

高溫下混凝土構件之熱傳數值分析

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 110 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)

高溫下混凝土構件之熱傳數值分析

研究 主持人 ： 陳柏端

研 究 期 程 ： 中華民國 110 年 3 月至 110 年 12 月

研 究 經 費 ：

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 110 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.....	V
摘要.....	VII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 文獻回顧.....	1
第三節 研究目的及方法.....	3
第四節 研究流程.....	4
第二章 材料高溫性質	5
第一節 混凝土材料之高溫性質	5
第二節 試體材料常溫性質.....	9
第三章 熱傳分析.....	15
第一節 升溫曲線.....	15
第二節 熱傳數值分析.....	16
第三節 混凝土熱交換係數.....	21
第四章 結論與建議	25

第一節 結論.....	25
第二節 建議事項.....	26
附錄一 研究業務協調會議紀錄	27
附錄二 期中審查會議紀錄	33
附錄三 期末審查會議紀錄	45
參考書目	59

表次

表 2 - 1 溫度變化下混凝土材料降伏強度及彈性模數折減係數	6
表 2 - 2 試體編號表	9

圖次

圖 1 - 1 研究流程圖.....	4
圖 2 - 1 混凝土之應力應變關係圖.....	5
圖 2 - 2 高溫下混凝土之應力應變關係圖.....	6
圖 2 - 3 受溫度影響之混凝土熱傳導係數.....	7
圖 2 - 4 受溫度影響之混凝土比熱.....	7
圖 2 - 5 受溫度及濕度影響之混凝土比熱.....	8
圖 2 - 6 受溫度影響之混凝土熱伸長率.....	9
圖 2 - 7 試驗柱尺寸.....	10
圖 2 - 8 試體配筋.....	11
圖 2 - 9 柱表面熱偶計設置位置.....	12
圖 2 - 10 試體 1、3、5、6、8 柱斷面 1 熱偶計埋設位置	13
圖 2 - 11 試體 1、3、5、6、8 柱斷面 2 熱偶計埋設位置	13
圖 2 - 12 試體 2、4、7、9、10 柱斷面 1 熱偶計埋設位置	14
圖 2 - 13 試體 2、4、7、9、10 柱斷面 2 熱偶計埋設位置	14
圖 3 - 1 CNS 12514-1 標準升溫曲線	15
圖 3 - 2 試體 1 之 1/4 斷面溫度結果	16
圖 3 - 3 試體 1 熱偶線量測溫度.....	17

圖 3 - 4 試體 1 濕度 0.3%數值分析溫度分布圖	17
圖 3 - 5 試體 2 熱偶線量測溫度.....	18
圖 3 - 6 試體 2 數值分析溫度分布圖.....	19
圖 3 - 7 試體 2 柱內 4 不同濕度溫度結果圖	20
圖 3 - 8 試體 2 柱內 5 不同濕度溫度結果圖	20
圖 3 - 9 試體 2 柱內 6 不同濕度溫度結果圖	21
圖 3 - 10 試體 4 熱偶線量測溫度.....	22
圖 3 - 11 試體 4 距離表面 30mm 熱偶線量測溫度及數值結果	23

摘要

關鍵詞：混凝土柱、綜合熱傳係數、數值分析

一、研究緣起

進行結構火害試驗所需經費高，每次計畫中所規劃的試體數量往往只夠做對照比較，而不足以做參數分析，加上目前本所防火實驗中心人力短缺，難以進行長時間之大型結構火害實驗。若能利用數值分析方法輔助結構火害實驗的數量不足，提供試驗中因儀器受限而無法量測之數據，並用於後續之參數研究，是重要且可行的方式。

為了建立一套配合本所防火實驗中心梁柱實驗爐設備特性的數值分析模式，節省大型實驗經費與人力，本所於 2018 年開始進行數值分析研究以與實驗相互結合運用，首要目標是能獲得結構的正確溫度場，由歸納過去實驗資料，找出本所實驗爐經由輻射及對流將熱能傳至試體表面之熱傳特性，以供實驗研究團隊應用。

經 2 年歸納分析，已可較為準確推測箱型鋼構件於火害中之溫度場變化，無論是在標準升溫曲線，或是自訂升溫曲線下，其熱傳數值分析結果皆與實驗數據相吻合，並可用於實驗前推測試體表面溫度到達既定溫度所需時間，以修正自訂升溫曲線及節省實驗所需時間。

本研究目的是延續箱型鋼構件綜合熱傳係數研究成果，應用到較為複雜的混凝土材料上，以探討混凝土在高溫下的綜合熱傳係數。本研究應用 2004 年度委託檢測案「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」實驗報告資料，以數值方法歸納分析鋼筋混凝土柱之熱傳影響，預測試體於標準升溫曲線下混凝土之表面溫度及內部溫度分布情形。

二、研究方法及過程

本研究應用 2004 年度委託檢測實驗資料，以數值方法探討鋼筋混凝土構件中混凝土材料之綜合熱傳係數。研究方法包括資料蒐集與整理、理論分析、試驗資料整理與數值分析。研究方法與步驟如下：

1. 文獻資料之收集與整理。
2. 以鋼筋混凝土柱之升溫加載試驗資料修正混凝土材料綜合熱傳係數。
3. 應用混凝土綜合熱傳係數以數值方法進行混凝土柱熱傳分析。

高溫下混凝土構件之熱傳數值分析

4. 進行數值分析結果與實驗結果比較，探討混凝土試體表層與內部溫度模擬之差異。

三、研究發現

本研究應用數值分析探討混凝土柱熱傳結果，結論如下：

1. 混凝土試體內部溫度差異大，以數值分析並應用混凝土綜合熱傳係數可得到較為平均之結果，可供實驗前分析評估及於實驗後比較參考。
2. 混凝土綜合熱傳係數是以本研究實驗資料歸納而來，雖已有初步結果，也可用於數值分析，但因混凝土為不良導體，致各測溫點所得之資料差異性大，仍需再進行多次實驗，並加強溫度測點位置設置之精確度，以獲得較多資料進行歸納分析，才能得到較為準確之結果。
3. 應用 Eurocode 2 之混凝土比熱，雖然已考量混凝土內部濕度，仍與混凝土實驗之溫度資料差距甚大，尤其是在混凝土內部深度較大之測點溫度，較難模擬於 115°C 左右約 30-50 分鐘之平台，可能之因素為混凝土內部濕度更高，超過 3%，以至於需讓水分子汽化所需熱能大，於數值分析時缺少相對應之比熱數據，較難以模擬。
4. 以各測點資料所得平均熱交換係數再加入濕度因子影響，所分析之溫度結果較為合理，數值分析是將所有混凝土假設為具有同樣濕度之材料，雖然可以得到距離表面 30mm 處之溫度，但對於內部可能需要再行分割具有不同濕度之材料層，較易捕捉因溼度所造成之溫度分布。

四、主要建議事項

應用 FDS 模擬梁柱於標準火害實驗之熱傳行為研究：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本所經多年研究，以數值分析探討鋼材料及混凝土材料之綜合熱傳係數已具成效，為台南防火實驗中心梁柱實驗爐建立構件於標準升溫曲線下之熱傳數值分析模式。綜合熱傳係數是簡化實驗爐中複雜之熱輻射與熱對流效應，可用於具有熱傳分析之軟體，找出試體內部之溫度場。為了協助實驗中心建立一套數值分析模式，建議以國際上廣泛應用之 FDS 程式進行試體之電腦模擬，取得溫度數據，做為後續力學分析以探討結構破壞行為之基礎。

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

進行結構火害試驗所需經費高，每次計畫中所規劃的試體數量往往只夠做對照比較，而不足以做參數分析，加上目前本所防火實驗中心人力短缺，難以進行長時間之大型結構火害實驗。若能利用數值分析方法輔助結構火害實驗的數量不足，提供試驗中因儀器受限而無法量測之數據，並用於後續之參數研究，是重要且可行的方式。

為了建立一套配合本所防火實驗中心梁柱實驗爐設備特性的數值分析模式，節省大型實驗經費與人力，本所於 2018 年開始進行數值分析研究以與實驗相互結合運用，首要目標是能獲得結構的正確溫度場，由歸納過去實驗資料，找出本所實驗爐經由輻射及對流將熱能傳至試體表面之熱傳特性，以供實驗研究團隊應用。

經 2 年歸納分析，已可較為準確推測箱型鋼構件於火害中之溫度場變化，無論是在標準升溫曲線，或是自訂升溫曲線下，其熱傳數值分析結果皆與實驗數據相吻合，並可用於實驗前推測試體表面溫度到達既定溫度所需時間，以修正自訂升溫曲線及節省實驗所需時間。

本研究目的是延續箱型鋼構件綜合熱傳係數研究成果，應用到較為複雜的混凝土材料上，以探討混凝土在高溫下的綜合熱傳係數。本研究應用 2004 年度委託檢測案「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」實驗報告資料，以數值方法歸納分析鋼筋混凝土柱之熱傳影響，預測試體於標準升溫曲線下混凝土之表面溫度及內部溫度分布情形。

第二節 文獻回顧

以數值方法分析混凝土構件火害問題可分二大步驟，為構件內部溫度分析與結構力學分析。在計算構件內部溫度場時，首先必須分析爐內依升溫曲線造成之熱量如何透過熱對流和熱輻射兩種方式傳遞到結構表面，一般能夠計算熱傳的數值分析程式如 ANSYS、ABAQUS、FDS 等，皆可分別輸入對流及輻射熱傳係數，同時進行運算求得結構表面溫度。尤其是 FDS 程式是由 NIST 發展

用於做火場模擬，它可考量火源位置、數量、熱釋放率、通風等，再計算熱量傳遞求得試體表面溫度。因為簡單及免費，使用者廣。

不過 FDS 雖然能分析溫度場，對於火場溫度變化後，如何同步造成結構變形行為，則無法分析，必須搭配其他有限元素軟體，如 ANSYS 及 ABAQUS 等，才能繼續做結構應力分析。另外，對於兩種不同軟體間資料傳遞及格式轉換，也是需要使用者整理或另寫程式處理。

Jowsey 等人(2004)探討高樓層結構火害時，對於火災-熱傳-結構之數值分析建議以 FDS 程式先做火源及熱量傳遞，再用有限元素軟體如 ABAQUS 做結構分析。

林誠興(2005)以數值分析探討混凝土梁火害，先以 FDS 程式模擬單一區間內部量受火害時之表面溫度，再以熱傳導理論，利用有限差分法，模擬鋼筋混凝土複合矩形梁內部溫度場，探討不同火源位置與熱釋放率大小對梁熱傳遞與結構強度之影響。以 FDS 程式分析雖然可以得到梁表面溫度，不過因無實驗數據加以印證，無法知道數值分析結果是否精確。

以此種方式計算溫度較為全面，各種因素都考慮，但是較為複雜，所需考量係數多，如對流熱傳係數，輻射放射率，輻射熱傳係數，火源熱釋放率，及排氣孔排氣速率等，尤其輻射熱傳是高度非線性，係數比重不同難以調整，雖然有實驗資料比較，但是因為係數過多，加上側向支撐、加勁板及梁柱接頭附近不易估算遮蔽效應，因此無法反算找出規律。

一種較為簡化的方法是將爐內溫度場直接用升溫曲線之溫度，熱傳方式則結合輻射與對流兩者，簡化成為對流輻射綜合熱傳方程式，即只需一個熱傳係數，再用實驗數據推算求得此係數即可。此係數代表此實驗爐之特性，因此可供實驗研究團隊於實驗前進行分析評估。張智梅(2008)採用此法，並以火場溫度分區間得到一組綜合熱交換係數，經分析獲得混凝土有效溫度場，並以 MATLAB 語言為開發平台，編寫鋼筋混凝土結構溫度場的非線性有限元素分析程式 TFARC，進行各種受火條件下的穩態、線性暫態以及非線性暫態溫度場分析。

綜合熱傳係數可直接應用於各種具有熱傳分析模組的數值分析程式中，如 ANSYS 及 ABAQUS 等，不一定還要再自行開發新的程式，而且熱傳分析完後可直接做結構應力分析，不需要用兩套不同的程式，也省去兩種不同程式間資料格式轉換。不過因為影響綜合熱傳係數很多，包括熱流體的物性，流動狀態，結構的材料性質及表面幾何形狀複雜程度等，獲得的溫度資料會有差異，需視不同實驗情況提供適合使用之綜合熱交換係數。

陳柏端(2018)嘗試以過去實驗資料，如陳誠直(2015)及陳柏端(2014、2015、2016)箱型鋼柱火害實驗，及 2 層束制鋼梁構架火害實驗，歸納出本所防火實驗

爐有關鋼結構實驗之綜合熱傳係數。先以表面幾何較為簡單之箱型鋼柱開始，找出一組適合標準升溫曲線的綜合熱傳係數。

陳柏端(2019)以 2018 年所得綜合熱傳係數探討箱型鋼柱於定溫下之溫度場，以數值方法分析 4 支箱型鋼柱，並與實驗結果進行比較修正綜合熱傳係數，得到較為吻合實驗的結果。

陳柏端(2020)探討內灌混凝土箱型鋼柱於定溫下之溫度場，以數值方法分析 2 支箱型鋼柱，並與實驗結果進行比較修正綜合熱傳係數，在鋼材料溫度方面，數值分析與實驗結果吻合，但內灌混凝土材料因有分離現象，熱傳方式由熱傳導逐漸改為對流及輻射，若持續用熱傳導方式，內部溫度場較實驗數值為高，若改為綜合熱傳係數，因混凝土材料較為複雜，影響熱傳性質因素較多，難以得到較為一致之結果，因此需要針對純混凝土材料做探討，以獲得較為確定之綜合熱傳係數。

在混凝土材料熱性質方面，Eurocode 2 及 Ulf Wickstrom 皆特別考量混凝土內部水含量對混凝土比熱所造成影響，在含水量 3%之比熱約為含水量 0 時之 2 倍，此性質對混凝土升溫影響頗大，造成混凝土到達 115°C 後溫度幾乎成水平線緩步上升，直到溫度達 200°C 才開始回復正常熱傳導行為。

第三節 研究目的及方法

本研究應用 2004 年度委託檢測實驗資料，以數值方法探討鋼筋混凝土構件中混凝土材料之綜合熱傳係數。研究方法包括資料蒐集與整理、理論分析、試驗資料整理與數值分析。研究方法與步驟如下：

1. 文獻資料之收集與整理。
2. 以鋼筋混凝土柱之升溫加載試驗資料修正混凝土材料綜合熱傳係數。
3. 應用混凝土綜合熱傳係數以數值方法進行混凝土柱熱傳分析。
4. 進行數值分析結果與實驗結果比較，探討混凝土試體表層與內部溫度模擬之差異。

第四節 研究流程

本計畫之研究項目包括資料與文獻收集、數值分析與實驗資料整理、報告撰寫，流程圖如圖 1-1 所示。

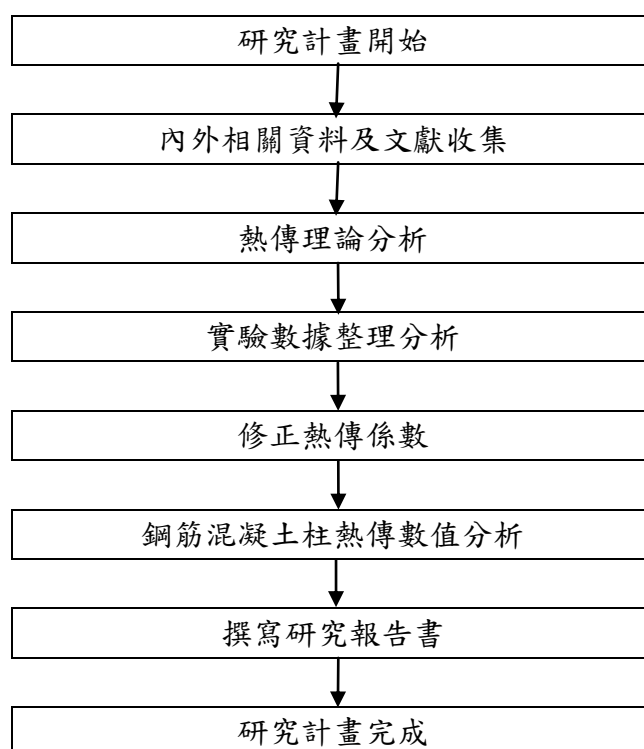


圖 1-1 研究流程圖

第二章 材料高溫性質

數值分析之材料參數設定將影響分析結果，本研究材料使用混凝土材料，其參數包括力學性質及熱性質，所用數值將參考文獻及 Eurocode 4 (2004-2005) 之規定。

本研究應用 2004 年度委託檢測案「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」實驗資料，進行數值分析並比較結果。

第一節 混凝土材料之高溫性質

壹、混凝土材料之力學性質

混凝土材料力學性質依照 Eurocode 4 建議，混凝土應力應變關係可分為兩個區域，區域一為應變小於等於抗壓應變 $\varepsilon_{cu,\theta}$ ，其應力 $\sigma_{c,\theta}$ 計算如公式 2-1 所示；區域二為應變介於抗壓應變 $\varepsilon_{cu,\theta}$ 與極限應變 $\varepsilon_{ce,\theta}$ 之間，此區域之應力應變曲線應以線性取代非線性階段，混凝土之抗壓強度 $f_{t,\theta}$ 隨溫度上升而降低，抗壓應變與極限應變增大，Eurocode 4 規定之建議值參考表 2-1，其應力應變曲線如圖 2-1 所示。於不同溫度下之應力應變關係如圖 2-2，其因溫度變化之折減係數如表 2-2 所示。

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \left[3(\varepsilon_{c,\theta} / \varepsilon_{cu,\theta}) / (2 + (\varepsilon_{c,\theta} / \varepsilon_{cu,\theta})^3) \right] \quad (2-1)$$

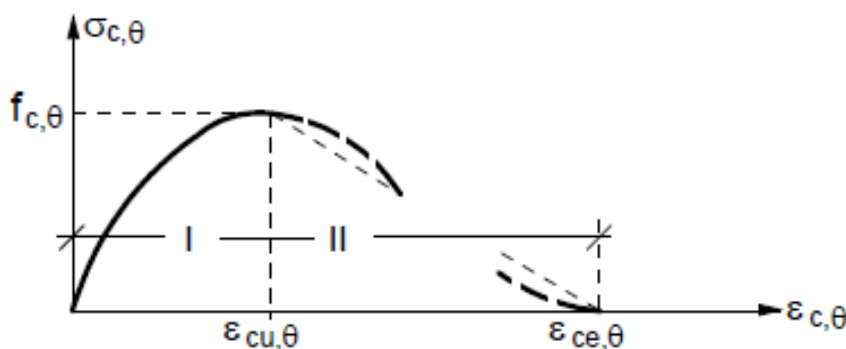


圖 2-1 混凝土之應力應變關係圖
(資料來源：Eurocode 4)

高溫下混凝土構件之熱傳數值分析

表 2-1 溫度變化下混凝土材料降伏強度及彈性模數折減係數

混凝土溫度 $\theta_a(^{\circ}\text{C})$	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_c$	$\varepsilon_{cu,\theta} (\times 10^{-3})$	$\varepsilon_{ce,\theta} (\times 10^{-3})$
20	1.00	2.5	20.0
100	1.00	4.0	22.5
200	0.95	5.5	25.0
300	0.85	7.0	27.5
400	0.75	10.0	30.0
500	0.60	15.0	32.5
600	0.45	25.0	35.0
700	0.30	25.0	37.5
800	0.15	25.0	40.0
900	0.08	25.0	42.5
1000	0.04	25.0	45.0
1100	0.01	25.0	47.5
1200	0.00	-	-

(資料來源：Eurocode 4)

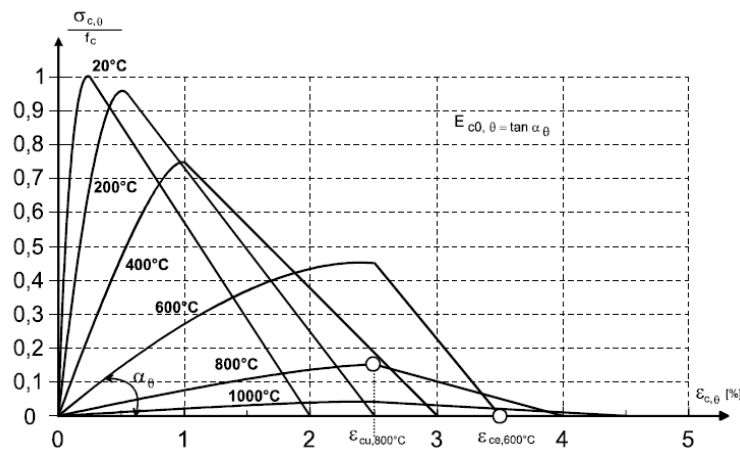


圖 2-2 高溫下混凝土之應力應變關係圖

(資料來源：Eurocode 4)

貳、混凝土材料之熱性質

1. 熱傳導，依照 Eurocode 4 規定，簡易計算中，常重混凝土之熱傳導係數可取為 1.6 W/mK；而隨溫度變化，Eurocode 4 規定其上限與下限值，並建議鋼與混凝土之複合結構採用熱傳導係數之上限值，可由公式 2-2 計算，結果如圖 2-3 所示。

$$\lambda_c = 2 - 0.2451(\theta_c/100) + 0.0107(\theta_c/100)^2 \quad \text{for } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad (2-2)$$

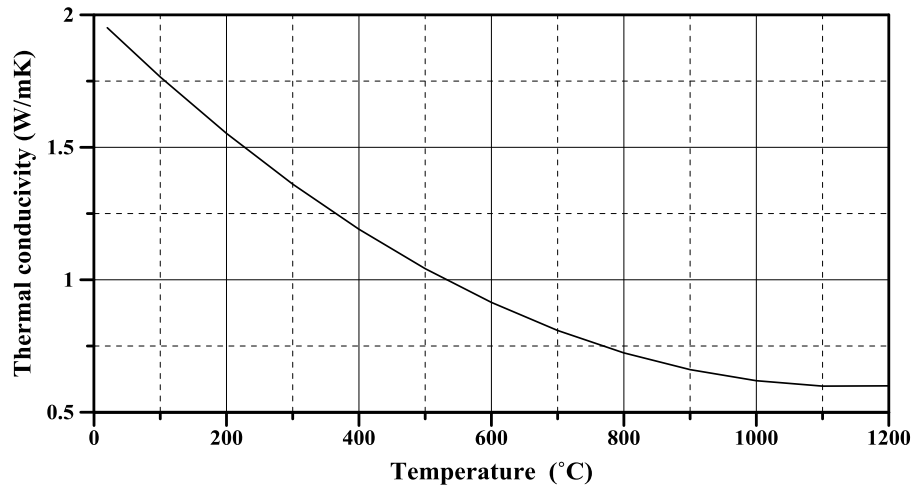


圖 2 - 3 受溫度影響之混凝土熱傳導係數
(資料來源：Eurocode 4)

2.比熱：依照 Eurocode 4 規定，簡易計算中(不受濕度影響)，混凝土之比熱可取為 1000 J/Kg K，各溫度階段之比熱可由公式 2-3 至 2-6 計算，結果如圖 2 - 4 所示。

$$C_c = 900 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 100^\circ\text{C} \quad (2-3)$$

$$C_c = 900 + (\theta_c - 100) \quad \text{for } 100^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 200^\circ\text{C} \quad (2-4)$$

$$C_c = 1000 + (\theta_c - 200)/2 \quad \text{for } 200^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 400^\circ\text{C} \quad (2-5)$$

$$C_c = 1100 \quad \text{for } 400^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2-6)$$

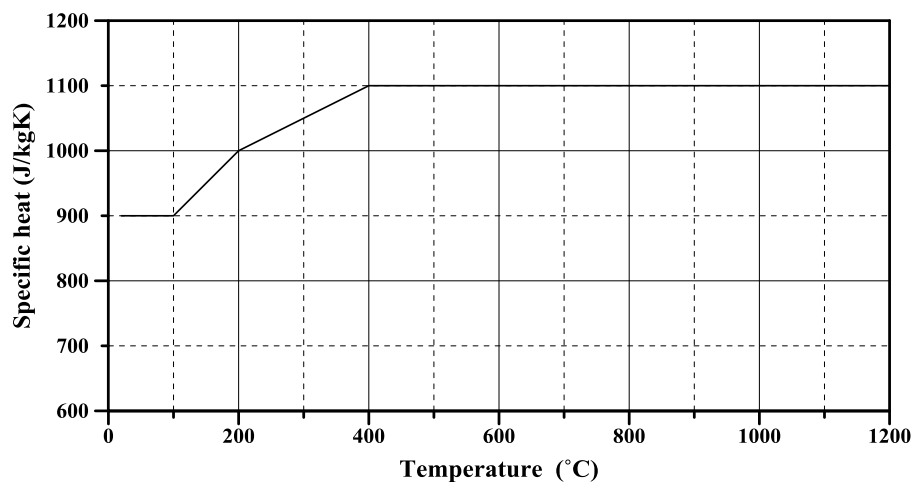


圖 2 - 4 受溫度影響之混凝土比熱
(資料來源：Eurocode 4)

高溫下混凝土構件之熱傳數值分析

若混凝土比熱考量濕度之影響，依照 Eurocode 2 規定，比熱峰值 $C_{c,peak}$ 發生在溫度 100°C - 115°C 區間，並於 115°C - 200°C 區間內線性遞減。 $C_{c,peak}$ 值如下

$$C_{c,peak} = 900 \text{ J/kg K} \quad \text{混凝土濕度 } 0\%$$

$$C_{c,peak} = 1470 \text{ J/kg K} \quad \text{混凝土濕度 } 1.5\%$$

$$C_{c,peak} = 2020 \text{ J/kg K} \quad \text{混凝土濕度 } 3.0\%$$

受溫度及濕度影響之混凝土比熱如圖 2 - 5 所示。

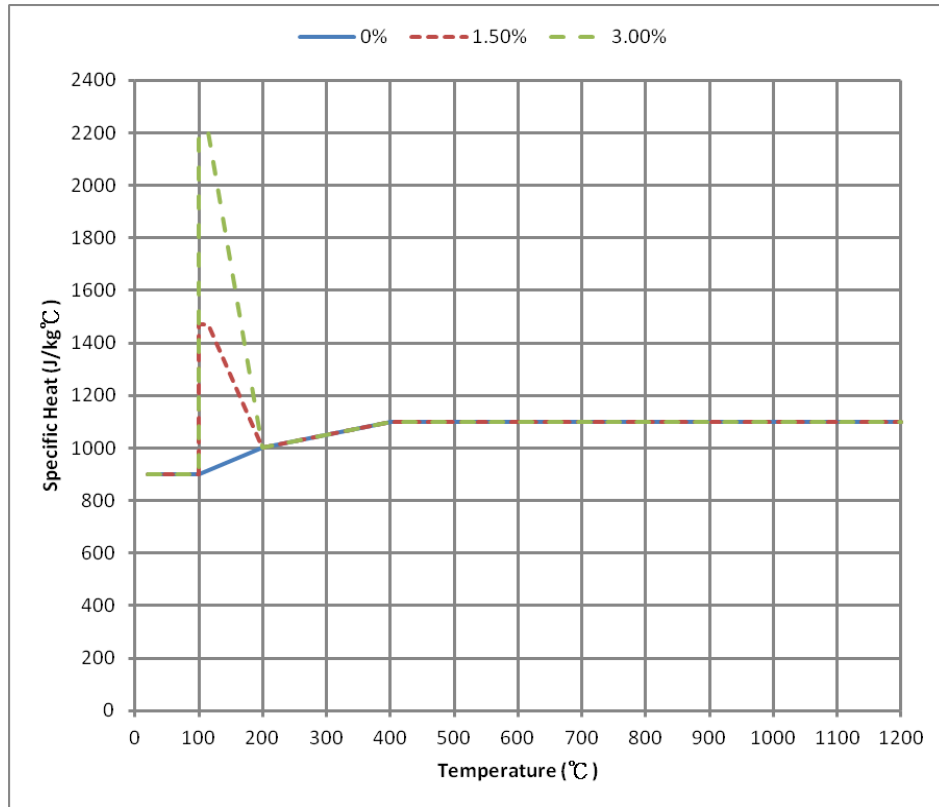


圖 2 - 5 受溫度及濕度影響之混凝土比熱
(資料來源：Eurocode 2)

3.熱膨脹係數：依照 Eurocode 4 規定，簡易計算中，混凝土之熱伸長率使用 $18 \times 10^{-6}(\theta_a - 20)$ 計算；各溫度階段之熱伸長率可由公式 2-7 與公式 2-8 計算，結果如圖 2 - 6 所示。熱膨脹係數之計算方法與鋼材之熱膨脹係數相同，如公式 2-9 所示。

$$\Delta l/l = -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta_c + 2.3 \times 10^{-11} \theta_c^3 \quad \text{for } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 700^{\circ}\text{C} \quad (2-7)$$

$$\Delta l/l = 14 \times 10^{-3} \quad \text{for } 700^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad (2-8)$$

$$\alpha_c = \Delta l / (l \times \Delta \theta_c) \quad (2-9)$$

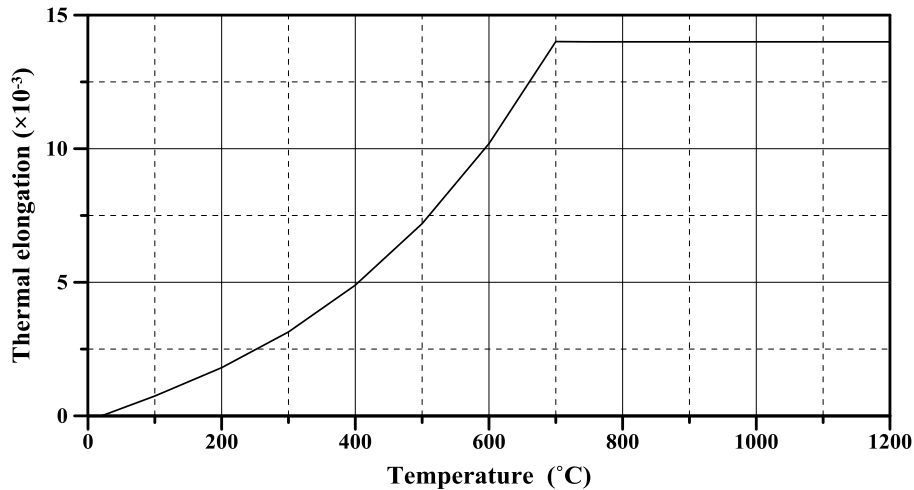


圖 2-6 受溫度影響之混凝土熱伸長率
(資料來源：Eurocode 4)

第二節 試體材料常溫性質

2004 年檢測試體共有 10 支，試體之規劃包括試體編號，混凝土抗壓強度、加熱時間及承受之軸壓力如表 2-2 所示，試體尺寸、配筋、柱表面熱偶計設置位置如圖 2-7 至圖 2-9 所示，柱斷面 1 與 2 熱偶計埋設位置如圖 2-10 至圖 2-13 所示。

表 2-2 試體編號表

試體編號	抗壓強度 (kg/cm^2)	主筋比 (%)	加熱時間 (hr)	軸壓應力/ 抗壓強度
1 (FC04)	266	1.4	2	0.20
2 (FC03)	266	1.4	2	0.20
3 (FC10)	261	2.3	2	0.20
4 (FC01)	253	1.4	2	0.20
5 (FC08)	405	2.3	2	0.20
6 (FC06)	301	1.4	2	0.20
7 (FC05)	301	1.4	4	0.20
8 (FC02)	253	1.4	4	0.20
9 (FC09)	261	2.3	4	0.20
10 (FC07)	405	2.3	4	0.20

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

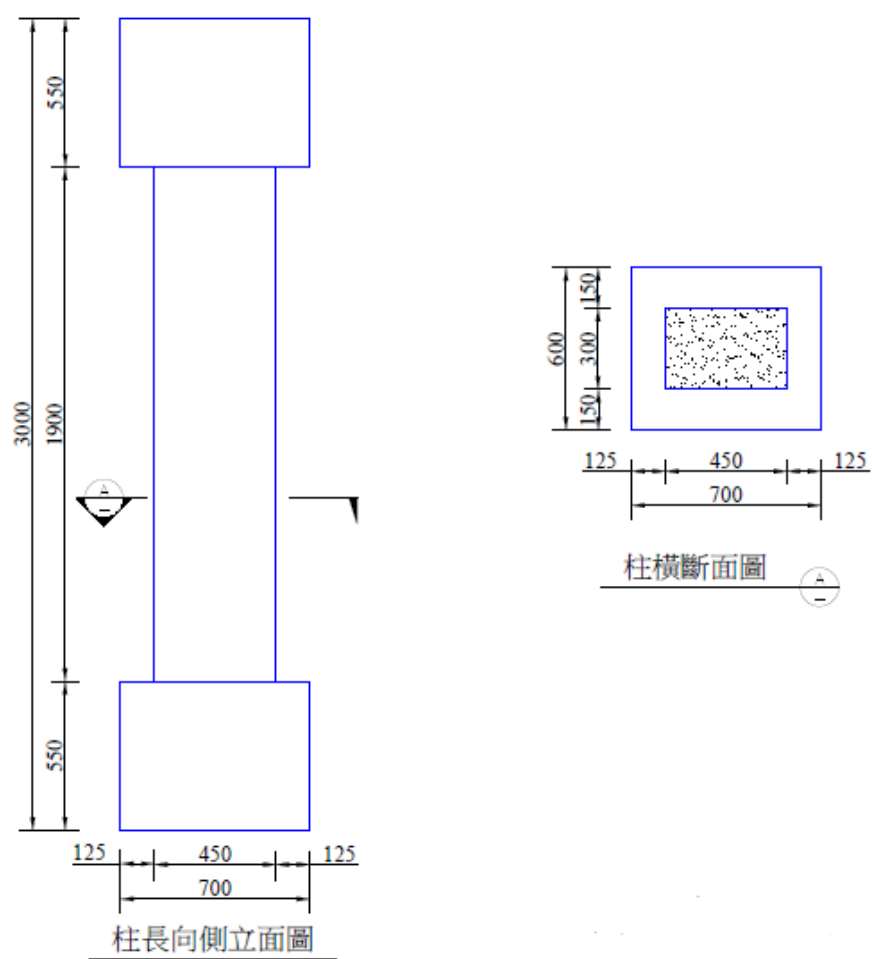
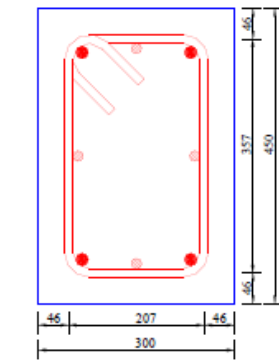
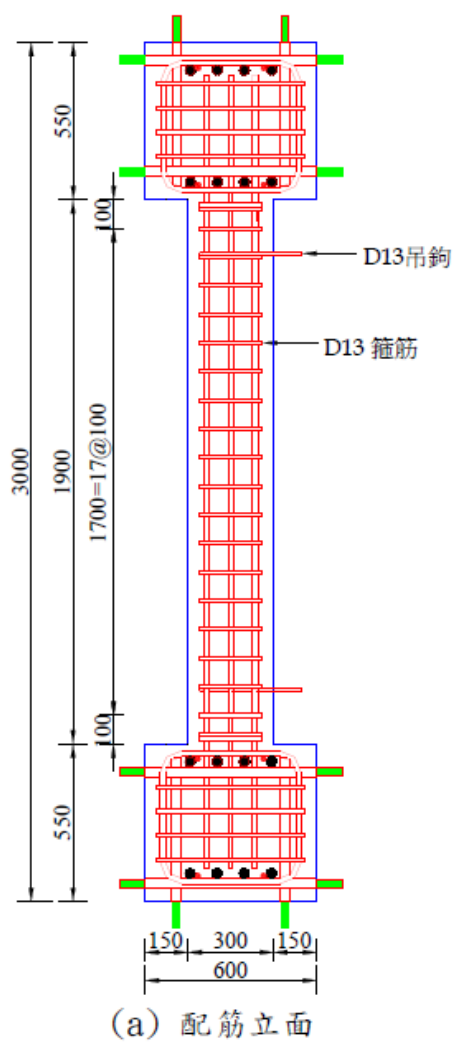
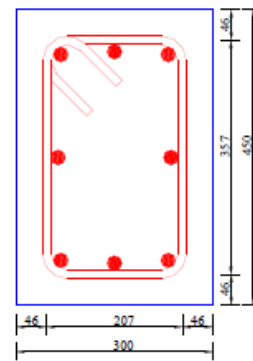


圖 2-7 試驗柱尺寸

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)



(b) 第一種斷面配筋 ($\rho = 1.44\%$)



(c) 第二種斷面配筋 ($\rho = 2.29\%$)

圖 2-8 試體配筋

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

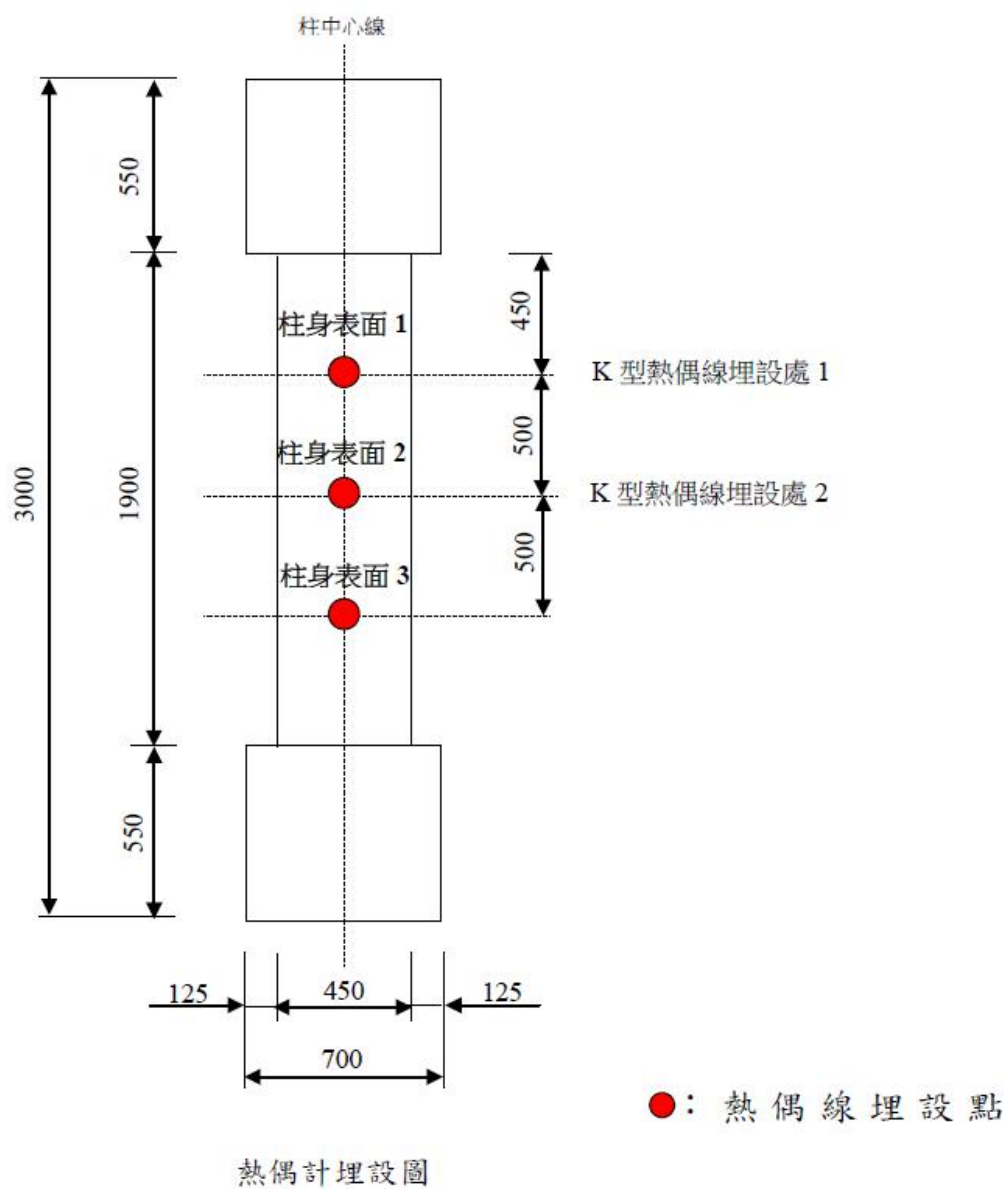


圖 2-9 柱表面熱偶計設置位置

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

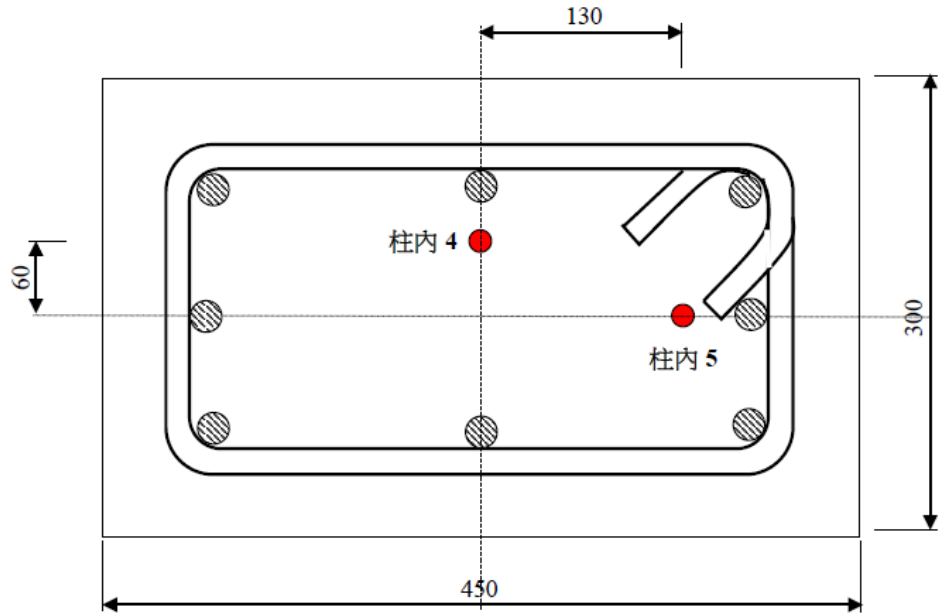
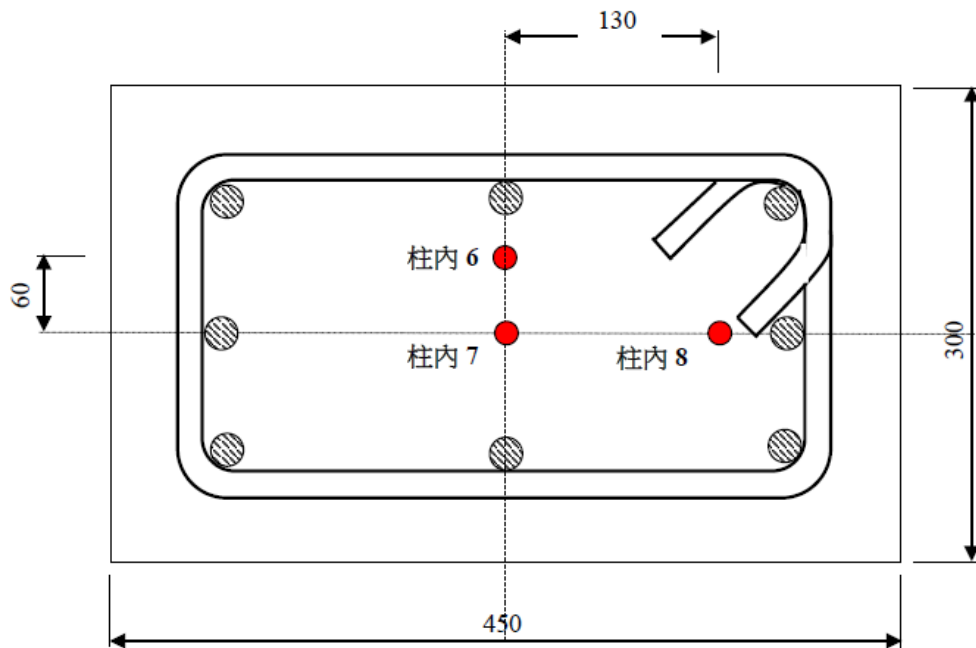


圖 2-10 試體 1、3、5、6、8 柱斷面 1 熱偶計埋設位置
(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)



●：鋼筋斷面 ●：熱偶線埋設點

圖 2-11 試體 1、3、5、6、8 柱斷面 2 熱偶計埋設位置
(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

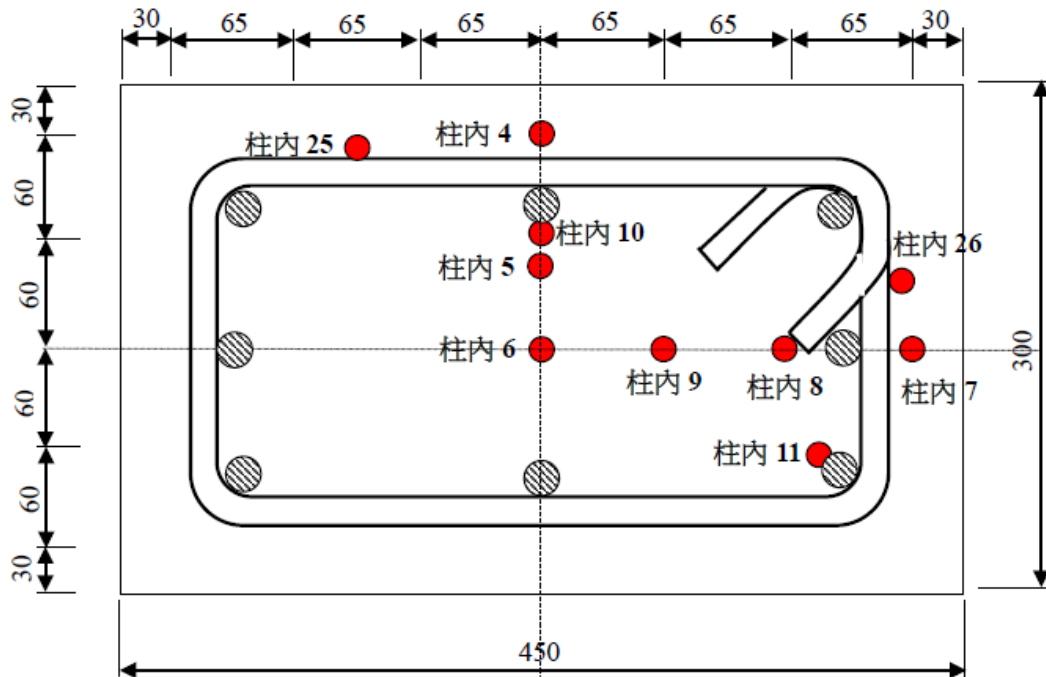


圖 2 - 12 試體 2、4、7、9、10 柱斷面 1 熱偶計埋設位置

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

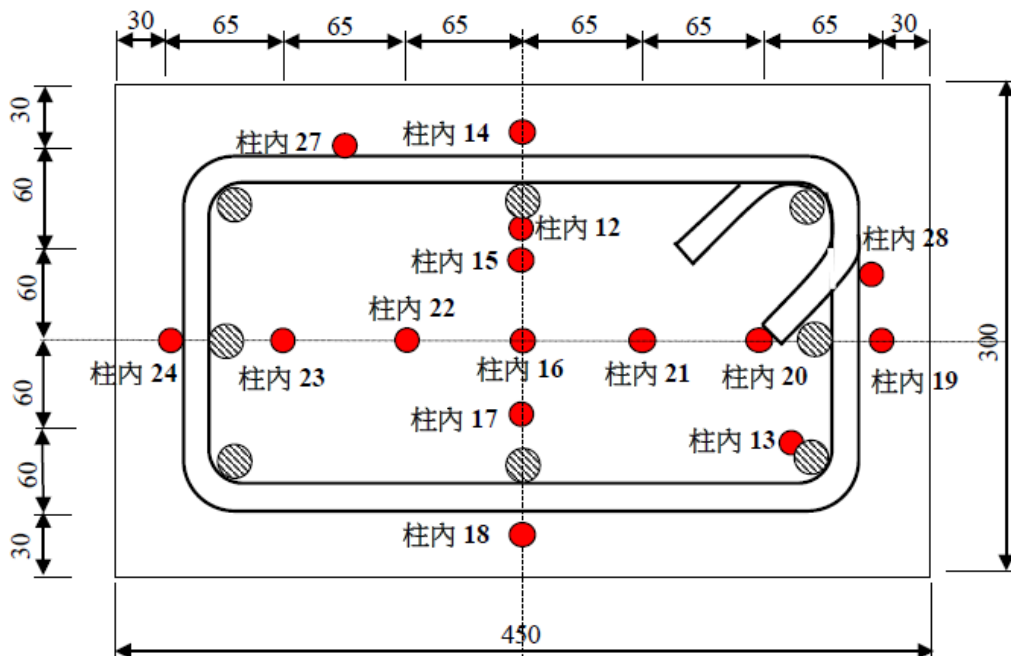


圖 2 - 13 試體 2、4、7、9、10 柱斷面 2 熱偶計埋設位置

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

第三章 熱傳分析

檢測案共規劃 10 支鋼筋混凝土柱試體，試驗步驟分為二階段，第一階段為加載加熱階段，第二階段為加熱結束後持壓至次日卸載。本研究目的是研究混凝土熱傳行為，應用 2018-2020 年之研究成果，將對流及輻射簡化成綜合熱傳係數概念，推算混凝土表面溫度及內部溫度。

第一節 升溫曲線

加熱試驗是依照 CNS 12514-1 標準升溫曲線進行控制，加熱函數為 $T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$ ，其中 T 為攝氏溫度， t 為時間(分)。其標準升溫曲線如圖 3 - 1 所示。

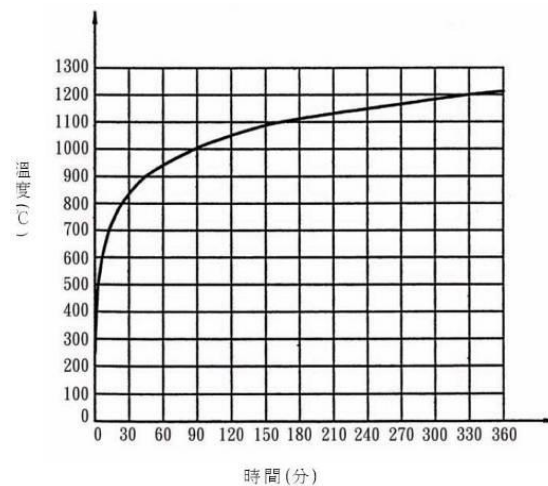


圖 3 - 1 CNS 12514-1 標準升溫曲線
(資料來源：CNS 12514-1)

第二節 熱傳數值分析

分析鋼筋混凝土柱試體在耐火爐內的溫度場時，因受火條件單純，爐溫可取平均值，實驗佈置在構件表面的熱電偶直接測得表面的溫度也取平均值，進行溫度場分析。

實驗試體長度為 3000 mm，受熱段為 1900 mm，數值分析用 ABAQUS 程式，只做熱傳處理，不做應力分析，混凝土材料熱性質方面採用第二章規定，分析元素用 3 維元素 DC3D8，於柱試體上下端裝設隔熱之防火棉部分元素分割較大，中央受熱段採取較細之分割。

熱傳分析之熱交換係數採用 108 年度研究成果，考慮混凝土內部 0%、0.15% 及 0.3% 三種濕度情形。試體內部溫度呈對稱關係，分析時可取斷面 1/4 進行。

1. 試體 1(RC01)結果：

試體 1 之 1/4 斷面溫度結果如圖 3-2 所示，溫度呈橢圓分布，試體 1 熱偶線量測溫度如圖 3-3 所示，濕度 0.3% 數值分析結果如圖 3-4 所示。由數值分析結果可見，混凝土內部水分只能將溫度稍微延緩一些，最後溫度仍然達到 400℃ 以上，但是試體實驗結果是內部水分的效應會將溫度保持於 100℃ 左右超過 60 分鐘，最後溫度仍維持在 200℃ 以下。

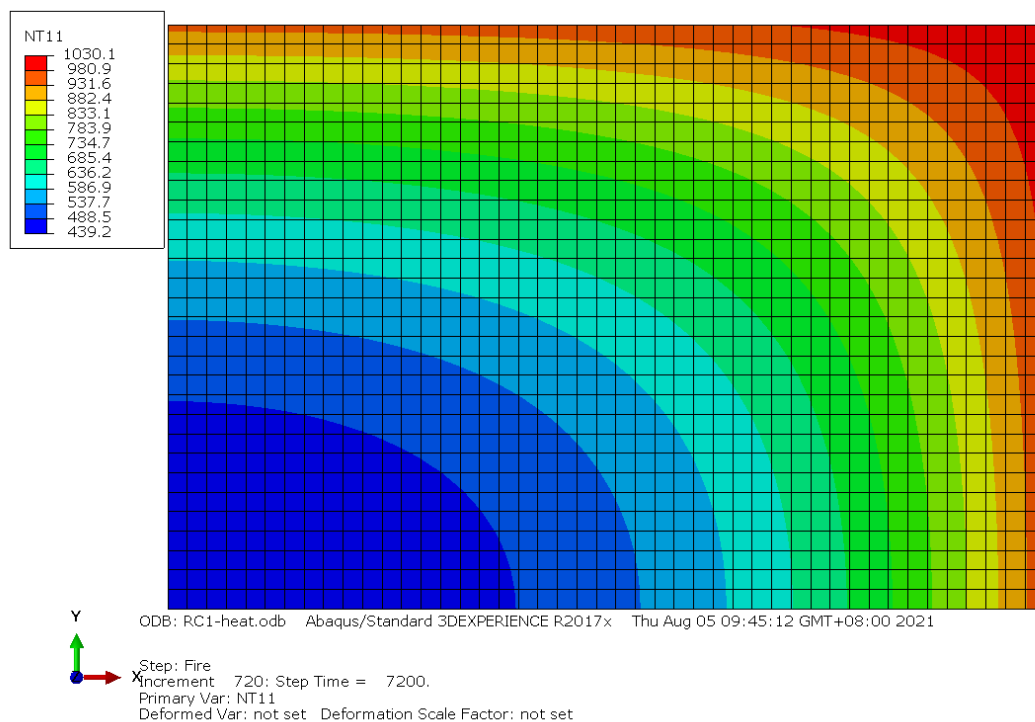


圖 3-2 試體 1 之 1/4 斷面溫度結果
(資料來源：本研究整理)

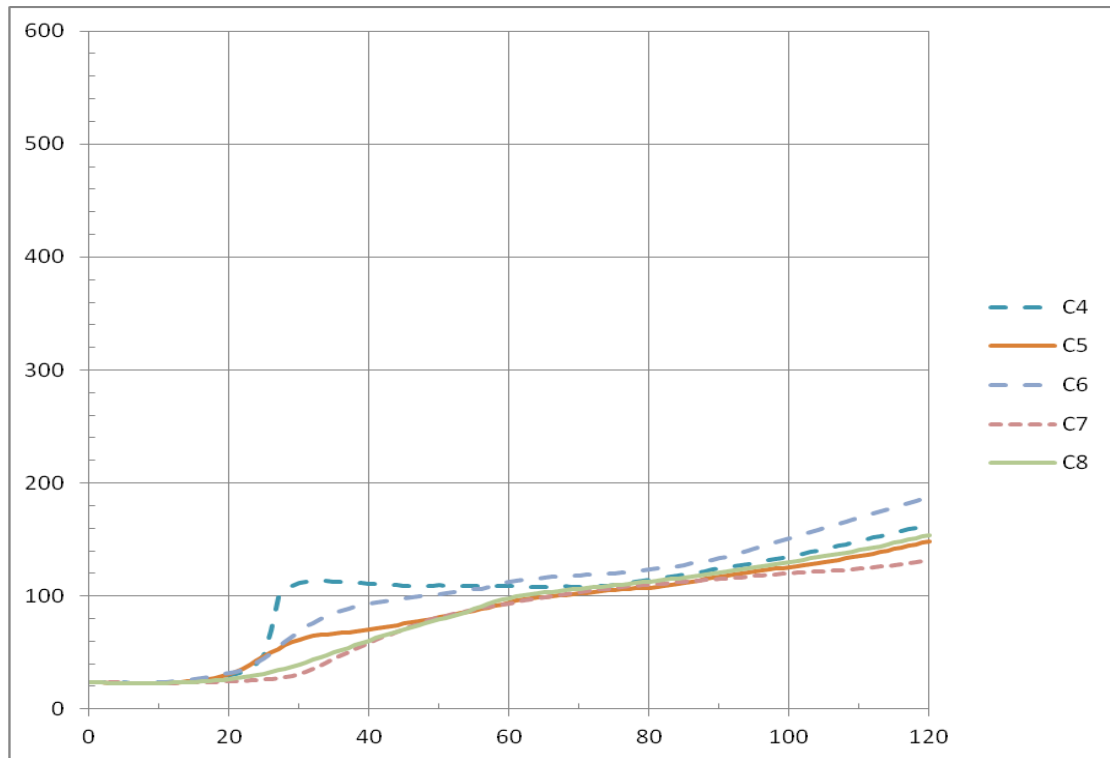


圖 3-3 試體 1 熱偶線量測溫度

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

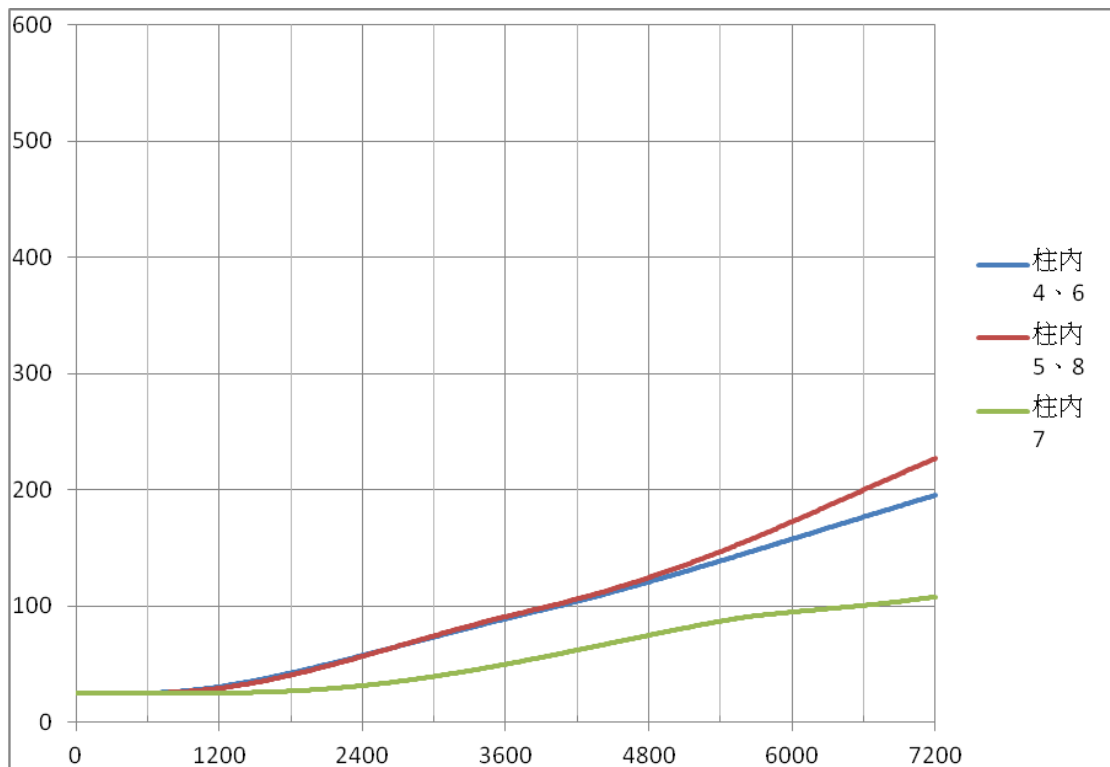


圖 3-4 試體 1 濕度 0.3%數值分析溫度分布圖

(資料來源：本研究整理)

2. 試體 2(RC02)結果：

試體 2 之熱偶線量測溫度如圖 3-5 所示，數值分析結果如圖 3-6 所示。如試體 1 之結果，混凝土內部水分對混凝土內部溫度影響仍大，造成混凝土 90 公分深度以內溫度保持在 100°C - 200°C 之間，而混凝土深度 3 公分處則有部分影響，造成溫度可達 350°C - 500°C 左右。

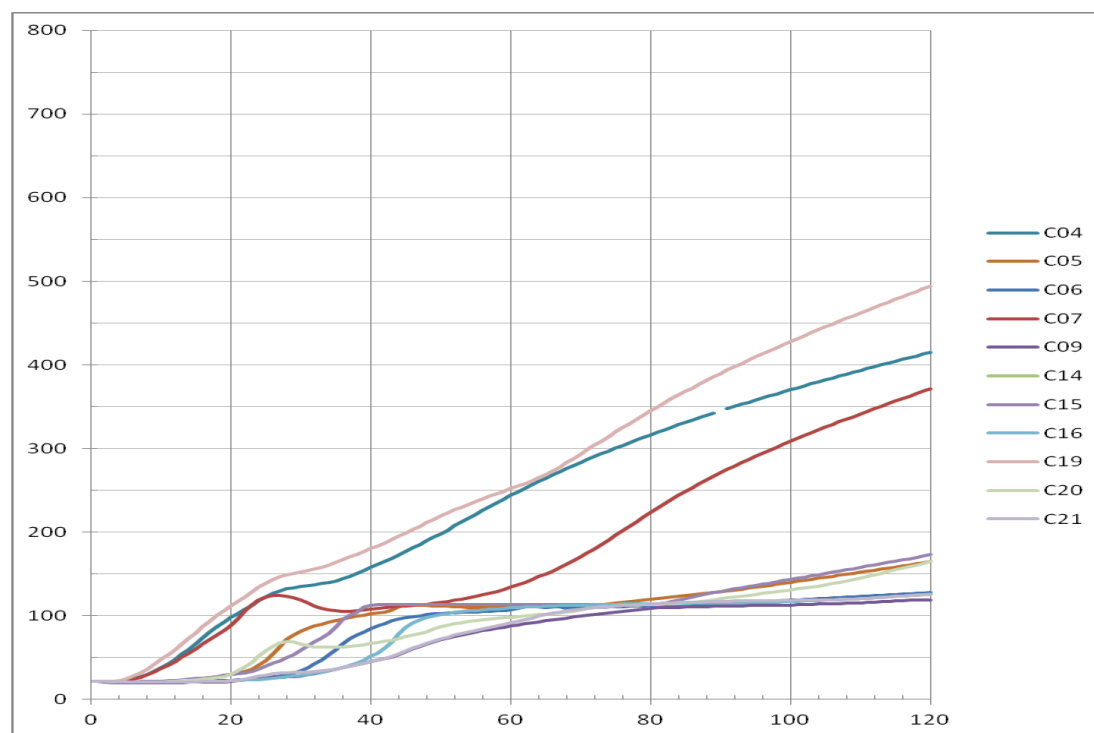


圖 3-5 試體 2 熱偶線量測溫度

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

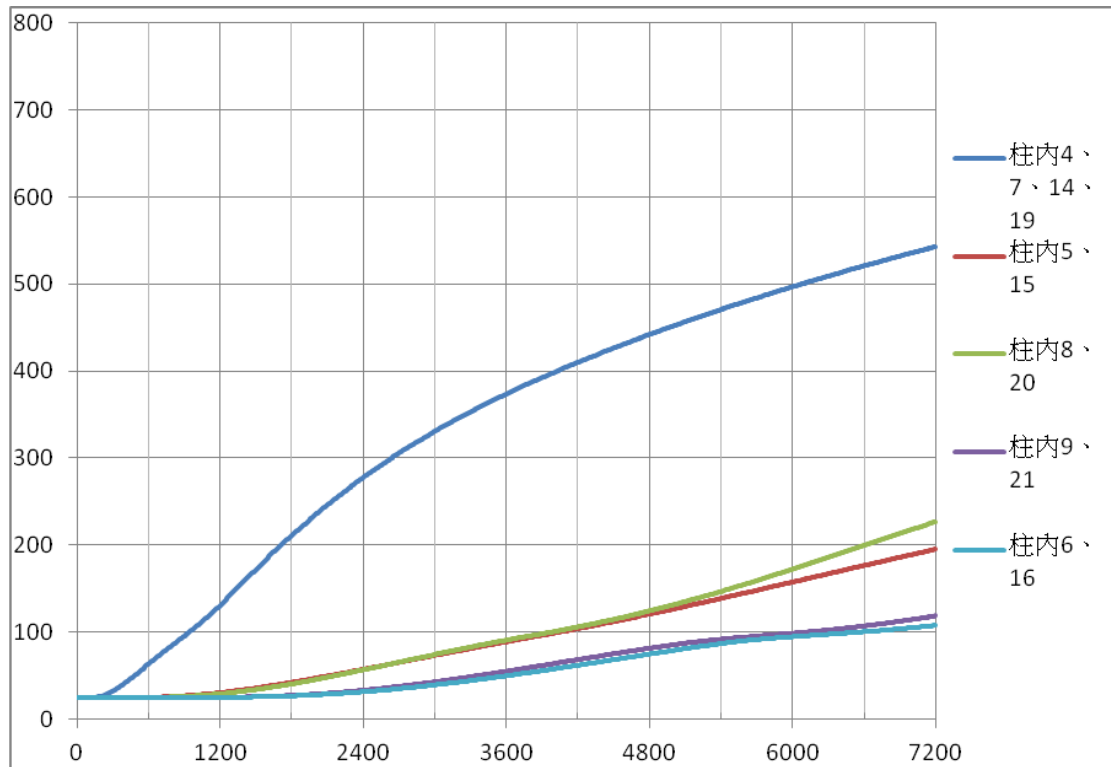


圖 3-6 試體 2 數值分析溫度分布圖

(資料來源：本研究整理)

3. 混凝土因濕度不同之溫度分析結果

由前節知混凝土內部濕度對於溫度影響大，比較三種混凝土溼度 0%、0.15%、0.3%之結果，依第二章圖 2-11 與圖 2-12 測溫點位置圖，取柱內 4(深度 3 公分)、柱內 6(深度 9 公分)與柱內 7(深度 15 公分)三位置資料分析結果如圖 3-8 至圖 3-9，可見混凝土溫度影響與濕度及深度有關，深度 3 公分，濕度影響小，深度達 15 公分，濕度影響漸增。

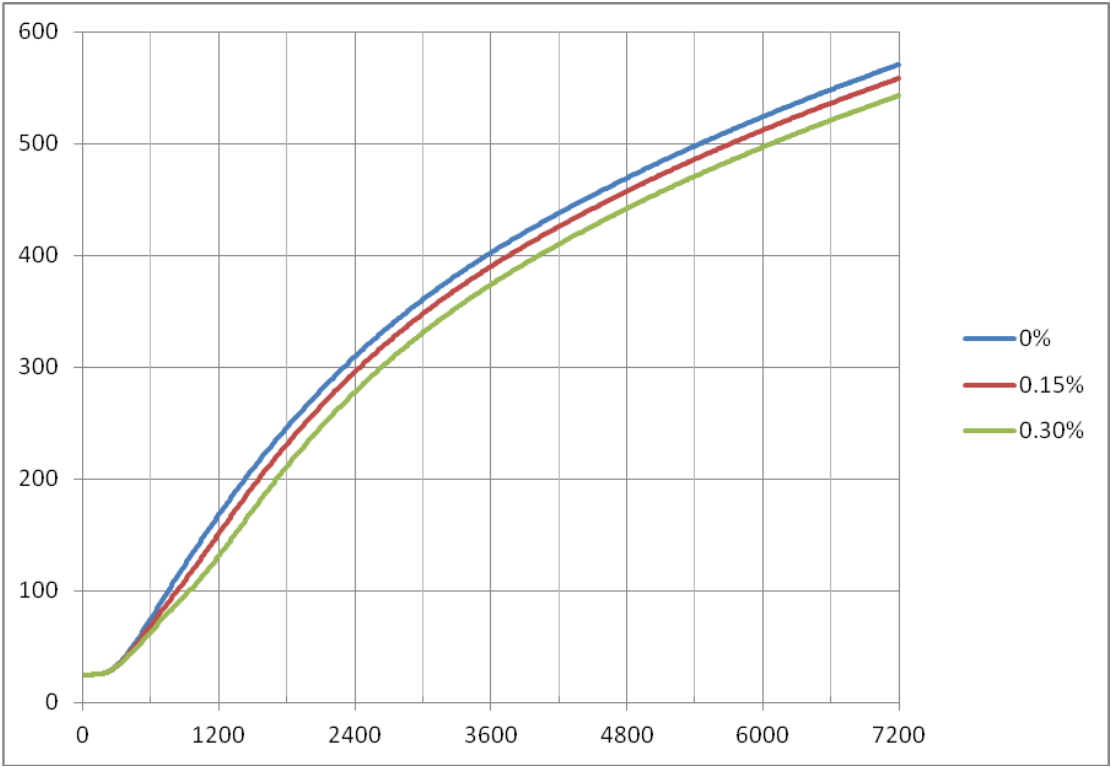


圖 3-7 試體 2 柱內 4 不同濕度溫度結果圖
(資料來源：本研究整理)

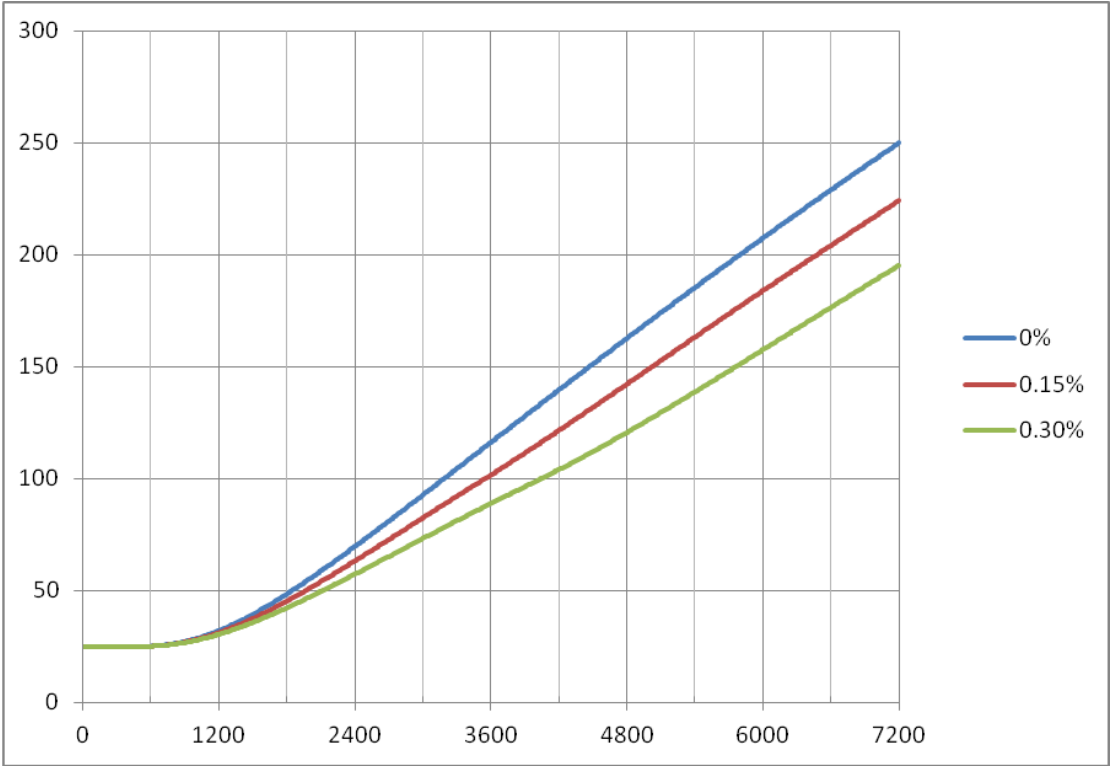


圖 3-8 試體 2 柱內 5 不同濕度溫度結果圖
(資料來源：本研究整理)

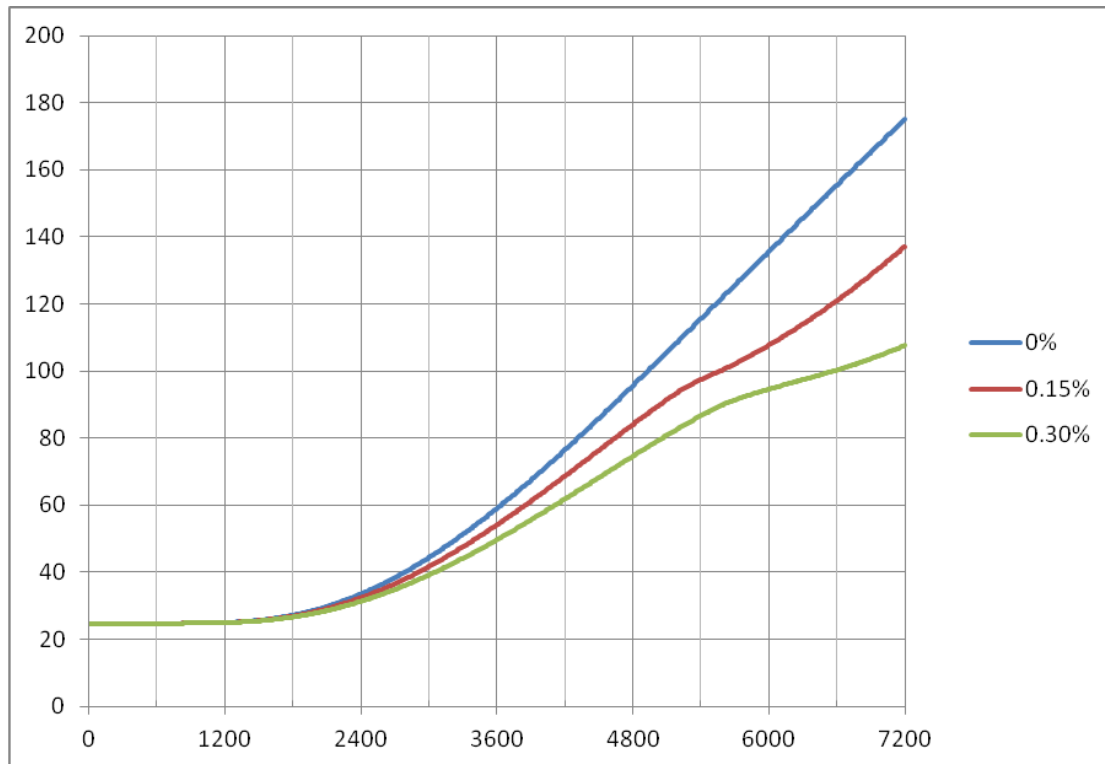


圖 3-9 試體 2 柱內 6 不同濕度溫度結果圖

(資料來源：本研究整理)

第三節 混凝土熱交換係數

混凝土試體內部熱傳分析較鋼試體困難，因混凝土為非均質材料，相同深度測點溫度差異很大，加上混凝土試體厚度大，熱偶線埋設與設計位置常因鋼筋位置及灌漿後搗實震動作用，導致熱偶線最終位置與規劃位置有誤差。因此在試體測點資料先選擇相同深度且受濕度影響小之測點進行，如試體 RC04 中距離表面 30mm 之測點，如圖 2-12 所示柱內 4、7 點位及圖 2-13 柱內 14、18、19 點位。

試體 RC04 測點實驗量測溫度資料如圖 3-10 所示，如上所選深度 30mm 等 6 個測點最高溫度亦相差約 200°C，因此先以各點資料做數值分析找出熱交換係數後，再取平均數。

依照 108 年研究成果，以能量守恆定律計算爐溫之熱能透過熱對流方式將熱能傳入混凝土試體，再以熱傳導方式將能量傳至試體內部。與鋼柱試體不同的是，鋼板厚度小，可假設熱量自表面傳入後立刻快速到達鋼板內部表面，且鋼板表面與內部溫度皆均勻上升，無能量損失。但是混凝土熱傳導較慢，且因

高溫下混凝土構件之熱傳數值分析

厚度大得分區塊，熱能自表面傳入後，透過各區塊間一直向內傳遞熱能，故每一區塊間有熱能傳入與傳出之現象，於計算熱交換係數實需加以考量。

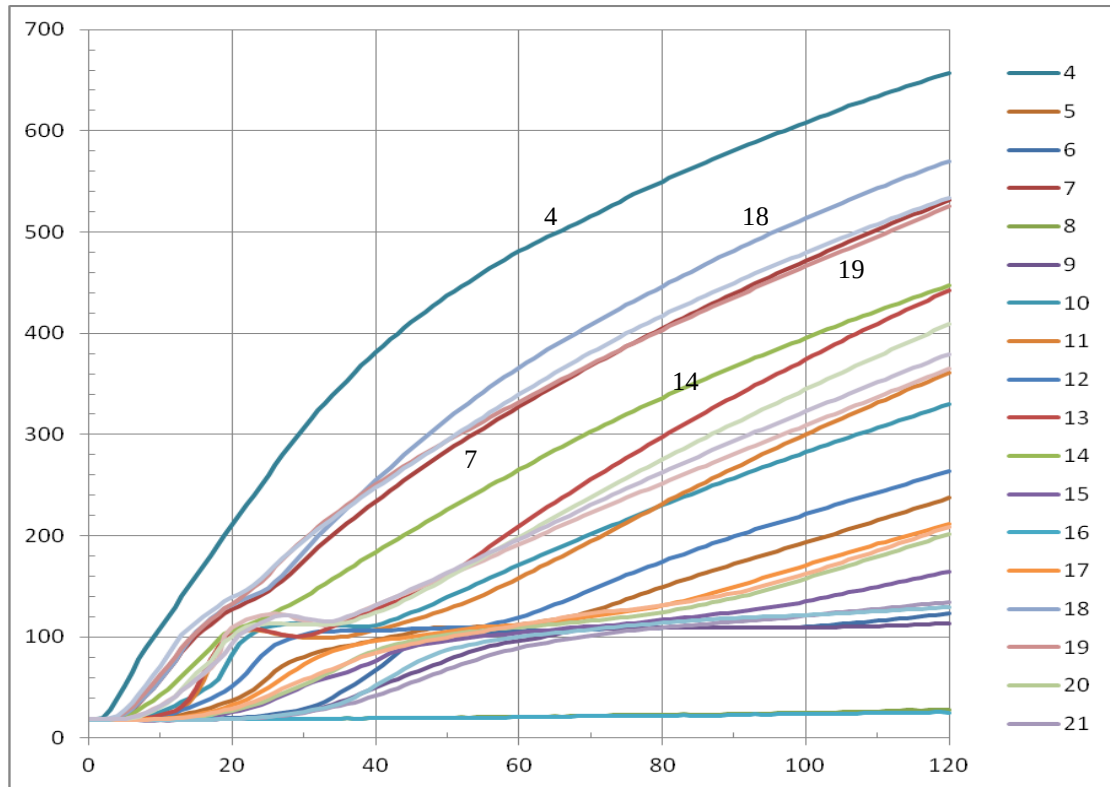


圖 3 - 10 試體 4 熱偶線量測溫度

(資料來源：2004「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」委託檢測報告)

圖 3 - 11 為試體 RC04 距離表面 30mm 熱偶線量測溫度及數值結果，如圖所示，規劃相同深度的各點溫度差異很大，溫度最高之第 4 測點似不受濕度影響，依循升溫曲線發展，而溫度較低測點受到濕度影響於 100 - 200°C 間發生轉折，以至於各測點最後溫度有差異。

因混凝土溫度量測精度較差，以各測點資料所得平均熱交換係數所分析之溫度結果較為合理，如圖 3 - 11 實線所示，數值分析已經加入濕度因素影響，不過因為溫度測點深度較淺，溫度上升較快，克服水分子汽化熱，不會如深度較深之測點溫度於 115°C 時，會有一長約 30-50 分鐘之平台，延緩溫度上升。

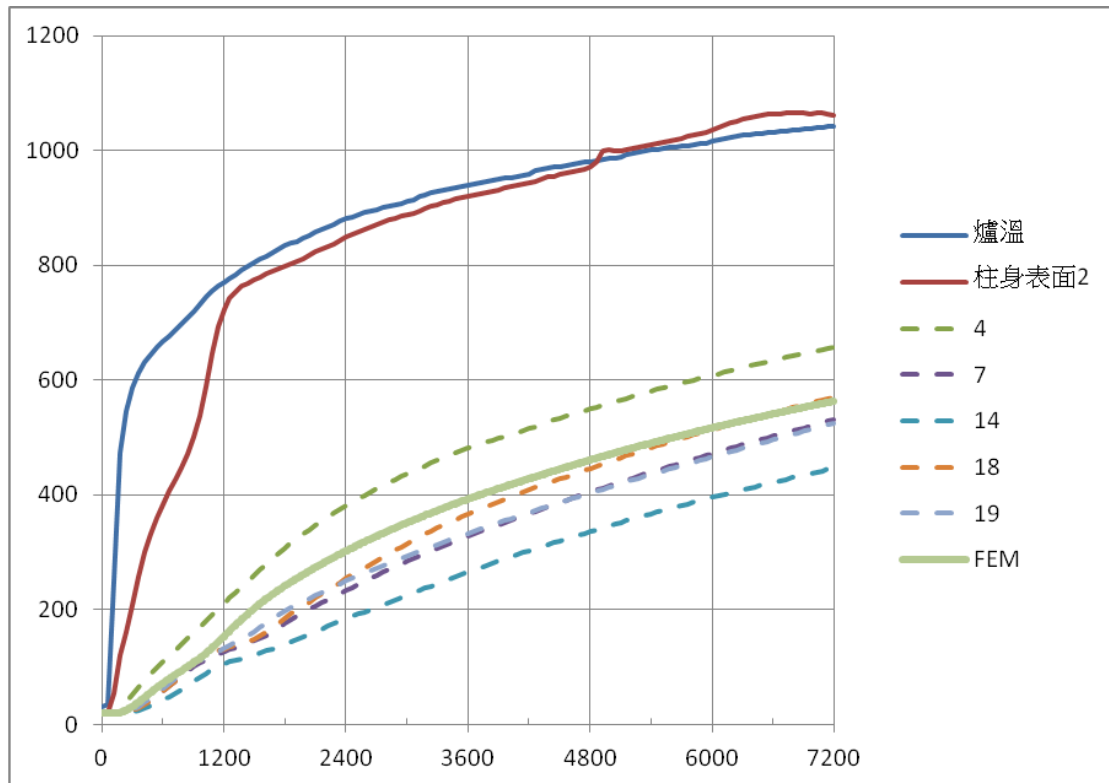


圖 3 - 11 試體 4 距離表面 30mm 熱偶線量測溫度及數值結果
(資料來源：本研究整理)

第四章 結論與建議

第一節 結論

本研究應用數值分析探討混凝土柱熱傳結果，結論如下：

1. 混凝土試體內部溫度差異大，以數值分析並應用混凝土綜合熱傳係數可得到較為平均之結果，可供實驗前分析評估及於實驗後比較參考。
2. 混凝土綜合熱傳係數是以本研究實驗資料歸納而來，雖已有初步結果，也可用於數值分析，但因混凝土為不良導體，致各測溫點所得之資料差異性大，仍需再進行多次實驗，並加強溫度測點位置設置之精確度，以獲得較多資料進行歸納分析，才能得到較為準確之結果。
3. 應用 Eurocode 2 之混凝土比熱，雖然已考量混凝土內部濕度，仍與混凝土實驗之溫度資料差距甚大，尤其是在混凝土內部深度較大之測點溫度，較難模擬於 115°C 左右約 30-50 分鐘之平台，可能之因素為混凝土內部濕度更高，超過 3%，以至於需讓水分子汽化所需熱能大，於數值分析時缺少相對應之比熱數據，較難以模擬。
4. 以各測點資料所得平均熱交換係數再加入濕度因子影響，所分析之溫度結果較為合理，數值分析是將所有混凝土假設為具有同樣濕度之材料，雖然可以得到距離表面 30mm 處之溫度，但對於內部可能需要再行分割具有不同濕度之材料層，較易捕捉因溼度所造成之溫度分布。

第二節 建議事項

應用 FDS 模擬梁柱於標準火害實驗之熱傳行為研究：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本所經多年研究，以數值分析探討鋼材料及混凝土材料之綜合熱傳係數已具成效，為台南防火實驗中心梁柱實驗爐建立構件於標準升溫曲線下之熱傳數值分析模式。綜合熱傳係數是簡化實驗爐中複雜之熱輻射與熱對流效應，可用於具有熱傳分析之軟體，找出試體內部之溫度場。為了協助實驗中心建立一套數值分析模式，建議以國際上廣泛應用之 FDS 程式進行試體之電腦模擬，取得溫度數據，做為後續力學分析以探討結構破壞行為之基礎。

附錄一 研究業務協調會議紀錄

內政部建築研究所 110 年度第 3 次研究業務協調會議紀錄

一、時間：109 年 3 月 8 日(星期一)下午 2 時 30 分

二、地點：本所簡報室

記錄：黃國倫、陶其駿、陳麒任、
黃中興、陳柏端、李其忠

三、主席：王所長榮進

四、出席人員：詳簽到簿

五、主席致詞：（略）

六、研究案主持人簡報：（略）

七、發言要點(依簡報順序)：

（一）「承受軸力位移型消能元件彈性及性能試驗方法之標準研究」案：

1. 建議多蒐集與本研究有關之 ANSI 試驗方法及標準。
2. 建議於研究期間，多與經濟部標準檢驗局聯繫及協調，以利採納本所提供之相關 CNS 標準草案。
3. 若研究成果未被 CNS 標準採納，或許可轉為建議內政部營建署將相關試驗規定納入適當規範。

（二）「建築耐震與延壽創新技術科技發展規劃研究」案：

1. 未來新興科技計畫的名稱，建議朝新方向發想(如「建築耐震 2.0」)。至建築延壽部分的標題，或許可再予修飾，例如材料性能創新之類的新科技計畫。
2. 對於建築物的老舊、補強或防水問題，民眾常寧願接受都更重建，居住於被修復或補強的建築之意願相較為低，因此未來所提的研究課題，或許可善用儀器設備的優勢提供試驗服務，並由建築耐震新技術的發展規劃，對於未來研究經費的爭取，可能更有助益。

3. 本研究進行專家訪談或座談時，建議擴大徵詢對象，並納入甫自國外學成返國的新一輩，多聽其意見，或許更可獲得新的創意或接軌國際的發展趨勢。
4. 建築耐震研究議題雖已推動多年，但是人類對於地震的瞭解，仍非常淺薄。歷經 921 地震後二十多年的發展，國內已開發許多包括耐震評估與補強方面之技術，亦已修訂建築物耐震設計規範。或可從原結論及建議中，再檢視是否有仍待完成的課題。
5. 近一、二十年新建之建築，無論於材料的使用及其結構設計，皆屬優良，故此類建築物之體質適於長期使用，未來該如何去保存這類建築物？由於國內建築物尚未建立維護的機制，因此國人未養成建築物維護及整修的觀念，而長期忽視建築物狀況。反觀歐洲等其他先進國家，多有固定周期進行建築物維護，而非發生問題才解決。建立建築的維護經歷，有助於開發「診斷」的技術，而所謂「維護」不單是修補，還包括如何檢查，以及建立並運用相關資料。平常進行定期性的檢查與維護保養，數年後再施以較大規模的修復，而這些機制或可嘗試建立，如此維護成本可降低，對於建築壽命的延長亦有助益。

(三)「新建集合住宅導入近零能源建築技術之推動策略研究」案：

1. 本研究蒐集之美國、日本、歐洲等為溫帶國家案例，其建築能源消耗係以供暖為主，與亞熱帶國家之通風及供冷需求不同。建議可蒐集分析相關耗能數據，以說明氣候因素造成我國住宅建築物之耗能特性與歐美等國不

同，及我國建築外殼隔熱性能無需比照溫帶國家標準之原因。

2. 建議可依我國政府分工運作體制，分析住宅建築之耗能組成模式及效率，找出具節能潛力之耗能項目，供該項目之主管部會參考，以進一步提升能源使用效率。
3. 建議可探討近零能源建築結合社區微電網與電動車之可行性，以利未來國際發展趨勢。
4. 建議可蒐集經濟部推動之沙崙綠能實驗屋案例資料，納入本研究分析探討。

(四)「設置附設位移機之行動不便者上下車專區可行性初探」案：

1. 建議先行釐清本研究之移位設備名稱，是「位移機」或為「移位機」。
2. 建議先行釐清本研究移位設備之定位，例如係屬於醫療、社福、護理或無障礙等範疇。
3. 就本研究構想提出之位移設備，若需重新研發應用，恐需要較長時間；建議可探討在現有的法規及空間架構體系下，結合現有的輔具設備資源，以對應行動不便者上下車之問題。
4. 本研究構想可能應用之範圍，以及後續之管理維護方式，建議亦可透過本研究進行資料收集及探討。

(五)「高溫下混凝土構件之熱傳數值分析」案：

1. 本研究可協助防火實驗中心耐火爐相關柱構件測試，無論是對於實驗前模擬以供實驗規劃參考及修正，或者是於實驗後提供數據輔助分析，對於防火實驗中心發展數值方法有相當之助益。

2. 本研究為探討混凝土材料於高溫下熱傳作用，但混凝土材料為非均質材料，其配比、含水量及養護情況差異性大，建議須控制相關參數，以得到良好之試體斷面溫度。
3. 建議補充國內外相關研究資料，尤其是混凝土材料之熱傳行為分析，以增加本研究數值方法之可靠度。

(六)「鋼構件防火被覆耐火試驗精進研究」案：

1. 建議本研究先瞭解國內潛在廠商意願，另若需增加實驗費用時，請做好成本效益分析。
2. 建議本研究內容納入國內現行的鋼構件防火被覆材料審核認可規定，增加抽查檢驗方式之可行性評估。

八、會議結論：

本次會議 6 項研究計畫通過。請計畫主持人參考與會同仁之寶貴意見，並請納入研究內容參採修正，使研究成果更為豐富完整。

九、散會：（下午 5 時 40 分）

附錄二 期中審查會議紀錄

內政部建築研究所

110 年度自行研究「鋼構件防火被覆耐火試驗精進研究」、「高溫下混凝土構件之熱傳數值分析」及「建築材料耐燃試驗納入發煙量實驗研究」等 3 案期中審查會議紀錄

一、時 間：110 年 8 月 13 日（星期五）下午 2 時 30 分

二、地 點：視訊會議

三、主持人：蔡組長綽芳 記錄：李其忠、陳柏端、陳佳玲

四、出席人員：（如簽到單）

五、主席致詞：（略）

六、業務單位報告：（略）

七、研究計畫簡報：（略）

八、出席人員審查意見（依發言順序）：

（一）「鋼構件防火被覆耐火試驗精進研究」案：

中華民國全國建築師公會 江建築師支川：

1. 鋼構件防火被覆材料已經普及運用，能否提供其實務上的選用建議，如單位成本與施工性等。
2. 加熱試驗造成加載試體膨脹，是否有考慮其所對試體的應力數據偏差影響。
3. 日本於 25 年前就有無防火被覆鋼管柱設計案例，如愛知工業大學第 10 號館，期待國內未來鋼骨結構，如填充型鋼管混凝土柱(Concrete Filled Tubular Column, CFTC)亦可以有無防火被覆設計。

蔡簡任研究員銘儒：

1. 防火被覆耐火性試驗與評估，依美國及歐洲可能有所差異，建議蒐集 美國及歐洲之試驗及評估案例資料加以比較，後續能有試驗規劃及評估範例做為參考，以利於試驗及評估，此外評估是由委託者或評定機構或第三機構宜有所建議。
2. 第 4 章第一節在標準上之差異如何因應？除非 CNS 12514-10 申請 TAF 認可，否則目前僅 CNS 12514-6 及 CNS 12514-7，必須符合才可出具 TAF 認可標識報告書。
3. 第 4.2 節修改所需費用及進行 1 次試驗所增加之耗材及人力費，應納入收費費額成本。
4. 部分短柱及短梁可否在不同試驗室進行？宜加以評估與規範。
5. ASTM E119:2020 8.4.4 為柱的基準，8.8.5 為梁的基準。

王副研究員鵬智：

1. 鋼構件防火被覆材料已實施評定認可多年，大部分皆採國外標準，請說明採用我國標準的契機與對實驗中心的助益如何？
2. 鋼材有應用於室內及戶外且認可亦會針對戶外提出要求，請說明本案是否有因應對策？
3. 依本研究試驗對被覆厚度之加乘有無建議？尤其不同形狀的鋼構造。

王聘用研究員天志：

1. 研究緣起提到國內缺少有關”鋼構件防火被覆材料之防火性能評估與其試驗方法”，此項緣起與現行 CNS 12514-6、7，構件耐火試驗有何差異？請於緣起即予以說明區隔，以聚焦本案研究目的。

2. 鋼構件防火被覆耐火試驗規定適用範圍包括拉力構件，請問構件耐火試驗均為加載柱、加載梁，此類結果如何轉化到評估拉力構件？
3. 現行引用國外試驗報告，原測試厚度需增加 25%，未來採用 CNS 所得結果，是否就不需要再增厚？會較易推行。
4. 請再補充說明爐底改善規劃、各試體的固定方式為何？

詹聘用副研究員家旺：

1. 研究報告重點在梁柱耐火爐改善，除需考慮梁加載兩端當由爐壁受力時，如經長時間加載試驗爐壁承受力是否足夠，有否另外增加支承座。
2. 報告書第 61 頁提到加熱功能調校，現在有梁柱耐火爐已使用 17 年，應考慮評估燃燒機老化問題納入改善規劃更新，避免加熱過程無法達到 CNS12514-1 標準升溫曲線。

蔡組長緯芳：

1. 請補充說明有關填充式箱型鋼柱(CFBC)防火被覆厚度評估之建議作法。
2. 本所之前進行無防火被覆的填充式箱型鋼柱(CFBC)耐火性能研究，已獲相關成果，可提供建築師公會參考設計運用。
3. 建議是否可與 UL、新加坡 PSB 或其他相關機構合作，以提昇國際檢測能量，增加實驗室收入。
4. 請加強補充本研究目的說明。

計畫主持人回應（李副研究員其忠）：

1. 有關填充式箱型鋼柱(CFBC)防火被覆厚度評估方法，將蒐集國外相關作法與資料，另本所「鋼骨鋼筋混凝土構造火害及耐火性能設計研究計畫」(100-103 年)已針

對 CFBC 或 CFTC 進行防火性能研究，其研究成果提出填充式箱型鋼柱防火設計指南，可供業界設計參考運用。

2. 目前鋼構件防火被覆材料大多為國外產品，經審核認可後其厚度需增加 25%，今國內已有相關評估與試驗之國家標準，可建議評定機構若依 CNS 12514-10 及 CNS 12514-11 所得防火被覆材料厚度可不用增加。
3. 國內防火被覆廠商曾詢問實驗室，是否能進行鋼構件防火被覆材料評估試驗，當時僅能回覆依據 CNS 12514-6 及 CNS 12514-7 進行單一梁或單一柱試驗，並無防火被覆材料評估與試驗之國家標準可遵循，現可依據 CNS 12514-10 及 CNS 12514-11，協助業界進行防火被覆材料研發與評估，除在國內使用並做為取得國外認證之先期試驗。
4. 本研究已探詢評定機構與潛在廠商共同合作意願，現初步就防火被覆材料評估試驗，所需相關試體設計、加熱爐改善、耗材及收費等進行討論，以期對取得 TAF 認可有所助益。
5. 感謝各位委員提供寶貴意見，其餘所提建議參採納入，並於期末報告修正與補充說明。

(二)「高溫下混凝土構件之熱傳數值分析」案：

中華民國全國建築師公會 江建築師支川：

1. 混凝土柱試體內部鋼筋是否會受熱傳導影響應力，請以定量之方式說明，供設計之參考。
2. 若混凝土材質調整為輕量混凝土或發泡混凝土，對於構件熱傳導行為，會產生何種影響，請加以說明。

3. 混凝土熱傳導與防火時效有關聯，建議本研究能對混凝土梁柱受火害所需之保護層厚度及其他相關建築設計提出建議。

蔡簡任研究員銘儒：

1. 混凝土構件含水量會影響試驗加熱溫度及其熱傳，所分析之試體含水量為何？ASTM E119 X4(樓板)對於含水量折減其耐火時效，可否分析此一效應以供實驗中心檢測試驗遇有高含水量試驗件時，加熱溫度控制或申請 TAF 認證，以利於此類檢測得以出具 TAF 認可標識報告書。
2. 本案今年以混凝土構件為主，依目前及後續科技計畫年度預算有限，就結論 1 仍需再進行多次實驗，顯然本研究所要建立可用之熱傳數值分析非短期可完成，混凝土構件火害研究與實驗在國際上應已很多，建議蒐集國外資料及早建立，後續有此方面之研究實驗計畫時再加以驗證。
3. 混凝土本已具有一定的耐火性，技術規則為規格式規定，本案在研究需求性有限，而檢測並無此需求，考量後續科技計畫經費有限，本案研究緣起目的已無其迫切性，本研究目的建議朝其他用途思考。

王副研究員鵬智：

由於熱作用致使鋼筋或鋼板與混凝土分離，造成熱傳導方式改變，使數值分析之溫度較實際實驗溫度高，但相對較為保守，安全性較高，請說明其間之差異程度為何。

王聘用研究員天志：

1. 本系列研究從 105~109 年已進行 5 年，在鋼結構、內灌混凝土鋼構件的高溫行為研究，已有豐碩的成果。

2. 混凝土數值分析有考慮水分濕度對溫度的影響，但其對高溫爆裂性質建議也應納入考慮，爆裂後的構件溫度傳遞會有很大的變異，會影響試體最終承重能力的計算。
3. 李副研究員其忠今年研究案需要進行多試體的爐溫調較，本案可否利用先前成果進行數值模擬予以協助？。
4. 今年題目針對高溫下混凝土進行探討，惟混凝土高溫性能相較鋼結構為佳，以風險程度而言，鋼結構高溫行為有較高風險，建議後續可參考國際研究方向，進行鋼構架的行為分析。

李副研究員其忠

1. 本研究數值分析所用之綜合熱傳係數，是否與試體材料種類無關，即對於鋼構件或是混凝土構件所用之係數是否一致，或是有另外之考量。
2. 有關混凝土比熱之文獻資料，歐洲規範 EC2 有考慮含水量，但美國規範 ASTM 沒有考慮含水量，而是於 500℃ 時增加相變之情形，建議加以考量。

蔡組長綽芳：

1. 建議參考國際文獻有關鋼筋混凝土之數值模擬研究，除了做為實驗的預測外，是否還有其他應用方向。
2. 混凝土材料之變異性大，影響之參數有含水量、配比、鋼筋量及箍筋間距等，建議參考國際文獻對相關影響參數詳加說明。

計畫主持人回應（陳聘用副研究員柏端）：

1. 有關混凝土內鋼筋受溫度影響，實驗資料於 2 小時內溫度皆小於 500℃，只需依規範對強度進行折減即可。
2. 若混凝土材質改變為其他性質材料，則只需使用相對應之熱傳參數，即可用本研究之方法分析。

3. 混凝土熱傳行為最重要之影響參數為濕度，但以比熱考量濕度模擬仍有些許誤差，將再參酌文獻資料加入相變因素進行分析。
4. 本研究數值分析所用之綜合熱傳係數與試體材料種類間之關聯性，目前仍持續進行探討中，結果將納入期末報告中。

(三)「建築材料耐燃試驗納入發煙量實驗研究」案：

中華民國全國建築師公會 江建築師支川：

1. 建議可對不同的材料、厚度及形狀以不同溫度進行試驗，以了解不同熱源對材料發煙量的影響及變化。
2. 木造建築使用之木頭可否進行耐燃試驗？

蔡簡任研究員銘儒：

1. 火災造成人員傷亡最主要原因為煙，以往耐燃材料測試標準 CNS 6532 判定基準包括發煙量，後來由 CNS 14705 取代後，判定基準已無發煙量，建議比較各國建材性能級數之判定基準（含發煙量）之標準，在試驗量測標準方法與 ISO 5660-1：2015 之發煙量量測比較，以提出國內耐燃建材判定納入發煙量基準建議。
2. 建材燃燒發煙量、發煙率及煙灰產生值（soot yield）隨火災成長變化，而這些數據為煙控、避難性能設計電腦模擬及驗證重要參數，建議加以探討，並提供評定機構評定參考。
3. ISO 5660-1：2015 及 ASTM E 1354：2017 皆已將燃燒量熱及煙合併，目前國家標準仍區分為 CNS 14705-1 及 CNS 14705-2，建議再檢視 ISO 5660-1：2015+ISO 5660-1：2015/AMD 1：2019，加以提出修訂及整併 CNS

14705-1 及 CNS 14705-2 草案，及 CNS 14705-1 附錄 B.4 判定納入發煙量基準。

4. 建議檢討收費標準，將光度計（壽命以時數計）、2 片遮光片（含校正）之成本納入計算。此外，輻射熱計已漲價將其納入修正收費標準。

王副研究員鵬智：

1. ASTM E84 分為 A、B、C 三級，採 FSI 值，有關煙密度如何律定 $SDI < 450$ ，又 EN 13501-1 煙產生率與判定級別皆分別訂定，本案是否亦採分別訂之。
2. ISO 5660-1 與 CNS 14705-1 之關係為何？取得 TAF 認證是否為標檢局或營建署指定性能實驗室有關？

王聘用研究員天志：

1. 簡報第 8 頁，一氧化碳中毒，但內容卻是缺氧的反應，請補充說明。
2. 報告書表 2-1，108 年合計數字及百分比欄位有誤，請修正。
3. 預期成果”初步建立室內裝修材料煙產生率實驗數據”，惟報告書或簡報未見實驗規劃，請補充說明。
4. 試驗納入發煙量，請收集分析煙產生率判定的基準，也要事先研析是否會對現行的合格產品分級造成影響，請一併分析補充說明。

詹聘用副研究員家旺：

1. 報告書第 24 頁圖 3-4 煙量測系統剖面圖係參考 ISO 5660-1 圖示，建議將各位置英文說明以中文呈現。
2. 報告書第二節第 1 點煙遮蔽率量測系統說明係指雷射光度計，建議修正為雷射光度計系統；第 3 點光度計查

驗建議修正為煙遮蔽率量測系統校正以對應說明及圖 3-9~圖 3-11 所示。

3. 本案預期成果為提升現有設備檢測能量並取得 TAF 認證，建議將 TAF 認證相關文件納入研究報告中。

李副研究員其忠

報告書 23 頁 s 定義是否有誤，請確認。

蔡組長緯芳：

1. 由火災現場得知煙的重要性，近年國內廣泛推廣應用 CLT 構材，但在防火安全上都僅注重防火時效的表現，對發煙量少有討論，本案是否也適用於檢視木構造之發煙量。
2. 若裝修材料耐燃等級加入發煙量之判定是否會影響原有級別。

計畫主持人回應（陳聘用助理研究員佳玲）：

3. 本研究案乃依據 CNS 14705-1 及參考 ISO 5660-1 進行熱釋放及煙產生率量測，因此試體尺寸、厚度及形狀等都需符合標準要求，惟測試種類除室內裝修材料外會再增加其他種類，如木頭或隔熱材等。
4. 將多加收集及分析各國對煙產生率判定的基準，並比較是否影響原已合格產品之分級。
5. 將依增設的設備及物價上漲等因素，納入成本考量研提技術服務收費標準修訂建議。
6. 修訂中之 CNS 14705-1 為依據 ISO 5660-1 不變更技術內容修訂，實驗中心已取得 ISO 5660-1：2015 TAF 認證，待 CNS 14705-1 完成修訂公佈實施，即可提出 TAF 及營建署指定實驗室增項申請。

7. 一氧化碳在血液中與血紅素結合後，會阻斷氧氣和血紅素結合並阻礙體內的氧氣運送及利用，造成組織缺氧，將修正報告內容以能更正確敘述。
8. 感謝與會人員提供寶貴意見，其餘部分將參酌修正於後續報告。

九、會議結論：

- (一) 本次會議 3 案期中報告，審查結果原則通過。請詳實記錄與會出席代表及本所人員之意見，並請計畫主持人參採，於期末審查時作適當回應。
- (二) 請計畫主持人掌握研究時程，並請留意成果報告格式，以符規定。

十、散會：下午 5 時整。

附錄三 期末審查會議紀錄

內政部建築研究所

110 年度自行研究「鋼構件防火被覆耐火試驗精進研究」、 「高溫下混凝土構件之熱傳數值分析」及「建築材料耐燃 試驗納入發煙量實驗研究」等 3 案期末審查會議紀錄

一、時 間：110 年 11 月 26 日（星期五）上午 9 時 30 分

二、地 點：採實體及視訊併行會議(實體會議於本所討論室(一)【新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓】)

三、主持人：蔡組長綽芳 記錄：李其忠、陳柏端、陳佳玲

四、出席人員：（如簽到單）

五、主席致詞：（略）

六、業務單位報告：（略）

七、研究計畫簡報：（略）

八、出席人員審查意見（依發言順序）：

（一）「鋼構件防火被覆耐火試驗精進研究」案：

中華民國全國建築師公會 江建築師支川：

1. 請補充註明報告書第 65 頁收費成本分析表，有關儀器費用 8 萬元，如何分攤獲得？
2. 另鋼結構防火被覆耐火性能評估試驗在不同形狀或材料變動等，可能會造成試驗成本增加，請於收費成本分析表加以註明，以利業界參考使用。
3. 國外使用無防火被覆填充型鋼管混凝土柱(Concrete Filled Tubular Column, CFTC)愈來愈普遍，例如，日本大阪關西機場的 CFTC 無防火被覆設計，期待國內

CFTC 之防火性能設計與本研究結合，未來對於 CFTC 無防火被覆設計有所助益。

財團法人台灣建築中心 郭工程師全豐：

本中心為內政部指定之建築新技術新工法新設備及新材料性能規格評定機構對本研究案之看法，本案對提昇國內防火被覆材料之材料商是有正面幫助的，目前台灣的防火被覆材的認證皆由國外之試驗機構出具的試驗結果或認可內容經國內的性能評定程序變成國內的認可證明文件再到市場使用，主要原由因為防火被覆材料經試驗再轉換成可以應用到各種尺寸及鋼構型式的膜厚是非常複雜的技術，國內的機構都沒有相關的經驗及案例可供引用，國外的實驗室各材料如何轉換的方式也是技術文件不容易得到，故國內有機會經 CNS12514 之試驗方法再去評估各種膜厚是很好的研究案，建議是否給評定機構之專家學者有機會參與討論及研究，以供國內之材料商有機會依國內的標準進行認證。

蔡簡任研究員銘儒：

1. 建議應就梁柱耐火爐設備改善所需期程，對於年度檢測可能產生的影響程度加以評估。
2. 鋼構件防火被覆材料之防火性能評估試驗，分為國內完整驗證及國外進口，國外進口是否應增加檢測驗證或抽驗，並依 ASTM 及 ISO(或 EN)之標準有所區別。
3. 國內鋼構件防火被覆材料的市場小，可考慮與 UL、新加坡 PSB 合作，採用 ASTM、BS 或 EN 等標準，以利國內廠商擴展外銷市場及提高檢測意願。

王聘用研究員天志：

1. 研究主題切合業界實務需求，研究內容詳實可行，對鋼構防火產業有很大的助益，且可擴展實驗中心技術服務項目，增加收入，符合預期成果。
2. 報告書內評估試驗初估增加費用為 33 萬元/次，建議再說明每次試驗可執行試體數量，並多加考慮本項試驗在國內的創新性與不可預期的部分，費用估算可再寬列，以考慮相關風險。
3. 厚度之現場施工查驗，報告建議可參考 CNS 12514-10 相關規定進行，是否能建議補充可應用於那些文件？例如 工程會“鋼結構施工及檢驗基準”？（惟該試驗量測點位較多，實務是否可行？）
4. 研究成果重要發現所提出的問題，如填充式箱型鋼柱、超高強度鋼材等，分別為國內常見使用形式及未來材料發展趨勢，建議可列入後續研究課題。

王副研究員鵬智：

1. 本研究對本所防火設備精進，尤其鋼構件防火被覆防火性能試驗十分重要，並已提出相關作業及收費原則，達預期成果。
2. 建議補充說明 CNS 12514-6、CNS 12514-7、CNS 12514-10 及 CNS 12514-11，在現行評定制度的不同及其影響。
3. 國外鋼構厚度需乘以 1.25，採用 CNS 12514 試驗應無需加乘外，另外其追蹤查核年限應亦不同，故本案有其優勢。

主席：

1. 有關鋼構件防火被覆評估試驗收費需增加 33 萬元/次，建議從成本面、市場面以及永續經營觀點再寬列檢討。

2. 考量國內防火被覆生產廠商不多，若僅以 CNS 標準進行測試業務來源可能不足，建議考慮透過與新加坡 PSB、UL 合作機會，增加適用其測試標準之試驗，不僅可增加國內廠商外銷之國際競爭力，未來也可以接受其他國家委託測試，擴大檢測業務來源。
3. 本所目前研訂「鋼構造建築物防火設計技術參考手冊」，可提供無防火被覆的填充式箱型鋼柱(CFBC) 及建築師公會設計參考運用。

計畫主持人回應（李副研究員其忠）：

1. 有關鋼構件防火被覆材料評估試驗收費成本分析表，將補充說明儀器費用分攤、試體數量等，另本研究之前先行以原有梁、柱構件耐火實驗收費報價給潛在廠商，迄今尚無回應，如果收費額度再提高，恐影響廠商意願。
2. 鋼構件防火被覆材料依 CNS 12514-10 及 CNS 12514-11 所得防火被覆材料厚度可不用增加 25%，若與新加坡 PSB 合作，採用 BS 或 EN 等標準，其厚度亦可不用增加 25%，惟 UL 採用 ASTM E119，與 CNS 12514-1 升溫曲線不同，防火被覆材料厚度需進一步探討是否增加。
3. 鑑於國內尚未進行鋼構件防火被覆材料評估與試驗，可先由國內潛在廠商、試驗室及評定機構一同參與討論及研究，以累積相關經驗。
4. 本案所提梁柱耐火爐設備改善規劃，目前為設計草稿，俟國內廠商申請試驗時，將與其進一步討論細部設計，同時與試驗室研商試驗期程，對於年度檢測影響程度應該不大。

5. 感謝各位委員提供寶貴意見，其餘所提建議參採納入，並於期末報告修正與補充說明。

(二)「高溫下混凝土構件之熱傳數值分析」案：

中華民國全國建築師公會 江建築師支川：

1. 高溫對鋼筋混凝土結構內鋼筋會產生降伏強度及抗拉強度折減，本研究是否可找出對應關係；另外若增加保護層厚度，對於防火時效的提升是否亦有相關資料可供參考。
2. 混凝土材料種類多，如普通混凝土及高強度混凝土，亦有輕量混凝土及發泡混凝土等，這些不同的混凝土材料對於熱傳導之影響是否有具體之差異，請加以說明。

蔡簡任研究員銘儒：

1. 混凝土含水量在火害時會影響混凝土受熱溫度，試驗時為符合所要加熱溫度，其實際受熱能量不同，數值模擬有無考量。
2. 研究目的 1、2 及 3 在短中期會進行此方面之研究試驗機率微乎其微，建議轉為火害後評估及反推火場溫度之應用。
3. 混凝土材料性質(如比熱、熱傳、機械膨脹)應以實測為主，不宜僅以文獻資料推估，宜經相關實驗據以探討試驗法及標準。

王聘用研究員天志：

1. 數值模擬為大型構件實驗、分析的重要工具，研究成果豐富。
2. 建議列表區分歷年研究成果之研究差異，可快速了解數值模擬進化的內容。

3. 建議補充本案數值模擬所比對的實際實驗試體之原始相關資訊，及說明是否針對本所實驗爐特性之結果，並補充本案模擬的適用對象範圍。
4. 建議以往鋼構件的模擬研究成果提供給實驗中心作為檢測服務實驗前預測工具，可增加實驗掌握度，如具體可行，還可轉為技術服務內容，增加實驗中心收入，發揮研究成果效益。
5. 混凝土材料含水量除了在攝氏 100 度附近會有汽化吸熱，影響內部升溫，在某些情況下會產生爆裂情形，對防火時效有明顯影響，建議本研究補充說明或考慮納入後續研究。

王副研究員鵬智：

建議數值分析法可應用於火災後結構性能分析。

李副研究員其忠

1. 建議本研究可朝向性能式設計發展，以數值分析找出溫度場後，接著再做結構力學分析，找出破壞模式。
2. 進行火害後評估重點在最後溫度，而非過程，尤其是火場最高溫度分佈，才能對材料做折減，預估剩餘強度。本研究建議可推估火場最高溫度及分布，供業界參考。
3. 有關混凝土含水量問題，本研究採用之模擬參數是歐洲規範，但國內因環境問題，濕度較歐洲高，所以較難精準模擬最初之遲緩階段，建議將研究重點放在最後溫度之分析。

主席：

1. 報告書之試體內部溫度圖資料多，建議用不同線條標示較為清楚；另外建議將本研究之適用性、目的及目標，於前言中詳加說明，增進對於計畫內容之了解。

2. 根據以往中空樓板測試經驗，容易大量滲水降低爐溫導致無法達到升溫曲線要求，本計畫之模型推估是否將類似情境納入考量。

計畫主持人回應（陳聘用副研究員柏端）：

1. 數值分析之混凝土內部測溫點是距離表面 3 公分處，所平均回歸之溫度約在 560°C，一般鋼筋混凝土保護層約為 4 公分，受火影響之溫度更低，鋼筋應仍保有原設計強度值，故在標準升溫曲線下受火 2 小時，4 公分以上混凝土保護層是足夠的。
2. 本研究是探討混凝土熱傳分析，所用之材料性質是熱傳部分，如熱傳導係數、比熱等，此部分實驗資料國內研究較少，故直接引用 EuroCode 數據。未來若進行力學分析時，除 EuroCode 資料外，將會再參考國內研究之數據。
3. 有關本研究所使用之數值分析軟體並無限制，因本研究重點在於歸納出混凝土材料之綜合熱傳係數，因此只要具有熱傳分析模組之軟體如 ABAQUS、ANSYS、FDS 等皆可進行分析。

（三）「建築材料耐燃試驗納入發煙量實驗研究」案：

中華民國全國建築師公會 江建築師支川：

1. 報告中實驗數據可否依其發煙量進行排序以更清楚了解哪些屬高發煙量之材料，有利日後選用材料時參考。
2. 火災現場燃燒的不僅天花板或牆面之裝修材料，室內使用之家具如沙發、窗簾也會燃燒，因此可否將室內會使用的材料或家具皆納入未來燃燒發煙量之研究範圍。

3. 木造建築使用之不同材種（如檫木、檜木、）或不同形狀（如板狀、塊狀）其燃燒結果及發煙量是否不同，可否納入未來之研究。

財團法人台灣建築中心

有關裝修材料的耐燃性評定由 CNS 6532 轉換為 CNS 14705-1 後，評定機構的專家學者擔心由原 CNS 6532 試驗法考量比較多的煙危害，變更為 CNS 14705-1 後只考量材料的熱釋放率，但火災現場煙往往也是死亡的原因，故目前國家標準也準備加入煙的量測有助於材料的提昇是很好的方向，但煙的分級如何落實到國內的耐燃一到三級，仍有待本研究是否有機會建議出更好的台灣的材料分級。

蔡簡任研究員銘儒：

1. 目前 ISO 5660-1：2015 為 ISO 5660-1：2002 及 ISO 5660-2：2002 所合併而成，實驗中心今年度 TAF 延展認證已通過 ISO 5660-1:2015 認證，後續 CNS 14705-1 及 CNS 14705-2 合併為 CNS 14705-1 後，應推動如何將發煙基準納入附錄 B 之級數判定。
2. 建築逃生避難性能與材料發煙量關係密切，但目前之模型推估多僅將文獻之標準帶入運算，未來若能發煙量納入試驗要求即可提供數值模擬之重要參數。
3. EN 13823 為 SBI 單材燃試驗 與 CONE 圓錐量熱儀試驗之尺度有差異，分級應有試驗比對為宜，不宜逕行引用。

王聘用研究員天志：

1. 研究內容詳實，符合預期成果。

2. 請於附錄補充實驗中心已取得煙產生率的 TAF 認證資訊。
3. 報告書表 2-6，在 A1 類材料，僅進行不然性試驗和熱量試驗，反倒未要求煙產生性質，請了解其原因？
4. 報告第三章第四節 煙產生率分級之探討，已列出建議 CNS 分級判定之數值，建議於附錄新增本項分級判定數值之詳細計算及驗證過程，同時請說明歐規計算公式， I_0 似乎僅取 300~900 秒，與 CNS 一、二、三級的試驗時間能否類比？
5. 未來耐燃檢測如果加入發煙量判定，若依本研究參考歐洲標準所擬訂的發煙量容許值，對國內現行材料耐燃級數及業界的影響建議後續研究應再深入探討。
6. 報告內容文句、錯字，會後再提供給計畫主持人參考修正。

王副研究員鵬智：

1. 本案已建議發煙量分級，後續應邀請相關業界、評定機構及主管機關研議參考。
2. 實驗數據似乎顯示複合性材料不符合級等的比例較高，未來發煙量分級將用於各類材料耐燃分級，因此是否亦應考量複合性材料的影響。

李副研究員其忠

本次建議之煙量判定值由大尺度結果推論至小尺度，僅為線性比例縮小推導之結果，尚有其他因素影響，有進一步討論空間，需有實測試驗結果予以驗證。

主席：

1. CNS 6532 包含發煙量判定，未來可對符合 CNS 6532 之耐燃材料進行 CNS 14705-1 試驗並與本研究建議之

發煙量進行比對，以了解二者判定結果之差異，未來若能在分級上能找到相對應的關係，將可減少分級爭議。

2. 國內木構造建築迅速發展但木構造之防火試驗並未包含發煙量的限制，後續可對集成材及 CLT 之發煙量加以探討。
3. 本案推導之發煙量允許值未來應進行實驗予以驗證，為能有實質應用成果，可邀請主管機關及評定中心進行座談以確認可行性方向。

計畫主持人回應（陳聘用助理研究員佳玲）：

1. 本案發煙量之建議值為參考歐洲（EN 13823）規範以煙量測系統之體積流率及管徑尺寸差異之比值初步推算結果，對於試體尺寸及試驗時間等因子未予以考慮，報告書中會加以說明清楚，未來還需作進一步分析探討並加以實驗驗證。
2. 對於木構造使用的不同材種、建築使用的各種材料或室內裝潢用家具、窗簾、櫃子等發煙量數據，可於後續研究中予以建立，以提供煙控或避難性能設計電腦模擬之參數。
3. 若國內現行材料耐燃級數加入發煙量判定後之影響程度，可於後續研究中建立較多試驗數據加以討論。
4. 實驗中心通過 ISO 5660-1:2015 TAF 認證資料將補充於附錄中，其餘部分將參酌修正於後續報告。

九、會議結論：

本次會議 3 案期末報告，經審查結果原則通過。請業務單位將機關團體代表、本所人員發言內容詳實記錄，供計畫主持人參採，納入後續事項積極辦理，並於成果報告妥予回應。

十、散會：上午 12 時整。

參考書目

中文部分：

蔡銘儒、李其忠、曹獻升、吳忠信、劉奎廷，2004，「火害鋼筋混凝土內柱之耐震性能試驗與分析」，內政部建築研究所台南防火實驗室委託檢測實驗報告，CNS12514-93004，2004 年 12 月。

林誠興、王士承，2005，「建築物火災行為與結構安全之性能模擬分析」，國科會專題研究報告。

中華民國鋼結構協會，2008，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範-鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2007 年 6 月。

中華民國鋼結構協會，2008，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範-鋼結構極限設計法規範及解說」，2007 年 6 月。

張智梅(2008)，「火災下鋼筋混凝土構件的熱反應數值分析和抗火設計方法研究」，上海大學博士論文。

趙文成、陳誠直(2009)，「鋼梁構造以不同性能基準判定耐火性能之研究」，內政部建築研究所委託研究報告。

楊國珍、林南交、楊方傑、王星堯、許書豪、許瓊芳(2011)，「銲接型式對高溫下軸向受力鋼柱破壞模式之影響」，內政部建築研究所委託研究報告。

陳誠直、徐連君、莊鎬璟、黃薪曄(2019)，「高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究」，內政部建築研究所委託研究報告。

陳誠直、黃薪曄、劉冠佑、陳浚愿(2020)，「高強度內灌混凝土箱型鋼柱於高溫下抗壓強度之研究」，內政部建築研究所委託研究報告。

陳柏端(2014)，「銲接型式對箱型鋼柱火害行為研究」，內政部建築研究所自行研究報告。

陳柏端(2018)，「彎矩連接式鋼梁標準火害試驗及數值分析研究」，內政部建築研究所自行研究報告。

陳柏端(2019)，「標準火害下箱型鋼柱之穩定性數值分析研究」，內政部建築研究所自行研究報告。

陳柏端(2020)，「高溫下內灌混凝土鋼構件之熱傳數值分析」，內政部建築研究

高溫下混凝土構件之熱傳數值分析

所自行研究報告。

英文部分：

- Ahn, J. K., Lee, C. H. and Park, H. N. (2013) "Prediction of fire resistance of steel beams with considering structural and thermal parameters." *Fire Safety Journal*, 56, 65-73.
- American Institute of Steel Construction (AISC) (2005), "Seismic provisions for structural steel buildings." Chicago.
- American Institute of Steel Construction (AISC) (2005), "Specification for structural steel buildings." Chicago.
- Bailey, C.G., Burgess, I. W., Plank, R. J (1996) "Analyses of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings." *Fire Safety Journal*, 26, 273-293.
- Chao Zhang, and Asif Usmani (2015) "Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire." *Fire Safety Journal*, 78, 85-96.
- Dai, X. H., Wang, Y. C., and Bailey C. G. (2009) "Effects of partial fire protection on temperature developments in steel joints protected by intumescent coating." *Fire Safety Journal*, 44, 376-386.
- Dwaikat, M. M. S. and Kodur, V. K. R. (2013) "A simplified approach for predicting temperatures in fire exposed steel members." *Fire Safety Journal*, 55, 87-96.
- Eurocode 2 (2004). "Design of Concrete Structures, Part 1.2, General Rules – Structural Fire Design." EN 1992-1-2: 2004 E, The European Union, Brussels.
- Eurocode 4 (2004). "Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1, General Rules and Rules for Building." EN 1994-1-1: 2004 E, The European Union, Brussels.
- Eurocode 4 (2005). "Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.2, General Rules-Structural Fire Design." EN 1994-1-2: 2005 E, The European Union, Brussels.
- Iu, C. K., Cnan, S. L., Zha, X. X. (2005) "Nonlinear pre-fire and post-fire analysis of steel frames." *Engineering Structures*, 27, 1689-1702.
- Jowsey, A., Torero, J. L., and Usmani, A. (2004) "Modelling of Structures in Fire: An Example of the Boundary Condition", *Proceedings of The International Technical Congress on Computational Simulation Fire Models in Engineering and Research*, Santander (Spain), pp. 297-313.

Ulf Wickstrom, Lulea University of Technology (2016), “Temperature Calculation in Fire Safety Engineering.” Lulea, Sweden.

Yang, K.C., Hsu, R.J. (2009). “Structural behavior of centrally loaded steel columns at elevated temperature.” *Journal of Constructional Steel Research* 65, 2062-2068.