鋼結構抗彎梁柱接頭在高溫環境下之行為研究

邱耀正[1]　何明錦[2]　李鎮宏[3]　蕭博勳[4]

摘要

本文應用有限元素分析程式 ABAQUS 探討 H 型鋼抗彎梁柱接頭在高溫環境下之行為。文中以暫態熱傳與結構耦合行為建立數值分析模式，熱傳分析係以耐火爐內經對流與輻射將熱量傳遞至試體表面之溫度模擬；結構分析考慮彈塑性大變形分析，網格建立係分別採用三維一階線性減積分殼元素(S4R)與實體元素(C3D8R)，進行鋼構架梁柱接頭於定溫加載狀態下之熱傳與結構行為數值分析(550^{0}C 與 650^{0}C)，最後以大尺寸梁柱接頭試體之定溫加載實驗成果驗證本文之數值結果。

經與實驗數據結果相比對，顯示本文之熱傳與結構數值分析與實驗結果趨勢一致，亦即所建立之熱傳與結構耦合行為之數值模式可有效分析高溫下結構大變形行為。

關鍵字: 抗彎梁柱接頭、熱傳結構耦合。

Study on Structural Behavior of Steel Beam-Column Moment Connection in Fire

Yaw-Jeng Chiou[1]　Ming-Chin Ho[2]　Chen-Hung Lee[3]　Po-Hsun Hsiao[4]

ABSTRACT

. This article presents the behavior of steel beam-column moment connections under high temperature by using the analysis program of ABAQUS. The transient heat transfer and structure sequential couple behavior has been carry out to build up the analysis model. The heat transfer model simulates the temperature development on the surface of steel under the heat convection and radiation. The structural analysis considers the large deformation and elasto-plastic behavior, to use three dimension linear-integration shell element(S4R) and solid element(C3D8R) individually to set up the network, and thus to proceed the data analysis of the structural behavior for the steel structure beam-to-column connection under constant temperature with loading (550^{0}C and 650^{0}C), at last, to use the practical result of large scale beam-to-column connection specimen under constant temperature with loading to verify the results with the analysis.

Through the comparison with the practical test results, it has shown that the analysis result from the program gives relatively close results, thus this proved that the simulation model of coupling the transient thermal and structure behavior could efficiently analysis the large structural deformation under high temperature

Keywords: Beam-Column Moment Connections、Thermal and structure sequential couple

一、前言

過去研究對於鋼結構在高溫環境下的結構行為模式都建立在對單一構件（如梁或柱）的耐火試驗結果上，而認為因溫度昇高所造成材料強度的降低為主要的控制因素，因此現行的設計規範亦遵循此一脈絡，即假設高溫環境下鋼結構之行為與常溫時是相同的，僅材料強度的差異。此簡單的基本假設，在靜定結構中因無熱應力的效應，一般而言尚可接受；但在具高度靜不定的實際結構物中，則有相當大的誤差。根據新的研究成果顯示，鋼結構

1 國立成功大學土木工程研究所教授
2 內政部建築研究所所長
3 國立成功大學土木工程研究所博士生，內政部建築研究所助理研究員
4 國立成功大學土木工程研究所碩士生

受熱所產生的熱膨脹(thermal expansion)與熱彎曲(thermal bowing)，因在結構中受束制（restrained）而引起的熱應力與變形方為主要控制因素，而材料強度的折減實為次要因素。且根據實驗結果，鋼結構所具有的耐火性能遠較由單一構件進行耐火試驗所得結果為高，此意謂著現行的設計規範皆過於保守而有檢討修正的空間。

過去在鋼結構受火害的研究上，多著重於以數值方法模擬結構個別構件或整體構架在不同溫度場的結構行為為主，並與試驗結果加以驗證。針對火害下結構之相關研究，G.M,Newman,等[1]彙整 1995~1996 年間於英國 Cardington 所做之 8 層樓鋼構造火災試驗，包括連續梁、樓板等實驗資料，為目前最具規模之火害研究;El-Rimawi 等[2]研究受火害下半剛性接頭之行為，由不同之接頭形式定義出相對應之破壞溫度;Liu 等[3]則針對軸向束制梁於高溫下之行為進行試驗，發現當梁下翼版之溫度介於 450~600℃ 接頭區之能承受之彎矩逐漸下降；上述研究描述實際結構體之連續性與較複雜的束制條件。另針對鋼材於火害中溫度之發展，Gardner & Ng[4]以 ABAQUS 進行一般碳鋼與不銹鋼材表面溫度之數值分析與實驗結果比對研究。

本研究以 95~96 年間於內政部建築研究所防火實驗中心所規劃進行之二組定溫加載實尺寸梁柱接頭高溫結構試驗為驗證對象，應用數值解析探討高溫引起梁柱接頭的熱應力與變形行為，並利用 ABAQUS 軟體為工具進行鋼結構梁柱接頭火害行為之分析，用以驗證本文所建立分析模式正確性。

二、研究規劃與設備概述

本研究主要針對台灣鋼結構建築常採用之抗彎矩梁柱接合火害下結構行為進行高溫破壞試驗，試體尺寸依現行極限設法規範進行設計，梁斷面為長 3.1m 之 H600x300x12x25mm 銲接組合型鋼，柱斷面為高 4.35m 之 H600x600x25x36mm 銲接組合型鋼。鋼材材質為 ASTM A572 Gr. 50，除梁柱接頭為現場銲接外，梁柱之銲接組合型鋼為工廠銲接。試體尺寸如圖一。

本研究所用之設備，為一多目的耐火試驗爐，經適當配置安排，可為梁柱單一構件或梁柱、樓板複合構架之耐火實驗，試驗設備外觀如圖二，相關規格及功能略敘如下：

1. 尺度：柱爐淨高 3.3m、斷面 4m*4m。
2. 梁版爐淨深 2.3m、斷面 4m*8m。
3. 加熱模式：可進行 ISO 834、ASTM E119、BS 476 等規範規定之加熱曲線。
4. 加載系統：柱加載 2000 頓，最大行程 500mm。梁集中加載 100 頓 1 支、最大行程 600mm，均佈載重 50 頓 4 支、最大行程 600mm。
5. 加載控制模式：梁、柱加載可為壓力控制及位移控制兩種模式。均佈載重則為壓力控制模式。
6. 試體型式：可進行單一梁、柱、板及屋頂構件。複合梁柱接頭構架、梁版系統及複合梁版柱系統。

三、結構與熱傳材料性質

分析火害下結構行為不外乎需考量下列高溫下材料性質1.應力-應變曲線2.熱膨脹係數3.熱傳導4.比熱5.自重等，本節中將針對高溫下應力應變曲線及兩大主要熱傳參數，熱對流係數與熱輻射之應用予以說明，其他部分參數則採用 ENV 1993-1-2[8]規範值。

3.1高溫下應力與應變曲線

鋼材在高溫中的應力應變曲線並無明顯之降伏點與降伏平台，然而對於降伏強度之決定方式目前亦無定論，因此各國規範目前也有不同之規定，如 BS 5950[5]中依結構受力形式提供 0.5%、1.5%、及 2%應變所對應之應力，而 Eurocode 3[6]則採用 2.0%應變所對應之應力為降伏強度。由於降伏強度之決定對結構強度之影響有密切關係，因此必須先探討高溫中降伏應力之大小及提出合理之決定方式，以利於建立合理預估鋼結構構件高溫強度之方法，後續分析模式所需之應力應變曲線，其根據不同溫度下材料單向拉伸試驗所得之應力應變曲線(圖三)。

3.2 熱對流係數

熱對流係數不是一材料常數且常視為一流體性質，與熱流參數及受熱物件之表面幾何有關，熱對流係數亦與溫度相依，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。當在標準升溫曲線加熱過程中，EN 1991-1-2 建議該熱對流係數為 25W/m^{2}K，該值與材料無關，而與所用升溫曲線(速率)不同而異，如碳氫化合物類火災曲線，本文後續分析採用建議值。

3.3 熱輻射(放射率)

輻射熱傳由放射率決定，通常介於 0~1 間，與溫度高低、放射角度與波長相關，一般工程應用上常引用 EN 1991-1-2 視放射率與波常無關且為一定值，當放射率為 0 時代表入輻射完全被反射回來，當為 1 時則視熱輻射完全被吸收，因此放射率越低時代表材料升溫過程將趨緩。在 ENV 1993-1-2 中一般鋼材之放射率 ε_m=0.7，後續分析亦採用此建議值。

試體在耐火爐中之溫度成長端視鋼材放射率 ε_m與耐火爐體之放射率 ε_f，兩者相對之尺寸與位置則十分重要，常視為一當量 $\varepsilon_r=\varepsilon_m\times\varepsilon_f$，當試體與爐體尺寸相對較小時而且耐火爐壁體所反射之輻射量可忽略時，該放射率當量可視為 ε_m，在 EN 1993-1-2 規範中對於一般火災情境下該值為 1。

四、數值分析與驗證

試體置放於耐火爐中進行加熱升溫，由於爐內強制對流與熱輻射之交互影響下，爐內溫度與鋼材表面溫度並不等同，本節將考慮熱對流與輻射情況下爐溫與鋼材表面溫度間之差異，應用 ABAQUS 建立分析模式進行暫態熱傳分析與實際量測到之鋼材表面溫度做一比較，並作為後續結構偶合分析之基礎，進行構件極限荷重與外力-變形關係之探討。

4.1 熱傳分析模式

鋼材表面溫度發展取決於熱對流與輻射，因此靜熱輻通量為h_{net} (W/m^2)由$h_{net,c}$(Eq1)與$h_{net,r}$(Eq2)之總合

$$h_{net,c}=\alpha_c\times\left(T_g-T_m\right) \quad (1)$$

其中 α_c為熱對流係數，T_g為爐溫，T_m為鋼材表面溫度

$$h_{net,r}=\varepsilon_m\varepsilon_f\sigma\times\left[\left(T_g+273\right)^4-\left(T_m+273\right)^4\right] \quad (2)$$

其中σ為 Stefan-Boltzmann 常數(=5.67×10^{-8} W/m^{2}K^4) 。

分析時以定溫 550^{0}C 與 650^{0}C 之升溫歷時為驗證對象，元素採用 DCC3D8 之 8 節點實體 HEX 元素，另殼元素因其於厚度方向之溫度分佈視為均值，恐與實際結果差異較大故暫不予以考量。

4.1.1 分析結果

為便於爐溫之輸入，將試體分為五大區域(圖四)1.柱上半部 2.接頭區 3.柱下半部 4.梁左端(以中間加勁板作區隔)5.梁右端，各區域內爐溫測溫棒之平均值視為爐溫，各區域鋼材表面溫度測點之平均值為驗證對象，分析結果如圖五~九所示，顯示數值結果與實驗間相關性頗為接近，以 550^{0}C 為例其相關係數皆近似 1(表一)，即代表本暫態熱傳之數值模式，於已知爐溫在試體周遭分布前提下，能夠預估模擬經熱對流與熱輻射將熱量傳遞至試體表面之溫度。

4.2 結構分析模式

因考慮大變形－彈塑性行為及避免剪力自鎖效應(Shear Locking)，研究中使用三維一階線性減積分殼元素(Shell Element S4R)與實體元素(C3D8R)進行鋼構架梁柱接頭於定溫加載狀態下之結構行為數值分析(550^{0}C 與 650^{0}C)，且為避免一階線性減積分元素因存在於本身的所謂沙漏現象(Hourglassing)，網格需細分以解決此一問題（圖十）；分析模式所需之應力應變曲線，係根據不同溫度下材料單向拉伸試驗所得之應力應變曲線，以求得試體之內力與位移、應力與應變等反應；至於分析模型之邊界條件係模擬實際試驗時之加載條件（柱上端 Ux=Uy=Uz=0；柱下端 Ux=Uy=0；梁端為自由端）。

4.2.1 定溫加載實驗驗證

1.定溫加載 550^{0}C 驗證

該實驗過程中當梁端加載至 53 噸時，因變形量過大而停止試驗，視為其極限荷重，經 ABAQUS 分析結果(圖十一)得知，其臨界荷重分別為 53.1 噸(Shell element)與 50 噸(Solid)，與實驗值誤差分別為+0.2%與-6%，而外力與變形歷時曲線之實驗與分析趨勢一致。

2. 定溫加載 650^{0}C 驗證

其實驗結果梁端極限荷重為 42 噸，而經分析所得極限荷重為 41 噸(shell)與 40 噸(solid)(圖十二)，與實驗值誤差分別為-2.4%與-4.8%，而外力與變形歷時曲線之實驗與分析趨勢一致。

由上可知，本文應用 ABAQUS 所得分析結果，於極限荷重與外力及變形歷時曲線之分析上頗為適切。

五、結論與展望

1.本文應用 ABAQUS 所建立之高溫下熱傳與結構數值分析模式，經引用實尺寸試驗結果相驗証下，不管於鋼材表面溫度模擬與極限荷重或外力-變形曲線之分析，該數值模式皆可與實驗結果相契合。

2. 以往熱傳結構分析均以試體表面溫度為以知前提下進行數值分析，惟實驗過程耗時甚巨，本文已更近一步於已知爐溫(標準升溫曲線或預計升溫速率)在試體周遭分布狀況下，有效模擬經熱對流與熱輻射將熱量傳遞至試體表面之溫度分佈，利於後續結構力學之分析。

3.經引用殼元素(shell element)與實體元素(solid element)進行定溫加載數值模擬梁端變位與極限荷重可知，兩元素皆可得與實驗結果比對不錯之成果(誤差±6%內)，然殼元素分析所需時間較短，可為暫態熱傳與結構耦合之元素分析考量；惟殼元素於厚度方向之溫度分部為均溫，倘進行定載加溫之暫態熱傳與結構耦合分析恐較不適宜。

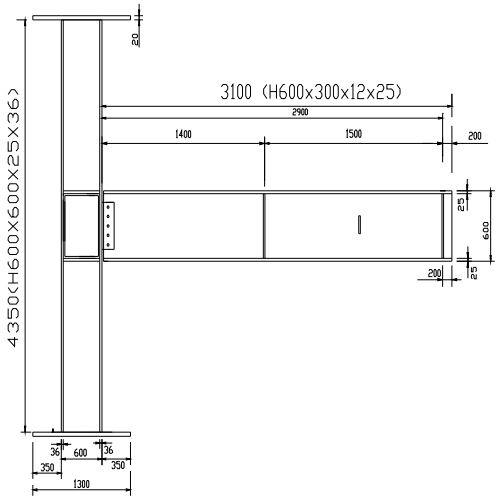
4.熱傳分析之參數研究(如熱對流係數與放射率等)，於強制對流與熱輻射交互影響下之數值穩定分析仍待後續討論。

參考文獻

1. G.M,Newman,C.G,Bailey&J.T.,Robinson, Fire Safe design:A New Approach to Multi-Storey Steel-Framed Buildings, The Steel Construction Institute,1998.
2. J.A. E1-Rimawi,I.W. Burgess,R.J. Plank," Studies of The Behavior of Steel Subframes With Semi-Rigid Connections In Fire", Journal of Constructional Steel Resear -ch,Vol49,pp83-98(1999).
3. T.C.H. Liu, M.K. Fahad, J.M. Davies," Experimental Investigation of Behavior of Axially Restrainted Steel Beams In Fire", Journal of Constructional Steel Resear -ch,Vol58,pp1211-1230(2002).
4. L. Gardner& K.T. Ng,"Temperature Development In Structural Stainless Steel Sections Exposed to Fire", Fire Safety Journal, Vol(41),pp185-203(2006).
5. "Structural Use of Steelwork In Building Part8:Code of Practice For Fire Resistant Design",British Standards Institution (19- 90).
6. "Eurocode3-Design of Steel Structures Part 1-2:General Rules-Structural fire Design", British Standards Institution,(1990)

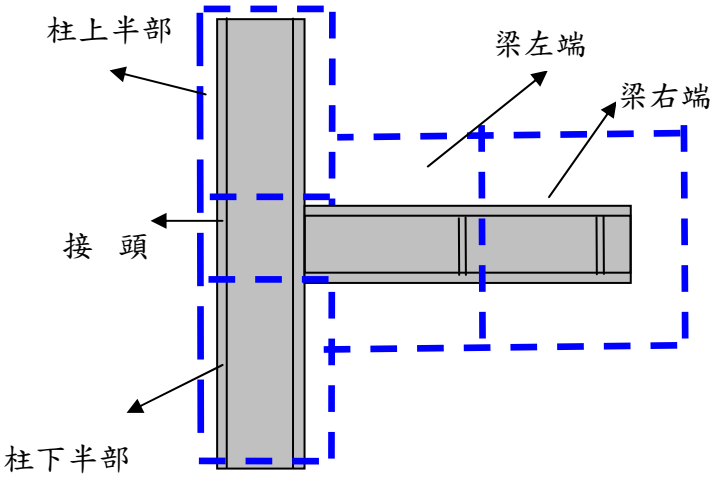
表一

表面最高溫(^{0}C)	柱上半部	接頭區	柱下半部	梁左端	梁右端
實驗值	518	528	512	520	481
分析值	550	547	552	548	510
曲線相關係數	0.98	0.97	0.97	0.98	0.99



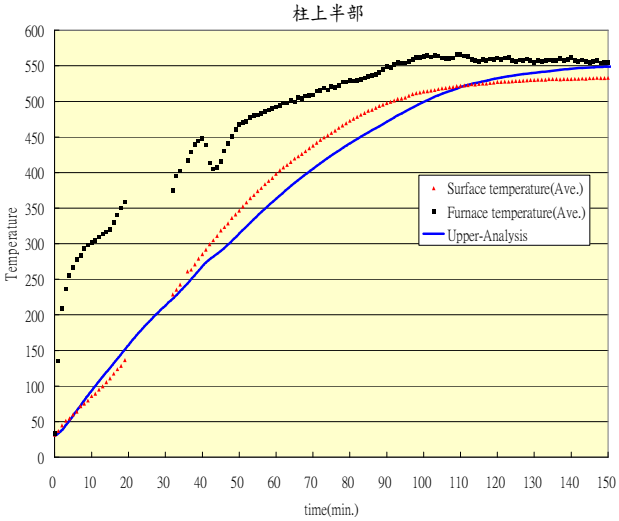
圖一 A 試體尺寸(單位:mm)

圖一 B 試體安裝於複合爐內

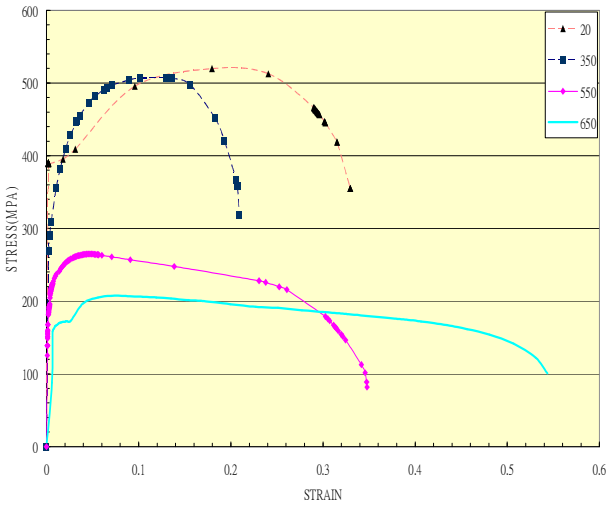


圖四:試體周遭爐溫分布圖

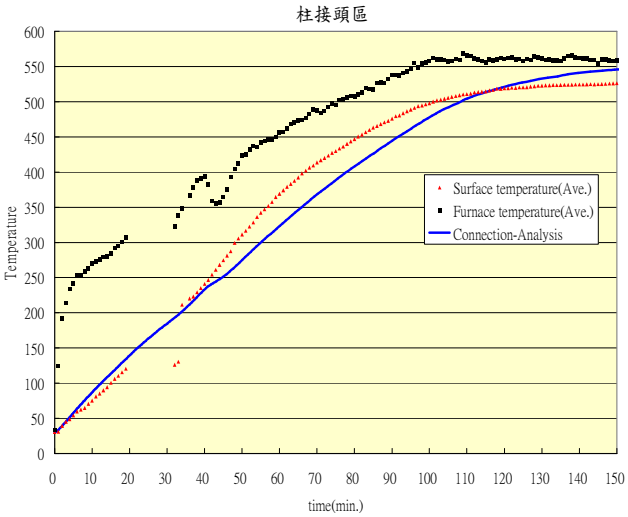
圖二複合爐與加載設備



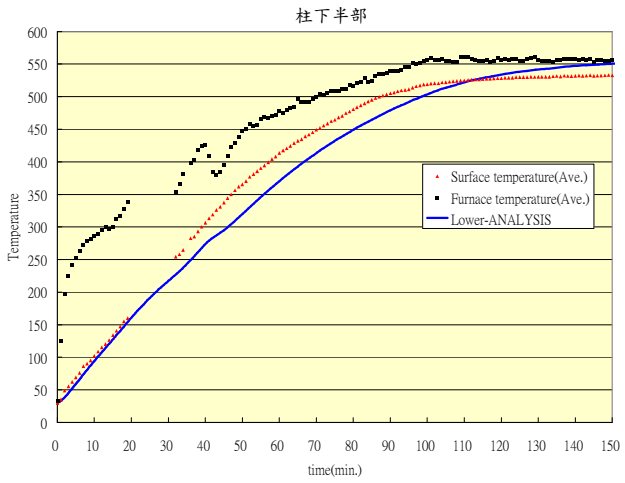
圖五柱上半部爐溫與鋼材表面溫度
(定溫 550^{0}C)



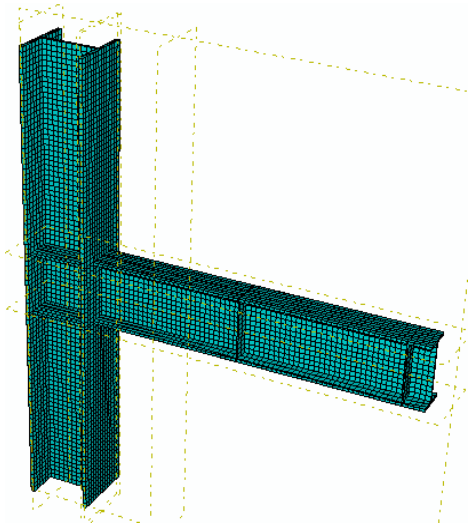
圖三:高溫應力-應變曲線圖



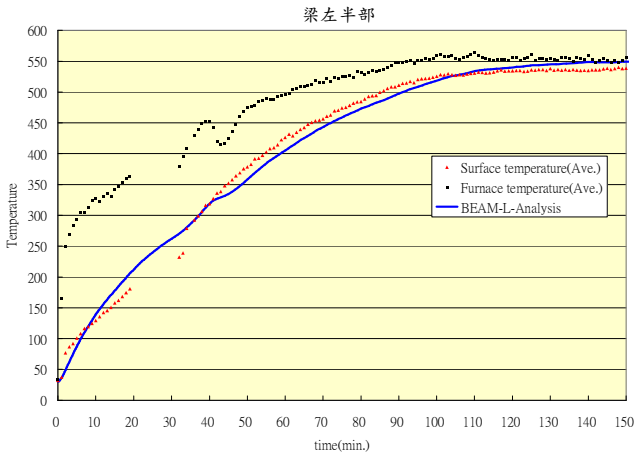
圖六柱接頭區爐溫與鋼材表面溫度
(定溫 550^{0}C)



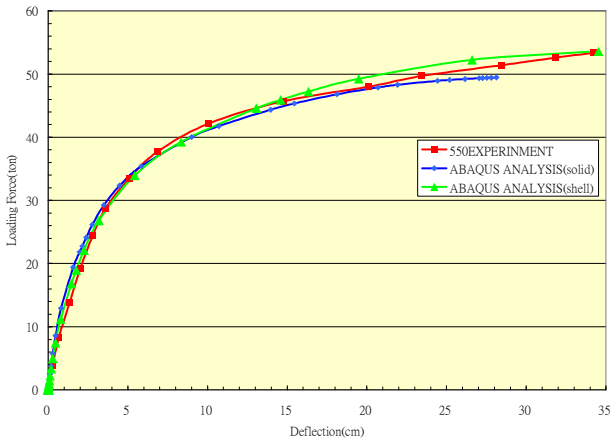
圖七柱下半部爐溫與鋼材表面溫度(定溫 550^{0}C)



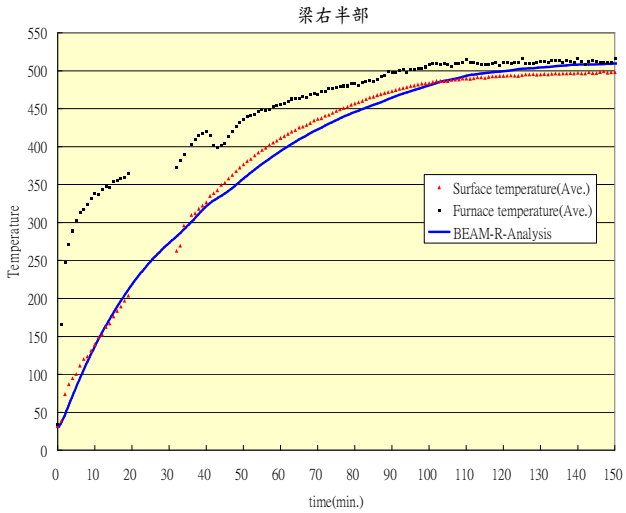
圖十 分析模型元素切割圖



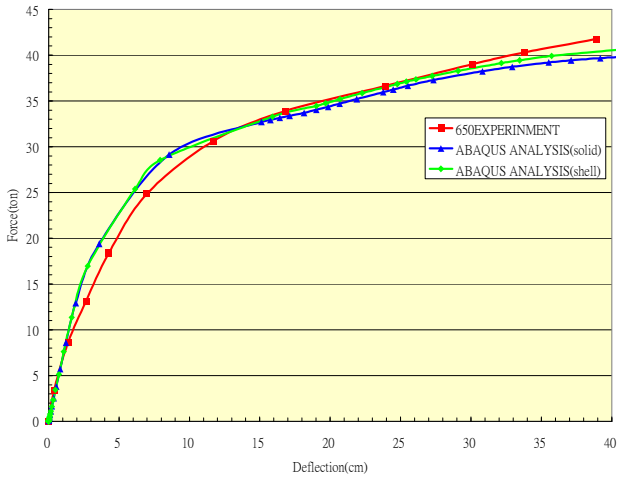
圖八梁左端爐溫與鋼材表面溫度(定溫 550^{0}C)



圖十一:定溫加載 550^{0}C 梁端受力與變形曲線



圖九梁右端爐溫與鋼材表面溫度(定溫 550^{0}C)



圖十二:定溫加載 650^{0}C 梁端受力與變形曲線