

自動化倉儲系統之下導軌結構分析

張文陽、王柏村

國立屏東科技大學 機械工程系

摘要

在倉儲系統中，其主結構可分為倉架本體、搬運機與基座。其中基座乃是支撐搬運機的重量以及搬運機做輸送動作時的重要結構。本報告乃是應用有限元素分析套裝軟體 ANSYS，探討單元負載式自動化倉儲系統之搬運機自重對於其位於基座上的下導軌做靜態結構之分析。本研究中以樑元素模擬實際的鋼骨結構，將搬運機之自重分成兩個集中力分別作用於下導軌上，並使用接觸元素模擬基座與地面之間的支撐情形，藉由改變邊界條件模擬基座的支撐方式為固定支撐或浮動支撐。分別對於基座之固定方法與搬運機在不同位置時，對下導軌與基座的位移與應力作評估。結果顯示當基座的固定方法為固著於地面時其應力值小於基座浮動於地面約 19%。當搬運機在不同位置時，所得到的各基礎點之反力以及各結構桿件的應力值與變形量，可做為基礎結構結構改善與研究設計之參考依據。

一、前言

在現今講求自動化的工業環境中，自動化倉儲系統的研究與發展也日趨重要。自動倉儲系統隨著國內自動化程度的發展已經愈來愈普及化。而自動倉儲系統的研究，國內皆偏重於物料管理與生產力之提昇。對於結構分析是非常缺乏的，因此在這次的報告中，針對一自動化倉儲系統之搬運機自重對於其基座影響作一分析。在做理論分析時，利用桁架結構的節點及斷面求解各結構桿件的反力，然後考慮靜力破壞與挫曲破壞的可能性。本文將利用有限元素法進行理論分析。有限元素法最早是用於航空器結構分析。隨著有限元素分析軟體的問世與電腦科技的發展，有限元素法也逐漸使用於學術界與工業界。

本文使用的有限元素分析軟體為美商 Swanson

Analysis Systems 公司所研發的 ANSYS 有限元素分析軟體，該軟體可進行靜態結構分析、振動結構分析、模態分析、熱傳導分析、流體力學分析、最佳化設計等等[4]。例如化工廠倉儲系統的桁架結構分析[3]、壓電材料的熱傳分析[3]、振動片的有限元素分析[3]。

本文的目的為應用有限元素之觀念，配合有限元素分析軟體 ANSYS 的使用，對國立屏東科技大學機械工程技術系內現有之單元負載式自動化倉儲系統作一分析，檢查是否會有破壞發生在下導軌上以及支撐架的固定方式對位移與應力所造成的影響。

二、問題定義與分析目標

有一單元負載式倉儲系統，其搬運機如圖 1，討論當搬運機在 y 軸上之不同位置，對下導軌所造成的彎曲影響。下導軌位於基座上，基座的尺寸尺寸圖，如圖 2 所示。本文的主要分析目標為：

- 1、比較支撐架固定於地面與支撐架浮動於地面之差別。
- 2、在導軌上的最大撓度變形量。
- 3、最大撓度變形量的所在位置。
- 4、最大應力是否會對導軌或支撐架產生破壞。



圖.1 自動倉儲系統整體示意圖

三、數學模式化與分析方法

本文中所採用的基本假設：

- 1、採用3D之樑元素進行架構各結構桿件。
- 2、可利用樑元素的物理特性(Real Constant)設定值，使其等效於所要模擬的實際結構。
- 3、使用接觸元素模擬支撐架與地面接觸，探討支撐架固定於地面與支撐架浮動於地面。
- 4、搬運機藉由兩個導輪與導軌接觸，故可將搬運機之總重量分成兩個集中力作用於導軌上。作用位置根據基座y軸的長度劃分為4等份。

由以的基本假設可分類成 8 種狀況：

- Case A1: 支撐架固定於地面，搬運機位於導軌起點。
- Case A2: 支撐架固定於地面，搬運機位於導軌 1/4 處。
- Case A3: 支撐架固定於地面，搬運機位於導軌 1/2 處。
- Case A4: 支撐架固定於地面，搬運機位於導軌終點。
- Case B1: 支撐架浮動於地面，搬運機位於導軌起點。
- Case B2: 支撐架浮動於地面，搬運機位於導軌 1/4 處。
- Case B3: 支撐架浮動於地面，搬運機位於導軌 1/2 處。
- Case B4: 支撐架浮動於地面，搬運機位於導軌終點。

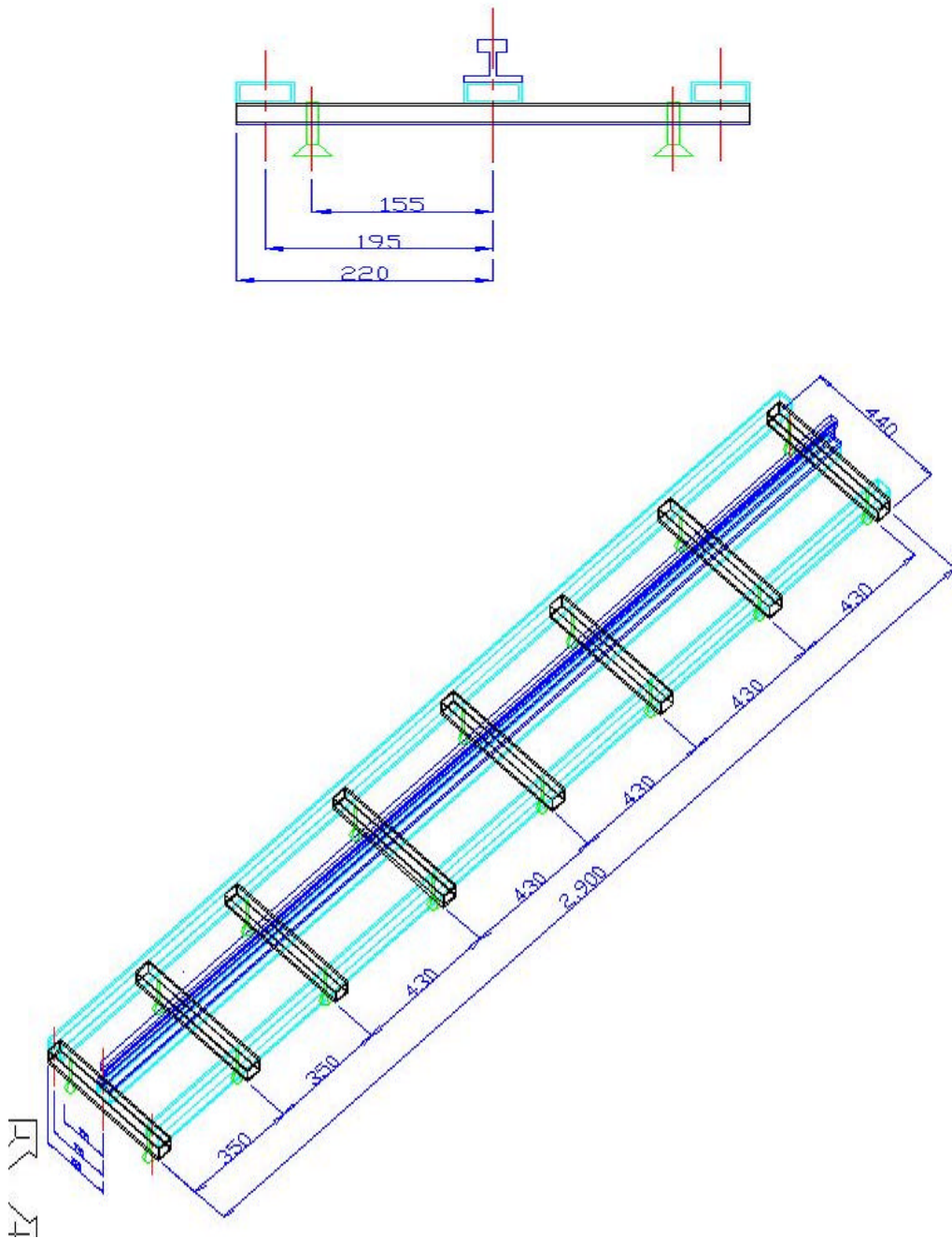


圖 2. 基座尺寸示意圖

四、有限元素模型

1、元素型式

本文中所採用的元素為 3D 結構樑元素與接觸元素，在 ANSYS 軟體中的編號分別為 Beam4 與 Contac52[4]。元素特性如表 1 所示，元素結構如圖 3 與圖 4 所繪。

2、材料性質 (MATERIAL PROPERTIES)

基座上所使用的為鋼骨結構，其材料性質為：
 Young's modulus(楊氏系數) $EX = 200 \times 10^9$ Pa
 Density(密度) $DENS=7850$ kg/m³
 Poisson's ratio(浦松比) $NUXY=0.33$

3、物理特性(Real Constant)

本文中利用 Beam4 與 Contac52 的物理特性模擬實際的鋼骨結構以及支撐架的固定方式。實際鋼骨結構為口字樑(如圖 5)以及口字樑與 I 型樑(如圖 6)的組合樑(如圖 7)，物理特性的計算如下式 1 到式 11 所示 [1]。物理特性經整理後如表 2 所示。

A、口字樑

面積： $A_1 = w \times h - (w-t) \times (h-t)$ (1)

極慣性矩：

$$I_{zz1} = \frac{1}{12} (w \times h^3 - (w-t) \times (h-t)^3) \quad (2)$$

$$I_{yy1} = \frac{1}{12} (h \times w^3 - (h-t) \times (w-t)^3) \quad (3)$$

B、I 型樑

面積：

$$A_2 = t_1 \times w_1 + (h-t_1-t_2) \times t + t_2 \times w_2 \quad (4)$$

極慣性矩：

$$I_{zz2} = \frac{1}{12} (t_1 \times w_1^3 + (h-t_1-t_2) \times t^3 + t_2 \times w_2^3) \quad (5)$$

$$I_{yy2} = \frac{w_1 t_1^3}{12} + w_1 t_1 \times \left(\bar{Z} - \frac{t_1}{2} \right)^2 + \frac{t(h-t_1-t_2)^3}{12} + t(h-t_1-t_2) \times \left(\bar{Z} - \frac{(h-t_1-t_2)}{2} \right)^2 + \frac{w_2 t_2^3}{12} + w_2 t_2 \times \left(\bar{Z} - \frac{t_2}{2} \right)^2 \quad (6)$$

C、組合樑

面積： $A = A_1 + A_2$ (7)

極慣性矩：

$$I_{zz} = I_{zz1} + I_{zz2} \quad (8)$$

$$I_{yy} = I_{yy1} + I_{yy2} \quad (9)$$

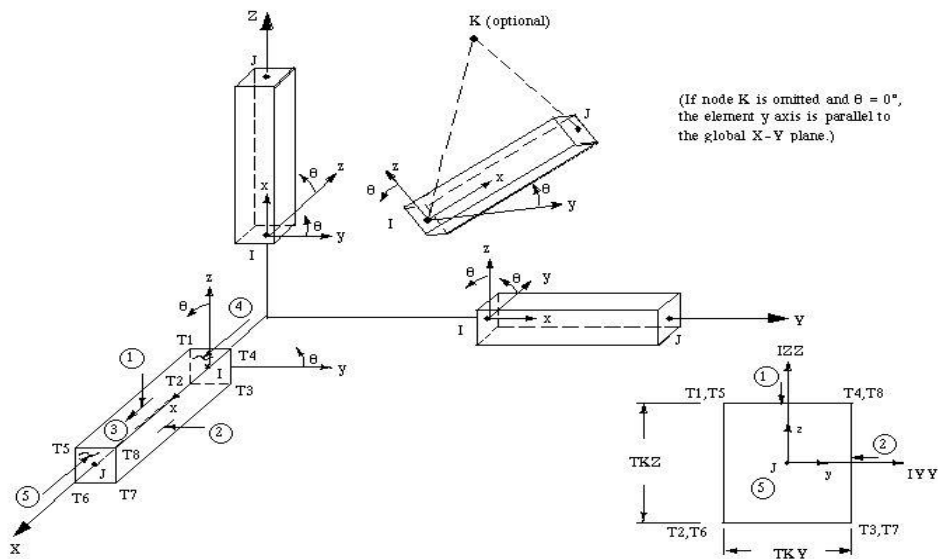


圖 3. Beam4 元素結構說明圖

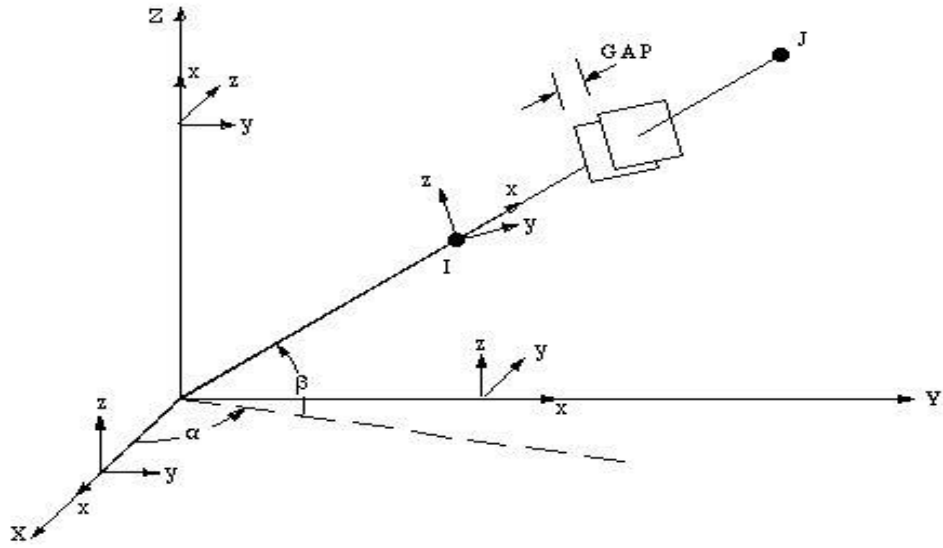


圖 4. Contact52 元素結構說明圖

表 1. 元素特性說明表

元素名稱	節點數(Nodes)	自由度(Degrees of Freedom)	物理特性(Real Constant)
Beam 4	I, J, K	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	AREA, IZZ, IYY, TKY, THZ
Contact 52	I, J	UX, UY, UZ	KN

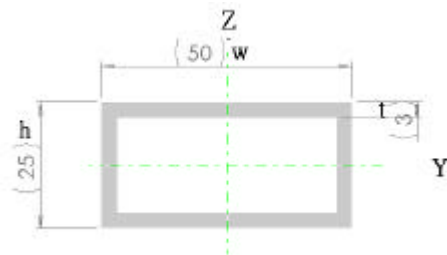


圖 5. 口字樑

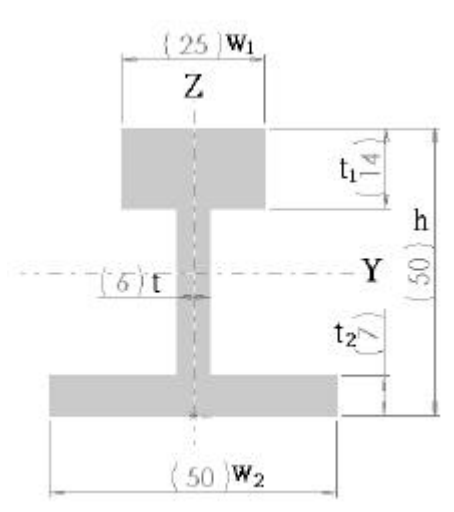


圖 6. I型樑

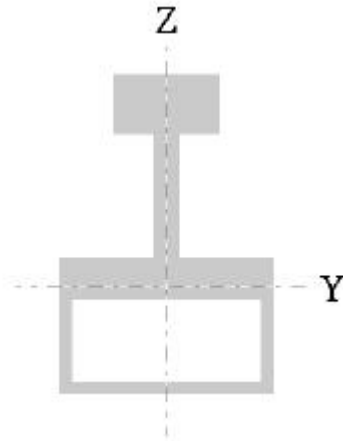


圖 7. 組合樑

表 2. 物理特性一覽表

Real Constant	AREA(mm ²)	IZZ(mm ⁴)	IYY(mm ⁴)	TKY(mm)	TKZ(mm)	KN
1	1288	217209.83	684853.6	75	50	
2	414	125542	39954.5	25	50	
3						0.06×10 ⁹

4、分割方法

將銷接處、受力位置以及支撐架連接結構處，使用直接架構法架構節點，再以元素連接各節點完成初步的有限元素模型。如圖 8 與圖 9 所示

5、位移條件

Case A 的類型是模擬支撐架固定於地面，故設定邊界條件在支撐架連接結構處，並限定 6 個自由度 (All DOF)，如圖 8 所示。

Case B 的類型是模擬支撐架浮動於地面，需使用 Contac52 模擬支撐架與地面之間力的傳遞。將邊界條件在支撐架與地面連接處，並限定 6 個自由度 (All DOF)，如圖 9 所示。由於 Beam4 與 Contac52 的自由度不同。在進行有限元素理論分析時，會產生相容性 (Compatibility) 問題，所以要使用限制方程式 (Constraints Equation) 進行修正。本文中所使用的限制方程式，如公式(10)所示。限制方程式的使用為每三個節點一組，可參閱圖 9 中，Contac52 與 Beam4 接合處的放大圖。

$$\mathbf{q}_{y3} = \frac{\mathbf{q}_{y2} + \mathbf{q}_{y4}}{2} \quad (10)$$

6、負荷

因搬運機與下導軌之間藉由兩個導輪接觸，故可將搬運機之總重量分成兩個集中力作用於下導軌上。因為導輪所承受的重量不同，故將其配重分成 60% 與 40 %。搬運機之總重量為 1432083.42 g，故兩個集中力分別為 F1=1002458.394g, F2=429625.026g，為了瞭解搬運機在不同位置所造成之影響，故將作用位置根據基座 y 軸的長度劃分為 4 等份，(如圖 10 中所示)。

1、搬運機位於下導軌起點。

$$\{ F1(100,220,0) ; F2(850,220,0) \}$$

2、搬運機位於導軌 1/4 處。

$$\{ F1(337.5,220,0) ; F2(1087.5,220,0) \}$$

3、搬運機位於導軌 1/2 處。

$$\{ F1(1050,220,0) ; F2(1800,220,0) \}$$

4、搬運機位於導軌終點。

$$\{ F1(2100,220,0) ; F2(2850,220,0) \}$$

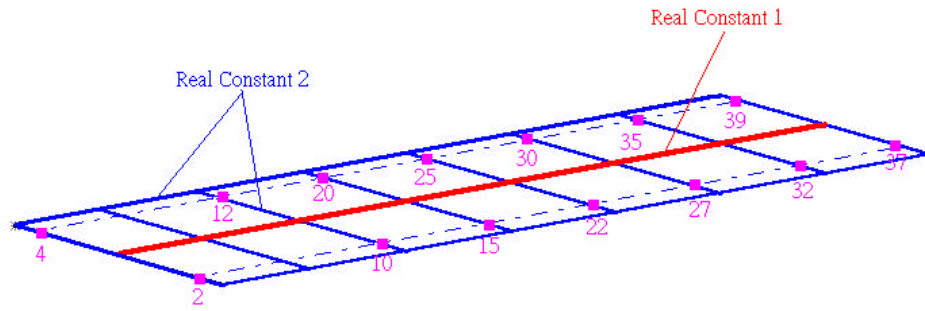


圖 8. 支撐架固定於地面時之有限元素模型示意圖

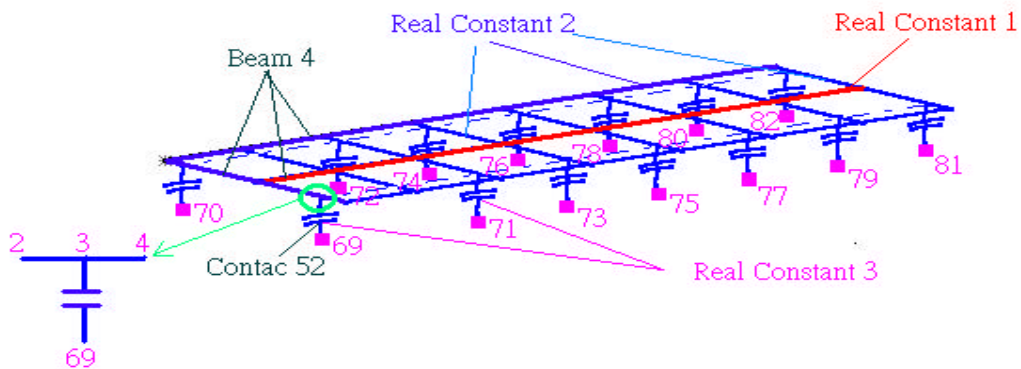


圖 9. 支撐架浮動於地面時之有限元素模型示意圖

7、求解

樑元素(Beam4)

樑元素中首要的觀察資料為節點位移資料與元素應力分佈，其中元素的應力分佈可分為最大應力(拉伸應力 $S_{max}=S_{dir}+S_{bzt}$)與最小應力(壓縮應力 $S_{min}=S_{dir}-S_{bzt}$)，如圖 11 所示，在本文中所採用的為最大應力。

接觸元素(Contac52)

接觸元素中所求得之解為節點位移資料與元素應力分佈，其元素應力為正向力(Normal Force)。在本文中其正向力可視為基礎反力。

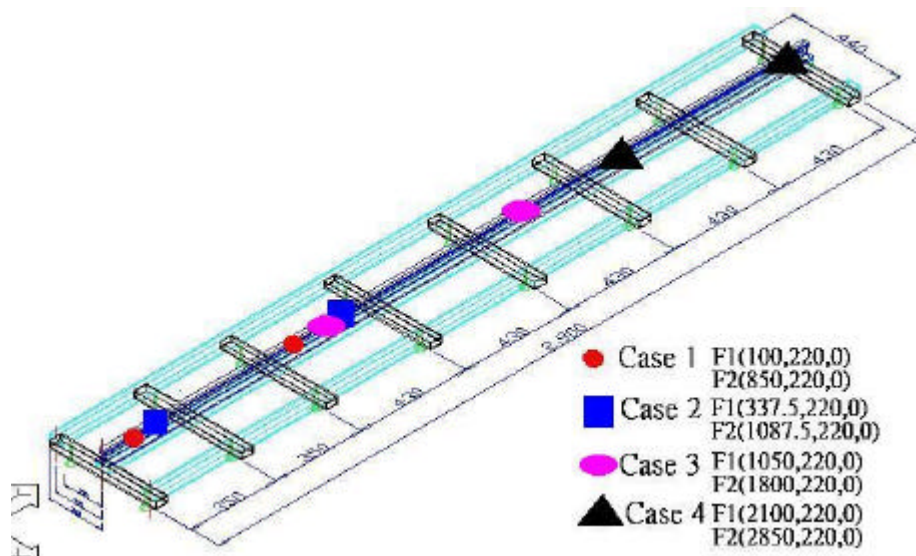


圖 10. 集中力作用位置示意圖

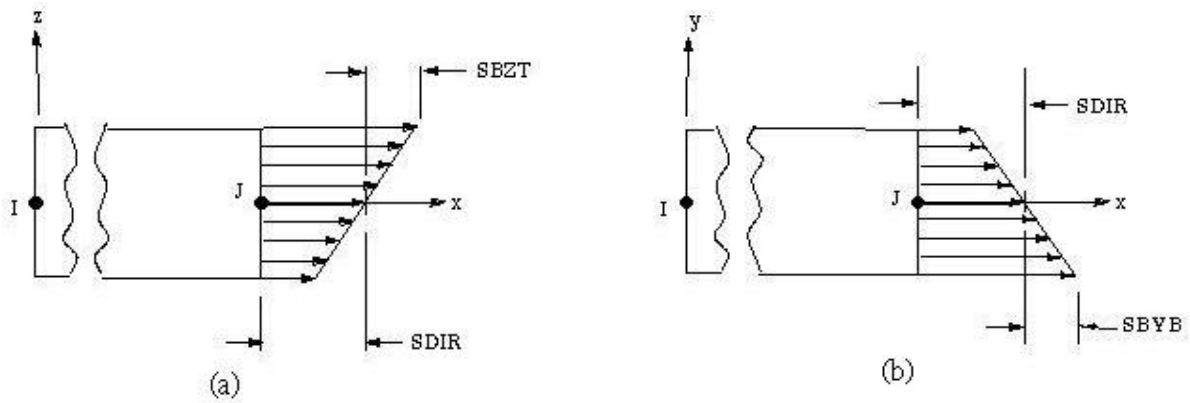


圖 11. 樑元素的最大應力與最小應力

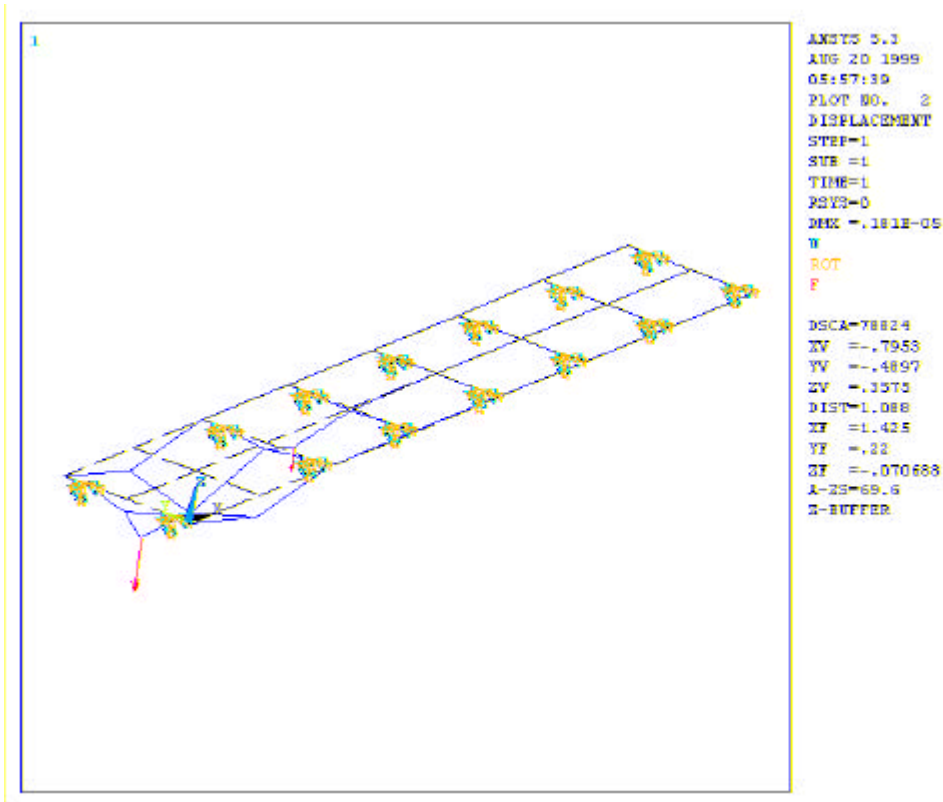


圖 12. 最大位移圖

五、結果與討論

將所得到的資料加以整理後，獲得基礎反力、靜力安全係數與挫曲安全係數以提供改善結構安全時的參考依據。表 3 為 Case A 與 Case B 的最大應力與 z 軸之變形量。由表 3 可發現導軌上之最大變形皆發生在自重所作用處(導輪的所在位置)，其中以搬運機位於導軌 1/4 處時產生的變形量最大。Smax 為最大應力；Max. Uz 為翹曲變形之數值。如圖 12 為最大位移圖。圖 13 為最大應力發生位置參照圖。

1、基礎反力分析

基礎反力可做為結構支撐處的改善依據及設計之參考，並可做為支撐架設計之參考。由於基礎所受的力主要在 z 方向，因此只考慮 z 方向的受力。在表 4 中，基礎反力皆相差在 5% 之內，故可推測 Case A 與 Case B 之基礎反力相當。在表 4 中的節點編號可參考圖 8 與圖 9。

2、靜態應力分析

為防止結構桿件發生破壞受到過大的拉伸應力

時發生破壞，故安全係數必須要大於 1。根據表格 3 為 Case A 與 Case B 的最大應力值，可以求出靜力破壞的安全因數。

$$F_{safety} = S_{allow} / S_{max} \quad (11)$$

其中：

F_{safety} ：靜力破壞安全因數

S_{max} ：最大應力

S_{allow} ：容許應力(在本文中，材料的容許應力為 253Mpa)

根據式(11)對靜力破壞的安全係數做定義。求出之靜力破壞系數皆遠超過 1，故此結構體為安全設計，如表 5 所示。

3、挫曲破壞分析

對桁架結構而言，由於多為細長桿件，當桿件受到一壓縮應力時，桿件會產生側向撓曲，在結構應力遠低於材料之容許應力時，即產生斷裂破壞，則稱為挫曲破壞(Buckling failure)。桁架兩端多為銷接，銷接之挫曲破壞可以利用尤拉挫曲公式判斷(式(12)到式(14))。

$$P_{cr} = \frac{P^2 EI}{L^2} \quad (12)$$

挫曲之臨界應力可以下式判斷：

$$s_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} \quad (13)$$

挫曲之安全係數：

$$S_{cr} = \frac{s_{cr}}{s} \quad (14)$$

其中：

P_{cr} ：挫曲臨界載重

E ：楊氏係數

I ：斷面極慣性矩

L ：桿件長度

s_{cr} ：挫曲臨界應力

A ：面積

S_{cr} ：挫曲之安全係數

s ：承受應力

求出挫曲安全係數列於表六中，可發現挫曲安全係數皆大於 1，故此結構體為安全設計。

4、Case A 與 Case B 之比較

比較 Case A 與 Case B 的不同，也就是比較支撐架固定於地面與支撐架浮動於地面時的不同。在本文中，所討論的倉儲系統為支撐架浮動於地面。故以 Case B 對 Case A 做比較。將表三中的數值繪成折線圖可發現其相差值(如圖 14 與圖 15)。再以 Case B 為基準對 Case A 做比較，換算成百分比(如表七所示)，發現 Case B 的平均位移值高出 Case A 百分之 50.5；最大應力高出百分之 19.35。因此當進行架設自動倉儲系統時，應選用支撐架固定於地面之固著方式，取代目前支撐架浮動於地面的設計。

5、總結

由分析結果可知，靜力與挫屈不致於對基座產生破壞，但實際上基座的桿件因運送單元在軌道上往返來回，使得基座的桿件所承受的是變動性的應力，桿件應對疲勞破壞方式做設計上的考量。許多材料所能容許疲勞破壞遠低於材料抗拉破壞或降伏破壞，因此若針對疲勞破壞做更進一步探討，可得到更為精確之結果。

表.3 Case A與Case B的最大應力與z軸之變形量

	Case A1	Case A2	Case A3	Case A4
$S_{max}(N/m^2)$	4375300	7354300	3658800	4394400
S_{max} 發生位置 (Element number)	2	2	4	7
Max. Uz (meter)	0.26661×10^{-4}	0.47732×10^{-4}	0.17654×10^{-4}	0.14329×10^{-4}
	Case B1	Case B2	Case B3	Case B4
$S_{max}(N/m^2)$	5254100	8123300	4638100	5644300
S_{max} 發生位置 (Element number)	2	2	4	7
Max. Uz (meter)	0.7322×10^{-4}	0.9110×10^{-4}	0.5533×10^{-4}	0.4396×10^{-4}

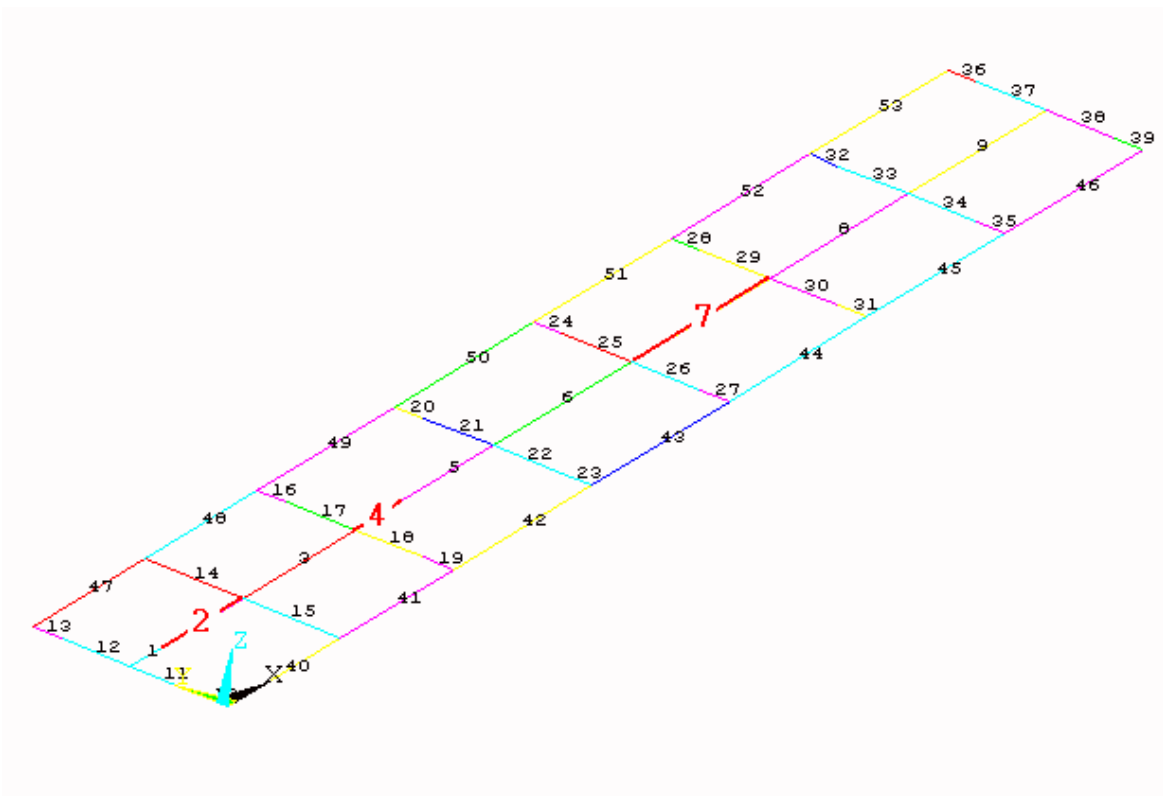


圖 13. Case A 與 Case B 之最大應力值發生位置參照圖

表4. 各支撐點之反力 (N)

支撐點編號	2	10	15	22	27	32	37
	4	12	20	25	30	35	39
Case A ₁	513.53	436.53	166.42	30.296	37.991	43.622	23.264
Case A ₂	295.82	512.75	271.17	74.109	33.396	42.134	23.514
Case A ₃	21.969	210.27	446.0	268.79	244.74	43.074	16.814
Case A ₄	36.938	61.365	24.961	70.380	435.21	239.13	-1.6678
支撐點編號	69	71	73	75	77	79	81
	70	72	74	76	78	80	82
Case B ₁	499.54	456.21	155.83	42.137	33.623	41.888	22.4333
Case B ₂	277.46	548.85	239.86	92.573	33.260	38.973	21.909
Case B ₃	15.741	242.98	399.55	295.22	228.7	63.063	6.937
Case B ₄	34.567	57.515	27.186	107.48	382.70	256.87	0.0

表 5. 靜力破壞安全係數

Case	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
F_{safety}	57.8	34.4	69.1	57.6	48.2	31.1	54.5	44.8

表 6. 挫曲之安全係數

Case	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
S_{cr}	9.04	5.38	10.82	9.01	7.53	4.87	8.53	7.01

表 7. Case A 與 Case B 的相差百分比(%)

相差百分比(%)	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	平均
S _{max}	20.1	10.5	26.8	28.4	21.4
U _z	63.6	47.6	68.1	67.4	61.7

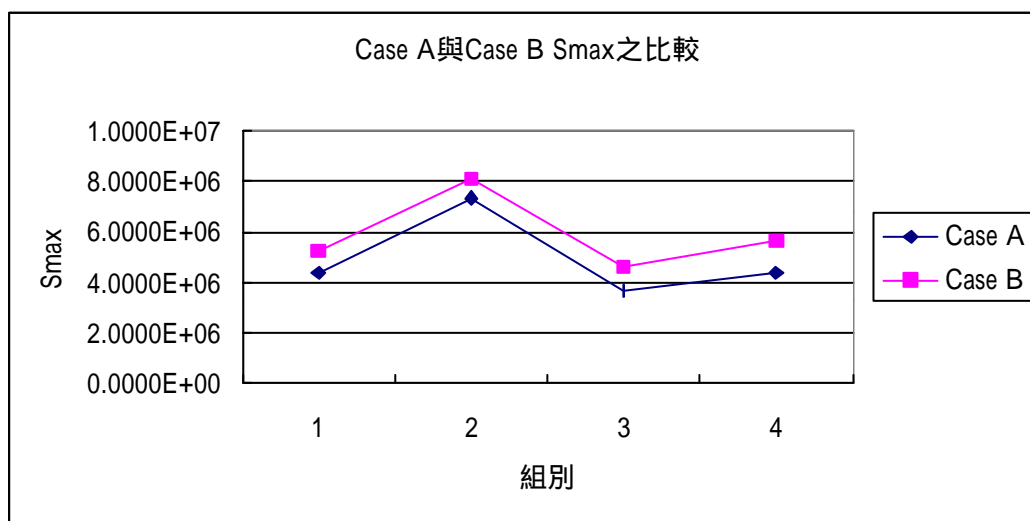


圖 14. 在 Case B 中之應力值大於 Case A 中的應力值

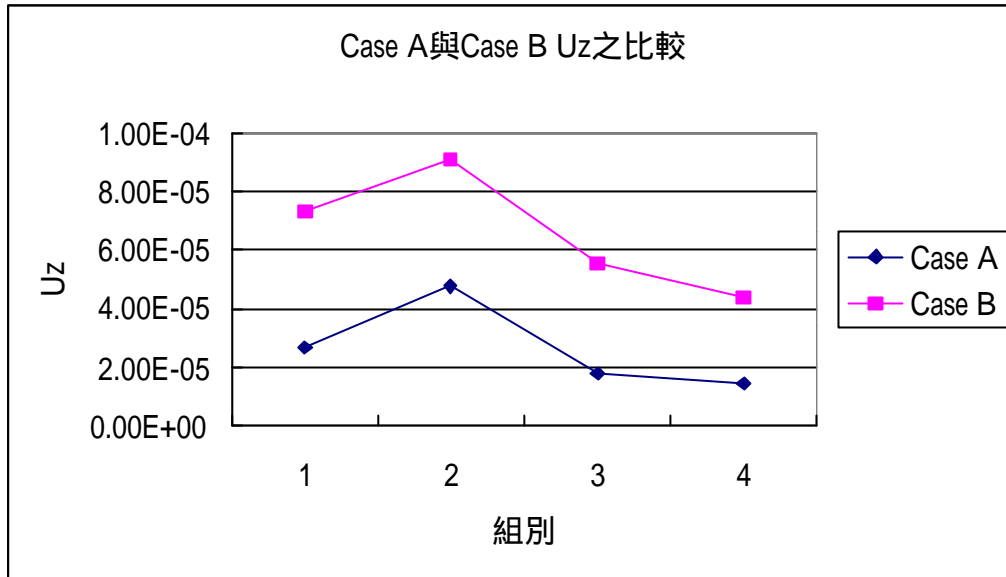


圖 15. 在 Case B 中之位移值大於 Case A 中的位移值

六、結論

針對倉儲系統下導軌做有限元素分析後，得到基礎反力、靜力破壞安全因數與挫曲之安全因數可得到下列結論：

- 1、 Case A 與 Case B 之基礎反力相當。由基礎反力可得知支撐點的反力，其數據可作為設計或改善運送結構之基座的參考數據。
- 2、 導軌上之最大變形皆發生在自重所作用處(導輪的所在位置)，其中以搬運機位於導軌 1/4 處時產生的變形量最大。
- 3、 靜力破壞係數與挫曲安全係數皆大於 1 結構體為安全設計。而由分析中，可得知靜力破壞係數為過設計(Over Design)。
- 4、 架設自動倉儲系統時，因選用支撐架固定於地面之固著方式為考量。

藉由此次的報告，可充分瞭解桁架結構受力作用時的有限元素分析流程。並瞭解 3D 樑元素、接觸元素與限制方程式之特性，作為往後架構相同元素之依據。分析所得之數據，可作為日後設計時的參考依據。