

Keynote Speech(VI)：

鋼結構承受火害之結構行為研究

A Study on Structural Behavior of Steel Structures Subjected to Fire

邱耀正

現職：國立成功大學土木工程學系教授

國家地震工程研究中心兼任組長

學歷：美國德州大學奧斯汀校區工程力學博士

電話：(06) 2757575 轉 63159

電子郵件：ceyjc@mail.ncku.edu.tw

鋼結構承受火害之結構行為研究

A Study on Structural Behavior of Steel Structures Subjected to Fire

邱耀正 Y.J. Chiou* 連寬宏 K.H. Lien** 李鎮宏 C.H. Lee***

*成功大學土木系 Department of Civil Engineering National Cheng Kung University

**高苑科技大學土木系 Department of Civil Engineering Kao Yuan University

***內政部建築研究所 Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior

摘要

本文旨在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，結構分析分別以向量式有限元素法、ABAQUS 有限元素軟體進行分析。文中數值結果驗證向量式有限元素法可有效模擬鋼結構在火害環境下之整體穩定行為，FDS 配合 ABAQUS 有限元素軟體亦可有效分析火災-結構耦合行為。

關鍵詞: 鋼結構、火災模擬、向量式有限元素法、火災-結構

Abstract

This research developed the analysis model for performance-based design of steel structures subjected to fire. The FDS was adopted for fire simulation, and the vector form intrinsic finite element (VFIFE) method and ABAQUS were used for structural analysis. The numerical results show that the VFIFE method can effectively predict the fire response of steel structures, and FDS cooperating with ABAQUS can well analyze the fire-structure interaction behavior.

Keywords: steel structures, fire simulation, vector form intrinsic finite element method, fire-structure

一、緒論

鋼結構因具有韌性佳、自重輕、工期短、可回收等特性，已被廣泛使用於高樓結構中；但鋼材本身對溫度的敏感性卻也成為鋼結構致命的弱點。最近，美國 911 恐怖攻擊造成紐約世貿雙子星大樓倒塌，美國 National Construction Safety Team (NCST) 提出未來應對於真實火災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。

對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」，除了根據實際試驗溫度外，其餘分析皆以假設溫度場進行模擬，其分析結果正確性是有疑慮的，因此建立火災-結構(fire-structure)分析介面有其必要性。此外，鋼結構受火害除了大變形之行為外，若結構本身存有未知瑕疵，在承受突發性載重(如建物受攻擊、爆炸或地震等因素)，是有可能發生桿件斷裂情形。當桿件發生斷裂，結構原有的平衡狀態受到破壞將會進行力量重分配以達到再次平衡或是倒塌。以分析觀點而言，斷裂的發生會產生節點與自由度增加的情形，傳統有限元素法在處理此類問題上較為棘手。近期 Ting 等(2004a, 2004b)、Shih 等(2004)提出適用於結構大變形分析的向量式有限元素法(vector form intrinsic finite element, VFIFE)，該法分析過程不需建立結構勁度矩陣，有別於傳統的有限元素法；且在非線性問題亦不需迭代計算，故無病態矩陣(ill-conditioned matrix)所造成數值分析的困擾。另外，VFIFE 是以個別獨立質點為基礎之動力分析模式，對於斷裂問題之處理相對而言簡易許多，其特性符合火害中結構的大變形，與可能發生桿件斷裂之不連續變形及運動分析的需求。

本文首先以向量式有限元素法建立平面鋼結構於火場環境下非線性行為之數值分析模式，並藉由應變率的效應，模擬結構受爆炸的反應。繼之結合火災軟體 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、開口因子進行火災模擬，探討其火場溫度非均勻分佈情況，以更合理的溫度場參數來預測建築結構受火害之行為。

二、向量式有限元素法

向量式有限元素法是一套結構大變形分析的演算法，其基本觀念係先將結構體離散化成有限個質點的集合，每個質點的獨立運動方程式則由牛頓運動定律決定，再以中央差分法求解各質點的運動方程式。而元素內力之計算則結合移動式基礎架構(convected material reference frame)與虛構反向剛體運動(fictitious reversed rigid body motion)的作用，先將質點的位移分解為剛體位移與變形位移，並進而求出質點間(即元素)之內力。此法建構的為各離散

獨立質點的運動方程式，因此其計算程序屬向量力學，有別於傳統之結構分析法，並不需建立結構勁度矩陣，亦不需任何之迭代計算。本文以向量式有限元素法為基礎，加入熱應變之效應，使用含溫度效應與非彈性的應力—應變關係式，建立平面鋼結構在高溫環境下結構行為之數值分析模式。

(一) 基本方程式

向量式有限元素法首先假設每個平面剛架元素的質量集結在元素兩端的結點上，且每個結點均具有三個自由度，分別為兩個平移與一個轉動自由度，如圖 1 所示，各質點之質量與轉動慣量則由該元素相鄰元素分配並疊加而成。考慮平面剛架結構離散化質點系統中某一質點 α ，若該質點的質量慣性矩陣為 m_α ，且在任意時間 t 的位移向量為 $d_\alpha(t)$ ，則 α 質點的運動方程式可表示為：

$$m_\alpha \ddot{d}_\alpha = F_\alpha = F_\alpha^{ext} - F_\alpha^{int} \quad \alpha = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

其中 F_α^{ext} 為作用在 α 質點上的外力向量， F_α^{int} 是質點周圍元素對運動產生阻礙的內力向量， n 則為總質點數。由每個質點所建立之獨立運動方程式，可利用顯性時間積分法之中央差分式求解，並建立一個增量的計算程序。



圖 1 向量式有限元素法元素與結點自由度示意圖

(二) 移動基礎架構

向量式有限元素法引用移動式基礎架構的觀念，描述結構大變形與計算元素內力。考慮如圖 2 連接兩質點的平面剛架元素，若該元素由初始時刻 t_0 到時刻 $t_a = t - \tau$ ，元素兩端結點位置由 $(1^0, 2^0)$ 變化到 $(1', 2')$ 的運動過程為已知。則由運動方程式以中央差分法，可分別求得元素兩端質點下一個時刻 t 之位移向量 d_1 、 d_2 與結點位置 $(1', 2')$ 。若以結構在 t_a 時刻之幾何形狀為基礎架構，則可求得在增量時間 (τ) 之增量位移向量 Δd_1 與 Δd_2 ，而基礎架構則隨增量計算過程不斷更新其位置。在結構產生大位移的運動過程中，實際上包含了剛體運動與變形兩部分，向量式有限元素以虛構反向剛體運動(fictitious reversed rigid body motion)扣除剛體位移。因此，元素之變形位移增量可以 t_a 時刻元素之幾何形態為基礎架構來描述。一個二結點之剛架元素則只有三個獨立的結點位移參數，

$$d_e^T = [\Delta_e \quad \theta_1 \quad \theta_2] \quad (2)$$

其中 Δ_e 為元素軸向變形增量， θ_1 與 θ_2 則分別為元素兩端結點的切線轉角增量。

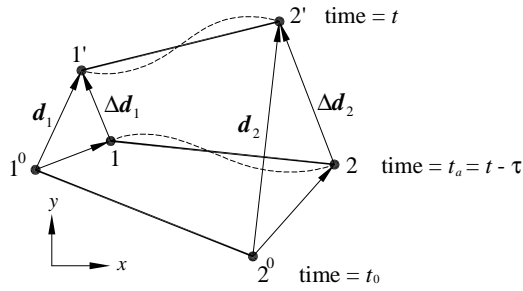


圖 2 元素結點位移與移動基礎架構示意圖

在 t_a 時刻之基礎架構座標下，由元素結點位移增量向量 d_e ，引入傳統有限元素法形狀函數與柏努利梁的撓曲理論，則剛架元素的軸向應變增量為：

$$\Delta \varepsilon = \mathbf{B} d_e = \frac{1}{l} [1 \quad (4-6s)y \quad (2-6s)y] \begin{Bmatrix} \Delta e \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

(三) 應變率效應

一般而言，在瞬間加載作用下材料之應變速率會隨之增加且會降低材料的降伏強度 (Yandzio 與 Gough, 1999)，而爆炸力即為典型的瞬間加載類型。Perzyna (1966) 建議應變速率與降伏強度關係如下：

$$\sigma'_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] \sigma_y \quad (4)$$

其中， σ'_y 為考慮塑性應變速率作用下的降伏強度、 $\dot{\varepsilon}^{pl}$ 為塑性應變率、 $m=0.2$ 且 $\gamma=40 s^{-1}$ (Bodner 與 Symonds, 1960, Izzuddin 與 Fang, 1997)。在 VFIFE 分析程序中，則根據移動基礎架構座標下之 $\dot{\varepsilon}^{pl}$ 與 σ_y 由式(4)決定下一個分析時刻之 σ'_y 。

三、火災-結構耦合數值分析

本文使用場模式之火災模擬軟體 FDS 模擬火災，繼之配合有限元素軟體 ABAQUS 分析建築物在火場中之行為。文中採用部分耦合熱應力分析(sequentially coupled thermal-stress analysis)，其分析流程圖如圖 3 所示，分析步驟說明如下：

1. 利用 ABAQUS 之 CAE 介面建立實體分析模組。
2. 將結構實體進行網格分割，截取結構體曝火面之節點資料。
3. 將步驟 2 之節點資料，透過自行撰寫之程式轉換成 FDS 相對應之輸入格式，將節點之輸出參數設成 WALL_TEMPERATURE 以輸出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，可輸出受熱面對應之節點溫度歷時。

5. 將受熱面之節點溫度歷時，利用自行撰寫之程式轉換成 ABAQUS 之輸入格式，當作熱傳分析之溫度邊界條件，置入輸入檔中。
6. 執行 ABAQUS 之熱傳分析，可得到結構體每一個節點之動態溫度變化，把此結果當作結構分析之溫度邊界條件。
7. 進行 ABAQUS 非線性結構分析，模擬結構在火場中之行為。

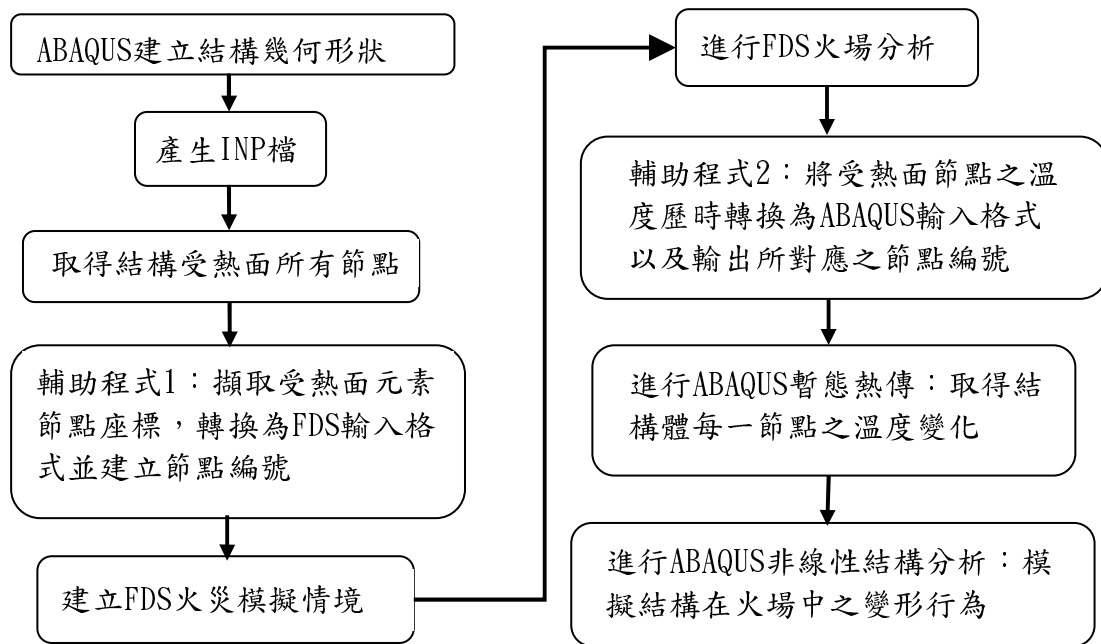


圖 3 Fire-Structure 分析流程圖

本研究使用FDS模擬軟體所擷取的溫度，是透過將試體表面模擬成牆，並以FDS內部計算「Wall-Temperature」做為試體表面節點溫度，再輸入至結構分析軟體做熱傳分析。Wall Temperature (WT) 定義為 (McGrattan et al. 2008)：

$$T_w \equiv T_{s,1/2} = (T_{s,0} - T_{s,1})/2 \quad (5)$$

其中 1/2 代表元素 cell 的中間位置。

FDS 利用格點的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，邊界條件如式(6)所示。

$$-k_{s,i} \frac{T_{s,i}^{n+1} - T_{s,0}^{n+1}}{\delta_{x_{1/2}}} = \dot{q}_c^{(n+1)} + \dot{q}_r^{(n+1)} \quad (6)$$

其中 $T_{s,i}$ 為第 i 個格點中心之溫度， $k_{s,i}$ 為第 i 個格點中心之固體熱傳導係數，而下一個時間點的對流熱通量及輻射熱通量的近似值如式(7)及式(8)所示。

(7)

(8)

其中 h 為熱對流係數, ϵ 為放射率, σ 為 Stefan-Boltzmann 常數, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ 。

四、數值分析模式驗證

(一) 鋼柱受爆炸力作用之分析

考慮如圖 4 所示, 由 UC254×254×89 型鋼組成、柱長 3m 且柱中點初始幾何瑕疵為 $L/1000$ 、柱頂承受初始壓力為 $0.5F_u$ 之鋼柱, 受均佈載重型式之爆炸力作用。分析假設彈性係數 205kN/mm^2 、降伏強度 275N/mm^2 、鋼材密度 7850kg/m^3 且為完全彈塑之材料模式。VFIFE 和 Liew 與 Chen(2004)之分析結果一致, 如圖 5 所示。顯示本文所建立考慮應變率效應之分析模式, 可有效應用於柱結構承受爆炸力作用下之結構行為。

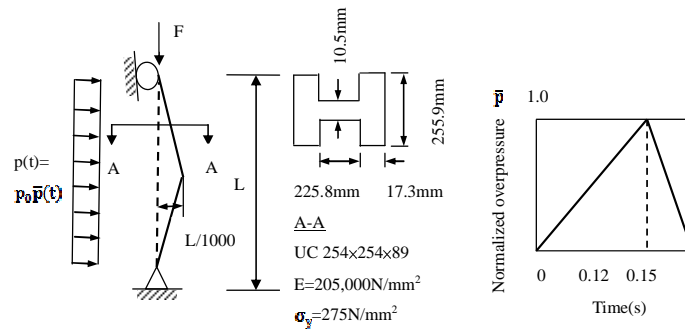


圖 4 鋼柱結構幾何與爆炸載重形式示意圖

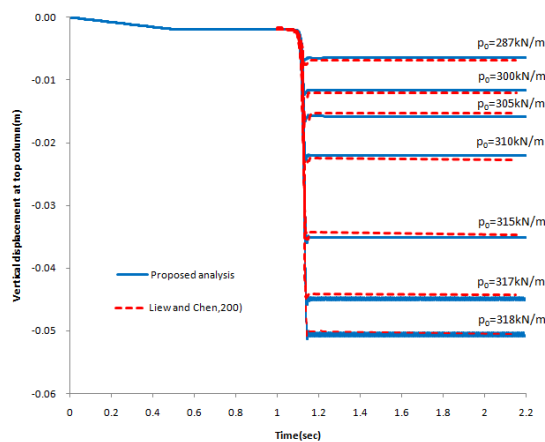


圖 5 柱頂位移與爆炸力關係圖

(二) 火災行為案例驗證

本文引用 2008 年內政部建築研究所(ABRI)的實驗結果，利用實驗提供的火災模型及實驗結果，進行 FDS 火災模擬分析，並與該實驗結果進行比較。

火場空間配置如圖 6 所示，火災室為長 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，火災室牆壁為厚度 0.15m 的耐火磚，其材料性質如下：比熱=1.04 kJ/kgK、熱傳導係數=0.38 W/Mk、密度=750 kg/m³、放射率(emissivity)=0.8。

環境初始溫度為 30°C，且火災室內部架設六組熱電偶樹分別命名 TC1~TC6，位置如圖 7 所示，每組熱電偶樹上共有八個溫度偵測點以偵測氣場溫度，由上到下分別距離天花板 10cm，30cm，45cm，60cm，110cm，160cm 以及 210cm。實驗過程以液化石油氣(LPG)為燃料，經由燃燒器引燃燃燒，燃燒器位於房間地板的角落處，燃燒器面積為 0.17m×0.17m，其熱釋放率歷時如圖 8 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直至模擬結束。利用上述提供之資料進行 FDS 火場情境的建立，FDS 所建立的分析模型如圖 9 所示，以網格尺寸 10cm 為一格對三維空間各方向進行網格劃分，可得格點數 138240 (64×72×30)，而火災的模擬時間設定為一小時，並設置氣場溫度偵測點且每分鐘輸出一氣場溫度。

文中數值結果顯示，氣場溫度預測值的發展趨勢與圖 8 的熱釋放率曲線相似。圖 10 與圖 11 所示為 TC3 實驗值與預測值的氣場溫度歷時曲線，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。

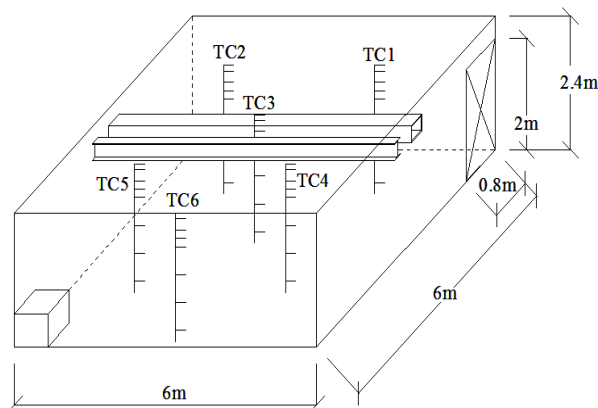


圖 6 火災室的幾何尺寸以及火源位

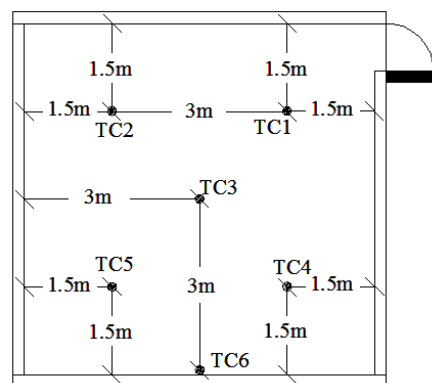


圖 7 六組熱電偶樹在火災室的位置

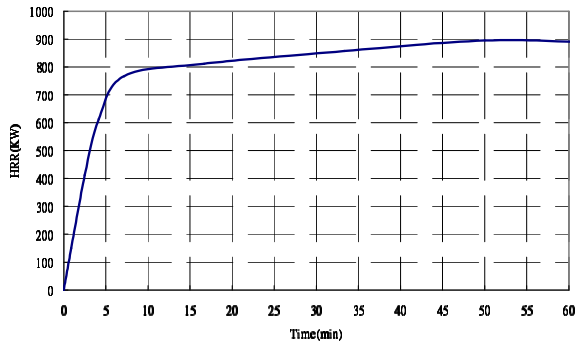


圖 8 FDS 輸入參數之熱釋放率歷時

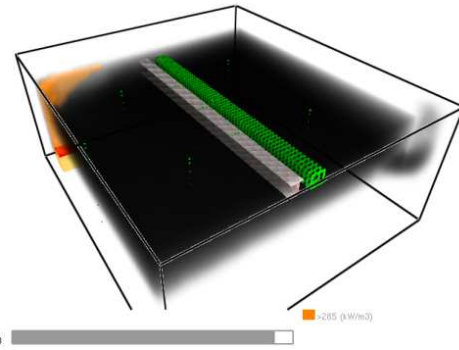


圖 9 驗證案例之 FDS 模型

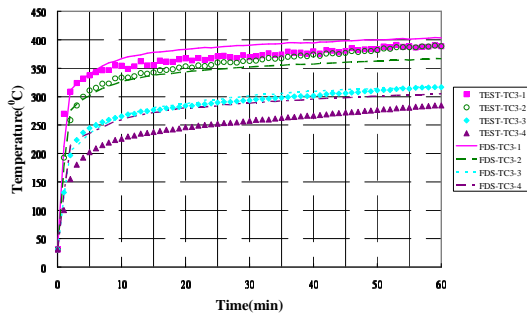


圖 10 熱電偶樹 TC3(#1~#4)之實驗與預測氣場溫度歷時

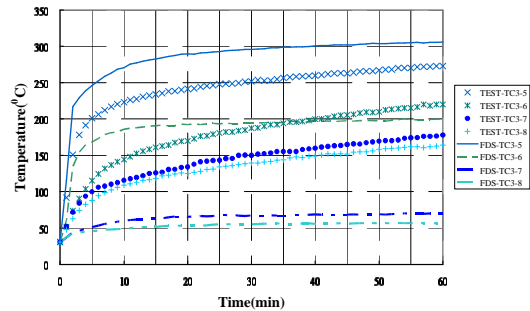


圖 11 熱電偶樹 TC3(#5~#8)之實驗與預測氣場溫度歷時

五、範例研討

(一) 平面剛架受地震與局部火災作用

一般而言火災與地震同時發生之機率甚低，唯地震引發火災之實例則時有所聞。本文考慮如圖 12 所示五層三跨非彈性平面剛架結構，討論伴隨地震引發火災並進而產生桿件斷裂時，結構之變形過程。分析假設該剛架初始承受如圖所示之均佈載重，隨後在時間 $t=20\text{sec}$ 與 360sec 時分別發生了相同規模之主震與餘震，地震規模引用 1940 年 El Centro 地震資料，且經 VFIFE 分析該剛架在地震作用過程 A 點之位移反應如圖 13 所示。假設主震作用階段局部最大反應時間($t=33\text{sec}$)發生局部火災，並假設僅有火災區域周圍桿件受溫度影響，且所有受火影響之桿件保持均溫、溫度變化如 ISO 834 標準升溫曲線；最後，在餘震作用過程局部最大反應時間($t=373\text{sec}$)，則在 A 點梁端發生斷裂。另外，鋼材高溫性質依 Eurocode-3 規定，且應變硬化參數(β)為 1%。初始靜載重、地震與溫度作用之歷時資料如圖 14 所示。VFIFE 分析 A 點垂直、水平位移與整體結構變形過程，結果分別如圖 15~17 所示。

圖 15 為 A 點位移與溫度之關係圖。圖中顯示，僅受火害作用時該點水平位移(A_x) 因初始梁受熱伸長而往左移動，隨著溫度增加、鋼材強度下降、梁垂直撓度增加等現象，使梁端部有被拉回之情形。而垂直位移(A_y)之發展趨勢則為先上升再下降。若考慮火災伴隨地震而

發生，分析顯示地震對 A 點水平位移之影響較為明顯，而對垂直位移則幾無影響。另外，因地震作用時間短，故主震期間火場溫度尚未顯著增加，所以因主震所增加之位移量不明顯。最後，餘震發生時火場溫度已達 600°C ，此時鋼材強度已大減，因此餘震所增加之位移明顯增加。最後，在餘震作用階段若 A 點梁端桿件發生斷裂，則 A 點水平位移不再受高溫時梁端位移往內側發展之影響，而產生持續往外位移之趨勢，與前述高溫時該點位移朝內側發展趨勢不同。另外，因桿件斷裂使梁上載重不再傳遞至柱，因此柱頂垂直位移因載重減少，由膨脹伸長反轉向下發生之溫度反而高於桿件未斷裂時之情形。圖 16 為整體剛架火害中之變形過程，圖中顯示柱頂位移下降趨勢與受高溫時梁端位移往內側發展之影響，結構最後產生柱向內挫屈崩塌之情形。而在桿件斷裂條件下，整體剛架變形過程則如圖 17 所示，顯示梁斷裂後結構最後在受火害區域產生柱向外挫屈崩塌現象，與僅受火害作用之結果不同；且因梁斷裂後結構受力重新分配之結果，造成剛架第二跨之變形亦明顯加大。

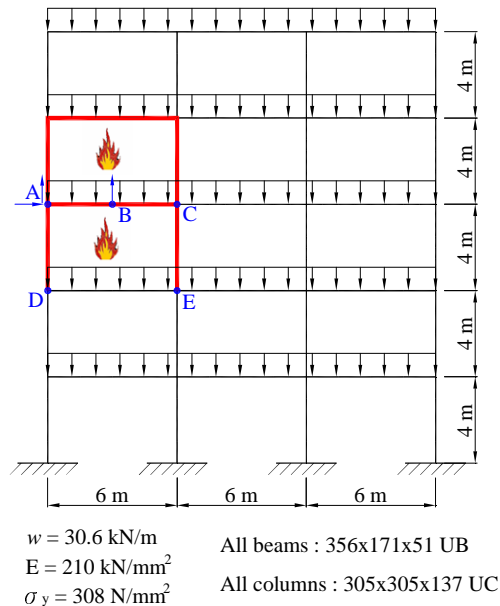


圖 12 五層三跨非彈性平面剛架

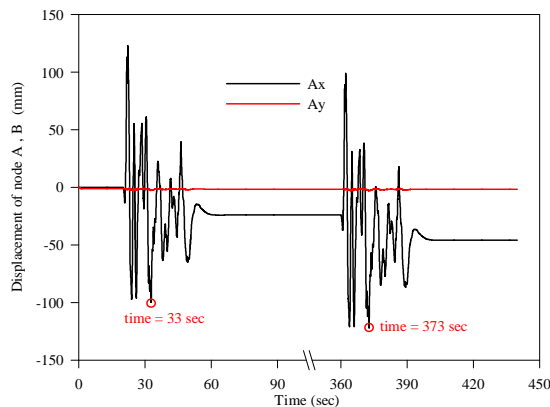


圖 13 在地震作用過程 A 點之位移反應

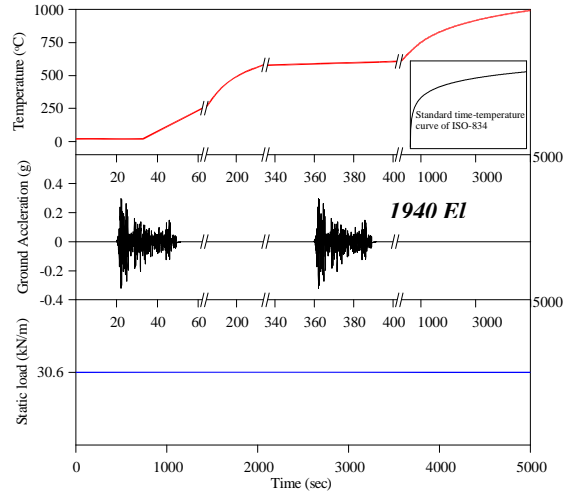


圖 14 地震與溫度作用之歷時資料

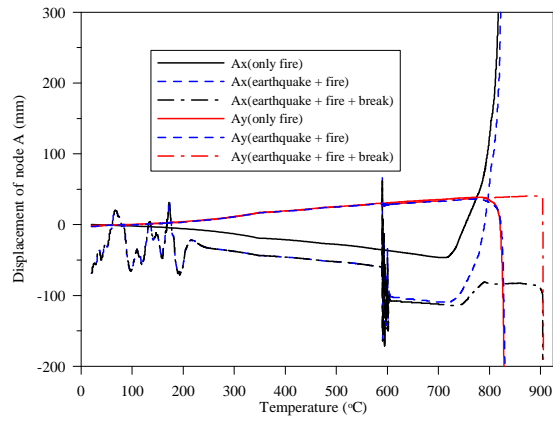


圖 15 地震引發局部火災與桿件斷裂剛架結點位移與溫度關係圖

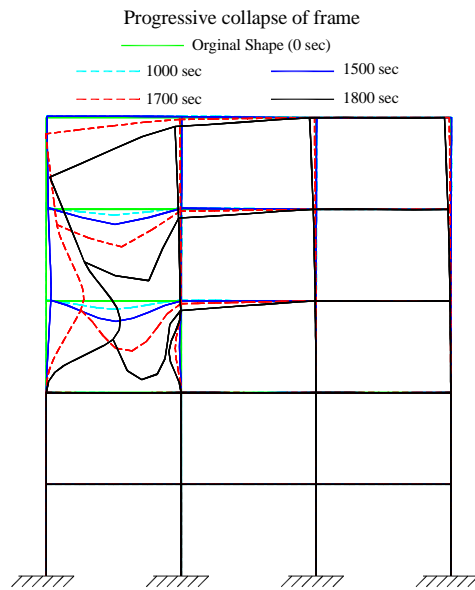


圖 16 受局部火害剛架變形過程示意圖

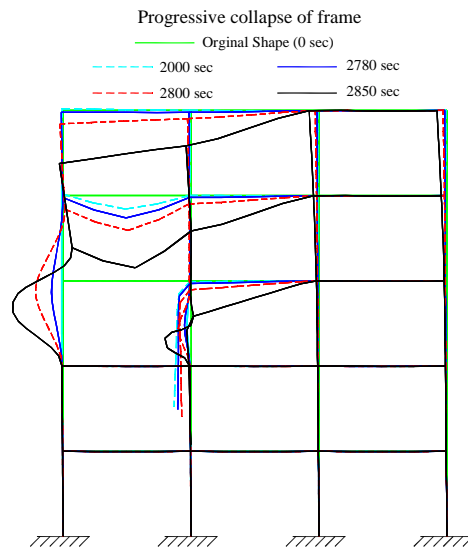


圖 17 地震引發局部火災與桿件斷裂剛架變形過程示意圖

(二) 單層多跨建築之數值分析

本文探討單層多間建築物的火災-結構耦合分析，考慮火災延燒特性，採用合理假設之物件燃燒模式，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。

圖 18 為此單層多間建築物的平面幾何尺寸，空間幾何尺寸為長 12m 寬 10m 高 3.3m，內部空間劃分成四間房間，分析時假設梁、柱構件為裸鋼，所以不考慮防火被覆的問題，樓板由鋼承板與輕質混凝土製成，尺寸如圖 18 所示，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圖 19 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，材料高溫行為如圖 20 與圖 21。

圖 22 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，設置在梁之下翼板的下方，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，門窗設置情形如圖所示，內容物有地毯、壁紙，桌子及櫃子其材料為木頭及木頭燃燒產生之炭，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，在室內空間設置氣場溫度偵測點，其位置分布如圖 23 且距離地板高度 2.9m，模擬時間為一小時，模擬過程之資料讀取時間為每 1 分鐘讀取一次，所以 FDS 所擷取之溫度歷時資料的時間間隔亦為 1 分鐘。

圖 24 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，分析模型可簡化為梁、柱系統與樓板的組合，梁柱尺寸如圖 18 所示，柱底的束制條件為固接，梁、柱結構的接合方式為銲接，但不考慮因銲接而產生殘餘應力的影響，樓板與梁、柱之束制條件使用束縛(Tie)約束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 800kg/m²，非線性結構分析時，鋼承板視為非承重式，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，本文使用 FDS 進行火災模擬，針對不同起火源位置與不同開口因子進行火災模擬，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)，位置如圖 22 所示。開口因子(F_v)的計算可參考式(9)，如圖 25 所示，在此固定書房與臥室之開口面積，只更改客廳與廚房兩個相通房間的開口部面積，作為模擬不同開口因子之依據，分別得到 $F_{v1}=0.263$ 、 $F_{v2}=0.334$ 、 $F_{v3}=0.211$ 。

$$F_v = \frac{A_v \sqrt{H_v}}{A_t} \quad (9)$$

其中 F_v 為開口因子($m^{0.5}$)， A_v 為開口面積(m^2)， H_v 為開口高度(m)， A_t 為火災室內部表面積(m^2)。

為了進一步了解各種火場參數對單一居室的火災行為與結構行為的影響，以 FDS 模擬火災行為，將結構表面溫度歷時輸入 ABAQUS 進行結構體的熱傳分析，最後以熱傳分析結果進行非線性結構分析，將結構行為以斷面軸力來表示，圖 26 為梁構件與梁柱斷面之編號。火災過程隨如圖 27 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。

在消防工程的設計上，通常以避免火災發生閃燃為設計目標。通常發生閃燃後，消防安全設備將完全失效，使火災現場內的人員處於極度危險的情況，所以視閃燃發生前的這段時間為人員逃生的有效時間，而在判斷火場是否發生閃燃時，通常以上層空氣溫度達到 600°C 或是到達地板之輻射熱通量達到 20kW/m² 以上為判斷條件。本案例結果顯示，以客廳(L)發生閃燃之速度最快，臥室(B)發生閃燃之速度最慢，當同一房間時，開口因子越大則越快發生閃燃，而起火源位置的不同除了影響房間發生閃燃之時間外，亦會改變各房間發生閃燃的順序。

火災發生的過程中，可燃物因燃燒而釋放能量，其釋放能量多寡與時間之關係為熱釋放

率曲線。熱釋放率歷時大致分成三個階段，分別為成長期、全盛期與衰退期，火災一開始由單一火源提供能量使可燃物燃燒，進而延燒至其他區域，使火場熱釋放率急速攀升，進入全盛期火災，此階段為通風控制，可燃物數量充足但受限於開口提供的通風量為一定值，所以其熱釋放率呈現穩定狀態，直到可燃物數量不足，燃燒釋放之能量降低，熱釋放率開始下降，火災進入衰退期，而所有的模擬火災其後期皆有進入衰退期，此表示整個火場的可燃物燃燒將盡，所釋出的能量變少，造成火場溫度降低。圖 28 為起火源位置在廚房(K)，開口因子不同的熱釋放率圖，圖中可明顯看出開口因子 $F_v1=0.263$ 在全盛期時火災規模約 22MW， $F_v2=0.334$ 火災規模約 27MW， $F_v3=0.211$ 火災規模約 18MW，所以開口因子可影響火場中可燃物的燃燒速度，控制熱能釋出速率，而開口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 29 為 Case-K 在不同開口因子下之房間 K 的氣場平均溫度歷時圖，開口因子由大到小依序為 $F_v2=0.334$ 、 $F_v1=0.263$ 、 $F_v3=0.211$ ，開口因子越大，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開口因子越大而越早發生，由圖 29 亦可見 K2-K 之最高氣場溫度為 1009°C > K1-K (902°C) > K3-K (855°C)，顯示最高氣場溫度會隨開口因子越大而增高。

因單層多跨建築為一複雜結構，在考慮不同開口因子的情況下，取其部分梁柱斷面進行軸力分析，梁柱斷面編號如圖 26 所示，取斷面 A1 進行分析，在此針對 Case-K 進行不同開口因子探討，圖 30 為斷面軸壓力與時間關係圖，而圖 31 為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。

在相同開口因子不同起火源位置的情況下，熱釋放率如圖 32 所示，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 33 為開口因子為 $F_v1=0.263$ 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°C 、S1-L 為 1040°C 、B1-L 為 1037°C ，三者溫度差異很小，顯示起火源位置對氣場溫度影響甚微。但是對於結構體溫度而言，在相同開口因子的情況下，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。

對於不同起火源位置對結構行為的影響，以開口因子為 $F_v1=0.263$ 為例，圖 34 與圖 35 為斷面 A1 軸力與時間、溫度關係圖，圖中不同起火源位置的軸力行為非常吻合，不同起火源位置對結構行為影響非常微小。

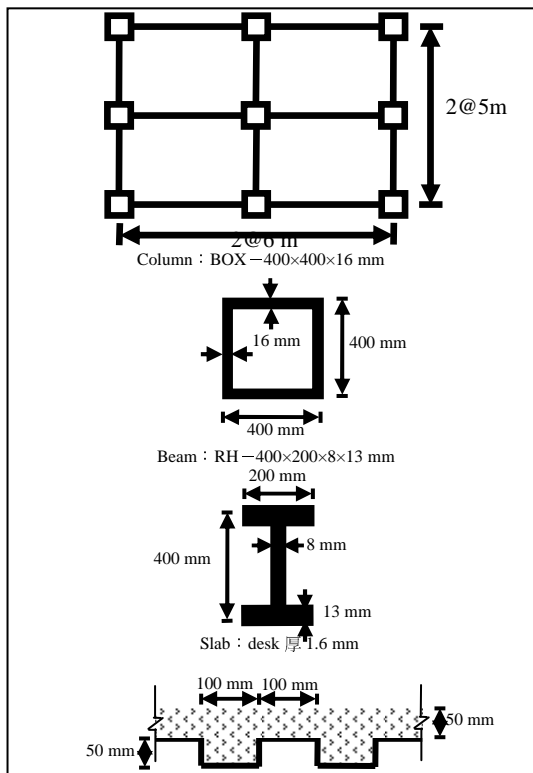


圖 18 單層多跨建築之平面幾何尺寸圖

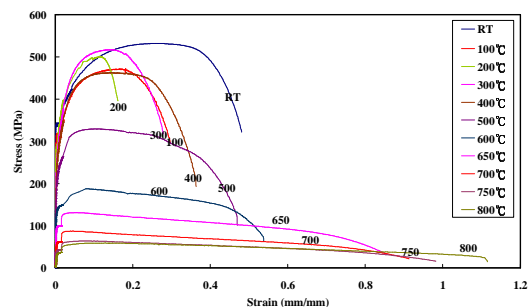


圖 19 SN490B 之應力應變曲線圖

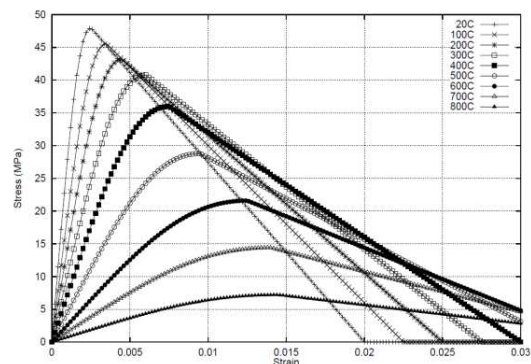


圖 20 輕質混凝土之受壓應力應變關係圖 (Gillie, 2000)

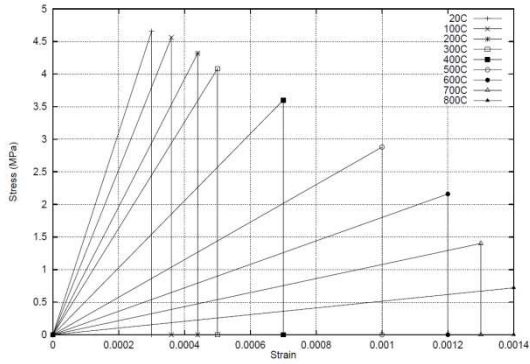


圖 21 輕質混凝土之受拉應力應變關係

Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008

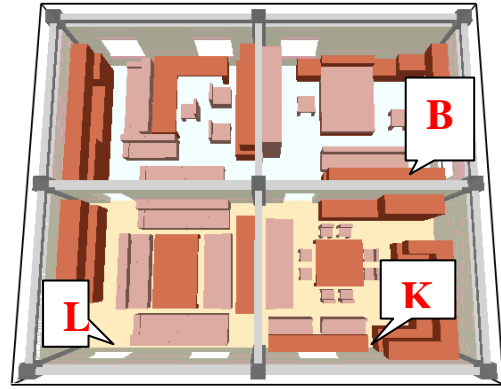


圖 22 單層多跨建築之 FDS 模擬模型

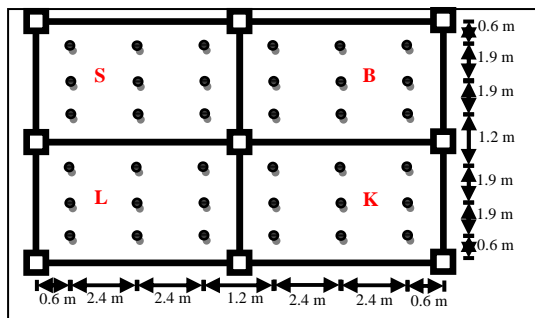


圖 23 FDS 模型之氣場溫度偵測點位置

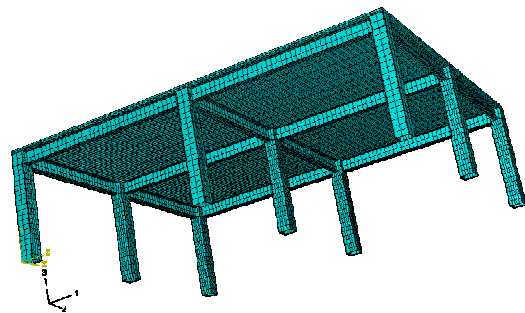


圖 24 單層多跨建築之 ABAQUS 模型

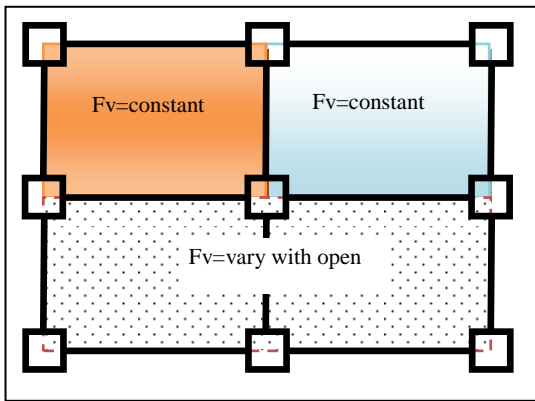


圖 25 改變開口面積之房間(Fv=開口因子)

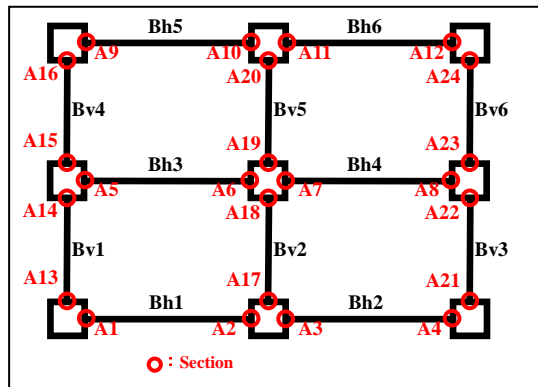
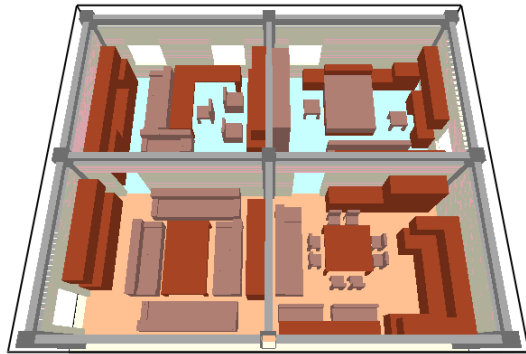


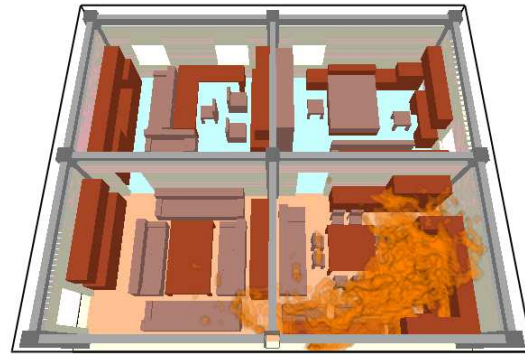
圖 26 單層多跨建築之梁與梁柱斷面編號

Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008



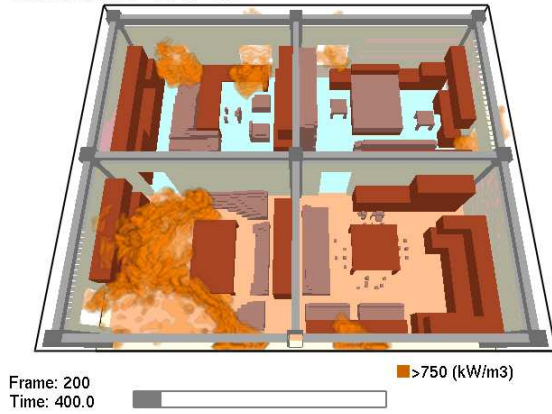
Frame: 0
Time: 0.0

Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008

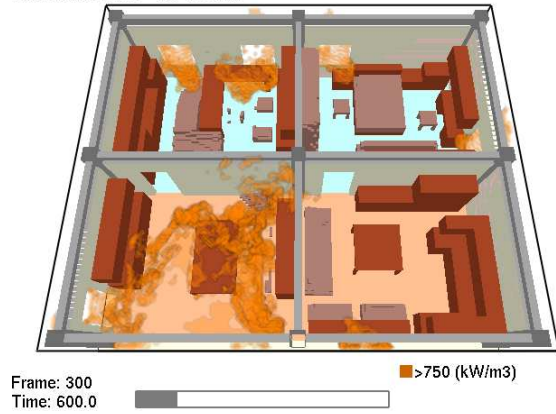


Frame: 12
Time: 24.0

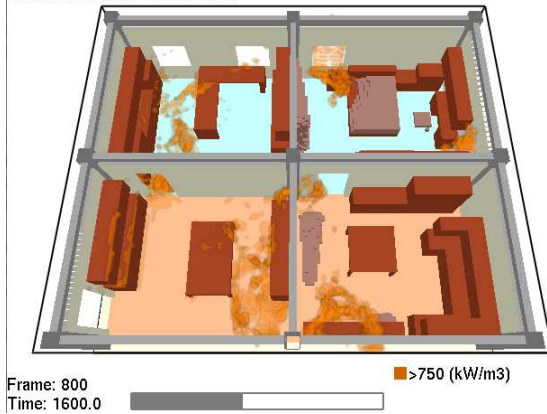
Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008



Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008



Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008



Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008

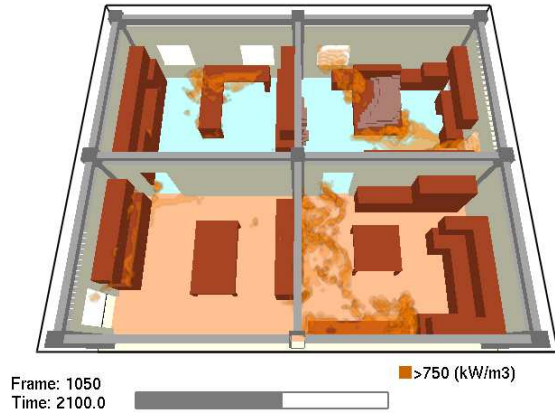


圖 27 Case-K1 火災之 FDS 火流分佈圖

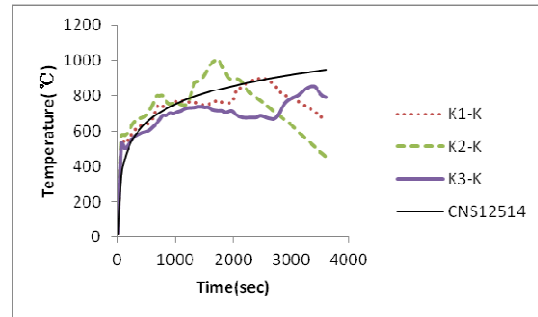
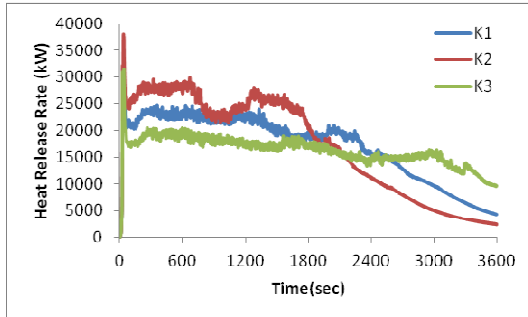


圖 28 Case-K 之不同開口因子熱釋放率曲線圖

圖 29 Case-K 之不同開口因子之房間 K 氣場平均溫度歷時

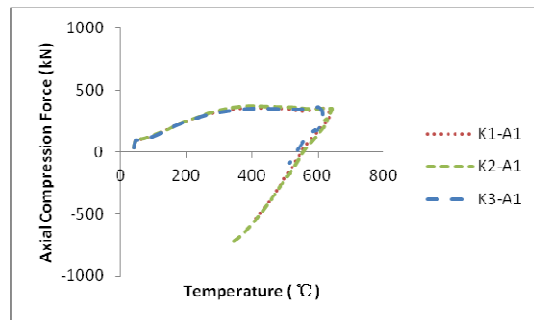
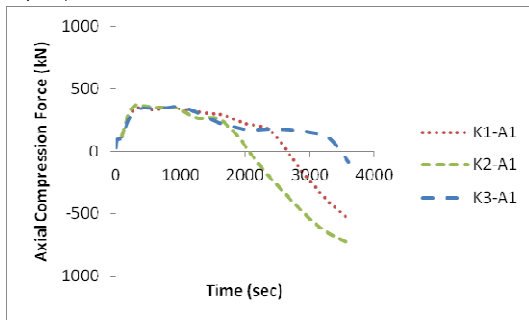
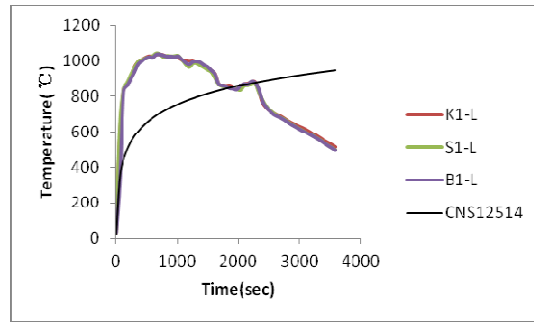
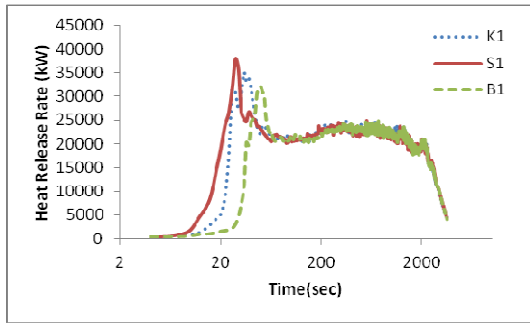


圖 30 Case-K 之不同開口因子之斷面 A1 軸壓力與時間關係圖

圖 31 Case-K 之不同開口因子之斷面 A1 軸壓力與溫度關係圖

圖 32 Fv1=0.263 之不同起火源位置熱釋

圖 33 Fv1=0.263 之不同起火源位置之房



放率曲線圖

間 L 氣場平均溫度歷時

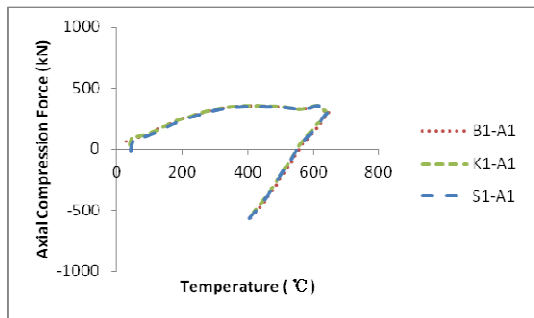
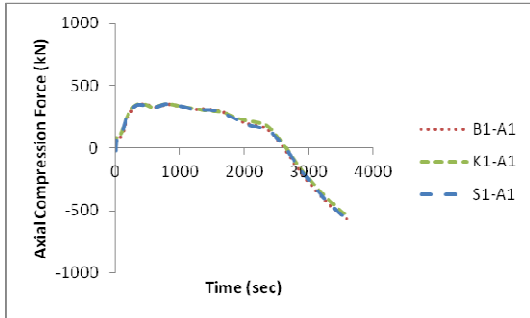


圖 34 Fv1 之不同起火源位置之斷面 A1 軸壓力與時間關係圖

圖 35 Fv1 之不同起火源位置之斷面 A1 軸壓力與溫度關係圖

六、結論與建議

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，結構分析分別以向量式有限元素法、ABAQUS 有限元素軟體進行分析。文中數值結果驗證向量式有限元素法可有效模擬鋼結構在火害環境下之整體穩定行為，FDS 配合 ABAQUS 有限元素軟體亦可有效分析火災-結構耦合行為。文中所得結論總結如下：

1. 由主震引發火災的情境中，火災初期因火場溫度不高、材料性質尚未嚴重劣化，且地震作用時間甚為短暫，故此階段地震與火害之聯合作用，對結構的反應相對於餘震階段較不明顯。惟餘震作用時，火災已發生一段時間故溫度較高，且材料性質劣化更為嚴重，故此時地震與火害聯合作用下所增加之位移，遠大於主震期間，且餘震越晚發生影響越大。
2. 桿件斷裂，導致結構幾何關係改變與載重進行重新分配。視斷裂位置的不同，可能造成結構提早發生崩塌；惟也有可能因斷裂而解除火害中對結構的不利因素，並明顯延緩倒塌發生時間。
3. 鋼結構受火害產生的大變形，大部分屬於永久變形，因此冷卻降溫對於變形的回復並無太大作用。惟冷卻降溫可使結構桿件強度恢復，避免變形繼續增加以致結構崩塌，因此火場中迅速降溫仍為必要。

4. 火源位置不同，空氣對流與熱傳結果亦改變，通常離開口越遠之房間內部能累積更多熱能提高氣場溫度，如果提供之燃料遠比所能燃燒消耗之燃料還多，此時火源位於空氣對流順暢之位置上，能提供更多氧氣進而消耗更多燃料使氣場溫度提高，對於梁柱斷面軸力而言，火源旁之斷面影響最大，其它斷面位置影響不大。
5. 開口因子越大，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，確會使火災持續時間縮短，導致斷面軸力很快就從壓力往拉力發展，使結構防火時效縮短，而開口因子有一界限存在，超過此界限則會降低氣場最高溫度。
6. 起火源位置的不同使火災延燒速度差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，使結構體的溫度分佈會有些微不同，起火源位置不太影響結構行為。

誌謝

本文為國科會計畫(NSC 98-2221-E-006-135-MY3)之部份成果，承蒙國科會經費補助，謹此誌謝。

參考文獻

1. AISC. (2005). "Specification for structural steel buildings." *American Institute of Steel Construction*.
2. BS5950. (2003). "Structural use of steelwork in building. Part 8. Code of practice for fire resistant design." *British Standard Institution*.
3. Bodner, S.R. and Symonds, P.S. (1960). "Plastic deformations in impact and impulsive loading of beams," *Proceedings of the Second Symposium on Naval Structural Mechanics*, Rhode Island, USA, pp.488-500.
4. ECCS. (1983). "Technical Committee 3. European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures." *European Convention for Constructional Steelwork*.
5. Eurocode 3. (2001). "Design of steel structures - Part 1.2: General rules - Structural fire design." *British Standard Institution*.
6. Gillie M. (2000). "The Behaviour of Steel-Framed Composite Structures in Fire Conditions,"

PhD thesis, University of Edinburgh.

7. Izzuddin, B.A. and Fang, Q. (1997). "Rate-sensitive analysis of framed structures Part I: model formulation and verification." *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.5, No.3, pp.221-237.
8. Liew, J.Y.R. and Chen, H. (2004). "Explosion and Fire Analysis of Steel Frames Using Fiber Element Approach." *Journal of Structural Engineering*, Vol.130, No.7, pp.991-1000.
9. McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J., (2008). "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide," NIST.
10. Perzyna, P. (1966). "Fundamental problems in viscoplasticity," *Advances in Applied Mechanics*, Vol.9, pp.313-377.
11. Shih, C., Wang, Y.K. and Ting, E.C. (2004). "Fundamentals of a vector form intrinsic finite element : Part III. Convected material frame and examples." *Journal of Mechanics*, Vol.20, No.2, pp.133-143.
12. Ting, E.C., Shih, C. and Wang, Y.K. (2004a). "Fundamentals of a vector form intrinsic finite element : Part I. Basic procedure and a plane frame element." *Journal of Mechanics*, Vol.20, No.2, pp.113-122.
13. Ting, E.C., Shih, C. and Wang, Y.K. (2004b). "Fundamentals of a vector form intrinsic finite element : Part II. Plane solid elements." *Journal of Mechanics*, Vol.20, No.2, pp.123-132.
14. Yandzio, E. and Gough, M. (1999). "Protection of buildings against explosions." *The Steel Construction Institute*, Ascot, U.K.