

# 110 內政部建築研究所

年度 研 究 成 果 發 表 講 習 會



## 論文集

### 場次C1 建築防火科技

- 火害後建築物之結構耐震性能評估(2/3)-鋼筋混凝土造構架屋火害後之耐震性能研究-劉光晏
- 智慧型消防機器人核心功能增值模組與消防人員火場定位技術之先期研究-游坤明
- 建築結構高強度鋼板及螺栓於火害後殘餘機械性質之研究-陳誠直

主辦單位：內政部建築研究所  
中華民國111年5月

火害後建築物之結構耐震性能評估(2/3)-鋼筋混  
凝土造構架屋火害後之耐震性能研究



## 主講人簡歷

姓名：劉光晏

服務單位：國立成功大學土木工程學系

職稱：副教授

聯絡電話：06-2757575#63157

傳真：06-2358542

電子信箱：kyliau@gs.ncku.edu.tw

學歷：國立台灣大學工學博士

經歷：國立中山大學土木工程學系副教授、國震中心兼任研究員

主要著作：

1. 劉光晏、黃世建、洪崇展、鍾興陽，「火害後建築物之結構耐震性能評估(2/3)--鋼筋混凝土造構架屋火害後之耐震性能研究」，內政部建築研究所專題研究計劃報告，2021。
2. 鍾興陽、洪崇展、黃世建、劉光晏，「火害後建築物之結構耐震性能評估(1/3)--鋼筋混凝土造與鋼構造構件火害後耐震性能研究」，內政部建築研究所專題研究計劃報告，2020。
3. 劉光晏、盧煉元、蕭輔沛，「應用非線性動力分析法於中高樓層軟弱層及扭轉不規則建築之詳細耐震能力評估」，內政部建築研究所專題研究計劃報告，2019。

## 中文摘要

劉光晏<sup>1</sup> 鍾興陽<sup>1</sup> 洪崇展<sup>2</sup> 施健泰<sup>3</sup> 黃世建<sup>4</sup>

**關鍵字：鋼筋混凝土造、鋼構造、火害、振動台實驗、耐震性能**

本研究係探討火害後的鋼筋混凝土(RC)造與鋼(SS)造構架屋的耐震能力，分別以實驗及分析方式進行研究。本研究團隊將使用 109 年度由建築研究所已委託製作完成之 2 座單層單跨 RC 造構架屋，一座為未受火害試體僅探討受震反應，另一座先於台南市歸仁區之內政部建築研究所防火實驗中心戶外場地進行火害實驗，模擬 RC 造構架屋在火場中可能受到的高溫變化，完成後再運至鄰近的國家地震中心台南實驗室，2 座試體可分別進行未受火害和受火害 RC 構架屋之振動台實驗，獲致火害後 RC 造構架屋的耐震能力影響。此外，本研究將製作 2 座單層單跨鋼(SS)造構架屋，以供後續 SS 造構架屋火害後之耐震能力研究。基於前述實驗成果，本研究亦進行受火害與未受火害單層單跨 RC 造、SS 造構架屋受地震之數值模擬，相關成果將研擬 RC 造火害後耐震能力評估流程。

---

<sup>1</sup>國立成功大學土木工程學系 副教授

<sup>2</sup>國立成功大學土木工程學系 特聘教授

<sup>3</sup>施健泰土木技師事務所 負責人

<sup>4</sup>國立台灣大學土木工程學系 特聘教授

# ABSTRACT

**Keywords : Reinforced Concrete Frame, Steel Frame, Post-Fire, Shaking table test, Seismic-Resistant Performance**

Fires and earthquakes have been the leading causes of damage and destruction to urban buildings (including reinforced concrete and steel buildings). In recent years, ABRI has focused on the fire experiments of members and structures of reinforced concrete (RC) and steel buildings. The fire experiments and research for the structural and sub assemblages have been systematically carried out and have achieved fruitful results. However, there is still a lack of research to discuss the seismic performance evaluation of buildings affected by fire high-temperatures and damages. After a fire, the building's material properties are affected by high temperatures, which reduces the strength of the building members (such as columns and beams) and reduces the building's seismic resistance. So far, a systematic approach to evaluate the seismic resistance reductions of post-fire buildings has not been established in Taiwan to address this critical issue yet. This research's main objective is to investigate the post-fire seismic performances of reinforced concrete (RC) and steel structures. The research team uses a single-bay and single-story RC experimental house as a benchmark to conduct the shaking table test in NCREE, South Laboratory. Another single-bay and single-story RC experimental house is first subjected to the fire at the outdoor field of ABRI in Tainan to simulate the high-temperature variations that the RC columns may be subjected to in the building fires by the shaking table test. This study will also build two single-bay and

single-story steel experimental houses for the same experimental purpose. This study will first carry out the numerical simulations for RC and steel single-story and single-bay experimental houses with or without fire damage. Therefore, in order to correctly evaluate the seismic resistance of buildings after fire damage and to provide correct information for the future seismic reinforcement of buildings after fire damage, the experimental study of structural seismic performance evaluation of buildings after fire damage should be conducted first to provide the references of fire-resistant and seismic-resistant design practices for buildings.

## 壹、緒 論

### 一、研究動機與目的

本研究係針對鋼筋混凝土造及鋼構造建築物，進行火害後建築物之結構耐震性能評估研究，以實際瞭解火害後建築物之耐震能力。110 年度的主題是探討火害後鋼筋混凝土（RC）構架屋之耐震性能，並製作鋼鋼構架屋。因此，本研究利用 109 年已製作之 RC 構架屋[1]，於內政部建築研究所防火實驗中心戶外場地進行火害實驗，以模擬 RC 構架屋在火場中所受到高溫影響，之後再運至鄰近的國家地震中心台南實驗室，進行未受火害和受火害 RC 構架屋之振動台實驗，進一步進行火害後單層單跨構架之振動台實驗，藉此發展火災後建築物之振動台實驗技術方法與流程，並建立有系統的火害後建築物之結構耐震性能評估方法，且研究火災及地震之多重性災害對建築物之影響。

本研究亦建置單層單跨鋼（SS）造構架屋 2 座，以供後續鋼造構架屋火害後的耐震性能研究之用。此外，本研究同時進行受火害與未受火害單層單跨 RC 造構架屋受地震之數值模擬，最後研擬完成鋼筋混凝土造火害後耐震能力評估流程。

## 貳、研究內容

### 一、鋼筋混凝土構架屋振動台實驗規劃

本研究主要在探討 RC 造建築物發生嚴重火災後之耐震能力，共製作兩座單層單跨 RC 構架屋。第一座為無火害對照組（NF），第二座為火害實驗組（F），利用長衝程高速度地震模擬振動台輸入地震波並量測試體之加速度、位移歷時變化，以了解火害後結構週期、構件行為與耐震能力。本研究由火害實驗換算等值火害延時，據以提出混凝土強度與斷面慣性矩折減係數，最終進行地震歷時分析，檢討層間位移與加速度



歷時反應。

### (一) 試體設計

本研究共製作兩座RC造單層單跨構架屋，其中一座為無火害對照組(NF)，另一座為有火害實驗組(F)，依據內政部營建署 100 年版混凝土結構設計規範(土木 401-100) [2]進行設計。混凝土設計抗壓強度為  $210 \text{ kgf/cm}^2$ ，實測值為  $266 \text{ kgf/cm}^2$ 。主筋號數包括D19 與D25，箍筋及版筋之號數包括D10 及D13。所有鋼筋材質與設計降伏強度皆為SD 420 W，實測強度分別為  $4689(\text{D10})$ 、 $4322(\text{D13})$ 、 $4597(\text{D19})$  與  $4607 \text{ kgf/cm}^2$  (D25)。

圖 1 所示為立面圖與平面圖，X、Y 平面各有一跨，跨徑皆為 3.5 m，構件尺寸、配筋如表 1 所示。梁尺寸為  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 350 \text{ cm}$ ，保護層厚度 5 cm，總高度 400 cm。柱尺寸為  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 350 \text{ cm}$ ，保護層厚度 5 cm，總高度 400 cm。地梁尺寸  $40 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ，保護層厚度 5 cm。試體底部配置獨立基腳，尺寸為  $70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ，其下方設有一鋼底版，使柱主筋可銲接在此底版上。試體製作期間，利用高強度錨定螺栓固定此鋼底版於經整平之鋼施工平台上。樓版厚度為 18 cm，鋼筋配置為雙層雙向  $\text{D13}@150 \text{ mm}$ 。樓版內埋 20 個內徑 7 cm PVC 套管，以利上方固定載重塊。載重塊尺寸為  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，壁厚 1 m，由國家地震工程中心提供。樓版及載重塊之組合可調整總載重，使每根柱之軸壓力達  $0.1f'c A_g$ 。

表 1 RC 造構架屋構件設計資料

Member	ID	Size (mm)	Longitudinal reinforcement	Lateral reinforcement
Beam	2B1	$250 \times 500 \times 4000$	4-D19	D10@100

	2G1	250 × 500 × 4000	4-D19	D10@100
Column	1C1	300 × 300 × 4000	8-D25	D10@70
Floor beam	FB1	400 × 500 × 4000	4-D19	D10@120
	FG1	400 × 500 × 4000	4-D19	D10@120

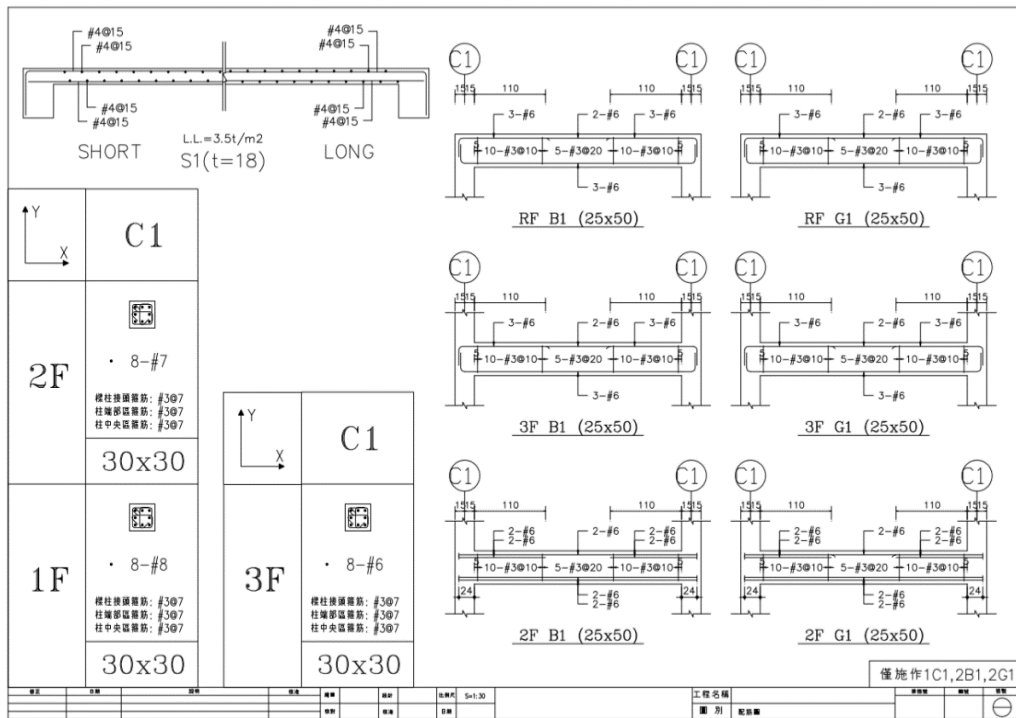
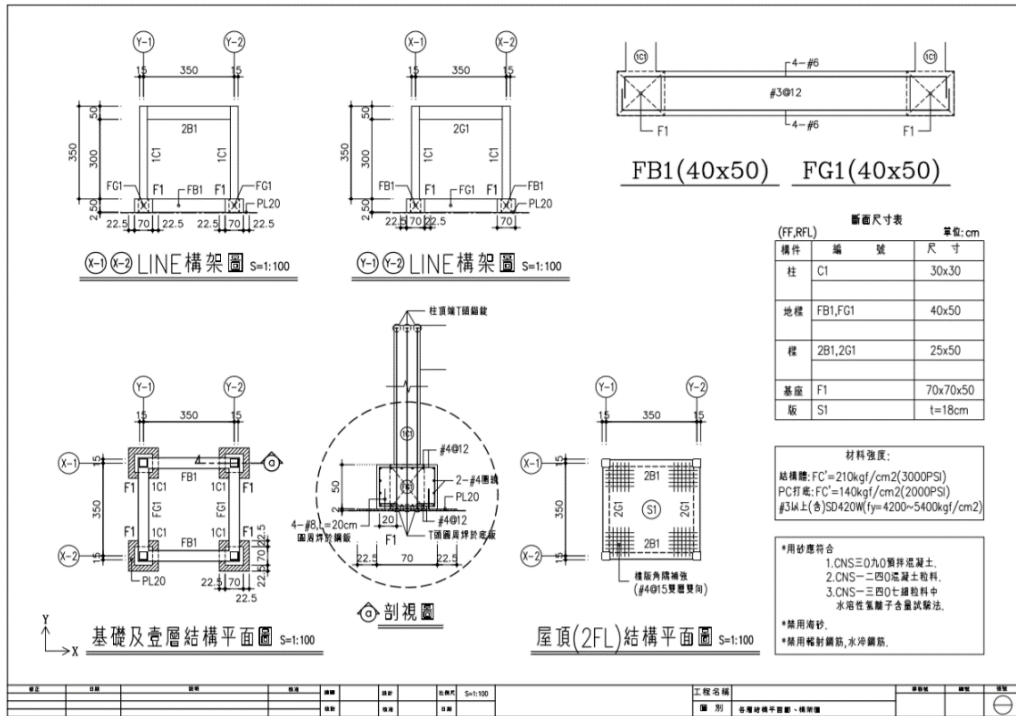


圖 1 RC 造構架屋設計圖

## (二)火害實驗規劃

火害條件以構架屋內堆疊木柴後燃燒，模擬實際結構火害狀況。本研究採用之設計火載量依據文獻[3]所記載之辦公室最大火載量，選擇 $1279 \text{ MJ/m}^2$ 為設計火載量，則RC構架屋所需之總火載量為 $19453.6 \text{ MJ}$ 。另根據趙翊翔[4]實驗中所使用之阿拉斯加雲杉作為燃料，木材熱值為 $15.1 \text{ MJ/kg}$ 、尺寸為 $3 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm} \times 90 \text{ cm}$ 、單位重為 $500 \text{ g}$ ，共需 $2577$ 根阿拉斯加雲杉木條。本研究將木材分為四堆置放於RC構架屋之四個角落，如圖 2 所示，每個角落各一堆，每堆木框架共 $64.5$ 層，每層有 $10$ 支木條，皆以 $3.5 \text{ cm}$ 的邊為高堆疊在 $93 \text{ cm} \times 93 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 之鋼架上。為防止目標區塊以外受到火害實驗影響，本研究使用ALC輕質白磚作為隔熱材料，並以地梁的邊為界築起白磚牆，並留 $110 \text{ cm} \times 210 \text{ cm}$ 的開口作為通風口，如圖 3 所示。

為量測鋼筋混凝土造構架屋內部受到木柴燃燒加熱至自然冷卻期間內的溫度變化，本研究於構件內預先埋設 K 型熱電偶計，其可測溫度範圍介於 $0$ 至 $1250^\circ\text{C}$ 。為了量測塑鉸區間的溫度變化，在距離梁柱接頭表面 $10 \text{ cm}$ 的混凝土斷面及鋼筋斷面上布設熱電偶計。本研究為量測空間中的溫度變化故設置空間熱電偶樹，每條鐵鍊在預設高程先綁好熱電偶計如圖 4 所示，共有 $5$ 個高程。



圖 2 木框架堆置情況



圖 3 隔熱白磚圍封與開口



圖 4 熱電偶計

### (三)振動台實驗規劃

本實驗選取兩筆具有代表性的地震歷時，分別為 1940 年美國 EL Centro 地震及 2016 年美濃地震 TCU063 南北向地表加速度，如圖 5 與圖 6 所示。其中，TCU063 震波具有近斷層地震之速度脈衝。實驗時先輸入 30 gal 白噪訊號進行系統識別，頻率範圍為 0.1 至 30 Hz，以識別結構物基本頻率。強震測試由最大地表加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 為 0.1 g 開始，加速度增量依試體變形程度而定，直到樓層間相對位移達柱高 3 % (90 mm)，或稱為層間位移角達 3% 時實驗終止。

本研究於無火害 NF 試體內埋設鋼筋應變計，量測梁柱接頭區之鋼筋應變值。梁、柱接頭表面起算 10、30 及 50 cm 的斷面黏貼主筋的應變計。同時，靠近黏貼斷面的箍筋上配置一片應變計，在柱主筋方面為了量測受到振動所產生的最大鋼筋應變值，因此在振動方向的兩側角隅主筋及中間主筋上各配一片以進行對照；梁斷面內在最外側主筋上各配置一片鋼筋應變計，其配置如圖 7 所示。

本實驗之加速規配置、方位及名稱如圖 8，取樣頻率為 512 Hz。振動台平面、基礎上方配置 3 顆 2g 加速規，樓板高程設置 3 顆 10g 加速規。其中，1F\_S 及 Plate 兩加速規用於量測後續分析之輸入波及輸出波。本實驗之位移量測係使用日本 Optitrak 公司所開發的 MOCAP 光學量測系統，藉由相機捕捉每個反射球反射回來的紅外線，再藉由兩台以上相機對同一顆反射球進行三維座標定位，取樣頻率為 100Hz。MOCAP 量測四支角柱之側向位移，並將淨高 300 公分的角柱切成 4 等分，並以沿著柱邊黏貼，總共貼三面。反射球主要分布如圖 9 所示，共計 10 條柱線，每條柱線有 5 個反射球。此外，地板上黏貼 6 顆反射球可量測振動台面位移。東、西面梁中心各貼一顆用以量測樓板側向位移。基礎底板黏貼 2 顆，可檢查基礎底板與振動台間之相對滑移，總共 20 個點位。無火害 NF 試體及有火害 F 試體之實驗配置，如圖 10 與圖 11 所示。

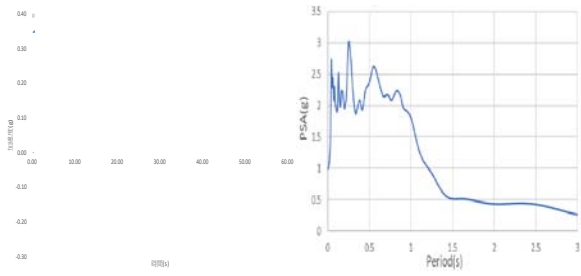


圖 5 EL Centro 加速度歷時與正規化  
反應譜

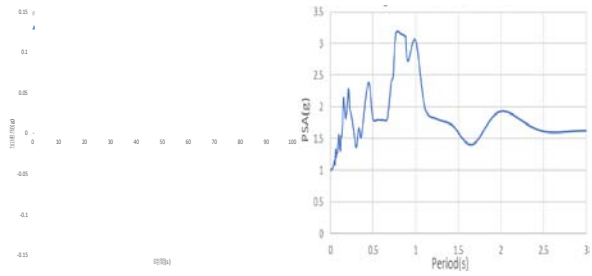


圖 6 TCU063 N 向加速度歷時與正規化反  
應譜

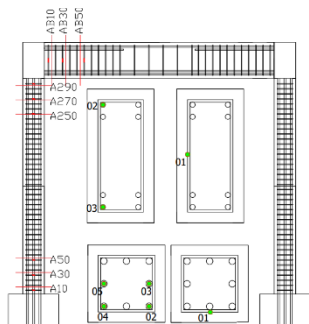


圖 7 NF 試體應變計位置

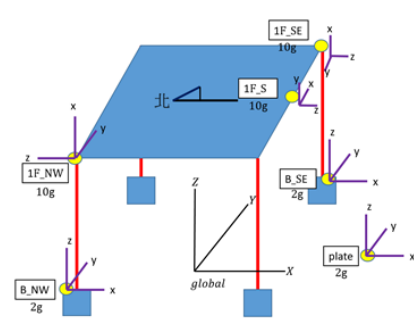


圖 8 加速度規格及位置

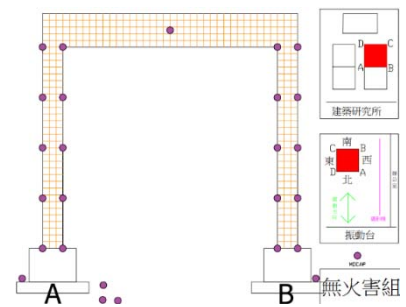


圖 9 MOCAP 位移計位置



圖 10 NF 試體振動台實驗配置

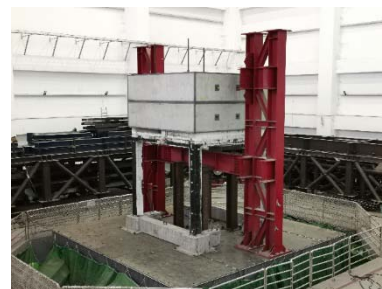


圖 11 F 試體振動台實驗配置

## 二、火害前後 RC 構架屋受地震力之數值模擬

本章旨於建立一鋼筋混凝土構架屋試體之數值模型，使用有限元素分析軟體 OpenSees[5]分析 RC 構架屋於火害前受地震力行為模擬之結果，期望能建立一簡化亦不失精準性之數值模型用於模擬未火害試體之實驗，進而透過分析結構物受振位移歷時與最大層間位移角來評估 RC 結構物模型之精確性。

本章之細節包含對實驗內容之 RC 構架屋進行完整之模擬，透過使用 OpenSees 建立數值模型進行有限元素之非線性分析，採用火害實驗所獲得之溫度資料，將斷面受火後強度以日本建築學會 AIJ 防火守則之材料強度折減率進行模擬，以分析受火後實驗試體之殘餘強度，並進行火害前後構架屋之動力分析。

本章在 OpenSees 中建立鋼筋混凝土構架屋數值模型，以 OpenSees 內建之非線性梁柱元素 (Displacement based beam column element) 為基礎，使用梁柱元素模擬構架非線性行為，模型如圖 12 所示。元素採用纖維斷面 (fiber section) 並切割成多塊斷面元素，建立由鋼筋與混凝土構成之複合斷面，描述構架斷面彎矩與曲率關係，其示意圖如圖 13，鋼筋與混凝土材料之定義皆選用 OpenSees 之內建材料卡。

由於 OpenSees 內建之梁柱接合點是使用端點力去進行結構力學傳遞之模擬，為求模擬內容之精確性，本章研究將 OpenSees 內建之梁柱接頭 (Joint 2D element) 元素設立於數值模型圖 12 之 Sketch A 處，將接頭之剪力反應納入構架受力行為。圖 14 為梁柱接頭之破壞行為示意圖，圖 15 為 Joint2D 梁柱接頭元素模型，其中央有一旋轉彈簧用於定義接頭剪力強度，側邊之旋轉彈簧用於模擬鋼筋滑移，接頭之定義尺寸則與實際尺寸相同。中央之旋轉彈簧使用 OpenSees 內建 Pinching4 材料卡，由修正壓力場理論 (Modified Compression Field Theory) 之計算結果定義接頭之剪力行為，模擬鋼筋滑移之側邊旋轉彈簧則使用內建彈性單軸材料卡 (Elastic Uniaxial Material) 進行設定。

由於纖維斷面無法考慮剪力與鋼筋滑移對斷面造成之影響，若僅使用梁柱元素只能模擬構架撓曲之變形。因此，本研究之數值模型於圖 12 Sketch B 處設置零長度元素 (zero length element)，其串聯剪力彈簧、旋轉彈簧與軸向彈簧，用以描述柱構件受剪與柱端鋼筋滑移之影響。剪力彈簧使用 OpenSees 內建 Limit State Material 材料模型，其可以考慮遲滯行為以及重載路徑，並連結 Shear Limit Curve 定義彈簧剪力破壞之曲線

點。旋轉彈簧與接頭相同，使用內建彈性單軸材料卡 (Elastic Uniaxial Material) 進行設定。軸向彈簧之用途僅為於零長度元素上傳遞軸向力，因此使用強度極高之內建彈性單軸材料卡模擬傳力之剛性體。

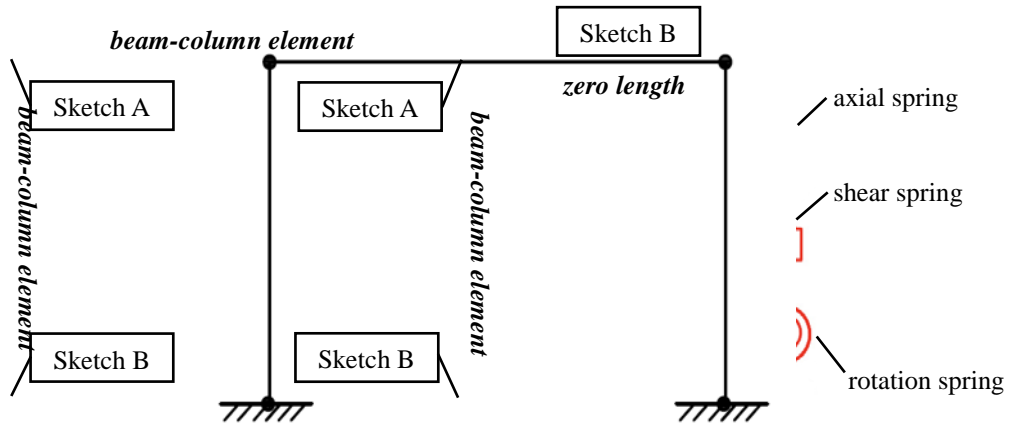


圖 12 RC 構架模型示意圖

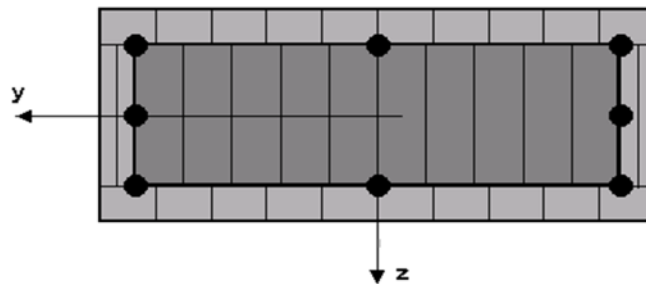


圖 13 纖維斷面示意圖

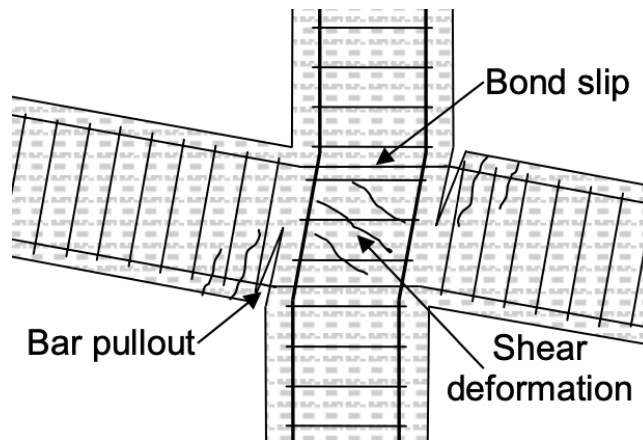


圖 14 梁柱接頭破壞行為示意圖 (Arash, 2004)[6]

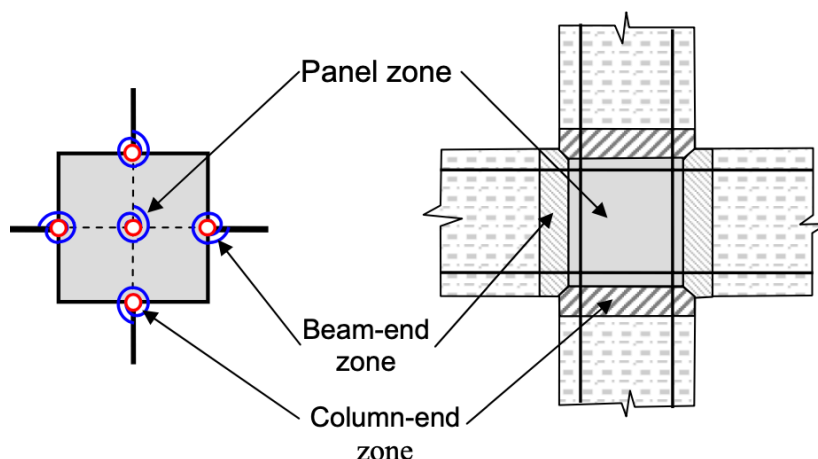


圖 15 Joint2D 梁柱接頭模型 (Arash, 2004)[6]

針對火害後之結構，全斷面折減法之流程即為將整個受火斷面之溫度設定為斷面表層之最高溫度，材料之折減率亦參考表 2[7]，統一以斷面之最高溫度進行折減。全斷面折減法模擬之示意圖如圖 16 所示。此法於運用上非常直接，但也因為全斷面皆設定為斷面之最高溫度而非常保守，其可行性將於後段驗證。此方法僅需使用最外圍溫度，因此為最快速模擬受火後斷面溫度之方法。

表 2 AIJ 常重砂質骨材混凝土-溫度對應性質變化率

T(°C)	Condition	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Comp. strength ratio	Hot	1.00	0.80	0.97	0.94	0.85	0.66	0.51	0.39	0.15
	Residual	1.00	0.94	0.87	0.80	0.64	0.48	0.32	0.16	0.00
Strain ratio at peak stress	Hot	1.00	1.00	1.10	1.47	1.84	2.21	2.58	2.95	4.30
	Residual	1.00	1.00	1.00	1.38	1.76	2.14	2.52	2.90	3.28
Elastic modulus ratio	Hot	1.00	0.80	0.68	0.57	0.45	0.35	0.25	0.15	0.075
	Residual	1.00	0.85	0.70	0.50	0.30	0.15	0.08	0.04	0.00
Tensile strength ratio	Hot	1.00	0.96	0.89	0.79	0.66	0.50	0.32	0.25	0.22



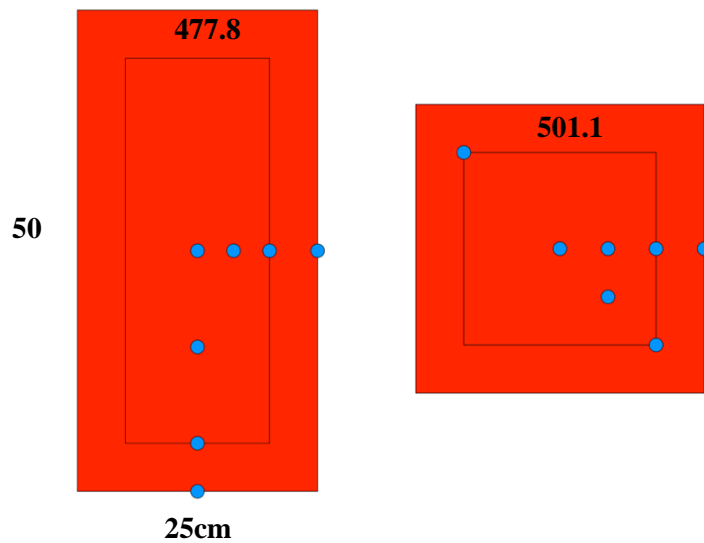


圖 16 全斷面折減法斷面示意圖

本章之火害後構架屋數值模型元素、材料參數設定細節以及計算流程皆參考前述內容，唯各構件元素與斷面之材料皆以前述驗證之全斷面折減法進行火害後斷面模擬。簡化各構件火害之溫度資料，為使用全斷面折減法，本小節取用梁與柱構件之表層溫度做為梁、柱、與接頭之混凝土強度折減依據。其中，柱之表層溫度為 501.1°C，其混凝土殘餘強度係數為 0.48，梁之表層溫度為 477.4°C，其混凝土殘餘強度係數為 0.53，實驗之鋼筋最高溫度皆未超過 500°C 因此無須折減。上述強度折減後之材料皆直接定義於各構件之纖維斷面上以建立火害後數值模型。接頭之剪力強度則依保守為原則選用柱之表層溫度以及混凝土殘餘強度折減係數做為混凝土強度折減之依據，再依此值重新以 MCFT 計算火害後接頭之剪力強度。

### 三、實尺寸鋼構實驗屋之設計與施工

為了探討一棟實尺寸三層樓鋼構建築（總載重為 44 tf）發生火災後受到地震侵襲之反應，本研究計畫新建單層單跨之實尺寸鋼構屋（自重為 11 tf），並在振動台實驗時在單層單跨之鋼構屋頂部加裝 33 噸載重塊，藉以模擬實尺寸三層樓鋼構建築之實際總載重（44 tf），其示意圖及載重分配情形如圖 17 所示。本研究新建之實尺寸單層單跨之鋼構實驗屋

的梁柱尺寸，係按照原實尺寸三層樓鋼構建築的結構分析和依照我國鋼結構耐震設計規範[8]決定而來。

此外，為比較鋼構實驗屋於火害後空冷及未受火害下之受震情形，本研究計畫製作兩座鋼構實驗屋試體，一座做為火害後空冷之實驗組試體，另一座做為未受火害之對照組試體。針對兩組鋼構實驗屋試體進行結構分析與數值模擬，以驗證本試體設計之安全性，說明兩座鋼構實驗屋於特定地震作用下之耐震能力及可能產生之破壞模式。

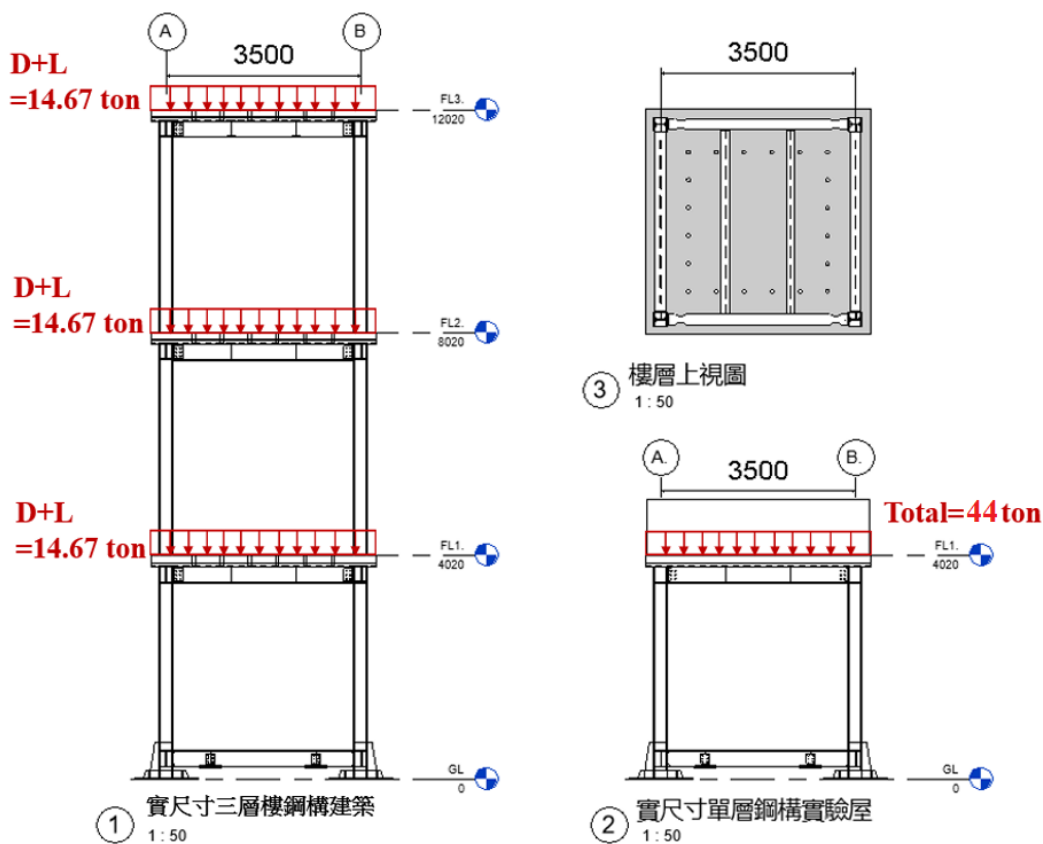


圖 17 實尺寸鋼構實驗屋載重分配示意圖

本計畫所興建之鋼構實驗屋為單跨×單跨之一層樓建築，圖 18 為鋼構實驗屋之立面圖與平面圖，整座鋼構實驗屋使用 SN490B 結構柱以及 SN400B 之大梁小梁和地梁作為主要構件，樓層高度 3.5 m，柱底墩座高度 0.5 m，樓層總高度為 4 m，其平面 X 向單一跨距為 3.5 m，平面 Y 向單一跨距亦為 3.5 m，四支 H 型鋼柱底板皆與柱底墩座栓接，柱底墩

座底部鋼板再與鋼框架底座之鋼板栓接。

上部構件尺寸如表 3 所示，整座鋼構實驗屋使用：四根結構 RH-250×250×12×20 之 SN490B 鋼材、大梁及地梁皆使用 RH-294×200×8×12 之 SN400B 鋼材、小梁使用 RH-300×150×6.5×9 之 SN400B 鋼材，而鋼承樓版使用 3W 鋼承板種類來做為樓版的材料。柱底墩座施作之斷面詳圖如圖 19 所示，柱底墩座尺寸為 600 mm(長)×600 mm(寬)×150 mm(高)，使用 20 mm 厚之鋼板圍成一 600 mm(長)×600 mm(寬)之開口，鋼板內外部皆銲上加勁版固定於鋼底板上，對柱底做加強避免試體發生傾倒之情形。

頂部梁柱接合如圖 20 所示，TYPE A 接合詳採用圓弧切削減弱式接頭使塑性鉸發生位置遠離梁柱交會區，確保梁柱能有效發揮塑性變形達到消能作用。

FSB1 與型鋼柱彎矩結合詳圖如圖 21 所示，為避免鋼構實驗屋在台南歸仁內政部建築研究所與震中心台南實驗室吊送途中產生扭矩，特別配置地梁 FSB1 避免破壞，地梁使用螺栓接合之方法固定，方便後續地梁的拆裝。

本試驗預計在鋼構實驗屋之鋼承樓版頂部放置一塊重 33 tf 之混凝土載重塊，用以模擬上部樓層重量，而鋼成樓版內部將預留 20 個內徑 10 公分之孔位，以利後續使用預力鋼棒將樓板及載重塊相互固定

本文共製作 2 座鋼構實驗屋，其中一座為未受火害之對照組試體、另一座為火害後空冷之實驗組試體以作比較。

表 3 鋼構實驗屋之構件斷面尺寸表

構件	編號	構件尺寸(mm)	材質
柱	SC1	RH-250×250×12×20	CNS SN490B
地梁	FSB1,FSG1	RH-294×200×8×12	CNS SN400B
梁	2SB1,2SG1	RH-294×200×8×12	CNS SN400B
	Sg1	RH-300×150×6.5×9	CNS SN400B
基座	F1	600×600×500	
版	SS1	t = 200	常重混凝土 $f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$
備註	本階段僅取地上壹層樓梁柱結構。		

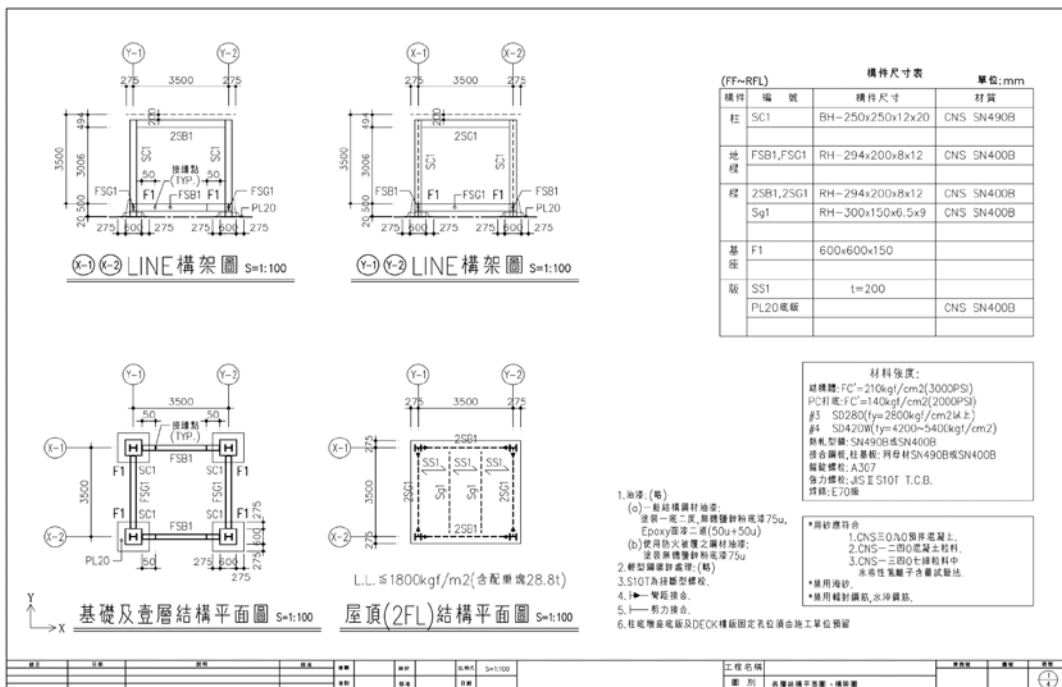


圖 18 鋼構實驗屋平面圖、立面圖

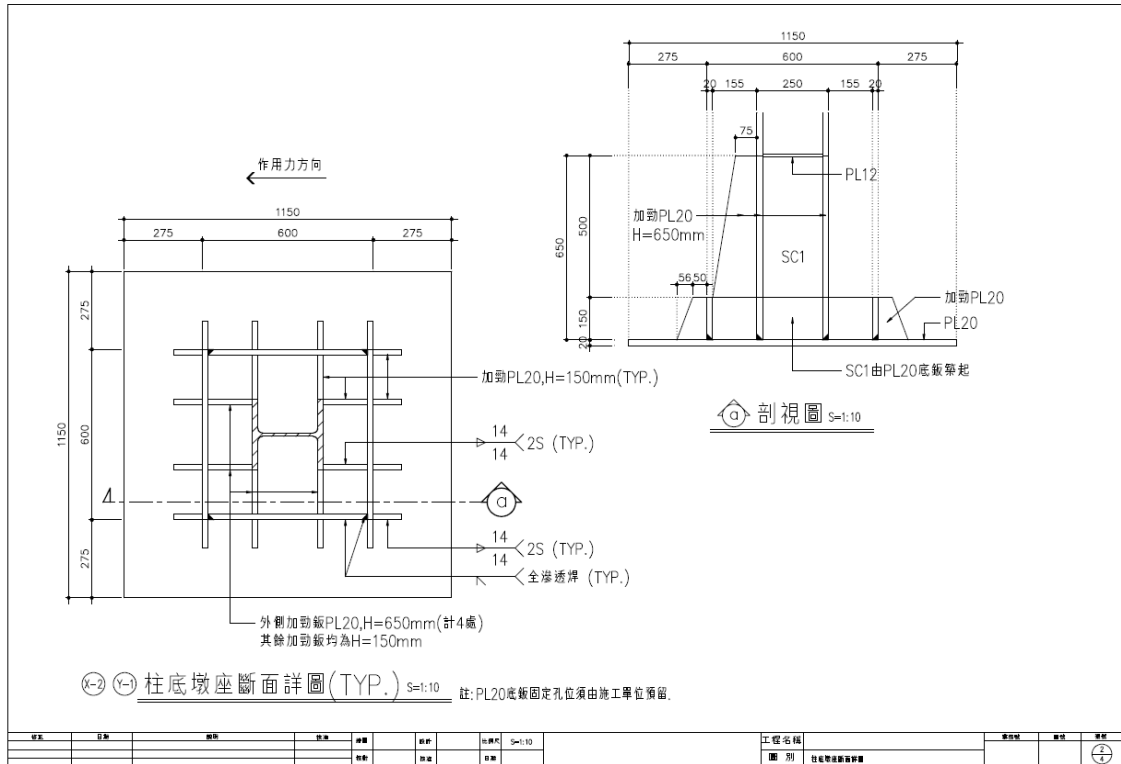


圖 19 柱底墩座斷面詳圖

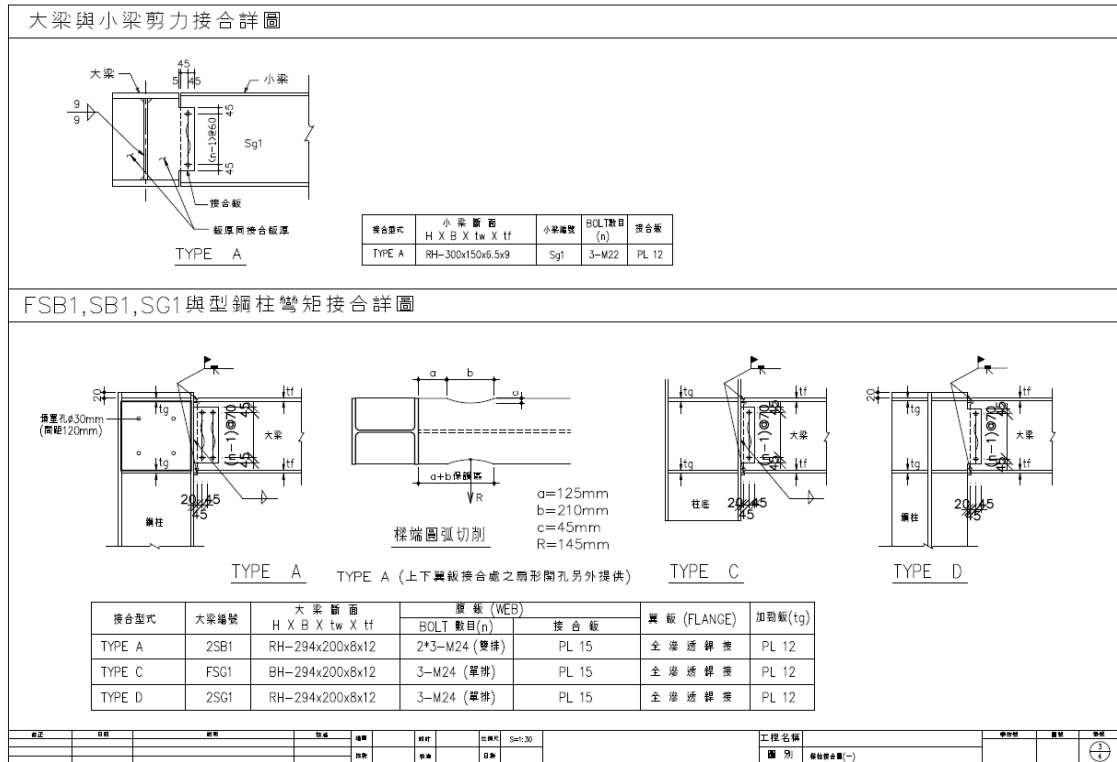


圖 20 鋼構實驗屋大梁小梁及梁柱剪力接合詳圖

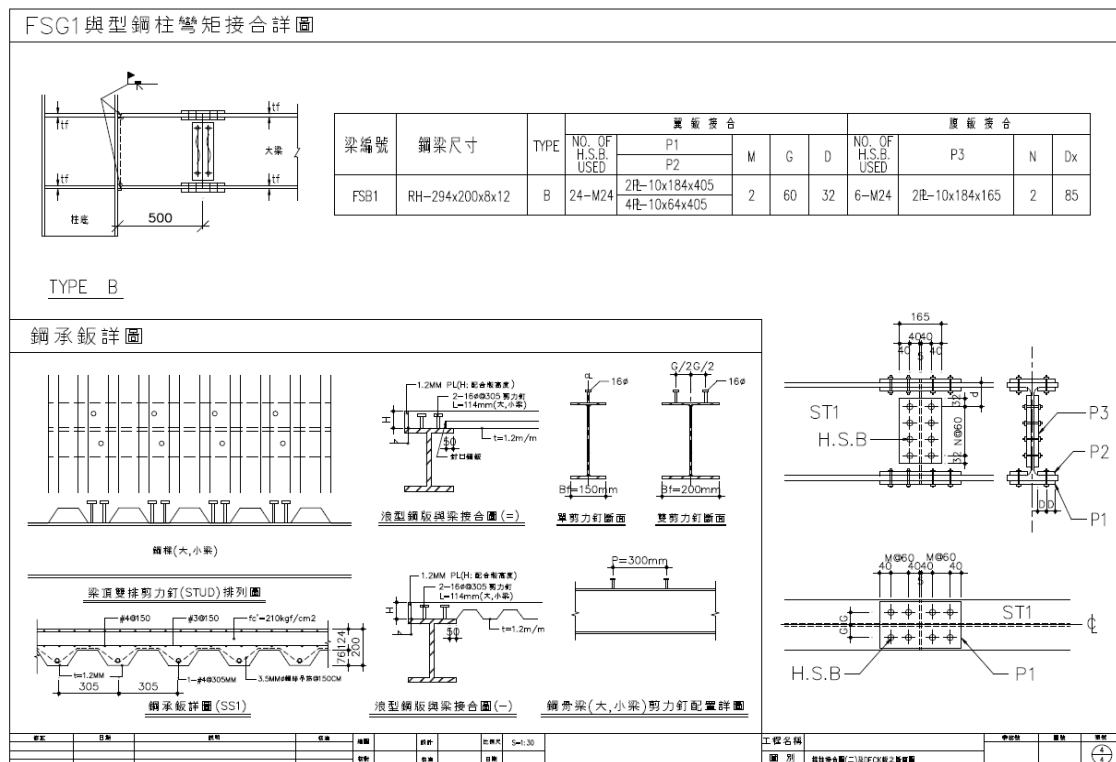


圖 21 鋼構實驗屋梁柱接合圖及 DECK 版斷面

## 參、研究發現

### 一、鋼筋混凝土構架屋振動台實驗結果

#### (一)火害實驗結果與討論

圖 22 為 F 試體之火害實驗進程，分為閃燃、完全燃燒、木材倒塌、停止燃燒等 4 個主要階段。本次實驗結果，梁表面、保護層內側、中心混凝土之最高溫分別為 478°C、229°C 及 106°C；鋼筋最高溫為 200°C。柱表面、保護層內側、中心混凝土之最高溫分別為 360~500°C、255°C 及 135°C；鋼筋最高溫為 191°C。樓板底部表面最高溫達 613°C，保護層內側最高溫為 327°C。F 試體在無額外載重塊加載條件下燃燒，裂縫紀錄如圖 23 所示。損壞最明顯處是角隅混凝土剝落，其主要原因為同時承受兩個方向的溫度傳遞，導致其溫度變化程度較高，熱膨脹較為劇

烈進而導致破壞剝落。角隅剝落現象主要位於柱中央段，其主要原因為木框架燃燒之高程正好落在柱底以上 40 cm 至柱頂的區間。

圖 24 所示為空間熱電偶樹所量測之溫度總平均圖。由圖中可知前 3000 秒內有兩次峰值產生，原因為木框架於不同時間點產生大量燃燒，並於二次燃燒後穩定直到產生悶燒蓄熱現象，導致後續溫度呈現平台段且延時長，約莫達 14000 秒後開始降溫，降溫速率約為  $2.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，直至 20000 秒空間平均溫度約降至  $100^{\circ}\text{C}$ 。

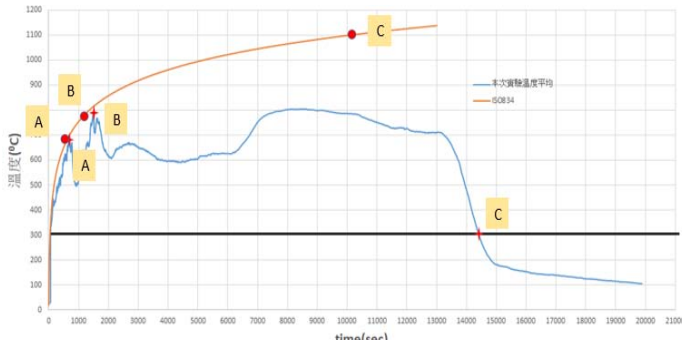
本研究參考 Inberg [9]之溫度等效面積法，並比對 ISO834 標準升溫曲線[10]以求取等效時間及等效溫度。由圖 24 取 3 個點，分別對應 A 點為溫度上升速率減緩點、B 點為最高溫度點，及 C 點為溫度降至  $300^{\circ}\text{C}$  點。由圖 24 在  $300^{\circ}\text{C}$  以上所圍成的面積，與 ISO834 曲線所圍面積相等原則，可得等效火害延時 167 分鐘（2.78 小時）及等效溫度  $1099^{\circ}\text{C}$ 。



圖 22 F 試體火害實驗進程



圖 23 F 試體火害後柱表面裂縫及混凝土剝落



時間點	編號	平均空氣溫度曲線	ISO834 標準升溫曲線
升溫速率減緩	A	697秒, 696.66°C	630秒, 685.65°C
最高溫出現	B	1504秒, 793.68°C	1290秒, 792.126°C
降至300°C	C	14414秒, 300.05°C	10060秒, 1099.112°C

圖 24 F 試體火害溫度延時曲線與 ISO834 標準升溫曲線比較圖

## (二)振動台實驗結果與討論

根據白噪試驗之加速度量測結果，分別以振動台面與 2 樓樓板之加速度作為輸入與輸出訊號，將其以快速傅立葉轉換後再相除取為頻率響應函數，由峰值所對應的橫坐標即為結構自然頻率。無火害 NF 試體受強震前之週期為 0.48 sec，實驗終止時（TCU063 組別，PGA = 0.185g）之週期為 1.06 sec。有火害 F 試體受強震前之週期為 0.80 sec，實驗終止時（TCU063 組別，PGA = 0.125g）之週期為 1.11 sec。如將 NF、F 試體皆視為單自由度剪力屋架系統，F 試體受強震前之初始側向勁度相較於 NF 試體，因為火害關係折減 64%。無論 NF 或 F 試體，地震引致的結構損壞均造成結構周期延長，F 試體在較小的震動作用下，結構週期就與 NF 相近。

NF 試體在 TCU063，PGA = 0.2g 時發生接頭剪力破壞，所有平行振動方向之接頭出現 X 形裂縫，如圖 25 所示。F 試體在 TCU063，PGA = 0.125g 時發生相同破壞模式，但裂縫數量較少。經檢討接頭剪力破壞與「接頭剪力容量係數」有關，現行混凝土結構規範（土木 401-100）[2] 採用 3.2，但預計 111 年頒布新規範（土木 401-111）[11]修正為 2.1。本實驗於規設階段採用現行規範，接頭剪力容量與剪力需求比值尚屬核可，但如以新規範檢核則有所不足，確實有剪力破壞發生的疑慮。

表 4 所示為地震輸入與結構反應關係。當 EL Centro，PGA = 0.1g 時，F 試體與 NF 試體之層間位移分別為 16.24 mm、26.56 mm，放大 1.63



倍；當 TCU063，PGA = 0.1g 時，F 試體與 NF 試體之層間位移分別為 18.21 mm、47.11 mm，放大 2.6 倍。圖 26 及圖 27 分別顯示 EL Centro 震波與 TCU063 震波，火害前、後 PGA 與層間位移關係，可觀察火害後初始勁度有顯著折減。TCU063 震波作用下，以樓層相對位移達 90 mm（層間位移角達 3%）作為實驗終止條件，PGA 由 0.184 g 降為 0.134 g，整體耐震能力下降 27%，折減幅度非常顯著。

表 4 NF 與 F 試體之地震輸入與結構反應

Specimen	Input ground motion	Target PGA (g)	Achieved PGA (g)	Roof Acc. (g)	Inter-story drift (mm)	Inter-story drift ratio (%)
NF	EL Centro	0.1	0.790	0.168	<u>16.24</u>	0.5
	TCU063	0.1	0.094	0.174	<u>18.21</u>	0.6
	EL Centro	0.2	0.164	0.299	38.27	1.3
	EL Centro	0.2	0.183	0.341	48.28	1.6
	TCU063	0.2	<u>0.184</u>	0.483	<u>91.86</u>	<u>3.1</u>
F	EL Centro	0.1	0.089	0.162	<u>26.56</u>	0.9
	TCU063	0.1	0.094	0.243	<u>47.11</u>	1.6
	EL Centro	0.125	0.092	0.227	42.79	1.4
	EL Centro	0.125	0.112	0.264	51.75	1.7
	TCU063	0.125	<u>0.134</u>	0.383	<u>98.64</u>	<u>3.3</u>



圖 25 NF 試體梁柱接頭剪力破壞 (TCU063, PGA = 0.2 g)

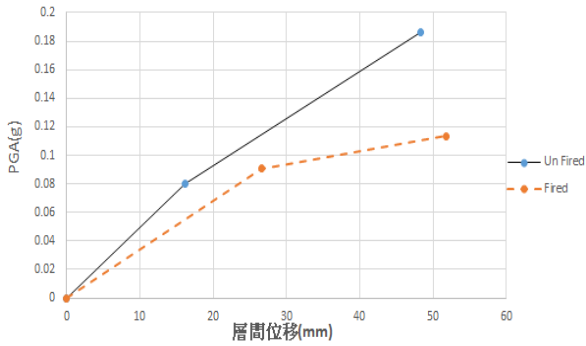


圖 26 EL Centro 組別 PGA 與層間位移圖

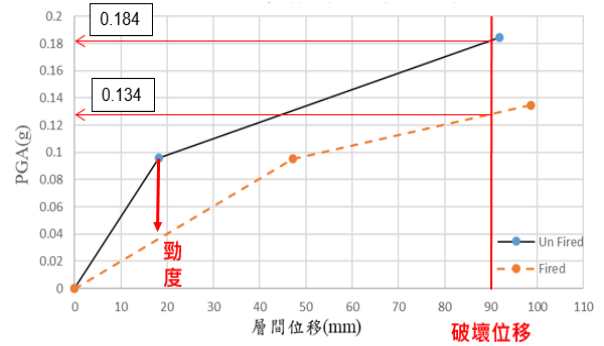


圖 27 TCU063 組別 PGA 與層間位移圖

## 二、火害前後 RC 構架屋受地震力之數值模擬

### (一)無火害原始質量塊數值模型接頭強度折減分析

由於前段無火害數值模型之模擬結果於受地震力各階段皆與實驗結果在結構物受振頻率與位移歷時之變化上稍有落差，因此本段接續對構架屋接頭之強度進行折減，探討接頭強度之變化對受振頻率與位移歷時上之影響。

本段研究彙整，當接頭強度折減至殘餘 30% 時，結構物振動頻率以及層間位移角始有明顯之折減，而當接頭強度折減至殘餘 20% 時，構架屋則於 0.2g TCU 時發生層間位移角超過 3% 以及接頭破壞使分析終止，同於實驗之結果。圖 28 至圖 32 為接頭殘餘 20% 強度模型之受各地震力位移歷時，表 5 與表 6 為最大層間位移角以及結構物振動頻率與實驗值之誤差比較。相較原始接頭強度之模擬結果，殘餘 20% 強度之接頭能於各受振階段以高正確性捕捉位移歷時以及頻率變化，其接頭強度應為更正確之值。表 7 與表 8 為原始強度接頭與殘餘 20% 強度接頭之最大層間位移角以及結構物振動頻率誤差比較。然而，如表 6 所示，實驗構架屋之初始頻率為 2.08 Hz，破壞時頻率為 0.94 Hz，本段之殘餘 20% 強度接頭構架屋模型之初始頻率為 1.64Hz，破壞時頻率為 1.20Hz，而先前章節之原始強度接頭構架屋模型之初始頻率為 2.11 Hz，破壞時頻率為 1.52 Hz，其破壞程度雖不及殘餘 20% 強度接頭之模型，但其初始頻率有

較高之正確性。因此，依本段所歸納之分析結果，值得對構架屋試體做進一步之探討了解是否有其他因素影響試體於受地震力後之破壞。

**表 5 接頭強度殘餘 20%之分析模型於未受火害時之最大層間位移角**

項目	實驗結果	20%殘餘強度	誤差
0.1g El Centro	0.54 %	0.52 %	4 %
0.1g TCU	0.56 %	0.57 %	2 %
0.2g El Centro	1.23 %	1.11 %	10 %
0.2g El Centro	1.61 %	1.33 %	17 %
0.2g TCU	3.06 %	3.22 %	5 %

**表 6 接頭強度殘餘 20%之分析模型於未受火害時之自然振動頻率**

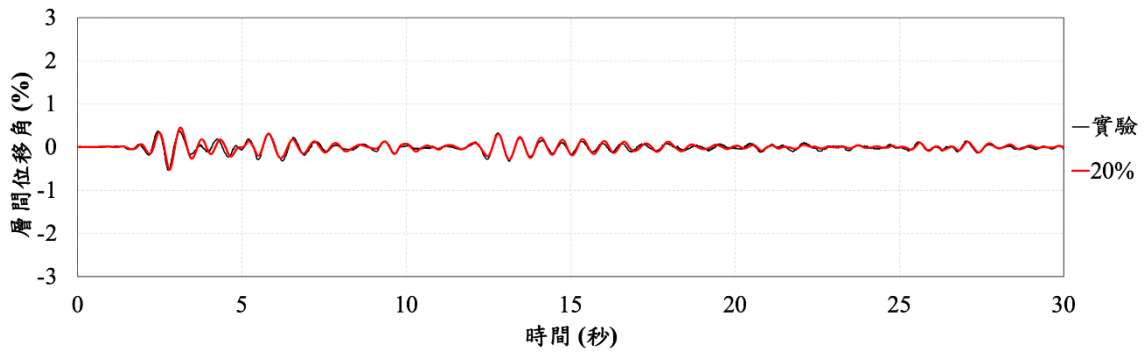
項目	實驗結果	20%殘餘強度	誤差
受地震力前	2.08 Hz	1.64 Hz	129 %
0.1g El Centro後			
0.1g TCU後			
0.2g El Centro後	1.31 Hz	1.27 Hz	3 %
0.2g El Centro後			
0.2g TCU後			

**表 7 有無接頭強度折減之最大層間位移角誤差比較**

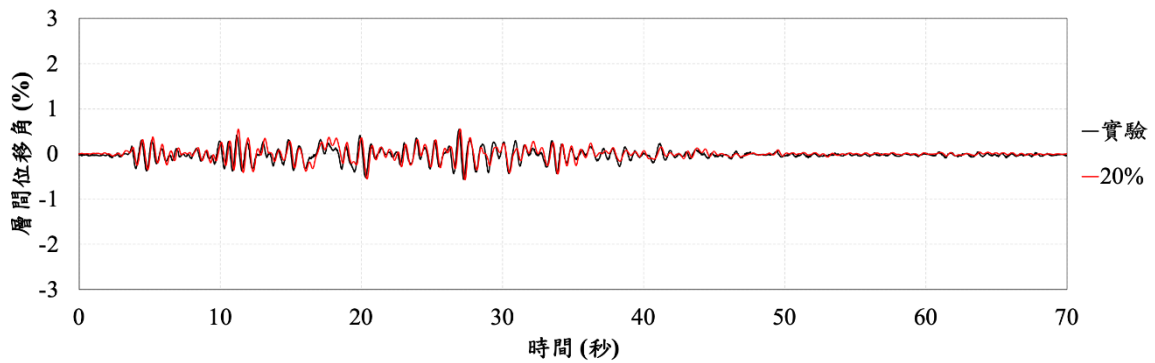
項目	原始強度	20%殘餘強度
0.1g El Centro	13 %	4 %
0.1g TCU	2 %	2 %
0.2g El Centro	15 %	10 %
0.2g El Centro	24 %	17 %
0.2g TCU	64 %	5 %

**表 8 有無接頭強度折減之自然振動頻率誤差比較**

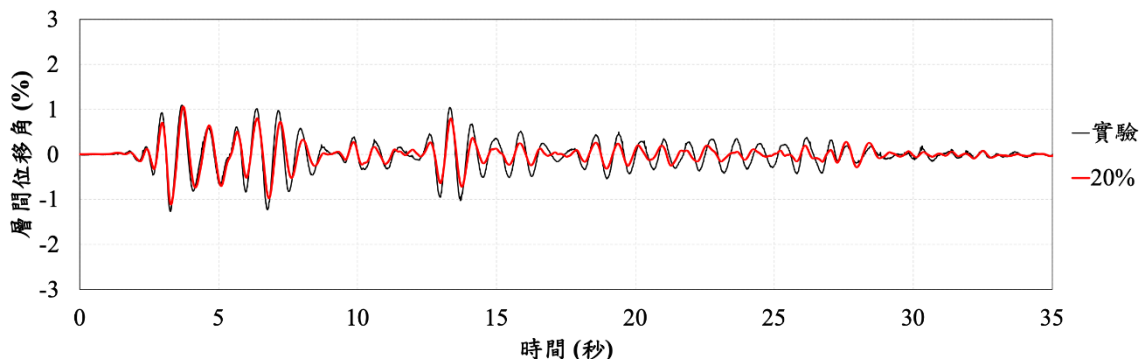
項目	原始強度	20%殘餘強度
受地震力前	1 %	129 %
0.1g El Centro後	5 %	8 %
0.1g TCU後	14 %	3 %
0.2g El Centro後	19 %	3 %
0.2g El Centro後	35 %	8 %
0.2g TCU後	62 %	28 %



**圖 28 0.1g El Centro 加速度無火害接頭強度殘餘 20%模擬結果**



**圖 29 0.1g TCU 加速度無火害接頭強度殘餘 20%模擬結果**



**圖 30 0.2g El Centro-1 加速度無火害接頭強度殘餘 20%模擬結果**

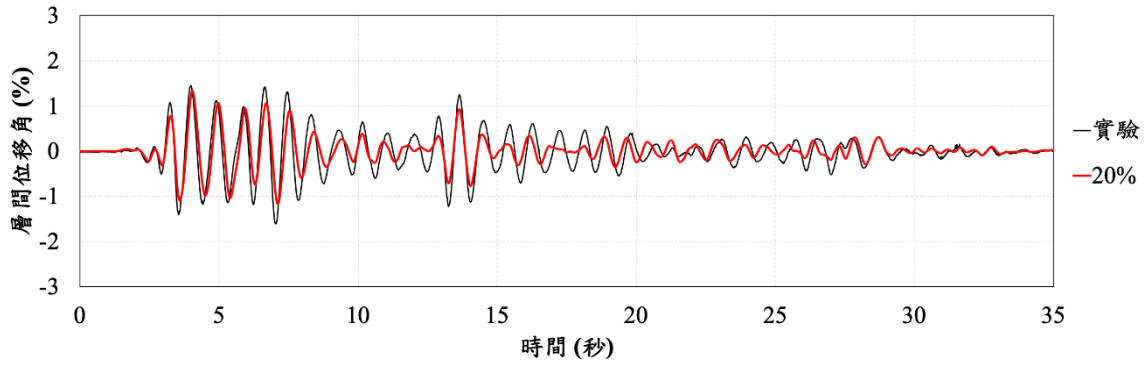


圖 31 0.2g El Centro-2 加速度無火害接頭強度殘餘 20%模擬結果

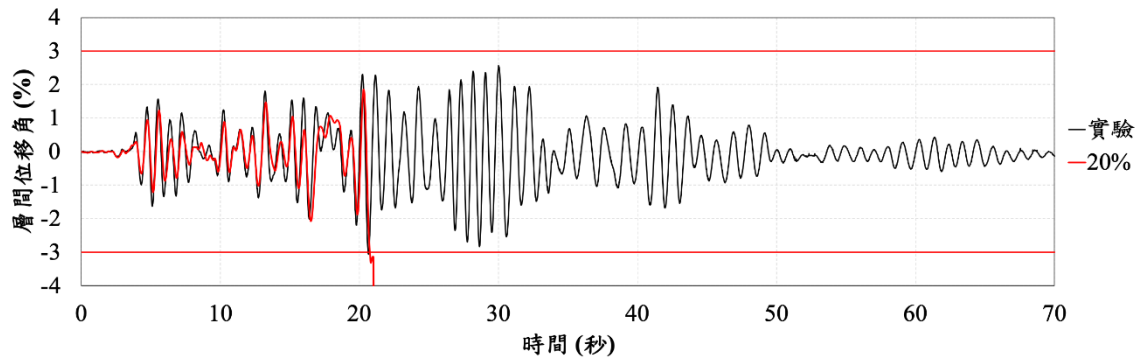


圖 32 0.2g TCU 加速度無火害接頭強度殘餘 20%模擬結果

## (二)有火害原始質量塊數值模型接頭強度折減分析

本章研究於先前章節因無火害數值模型之模擬結果與實驗結果於結構物受振頻率與位移歷時之變化上稍有落差，因此折減接頭強度以探討接頭強度之變化對受振頻率與位移歷時上之影響，本段亦做相同之探討，將火害後構架屋之接頭做折減後進行分析。

本段對火害後構架屋仍進行接頭強度折減至殘餘 70% 以及 50% 之受地震力模擬，其受振位移歷時彙整於圖 33 至圖 42 中，兩者皆於 0.125g TCU 地震力加載初期或加載前發生接頭破壞。與前段原始接頭之結果相比，可知接頭強度折減並未對分析結果有明顯影響。本段研究可歸納，本節所定義之火害後原始接頭強度構架屋於模擬試體之受振位移歷時與結構物振動頻率即有高正確性，而對構架屋接頭進行強度折減分析後亦可知其並未對受振位移歷時有明顯之影響，僅對結構物振動頻率有些微之折減，以及接頭破壞之提前，因此不需再對此進行探討。

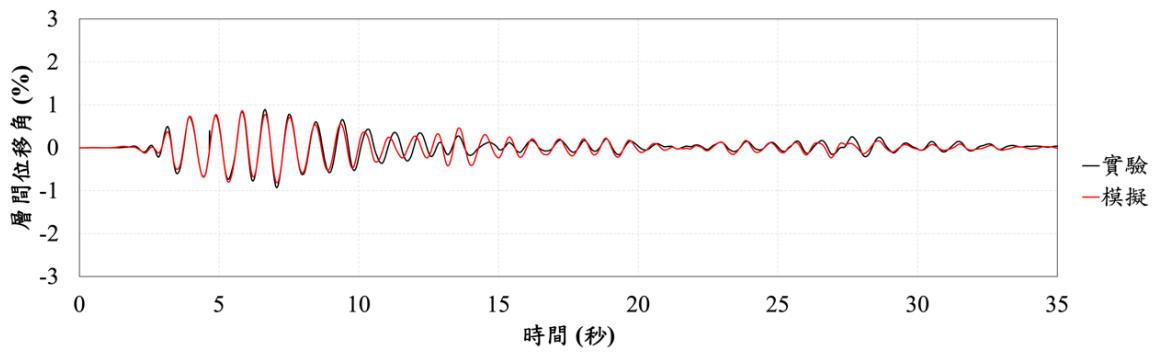


圖 33 0.1g El Centro 加速度火害後接頭強度殘餘 70% 模擬結果

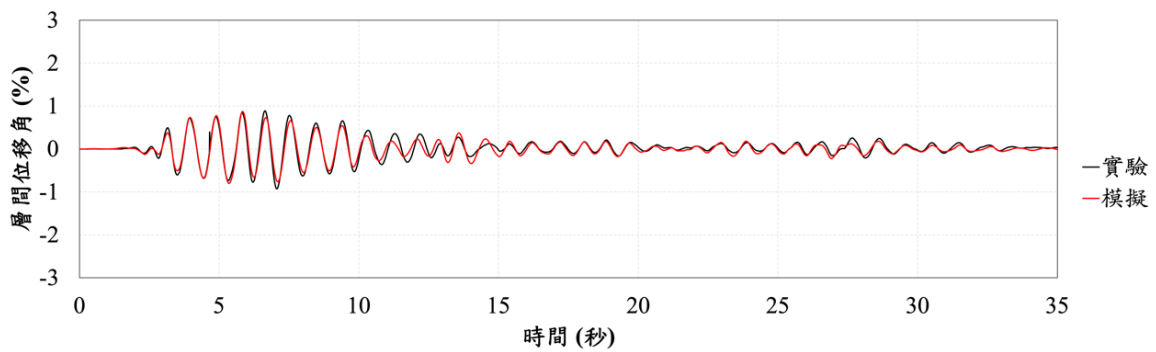


圖 34 0.1g El Centro 加速度火害後接頭強度殘餘 50% 模擬結果

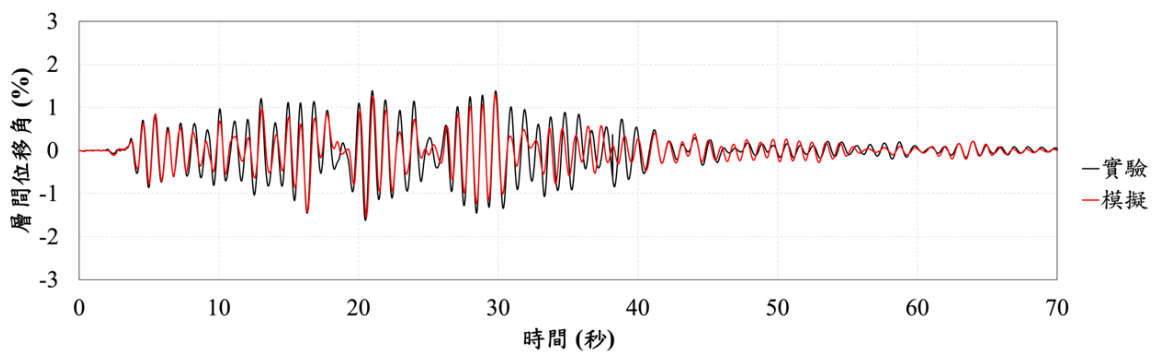


圖 35 0.1g TCU 加速度火害後接頭強度殘餘 70% 模擬結果

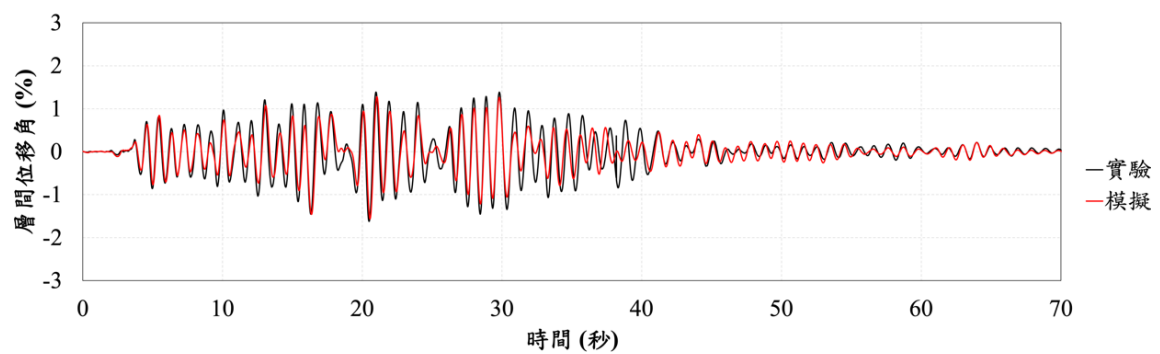


圖 36 0.1g TCU 加速度火害後接頭強度殘餘 50% 模擬結果

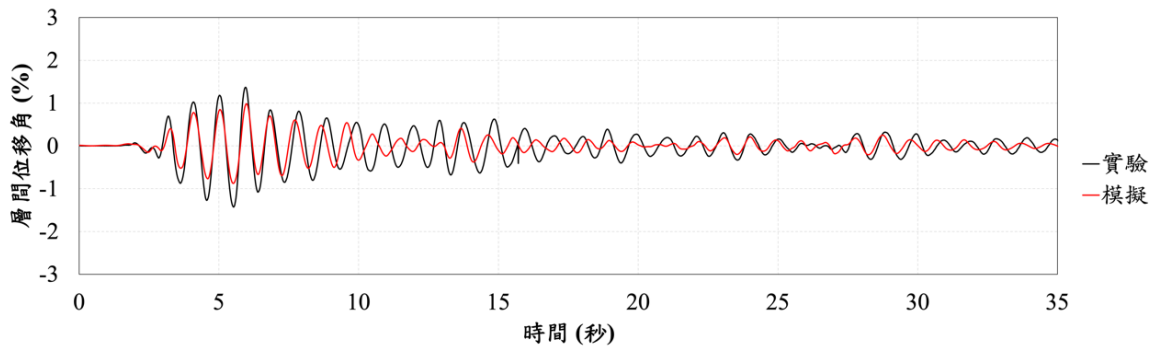


圖 37 0.125g El Centro-1 加速度火害後接頭強度殘餘 70% 模擬結果

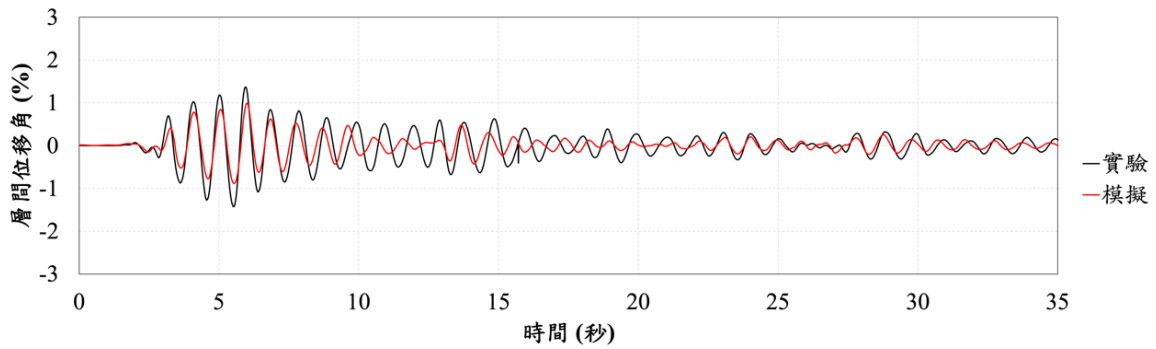


圖 38 0.125g El Centro-1 加速度火害後接頭強度殘餘 50% 模擬結果

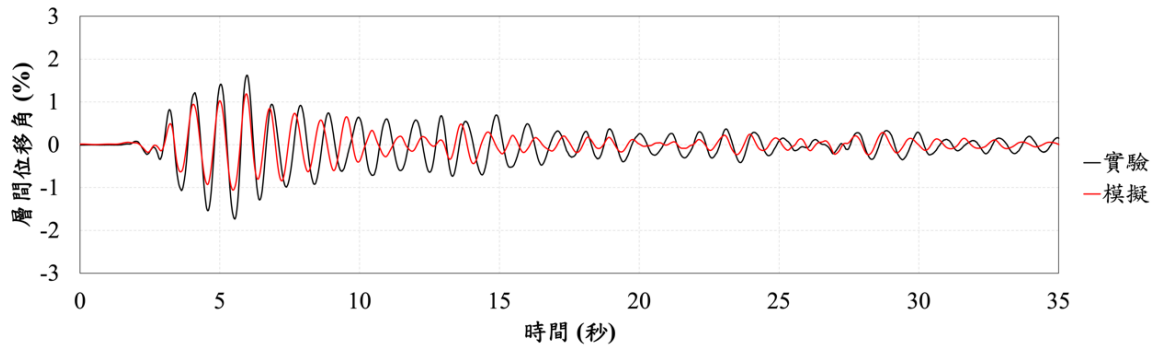


圖 39 0.125g El Centro-2 加速度火害後接頭強度殘餘 70% 模擬結果

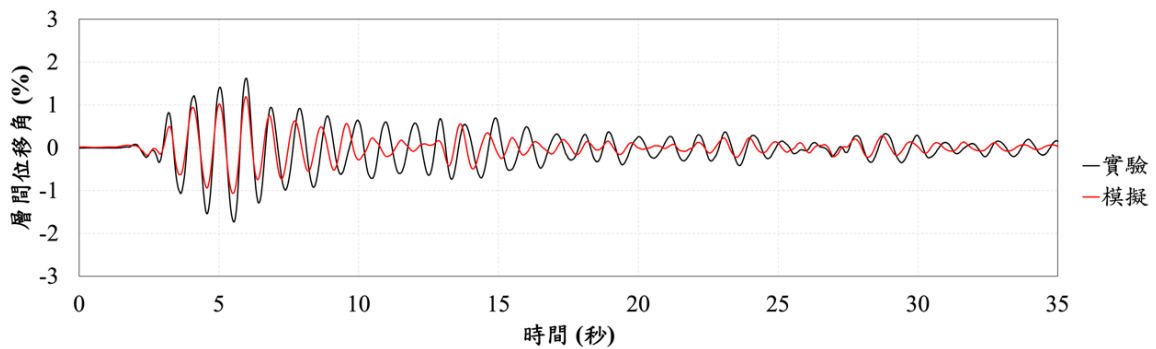


圖 40 0.125g El Centro-2 加速度火害後接頭強度殘餘 50% 模擬結果

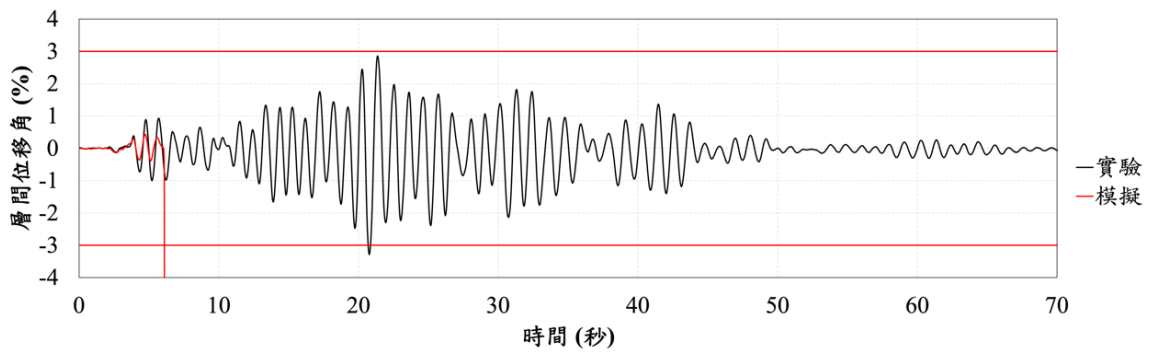


圖 41 0.125g TCU 加速度火害後接頭強度殘餘 70%模擬結果

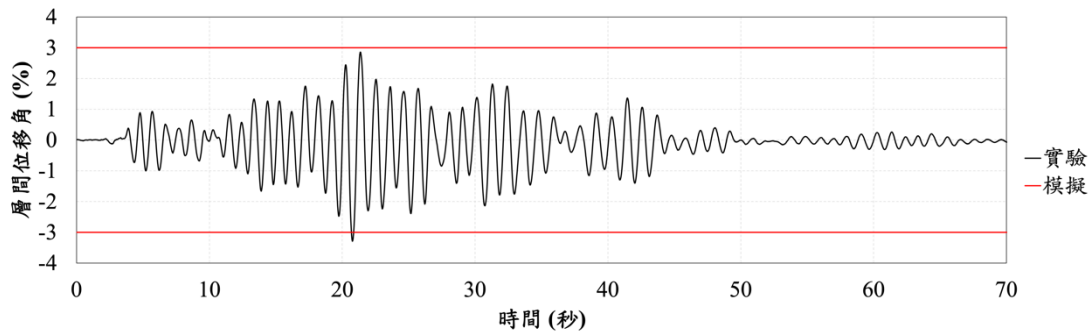


圖 42 0.125g TCU 加速度火害後接頭強度殘餘 50%模擬結果

### 三、實尺寸鋼構實驗屋之施作

本節整理其詳細施工項目如表 9 所示，本研究於 110 年 10 月 1 日開始動工，隨後即按照既定之施工項目與施作進度進行，其施工項目依序為：型鋼放樣、型鋼長度切割、腹板開孔、全滲透銲接開槽切削、大梁圓弧切削減弱式接頭切割、結構柱與 PL20 底板銲接、銲道非破壞檢測 (UT)、加勁版、連接版銲接、現場勘驗、梁柱現場組立、鋼承板施工、剪力釘佈設、鋼承板依圖面開孔、鋼承板開孔預留管施作、鋼承板內鋼筋綁紮、依圖 6-6 佈設熱電耦點位、熱電耦依圖面佈設、鋼承板內灌漿、鋼承板粉光。

施工過程中，有專業技師與本研究團隊進行現場之監造事宜，其施工進度及現場監造照片，如圖 43 所示。



表 9 實尺寸鋼構實驗屋施工項目

項次	施工項目	項次	施工項目
1	型鋼放樣	10	梁柱現場組立
2	型鋼長度切割	11	鋼承板施工
3	腹板開孔	12	剪力釘佈設
4	全滲透銲接開槽切削	13	鋼承板依圖面開孔
5	大梁圓弧切削減弱式接頭切割	14	鋼承板開孔預留管施作
6	結構柱與 PL20 底板銲接	15	鋼承板內鋼筋綁紮
7	銲道非破壞檢測(UT)	16	依圖 6-6 佈設熱電耦點位
8	加勁版、連接版銲接	17	鋼承板內灌漿
9	現場勘驗	18	鋼承板粉光

1. 型鋼放樣



2. 型鋼長度切割



### 3. 腹板開孔



### 4. 全滲透銲接開槽切削



### 5. 大梁圓弧切削減弱式接頭切割



6. 結構柱與PL20底板銲接



7. 銲道非破壞檢測(UT)



8. 加勁版、連接版銲接



圖 43 實尺寸鋼構實驗屋之施作

## 肆、結 論

本研究 110 年的主題是探討火害後鋼筋混凝土 (RC) 構架屋之耐震性能，並製作鋼鋼構架屋。因此，本研究團隊利用 109 年已製作之 RC 構架屋，於內政部建築研究所防火實驗中心戶外場地進行火害實驗，以模擬 RC 構架屋在火場中所受到高溫影響，之後再運至鄰近的國家地震中心台南實驗室，進行未受火害和受火害 RC 構架屋之振動台實驗，藉以了解火害後 RC 構架屋之耐震能力變化。本研究亦建置單層單跨鋼(SS)造構架屋 2 座，以供後續鋼造構架屋火害後的耐震性能研究之用。此外，本研究同時進行受火害與未受火害單層單跨 RC 造構架屋受地震之數值模擬，並研擬完成鋼筋混凝土造火害後耐震能力評估流程。本研究所得結論如下：

- (1) RC 構架屋之振動台實驗結果顯示，相較於無火害 RC 構架屋，有火害 RC 構架屋受近斷層地震作用時，側向勁度折減 64%、層間位移放大 2.6 倍、耐震能力下降 27%。
- (2) RC 構架屋之梁柱接頭剪力破壞可印證，土木 401-110 規範草案對於梁柱接頭剪力容量之係數由 3.2 修正為 2.1 為合理作法。假設梁柱接頭未發生剪力破壞，依系統識別之參數進行側推分析模擬，火害後構架屋之耐震能力降低 28%。
- (3) 根據受火害 RC 構架屋實驗與分析比較結果，以等效 ISO 834 火害延時搭配 Eurocode2 之 500 度等溫線法，選擇截角斷面可獲得火害後柱斷面之等效混凝土抗壓強度與慣性矩折減係數(0.25)。
- (4) 本研究驗證使用有限元素分析軟體 OpenSees 建立之 RC 構架屋數值模型於模擬火害前後試體受地震力行為之正確性與可行性，並能用於日後模擬 RC 結構物受火害後之使用性與安全性之評估與預測。
- (5) 本研究依照我國鋼結構耐震設計規範，完成實尺寸鋼構屋結構之分析與設計，並興建 2 座單層單跨之實尺寸鋼構實驗屋，未來可用來模擬

實際三層樓鋼構建築火害前後受震之振動台實驗。

- (6)鋼構屋之側推分析結果顯示，火害後鋼構屋之最大側推(剪力)強度下降約 24%、彈性段之側向勁度下降約 8%。另動力分析結果發現，火害後鋼構屋有延長周期、增加層間位移及頂層加速度趨勢。

## 伍、參考文獻

1. 鍾興陽、洪崇展、黃世建、劉光晏，「火害後建築物之結構耐震性能評估(1/3)--鋼筋混凝土造與鋼構造構件火害後耐震性能研究」，內政部建築研究所專題研究計劃報告，2020。
2. 內政部營建署，「混凝土結構設計規範」，2011。
3. 蘇鴻奇、張尚文、王鵬智，「火載量評估技術之研究-以辦公空間為例」，2010 建築防火科技創新技術國際研討會，台北，2010。
4. 趙翊翔，「實尺寸鋼構實驗屋之複合鋼承樓版於自然火災下結構行為研究」，國立成功大學碩士論文，2016。
5. 楊元森，「地震工程結構分析 OpenSees 軟體簡介」，檢自 <http://www.ncree.org/Files/Publications/10000024.PDF>，2003。
6. AIJ, 2009. "Guidebook for fire resistive performance of structural materials." 34-171.
7. 內政部營建署，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」，2010。
8. Ingberg, SH. 1928, "Tests of the severity of building fires". NFPA Quarterly, 22(1), 43-61, 1928.
9. ISO 834, 1999. "Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements". International Standard ISO 834, Geneva.
10. 中國土木水利工程學會，「混凝土工程設計規範與解說（土木 401-111）」，科技圖書股份有限公司，台北，2022。

智慧型消防機器人核心功能增值模組與消防人員  
火場定位技術之先期研究



## 主講人簡歷

姓 名：游坤明

服務單位：中華大學資訊工程學系

職 稱：特聘教授兼副校長/研發長/AI<sup>+</sup>體驗中心主任

聯絡電話：03-5186105

傳 真：03-5375185

電子信箱：yu@chu.edu.tw

學 歷：美國德州大學電腦科學博士

經 歷：中華大學資訊學院院長、中華大學管理學院院長、中華大學  
巨量資料研究中心主任、中華大學物聯網研究中心主任

主要著作：

1. 陳昫暄、游坤明、余佑享、徐煥博、童尚偉、雷明遠、蔡綽芳，「基於深度學習之極早期火焰辨識系統與應用」，ITAOI 2021 第十九屆離島資訊技術與應用研討會，2021。
2. 劉鍾興、游坤明\*、陳昫暄、歐陽雯、徐煥博、雷明遠、蔡綽芳，「以物聯網技術探討 FDS 室內燃燒模擬--以長照機構為例」，ITAOI 2021 第十九屆離島資訊技術與應用研討會，2021。
3. 歐陽雯、游坤明\*、劉鍾興、陳昫暄、雷明遠、蔡綽芳，「應用 Poisson 分佈技術建置一個智慧型室內火災預測模型--以長照機構為例」，ITAOI 2021 第十九屆離島資訊技術與應用研討會，2021。
4. 游坤明\*、徐煥博、雷明遠、蔡綽芳，「建築物智慧動態避難引導分析」，2019 智慧防救災理論與實務研討會，pp. 1-13，2019。
5. Hong Zhou, Kun-Ming Yu\*, Yen-Chiu Chen, Huan-Po Hsu., " A Hybrid Feature Selection Method RFSTL for Manufacturing Quality Prediction Based on a High Dimensional Imbalanced Dataset", IEEE Access, Vol. 9, pp. 29719 - 29735, Feb. 2021. (IF=3.745, SCIE, EI, SCOPUS). (MOST 105-2221-E-216 -015 -MY2).
6. Zhou Hong & Kun-Ming Yu, "Research on Spatio-Temporal Association Mode and Mobile Object Behavior Pattern Mining Based on Taxi Track



- Data under Big Data Background", *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, Vol. 21, No. 2, 2018.
7. Yen-Chiu Chen, Kun-Ming Yu, Huan-Po Hsu, You-Xiang Xu, Shang-Wei Tong, Wen Ouyang, Ming-Yuan Lei and Nancy Tsai, "Hdf-RTFD: Heterogeneous-data-fusion based Real Time Fire Detection System in AIoT Environments," *The 12th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (AOSFST 2021)*, Brisbane, Australia, December 07-09, 2021.
  8. Wen Ouyang, Chung-Hsing Liu, Kun-Ming Yu, Yen-Chiu Chen, Ming-Yuan Lei and Nancy Tsai, "Intelligent Detection and Prediction of Indoor Fires Based on Gamma Distribution Models for Long-Term Care Facilities," *The 12th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (AOSFST 2021)*, Brisbane, Australia, December 07-09, 2021.
  9. Xianfeng Hu, Kun-Ming Yu\*, Ken H. Chuang, Huan-Po Hsu, Chung-Hsing Liu, Shang-Wei Tung, Yen-Chiu Chen, Ming-Yuan Lei, Nancy Tsai, "Design and Implementation of Indoor Positioning System using Bluetooth Low Energy", *2019 2nd International Conference on Communication, Network and Artificial Intelligence (CNAI2019)*, pp. 52-57, 2019. (EI), *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 790 (2020), doi:10.1088/1757-899X/790/1/012009.
  10. Yen-Chiu Chen, Kun-Ming Yu, Huan-Po Hsu, Chung-Hsing Liu, Ming-Yuan Lei, Nancy Tsai, "IFPSS : Intelligence Fire Point Sensing Systems in AIoT Environments ", *2019 the 2nd International conference on Image, Video Processing and Artificial Intelligence (IVPAI 2019)*, pp. 7-12, 2019. (EI), *Proceedings of SPIE* Vol. 11321; doi: 10.1117/12.2550315.
  11. Kun-Ming Yu, Huan-Po Hsu, Nien-En Chung, Cheng-Chang Lien, Shao-Tsai Cheng, Ming-Yuan Lei, Nancy Tsai, "Construct an Intelligent Evacuation Guidance System with Open System Architecture", *2018 International Conference on Advanced Control, Automation and Artificial Intelligence (ACAAI 2018)*, 2018. (EI).

## 中文摘要

游坤明<sup>1</sup> 陳昀暄<sup>2</sup> 吳明倫<sup>3</sup> 童尚偉<sup>4</sup> 雷明遠<sup>5</sup> 蔡綽芳<sup>6</sup>

**關鍵字：**智慧型消防機器人、物聯網技術、室內定位、人工智慧

因應不同地形與地區特性的建築形式皆有所不同，在都市環境中空間緊密且多型態的建築物類型，其室內規劃方式更因不同年代之建築工法演進有各式種類的變化。環境的佈置以及設計會依據建築應用的特性有所差異，讓消防救災的救災訓練逐漸增加困難。在發生火災時，錯綜複雜的室內環境與瞬息萬變的火場變化往往會讓消防救災人員因現場資訊不足容易陷入危機，倘若消防救災人員能夠在救災前進行室內環境的初步了解與探知，不僅能夠提升救災避難的效率，也能夠降低消防救災人員的危險性。隨著消防設備技術的日新月異，在消防場域中，如何使用機器人以輔助消防專業人員成為一個新興之議題。

近年各國已經針對火災提出許多的消防救災機器人，但救災機器人種類繁多也沒有一定的應用準則，因此在各消防單位在挑選購買及使用消防機器人時，因功能不足或不適當而造成選購成本浪費。因此，本研究預計進行目前市場或研究領域上最新的消防救災機器人文獻探討與分析，以作為智慧型消防機器人核心功能增值模組之先期研究，並且提出一套可應用於室內環境無線定位之定位系統雛形，以提供火場環境的資訊傳輸以及室內定位之方法，其可作為提供消防救災時取得火場室內環境情況與輔助性研判資訊，以有效協助消防專業人員進行救災避難行動之參考應用。

---

<sup>1</sup>中華大學特聘教授、<sup>2</sup>中華大學助理教授、<sup>3</sup>中華大學碩士研究生、<sup>4</sup>中華大學碩士研究生、<sup>5</sup>內政部建築研究所研究員、<sup>6</sup>內政部建築研究所組長

# ABSTRACT

**Keywords : Intelligent fire-fighting robots, Internet of Things technology, indoor positioning, artificial intelligence**

The layout and design of the environment will vary according to the characteristics of the building application, making the disaster relief training for fire and disaster relief gradually more difficult. In the event of a fire, the complex indoor environment and the ever-changing fire scene often make fire rescue personnel fall into crisis due to insufficient information on the scene. The efficiency of evacuation can also reduce the risk of fire and disaster relief personnel. With the rapid development of firefighting equipment technology, how to use robots to assist firefighting professionals has become an emerging issue in the firefighting field.

In recent years, many countries have proposed many fire-fighting and disaster-relief robots for fires, but there are many types of disaster-relief robots and there is no certain application criteria. Therefore, when each fire-fighting unit chooses to buy and use fire-fighting robots, due to insufficient or inappropriate functions, the purchase cost is wasted. . Therefore, this research is expected to discuss and analyze the latest literature on fire-fighting and disaster-relief robots in the current market or research field, as a preliminary study on the core function value-added modules of intelligent fire-fighting robots, and propose a set of wireless positioning systems that can be applied to indoor environments. The prototype of the positioning system is to provide the information transmission of the fire environment and the method of indoor positioning.

It can be used as a reference application to obtain the indoor environment of the fire and auxiliary research and judgment information during fire rescue and disaster relief, so as to effectively assist fire professionals in disaster relief and evacuation operations.

# 壹、緒 論

## 一、研究動機與目的

發生火災時，錯綜複雜的室內環境讓消防救災人員常因現場資訊不足而易陷入危機，倘若消防救災人員能夠在救災前進行室內環境的初步了解與探知，不僅能夠提升救災避難的效率，也能夠降低消防救災人員的危險性。隨著在不同領域中使用機器人輔佐人類工作之功能研發，在消防救災領域中，各國已經針對火災場域提出許多的消防救災機器人，以協助消防人員進行火場資訊偵蒐或是救援，旨在降低搜救人員之傷亡。然而，救災機器人種類繁多也沒有一定的應用準則，因此在各消防單位在挑選購買及使用消防機器人時，因功能不足或不適當而造成選購成本浪費。

本研究預計將進行目前市場或研究領域上最新的消防救災機器人文獻探討與分析，參考及更新先前年度本所完成部分消防機器人之調查，本研究將更進一步探究消防機器人之核心功能研究，以完善消防機器人之核心功能分類規劃，以作為智慧型消防機器人核心功能增值模組之先期研究。另有別於現存以無線電通訊方式進行人員於火場中定位資訊之傳遞，本研究亦將針對現行室內定位技術進行文獻探討研究以提出一套可應用於室內環境無線定位之定位系統雛形，以提供火場環境的資訊傳輸以及室內定位之方法，其可作為提供消防救災時取得火場室內環境情況與輔助性研判資訊，以有效協助消防專業人員進行救災避難行動之參考應用。

## 二、研究目標

本計畫「智慧型消防機器人核心功能增值模組與消防人員火場定位技術之先期研究」是針對消防機器人的蒐集以及文獻分類以作為消防

選擇之參考依據及智慧型消防機器人核心功能之前期研究，並提供室內資訊以及定位之傳輸雛型架構，以提升輔助消防救災資訊傳遞之有效性，其研究目的如下：

1. 蒐集消防用無線感知設備、物聯網整合平台、影像監視資料及人員定位技術資訊及相關問題，並蒐集瞭解建築物無線電屏蔽效應及可能克服新技術資訊。
2. 探討消防機器人在消防救災各階段所需具備的核心功能，包含：偵蒐階段、滅火階段及救援階段所需之各項資訊與需求。
3. 進一步詳細盤點目前消防機器人之實際應用性，包含消防機器人之操控方式、應用場域、應用時機、應用功能及其限制項目。
4. 檢討如何透過模組化技術，將本所既有研究成果--多元異質(溫度、照度、影像以及特定氣體濃度等資料)人工智慧極早期火災預測即時運算系統及煙霧中人員搜尋 LiDAR 應用技術等，提供現有消防機器人功能加值之可行性研究。
5. 研究極早期火災之人工智慧精準預測模型[5]等與現行各應用場域消防機器人核心功能模組整合技術之可行性分析。

## 貳、研究內容

### 一、消防救災特性分析

火災發生時，消防救災致力於總體目標，集中運用消防戰力，快速達成人命搶救、撲滅火災，使傷亡損失減至最低的程度，確保民眾生命財產安全。在救災過程中如何依火災燃燒現象、發展情勢、擬定適當戰術，做好戰力部署，實有賴火場指揮官迅速、明智與正確地做出狀況判斷，狀況判斷在消防作戰中實居於關鍵性的程序，如圖 1 所示。

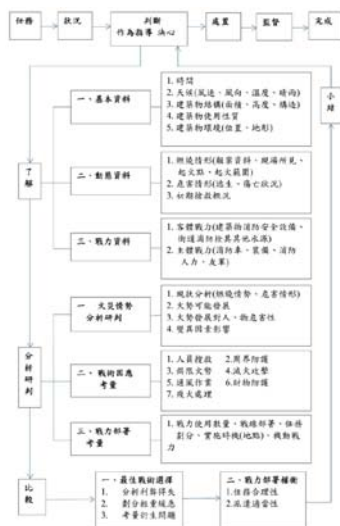


圖 1: 消防救災指揮作業程序模式[1]

在救災時，消防人員會使用救命器、火災安全管制版與個人安全名牌等方式，了解消防人員是否安全或是如何進行人員編排。

在火災救援主要分成下列三階段[2]：

1. 極早期偵蒐階段：極早期偵蒐階段火災範圍小，可燃物剛剛到達臨界溫度燃燒，不會產生高熱量輻射及高強度的氣體對流，煙氣量不大，燃燒所產生之有害氣體未瀰漫，被困人員有一定時間逃生，且對建築未達破壞性[4]。此時，若消防撲救方式正確，人員充沛，可把火勢把控，甚至完全熄滅。
2. 燃燒初期與旺盛時期階段：火災沒辦法控制時，繼續持續燃燒，則稱之為火災的燃燒初期與旺盛時期階段，火災的控制與失控也與當時火場的燃燒種類、氣候條件、撲救環境，及撲救人員裝備和方式有著直接的關係。這時火災的持續燃燒速度加快，溫度不斷升高，氣體對流增強，燃燒產生炙熱的煙氣迅速彌散，這些熱傳導方式會加速火勢蔓延，火場範圍擴大，火勢也難以控制。火災發展到此階段是最危險，也最具破壞性。
3. 災後探勘救援階段：因可燃物值燒盡，消防員撲救等因素使火

場溫度下降，氣體對流也減弱，這時火災成下降熄滅階段。但這階段也因地理位置，火場環境等因素不同，持續實踐也不一樣，有時或持續很長時間，有時也會因建築物本體坍塌，重新產生有氧對流而出現死灰復燃現象。

## 二、消防機器人現況

國際標準組織(ISO)中的工業自動化系統及整合(TC184) 專門制定工業環境中的機器人標準(SC2)在 1984 年曾對機器人定義：「機器人是可程式的機械，在自動控制下實行包括操作或移動動作之課題」[8]。一般工業用機器人均具有操作機(Manipulator)及記憶裝置，而記憶裝置可為可變順序控制裝置或是固定順序控制裝置。如此，機器人便可透過記憶裝置送出訊號，以使機器人之操作機執行各種移動、旋轉、或是伸縮等相關之動作。

在了解機器人定義後，本研究進行各國消防機器人的搜索，並依照火災不同階段的特徵，對各種消防機器人進行分類並且去了解其功能及應用場域，並在後續雛型機器人上對於本研究認為在搜救方面有用功能進行驗證與合併。

### 1. 極早期偵蒐階段機器人

- Kesurobo 機器人：Kesurobo[11]適用的功能以及在發生火災時整個系統的流程為先偵測是否有火源，若有偵測到火焰將攝像頭對準火焰方向，並且會監控火焰的大小及火焰的增長，若火焰的大小超過一定程度，並且 Kesurobo 判斷它是危險的，則會開始噴射水柱進行滅火，並且透過電話、簡訊和電子郵件將狀況傳給有進行登記的使用者，用戶也能在郵件中將收到滅火前火災類型的照片和滅火後現場情況的照片。即使滅火失敗，也可以拍照確認。

- Quince 機器人：救援機器人 Quince[7]憑藉其出色的運動表現和測量功能，負責收集災害現場等危險環境的訊息，從而實現救援活動。這是一款旨在預防下一次災難的機器人. 通過充分利用覆蓋全身的移動履帶和四個履帶式驅動裝置（輔助輪爪，像手臂一樣移動的履帶），這些輔助輪爪能夠自動調整配合地底角度位置—不論是陡峭的階梯或是難以通行的地面。最重要的先決條件是能確實地與地面接觸。而透過測量輪爪馬達的功率消耗，可以精確分析是否有正確的地面接觸，如圖 6 所示。



圖 5：Kesurobo[11]



圖 6：Quince 機器人[7]

## 2. 燃燒初期與旺盛時期階段機器人

- Magirus AirCore 機器人：AirCore 為美國 Magirus 研發的消防機器



人，其開發原因是因美國近年森林大火嚴重，且有很多場所人員無法靠近滅火，其具有氣霧式噴霧器能高速滅火，適用於大面積或大表面的火災。AirCore 底盤採用履帶系統，能夠應付各種路面避免受困，前端具有鏟刀，可用於清除約 4 噸重之障礙物，並利用渦輪排風達到降溫效果，如圖 7 所示。



圖 7: Magirus AirCore 機器人

- 力中滅火機器人：力中滅火機器人[4]為台灣力中國際有限公司[3]研發，用於消防人員無法接近之火災場域，其底盤採用履帶系統，具有直線射水、水霧射及泡沫滅火功能，且能自行配選輔助設備，可擴增五用氣體探測器、熱影像儀系統及夜視等功能，如圖 8 所示。



圖 8: 力中滅火機器人[4]

### 3. 災後探勘救援階段機器人

- RoboCue 機器人：RoboCue 機器人[10]是為了提高救援人員在當前救援人員難以接近的災難情況下的救援能力。RoboCue 為使用電池的電動汽車。採用履帶驅動，配備兩個機械手，將需要救援的人員存放在車身中央的配置，下降到地面的皮帶輸送機能夠將救援人員捲起來並儲存起來。已經收容的救援人員的儲物帶式輸送機上裝有安全氣囊，可以提供新鮮空氣，用攝影機觀察情況，操作人員可以通過麥克風與救援人員通話，如圖 9 所示。



圖 9: RoboCue 機器人

### 三、室內定位技術現況

目前現行的五種感測方式有紅外線雷達、超聲波、毫米波雷達、光達、攝影機。紅外線與超聲波雷達的價格雖較低，但可探測的距離過短；攝影機雖然可分辨障礙物的大小與顏色，但易受天氣因素影響。光達雖精準度高，但有天氣因素制約，且價格最低約 400 美元，離大量普及還有一段時間。而毫米波雷達，雖然價格適中，不易受環境影響，但精度卻也遜於光達。

因此，目前看來，並沒有哪一類型的感測方式獨霸一方，實務上反倒是在各應用場景中互相搭配、各取所需。例如，在自動駕駛領域

中，超聲波雷達、紅外線感測器、光達、毫米波雷達、攝影機便會各司其職，在性能上互補。而根據日本 YANO Research Institute 的研究報告，幾個主流的感測器中，除了紅外線感測器、超聲波雷達的成長幅度相對持平，其他像是毫米波雷達、攝影機、光達等感測器皆顯著成長。其中，毫米波雷達更是這幾年來成長最快速的類別。

毫米波(millimeter Wave；mmWave) [6]是指波長介於 1 毫米至 1 公分、頻率介於 24GHz 至 300GHz 間的電磁波。於通訊領域應用於衛星和 5G。如美國聯邦通訊委員會即授權 24GHz、28GHz、37GHz、39GHz、47GHz 為 5G 之用。應用於毫米波的雷達感測起源於軍事，用於偵測敵軍，因精確度高，亦被自駕車採用。

## 參、研究發現

本研究經實務資料收集與專家交流得知，不同建築物之特性與室內格局是救災現場重要資訊之一，建築物內部配置情況、起火點位置、是否有危險之易燃物如：酒精類、是否有受困人員等實際場域環境資訊為消防隊進行火災搶救時最關切之資訊。本研究透過現今消防相關之應用技術、消防機器人、建築物特性來進行廣域文獻蒐集及其文獻探討，以作為智慧型消防機器人核心功能增值模組之先期研究。

本研究透過現今消防相關之應用技術、消防機器人、建築物特性來進行廣域文獻蒐集及其文獻探討，以作為智慧型消防機器人核心功能增值模組之先期研究。依據收集各階段機器人資料表示出極早期偵蒐機器人注重發現起火點並即時滅火或是通知功能，燃燒初期與旺盛時期階段機器人，需注重滅火及防爆、防水、防火等機器硬體方面的問題，災後探勘救援階段機器人則需要較多感測器來收集各種資料，防範閃焰、閃燃及爆燃等現象或是能夠識別傷員及避障等功能。針對火

災三階段特性下，及各國消防機器人之資料收集與彙整，本研究提出智慧型消防機器人於火災三階段中所需之加值模組及其說明，如表 1 所示。

表 1：智慧消防機器人加值模組彙整表

		極早期偵蒐	燃燒初期與旺盛期	災後探勘救援
外部功能	隔熱機身	●	●	●
	自動避障	●	●	●
	履帶	●	●	●
	懸浮	●		●
模組功能	溫度感測	●	●	●
	氣體感測	●	●	●
	火點感知	●	●	
	滅火功能		●	
	影像偵測	●	●	●
	聲波探測			●
	資料傳輸方式	廣播系統、wifi		
	接收端裝置	智慧型手機、遙控器、無線遠端電腦操控		
	高危險物質探測	●	●	

本研究透過使用智慧型雛形機器人進行機器人加值功能模組織驗證 [9]，進行人臉追隨、顏色追隨、物件追蹤、自動避障等功能測試，其中物件追蹤、自動避障經判斷後將兩者結合是較適合適用於火場災後探勘救援階段的使用。本研究也針對火場可能發生之閃燃、爆燃或是危害氣體進行資料收集，並且也使用 Arduino UNO、Arduino Mega 2560 開發板搭配溫溼度感測器及各種氣體感測器安裝於智慧型雛形機器人上，並且透過遠端使用 Jupyter 進行偵測數值接收。相關的機器人加值功能模組之驗證資訊可供後續智慧型機器人製造商或研究團隊進行進一步建置與研發。

在消防人員火場定位技術上，現階段室內定位科技技術之困難點為建築物材質導致訊號被屏蔽之屏蔽效應、不同遮蔽物造成訊號衰減、及複雜多變化的室內環境造成訊號多路徑效應。本研究蒐集消防用無線感知設備、人員定位技術資訊及相關問題，初步鎖定不易受環境影響的毫米波雷達技術及其訊號傳輸方式，以進一步進行室內定位技術之驗證。

本計畫於中華大學 AI+體驗中心進行室內定位毫米波技術之雛型系統驗證，在系統畫面中藍點為毫米波雷達偵測到物體時呈現的點，點會實際物體的移動做相對位置的移動並呈現移動軌跡。若同時偵測到 3 個移動的物體時，則會呈現 3 個不同顏色的點及移動軌跡。除此之外，可設置觸發區如藍色方框所示，當物體移動到藍色方框時，此方框就會變為粗線條的方框，以作為警戒或危險區域之劃分，以進行下一步之警訊通知。毫米波雷達目前偵測範圍為廣角  $120^\circ$ 、仰角  $\pm 30^\circ$ ，可承受溫度為  $85^\circ\text{C}-100^\circ\text{C}$ ，並以有線方式且建議安裝於一定高度位置，而在安裝後我們需輸入建築平面圖及安裝位置，並且需要於可偵測範圍內移動。當假設我們從毫米波雷達可偵測範圍離開，其紅色圓點會有短暫停留在最後偵測位置。

本研究以毫米波雷達進行室內定位系統的進行研究，結果可知目前毫米波雷達需要透過線纜連接及需要建築平面圖，並且需要再一定高度方可偵測的到移動的物體，且能承受溫度尚需加強，但仍然可用於災後探勘救援階段。

## 肆、結 論

本研究透過現今消防實務應用技術、消防機器人、火災階段特性來進行廣域文獻蒐集及其文獻探討並分類，以作為智慧型消防機器人核

心功能加值模組之研究。依據收集各階段機器人資料表示出極早期偵蒐機器人注重發現起火點並即時滅火或是通知功能，燃燒初期與旺盛時期階段機器人，需注重滅火及防爆、防水、防火等機器硬體方面的問題，災後探勘救援階段機器人則需要較多感測器來收集各種資料，防範閃焰、閃燃及爆燃等現象或是能夠識別傷員及避障等功能。在消防人員火場定位技術上，本研究蒐集消防用無線感知設備、人員定位技術資訊及相關問題，初步鎖定不易受環境影響的毫米波雷達技術及其訊號傳輸方式，以進一步進行室內定位技術之驗證，其結果可知目前毫米波雷達需要透過線纜連接及需要建築平面圖，並且需要再一定高度方可偵測的到移動的物體，且能承受溫度尚需加強，但仍然可用於災後探勘救援階段。

## 伍、參考文獻

- [1] “消防戰術規劃與戰技應用,” 博客來.  
<http://www.books.com.tw/products/0010412786> (accessed Mar. 03, 2022).
- [2] 火災分為哪幾個階段(2018)。中國如皋市公安消防大隊。檢自  
<https://kknews.cc/zh-tw/society/mq2vb86.html>
- [3] “力中國際有限公司.” <http://www.firewolf.com.tw/> (accessed Mar. 03, 2022).
- [4] Hub 中科智慧機器自造基地 Ai, “【電子報#28-01】「消防機器人」保護消防員安全，深入火場最前線!,” 中科智慧機器自造基地 Ai robotics Hub, Nov. 23, 2008.  
[https://ctsphub.org.tw/news/info\\_more?id=e462b554571c4f09895786cb2d03ea81](https://ctsphub.org.tw/news/info_more?id=e462b554571c4f09895786cb2d03ea81) (accessed Mar. 03, 2022).

- [5] “早期火災探測預警人工智慧技術與消防救災結合應用研究,” 中華民國內政部建築研究所, Mar. 21, 2020.  
[http://www.abri.gov.tw/News\\_Content\\_Table.aspx?n=807&s=140172](http://www.abri.gov.tw/News_Content_Table.aspx?n=807&s=140172) (accessed Mar. 03, 2022).
- [6] 毫米波應用涵蓋通訊和雷達感測(2020)。大橡股份有限公司。檢自  
[https://www.digitimes.com.tw/tech/showimg.asp?sourcetype=2&filename=0000020200956\\_1\\_\\_0D05113YS.png&source=20201230-308](https://www.digitimes.com.tw/tech/showimg.asp?sourcetype=2&filename=0000020200956_1__0D05113YS.png&source=20201230-308)
- [7] “Disaster response robot ‘Quince’ |TadoLab.”  
[https://www.rm.is.tohoku.ac.jp/quince\\_eng/](https://www.rm.is.tohoku.ac.jp/quince_eng/) (accessed Mar. 03, 2022).
- [8] “ISO 8373:1994,” ISO.  
<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/01/55/15532.html> (accessed Mar. 03, 2022).
- [9] Y. Technology, JetBot-AI-Robot-Car. 2022. Accessed: Mar. 03, 2022. [Online]. Available:  
<https://github.com/YahboomTechnology/JetBot-AI-Robot-Car>
- [10] “Robot Watch-ニュース--「危機管理産業展 2009」レポート.”  
<https://robot.watch.impress.co.jp/docs/news/325241.html>  
(accessed Mar. 03, 2022).
- [11] “全自動消火システム『ケスロボ』 | 株式会社 CFP.”  
<https://www.kesurobo.com/jp/> (accessed Mar. 03, 2022).

建築結構高強度鋼板及螺栓於火害後殘餘機械性質之研究





## 主講人簡歷

姓 名：陳誠直

服務單位：國立陽明交通大學土木工程學系

職 稱：教授

聯絡電話：03-5712121 ext.54915

傳 真：03-5716257

電子信箱：chrischen@nycu.edu.tw

學 歷：美國加州大學柏克萊校區土木工程博士

經 歷：泰興工程顧問有限公司工程師、Bechtel Power Corporation  
工程師、國立交通大學土木工程學系教授

主要著作：

1. 陳誠直、林克強、黃薪曄、趙俊宇(2021)，「建築結構高強度鋼板及螺栓於火害後殘餘機械性質之研究」，內政部建築研究所委託研究報告。
2. 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。
3. 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。
4. 陳誠直、楊國珍、洪政鴻、莊鎬璟 (2018)，「鋼構造建築物防火設計技術參考手冊之研究」，內政部建築研究所委託研究報告。
5. 陳誠直、洪政鴻、顧芳瑀 (2017)，「高強度鋼構造梁柱接頭之耐火性能研究」，內政部建築研究所委託研究報告。
6. 陳誠直，林政億，陳建忠 (2016)，「填充混凝土方形箱型鋼柱之耐火性能」，中國土木水利工程學刊，第 28 卷第二期，第 85-93 頁。

## 中文摘要

陳誠直<sup>1</sup> 林克強<sup>2</sup> 黃薪擘<sup>3</sup> 趙俊宇<sup>3</sup>

**關鍵字：**火害後、高強度鋼材、高強度螺栓、殘餘機械性質

國內常用之 SM570M 系列高強度鋼板之降伏強度為 420~540 MPa，抗拉強度為 570~720 MPa，降伏比低於 0.85，具優良塑性變形能力及銲接性。鋼構件常用的螺栓接合之施工技術要求低且品質穩定，高強度螺栓能施加較大之螺栓預拉力，使接合強度更高。鋼構造建築遭受火災後之鋼板及螺栓會因高溫及冷卻方式而導致其殘餘機械性質改變，進而影響建築物火害後之強度。國內常使用之高強度鋼板及螺栓於火害後殘餘機械性質之研究甚為匱乏，故本研究進行高強度鋼板及螺栓火害後之殘餘機械性質之探討。

實驗方式為將鋼材與螺栓加熱至 200°C~1000°C，再以空氣冷卻或水中冷卻後，進行鋼材於火害後之硬度試驗、拉伸試驗、衝擊試驗及螺栓之拉伸試驗。最後建立高強度鋼材及螺栓各項殘餘機械性質相對於常溫之折減係數。實驗結果顯示 SM570M 系列高強度鋼板之殘餘機械性質於受火溫度為 600°C 前，不因受火溫度及冷卻方式之改變而發生太大變化。受火溫度為 800°C 以上時，受火溫度及冷卻方式將對 SM570M 系列高強度鋼板之殘餘機械性質影響甚鉅。F10T 系列螺栓之降伏強度與抗拉強度在受火溫度 500°C 前不因受火溫度及冷卻方式產生明顯變化。在受火溫度 500°C 至 700°C 間，不同的冷卻方式皆造成 F10T 系列螺栓之降伏強度與抗拉強度低於常溫試體。受火溫度 700°C 以上時，受火溫度及冷卻方式將對 F10T 系列高強度螺栓之降伏強度與抗拉強度影響甚大。

---

1 國立陽明交通大學土木工程學系 教授

2 國家地震工程研究中心 研究員

3 國立陽明交通大學土木工程學系 碩士生研究助理

## ABSTRACT

**Keywords** : post-fire, high-strength steel, high-strength bolt, residual mechanical properties.

With good plasticity and weldability, SM570M series steel of high-strength steel widely used in practice has yield strength of 420~540 MPa and tensile strength of 570~720 MPa, resulting in a yield ratio of lower than 0.85. Bolted connections commonly used in steel members have lower requirement of construction technique and stable quality. The higher pre-tension exerted from the high-strength bolt results in a higher connection strength. The steel plates of steel structures after fire will change their residual mechanical properties due to the effects of high temperature and cooling method, which further affect the strength of steel structures. The research of the residual mechanical properties of the high-strength steel and bolt commonly used in practice is lack; therefore, a series of the tests was conducted to investigate the residual mechanical properties of the high-strength steel and bolt.

This research was conducted experimentally. High-strength steel coupons and bolts were heated to temperatures varying from 200°C to 1000°C in the increments of 100°C and then cooled in air or in water. Further, Leeb hardness test, tension test and Charpy impact test were carried out for high-strength steel coupons and tension test was performed for high-strength bolt. Finally, the reduction factors, relative to room temperature, of the residual mechanical properties of the high-strength steel and bolt were established. The results showed that the residual mechanical properties of SM570M series high-strength steel heated under 600°C were not changed significantly due to the temperature and cooling method. When the steel coupons were heated above 800°C, temperature and cooling method would make a significant influence on the residual mechanical properties. The yield and tensile strengths of the F10T series high-strength bolts heated under 500°C were not changed significantly due to the temperature and cooling method. When these bolts heated between 500°C and 700°C, their yield and tensile strengths dropped significantly regardless of the cooling method. When these bolts heated above 700°C, temperature and cooling method would make a significant influence on yield and tensile strengths.

# 壹、緒論

## 一、研究動機

SM570M 系列高強度鋼板於國內之應用已逐漸增多，其比照 SN 鋼材，增訂碳當量上限、抗拉強度範圍限制、降伏比及衝擊值等物化性要求，以確保 SM570M 鋼材之良好耐震性能。SM570M 鋼材之降伏強度為 420~540 MPa，抗拉強度為 570~720 MPa，降伏比低於 0.85，具優良塑性變形能力及銲接性。鋼構件常用的接合方式有螺栓接合與銲接接合。螺栓接合之施工技術要求低且品質穩定。高強度螺栓能施加較大之螺栓預拉力，使接合強度更高。鋼結構建築之螺栓接合大多採用高強度螺栓接合。

鋼材為熱的良好導體，受高溫作用將使其強度及勁度大幅度降低，國外規範如 Eurocode 3<sup>[1]</sup>、AIJ<sup>[2]</sup>與 AISC<sup>[3]</sup>皆已訂定高溫下鋼材機械性質的折減係數。鋼構造建築受火後之構件亦會因高溫作用而導致降伏強度、抗拉強度及勁度等機械性質改變，進而影響建築物火害後之強度。高強度螺栓火害後之機械性質亦會影響建築物構件接合之強度。高強度鋼材及螺栓火害後之殘餘機械性質除受溫度影響外，亦受其冷卻方式影響。冷卻方式可分為自然冷卻與消防水柱冷卻，亦即空氣冷卻及水中冷卻。針對國內常使用之高強度鋼板及螺栓於火害後殘餘機械性質之研究甚為匱乏，故受火溫度及冷卻方式對高強度鋼板及螺栓火害後之殘餘機械性質之影響須更深入了解與探討。

## 二、研究方法

研究方法依照美國 ASTM 規範之相關規定，進行鋼材於火害後之硬度試驗<sup>[4]</sup>、拉伸試驗<sup>[5]</sup>及衝擊試驗<sup>[6]</sup>及螺栓於火害後之拉伸試驗，以探討其殘餘機械性質於不同溫度與冷卻方式之變化。同時針對殘餘機械性質

變化較大之試體進行金相試驗及常溫試體之成份分析，用以佐證受火溫度及冷卻方式對鋼材殘餘機械性質之影響。最後建立降伏強度、抗拉強度、彈性模數、伸長率、衝擊韌性、硬度等殘餘機械性質之折減係數，並將硬度試驗之結果與各種殘餘機械性質進行比較，研究成果可作為鋼構造建築火害後建築鑑定、安全評估及補強之依據。因研究試體為數眾多，完整研究成果可參考陳誠直等人<sup>[7]</sup>的報告。

## 貳、研究內容

### 一、試體規劃與設計

本研究規劃並製作高強度鋼板拉伸試片及衝擊試片，高強度螺栓則製作試棒，於火害後進行試驗以探討受到不同溫度與冷卻方式後殘餘機械性質之變化。

拉伸試驗可獲得之火害後殘餘機械性質有彈性模數<sup>[8]</sup>、降伏強度、抗拉強度、延伸率、及應力應變曲線，可用於建立各溫度下受到空氣冷卻或水中冷卻後之各項殘餘機械性質之折減係數。此外，本研究將藉由硬度試驗量測鋼材受火冷卻後之硬度，並將其與拉伸試驗之結果進行比較。

影響鋼板及螺栓殘餘機械性質之參數為鋼材種類、受火溫度及冷卻方式，故本研究以高強度鋼板等級、受火溫度及不同冷卻方式作為主要研究參數。試體參數如表 2-1 所示，其中試體編號以鋼板等級或螺栓尺寸、受火溫度及冷卻方式表示。以CHW8A為例，表示此組拉伸試片使用SM570M-CHW製作，受火溫度為 800°C，冷卻方式為空氣冷卻。

### 二、實驗設備與設置

試體升溫作業使用內政部建築研究所防火實驗中心之箱型電熱爐。

試驗開始前須先將試體之端部、控制試片之端部及平行部設置熱電偶測點，確認訊號無異常後即可開始加熱。待試體之溫度提升至目標溫度且穩定後，開始持溫 30 分鐘。持溫完畢後，取出試體以空氣冷卻或水中冷卻至室溫。

表 2-1 試體參數表

試體編號	鋼板種類/螺栓種類	受火溫度	冷卻方式
MB-RT	SM570MB	常溫	無
MB-溫度-A		200、300、400、 500、600、700、 800、900、1000°C	氣冷
MB-溫度-W			水冷
MC-RT	SM570MC	常溫	無
MC-溫度-A		200、300、400、 500、600、700、 800、900、1000°C	氣冷
MC-溫度-W			水冷
CHW-RT	SM570M-CHW	常溫	無
CHW-溫度-A		200、300、400、 500、600、700、 800、900、1000°C	氣冷
CHW-溫度-W			水冷
M20-RT	F10T (M20×190)	常溫	無
M20-溫度-A		200、300、400、 500、600、700、 800、900、1000°C	氣冷
M20-溫度-W			水冷
M24-RT	F10T (M24×160)	常溫	無
M24-溫度-A		200、300、400、 500、600、700、 800、900、1000°C	氣冷
M24-溫度-W			水冷

拉伸試驗使用國家地震工程研究中心之MTS 810 萬能材料試驗機。

拉伸試驗依照美國ASTM E8<sup>[5]</sup>之相關規定，並黏貼NDI maker至試體之標點處以記錄試體之伸長量。

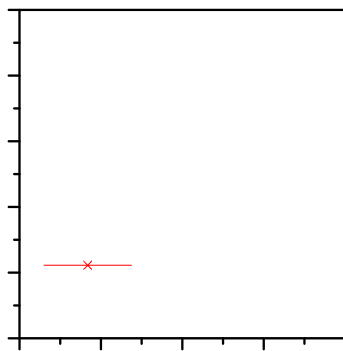
## 參、研究發現

### 一、高強度鋼板試驗結果與討論

#### (一) 應力應變曲線

SM570M-CHW 之應力應變曲線如圖 1 及圖 2 所示。歸納應力應變曲線於火害後之行為，可發現受火溫度 600°C 前，不論冷卻方式皆對應力應變曲線無明顯影響。受火溫度 800°C 以上空氣冷卻試體之應力應變曲線將低於常溫試體。受火溫度 800°C 以上以水中冷卻試體之應力應變曲線高於常溫試體。

(a) 整體曲線



(b) 曲線之初始部分

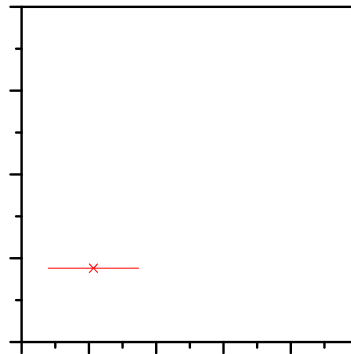
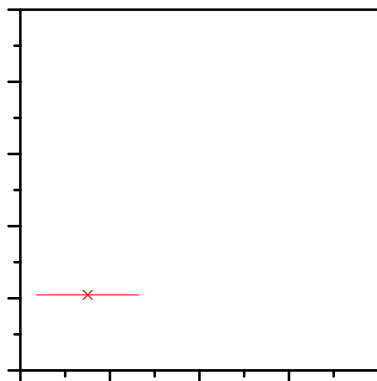


圖 1 SM570M-CHW 鋼板空氣冷卻系列試體應力應變曲線

(a) 整體曲線



(b) 曲線之初始部分

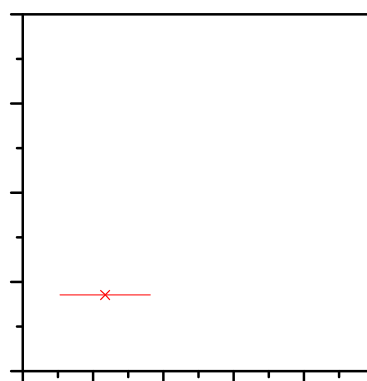


圖 2 SM570M-CHW 鋼板水中冷卻系列試體應力應變曲線



## (二) 彈性模數

彈性模數及其折減係數隨受火溫度之變化趨勢如圖 3 所示。歸納彈性模數於火害後之行為，發現受火溫度為  $600^{\circ}\text{C}$  前，以水中冷卻試體之彈性模數無發生明顯變化。受火溫度為  $700^{\circ}\text{C}$  後，以水中冷卻試體之彈性模數顯著低於常溫試體，最大衰減幅度為常溫試體之 81%。受到空氣冷卻之試體，其彈性模數將不因受火溫度而發生大幅度變動。

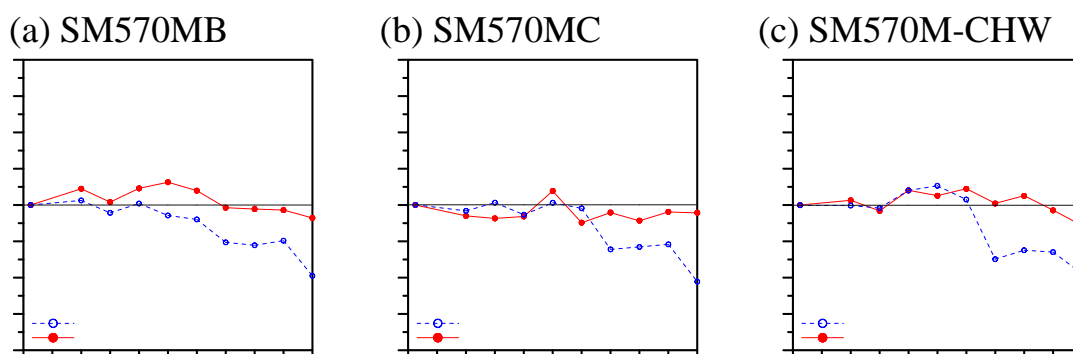


圖 3 SM570M 系列鋼板彈性模數折減係數與受火溫度關係圖

## (三) 降伏強度

降伏強度及其折減係數隨受火溫度之變化趨勢如圖 4 所示。歸納降伏強度於火害後之行為，顯示三種鋼板於受火溫度  $600^{\circ}\text{C}$  前，其降伏強度因受火溫度或冷卻方式影響甚微。受火溫度  $700^{\circ}\text{C}$  及  $800^{\circ}\text{C}$  時，鋼板之降伏強度皆明顯降低。受火溫度  $900^{\circ}\text{C}$  以上時，三種鋼板以空氣冷卻試體之降伏強度皆明顯降低，最大衰減幅度為常溫試體之 53%。以空氣冷卻試體之降伏強度於變態點溫度前後之變化趨勢不變，不受變態點溫度影響。以水中冷卻試體之降伏強度於變態點溫度後之變化仍保持一定趨勢，但於受火溫度為  $900^{\circ}\text{C}$  以上時大為不同。

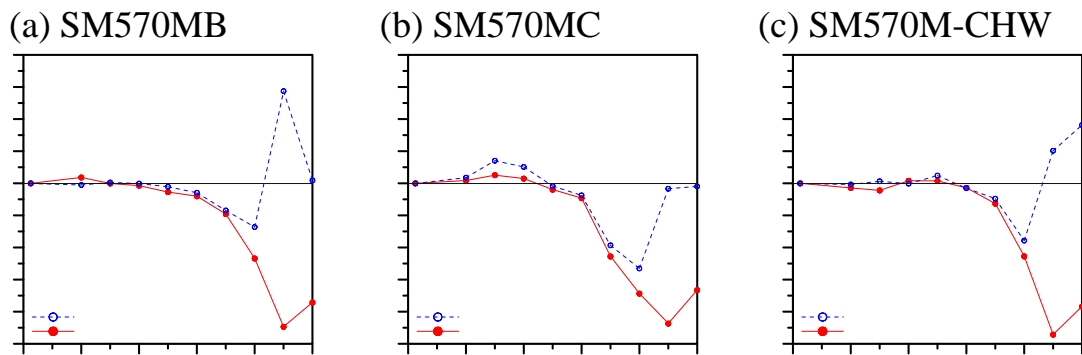


圖 4 SM570M 系列鋼板降伏強度折減係數與受火溫度關係圖

#### (四) 抗拉強度

抗拉強度及其折減係數隨受火溫度之變化趨勢如圖 5 所示，顯示 SM570MB 及 SM570M-CHW 兩種鋼板於受火溫度為 600°C 前，抗拉強度受溫度及冷卻方式影響甚小。SM570MC 鋼板於受火溫度為 500°C 及 600°C 時，兩種冷卻方式之試體抗拉強度隨溫度提高而降低。三種鋼板於受火溫度為 700°C 時，不論何種冷卻方式之試體抗拉強度皆略微降低，最大衰減幅度為常溫試體之 83%。受火溫度為 800°C 至 1000°C 時，三種鋼板以空氣冷卻試體之抗拉強度皆顯著下降，於水中冷卻試體之抗拉強度則明顯上升，最大提升幅度相較於常溫試體提升約 57%。

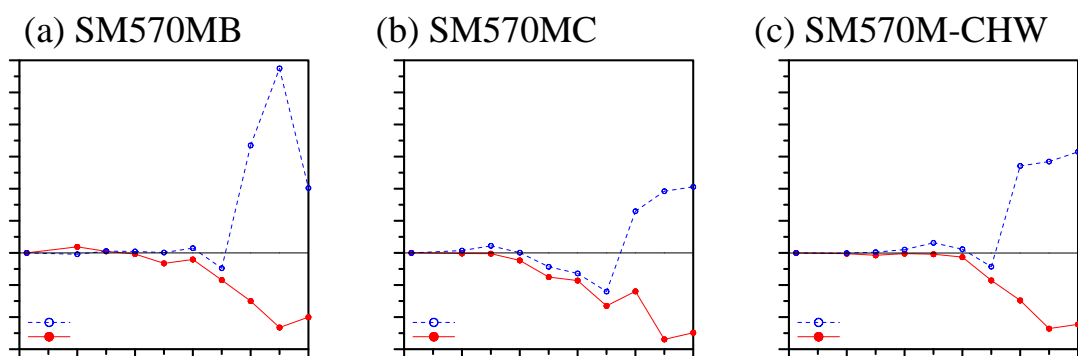


圖 5 SM570M 系列鋼板抗拉強度折減係數與受火溫度關係圖

#### (五) 里氏硬度

里氏硬度及其折減係數隨受火溫度之變化趨勢如圖 6 所示，顯示三種鋼板以空氣冷卻之試體於受火溫度為 600°C 前，其硬度受到受火溫度影響較小。三種鋼板以空氣冷卻之試體於受火溫度於 700°C 至 1000°C 時，硬度相較於常溫試體則明顯降低。於水中冷卻之試體於受火溫度為 800°C 前，其里氏硬度較無大幅度之變化；於受火溫度於 900°C 至 1000°C 時，其硬度皆有明顯提升。

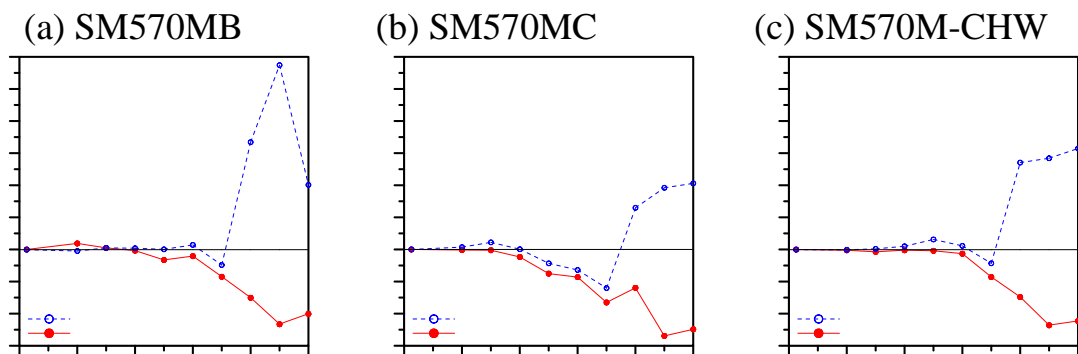


圖 6 SM570M 系列鋼板里氏硬度折減係數與受火溫度關係圖

## 二、高強度螺栓試驗結果與討論

### (一) 應力應變曲線

F10T M20×190 螺栓之應力應變曲線，如圖 7 及圖 8 所示。兩種螺栓之應力應變曲線當受火溫度低於 400°C 時，冷卻方式對其應力應變曲線之影響不顯著。當受火溫度為 400°C 至 700°C 間，不論以何種冷卻方式，降伏強度及抗拉強度皆低於常溫試體。以空氣冷卻之試體在受火溫度高於 700°C 時，應力應變曲線形狀相似於常溫試體，惟降伏強度及抗拉強度皆低於常溫試體。置於水中冷卻試體，當受火溫度為 800°C 時，應力應變曲線由於脆性破壞並且無明顯降伏平台；當受火溫度高於 800°C 時，應力應變曲線無明顯降伏平台，降伏強度與抗拉強度上升。

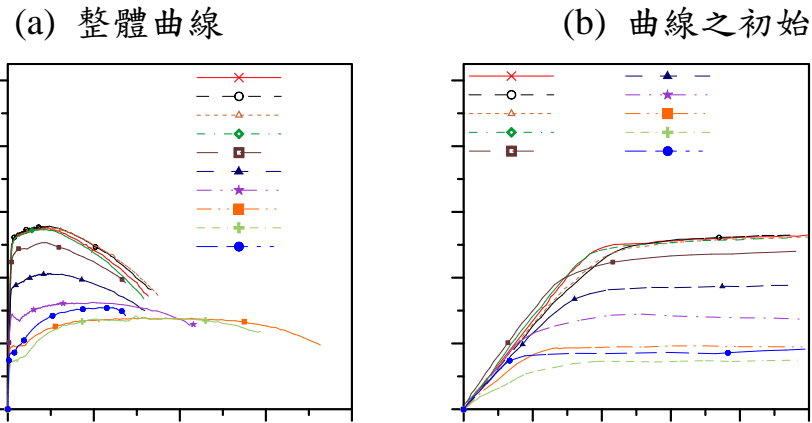


圖 7 F10T M20x190 螺栓空氣冷卻系列試體應力應變曲線

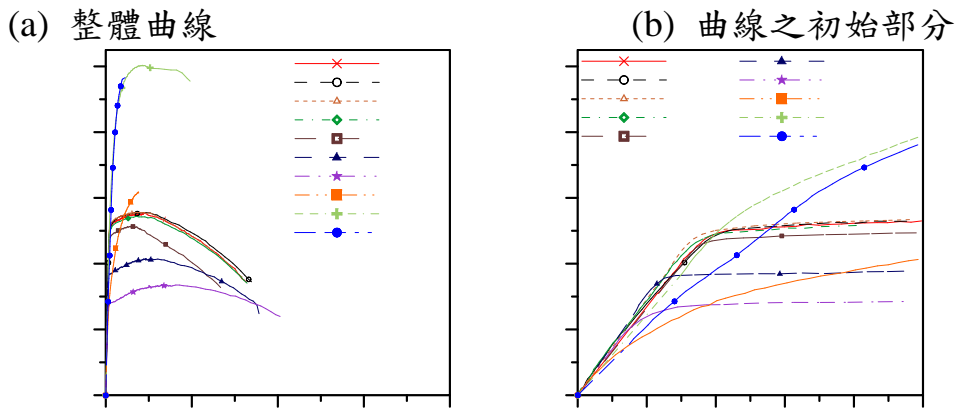


圖 8 F10T M20x190 螺栓水中系列試體應力應變曲線

## (二) 彈性模數

彈性模數及其折減係數隨受火溫度之變化趨勢如圖 9。置於水中冷卻試體之彈性模數並不隨受火溫度變化而出現明顯變化趨勢，置於水中冷卻之M24 系列試體比M20 系列試體擁有更大的彈性模數變動幅度。以空氣冷卻試體之彈性模數於受火溫度 700°C前並不隨受火溫度變化而產生明顯變化，M24 系列試體比M20 系列試體亦有更大的彈性模數變動幅度。在受火溫度 700°C至 900°C間，試體之彈性模數相較於常溫試體大幅下降，最低為常溫試體之 46%。在受火溫度 1000°C時，試體之彈性模數回復至略低於常溫試體，最低為常溫試體之 77%。

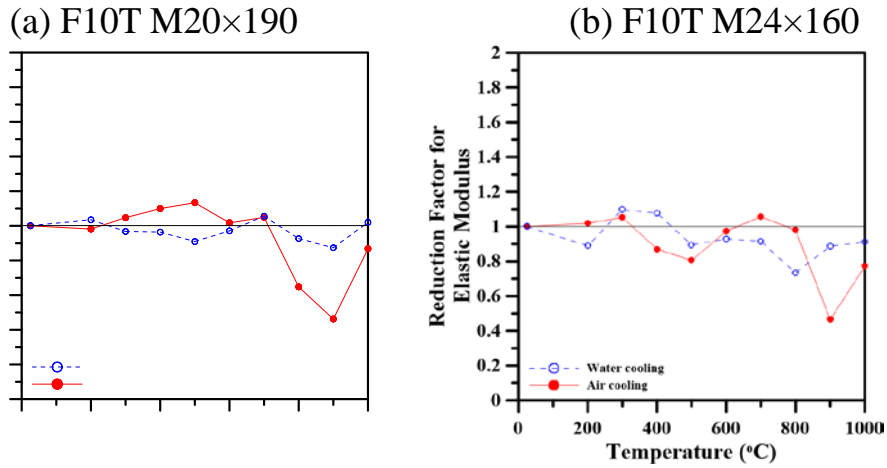


圖 9 F10T 系列螺栓彈性模數折減係數與受火溫度關係圖

### (三) 降伏強度

降伏強度及其折減係數隨受火溫度之變化趨勢如圖 10 所示。試體在受火溫度 500°C 前，無論試體於空氣冷卻或置於水中冷卻，降伏強度並不隨受火溫度增加而有明顯變化。在受火溫度為 500°C 與 800°C 間，無論何種冷卻方式，其降伏強度皆明顯低於常溫試體。在受火溫度 800°C 後，冷卻方式對試體降伏強度之變化有明顯影響，以空氣冷卻之試體在受火溫度 800°C 後降伏強度持續下降；置於水中冷卻之試體在受火溫度 800°C 後降伏強度大幅上升。

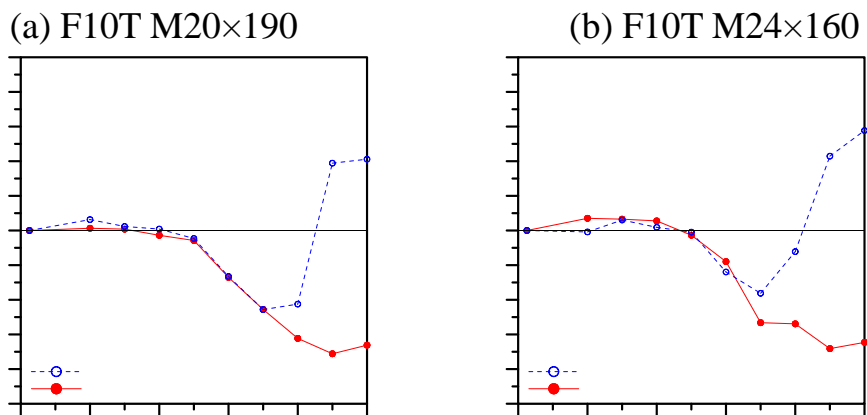


圖 10 F10T 系列螺栓降伏強度折減係數與受火溫度關係圖

#### (四)抗拉強度

抗拉強度及其折減係數隨受火溫度之變化趨勢如圖 11 所示。M20 系列試體在受火溫度 400°C 前，無論試體以空氣冷卻或置於水中冷卻，抗拉強度不隨受火溫度增加而有明顯變化，變動幅度在 92% 至 101% 之間。在受火溫度為 400°C 與 700°C 間，不論以何種冷卻方式，其抗拉強度皆明顯低於常溫試體。在受火溫度 700°C 後，以空氣冷卻試體之抗拉強度明顯低於常溫試體，為常溫試體之 49% 至 52% 之間。置於水中冷卻試體之抗拉強度大幅上升，在受火溫度 900°C 時達到常溫試體之 177%。M24 系列試體在受火溫度 400°C 前，以空氣冷卻試體之抗拉強度隨受火溫度增加而略為下降，最大衰減幅度為常溫試體之 12%。置於水中冷卻試體之抗拉強度則無明顯變化，變動幅度在 97% 至 102% 之間。在受火溫度為 400°C 與 700°C 間，不論以何種冷卻方式，其抗拉強度皆明顯低於常溫試體。在受火溫度 700°C 後，以空氣冷卻試體之抗拉強度明顯低於常溫試體，為常溫試體之 49% 至 58% 之間。置於水中冷卻試體之抗拉強度大幅上升，在受火溫度 1000°C 時達到常溫試體之 185%。

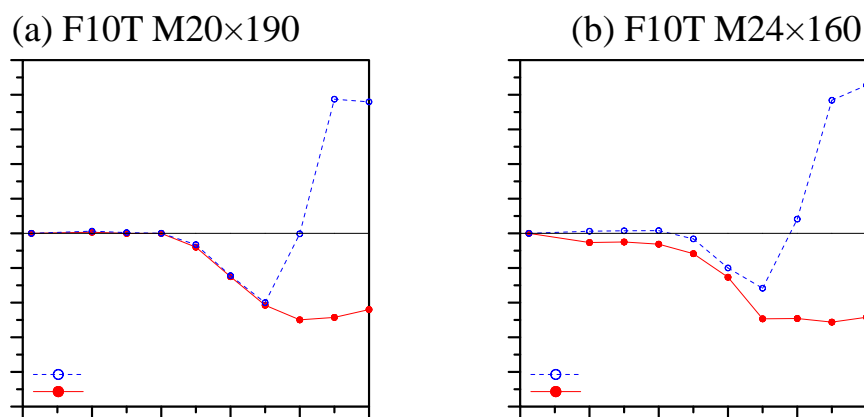


圖 11 F10T 系列螺栓抗拉強度折減係數與受火溫度關係圖

## 肆、結 論

本研究進行SM570MB、SM570MC及SM570M-CHW三種等級高強度鋼板火害後之拉伸試驗、里氏硬度試驗及衝擊試驗；及M20 及M24 之F10T高強度螺栓於火害後之拉伸試驗，以取得SM570M系列高強度鋼板與F10T高強度螺栓火害後之殘餘機械性質，並建立各溫度下之折減係數。受火溫度為常溫、200°C至 1000°C，冷卻方式分為空氣冷卻與水中冷卻。總結試驗結果提出以下結論。

1. SM570M系列高強度鋼板之應力應變曲線、彈性模數、降伏強度、抗拉強度及里氏硬度等殘餘機械性質於受火溫度為 600°C前受冷卻方式及受火溫度影響甚微。
2. 以空氣冷卻之SM570M系列高強度鋼板於受火溫度為 700°C以上時，降伏強度、抗拉強度及里氏硬度等殘餘機械性質皆顯著下降，彈性模數則受溫度影響甚微。
3. 置於水中冷卻之SM570M系列高強度鋼板，彈性模數於受火溫度為 700°C以上時將隨受火溫度提高而衰減。降伏強度於受火溫度為 700°C及 800°C時皆下降。抗拉強度於受火溫度為 700°C時將略微衰減，受火溫度為 800°C至 1000°C時則明顯上升。
4. SM570M 系列高強度鋼板火害後受空氣冷卻之里氏硬度與抗拉強度變化趨勢幾乎一致。
5. F10T系列高強度螺栓之應力應變曲線、彈性模數、降伏強度、抗拉強度等殘餘機械性質於受火溫度為 400°C前受冷卻方式及受火溫度影響甚微。
6. 以空氣冷卻之F10T系列高強度螺栓在受火溫度 700°C以上之降伏強度與抗拉強度下降；彈性模數、降伏強度與抗拉強度等殘餘機械性質

皆顯著下降。

7. 以水中冷卻之F10T系列高強度螺栓在受火溫度 700°C以上時，應力應變曲線形狀無明顯降伏平台。在受火溫度 800°C時，試體產生脆性破壞。在受火溫度為 900°C及 1000°C時，降伏強度與抗拉強度大幅上升。彈性模數則受溫度影響甚微。

## 伍、參考文獻

1. Eurocode 3. (2005). Design of Steel Structures, Part 1.2, General Rules-Structural Fire Design. Eurocode 3 BS EN 1993-1-2:2005, British Standards Institution, London.
2. AIJ (2017). AIJ Recommendations for Fire Resistant Design of Steel Structures. Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan.
3. AISC (2016). Specification for Structural Steel Buildings. ANSI/AISC 360-16 American Institute of Steel Construction, Chicago.
4. ASTM A956 (2017). Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. ASTM A956/A956M-17a, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
5. ASTM E8 (2016). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8/E8M-16a, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
6. ASTM E23 (2018). Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. ASTM E23-18, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
7. 陳誠直、林克強、黃薪曄、趙俊宇 (2021)，「建築結構高強度鋼板及螺栓於火害後殘餘機械性質之研究」，內政部建築研究所委託研究報告，ISBN 978-986-5456-34-4。



