

火災-結構行為模擬以 CIB W14 國際比對試驗為例

李鎮宏* 邱耀正** 陳建忠***

*內政部建築研究所副研究員暨成功大學土木工程研究所博士生

**成功大學土木工程系教授

***內政部建築研究所組長

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。火災數值模擬部分係以 FDS 場模式進行分析並與 CIB W14 Subgroup 2, 1997 年所完成之實驗相互比對，於居室內分成三處不同位置加以預測 60 分鐘內之火場溫度分布，該數值模式可完整重現定性化的分析結果，由於該國際比對實驗中並無梁、柱、樓板系統，為進行後續結構火害行為分析，自行設計納入。在梁柱構架受熱暴露之邊界上之溫度歷時，可應用 FDS 計算求得該構架受熱邊界之牆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。隨著火災發展進程，該梁柱樓板隨著同時變形，其中針對不同火源位置對整體構架應力分布之影響於文中有所討論。

關鍵詞：鋼結構、火災模擬、有限元素法

Abstract

This research developed the analysis model for performance-based design of steel structures subjected to fire. The fire model and nonlinear fire response of steel structures were numerically investigated. Numerical predictions produced by the FDS fire field model were compared with experimental data from CIB W14 Round Robin test. In gas phase temperatures, the simulation predicted 3 different locations within the compartment over a 60 min period. The simulation was found capable of reproducing the overall qualitative results. According to the arrangement of the Round Robin test, the beam-column frame was not included. In order to analyze the behavior of structure in fire, the frame has been designed and involved. On the exposure surfaces of the beam-column frame, wall temperatures at boundaries can be calculated using FDS. The results of wall temperatures can be used as input variables for detailed heat transfer calculations within a solid structure, by finite element (ABAQUS) analysis. Following the development of fire stages, the beam-column frame included the deck system deformed simultaneously. The differences of fire ignition places have been considered to discuss how they effect the stress development in the

beam-column frame.

Keywords: steel structures, fire simulation, finite element method

一、前言

自 911 雙子星大樓倒塌後，美國 NCST (National Construction Safety Team) 彙整相關研究，建議未來應對於真實火災與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、閃然發生至全盛期與降溫階段甚至結構倒塌等模擬。目前雖有相關軟體可進行實際火場模擬(如 FDS)，但僅能就該居室空間氣場溫度分佈或火災延燒與持續時間加以分析，對於該火場溫度如何同步造成結構變形或倒塌等行為，尚無建立分析介面或統合性軟體可供利用。據此，對於火災-結構(Fire- Structure)分析介面與統合性分析軟體之建立有其必要性。

我國建築技術規則有關建築物之防火及避難設施規劃，已順應世界潮流於 2004 年開始由單一條列式法規邁向與性能式防火法規並行，透過一些量化之模擬及防火避難性能設計計畫之擬定，提供建築物在設計或變更使用時一個較為彈性之設計方法。目前業界在判定建築物於火害後是否堪用，大致分初勘、複勘及結構安全鑑定的步驟，而結構安全鑑定須要有相當經驗的累積才能有較正確的判斷，但因缺乏客觀的量化數據來佐證判定是否正確，因此難以確定建築物結構強度的安全性。台灣位於地震帶上，經過火害後的建築物是否還能承受地震負向力矩的侵襲，恐怕無法只透過單純之調查表與經驗來判斷。因此發展一套符合力學原理的量化分析方法，將有助於判定建築物於火害後的結構安全。

由於火災現象極為複雜，想要利用實驗的方式來了解火災所有的物理現象極為困難，實驗數據可給予建築物經實際火害後行為的比對與驗證，但目前之實驗均僅針對在標準升溫曲線、三面或四面加溫情形下單一材料受火災後之溫度分佈，對於較複雜的建築物與火災情境，實驗分析的方法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，而結構元件如梁、柱也會因為所在位置之不同，以及與隔間牆的相關位置，可能會使柱遭受一~四面之火害，會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，使得建築物火害後的強度不均勻的減低。

目前若干學者已著手進行相關研究建立火災-結構(Fire-Structure)的分析介面，像是 Wickstrom et al.[1]提出絕熱表面溫度的概念，而Duthinh et al.[2]文中也提出由絕熱表面溫度取得結構表面溫度歷時，以建立火災-熱傳-結構之分析介面；Wickstrom[3]利用平版溫度計(Plate Thermometer) 取得絕熱表面溫度值去做數值分析。而國內95年間由元智大學林誠興教授主持之「建築物火災行為與結構安全之性能模擬分析」國科會補助專題研究案[4]，以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，利用有限差分(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，主要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，提供建築物受火害後結構安全數值估算模型供參考應用。另外以FDS搭配非線性有限元素分析軟體(如ANSYS、ABAQUS)進行研究的，有Jowsey et al.[5] 透過FDS與ABAQUS分析火害引起，建立氣相環境與固相(如結構構件)間的邊界條件。

為擴展前揭分析應用上之範疇，並能準確的預測火勢發展與結構熱傳與強度折減的情形，後續將應用FDS火災模擬軟體分析火災中之熱流場，針對火場溫度與構件表面溫度歷時與以驗證分析，並搭配結構有限元素軟體計算(ABAQUS)，與相關實驗文獻來輔助熱傳遞與強度計算模型建立的正確性。

二、 火災-結構部份耦合數值分析

目前利用電腦數值模擬來研究火災的模式有兩種，一為區域模式(Zone model)，另一個為場模式(Field model)。區域模式是將模擬區域劃分為若干區域，在同一區域內在劃分成流場及物理、化學性質均勻的高溫煙層及低溫空氣層，不同區域有不同性質，並利用數值方法求解守恆方程式，預測每個區域內之溫度、濃度分佈情形，此模式在計算上較簡單、快速，但缺點是需要大量假設，這些假設需仰賴實際實驗結果。

場模式也就是CFD (Computational Fluid Dynamics)模式，將模擬區域分成眾多細小的格點，利用數值方法求解控制方程式，由於火場行為複雜，使用場模式需要其它物理及化學模式(如紊流模式、燃燒模式、熱輻射模式等)以預測火災發生過程中，每個格點的氣流速度、溫度、壓力以及濃度值，此模式所需假設較少，因此能較仔細正確地描述火場結果，但計算所耗時間較多。隨著電腦科技的發展而提升電腦的計算速度，對於模擬效率而言，也較以前快速省時，因此場模式已逐漸成為火災模擬的主要趨勢。

此兩種模式的比較上，區域模式雖可得到合理的結果，但需要仰賴眾多實際實驗結果以作為參數假設，且只能得到各區域的平均值，無法考量因火源位置或延燒特性的不同所產生之非均勻溫度分佈的火場行為，而場模式計算出的非均勻溫度火場則可提供更具體之細部結果，可以較清楚看出火場內任一點的溫度、速度、壓力等變化，本文研究使用之火災模擬軟體FDS即為場模式之分析軟體。

本文應用數值模擬分析建築結構在火場溫度下之行為，其建築材料會受火場溫度影響而產生結構變形行為，所以構件實際上所受的載重型態有結構載重與熱載重，且這兩種載重型態是同時進行，隨溫度升高，結構之熱膨脹受束制條件的不同，產生相應的溫度應力，造成

結構應力的重新分配。其中結構載重包括模型自重與外力載重，而熱載重的施加過程實際上為建築結構在受熱時材料性質變化之歷時，而模型中所有材料性質變化歷時則可由結構受熱時之溫度分佈歷時配合各溫度下之材料性質求得。本文採用熱傳分析來模擬建築結構在火災過程中，結構體受熱時每個元素節點之溫度歷時之變化，因火場與結構間之熱傳效應，包括熱傳導、熱對流以及熱輻射已在FDS模擬並求得構件受熱表面對應節點之溫度歷時，故熱傳分析以考慮結構內部之熱傳導效應為主，所以先輸入模型受熱面之表面溫度歷時執行熱傳分析(ABAQUS)來求得試體受熱時每個元素節點的溫度歷時之結果，以提供在接下來在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災之結構變形行為，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)，其耦合分析流程圖如圖1所示。因材料性質受溫度影響極大，熱傳分析結果將嚴重影響結構高溫受熱非線性行為；反之，非線性結構分析結果(如過大變形造成開口)對火場分析暫無納入因構件過大變形導致開口增加而影響該區劃內之溫度分佈影響之分析。

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。以下由Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide (McGrattan et al.[6]文中提到對Wall-Temperature定義稍加說明。

邊界條件如下：

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

$T_{s,i}$: 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系數

Wall Temperature (WT) 定義為：

$$T_w \equiv T_{s,1/2} = (T_{s,0} + T_{s,1})/2 \quad \text{其中 } 1/2 \text{ 為元素 cell 的中間位置} \quad (2)$$

該分析步驟說明如下：

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，可輸出受熱面相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。

三、火災行為案例驗證

為了驗證本研究所建立分析模式之準確性，利用 Wang[7] 文獻中案例之火災模型及實驗結果，進行火災模擬分析並與該實驗結果進行比較。

(一) 模型參數介紹

Wang(2001)文中驗證案例係使用 CIB W14 Round Robin 火災實驗系列裡的 B1 實驗，其實驗主要目的在研究一自然通風火災室發生火災且火源集中在一特定點位置時的居室火災發展行為。圖 2 為火災室的幾何尺寸及火源位置示意圖，火災室為長 14.4m、寬 7.2m、高 3.53m 的空間，在右側面有一寬 2.13m、高 2.97m 的開口，而火災模擬所使用之網格尺寸設定以 10cm 為一格。牆壁材質為混凝土塊，厚度 0.3m，其材料性質如下：比熱=1.05 kJ/kgK、熱傳導係數=0.12 W/Mk、密度=500 kg/m³、初始溫度=20 °C 放射率(emissivity)=0.8。

火災室內架設三組熱電偶樹，位置如圖 3 所示，分別位於火災室內部、火源旁邊與門旁角落，熱電偶樹上包含 5 個熱電偶偵測點，由上到下分別距離天花板 20cm，50cm，100cm，180cm 以及 250cm，共可取得 15 個位置的溫度歷時資料。火源位於房間地板中央，如圖 2 所示，燃料為一長 2.4m、寬 2.4m 及高 1.4m 的木框架，木框架燃燒時，其質量損失率與時間歷程之關係如圖 4 所示，前 10 分鐘的質量損失率偏低，之後便快速增加，大約在 26 分鐘時會達到質量損失率最大值，接著以線性下降直到 60 分鐘，因文獻中的實驗數據只有 60 分鐘，所以火災模擬時間以 60 分鐘為限，而 FDS 之火災模擬可利用輸入熱釋放率曲線來模擬火災發展過程中火源釋放出的熱能。熱釋放率曲線可經由下式求得：

$$\dot{Q} = \chi \times \Delta H_c \times \dot{m} \quad (3)$$

上式中 \dot{Q} 為熱釋放率(MW)， $\chi = 0.7$ 為燃燒效率因子， $\Delta H_c = 17.8$ (MJ/kg) 為木頭的燃燒熱， \dot{m} (kg/s) 為木框架的質量損失率，計算後所得之最大熱釋放率約為 11MW，其發展趨勢與質量損失率一樣。

(二) 分析結果

於 FDS 火災模擬之模型中設置 Ta、Tb、Tc 三位置共 15 個氣場溫度偵測點，今以各熱電偶樹之實驗數據與火災模擬所得之溫度歷時資料做一比較。

1. 圖 5 為 Ta 位置(A-A')之熱電偶樹之實驗值與分析值比較圖，實驗值在前 10 分鐘時溫度上升緩慢，接著溫度開始快速上升直到大約 25 分鐘後，溫度開始保持 900°C 左右並持續一段時間，大約 45 分鐘後溫度開始下降，而分析值在前 10 分鐘時溫度一樣上升緩慢，但之後卻以非常快的速度攀升，在 28 分鐘達到 1200°C 左右，接著就開始下降，在 45 分鐘後其下降趨勢大致與實驗值吻合，其中溫度差異最大發生在 25 分鐘到 45 分鐘這一階段，分析值明顯高估，造成此差異之原因，應該是實驗與模擬之熱釋放率不同造成空氣對流情況不同，文獻中提到，經由(3)式得到的熱釋放率，其準確性有±15%的誤差。

2. 圖 6 為 Tb 位置(B-B')之熱電偶樹之實驗值與分析值比較圖，兩者溫度在前 10 分鐘皆緩慢上升，之後快速升至 29 分鐘時的 1100°C 左右，但分析值的溫度上升較慢，應該是火焰被風吹向火災室內部，造成熱能分散開來，使 Tb 位置熱能累積較慢，溫度爬升較慢。

3. 圖 7 為 Tc 位置(C-C')之熱電偶樹之實驗值與分析值比較圖，圖中的實驗值與分析值在升溫階段的成長趨勢大致吻合，至於降溫階段，分析值較快降溫，如果將降溫階段延遲一些時間的話，與實驗值的降溫趨勢比較起來，兩者差異有限，所以此位置之實驗與分析值較吻合，受空氣對流影響較小。

4. 表 1 為實驗平均溫度與 FDS 分析結果和 Wang 文獻分析結果之誤差比較，Wang 之文獻分析結果與 FDS 一樣皆有高估之情形發生，以 C-C' 位置而言，FDS 誤差明顯小於 Wang，以 B-B' 位置而言，FDS 結果亦比 Wang 文獻結果好，在 A-A' 位置時，FDS 之誤差在火災前期與後期較 Wang 文獻分析值小。綜合而言，實驗數據與分析得到之結果，其溫度成長模式大致相同，利用 FDS 可以合理的模擬火災室的火災行為。

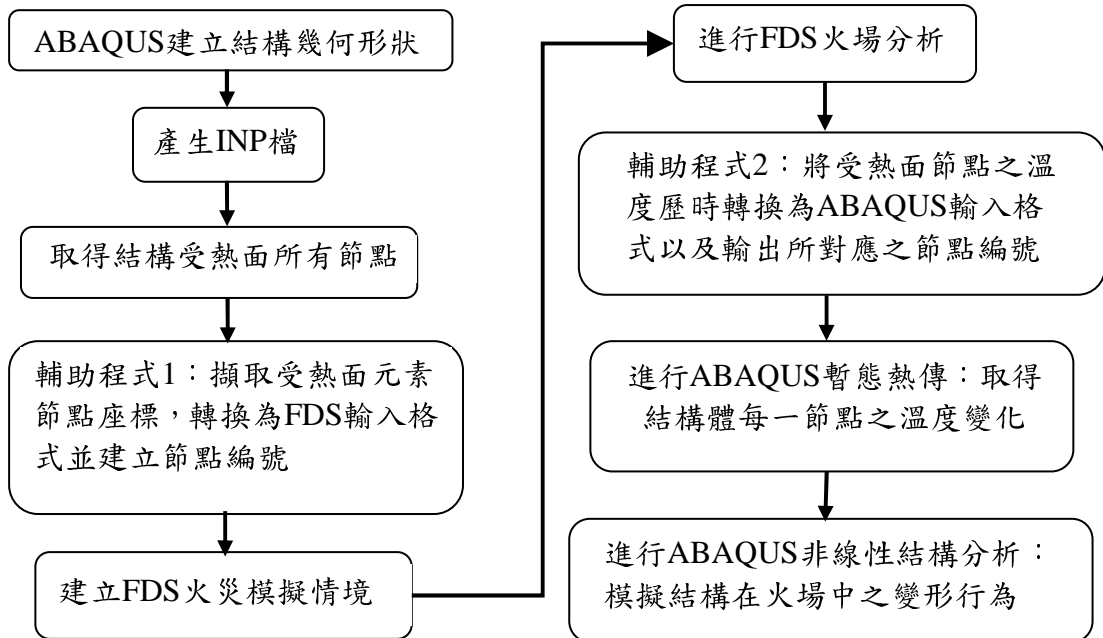


圖 1 Fire-Structure 分析流程圖

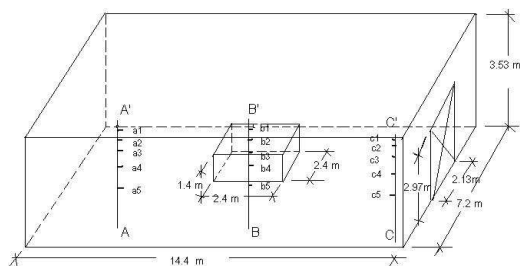


圖 2 火災室的幾何尺寸以及火源位，單位(m)

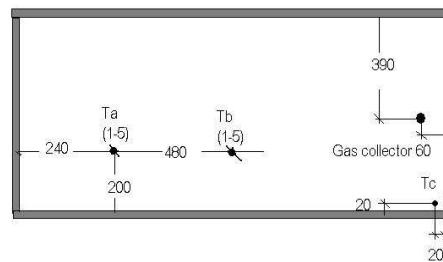


圖 3 三組熱電偶樹(Ta、Tb、Tc)在火災室的位置，單位(cm)

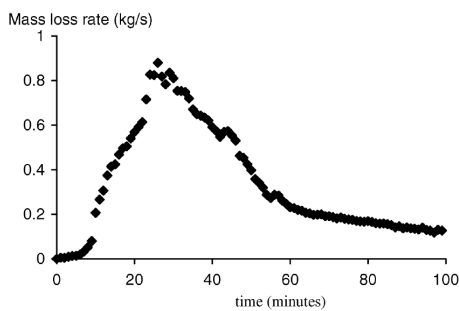


圖 4 木框架燃燒之質量損失率(kg/s)

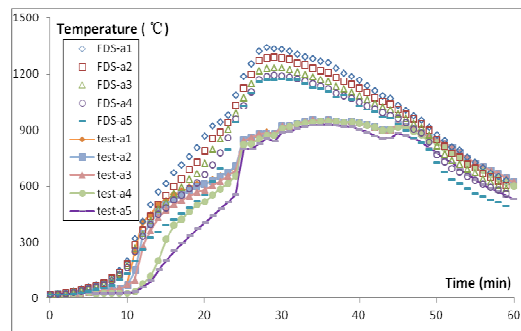


圖 5 熱電偶樹 A-A' 之分析與實驗溫度歷時

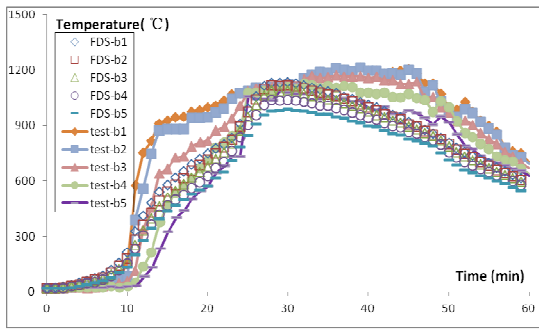


圖 6 熱電偶樹 B-B' 之分析與實驗溫度歷時

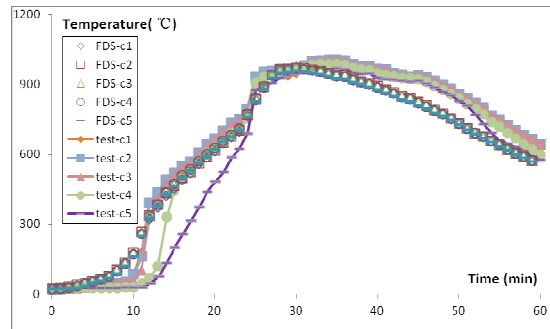


圖 7 熱電偶樹 C-C' 之分析與實驗溫度歷時

表 1 驗證案例之實驗值與分析值的比較與誤差

Time (min)	Location	Experimental average temp °C	Wang 文獻		FDS	
			Temp °C	%error	Temp °C	% error
5	A-A'	27	58	115	52	91
	B-B'	30	60	100	50	68
	C-C'	27	59	119	53	95
10	A-A'	54	293	443	171	216
	B-B'	71	308	334	170	140
	C-C'	55	298	442	171	211
20	A-A'	546	689	26	718	32
	B-B'	629	942	50	669	6
	C-C'	621	671	8	620	0
25	A-A'	829	848	2	1088	31
	B-B'	1079	1220	13	933	14
	C-C'	910	764	16	834	8
30	A-A'	910	1072	18	1242	37
	B-B'	1116	1310	17	1074	4
	C-C'	963	796	17	970	1
40	A-A'	932	1184	27	1091	17
	B-B'	1125	1278	14	965	14
	C-C'	951	800	16	887	7
50	A-A'	831	851	2	806	3
	B-B'	971	1032	6	773	20
	C-C'	843	739	12	730	13
60	A-A'	596	452	24	556	7
	B-B'	669	529	21	573	14
	C-C'	615	456	26	554	10

四、單一居室之數值分析

火場情境會隨房間幾何大小、可燃物數量、窗口位置大小等因素而產生不同的火災行為，所以不會有兩個具有相同火災行為的火災發生，對於特定火災情境的模擬需具備相關的火場資料。本章之火災情境係參考內政部建築研究所出版之「建築物構造防火性能驗證技術手冊」所載的相關資料，模擬辦公室火災處於單一火源的情況下，分析不同設計參數對火災室氣場溫度的影響，進而模擬梁柱斷面之軸力在不同火災情境下之行為反應。

(一)單一居室模型介紹

圖 8 為模擬辦公室的平面幾何尺寸，此單一居室的幾何尺寸為長 6m 寬 5m 高 3.3m 的房間，其中梁、柱構件所使用材料為 SN490B 鋼材，材料於高溫下支應例應變行為如圖 9，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 10 與圖 11 [11]，此居室為鋼梁、鋼柱、混凝土樓板所組成之複合結構。

圖 12 為單一居室在 FDS 火災模擬中的模型，模擬區域之幾何大小為 6.6m× 5.6m×3.5m，格點數為 66×56×37，初始環境溫度為 28°C，其中牆壁採用耐燃石膏板，設置在梁之下翼板的下方，並於下方牆壁中間設置一個寬 1m、高 2m 的門口，在室內空間設置 9 個氣場溫度偵測點，其位置距離地板高度 2.9m，假設火災為單一非延燒火源型態。圖 13 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，分析模型為梁、柱系統與樓板的組合，柱底的束制條件為固接，樓板與梁、柱之束制條件為完全束制，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，非線性結構分析使用之元素種類為 8 個節點之實體元素 C3D8I，共有 5460 個元素。

(二)火源設計

可燃物燃燒就會釋放熱能增加火場總熱能，而熱能釋出的多寡取決於材料的燃燒速率與燃燒持續時間的長短，所以火源的設計是依據可燃物燃燒所能產生之熱能，合理地在火災過程中分配熱能輸出量，也就是以熱釋放率來描述火災過程。在火源設計的成長期階段，可把成長速率表示為一理想化的拋物線方程式，一般所知為美國國家防火協會 NFPA 之 t-squared fire。t² 火災的熱釋放率成長與時間平方成一比例關係。

整個火源設計過程大致可分四大步驟，過程如下：

1. 計算閃燃所需之熱釋放率

居室火災達到閃燃之熱釋放率的多寡，尚須考慮房間幾何大小及開口面積與高度等因素，當居室火災存在單一開口時，可使用 Walton 與 Thomas[8]提出的 Thomas 閃燃臨界值來判斷閃燃所需熱釋放率多寡，如(4)式所示。

$$\dot{Q}_{f0} = 0.0078A_t + 0.378A_v\sqrt{H_v} \quad (4)$$

其中： \dot{Q}_{f0} 達到閃燃所需熱釋放率(MW) A_t ：房屋內部表面積(m²)

A_v ：開口面積(m²) H_v ：開口高度(m)

2. 選擇火災規模 \dot{Q}_p 與火源成長速率 α

火災規模的選擇代表火災達到穩定燃燒時之熱釋放率大小，也是火源設計的最大熱

釋放率。式(5)為 t^2 火災之燃燒時間與熱釋放率關係式，依火源成長速率又可分成慢速(Slow)、中速(Medium)、快速(Fast)、極快速(Ultrafast)。火災規模的選擇必須大於閃燃所需熱釋放率，選定火災規模與火源成長速率後，可進行火災成長期之時間設計。

$$\dot{Q}_p = \alpha \times t^2 = (t/k')^2 \quad (5)$$

其中 \dot{Q}_p : 最大熱釋放率(kW) α : 火源成長係數(kW/s²)
 k' : 火源成長常數() t : 燃燒時間(s)

3.計算居室內之可燃物總發熱量

使用內政部建築研究所出版的「建築物構造防火性能驗證技術手冊」[9]一書提供之火災室總發熱量計算方法，如式(6)所示，先選定房間種類與室內裝修用材料的種類，依手冊提供之材料發熱量估算室內可燃物的總發熱量。

$$Q_r = q_l A_r + \sum (g_f A_f d_f) \quad (6)$$

4.計算火災發展各階段時

火災設計的燃燒過程可分成三個階段，分別為成長期、全盛期與衰退期，其中衰退期的時間設計採用 Feasey [10]提供之方法，衰退期之熱釋放率為線性衰減，其能量占全盛期之能量一半，故兩階段之持續時間相同。成長期之時間設計與火災規模 \dot{Q}_p 和火源成長速率 α 有關，利用式(7)即可求得成長期時間 t_1 。

$$t_1 = \sqrt{\frac{\dot{Q}_p}{\alpha}} \quad (7)$$

全盛期、衰退期之時間設計與火災規模 \dot{Q}_p 和火災室總發熱量 Q_r 有關，經由下面算式可求全盛期 t_2 與衰退期 t_3 時間。

$$E_1 = \frac{1}{3} t_1 \dot{Q}_p = \frac{1}{3} \alpha t_1^3 \quad Q_r = E = (E_1 + E_2) / 1000$$

$$E_2 = \frac{3}{2} t_d \dot{Q}_p \quad t_d = \frac{2}{3} \times \frac{E_2}{\dot{Q}_p}$$

$$t_2 = t_1 + t_d \quad t_3 = t_2 + t_d$$

依循上述四個步驟即可計算出完整的熱釋放率對時間之關係，將此熱釋放率曲線當成 FDS 之火源設計，即可模擬出單一居室受火災之結果。利用上述之火源設計方法，以火災模擬軟體 FDS 模擬辦公室發生火災時的氣場溫度歷時並與 CNS 12514 標準升溫曲線(同 ISO 834)和「建築物構造防火性能驗證技術手冊」預測之火災室溫度歷時作比對。「建築物構造防火性能驗證技術手冊」預測之火災室氣場溫度歷時比起標準升溫曲線更加貼近真實火場行為，此預測方法考慮了下面所列之火場參數：1.火災室幾何大小 2.開口部幾何大小 3.火災室的房間

種類 4.內部裝修用材料種類。以辦公室火災為例，固定房間種類，隨著其它火場參數不同，預測之氣場溫度歷時亦不同，此種結果是符合真實火災在不同火場情境下有著不同的火災行為。為了與預測結果比較，在火源設計過程中使用相同的火場參數，而預測方法中並無火災規模與火源成長速率的考量，所以選擇適合的火災規模與成長速率才能模擬出符合預測方法的結果，並配合技術手冊之預測結果進行火源參數修正，選擇火災規模 2050kW，火源成長速率為極快速(Ultrafast)進行火災模擬，其模擬結果如圖 14 所示，並與「建築物構造防火性能驗證技術手冊」之預測結果和 CNS 12514 標準升溫曲線進行比較，火災模擬之氣場溫度在初期的成長速率與技術手冊預測結果和標準升溫曲線的成長速率相符合，後續的發展趨勢亦與技術手冊和 CNS 12514 升溫曲線相差不多，此結果顯示本研究結合 FDS 與火源設計方法來模擬火災行為確為可行。

(三)分析結果

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，將火災結果輸入 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。FDS 火災模擬以辦公室火災為基礎，利用第二章的設計方法採用極快速型的火源成長速率，針對相同火災規模(6MW)、相同開口因子，探討不同火源位置對火場熱釋放率和火災室氣場溫度的影響及梁構件之內力變化，火源位置則分成三個位置 IM、NE、SW 如圖 15 所示，本文取梁柱接合之斷面，探討其軸力變化，梁與梁柱斷面之編號如圖 15 所示，共有 8 個斷面。

圖 16 為不同火源位置之平均氣場溫度，位置 IM 最高溫度發生在 2520 秒時之 1172°C、位置 NE 最高溫度發生在 2940 秒時之 1147°C、位置 SW 最高溫度發生在 2820 秒時之 1124°C，此時三者發生最高溫度之時間皆不一樣，但以火源位置 IM 溫度最高，位置正對開口，空氣流暢程度較佳，1900 秒前熱能散失速度較快，溫度最低，但之後也因空氣流暢程度較佳，提供更多氧氣使燃料燃燒更多而釋出更多熱能，提高氣場溫度。

為探討不同火源位置之火災對建築結構有何影響，取梁柱斷面之軸壓力隨梁溫度及時間變化作分析依據，圖 17 至圖 24 為火災規模 6000kW 在不同火源位置的火災情境下各斷面軸壓力與時間關係圖，在相同斷面位置之軸力發展歷時趨勢非常相近，且最大值軸力亦雷同。

而圖 25 至圖 32 為火災規模 6000kW 在不同火源位置的火災情境下各斷面軸壓力與梁平均溫度關係圖，其中因火源位置不同造成軸力行為差異較大的地方通常為接近火源位置的斷面，如圖 20 及圖 28 所示之斷面 A4，因靠近火源位置 NE，造成斷面附近溫度短時間內急速上升使軸力在梁平均溫度未上升時，提前讓軸壓力往軸拉力發展，但隨著火災進程的持續發

展，A4 斷面之軸力發展趨於相似，然對於其它非火源旁之斷面，火源位置所造成的影響並不大，其軸力行為表現相當接近。

五、結論

本研究火災數值模擬部分經以 FDS 場模式進行單一居室火場分析並與 CIB W14 Subgroup 2, 1997 年所完成之實驗相互比對，於居室內三處不同位置加以預測 60 分鐘內之火場溫度分布結果，可知本文建立之 FDS 數值模式較該篇文獻之分析方法 SMARTFIRE 更趨近於實驗值。

利用火災軟體 FDS 模擬辦公室火災，須先建立一適當之設計火源，將模擬結果之氣場溫度與內政部建築研究所訂頒之「建築物構造防火性能驗證技術手冊」之預測結果進行比較，結果顯示本研究結合 FDS 與火源設計方法來模擬火災行為確為可行。

針對火源位置不同，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，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。雖然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，但一旦火災進入全盛期後，對火災氣場溫度影響甚微，結構體的溫度分佈會有些微不同。整體而言，起火源位置所造成結構斷面軸力之差異甚微。

另外對於較複雜的建築物火場情境，利用火災模擬軟體 FDS 結合結構分析軟體 ABAQUS 建立火災-結構分析介面，可針對不同起火方式、開口位置與大小、延燒特性、內部物品擺設、建築結構型式、進行火災模擬，取得不同火災情境之溫度分佈情形，分析火害對建築結構的影響，以提供國內防火性能設計時的參考。

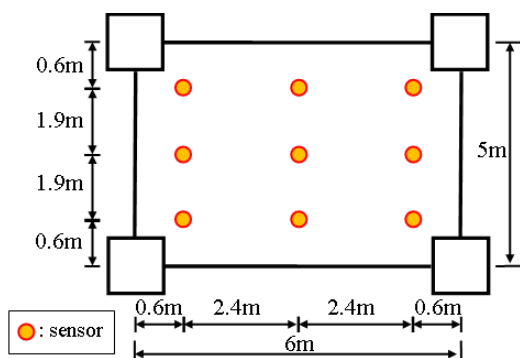


圖 8 單一居室平面圖與氣場溫度偵測位置

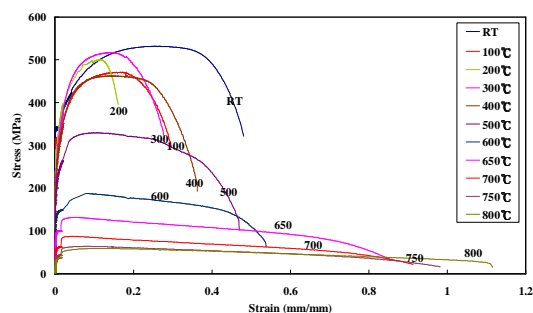


圖 9 SN490B 之應力應變曲線圖

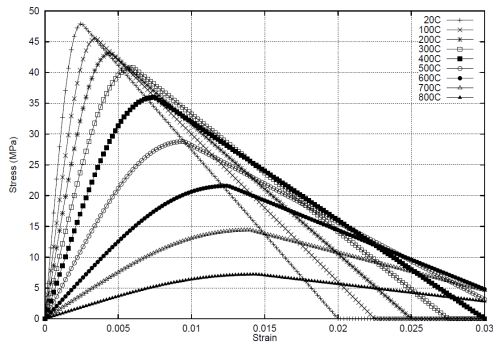


圖 10 輕質混凝土之受壓應力應變關係圖 (Gillie (2000))

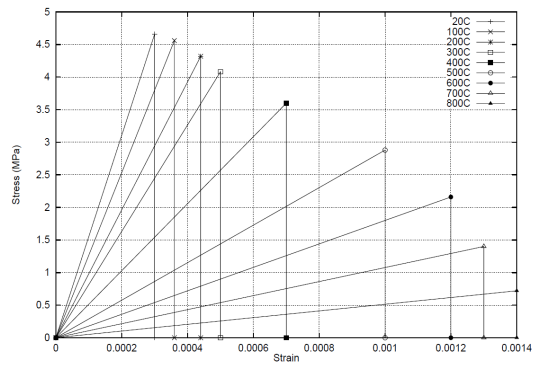


圖 11 輕質混凝土之受拉應力應變關係圖

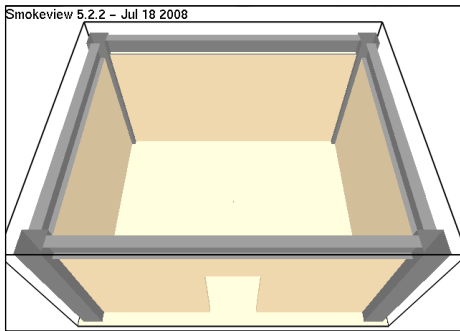


圖 12 單一居室之 FDS 火場情境

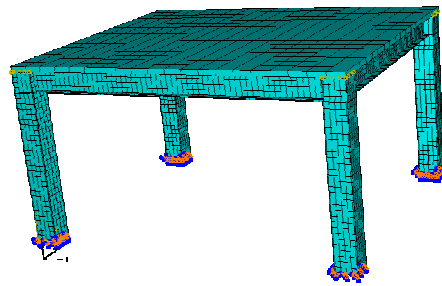


圖 13 單一居室之 ABAQUS 模型

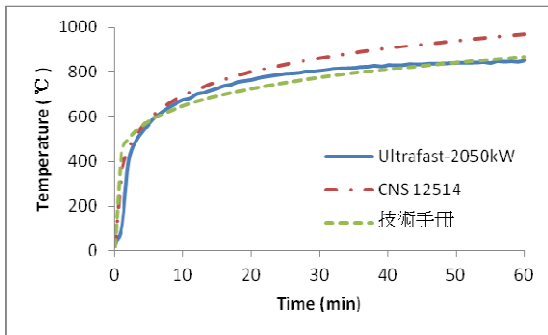


圖 14 FDS 模擬辦公室氣場溫度歷時比較

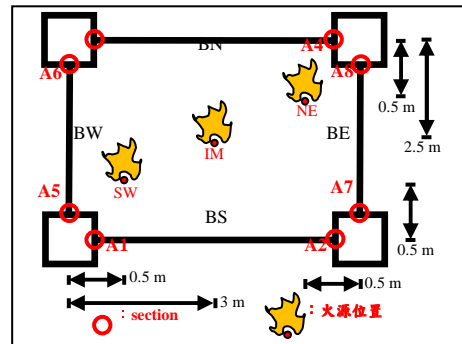


圖 15 火源位置與梁柱斷面編號

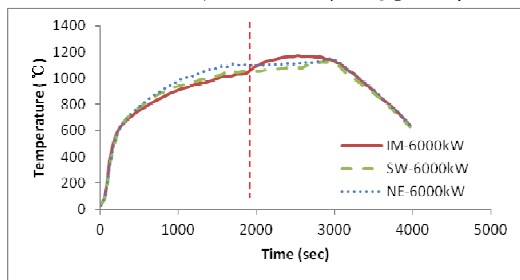


圖 16 單一居室 6000kW 之不同火源位置的氣場溫度

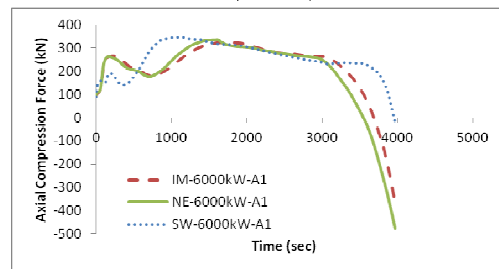


圖 17 斷面 A1 軸壓力與時間關係

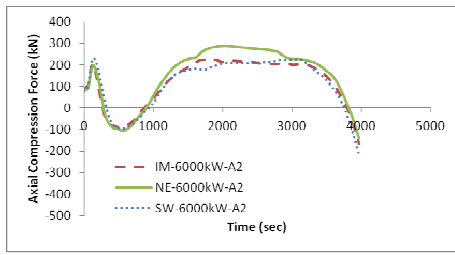


圖 18 斷面 A2 軸壓力與時間關係

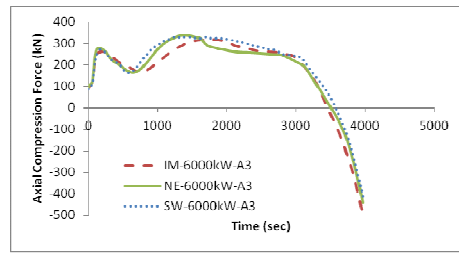


圖 19 之斷面 A3 軸壓力與時間關係

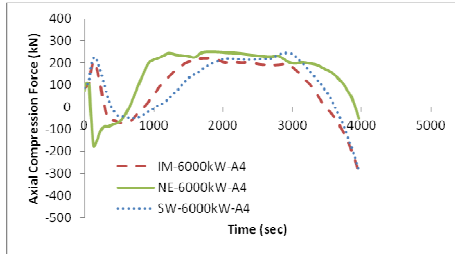


圖 20 斷面 A4 軸壓力與時間關係

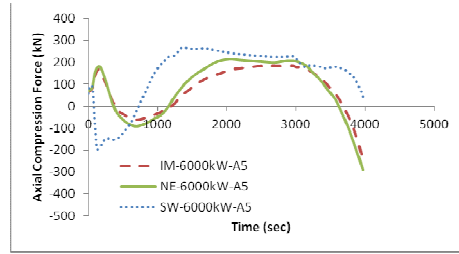


圖 21 斷面 A5 軸壓力與時間關係

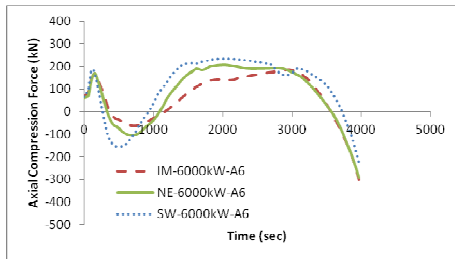


圖 22 斷面 A6 軸壓力與時間關係

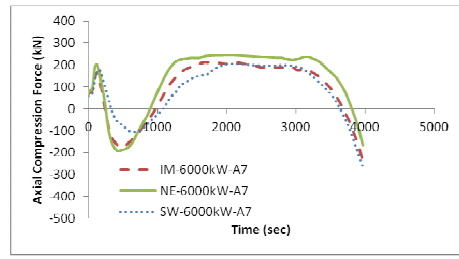


圖 23 斷面 A7 軸壓力與時間關係

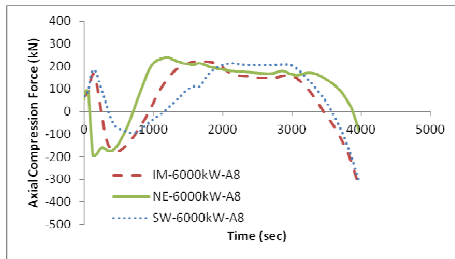


圖 24 斷面 A8 軸壓力與時間關係

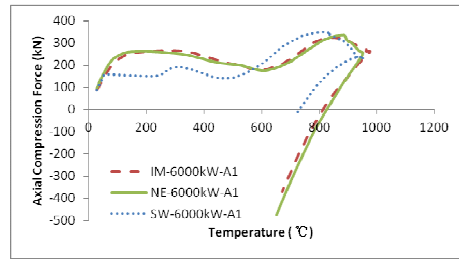


圖 25 斷面 A1 軸壓力與溫度關係

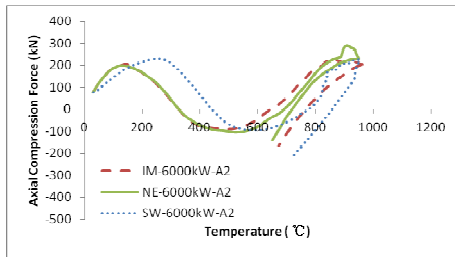


圖 26 A2 軸壓力與溫度關係

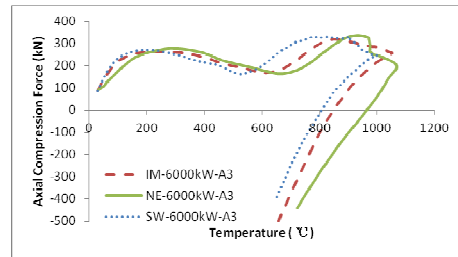


圖 27 斷面 A3 軸壓力與溫度關係

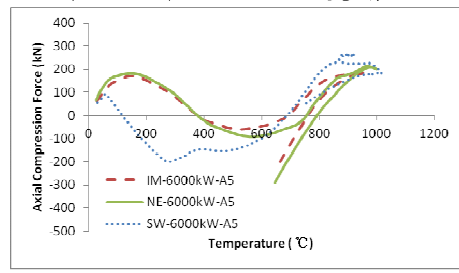
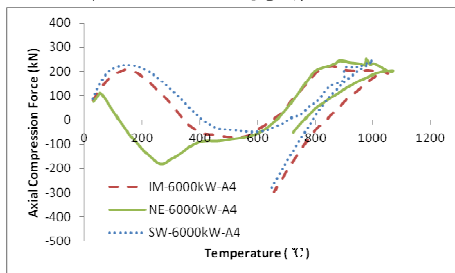


圖 28 斷面 A4 軸壓力與溫度關係

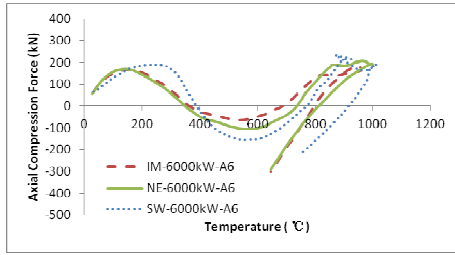


圖 29 斷面 A5 軸壓力與溫度關係

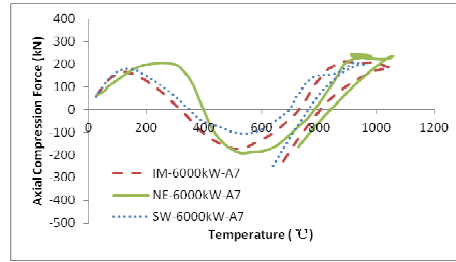


圖 30 斷面 A6 軸壓力與溫度關係

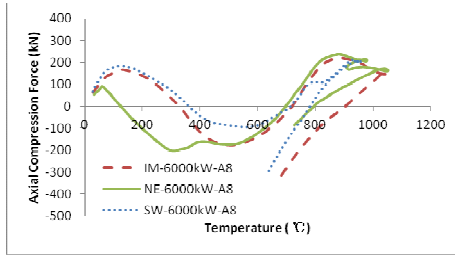


圖 31 斷面 A7 軸壓力與溫度關係

圖 32 斷面 A8 軸壓力與溫度關係

六、參考文獻

1. Wickstrom, U., Duthinh, D., McGrattan, K.(2007) “Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures.” *Interflam 2007*, London, England, September 3-5, pp.943.
2. Duthinh, D., McGrattan, K., Khaskia, A. (2008) “Recent advances in fire-structure analysis.” *Fire Safety Journal*, Vol.43, pp.161-167.
3. Wickstrom, U. (2009) “Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer for Calculating Heat Transfer and Controlling Fire Resistance Furnaces,” *Fire Safety Science*, Proceedings of the Ninth International Symposium, pp 1227-1238.
4. 林誠興(2006),「建築物火災行為與結構安全之性能模擬分析」,行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
5. 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*, Santander (Spain), pp. 297-313.
6. McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J.(2008) “Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide.” NIST.
7. Wang Z., Jia F., Galea E.R., Patel M.K. and Ewer J.(2001) “Simulating one of the CIB W14 round robin test cases using the SMARTFIRE fire field model,” *Fire Safety Journal*, Vol.36 , pp. 661–667.
8. Andrew H. Buchanan (2001) ‘Structural Design for Fire Safety’, England, pp60-61.
9. 內政部建築研究所(2009),建築物構造防火性能驗證技術手冊,台北,初版,頁 99-12。
10. Feasey, R.,and Buchanan, A.H. (2002) “Post-flashover Fires for Structural Design,” *Fire Safety Journal*, Vol. 37, pp.83–105.
11. Gillie M. (2000) “The Behaviour of Steel-Framed Composite Structures in Fire Conditions,” PhD thesis, University of Edinburgh.