

實尺寸鋼構實驗屋鋼梁構件之大型現地結構火害實驗

The Large-Scale In-situ Structural Fire Test for the Steel Beams in the Full-Scale Steel Experimental Building

鍾興陽¹ 李其忠² 陳嘉倫³ 陳博政³ 郭彥廷³ 朱聖浩⁴ 蔡銘儒⁵ 蔡綽芳⁶ 施健泰⁷ 朱世禹¹

¹ 成功大學土木工程學系副教授 E-mail: hychung@mail.ncku.edu.tw

² 內政部建築研究所副研究員

³ 成功大學土木工程學系碩士生

⁴ 成功大學土木工程學系特聘教授

⁵ 內政部建築研究所防火實驗中心主任

⁶ 內政部建築研究所安全防災組組長

⁷ 施健泰土木技師事務所主持人兼博士後研究員

科技部計畫編號：MOST-106-2221-E-006-054

摘要

國內鋼構造建築中連接鋼柱之大梁兩端常採用梁翼板銲接於柱板、梁腹板栓接於柱板剪力片(或梁腹板銲接於柱板)之梁柱接頭型式，此種大梁型式係為彎矩連接式的鋼梁，除直接承受部分樓板載重，亦承受小梁所傳遞之樓板剪力，而樓板下方的小梁之兩端常以腹板栓接於大梁之加勁板，此種小梁型式係為一種剪力連接式的鋼梁，直接承受樓板之載重，由於大梁與小梁皆屬於鋼構建築的重要構件，若受到高溫破壞，嚴重情況將造成樓板的大規模坍塌，所連接之鋼柱失去側向支撐而挫屈破壞，進而造成鋼構建築之嚴重倒塌。目前我國現行對於建築物之鋼梁構件的耐火能力檢驗，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」及 CNS 12514-6「建築物構造構件耐火試驗法—第 6 部：梁特定要求」，以單一構件的鋼梁進行耐火試驗，然而，此種方法未考慮真實鋼構造建築受到火害時，鋼梁與其他鋼構件相連接，其他鋼構件所施予鋼梁之束制內力與邊界條件，因此，本研究團隊於國立成功大學歸仁校區之內政部建築研究所戶外實驗場，興建一層樓高的實尺寸鋼構實驗屋，並針對此鋼構實驗屋部分空間之鋼梁進行大型結構火害實驗，藉以瞭解與研究鋼構實驗屋中有防火被覆和無防火被覆的彎矩連接與剪力連接之鋼梁構件在真實的結構束制情況下受到真實火害之結構行為。

關鍵字：鋼構實驗屋、火害實驗、鋼梁、高溫、防火被覆、束制

Abstract

In Taiwan, steel girders in steel buildings are usually linked to steel columns by a connection type of welded flanges and bolted web (or welded web). This type of beam-to-column connections are classified as moment connections, and these steel girders are also known as steel moment connected girders, which directly support partial floor loadings and sustain the shear forces from steel beams. Since moment connected girders are important components in steel buildings, the failures of girders in high temperatures will cause the extensive floor collapse, steel column buckling and the whole building collapse in case of serious situation. At present in Taiwan, the fire-resistance test for a steel girder mainly follows CNS 12514-1 and CNS 12514-6, which requires to test a simply supported steel girder in fire. However, this kind of test method does not consider the restraint forces between beam-to-girder moment connections in a real steel building in fire, and the behavior and strength of this kind of moment connections in high temperatures. Therefore, through the real fire test of a steel experimental house, we can study the real structural behavior of steel moment connected girders, and the fire resistance differences of steel shear connected beams with/without fireproofing.

Keywords: Steel Experimental House, Fire Test, Steel Girder, High Temperature, Restraint

一、前言

鋼構造建築由於強度高、韌性佳、耐震性能優良且施工期短，近年來已逐漸成為國內建築業界興建大型集合式住宅或商業辦公大樓的主流，然而，高溫下鋼材有強度折減與軟化的現象，使得火害對鋼構造建築的危害性較一般鋼筋混凝土建築為嚴重，民國 90 年的汐止東方科學園區鋼構大樓火災，其延燒範圍廣且延燒時間長，損失金額慘重，雖然無人員傷亡，但是卻造成該鋼構大樓內部之重要構件(如：鋼柱、鋼梁、樓板…等)受火害高溫而損壞嚴重，為歷年所僅見，顯示有必要對鋼構造建築之整體結構受到火害高溫之影響進行有系統之研究。

國內鋼構造建築中連接鋼柱之大梁兩端常採用梁翼板銲接於柱板、梁腹板栓接於柱板剪力片(或梁腹板銲接於柱板)之梁柱接頭型式，此種大梁型式係為彎矩連接式的鋼梁，除直接承受部分樓板載重，亦承受小梁所傳遞之樓板剪力，而樓板下方的小梁之兩端常以腹板栓接於大梁之加勁板，此種小梁型式係為一種剪力連接式的鋼梁，直接承受樓板之載重，由於大梁與小梁皆屬於鋼構建築的重要構件，若受到高溫破壞，嚴重情況將造成樓板的大規模坍塌，所連接之鋼柱失去側向支撐而挫屈破壞，進而造成鋼構建築之嚴重倒塌。目前我國現行對於建築物之鋼梁構件的耐火能力檢驗，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」及 CNS 12514-6「建築物構造構件耐火試驗法—第 6 部：梁特定要求」，以單一構件的鋼梁進行耐火試驗，然而，此種方法未考慮真實鋼構造建築受到火害時，鋼梁與其他鋼構件相連接，其他鋼構件所施予鋼梁之束制內力與邊界條件，因此，本研究團隊於國立成功大學歸仁校區之內政部建築研究所戶外實驗場，興建一層樓高的實尺寸鋼構實驗屋，並針對此鋼構實驗屋部分空間之鋼梁進行大型結構火害實驗，藉以瞭解與研究鋼構實驗屋中有防火被覆和無防火被覆的彎矩連接與剪力連接之鋼梁構件在真實的結構束制情況下受到真實火害之結構行為。

二、實尺寸鋼構屋鋼梁構件之火害實驗

2.1 鋼構實驗屋與火害實驗概述

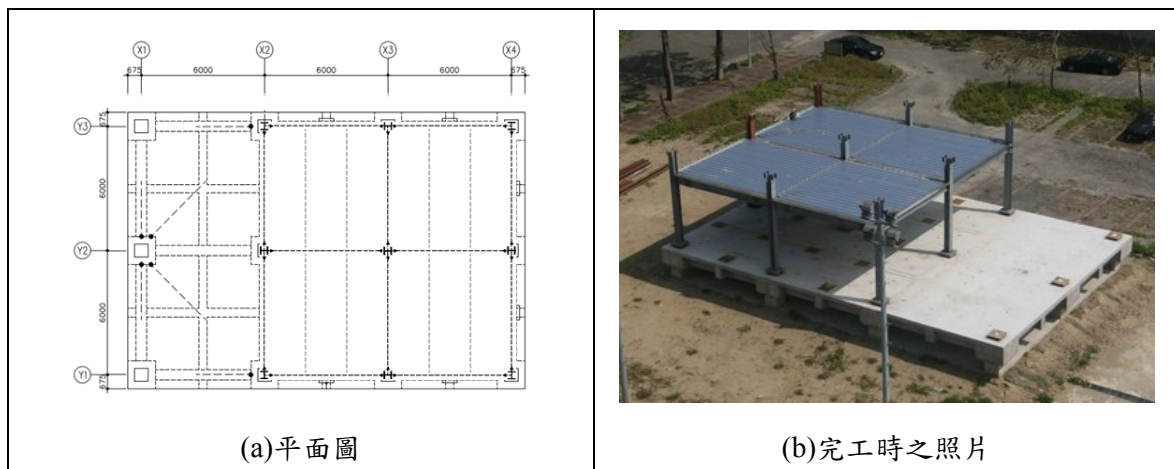


圖 1 台南歸仁戶外實驗場之實尺寸鋼構實驗屋

本研究火害實驗用的實尺寸鋼構實驗屋座落於國立成功大學台南歸仁校區內之內政部建築研究所防火實驗中心之戶外實驗場，為一層樓 2 跨×2 跨的建築，樓高 4 m，其平面 X 方向有 2 跨，每跨 6 m，總長 12 m，其平面 Y 方向亦有 2 跨，每跨 6 m，總長亦為 12 m，共有 9 支鋼柱。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 1 樓頂版上方 1.1 m 處，此鋼構實驗屋之平面圖與立面圖分別如圖 4-1 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，梁腹板亦與柱銲接的彎矩接頭，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，所有大梁與小梁上翼板以剪力釘與上方 RC 鋼承樓板形成複合鋼梁。

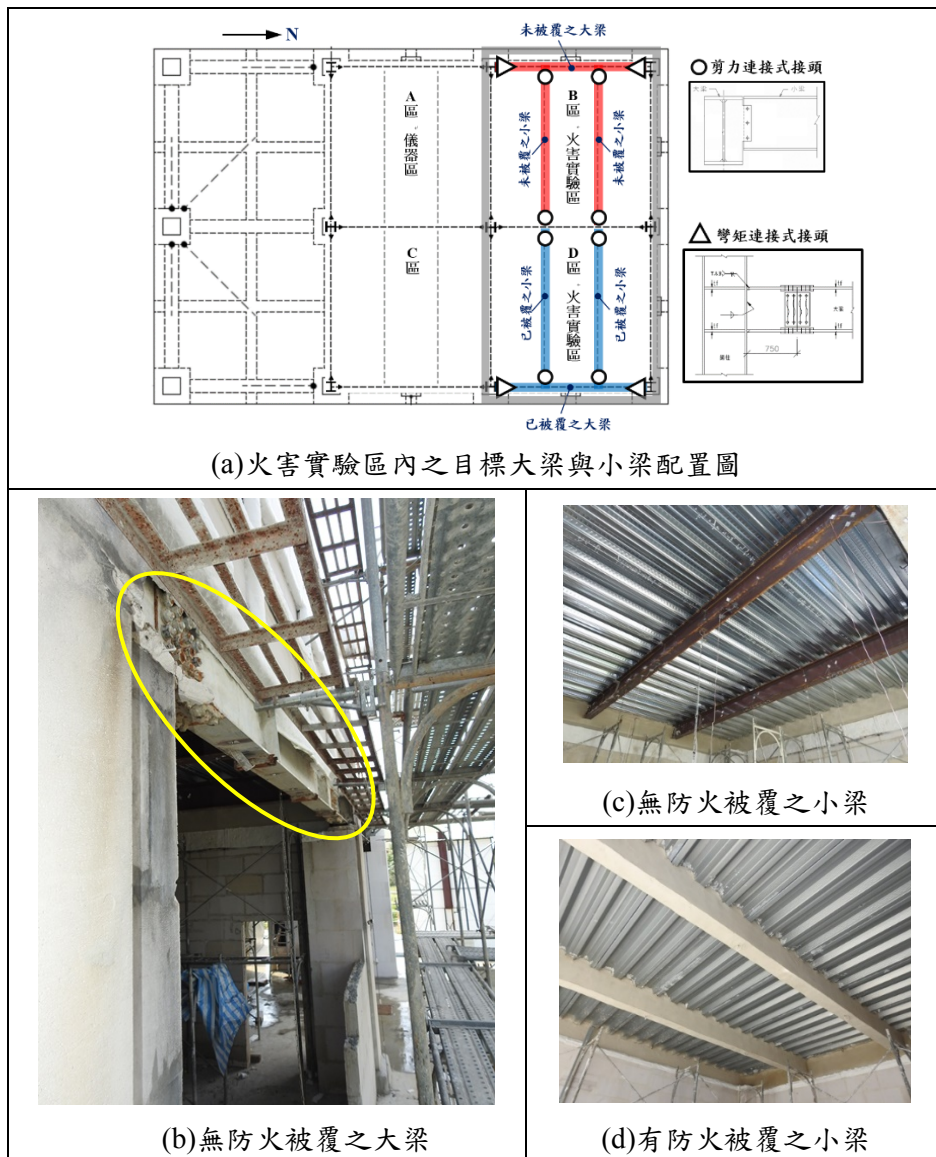


圖 2 鋼構實驗屋火害實驗之鋼梁

如圖 2(a)所示，本次火害實驗的區域包含 B 區與 D 區，B 區內未施加防火被覆的目標大梁與目標小梁為實驗組，D 區內已施加防火被覆的目標大梁與目標小梁為對照組；如圖 2(b)所示，

兩區的目標大梁之兩端皆以彎矩連接式接頭與鋼柱連接，而兩區的目標小梁之兩端皆以剪力連接式接頭與大梁連接，如圖 2(c)與圖 2(d)所示。

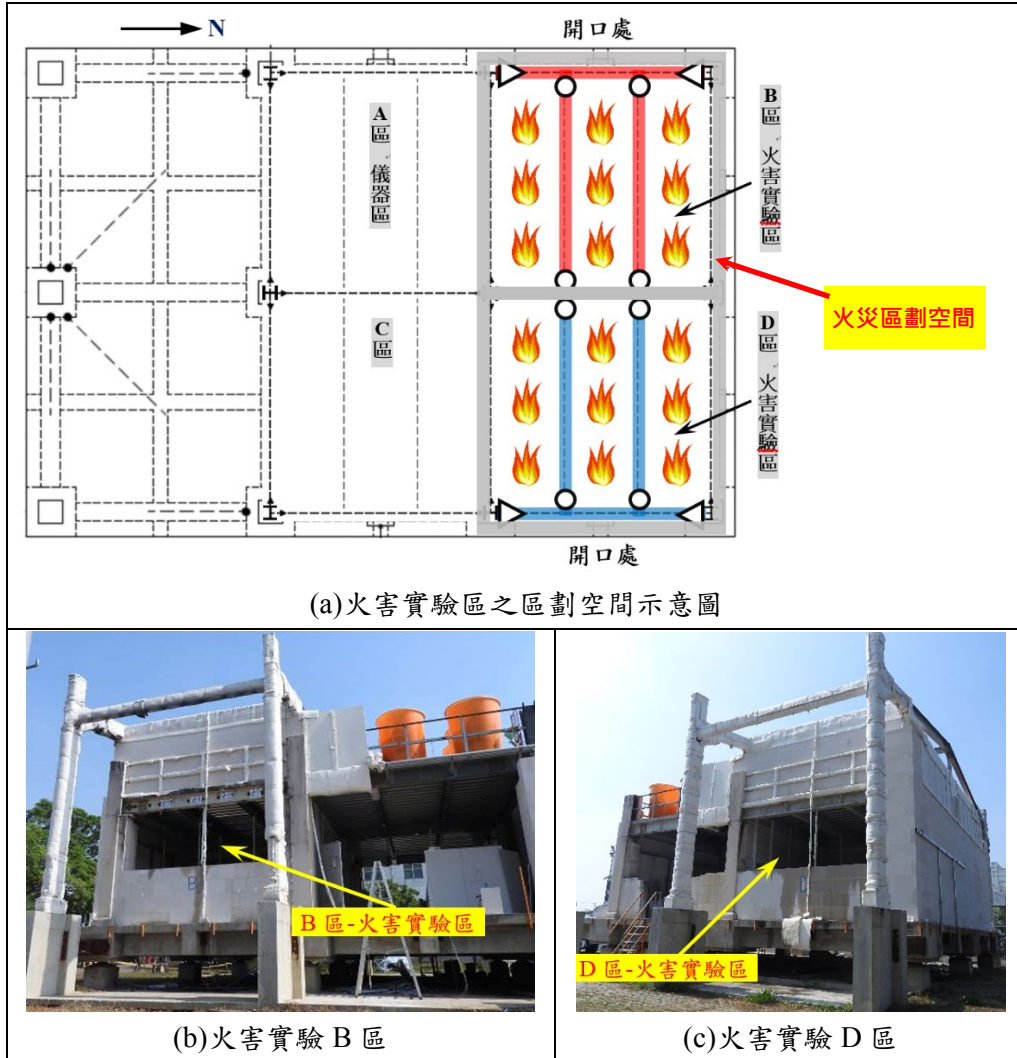


圖 3 鋼構實驗屋之火害實驗區

為了使得本次火害實驗之實驗組與對照組的大梁與小梁盡量能在相同的火場中受熱，因此將鋼構實驗屋的 B 區與 D 區隔間成兩個地板面積和開口通風面積相同的火災區劃空間，如圖 3(a) 所示，兩個火災區劃空間皆以足夠厚度的 ALC 磚牆進行隔間，藉以隔離火場，保護隔間以外未受實驗的構件與空間不受火害高溫侵襲，隔間內未受實驗的其他構件與構架則塗覆足夠厚度的防火被覆，使其在火害實驗中不受損壞(如圖 2(b)與圖 2(c)所示)，圖 3(b)與圖 3(c)分別為火害實驗 B 區與 D 區隔間完成後，在兩個火害實驗區間佈設重量相同且木條整齊堆疊的木堆(wood crib)做為火源之情況，B 區與 D 區將分別在西側與東側設置尺寸相同的開口以供應空氣與排氣，透過木條總質量和開口尺寸的設計，吾人在火害實驗區內燃燒木框架來模擬特定情境的區劃空間火災(compartment fire)，藉以加熱欲研究的目標大梁與目標小梁，並在目標大梁與目標小梁達到預定的變形量後，中止實驗，以免鋼構實驗屋整體的結構破壞。

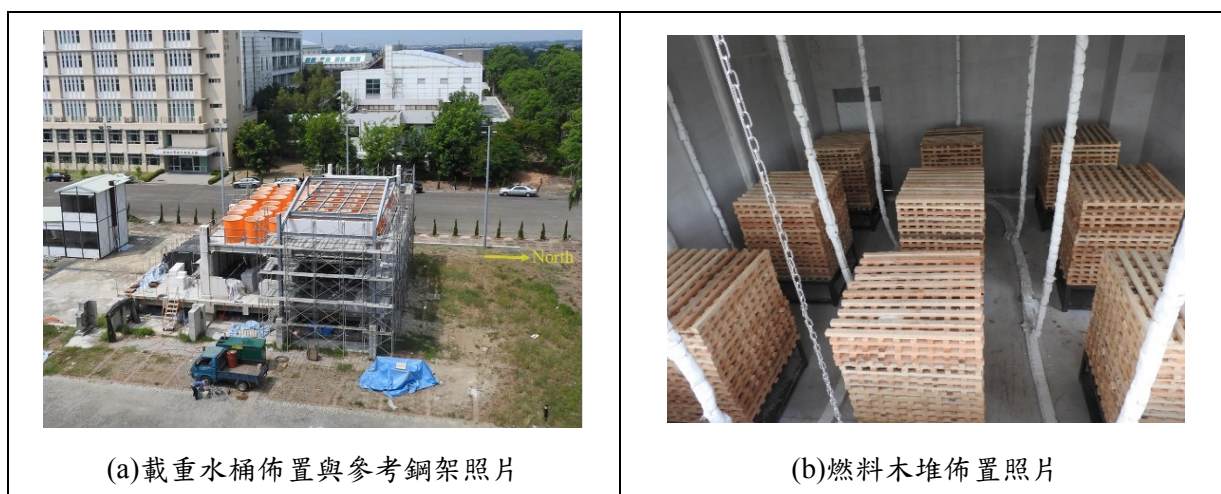


圖 4 鋼構實驗屋火害實驗之相關佈置

圖 4 為本次鋼構實驗屋火害實驗之相關重要佈置照片與示意圖；本研究參考英國 BRE 於 Cardington 進行之七次鋼結構現地火害實驗[1]，整理出其樓板上之載重設計介於(1.0D+0.3L)至(1.0D+0.56L)之間，而本研究採用(1.0D+0.4L)的保守載重設計，由於實驗屋已承載 1 倍靜載重 $D=380\text{kg/m}^2$ ，0.4 倍的活載重(L)約需在樓板加載 333kgf/m^2 的均佈載重，本實驗將利用 48 個加載用大水桶來對鋼構實驗屋進行加載，每個大水桶皆注入 1 公噸，總共 48 公噸重，平均分佈於面積為 144m^2 的樓板上，其佈置如圖 4(a)所示；此外，本次鋼構實驗屋 B 區與 D 區火害實驗區的火災情境設定為一般辦公室火災，其火載量能量密度約介於 500MJ/m^2 至 600MJ/m^2 [2]，本研究亦參考英國 BRE 於 Cardington 進行所鋼結構火害實驗[1]之配置，將木材堆放密度設計為 40kg/m^2 ，由於本次實驗所採用之木材的平均單位重熱釋放率(熱值)為 15.1MJ/kg [3]，故 B 區與 D 區火害實驗區之火載量能量密度約為 604MJ/m^2 ，兩個火害實驗區內皆依照國內相關規範 [4,5] 將木條排置成九堆木框架以做為燃料(如圖 4(b)所示)，其火載量符合前述之設計；為了量測火害實驗中鋼梁的變位，本研究在鋼構屋上方設置參考鋼架以架設位移計，如圖 4(a)所示，藉以量測鋼梁在火害實驗中的位移變化，並在鋼梁上設置熱電偶，用來量測鋼梁在火害實驗中的溫度變化。待所有實驗相關配置準備就緒，所有量測儀器開始記錄，隨即開始在 B 區與 D 區火害實驗區內一起依序點燃該區的木框架，進行火害實驗，由於本研究的標的為兩個火害實驗區上方的大梁與小梁，因此，實驗的中止條件將參考 CNS 12514-1 [6]中第 10.2.1 節承重能力之(a)項，對撓曲構造的規定，其規定之最大撓曲量(D)與最大撓曲速率(dD/dt)如下：

$$D = L^2/400d \text{ (mm)} \quad (1)$$

$$dD/dt = L^2/9000d \text{ (mm/min)} \quad (2)$$

公式(1)和公式(2)中，L 為試體之淨跨度(mm)，d 為試體構造斷面之壓縮側緣至拉伸側緣之距離，量測結果只要達到公式(1)或公式(2)之值，實驗立即中止。

三、結果與討論

3.1 火害實驗概述



圖 5 鋼構實驗屋火害實驗照片

本實驗於 106 年 11 月 16 日下午 2:30 舉行，火害實驗 B 區與 D 區同時點燃木堆，圖 5 為 B 區與 D 區在火害實驗時火災旺盛期之照片。B 區在第一個木堆點火後 4 分 31 秒室內火焰碰觸到天花板，5 分 00 秒木堆全部冒出火焰，6 分 09 秒室內火焰竄出窗口且煙霧變淡，8 分 46 秒室內有異音，9 分 49 秒室內持續產生異音且火勢加大，10 分 51 秒火勢加大且煙變濃，出現閃燃現象，12 分 21 秒室內持續產生異音且火煙大量竄出，18 分 16 秒火勢加大，20 分 15 秒火勢變小，26 分 04 秒燃燒停止。D 區在第一個木堆點火後 3 分 45 秒火焰接觸至屋頂板，4 分 01 秒火焰燒出窗戶，煙量減少，9 分 41 秒室內有異音傳出，14 分 46 秒冒煙轉濃黑，15 分 25 秒內部發生閃燃，15 分 45 秒內部持續產生爆裂聲，16 分 12 秒火煙大量持續冒出，21 分 25 秒火勢開始變小，28 分 45 秒從地面看向窗戶，火焰已消失。

3.2 B 區與 D 區之小梁變位、溫度與破壞情形

圖 6(a)和圖 6(b)分別為 B 區無防火被覆北側小梁與 D 區有防火被覆北側小梁的中點變位歷時曲線圖。B 區北側小梁在 227 秒後，其變位以較快的速率向下增加，約在 1147 秒時，B 區北側小梁中點達到最大的向下變位 68mm，由於 B 區的火害溫度逐漸下降，約在 1888 秒後，B 區北側小梁之中點變位出現向上回彈的現象，在 7477 秒時的回彈速率開始平緩，其中點變位為向下 23mm，冷卻到常溫時，其中點殘餘變位為向下 29mm，為其最大變位的 43%。D 區北側小梁在 1355 秒之後，開始有明顯的向下變位，在 2681 秒到 4023 秒之間，中點變位歷時曲線產生平原區，D 區北側小梁中點之最大向下變位 12mm 亦發生在此平原區，此最大向下變位僅為 B 區北側小梁最大向下變位之 17.6%，D 區北側小梁在 4023 秒後，因為 D 區之火害溫度下降，其中點變位向上回彈，約在 9000 秒時，其中點變位為向下 1.4mm，然冷卻到常溫時，北側小梁中點殘餘變位回彈至向上 2.7mm。

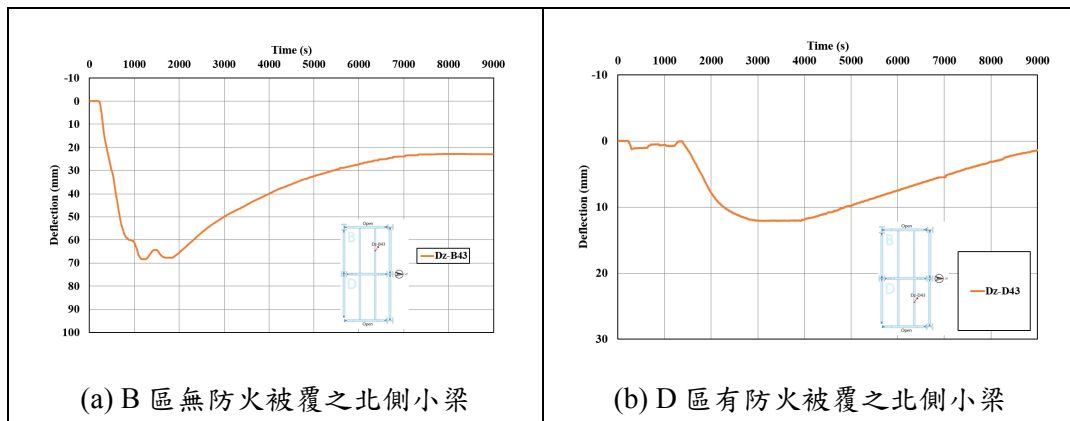


圖 6 火害實驗區北側小梁之中點變位歷時曲線

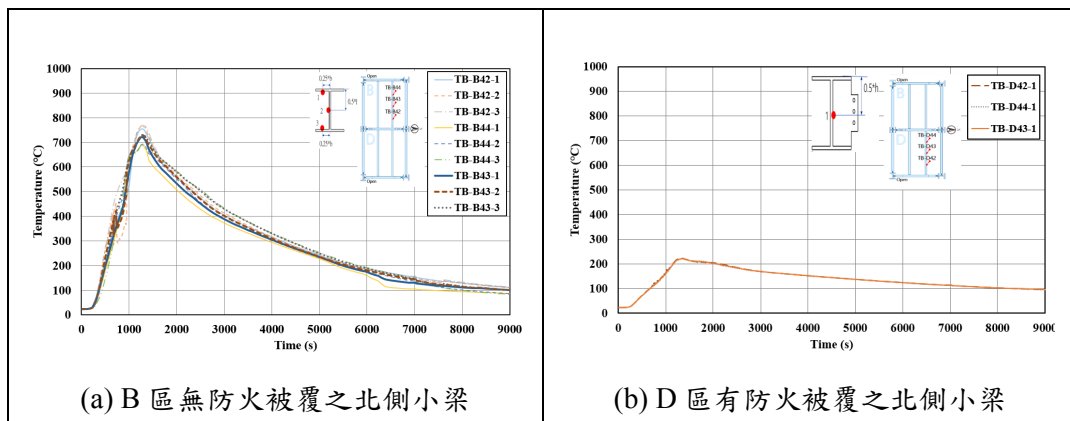


圖 7 火害實驗區北側小梁之溫度歷時曲線

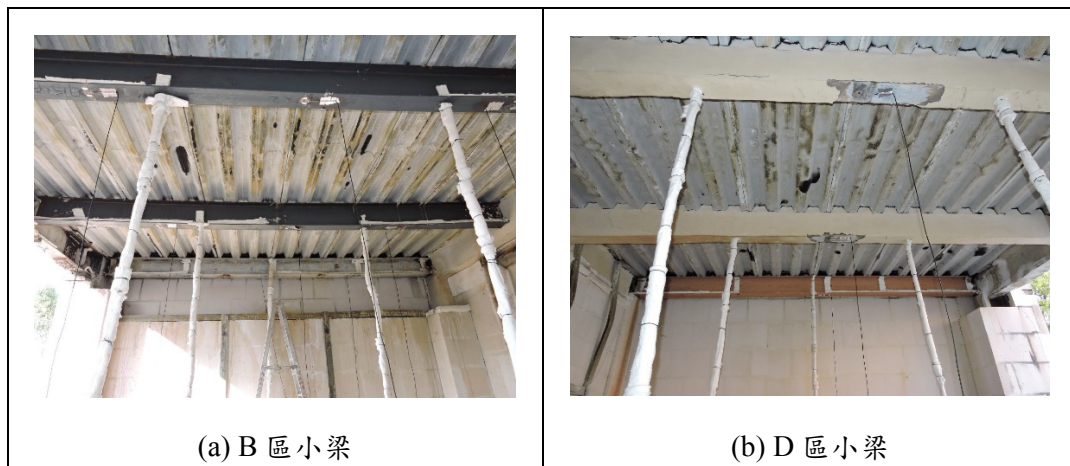


圖 8 火害實驗區小梁之火害後照片

圖 7(a)和圖 7(b)分別為火害實驗時 B 區無防火被覆北側小梁與 D 區有防火被覆北側小梁的溫度歷時曲線圖。B 區北側小梁在約 1248 秒時達到最高溫，熱電偶量測到的最高溫約為 770°C，

D 區北側小梁在約 1315 秒時達到最高溫，熱電偶量測到的最高溫約為 221°C，顯示防火被覆確實有其功效，1315 秒之後，小梁溫度開始下降，由於受到防火被覆的影響，D 區小梁的升溫與冷卻的速率皆較 B 區小梁為慢。圖 8(a)和圖 8(b)分別為火害實驗時 B 區無防火被覆小梁與 D 區有防火被覆小梁於火害後之照片；B 區的兩支小梁除了產生永久的垂直殘餘變位以外，兩支小梁在靠近東側的內牆端發生了扭轉挫屈和局部挫屈的現象，其主要原因為兩支小梁之東側接頭(內牆端)的軸向束制較強。D 區的兩支小梁由於有防火被覆保護，從外觀未觀察到明顯的變位或挫屈，然兩支小梁與大梁接頭處之防火被覆皆有龜裂的現象。

3.3 B 區與 D 區之大梁變位、溫度與破壞情形

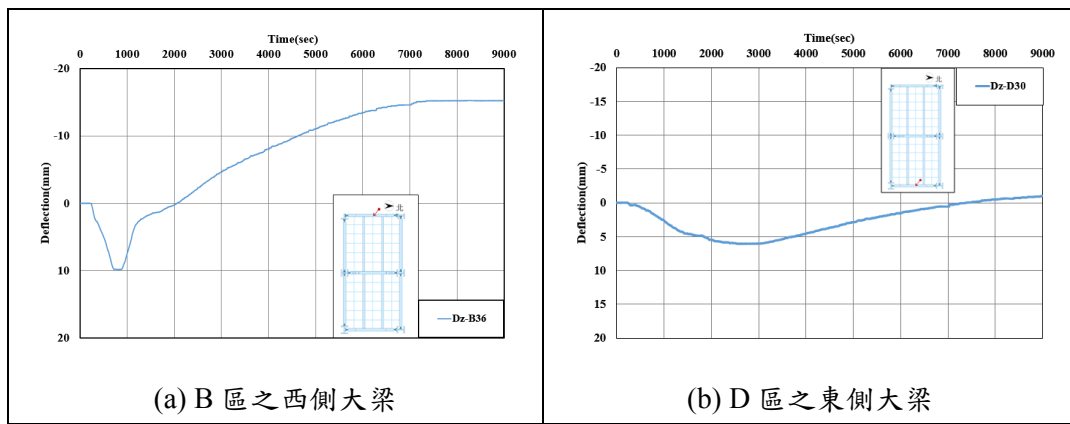


圖 9 火害實驗區大梁之中點變位歷時曲線

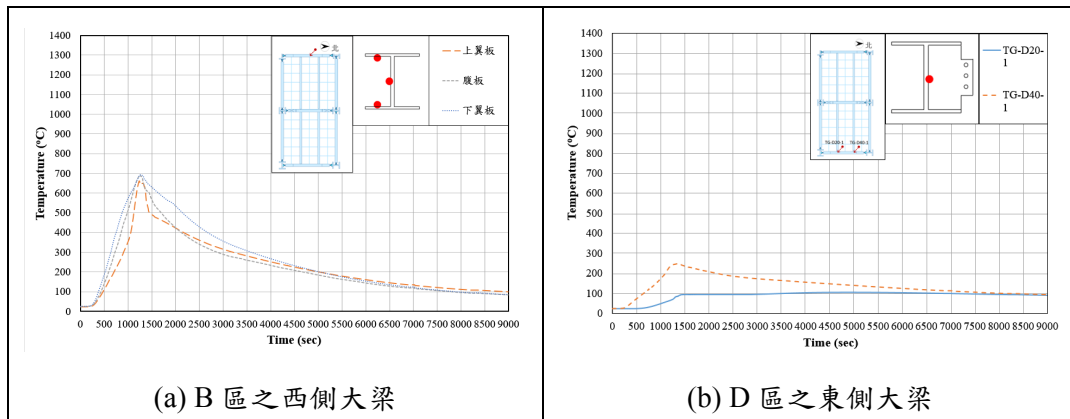


圖 10 火害實驗區大梁之中點溫度歷時曲線

圖 9(a)和圖 9(b)分別為 B 區無防火被覆西側大梁與 D 區有防火被覆東側大梁的中點變位歷時曲線圖。B 區西側大梁在點火後約 196 秒有明顯的向下變位產生，在 718 秒及 892 秒時，西側大梁的中點變位曲線呈現出平原區，亦在此時達到最大向下變位 10 mm，之後由於 B 區的火害溫度下降，西側大梁的中點變位便開始出現向上回彈的現象，約在 2076 秒時，西側大梁中點變位歸零，在 2076 秒之後，大梁中點變位還是持續向上，直到 7365 秒上拱情形才趨於平緩，

最後冷卻至常溫的中點變位為向上 14 mm。D 區東側大梁約在 203 秒時有明顯的向下變位發生，由於受到防火被覆的保護，D 區東側大梁向下的變位速率較 B 區西側大梁緩慢，大約在 2668 秒時達到最大向下變位 6.11 mm，之後由於 D 區的火害溫度下降，使得東側大梁的中點變位開始出現向上回彈的現象，約在 7440 秒時，大梁中點變位歸零，之後大梁中點變位緩慢地像上回彈，最後冷卻至常溫，大梁中點變位為上拱 2.3 mm。

圖 10(a)和圖 10(b)分別為 B 區無防火被覆西側大梁與 D 區有防火被覆東側大梁的中點溫度歷時曲線圖。B 區的西側大梁中點溫度大約在 237 秒時開始上升，大約在 1224 秒時，西側大梁中點處達到最高溫 700℃，之後溫度隨即下降冷卻。D 區有東側大梁亦大約在 237 秒溫度開始上升，大梁北側溫度上升至 250℃之後開始下降。

圖 11(a)和圖 11(b)分別為 B 區無防火被覆西側大梁與 D 區有防火被覆東側大梁於火害後之外觀照片。由圖 11(a)可以看到，火害後西側大梁在南端接頭托梁和連接梁接合處以北之下翼板發生局部挫屈，但其北端接頭之翼板或腹板並無局部挫屈，其原因可能與西側大梁的南端接頭連接邊柱，而北端接頭連接角柱有關，邊柱能提供較強的束制有關，此外，西側大梁的中段也有輕微向外的側向扭轉挫屈發生，其原因可能是 B 區兩支小梁受高溫火害後變形伸長所導致，西側大梁的南端與北端接頭並未發現接合鋼板與螺栓有明顯的破壞與變形。由圖 11(b)可以觀察到，D 區東側大梁與兩端接頭被防火被覆保護良好，並未有任何變形與挫屈產生，只有在南端與北端接頭處發現多個防火被覆的裂痕。

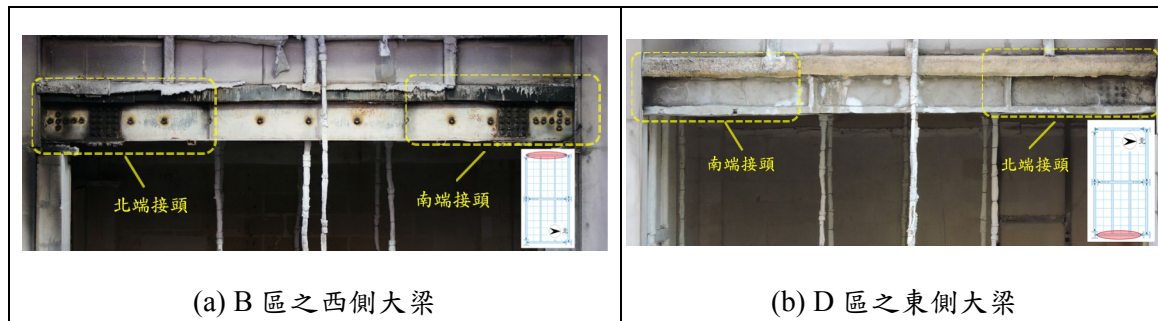


圖 11 火害實驗區大梁之火害後照片

四、結論

本研究針對大梁與小梁所進行的實尺寸鋼構實驗屋現地火害實驗所獲致的結論如下：

- (1) 本研究以大梁與小梁為實驗主體，完成在實尺寸鋼構實驗屋中受真實束制條件之有無防火被覆大梁與小梁受真實火害的現地結構火害實驗，並獲得其於火害前、中、後的溫度與變位的相關重要數據，此數據對於瞭解大梁與小梁在真實鋼構架束制條件與真實火害下的結構行為將有所幫助。
- (2) 本次鋼構實驗屋的現地火害實驗在 40kg/m² 木條所組成 18 個木堆的火載量(43488 MJ)平分在兩個火害區間燃燒下，其中之大梁、小梁與樓板下陷的變位值皆未超過我國 CNS 標準所規定下陷量的破壞判定值，本實驗的樓板內埋設有拉力鋼筋與雙向的溫度鋼筋。

- (3) 在真實彎矩連接束制條件下的大梁受火害的結構行為與單一無束制的鋼梁在標準爐中進行火害試驗之結構行為有所不同。以本實驗為例，真實彎矩連接束制條件的大梁(邊梁)在火害初期因受熱而膨脹，但在膨脹時亦會受到大梁兩端與鋼柱彎矩接合所產生之束制軸向壓力，由於大梁之一端連接角柱，另一端連接邊柱，火害中邊柱端給予大梁的束制壓力較強，再加上原先樓板載重施予大梁接頭負彎矩所產生之壓應力，因而造成大梁下翼板的局部挫屈，此外，大梁(邊梁)的中段與兩支小梁連接處，因受到兩支小梁受高溫火害後變形伸長，也有輕微向外的側向扭轉挫屈發生，當大梁冷卻到常溫時，整體大梁亦被發現到有上拱之現象。
- (4) 在真實剪力連接束制條件下的小梁受火害的結構行為與單一無束制的鋼梁在標準爐中進行火害試驗之結構行為有所不同。本實驗結果顯示，真實剪力連接束制條件的複合小梁在火害初期因受熱膨脹而先向外伸長，但在膨脹伸長的同時也受到小梁兩端與大梁剪力接合所產生之束制壓力，另外，由於小梁一端連接內梁，東側連接邊梁，因此內梁端的束制力較強，造成小梁在內梁端的下翼板有明顯的側向扭轉挫屈現象發生，且小梁之腹板與下翼板皆有局部挫屈的產生。

誌謝

特別感謝內政部建築研究所和科技部對於本研究的支持與各項協助，亦感謝中鋼結構公司與中鋼公司的贊助，內政部建築研究所防火實驗中心與國立成功大學提供完善設備與場地亦一併誌謝。

參考文獻

1. Results and Observations from Full-Scale Fire Test at BRE Cardington, Client Report 215-741, BRE, UK, (2003).
2. Lennon, T., Moore, D. B., Wang, Y. C. and Bailey, C. G. "Designers' Guide to EN 1991-1-2, EN 1992-1-2, EN 1993-1-2, EN 1994-1-2," Thomas Telford Ltd, UK, (2006).
3. 朱聖浩、鍾興陽、朱世禹、施建泰、趙翊翔、卓俊成、劉品瑄、翁玉倫、余耀宇、張喬歲，「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，(2016)。
4. CNS 1387 Z2003，「消防 手提滅火器 性能及構造」，中華民國國家標準，中華民國 96 年版，(2007)。
5. CNS 1387 Z2003，「消防 手提滅火器 性能及構造」，中華民國國家標準，中華民國 104 年版，(2015)。
6. 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，(2014)。