

出國報告（出國類別：開會）

風力發電機葉片複合材料研討會及 離岸風力先進防蝕技術

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：鄭錦榮、化學師

派赴國家：丹麥、荷蘭

出國期間：95年9月2日至95年9月13日

報告日期：95年11月10日

出國報告審核表

出國報告名稱：風力發電機葉片複合材料研討會及離岸風力先進防蝕技術		
出國人姓名（2人以上，以1人為代表）	職稱	服務單位
鄭錦榮	化學師	台灣電力公司綜合研究所
出國期間：95年9月2日至95年9月13日		報告繳交日期：95年11月10日
<input type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2.格式完整（本文必須具備「目的」、「過程」、「心得」、「建議事項」） <input type="checkbox"/> 3.內容充實完備 <input type="checkbox"/> 4.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 5.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7.退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 8.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會（說明會），與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 9.其他處理意見及方式：		
<input type="checkbox"/> 1.同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____（填寫審核意見編號） <input type="checkbox"/> 2.退回補正，原因：_____		
<input type="checkbox"/> 3.其他處理意見：		

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「出國報告資訊網」為原則。

報告人： _____ 單位： _____ 主管處： _____ 總經理： _____
 主管： _____ 主管： _____ 副總經理： _____

QP - 08 - 00 F06

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：風力發電機葉片複合材料研討會及離岸風力先進防蝕技術

頁數 35 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人事處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

鄭錦榮/台電綜合研究所/化學與環境研究室/化學師/02-80782246

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：中華民國95年9月2日至95年9月13日 出國地區：丹麥、荷蘭

報告日期：中華民國 95 年 11 月 10 日

分類號/目

關鍵詞：三文治複合材、皺曲、剛度

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國任務主要參加在丹麥 Riso 研究中心舉行之第 27 屆國際材料研討會，研討會主題為『風力發電機葉片複合材料』，共有來自全世界 17 個國家、100 人參加，會中四天議程共發表論文 39 篇，主要可區分為 1. 風力發電機葉片三文治複合材料研製及力學探討，2. 風力機葉片製程及破損分析，3. 風力機葉片認證及修護等三部份，另赴 Hempel 防蝕公司研討離岸風力及風機塔座防蝕技術，提供各機種容易產生腐蝕的設計弱點及採用於離岸風力的防蝕對策。

一般風力機葉片是用玻璃纖維建造的複合材料構造，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積

層脫落等現象發生，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷。隨著離岸風力發展風機葉片長度會不斷的增加，其中以三明治發泡體及天然纖維複合材在風機葉片構材中最具前瞻性，予會學者提出，在狂風中風力發電機葉片破損主要承受縱樑翼板皺曲的壓力承重破損模式，在主縱樑翼板及機翼的負壓側翼板上使用三明治複材設計可解決皺曲的缺陷，但三明治複材結構在高承重風機大葉片的應用，需建立損傷容忍度，非破壞檢測方法和內部接合的設計，本報告分別整理會議中論文所提出之三明治發泡體的應用與力學分析，風機腐蝕設計的弱點及離岸風力的防蝕系統。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

摘要

本次出國任務主要參加在丹麥 Riso 研究中心舉行之第 27 屆國際材料研討會，研討會主題為『風力發電機葉片複合材料』，共有來自全世界 17 個國家、100 人參加，會中四天議程共發表論文 39 篇，主要可區分為 1. 風力發電機葉片三文治複合材料研製及力學探討，2. 風力機葉片製程及破損分析，3. 風力機葉片認證及修護等三部份，另赴 Hempel 防蝕公司研討離岸風力及風機塔座防蝕技術，提供各機種容易產生腐蝕的設計弱點及採用於離岸風力的防蝕對策。

一般風力機葉片是用玻璃纖維建造的複合材料構造，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷。隨著離岸風力發展風機葉片長度會不斷的増加，其中以三明治發泡體及天然纖維複合材在風機葉片構材中最具前瞻性，予會學者提出，在狂風中風力發電機葉片破損主要承受縱樑翼板皺曲的壓力承重破損模式，在主縱樑翼板及機翼的負壓側翼板上使用三明治複材設計可解決皺曲的缺陷，但三明治複材結構在高承重風機大葉片的應用，需建立損傷容忍度，非破壞檢測方法和內部接合的設計，本報告分別整理會議中論文所提出之三明治發泡體的應用與力學分析，風機腐蝕設計的弱點及離岸風力的防蝕系統。

目 次

摘 要.....	5
目 次.....	6
一、目的.....	8
二、行程概要.....	9
三、會議及研習內容.....	10
1. 風力發電機葉片的發展.....	11
2.風力發電機葉片的設計和破損模式.....	13
2.1 葉片受力狀況.....	13
2.2 目前葉片設計的特式.....	14
2.3 破損模式.....	17
3. 三明治材料在風力發電機葉片裡的潛在用途.....	17
3.1 最佳葉片設計基於不連續材料的最佳化.....	18
3.2 非線性分析的最佳葉片設計概念.....	21
4. 挑戰與增加三明治材料的使用.....	22
4.1 疲勞防治設計.....	22
4.2 損傷的容忍度.....	23
4.3非破壞檢測(NDI)方法.....	24
4.4 三明治材的革新概念和局部效應.....	25
4.5 葉片結構之偵測與防範.....	26
5. 風機塔座腐蝕防治技術.....	27
5.1 圓筒塔架製作.....	27
5.2 圓筒塔架內構.....	28
5.3 風機塔座腐蝕防治對策.....	28
四、心得與感想.....	30
五、結論與建議.....	31

六、參考文獻..... 33

一、目的

台電公司推展『風力發電十年發展計畫』，規劃 92 年度起的十年內設置至少 200 部風力機組或總裝置容量達 30 萬瓩以上為目標。目前一、二期計畫共有 123 台大型風力發電機加入台電服勤機組，由於是分批發包建置，分別由不同廠家提供機組，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，一般風力機葉片是用玻璃纖維建造的複合材料構造，有時也部份使用碳纖維，積層樹脂則使用聚酯或環氧樹脂。複合材料結構雖然有輕量的好處，但也較軟，變形大，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷，因此相關資料收集與劣化評估分析建立，將有助於風力機組維護及新機組技術規範修訂。

『建立風力機葉片複合材料破損分析及劣化監測技術』、『風機塔座塗層劣化診斷評估』，提高設備運轉的可靠度，建立風力機組葉片複合材料破損分析及維修評估方法與風力機組葉片複合材料結構的安全監測，為研究人員努力求知的目標，95 年 9 月 4-7 日在丹麥 Riso 研究中心舉辦風力發電機葉片複合材料研討會，透過研討會的學習及討論，風力機葉片複合材料破損分析及劣化監測技術，作為未來工作規劃之參考，另赴 Hempel 研發中心研習離岸風力先進防蝕技術及風機塔座腐蝕防治技術，因應離岸風力防蝕規範的研訂。

二、行程概要

本案開會期間含往返行程共十二天，即自民國 95 年 9 月 2 日至同年 9 月 13 日止。其行程概要簡述如下：

- 950902-950903 由中正機場赴丹麥(Roskilde)行程
- 950904-950907 參加 27 屆 Riso 『風力發電機葉片複合材料國際研討會』
- 950908-950908 丹麥哥本哈根 Hempel 研發中心研習離岸風力防蝕技術
- 950909-950911 荷蘭阿姆斯特丹 Hempel 公司研習風機塔座腐蝕防治技術
- 950912-950913 由荷蘭返國行程

三、會議及研習內容

本次出國任務主要參加在丹麥 Riso 研究中心舉行之第 27 屆國際材料研討會，研討會主題為『風力發電機葉片複合材料』，共有來自全世界 17 個國家、100 人參加，會中四天議程共發表論文 39 篇，主要可區分為 1. 風力發電機葉片三文治複合材料研製及力學探討，2. 風力機葉片製程及破損分析，3. 風力機葉片認證及修護等三部份，另赴 Hempel 防蝕公司研討離岸風力及風機塔座防蝕技術，提供各機種容易產生腐蝕的設計弱點及採用於離岸風力的防蝕對策，分別整理會議中論文所提出之三明治發泡體的應用與力學分析，風機腐蝕設計的弱點及離岸風力的防蝕系統。



1. 風力發電機葉片的發展

現代風力發電機機組已變得越來越大，現今最大的 5 百萬瓦電力輸出風力發電機葉片轉子直徑已經超過 126 米，由於平均風速隨著高度增加、轉子面積與風能成正比，與風速成立方比，因此風能在較大的單位轉子面積有較大的風能輸出。即使較大的風力發電機建造成本比較小的風力發電機昂貴，但一般趨勢是每千瓦小時的發電量的總建造成本隨風力發電機葉片尺寸的增加而減少。1970 年代末期風力發電機葉片尺寸的大小發展如圖 1 所示，與圖 2 比較，顯示 5 百萬瓦風力發電機葉片已超越最大的波音 747 和 A380 號空中巴士飛機的機身長度。

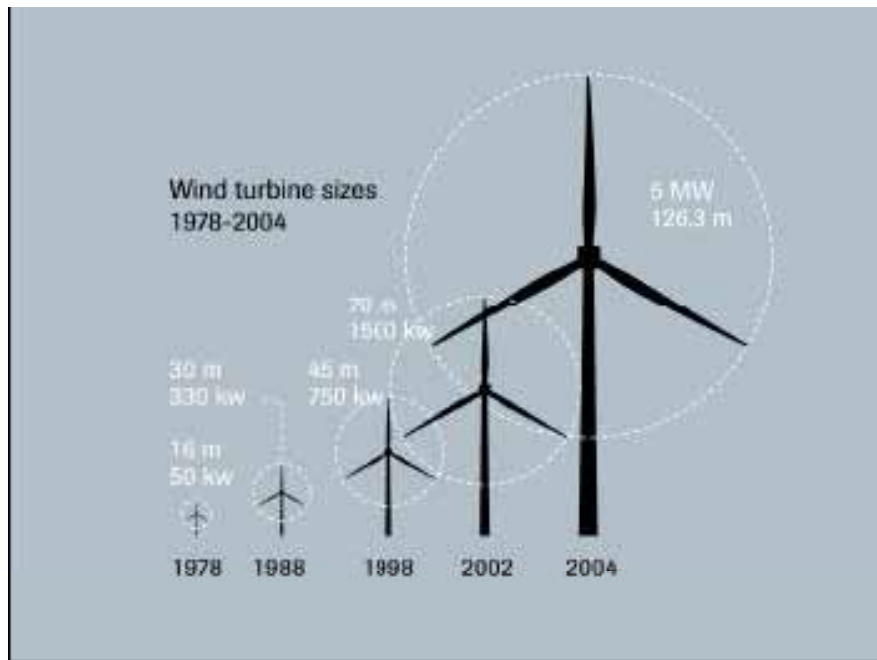


圖1：1978-2004年風力發電機發電量及容積發展(LM Glasfiber A/S)

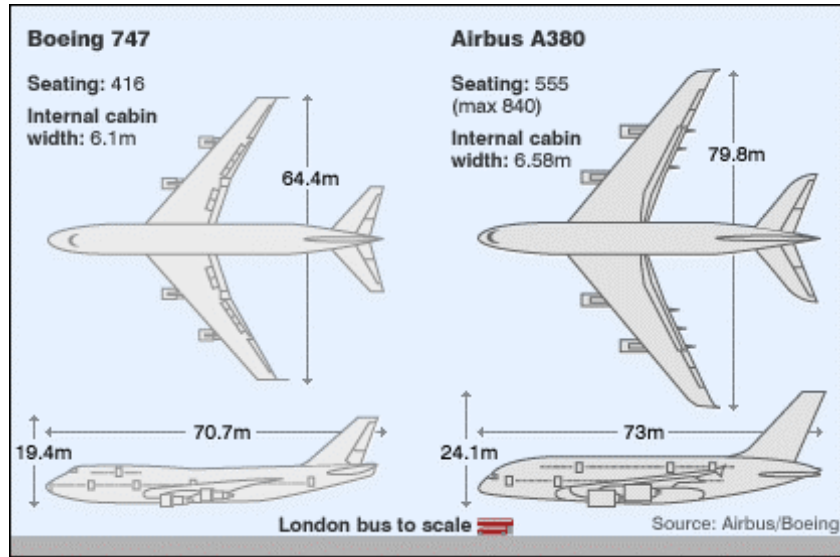


圖2：5百萬瓦風機葉片已超越最大的波音747和A380號空中巴士飛機的機身長

風力發電機葉片的大小預計將來會不斷的增加，主要是建置於離岸風力發電，渦輪機的電力輸出將達到 10 百萬瓦，在今後 10-15 年內葉片轉子直徑會到達 180 米。歐盟在 2006 年亦成立一 UpWind 2006 的 5 年計劃，綜合大約 40 個風力發電機製造商，維修廠商，大學，研究組織和其他專業組織，研討並且解決在 2010 之後的風力發電機建造上的設計極限。提出大型機組的設計方法及可用零組件和材料，並且規劃在 2020 年前達成目標。透過 UpWind 計畫發展的關鍵技術，開發足夠強度及輕重量比的創新葉片材料及結構，葉片轉子的設計等。

現代風力發電機葉片混合材質架構是由高性能聚合物基體複合材料(PMC)和一體成型的樹脂纖維(單層的皮肤)與三明治發泡體結合而成。目前的材質設計主要使用玻璃纖維(GFRP)，除 GFRP 之外幾個製造商為了降低葉片的重量，加強結構強度，對大型葉片採用碳纖維(CFRP)越來越多。

三明治發泡體可以被認為是兩或更多層狀的特殊複合材，具輕薄、堅固、強硬與稠密表層的核心材料。由於高強度、優異的抗彎曲特性，因此三明治優異的結構在風力發電機葉片夾層獲得廣泛的應用。

2. 風力發電機葉片的設計和破損模式

現代風力發電機葉片皆是採用中間為縱樑(spar)、兩面符合空氣動力學外殼夾層的承重設計，如圖 3 所示。在運轉期間為避免與塔座碰撞，葉片應具有足夠的剛性，當縱樑以及外殼的剛度保證空氣動力的流速分佈儘可能維持穩定。

2.1 葉片受力狀況：

在運轉過程中風力發電機葉片受力如下 Riso/DNS (2002)

- 由於氣流需在葉片表面形成的壓力差(傾斜彎曲)，構成襟翼端(flapwise)與邊緣端(edgewise)的扭曲。
- 地心引力的承重，在葉片的旋轉期間方向的改變，產生邊緣端彎曲。
- 由於襟翼端與邊緣端的剪刀合力並未到達葉片的中心點，導至葉片產生扭轉。
- 由於葉片(慣性力)的旋轉的額定承重。
- 由於pitch控制的加速或減速所導致的小量承重。

後三者對設計的影響較小，葉片受力主要在襟翼端與邊緣端的承重，由結構的設計和葉片的橫斷面所決定。縱樑承受襟翼端的大多數彎曲，而邊緣端的彎曲主要由葉緣(leading edge)及葉端(trailing edge)的氣流分佈所形成。

當風力發電機在大風失速(standstill)時，葉片遭受巨風的影響會產生極大的襟翼端彎曲承重損失。邊緣端最大彎曲承重的設計可以經由結合不同承重的動態模擬。

風力發電機葉片承受嚴苛的疲勞承重，疲勞分析可顯示葉片的臨界條件，葉片根部和元件的承重狀況，疲勞強度可經由層板和元件的承重建立的S/N 曲線查證，由破損累積假設(Palmgren/Miner定律)以 10^7 循環週期的應變作為疲勞極限。構成葉片疲勞的主要因素為襟翼端與邊緣端所產生的彎距，估算因襟翼端與邊緣端彎距所構成的損害約為97%，因此疲勞分析通常利用此二者彎距表示，對疲勞分析需同時考

慮彎矩的作用，因此疲勞分析亦需考慮時間的因素。

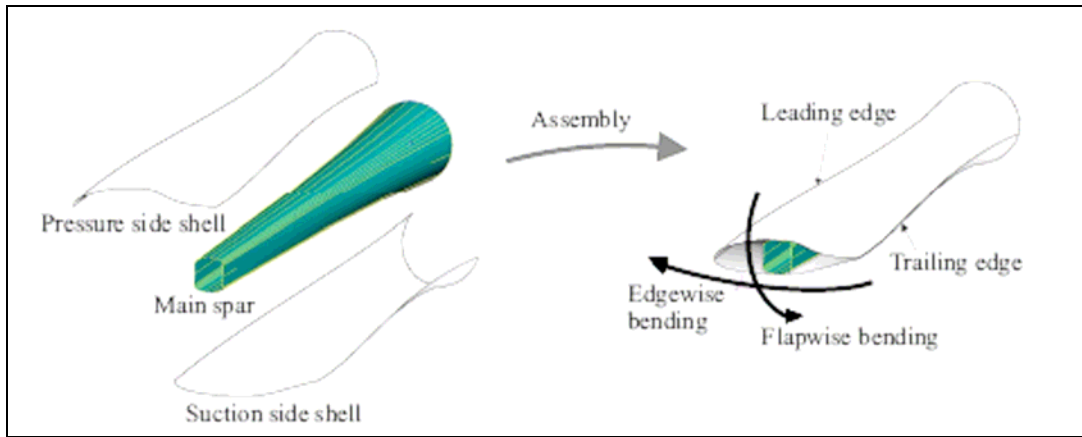


圖3：風力發電機葉片組件(Vesta wind System A/S)

2.2 目前葉片設計的特式

圖4為風力發電機葉片的機翼，是縱樑和外殼的典型設計。

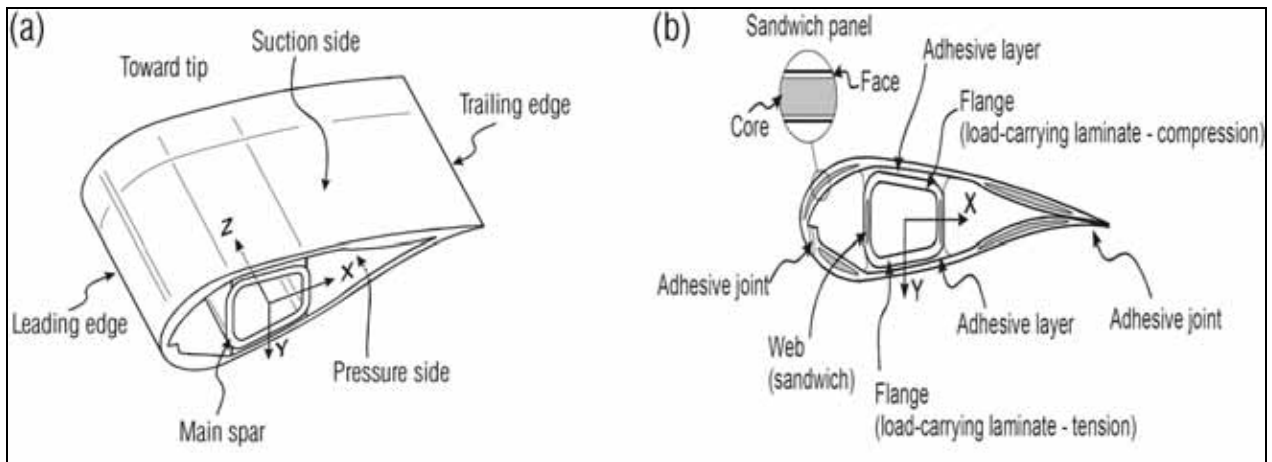


圖4：(a)風力發電機葉片的機翼含縱樑和外殼（氣動力學分佈），(b) 風力發電機葉片典型設計

在圖3和圖4中縱樑和機翼外殼是分開製造，再經接著劑黏合。目前部份風機葉片製造仍以這種接合方法，亦有其他製造商使用不同的設計和生產概念。比較圖3與圖4的不同設計，如圖5包括兩個機翼外殼是由二支或多支內腹板(web)結合而成。

利用這個設計概念，機翼外殼由相對厚的縱樑帽製造，材質為整塊的複合材層板。其他風力發電機製造商已有採用一體成型製程的生產技術，包括內部的腹板/勁杆的整個葉片架構。

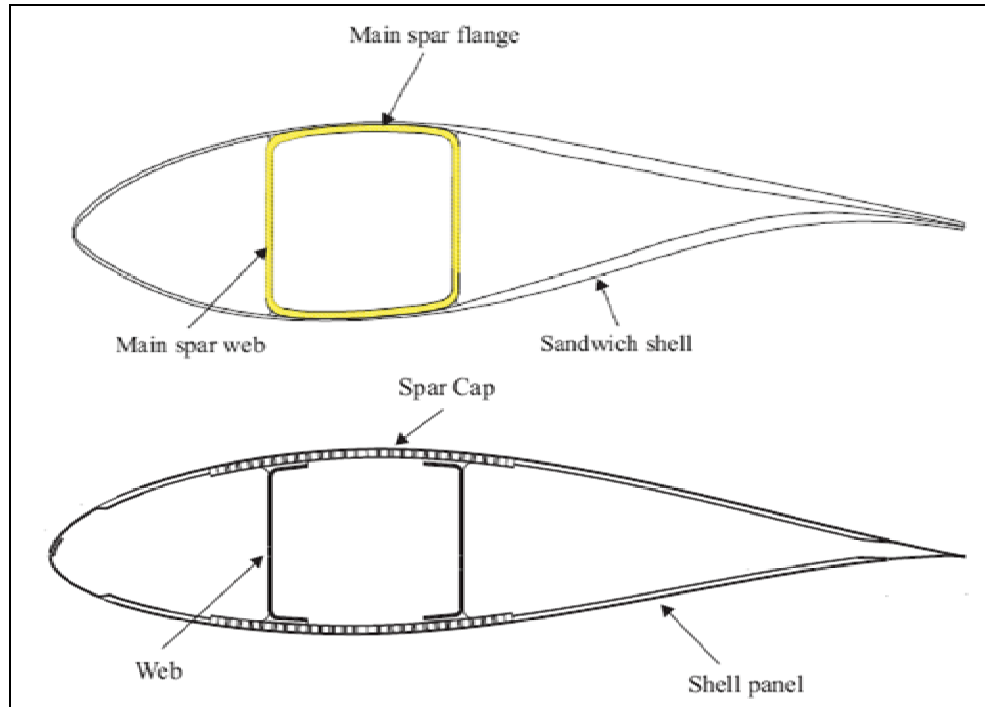


圖5：不同葉片設計概念，上圖為內部主縱樑的傳統設計，下圖兩個機翼外殼是由二支或多支內腹板結合而成Kuhlmeier(2006)

使用的生產技術隨著不同的製造商方法亦有很大的差異，但是一般風力發電機葉片的生產多採用複合預浸法 (prepreg) 技術或者真空注入法 (VARTM 或者不同的方法)，不管在圖5中採用的一種或多種的設計概念，更早描述的主要架構的原則皆適用，例如襟翼端的彎曲承重即是由縱樑或者類似縱樑結構所造成 (透過縱樑帽子和內部腹板/勁杆形成)，邊緣端的承重由外殼所造成。

如前所述風力發電機葉片是使用聚合物基材複合材料 (PMC) 與整塊的 (單皮) 及三明治複合材結合製造。複合材是由玻璃纖維或碳纖維所組成，而三明治核心材料可能是聚合的發泡體 (PVC 或 BMI)，巴西軟木或少部份蜂窩型的 (nomex)。考慮到風力發電機葉片的佈置，下列圖4 和圖5的設計特色通常被採用：

- 機翼外殼：葉緣及葉端採用複合材三明治層板能增加抗彎曲(沿邊緣的承重)。由傳統的葉片設計，圖4和圖5三明治外殼零件材在外殼與縱樑的黏接多使用相對薄的整塊複合層板。對內部的腹板/勁杆葉片設計如下。
- 主要縱樑：主縱樑通常從葉片的根部延伸到一個接近葉鼻的位置,如圖3所示，如前提及主縱樑的主要功能是將沿葉片的彎曲承重將轉移，因此主縱樑可視為梁。而翼板的主要功能(如圖4 和5之上下端)為將減少襟翼端的彎矩，並且它們通常用厚的整塊複合層板做成，對一些大型的葉片，通常使用混合的玻纖/碳纖混合組成。主縱樑積層通常包括UD層提供為彎曲的剛度及離開軸心或者角層(通常是雙軸)作為翼板在受壓中的(機翼的負壓側)的抗彎曲。腹板的功能(參閱圖4)減少襟翼端的剪應力，並且它們通常是由三文治複合材或巴西軟木核心及二軸積層的複合面板(相對葉片 $\pm 45^\circ$ 的方向座標)所組成。
- 縱樑帽(參閱圖5)：縱樑帽的主要功能是減少襟翼端的彎矩(如圖3和5)，並且由整塊厚的合成組織成層狀，一些大葉片亦採用玻璃纖維與碳纖維的混合。碳纖維是用來提升葉片的彎曲的剛度，主縱樑積層通常包括UD層提供為彎曲的剛度及離開軸心或者角層(通常是雙軸)作為翼板在受壓中的(機翼的負壓側)的抗彎曲。
- 內腹板/勁杆(參閱圖5)：腹板的功能是減少襟翼端的剪應力，並且它們通常是由三文治複合材或巴西軟木核心及二軸積層的複合面板(相對葉片 $\pm 45^\circ$ 的方向座標)所組成。三明治設計的選擇為了加強抵抗在同一面的剪彎曲力。

在翼板與腹板間的彎角轉旋剛度的縱樑設計，主要是加強翼板足夠的彎曲抵抗性和葉片及主縱樑切面因襟翼端彎曲橢圓型的壓抑，亦所謂Brazier效應(Brazier1927)。

2.3 破損模式：

考慮現今風力發電機葉片的設計，當風機承受五十年來的極端狂風，導致可能是襟翼端的承重的單一臨界承重升高而葉片的撞擊(Riso/DNV 2002)。如前述，承擔這種承重主要是縱樑或類似縱樑結構(由縱樑帽和內部的腹板/勁杆構成)，從葉片的根部延伸到鼻祖的位置。減輕結構翼板的承重通常由整塊的複合層板構成，因此大型的風力發電機葉片採用非常大的整塊無剛度外殼帽，這對局部皺曲破損頗為靈敏。由經驗顯示，局部皺曲或類似局部皺曲為主縱樑翼板整塊複層(Jorgensen et al. 2004; Kuhlmeier 等. 2005; Kuhlmeier 2006; Overgaard 2005a和2005 b; Sorensen et al. 2004)。局部類似皺曲破損模式主要取決於產品的瑕疵，大多發生於生產設備和製程方法的改變。例如產品的瑕疵在腹板主要是核心材料的厚度不均一，翼板複合材的角度失調及幾何形狀的瑕疵皆是由於部份的變化(Kuhlmeier等2005; Kuhlmeier 2006; Overgaard 2005a和2005 b)。

3. 三明治材料在風力發電機葉片裡的潛在用途

三明治材料或者結構構件設計已經在現代風力發電機葉片中扮演非常重要的角色。如圖4和圖5三明治材料/元件目前已應用在機翼外殼及主縱樑的腹板，應用三明治的主要基本原理是它能提升皺曲的抵抗，並且同時使重量減到最小。

風力發電機葉片結構使用更多的複合三明治素材/結構是否有利？目前大多數葉片組件已經採用三明治材料，如果主縱樑翼板也採用複合三明治材料/結構生產，是否有利的問題。這問題要求整個葉片設計概念重新評價，考慮到全部相關承重，這將一艱困的任務，根據最近的研究，部分處理問題是可獲得解答，並且顯示可得完整的答案，這將在下述內容中針對襟翼端承重彎曲來討論。

在主縱樑的設計過程中需考慮很多的評估標準：

-整體的剛度(葉鼻撓折-塔間隙)。

- 耐剛性(在機翼的負壓側上的主腹板或縱樑帽)。
- 葉片的eigenfrequencies，利用經過1P和3P,4P頻率評估不會與塔座碰撞的葉片eigenfrequencies。
- 在靜止和疲勞承重下的材料破損，見Wacker(2003)。
- 三明治組件的局部表面不穩定 Leissa(1985)及Zenkert (1999)。

3.1 最佳葉片設計基於不連續材料的最佳化(discrete material optimization)

在最近的研究中 Lund and Stegmann (2005, 2006),以及 Lund 等(2005), 提出一種複合材外殼構造的最佳化之新方法，被稱為不連續材料的最佳化(DMO)的這種方法，材料剛度(或者密度)從多相拓撲學最佳化的想法，作為殷選計算的重量總數材料，並且適合在有限元素分析處理。在殷選材料設計變量為比例因子(或者重量函數)，以這種不連續方法選擇最好的材料(用最佳的定向性)變為一個連續的公式。設計目標選擇整體數量，例如最大的剛度(整體剛度)，最低 eigenfrequency 或與限制承重條件一起的最大總重量，因此原料成本亦被考慮。材料局部破損模式或起皺的破損並在這種方法方面提出，但是進一步研究也在進行中。

如圖 3 風力發電機主縱樑架構以 DMO 方法設計最大的整體剛度，以及設計最佳化的風力發電機縱樑帽如圖 5，主要目標是要增加的皺曲的承重因子，考慮重量因素。在各種情況下 DMO 方法可結合有限元業分析法使用在複合成殼體元件。這裡只引用與葉片主要部分的最大剛度設計有關的結果，但是關於使縱樑帽承重最佳化皺曲的結果可查閱 Lund(2005a)以及 Lund(2006)。

考慮風力發電機主縱樑的問題，如 Vestas V52 風力發電機(Vestas 風力系統 A/S 丹麥)25 米風機葉片，受到如 Jorgensen 等(2004)及 Overgaard(2005)所定義襟翼端的彎曲承重，DMO 方法已被提出應用在一個最大的整體剛度設計，Lund 等(2005 b)

及 Lund 和 Stegmann (2005)。圖 6 為主縱樑的有限元素分析結構。

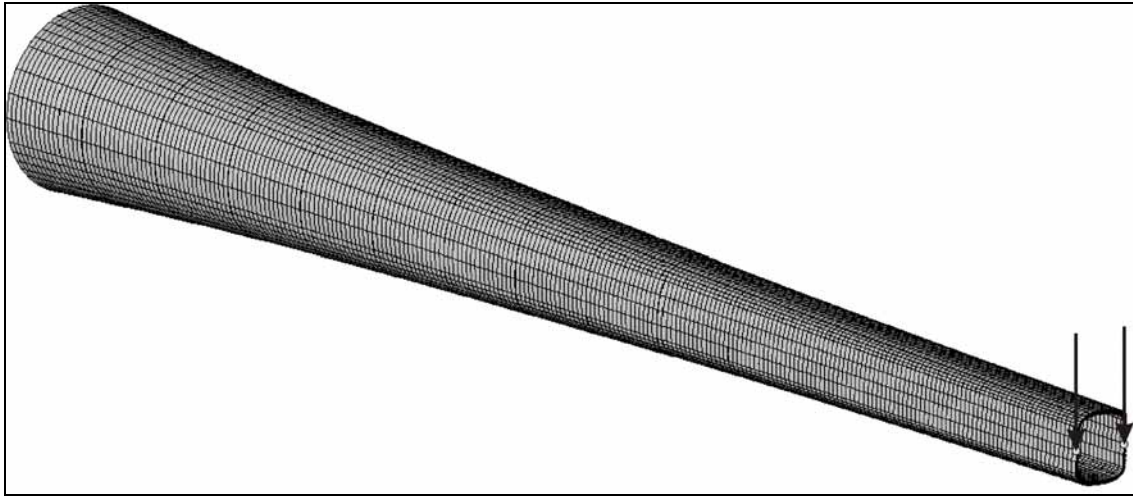


圖6：主縱樑受承重時最大剛性設計的有限元素模式(lund and Stegmann,2005)

在圖 6 模型裡有兩種材料，一種是鋼硬的GFRP材料和另一種更柔軟的等方向性 (isotropic) 核心材料，並且限制條件為填滿柔軟的材料總量為 15%，積層數被設定為 8，柔軟材料只能選擇 6 層內層，並不用在表層。簡單而言GFRP 材料只能在 0° 、 $\pm 45^\circ$ 及 90° 方向排列，因此內、外層設計變數為 4，全部 6 個層為 5。

在圖 7 中最佳的玻璃纖維材料方向為 8 層，如果已經選擇柔軟的材料，方向並沒有被顯示，第 1 層是內部(底部)層，第 8 層為外部層(頂部)。如預期大多數柔軟的材料已經被加入內層的腹板，接近主縱樑的根部的輕微應力區域。GFRP材料的方向性也符合早期與承重有關縱樑的機理。在翼板的各層主要受 0° 方向性所支配，例如沿著縱樑的長度，計算彎曲。由於主縱樑會稍微地沿著桅杆方向扭曲產生切應力及扭力，故在最後第三塊腹板大多數GFRP材料皆設計為 $\pm 45^\circ$ 方向性。

在圖7中已選用5 種天然材料，對天然纖維材的選擇下一步是擴大設計空間，為了獲得更多的詳細設計資料，並且考慮更大的纖維角度變化。不過圖7仍然說明解決材料的適當選擇、積層的順序及風力發電機葉片主縱樑的最大剛度設計，同時在圖7中很清楚敘述最佳剛度設計符合圖4 和圖5傳統主縱樑的設計，例如整塊翼板受 0° 積層(UD)支配，腹板由三明治材以 $\pm 45^\circ$ 面膜與一層柔軟/順從核心材料方向性彼此

疊積。

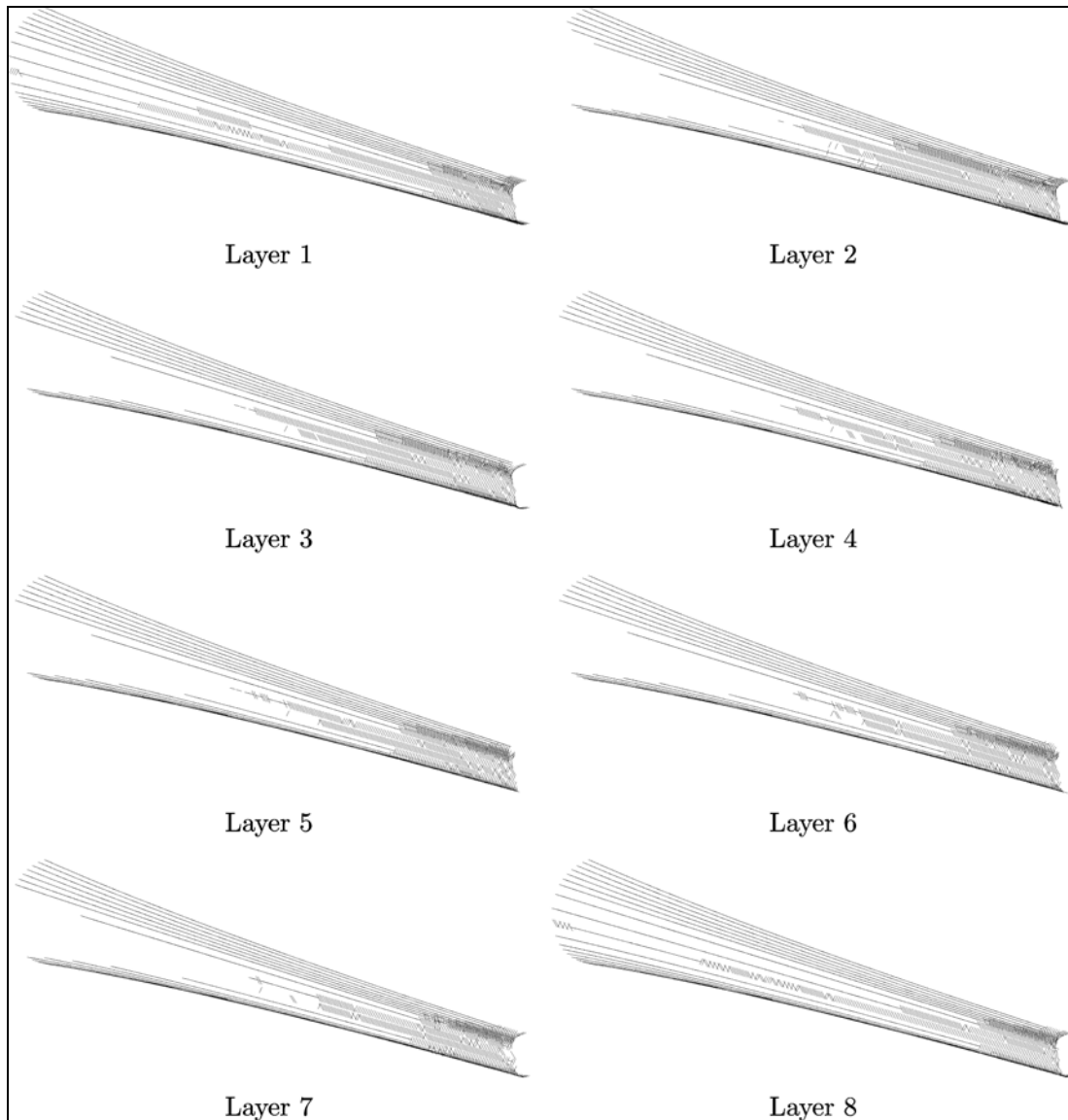


圖7：在16層玻璃纖維中利用77片嵌板的最佳材料排列方向，包括四種玻璃纖維DMO積層方位變化(0° 、 $\pm 45^\circ$ 及 90°)(Lund and Stegmann, 2005)

因此典型整塊主縱樑的設計概念，可以認為是在襟翼端承重的最大剛度的最佳選擇(或者最好的選擇)，返回問題焦點，例如風力發電機葉片在相當程度上使用三明治架構後是否比目前實際，相對於主縱樑需考慮襟翼端承重的最大剛度，答案是

否定的。

3.2 非線性分析的最佳葉片設計概念

由Berggreen(2006)最新的一項研究，考慮風力發電機葉片在主縱樑襟翼端承重的傳統積層設計如圖3和圖4所示，研究的目的是探討使用三明治材料的潛在優點，與未來風力發電機傳統在翼板整塊的複合材葉片直徑180米的轉子比較，研究重點含先前所述評估基準(非整體刚度)，並且建議設計的變化如圖8 所示。

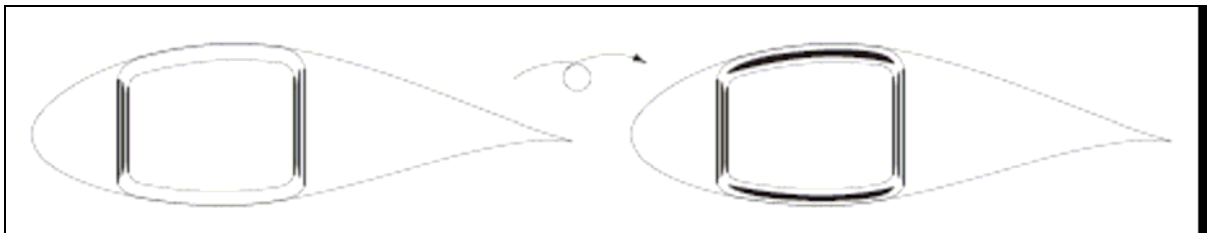


圖8：Berggreen(2006)建議設計的變化

在研究過程中，利用有限元素分析的一個參數模式來分析整塊複合材和三明治材翼板的兩種基本設計，分析證明在縱樑翼板受壓皺曲已超出整塊的設計標準，與Jorgensen et.al(2004)裡在報告的結論相符、Kuhlmeier (2005)、Kuhlmeier(2006)、Overgaard(2005a)和(2005b)；Sørensen et.al(2004)。

更進一步顯示引入三明治材至縱樑翼板導致整體更彈性的結構，使塔座評估標準更為明確，原因是機翼尺寸固定，暗示取代剛硬的複合材(例如三明治的底層)被移至更接近於機翼中心(襟翼端軸的彎曲)，降低抗彎刚度，預估三明治材設計有效的減重和增加皺曲的能力，雖然利用三明治材可獲得前述列舉的設計標準及限制，但需要較高的費用，而且研究顯示適當的選擇三明治核心材料是重要的防止壓縮時表面起皺紋。

研究也包括偵測幾何學形狀殘缺的影響，由幾何學非線性有限元素分析，假設

殘缺品相當於形狀模式，從線性分析獲得最大幾何學殘缺幅度(最大GIA)之10%和20%翼板厚度，從非線性分析證實殘缺品的敏感度，以及顯示當翼板變軟時，縱樑腹板角落的材料破損變得更為關鍵。對整體的感觀，這些結果與大型試驗報告Kuhlmeier等(2005)；Kuhlmeier(2006)；Overgaard(2005a和2005b)的實驗結論相符，除了真正的殘缺品模式形狀與Berggreen等(2006)不同，依循在生產過程期間引入幾何學殘缺品，經試驗後發現局部類似模式的皺曲導致破壞，此外發現沒有發生模式跳躍的模式相互作用，意思為承重撓度沿著基本路徑直至沒遇到分歧或者轉動行為的一個極限點。因此所獲得曲線並無顯示斷斷續續的特性。由於在翼板層內結合層間和壓縮應力的效應導致發生破損，最後逐漸脫層至斷裂。

據Berggreen等(2006)的研究當皺曲量被過份高估及不考慮殘缺品的不可避免存在時，判斷線性皺曲分析並不足夠，因皺曲對殘缺品敏感，撓度並不敏感，由於三明治設計較單面設計容納的皺曲量為佳，建議最可行的縱樑設計應包括額外的皺曲量，而不是撓度上的安全。

4. 挑戰與增加三明治材料的使用

在隨後部分報告的結論，說明主縱樑翼板(或者縱樑帽)的局部皺曲是風力發電機葉片上負壓側是主要的破損模式。因此翼板(或縱樑帽)在壓縮承重時，使用三明治材較整塊的複合層板為優，一個三明治層板可提供額外的皺曲量和/或提供一種相似皺曲量更輕便的設計。不過許多潛在挑戰性的問題，皆與增加複合三明治層板的使用有關，必須加以鑑定。

4.1 疲勞防治設計

提升皺曲量達到減低整體剛度的花費，Berggreen等(2006)說明翼板的應變會顯著增加，可能導致與疲勞有關的設計，需要更深入有系統的設計研究，包括考慮所有相關的承重、在狂風下襟翼端與邊緣端的扭曲、疲勞和衝擊狀況，系統設計學習基於發展的最優化策略，由Stegmann和Lund(2005)、Lund和Stegmann(2006)、

Lund 等(2005)建議之 DMO 方法是強有力的工具，可合理評估不同的材料系統(複合 GFRP 和 CFRP 系統，材料方向性和核心材料)及設計，對不同數量的整塊和三明治的層板(以重量限制採用總體積不同量的軟性材料)，三明治材的設計概念透過 DMO 分析，可獲得在實際的承重條件或疲勞下的分析。

4.2 損傷的容忍度

損傷的容忍度是非常受到關注，例如預先更換風力發電機葉片的承重架構部分元件，在主縱樑的翼板，複合三明治層板在整體的架構應獲得信賴，不可在更換過程中受到損害，與飛機或者船舶相比較，一般風力發電機的安全性較受輕視，Herrmann 等(2005) 及 Hayman(2006)，不過風力發電機葉片提出特別挑戰，它們類似於飛機(或更大)的大尺寸生產，但是有規律的全面檢查的可能性受到限制，或者甚至不存在，由於易受問題的影響，關於風力發電機葉片損壞容忍度舉例如后：

Hayman (2006)

- 普遍無安全性的介定；損耗作為經濟損失。
- 容易被停止使用。
- 在安裝之後基本上不易接近；有規律的全面檢查難或者不可能。
- 很多類型的缺陷與製造商及製程有關，較少在運轉中受到損傷。
- 很少在運轉中受到鳥、雹、閃電損害。
- 相對明確的承重(空氣動力學，重力)。
- 大量生產，及經常是大尺寸。

因此最理想的方法是安全壽命的設計，估算結合瑕疵可能未被發現最壞的產品缺陷，及很可能發生而沒有被注意到最壞的運轉損傷。

為了實現一個安全壽命設計系統模式，要求發展一個易理解及可靠的運轉時損傷事故，缺陷可能在實際的產品內發生，包括它們的意外統計，最好整個過程的結

果是最大可允許的缺陷與損傷和可經由外觀可觀察的。

目前對工業的主要挑戰，在於製造商之間的彼此競爭，限制了他們分享資訊的數量，與很多其他工業相比，由於生產技術的差異，使得產品的缺陷更依靠製造商，由於葉片體積龐大，各方面的生產控制改進，包括非破壞檢測能力，應該是降低葉片缺陷和不確定意外的發生，為節省成本的方法。

4.3 非破壞檢測(NDI)方法

經由檢測取得葉片最大允許的缺陷或損傷訊息，已經成為重要的問題，三明治結構的主要缺點是製造上的缺陷及損傷(特別是在核心和界面的深處)不能被一般方法所檢測。有時候只能單邊擷取，並且對大區域檢查更造成進一步的挑戰，有許多可應用的NDI技術，可發展為三明治結構材所需要的檢測，三明治結構材檢測技術以超音波，shearography和X射線為最有前瞻性的非破壞檢測技術。

引用Hayman(2006)關於檢測較厚的三明治結構材的缺陷和損傷，最大的挑戰包括：

- 檢測較厚的三明治結構材的缺陷/損傷能力受限制。
- 巴西軟本的三明治核心結構特別難以檢查，因很多缺陷隱藏在核心接合間，核心材料的自然特性為局部密度有很大的變化。
- 通常用單邊的觀察法不可能發現遠邊的缺陷。
- 目前對NDI系統的靈敏性和可靠性相關知識貧乏，使複合材檢測能力受到限制，檢測的結果亦需被量化。
- 目前倘未有三明治複合材的非破壞檢測標準。

一次發展，因風力發電機而改進那些情勢很可能在廣泛使用是架構健康監控的例如使用纖維眼傳感器的葉片的。這些可能使用既沒發現異常事件並且識別變化

在同損害的發生或者一個缺陷的主要發展交往的動態的回應內。

4.4 三明治材的革新概念和局部效應

三明治複合材主要結構非常倚重設計、建構和材質的選擇，三明治複材/結構與整塊複材相比較，由於三明治複材鄰近材料具有不同剛性和強度的特性，導致界面結合薄弱，更容易脫層和破損為其主要缺點。

三明治複材與均質結構（例如發泡體核心,巴西軟木核心)或者非均質(例如蜂窩、溝狀核心等)支援核心、如圖9所示，集中的承重在支撐接合處、接合點或接合線上，層間剪應力已是眾所周知，主要是幾何效應和材質的間斷性所引起的局部效應。雖然三明治複材結構很適合轉移整體承重的彎曲、剪應力、局部剪力及彎曲效應，如前所述，引致嚴厲的厚度剪力和正應力，這些厚度應力組件具有重要的大小，在三明治複材及材質界面中可以接近或者超過可允許的應力Zenkert(1995)。

風力發電機葉片包括許多接合(翼殼的葉緣及葉端，翼殼和主縱樑之間，在縱樑帽和內部勁杆與剪腹板間) 如圖4和圖5，在接合處鄰近，上述原因應力集中導致局部效應，影響三明治複材的靜態和疲勞強度Thomsen等(2005)、Bozhevolnaya等(2005)、Bozhevolnaya和Thomsen (2005a和2005 b)。在前節所討論的皺曲現象會引起嚴重的層間和厚度的正應力，在很多案例中須確定風力發電機葉片結構的極限承重Kuhlmeier等(2005)；K uhlmeier(2006)，Overgaard(2005a及2005b)。改進或提升三明治複材系統損傷的容忍度和革新裂縫終止與承重介紹概念將是關鍵問題。

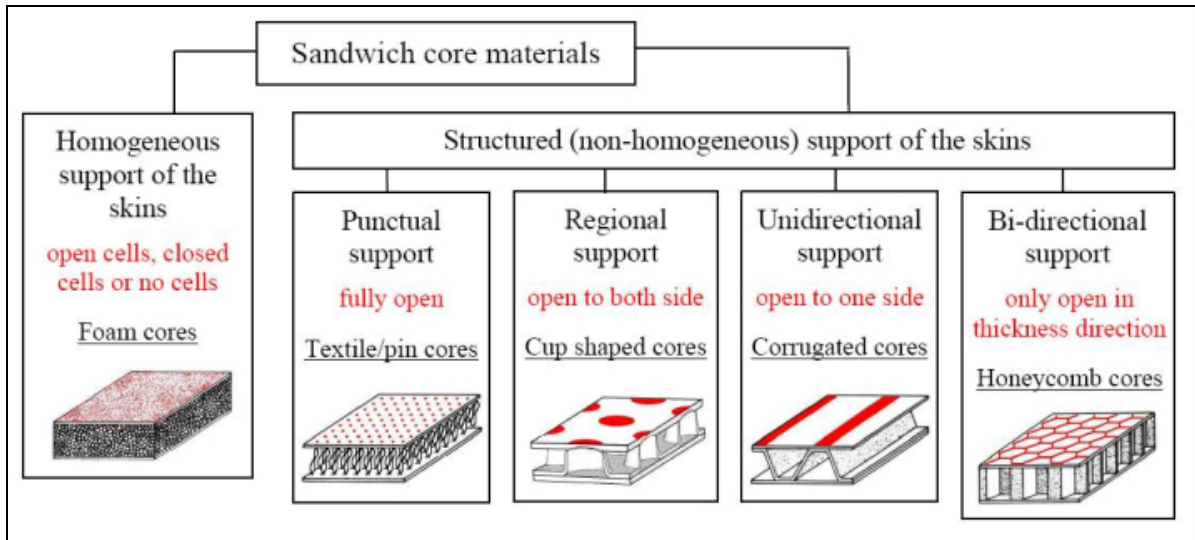


圖9：三明治複材可區分為均質核心結構及非均質支撐架

一種改進表皮及核心的界面損傷容忍度的方法，包括將纖維的形式用結構構件發展成三明治複材系統，由針狀或板狀組織成較厚層的三明治複材結構，如圖9所示。這些Z方向應該提供剛硬和堅固的表面與表皮的連接如圖9所示，如果發生局部損傷考慮到承重再分散，並且同時三明治複材在板面的剛度和強度並不會受到損害。

4.5 葉片結構之偵測與防範

葉片施工過程大都以機器代勞，準備工作及檢查重點還是靠人判斷後施作，雖再三強調事前謹慎，但人為疏忽總是難免，製程中每一關鍵點及步驟須一再檢查外，還須透過儀器進行非破壞檢測以防範、篩選、確認，直到成品。

風力機安裝運轉後，如何監視葉片之情況，供為卸葉檢查或更新之判斷參考，也很重要。是不是在葉片製作時即預埋偵測器？目前有很多國家還在研討中。經與葉片製造商討論其中以應用 UT 檢測為一般廠商所採用，如下圖 10 至圖 12 所示。

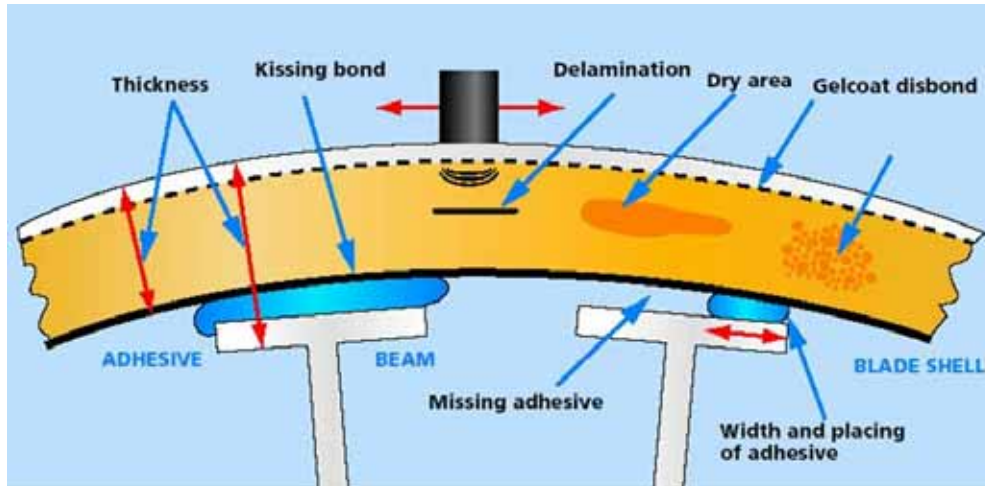


圖10：各式葉片結構所偵測出之可能缺失



圖11：現場偵測葉片結構之一



圖12：現場偵測葉片結構之二

5. 風機塔座腐蝕防治技術

5.1 圓筒塔架製作

鋼板(A572-50)進料準備落樣，若加工時間長，可考慮先噴砂再塗預塗底漆(Shop primer)，以防止工廠期間的銹蝕，通常採無機鋅粉漆。若未來之正式漆將採高鋅粉底漆或鋁鋅熱熔射打底，反正要作全面噴砂，可考慮免作預塗底漆並保留黑皮，唯

應留意鋼板之置放場所。凸緣(A694-50)以鍛造成形進料，也可考慮先噴砂再塗預塗底漆。其情況與鋼板類似，可考慮免作預塗底漆並保留黑皮，唯應留意置放之場所，不宜曝露室外，以減輕未來表面處理的工作負擔。若須採高鋅粉底漆或鋁鋅熱熔射打底，應先全面噴砂，得到應有的乾淨表面及粗度，才正式施工，過程中應控制好環境條件。

5.2 圓筒塔架內構

塔架內之艙品可採熱浸鍍鋅或油漆，為免保養，建議全採熱浸鍍鋅為宜；但在塔架外，僅採熱浸鍍鋅是不夠的，鋅怕氯離子，應採油漆雙重防蝕。圓筒塔架法蘭接頭靠外緣須施塗填縫劑，以防間隙腐蝕及防水滲，桁構塔架接合處亦然，靠海者僅熱浸鍍鋅絕對不足，須全面塗漆。

5.3 風機塔座腐蝕防治對策

- (1) 目前多數風力機之 FRP 鼻錐罩或機艙罩都設馬鬃於活動隙以隔離，仍然無法確保百分之百氣密，這將是腐蝕嚴重根源。
- (2) 輪轂雖有 FRP 鼻錐保護，但多數風力機鼻錐、葉片與機艙之間都有縫隙，仍曝露室外，雖然鑄件不易生銹，但為確保 20 年，須補土再塗漆以防蝕。
- (3) 輪轂有 FRP 鼻錐保護，縫隙還是不少，多數風力機之鼻錐骨架僅採熱浸鍍鋅，若在海邊將渡不過 5 年，一樣須再塗漆以防蝕。
- (4) 風力機之鼻錐骨架僅採熱浸鍍鋅，在海邊放置數月，會有鋅銹蝕之情況，事前應塗油漆。
- (5) 風力機之葉片根部螺栓採熱浸鍍鋅，在海邊不到數月，一樣有白銹斑斑、鋅盡銹蝕之現象，內陸環境比較單純，熱浸鍍鋅應可渡過，但海邊則較嚴重，因 T 形螺栓在疲勞及應力腐蝕的環境下運作。
- (6) 多數風力機傳動軸與機艙罩、塔架與機艙罩等之間皆有縫隙，氣冷式冷卻器通室外，機組仍曝露室外，主軸機座須塗漆隔離，螺栓可採用 316

材質，機艙內部元件須各自防蝕。

- (7) 因縫隙的關係，發電機組幾乎仍曝露於室外，機艙內部構件及骨架須防蝕。
- (8) 電器控制箱雖位於機艙內，但應採雙重防蝕措施以隔離，開門皆設置迫緊以氣密，相對而言，另要好好規劃通風冷卻之相關措施，以免溫升跳機。位於輪轂之螺距器控制箱，其訊號輸出端及輸入端應設置耐候性良好的連接器以隔離鹽份與水氣並確保線路正常運轉。
- (9) 離岸風力防蝕規範可參照 NORSOK M501 (first edition in 1994)、ISO 12944 (first edition in 1998)、ISO 20340 (first edition in 2003)及 NACE TM 0204, 0304 and 0404 (first editions in 2004)。
- (10) Hempel 油漆公司建議(a)高出水面區域：底漆為富有鋅漆，環氧中塗和聚氨基甲酸酯面漆，最小 3 度和總膜厚最小 320 μm 。(b)飛濺區域：環氧或者聚酯樹脂(耐海水等級)，最小 2 度和總膜厚最小 600 μm 。(C)低於水線區域：環氧的(耐海水等級)，最小 2 度和總膜厚最小 450 μm 。

四、心得與感想

台電公司推展『風力發電十年發展計畫』，規劃92年度起的十年內設置至少200部風力機組或總裝置容量達30萬瓩以上為目標。目前一、二期計畫共有123台大型風力發電機加入台電服勤機組，為使其能依規制發揮功能，則建立適當的維修計畫是首要步驟，但由於是分批發包建置，分別由不同廠家提供機組，維修計畫也要兼顧個別機組的特性，容易發生非計畫性損壞的構件，勢必成為使用上的安全困擾，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，一般風力機葉片是用玻璃纖維與發泡材建造的三文治複合材料構造，有時也部份使用碳纖維，積層樹脂則使用聚酯或環氧樹脂。複合材料結構雖然有輕量的好處，但也較軟，變形大，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷。

由於風機廠商技術資訊有限釋出，預估待風機承包商保固期結束後，台電公司將要面對風機關鍵性元件形形色色的毀破及維護，因此面對多家廠商機種與技術、設計資訊不公開，如何建立監控、偵測、破損分析、修補及更換技術，公司內部將要面臨極大的考驗。

目前國外預估離岸風機可發展至 12MW，針對台灣颱風、高溫、高濕、鹽害腐蝕氣候及腐蝕防治收集相關資訊，以配合政策釐訂離岸風機相關規範及設備維修診斷方法。

五、結論與建議

1. 針對風機的發展歐洲已組織 2006 upwind 聯盟，美國 2005 年在德州公眾土地辦公室（GLO）及州立能源管理辦公室(SEC0)支持下，由休士頓大學針對離岸風能技術研發、經濟、環境及政府政策面成立聯盟，成員包括各大學、州立行政機構以及美國能源部，國內亦有風力聯盟與風機產業聯盟組織，因此離岸風機的發展為全球趨勢。
2. 目前台電公司風力機組分別由不同廠家提供，維修計畫特別煩重，針對葉片損傷，公司相關單位應籌組維護小組建立葉片力學結構分析、複合材料的組成研究、黏合接著技術開發、防雷擊設計規劃、材料之機械化學腐蝕特性、使用壽命預估、非破壞檢測、破損分析與維護修補技術等。
3. 維護小組全面整合各廠牌機組在保固合約期內維護、維修技術之學習，儘早購置檢測設備及建立相關技術，以迎戰歐美機組葉片的水土不服。
4. 建立上述基礎技術後再推展至其他廠牌機組才不致受制於系統廠商，爭取國內數百座風機維修保養、破損事故分析工作，日後更可立足台灣離岸風機，遠望新興的亞洲市場，納入台電風機維護事業之版圖。
5. 台灣岸上風力建置地點已趨飽和，岸上風機建置技術在歐美等國已是成熟技術，關鍵元件與系統整合完全掌握在國外數大風機廠商手中，國內產業已有共識投入離岸風機產業，共同開發適合亞洲(高溫、潮濕、颱風)氣候的離岸風機，風機葉片修護技術的建立，亦將有助國內離岸風機產業之發展。
6. 目前國外預估離岸風機可發展至 12MW，針對台灣颱風、高溫、高濕、鹽害腐蝕氣候及腐蝕防治收集相關資訊，以配合政策釐訂離岸風機相關規範及設備維修診斷方法。
7. 在狂風中風力發電機葉片破損主要承受縱樑翼板皺曲的壓力承重破損模式，在主縱樑翼板及機翼的負壓側翼板上使用三明治複材設計可解決皺曲的缺陷，但三明治複材結構在高承重風機大葉片的應用，需建立損傷容忍度，非破壞檢測方法和內部接合的設計。

8. 離岸風力防蝕保護系統(a)高出水面區域：底漆為富有鋅漆，環氧中塗和聚氨基甲酸酯面漆，最小3度和總膜厚最小320 μm 。(b)飛濺區域：環氧或者聚酯樹脂(耐海水等級)，最小2度和總膜厚最小600 μm 。(C)低於水線區域：環氧的(耐海水等級)，最小2度和總膜厚最小450 μm 。

六、參考文獻

Berggren, C., Branner, K., Jensen, J.F. and Schultz, J.P., (2006). Application and Analysis of Sandwich Elements in the Primary Structure of Large Wind Turbine Blades. *Journal of Sandwich Structures and Materials* (Special Issue – 7th International Conference on Sandwich Structures), Accepted for publication.

Bozhevolnaya, E. and Thomsen, O.T. (2005a). Structurally Graded Core Junctions in Sandwich Panels: Quasi Static Loading Conditions. *Composite Structures* 70 (Issue 1), 517-527.

Bozhevolnaya, E. and Thomsen, O.T. (2005b). Structurally Graded Core Junctions in Sandwich Panels: Fatigue Loading Conditions. *Composite Structures* 70 (Issue 1) 528-539.

Bozhevolnaya, E., Lyckegaard, A. and Thomsen, O.T. (2005). Localized Effects Across Core Junctions in Sandwich Beams Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Loading. *Applied Composite Materials* 12, 135-147.

Brazier, L. G. (1927). On the Flexure of Thin Cylindrical Shells and Other Thin Sections. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 104–114.

EU Project “UpWind” (2006).

Hayman, B. (2006). Damage Assessment and Damage Tolerance of Sandwich Structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials* (Special Issue – 7th International Conference on Sandwich Structures), Accepted for publication.

Herrmann, A. S., Zahlen, P.C. and Zuardy, I. (2005). Sandwich Structures Technology in Commercial Aviation – Present Application and Future Trends. In *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials* (Eds. O.T Thomsen et al.), *Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures (ICSS-7)*, Aalborg, Denmark, 13-26.

Jørgensen, E. R., Borum, K. K., McGugan, M., Thomsen, C. L., Jensen, F. M., Debel, C. P. and Sørensen, B.F. (2004). Full Scale Testing of Wind Turbine Blade to Failure - Flapwise Loading. Risø-R-1392(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.

Kühlmeier, L., Thomsen, O.T., Lund, E., (2005). Large Scale Buckling Experiment and Validation of Predictive Capabilities. In Proceedings (CD-rom) of the 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), Durban, South Africa.

Kühlmeier, L. (2006). Buckling of Wind Turbine Rotor Blades: Analysis, Design and Experimental Validation. Ph.D. Thesis. Aalborg University and Vestas Wind Systems A/S.

Leissa, A.W. (1985). Buckling of Laminated Composite Plates and Shell Panels. AFWAL-TR-85-3069, 1985.

Lund, E., Kühlmeier, L., Stegmann, J. (2005a). Buckling Optimization of Laminated Hybrid Composite Shell Structures Using Discrete Material Optimization. In Proceedings of the 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-6), Rio de Janeiro, Brazil.

Lund, E., Stegmann, J., Johansen, L., Jakobsen, J. (2005b). On Methods for Gradient Based Structural Optimization of Sandwich Structures. In: Theory and Applications of Sandwich Structures (Eds. R. A. Shenoi, A. Groves & Y.D. S. Rajapakse), University of Southampton, ISBN 085432-8254, 287-322.

Lund, E., Stegmann, J. (2005). On Structural Optimization of Composite Shell Structures Using a Discrete Constitutive Parameterization. *Wind Energy* 8 (Issue 1), 109-124.

Lund, E. (2006). Large Scale Optimization of Compression Loaded Composite Structures. In Proceedings of the 3rd European Conference on Computational Mechanics (ECCM-2006), Lisbon, Portugal.

Lund, E., Stegmann, J. (2006). Eigenfrequency and Buckling Optimization of Laminated Composite Shell Structures Using Discrete Material Optimization. In: Proceedings of IUTUAM Symposium on Topological

Design Optimization of Structures, Machines and Materials: Status and Perspectives (eds. M.P. Bendsøe, N. Olhoff and O. Sigmund), 147-156, Springer.

Overgaard, L.C.T. (2005a). On the Structural Assessment of Failure Mechanisms and Instability Phenomena in the V52 Turbine Blade Static Test PERformed within the EFP2003 Programme. Technical Report, Department of Mechanical Engineering, Aalborg University, Denmark.

Overgaard, L.C.T. (2005b). Structural Design Sensitivity Analysis and Optimization of Vestas V52 Wind Turbine Blade. In: Proceedings of the 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-6), Rio de Janeiro, Brazil.

Risø/DNV (2002). Guidelines for Design of Wind Turbines. Jysk Centraltrykkeri, Denmark, 2nd Edition.

Stegmann, J., Lund, E. (2005). 'Discrete Material Optimization of General Composite Shell Structures'. International Journal for Numerical Methods in Engineering 62 (No. 14), 2009-2027.

Sørensen, B.F., Jørgensen, E., Debel, C. P. , Jensen, F. M., Jensen, H. M., Jacobsen, T. K. and Halling, K.M. (2004). Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects (phase 1) - summary report. Risø-R- 1390(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.

Thomsen, O.T., Bozhevolnaya, E. and Lyckegaard, A. (2005). Structurally Graded Core Junctions in Sandwich Elements. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 36 (Issue 10), 1397-1411.

Wacker, G. (2003). Requirements for the Certification of Rotor Blades. Germanisher Lloyd WindEnergie GmbH, Hamburg, Germany.

Zenkert, D. (1995). An Introduction to Sandwich Construction. Chameleon Press, London, United Kingdom.

