

國立交通大學
機械工程學系
碩士論文

複合材料風力葉片之設計與破壞行為研究

Design and Failure Behavior of Composite Wind Blades



研究 生：陳正平

指導教授：金大仁 博士

中華民國九十九年八月

複合材料風力葉片之設計與破壞行為研究

Design and Failure Behavior of Composite Wind Blades

研究 生：陳正平

Student : Zheng-Ping Chen

指 導 教 授：金大仁 教 授

Advisor : Dr. Tai-Yan Kam

國 立 交 通 大 學

機 械 工 程 學 系

碩 士 論 文

A Thesis
Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
1896
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

August 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 九 十 九 年 八 月

複合材料風力葉片之設計與破壞行為研究

研究生：陳正平

指導教授：金大仁 博士

國立交通大學機械工程學系

摘要

本文主要探討複合材料風力葉片之設計與破壞行為研究，在此採用複合材料三明治層板設計風力葉片外形，並設計出適當的葉片形狀，使葉片能產生足夠的扭矩來帶動發電機旋轉，再由翼型氣動條件代入葉片元素理論計算葉片受風的荷載，以及發電機與葉片之間的匹配和設計。由若干個實驗進行驗證所預測的葉片模型受風荷載是否合適。在複合材料風力葉片結構設計方面，以 ANSYS 有限元軟體進行結構分析，並確認風力葉片的複合材料疊層方式及層數位置。在破壞分析上，以 1m 和 2.5m 的風力葉片分析破壞過程中，找出破壞位置、破壞模式、首層破壞的荷載，以及葉片極限破壞的荷載。對於 1m 的風力葉片分析破壞，其理論和實驗的極限破壞差異荷載小於 17%。而本文設計之 2.5m 的風力葉片極限破壞風速理論值為 131m/s。

Design and Failure Behavior of Composite Wind Blades

Student : Zheng-Ping Chen

Advisor : Dr. Tai-Yan Kam

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

This thesis studies the design methodology and failure behavior of composite sandwich wind blades. In the shape design of a composite sandwich wind blade, the appropriate blade shape which can produce sufficient twisting moment to rotate the generator is determined, the airfoil aerodynamic conditions are incorporated into the blade element theory to calculate the wind loads on the blade, and the matching between generator and wind blades are designed. Several tests have been performed to verify the suitability of the adopted models for predicting wind loads on the blade. In the structural design of the composite sandwich wind blade, the finite element code ANSYS is used to perform the structural analysis and determine the lamination arrangement of the blade. In the failure analysis, the progressive failure processes of the 1m and 2.5m long blades are determined to determine the failure locations, failure modes, first-ply failure loads, and collapse loads of the blades. For the 1m long blade, the difference between the theoretical and experimental collapse loads is less than 17%. The theoretical maximum wind speed for the 2.5m long blade is 131m/s.

誌謝

碩士兩年的求學過程中，充滿各式各樣的難忘回憶，對我的人生影響重大，這都要感謝指導教授金大仁博士的細心、耐心指導，不僅在研究領域上不吝指教，對於求學態度和處世道理更是諄諄教誨，更感謝讓我能夠順利完成學業及論文。

感謝家人、朋友、同學的陪伴，有你們的支持讓我在求學過程中充滿力量，順利完成學業。感謝博士班學長昌毅、于昇、崧哥、欣翰、宗鴻、宏明的傾囊相授，在學業和生活上的協助；感謝畢業學長致翔、秉達、琮鐘、恩寶、奕樵的教導，在我遇到困難時，提供寶貴的意見。

最後感謝同窗好友立武、浩翔、耀民、建順、志明兩年來的互相勉勵，在碩士生涯中不會孤單，一起努力完成學業；感謝學弟博聞、郁倫、達裕、竣維、峻嘉、柏毅、祖建讓我的生活充滿歡樂，使得求學過程更加豐富。並要謝謝一路上幫助過我的朋友們，僅以本文獻給所有關心我的人。

正平 2010.8 于交大

目錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	ii
誌謝	.....	iii
目錄	.....	iv
表目錄	.....	v
圖目錄	.....	vi
第一章	緒論.....	1
1-1	前言.....	1
1-2	文獻回顧.....	2
1-3	研究目的與方法.....	3
第二章	基本概念及應用理論.....	5
2-1	風力機種類.....	5
2-2	葉片設計目標尺寸理論.....	5
2-3	葉片幾何外型介紹.....	6
2-4	翼剖面形狀.....	6
2-5	葉片空氣動力學理論.....	7
2-5-1	葉片元素理論.....	7
2-5-2	二維翼型理論.....	7
2-6	正向性複合材料層板的破壞分析模式.....	9
2-6-1	正向性複合材料層板的應力-應變關係.....	9
2-6-2	疊層板極限破壞分析公式推導.....	11
2-6-3	疊層板極限破壞分析步驟.....	12
2-7	複合材料的破壞準則.....	12
2-7-1	最大應力破壞準則.....	13
第三章	設計風力葉片.....	14
3-1	空氣動力學公式驗證.....	14
3-1-1	文獻比對驗證.....	14
3-1-2	1m 風力葉片實驗驗證.....	14
3-2	水平式風力葉片設計.....	15
3-2-1	葉片設計目標.....	15
3-2-2	翼型氣動力分析.....	15
3-2-3	葉片外型設計.....	16
3-2-4	葉片匹配發電機.....	16
第四章	有限元素分析驗證.....	18
4-1	疊層複材懸臂梁純彎驗證.....	18

4-2	疊層複材風力葉片結構應力驗證.....	18
4-2-1	葉片靜態受風測試.....	19
4-3	疊層複材平板結構破壞驗證.....	20
4-4	1m 風力葉片結構破壞驗證.....	20
第五章	風力葉片結構設計.....	26
5-1	葉片結構材料選用.....	26
5-2	2.5m 葉片疊層設計.....	27
5-3	2.5m 葉片結構強度分析.....	27
第六章	結果與討論.....	29
6-1	葉片外形改變之影響.....	29
6-2	葉片結構設計之影響.....	29
第七章	結論與建議.....	30
7-1	結論.....	30
7-2	建議.....	31
第八章	未來研究方向.....	32
參考文獻	.....	33

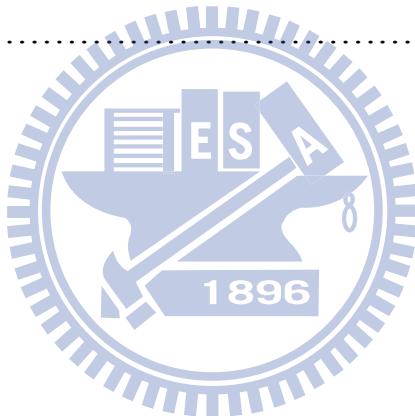


表 目 錄

表 1	S809 翼型外部座標點資料.....	36
表 2	5.03m 葉片不同風速下升力係數.....	37
表 3	5.03 m 葉片各截面弦長和扭角條件.....	38
表 4	1m 葉片 葉根和葉尖翼型外部座標.....	38
表 5	葉片風場量測.....	41
表 6	實驗與分析扭矩比較驗證.....	42
表 7	NACA 4418 翼型外部座標點資料.....	42
表 8	NACA4418 在 $Re=1\times10^5$ 最佳升阻力係數.....	43
表 9	2.5m 兩種葉片外形弦長尺寸.....	43
表 10	2.5 m 兩種葉片外形分析結果與規格.....	43
表 11	6KW 發電機與葉片的轉數、扭矩、風速匹配.....	43
表 12	1KW 發電機與葉片的轉數、扭矩、風速匹配.....	44
表 13	3KW 發電機性能.....	44
表 14	混合元素變形與彎曲應力結果.....	44
表 15	分析材料參數.....	45
表 16	葉片風場量測.....	45
表 17	葉片應變規量測.....	45
表 18	Graphite/Epoxy(Q-1115)的材料參數.....	46
表 19	首層破壞文獻與分析值比較驗證 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$	46
表 20	極限破壞強度文獻與分析驗證.....	46
表 21	玻璃纖維/樹脂的材料破壞強度.....	46
表 22	Whiffle tree 試驗的結果.....	47
表 23	首層破壞施力.....	47
表 24	極限破壞施力.....	47
表 25	葉片結構材料重量.....	48
表 26	鋁(6061-T6)材料強度.....	48
表 27	材料力學計算應力.....	48
表 28	葉片受均勻風速 60 m/s 變形量.....	49
表 29	2.5m 葉片首層破壞風速及位置.....	49
表 30	2.5m 葉片極限破壞風速.....	49

圖 目 錄

圖 1	風力發電機運轉原理示意圖.....	50
圖 2	風力葉片說明示意圖.....	50
圖 3	不同風力機型式 C_p 對 λ 曲線[24].....	51
圖 4	不同翼型外型之效率比較圖[24].....	51
圖 5	轉子固相比與葉尖速度比關係圖[25].....	52
圖 6	葉片翼型說明圖.....	52
圖 7	葉片元素理論示意圖.....	53
圖 8	翼型受風作用力分解圖.....	53
圖 9	纖維複材板的主座標系統.....	54
圖 10	複材疊層厚度堆疊示意圖.....	54
圖 11	疊層破壞 $F-u$ 關係示意圖.....	55
圖 12	複合材料纖維座標軸的取法.....	55
圖 13	S809 翼型外部座標點資料取法示意圖.....	56
圖 14	5.03m 葉片外形葉片.....	56
圖 15	驗證氣動力公式與文獻扭矩-風速圖.....	57
圖 16	室內測試.....	57
圖 17	NACA 4418 翼剖面.....	58
圖 18	NACA4418 翼型最佳攻角及升阻力係數圖.....	58
圖 19	2.5 m 兩種葉片外形.....	59
圖 20	2.5 m 兩種葉片外形不同風速扭矩圖.....	59
圖 21	2.5 m 風力葉片發電機性能扭矩-轉數圖.....	60
圖 22	懸臂梁 Ansys 建模.....	60
圖 23	懸臂梁變形示意圖.....	61
圖 24	50cm 長的保麗龍葉片模型.....	61
圖 25	玻璃纖維布複材貼覆方式.....	62
圖 26	葉片製作過程.....	62
圖 27	玻璃纖維複合材料葉片.....	63
圖 28	葉片靜態受風測試.....	63
圖 29	玻纖複材葉片應變規黏貼位置.....	64
圖 30	量測點 1 的應變值(放大倍率 10^6).....	64
圖 31	量測點 2 的應變值(放大倍率 10^6).....	65
圖 32	50cm 葉片 Ansys 建模示意圖.....	65
圖 33	薄板中央施力及邊界條件示意圖.....	66
圖 34	破壞過程 $F-u$ 關係圖.....	66
圖 35	1m 風力葉片 4-8 層(780g).....	67

圖 36	調整距離來模擬真實葉片的負載力(單位:m).....	67
圖 37	Whiffle tree 實體組裝.....	68
圖 38	Whiffle tree 實驗示意圖.....	68
圖 39	葉片玻纖布強化層數位置示意圖.....	69
圖 40	葉片接頭實驗破壞位置示意圖.....	69
圖 41	葉片破壞分析過程示意圖.....	70
圖 42	葉片接頭實驗破壞位置示意圖.....	70
圖 43	1 m 葉片接頭破壞狀況(單位:m).....	71
圖 44	第八層 XY 方向應力(單位:m).....	71
圖 45	1m 葉片分析+Y 方向破壞量測自由端 F-u 關係曲線.....	72
圖 46	金屬接頭尺寸示意圖.....	72
圖 47	葉片受均布風速壓力作用示意圖.....	73
圖 48	葉柄局部應力示意圖.....	73
圖 49	葉柄組裝接頭示意圖.....	74
圖 50	風力葉片受風施力方向示意圖.....	74
圖 51	2.5m 葉片 Ansys 建模示意圖.....	75
圖 52	葉片玻纖布強化層數位置示意圖.....	75
圖 53	均2層玻纖布葉片 y 方向應力示意圖.....	76
圖 54	4-8 層玻纖布葉片 y 方向應力示意圖.....	76
圖 55	2-4 層玻纖布葉片 y 方向應力示意圖.....	77
圖 56	4-8 層葉片於首層破壞第八層 sxz 方向應力.....	77
圖 57	4-8 層葉片-Z 方向極限破壞風速與位移關係圖.....	78
圖 58	葉片設計及發電機匹配流程圖.....	79

第一章 緒論

1-1 前言

隨著世界經濟蓬勃發展，世界各國對於能源的需求量亦逐年增加，近年來石化能源的短缺造成油價的上漲，世界各國均已意識到能源短缺的危機。石油能源供需失衡除了戰爭禍亂與市場炒作外，更加可以看到因石油儲量漸少而導致石油價格逐年爬升的現象，石油除了是許多材料的基礎外更是現代的主要能源。因此，除了提高能源之使用效率外，尋找新的替代能源更是刻不容緩的議題，其中風力發電又為替代能源之一，也是各國政府積極發展項目。

而風力發電的原理，是利用風力帶動風車轉子(rotor)旋轉，將風能轉換成旋轉機械能，再帶動發電機發電如圖1。風車轉子包括葉片以及用於固定葉片之軸轂(hub)。風力發電的過程中，主要是利用風車葉片的空氣動力特性產生升力帶動轉子旋轉，並透過軸系傳遞驅動發電機產生電能。風力葉片設計探討分為三部份，分別為葉尖、葉身、葉柄進行設計及改良如圖2。

因為風力葉片種類繁多，為了能設計合適風力葉片匹配發電機，本文利用翼型氣動力分析軟體輔助設計葉片，並以空氣動力學計算方式求得葉片性能或修改設計，並依葉片性能找尋發電機匹配。

為了清楚了解風力葉片在何種條件下的受力，會使風力葉片面臨

損壞，因此本文將依據設計的葉片外型、尺寸、複材疊層方向、複材疊層厚度及其材料性質，進行分析其葉片破壞強度，藉此可推斷葉片結構安全性是否足夠，也可提供製程人員改善複材疊層厚度及減重以增強葉片的可靠性和降低成本。

1-2 文獻回顧

關於風力機葉片氣動理論方面，Rankine 在 1865 年[1]用線性動量理論形成了螺旋槳流場的簡單模型。德國空氣動力科學家 Betz[2]於 1919 年推導出風力機風能利用系數所能達到的最大值，然而實際狀況下無法達到該理想情形，Glauert[3]考慮了 Schmitz 提出的渦流效應影響，把動量理論結合葉片元素理論來分析螺旋槳、風車周圍的流動並將 Rankine 一維流發展成為有旋轉作用的二維流。1974 年時 Wilson 和 Lissaman[4]將葉片元素動量理論應用於風力機，考慮葉尖損失效應並引用 Prandtl 推導的葉尖損失因子，形成了經典的葉片元素動量理論理論 (Blade Element Momentum, BEM)，此理論簡單且易於使用。從 Wilson 和 Lissaman 之後，葉片元素動量理論被廣泛用於風力機的設計[5]和性能計算[6]，並且用來確定風力機的動態載荷[7]，同時葉片元素動量理論還不斷地被進一步改進和完善[8]。設計風力葉片須依據翼型升阻力係數及攻角[9]，選定翼型以符合葉片目標性能。以 Roger 所提出設計風力葉片觀點，設計者可根據他所提出

觀點設計風力葉片及結構，以減少設計缺失及降低製造葉片成本[10]。本文根據風力葉片性能與發電機性能線圖比對，匹配適發電機[11]。Habali 和 Saleh 利用葉片元素法修正式設計 5m 葉片氣動力外形，以有限元素法分析葉片箱型梁結構決定設計形式，製程以複合材料模方式建構葉片模具並以手積成型方式製作葉片，最後建構測試實驗方式[12、13]。根據 Haugen 和 Skramstad 由葉片複材製程中，經測試複材在葉緣處及箱型梁交接處易造成表層複材先行破壞[14]，為了避免葉片因此降低其強度，可改變複材疊層方向及厚度[15、16]，以有限元素分析軟體[17]進行分析葉緣及箱型梁交接處的應力，由分析結果改變其箱型梁的設計以增強葉片強度。本文根據[18、19]如何應用有限元素理論找出平板各種破壞準則的首層破壞，當平板發生第二層以後的破壞，變形已經不在是線性及小變形假設，則須根據[20、21、22]所提出方法進行修正分析，讓分析貼近實驗值。

1-3 研究目的與方法

本文藉由空氣動力學理論計算方法來設計 2.5m 風力葉片，並估算葉片在不同風速下所能提供的扭矩性能，並與發電機性能作匹配，再建構葉片與發電機匹配流程方法，以供設計新的風力葉片當準則依據。葉片結構破壞分析方面，目前大部分文獻主要研究偏向於大型風力葉片局部探討其結構安全性，如葉緣複材層破壞、箱型梁接縫處及

彎摺處破壞等，鮮少針對小型風力葉片進行結構破壞探討，然而本文所採用的風力葉片結構非箱型梁設計，而是採用複合材料三明治層板的概念進行設計葉片結構，所以複合材料三明治層板的風力葉片破壞形式考量點將與箱型梁葉片不同，例如：箱型梁接縫處及彎折處破壞將不會發生在複合材料三明治層板的風力葉片上。在此本文將針對複合材料三明治層板的風力葉片最易破壞的柄部作研究，並以所設計的 2.5m 風力葉片進行結構破壞分析，使設計的葉片結構有足夠強度，以及訂出安全操作範圍。

本文主要利用風機性能曲線圖訂出設計目標值及預設葉片參數，在將預設之參數代入公式後得到初步葉片尺寸及理想轉數，並從風力葉片常用翼型選出合適之翼型，再將選定翼型以 Javafoil 軟體[23]分析翼型最佳攻角範圍及升阻力係數。因此可有已知之參數訂出葉片扭角，最後以葉片元素法及二維翼型理論計算初步葉片性能參數和訂定葉片外形，最後以列出葉片性能參數並繪成曲線圖匹配發電機；接續本文將利用 Ansys 有限元素分析軟體分析葉片破壞強度，找出該葉片可承受多大的風速，以利訂出安全操作範圍或改善強度。

第二章 基本概念及應用理論

2-1 風力機種類

風力機的分類有許多種，通常可以用容量大小、轉子配置方式、力學型態、旋轉速度等等做為分類的方式，本文採用轉子配置方式型態的不同做一個簡單的介紹，轉子不同的配置方式造成氣流的前進方向有所不同，可分成水平軸式及垂直軸式。

而風力發電機最重要的取決項目就是做功的效率，從圖 3 可以得知，三葉片設計具有較高的效率，其中 C_p 為風能吸收效率， λ 為葉尖速度比。

2-2 葉片設計目標尺寸理論

首先訂定風力發電機之發電功率目標，接續設定風機發電效率、風能吸收係數、風機運轉風速範圍、預設葉尖速度比及達到預設發電功率之風速，最後將上述之條件代入至 (2.1) 及 (2.2) 式中[26]求得葉片設計之最大旋轉半徑及達到預設發電量之轉數，其中葉尖速度比 λ 、發電效率 η 、空氣密度 ρ (單位 kg/m^3)、軸向風速 U (單位 m/s) 、風能吸收效率 C_p 、發電功率 P (單位 W) 、角速度 Ω (單位 rad/s) 。

$$R = r_{\max} = \sqrt{\frac{2P}{\eta\rho\pi U^3 C_p}} \quad (2.1)$$

$$\Omega = \frac{\lambda_{design} U_0}{r_{max}} \quad (2.2)$$

2-3 葉片幾何外型介紹

風機轉子吸收風能轉為動能的效率也受葉片外型影響，因此如何決定最佳之外形就成為設計者的重要工作之一。圖4為不同葉片外型之風能吸收係數比較，其中具有弦長變化之B與C，其效率顯然都比弦長維持固定的A還高。葉片外型主要包括兩部份，一為裝置角(pitch angle)分佈，另一為弦長C分佈。另外，有兩個跟裝置角與弦長有關之參數分別為扭轉角 θ_p 與轉子固相比S如圖5，其中修正葉尖損失因子F、葉尖損失因子f、軸向干擾因子a、葉片數N、葉片最大旋徑R（單位m），上述參數關係式為下列所示：

$$f = \frac{N}{2} \frac{R - r}{R \sin \phi} \quad (2.3)$$

$$F_r = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \quad (2.4)$$

$$C = \frac{8\pi a F (1 - a F)}{(1 - a)^2} \frac{\sin^2 \phi}{\cos \phi} \frac{r}{N C_L} \quad (2.5)$$

$$S = \frac{N R C}{\pi R^2} \quad (2.6)$$

2-4 翼剖面形狀

在所有葉片性能影響參數中，翼剖面形狀應該算是最重要的一個，也是風車葉片發展過程中，投入最多研究工作的項目。如果將葉片切成數段，從其橫剖面可發現整個葉片是由數個不同典型的升力翼

剖面所組成，而葉片的運動介質是空氣，因此葉片的設計就必須依靠空氣動力學理論，藉由詳細的性能設計與計算，以決定葉片剖面的形狀，請參考圖6。

翼剖面的幾何外型，決定了葉片所能產生的升力及阻力的大小，傳統的翼型為美國太空總署所命名的NACA系列，以4、5、或6位數字表達翼剖面的幾何外型，例如NACA 4415：

1.最大弧高為4%弦長

2.最大弧高發生位置距前緣40%弦長

3.厚度為15%的弦長

2-5 葉片空氣動力學理論

2-5-1 葉片元素理論(Blade Element Theory)



將葉片切割成許多的截面如圖7，將每個截面假設是二維翼剖面，然後根據其所相對於氣流的攻角來計算升阻力再疊加計算扭矩，此法由於忽略了葉尖渦流的三維效應。

2-5-2 二維翼型理論

根據二維翼型理論葉片一段翼剖面受風作用力的情形如圖8說明相互關係，其中 U 為軸向風速、 W 為相對風速（單位m/s）、 $r\Omega$ 為徑向風速、攻角 α 、傾斜角 φ 之間的關係式為：

$$W = \sqrt{(r\Omega)^2 + U_0^2} \quad (2.7)$$

因翼型形狀、攻角不同受風作用將有不同升力係數 c_L 、阻力係數 c_D ，再將升阻力係數代入 (2.8)、(2.9) 式得到該翼型剖面升阻力狀況，最後將阻力及升力投影至(發電機的主軸方向)與徑向(葉片旋轉方向)，得知翼型剖面受力和幾何之間關係式為下列所示：

$$dL = 0.5 \rho W^2 C c_L dr \quad (2.8)$$

$$dD = 0.5 \rho W^2 C c_D dr \quad (2.9)$$

$$\phi = \theta_P + \alpha \quad (2.10)$$

$$\phi = 90^\circ - \beta \quad (2.11)$$

$$\beta_i = \tan^{-1} \lambda_i \quad (2.12)$$

$$dT = 0.5 \rho W^2 C N (c_L \cos \phi + c_D \sin \phi) dr \quad (2.13)$$

$$dq = 0.5 \rho W^2 C N (c_L \sin \phi - c_D \cos \phi) dr \quad (2.14)$$

$$dQ = 0.5 \rho W^2 C N (c_L \sin \phi - c_D \cos \phi) r dr \quad (2.15)$$

其中升力 L(單位 N)、阻力 D(單位 N)、軸向推力 T(單位 N)、徑向推力 q(單位 N)、扭矩 Q(單位 N-m)，最後利用葉片元素法將各段翼型疊加得到整支葉片受力及扭矩狀況關係式為：

$$dr = \frac{R}{n} \quad (2.16)$$

$$T_{total} = \sum_{k=1}^n T_k = \sum_{i=1}^n 0.5 \rho N [W_i^2 C_i (c_{Li} \cos \phi_i + c_{Di} \sin \phi_i)]_i dr \quad (2.17)$$

$$q_{total} = \sum_{k=1}^n q_k = \sum_{i=1}^n 0.5 \rho N [W_i^2 C_i (c_{Li} \sin \phi_i - c_{Di} \cos \phi_i)]_i dr \quad (2.18)$$

$$Q_{total} = \sum_{k=1}^n Q_k = \sum_{i=1}^n 0.5 \rho N [W_i^2 C_i (c_{L_i} \sin \phi_i - c_{D_i} \cos \phi_i) r_i] dr \quad (2.19)$$

2-6 正向性複合材料層板的破壞分析模式

2-6-1 正向性複合材料層板的應力-應變關係

複合材料單層板之主軸座標定義如圖 9，根據平面應力的假設

$\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$ ；對正向性材料而言，應變關係為 $\varepsilon_3 = s_{13}\sigma_1 + s_{23}\sigma_2$ 、

$\tau_{23} = \tau_{31} = 0$ ，則應力-應變的關係可寫成如下式(2.20)。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [s] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{12} & s_{12} & 0 \\ s_{12} & s_{22} & 0 \\ 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

式中: $s_{11} = \frac{1}{E_{11}}$ 、 $s_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{21}}{E_{22}}$ 、 $s_{22} = \frac{1}{E_{22}}$ 、 $s_{66} = \frac{1}{G_{12}}$

又可轉換成(2.21)式：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

[Q]: lamina stiffness matrix

其中 $Q_{11} = \frac{s_{22}}{s_{11}s_{22} - s_{12}^2} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$ 、 $Q_{12} = Q_{21} = \frac{s_{12}}{s_{11}s_{22} - s_{12}^2} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$ 、
 $Q_{22} = \frac{s_{11}}{s_{11}s_{22} - s_{12}^2} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$ 、 $Q_{66} = \frac{1}{s_{66}} = G_{12}$ 、 $\varepsilon_{12} = \frac{\gamma_{12}}{2}$

複材板由中性層堆疊方式如圖 10，可推導上式其力與位移關係如

(2.22)、(2.23)、(2.24)、(2.25)、(2.26)式所示：

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz \quad (2.22)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (2.23)$$

$$[A] = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\bar{Q}]_k dz = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k t_k \quad (2.24)$$

$$[B] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k [z_k^2 - z_{k-1}^2] \quad (2.25)$$

$$[D] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k [z_k^2 - z_{k-1}^2] \quad (2.26)$$

其中 k :層數、 t_k :厚度、 $[A]$:拉伸勁度矩陣、 $[B]$:耦合勁度矩陣、 $[D]$:

彎曲勁度矩陣

經由上式關係可簡化成如下式：

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

若分析為對稱板 $[B]=0$ ，且只施純拉力，所以 $\{M\}=0$ ，則可求得 $N-\varepsilon$ 關係 $\{N\}=[A]\{\varepsilon^0\}$ ；發生材料符合破壞準則，判斷是基材或纖維破壞，而基材先破壞，就假設 $G_{12}=E_2=0$ ，則 $[Q]_k$ 可寫成下式(2.28)，若纖維和基材都破壞，則 $[Q]_k \rightarrow 0$ 。

$$[Q]_k \rightarrow [Q']_k = \begin{bmatrix} E_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$[Q']_k$:改變後的疊層材料勁度矩陣

已知 $[Q]_k$ 會隨著每層破壞降至為零，所以 $N-\varepsilon$ 關係式將會改變；

為了求得極限破壞施力，則須將每層破壞得到施力、材料性質、變形等，以疊加方式計算，才可以求得最後破壞總施力，其中推導式子如(2.29)、(2.30)、(2.31)式所示。

$$[A] \rightarrow [A'] \quad (2.29)$$

$$\{\Delta N\} = [A']\{\Delta \varepsilon\} \quad (2.30)$$

$$\{N_{\text{total}}\} = \{N\} + \{\Delta N\} \quad (2.31)$$

其中 $[A']$ ：材料破壞後的拉伸勁度矩陣、 $\{\Delta \varepsilon\}$ ：材料破壞後的變化應變值、 $\{\Delta N\}$ ：材料破壞後的變化施力

2-6-2 疊層板極限破壞分析公式推導

當考量整體疊層板的極限破壞，又可以將上一小節寫成 $F-u$ 關係

式探討如(2.32)式：

$$\{\bar{F}\} = [\bar{K}]\{\bar{u}\} \quad (2.32)$$

首層破壞至極限破壞過程中，則勁度矩陣會逐漸遞減，若達極限破壞上式可寫成(2.33)式。

$$\{\bar{F}_n\} = \{\bar{F}'_j\} + \{\Delta F_{j-1}\} = [\bar{K}'_{ij}]\{\bar{u}'_j\} + [K_{ij}]\{\Delta u_{j-1}\} ;$$

$$\{\Delta F_0\} = \{0\} \quad n=1 \sim a \quad j=1 \sim b \quad (2.33)$$

其中 \bar{K} ：勁度矩陣、 \bar{F} ：破壞施力、 \bar{u} ：位移、 \bar{K}' ：前一個勁度、 \bar{u}' ：前一個位移、 \bar{F}' ：前一個破壞施力

若將上述之公式以圖說明過程如圖 11 所示。

2-6-3 疊層板極限破壞分析步驟

- (1) 首先增加一小量負載 ΔF ，使負載由 F_{n-1} 成為 F_n ，如下： $F_n = F_{n-1} + \Delta F$ 。
- (2) 利用有限元素法作應力分析，可得積層板中任一點的應力值。
- (3) 將上述應力值帶入破壞準則中評估。
 - (a) 如果應力值符合破壞準則時，顯示此部份材料已遭破壞，繼續下一步驟。
 - (b) 如不符合則返回步驟1。
- (4) 如為積層板之初始首層破壞，則記錄此 F_1 ，繼續下一步驟。
- (5) 更改首層破壞處材料性質，並持續施力至下一層破壞，再記錄此時 ΔF 。
- (6) 如果材料損壞區域繼續向外擴張，返回步驟5，可重新分配應力，直至破壞邊界。
- (7) 若分析疊層極限破壞，必須考慮每一層材料損壞區域是否繼續向外擴張，進而更改破壞層材料性質，重新分配應力。



2-7 複合材料的破壞準則

依據複合材料的破壞準則，可區分為最大應力破壞準則、最大應變破壞準則等，但是本論文在此只用最大應力破壞準則進行判斷。上述各種破壞準則考慮在複合材料的對稱軸受力方向如圖 12 所示 x_1 、

y_1 、 z_1 。

2-7-1 最大應力破壞準則

複合材料的 x_1 方向上的極限強度以 X_T (拉力強度)、 X_C (壓力強度)

表示， y_1 方向上的極限強度以 Y_T 、 Y_C 表示，而 x_1y_1 方向上的極限剪斷

強度以 S 表示，當材料內的應力達到如下式(2.34)條件即為破壞：

$$\sigma_1 \leq X, \sigma_2 \leq Y, \tau_{12} \leq S \quad (2.34)$$

另在受力方向不限制在對稱軸方向，也就是受力方向與對稱軸夾 θ 角時，有必要計算出 σ_1 、 σ_2 、 τ_{12} 如下式(2.35)所示：

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\cos\theta\sin\theta & \cos\theta\sin\theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

第三章 設計風力葉片

3-1 空氣動力學公式驗證

3-1-1 文獻比對驗證

本文所列出之分析公式如 (2.8) ~ (2.19) 式為了驗證公式計算結果的正確性，所以本文在此以文獻[27]風力葉片分析實例的扭矩-風速圖與利用本文所列出的公式計算結果扭矩-風速圖比對其差異，其中選定分析翼型為 S809，翼型外部座標點資料如表 1 和圖 13、葉片升阻力係數變化如表 2、葉片半徑 5.03 m 如圖 14、葉片扭角和弦長變化如表 3、葉片數為 3，再依文獻所提供之參數代入公式得到扭矩-風速圖如圖 15，發現文獻與本文計算結果趨勢穩合。

3-1-2 1m 風力葉片實驗驗證

本實驗主要量測 1m 葉片配上 300W 三相交流發電機，葉片裝置角(Pitch angle) 40° 如圖 16，葉片根部與葉尖翼型外部座標點資料如表 4，實驗風速分布於葉片上如表 5，量測其轉數、電壓、電流，再將量測數據記錄下如表 6，其中誤差為風場不穩定性及使用葉片元素法疊加計算所造成，故所使用的公式計算是合理。

3-2 水平式風力葉片設計

3-2-1 葉片設計目標

本文設計風力葉片基本參數目標分別為發電機 3KW、葉片數 3、啟動風速為 3 m/s、設計葉尖速度比為 3.5、最大發電量風速為 8.5 m/s、葉片最大旋徑 2.5 m(根據 2.1 式求得)、風能吸收效率為 45%、發電機效率為 80%、空氣密度為 1.25 kg/m^3 ，選定翼型為 NACA 4418 點資料如表 7，翼剖面如圖 17。

3-2-2 翼型氣動力分析

本文設計的風力葉片，以 Javafoil 軟體分析翼型氣動力，並將分析 NACA4418 翼型參數及流場狀況列出找尋最佳值如圖 18，選定雷洛數(流體慣性力與黏滯力比值)為 1×10^5 (3m/s 以下為 $Re=1 \times 10^5$ 、3m/s~7m/s 為 $Re=2 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ 、7m/s~9m/s 為 $Re=6 \times 10^5 \sim 9 \times 10^5$ 、9m/s 以上為 $Re=1 \times 10^6$)作為依據參數如表 8，分析得到較好的攻角為 20° ，操作步驟如下：

1. 輸入翼型點資料模型→Flow field 模組分析翼型流場→Analyze it：觀察翼型流場狀況及壓力係數分布。
2. Polar 模組輸入分析雷洛數範圍→Surface Finish 狀況假設光滑→Analyze it：觀察該翼型最佳升阻力係數、攻角範圍，提供設計者決定葉片扭角設計及提供計算空氣動力學參數。

3-2-3 葉片外型設計

本文為了瞭解設計之葉片因改變外形，是否對葉片性能有所改善，所以本文在此利用所設計兩種 2.5m 葉片外形比較並觀察如圖 19，分析結果如表 9、10 和圖 20，並由結果得知葉片外形 2 提供扭矩較小，葉片外形 1 的旋轉速度較快，另外葉片之後所匹配發電機為低轉數較高的扭矩，故採用葉片外形 1。

3-2-4 葉片匹配發電機

本文利用 2.5 m 風力葉片的葉片元素法分析，以葉片裝置角固定 15 度進行計算，繪出 3、6、9m/s 風速下轉數-扭矩關係圖，最後利用發電機不同輸出瓦數下轉數-扭矩圖與葉片性能比較觀察，找出合適的發電機如圖 21。本文研究利愛 6KW 以及 1KW 發電機匹配 2.5m 葉片性能，葉片在裝置角 15 度、直接驅動時，匹配 6KW 以及 1KW 發電機觀察輸出功率如表 11、12，且由表 12 得知 6KW 發電機欲達 4KW 則風速須達 16m/s 以上，而低功率下風速至少要 3m/s，再觀察 1KW 發電機欲達額定發電量則風速須達 5m/s，比較兩種發電機後，在同樣發電量下 1KW 發電機所需風速比 6KW 發電機風速 8m/s 小，故選用與 1KW 發電機同樣低扭矩的發電機匹配葉片會比 6KW 發電機更合適；在此本文依據此兩種發電機性能，找出介於兩者之間符合葉片性能的發電機，設定額定發電量 3KW、最大發電量為 5KW、最

大轉數為 200rpm，其性能如表 13 所示。



第四章 有限元素分析驗證

隨著欲了解風力葉片複合材料疊層結構關係，本文在此使用 Ansys 進行分析，以殼元素 shell 99(shell element)模擬葉片玻璃纖維/樹脂疊層，以及使用實體元素 solid 95 來模擬葉片芯材發泡材 PS 和金屬接頭，藉此貼近分析風力葉片實體狀況。

4-1 疊層複材懸臂梁純彎驗證

由於複合材料的作用行為較為複雜，本文先以均勻等向性之材料，驗證分析之可行性，楊氏系數為 $2.05E+5$ Pa，蒲松比為 0.3，幾何形狀為 $[10 \times 0.2 \times 0.5m]$ 矩形斷面梁。為了驗證模擬貼近真實的葉片分析，殼元素與實體元素(共節點)在不同自由度下能否搭配使用分析，首先芯材選用 solid95(厚度為 0.498m)，而面層選用 shell99 設定一層(上下層各厚度為 1mm)，一端拘束，元素總數為 80 個如圖 22，另外在自由端施一力 102N，經驗證彎曲應力、變形皆與材料力學計算結果比較如表 14 和圖 23，且其誤差值在 5%左右，故此分析方法可行。

4-2 疊層複材風力葉片結構應力驗證

為了驗證有限元素分析的 2.5m 葉片結構設計強度是否合理，在此本文為了製作上的方便，將 2.5m 葉片縮小尺寸至 50cm 長，以 NC

雕刻機刻出其葉片模型如圖 24，並在上下表面貼一層十字針織玻纖複材 $[0^\circ/90^\circ]$ (在此本文為了簡化分析，以一層視為 $[0^\circ]$ 作分析，玻纖/樹脂厚度為 0.3mm)的保麗龍葉片，成品及製作方法如圖 25、26、27，以手積成型法抽真空製作，接著設計簡易測試平台，測試葉片靜態下受風的變形與應力，再根據實驗結果驗證分析。

4-2-1 葉片靜態受風測試

(1) 測試方法:

首先葉片調整至欲測試的裝置角(0 度)固定於測試平台上，以電風扇當風源如圖 28，測試幾種風速下的力學作用行為，在此本文以葉片黏貼應變規做測試，並於葉片上黏貼兩處應變規如圖 29 所示。

(2) Ansys 分析元素座標的設定:

由於纖維材料具有方向性，必須在各面層的網格中定義座標系統，使得在實體常數中設定的角度有所意義，依據面層定義座標系統分別設定葉片於翼展方向設定為 Z，葉片旋轉方向(翼弦方向)為 X，葉片表面的法向量方向為 Y，設定完成後即可產生有規律且整齊的元素。

(3) 實驗與分析驗證:

欲分析之材料參數如表 15，此時空氣密度假設為 1.225kg/m^3 ，測試與分析結果如下表 16、17 所示，量測點應變值如圖 30、31，葉片

Ansys 建模如圖 32 所示；當葉片受風情況時，因為風源的關係所量測風速會有小幅範圍變動，導致量測葉片晃動，以至於量測的應變值會跳動，為了驗證將取實驗量測應變平均範圍，得到分析與實驗誤差為 7.9%，所造成誤差值略大為量測風速的誤差和葉片受風變形晃動導致應變規量測誤差，所以分析結果為合理。

4-3 疊層複材平板結構破壞驗證

本文參考文獻[28]複材薄板破壞的例子，以驗證元素和破壞準則使用上的合理性，模型尺寸為 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 矩形板，疊層板層數為 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ ，每層厚度為 0.155 mm ，材料參數如表 18，拘束條件為四邊固定，並於模型中點處施一集中力至破壞如圖 33，以最大應力準則用 ansys 分析判斷首層破壞施力及極限破壞施力，使用元素為 shell99(10×10 mesh)，再與文獻比較實驗和理論值誤差如表 19、20，分析方法如 2-6-3 節所提的步驟，而首層破壞至極限破壞力與變形關係如圖 34，其所造成誤差原因為假設小變形進行分析、文獻的平板厚度較薄，以及拘束邊界導致變形縮小，但是力與變形關係曲線趨勢符合，故此分析驗證是合理。

4-4 1m 風力葉片結構破壞驗證

(1) 實驗方法：

本文為了驗證 2.5m 葉片分析破壞力量的準確性，以本實驗室已建構完成的 1m 葉片測試實驗結果與分析值比較如圖 35，以說明 2.5m 葉片分析結果合理性。

1m 葉片實驗方法以四個托梁(Saddle)及柔韌型連接器(Compliant linkage)的最佳距離來模擬真實葉片受到風力作用的負載力如圖 36，其真實葉片與 IEC(International Electrotechnical Commission)規範的自製夾治具之組裝如圖 37 所示。Whiffle tree 測試的夾治具是經 Solid Works 軟體詳細設計後開發出理想幾何形狀，材料，尺寸和固定方式，使其自製夾治具產生最小的形變量，並檢查是否有產生設計上干涉的問題。Whiffle tree 測試方法是利用 MTS-810 將葉片根部的接頭夾住如圖 38 所示，以循序漸進來放入鋼珠，直到葉片產生破壞再記錄負載。

(2) Ansys 模型建立步驟：

首先葉片建模的芯材和金屬接頭部分選用 solid95 元素，面層的玻纖/樹脂選用 shell99 元素，分析葉柄端拘束下邊界條件，並於葉片自由端面層施予荷重，實際操作首層破壞步驟如下說明。

前處理部份：

1. Preprocessor → Element type：選擇芯材 solid95，面層 shell99。
2. Preprocessor → Real constant：設定面層疊層數，包含排列角度、

厚度等等。

3. Preprocessor → Material Props → Material Models：設定各面層、芯材、金屬接頭的材料性質。
4. Preprocessor → Modeling：先使用3-D繪圖軟體建立模組，儲存成ANSYS可以讀取的格式（如Parasolid、IGS、Sat等），以ANSYS匯入葉片3-D立體模組。
5. Utility Menu → Work Plane → Local Coordinate Systems → Create Local CS：建立元素座標，由於纖維材料具有方向性，需先定義座標系統。
6. Preprocessor → Mesh Tool：選擇元素參數、材料性質、各元素之尺寸大小，並分割元素。
準備進行破壞應力分析：
7. Solution → Analysis Type → New Analysis：選擇分析型態，分析點選“Static”。
8. Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement：設定葉片葉柄為拘束固定。
9. Solution → Define Loads → Apply → Structural → Force/Moment：設定葉片自由端受力。
10. Solution → Solve → Current Ls：求解。
11. General Postproc → List Results：列出所有元素應力。

12. General Postproc→Element Table→Define Table→Add→By sequence num→NMISC, : 列出FC(破壞準則)、FCMX(failure index)、FCLN(破壞層)。

13. General Postproc →Plot Results →Contour Plot →Nodal Solu: 再選 Nodal Solution →Displacement vector sum , 圖示出各節點的位移。

以上步驟將可以得到葉片在葉柄拘束條件下的破壞應力及荷重值。

(3) 分析葉片破壞與實驗:

本文以上述的實驗方法，實驗 1m 葉片結構強度，而 1m 葉片製作法以 VARTM 方式製作，面層採用十字針織玻璃纖維布，每層厚度為 0.2mm，芯層為保麗龍 PS，將玻璃纖維布披覆於保麗龍上，結構強化位置如圖 39。

Ansys 分析設定，由於纖維材料具有方向性，必須在各面層的網格中定義坐標系統，使得在實體常數中設定的角度有所意義，依據面層定義座標系統分別設定葉片於翼展方向設定為 X，葉片旋轉方向（翼弦方向）為 Y，葉片表面的法向量方向為 Z，設定完成後即可產生有規律且整齊的元素。

首先葉片建模的芯材和金屬接頭部分選用 solid95 元素、面層的玻纖/樹脂選用 shell99 元素、邊界條件為葉柄拘束，施力條件採用 Whiffle tree 如圖 36 的施力位置，而施力以四個均一樣大小的集中力施於葉片表面上如圖 40，選用材料參數及破壞參數如表 15、21，以 2-6-3 節的

方法用Ansys軟體分析；葉片破壞分析簡易說明過程如圖41，首先分析出首層破壞位置、應力、葉尖的位移，且由2-6-1節的極限破壞分析方式得知，當首層破壞(failure index>1)後則是記錄此時元素負載、應力、位移的數值，之後更改元素破壞層的破壞方向的材料參數，再從新分析施加負載來得到下一層破壞，而這時新加的負載得到應力、位移的數值，則必須加上首層破壞所記錄的數值，再代入破壞準則判斷是否符合破壞，若不符合則繼續施加負載至破壞，而再下一層破壞分析則由上一層破壞位置來更改破壞方向的材料參數，再由上一層的破壞數值加上下一層分析的數值判斷是否破壞，並持續使用疊加破壞數值方式至得到極限破壞；本文在此分析再加上一個修正，當發生破壞時更改元素破壞材料參數後，並以破壞時的負載再從新代入分析得到應力、位移，再以這時得到的數值疊加下一層的數值進行判斷破壞如圖11的F-u關係圖，原因是為了使分析貼近實際破壞過程的連續性，來修正每層破壞連接處的破壞數值，以補充2-6-1節所未考慮該處材料強度已變弱了，所以分析最後極限破壞的結果數值將比較保守；上述為元素破壞分析的細部過程，而風力葉片極限破壞停止範圍，則根據分析過程中可知道破壞元素區域將會持續成長擴散，擴散方式將從首層破壞位置的元素開始，主要為葉柄圓環方向，直到破壞元素區域成長至約圓環240°左右，這時葉片將無法再承受任何的負

載；在此本文為了分析的便利性，只考慮首層破壞位置的周圍10mm範圍內繞葉柄一圈的元素進行分析。

由分析結果所得到首層破壞和極限破壞數據與Whiffle tree試驗的結果比較如表 22、23、24所示，而實驗破壞位置與分析首層破壞位置，分別為0.062m和0.067m其差異性並不大如圖42、43、44，再觀察首層破壞至極限破壞F-u關係由Ansys分析求得如圖45所示，再由表24得知分析施力+Y方向與實驗值的誤差為16.5%，其中的誤差，可能是由實驗時負載掛重導致晃動、分析考量建模方便將接頭簡化造成，以及假設小變形進行分析造成的誤差，所以此驗證分析是合理的。



第五章 風力葉片結構設計

5-1 葉片結構材料選用

(1) 結構減重：

本文選用葉片製程以VARTM作法進行製作，為了減輕葉片整體重量，在此以複合材料三明治層板的結構方式製作葉片，芯材選用材料為發泡材PS，以減輕大部分葉片的重量，外層則是以玻璃纖維布混合樹脂披覆芯材來強化結構，接頭部分則以金屬材料取代如圖46，由表25得知玻璃纖維布/樹脂披覆層(厚度為2mm)和接頭部分決定葉片整體重量，為了減重所以接頭選用鋁材，假設芯材不被壓縮下，將可以使葉片整體重量降至3.15 kg。

(2) 金屬接頭設計：

本文為了減輕葉片整體重量，將從接頭部分改良設計，可由上表得知接頭約2公斤左右(鋁 6061-T6)的重量，在此先Ansys分析原尺寸模型受均布風速85m/s作用於葉片狀況如圖47，輸入材料參數如表15，再由結果來改良設計，又得知螺絲固定圓盤處變形趨近於零，而且在組裝時將接上轉接頭，是必強度將會增強，由受力觀點切入觀察圖48應力分析結果得知，玻璃纖維布纏繞金屬管處將有最大應力，所以可以把圓盤厚度減至5mm以便加工，金屬管部分強度判斷則根據表26降伏強度進行設計，並以材料力學公式計算得到的中空管厚5mm

如表27，還不至於破壞，將可使接頭部分再減重0.46 kg，設計示意圖如圖49。

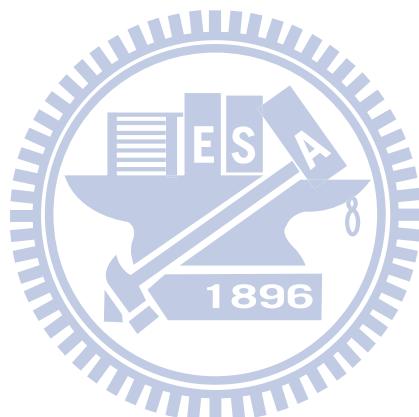
5-2 2.5m葉片疊層設計

本文為了設計葉片能在極端的環境下不被破壞，在此假設極端風速為 60 m/s 均布風壓作用在葉片表面上，而風力葉片迎風面受力為-Z 方向如圖 50，邊界條件為葉柄處拘束進行設計結構如圖 51；為了減輕重量及成本下，將找出較合理的玻璃纖維布披覆層數為多少，還有強化結構的位置，在此做了幾種假設位置的層數分別為 2(①②③)、2-4-8(③-②-①)、4-8(③-②①)、2-4(③-②①)層等如圖 52，葉片結構材料參數如表 15，其分析 y 方向應力結果如圖 53、54、55，從表 28 和不同疊層厚度應力分布圖狀況中得較佳的結構設計為 4-8 層。

5-3 2.5m葉片結構強度分析

本文根據上一節分析結果得知以4-8層的疊層厚度對風速60m/s 下有較小變形量，故以此疊層厚度為依據分析其破壞，其中材料破壞強度如表21所示。施力與拘束條件如5-2節的方式，分析結果如表29、30所示，破壞過程分析類似如4-4節的1m葉片破壞，破壞元素範圍為首層破壞位置的周圍10mm範圍內繞葉柄一圈的元素，分析破壞元素區域成長範圍與1m葉片相同繞圓環240°，發現首層破壞在均布風速

83m/s為柄部最外層受到剪力破壞如圖56，其極限破壞風速為131m/s，而葉片受風至完全破壞位移關係圖如圖57所示，以目前分析的迎風面葉片結構強度，已達成風速60m/s還不會首層破壞，所以葉片結構設計符合安全。



第六章 結果與討論

6-1 葉片外形改變之影響

本文以NACA 4418翼剖面進行設計葉片，由3-2-3節葉形外型表11和圖19得知葉片外形成鐮刀狀時，轉數將可以提高，但是扭矩值會降低如圖20，因為葉弦長變短導致推力變小，所以設計可以根據發電機的性能來對葉片外形改變得到合適扭矩。

6-2 葉片結構設計之影響

根據本文表28和圖52分析結果得到疊層位置及層數，以均兩層玻纖複材發現應力整體較大分布區域在葉柄至1.3m處如圖53，為了降低這些區域應力，本文將玻纖複材強化至1.6m處，直接改善葉片變形量及重新分配應力降低最大應力，若強化位置小於1.3m，將導致葉尖部分強度不足，使變形量增加；確認疊層位置後，則著重於降低局部應力及變形量，在此為了考量極端風速60m/s或以上的環境，則須對局部位置增加疊層厚度，再根據Ansys分析首層破壞和極限破壞找出破壞風速範圍如表29、30，以達到此風速下葉片有足夠結構強度，若破壞強度設計不足，將導致葉片無法承受瞬間陣風風速達60m/s以上，以至於葉片損壞。

第七章 結論與建議

7-1 結論

隨著環保意識抬頭和能源的危機，讓世界各國政府著手於開發再生能源，其中風力發電潛能大有可為，以台灣而言發展中小型尺寸的風力發電機，從技術面較容易進行切入，在此本文以設計中小型的風力發電機的葉片(2.5 m長)，來匹配合適的發電機。

由本文所選定翼型NACA 4418作為葉片設計參考，此翼型由Javafoil軟體分析得知在攻角 20° 有較佳的升阻力係數比，再經由葉片元素理論計算得知在裝置角為 15° 下葉片 $0^\circ\sim20^\circ$ 扭角有較佳的推力，補充一點使用葉片元素理論盡量將元素切的多一點，有助於減少分析誤差，再經由本文3-2節內容介紹不同葉片外形，也將得到不同葉片性能，當葉片外形越尖則葉片轉數也越高，而葉片外形較寬則轉數越慢，相反地葉片外形較寬則可以提供較高的扭矩，因為目前要搭配的發電機需要較高的初始扭矩，故選用葉片外形1。

結構設計部分，本文由5-2節疊層分析結果得知，葉片採用4-8層玻璃纖維布披覆方式，葉柄採用直徑140mm，可以得較小變形量及改善葉柄強度，接著分析首層破壞部分，得知需要風速83m/s會達成首層破壞，風速131m/s才會達成極限破壞，若以極端風速60m/s考量下，設計安全強度早超過預先設定風速60m/s的要求，故此葉片安全性足

夠。

7-2 建議

如何設計風力葉片本文根據空氣動力學公式、風機特性、發電機特性，作出設計葉片和發電機匹配流程圖如圖58，並根據上述流程圖及分析結果，提出幾項建議供參考：

- (1) 設計中小型葉片，建議以低啟動風速、低噪音，進行設計翼型及葉片外形。
- (2) 匹配發電機部分，發電機要具備低扭矩和低轉數的特性，以利合適水平式風力葉片的運轉特性。
- (3) 葉片結構設計強度破壞，要以極端風速考量下進行設計，建議以當地風場環境找出安全風速範圍設計葉片結構，以台灣為例，台灣比較常會受到強烈颱風(約50m/s左右)和東北季風的影響下，故本文以極端風速60m/s進行設計。

第八章 未來研究方向

本文研究設計2.5m風力葉片流場部分以葉片元素法計算葉片性能，其計算結果值都假設在風速和轉數理想狀況下求得，實際上葉片會因外形受風旋轉造渦流現象，在此本文未考慮其影響，可能需要利用計算流體力學軟體分析動態結果和風洞測試互相驗證，來得到與實際情形相符合結果。

在結構部分只分析葉片靜態受力破壞範圍，不考慮實際情況葉片會受到振動、疲勞、旋轉效應等影響，故為了得更準確的值，須將上述的影響考慮進去，以得到與實際情形相符合結果。



參考文獻

1. Rankine, W. J., “On the mechanical principles of the action of ship propellers”, Trans. Inst., Naval Arch.6, Pages 13-39, 1865.
2. Betz, A., “Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren”, Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, Volume 26, Pages 307-309, 1920.
3. Glauert, H., “Airplane Propellers Aerodynamic Theory”, Division L, Dover Publication, Inc., New York, Volume 4, 1943.
4. Wilson, R. E., and Lissaman, P. B. S., “Applied Aerodynamics of Wind Power Machines”, Oregon State University, Report NSF/RA/N-74113, 1974.
5. Rijs, R. P. P., Jacobs, P., Smulders, P. T., “Parameter study of the performance of slow running rotors”, J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn., Volume 39, Pages 95-103, 1992.
6. Neogi, S., “Modified flexible iterative model for the performance of slow speed wind turbines for water pumping”, Wind Eng., Volume 19, Pages 249-264, 1995.
7. Riziotis, V. A., Chaviaropoulos, P.K., Voutsinas, S.G., “Development of a state-of-the-art aeroelastic simulator for horizontal axis wind turbines. Part 2”, Aerodynamic aspects and application, Wind Eng., Volume 20, Pages 423-440, 1996.
8. Laino, D. J., Hansen, A. C., “Current efforts toward improved aerodynamic modeling using the Aerodyne subroutines”, Collection of ASME Wind Energy Symposium Technical Papers AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Pages 329-338, 2004.
9. Lanzafame, R., Messina, M., “Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory”, Renewable Energy, Volume 32, Pages 2291-2305, 2007.
10. Roger, S., “Blade design aspects”, Renewable Energy, Volume 16, Pages 1272-1277, 1999.

11. Eftichios, K., Kostas, K., “Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications”, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Volume 53, Pages 486-494, 2006.

12. Habali, S. M., Saleh, I. A., “Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics Part I: Design of the blade and root”, Energy Conversion and Management, Volume 41, Pages 249-280, 2000.

13. Habali, S. M., Saleh, I. A., “Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics: Part II: Manufacturing of the blade and rotor”, Energy Conversion and Management, Volume 41, Pages 281-298, 2000.

14. Skramstad, J. D., “Evaluation of hand lay-up and resin transfer molding in composite wind turbine blade manufacturing”, Ph. D. Thesis, Montana State University-Bozeman, 1999.

15. Lund, E., “Buckling topology optimization of laminated multi-material composite shell structures”, Composite Structures , Volume 91, Pages 158–167, 2009.

16. Lund, E., Stegmann, J., “On structural optimization of composite shell structures using a discrete constitutive parametrization”, Wind Energy , Volume 8, Pages 24–109, 2005.

17. Bechly, M. E., and Clausent, P. D., “Structural design of a composite wind turbine blade using finite element analysis”, Computer & Structures, Volume 63, Page 639-646, 1997.

18. Prusty , B. G., Ray, C., Satsangi , S. K., “First ply failure analysis of stiffened panels - a finite element approach”, Composite Structures, Volume 51, Pages 73-81, 2001.

19. Soden, P. D., Hinton, M. J., and Kaddour, A. S., “A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates” Composites Science and Technology, Volume 58 , Pages 1225-1254, 1998.

20. Marco, D. S., Ugo, I., and Michele, V. J. N., “Failure analysis of composite laminates under large deflection”, Composite Structures, Volume 40, Pages 239-255, 1998.

21. Reddy, Y. S. N., Dakshina Moorthy, C. M., and Reddy, J. N.,
“Non-linear progressive failure analysis of laminated composite plates”,
Non-linear mechanics, Volume 30, Pages 629-649, 1995.

22. Padhi, G. S., Shenoi, R. A. , Moy, R. A. ,and Hawkins, G. L.,
“Progressive failure and ultimate collapse of laminated composite
plates in bending”, Composite Structures, Volume 40, Pages 277-291,
1998.

23. 黃竣信與賴維祥,“傾轉機翼式無人飛機由懸停過渡至定翼之飛
行力學研究”,國立成功大學航太工程研究所碩士論文,2009.

24. 黃正利,陳正泰,“漫談風車氣動力技術”,機械工業 278 期, 2006.

25. 鄭泗滄與陳興加,“複合材料應用於風力葉片之研究”,國立成功大
學航太工程研究所碩士論文, 2007.

26. Vitale, A. J., Rossi, A. P., “Computational method for the design of
wind turbine blades”, Hydrogen Energy, Volume 33, Pages 3466-3470,
2008.

27. Giguère, P., and Selig, M. S., “Design of a Tapered and Twisted Blade
for the NRELCombined Experiment Rotor”, NREL/SR-500-26173,
1999.

28. Kam, T. Y., Sher, H. F., “Non-linear and first-ply failure analysis of
laminated composite cross-ply plates”, Composite Material, Volume 29,
Page 82-463, 1995.

圖表

表 1. S809 翼型外部座標點資料

Upper Surface		Lower Surface	
x/c	y/c	x/c	y/c
0.00037	0.00275	0.00140	-0.00498
0.00575	0.01166	0.00933	-0.01272
0.01626	0.02133	0.02321	-0.02162
0.03158	0.03136	0.04223	-0.03144
0.05147	0.04143	0.06579	-0.04199
0.07568	0.05132	0.09325	-0.05301
0.10390	0.06082	0.12397	-0.06408
0.13580	0.06972	0.15752	-0.07467
0.17103	0.07786	0.19362	-0.08447
0.20920	0.08505	0.23175	-0.09326
0.24987	0.09113	0.27129	-0.10060
0.29259	0.09594	0.31188	-0.10589
0.33689	0.09933	0.35328	-0.10866
0.38223	0.10109	0.39541	-0.10842
0.42809	0.10101	0.43832	-0.10484
0.47384	0.09843	0.48234	-0.09756
0.52005	0.09237	0.52837	-0.08697
0.56801	0.08356	0.57663	-0.07442
0.61747	0.07379	0.62649	-0.06112
0.66718	0.06403	0.67710	-0.04792
0.71606	0.05462	0.72752	-0.03558
0.76314	0.04578	0.77668	-0.02466
0.80756	0.03761	0.82348	-0.01559
0.84854	0.03017	0.86677	-0.00859
0.88537	0.02335	0.90545	-0.00370
0.91763	0.01694	0.93852	-0.00075
0.94523	0.01101	0.96509	0.00054
0.96799	0.00600	0.98446	0.00065
0.98528	0.00245	0.99612	0.00024
0.99623	0.00054	1.00000	0.00000
1.00000	0.00000	0.00000	0.00000

表 2. 5.03m 葉片不同風速下升力係數

Normalized Radial Distance (r/R)	Lift Coefficient Wind Speed 4.5 m/s	Lift Coefficient Wind Speed 6.7 m/s	Lift Coefficient Wind Speed 8.9 m/s	Lift Coefficient Wind Speed 11.2 m/s
0.03 and 0.08	0	0	0	0
0.13	0.2695	0.8077	1.1504	1.2206
0.18	0.056	0.7449	1.1505	1.2397
0.23	0.0221	0.6578	1.1342	1.2315
0.28	0.1352	0.7147	1.1341	1.2283
0.33	0.2243	0.7774	1.1249	1.2197
0.38	0.2773	0.7991	1.12	1.2112
0.43	0.3015	0.7937	1.1098	1.2027
0.48	0.3077	0.7729	1.1005	1.1938
0.53	0.3078	0.7488	1.0866	1.1849
0.58	0.308	0.7281	1.0787	1.1739
0.63	0.3083	0.7102	1.0651	1.1559
0.68	0.3093	0.6949	1.0443	1.1275
0.73	0.3117	0.6825	1.0255	1.0999
0.78	0.3165	0.6734	1.0062	1.0838
0.83	0.3224	0.6653	0.9861	1.0537
0.88	0.3255	0.6512	0.9636	1.02
0.93	0.3185	0.6193	0.9213	1.0137
0.98	0.2787	0.5311	0.7986	0.9935

表 3. 5.03 m 葉片各截面弦長和扭角條件

Radial Distance (m)	Chord(m)	Twist(degree)
0.000	Hub diameter	0.00
0.724	Hub diameter	0.00
0.838	To be computed	30.00
0.968	To be computed	27.59
1.258	0.737	20.05
1.522	0.710	14.04
1.798	0.682	9.67
2.075	0.654	6.75
2.352	0.626	4.84
2.628	0.598	3.48
2.905	0.570	2.40
3.181	0.542	1.51
3.458	0.514	0.76
3.735	0.486	0.09
3.772	0.483	0.00
4.011	0.459	-0.55
4.288	0.431	-1.11
4.565	0.403	-1.55
4.841	0.375	-1.84
5.030	0.356	-2.00

表 4. 1m 葉片葉根和葉尖翼型外部座標點資料

Root		Tip	
x	y	x	y
0	0	1	-0.16096
0.00307	0.008584	0.989723	-0.15623
0.008566	0.017366	0.978846	-0.15058
0.016867	0.025497	0.967343	-0.1441
0.026754	0.033659	0.955118	-0.13692
0.038288	0.041638	0.942029	-0.12919
0.05137	0.049419	0.928048	-0.121
0.065883	0.057055	0.913261	-0.11228
0.081763	0.064538	0.897618	-0.10315

0.098958	0.071847	0.881109	-0.09368
0.117413	0.078964	0.863983	-0.08368
0.137065	0.085868	0.84629	-0.07319
0.157856	0.09253	0.82768	-0.06261
0.179721	0.098915	0.808172	-0.05203
0.202589	0.104985	0.788161	-0.04115
0.226383	0.110704	0.767732	-0.02997
0.251015	0.116037	0.746749	-0.01876
0.276398	0.120928	0.725189	-0.00764
0.302431	0.125347	0.703093	0.003312
0.32901	0.129259	0.680542	0.014042
0.356024	0.132626	0.657602	0.024486
0.383357	0.135404	0.634278	0.034503
0.410889	0.137544	0.610634	0.04401
0.438497	0.139005	0.586784	0.052989
0.466051	0.139739	0.56282	0.061393
0.49342	0.139652	0.538831	0.06917
0.520659	0.138635	0.514672	0.076366
0.548034	0.136571	0.489959	0.083106
0.575423	0.133431	0.464762	0.089417
0.60268	0.129275	0.439205	0.095318
0.629669	0.124205	0.413397	0.100812
0.656275	0.11837	0.387446	0.105892
0.682404	0.111954	0.361455	0.11055
0.707965	0.105098	0.335535	0.114791
0.732877	0.097922	0.309786	0.118603
0.757066	0.090544	0.284304	0.12196
0.780466	0.083072	0.259185	0.124844
0.803012	0.075585	0.234531	0.127269
0.824645	0.068158	0.210436	0.129234
0.845316	0.060859	0.186986	0.130722
0.864979	0.053747	0.164269	0.131709
0.883583	0.046838	0.142365	0.13219
0.901061	0.040092	0.12136	0.132181
0.917368	0.033508	0.101329	0.131653
0.932484	0.027129	0.082358	0.130546
0.946431	0.021073	0.064545	0.128783

0.959248	0.015476	0.047988	0.126363
0.97098	0.010474	0.032818	0.123242
0.981682	0.006209	0.019253	0.119269
0.991411	0.002871	0.007896	0.114029
0.006381	-0.00642	0.006794	0.099852
0.016525	-0.01001	0.01903	0.094514
0.028151	-0.01238	0.03283	0.089821
0.040966	-0.01425	0.04773	0.085259
0.054881	-0.01597	0.063523	0.080542
0.069863	-0.01769	0.080141	0.075602
0.085892	-0.01942	0.097547	0.070443
0.102943	-0.02116	0.115733	0.065122
0.120986	-0.02292	0.134651	0.05964
0.139985	-0.02469	0.154226	0.053948
0.1599	-0.02647	0.174404	0.048044
0.180685	-0.02824	0.195148	0.041969
0.202288	-0.02998	0.216413	0.035753
0.224651	-0.03168	0.238147	0.02942
0.247709	-0.03332	0.260291	0.022982
0.271395	-0.03486	0.282778	0.016447
0.295632	-0.03627	0.305547	0.009834
0.320341	-0.03757	0.32855	0.003194
0.345436	-0.03872	0.351731	-0.00344
0.370834	-0.03955	0.375005	-0.01009
0.39644	-0.04004	0.398287	-0.01676
0.422147	-0.04067	0.421531	-0.02341
0.447858	-0.04151	0.444707	-0.02995
0.473492	-0.04133	0.467755	-0.03634
0.498913	-0.03952	0.49063	-0.04262
0.524414	-0.03714	0.513677	-0.04891
0.550155	-0.03494	0.537077	-0.05522
0.575994	-0.03248	0.560773	-0.06149
0.60179	-0.02943	0.584708	-0.06767
0.627451	-0.02599	0.608821	-0.07368
0.652896	-0.02235	0.63303	-0.0795
0.678035	-0.0186	0.657248	-0.08513
0.702782	-0.01481	0.681389	-0.09053

0.727058	-0.01108	0.70537	-0.0957
0.750788	-0.00751	0.729101	-0.10063
0.773903	-0.00419	0.752487	-0.10534
0.796333	-0.00122	0.775435	-0.10985
0.818012	0.001351	0.797851	-0.11421
0.838874	0.003474	0.819655	-0.11842
0.858855	0.005119	0.840777	-0.12248
0.877897	0.006274	0.861135	-0.12643
0.895943	0.006943	0.880633	-0.13038
0.912943	0.007147	0.899205	-0.13434
0.928855	0.006931	0.916813	-0.13827
0.943639	0.006351	0.93342	-0.14214
0.957271	0.005469	0.948985	-0.14596
0.969732	0.004351	0.963467	-0.14974
0.981013	0.003053	0.976829	-0.15348
0.991101	0.001576	0.98901	-0.15723
1	0	1	-0.16096



表5. 葉片風場量測(距離風源位置為4m)

	葉片區域位置(cm)	量測風速(m/s)
1	0~30(葉柄)	0~0.5
2	30~70	1.5~2.3
3	70~100(葉尖)	2.5~3.5

表6. 實驗與分析扭矩比較驗證

發電量(W)	轉數(rpm)	實驗扭矩(N-m)	分析扭矩(N-m)	誤差(%)
51.6	50~56	9.855	9.052	8.15

表 7. NACA 4418 翼型外部座標點資料

Upper Surface		Lower Surface	
x/c	y/c	x/c	y/c
1.0000	0.0019	0.0000	0.0000
0.9500	0.0189	0.0125	-0.0211
0.9000	0.0346	0.0250	-0.0299
0.8000	0.0622	0.0500	-0.0406
0.7000	0.0855	0.0750	-0.0467
0.6000	0.1044	0.1000	-0.0506
0.5000	0.1185	0.1500	-0.0549
0.4000	0.1270	0.2000	-0.0556
0.3000	0.1276	0.2500	-0.0549
0.2500	0.1240	0.3000	-0.0526
0.2000	0.1172	0.4000	-0.0470
0.1500	0.1066	0.5000	-0.0402
0.1000	0.0911	0.6000	-0.0324
0.0750	0.0806	0.7000	-0.0245
0.0500	0.0675	0.8000	-0.0167
0.0250	0.0500	0.9000	-0.0093
0.0125	0.0376	0.9500	-0.0055
0.0000	0.0000	1.0000	0.0019

表 8. NACA4418 在 $Re=1\times10^5$ 最佳升阻力係數

Reynolds number	c_L	c_D	α
1×10^5	1.81	0.20583	20^0

表 9. 2.5m 兩種葉片外形弦長尺寸

type	$C_{max}(\text{mm})$	$C_{min}(\text{mm})$
1	300	100
2	300	50

表 10. 2.5 m 兩種葉片外形分析結果與規格

type	Q_{max}	U	θ_P	λ	S
1	86.7	8	$20^0 \sim 0^0$	3.5	10
2	72.1	8	$20^0 \sim -5^0$	6	5

表 11. 6KW 發電機與葉片的轉數、扭矩、風速匹配

輸出功率(W)	轉數(rpm)	扭矩(N·m)	分析風速(m/s)
120	30	20.8	3
200	35	37.5	4
500	45	76.1	4.8
1000	55	143.2	8
1500	65	163	11
2000	80	210	12.8
3000	105	330	14.4
4000	120	467	>16

表 12. 1KW 發電機與葉片的轉數、扭矩、風速匹配

輸出功率(W)	轉數(rpm)	扭矩(N-m)	分析風速(m/s)
1000	180	53.05	5

表 13. 3KW 發電機性能(Maximum 5KW)

輸出功率(W)	轉數(rpm)	扭矩(N-m)	需求風速(m/s)
1000	40	35	4
2000	80	100	6
3000	120	170	9
4000	160	250	10
5000	200	300	14

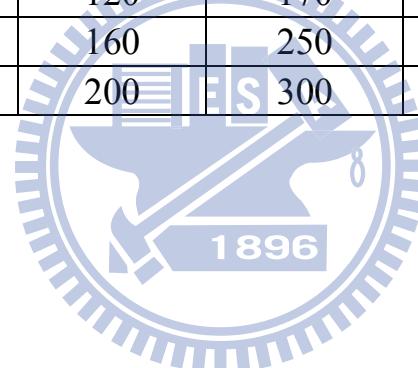


表14. 混合元素變形與彎曲應力結果

	σ_{\max} (MPa)	δ (m)	Load(N)
混合Solid95和Shell99	0.121	78.845	102
材料力學	0.1224	79.6	102

表 15. 分析材料參數

單位 (MKS)	MAT=1	MAT=2	MAT=3	MAT=4
	玻璃纖維/樹酯	PS (聚苯乙烯) 發泡	純樹脂	鋁(6061-T6)
E_x	3.648E+10			
E_y	3.648E+10	1.000E+07	3.226E+09	6.89E+10
E_z	3.648E+10			
ν_x	0.212			
ν_y	0.212	0.3748	0.375	0.35
ν_z	0.212			
G_{xy}	2.637E+09			
G_{yz}	2.637E+09			
G_{xz}	2.637E+09			

表 16. 葉片風場量測(風源距離平台為 0.3 m)

	距葉片柄部位置區(cm)	風速(m/s)	壓力(Pa)
1	0~10(葉柄)	3	5.513
2	10~17	5	15.31
3	17~26	5	15.31
4	26~36	3.3	6.67
5	36~50(葉尖)	3	5.513

表 17. 葉片應變規量測(單軸向 風源距離平台為 0.3 m)

位置	實驗值	分析值	誤差%
1	0.418 e-4	0.454 e-4	7.9
2	0.334 e-4	0.358 e-4	6.7

表 18. Graphite/Epoxy(Q-1115)的材料參數

Material Constants		Strengths	
$E_1=142.5$ GPa		$X_T=2193.5$ MPa	$X_{\varepsilon T}=0.015393$
$E_2=9.79$ GPa		$X_C=2457$ MPa	$X_{\varepsilon C}=0.017242$
$E_3=9.79$ GPa		$Y_T=Z_T=41.3$ MPa	$Y_{\varepsilon T}=Z_{\varepsilon T}=0.004128$
$G_{12}=G_{13}=4.72$ GPa		$Y_C=Z_C=206.8$ MPa	$Y_{\varepsilon C}=Z_{\varepsilon C}=0.021124$
$G_{23}=1.192$ GPa		$R=61.28$ MPa	$R_{\varepsilon}=0.051409$
$\nu_{12}=\nu_{13}=0.27$		$S=78.78$ MPa	$S_{\varepsilon}=0.016691$
$\nu_{23}=0.25$		$T=78.78$ MPa	$T_{\varepsilon}=0.016691$

表 19. 首層破壞文獻與分析值比較驗證 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$

Failure criterion	a/h	Experimental failure load $L(N)$	Theoretical failure load $F_1(N)$	Ansys $F_2(N)$	Difference	
					$\frac{|F_i - L|}{L} \%$	F_i
Maximum stress	80.64	317.74	290.12	268	8.69	15.7

表 20. 極限破壞強度文獻與分析驗證

Laminates	Experimental strength (N)	Analytical strength			
		Theoretical strength	Error(%)	Ansys (N)	Error(%)
$[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$	2675	2350	6.78	2263	15.4

表 21. 玻璃纖維/樹脂的材料破壞強度

X_T	X_C	Y_T	Y_C	Z_T	Z_C	S	R
576.44 MPa	601.2 MPa	576.44 MPa	601.2 MPa	576.44 MPa	601.2 MPa	64 MPa	30.17 MPa

表 22. Whiffle tree 試驗的結果

製程	葉片重量(g)	承受最大負載(kg)	破壞模式
手積層+ RTM	780	126(夾具 15kg)	接頭破裂

表 23. 首層破壞施力

Failure criterion	Load direction	Ansys F(N)	Laminate number
Maximum stress	+Y	480	8

表 24. 極限破壞施力

Failure criterion	Load direction	Experimental failure load L(N)	Ansys F(N)	Error(%)
Maximum stress	+Y	1236.06	1032	16.5

表 25. 葉片結構材料重量

\\	材質	密度(kg/m ³)	部位	重量(kg)	
				0.21	0.19(2mm)
1	PS	13.62	芯材	0.21	0.19(2mm)
2	樹脂	1170		18	2.19(2mm)
3	玻璃纖維布/樹脂	1870	披覆外層	1.7 (2mm)	
4	鋁(6061-T6)	2702	接頭	1.45	
5	碳鋼	7850	接頭	4.21	

表 26. 鋁(6061-T6)材料強度

\\	拉應力 Mpa	壓應力 Mpa	剪應力 Mpa
降伏強度	255	255	131
極限強度	290	290	186

表 27. 材料力學計算應力

\\	中空管壁厚度 (mm)	σ (MPa)	τ (MPa)
1	5	31.1	1.89
2	2	79.7	4.95

表 28. 葉片受均勻風速 60 m/s 變形量

疊層方式	變形量(m)
4-8	0.128
2-4	0.256
2	0.468

表29. 2.5m葉片首層破壞風速及位置(4-8層)

應用破壞準則	受風方向	風速(m/s)	首層破壞層	首層破壞位置(m)
最大應力破壞準則	-Z	83	8	0.15

表30. 2.5m葉片極限破壞風速(4-8層)

受風方向	破壞風速(m/s)	壓力(Pa)
-Z	131	10511.1

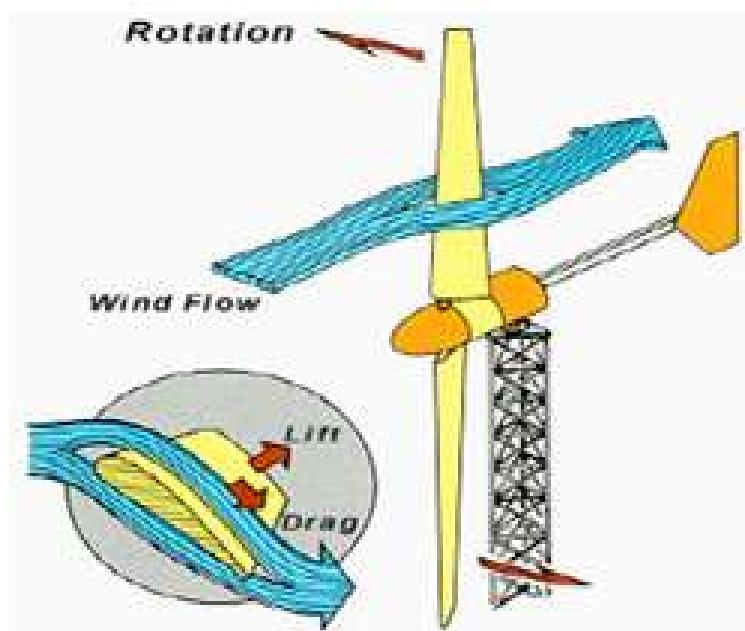


圖 1. 風力發電機運轉原理示意圖



圖 2. 風力葉片說明示意圖

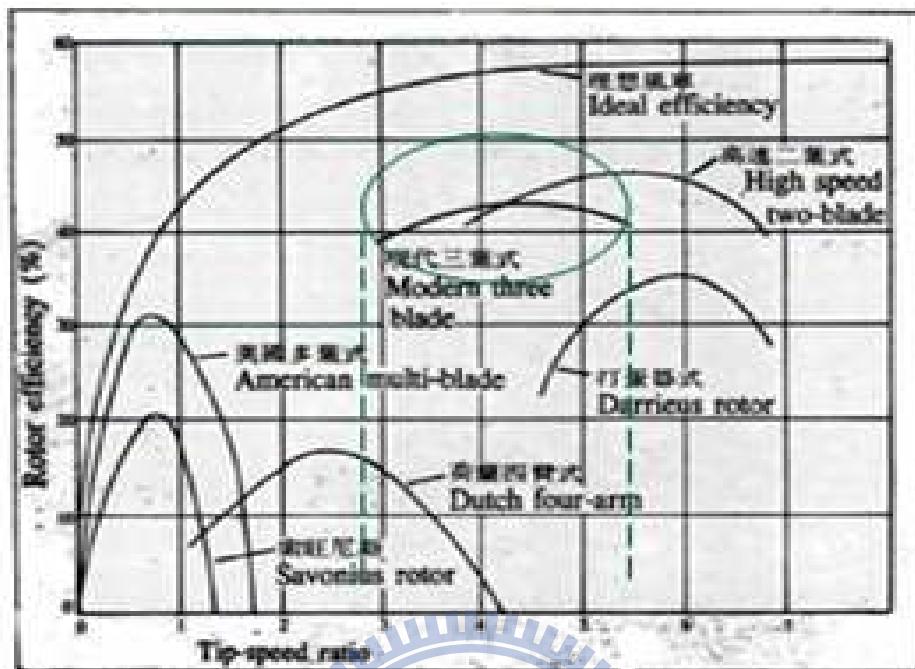


圖 3. 不同風力機型式 C_p 對 λ 曲線[24]

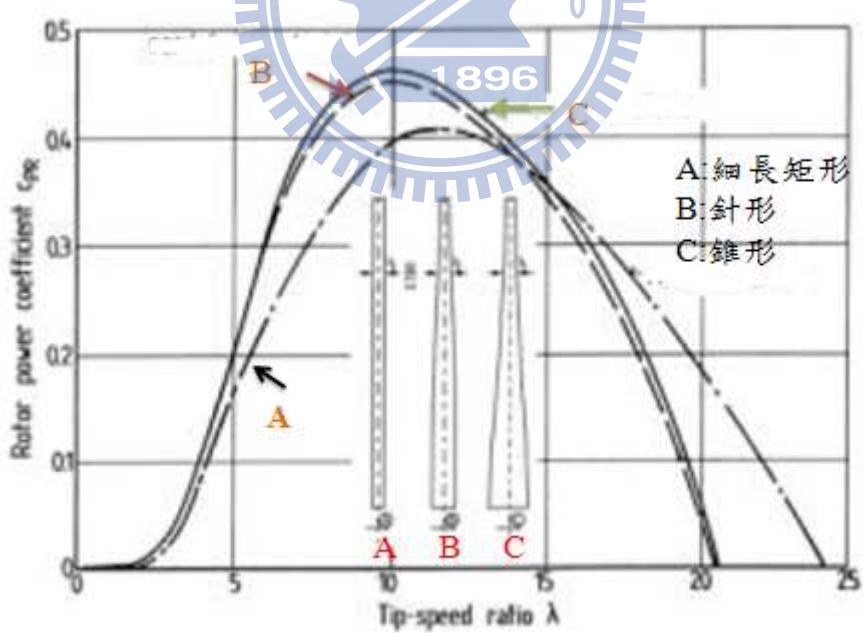


圖 4. 不同翼型外型之效率比較圖[24]

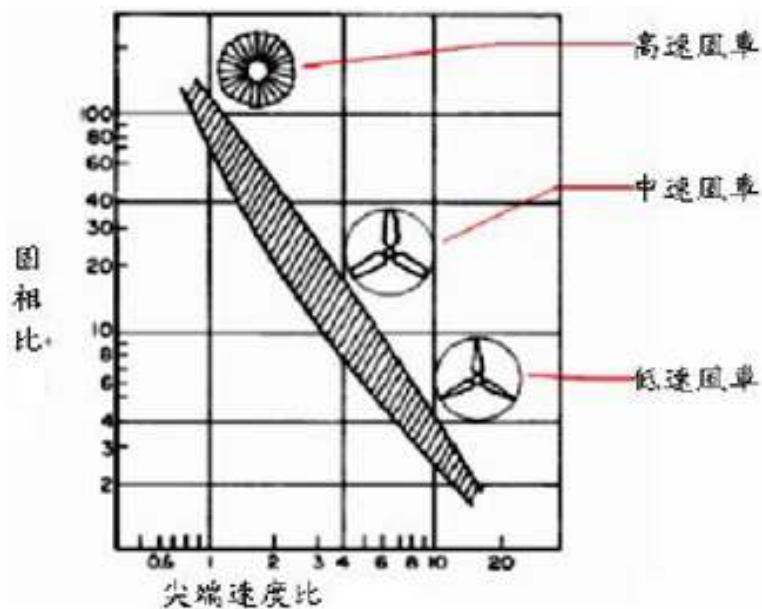


圖5. 轉子固相比與葉尖速度比關係圖[25]

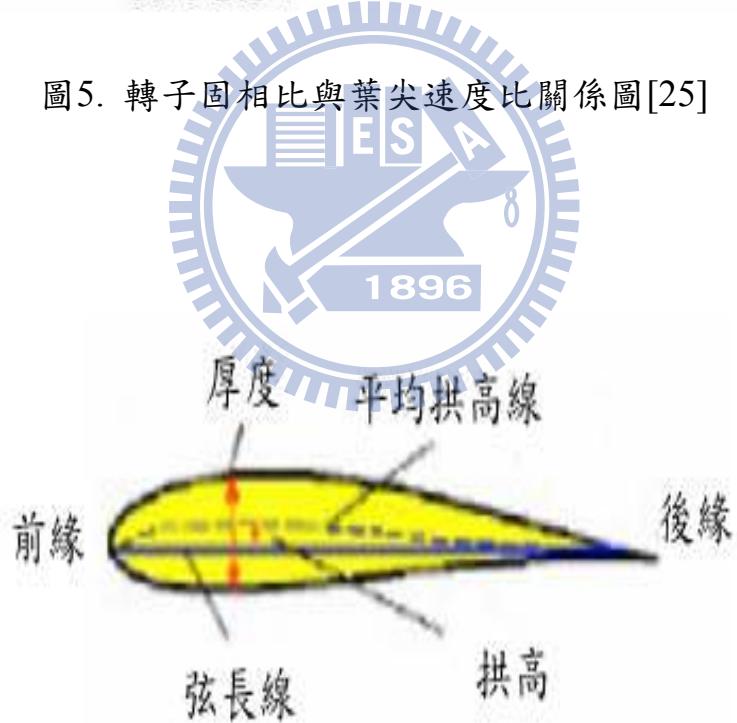


圖6. 葉片翼型說明圖

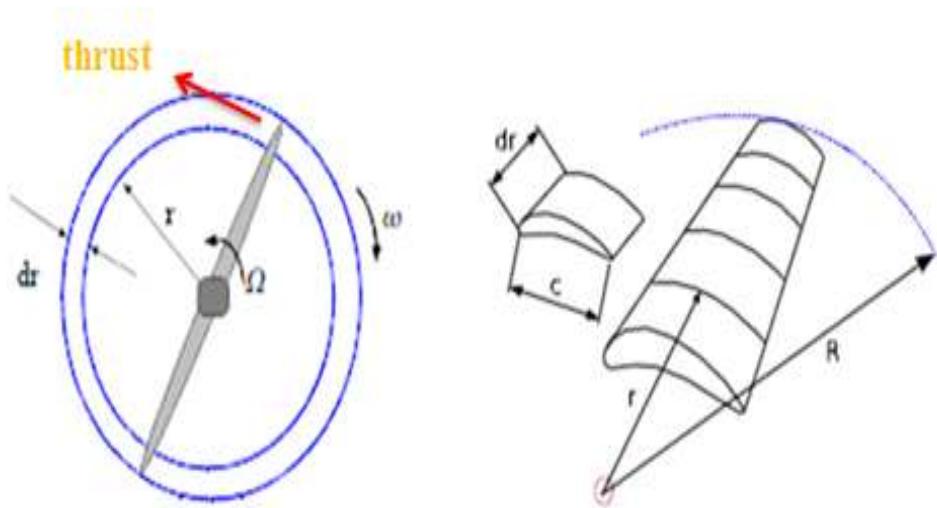


圖 7. 葉片元素理論示意圖

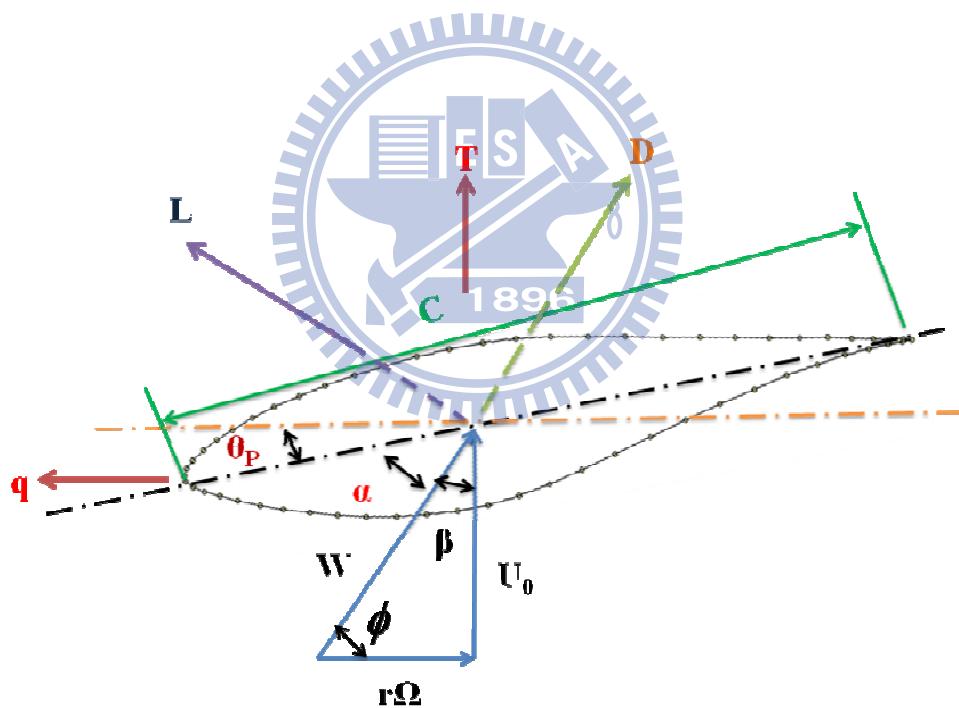


圖8. 翼型受風作用力分解圖

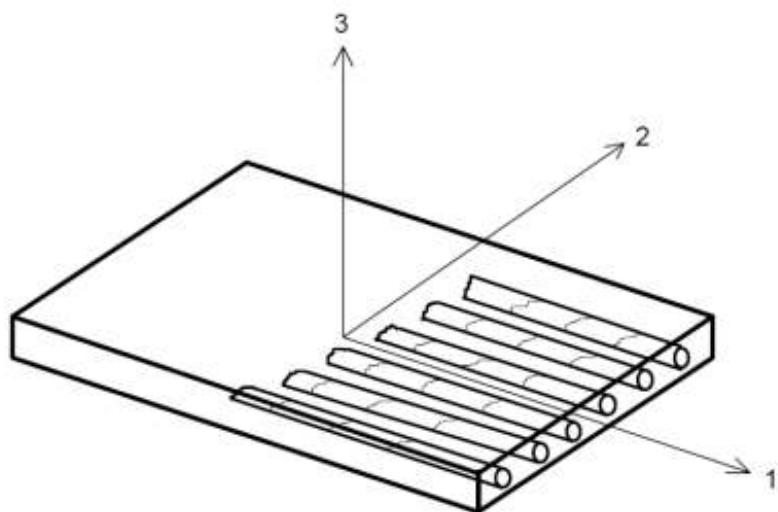


圖 9. 纖維複材板的主座標系統

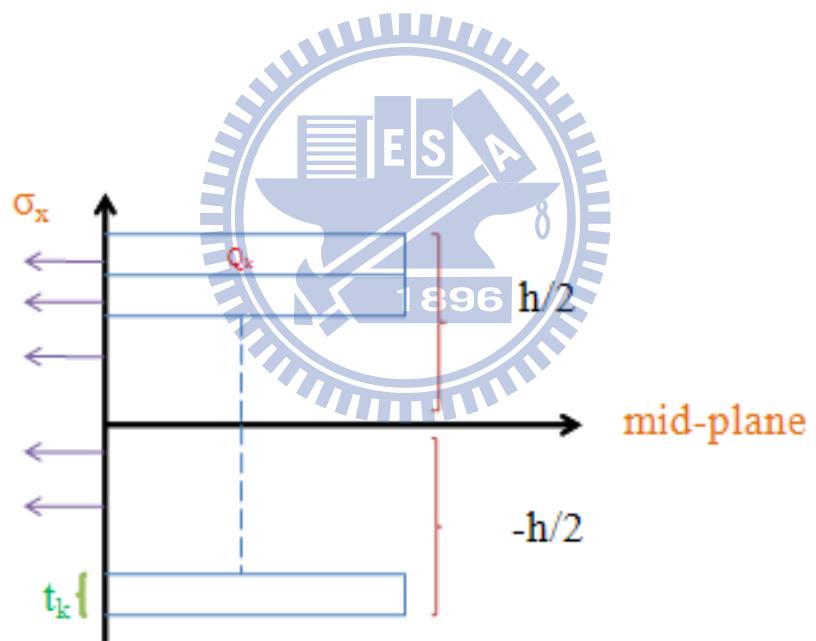


圖 10. 複材疊層厚度堆疊示意圖

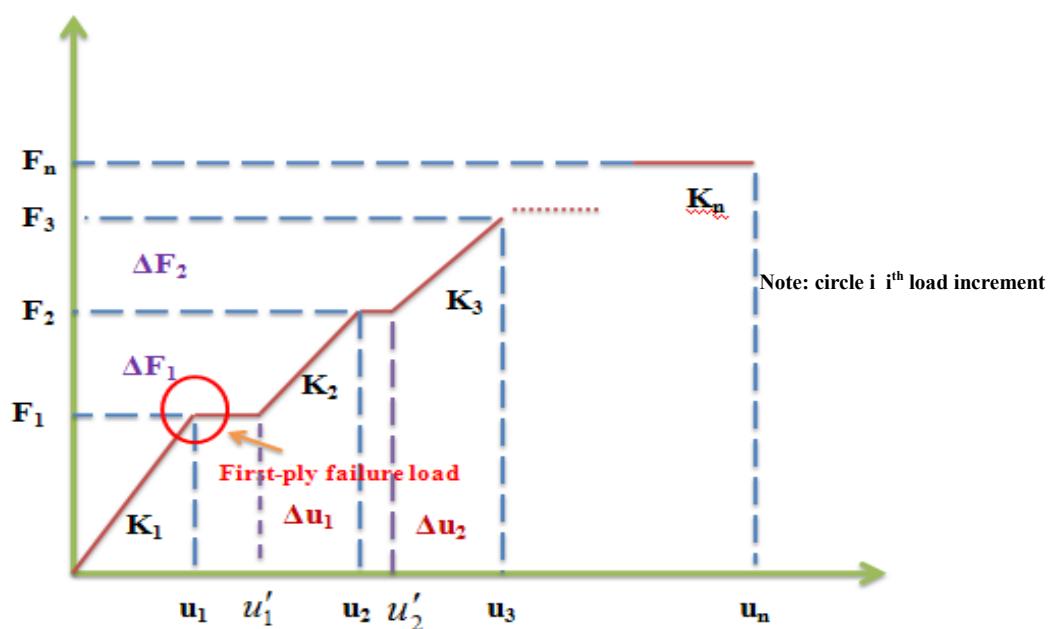


圖 11. 疊層破壞 F-u 關係示意圖

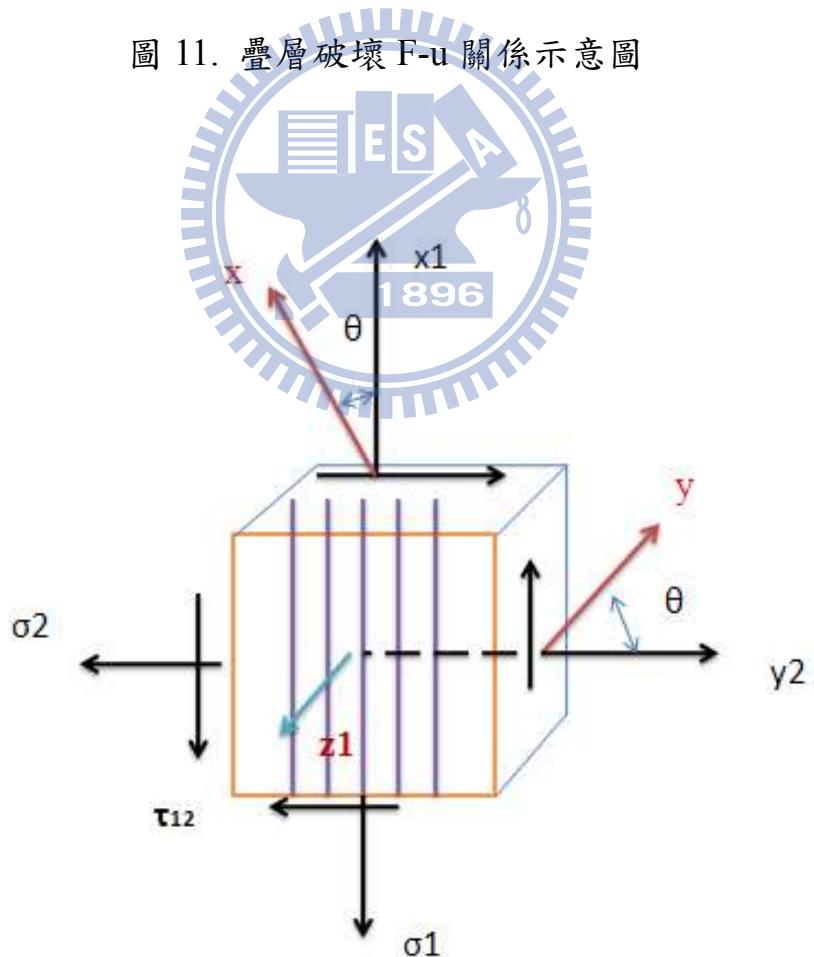


圖 12. 複合材料纖維座標軸的取法

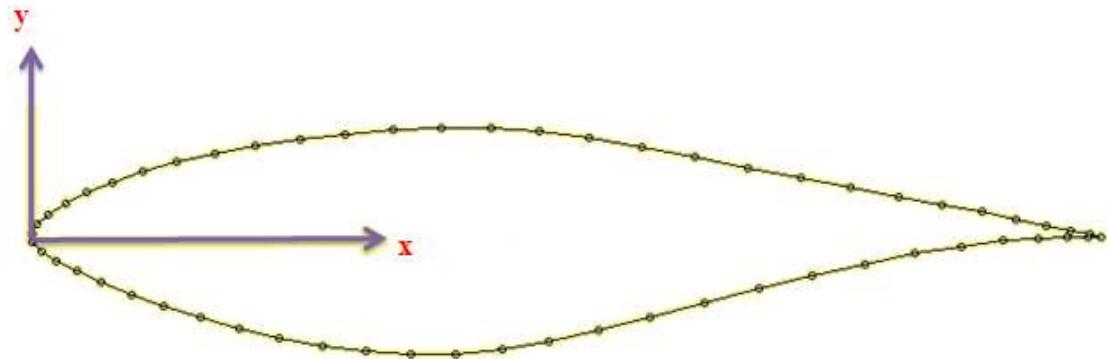


圖 13. S809 翼型外部座標點資料取法示意圖

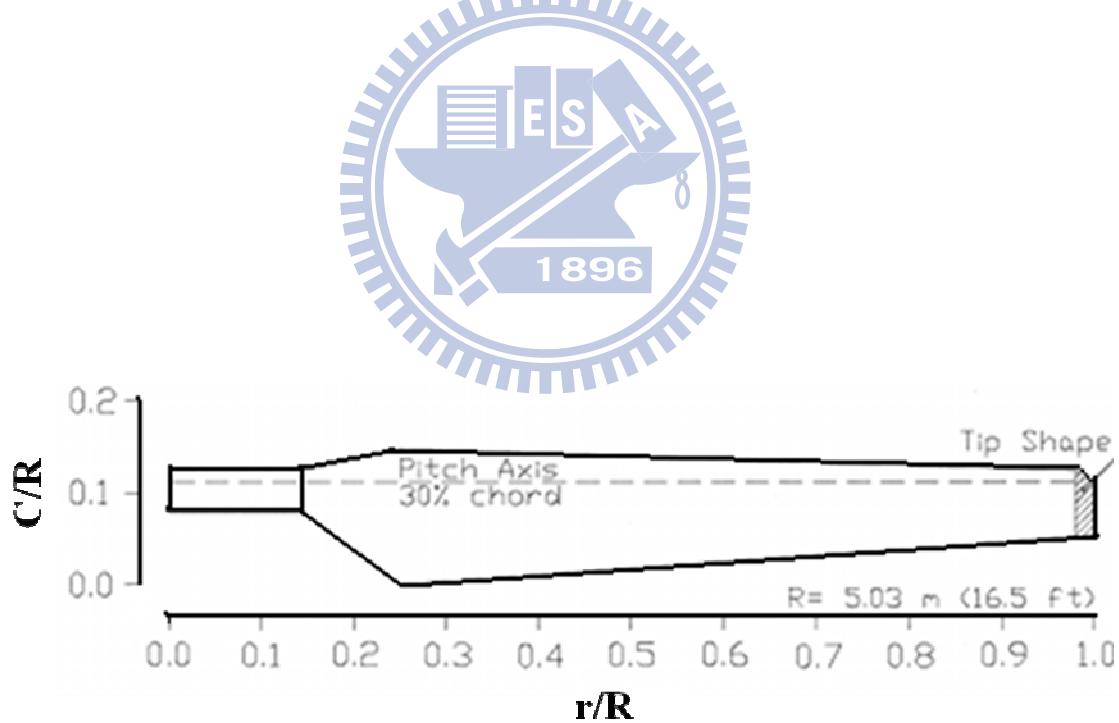


圖 14. 5.03m 葉片外形[27]

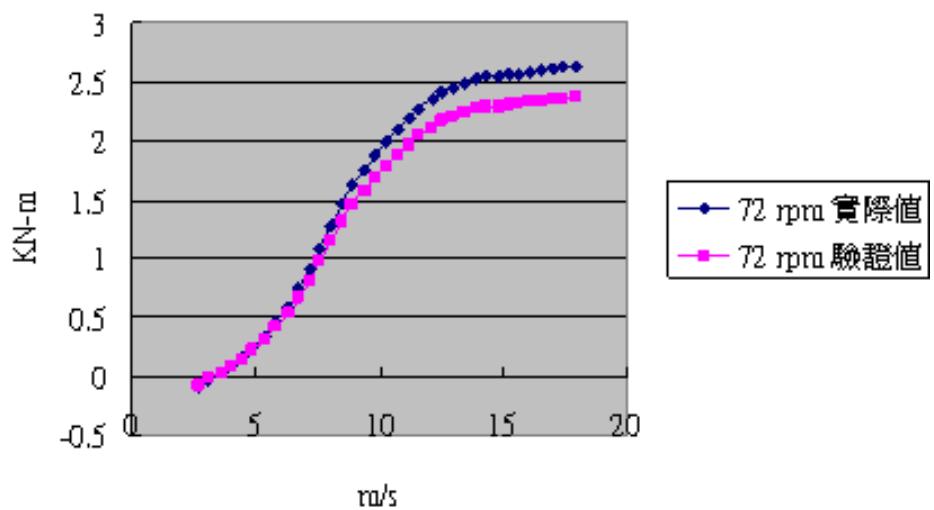


圖 15. 驗證氣動力公式與文獻扭矩-風速圖[27]



圖 16. 室內測試

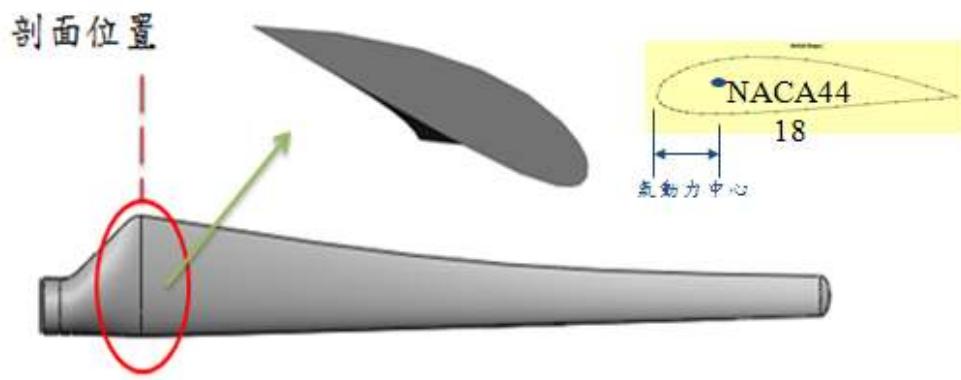


圖 17. NACA 4418 翼剖面

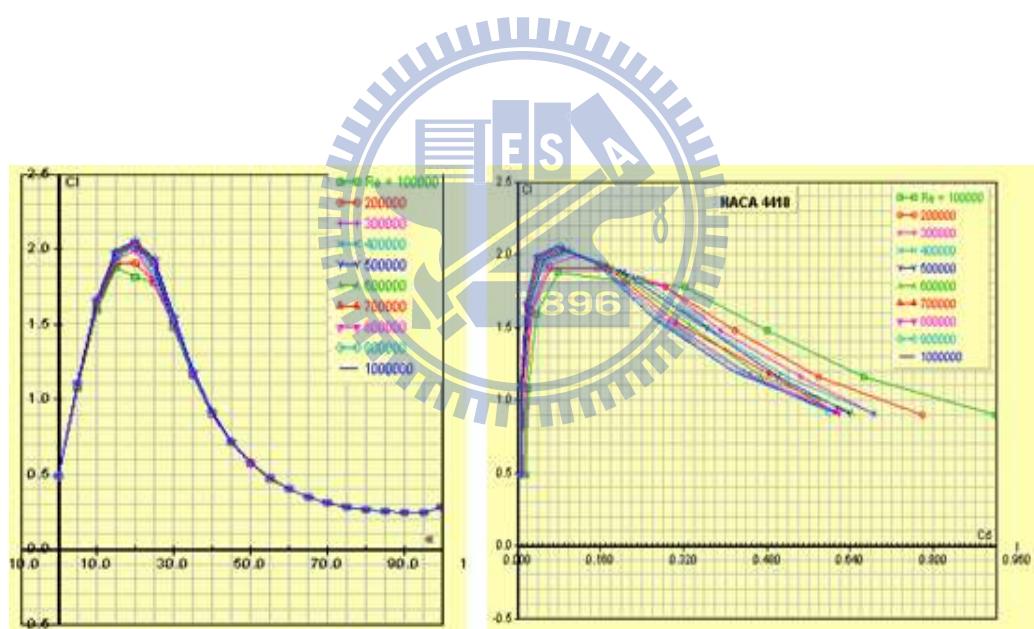


圖 18. NACA4418 翼型最佳攻角及升阻力係數圖

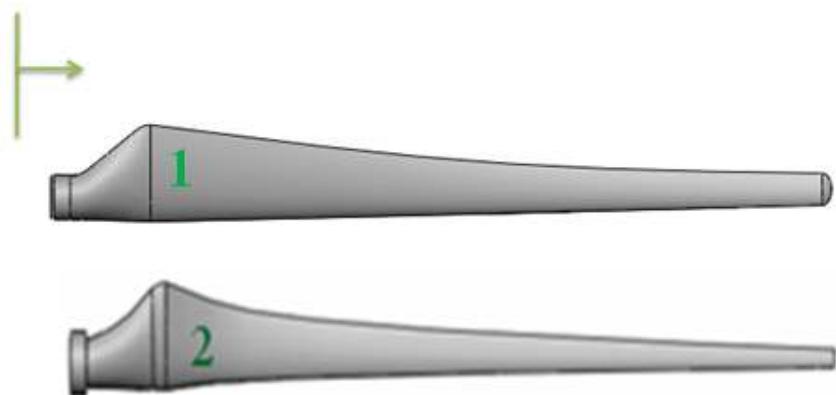


圖 19. 2.5 m 兩種葉片外形

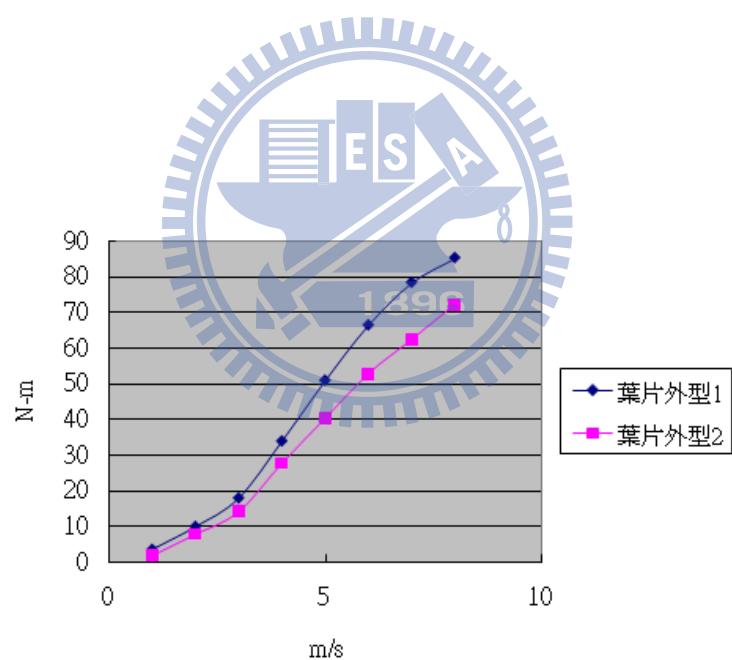


圖 20. 2.5 m 兩種葉片外形不同風速扭矩圖

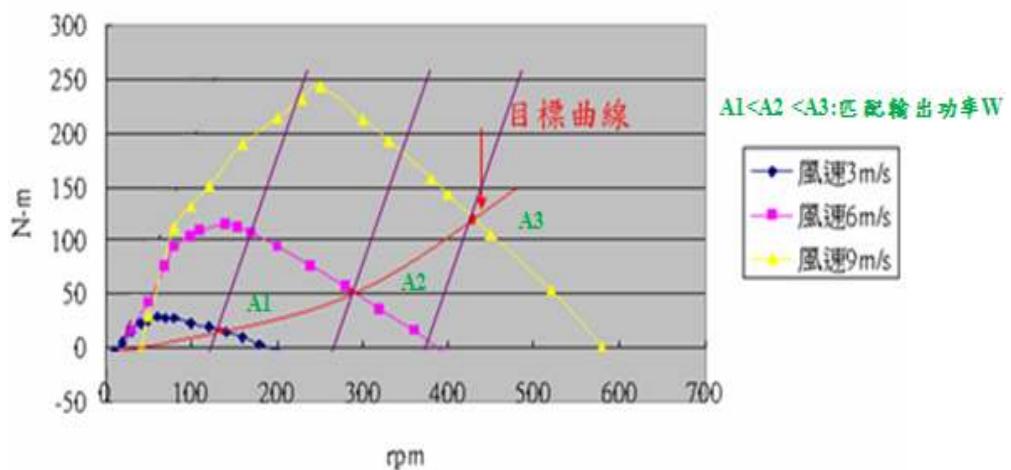


圖 21. 2.5 m 風力葉片發電機性能扭矩-轉數圖

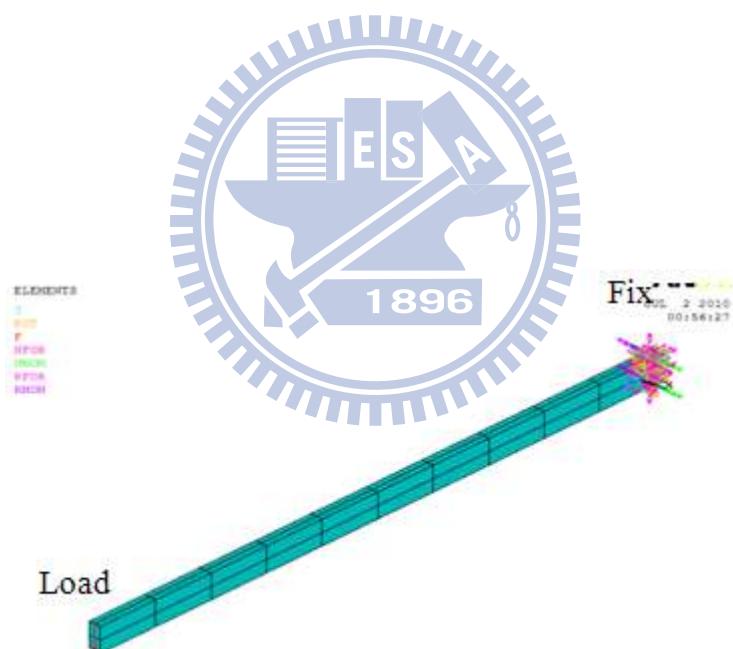


圖 22. 懸臂梁 Ansys 建模

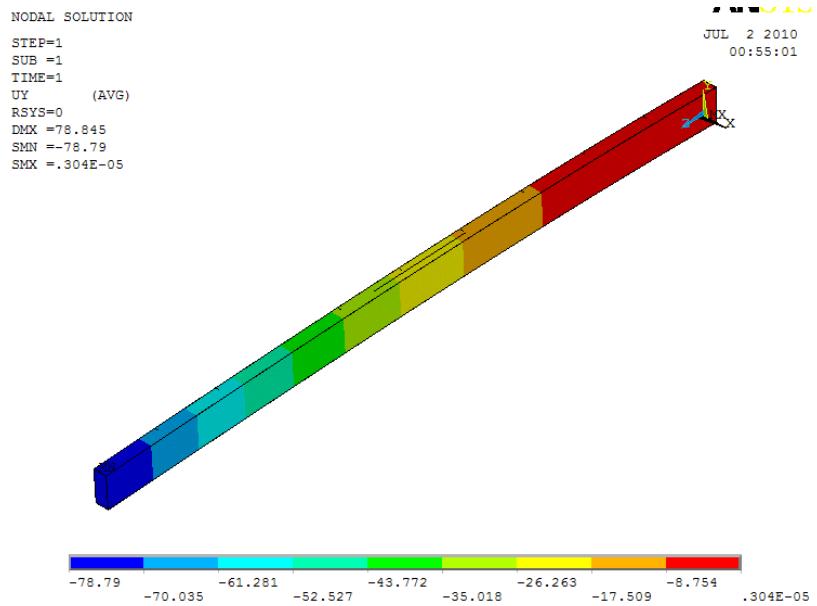


圖 23. 懸臂梁變形示意圖



圖 24. 50cm 長的保麗龍葉片模型



圖 25. 玻璃纖維布複材貼覆方式



圖 26. 葉片製作過程



圖 27. 玻璃纖維複合材料葉片



圖 28. 葉片靜態受風測試

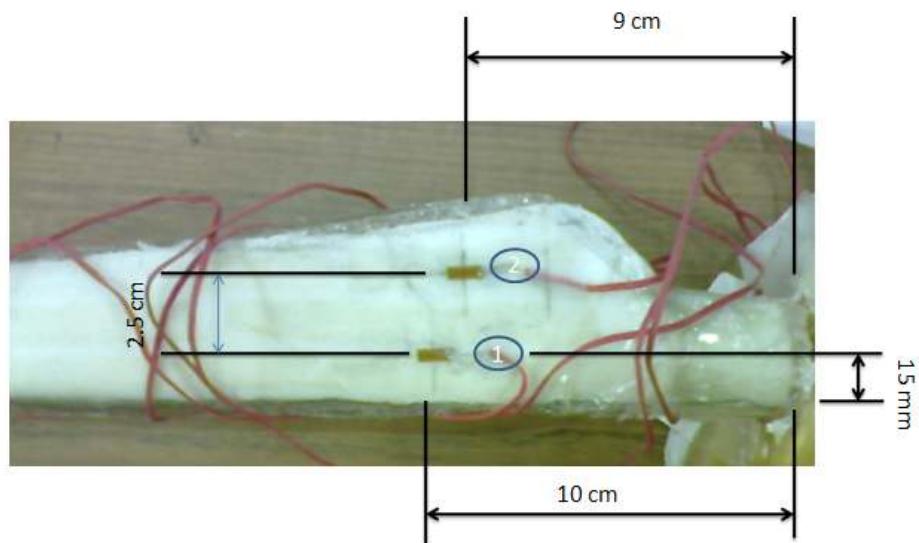


圖 29. 玻纖複材葉片應變規黏貼位置

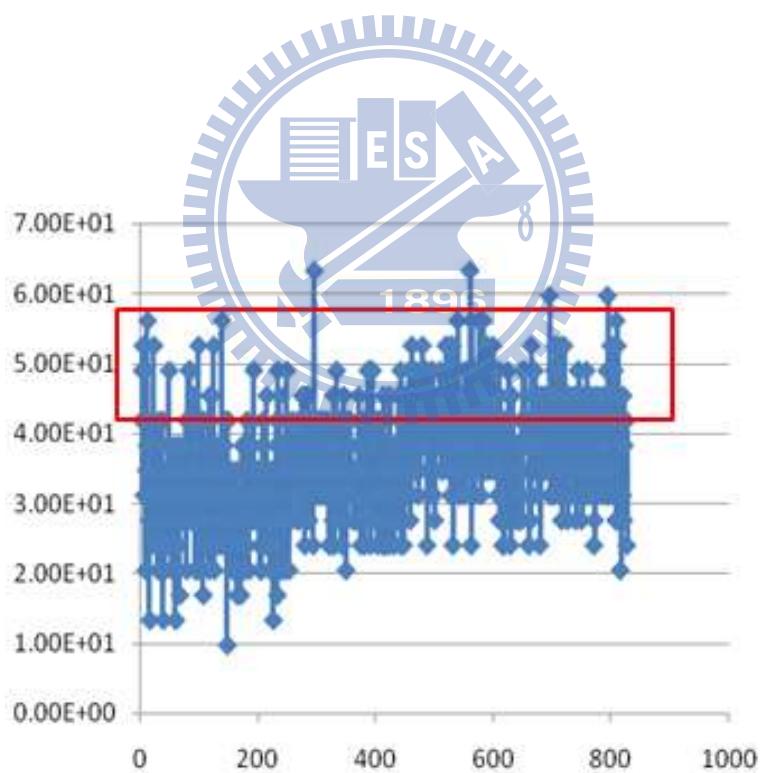


圖 30. 量測點 1 的應變值(放大倍率 10^6)

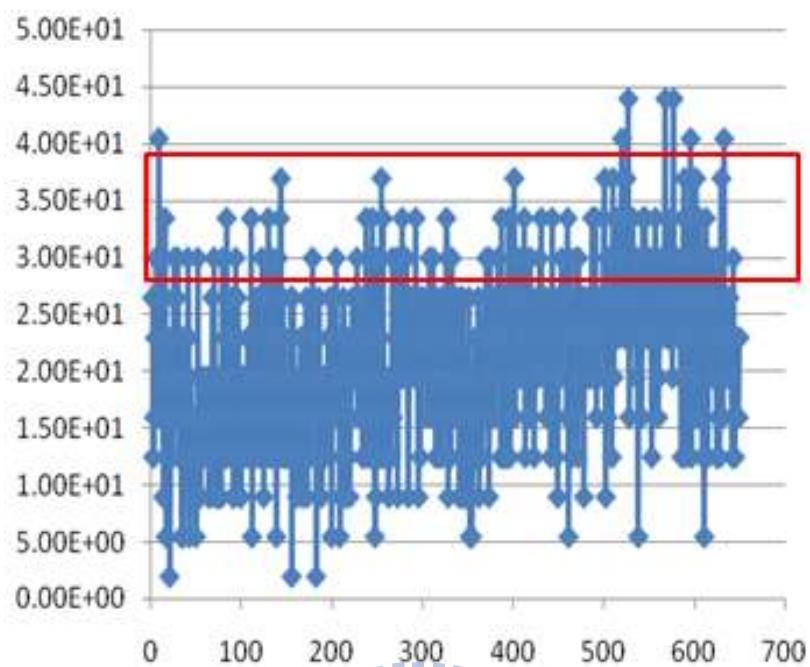


圖 31. 量測點 2 的應變值(放大倍率 10^6)

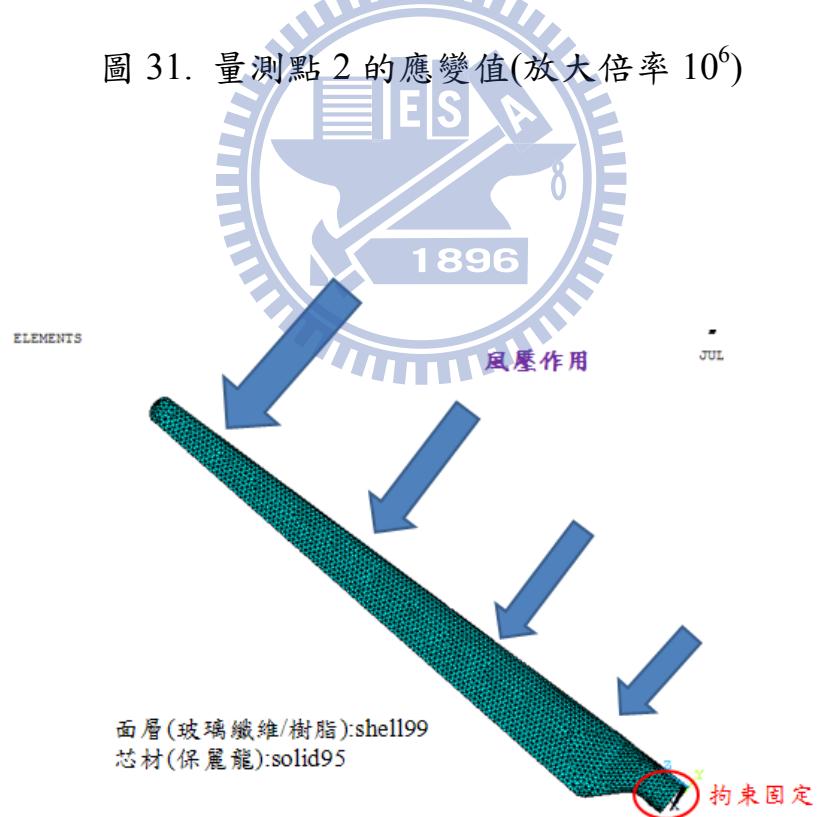


圖 32. 50 cm 葉片 Ansys 建模示意圖

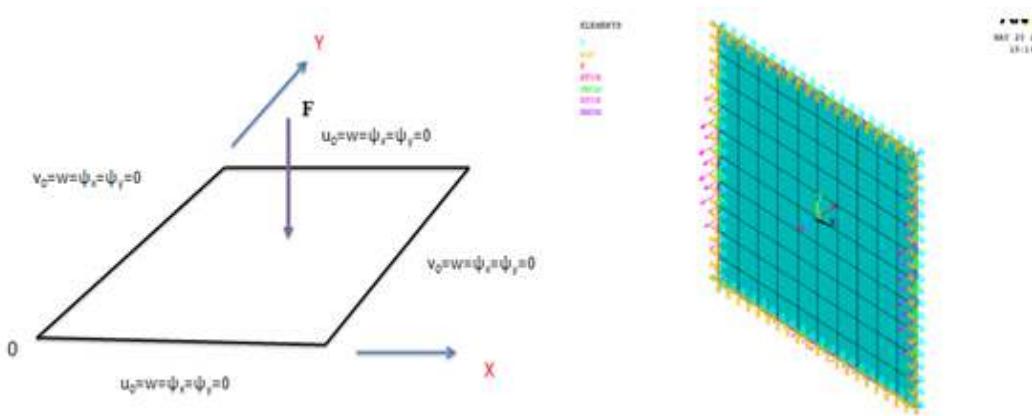


圖 33. 薄板中央施力及邊界條件示意圖

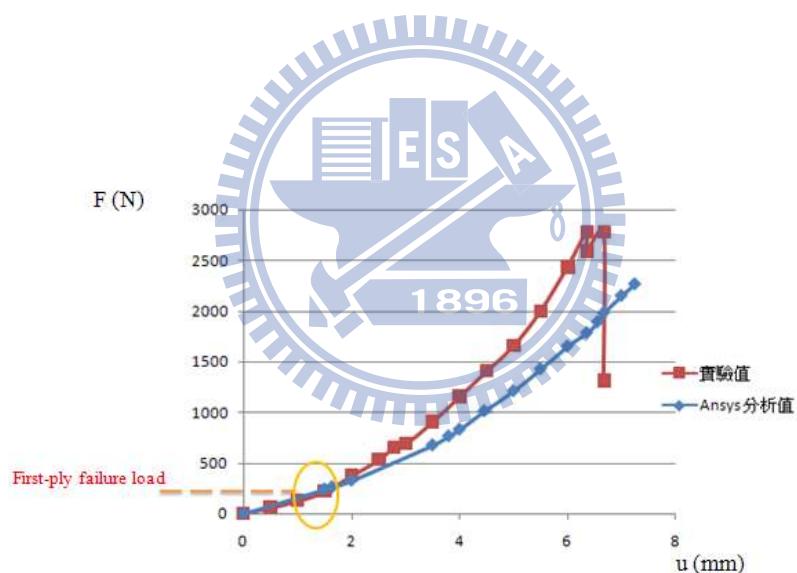


圖 34. 破壞過程 F - u 關係圖



圖 35. 1m 風力葉片 4-8 層(780g)

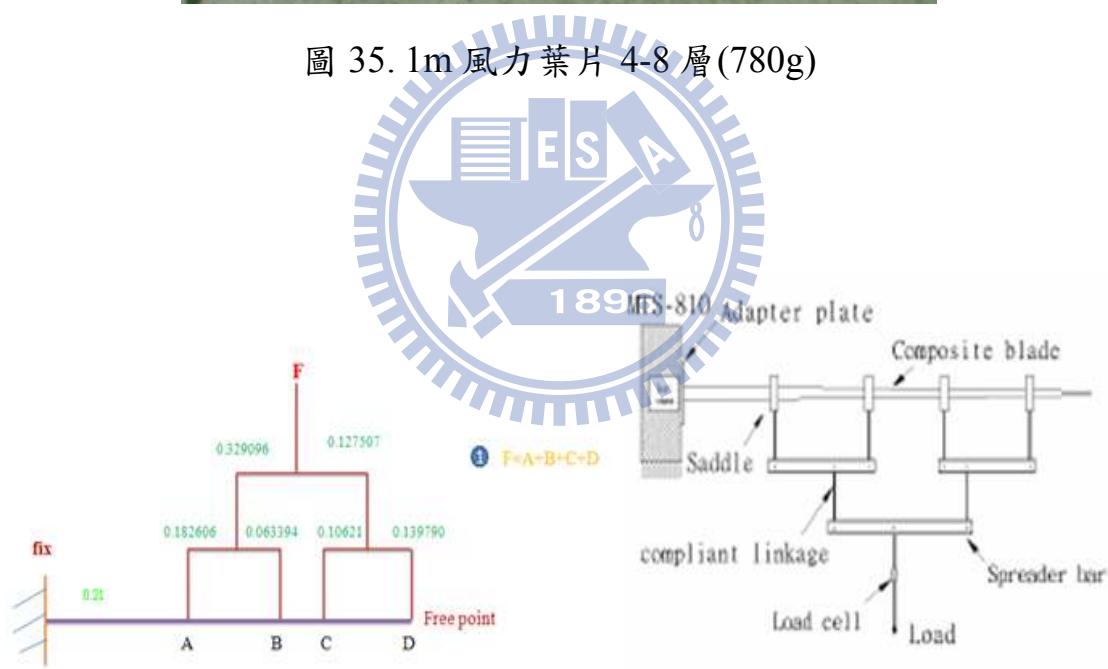


圖 36. 調整距離來模擬真實葉片的負載力(單位:m)



圖 37. Whiffle tree 實體組裝



圖 38. Whiffle tree 實驗示意圖

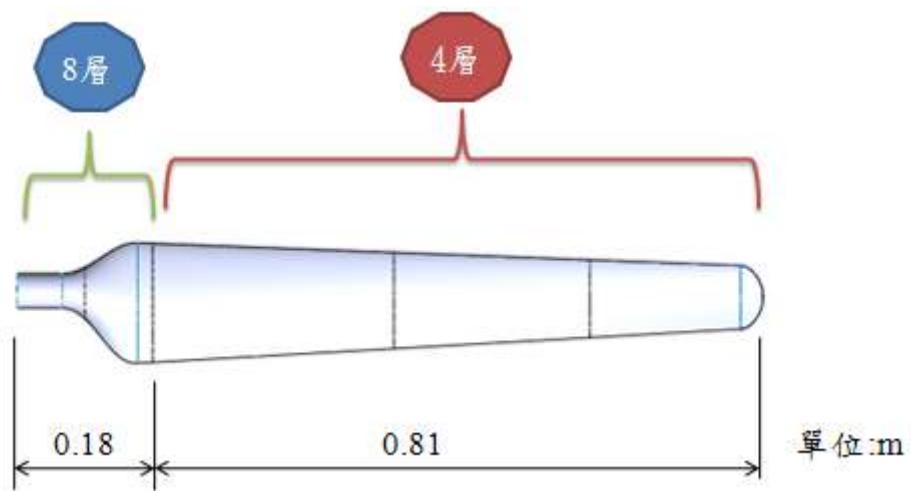


圖 39. 葉片玻纖布強化層數位置示意圖

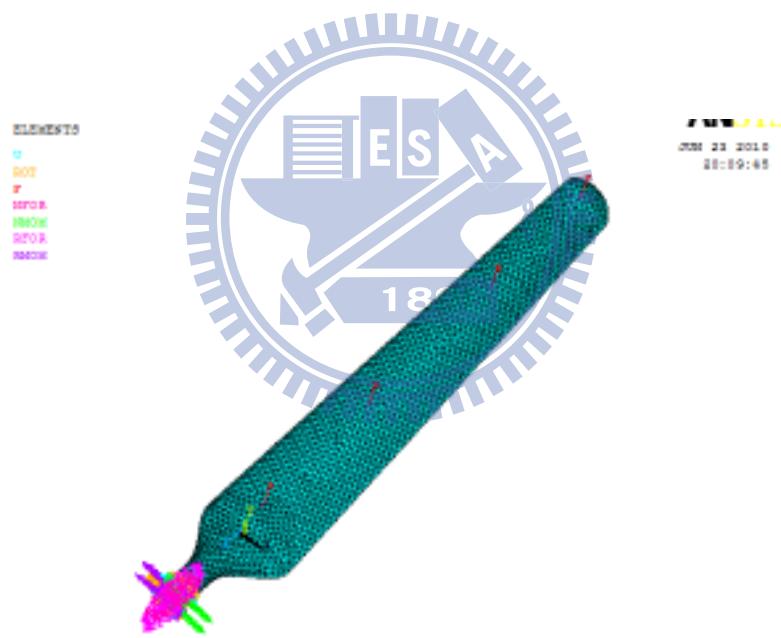


圖 40. 1m 葉片的 Ansys 建模

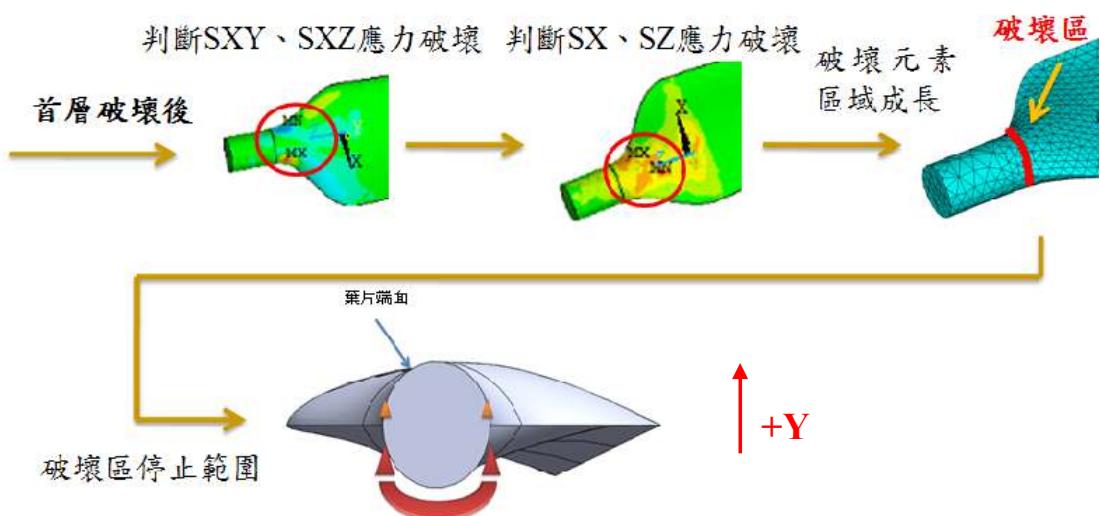


圖 41. 葉片破壞分析過程示意圖

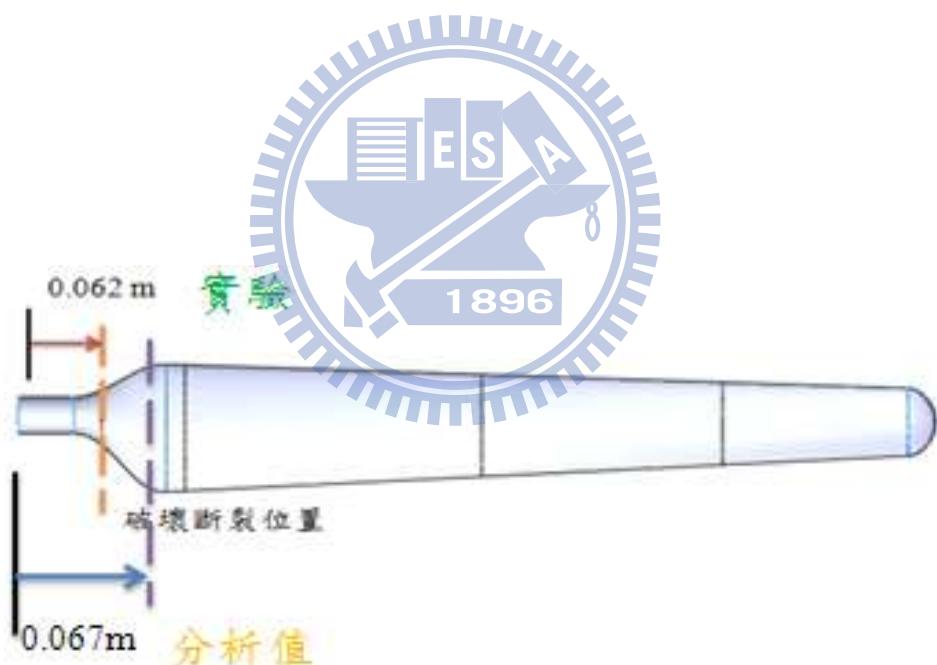


圖 42. 葉片接頭實驗破壞位置示意圖



圖 43. 1 m 葉片接頭破壞狀況(單位:m)

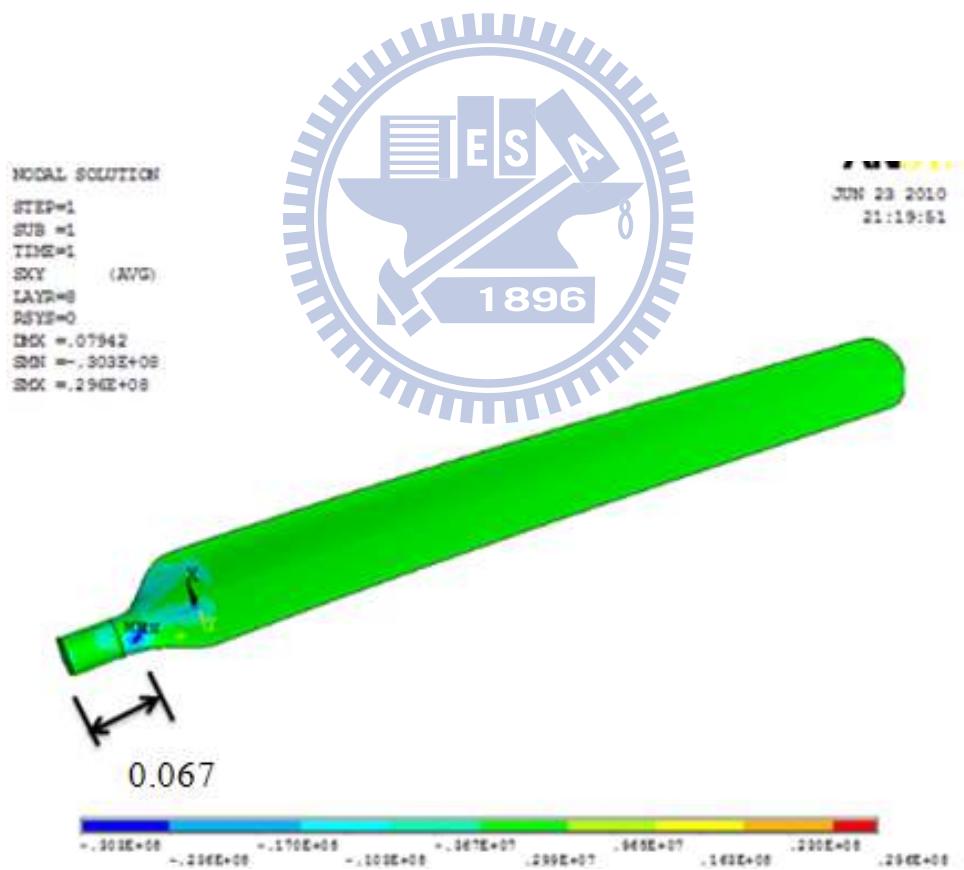


圖 44. 第八層 XY 方向應力(單位:m)

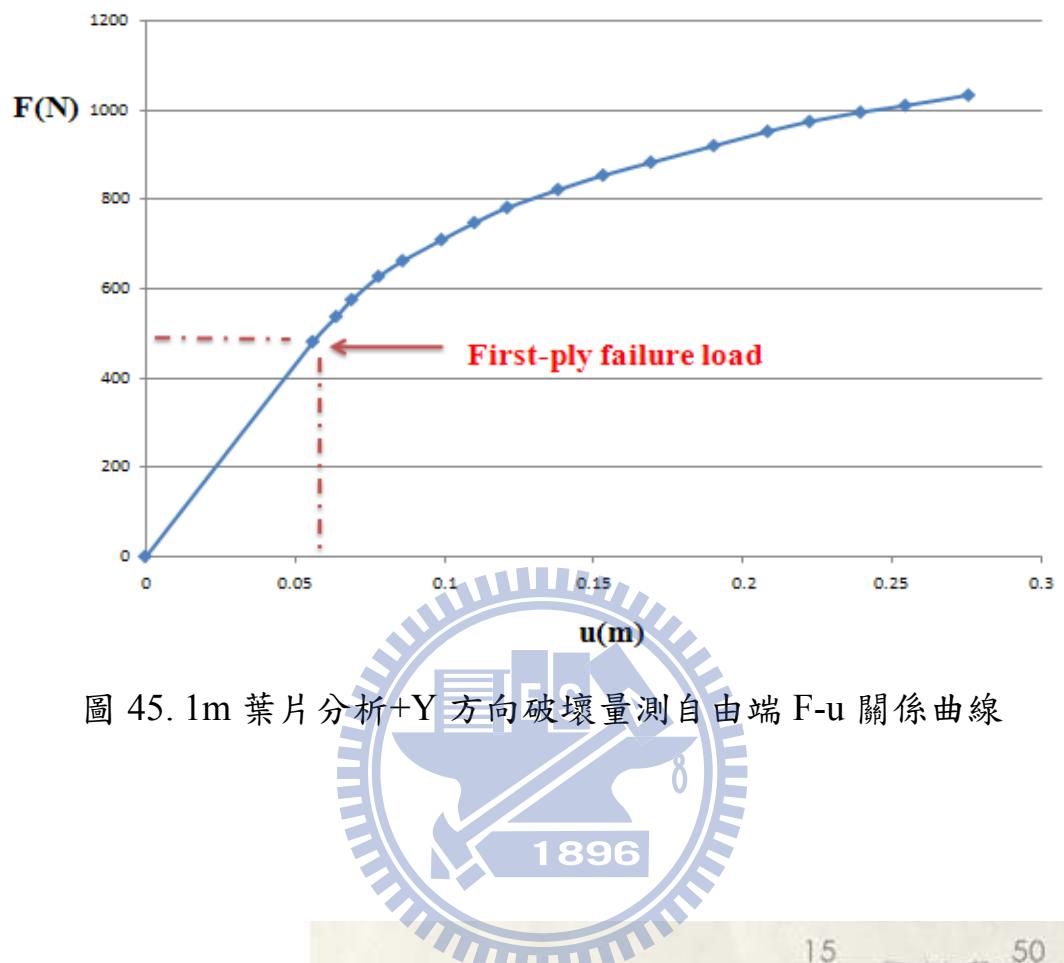


圖 45. 1m 葉片分析+Y 方向破壞量測自由端 F-u 關係曲線

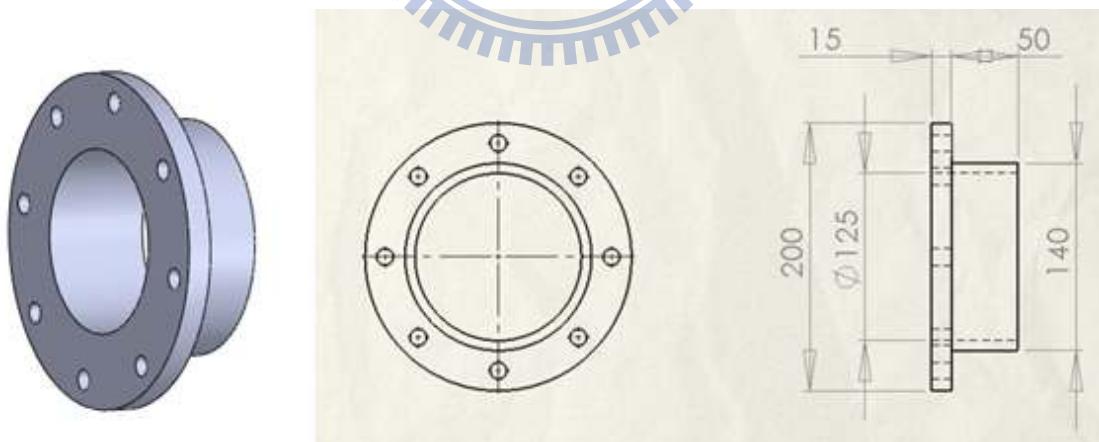


圖 46. 金屬接頭尺寸示意圖

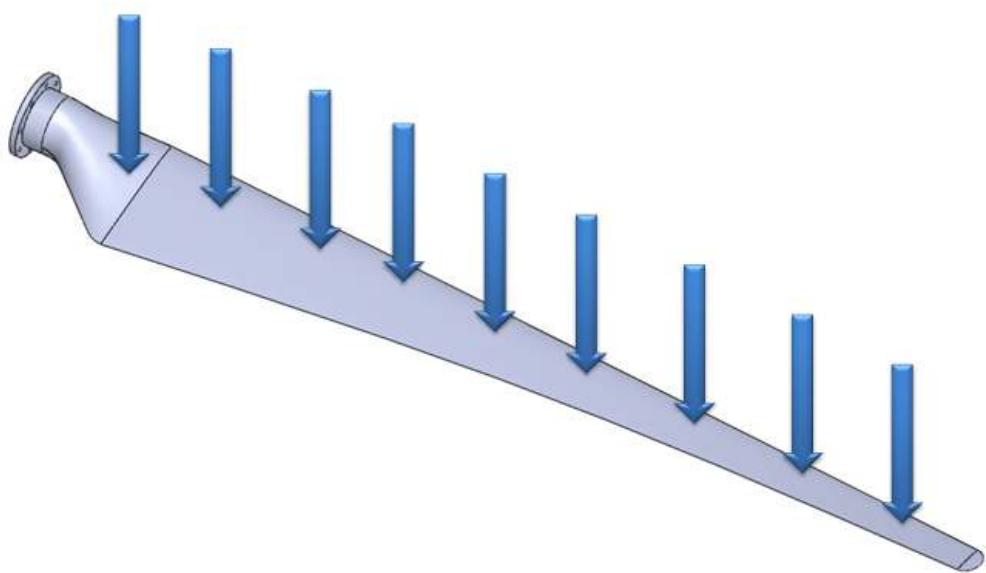


圖 47. 葉片受均佈風速壓力作用示意圖

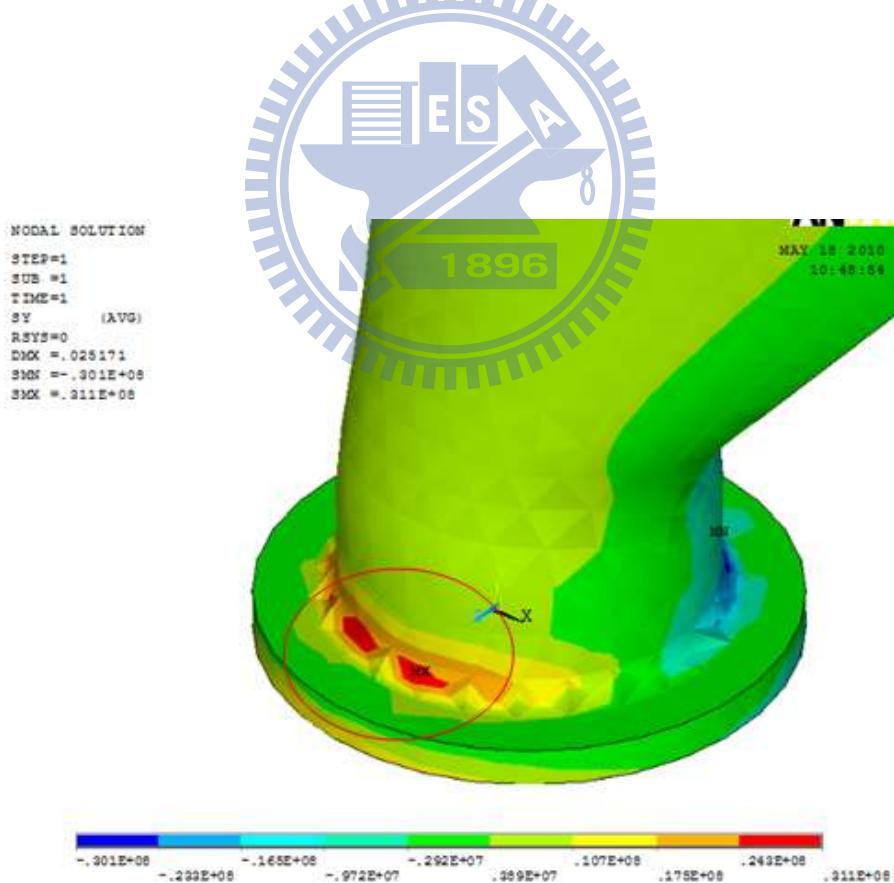


圖 48. 葉柄局部應力示意圖

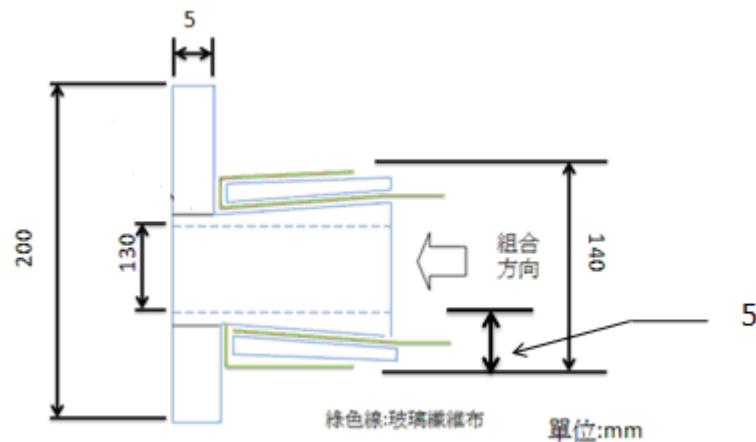


圖 49. 葉柄組裝接頭示意圖

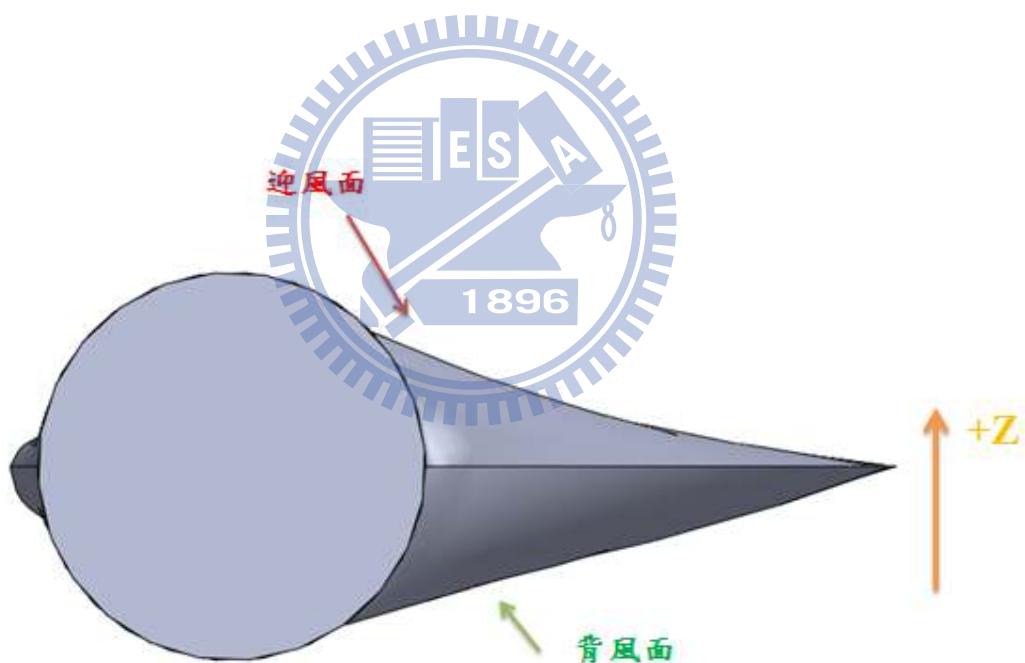


圖 50. 風力葉片受風施力方向示意圖

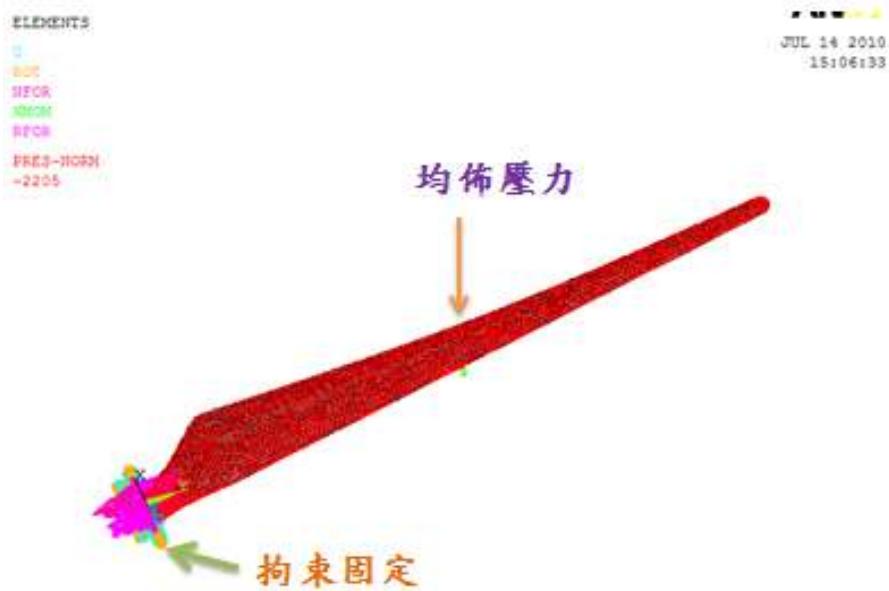


圖 51. 2.5m 葉片 Ansys 建模示意圖

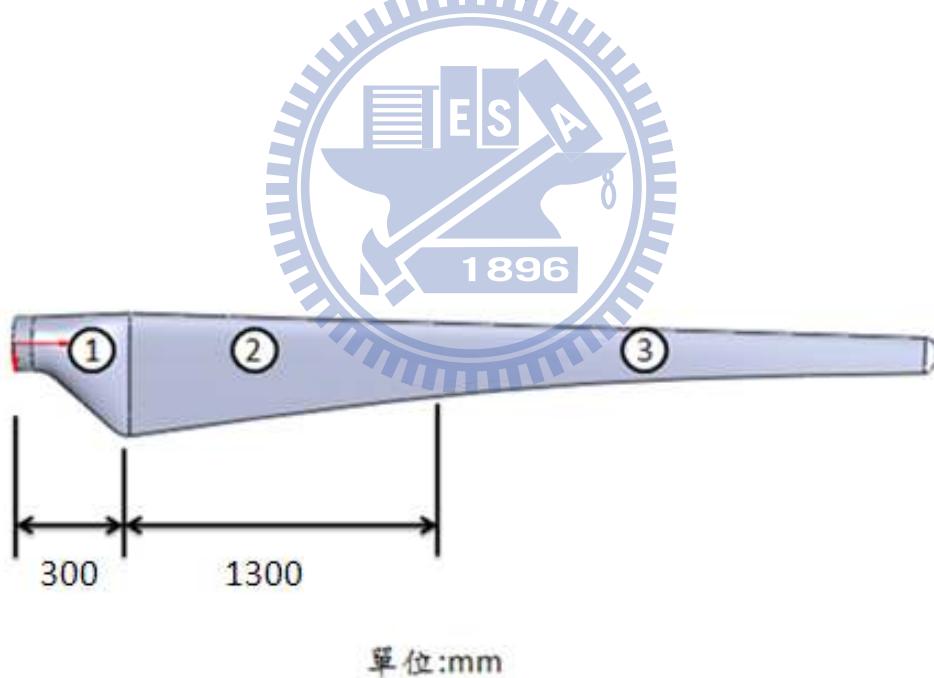


圖 52. 葉片玻璃纖維布強化層數位置示意圖

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SY (AVG)
RSYS=0
DMX =.469584
SMN =-.516E+09
SMX =.429E+09

JUL 7 2010
22:59:46



圖 53. 均 2 層玻璃纖維布葉片 y 方向應力示意圖

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SY (AVG)
RSYS=0
DMX =.128345
SMN =-.133E+09
SMX =.124E+09

JUL 7 2010
23:04:04

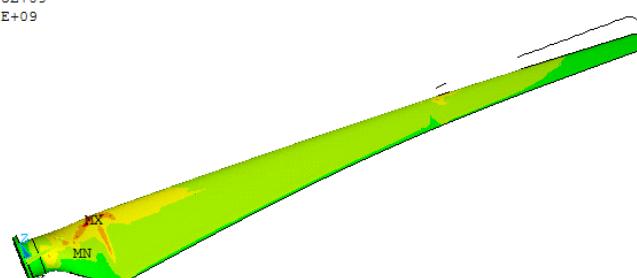


圖 54. 4-8 層玻璃纖維布葉片 y 方向應力示意圖

NODAL SOLUTION

SUB =1
TIME=1
SY (AVG)
RSYS=0
DMX =.256571
SMN =-.263E+09
SMX =.232E+09

JUL 7 2010
22:52:55

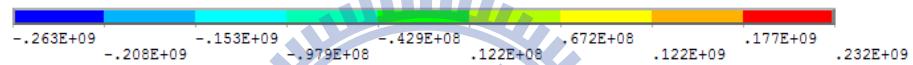
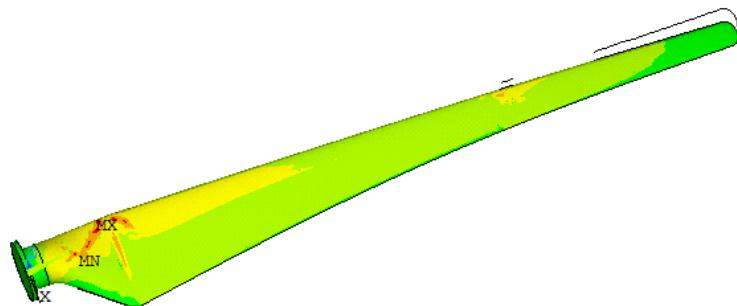


圖 55. 2-4 層玻璃纖維布葉片 y 方向應力示意圖

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SX1 (AVG)
LAYR=8
RSYS=0
DMX =.245601
SMN =-.263E+08
SMX =.304E+08

JUL 7 2010
22:28:28

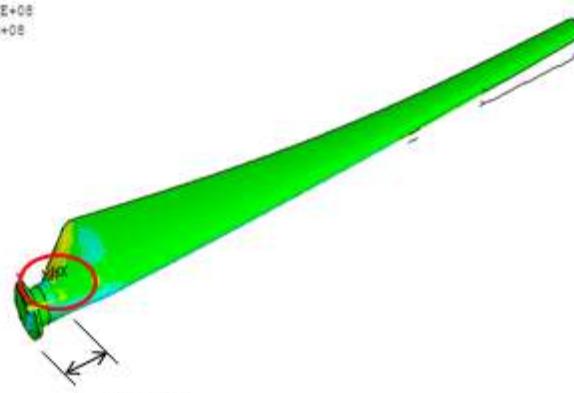


圖 56. 4-8 層葉片於首層破壞第八層 sxz 方向應力

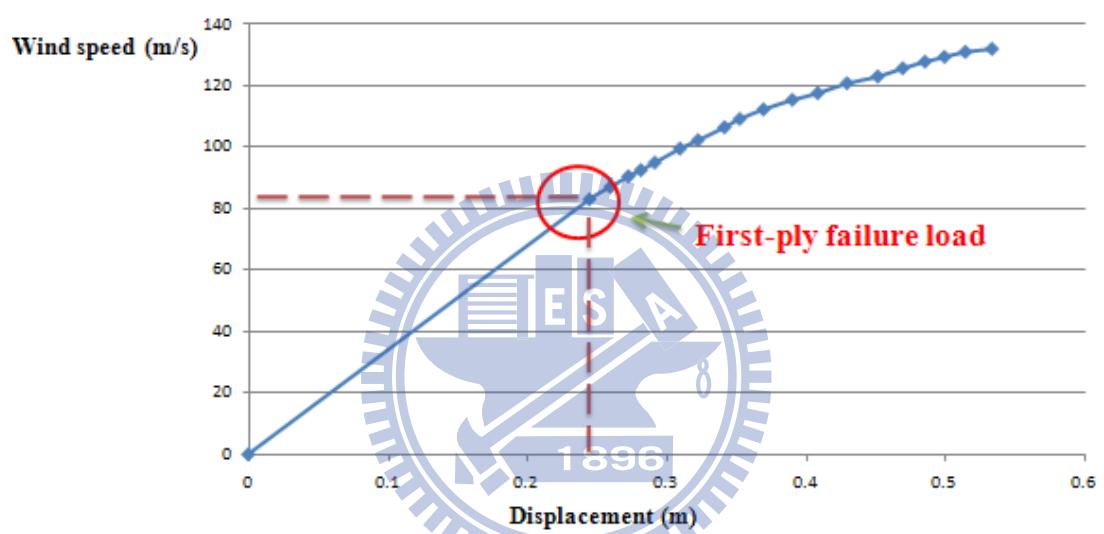


圖 57. 4-8 層葉片-Z 方向極限破壞風速與位移關係圖

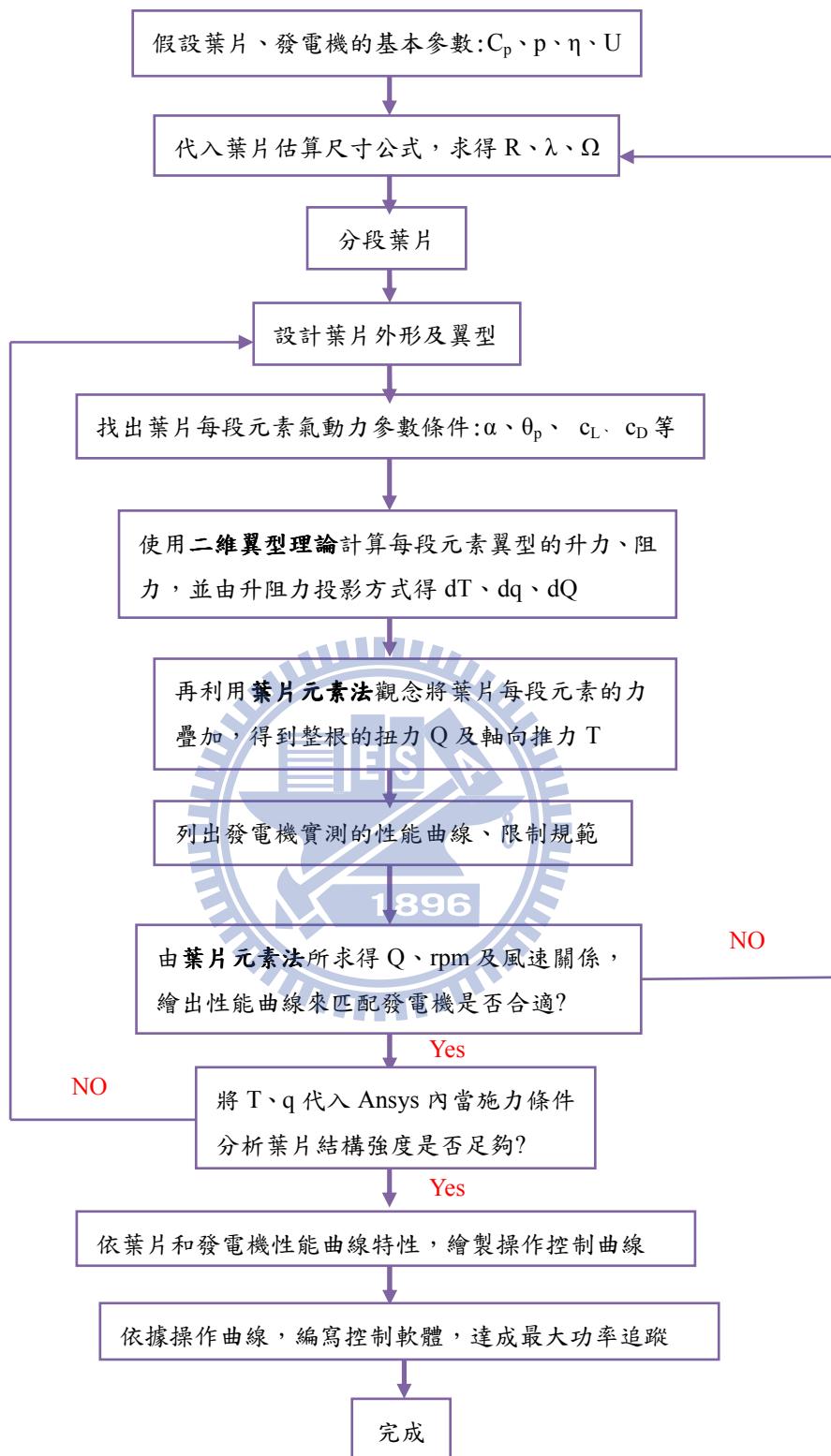


圖58. 葉片設計及發電機匹配流程圖