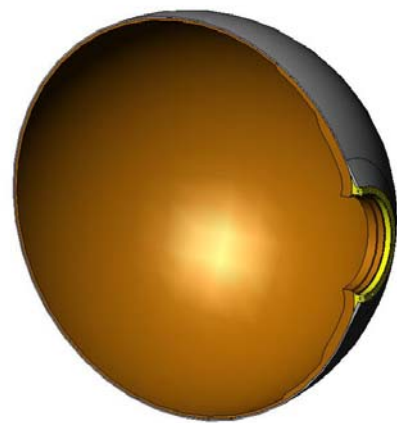
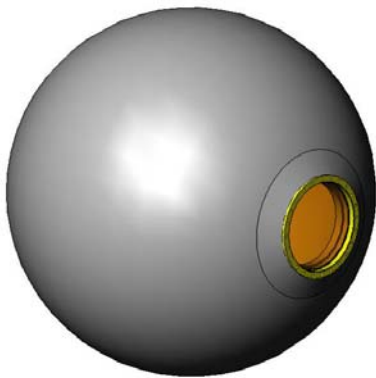


# 有限元素法在工程上之應用

研究題目：

## 纖維纏繞內壓容器之 金屬配接座非線性結構 設計及分析



指導教授：陳申岳 博士

研究團隊：

9369516 孫啟仁

9369517 祁 凌

9369525 林子翔

9469516 顏俊宏

9469517 唐榕崧

9469525 林宗漢

## 目錄

一、前言.....	3
二、任務分配.....	4
三、任務說明.....	5
1.基本理論計算及分析.....	5
2.設計及 3D 模組建立.....	6
3.部分域線性結構分析.....	7
4.非線性結構分析.....	8
四、硬品設計.....	9
五、線性結構分析.....	11
1.set element type.....	11
2.set material props. ....	11
3.set model.....	11
4.set mesh.....	11
5.set B.C. ....	13
6.solve.....	13
六、非線性結構分析.....	15
1.set element type.....	15
2.set material props. ....	15
3.set model.....	15
4.set mesh.....	15
5.set B.C. ....	16
6.solve.....	16
七、結論.....	20
參考文獻.....	21

## 一、前言

複合材料纏繞技術一直是世界各國研究的重點，其原因在於其製造出來的產品質輕性能佳，最主要的是能迅速且高重複性的製造工藝，而對於纖維纏繞內壓容器的設計上來說，複合材料確實是一種最佳的設計取向，無論工業上的使用（儲壓槽）、運動器材上的使用（空氣瓶、呼拉圈）、或是國防工業（燃燒管、噴管）上的使用，都是值得設計考量的方向，然而因為製造工藝的需求，各種纖維纏繞內壓容器必須搭配金屬的配接（統稱為金屬配接座），以達到多種不同需求的變化，而面對任務需求的不同，金屬材料的設計也將與傳統的設計方向大不相同，在傳統工業設計上或應用在航空器上的設計的都保有相當高的安全裕度，而在金屬與複合材料結合的情況下，設計概念將因為複合材料力學的性能，金屬材料必須有更嚴謹、精確、可靠的設計，本文將針對國防科技的火箭飛彈發動機之燃燒室，探討與壓力容器搭接的金屬配接座的非線性結構設計。

由於設計任務的需求，飛彈一般都屬於一次性任務，在發射後、或試驗過後，就將不再重複使用，主要原因在於，飛彈的最高需求即是在最高的性能下，以最輕的設計為主，因而各項組件的設計都必須達到臨界設計值，由於需要極輕質量的設計，金屬配接座在線性範圍內的設計，安全裕度將過度高，相較於複合材料的力學行為也極不符合，如此將會大大影響整體的物性，金屬（鋼、鋁等）一般常用的密度等都遠大於複合材料（碳纖／樹脂），因而研改金屬的效益也將遠大於研改複合材料的效益；從各國的文獻、技資研究，在進行纖維纏繞內壓容器試驗時，破壞方式及形態都希望在複合材料上，由此可見金屬配接座的設計不僅要具有最小的質量，還必須在受壓力後塑性變形時不致失效，因而在設計時單純以理論的塑性分析是不夠的，必須搭配有限元素法的分析，以增加產品設計的可靠性，更可減少試驗成本，加速研改時程，提供設計者可靠及準確的設計參數。

## 二、任務分配

1. 孫啟仁－將 CAD 建立的 3D 模組檔匯入有限元素分析軟體 ANSYS，並建立格點，以線性下的變形環境設定，先行計算找出網格的收斂性，及初步的線性變形結果。
2. 祁 凌－利用基本理論計算結構所需的參數，並繪製藍圖，設計整體構型；由於理論分析不可能與實際狀況相同，必須以理論公式簡化邊界條件設定。
3. 林子翔－利用三維繪圖軟體 SolidWorks 建立 3D 模組，並依據分析者所需要的不同尺寸需求或分割部分域，提供 3D 模組檔。
4. 顏俊宏－將 CAD 建立的 3D 模組檔匯入有限元素分析軟體 ANSYS，並建立格點，以線性下的變形環境設定，先行計算找出網格的收斂性，及初步的線性變形結果。
5. 唐榕崧－將建好元素的 CAE 檔改變邊界條件設定，計算非線性範圍，並運用不同的收斂方式，改善分析運算速度及收斂性。
6. 林宗漢－將建好元素的 CAE 檔改變邊界條件設定，計算非線性範圍，並運用不同的收斂方式，改善分析運算速度及收斂性。

### 三、任務說明

#### 1. 基本理論計算及分析

纖維纏繞殼體的配接座，不僅具有開口加強效果、連接點火器和噴嘴的作用，而且是殼體纏繞時所必須的，複合材料的外殼設計在本文中略，僅單一討論金屬配接座的設計。

##### (1) 配接座肩部厚度計算

殼體在內壓作用下，配接座肩部是重要的受力部位，其厚度變化規律可表示

$$\delta(r) = \frac{\delta}{r_a - r_b} (r_a - r)$$

式中  $r_a$  為肩部外圓半徑； $r_b$  為肩部內圓半徑； $r$  為確定厚度的計算點至殼體軸線的距離； $\delta$  為肩根部厚度。

肩根部厚度為

$$\delta = r_b \sqrt{\frac{-\left[1 + 3\gamma + (1 - \gamma)\lambda_s^2 + \frac{4(1 + \gamma)}{1 - \lambda_s^2} \ln \lambda_s\right] P_b}{8k_0[1 + \gamma + (1 - \gamma)\lambda_s^2][\sigma_b]}}$$

式中  $\gamma$  為接頭材料泊松比； $\lambda_s = r_b/r_a$ ；當彈性設計時  $k_0 = 1/6$ ，當塑性設計時  $k_0 = 1/4$ ，單一使用此經驗試計算較為保守，如需要更精確計算必須採用迭代法運算，如此更能符合設計的目標。

採用迭代法運算時，以上試計算值為一猜值，代入以下公式進而迭代運算

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{C_6(C_2 + C_5)}{C_1(C_2 + C_5) + C_2(C_3 + C_4)}}$$

$$C_1 = \frac{12K_0\sigma_b r_b \left[ (1 - \nu)\lambda_s^2 + \nu + 1 \right]}{(1 - \lambda_s^2)\delta}$$

$$C_2 = \frac{4E_2 SH_1}{\pi E_3 r_s^4}$$

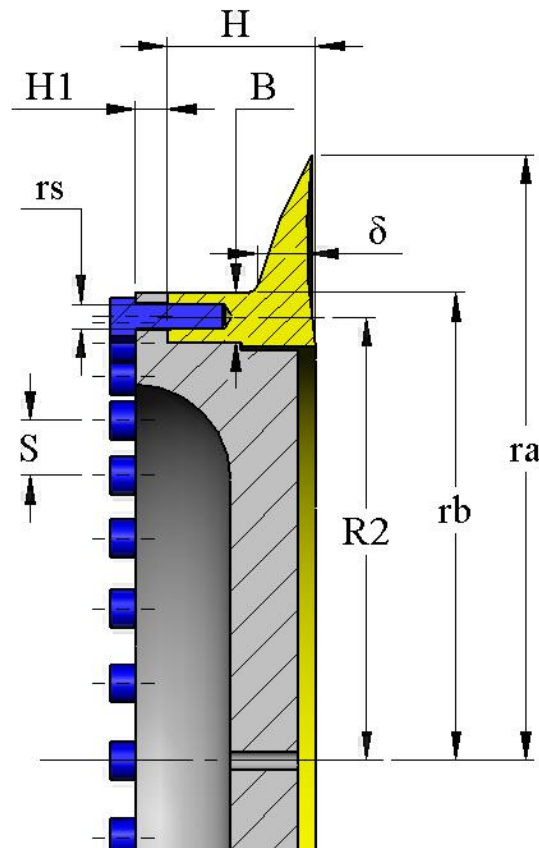
$$C_3 = \frac{12R_2^2 K_d \sigma_b \delta^2}{BH^3}$$

$$C_4 = \frac{3r_b R_2^2 P_b}{H^3}$$

$$C_5 = \frac{12R_2^2}{BH^3}$$

$$C_6 = -\frac{3r_b^3 P_b}{2(1 - \lambda_s^2)} \left[ 1 + 3\nu + (1 - \nu)\lambda_s^2 + \frac{4(1 + \nu)}{1 - \lambda_s^2} \ln \lambda_s \right]$$

式中  $P_b$  為設計爆破壓力，亦是邊界條件的參數之一， $\sigma_b$  為金屬材料抗拉強度，其餘符號將以圖示方式說明，使讀者更能清晰了解相關定義及位置。



- Kd : 設計參數
- 彈性設計為 1/6
- 線性設計為 1/4
- $\sigma_b$  : 接座抗拉強度
- $\mu$  : 接座泊松比
- $\lambda_s$  :  $r_a/r_b$
- E2 : 接座彈性係數
- E3 : 螺栓彈性係數
- S : 螺栓間距離

## (2) 肩寬比確定

纖維纏繞殼體接頭的另一個重要參數是肩寬比： $r_a/r_b$ 。從受力的角度考慮，肩寬比越小越好。但肩寬比太小，殼體在內壓作用下，有可能使接頭整體脫掉。目前，對肩寬比的取法為：

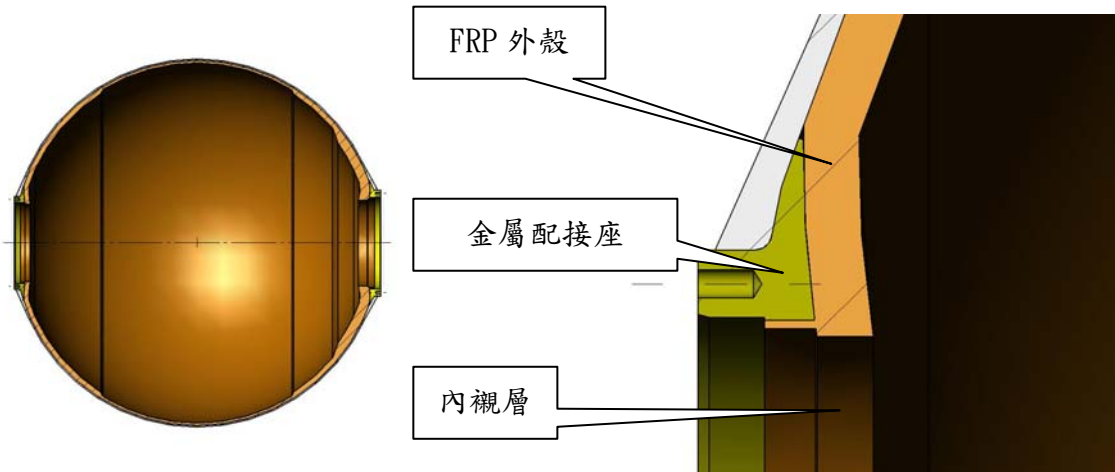
$$a/b = 1.2 \sim 1.6$$

由此確定的肩寬為

$$W = a - b = 0.2b \sim 0.6b$$

## 2. 設計及 3D 模組建立

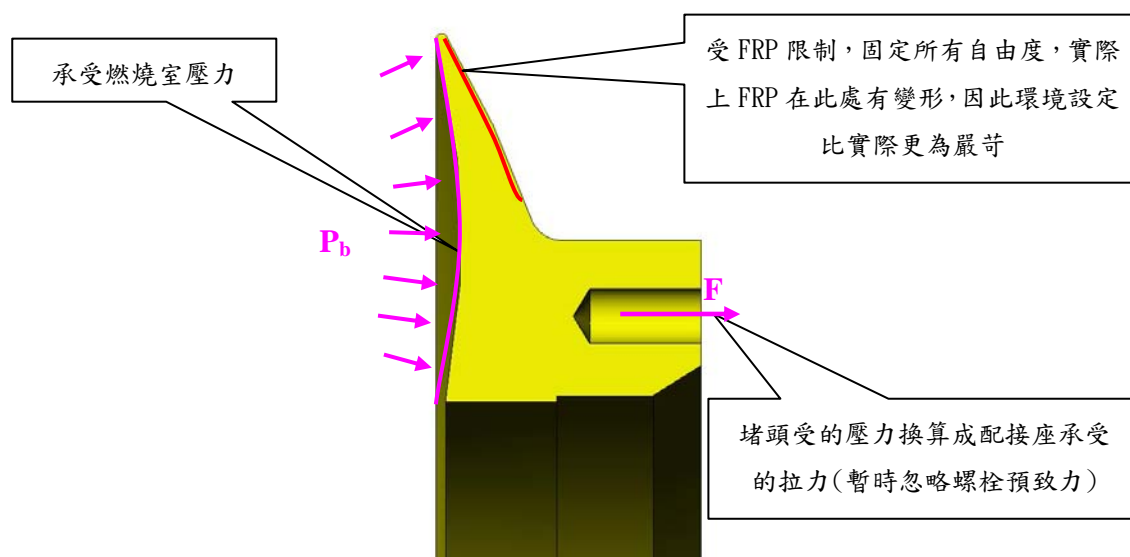
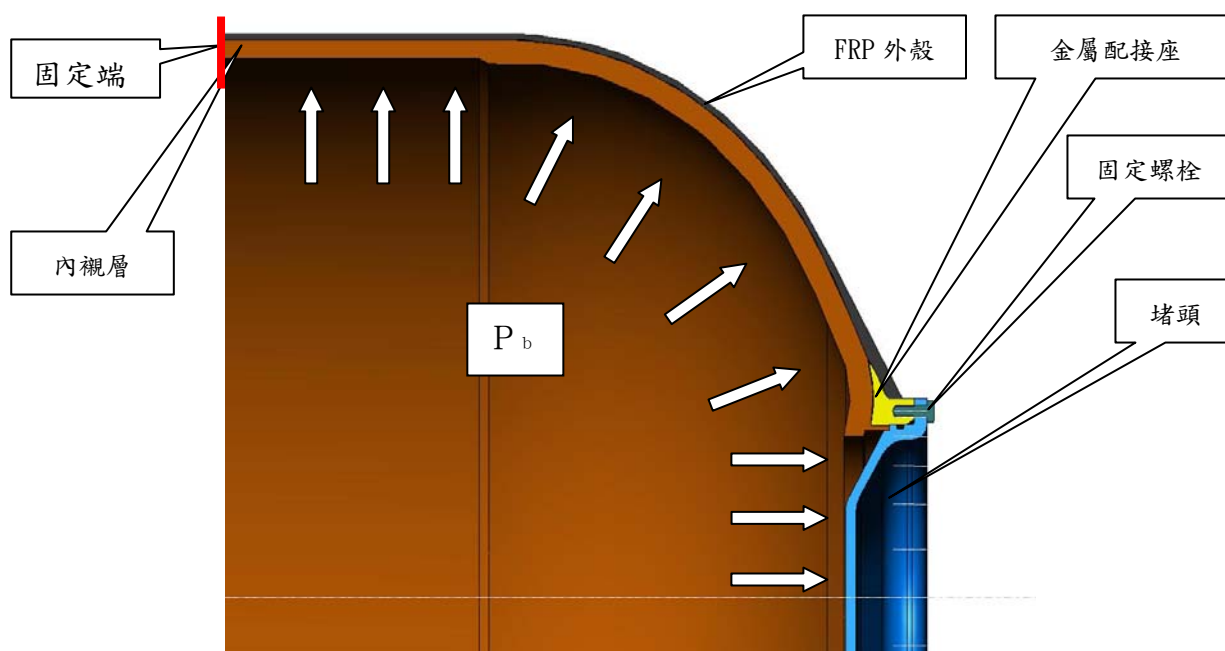
下圖為典型的纖維纏繞燃燒室圖形，及局部放大圖：



由圖中可看出主要分為三個部份，外殼、配接座、及內襯層，設計的目標主要依據各國的相關技術文件，仿效典型的基本燃燒室設計，結合、組裝、機構都以最基本的設計為方向，設計者依據設計的燃燒室爆破壓力  $P_b$ ，配合上一節探討的計算方式，計算所有需要參數，使用 3D 繪圖軟體 SolidWorks 完成模組建立，SolidWorks 程式可轉存成 Parasolid 檔，以提供有限元素分析軟體使用。

### 3.部分域線性結構分析

由於整體結構包含了正交各項異性的複合材料，導致在以總域分析時無法確實分析複材部份，而本小組主要研究的方向為金屬部份，因而採用部分域的方式單一分析金屬配接座，然而此法一定與實際的作用環境大不相同，因而必須簡化邊界條件的設定，實際產品的受力環境及簡化後的邊界條件，圖示說明如下：



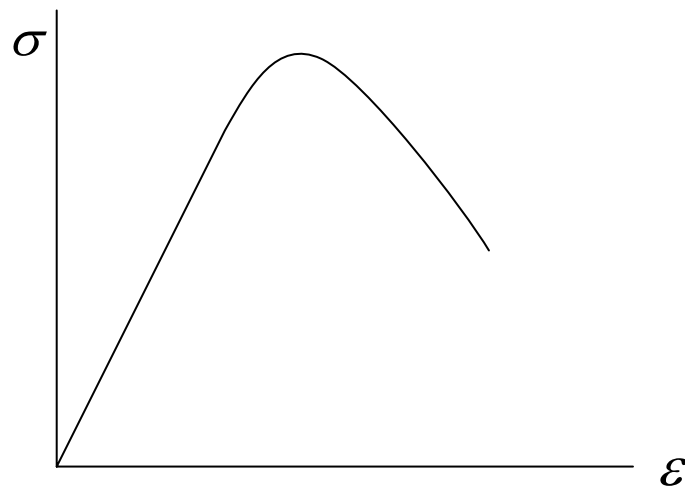
邊界條件確定後，必須建立有效且準確的網格，先將邊界條件設定在產品線性變形區域內，以方便找出網格的收斂性，由於主要目的在於非線性分析，需要較高階的網格元素，

擬採用六面體元素 20 個節點，並在線性分析下，建立收斂性的網格，分析後進行錯誤評估，以預防所有可能的人工錯誤行為。

依據實際的產品試驗規劃，在製造完成後會先進行一般性的液壓試驗，所以產品在實際使用時已經受過外力作用，通常液壓試驗會先加壓至某一試驗值  $P_c$ ，然後洩壓，因而在產品使用時已經有液壓過後的殘留應力，由於  $P_c$  的作用在產品的線性變形下，因而在此一步驟可先行計算出來殘留應力，而後將結果代入非線性分析時的邊界條件。

#### 4. 非線性結構分析

依據材料手冊 HandBook5 找出材料的真實應力-應變曲線，建立材料常數檔案，將殘留應力及邊界條件代入設定，由於在大變形分析下可能會有無法收斂的情形發生，因而本研究團隊分工採用不同的收斂方式、計算數學式以確保其達到收斂。由於金屬的非線性應力-應變曲線如下圖所示：



採用不同的方式計算，以減少運算時間，在 ANSYS 中使用的是 Newton-Type 的 Newton-Raphson，收斂設定本組將分別採用 Arc-Length 及 Line-Search 的環境，以比較其結果的收斂性及計算速度，在求解器中擬採用兩種不同的方式求解，PCG 及 Sparse 比較其在非線性時的收斂性能及 CPU 的處理速度，在元素的 element technology 設定採用一般所謂的 URI，而 element formulation 則採用內建的 pure displacement，對於材料常數的設定採用 KINH 的方式。

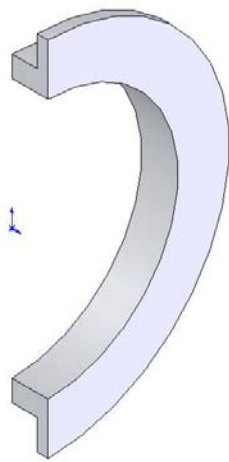
#### 四、硬品設計

依據上一節的理論公式方式計算可以得到一個初步的設計參數，茲將計算數據表列如下：

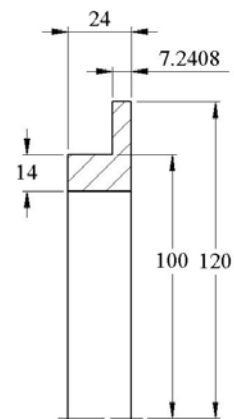
假設			尺寸		
Pm	90	kgf/cm <sup>2</sup>	ra	120	mm
Kd	0.1667		rb	100	mm
配接座材料 AL7075-T6			λs	0.83	mm
σb	51.3	kgf/mm <sup>2</sup>	R2	93	mm
E2	7300	kgf/mm <sup>2</sup>	H	24	mm
μ	0.33		B	14	mm
螺栓材料 SAE4130			H1	7	mm
E3	20386	kgf/mm <sup>2</sup>	rs	6	mm
			S	25.97	mm

迭代運算							
△δ	C1	C2	C3	C4	C5	C6	δ
	8303.57	0.06	241.66	168.93	0.54	3177142.26	7.2598
0.012705	8318.13	0.06	240.81	168.93	0.54	3177142.26	7.2471
0.004182	8322.93	0.06	240.53	168.93	0.54	3177142.26	7.2429
0.001378	8324.51	0.06	240.44	168.93	0.54	3177142.26	7.2415
0.000454	8325.04	0.06	240.41	168.93	0.54	3177142.26	7.2411
0.000150	8325.21	0.06	240.40	168.93	0.54	3177142.26	7.2409
0.000049	8325.26	0.06	240.40	168.93	0.54	3177142.26	7.2409
0.000016	8325.28	0.06	240.40	168.93	0.54	3177142.26	7.2409
0.000001	8325.29	0.06	240.40	168.93	0.54	3177142.26	7.2408

本文採用收斂至  $10^{-6}$  為目標值，由表中計算得到其目標值為 7.2408mm，依據其相關尺寸參數可得到一個初步的設計結果，初步設計結果如下圖所示：

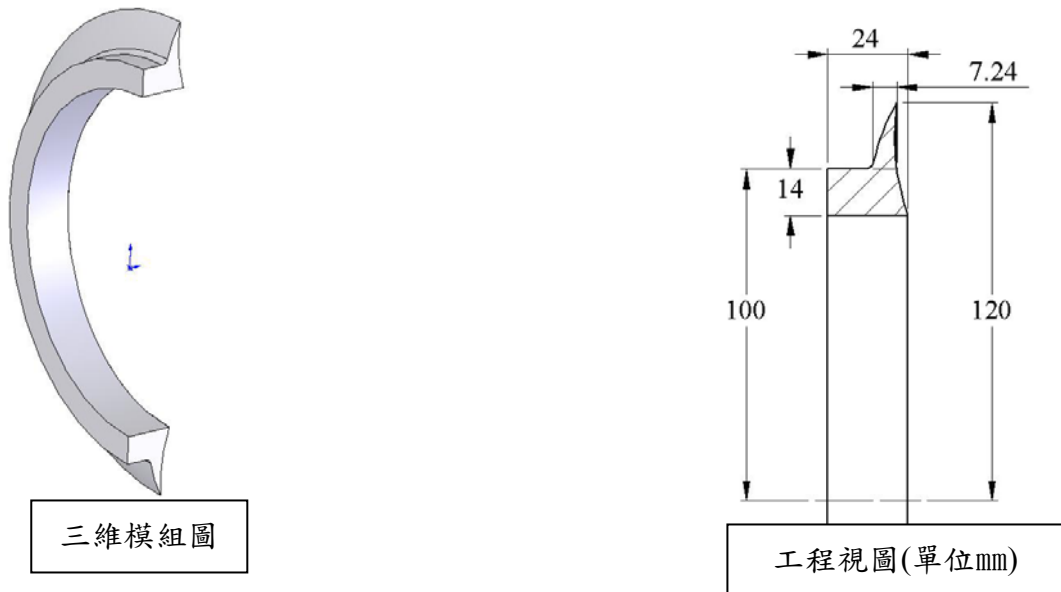


三維模組圖



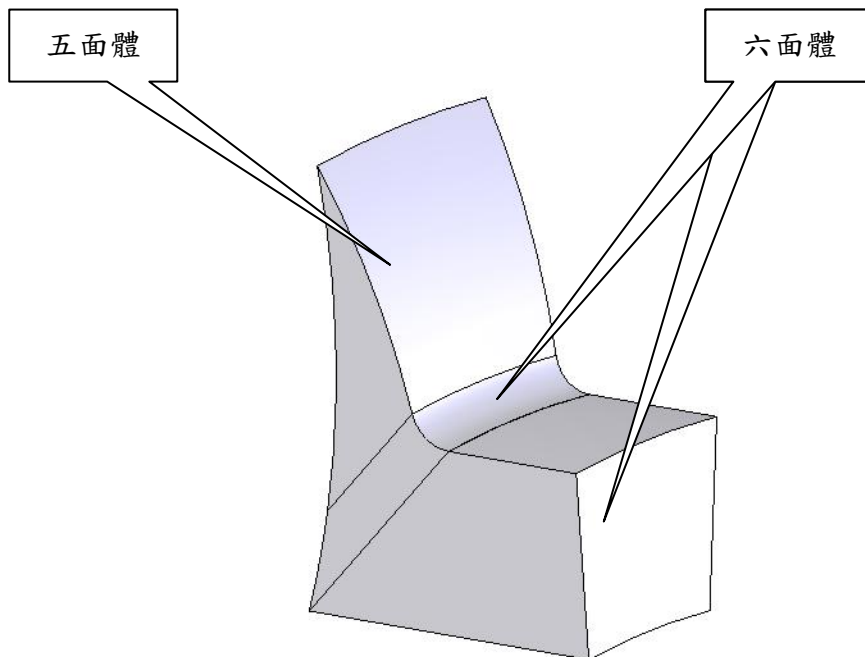
工程視圖(單位mm)

由於整體的設計目標值為肩寬 $\delta$ 的厚度，理論值為 7.2408 mm，因此其餘的尺寸可依據設計者的需要而有所改善，為了能配合複合材料外殼的繞線曲線，因此在直角的地方可改為圓弧以方便纏繞，而在容易產生應力集中的地方，可設計圓角以減少應力的負擔，在優化設計後，可得到如下的設計圖形：



其中重要的特徵參數值都相同，優化設計後降低了物性重量、及方便與其他介面組合製造，膠合面積增加即增加了結合強度。

為了能使用六面體元素分析，必須將複雜的模組圖分割成四、五、或六面體，在分割時必須考慮到會有應力集中效果處的地方，以及將模組簡化成 1/36 份，以縮減模型處理及計算時間，本組試著將模型切割成以下形式：



## 五、線性結構分析

### 1.set element type :

本類型題目通常使用 3D 實體元素較為佳，而在 solid45、solid95、solid185、solid186 等元素中，高階的元素較適合使用之，從以往的經驗 solid95 比 solid45 的收斂性能來的佳，而對於非線性計算時 solid186 將擁有更好、更可靠的收斂值，因此本組為了方便接下來非線性分析時與線性分析的比較，同樣採用 solid186 來進行計算。

<KEYOPT(2)> Element technology : Uniform reduced integration (default)

<KEYOPT(6)> Element formulation : Use pure displacement formulation (default)

依據線上手冊說明，及參考書目，URI 方式具有良好的計算速度，並可應用在非線性分析上，因此本組在線性及非線性分析上皆採用相同設定值。

### 2.set material props. :

在進行線性分析時只需在<Material Props>→<Material Models>下設定<structure>→<linear>→<elastic>即可，本項工件採用鋁合金 7075-T6 材質，茲將其相關參數表列如下：

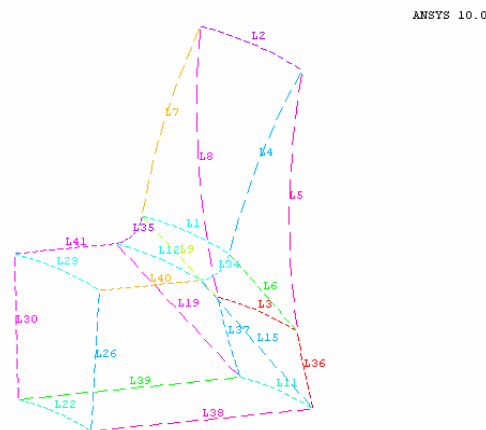
AL7075-T6(MKS)			
E	$\nu$	$\sigma_y$	$\rho$
7.12E+10	0.33	4.27E+08	2798

### 3.set model :

將 solidworks 繪製好的 parasolid 圖檔匯入 ANSYS 程式，由於匯入之後各分割件之間是分開的，因此必須進入<modeling>進行布林運算的黏合指令。

### 4.set mesh :

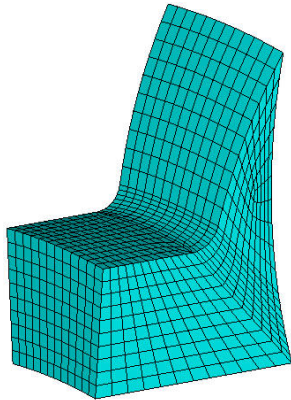
在線性分析中主要是為了找到網格的收斂性，以確保在進行非線性分析時的分析誤差，為了順利網格的細分，將網格細分成 1.5 及 2 倍，茲將各個邊線的編號及分割數量表列如下：



NUMBER	NDIV	refine 1.5	refine 2	NUMBER	NDIV	refine 1.5	refine 2
34	8	12	16	30	10	15	20
35	8	12	16	1	12	18	24
36	8	12	16	2	12	18	24
37	8	12	16	3	12	18	24
4	10	15	20	11	12	18	24
5	10	15	20	12	12	18	24
6	10	15	20	22	12	18	24
7	10	15	20	23	12	18	24
8	10	15	20	38	12	18	24
9	10	15	20	39	12	18	24
15	10	15	20	40	12	18	24
19	10	15	20	41	12	18	24
26	10	15	20				

格點建立後的形式如下圖所列：

ELEMENTS  
MAT NUM

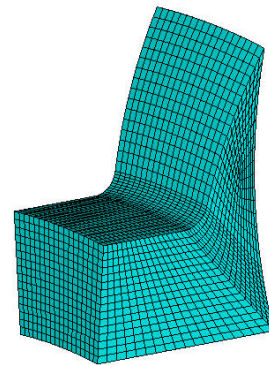


Refine 1.0

ANSYS 10.0

ELEMENTS

ANSYS 10.0



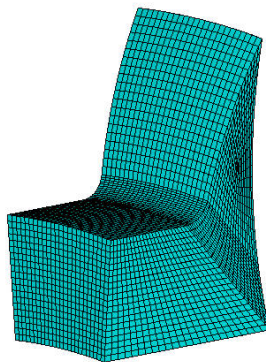
Refine 1.5

ELEMENTS

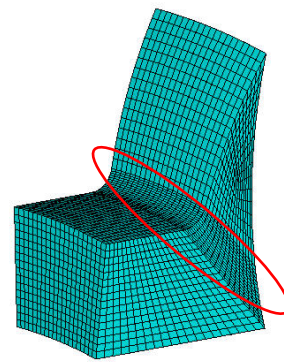
ANSYS 10.0

ELEMENTS

ANSYS 10.0



Full Refine 2.0

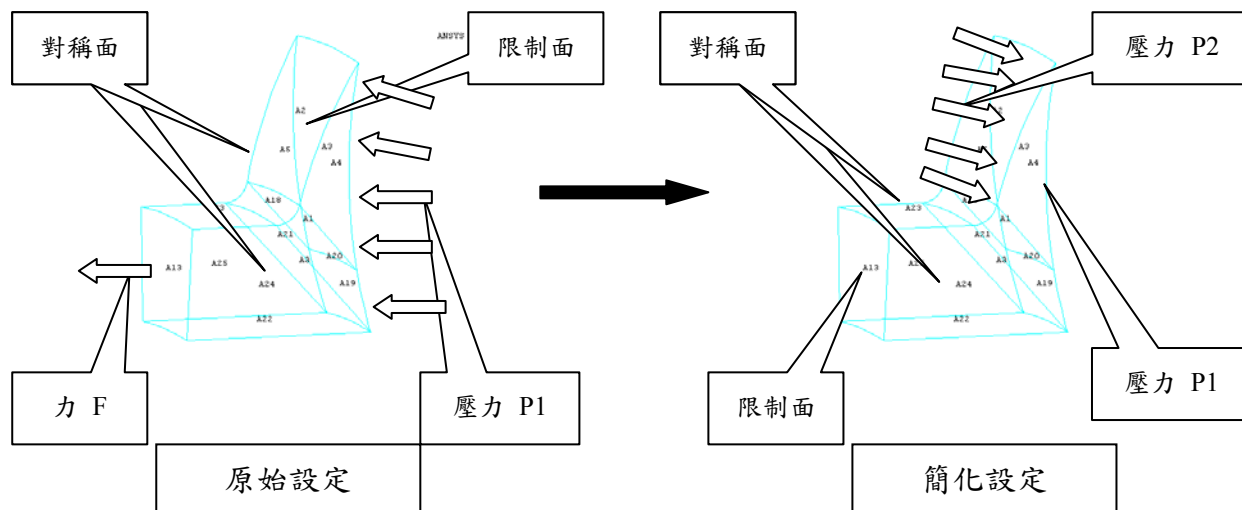


Part Refine 2.0

由於全部 2 倍細分太浪費系統資源，因此僅將重要分析部份細分處理。

### 5.set B.C. :

由於在 ANSYS 中力的給予比較困難，因此如果將整體受利條件簡化成壓力形式，雖然會比實際情況嚴苛，但有助於邊界條件的方便設定，更可避免產生奇異點的情形，原始的環境條件在上節中討論過，本節將簡化成壓力形式設定，說明如下：



假設人站在原先的施力處看整個工件受力情形，因此原先的施力處改為限制面，而將力量轉換成在原先限制面所受到的反作用力，將力轉換成壓力後分析，在線性分析時採用較小的壓力，以避免工件產生大變形，依據經驗公式在  $90\text{kgf/cm}^2$  時，將有塑性變形，因此，必須將壓力減小才能確保其變形在線性範圍內，本組以  $70\text{kgf/cm}^2$  為邊界條件的設定，又因為採用原來的  $1/36$ ，在力的方面可加成，所以必須先做處理，而壓力屬於內涵性質無須特別處理，茲將重要的條件設定及相關公式計算如下：

$$P2 = \frac{F}{A}$$

$$A = A2 + A18 = 4.4048 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$F = 5.178 \times 10^3 \text{ (N)}$$

$$P2 = \frac{5.178 \times 10^3}{4.4048 \times 10^{-4}} = 1.176 \times 10^7 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

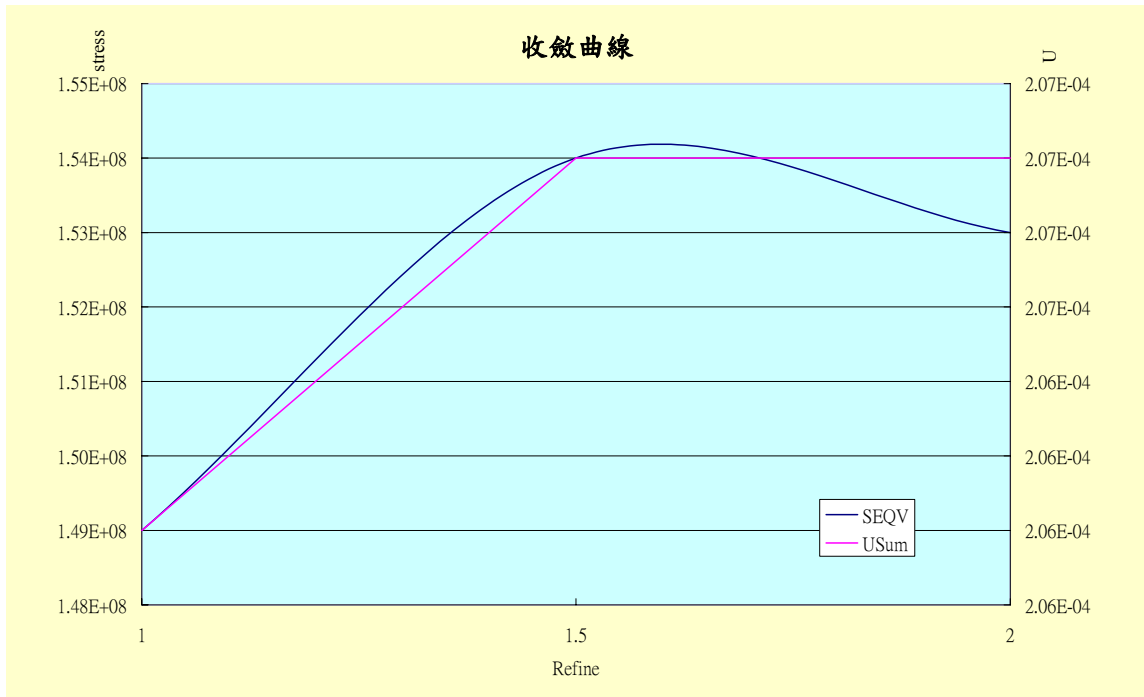
$$P1 = 6.86 \times 10^6 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

### 6.solve :

分別將不同程度細分的網格求解後，本小組將平均應立及變型量抓出作一比較，從下表中可看到相關的結果：

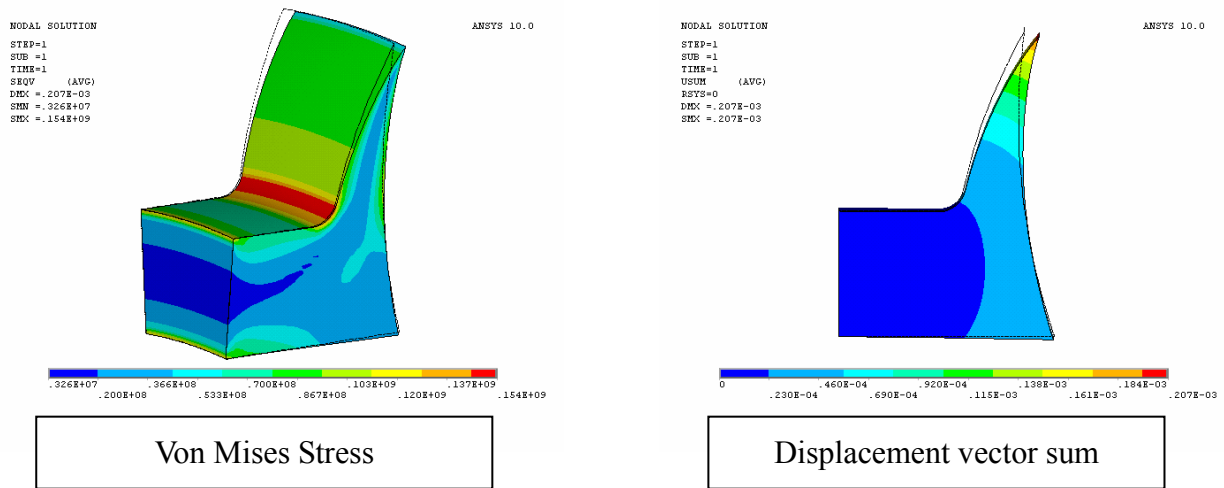
Refine 1.0	SEQV	USUM	Refine 1.5	SEQV	USUM	Refine 2	SEQV	USUM
數值解	1.49E+08	2.06E-04	數值解	1.54E+08	2.07E-04	數值解	1.53E+08	2.07E-04
誤差量	N/O	N/O	誤差量	3.36%	0.49%	誤差量	-0.65%	0.00%

為了方便了解其相互關係，茲將以圖形方式表示：



由結果資料中可看出在 refine 2 的時候變形量已經開始不變動，而應力僅變化 0.65%，而這樣的變化已經足夠工程設計使用，由於 refine 2 與 refine 1.5 計算的值相差不遠，而計算速度 refine 1.5 遠優於 refine 2，因此在進行非線性分析時採用 refine 1.5 的網格分割方式。

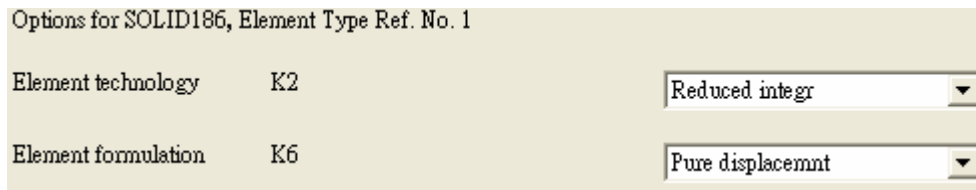
下圖為 refine 1.5 計算出的應力曲線分布圖及變形量分布圖：



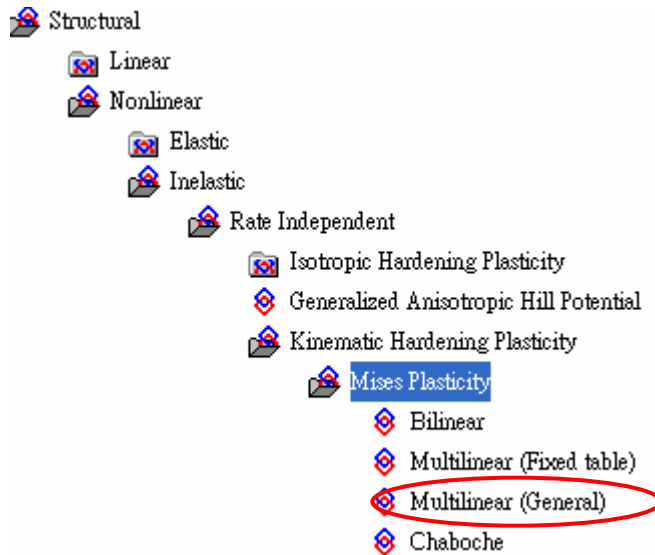
從以上結果來看是相當合理的，在肩寬的地方是最脆弱處，從應力分布圖中可看到，大部分較強的應力都集中該處，而在設計上來說最重要的關注點也就在這裡，變形方面也與實際相符合，在弧面處有很大的相對變形，因而力量會集中在肩寬處，應力最大值為 1.54E8 此數值與降服強度 4.69E8 相差甚遠，大約保有 3 倍的安全裕度，因此邊界條件的設定確實為線性範圍區域解。

## 六、非線性結構分析

1.set element type：採用與線性結構分析時一樣的設定。



2.set material props.：採用 BKIN 理論的材料設定，在 GUI 的設定如下圖：



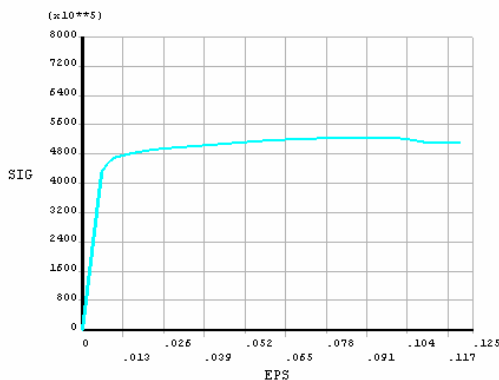
將材料的應力－應變關係依序鍵入表內，可得到如下的曲線圖形：

Table Data

KINH Table Preview

ANSYS 10.0

T1=0.00



AL7075-T6 應力－應變曲線

```
TB,KINH,1,1,14
TBTEMP,0
TBPT,,0.006,4.2718E8
TBPT,,0.008,4.5474E8
TBPT,,0.01,4.6852E8
TBPT,,0.016,4.823E8
TBPT,,0.02,4.8919E8
TBPT,,0.026,4.9608E8
TBPT,,0.036,5.0297E8
TBPT,,0.06,5.1675E8
TBPT,,0.07,5.2157E8
TBPT,,0.08,5.2364E8
TBPT,,0.09,5.2502E8
TBPT,,0.1,5.2364E8
TBPT,,0.106,5.1675E8
TBPT,,0.11,5.0986E8
```

3.set model：採用與線性分析時一樣模型。

4.set mesh：採用 Refine1.5 的格點設定。

指令式

5.set B.C. :

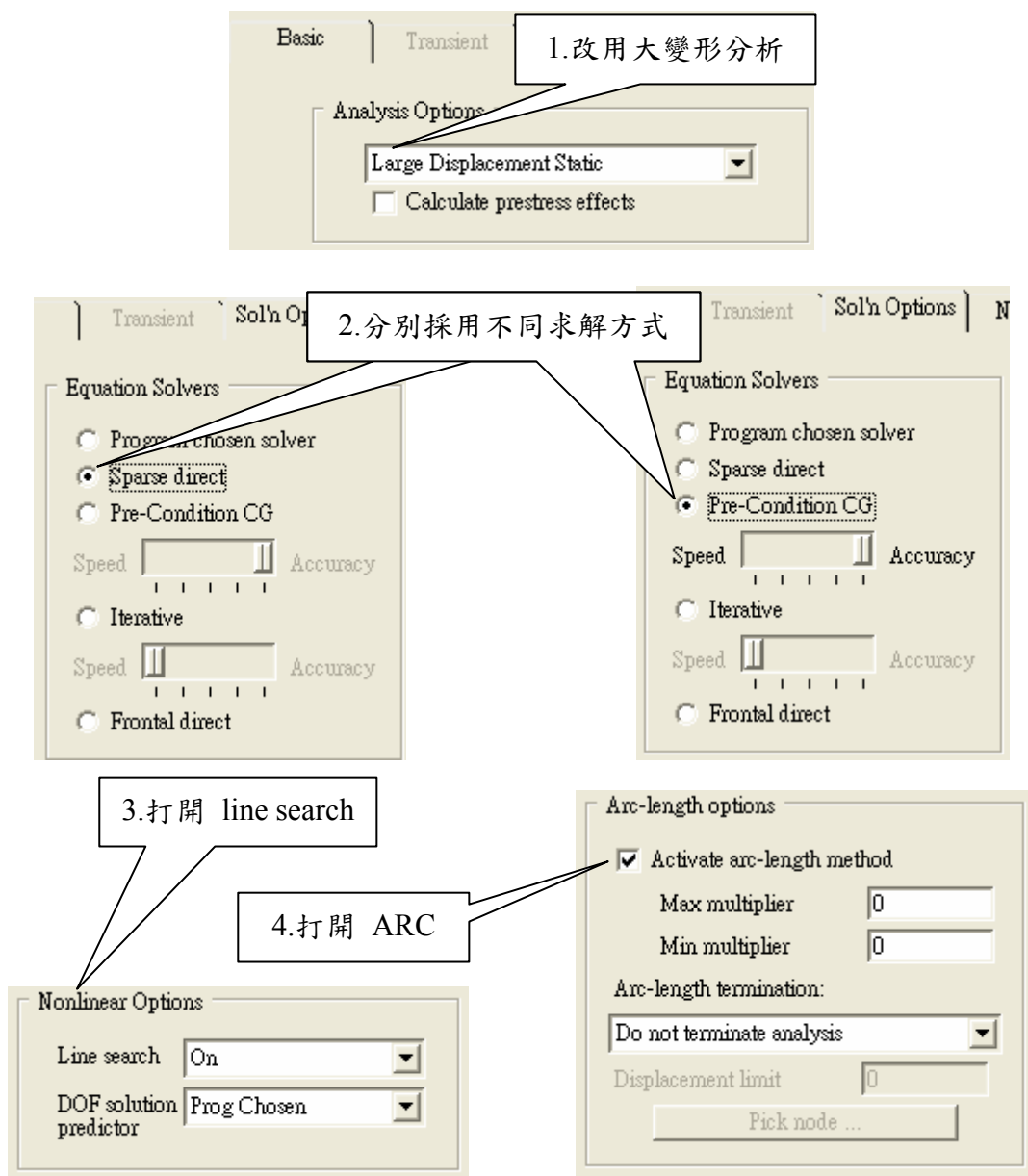
在理論公式上在  $90\text{kgf/cm}^2$  時將產生塑性變形，為了明顯表示塑性變形的情況，將邊界條件設定為  $210\text{kgf/cm}^2$ ，依此數值可計算出相關的邊界條件為：

$$F = 1.5533 \times 10^4 \text{ (N)}$$
$$P2 = \frac{1.5533 \times 10^4}{4.4048 \times 10^{-4}} = 2.058 \times 10^7 \text{ (N/m}^2\text{)}$$
$$P1 = 3.5265 \times 10^7 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

6.solve :

首先採用線性分析計算方式，即不做任何非線性的調整，用來作為一個比較數據。

在非線硬分析方面，本組將分別採用 sparse 及 PRG 的方式計算，並利用不同的收斂方式 Line search 和 Arc Length 兩種。



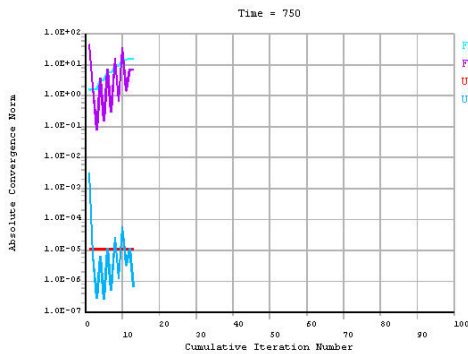
為了加速處理速度節省及善用資源，本組參考參考書目<sup>[1]</sup>內的方式，首先將原素內部編後重新組合

”wsort,all’

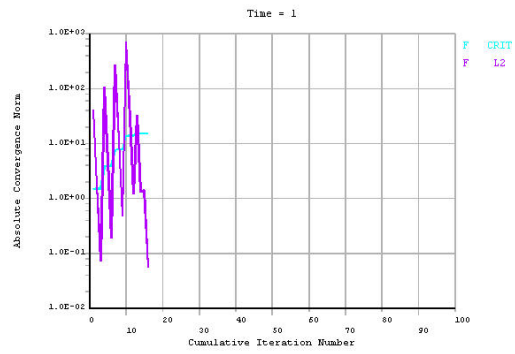
，然後寫出兩個乾淨的檔案

”save”→””/prep7”→”cdwrite,db,file,cdb”→”finish”→”/clear”→  
 ”cdread,db,file,cdb”→”/solu”→進行個別設定後開始求解。

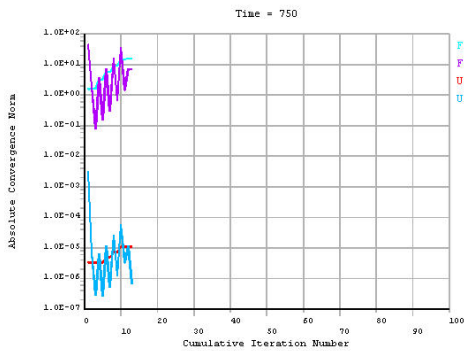
非線性求解後各方法的螢幕數據如下圖表列出：



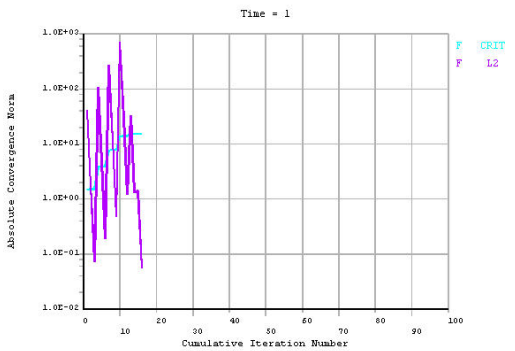
Sparse (by Line Search)



Sparse (by Arc Length)



PCG (by Line Search)



PCG (by Arc Length)

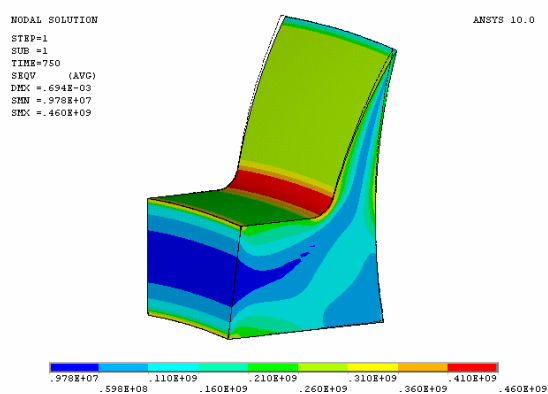
經統整後其求解的數據資料完全相同，茲將各方法求得的數據列表於后：

	Sparse Line	Sparse Arc	PCG Line	PCG Arc	Linear	誤差量
SEQV	4.56E+08	4.56E+08	4.56E+08	4.56E+08	4.60E+08	0.88%
EPTOEQV	0.006403	0.006403	0.006403	0.006403	0.006462	0.92%
USUM	6.93E-04	6.93E-04	6.93E-04	6.93E-04	6.94E-04	0.14%

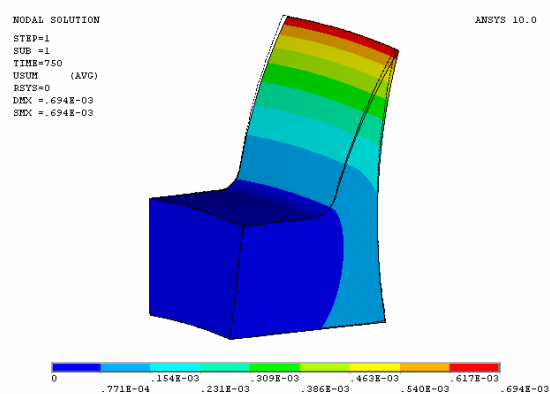
由列表中可看出四種方式皆可得到良好的收斂，及可靠的數值解，利用線性設定方式求解雖然與非線性計算值有所差異，但僅在1%內，而且在應變上可看出確實已經超過降伏強度時的應變量，在非線性計算上的差別最大點在其計算速度不同，採用 PCG 的計算速度遠快於 Sparse，而在 Arc 與 line 比較下，計算速度似乎相當，由於本次採用的計算模組的材料特性較為簡單，屬於一般的金屬材料，再使用 ANSYS 時可得到良好的收斂條件，因此以後在計算這類模組時，為了減少計算時間可採用 PCG 方式計算，既可得到收斂的解更可大量減少記憶體使用量。

茲將計算後的相關數值圖示如后：

### 線性結構計算結果

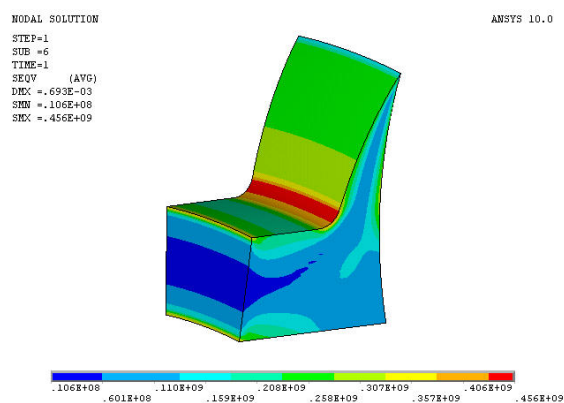


Von Mises Stress

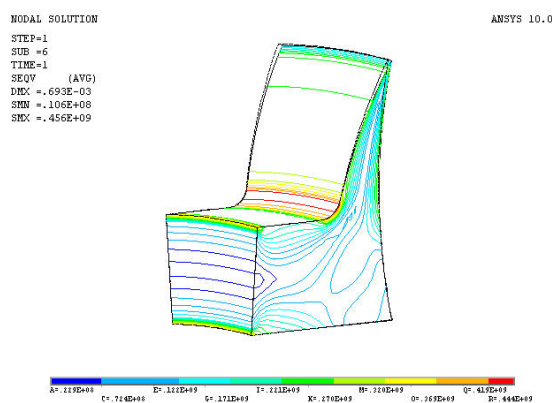


Displacement vector sum

### 非線性結構計算結果



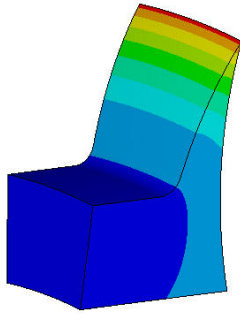
Von Mises Stress



Von Mises Stress

# 非線性結構計算結果

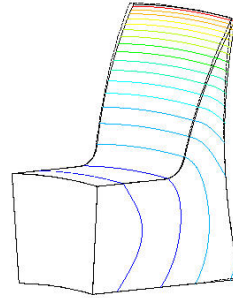
NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =6  
 TIME=1  
 (AVG)  
 USUM  
 RSY=0  
 DMX =.693E-03  
 SMX =.693E-03



Displacement vector sum

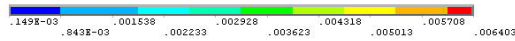
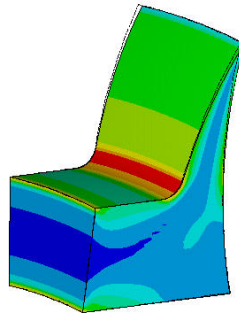
ANSYS 10.0

NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =6  
 TIME=1  
 (AVG)  
 USUM  
 RSY=0  
 DMX =.693E-03  
 SMX =.693E-03



Displacement vector sum

NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =6  
 TIME=1  
 (AVG)  
 EPTOEQV  
 DMX =.693E-03  
 SMN =.149E-03  
 SMX =.006403



Von Mises total Strain

## 七、結論

在分析上來說，整體的分析情形仍然與實際的環境發生條件有所差異，因此結果與實際上必然會有所誤差，如果要彌補這類的情形，必要採去的條件就是利用總域的方式求解，將所有組件模型建立，給予各自的材料參數，設定邊界條件而後求解，然而這類題目牽扯到複合材料，因此要使用總域分析，還是有一些難度要去克服。

在結果上看來，其總應變洽超過材料降伏強度時的應變對應值，由於受力情形不足到達極限強度附近，因此雖然變形量不大，但對於線性分析來說，已經可以定義成大變形，如果要看到明顯的大變形，可增加外力情形，重新計算已觀察其間的差異及變化。

關於邊界條件的設定也與實際上有所出入，實際上為螺栓鎖合，而本題將其簡化成限制面，將力轉換成壓力給予，雖然以理論來說行得通，但如果能建立全部模組計算，再螺栓實體上給予一個力，必能與實際更相符，或者在螺孔處加施節點合力，也較為接近實際情形。

單就從設計觀點來看，本件的多處安全裕度過高，如果將必要的組合區域，接合面等處不變動的前提下，確實仍有可以改進的設計，單就肩寬後度來說，以理論值計算與分析結果相比，確實有過於保守的，即使考慮的3%的分析誤差、5%材料特性及製作工藝差別、理論計算值仍然有高於180%的安全裕度，然而此以點還是必需與實際的試驗結果作為比較，在經過試驗后，取得可靠的數值，而後比對分析值，則可進行減重設計已達到最佳化的需求。

## 參考文獻

- 1.ANSYS 有限原宿法軟體-實務產品可靠度分析 陳申越 全華科技圖書
- 2.ANSYS 入門 陳信吉 全華科技圖書
- 3.ANSYS 有限原素法非線性結構分析 虎門科技
- 4.Adveanced Finite Element Analysi, Shen-Yeh Chen
- 5.固體火箭發動機複合材料基礎 王克秀 宇航出版社
- 6.纖維纏繞技術 哈玻 科學出版社
- 7.新昕季刊第十四卷第四期 FRP 外殼發動機技術發展 陳維明
- 8.Filament winding composite structure fabrication S.T.Peter,W.D.Humphrey,R.F.Foral
- 9.纤维纏繞壳体连接结构设计计算 陈汝训 固体火箭技术 Vol.22 no.2 1999