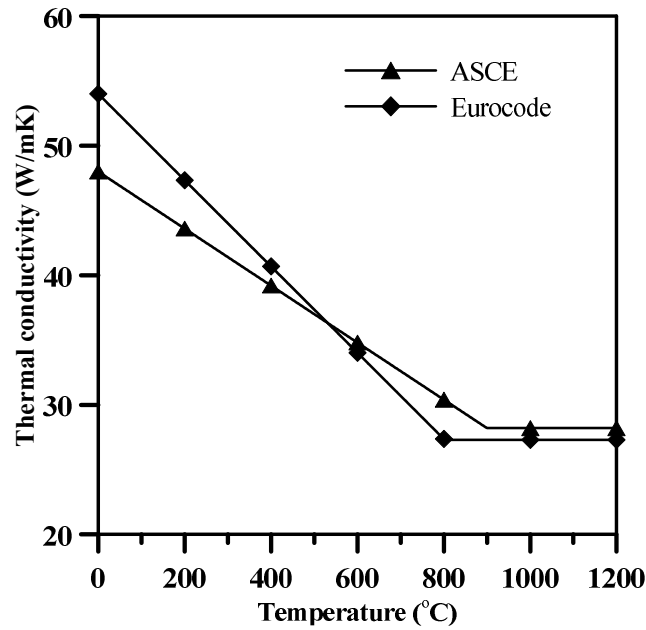


圖 2-5 高溫下鋼材之熱傳導係數比較

(資料來源：本研究整理)

### 參、比熱

比熱(Specific heat)的定義為單位物質升高 1°C 所需之熱能，隨溫度變化下鋼材之比熱(J/kg K)如圖 2-6 所示，可知當溫度約 750°C 時鋼材比熱突然升高。

依據 Eurocode 3 規定，鋼材之比熱可由公式(2-5)至(2-8)計算。

$$20 \leq T \leq 600^{\circ}\text{C} \quad c_s = 425 + 7.73 \times 10^{-1}T - 1.69 \times 10^{-3}T^2 + 2.22 \times 10^{-6}T^3 \quad (2-5)$$

$$600 \leq T \leq 735^{\circ}\text{C} \quad c_s = 666 + \frac{13002}{738 - T} \quad (2-6)$$

$$735 \leq T \leq 900^{\circ}\text{C} \quad c_s = 545 + \frac{17820}{T - 731} \quad (2-7)$$

$$900 \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad c_s = 650 \quad (2-8)$$

美國土木工程師學會 ASCE (1992)於鋼材隨溫度變化下比熱之建議公式，如公式(2-9)至(2-12)所示。

$$20 \leq T \leq 650^{\circ}\text{C} \quad c_s = \left( \frac{0.004 \times T + 3.3}{\rho_s} \right) \times 10^6 \quad (2-9)$$

$$650 \leq T \leq 725^{\circ}\text{C} \quad c_s = \left( \frac{0.068 \times T - 38.3}{\rho_s} \right) \times 10^6 \quad (2-10)$$

$$725 \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \quad c_s = \left( \frac{-0.086 \times T + 73.35}{\rho_s} \right) \times 10^6 \quad (2-11)$$

$$900 \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad c_s = \frac{4.55}{\rho_s} \times 10^6 \quad (2-12)$$

其中  $\rho_s$  為鋼材的密度，依 Eurocode 3 規定，鋼材密度為  $7850 \text{ kg/m}^3$ 。

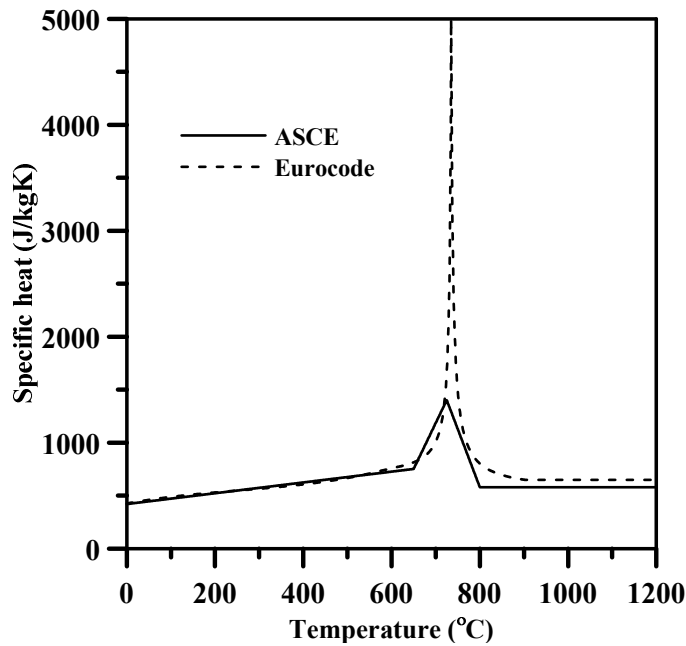


圖 2-6 高溫下鋼材之比熱

(資料來源：本研究整理)

由圖 2-6 可知，在約  $750^{\circ}\text{C}$  時，會有一峰值出現，其原因是原子排列方式由面心立方堆積轉變為體心立方堆積，此為吸能反應 Kodur (2010)。ASCE 與 Eurocode 3，在  $700^{\circ}\text{C}$  以下相差不大，而於  $750^{\circ}\text{C}$  的峰值有明顯差異，於  $800^{\circ}\text{C}$  以上則大致吻合。

### 肆、熱膨脹

熱伸長(Thermal elongation)定義為材料溫度每上升  $1^{\circ}\text{C}$ ，造成材料之伸長，



可由熱膨脹係數乘上溫度差值求得。鋼材隨溫度變化下之熱伸長如圖 2-7 所示。

Touloukian et al. (1977)以三階多項式計算鋼熱膨脹係數，如公式(2-13)所示。

$$\alpha(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 \quad (2-13)$$

$$\alpha_0 = 7.3633 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$$

$$\alpha_1 = 1.8723 \times 10^{-8} (\text{°C})^{-2}$$

$$\alpha_2 = -9.8382 \times 10^{-12} (\text{°C})^{-3}$$

$$\alpha_3 = 1.6718 \times 10^{-16} (\text{°C})^{-4}$$

$$\Delta L/L = \alpha(T) \times \Delta T \quad (2-14)$$

根據 Eurocode 4 規定，熱伸長可由公式(2-15)至(2-17)計算。

$$\begin{aligned} 20 \leq T \leq 750\text{°C} \quad \Delta L/L &= -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5} T \\ &+ 0.4 \times 10^{-8} T^2 \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$750 \leq T \leq 860\text{°C} \quad \Delta L/L = 11 \times 10^{-3} \quad (2-16)$$

$$860 \leq T \leq 1200\text{°C} \quad \Delta L/L = -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} T \quad (2-17)$$

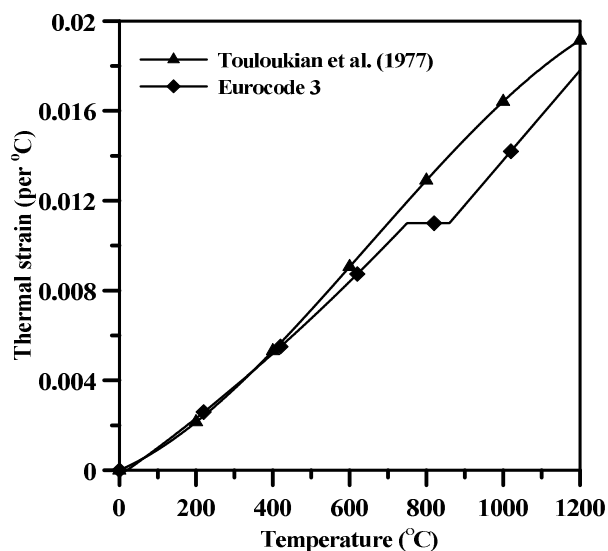


圖 2-7 高溫下鋼材之熱伸長比較

(資料來源：本研究整理)

### 第三節 混凝土高溫性質

#### 壹、抗壓強度

根據 Eurocode 4 規定，常重混凝土之受溫度影響的抗壓強度與常溫抗壓強度 ( $f_c$ ) 之比值為折減係數，其折減係數 ( $k_{c,T}$ ) 如表 2-2 與圖 2-8 所示。由表 2-2 得知受溫度影響之抗壓強度與抗壓應變相互對應數據。

表 2-2 Eurocode 4 高溫下混凝土抗壓強度折減與對應之應變

混凝土溫度 $T_c$ [°C]	$k_{c,T} = f_{c,T} / f_c$	$\epsilon_{cu,T} \times 10^3$
20	1.00	2.5
100	1.00	4
200	0.95	5.5
300	0.85	7
400	0.75	10
500	0.60	15
600	0.45	25
700	0.30	25
800	0.15	25
900	0.08	25
1000	0.04	25
1100	0.01	25
1200	0	—

(資料來源：本研究整理)

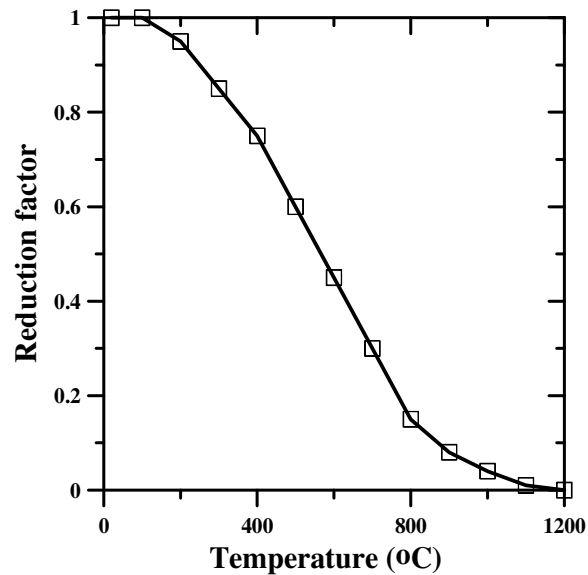


圖 2-8 Eurocode 4 高溫下混凝土之抗壓強度折減係數

(資料來源：本研究整理)

## 壹、 彈性模數

Li 與 Purkiss (2005)建議混凝土在不同溫度下彈性模數  $E(T)$  與常溫下彈性模數  $E_0$  之比值，如圖 2-9 所示，計算如下。

$$T \leq 60^\circ\text{C} \quad E(T) = E_0 \quad (2-18)$$

$$60 < T \leq 800^\circ\text{C} \quad E(T) = \frac{800-T}{740} E_0 \quad (2-19)$$

其中  $E(T)$  為混凝土高溫下彈性模數， $E_0$  為混凝土常溫下彈性模數。

Eurocode 2 訂出混凝土在不同溫度下抗壓、抗拉強度與常溫下抗壓、抗拉強度之比值，如表 2-3 與圖 2-9、圖 2-10 所示。當溫度到達  $600^\circ\text{C}$  時，混凝土的彈性模數與抗壓強度都降至常溫的一半以下，溫度對於混凝土強度影響甚鉅。

表 2-3 高溫下混凝土之力學性質折減係數

混凝土溫度 $T_a$	在 $\theta_a$ 溫度相對於 20°C 之抗壓強度 $f_c$ 、抗拉強度 $f_t$ 或彈性係數 $E_a$ 之折減係數		
	抗壓強度 折減係數 (相對於 $f_c$ ) $K_{y,T} = f_{y,T} / f_y$	抗拉強度 折減係數 (相對於 $f_t$ ) $K_{p,T} = f_{p,T} / f_y$	彈性模數 折減係數 (相對於 $E_0$ ) $K_{E,T} = E_{a,T} / E_a$
20°C	1.00	1.00	1.00
100°C	1.00	1.00	1.00
200°C	0.95	0.80	0.95
300°C	0.85	0.60	0.81
400°C	0.75	0.40	0.68
500°C	0.60	0.20	0.54
600°C	0.45	0.00	0.41
700°C	0.30	0.00	0.27
800°C	0.15	0.00	0.14
900°C	0.08	0.00	0.00
1000°C	0.04	0.00	0.00

註：可由線性內插求得介於混凝土溫度間之值。

(資料來源：本研究整理)

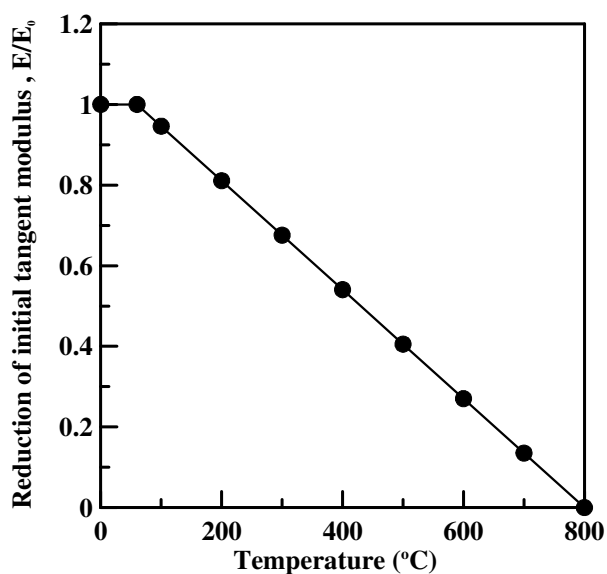


圖 2-9 Li and Purkiss 高溫下混凝土之彈性模數折減係數

(資料來源：Li and Purkiss 2005)

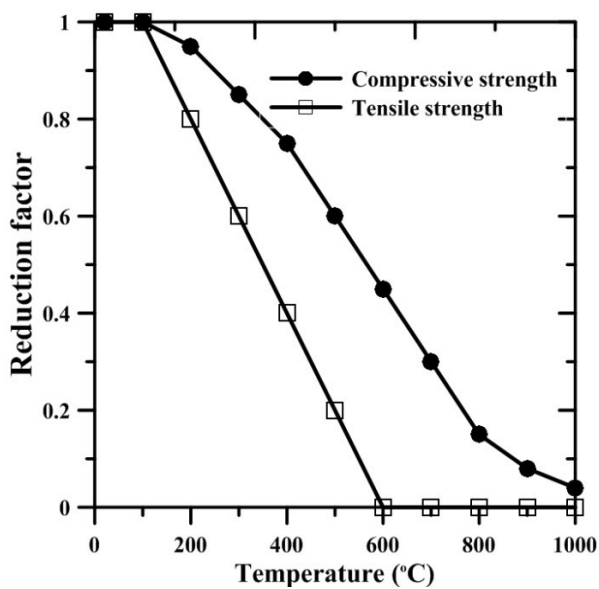


圖 2-10 Eurocode 2 高溫下混凝土之力學性質折減係數

(資料來源：本研究整理)

## 貳、 熱傳導

根據 Eurocode 4 規定，受溫度影響之常重混凝土熱傳導( $k_c$ )乃由上、下限值決定，其分別為公式(2-20)與(2-21)，亦如圖 2-11 顯示；如以簡易計算時，熱傳導則取 1.6 W/m K。

$$20 \leq T_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$k_c = 2 - 0.245(T_c/100) + 0.0107(T_c/100)^2 \quad (2-20)$$

$$20 \leq T_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$k_c = 1.36 - 0.136(T_c/100) + 0.0057(T_c/100)^2 \quad (2-21)$$

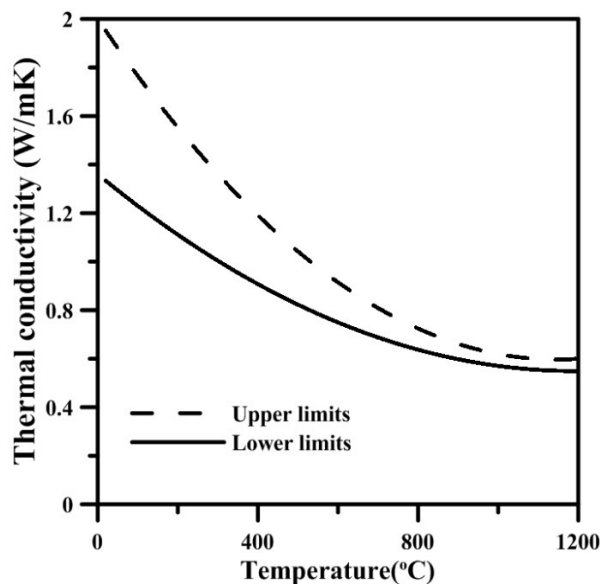


圖 2-11 Eurocode 4 高溫下混凝土之熱傳導係數上下限

(資料來源：本研究整理)

根據 Harmathy (1973)建議的混凝土熱傳導公式(W/m°C)。

$$0^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$$

$$k = -0.000625T + 1.5 \quad (2-22)$$

$$T > 800^\circ\text{C}$$

$$k = 1 \quad (2-23)$$

根據 Ellingwood (1980)等人建議的混凝土熱傳導公式(W/m K)。

$$0^{\circ}\text{C} < T \leq 300^{\circ}\text{C}$$

$$k_c(T) = 1.81 - 0.62T/100 \quad (2-24)$$

$$300^{\circ}\text{C} < T \leq 800^{\circ}\text{C}$$

$$k_c(T) = 1.55 - 0.60T/500 \quad (2-25)$$

$$800^{\circ}\text{C} < T \leq 1500^{\circ}\text{C}$$

$$k_c(T) = 0.81857 - 0.20T/700 \quad (2-26)$$

Eurocode 2 訂出混凝土熱傳導係數，計算公式如下(W/m K)。

$$20^{\circ}\text{C} < T \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

$$k_c = 2 - 0.2451(T) + 0.0107(T/100)^2 \quad (2-27)$$

其中  $k_c$  為混凝土的熱傳導係數。

Eurocode 2 訂出矽質骨材混凝土熱傳導係數，計算公式如下(W/m K)。

$$20^{\circ}\text{C} < T \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

$$k_c = 2 - 0.24(T)/120 + 0.012(T/120)^2$$

Eurocode 2 訂出石灰質骨材混凝土熱傳導係數，計算公式如下(W/m K)。

$$k_c = 1.6 - 0.16(T)/120 + 0.008(T/120)^2$$

根據 Kodur (2003) 等人建議的高強度混凝土熱傳公式。其中依混凝土骨材的不同又分為矽質骨材混凝土(Siliceous aggregate concrete)與石灰質骨材混凝土(Carbonate aggregate concrete)。見圖 2-14 所示，兩者均隨溫度增加而遞減，矽質骨材混凝土有較石灰質骨材混凝土高的熱傳導係數，300°C 以後石灰質骨材混凝土之熱傳導係數下降較快。

#### 1. 矽質骨材混凝土熱傳

$$0^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

$$k = 2.00 - 0.001T \quad (2-28)$$

#### 2. 石灰質骨材混凝土熱傳



$$0^{\circ}\text{C} < T \leq 300^{\circ}\text{C}$$

$$k = 2.00 - 0.0013T \quad (2-29)$$

$$300^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

$$k = 2.21 - 0.0020T \quad (2-30)$$

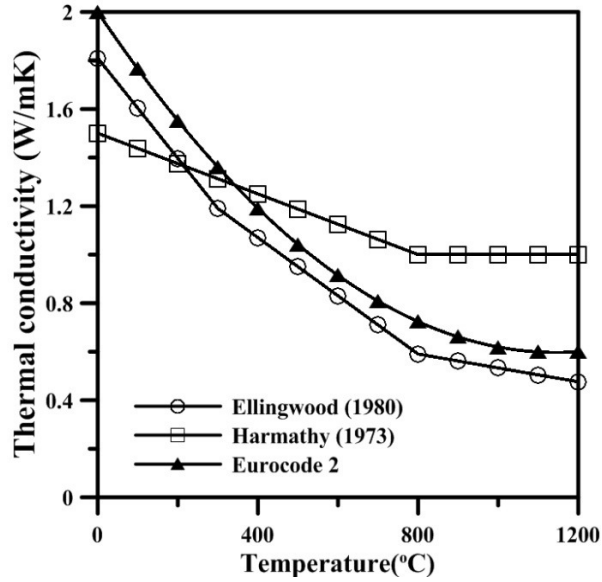


圖 2-12 高溫下普通混凝土之熱傳導係數

(資料來源：本研究整理)

由圖 2-12 所示，可知 Ellingwood 所提供的高溫混凝土熱傳導公式和 Eurocode 2 有相近的趨勢，熱傳導係數皆隨溫度增加而遞減，但 Eurocode 2 建議之熱傳導係數較 Ellingwood 高。

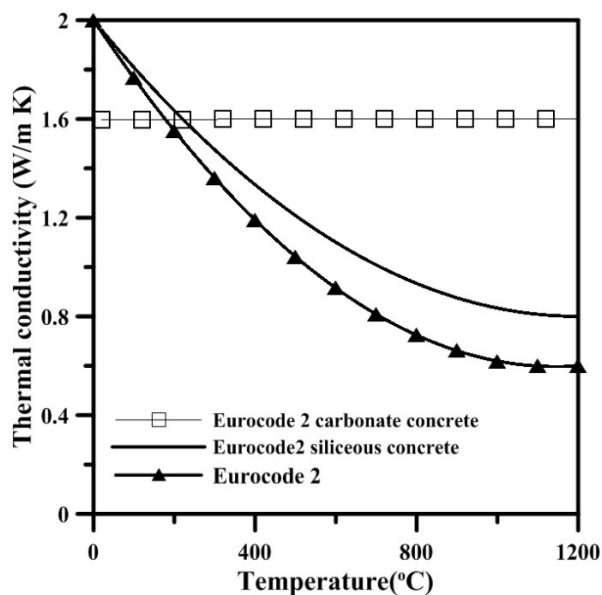


圖 2-13 Eurocode 2 高溫下混凝土之熱傳導係數

(資料來源：本研究整理)

由圖 2-13 可知 Eurocode 2 常重混凝土高溫熱傳公式和矽質骨材混凝土高溫熱傳公式有相近的趨勢，兩者均隨溫度遞減，但矽質骨材混凝土的熱傳係數較常重混凝土高；石灰質骨材混凝土則幾乎維持為定值。

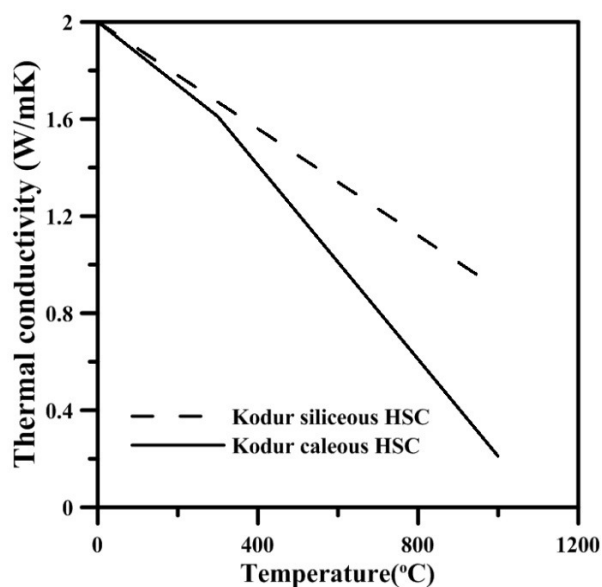


圖 2-14 Kodur 高溫下高強度混凝土之熱傳係數比較

(資料來源：本研究整理)

## 參、 比熱

對於常重混凝土之比熱( $c_c$ )依照 Eurocode 4。若以簡易計算方法時，比熱取 1000 J/kg K；或以公式(2-31)至(2-34)計算不同溫度範圍下之比熱參數；或以公式(2-35)計算隨溫度變化之比熱近似值，如圖 2-15 所示。然而當溫度介於 100 至 200°C 之間，混凝土濕度會影響比熱，使其產生尖峰值。

(1) 條件計算：

$$20 \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad c_c = 900 \quad (2-31)$$

$$100 < T \leq 200^\circ\text{C} \quad c_c = 900 + (T - 100) \quad (2-32)$$

$$200 < T \leq 400^\circ\text{C} \quad c_c = 1000 + (T - 200)/2 \quad (2-33)$$

$$400 < T \leq 1200^\circ\text{C} \quad c_c = 1100 \quad (2-34)$$

(2) 近似計算：

$$c_{c,T} = 890 + 56.2(T/100) - 3.4(T/100)^2 \quad (2-35)$$

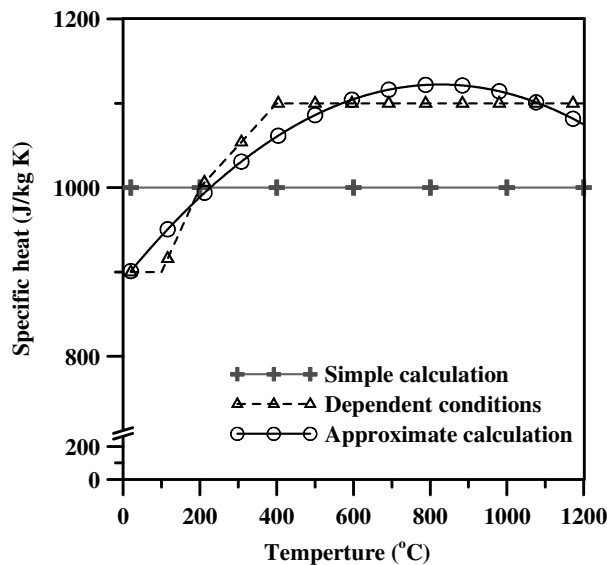


圖 2-15 Eurocode 4 高溫下混凝土之比熱

(資料來源：Eurocode 4)

對於混凝土密度( $\rho_c$ )依照 Eurocode 4 之規定。常重混凝土於靜態載重下且不考慮溫度影響，其常重純混凝土之密度( $\rho_{c,NC}$ )為 2300 kg/m<sup>3</sup>；若常重混凝土考慮

鋼骨鋼筋混凝土高溫材料性質之研究

溫度影響，則以近似公式計算，如公式(2-36)所示。

$$\rho_{c,T} = 2354 - 23.47(T/100) \quad (2-36)$$

Lie (1994) 建議的混凝土高溫熱容量公式  $J/(m^3) \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

$0^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = 2.566 \times 10^6 \quad (2-37)$$

$400^\circ\text{C} < T \leq 410^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = (0.1765T - 68.034) \times 10^6 \quad (2-38)$$

$410^\circ\text{C} < T \leq 445^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = (-0.05043T + 25.0067) \times 10^6 \quad (2-39)$$

$445^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = 2.566 \times 10^6 \quad (2-40)$$

$500^\circ\text{C} < T \leq 635^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = (0.0160T - 5.4488) \times 10^6 \quad (2-41)$$

$635^\circ\text{C} < T \leq 715^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = (0.1663T - 10090225) \times 10^6 \quad (2-42)$$

$715^\circ\text{C} < T \leq 785^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = (-0.2210T + 17607343) \times 10^6 \quad (2-43)$$

$T > 785^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = 2.566 \times 10^6 \quad (2-44)$$

Kodur 等人(2003)建議的高強度混凝土高溫熱容量公式  $J/(m^3) \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

矽質骨材高強度混凝土熱容量

$0^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C}$

$$\rho_c c_c = (0.005T + 1.70) \times 10^6 \quad (2-45)$$

$$200^{\circ}\text{C} < T \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = 2.7 \times 10^6 \quad (2-46)$$

$$400^{\circ}\text{C} < T \leq 500^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = (0.0013T - 2.5) \times 10^6 \quad (2-47)$$

$$500^{\circ}\text{C} < T \leq 600^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = (-0.0013T + 10.5) \times 10^6 \quad (2-48)$$

$$600^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = 2.70 \times 10^6 \quad (2-49)$$

石灰質骨材高強度混凝土熱容量

$$0^{\circ}\text{C} < T \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = 2.45 \times 10^6 \quad (2-50)$$

$$400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 475^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = (-0.026T + 12850) \times 10^6 \quad (2-51)$$

$$475^{\circ}\text{C} \leq T \leq 650^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = (0.0143T - 6.295) \times 10^6 \quad (2-52)$$

$$650^{\circ}\text{C} \leq T \leq 735^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = (0.1894T - 12011) \times 10^6 \quad (2-53)$$

$$735^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = (-0.263T + 21240) \times 10^6 \quad (2-54)$$

$$800^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_c c_c = 2 \times 10^6 \quad (2-55)$$

Kodur (2003) 等人提出高強度混凝土高溫熱容量公式，對於石灰質骨材混凝土，根據 Kodur 的研究，如圖 2-16 所示，在 150°C 到 400°C 之間會有一尖峰

值；然而對於矽質骨材混凝土則是在於 500°C 時有一尖峰值。根據 Lie(1972)的研究認為第一個上昇是由於混凝土孔隙水的氣化，第二個峰值是由於水泥砂漿內結晶水氣化；在此溫度範圍大部份的熱能用於水氣化。矽質骨材混凝土由於含有大量的石英，在大約 573°C 時產生晶相轉換，使熱容量有明顯地上昇。高強度混凝土比熱和普通強度混凝土相似；但超過 600°C 後，也受到水泥砂漿與骨材性質的影響。

石灰質骨材混凝土超過 600°C 後，此時石灰質骨材熱容量為矽質骨材混凝土熱容量十倍，延緩溫度的上升，這使得石灰質骨材混凝土較矽質骨材混凝土不容易產生爆裂的現象。

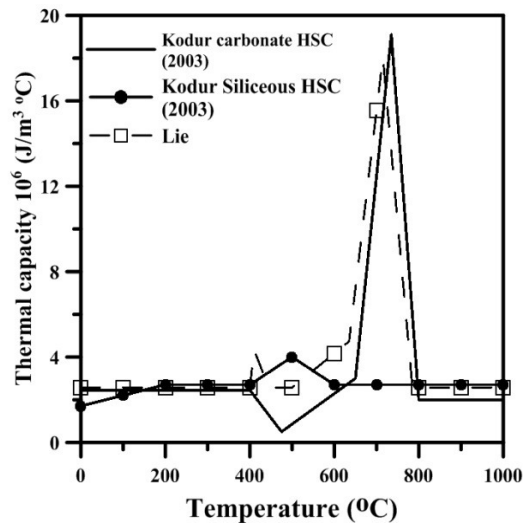


圖 2-16 高溫下高強度混凝土之熱容量比較

(資料來源：本研究整理)

如圖 2-16 所示，Kodur 所提供的石灰質骨材混凝土高溫熱容量公式與 Lie 研究所提供的高溫熱容量公式趨勢接近，在 400°C 以前維持定值，兩者在皆約略 750°C 時有明顯的突峰值。

#### 肆、 熱膨脹

依 Eurocode 4 規定，簡易計算常重混凝土熱伸長率為  $18 \times 10^{-6}(T_c - 20)$ ；受溫度影響，各溫度階段伸長率可由公式(2-56)與(2-57)計算。

$$20^{\circ}\text{C} \leq T_c \leq 700^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta L/L = -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} T_c + 2.3 \times 10^{-11} T_c^3 \quad (2-56)$$

$$700^{\circ}\text{C} \leq T_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta L/L = 14 \times 10^{-3} \quad (2-57)$$

Lie (1994) 研究建議混凝土在高溫下熱膨脹係數公式，計算公式如下。

$$\alpha_c = (0.008T + 6) \times 10^{-6} \text{ m/(m}^{\circ}\text{C)} \quad (2-58)$$

其中  $\alpha_c$  為混凝土的熱膨脹係數 (m/m<sup>°</sup>C)。

Kodur 等人 (2003) 研究提出高強度混凝土高溫下熱膨脹係數公式。

矽質骨材高強度混凝土 (m/m<sup>°</sup>C)

$$0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 450^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = -0.0002 + 0.00001T \quad (2-59)$$

$$450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 650^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = -0.0115 + 0.000036T \quad (2-60)$$

$$650^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = 0.0119 \quad (2-61)$$

石灰質骨材高強度混凝土

$$0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 450^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = -0.0002 + 0.000008T \quad (2-62)$$

$$450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 920^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = -0.0061 + 0.00002T \quad (2-63)$$

$$920^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = 0.0242 - 0.000012T \quad (2-64)$$

由圖 2-17 比較 Kodur 建議的高溫高強度混凝土熱膨脹係數公式，兩種不同

骨材混凝土的熱膨脹趨勢相當接近，800°C 以前矽質骨材高強度混凝土較石灰質骨材高的熱膨脹係數。骨材的種類對混凝土熱膨脹有極大的影響，對矽質骨材混凝土而言，熱膨脹隨著溫度增加，到 700°C 後維持定值；對石灰質骨材高強度混凝土，過了 500°C 後熱膨脹急遽地升高；超過 800°C 後由於碳酸鹽熱解成二氧化碳，混凝土收縮，熱膨脹稍為下降。

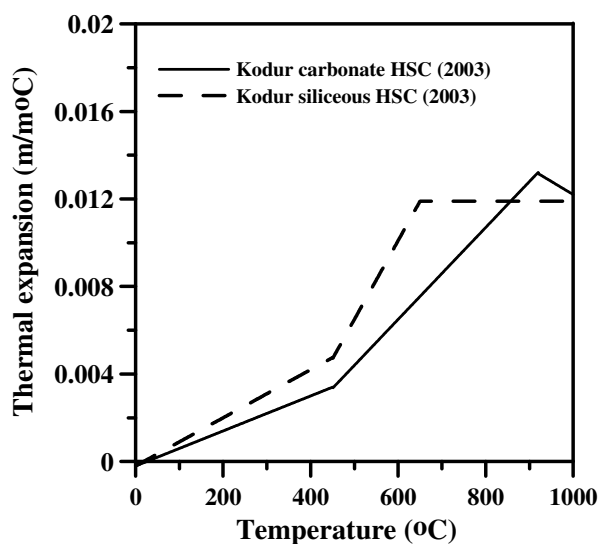


圖 2-17 Kodur 高溫下高強度混凝土之熱膨脹係數

(資料來源：本研究整理)

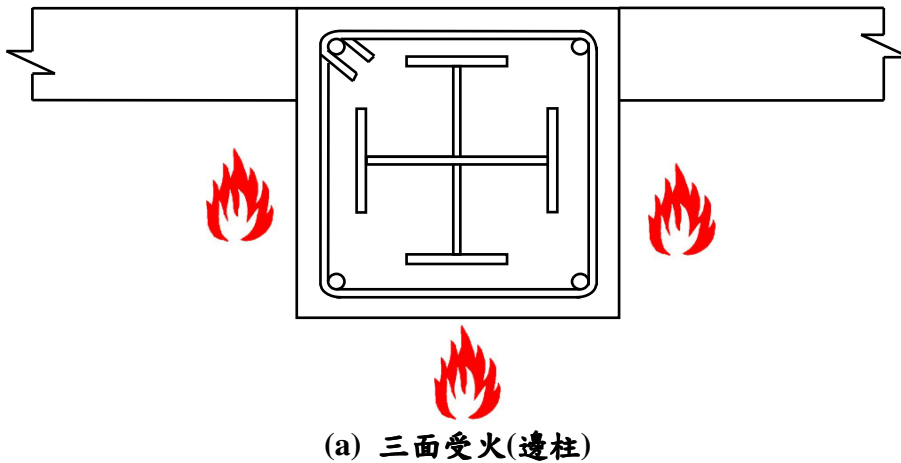


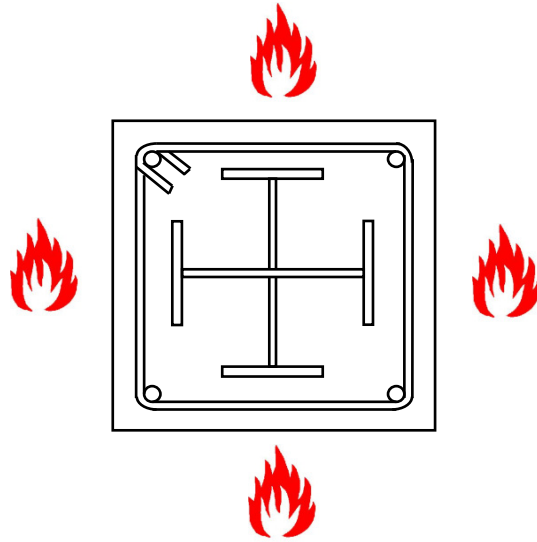
## 第三章 鋼骨鋼筋混凝土柱斷面溫度分佈之實驗

SRC 斷面溫度場之分佈差異易造成不對稱之結構變形，使結構提早產生破壞，因此本章採用實驗與分析方法探討 SRC 斷面溫度之分佈，以供未來防火設計所需。

### 第一節 試驗規劃

本計劃目的在於利用實驗了解鋼骨鋼筋混凝土柱受火害下之斷面溫度分佈，設計柱試體將根據「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」設計，對於模擬火災高溫情況，則依據 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」之相關規定，規劃 5 小時(加溫爐最大限)高溫試驗進行研究。試驗參數模擬火場內不同位置之柱構件受熱情形(邊柱、中間柱)，如圖 3-1 所示；此外尚有柱之斷面形狀(矩形、圓形)及混凝土強度(普通強度混凝土、高強度混凝土)。





(b) 四面受火(中間柱)

圖 3-1 柱受火面示意圖

(資料來源：本研究整理)

## 第二節 試體規劃

### 壹、試體設計

本計畫規劃 12 支包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱，其中 8 支試體進行高溫試驗，另外 4 支試體將於明年度進行載重試驗，以作為火害後殘留強度之對照組。試體編號如表 3-1 所示。柱長為 2030 mm，方形柱斷面尺寸為 360×360 mm，圓形柱斷面尺寸為直徑 400 mm。十字型鋼骨以兩 RH 250×125×6×9 型鋼以填角銲接方式接合而成，採用 A36 之鋼材，柱高為 2000 mm，並於上下銲接端板厚度 15 mm，如圖 3-2 至圖 3-4 所示。方型柱與圓形柱主筋皆為 6 號竹節鋼筋，SRC 圓形柱試體配置四支主筋加上圓型箍筋。所有試體箍筋皆採用 3 號竹節鋼筋，箍筋間距詳見圖 3-5。試體鋼骨比分別為方型柱 5.62%、圓形柱 5.79%。

依照建築技術規則，防火時效 3 小時之混凝土保護層厚度為 6 cm，2 小時防火時效混凝土保護層厚度為 5 cm。為了量測 SRC 試體斷面之溫度分佈，故本研究調整鋼骨之保護層厚度，避免鋼骨溫度難以上升，影響實驗結果。

試體編號第一個字代表斷面形狀，S 代表方形、C 代表圓形；第二個字代表

混凝土強度，N 代表普通強度混凝土(Normal Strength Concrete)、H 代表高強度混凝土(High Strength Concrete)；第三個數字代表試體受火面。

表 3-1 試體規劃

試體編號	柱斷面形狀	混凝土種類	受熱面	備註
SN3	方	NSC	3	-
SN4	方	NSC	4	-
SH3	方	HSC	3	-
SH4	方	HSC	4	-
CN2	圓	NSC	2	-
CN4	圓	NSC	4	-
CH2	圓	HSC	2	-
CH4	圓	HSC	4	-
SN0	方	NSC	0	載重試驗
SH0	方	HSC	0	載重試驗
CN0	圓	NSC	0	載重試驗
CH0	圓	HSC	0	載重試驗

(資料來源:本研究整理)

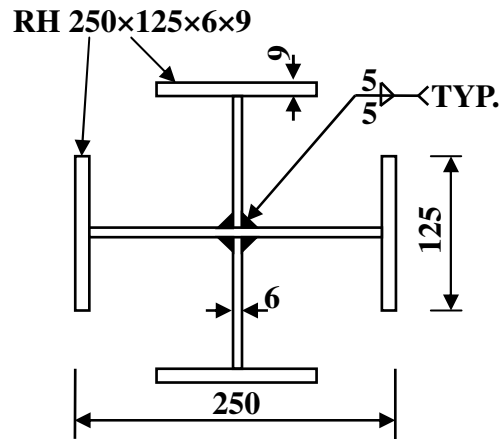
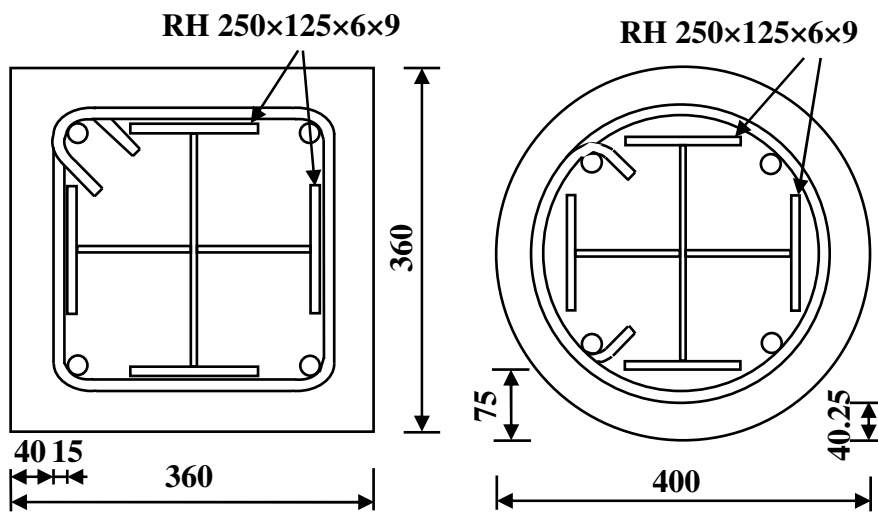


圖 3-2 鋼骨設計圖

(資料來源:本研究整理)



單位：mm

圖 3-3 鋼骨鋼筋混凝土柱斷面示意圖

(資料來源：本研究整理)

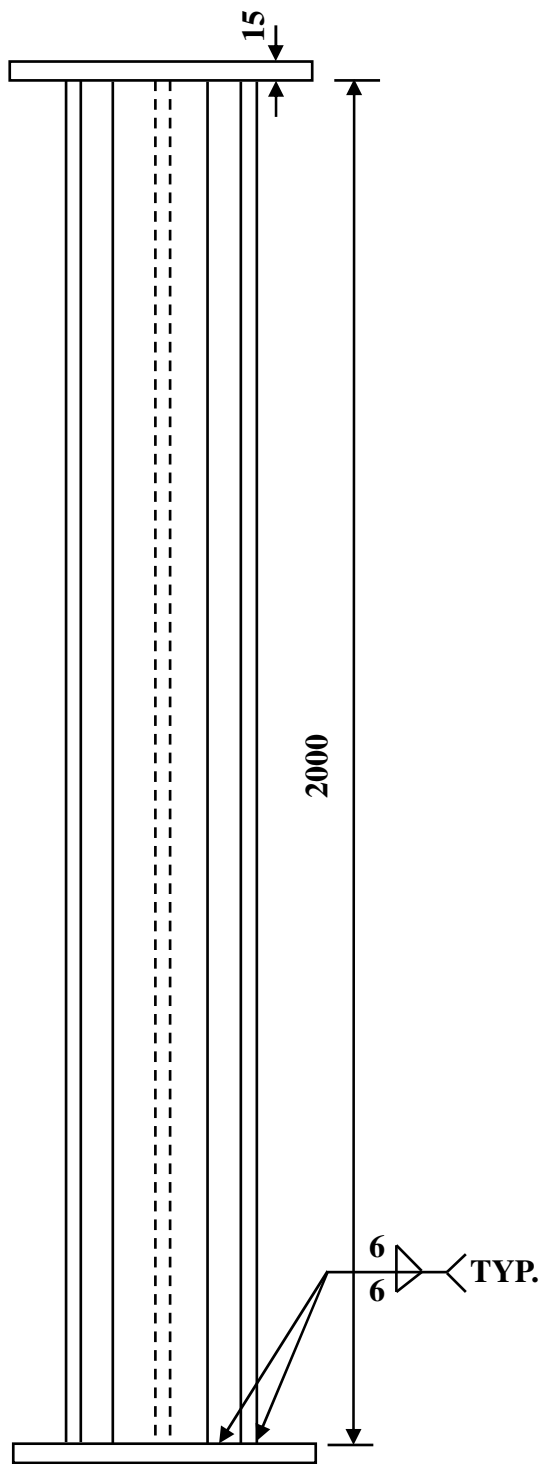


圖 3-4 鋼柱設計圖

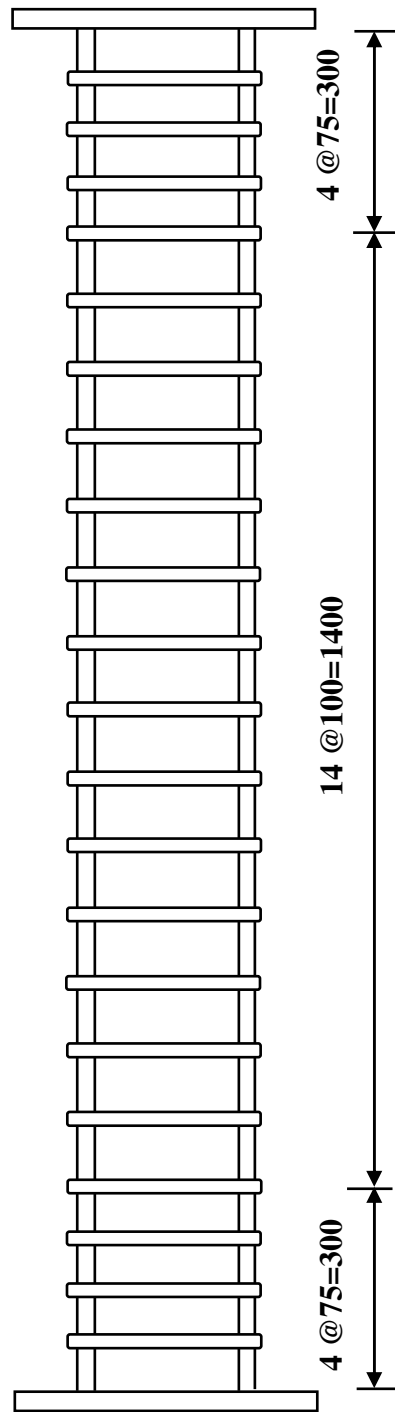


圖 3-5 箍筋配置圖

(資料來源:本研究整理)

## 貳、熱電偶線配置

依照 CNS 12514 規定，試體需設置熱電偶監測溫度，並使用 0.75 級性能以上及直徑 0.65 mm 之 K 型熱電偶線，以確保良好的熱接觸。受制於實驗設備之限制，試體上、下端距離底板各保留 350 mm 未受熱，本研究試體熱電偶測點位於柱中心斷面，熱電偶測點的設置以受火情況以及斷面形狀對稱性為主要考量，每個試體熱電偶測點安排，如圖 3-6 至圖 3-9 所示。

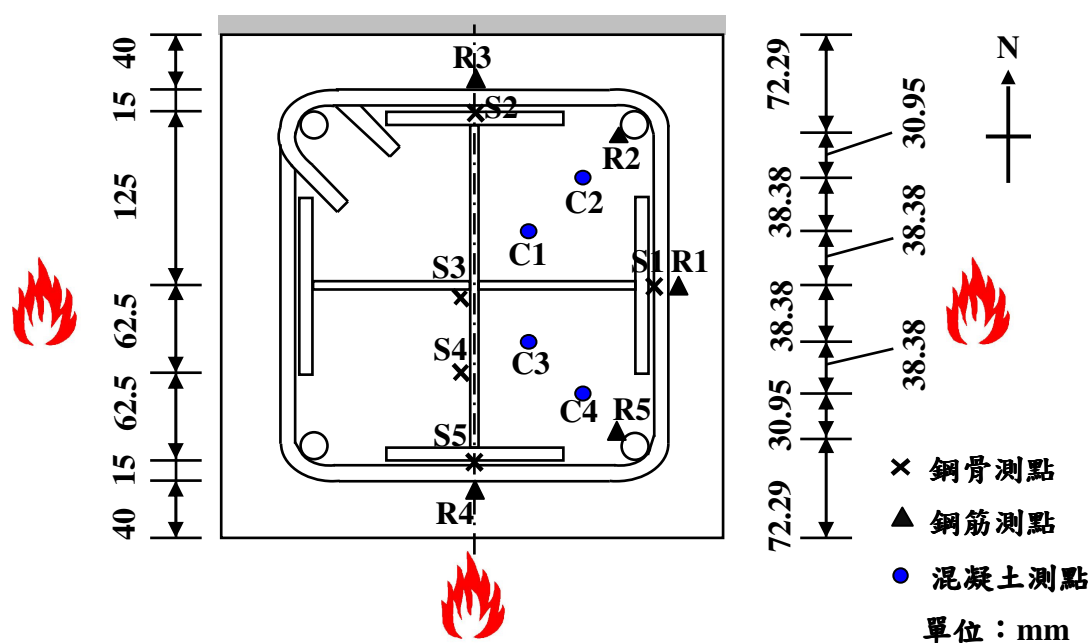


圖 3-6 方形 SRC 邊柱熱電偶線配置圖

(資料來源:本研究整理)

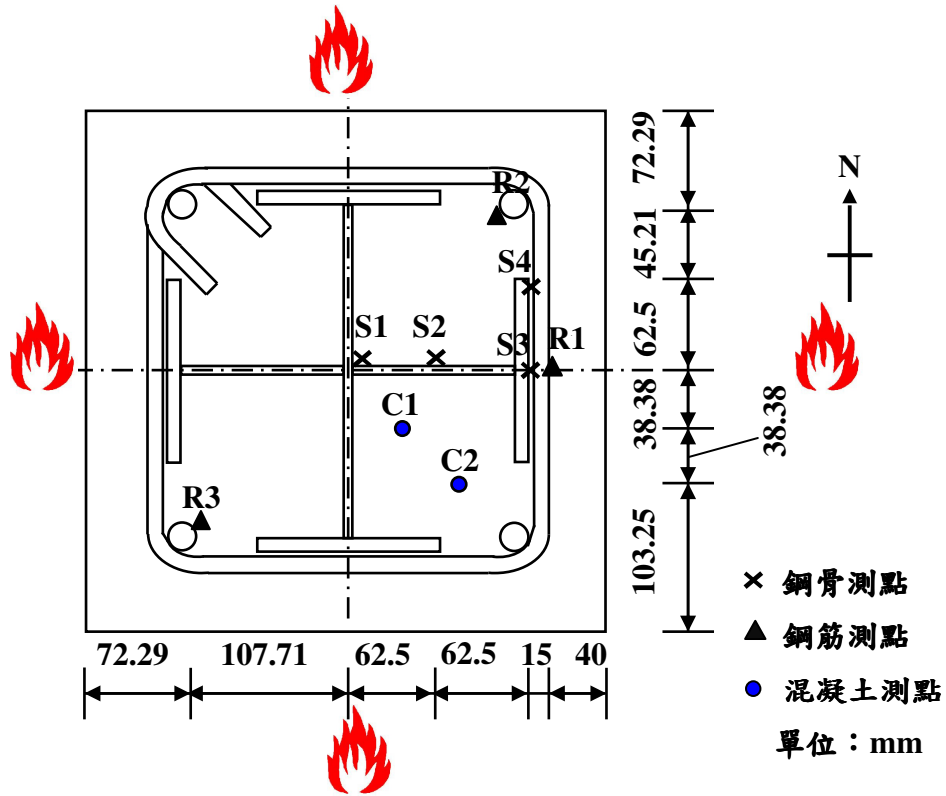


圖 3-7 方形 SRC 中間柱熱電偶線配置圖

(資料來源:本研究整理)

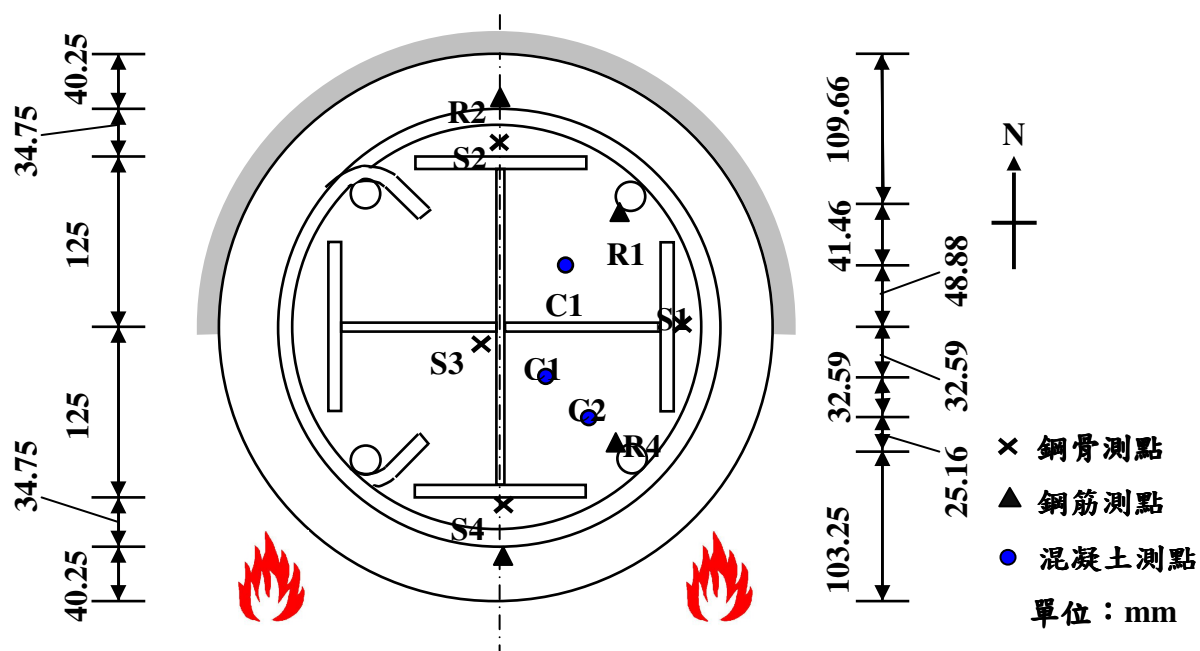


圖 3-8 圓形 SRC 邊柱熱電偶線配置圖

(資料來源:本研究整理)



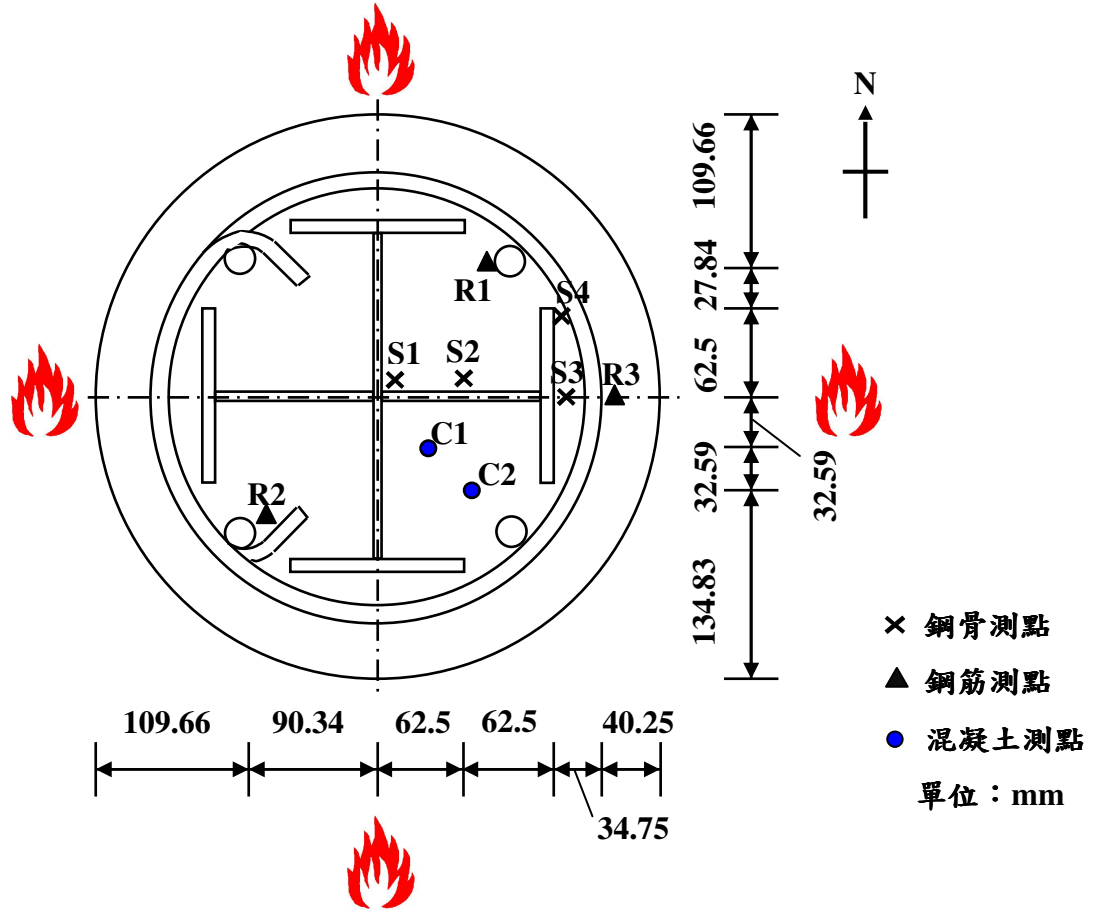


圖 3-9 圓形 SRC 中間柱熱電偶線配置圖

(資料來源:本研究整理)

### 參、試體製作

試體製作程序如下：

1. 製作十字型鋼骨、訂作縱向主筋、箍筋
2. 銲接上下兩端板
3. 鋼骨鋼筋籠製作
4. 熱電偶線預埋
5. 模板製作與組裝
6. 混凝土澆置

## 7. 混凝土養護



(a) 方形斷面

(b) 圓形斷面

**圖 3-10 柱試體施工照片**

(資料來源:本研究整理)

本實驗採用 A36 鋼材，其降伏強度為 445 MPa，抗拉強度為 514 MPa。混凝土則採用設計強度分別為  $350 \text{ kgf/cm}^2$  與  $560 \text{ kgf/cm}^2$  之預拌自充填混凝土，其圓柱試體抗壓試驗期間之平均抗壓強度分別為  $478 \text{ kgf/cm}^2$  與  $631 \text{ kgf/cm}^2$ 。鋼筋降伏強度為  $5556 \text{ kgf/cm}^2$ 。

### 第三節 實驗裝置

#### 壹、加載及升溫儀器

本研究擬使用內政部建築研究所台南防火實驗室小型複合高溫爐，如圖 3-11 所示，其加熱空間為 120×120×120 cm，爐兩側各有 2 個噴火孔，共 4 個燃燒機提供熱能，使用燃料為液化瓦斯，加熱爐上方安裝一加載能力為 100 噸之油壓機。試驗裝置，如圖 3-12 所示。



圖 3-11 小型複合高溫爐

(資料來源:本研究整理)

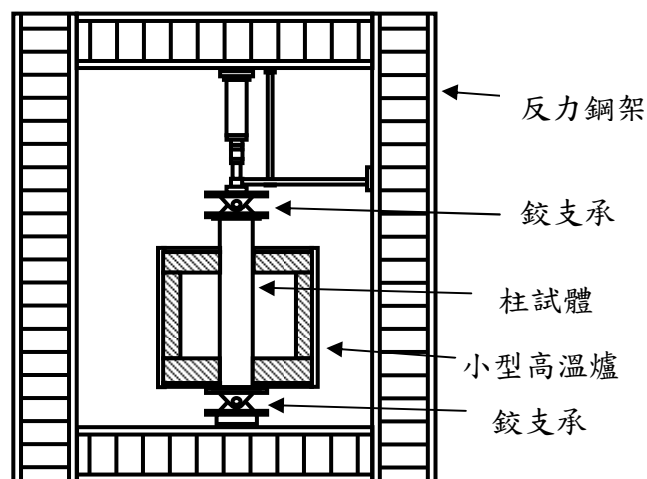


圖 3-12 試驗設置示意圖

(資料來源:本研究整理)

### 貳、量測儀器

油壓機加載的載重大小由油壓機獨立之量力計(Load cell)進行量測監控。柱之軸向壓縮量及上下柱頂面轉動由柱頂面南北側各安裝電橋式位移計(LVDT)，見圖 3-13，由此計算出柱轉角及軸向變形。溫度量測由 Yagawa DA100 及 DS600 溫度計錄器配合工業電腦及軟體，間隔每 10 秒紀錄一次。



圖 3-13 柱頂端位移計架設

(資料來源:本研究整理)

## 第四節 實驗步驟

依照 CNS 12514 規定，試驗步驟如下所示：

### 壹、試驗開始前

對於試體，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，試體變形應不再變化，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，且爐內溫度需小於 50°C 及室內氣溫須在 10°C ~40°C 範圍之內。

### 貳、試驗過程

當溫度依照標準加熱曲線函數開始升溫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，其標準加熱溫度-時間曲線如圖 3-14 所示。其中加熱函數為  $T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$ 。式中， $T$  = 平均爐內溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )； $t$  = 試驗經過時間(分)。

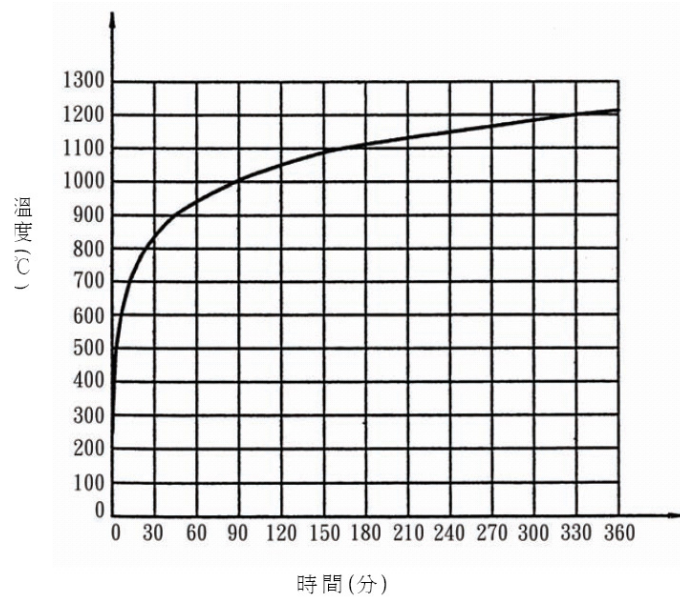


圖 3-14 標準加熱溫度-時間曲線

(資料來源：CNS 12514)

### 參、量測與觀察

在熱電偶溫度測點量測方面，溫度應每隔不超過一分鐘量測一次溫度，且應觀察注意試體是否達試驗終止條件，若否須記錄其試體破壞的時間。高溫實驗進行時，須詳細記錄試體的狀況有無爆裂、保護層剝落等情形。高溫實驗結束後，待冷卻後打開爐門，觀察試體之外觀變化並詳實記錄之。

### 肆、試驗終止條件

本研究根據 CNS12514，試驗終止條件如下所示：

1. 試驗中已達到性能基準。
2. 試驗時間已達預定時間。
3. 若人員安全或設備可能遭受破壞，試驗須立即停止。

鋼骨鋼筋混凝土高溫材料性質之研究

本研究因加溫爐之容量，試驗終止條件將以五小時為限，或試體溫度達破壞基準即鋼材最高值超過 550°C 或平均溫度超過 500°C。

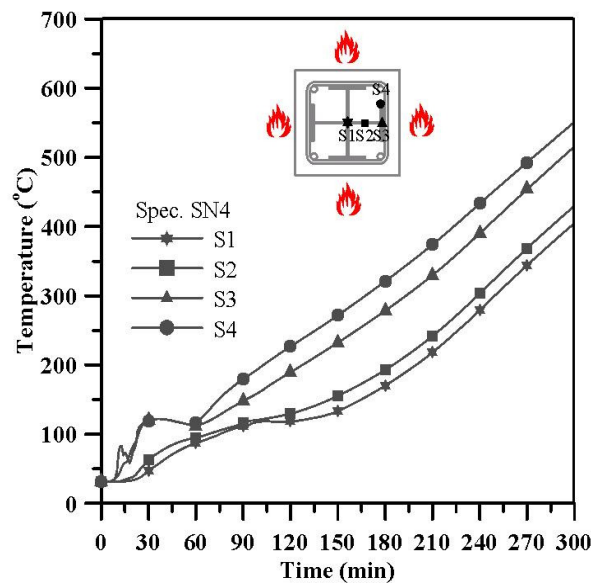


## 第四章 實驗結果與討論

### 第一節 高溫試驗各測點溫度歷時

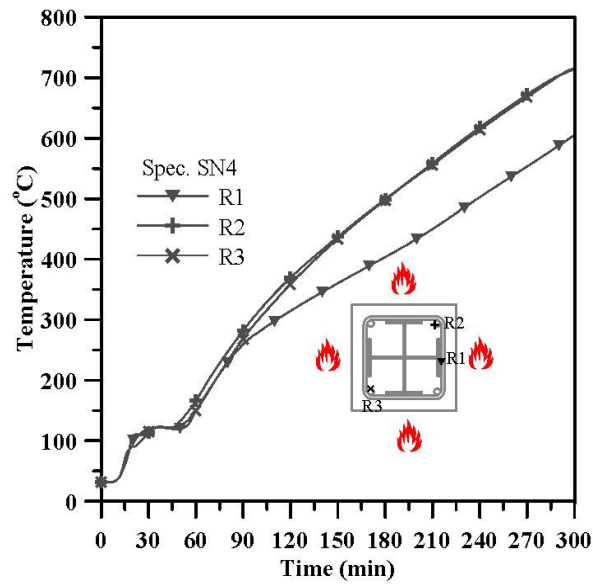
高溫試驗各測點溫度歷時，如圖 4-1 至 4-8 所示，各測點於升溫至 100°C 與 120°C 會出現一明顯之溫度平台，是由於混凝土內部孔隙水之汽化，待完全氣化後溫度往上攀升，其中以混凝土及鋼骨測點溫度平台較為明顯，且靠近受火面表面溫度平台愈明顯。如圖 4-1 (d)、4-2(d)所示，由鋼骨腹板中心 S2 與鄰近之混凝土測點 C1 比較可知鋼骨溫度歷時較混凝土測點溫度高，火害之熱由混凝土表面傳入鋼骨翼板，再經由鋼骨高導熱的特性傳入鋼骨腹板到達斷面中心，使中心溫度升高，可知鋼骨會影響柱試體內部斷面溫度之分佈情形。鋼筋測點部分圓形柱箍筋由於在高溫試驗中前 30 分鐘產生混凝土爆裂使箍筋外露，使溫度急速飆高，如圖 4-2 (b)、4-4 (b)、4-6 (b)、4-8 (b)所示；角隅處主筋測點溫度歷時較高，如圖 4-1 (b)，顯示受方型柱角隅處升溫較快。

#### 試體 SN4



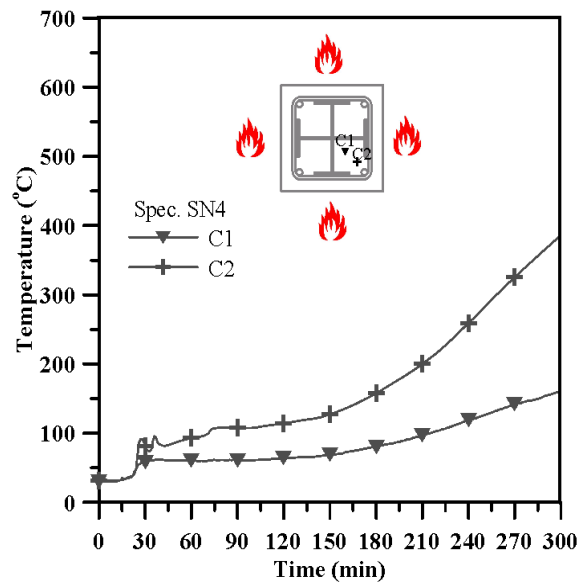


(a) 試體 SN4 鋼骨測點溫度歷時

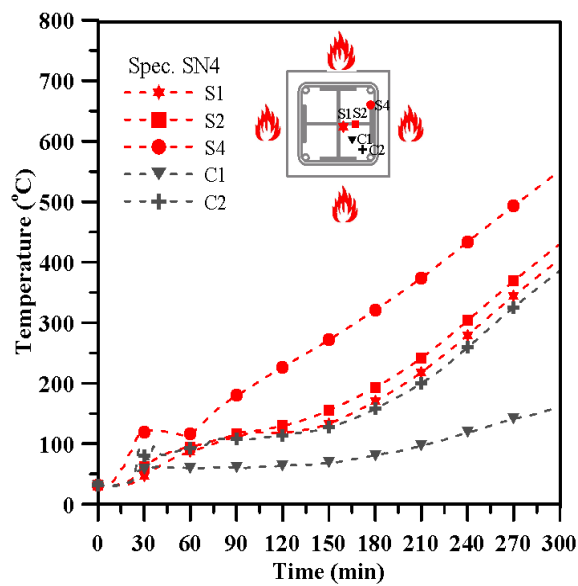


(b) 試體 SN4 鋼筋測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)



(c) 試體 SN4 混凝土測點溫度歷時



(d) 試體 SN4 鋼骨及混凝土測點溫度歷時

圖 4-1 試體 SN4 測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)

表 4-1 試體 SN4 試驗結果

試體編號:SN4	
混凝土抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	452
試驗時間(hr.)	5
混凝土中心相對濕度 (% RH)	89.3
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	8.15
鋼筋是否外露	否
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	輕微
試驗終止時爐溫(°C)	1183
試驗終止時鋼骨中心測點 S1 溫度(°C)	405
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S4 溫度(°C)	551
試驗終止時角隅主筋測點 R1(°C)	714
試驗終止時角隅箍筋測點 R3(°C)	605
試驗終止時混凝土延對角線向外 1/3 處測點 C1(°C)	162
試驗終止時混凝土延對角線向外 2/3 處測點 C2(°C)	384

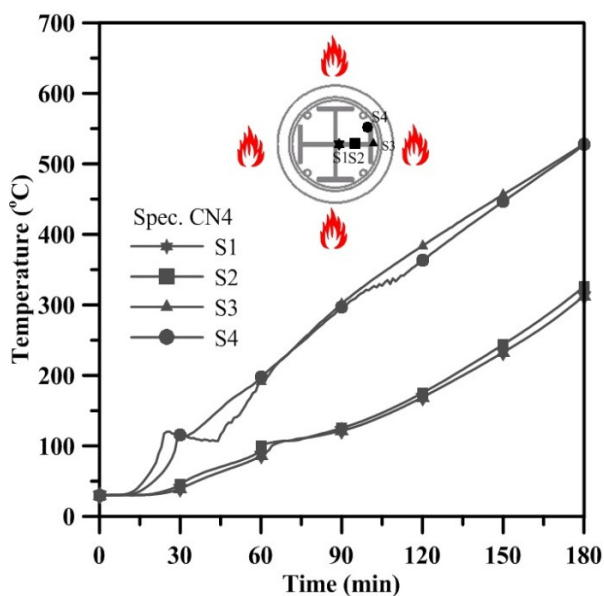
(資料來源:本研究整理)

表 4-2 試體 SN4 各測點溫度歷時

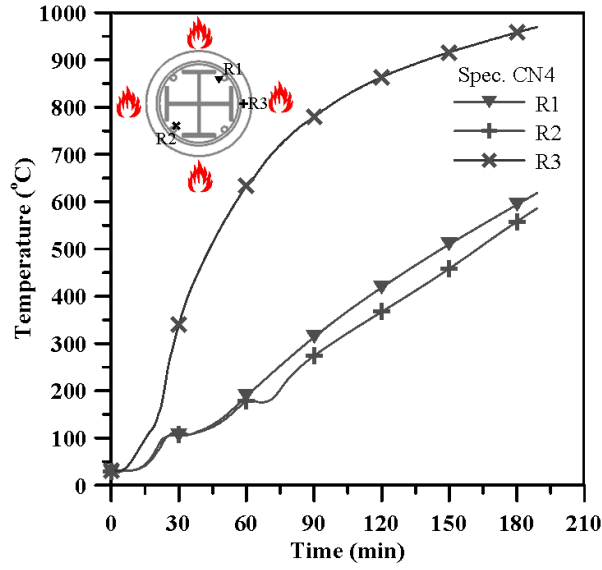
測點溫度 (°C)	時程(min.)					
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.	300 min.
S1	46.9	87.1	118.8	170.1	279.3	405
S2	62.7	95	129.9	192.9	303.6	430.1
S3	119.9	111.5	189.8	278.4	390.4	515.8
S4	119.4	116.5	226.9	321	433.4	551.6
R1	119.2	149.7	314.6	403.5	502.6	605.5
R2	113.9	166.4	369.6	499.2	617.8	714.4
R3	114.8	149.8	359	497.8	613.7	715.6
C1	80.8	93.2	114.2	157.8	259.3	384.4
C2	58.6	60.1	63.9	80.5	118.8	162
平均爐溫	831.4	942.1	1042.7	1111.8	1151.9	1183.1

(資料來源:本研究整理)

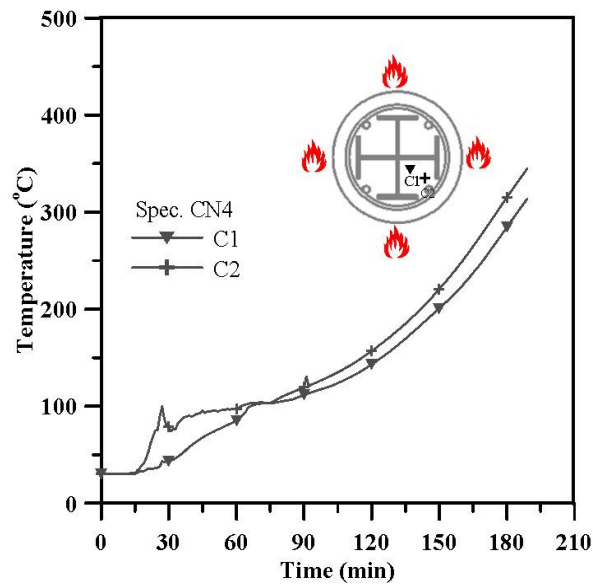
試體 CN4



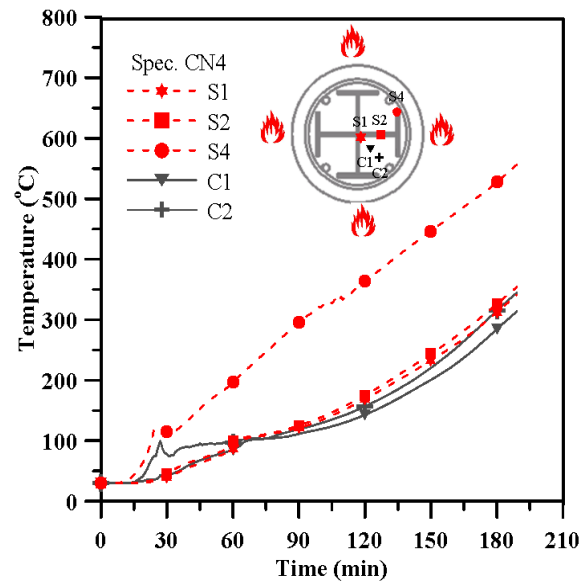
(a) 試體 CN4 鋼骨測點溫度歷時



(b) 試體 CN4 鋼筋測點溫度歷時



(c) 試體 CN4 混凝土測點溫度歷時



(d) 試體 CN4 鋼骨及混凝土測點溫度歷時

圖 4-2 試體 CN4 測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)

表 4-3 試體 CN4 試驗結果

試體編號:CN4	
混凝土抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	483
試驗時間(min.)	189
混凝土中心相對濕度 (% RH)	83.5
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	5.9
鋼筋是否外露	是
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	嚴重
試驗終止時爐溫(°C)	1119
試驗終止時鋼骨中心測點 S1 溫度(°C)	341
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S4 溫度(°C)	556
試驗終止時主筋測點 R1(°C)	619
試驗終止時箍筋測點 R3(°C)	970
試驗終止時延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	314
試驗終止時延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	345

(資料來源:本研究整理)

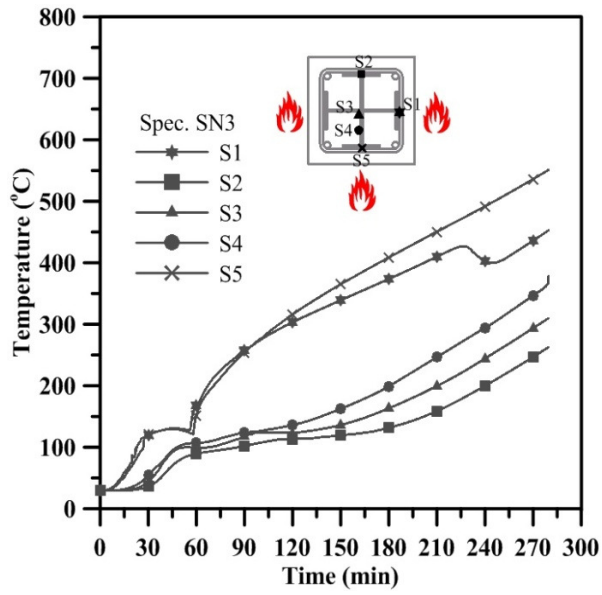
表 4-4 試體 CN4 各測點溫度歷時

測點溫度 (°C)	時程(min.)				
	11min.	21 min.	60 min.	120 min.	189 min
S1	30.3	31.6	86.9	169.1	341.0
S2	30.2	33.1	100.0	175.2	354.1
S3	31.6	52.8	191.1	383.3	550.7
S4	32.9	76.3	197.5	363.4	556.3
R1	33.5	85.4	188.7	418.6	618.6
R2	33.1	74.6	178.6	367.2	586.1
R3	66.4	151.7	633.4	863.9	969.8
C1	30.4	36	85.2	141.3	313.7
C2	30.7	53.4	97.5	157.0	344.8
平均爐溫	668.7	777.6	945.7	1050.7	1119.07

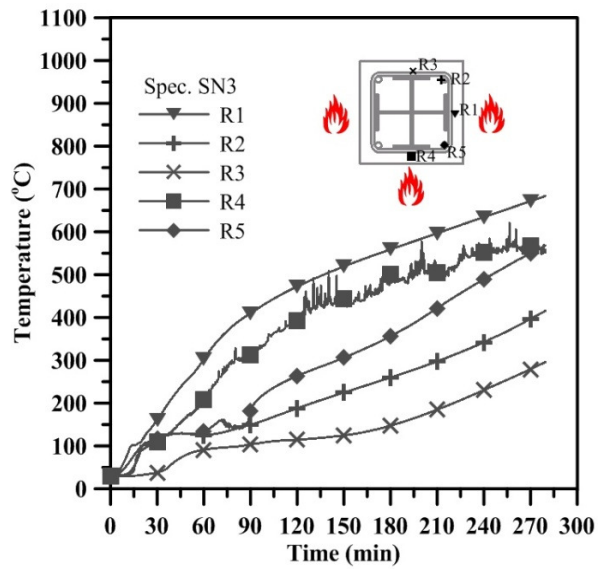
(資料來源:本研究整理)



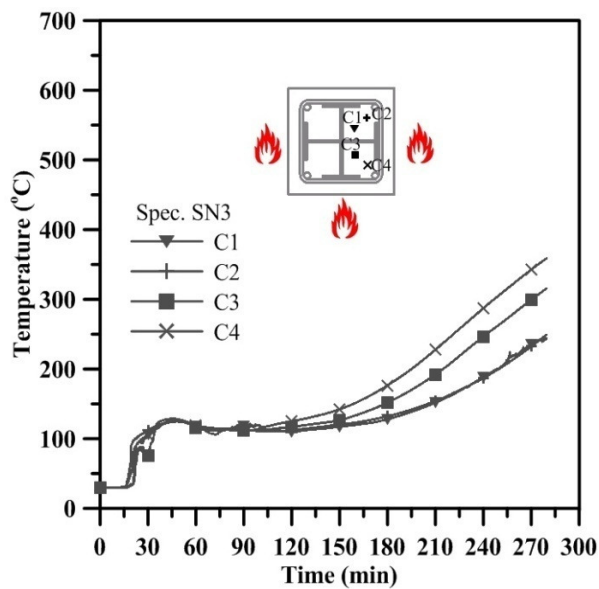
試體 SN3



(a) 鋼骨測點溫度歷時



(b) 鋼筋測點溫度歷時



(c) 混凝土測點溫度歷時

圖 4-3 試體 SN3 測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)

表 4-5 試體 SN3 試驗結果

試體編號:SN3	
混凝土抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	-
試驗時間(min)	270
混凝土中心相對濕度 (% RH)	97.7
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	5.5
鋼筋是否外露	否
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	輕微
試驗終止時爐溫(°C)	1074
試驗終止時包防火棉側鋼骨翼板中心測點 S2 溫度(°C)	263
試驗終止時鋼骨中心測點 S3 溫度(°C)	307
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S5 溫度(°C)	551
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R3(°C)	296
試驗終止時包防火棉側主筋測點 R2(°C)	415
試驗終止時受火面主筋測點 R5(°C)	568
試驗終止時包防火棉側延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	244
試驗終止時包防火棉側延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	249
試驗終止時受火面延對角向外 1/3 處混凝土測點 C3(°C)	316
試驗終止時受火面延對角向外 2/3 處混凝土測點 C4(°C)	358

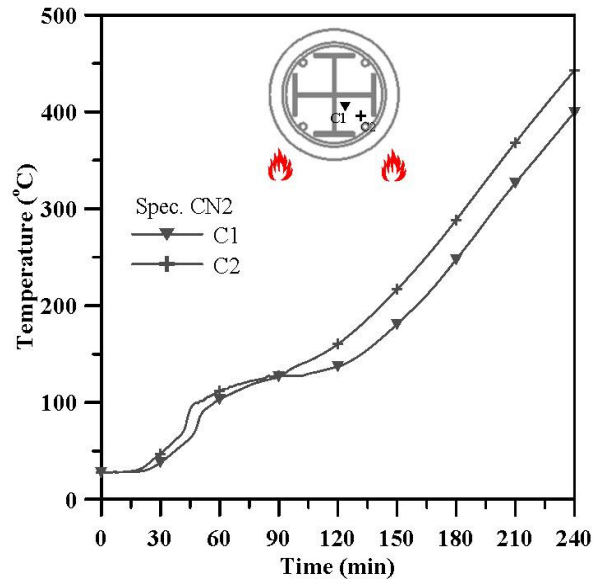
(資料來源:本研究整理)

表 4-6 試體 SN3 各測點溫度歷時

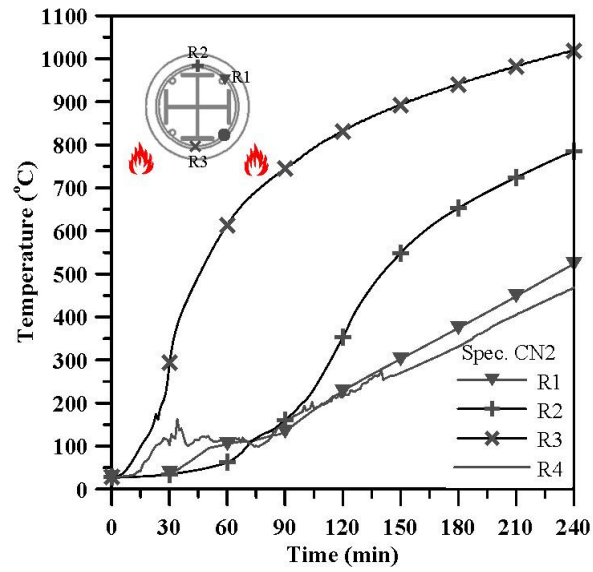
測點溫度 (°C)	時程(min.)					
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.	278 min.
S1	119.4	167.3	302.9	373.2	402.8	449.5
S2	35.7	89.3	113.2	131.3	199.5	259.6
S3	42.5	98.7	122.9	162.8	243.8	306.7
S4	54.0	106.9	136.0	198.3	293.8	361.3
S5	120.3	149.3	315.8	408.1	491.5	551
R1	159.4	302.0	471.7	558.5	634.0	681.2
R2	110.7	125.4	187.5	259.4	341.7	411.7
R3	37.9	91.0	114.0	146.9	229.9	292.6
R4	109.6	205.7	391.2	497.6	552.1	555.4
R5	117.3	133.8	263.2	355.3	489.1	564.7
C1	104.8	118.4	109.8	127.8	187.9	240.9
C2	112.1	118.5	111.9	132.0	186.8	245.9
C3	75.6	115.8	116.9	151.4	246.0	312.6
C4	104.2	119.6	125.0	176.1	286.1	355.7
平均爐溫	850.9	943.2	1044.3	1105.7	1139.4	1171.8

(資料來源:本研究整理)

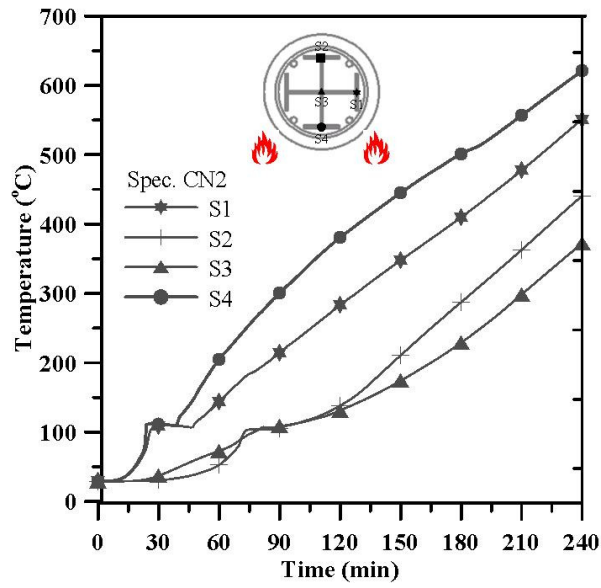
試體 CN2



(a) 鋼骨測點溫度歷時



(b) 鋼筋測點溫度歷時



(c) 混凝土測點溫度歷時

圖 4-4 試體 CN2 測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)

表 4-7 試體 CN2 試驗結果

試體編號:CN2	
混凝土抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	498.6
試驗時間(hr.)	4
混凝土中心相對濕度 (% RH)	9.5
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	6.05
鋼筋是否外露	是
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	嚴重
試驗終止時爐溫(°C)	1143
試驗終止時包防火棉側鋼骨翼板中心測點 S2 溫度(°C)	440
試驗終止時鋼骨中心測點 S3 溫度(°C)	372
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S5 溫度(°C)	524
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R3(°C)	1018
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R2(°C)	785
試驗終止時受火面主筋測點 R5(°C)	1145
試驗終止時包防火棉側延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	180
試驗終止時包防火棉側延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	366
試驗終止時受火面延對角向外 1/3 處混凝土測點 C3(°C)	407

(資料來源:本研究整理)

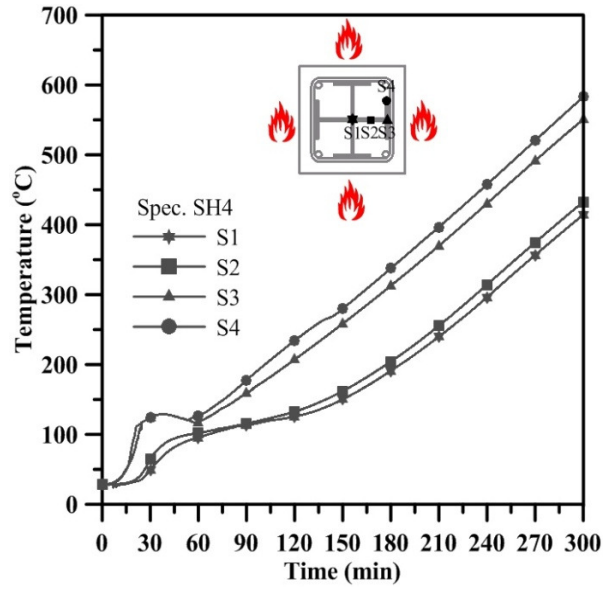
表 4-8 試體 CN2 各測點溫度歷時

測點溫度 (°C)	時程(min.)				
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.
S1	109.2	144.4	283.1	409.8	551.2
S2	30.5	52.5	138.1	287.3	440.8
S3	37.2	72.8	131.1	228.9	372.4
S4	111.8	204.2	380.4	501.6	523.5
R1	37.9	104.8	228.1	374.7	621.1
R2	34.7	62.3	353.1	653.2	784.5
R3	293.6	614.0	831.2	940.6	1018.5
R4	102.1	113.3	214.5	331.4	468.5
C1	30.6	47.8	70.8	103.9	179.8
C2	47.2	78.5	124.9	222.2	365.5
C3	81.8	97.5	134.6	247.7	407.2
平均爐溫	837.6	943	1041.0	1094.3	1142.6

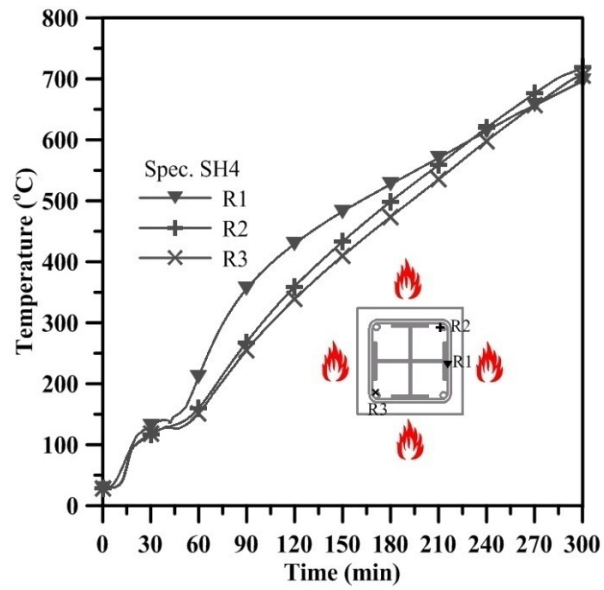
(資料來源:本研究整理)



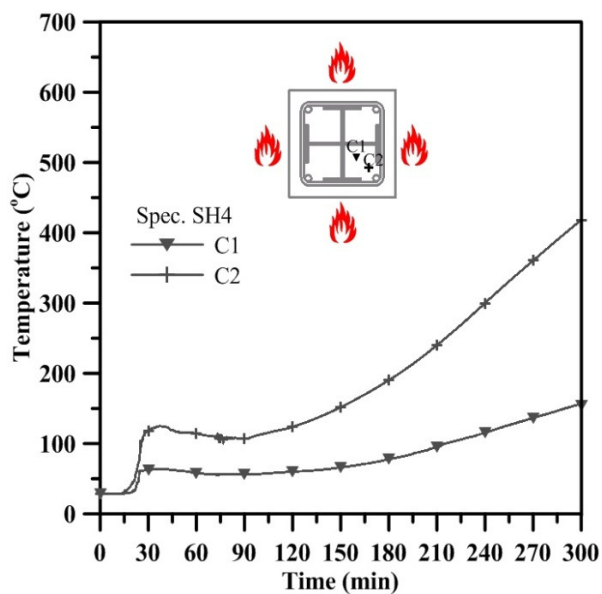
試體 SH4



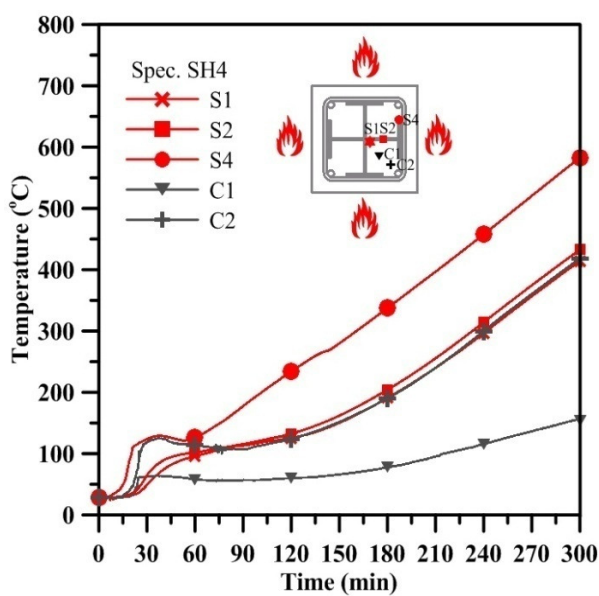
(a)鋼骨測點溫度歷時



(b)鋼筋測點溫度歷時



(c) 混凝土測點溫度歷時



(d) 鋼骨與混凝土測點溫度歷時比較

圖 4-5 試體 SH4 測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)

表 4-9 試體 SH4 試驗結果

試體編號:SH4	
混凝土抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	623
試驗時間(hr.)	5
混凝土中心相對濕度 (% RH)	95
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	7.45
鋼筋是否外露	否
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	無
試驗終止時爐溫(°C)	1180
試驗終止時鋼骨中心測點 S1 溫度(°C)	414
試驗終止時鋼骨翼板中心測點 S3 溫度(°C)	550
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S4 溫度(°C)	583
試驗終止時角隅主筋測點 R1(°C)	712
試驗終止時角隅箍筋測點 R3(°C)	696
試驗終止時混凝土延對角線向外 2/3 處測點 C2(°C)	418

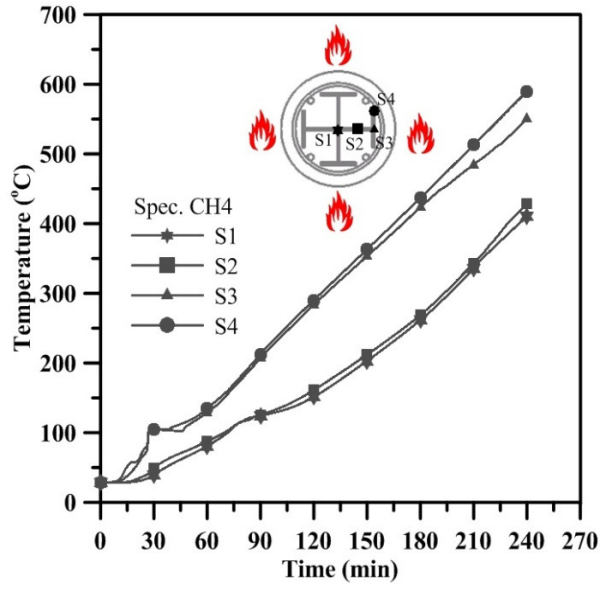
(資料來源:本研究整理)

表 4-10 試體 SH4 各測點溫度歷時

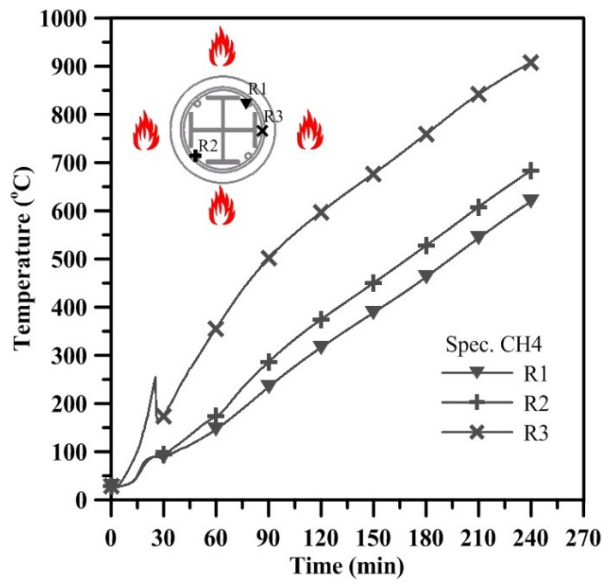
測點溫度 (°C)	時程(min.)					
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.	300 min.
S1	48.6	95.5	125.5	190.8	296.1	414.1
S2	64.7	101.8	132.4	204.2	314.1	432.6
S3	123.7	116.8	206.8	312.5	430.1	550.3
S4	123.6	126.5	233.9	337.4	457.5	582.8
R1	130.3	211.3	429.2	526.8	614.2	696.4
R2	116.7	159.7	359.0	498.5	619.5	718.9
R3	117.6	151.2	338.6	473.4	597.9	705.8
C1	62.4	58.0	59.7	77.4	115.4	154.5
C2	117.5	114.3	123.5	189.9	299.8	418.2
平均爐溫	830.6	937.7	1032.5	1101.3	1145.2	1180.4

(資料來源:本研究整理)

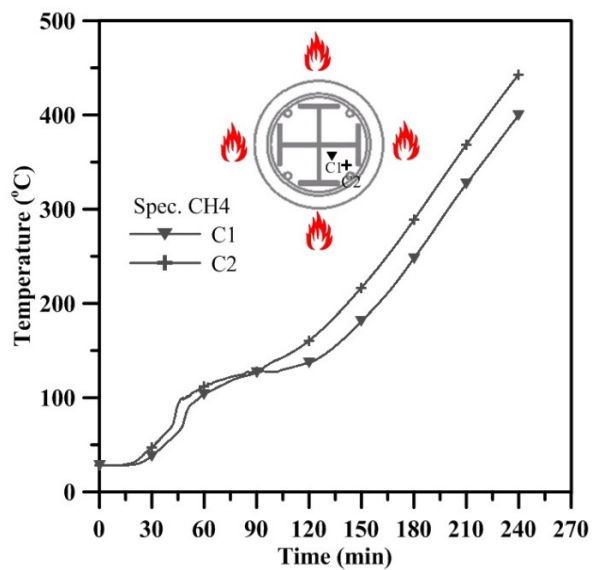
試體 CH4



(a) 鋼骨測點溫度歷時



(b) 鋼筋測點溫度歷時



(c) 混凝土測點溫度歷時

圖 4-6 試體 CH4 測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)

表 4-11 試體 CH4 試驗結果

試體編號:CH4	
混凝土抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	640
試驗時間(hr.)	4
混凝土中心相對濕度 (% RH)	95
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	5.71
鋼筋是否外露	是
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	嚴重
試驗終止時爐溫(°C)	1149
試驗終止時鋼骨翼板中心測點 S3 溫度(°C)	551
試驗終止時鋼骨中心測點 S1 溫度(°C)	410
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S4 溫度(°C)	590
試驗終止時箍筋測點 R3(°C)	908
試驗終止時主筋測點 R2(°C)	683
試驗終止時主筋測點 R1(°C)	619
試驗終止時延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	400
試驗終止時延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	443

(資料來源:本研究整理)

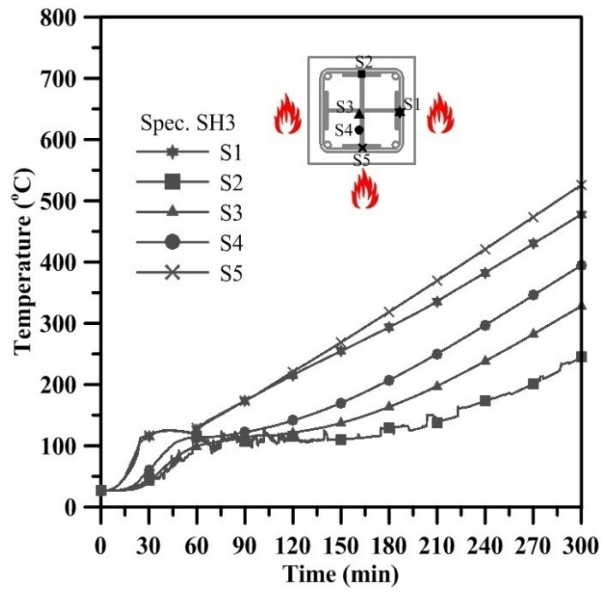
表 4-12 試體 CH4 各測點溫度歷時

測點溫度 (°C)	時程(min.)				
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.
S1	39.6	80.8	151.4	261.4	410.3
S2	48.7	87.5	160.8	268.8	428.1
S3	104.6	129.1	283.4	423.2	550.7
S4	105.1	134.4	290.1	436.9	589.7
R1	88.1	146.3	316.0	462.5	619.4
R2	94.0	173.4	374.3	527.5	683.4
R3	173.6	355.2	596.8	759.5	907.7
C1	37.8	103.4	137.0	247.7	399.4
C2	47.2	111.9	160.3	288.6	442.9
平均爐溫	836.1	941.0	1047.0	1109.2	1150.4

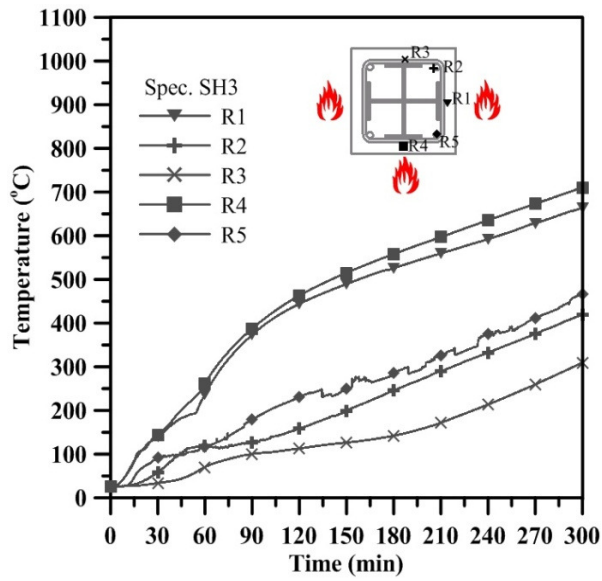
(資料來源:本研究整理)



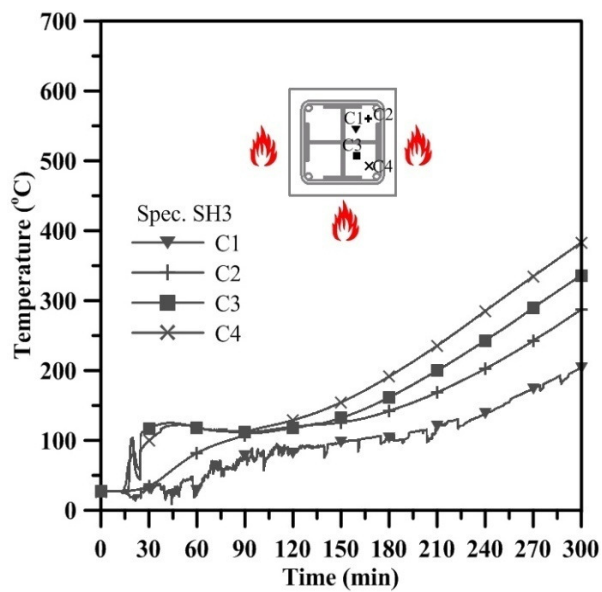
試體 SH3



(a)鋼骨測點溫度歷時



(b)鋼筋測點溫度歷時



(c) 混凝土測點溫度歷時

圖 4-7 試體 SH3 測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)

表 4-13 試體 SH3 試驗結果

試體編號:SH3	
混凝土抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	594
試驗時間(min)	300
混凝土中心相對濕度 (% RH)	86
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	6.39
鋼筋是否外露	否
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	輕微
試驗終止時爐溫(°C)	1170
試驗終止時包防火棉側鋼骨翼板中心測點 S2 溫度(°C)	244
試驗終止時鋼骨中心測點 S3 溫度(°C)	328
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S5 溫度(°C)	526
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R3(°C)	309
試驗終止時包防火棉側主筋測點 R2(°C)	419
試驗終止時受火面主筋測點 R5(°C)	466
試驗終止時包防火棉側延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	204
試驗終止時包防火棉側延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	287
試驗終止時受火面延對角向外 1/3 處混凝土測點 C3(°C)	335
試驗終止時受火面延對角向外 2/3 處混凝土測點 C4(°C)	382

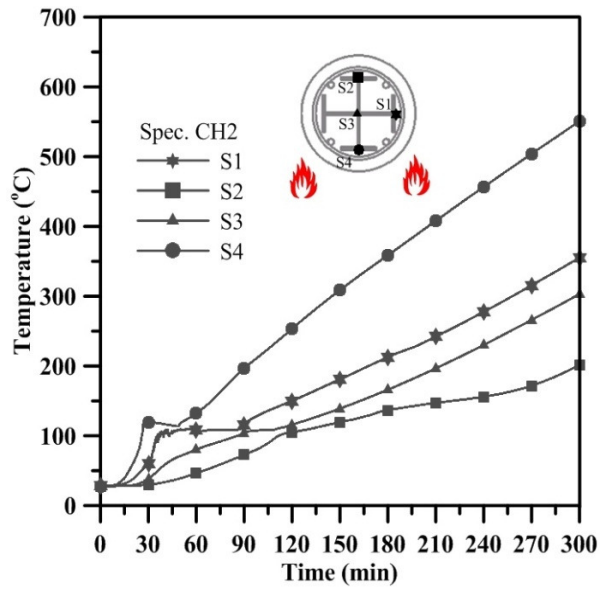
(資料來源:本研究整理)

表 4-14 試體 SH3 各測點溫度歷時

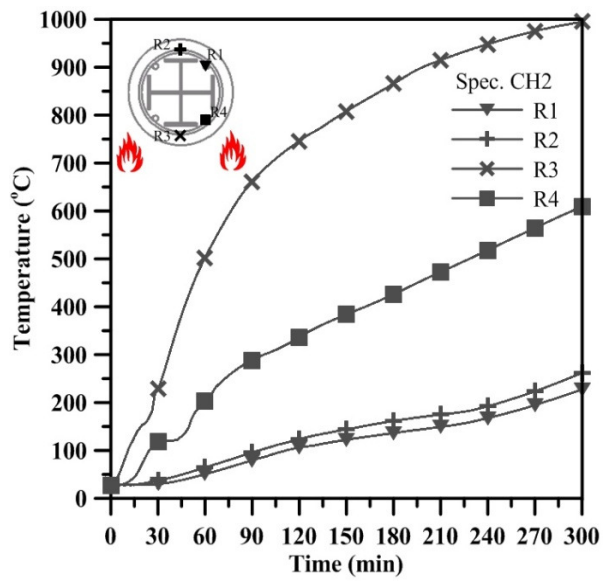
測點溫度 (°C)	時程(min.)					
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.	300 min.
S1	115.3	126.8	215.3	293.4	382.6	477.6
S2	46.3	115.6	115.6	129.1	173.0	244.7
S3	40.2	99.3	121.2	163.3	238.0	327.8
S4	60.5	112.9	141.2	207.0	296.8	394.3
S5	117.3	129.0	220.8	318.4	420.8	525.6
R1	138.8	236.9	443.7	525.2	592.1	663.4
R2	58.9	119.5	158.5	245.5	332.4	419.8
R3	33.4	70.2	112.6	141.8	213.4	309.2
R4	144.2	260.9	462.8	557.9	635.9	710.5
R5	92.8	116.7	230.4	286.7	375.3	466.1
C1	31.3	28.5	81.1	103.2	138.0	204.1
C2	34.7	81.7	119.6	141.9	202.3	287.0
C3	116.1	118.3	117.7	161.4	242.8	335.6
C4	99.4	118.4	128.6	191.4	284.9	382.7
平均爐溫	840.7	946.2	1047.4	1104.7	1139.0	1170.9

(資料來源:本研究整理)

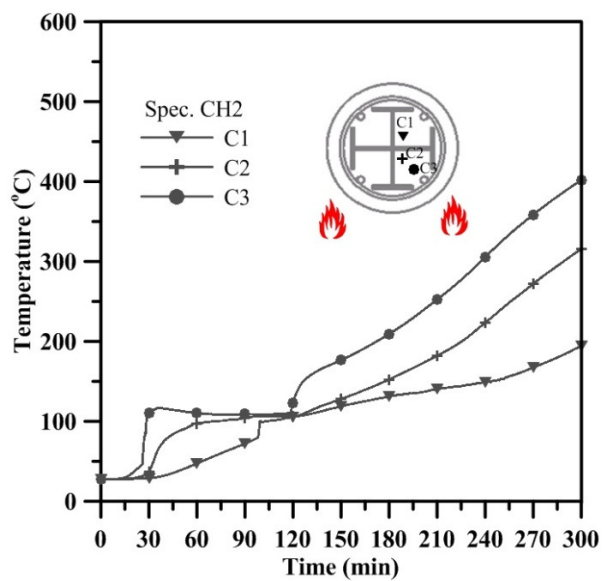
試體 CH2



(a) 鋼骨測點溫度歷時



(b) 鋼筋測點溫度歷時



(c) 混凝土測點溫度歷時

圖 4-8 試體 CH2 測點溫度歷時

(資料來源:本研究整理)

表 4-15 試體 CH2 試驗結果

試體編號:CH2	
混凝土抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	640
試驗時間(hr.)	5
混凝土中心相對濕度 (% RH)	83.5
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	5.24
鋼筋是否外露	是
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	嚴重
試驗終止時爐溫(°C)	1173
試驗終止時包防火棉側鋼骨翼板中心測點 S2 溫度(°C)	200
試驗終止時鋼骨中心測點 S3 溫度(°C)	303
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S4 溫度(°C)	550
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R3(°C)	994
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R2(°C)	260
試驗終止時受火面主筋測點 R4(°C)	608
試驗終止時包防火棉側延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	193
試驗終止時包防火棉側延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	314
試驗終止時受火面延對角向外 1/3 處混凝土測點 C3(°C)	400

(資料來源:本研究整理)

表 4-16 試體 CH2 各測點溫度歷時

測點溫度 (°C)	時程(min.)					
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.	300 min.
S1	60.4	108.8	149.9	212.6	277.5	354.8
S2	29.7	46.0	105.0	136.6	155.9	201.1
S3	38.5	80.0	115.8	165.9	230.0	302.8
S4	119.3	131.8	253.3	358.6	456.3	550.4
R1	29.6	50.2	105.9	136.1	167.4	227.1
R2	36.6	64.1	123.3	161.3	192.1	261.7
R3	228.5	502.1	745.4	865.4	948.0	994.8
R4	117.8	202.7	336.2	425.7	517.9	609.2
C1	28.8	47.1	105.3	130.9	149.1	194.0
C2	36.6	97.3	106.2	152.2	223.3	315.3
C3	109.9	110.3	123.1	209.0	305.5	401.3
平均爐溫	878.1	964.0	1049.5	1117.7	1151.6	1030.5

(資料來源:本研究整理)

## 第二節 高溫試驗時各試體軸向變形及柱端相對總轉角

根據文獻，柱構件受到火害變形行為如下，加溫初期隨著溫度升高，柱體產生膨脹伸長，但隨著柱體內部溫度升高，柱體的彈性模數隨之遞減，使柱體勁度折減，在定載的情況下，軸向變形量不再像常溫一樣維持定值，而是逐漸地失去抵抗載重變形的能力，直到膨脹達最大值，當柱膨脹速率小於壓縮速率時，柱便開始壓縮，軸向壓縮速率逐漸增快，終至破壞。

由表 4-17 可得知各試體於高溫試驗中軸向變形及邊柱柱端相對總轉角值，因本試驗軸向加載小所有試體於高溫試驗中皆未進入壓縮階段，至高溫實驗結束時仍持續性膨脹。



表 4-17 高溫試驗時各試體軸向變形及柱端相對總轉角

試體編號	火害中 軸向變位 (mm)	柱端 相對總轉角 (rad)	火害延時 (min.)
SN4	8.15	-	300
CN4	5.9	-	189
SH4	7.58	-	300
CH4	6.08	-	240
SN3	6.74	0.125	300
CN2	6.49	0.113	240
SH3	6.39	0.096	300
CH2	5.32	0.117	300

(資料來源:本研究整理)

### 第三節 高溫試驗後各試體破壞模式

包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱的耐火性能，與鋼骨至混凝土表面的保護層厚度有極大關係，混凝土為熱傳性較低的材料，可延遲柱內部鋼骨力學性質受高溫的破壞，提升柱之防火時效。因此調查火災後表面保護層損害情況為研判損壞程度的重要依據。根據文獻，一般火害後混凝土表面之觀察重點有表面裂縫數量及分佈、爆裂、顏色變化及鋼筋外露等情形。

#### 試體 SN4 與試體 SH4

高溫試驗結束後，爐內溫度依舊相當高待試體經過 21 小時冷卻後打開爐門觀察，SN4 試體在加溫爐內的情形如圖 4-9 (a)-(b)，表面受熱段有明顯裂縫，裂縫寬度約略 1 mm，其中裂縫多集中於試體受熱段角隅處，角隅處的裂縫寬度較寬，接近 2 mm。角隅處混凝土剝落如圖 4-9 (b)所示，顏色變化最深呈現焦黃色，如圖 4-9 (c)所示。試體受熱段表面顏色約呈現均勻的淺黃色，未受熱段顏色則無明顯變化，呈現混凝土本來的灰色。試體東北角隅剝落，剝落縱長約略延伸 147 cm，如圖 4-9 (c)所示，靠近受熱段下段剝落寬度最長約 8 cm，角隅處保護層剝落深度約略 3 cm，未觀察到箍筋及主筋外露，顯示鋼筋仍受到混凝土良好的保護。

試體 SH4 經高溫試驗後外貌變化，近乎相同的，唯一不同之處僅是試體 SH4 角隅處未如 SN4 發生剝落，見圖 4-9 (e)-(f)。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

(f)

圖 4-9 試體 SN4 與試體 SH4 高溫試驗後外觀變化

(資料來源:本研究整理)

#### 試體 CN4 與試體 CH4

高溫試驗結束待試體經過 21 小時冷卻後打開爐門，試體 CN4 在加溫爐內的情形如圖 4-10 (a)-(f)所示。剝落後的混凝土表面骨材沿著平行受熱面的方向劈裂，呈現磚紅色且發現剝落的混凝土保護層多呈現片狀，如圖 4-11 (c)-(d)所示。觀察到受熱段保護層完全地剝落，如圖 4-11 (f)所示，其中裂縫均勻分布於試體受熱段。試體受熱段表面顏色約呈現均勻的淺黃色，未受熱段顏色則無明顯變化。試體受熱段保護層嚴重剝落，受熱段柱周長由原來 125.6 cm 縮減為平均周長 116.3 cm，其中以柱試體受熱段下半部周長減少最多。受熱段箍筋多處，外露如圖 4-11 (e)-(f)所示，北面箍筋外露最為嚴重，其中包括安裝熱電偶測點 R3 之箍筋，主筋仍受混凝土良好的保護。

試體 CH4 經過高溫試驗後外觀變化與 CN4 大致相同，均發生嚴重的爆裂、

保護層剝落，如圖 4-11 (g)-(h)。



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

(h)

圖 4-10 試體 CN4 與試體 CH4 高溫試驗後外觀變化

(資料來源:本研究整理)

### 試體 SN3 與試體 SH3

高溫試驗結束待試體經過 21 小時冷卻後打開爐門，試體 SN3 在加溫爐內的情形如圖 4-11(a)所示。試體受熱段表面顏色約呈現均勻的淺黃色，未受熱段顏色則無明顯變化。裂縫寬度約略 1 mm，呈現網格狀分佈，受防火綿包覆保護的試體北面，裂縫的密度較受火面少，裂縫寬度多小於 0.5 mm。受熱段西南側一處角隅保護層剝落。

試體 SH3 經過高溫試驗後外觀變化與 SN3 大致相同，但無角隅剝落現象，見圖 4-11(b)。



(a)

(b)

圖 4-11 試體 SN3 與試體 SH3 高溫試驗後外觀變化

(資料來源:本研究整理)

### 試體 CN2 與 CH2

高溫試驗結束待試體經過 21 小時冷卻後打開爐門，觀察到受熱段保護層完全地剝落，受熱段的試體保護層剝落，使用來固定防火綿的熱電偶線鬆脫，熱可能由鬆脫的防火綿旁傳入，此次試驗量測之溫度歷時可能因此失準。

試體 CH2 打開爐門後觀察，受火段表面顏色約呈現均勻的淺黃色，試體受火段保護層嚴重剝落，包覆防火綿段則不受影響，混凝土保護層，見圖 4-12 (b)，防火綿拆掉後混凝土表面約略呈現灰白色。受火段箍筋少量外露，主筋未外露。



(a)

(b)

圖 4-12 試體 CN2 與試體 CH2 高溫試驗後外觀變化

(資料來源:本研究整理)

## 第四節 不同混凝土強度溫度歷時比較

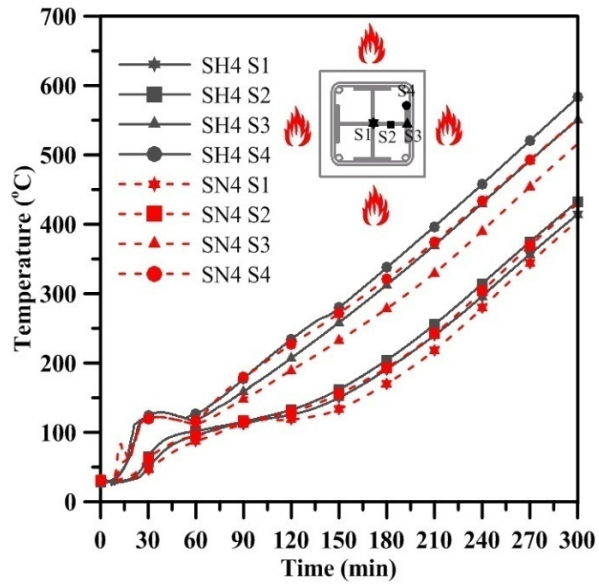
### 試體 SN4 與試體 SH4

鋼骨溫度 SH4 測點溫度歷時皆高於 SN4 測點 10~40°C 之間，如圖 4-13 (a) 所示，升溫梯度、趨勢兩者大致相同。主筋測點溫度歷時 R2 與 R3，SH4 與 SN4 比較並無明顯差異，如圖 4-13 (b)，兩者相差約 20°C。箍筋測點 R3，SN4 則低於 SH4 約 100~120°C。混凝土溫度內側測點 C1，如圖 4-13 (c)所示，SH4 與 SN4 近乎接近，混凝土近表面較近之測點 C2 兩者相差約 40°C，但仍以 SH4 之混凝土測點溫度歷時較高。

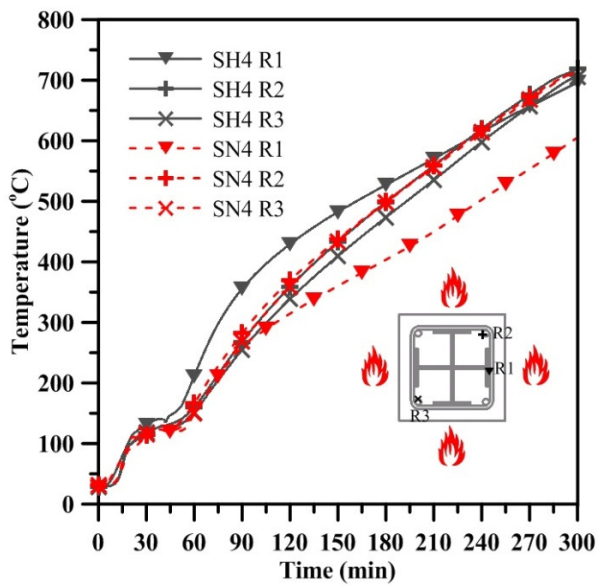
試體 SN4 與試體 SH4 皆為四面受火之方柱，惟混凝土種類不同。斷面溫度之升溫梯度，升溫趨勢，兩者大致相同，使用高強度混凝土之 SH4 試體相較使



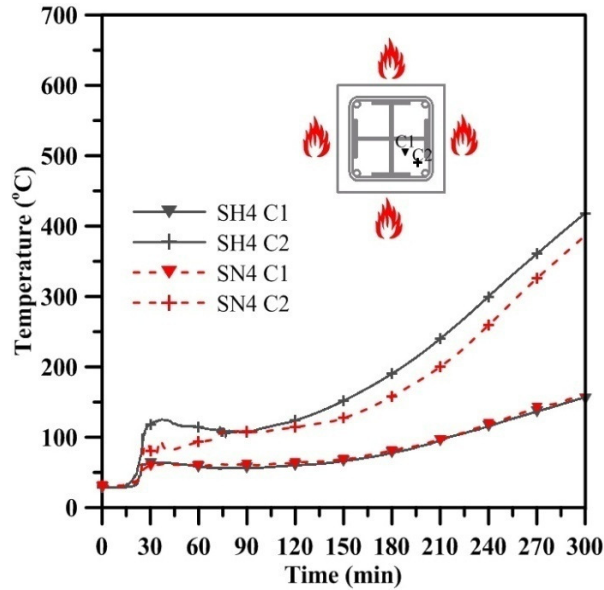
用普通強度混凝土之 SN4 試體，前者各測點溫度歷時均大於後者，可知強度較高的混凝土傳熱較快，但其影響並不顯著。



(a) 鋼骨測點溫度歷時比較



(b) 鋼筋測點溫度歷時比較



(c) 混凝土測點溫度歷時比較

圖 4-13 試體 SH4 與 SN4 測點溫度歷時比較

(資料來源:本研究整理)

## 第五節 不同斷面形狀溫度歷時比較

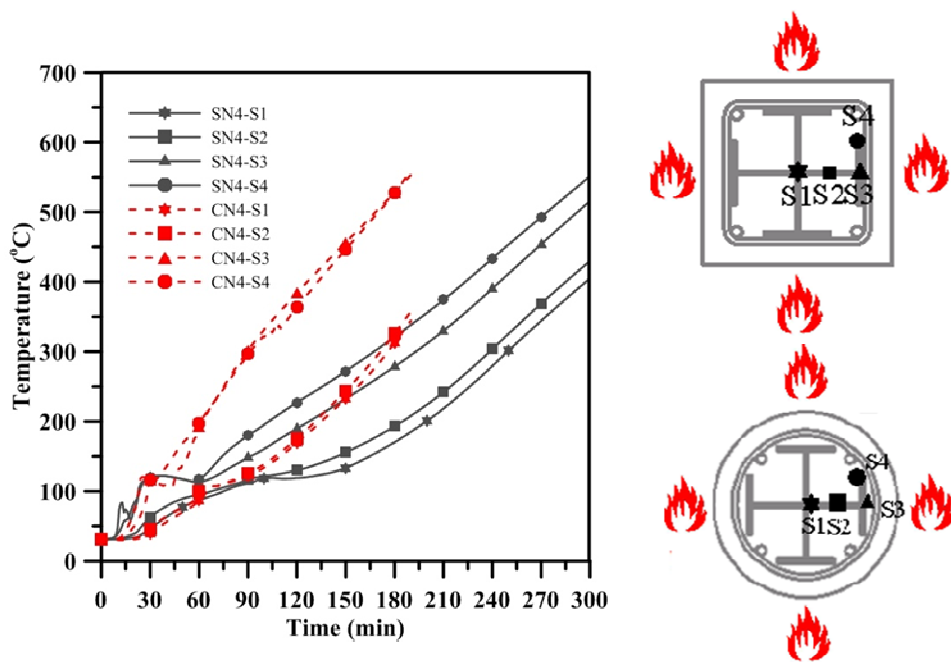
### 試體 SN4 與試體 CN4

鋼骨測點溫度歷時趨勢大致相同，如圖 4-30 (a)所示，惟圓形柱測點由於爆裂使混凝土保護層減少，使圓形柱各鋼骨測點溫度上升均較相對應之方形柱鋼骨測點溫度高。圓形柱鋼骨翼板端測點 S4 與翼板中心測點 S3 以近乎相符的溫度上升，方形柱兩測點則以一小段溫度差距穩定上升。

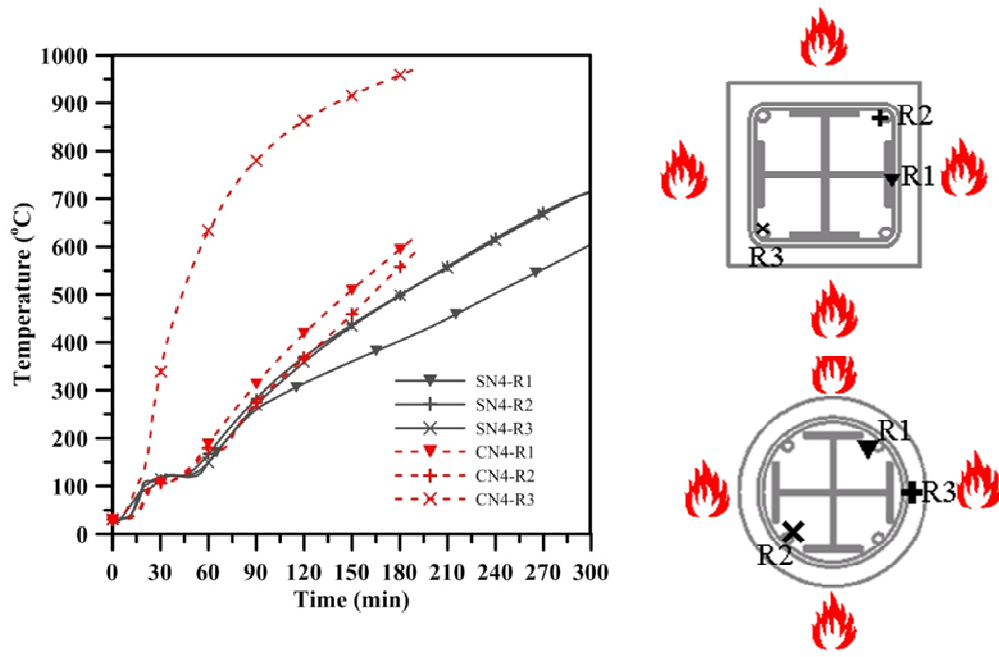
圓形柱混凝土測點部分也有較方形柱高的升溫趨勢，如圖 4-30 (c)所示，發現距表面較近之測點在靠近 100°C 出現一驟降，其後往上爬升。混凝土測點溫度平台皆較鋼骨及鋼筋測點明顯。

鋼筋溫度測點部分，如圖 4-30 (b)所示可發現圓形柱與方形柱主筋測點均有

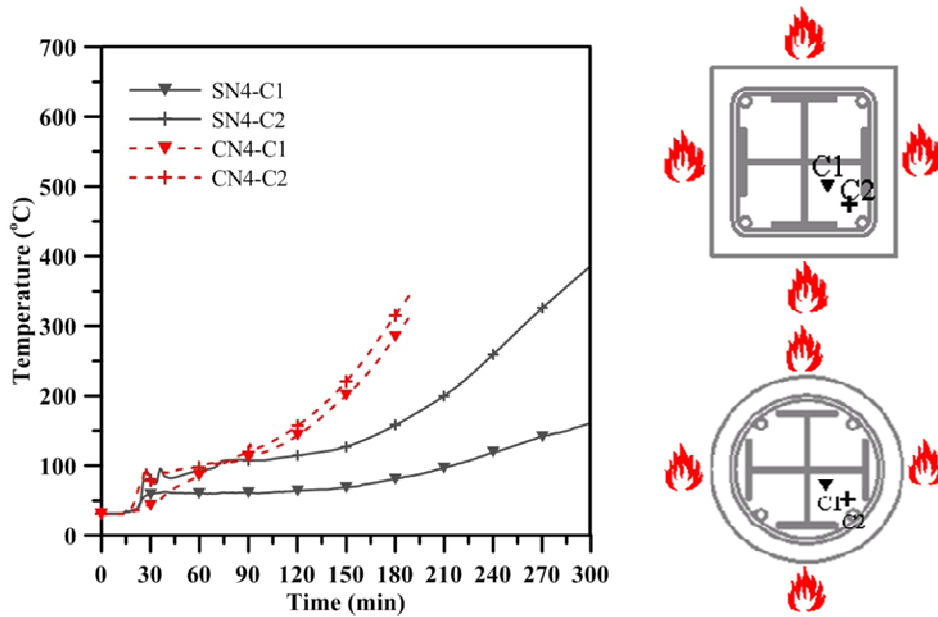
明顯之溫度平台，惟圓形柱箍筋測點由於爆裂使測點所在之箍筋外露，其溫度歷時明顯較其它測點高。圓形柱爆裂情形嚴重，保護層嚴重脫落以至多處箍筋外露，方形柱則僅有角隅處有爆裂情形，顯示柱斷面幾何形狀對於混凝土試體火害中爆裂行為有顯著影響。



(a)鋼骨測點溫度歷時比較



(b)鋼筋測點溫度歷時比較



(c)混凝土測點溫度歷時比較

圖 4-14 試體 SN4 與 CN4 測點溫度歷時比較

(資料來源:本研究整理)

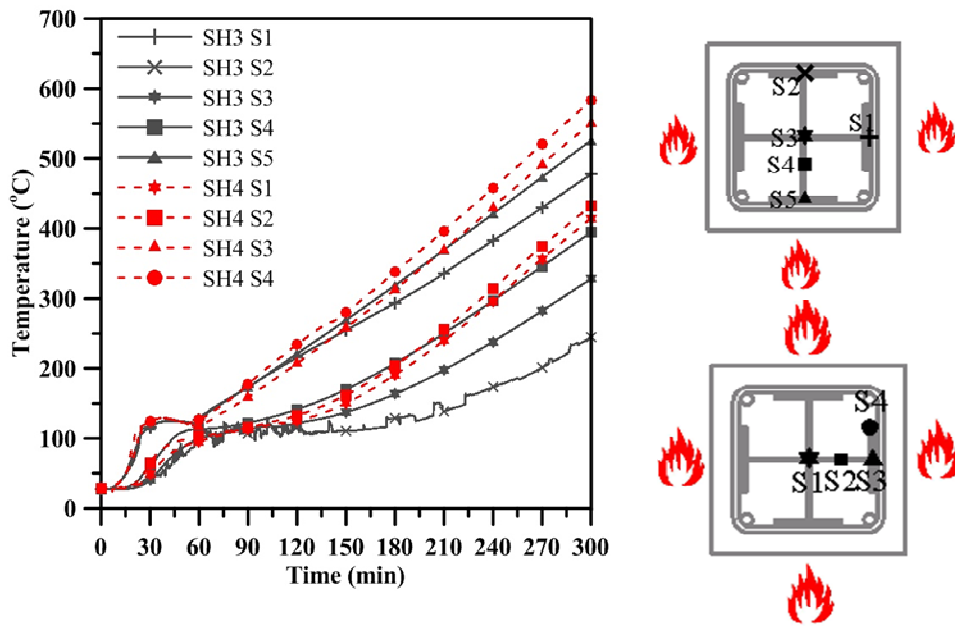
## 第六節 不同受火面溫度歷時比較

### 試體 SH4 與 SH3

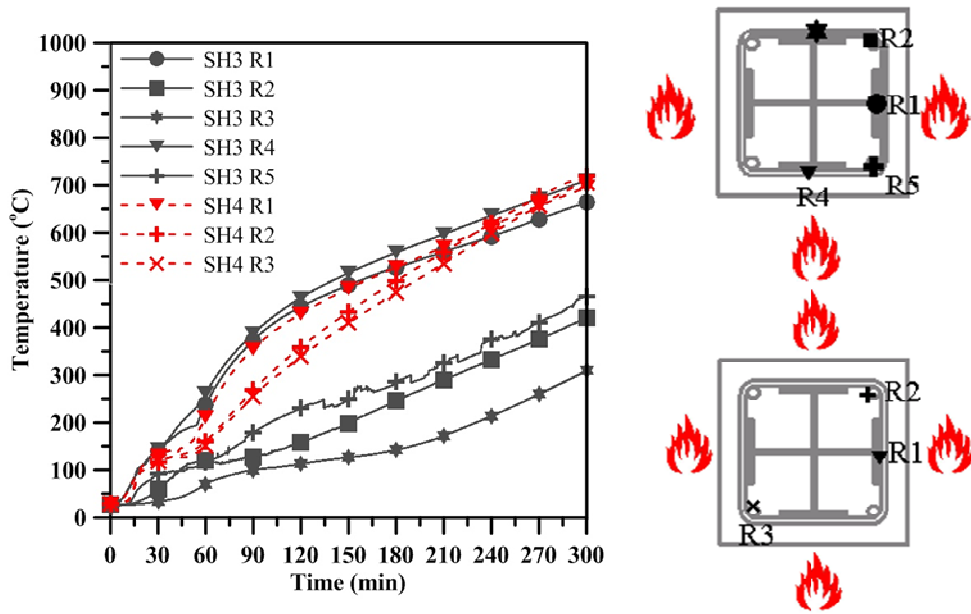
試體 SH4 為方形柱為模擬中間柱受四面火，試體 SH3 為模擬邊柱受三面火；鋼骨溫度上升速度兩者大致相同，如圖 4-15 (a)所示。在相同位置下，受火面之鋼骨翼板測點 SH4 僅高於 SH3 約 35°C，腹板測點約 48°C，但鋼骨中心溫度則 SH4 高出 96°C。試體 SN4 與 SH4 至高溫試驗結束時，鋼骨翼板端點 S4 平均溫度為 567°C，十字型鋼骨中心溫度測點 S1 平均溫度為 410°C，相差 157°C 左右，試體 SN3 與 SH3 至高溫試驗結束時，鋼骨翼板中心點 S5 平均溫度為 535°C，鋼骨中心測點 S3 溫度 317°C，相差 218°C 左右，顯示受四面火之包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱較受三面火之柱鋼骨中心之溫度較大，中心溫度相差 93°C，顯示十字型鋼骨以四面受火受高溫影響較嚴重。

鋼筋溫度方面，如圖 4-31 (b)所示，四面受火試體 SH4 之主筋與箍筋測點升溫趨勢相近，最終溫度也幾乎相同，而三面受火試體 SH3 則可看出由受火面至不受火面，主筋與箍筋之溫度由高而低分布。

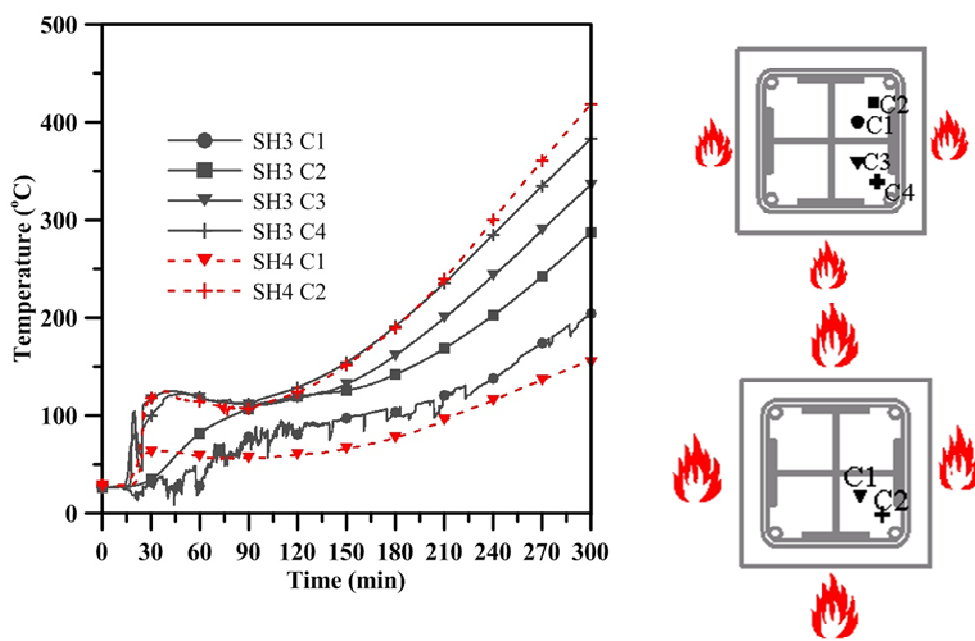
混凝土溫度方面，如圖 4-31 (c)所示，其外側測點 SH4 與 SH3 相差不多，而 SH4 略高 36°C，但內側測點則可看出四面受火試體其內部混凝土溫度低於三面受火試體不受火面之內部混凝土溫度，顯示受火面對於內部混凝土溫度有顯著的影響。



(a)鋼骨測點溫度歷時比較



(b)鋼筋測點溫度歷時比較



(c)混凝土測點溫度歷時比較

圖 4-15 試體 SH4 與 SH3 測點溫度歷時比較

(資料來源:本研究整理)





## 第五章 斷面溫度分佈之熱傳分析模式

對於包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱之熱傳評估模式，評估步驟如下：

1. 確定分析計算方法與合理假設分析模型。
2. 基於實驗量測溫度結果，驗證分析模型之正確性。
3. 瞭解材料熱性質對斷面溫度分佈之影響。
4. 比較試體有無十字型鋼對溫度分佈和溫度傳遞之影響。
5. SRC 試體之型鋼保護層厚度對溫度傳遞之影響。
6. 綜合相關影響試體斷面熱傳遞之因素，並由量化之圖表資料，建立熱傳評估模式。

### 第一節 熱傳分析之驗證

本研究先嘗試以有限元素分析軟體，模擬 Mao 與 Kodur (2011)之 SRC 試體分別受三面和四面火，其試體斷面測點溫度，如圖 5-1 至圖 5-2 所示，分析結果與文獻實驗數據比對，以期評估分析模型的可用性。熱傳分析之基本假設及模型相關設定，如下：

#### 壹、基本假設

1. 假設加溫爐內溫度均勻分佈。
2. 忽略混凝土內部含水份汽化對溫度之影響。
3. 忽略混凝土因高溫產生開裂或爆裂影響試體斷面溫度。
4. 假設試體材料之鋼筋、混凝土和鋼骨之接觸介面為完全握裹。
5. 不考慮材料接觸介面間之熱對流與熱輻射影響。
6. 不考慮軸向熱傳遞，簡化為 2 維熱傳問題。

## 貳、材料性質

SRC 分析模型由鋼筋、型鋼和混凝土所組成，其材料性質參考 Lie (1994) 相關規定；模擬三面受火之不受火面為與實驗情況接近，防火層將依 Mao and Kodur (2011) 實驗設置，而防火層之材料性質將採何奇鈺(2008)之研究數據。

## 參、溫度與接觸設定

依據文獻以 ISO 834 耐火試驗規範之標準升溫歷時曲線溫度輸入至試體表面(四面受火試體為混凝土；三面受火試體為混凝土和防火層)，再輸入熱對流與熱幅射，其熱對流為  $25\text{W/m}^2\text{K}$ ，熱幅射為 0.7；依實驗起始溫度為分析模型之初始溫度。對於不同材料間之接觸設定為完全握裹。

## 肆、有限元素分析模型

以 2 維模型進行 SRC 試體之熱傳分析，文獻之 SRC 柱斷面可分為具箍筋斷面和未具箍筋斷面，而鋼筋、型鋼、混凝土和防火層材料之熱傳分析元素皆為 DC2D4。DC2D4 溫度分析之二維元素，每個元素有 4 個節點。對於三面和四面受火試體之試體尺寸、溫度測點設置及分析結果，如圖 5-1 至 5-4 所示。

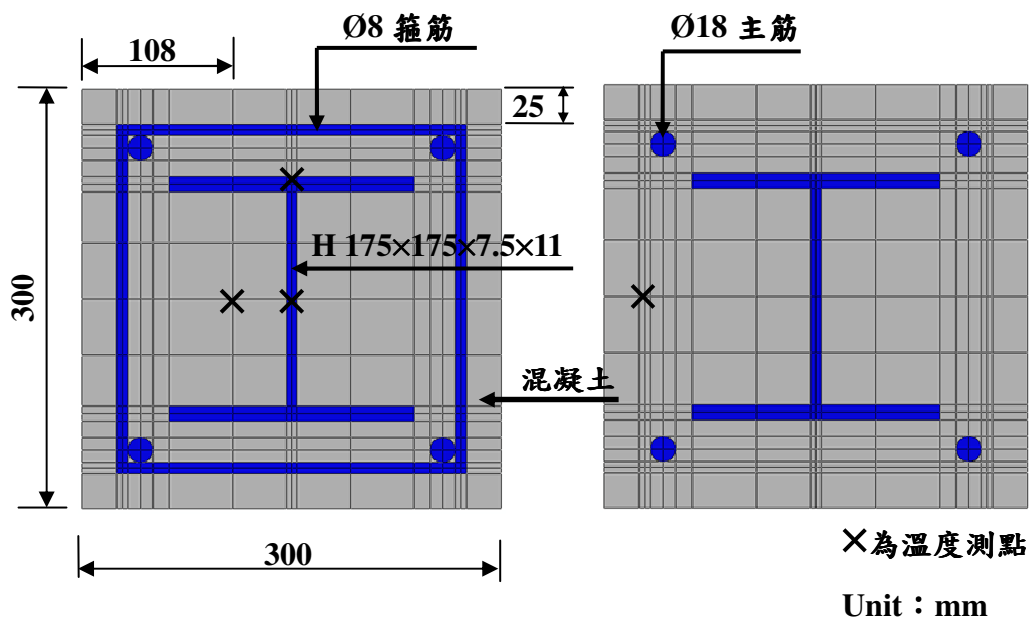


圖 5-1 四面受火之有限元素分析模型

(資料來源：本研究整理)

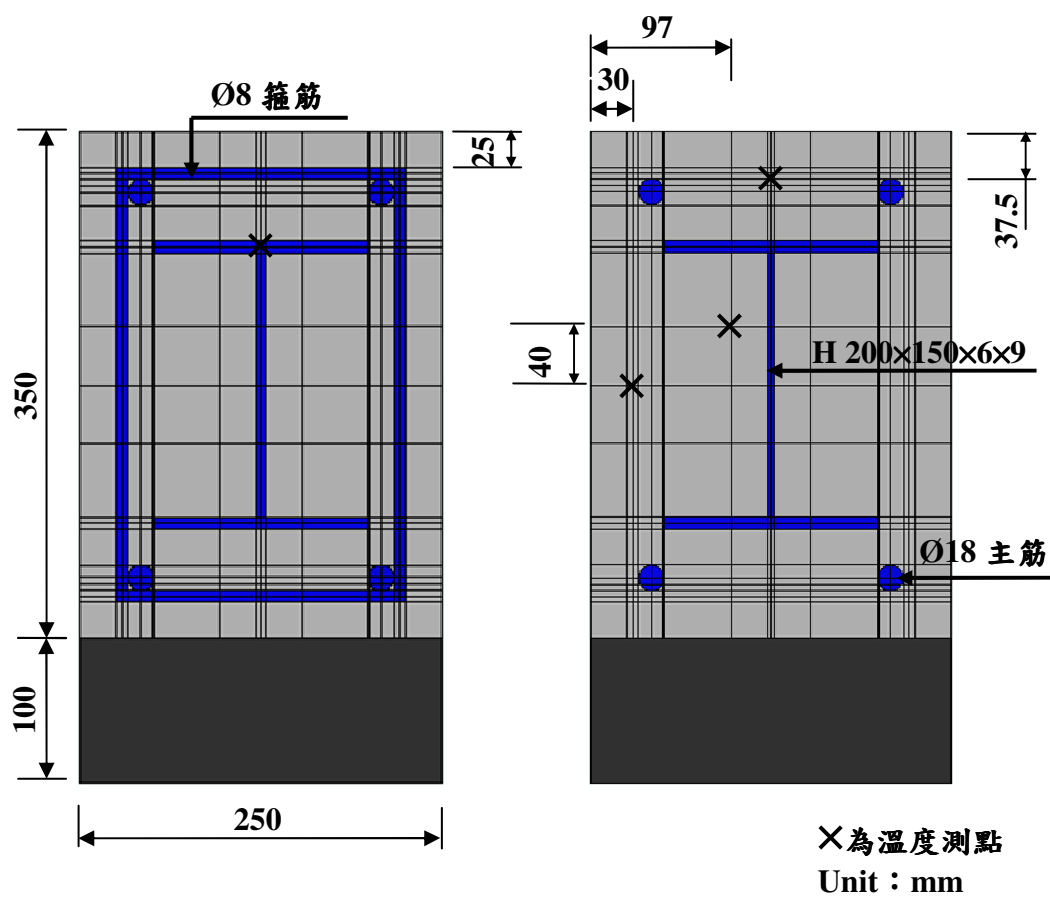


圖 5-2 三面受火之有限元素分析模型

(資料來源：本研究整理)

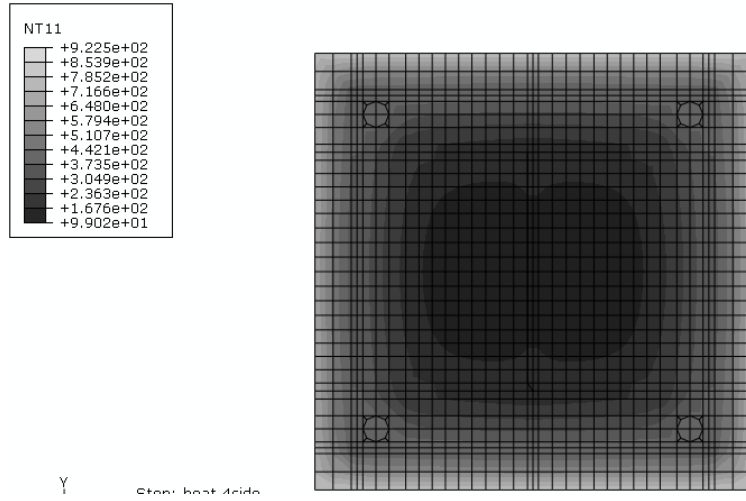


圖 5-3 分析四面受火試體加溫一小時之斷面溫度分佈

(資料來源：本研究整理)

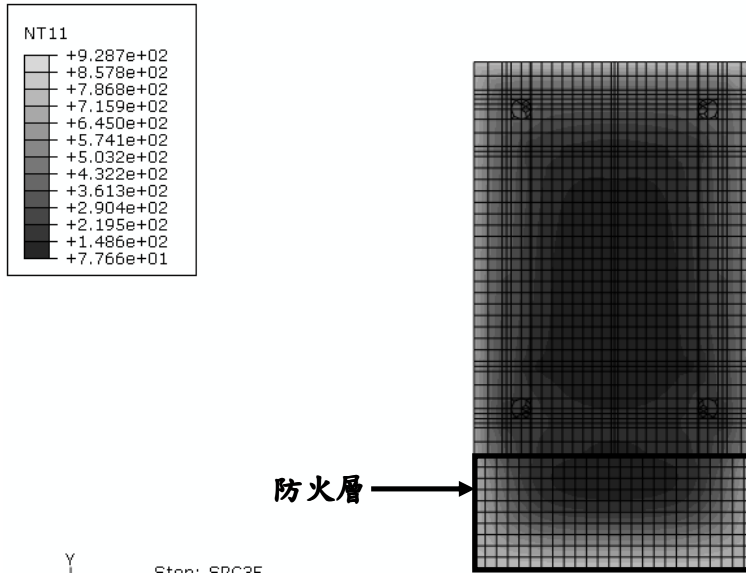


圖 5-4 分析三面受火之試體加溫一小時斷面溫度分佈

(資料來源：本研究整理)

## 伍、實驗與分析斷面測點溫度比較

### 1. 試體四面受火

由圖 5-5 可知以本研究初步有限元素分析結果與 Mao and Kodur (2011)實驗

溫度數據大致吻合，距混凝土表面較近的測點(Depth 28 mm)有較快速的升溫趨勢；鋼骨腹板及翼板在混凝土的包覆下，溫度明顯偏低，腹板(Steel web)由於離受火面較翼板(Steel flange)遠，溫度較翼板低，而靠近腹板測點附近的混凝土測點(Depth 108 mm)又較腹板測點低，由於鋼熱傳導性質較快，顯示出鋼骨對柱試體內部斷面溫度分佈會有顯著影響，熱能會由高溫的鋼骨傳至鄰近較低溫的混凝土。

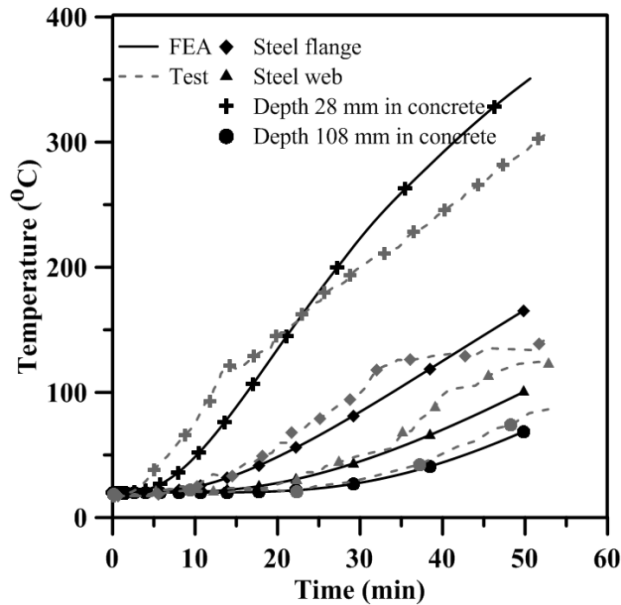


圖 5-5 四面受火試體試驗值與分析值比較

(資料來源：本研究整理)

## 2. 試體受三面受火

由圖 5-6 可知以本研究初步有限元素分析結果與 Mao and Kodur (2011) 實驗溫度數據大致吻合，距混凝土表面較近的測點(Depth 30 mm)有較快速的升溫趨勢；距混凝土表面次近的測點(Depth 37 mm)次之；測點(Depth 97 mm)由於離受火面較遠，在混凝土的包覆下，溫度歷時最低，其與翼板測點(Steel flange)溫度相近，可推測熱源多來自鋼骨的傳導。

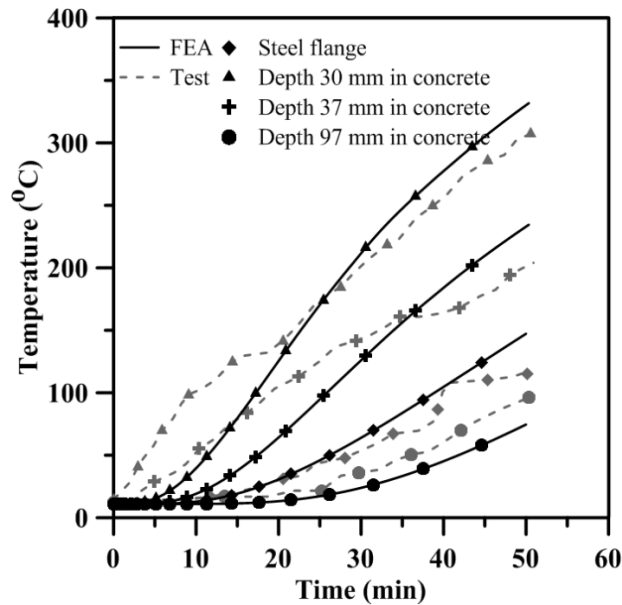


圖 5-6 三面受火試體試驗值與分析值比較

(資料來源：本研究整理)

## 第二節 鋼骨鋼筋混凝土柱之熱傳分析

由上節比對結果得知，以有限元素之熱傳分析可得到合理的分析結果，因此本研究將進行有限元素熱傳分析。對於包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱分析之材料性質及分析模型相關設定，如下：

### 壹、材料性質

模擬方形和圓形包覆型鋼骨鋼筋混凝土之鋼骨、鋼筋和混凝土材料性質皆依照 Eurocode 規範；對於分析模型之混凝土材料依照 Eurocode 建議考慮內部含 10% 含水率，而其它材料之相關規定，如本研究第二章所示。非四面受火試體皆於不受火面設置防火棉，而分析模型之防火層材料性質採何奇鈺(2008)研究建議；由前節 SRC 試體於加溫 1 小時之結果得知，防火層厚度至少 100 mm 以上，故本研究分析模型之防火層須設置足夠厚度，以阻隔升溫歷時之溫度傳入不受火面處。

## 貳、溫度與接觸設定

為模擬包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱曝露於火災環境，其火害升溫情況依 CNS 12514 標準升溫歷時曲線規定，將溫度輸入至試體表面(四面受火試體為混凝土；三面受火試體為混凝土和防火層)，並依實際試體實驗時之室內溫度，設定為分析模型初始溫度。

## 參、分析步驟與模型

以 ABAQUS 軟體進行包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱於火害高溫環境之模擬，其分析步驟為建立分析模型、設定各部件材料性質、組合裝配部件、設定接觸與邊界條件、選擇分析元素、模型網格化與進行熱傳分析。

本研究方形及圓形之 SRC 柱採三維模型建立，其模型由各部件組裝配置，分別為混凝土、十字型鋼骨、主筋、箍筋及防火層(四面受火試體無防火層)；其中，混凝土、十字型鋼骨和防火層部件是以三維實體形態建模，而主筋與箍筋部件為三維桁架形態建模。分析模型考慮受火面造成之對稱性，故採對稱建模以增加分析效率；對於四面受火試體為雙軸對稱，採 1/4 斷面模擬，三面受火試體為單軸對稱，採 1/2 模擬。圖 5-7 至圖 5-10 為方形及圓形包覆型 SRC 柱於不同受火下之對稱分析模型示意圖，其分析模型之溫度擷取點位置參考實驗試體設置，如本研究第四章第二節實驗規劃所述。

在進行熱傳分析前，分析模型須選擇適當的分析元素，其混凝土部件、十字型鋼骨部件及防火層部件使用 DC3D8 元素，主筋和箍筋部件使用 DC1D2 元素。DC3D8 為三維元素(C3)，每個元素有八個節點(D8)，而第一個字母“D”代表溫度分析；DC1D2 為溫度分析之一維元素，每個元素有 2 個節點。



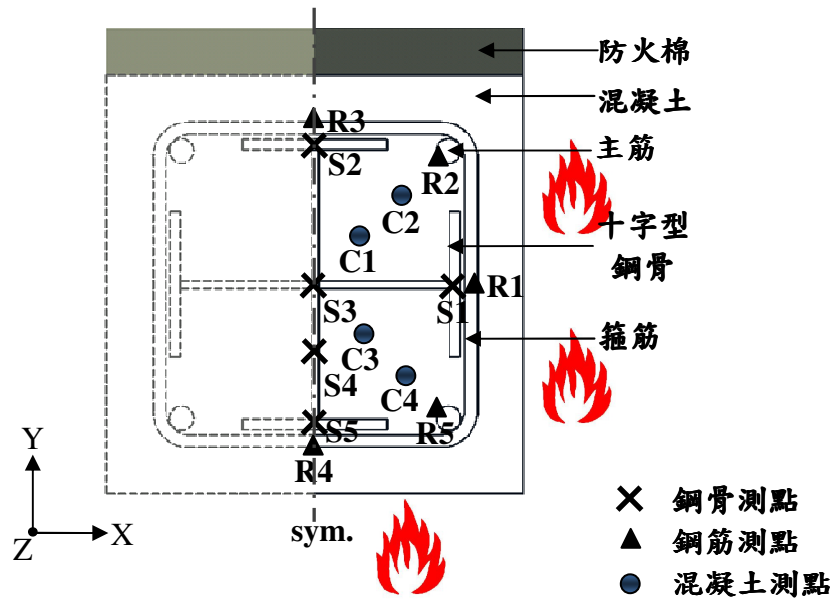


圖 5-7 方形包覆型 SRC 柱於三面受火之 1/2 分析模型

(資料來源:本研究整理)

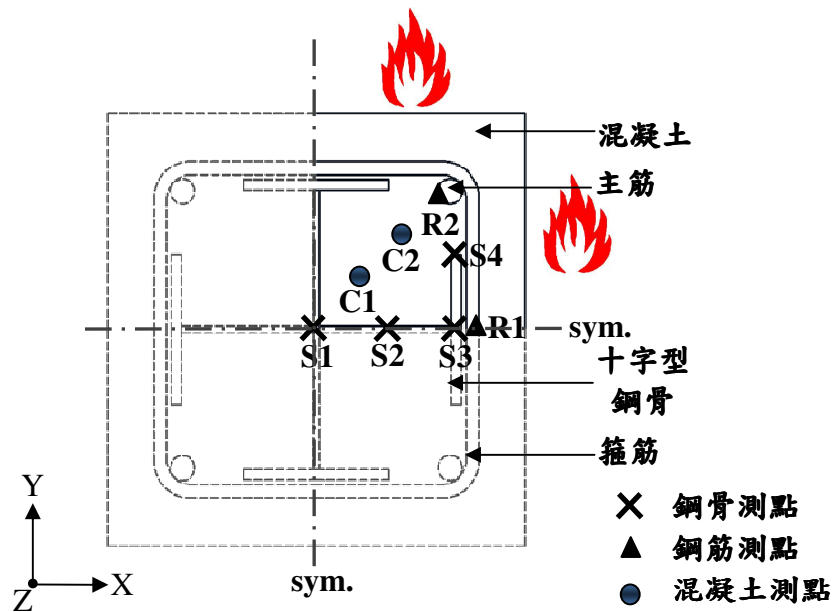


圖 5-8 方形包覆型 SRC 柱於四面受火之 1/4 分析模型

(資料來源:本研究整理)

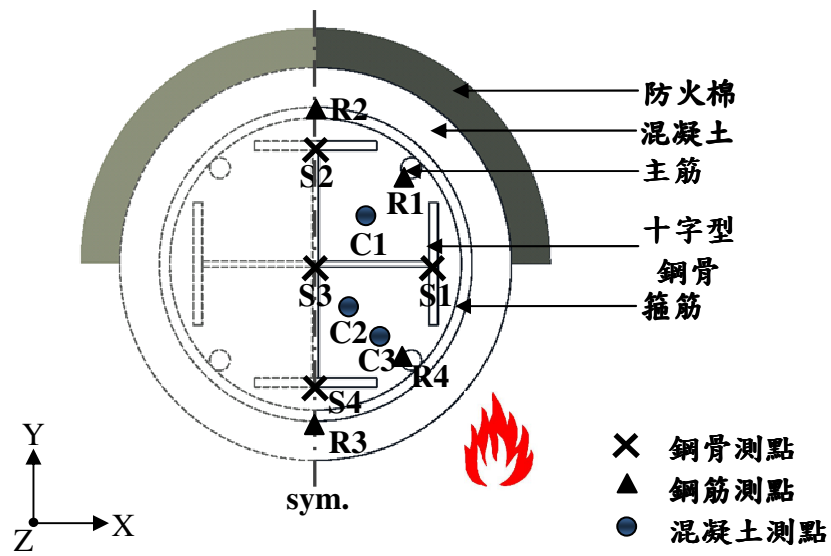


圖 5-9 圓形包覆型 SRC 柱於二面受火之 1/2 分析模型

(資料來源:本研究整理)

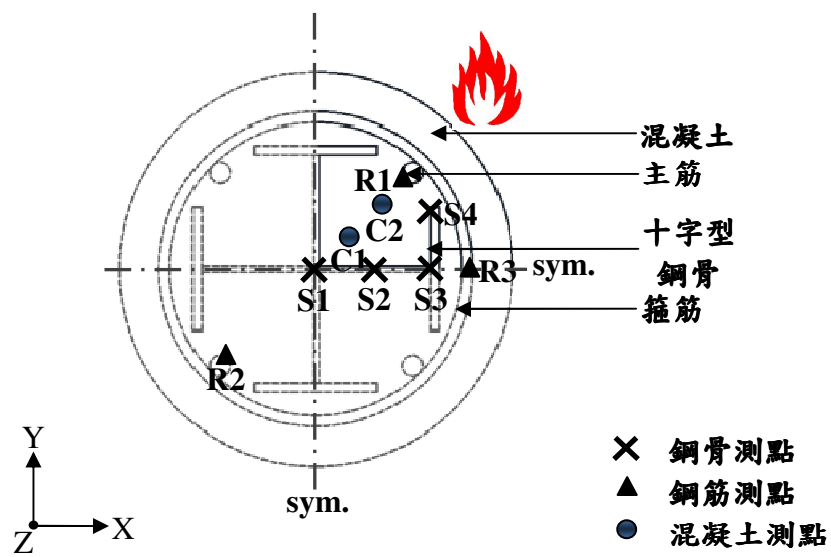


圖 5-10 圓形包覆型 SRC 柱於四面受火之 1/4 分析模型

(資料來源:本研究整理)

## 肆、實驗與分析比較

### 1. 方形 SRC 柱於四面受火

實驗試體 SN4 及 SH4 為方形斷面，分別以普通強度和高強度混凝土包覆型 SRC 柱，受火條件為四面受火。依據實驗試體建立分析模型，以實驗當天室內溫度設定模型初始溫度，實際量測為 30°C，再依升溫曲線進行熱傳分析，分析結果於圖 5-11 顯示。

圖 5-12 為比較實驗與分析於加溫 4 小時之斷面測點溫度曲線，經比較發現爐內高溫往試體低溫處傳遞，但因材料性質不同、混凝土開裂及方形斷面角隅處之影響，其溫度傳遞不一定隨深度增加而降低，如鋼筋測點 R2 和 R3 之溫度較 R1 高，鋼骨測點 S4 之溫度較 S3 高，鋼骨測點 S1 溫度較混凝土測點 C1 高；其中，測點距試體 X 向表面之距離，由淺至深依序為鋼筋測點 R1、鋼筋測點 R2 和 R3、鋼骨翼板測點 S3 和 S4、混凝土測點 C2、鋼骨腹板測點 S2、混凝土測點 C1 及鋼骨腹板測點 S1。

比較十字型鋼骨測點(S1~S4)之實驗(SN4 及 SH4)與分析結果發現，試體加溫 2 小時，其試體 SN4 鋼骨測點 S4 與分析溫度相差最大為 67°C；加溫 4 小時，試體 SN4 測點 S1 之溫度差異最大為 45°C，如圖 5-12(a)所示。圖 5-12(b)為實驗和分析之混凝土測點(C1 和 C2)溫度時間曲線；由加溫 2 小時結果顯示，試體測點 C1 之平均溫度和分析相差 52°C，而兩者加溫 4 小時之測點 C1 溫度相差 199°C。實驗試體於加溫 30 至 150 分鐘期間，混凝土因內部含水汽化作用，使 C1 測點溫度介於 100°C 至 120°C 之間，而分析模擬於加溫 60 至 150 分鐘之間也有相同的趨勢。由鋼筋測點(R1~R3)溫度結果顯示，實驗與分析於加溫 2 小時之鋼筋測點 R1 之溫度相差最大為 127°C，而加溫 4 小時最大溫度差為 145°C(R1)，如圖 5-12(c)所示。實驗試體 SH4 測點 R1 與分析之溫度差異較大，可能原因為實驗試體 SH4 之混凝土保護層開裂程度較試體 SN4 嚴重；分析模型並無考慮混凝土受高溫產生開裂、剝落或爆裂之影響，因此鋼筋測點之分析值偏低。

綜合上述說明得知，試體 SN4 之斷面中心鋼骨測點 S1 溫度較鄰近混凝土測點溫度高，此結果乃因鋼材熱傳導能力較混凝土佳所造成；對於方形試體表面和

角隅處混凝土因高溫開裂或剝落將使試體有效保護層減少，造成試體內部之主筋溫度較分析值高；整體而言，分析模型模擬試體 SN4 及 SH4 於加溫 4 小時之溫度結果合理，且各測點溫度-時間曲線之趨勢也雷同。

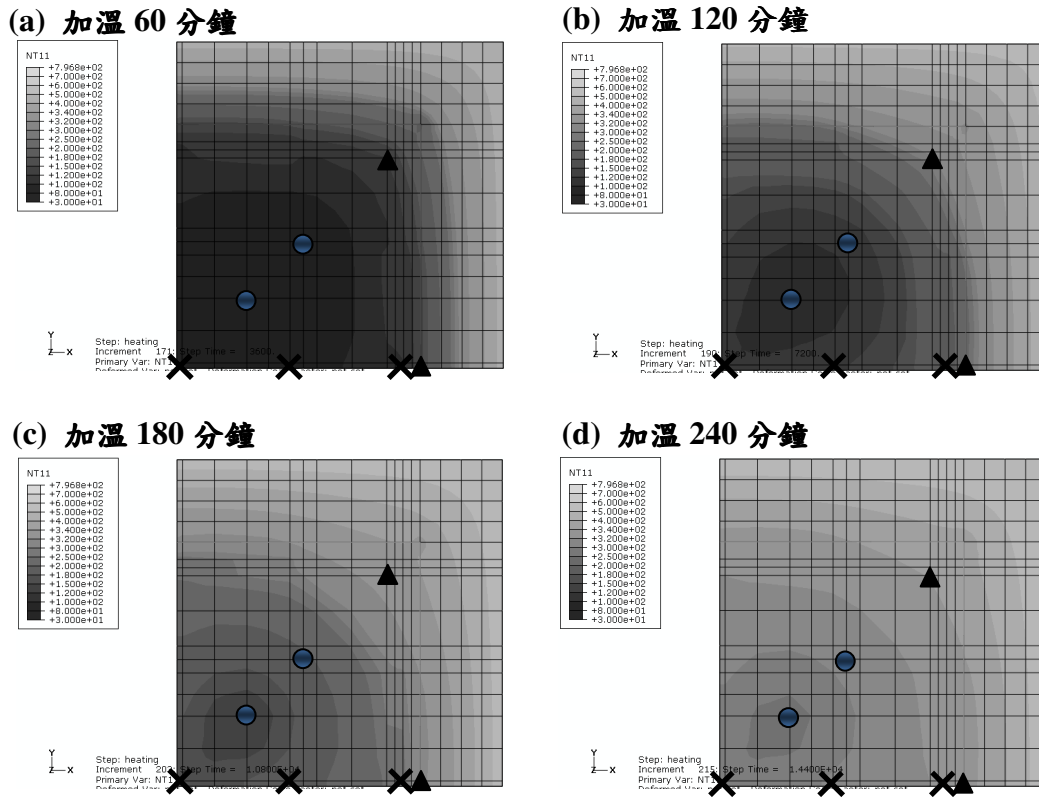


圖 5-11 模擬方形 SRC 柱四面受火之斷面溫度分佈

(資料來源:本研究整理)

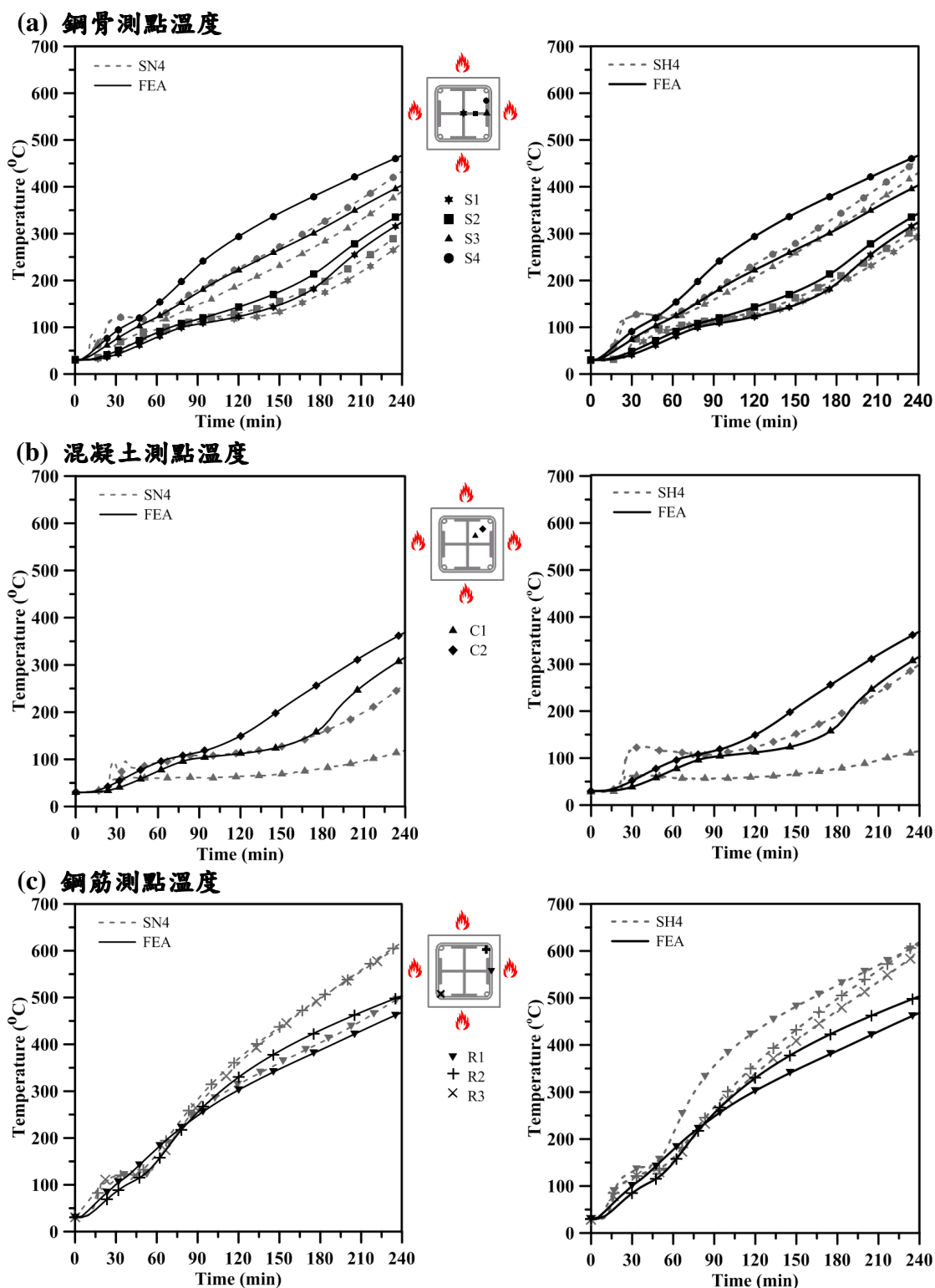


圖 5-12 實驗試體 SN4 及 SH4 與分析模擬之斷面溫度測點結果比較

(資料來源:本研究整理)

## 2. 方形 SRC 柱於三面受火

模擬三面受火方形 SRC 柱斷面溫度分佈之分析結果如圖 5-13 所示，其顯示加溫爐溫傳遞至試體內部，試體受火面處之溫度相較不受火面高，且試體之鋼骨溫度也比鄰近混凝土溫度高；比較相同測點位置之方形 SRC 柱於三面和四面受火分析結果發現，四面受火之試體溫度相較三面受火高。

圖 5-14 為試體 SN3 及 SH3 斷面測點溫度與分析結果之比較。圖 5-14(a)顯示兩試體之鋼骨測點溫度皆較分析溫度為偏高，而試體 SH3 之測點溫度與分析溫度較為接近；實驗與分析之鋼骨測點溫度由高至低，皆依序為測點 S5、S1、S4、S3 和 S2，其中測點 S5 和 S1 皆為距試體表面相同深度之測點，但測點 S5 比 S1 溫度高之可能原因為測點 S5 之兩側皆為受火面，而測點 S1 兩側分別為受火面和不受火面；當試體加溫 2 小時，實驗與分析之鋼骨測點最大溫差為試體 SN3 測點 S5(96°C)，在加溫 4 小時之溫差達 110°C。混凝土測點溫度經比較後發現，分析值比實驗測點溫度偏高，其與前述四面受火方形試體之比較結果相同；測點溫度由高至低為測點 C4、C3、C2 及 C1，其中測點 C4 溫度較 C2 高之可能原因為測點 C4 受兩側溫度傳入之影響；試體 SN3 測點 C4 於加溫 2 小時與分析值相差 23°C，至加溫 4 小時之溫差達 59°C，如圖 5-14(b)所示。圖 5-14(c)為比較實驗試體 SN3 及 SH3 與分析之斷面測點溫度。結果顯示，若試體之混凝土保護層未產生開裂行為，則試體於加溫 4 小時期間，鋼筋測點溫度由高至低，依序為 R5、R4、R1、R2 及 R3，但試體 SN3 之測點 R1 溫度相較 R4 及 R5 高，且試體 SH3 之測點 R4 相較 R5 溫度高，其兩試體測點 R5 量測溫度較低之可能原因為施工造成熱電偶測點異位。

由上述說明得知，試體三面受火之斷面溫度分佈與四面受火有差異；受火面影響距試體表面相同深度不同位置之測點溫度；試體混凝土於加溫 30 至 150 分鐘期間仍有內部含水汽化作用之現象；除鋼筋測點溫度與分析結果差異較大，分析模型可合理模擬三面受火方形 SRC 柱之斷面溫度。

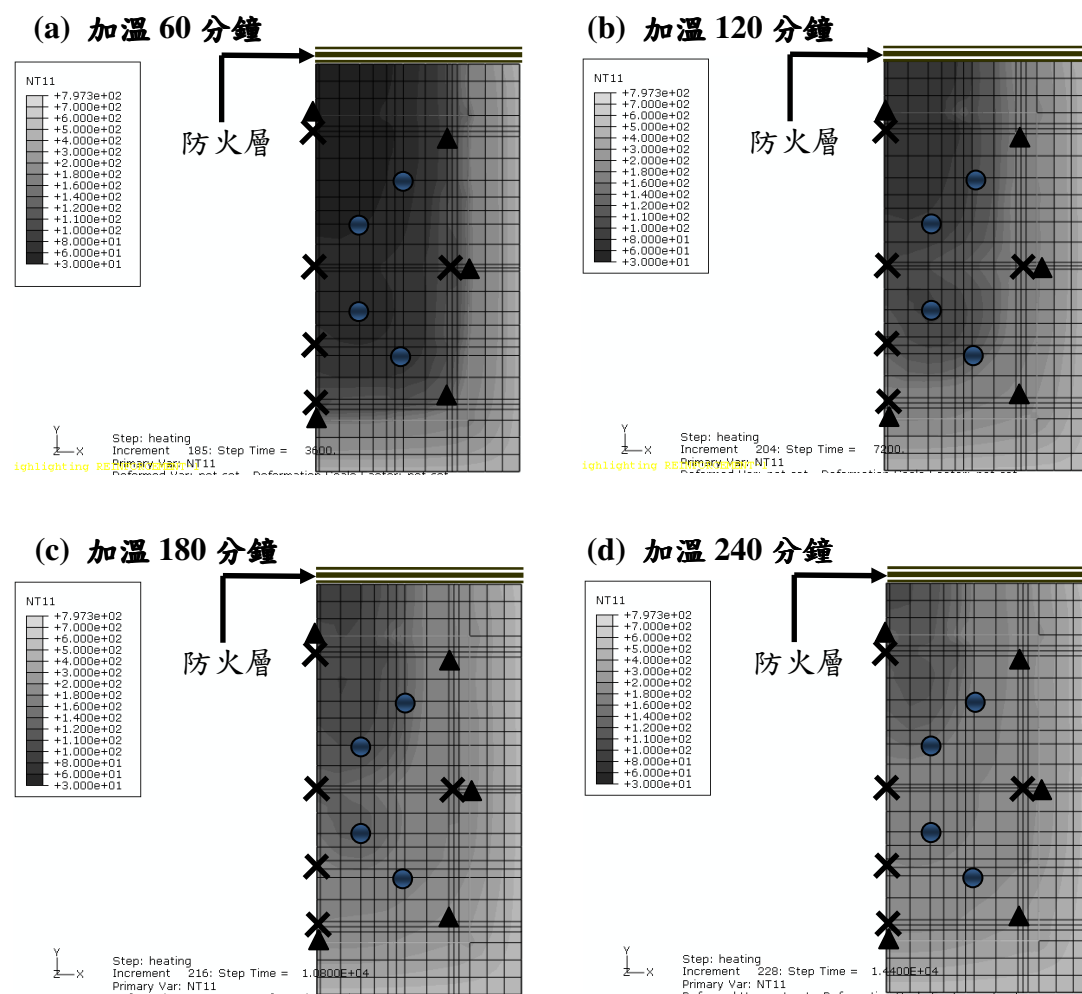


圖 5-13 模擬方形 SRC 柱三面受火之斷面溫度分佈

(資料來源:本研究整理)



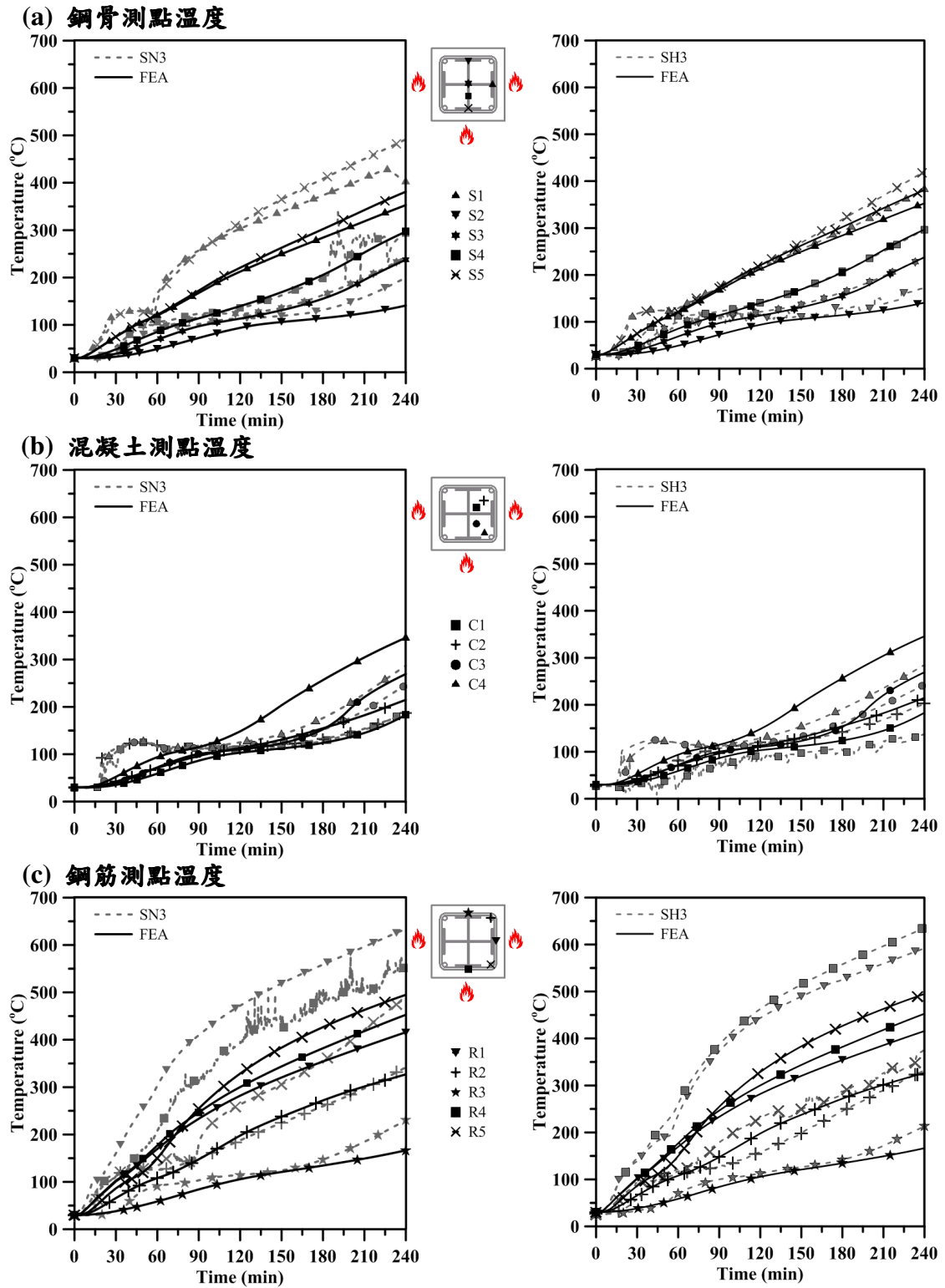


圖 5-14 實驗試體 SN3 及 SH3 與分析模擬之斷面溫度測點結果比較

(資料來源:本研究整理)

### 3. 圓形 SRC 柱於四面受火

為模擬四面受火試體 CN4 與 CH4 之斷面溫度分佈情形，分析模型依火害試驗前所量測之室內溫度，設定為分析模型之初始溫度，並輸入升溫曲線之溫度至模型表面，進行 4 小時熱傳分析，其分析結果顯示於圖 5-15；由分析結果發現，材料性質將影響模型斷面溫度分佈情形，如斷面中心鋼骨測點 S1 之溫度較混凝土測點 C1 高，其原因為鋼骨材料之熱傳導較混凝土佳。

由試體 CN4 及 CH4 火害試驗結果與分析結果比較顯示，鋼骨、鋼筋和混凝土之測點溫度皆相較分析值高，而試體 CN4 僅進行 3 小時火害試驗，如圖 5-16 所示。比較圖 5-16(a)鋼骨測點(S1~S4)溫度時間曲線，實驗與分析於加溫期間，鋼骨測點之溫度由高至低皆依序為 S4、S3、S2 及 S1，且實驗測點溫度皆比分析值高；當加溫 2 小時，鋼骨測點最大溫差處為試體 CH3 測點 S3，其相差 189°C。混凝土測點之比較結果發現，實驗與分析模型於加溫 90 分鐘前，測點溫度接近，且曲線皆持平於 100°C 之間，此持平現象可能為混凝土內部含水汽化之影響，如圖 5-16(b)所示。圖 5-16(c)顯示試體 CN4 及 CH4 之測點 R3 溫度與分析值差異極大，且箍筋測點 R3 之溫度較主筋測點 R1 和 R2 之溫度高，而此結果與受四面火之方形試體不同。

綜合上述分析結果與試體實驗結果比對發現，試體 CN4 之斷面中心鋼骨溫度較鄰近混凝土高，此與試體 SN4 之溫度結果相同，故十字型鋼骨將增加試體斷面溫度；在試體進行 10 分鐘加溫試驗時，研究人員於加溫爐外已聽到混凝土爆裂聲音，其爆裂行為使混凝土保護層減少，且爐內高溫將直接曝露於爆裂後所剩之試體表面，因此實驗試體 CN4 及 CH4 之測點溫度與分析數據相差較大，並也印證混凝土保護層對含十字型鋼骨鋼筋混凝土試體之重要性。

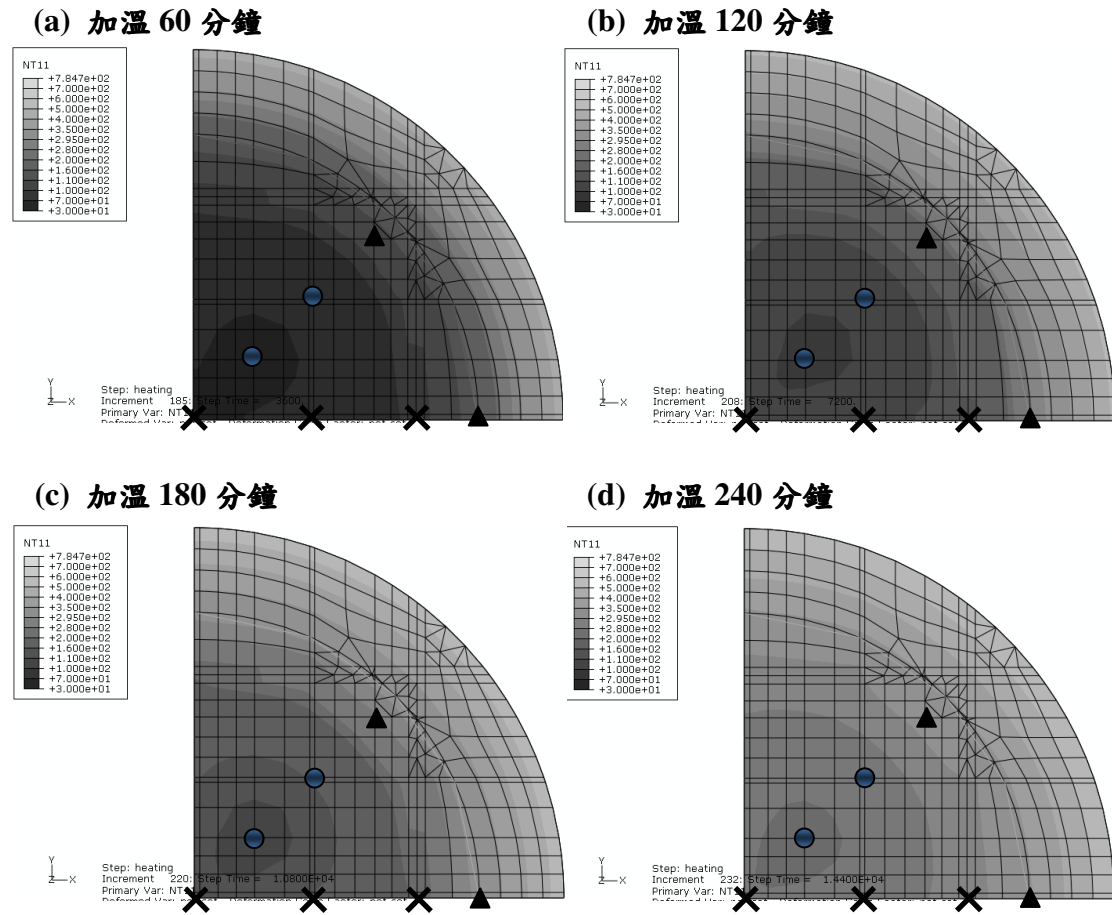


圖 5-15 模擬圓形 SRC 柱四面受火之斷面溫度分佈

(資料來源:本研究整理)



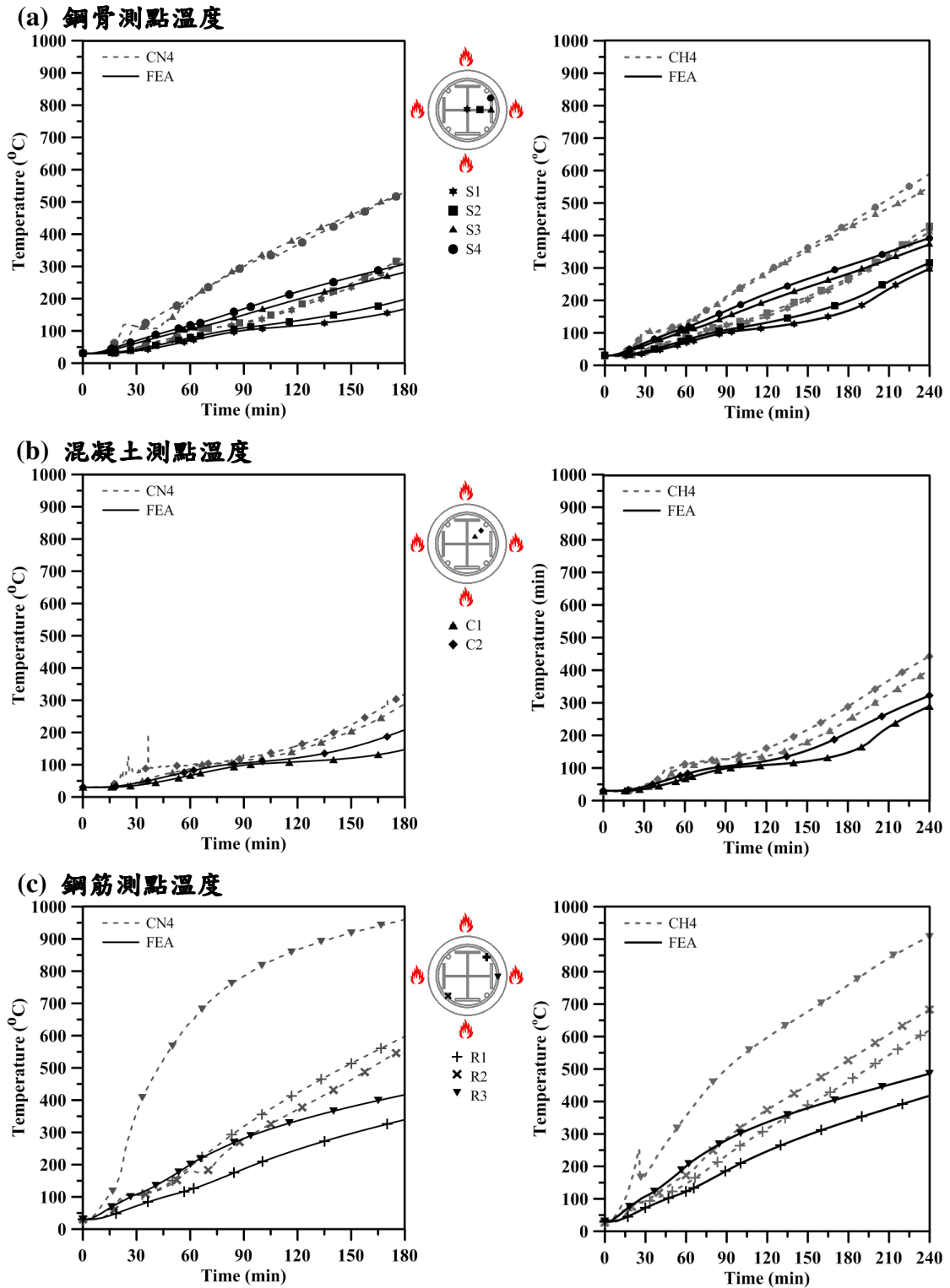


圖 5-16 實驗試體 CN4 及 CH4 與分析模擬之斷面溫度測點結果比較

(資料來源:本研究整理)

#### 4. 圓形 SRC 柱於二面受火

依實驗試體建立分析模型，模擬二面受火試體於加溫 4 小時下，瞭解各測點溫度與斷面溫度分佈之情形，如圖 5-17 所示。圖 5-18 為實驗試體 CN2 及 CH2 斷面測點溫度與分析結果之比較，其測點溫度皆較分析值高，乃因試體受火面之混凝土因高溫產生爆裂，而混凝土保護層爆裂的程度將直接影響鋼筋溫度，並間接影響試體內部鋼骨與混凝土溫度。對於圓形試體內部十字型鋼骨溫度，其測點溫度由高至低依序為 S4、S1、S3 及 S2；溫度隨距試體表面徑向深度增加而降低，但測點 S4 溫度比 S2 高之原因為測點 S4 位處試體受火部分，如圖 5-18(a)所示。由圖 5-18(c)得知，混凝土保護層有助於阻擋和減緩高溫傳遞至試體內部，但本研究圓形試體受火面皆產生混凝土爆裂行為，因此實驗量測溫度與分析結果之鋼筋測點溫度差異極大。

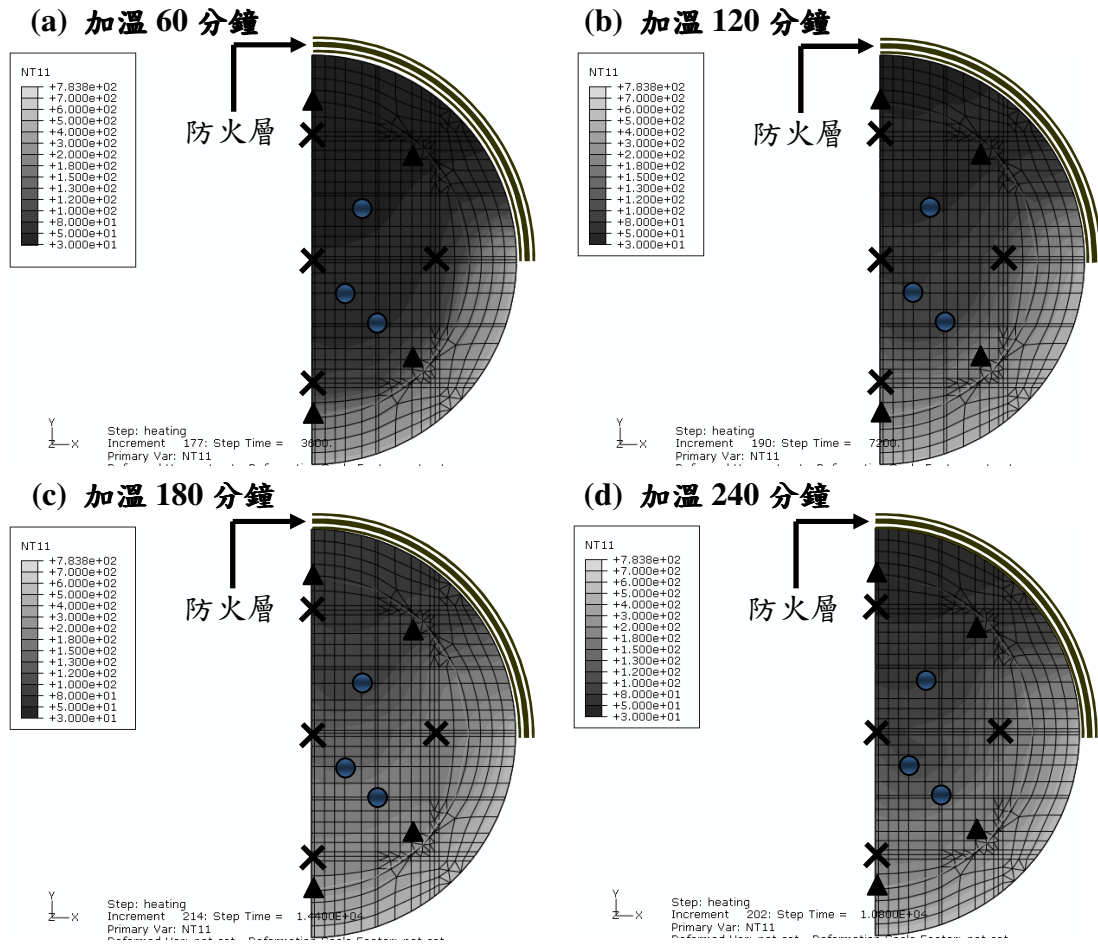


圖 5-17 模擬圓形 SRC 柱二面受火之斷面溫度分佈

(資料來源:本研究整理)

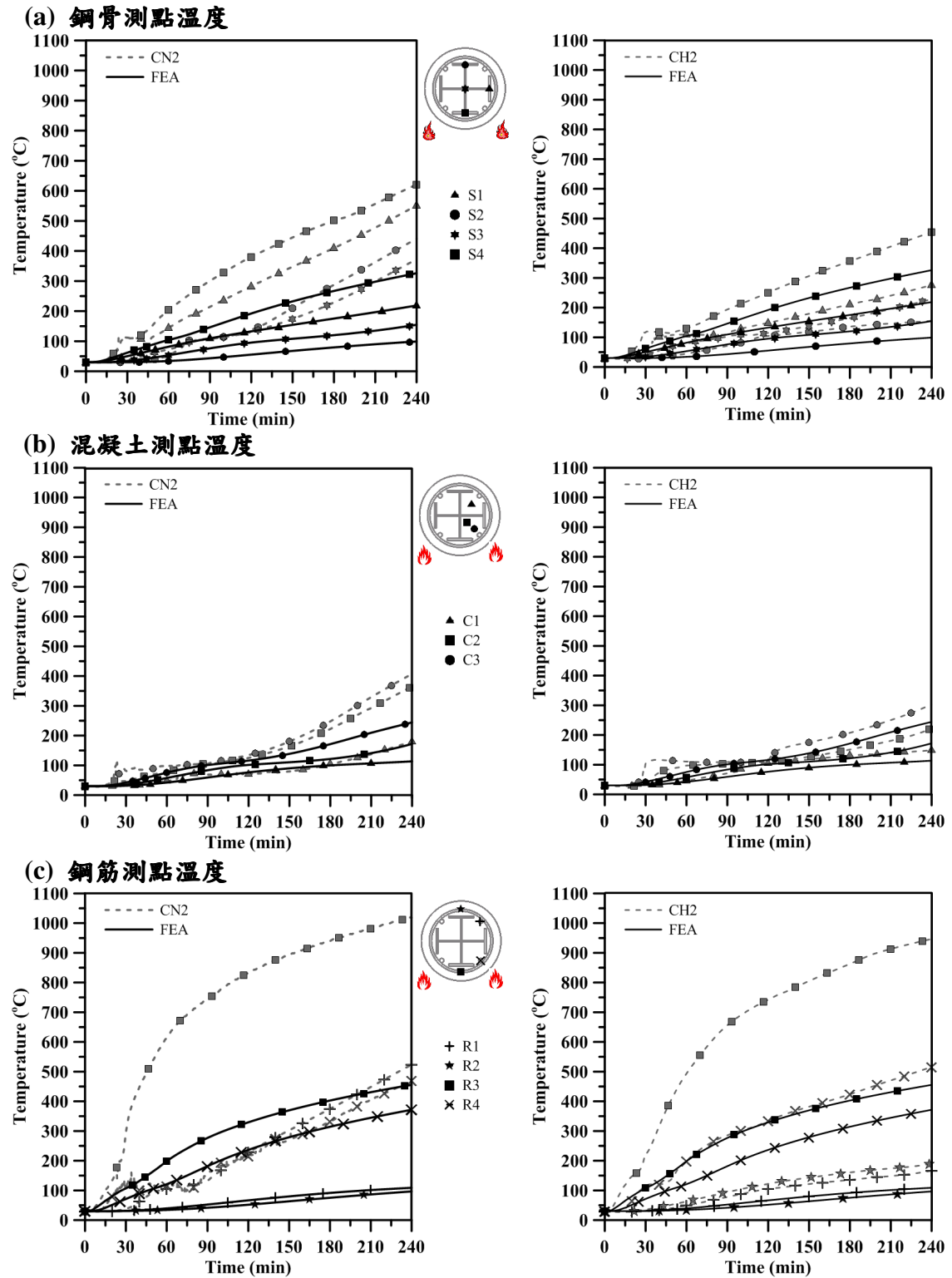


圖 5-18 實驗試體 CN2 及 CH2 與分析模擬之斷面溫度測點結果比較

(資料來源:本研究整理)



### 第三節 實尺寸與縮尺寸 SRC 柱斷面溫度分佈之比較

本研究所規劃之試體尺寸與實際柱構件所採用之尺寸有別，而尺寸的差異是否會影響試體斷面溫度將需進一步深入探討。

本節將以 1/4 分析模型模擬實尺寸試體曝露於高溫環境中，以比較實尺寸與縮尺寸之斷面溫度差異；實尺寸試體全斷面尺寸為 800×800 mm，十字型鋼骨以兩 RH 500×304×15×24，其它尺寸與溫度測點位置，如圖 5-21 所示；實尺寸之溫度測點乃依據試體 SN4 之溫度測點位置，於相同距試體表面之距離及相同材料位置配置，如鋼骨測點 S1 距 SN4 試體表面 180 mm，而混凝土測點 C1 與 C2 分別距 SN4 試體表面 141 mm 及 103 mm。其中，縮尺寸模型為依照本研究試體 SN4 設置。對於實尺寸之分析模型，假設模型初始溫度為 30°C，而升溫條件、材料性質、不同材料間之接觸及分析元素皆與前節設定相同。

由圖 5-22 之測點溫度發現，爐內溫度隨標準升溫曲線增加時，測點溫度隨距試體表面增加而降低，如加溫 3 小時之最高溫為測點 C2，最低溫為大尺寸試體測點 C11。比較實尺寸與縮尺寸之鋼骨測點 S1，其溫度差異較大的原因為實尺寸試體之鋼骨翼板與箍筋距 100 mm，且僅受緊臨受火面之溫度傳入影響。縮尺寸之測點 C1 溫度較實尺寸測點 C1 高，其原因為縮尺寸 C1 測點配置於十字型鋼骨之間，而鋼材較佳的熱傳導能力將可能影響鄰近混凝土溫度。實尺寸與縮尺寸試體於相同深度位置之測點，其測點溫度約略接近，如測點 C2 之溫度曲線。

總結而言，於相同深度位置之測點，實尺寸與縮尺寸試體分析之溫度約略接近。惟位於鋼骨間之縮尺寸之測點，其溫度較實尺寸相同位置之分析溫度為高，主要原因為縮尺寸鋼骨之混凝土保護層較小，因鋼材較佳的熱傳導能力將可能影響鄰近混凝土溫度，導致縮尺寸之溫度較高。實尺寸因斷面大，於三小時加溫之分析顯示斷面中心仍處於低溫狀態，整體而言實尺寸應有較佳的防火性能。

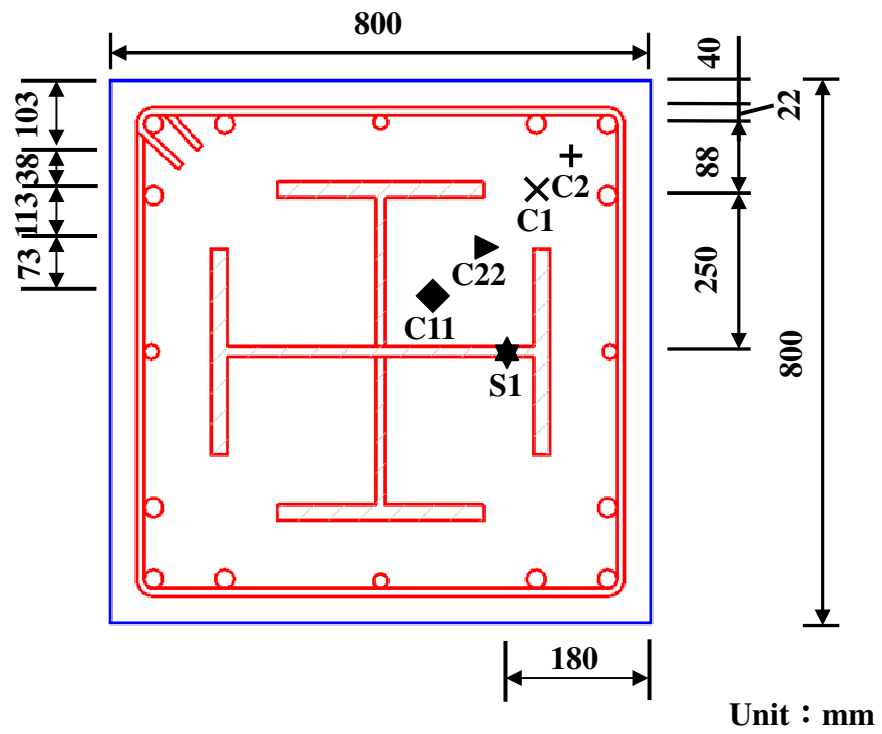
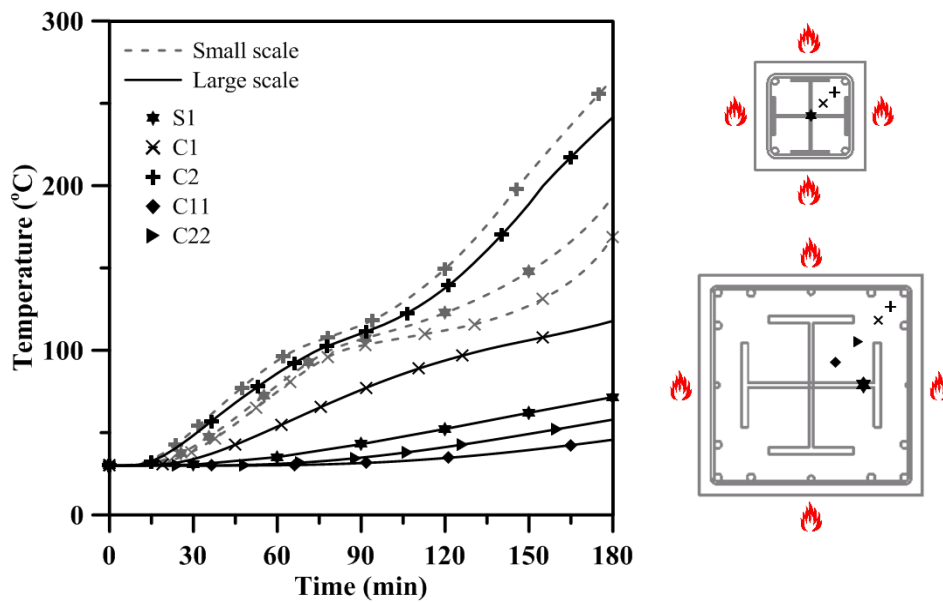


圖 5-19 四面受火之實尺寸 SRC 柱模型溫度測點

(資料來源:本研究整理)



**圖 5-20 四面受火之實尺寸與縮尺寸 SRC 柱模型斷面溫度分佈**

(資料來源:本研究整理)

## 第六章 結論與建議

### 第一節 結論

本計畫執行至今，完成 8 支包覆型 SRC 柱試體高溫試驗斷面溫度之量測與有限元素分析。

1. 相較於方形柱圓形柱於高溫試驗中初期，皆產生嚴重的混凝土爆裂現象，混凝土保護層近乎完全剝落，推斷柱斷面之形狀影響柱之熱傳性質，進而影響其混凝土爆裂行為，對柱防火時效有重要影響。
2. 不同混凝土強度會影響包覆形 SRC 柱之熱傳性質，較高強度混凝土試體有較高之升溫歷時，但差距並不顯著。
3. 不同受火面影響柱試體斷面溫度之分佈，試體會因不均勻之溫度分佈使試體膨脹產生撓曲的現象。
4. 高溫試驗中，十字型鋼骨測點皆較齡近之混凝土測點高，顯示鋼骨為使鋼骨中心升溫主要原因，影響斷面溫度分佈。
5. 以有限元素軟體 ABAQUS 進行模擬方形試體於三面火與圓形試體於二面火之熱傳分析發現，熱能由受火面傳遞至模型內部，分析模型之斷面溫度呈單對稱分佈，未受火面處之混凝土與鋼骨皆較受火面為低，而四面受火模型之斷面溫度分佈為雙對稱，且其斷面平均溫度相較二面及三面火高。十字型鋼骨及鋼筋之溫度皆相較該鋼材所緊鄰之混凝土溫度高。
6. SRC 柱試體之混凝土保護層能有效阻隔或減緩火害高溫傳遞至試體內部，若混凝土因高溫產生爆裂，將直接造成熱能更易傳入試體鋼筋及間接影響鋼骨溫度，且混凝土爆裂位置與程度將影響試體斷面溫度分佈情形。
7. 實尺寸與縮尺寸柱試體於三小時加溫之分析顯示，兩者於相同深度位置之測點溫度約略接近，但縮尺寸鋼骨之混凝土保護層較小且鋼材較佳的熱傳導能力，導致縮尺寸之溫度較高，而斷面較大之實尺寸試體中心仍處於低溫狀

態，故實尺寸包覆型 SRC 柱應有較佳的防火性能。

## 第二節 建議

### 建議一

實尺寸包覆十字鋼骨之鋼筋混凝土柱高溫耐火性能研究:立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院國家科學委員會

鋼骨鋼筋混凝土柱之耐火性能國內鮮少有實尺寸研究成果，本研究僅進行縮小尺寸試體之試驗，斷面溫度分佈是否受到尺寸效應的影響尚未十分明朗，故可就本次實驗規劃進一步一系列實驗探討其行為，如載重比、偏心載重、保護層厚度、鋼骨比等參數了解其耐火性能。

### 建議二

實尺寸鋼骨鋼筋混凝土柱之火害殘餘強度之研究：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院國家科學委員會

台灣屬環太平洋火山地震帶，能夠抵抗地震力是設計的重要考量，柱構件承受火災後，強度大減，到底還保有多少抵抗地震力的能力是建築物決定拆除或補強的重要因素，可進行相關殘餘強度之數值模擬與實驗作探討。

### 建議三

營建材料高溫材料熱學性質之研究：中長期建議

主辦機關：行政院國家科學委員會

協辦機關：內政部建築研究所

台灣的結構物多屬混凝土及鋼兩種材料，此兩種材料受火災高溫破壞後，其熱學性質如熱傳導係數及比熱係數均隨著溫度上升而改變，而這兩種熱學性質對

火害中結構物之溫度場分佈有著決定性影響，國內對高溫材料熱學性質的研究只有少數零星的研究，未累積足夠多的數據。未來可參考本研究所提出之建議，進行一系列常用鋼材及混凝土之高溫材料熱性質試驗，建立本土之高溫材料熱學性質公式，有助了解火害中之結構行為。



## 附錄一 審查意見與答覆

### 壹、期初審查意見與答覆

會議日期：99 年 12 月 17 日下午 2 時 30 分

地點：內政部建築研究所簡報室

台北縣新店市北新路三段 200 號 13 樓

#### 鍾負責人肇滿

1. SRC 斷面高溫下之力學性質以小斷面做試驗，以其試驗所得結果是否可推估實體斷面之火害力學性質以供實務研判之依據。

答覆：研究將嘗試建立分析模式以小斷面試驗驗證分析模型之正確性，進而再推演至實尺寸構件，探討斷面溫度之分佈。

2. 就建築整體之結構強度而言，火害後之 SRC 構造是否可予適當修復補強，可提供後續修復補強設計之所需資料。

答覆：結構火害後之修復補強有賴火害後之鑑定，本研究成果將可提供 SRC 斷面在高溫下斷面溫度之分佈，進而推估材料與結構之強度

#### 林教授炳宏

1. 研究的 SRC 斷面除「十字型鋼骨」外；一般常用的箱型柱，亦應給予系統性的序列研究。

答覆：內灌混凝土箱型柱之研究有待後續之研究

2. 研究的題目「SRC 高溫材料性質之研究」範圍較廣泛，該研究僅作斷面溫度分佈，目標較局部明確，但需再詳述溫度分佈與高溫度材料的力學性質間的關係。例如溫度分佈與承載能力之間的關係等。

答覆：溫度分佈與承載力間的關係值得研究，礙於研究經費與時程，本研究將採用定載方式。



3. 程式具有那些功能，其可應用領域，可再詳述。

答覆：遵照辦理。

### 劉教授玉文

1. 本研究主要工作項目有 SRC 構件試體設計製作，火害試驗及分析並建立模式，然計畫書內沒有看到試體如何規劃試驗考量三種變數下及研究目的，如何設計試驗變數。

答覆：本研究主要試驗參數為不同受火面、混凝土種類及斷面形狀，試體之設計規劃將詳述於報告內。

2. 計畫經費中擬進行 SRC 火害試驗為 18 組，但口述報告中第 19 頁為 12 組，相差 6 組？

答覆：試體數量將重新規劃以考量試體變數與研究目的。

3. 火害試驗以 SRC 梁柱構件之端點束制條件及受力條件如何？未見說明。

答覆：端點的束制條件及受力條件將依實驗規劃與設備儀器而定。

4. 分析工具採用有限元素軟體之分析模式為 2D or 3D，如何模擬應有規劃，並將小模型試驗結果應用於實體 SRC 構架。

答覆：因試驗設備為小型高溫爐，分析模式不考慮柱軸向熱傳，採用之有限元素將為 2D 熱傳分析。

5. 計畫書中其他費用之臨時工資應歸入人事費。

答覆：經費的編列將依委託單位之規定。

### 高教授健章

1. 試體斷面 25×25 公分，屬縮小比例模型。所得試驗與分型模數之結果，需能推演至實際實尺寸之耐火模數，此點應能列入預期成果中。

答覆：SRC 試體之設計將儘量考慮實務常用型式與尺寸，以降低尺寸效應之影響，並將建立分析模式以期預測實尺寸之構件。

### 陶研究員其駿

1. 服務建議書中曾提及「高溫」、「火害」及「耐火」等同質性之文字敘述，建議應予統一。

答覆：遵照辦理。

2. 針對本案所探討 SRC 梁柱構件之鋼骨斷面究竟是十字型、H 型或 I 型應於計畫書中敘明。

答覆：遵照辦理。

3. 本研究所規劃實驗參數相當多，建議宜再有所取捨，並應嘗試將試體之數量，做一初步且保守之說明。

答覆：遵照辦理。

4. 建議本案宜針對未來擬研訂相關測試方法之名稱，做一概略之說明，否則難以由計畫書中瞭解其測試方法之標的。

答覆：遵照辦理。

### 蔡簡任研究員銘儒

1. 請評估構造耐火性能設計所須之材料高溫性質項目(含 K、 $\rho$ 、C 等)及其試驗法。

答覆：遵照辦理。

2. 請檢討法規或規範就構造耐火性能設計於材料高溫性質應規範條文，具體提出制(修)訂建議。

答覆：擬制(修)訂測試方法將涵蓋鋼材、鋼筋與混凝土。材料高溫性質之測定將視研究經費與試驗儀器而定。

3. 火害中結構安全性與構件熱膨脹關係大，請將熱膨脹性質納入探討。

答覆：銘謝指教。

### 陳組長建忠

1. 鋼骨鋼筋混凝土構造火害研究的重要性何在？

答覆：國內近十年高樓結構多採用鋼骨鋼筋混凝土構造，但對其火害下行為尚未十分了解，故對其深入探討有其必要性。

2. 鋼筋混凝土、鋼骨及鋼骨鋼筋混凝土，一般來說何者最為耗能。

答覆：報告將簡要的探討各式結構之耗能。

3. 本案與性能設計關連的部份為何？如何在性能設計案件使用。

答覆：本研究可得到 SRC 柱斷面溫度分佈歷時，進而由材料高溫性質推估耐火性能可供後續性能設計參考用。

## 貳、第一次專家學者諮詢座談會意見與答覆

會議日期：100年6月10日(星期五)下午2時30分

會議地點：內政部建築研究所簡報室

台北縣新店市北新路三段200號13樓

### 郭教授詩毅

1. 研究內容具有一定困難度，在試驗進行中建議再對細節作檢視，以期能達到預期目標。

答覆：遵照辦理。

2. 本研究重點在於建立相關圖表及特性公式可以應用，建議在預期成果(二)部分章節納入熱重分析(DSC)及熱差分析(DTA)等試驗及分析，在建立材料高溫特性模式上會有一定幫助。

答覆：熱重分析與熱差分析於材料高溫特性有其重要性，研究將視經費與時程而考量。

3. 目前業界檢視 RC、SRC 等結構受火害後之結構安全的評估多用火害現場取樣作燒失量分析，藉燒失量來推估火場最高溫度及材料殘餘強度，若能建立相關應用模式可供參考應用，更具實用性。

答覆：銘謝指教。

### 邱瑞深委員

1. 試體建議先行養護(加溫)，避免日後實驗產生異常值，影響研究計畫成果。

答覆：遵照辦理。

2. 試體實驗中應注意加熱爐及試體間應保持無瑕疵(即兩者間孔隙加強封閉性)，取得數據值可信度較佳。

答覆：遵照辦理。

**陳結構技師照堂**

1. 鋼骨保護層厚度 55 mm，與業界常用的似乎不符合，一般業界多為 15 cm。

答覆：為量測到斷面溫度分佈，故將鋼骨保護層厚度縮小。

### 參、期中審查意見與答覆

會議日期：100 年 7 月 8 日下午 2 時 30 分

地點：內政部建築研究所第三會議室

台北縣新店市北新路三段 200 號 15 樓

#### 邱顧問昌平

1. 參考書目請加[ ]及編號，如 19. Mao, X.Y and Kodur,...，則圖 4-21...Test[19]即可知是他人之 Test。

答覆：遵照辦理。

2. 2 小時及 3 小時防火時效，要求鋼筋之混凝土保護層各為 5 公分以上及 6 公分以上，而本研究之方柱及圓柱式體皆只有 4 公分，研究團隊對陳照堂技師之答覆是為了量測到斷面溫度分布，故將之縮小，建議對此問題做進一步之說明。由本研究之 FEM 分析，應可知保護層大於 6 公分時，可能鋼骨之溫度會更低(小於 100°C)，則與 SRC 之主題偏離。

答覆：遵照辦理。

3. 加熱試驗過程保持固定的加載 P，P 為工作載重，報告中未註明多少？(油壓機能量僅 100 噸)，又標準加熱溫度、時間曲線最高可達 1200°C，時間長至 6 小時，為何分析只做 3 小時？

答覆：因油壓機容量，僅加載至 90 噸。加熱時間受試驗爐限制，最長至 5 小時。

#### 高教授健章

1. 報告內容中甚多圖表來源列為本研究整理，建議詳列資料出處。

答覆：遵照辦理。

2. 本研究擬實驗之項目大多尚未進行，須加緊進行。

答覆：遵照辦理。

3. 小型試體試驗結果引用到實尺寸大構件時，需要相似性之換算，需加探討。

答覆：本研究所規劃之試體尺寸較實際柱構件所採用之尺寸為小，而尺寸的差異是否會影響試體斷面溫度以有限元素分析探討。於相同深度位置之測點，實尺寸與縮尺寸試體分析之溫度約略接近。惟位於鋼骨間之縮尺寸之測點，其溫度較實尺寸相同位置之分析溫度為高，主要原因為縮尺寸鋼骨之混凝土保護層較小，因鋼材較佳的熱傳導能力將可能影響鄰近混凝土溫度，導致縮尺寸之溫度較高。實尺寸因斷面大，於三小時加溫之分析顯示斷面中心仍處於低溫狀態，整體而言實尺寸應有較佳的防火性能。

#### **馮主任秘書俊益**

1. 實驗規劃已完成應屬可行。

答覆：銘謝指教。

2. 建議將熱膨脹性質納入探討。

答覆：銘謝指教。

3. 目前進度符合預期成果需求。

答覆：銘謝指教。

#### **林教授炳宏**

1. SRC 柱被覆混凝土材質採用 CNS 配製，此與歐洲規範材質之異同所造成之差異，在試驗結果綜合比較時，應將此些因素納入考量。採用之鋼材材質，亦應秉此原則審慎估量。

答覆：遵照辦理。

**陳組長建忠**

1. 請檢討本所科技計畫中所提的 SRC 防火科技計畫，對於已執行的各年度細部計畫、未來細部計畫的前後關係，已建立的數據項目、方程式，未來細部計畫要調整的部份為何？

答覆：建研所 SRC 防火科技計畫規劃 100 年至 103 年主要計畫目標為(一)提高 SRC 建築物的防火安全要求，(二)發展防止結構破壞技術或新材料開發。為一連續性提高 SRC 建築物防火性能之規劃，各年度計畫針對不同 SRC 建築物研究其防火性能。本計畫針對包覆型 SRC 柱探討 SRC 材料熱性質與 SRC 柱溫度分佈，可據以發展包覆型 SRC 柱之耐火性能之研究。

2. 本計畫上位之科技計畫是以結構防火性能設計為重，目前以往各項研究及本研究能修正本所出版的構造防火性能驗證技術手冊內容為何？(如材料熱性質或被覆/不被覆的設計、驗證方法為何?)

答覆：手冊中防火時效之計算已有鋼構造及鋼筋混凝土，尚缺乏 SRC，本研究可提供 SRC 材料熱性質及溫度分布之相關資料以供計算。

**業務單位**

1. 歐規 EN 1994 (2006) 對於 SRC 防火性能設計有所著墨，建議研究團隊依本研究實驗數據，進行該規範設計方法與結果比對，或可據以修改為較適合國內之設計方式。

答覆：銘謝指教。



#### **肆、期末審查意見與答覆**

會議日期：100 年 11 月 9 日下午 2 時 30 分

地點：內政部建築研究所第三會議室

台北縣新店市北新路三段 200 號 15 樓

#### **中華民國消防設備師公會全國聯合會（林主委世昌）**

因與本會及個人專業有別，無意見。

#### **吳教授玉祥**

1. 試驗中混凝土的比例及混凝土的尺寸大小是否會影響火害的結果？。

答覆：鋼筋的混凝土保護層厚度會影響防火時效。

2. 是否可以在報告中說明方形為何比圓形鋼筋混凝土較為耐高溫。

答覆：試驗結果並未顯示方形斷面 SRC 柱試體比圓形耐高溫，而是圓形試體於火害中因形狀因素較易有混凝土保護層爆裂現象。

#### **邱顧問昌平**

1. 本研究利用小型複合高溫爐進行 12 根實尺寸含十字型鋼鋼筋混凝土柱試體之高溫試驗，以電熱偶量測鋼骨、鋼筋，混凝土之升溫狀況及最後之破壞情況。另以有限元素法作斷面溫度分布之熱傳分析模式，以其結果與試驗值作比較。內容豐富，成果良好。

答覆：銘謝指教。

2. 研究發現圓形斷面較方形斷面易損，對於混凝土保護層在防火設計考量上，未來是否建議不同之厚度規定？

答覆：本研究火害試驗發現在相同混凝土保護層厚度下，圓形試體保護層較易爆

裂，造成箍筋溫度急速上升，影響試體防火時效，圓形斷面柱試體之保護層厚度是否不同於方形斷面應須深入探討。

### **曾理事長順正**

1. 試體的完整性是否已於試驗前確認？

答覆：試驗前確認試體完整性無誤。

2. 圓形柱是否 6 組全部相同的爆裂？

答覆：圓形試體皆有混凝土保護層爆裂的現象。

3. 有關火害後鑑定應加強數據化，日後可供消防火場鑑定參考。

答覆：因研究時程緊迫，本研究僅將進行後續的火害後殘餘強度之試驗。

4. 其他火害溫度與構件變化可供起火點鑑定。

答覆：報告將可提供火害溫度與試體內溫度分布及破壞模式之試驗結果。

### **馮主任秘書**

1. 研究成果符合預定需求。

答覆：銘謝指教。

### **蔡教授匡忠**

1. 實驗及斷面熱傳評估模式之工作量大，已產出之結果甚佳。

答覆：銘謝指教。

2. 依計畫進度，未完成之實驗須儘速完成。

答覆：遵照辦理。

3. 依預期成果，有關材料高溫特性及標準草案擬定須儘速完成。

答覆：報告將建議材料高溫特性試驗之國際標準。

4. 依預期成果，國內現行法規採用之規範或標準研修須儘速完成。

答覆：現階段研究成果尚難以訂定規範或標準。

5. 實驗設計及成果中對於加載情形，束制條件須標明。

答覆：試驗之加載情形、束制條件於報告第三章有相關說明，即試體加載方式為定載 90 噸，束制條件上下皆為鉸支承。

### **主席（陳組長建忠）**

1. 有關成果第 2 項的(1)、(2)，其圖形、數值、公式之顯現，宜予使用端（應用端）等代表性機構人員妥適討論，訂出可用的量化資料。

答覆：銘謝指教。

2. 本研究及試驗，其本土化的發現為何？

答覆：國外包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱多為包覆 H 型鋼，而國內工程多為包覆十字型鋼骨，可提供本土之包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱火害研究參考。

3. 常見構造火害行為模式為何？如具體分析，似可洽國內經常進行火害鑑定的機構，如建築技術學會，或相關建築師、技師公會及團體，取得其樣態。

答覆：可參閱「建築物火害及災後安全評估法」。

4. 未來研究建議，除於第 8 章另立一節提出外，請輔以詳細提案單，或國科會提案格式，已供本所後續研究參考。

答覆：將依時程安排儘量執行。

### **業務單位**

1. 有關試體斷面溫度分布歷時資料，建議與 Eurocode 之推估公式相比對，並調整相關設計參數，俾利提出 SRC 結構本土化性能防火設計規範。

鋼骨鋼筋混凝土高溫材料性質之研究

答覆：銘謝指教。

2. 對於本次 12 支火害後試體殘餘強度之相關試驗，建議研究團隊可規劃後續相關研究課題。

答覆：將檢討火害後 SRC 試體殘留強度之實驗可行性，以充實研究成果。

### **伍、第二次專家學者諮詢座談會意見與答覆**

會議日期：100 年 12 月 9 日(星期五) 下午 3 時 30 分

地點：國立交通大學工程二館 EB208 會議室

#### **鄭教授復平**

1. 試體 SN4 實驗結果和溫度歷時、熱偶量測點位置不同之溫度值未來可以再深入探討相關性。

答覆：待後續研究。

2. 試體發生混凝土爆裂的原因有可能是試體內外溫度差異導致膨脹不一致而產生爆裂。

答覆：銘謝指教。

#### **陳教授鴻輝**

1. 試體 SN3 為模擬邊柱情況下之三面受火，實驗情況下水汽可能從不受火面散出。

答覆：銘謝指教

2. 實驗結果照片建議可轉換成破壞位置示意圖。

答覆：銘謝指教。

#### **陳技師照堂**

1. 本研究為鋼骨鋼筋混凝土柱之高溫試驗，而剪力釘對於高溫試驗結果之影響，可以再做進一步之研究。

答覆：受限於研究時程與經費，剪力釘對於高溫試驗之影響有待後續之研究。

**鄭教授紹材**

1. 實尺寸與縮尺寸 SRC 斷面溫度分布之分析比較，建議以同樣深度之混凝土溫度互相比較。

答覆：銘謝指教

2. 試體的含水率為影響爆裂之因素之一，高於 100°C 烘乾可降低試體含水率，但溫度太高可能會影響試體性質。

答覆：銘謝指教。

## 附錄二 結構耗能概論

永續發展為目前國內外政府之重要政策，建築產業消耗了大量的能源，並產生了許多的營建廢物與排放了大量的二氧化碳。建築產業於節能減碳的永續性扮演了重要的角色。因而結構系統的選用時而被探討於節能減碳的優劣；鋼筋混凝土(RC)、鋼結構(S)與鋼骨鋼筋混凝土結構(SRC)何者較為符合永續建築實有深入探討之必要性。

Tang 等人(2010)探討一棟位於香港的 36 層高層建築物於不同結構系統的防火設計、建築成本與時間、二氧化碳排放量與能量損耗。初步規劃時以柱為例，發現 SRC 柱將比鋼構造便宜。於近似的斷面尺寸與撓曲勁度下，包覆型 SRC 柱亦將比內灌混凝土箱型柱便宜 47%。Tang 等人針對此三種柱結構，其二氧化碳排放與耗能如下表 1 所示。

**表 1 柱結構二氧化碳排放量與耗能比較**

	箱型 鋼柱	十字型 鋼柱	內灌混凝土 箱型柱	包覆十字型 SRC 柱
每單位長度約略二氧化碳 排放量 kg/m	9,229	12,689	7,025	5,474
每單位長度耗能 MJ/m	152,557	209,646	93,241	66,675

(資料來源：Tang et al. 2010)

上表二氧化碳排放量與耗能为依據文獻資料(The Structural Engineer 2007)計算而得，如下表所示。

**表 2 建築材料二氧化碳排放量與耗能比較**

材料	二氧化碳排放量(ton/每噸材料)	耗能(MJ/每噸材料)
鋼	1.01	16837
混凝土	0.142	1800
鋼筋	1.34	12920

(資料來源：The Structure Engineer 2007)

由表 2 可見包覆型 SRC 柱有最小的二氧化碳排放量且耗能最少，而最有利於永續性。該文獻亦比較鋼筋混凝土柱之二氧化碳排放量與耗能。於二氧化碳排放量之柱結構為包覆十字型鋼骨之 SRC 柱<內灌混凝土箱型柱≈鋼筋混凝土柱<鋼柱(箱型柱或十字型柱)。於耗能則為鋼筋混凝土柱<包覆十字型鋼骨之 SRC 柱<內灌混凝土箱型柱<鋼柱(箱型柱或十字型柱)，因而以環保之觀點，採用 SRC 柱有其優勢。



## 參考書目

- ASCE. (1992). "Structural fire protection." ASCE committee on fire protection, Manual, No. 78, ASCE, Reston, Va..
- Arioz, O. (2007). "Effects of elevated temperatures on properties of concret." Fire Safety Journal, 42(8), 516-522.
- ASTM E21 (2009). "Standard Test Method for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials." American Society for Testing and Materials.
- BS 1902-5.5 (1991) Methods of testing refractory materials. Refractory and thermal properties. Determination of thermal conductivity (panel/calorimeter method) (method 1902-505). British Standards Institution.
- BS 1902-5.8 (1992) Methods of testing refractory materials. Refractory and thermal properties. Determination of thermal conductivity (split column method) (method 1902-508). British Standards Institution.
- BS 476-20 (1987). "Fire tests on building materials and structures, Part 20, Method of determination of the fire resistance of elements of construction (general principles)." BS 476-20, 1987, British Standards Institution, London.
- BS 476-21 (1987). "Fire tests on building materials and structures, Part 21, Method for determination of the fire resistance of load bearing elements of construction." BS 476-21, 1987, British Standards Institution, London.
- Ellobody, E., and Young, B. (2010). "Investigation of concrete encased steel composite columns at elevated temperatures," Thin-Walled Structures, 48(8), 597-608
- Ellingwood, B., and Shaver, JR. (1980). "Effects of fire on reinforced-concrete members." Journal of the structural division-ASCE, 106(11), 2151-2166.
- Eurocode 2. (1996). "Design of concrete structures, Part 1.2, General rules-structural fire design." Eurocode 2 DD ENV 1992-1-2 : 1996, British Standards Institution, London.
- Eurocode 3. (2005). "Design of steel structures, Part 1.2, General rules-structural fire design." Eurocode 3 DD ENV 1993-1-2 : 2005, British Standards Institution,

London.

Eurocode 4. (2005). “Design of composite steel and concrete structures, Part 1.2, General rules-structural fire design.” Eurocode 4 DD ENV 1994-1-2 : 2005, British Standards Institution, London.

Harmathy, T. Z. and Alien, L. W. (1973), “Thermal properties of selected masonry unit concretes.” Journal of the American Concrete Institute, 70, 132-162

Huang, Z.-F., Tan, K.-H., and Phng, G.-H. (2007). “Axial restraint effects on the fire resistance of composite columns encasing I-section steel.” Journal of Constructional Steel Research, 63(4), 437-447.

Huang, Z.-F., Tan, K.-H., Toh, W.-S., and Phng, G.-H. (2008). “Fire resistance of composite columns with embedded I-section steel - Effects of section size and load level.” Journal of Constructional Steel Research, 64, 312-325.

JIS A1412-1 (1999) Test method for thermal resistance and related properties of thermal insulations – Part 1: Guarded hot plate apparatus. Japanese Industrial Standards.

JIS A1412-2 (1999) Test method for thermal resistance and related properties of thermal insulations – Part 2: Heat flow meter apparatus. Japanese Industrial Standards.

JIS A1412-3 (1999) Test method for thermal resistance and related properties of thermal insulations – Part 3: Circular pipe apparatus. Japanese Industrial Standards.

ISO 11357-1 (2009) Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC) – Part 1: General principles. International Organization for Standardization.

ISO/TR 15655 (3003) Fire resistance – Guidelines for evaluating the predictive capability of calculation models for structural fire behaviour. International Organization for Standardization.

ISO 8301 (1991) Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus. International Organization for Standardization.

- ISO 6892-2 (2011) Metallic materials – Tensile testing – Part 2: Method of test at elevated temperature. International Organization for Standardization.
- ISO 8302 (1991) Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus. International Organization for Standardization.
- ISO 834. (1999). “Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements.” International Standard ISO 834, Geneva.
- Kodur, V. K. R. (2010). “High-temperature properties of steel for fire resistance modeling of structures.” *Journal of material in Civil Engineering*, ASCE, 22(5), 423-434.
- Kodur, V. K. R., and Sultan, M. A. (2003). “Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(2), 101-107.
- Lie, T. T. (1972). “Fire and buildings,” Applied Science, London
- Lie, T. T. (1994). “Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(5), 1489-1509.
- Li, L. Y., and Purkiss, J. (2005). “Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures.” *Fire Safety Journal*, 40(7), 669-686.
- Mao, X. Y., and Kodur, V. K. R. (2011). “Fire resistance of concrete encased steel column under 3- and 4-side standard heating.” *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 270-280.
- Raut, N. K., and Kodur, V. K. R. (2011). “Response of high strength concrete columns under design fire exposure.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 67(4), 69-79.
- Touloukian, Y. S., Kirby, R. K., Taylor, R. E., Desai, P. D. (1977). “Thermal Expansion Metallic Elements and Alloys,” IFI/Plenum. New York, NY.
- The Structural Engineer, “Structural design benefits sustainability,” Volume 85, Issue 9, 2007.
- Tang, A., Lee, W. C., and Cheng, P. “Case studies – composite structural design of a high-rise building in Hong Kong and the Haeco aircraft maintenance facility in

含混凝土箱型鋼柱火害下軸向受力行爲之研究

Hong Kong International Airport,” 第六屆海峽兩岸及香港鋼及組合結構技術研討會，香港，2010。

Yu, J.-T., Lu, Z.-D., and Xie, Q. (2007). “Nonlinear analysis of SRC columns subjected to fire.” Fire Safety Journal, 42(1), 1-10.

林銅柱(1995)，「高性能混凝土耐火性能之探討」，內政部建築研究所專題研究成果報告。

沈進發、沈得縣(1996)，「鋼筋混凝土結構物火害後安全評估程序之研訂」內政部建築研究所專題研究成果報告。

沈得縣、林英俊(1996)，「混凝土結構物火害後安全性能評估方法之探討」，內政部建築研究所專題研究計畫成果報告。

林草英(2000)，「雙 H 鋼骨鋼筋混凝土柱火害後之強度評估」，國家科學委員會專題研究計畫報告 NSC89-2211-E011-010。

危時秀(2003)，「普通混凝土熱傳導性質之研究」，中原大學土木工程學系碩士論文，何仲明指導。

王天志(2002)，「高性能混凝土柱耐火性能之研究」，國立交通大學土木工程學系博士論文，鄭復平指導。

莊有清(2004)，「鋼材在高溫環境下之行為探討」，國立成功大學土木工程學系碩士論文，邱耀正指導。

簡承宏(2005)，「H 型鋼柱高溫整體結構型為研究」，國立高雄第一科技大學營建工程系碩士論文，楊國珍指導。

林子賓(2006)，「高溫下螺拴孔承壓能力之研究」，國立成功大學土木工程學系碩士論文，鍾興陽指導。

陳諺輝(2006)，「螺拴孔於高溫下承壓行為之量測與數值模擬」，國立成功大學土木工程學系碩士論文，鍾興陽指導。

張雲妃(2006)，「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，許茂雄指導。

- 何奇鈺(2007),「鋼結構用防火被覆材料之熱傳特性研究」,國立成功大學航空太空工程學系碩士論文,賴維祥指導。
- 邱耀正(2007),「複合構件 SRC 柱及 H 型鋼梁之火害行為研究—先期規畫研究」,內政部建築研究所委託研究成果報告。
- 黃彰斌、林誠興、徐瑞祥(2006),「鋼筋混凝土梁受火害之溫度分佈與殘餘強度分析」,技術學刊,第二十一卷,第二期,pp. 175-188,民國九十五年。
- 徐瑞祥、林誠興、黃彰斌(2004),「鋼筋混凝土樑受火害後之剪力強度數值模擬」,中華民國建築學會「建築學報」,第四十八期,pp. 59-73,民國九十三年。
- 中華民國國家標準 CNS 12514 (2010),「建築物構造部分耐火試驗法」,經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS 5336 (1997),「鋼鐵及耐熱合金之高溫拉伸試驗法」,經濟部標準檢驗局。
- 楊華(2010),「單面受火的矩形鋼管混凝土柱截面溫度場分析」,天津大學學報,第四十三卷,第五期。
- 內政部營建署(2004),「鋼骨鋼筋混凝土構造設計與解說」。
- 陳舜田(1999),「建築物火害及災後安全評估法」,科技圖書股份有限公司。



鋼骨鋼筋混凝土高溫材料性質之研究

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：陳誠直、趙文成

出版年月：100年12月

版次：第一版

ISBN：978-986-03-0611-8 (平裝)