

國立交通大學
機械工程學系
碩士論文

纏繞式複合材料桁架之強度分析
Strength Analysis of Filament Wound Truss



研究生：張維成

指導教授：金大仁 教授

中華民國九十四年九月

纏繞式複合材料桁架之強度分析

Strength Analysis of Filament Wound Truss

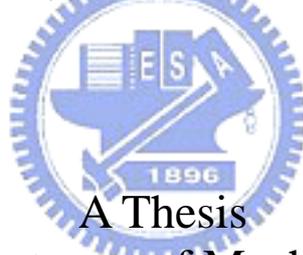
研究生：張維成

Student：Wei-Cheng Chang

指導教授：金大仁 教授

Advisor：Tai-Yan Kam

國立交通大學
機械工程研究所
碩士論文



Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Mechanical Engineering
September 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年九月

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校 機械工程 學系碩士班 張維成 君

所提論文(中文)纏繞式複合材料桁架之強度分析

(英文) Strength Analysis of Filament Wound Truss

合於碩士資格水準、業經本委員會評審認可。

口試委員：

金大

賴峯民

吳家宏

指導教授：

金大

系主任：

傅武雄

教授

中華民國 94 年 09 月 16 日

纏繞式複合材料桁架之強度分析

研究生：張維成

指導教授：金大仁博士

國立交通大學工學院機械工程學系

中文摘要

本文目的在研發一質輕、強度高、易於組裝的複合材料桁架。此桁架是由纏繞式複合材料連桿與球接頭相接而成。文中介紹桁架製造的過程與方法，包括連桿的製作與球接頭的製作以及組裝。其中纏繞式複合材料連桿兩端的端接頭與球接頭的連接方式經特別設計，使組裝方便和減小組裝公差。為了減重，特研發一複合材料球狀接頭，其中包括複合材料球接頭的設計、製作、模具設計、力學分析和試驗方面的開發，並對桁架進行試驗與分析。試驗方面分為連桿之拉力破壞，球接頭之拉力與壓力破壞，桁架之壓力分析。理論模擬上，使用有限單元軟體-ANSYS 建構模擬進行分析，包括連桿之拉力與壓力破壞，球接頭之拉力分析，桁架受力情形之分析。經由實驗與分析之比較結果，證明本複合材料球接頭的設計和製作方法確實可行。使得整體桁架的重量可以更輕，組裝更為方便，為實際應用時程向前邁進一步。

Strength Analysis of Filament Wound Truss

Student : Wei-Cheng Chang

Advisor : Professor Tai-Yan Kam

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

In this thesis, a light weight, high strength, and easy to assemble composite truss have been developed. The fabrication process and method of the truss are presented in this paper and the fabrication of the link and spherical joint as well as the way to assemble are included. The composite truss consists of a number of filament wound composite line and spherical joint. The two ends of each link are two connectors used to connect to two spherical joints. The connectors and joints are designed in such a way that the composite truss can be assembled in an efficient and accurate way. In order to decrease the truss weight, the composite spherical joint is developed in a particular method which includes the design, the fabrication, the mold design, the mechanics analysis, and the test of the composite spherical joint and then the truss is tested experimentally and analyzed. There are three parts of the experiment which are tensile failure test of the link, the tensile and the compressive failure test of spherical joint, and the compressive test of the truss. The analysis methods of truss contain the tensile and the compressive failure analysis, the tensile analysis of spherical joint, force- applied analysis of truss by using the finite element software-ANSYS. The method of design and fabrication of composite spherical joint has been proved to work through comparing the results between experiments and analyses. It could make the entire truss lighter and the assembled way easier. The present study is a step forward to the actual application.

誌 謝

本文承蒙指導教授金大仁博士的熱心指導與教誨方能順利完成，在此致上無限的感激與敬意。

在這兩年的學習與研究過程中，還要感謝偉芬學姐、清榮學長、志明學長、昌毅學長、于昇學長、彥方學長、巧鈴學姐、鎮隆學長、志鴻學長、國晉學長在學習上的協助與指導；同學崧任、建郎在同窗的歲月中一起奮鬥與勉勵，還有實驗室其他學弟的友情幫忙；另外要感謝土木研究所張簡嘉賞學長於桿件及桁架試驗方面的配合，合作廠商「巨亞機械」與機械工廠配合與協助，才使得研究工作得以順利進行。

最後要感謝我的父母親、姊姊、給我的支持與鼓勵，讓我能心無旁騖的完成學業並取得學位，僅以此文獻給所有關心我與我關心的人。

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	2
1-3 本文研究方向	3
第二章 纏繞式複合材料桁架製作方法	4
2-1 簡介	4
2-2 纖維纏繞法之介紹	4
2-3 製程設備介紹	4
2-3-1 纏繞機.....	4
2-3-2 烤箱	5
2-4 圓桿製程所使用之材料	6
2-5 圓桿心軸之製作	6
2-6 圓桿之纏繞	7
第三章 金屬球接頭的製作	10
3-1 簡介	10
3-2 金屬球接頭的製作	10
3-3 桁架之組裝	11

第四章 複合材料桿件之強度分析	13
4-1 複合材料積層板的力學性質	13
4-2 積層複合材料圓管的分析	15
4-3 破壞準則	16
4-4 圓桿的有限單元分析	17
4-5 分析結果	18
4-6 以不同的角度來比較	19
4-7 不同材料常數的比較	19
第五章 桁架的分析與實驗	21
5-1 簡介	21
5-2 桁架的有限單元的分析	21
5-2-1 參數的設定	21
5-2-2 分析的結果	22
5-3 桁架之實驗	23
第六章 複合材料球接頭的製作	25
6-1 複合材料球接頭的製作	25
6-2 球接頭製作方法的改進	28
6-3 複合材料球接頭與金屬球接頭的比較	28
6-4 複合材料球接頭的成品	29
第七章 球接頭實驗與分析	31
7-1 簡介	31
7-2 球接頭實驗過程	31
7-3 球接頭有限單元分析	32
7-4 結果比較	33
第八章 結論與未來展望	35

8-1 結論	35
8-2 未來展望	36
參考文獻.....	37



表目錄

表 4-1 Real Constants 設定	39
表 4-2 纏繞纖維之材料常數	39
表 4-3 纏繞纖維之材料強度	40
表 4-4 預浸材纖維之材料常數	40
表 4-5 預浸材纖維之材料強度	40
表 4-6 分析與實驗比較	41
表 4-7 不同的角度比較結果	41
表 4-8 修正後之預浸材強度	41
表 6-1 球形接頭使用材料	41
表 6-2 金屬與複材比較	42
表 7-1 不同做法的球接頭承受結果	42
表 7-2 8 mm碳纖維的球接頭分析結果	42
表 7-3 10 mm碳纖維的球接頭分析結果	43
表 7-4 實驗與分析比較	43

圖目錄

圖 2-1	基本的纏繞機示意圖	44
圖 2-2	纖維纏繞法之流程圖	44
圖 2-3	纏繞機	45
圖 2-4	張力機構	45
圖 2-5	纏繞機之樹脂槽	45
圖 2-6	纏繞機之四軸關係圖	46
圖 2-7	心軸成形用烤箱之外觀	46
圖 2-8	心軸成形用烤箱之內部構造	46
圖 2-9	剪好之預浸材 0° 及 90°	46
圖 2-10	木質圓棒、真空袋、離形布、脫模臘	47
圖 2-11	離形布上塗抹一層脫模臘	47
圖 2-12	依序貼預浸布	47
圖 2-13	將氣袋放入預浸材圓管柱內	47
圖 2-14	心軸接頭	48
圖 2-15	預浸材圓管置於模具中	48
圖 2-16	心軸成形氣袋壓力變化曲線	48
圖 2-17	合模後送入烤箱加熱	49
圖 2-18	設定加熱溫度及時間	49
圖 2-19	圓桿心軸製作流程圖	50
圖 2-20	圓桿心軸成品及調好之環氧樹脂	50
圖 2-21	螺旋形繞線基本模型	51
圖 2-22	基本螺旋形繞線花式	51
圖 2-23	準備妥開始上線纏繞	51

圖 2-24 纏繞程序完成	52
圖 2-25 第一層離形布抹脫模蠟	52
圖 2-26 第二層 peel ply	53
圖 2-27 第三層小棉布	53
圖 2-28 第四層厚棉布	53
圖 2-29 送入旋轉烤箱	53
圖 2-30 將包覆材拆下	54
圖 2-31 包覆材拆卸完成	54
圖 2-32 纏繞圓桿成品	54
圖 3-1 金屬製球接頭模型圖	55
圖 3-2 球接頭尺寸設計圖	55
圖 3-3 纏繞桁架成品	56
圖 3-4 改良後的桿件端接頭	56
圖 4-1 桿件之邊界條件	57
圖 4-2 纏繞三十度的拉力破壞圖	57
圖 4-3 纏繞三十度的壓力破壞圖	58
圖 4-4 模擬拉力時最終破壞位置	58
圖 4-5 模擬壓力時最終破壞位置	58
圖 5-1 桁架之模型	59
圖 5-2 桁架受力位置一	59
圖 5-3 桁架受力位置二	60
圖 5-4 桁架實驗裝置圖	60
圖 5-5 量測桿件順序圖	61
圖 5-6 力與位移分佈圖	61
圖 5-7 力與應變分佈圖一	62

圖 5-8 力與應變分佈圖二	62
圖 5-9 力與應變分佈圖三	63
圖 6-1 金屬管接頭之尺寸圖	63
圖 6-2 球接頭模具	64
圖 6-3 球的試作品一	64
圖 6-4 球的試作品二	65
圖 6-5 使用壁虎釘破壞之情形	65
圖 6-6 金屬管接頭的改良設計	66
圖 6-7 新的金屬管接頭的製作成品	66
圖 6-8 新的金屬管接頭	67
圖 6-9 中空之金屬管	67
圖 6-10 模具的處理	68
圖 6-11 放入玻璃纖維布	68
圖 6-12 碳纖維束	69
圖 6-13 將管接頭裝置在模具圖	69
圖 6-14 球接頭製作圖	70
圖 6-15 管接頭拉壞圖	70
圖 6-16 球體拉壞圖	71
圖 6-17 改良後金屬管接頭	71
圖 6-18 球內部示意圖	72
圖 6-19 螺紋拉壞圖	72
圖 6-20 金屬球接頭	73
圖 6-21 球接頭成品	73
圖 6-22 將管接頭鎖在模具上	74
圖 6-23 填充玻纖布到下模表面	74

圖 6-24 將剩餘的金屬管接頭鎖在模具上.....	75
圖 6-25 將中心點中的碳纖維打結.....	75
圖 6-26 將玻纖布填充.....	76
圖 6-27 纏繞碳纖維在球邊緣.....	76
圖 7-1 拉伸試驗的夾具與試體.....	77
圖 7-2 壓縮試驗的試體.....	77
圖 7-3 試體架設在拉伸試驗機上.....	78
圖 7-4 球接頭模型.....	78
圖 7-5 元素分割數量的收斂情形.....	79
圖 7-6 球接頭邊界條件圖.....	79
圖 7-7 球接頭模型展開圖.....	80
圖 7-8 球接頭應力分佈圖(8 mm).....	80
圖 7-9 金屬管接頭應力分佈.....	81
圖 7-10 玻纖布應力分佈.....	81
圖 7-11 球接頭應力分佈圖(10 mm).....	82
圖 7-12 球接頭應力分佈圖(圓弧).....	82
圖 7-13 改良後球接頭模型.....	83
圖 7-14 改良後球接頭應力分佈圖.....	83

第一章 緒論

1-1 前言

在現在所使用的各式各樣材料中，複合材料具有相當高的比模數及比強度，且有較佳的抗腐蝕能力，因此經常被用來作為結構方面的應用。但對一個設計者來說，複合材料最主要的優點還是在於它的非等向性：纖維方向的強度遠比垂直纖維方向的強度要大的許多，如此一來便提供了設計者更大的設計空間，可以依照其所需的強度條件及幾何條件來設計並製造出最佳的工件。

目前複合材料的應用已經相當的廣泛，舉凡考量高強度及低重量的工件或結構，如航空器材結構、軍備武器製造、休閒運動器材等，常以複合材料為考慮的對象；此外，如汽車、工具機、化學工業甚至大型工程結構均有逐步運用複合材料的趨勢。

纖維纏繞法是一種複合材料的製造過程，將連續性的強化材，如碳纖維、玻璃纖維紗束等，經過樹脂槽含浸後通過出眼口，沿著預先設計過的路徑，讓纖維紗束能精確地纏在一個可旋轉的心軸上，當達到設計時所需的纏繞厚度，再將樹脂加熱硬化，最後就會得到所要的工件成品。

纖維纏繞法也是一種電腦數值控制的製程，纖維紗束可以高速且高重複性的纏繞，精密度也可以達到相當高的程度，最重要的是如此可以節省許多人力及物力方面的成本，同時增加產量。再者，由於纖維的排列角度是經過設計來配合工件承受負載的方向，加上對整個工件而言，為一條沒有切斷的連續性纖維所構成，所以可以獲得相當良好的機械性質。

桁架結構係由桿件相結合而成的剛體結構，其目的為安全地支接

或傳遞負荷，當材料從金屬演變成複合材料後，由於質量與體積都跟減少了許多，所以在搬運上與組裝時也變的更容易。在靈活度與機動性上也增加了許多，也增加了許多的應用。在設計上也少了各種的限制。

1-2 文獻回顧

在許多有關複合材料的書籍資料中，如：Berlamont[1]、Peters,Humphrey,Foral[2]、Tranpol,Beil[3]、Shibley[4]，均有介紹纖維纏繞法的基本架構，從纖維及樹脂的類別、心軸及纏繞機的功能運作，到繞線原理、成型過程及纏繞式複材工件材料常數的測量。就本文的主題，蔡坤聰[5]、游皓全[6]、王文庭[7]、葉乃綱[8]及林彥方[9]等人在有關纏繞式複合材料之製程及材料性質之識別等研究有做深入的探討。

Olofsson等人[10]針對溼繞法纏繞厚壁圓管，建立了模型，來計算纏繞過程中的纖維含量，樹脂硬化程度，溫度及應力應變的分佈。對於硬化脫模後，圓管成品承受負載的應力分佈。Rizzo和Vicario[11]利用有限元素法分析管件承受負載的應力分佈，發現當厚度/直徑比小於0.1時，應力的分佈在圓管斷面是線性的，而厚度/直徑比大於0.1時，則成非線性的分佈，在厚度/直徑比小於0.02可被視為薄殼(thin Shell)複材圓管。Pagano和Whitney[12]利用組合面應變(Plain Strain)及板殼力學理論，分析纏繞複材管件的應力分佈，他們發現即使在單方向的負荷作用下，複材管件的應力分佈仍然非常不均勻。在複合材料圓柱形管件的應力設計分析可參照，Fukunaga [13]，Krandekar[14]和 Adali[15] 的研究群在複材管件理論分析上之文章，在這些文章中，可以瞭解到基本的圓柱管件應力分析，而基本複合材料積層理論，在Gibson[16]的著作中有詳盡的推導。

1-3 本文研究方向

桁架結構大致可分為三部份(1)桿件(2)接頭(3)連接機構，本文的主要內容在於將已經製作過的桿件使用有限單元來分析強度大小，製作出足夠的桿件以製成桁架。並且實驗整個桁架所能夠承受的力有多少，並與理論值作比較。有限單元使用的是 ANSYS 軟體，透過破壞準則來判斷是否破壞，並找出反力求得桿件強度。

在連接機構部分，計畫將原來的金屬球接頭替換成部分是複合材料的接頭，使得重量減輕，並使整體的重量減少。經由不斷的改良，使得連接機構部分可以承受適當的拉力與壓力。並使用有限單元分析來探討連接機構的受力情形。



第二章 纏繞式複合材料桁架製作方法

2-1 簡介

纏繞式桁架製作過程主要分為圓桿、球形接頭製作過程及組裝。其中所使用之圓桿主要包含三個部分，先將其中的心軸和兩側接頭組合，接著使用碳纖維紗束纏繞包覆於兩側接點與心軸上，最後再加以高溫壓化即完成。以下將詳加敘述此圓桿之製造方法與所經歷的流程。

2-2 纖維纏繞法之介紹

纖維纏繞法為複合材料的一種製程，即是將強化材(纖維)與基材(樹脂)利用機器自動控制的方式，纏繞於轉動之心軸。由於繞製時能控制纖維之張力，使層間存留氣泡擠出，減少空孔，提高纖維含量，且纖維排列整齊受力均勻，能獲得高機械性能與強度，比傳統的手積層或預浸材疊層法來的有效率及變化。基本繞線示意圖如圖 2-1 所示，纖維纏繞法的製作流程圖如圖 2-2 所示。

2-3 製程設備介紹

在纖維纏繞法製造的過程中，我們最主要會用到的機器為纏繞機及烤箱，前者主要用來纏繞產生工件之外形，後者則用來使樹脂硬化定型。下面則對這兩種機器加以敘述：

2-3-1 纏繞機

我們所使用的纏繞機為「纏繞實業有限公司」所出品，型號為 SUPERVEGA 的纏繞機，如圖 2-3 所示。這台纏繞機擁有一產生張力的機構、樹脂槽、兩個移動軸及兩個轉動軸和四軸的控制器。纖維張力對於纏繞相當重要，張力不夠，纖維沒有足夠的摩擦力固定在心軸上；張力太大，則使纖維紗束無法完全伸展，影響帶寬。樹脂槽是使纖維在繞於心軸之前，能夠讓樹脂與纖維含浸在一起，圖 2-4 及圖 2-5 分別為張力機構及樹脂槽的外型圖。接著，這四軸纏繞機的四個軸分別定義如下：

- (1) X 移動軸：又稱為滑台，如果改變極限開關的位置，則工作範圍可以有 102cm、82cm 及 62cm 等三種(目前設定調整在 102cm)，可以按工件需求定義其原點的座標位置。
 - (2) Y 轉動軸：又稱為主軸，也就是心軸的軸方向。
 - (3) Z 移動軸：又稱為前進軸，控制出眼口與主軸的距離，以主軸處為原點，工作範圍從 2.2cm 到 19.2cm，有 17cm 寬。
 - (4) W 轉動軸：又稱為轉紗軸，可以控制纖維出眼時的位置。
- 纏繞機的四軸關係如圖 2-6 所示。纖維纏繞的工作即是藉由控制四軸的路徑來達成。

2-3-2 烤箱

1. 心軸成形用烤箱(如圖 2-7 及圖 2-8)
2. 纏繞後定形用烤箱

纖維纏繞完後，需要加熱來使樹脂硬化，除了不同的樹脂有不同的成型溫度，且樹脂會因重力的關係集中到工件下方，所以纏繞用的烤箱除了溫度控制之外，還須有一個轉動的軸來旋轉工件。

2-4 圓桿製程所使用之材料

	材料	規格或尺寸	用途
主要材料	碳纖維		強化材
	預浸材	830mm*302mm	強化材
	環氧樹脂	ML3030A+ML3031B	基材
	鋁合金	AA6061	接頭
輔助材料	peel ply	930mm*350mm	隔離複材與輔助材
	T1040	930mm*350mm	脫模用
	小綿布	930mm*600mm	吸多餘樹脂
	厚綿布	930mm*450mm	吸多餘樹脂
	脫模蠟		隔離模具與複材
	真空袋	1150mm*380mm	充氣用

2-5 圓桿心軸之製作

- (1) 裁製 10 張 830mm*302mm 之碳纖維預浸布，如圖 2-9。
- (2) 事前車製妥一支長 1100mm，直徑 94mm 之木質圓棒，作為包覆預浸布之輔助工具，再備妥真空袋、離形布 T1040、脫模蠟，如圖 2-10。
- (3) 木質圓棒架於車床或纏繞機之 Y 軸上，如圖 2-11 所示。
- (4) 將預浸布依 $[0^\circ/90^\circ]_5$ 的方式(以軸向為 0°)逐次疊層於心模上，如圖 2-12 所示。
- (5) 接著在模具之上下模表面均勻抹上一層脫模蠟。
- (6) 將疊層完成之預浸材圓管柱從心模脫下，製作氣袋，並將氣袋

放入預浸材圓管柱內，如圖 2-13 所示。

- (7) 備妥鋁合金接頭，如圖 2-14 所示。預浸材圓管柱放入模具中，兩端加上鋁合金接頭，如圖 2-15 所示。其中有一點需特別注意，若於冬天氣溫低於 20°C 時進行製作，則模具及鋁合金接頭兩者需進行預熱，預熱溫度為 45 至 55°C 之間，預熱完成後才可將預浸材放入模具中及進行接下來之程序。
- (8) 將預浸材之內模盡量壓縮在模穴內（避免上下模具合模時壓損）。將上下模合模，並將固定螺絲鎖緊，由內向外。左端氣袋封妥，右端氣袋接壓縮空氣不鏽鋼軟管，而氣壓調整需分階段升壓，避免一次升壓造成成型不良或氣袋破裂，升壓曲線如圖 2-16 所示，最終壓力需維持在約 35-40 psi。
- (9) 將處理完成之模具放入烤箱，如圖 2-17 所示，分兩段加熱，溫度上升曲線如圖 2-18 所示：
 - (a) 在 80°C 加熱 30 分鐘。
 - (b) 在 140°C 加熱 90 分鐘。
- (10) 加熱完畢待冷卻後拆模，可得到一根含接頭之碳纖維化後黑色圓桿，此即為待纏繞的圓桿工作物，以上所述之心軸製作流程另以流程圖說明如圖 2-19 所示。心軸成品如圖 2-20 所示。

2-6 圓桿之纏繞

纏繞機附屬有一組套裝軟體，其具有繞線路徑自動產生、路徑編輯及路徑模擬功能的整合性處理系統；故在操作纏繞機之前，必須先根據所需求之條件與工作物件之規格，計算出各項必須之參數後，將數據輸入軟體檔案中，以使其便於編輯控制纏繞機運作的程式。

螺旋形繞線可用來於一固定直徑工件上產生定角度的繞線路徑，同時並考慮在工件兩端點繞線方向轉向時的減速及駐留動作，其基

本的機械運作模式如圖 2-21 所示，其中駐留半徑決定了駐留時的減速特性，而駐留長度則決定了駐留旋轉角的多寡。如圖 2-22 所示極為典型的螺旋繞線路徑主軸角度與滑台位置的關係圖，其曲線類似一鐘型曲線而具有兩側對稱的特性。

纏繞的步驟如下：

- (1) 調好環氧樹脂 ML3030A (2) + ML3031B (1)
- (2) 加入樹脂槽，加熱溫度設定於 40°C
- (3) 編輯纏繞程式：在電腦軟體上編輯所需工作物之規格參數。

例如欲製作一根纏繞 30 度三層之桿件，其設定參數如下：

- ※ 工作直徑(mm) : 96.0
- ※ 滑台行程(mm) : 810.0
- ※ 纏繞纖維寬度(mm) : 5.0
- ※ 繞線角度(deg) : 15.0
- ※ 起始偏移角(deg) : 0.0
- ※ 最大主軸旋轉速度(rpm) : 150.0
- ※ 最大載台速度 : 65.0
- ※ 駐留旋轉角度(deg) : 150.0
- ※ 纏繞層數 : 3.0
- ※ 起繞位置(mm) : 5.0
- ※ 駐留緩衝長度(mm) : 20.0
- ※ 出線眼距離(mm) : 70.0
- ※ 出線眼距起點(軸心 : 0 工件 : 1) : 0.0

- (4) 將製作完成之檔案輸出至磁碟片中。

(需將 *_bh 檔使用 pconvert 指令轉換成 *_bn 檔)

- (5) 啟動空壓機。
- (6) 啟動 NC 纏繞主機。
- (7) 將工件兩端連接桿 (M20 螺桿) 接上。
- (8) 將圓桿固定置於纏繞機上(定位點為：175mm 從夾頭至工件左端)。
- (9) 編輯妥之程式以磁片移至纏繞機之電腦內，重新轉譯。
- (10) 根據圓桿規格重新設定纏繞機起始參數，並進行原點回歸。
- (11) 將紗束端固定於工件上，開始上線作業，如圖 2-23 所示。
- (12) 纏繞完成(如圖 2-24 所示)後將輔助材覆於管件上，由內而外，如圖 2-25、2-26、2-27、2-28 所示。
順序如下：Pear Ply(上抹脫模蠟)→離形布→
小棉布(多層便於吸膠)→厚棉布
- (13) 將完成包覆之桿件置於烤箱中，如圖 2-29 所示，分兩段加熱：
 - (a) 在 80°C 加熱 35 分鐘。
 - (b) 在 140°C 加熱 90 分鐘。
- (14) 加熱完成待冷卻後將包覆材拆下，如圖 2-30 及圖 2-31 所示，即可得到一纏繞式複合材料圓桿成品，如圖 2-32 所示。

第三章 球形接頭的製作

3-1 簡介

球接頭主要的目的是要將多根桿件接連在一起，使得桿件與桿件間能夠傳遞力量。本章節將會介紹金屬球的製作方法以及設計過程，以及說明金屬球接頭的缺點。

3-2 金屬球接頭的製作

在這個桁架中，水平方向上的角度有零度，正負四十五度，九十度，一百八十度。在垂直方向上的角度有零度，正負六十度，一百八十度。預計完成的圖形如 3-1，3-2 所示。製作一金屬球接頭的話，其步驟如下：

- (1) 準備一金屬圓棒，材料是鋁合金，圓棒外徑要大於 10 cm，長度要比 10 cm 還要大一段。
- (2) 將圓棒銑成球形，直徑為 10 cm。並且要先預留一段小圓棒，用來夾在車床上。
- (3) 將圓棒夾在車床，依序鑽下 0 度、45 度、90 度、135 度、180 度的孔。
- (4) 將球體旋轉 90 度，鑽下 60 度、120 度的孔。
- (5) 將鑽的孔攻成 M20 的螺紋。
- (6) 將圓棒切除。

鋁合金的球接頭重量約 1.65 kg，對桁架整體相比太重。在製作過程時，螺孔的定位容易造成誤差。角度的影響，並不容易發現，等到組裝時發現公差就無法組裝了。

3-3 桁架的組裝

組裝一個桁架，需要製作 20 根的圓形桿件以及 10 個連接機構，可以組成一長 2.2 公尺，寬 1.1 公尺，高 0.95 公尺的桁架如圖 3-3 所示。

桿件與球接頭接合的端接頭是經過特別設計[9]如圖 3-4 所示，這種設計分為六個零件，球接頭接合的螺桿與端接頭間含有一個彈簧，彈簧使得螺桿在端接頭內有伸展的空間，並且螺桿可以自由轉動。組合後兩端分別連接球接頭與連桿。組裝時先將端接頭與桿件接合，將桿件放置在欲接合的螺孔前面，使用一圓棒插入螺桿內，旋轉螺桿使得螺桿埋入螺孔內，旋轉到底使得端接頭與球接頭的距離剛好是螺帽的長度(此時埋入距離為 15 mm)。

一般的桁架在組裝時會遇到組裝公差的問題，在此端接頭中可以大幅減少組裝時公差的產生，其說明如下：

- (1) 組裝時各桿件的長度以及連接距離不一時會造成組裝公差，在此桁架中，桿件是由模具製作，長度皆固定；連接距離會受到螺帽控制，鎖入距離固定，所以可以控制在組裝後桁架的形狀不會改變。
- (2) 一般桿件兩端都是螺紋，組裝時要轉動整根桿件，兩端常常無法配合，造成不便，也不容易控制桿件鎖入長度。改良後的螺桿可以自由轉動，組裝時不用轉動整根桿件，並且桿件兩端不會互相影響，可以同時組裝，也更容易控制螺桿鎖入距離，使組裝簡單與準確。
- (3) 一般組裝過程的後半部，球接頭的位置都已經固定了，桿件加上螺桿的距離會大於球接頭的距離，組裝時必須搬開一段距離才能接合起來。改良後的端接頭在螺桿部位有一段可移動距離，組

裝時可先將螺桿壓縮到端接頭內，使得桿件可以放入兩顆球接頭之中，再旋轉螺桿使螺桿埋入球接頭內。

桁架在組裝時因為端接頭的改良減少了公差，使得組裝過程更快速、簡單與準確，也使得複合材料桿件質量輕的優點能夠發揮在桁架的組裝上。



第四章 複合材料桿件之強度分析

在本章中，將製作出的桿件進行有限單元分析。首先先解釋複合材料的基本理論，再介紹所使用的破壞準則。接著使用模擬分析軟體 ANSYS 來進行有限單元的分析，模擬桿件的拉力與壓力試驗，並且藉由模擬來探討纏繞桿件在不同的角度下，其強度的變化與物理性質是否一致。

4-1 複合材料積層板的力學性質

複合材料積層板是由多層薄板(Laminate)疊合而成的，薄板是單向加強(unidirection reinforced)且為正交性(orthotropic)材料，因此 $\bar{\sigma}_3$ 可以忽略，應力-應變的關係為：

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

其中

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_{11}}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \\ Q_{22} &= \frac{E_{22}}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{21}E_{11}}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

$$Q_{16} = Q_{26} = 0$$

由座標轉換關係，將X-Y座標轉化成 $X_1 - X_2$ 座標時，其應力-應變關係為：

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T_\sigma] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [T_\varepsilon] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

其中

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 2SC \\ S^2 & C^2 & -2SC \\ -CS & SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix} \quad [T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & SC \\ S^2 & C^2 & -SC \\ -2CS & 2SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$$C = \cos \theta \quad S = \sin \theta$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T_\varepsilon]^T [Q] [T_\varepsilon] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

殼的應變與位移關係式的推導過程與平板理論相同，所以圓殼理論合應力及合力矩的推導與平板理論亦相同，對單層的複合材料積層板，必須考慮各單層薄殼之應力沿厚度方向之積分，可得複合材料積層板的合應力與合力矩，則殼的組織方程式如下：

$$\begin{bmatrix} \underline{N} \\ \underline{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{B} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\varepsilon}^0 \\ \underline{k} \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

其中

$$\begin{aligned}
A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \\
B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \\
D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3)
\end{aligned} \tag{4-8}$$

A_{ij} : 代表拉伸勁度矩陣(extensional stiffness matrix)元素

B_{ij} : 代表耦合勁度矩陣(coupling stiffness matrix)元素

D_{ij} : 代表彎曲勁度矩陣(bending stiffness matrix)元素

4-2 積層複合材料圓管的分析

假設疊層順序為 $[\alpha_1/\alpha_2/\alpha_3/\alpha_4/\dots]$ ，利用積層板理論可將應力-應變關係表示如 4-6 式，其中我們利用 4-5 式得到任一層的 $[\overline{Q}]$ 矩陣，然後利用 4-8 式可得 $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[D]$ 矩陣，由於疊層角度非對稱，故 $[B] \neq 0$ ，它耦合了拉伸與彎曲之間的關係，也就是說桿件在受單純拉伸應力時，會伴隨產生彎曲力矩而使得桿件彎曲變形，但因為圓管柱兩端使用接頭固定的關係，限制了桿件彎曲變形，使得 $[k]=0$ 。合應力-應變之關係即可表示如下：

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4-9}$$

將上式轉換後得到下式：

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{26} \\ a_{61} & a_{62} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4-10}$$

其中 $[a]=[A]^{-1}$ ；因為將圓桿展開成平板計算，由材料力學薄板假設可知，於單純受X方向力時 N_y 及 N_{xy} 很小可忽略不計，因此圓桿所受應力可表示如下：

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F/2\pi r \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4-11)$$

上式中 $[a]$ 矩陣的各項均為材料常數的函數，而應變也同樣為材料常數的函數。

4-3 破壞準則

針對複合材料桿件，去計算各層每一點的應變、應力等資料後，將應力資料帶入各種不同破壞準則（failure criterion）中來預測纏繞式複合材料圓桿之破壞強度，以下將介紹本文所使用的兩種破壞準則。

最大應力破壞準則

最大應力準則描述在主要材料方向之應力必須小於相對應之強度，否則破壞就會發生。以數學模式表示如下：

$$\sigma_1 < X_T \quad ; \quad \sigma_2 < Y_T \quad ; \quad \sigma_6 < S \quad (4-12)$$

其中 σ_1 、 σ_2 為正向應力， σ_6 為剪應力， X_T 、 Y_T 為沿1、2方向的層間正向拉伸強度， S 為在12平面的剪強度。當 σ_1 、 σ_2 為壓縮正向應力時，則應該與沿1、2方向的 X_C 、 Y_C 正向壓縮強度相對應。

Tsai-Wu 破壞準則

當 $F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \geq 1$ 式子成立時，破壞就發生，其中 F_i 與 F_{ij} 的定義如下：

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} & F_2 &= \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \\ F_{11} &= \frac{1}{X_T X_C} & F_{22} &= \frac{1}{Y_T Y_C} \\ F_{12} &= -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{X_T X_C Y_T Y_C}} \right) & F_{66} &= \frac{1}{S^2} \end{aligned} \quad (4-13)$$

其它常數是零。

4-4 圓桿的有限單元分析

使用有限單元軟體來分析時，有一定的步驟。首先是設定元素，根據不同得材料與形狀來決定使用何種元素。接著設定元素的實體參數 Real Constants。以及所使用材料的材料常數。建立有限單元的模型。接著進行網格的分割，依照需求來決定分割的大小。給定邊界條件，可以指定模型的某一點、線、面位移情形或受力情形。接下來進行求解，將上述的情形解出，並且觀看答案，檢查是否正確，並儲存需要的結果。

圓桿屬於殼結構，元素上使用的是 SHELL 99，SHELL 99 是殼元素，使用在複合材料疊層板上，可以給定每個疊層的設定，並且進行破壞分析，所以適合用來分析圓桿的強度。

Real Constants 設定部份，由於纏繞時所產生的滑線問題，所照呈碳纖維分布的不均勻，所以設定的疊層數為 17 層，將圓桿的長度分為五個等分，寬度方面分為四等分，根據實際得纏繞情況而來分配每一層纏繞的厚度，使得碳纖維的分布情形能和實際所纏繞的結果一

樣。設定的情形如表(4-1)。

在建模方面，是先建立線段，在使用延伸出一個圓的面來，所以雖然是 3D 的分析，但是其實只有面積而已。元素分割方面，使用總長的百分之一(0.008m)，共切割成 4000 個 Element。元素的數量也已經收斂了。碳纖維材料常數，是引用表 4-2[6]、4-3[6]。預浸材的材料常數，是經由實驗而得出，拉伸試驗遵從 ASTM D3039-76 之規範，而實驗結果如表 4-4、4-5。材料受壓的強度無法由實驗得出，所以先採用碳纖維之常數來取代。

定義水平方向為 0 度，垂直方向為 90 度。邊界條件則是與拉伸試驗的條件相同，一端是給予位移量為零，完全不能移動。一端則給固定距離的位移，並且其他方向都不能移動如圖 4-1 所示。以探討在拉伸過程中會產生多大的反力，最大應變，以及在破壞時的受力是多少，以及破壞位置。結果則分為拉力與壓力兩方面來探討。

複合材料力學理論的計算方式是用施力除以圓管纏繞截面積，所得到之應力值再參考該處纏繞纖維角度經由複材理論轉換，算出各疊層之應力值，依 TSAI-WU 破壞準則計算各疊層所能容許之強度大小，其中最小者即是首層破壞，判斷破壞型式是屬於 Matrix Failure 或 Fiber Breaking，若屬於 Matrix Failure 則令該疊層之 $E_2=G_{12}=0$ ，然後重新計算出第二階段之破壞強度。雖然再真實的情況下，單一層發生首層破壞時，其他同角度的疊層不見得也發生破壞了(例：第 2 層 90 度破壞時第 8 層可能還沒破壞)，但是在給予軸向力的實驗時，同角度受到破壞時的受力相差不大，所以在這裡是假設為同時發生破壞。

4-5 分析結果

拉力破壞：

在受到 51KN 的力時，心軸內九十度的預浸材產生了首層破壞，繼續

受力後到 109KN 時產生第二階段破壞，如圖 4-2 所示。是在第 17 層，也就是纏繞的三十度碳纖維的地方，破壞之位置為距右端之接頭 160mm 附近。如圖 4-4 所示：

壓力部份：

受力在 140KN 時心軸內零度的預浸材產生了首層破壞，繼續受力後到 128KN 時產生第二階段破壞，是在心軸內九十度的預浸材產生，最後是在 168KN 時產生第三階段破壞，是在第 17 層，如圖 4-3 所示。破壞的地方是在約中間的地方，如圖 4-5 所示。

在之前的研究中[9]，以複合材料桿件來進行拉伸的試驗。將拉力實驗與分析結果相比較，可以顯示出比較結果是符合的。比較結果如表 4-6 所示。

4-6 以不同的角度來比較：

將疊層的角度逐步減少五度，在進行同樣的分析，可得出結果如表 4-7，就拉力而言，角度減少時可承受的力會逐漸上升，從壓力來看，雖然角度減少時可承受的力會逐漸上升，但是 0 度破壞時受力下降的太多，導致纏繞破壞時的受力甚至比 0 度破壞時還小。另外，在 15 度疊層角度時，一開始是在 90 度的地方就破壞了而角度減少時破壞的位置並不會有太大的改變。

4-7 不同材料常數的比較

由於預浸材材料強度在受壓時的參數無法得知，而預浸材的材質也時碳纖維的一種，所以參考碳纖維的強度比例來修正預浸材之強度，來進行分析，修正後的常數如表 4-8 所示。以此分析的結果也分為拉力與壓力兩部份來討論。

拉力破壞：

拉伸距離至 0.22 cm時發生破壞，破壞在第 17 層，纏繞三十度的地方，破壞應力為 112KN。

壓力破壞：

壓縮距離在 0.305 cm時 0 度發生破壞，此時受力 156KN，受力減弱至 83.34KN，繼續受力到 104KN 時，30 度的地方發生破壞。

改變材料常數後跟實驗的情形來比較，拉力破壞時最終破壞受力誤差在 10%以內，不過實驗時有首層破壞產生的情形，所以之前的材料常數比較符合真實的情形。修改材料強度中的 X_c 與 Y_c ，雖然表面上是對抗壓有關係，不過在Tsai-Wu準則中，是會有影響的。在 4-13 式中， F_{11} 會與 X_c 成反比。所以當預浸材的 X_c 與 Y_c 增加後， F_{11} 的值會變小，導致破壞準則的值會變小，所以會是碳纖維先破壞。



第五章 桁架的分析與實驗

5-1 簡介

在探討過桿件的強度之後，接著將目標放在整體桁架的強度分析上面。本章節主要分為三個方向，分別是 ANSYS 的分析、對球接頭的影響以及桁架的實驗。根據這些結果來決定球接頭強度的需求。

5-2 桁架的有限單元分析

本節中第一部份是介紹 ANSYS 裡的一些設定，說明設定的變數的由來，第二部份是討論分析的結果以及對球接頭的影響，第三部份是將桁架作實際上的實驗，並討論其結果。

5-2-1 參數的設定

由於原本的桿件中，九十度的疊層對強度的影響不大，所以減少九十度的疊層數，新的桿件疊層如下：

(1)心軸尺寸：直徑(外徑)----96mm

長度----800mm

疊層----[0°/0°/0°/0°/0°/0°/90°/90°]

疊層厚度----0.071mm(每層)，8層共厚 0.568mm

(2)纏繞尺寸：直徑(內徑)----96mm

長度----800mm

疊層----[±30°]₃

疊層厚度----0.24mm(平均每層)，6層共厚 1.44mm

在ANSYS裡分析桁架時，使用的元素是Link的選項，Link的模型

是以線條來組成，如果是立體的模型則是選擇Link>spar 8，spar 8 是用來解 3D的問題的。並且在實體參數上給定面積。以長乘寬乘厚度來計算纖維的面積，計算結果是 $0.6096 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 。

假設是桁架是均質，所以只需要計算桿件的 Ex 值。Ex 計算過程如下：

- (1) 首先從材料常數(E_1 、 E_2 、 G_{12} 、 ν_{12})算出複材的 Q 矩陣。
- (2) 計算出 90 度與正付 30 度的 Q 矩陣。
- (3) 將 Q 矩陣乘上厚度計算出 A 矩陣。
- (4) 算出 A 的反矩陣。
- (5) $Ex = \frac{1}{t \times A_{11}}$ 是厚度乘上 A 之反矩陣之第一項的倒數。

計算後是 56.27Gpa。將這些值輸入後，可以畫出模型(如圖 5-1 所示)。在模型中，由於是使用均質的材料，所以整體都是由碳纖維來組成，由於此模型主要是探討受力後各桿件產生的反力分佈，並且金屬連接機構的強度比碳纖維還強，所以不會有太大的影響。

在桁架的分析中，使用 link 8 為元素時，在網格分割上的設定，是每條線分割段數為一段，如果分割數量超過一段，桿件就會斷掉，所以只分割為一段。

在邊界條件方面，將桁架底下的八個點 Y 方向固定，其中最左邊的兩個點是連 X 和 Z 方向都固定住。

5-2-2 分析的結果

模擬一車重 3.5 公噸，在桁架上行走時最大的受力情形，根據不同的位置，施力點會有所不同，分為兩個情形如下：

1. 受力於初始的兩點上，各點受力為 1.75 公噸(17.16225KN)，則受力最大的桿件為標注 Max 的桿件，受力為 10.4098KN(如圖 5-2 所示)。

2. 受力於四點上，各點受力為 0.875 公噸(8.581125KN)，則受力最大的桿件為標注 Max 的桿件，受力為 5.53518KN(如圖 5-3 所示)。

總和上面的情形，最大的受力方向是六十度，受力為 10.4098KN 的壓力。所以球接頭能承受的壓力至少要超過 10.4098KN。

5-3 桁架之實驗

在邊界條件與施力方面，本來是打算施力在中間，平均分配在上面的四個點上。但是由於拉伸試驗機的高度受到限制，若是架設成 4 個點的裝置，總高度會超過 MTS 的最大高度。所以改成只支承在其中一點。底下的點則是固定住。根據這樣的情況來進行分析，並估計可承受的距離。單根可承受的最大壓力為 81KN，並使用兩倍的安全係數。壓縮的距離為 5mm。桁架的實際架設情形如圖 5-4 所示，並且以此條件作分析來加以比較。在實驗中，分別量取不同的桿件來測量受力與應變的關係，桁架的受力位置與量測的桿件之順序如圖 5-5 所示。

在分析的邊界條件上，受力方面改成與實驗相同，只對單點受力。底下的邊界條件方面，以兩種情形來假設。第一種假設是最底下左邊的兩點全部固定不動，中間與右邊的四點只有 Y 方向固定。第二種假設是底下中間的兩點只有 Y 方向固定，其他四點都是固定不動的。

壓縮距離為 5mm 時，最大會受到 1400kgf 的力。力與位移的圖如 5-6 所示。數據整理後可看出實驗與分析有誤差產生。分析時變形量只與桿件有關，而實驗時會受到其他方面的影響，例如金屬球接頭，地板，夾具裝置對會跟著變形，所以會造成誤差。

在量測結果方面，總共壓了 4 次每一次量取一根桿件上的三個

點，已確保量取的準確度。其中 1，3 點受到的是拉力，第 2 點受到的時壓力。在受到拉力時，同樣的應變時，實驗上所受到的力比理論值還小很多。三次的結果如圖 5-7，5-8，5-9 所示。原始數據在 5-7 會造成太大的跳動，所以整理後變成直線。圖 5-7 是量測順序中第一個所量取的。圖 5-8、5-9 分別是第 2 次與第三次實驗的桿件。圖中的線代表了實驗時不同的點所量到的應變，以及分析時不同的假設。從圖 5-7、5-8 來看，第 2 種假設與實驗結果較為吻合，而圖 5-9 因為中間點邊界條件與實驗有些許差距(實驗時中間點會往下偏移 1 公分)，所以分析的結果與實驗有差異。不過實驗值介於分析之間，表示此桿件的強度在預測之內。

實驗的結果與分析互相符合，這代表了在實驗時桁架的邊界是不會移動的。這也表示在 5-2 節中以模擬車重來分析的結果是沒有問題的。



第六章 複合材料球接頭的製作

6-1 複合材料球形接頭的製作

使用複合材料來製作球接頭時，先製作模具，在模具上車出螺紋孔來定位，並且再另一端使用設計過的金屬管接頭來連接，其他部分使用複合材料來強化。

由於球接頭連接的角度很多，所以裡面的金屬管接頭尺寸不能太大，以免會卡住。根據這些尺寸限制所設計出來的金屬管接頭如圖 6-1 所示。

模具的設計必須要考慮的是角度精準，合模時要能夠確實緊密，不留空隙，拆模時能夠方便，並且不會因為沾到複合材料而上下模黏住，而拖模時要盡量簡單，不會為了脫模而對模具或球體造成影響。所以在設計上將模具分為四塊如圖 6-2 所示，使得能夠達成上述之要求。

在一開始的製作中，並沒有放入金屬管接頭。因為還在實驗階段，所以必須要節省製作的成本，而等到接近完成時才將金屬管接頭放入。在沒有金屬管接頭的其間，將製作的目標放在球可承受的壓力方面以及球的外觀上是否夠圓夠光滑。在改良的過程中使用很多材料，有的材料並不是每次都會用到，所有會用到的材料都列在表 6-1 所示。

原先的作法是想要在球的中心使用發泡，而外表使用碳纖維的纏繞絲。這種作法會無法使球的形狀保持圓形，並且表面會不均勻如圖 6-3 所示。為了要改善表面，所以模具的表面先貼上一定厚度的預浸材，使得外表可以更接近圓形如圖 6-4 所示。

但是再將表面改善後，在壓力實驗時卻發現無法承受壓力，原因是球只有周圍有碳纖維，因此在受力上都只會受到剪力，而纖維只有

在其纖維方向的地方能承受最大的力，無法承受剪力。所以必須使用別的方法來改良。

要強化抗壓的能力，就必須受壓的位置放入該方向的纖維。在此嘗試了一些做法，例如使用碳纖維做成圓棒放入球中，或是做成支架放入球中，不過這些方法並沒有很好的效果，只是提伸製作上的難度而已。最後是使用複合材料板做成框架，而在空隙中填入玻璃纖維布，使得球可以承受壓力。雖然這種做法可以使球承受壓力，並且能使球的外觀保持圓形，但是卻無法承受拉力。所以必須要製作可以同時承受拉力與壓力的連接機構才行。

為了要承受拉力，必須使金屬與複材能夠緊密接合。一開始使用的做法是使用類似壁虎釘的裝置，先將壁虎釘塞入球內，在周圍塞滿複材，等到加熱完後將壁虎釘撐開，就能夠與周圍的複材結合，也不容易被拉出來。這種做法能夠承受 16KN 的拉力，所以必須尋求提伸拉力的做法，實驗結果如圖 6-5 所示。

由於壁虎釘所撐開的角度不大，所以將原先的金屬管接頭稍作修改，改成了中間有個凹槽的形式如圖 6-6 所示，在製作時將複材填入此凹槽中，使之可以卡住，產生受拉之力。由於是只測試新接頭的拉力實驗，所以不需要製作整個球，受力上是注重在接頭的周圍，所以只製作成一個管狀的連接頭如圖 6-7 所示來測試拉力。這種做法可以承受到 25KN，所以根據這種方法來思考如何提升球接頭抗拉強度的方法。

將原先的金屬管接頭中間穿孔，以螺絲套住，可以做出類似之前凹槽的形狀如圖 6-8 所示。這種做法會隨著螺絲的大小而改變。因為每次拉壞的地方都是螺絲，所以稍微修改使得中間部份變成碳纖維，使得所承受的拉力可以變強，而這也是目前可以承受最大拉力的方

法。所以會作比較詳細的介紹。

其中設計一個類似螺絲管但是其內容物是中空之物如圖 6-9 所示。作用是為了中間能夠放碳纖維。實際的做法如下：

- (1) 首先在模具表面蓋上一層錫箔紙，在塗上一層脫模蠟。錫箔只是為了防止樹脂滲透到模具內，導致無法拆模。脫模蠟是為了使錫箔紙與模具順利分離用的。接著在模具的球面上覆蓋一層碳纖維預浸材。使得表面良好如圖 6-10 所示。
- (2) 分別在兩個半圓上以沾了樹脂的玻璃纖維布來填充，使得作出來的球夠如圖 6-11 所示。
- (3) 接著將碳纖維的纏繞絲捆成一捆，並且放入上面所製作的中空管內，並將一端打結，以免在受拉力時脫離如圖 6-12 所示。
- (4) 將纖維束沾上樹脂，塗抹均勻，放入金屬管接頭內。
- (5) 將金屬管接頭固定在模具上，將兩邊的纖維整理，纖維要維持水平使得受拉效果最佳，以玻纖布覆蓋住一定的量能夠避免在加熱時纖維變軟會產生滑移如圖 6-13 所示。
- (6) 將上下模具合模，放入烤箱。加熱時間為 80°C 30 分鐘，接著是 140°C 90 分鐘。
- (7) 等到冷卻後，拆除模具與錫箔紙，將球體取出如圖 6-14 所示。

這個做法有一些地方是要注意的，一開始的時候蠟要塗的夠多，拆模才會順利，要注意在合模的地方的纖維不能有缺口，否則作出來的球會有痕跡，在圖 6-14 時雖然在交界的地方有痕跡，不過因為是只作拉伸實驗所以不會造成影響。加熱前要檢查模具表面不能沾到樹脂或是玻璃纖維，否則會黏在模具上。

經過拉力實驗後，金屬管接頭被拉出來如圖 6-15、16 所示，從途中可以看出兩種情形，其中一種是中空管和碳纖維被拉斷，另一種是

只有碳纖維被拉斷。會有這樣的差別是在金屬和中空管之間的凹槽有沒有被複材填充住。有填滿複材的會拉住中空管，所以會一起拉斷。否則的話是只有碳纖維斷而已。而這種做法可以達到 30KN，不管中空管有沒有斷掉對所承受的力並沒有太大的影響。這是因為中空管的強度跟碳纖維比太弱，所以沒有辦法增加多少強度。

既然中空管無法增加強度，又會減少纖維束的面積，所以就試著不使用中空管，增加纖維束數量的做法。原先的中空管內部的直徑是 8 mm，而現在最大可以放入直徑為 12 mm 的碳纖維。不過在實際製作時發現如果放滿的話，在金屬管接頭的另一端會因為纖維的量過多而無法鎖上螺桿。所以最後是使用直徑為 10 mm 的纖維束來製作，拉伸實驗後可以達到 37KN。目前是以這種做法的承受拉力為最強，如果應用在桁架上，以車重來施力的話也是沒有問題了。

6-2 製作方法做法的改進

在之前的球接頭做法中，由於要考慮到桁架角度的問題，所以金屬管接頭做的很小，不過在之前的做法中，已經有了一定的強度，在桁架中 45 度的位置受力又不大，所以可以考慮減少 45 度接頭的體積，已增加其他角度的接頭之體積。改大的接頭如圖 6-17 所示。將接頭放大後，在壓力的部份，因為底部變大，可接觸的面積也變多，而傾斜的角度增加後碳纖維除了在中間加強外，也可以繞在接頭的斜角上，使得抗拉力變強。這種做法的示意圖如圖 6-18 所示。

這種做法作出來的球強度提伸不少，在拉伸實驗時受力到了 47.2KN 時螺紋崩壞，與夾具分開如圖 6-19 所示。球體本身並沒有損壞，接頭也沒有被拉出來，所以這個做法已經有一定的強度了。

6-3 複合材料球接頭與金屬球接頭的比較

金屬的材料彈性模數比複合材料強，不過重量上比複合材料重，而且在破壞時的強度上比起纖維在零度上的強度弱很多，為了比較兩種材料的差異，所以作了一顆金屬球如圖 6-20 所示來作比較。金屬球在拉伸時受力到達 74.2KN 時螺紋被拉壞。同樣是螺紋被拉壞，用複材做的球接頭卻比較弱。這是因為在做複材的球時，為了避免金屬管接頭被拉開，而將碳纖維塞在金屬管接頭裡，所以鎖螺桿的地方變小，接觸的距離便短，所以會比較弱。金屬與複材不同的地方如表 6-2 所示。在表中可以看出強度與螺紋的比例約是 8.3，而原本的凹槽是 15 mm，如果可以放大螺紋接合的距離，可以將強度提高到 100KN 以上。

6-4 球接頭的成品

在球接頭的強度到了一定程度後，就要將角度恢復成七個角度，並將完成的成品製作出來，製作完成的球接頭如圖 6-21 所示。隨著角度的增加在製作上的難度也跟著提升，要注意每個角度的纖維都要配置好，並且用玻璃纖維布固定住碳纖維的位置。在製作上有一些地方需要注意，並且提供一些心得與改進的方法如下：

- (1) 在 ± 45 度金屬管接頭受力很小，可以用螺絲代替，用螺帽固定螺絲的位置，可節省製作的時間。
- (2) 要固定碳纖維的位置，可以使用如圖 6-9 的金屬空心管，計算出需要的長度與寬度，將纖維放入後可以確保碳纖維在成型之前不會變形。
- (3) 先將螺絲與金屬管放入金屬管接頭，將 3 個金屬管接頭放入底部鎖入如圖 6-22 所示。
- (4) 填充玻纖布到下模表面，將其他的金屬管接頭鎖入下模內如

圖 6-23、6-24 所示。

(5) 將中心點中的碳纖維打結，使之結合在一起，如圖 6-25 所示。

(6) 填充玻纖布至一定的高度，在 2 根會受壓的接頭中（60，120 度），可用碳纖維包附在金屬管的周圍，再用玻纖布填充，可增加抗壓能力如圖 6-26 所示。

(7) 成型後在纏繞碳纖維在球邊緣，要注意纖維線要繞在金屬管接頭斜角的地方，以增加抗拉強度如圖 6-27 所示。

上述所提到的幾個步驟是將球接頭角度變多後要注意的地方，其他沒有提到的部份都跟之前製作的球接頭做法一樣。



第七章 球接頭實驗與有限單元分析

7-1 簡介

在本章中，將會說明實驗過程與有限單元分析的步驟，實驗方面使用拉伸試驗機 MTS 來進行實驗，而分析方面則是使用有限單元分析軟體 ANSYS，建立合適的模型做受力的模擬分析。並將兩種結果做以比較。

7-2 球接頭實驗過程

在球接頭的實驗時，分壓力與拉力的實驗，在作拉力實驗時，需準備兩個夾具以連接夾頭與接頭如圖 7-1 所示。進行壓力實驗時，需要準備鐵板與球體接和來承受壓力如圖 7-2 所示。

將球接頭與夾具結合後，將夾具放在拉伸試驗機上如圖 7-3 所示，實驗步驟如下：

1. 開啟油壓機並進行熱機。
2. 將上下夾頭固定在適當位置。
3. 進行校正工作。
4. 設定控制參數，以位移大小來控制拉伸速率，設定最大位移量 5 cm 與速率 0.01(mm/sec)。
5. 設定記錄方式。
6. 將試體架設在拉伸試驗機的上下夾頭上，並檢查試體是否受到預力。
7. 檢查是否有問題，按下 START 開始實驗。
8. 注意數值的變化，如果數值突然下降表示已經拉壞，按下 STOP 結束。

9. 將記錄資料取出，並稍作檢查。

10. 取出試體，將夾具還原，關油壓機。

根據不同的球接頭做法，實驗結果會不相同，而將各種實驗結果整理如表 7-1 所示。

7-3 有限單元分析

在有限單元方面，球體的模型是中心對稱，使用的元素是 SOLID 的 PLANE82。PLANE82 是以平面來模擬 3D 實體，模擬的方法是對 Y 軸軸對稱，從平面環繞出 3D 模型。使用 SOLID 元素不需要給定實體參數，而是從模型來判斷所需的參數。

分析時使用的材料分為 3 類型，分別是覆蓋用的玻璃纖維布，金屬管接頭，纏繞用碳纖維。根據 3 種材料繪製出的模型如圖 7-4。這個模型是碳纖維是直徑 8 mm 的。在網格方面，元素分割的收斂情形如圖 7-5 所示。由圖中可以發現在 6000 個 element 時，開始產生收斂。

在施力方面，是以拉伸 10KN 的力來觀察各種材料應力的大小。由於是軸對稱的平面，在輸入施力時不是直接給予 FORCE，而是輸入壓力值，在展開時會乘上面積而變為力的值，在作分析之前，先以一個圓棒來作模擬，驗證過沒有問題後在輸入。在壓力的地方輸入一負值 -31830988.62(Pa)，使得變為拉力，在邊界條件方面，Y 軸軸對稱，Y 軸的水平位移為零，X 軸上下對稱，所以垂直位移為零。如圖 7-6 所示將平面展開後的圖如 7-7 所示。材料常數方面，碳纖維常數和之前一樣，金屬部份是用低碳鋼的材料常數，彈性模數是 207GPa，最大強度是 395 GPa。玻璃纖維的強度則是 50 GPa。

分析後的應力分部如圖 7-8 所示，可以看出最大的應力是在碳纖維上。為 350MPa，接著再把其他的部份分別取出來看，如圖 7-9、

7-10 所示。金屬管接頭的最大應力是 104MPa，而玻纖布只有 0.7MPa，所以將金屬管接頭跟碳纖維比較，發現碳纖維先壞，壞時受力為 34.3KN。如表 7-2 所示。

接著將碳纖維的部份直徑放大到 10 mm，與 8 mm 的比較結果。應力分佈如圖 7-11 所示。與金屬管接頭的比較如表 7-3 所示，受力提升到 46.9KN。金屬管接頭的最大應力位置，是在接頭中心的底部，是因為被碳纖維頂到所造成，在實際的實驗中那個位置並不是金屬管接頭的一部份，而是與接頭相連的螺桿的位置。當應力在那裡時，會對螺紋造成影響。螺紋與強度與螺桿的長度有關，依之前試驗的結果來看，都是接頭先壞，所以先不必考慮這個問題。

在圖 7-8 與 7-11 中，碳纖維的最大應力位置是在角度直角的地方，為了避免是因為直角的關係導致應力集中，所以將集中位置改成圓弧，來探討應力最大的位置。分析結果如圖 7-12 所示。從圖形來看，分析結果也是在交界處產生應力最大的位置。從分析結果來看與原本的結果並沒有什麼不同。在圓球的實際製作時，應力也是集中在交界處，且破壞位置也是在交界處斷裂，所以改成圓弧型對結果沒有太大影響。

以改進後的複材球接頭做法(金屬管接頭周圍纏繞複材)來作分析，建立模型圖如圖 7-13 所示，面積 1 與 2 是玻璃纖維，面積 3 與 5 是碳纖維，4 是金屬管接頭。分析的結果如圖 7-14 所示。受到最大應力的還是碳纖維，不過金屬的強度較弱，所以會先損壞。此時金屬受力為 112KN。這是金屬管接頭的不包含螺紋的情形，而實驗時是螺紋都先拉壞，所以與實驗是相符合的。

7-4 結果比較

從實驗與分析的結果來看，當碳纖維直徑是 8 mm 時，與分析的差異只有 12.53%，而當直徑放大到 10 mm 時，差異增加到了 20.77% 如表 7-4 所示，而造成這結果的原因，可以從以下數點來看。

1. 碳纖維的量比實際的面積少，在製作中，纖維的量如果太多，會造成填充上的困難所以會比理論的少一點。
2. 並非每一根纖維都是以九十度排列，角度可能會照成誤差。
3. 纖維在成型時沒有受到相同的拉力，所以對強度有影響。
4. 纖維的量越多，製作也越困難，所造成的誤差也越大，所以提伸的效果比分析的還要少。



第八章 結論與未來展望

8-1 結論

本文之目的在於使用複合材料纖維，改進桁架結構中所使用的連接機構，取代原先使用全部金屬製作的連接機構，減輕整體的重量，並維持一定的強度。連接機構的製作方法，是與桿件連接的地方用金屬管接頭來連接，使用碳纖維來強化球的強度，使用玻璃纖維來填充球體的其他部份。使用 MTS 進行拉力與壓力的試驗。在抗拉與抗壓上都能承受 47KN 左右。在受拉時與桿件連接的距離會照成強度的影響。對於連接機構的製作過程與結果，整理出以下結論：

- (1) 複合材料製作的接頭與全是金屬所製作的接頭相比，重量約減輕了 1 kg 左右。
- (2) 以複合材料為主的製作方式可以針對不同角度與不同情況下所造成對強度的需求不一作調整。
- (3) 球形接頭的強度已經有一定的標準，組裝在桁架上即使以車重來負荷也沒有問題。

在球形接頭的製作上，手動製作的過程很多，所以在強度方面會受到一些影響，精密度方面也沒辦法做到非常高。在製作與改良的過程中可得到以下幾點心得：

- (1) 纖維束必須均勻塗上樹脂，否則成型後的強度會差很多。
- (2) 玻璃纖維布必須要填充到滿，在成型前要確認模具表面是否有沾到樹脂或者是零碎的纖維布。
- (3) 在球接頭成型後，可以在表面塗上樹脂，並以兩片鐵弗龍片蓋住，再放入模具成型一次，可以改善表面，變的更為光滑。
- (4) 在合模的地方必須要注意是否有空隙，可以多放一些碳纖維

以確保合模後無空隙，成型後再將多餘的部份用砂紙磨去即可。

8-2 未來展望

在球的製作上，以及桁架的組裝過程中，還有許多可以改進的地方，在未來至製作複合材料的桁架上，可以朝著這些目標改進：

- (1) 球接頭的金屬部份，形狀可以稍作改變，使得螺紋與桿件的連接距離可以更長，才不會造成螺紋崩壞的情形。
- (2) 如果要製作複合材料桁架的建築機構時，可以球接頭尺寸放大，使得可放入的碳纖維更多，並且在製作上會比較容易，可提伸不少強度。
- (3) 減少金屬的使用，使得整體的重量能夠再降低。並且研究如何減少人工的部份，考慮製程的改進。
- (4) 設計並製作出以複合材料為主的橋樑，並且以車輛通過來進行實驗。



參考文獻

1. J. Berlamont , “Production Oriented Design of Filament Wound Composites,” pp. 33-59 , Apr. 1990.
2. S. T. Peters , W. D. Humphrey , R. F. Foral , “Filament Winding,” *Composite Structure Fabrication* , 1991.
3. Y. M. Tranpol , A. I. Beil , “Problems of the Mechanics of Composite Winding-Fabrication of Composite,” *Handbook of Composites* , Vol.4 , pp. 45-108 , 1983.
4. A. M. Shibley , “Filament Winding,” *Handbook of Composites* , 1982.
5. 蔡坤聰 , “纏繞式複合材料壓力容器之製程研究” , 國立交通大學機械工程研究所碩士論文 , 新竹市 , 1998.
6. 游皓全 , “纏繞式複合材料壓力容器之強度研究” , 國立交通大學機械工程研究所碩士論文 , 新竹市 , 1998.
7. 王文庭 , “複合材料結構的彈性常數識別” , 國立交通大學機械工程研究所博士論文 , 新竹市 , 2000.
8. 葉乃綱 , “纏繞式複合材桿件之研製” , 國立交通大學機械工程研究所碩士論文 , 新竹市 , 2001.
9. 林彥方 , “纏繞式桁架之研製” , 國立交通大學工學院精密與自動化工程學程碩士論文 , 新竹市 , 2003
10. S. Kurt Olofsson, P. Gudmundson, L. Anders Strombeck, “Process Simulation of Wet Filament Winding and Curing of Thick Walled Cylinders,” 37th , *International SAMPLE Symposium*, pp. 1132-1145 , 1992.
11. R.R. Rizzo and A.A. Vicario, “A Finite Element Analysis of Laminated Anisotropic Tubes,” *J. Composite Materials*, Vol.4, pp.

- 344-359 , 1970.
12. N.J. Pagano and J.M. Whitney, “Geometric Design of Composite Cylindrical Characterization Specimens,” *J. Composite Materials*, Vol.4, pp. 360-379 , 1970.
 13. H. Fukunaga, & T. W. Chou, “Simplified design techniques for laminated cylindrical pressure vessels under stiffness and strength constraints,” *Journal. Comp. Master.* , Vol.9, pp. 1157-1169 , 1988.
 14. H. Kranderkar, R. Srivivasan, F. Mistree, & W. J .Fuchs, Compromise:”An effective approach for the design of pressure vessels using composite materials,” *Computer & Structure*, Vol. 33, No. 6, pp. 1465-1477 , 1989.
 15. S. Aladi., Summers E. B. & V. E. Verijenko.,”Optimization of laminated cylindrical pressure vessels under strength criterion,” *Composite Structures*, Vol. 25, pp. 305-312 , 1993.
 16. R. F. Gibson , “Principles of Composite Material Mechanics,” *McGraw Hill Inc.* , pp. 190-215 , 1994.

表 4-1 Real Constants 設定

各段的 Real Constants 設定明細							
Layer	1	2	3	4	5	6	7
角度	30	-30	30	-30	30	-30	30
厚度							
RC1	0.24	0.24	0.24	0.24	0	0.24	0
RC2	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0
RC3	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
RC4	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0	0.24
RC5	0.24	0.24	0.24	0	0.24	0	0.24
						單位:	mm

表 4-1 Real Constants 設定

纏繞滑線情形轉換為 Real Constants 設定					
分段區域	3A	2A	1a	2B	3B
A	RC1	RC1	RC2	RC3	RC4
B	RC1	RC2	RC2	RC4	RC5
C	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5
D	RC2	RC2	RC3	RC4	RC5

表 4-2 纏繞纖維之材料常數

Material Constant	Value(GPa)
E_1	117.444
E_2	5.956
E_3	5.956
$G_{12}=G_{13}$	2.709
G_{23}	0.686
ν_{12}	0.34

表 4-3 纏繞纖維之材料強度

Material Constant	Value(MPa)
X_T	1200.52
X_C	1332.53
$Y_T=Z_T$	16.16
$Y_C=Z_C$	83.73
$S=T$	57.30
R	42.90

表 4-4 預浸材之材料常數

Material Constant	Value(GPa)
E_1	147.7
E_2	11.2
E_3	11.2
$G_{12}=G_{13}$	6.57
ν_{12}	0.3

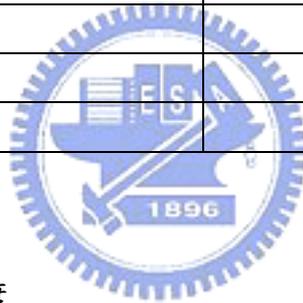


表 4-5 預浸材之材料強度

Material Constant	Value(MPa)
X_T	1882
$Y_T=Z_T$	32.7

表 4-6 分析與實驗比較

	實驗結果	ANSYS 分析	誤差
首層破壞	52KN	50KN	4%
最終破壞	104KN	108KN	3.7%

表 4-7 不同的角度比較結果

拉力	疊層角度	90 度破壞	纏繞破壞	
	30 度	50KN	108KN	
	25 度	58KN	128KN	
	20 度	65KN	151.5KN	
	15 度	72KN	181KN	
壓力	疊層角度	0 度破壞	90 度破壞	纏繞破壞
	30 度	140KN	128KN	168KN
	25 度	175KN	162KN	176KN
	20 度	242KN	194KN	206KN
	15 度		348KN	365KN

4-8 修正後之預浸材強度

Material Constant	Value(MPa)
X_T	1882
X_C	2090
$Y_T=Z_T$	32.7
$Y_C=Z_C$	169
$S=T$	139

表 6-1 球形接頭使用材料

	材 料	用 途
主要材料	預浸材	強化表面
	碳纖維	加強受力
	玻纖維	填充多餘空隙
	環氧樹脂	基材
	金屬接頭	與桿件接連
輔助材	發泡材	填充多餘空隙
	錫箔紙	隔絕樹脂與模具
	脫模蠟	隔離複材與錫箔紙

表 6-2 球接頭金屬與複材比較

球的材料	全是金屬	以複材為主
重量	1.65 kg	0.5 kg
抗拉強度	74.2KN	47.2KN
螺紋距離	8.95 mm	5.68 mm
抗拉強度與螺紋距離比	8.29	8.31

表 7-1 球接頭不同情形的實驗結果

球的製作方法	實驗種類	實驗結果	備註
外圍用纏繞絲中間發泡	受壓	無法承受壓力	
在受壓的位置擺上纖維	拉與壓	無法受拉	接頭會被拉出
使用壁虎釘方式	拉力	承受 16KN 拉力	
在接頭上增加凹巢	拉力	承受 25KN 拉力	
使用纏繞絲支撐中間	拉力	承受 30KN 拉力	纏繞絲直徑 8mm
使用纏繞絲支撐中間	拉力	承受 37KN 拉力	纏繞絲直徑 10mm
使用纏繞絲支撐中間	壓力	承受 37.5KN 壓力	纏繞絲直徑 10mm

表 7-2 8 mm 碳纖維分析結果

	碳纖維	金屬接頭
最大應力(Pa)	3.50E+08	1.04E+08
最大強度(Pa)	1.20E+09	3.95E+08
比值	3.43E+00	3.80E+00

表 7-3 10 mm 碳纖維分析結果

	碳纖維	金屬接頭
最大應力(Pa)	2.56E+08	7.64E+07
最大強度(Pa)	1.20E+09	3.95E+08
比值	4.69E+00	5.17E+00

表 7-4 球接頭實驗與分析比較

纖維束直徑	實驗(KN)	分析(KN)	誤差
8mm	30	34.3	12.53%
10mm	37	46.7	20.77%



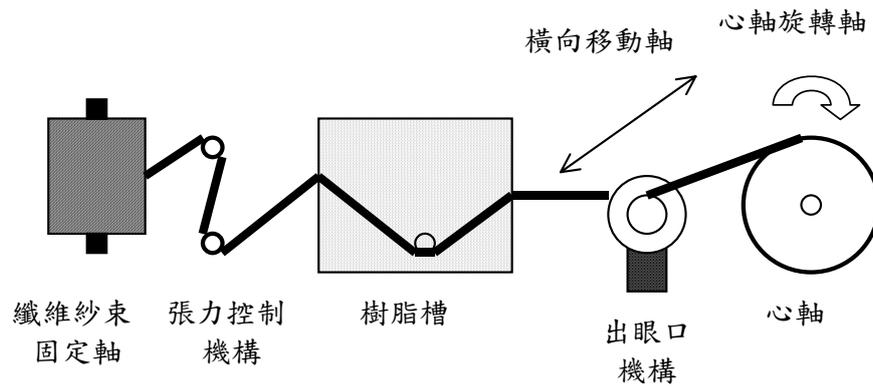


圖 2-1 基本的纏繞機示意圖

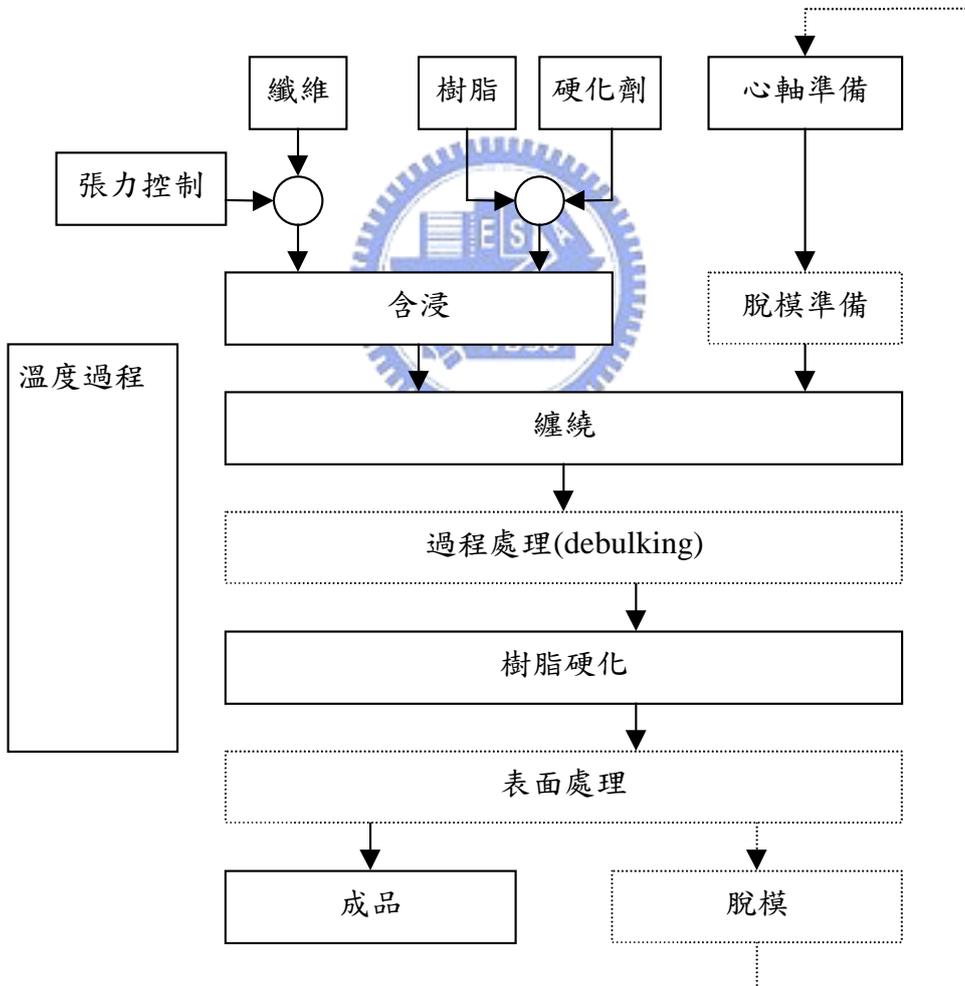


圖 2-2 纖維纏繞法之流程圖



圖 2-3 纏繞機

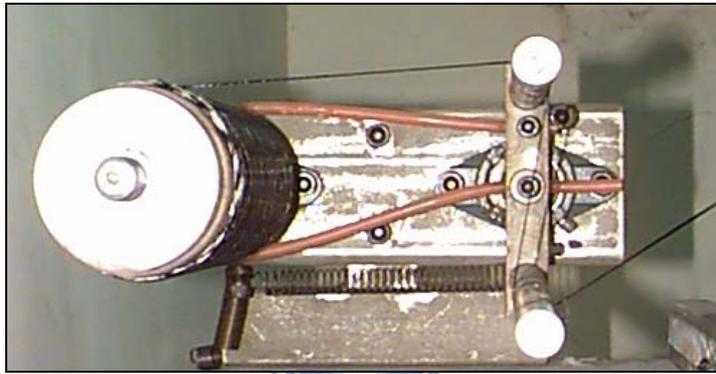


圖 2-4 張力機構



圖 2-5 纏繞機之樹脂槽



圖 2-6 纏繞機之四軸關係圖



圖 2-7 心軸成形用烤箱之外觀



圖 2-8 心軸成形用烤箱之內部構造



圖 2-9 剪好之預浸材 0° 及 90°

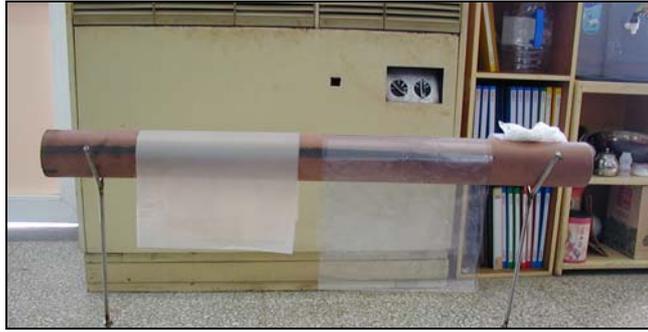


圖 2-10 木質圓棒、真空袋、離形布、脫模臘



圖 2-11 離形布上塗抹一層脫模臘



圖 2-12 依序貼預浸布



圖 2-13 將氣袋放入預浸材圓管柱內



圖 2-14 心軸接頭



圖 2-15 預浸材圓管置於模具中

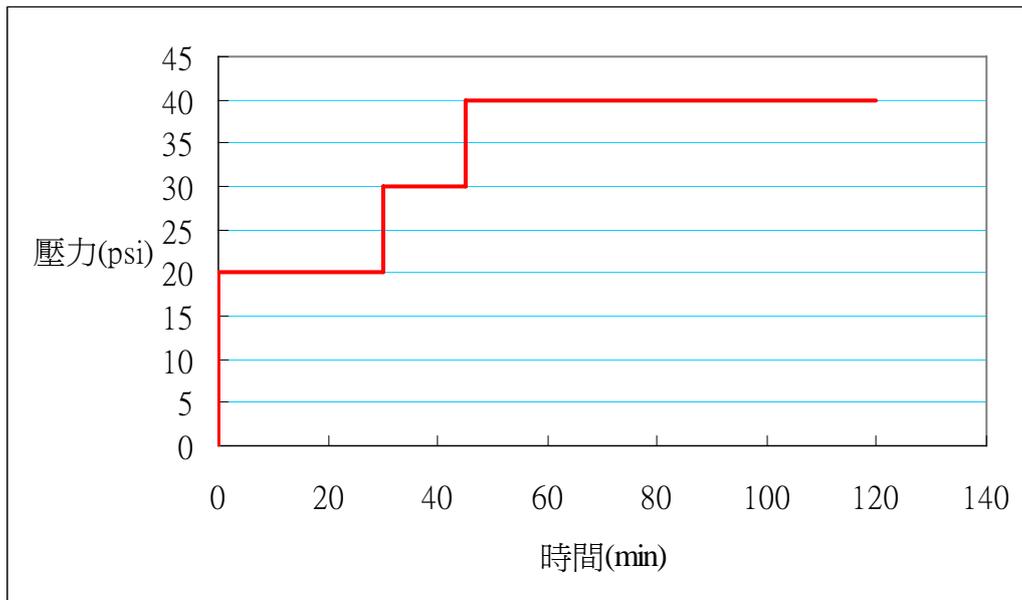


圖 2-16 心軸成形氣袋壓力變化曲線



圖 2-17 合模後送入烤箱加熱

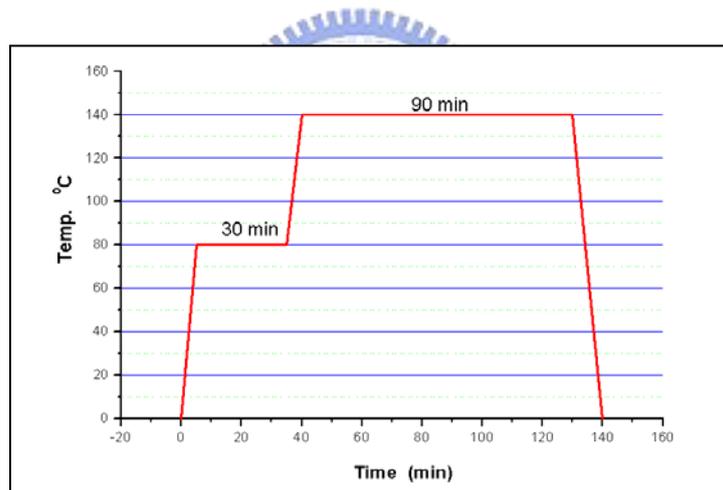


圖 2-18 設定加熱溫度及時間

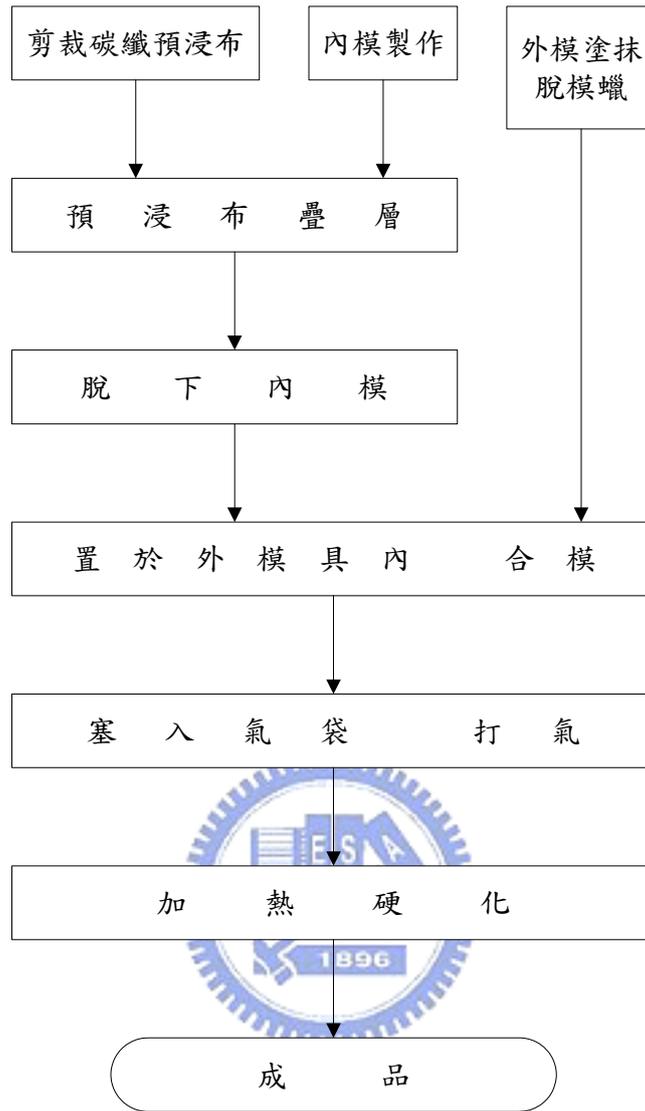


圖 2-19 圓桿心軸製作流程圖

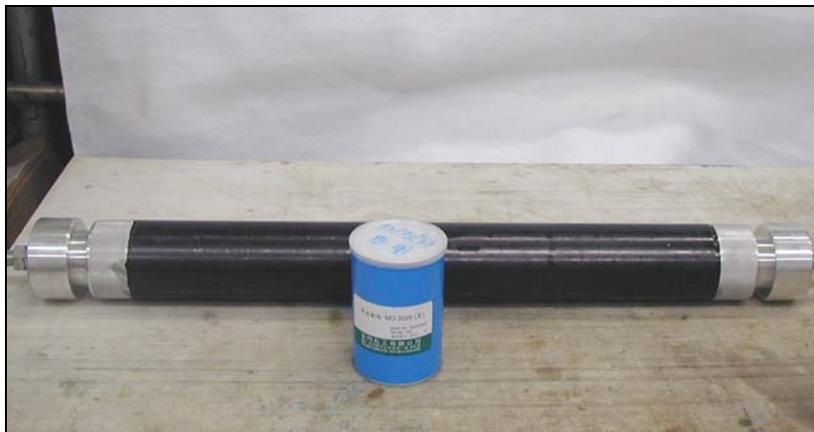


圖 2-20 圓桿心軸成品及調好之環氧樹脂

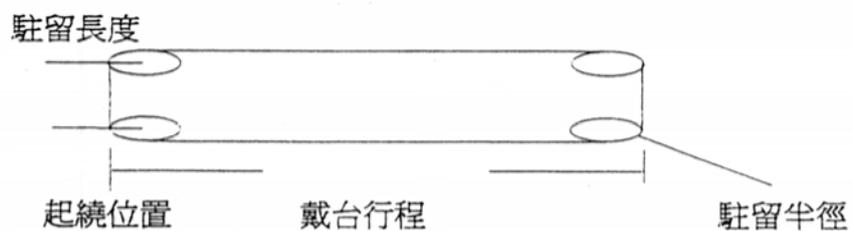


圖 2-21 螺旋形繞線基本模型

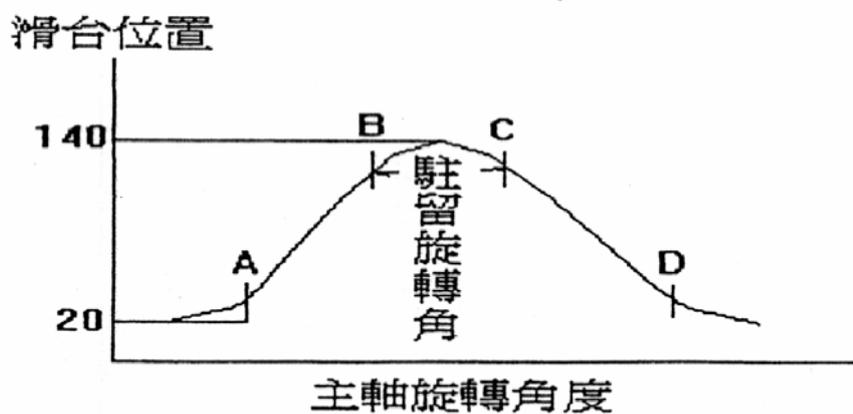


圖 2-22 基本螺旋形繞線花式

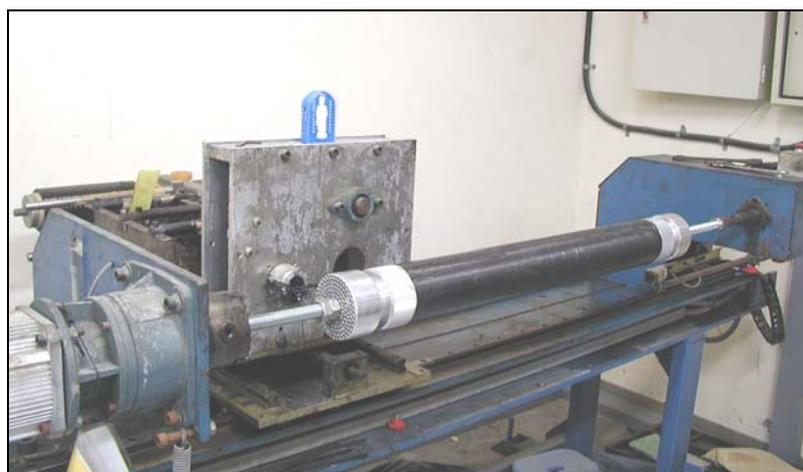


圖 2-23 準備妥開始上線纏繞



圖 2-24 纏繞程序完成



圖 2-25 第一層離形布抹脫模蠟



圖 2-26 第二層 peel ply

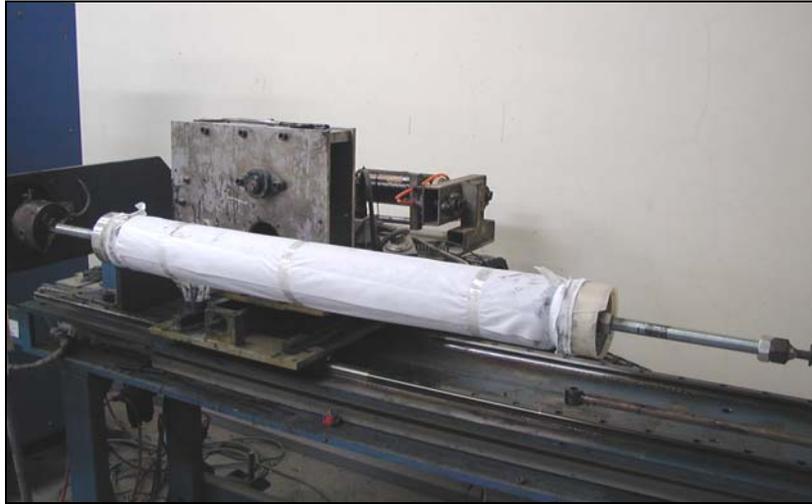


圖 2-27 第三層小棉布

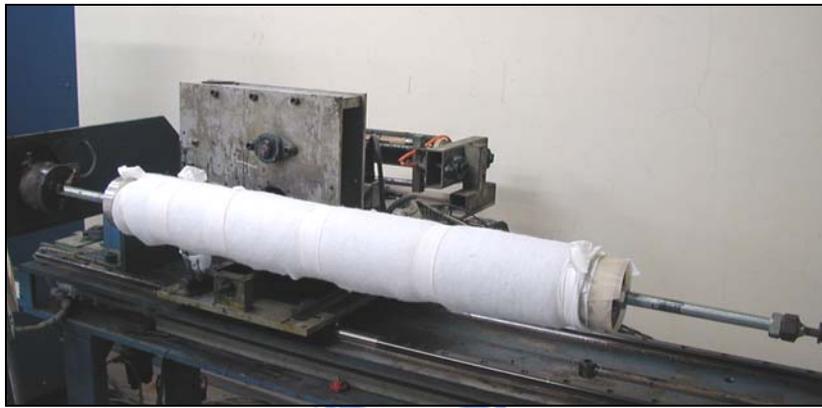


圖 2-28 第四層厚棉布



圖 2-29 送入旋轉烤箱



圖 2-30 將包覆材拆下



圖 2-31 包覆材拆卸完成



圖 2-32 纏繞圓稈成品



圖 3-1 金屬球接頭模型圖

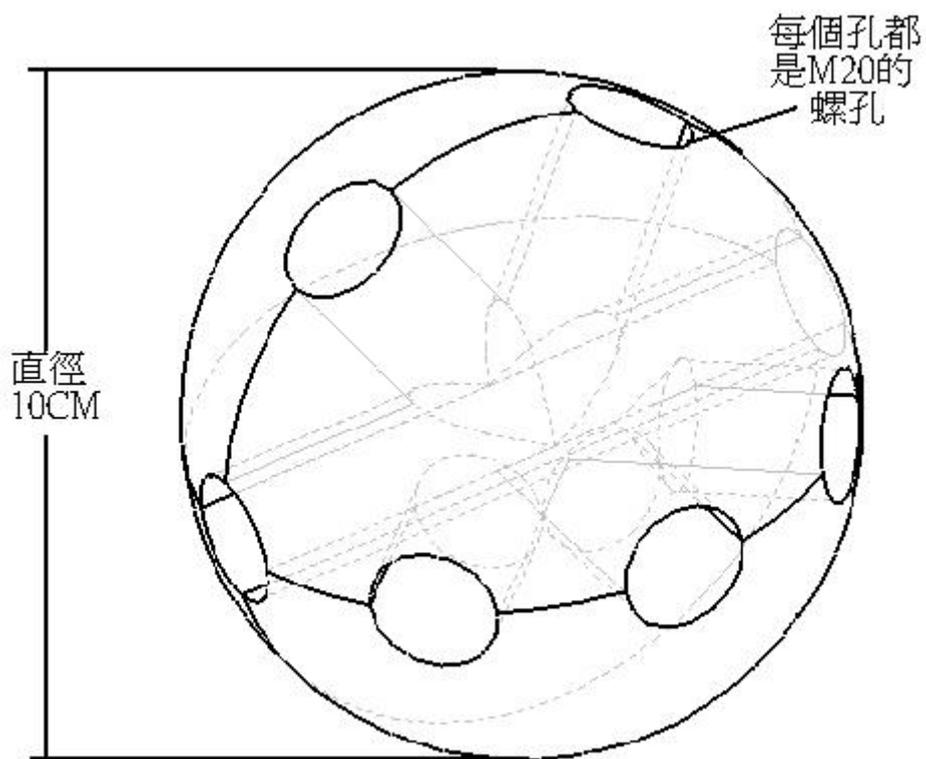


圖 3-2 球接頭尺寸設計圖

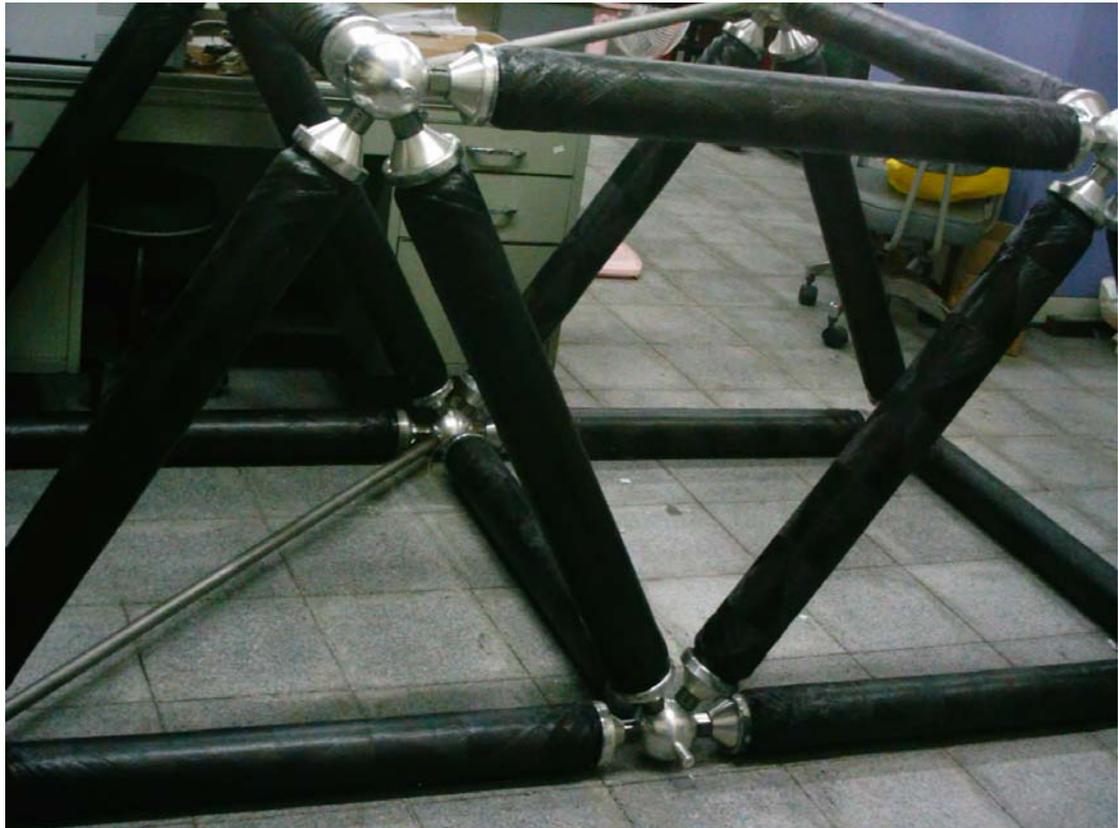


圖 3-3 複合材料桁架成品



圖 3-4 改良後的桿件端接頭

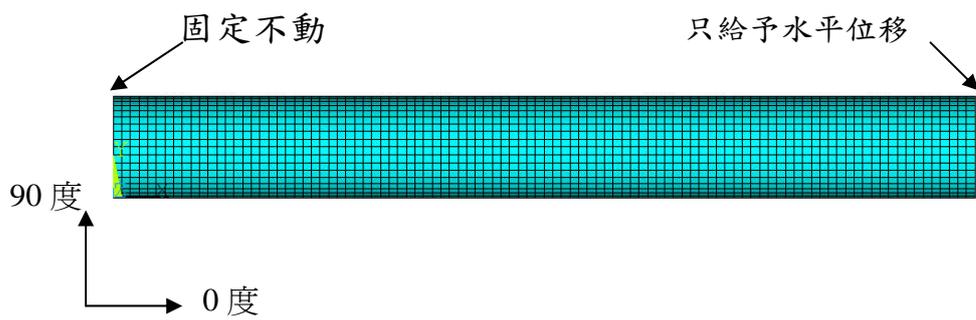


圖 4-1 桿件之邊界條件

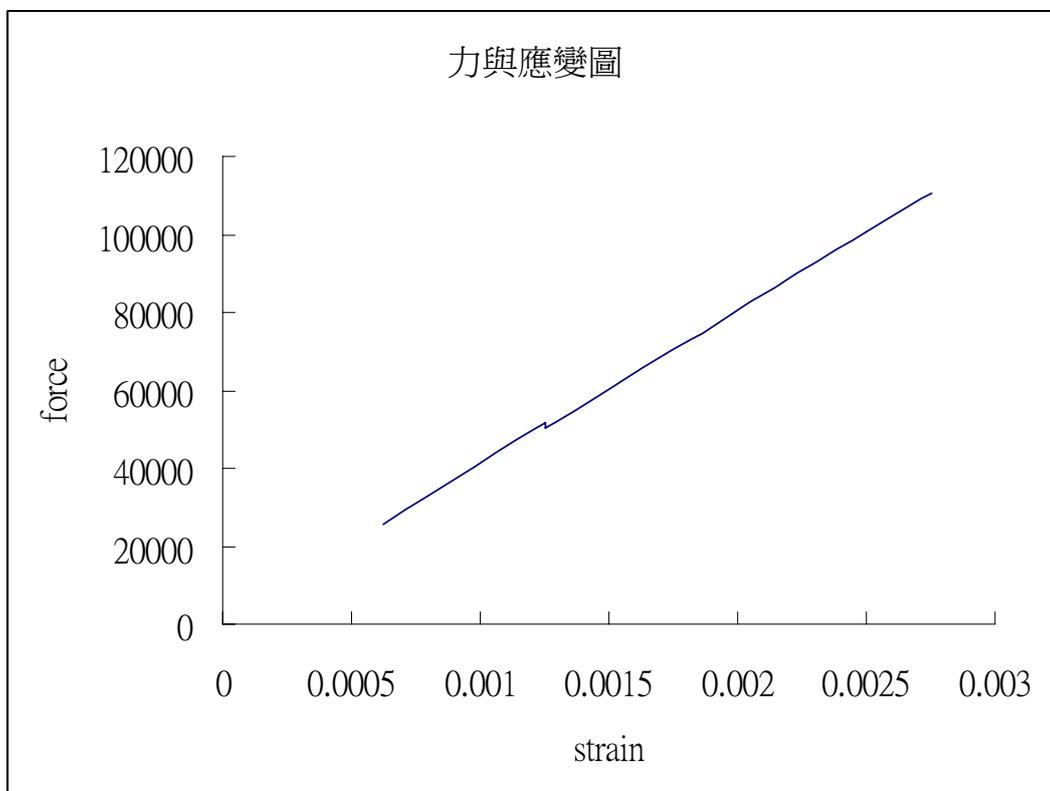


圖 4-2 纏繞三十度的拉力破壞圖

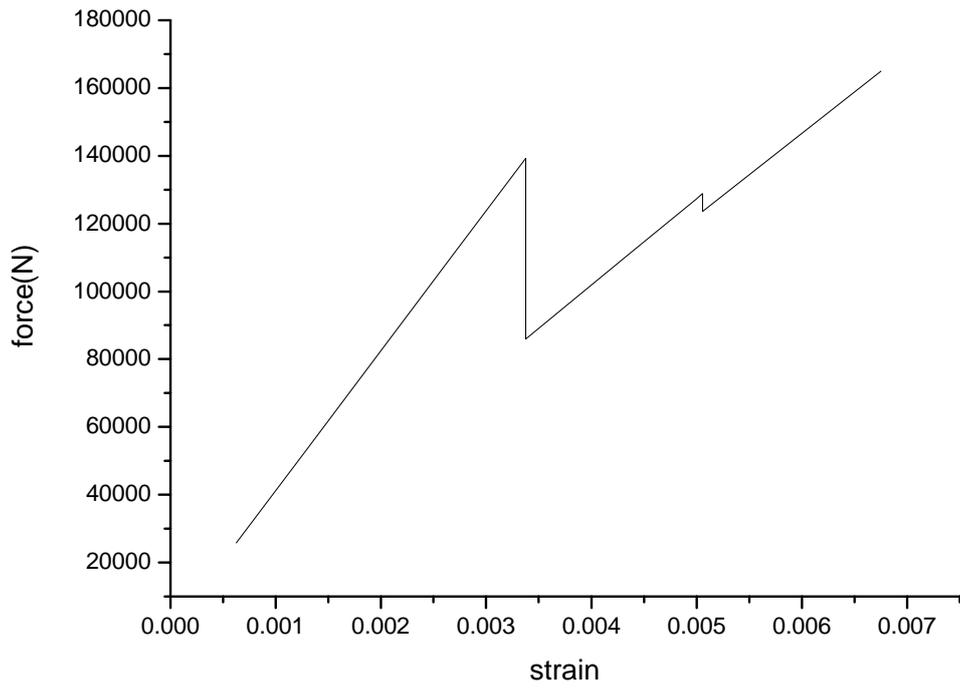


圖 4-3 纏繞三十度的壓力破壞圖

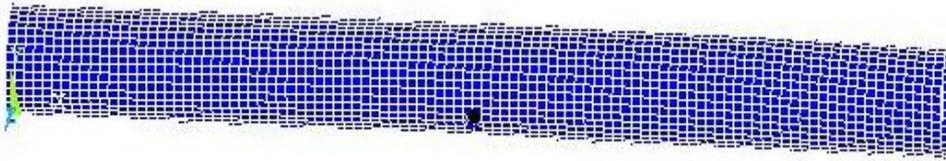


圖 4-4 模擬拉力時最終破壞位置

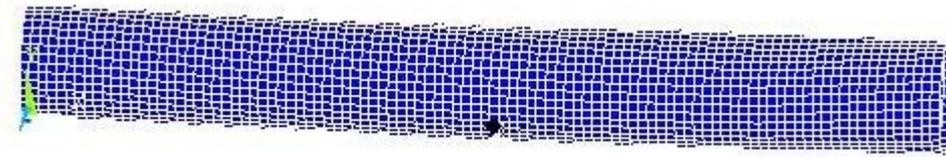


圖 4-5 模擬壓力時最終破壞位置

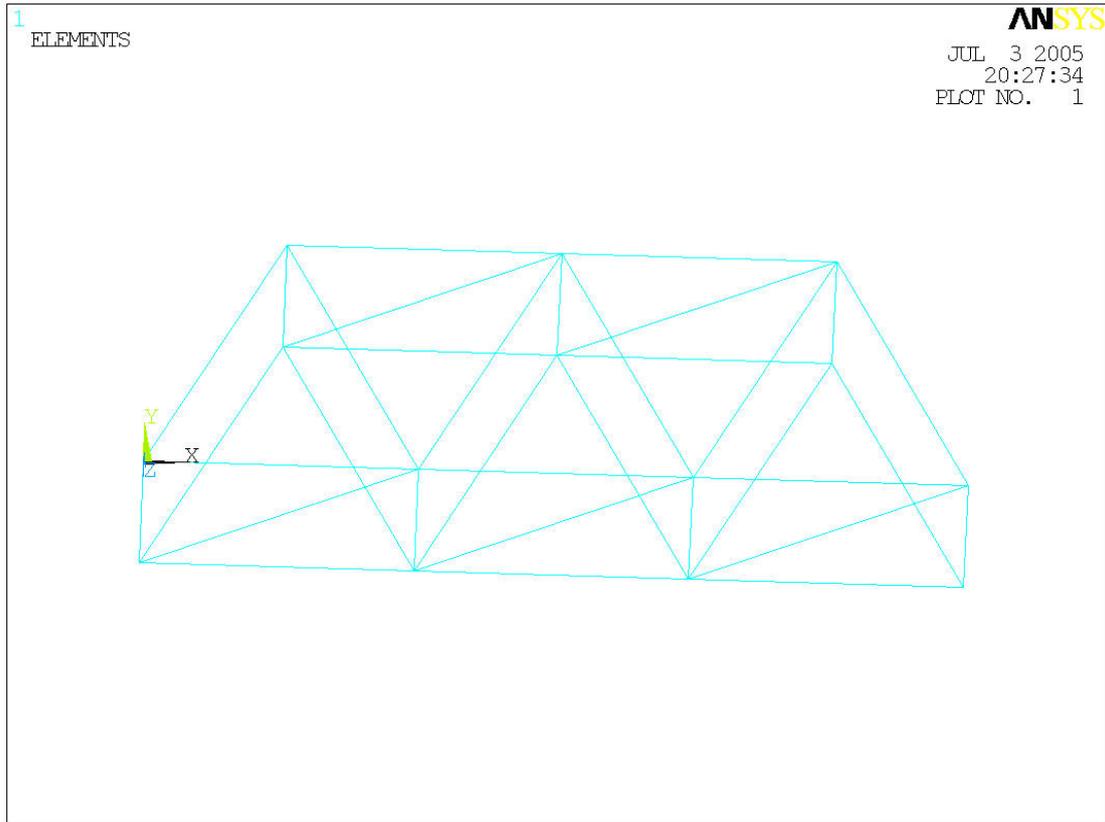


圖 5-1 桁架之模型

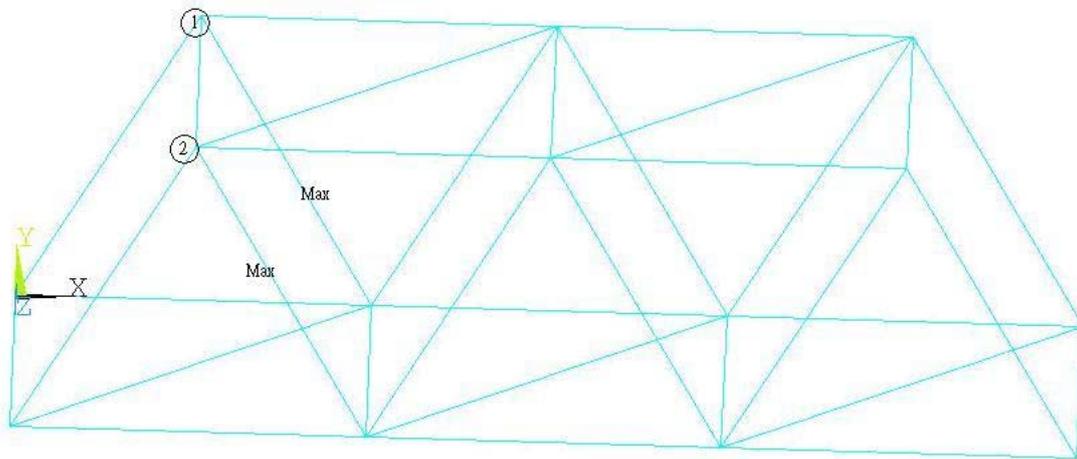


圖 5-2 桁架受力位置

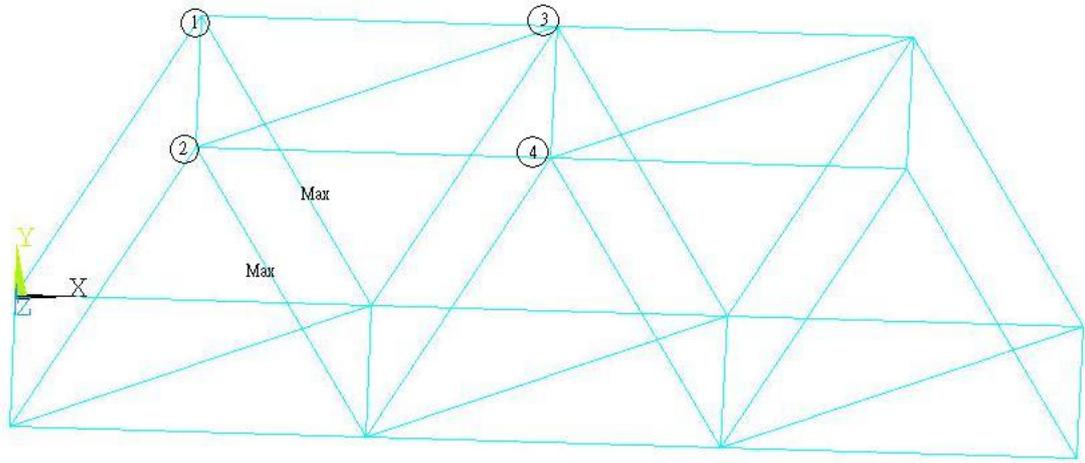


圖 5-3 桁架受力位置

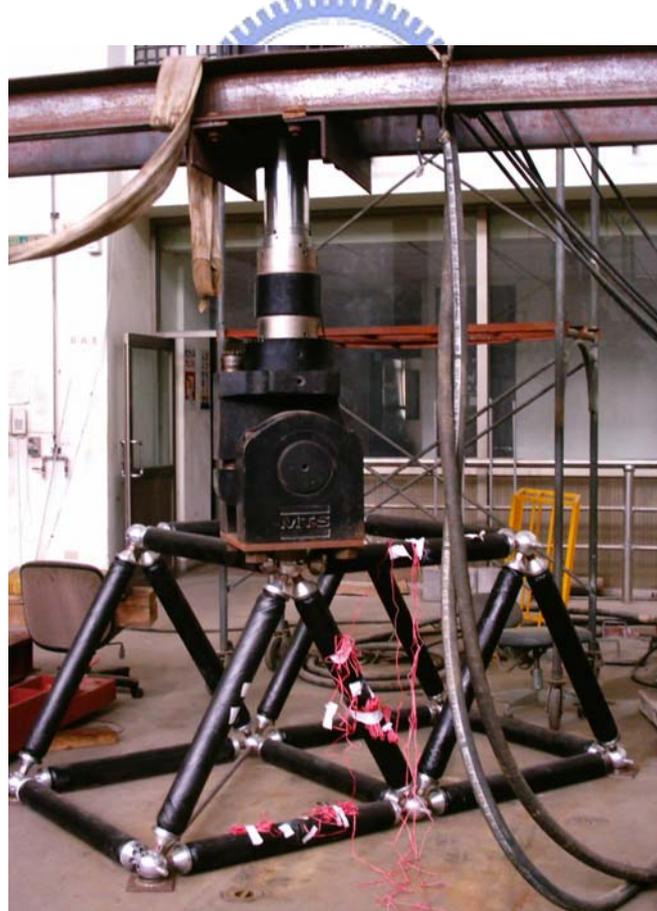


圖 5-4 桁架實驗裝置圖

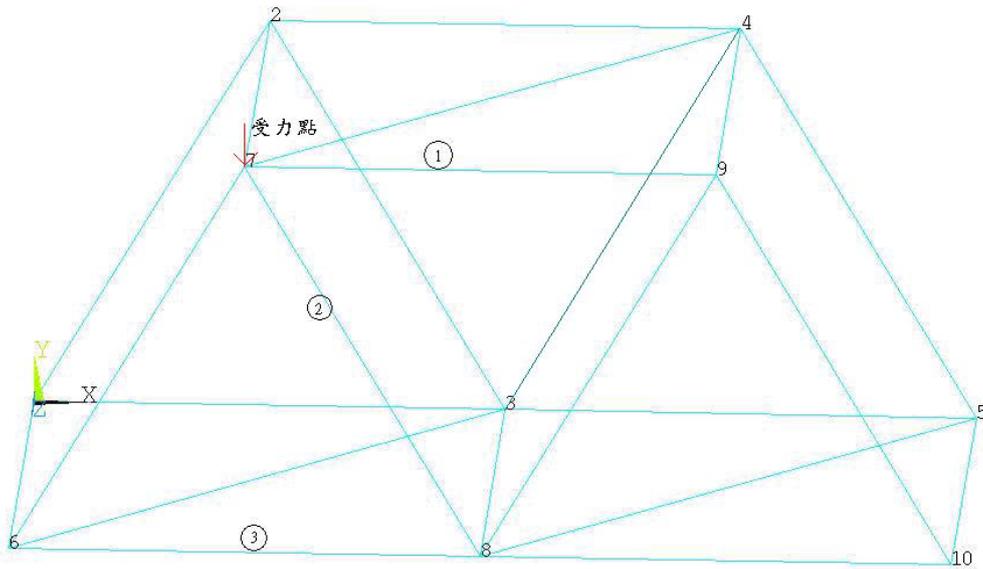


圖 5-5 量測桿件順序圖

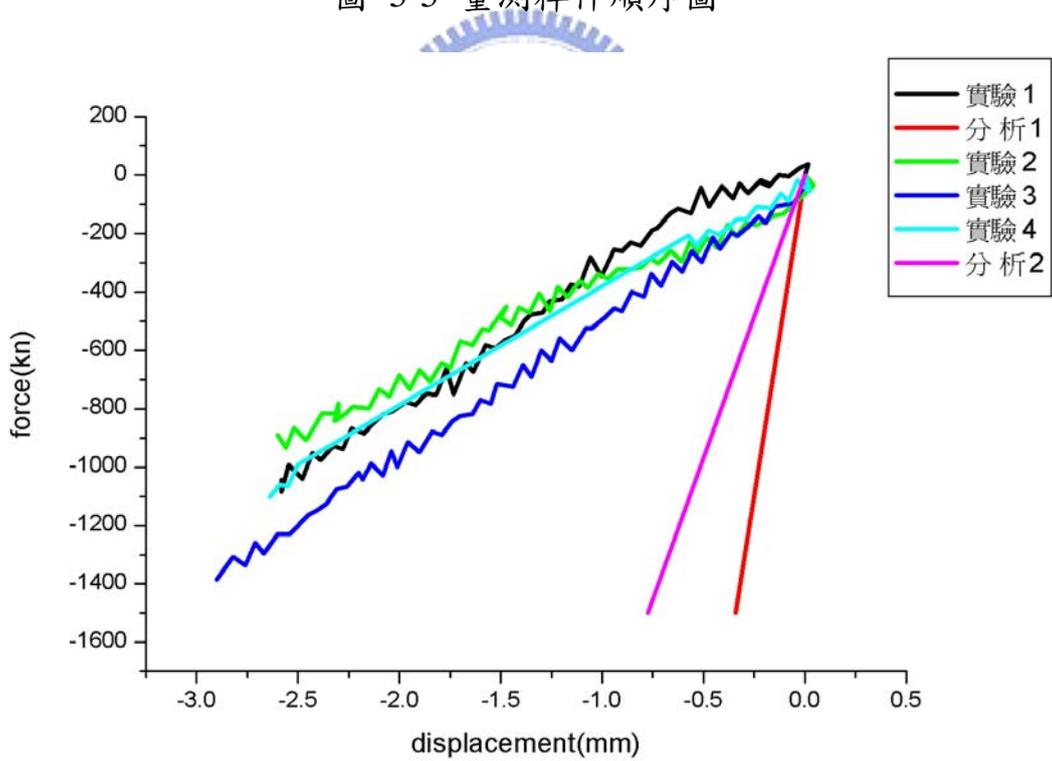


圖 5-6 力與位移分佈圖

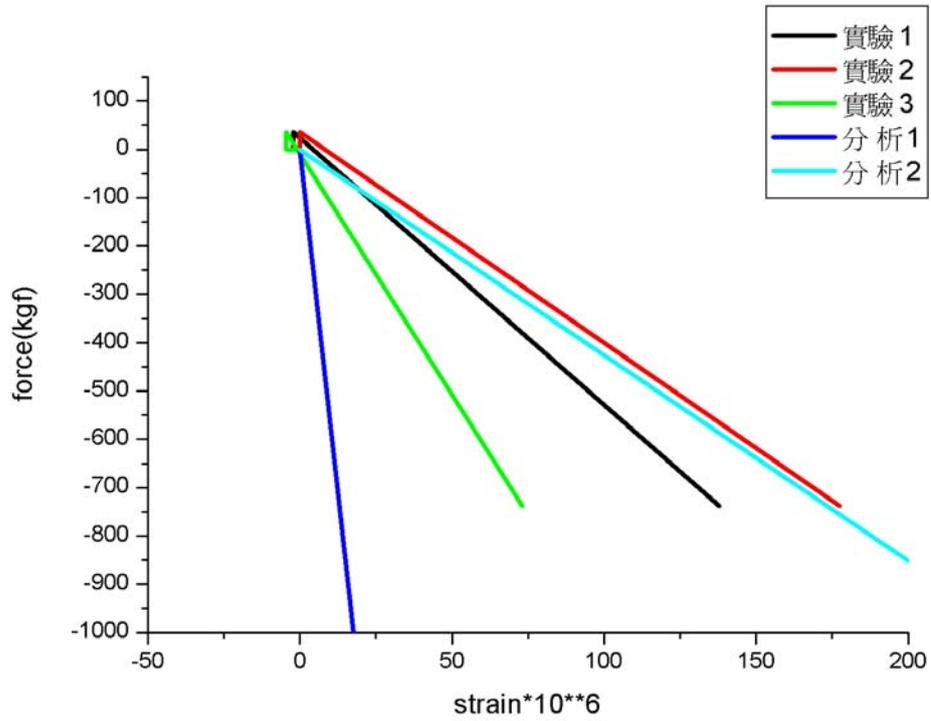


圖 5-7 力與應變分佈圖(桿 1)

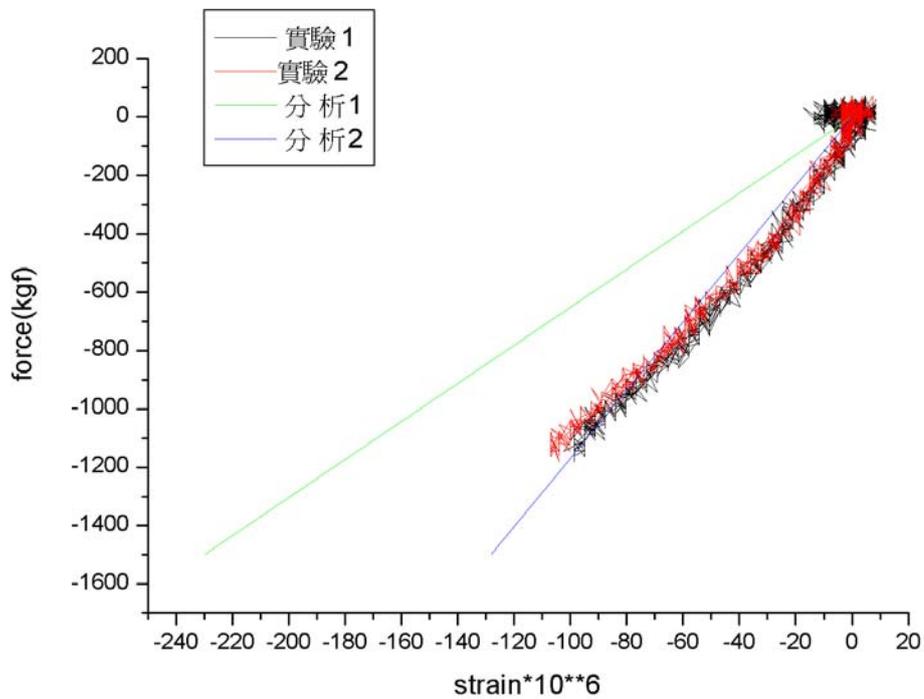


圖 5-8 力與應變分佈圖(桿 2)

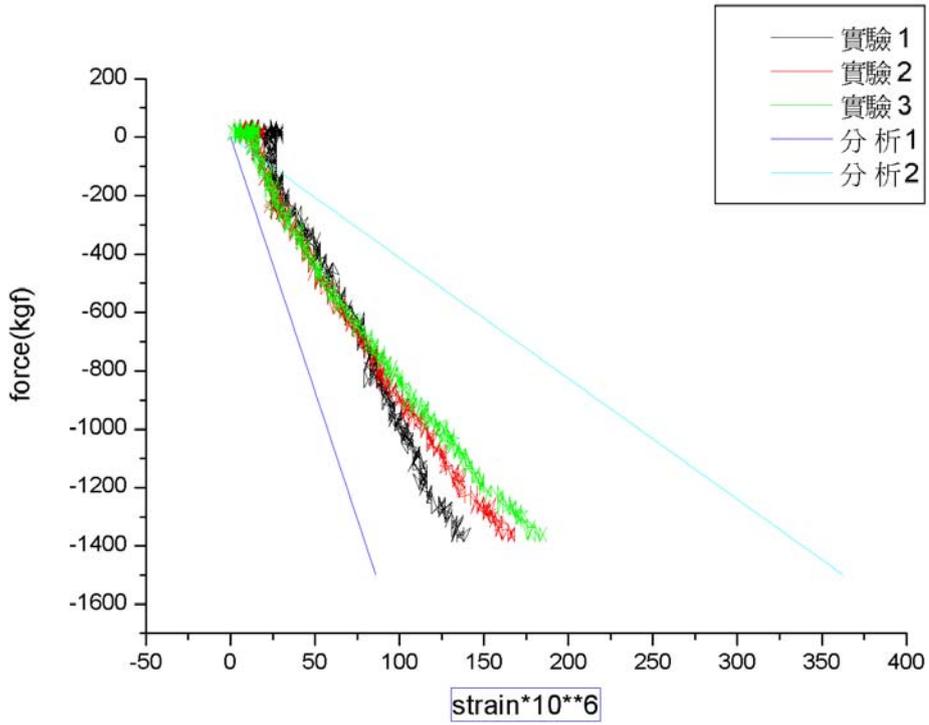


圖 5-9 力與應變分佈圖(桿 3)

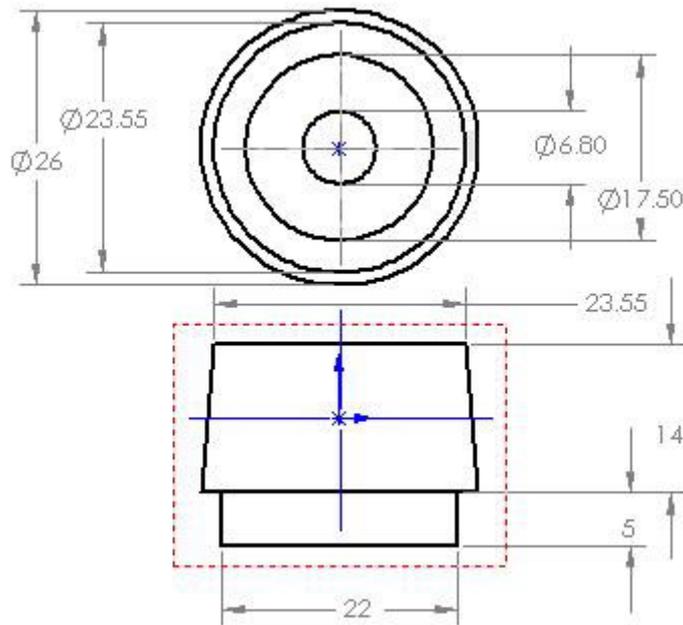


圖 6-1 圓錐頭之尺寸圖

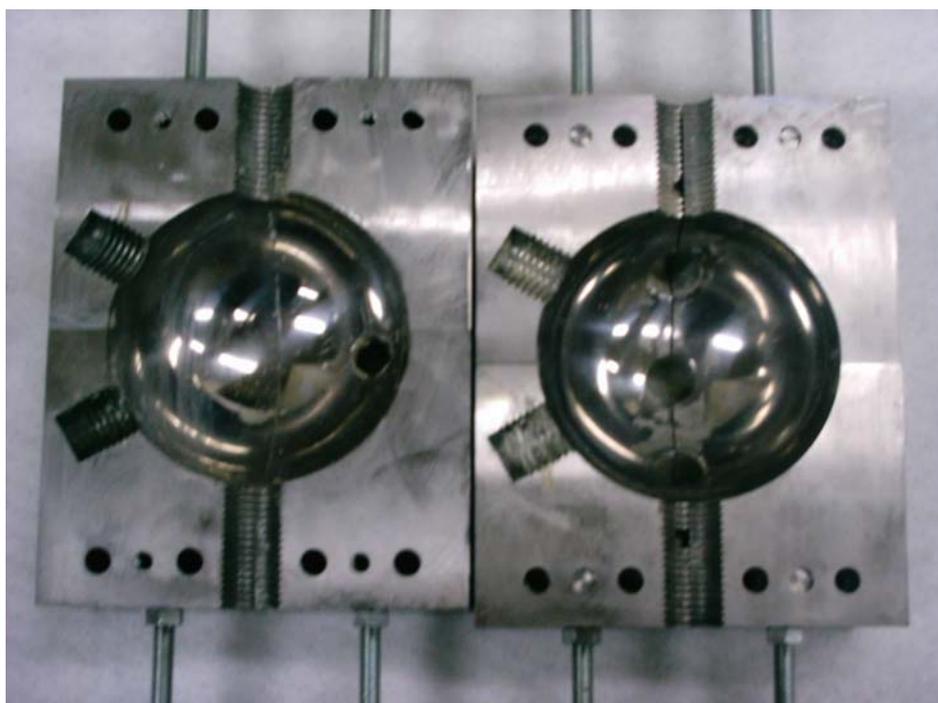


圖 6-2 球接頭模具

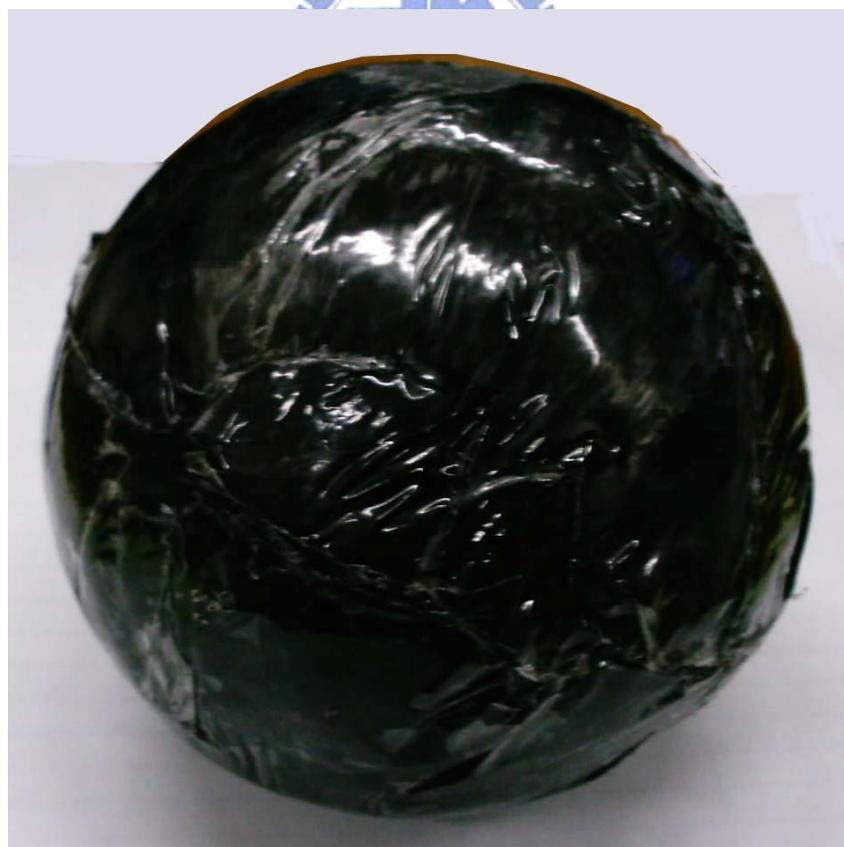


圖 6-3 球的試作品



圖 6-4 球的試作品



圖 6-5 使用壁虎釘破壞之情形

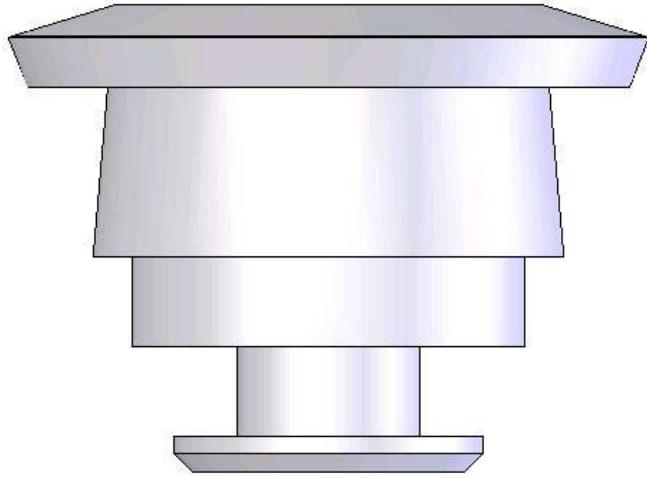


圖 6-6 金屬管接頭的改良設計



圖 6-7 新的金屬管接頭之製作成品



圖 6-8 新的金屬管接頭

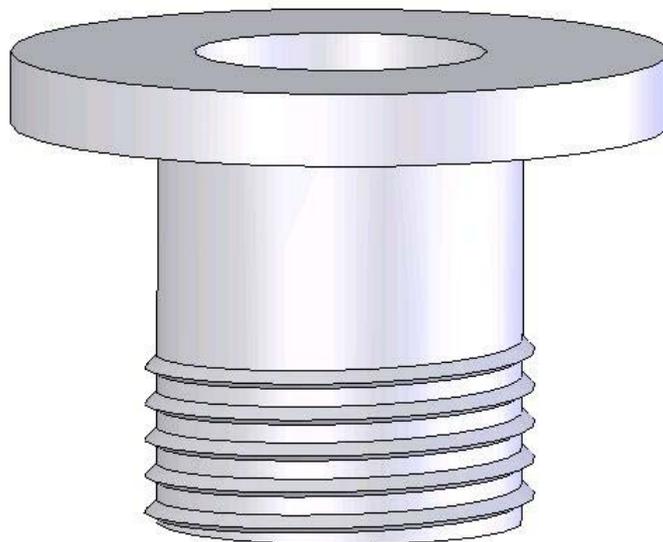


圖 6-9 中空之金屬管

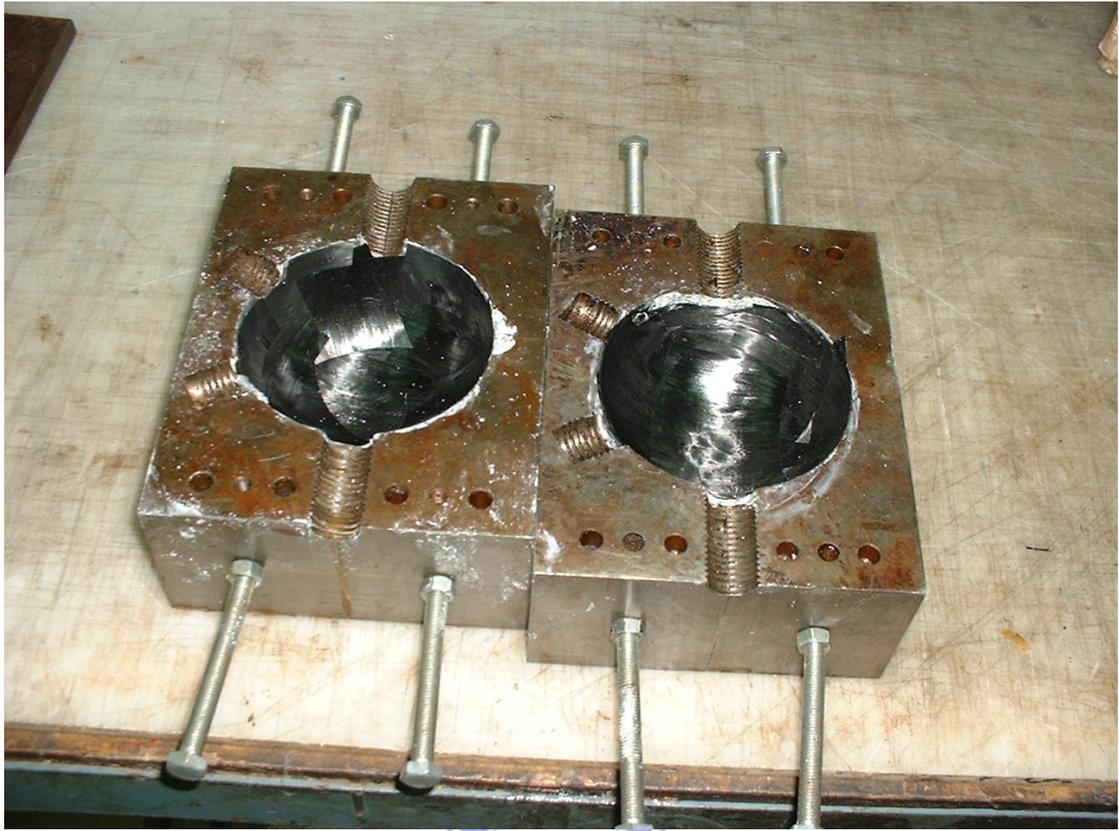


圖 6-10 模具的處理



圖 6-11 放入玻璃纖維布



圖 6-12 碳纖維束



圖 6-13 將管接頭裝置在模具圖



圖 6-14 球形接頭製作圖



圖 6-15 接頭拉壞圖



圖 6-16 球體拉壞圖

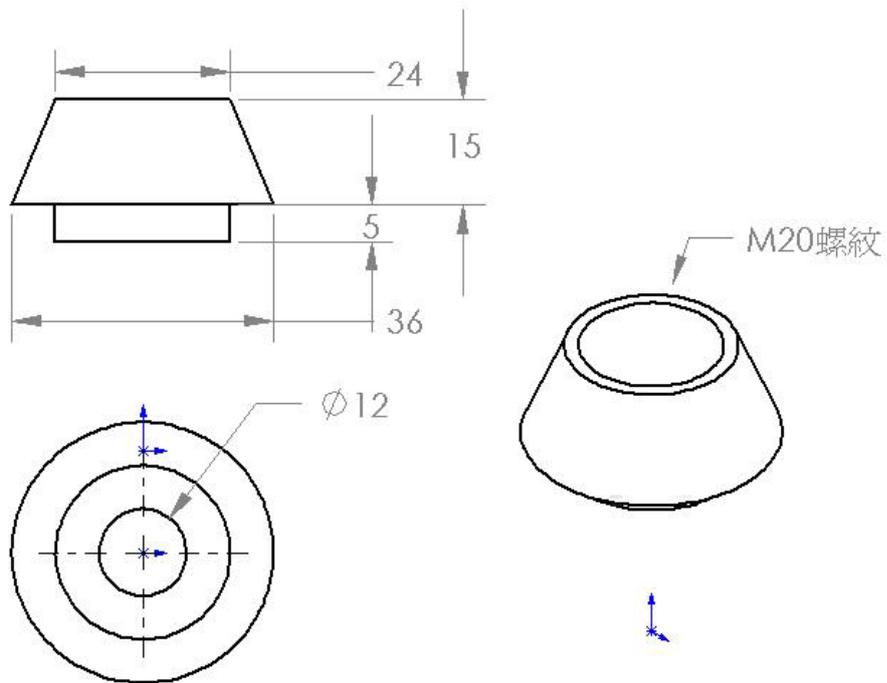


圖 6-17 新型金屬管接頭

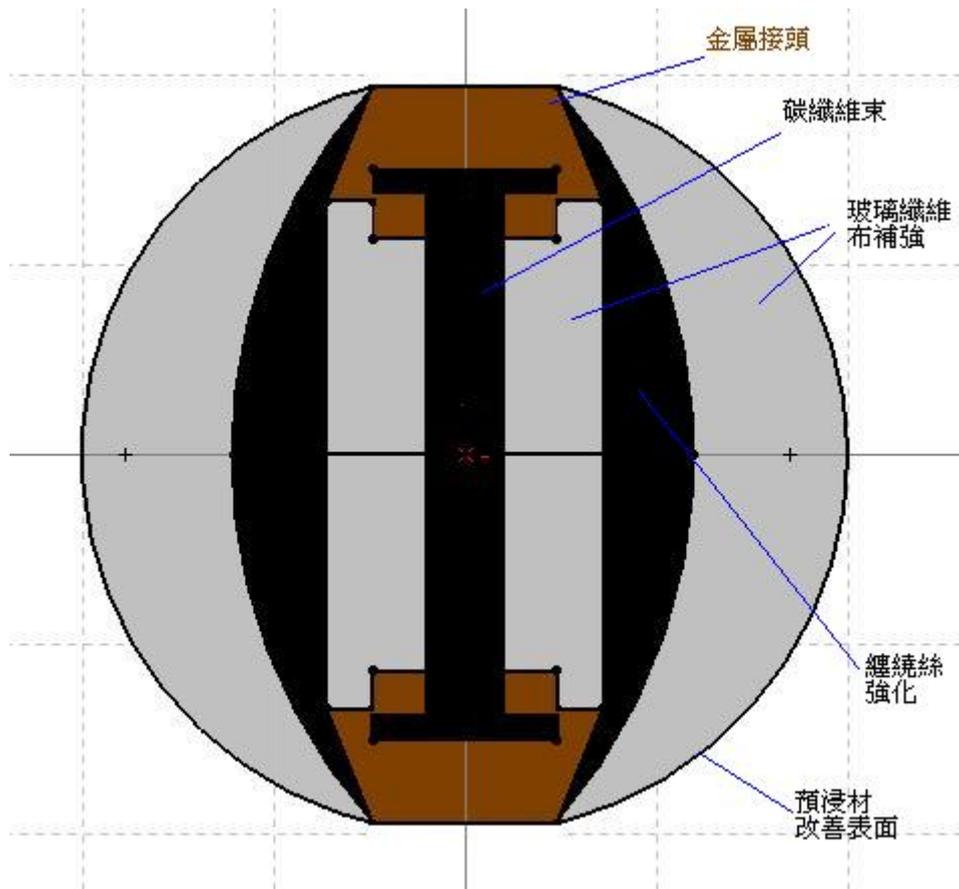


圖 6-18 球內部示意圖



圖 6-19 螺紋拉壞圖



圖 6-20 全金屬球接頭



圖 6-21 球接頭成品

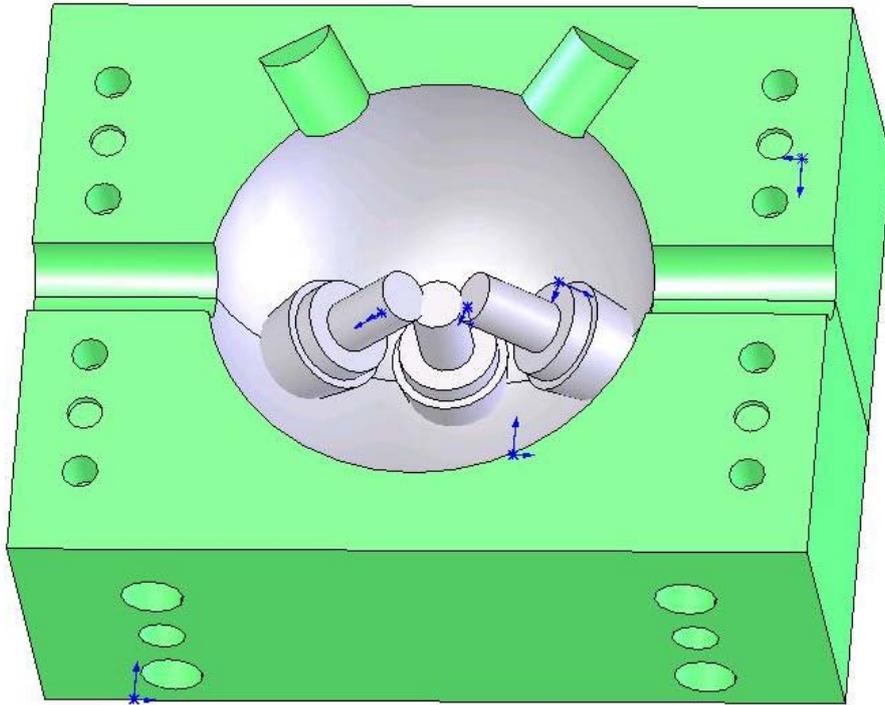


圖 6-22 將管接頭鎖在模具上

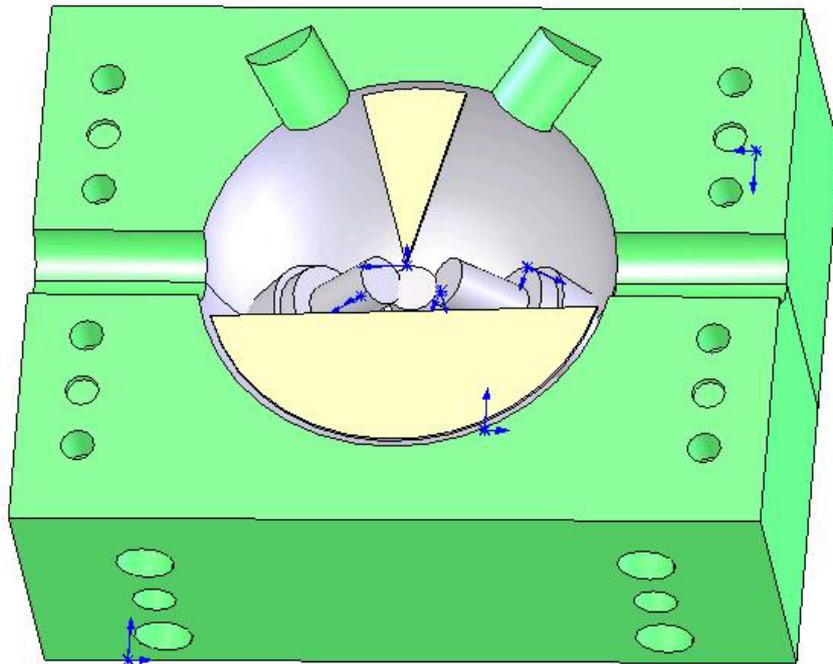


圖 6-23 填充玻纖布到下模表面

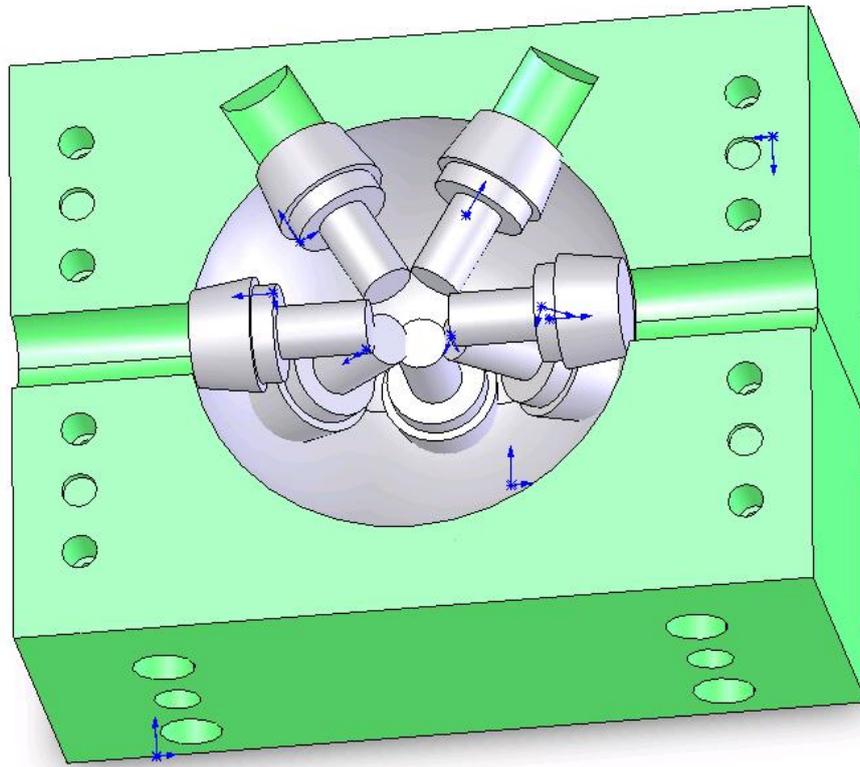


圖 6-24 將剩餘的金屬管接頭鎖在模具上

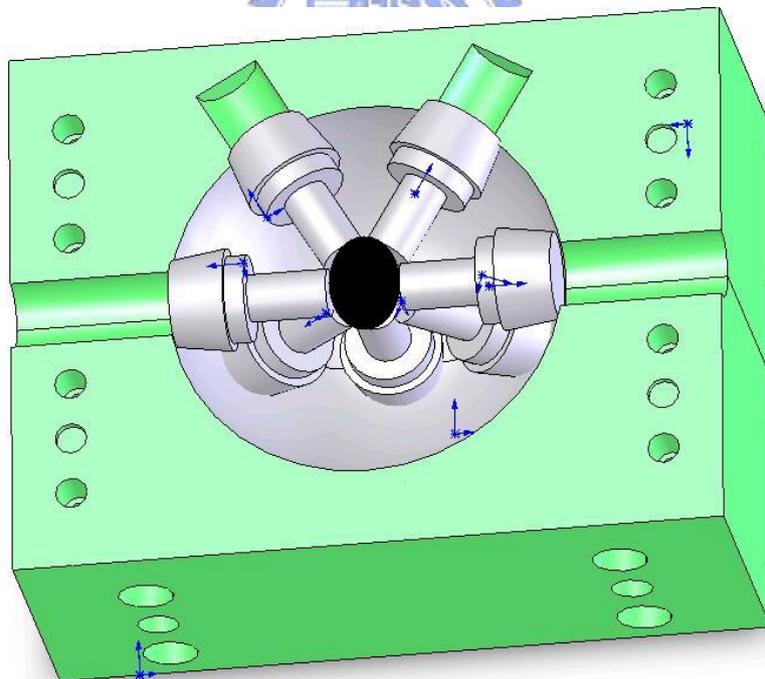


圖 6-25 將中心點中的碳纖維打結

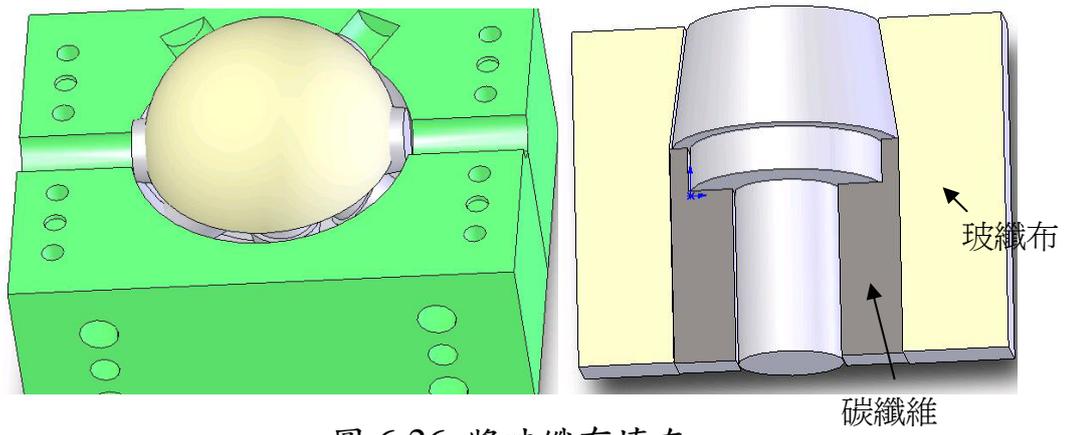


圖 6-26 將玻纖布填充

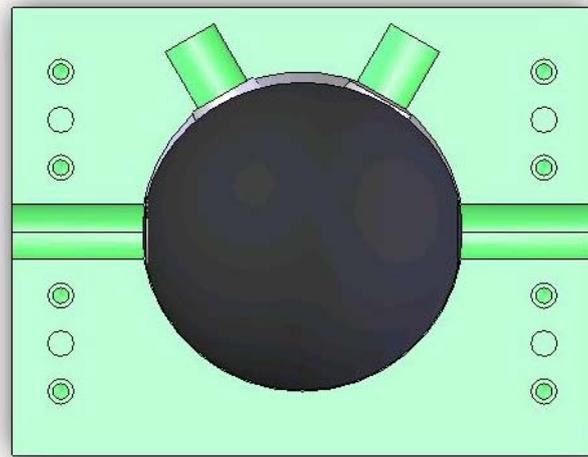


圖 6-27 纏繞碳纖維在球邊緣



圖 7-1 拉伸試驗的夾具與試體



圖 7-2 壓縮試驗的試體



圖 7-3 試體架設在拉伸試驗機上

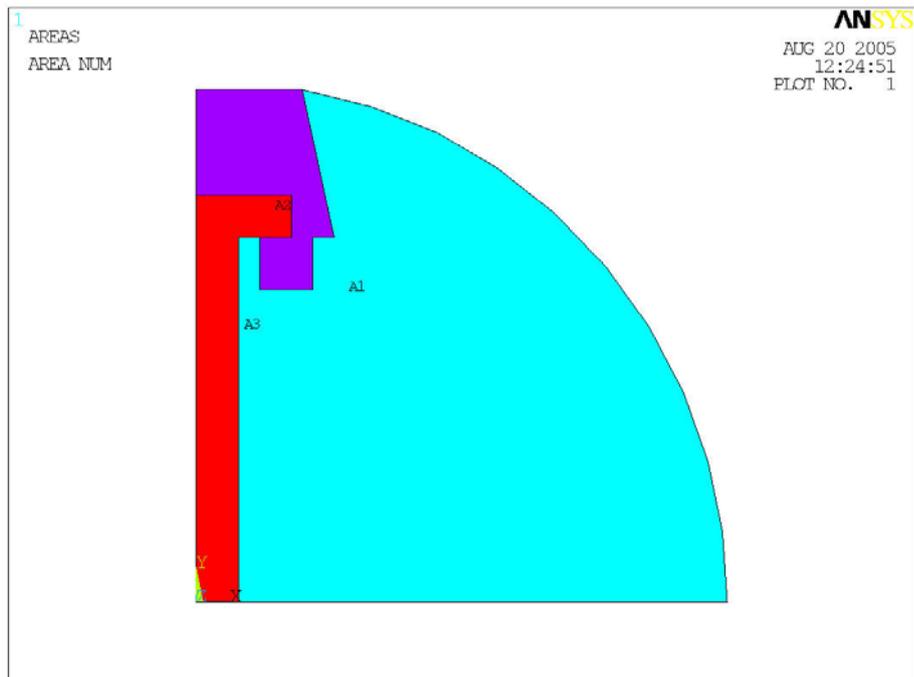


圖 7-4 球的模型

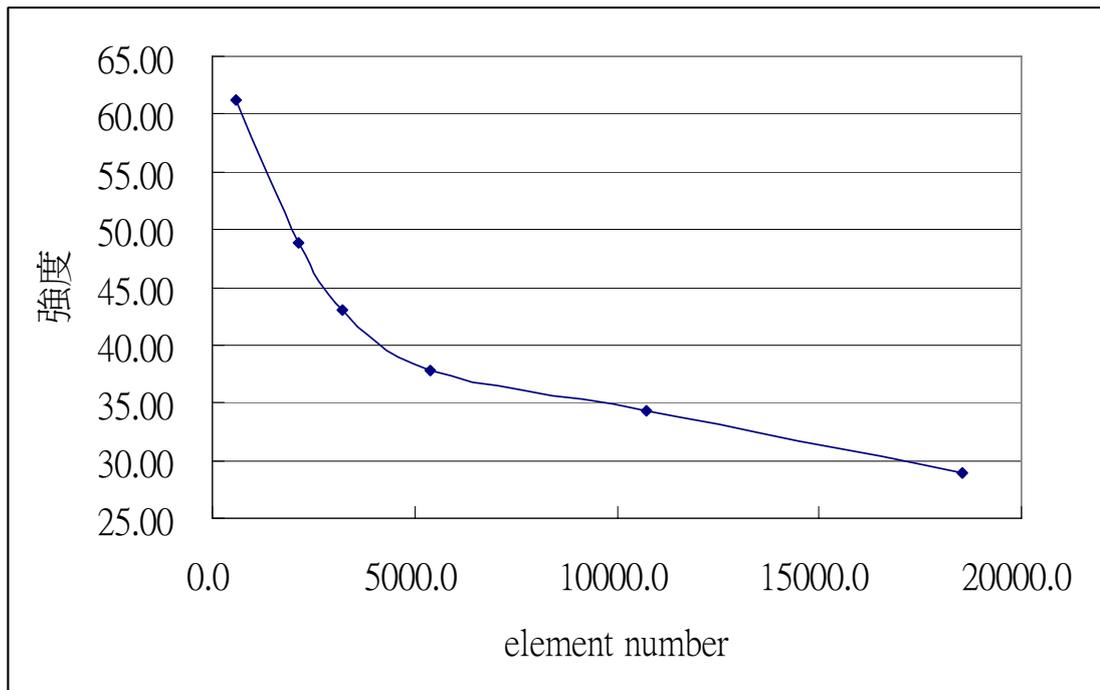


圖 7-5 元素分割數量的收斂情形

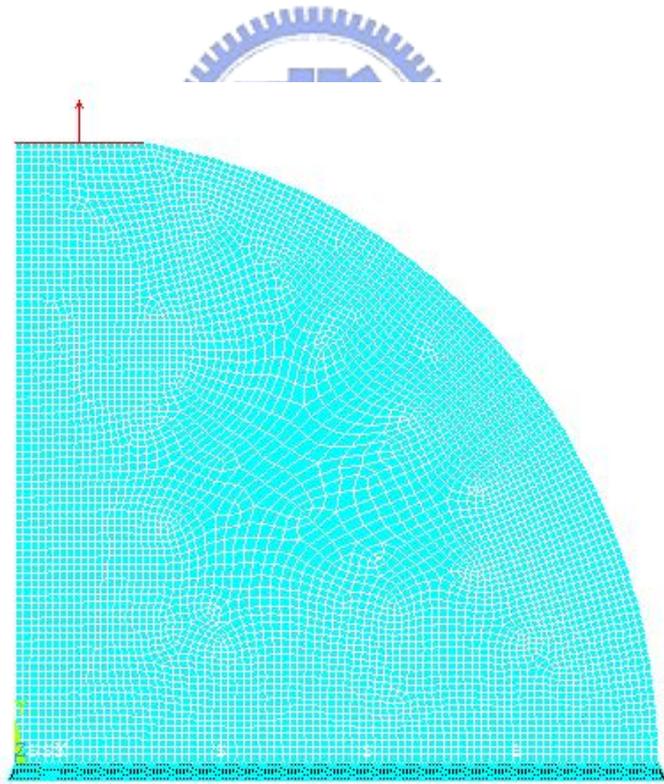


圖 7-6 邊界條件圖

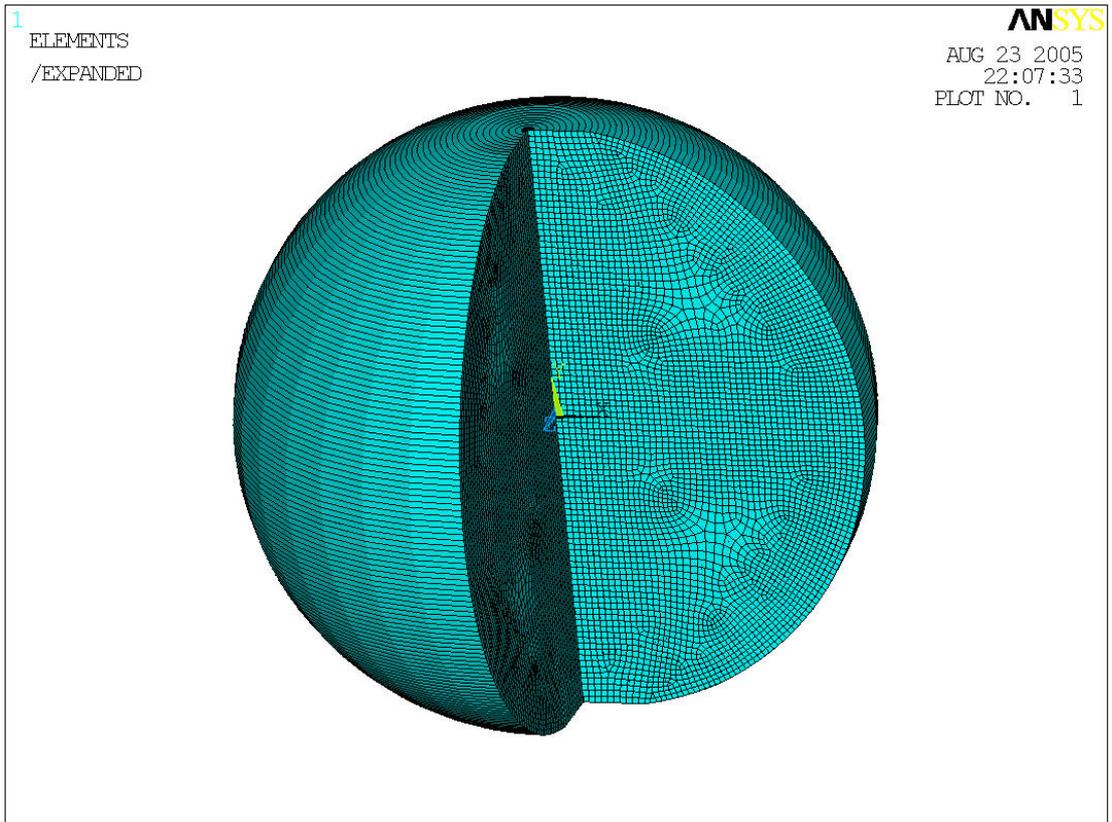


圖 7-7 模型展開圖

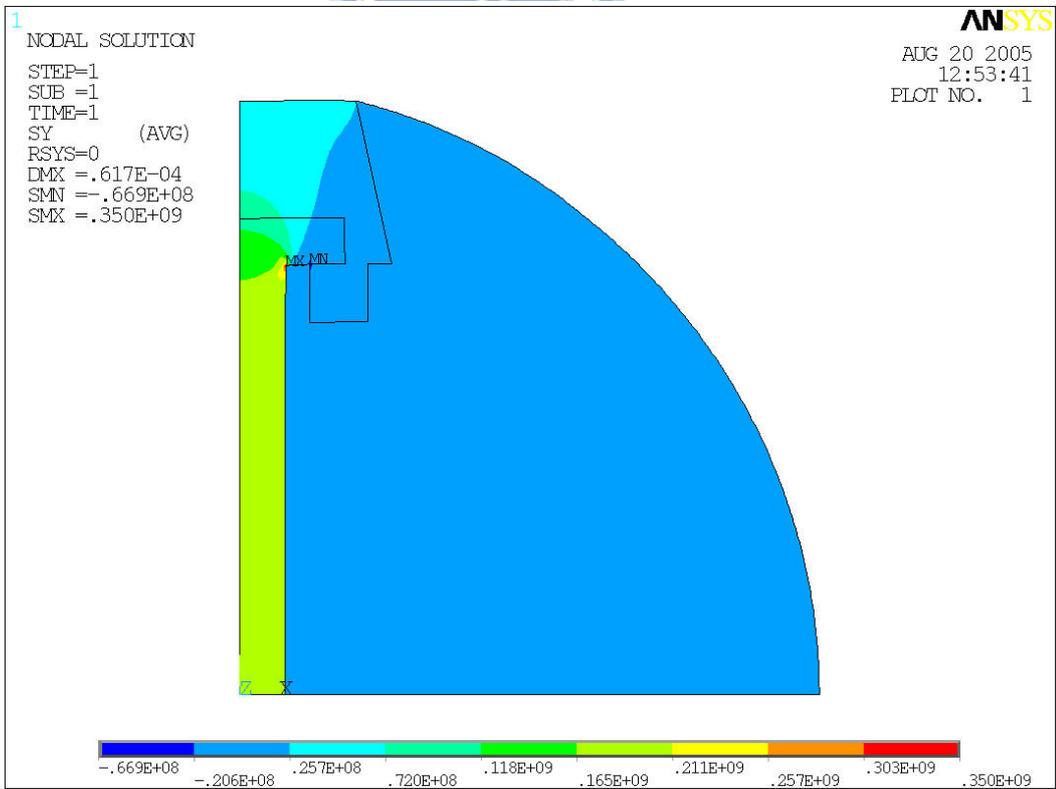


圖 7-8 應力分佈圖(纖維束直徑 8 mm)

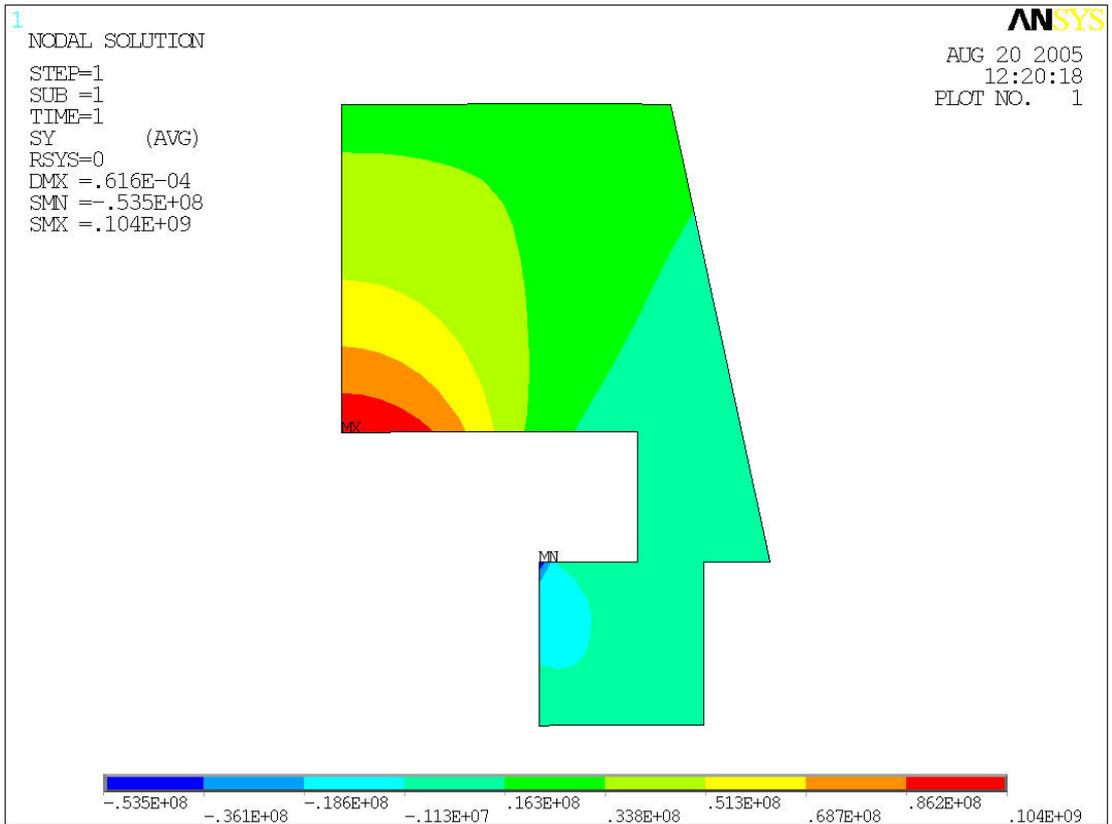


圖 7-9 管接頭應力分佈

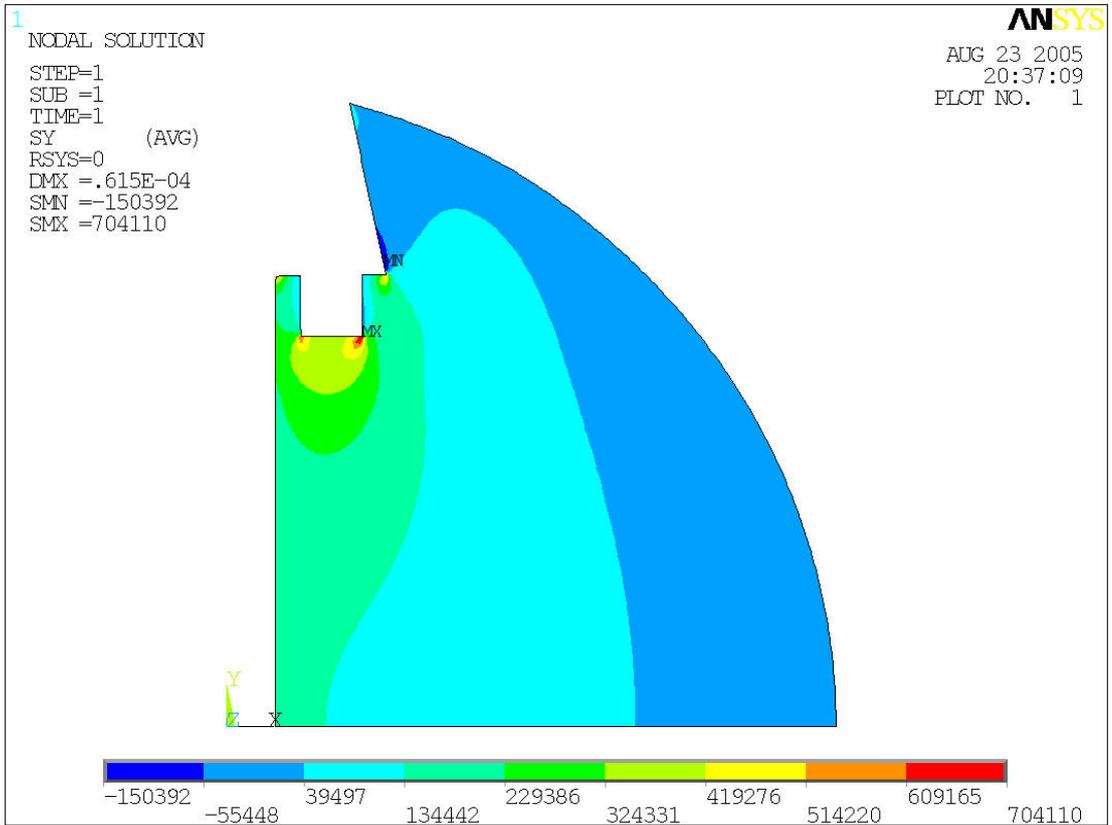


圖 7-10 玻纖布應力分佈

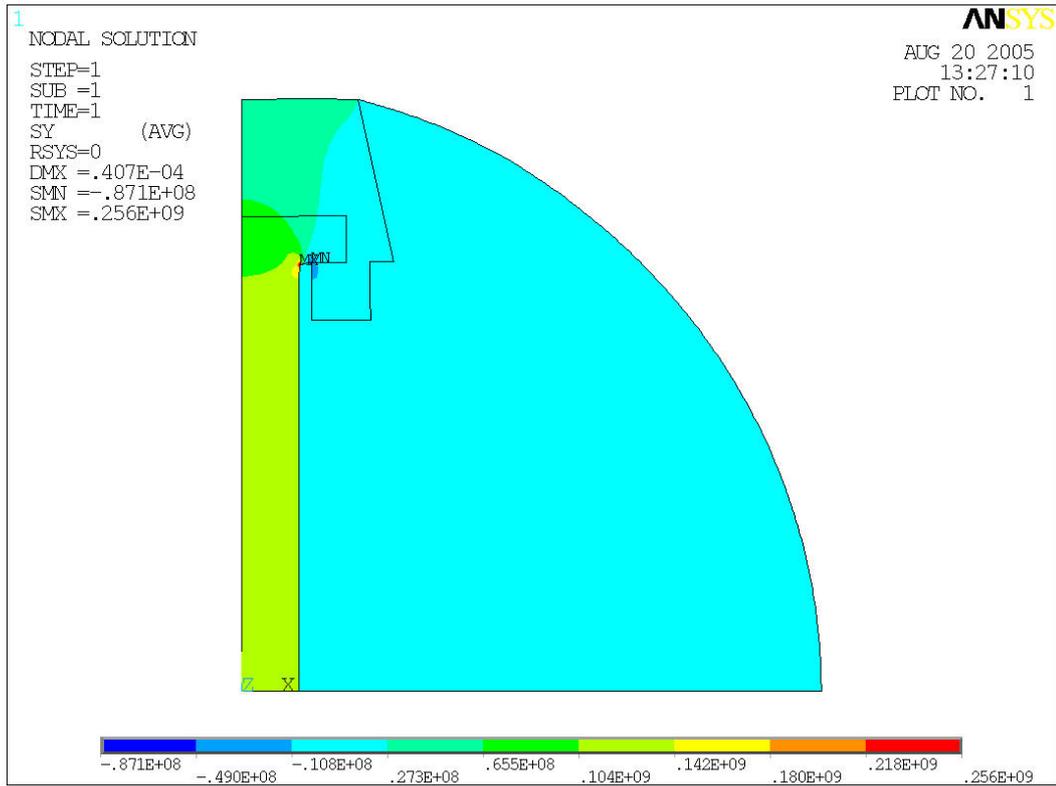


圖 7-11 應力分佈圖(纖維束直徑 10 mm)

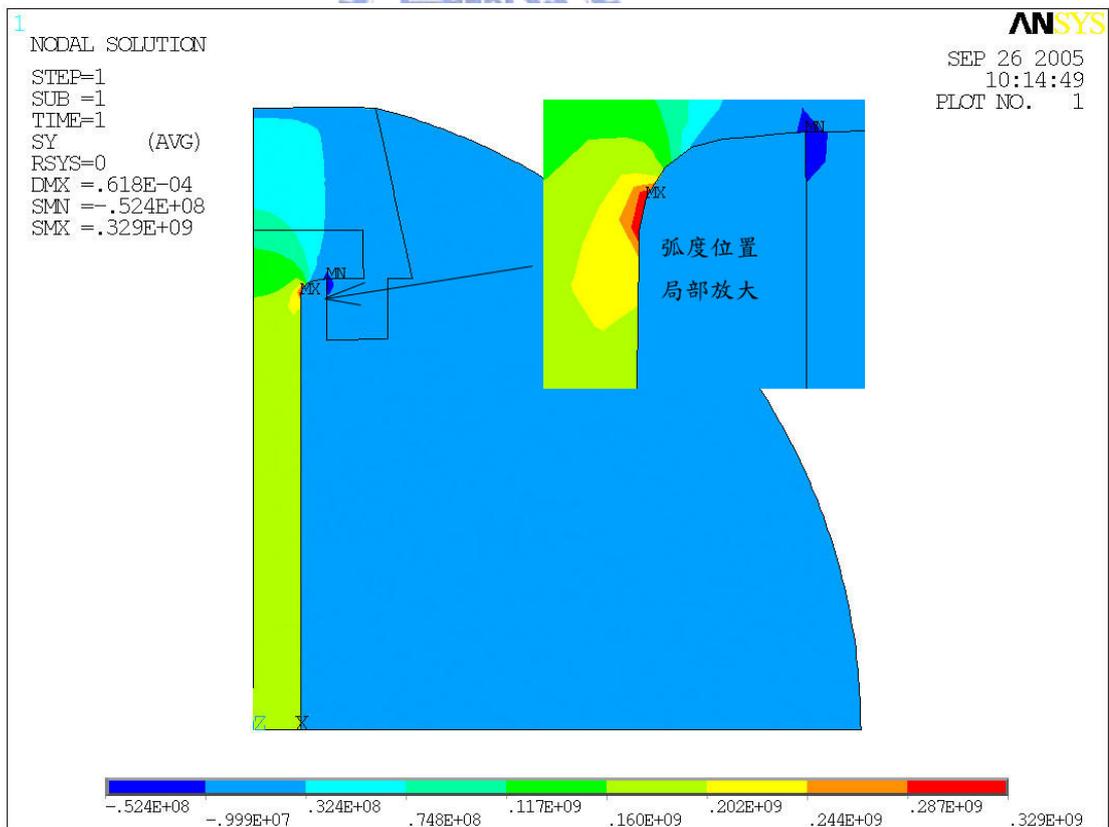


圖 7-12 應力分佈圖(碳纖維改圓弧)

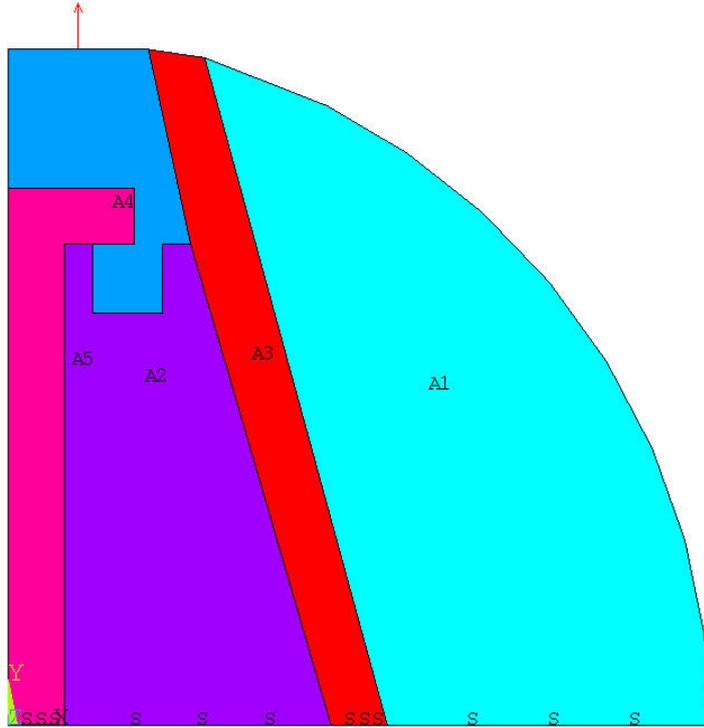


圖 7-13 新的模型

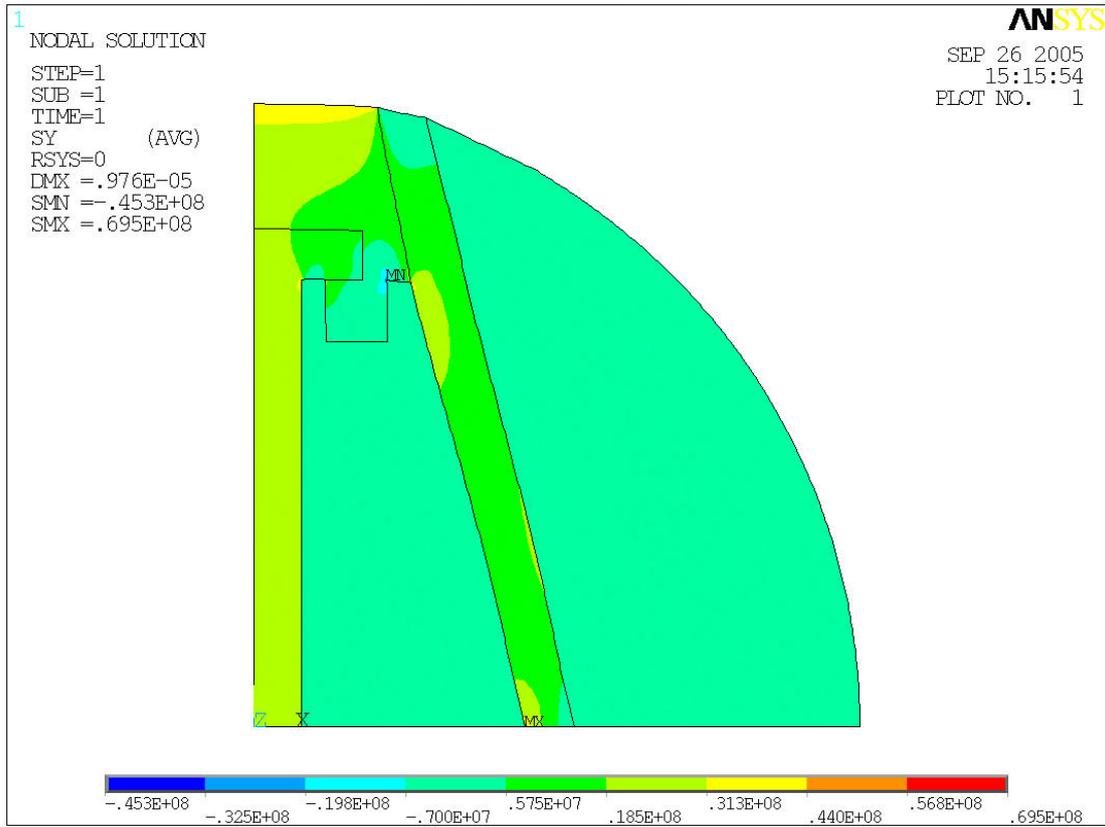


圖 7-14 應力分佈圖