

火災熱傳遞與鋼結構安全性能評估之 分析研究

內政部建築研究所自行研究成果報告
中華民國 98 年 12 月

(本部計畫編號)

098301070000G2020

火災熱傳遞與鋼結構安全性能評估之 分析研究

執行單位：內政部建築研究所

研究主持人：李鎮宏 副研究員

內政部建築研究所自行研究成果報告

中華民國 98 年 12 月

目次

表次.....	II
圖次.....	III
摘要.....	VI
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 文獻回顧.....	2
第二章 複合爐火場模擬建置與平板測溫器之應用.....	5
第一節 Fire-Structure 介紹.....	5
第二節 Wall-Temperature 介紹.....	7
第三節 鋼材之高溫材料性質.....	9
第四節 FDS 參數設定.....	14
第五節 平板式測溫器之應用.....	17
第三章 非均勻火場熱傳與結構行為.....	39
第一節 實驗與分析案例.....	40
第二節 鋼材表面溫度熱傳分析比較.....	41
第三節 結構火害行為分析比較.....	42
第四章 側板式梁柱接頭火害性能分析.....	63
第一節 緒論.....	63
第二節 側板式梁柱接頭設計.....	64
第三節 火害行為分析.....	66
第五章 結論與建議.....	75
第一節 結論.....	75
第二節 建議.....	76
附錄.....	77
參考書目.....	81

表次

表 2-1 FDS 設定參數說明	19
表 2-2 FDS 噴火口位置座標	20
表 2-3 爐溫測點編號位置座標	22
表 2-4Type-C 爐溫實驗值與分析值 26 分最後溫度與相差值	23
表 2-5Type-D 爐溫實驗值與分析值 30 分最後溫度與相差值	24
表 3-1Type-C 實尺寸實驗值與分析值 25.5 分最後溫度及相差值	45
表 3-2Type-D 實尺寸實驗值與分析值 29 分最後溫度及相差值	45

圖次

圖 2-1	Fire-Structure 分析流程圖	6
圖 2-2	各溫度下鋼材的熱傳導係數值	13
圖 2-3	各溫度所對應的比熱值	13
圖 2-4	大型複合實驗爐	25
圖 2-5	安全側撐裝置	25
圖 2-6	火源編號及排氣口位置	26
圖 2-7	FDS 虛擬耐火爐情境示意圖	26
圖 2-8	實驗爐內部噴火孔和量測火爐溫度的熱電偶	27
圖 2-9	FDS 模擬座標原點	27
圖 2-10	Type-C 火源熱釋放率曲線	28
圖 2-11	Type-D 火源熱釋放率曲線	28
圖 2-12	Type C 爐溫升溫曲線比較圖	29
圖 2-13	Type D 爐溫升溫曲線比較圖	29
圖 2-14	FDS 模擬爐溫測點位置示意圖	30
圖 2-15	Type C 爐溫測點 AN17、18、19、21 實驗值與 FDS 值比較	30
圖 2-16	Type-C 爐溫測點 AN22、23、28、29 實驗值與 FDS 值比較	31
圖 2-17	Type-C 爐溫測點 AN30、32、33、34 實驗值與 FDS 值比較	31
圖 2-18	Type-C 爐溫測點 AN35、36、37、41 實驗值與 FDS 值比較	32
圖 2-19	Type-C 爐溫測點 AN42、46、48、51、52 實驗與 FDS 值比較	32
圖 2-20	Type-D 爐溫測點 AN17、18、19、21 實驗值與 FDS 值比較	33
圖 2-21	Type-D 爐溫測點 AN22、23、28、29 實驗值與 FDS 值比較	33
圖 2-22	Type-D 爐溫測點 AN30、32、33、34 實驗值與 FDS 值比較	34
圖 2-23	Type-D 爐溫測點 AN35、36、37、41 實驗與 FDS 值比較	34
圖 2-24	Type-D 爐溫測點 AN42、46、48、51、52 實驗值與 FDS 值比較	35
圖 2-25	平板式測溫器之構成	35

圖 2-26	鋼材表面測溫點佈設	36
圖 2-27	鋼柱試體配置	37
圖 2-28	鋼梁試體配置	37
圖 2-29	鋼柱表面溫度比較	38
圖 2-30	鋼梁表面溫度比較	38
圖 3-1	非耦合分析法流程圖	46
圖 3-2	Type-C 托梁式彎矩接頭試體設計圖	47
圖 3-3	Type-C 托梁式彎矩接頭試體細部設計圖	48
圖 3-4	Type-C 托梁式彎矩接頭試體細部設計圖	49
圖 3-5	Type-D 托梁式彎矩接頭試體設計圖	50
圖 3-6	Type-D 托梁式彎矩接頭試體細部設計圖	51
圖 3-7	模擬試體載重及邊界條件示意圖	52
圖 3-8	擷取斷面編號位置	53
圖 3-9	Type-C 實尺寸 ABAQUS 熱傳結果	54
圖 3-10	Type-C 實尺寸柱斷面溫度 TC1~5 實驗值與分析值比較	54
圖 3-11	Type-C 實尺寸梁斷面溫度 TB1~5 實驗值與分析值比較	55
圖 3-12	Type-C 實尺寸梁斷面溫度 TB6~9 實驗值與分析值比較	55
圖 3-13	Type-D 實尺寸 ABAQUS 熱傳結果	56
圖 3-14	Type-D 實尺寸柱斷面溫度 TC1~5 實驗值與分析值比較	56
圖 3-15	Type-D 實尺寸梁斷面溫度 TB1~5 實驗值與分析值比較	57
圖 3-16	Type-D 實尺寸梁斷面溫度 TB6~9 實驗值與分析值比較	57
圖 3-17	Type-C 與 Type-D 斷面 TB9 溫度實驗值比較	58
圖 3-18	FDS 模擬試驗爐內空間分布	58
圖 3-19	變形量測位置	59
圖 3-20	Type-C 實驗與分析破壞模式比對	59
圖 3-21	Type-C 變形(DB4)-時間歷時曲線圖	60
圖 3-22	Type-C 變形(轉角)-時間歷時曲線圖	60

圖 3-23	Type-D 實驗與分析破壞模式比對	61
圖 3-24	Type-D 變形(DB4)-時間歷時曲線圖	61
圖 3-25	Type-D 變形(轉角)-時間歷時曲線圖	62
圖 4-1	各接頭型式	68
圖 4-2	彎矩容量投影圖	69
圖 4-3	側板處所提供之彎矩容量示意圖	69
圖 4-4	側板式補強尺寸圖	70
圖 4-5	側版遮蔽造成接頭區溫度降低	70
圖 4-6	普通鋼側板補強普通鋼托梁之升溫歷時曲線	71
圖 4-7	側板接頭火害分析破壞模式	72
圖 4-8	側板加勁與一般接頭變形(DB4)-時間歷時曲線圖(Type-C)	72
圖 4-9	側板加勁與一般接頭變形(轉角)-時間歷時曲線圖(Type-C)	73

摘要

關鍵字：熱傳分析、結構分析、火災模擬、溫度

一、研究緣起

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。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，實驗的數據給予建築物經實際火害後相當好的比對與驗證，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。

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程序之建立有其必要性。

二、研究方法及過程

應用 FDS 進行本所複合爐火場模擬建置，並以火場環境模擬取得之結構表面溫度歷時數據作為結構行為分析之輸入資料。為了能準確的預測火勢發展與結構熱傳與強度折減的情形，本研究將分析建築物梁柱系統，利用 FDS 火災模擬軟體分析火災中之熱流場，並將火災對建築物之熱傳與力學行為效應，搭配結構有限元素軟體計算，並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，最後提供建築物受火害後結構強度估算程式供參考應用。並配合本所 98 委辦案「鋼樑構造以不同性能基準判定耐火性

能之研究」之實驗規劃，並另行以小型耐火爐規劃進行鋼柱火害實驗，搭配 Forum 建議之平板式測溫計量測爐溫，以符合 ISO834 之標準升溫曲線進行鋼樑溫度、被覆材與構件變形等量測與分析比對。

三、重要發現

(一)由實驗結果可知，於一樣之標準爐溫升溫狀態下，利用平板式測溫器

控制爐溫所造成之鋼材表面溫度，其升溫速率較利用熱電偶控制爐溫者

快，惟到實驗 1 小時後，兩者溫度差異甚小。

(二)平板式測溫器於安裝時較 K-type 測溫棒不易，且因其端部為一板狀，

倘試驗過程中損害，並無法直接抽回更換，如屬紀錄性質尚無影響實

驗進行，如為控制爐溫點，則試驗結果將有所差異，因此在實驗操作

上風險較高。

四、主要建議事項

建議一

鋼結構火害實驗進行前之規劃與試體破壞評估:立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

利用虛擬之複合爐結合 FDS 與結構分析軟體，可建構完整對於火災－結構(Fire- Structure)分析介面與整合，對於實驗進行前之規劃與試體破壞情形，得以先行分析得知，予以設計妥適安全設備(如適當側撐等)，以維護試驗進行與爐體設備安全。

建議二

側板式梁柱耐震接頭火害行為研究:中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

側板式梁柱耐震接頭設計於接頭區所造成之遮蔽效應，接頭鋼梁溫度明顯低於一般接頭，其破壞模式亦如預期發生於遠離接頭區，避免無法發揮原有之韌性之行為，而經分析比對一般接頭與側板接頭火害行為可發現，不論在梁端點變形或梁柱相對轉角上，不僅符合耐震要求，更可提升結構耐火時效。因此，該接頭之具體實驗規劃與進行有其研究價值。

Abstract

The Fire Dynamics Simulator (FDS) has been used to reconstruct fire scenario and proceed with the heat transfer analysis to study the behavior of structural element in fire. First, using the FDS to build a virtual furnace of the full-scale test with H-beam to Box-column steel moment connection in Architectural and Building Research Institute (ABRI). The temperature distribution of specimens on the exposed surface has been calculated by FDS and deal with the heat transient analysis by the finite element software (ABAQUS). At last, comparing the test and analytical results to discuss the suitability of using FDS and ABAQUS to predict the non-uniform temperature distribution on the specimens. The different material properties of steel, SN490B and SN490C-FR, are used in the test. The material properties of steel at high temperature are adopted from the material test and relevant documents in this study.

Different shapes and two material properties of beams with Box-column to perform all the analytic cases. We could make a brief result from the study that the effects of heat transfer analysis in the beginning maybe under predict the temperature of specimens. However, the temperature curves have fitted the test result in an accepted agreement. Therefore, the method of using FDS and ABAQUS to predict the performance of temperature distribution on specimens in fire is reasonable.

第一章緒論

第一節研究緣起與背景

在過去人們對於火災的警覺性以及火災相關法律的不完全，常常導致火災一發生，便會損失大量生命財產，有鑑於此，漸漸有許多學者開始對火災作探討，進行相關試驗。過去早期以實驗為主，實體試驗雖然較為準確，但所費不貲且費時，因此也開發出了許多對於火災分析的相關軟體，如 Fire Dynamics Simulator (FDS)等，而如今隨著科技迅速發展，電腦處理速度也越來越快，因此以分析軟體來先行預測也逐漸變為主要趨勢。

之前美國 911 事件，雙子星大樓倒塌，並非是飛機撞擊引起，而是由於瞬間大量汽油起火燃燒產生高溫，鋼材承受不了高溫而導致大樓崩毀。有鑑於此，美國 NCST (National Construction Safety Team) 提出了未來應對於真實火災與建築結構因火災產生反應之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。一般火災模擬軟體大致以模擬空間氣場溫度分布、濃度等狀況為主要目標，但對於結構建築有何影響並無一分析介面或軟體可供參考，為了能對火場狀況更加了解，諸如物件延燒、結構撓曲等變化，建立火災-結構(Fire-Structure)分析介面是目前探討的重點。

第二節文獻回顧

火災軟體從發表以來，至今已有許多使用者應用相關防火工程研究，在文獻上，陳朝慶(2001)以CFD模式對半導體廠房進行火災模擬，因其無塵室環境特殊，且有許多可燃性及易燃性氣體或液體，因此依據容易發生火災的器材進行模擬。在民國87年有劉君逸(1998)對三維單房間內火災的模擬，探討火源條件、通風狀況、牆壁狀態對火災的影響。楊育荃(2002)則以模擬軟體FDS透過立體停車場及一棟辦公型大樓的其中兩層作模擬，分析格點與邊界條件設定不同所產生的結果。另外還有蔡清雄(2004)也使用FDS去模擬核電廠內相鄰開關箱室的火災情境，比較兩房間氣場溫度，藉此了解是否會達到儀器損壞溫度。另外在評估室內裝修材料的防火性能測試中，ISO 9705 全尺寸房間試驗是最能表現出材料於真實火場行為而備受國際認可，但此試驗耗費高且費時，因此利用就有黃雄義(2005)使用FDS去模擬ISO 9705全尺寸房間試驗，一開始進行最佳格點尺寸及配置條件，之後決定材料的熱屬性參數，最後以實際ISO 9705房間進行石膏板及耐燃合板實驗並與模擬結果比對。黃育祥(2005)探討現行火災調查進行方式及未來發展趨勢，以FDS進行火災模擬，並討論FDS相關參數。蕭培黃(2007)對火災模擬器進行研發與製作。陳明宗(2008)以實際案例作火害分析，先以FDS重建火場狀況，再以對外開口時間、房間隔間牆材質以及改變主火源類型進行比較火場狀況。林誠興與王士承(2007)也以FDS模擬實際案例「卡爾登理容院」火災案例來作火災模擬研究，首先以格點獨立性分析的方式找出

最適模擬之格點數，再以包廂隔板之汽化熱、一樓包廂天花板開口變動的情形，配合火場實際情境來重建火場，主要以溫度場、火流方向與濃煙擴散情形來評估人員逃生時間，藉此了解此火場中人員喪生之主因，分析影響火場之重要參數。

以上為電腦防火軟體FDS應用的相關文獻，但為了能更進一步探討火災如何對結構構件產生變形或倒塌等行為，已有若干學者開始著手進行相關研究，建立火災-結構(Fire-Structure)的分析介面，像是Wickstrom et al.(2007)提出絕熱表面溫度的概念；在Duthinh et al.(2008)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(2009)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(林誠興(2006))，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.(2004)透過FDS與ABAQUS分析火害引起氣相環境與固相(如結構構件)間的邊界條件；張永恆(2007)以FDS進行火場研究，再以ANSYS進行結構分析。

第二章複合爐火場模擬建置與平板測溫器之應用

FDS 可以模擬空間中的氣場溫度變化等等，但現今所需要的不僅僅是溫度變化，因伴隨著火災的發生，火災溫度對於建築物整體結構亦有所影響。一般在火災過後，對建築物均會鑑定其結構強度衰減程度，因此在模擬時，如能對於結構強度變化上也能加以模擬，即 Fire-Structure 介面，對於火災後建築的鑑定，亦有所幫助。以下對 Fire-Structure 介面做個說明。

第一節 Fire-Structure 介紹

自 911 過後，美國 NIST 提出未來應整合火災-結構分析介面，因一般火場模擬軟體僅能得知空間的氣場溫度、濃度、速度等資料，無法同時得知結構物的損害狀況，因此建議能同步進行結構分析比較，因此國外由 NIST(Duthinh and McGrattan(2008))提出由 AST(應用絕熱表面溫度)取得結構表面溫度歷時，以建立火災-熱傳-結構之分析介面。

本次研究是利用 FDS 火災模擬軟體來分析局限空間火災溫度成長歷時，探討建築物本體結構表面之溫度變化，並運用結構非線性有限元素分析軟體進行三維暫態熱傳分析。一開始先以結構軟體建立欲分析案例的模型，輸出 INP 檔，之後在 INP 檔內“PART”的部分，此為各個構件(梁、柱等等)的全部節點編號及座標，依序將各個構件全部節點編號及座標各輸出一個 Excel 檔，接著在 INP 檔內的“SURFACE”部份，這是構件的外表面節點編號，同樣將此部分依序輸出成 Excel 檔，如此一來各構件各自有兩個

Excel 檔，一個為全部節點編號及座標，另一個為表面節點編號。接著使用第一個 MATLAB 小程式“FIRE-1”，讀取兩個 Excel 檔，將外表面的節點及座標轉換成 FDS 的輸入格式並判定溫度方向，以及輸出之後 INP 檔的對應編號。所需要的節點座標取得之後，接著進行 FDS 的建模，將參數設定完畢之後便可開始進行火場分析。

分析完畢後，可得到許多 Excel 檔，此為各受熱面節點的溫度歷時，透過第二個 MATLAB 小程式“FIRE-2”，將溫度歷時數據轉換成 INP 檔的輸入格式，以及輸出對應編號的邊界條件，最後再將之前 MATLAB 小程式“FIRE-1”所得到的 INP 檔對應編號，連同溫度歷時及邊界條件輸入至 INP 檔，即可開啟結構程式，進行暫態熱傳分析，最後與實驗值進行比對驗證。

流程圖如圖 2-1 所示。

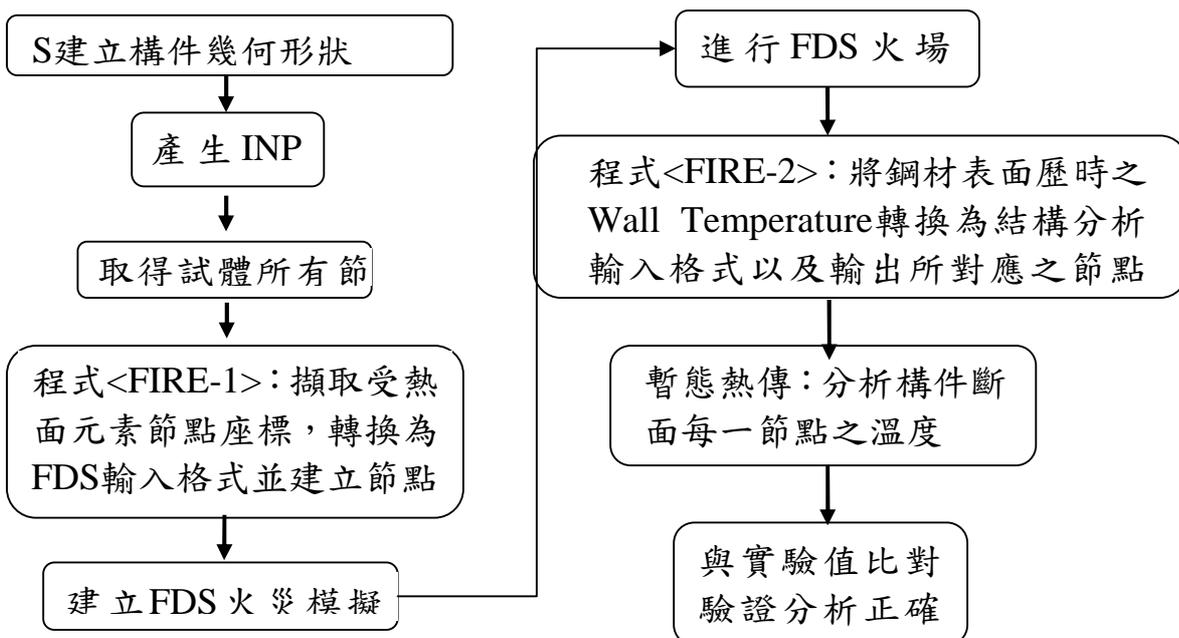


圖 2- 1 Fire-Structure 分析流程圖

第二節 Wall-Temperature 介紹

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”(牆的溫度)作為試體表面節點溫度，透過FDS模擬計算，求得其歷時變化，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.(2008b))文中提到對“Wall-Temperature”做個說明。

邊界條件如下：

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

其中

$T_{s,i}$: 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

元素邊界位於第 x_i 點

下一個時間點的熱對流通量 : $\dot{q}_c^{n(n+1)} \approx \dot{q}_c^{nn} - h(T_{s,1/2}^{n+1} - T_{s,1/2}^n)$

下一個時間點的熱輻射通量 : $\dot{q}_r^{n(n+1)} \approx \dot{q}_r^{nn} - 4\varepsilon\sigma T_{s,1/2}^{n3} (T_{s,1/2}^{n+1} - T_{s,1/2}^n)$

其中

$$\text{熱對流係數} : h = \max\left(C|T_{gas} - T_w|^{1/3}, \frac{k_{air}}{L} 0.037 \text{Re}_L^{4/5} \text{Pr}^{1/3}\right)$$

unit : $W / m^2 / K$

C : 經驗常數，垂直面為 1.31；平行面為 1.52

k_{air} : 氣體熱傳導係數

Re_L : Reynolds number，流體流動中慣性力與黏滯力
比值

Pr : Prandtl number，設為 0.7

ε : 放射率(emissivity)

σ : Stefan-Boltzmann 常數

“wall temperature” (WT) 定義為：

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

其中

1/2 為元素 cell 的中間位置

第三節 鋼材之高溫材料性質

本研究模擬採用之鋼材試體，以 H 型梁-箱型柱彎矩接頭高溫試驗為主，使用鋼材為 SN490B 耐震級鋼及 SN490C-FR 耐火級鋼。我國 CNS 13812 G3262-03 建築結構用鋼標準中，此 SN 級鋼材主要用於結構耐震補強上，等級分為 A、B、C 三種等級，是以耐震補強及銲接來做區分。SN490B 鋼材目前為建築結構一般廣泛使用防耐震之鋼材，而 SN490C-FR 耐火級鋼材是由中鋼公司自行研發而成，不僅有著 SN490C 耐震級鋼材的耐震特性，另外當溫度達到 600°C 時，據稱仍保有規範訂定降伏強度三分之二的耐火特性。而耐火鋼在常溫下與一般鋼材性能相差不多，在高溫時才會顯現其耐火性能，另外在 Liu et al.(2002)文中的實驗數據也有此種現象。

熱傳導係數

熱傳導 (Thermal Conductivity) 在三維的等方向均勻介質裡的傳播方式可用以下方程式表示：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = k(T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}) \quad (2-3)$$

其中

$T = T(t, x, y, z)$ 表溫度，為時間 t 與空間 (x, y, z) 之變數函數。

$\partial T / \partial t$ 是空間中一點的溫度對時間的變化率。

T_{xx}, T_{yy}, T_{zz} 的溫度對三個空間座標軸的二次導數。

k 為熱傳導係數，決定於材料的熱傳導率、密度與熱容。

由上述方程式可知，熱傳導係數- k 的計算非常繁雜，依 Eurocode-3 (1995) 規範所建議的計算公式如下：

$$\text{當 } 20^{\circ}\text{C} \leq T < 800^{\circ}\text{C} \text{ 時， } k = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T \quad \text{W/m}^{\circ}\text{C} \quad (2-4)$$

$$\text{當 } 800^{\circ}\text{C} \leq T < 1200^{\circ}\text{C} \text{ 時， } k = 27.3 \quad \text{W/m}^{\circ}\text{C} \quad (2-5)$$

其中 T 為鋼材的溫度 ($^{\circ}\text{C}$)

依公式所得熱傳導係數曲線如圖 2-2 所示。

密度

一般業界所認定的密度值不同但差異不大，而國內工會係採用歐美公會的公認值，故使用 Eurocode-3 (1995) 規範建議採用鋼材密度

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3 \text{。}$$

熱膨脹係數

由於 H 型梁-箱型柱彎矩接頭高溫試驗並無提供鋼材各溫度下膨脹係數之資料，本文採用 Eurocode-3 (1995) 規範所建議，熱膨脹係數採用

$$\alpha = 14 \times 10^{-6} (\text{}^{\circ}\text{C})^{-1} \text{。}$$

比熱

單位質量物質升高 1°C 時所需的熱能稱為該物質的比熱容量，簡稱『比熱』 (Specific Heat- C)，亦是試體的材料特性，圖 2-3 為各鋼材於各溫度下的比熱值，依規範所建議的計算公式如下：

當 $20^{\circ}\text{C} \leq T < 600^{\circ}\text{C}$ 時，

$$C = 425 + 7.73 \times 10^{-1} T - 1.69 \times 10^{-3} T^2 + 2.22 \times 10^{-6} T^3 \quad \text{J/kg}^{\circ}\text{C} \quad (2-6a)$$

當 $600^{\circ}\text{C} \leq T < 735^{\circ}\text{C}$ 時，

$$C = 666 + \frac{13002}{738 - T} \quad J/kg^{\circ}\text{C} \quad (2-6b)$$

當 $735^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C}$ 時，

$$C = 545 + \frac{17820}{T - 731} \quad J/kg^{\circ}\text{C} \quad (2-6c)$$

當 $900^{\circ}\text{C} \leq T < 1200^{\circ}\text{C}$ 時，

$$C = 950 \quad J/kg^{\circ}\text{C} \quad (2-6d)$$

其中 T 為鋼材的溫度 ($^{\circ}\text{C}$)

熱對流與熱輻射

1. 對流熱傳遞係數(Convection Heat Transfer Coefficient)：

熱對流傳遞係數不是一個材料常數，而且常視為一個流體性質，如果熱對流參數與及受熱物件之表面幾何有關，則熱對流係數與溫度相依，而且在火災的任一階段皆會發生，尤其在溫度較低熱輻射較少之階段尤為重要。

2. 熱輻射(Radiation)：

熱輻射部分，需使用的參數有兩個，通常輻射熱傳由放射率(emissivity)決定，通常介於 0~1 間，與溫度高低、放射角度與波長相關，工程應用上常引用 Eurocode-3(1995)視放射率與波常無關且為一定值，當放射率為 0 時代表熱輻射完全被反射回來，當為 1 時則視熱輻射完全被吸收，因此放射率(emissivity)越低時代表材料升溫過程將趨緩。在 Gardner 與 Ng(2006)中建議一般鋼材之放射率為 $\varepsilon = 0.7$ ，另外需決定的另一參數 Stefan-Boltzmann 常數 σ 則依 Eurocode-3(1995)建議取 Stefan-Boltzmann

常數 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ 。

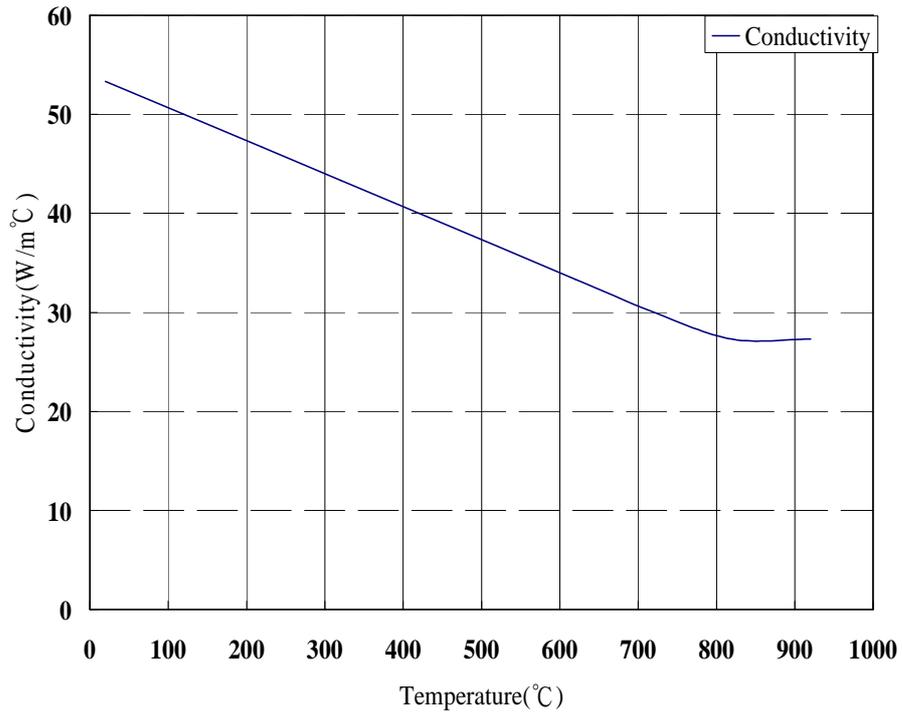


圖 2-2 各溫度下鋼材的熱傳導係數值

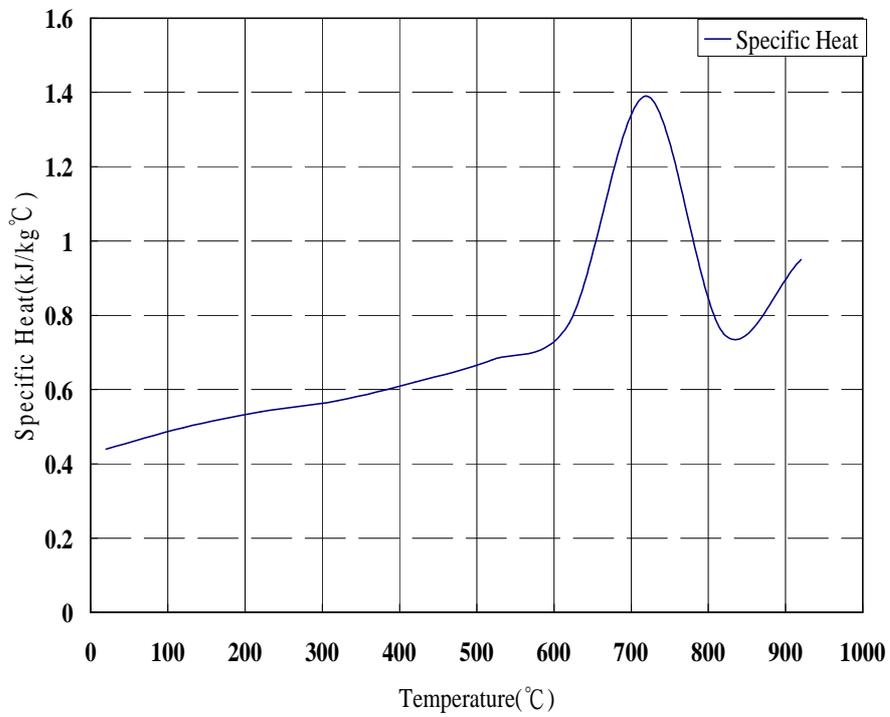


圖 2-3 各溫度所對應的比熱值

第四節 FDS 參數設定

本研究是以 H 型梁-箱型柱彎矩接頭高溫試驗為基礎做火場模擬，因此在模擬空間設定上是模擬建築研究所的大型複合實驗爐，如圖 2-4 所示，其大小為 $9.0 \times 4.8 \times 5.0\text{m}$ ，網格設定上考量到計算時間，取 $90 \times 48 \times 50$ ，也就是 X 向切割 90 等份，其它向依此類推，因此是將整個空間以 $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ 為一個網格；試體加熱裝置，是散佈在實驗爐內部兩面牆上的噴火口，下一節會詳細說明；另外實驗試體部份是模擬 Type-C 及 D 兩種，尺寸大小在 3.7 節會說明，另外還有安全側撐裝置，這是在試驗時，為了預防梁產生側向扭轉挫屈現象，因此在試體的梁端兩側加裝安全側撐裝置，幾何大小為 $50 \times 5 \times 70\text{cm}$ ，如圖 2-5 所示；試體燃燒時間部份，因實尺寸試驗時間為 30 分鐘，因此 FDS 設定為 30 分鐘，但後續有針對不同的梁型式做分析，其中一個梁長度較長，為了後續結構分析，因此試驗時間增為 60 分；排氣孔部份，實驗爐內部空間前後為一高一低，有兩個排氣孔設置在爐內中間低地板往高地板的牆面上，大小為 $50 \times 50\text{cm}$ ，排氣速率為 4m/s ，其位置可參考圖 2-6。其它邊界設定如表 2-1 說明。圖 2-7 為本文研究設定 FDS 完成分析的火場情境示意圖。

熱源位置及爐溫升溫曲線比較

熱源位置是在實驗爐內的兩旁牆上，可參考圖 2-8，有 30 個噴火孔，幾何大小為 $20 \times 10 \times 20\text{cm}$ ，彼此間隔約 $100 \sim 120\text{cm}$ ，表 2-2 為 FDS 模擬中的位置座標，與圖 2-6 相對照，座標原點以梁柱接頭試體柱的底端四角某一角

為原點(圖 2-9)。熱源熱釋放率上，本文模擬為實驗 Type-C 及 Type-D 兩種，因此在 FDS 設定上其熱源熱釋放率歷時圖如圖 2-10、11 所示；爐溫升溫曲線方面，實驗是依照 ISO 834 標準升溫曲線升溫加熱，但是實際升溫曲線並不會完全跟 ISO 834 標準升溫曲線一模一樣，因此本研究使用的升溫曲線並不是使用 ISO 834 標準升溫曲線，而是去依據實驗所得的實驗值來做 FDS 升溫曲線，又因實驗有 Type C 及 Type D 兩種，兩次實驗升溫曲線也不會相同，因此使用 FDS 根據溫度實驗值模擬兩種升溫曲線，兩者時間稍有不同，因試體破壞時間不同，因此 Type-C 實驗爐溫記錄到 26 分，Type-D 則是記錄到 30 分，其分別與 ISO 834 標準升溫曲線及實驗曲線比較圖如下圖 2-12、13 所示。

1. Type-C：可看出實驗值在前 15 分均略低於標準升溫曲線，而 FDS 模擬的升溫曲線，則是在前 10 分鐘和實驗值有些差異，之後則較為吻合。
2. Type-D：實驗值和 Type-C 一樣，前 15 分均略低於 ISO834 升溫曲線，至於 FDS 模擬的升溫曲線，則是與實驗值有著不錯的相似性，比起 Type-C 模擬的升溫曲線還來得更加接近實驗值。

爐溫實驗值與分析值比較

在實尺寸實驗中有量測爐溫的熱電偶(Furnace thermocouples)，主要量測周圍氣場溫度值，其 FDS 座標位置如表 2-3 所示，另外圖 2-14 為 FDS 模擬這些熱電偶於火場情境中的分布位置圖，代號為 AN17、18、19、21...

等等。圖 2-15~24 為 Type-C 及 Type-D 這些熱電偶量測爐內氣場溫度實驗值與 FDS 分析值比較，而表 2-5 是實驗值與分析值的最後溫度與相差值。

由實驗與分析值比較圖可看出氣場溫度一開始上升較快，約在前 5 分鐘上升最快，很快溫度就上升到 5~6 百度，之後升溫速率才漸漸緩慢下來，大約 15 分鐘後開始慢慢趨於平穩，最後溫度幾乎都有達 8 百度以上。另外觀察到 AN21、22、23、32、33、34、41 及 42 這些熱電偶的實驗數據，發現在前 5 分鐘較其他熱電偶升溫速率又來得快些，不只是 Type-C 試驗，Type-D 試驗也有這種現象，而在實驗中這些熱電偶放置位置中間並沒有任何物體阻隔，因此在這些熱電偶位置的熱對流狀況較好，其他熱電偶位置附近因有試體而造成其熱對流較差，所以造成一開始溫度上升時的差異，而 FDS 分析值相比之下，並未突顯出這個現象，但最後溫度相差不多。

在最後溫差的部份，由表 2-5 可看出 AN52 差異是最大的，Type-C 分析值較實驗值低 90.12°C ，Type-D 分析值也較實驗值低 70.93°C ，由表可知 AN52 的座標是在較低的位置，離試體相當靠近，距離最近的噴火口位置是 Burner29，座標位置如表所示，垂直高度比 AN52 稍低，分析值較實驗值低的原因可能是因為此處位置較低，一般熱氣往高處移動，但考慮到噴火口位置，所以也有可能是因為噴火口噴出的火焰較靠近此位置，造成此位置實驗值較高。

由以下分析與實驗值比較圖，整體來說，FDS 分析值模擬的結果還算不錯，趨勢也大致與實驗值相同，唯有一些細節 FDS 可能還需要多加探討，

像是空間中有無物體所造成的熱對流狀況，以及考量到火源是否更加模擬真實的火源，這些都是影響氣場溫度上升的因素。

第五節平板式測溫器之應用

依照 ISO834 或 EN1363-1 於標準升溫曲線下進行構件耐火試驗，其爐內溫度須經由平板式測溫器量得，以減低加熱爐本身構造因素，燃料種類對爐內溫度、熱量分布之影響並使爐內溫度量測能同時對於熱輻射與熱對流之效應較為靈敏，以使溫度控制較精確，而國內 CNS12514 標準除應用熱電偶外亦可採用此一方法。

此裝置之構成、形狀、尺度等規格說明如下：

(1) 平板測溫計係由"冂"型摺疊鋼板、熱電偶及絕緣材料所構成。摺疊鋼板係由長度 $150\pm 1\text{mm}$ ，寬度 $100\pm 1\text{mm}$ ，厚度 $0.7\pm 0.1\text{mm}$ 鎳合金鋼片摺疊加工而成，如圖 2-25 所示。

(2) 測溫用熱電偶線為 CNS 5534 所規定之 0.75 級性能以上直徑 0.65mm 之 K 型熱電偶線，且包封於直徑約 2mm 耐熱不銹鋼鞘管中，其熱接點須位在鞘管頂端處，但與鞘管絕緣。熱電偶頂端須以相同材質小鋼片固定於平板中心點位置，該小鋼片得以銲接或螺釘固定並幫助調整熱電偶位置。若採點銲固定方式，小鋼片尺度須為 $18\times 6\text{mm}$ ，若採螺絲固定方式，其尺度為 $25\times 6\text{mm}$ ，且螺絲須用直徑 2mm 者。摺疊平板與熱電偶組合妥後，須置入無機絕緣墊片，其尺度須為長、寬 $97\pm 1\text{mm}$ 、厚 $10\pm 1\text{mm}$ 、密度 $280\pm 30\text{kg/m}^3$ 。

(3)第一次使用之平板測溫計須經適當老化處理；置於耐火試驗爐在標準加熱溫度—時間曲線條件下曝火 90 分鐘。

(4)平板測溫計之熱電偶及絕緣墊片經過 50 小時爐火加熱後應予以更換。

實驗規劃與初步成果

為初步探討兩種不同測溫設備所造成之鋼材表面溫度影響，試驗規劃如下共計四支試體，鋼材表面溫度量測位置如圖 2-26 所示：

試體編號	鋼柱 BOX 試體	鋼樑 I 試體
爐內溫升控制(熱電偶)	BOX-1	I-1
爐內溫升控制(PT)	BOX-2	I-2

試驗升溫曲線皆依照 CNS12514 規定

$$T=345*\text{Log}(8*t+1)+20$$

由圖 2-28 與 2-29 實驗結果可知，於一樣之標準爐溫升溫狀態下，利用 PT 控制爐溫所造成之鋼材表面溫度，其升溫速率較利用熱電偶控制爐溫者快，惟到實驗 1 小時後，兩者溫度差異甚小。

表 2- 1 FDS 設定參數說明

邊界條件	設定說明
幾何大小	9.0×4.8×5.0m
格點數	90×48×50
模擬時間	30 分鐘(beam4050 為 60 分鐘)
火源	初始熱釋放率為 2390 kW/m^2
通風口	兩個排氣孔，寬 50cm，高 50cm，排氣速率為 4 m/s
實驗爐	周圍牆壁地板天花板材質設為絕熱
梁柱試體	熱傳導係數依圖 2-2 所示，密度為 7850 kg/m^3 ，比熱如圖 2-3 所示。

表 2- 2 FDS 噴火口位置座標

熱源編號	座標範圍(x1,x2,y1,y2,z1,z2) (unit : m)
Burner1	(-1.10,-0.90,-1.70,-1.60,2.90,3.10)
Burner2	(0.20,0.40,-1.70,-1.60,2.90,3.10)
Burner3	(1.50,1.70,-1.70,-1.60,2.90,3.10)
Burner4	(2.9,3.1,-1.70,-1.60,2.90,3.10)
Burner5	(4.2,4.4,-1.70,-1.60,2.90,3.10)
Burner6	(5.5,5.7,-1.70,-1.60,2.90,3.10)
Burner7	(-1.10,-0.90,-1.70,-1.60,1.60,1.80)
Burner8	(0.20,0.40,-1.70,-1.60,1.60,1.80)
Burner9	(1.50,1.70,-1.70,-1.60,1.60,1.80)
Burner10	(2.9,3.1,-1.70,-1.60,1.60,1.80)
Burner11	(4.2,4.4,-1.70,-1.60,1.60,1.80)
Burner12	(5.5,5.70,-1.70,-1.60,1.60,1.80)
Burner13	(-1.10,-0.90,-1.70,-1.60,0.40,0.60)
Burner14	(0.20,0.40,-1.70,-1.60,0.40,0.60)
Burner15	(1.50,1.70,-1.70,-1.60,0.40,0.60)
Burner16	(-1.10,-0.90,2.20,2.30,2.90,3.10)
Burner17	(0.20,0.40,2.20,2.30,2.90,3.10)
Burner18	(1.50,1.70,2.20,2.30,2.90,3.10)
Burner19	(2.9,3.1,2.20,2.30,2.90,3.10)
Burner20	(4.2,4.4,2.20,2.30,2.90,3.10)
Burner21	(5.50,5.70,2.20,2.30,2.90,3.10)
Burner22	(-1.10,-0.90,2.20,2.30,1.60,1.80)
Burner23	(0.20,0.40,2.20,2.30,1.60,1.80)
Burner24	(1.50,1.70,2.20,2.30,1.60,1.80)
Burner25	(2.9,3.1,2.20,2.30,1.60,1.80)

Burner26	(4.2,4.4,2.20,2.30,1.60,1.80)
Burner27	(5.50,5.70,2.20,2.30,1.60,1.80)
Burner28	(-1.10,-0.90,2.20,2.30,0.40,0.60)
Burner29	(0.20,0.40,2.20,2.30,0.40,0.60)
Burner30	(1.50,1.70,2.20,2.30,0.40,0.60)

表 2-3 爐溫測點編號位置座標

爐溫測點	座標(m)	量測點	座標(m)
AN17	(-0.70,-0.10,3.30)	AN34	(5.40,-0.10,2.00)
AN18	(0.50,-0.10,3.30)	AN35	(-0.80,-0.10,0.80)
AN19	(1.40,-0.10,3.30)	AN36	(0.50,-0.10,0.80)
AN21	(2.80,-0.10,3.30)	AN37	(1.40,-0.10,0.80)
AN22	(4.10,-0.10,3.30)	AN41	(5.20,0.70,3.30)
AN23	(5.40,-0.10,3.30)	AN42	(3.90,0.70,3.30)
AN28	(-0.80,-0.10,2.00)	AN46	(0.20,0.70,3.30)
AN29	(0.50,-0.10,2.00)	AN48	(-0.80,0.70,3.30)
AN30	(1.40,-0.10,2.00)	AN51	(0.30,0.70,2.00)
AN32	(2.80,-0.10,2.00)	AN52	(0.30,0.70,0.80)
AN33	(4.10,-0.10,2.00)		

表 2-4 Type-C 爐溫實驗值與分析值 26 分最後溫度與相差值

Type-C	實驗值 最後溫度(°C)	分析值 最後溫度(°C)	相差值(°C) (分析值-實驗值)	誤差%
AN17	852.75	818.88	-33.87	-3.97
AN18	821.18	817.23	-3.94	-0.48
AN19	816.95	838.20	21.25	2.60
AN21	829.25	841.03	11.78	1.42
AN22	838.35	852.07	13.72	1.64
AN23	821.55	851.43	29.88	3.64
AN28	848.48	813.80	-34.67	-4.09
AN29	803.80	816.10	12.30	1.53
AN30	805.13	796.10	-9.02	-1.12
AN32	811.93	820.26	8.33	1.03
AN33	820.78	823.43	2.66	0.32
AN34	814.03	820.15	6.12	0.75
AN35	832.95	774.49	-58.46	-7.02
AN36	825.45	773.76	-51.69	-6.26
AN37	819.78	765.60	-54.17	-6.61
AN41	826.68	846.65	19.97	2.42
AN42	832.15	844.22	12.07	1.45
AN46	821.88	789.29	-32.59	-3.96
AN48	877.63	820.18	-57.45	-6.55
AN51	812.40	783.14	-29.26	-3.60
AN52	827.68	737.56	-90.12	-10.89

表 2- 5 Type-D 爐溫實驗值與分析值 30 分最後溫度與相差值

Type-D	實驗值 最後溫度(°C)	分析值 最後溫度(°C)	相差值(°C) (分析值-實驗值)	誤差%
AN17	864.20	829.80	-34.40	-3.98
AN18	843.70	830.27	-13.43	-1.59
AN19	784.80	840.71	55.91	7.12
AN21	847.50	859.02	11.52	1.36
AN22	858.20	883.57	25.37	2.96
AN23	843.00	870.94	27.94	3.31
AN28	860.70	823.27	-37.43	-4.35
AN29	830.40	827.87	-2.53	-0.31
AN30	818.80	813.70	-5.10	-0.62
AN32	828.30	847.79	19.49	2.35
AN33	840.00	857.76	17.76	2.11
AN34	843.10	850.64	7.54	0.89
AN35	841.30	794.39	-46.91	-5.58
AN36	842.20	788.39	-53.81	-6.39
AN37	835.50	782.15	-53.35	-6.38
AN41	843.80	860.11	16.31	1.93
AN42	847.60	861.95	14.35	1.69
AN46	858.40	812.80	-45.60	-5.31
AN48	892.10	831.82	-60.28	-6.76
AN51	842.20	795.76	-46.44	-5.51
AN52	846.70	775.77	-70.93	-8.38



圖 2-4 大型複合實驗爐



圖 2-5 安全側撐裝置

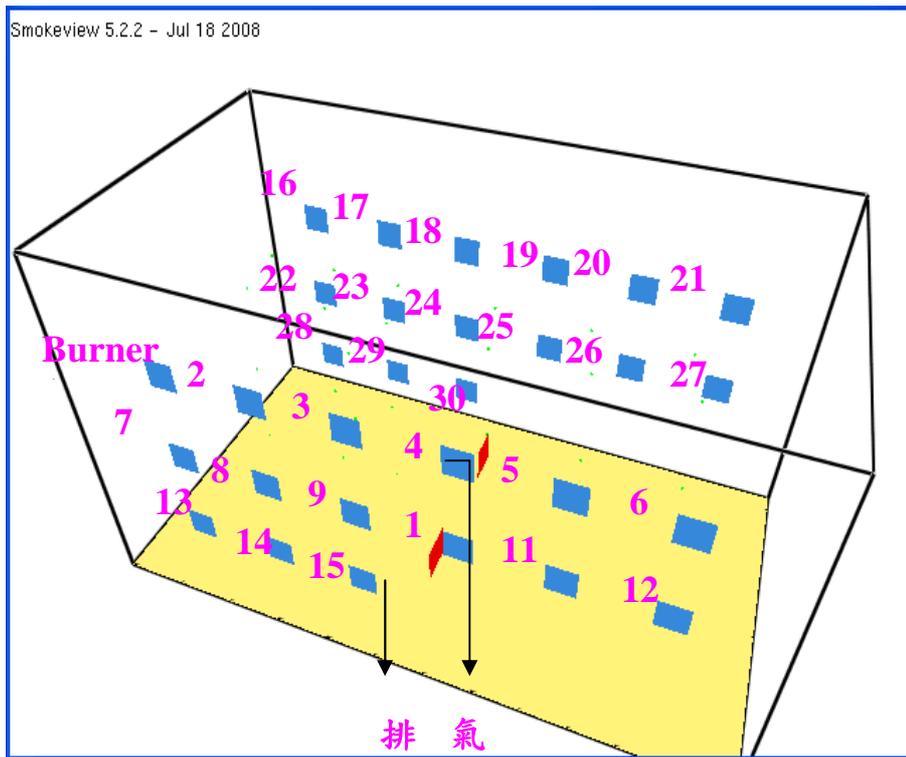


圖 2-6 火源編號及排氣口位置

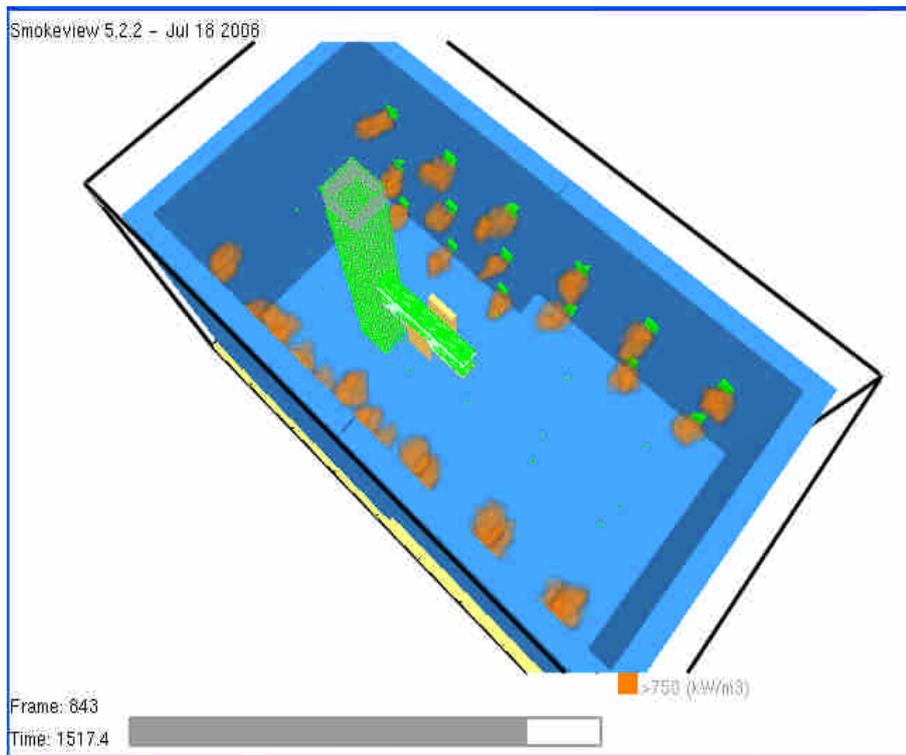


圖 2-7 FDS 虛擬耐火爐情境示意圖

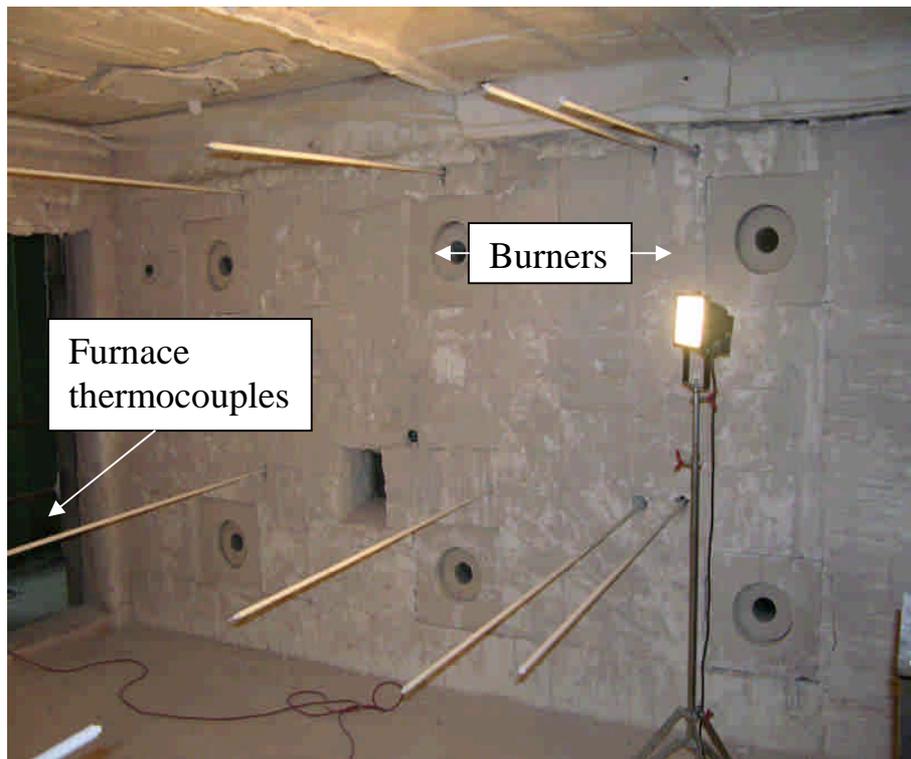


圖 2-8 實驗爐內部噴火孔和量測火爐溫度的熱電偶

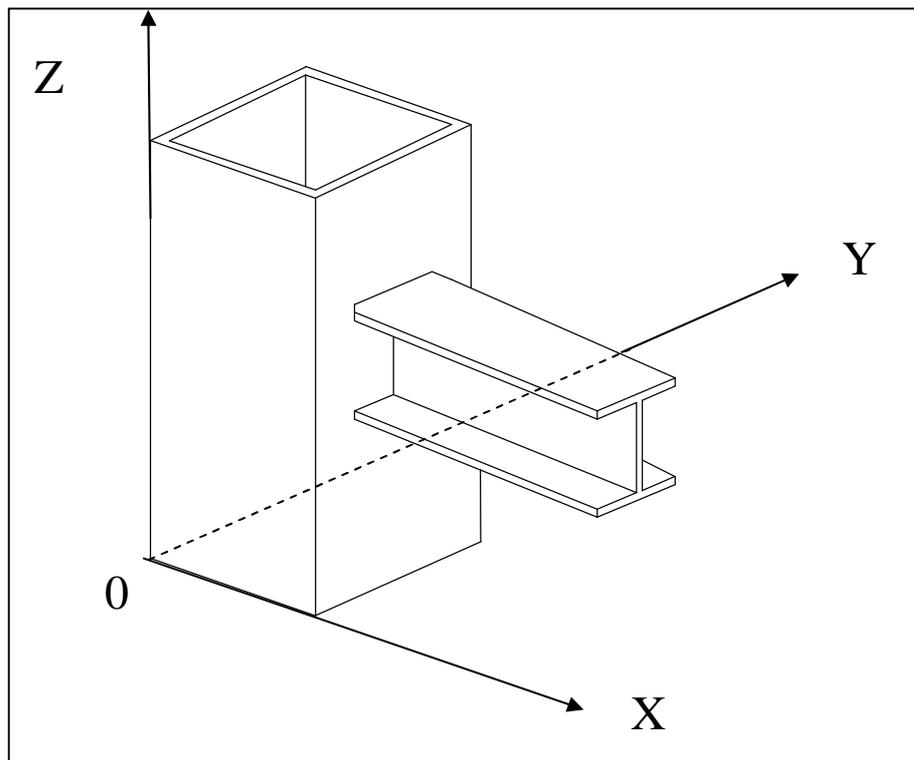


圖 2-9 FDS 模擬座標原點

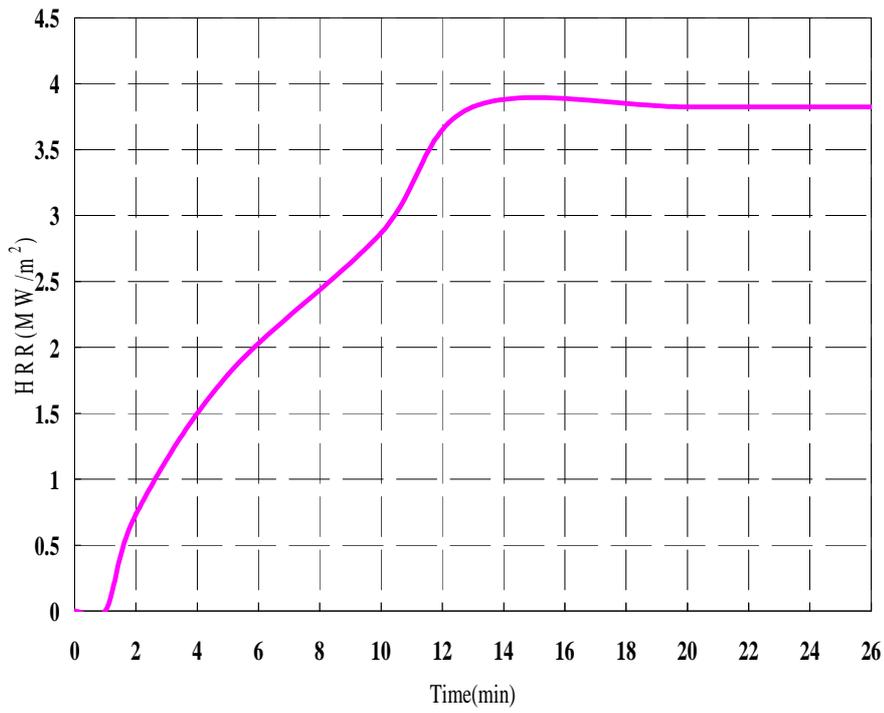


圖 2- 10 Type-C 火源熱釋放率曲線

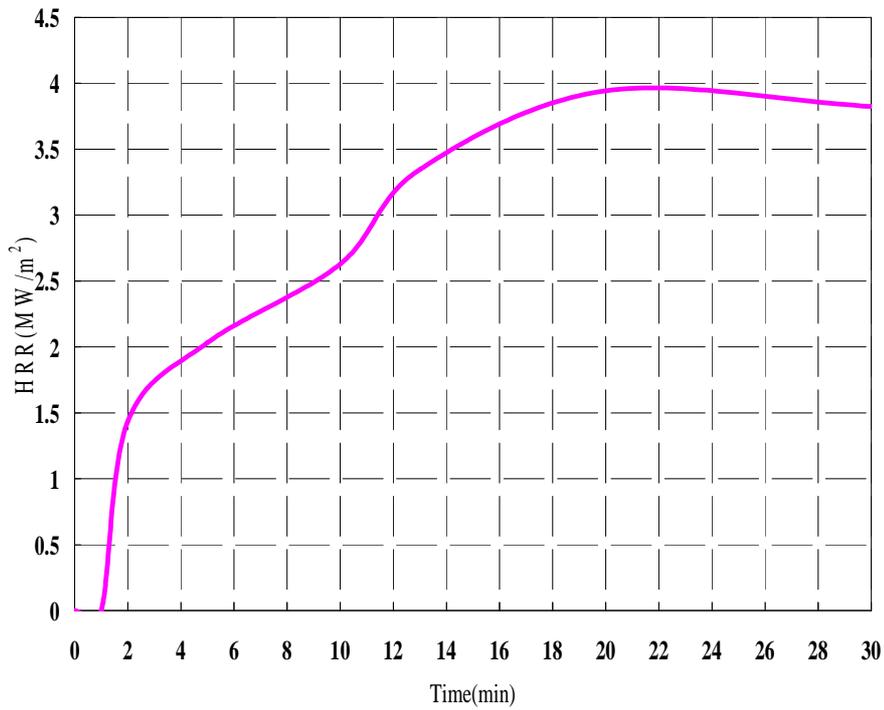


圖 2- 11 Type-D 火源熱釋放率曲線

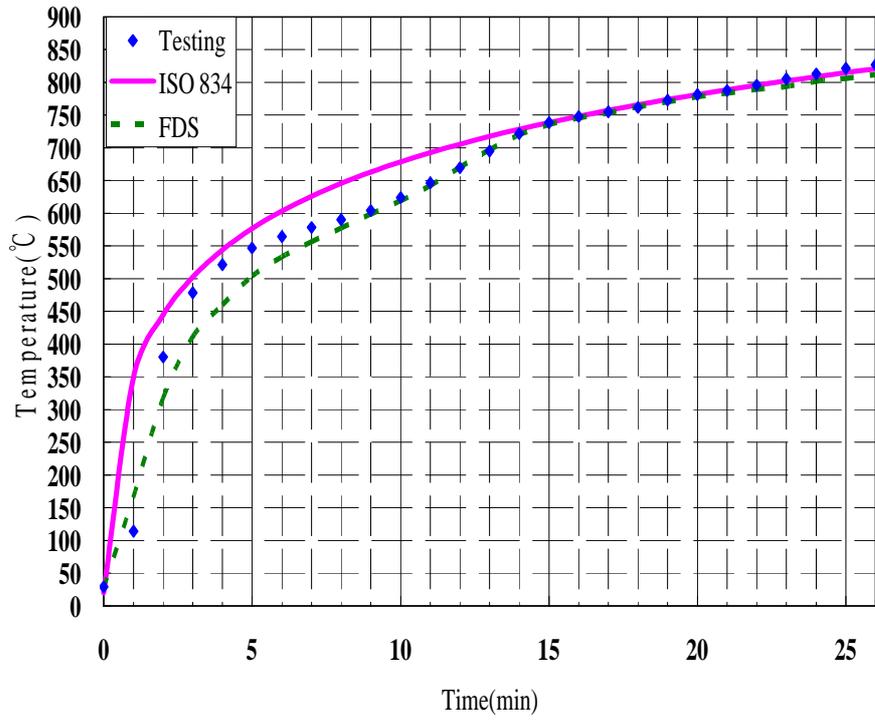


圖 2- 12 Type C 爐溫升溫曲線比較圖

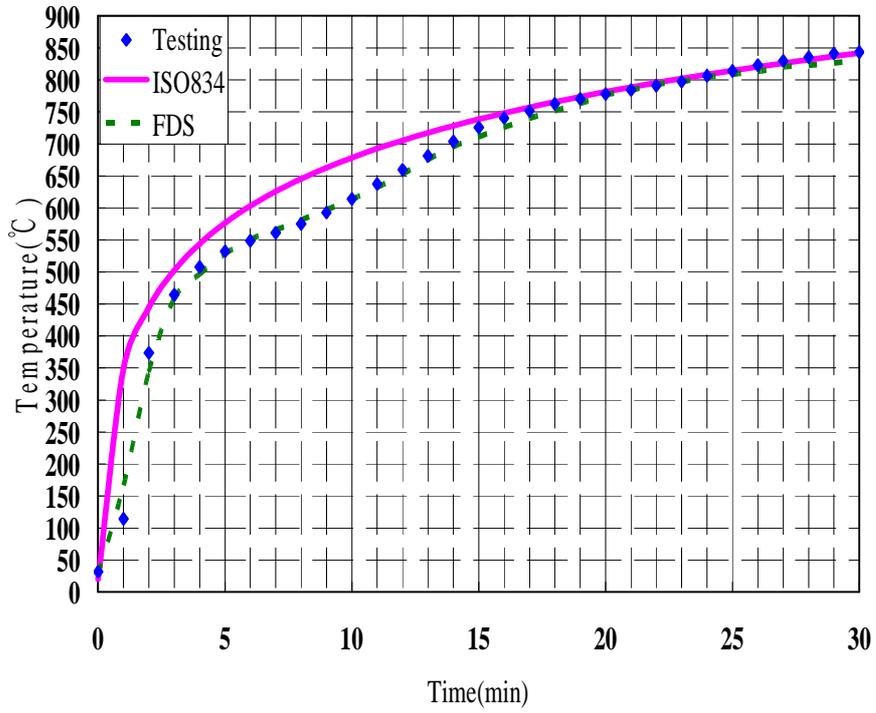


圖 2- 13 Type D 爐溫升溫曲線比較圖

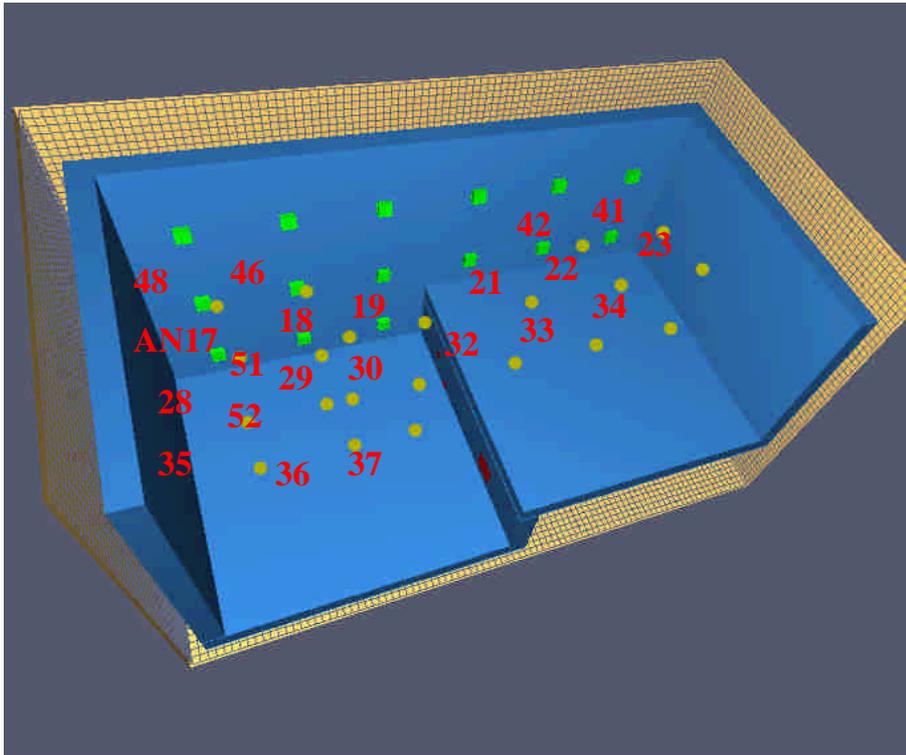


圖 2- 14 FDS 模擬爐溫測點位置示意圖

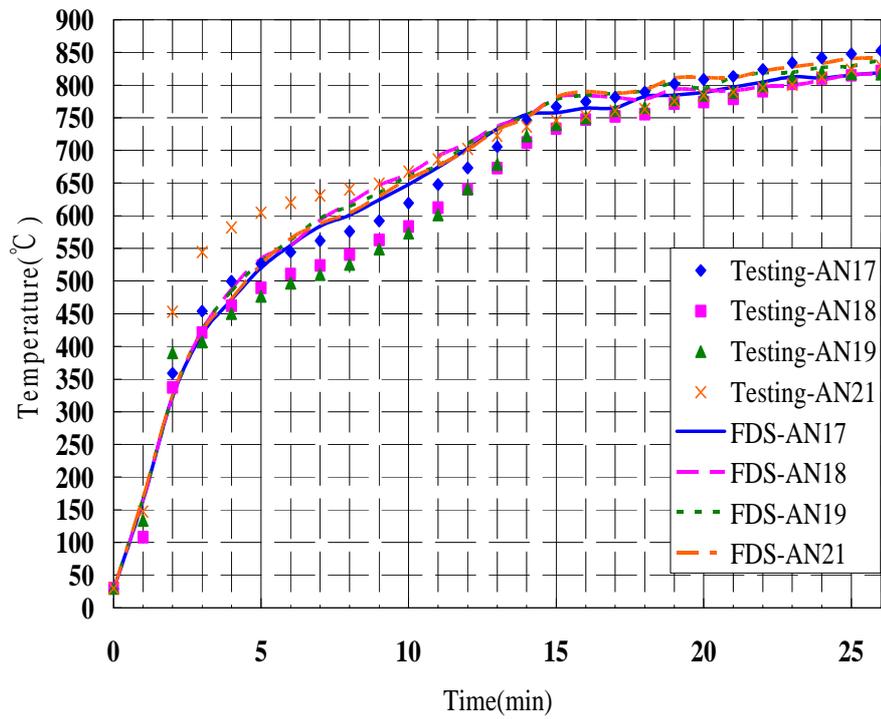


圖 2- 15 Type C 爐溫測點 AN17、18、19、21 實驗值與 FDS 值比較圖

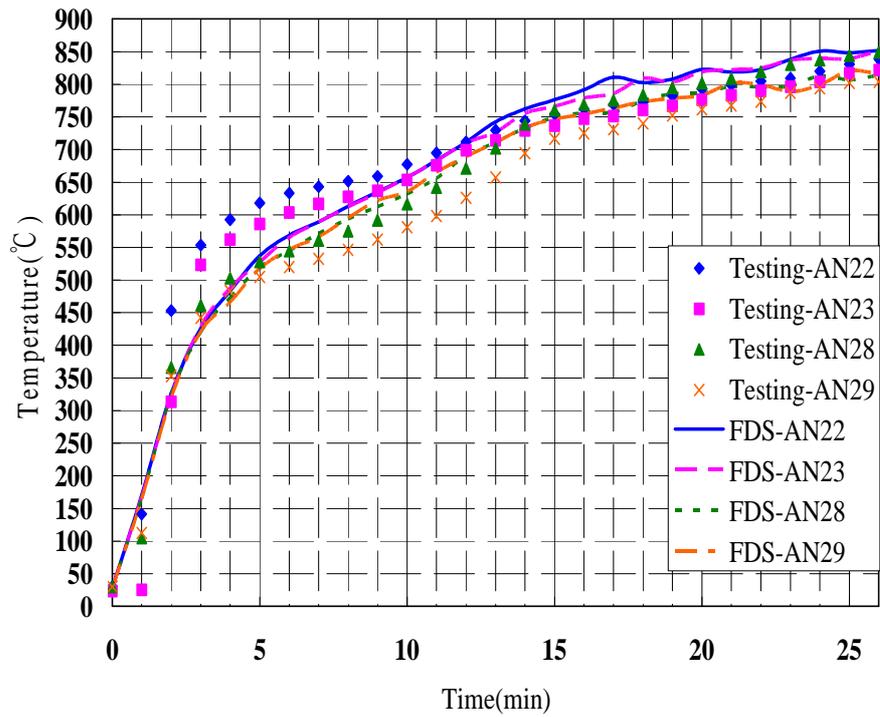


圖 2- 16 Type-C 爐溫測點 AN22、23、28、29 實驗值與 FDS 值比較圖

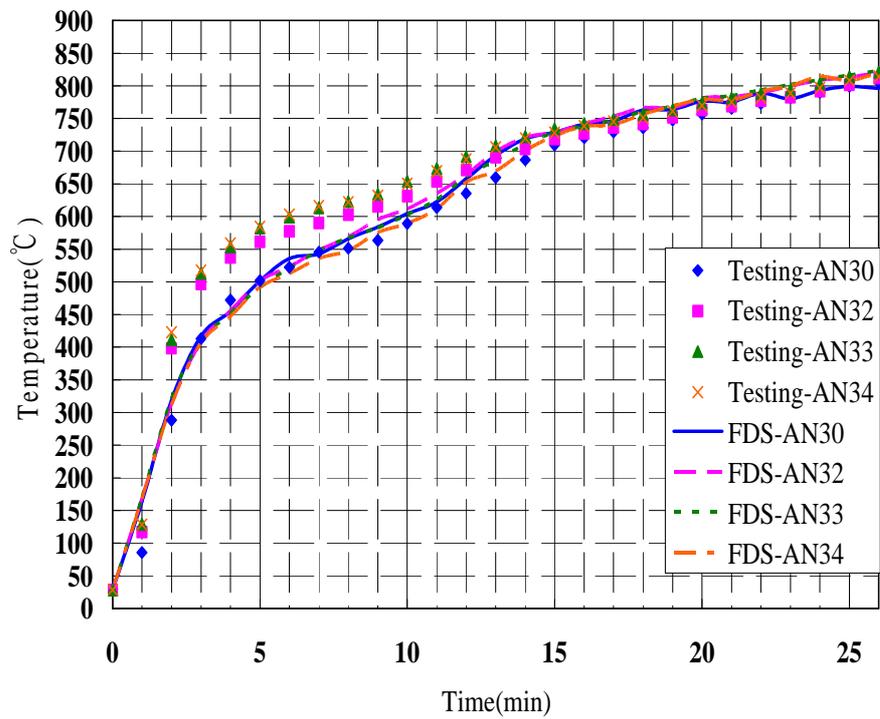


圖 2- 17 Type-C 爐溫測點 AN30、32、33、34 實驗值與 FDS 值比較圖

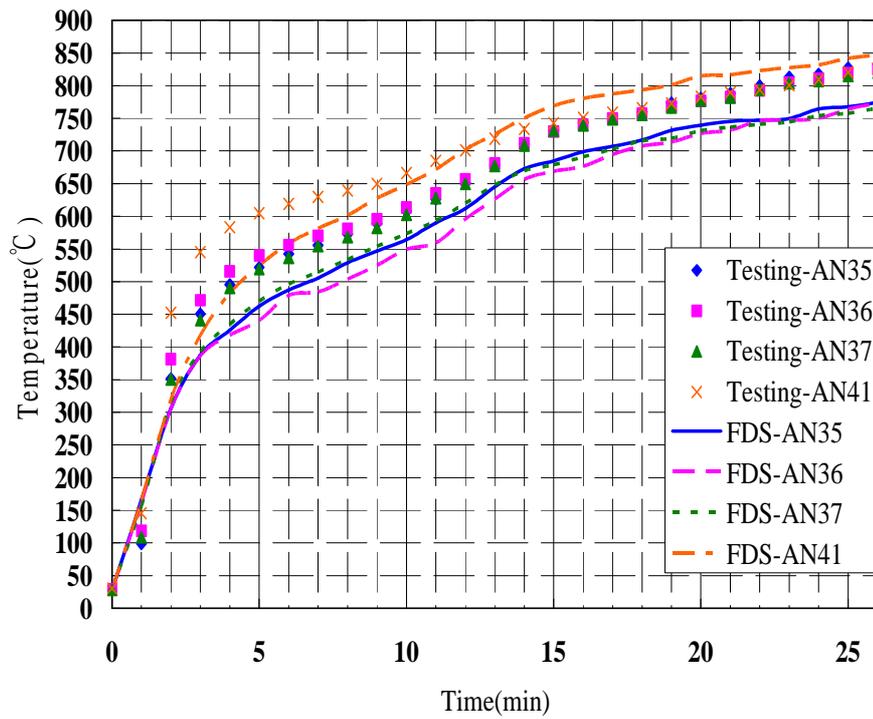


圖 2- 18 Type-C 爐溫測點 AN35、36、37、41 實驗值與 FDS 值比較圖

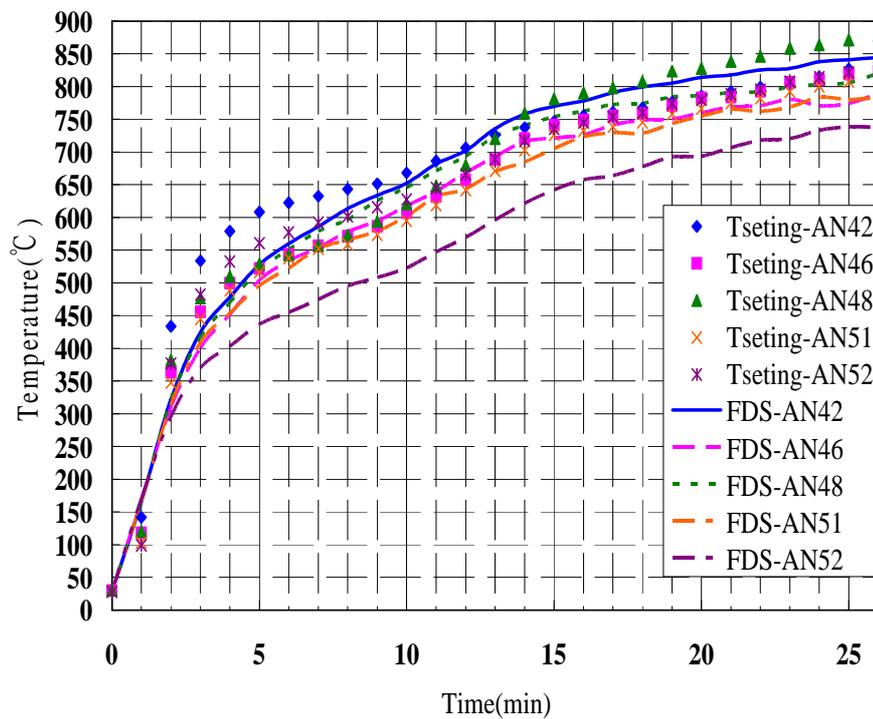


圖 2- 19 Type-C 爐溫測點 AN42、46、48、51、52 實驗值與 FDS 值比較圖

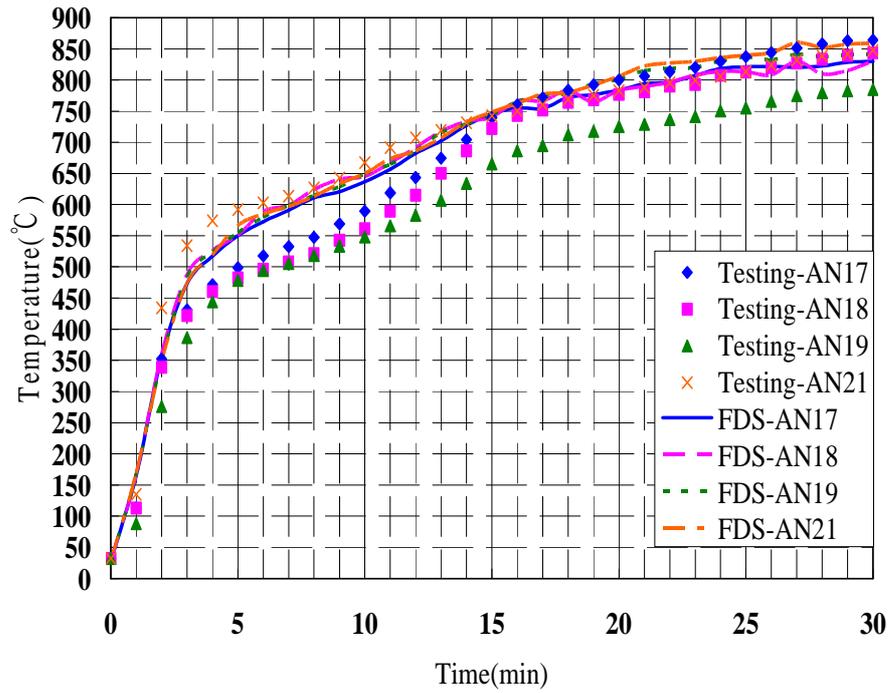


圖 2- 20 Type-D 爐溫測點 AN17、18、19、21 實驗值與 FDS 值比較圖

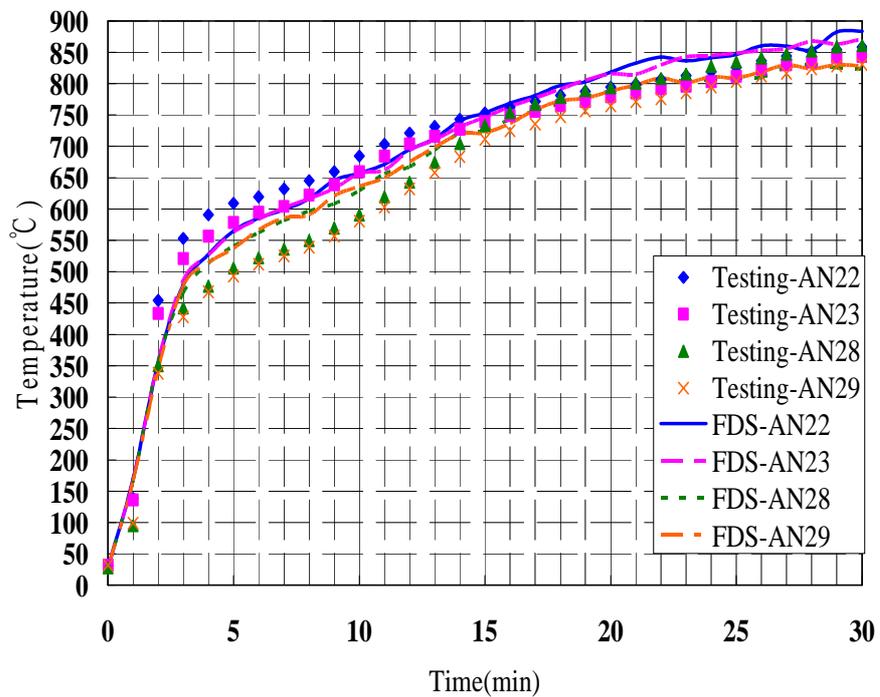


圖 2- 21 Type-D 爐溫測點 AN22、23、28、29 實驗值與 FDS 值比較圖

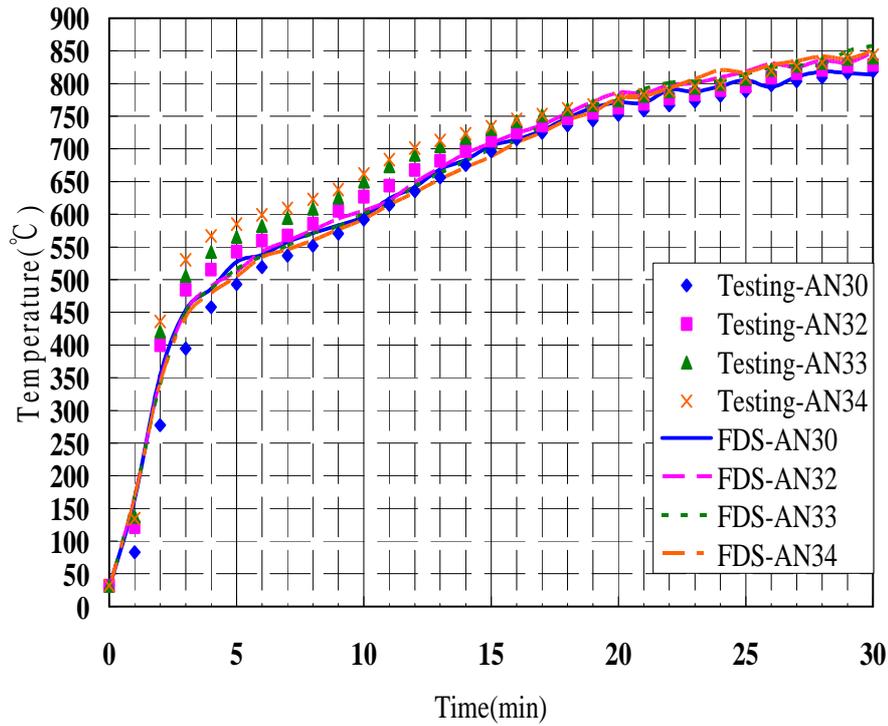


圖 2- 22 Type-D 爐溫測點 AN30、32、33、34 實驗值與 FDS 值比較圖

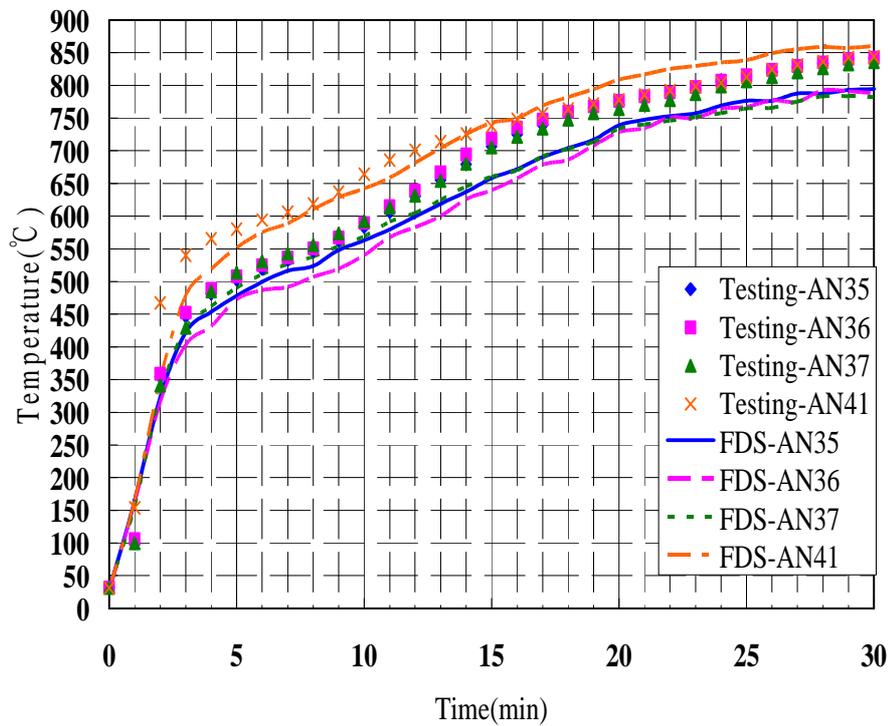


圖 2- 23 Type-D 爐溫測點 AN35、36、37、41 實驗值與 FDS 值比較圖

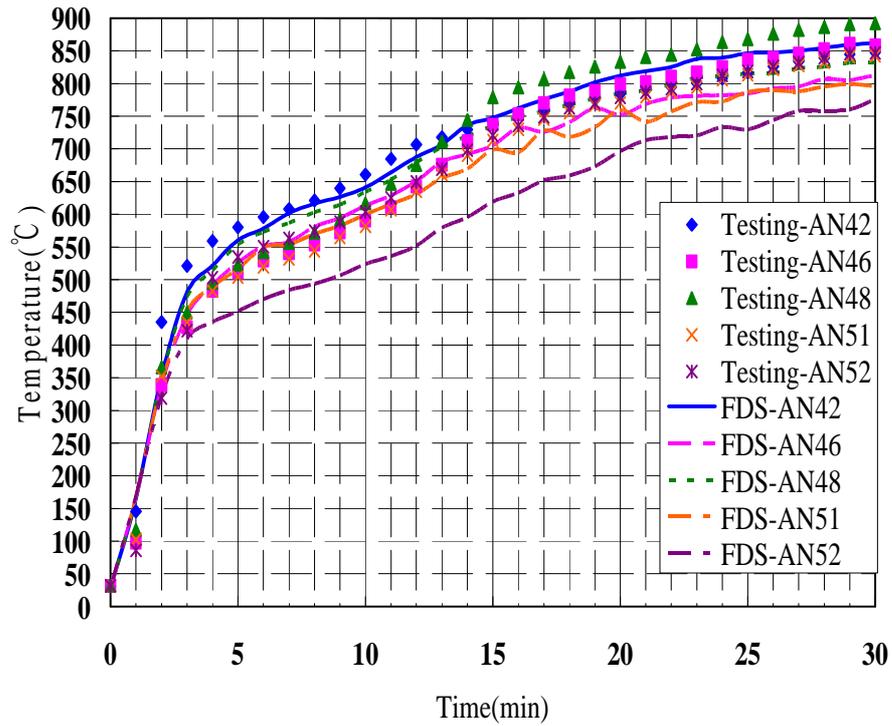


圖 2- 24 Type-D 爐溫測點 AN42、46、48、51、52 實驗值與 FDS 值比較圖

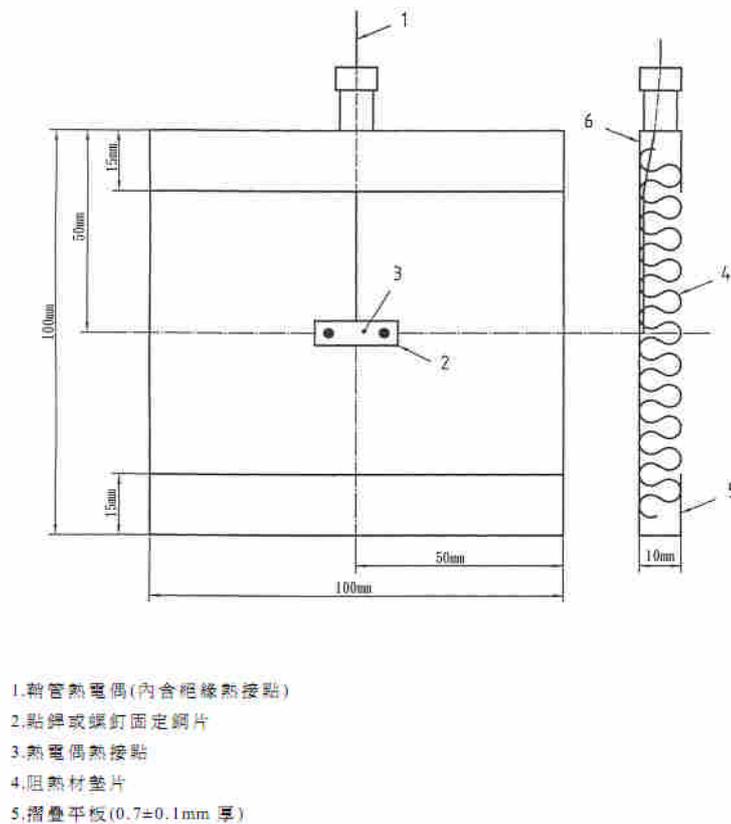


圖 2-25 平板式測溫器之構成

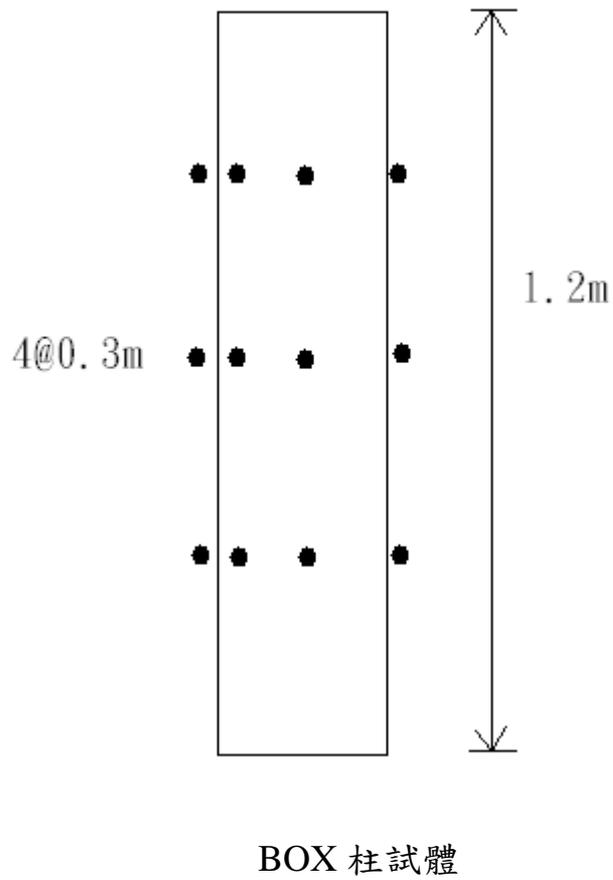
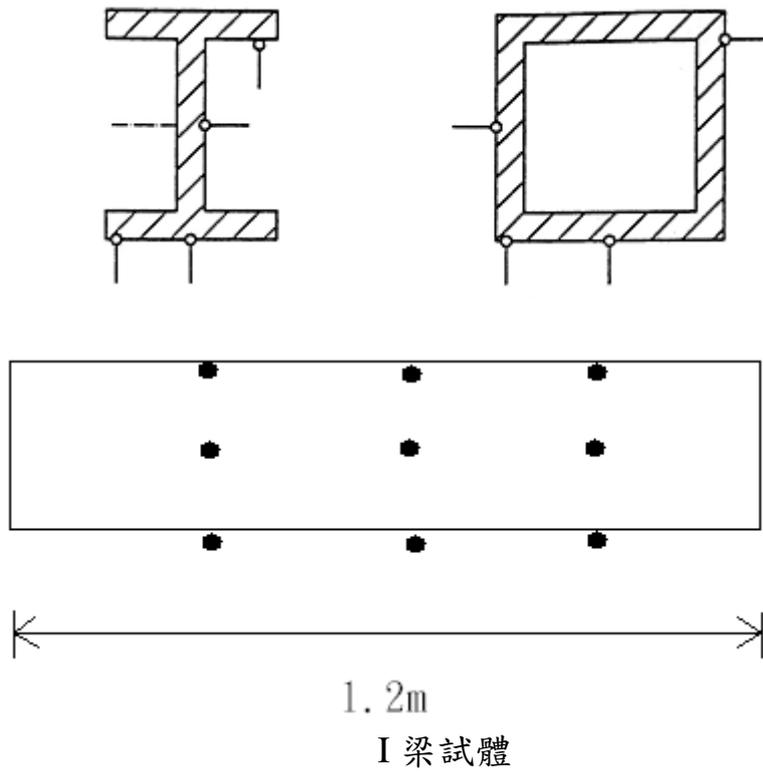


圖 2-26 鋼材表面測溫點佈設

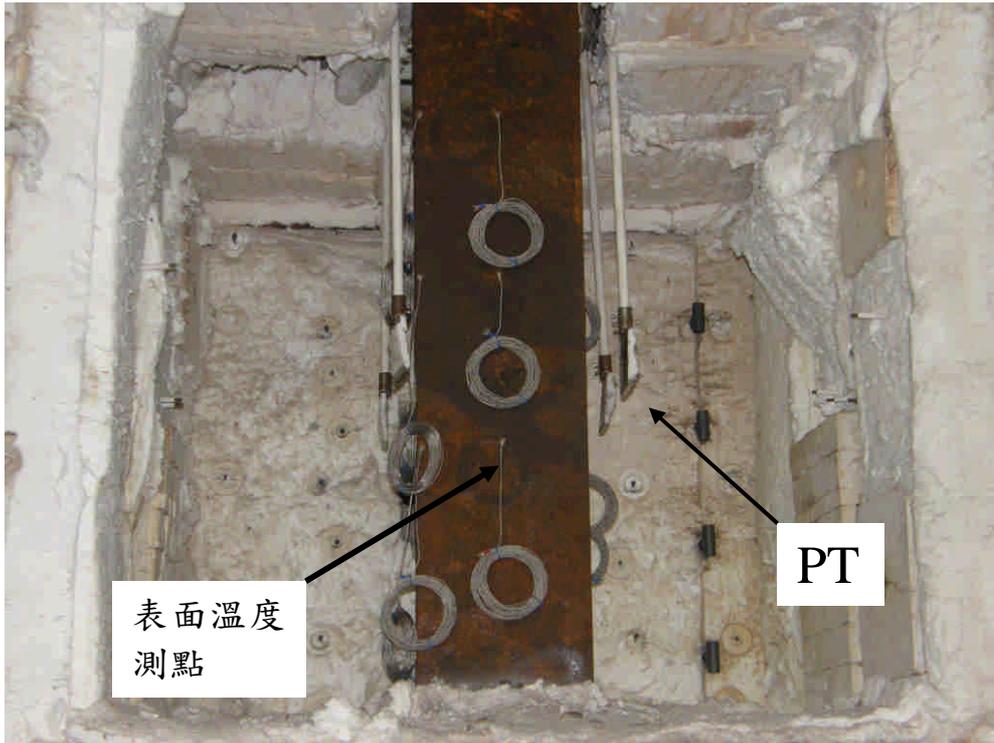


圖 2-27 鋼柱試體配置



圖 2-28 鋼梁試體配置

Box-Column

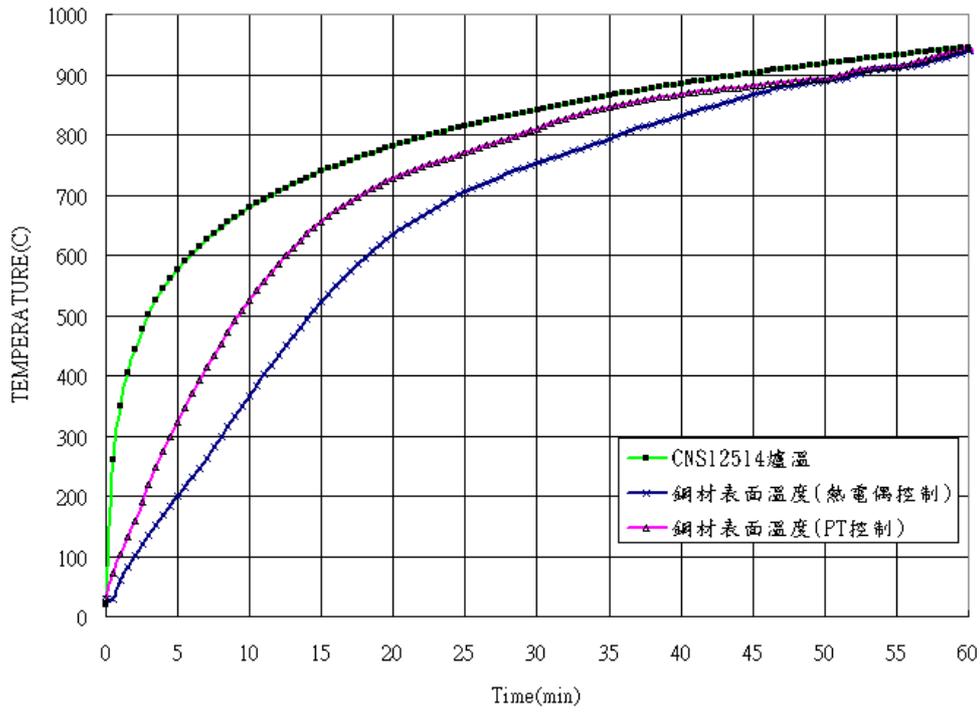
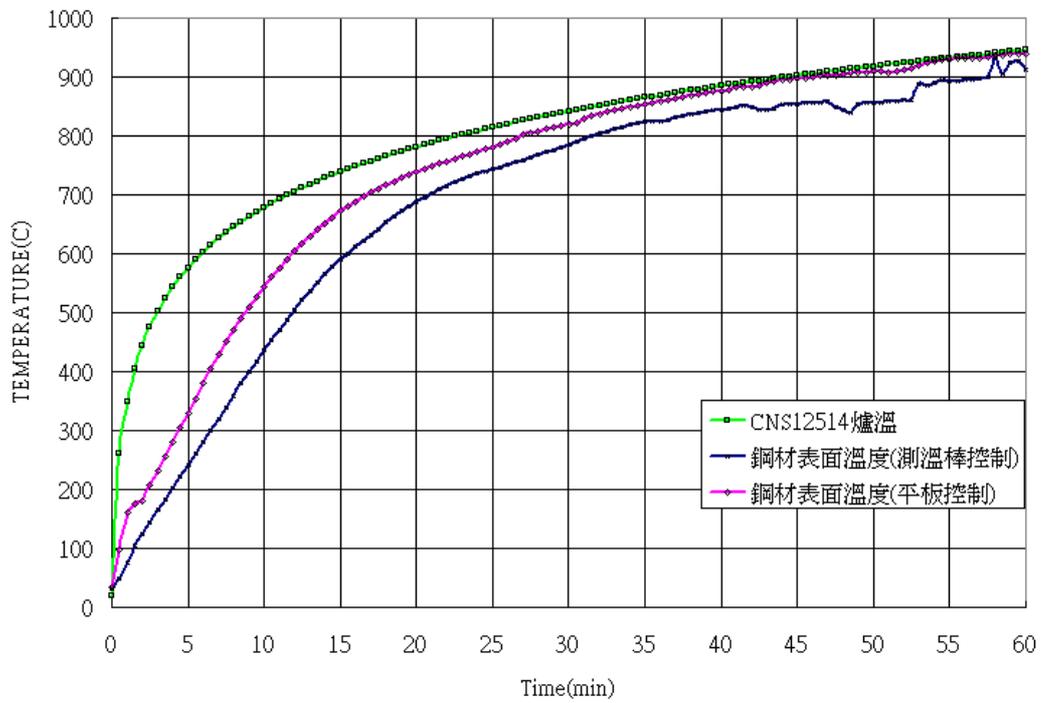


圖 2-29 鋼柱表面溫度比較

I-BEAM

圖



2-30 鋼梁表面溫度比較

第三章非均勻火場熱傳與結構行為

在 2001 年美國世貿大樓 (WTC) 倒塌事件中，由於鋼結構建物處在高溫的環境下，經過長時間火害後，容易造成鋼結構之材料性質改變，使得鋼材強度下降或軟化等行為，讓樓板與內、外柱相接之接頭破壞，而無法支撐樓地板載重，最後導致鋼結構建物倒塌，造成許多人員傷亡，由此可知，鋼結構之梁柱接頭火害行為研究的重要性；英國 Cardington 火場研究顯示，結構物因梁柱接頭處在火害時保有一定的強度，使得梁身在高溫火害下發生懸垂效應時，尚未發生破壞現象，表現出良好的行為並維持了結構的安全性，若梁柱接頭在高溫火害下無法維持原有的功能而破壞時，便容易造成鋼梁掉落、樓板坍塌及鋼柱挫屈等現象，由此證明梁柱接頭在高溫火害下存活與否對結構物的重要性；此外，在強震後常伴隨著火災的發生，而鋼結構之梁柱接頭在經過強震侵襲後，是否能夠抵抗火害所產生高溫，在火害中存活並維持整體結構物的安全，也是值得吾人研究探討的問題。

在模擬受載重之鋼結構試體在燃燒的高溫爐中之行為，乃是結構-熱流-熱傳多重耦合之複雜問題，需要同時考慮到高溫爐內部所產生之溫度場與鋼結構試體應力場相互影響之結果，但在土木工程中，目前可完整模擬此耦合問題之軟體相當有限。因此，本文採用 FDS (Fire Dynamics Simulator) 動態火場模擬軟體 (2008) 模擬出高溫爐內之溫度資料及試體表面溫度，

輸入至 ABAQUS 有限元素軟體中進行熱傳分析，並以順序耦合(Sequentially Coupled Thermal-Stress Analysis) 方式進行高溫火害結構分析，流程如圖 3-1，並且無須再透過複雜的實驗過程及花費龐大的成本，就能進行梁柱接頭試體在高溫火害實驗之模擬。

因此，本論文將利用 ABAQUS 有限元素軟體配合 FDS 動態火場模擬，在考慮撓曲作用，但不考慮梁受軸向束制(axially restrained)情況下，進行國內外常見之補強式梁柱韌性接頭試體之高溫火害模擬，並分析補強式接頭試體之高溫火害破壞行為及臨界破壞溫度等，且積極採用耐火鋼材質改良，以期提高結構物之防火時效及破壞溫度，達到延遲破壞的目的，比較使用普通鋼與耐火鋼之差異，並分析數據及整理完整的資料，以便提供其它梁柱接頭試體火害研究使用。

第一節 實驗與分析案例

普通式托梁接頭試體介紹

試體為 H 型梁-箱型柱彎矩接頭高溫試驗所做實驗的試體，柱長 4350mm，型鋼為 BOX-600×25t，是箱型柱，由中國鋼鐵公司生產之 SN490B 鋼材銲接組合而成，外圍邊長是 600mm，厚度為 25mm。

梁長度為 1900mm，型鋼為 RH 488×300×11×18 的滾壓型鋼，梁柱接頭部分採用托梁接合的方式接合，均由東和鋼鐵公司所生產。材質方面分為 Type C 及 Type D 兩種，Type C 為托梁採用 SN490B 普通鋼材，Type D 則為中國鋼鐵公司所生產之 SN490C-FR 耐火鋼材；在托梁部分，由於國內現

無耐火鋼材質之熱軋型鋼，因此托梁是由鋼板組立 H 型鋼的方式組立托梁，再將組立完成之托梁銲接於箱型柱面上，接著再進行托梁與梁的接合。托梁與梁的接合方式為將梁與托梁兩者之上下翼板以銲接方式接合，腹板則是以剪力片採用螺栓與腹板作接合，形成有抗彎能力的設計接頭；另外箱型柱內側亦有兩片內隔板，梁腹有兩片加勁板，其中內隔板尺寸為 PL 18×500×550，梁腹加勁板尺寸為 PL 12×130×452，而內隔板在箱型柱內，則是配合背墊板銲接在箱型柱內，加勁板在梁腹板則是以銲接方式將加勁板其中三邊與梁腹板及翼板連接，圖 3-2~6 為試體設計圖。

第二節 鋼材表面溫度熱傳分析比較

本文使用 FDS 模擬實驗爐燃燒試體，為了比較試體分析值與實驗值之差異性，因此依照試體熱電偶放置部位，求得各斷面溫度平均值，進行分析比較。熱電偶位置，本研究依據 CNS 規範梁柱試體熱電偶分布所規定，並自行加上額外的熱電偶位置，如圖 3-8 是各斷面的編號。試驗時間因試體破壞時間不同，因此試驗時間也不同，Type-C 試體實驗是在 25.5 分鐘時，試體發生破壞，而 Type-D 試體實驗則是在 29 分時，試體發生破壞，因此兩者試驗時間才有所不同。實驗值與 FDS 分析值比較結果分別是圖 3-9~12 及圖 3-13~17，另外表 3-1、2 為兩者實驗值與分析值的最後溫度及相差值。

觀察柱升溫比較圖，在分析值中，Type-C 及 Type-D 均為 $TC4 > TC1 > TC2 > TC5 > TC3$ ，一般來說，熱氣流往上升，因此位置越高溫度愈高，因此 TC4 溫度最高，但其他斷面溫度有些差異，在比較圖顯示出

TC2<TC1 及 TC3<TC5，因各斷面放置熱電偶的位置不盡相同。

在梁斷面溫度比較上，兩個實驗最高溫均發生在梁端位置 TB9，最低溫除了 Type-C 實驗值是在 TB7 之外，其它都是在 TB6。而 TB9 實驗值在一開始溫度就急速上升，在 Type-D 實驗也同樣有這個現象，兩者溫度曲線比較如圖 3-11 所示，可看出兩者相當一致，推測 TB9 上升較快有可能是由於此位置附近因無物體阻隔，所以熱對流狀況較好(圖 3-18)，而由之前爐溫比較圖也可發現此附近熱電偶(AN21、22、23 等等)一開始升溫較快，因此有可能是因為熱對流效果較好的緣故。而分析值雖一開始升溫速率較慢，但中途開始急起直追，由表 3-1、2 可得知最後溫度相差不多。而 TB6、TB7 的部份，在實驗中，此位置附近有安全側稱裝置，因阻隔了火源直接加熱的緣故，影響了升溫速率，所以溫度較低。

在表 3-1、2 中可看出梁的溫度比柱的溫度來得高，因為柱厚度為 25mm，升溫較慢，梁翼版為 18mm，腹版只有 11mm，升溫較快，所以才會有此差距。另外觀察到最後溫度相差最多的是發生在 TB7 的位置，Type-C 分析值高於實驗值 234.88°C，此處附近有安全側稱裝置，在 FDS 設定其 X 座標為 1.36~1.86，推測安全側稱裝置雖沒有直接阻擋到火燄，但是卻也影響到了附近的熱對流，因此有可能造成 TB7 溫度上的差異。但是在 Type-D，溫度卻沒有相差到兩百多度，因此有可能安全側稱裝置位置有些差異。

第三節 結構火害行為分析比較

本文除了按照實驗位移計所佈設之量測點如圖 3-19 所示，其中 DB1~

4 用於量測鋼梁變形，DC1~4 用於量測鋼柱變形，可以直接獲得結構試體表面位置的垂直/水平位移量值。除了比較 DB3 與 DB4 為梁位移變化量之外，另外也考量到整體梁柱接頭的轉角變化量，依公式 $\phi = \tan^{-1}(u/L)$ 計算梁柱接頭轉角，其值為梁端量測到的轉角值扣除柱端量測到的轉角值之淨值，並繪製成時間/溫度與轉角關係圖，可利用來決定極限載重，試體載重及邊界條件模擬如圖 3-7。以下就以各實驗與分析的溫度/時間下位移及轉角的關係來說明：

一般鋼托梁式接頭於升溫下定載加溫試驗[Type C]

- (1) 一般鋼托梁式梁柱接頭在加溫狀態下，梁柱接頭的溫度-梁端變形 (DB4) 關係 (圖 3-21) 而言，升溫時間與變形來看，實驗在 24 分鐘多發生破壞，分析則在 25 分鐘左右產生，誤差約 1 分鐘左右。
- (2) 以梁柱接頭的相對轉角而言，由時間與其關係圖 (圖 3-22) 來看，產生大變形的溫度大致上皆在 500°C 左右，而破壞時間都在 22 分鐘左右，都符合預期性破壞結果。
- (3) 圖 3-20 為試體分析所得的試體變形結果與實驗破壞模式相比對，顯示出接頭結構並沒有產生扭轉，唯梁下翼板發生挫屈變形，實驗與分析兩者比較相符。

部分耐火鋼托梁式接頭於升溫下定載加溫試驗[Type D]

- (1) 部分耐火鋼托梁式接頭在加溫狀態下，梁柱接頭的時間-梁端位

移 (DB4) 曲線 (圖 3-24) 對照，其分析與實驗曲線幾乎重合，兩者皆在升溫時間為 29 分鐘時發生破壞。

- (2) 由分析與實驗的相對轉角探討，不論在溫度或是時間上，分析出的相對轉角比較，都能跟實驗數據相吻合，其趨勢符合預期性結果。
- (3) 圖 3-23 為試體分析所得的變形結果，顯示出接頭結構並無產生扭轉，只有在梁之下翼板處發生挫屈變形，並且比試驗 (Type-D) 之變形較遠離梁柱接合面，實驗與分析兩者相符，表示耐火鋼確實比一般鋼更能提升在高溫下的抗彎性能。

表 3-1 Type-C 實尺寸實驗值與分析值 25.5 分最後溫度及相差值

斷面編號	實驗值 最後溫度(°C)	分析值 最後溫度(°C)	相差值(°C) (分析值-實驗值)
TC1	353.73	395.78	42.04
TC2	344.62	368.60	23.99
TC3	414.03	354.66	-59.36
TC4	458.81	412.82	-45.99
TC5	401.14	363.70	-37.44
TB1	509.01	557.72	48.71
TB2	610.15	604.31	-5.84
TB3	618.91	618.38	-0.53
TB4	514.83	552.28	37.45
TB5	505.58	527.57	21.99
TB6	410.18	504.91	94.73
TB7	382.45	617.33	234.88
TB8	513.45	623.17	109.72
TB9	696.03	663.91	-32.12

表 3-2 Type-D 實尺寸實驗值與分析值 29 分最後溫度及相差值

斷面編號	實驗值 最後溫度(°C)	分析值 最後溫度(°C)	相差值(°C) (分析值-實驗值)
TC1	494.74	449.47	-45.27
TC2	383.66	419.63	35.96
TC3	467.87	405.68	-62.19
TC4	428.79	465.91	37.12
TC5	475.13	418.62	-56.51
TB1	636.96	606.89	-30.07
TB2	696.75	652.84	-43.91
TB3	689.88	664.98	-24.90
TB4	585.63	603.68	18.05
TB5	641.53	578.39	-63.14
TB6	577.08	557.07	-20.01
TB7	586.73	666.56	79.83
TB8	632.50	673.30	40.80
TB9	740.58	707.65	-32.93

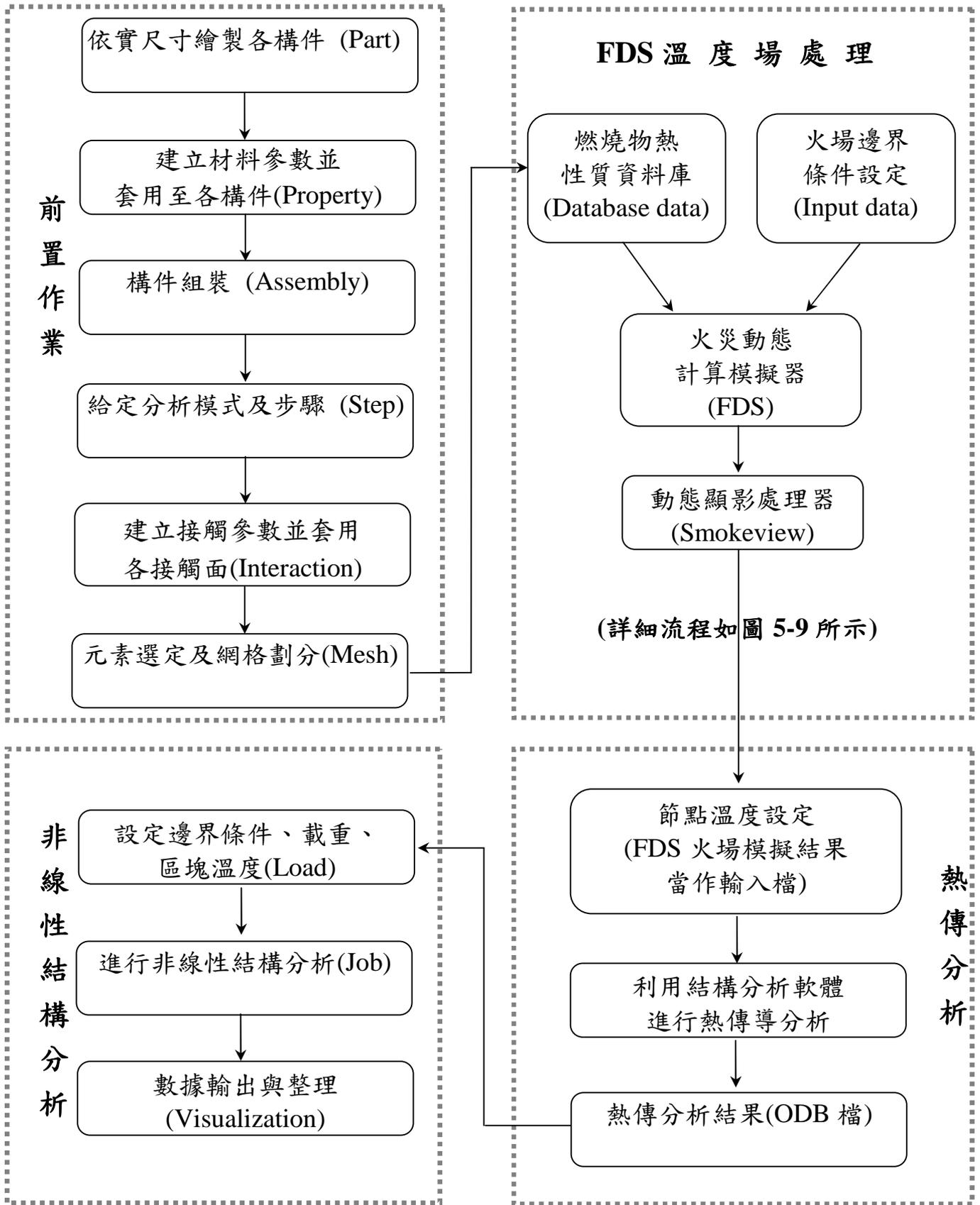
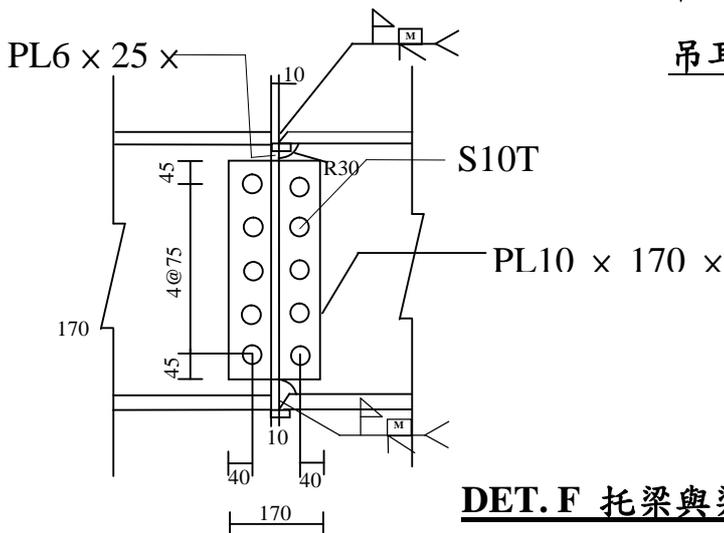
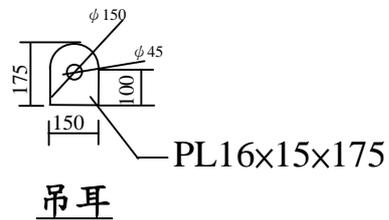
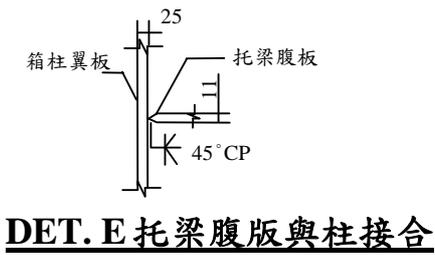
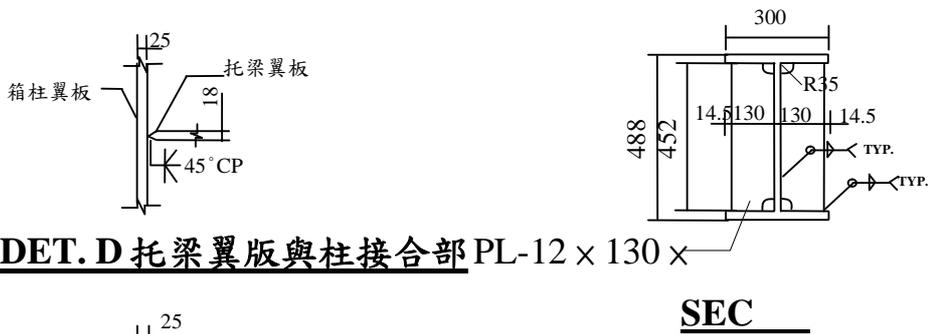
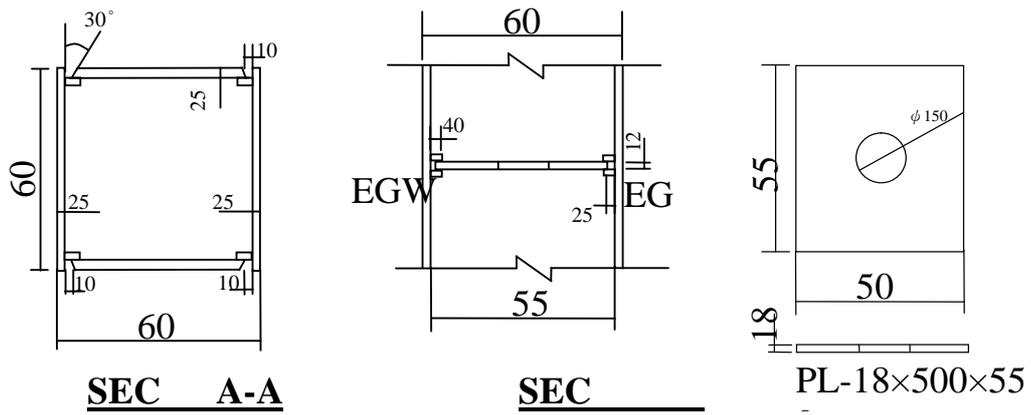


圖 3-1 非耦合分析法流程圖



Unit : mm

圖 3- 3 Type-C 托梁式彎矩接頭試體細部設計圖

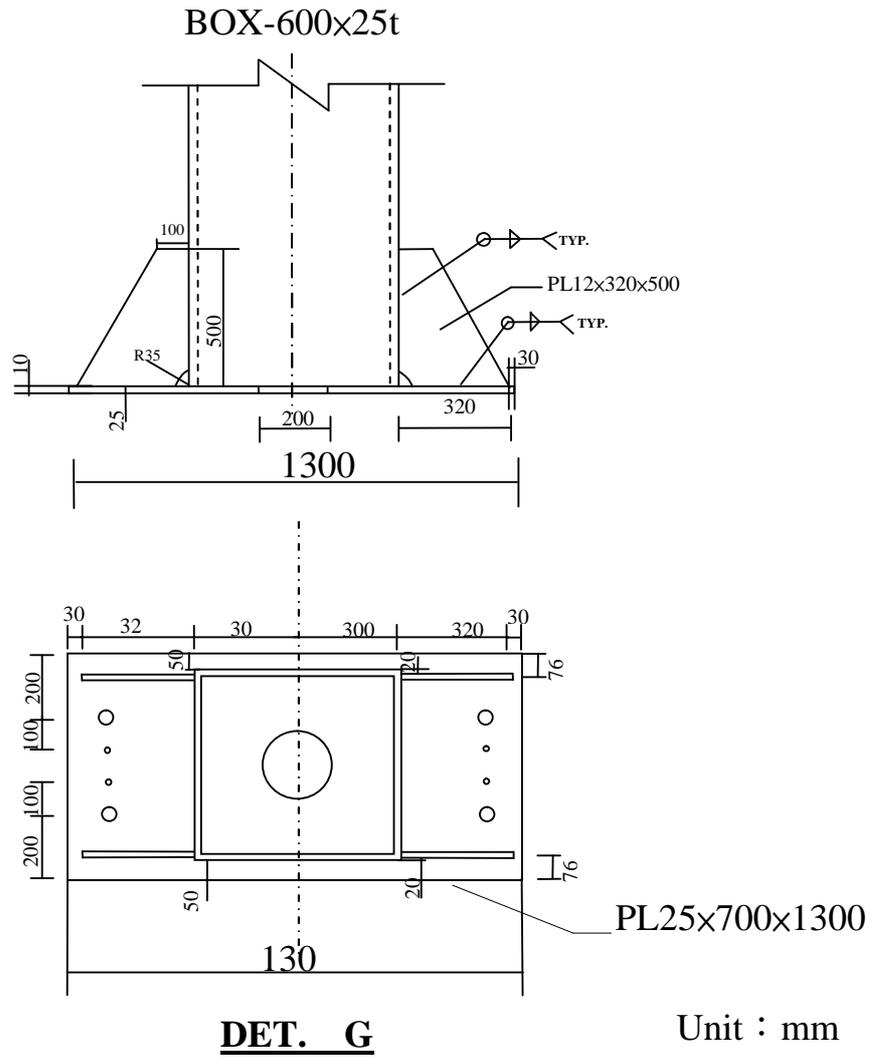


圖 3- 4 Type-C 托梁式彎矩接頭試體細部設計圖

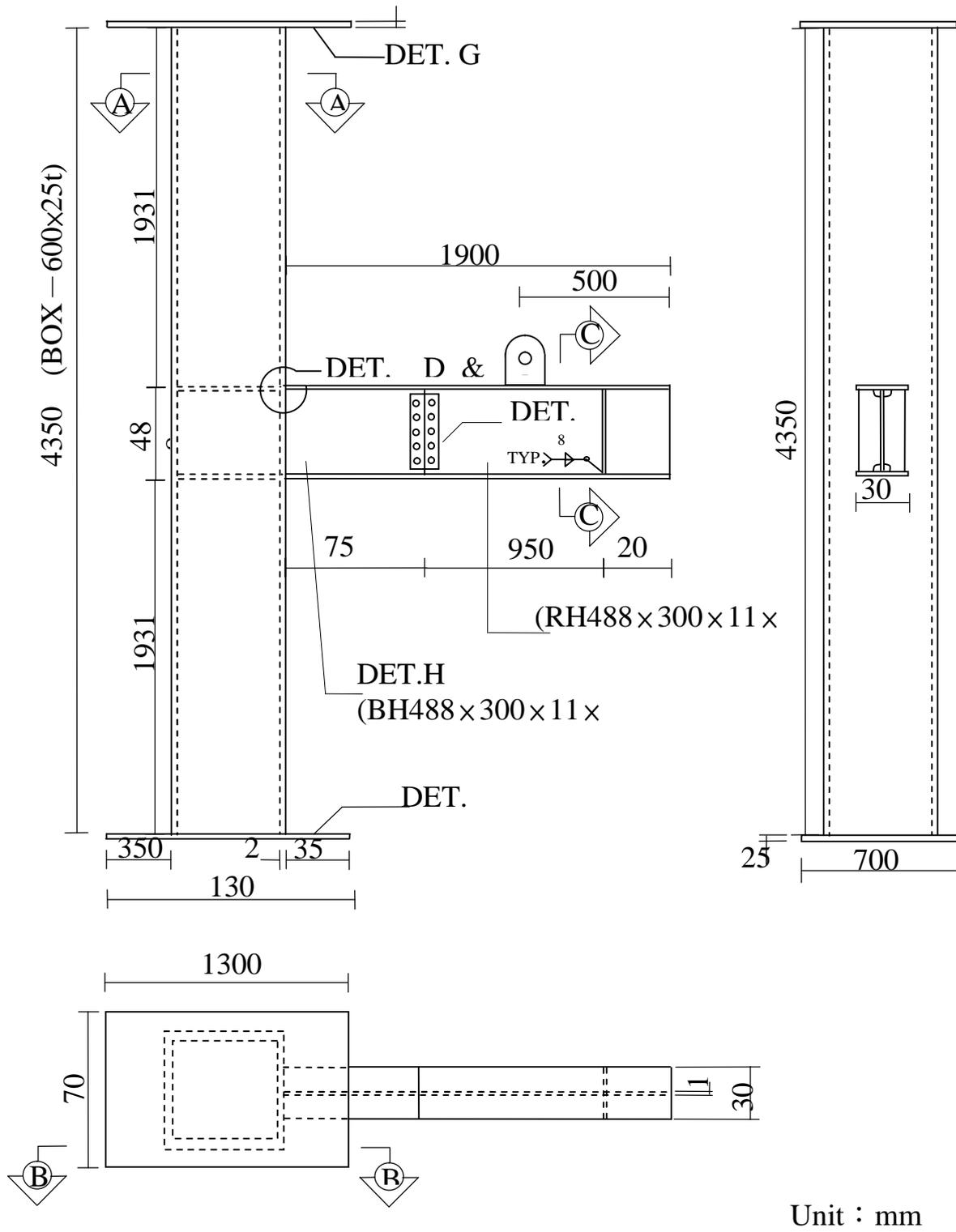


圖 3-5 Type-D 托梁式彎矩接頭試體設計圖

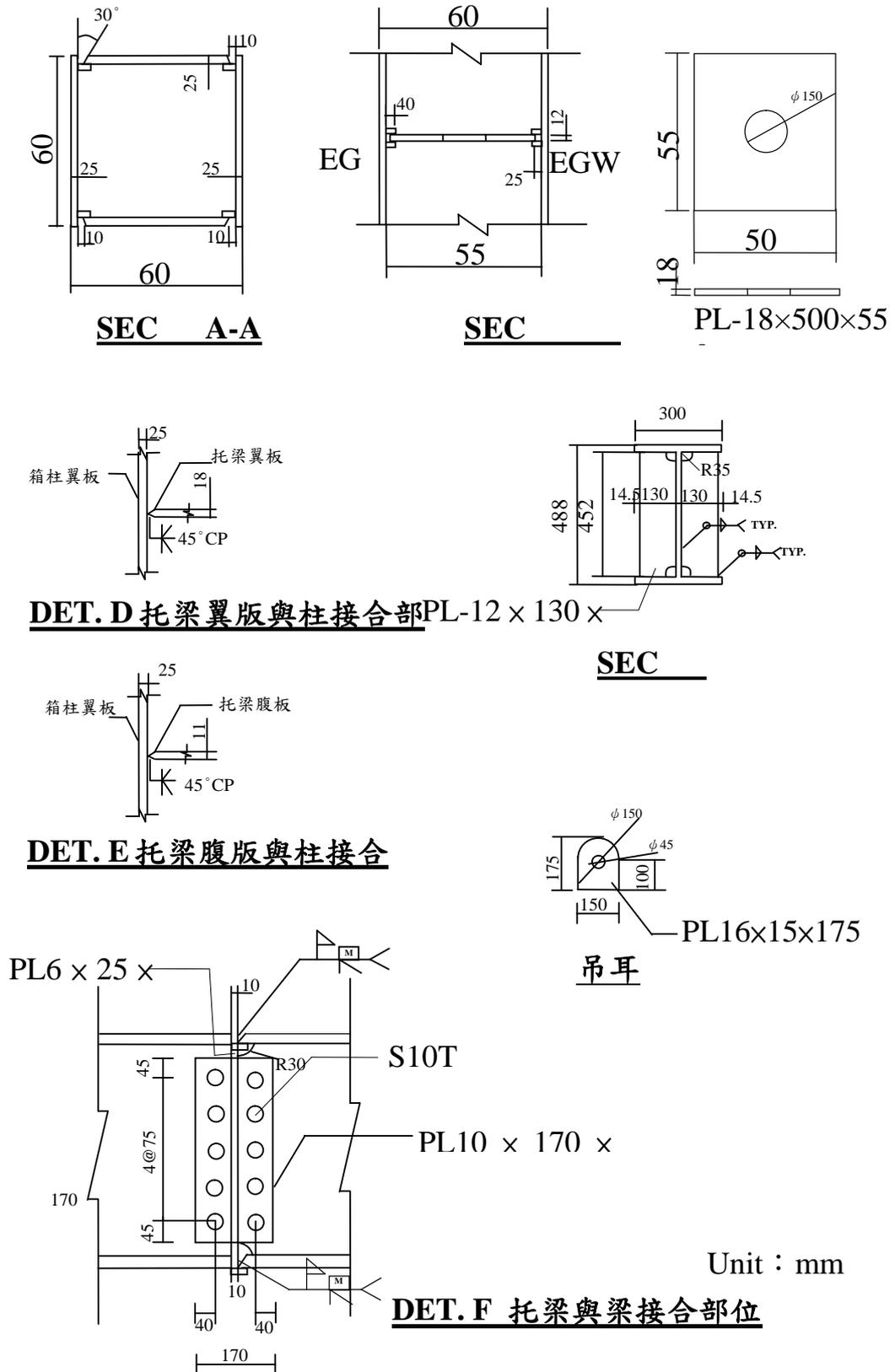


圖 3- 6 Type-D 托梁式彎矩接頭試體細部設計圖

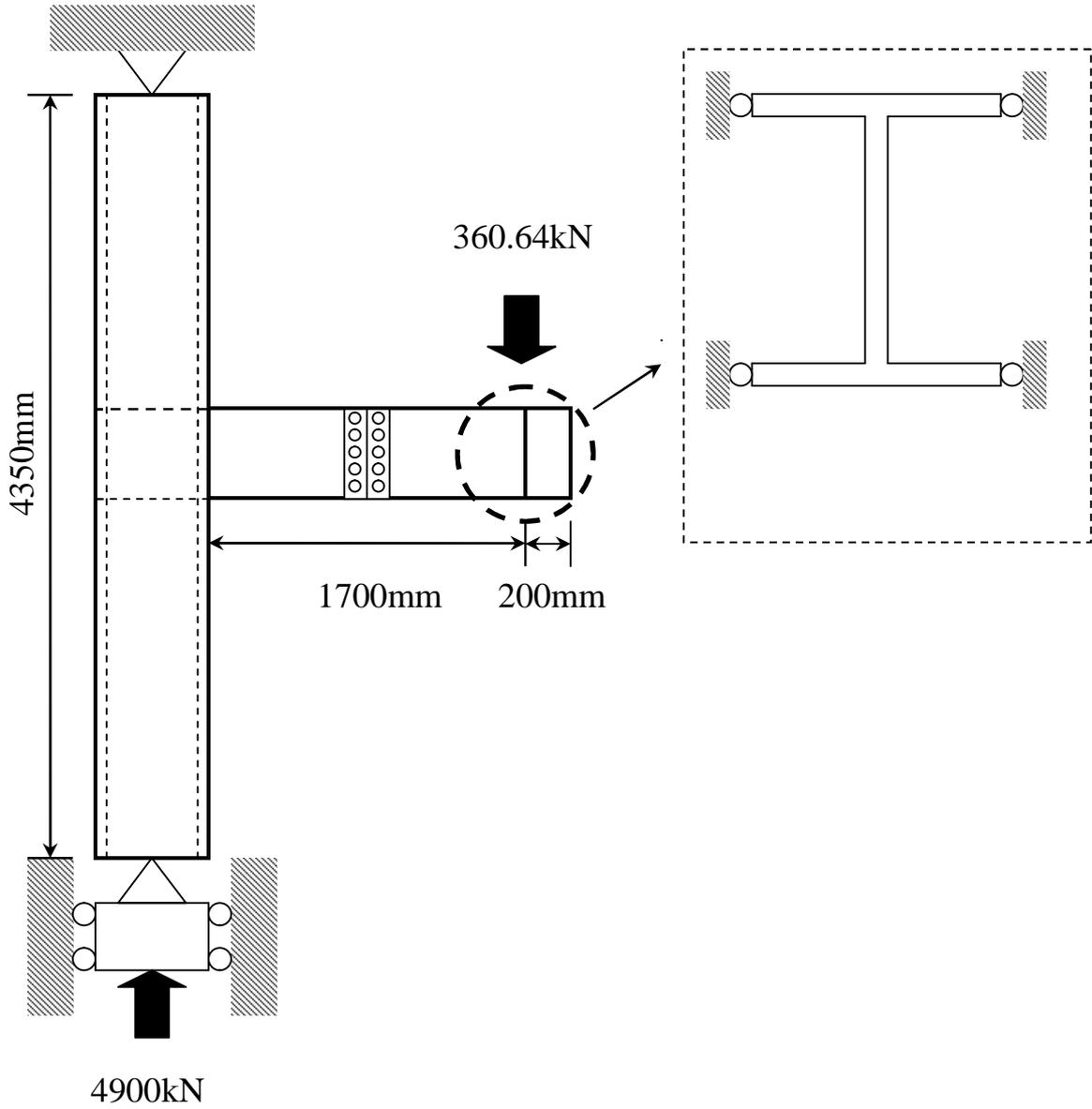


圖 3-7 模擬試體載重及邊界條件示意圖

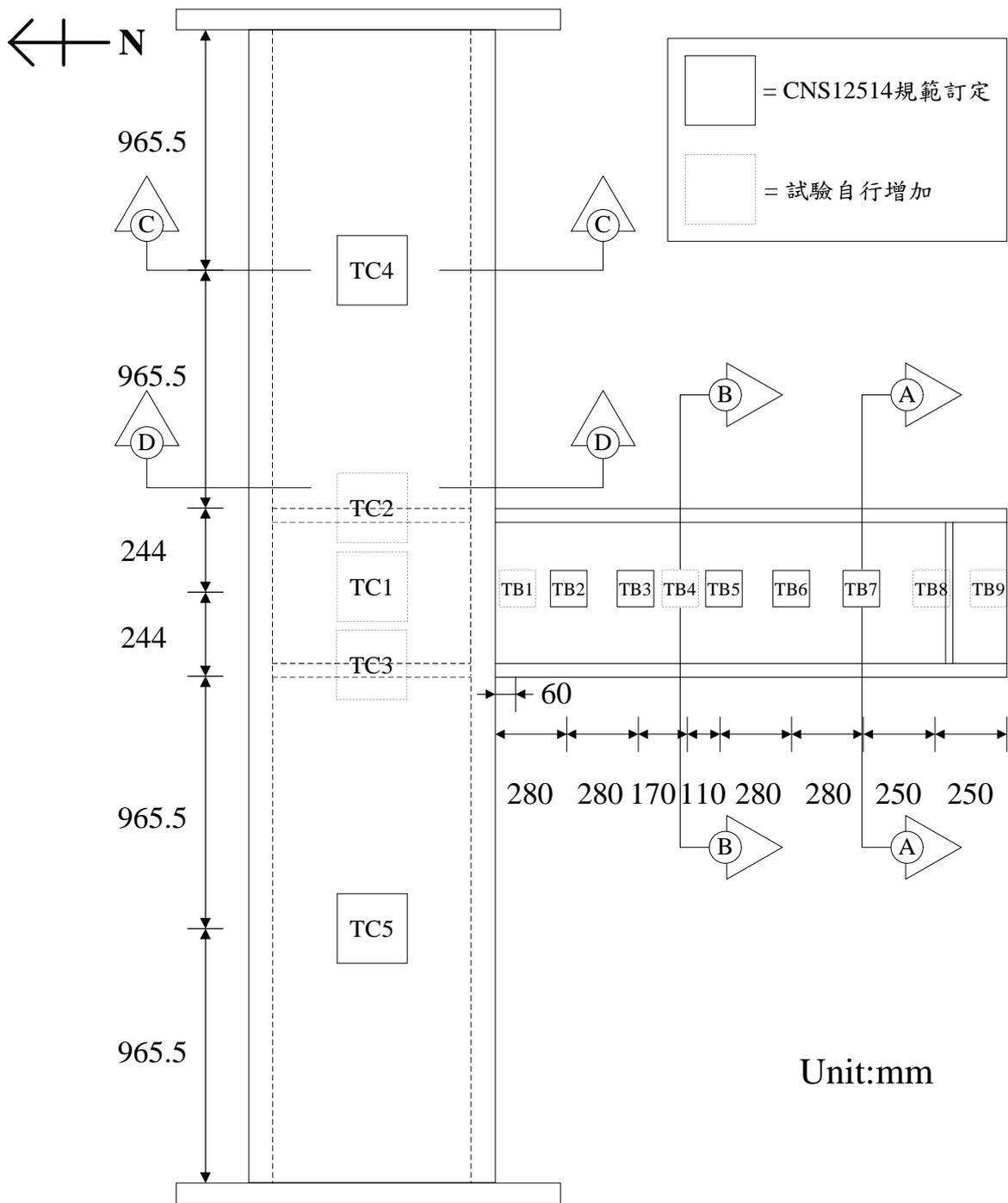


圖 3-8 擷取斷面編號位置

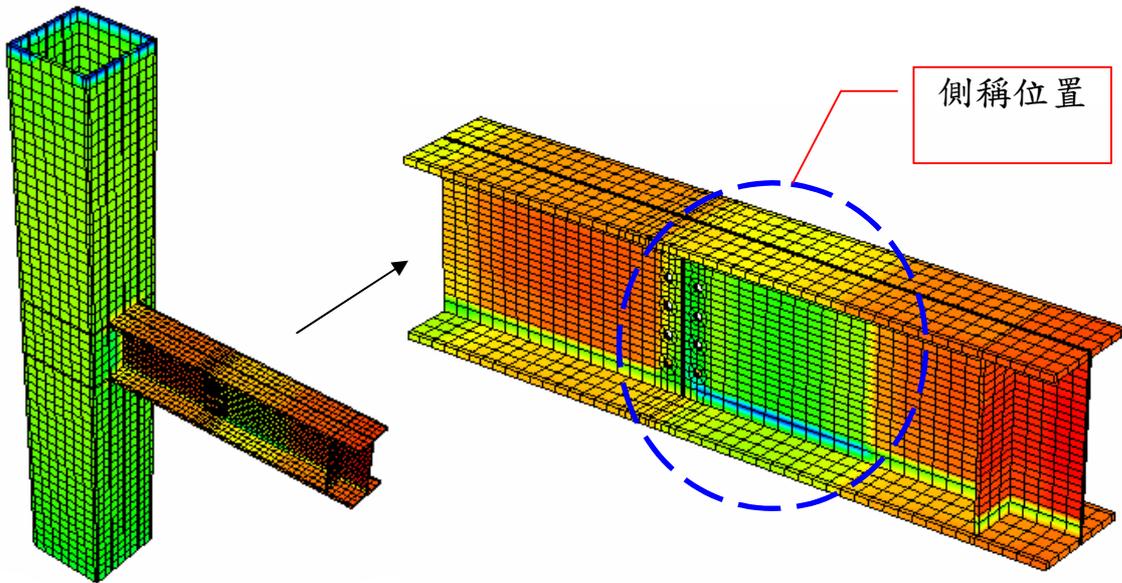


圖 3-9 Type-C 實尺寸 ABAQUS 熱傳結果

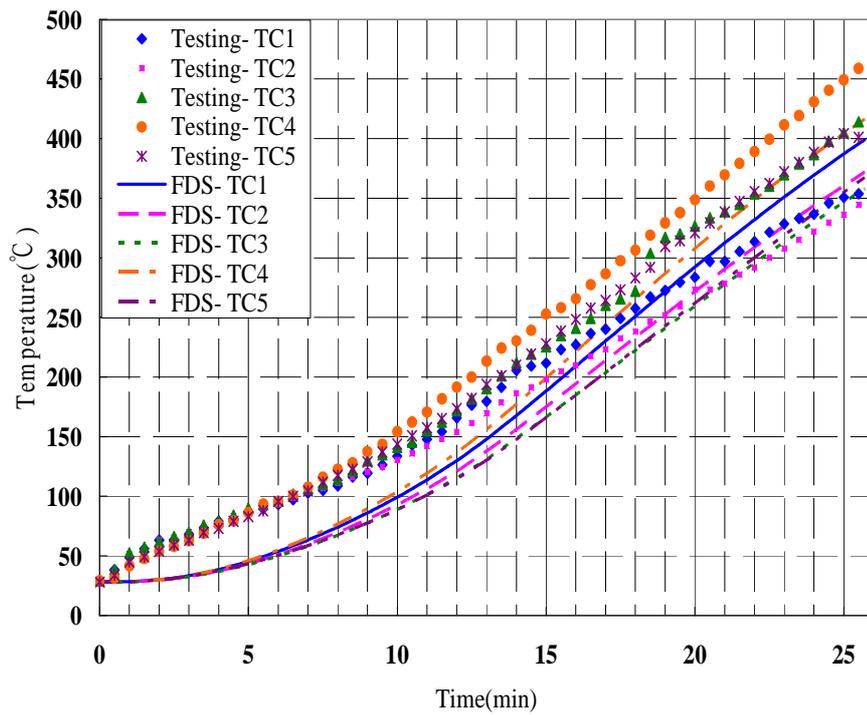


圖 3-10 Type-C 實尺寸柱斷面溫度 TC1~5 實驗值與分析值比較

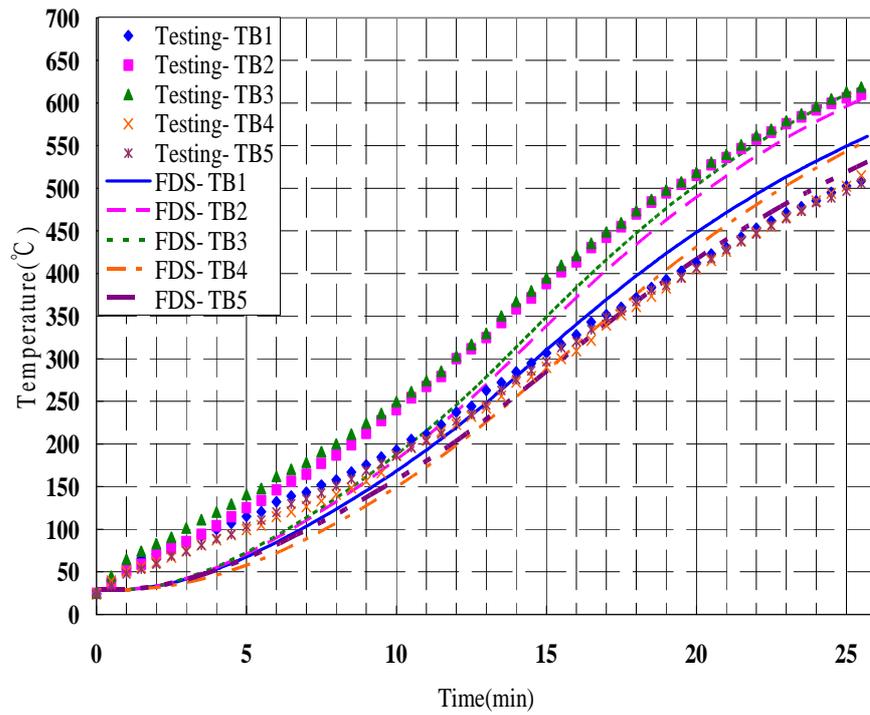


圖 3-11 Type-C 實尺寸梁斷面溫度 TB1~5 實驗值與分析值比較

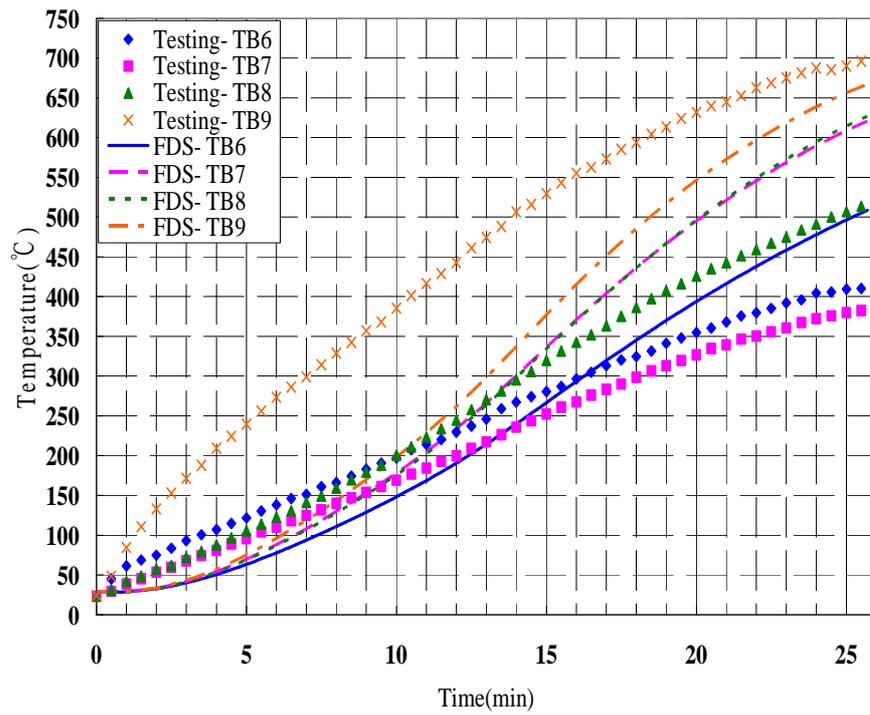


圖 3-12 Type-C 實尺寸梁斷面溫度 TB6~9 實驗值與分析值比較

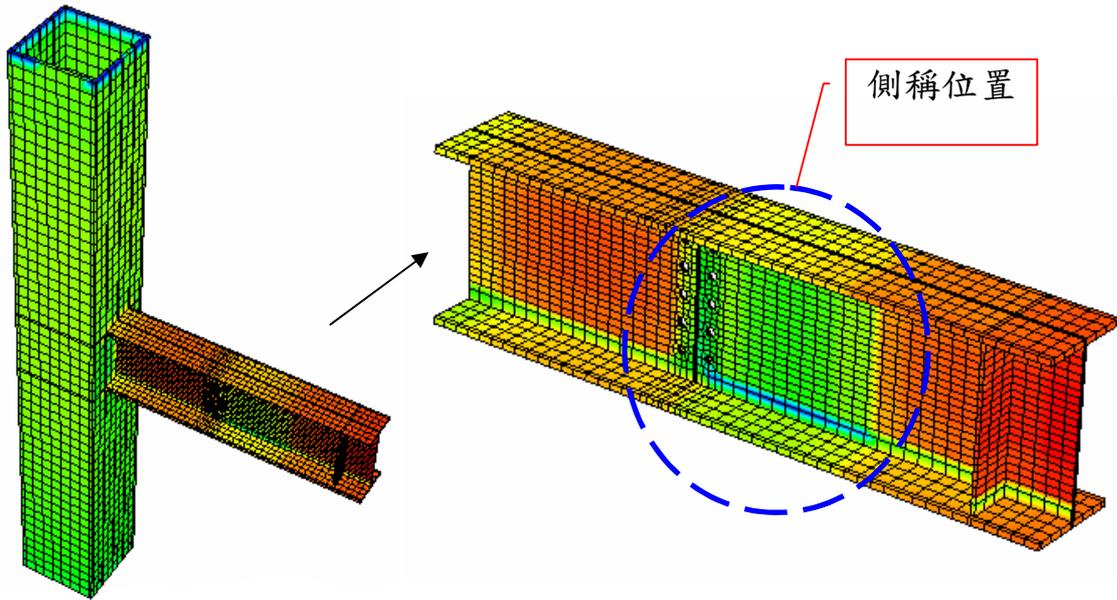


圖 3-13 Type-D 實尺寸 ABAQUS 熱傳結果

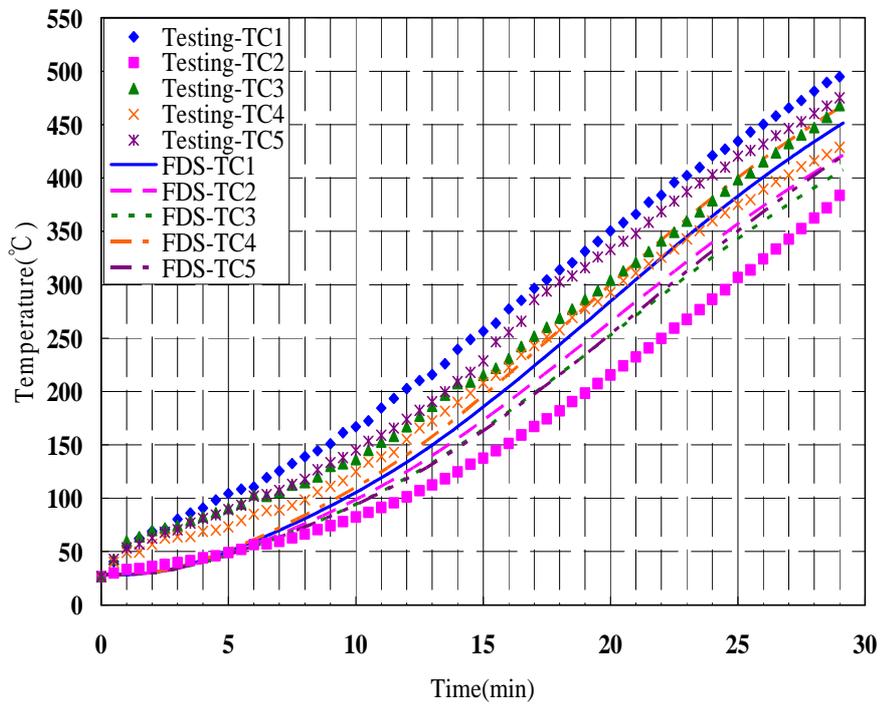


圖 3-14 Type-D 實尺寸柱斷面溫度 TC1~5 實驗值與分析值比較

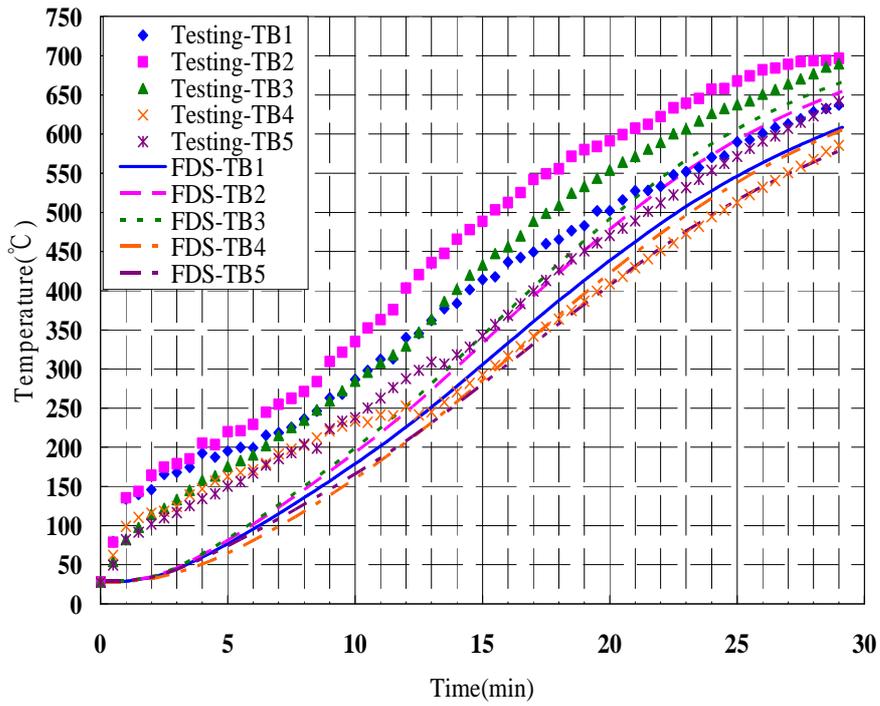


圖 3-15 Type-D 實尺寸梁斷面溫度 TB1~5 實驗值與分析值比較

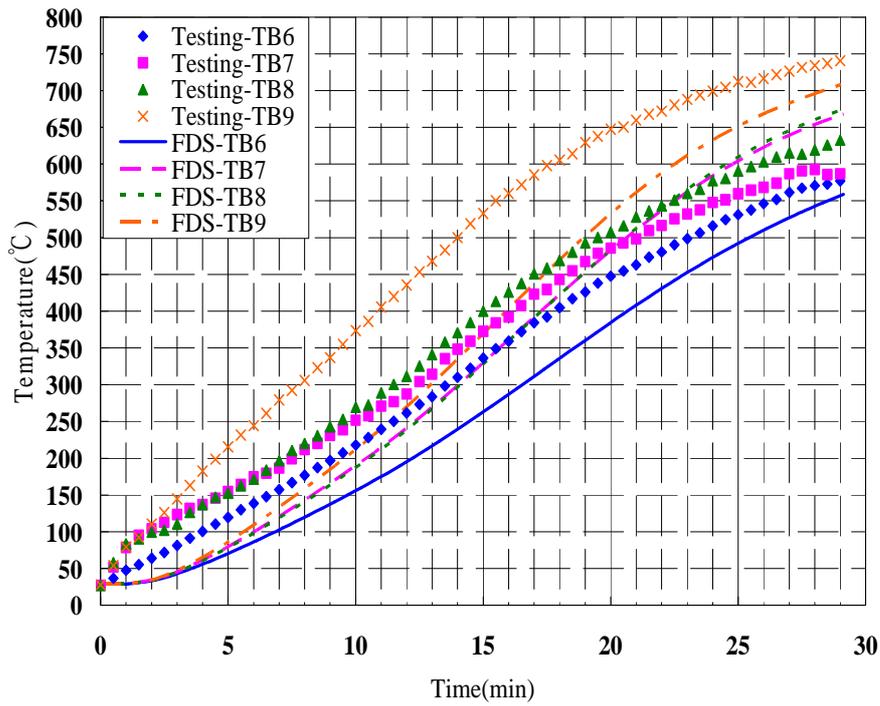


圖 3-16 Type-D 實尺寸梁斷面溫度 TB6~9 實驗值與分析值比較

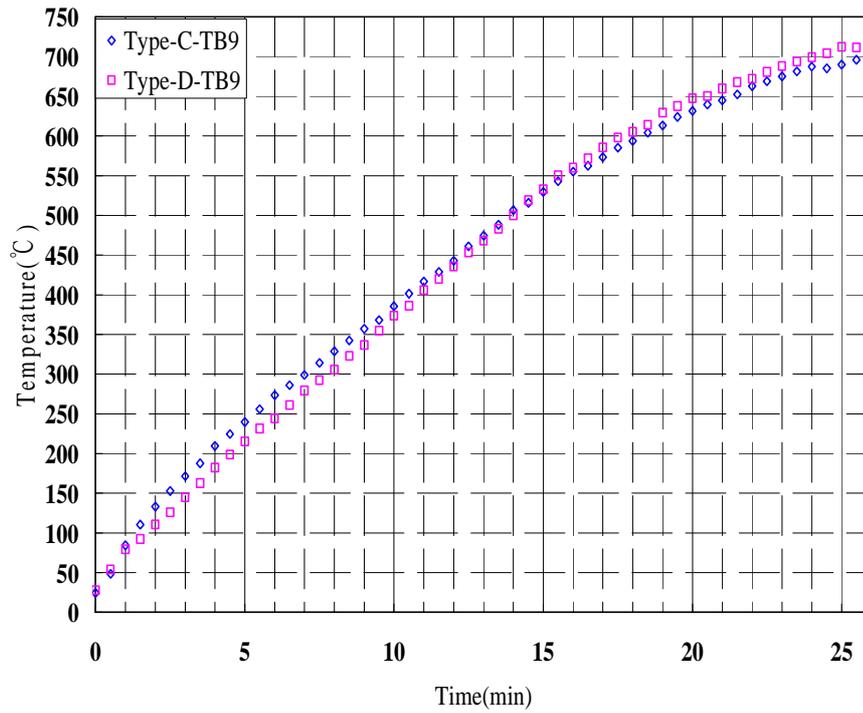


圖 3-17 Type-C 與 Type-D 斷面 TB9 溫度實驗值比較

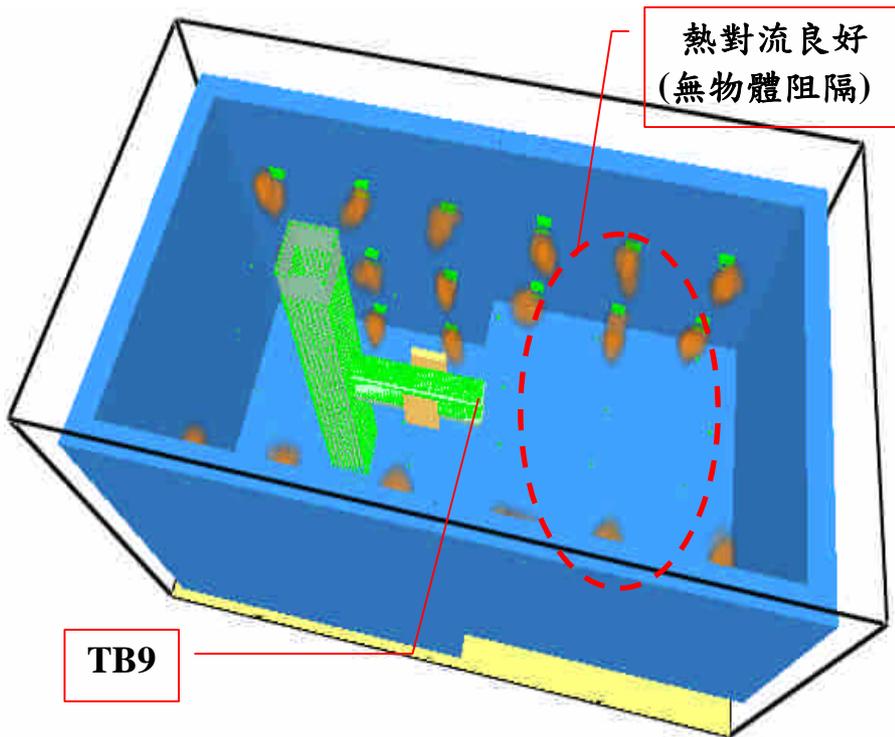


圖 3-18 FDS 模擬試驗爐內空間分布

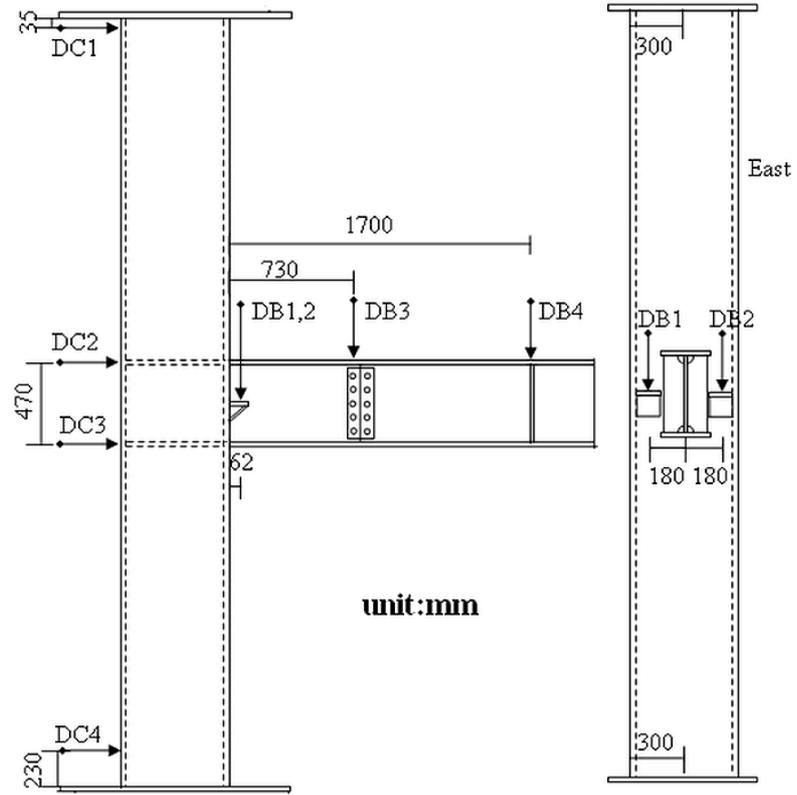


圖 3-19 變形量測位置

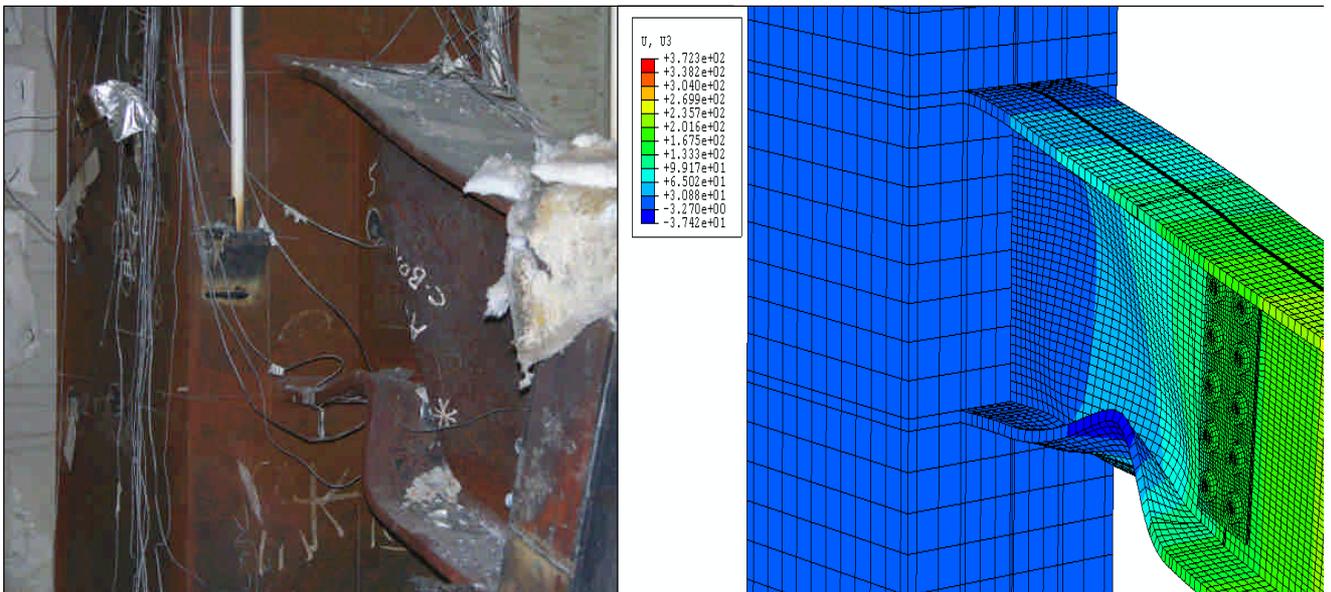


圖 3-20 Type-C 實驗與分析破壞模式比對

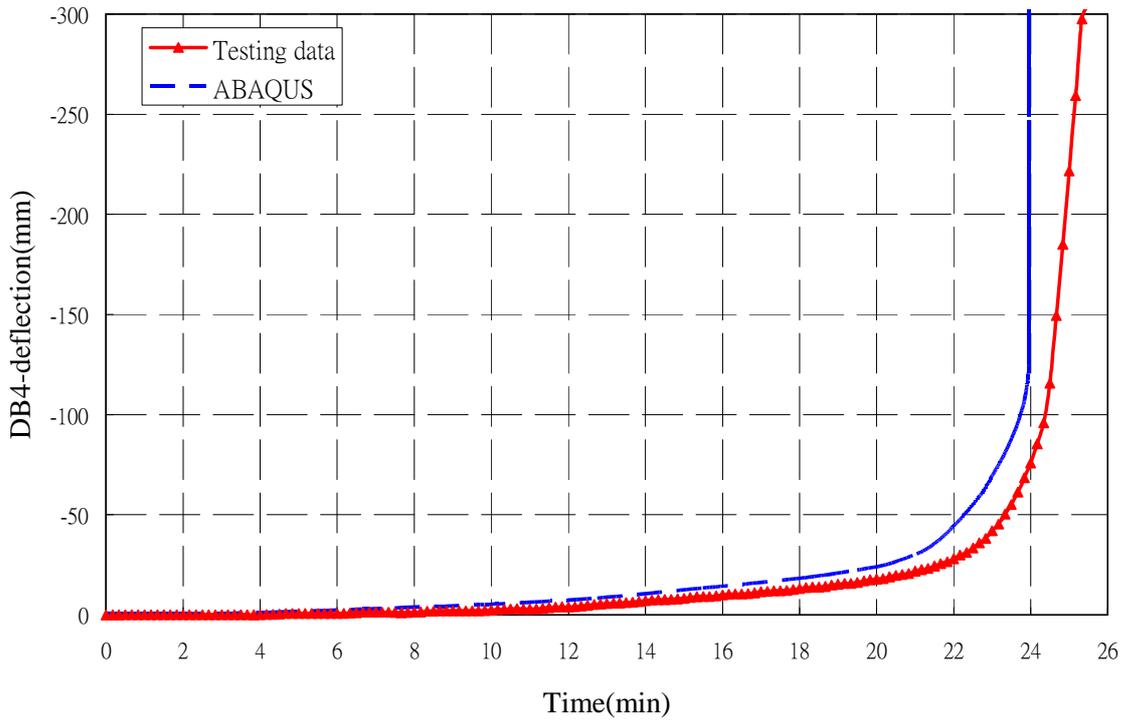


圖 3-21 Type-C 變形(DB4)-時間歷時曲線圖

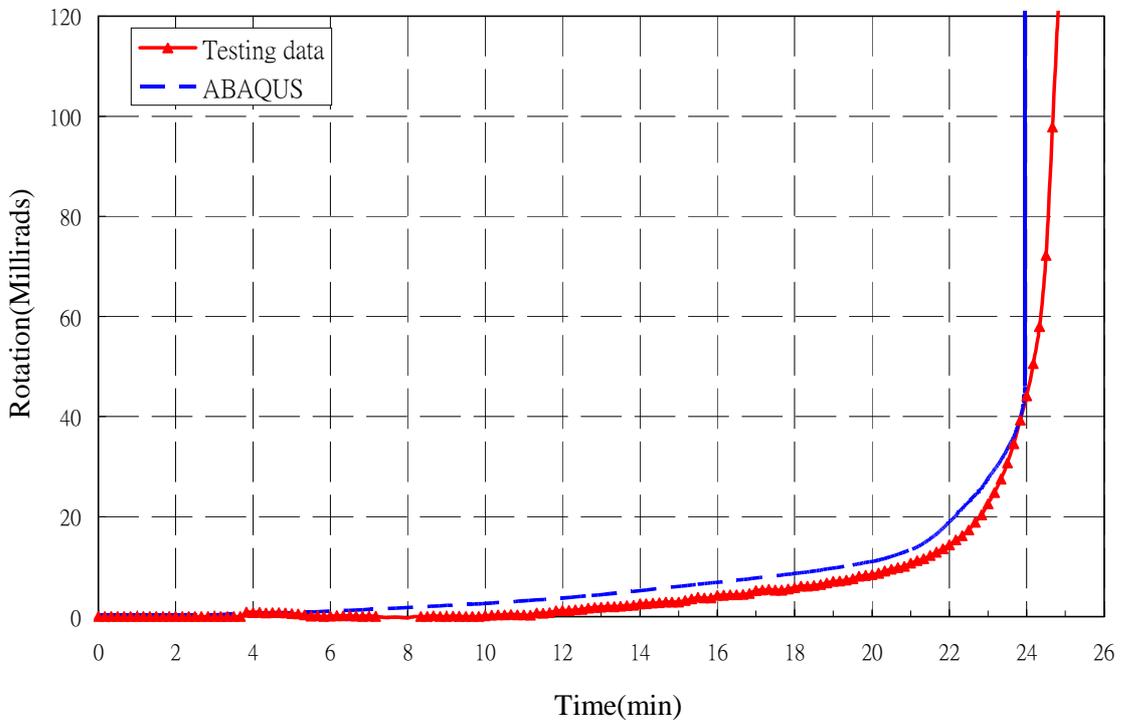


圖 3-22 Type-C 變形(轉角)-時間歷時曲線圖

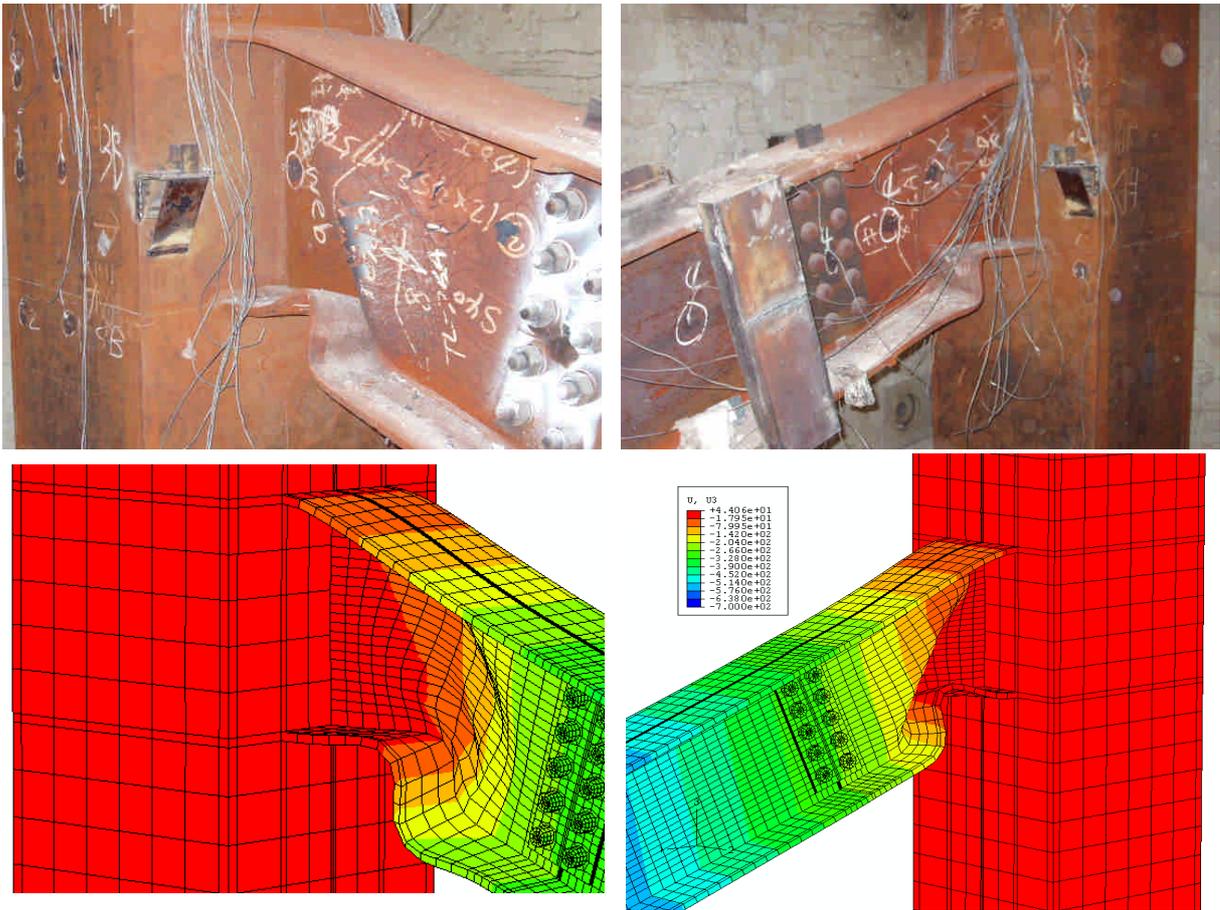


圖 3-23 Type-D 實驗與分析破壞模式比對

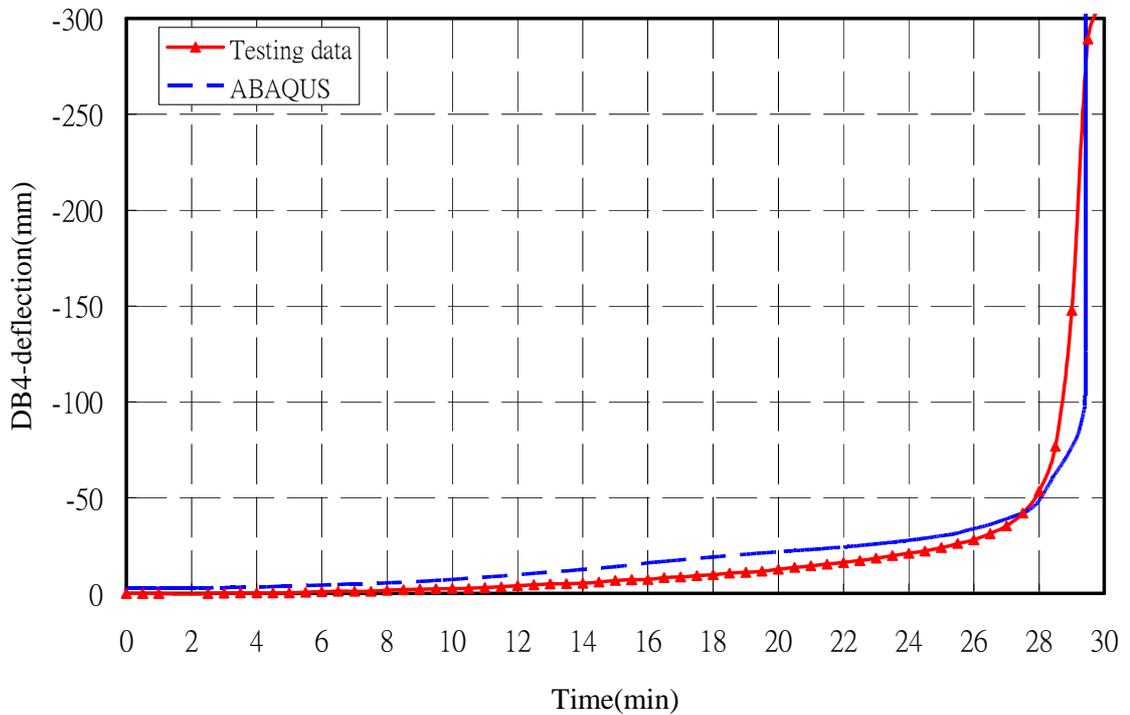


圖 3-24 Type-D 變形(DB4)-時間歷時曲線圖

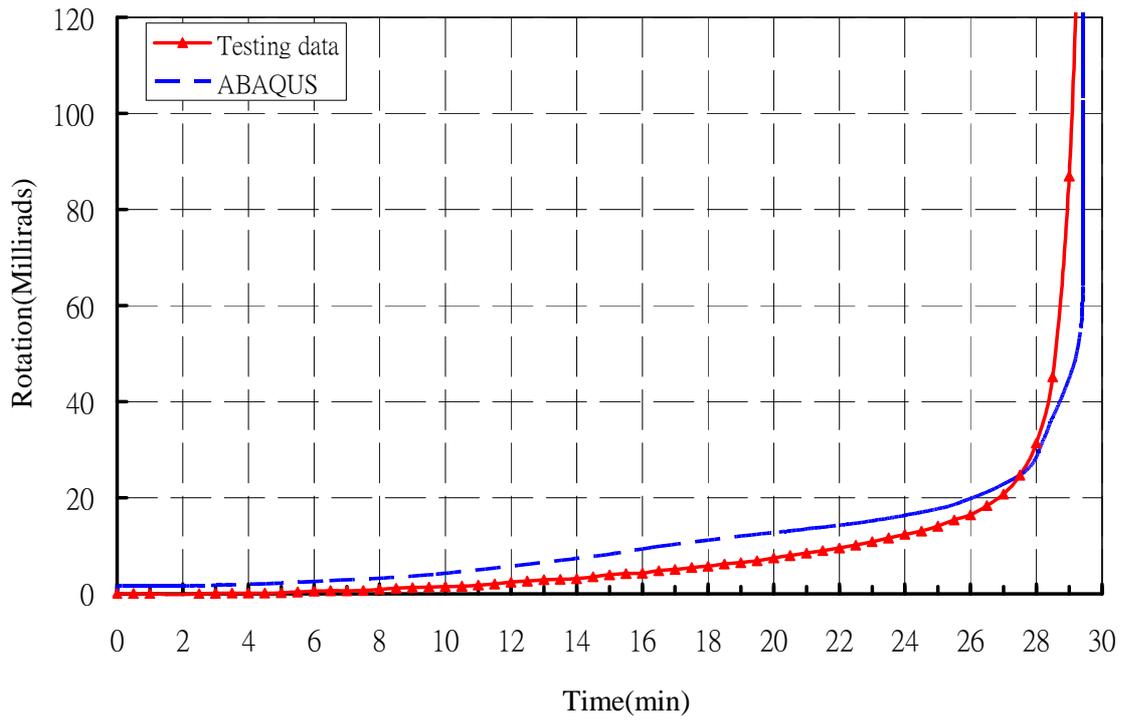


圖 3- 25Type-D 變形(轉角)-時間歷時曲線圖

第四章側板式梁柱接頭火害性能分析

1994 年美國洛杉磯北嶺地震 (Northridge earthquake) 發生時，傳統式抗彎矩梁柱接頭在強震下，發生梁柱接合區鐸道或梁翼板處撕裂破壞，導致鋼結構無法發揮原有之韌性行為等，表示北嶺地震之前所設計之鋼結構梁柱接頭，無法完全抵抗強震，因此鐸接品質及梁柱接頭的補強在北嶺地震後成為首要重點。國內外學者及 FEMA-350 (2000) 皆提出梁柱接頭改良方法，並經過動態遲滯迴圈實驗證明，改良試體之塑性鉸確實能遠離柱面鐸道，且塑性轉角容量大於 3%，表示改良之梁柱接頭能有效的抵抗強震，並達到消能目的。

第一節 緒論

國內常見之改良梁柱接頭包含補強式 (strengthened) 接頭及減弱式 (weakened) 接頭，其中補強式接頭包括蓋板式 (cover plate)、側板式 (side plate)、擴翼式 (wing)、肋板式 (rib)、Haunch 式等；而減弱式接頭包括圓弧式切削及高韌性切削等 RBS (Reduced Beam Section) 梁柱切削接頭，其國內外常見及 FEMA-350 建議之梁柱接頭型式，如圖 4-1 所示，如逐一進行試驗將需考量成本與評估火害性能上的效益。因此，本研究將以上述改良式梁柱接頭，於虛擬複合爐中進行火害行為研究，期能利用分析先行得知何種形式接頭火害行為值得研究予以進行規劃。

第二節 側板式梁柱接頭設計

本節主要介紹側板式梁柱接頭設計，梁為 H488×300×11×18、全長為 8100mm，其步驟則參考饒智凱(2007)論文所設計，如下所示：

(1) 依梁斷面計算出梁本身之塑性彎矩 M_{pb} ：

$$M_{pb} = R_y Z_b \sigma_y \quad (4-1)$$

R_y 為材料變異係數、 Z_b 為梁之塑性模數、 σ_y 為鋼材之降伏強度，而本研究先前已委託中鋼構鋼試驗室進行 SN490B 鋼材之材料試驗，並且確定材料之力學性質等，所以上式之 R_y 材料變異係數可帶 1.0，設計梁之塑性模數為 3130cm^3 、鋼材降伏強度為 343.964MPa ，經過計算之 $M_{pb}=109.75$ (t-m)。

(2) 假設塑性鉸發生在離柱面 $d_b/4$ 位置，計算此處塑性鉸彎矩 M_{ph} ：

$$M_{ph} = \beta M_{pb} \quad (4-2)$$

$$\beta = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y} \quad (4-3)$$

d_b 為梁深 (488mm)、 σ_u 為鋼材極限強度、 β 為塑鉸超強因子，依 FEMA-350 建議 $\beta \geq 1.2$ ，經過計算之 $M_{ph}=131.7$ (t-m)。

(3) 將塑性鉸之彎矩投影至柱面，如圖 4-1 所示，並設計柱面需求之彎矩 M_{dem} ：

矩 M_{dem} ：

$$M_{dem} = \frac{L_b M_{ph}}{L_b (L_s + \frac{d_b}{4})} \quad (4-4)$$

L_b 為實尺寸梁跨距之半 (4050mm)， L_s 為加勁板長度 (300mm) $\geq b_f$ 梁翼板寬度 (300mm)，經過計算之 $M_{dem}=148.39$ (t-m)。

(4) 依圖 4-2 所示，可計算出加勁板所提供之塑性彎矩 M_{ps} ：

$$M_{ps} = \frac{1}{2} (d_b - 2t_f)^2 \sigma_y t_s \quad (4-5)$$

t_f 為梁翼板厚度 (18mm)、 t_s 為加勁板厚度，假設加勁板厚度為 18mm，代入上式後可得 $M_{ps}=64.47$ (t-m)。

(5) 計算梁身經側板補強後之彎矩容量 M_{cap} ：

$$M_{cap} = M_{pb} + M_{ps} \quad (4-6)$$

將梁與加勁板之彎矩相加，可得 $M_{cap}=174.22$ (t-m)。隨後利用側板補強之彎矩容量 M_{cap} ，計算出下節之蓋板補強厚度。

(6) 檢核彎矩強度需求比 α' ：

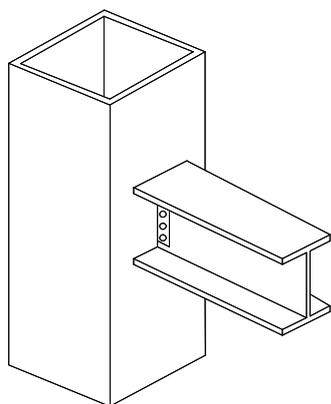
$$\alpha' = \frac{M_{cap}}{M_{dem}} \quad (4-7)$$

將 M_{cap} 及 M_{dem} 代入，可得 $\alpha'=1.174$ 大於建議值 1.15。

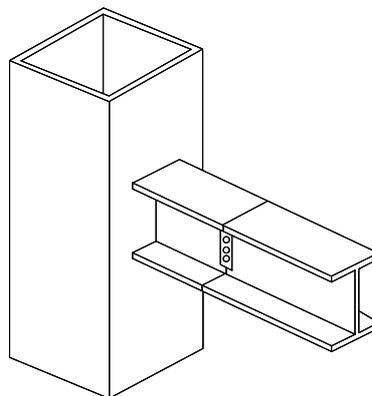
(7)最後可得側板尺寸，如圖 4-4 所示。

第三節 火害行為分析

由於側板於接頭區所造成之遮蔽效應，接頭鋼梁溫度明顯低於一般接頭，如圖 4-5 與 4-6。其破壞模式（圖 4-7）亦如預期發生於遠離接頭區，避免無法發揮原有之韌性之行為，而經分析比對一般接頭與側板接頭火害行為可發現，不論在梁端點變形（圖 4-8）或梁柱相對轉角上（圖 4-9），皆由原破壞歷時 24 分鐘提升至 26 分，提昇達 8.33%，不僅可達耐震要求，更可提升結構耐火時效。

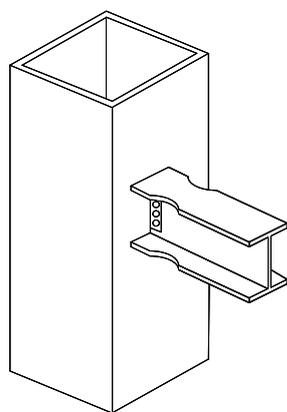


普通接頭

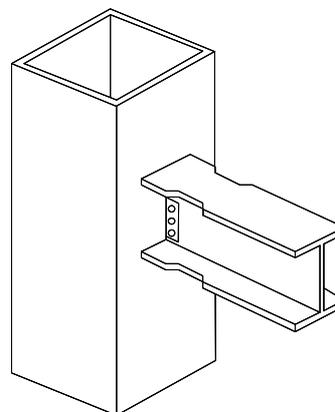


托梁接頭

(a) 未補強接頭

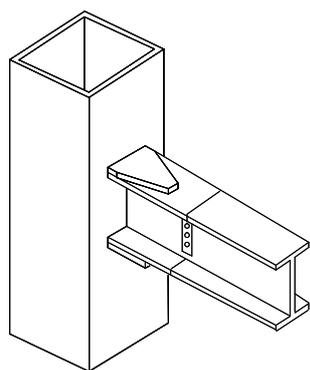


圓弧式切削接頭

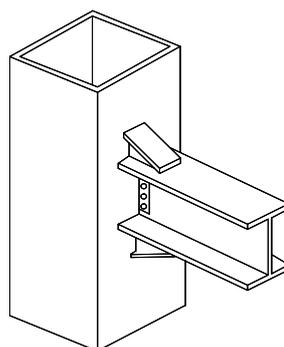


高韌性切削接頭

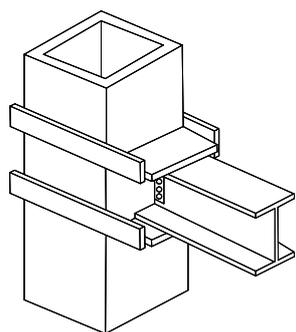
(b) 減弱式接頭



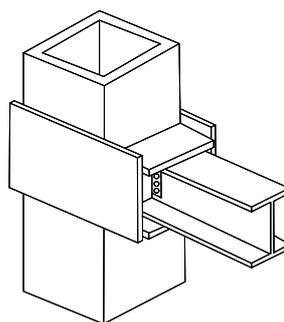
蓋板式



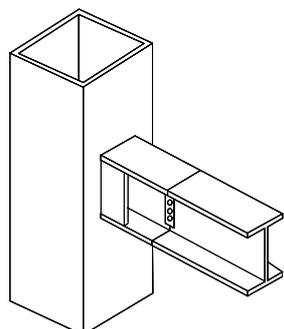
Haunch 式



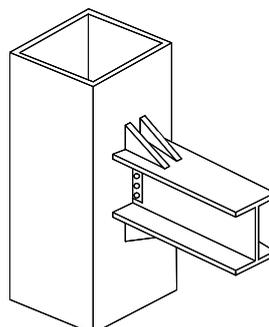
側板式 I



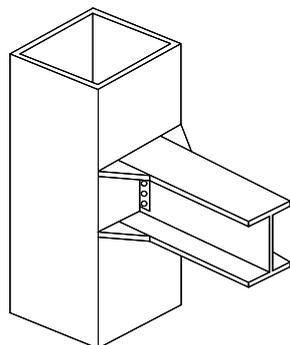
側板式 II



側板式 III



肋板式



擴翼式接頭

(c) 補強式接頭

圖 4-1 各接頭型式

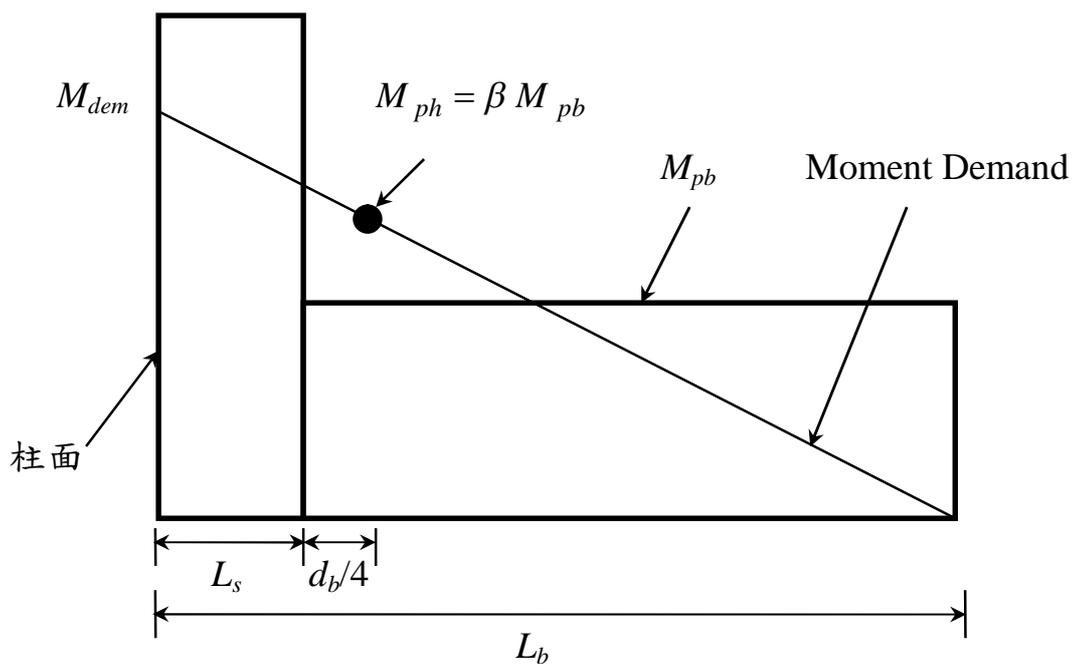


圖 4-2 彎矩容量投影圖 (饒智凱, 2007)

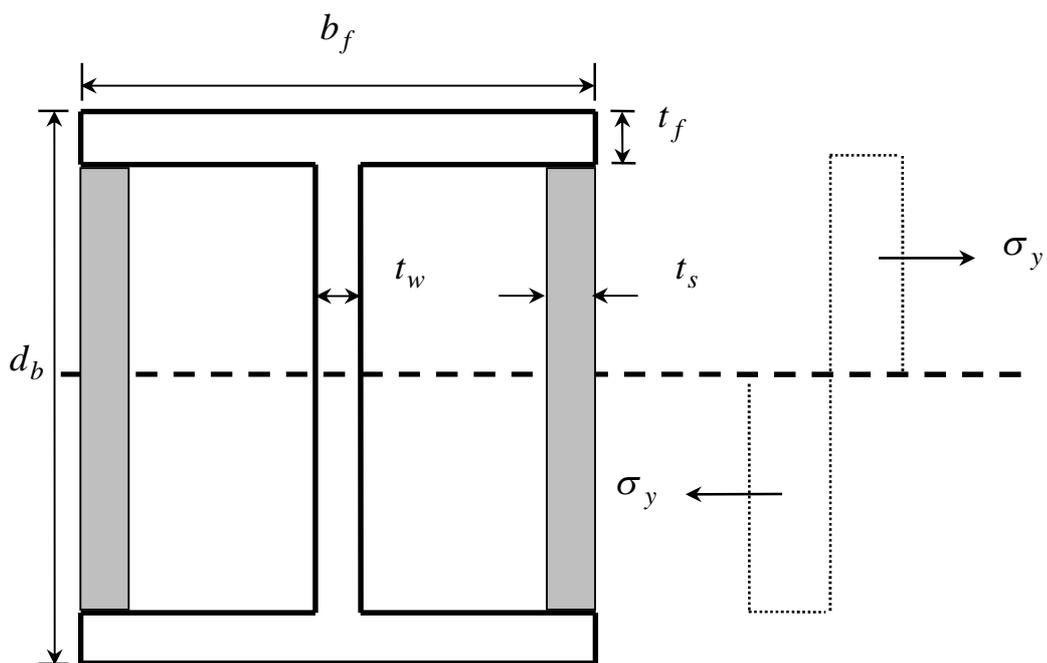


圖 4-3 側板處所提供之彎矩容量示意圖

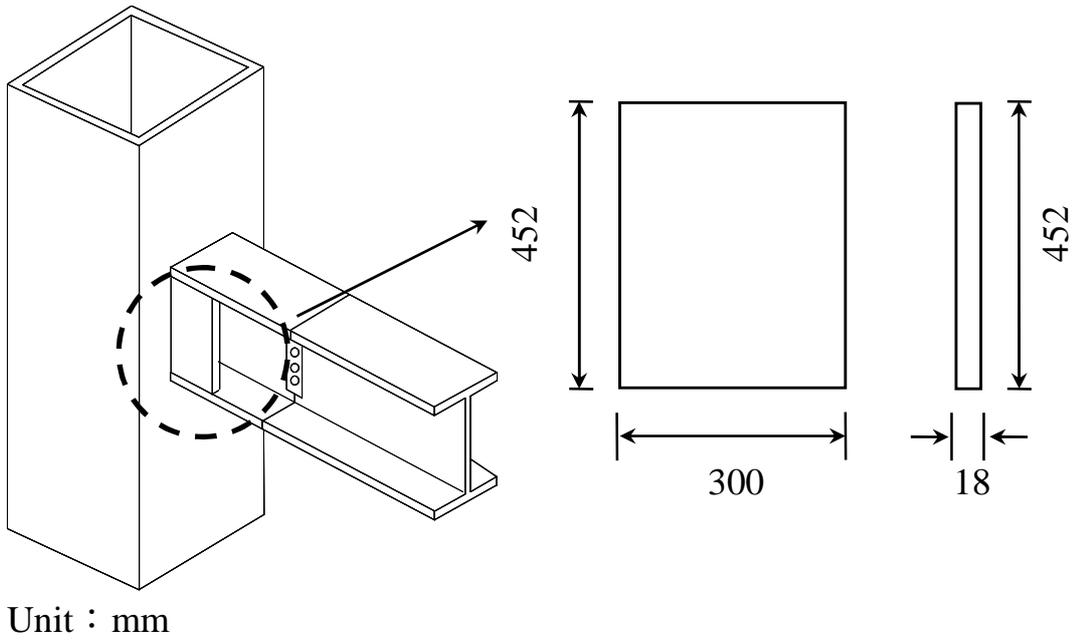


圖 4-4 側板式補強尺寸圖

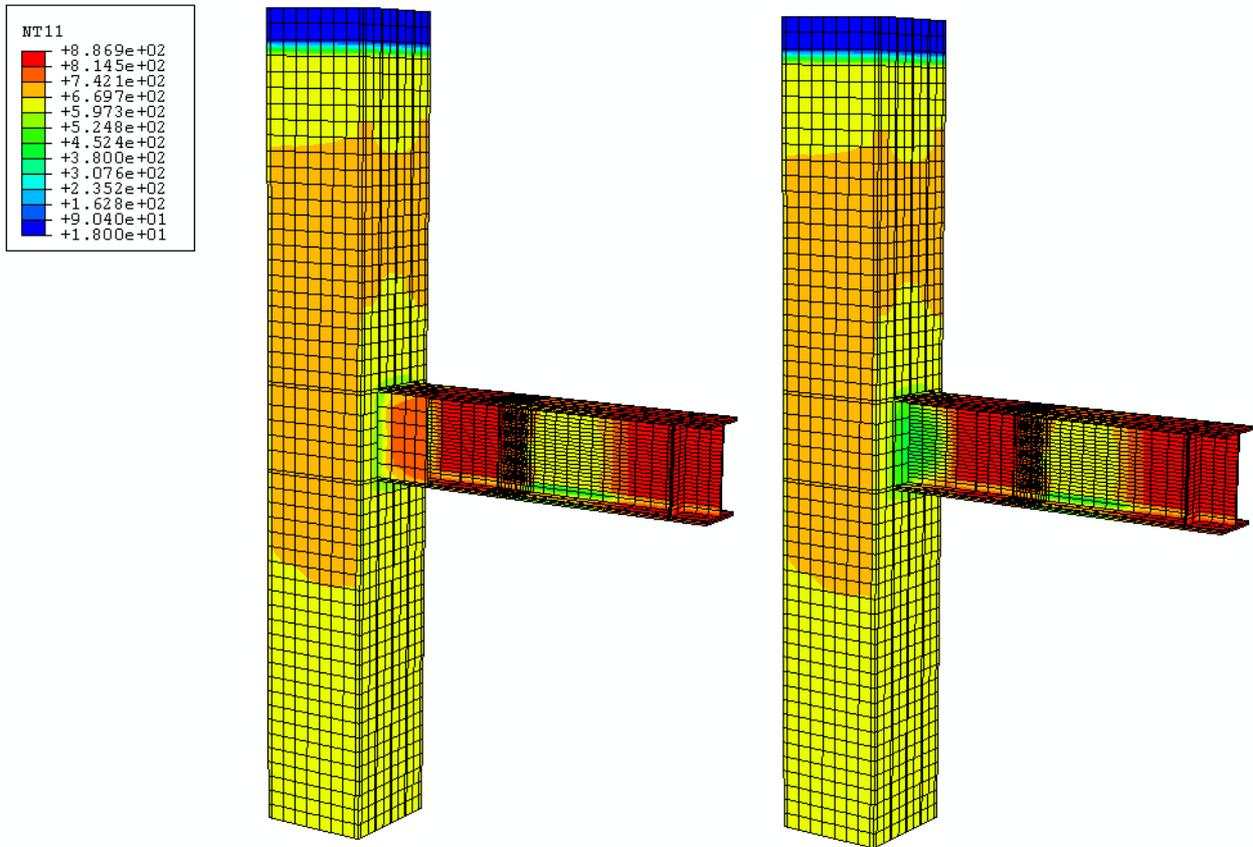


圖 4-5 側版遮蔽造成接頭區溫度降低

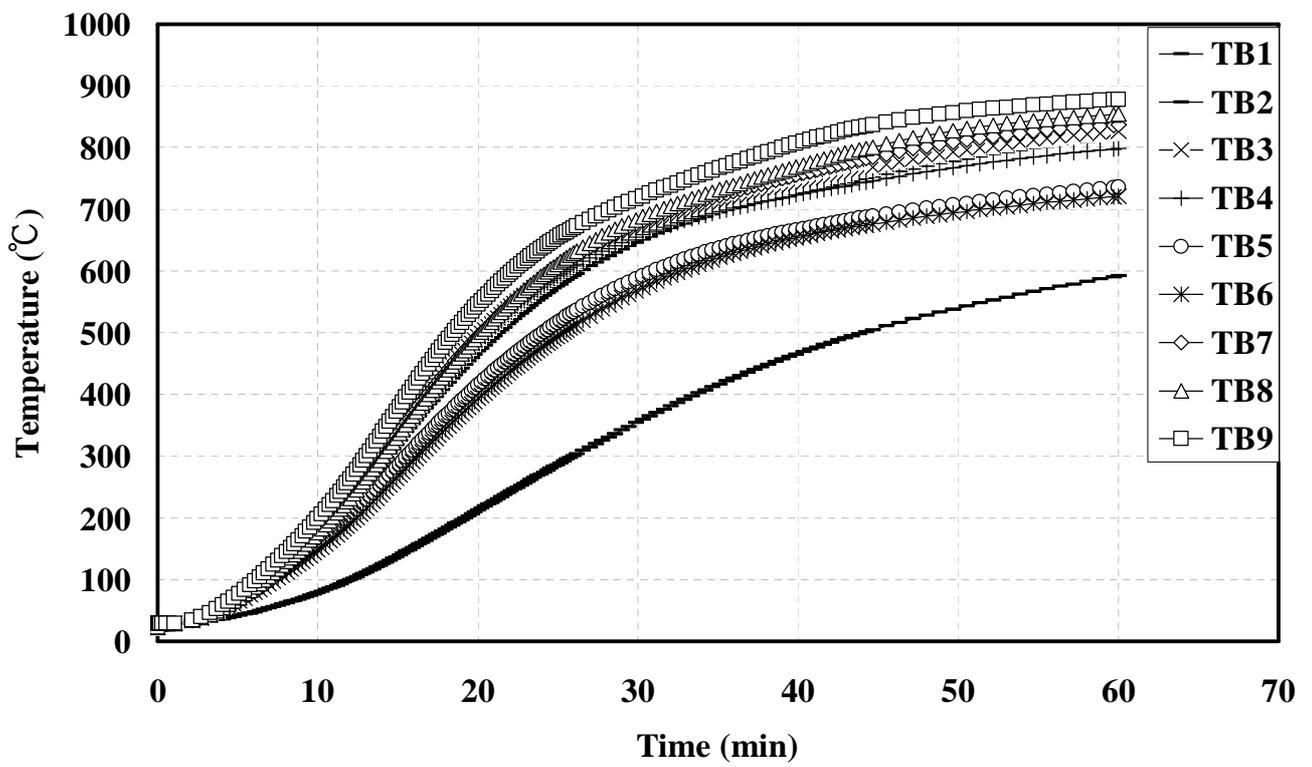
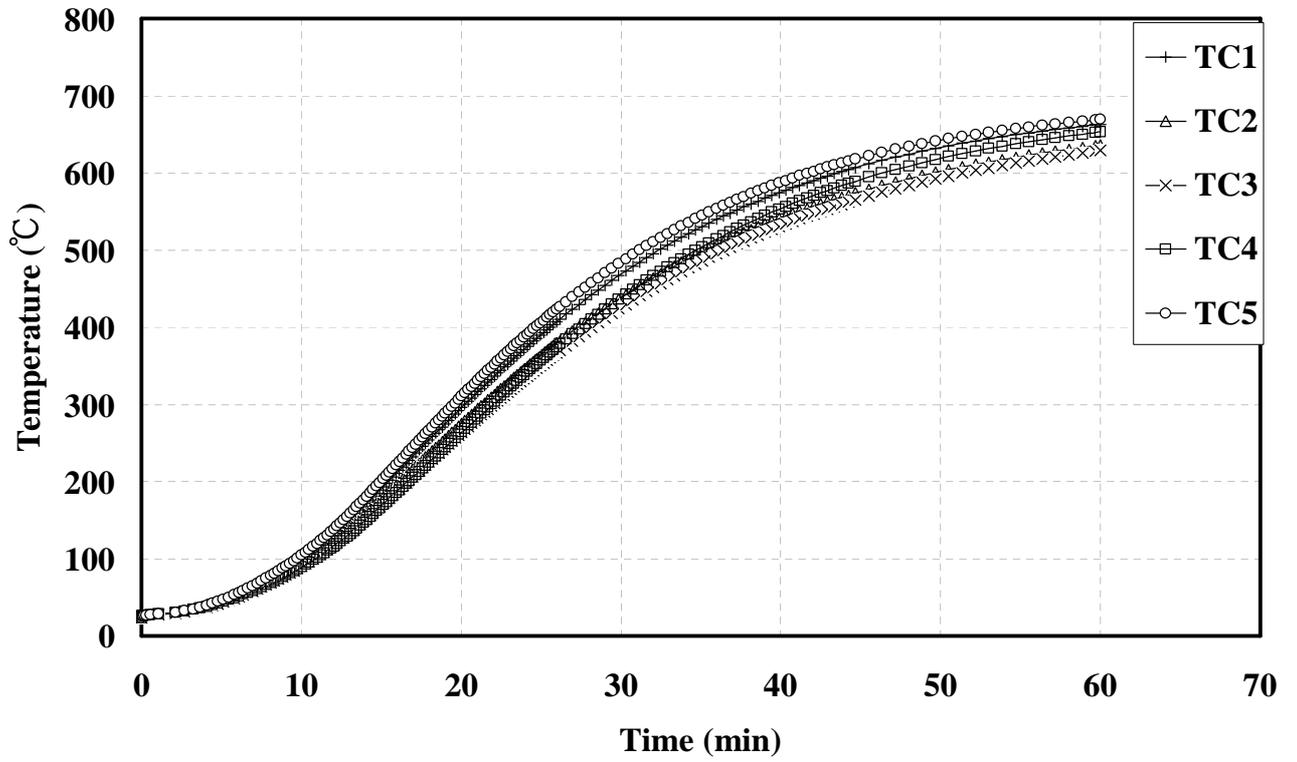


圖 4-6 普通鋼側板補強普通鋼托梁之升溫歷時曲線

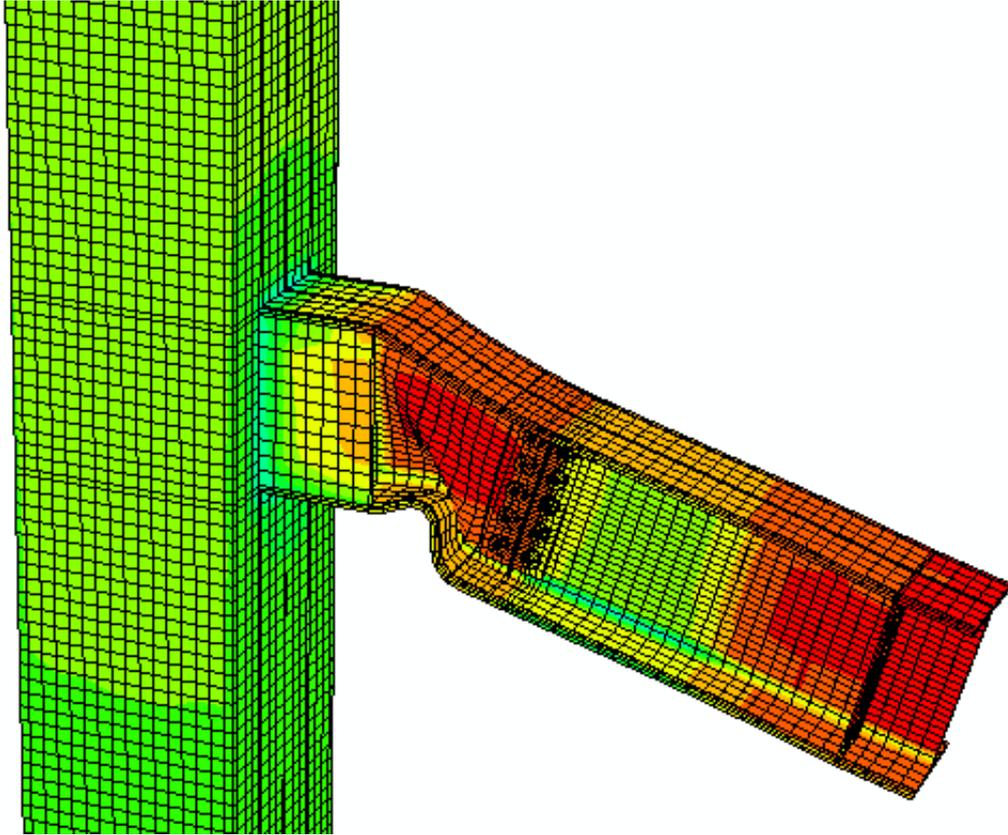


圖 4-7 側板接頭火害分析破壞模式

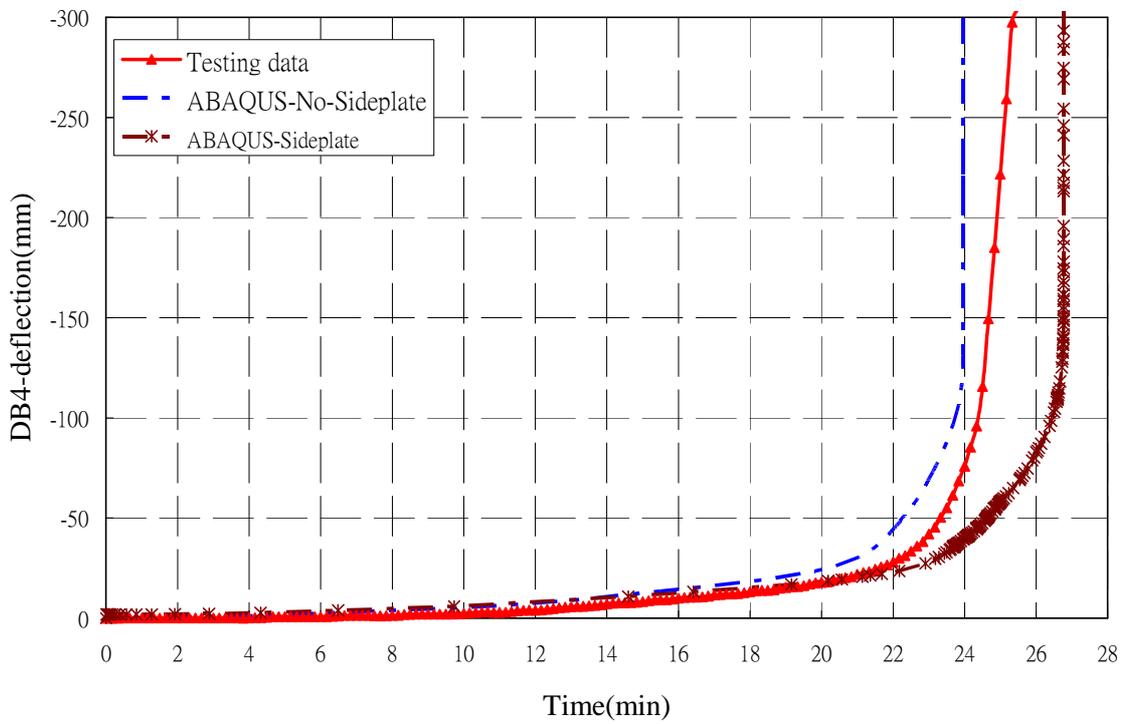


圖 4-8 側板加勁與一般接頭變形(DB4)-時間歷時曲線圖(Type-C)

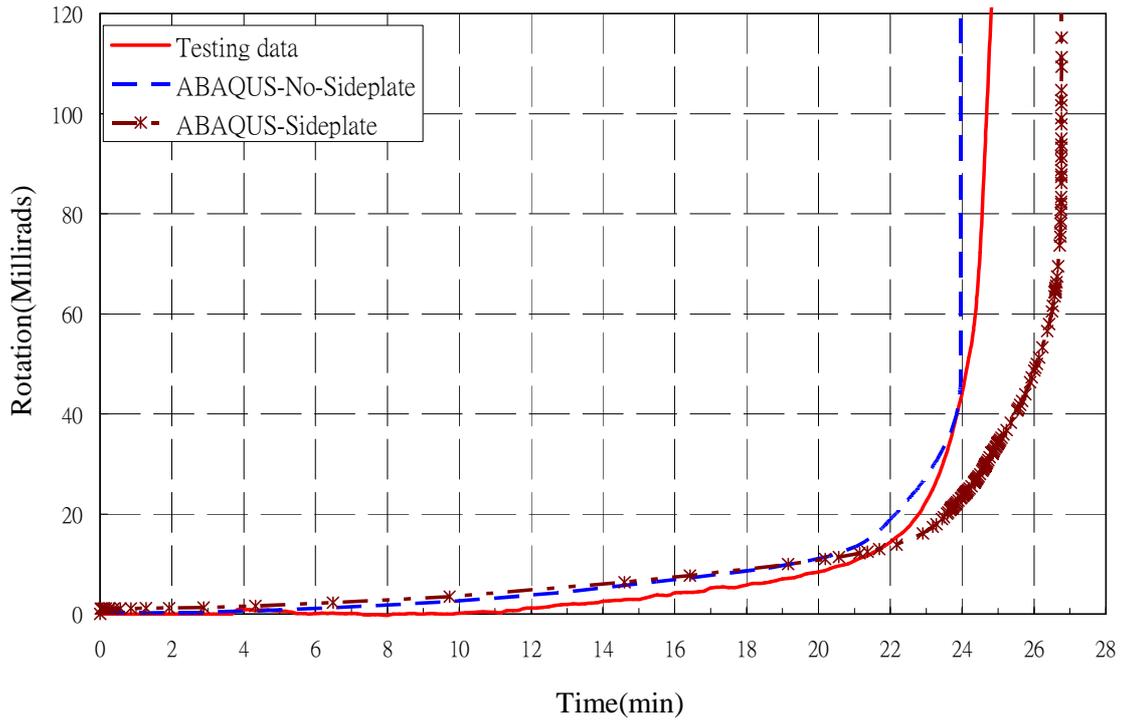


圖 4-9 側板加勁與一般接頭變形(轉角)-時間歷時曲線圖(Type-C)

第五章結論與建議

第一節 結論

1. 以 FDS 建立虛擬複合爐火害實驗，對於氣場溫度分佈及透過「Wall Temperature」計算鋼材試體受熱面溫度歷時，經與實驗比對，皆可達預期之分析成果；因此應用 FDS 結合結構分析軟體模擬火場重建，可行性相當高。
2. 由實驗結果可知，於一樣之標準爐溫升溫狀態下，利用平板式測溫器控制爐溫所造成之鋼材表面溫度，其升溫速率較利用熱電偶控制爐溫者快，惟到實驗 1 小時後，兩者溫度差異甚小。
3. 平板式測溫器於安裝時較 K-type 測溫棒不易，且因其端部為一板狀，倘試驗過程中損害，並無法直接抽回更換，如屬紀錄性質尚無影響實驗進行，如為控制爐溫點，則試驗結果將有所差異，因此在實驗操作上風險較高。
4. 補強式側板接頭形式，於火害初步分析時可使試體之塑性鉸遠離柱面，更可提升接頭耐火時效。

第二節 建議

建議一

鋼結構火害實驗進行前之規劃與試體破壞評估:立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

利用虛擬之複合爐結合 FDS 與結構分析軟體，可建構完整對於火災－結構(Fire- Structure)分析介面與整合，對於實驗進行前之規劃與試體破壞情形，得以先行分析得知，予以設計妥適安全設備(如適當側撐等)，以維護試驗進行與爐體設備安全。

建議二

側板式梁柱耐震接頭火害行為研究:中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

側板式梁柱耐震接頭設計於接頭區所造成之遮蔽效應，接頭鋼梁溫度明顯低於一般接頭，其破壞模式亦如預期發生於遠離接頭區，避免無法發揮原有之韌性之行為，而經分析比對一般接頭與側板接頭火害行為可發現，不論在梁端點變形或梁柱相對轉角上，不僅符合耐震要求，更可提升結構耐火時效。因此，該接頭之具體實驗規劃與進行有其研究價值。

參考書目

- Banovic, S.W., McCowan, C.N., and Luecke, W.E., “Physical Properties of Structural Steels, Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster,” National Institute of Standards and Technology, 2005.
- Duthinh, D., McGrattan, K., Khaskia, A., “Recent advances in fire-structure analysis”, Fire Safety Journal, Vol.43, pp.161-167, 2008.
- Eurocode 3, “Design of Steel Structures-Part1.2 : General rules-Structural Fire Design.” (ENV1993-1-2), 1995.
- Forney, G.P., “User’s Guide for Smokeview Version 5- A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data”, NIST, 2008.
- Gardner L., and Ng K.T., ”Temperature Development in Structural Stainless Steel Sections Exposed to Fire.” Fire Safety Journal, Vol.41, pp.185-203, 2006.
- Jowsey, A., Torero, J.L., Usmani, A., “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, 2004.
- Liu, T.C.H., Fahad, M.K., and Davies, J.M., “Experimental Investigation of Behavior of Axially Restrained Steel Beam in Fire,” Journal of Constructional Steel Research, Vol. 58, pp. 1211-1230, 2002.
- McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J., “Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide”, NIST, 2008.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., McDermott, R., “Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide”, NIST, 2008.

Wickstrom, U., Duthinh, D., McGrattan, K., “Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures”, Interflam 2007, London, England, September 3-5, 2007, pp.943.

Wickstrom, U., “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, 2009.

林誠興，「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，2006。

林誠興、王士承，「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，pp46-53，2007。

附錄-期末審查意見

黃教授玉麟	意見答覆
<p>(1) 第 54 頁圖 3-9 及第 56 頁圖 3-13 側稱位置是否為筆誤。</p> <p>(2) 模擬破壞模式與試驗破壞模式完全符合，實屬難得。</p> <p>(3) 側板柱頭之試驗請在後續研究中執行。</p> <p>(4) 若不需要側板之強度，則使用防火材料代替側板，是否可能在成本上及效果上更佳。</p> <p>(5) 後續研究中若試驗結果包含殘留強度之模擬與試驗，則對安全性能之評估，將更為完整。</p>	<p>已修正於第 56 頁與第 56 頁。</p> <p>謝謝指教</p> <p>將於後續研究中納入規劃</p> <p>本研究側板之應用係於耐震接頭上需考慮為前提</p> <p>強度之推估分析於後續研究中將予以納入</p>
陳技師正平	
<p>(1) 研究成果對接頭區之遮蔽有保護作用延緩破壞時間，惟一般情況連續梁受火害後有懸索作用及力量重分配作用，因此後續研究建議以連續梁模式研究。</p> <p>(2) 一般鋼結構之火害行為，主要為挫屈變形為主，建議亦為後續研究之課題。</p>	<p>後續研究予以規劃納入</p> <p>參採所建議課題</p>
陳教授舜田	
(1) 本研究目的是要瞭解火害中鋼結構行	本研究以分析火害中鋼結構行為為主

<p>為？或火害後鋼結構之殘餘強度？或做為防火設計之參考？宜做較明確的釐清。</p> <p>(2) 側板加強的梁柱接頭對接頭部位溫度之升高自有幫助，但在無火之正常情況其強度韌性是否較其他接頭更優秀，宜有些瞭解與說明。</p> <p>(3) 工程實用上對鋼結構似應以防止火災中結構倒塌為主要考量，被覆材料的保護是必要的。</p>	<p>國內外對於常溫下側板加強的梁柱接頭之遲滯圈分析期刊或文章已頗多，本案不另行著墨</p> <p>謝謝指正</p>
<p>林主任委員世昌</p>	
<p>(1) 第 12 頁與第 13 頁圖 2-6 與 2-7 曲線的定義，請加註說明。</p>	<p>已於第 12 頁與第 13 頁圖 2-6 與 2-7 曲線的定義加註說明</p>
<p>許理事長俊美</p>	
<p>(1) 肯定李計畫主持人對本研究案預期成果的努力。</p> <p>(2) 對研究預期成果，如何對建築物規劃設計，對空間規劃時考量與成果的應用。</p> <p>(3) 以上建議作後續研究</p>	<p>謝謝指正</p> <p>預期成果中對於本案之應用層面已另行補述</p> <p>謝謝指正</p>
<p>金教授大仁</p>	
<p>本計劃所建立之有限單元模式可合理預測鋼梁柱在高溫下的力學行為。建議利用所提之有限單元模式探討不同接頭方式、受溫狀況</p>	<p>所提之有限單元模式探討不同接頭方式、受溫狀況及構架型態等參數對鋼構強度之影響，將進行後續參數研究</p>

及構架型態等參數對鋼構強度之影響。	
陳組長建忠	
<p>(1)研究所提平板測溫計之「使用限制」，是研究所撰，亦或文獻整理而來，如是前者，已有具體發現，宜詳細整理，以免國際防火研究一再誤用。</p> <p>(2)請多研提研究課題提案單以及研究計畫，以供各「個案中綱計畫」之分年研究計畫規劃之參考。</p>	<p>研究中所提之限制係參考國外文獻而來，並輔以本案實驗成果所得。</p> <p>遵照辦理</p>

