

建築居室火災實驗與結構行為分析研究

李鎮宏* 邱耀正** 何明錦*** 蔡宗奮****

關鍵字：火場模擬，通風因子，火災-結構耦合分析

摘要

本文旨在探討當建築居室發生火災時，單一居室內氣場溫度與結構表面溫度之實驗結果與分析模式驗證，並擴展至單層多間之火災-結構耦合行為研究。火災數值模擬部分係以 FDS 軟體進行分析並與本研究進行之居室火災實驗結果相互比對驗證，於居室內不同位置加以預測 60 分鐘內之火場溫度分布及鋼梁受熱表面溫度成長歷時，經分別對氣場溫度與結構表面溫度，其實驗值與預測值之發展趨勢相似，足證文中所建立分析模式之準確性。對於進一步建構之單層多跨建築居室分析模型，係應用 FDS 計算求得該構架受熱邊界表面溫度作為輸入參數，供 ABAQUS 有限軟體進行構架內之熱傳與結構行為分析，對於不同火源位置與居室通風因子對整體構架應力分布之影響於文中亦有所分析討論。

Experimental and Analytical Studies on the Fire-Structure Behavior in a Compartment of Building

C. H. Lee* Y. J. Chiou** M. C. Ho*** Z. F. Tsai****

KEYWORDS: Fire Simulation, Ventilation Factor, Fire-Structure Coupling Analysis

ABSTRACT

The purpose of this study discussed the experimental results of the gas phase and structural surface temperatures in a compartment fire of building. The simulation model had been checked by the experiment data and extended to simulate the behavior of single level and multi-rooms in fire. Numerical predictions produced by the FDS fire field model were compared with experimental data from the arrangement of our own test. The development of the gas phase temperatures in a compartment fire and the surface temperatures on beams had been predicted and compared to the test result over a 60 min period. The simulation model was found to be able to reproduce the overall qualitative test results. The accuracy approved the model. For further discussion, the argument of WALL_TEMPERATURE in FDS was adopted to determine the thermal boundary of structural elements in the single level and multi-rooms. And the transient thermal and structural analysis in Finite Element Model (ABAQUS) was performed by adopting the above temperature profiles from FDS. The differences of fire ignition places and opening size of the compartment have been considered to discuss how they effect the stress development in the whole frame.

* 國立成功大學土木工程研究所博士生 (通訊作者 Email: bornin22@abri.gov.tw /Tel:06-2392755 #1208)

Ph. D., Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan

** 國立成功大學土木工程系教授

Professor, Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan

*** 內政部建築研究所所長

Director General, Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior, Taiwan

**** 國立成功大學土木工程研究所碩士

Master, Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan

2011 年 9 月 16 日受稿，2012 年 3 月 9 日通過

一、研究背景及目的

美國 911 恐怖攻擊造成雙子星大樓倒塌，根據 Federal Emergency Management Agency 災後調查報告顯示，紐約世貿大樓並未毀於飛機之瞬間撞擊，而是由於大量汽油起火燃燒產生高溫，鋼材承受不了高溫而導致承載能力不足大樓崩毀。有鑑於此，美國 NCST (National Construction Safety Team) 提出未來相關建築火災之研究，應能對於真實火場與建築結構行為間之電腦分析方法加以探討，包含火災發生時物件延燒、閃燃發生至全盛期與降溫階段甚至結構倒塌等分析。早期對於火災研究通常以實驗為主，但實驗成本高且耗時，隨著電腦計算能力的提高，利用計算流體力學為工具之數值模擬已為當今火災研究之趨勢，利用火災模擬軟體進行火災模擬可得到火場中的溫度場、速度場、濃度場等資料，但對於火場溫度如何同步造成結構物構件斷面應力變化（如軸力變化），則較少研究針對該內容進行探討。

於建築結構承受火害之行為研究，除了實驗外，目前普遍使用數值模擬方法進行分析研究，但對於分析之重要參數「火場溫度分佈」與「結構表面溫度」，除了根據實際試驗溫度進行後置分析外，多以假設火場溫度進行模擬，其分析結果正確性似有疑慮。對結構梁柱系統而言，目前之實驗均僅針對在標準升溫曲線加熱情形下，如 ISO 834 或 CNS 125141 標準等，皆以單一構件梁或柱受火害後之溫度分佈上限或變形量大小判定該構件是否能提供足夠之承載能力，對於較複雜的建築火災情境，實驗規劃就難以提供整個火災狀況，因此有必要透過數值方法來模擬各種火災情境下之溫度分佈。火災會因為起火方式、延燒速度、內部環境的不同，使得火災熱流場空間之溫度分佈有相當大的差異，因此對建築物本體亦有不同程度的傷害，而構件如柱也會因為所在位置之不同，以及與隔間牆的相關位置，可能會使柱遭受 1~4 不同受熱面之火害，使構造內部產生不均勻的溫度分佈，構件內材料受到熱應力後會產生不同的力學行為，使得建築物火害中的強度不均勻的減低。因此結合火災軟體與結構分析軟體，來模擬火場溫度如何同步造成結構應力變化或變形等行為，以建立火災-結構 (Fire-Structure) 分析介面有其必要性。本文結合火災軟體 FDS 與有限元素軟體 ABAQUS 進行建築物在火場中之行為分析，針對不同火源位置、通風因子、火災規模、延燒特性、單一居室與複合居室進行火災實驗與數值模擬，探討在火場溫度非均勻分佈情況，下可行之性能設計或分析方法來預測建築結構受火害之行為。

目前火災行為的研究上已有許多學者應用數值模擬方式進行火場研究，其中 (Chow, 1997) 使用 CFD 套裝軟體 PHOENICS 探討香港某機場的航廈大廳之火災模擬預測，是否已達防火安全設計條件。(McGrattan, et al., 1998) 採用大渦流模擬 (Large Eddy Simulations, LES) 做動態的煙控模擬研究。(Wang, et al., 2001) 使用 SMARTFIRE 軟體進行單一居室的火災模擬並與實驗的火場溫度分佈情形作比較。國內 (黃雄義, 2005) 使用 FDS 模擬 ISO 9705 全尺寸房間試驗，首先進行最佳格點尺寸及配置條件探討，之後決定材料的熱屬性參數，並以實際 ISO 9705 房間進行石膏板及耐燃合板之實驗數據與模擬結果作比對。(林誠興及王士承, 2007) 利用 FDS 模擬實際火災案例「卡爾登理容院」做火災模擬研究，首先進行格點獨立性分析以找出最佳模擬之格點數，再以包廂隔板之汽化熱、一樓包廂天花板開口變動的情形，與火場定性描述作比較來重建火場，並以溫度場、火流方向與濃煙擴散情形來評估人員逃生時間，藉此了解火場中人員喪生之主因與影響火場之重要參數。

為了進一步探討火災高溫下如何對結構構件產生應力變化或變形等行為，目前已有若干學者進

行相關研究建立火災-結構 (Fire-Structure) 的分析介面，(徐瑞祥等, 2004) 利用FDS火災模擬軟體模擬單一區間內部梁受火害時之邊界溫度，接著以熱傳導理論，搭配有限差分 (Finite Difference Method) 數值方法，模擬鋼筋混凝土複合矩形梁內部溫度分布，以探討不同火源位置與熱釋放率大小對梁熱傳遞與結構強度之影響，惟其假設每一梁斷面區塊溫度為均溫，尚無考慮斷面溫度變化所造成梁火害後強度折減之效應。而 (Wickstrom, et al., 2007) 提出應用絕熱表面溫度 (Adiabatic Surface Temperature, AST) 來建立火災-熱傳-結構之分析介面的概念。(Duthinh, et al., 2008) 文中也提出以FDS進行絕熱表面溫度與熱通量的計算，透過公式轉換計算結構表面溫度來取得火災下結構表面溫度歷時。(Wickstrom, 2009) 則更進一步應用平板測溫計 (Plate Thermometer) 取得實際實驗中之絕熱表面溫度並進行數值模擬分析比對。在數值分析上，AST可視為一定量參數來進行火災與結構模擬中的介面分析，該模式用來計算包圍在固體表面之邊界溫度時，毋需建構一個確切之實體物件，而以流體動力進行分析，僅需以一無限厚的板來趨近一固體邊界以評估其表面邊界溫度。惟運用該AST來進行較複雜固體面內之熱傳分析時，須另行加以建立轉換氣體與固體間之溫度模式，對於建築結構防火設計而言，又多需建立另一層分析技巧來進行火災與結構耦合行為之研究，疏甚不易。

為使火災-結構耦合分析簡易可行，本文以前揭文獻常用之火災模擬軟體FDS，配合結構分析軟體ABAQUS為基礎，發展該二套分析系統之溝通模式，以FDS建構火場並將其分析所得之結構梁柱系統邊界溫度歷時以WALL_TEMPERATURE參數輸出，該參數能擷取不同位置、不同高程、不同斷面、不同方向上固體表面溫度資料，可供ABAQUS有限元素分析時各節點所需之溫度歷時，進一步進行斷面熱傳與結構分析。為驗證本研究所提之分析方法係屬可行並有其準確性，文中以本研究所進行之居室火災實驗結果，針對火災氣場溫度與結構表面溫度分析比對，並以單層多跨平面式建築居室配置，進一步了解不同火場參數對居室火災歷程與結構行為的影響。

二、火災-結構分析模式

本文應用數值模擬分析建築鋼結構隨著居室火勢成長下之氣場溫度、受熱結構表面溫度與斷面應力之變化，建築結構因受火場溫度影響，構件所受的載重型態將包含結構載重與熱載重，且這兩種載重型態是同時進行，隨溫度升高，結構在熱膨脹受不同束制條件下與材料在高溫下強度與勁度之折減，產生相對的溫度應力，造成斷面應力的重新分配，構件亦隨之變形。

2.1 部分耦合熱應力分析法

建構該分析方法之基礎，係由進行火場實驗規劃配置時所衍生，由於為測得居室內氣場溫度之分佈，需以熱電耦集結成束自天花板下垂佈置，以量得不同高程上氣場溫度數據，倘可於梁柱結構體上依有限元素法所切割之元素節點位置，擷取所得構件邊界表面溫度歷時，加上暫態熱傳分析求得非受熱面各節點之溫度並進行結構分析，即可求得火災-結構耦合分析之結果。由於 FDS 火場模擬軟體非有限元素分析方法，其係以大渦流模擬 (LES) 以及直接數值模擬 Direct Numerical Simulation (DNS) 求解控制方程式，而控制方程式包含質量守恆、動量守恆、物種守恆方程式、能量守恆等，無建構前揭之元素節點並與以編號功能。然而，對有限元素軟體 ABAQUS 而言，其有將構件分割成元素與節點並給予編號之功能，故先行以 ABAQUS 建構實體梁、柱幾何尺寸並切割成適當元素大小與進行節點編號及將梁、柱直接曝熱處邊界上元素節點截取出來，為分析首要步

驟。其後便是以 FDS 建構所需之火場情境，包含燃燒物件之特性、開口位置尺寸、火載量大小、起火源設定、與梁、柱、牆、天花板等構件後，進行火場燃燒模擬，而最重要的是應用 FDS 所提供之 WALL_TEMPERATURE 參數，將所對應之前揭邊界上受熱節點之溫度歷時資料輸出，以便將該數據整理後供 ABAQUS 進行後續熱傳與結構分析之用。結構邊界上直接曝熱處元素結點之溫度成長歷時，包括熱對流以及熱輻射之影響，已在 FDS 模擬並求得構件受熱表面對應節點之溫度變化，而結構斷面上非邊界直接曝熱處每個元素節點之溫度歷時之變化，則以 ABAQUS 暫態熱傳分析來模擬，並提供非線性結構分析中熱載重的施加模擬，最後得到建築結構火害之斷面應力變化，此結合兩種分析的方法稱為部份耦合熱應力分析 (Sequentially coupled thermal-stress analysis)，其耦合分析流程圖 1 所示。僅將該分析步驟說明如下：

1. 利用 ABAQUS 之視窗介面建立實體構件分析模組。
2. 將結構實體進行網格分割，截取結構體曝火面之節點位置與編號等資料。
3. 將步驟 2 之節點資料，轉換成 FDS 相對應之輸入格式，並將各節點之輸出參數設成 WALL_TEMPERATURE 以取得結構體表面溫度資料，並納入 FDS 火災模擬中。
4. 建立 FDS 之火災模擬情境，進行火場分析後，可輸出受熱面相對應之節點溫度歷時。
5. 將受熱面之節點溫度歷時，轉換成 ABAQUS 之輸入格式，做為熱傳分析之溫度邊界條件。
6. 執行 ABAQUS 之暫態熱傳分析，可得到結構體內每一個節點之溫度變化，把此結果當作結構分析之溫度條件。
7. 進行 ABAQUS 非線性結構分析，模擬結構在火場中之行為。

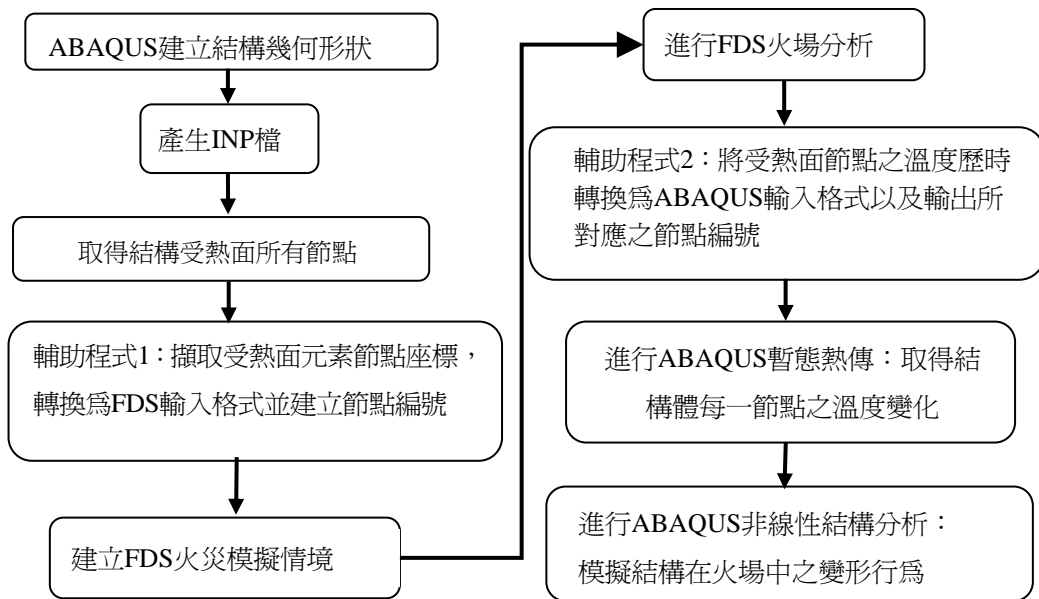


圖 1 Fire-Structure 分析流程

在 FDS 中利用固體邊界條件來完成格點的一維熱傳計算，當格點位於第 X_i 點時，邊界條件下式所示：

$$-k_{s,1} \frac{T_{s,1}^{n+1} - T_{s,0}^{n+1}}{\delta_{x_{1/2}}} = \dot{q}_c^{(n+1)} + \dot{q}_r^{(n+1)} \quad (1)$$

WALL_TEMPERATURE 定義為：

$$T_w \equiv T_{s,1/2} = (T_{s,0} + T_{s,1})/2 \quad (2)$$

$T_{s,i}$ ：第 i 個元素的中心點溫度 $k_{s,i}$ ：第 i 個元素的中心點固體熱傳導係數

2.2 網格靈敏度分析

除了前面所提及之耦合分析方法外，為了能更廣泛的模擬所有的燃燒物件，FDS 分析中所用網格尺寸需適當，過大將造成分析結果有誤而太小則耗損分析時間。(Kwon, 2006) 指出在考慮實驗配置與分析時間的最佳化設計上，可接受網格尺寸最大設為 0.1m。(Chen, et al., 2010) 進行 3 種不同網格尺寸下之熱釋放率實驗值與分析值比對，發現網格尺寸設為 0.05m 之比對結果較佳。本文中針對網格尺寸之靈敏度分析係參考 (Ma & Quintiere, 2003) 所提之公式 (3)

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (3)$$

式中 \dot{Q} 表示熱釋放率 (kW)，空氣密度 $\rho_\infty = 1.204 \text{kg/m}^3$ ，比熱 $C_p = 1.005 \text{kJ/kg-K}$ ，常溫 $T_\infty = 290 \text{K}$ 。而 D^*/dx 比值需介於 4 至 16 間， dx 為網格尺寸 (m)。

舉例而言，當居室內之平均熱釋放率為 840KW，採用 $D^*/dx = 4$ 時，較粗網格尺寸為 0.224 m，當採用 $D^*/dx = 10$ 時，較適網格尺寸為 0.089 m，採用 $D^*/dx = 16$ 時，較細網格尺寸為 0.056 m。究採用何者網格尺寸為分析所需，應先進行實驗之熱釋放率曲線與分析值比對結果來決定。

2.3 熱傳與結構分析

在 ABAQUS 熱傳分析時考慮結構表面溫度傳導至結構內部，所使用之元素為一階實體元素 DC3D8，每個節點上有一個溫度的自由度。結構分析元素種類上，ABAQUS 具備相當豐富的元素庫，對於不可壓縮材料 (例如金屬材料)，因為體積不可壓縮的限制，使元素積分點處的體積需保持常數，限制了彈塑性分析時可使用的元素類型，當某些元素類型加入不可壓縮的約束，使得元素過度約束，就會造成體積自鎖 (Volumetric Locking) 的現象，導致分析行為過於剛硬。在 ABAQUS 中的完全積分一階實體元素則不受體積自鎖的影響，可模擬不可壓縮的性質，對塑性問題有較好之求解能力。但是對於彎曲負載，完全積分的一階實體元素會存在著剪力自鎖 (Shear Locking) 的問題，若使用減積分元素雖然可以克服剪力自鎖問題，但一階實體減積分元素本身存在所謂的沙漏 (Hourglassing) 數值問題而過於柔軟，當網格不夠細緻時會有所謂的零能量模式通過網格擴展，使精度變差。文中採用之非協調模式元素 C3D8I 屬一階線性元素，除了原本每節點上的三方向自

由度外，額外增加 13 個自由度來克服剪力自鎖問題，而且其分析結果與二階元素精度相當，且所耗費的計算成本亦較少。

三、火災行為案例驗證

爲了驗證所建立分析模式之準確性，應用本次規劃進行之居室火災實驗成果，進行火災模擬分析，主要目的爲探討氣場溫度成長與梁構件表面溫度在居室火災下的變化歷時。由於結合 FDS 及 ABAQUS 之分析方法，須先尋得兩者間可供彼此共用之溫度邊界值，而採用 FDS 之 Wall_Temperature 參數來進行結構表面溫度預測。經由實驗驗證已確認該參數預測結果與轉換之可行性，有利於後續火害結構分析。

3.1 實驗配置與模型參數介紹

火場空間配置如圖 2 所示，火災室爲長 6m、寬 6m、高 2.4m 的空間並有一個寬 0.8m、高 2m 的開口位於房間角落，火災室牆壁爲磚造厚度 0.15m，其材料性質如下：比熱=1.04 kJ/kgK、熱傳導係數=0.38 W/m/K、密度=750 kg/m³、放射率 (emissivity) =0.8。環境初始溫度爲 30°C，且火災室內部架設六組熱電耦束分別爲 TC1~TC6，位置如圖 3 所示，每組熱電耦束上共有 8 個溫度偵測點以偵測氣場溫度，由上到下分別距離天花板 0、10、30、45、60、110、160 以及 210cm。

實驗過程於內政部建築研究所 10MW 集氣設備實驗屋進行如圖 4，以液化石油氣 (LGP) 爲燃料，經由燃燒器引燃燃燒，燃燒器位於房間地板的角落處，燃燒器面積爲 0.17m×0.17m，其熱釋放率歷時如圖 5 所示，前 10 分鐘之熱釋放率急速增加，10 分鐘後，熱釋放率大致保持穩定於 840KW 直至模擬結束。另經靈敏度分析結果，以網格尺寸 0.056m 對三維空間各方向進行網格劃分，所得分析之熱釋放歷程與實驗結果較接近 (圖 5)。爲了解火場溫度與建築結構表面溫度之差異，於實驗屋內另行安置 2 支不同斷面之梁構件如圖 6，並於梁長方面均勻佈設測溫點，利用上述資料進行 FDS 火場情境的建立，其分析模型如圖 7 所示。

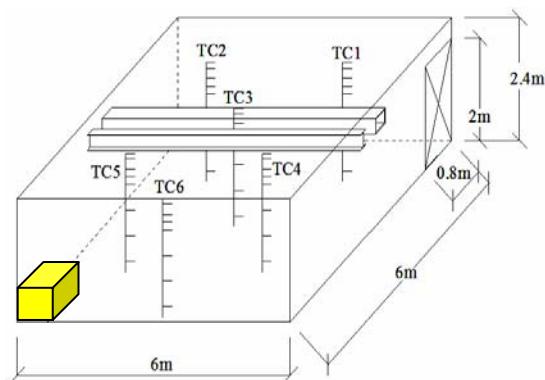


圖 2 火災室的幾何尺寸以及火源位置

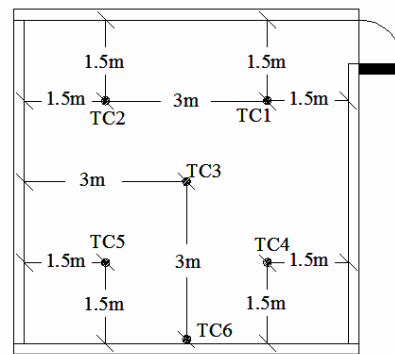


圖 3 熱電耦束 6 組分佈位置



圖 4 10MW 集氣設備實驗屋

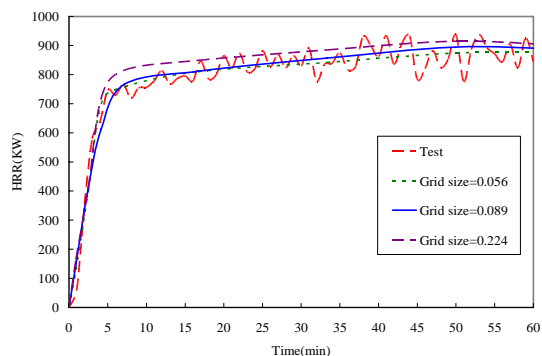


圖 5 靈敏度分析之熱放率比對

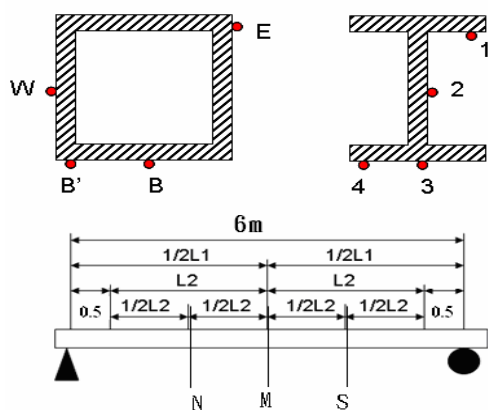


圖 6 鋼梁表面測溫點佈設

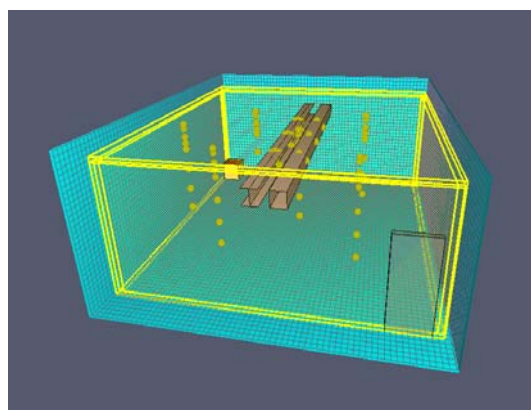


圖 7 驗證案例之 FDS 模型

3.2 分析結果

(1) 火場溫度驗證

圖 8 為實驗前後對照圖，圖 9 至圖 12 為熱電耦束上之氣場溫度實驗值與預測值的比較，每個熱電耦束又以距離天花板 45cm 為基準分成上下層，上層測溫點為#1~#4 分別距離天花板 0、10、30、45cm，下層測溫點為#5~#8 分別距離天花板 60、110、160、210cm，氣場溫度的發展趨勢與圖 6 的熱釋放率曲線相似，火災前 10 分鐘時，氣場溫度急速增加，10 分鐘後，氣場溫度之上升速度趨緩，溫度緩慢增加。

圖 9 與圖 10 為 TC1 之實驗值與預測值的氣場溫度歷時圖，TC1 位於開口旁且距離火源位置最遠，FDS 預測之溫度與實驗值有相同的發展趨勢，其中 TC1-1~TC1-6 的預測溫度皆高於實驗值，只有 TC1-7 和 TC1-8 之預測溫度低於實驗值，此結果可能受到熱煙由開口上部流出以及冷空氣由開口下部流入之影響，在 10 分鐘時誤差為 18%，隨著時間發展誤差逐漸縮小，60 分鐘後，平均溫度的預測值只比實驗值的 241°C 高 7°C 且誤差縮小至 3%。

TC3 位於火災室正中間，實驗值與預測值的氣場溫度歷時如圖 11 與圖 12 所示，隨著熱電耦束的位置越靠近火源，TC3 的氣場溫度比 TC1 和 TC2 高，圖中之 TC3-1~TC3-3 的實驗值與預測值很相近，而 TC3-4~TC3-8 的溫度差異較大，對於氣場溫度的模擬而言，上層氣場溫度的準確度較高。60 分鐘時 TC3 之實驗值平均溫度為 277°C，預測值低估了 24°C 誤差 9%。

TC5 位置最接近火源，在其上層氣場溫度中，FDS 模擬得到之氣場溫度預測值皆小於實驗值，對於 60 分鐘時的實驗值平均溫度而言，距離火源越近會有越高的平均溫度，TC5 為 340°C，大於

TC4 的 273°C、TC3 的 277°C、TC2 的 258°C、TC1 的 241°C，預測值亦有此種趨勢。

整體而言，火場在 60 分鐘時熱電耦位置越靠近火源的預測準確度較差，遠離火源之平均溫度誤差較小模擬結果較準確，對於氣場溫度的模擬而言，上層氣場溫度的預測準確度較下層溫度預測來的好，實驗結果與 FDS 模擬預測的溫度成長趨勢相似。



圖 8 實驗前後對照圖

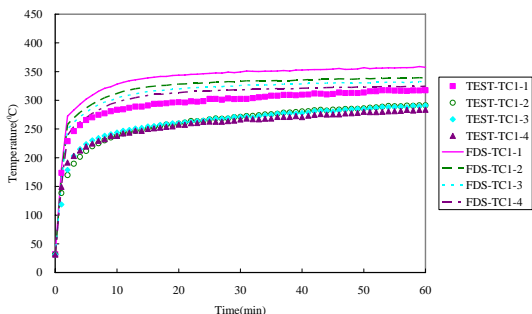


圖 9 TC1 (#1~#4) 之實驗與預測氣場溫度歷時

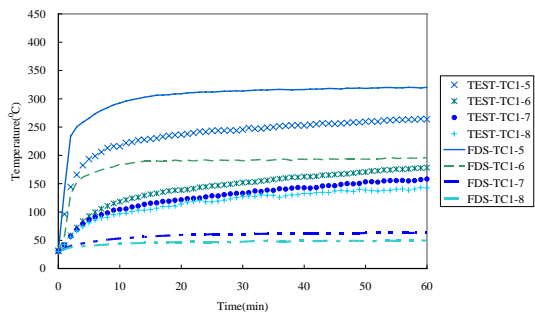


圖 10 TC1 (#5~#8) 之實驗與預測氣場溫度歷時

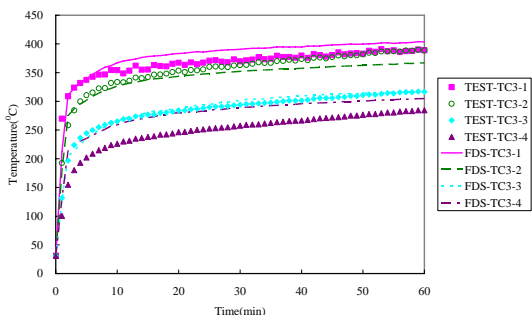


圖 11 TC3 (#1~#4) 之實驗與預測氣場溫度歷時

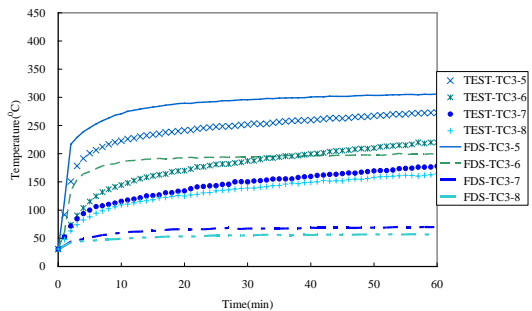


圖 12 TC3 (#5~#8) 之實驗與預測氣場溫度歷時

(2) 結構受熱面溫度驗證

圖 13 至圖 15 為箱型梁不同斷面與位置之表面溫度歷時，與氣場溫度相較之下，因氣場溫度主要受熱輻射與對流影響，且在空氣中之熱擴散係數較鋼材來的大，故初期鋼材表面溫度成長速度不似氣場溫升快速，趨於平穩線性成長，就箱型梁實驗值與分析值而言，除圖 15 熱電耦點 (W) 因未穩固於鋼材表面，導致量測到氣場溫度外，截至 60 分鐘固體表面溫度介於 200~300°C 間，而此時之氣場溫度 TC3 (居室中間) 已介於 300~400°C。在圖 13 中，SE、SB 與 SW 斷面位置之表面溫度分析結果與量測值相近，然而在斷面 M 的分析值則接高估實際量測值，在 60 分鐘時誤差為 19% (表 1)。至於 N 斷面之分析結果，在 NB 處分析值是較低估的。

表 1 箱型梁表面溫度實驗值與分析值比較

時間 (分)	斷面位置	實驗平均溫度 (°C)	分析平均溫度(°C)	誤差 (%)
10	S	70	69	-1
	M	69	69	0
	N	98	70	-29
20	S	117	114	-3
	M	99	115	16
	N	137	119	-13
30	S	154	154	0
	M	133	155	17
	N	174	161	-7
40	S	187	187	0
	M	161	189	17
	N	206	198	-4
50	S	213	214	0.5
	M	184	217	18
	N	233	227	-3
60	S	234	235	0.4
	M	201	239	19
	N	254	250	-2

而對 I 型梁實驗值與分析值來說，其成長趨勢與箱型梁一樣，截至 60 分鐘固體表面溫度介於 250~350°C 間，較箱型梁溫度高約 50°C，主要因其較箱型梁靠近火源所致。在起火初始階段，表面溫度分析結果較低估實驗結果，誤差達 24%，而隨著火勢成長趨於穩定階段，分析與實驗之誤差縮小至 11%。整體而言，鋼梁表面溫度之實驗與預測分析趨勢與大小皆相接近（表 2）。

表 2 I 型梁表面溫度實驗值與分析值比較

時間 (分)	斷面位置	實驗平均溫度 (°C)	分析平均溫度(°C)	誤差 (%)
10	S	107	92	-14
	M	123	93	-24
	N	124	100	-19
20	S	156	153	-2
	M	176	156	-11
	N	193	168	-13
30	S	205	198	-3
	M	219	202	-8
	N	246	217	-12
40	S	234	229	-2
	M	251	235	-6
	N	284	252	-11
50	S	257	250	-3
	M	275	258	-6
	N	311	276	-11
60	S	273	266	-3
	M	292	274	-6
	N	330	294	-11

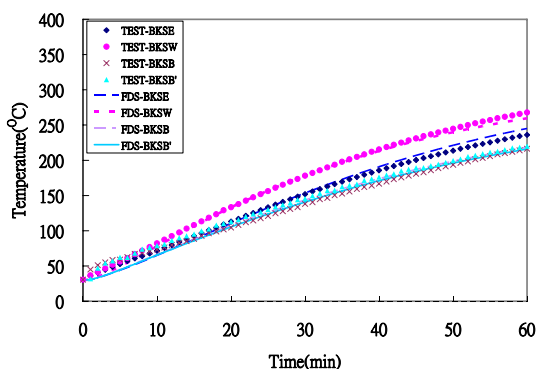


圖 13 箱型梁表面溫度實驗與分析值 (S 側)

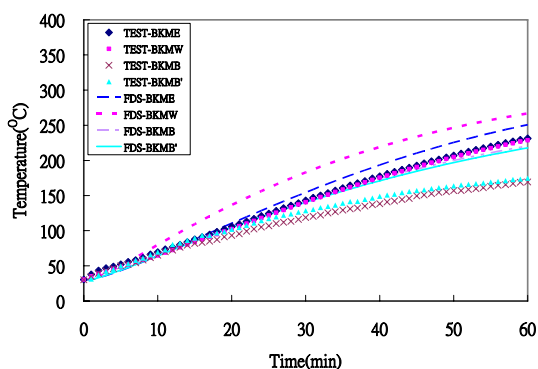


圖 14 箱型梁表面溫度實驗與分析值 (M 側)

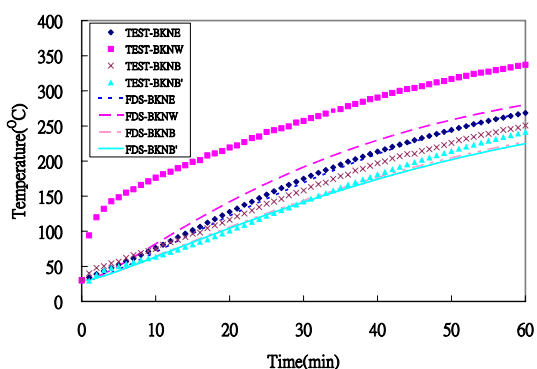


圖 15 箱型梁表面溫度實驗與分析值 (N 側)

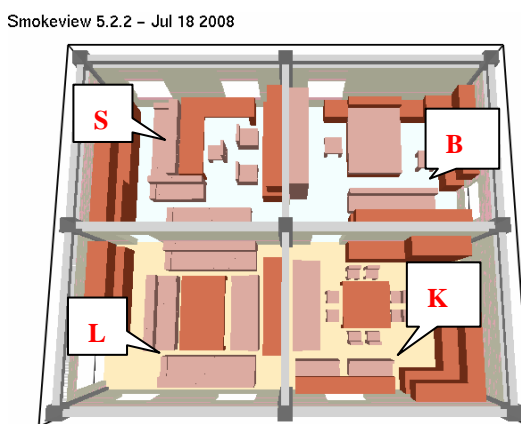


圖 16 單層多跨建築之 FDS 模擬模型

四、單層多跨建築之數值分析

為探討單層多間建築物的火災-結構耦合分析，採用 FDS 所提供之物件燃燒模式，建立火災水平延燒現象的數值模擬，並分析不同火場參數對氣場溫度的影響，進而模擬特定火災情境下之火災與結構行為。

單層多間建築物的平面幾何尺寸為長 12m 寬 10m 高 3.3m，內部空間劃分成四間房間，其中梁、柱構件所使用材料為 SN490B 鋼材，材料於高溫下之應力應變行為如 (Lee, et al., 2011) 所示，H 型梁斷面尺寸為 RH 400×200×8×13 mm，箱型柱斷面尺寸為 BOX 400×400×16 mm，分析時假設梁、柱構件為裸鋼，所以不考慮防火被覆的問題，樓板採用輕質混凝土且厚度為 10cm，輕質混凝土之受壓應力應變與受拉應力應變關係參考 (Gillie, 2000) 所提，可求得高溫下輕質混凝土之彈性模數與塑性應力應變曲線，作為 ABAQUS 分析時之基本材料性質。

圖 16 為單層多跨建築在 FDS 火災模擬中的模型，模擬區域的幾何大小為 12.6m×10.6m×3.5m，格點數為 126×106×35，初始環境溫度設為 28°C，其中牆壁採用耐燃石膏板，整個模擬區域劃分成

四間房間，右上為臥室 (B)，右下為廚房 (K)，左上為書房 (S)，左下為客廳 (L)，房間與房間之間都有門可相通，其中客廳與廚房相通無牆壁阻隔，視為一火災室，門窗設置情形如圖 16 所示，居室總可燃物發熱量計算火載量大小係參考 (何明錦及陳建忠，2008)，內容物有地毯、壁紙，桌子及櫃子其材料為木頭，椅子及床墊其材料為室內裝潢品 (可完全燃燒殆盡)，利用初始火源提供熱能使材料燃燒進而延燒至他室，火源面積為 0.3m×0.5m，熱釋放率為 0.5MW。在室內空間均勻且於距離地板高度 2.9m 設置氣場溫度偵測點，模擬時間為 1 小時，分析案例之代號如表 3。

表 3 分析案例代號

起火源位置	廚房 (kitchen)	書房 (study)	臥室 (bedroom)
通風因子			
Fv1=0.263	K1	S1	B1
Fv2=0.334	K2	S2	B2
Fv3=0.211	K3	S3	B3

圖 17 (a) 為 ABAQUS 中進行結構分析的模型，牆壁假設為非承重式牆，在執行結構分析時不考慮牆體作用，分析模型簡化為梁、柱系統與樓板的組合，柱底的束制條件為固接，梁、柱結構的接合方式為剛接，樓板與梁、柱之束制條件使用完全束縛而不考慮剪力釘的問題以簡化分析模型，載重型式為施加於樓板上的均佈載重 400kg/m²，非線性結構分析時，使用之元素種類為 C3D8I，共有 11164 個元素。

為了探討不同火場參數對單層多跨建築物在火場中行為的影響，針對不同起火源位置與不同通風因子進行火災模擬，以了解不同火場情境對火災行為的影響，火源位置分別坐落於廚房 (K)、書房 (S)、臥室 (B)。通風因子 (F_v) 的計算可參考式 (5)，文中僅更改客廳與廚房對外開口部面積，作為模擬不同通風因子之依據，分別為 F_{v1}=0.263 (m^{0.5})、F_{v2}=0.334 (m^{0.5})、F_{v3}=0.211 (m^{0.5})。

$$F_v = \frac{A_v \sqrt{H_v}}{A_t} \quad (5)$$

其中 F_v 為通風因子 (m^{0.5})，A_v 為開口面積 (m²)，H_v 為開口高度 (m)，A_t 為火災室內部表面積 (m²)。

當前述之火場情境、燃燒物件、火源位置、開口尺寸等參數設定完畢後，即以 FDS 模擬火災行為，將執行後輸出之 Wall_Temperature 結構表面溫度歷時輸入 ABAQUS 進行結構體的熱傳分析，最後再將熱傳分析結果引入進行非線性結構分析，並將結構斷面行為以軸力發展歷時來表示。梁構件與梁柱斷面之編號如圖 17 (b) 所示，整體火災模擬過程隨如圖 18 所示，以 Case-K1 之結果為例，在火災初期，起火源位置在廚房，由廚房開始燃燒，24 秒時火焰開始蔓延擴大燃燒範圍，400 秒時火災延燒使其他房間開始燃燒，600 秒時可明顯看出有更多物品燃燒消失，客廳的椅子幾乎燒光，1600 秒時書房的椅子也燒光，至 2100 秒時廚房椅子亦燒光，剩下木頭燃燒與臥室床墊未燒光。

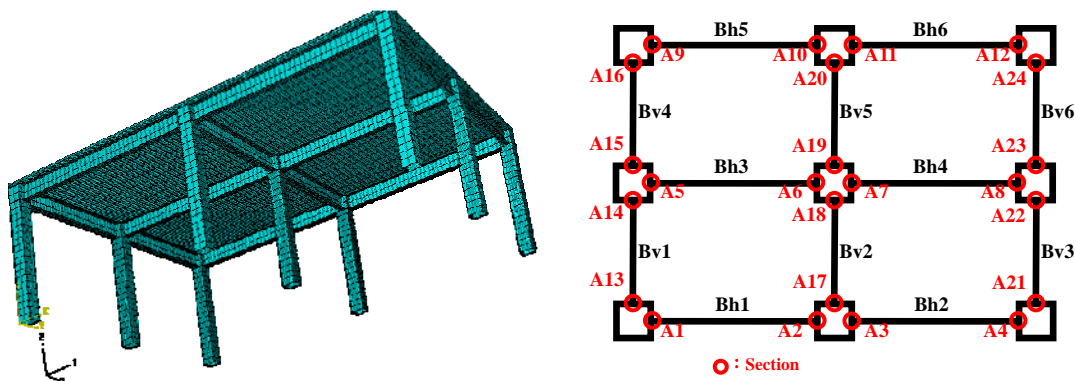


圖 17 單層多跨之 ABAQUS 模型與梁斷面編號

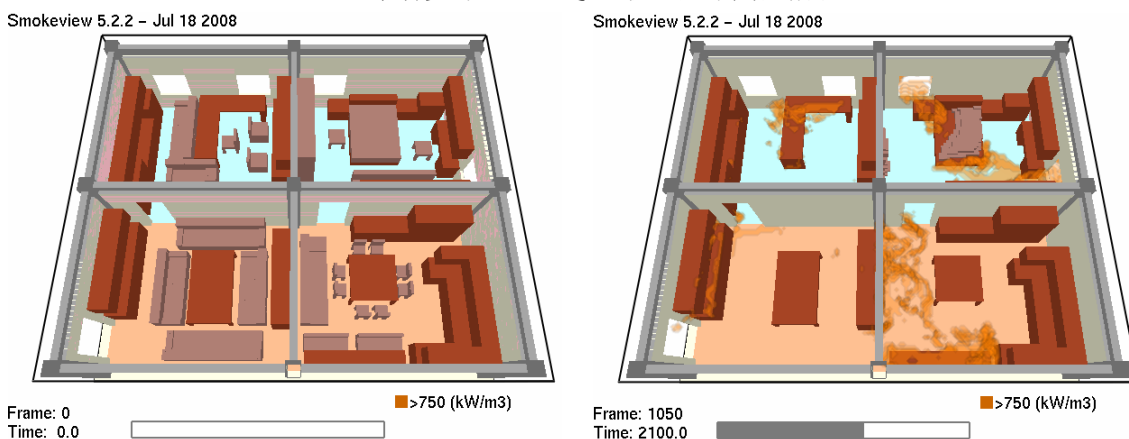


圖 18 Case-K1 火災之 FDS 火流分佈圖

4.1 通風因子影響

圖 19 為起火源位置在廚房 (K)，通風因子不同的熱釋放率圖，圖中可明顯看出通風因子 $F_{v1}=0.263 (m^{0.5})$ 在全盛期時火災規模約 22MW， $F_{v2}=0.334 (m^{0.5})$ 火災規模約 27MW， $F_{v3}=0.211 (m^{0.5})$ 火災規模約 18MW，所以通風因子可影響火場中可燃物的燃燒速度，控制熱能釋出速率，而通風因子越大可提供氧氣越多，燃燒速度加快，釋放的能量越多，因此也越快進入衰退期，這是因為整個火場可燃物數量固定下，火災燃燒所能釋放的能量為一定值。

圖 20 為 Case-K 在不同通風因子下之房間 K 的氣場平均溫度歷時圖，通風因子由大到小依序為 F_{v2} 、 F_{v1} 、 F_{v3} ，通風因子越大，空氣流通越好，提供之氧氣亦越多，造成房間內之可燃物燃燒愈加迅速，使熱能釋放速度加快，加速火災發展速度，發生最高氣場溫度之時間會隨通風因子越大而越早發生，由表 4 與圖 20 可知 K2-K 之最高氣場溫度為 $1009^{\circ}C > K1-K (902^{\circ}C) > K3-K (855^{\circ}C)$ ，顯示最高氣場溫度會隨通風因子越大而增高。因此通風因子會影響氣場溫度的升溫速度與溫度的最高值。同樣地，此結果也可由結構體溫度上得知，如表 5 之梁最高溫度所示，大致上以通風因子 $F_{v2}=0.334 (m^{0.5})$ 之梁溫度最高，接著才為 $F_{v1}=0.263 (m^{0.5})$ 與 $F_{v3}=0.211 (m^{0.5})$ 。

表 4 不同案例之各房間的最高氣場溫度值

Case	通風因子 Fv	L-room	K-room	S-room	B-room
K2	0.334	1085°C	1009°C	796°C	701°C
K1	0.263	1036°C	902°C	764°C	693°C
K3	0.211	972°C	855°C	743°C	663°C
S2	0.334	1086°C	1016°C	798°C	691°C
S1	0.263	1040°C	902°C	762°C	678°C
S3	0.211	981°C	824°C	745°C	675°C
B2	0.334	1090°C	998°C	797°C	711°C
B1	0.263	1037°C	885°C	759°C	685°C
B3	0.211	977°C	827°C	752°C	684°C

表 5 單層多跨建築之梁最高溫度

Case	通風因子 Fv	Bh1	Bh2	Bh3	Bh4	Bh5	Bh6
B1	0.263	650	584	621	542	521	430
B2	0.334	649	650	607	561	542	438
B3	0.211	617	543	591	501	519	430
K1	0.263	641	603	629	542	528	430
K2	0.334	645	657	608	562	540	436
K3	0.211	616	562	596	498	519	426
S1	0.263	644	590	613	536	530	425
S2	0.334	645	650	609	564	539	432
S3	0.211	626	539	578	492	521	425

Case	通風因子 Fv	Bv1	Bv2	Bv3	Bv4	Bv5	Bv6
B1	0.263	651	685	580	513	440	497
B2	0.334	648	732	616	523	478	511
B3	0.211	575	655	524	508	423	463
K1	0.263	640	687	589	515	440	460
K2	0.334	645	734	618	524	477	459
K3	0.211	589	655	544	505	426	436
S1	0.263	640	672	587	518	442	454
S2	0.334	650	739	614	526	471	458
S3	0.211	579	660	523	518	433	423

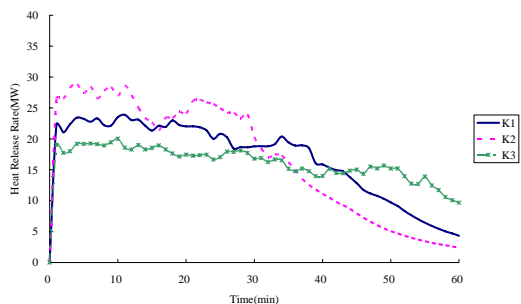


圖 19 Case-K 之不同通風因子熱釋放率曲線圖

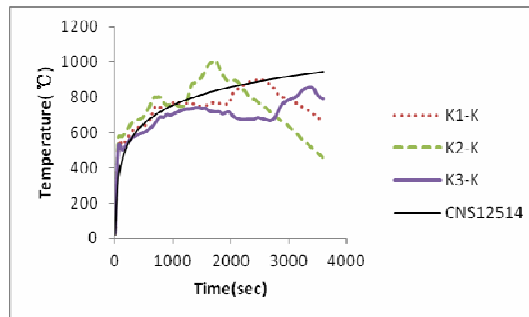


圖 20 Case-K 之不同通風因子之房間 K 氣場平均溫度歷時

因單層多跨建築為一複雜結構，在考慮不同通風因子的情況下，取其部分梁柱斷面進行軸力分析，針對 Case-K 進行不同通風因子探討，圖 21 與圖 22 分別為 A1 與 A6 斷面軸壓力與梁平均溫度之關係圖。軸力圖大致可分成三個階段，第一階段為軸壓力增加，因梁的溫度增加會造成熱膨脹效應，此時梁之邊界束制條件會對熱膨脹產生之伸長量產生抑制作用，造成梁之軸壓力持續增加，達到最大軸壓力後會隨梁的溫度持續上升而開始進入第二階段，因材料在高溫時之軟化，使軸壓力開始慢慢變小，當溫度開始降溫時為第三階段，此時材料受冷卻效應，體積開始縮小，使梁之邊界條件抑制膨脹的作用變小，使軸壓力急速變小甚至轉成拉力。整體而言，因開口因子之影響下，梁內最大軸向壓力之誤差為±5%。

4.2 起火源位置影響

在相同通風因子不同起火源位置的情況下，熱釋放率如圖 23 示，不同起火源位置對火災規模並無太大影響，熱釋放率曲線的發展趨勢大致相同，只在火災成長期時有差別，故圖中時間使用對數刻度，突出火災前期的差異性。起火源位置的不同，火源附近可燃物之材料性質、數量及擺放方式亦不同，房間幾何條件也不同，此皆會影響火焰蔓延速度及熱能釋放速度，進而影響火災發展到全盛期的時間快慢。

圖 24 通風因子 $Fv_1=0.263 (m^{0.5})$ 時，在不同起火源位置之房間 L 氣場平均溫度歷時圖，觀察圖中之氣場溫度發展歷時可知不同起火源位置之氣場溫度結果非常吻合，發展趨勢皆相同，K1-L 之最高氣場溫度值為 $1036^{\circ}C$ 、S1-L 為 $1040^{\circ}C$ 、B1-L 為 $1037^{\circ}C$ ，三者溫度差異很小。由 FDS-Smokeview 觀看模擬結果，顯示當火源不管位於某一特定房間內，火流皆會漫延造成所有房間起火引燃，進而讓該居室內所設計之固定火載量得以釋放，而在通風因子不變情況下，氣場溫度未因不同房間彼此間之熱交換而有所明顯差異，僅將該居室內之可燃物所釋放之熱量交換至大氣中，造成該房間內之氣場溫度因火載量固定而變化不大。但是對於結構體溫度而言，在相同通風因子的情況下，起火源位置不同會造成不一樣的空氣對流與熱傳行為，因此相同位置的梁構件，會因起火源位置不同而產生不同燃燒行為，產生不同梁溫（表 5）。

對於不同起火源位置對結構行為的影響，以通風因子為 $Fv_1=0.263 (m^{0.5})$ 為例，圖 25 與圖 26 為 A1 與 A6 軸力與溫度關係圖，圖中不同起火源位置的軸力行為非常相似，因此，就前面分析結果而言，不同起火源位置對結構軸力行為發展影響不大，所造成梁內最大軸向壓力之誤差為±2%。

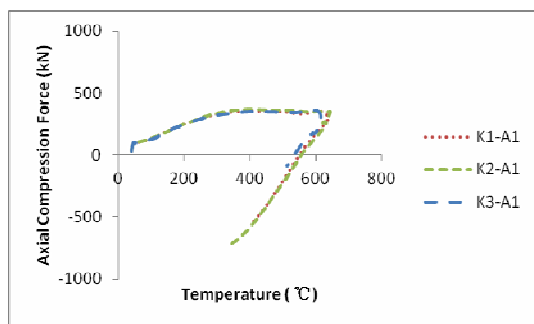


圖 21 Case-K 之不同通風因子之斷面 A1 軸壓力與溫度關係圖

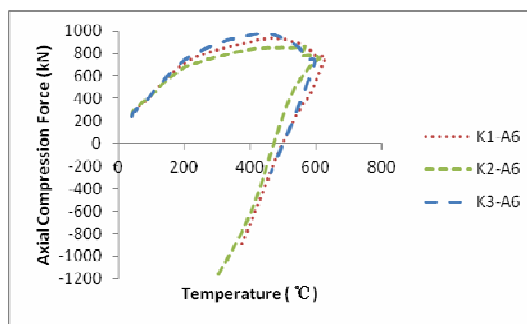


圖 22 Case-K 之不同通風因子之斷面 A6 軸壓力與溫度關係圖

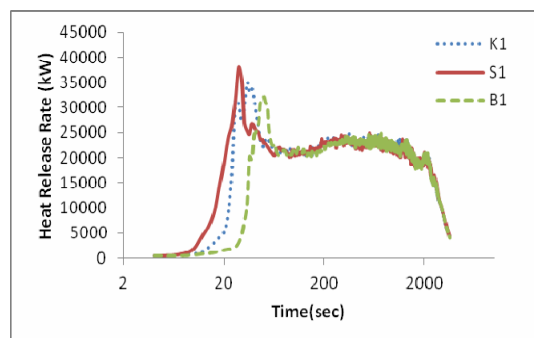


圖 23 $Fv_1=0.263$ 下不同起火源位置熱釋放率曲線

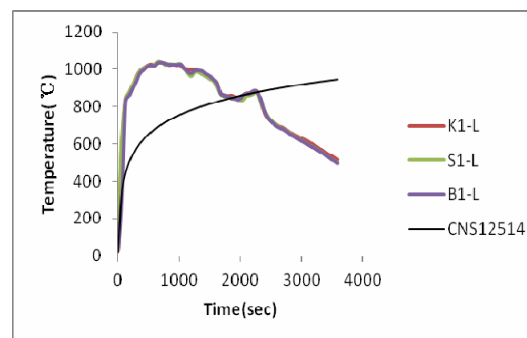


圖 24 $Fv_1=0.263$ 下不同起火源位置之房間 L 氣場平均溫度歷時

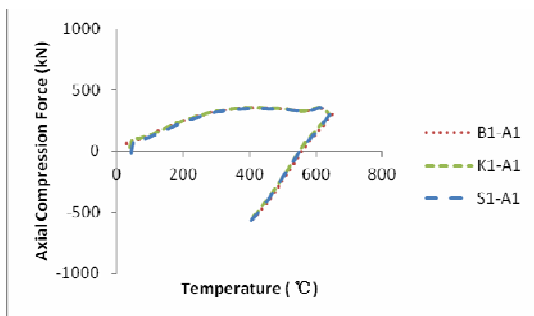


圖 25 $Fv_1=0.263$ 下不同起火源位置之斷面 A1 軸壓力與溫度關係圖

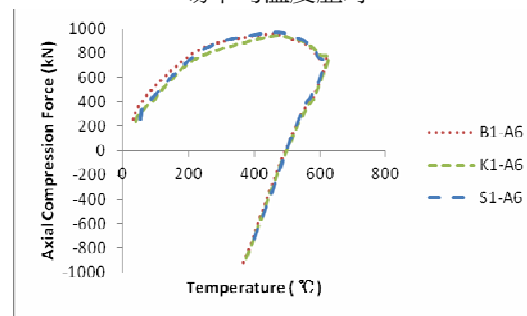


圖 26 $Fv_1=0.263$ 下不同起火源位置之斷面 A6 軸壓力與溫度關係圖

五、結論

本文建立鋼結構耐火性能設計之分析模型，應用數值模擬探討鋼結構受火害之火場環境與非線性結構行為。火災數值模擬以 FDS 場模式進行分析，結構分析則以 ABAQUS 有限元素軟體進行模擬。並延伸火災居室至單層多跨之平面立體構架，用以探討火場參數不同對於結構行為之影響。文中所得結論總結如下：

(1) 火災實驗驗證部份:

- (A) 靠近火源的氣場溫度，FDS 預測準確度較差，而較遠離火源之預測平均溫度誤差則較小，模擬結果較準確；以居室高度劃分，上層氣場溫度預測較下層氣場準確度高。
- (B) 鋼材表面溫度成長速度不似氣場溫升快速，趨於平穩線性成長，截至 60 分鐘箱型梁、I

型梁之固體表面溫度實驗值與分析值皆低於當時氣場溫度。

- (C) 文中所提之部份耦合熱應力分析方法經與實驗案例驗證，可有效結合 FDS 火場模擬與結構分析 ABAQUS 進行火災-結構之分析，用以探討火災延燒、開口尺寸、火源位置等諸多不同參數對於結構行為之影響。
- (2) 於通風控制型火場下，通風因子越大，可加速火場的升溫速度並提高氣場溫度，使結構物整體溫度提高，亦使梁柱斷面軸壓力更大，並使火災持續時間縮短，導致斷面軸力很快就從壓力轉往拉力發展，梁內最大軸向壓力之誤差為 $\pm 5\%$ 。
- (3) 起火源位置的不同使火災延燒速度產生差異造成火災成長期的持續時間不同，一旦火災進入全盛期後，對火災氣場溫度影響甚微。而對於結構梁的溫度分佈而言，起火源位置不同，梁表面溫度的分佈亦不同，整體梁斷面軸力發展歷時，其最大軸向壓力相近，故起火源位置影響不大，所造成梁內最大軸向壓力之誤差為 $\pm 2\%$ 。

參考文獻

- 何明錦，陳建忠（2008）。*建築物構造防火性能驗證技術手冊*。新北市：內政部建築研究所。
- 林誠興，王士承（2007）。數值模擬技術應用於建築物火災情境重現之探討。*工業安全科技*，63，46-52。
- 徐瑞祥，林誠興，黃彰斌（2004）。鋼筋混凝土樑受火害後之剪力強度數值模擬。*建築學報*，(48)，59-73。
- 黃雄義（2005）。FDS 預測 ISO9705 房間試驗火場情境之可行性研究。未出版之碩士論文，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系，高雄市。
- Chen, C. J., Hsieh, W. D., Hu, W. C., Lai, C. M., & Lin, T. H. (2010). Experimental investigation and numerical simulation of a furnished office fire. *Building and Environment*, 45(12), 2735-2742.
- Chow, W. K. (1997). One the 'cabin' fire safety design concept in the new Hong Kong airport terminal buildings. *Journal of Fire Science*, 15(4), 404-423.
- Duthinh, D., McGrattan, K. B., & Khaskia, A. (2008). Recent advances in fire-structure analysis. *Fire Safety Journal*, 43(2), 161-167.
- Gillie, M. (2000). *The Behavior of Steel-Framed Composite Structures in Fire Condition*. Unpublished doctoral dissertation. College of Science and Engineering, School of Engineering and Electronics, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK.
- Kwon, J. (2006). *Evaluation of FDS V.4: Upward Flame Spread*. MA, USA: Worcester Polytechnic Institute Press.
- Lee, C. H., Chiou, Y. J., Chung, H. Y., & Chen, C. J. (2011). Numerical modeling of the fire-structure behavior of steel beam-to-column connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(9), 1386-1400.
- Ma, T. G., & Quintiere, J. G. (2003). Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations. *Fire Safety Journal*, 38(5), 467-492.
- McGrattan, K. B., Baum, H. R., & Rehm, R. G. (1998). Large eddy simulations of smoke movement. *Fire Safety Journal*, 30(2), 161-178.

- Wang, Z., Jia, F., Galea, E. R., Patel, M. K., & Ewer, J. (2001). Simulating one of the CIB W14 round robin test cases using the SMARTFIRE fire field model. *Fire Safety Journal*, 36(7), 661-667.
- Wickstrom, U. (2009). Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer for Calculating Heat Transfer and Controlling Fire Resistance Furnaces. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Fire Safety Science* (pp. 1227-1238). London, UK: The International Association for Fire Safety Science.
- Wickstrom, U., Duthinh, D., & McGrattan, K. B. (2007). Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures. *Interflam 2007: International Interflam Conference, 11th Proceedings* (pp. 943-946). MD, USA: The National Institute of Standards and Technology.

REFERENCES in English

- Chen, C. J., Hsieh, W. D., Hu, W. C., Lai, C. M., & Lin, T. H. (2010). Experimental investigation and numerical simulation of a furnished office fire. *Building and Environment*, 45(12), 2735-2742.
- Chow, W. K. (1997). One the 'cabin' fire safety design concept in the new Hong Kong airport terminal buildings. *Journal of Fire Science*, 15(4), 404-423.
- Duthinh, D., McGrattan, K. B., & Khaskia, A. (2008). Recent advances in fire-structure analysis. *Fire Safety Journal*, 43(2), 161-167.
- Huang, S. Y. (2005). *The Feasibility of Using FDS in the Prediction of ISO 9705 Room Fire*. Unpublished master's thesis. Department of Safety Health and Environmental Engineering, NKFUST, Kaohsiung.
- Ho, M. C., & Chen, C. J. (2008). *The Technique Handbook of Structure Fire-Resistance Certification of Buildings*. New Taipei City: Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior.
- Gillie, M. (2000). *The Behavior of Steel-Framed Composite Structures in Fire Condition*. Unpublished doctoral dissertation. College of Science and Engineering, School of Engineering and Electronics, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK.
- Jowsey, A., Torero, J. L., & Usmani, A. (2004). Modelling of structures in fire : An example of the boundary condition. *Proceedings of the International Technical Congress on Computational Simulation Fire Models in Engineering and Research* (pp. 297-313). Spain: Santander.
- Kwon, J. (2006). *Evaluation of FDS V.4: Upward Flame Spread*. MA, USA: Worcester Polytechnic Institute Press.
- Lee, C. H., Chiou, Y. J., Chung, H. Y., & Chen, C. J. (2011). Numerical modeling of the fire-structure behavior of steel beam-to-column connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(9), 1386-1400.
- Lin, C. X., & Wang, S.C. (2007). Application of simulation technology to reconstruct the fire scenario of building. *Industrial Safety and Technology*, 63, 46-52.
- Ma, T. G., & Quintiere, J. G. (2003). Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations. *Fire Safety Journal*, 38(5), 467-492.
- McGrattan, K. B., Klein, B., Hostikka, S., & Floyd, J. E. (2008). *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*. Washington, DC: NIST Special Publication Press.

- McGrattan, K. B., Baum, H. R., & Rehm, R. G. (1998). Large eddy simulations of smoke movement. *Fire Safety Journal*, 30(2), 161-178.
- Wang, Z., Jia, F., Galea, E. R., Patel, M. K., & Ewer, J. (2001). Simulating one of the CIB W14 round robin test cases using the SMARTFIRE fire field model. *Fire Safety Journal*, 36(7), 661-667.
- Wickstrom, U. (2009). Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer for Calculating Heat Transfer and Controlling Fire Resistance Furnaces. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Fire Safety Science* (pp. 1227-1238). London, UK: The International Association for Fire Safety Science.
- Wickstrom, U., Duthinh, D., & McGrattan, K. B. (2007). Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures. *Interflam 2007: International Interflam Conference, 11th Proceedings* (pp. 943-946). MD, USA: The National Institute of Standards and Technology.
- Xu, R.X., Lin, C.X., Huang, Z.B. (2004). Numerical modeling of the shear strength for reinforced concrete beams after fire damage. *J. of Architecture*, (48), 59-73.