

橋型起重機結構強度 有限元素分析的處理技術

毛昭陽

高雄市政府勞工局勞動檢查處

摘要

橋型起重機(portal crane)為目前工廠及港區貨櫃場(container yard)中，使用最普遍的起重機械之一，其主要結構為桁架、剛搖腳、端樑、腳橫樑、吊升機構、橫行及直行機構等。傳統的計算方法，實際上是以平面結構並儘量降低靜不定(statically indeterminate)的次數，故一般皆採用靜定的簡支樑(simple supported beam)系統來計算，但由於分析模型的簡化，使得計算精度降低，因而存在設計保守、材料量大、成本高及安全係數過大的缺點。對於小噸數的起重機，簡化的結構計算尚可接受；但對於大噸數的起重機，卻會大大地增加製造成本。

本文主要是探討有限元素分析軟體 ANSYS 模擬橋型起重機的分析程序，以 ANSYS 的 APDL(ANSYS Parametric Description Language)參數式語言來撰寫分析程式，以方便自動建立模型、加載與求解，並自動進行後處理，以提高設計時之精度及分析效率。本研究將建立有限元素分析軟體 ANSYS 建構橋型起重機之 FEM 模型技術，並分析橋型起重機結構所受最大應力、撓度值及整體重量。

一、前言

對於起重機的設計，傳統的計算方法是以平面結構並儘量降低靜不定的次數，故一般皆採用靜定的簡支樑系統來計算，但由於大幅度的簡化，使得計算精度降低，因而存在設計保守、材料量大、成本高及安全係數過大的缺點。對於小噸數的起重機，簡化的結構計算尚可接受；但對於大噸數的起重機，卻會大大地增加製造成本。

橋型起重機(如圖 1)主要結構為桁架、剛搖腳、端樑、腳橫樑，如圖 2 所示。



圖 1 港區貨櫃場中的橋型起重機

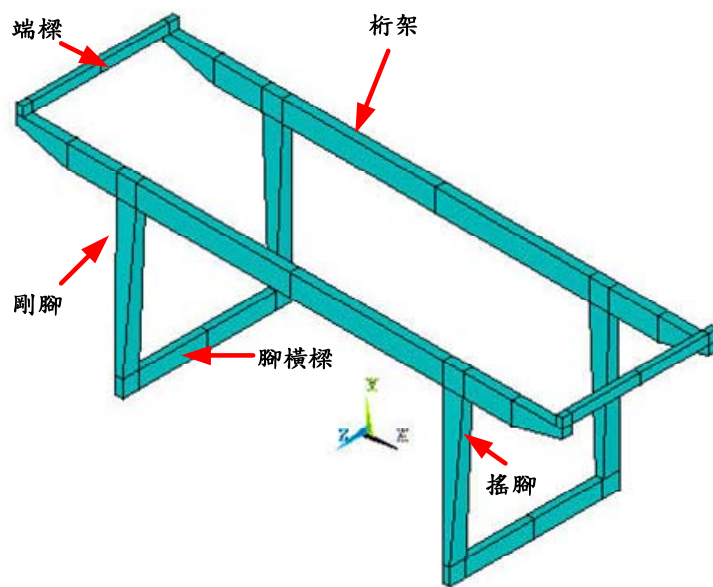


圖 2 橋型起重機結構說明

二、固定式起重機之結構應力分析^{[1][2]}

金屬結構是起重機的重要組成部分，用以裝設吊運車、電器設備及步道等，並承受和傳遞作用在起重機上的各種荷重及支承吊物的重量。依勞委會固定式起重機構造標準(簡稱「構造標準」)，起重機結構部份需核算垂直動荷重、垂直靜荷重、水平動荷重、熱荷重、風荷重及地震荷重等所引起之應力。其荷重組合分為 A、B、C 三種荷重狀態，如表 1 所示。

表 1 起重機結構應力分析時的三種荷重組合

荷重狀態	荷重組合
A	M【 Ψ (垂直動荷重) + (垂直靜荷重) + (水平動荷重)】 + (熱荷重)
B	M【 Ψ (垂直動荷重) + (垂直靜荷重) + (水平動荷重)】 + (作業時風荷重) + (熱荷重)
C	(垂直動荷重 + 垂直靜荷重 + 地震荷重 + 熱荷重) 或 (垂直動荷重 + 垂直靜荷重 + 衝擊荷重 + 熱荷重) 或 (垂直靜荷重 + 停止時風荷重 + 熱荷重)

表 1 中的 M 值稱為作業係數，係根據起重機的負荷次數和負荷情形來加以區分，如表 2 所示。 Ψ 稱為衝擊係數，對本文所研究的橋型起重機而言，採下式計算之，

$$\Psi = 1 + 0.6V \quad (1)$$

其中

V：上升之額定速率(m/sec)

表 2 作業係數(M 值)

負荷 次數 情形	N < 6.3×10 ⁴	6.3×10 ⁴ ≤N < 1.2×10 ⁵	6.3×10 ⁴ ≤N < 1.2×10 ⁵	6.3×10 ⁴ ≤N < 1.2×10 ⁵	6.3×10 ⁴ ≤N < 1.2×10 ⁵	6.3×10 ⁴ ≤N < 1.2×10 ⁵	N < 6.3×10 ⁴
W < 50%Q	1.00	1.02	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17
50%Q ≤ W < 63%Q	1.02	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17	1.2
63%Q ≤ W < 80%Q	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17	1.2	1.2
W ≥ 80%Q	1.08	1.11	1.14	1.17	1.2	1.2	1.2

註：W—負荷，Q—額定荷重，N—負荷次數

四輪吊運車對桁架所產生之單一輪壓荷重為

$$P = (Q + G_1 + g_0) / 4 \quad (2)$$

其中

Q：額定荷重(N)

G1：吊運車重(N)

g0：吊具重(N)

考慮單桁架受吊運車輪所傳遞的兩集中負載 P，並考慮結構自重、因吊運車移動所產生之慣性力及車輪側向力，桁架之正向應力 (normal stress) 表示為

$$\sigma_n = \frac{M_v}{Z_x} + \frac{M_H}{Z_y} \quad (3)$$

$$M_v = M(M_G + \Psi M_P) \quad (4)$$

$$M_H = M(\beta(M_G + M_P) + M_S) \quad (5)$$

$$M_P = \frac{P}{2L} \left(L - \frac{b}{2} \right)^2 \quad (6)$$

$$M_G = \frac{\omega L^2}{8} \quad (7)$$

$$M_S = \frac{S_r}{2L} \left(L - \frac{b}{2} \right)^2 \quad (8)$$

$$S_r = \lambda_r \cdot R \quad (9)$$

$$\lambda_r = \begin{cases} 0.05 & , L_t / b \leq 2 \\ (1 + L_t / b) / 60 & , 2 < L_t / b < 8 \\ 0.15 & , L_t / b \geq 8 \end{cases} \quad (10)$$

其中

L：桁架跨距(mm)

L_t ：吊運車軌距(mm)

b：吊運車軸距(mm)

ω ：桁架自重(N/mm)

M_V ：合成垂直彎矩(N-mm)

M_H ：合成水平彎矩(N-mm)

M_G ：桁架自重引起之彎矩(N-mm)

M_P ：由 P 引起之彎矩(N-mm)

Z_x ：對 X 軸剖面模數(mm³)

Z_y ：對 Y 軸剖面模數(mm³)

β ：慣性係數($\beta = 0.008\sqrt{V}$ ，V 為速度(m/min)，一般 β 取 0.15)

S_r ：車輪側向力(N)

R：車輪負荷(N)

λ_r ：側向力係數

起重機撓度必需考慮由於負載產生的撓度及由桁架自重所引起之撓度。

$$\delta = \frac{P}{48EI}(L-b)\left[L^2 + (L+b)^2\right] + \frac{5wL^4}{384EI} \quad (11)$$

其中

E：彈性模數(elastic modulus, MPa)

I：剖面慣性矩(inertia moment, mm⁴)

三、起重機分析參數

本文所分析的橋型起重機，如圖 3 所示三視圖，結構大致分為桁架、剛搖腳、端樑及腳橫樑。其桁架具伸臂段(outreach)，該伸臂在接近末端處，為採漸縮之變截面設計；另，值得注意的是，其剛搖腳在前視圖的方向為上寬下窄的設計，但在側視圖的方向卻為上窄下寬的設計，其相關尺寸如表 3 所示。所使用的鋼板為 SS400，假設為等向彈性(isotropic elasticity)特性，材料機械性質如表 4 所示。

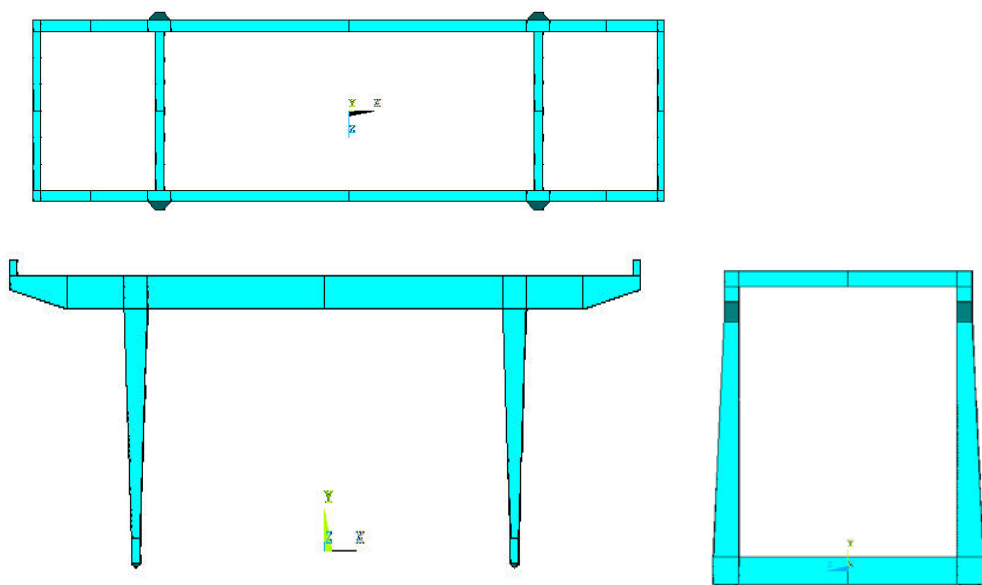


圖 3 橋型起重機三視圖

表 3 原始分析模型(prototype)之相關尺寸表

Item List	尺寸(mm)	Item List	尺寸(mm)
桁架跨距	36000	腳橫樑長度	16100
吊運車跨距	16100	腳橫樑剖面寬度	800
吊運車輪距	3800	腳橫樑剖面高度	1852
直行輪距	16520	剛(搖)腳長度(從腳橫樑剖面中心至主桁架中心間垂直距離)	18367
伸臂外伸部分長度	13100	剛(搖)腳剖面寬度(與桁架)	2200
伸臂等截面段長度	6500	剛(搖)腳剖面高度(與桁架)	1025
伸臂等截面段剖面寬度	1025	剛(搖)腳剖面寬度(與腳橫樑)	800
伸臂等截面段剖面高度	2420	剛(搖)腳剖面高度(與腳橫樑)	1800
伸臂變截面段長度	6500	桁架內側腹板厚度	10
伸臂變截面段剖面寬度	1025	桁架外側腹板厚度	10
伸臂變截面段剖面高度	1000	桁架上翼板厚度	20
端樑長度	16100	桁架下翼板厚度	20
端樑剖面寬度	660	端樑腹板厚度	10
端樑剖面高度	1090	端樑翼板厚度	20
		剛(搖)腳板厚度	10
		腳橫樑腹板厚度	10
		腳橫樑翼板厚度	20

表 4 材料機械性質

材質	降伏強度 σ_y (MPa)	密度 ρ (kg/mm ³)	蒲松比 ν	彈性模數 (MPa)
SS400	235	7.85×10^{-6}	0.3	206000

四、有限元素分析理論及模型的建立

本文採用 ANSYS 有限元素分析軟體，模擬橋型起重機在邊界條件及固定式起重機構造標準^[1]所規定的荷重組合下之結構應力與變形行為。

(一)、有限元素分析理論

為對三維複雜的橋型起重機鋼結構體能有更精確的應力分析，本文採用有限元素法(finite element method)來進行分析。有限元素法可將複雜的機械結構系統轉化成由節點(nodes)與元素(elements)所組合而成之有限元素分析模型，以取代原有的工程系統。有限元素法分析程序^[3]，簡述如下，

1. 建立有限元素分析模型，包括邊界條件(boundary conditions)及負載條件(loading conditions)。
2. 對每一元素，逐一建立其個別的力平衡方程式。
3. 將個別的力平衡方程式聯立，建立整體結構的力平衡方程式。
4. 求解整體結構的力平衡方程式的位移矩陣{D}，每一個元素之各節點位移可由位移矩陣{D}中取得。
5. 再由節點位移，逐一計算每個元素的位移場(displacement field)，再計算其應變場(strain field)及應力場(stress field)。

實際上，採用 ANSYS 有限元素分析軟體，其執行步驟可區分為前處理(pre-processing)、求解(solving)以及後處理(post-processing)三部分，如下說明，

1. 前處理：主要設定有限元素分析模型之元素形式(element Type)、材料性質(material property)、建立幾何模型(geometry model)及網格分割(mesh)。
2. 求解：設定分析型態(analysis type)、邊界條件(boundary condition)、負載(load)及相關非線性選項。
3. 後處理：提供各時段之應力、應變、能量、變位、範圍或時間歷程等分佈圖或範圍圖，以及時間歷程曲線圖及各種列表等，以利進一步之判讀與分析。

(二)、起重機有限元素模型建立

有限元素法分析元素(element)型式的選擇取決於受力特徵和分析目標的需要而定。一般來說，元素數目多，元素階次(order)高，其精度高但計算量大，實際應用中，應綜合考量。在計算量允許情況下，儘可能選擇精度高的單元。由於，本文研究對象橋型起重機的組成結構主為受彎曲的薄壁金屬結構，故選用 ANSYS Shell 63 元素，不但計算量小且計算精度亦準確。Shell 63 元素為 4 個節點的三維彈性殼分析元素，而各節點有 6 個自由度，分別為 3 個 x、y、z 方向平移自由度及 3 個 x、y、z 方向旋轉自由度。此單元具有彎曲和薄膜(membrane)特性，可同時承受殼面內(in-plane)及殼面外(out-of-plane)的負載，具應力強化及大變形的能力，主要用於平板結構及曲面殼體的分析，如圖 4 所示。

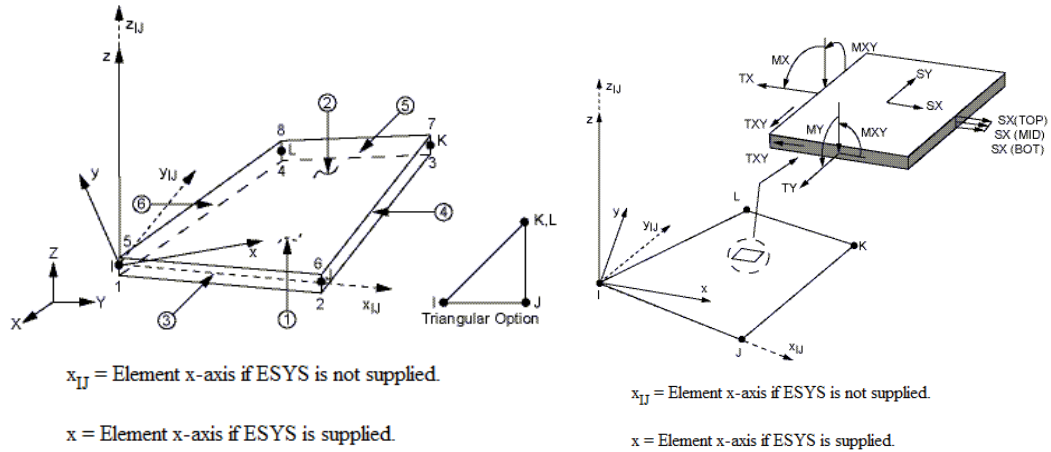
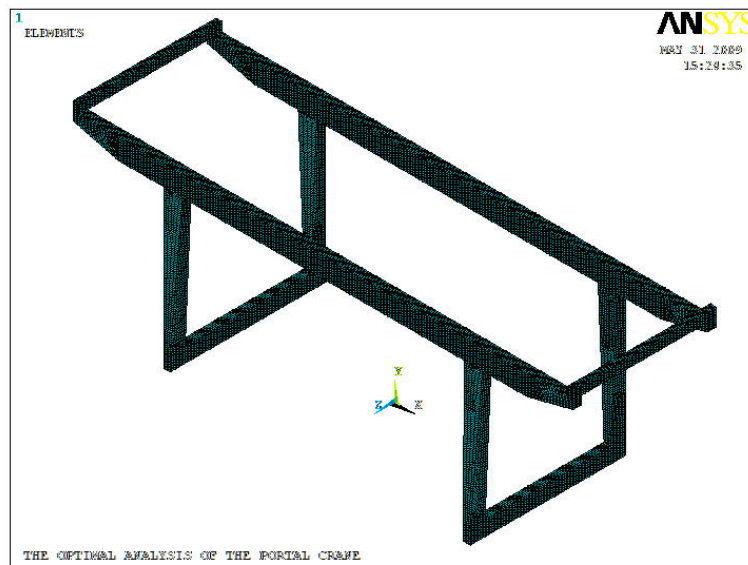
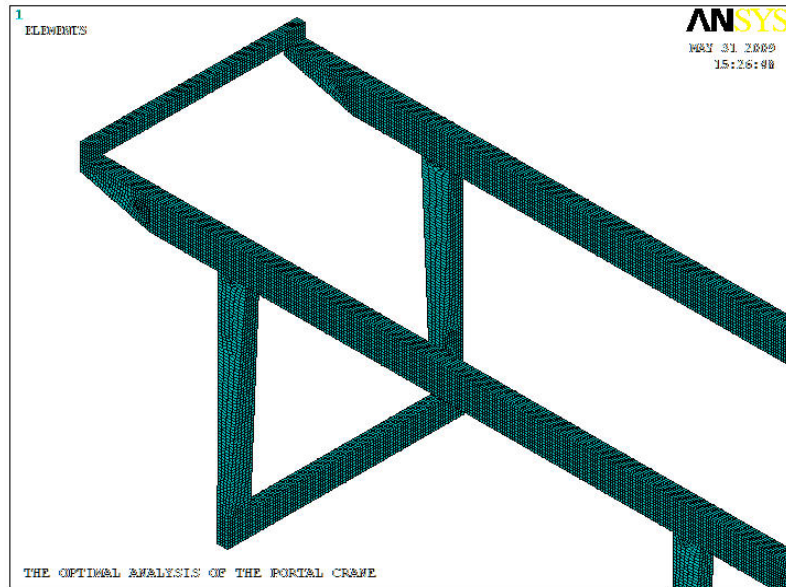


圖 4 Shell 63 元素示意圖

進行模型分析時，取得足夠精確的位移是必要的，然精確結果與分析之時間需取得一平衡點，乃以不同網格數目之模型進行收斂分析，以求能建立兼顧計算效率與分析精確之模型。本文透過分割網格數的增加，分析最大位移的收斂趨勢。在考量分析的準確性與計算效率的平衡下，最終的有限元素之網格模型，如圖 5 所示。分析模型的元素數目 39346 個，節點數目 38964 個。



(a)



(b)

圖 5 有限元素網格 (a)整體圖 (b)局部放大圖

(三)、模型的邊界條件與荷重條件

橋型起重機直行軌道並不限制車輪的 3 個轉動自由度(rotational d.o.f.)，由於垂直荷重作用向下，車輪的垂直方向位移被約束；橫向位移被車輪輪緣限制；車輪沿軌道方向的位移不能被約束，所以沿軌道方向的水平位移自由度(translational d.o.f.)存在。但因當橋型起重機承受風荷重或水平動荷重時，為不使整個橋型結構產生剛體運動(rigid body motion)，故在跨距兩側應各有一支點在大車軌道方向被約束，使其不能平移。

為簡化分析，以固定式起重機構造標準所規定的 A 荷重組合為負載施加於橋型起重機結構上，來進行分析。橋型起重機的結構型態，除剛(搖)腳外，主要是受彎曲的樑，由於吊運車車輪作用於軌道上時，接觸長度較小，可簡化成集中力。同樣地，車輪側向力也簡化成集中力，作用於水平方向上。結構自重之慣性力，及起重機直行時，因加減速度所產生之慣性力，則以均佈力分別施加於垂直方向及水平

方向。

換言之，根據構造標準及 (4)、(5)及(7)式，可得知在垂直方向上，單一車輪的集中力為 $M \times \Psi \times P$ ，整個結構的均佈力為 $M\omega$ ；在水平方向上，單一車輪的集中力為 $(M \times S_r + M \times \beta \times P)$ ，整個結構的均佈力為 $M \times \beta \times \omega$ 。在 ANSYS 中要達成垂直及水平向的慣性力施加，可利用定義材料的密度(density)及引入重力場(ACEL 指令)來產生。整個有限元素模型邊界條件與負載條件如圖 6 所示。

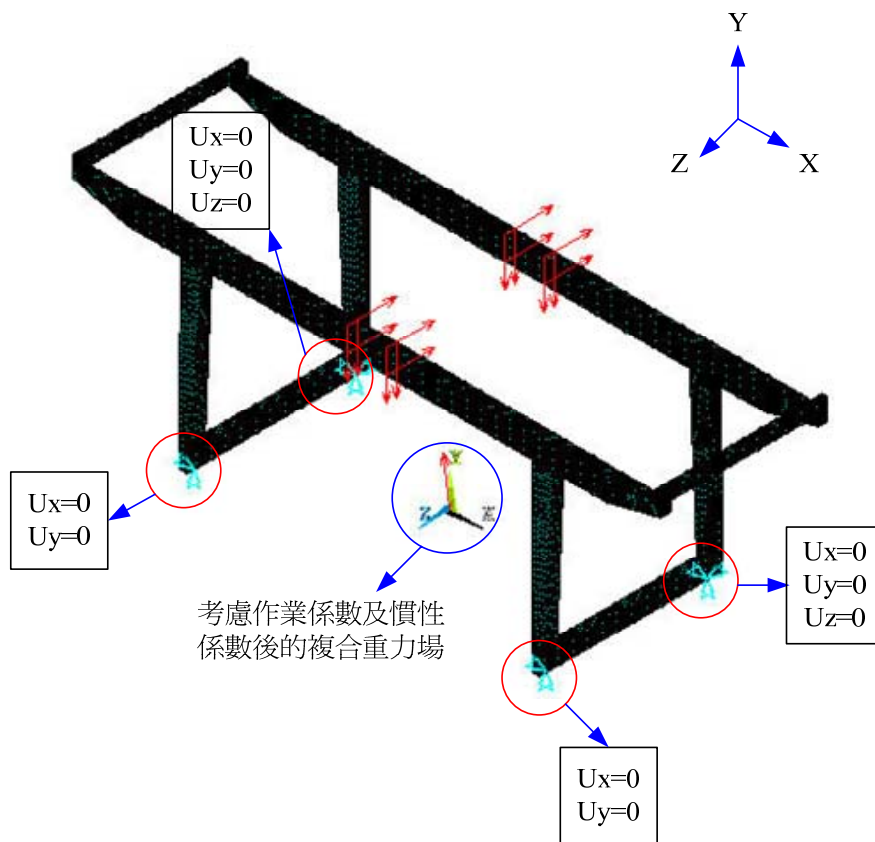


圖 6 邊界條件與負載條件

五、起重機的有限元素分析

依構造標準，起重機最大撓度應為起重機桁架跨距的 1/800 以下及結構部分鋼材之各種容許應力，不得大於下列各式計算值。

$$\sigma_{ta} = \text{Min} \left\{ \frac{\sigma_y}{1.5}, \frac{\sigma_u}{1.8} \right\} = \sigma_{bat} \quad (12)$$

$$\sigma_{ca} = \frac{\sigma_{ta}}{1.5} = \sigma_{bac} \quad (13)$$

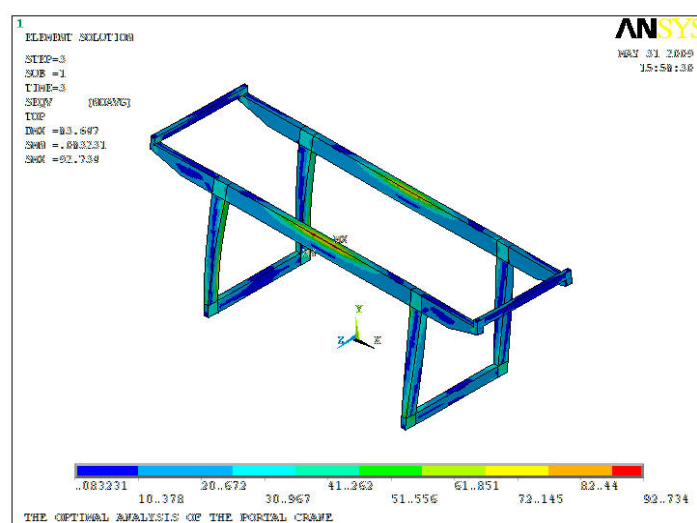
其中， σ_u 為材料抗拉強度， σ_{ta} 為容許抗拉應力， σ_{bat} 為容許抗拉彎曲應力， σ_{ca} 為容許抗壓應力， σ_{bac} 為容許抗壓彎曲應力。

因本文研究對象橋型起重機的組成結構主要為受彎曲的負載型態，故由(12)及(13)式，考量最低80%的熔接效率，可求得SS400鋼材的容許應力值不可超過109MPa，如表5所示。

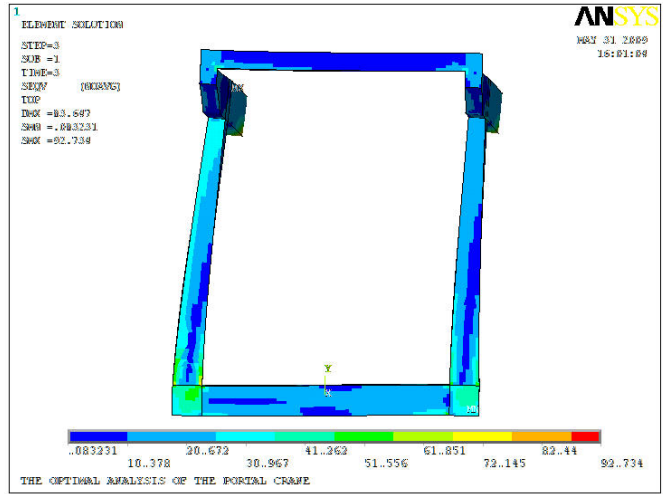
經有限元素分析後，原始模型之應力值107.245MPa，撓度值20.708mm，皆均未超過設計的限制條件，如表6所示。原始模型之應力圖，如圖7所示。

表 5 允許條件

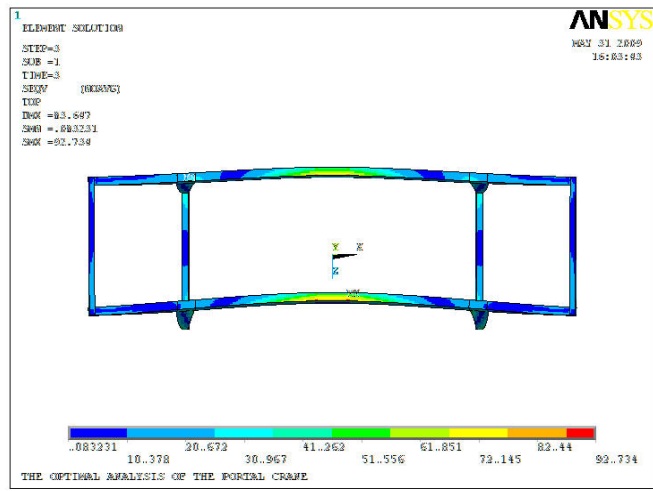
項目	允許條件	數值
容許應力(MPa)	$((\sigma_y/1.5)/1.15) \times 0.8$	109
容許撓度(mm)	跨距的 1/800	45



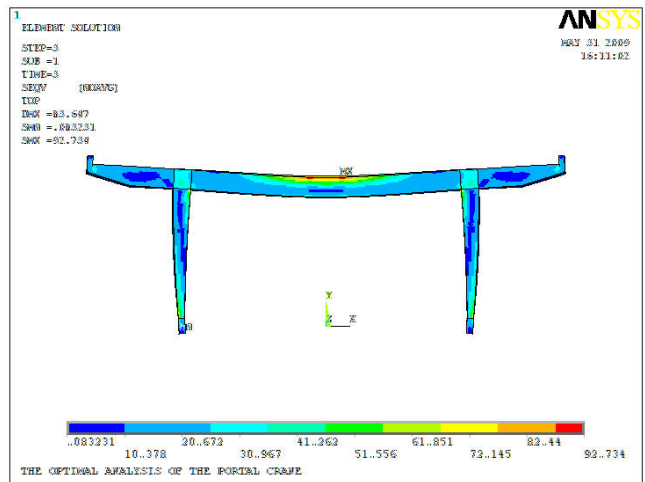
(a) 等角視圖



(b) 側視圖



(c) 上視圖



(d) 前視圖

圖7 模型之應力圖

表 6 分析結果

Item List	分析模型	容許值
桁架上翼板厚度	20	—
桁架下翼板厚度	20	—
桁架內腹板厚度	10	—
桁架外腹板厚度	10	—
端樑翼板厚度	20	—
端樑腹板厚度	10	—
最大應力(MPa)	92.734	109
撓度(mm)	18.008	45
重量(N)	1476700	—

六、結論

有限元素分析結果顯示，原始模型之應力值 107.245MPa，撓度值 20.708mm，符合固定式起重機構造標準的規範要求。未來接續的研究將以有限元素分析軟體 ANSYS 建構橋型起重機之 FEM 模型，分析橋型起重機結構所受最大應力、撓度值及整體重量，對結構剖面的形狀尺寸進行參數設計，並引用反應曲面法，建構各設計參數與目標函數值關係之反應曲面模型，再將此反應曲面模型採用基因演算法進行最佳參數組合搜尋，以得到最佳剖面尺寸設計。

七、參考文獻

- (1) 行政院勞工委員會，固定式起重機構造標準，2005。
- (2) 行政院勞工委員會，固定式（架空）起重機強度計算範例，1997。
- (3) 李輝煌，ANSYS 工程分析—基礎與觀念，高立圖書，2005。