

實尺寸鋼構屋邊柱之火害結構行為 研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 108 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)

實尺寸鋼構屋邊柱之火害結構行為 研究

研究主持人：李其忠副研究員

研究期程：中華民國 108 年 2 月至 108 年 12 月

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 108 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)

**ARCHITECTURE AND BUILDING RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF THE INTERIOR
RESEARCH PROJECT REPORT**

**The Structural Behaviors of Edge Column
in a Full-Scale Steel Building in Fire**

BY

Lee, Chi-Chung

December, 2019

目次

表次	III
圖次	V
摘要	IX
第一章 緒論	1
第一節 研究計劃背景與目的	1
第二節 研究範圍	2
第三節 研究方法及進行步驟	2
第二章 文獻回顧	3
第一節 前期研究成果	3
第二節 鋼材受火害之力學性質	6
第三節 實尺寸構造屋火害研究	8
第四節 鋼柱火害研究	13
第三章 實驗計劃	15
第一節 試驗規畫	15
第二節 試體製作	16
第三節 試驗方法	25
第四章 實驗結果	31
第一節 火害實驗	31
第二節 與前期試驗結果討論	48
第五章 實尺寸鋼構屋火害實驗資料庫	51
第六章 結論與建議	63
第一節 結論	63
第二節 建議	64
附錄一 審查會議紀錄	65
附錄二 本研究試體設計資料	71
參考書目	73

表次

表 2.1 高溫中鋼材之力學性質與折減係數.....	7
表 2.2 英國 Cardington 七次火害實驗基本資料.....	10
表 2.3 英國 Cardington 七次火害實驗範圍.....	10
表 4.1 火害實驗觀察紀錄表.....	31
表 5.1 第 1 次火害實驗區空間溫度時間表例.....	53
表 5.2 第 1 次火害實驗區小梁位移時間表例.....	55
表 5.3 第 1 次火害實驗區小梁溫度時間表例.....	57
表 5.4 第 1 次火害實驗區樓板位移時間表例.....	60
表 5.5 第 1 次火害實驗區樓板溫度時間表例.....	61

圖次

圖2.1	Eurocode 3高溫中鋼材應力應變曲線之關係.....	6
圖2.2	英國Cardington鋼構大樓之七次火害實驗範圍示意圖.....	9
圖2.3	英國Cardington第七次火害實驗照片.....	9
圖2.4	美國加州大學聖地亞哥分校(UCSD) 鋼筋混凝土實驗屋...	10
圖2.5	3層樓鋼結構實驗屋.....	11
圖2.6	門形鋼構架真實火災實驗(1)	12
圖2.6	門形鋼構架真實火災實驗(2)	12
圖3.1	實尺寸鋼構屋H型鋼邊柱.....	15
圖3.2	試體立面圖.....	16
圖3.3	混凝土樓板熱電偶線配置示意圖.....	17
圖3.4	實尺寸鋼構屋混凝土板及小梁拆除.....	18
圖3.5	鋼承板重新鋪設.....	19
圖3.6	樓板之熱電偶線埋設照片.....	19
圖3.7	樓板澆置混凝土.....	20
圖3.8	樓板修復完成.....	20
圖3.9	鋼承板下熱電偶樹配置圖.....	21
圖3.10	小梁下熱電偶樹配置圖.....	21
圖3.11	鋼柱旁之鋼承板下熱電偶樹配置圖.....	22
圖3.12	鋼柱熱電偶配置圖.....	22
圖3.13	火害實驗之隔間平面圖.....	23
圖3.14	火害實驗之隔間工程施作(1).....	24
圖3.15	火害實驗之隔間工程施作(2).....	24
圖3.16	大梁防火被覆施作.....	25
圖3.17	火害實驗加載用水桶.....	25
圖3.18	木燃料堆構造圖.....	26
圖3.19	火害實驗區木燃料堆配置示意圖.....	27

圖3.20	火害實驗區木燃料堆與熱電偶樹照片.....	27
圖3.21	樓板及柱頭之位移計配置圖.....	28
圖3.22	鋼柱位移計配置斷面圖.....	29
圖3.23	本次火害實驗區範圍.....	30
圖4.1	火害實驗前照片.....	32
圖4.2	火害實驗照片(1).....	32
圖4.3	火害實驗照片(2).....	33
圖4.4	火害實驗照片(3).....	33
圖4.5	火害實驗照片(4).....	34
圖4.6	火害實驗後照片(1).....	34
圖4.7	火害實驗後照片(2).....	35
圖4.8	火害實驗後照片(3).....	35
圖4.9	火害實驗空間各熱電偶樹平均溫度時間曲線圖.....	36
圖4.10	火害實驗空間平均溫度與CNS12514-1及EN 1991-1-2比較圖	37
圖4.11	邊柱於0.9H斷面之溫度時間曲線圖.....	38
圖4.12	邊柱於0.6H斷面之溫度時間曲線圖.....	39
圖4.13	邊柱於0.3H斷面之溫度時間曲線圖.....	39
圖4.14	邊柱北側翼板於不同高程之溫度時間曲線圖.....	40
圖4.15	邊柱腹板於不同高程之溫度時間曲線圖.....	40
圖4.16	邊柱弱軸方向之水平位移時間圖.....	41
圖4.17	邊柱於0.9H處弱軸方向之水平位移時間圖.....	42
圖4.18	邊柱於0.6H處弱軸方向之水平位移時間圖.....	43
圖4.19	邊柱於0.3H處弱軸方向之水平位移時間圖.....	44
圖4.20	邊柱軸向位移時間圖.....	45
圖4.21	邊柱於二樓柱頭之南北向位移時間圖.....	46
圖4.22	邊柱於二樓柱頭之東西向位移時間圖.....	47
圖4.23	火害實驗空間平均溫度時間曲線比較圖.....	49
圖5.1	鋼構實驗屋平面圖與本次火災實驗範圍圖例.....	51

圖5.2	第1次火害實驗區熱電偶樹配置圖例·····	52
圖5.3	第1次火害實驗區空間溫度歷時圖例·····	52
圖5.4	第1次火害實驗區小梁位移計位置圖例·····	54
圖5.5	第1次火害實驗區小梁熱電偶位置圖例·····	54
圖5.6	第1次火害實驗區小梁位移歷時圖例·····	54
圖5.7	第1次火害實驗區小梁溫度歷時圖例·····	56
圖5.8	第1次火害實驗區樓板位移計位置圖例·····	58
圖5.9	第1次火害實驗區樓板熱電偶位置圖例·····	59
圖5.10	第1次火害實驗區樓板位移歷時圖例·····	60
圖5.11	第1次火害實驗區樓板溫度歷時圖例·····	61

摘 要

關鍵詞：實尺寸鋼構實驗屋、火害、邊柱

一、研究緣起

本所「鋼構建築複合性災害作用下耐火科技研發計畫」於104年完成建置實尺寸鋼構屋，其基地為19.35m×13.35m，尺寸為一層樓的鋼構（樓層高度4m，面積12m×12m，2跨×2跨，計9根柱），其鋼梁與鋼柱皆採用H型鋼，梁柱接頭採用梁翼板與柱銲接，梁腹板與柱栓接的彎矩接頭，小梁與大梁接頭採用小梁腹板與大梁加勁板栓接之剪力接頭，未來可擴建成5層樓，且設置隔震器(滑動支承)與激振設施，作為多重災害實驗基地。並在105年委託研究案「實尺寸鋼構屋之剪力連接複合鋼梁火害結構行為研究」，首次進行有關實尺寸鋼構屋火害實驗，探討實尺寸鋼構屋之之剪力連接合成鋼梁在真實的結構束制情況下受真實火害行為。當時與其研究團隊共同研究混凝土鋼承板在火害中的結構行為。106年委託研究案「實尺寸鋼構屋彎矩連接與剪力連接鋼梁之火害結構行為研究」，廣續有關實尺寸鋼構造火災實驗研究，於106年11月16日進行彎矩連接鋼梁(大梁)與受火害修復之剪力連接鋼梁(小梁)的火災模擬實驗，探討彎矩連接鋼梁於火害的真實結構行為，及剪力連接鋼梁在有無防火被覆受到高溫侵襲之差異。並與之合作探討受火害修復之混凝土鋼承板之火害結構行為。107年度委託研究案「實尺寸鋼構屋切削減弱式接頭鋼梁(RBS)與梁柱接頭之火害結構行為研究」，針對實尺寸鋼構實驗屋的切削減弱式接頭鋼梁(RBS)與梁柱接頭來進行真實火害實驗。與該委託研究團隊合作，探討剪力釘與受火害修復之混凝土鋼承板之火害結構行為。

今(108)年度委託研究案「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」，針對實尺寸鋼構實驗屋的角柱來進行真實火害實驗。建築物的柱構件受火害影響可分為內柱（四面受火）、邊柱（三面受火）及角柱（二面受火），由於角柱與邊柱，其鋼梁連接方式較內柱不對稱，造成角柱與邊柱受到較大的彎矩，加以角柱與邊柱

在火場中曝火面之故，使得溫度分佈不對稱，火害下的結構行為複雜，以往研究大多針對內柱火害行為，鮮少對於角柱與邊柱的火害行為進行研究，由於鋼柱屬於鋼構建築的重要構件，若受到火害高溫侵襲，嚴重情況將造成鋼柱挫屈破壞，進而造成鋼構建築之嚴重倒塌。因此，本研究將與該委託研究團隊合作，探討邊柱之火害結構行為。

二、研究方法及過程

本研究針對實尺寸鋼構屋邊柱進行相關火害研究，已將 107 年受火害的混凝土板及小梁再予以拆除並重新製作，真實火害實驗時蒐集分析鋼柱溫度與其位移、火災區劃空間內氣體溫度等資料，上述全部實驗資料均整理納入實驗研究資料庫，可供業界對於鋼結構火害後檢測與安全評估參考運用。

三、重要發現

本研究針對實尺寸鋼構實驗屋 H 型鋼邊柱之火害實驗可得到以下結論：

- (一)本研究主要探討鋼構實驗屋中之邊柱於真實火災下之結構行為，由所蒐集的溫度和位移數據，對於瞭解邊柱與其他構件之間相互束制有所幫助。例如高溫中邊柱在弱軸方向水平位移受到大梁影響，其行為相當複雜，軸向變形則為伸張收縮與高溫爐所進行鋼柱標準試驗現象一致，但標準試驗無法完整呈現真實鋼柱的受力情況與束制條件，爰有關鋼柱於真實束制及真實火害中之結構反應與行為，實有必要做進一步研究。
- (二)本次火害實驗的火載量密度為 604 MJ/m^2 ，邊柱位移未超過 CNS 12514-1 標準之承重能力規定值。
- (三)經由邊柱在弱軸方向水平位移量測結果，發現邊柱將會因 P- Δ 效應而在火害中後受到二次彎矩作用。
- (四)本次火害實驗邊柱於弱軸方向之水平位移最大值皆發生在該斷面達到最高溫之後，0.9H 處為 4.12 mm 向西(實驗區外側)，其平均斷面溫度為 520°C ，0.6H 處為 3.68 mm 向西(實驗區外側)，其平均斷面溫度為 638°C ，0.3H 處為 1.25 mm 向西(實驗區外側)，其平均斷面溫度為 603°C 。

(五)本研究已初步完成彙集整理 105 年起所進行之實尺寸鋼構屋火害實驗數據資料庫，其內容包含歷次實尺寸鋼構屋火害實驗目的與規劃、歷次實驗的溫度與位移量測位置圖及歷次實尺寸鋼構屋火害實驗之各構件的溫度與位移數據，以圖形及表格呈現。

(六)本次(108 年)分別將實驗區開口寬度縮減至 4.70m；高度縮減至 1.0m，閃燃時間與第 2、3 次實驗發生時間相當，於 470 秒時發生，1360 秒時，室內總平均溫度達到高峰約 833.8°C，較第 1 至 3 次低約 100°C，火害初期升溫速率與第 2、3 次實驗相似，顯見真實火災實驗目前仍難以控制及預測，使得每次實驗之火場溫度一致，火場的燃燒行為受到諸多因素影響，每次實驗之溫度時間曲線在線形與火災歷程皆有所差異。

(七)邊柱在不同高程下之各測溫點溫度相差不大，顯示出鋼材良好的熱傳導性。

其各斷面的最高溫度：0.6H 斷面最高溫 > 0.3H 斷面最高溫 > 0.9H 斷面最高溫。

四、主要建議事項

建議一

承受高載重比鋼柱之真實火害研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

經由實尺寸鋼構屋鋼柱火害實驗，發現鋼柱所受載重比在高溫中對鋼柱耐火性能影響甚巨，限於鋼構屋加載設備無法完整提供真實鋼柱的受力情況，建議可設計不同重量載重塊進行加載實驗，增加鋼構屋鋼柱所受載重比，更能反映真實條件，以了解載重比對鋼柱在真實火害中的耐火性能影響。

ABSTRACT

Keywords: full-scale steel experimental building, fire test, edge column

The columns subjected to fire in steel buildings can be divided to interior columns (fire on four sides), edge columns (fire on three sides) and corner columns (fire on two adjacent sides). A edge column connecting three beams in one end, and this kind of connecting detail is more asymmetric than interior columns. As a result, the rotational restraint of corner column is weaker, which causes the longer effective length of the edge column, so the buckling strength of the edge column is smaller. Due to the asymmetric beam connecting detail, edge columns are subjected to larger moments. The past studies mostly focused on the structural behaviors of interior columns in fire, and very few studies were done for the structural behaviors of edge columns in fire. Steel columns are the important components in steel buildings. If the steel columns are fire damaged and failed by buckling, the steel building might collapse seriously. At present in Taiwan, the fire-resistance test for a steel column mainly follows CNS 12514-1 and CNS 12514-7, which requires to test a single steel column in a standard furnace. However, this kind of test method does not consider the restraint forces between steel columns and other components in a real steel building in fire. Besides, edge columns might be pushed by the expanded beams in fire and this might cause second-order moment. This kind of effect cannot be presented in a standard fire test. Therefore, through the real fire test of a steel experimental house, we can study the real structural behavior of steel H-shaped corner column.

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

For immediate strategies:

The study on the real fire of steel columns subjected to high load ratio.

第一章 緒論

第一節 研究計畫背景與目的

本所「鋼構建築複合性災害作用下耐火科技研發計畫」於104年完成建置實尺寸鋼構屋，其基地為 $19.35\text{m} \times 13.35\text{m}$ ，尺寸為一層樓的鋼構（樓層高度 4m ，面積 $12\text{m} \times 12\text{m}$ ，2跨 $\times$ 2跨，計9根柱），其鋼梁與鋼柱皆採用H型鋼，梁柱接頭採用梁翼板與柱銲接，梁腹板與柱栓接的彎矩接頭，小梁與大梁接頭採用小梁腹板與大梁加勁板栓接之剪力接頭，未來可擴建成5層樓，且設置隔震器(滑動支承)與激振設施，作為多重災害實驗基地。並在105年委託研究案「實尺寸鋼構屋之剪力連接複合鋼梁火害結構行為研究」[1]，首次進行有關實尺寸鋼構屋火害實驗，探討實尺寸鋼構屋之之剪力連接合成鋼梁在真實的結構束制情況下受真實火害行為。當時與其研究團隊共同研究混凝土鋼承板在火害中的結構行為[2]。106年委託研究案「實尺寸鋼構屋彎矩連接與剪力連接鋼梁之火害結構行為研究」[3]，廣續有關實尺寸鋼構造火災實驗研究，於106年11月16日進行彎矩連接鋼梁(大梁)與受火害修復之剪力連接鋼梁(小梁)的火災模擬實驗，探討彎矩連接鋼梁於火害的真實結構行為，及剪力連接鋼梁在有無防火被覆受到高溫侵襲之差異。並與之合作探討受火害修復之混凝土鋼承板之火害結構行為[4]。107年度委託研究案「實尺寸鋼構屋切削減弱式接頭鋼梁(RBS)與梁柱接頭之火害結構行為研究」[5]，針對實尺寸鋼構實驗屋的切削減弱式接頭鋼梁(RBS)與梁柱接頭來進行真實火害實驗。與該委託研究團隊合作，探討剪力釘與受火害修復之混凝土鋼承板之火害結構行為[6]。

今(108)年度委託研究案「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」[7]，針對實尺寸鋼構實驗屋的角柱來進行真實火害實驗。建築物的柱構件受火害影響可分為內柱（四面受火）、邊柱（三面受火）及角柱（二面受火），由於角柱與邊柱，其鋼梁連接方式較內柱不對稱，造成角柱與邊柱受到較大的彎矩，加以角柱與邊柱在火場中曝火面之故，使得溫度分佈不對稱，火害下的結構行為複雜，以往研究大多針對內柱火害行為，鮮少對於角柱與邊柱的火害行為進行研究，由於鋼柱屬於鋼構建築的重要構件，若受到火害高溫侵襲，嚴重情況將造成鋼柱挫屈破壞，進而造成鋼構建築之嚴重倒塌。因此，本研究將與該委託研究團隊合作，探討邊柱之火害結構

行為。

現行鋼柱的耐火性能試驗，係依據CNS 12514-1「建築物構造構件耐火試驗法—第1部：一般要求事項」[8]及CNS 12514-7「建築物構造構件耐火試驗法—第7部：柱特定要求」[9]，然而，此試驗方法未能考慮真實鋼柱的受力情況與邊界條件，因此，透過實尺寸鋼構屋的火害實驗，以瞭解鋼柱於鋼構造實驗屋的真實束制情況下，受到真實火害之結構反應與行為。

第二節 研究範圍

本研究配合本(108)年度委託研究案「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」，進行實尺寸鋼構屋角柱火災實驗，一併探討邊柱之耐火性能影響，及分析邊柱在真實火害中、後的結構行為，另建立實尺寸鋼構屋火害實驗資料庫。

第三節 研究方法及進行步驟

本研究針對實尺寸鋼構屋邊柱進行相關火害研究，已將 107 年受火害的混凝土板及小梁再予以拆除並重新製作，真實火害實驗時蒐集分析鋼柱溫度與其位移、火災區劃空間內氣體溫度等資料，上述全部實驗資料均整理納入實驗研究資料庫，可供業界對於鋼結構火害後檢測與安全評估參考運用。

第二章 文獻回顧

第一節 前期研究成果

一、105 年「實尺寸鋼構屋之混凝土鋼承板火害下承重行為研究」[2]

本研究針對混凝土鋼承板(埋設有拉力鋼筋與雙向的溫度鋼筋)所進行的實尺寸鋼構實驗屋火害實驗可得到以下結論：

- (一)、Cardington 火害試驗發現高溫中整體結構的混凝土鋼承板具有非常明顯的薄膜效應，樓版在防止鋼結構的倒塌，扮演重要角色。由於英國或歐洲之鋼構造建築的設計有別於我國，有關混凝土鋼承板在高溫中行為，有必要進一步研究。
- (二)、完成實尺寸鋼構屋真實火害之實驗，所得實際火場溫度與 Eurocode 1 建議升溫曲線差異，其原因可能為防火隔間及木材的含水量偏高。
- (三)、本次實驗結果顯示，小梁因高溫導致鋼材強度降低，混凝土鋼承板垂直位移隨溫度增加而逐漸變大。火害初期，其撓度變化較快且呈線性遞增。火害中後期，小梁已失去大部分承載能力且喪失結構行為，改由樓板控制。
- (四)、本次現地火害實驗在火載量密度為 40kg/m^2 木材重量(即： 604 MJ/m^2)燃燒下，混凝土鋼承板最大垂直位移約為 94mm ，未超過 CNS12514-1 規定的容許基準值。

二、106 年「實尺寸鋼構屋火害後修復混凝土鋼承板之耐火行為研究」[4]

本研究針對耐火鋼小梁之混凝土鋼承板(埋設有拉力鋼筋與雙向的溫度鋼筋)所進行的實尺寸鋼構實驗屋火害實驗可得到以下結論：

- (一)、普通鋼小梁之混凝土鋼承板試體明顯有較大之變形，其試體中心變形為 93.49 mm ，耐火鋼小梁之混凝土鋼承板試體為 63.82 mm ，耐火鋼小梁之混凝土鋼承板試體的其餘各量測點變形，皆較普通鋼小梁之混凝土鋼承板試體小。耐火鋼小梁之混凝土鋼承板試體除有效降低受高溫所產生變形外，並能以較高的回升比率，在冷卻至室溫時產生較小的殘餘變形。

- (二)、火害實驗後可發現混凝土鋼承板與小梁表面漆剝落與燻黑，有明顯挫屈與接縫處分離，小梁於靠近內牆產生明顯側向扭轉挫屈。混凝土鋼承板接縫分離過大導致混凝土與拉力鋼筋直接曝火。
- (三)、火害後混凝土表面裂縫於小梁與大梁接合處特別嚴重。而混凝土裂縫表示受拉力造成，由於小梁高溫軟化產生大變形，樓版須提供較大強度以束制小梁向下變形，因此小梁端負彎矩區上方之混凝土表面受到拉力，產生混凝土開裂現象。
- (四)、試體內的最高溫度不是發生在加熱結束時，而是在冷卻過程中出現，主要因混凝土為熱惰性材料，在火災結束時試體表面溫度開始下降，但仍高於非曝火面處之溫度，部份熱量仍會往內部傳送，致使試體內部溫度繼續上升。
- (五)、混凝土鋼承板溫度分析，發現混凝土溫度最高約為 166°C ，拉力鋼筋溫度最高為 500.6°C ，溫度鋼筋溫度最高為 224.5°C ，小梁上方樓版溫度與單純樓版之溫度變化大致相同，但較為偏低可能小梁影響熱傳遞。
- (六)、小梁因高溫導致鋼材強度降低，混凝土鋼承板垂直變形隨溫度增加而逐漸變大。樓版中央(D2)變形量最大，靠近室內開口處(D1)變形略大於內牆處(D3)。

三、107 年「剪力釘對混凝土鋼承板耐火性能影響之研究」[6]

本研究針對修復的普通鋼小梁支撐之混凝土鋼承板試體(新舊混凝土黏結界面，以水泥漿添加海菜施作)(埋設有拉力鋼筋與雙向的溫度鋼筋)所進行的實尺寸鋼構實驗屋火害實驗可得到以下結論：

- (一)、比較第 1 次與第 4 次實驗，第 1 次的殘餘變位較第 4 次大，可能是因為第 4 次的鋼承板與小梁是由雙排剪力釘連接，與小梁的合成作用較佳，冷卻到室溫，其強度有一定程度的恢復，故回升量較多，而第 1 次的鋼承板與小梁僅用單排剪力釘連接，火害後，與小梁的合成作用變差，導致樓版變位回升有限。
- (二)、4 次火害實驗的樓版中心垂直變形比較結果顯示，樓版火害中變形行為受到諸多因素影響，如大梁有無防火被覆、小梁鋼材性質、新舊混凝土接觸面處

理方式、剪力釘長度與數量等，致 4 次實驗之垂直變形曲線有所差異，需再加以進一步探討。

- (三)、4 次火害實驗的結果顯示，真實火災實驗目前仍難以控制及預測，使得每次實驗之火場溫度一致，火場的燃燒行為受到諸多因素影響，4 次實驗之溫度時間曲線在線形與火災歷程皆有所差異。
- (四)、火害實驗後可發現混凝土鋼承板與小梁些許燻黑，且鋼承板接縫處出現分離之情況，小梁於靠近內牆處產生側向扭轉挫屈。
- (五)、試體內的最高溫度不是發生在加熱結束時，而是在冷卻過程中出現，主要因混凝土為熱惰性材料，在火災結束時試體表面溫度開始下降，但仍高於非曝火面處之溫度，部份熱量仍會往內部傳送，致使試體內部溫度繼續上升。
- (六)、混凝土鋼承板溫度分析，發現混凝土溫度最高約為 $190.1\sim 210.6^{\circ}\text{C}$ ，拉力鋼筋溫度最高為 $340.1\sim 385.7^{\circ}\text{C}$ ，溫度鋼筋溫度最高為 $190.1\sim 241.5^{\circ}\text{C}$ ，大梁上剪力釘之溫度最高為 $265\sim 271.3^{\circ}\text{C}$ 。
- (七)、小梁因高溫導致鋼材強度降低，混凝土鋼承板垂直變形隨溫度增加而逐漸變大。樓版中央(D2)變形量最大。

第二節 鋼材受火害之力學性質

Eurocode 3 [10]建議高溫中的鋼材強度與變形性質，係為每分鐘 2 至 50K 加熱速率的情形下所得之應力應變關係，如圖 2.1 所示。由應力應變曲線所得之鋼材性能，包括有效降伏強度 (effective yield strength)、極限強度與彈性模數，於 Eurocode 3 [10]規範所建議之折減係數列於表 2.1，可發現鋼材強度會隨著溫度上升而遞減。

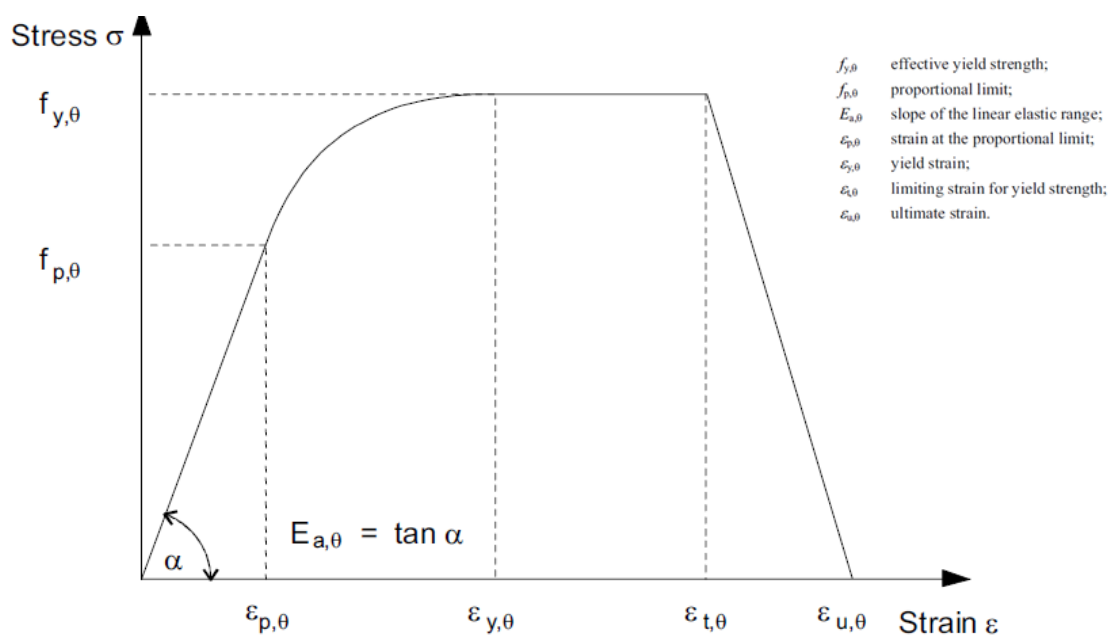


圖 2.1 Eurocode 3 高溫中鋼材應力應變曲線之關係(參考書目[10])

表 2.1 高溫中鋼材之力學性質與折減係數

Steel Temperature θ_a	Reduction factors at temperature θ_a relative to the value of f_y or E_a at 20°C		
	Reduction factor (relative to f_y) for effective yield strength $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to f_y) for proportional limit $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000
NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.			

(參考書目[10])

第三節 實尺寸構造屋火害研究

國內外大多著重研究有關柱、梁、樓版、梁柱接頭等重要構件在火害高溫下的結構行為，由於實尺寸構造屋的火害實驗所費不貲，規模甚大，需要縝密地設計、安排與規劃，目前有關實尺寸構造屋的火災試驗研究很少，其中最著名的是英國BRE (British Research Establishment) 在Cardington建造八層樓實尺寸鋼構架屋[11-15]，此鋼構大樓主要以鋼材與混凝土為建築構材，大樓中包含了電梯井，及建築物兩側之樓梯牆，而構材的複合是透過剪力釘焊接的方式來完成，混凝土使用的是輕質材料混凝土(1900 kg/m^3)。建築物長邊有 5 跨，每跨長度為 9m，總長 45m，建築物短邊有 3 跨，分別為 6m、9m、6m，總長 21 m，鋼梁使用了四種斷面尺寸，分別為 254UB、305UB、356UB、610UB，柱使用了三種斷面尺寸，分別為 305UC $\times$ 198kg/m、305UC $\times$ 118kg/m和 254UC $\times$ 98kg/m，此外於實體結構物，提供額外之軸向載重，使樓地板載重達 2.5 kN/m^2 。此實驗計畫的主要目的在探討多層鋼構大樓建築於真實火害中之結構行為，並建立數值分析方法，來預測多層鋼結構建築於火害後結構行為。並於 1993 年至 2003 年間進行總共七次火害實驗，為目前所進行過最大型的實尺寸構架屋火害實驗，各次火害實驗範圍如圖 2.2 所示，每次實驗所採用的區劃空間面積、火載量、載重如表 2.2 所示，部分實驗佈置照片如圖 2.3 所示，7 次實驗的部分結果如表 2.3 所示。

Cardington 火害實驗發現：混凝土鋼承板的底部和鋼梁沒有防火被覆，鋼柱有全面防火被覆。試驗的最高溫度超過 1100°C ，混凝土鋼承板產生很大的垂直位移（大於跨度的 $1/20$ ），但結構並沒有出現倒塌。試驗結果發現，火災作用下，雖然沒有防火被覆的鋼梁溫度超過 1100°C ，但由於混凝土鋼承板與鋼梁相互作用，鋼梁所承擔的載重逐漸轉移至混凝土鋼承板，使構件出現較佳耐火性能。為研究火災下樓版的薄膜效應[16]，BRE 進行實尺寸的混凝土鋼承板火災試驗[17,18]，混凝土鋼承板尺寸為 $9.5\text{m}\times 6.5\text{m}$ ，鋼承板的肋高 60mm，板厚度為 150mm。俟混凝土澆置完成一段時間後，將混凝土鋼承板下面的鋼承板移除，剩下只有鋼筋網的混凝土樓版，移除的鋼承板相當於火災時板的強度和剛度損失。板垂直支承於梁和柱上，水平方向沒有束制。試驗結果顯示四邊簡支承樓版的承载力遠大於依據傳統降伏線理論計算所得的承载力。

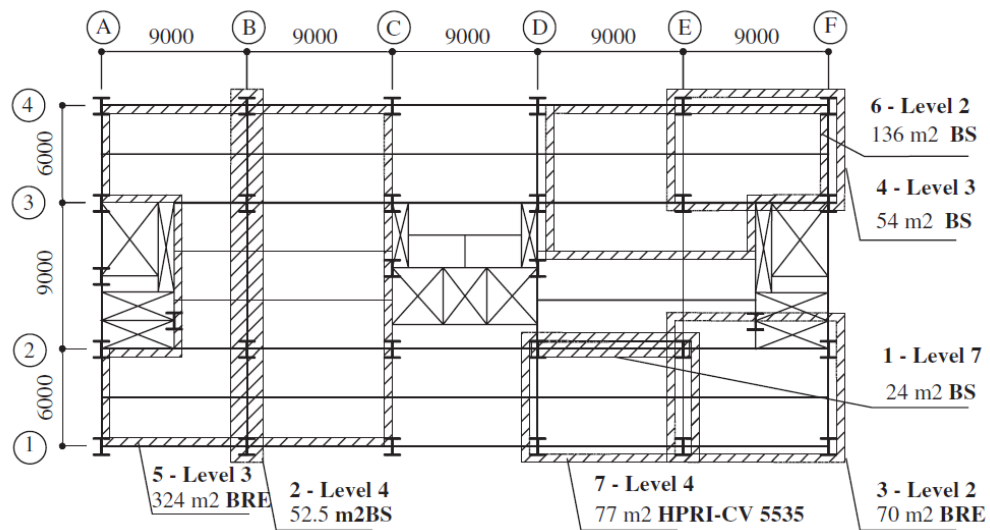


圖 2.2 英國Cardington鋼構大樓之七次火害實驗範圍示意圖(參考書目[14])



圖 2.3 英國Cardington第七次火害實驗照片(參考書目[14])

表 2.2 英國 Cardington 七次火害實驗基本資料

No.	Test	Fire compartment		Load	
		Size, (m)	Area (m ²)	Fire	Mechanical (%)
1	One beam heated by gas	8 × 3	24	Gas	30
2	One frame heated by gas	21 × 2.5	53	Gas	30
3	Corner compartment	9 × 6	54	40 kg/m ² of wood cribs	30
4	Corner compartment	10 × 7	70	45 kg/m ² of wood cribs	30
5	Large compartment	21 × 18	342	40 kg/m ² of wood cribs	30
6	Office—Demonstration	18 × 9	136	45 kg/m ² of wood cribs	30
7	Structural integrity	11 × 7	77	40 kg/m ² of wood cribs	56

(參考書目[14])

表 2.3 英國 Cardington 七次火害實驗範圍

No.	Org.	Floor	Time (min) to max. atmosphere temp.	Maximum temperature (°C)		Measured deformations (mm)	
				Gas	Steel	Maximal	Residual
1	BS ^a	7	170	913	875	232	113
2	BS	4	125	820	800	445	265
3	BS	3	114	1000	903	269	160
4	BRE ^b	2	75	1020	950	325	425
5	BRE	3	70	—	691	557	481
6	BS	2	40	1150	1060	610	—
7	ČVUT ^c	4	55	1108	1088	> 1000	925

(參考書目[14])

2012 年美國加州大學聖地亞哥分校(UCSD)利用其全球獨特之戶外振動台[19]，進行 5 層樓實尺寸鋼筋混凝土實驗屋受地震作用後遭遇火災的實驗，如圖 2.4 所示，評估非結構構件、維生管線及防火設備在地震破壞後之防火能力與火害行為。



圖 2.4 美國加州大學聖地亞哥分校(UCSD) 鋼筋混凝土實驗屋(參考書目[19])

Dong 等人[20-24]曾藉由 3 層樓之鋼結構實驗屋(由鋼筋混凝土樓版、鋼樑、鋼柱和磚牆構成，一樓高度 3.5m，二至三樓高 3m，每層為 3×3 跨，每跨 4.5m)，依據 ISO834 進行一系列火害實驗，分別探討鋼筋混凝土雙向板、鋼梁、鋼柱、梁柱接合等耐火性能，如圖 2.5 所示。Lou 等人[25,26]研究門形鋼構架在真實火災下連續性倒塌問題，分別建造 36 m×12 m 及 12 m×6 m 門形鋼構架，進行真實火害實驗與數值模擬，探討火害下門形鋼構架之局部破壞，進而引起連續性倒塌，實驗結果顯示大約火害時間 15~20 分鐘門形鋼構架，分別出現向內及向外倒塌，經由適當設計，可阻止火災範圍的蔓延、減少消防隊員傷亡和結構破壞程度，如圖 2.6 及圖 2.7 所示。



圖 2.5 3 層樓鋼結構實驗屋(參考書目[23])



圖 2.6 門形鋼構架真實火災實驗(1)(參考書目[24])

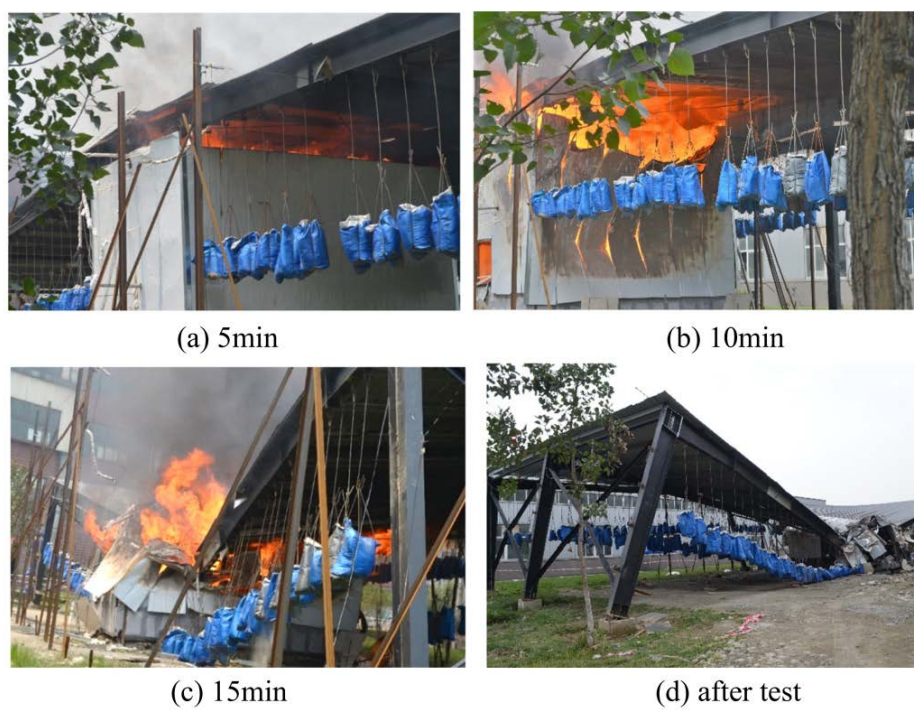


圖 2.7 門形鋼構架真實火災實驗(2)(參考書目[25])

第四節 鋼柱火害研究

Ali 等人[27,28] 針對有束制的鋼柱進行火害試驗，試驗參數有軸向載重、細長比及軸向束制，試驗結果顯示，軸向束制，將造成鋼柱內產生額外軸力，降低鋼柱臨界溫度。但是該試驗的軸向束制只在鋼柱膨脹階段有效，並未考慮束制對鋼柱挫曲後的影響。Rodrigues 等人[29]探討高溫中束制鋼柱試驗，考量束制鋼柱在挫曲後的性能，結果發現受軸力的鋼柱在束制剛度很大時，鋼柱挫曲後所受軸力突然下降，但隨後達到新的平衡。Wang 等人[30-32]對有旋轉束制的鋼柱進行火害試驗，結果顯示高溫作用下，束制鋼柱與旋轉束制之間的彎矩關係比較複雜，升溫階段，鋼柱彎矩隨溫度的升高而減小，隨後鋼柱的彎矩會發生改變。Tan 等人[33,34]進行束制的鋼柱火害試驗，將軸向剛度和細長比納入考量，所得結論與 Ali 等人[27,28]一致。Dwaikat 等人[35]對三面受火的鋼柱進行試驗，發現鋼柱構件在同一斷面存在溫度梯度，且由於溫度梯度存在，使得斷面剛度中心發生轉變而產生彎矩，斷面抗彎矩和軸力也會受到斷面溫度梯度影響。另該試驗亦考慮載重大小、火場溫度及鋼柱不同受熱面等影響。

國內李鴻欣[36]藉由 H 型未加勁的鋼柱高溫極限強度試驗，比較耐火鋼、普通鋼對於不同寬厚比，對強度和韌性影響，且發現火害後對殘留應力明顯減少，並由拉力試驗中發現 SM400、SM490 鋼材及耐火鋼均建議採用 1% offset 應變值預估，較接近高溫 600°C 的降伏強度；在短柱高溫試驗下得出建議之耐火鋼寬厚比，但比較現行規範中普通鋼寬厚比仍較嚴格，建議採用現行規範設計之。許睿佳[37]針對高溫下 SN490 銲接 H 型鋼柱進行研究，分為高溫結構試驗及非線性有限元素，高溫試驗採短柱及中長柱進行定溫加載，探討高溫下鋼柱的受力行為，其研究指出，當寬厚比、細長比及溫度增加，皆造成鋼柱極限強度減少，結果發現，溫度升高時，非彈性柱所具有強度降低，其結果再與耐火鋼比較，可發現一般鋼材的韌性對於溫度及寬厚比的變化較耐火鋼敏感。

第三章 實驗計劃

第一節 試驗規畫

實尺寸鋼構屋分別於 105 年 11 月 29 日、106 年 5 月 4 日及 106 年 11 月 16 日進行小梁與樓板火害實驗，隨後將受火害的混凝土板及小梁予以拆除，重新依原規格尺寸製作，107 年 8 月 10 日再進行大梁、梁柱接頭及樓板火害實驗。今(108)年將受火害的混凝土板及小梁再予以拆除並重新製作，並進行 H 型鋼邊柱之火害實驗，如圖 3.1 所示。



圖 3.1 實尺寸鋼構屋H型鋼邊柱 (本研究整理)

第二節 試體製作

3-2-1 試體尺寸：

本研究 H 型鋼邊柱尺寸為 RH-300×300×10×15mm，高度 4m，材質為 SN490B 等級之鋼材，如圖 3.2 所示，其餘實尺寸鋼構屋相關設計資料詳附錄二。



圖 3.2 試體立面圖(本研究整理)

3-2-2 混凝土樓板熱電偶線配置

為量測實尺寸鋼構屋混凝土樓板內的混凝土、鋼筋及鋼承板溫度，預先埋設 K-Type 型式的熱電偶線，以量測鋼構屋受火害期間，混凝土、鋼筋與鋼承板溫度變化及分佈情形，可提供後續數值分析及其他相關研究用，如圖 3.3 所示，其相關量測位置與之前

實驗一致，但限於經費與人力，量測數量將酌予減少，有關熱電偶配置情況，請詳閱委託研究案「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」報告書[7]，本文不再贅述。

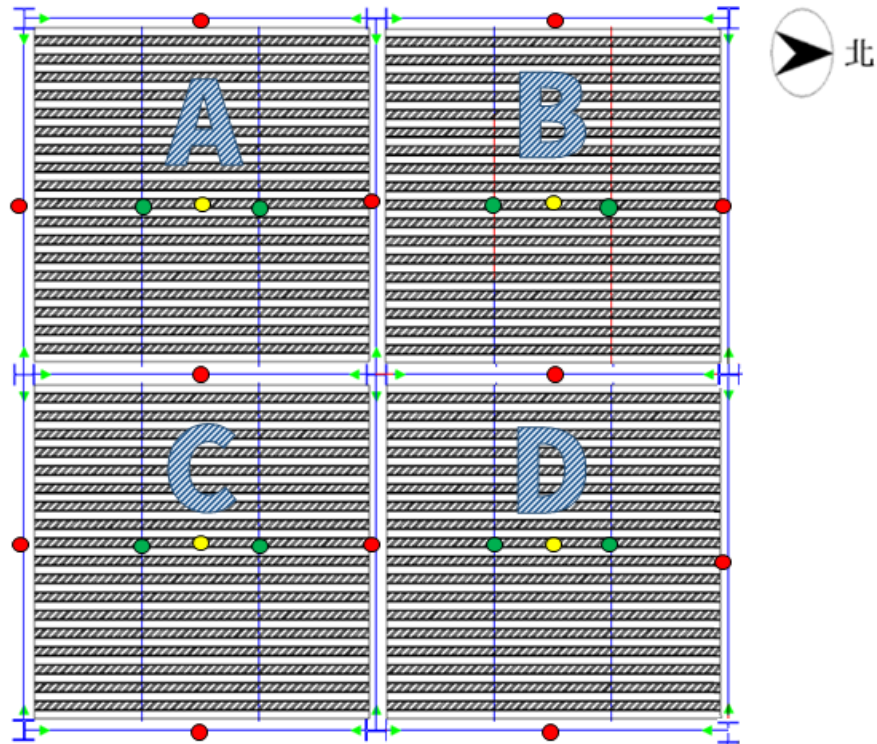


圖 3.3 混凝土樓板熱電偶線配置示意圖(參考書目[7])

3-2-3 混凝土樓板及小梁修復製作

實尺寸鋼構屋混凝土樓板及小梁修復製作過程簡述如下：將樓板打除，重新吊裝新的小梁，再依序進行鋼承板鋪設、剪力釘植鉚、鋼筋配設、熱電偶線埋設及混凝土澆置等，如圖 3.4~圖 3.8。



(a) 混凝土板拆除



(b) 小梁拆除

圖 3.4 實尺寸鋼構屋混凝土板及小梁拆除(本研究整理)



圖 3.5 鋼承板重新鋪設(本研究整理)



圖 3.6 樓板之熱電偶線埋設照片(本研究整理)



圖 3.7 樓板澆置混凝土(本研究整理)



圖 3.8 樓板修復完成(本研究整理)

3-2-4 火害實驗區熱電偶樹配置

為瞭解火害實驗區間溫度的分布及傳遞，於實驗區內配置熱電偶樹，分成3種，一種為配置在鋼承板下方，該位置在垂直高程上佈有4個測溫點，另一種則配置於小梁下，該位置在垂直高程上佈有3個測溫點，最後一種佈設於鋼柱旁之鋼承板下，該位置在垂直高程上佈有4個測溫點，火害實驗區的熱電偶樹配置圖，以本實驗範圍為例，如圖3.9至圖3.11所示。

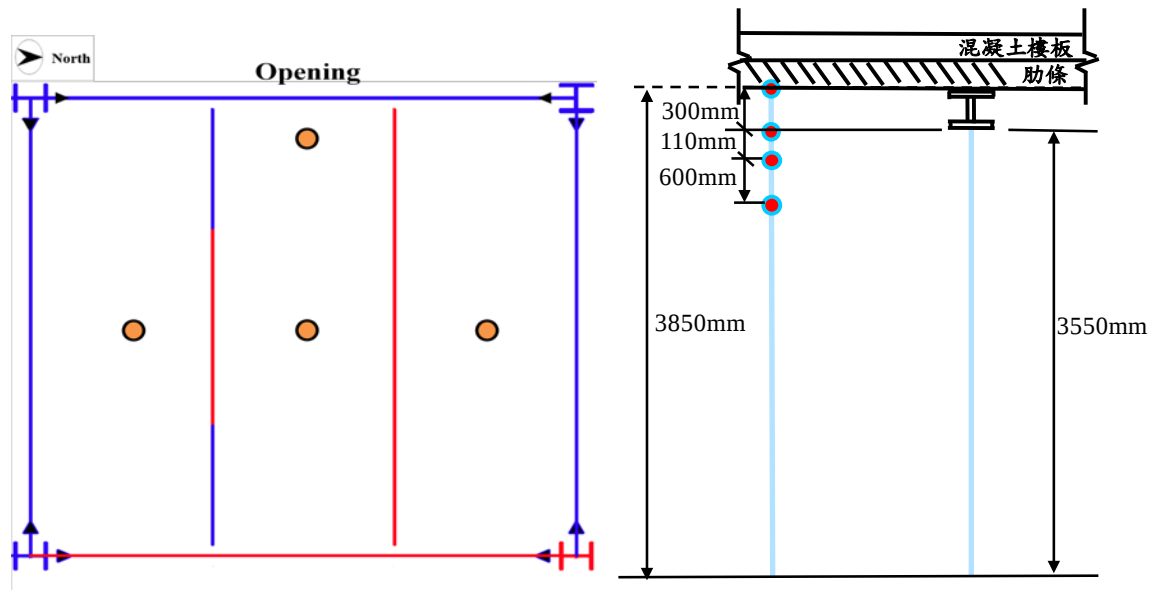


圖 3.9 鋼承板下熱電偶樹配置圖(本研究整理)

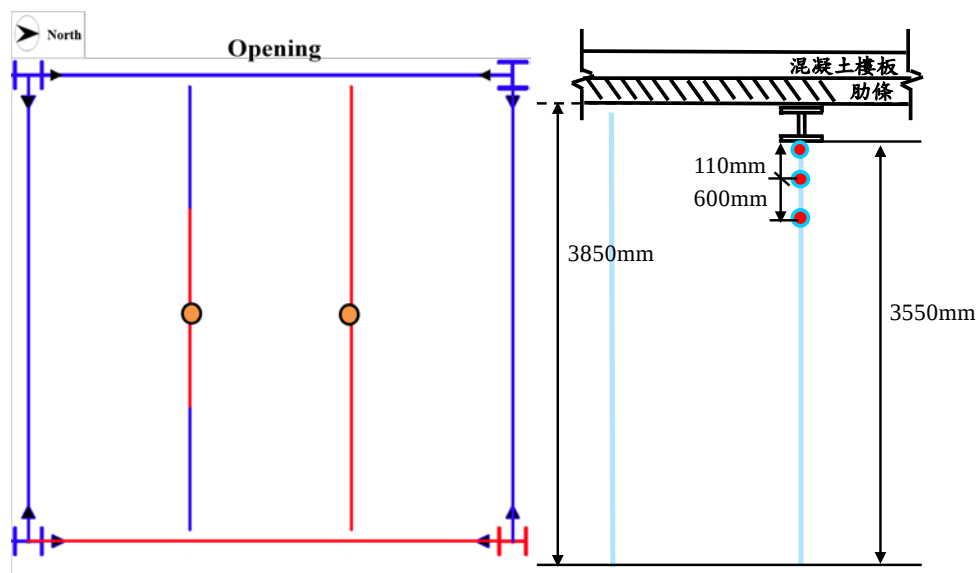


圖 3.10 小梁下熱電偶樹配置圖(本研究整理)

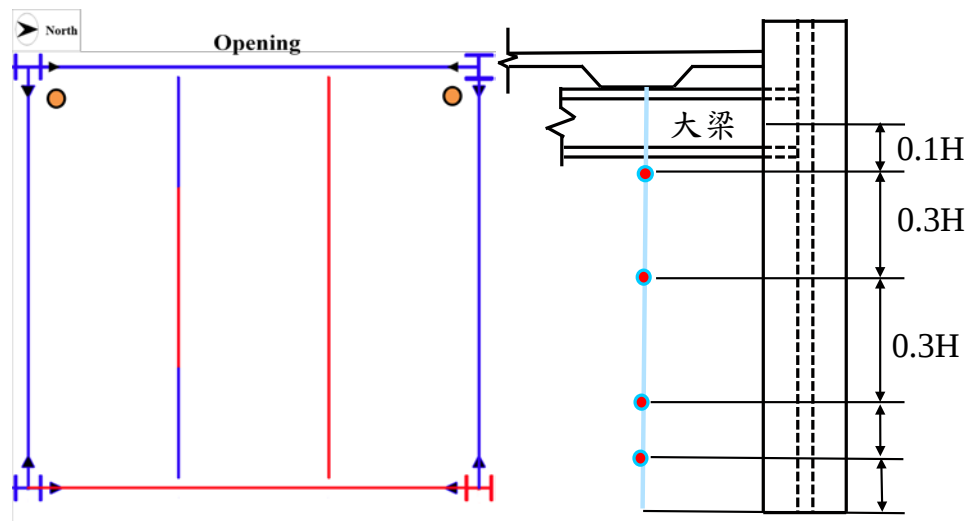


圖 3.11 鋼柱旁之鋼承板下熱電偶樹配置圖(本研究整理)

3-2-5 試體熱電偶配置

本研究鋼柱溫度量測位置，如圖 3.12 所示，圖中的每個圓圈即代表熱電耦的佈設位置，熱電耦數量共 9 個。預先埋設 K-Type 型式的熱電耦線，以量測鋼柱受火害期間之溫度變化及分佈情形，提供後續數值分析及實驗監測用，其他有關鋼柱、大梁及小梁之熱電耦配置情況，請詳閱委託研究案「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」報告書[7]，本文不再贅述。

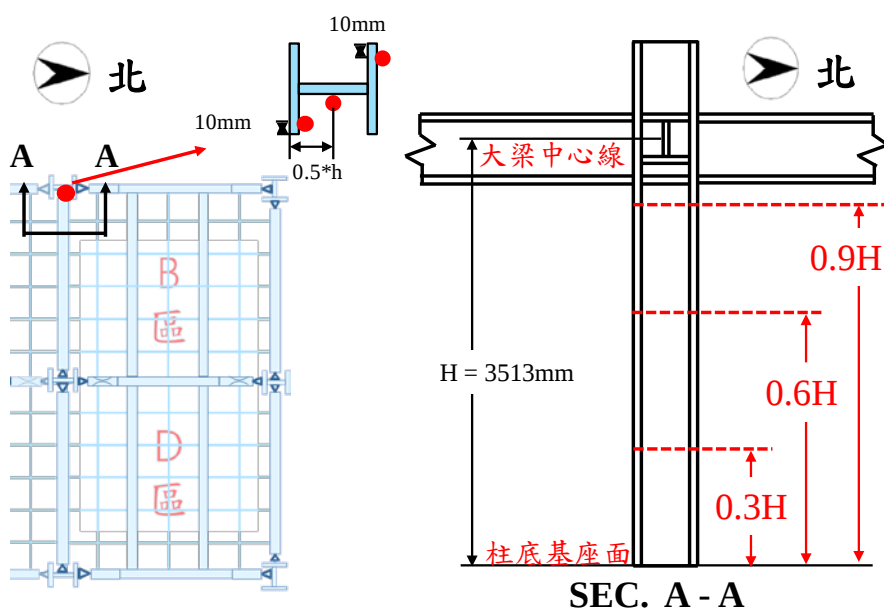


圖 3.12 鋼柱熱電偶配置圖(本研究整理)

3-2-6 火害實驗區之隔間與防火被覆

本研究火害實驗之隔間工程採用高壓蒸氣養護輕質混凝土 (Autoclaved Lightweight Concrete)，簡稱 ALC，ALC 具有 1~2 小時的防火時效。本次火害實驗之隔間牆分成兩部分，第一部份先以 ALC 磚牆進行隔間，將 2 跨×2 跨之鋼構實驗屋分隔出火害實驗區及儀器區，第二部分將鋼柱外側磚牆同樣以距離 10 公分施作且填塞防火棉，旁邊一側則距離柱心 1 公尺處隔間牆再轉彎，使鋼柱達到三面受火情形，如圖 3.13 至圖 3.15 所示。本次火害實驗區內的大梁並非實驗構件，並考量實驗安全，火害實驗區內所有大梁，先在 ALC 隔間工程進行前，施做 2 小時防火時效的防火被覆，如圖 3.16 所示。

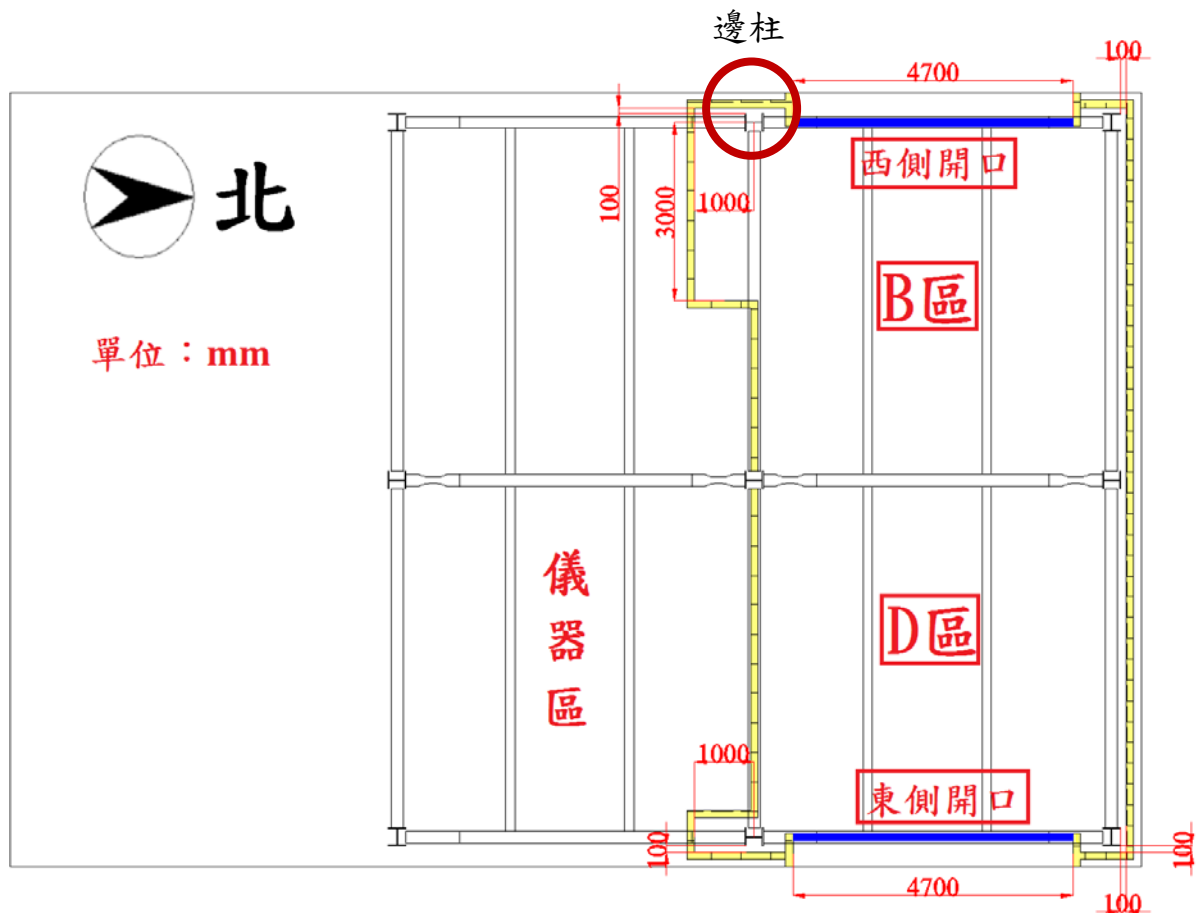


圖 3.13 火害實驗之隔間平面圖(本研究整理)



圖 3.14 火害實驗之隔間工程施工作(1)(本研究整理)



圖 3.15 火害實驗之隔間工程施工作(2)(本研究整理)



圖 3.16 大梁防火被覆施作(本研究整理)

第三節 試驗方法

3-3-1 試驗加載

本研究將採用 $(1.0D+0.4L)$ 的載重設計，鋼構實驗屋結構設計時的靜載重 $D=380 \text{ kgf/m}^2$ ，活載重 $L=832 \text{ kgf/m}^2$ ，目前實驗屋已承載靜載重 $D=380 \text{ kgf/m}^2$ ，火害實驗時以 48 個水桶加載至 333 kgf/m^2 ，如圖 3.17 所示。



圖 3.17 火害實驗加載用水桶

3-3-2 試驗火載量

本研究之木燃料堆構造設計主要根據滅火器規範—CNS 1387(104 年版) [38]之A類火災試驗模型，採用由木條所組成之架構，木條下方包含以角鋼組成之支撐架使其高度可在地板上方 400 mm處，並且將燃料盤(火源)放置於支撐架下方，以酒精膏作為點火源，如圖 3.18 所示，並依木材火載量密度 40 kg/m^2 ，於火害實驗的區劃空間內裝置 9 堆木燃料堆，如圖 3.19 及圖 3.20 所示。

木條種類選用阿拉斯加雲杉，木條尺寸參考 CNS 1387 (96 年版) [39]，截面邊長分別為 30 mm、35 mm，長度為 900 mm 之木條，木燃料之堆疊方式則參考 CNS 1387 (104 年版) [38]之表 8 中之 6A，以每層 10 支木條進行排列，層數則依照木材火載量設計進行調整。

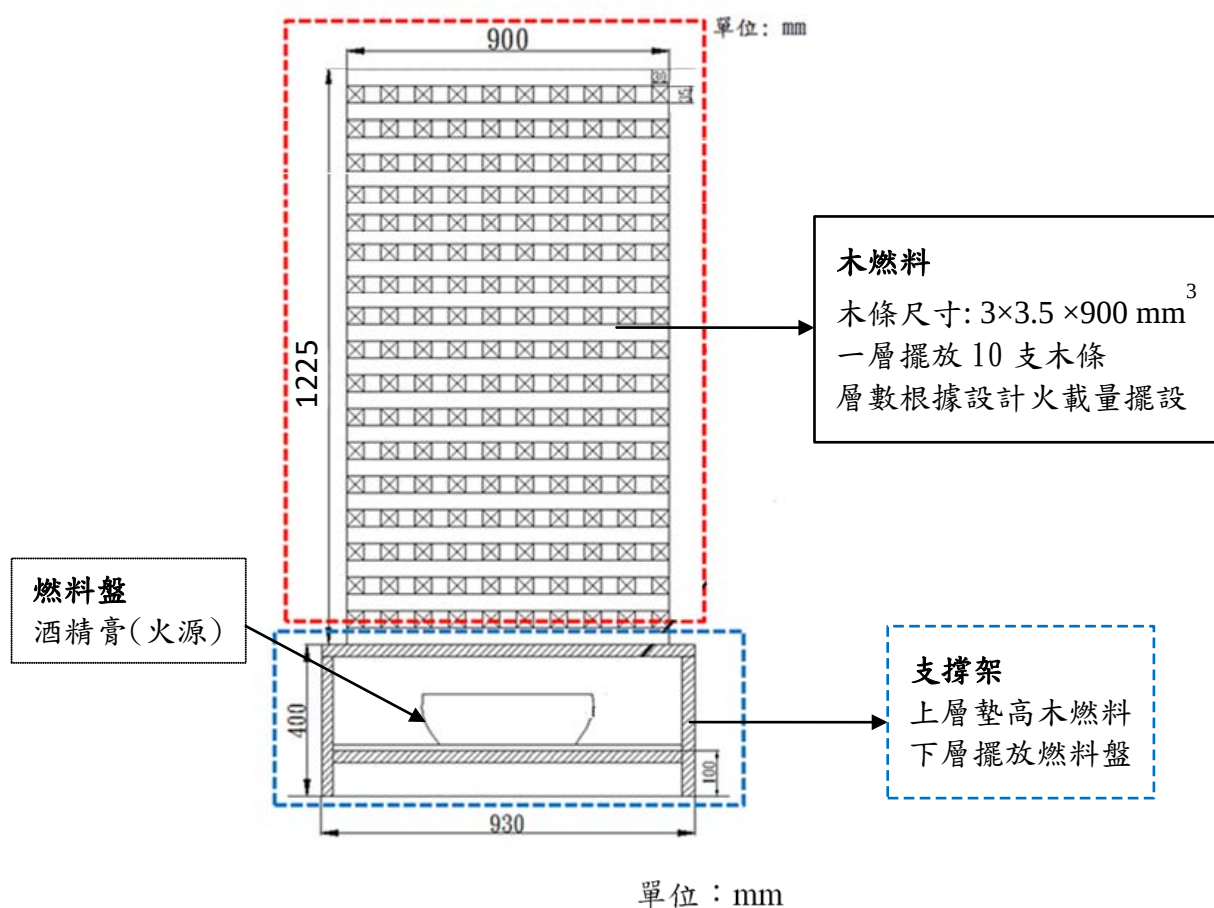


圖 3.18 木燃料堆構造圖

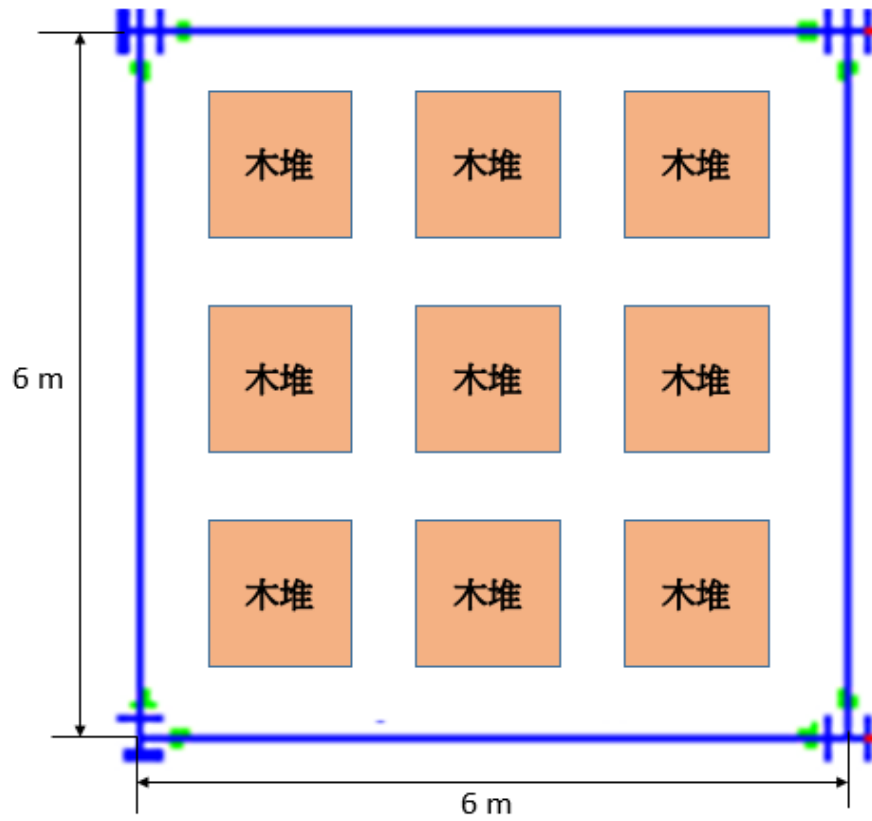


圖 3.19 火害實驗區木燃料堆配置示意圖



圖 3.20 火害實驗區木燃料堆與熱電偶樹照片

3-3-3 試體位移量測

本研究主要聚焦於邊柱的位移量測，然委託研究案「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」，為了量測實驗目標於火害中的變形量及監測火害時安全性，架設數個位移計來量測各個構件的變位量，其中包含水平變位及垂直變位的量測，樓板與柱頭之位移計配置，如圖 3-21 所示，圖中虛線箭頭為量測垂直變位量測點，而實線箭頭則是水平變位量測點，鋼柱之柱頭上皆配置水平與垂直方向的位移計，有關位移計配置情況，請詳閱其報告書[7]，本文不再贅述。鋼柱位移計配置如圖 3-22 所示，於腹板配置三支的水平變位量測點，以量測鋼柱於火害中之變形趨勢。

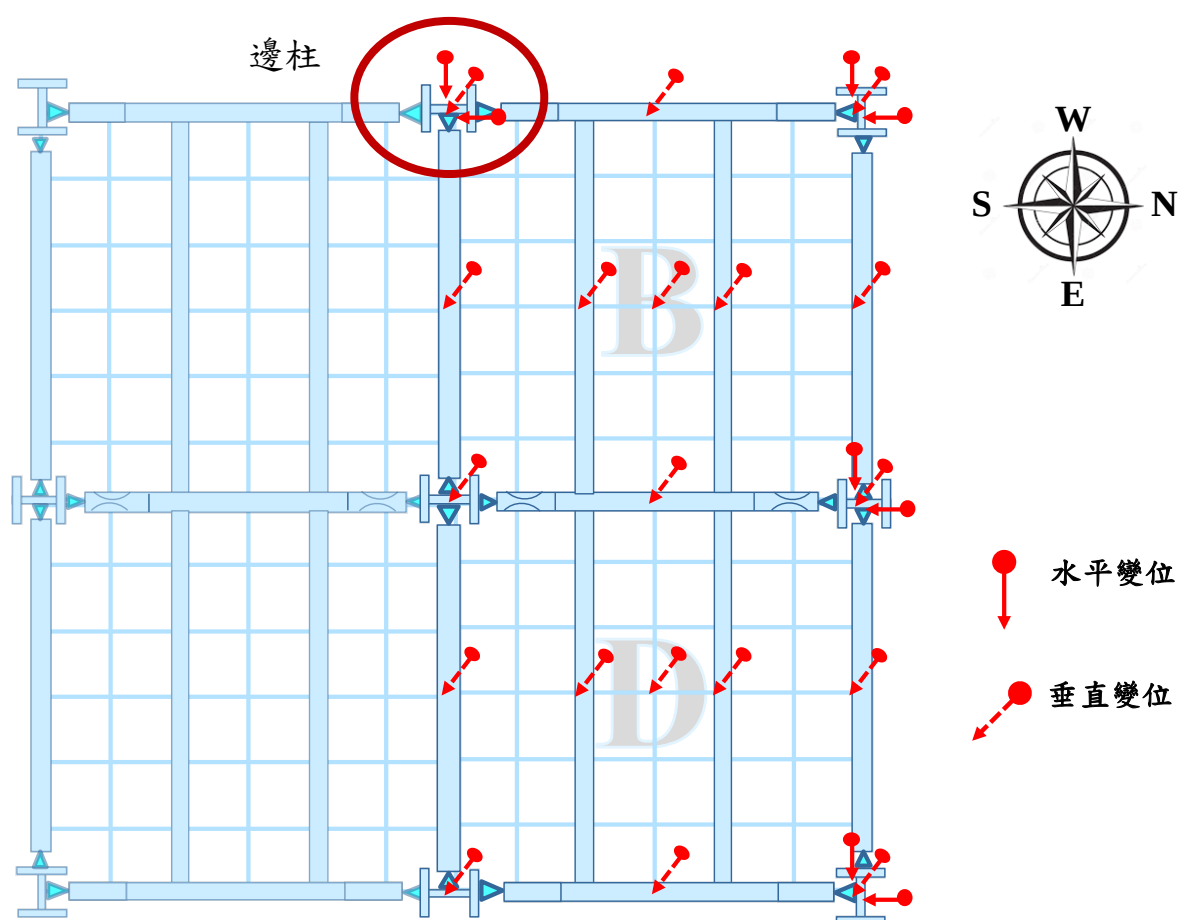


圖 3.21 樓板及柱頭之位移計配置圖(參考書目[7])

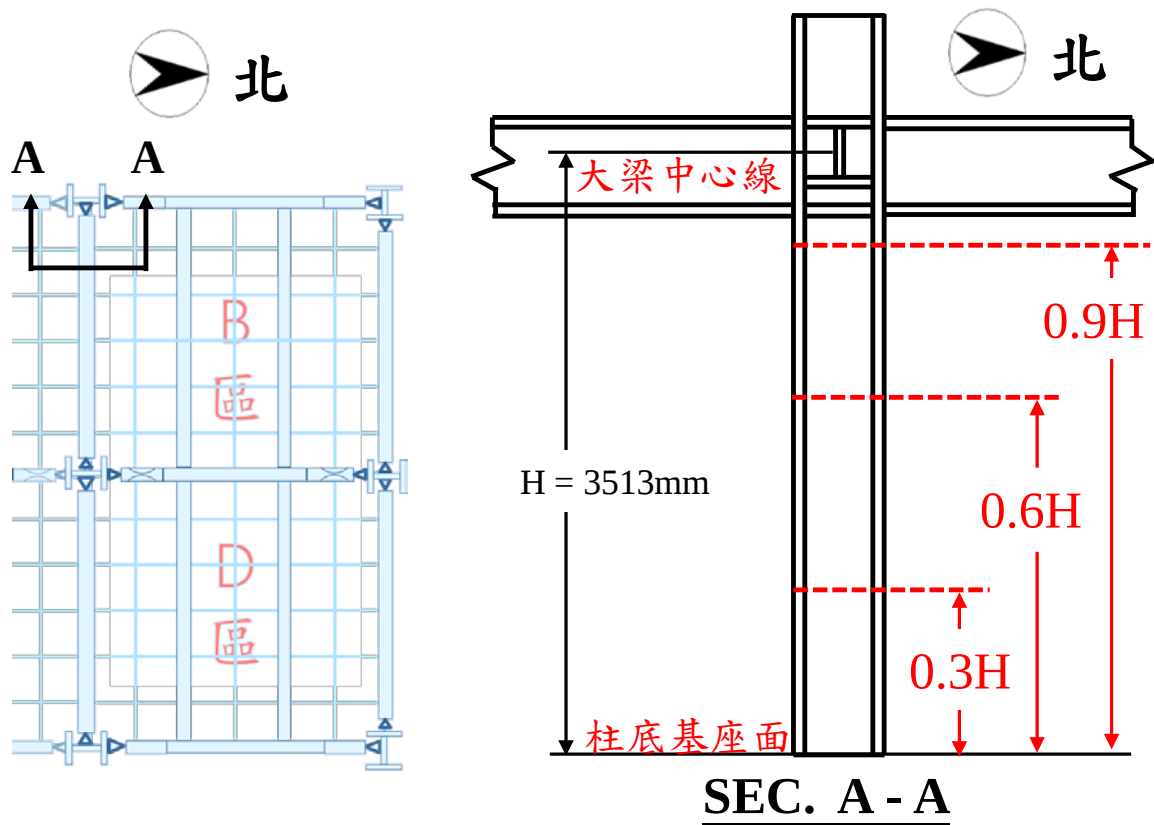


圖 3.22 鋼柱位移計配置斷面圖(本研究整理)

3-3-4 試驗流程

本研究火害實驗為定載升溫與降溫的現地真實結構火害實驗，與本(108)年度委託研究案「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」共同進行火害實驗，為維護實驗安全，協調台南市消防局在旁支援待命，量測儀器與攝影設備開始記錄，隨即依序點燃本次火災區劃空間內的木燃料，如圖 3.23 所示，進行火害實驗，由於本研究實驗的標的為鋼柱，實驗的中止條件將參考 CNS 12514-1[5]第 10.2.1 節承重能力之(a)項，對軸向承載構件的規定，最大軸向壓縮量(C)與最大軸向壓縮速率(dC/dt)如下：

$$\text{最大軸向壓縮量: } C = \frac{h}{100} \text{ (mm)} \quad (3-1)$$

$$\text{最大軸向壓縮速率: } \frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} \text{ (mm/min)} \quad (3-2)$$

公式(3-1)和公式(3-2)中，h 表示構件之初始高度(mm)。量測結果只要超過公式(3-1)或公式(3-2)之值，構件即視為承重能力失敗。

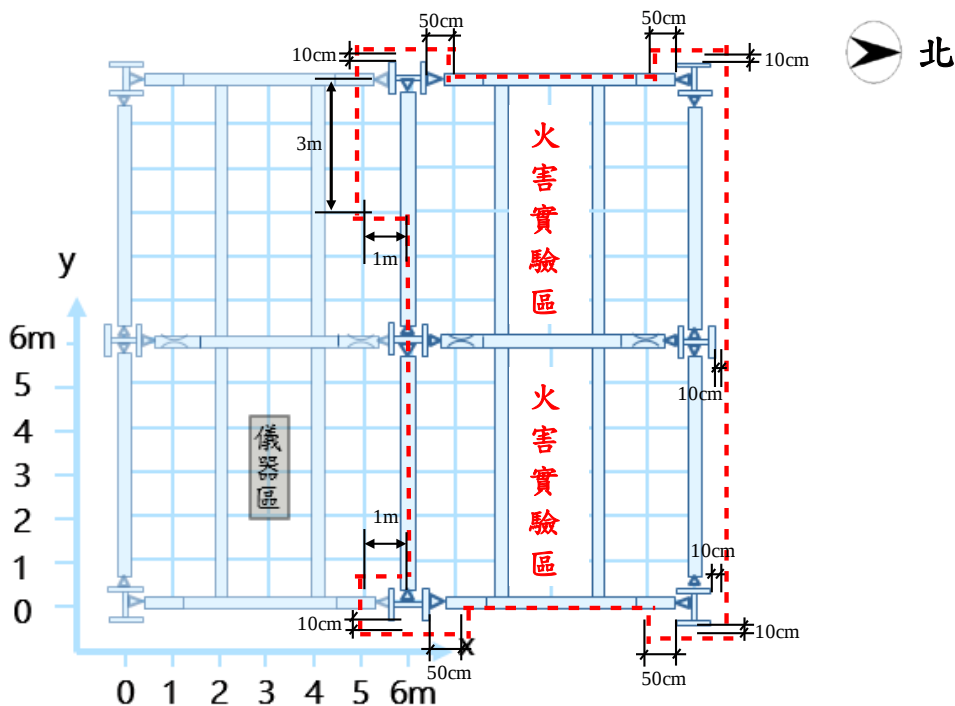


圖 3.23 本次火害實驗區範圍(本研究整理)

第四章 實驗結果

第一節 火害實驗

4-1-1 火害實驗觀察

本次火害實驗範圍區域分為 B、D 區；於 108 年 9 月 19 日進行，實驗當日為多雲實晴，風向北微西風，室外氣溫 31.9℃，室外相對濕度 51%，火害實驗室內溫度 28.3℃，相對溼度 60%，本研究之對象邊柱位於 B 區，僅以 B 區進行觀察與討論，火害現場觀測紀錄，如表 4.1 所示，實驗過程中的照片如圖 4.1~圖 4.5。

表 4.1 火害實驗觀察紀錄表

時間(分：秒)	現象描述
00:00	開始點火
02:28	室內產生煙霧飄向戶外
03:44	大量灰煙從開口處竄出
04:29	室內火焰碰觸鋼承板
07:31	室內傳出輕微爆炸聲
07:50	閃燃(室內天花板溫度已達 600℃)
17:30	大量火焰以及黑煙由開口竄出，全面燃燒（旺盛期）
29:50	火勢減小
31:23	黑煙消散
47:10	無可視明火



圖 4.1 火害實驗前照片



圖 4.2 火害實驗照片(1)



圖 4.3 火害實驗照片(2)



圖 4.4 火害實驗照片(3)



圖 4.5 火害實驗照片(4)

圖 4.6 及圖 4.8 為火害實驗後照片，可發現混凝土鋼承板與小梁些許燻黑，且鋼承板接縫處出現分離之情況，小梁於靠近內牆處產生側向扭轉挫屈，目測邊柱翼板有些許變形但不明顯。



圖 4.6 火害實驗後照片(1)



圖 4.7 火害實驗後照片(2)



圖 4.8 火害實驗後照片(3)

4-1-2 火害實驗空間溫度

各熱電偶樹平均溫度，如圖 4.9 所示，可發現約前 220 秒為引燃期，220 秒後室內溫度明顯快速上升，470 秒時天花板平均溫度已達 600°C ，此時發生閃燃(以室內平均溫度 600°C 為閃燃發生的判定)，最高溫度與熱電偶樹距離火災室開口遠近有關係，西側開口附近所量測到的空間最高溫度約 850°C ，遠離開口處所量測到的空間最高溫度大約為 950°C ，靠近北側之點位，在高溫階段持續較久，可能受到空氣對流之影響。在 1360 秒時，室內總平均溫度達到高峰約 833.8°C ，隨後室內溫度開始下降進入衰退期，最高溫度發生於 TT-B23 在 2810 秒時平均溫度為 1055.4°C 。圖 4.10 為室內總平均溫度與 CNS 12514-1 及 EN 1991-1-2 火場模擬時間溫度曲線的比較，由於實驗區劃空間溫度在木堆引燃後，緩慢的溫度上升，此為火災的起火期與成長期，然而，CNS 12514-1 及 EN 1991-1-2 火場模擬時間溫度曲線為火災的閃燃及全盛期，因此，將火害實驗區劃空間平均溫度向左平移，發現實驗 220 秒室溫急遽上升與 CNS 12514-1 類似，火害實驗高溫期較 CNS 12514-1 及 EN 1991-1-2 略高，火害時間與最高溫度較 EN 1991-1-2 短且低。此外，CNS 12514-1 未考慮火災的衰退期，溫度持續上升。EN 1991-1-2 有考慮火災的衰退期，火害實驗降溫速率與 EN 1991-1-2 預測相似。

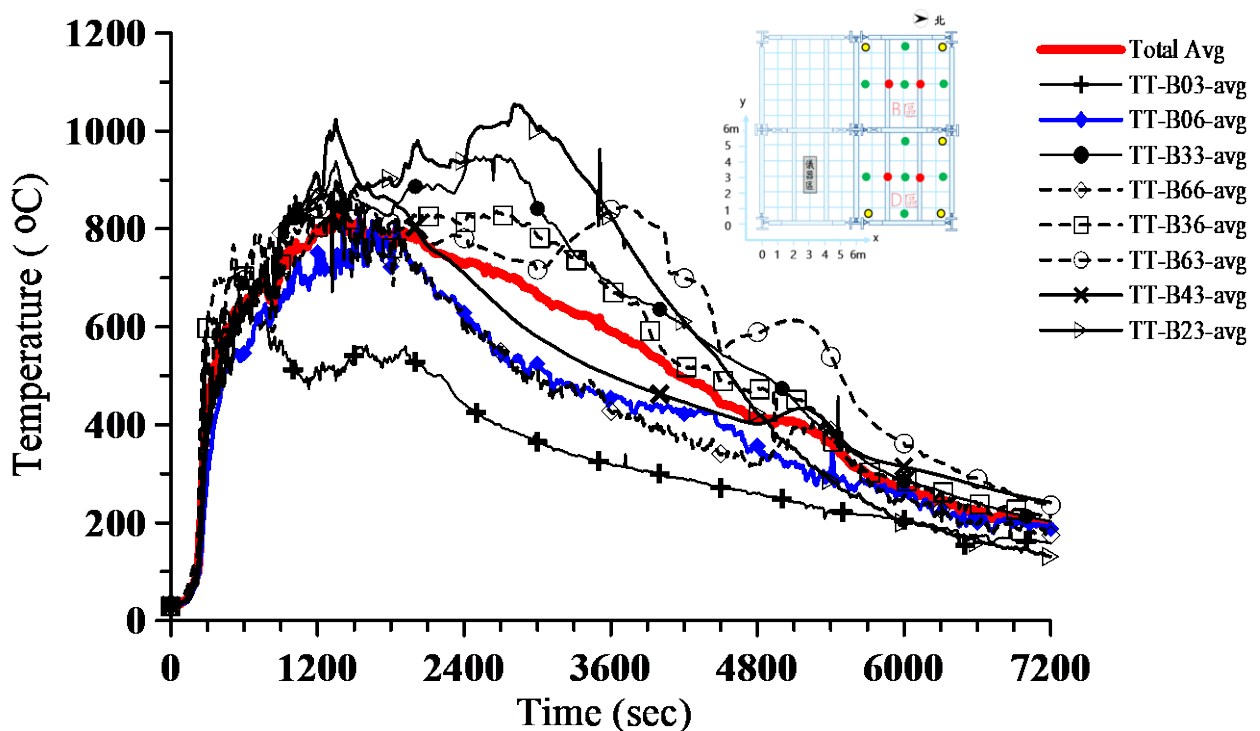


圖 4.9 火害實驗空間各熱電偶樹平均溫度時間曲線圖(本研究整理)

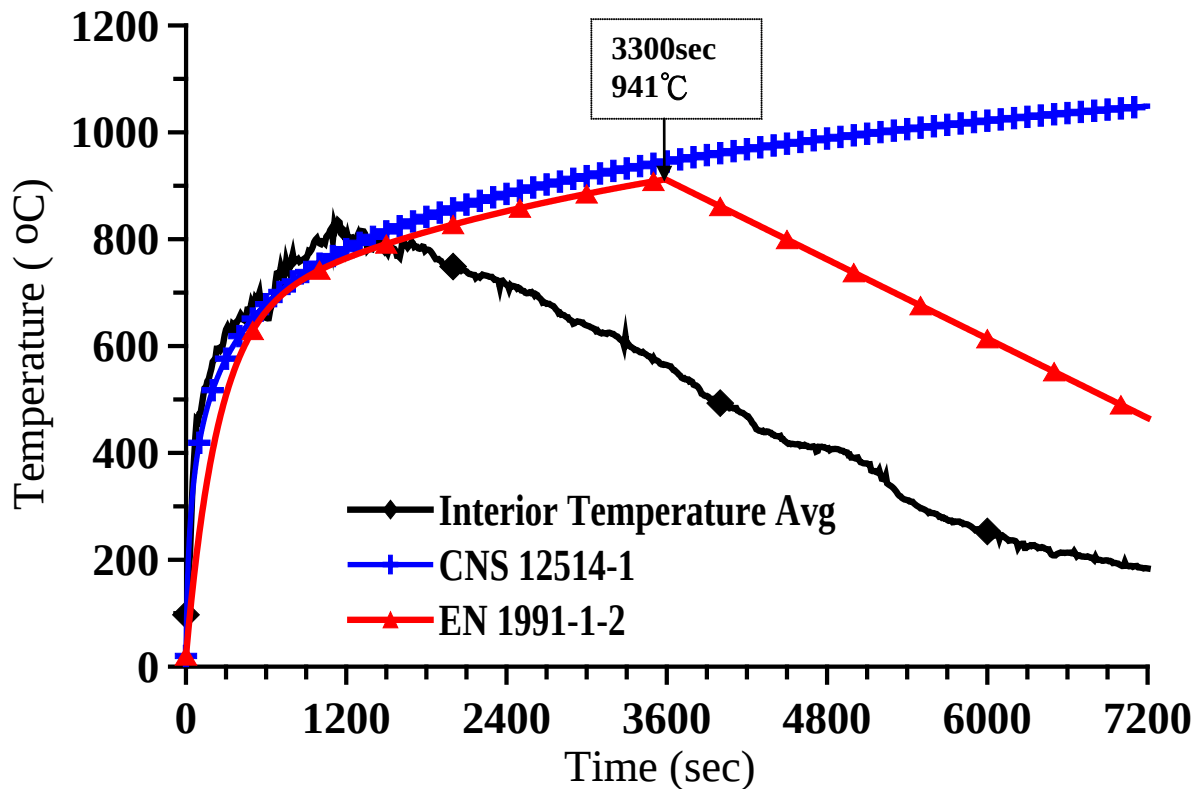


圖 4.10 火害實驗空間平均溫度與CNS12514-1 及EN 1991-1-2 比較圖(本研究整理)

4-1-3 邊柱溫度分佈

本研究鋼柱溫度量測位置，如圖 3.12 所示，共 9 個測溫點。分別布設於 0.3H、0.6H 及 0.9H 共三處斷面(以下簡稱為 0.3H 斷面、0.6H 斷面、0.9H 斷面)，為求實驗資料蒐集一致性，其定義請詳閱委託研究案「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」報告書[7]，本文不再贅述。各斷面皆含 3 個測溫點分別位於北側翼版靠西邊外側、腹版靠東側中央及南側翼版靠東邊內側。

(1) 0.9H 斷面

圖 4.11 為邊柱於 0.9H 斷面之溫度時間圖，點火後約 300 秒時開始有明顯升溫趨勢，2130 秒時鋼柱斷面之腹版靠東側中央點位達到最高溫 539.3°C(此時已過火害實驗空間最高溫度)，之後鋼柱溫度開始下降，降溫速率小於升溫速率。依 Eurocode 3 [10] 之建議，鋼材伏強度折減為常溫的 66%。

(2) 0.6H 斷面

圖 4.12 為邊柱於 0.6H 斷面之溫度時間圖，點火後約 300 秒時開始有明顯升溫趨勢，2063 秒時鋼柱斷面之南側翼版靠東邊內側點位達到最高溫 661.2°C(此時已過火害實驗空間最高溫度)，之後鋼柱溫度開始下降，降溫速率小於升溫速率。依 Eurocode 3 [10] 之建議，鋼材伏強度折減為常溫的 31 %。

(3) 0.3H 斷面

圖 4.13 為邊柱於 0.3H 斷面之溫度時間圖，點火後約 330 秒時開始有明顯升溫趨勢，2092 秒時鋼柱斷面之南側翼版靠東邊內側點位達到最高溫 624.9°C(此時已過火害實驗空間最高溫度)，之後鋼柱溫度開始下降，降溫速率小於升溫速率。依 Eurocode 3 [10] 之建議，鋼材伏強度折減為常溫的 41 %。

由圖 4.14 至圖 4.15 發現在不同高程下之各測溫點溫度相差不大，顯示出鋼材良好的熱傳導性。邊柱各斷面的最高溫度：0.6H 斷面最高溫 > 0.3H 斷面最高溫 > 0.9H 斷面最高溫。

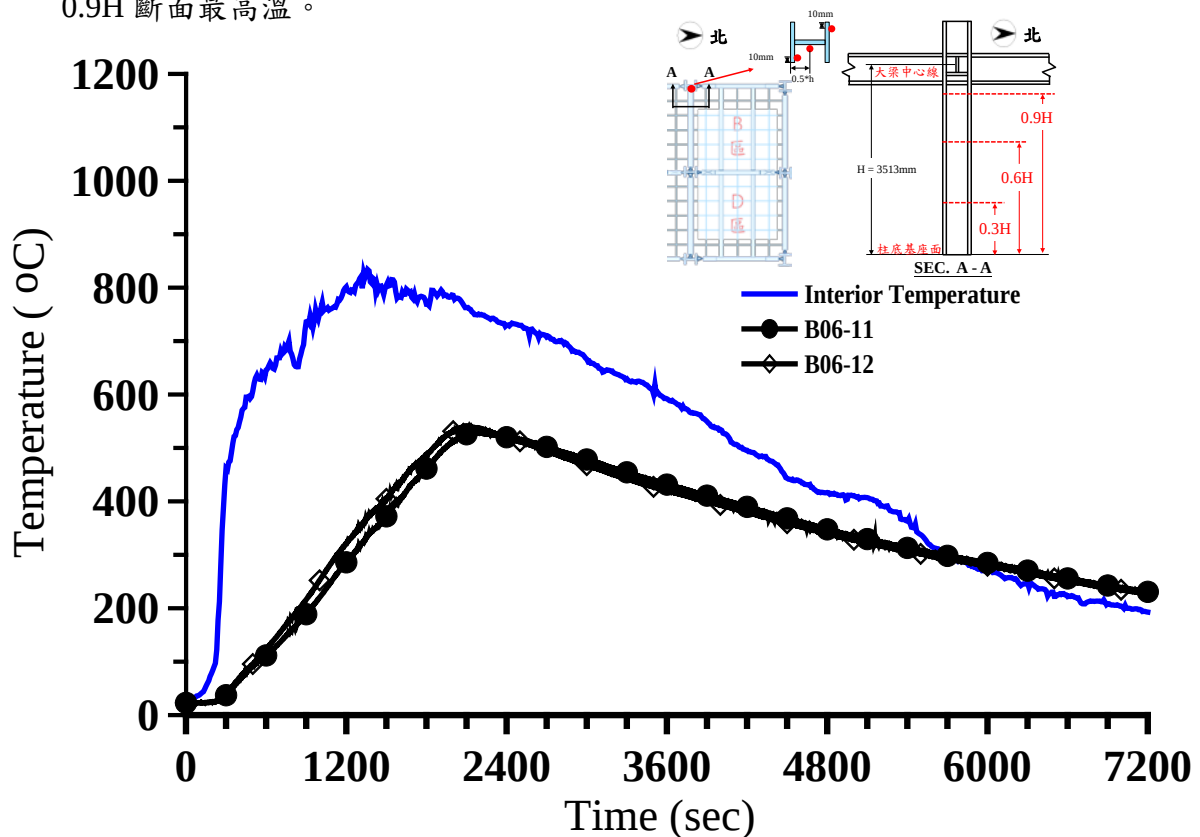


圖 4.11 邊柱於 0.9H 斷面之溫度時間曲線圖(本研究整理)

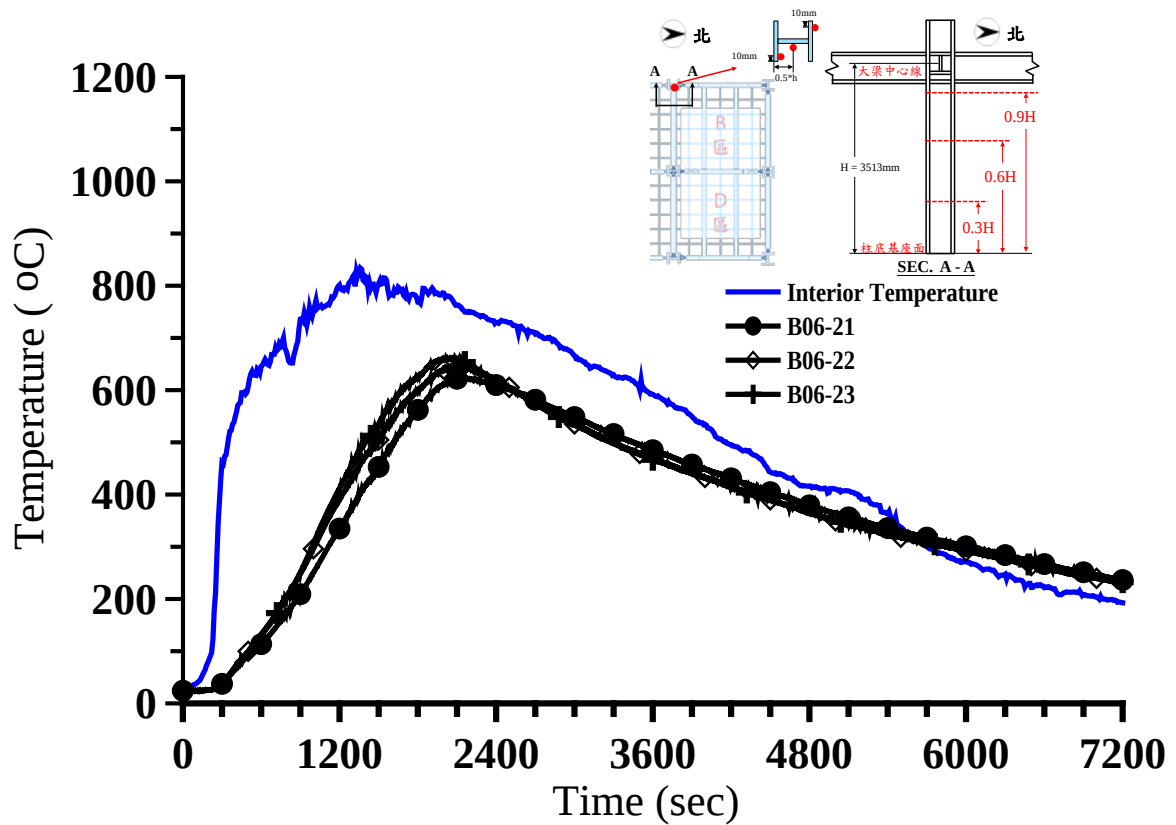


圖 4.12 邊柱於 0.6H 斷面之溫度時間曲線圖(本研究整理)

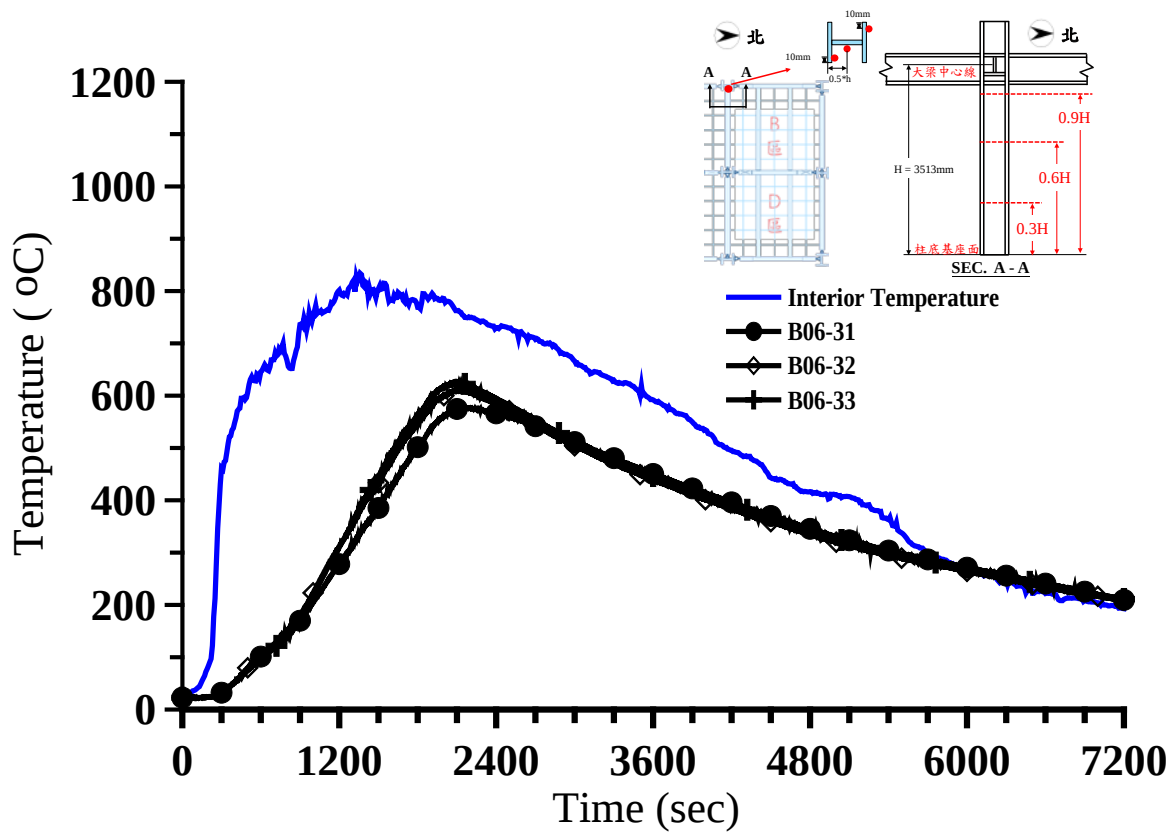


圖 4.13 邊柱於 0.3H 斷面之溫度時間曲線圖(本研究整理)

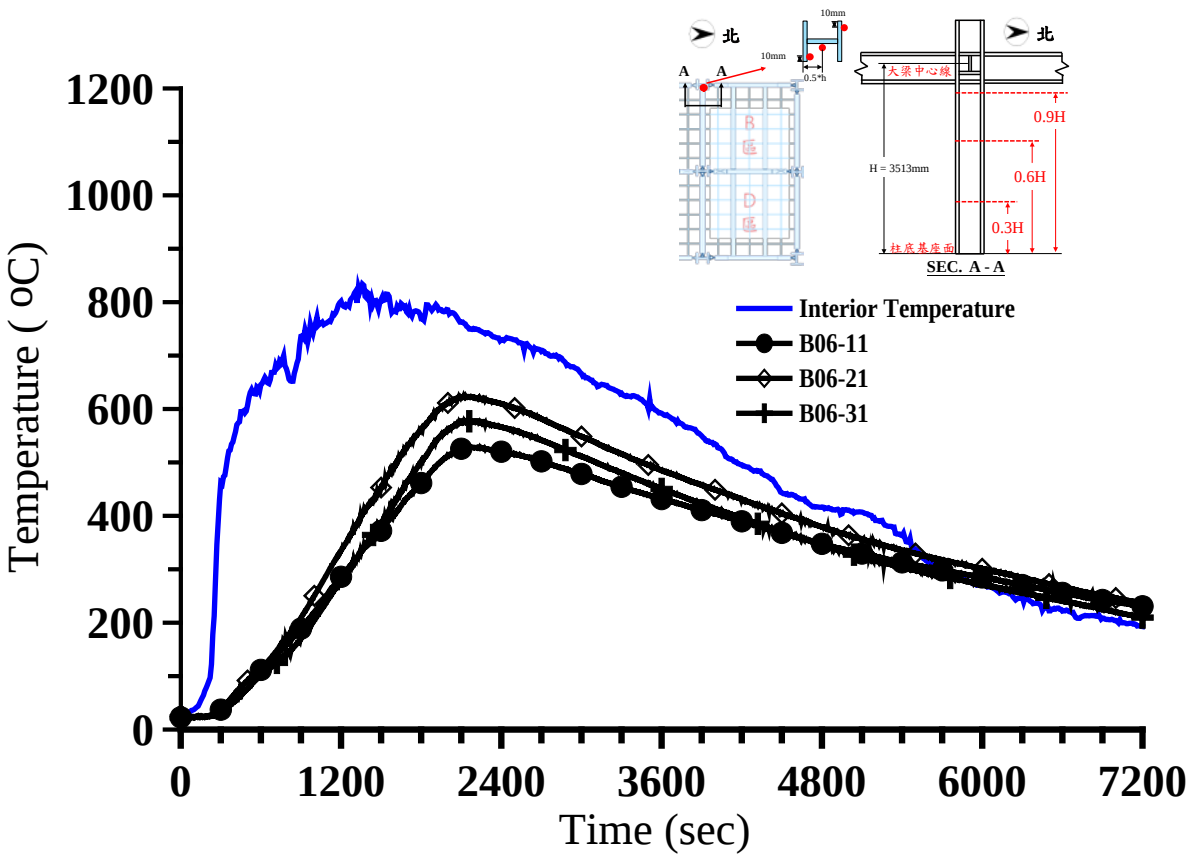


圖 4.14 邊柱北側翼板於不同高程之溫度時間曲線圖(本研究整理)

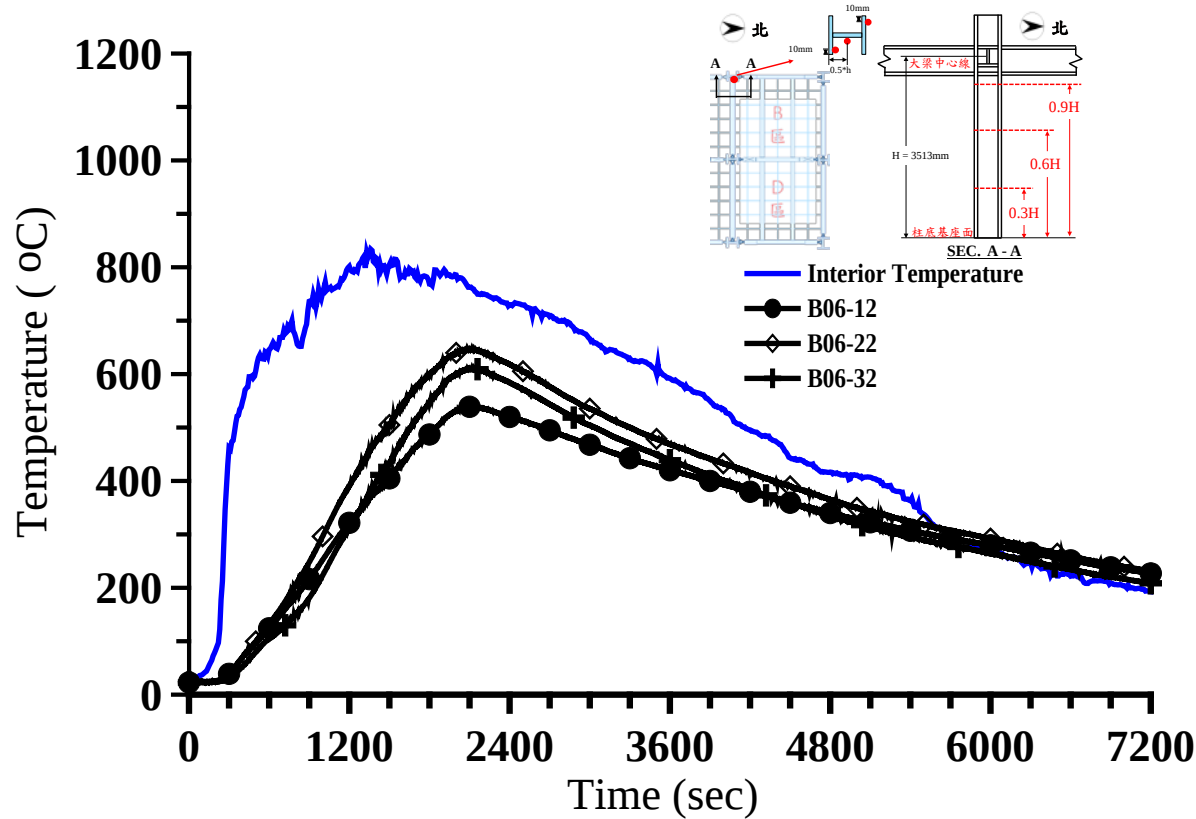


圖 4.15 邊柱腹板於不同高程之溫度時間曲線圖(本研究整理)

4-1-4 邊柱變位量測

本次實驗為了量測邊柱在弱軸彎曲方向之水平位移，分別在邊柱 0.9H 處、0.6H 處及 0.3H 處之東西向架設位移計共 3 支，以及邊柱軸向變位，在二樓柱頭架設垂直向位移計 1 支，另於二樓柱頭架設東西向與南北向位移各 1 支，以上位移計之架設如圖 3.21 及圖 3.22 所示，其所得量測結果如下：

(1) 邊柱 0.9H 處、0.6H 處及 0.3H 處之位移

圖 4.16 為邊柱 0.9H 處、0.6H 處及 0.3H 處在弱軸彎曲方向之水平位移，以向西(實驗區外側)方向為正，向東(實驗區內側)方向為負。除 0.9H 處之水平位移均向西(實驗區外側)外，0.6H 處及 0.3H 處之水平位移先向西(實驗區外側)；再轉為向東(實驗區內側)方向，最後為向西(實驗區外側)。

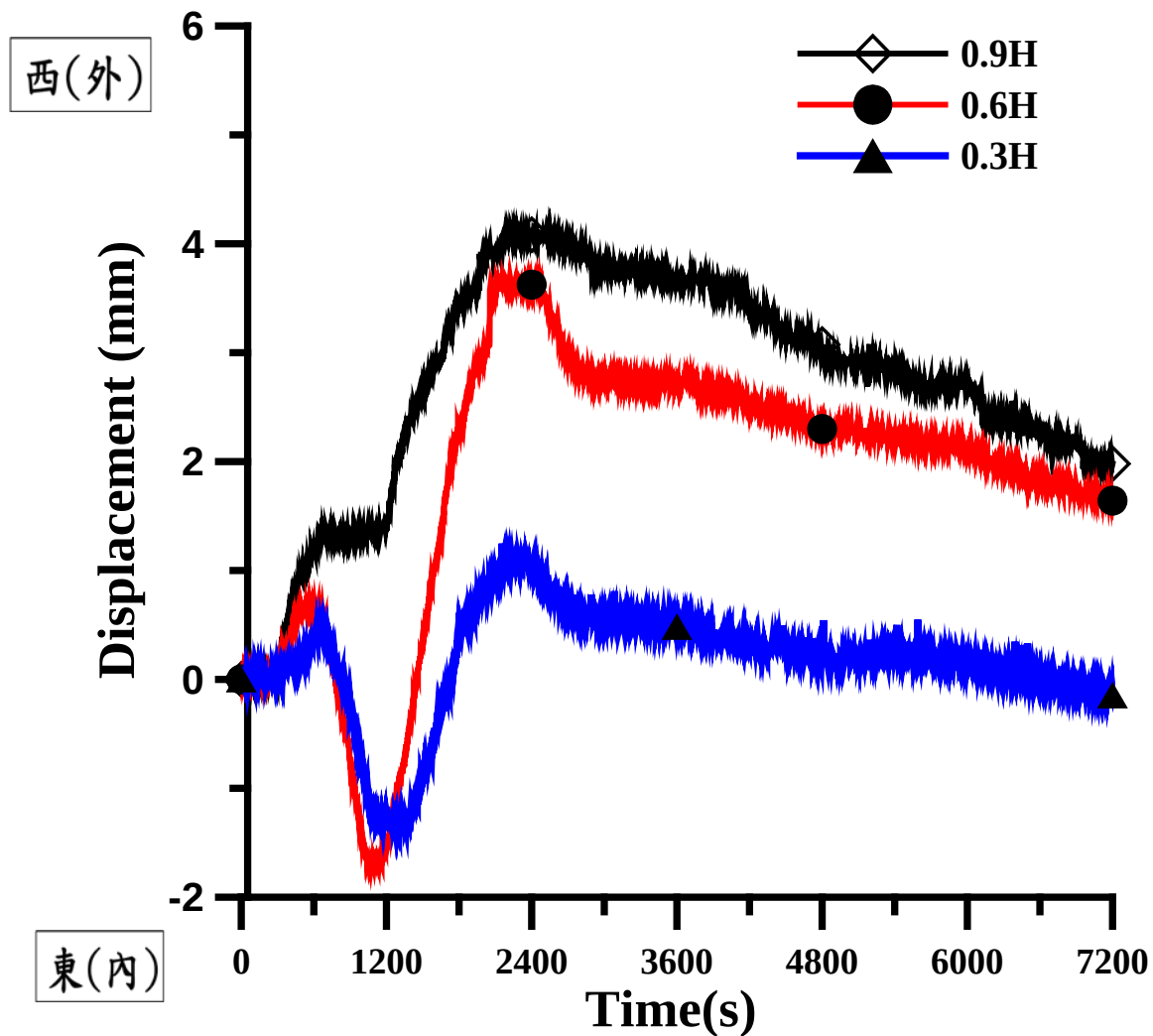


圖 4.16 邊柱弱軸方向之水平位移時間圖(本研究整理)

圖 4.17 為邊柱於 0.9H 處弱軸方向之水平位移時間圖，邊柱於點火後約 300 秒時鋼材開始有明顯升溫趨勢(鋼材平均溫度 38°C)，此時室內平均溫度 462°C，開始產生向西(實驗區外側)方向位移，約從 640 秒至 1200 秒(鋼材平均溫度 127.7~303.8°C，室內平均溫度 655.5~801.6°C)位移速率變緩，維持一平原段，此時位移為 1.25~1.42mm 向西(實驗區外側)，之後隨室內溫度與鋼材溫度上升，邊柱位移朝向西(實驗區外側)方向增加，約在 2157 至 2630 秒時(鋼材平均溫度 504.5~533.3°C，室內平均溫度 713.2~749.6°C)，水平位移達最大且維持一平原段，最大值為 4.12 mm 向西(實驗區外側)，並在之後隨著實驗區溫度及鋼柱溫度降低而漸漸開始向東(實驗區內側)回彈，其回彈速率小於升溫位移速率，於 7200 秒時，該處之殘餘位移為 1.98 mm 向西(實驗區外側)。

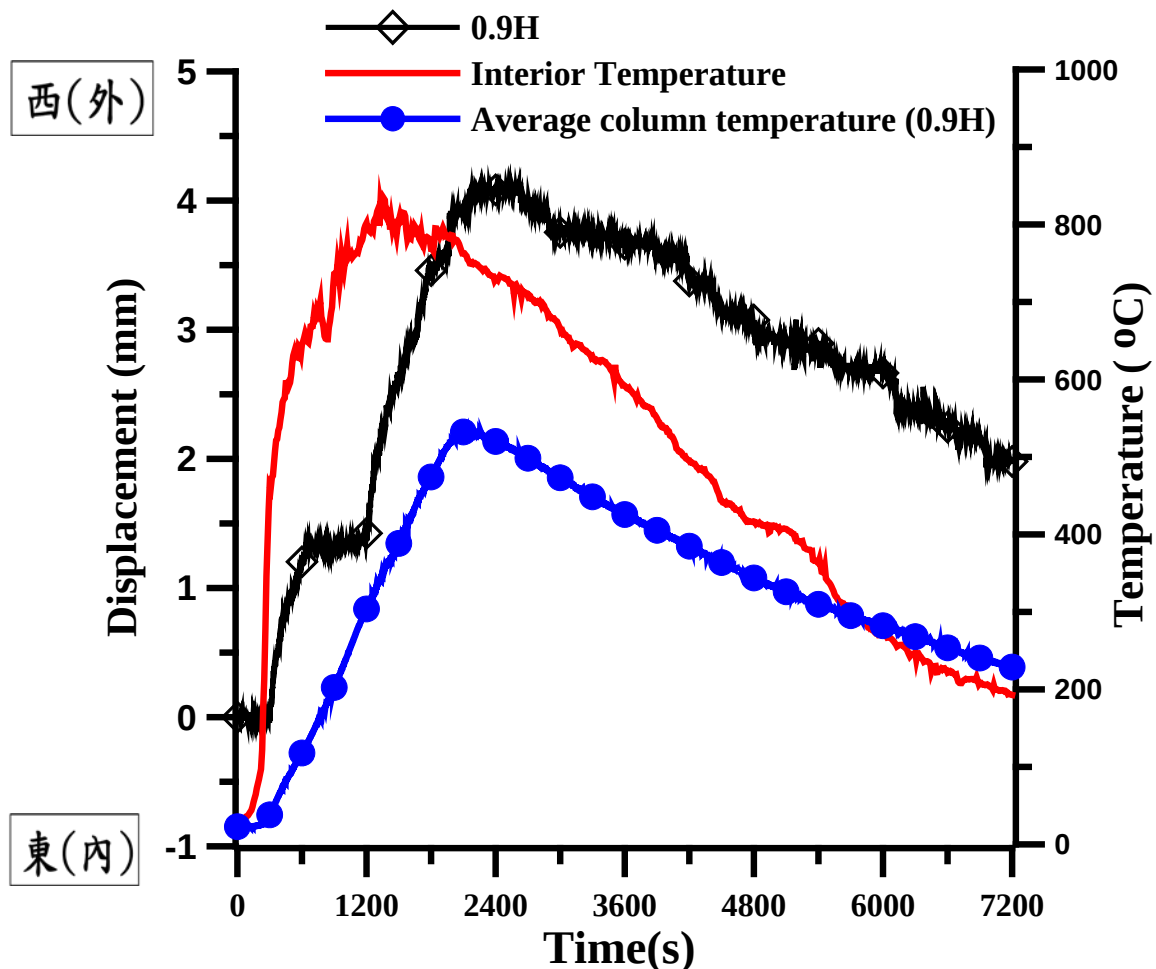


圖 4.17 邊柱於 0.9H 處弱軸方向之水平位移時間圖(本研究整理)

圖 4.18 為邊柱於 0.6H 處弱軸方向之水平位移時間圖，邊柱於點火後約 300 秒時鋼材開始有明顯升溫趨勢(鋼材平均溫度 37.8°C)，此時室內平均溫度 462°C，開始產生向西(實驗區外側)方向位移，約從 480 秒至 680 秒(鋼材平均溫度 91~150.7°C，室內平均溫度 592.3~668.4°C)位移速率變緩，維持一平原段，此時位移最大約為 0.69mm 向西(實驗區外側)，之後隨室內溫度與鋼材溫度上升，邊柱位移開始向東(實驗區內側)回彈，約在 1027 至 1180 秒時(鋼材平均溫度 298~370.7°C，室內平均溫度 756.9~794.7°C)，水平位移達回彈最大且維持一小段平原，最大值為 1.73 mm 向東(實驗區內側)，並在之後隨著實驗區溫度及鋼柱溫度上升而轉向西(實驗區外側)變形，約在 2054 至 2471 秒時(鋼材平均溫度 607.3~641.2°C，室內平均溫度 731.6~777.8°C)，水平位移達最大且維持一平原段，最大值為 3.68 mm 向西(實驗區外側)，並在之後隨著實驗區溫度及鋼柱溫度降低而開始向東(實驗區內側)回彈，於 7200 秒時，該處之殘餘位移為 1.64 mm 向西(實驗區外側)。

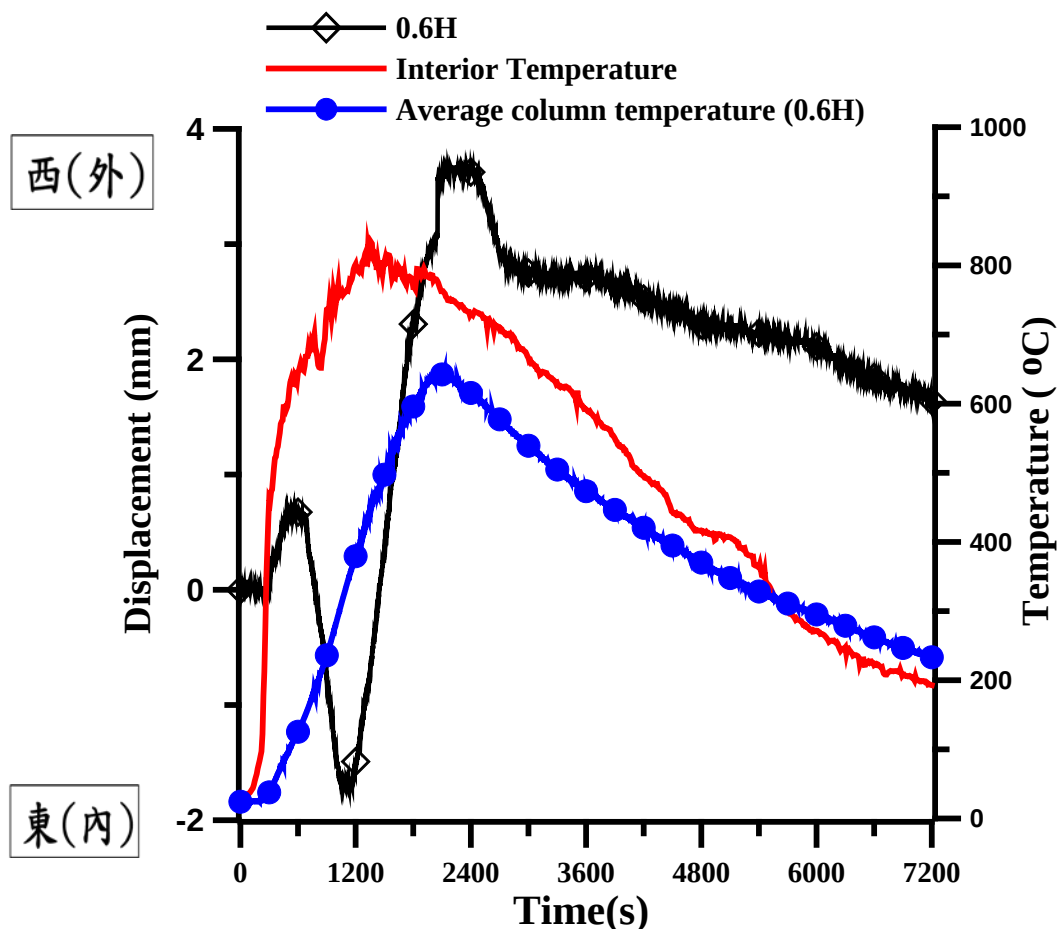


圖 4.18 邊柱於 0.6H 處弱軸方向之水平位移時間圖(本研究整理)

圖 4.19 為邊柱於 0.3H 處弱軸方向之水平位移時間圖，邊柱於點火後約 330 秒時鋼材開始有明顯升溫趨勢(鋼材平均溫度 37.2°C)，此時室內平均溫度 462°C，開始產生向西(實驗區外側)方向位移，約 664 秒(鋼材平均溫度 113°C，室內平均溫度 648°C)位移達最大，約為 0.52mm 向西(實驗區外側)，之後隨室內溫度與鋼材溫度上升，邊柱位移開始向東(實驗區內側)回彈，約在 1134 至 1379 秒時(鋼材平均溫度 273.5~377.2°C，室內平均溫度 770~810.7°C)，水平位移達回彈最大且維持一小段平原，最大值為 1.37 mm 向東(實驗區內側)，並在之後隨著實驗區溫度及鋼柱溫度上升而轉向西(實驗區外側)變形，約在 2157 至 2438 秒時(鋼材平均溫度 577.5~603°C，室內平均溫度 733.7~750°C)，水平位移達最大且維持一平原段，最大值為 1.25 mm 向西(實驗區外側)，並在之後隨著實驗區溫度及鋼柱溫度降低而開始向東(實驗區內側)回彈，於 7200 秒時，該處之殘餘位移為 0.14 mm 向東(實驗區內側)。

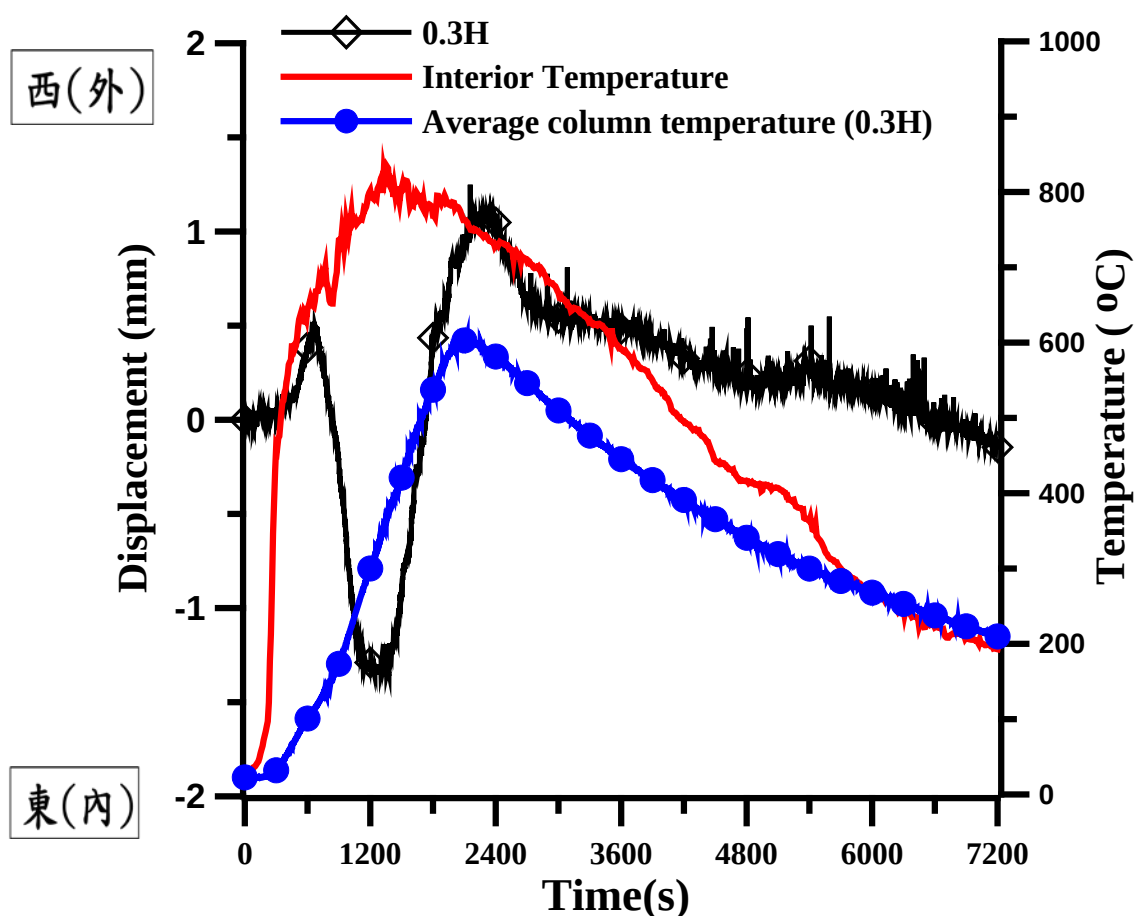


圖 4.19 邊柱於 0.3H 處弱軸方向之水平位移時間圖(本研究整理)

(2)邊柱軸向位移

圖 4.20 為邊柱軸向位移，邊柱於點火後約 330 秒時開始有明顯的向上軸向位移產生，隨著實驗區溫度及鋼柱溫度上升，約在 1909 至 2723 秒時(鋼材平均溫度 543.3~574.8°C，室內平均溫度 707.8~795.4°C)，軸向位移達最大且維持一平原段，最大值為 25.8 mm 向上膨脹，並在之後隨著實驗區溫度及鋼柱溫度降低而開始向下收縮，於 7200 秒時，該處之殘餘位移為 8.3mm 向上。

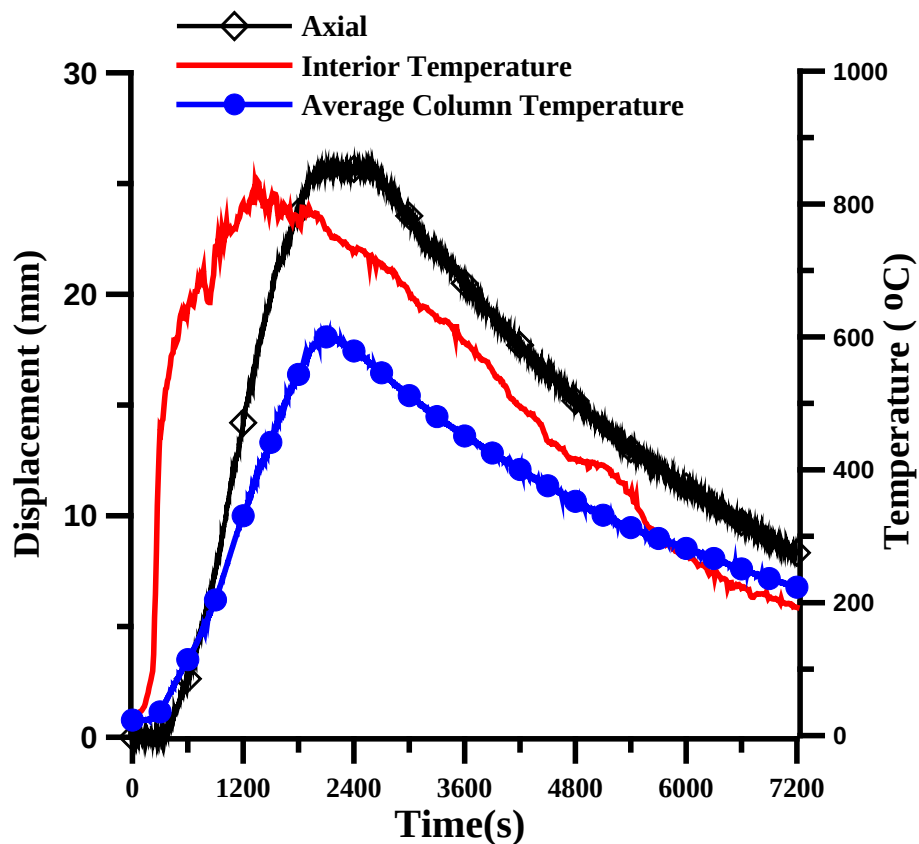


圖 4.20 邊柱軸向位移時間圖(本研究整理)

(3)邊柱柱頭東西向與南北向位移

圖 4.21 為邊柱於二樓柱頭之南北向位移，邊柱於點火後約 240 秒時開始產生向南(實驗區外側)方向位移，此時鋼材平均溫度 26.7°C，室內平均溫度 177.8°C，隨著實驗區溫度及鋼柱溫度上升，約 2010 至 2530 秒(鋼材平均溫度 565.9~592.7°C，室內平均溫度 724.1~778.2°C) 位移達最大且維持一平原段，最大值為 18.67mm 向南(實驗區外側)，

之後隨室內溫度與鋼材溫度降低而開始向北(實驗區內側)回彈，於 7200 秒時，該處之殘餘位移為 11.5mm 向南(實驗區外側)。

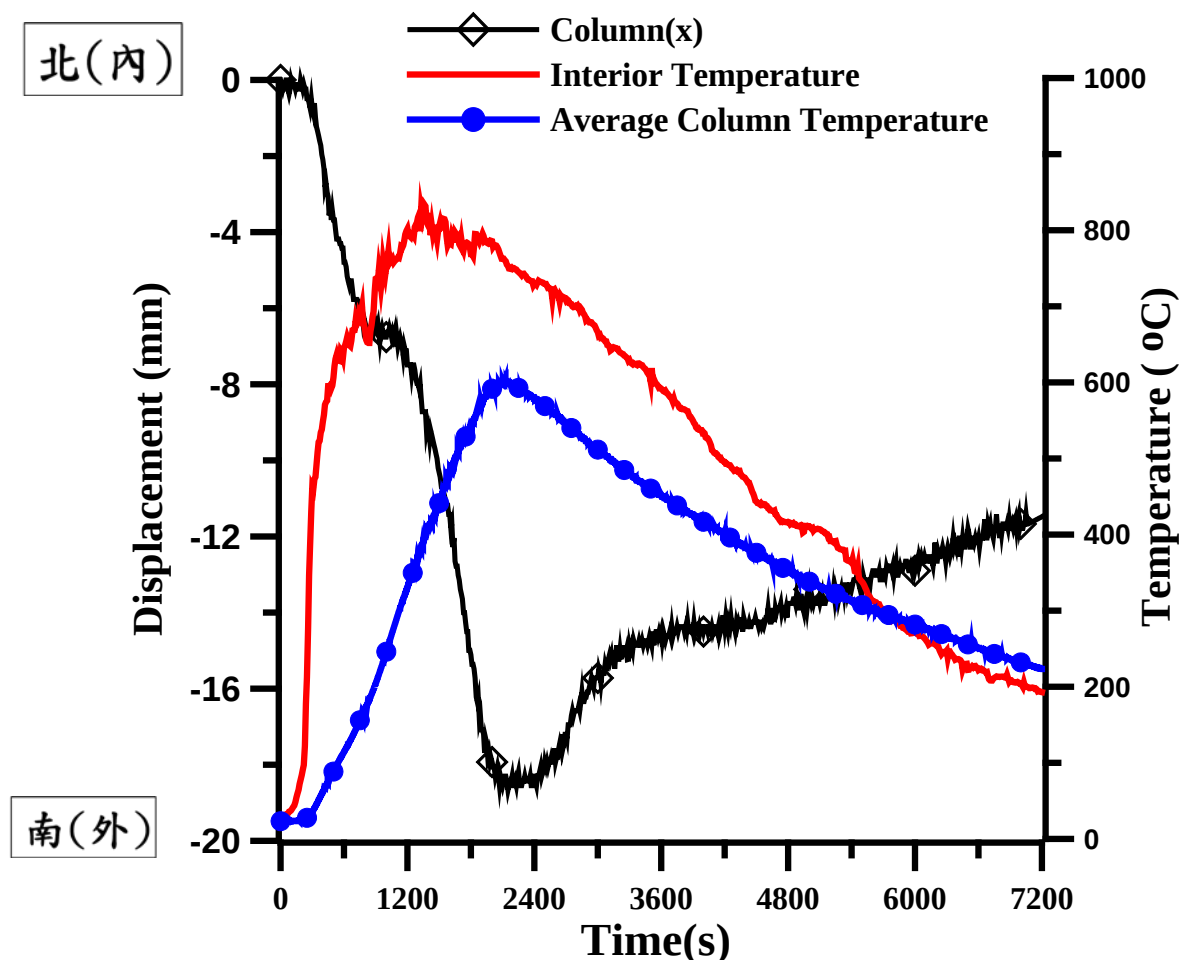


圖 4.21 邊柱於二樓柱頭之南北向位移時間圖(本研究整理)

圖 4.22 為邊柱於二樓柱頭之東西向位移，邊柱於點火後約 280 秒時開始產生向東(實驗區內側)方向位移，此時鋼材平均溫度 31.9°C ，室內平均溫度 386.5°C ，隨著實驗區溫度及鋼柱溫度上升，約 670 秒(鋼材平均溫度 132°C ，室內平均溫度 655°C)位移達最大，約為 2.2mm 向東(實驗區內側)，之後隨室內溫度與鋼材溫度上升，邊柱位移開始向西(實驗區外側)回彈，約在 1160 秒時(鋼材平均溫度 315°C ，室內平均溫度 780.2°C)位移達最大，約為 0.8mm 向西(實驗區外側)，但隨著實驗區溫度及鋼柱溫度上升，邊柱位移轉向東(實驗區內側)變形，且最大位移不是在實驗區溫度及鋼柱溫度最高時，反而在降溫階段，約在 2190 至 2850 秒(鋼材平均溫度 $528\sim 597.5^{\circ}\text{C}$ ，室內平均溫度

695.4~750.5°C) 位移達最大且維持一平原段，最大值為 10.49mm 向東(實驗區內側)。
之後隨室內溫度與鋼材溫度降低而開始向西(實驗區外側)回彈，於 7200 秒時，該處之
殘餘位移為 4.1mm 向東(實驗區內側)。

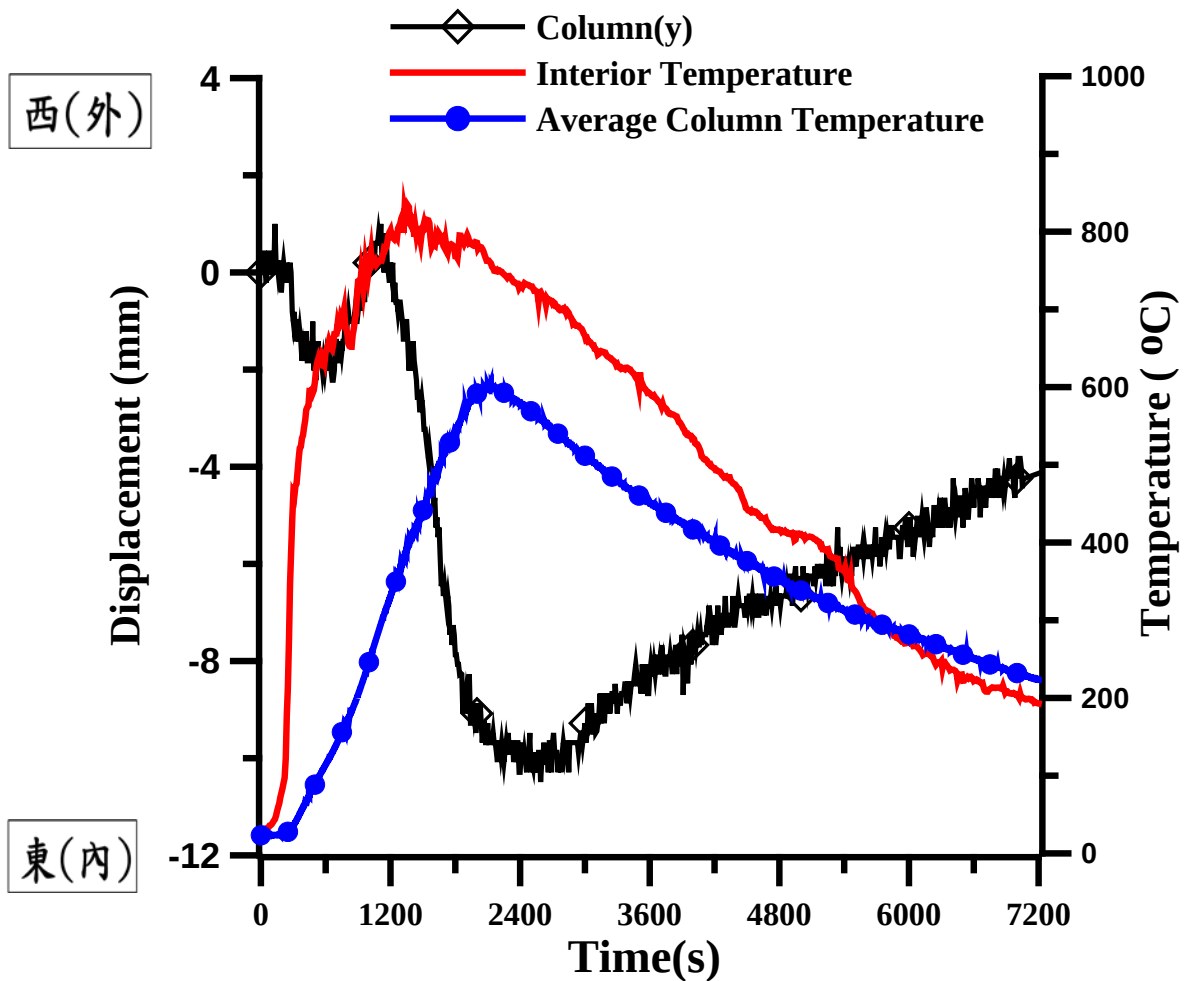


圖 4.22 邊柱於二樓柱頭之東西向位移時間圖(本研究整理)

第二節 與前期試驗結果討論

圖 4.23 為普通鋼小梁支撐之混凝土鋼承板火實驗(第 1 次)、耐火鋼小梁支撐之混凝土鋼承板實驗(第 2 次)、修復的普通鋼小梁支撐之混凝土鋼承板試體(第 3 次, 新舊混凝土黏結界面, 以環氧樹脂黏結材料施作)、修復的普通鋼小梁支撐之混凝土鋼承板試體(第 4 次, 新舊混凝土黏結界面, 以水泥漿添加海菜施作)與本次實驗(第 5 次)的室內溫度比較, 第 1 次火害實驗相對溼度為 68 %, 第 2 次火害實驗相對溼度為 58 %, 第 3 次火害實驗相對溼度為 52%, 第 4 次火害實驗相對溼度為 70%, 第 5 次火害實驗相對溼度為 60%, 第 1 次火害實驗引燃時間較長。

圖中顯示第 2、3 次實驗升溫速率較快, 約 420~463 秒時發生閃燃, 第 2 次實驗於 1278 秒時室內平均溫度已達最高 920.1°C, 第 3 次實驗於 1246 秒時室內平均溫度已達最高 954.7°C, 第 1 次實驗於 979 秒時發生閃燃, 而平均最高溫度則達到 978.1°C, 發生在 1602 秒。第 4 次及第 5 次實驗為使得火害歷時增加, 縮小實驗區開口, 第 4 次將開口高度縮至 1.05m, 於 925 秒時發生閃燃, 2050 秒至 2250 秒時, 室內總平均溫度達到高峰約 922°C。第 5 次將開口寬度縮減至 4.70m, 開口高度縮減至 1.0m, 於 470 秒時發生閃燃, 1360 秒時, 室內總平均溫度達到高峰約 833.8°C。第 4、5 次的室內總平均溫度較前 3 次略低。

5 次火害實驗的結果顯示, 真實火災實驗目前仍難以控制及預測, 使得每次實驗之火場溫度一致, 火場的燃燒行為受到諸多因素影響, 5 次實驗之溫度時間曲線在線形與火災歷程皆有所差異。

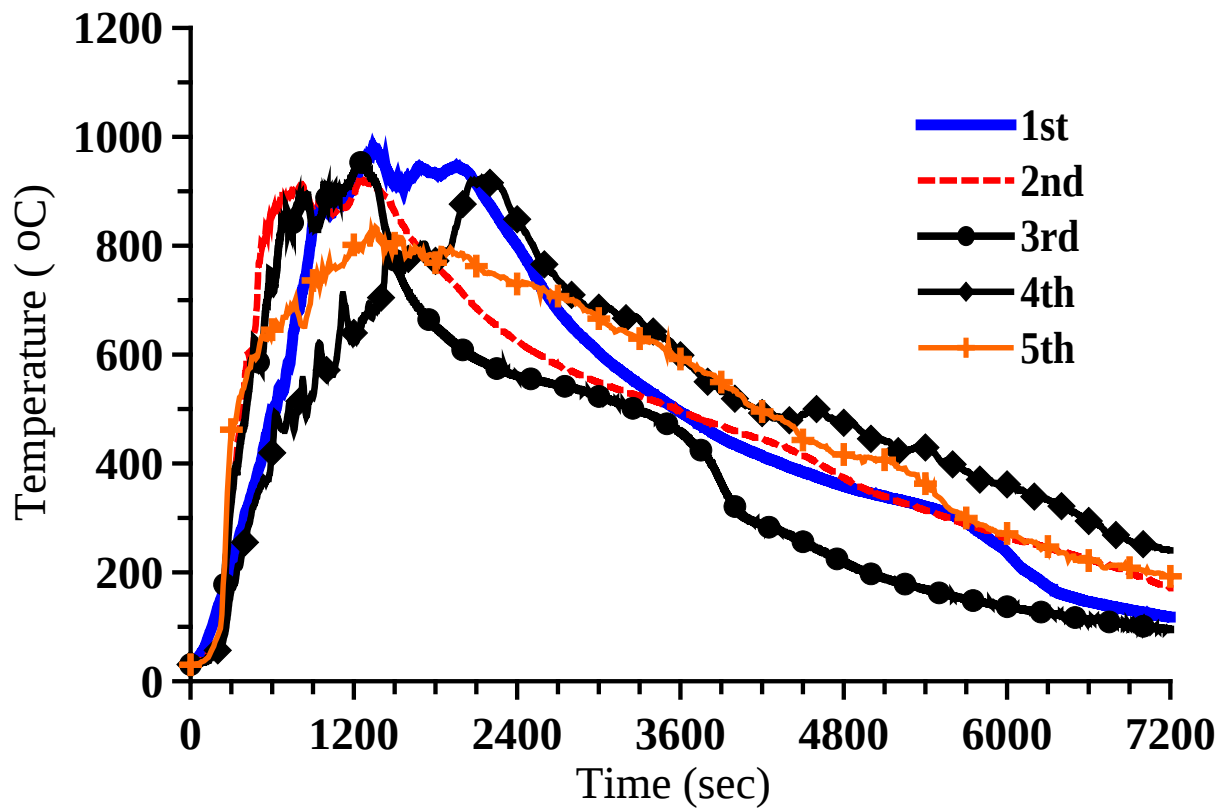


圖 4.23 火害實驗空間平均溫度時間曲線比較圖(本研究整理)

第五章 實尺寸鋼構屋火害實驗資料庫

本研究彙集整理 105 年起所進行之實尺寸鋼構屋火害實驗，不包括靜動態實驗，並參考英國 Cardington 實尺寸鋼構架屋火害實驗數據資料庫格式建立，其內容為 1. 實尺寸鋼構屋規劃與設計。2. 歷次實尺寸鋼構屋火害實驗目的與規劃。3. 歷次實驗的溫度與位移量測規劃與位置圖。4. 歷次實尺寸鋼構屋火害實驗之各構件的溫度與位移數據，以圖形及表格呈現，已與委託研究團隊討論後著手進行整理 4 次實驗結果。

現將初步完成整理實驗的溫度與位移數據資料，以第 1 次實驗為例，摘述如下。

一、火害實驗目的與規劃

本計畫主要在研究實尺寸鋼構實驗屋內部分剪力連接之複合鋼梁(即：小梁)在火害中的結構行為，在實尺寸鋼構實驗屋內的部分區劃空間，進行真實火災實驗，藉以研究此區劃空間內以剪力連接之複合鋼梁於真實的結構束制情況下受真實火害之行為。

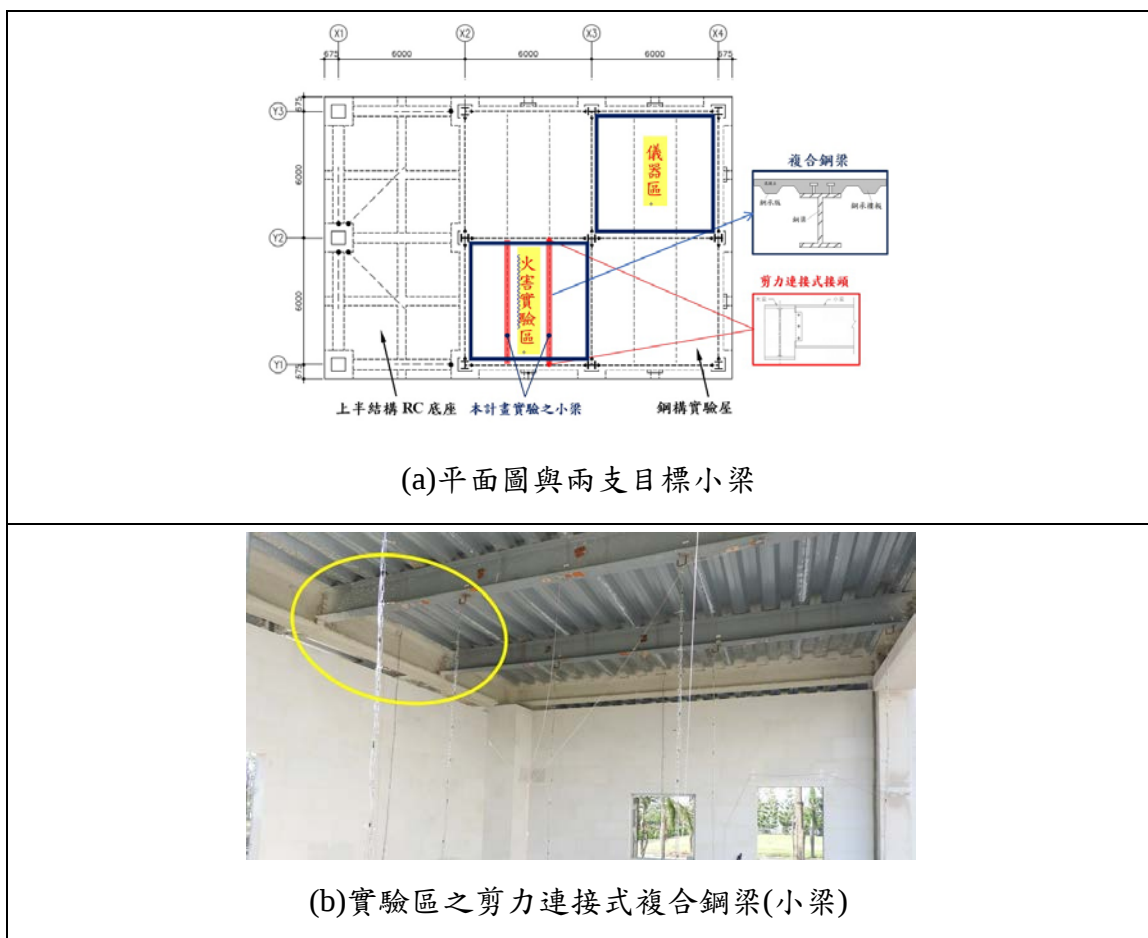


圖 5.1 鋼構實驗屋平面圖與本次火災實驗範圍圖例(參考書目[1])

二、火害實驗空間溫度

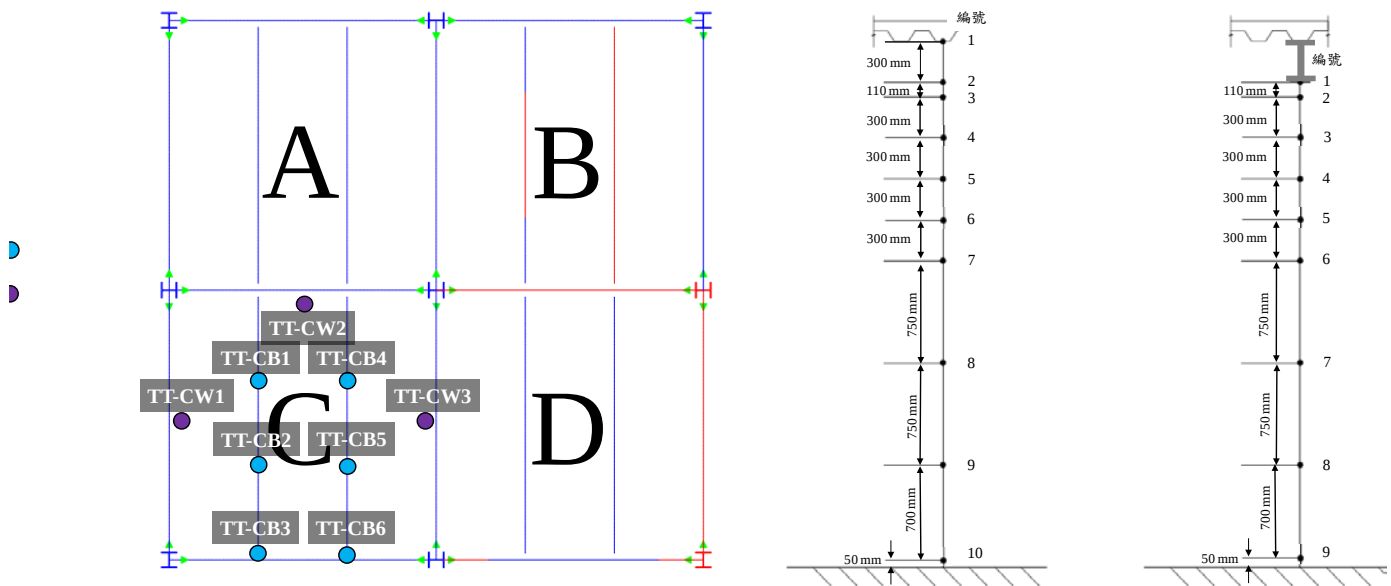


圖 5.2 第 1 次火害實驗區熱電偶樹配置圖例(本研究整理)

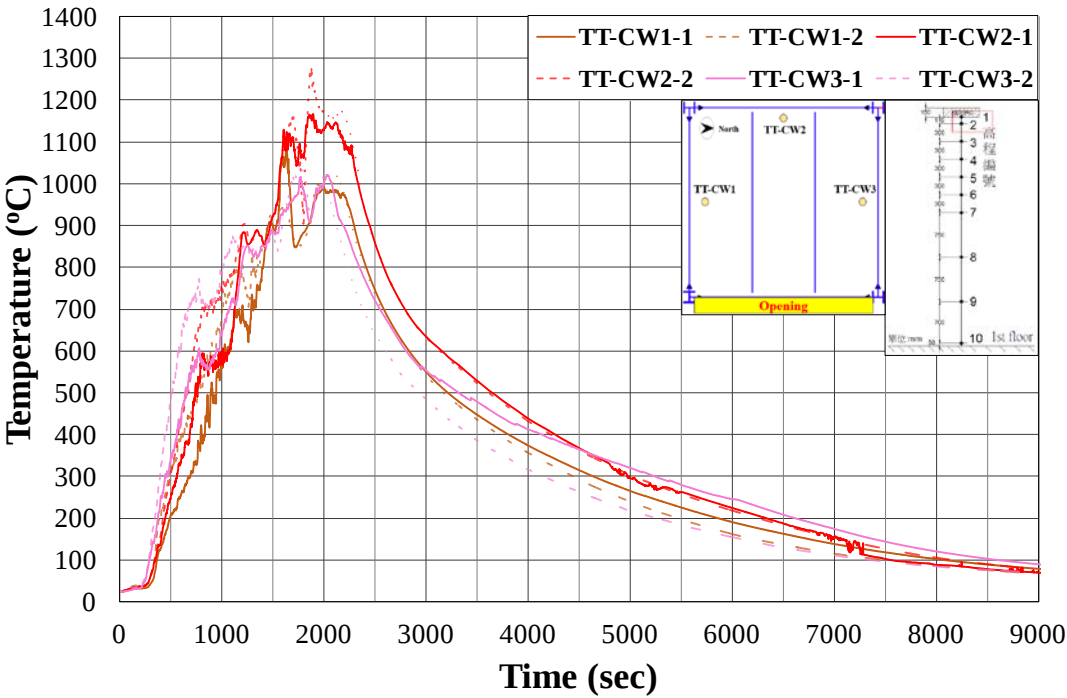


圖 5.3 第 1 次火害實驗區空間溫度歷時圖例(本研究整理)

表 5.1 第 1 次火害實驗區空間溫度時間表例

Time(s)	TT-CW1-1	TT-CW1-2	TT-CW2-1	TT-CW2-2	TT-CW3-1	TT-CW3-2
0	24.6	24.9	23.7	24.6	22.9	24.3
10	24.5	24.9	23.6	24.6	22.9	24.3
20	24.5	25.2	24.4	25.0	23.0	24.3
30	25.0	26.9	25.2	25.7	22.9	24.2
40	25.7	29.0	25.9	26.8	23.1	24.8
50	26.3	30.2	26.9	27.3	24.1	26.1
60	26.9	31.6	27.8	28.3	24.6	27.1
70	27.7	33.0	28.8	29.4	24.9	28.0
80	28.6	34.9	29.9	30.5	25.3	29.1
90	29.3	35.8	30.8	31.4	26.1	30.2
100	29.7	36.0	31.0	32.0	26.3	30.9
110	30.2	37.1	31.9	33.0	26.9	31.8
120	30.7	38.2	32.8	33.8	27.5	32.8
130	31.2	39.0	33.7	34.3	28.6	33.6
140	31.4	39.4	35.0	35.3	29.5	34.5
150	31.9	39.9	35.0	35.4	30.4	35.2
160	31.9	39.9	35.1	36.0	30.5	35.8
170	32.1	39.5	35.6	36.1	30.1	36.0
180	32.1	39.8	36.2	36.5	30.2	36.1
190	32.4	40.7	36.5	36.8	30.5	36.7
200	32.2	40.7	36.2	37.1	30.4	36.9
210	31.9	39.8	36.2	37.2	33.5	39.8
220	32.4	41.1	37.2	37.7	39.2	45.1
230	33.1	42.2	37.5	38.0	45.3	50.8
240	32.9	41.5	37.6	39.1	46.9	54.5
250	33.3	41.7	38.2	40.1	52.2	60.0
260	34.4	44.0	40.6	42.2	64.5	70.2
270	35.2	46.3	43.2	45.0	78.1	84.4
280	36.9	49.9	47.5	50.0	89.6	100.0
290	41.0	56.3	54.1	56.7	100.7	116.2
300	44.7	63.2	62.4	64.3	112.6	135.7

(本研究整理)

三、構件位移與溫度

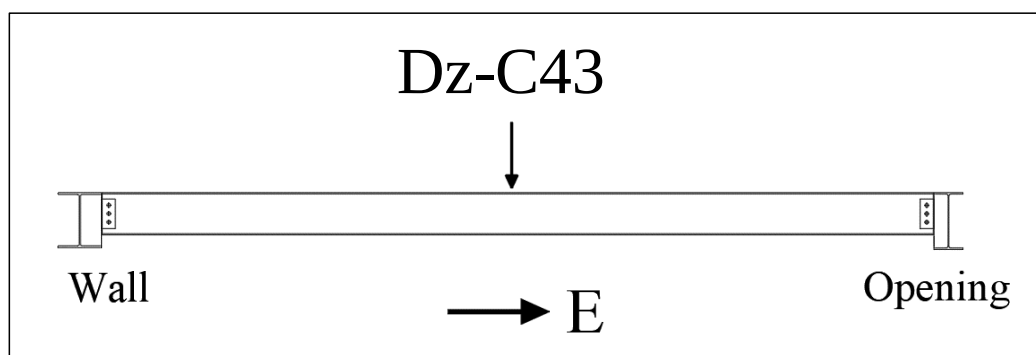


圖 5.4 第 1 次火害實驗區小梁位移計位置圖例(本研究整理)

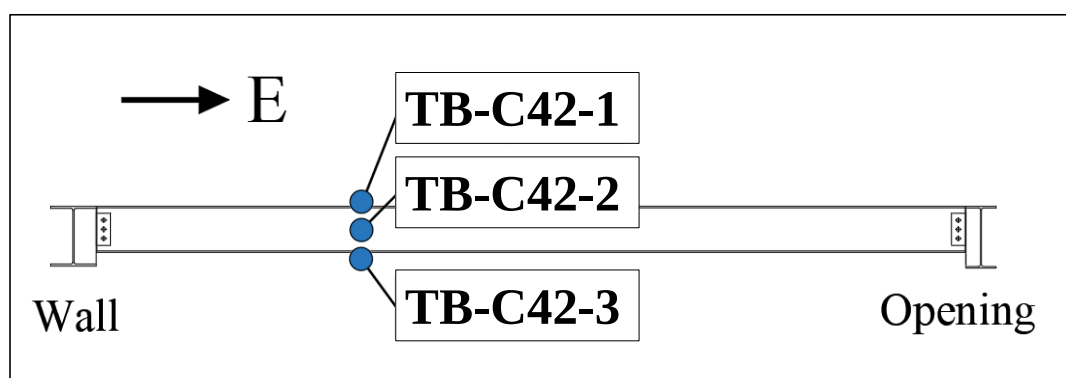


圖 5.5 第 1 次火害實驗區小梁熱電偶位置圖例(本研究整理)

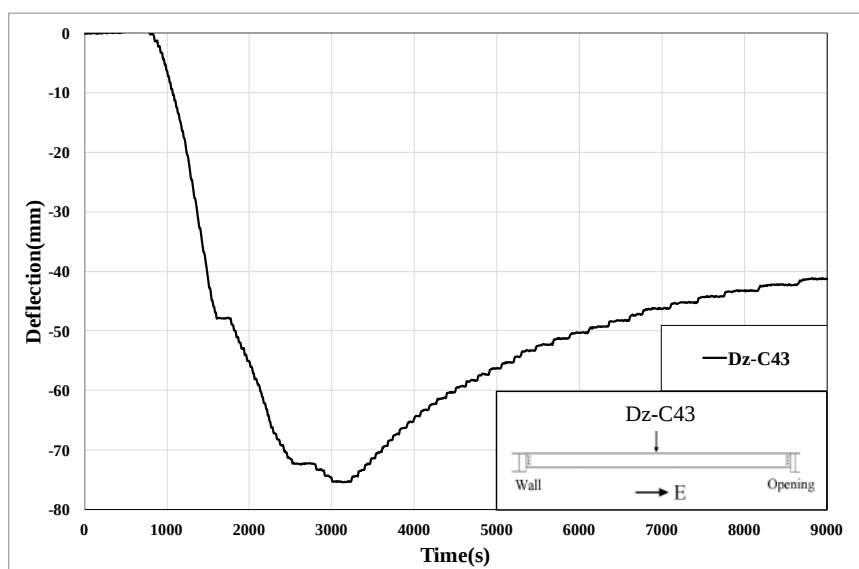


圖 5.6 第 1 次火害實驗區小梁位移歷時圖例(本研究整理)

表 5.2 第 1 次火害實驗區小梁位移時間表例

Time(s)	Dz-C43
0	0
10	0.020527
20	-0.06158
30	-0.02053
40	0.027369
50	0.061581
60	-0.04105
70	0.006842
80	0.006842
90	0.061581
100	0.041054
110	0.116319
120	0.027369
130	0.034212
140	0.006842
150	-0.06158
160	0.020527
170	0.013685
180	0.034212
190	0.034212
200	0.109477
210	-0.02737
220	0.102634
230	0.164215
240	0.136846
250	0.102634
260	0.095792
270	0.020527
280	0.075265
290	0.198426
300	0.177899

(本研究整理)

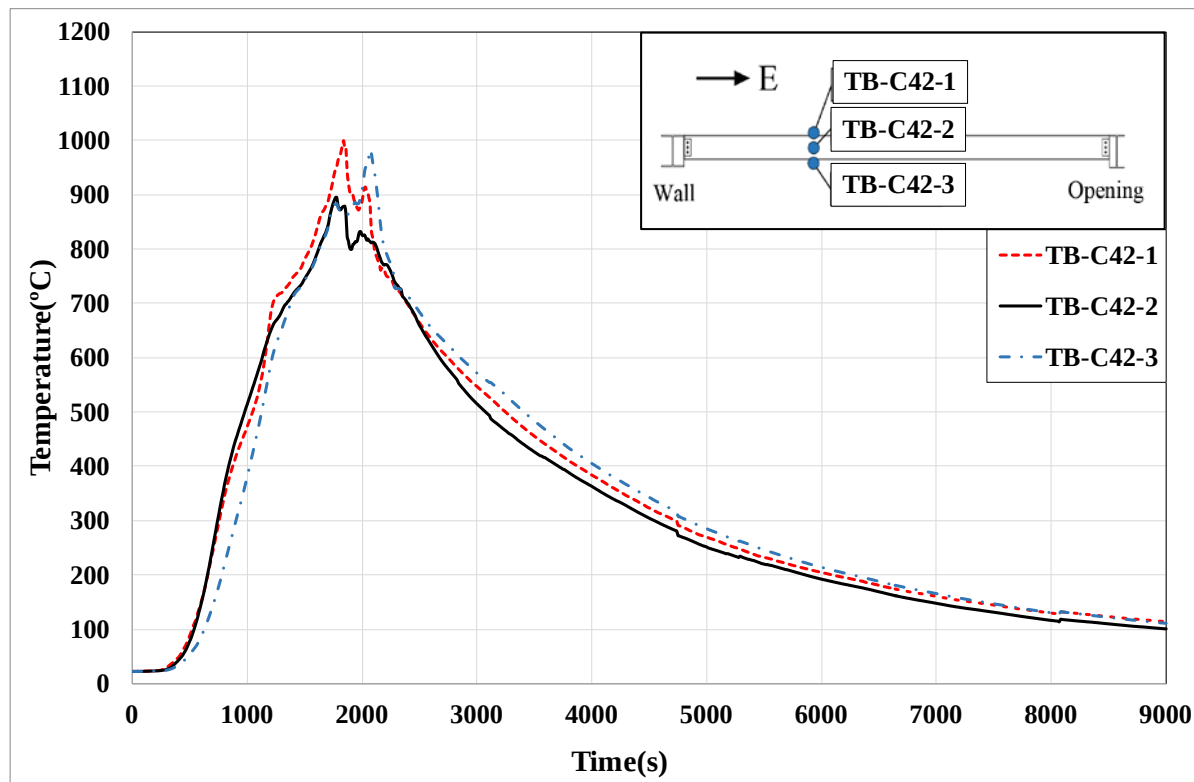


圖 5.7 第 1 次火害實驗區小梁溫度歷時圖例(本研究整理)

表 5.3 第 1 次火害實驗區小梁溫度時間表例

Time(s)	TB-C42-1	TB-C42-2	TB-C42-3	TB-C44-1	TB-C44-2	TB-C44-3
0	21.765952	22.40613	22.572441	22.173326	22.756914	22.923547
10	21.820672	22.430541	22.589257	22.152247	22.720688	22.894901
20	21.844519	22.424071	22.567644	22.183686	22.767272	22.911168
30	21.842294	22.406686	22.618444	22.143555	22.749893	22.908946
40	21.919188	22.460861	22.551382	22.190157	22.751003	22.947947
50	21.93177	22.518925	22.586683	22.202741	22.778738	23.013568
60	21.943589	22.57623	22.651521	22.214569	22.820875	22.979925
70	21.989612	22.584364	22.652078	22.283359	22.874475	22.988059
80	22.043208	22.637976	22.667781	22.253588	22.912916	23.018924
90	22.134129	22.69103	22.629909	22.33698	22.943227	23.117425
100	22.173122	22.730035	22.744633	22.353254	22.9898	23.118536
110	22.296003	22.868109	22.731153	22.468625	23.021772	23.135354
120	22.291206	22.870886	22.786944	22.471404	23.092735	23.20632
130	22.384679	22.888619	22.774371	22.489141	23.110466	23.246776
140	22.410737	22.998032	22.868583	22.575851	23.242584	23.272835
150	22.577367	23.066221	22.876158	22.575849	23.318334	23.341012
160	22.654766	23.166376	22.930833	22.706355	23.35787	23.40328
170	22.707221	23.196122	22.93785	22.774002	23.463353	23.433023
180	22.775372	23.287023	23.028716	22.849779	23.539086	23.463321
190	22.864012	23.352974	23.087067	22.908173	23.552011	23.567135
200	22.987928	23.454213	23.089844	22.971564	23.622943	23.622927
210	23.020431	23.532166	23.145065	23.064699	23.693314	23.617574
220	23.246966	23.70578	23.197506	23.230801	23.85933	23.685176
230	23.549684	23.758783	23.28835	23.450447	23.972887	23.791189
240	23.868003	23.89562	23.432728	23.625174	24.147543	23.890178
250	24.351483	24.182713	23.560839	23.874467	24.43457	24.07132
260	24.941111	24.492985	23.704628	24.184807	24.759898	24.237851
270	25.710017	24.771245	23.84673	24.606878	25.121277	24.501069
280	26.585129	25.194227	24.216859	25.256746	25.657507	24.75777
290	27.901703	25.705174	24.576733	26.016988	26.304213	25.238723
300	29.313192	26.388308	24.97297	26.89618	27.017162	25.604766

(本研究整理)

四、樓板位移與溫度

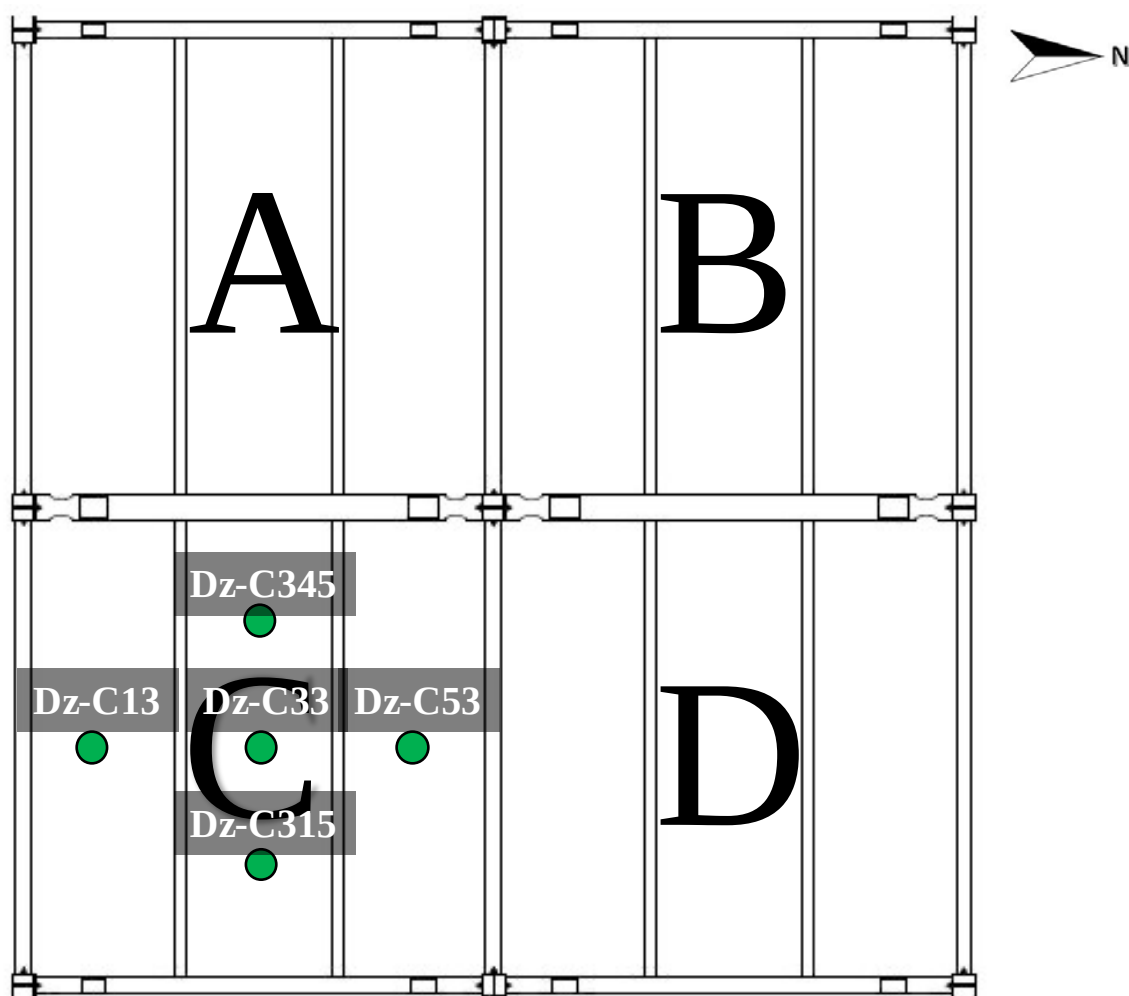


圖 5.8 第 1 次火害實驗區樓板位移計位置圖例(本研究整理)

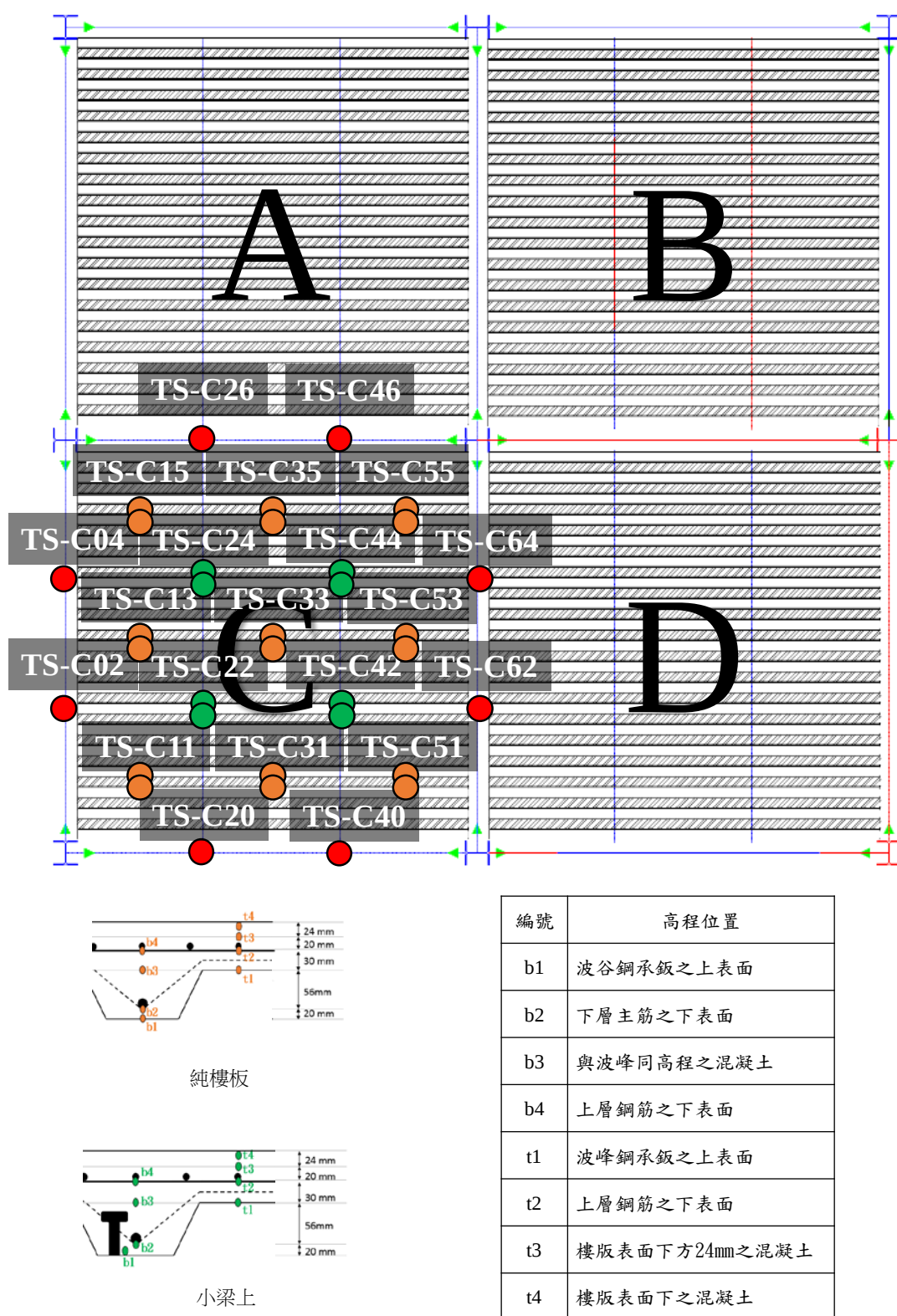


圖 5.9 第 1 次火害實驗區樓板熱電偶位置圖例(本研究整理)

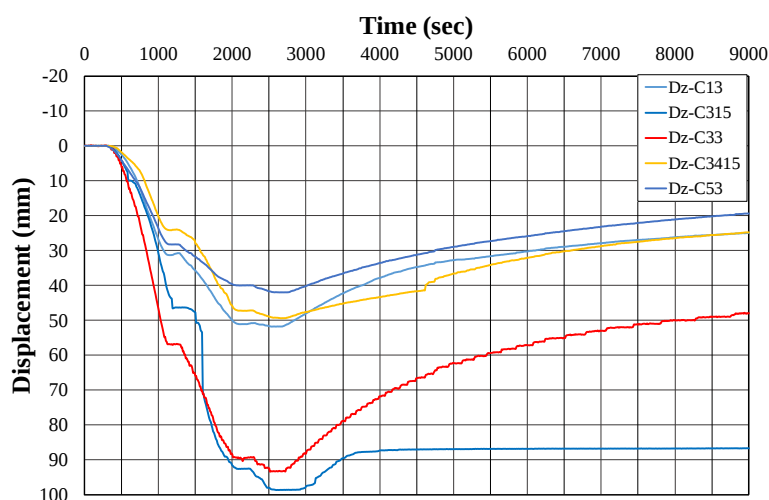


圖 5.10 第 1 次火害實驗區樓板位移歷時圖例(本研究整理)

表 5.4 第 1 次火害實驗區樓板位移時間表例

Time(s)	Dz-C13	Dz-C315	Dz-C33	Dz-C3415	Dz-C53
0	0	0	0	0	0
10	0.013094	0.011042	-0.164614	0.006864	0
20	0.016367	-0.018403	-0.041154	-0.006864	-0.003266
30	0	0.003681	-0.054872	-0.006864	-0.013065
40	0.013094	-0.011042	-0.006859	0.003432	0.019598
50	0.013094	0	-0.157755	0.006864	0
60	0.016367	-0.044168	-0.041154	-0.017161	0.003267
70	0.00982	-0.014723	-0.096025	-0.013729	-0.003266
80	0.013094	-0.011042	-0.19205	-0.010296	-0.019597
90	0.026188	0.022084	-0.240063	0.013729	0.032663
100	0.019641	-0.011042	0	-0.010296	0
110	0.003273	0.007361	-0.102884	-0.013729	-0.006532
120	0.032735	-0.003681	-0.13032	-0.006864	-0.003266
130	0.042555	-0.014723	-0.027436	0.003432	0.003267
140	0.029461	-0.011042	-0.089166	0	0.009799
150	0.022914	-0.036807	-0.089166	-0.010296	0.016331
160	0.006547	-0.036807	-0.020577	-0.034321	-0.006532
170	0.029461	0	0.013718	-0.003432	0.006533
180	0.022914	-0.022084	0.027436	-0.020593	-0.013065
190	0.016367	-0.018403	0.041153	-0.024025	-0.019597
200	0.016367	0.007361	-0.006859	-0.034321	-0.006532
210	0.016367	-0.007361	-0.068589	-0.003432	0
220	0.006547	-0.003681	-0.061731	-0.034321	-0.013065
230	0.00982	0.029446	-0.144038	-0.006864	0.022864
240	0.016367	0.033126	-0.082307	0.010296	0.006533
250	0.016367	-0.003681	-0.020577	-0.017161	0.009799
260	-0.003274	-0.025765	-0.075448	-0.010296	-0.003266
270	0.032735	0.025765	-0.178332	0	0.009799
280	0	-0.003681	-0.102884	-0.013729	-0.003266
290	0.013094	0.014723	-0.185191	-0.030889	0.009799
300	0.019641	-0.003681	-0.068589	-0.010296	0.05226

(本研究整理)

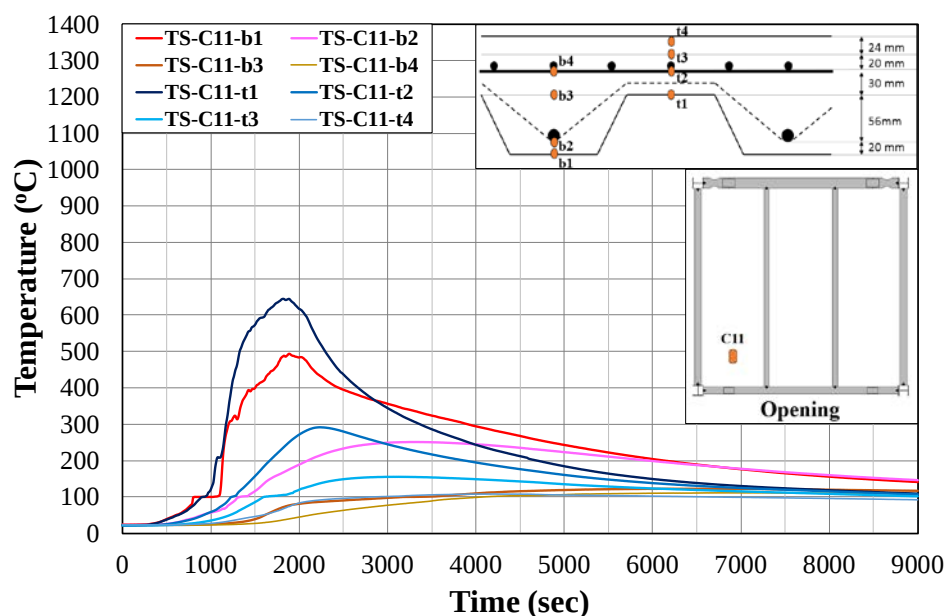


圖 5.11 第 1 次火害實驗區樓板溫度歷時圖例(本研究整理)

表 5.5 第 1 次火害實驗區樓板溫度時間表例

Time(s)	TS-C11-b1	TS-C11-b2	TS-C11-b3	TS-C11-b4	TS-C11-t1	TS-C11-t2	TS-C11-t3	TS-C11-t4
0	23.6	23.2	22.8	22.6	22.0	21.9	22.0	23.2
10	23.6	23.3	22.8	22.6	22.0	21.9	22.0	23.1
20	23.6	23.3	22.9	22.7	22.0	21.9	22.0	23.1
30	23.6	23.2	22.8	22.6	22.0	21.9	22.0	23.0
40	23.6	23.2	22.8	22.6	22.0	21.9	22.0	23.2
50	23.6	23.2	22.8	22.6	22.0	21.9	22.0	23.2
60	23.6	23.2	22.7	22.6	22.1	21.9	22.0	23.2
70	23.6	23.3	22.8	22.6	22.1	21.9	22.0	23.2
80	23.6	23.2	22.8	22.6	22.2	22.0	22.1	23.0
90	23.8	23.3	22.9	22.7	22.1	21.9	22.0	23.0
100	23.8	23.3	22.9	22.7	22.2	21.9	22.0	23.1
110	23.8	23.3	22.9	22.7	22.2	21.9	22.0	23.2
120	23.7	23.2	22.8	22.6	22.3	21.9	22.0	23.1
130	23.9	23.3	22.9	22.6	22.3	21.9	22.1	23.2
140	24.0	23.3	22.9	22.7	22.3	21.9	22.0	23.1
150	23.8	23.2	22.7	22.6	22.4	21.9	22.1	23.1
160	23.9	23.3	22.8	22.6	22.4	22.0	22.1	23.0
170	23.9	23.2	22.7	22.6	22.6	22.1	22.1	23.1
180	24.0	23.3	22.8	22.6	22.6	22.1	22.2	23.0
190	24.1	23.3	22.9	22.7	22.5	22.0	22.1	23.0
200	24.0	23.3	22.8	22.6	22.6	22.2	22.2	23.0
210	24.1	23.3	22.9	22.7	22.6	22.2	22.2	23.0
220	24.1	23.3	22.8	22.6	22.8	22.2	22.2	23.0
230	24.2	23.3	22.9	22.7	22.8	22.1	22.1	23.0
240	24.2	23.3	22.9	22.7	22.9	22.2	22.2	23.0
250	24.3	23.4	22.9	22.6	22.9	22.1	22.1	23.1
260	24.4	23.4	22.9	22.7	23.0	22.2	22.2	23.1
270	24.5	23.4	22.9	22.7	23.0	22.1	22.1	23.0
280	24.6	23.4	22.9	22.6	23.3	22.2	22.2	23.0
290	24.9	23.4	22.9	22.7	23.6	22.3	22.2	23.1
300	25.0	23.4	22.9	22.7	23.9	22.2	22.2	23.1

(本研究整理)

第六章 結論與建議

第一節 結論

本研究針對實尺寸鋼構實驗屋 H 型鋼邊柱之火害實驗可得到以下結論：

- 一、 本研究主要探討鋼構實驗屋中之邊柱於真實火災下之結構行為，由所蒐集的溫度和位移數據，對於瞭解邊柱與其他構件之間相互束制有所幫助。例如高溫中邊柱在弱軸方向水平位移受到大梁影響，其行為相當複雜，軸向變形則為伸張收縮與高溫爐所進行鋼柱標準試驗現象一致，但標準試驗無法完整呈現真實鋼柱的受力情況與束制條件，爰有關鋼柱於真實束制及真實火害中之結構反應與行為，實有必要做進一步研究。
- 二、 本次火害實驗的火載量密度為 604 MJ/m^2 ，邊柱位移未超過 CNS 12514-1 標準之承重能力規定值。
- 三、 經由邊柱在弱軸方向水平位移量測結果，發現邊柱將會因 P- Δ 效應而在火害中後受到二次彎矩作用。
- 四、 本次火害實驗邊柱於弱軸方向之水平位移最大值皆發生在該斷面達到最高溫之後，0.9H 處為 4.12 mm 向西(實驗區外側)，其平均斷面溫度為 520°C ，0.6H 處為 3.68 mm 向西(實驗區外側)，其平均斷面溫度為 638°C ，0.3H 處為 1.25 mm 向西(實驗區外側)，其平均斷面溫度為 603°C 。
- 五、 本研究已初步完成彙集整理 105 年起所進行之實尺寸鋼構屋火害實驗數據資料庫，其內容包含歷次實尺寸鋼構屋火害實驗目的與規劃、歷次實驗的溫度與位移量測位置圖及歷次實尺寸鋼構屋火害實驗之各構件的溫度與位移數據，以圖形及表格呈現。
- 六、 本次(108 年)分別將實驗區開口寬度縮減至 4.70m；高度縮減至 1.0m，閃燃時間與第 2、3 次實驗發生時間相當，於 470 秒時發生，1360 秒時，室內總平均溫度達到高峰約 833.8°C ，較第 1 至 3 次低約 100°C ，火害初期升溫速率與第 2、3 次實驗相似，顯見真實火災實驗目前仍難以控制及預測，使得每次實驗之火場溫度一致，火場的燃燒行為受到諸多因素影響，每次實驗之溫度時間曲線在線形與火災歷程皆有所差異。

- 七、 邊柱在不同高程下之各測溫點溫度相差不大，顯示出鋼材良好的熱傳導性。其各斷面的最高溫度： $0.6H$ 斷面最高溫 $> 0.3H$ 斷面最高溫 $> 0.9H$ 斷面最高溫。

第二節 建議

建議一

承受高載重比鋼柱之真實火害研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

經由實尺寸鋼構屋鋼柱火害實驗，發現鋼柱所受載重比在高溫中對鋼柱耐火性能影響甚巨，限於鋼構屋加載設備無法完整提供真實鋼柱的受力情況，建議可設計不同重量載重塊進行加載實驗，增加鋼構屋鋼柱所受載重比，更能反映真實條件，以了解載重比對鋼柱在真實火害中的耐火性能影響。

附錄一 審查會議紀錄

(一)、期初審查會議紀錄與回應

審查意見	研究回應
1. 本案除參考英國 Cardington 實尺寸鋼構架屋火害實驗數據資料庫格式建立外，建議規劃如何運用資料庫，以增加實驗室之收入。 2. 本案研究經費編列似乎偏低，請補充說明原由。	1. 遵照辦理。 2. 本研究與 108 年該委託研究團隊合作，經費編列尚屬合理。

(二)、期中審查會議紀錄與回應

審查意見	研究回應
鄭教授復平： 1. 結構設計為兩層樓，但試驗只有一層，柱軸重偏低，如可能，建議加載重。 2. 位移計設置位置建議儘可能在 A 區及 B 區，涵蓋可能影響邊柱的梁。 3. 火源是否考慮先在柱邊燃燒。	1. 謝謝指教，本研究載重限於經費，無法模擬 2 層樓的載重來進行加載，將透過數值模擬分析比較。 2. 謝謝指教，位移計數量有限，鋼柱位移量測位置係參考數值模擬分析，發現弱軸位移較大，以弱軸為主進行佈設。 3. 謝謝指教，本案火源已與委託研究案團隊討論，為求與之前火害實驗一致，仍參考前例進行實驗。
鍾教授興陽： 1. 水平位移的量測為本實驗的重點，應注意其位移計的安裝。 2. 未來可用數值模擬，補足邊柱載重比的火害行為差異。	1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。
柯教授佑沛： 本計畫設置實尺寸鋼構屋進行實驗，但此鋼構屋只有一個樓層的結構體，立柱所受負載與實際建築物大不相同，建議設法增加負載以接近實況，或是數值分析時加以考量與實況的差異，進行修正。	謝謝指教，本研究載重限於經費，無法模擬 2 層樓的載重來進行加載，將透過數值模擬分析比較。
李教授訓谷： 本案期中完成項目符合預期成果需求。	謝謝肯定。

張建築師尚文： 1. 研究成果符合預期。 2. 如有防火被覆，宜控管厚度品質，如無防火被覆，亦符合建築技術規則第 70 條工廠以不燃材料之規定，可以探討工廠火害倒塌議題。	1. 謝謝肯定。 2. 謝謝指教，本案係探討無防火被覆鋼柱火害行為及辦公住宅，有關工廠火害倒塌議題可納入後續研究。
梁教授漢溪(書面意見)： 1. 本研究因與 108 年委辦案相互配合，對於配合內容、資料分析、採用方法可予以描述。 2. 由報告書第 27 頁之圖 3.19 實驗區配置圖及第 25 頁火害實驗加載圖中，均無邊柱呈現，只有角柱，應加以釐清。	1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理，已於報告書修正。
中華民國全國建築師公會 楊建築師勝德： 載重加載應符合設計要求。	謝謝指教，本研究載重限於經費，無法模擬 2 層樓的載重來進行加載，將透過數值模擬分析比較。
台北市結構工程工業技師公會 王技師森源： 建議增加鋼柱水平位移量測點，有助於了解鋼柱結構行為。	謝謝指教，位移計數量有限，鋼柱位移量測位置係參考數值模擬分析，發現弱軸位移較大，以弱軸為主進行佈設。
蔡研究員銘儒： 1. 邊柱左側僅 1 m 空間，火熱效應應注意。 2. 火載量分布對邊柱之效應宜作探討。 3. 未來實驗規劃可考量瓦斯燃燒器模擬火災成長。	1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。 3. 遵照辦理。

(三)、期末審查會議紀錄與回應

審查意見	研究回應
鄭教授復平： 1. 建議實驗屋提高至 3 層以上。 2. 如果可行將 H 型鋼柱改成箱型鋼柱。 3. 混凝土板上面建議加熱電偶及變形位移計。 4. 建議鋼柱大小分 3 種模擬高層、中層及低層。 5. 建議加載模擬實際情況。 6. 作熱流分析數值研究。	1. 謝謝指教，有關實驗屋提高至 3 層以上可納入後續研究。 2. 謝謝指教，H 型鋼柱改成箱型鋼柱可納入後續研究。 3. 謝謝指教，未來進行實驗時將納入考量。 4. 謝謝指教，有關鋼柱尺寸分 3 種模擬高層、中層及低層課題可納入後續研究。 5. 謝謝指教，本研究加載模擬已請委託研究案團隊進行數值模擬分析比較。 6. 謝謝指教，有關熱流分析數值研究將納入後續研究。
方教授一匡： 1. 本實尺寸鋼構屋之測試資料蒐集豐碩，火場的溫度控制與 CNS 12514 的標準升溫曲線有很好的關聯性，有助於後續數值模擬的參考。 2. 建議有後續計畫整合本年度邊柱的測試成果與往年的測試結果，討論相關構件的高溫行為差異性及其可能的原因。 3. 建議在後續計畫根據近幾年的研究成果提出施工或設計應注意之事項，以供業界實務應用之參考。	1. 謝謝肯定。 2. 謝謝指教，本研究將持續彙整實驗屋火害實驗資料，討論相關構件的高溫行為差異性及其可能的原因。 3. 謝謝指教，本研究將持續彙整實驗屋火害實驗資料，供業界應用參考。

梁教授漢溪： 1. 報告書第 38 頁之柱剖面應該是角柱示意非邊柱(比對簡報第 10 頁)。 2. 變形量之分析是否可與實驗載重予以探討。 3. 結論第 4 點談多個斷面之平均溫度，其現象可加以推論。	1. 謝謝指教，已於報告書修正。 2. 謝謝指教。 3. 謝謝指教。
張建築師尚文： 1. 研究符合預期成果需求。 2. 結論與建議可以考慮再依預期成果目標來整理。 3. 歷次專家建議與回應，可考量納入。 4. 可以考慮在鋼結構設計規範增列鋼構防火專節之可能性，納入後續研究。 5. 考慮修正技術規則建築設計施工編 69 條防止工廠火災倒塌，例如修正 69 條但書工廠建築應為不燃材料，改為工廠建築結構應有 1 小時防火時效。	1. 謝謝肯定。 2. 謝謝指教。 3. 謝謝指教，已於報告書補充。 4. 謝謝指教。 5. 謝謝指教。
中華民國全國建築師公會 楊建築師勝德： 1. 鋼構火害與溫度有直接關係，柱實驗發生在 0.3-0.6H 高度之應力降低很多，值得警惕。若能與柱應力圖比對，更能了解鋼構防火的重要性。 2. 有需要進一步作載重達 0.5 fa (容許應力)狀況下之火害實驗。 3. 廠房大多為大跨距低載重，未來可進行標準跨距(10m 左右)高載重之不同狀況的火害行為比較，則報告將更有說服力。	1. 謝謝指教。 2. 謝謝指教，本研究載重限於經費，無法模擬 0.5 fa (容許應力)狀況下進行加載，將透過數值模擬分析比較。 3. 謝謝指教，納入後續研究。

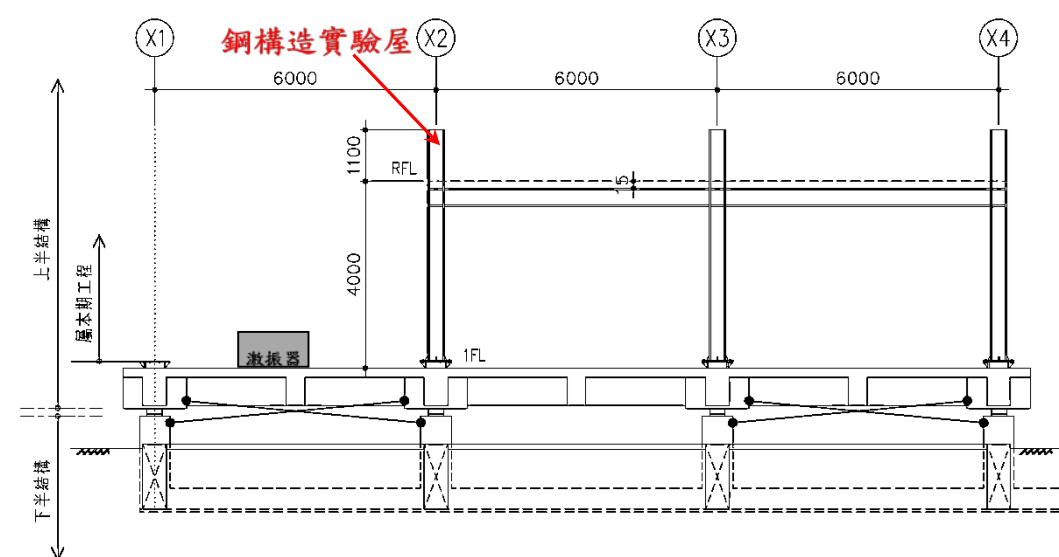
實尺寸鋼構屋邊柱之火害結構行為研究

中華民國結構工程技師公會全國聯合會 陳技師正平： 柱水平位移方向及位移量的實驗結果，與一般實際火場之水平位移現象明顯不同，建議探討原因。	謝謝指教，將與委託研究案團隊探討原因。
主席 蔡組長綽芳 建議未來可將火場煙層下降速度納入觀察與紀錄。	有關火場煙層觀察與紀錄，實驗中心之前已有些實驗及紀錄資料，未來進行實驗屋火害實驗時，將觀察與紀錄煙與燃燒行為，以供後續相關研究之參考。

附錄二 本研究試體設計資料[40]

本計畫所興建的上部結構設施，即實尺寸鋼構造實驗屋本體係以 2 跨×2 跨、9 根柱子、每跨 6m 的兩層樓鋼構屋所受之載重與外力進行結構設計，再以此結構設計結果，取其第一層樓之梁、柱、版，興建一層樓的實尺寸鋼構實驗屋。

本研究團隊中的專業技師依照國內建築法規、鋼結構規範、耐震規範以及國內常用之鋼構建築型式，所設計之一層樓鋼構實驗屋的立面圖與平面圖如圖 A1 與圖 A2 所示，此鋼構造實驗屋為 2 跨×2 跨的一層樓建築，樓層高度 4m，其平面 X 方向有 2 跨，每跨 6m，總長 12m，其平面 Y 方向有 2 跨，每跨 6m，總長 12m。所有鋼柱下端底板將以高強度錨定螺栓固定於上半結構 RC 底座，鋼柱上端將延伸至一樓頂版上方 1.1m 處，以利後續增建與加載之用。此一層樓鋼構實驗屋之梁、柱、版構件尺寸如表 A1 所示。



圖A1 上部結構設施所規畫一層樓鋼構造實驗屋之立面設計圖(參考書目[40])

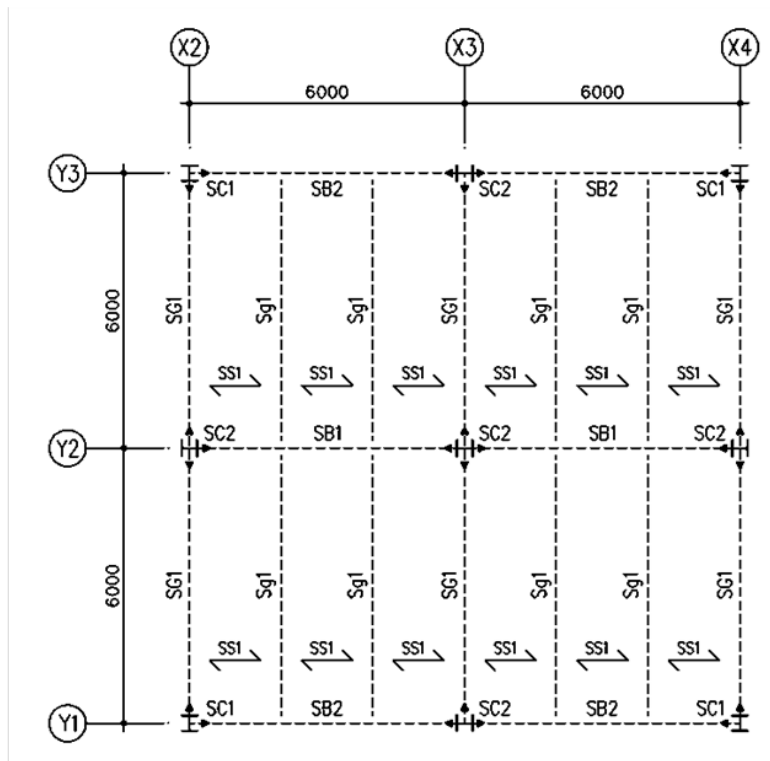


圖 A2 上部結構設施所規畫一層樓鋼構造實驗屋之平面設計圖(參考書目[40])

表 A1 壹層樓鋼構造實驗屋之構件尺寸

構件	編號	構件尺寸(mm)	材質
柱	SC1	RH-300×300×10×15	CNS SN490B 或同等級鋼材
	SC2		
梁	SB1	RH-390×300×10×16	CNS SN490B 或同等級鋼材
	SB2	RH-400×200×8×13	CNS SN490B 或同等級鋼材
	SG1	RH-294×200×8×12	CNS SN490B 或同等級鋼材
	Sg1	RH-300×150×6.5×9	CNS SN490B 或 A572 或同等級鋼材
版	SS1	t = 150	
備註	上半實驗屋係以 2F 建物分析所得斷面， 本階段僅取地上一層樓梁柱結構。		

(參考書目[40])

參考書目

1. 朱聖浩、鍾興陽、朱世禹、施健泰，「實尺寸鋼構屋之剪力連接複合鋼梁火害結構行為研究」，內政部建築研究所委託研究計劃成果報告，臺北，2016。
2. 李其忠，「實尺寸鋼構屋之混凝土鋼承板火害下承重行為研究」，內政部建築研究所自行研究計劃成果報告，臺北，2016。
3. 朱聖浩、鍾興陽、朱世禹、施健泰，「實尺寸鋼構屋彎矩連接與剪力連接鋼梁之火害結構行為研究」，內政部建築研究所委託研究計劃成果報告，臺北，2017。
4. 李其忠，「實尺寸鋼構屋火害後修復混凝土鋼承板之耐火行為研究」，內政部建築研究所自行研究計劃成果報告，台北，2017。
5. 朱聖浩、鍾興陽、朱世禹、施健泰，「實尺寸鋼構屋切削減弱式接頭鋼梁(RBS)與梁柱接頭之火害結構行為研究」，內政部建築研究所委託研究計劃成果報告，臺北，2018。
6. 李其忠，「剪力釘對混凝土鋼承板耐火性能影響之研究」，內政部建築研究所自行研究計劃成果報告，臺北，2018。
7. 鍾興陽、朱聖浩、施健泰，「實尺寸鋼構屋角柱之火害結構行為研究」，內政部建築研究所委託研究計劃期中報告，臺北，2019。
8. CNS 12514-1，「建築物構造構件耐火試驗法—第 1 部：一般要求事項」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗局，2014。
9. CNS 12514-7，「建築物構造構件耐火試驗法—第 7 部：柱特定要求」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗局，2014。
10. Eurocode 3 (2005b). “Design of steel structures, Part 1.2, General rules - Structural fire design” Eurocode 3 DD ENV 1993-1-2 : 2005, British Standards Institution, London.
11. “Behaviour of Steel Framed Structures under Fire Conditions,” Main Report, DETR-PIT Project, School of Civil and Environmental Engineering, University of Edinburgh, 2000.
12. O'Connor, M. A. and Martin, D. M., “Behaviour of a Multi-Storey Steel Framed Building Subjected to Fire Attack,” Journal of Constructional Steel Research, Vol.

- 46, 1998, pp.295.
13. O'Connor, M. A., Kirby, B. R., Martin, D. M. , “ Behaviour of a multi-storey composite steel framed building in fire,” *Structural Engineering*, Vol. 81, No. 30, 2003, pp. 27-36.
 14. Wald, F., Simões da Silva, L., Moore, D. B., Lennon, T., Chladná, M., Santiago, A., Beneš, M., Borges, L., “Experimental Behaviour of a Steel Structure under Natural Fire,” *Fire Safety Journal*, Vol. 41, Issue 7, pp. 509-522
 15. Foster, S., Chladná, M., Hsieh, C., Burgess, I., Planck, R. , “ Thermal and structural behaviour of a full-scale composite building subject to a severe compartment fire,” *Fire Safety Journal*, Vol. 42, Issue 3, 2007, pp. 183-199.
 16. Gillie, M., Usmani, A. S., Rotter, J. M. , “ A structural analysis of the Cardington British steel corner test,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, Issue 4, 2002, pp. 427-442.
 17. Bailey, C. G., White, D. S., Moore, D. B. , “ The tensile membrane action of unrestrained composite slabs simulated under fire conditions,” *Engineering Structures*, Vol. 22, Issue 12, 2000, pp. 1583-1595.
 18. Bailey, C. G. , “ Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire,” *Engineering Structures*, Vol. 26, Issue 12, 2004, pp. 1691-1703.
 19. Full-Scale Structural and Nonstructural Building System Performance during Earthquakes & Post-Earthquake Fire.<http://nees.ucsd.edu/projects/2011-five-story/>
 20. Dong, Y. L., Zhu, E. C., Prasad, K., “ Thermal and structural response of two-storey two-bay composite steel frames under furnace loading,” *Fire Safety Journal*, Vol. 44, 2009, pp. 439-450.
 21. Dong, Y. L. and Zhu, C. J. , “ Limit load carrying capacity of two-way slabs with two edges clamped and two edges simply supported in fire,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, Issue 10, 2011, pp. 1182-1192.
 22. Yang, Z. N., Dong, Y. L., Xu, W. J., “Fire tests on two-way concrete slabs in a full-scale multi-storey steel-framed building,” *Fire Safety Journal*, Vol. 58, 2013, pp. 38-48.
 23. Wang, Y., Dong, Y. L., Li, B., Zhou, G. C., “A fire test on continuous reinforced concrete slabs in a full-scale multi-story steel-framed building,” *Fire Safety Journal*, Vol. 61, 2013, pp. 232-242.
 24. Li, B., Dong, Y. L., Zhang, D. S., “Fire behaviour of continuous reinforced concrete slabs in a full-scale multi-storey steel-framed building,” *Fire Safety*

- Journal, Vol. 71, 2015, pp. 226-237.
25. Lou, G. B., Wang, C. G., Jiang, J., Jiang, Y. Q., Wang, L. W., Li, G. Q., "Fire tests on full-scale steel portal frames against progressive collapse," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 145, 2018, pp.137-152.
26. Lou, G. B., Wang, C. G., Jiang, J., Jiang, Y. Q., Wang, L. W., Li, G. Q., "Experimental and numerical study on thermal-structural behavior of steel portal frames in real fires," Fire Safety Journal, Vol. 98, 2018, pp. 48-62.
27. Ali, F. A., O'Connor, D. J., "Calculation of axial forces generated in restrained pinended steel columns subjected to high temperatures," Journal of Applied Fire Science, Vol. 6, 1997, pp. 383-394.
28. Ali, F. A., Shepherd, P., Randall, M., "Effect of axial restraint on the fire resistance of steel columns," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46, 1998, pp. 305-306.
29. Rodrigues, J. P. C., Neves, I. C., Valente, J. C., "Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation," Fire Safety Journal, Vol. 35, 2000, pp. 77-98.
30. Wang, Y. C., Davies, J. M., "An experimental study of non-sway loaded and rotationally restrained steel column assemblies under fire conditions: Analysis of test results and design calculations," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, 2003, pp. 291-313.
31. Wang, Y. C., Davies, J. M., "An experimental study of the fire performance of nonsway loaded concrete-filled steel tubular column assemblies with extended endplate connections," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, 2003, pp. 819-838.
32. Wang, Y. C., Davies, J. M., "Fire tests of non-sway loaded and rotationally restrained steel column assemblies," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, 2003, pp. 359-383.
33. Tan, K. H., Toh, W. S., Huang, Z. F., "Structural responses of restrained steel columns at elevated temperatures. part 1: Experiments," Engineering Structures, Vol. 29, 2007, pp. 1641-1652.
34. Huang, Z. F., Tan, K. H., "Structural response of restrained steel columns at elevated temperatures. part 2: simulation with focus on experimental secondary effects," Engineering Structures, Vol. 29, 2007, pp. 2036-2047.
35. Dwaikat, M. M. S., Kodur, V. K. R., Quiel, S. E., Garlock, M. E. M.,

- “ Experimental behavior of steel beam-columns subjected to fire-induced thermal gradients,” Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, 2011, pp. 30–38.
- 36.李鴻欣，「H 型鋼柱高溫局部挫屈行為研究」，國立高雄第一科技大學營建工程所碩士論文，2004。
37. 許睿佳，「SN490 銲接H型鋼柱高溫結構行為研究」，國立高雄第一科技大學營建工程所碩士論文，2007。
- 38.CNS 1387，「消防-手提滅火器-性能及構造」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗局，2015。
- 39.CNS 1387，「消防-手提滅火器-性能及構造」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗局，2003。
- 40.朱聖浩、朱世禹、施健泰，「複合性災害實驗用實尺寸鋼構屋結構行為研究」，內政部建築研究所委託研究計劃成果報告，臺北，2015。