

風力發電機葉片結構受颱風侵襲 之表面開裂機制與災因探討

周瑞生* 邱建國**
紀凱甯*** 黃一桂****

摘要

能源安全、永續發展與環境保護，為近年來國際間備受矚目的議題，世界先進國家無不投注大量資金發展再生能源系統。在此風潮與趨勢下，風力發電成為台灣極具潛力的新興能源之一。然而，在政府及民間企業大力推廣風力發電建設之際，西元 2008 年 9 月 28 日於台中彰濱工業區裝設之大型風力發電機組疑受薔蜜(Jangmi)颱風之強風豪雨侵襲，造成位於場區內 5 座大型風力發電機之葉片產生表面剝離與裂縫。為探討本事故致災因子及葉片剝離破損之觸發機制，本文以個案分析方式，首先針對工程文件進行資料複核與研析，並統整國外類似案例，歸納風機葉片災損事故之常見災因。接續，根據資料複核的內容，進行風機

葉片結構力學行為模擬，分析研判可能之致災機制，並提出災損防阻建議。研究成果期能應用於實務所需，防止爾後類似的工程事故，並可回饋利害關係人於風險管理強化與防災因應策略研擬。

關鍵字：風力發電、葉片損壞、致災因子、結構力學行為、共振模態分析、風險管理

一、研究緣起與目的

西元 2008 年 9 月 27-29 日強烈颱風『薔蜜』重創台灣，而於台中彰濱工業區設置之風力發電機回傳之最大風速讀數亦超過 53m/sec。颱風離境後，風機所有權人派遣維修勘查小組作例行性巡查即發現位於場區之五組風機(#11、#12、#14、#15、#23)計有七支葉片出現破損、裂縫、葉緣表層剝離等情形，

* 國立台灣科技大學營建工程學系教授

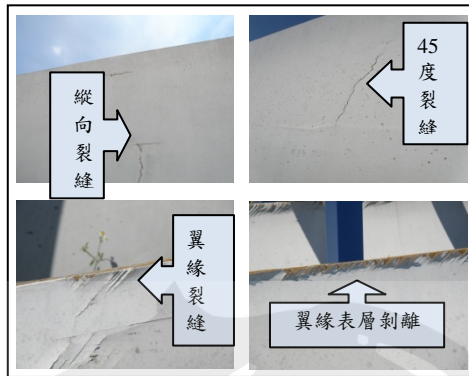
** 國立台灣科技大學營建工程學系副教授

*** 國立台灣科技大學營建工程學系博士生

**** 國立台灣科技大學營建工程學系碩士生

詳圖一所式。經風機原廠供應商判定其中六支葉片需更換(不宜修補)，另有一葉片可進行修補(已於修補後重新安裝至風機)。受損風機之地理位置(圖二)位於臺灣彰化縣西北方、距大

肚溪出海口南方約 5 公里之彰濱工業區，此工業區共劃分成線西區、崙尾區及鹿港區，而此次災損案件之受損風力機組皆位於崙尾區。



圖一 葉片受損類型

為瞭解葉片在強風吹襲下剝離破損之觸動機制，本研究透過現地勘查、材料試驗與相關文獻建立風機葉片模型並進行風機葉片結構力學模擬，綜合研析可能之致災原因，最終

針對葉片結構表層剝離機制與主要災因提出研究結論與災損防阻建議，期望減少未來類似意外災害之發生。



圖二 受損風機地理位置

二、文獻探討

本節首先針對再生能源現況進行瞭解與調查，從時代趨勢突顯風力發電產業的重要性。其次為蒐集國外有關風機葉片事故之歷史資料，透過統計分析歸納常見致災因子，作為本次事故的歷史殷鑑。最後概述工程鑑識應用與效益，作為後續系統化工程分析與災因辨識之文獻依據。

2.1 再生能源

現今人類社會賴以生產與活動所使用的

能源仍有將近 90%來自石化燃料的燃燒所產生的電力，故其伴隨的二氧化碳排放與經濟發展難以脫勾(Young Ku 2009)。根據國際能源署(International Energy Agency, IEA 2009)的統計與預測顯示，全球未來與能源相關的二氧化碳排放量仍持續增加；而聯合國「跨政府間氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)」表示，若人類置暖化現象不理，則 2100 年大氣中二氧化碳濃度將可高達 540 至 970 ppm 間，此濃度足以提高地表溫度攝氏 1.4 至 5.8 度，並導致全球海平面

提升 0.1 至 0.9 公尺。此外，IEA 的「2009 年世界能源展望報告 (World Energy Outlook 2009)」指出，全球能源需求仍不減反增，主要能源需求由 2007 年至 2030 年間預計增長 40% (IEA 2009)。

龐大的能源需求以及二氧化碳排放量不斷增加等問題，對自然資源及環境帶來難以想像的劫難。有鑑於此，具低碳且可減緩溫室氣體排放特性之永續能源研究與開發，儼然成為世界各國在新能源政策佈局中積極推動之目標。根據 IEA 統計，目前全球至少有超過 40 個國家訂定再生能源發展政策，預估再生能源發電占總發電量之比例，將由 2005 年的 18% 提升至 2050 年的 46%。

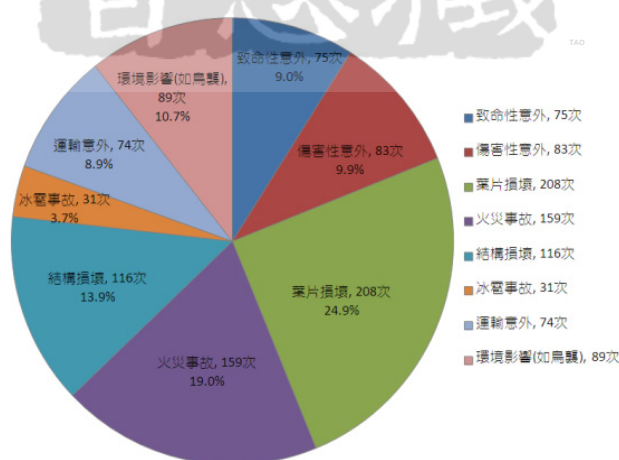
國內對再生能源則積極著墨於政府與企業發展政策上，如經濟部能源局推動之「再生能源發展條例」已於 2009 年 6 月 12 日完成立法，並於 2010 年 1 月啟動，預期提高自產能源並促進能源多元化、溫室氣體減量、帶動新興再生能源產業發展 (Huang 2008)，風力發電即為國內積極扶植之新興能源產業之一。爰此，除能維持風機營運的正常運轉，面對臺灣之海島型氣候及經年頻繁的強風豪雨，發電機組之可能致災因子，實有值得探討的必要性。

2.2 國際相關案例

本研究延續文獻 (Chou and Tu 2011) 蒐集國外有關風力發電機組損壞之相關案例並進行分類統整，藉以深入了解一般風力發電機葉片損壞之可能致災原因與潛在危險因子。

本節所統整之案例資料係從官方資料 (<http://www.caithnesswindfarms.co.uk/page4.htm>) 或新聞報導查證，原始資料截至 2011 年 6 月底止，有歷史紀錄風力機組相關災損案共 1,026 件，歸類為「葉片損壞」之案件數佔所有案件之 20.3% (計 208 件)。但案件數次之者為「其他」約佔 18.6% (計 191 件)，此類未界定損壞類型之災害，可能因災損調查報告並未公開或其他因素無從得知。

因此，若扣除「其他」項目後，案件總數則減為 835 件，圖三顯示「葉片損壞」比例由原 20.3% 提升至 24.9%。換言之，已界定災損類型之案件有接近 1/4 被歸類為葉片損壞事故，其餘致災因子依發生頻率高至低分別為火災事故 (fire, 19%)、結構損壞 (structural failure, 13.9%)、環境影響 (environmental damage, 10.7%)、傷害性意外 (human injury, 9.9%)、致命性意外 (fatal accidents, 9.0%)、運輸意外 (transport, 8.9%)、冰雹事故 (ice throw, 3.7%)。由前述統計分析可初步辨識葉片損壞確為風力發電機組最常見之災損類型，從風險管理的角度亦突顯優先考量風機葉片災損機制之重要性。



圖三 風機災損類型分佈圖(扣除其他災損案例)

2.3 工程鑑識科學方法

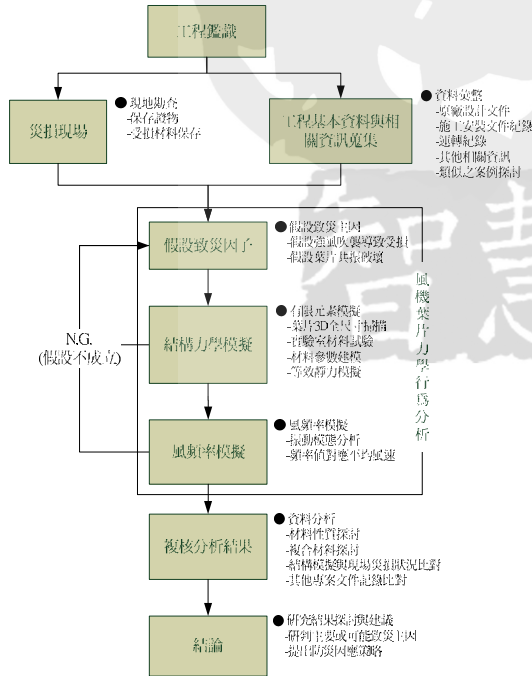
基礎設施受極端氣候影響甚而引致災害，使得鑑識工程(forensic engineering)成為近年逐漸重視之領域，基於以事實為基礎論證的系統化分析流程可協助工程師進一步瞭解工程設施之事故形成的可能原因(Athiniotis et al. 2009; Athiniotis et al. 2010)，更可回饋於設計施工階段，提供不同於品質、成本或工期等傳統思維，降低設施未來損害風險或面對事故後續處理之困擾(Brown 2007; C. Roarty 2006; Hou et al. 2002)。而對於工程整體而言，如有類似工程事故鑑識報告回饋，即可根據先例從專案生命週期起始時之規劃設計階段便納入結構體未來可能之影響，除能有效防阻未來工程風險，更能強化工程績效、增加安全性與降低風險成本(C. Roarty 2006; Chen et al. 2005; López Gayarre et al. 2009; Noon 2000; Zimmer

2006)。本文後續即以風力發電機葉片災損，提出本案系統化鑑識調查方法，包括管理科學邏輯、實證試驗與科學化結構分析(Marín et al. 2009; Mazur et al. 2008; Prasad Rao et al. 2012)，期能作為爾後非工程專業人員於類似災損分析之標準作業流程參考範例。

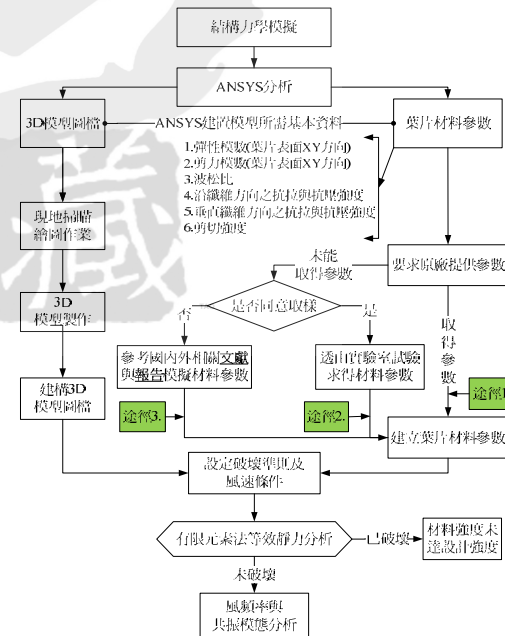
三、研究方法

3.1 研究流程

災損事故可能由多個因子或其複合作用所引起(Choi and Mahadevan 2008; Yates and Lockley 2002)，故可將調查程序及所需查驗之作業依圖四之分化流程(divide-and-conquer)進行災損事故調查，過程中包括蒐集相關工程資料與歷史案例，現地踏勘瞭解案例背景，並進行相關模擬分析，研判可能之致災因子。



圖四 風機葉片災害事故調查流程圖



圖五 結構力學行為分析流程圖

3.2 結構分析材料參數取得流程

本研究對於葉片材料相關之結構力學模擬係採用『ANSYS』(結構工程分析系統套裝軟體)作為葉片力學行為分析之工具軟體，ANSYS 現今已廣泛應用於航太工業(Farrahi et al. 2011)、土木建築工程(Khalaf and Seibi 2011)、能源產業(Sankar et al. 2011)及各構造物件受力分佈等相關分析。惟分析前須建置 3D 幾何模型並輸入相關材料參數，方得以力學學理基礎進行運算與模擬。圖五為進一步呈現本案力學行為分析流程圖，後續章節將依序

闡述主要步驟。

四、分析案例基本資料

4.1 風力發電機組簡介

調閱設計圖說主要的目的為瞭解風力葉片幾何結構，以利後續結構模型建置。透過原廠設計圖(Vestas 2003)與現地查勘災損葉片，可知單一葉片重量約為 6.5 公噸(14500lbs)，其餘葉片部位尺寸如圖六所示由中心(hub)至葉片末端約為 39.5m，葉片最寬處約 3.317m，末端寬度約為 0.497m。

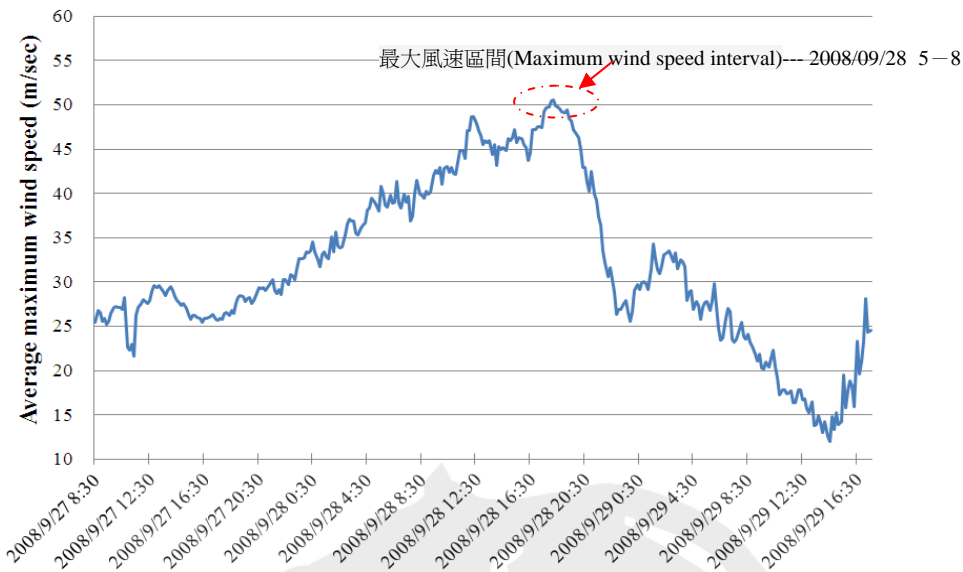


圖六 V80 風機尺寸標註圖(單位：m)

4.2 風機量測之風速資料

圖七為 2008 年 9 月 27 日 上午 8 時 30 分至 29 日 16 時 30 分蓄密颱風發布陸上颱風警報期間平均最大風速紀錄。

颱風期間各風機艙感測裝置所紀錄之最大風速 (ambient wind speed max) 約為 53.4m/sec (Taipower 2009)，各風力機組之風速讀數雖有些微差異，但瞬間風速皆曾達 50m/sec 以上。



圖七 蓄密颱風發布陸上警報期間風機艙感測之平均最大風速紀錄

五、3D 葉片建模與力學行為分析

5.1 幾何圖形掃描與建構

本研究利用泛用型有限元素法軟體(ANSYS)協助分析風機葉片受不同風速時,可能產生之應力與應變行為。首先需依實際尺寸建立葉片結構幾何模型,再依尺寸座標匯入軟體執行分析,即可模擬於設定條件與破壞準則下之受力及變形機制。分析結果利於比對葉片實際之破壞部位,並藉以判別葉片損壞之臨界風速。

現地風機葉片之全尺寸掃描前置作業包含:斷面點位清潔擦拭(如圖八(a))、黏貼雷射定位貼紙(如圖八(b))與乒乓球黏置作業(如圖八(c))。乒乓球需固定於葉片上下兩端頂點,每道斷面黏貼四顆以作為斷面定位基準。

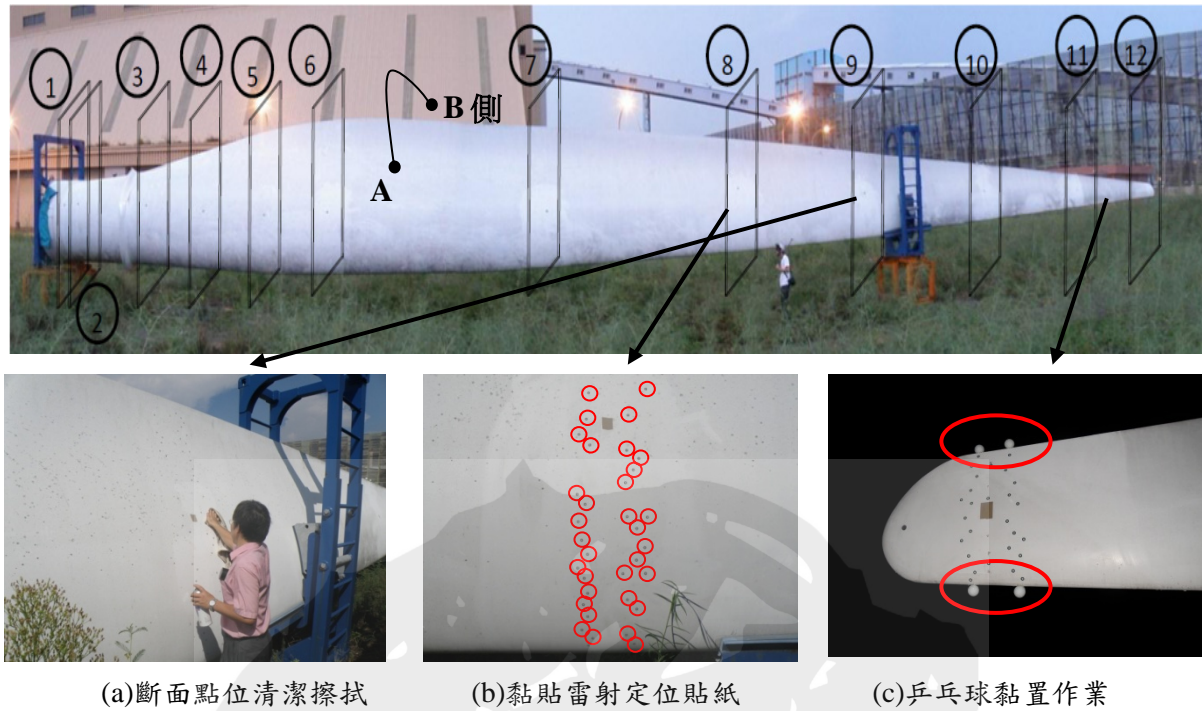
葉片全景詳圖八所示,拍攝方向為風機葉片之迎風面(A側,背風面為B側)。圖中可見鋼製底座將葉片騰空架置,底座約1公尺高,使得葉片底部具有足夠空間進行儀器掃描;葉片結構物全長約40公尺,最寬處約3.3公尺,

全景圖中亦標註掃描之斷面位置,由轉子處起算共計分為編號1~12道斷面。

值得注意的是,斷面1~6區塊間距安排較為密集,乃由於此部分形狀較複雜。其中,除斷面1、2因位於風機組轉子嵌合處形狀較趨近圓形外,斷面3~6為葉片斷面變化最為劇烈之部位。相較之下,斷面7~9之橫向與縱向外型變化則較為平緩,因此該區段之掃描點位距離設置最疏。然而,點位距離次密集者為斷面10~12,此部位為葉片末端閉合區段,表面形狀明顯快速收斂。

掃描作業完畢後,將實測原始資料(圖九(a))匯出,但原始資料僅能顯示各道斷面之範圍與輪廓,仍無法直接採用,尚需將原始資料匯入電腦繪圖軟體(SolidWorks 2009),建立斷面幾何模型,並標示各斷面之編號(圖九(b))。最後,再透過設定座標和介面拉伸之功能以及適度的平滑內插處理,逐步將葉片外觀繪製成形。

茲將幾何模型繪製過程分為三階段:(1)點位資料座標設定、(2)斷面延伸與修補以及(3)葉片內部結構設置,並扼要描述於後。



圖八 葉片全景與掃描前置作業示意圖

步驟 1：點位資料座標設定

根據 12 道断面配置(如圖八)，於現地架設雷射測距儀量測各道断面與轉子端頂點之距離列於表一。表中數值為從葉片轉子接合處開始計算，定義長度方向位置後，即可根據點位座標配合 3D 電腦繪圖軟體(SolidWorks)進行幾何模型繪製。

步驟 2：断面延伸與修補

模型繪製完成後，形狀相似之断面可透過軟體中『拉伸』功能繪出断面間合理之柱狀延伸。前端變化較大之断面，則透過『邊界面』功能作不規則形狀之平滑修補，詳圖九(c)。

步驟 3：葉片內部結構設置

依上述方式將各個断面修補接合後，即可繪製如圖九(d)之葉片幾何模型。然此類型風機葉片內部設計有箱型樑(box-spar)。為模擬力學行為，尚需定義模型內部箱型樑位置(圖九(d))，該構造可概分為 X 方向與 Y 方向兩種設置，為風機葉片強度之主要來源。

表一 断面編號與距離(單位：m)

断面編號	距轉子端頂點 (m)
断面 1	0.84
断面 2	1.25
断面 3	3.28
断面 4	4.88
断面 5	6.44
断面 6	8.05
断面 7	13.28
断面 8	18.46
断面 9	22.46
断面 10	27.61
断面 11	32.83
断面 12	38.63
總長	39.5

5.2 葉片鑽孔取樣與材料試驗

(1) 鑽孔作業

為探求風機葉片沿縱軸向之壁體厚度變化，於現地使用電鑽配備專用轉接器加裝切削鑽

頭(深度約 38mm)鑽取受損葉片表層樣體。圖十(a)與(b)為鑽孔作業流程，需注意鑽孔時應保持高轉速模式切削推入，以利取得完整樣體。

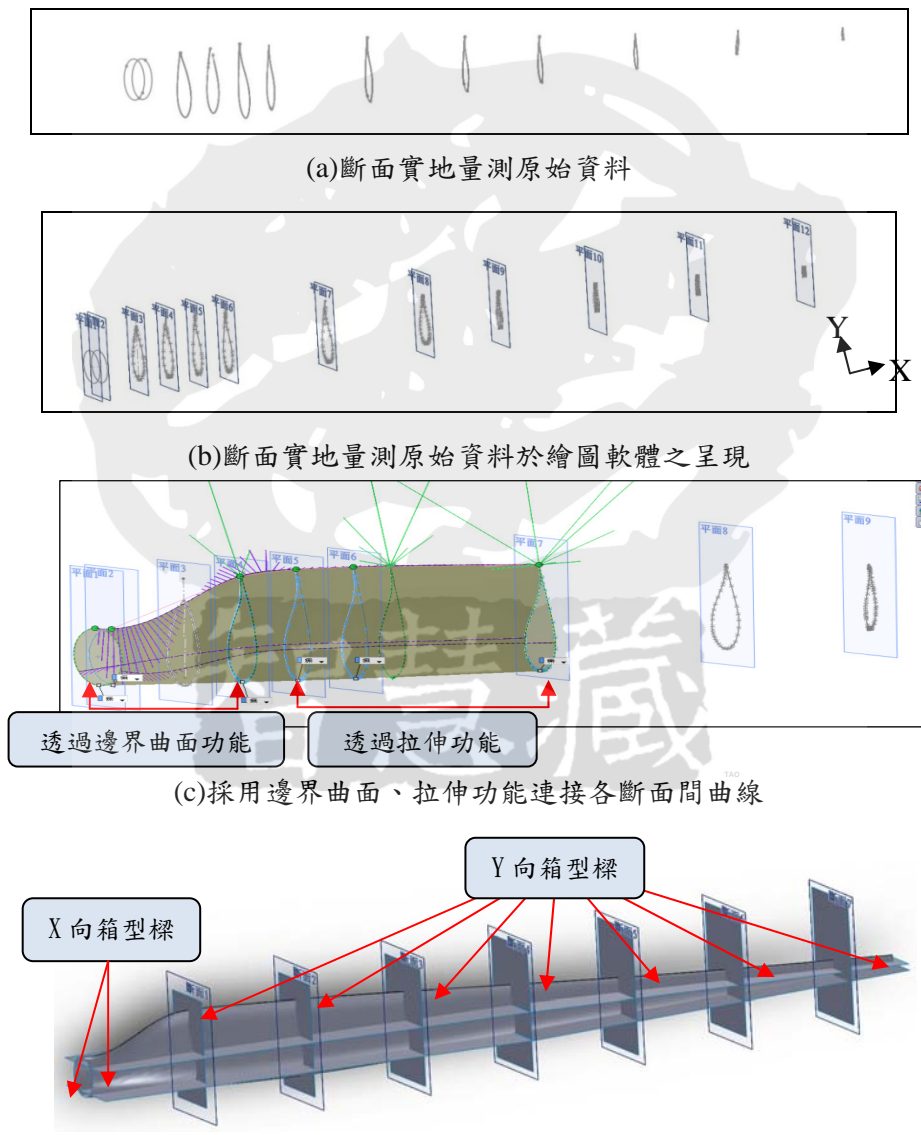
(2) 取樣作業

圖十(c)與(d)為現地量測放樣完成後之區塊取樣流程。首先，使用手持式圓鋸機沿放樣線割劃引道，以確保取樣區塊外型之完整性。而後，順引道利用鋸刀進行第二次深入切割。取得之葉片樣本則依下述標準規範進行材料試驗，推求風

機葉片材料力學性質。

(3) 材料試驗

風機葉片材料試驗規劃為兩組，一組為撓曲試驗，其試驗材料係從取樣之區塊樣片直接分切為 15 件完整試體(複合材料)；另一組為單獨分離表面玻璃纖維強化塑膠(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)之材料層(單一材料)進行拉伸試驗。



圖九 風機葉片外觀幾何模型建置作業流程

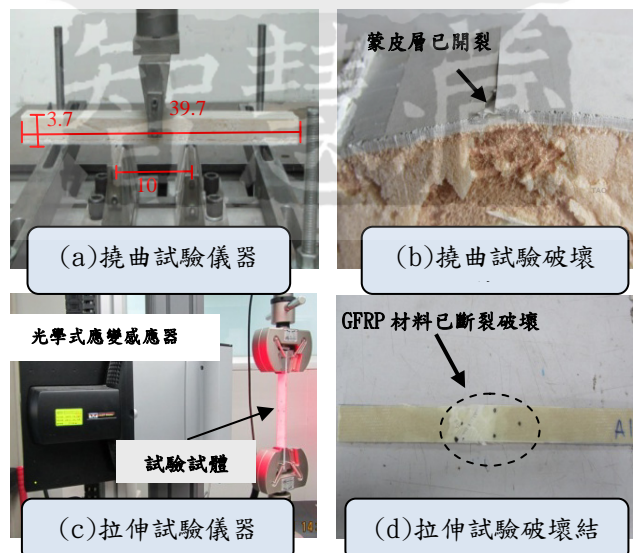


圖十 鑽孔取樣作業圖

依照中國國家標準 (Chinese National Standards, CNS) 12779 中 5.3.1 節 (Bureau of Standards Metrology & Inspection 2005) 之規定，每組試驗試片數量需至少五組以上。又風機葉片表面蒙皮材料分為內層、外層兩組，因此拉伸試驗共計 10 組試體。

在撓曲試驗中，由於試驗樣本為複合材料常

見之夾層結構，為考量實驗裝置，切削之形狀為經由專業評估後之建議尺寸 (SGS Taiwan Ltd. 2011)，於破壞後透由最大荷重力及破壞斷面之截面積作為計算強度之依據，試驗儀器與樣本設置如圖十一(a)所示，所有試體皆受向下載重至產生完全破壞為止，試體樣本破壞照片如圖十一(b)所示，撓曲試驗之結果彙整如表二所示。



圖十一 風機葉片材料試驗(單位：cm)

表二 撓曲試驗結果

試體名稱	(翼厚)max/ (翼厚)min (cm)	破壞斷面 (cm)	破壞點斷面積 (cm ²)	最大荷重 (N)	破壞面撓曲應力 (N/m ²)	平均
A1#1	2.8	2.5	2.0 1.3	6.60	2711.66	37.35
A1#2	2.5	2.1	2.1 1.8	7.80	2760.95	27.23
A1#3	3.2	2.8	2.5 2.1	9.20	3238.80	22.96
A2#1	4.4	4.4	2.9 2.7	11.2	9790.10	46.83
A2#2	4.2	3.9	3.1 2.9	12.0	7385.97	30.77
A2#3	4.3	4.3	3.1 2.9	12.0	8964.84	37.35
A3#1	3.6	3.3	2.5 2.5	10.0	3413.93	20.48
A3#2	3.3	2.9	2.3 2.1	8.80	4402.26	34.11
A3#3	2.6	2.2	1.8 1.6	6.80	3720.77	48.28
B1#1	5.3	5.3	3.7 3.7	14.8	6548.26	17.94
B1#2	5.3	5.3	3.9 3.9	15.6	4857.37	11.98
B1#3	5.3	5.3	3.8 3.7	15.0	7053.65	18.81
B2#1	3.8	3.8	2.8 2.7	11.0	6065.02	30.07
B2#2	3.7	3.7	2.9 2.8	11.4	4717.62	21.78
B2#3	3.9	3.8	2.9 2.9	11.6	4593.26	20.48
					應力總平均	28.43

◎註：A：風機葉片迎風面；B：風機葉片背風面。

拉伸試驗係依 CNS 12779 之規定(Bureau of Standards Metrology & Inspection 2005)，先將材料裁切成制式規格，圖十一(c)為拉伸試驗試體及儀器示意圖，紅色光為光學式應變感應

器所投射出光線，其利用試體上以黑筆畫之黑圓點作為定位點並於拉伸試驗過程中回傳應變量測資料於資料伺服器，表三為拉伸試驗之資料彙整(SGS Taiwan Ltd. 2011)。

表三 葉片材料拉伸試驗數據

葉片材料內側拉伸試驗結果								
試片名稱	厚度 (mm)	寬度 (mm)	標線間距 (mm)	速率 (mm/min)	最大荷重 (N)	拉伸應力 (N/m ²)	拉伸應變 (%)	浦松比
A1 內	1.90	26.09	50.87	1.00	13840.44	2.79	1.58	0.81
A2 內	1.94	25.63	51.02	1.00	14058.00	2.83	1.36	0.72
A3 內	1.06	25.38	50.52	1.00	8505.130	3.16	1.86	0.97
B1 內	2.03	25.35	49.83	1.00	13249.40	2.57	1.58	0.47
B2 內	1.78	25.35	50.96	1.00	13497.54	2.99	1.89	0.81
平均值	1.74	25.56	50.64	1.00	12630.10	2.87	1.65	0.76
葉片材料外側拉伸試驗結果								
A1 外	2.84	25.90	50.35	1.00	14313.59	1.95	1.53	0.36
A2 外	2.77	25.59	49.53	1.00	14554.76	2.05	1.28	0.54
A3 外	2.10	25.37	49.95	1.00	11969.43	2.25	1.65	0.65
B1 外	2.81	25.76	50.53	1.00	11594.58	1.60	0.84	0.65
B2 外	1.78	25.12	50.88	1.00	9348.12	2.09	2.70	0.76
平均值	2.46	25.55	50.25	1.00	12356.10	1.99	1.60	0.59

◎註：A：風機葉片迎風面；B：風機葉片背風面。

由於本次風機葉片材料藉由撓曲試驗及拉伸試驗結果推算求得之材料數值皆為單向(沿纖維方向)，且由於複合材料特性不一緣故，無法透過試驗測試取得單一材料之性質，僅能得知該複合材料之破壞行為模式，故透過文獻(陳興加 2007)及文獻(林輝政 2010)之材料

強度數值的整理，比照該測試結果做一材料性質數值處理，其中浦松比數值經該測試結果皆大於 0.5，一般材料之浦松比數值普遍不超過 0.5，故本文浦松比保守採用 0.5，本材料試驗所得之材料參數列於表四所示，供後續力學模擬分析之用。

表四 材料試驗所得之材料參數

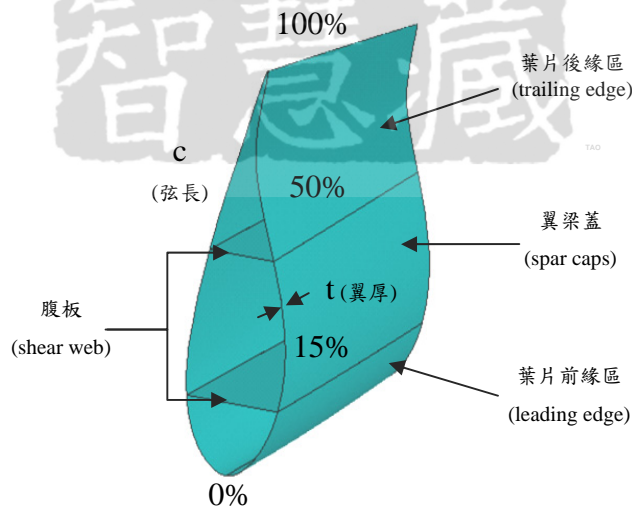
參數	數值 (GPa)
E_x	44.65
E_y	12.96
E_z	12.96
PR_{xy}	0.500
PR_{yz}	0.500
PR_{xz}	0.500
G_x	4.320
G_y	4.320
G_z	4.320
密度(kg/mm^3)	0.00001715

◎註：E：彈性模數；PR：浦松比；G：剪力模數。

5.3 葉片模型建置與材料參數選定

風機葉片內部構件形式與位置經由現地試驗判定並輔採文獻(陳興加 2007)之建議，設置腹板(shear web)於各斷面翼弦之 15%及 50%

兩處(圖十二)，腹板間採厚實之翼梁蓋(spar caps)結構，葉片表層及內部上/下腹板均採用三軸向玻璃纖維複合材料積層板(Tri-axial fabric)並以聚乙烯(Polyethylene)材料為核心之夾心層結構。



圖十二 風機葉片翼型剖面結構示意圖

此外，為設定材質屬性，須將葉片結構作適當切割處理，模型選用 Shell99 (8-nodes,3-D shell element with six degrees of freedom at each node)之薄殼元素(ANSYS Inc. 2006)，該元素適合葉片複合材料之特性，元素之實體常數(real constant；可視為元素總類編號)可編輯分層材料編號(material number)、纖維排列角度及材料厚度參數。

葉片內部結構(structure-shell)實際組成方

式，部份係依文獻(陳興加 2007)建議之材料表(如表五)定義，並結合本案例實際葉片材料試驗結果，其中前/後腹板結構(shear web)置換為聚乙烯(Polyethylene)材料，厚度設定係採文獻(陳興加 2007)建議之伴隨厚弦比變化，並於聚乙烯頂、底部兩面膠合 1.27mm 厚之三軸向玻璃纖維層版，且因表皮膠凝體(Gel coat)所貢獻之強度幾可忽略，故表六為簡化模型參數後之葉片複層材料力學性質表。

表五 基準型葉片結構殼體(structure-shell)材料定義表

材料編號No. (material number)	材質	厚度(mm)
1	表皮膠凝體(Gel coat)	0.51
2	混雜纖維層(Hybrid fiber mat)	0.38
3	三軸組織(Tri-axial fabric)	1.27
4 0%-15% c	聚乙烯(Polyethylene)	0.5% c
5 15%-50% c	翼梁蓋複合材質(Spar cap mixture)	spec % t/c
6 50%-100% c	聚乙烯(Polyethylene)	1.0% c
7	三軸組織(Tri-axial fabric)	1.27

◎ 註：c：弦長(chord)；t：翼厚(thickness)；t/c：翼剖面厚弦比；No.1~7 為葉片表面至內部構造，由外而內之材料層序。

表六 葉片之複層材料力學性質表

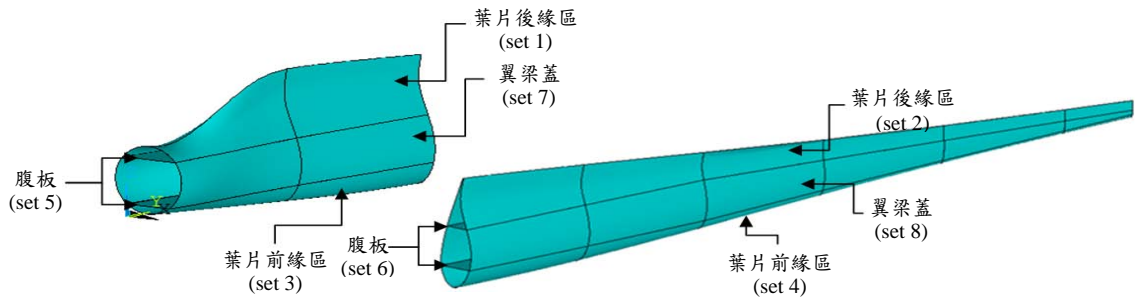
本研究材料參數				
	材料編號 No.2 混雜纖維層 (Hybird fiber mat)	材料編號 No.3 玻璃纖維 (GFRP)	材料編號 No.4/6 聚乙烯 (Polyethylene)	材料編號 No.5 翼梁蓋複合材質 (Spar cap mixture)
$E_x (GPa)$	9.65	44.65	0.65	25.0
$E_y (GPa)$	9.65	12.96	0.65	9.23
$E_z (GPa)$	9.65	12.96	0.65	9.23
PR_{xy}	0.30	0.500	0.33	0.35
PR_{yz}	0.30	0.500	0.33	0.35
PR_{xz}	0.30	0.500	0.33	0.35
$G_{xy} (GPa)$	3.86	4.320	0.25	5.00
$G_{yz} (GPa)$	3.86	4.320	0.25	5.00
$G_{xz} (GPa)$	3.86	4.320	0.25	5.00
Density(kg/mm ³)	0.00000167	0.00000175	0.000925	0.00000175
採文獻(陳興加 2007)建議參數				
	材料編號 No.2 混雜纖維層 (Hybird fiber mat)	材料編號 No.3 玻璃纖維 (GFRP)	材料編號 No.4/6 巴沙木核心 (Balsa-core)	材料編號 No.5 翼梁蓋複合材質 (Spar cap mixture)
$E_x (GPa)$	9.65	30.89	2.07	25.0
$E_y (GPa)$	9.65	7.38	2.08	9.23
$E_z (GPa)$	9.65	7.38	2.09	9.23
PR_{xy}	0.30	0.27	0.22	0.35
PR_{yz}	0.30	0.30	0.22	0.35
PR_{xz}	0.30	0.27	0.22	0.35
$G_{xy} (GPa)$	3.86	3.52	0.14	5.00
$G_{yz} (GPa)$	3.86	2.84	0.14	5.00
$G_{xz} (GPa)$	3.86	3.52	0.14	5.00
Density(kg/mm ³)	0.00000167	0.00001715	0.0000144	0.00000175
採文獻(林輝政 2010)建議參數				
	材料編號 No.2 混雜纖維層 (Hybird fiber mat)	材料編號 No.3 玻璃纖維 (GFRP)	材料編號 No.4/6 玻璃纖維 (GFRP)	材料編號 No.5 翼梁蓋複合材質 (Spar cap mixture)
$E_x (GPa)$	9.65	37.98	37.98	25.0
$E_y (GPa)$	9.65	12.52	12.52	9.23
$E_z (GPa)$	9.65	12.52	12.52	9.23
PR_{xy}	0.30	0.487	0.487	0.35
PR_{yz}	0.30	0.487	0.487	0.35
PR_{xz}	0.30	0.487	0.487	0.35
$G_{xy} (GPa)$	3.86	7.361	7.361	5.00
$G_{yz} (GPa)$	3.86	7.361	7.361	5.00
$G_{xz} (GPa)$	3.86	1.361	1.361	5.00
Density(kg/mm ³)	0.00000167	0.000015	0.000015	0.00000175

風機葉片模擬過程係以線性分析為主，葉片結構材料力學性質，分別為 E (彈性模數)、PR (浦松比)、G (剪力模數)，各特性依座標方向亦定義有 E_x 、 E_y 、 E_z 、 PR_{xy} 、 PR_{yz} 、 PR_{xz} 、 G_{xy} 、 G_{yz} 、 G_{xz} 等九項。本研究僅採用葉片主

要材料為建模參數，表六所列參數為本案於葉片複層之主要組成材料設定，包含文獻(陳興加 2007)及文獻(林輝政 2010)對材料參數之定義，並依圖十三所示將表七所列之各層材料依實體常數名稱帶入所設定之區塊排列。

表七 實體常數及各層材料角度與厚度對照表

實體常數 (real constant)	材料編號 No. (material number)	纖維排列角 度 (degree)	各層材料厚 度 (mm)	實體常數 No. (real constant)	材料編號 No. (material number)	纖維排列角 度 (degree)	各層材料厚 度 (mm)
set 1	2	0	0.38	set 5	3	45	0.32
	3	45	0.32		3	0	0.64
	3	0	0.64		3	-45	0.32
	3	-45	0.32		5	0	15.85
	6	0	24.23		3	-45	0.32
	3	-45	0.32		3	0	0.64
	3	0	0.64		3	45	0.32
	3	45	0.32		3	45	0.32
set 2	2	0	0.38	set 6	3	0	0.64
	3	45	0.32		3	-45	0.32
	3	0	0.64		5	0	14.85
	3	-45	0.32		3	-45	0.32
	6	0	24.12		3	0	0.64
	3	-45	0.32		3	45	0.32
	3	0	0.64		2	0	0.38
	3	45	0.32		3	45	0.32
set 3	2	0	0.38	set 7	3	0	0.64
	3	45	0.32		3	-45	0.32
	3	0	0.64		3	45	27.0
	3	-45	0.32		5	0	9.97
	4	0	22.52		3	-45	27.0
	3	-45	0.32		3	-45	0.32
	3	0	0.64		3	0	0.64
	3	45	0.32		3	45	0.32
set 4	2	0	0.38	set 8	2	0	0.38
	3	45	0.32		3	45	0.32
	3	0	0.64		3	0	0.64
	3	-45	0.32		3	-45	0.32
	4	0	18.45		3	45	19.5
	3	-45	0.32		5	0	24.6
	3	0	0.64		3	-45	19.5
	3	45	0.32		3	-45	0.32
				3	0	0.64	
				3	45	0.32	



圖十三 葉片實體常數(real constant；可視為元素總類編號)示意圖

5.4 破壞準則

國際間一般用於判斷纖維強化塑膠(Fiber Reinforced Plastic, FRP)複合材料之強度檢核皆係使用蔡吳法則(Tsai-wu failure criterion)協助研判材料是否已達破壞。公式 5-1 為判斷方程式，值若大於 1 時，代表材料有破壞的疑慮 (Van Paeppegem and Degrieck 2003)

$$F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + F_2\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 = 1$$

$$F_1 = \frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_C} \quad F_{11} = \frac{-1}{X_T X_C} \quad F_2 = \frac{1}{Y_T} + \frac{1}{Y_C} \quad (5-1)$$

$$F_{11} = \frac{-1}{Y_T Y_C} \quad F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11} F_{22}}$$

◎註：上式方程式代號僅表示準則中拉張、壓縮強度與剪切強度間之運算關係。

其中， X_T 、 X_C 與 Y_T 、 Y_C 分別代表沿纖維方向與垂直纖維方向的拉張與壓縮強度， S 代表剪切強度。本研究以 ANSYS 內建之蔡吳法則進行破壞評估，並以色階呈現其破壞程度與區域，當中需有沿纖維方向、垂直纖維方向的拉張與壓縮強度及各層間的剪切強度，由於該材料測試僅作拉伸及撓曲試驗，僅得知沿纖維方向之拉張強度，故本文研判破壞上限所需採用之相關材料強度數值係根據文獻(陳興加 2007)定義，並對纖維強化塑膠進行蔡吳法則之分析，其強度數值詳表八所示。

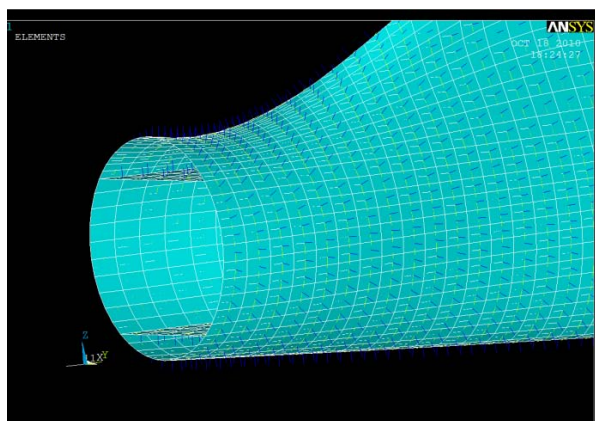
表八 纖維強化塑膠複合材料於蔡吳法則設定參數表

纖維強化塑膠(Fiber Reinforced Plastic, FRP)複合材料參數	
沿纖維方向之拉張強度， X_T	735.32 MPa
沿纖維方向之壓縮強度， X_C	539.66 MPa
垂直纖維方向之拉張強度， Y_T	50.336 MPa
垂直纖維方向之壓縮強度 Y_C	134.54 MPa
剪切強度， S	25.116 MPa

5.5 有限元素法分析

基於前述風機葉片取樣測試之實際材料特性，另考量文獻(陳興加 2007)及(林輝政 2010)建議之材料參數值，模擬葉片分別於 50、53.4(蓄密颱風期間風機所測得最大風速)、60、70、80 及 90 m/sec 等六種風速條件下之受力情形，其風速加壓方式設定垂直於葉

片模型之各節點上(如圖十四)，並以蔡吳法則作為判斷基準，檢核各模型之破壞型態與範圍。根據破壞指數分析結果總表(表九)發現，以在蓄密颱風期間測得之最大風速 53.4 m/sec 的條件下，葉片於文獻(陳興加 2007)、(林輝政 2010)建議參數與本研究藉由材料試驗所獲得參數設定下皆無顯著破壞疑慮。



圖十四 風速加壓方式設定於葉片模型圖

表九 破壞指數分析結果總表

風速 (m/sec)	採文獻(陳興加 2007) 建議之葉片材料模型		採文獻(林輝政 2010) 建議之葉片材料模型		本研究葉片材料模型	
	破壞指數	破壞疑慮	破壞指數	破壞疑慮	破壞指數	破壞疑慮
50	0.166	無	0.36089	無	0.323	無
53.4	0.207	無	0.44693	無	0.399	無
60	0.283	無	0.58345	無	0.521	無
70	0.467	無	0.89672	無	0.798	無
80	0.734	無	1.32600	有	1.178	有
90	1.107	有	1.90000	有	1.685	有

圖十五為考量不同風速下，各模型之應力分佈圖及以蔡吳法則所得之最大破壞指數部位。由於文獻(陳興加 2007)建議之葉片材料參數相對強度較高，故當風速提升近 90 m/sec 時已有破壞疑慮；依文獻(林輝政 2010)設定之葉片材料則於風速 80 m/sec 時已產生破壞疑慮；而本研究之葉片材料係採現地材料取樣試驗後之真實性質，亦於風速 80 m/sec 時產生破壞疑慮。從分析結果發現，受 53.4 m/sec 之風速作用時，文獻(陳興加 2007)、(林輝政 2010)與本研究模型皆無顯著之破壞疑慮。此外，本研究不論採用何組參數所建立之模型，風速條件達 70 m/sec 時，風機葉片主體結構並無破壞疑慮，符合原廠之設計耐風速。表九歸納綜整各風速條件下，葉片模型對應之最大破壞指數與破壞疑慮。

綜合以上分析所示，各葉片模型之抗風能力略有些微差異，發現其決定性因素取決於「材料性質」與「複合性材料厚度」兩項，詳

述如下：

(1) 材料性質

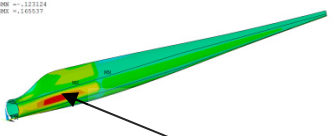
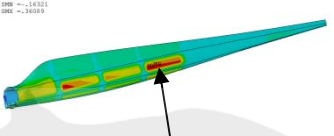
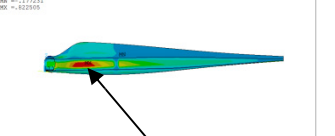
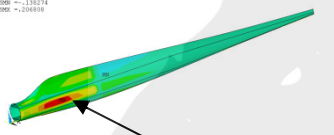
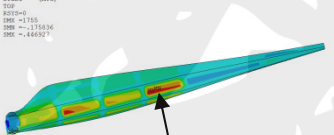
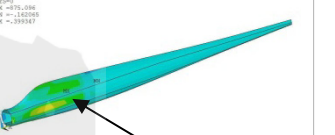
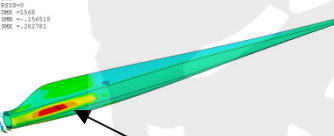
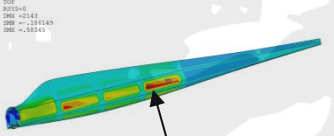
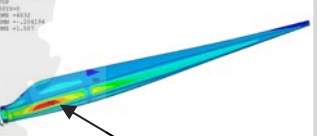
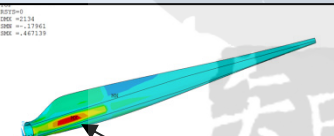
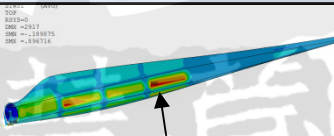
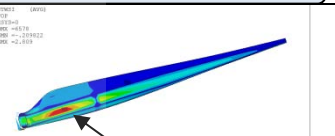
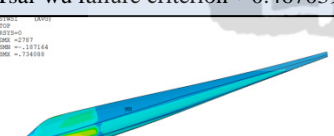
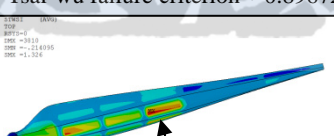
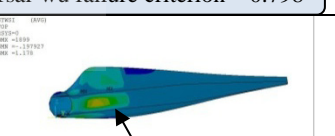
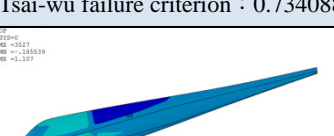
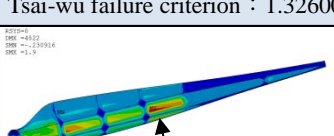

就葉片材料性質而言，文獻(陳興加 2007)建議之材料強度為三者之最；本研究依真實材料特性設定，強度介於三者之中。就葉片材料層數而言，文獻(林輝政 2010)採用單一材料(GFRP)模擬整體風機葉片，與本案實際風機葉片之三明治結構較為不符；文獻(陳興加 2007)建議模型之複合材料由表層、玻璃纖維及巴沙木組合而成；本研究則參照真實風機葉片之材料組成，分別為表層、玻璃纖維及聚乙烯組合並由材料試驗所得參數輸入模型。因此，材料強度之差異，為影響不同破壞狀況的主要因素。

(2) 複合材料厚度

依文獻(林輝政 2010)建議參數所建立之葉片模型，各積層係由單一材料模擬，故其材料厚度僅能採用單層模擬，較不符合風機葉片之真實情況；依文獻(陳興加 2007)建議參數所建立之模型，由表層、玻璃纖維及巴沙木組合

成複合材料，各材料之厚度係參照該文獻之建議設定；本研究參數則由表層、玻璃纖維及聚乙烯組成複合材料，而厚度之設定則經由鑽孔之樣本，量測各部位風機葉片之實際斷面厚度。而本研究模型與文獻(陳興加 2007)之模型

迥異之處在於葉片中間層之材料種類與厚度設定；文獻(陳興加 2007)選用巴沙木，其厚度設定較厚，而本研究則選用聚乙烯且厚度較薄。厚度設定會影響應力集中與破壞位置之不同。

風速 (m/sec)	採文獻(陳興加 2007)材料參數模型	採文獻(林輝政 2010)材料參數模型	本研究材料參數模型
50	 Tsai-wu failure criterion : 0.165537	 Tsai-wu failure criterion : 0.36089	 Tsai-wu failure criterion : 0.323
53.4	 Tsai-wu failure criterion : 0.206808	 Tsai-wu failure criterion : 0.44693	 Tsai-wu failure criterion : 0.399
60	 Tsai-wu failure criterion : 0.282781	 Tsai-wu failure criterion : 0.58345	 Tsai-wu failure criterion : 0.521
70	 Tsai-wu failure criterion : 0.467039	 Tsai-wu failure criterion : 0.89672	 Tsai-wu failure criterion : 0.798
80	 Tsai-wu failure criterion : 0.734088	 Tsai-wu failure criterion : 1.32600	 Tsai-wu failure criterion : 1.178
90	 Tsai-wu failure criterion : 1.107	 Tsai-wu failure criterion : 1.90000	 Tsai-wu failure criterion : 1.685

圖十五 葉片應力分佈圖

5.6 風頻率與共振模態分析

本研究除採用等效應力模式分析外，亦進一步考量風力造成之紊流情形對風機葉片產生的結構共振現象，並從共振角度深入探討。因風力對於風機葉片之作用屬動態負載，其負載頻率內含影響風機葉片之共振狀態。本研究中之振動頻率，係藉由軟體 ANSYS 中之模態分析(modal analysis)求得，其基本原理為利用有限元素法求解該葉片之振動方式，如下式 5-2 所示，目的為求出該風機葉片之自然振動頻率與模態。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \Rightarrow \det([K] - \omega^2 [M]) = 0 \quad (5-2)$$

其中「 M 」為該風機葉片結構體之質量，與材料之組成及密度有關；「 K 」為該風機葉片結構體之勁度，與材料性質、結構形狀及尺寸有關。

共振型式係依據 ANSYS 分析結果，評斷其為結構主體振動或局部振動。若風機葉片產生局部振動時，於結構體較脆弱之處則可能產生破損。值得注意的是，由局部/末端振動 3D 結構圖發現共振觸發位置與現地風機葉片實際破損大致相符，表十為各模態對應之自然振動頻率。當結構之自然振動頻率與外力負載頻率相近時，會因共振效應使結構反應放大，長

期作用下，極易引致疲勞性損傷(Shirani and Härkegård 2011)。然而強風環境下之葉片結構周圍外力負載頻率不易估算，文獻(Lam and Leung 2005)建議可依式 5-3 估算渦流(vortex)頻率：

$$f \cdot \frac{U}{B} = 0.15 \quad (5-3)$$

由表十可知，依文獻(林輝政 2010)所建構之結構系統主體振動頻率約在 1.077Hz 以下，局部振動頻率則介於 1.128-1.485Hz，若以平均值 1.25Hz 代入式 5-3 之渦流頻率，而渦流之特徵長度則取受損處之葉片寬度 3.0 公尺，由式 5-3 可知其對應流體速度約為 25m/sec。換言之，平均風速為 25m/sec 時，葉片結構局部共振即會產生，長期作用可能造成葉片表面之裂縫損傷。

另以文獻(陳興加 2007)建議之參數模型為例，其結構系統之主體振動頻率約在 0.726Hz 以下，局部振動頻率則介於 0.814-0.962Hz，若以平均值 0.9Hz 代入式 5-3 之渦流頻率，得其對應流體平均速度約為 18m/sec。

本研究模型結構系統之主體振動頻率約在 0.532Hz 以下，局部振動頻率則介於 0.663-0.891Hz，若以平均值 0.7Hz 代入式 5-3 之渦流頻率，對應之流體平均速度約為 14m/sec。

表十 各模態振動頻率

(陳興加 2007)		(林輝政 2010)		本研究模型	
模態 (Mode)	頻率 (Frequency)	模態 (Mode)	頻率 (Frequency)	模態 (Mode)	頻率 (Frequency)
1	0.025	1	0.065	1	0.028
2	0.028	2	0.175	2	0.030
3	0.075	3	0.196	3	0.088
4	0.126	4	0.354	4	0.140
5	0.159	5	0.542	5	0.182
6	0.252	6	0.681	6	0.283
7	0.266	7	0.958	7	0.294
8	0.318	8	1.077	8	0.322
9	0.355	9	1.128	9	0.400
10	0.467	10	1.249	10	0.507
11	0.469	11	1.338	11	0.517
12	0.592	12	1.384	12	0.532
13	0.648	13	1.431	13	0.663
14	0.718	14	1.471	14	0.708
15	0.726	15	1.485	15	0.781
16	0.814	16	1.543	16	0.809
17	0.817	17	1.569	17	0.826
18	0.876	18	1.656	18	0.891
19	0.913	19	1.685	19	0.922
20	0.962	20	1.759	20	0.930
21	1.047	21	1.795	21	0.958
22	1.061	22	1.830	22	1.020
23	1.092	23	1.839	23	1.027
24	1.124	24	1.872	24	1.079

其中 f 為渦流頻率； B 為渦流特徵長度； U 為流體入流速度。

六、潛在致災因素探討

本節綜整前述資料複核、歷史災因回顧、分析結果與研究發現，將風機葉片結構損傷的可能主要致災因子分為：(A) 葉片材料強度、(B) 風頻率與共振效應及 (C) 安裝施工階段人為因素，並分項討論如後。

6.1 葉片材料強度

(1) 複層材料破壞分析檢核

本研究依白努力定理與經驗參數修正後將平均風速轉換為作用於葉片主體上之等效靜力，然而本案葉片之結構力學性質與材料組成因原廠供應商並未能提供，故進行現地風機材料取樣及實驗室試驗，且同步以文獻(陳興加 2007)與(林輝政 2010)所建議之葉片力學性質與材料組成構造分別進行分析與比較。在獲取結構元素之拉壓應力與剪切應力後，以蔡吳法則(Van Paepegem and Degrieck 2003)判斷葉片複層材料之破壞區域，風速設定則由 5-5 節所述之六種條件進行模擬。

若採文獻(陳興加 2007)所建議之材料性質,風機葉片於風速 90 m/sec 時已產生主體結構破壞,主要集中於根部腹板間之箱型樑翼樑蓋(spar cap);若採文獻(林輝政 2010)建議之材料性質,風機葉片於風速 80 m/sec 時已產生破壞,其位置主要集中於根部與中央腹板間之箱型樑翼樑蓋;而本研究案之葉片材料選用實際受損葉片之材料性質,風機葉片於風速 80 m/sec 時亦產生破壞,其破壞位置則主要位於葉片後緣靠近翼板之區域。

本研究進一步針對颱風期間最大瞬間風速 53.4 m/sec 條件下進行模擬(如圖十五),分析結果顯示模型於文獻(陳興加 2007)、(林輝政 2010)及本研究三者之參數設定下皆未產生顯著破壞疑慮。

(2) 施工綱要規範所載明之葉片規格與強度

根據施工綱要規範中風力發電機組及其附屬設備工作要領之設計條件中提及「耐風速 ---70m/sec 以上」,經本研究透過 3D 有限元素法進行之結構分析結果顯示,葉片主體結構應可在風速 70m/sec 之環境下維持其完整性,因此僅 53.4m/sec 之風速在無其他外力作用下造成葉片主體結構直接破壞之可能性較低。

6.2 風頻率及共振效應

依前文 5-6 節之分析結果可知,採用文獻(林輝政 2010)建議材料參數之葉片模型,其渦流頻率對應流體平均風速約為 25 m/sec;文獻(陳興加 2007)建議之材料參數,其對應平均風速約為 18m/sec;以本研究模型而言,對應平均風速約為 14m/sec。換言之,在上述風速長期作用下,葉片之局部結構與渦流之共振效應可能造成局部共振而造成材料疲勞引致之表面剝離與裂縫損傷,本研究分析結果亦發現模態振動位置與損傷位置相符。

綜合 5-5 節等效靜力分析結果與 5-6 節共振效應推論,於本研究所設定之葉片材料性質

條件下,風機葉片於風速 53.4 m/sec(颱風期間瞬間最大風速)或 70m/sec(風機設計最大風速)對應之等效靜力作用時其材料強度應足以抵抗主體振動,故葉片損傷之主要原因可推斷為渦流所引致之局部共振效應導致翼緣振盪而造成。

6.3 安裝施工階段人為因素

由國際歷史風機災損經驗顯示,安裝施工階段須檢核承包商於運輸、吊裝之操作過程中之文件記錄和自主檢查表中之各個工作項目是否良好且經施工安檢人員確認核可。一般風機工程安裝案之構件係從工廠製造後運送至工址,其中最脆弱之零件就屬風機葉片,在運送階段可能因為不當之操作而造成損壞,也可能在裝配時因施工不慎造成損傷,葉片從拖車水平放置到旋轉呈垂直形式吊掛至轉子時,若未適當的保護延伸葉片,亦可能造成損傷。

經查#11、#12、#14、#15、#23 等五組風力機組之「安裝施工記錄」後,顯示吊裝過程及試運轉中皆經現場人員仔細檢核並簽章負責,故應可排除工程於施工階段發生運輸、吊裝途中可能引致的葉片表面剝離或裂縫。

七、結論與建議

本文最後從結構分析、振動模態、環境風場與耐風設計規範等觀點,歸納以下結論並提出建議。

7.1 結論

本研究模擬葉片主體結構在承受不同風速吹襲下之反應,分析結果發現葉片可承受風速 70m/sec,超過蓄密颱風侵襲時經由風機運轉記錄所測得之最高風速 53.4m/sec,故在颱風期間若無其他外力作用下應無法導致葉片結構出現損壞情形。

本研究續從「局部共振效應」進行探討，考量風速並非恆久穩定狀態，模擬一系列振動模態之頻率，同時採用文獻建議(陳興加 2007; 林輝政 2010)及實際材料試驗結果，建立三組風機葉片模型，分析結果顯示：

(1) 文獻(陳興加 2007)參數模型：

共振頻率平均值 0.9Hz 對應平均風速→18 m/sec。

(2) 文獻(林輝政 2010)參數模型：

共振頻率平均值 1.25Hz 對應平均風速→25 m/sec。

(3) 本研究參數模型：

共振頻率平均值 0.7Hz 對應平均風速→14 m/sec。

研究發現葉片結構受渦流影響產生局部共振效應，在長期作用下可能造成葉片材料疲勞引致局部之裂縫損傷與剝離，分析圖型顯示與本案風機葉片表層實際受損之部位吻合。換言之，若葉片承受之長期風速落於上述區間時，可能發生葉片翼緣振盪(Ekelund 2000)之情形，產生共振效應漸進式破壞。

7.2 建議

根據模擬結果顯示，本案之風機葉片應可承受蓄密颱風侵襲時所量測之最大風速(53.4m/sec)，然實際情形風機葉片之破壞仍然出現於葉片後緣近翼版之區域，此區域之破壞大多係表面與蒙皮層接合處之損傷，顯示此區域局部材料消耗耐久性偏弱。意即雖然風機葉片整體結構可承受設計規範 70m/sec 以上之風速，然並未考慮蒙皮層接合處弱面因長期風力效應下產生裂痕或剝離，故建議未來類似工程招標時可要求廠商提供風機葉片蒙皮層材料之耐久性資料，避免一般運轉或颱風期間承受強烈風速之侵襲時引致蒙皮層的漸進破壞。

共振效應對於各項工程結構體皆存在相當風險，鑒於原廠設計不易變更之考量，建議

業主應於施工前要求廠商提出共振頻率範圍之模擬數據供設計單位參量，並於工程施作完成後持續監測風場。以本案為例，可規劃監測風速及風頻率，並於可能產生共振效應頻率之區間設定預警機制系統，以顧及其長期運轉安全性。並建議業主應導入預防性定期維護觀念，藉由平日定期性之維護工作延長風機葉片使用壽命。本研究經由經驗公式推算渦流頻率對應之風速仍尚有未完善之處，未來祈由風洞試驗獲得現地之風場渦流資料，將更有助於建立預警機制之頻率區間。

本災損地點之週遭環境幅員遼闊，周圍多為荒涼濕地。當強風吹襲風力機組時，可能產生橫向風力效應，風機原廠設計中未見其將橫向風力效應可能造成之影響納入考慮，包括尾跡風馳效應(wake galloping)、渦流顫動效應(vortex shedding)、渦流鎖定效應(vortex lock-in)等，因此建議日後施作類似之風力機組工程時，應要求設計單位提出上述之橫向風力效應提供參考，以利工程施工單位了解橫向風效應對於風力機組葉片之影響，亦可將試驗資料回饋於施工規範中，確保工程品質，減少類似災損發生。

此外，於原廠設計書中，並未見其針對國內相關之風力規範進行評估。考量地域性風場的差異，各國皆有其特定規範，建議設計單位應根據國內耐風設計規範複核，並且於施工前要求廠商提供風力機組製造商對於施工環境風場特性與目前相關法規中訂定之風力規範提出品質聲明與分析檢核結果，避免因不同之規範產生不同標準導致設計與施工文件不符而混淆，確保風力機組之安全性符合國內風場特性相關規範與法令。

八、參考文獻

1. ANSYS Inc. (2006). "ANSYS Programmer's Manual." Canonsburg, Pennsylvania, USA.
2. Athinotis, N., Lombardo, D., and Clark, G.

- (2009). "On-site aspects of a major aircraft accident investigation." *Engineering Failure Analysis*, 16(7), 2020-2030.
3. Athinotis, N., Lombardo, D., and Clark, G. (2010). "Scientific analysis methods applied to an investigation of an aircraft accident." *Engineering Failure Analysis*, 17(1), 83-91.
 4. Brown, S. (2007). "Forensic engineering: Reduction of risk and improving technology (for all things great and small)." *Engineering Failure Analysis*, 14(6), 1019-1037.
 5. Bureau of Standards Metrology & Inspection, M. O. E. A., R.O.C. (2005). "Method of Test for Tensile Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics." *Chinese National Standards, CNS*.
 6. C. Roarty, J., J. Sivak, P. Vogel, and K.V. Ramachandran (2006). "South Clear Well Roof Collapse: Hydraulic Uplift or Excessive Construction Loading?" *The Fourth Forensic Engineering Congress* Cleveland, Ohio, P.210-224.
 7. Chen, D. H., Harris, P., Scullion, T., and Bilyeu, J. (2005). "Forensic investigation of a sulfate-heaved project in Texas." *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 19(4), 324-330.
 8. 陳興加，複合材料應用於風車葉片之研究，國立成功大學航空太空工程學系，碩士在職專班論文，2007。
 9. Choi, H. H., and Mahadevan, S. (2008). "Construction project risk assessment using existing database and project-specific information." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(11), 894-903.
 10. Chou, J.-S., and Tu, W.-T. (2011). "Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower." *Engineering Failure Analysis*, 18(1), 295-313.
 11. Ekelund, T. (2000). "Yaw control for reduction of structural dynamic loads in wind turbines." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(3), 241-262.
 12. Farrahi, G. H., Tirehdast, M., Masoumi Khalil Abad, E., Parsa, S., and Motakefpoor, M. (2011). "Failure analysis of a gas turbine compressor." *Engineering Failure Analysis*, 18(1), 474-484.
 13. Hou, J., Wicks, B. J., and Antoniou, R. A. (2002). "An investigation of fatigue failures of turbine blades in a gas turbine engine by mechanical analysis." *Engineering Failure Analysis*, 9(2), 201-211.
 14. <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/page4.htm> "Summary of Wind Turbine Accident, Accessed on 30/06/2011."
 15. 黃恆傑，高科技廠房綠建築設計指標可行性分析，國立台灣大學土木工程學研究所，碩士論文，2008。
 16. IEA (2009). "World Energy Outlook 2009" <http://www.iea.org/>, Accessed on 10/11/2009.
 17. Khalaf, A. M., and Seibi, A. C. (2011). "Failure analysis of lube oil feed tube of a gas turbine operating in oil fields." *Engineering Failure Analysis*, 18(5), 1341-1350.
 18. López Gayarre, F., González-Nicieza, C., Alvarez-Fernández, M. I., and Álvarez-Vigil, A. E. (2009). "Forensic analysis of a pile foundation failure." *Engineering Failure Analysis*, 17(2), 486-497.
 19. Lam, K. M., and Leung, M. Y. H. (2005). "Asymmetric vortex shedding flow past an inclined flat plate at high incidence." *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 24(1), 33-48.
 20. 林輝政，彰工風力葉片受損肇因評估分析期末報告，國立台灣大學嚴慶齡工業發展基金會合設工業研究中心，2010。
 21. Marín, J. C., Barroso, A., París, F., and Cañas, J. (2009). "Study of fatigue damage in wind

- turbine blades." *Engineering Failure Analysis*, 16(2), 656-668.
22. Mazur, Z., Garcia-Illescas, R., Aguirre-Romano, J., and Perez-Rodriguez, N. (2008). "Steam turbine blade failure analysis." *Engineering Failure Analysis*, 15(1-2), 129-141.
23. Noon, R. K. (2000). *Forensic Engineering Investigation* CRC, Hiawatha.
24. Prasad Rao, N., Samuel Knight, G. M., Mohan, S. J., and Lakshmanan, N. (2012). "Studies on failure of transmission line towers in testing." *Engineering Structures*, 35(0), 55-70.
25. Sankar, S., Nataraj, M., and Raja, V. P. (2011). "Failure analysis of shear pins in wind turbine generator." *Engineering Failure Analysis*, 18(1), 325-339.
26. 風機葉片材料抗拉強度及伸長率試驗，Test report HV-11-05101X，SGS 台灣檢驗科技股份有限公司，2011。
27. 風機葉片材料試驗報告，Test report HL80432/2011，SGS 台灣檢驗科技股份有限公司，2011。
28. Shirani, M., and Härkegård, G. (2011). "Large scale axial fatigue testing of ductile cast iron for heavy section wind turbine components." *Engineering Failure Analysis*, 18(6), 1496-1510.
29. 台灣電力公司，風速運轉紀錄表，台電公司彰濱風機葉片案資料，2009。
30. Van Paepegem, W., and Degrieck, J. (2003). "Calculation of damage-dependent directional failure indices from the Tsai-Wu static failure criterion." *Composites Science and Technology*, 63(2), 305-310.
31. Vestas, "Blades 947919.R2 " 台電公司彰濱風機葉片案資料，vol. 1-5, 2003.
32. Yates, J. K., and Lockley, E. E. (2002). "Documenting and analyzing construction failures." *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(1), 8-17.
33. Young Ku, Y.-S. S. (2009). "Analysis of sustainable energy development situation." 2009 Series of Reports of the National Energy Conference, Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs, Taipei.
34. Zimmer, A. S., Bell, G.R. (2006). "John Hancock Center Scaffold Collapse." *The Fourth Forensic Engineering Congress*, Simpson Gumpertz and Heger, Inc., Cleveland, Ohio, P.97-111.