火害後鋼筋混凝土樑極限強度分析

林誠興, 王士承, 周國達, 陳德啟

元智大學機械工程系

摘要

建築物主要是由樑、柱、板等構件所組成，當建築物發生火災時，建築物的結構強度可能會因高溫而衰減。因此分析建築結構受火害後是否還保有原本的設計強度，以及哪些地方需要做結構補強，必須要有更精確的工程方法來探討。隨著電腦科技、CFD(Computational Fluid Dynamics)軟體、火災數值模型的持續發展，數值模擬方法已廣泛應用到防火工程研究。本文以 FDS(Fire Dynamics SiMulator)火災模擬軟體建構建築物火災熱流場數值模型，探討不同火勢大小、樑位置對空間熱流場溫度變化之影響，並截取樑邊界溫度隨時間之變化，以 PHOENICS 熱流模擬軟體詳細計算鋼筋混凝土樑受火害時內部溫度分佈，最後以工程方法計算樑強度之量化數據供參考。

關鍵詞：火災、鋼筋混凝土樑、數值模擬、場模式、FDS

姓名：林誠興　現職：元智大學機械工程系教授　電話：03-4638800-2457　傳真：03-4558013
E-mail：mecslin@saturn.yzu.edu.tw

ULTIMATE STRENGTH ANALYSIS FOR A CONCRETE BEAM AFTER A SUSTAINED BUILDING FIRE

C.S Lin, S.C Wang, K.D Chou, T.C Chen

Department of Mechanical Engineering, Yuan Ze University

ABSTRACT

More than 90% of the buildings in Taiwan use reinforced concrete (RC) structures. After fire damage, whether the RC structure can still be safe or not is important to human's life and property. However, obtaining fire thermal parameters quantitative data from actual building fires is impossible. Therefore, numerical siMulation software that siMulates fire scenarios has been utilized to model fires for fire protection engineering. Beam strength decreased due to high temperature. To obtain beam precise temperature profile in a building fire, this study utilizes fire model FDS and field model PHOENICS software to siMulate fire development and beam inner temperature variation. Fire scenarios and beam surface temperatures in a room fire were analysed by FDS fire model. Beam boundary temperatures will be transferred into PHOENICS field model to compute the detailed temperature profile within the beam. The structural strength estimated using beam various cross-section temperature to investigate dynamic ultimate bending moment of a RC beam in a room fire. Through the various siMulations and calculations, this investigation obtains the influence of different beam positions, fire intensity, fire duration and fire damage sustained (whether two or three faces) by a RC beam after a building fire.

Keywords: fire, reinforced concrete beam, numerical siMulation, field model, FDS

姓名：林誠興　現職：元智大學機械工程系教授　電話：03-4638800-2457　傳真：03-4558013

E-mail：mecslin@saturn.yzu.edu.tw

壹、前言

台灣地小人稠，都會地區人口與建築物相當密集，為了有效利用建築物空間，超限使用情形經常可見。如果火災發生在消防隊員搶救困難之處，火災將可能會持續相當長的時間而對建築物本體結構造成嚴重的危害。

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等步驟。但在評斷的過程中仍缺乏客觀的量化數據來佐證判定的正確性，因此發展一套符合力學與工程原理的分析方法，將有助於判定建築物受火害後之結構安全。

鋼筋與混凝土材料在遭受火害後強度之衰減包含許多因素，而火災之最高溫度為主要影響參數[1]。而構件內之溫度分佈主要與材料熱容、熱傳導係數有關。鋼筋為單一材料，其熱學性質較為單純。混凝土是由水泥、砂、骨材加水後經水化作用膠結而成，為複雜之混合物，因內部含有細小之孔隙及部分水氣，加熱後化學組成成份與各物理性質交互影響較為明顯，且不同加熱速率及加熱歷程亦會影響混凝土材料性質變化[2-4]。樑會因為所在位置不同而遭受一面、二面或三面之火害，造成鋼筋混凝土內部產生不均勻的溫度分佈，使得建築物整體強度於火害後不均勻的減低[5-8]。

本研究結合兩套 CFD 電腦數值模擬軟體來分析建築物火災空間之熱流場與樑內部之溫度場。首先以 FDS 火災模擬軟體模擬單一區間樑受火害時之表面溫度，再以 PHOENICS 熱流模擬軟體分析鋼筋混凝土複合矩形樑內部溫度分佈，以不同火勢大小探討樑受二面、三面之火害時對樑之熱傳遞與結構強度之影響，期望能提供建築物受火害後結構安全數值估算方法供參考與應用。

貳、數值模擬模型

以下分別說明熱流分析軟體 FDS、PHOENICS 模擬方法與樑結構強度物理模型。

2.1FDS 火災數值模擬

FDS 是 NIST/BFRL(美國國家標準局暨技術協會火災實驗室)所發展出來的場模式火災模擬軟體，於西元 2000 年 2 月開放第 1 版，並持續加強及改善軟體功能，

於西元 2010 年 4 月開放第 5.5.0 版。此軟體以 LES(Large Eddy SiMulation)模式計算火災流場，燃燒模式為混合分量燃燒，輻射熱傳是以 FVM(Finite Volume Method)方式求得，並可設定多重網狀區間(Multiple-mesh)、撒水設備、通風設備等。其 MPI(Message Passing Interface)介面可提升火災模擬運算時之速度，而後處理程式 Smokeview 可提供火場參數三維動態變化[9,10]。

FDS 主要以 Navier-stokes equations 來計算火災對建築物等空間所造成的流場與熱傳變化，其守恆方程式如下：

(1)質量守恆方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho\ \mathbf{u} = \dot{m}'''$$

(2)動量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\mathbf{u} + \nabla \cdot \rho\mathbf{u}\mathbf{u} + \nabla p = \rho\mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij}$$

(3)能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h\mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' \ - \nabla \dot{\mathrm{q}}'' + \varepsilon$$

(4)理想氣體狀態方程式

$$p = \frac{\rho \Re T}{\overline{W}}$$

符號說明：

ρ	Density	h	Enthalpy; heat transfer coefficient
$\mathbf{u}$ = (u,v,w)	Velocity vector	$\dot{q}'''$	Heat release rate per unit volume
$\dot{m}'''$	Mass flow rate of per unit volume	$\dot{\mathrm{q}}''$	Heat flux vector
p	Pressure	ε	Dissipation rate
$\mathbf{g}$	gravity vector, normally (0,0,−g)	R	Universal gas constant
$\mathbf{f}_b$	External force vector (excluding gravity)	T	Temperature
τ_{ij}	Viscous stress tensor	$\overline{W}$	Molecular weight of the gas mixture

本研究以 FDS 軟體建構長 8.1m、寬 2.7m、高 3.6m 之區間，其模擬 3D 示意圖與邊界條件如圖 1、表 1。火災成長期以 t 平方快速成長火勢($Q=\alpha t^2$)來設定(火勢成長係數$\alpha=0.0469$) [11,12]，當火源熱釋放率達到最大值(3MW、4.5MW、6MW)時即保持此一熱值做熱釋放，總模擬時間為 240 分鐘。

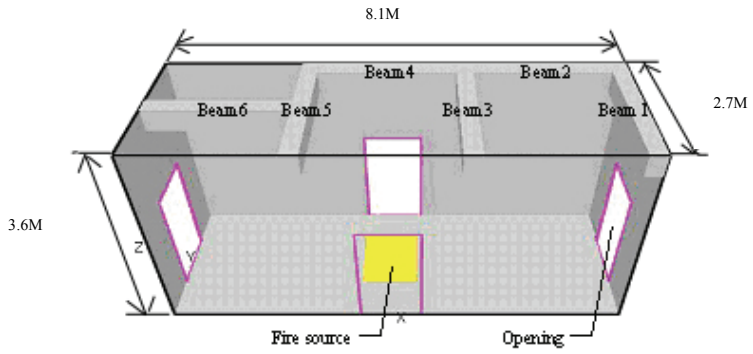


圖 1 FDS 模擬區間 3D 視意圖

表 1 火場邊界條件設定說明表

邊界條件	設定參數	說明
幾何尺寸	8.1m×2.7m×3.6m	-
格點數	81×27×36	-
總模擬時間	-	240 分鐘
起火源尺寸	1m×1.1m×0.2m	矩形方塊
Beam 1,3,5 尺寸	0.3m×2.4m×0.4m	矩形方塊
Beam 2,4,6 尺寸	2.4m×0.3m×0.4m	矩形方塊
開口尺寸	1.1m×2m	DOOR

2.2PHOENICS 樑溫度分佈數值模擬模型

PHONEICS 套裝軟體是以 1980 年的 SIMPLE 法作為計算基礎，主要以 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)的計算方式求解。PHOENICS從1981年發展至今已是相當成熟的CFD軟體，對於一般冷、熱流場之估算已行之有年，且使用的便利性與彈性也逐年調整。為了能更接近人性化之設定，PHOENICS於2001年加入IN-FORM介面，可將自行輸入資訊與計算模組結合，使得參數設定、求解

方式的修改、模擬結果的呈現更加容易。所以本研究採用PHOENICS軟體作為樑內部熱傳計算之輔助工具。其統御方程式可表成如下的通式：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + div\,(\rho u_j \phi) = \psi_\phi \nabla^2 \phi + S_\phi$$

其中$\phi \cdot \Gamma_\phi \cdot S_\phi$分別為相關之物理參數、擴散係數及源頭。

本研究樑之大小為長 240cm、寬 30cm、高 40cm，樑內之設定包括四根外層鋼筋、二根內層鋼筋與 25 圈箍筋，鋼筋於混凝土內之位置如圖 2。首先以 PHOENICS 建構樑承受二面、三面時之數值模型(如圖 3、4)，天花板與牆均為純混凝土，厚度分別為 15cm 與 10cm。為了詳細計算樑內部溫度分佈，樑截面之格點大小以 0.5cm×0.5cm 來計算，其它區域均以小於 1cm×1cm 之格點大小來計算。為了提升溫度模擬的精確度與效率，本研究經格點獨立性測試(如圖 5)後將樑長度劃分為 48 個格點數來計算。由於混凝土之熱擴散係數($k/\rho C_p$)對溫度分佈有相當大的影響，因此將混凝土之熱傳導係數(k)與比容(C_p)隨溫度之變化設定於 PHOENICS 軟體內加以計算(密度ρ為常數)，其方程式為[13,14]

$$k = T^2 \times 10^{-6} - 0.003 \times T + 2.31\ (W/mk)$$
$$C_p = -0.0003 \times T^2 + 0.7598 \times T + 889.76\ (J/kgk)$$
$$\rho = 2300\ (kg/m^3)$$

而鋼筋與箍筋材質則以 PHOENICS 軟體內建之 Steel 材質來估算。本研究僅以 PHOENICS 軟體內之能量方程式來求解樑溫度分佈。樑之初始溫度為 23℃，疊代次數為 500 次，總模擬時間為 4 小時，內部溫度場之收斂條件為 $\sum \frac{|T_i - T_{i-1}|}{T_i} \le 0.001$。

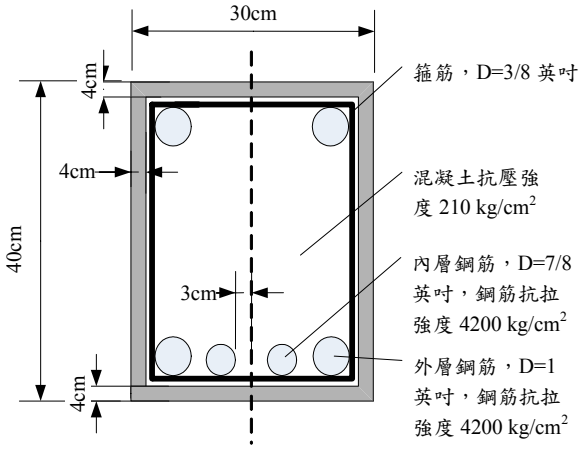


圖 2 RC 樑內鋼筋位置示意圖 [19]

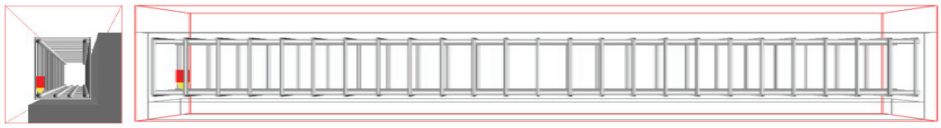


圖 3 PHOENICS 模擬 RC 樑二面受熱視意圖

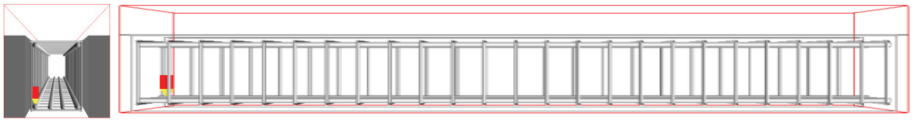


圖 4 PHOENICS 模擬 RC 樑三面受熱視意圖

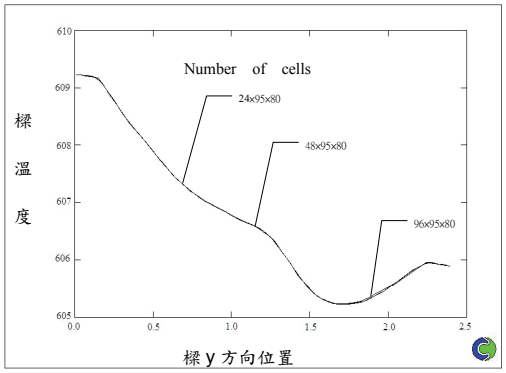


圖 5 PHOENICS 樑溫度模擬之格點獨立性測試(為截取火勢 4.5MW 下燃燒 4 小時後，Beam3 在 x:10cm, z:10cm 處不同 y 方向格點數之溫度比對)

2.3 鋼筋混凝土樑撓曲強度物理與實驗模型

根據 ACI 318-99 Building Code[15]之假設，對於構件受撓載重下之強度設計主要基於下列假設：

1. 鋼筋與混凝土應變與中性軸之距離大小成正比，垂直於彎曲軸之斷面平面在承受彎矩後仍然維持為一平面。
2. 在未達極限應力 f_y 前，鋼筋之應力可以以鋼筋應變 ε_s 乘以彈性模數 E_s 之積來替代；當應變大於 f_y/E_s 時，將被認為與應變無關而等於 f_y 。
3. 計算撓曲強度時，忽略混凝土之抗拉強度。

本研究以上述之假設條件，利用 Fortran 程式語言撰寫樑強度計算程式，其計

算流程及樑受火害後溫度分布模擬流程圖(如圖 6)。

4. 未受火害與受火害情況後計算結果，實尺寸實驗之比較驗證與 ACI Code 值之比較結果[17,18]

驗證[16]：在常溫(20°C)下，針對 20×40；30×45 及 3060 三種樑斷面，並分別以三種鋼筋比：$\rho_{\min}$；$\rho_{\max}$ 及$\frac{1}{2}(\rho_{\max}+\rho_{\min})$，在 fc'=210 kg/cm^2[19]、 fy=4200 kg/cm^2、Lump unit=1cm*1cm 情況下，全面計算出其極限力矩 Mu，並與 Code 結果比較，其結果如圖 7-a、7-b 表 2 與表 3 所示。文獻實驗中製作了 30cm*50cm*340cm 之實尺寸(Full Scale)鋼筋混凝土樑，懸吊置入瓦斯爐中，三面加溫而頂部絕熱，以英國 BS 476 標準升溫曲線加溫，利用熱偶計量測斷面內之溫度分佈，並繪出各加溫延時之等溫曲線，經自然降溫後，再加載使其破壞。其中三支樑(編號 N3B2;B3B2;D3B2)是針對加溫延時 0 小時、2.5 小時及 3.5 小時後所承受撓曲極限力矩實驗。

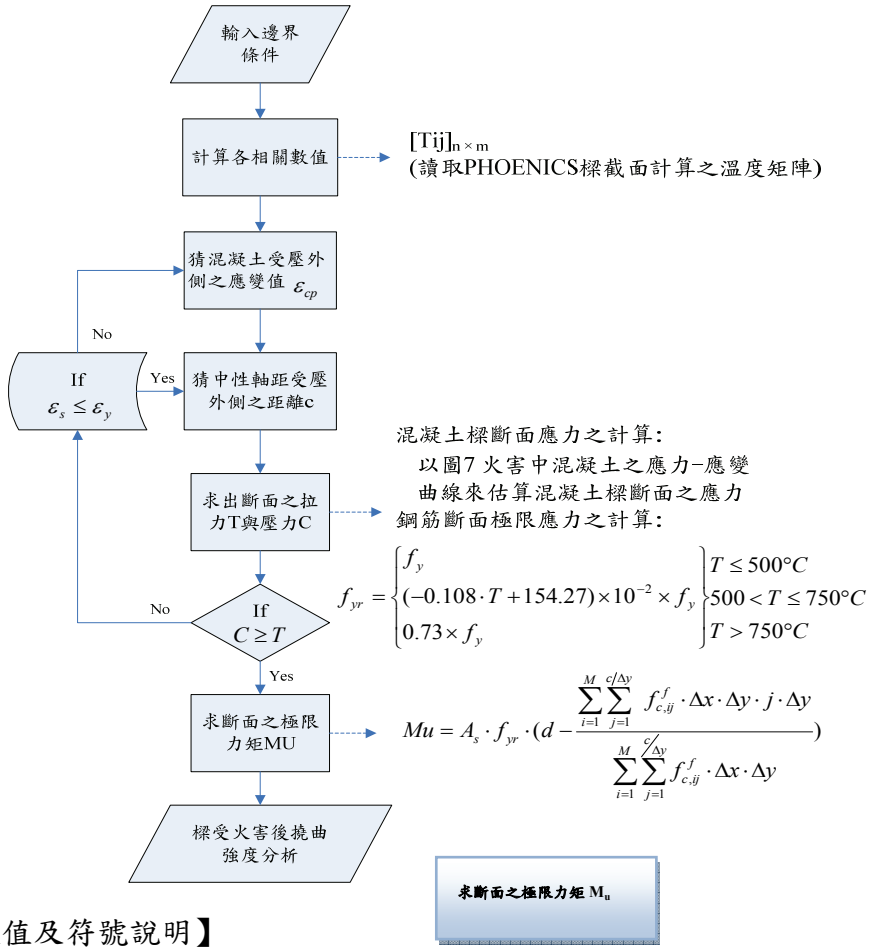
本研究先由其實驗所繪之等溫曲線經由線性內插而得斷面之溫度分佈，再將斷面之溫度矩陣輸入，根據 ACI 318-02 Building Code 之假設及斷面各位置之力學性質，先模擬出斷面受不同火害及撓曲強度時之熱應力分佈情形。進一步再求出斷面受不同火害之殘餘撓曲強度，計算結果與其實驗結果比較，如表 2。美國混凝土協會 ACI318-02 規範對於撓曲構材設計有較重大的變革，載重因子(Load Factor)、強度衰減因數ϕ及相關斷面控制區規定相較於以往的規範是不同的，因此本文探討新規範對於矩形單向樑柱設計之數值計算方式。

表 2 常溫下(20℃)計算之極限力矩值(KN-m)與 ACI Code 比較

斷面尺寸(cm) / 極限力矩(KN-m) / 鋼筋量(cm^2)	20×40		30×45		30×60	
	Code 值	計算值	Code 值	計算值	Code 值	計算值
$\rho_{\min}$	42.18	42.18	80.15	80.05	142.34	142.44
$\frac{1}{2}(\rho_{\max}+\rho_{\min})$	127.43	128.51	241.91	243.97	429.97	434.39
$\rho_{\max}$	193.75	196.79	367.97	373.66	654.03	664.92

表 3 加溫延時之試驗值與計算值比較

Mu 值 / 加溫延時	試驗值 (kN-m)	計算值 (kN-m)
0	279.00	274.48
2.5 hr.	252.31	247.21
3.5 hr.	228.77	231.71



【相關數值及符號說明】

T(鋼筋及混凝土曾遭受之最高溫度)、As(抗拉鋼筋面積)、

f_c'(混凝土火害後之殘餘極限抗壓強度)、

f_{yr}(鋼筋火害後之殘餘降伏強度)。

M_u(斷面極限力矩)、M(樑寬分割數目) 、N(樑深分割數目)、As(抗拉鋼筋面積) 及〔Tij〕$_{n\times m}$(樑截面之溫度矩陣)，Tij 為各單元 ij 中心點之溫度。ε_{max}(為相

對應於最大應力之應變) 計算各相關數值及斷面性質矩陣：Δx、Δy、f_{yr}、〔$f'_{cr,ij}$〕$_{n\times m}$及〔$\varepsilon^{t}_{\max,ij}$〕$_{n\times m}$，其中：

Δx (分割單元寬度) = b/M　Δy (分割單元深度) = d/N

圖 6 樑撓曲強度估算流程圖

Code

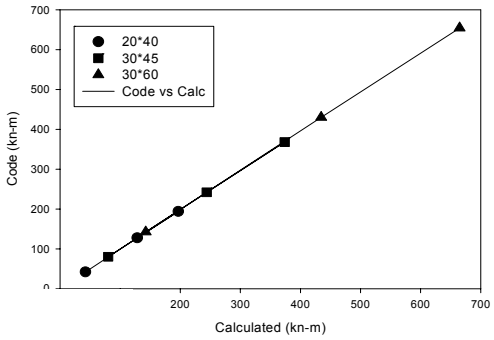


圖 7-a Code 值與計算值比較圖

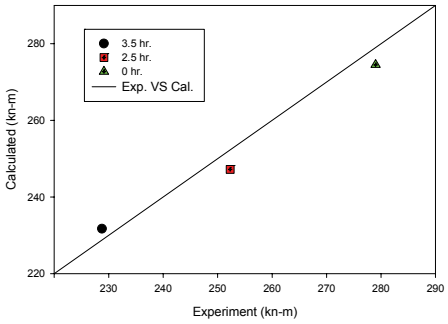


圖 7-b Code 試驗值與計算值比較圖

參、結果與討論

本研究以不同熱釋放率來探討樑在不同位置下受二面、三面火害時之溫度分佈，並進一步分析樑在不同截面下其強度隨溫度變化之折減情形，分別說明如下：

3.1 樑溫度分佈之探討

圖 8~10 為 FDS 模擬火源最大熱釋放率 3MW、4.5MW、6MW 於 60 分鐘時火源中心 y 截面溫度分佈圖。由於火勢成長率設定為快速成長，因此各火源在短時間內(分別在 253 秒(3MW)、309 秒(4.5MW)、358 秒(6MW)達到最大熱值就已達到設定之最大熱釋放率至模擬結束。火勢為 3MW 時，由於高溫濃煙受到樑之阻隔，高溫大部份集中於火源上方天花板附近，火源外部區域上下層溫度呈現明顯分隔，約在 600℃以下變化。當火勢提升至 4.5MW 時，高溫濃煙除集中於火源上方天花板外，部份高溫濃煙往鄰近天花板漫延，且上層溫度開始出現層化的情形。當火勢增大至區間可容許之最大熱釋放率 6MW 時，區間上層幾乎已充滿 1000℃以上之濃煙。由結果可得知火勢大小對於樑影響範圍不同，因此於 3MW 火勢下僅探討 Beam3、4、5 之強度，4.5MW 僅 Beam1 強度未探討，6MW 則所有樑強度均探討。

Beam3、4、5 截面 130cm 處於火勢 3MW 下 60~240 分鐘溫度分佈如圖 11~13。Beam3 左側因較靠近火源，因此溫度明顯比右側要高。120 分鐘時樑左側與底部鋼筋附近溫度已提升至 300℃以上，樑中心處約在 89~155℃之間，隨著時間增加，天花板溫度亦持續上升，至 240 分鐘時，樑中心溫度約在 155~287℃之間。由於高溫濃煙是由天花板處往外移動，因此 Beam4 下方溫度較右側低。由於只有兩面受熱，因此樑內左上側之鋼筋附近區域在整個模擬過程中均為常溫。120 分鐘時樑下方與右側鋼筋溫度約在 242℃以上，由於樑右下方之鋼筋同時受到樑右側與下方之熱傳，因此鋼筋之模擬溫度較其它鋼筋高。240 分鐘時離樑下方與右側 12 cm 之範圍內溫度至少在 169℃以上。由於 Beam5 之 y 截面 130cm 處與 Beam6 側邊相連接(如圖 1 之 Beam5 與 Beam6 相連接處)，因此 Beam5 內溫度分佈相當不均勻。因樑右側溫度直接受火波汲，因此溫度較樑左側高出許多，樑左側因受到 Beam6 防護，高溫濃煙並無法直接將熱能傳達至 Beam5 樑之左側表面，使得樑左側(離樑底部 10cm 以上處)溫度均在 320℃以下，雖然此處類似二面受熱，但因受到側邊熱傳的影響，因此溫度仍有上升。由各樑之溫度模擬結果可得知火勢在 3MW 時，火源上方天花板附近溫度約在 1000℃左右變化。

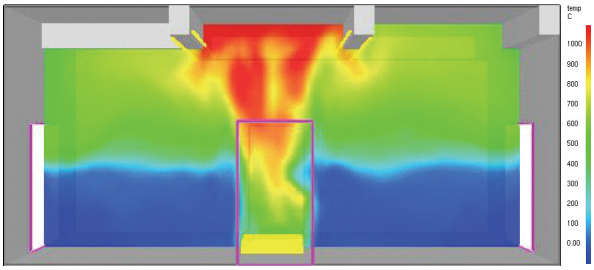


圖 8 火源最大熱釋率 3MW 於 60 分鐘時火源中心 y 截面溫度分佈圖

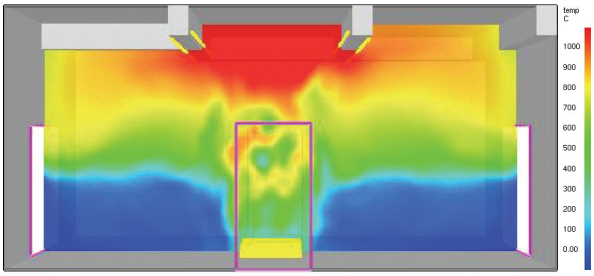


圖 9 火源最大熱釋率 4.5MW 於 60 分鐘時火源中心 y 截面溫度分佈圖

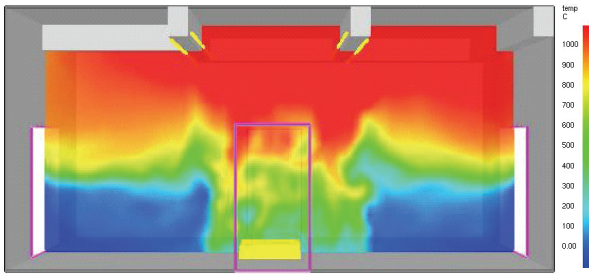


圖 10 火源最大熱釋率 6MW 於 60 分鐘時火源中心 y 截面溫度分佈圖

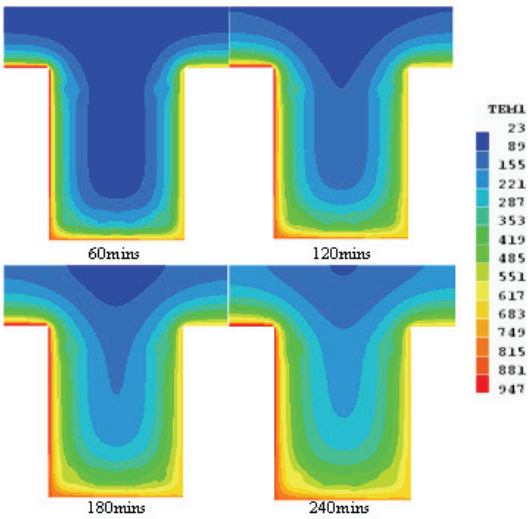


圖 11 Beam3 之 y 截面 130cm 處於火勢 3MW 下 60~240 分鐘溫度分佈圖

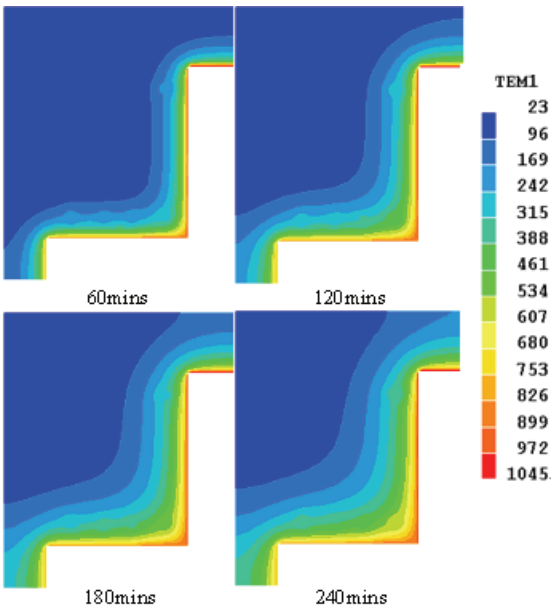


圖 12 Beam4 之 x 截面 130cm 處於火勢 3MW 下 60~240 分鐘溫度分佈圖

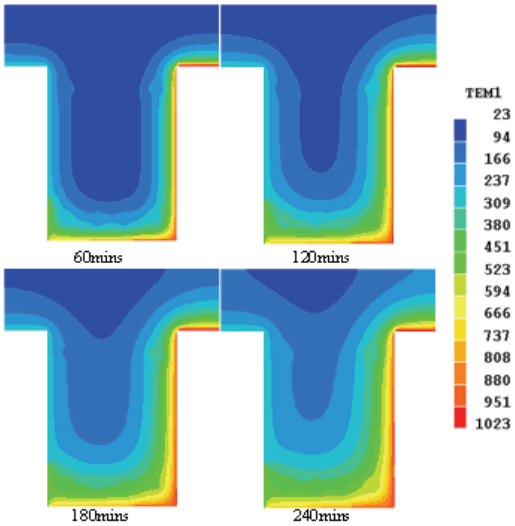


圖 13 Beam5 之 y 截面 130cm 處於火勢 3MW 下 60~24 分鐘溫度分佈圖

Beam3、4、5 截面 130cm 處於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘溫度分佈如圖 14~16。火源上方天花板附近溫度約比 3MW 火勢高 200℃左右，雖然區間溫度大幅提升，但因混凝土熱傳效率極差，造成樑內溫度梯度相當大，因此樑中心處溫度分佈僅較 3MW 火勢稍高。Beam3 中心附近於 120 分鐘時溫度約在 190℃以下變化，由於火勢較大，使得樑左下角與右下角溫度差異較火勢為 3MW 時小，且鋼筋溫度變化

較為相似。雖然 Beam4 二面受熱情況相當類似，但對樑中心溫度影響相當有限。火勢雖有提升，但對於 Beam5 左側溫度並無太大影響，但離樑下方 2cm 範圍內其溫度分佈較火勢為 3MW 時均勻。

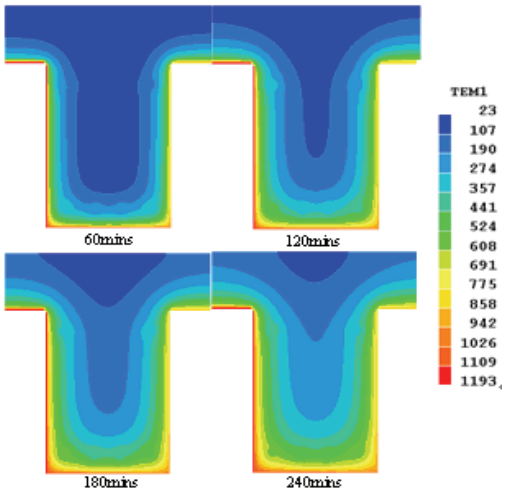


圖 14 Beam3 之 y 截面 130cm 處於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘溫度分佈圖

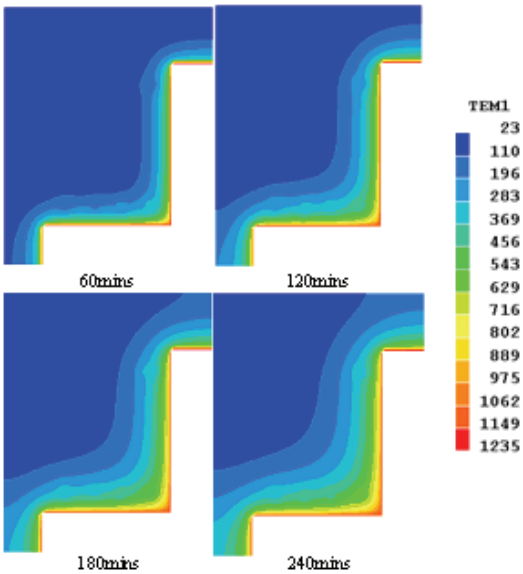


圖 15 Beam4 之 x 截面 130cm 處於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘溫度分佈圖

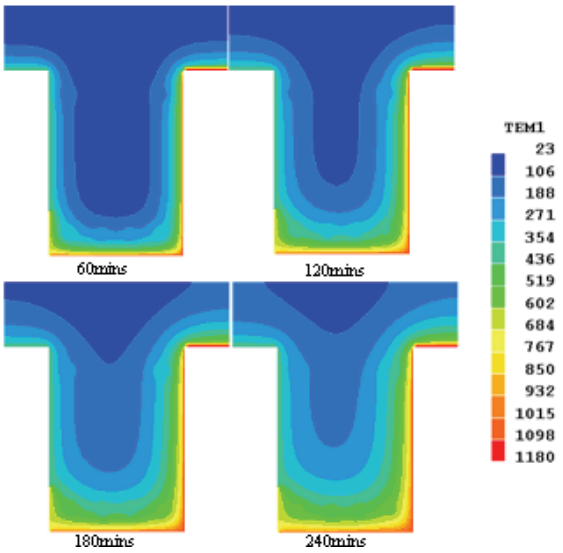


圖 16 Beam5 之 y 截面 130cm 處於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘溫度分佈圖

Beam3、4、5 截面 130cm 處於火勢 6MW 下 60~240 分鐘溫度分佈如圖 17~19。由模擬結果可得知火場上層溫度至少在 1200℃以上變化，因高溫濃煙均勻瀰漫整個上層區間，因此所有樑邊界受熱情形相當類似，使得三面受熱之混凝土樑溫度分佈呈現近似對稱的情形。由於 4.5MW 與 6MW 火勢之最高溫度相差約 100℃左右，因此兩火勢 Beam3 中心附近在 120 分鐘時溫度差不超過 20℃。由於鋼筋較靠近樑邊界，因此在 240 分鐘時 6MW 火勢較 4.5MW 火勢之鋼筋溫度高約 60℃左右。Beam4 在二面均勻受熱下，右側與下方溫度亦呈現近似對稱的情況，由於下方鋼筋數量較多，因此下方鋼筋附近之溫度呈現些許波浪形狀分佈。雖然火場區間火勢已達到最大，但 Beam5 於 y 截面 130cm 處之左側溫度仍較右側溫度低許多。相較於 3MW 之火勢，樑表面附近區域其溫度較高，且分層情況較多，樑左側在強大的高溫火勢下表面溫度已達 400℃以上。

由以上模擬結果可得知火勢於 3MW、4.5MW、6MW 下火源上方天花板附近溫度高達 1000~1300℃左右，隨著火勢的增大，高溫濃煙漫延的範圍亦隨之擴大，且各樑表面溫度差越小，使得樑內部溫度分佈呈現較均勻且對稱的情況。因鋼筋熱傳導相當好，使得內部溫度很快就達到均溫，導致混凝土與樑交界面之溫度產生較不規則之分佈。

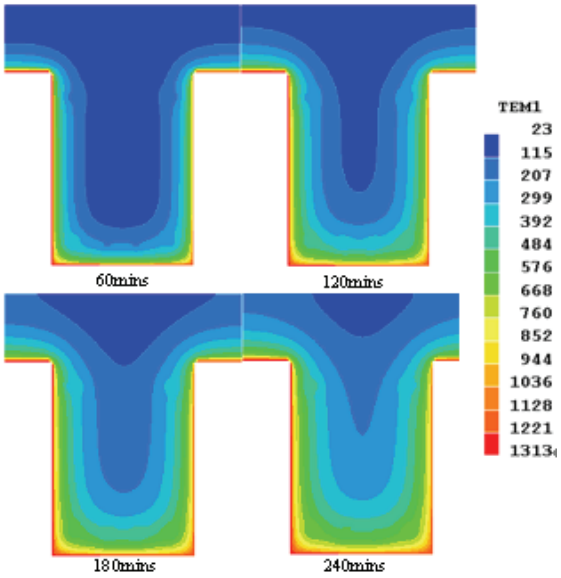


圖 17 Beam3 之 y 截面 130cm 處於火勢 6MW 下 60~240 分鐘溫度分佈圖

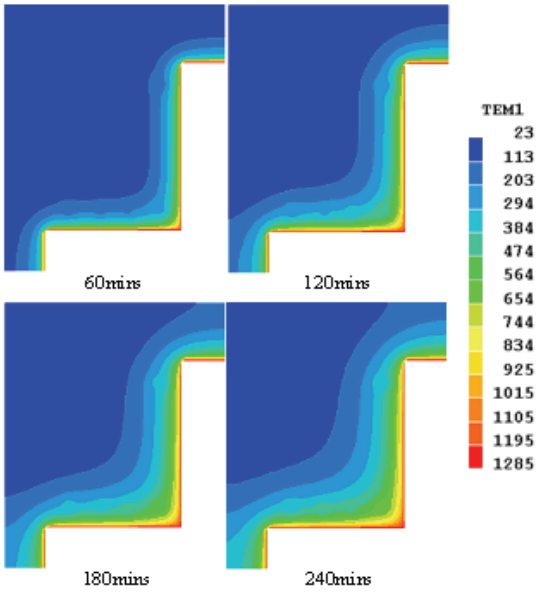


圖 18 Beam4 之 x 截面 130cm 處於火勢 6MW 下 60~240 分鐘溫度分佈圖

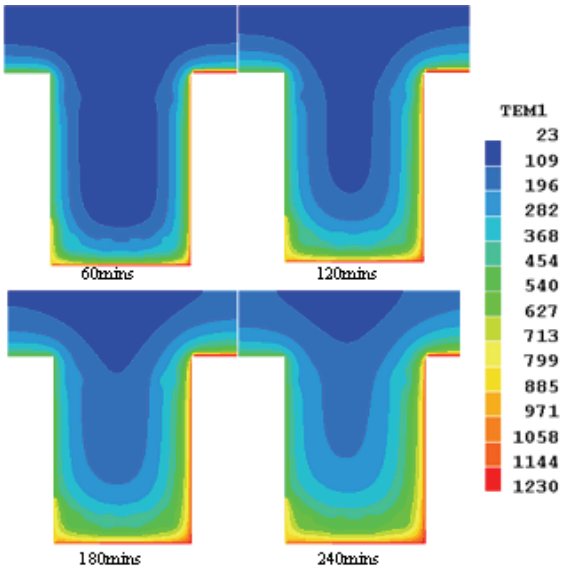


圖 19 Beam5 之 y 截面 130cm 處於火勢 6MW 下 60~240 分鐘溫度分佈圖

3.2 樑撓曲強度之探討

本研究主要探討樑受火害後其撓曲強度之變化，以樑斷面可承受之極限力矩(M_u)來說明。混凝土之抗壓強度設定為 210kg/cm^2，內層鋼筋與外層鋼筋其抗拉強度設定為 4200kg/cm^2，樑各截面計算所得之撓曲強度均為平均值，火場內不同火源大小下各樑截面受火害時之極限力矩變化如圖 20~33 所示。

圖 20~22 為火勢 3MW 時火源附近 Beam3、4、5 於 60~240 分鐘之各截面 M_u 分佈圖。樑未受火害時其 M_u 值為 223kN-m，隨著火場溫度提升，樑之 M_u 值開始下降，Beam3 受火害 60 分鐘後各截面 M_u 值約在 215.8~216.3kN-m 之間。至 180 分鐘時，樑各截面 M_u 值雖然仍持續下降，但下降幅度不大，各截面 M_u 值至少還保有 213kN-m 以上。但隨著高溫火勢持續加熱，樑 M_u 值開始呈現大幅折減，使得樑於 240 分鐘時已有截面之 M_u 值降至 207.1kN-m。Beam4 因僅承受兩面火害，因此樑各截面之 M_u 值下降情況較三面火害時平緩。各截面 M_u 值在各時段(60、120、180、240 分鐘)彼此下降的幅度差異約在 2~4 kN-m 之間，至模擬結束時，各截面 M_u 值仍保有 212.8 kN-m 以上。Beam5 大部份是承受三面火害，因於 y 截面 120~150cm 間之左側受到 Beam6 防護，所以此段之 M_u 值下降幅度較其它截面平緩。至 180 分鐘前 Beam5 各截面之 Mu 值仍保有 214.3kN-m 以上。在 240 分鐘時可明顯看出未承受三面火害處之 M_u 值高於其它樑之截面，最大相差約 2.5kN-m 左

右。

圖 23~27 為火勢 4.5MW 時 Beam2~6 於 60~240 分鐘之各截面 M_u 分佈圖。Beam2 與 Beam4 均受到二面火害，在 180 分鐘前，Beam2 與 Beam4 各截面 M_u 值變化相似，但因與火源距離不同，各截面之 M_u 值仍有些許差異。至 240 分鐘時，Beam4 因均勻受熱，所以各截面彼此之 M_u 值差異較小，約在 212.1~212.6kN-m 間變化。Beam2 其 y 截面 10cm 處因較靠近角落，且受到 Beam3 阻隔火勢，因此該截面 M_u 值較鄰近截面稍高，而在 y 截面 130cm 後之區段因離火源越來越遠，使得各截面 M_u 值大小與火源距離成正比，因此整支樑各截面彼此之 M_u 值大小差異較大，約在 212.4~215.4kN-m 間變化。Beam3 因受熱較 3MW 均勻，使得整支樑各截面 M_u 值隨時間下降幅度很相近。在 60~180 分鐘，M_u 值約在 216.3~210.9kN-m 間變化，此後隨時間增加，M_u 值開始迅速下降，至 240 分鐘時，各截面均較 180 分鐘時之 M_u 值低 8kN-m 以上。隨著火勢的增大，Beam5 表面溫度加熱較為均勻，使得受三面火害之截面其 M_u 值變化相當近似。在僅受到兩面火害波及區域，雖然火勢未直接加熱於防護表面，但因火災熱流場溫度相當高，使得側向熱傳持續進行，因此對於樑之 M_u 值仍有些許影響。而受到 Beam6 防護與受三面火害之截面於 240 分鐘時其 M_u 值最大差異可達 7kN-m 左右。Beam6 表面雖然承受三面火害，但因每一段截面與火源距離不同，因此各截面所承受之火害亦有些許差異。由圖 27 可明顯看出從 x 截面 10cm 至 230cm 在同一時段下其 M_u 值大小是呈現持續下降，因 x 截面 10cm 處離火源最遠，受火害的情況較其它截面小，於 240 分鐘時，其 Mu 值仍有 211.5kN-m。而 x 截面 190cm~230cm 處因離火源相當近，其 M_u 值隨時間變動情形類似，與 x 截面 10cm 之 Mu 值最大相差約 7kN-m。

圖 28~33 為火勢 6MW 時 Beam1~6 於 60~240 分鐘之各截面 M_u 分佈圖。Beam1 因整支樑離火源有最遠，因此僅有 6MW 之火勢才足以影響此樑之強度。由於 Beam1 為二面火害且均勻受熱，因此各截面 M_u 值隨時間下降的幅度(約在 1~4 kN-m 間)相當類似，於 240 分鐘時，各截面之 M_u 值約在 211.3kN-m 上下。Beam2 雖然比 Beam4 離火源要遠，但因火勢強度相當大，因此兩支樑二面受火害之情形類似，各截面各時段之 M_u 值大小彼此差距不超過 0.3 kN-m，於 240 分鐘時，兩支樑仍可承受 210 kN-m 大小之力矩。Beam3 與 Beam5 各截面在三面受火害情況下，其 M_u 值於各時段差距約在 1~9kN-m，且某些截面 M_u 值於 240 分鐘時，已低於 200kN-m。Beam5 側面受到 Beam6 防護之部份其截面之 M_u 最大值為 207.7kN-m，仍明顯高於其它截面之 M_u 值。在高強度火勢下，Beam6 各截面 M_u 值之差異有縮小的情形，在 x 截面 90~230cm 間，其 M_u 值受火害 180 分鐘後開始迅速下降，至

240 分鐘時各截面 M_u 值均低於 202kN-m，而離火源最遠處(x 截面 10cm 處)其 Mu 值(204.4kN-m)雖然較其它截面高，但差距不大。

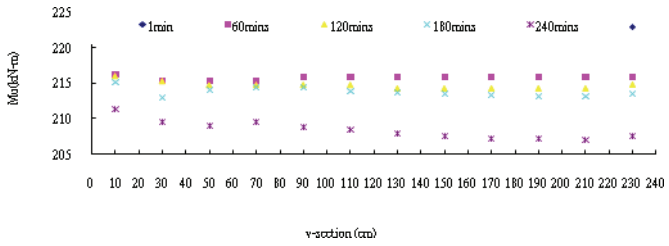


圖 20 Beam3 於火勢 3MW 下 60~240 分鐘各 y 截面極限力矩分佈圖

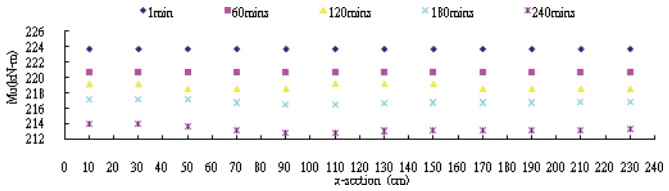


圖 21 Beam4 於火勢 3MW 下 60~240 分鐘各 x 截面極限力矩分佈圖

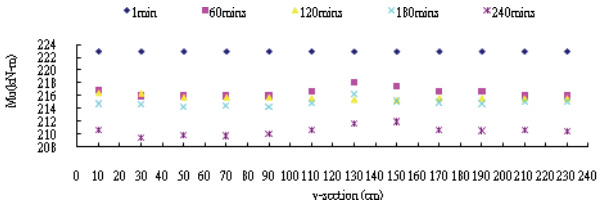


圖 22 Beam5 於火勢 3MW 下 60~240 分鐘各 y 截面極限力矩分佈圖

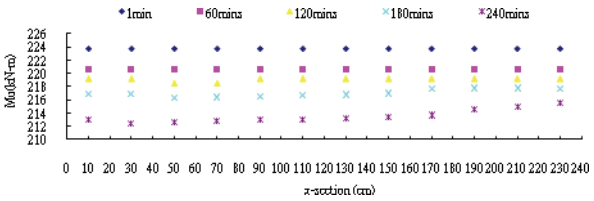


圖 23 Beam2 於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘各 x 截面極限力矩分佈圖

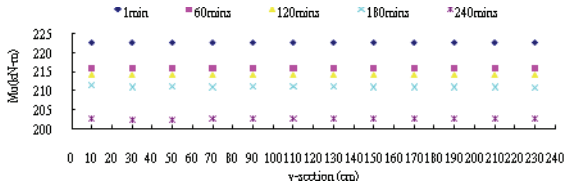


圖 24 Beam3 於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘各 y 截面極限力矩分佈圖

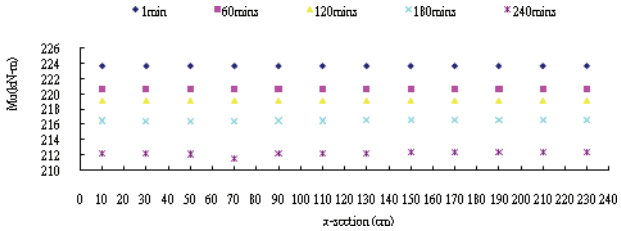


圖 25 Beam4 於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘各 x 截面極限力矩分佈圖

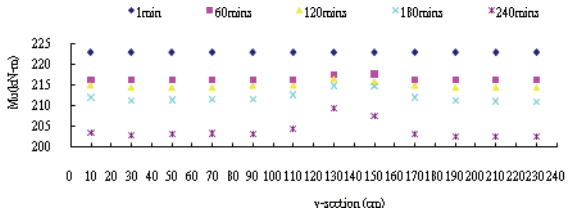


圖 26 Beam5 於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘各 y 截面極限力矩分佈圖

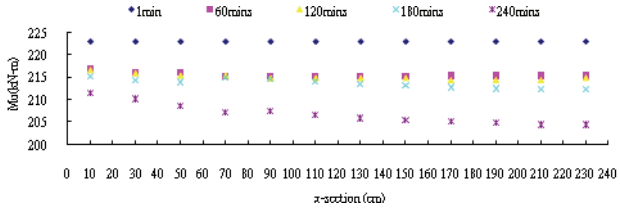


圖 27 Beam6 於火勢 4.5MW 下 60~240 分鐘各 x 截面極限力矩分佈圖

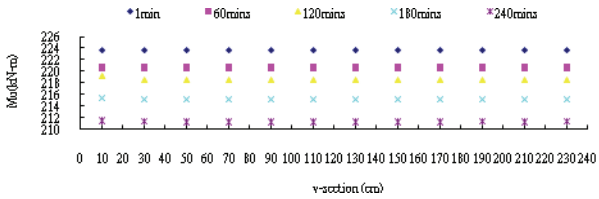


圖 28 Beam1 於火勢 6MW 下 60~240 分鐘各 y 截面極限力矩分佈圖

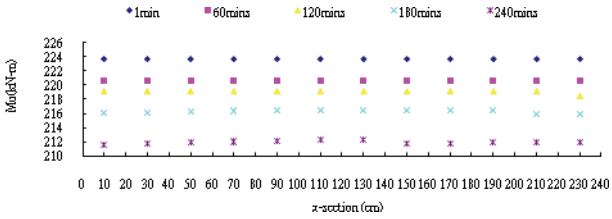


圖 29 Beam2 於火勢 6MW 下 60~240 分鐘各 x 截面極限力矩分佈圖

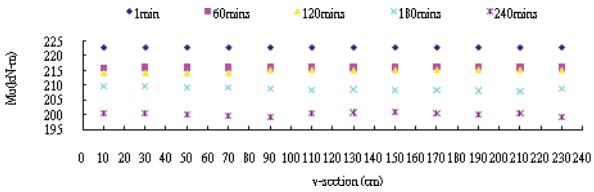


圖 30 Beam3 於火勢 6MW 下 60~240 分鐘各 y 截面極限力矩分佈圖

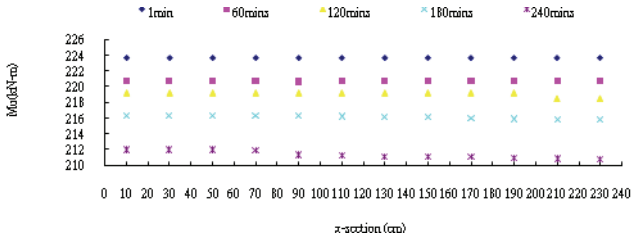


圖 31 Beam4 於火勢 6MW 下 60~240 分鐘各 x 截面極限力矩分佈圖

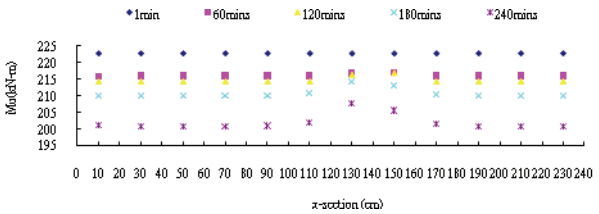


圖 32 Beam5 於火勢 6MW 下 60~240 分鐘各 y 截面極限力矩分佈圖

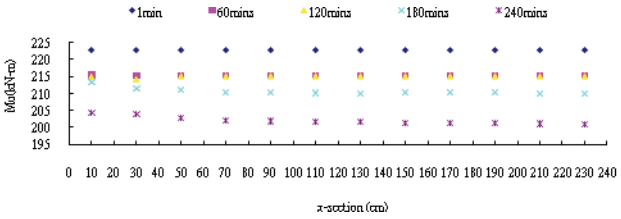


圖 33 Beam6 於火勢 6MW 下 60~240 分鐘各 x 截面極限力矩分佈圖

由以上樑各截面 M_u 值之探討可得知火勢大小、樑位置、樑承受火害之情況(如二面、三面)對樑受火害後可承受之強度有相當大之影響。在較小的火勢與離火源較遠之樑，因表面為非均勻受熱，各截面 M_u 值皆不同。而有些樑與樑之交界處附近區域，火勢與高溫濃煙不易直接侵襲，因此 M_u 值較其它截面高。二面受火害之樑，其 M_u 值在整個模擬過程中均在 210kN-m 以上變化，而三面受火害之樑，其 M_u 值在整個模擬過程中最低值為 199kN-m。

肆、結論

建築物在發生火災時，樑各區段會因承受火勢溫度之不同，各截面鋼筋及混凝土材料力學行為互有差異，致使樑構件斷面之應力不易探討。因此本文期望能提供一個符合熱學與力學原理之方法來分析建築物主要構件受火害後之安全性，提供量化的結果供參考。本研究主要整合 FDS 火災模擬軟體、PHOENICS 場模式模擬軟體與樑強度估算程式，並以 Fortran 程式來串聯兩數值模擬軟體之溫度場，以分析實際火場中不同火勢大小對鋼筋混凝土樑各截面強度隨時間之衰減程度。

由模擬結果可得知火源熱釋放率之大小、火源與樑之相對位置、樑承受火害之情況(如二面、三面)對樑受火害後各截面可承受之強度均有影響。但隨著火源熱釋放率的增加，樑位置對樑強度下降之影響會逐漸減小。由此可知，樑受火害之

強度變化主要與區間內火勢大小有關。由以上分析方式可詳細探討樑各截面受火害後強度衰減之差異，可了解建築物受火害後其樑結構是否還保有原本的設計強度，並可針對強度較弱的區段做結構補強。

樑承受三面火害其強度下降幅度較二面火害快，且隨著火勢的增加，強度下降率更為顯著，因此對建築物區間可能受三面受火害之樑應先加以防護，由於樑強度下降主要是受到火勢、高溫濃煙、樑之內部熱傳效率等影響，因此除了積極防止火勢擴大外，亦可針對樑材料之熱性質做一改善，或於樑邊界做隔熱防護，阻止高溫傳導至樑內部。

伍、參考文獻

[1] 沈進發、陳舜田、張郁慧，“火害延時對混凝土材料性質之影響”，國科會專案研究計畫 NSC 82-0410-E011-079 研究報告，pp. 4-6，1993。

[2] B.Ellingwood ,J.RShaver, “Analysis of Reinforced Concrete Beams Subjected to Fire”, National Bureau of Standards, *Building Science Series*, p. 73, 1976.

[3] Z.H.Hung ,L.W.Burgess, R.J Plank., “Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Fire”, *ACI Structural Journal*, pp. 127-135, 1999.

[4] Z.H.Hung ,A.Platten, “Nonlinear Finite Element Analysis of Planar Reinforced Concrete Members Subjected to Fires”, *ACI Structural Journal*, pp. 272-282, 1997.

[5] V.K.R. Kodur, T.C. Wang, F.P. Cheng, “Predicting the fire resistance behavior of high strength concrete columns”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 141-153, 2004.

[6] 徐瑞祥、林誠興、黃彰斌，“火災後鋼筋混凝土樑之熱應力分佈模擬”，現代防災防火科技展望與應用國際研討會，pp. D5-1~14，2003。

[7] 徐瑞祥、林誠興，“鋼筋混凝土樑受火害後之撓曲能力數值模擬”，技師月刊，Vol. 36，pp. 96-103，2005。

[8] 王士承、林誠興、徐瑞祥、黃彰斌，“鋼筋混凝土樑於火災中撓曲強度動態模擬研究”，中華民國燃燒學會第十六屆學術研討會，2006。

[9] K.B. McGrattan and G.P. Forney, “Fire Dynamics Simulator (Version 4)”, User’s Guide, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010.

[10] G.P. Forney and K.B. McGrattan, “User’s Guide for Smokeview Version 4”, NIST

Special Publication 1017, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010.

[11] Drysdale, “An Introduction to Fire Dynamics”, 2nd ed.John Wiley&Sons,LTD 1999.

[12] A.H. Buchanan, “Structural Design for Fire Safety” John Wiley&Sons,LTD, 2002.

[13] 黃彰斌、林誠興、徐瑞祥，“鋼筋混凝土樑受火害時之溫度分佈與殘餘強度分析”，技術學刊，Vol. 21(2)，pp. 175-188，2006。

[14] Jui Hsiang Hsu, C.S. Lin, “Residual Bearing Capabilities of Fire-Exposed Reinforced Concrete Beams”, International Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 4(2), pp. 151-163, 2006.

[15] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), 2002.

[16] J.H Hsu, C.S. Lin, “Effect of Fire on the Residual Mechanical Properties and Structural Performance of Reinforced Concrete Beams”, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 18, No.4, pp.245-274, 2008。

[17] 何象鏞，“鋼筋混凝土樑火害後力學行為探討”， 國立台灣工業技術學院，碩士論文，1989。

[18] 閔明保、李延和等，“建築物火災後診斷與處理”，江蘇科技技術出版社，1994。

[19] 李錫霖-鋼筋混凝土學,2005。