

實尺寸鋼構屋剪力連接複合鋼梁火害前後動態行為之分析模擬與參數識別

Parameter Identification of Full-scale Steel Building with Shear Connected Composite Beam Exposed to Fire

朱世禹¹ 朱聖浩² 鍾興陽³ 施健泰⁴ 王邑薪⁵ 許碩庭⁶ 陳曜弋⁷ 蔡綽芳⁸ 蔡銘儒⁹ 李其忠¹⁰

¹ 成功大學土木工程學系副教授(E-mail: sychu@mail.ncku.edu.tw, 06-2757575#63131)

² 成功大學土木工程學系特聘教授

³ 成功大學土木工程學系副教授

⁴ 施健泰土木技師事務所主持人兼博士後研究員

⁵ 成功大學土木工程學系碩士

⁶⁻⁷ 成功大學土木工程學系碩士生

⁸ 內政部建築研究所安全防災組組長

⁹ 內政部建築研究所簡任研究員兼防火實驗中心主任

¹⁰ 內政部建築研究所副研究員

摘要

內政部建築研究所於台南成功大學歸仁校區內興建大型戶外研究設施，該複合性災害試驗平台為長 18 公尺、寬 12 公尺之戶外 RC 結構，採用盤式支承墊連結下部基礎與上部 RC 底座，成為全世界少數戶外隔震防火試驗平台之一，並配置成功大學土木系之 MK-155U 離心式激振設備作為外部驅動力進行強迫振動。本研究針對上部結構乘載實尺寸鋼構架實驗屋，平面尺寸為長、寬各 12 公尺分為兩跨，單一樓層高約 4 公尺。本次火害的探討對象為其中單一區劃之剪力連接複合鋼小梁，利用 MK-155U 激振系統對火害前後鋼構屋進行系統掃頻，並說明各次實驗流程及實驗後訊號的處理的方法。另外，推導雙自由度系統的隔震數值模型，利用雙自由度系統之轉換函數，解釋實驗的趨勢與現象，且與 SAP2000 模型進行擬合驗證。SAP2000 主要針對現階段局部小梁與混凝土版受火害前後進行火害模擬，觀察火害後對系統參數的影響。

關鍵字：複合性災害、實尺寸鋼構造、火災、地震、隔震平台、強迫振動、激振器、參數識別

一、前言

火害對鋼構建物的危害性較鋼筋混凝土和鋼骨鋼筋混凝土結構物相對嚴重。近年鋼構造建築物盛行，實有必要針對鋼構建築物受火害前後的影響進行探討。為了研究鋼構實驗屋在部分區域受到火害後對整體結構之影響，於火害前後對鋼構實驗屋進行動態加載實驗與分析，藉以探討整體鋼構實驗屋於火害前後的變化。

實尺寸實驗屋受限於實驗設施限制以及傳統耐震評估，目前全世界所進行過最大型的實尺寸實驗屋火害試驗，是於 1998 年英國 BRE (British Research Establishment)^{[1][2][3]}在 Cardington 所

進行的八層樓實尺寸鋼構架屋火害實驗，對其結構進行真正的火燒實驗，透過真實的結構邊界條件，研究結構構件之真實破壞情形。2011 年，美國加州州立大學聖地牙哥分校(US San Diego) Hutchinson^[4]等人在其獨特之戶外振動台上，進行實尺寸鋼筋混凝土構架屋之相關非結構構件及維生管線火害後之耐震實驗，此實尺寸鋼筋混凝土構架屋有五層樓高。盧煉元、蔡益超、羅俊雄^[5]等人於振動產生器及其在地震工程上之應用研討會中探討激振器產生之原理、強迫振動於拱壩之應用、樓房結構物強迫震動系統識別、強迫震動在土壤結構互制上之應用、系統識別方法應用於土木結構之地震反應分析。李其忠^{[6][7]}利用樑柱接頭試體，探討樑柱接頭在高溫下耐火性能及高溫後殘餘強度與勁度，並配合套裝軟體 ANSYS 分析與測試結果比對，確立混凝土及鋼筋熱性質假設與數值模擬之合理性，以補充鋼筋混凝土結構物火害後之安全評估程序之實驗資料與分析。

二、複合性災害研究設施

2.1 實驗設施設計規劃

進行實驗前必須先建造實驗基礎設施，實驗基礎設施包含：實驗平台下半結構(筏式基礎)、實驗平台上半結構(實尺寸鋼構屋)、滑動支承墊、MK-155U 離心質量系統、平台歸位反力座系統、實驗量測系統、滑動滾輪裝置、供電設備系統、防災安全機制。

2.2 實驗試體與設備介紹

2.2.1 隔震平台之上部鋼構屋結構

成功大學土木系以及內政部建築研究所研究團隊，在成功大學歸仁校區建立戶外的防火實驗設施，實驗場址大小約為 24.5m × 90m，實驗平台約為 18m×12m。鋼構實驗屋以國內外常用之鋼構建築型式，為 3×3 柱位配置(2 跨×2 跨，9 根柱子)，柱與柱間每跨 6 公尺，與實驗平台比例關係如錯誤! 找不到參照來源。。

現階段之鋼構實驗屋為一樓層，樓層高 4m，樓板 SS1 為 12m×12m 之鋼承板與鋼筋混凝土；各柱長度皆為 5.1m，亦即從樓板 SS1 向上計算之高度為 1.1m，柱主要材料為 H 型鋼；大樑與小梁長度皆為 6m，大梁共 12 座，小梁共 8 座；樓板、柱、梁編號與配置方式如圖 2 所示。圖 3 為實驗平台與鋼構實驗長向立面示意圖。

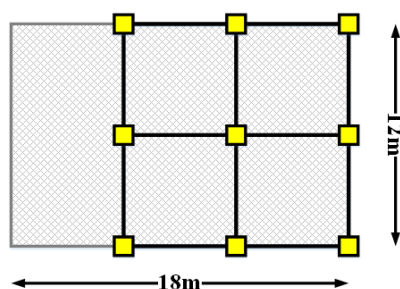


圖 1 鋼構實驗屋與實驗平台比例規劃設計示意圖

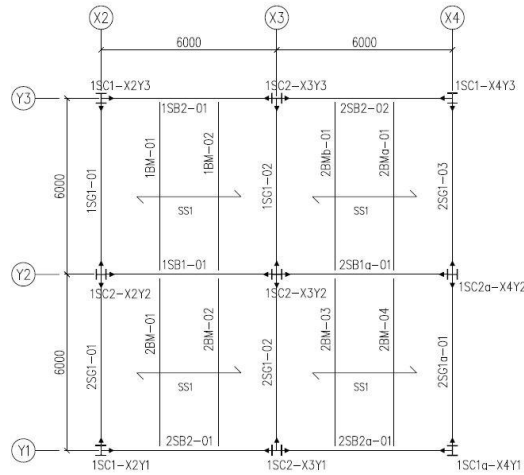


圖 2 鋼構實驗屋頂樓平面圖(各梁、柱與樓板編號)

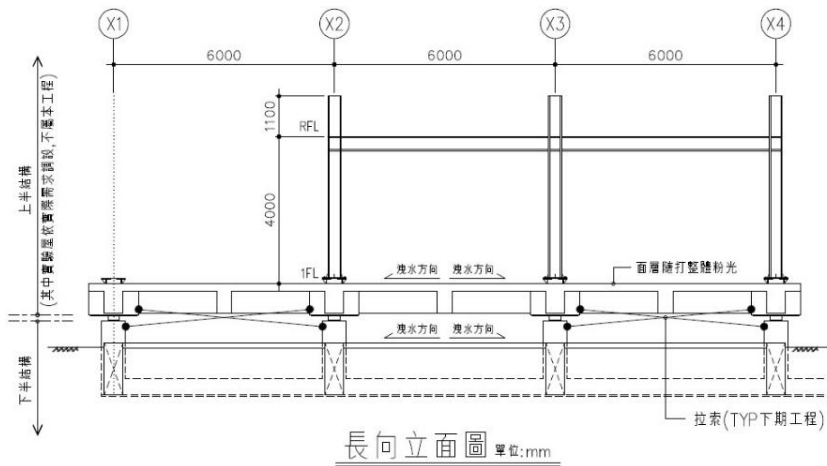


圖 3 實驗平台與鋼構實驗屋長向立面示意圖(單位:mm)

2.2.2 滑動支承墊

滑動支承墊安裝於下部結構(筏式基礎)柱頭處與上部實驗平台間，主要目的為利用支承低摩擦之滑動特性，減少激振器提供動態加載能力之損耗。滑動支承墊為平板滑動支承墊，其曲率接近零，近似無回復力。最大靜摩擦力為 0.015，最大動摩擦力為 0.001 至 0.004 之間，支承墊設計垂直載重為 450 噸。

2.2.3 激振器系統

歸仁校區之戶外大型研究設施，由於其尺寸仿真，重量極重，如由動態油壓伺服制動器進行側推驅動，成本極高，故經過種種實際操作以及經費限制的考量下，本案之激振力決定以成功大學土木系所擁有之 MK-155U 離心質量激振系統提供，此系統原理為透過兩組質量塊反向

旋轉造成離心力，藉此將離心力傳至受測系統中。激振器架設位置如圖 4。

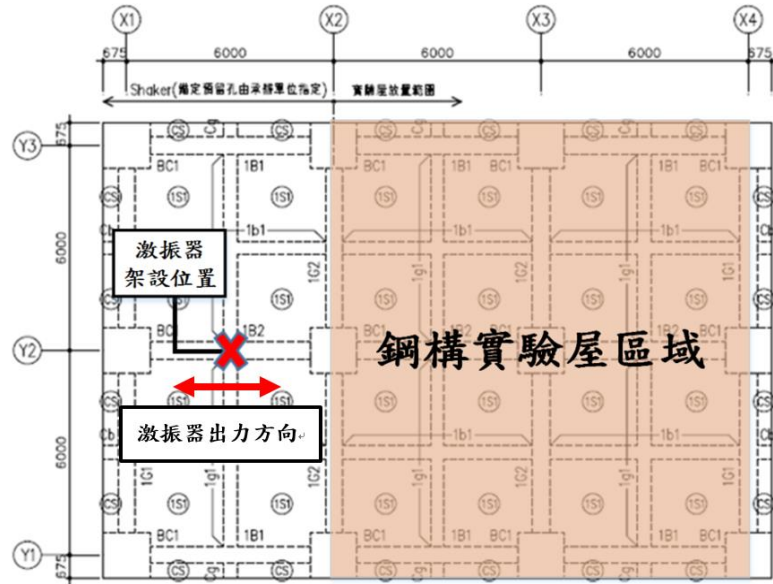


圖 4 激振器架設位置

三、數值系統模擬

3.1 雙自由度數值模型(雙線性模型等值線性化參數)

為探討高摩擦係數與低摩擦係數對複合災害實驗屋反應之影響，故推導理論模型之轉換函數，合理簡化數值模型用以模擬真實結構物反應。雙自由度模型主要分為上部結構與下部結構，下部結構為摩擦支承墊等值成線性化參數 C_{eff} 、 K_{eff} ，上部結構為鋼構屋 c_s 、 k_s 。單個隔震墊參數則為 C_{eff} 、 K_{eff} 除上隔震墊個數得到 c_b 、 k_b 。

3.1.1 等值線性模型轉換函數

鋼構屋對外力之轉換函數與平台對外力之轉換函數如式(1)，鋼構屋對平台之轉換函數如式(2)。由式(2)，鋼構屋對平台之轉換函數中可以發現式中的參數只有和鋼構屋有關，所以當上部結構參數固定後，不管外力與隔震層的摩擦係數為何，轉換函數峰值頻率皆為固定基礎鋼構屋頻率，並不會有隔震平台的峰值頻率出現。如式(1)，可以看到分母有隔震層參數與鋼構屋參數，因此(1)轉換函數將會顯示出隔震平台的特性與鋼構屋的特性。

$$\begin{aligned} \frac{u_s}{P_0} &= \frac{\alpha_s + \alpha_b}{\beta} \\ \frac{u_b}{P_0} &= \frac{\alpha_b}{\beta} \\ \frac{\ddot{u}_s}{P_0} &= \frac{\alpha_s + \alpha_b}{\beta} \omega_p^2 \\ \frac{\ddot{u}_b}{P_0} &= \frac{\alpha_b}{\beta} \omega_p^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$H_a = H_d = \frac{u_s}{u_b} = \frac{\alpha_s + \alpha_b}{\alpha_b} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \alpha_s &= -(m_s \omega_p^2) \\ \text{其中, } \alpha_b &= -(k_s + \omega_p (ic_s - m_s \omega_p)) \\ \beta &= m_s^2 \omega_p^4 + (k_b + \omega_p (ic_b - M \omega_p))(-k_s + \omega_p (-ic_s + m_s \omega_p)) \end{aligned}$$

且定義 u_b 、 u_s 為絕對座標， ω_p 為外力激振頻率。

3.1.2 SAP2000 等值線性參數模型驗證

將計算出之等值線性化參數，如表 1，輸入 Sap2000 雙線性隔震元件中，其中分別對 U2 和 U3 方向，輸入一組等值線性參數和一組非線性參數。Sap2000 設定 X 方向簡諧外力，在不考慮外力振幅的影響下，以間隔 0.1Hz 進行 3Hz 到 5Hz 的掃頻，將掃頻結果與等值線性模型結果比較，以圖 5 表示之。在考慮外力振幅的影響下，重複掃頻動作掃頻，掃頻結果與等值線性模型結果比較以圖 6 表示。SAP2000 隔震層等值線性化模型與雙自由度模型擬合結果良好，所以 SAP2000 隔震層等值線性化模型與雙自由度模型模擬接近。

表 1 單顆隔震墊相關參數

摩擦係數 (μ)	等效勁度 $k_{eff} (kN/m)$	等效阻尼 $c_{eff} (kN/sec)$	降伏前勁度 $k_1 (KN/m)$	特徵強度 $Q(kN)$	降伏後/前 勁度比 r
0.004	38.9635	1.8383	1.8554e+03	0.9277	0.02
0.4	3.8963e+03	18.3834	1.8554e+05	92.7702	0.02
1.475	1.4368e+04	35.3013	6.8418e+05	342.0902	0.02
10	9.7409e+04	91.9168	4.6385e+06	2.3193e+03	0.02
25	2.4352e+05	145.3333	1.1596e+07	5.7981e+03	0.02

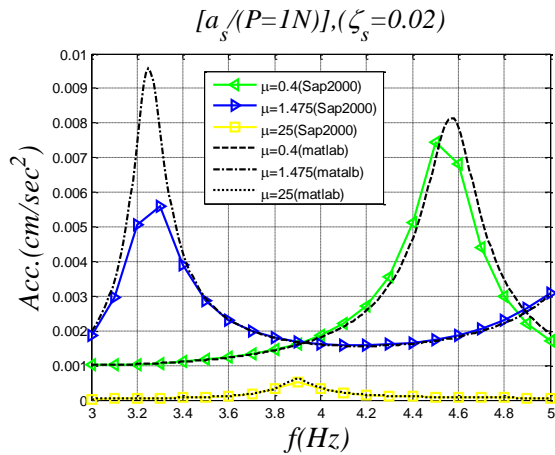


圖 5 鋼構屋對外力之加速度轉換函數
(不考慮外力振幅)

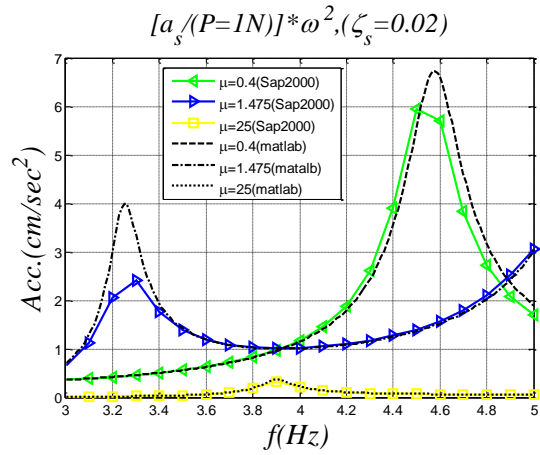


圖 6 鋼構屋對外力之加速度轉換函數
(考慮外力振幅)

四、現地實驗規劃與分析

4.1 實驗原理及方法

對於結構系統為未知的情況下，透過激振外力對結構物施與不同頻率，得到結構系統的模態。

4.2 現地實驗規劃

利用離心質量激振系統在實驗平台上產生不同頻率的簡諧振波，對隔震實驗平台進行單向動態加載實驗。以調整激振器的質量塊數量和大小來改變外力大小，調整屋頂(鋼構屋二樓)上水桶之盛水狀況來模擬不同的載重；記錄不同狀況之實驗平台及火害後實尺寸鋼構實驗屋的整體動力反應，來識別火害後實尺寸鋼構實驗屋之相關動態參數。各次實驗測試如表 2。火害區域如圖 7。

表 2 各次實驗編號

火害前	實驗日期	實驗編號	激振器質量塊	鋼構屋水位
	2016/11/18	Date 11118	NO.4(2 small) (約 104kg)	約半桶滿水(50 噸)
火害後	2016/12/16	Date 1216	NO.4(2 small) (約 104kg)	約半桶滿水(50 噸)

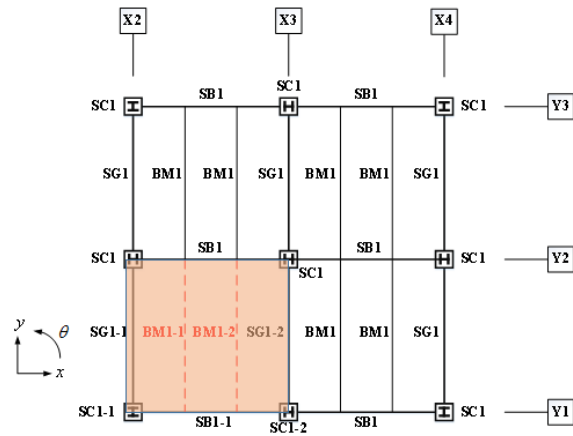


圖 7 鋼構屋火燒情境(BM1 混凝土版、SS1 小梁)

4.2.1 現地感測器架設位置與編號

加速度計一共有 15 顆，考量最經濟的配置方式，為平台兩端角隅處南北向與東西向各配置兩組。鋼構屋加速計配置於角隅處與質心處南北向與東西向各配置兩組。地表則配置一組南北向加速計。位移計一共有 5 組，為考慮平台可能產生偏心扭轉現象，在平台處南北向於角隅端各配置兩組位移計。另外，鋼構實驗屋在角隅端配置一組南北向位移計，質心鋼柱處配置南北向與東西向各一組位移計。儀器整理配置圖與點位編號如圖 8。

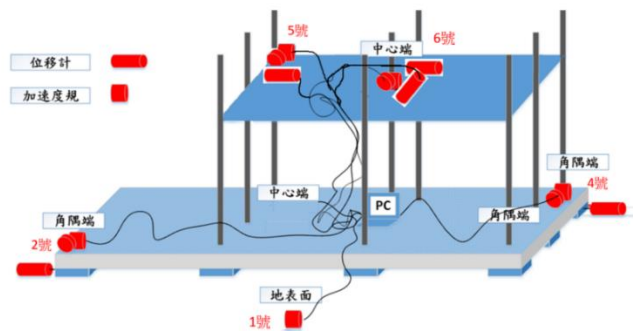


圖 8 儀器位置配置圖(Date 1118、Date 1216)

4.3 實驗訊號處理與分析

位移計處理方式大致與加速度計處理方式相同，由於加速度訊號比位移計訊號明顯，因此以下以加速度訊號說明。首先將平台與鋼構屋量測的原始加速度訊號與電壓校正後訊號繪出，實驗所存下之各筆資料均含有四種激振作動頻率，每種激振時間均為一分鐘，在各次調頻數值切換處，由於訊號較不穩定，因此取各作動數值下訊號相對穩定的 15 秒至 45 秒區間進行訊號處理，因此各原始訊號將拆成四筆不同的作動頻率且各訊號擷取後均為 30 秒。理論上，激振器輸入頻率為單頻的正弦函數，但實際上，由傅立葉轉換後卻發現量取到之輸入訊號並不是單一頻率，且量入很多高頻與低頻訊號。因此需選擇適當的濾波器，留下合理外力訊號頻率。

4.3.1 頻率域訊號處理

在訊號處理時選擇 butterworth 濾波進行濾波。濾波器性能設計為帶寬濾波器，帶寬截斷頻率為外力作動頻率之上下 1.5 赫茲，濾波器階數取 8 階。將濾波後平台與鋼構屋訊號進行傅立葉轉換，頻率域中，可觀察若濾波頻率以外之頻率振幅近乎為零，代表濾波後的效果是可信的。將濾波後之頻率域峰值取出，此峰值為激振頻率下之振幅貢獻，稱為外力激振振幅。

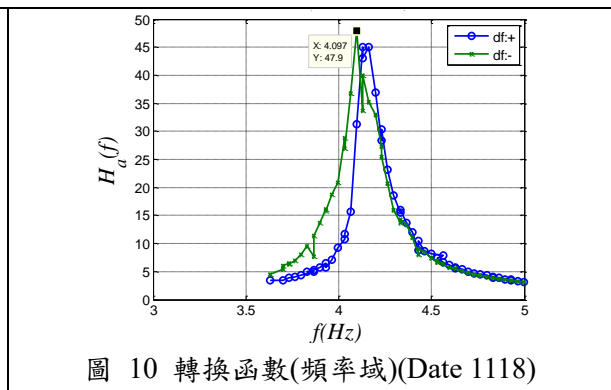
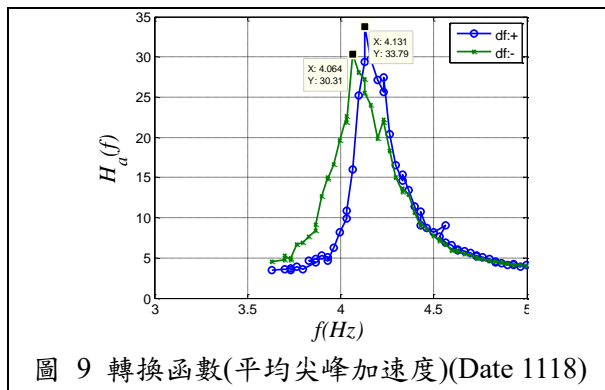
4.3.2 時間域訊號處理

訊號經濾波後進行傅立葉轉換，最大振幅處所對應的頻率就是實際外力的作動頻率，而外力作動週期為實際作動頻率的倒數。在尋找平均尖峰加速度時，以外力作動週期切割濾波後的加速計訊號，並將切割後的各段加速度訊號，取絕對加速度的最大值，並累加各段加速度絕對最大值，最後除以總段數得到平均尖峰加速度訊號。切割各段平均加速度訊時，大部分情況會切割到一個完整的正弦波，這時能夠找到合理的絕對最大值。少部份情況是無法完整切割出完整的正弦波，當取絕對最大值時代表性會比較低，當訊號經過濾波後，振幅會衰減下來。以上即為時間域之平均尖峰加速度分析過程。

五、結果比較

5.1 現地實驗結果

在時間域中，Date 1118 試驗中平均尖峰加速度轉換函數的峰值頻率約在 4.064Hz 至 4.131Hz 間，鋼構屋之平均尖峰加速度峰值頻率約為 3.931Hz 至 4.064Hz 間。Date 1216 試驗中平均尖峰加速度轉換函數的峰值頻率約在 4.031Hz 至 4.097Hz 間，鋼構屋之平均尖峰加速度峰值頻率約為 3.964Hz 至 4.031Hz 間。在頻率域中，Date 1118 試驗中由頻譜值之轉換函數可知道峰值頻率約為 4.097Hz 至 4.164Hz 間，鋼構屋之平均尖峰加速度峰值頻率約為 3.931Hz 至 4.064Hz 間。Date 1216 試驗中由頻譜值之轉換函數可知道峰值頻率約為 3.031Hz 至 3.131Hz 間，鋼構屋之平均尖峰加速度峰值頻率約為 3.964Hz 至 4.031Hz 間。綜合時間域與頻率域之轉換函數峰值頻率可知，Date 1118 峰值落於 3.931Hz 至 4.131Hz，Date 1216 峰值落於 3.931Hz 至 4.031Hz。**錯誤！找不到參照來源。**到圖 12 為三次實驗紀錄之點位 4 與點位 6 所計算的轉換函數(I4O6)。



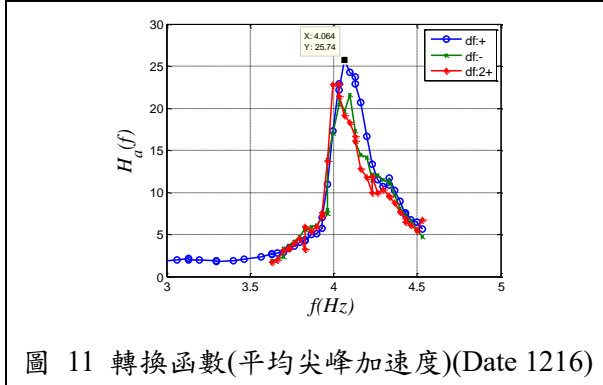


圖 11 轉換函數(平均尖峰加速度)(Date 1216)

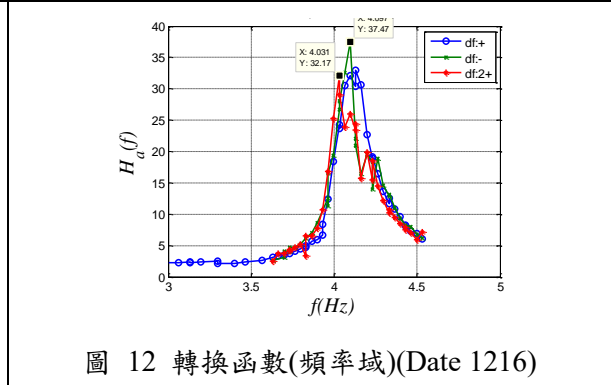


圖 12 轉換函數(頻率域)(Date 1216)

5.2 鋼構實驗屋火害前後之比較

火害前鋼構屋第一模態為 Y 向，第二模態為 X 向，第三模態為扭轉方向。當版溫度超過 800 度以上、鋼材溫度稍至 1100 度時，在 X 方向鋼構屋頻率由 3.92306Hz 下降至 3.92238Hz。在 Y 方向鋼構屋頻率由 3.72254Hz 下降至 3.67187Hz。在扭轉方向鋼構屋頻率由 5.30581Hz 下降至 4.90713Hz。火害後，頻率上的變化並不顯著。本篇僅針對特定區塊進行小梁與混凝土版的火害實驗。參考 105 年建研所期末報告第五章鍾興陽等人報告中，混凝土版量測溫度約為 800 度，鋼構屋溫度約為 1083 度，依據此火燒溫度進行火害模擬。以強度折減係數模擬火害情境，鋼構屋頻率變化模擬結果如圖 13。整體來說，Y 方向與 θ 方向頻率變化相對於 X 方向明顯，主要是小梁原先提供 Y 方向的側向勁度，隨火害溫度快速下降，造成 Y 方向與 θ 方向頻率的變化。

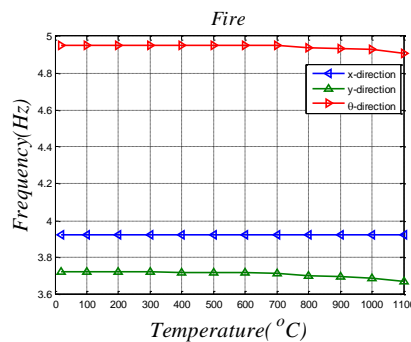


圖 13 各模態火害頻率變化

六、結論

內政部建築研究所及成大研究團隊規劃之「複合性災害」研究設施，是基於火災與地震的交互作用產生之災害；在有限的經費以及實驗目的的考量下，以最大可能構築之實尺寸五層樓

鋼構實驗屋作為需求，設計出以 RC 鋼筋混凝土為主體的基礎設施。上半部分為實驗平台，並以盤式支承墊作連結。盤式支承低摩擦係數與幾乎無回復力的特性使得實驗平台能透過激振系統推動成為一實驗用之大型戶外振動台。目前火害後整體頻率變化並不明顯，原因為小梁非主要結構的勁度元件。若鋼構屋針對其他區域進行火害實驗，預估頻率變化將會較明顯。

七、致謝

本研究案承蒙內政部建築研究所 102301070000G0019、104301070000G0007、105301070000G0025、106301070000G0025 及 107301070000G0014 委託研究計畫案經費補助，特此致謝。

參考文獻

1. B. R. Kirby. Large Scale Fire Tests: the British Steel European Collaborative Research Programme on the BRE 8-Storey Frame. Fire Safety Science 5: 1129-1140. doi:10.3801/IAFSS.FSS.5-1129. England, UK(1997)
2. 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, 46:1-3, Paper No. 169 (1998)
3. "Behaviour of steel framed structures under fire conditions." Main Report, DETR-PIT Project, School of Civil and Environmental Engineering, University of Edinburgh, 2000
4. Full-Scale Structural and Nonstructural Building System Performance during Earthquakes & Post-Earthquake Fire. <http://nees.ucsd.edu/projects/2011-five-story/>
5. 盧煉元、蔡益超、羅俊雄、陳正興，「振動器生產器之原理、強迫振動之拱壩之應用、強迫震動在土壤結構互制上之應用」振動產生器及其在地震工程上之應用研討會
6. 李其忠，「鋼筋混凝土結構梁柱接頭火害後強度初估」，內政部建築研究所自行研究成果報告(2009)
7. 李其忠，「鋼筋混凝土複合構件火害安全模擬評估研究」，內政部建築研究所自行研究成果報告(2009)
8. 經濟部中央標準局 建築物構造部分耐火試驗法 CNS 12514 A3305 (2010)