

## 12 米複材桅桿結構負載與應力分析

李政錡, 柯著成

國家中山科學研究院 航空研究所 結構與材料系統組

### 摘要

本文以單向流固耦合的概念，建立一個完整流固耦合分析流程。考慮實際桅桿外在受力條件，利用流場分析軟體，計算桅桿表面之氣動力分布；利用 Abaqus 有限元素分析軟體，將桅桿表面之氣動力分布作為結構受力之邊界條件，並考慮桅桿結構非線性接觸條件，探討不同接觸條件對桅桿整體應力峰值及頂傾角的影響。

**關鍵字：**流固耦合、Abaqus、非線性接觸、應力

### ABSTRACT

An one way fluid and structure interaction(FSI) is presented to calculate the wind loadings and stresses of a 12 meter composite telescoping mast. The mast wind loading distribution is generated by flow program and then is transferred to Abaqus software for the nonlinear contact analysis. The effects of contact condition on the displacement and stress peaks for the mast are investigated.

**Keywords:** FSI, Abaqus, Nonlinear Contact, Stress

### 一、緒論

以往在分析升降桅桿時，常因為無法考慮內部零件間的接觸行為，以及實際風力負載，而錯估了結構的強度與變形量，嚴重影響結構強度之預判，使得製造出來的產品無法滿足計畫需求。

如今，電腦輔助工程分析(Computer Aid Engineering)技術愈趨成熟，結構分析採用有限元素法(Finite Element Method)，坊間軟體如 Abaqus、ANSYS 等，能夠處理零件間之非線性接觸問題，並依據複合材料之破壞準則確保結構之強度，以及變形量計算來模擬驗證產品是否滿足需求。流場分析採用計算流體力學(Compute Fluid Dynamics)，坊間軟體如 ANSYS CFX、Fluent 等，能夠實際評估桅桿整體結構所受到的風力負載，確保結構分析時的外力負載條件。

如此一來，利用單向流固耦合的概念，將流體與固體進行分析串連，不僅能簡化分析流程與時間，還能考慮較為複雜的結構接觸行為；更重要的是，還能利用先進的硬體設備提高運算精度，減少不必要的製造與試驗，領導設計者進行結構優化設計，達到研發時程快、分析結果精準及製造低成本三大

原則。

### 二、流固耦合分析

所謂流固耦合[1]，就是流體與結構體產生交互作用，流體對結構施予正向力和摩擦力，構成結構的力邊界條件；而在結構變形的過程之中結構的外形則構成流場的運動邊界，隨著時間彼此相互影響。

按照流固邊界的耦合程度，可區分為兩種類型，一為流-固單向耦合，另一為流-固雙向耦合。流固單向耦合主要應用於流體對結構體無明顯影響，也就是結構幾乎不變形，流固邊界改變很小的時候。雙向流固耦合主應用於流體對結構體產生顯著影響，結構體產生大變形，改變流固邊界，流場分佈產生改變的時候。

由於本文主要探討桅桿結構非線性接觸行為，僅採用單向流固耦合法進行探討，將問題解耦成流體問題和結構問題，並不考慮結構變形對流場的交互影響。

本文所建立之單向流固耦合分析流程如圖 1 所示，首先，利用 SolidWorks 繪圖軟體繪製 3D 圖檔，以 stp 格式匯入至 Hypermesh 進行固體及流場網格建立，接著

由流場分析軟體計算出流固介面之表面壓力分佈，將壓力分佈當作結構之力邊界條件，在 Abaqus[2]中定義完約束條件後進行結構分析，最後可求解結構體之安全裕度。

### 三、流場分析模型

桅桿整體幾何模型如圖 2 所示，其包含桅桿本體、天線、雲台分別如圖 3、4、5 所示。

ANSYS CFX 之流場分析模型如圖 6 所示，共使用 342059 個節點及 1280699 個元素進行網格劃分。然後，分別設定流體入口(Inlet)、出口(Outlet)、開放邊界(Opening)以及壁面(Wall)等流體邊界條件。其中，工作流體為空氣，流體流速為 40Knot，紊流模型採用 SST，模擬桅桿外部流場條件。

桅桿氣動壓力分佈如圖 7 所示，所受氣動力為 414.242 N，天線氣動壓力分佈如圖 8 所示，所受氣動力為 202.171 N，雲台氣動壓力分佈如圖 9 所示，所受氣動力為 69.708 N。

流場分析將計算得到的壓力分佈輸出成.txt 檔，內容紀錄網格座標值以及壓力值，提供後續 Abaqus 應力分析使用。

### 四、Abaqus 結構分析模型

結構分析流程如圖 10 所示。桅桿幾何模型如圖 11 所示，長度為 12 米，分為 8 節，其中包含複材外管、內外管重疊區、各節基座、各節內襯環、支撐底座以及側向支撐等六個主要部分。

有限元素模型共使用 73710 個節點，87968 個元素進行網格劃分，如圖 12、13、14、15、16 所示，桅桿之複合材料設定示意圖如圖 17 所示，複合材料疊序如表 1 所示，非線性接觸條件設定如表 2 所示，桅桿外表面之氣動負載由 ANSYS CFX 計算得到，如圖 18 所示，將其乘上 1.5 倍之結構安全係數後轉換成結構負載，桅桿外表面之結構負載如圖 19 所示，天線、雲台自重與受風負載作用點如圖 20 所示，詳細桅桿之結構負載如表 3 所示。桅桿結構之位移固定條件設定如圖 21 所示。

待上述分析模型前處理完成後，開始執行結構靜態非線性接觸分析，分析結果將於下一章節作詳細討論。

## 五、Abaqus 分析結果

12 米複材桅桿在受到 40Knot 的風力負載下，桅桿、天線及雲台之氣動力負載經 ANSYS CFX 計算分別為 414.242N、202.171N、69.3708N。經由單向流固耦合流程後，結構最大變形量經 Abaqus 計算為 11.381in，頂傾角為 1.380°，整體變形如圖 22 所示。應力集中現象發生於第二節重疊區靠近內襯環的地方，整體 VonMises 分佈如圖 23 所示，應力峰值為 22.481ksi 如圖 24 所示。複合材料破壞準則[3]採用最大應變破壞準則，若破壞指標 MSTRN 值超過 1 表示結構將發生破壞，MSTRN 峰值發生於第 21 層，其疊層角度為 0 度，其值為 0.2964 小於 1，代表結構尚能承受風力負載不破壞，複材桅桿 MSTRN 分佈如圖 25 所示，各複材疊層安全裕度表如表 4 所示。

## 六、結果與討論

本章將以兩方面進行研究與探討，分別為 1.接觸條件對複材桅桿的影響。2.複材疊序對複材桅桿的影響。

### 6.1 接觸條件對複材桅桿的影響

本節將探討摩擦係數分別為 0.1、0.26、0.4 以及 $\infty$ 四種情況下，接觸條件對複材桅桿的影響。

四組頂傾角及破壞指標(MSTRN)之分析結果如圖 26、27 所示，分析數據如表 5 所示。由結果可以發現若摩擦係數越高，則複材桅桿的頂傾角以及破壞指標值越小，這說明了接觸條件對結構變形及受力有顯著影響，若複材管與各節基座及內襯環接合的越緊密，其受風力負載產生破壞及大變形的機率越低，反之亦然。

### 6.2 複材疊序對複材桅桿的影響

本節將探討三種不同疊層順序對複材桅桿的影響，詳細疊序如表 6 所示。

三組頂傾角及破壞指標(MSTRN)之分析數據如表 7 所示。由結果可以發現當疊層角度均為零度時，複材桅桿的破壞指標值及頂傾角最大，當同時考慮 0、45 度疊層時，破壞指標值及頂傾角開始降低，當同時考慮 0、45、90 度疊層時，破壞指標值及頂傾角最小，這說明了複材疊序對複材桅桿也有顯著影響，結構受力產生變形，原圓形斷面變

形為橢圓形，此時完全 0 度疊層將因無側向加強而導致較大變形，而 45、90 度疊層則因側向強度增強而使變形量降低、破壞指標指降低。

七、參考文獻

- [1] Wang, X., "Fundamentals of Fluid-Solid Interactions: Analytical and Computational Approaches. Monograph Series on Nonlinear Science and Complexity". Elsevier, Netherland, 2008.
- [2] Abaqus, "Analysis User's Manual", Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012.
- [3] Robert M. Jones, "Mechanics of Composite Materials". Institute of Technology, Southern Methodist University, Dallas, Texas, 1975.

八、表格

第 n 層	疊層角度[°]	第 n 層	疊層角度[°]
1	45	12	90
2	0	13	-45
3	0	14	0
4	0	15	0
5	-45	16	45
6	90	17	90
7	45	18	-45
8	0	19	0
9	0	20	0
10	-45	21	0
11	90	22	45

表 1 複材疊序表

主面	從面	接觸性質	摩擦係數
重疊區	桅桿底座	Frictional	0.26
重疊區	各節內襯環	Frictional	0.26
複材外管	各節內襯環	Frictional	0.26
複材外管	各節基座	Frictional	0.26
重疊區	各節基座	Bonded	
複材外管	側向支撐	Bonded	
複材外管	頂蓋	Bonded	
桅桿底座	支撐底座	Bonded	
桅桿底座	第一節基座	Bonded	
第一節基座	支撐底座	Bonded	

表 2 複材桅桿接觸條件設定表

項目	負載情況	負載值 [N]
1	天線、雲台自重	607.329
2	桅桿受風負載(x1.5 倍)	621.360
3	天線受風負載(x1.5 倍)	303.264

4	雲台受風負載(x1.5 倍)	104.561
---	----------------	---------

表 3 複材桅桿結構負載表

第 n 層	角度 [°]	應力值 [ksi]	MSTRN	Safety Margin
1	45	10.245	0.1421	6.037
2	0	8.880	0.2836	2.526
3	0	8.348	0.2798	2.574
4	0	8.170	0.2761	2.622
5	-45	9.628	0.1175	7.511
6	90	21.636	0.0711	13.065
7	45	9.119	0.1140	7.772
8	0	7.523	0.2609	2.833
9	0	7.378	0.2572	2.888
10	-45	8.625	0.1065	8.390
11	90	20.916	0.0584	16.123
12	90	21.177	0.0585	16.094
13	-45	8.893	0.1093	8.149
14	0	7.150	0.2691	2.716
15	0	7.166	0.2724	2.671
16	45	10.086	0.1315	6.605
17	90	22.482	0.0765	12.072
18	-45	12.697	0.1418	6.052
19	0	9.206	0.2866	2.489
20	0	9.739	0.2915	2.431
21	0	10.273	0.2964	2.374
22	45	14.095	0.2254	3.437

表 4 複材桅桿各疊層安全裕度表

摩擦係數	變形量 [in]	頂傾角 [°]	MSTRN	S.M.
0.100	11.637	1.411	0.335	1.985
0.260	11.381	1.380	0.296	2.378
0.400	11.213	1.360	0.271	2.685
∞	3.165	0.384	0.071	13.025

表 5 不同接觸條件之頂傾角及破壞指標值比較

項次	疊序
1	(0)22
2	[(45/0/-45/0/45/0/-45/0/45/0/-45)s]
3	[(45/0/0/0/-45/90/45/0/0/-45/90)s]

表 6 複材桅桿疊序表

疊序	變形量 [in]	頂傾角 [°]	MSTRN	S.M.
1	14.284	1.732	0.840	0.191
2	11.726	1.422	0.432	1.314
3	11.381	1.380	0.296	2.378

表 7 不同疊序之頂傾角及破壞指標值比較

十一、圖片

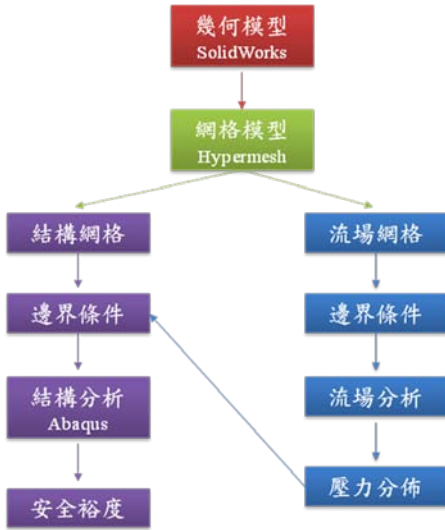


圖 1 單向流固耦合分析流程

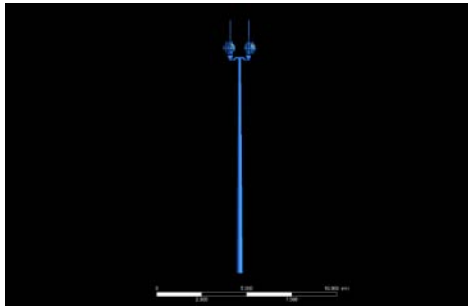


圖 2 桅桿總組合模型

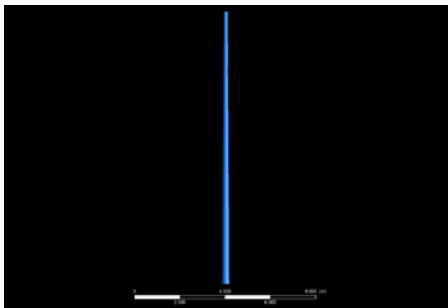


圖 3 桅桿幾何模型



圖 4 天線幾何模型

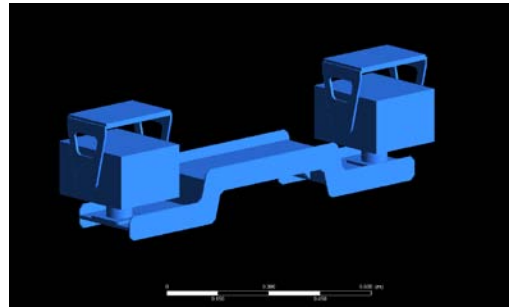


圖 5 雲台幾何模型

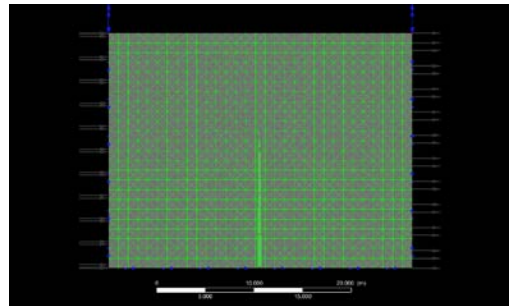


圖 6 流場分析模型

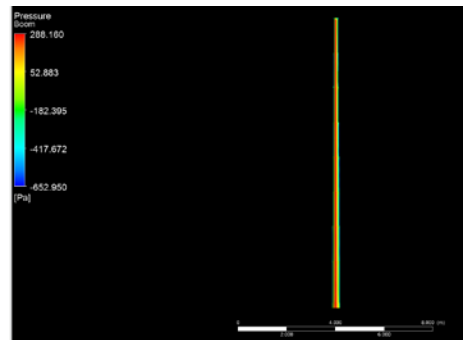


圖 7 桅桿氣動力分布

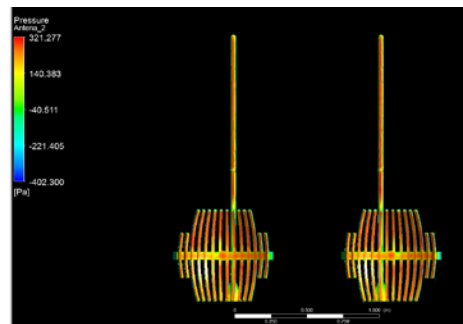


圖 8 天線氣動力分布

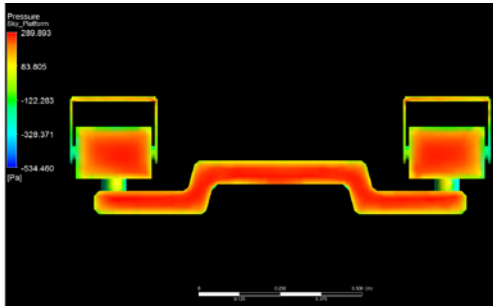


圖 9 雲台氣動力分布



圖 10 結構分析流程

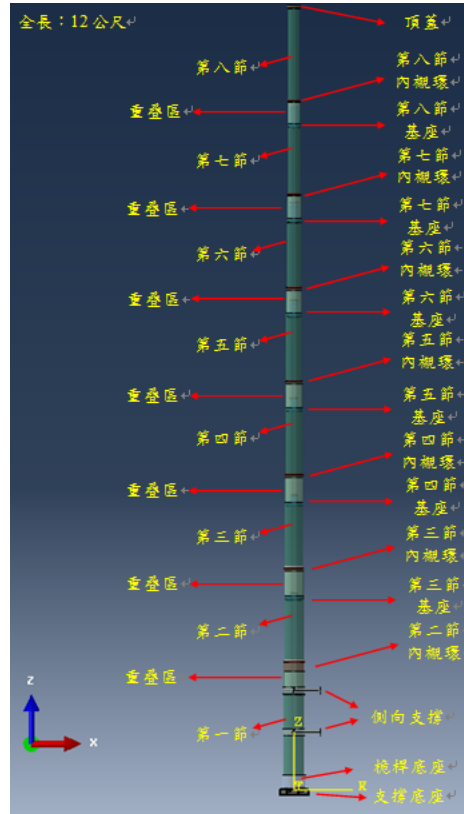


圖 11 桅桿幾何模型

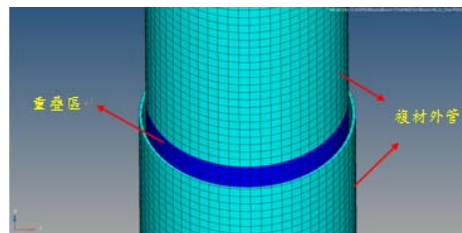


圖 12 複材外管有限元素模型

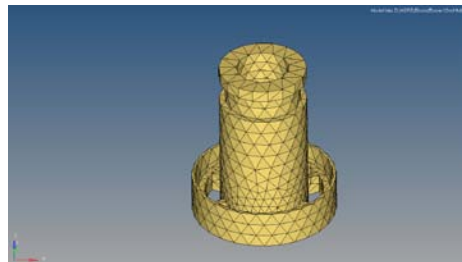


圖 13 底座有限元素模型

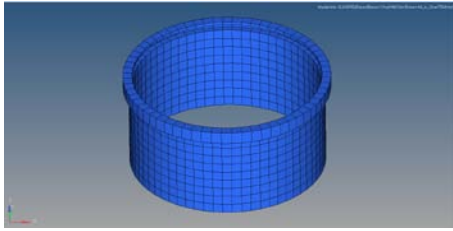


圖 14 內襯環有限元素模型

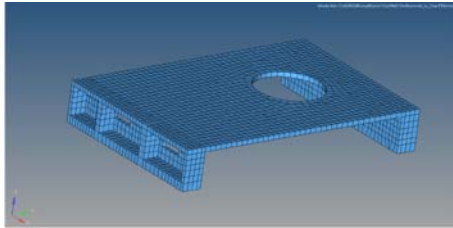


圖 15 支撐底座有限元素模型

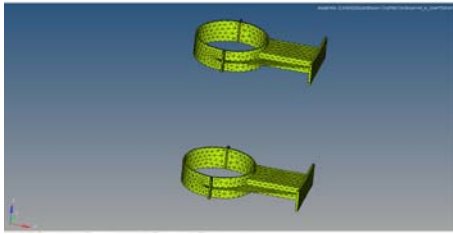


圖 16 側向支撐有限元素模型

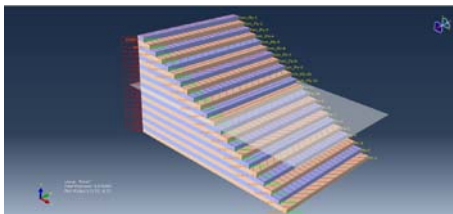


圖 17 桅桿複合材料設定示意圖

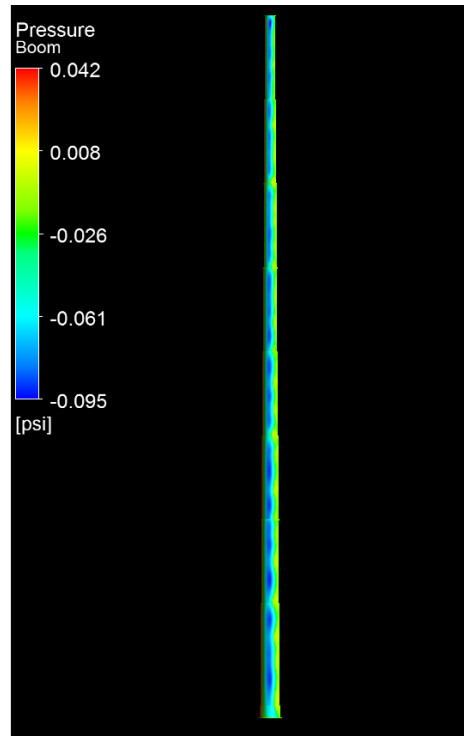


圖 18 桅桿外表面氣動負載分布圖

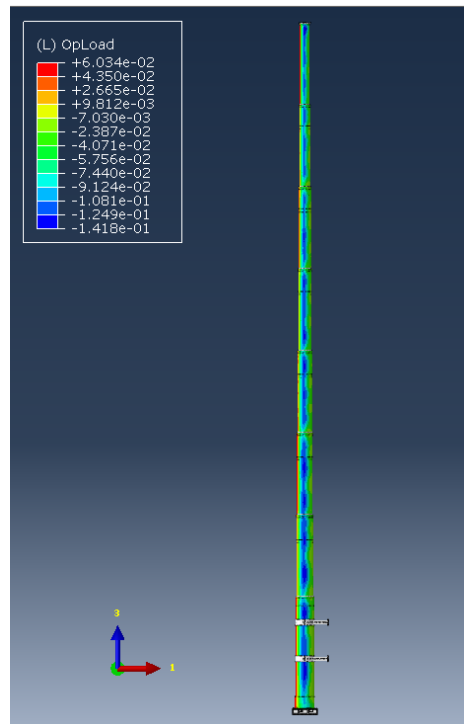


圖 19 桅桿外表面結構負載分布圖

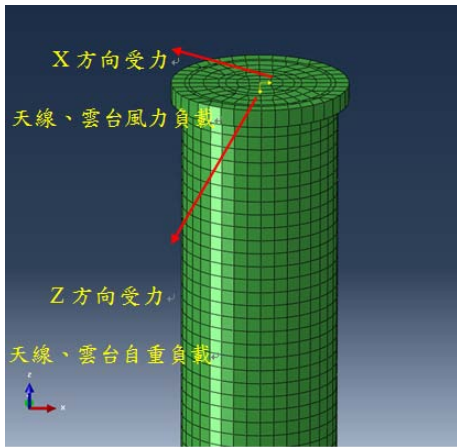


圖 20 天線、雲台自重及風力負載示意圖

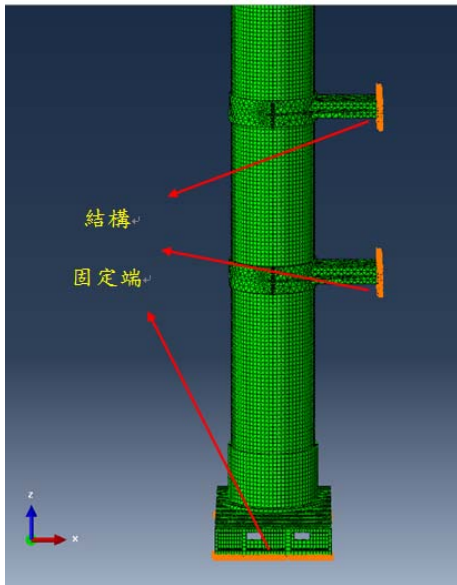


圖 21 桅桿位移拘束條件示意圖

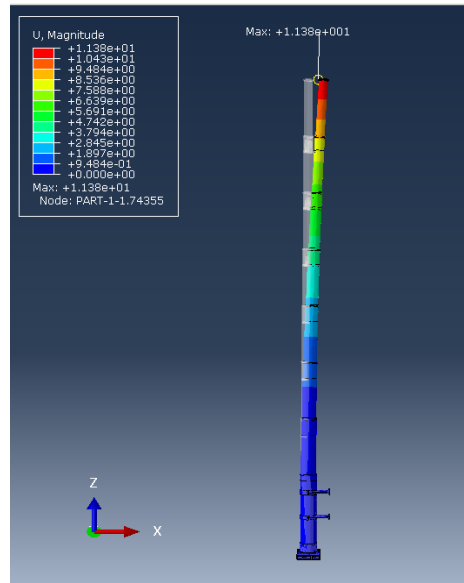


圖 22 複材桅桿變形圖

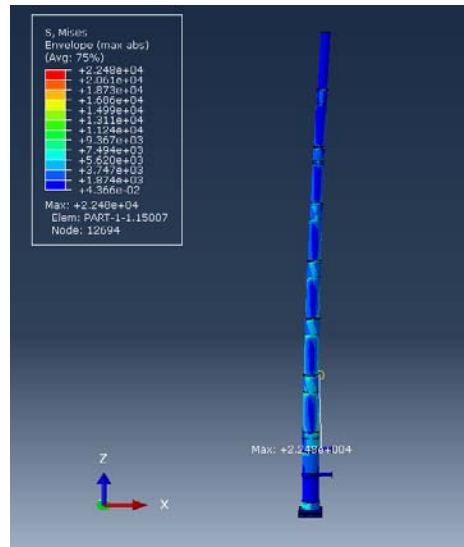


圖 23 複材桅桿應力分布圖

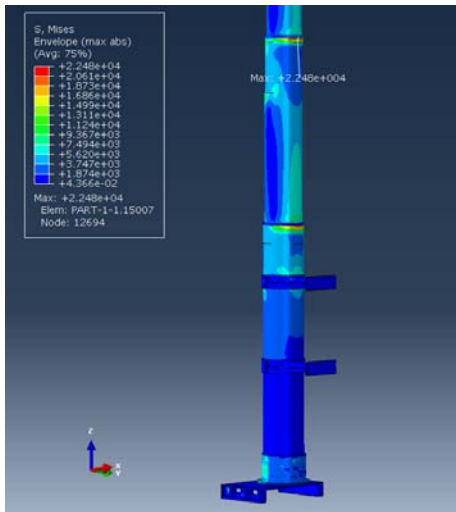


圖 24 複材桅桿應力峰值發生處

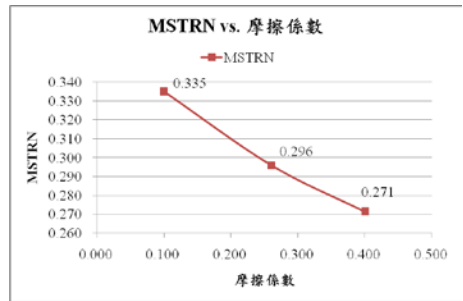


圖 27 MSTRN 與摩擦係數關係圖

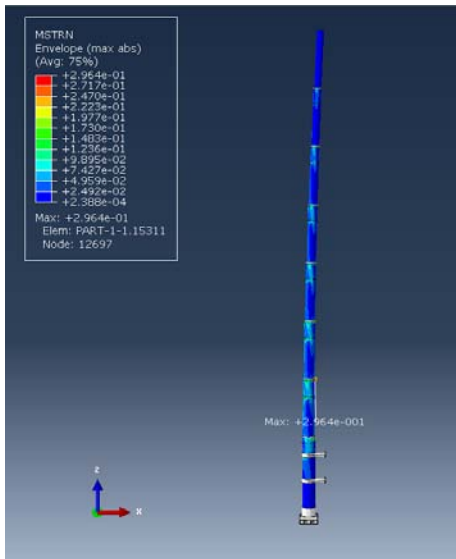


圖 25 複材桅桿 MSTRN 值分布圖

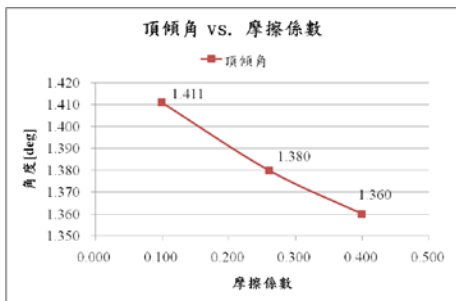


圖 26 頂傾角與摩擦係數關係圖