

實尺寸鋼構架屋區劃空間之真實火害燃燒行為初探

The Preliminary Investigation for the Natural Fire Combustion Behaviors in the Compartments of the Full-Scale Steel Experimental Building

李其忠¹ 鍾興陽² 趙翊翔³ 卓俊成³ 郭彥廷⁴ 陳博政⁴ 陳嘉倫⁴ 朱聖浩⁵ 蔡銘儒⁶ 蔡綽芳⁷

¹ 內政部建築研究所副研究員

² 成功大學土木工程學系副教授 hychung@mail.ncku.edu.tw

³ 成功大學土木工程學系碩士

⁴ 成功大學土木工程學系碩士生

⁵ 成功大學土木工程學系特聘教授

⁶ 內政部建築研究所防火實驗中心主任

⁷ 內政部建築研究所安全防災組組長

摘要

我國建築物結構用構件(如梁與柱)耐火性能試驗是依據 CNS 12514-1「建築物構造構件耐火試驗法—第 1 部:一般要求事項」進行,其加熱條件為均勻升溫,與實際火災不同,火災會因起火方式、延燒速度及延燒模式,使得火場的溫度分佈有相當大差異,因此,對建築物構造亦有不同程度的傷害,使得建築物火害後的結構強度呈現非均勻性變化。最佳的評估方式應該是在實際火災場景的情況下,利用實尺寸火災實驗來加以驗證。本研究以實尺寸鋼構架屋進行真實火災實驗,針對所擬空間型態與火災情境,進行火場實驗觀測,探討火災(引燃、延燒、閃燃、熄滅)歷程,火場溫度之變化。實驗結果發現 2 次火害實驗皆在溫度超過 850℃ 後,升溫速率會趨緩,可能是受到火載量與開口尺度之影響,使火場條件控制在此條件下。真實火災實驗目前仍難以控制及預測,難以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,實驗之溫度時間曲線在線形與火災歷程皆有所差異。

關鍵字: 實尺寸鋼構架屋、真實火災、高溫

Abstract

In our country, the fire resistance tests for structural members (such as beams and columns) of buildings are based on CNS 12514-1. The heating condition, which is uniform temperature elevation, is different from the actual fire condition. Due to ignition method, fire spreading speed and fire burning mode, the temperature distributions of fires have considerable differences. As a result, the building structures also have different degrees of damage, and the post-fire structural strengths of a building show non-uniform variation. The best way to evaluate the fire resistance of building structures should utilize full-scale fire tests in the condition of natural fire. In this study, the natural fire experiments were carried out using a full-scale steel experimental building. The fire test observations were carried out for the proposed space type and fire scenario, and the fire (ignition, growth, flashover, extinction) histories and the fire temperature variations were discussed. The two fire test results show that the temperature elevation rate slowed down after the temperature exceeded 850°C. The reason may be due to the fire load and the opening scale. The natural fire test was difficult to control and predict. Therefore, it was difficult to have the same temperature for each fire. The combustion behavior of a natural fire was affected by many factors, and the temperature-time curves and fire histories of the two fire test were different as well.

Keywords: full-scale steel experimental building, natural fire, high temperature

一、前言

鋼構造因輕量、耐震性佳及具循環利用之綠色環保特性，成為大型集合式住宅或商業辦公大樓的主流，然而鋼材在高溫下有強度折減的缺點，如 911 事件及東方科學園區鋼構大樓火災，造成建築物嚴重損壞，危及人命安全與財產損失，有必要進行鋼構造建築的火害影響研究。

國內外鋼構造建築受火害的結構行為實驗與研究，大多著重在單獨構件，研究有關柱、梁、樓板、接頭等於火害中結構行為，我國有關建築物構件的耐火性能試驗，主要依據 CNS 12514-1「建築物構造構件耐火試驗法—第 1 部：一般要求事項」[1] 進行，將單獨構件以標準升溫曲線加熱，藉以評估此單獨構件之耐火時效與其在火害下之結構行為與破壞模式，然而，此種耐火試驗方法與實際建築結構受火害侵襲時，其內部構件的耐火行為是否有所不同，值得做更深入之研究，通常實際建築的構件皆相互連接與接合，因此單獨構件的耐火試驗方法無法反映此種實際構件的邊界條件，此外，實際建築受到火害侵襲時，不同的延燒方式與延燒速度將造成建築內部空間熱流場分布之變化，因而對建築構件所受到的火害溫度分布造成影響，此與單獨構件以標準升溫曲線加熱的耐火試驗方法不同。因此，最符合實際建築構件的火害評估方式應該是在真實火災場景下，利用實尺寸實驗屋進行火災實驗來加以驗證與評估。

英國 BRE (British Research Establishment) 在 Cardington 建造八層樓實尺寸鋼構架屋[2-6]，並於 1993 年至 2003 年間進行總共 7 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，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。內政部建築研究所於 104 年完成建置實尺寸鋼構架屋，並在 105 年至 106 年進行 3 次實尺寸鋼構架屋區劃空間之真實火害實驗[7,8]，本文以前兩次的真實火災實驗，針對所擬空間型態與火災情境，進行火場實驗觀測，探討火災（引燃、延燒、閃燃、熄滅）歷程，火場溫度之變化。

二、試驗規畫

2.1 試體設計

本研究實尺寸鋼構實驗屋為一層樓 2 跨×2 跨，樓高 4 m，每跨 6 m，總長 12 m，計有 9 支鋼柱。每個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 1 樓頂版上方 1.1 m，如圖 1 所示，鋼構實驗屋之鋼梁與鋼柱皆採用 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。本文討論的實尺寸鋼構屋火害實驗區域為第 1 次火害實驗(105 年 11 月 29 日)與第 2 次火害實驗(106 年 5 月 4 日)，如圖 2 所示。



圖1 實尺寸鋼構實驗屋

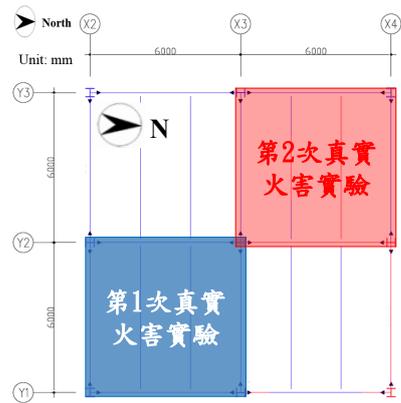


圖2 真實火害實驗位置

2.2 火害實驗區熱電偶樹配置

藉由熱電偶樹的配置以瞭解火害實驗區間溫度的分布及傳遞，熱電偶樹配置分成 2 種，一種為配置在鋼承板下方，另一種則配置於小梁下，其中配置於鋼承板下的熱電偶樹因其垂直高度較配置於小梁的長，故其熱電偶數量較多。火害實驗區的熱電偶樹配置，以第 1 次火害實驗為例，如圖 3 所示，配置於小梁下的熱電偶樹有 6 個，每個 9 點，配置於鋼承板下的熱電偶樹有 3 個，每個 10 點，各個斷面的佈設如圖 4 至圖 5 所示。火害實驗區佈設的熱電偶總計 84 點。

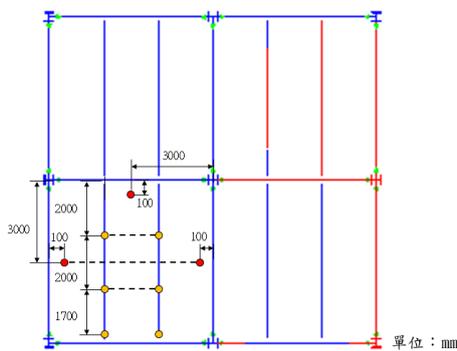


圖3 熱電偶樹配置平面圖

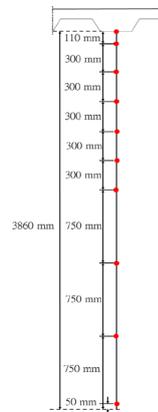


圖4 鋼承板下熱電偶樹配置圖

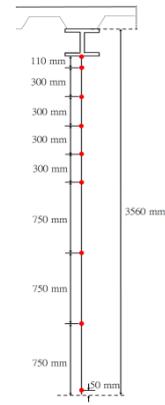


圖5 小梁下熱電偶樹配置圖

2.3 火害實驗區之隔間

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。

2.4 試驗火載量設計

本研究為探討真實火害(Natural Fire)對鋼構實驗屋之結構行為影響，而真實火害實驗與標準試驗爐以瓦斯燃燒進行加熱不同，經參考國內外真實火害相關研究後，以木材作為燃料，後續將針對本實驗火載量進行說明。

2.4.1 木燃料熱釋放率試驗

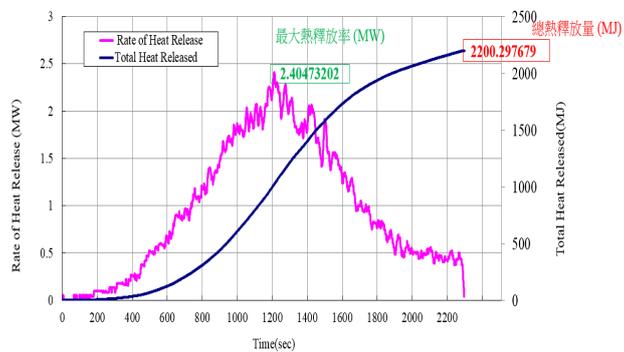
為瞭解火害實驗之木燃料的熱釋放量，以供試驗時火場溫度時間評估，分別進行單堆與雙堆木燃料的熱釋放試驗，觀察與分析木燃料之熱釋放率及總熱釋放量之關係，藉以獲得木燃料之燃燒行為與設計參數。

2.4.1.1 單堆木燃料熱釋放試驗

單堆實驗之木材總重量約為 140 公斤重，其熱釋放率曲線如圖 6(b)所示，在燃燒時間約 20 分鐘後達到最大熱釋放率(2.4 MW)，總熱釋放量為 2200 MJ，單堆木燃料單位重之熱釋放量為 15.7 MJ/kg。



(a) 單堆木燃料燃燒照片



(b) 單堆木燃料熱釋放率曲線

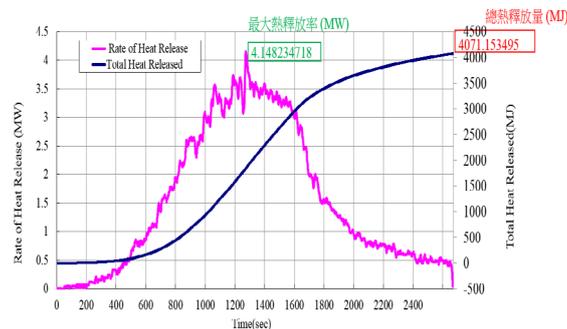
圖 6 單堆木燃料熱釋放試驗

2.4.1.2 雙堆木燃料熱釋放試驗

雙堆實驗之木材總重量約為 280 公斤重，其熱釋放率曲線如圖 7(b)所示，在燃燒時間約 21 分鐘後達到最大熱釋放率(4.1 MW)，總熱釋放量為 4071 MJ，雙堆木燃料單位重之熱釋放量為 14.5 MJ/kg。



(a) 雙堆木燃料燃燒照片



(b) 雙堆木燃料熱釋放率曲線

圖 7 雙堆木燃料熱釋放試驗

兩次的木燃料熱釋放率實驗結果，發現以酒精膏引燃木堆大約需要 1 至 2 分鐘，且從熱釋放率曲線圖可觀察兩者趨勢相同，燃燒時間約在 20 分鐘達到最旺盛，燃燒歷時約 40 分鐘火勢幾乎湮滅。將兩次木燃料熱釋放率實驗平均，可獲得本研究木材(阿拉斯加雲杉)之熱釋放量約為

15.1 MJ/kg。

2.4.2 木燃料設計

經由木燃料熱釋放率實驗及參考英國 BRE (Building Research Establishment) 於 Cardington 進行之第七次實尺寸鋼結構火害實驗之配置，本研究火載量設計為 40 kg/m^2 。另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) [9]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 8 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 9 及圖 10 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) [10]，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) [9]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。

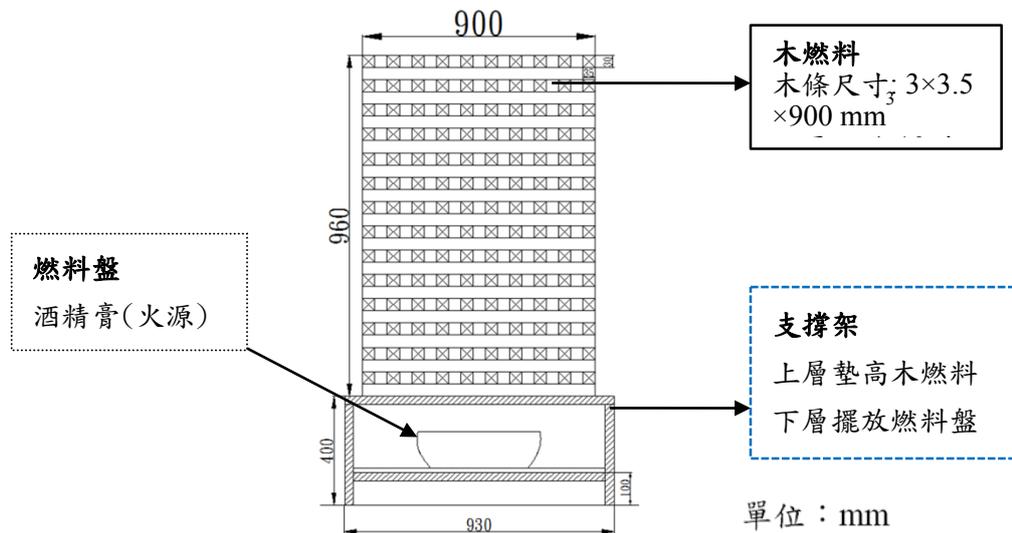


圖 8 木燃料堆構造圖

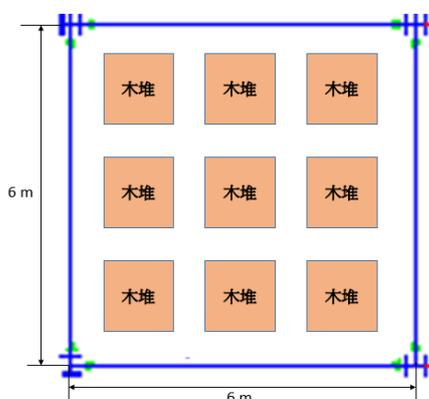


圖 9 火害實驗區木燃料堆配置示意圖



圖 10 火害實驗區木燃料堆與熱電偶樹照片

2.5 火場模擬時間溫度曲線

本研究為瞭解真實火場溫度變化趨勢，預先以 Eurocode 1[11]建議升溫曲線來進行溫度模擬預估，其公式如下：

1、升溫階段：

$$\theta = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) \quad (2-1)$$

式中

θ ：火場溫度(°C)

$$t^* = t \times \Gamma \quad (2-2)$$

t ：時間(小時)

$$\Gamma : \text{時間因子} \left(= \frac{[F_v/b]^2}{(0.04/1160)^2} \right) \quad (2-3)$$

b ：區域邊界材料之熱慣量(= $\sqrt{(\rho ck)}$)， $100 \leq b \leq 2200$ (J/s^{1/2}m²°C)

F_v ：開口因子(= $A_v \sqrt{h_{eq}}/A_t$)， $0.02 \leq F_v \leq 0.2$ (m^{1/2})

ρ ：區域邊界材料之密度 (kg/m³)

c ：區域邊界材料之比熱 (J/kg°C)

k ：區域邊界材料之熱傳導係數 (W/m°C)

A_v ：垂直開口之總面積 (m²)

h_{eq} ：開窗高度之加權平均(= $(\sum_i A_{v,i} h_i)/A_v$)

A_t ：區域內之總面積 (m²)

2、降溫段：

$$\theta = \theta_{max} - 625(t^* - t_{max}^*) \quad , t_{max}^* \leq 0.5 \quad (2-4)$$

$$\theta = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^*) \quad , 0.5 < t_{max}^* < 2.0 \quad (2-5)$$

$$\theta = \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^*) \quad , t_{max}^* \geq 2.0 \quad (2-6)$$

式中

θ_{max} ：升溫段之最高溫度(°C)

t_{max}^* ：最高溫度發生之時間(小時)

$$t_{max}^* = \text{maximum of} \left(0.2 \times 10^{-3} \times \frac{e_t}{F_v} \right) \text{ or } (t_{lim}) \quad (2-7)$$

$$e_t : \text{設計燃料能量密度(對於區劃內總表面積)} = e_f \times A_f / A_t \quad (2-8)$$

t_{lim} ：火場最小燃燒時間

本研究火害實驗區的開口為 1.73 m，開口因子 $F_v=0.0798$ ，火載量為 40 kg/m²，且於區劃空間邊界上使用了三種材料，分別為鋼承板、混凝土樓板、ALC 輕質磚牆，可分別計算出其熱慣量($b_1=1120$, $b_2=1694.33$, $b_3=334.96$)，再依照各材料所佔之面積加權平均算出區劃空間之總熱慣量 b ，計算如下：

$$b = \frac{1694.33 \times 36 + 334.96 \times 87.6 + 1120 \times 36}{36 + 87.6 + 36} = 818.7 \text{ (J/m}^2 \text{ s}^{0.5} \text{ K)}$$

將上述數值代入公式(2-1)及(2-2)，可得火場模擬時間溫度曲線升溫階段，然而，根據 EN-1991-1-2 所表示公式(2-1)僅適用於火場衰減期前使用，火場衰減期係指火場氣溫到達全歷程最高溫度 Θ_{max} 以後之歷程，而到達 Θ_{max} 之時間為 t_{max} ，其估算方法如公式(2-7)及(2-8)所示(式中 t_{lim} 為火場最小燃燒時間=20 分鐘)，再將 t_{max} 代入公式(2-1)即可獲得 Θ_{max} ，之後便可依條件代入公式(2-4)至(2-6)，獲得火場模擬時間溫度曲線降溫段，如圖 11 所示。本研究火場溫度預測約於 20 分鐘時達到最高 1093 °C，因此火場於 20 分鐘後至結束這段歷程即稱為火場衰減期，而火災總歷時約 53 分鐘。由此溫度曲線可預測出實驗區火場屬於通風充足之燃料控制型燃燒，其特點為溫度上升之速度非常迅速，火場總歷時不長。

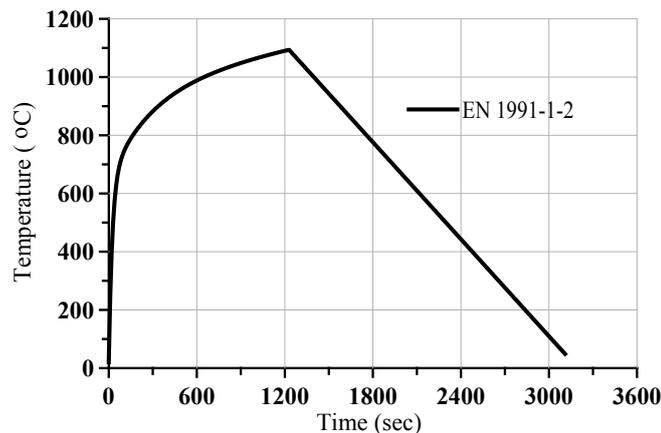


圖 11 火場模擬時間溫度曲線

三、結果與討論

3.1 火害實驗觀察

第 1 次實尺寸鋼構實驗屋之真實火害實驗於 105 年 11 月 29 日進行，如圖 12 所示，實驗當日為晴天，風向為北風，室溫 25 °C，相對溼度為 68 %，木條含水率約為 16%。本實驗以第一堆木燃料之酒精膏點燃為點火開始，即第 0 秒。3 分 37 秒，室內白色煙霧開始從開口處飄散至戶外；4 分 45 秒可見室內有火焰，但是室內火場分佈不均勻，明顯看到北側火焰，然而南側木燃料則無動靜；6 分 33 秒北側火焰高度已達到鋼承板，南側火焰則於 12 分 53 秒才可見；閃燃(以室內平均溫度 600 °C 為閃燃發生的判定)約於 16 分 19 秒時發生，室內所有可燃物呈現燃燒狀態，火勢成長快速；閃燃後大火持續旺盛燃燒並伴隨著濃密黑煙，30 分 04 秒時發現北側牆面上之觀測窗玻璃受高溫融化；32 分 29 秒，火勢明顯開始減小，煙量亦隨之減少，可以觀測實驗區內情況；41 分 30 秒，開口高度以上已無法看見火焰，50 分，僅剩木材灰燼中有零星的火苗燃燒。

第 2 次真實火害實驗於 106 年 5 月 4 日進行，如圖 13 所示，實驗當日為晴天，風向南風，氣溫 34 °C，相對溼度 58 %，木條含水率約為 11.19%。本次實驗在點燃引火源後 1 分 56 秒發現有白色煙霧自開口處飄散至戶外；3 分 54 秒火場產生大量濃密白煙，4 分 51 秒白煙減少，室內火焰已接觸到鋼承板，火勢逐漸增長。閃燃約於 7 分時發生，21 分 48 秒，火勢仍然強烈且伴隨著濃密黑煙，23 分 25 秒火勢開始逐漸減弱，煙量亦隨之減少，可觀測實驗區內情況；27 分

37 秒，開口高度以上已無法看見火焰，32 分，僅剩木材灰燼中有零星的火苗燃燒。



圖12 第1次真實火害實驗照片



圖13 第2次真實火害實驗照片

3.2 實尺寸鋼構架屋區劃空間溫度

第 1 次真實火害實驗，實尺寸鋼構架屋區劃空間之各熱電偶樹平均溫度，如圖 14 所示，可發現約前 500 秒為引燃期，500 秒後室內溫度明顯快速上升，979 秒時平均溫度達 600°C ，此時發生閃燃，約於 1600 秒時，大部份之量測點位開始在此刻測得最高溫度，而在 2300 秒左右發現有另一部份測得最高溫度，此後溫度開始下降進入衰退期，最高溫度位於內牆面，高達 1187°C ，而室內總平均氣溫最高為 978°C 。另外，在火焰衰退期時，南側小梁下之空氣溫度下降趨勢明顯與其他位置不同，在 4000~6000 秒間溫度維持在攝氏 $500\sim 600$ 度間，推測為附近之木燃料因引燃時間較慢，故此時仍餘下較多木材可燃燒。

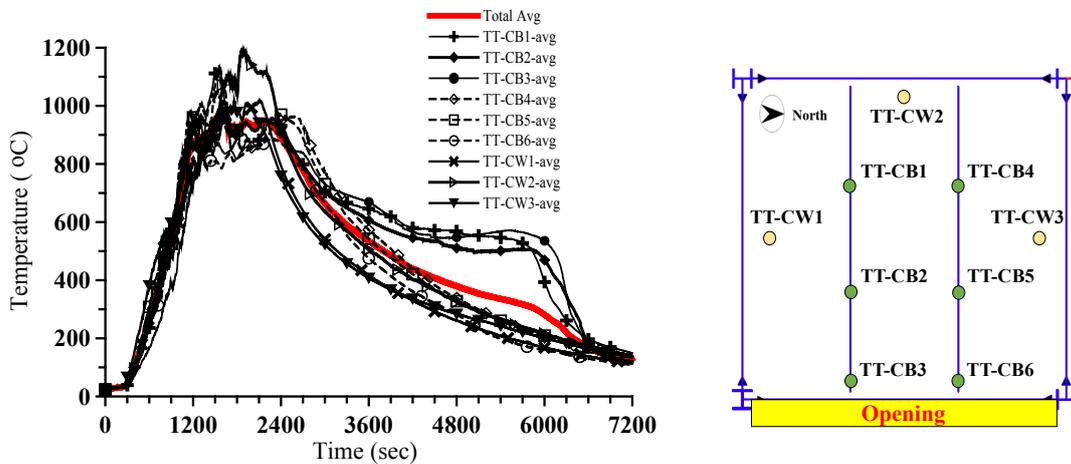


圖 14 第 1 次真實火害實驗空間平均溫度及各熱電偶樹平均溫度時間曲線圖

第 2 次火害實驗，實尺寸鋼構架屋區劃空間之各熱電偶樹平均溫度，如圖 15 所示，可發現約前 120 秒為引燃期，120 秒後室內溫度明顯快速上升，420 秒時平均溫度達 600°C ，此時發生閃燃，後持續上升至約 850 秒時，室內溫度達到第一個尖峰之後，室內溫度略為降低，約於 1300 秒達第二個尖峰，其後溫度開始下降進入衰退期，最高溫度發生於內牆面(TT-BW2)在 1441 秒時為 1183°C ，室內溫度總平均最高為 920°C 。

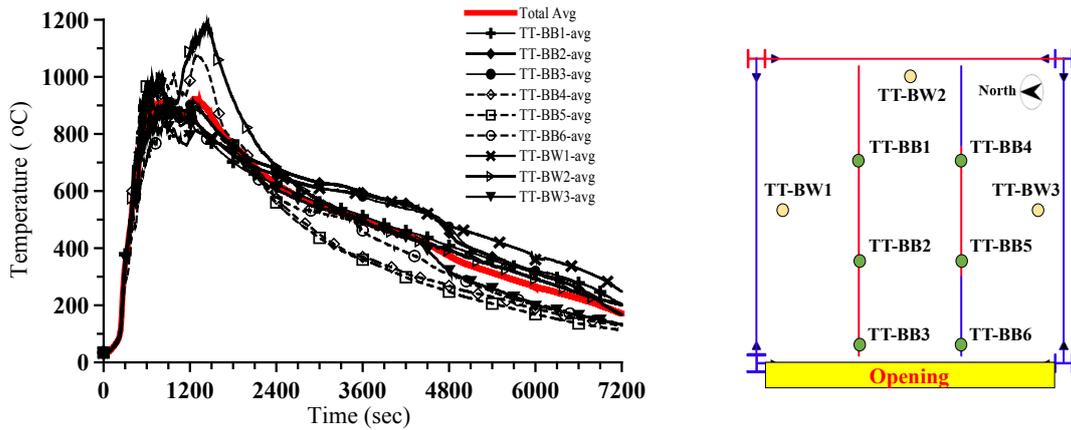


圖 15 第 2 次真實火害實驗空間平均溫度及各熱電偶樹平均溫度時間曲線圖

3.3 實尺寸鋼構架屋區劃空間溫度比較

圖 16 為兩次真實火害實驗區劃空間的室內溫度比較，第一次火害實驗引燃時間較長，可能受到天候條件與木材含水率之影響，第一次火害實驗相對溼度為 68% 且木材平均含水率 16%，第二次火害實驗相對溼度為 58%、木材平均含水率 11% 較為乾燥。

圖中顯示第二次實驗升溫速率較快，約 420 秒時發生閃燃，1278 秒時室內平均溫度已達最高 920.1℃，第一次實驗於 979 秒發生閃燃，而平均最高溫度則達到 978.1℃，發生在 1602 秒。

兩次火害實驗皆在溫度超過 850℃ 後，升溫速率會趨緩，可能是受到火載量與開口尺度之影響，使火場條件控制在此條件下。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，兩次實驗之溫度時間曲線在線形與火災歷程皆有所差異。

圖 17 為兩次火害實驗區劃空間平均溫度與 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，將兩次火害實驗區劃空間平均溫度向左平移，發現第二次實驗前 200 秒室溫急遽上升與 CNS 12514-1 極為類似，兩次火害實驗高溫期均較 CNS 12514-1 高，但比 EN 1991-1-2 低，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，然而降溫速率較兩次火害實驗快。

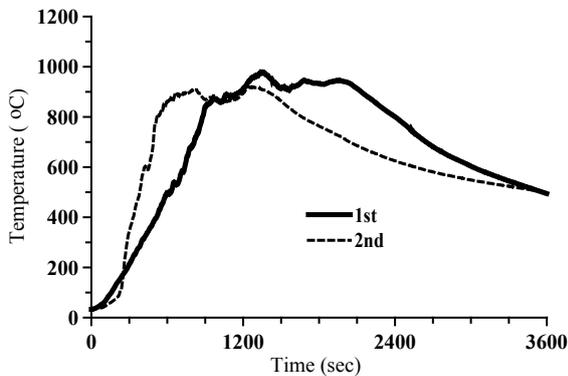


圖 16 兩次火害實驗平均溫度時間曲線比較圖

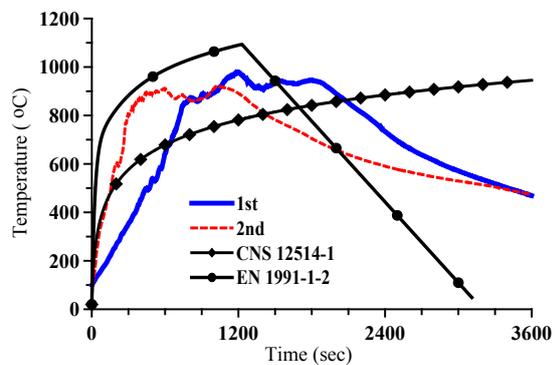


圖 17 實驗平均溫度與標準升溫及火場模擬時間溫度曲線比較

四、結論

本研究針對兩次實尺寸鋼構架屋真實火害實驗，可得到以下結論：

- 1、兩次真實火害實驗的區劃空間配置與火載量等實驗條件皆相同，實驗結果發現兩次實驗室內平均空氣溫度皆在超過 850°C 後，升溫速率會趨緩，然而，第一次實驗之室內空氣升溫速率較慢，平均溫度較晚達到最高(1602 秒 > 1278 秒)，但最高溫度較高(978.1 °C > 920.1 °C)，可能原因為第一次火害實驗環境較潮溼及其木材含水率較高致引燃與成長期較緩慢；另為木堆並無同時點燃所致。
- 2、兩次實驗之空氣最高溫度皆發生於靠近內牆處，顯示真實火場為不均勻加熱與標準試驗之均勻加熱不同。
- 3、真實火災實驗目前仍難以控制及預測，難以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，實驗之溫度時間曲線在線形與火災歷程皆有所差異。

誌謝

本文為內政部建築研究所 105301070000G0025 及 106301070000G0034 研究計畫之部分研究成果，感謝內政部建築研究所防火實驗中心提供完善設備與場地。

參考文獻

1. 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。
2. “Behaviour of Steel Framed Structures under Fire Conditions,” Main Report, DETR-PIT Project, School of Civil and Environmental Engineering, University of Edinburgh, 2000.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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。
8. 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。
9. 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。
10. 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。
11. Eurocode 1, 1991-1-2: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire, 2002.