

# 50kW 風力發電機複合材料葉片設計、分析與製作

黃慶民<sup>1</sup> 蔡國忠<sup>2</sup> 陳世雄<sup>3</sup> 王晟桓<sup>3</sup> 李啟勝<sup>4</sup>

1. 捷豹科技有限公司

2. 國立宜蘭大學機械與機電工程學系

3. 國立成功大學航空太空工程學系

4. 擎洋科技有限公司

E-mail: gctsai@niu.edu.tw

## 摘要

本研究旨在於探討一 50kW 外罩式風力發電機複合材料葉片之結構設計方法，並以試驗之方式驗證其可行性。研究過程中，結合外型設計軟體建立幾何形狀，計算流體力學軟體之流場分析驗證風能轉換為發電之性能，並計算發電機於強風停機狀態下葉片表面之壓力分佈，以供有限元素軟體進行結構分析、試驗及複合材料製作葉片之可靠強度。於後進行葉片實體製作，再以靜態載重方式測試並量測葉片之結構變形及受力狀態，以確定複合材料葉片於設計風速下，仍可正常運轉而不致損壞。

**關鍵詞：**複合材料，葉片，有限元素法，風力發電機。

## 1. 前言

人類自工業革命後，對於能源之需求與日俱增，相對地造成環境之污染，使得人們於擷取與使用能源之同時，需思索著是否能適度地降低對環境之衝擊。風能取之於自然，屬於綠色能源之一。近年，風力發電產業之發展日益蓬勃，逐漸成為世界各國政府選擇之替代能源。風力發電機概分為水平軸式與垂直軸式二種，各有其優缺點，但因水平軸式之風能擷取效率較高，其開發與使用因而較為廣泛。風力發電機之葉片設計，涉及風能效率與葉片結構之問題，一直是探討之重要課題。

本研究在探討一 50kW 外罩式風力發電機複材葉片之結構設計方法，研究之過程中結合流體力學計算方法與有限元素法，進行葉片結構強度之設計，並以試驗之方式證明其正確性。50kW 外罩式風力發電機[4,5]之外觀，如圖 1 所示，為定漿矩型，額定風速 13m/s，額定轉速 200rpm，具有一收斂之入口與發散之出口，藉此增大風速，並於喉部達最大風速，故將葉片安裝於此，以提高風力發電機之功率輸出。由於葉片之運轉之最高風速定為 20m/s，於風速高於運轉風速時，葉片將呈現鎖住不動之狀態，以避免發電機燒毀。風力發電機葉片運作經常是處於嚴苛之環境下，並包括颱風、颶風等天災，需考慮在較高之風速下運轉，故將設計風速定為 48m/s。

## 2. 葉片流場分析與外型設計

葉片設計與分析可分為兩個步驟，步驟一為流場分析與外型設計，步驟二為結構分析與實體設計，詳細分

述如下。

### 2.1 流場模擬與外型設計

50 kW 外罩式風力發電機之氣動力設計開發，係根據流體機械理論，再藉分析結果逐步修正外型，以致符合設計需求為止。50 kW 外罩式風力發電機之氣動力設計開發，係根據流體機械理論與正常設計流程進行工作，流程圖如圖 2 所示，由訂定性能需求開始，至滿足性能分析驗證計算。流場模擬與外型設計，詳細分述如下。

### 2.2 流場分析

本研究採用之數值方法為 ANSYS CFX 計算流體力學(CFD)軟體[3,6]，其已經普遍地被應用於各式渦輪機械之流場模擬及設計上，以求解雷諾平均納維斯托克斯方程式(Reynolds-averaged Navier-Stokes Equation)，並搭配  $k-\epsilon$  紊流模型及壁面函數以計算複雜之三維流場。數值運算乃將座標系統置於葉輪轉動座標系上，故解出之速度為相對速度。流道之外罩壁面座標固定於外罩上，為一靜止之絕對座標，其解出之速度為絕對速度。因此，兩者之速度與其他相關參數於交界面上必需作座標轉換，以使質量、動量與能量皆為守恆。

網格生成使用計算流體力學軟體 ANSYS ICEM CFD 產生非結構性網格，非結構性網格較適用於複雜之幾何外型，並於實體邊界周圍建立幾層較密之結構性網格，以利於邊界層黏性流場模擬之準確性。

50 kW 外罩式風力發電機之流場模擬，可分為外流場與內流場兩部分，其計算區域之相關大小如圖 3 所示，外流場之前端邊界距外罩入口為四倍外罩直徑遠，即  $4D$ ( $D$ =外罩直徑)，外流場之末端邊界距外罩出口為  $10D$ ，外流場之側面邊界距外罩邊界為  $2D$ 。

為簡化渦輪葉片流場分析問題並考慮計算機記憶體容量及計算時間，假設渦輪轉子之流場為軸對稱，且相對於轉子座標系而言為定常(Steady State)，故可採取單一流道作分析。其方法乃將整個渦輪設為一個呈現週期性變化之單一流道，且具有單一流體之入口與出口，故採取出流道夾葉片之單一流道作為計算區域。邊界條件設定如圖 4 所示，於流道入口邊界給定一固定之軸向

速度作為流道入口之條件，而在周圍及出口邊界上給予開放性邊界。葉片表面、輪轂及外罩壁面給定壁面邊界條件，其壁面條件及該邊界具有不可穿透性，而對於黏性流場，流體流經壁面必需滿足無滑動條件(No-slip Condition)，亦即壁面上之流體速度與壁面之速度相等，另於兩側面設定為週期性邊界，亦即一邊界之物理量強制其相當於另一邊界對應位置之物理量。

### 2.3 性能分析

葉片之外型設計，乃依初步擬定葉片之幾何形式，包括葉片長度、寬度、曲面形式...等，於後使用 ANSYS CFX 進行流場分析，再根據流場分析結果修正葉片之幾何形狀，並重複此分析和修改之程序，以調整至設計所需之規格為止。經多次修正葉片之外形後，最終採用之型式，其於風速 48m/s 下之風負載應力分佈如圖 5 所示。

## 3. 結構分析與實體設計

50 kW 外罩式風力發電機之葉片結構分析與實體設計，係根據有限元素理論，再藉分析結果逐步修正葉片積層配置方式，以致符合設計需求為止。葉片之流場計算分析結果，將作為結構分析時之負載，亦即不同風速下葉片承受不同之空氣動力負載。本研究葉片依設計風速之需求，逐步調整複材積層方式，以致分析結果合於需求為止，其流程圖如圖 6 所示。結構分析與實體設計，詳細分述如下。

### 3.1 結構分析

結構分析細分為施加負載、複材積層設定、網格生成及邊界設定。本研究採用之數值方法為 ANSYS MultiPhysics 軟體，且由於葉片之風負載對葉片產生之位移量與端點轉角甚大，因此除線性分析外，亦考慮含二階效應之非線性分析[2]。由於考慮非線性分析，因此選用 8 節點且每節點 6 自由度之 SHELL91 元素[1]。葉片之負載，藉由 ANSYS Workbench 操作介面，讀取 ANSYS CFX 之計算結果(Resource File)，之後將流場分析產生之負載施加於葉片上，改以 ANSYS MultiPhysics 介面進行複材分析。

葉片於實際運轉下除風壓力外，尚需考慮突發性陣風與風向改變，對葉片所造成額外之應力增量[8]，此部份可以一適當比例之係數，對設計外力放大以作為額外應力增量之考量。葉片常見之破壞區域，需避免設定為葉片積層分區之交界。葉片全長 4.18 米，劃定四個區段，分別自根部起算 0.75、1.9、3.05 米處為複材積層分界處，並於上、下葉面間包覆一空心矩形複材夾層梁(Spar Cap)。複材積層選用三種不同規格之玻璃纖維，其抗拉強度分別為 125.6(平織布)、292.7MPa(單向布)、252.7(45 度交叉逢織布)。平織布配置於外層，主要為美觀之考量使用，對於葉片強度之貢獻較小；單向布提供葉片之軸向負載，抵抗轉動狀態時產生之離心力；45 度交叉逢織布能分散葉片之風壓力，並提供葉片彎矩與扭矩所需之強度。

由於幾何實體內無法建立面域，而以面域構成之圖形亦因葉面為複雜不規則幾何曲面，CAD 軟體往往因建立之夾層梁面域未能與上、下葉面準確密合，使得於網格生成後葉面與夾層梁之元素並未相互連結，而造成分析錯誤之情形。遂而以網格生成使用之葉片幾何圖形，先行使用 CAD 軟體於各葉片分區處劃定分割線，以便於網格產生後指定各區域之複材積層屬性，並用以產生夾層梁元素之用。由於使用之 SHELL91 元素含中間節點，因此需於 ANSYS Workbench 下產生網格之同時即需使用同性質之元素 SOLID187。網格於 ANSYS Workbench 下產生，元素大小取 30 毫米即可符合需求，共產生 5217 個元素，25512 個節點。

自 ANSYS Workbench 轉入 ANSYS Multiphysics 介面後，負載(Element Surface Load)施加於系統預設之元素 SURF154 上，需將元素種類變更為 SHELL91，且由於不同元素之負載預設作用面不同，因此必需同時修正負載對全部之 SHELL91 元素之作用面。以葉片之夾層梁與上、下葉面接合處之幾何分割線之上節點建立面域，並以同葉面之元素大小對夾層梁面域作網格劃分。葉片與夾層梁之網格生成，共有 3739 個元素，11205 個節點，如圖 7 所示。依據材料試驗結果分別設定各區域之材料參數，配合葉片積層之範圍指定實常數(Real Constant)。網格產生後，由於各元素之座標軸不一致，因而需另外定義座標系統，作為重新校調元素座標軸之用，以使結構分析之結果符合複材之材料特性。

葉片根部與輪轂接合，而輪轂鎖固於轉盤上，乃不可移動之狀態，輪轂與葉片根部實為相互接觸之關係。因此，可採葉片之根部為固定端，或以輪轂為固定端，而將輪轂與葉片做接觸分析。本研究為避免接觸分析耗時，乃以葉片根部之輪轂握持區域為固定端，分析葉片之應力應變。葉片與輪轂接觸時，為不可移動、轉動之狀態，因此將其三軸之位移皆設為零。

### 3.2 性能分析

葉片之積層設計，乃先規劃葉片積層分區交界處，再行擬定各分區之各材質複材積層厚度，於後使用 ANSYS MultiPhysics 進行應力分析，再根據應力分析結果修正葉片之各材質複材積層厚度，並重複此分析和修改之程序，以調整至設計所需之規格為止。經多次修正葉片之複材配製後，最終採用之型式，其於風速 48m/s 下之非線性分析 von Mises Stress 分佈如圖 8、9 所示，葉面最高應力 190MPa 發生於葉片根部與輪轂接合處，夾層梁最高應力 143MPa 亦位於該區域，二者皆小於玻璃纖維抗拉強度，符合設計需求。葉片分析結果顯示，線性分析與非線性分析之結果相當接近，如表 1 與圖 10 所示，可以線性分析取代非線性分析，以縮短分析之時程。

## 4. 複材葉片製作

葉片採用玻璃纖維補強塑膠(Fiberglass Reinforced Plastic, F.R.P)，採手積層法[7]以常溫硬化樹脂製作。葉片之製作，分為複材模製作和葉片製作兩步驟，詳細分

述如下。

#### 4.1 複材模製作

依 CAD 軟體設計所需翼形、曲面及角度，再將此資料經由電腦數值控制(CNC)銑床，以代木製造全尺寸之木模(Plug)，並以手積層法於代木模上積層至所需之厚度，再藉由鐵架補強後即為製作葉片所需之複材模(Tooling)，如圖 11 所示。

#### 4.2 葉片製作

複材模提供葉片之外形、曲面及角度等條件，以適當之材料組合於複材模上，再以手積層法積層至所需之厚度。於製作葉片之同時，依葉片曲面之變化形式製作一空心矩形複材夾層梁，並以一條硬質泡綿梁(Spar)為被覆複材，以增加葉片之抗彎抗扭強度。於葉片積層完成後，添加於上下葉片之間，並以膠結劑使其固化，如圖 12 所示。50kW 葉片成品，單支重約 17kg。

### 5. 葉片靜力實驗

於葉片設計完成後，為驗證葉片之實際強度，遂設計一測試平台，如圖 13 所示。平台之一側可藉夾具固定葉片，並以垂吊方式作靜態載重試驗。葉片之夾具與輪轂型式相同，以防止葉片於負載時產生滑動或扭轉之情形。

#### 5.1 靜態載重試驗

為使實驗精確，遂將葉面上之負載分為十個區域，並以 ANSYS CFX 計算各分區之載重合合力，作為靜態載重試驗之施加砝碼重量，以模擬葉片實際運轉下之負載。由於靜態載重之合力方向非重力方向，因此需要修正葉片於靜態載重時與夾具之夾角。葉片之合力方向與重力方向之夾角為 29 度，因此於實驗時將葉片旋轉 29 度後，在進行靜態載重試驗，以使葉片合力與試驗載重之方向一致。

靜態載重試驗採用之砝碼最小單位為 0.1kg，配重之載重誤差將小於 1%，分別為風速 12m/s、24m/s、36m/s、48m/s 之載重配重，每風速等級分四次加載砝碼，其各分區載重如表 2 所示。此重量係來自於流體計算結果，再將負荷轉換為實際靜態載重吊掛位置之重量。葉片逐步施加载重，於風速 48m/s 時，葉片尖端之位移量達 573mm，但未發生斷裂之情形，如圖 14 所示。靜態載重試驗之結果，如表 3 與圖 15 所示。

#### 5.2 結果討論

根據試驗結果顯示，葉片加載至風速 48m/s 時並未產生斷裂，符合原設計之目標。由圖 15 之風速 48m/s 加載之第 4 載重點，左右兩側具明顯之斜率轉變，顯示於該風速等級加載時，此區域之纖維組織已產生局部崩壞之情形。該區域之應力分佈，如圖 16 所示，其最高應力 66.5MPa 發生於夾層梁與下葉面接合處，遠小於複材抗拉強度，且無局部應力集中現象，顯示此區域之纖維崩壞應為施工不良所導致。

圖 17 顯示葉片與輪轂接合處之應力分佈，於第 4、5 層配置之單向布複材具小區域之應力集中現象，最高應力達 446MPa，已超出抗拉強度 292.7MPa，其纖維組織將產生局部崩壞之情形。單向布之應力值較高之故，乃由於其彈性模數(Young's Module)高於平織布與 45 度交叉織布許多，不同材質於相同之應變下將獲取較高之應力，亦即吸收較高之能量，以致於產生局部應力集中之情形。

葉片與輪轂接合處 2.5D(D=葉片根部直徑)區域內為高應力區域，其應力值皆位於 200MPa 上下，需對此區域作局部補強。補強材料之選取方面，需考慮葉片若過重，將導致啟動風速降低，並進一步於運轉時產生較高之離心力，而偏離原設計條件。T6061-T6 為結構用鋁合金，其降伏強度 245MPa 接近 A36 碳鋼，且比重僅 2.7，為適當之補強材料。因此，於葉片根部 3D 區域內，採用 3mm 厚之 T6061-T6 環狀鋁板以作局部補強，並進一步控制接合處單向布應力集中之問題。葉片添加鋁板之分析結果，如圖 18 所示，原複材高應力區域之應力值已降至 110MPa 上下，其葉片與輪轂接合處之最高應力亦已降至 198MPa，小於鋁板降服強度，為適當之配置。

以葉片實驗頂端位移量，與非線性分析結果繪製載重位移圖，如圖 19 所示。葉片於施加風速 48m/s 之負載後，相較於非線性分析結果，位移量增加比例較為明顯，此為輪轂接合處與第 4 載重點部份纖維於高負載下崩解脫落，因而降低葉片本身之結構勁度，以致產生額外之位移量。

有限元素分析與靜態載重實驗之載重位移曲線，於葉片加載至 250kg 前完全吻合，而當載重增加至 400~450kg 時，誤差值方才出現，故整體之分析乃可接受之結果。葉片上之應力應變分佈，可用以判斷可能產生破壞之區域，進行局部補強或變更原複材積層配置，以達長期運轉之目標。

### 6. 結論

本研究在於探討並建立以複材為主之風力發電機葉片設計方法，並以一 50kW 外罩式風力發電機為例進行設計、分析、測試與改良。複材葉片之原始形狀經流體力學分析，於確定其風能轉換效率後，再依據此外形進行實體之分析與設計。葉片使用玻璃纖維複材製作，並經 CAE 計算與實際等風力之靜態載重測試，確定此葉片於設計風力下仍可安全運轉，而不致產生破壞。

### 7. 參考文獻

- [1] S. Ahmad, B. M. Irons, and O. C. Zienkiewicz, "Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Finite Elements," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 419-451, 1970.
- [2] T. Y. Chang and K. Sawamiphakdi, "Large Deformation Analysis of Laminated Shells by Finite Element

Method,” *Journal of Computers & Structures*, Vol. 13, pp. 331-340, 1981.

[3] G. E. Schneider and M. J. Raw, “Control Volume Finite Element Method for Heat Transfer and Fluid Flow Using Collocated Variables Computational Procedures,” *Numerical Heat Transfer*, Vol. 11, pp. 363-390, 1987.

[4] Sheng-Huan Wang and Shih-Hsiung Chen, “Blade Number Effect For a Ducted Wind Turbine,” in *9th Asian International Conference on Fluid Machinery*, Jeju, Korea, Paper No. AICFM9-111, 2007.

[5] Sheng-Huan Wang and Shih-Hsiung Chen, *50kW Wind Turbine Aerodynamic Design*, Jetpro Tech., Inc. Internal R&D Report, JP-WT-RD-A01, 2007.

[6] J. P. Van Doormaal, A. Turan and G. D. Raithby, “Evaluation of New Techniques for the Calculation of Internal Recirculating Flows,” *AIAA, Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, AIAA paper 87-0059, 1987.

[7] 馬振基、趙珏，*高分子複合材料(下冊)-製程、檢測與應用*，國立編譯館，2006。

[8] 肖铁，“风力发电机叶片断裂原因分析”，*风力发电*，总第61期，58-59页，2001。

表 1 50kW 葉片頂端總載重與位移表

| 風速 (m/s) | 總載重 (kg) | 葉片頂端位移量(mm) |         |
|----------|----------|-------------|---------|
|          |          | 線性分析        | 非線性分析   |
| 12       | 27.8     | 32.016      | 32.034  |
| 24       | 111.2    | 128.494     | 128.528 |
| 36       | 250.3    | 289.563     | 289.702 |
| 48       | 445.0    | 514.900     | 517.589 |

表 2 50kW 葉片靜態載重測試加載表

| 風速(m/s)     |    | 12   | 24    | 36    | 48   |
|-------------|----|------|-------|-------|------|
| 載重分區碼重 (kg) | 1  | 2.6  | 10.3  | 23.2  | 41.2 |
|             | 2  | 3.8  | 15.1  | 33.9  | 60.3 |
|             | 3  | 3.6  | 14.3  | 32.2  | 57.2 |
|             | 4  | 3.4  | 13.7  | 30.8  | 54.7 |
|             | 5  | 3.2  | 12.8  | 28.8  | 51.3 |
|             | 6  | 2.9  | 11.7  | 26.4  | 47.0 |
|             | 7  | 2.8  | 11.1  | 25.0  | 44.4 |
|             | 8  | 2.4  | 9.8   | 22.0  | 39.1 |
|             | 9  | 1.9  | 7.6   | 17.1  | 30.4 |
|             | 10 | 1.2  | 4.8   | 10.9  | 19.4 |
| 總重(kg)      |    | 27.8 | 111.2 | 250.3 | 445  |

表 3 50kW 葉片靜態載重測試位移表

| 風速(m/s)      |    | 12 | 24  | 36  | 48  |
|--------------|----|----|-----|-----|-----|
| 載重分區位移量 (mm) | 1  | 1  | 2   | 6   | 12  |
|              | 2  | 6  | 13  | 25  | 43  |
|              | 3  | 9  | 26  | 50  | 86  |
|              | 4  | 2  | 23  | 62  | 116 |
|              | 5  | 11 | 40  | 95  | 175 |
|              | 6  | 18 | 57  | 130 | 236 |
|              | 7  | 17 | 66  | 159 | 301 |
|              | 8  | 21 | 80  | 196 | 367 |
|              | 9  | 26 | 97  | 237 | 443 |
|              | 10 | 30 | 124 | 289 | 532 |
| 頂端           |    | 36 | 122 | 308 | 573 |

## Design, Analysis and Fabrication of Composite Material Blade for A 50kW Wind Turbine

C.-M. Huang<sup>1</sup>, G.-C. Tsai<sup>2</sup>, S.-H. Chen<sup>3</sup>,  
S.-H. Wang<sup>3</sup>, C.-S. Lee<sup>4</sup>

1. Jetpro Tech., Inc.
2. Dep. of Mech. & Electro-Mech. Eng., Nat'l Ilan Univ.
3. Dep. of Aero. & Astro., Nat'l Cheng Kung Univ.
4. Lift Tech. Co., Ltd.

### ABSTRACT

The mechanical design method for a 50kW composite material wind turbine blade is discussed. The design procedure integrates the blade shape design approach, the computational fluid dynamics method for performance verification, and calculates the stress on the blade for finite element method for composite material stress prediction. A full scale 50kW turbine blade based on the design procedure were fabricated and tested in a rig to verify its design accuracy. It was found from the deformation that the blade can survive in the design wind speed.

**Keywords:** composite material, blade, finite element analysis, wind turbine.

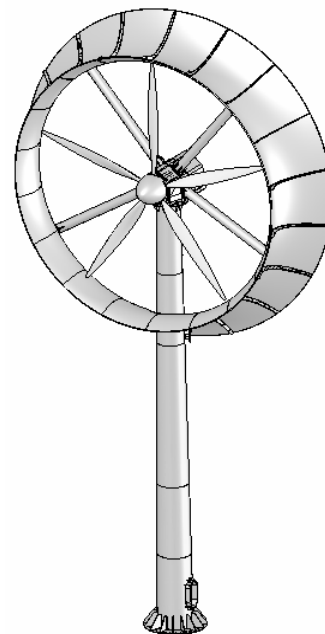


圖 1 50kW 外罩式風力發電機之外觀

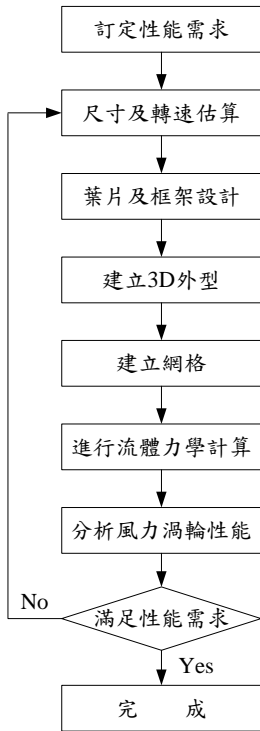


圖 2 外罩式風力發電機葉片氣動力設計流程

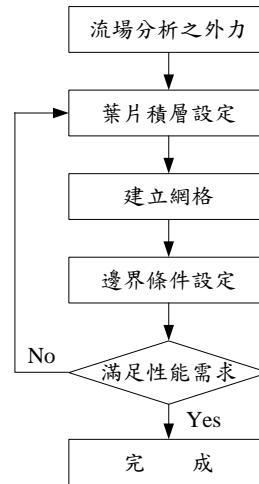


圖 6 外罩式風力發電機葉片結構設計流程

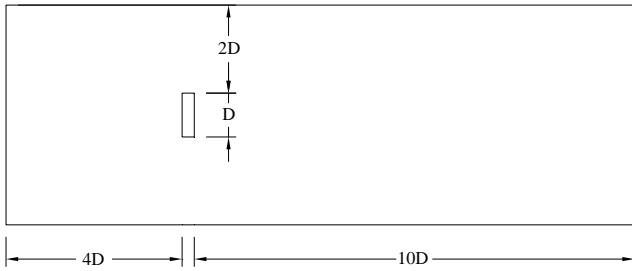


圖 3 外流場網格計算區域相關大小

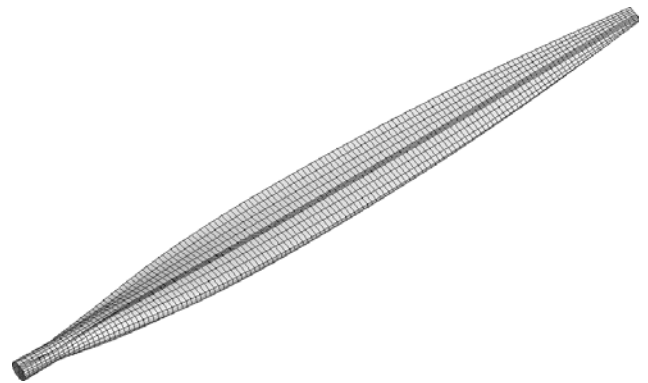


圖 7 葉片網格生成

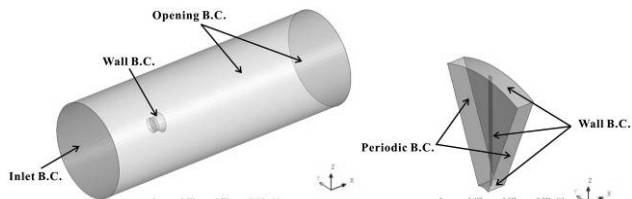


圖 4 網格配置及邊界條件設定

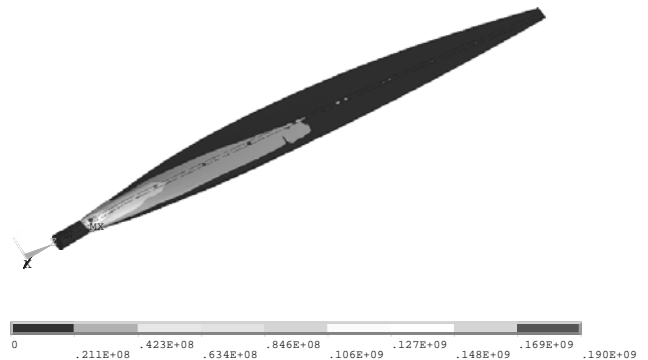


圖 8 風速 48m/s 下之葉面應力分佈

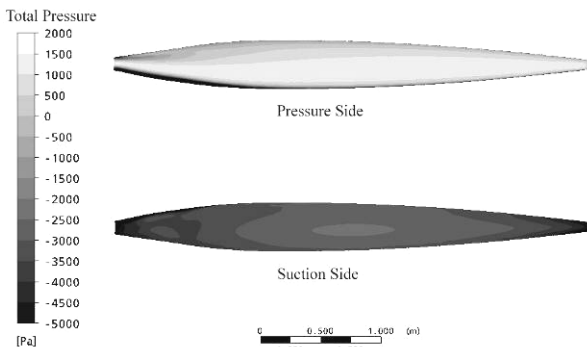


圖 5 風速 48m/s 下之葉片風負載應力分佈

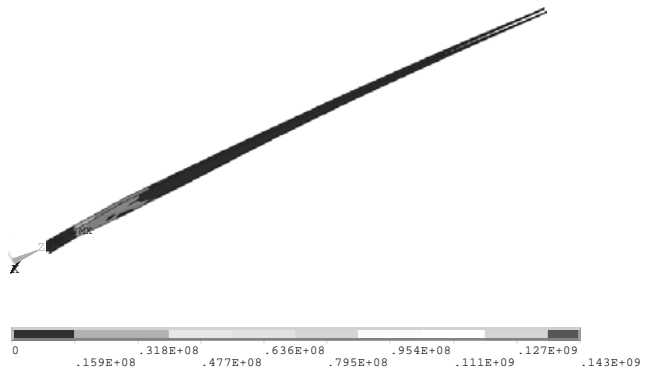


圖 9 風速 48m/s 下之夾層梁應力分佈

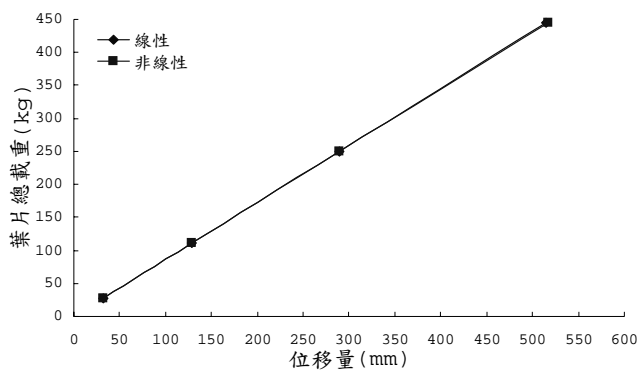


圖 10 線性、非線性分析載重位移圖



圖 11 葉片複材模



圖 12 葉片與夾層梁結合



圖 13 葉片靜態載重測試平台



圖 14 葉片於風速 48m/s 時之靜態載重

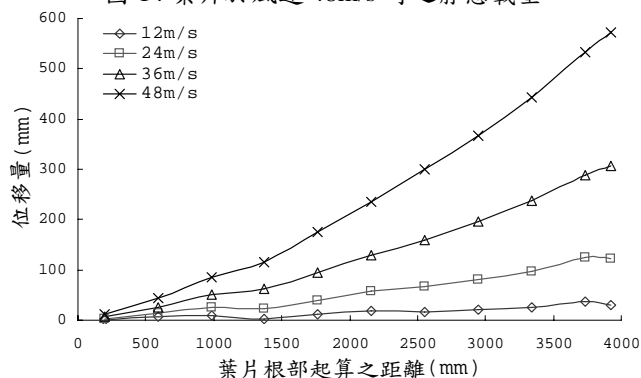


圖 15 葉片靜態載重測試位移曲線圖

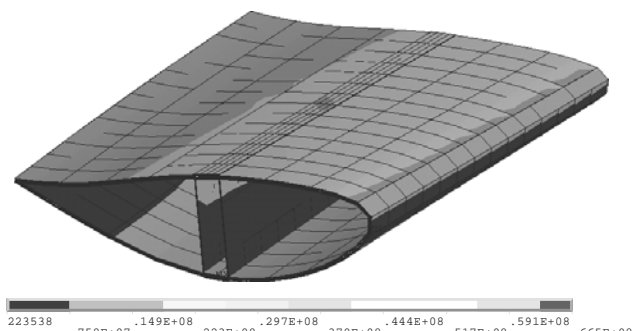


圖 16 風速 48m/s 加載之第 4 載重點應力分佈圖

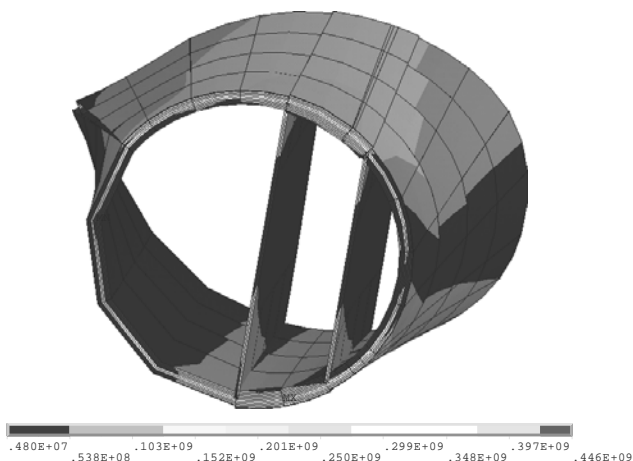


圖 17 風速 48m/s 加載之葉片與輪轂接合處應力分佈圖

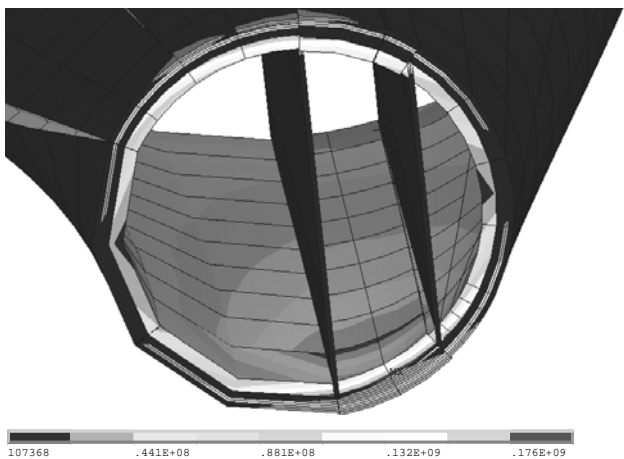


圖 18 葉片根部添加鋁合金 T6061-T6 之應力分佈圖

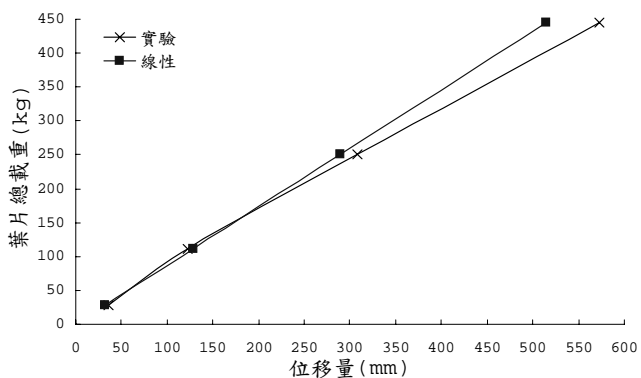


圖 19 葉片載重位移圖