

風力發電機塔架受颱風侵襲倒塌致災原因之探討

周瑞生

國立台灣科技大學 營建工程系 副教授

涂堯庭

國立台灣科技大學 營建工程系 碩士生

陳正誠

國立台灣科技大學 營建工程系 教授

陳瑞華

國立台灣科技大學 營建工程系 副教授

楊維和

智全工程技術顧問有限公司 副總經理

摘要

面對全球暖化及能源危機的困境，各國皆致力於再生能源的開發。考量能源安全、環保與未來發展，風力發電為台灣最具潛力的新能源之一。然而在政府及民間企業大力推廣風力發電建設之際，台灣於民國 97 年 9 月 28 日，受薔蜜(Jangmi)颱風所挾帶之強風豪雨侵襲造成重大災害，位於台中港區的二號風力發電機(風機)塔架也因而倒塌損毀。此乃台灣首次大型風機塔柱攔腰斷裂事件，並無相關前例可循，故其災因研判與分析對爾後類似工程之風險管理愈顯重要。為探討本事故之致災因子及倒塌機制，本文以案例分析法，從專案管理觀點針對工程基本文件進行資料複核與研析。此外，亦統計整理國外類似案例，歸納風機災損事故之災因及潛在風險因子引為殷鑑。本研究根據資料複核結果，從設計風速影響、完整與斷裂螺栓材料強度試驗、風機塔柱 3D 模型結構分析、法蘭(Flange)接合處螺栓力學行為複核及施工品質管理構面研判可能之致災因子，並提出具體可行之建議與風險防阻措施。研究成果期能應用於實務所需，防止爾後類似工程事故，並回饋利害關係人強化專案風險管理計畫與防災策略。

關鍵字：災因分析、風險管理、颱風損失、風力發電、專案控制

FORENSIC INVESTIGATION OF A COLLAPSED WIND TURBINE TOWER

Jui-Sheng Chou

Associate Professor, Construction Management, Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech), Taiwan.

Wan-Ting Tu

Master Student, Construction Management, Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech), Taiwan.

Cheng-Cheng Chen

Professor, Structural Engineering, Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech), Taiwan.

Rwey-Hua Cherng

Associate Professor, Structural Engineering, Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech), Taiwan.

Wei-her Yang

Vice President, All-wisdom Engineering Consultants LTD, Taiwan.

ABSTRACT

Wind turbine is one of the most appropriate new sources of renewable energy in Taiwan, which has achieved significant progress in practice by effectively exploiting available natural resources. However, on September 28th 2008, typhoon Jangmi struck Taiwan with strong winds and heavy rainfall that brought down a wind turbine tower located in the Taichung harbor area. The study represents the first attempt to investigate the causes of the collapse of a large-scale wind turbine tower in Taiwan. Based on the site investigation, collected project documents and analytical results, possible causes of tower failure are presented from construction management and technical perspectives. Practical suggestions regarding wind tower risk management and future action plans cover the areas of natural wind effects, re-evaluation of tower structural design, implications of experimental testing of intact and broken bolts, and managerial issues relating to wind turbine tower construction. By applying this study's findings, project stakeholders can adjust risk management plan strategies, and construction firms can also utilize these findings to provide lessons for future reference.

Keywords: Cause Analysis, Risk Management, Wind Turbine, Natural Disaster, Project Control.

一、研究背景與目的

民國 97 年 9 月 28 日蓄蜜颱風襲台，造成台中港區 2 號風力發電機(風機)之下、中塔架連接部份斷裂及上、中塔架倒塌變形，塔架上的機艙及 3 支葉片皆嚴重毀損。業主於事故發生後通知產物保險公司(以下簡稱產險公司)申請災損評估，產險公司另委託獨立保險公證人有限公司辦理相關公證與理算損失作業，並委由國立台灣科技大學生態與防災工程研究中心(研究中心)進行災因鑑識工程(Forensic Engineering)，隨後於 97 年 10 月 17 日偕同相關單位赴現場進行勘查作業。

風力發電為本國大力推廣之新能源方式之一，而本案係台灣第一次大型風機塔架發生倒塌事故，為瞭解倒塌機制，據以回饋管理體制並防止爾後類似意外發生或減輕造成之損害，本研究首先針對蒐集的專案基本資料進行複核分析，提出系統化研究方法與研析程序，輔以相關實驗室材料試驗結果比對，並回饋參數進行 3D 塔柱結構力學行為重新分析，綜合研判可能致災因子，最後從技術層面與專案管理的學術角度提出結論與具體建議。

二、現況調查及工程基本資料蒐集

工程鑑識(Forensic Engineering)為近年來國內外工程界之新興學門，透過鑑識結果可幫助確認工程設

施之現況或工程事故之形成原因，此外亦可有效降低設施未來損害風險或提供事故後續處理之借鏡(Alec S. Zimmer, 2006; Brown, 2007; C. Roarty, 2006)。

欲瞭解災害事故發生之原因，本研究以營建管理觀點，透過系統方法進行現況調查並蒐集工程相關基本資料(如表 1 所示)，以利後續災因鑑識及探討。

2-1 現況調查

為有效執行後續之工程調查與研析，於事故發生後應儘速偕同專家學者與相關單位赴災損現場進行現況勘查與景象拍攝，專業地詳予紀實災損現場實際情形(Hadipriono, 2001; Yates and Lockley, 2002)，勘災後應請求相關工程單位配合提供各類專業文件(Documentation)，包含設計圖說、結構計算書、施工文件、安裝手冊、施工紀錄、契約與規範等有助於釐清或排除當下工程事故發生機制與可能災因之判識。

2-2 工程專案文件摘錄說明

1. 契約範圍

風機塔架建設工程係承包商以統包方式，負責風機場址的風力發電機組及其附屬設備之設計、施工製造、安裝等工作，共計二十二部風力發電機組(業主, 2003)。風機組成示意圖如下圖 1 所示：A 為葉片(Blade)，B 為機艙(Nacelle)、主

表 1、工程基本資料蒐集項目

文件類別	文件項目	文件來源	文件類別	文件項目	文件來源
現況	現地勘查	本研究	施工安裝紀錄	施工計畫書	承包商
	梧棲測站氣象資料	中央氣象局		自主檢查表	承包商
契約規範	契約	業主		施工查驗表	業主
	工程施工綱要規範	業主		試運轉併聯紀錄	業主
原廠設計	原廠結構計算書	風力發電機原廠	螺栓資料	螺栓強度出廠證明	分包商 A
	原廠相關設計圖說	風力發電機原廠		螺栓強度抽樣試驗報告	分包商 B
	原廠安裝手冊	風力發電機原廠		案例蒐集	國外類似案例

軸 (Shaft) 及轉子 (Rotor)，C 為上塔架 (Upper Tower)，D 為中塔架 (Middle Tower)，E 為下塔架 (Bottom Tower)。

2. 規範—業主工程施工綱要規範：

根據該規範「機械部分」章節中所規定，「風力機 (Wind Turbine)」之「性能」需符合以下標準 (業主, 2002)：

- (1) 起動風速 (Cut-in Wind Speed)：4 公尺/秒以下；
- (2) 關機風速 (Cut-out Wind Speed)：24 公尺/秒以上；
- (3) 設計耐風速 (Survival Wind Speed)：70 公尺/秒以上。

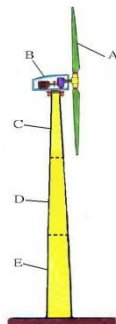


圖 1、風力發電機之組成示意圖

3. 安裝施工紀錄

風機主要係在中、下塔架之銜接處受損，故需

檢核毀損塔架於安裝前及施工中的相關資料 (Yates and Lockley, 2002)，其中包含原文安裝手冊 (Technical Documentation: Installation Manual)(Manufacturer, 2005)、施工計畫書(承包商, 2006)、施工查驗表(業主, 2006)及施工自主檢查表(承包商, 2005)。

4. 塔架結構計算書與設計圖說

為瞭解風力發電機組之幾何結構，原廠塔架結構計算書與設計圖 (Taichung Tower Design Report)(Manufacturer, 2004) 可為後續進行風力發電機組塔架之 3D 數值模型建立與結構重新分析之參考。塔架總高為 62m，上、中、下塔架高度分別為 19.7m、25m、17.3m，單葉片長度 34m，茲將塔架規格型式、設計條件與原設計結構計算書資訊扼要摘錄於表 2。

5. 風速資料

原廠安裝手冊及承包商施工計畫書中均述及塔架安裝時需查核當地之風速氣象資料，為瞭解塔架於安裝時及倒塌時承受風力之氣象狀況，以利後續災因研判，本研究調閱中央氣象局台中縣梧棲測站歷史「逐日逐時平均風風速」、「逐月逐日最大平均風速」與「最大瞬間風速」記錄資料(交通部中央氣象局, 2008)。此外，亦請

表 2、原廠塔架結構計算書摘要

名稱	項目	內容
設計參數	耐風速	70 m/sec 以上
	水平地震加速度	0.33g
	垂直地震加速度	0.22g
原設計結構	風力發電機型式	Z72-2000-2B ¹ 65m
計算書	結構計算依據	IEC 61400-1 ² 及 NVN 11400-0 ³
	設計風速	70 m/sec
	規格	鋼結構塔柱高度 62m，最大外徑 4.2m，最小外徑 2.3m；機艙具三葉片，葉片所圍直徑 70m。
	材料性質	S355J2G3 ⁴ (計算書上之標示)
		SM490YB ⁵ (製造圖上之標示)
	計算程序	彈性模數(Young's Modulus) E=2.1×10 ¹¹ N/m ²
螺栓檢核	分別計算極限載重(Ultimate Load)及疲勞載重(Fatigue Life)下之狀況。 法蘭接合處螺栓受力檢核是根據「Petersen Flange Calculation」方式。	

¹Z72-2000-2B: 風機型號。

²IEC 61400-1: International Electrotechnical Commission (IEC), 61400-1: Wind Turbine Safety and Design，全球風力機認證標準。

³NVN 11400-0: The Dutch pre-standard NVN 11400-0 “Wind Turbines—Part 0: Criteria for Type-certification—Technical Criteria”，荷蘭葉片認證標準。

⁴S355J2G3: 低合金高強度結構鋼，係歐洲標準的鋼材，為半鎮靜鋼。

⁵SM490YB: 馬鋼熱軋 H 型。

相關單位提供塔架吊裝施工當時之「現地風速紀錄表」與發電機運轉感應裝置(Sensor)於每十分鐘自動量測之「連續運轉紀錄」(承包商, 2008)；連續運轉資料記錄包含各風機機艙所承受之最大瞬間風速(m/s)、轉子最大轉速(rpm)、葉片面風角度(degree)等。該紀錄顯示 2 號風機(H02)之最終運轉紀錄時間為 2008/9/28 17:15，之後運轉紀錄空白，然而其它風機仍持續有正常運轉紀錄，與現場事故回報時間及新聞資訊比對可

研判風機塔架倒塌應發生於當日 17:15 至 17:25 間。

6. 廠商螺栓資訊

藉由複核與災損塔架所使用之同批螺栓出廠證明(分包商 A, 2005)，可瞭解該批螺栓之材料原始性質，茲將廠商提供之螺栓出廠證明(表 3)及其抽樣試驗資料(分包商 B, 2005)(表 4)整理如下。

表 3、螺栓出廠證明—力學性質

試體編號 尺寸		NO.364859 M30*190 ²	NO.363290 M36*250 ³
硬度(HRC ¹)	32~39	34.8	35.2
抗拉強度(MPa)	Min: 1040	1041.11	1040.85
降伏強度(MPa)	Min: 940	940.63	941.02
伸長率(%)	Min: 9	9.79	9.93
試驗結果		O.K.	O.K.

¹HRC: 洛式硬度 C，為硬度單位，全名為 Hardness Rockwell C。

²M30*190: 螺栓規格直徑 30mm、長度 190mm。

³M36*250: 螺栓規格直徑 36mm、長度 250mm。

三、國外風力發電機災損案例

本節針對國外風力發電機組發生災損之案例進行統整，其用意為引他山之石的主要致災因子及潛在

風險因子作為殷鑑(Pierpont, 2005)。根據原始資料所載(CWIF, 2008; Linowes, 2008; NWW, 2005)，本研究間如圖 2 所示，各國發生風力發電機事故次數頻率統

彙整其官方證實之紀錄、出版物或新聞公佈等相關災損事故截至 2008 年底止計 560 件，案例所涵蓋之時間如表 5 所示。

表 4、螺栓抽樣試驗資料

試件編號	M30*190	M36*250	JIS 規範要求
降伏強度(MPa)	1050	1089	940 以上
抗拉強度(MPa)	1137	1121	1040 以上
伸長率 (%)	13	13	9 以上
斷面收縮率(%)	53	52	48 以上
硬度值 (HRC)	38	38	32~39

表 5、各國風力發電機發生意外或事故統計(共計 560 件)

國家	案例(件數)	國家	案例(件數)
德國 (Germany)	186	日本 (Japan)	4
美國 (USA)	140	紐西蘭 (New Zealand)	4
英國 (UK)	71	瑞典 (Sweden)	4
丹麥 (Denmark)	51	奧地利 (Austria)	3
荷蘭 (Holland)	20	台灣 (Taiwan)	3
法國 (France)	17	比利時 (Belgium)	2
加拿大 (Canada)	13	印度 (India)	2
澳大利亞 (Australia)	12	中國 (China)	1
西班牙 (Spain)	12	希臘 (Greece)	1
愛爾蘭 (Ireland)	6	葡萄牙 (Portugal)	1
挪威 (Norway)	6	其它公海地區 (Various offshore locations)	1

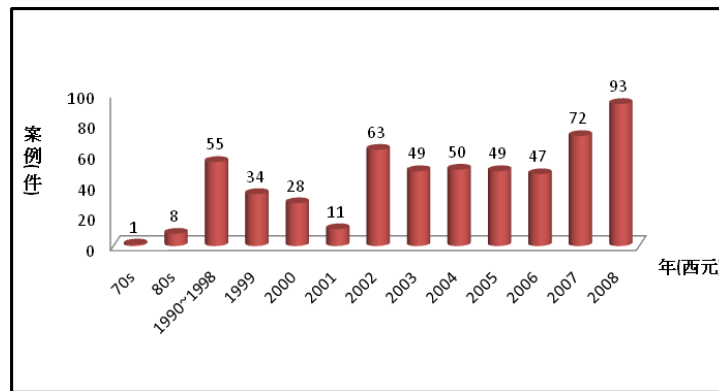


圖 2、國外風力發電機各年發生災損案例統計分佈圖(共計 560 件)

經本研究逐筆整理與敘述性統計分析，事故類別分別有風力發電機主體結構與葉片災損意外(36%)、風機元件運輸過程損害意外(不含人員傷亡)(7%)、火災或冰雹襲擊致損(24%)、人員維修墜落意外/機組運送安裝致使傷亡(14%)、風力發電機設置而造成環境或環保之破壞(9%)與其他無法歸類之事故(10%)，例如：零件或元件故障(無造成後續結構損壞)、電力系統故障(無造成後續火災事故或人員觸電傷亡意外)或閃電擊中(無造成後續火災事故或風機葉片災損)，各意外事故類型分佈彙整如圖 3；而事故類型中，依本

研究逐筆蒐集案例(560 件)有 40 件係被判定為「塔架倒塌」(佔 7%)。

值得注意的是災損紀錄自 1999 年迄今(2008 年 12 月)佔所有紀錄案例數(560 件)之 88.6%，而於 1999 年之前的官方紀錄或新聞僅 64 件。探究其可能原因為風力發電產業自十九世紀起蔚為風潮，加上電子媒體及時傳遞公佈與網路資訊科技的進步，使近代風力發電機相關歷史紀錄(1999-2008)較完整而有跡可循。

本研究之敘述性統計資料顯示，在 40 件「塔架

倒塌」案例扣除 8 件未知致災原因後，暴風雨(佔 47%)及強風吹襲(佔 22%)為各國風機倒塌事故之主要致災外力，由歷史股鑑發現「強風暴雨」確為風力發電機組塔柱於規劃設計、施工、營運等建築物生命週期內評估塔柱倒塌風險的主要不確定性因子；其它倒塌致災因子則依序包括「冰雹襲擊」(3 次)、「塔柱連接點

焊接失敗」(2 次)、「塔柱結構材料疲勞」(2 次)「葉片損害擊中塔柱」(2 次)與「風機艙剎車系統故障」(1 次)。而在「塔架倒塌」案例中，九個國家中發生頻率次數最多的為美國 (13 次)，其次為德國(7 次)、英國(6 次)與法國(5 次)；丹麥、荷蘭、日本與西班牙各發生 2 次，加拿大為 1 次。

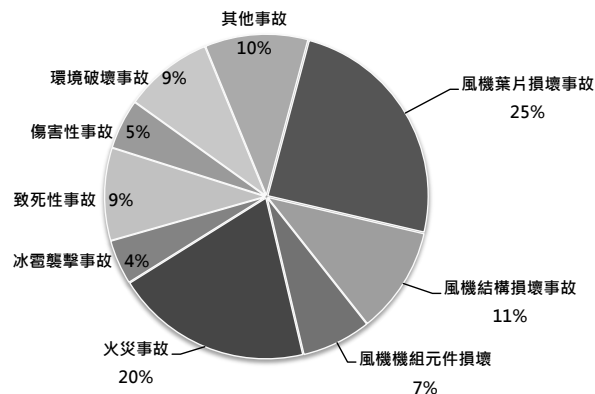


圖 3、風力發電機發生意外或事故之類型分佈(共計 560 件)

四、研究方法與分析程序

本章主要係依災害事故調查與文件查核流程方法(如圖 4)，並依文獻建議(Spittler, et al., 2008; Yates and Lockley, 2002)提出結構物材料實驗室試驗規劃、力學分析理論方法、最新規範現況與結構重新分析程序，探討塔架斷裂之可能災因，茲將文件複核與分析內容彙整於表 6，並整合性扼要闡述於後續小節。

4-1 安裝施工紀錄複核

塔架安裝係採用高強度螺栓接合方式，而塔架倒塌後由現場鑑識發現塔柱中、下節之 128 根螺栓已全數斷裂並散落於事故現場，故本節首先針對此部分進行施工紀錄複核，主要探討內容包含(1)螺栓扭力值之設定、(2)施工單位之「施工自主檢查表」及(3)業主之「施工查驗表」。其中文件(2)及(3)所紀錄之螺栓扭力值有些微出入，但仍大於原廠安裝手冊規定之螺栓扭力值，茲將各文件之螺栓扭力設定值比較如表 7 所示。

4-2 試運轉併聯試驗

依台中港區風力發電機組 2 號風機(H02)之試運轉併聯試驗紀錄(承包商, 2007)顯示，其試運轉併聯

前後各項自主檢查、安全、功能、卸載測試，均經業主查驗核可。

4-3 螺栓拉力強度試驗

受颱風所挾帶之強風豪雨侵襲，塔柱主要先於中、下塔架之法蘭(Wind Tower Flange)銜接處斷裂，該處接合螺栓規格為 M30、10.9 級。倒塌後 128 根螺栓全數損毀並散落於周圍地面，為進一步瞭解可能之破壞原因與機制，特拆取高美溼地內鄰近未受損塔架之 M30 螺栓，並隨機選取 6 組(A~F)完整螺栓及該塔架斷裂後散落地面之受損螺栓 11 組(No.1~No.11)，委託國立台灣大學與嚴慶齡工業發展基金會合設工業研究中心(以下簡稱慶齡中心)施作拉力強度試驗。完整螺栓試驗方法係依日本工業規格(Japanese Industrial Standards, JIS(JIS, 2000)) JIS Z2241 施行；受損螺栓試驗係依中華民國國家標準(Chinese National Standards, CNS(CNS, 1996)) CNS2111-G2013 施行。藉由慶齡中心試驗結果可複核該批螺栓之拉力強度及其力學性質，茲將完整與受損螺栓試驗報告(TLIRI, 2009)結果分別列於表 8 與表 9 (有 5 組受損螺栓因長度過短無法進行相關試驗)。

圖 5 為典型螺栓之應力—應變行為理論曲線，當螺栓加載進入應變硬化現象後，如已到達 C 點，此時若

將其卸載，則其卸載之路徑 CD 將平行於其彈性勁度 AB，若再次加載，則其加載路徑將隨著彈性勁度由 D 到 C，而此種現象將使得其彈性區 CD 大於原始的彈性區 AB，此種硬化現象類似於塑性設計或金屬加工中之安定(Shakedown)現象(陳生金, 2005)。在加、

卸載過中，若由 C 卸載至 D 後停留一段時間後再進行加載，則其彈性強度可能高於原來之非彈性卸載點 C 而至 E 點，沿著 DCEHI 曲線變形，此乃因於非彈性加卸載過程中材質發生變化，使其強度提高。

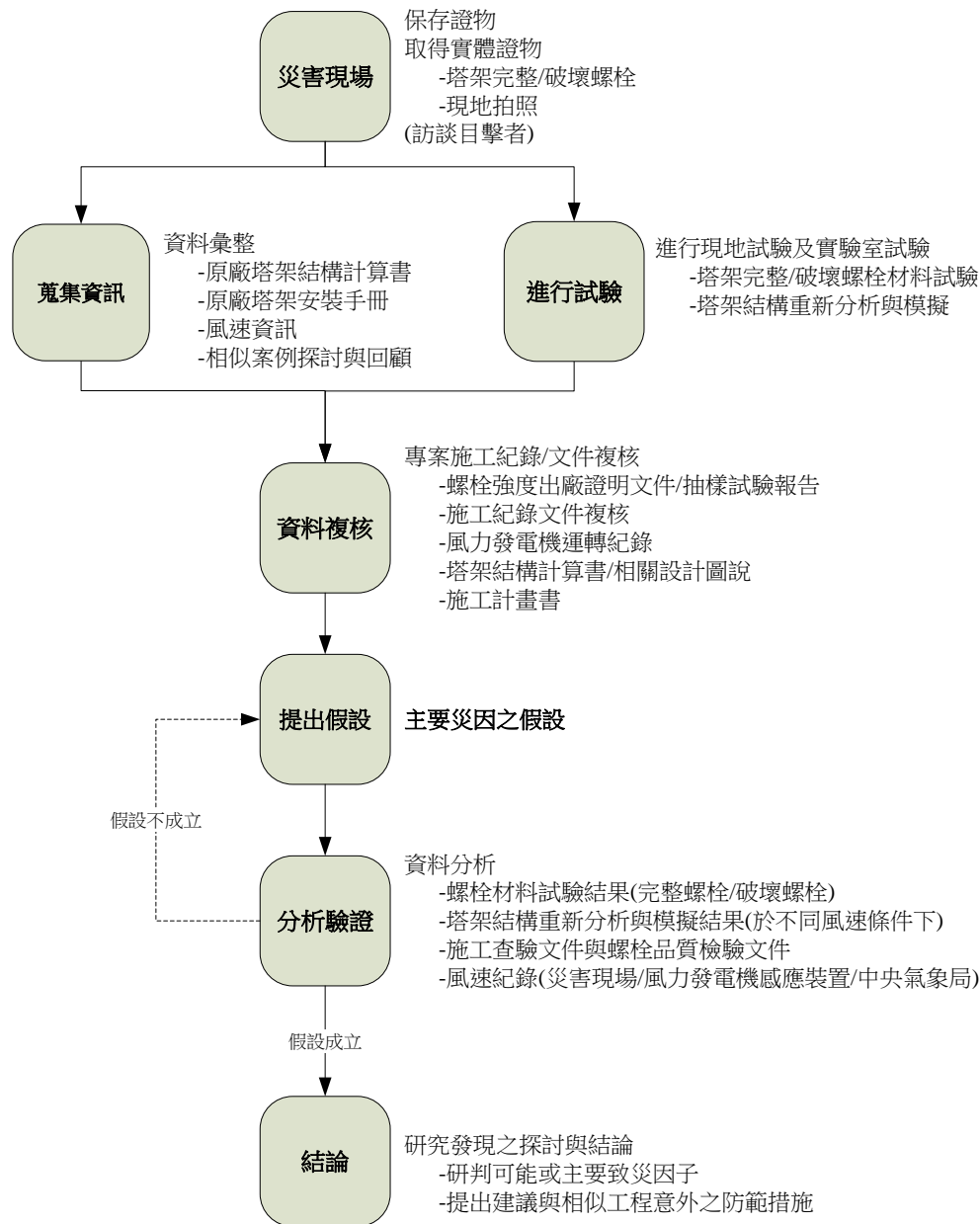


圖 4、災害事故調查與文件查核流程圖

表 7、各文件之螺栓扭力設定值比較表

項 目	扭力設定值 (Nm)	
	上、中塔架連接處	中、下塔架連接處
原廠安裝手冊	1190	2100
自主檢查表	1530	2750
施工查驗表	1351	2338

表 6、文件複核內容

文件名稱		複核內容摘錄	文件來源
契約與	契約	承攬方式、工作範圍、施工內容、施工工期、試運轉與驗收等	業主
規範	工程施工綱要規範	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 電器部分 ▪ 土木結構(耐風速、水平地震加速度、垂直地震加速度) ▪ 機械部分(風力機之性能-起始、關機、設計耐風速、剎車系統、轉向系統、保護及安全裝置) 	業主
原廠設	原廠結構計算書	機組型號、結構計算之規範依據、設計風速、安全係數、材料性質、計算程序、螺栓檢核計算與結果	原廠
	原廠相關設計圖說	塔架規格、螺栓接合方式	原廠
施工安	原廠安裝手冊	安裝之風速規定、螺栓扭力設定值	原廠
裝紀錄	施工計畫書	氣象條件(風向、風速、雷擊警報)、螺栓鎖緊方式、螺栓扭力設定值	承包商
	自主檢查表	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 施工中檢查(外觀、螺栓鎖緊、接地線安裝、轉子固定與葉片方向、0點位置) ▪ 施工完成檢查(外觀、塔架爬梯防墜裝置、塔架內外部) 	承包商
	施工查驗表	塔架外觀、器材檢驗核對、法蘭表面、法蘭螺栓扭力檢驗、完成後整體塔架檢查	業主
	試運轉併聯紀錄	風力發電機組試運轉併聯前後各項自主檢查、安全、功能、卸載測試	業主
風速資	連續運轉紀錄	最後運轉時間、紀錄之最大風速	業主
	梧棲測站氣象資料	災損時之風速、當日最大風速、每小時平均風速與風向、最大瞬間陣風	中央氣象局
螺栓資	螺栓強度出廠證明	螺栓力學性質、化學成份、採用之規範	分包商 A
	螺栓強度抽樣試驗	螺栓力學性質、採用之規範	分包商 B
重新分析	完整螺栓試驗報告	試驗規範依據、力學性質(降伏強度、抗拉強度、伸長率)	材料試驗
複核	受損螺栓試驗報告	試驗規範依據、力學性質(降伏強度、抗拉強度、伸長率)	材料試驗
	塔架結構重新分析	台灣現行耐風設計規範、塔架風壓力計算、彎矩圖、軸向應力圖、撓曲應力圖、螺栓軸拉力、降伏強度、降伏拉力	本研究

表 8、完整螺栓材料強度試驗結果

螺栓編號	斷面直徑 (mm)	降伏強度 f_y (MPa)	與 JIS B1051 規範值	抗拉強度 f_u (MPa)	與 JIS B1051 規範值	伸長率(%)
			最低降伏強度 (940MPa)比較		最低抗拉強度 (1040MPa)比較	
A	14.03	913	0.97	1059	1.01	13
B	14.05	921	0.98	1061	1.02	13
C	14.05	876	0.93	1026	0.99	12
D	14.03	884	0.94	1028	0.99	13
E	14.05	943	1.00	1089	1.05	13
F	14.05	888	0.94	1032	0.99	13
平均值	14.04	904	0.96	1049	1.01	12.83
標準差	0.01	25.81	0.03	24.91	0.02	0.41

表 9、受損螺栓材料強度試驗結果

螺栓編號	斷面直徑 (mm)	降伏強度 f_y (MPa)	與 JIS B1051 規範值		伸長率(%)
			最低降伏強度 (940MPa)比較	最低抗拉強度 (1040MPa)比較	
No.1	12.53	910	0.97	1015	14
No.5	12.47	915	0.97	1022	12
No.6	12.48	834	0.89	954	14
No.7	12.53	921	0.98	1034	13
No.10	12.51	825	0.88	955	15
No.11	12.53	882	0.94	1006	14
平均值	12.51	881	0.94	997	13.67
標準差	0.03	42.29	0.04	34.67	1.03

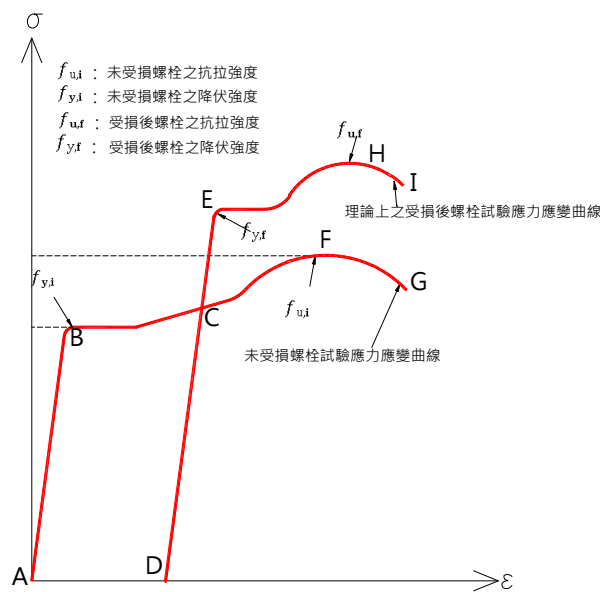


圖 5、螺栓之應力—應變曲線繪成示意圖

本研究發現所取得之受損螺栓若已進入應變硬化現象，則理論上材料試驗之強度應較完整無受損螺栓高。茲將試驗結果進一步與分包商提供之 JIS B1051 規範要求標準比較，整理如表 10 所示：

探究隨機抽樣螺栓強度大多未能符合 JIS 規範

標準之主因可能為：(1)螺栓品質管制問題，以致同批螺栓強度變異性大、(2)原螺栓於安裝接合後，可能因承受長期之鎖定應力作用，產生持續的變形與部分潛變行為，進而造成螺栓強度下降。

表 10、螺栓試驗結果與 JIS B1051 規範要求比較

檢核項目	完整螺栓(A~F)	受損螺栓(No.1~11)	JIS 規範標準
平均伸長率 (%)	12.83	13.67	> 9.0
降伏強度 (MPa)	876~943	825~921	≥ 940
抗拉強度 (MPa)	1026~1089	955~1034	≥ 1040

4-4 塔柱結構力學行為重新分析

塔柱結構力學行為重新分析係以國內 96 年 1 月 1 日頒行之「建築物耐風設計規範」(內政部, 2007) 為依據, 針對當日倒塌時機艙感應器所量測之瞬間

最大風速與原廠規範之設計耐風速分別重新計算塔柱結構應力分佈, 以檢核原設計是否符合國內最新規範要求, 採用規範之各項係數及基本條件如表 11 所示。

表 11、「建築物耐風設計規範」係數採用說明

係數類別	記號	採用值	採用依據	備註
地況分類	C	--	平坦開闊之地面或海岸地區	--
垂直分佈法則指數	α	0.15	相對於 10 分鐘平均風速之垂直分佈法則指數	--
梯度高度	Z_g	300m	地況種類 C 所對應之梯度高度為 300m	--
基本設計風速	$V_{10}(C)$	70m/sec	離地面 10m 高, 相對於 50 年回歸期之 10 分鐘平均風速	<ul style="list-style-type: none"> 依本工程設計規範提高至 70m/sec 法規: 台中縣為 32.5m/sec 塔架倒塌時之瞬間最大風速為 54.3m/sec
用途係數	I 值	1.0	第一類建築物之 I 值=1.1	本工程基本設計風速已大幅提高, 因此改以 I=1.0 檢核。
風力係數	C_f	0.7	圓形煙囪及水塔等表面為中度光滑, $C_f=0.7$	--
陣風反應因子	G_f	2.545 2.397	設計風速 70m/sec 設計風速 54.3m/sec	-- --

1. 風力載重計算

分析程式係採用有限元素數值模擬軟體 Midas/Gen V7.4.1(MIDAS, 2008), 其 3D Model

之節點及桿件編號設置如圖 6 所示。塔架由上而下共分為 22 個元素(23 個節點), 「節點 7」為塔架斷裂處。

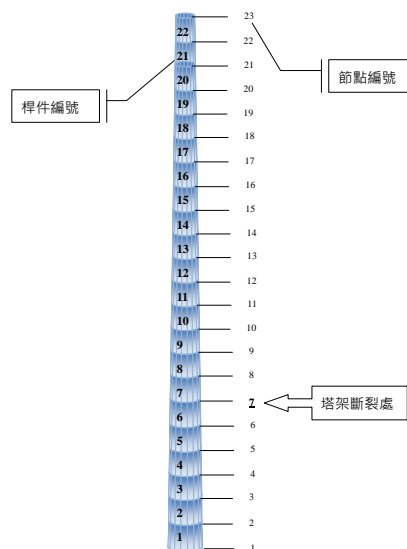


圖 6、3D Model 之節點及桿件編號圖

2. 塔柱 3D 結構數值分析結果

圖 7 為模擬設計風速 $V_{10}(C) = 54.3 \text{ m/sec}$ (塔架

倒塌時機感測裝置所量測到之瞬間最大風速) 及 $V_{10}(C) = 70 \text{ m/sec}$ (業主工程施工綱要規範

之設計耐風速)時，塔架分別承受總風力 43000kg、76000kg 之設計風壓力分佈圖。

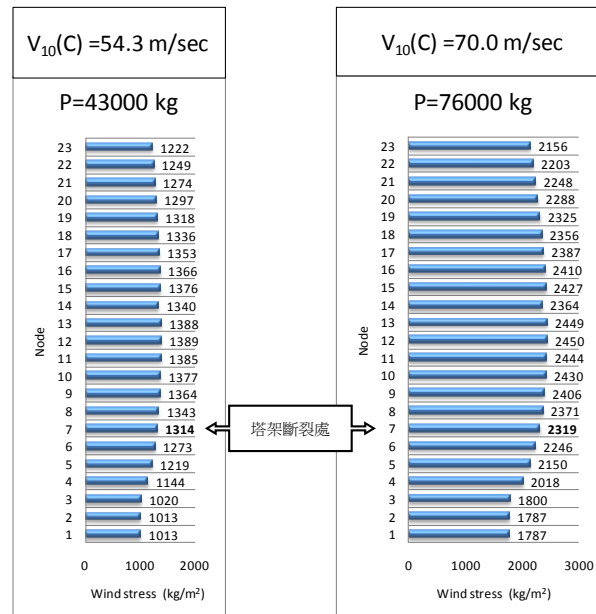


圖 7、塔架受風壓力分佈圖

塔柱係依實際情況模擬斷裂於節點編號 7，現場發現上、中塔柱接合處及下塔柱與基礎面版接合處並無螺栓斷裂現象，故後續可以下塔柱(節點 1~7)之輸出值為分析重點。表 12 為模擬塔柱承受基本設計風速 54.3 m/sec 及 70 m/sec 時，於斷裂處(節點 7)所承受之彎矩(t-m)、撓曲應力(kg/cm²)及軸向應力(kg/cm²)。

表 12、塔柱斷裂處之彎矩、撓曲應力、軸向應力

基本設計風速	彎矩 (t-m)	撓曲應力 (kg/cm ²)	軸向應力 (kg/cm ²)
54.3 m/sec	3230	-1555	-66
70.0 m/sec	5699	-2742	-66

表 13、塔柱與螺栓力學模擬分析

設計風速 $V_{10}(C)$	54.3 m/sec	70.0 m/sec
應力 $\sigma_{wall,max}$ ¹	1489 kg/cm ²	2676 kg/cm ²
軸拉力 F_{bolt}	41 t	73.7 t
降伏拉力 P_y		48.6 t
P_y / F_{bolt}	1.185 > 1.0	0.66 < 1.0

¹ $\sigma_{wall,max}$: 塔柱環狀壁體所承受之最大撓曲應力。

(1) 以基本設計風速為 54.3 m/sec 檢核：若 $\sigma_{all,bolt}$ ^{*2} = 900 MPa 時， $F.S. = 900/759 = 1.185 > 1.0$ ；若 $\sigma_{all,bolt}$ ^{*3} = 876 MPa 時， $F.S. = 876/759 = 1.15 > 1.0$ ，此時螺栓未降伏，尚符合安全標準。

3. 塔柱與螺栓力學分析與複核結果

塔柱力學模擬分析結果如表 13 所示，塔柱法蘭接合處螺栓強度複核則係依原廠設計時採用之德國國家標準(DIN, 1979)為依據。當所採用之螺栓降伏強度為原廠設計 DIN 6914 規範值要求之 84.3 % (= 759/900 × 100 %)時*1，螺栓將產生降伏。

*1 假設安全係數為 1.0 之情況，反算在 54.3 m/sec 風速作用下，螺栓所需之最小降伏應力值 $\sigma_{req'd,min} = 759 \text{ MPa}$ (約為原廠設計 DIN

6914 規範值要求之 84.3 %)

*2 DIN 6914 規範之螺栓降伏強度 $\sigma_{all,bolt} = 900 \text{ MPa}$

*3 完整螺栓試驗結果中，降伏強度最低者為 $\sigma_{all,bolt} = 876 \text{ Mpa}$

- (2) 以基本設計風速為 70 m/sec 檢核：若以施工綱要規範之設計耐風速值檢核，則 $\sigma_{all,bolt} = 900 \text{ MPa}$ ， $F.S. = 48.6/73.7 = 0.66 < 1.0$ (表 13)，此時螺栓已產生降伏。

五、研究發現、潛在致災因子與管理策略探討

本節依前述研析結果，將檢核程序中所得之發現、潛在致災因子探討及針對塔柱倒塌事件所提出之營建管理改善策略綜合歸類為設計風速之影響、高強度螺栓品質與檢核、施工品質查驗、規範採用一致性及其它考量因素，茲分述如后：

5-1 設計風速之影響

塔架倒塌時之風速：依據原廠設計手冊顯示，風力發電機組之最大設計耐風速為 70 m/sec，然依國內現行最新規範複核發現，下、中塔架連接處即使採用符合材料規範要求之螺栓亦無法抵抗 70 m/sec 風速。

塔架吊裝施工中之風速：經檢視承包商之施工自主檢查表及業主施工查驗表，均無塔架安裝時工址確切位置之相關風速與方位紀錄資料，故無法研判安裝過程中是否依循規範，於規定風速下進行塔架吊裝。

5-2 高強度螺栓品質與檢核

1. 高強度螺栓品質管制

塔架法蘭銜接處所需求之「螺栓強度」係以原設計廠商安裝手冊與結構設計書為依據，故後續抽樣試驗與施工採用之「螺栓強度」理應較規範需求的「螺栓強度」大，方能確保塔柱法蘭接合處之強度安全性。然螺栓材料強度於原廠設計要求、施工計畫書、螺栓出廠證明、單組抽樣試驗文件上皆採不同之規範，故應對每

次實際採用之同批螺栓進行合理統計抽樣數量 (Sample Size) 之強度試驗，以確保材料品質能顯著 (Statistical Significance) 符合契約規範中之最嚴格標準，若不幸發生意外事故，較有利於權責釐清。

2. 依國內現行最新「建築物耐風設計規範」之結構分析結果

根據塔架結構重新計算結果顯示，即使採用符合原廠設計 DIN 6914 規範值要求之螺栓，於基本設計風速 70 m/sec 作用下，中、下塔柱接合處螺栓已發生降伏；而於基本設計風速 54.3 m/sec 時 (事故當日機艙感應器所量測之瞬間最大風速)，螺栓應尚符合安全要求，然實際事故現場之螺栓已全數斷裂。

3. 原設計廠商規劃之螺栓需求強度與施工計畫書內所載明之螺栓規格與強度不符

原廠設計規劃之螺栓為符合德國 DIN 6914 規範，所要求之最小降伏強度為 900MPa，最小抗拉強度為 1000MPa；而施工計畫書係採用符合 ASTM A325 規範之高張力螺栓，所要求之最小降伏強度為 5.67 tf/cm² (約 556MPa)，最小抗拉強度為 7.35 tf/cm² (約 721MPa)。

4. 螺栓出廠證明及抽樣試驗資料

根據分包商提供之螺栓出廠證明及單一抽樣試驗資料顯示，該強度試驗結果符合 JIS B1051 規範，即滿足最小降伏強度 940MPa 及最小抗拉強度 1040MPa。然由本研究隨機選取目前運轉中風機之同批完整螺栓及現場所蒐集之受損螺栓進行之力學性質複核試驗，其結果發現與螺栓出廠證明及單一抽樣試驗資料不符，茲將本研究試驗報告摘錄如下：

- (1) 完整螺栓：最小之降伏強度約為 876MPa，平均之降伏強度約為 904MPa；最小之抗拉強度約為 1026MPa，平均之抗拉強度約為 1049MPa。
- (2) 受損螺栓：最小之降伏強度約為 825MPa，平均之降伏強度約為 881MPa；最小之抗

拉強度約為 954MPa，平均之抗拉強度約為 997MPa。

表 14 綜整上述 1~4 對於高強度螺栓之合約內廠商規範要求及試驗結果；表中顯示，若原廠結構計算書採用 DIN 6914 規範為螺栓強度需求，施工中採用 JIS B1051 規範之螺栓，其強度仍可符合原廠設計之要求；反之，因施工計畫書之螺栓材料強度(符合 ASTM A325 規範)僅約為原廠設計需求強度之 62~72%，若以此作為中、下節塔架法蘭接合處螺栓，

將無法滿足原廠設計規定，意即塔架可能因螺栓強度不足而產生破壞之虞。此外，材料複核試驗結果(TLIRI, 2009)顯示完整或受損抽樣螺栓強度品質偏差變異性頗大，此現象不易於分包商單組螺栓抽樣試驗報告中呈現。若塔架法蘭接合處有一螺栓達到降伏破壞時，其所承受之外力將轉嫁至其它尚未降伏螺栓，造成其它螺栓可能因受力超過材料強度而發生骨牌式連鎖破壞，致使塔架倒塌，而此現象對於品質欠佳之螺栓影響更劇。

表 14、螺栓強度於不同來源之規範標準值

相關文件	來源	規範	最低降伏強度	最低抗拉強度
原廠結構計算書	原設計單位	DIN 6914	900 MPa	1000 MPa
施工計畫書	承包商	ASTM A325	556 MPa	721 MPa
螺栓出廠證明	分包商 A	JIS B1051	940 MPa	1040 MPa
螺栓抽驗資料	分包商 B	JIS B1051	940 MPa	1040 MPa

5-3 施工品質查驗與規範採用

本節主要針對螺栓施工安裝之品質查驗及施工規範落實與否對風機塔架可能的致災影響分項進行說明：

1. 螺栓安裝人員是否通過相關專業訓練或相關認證
螺栓安裝人員對於安裝流程、安裝方法之熟悉程度，將影響該施工之品質與安全(Yates and Lockley, 2002)。
2. 螺栓安裝時是否鎖緊
螺栓安裝時，應考量現地風速分兩次鎖緊，首先將接合之鋼板鎖緊至緊貼狀態(Snug Tight)，避免鋼板及構件接合面因不夠平整而有變形存在，而後方可進行第二次鎖緊動作，承包商提供之自主檢查表及業主之查驗表應詳載安裝時風速與二次鎖緊紀錄。
3. 螺栓安裝時工具是否經過校正
施作螺栓安裝工作前，扭力扳手須先與張力計校正以確定其扭力係數值，才可確保安裝時施加之扭力達設計值，使其達到設計規範之扭力值，確保強力螺栓發揮其承力效用；若未經校

正，則可能因誤差而無法確實施加扭力。

4. 自主檢查表與查驗表中的螺栓之扭力值不一致
經查核承包商之施工自主檢查表及業主之施工查驗表，於塔架螺栓扭力值部份略有出入，但仍大於原廠安裝手冊規定之螺栓扭力值，故研判安裝時螺栓設定扭力值對整體塔架安全性之影響應較小，然而仍建議應制定統一評估標準，避免疑慮。
5. 螺栓扭力值是否進行檢視且合格
由相關施工資料中並無法得知塔架中各螺栓是否均達設定之扭力值；若部份未達設定值，則可能造成 4-2 節所述受力不均現象，使其它螺栓受力增加而產生破壞。

5-4 其它可能致災因素

除前述之可能致災因子外，本節針對其他可能因子如時間、環境空間等因素進行綜合性探討。

1. 螺栓材料劣化
螺栓受長期鎖定應力而產生潛變行為或因環境因素影響以致螺栓本身銹蝕、劣化或材料疲勞，均可能使工作螺栓無法達到原設計之需求而造成破壞(Cho, et al., 2001; Hou, et al., 2002)。

2. 災害發生時之環境因素

本塔架倒塌時適逢颱風侵襲，倒塌前 2 號風機感應器所記錄之瞬間最大風速為 54.3 m/sec，故當此強風繞過其他風力發電機組塔架時，可能於 2 號風力發電機組塔架側向產生橫風向風力效應，如：渦流顫動(Vortex Shedding)效應及尾跡風馳(Wake Galloping)效應，造成 2 號風力發電機組塔架發生未預期之破壞。

3. 運送過程造成鋼板材料變形或損壞

於材料運送階段，可能因碰撞等因素造成鋼板安裝或焊接時表面不完全平整，而使安裝後之塔架螺栓受力不均。若某些螺栓無法承受過大之應力時，將提前產生降伏，繼而引致骨牌式連鎖破壞。

六、結論與建議

本文綜整國外類似案例、專案文件紀錄、試驗結果與結構複核分析後，根據研究結果與發現，從設計風速影響、完整未受損與斷裂螺栓材料強度試驗、風機塔柱 3D 模型結構分析、法蘭(Flange)接合處螺栓力學行為複核及施工品質管理構面研判可能之致災因子。最後，從營建管理觀點提出研究結論、具體可行之建議與未來可採取之風險防阻措施，研究成果期能應用於實務所需，防止爾後類似工程事故，並回饋利害關係人強化專案風險管理計畫與防災策略。

6-1 結論

本事故乃台灣首次風力發電機塔架受颱風侵襲倒塌事件，並無相關前例可循，故災因研判與分析對爾後類似工程之風險管理愈顯重要。本文從案例分析角度，輔以系統化研究方法進行各項工程基本資料蒐集與資料複核，探討事故可能的主要致災因子及倒塌機制。

複核資料顯示並無當地塔架安裝時的風速紀錄資料，而倒塌前之強陣風(54.3 m/sec)繞過其他風機塔架時，可能連帶產生渦流與橫風向之風力伴隨效應，造成單一塔架倒塌、破壞之情形，此一現象對

巨型塔柱影響更劇，設計單位應於規劃、設計、施工與營運階段納入評估。

此外，針對螺栓強度部分，本研究依國內現行「建築物耐風設計規範及解說」進行重新結構分析，在採用原廠規範值及模擬基本設計風速 54.3 m/sec(塔柱實際倒塌前之瞬間最大風速)為分析條件時，其螺栓受力分析結果尚符合安全要求；而採相同規範值模擬基本設計風速 70 m/sec(合約規範值)為分析條件時，顯示螺栓已降伏破壞。

另一方面，由分包商提供之同批抽樣完整螺栓材料強度試驗之結果顯示，約 83.33%的螺栓與本研究所檢驗之螺栓強度結果不符，且其中 50%的螺栓，其平均降伏強度為其參考規範值的 93.9%；抗拉強度則約有 50%之螺栓不符。

從施工文件複核、營建施工管理與品質控制之觀點，本研究另可歸納下列要點：

1. 施工紀錄：施工單位未詳實記錄塔架螺栓是否遵照規範中之連接螺栓鎖緊方式。此外，亦無從得知螺栓安裝工具是否於事前進行校正，以確實達成安裝手冊中各項要求數值。
2. 資料查驗：施工查驗表與試運轉併聯試驗紀錄顯示，其各項自主檢查、安全、功能、卸載測試，均經業主認可並符合業主之要求。
3. 人員品質：塔架施工作業中，螺栓之安裝實屬重要環節，但於施工合約之特定條款中並無針對螺栓安裝人員品質實施檢核。此舉將無法確保螺栓安裝人員對於安裝流程、安裝方法之熟悉程度，進而可能造成施工品質與塔架結構安全之疑慮(Cacciabue, 2004; Pierpont, 2005)。
4. 規範採用：由前述相關文件複核顯示，各文件(原廠結構設計資料、施工計畫書、螺栓出廠證明與分包商抽樣試驗資料)用以檢驗螺栓強度之規範於設計單位、承包商、分包商及監造單位皆無統一，此情況亦發現在其它專案文件交叉比對過程中，此易造成混淆與規範遵從性不一致。

6-2 建議

1. 施工中風速查驗與橫風向影響評估

原廠安裝手冊中及施工計畫書中，均述明應注意安裝時風速，故日後進行其他類似工程時，施工單位應詳實紀錄於工址處安裝時之風速資料，並將其增列於施工自主檢查表及施工查驗表中，以提高塔架安裝工作之安全性、避免因風速過大或施工誤差造成之殘餘應力降低結構體原先設計之載重力(Kasap and Kaymak, 2007)。

於規範、原廠安裝手冊、施工計畫書、原廠結構計算書中，所提及之「風速」並未明確定義其量測之高度、平均時間(平均或瞬時風速)及附近之地況與風向方位，建議政府法令及設計單位應針對風速之量測方式做一定義與說明，對施工者於紀錄風速資料時有較為明確之依據，而對設計者亦能依此回饋資訊進行合理分析及評估。

橫風向風力作用為許多高塔結構破壞之原因，而原廠塔架結構計算書中，未見其考量塔架受橫風向風力影響之計算。未來應要求專業設計單位進行相關分析或風洞試驗，並提供評估結果，以了解橫風向效應對於大型風機塔架之影響。

2. 例行性工程材料品質檢核

分包商提供之螺栓抽樣試驗資料及出廠證明資料，僅為單組螺栓試驗結果，無法顯著(Significance)代表該批螺栓強度，為避免螺栓品質差異過大，應依工程經驗增加合理之螺栓抽樣試驗數，確保信心水準與品質可靠度。目前補救措施則可針對同期施作之風機塔架進行螺栓拆解與抽樣強度試驗，以瞭解該批出廠螺栓之品質偏差程度，差異過大者，應對問題螺栓進行全面抽換。另一方面，未來若欲施作其它風力發電機組，承包商應將「出廠螺栓」之品質可靠度評估列入考量，以確保「工作螺栓」之材料強度。

對於已完成之塔架，業主則應定期施作螺栓例行性檢查及保養，檢視風機目前工作螺栓是否

有銹蝕劣化等情況，必要時應立即辦理塔架法蘭接合處螺栓補強措施或抽換塔架螺栓。需注意的是，此倒塌事故的發生讓其餘現存之風力發電機組在下次強風作用下，再次破壞之貝氏機率將比原設計者之先前規劃來得高，因此建議除後續之風力發電機組施工前應進行詳細之現況調查外，應檢核現有塔架所使用之工作螺栓材料規格，是否符合原廠設計圖說之要求，必要時建議拆解部份現存其餘同期施作之風力發電機組塔架之工作螺栓進行材料強度試驗，若試驗結果不符原廠設計圖說之要求，則應立即進行全面性補強或抽換螺栓。

3. 落實工程安裝過程查驗與施工機具校正

塔架螺栓是否分兩次鎖緊、第一次鎖緊時之扭力值部分，施工單位及監造單位應增列於施工查驗表及施工自主檢查表中，以確保符合原廠安裝手冊之規定。此外，業主與承包商查驗文件中螺栓扭力值差異問題，應將螺栓扭力值予以統一，以免造成施工及查驗時之混淆。為確保安裝時所施加之扭力可達設計之要求值，建議於施工自主檢查表中增列「螺栓安裝前，安裝工具是否校正」一項，落實螺栓安裝前工具之校正。

4. 確保工程安裝人員品質與持續性教育訓練

螺栓安裝人員對於安裝流程、安裝方法之熟悉程度，均可能影響施工品質，進而影響安裝人員與塔架結構之安全性，然本研究發現螺栓安裝人員是否需通過相關專業訓練或相關認證並無明確規範要求。建議日後類似工程之高強度螺栓安裝人員，施工單位應採用持續性接受教育訓練，通過測試或具有合格執照的專業工程人員進行施作，藉此減少安裝時可能發生之錯誤，確保施工品質(Le May and Deckker, 2009)。

5. 規範採用之一致性

本研究複核相關資料之結果顯示，原廠設計資料(DIN 6914)、施工計畫書(ASTM A325)、螺栓

出廠證明及分包商抽樣試驗資料(JIS B1051)所採之螺栓規範值均不同。在未來相關文件書寫或審查時，採用之規範應統一標準，避免施工時因採用規範不一致而混淆。

6. 保存事故現場完整性

意外或災害事故發生時，相關單位應保存事故現場之完整性，並請相關權責單位與專業人員儘速至現場做第一時間之鑑識調查，重大災害事故發生原因繁複並可能交互影響，惟妥善保存事故現場之物證，方能確保災損機制之研判(Noon, 2000; Spittler, et al., 2008)，藉以回饋修訂規設計、施工規範與管理體制，降低爾後類似工程事故發生機率或而減輕事故所造成之衝擊。

七、參考文獻

- 內政部，2007，. 建築物耐風設計規範及解說，中華民國內政部。
- 分包商 A，2005，螺栓出廠證明。
- 分包商 B，2005，螺栓抽樣試驗報告。
- 交通部中央氣象局，2008，氣象局風速紀錄與氣象資料。
- 承包商，2005，風力發電機組安裝施工自主檢查表。
- 承包商，2006，塔架施工計畫書。
- 承包商，2007，第 H02 部風機試運轉併聯試驗紀錄。
- 承包商，2008，台中港區 H01-H03 風力發電機組 9/22-9/30 連續運轉紀錄。
- 陳生金，2005，「鋼結構設計—極限設計法與容許應力設計法」，科技圖書。
- 業主，2002，業主工程施工綱要規範。
- 業主，2003，招標契約文件第 00810 章特定條款。
- 業主，2006，現場施工查驗表。
- Alec S. Zimmer, G. R. B. 2006, "John Hancock Center Scaffold Collapse", Paper presented at the The Fourth Forensic Engineering Congress, Cleveland, Ohio.
- Brown, S. 2007, "Forensic engineering: Reduction of risk and improving technology (for all things great and small). [doi: DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.065]", *Engineering Failure Analysis*, 14(6), pp.1019-1037.
- C. Roarty, J., J. Sivak, P. Vogel, and K.V. Ramachandran. 2006, "South Clear Well Roof Collapse: Hydraulic Uplift or Excessive Construction Loading?", Paper presented at the The Fourth Forensic Engineering Congress, Cleveland, Ohio.
- Cacciabue, P. C. 2004, "Human Error Risk Management for Engineering Systems: A Methodology for Design, Safety Assessment, Accident Investigation and Training", *Reliability Engineering & System Safety*, 83(2), pp.229-240.
- Cho, H.-N., Lim, J.-K., & Choi, H.-H. 2001, "Reliability-based fatigue failure analysis for causes assessment of a collapsed steel truss bridge. [doi: DOI: 10.1016/S1350-6307(00)00020-0].", *Engineering Failure Analysis*, 8(4), pp.311-324.
- CNS. 1996, 中華民國國家標準(Chinese National Standards), 中華民國.
- CWIF. 2008, "Caithness Windfarm Information Forum Retrieved January 2010", from <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/page4.htm>
- DIN. 1979, 德國國家標準 (Deutsches Institut für Normung), Germany.
- Hadipriono, F. C. 2001, "Forensic Study for Causes of Fall Using Fault Tree Analysis", *Journal of Performance of Constructed*

- Facilities, 15(3), pp.96-103.
22. Hou, J., Wicks, B. J., & Antoniou, R. A. 2002, "An investigation of fatigue failures of turbine blades in a gas turbine engine by mechanical analysis. [doi: DOI: 10.1016/S1350-6307(01)00005-X]." *Engineering Failure Analysis*, 9(2), pp.201-211.
 23. JIS. 2000, 日本工業標準 (Japanese Industrial Standards), Japan.
 24. Kasap, D., & Kaymak, M. 2007, 5-9 Aug. 2007, "Risk Identification Step of the Project Risk Management", Paper presented at the Portland International Conference on Management of Engineering and Technology.
 25. Le May, I., & Deckker, E. 2009, "Reducing the Risk of Failure by Better Training and Education. [doi: DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.07.006]." *Engineering Failure Analysis*, 16(4), pp.1153-1162.
 26. Linowes. 2008, "Industrial Wind Action Group. Retrieved March 2009", from <http://www.windaction.org/>
 27. Manufacturer. 2004, Z72-2000-62m Taichung Tower Design Report. Netherlands.
 28. Manufacturer. 2005, Technical Document: Installation Manual. Netherlands.
 29. MIDAS. 2008, MIDAS/Gen V7.4.1 建築結構通用分析與設計系統. Korea: MIDAS Information Technology Co., Ltd.
 30. Noon, R. K. 2000, *Forensic Engineering Investigation* (1 edition ed.). Hiawatha: CRC.
 31. NWW. 2005, "National Wind Watch® (NWW) Retrieved March 2009", from www.wind-watch.org.
 32. Pierpont, N. 2005, March 2, 2005, "Health, Hazard, and Quality of Life Near Wind Power Installations— How Close Is Too Close? ",Malone (New York, USA) Telegram, p. 5.
 33. Spittler, J. R., Brown, R. B., & Lattyak, J. F. 2008, Managing evidence preservation at a construction accident site, Toronto, ON, Canada.
 34. TLIRI. 2009, 材料試驗室接受委託試驗報告書, 國立台灣大學與嚴慶齡工業發展基金會合設工業研究中心(TLIRI), 台北。
 35. Yates, J. K., & Lockley, E. E. 2002, "Documenting and analyzing construction failures", *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(1), pp. 8-17.

投稿日期：2009/12/22。

送審日期：2009/12/23。

第一次修改日期：2010/02/01。

第二次送審日期：2010/02/01。

第二次修改日期：2010/03/11。

接受日期：2010/03/22。