

再生能源風力發電塔架結構設計之探討 The Study of Design for Wind Turbine Tower

詹益梁^{1*} 王錦華²

Yi-Liang Chan¹

Jin-Hua Wang²

1 花蓮縣政府客家事務處 科長

Chief, Hakka Affair Department, Hualien County Government

2. 大漢技術學院土木工程與環境資源管理系 副教授

Associate Professor, Department of Civil Engineering & Environmental Resource

Management, Institute of Dahan Technology

* Corresponding author: yiliang.chan@msa.hinet.net

摘要

風能是一種可再生自然能源，就目前的技術發展來看，風力發電已成為綠色能源的主流之一，也是當前技術和經濟上最具商業化規模開發條件的新能源。風力發電機塔架，在一般情況下大都是由風力所控制，塔架結構設計主要由頂部側向位移量控制，而不是塔架強度控制。本研究以荷蘭Zephyros Z72型，裝載容量為2.0MW。塔架高度分別為62m、76.2m及100m，基本設計風速採用47.5公尺/秒時，分析結果顯示，100m之塔架，在100公尺處塔頂之風速為67.1m/sec，尚未達到設計耐風速(Survival wind speed)70公尺/秒之要求。顯示依據我國風力規範之基本設計風速 $V_{10}(c)$ 來設計風機塔架，無法滿足有特殊要求等級之風機塔架，應依比例提高基本設計風速 $V_{10}(c)$ 。

關鍵詞：風力、風力發電、塔架設計

壹、前言

政府於100年11月3日公布「確保核安、穩健減核、打造綠能低碳環境、逐步邁向非核家園」之能源發展願景，全力擴大各類再生能源推廣[1]，諸如推動「千架海陸風力機」與「陽光屋頂百萬座」計畫[2]；倡導節能生活、推動節能示範推廣等，期能藉由增加再生能源之供給量，及提高能源使用效率，減少對能源之需求，建立國內綠能使用環境。在「千架海陸風力機」計畫，預定陸域於2020年完成設置量1,200MW(約450架風力機)；海域於2030年完成設置量3,000MW(約600架風力機)。陸域方面，2012年已完成開發28座風場共314台風力機，總裝置容量621MW，其中已商轉571MW；海域方面，公告「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，並於2012年1月9日公布獲選廠商，目標於2015年前完成國內首座離岸風電示範系統。

風能是一種可再生自然能源，與太陽能、生物、水力、生質能、地熱和海洋能發電相比，就目前的技術發展來看，風力發電已成為綠色能源的主流之一，也是當前技術和經濟上最具商業化規模開發條件的新能源。隨著陸地風能利用及其發電技術的不斷進步

和發展，海上風能利用及其發電關鍵技術開發已經成為許多國家的政府和工程技術人員的重要領域。風力發電塔架其特點為鋼構造，具有較高之高度，橫截面與高度之比值較小，其行為類似懸臂樑。陸域風力發電塔架所承受之荷載包括自重、風力、地震力、溫度作用等，海域塔架則需另考量波浪、洋流等造成之荷載。一般直立式結構，橫向荷載將會具有決定性之作用，因此風力通常被視為最主要的控制項，大部份的應力及變形都由風載重造成，風載重影響結構物整體之穩定性與安全性。2008年9月28日位於台中港區的二號風力發電機(風機)塔架，受薔蜜(Jangmi)颱風所挾帶之強風豪雨侵襲，22座同類型之風力發電機中，在第1節與第2節結合處之螺栓斷裂[3]而倒塌損毀(圖1-1)。2015年元月2日北愛爾蘭2.5MW之風力發電塔架在非颱風之情況下折斷(圖1-2)，因此風力發電機塔架之結構分析與設計值得進一步探討。本文以靜力分析方法探討風力發電塔架結構初步設計，進而以案例驗證說明風力發電塔架結構設計，探討風力發電塔架承受各種載重效應的作用及塔架倒塌損毀之可能因素。



圖1-1風力發電機組被薔蜜颱風吹倒



圖1-2 北愛爾蘭2.5MW之風力發電塔架折斷

貳、風力發電機塔架設計準則

風力發電機依安裝場地之風速和湍流參數來分級[8]，如表2-1。分級是想要達到最大限度地應用的目的，使風速和湍流參數在不同的場地的特徵值，而不是與某一特定場地精確描述。設計中需考慮的外部條件，取決於風力發電機組安裝的預定場地或場地類型。依據風速和湍流參數確定風力發電機組的等級。劃分等級的目的是為了包含最廣泛的應用。風速值和湍流參數可用於表示許多不同場地的特性值，但不能給出任何特定場地的準確表述。目的是按強度變化明顯程度對風力發電機組分類，而強度變化取決於風速和湍流參數。表中規定了風力發電機組等級的基本參數，其中 V_{ref} 為參考風速，指相對於50年回歸期10分鐘之平均風速在輪殼(hub)高度或低於風車頭高度。 V_{ave} 為高度在輪殼高度年平均風速。設計壽命應至少20年。對一些需要特殊設計(如特殊風況或其他外部條件或特殊安全等級)的情況，規定了其他風力發電機組等級S級，S級風力發電機組的設計值應由風機製造商指定，並在設計文件中規定。對這樣的特殊設計，設計狀態的選取值應反映比預期使用風力發電機組更重要的環境。

風力發電機結構設計主要有兩項：塔架與其基礎。控制塔架設計之主要因素為風力或地震力，一般情況大都是風力控制，風力分別作用在機艙(Nacelle)、輪殼(Hub)、扇葉(Rotor blades)與塔架(Tower)。臺灣由於位於地震帶，因此需要考慮地震力與近斷層因素。目前一般規範均假設風力與地震力不須同時發生，但在臺灣，風力發電機在運轉時，

有可能發生大地震，因此應考慮風力發電機運轉時之風力與地震之合併效應。作用在構造物上之風壓力與風速之平方成正比，故風速之垂直分布情形甚為重要。風因受地表糙度的影響而形成邊界層，風速隨高度增加至梯度高(gradient height) z_g 後，保持均勻分布，其速度稱為梯度風速(gradient velocity)。風速與高度 z 之關係通常如下式(2.1)所示[4]。

$$\frac{V_z}{V_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad 0 \leq z \leq z_g \quad (2.1)$$

上式 V_z 為高度 z 處之風速(m/sec)。 V_{10} 為10公尺高之風速(m/sec)。 α 為相對於10分鐘平均風速之垂直分布法則的指數，與地況種類有關。 z_g 為梯度高度(m)，與地況種類有關。參考高度不一定取10公尺，取任何高度時，指數律風速分布照樣成立。式中 α 值與 z_g 值隨地況種類而異。 α 值尚與風速平均時間有關，平均時間愈長， α 值愈大，我國風力規範規[3]定，地況A、B與C，相對於10分鐘平均風速之 α 值分別取為0.32、0.25與0.15。風力發電機塔架結構設計準則及設計規範如表2-2所示。

表2-1 風力發電機組等級基本參數

風力發電機組等級	正常安全等級			特殊安全等級
	I	II	III	S
- V_{ref} [m/s]	50	42.5	37.5	設計值由製造商指定
- V_{ave} [m/s]	10	8.5	7.5	
- A I_{15} (-)	0.18	0.18	0.18	
- a (-)	2	2	2	
- B I_{15} (-)	0.16	0.16	0.16	
- a (-)	3	3	3	

表中 V_{ref} 為參考風速，指相對於50年回歸期10分鐘之平均風速在輪殼(hub)高度或低於風車頭高度。 V_{ave} 為高度在輪殼高度年平均風速。A=較高湍流特性的類型，B=較低湍流特性的類型， $I_{15} = 15$ m/s 時的湍流強度特性值， $a =$ 下式縱向風速分量標準差特性值之斜率參數。 $\sigma_1 = I_{15}(15 + aV_{hub})/(a+1)$ ， $\sigma_1 =$ 在輪殼(hub)高度風速之標準偏差。

表2-2 風力發電機塔架結構設計準則

設計因子	設計準則	設計規範
靜載重與活載重	靜載重主要包括機艙、輪殼、扇葉與塔架等，如果有雪載重也應考慮，活載重主要為安全、營運與維修時之活載重。	鋼結構容許應力設計法規範及解說、鋼結構極限設計法規範及解說[5]
風力	風力應依風力發電機之等級，考慮作用在機艙、輪殼、扇葉與塔架等構件之風力	建築物耐風設計規範及解說[3]
地震力	應考慮風力發電機運轉時之風力與地震之合併效應	建築物耐震設計規範及解說[6]
穩定與局部挫屈	考慮柱之長細比及鋼管之直徑與板厚之比	鋼結構容許應力設計法規範及解說、鋼結構極限設計法規範及解說或AISC[7]

撓曲破壞	考慮由於撓曲所造成之拉應力或壓應力未超過規定強度	鋼結構容許應力設計法規範及解說、鋼結構極限設計法規範及解說或AISC
軸向壓力與彎矩聯合作用	承受彎矩與軸力交互作用，非彈性二階分析或彈性二階分析，若以一階之彈性分析設計結構，則須考慮壓力與側向位移 彎矩放大因子B1與B2。	鋼結構容許應力設計法規範及解說、鋼結構極限設計法規範及解說或AISC

參、塔架結構設計

對風力發電機塔架結構設計，我國尚無特別之設計規範。因此可參考德國GL公司風機認證設計指引[8]及內政部發布「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」，鋼構造建築物結構設計可採用「容許應力法」或「極限強度設計法」。

發電機塔架的設計為決定塔架型式及塔架斷面尺寸，依據決定之構架，計算其作用力是否符合強度要求及穩定性要求。其要點如下：

- 1.設計應檢核強度極限狀態和使用性極限狀態；強度極限係指結構之最大承載能力。使用性極限係指正常使用下其使用功能之極限狀態。
- 2.結構物之設計強度須依其結構型式，在不同載重組合下，可利用彈性分析或非彈性分析決定之，並須符合規範有關結實斷面、穩定性及有效無支撐長度之規定。
- 3.構材及接頭之設計強度必須大於或等於由因數化載重組合計得之需要強度。強度折減係數及載重放大係數應依照規範相關之規定決定之，同時應考慮到疲勞之極限狀態。
- 4.使用性及其他考慮：是指在正常使用下，功能、外觀、可維修性、耐久性等都保持合乎要求之一種狀態。為維持使用性而須限制之結構行為之極限值（如最大位移），應依該結構所欲發揮之功能而定。
- 5.塔架容許變形量、傾斜量與旋轉量：德國GL公司風機認證設計指引建議，陸上風渦輪機在設計載重時，頂部側向位移量不超過1/200。
- 6.對於鋼結構，圓柱或圓錐形狀的鋼管塔架，極限狀態下應力校驗需要根據板殼理論。換言之由風力所造成之彎矩可用來分析鋼管之應力。但由於風力在鋼管圓周不均勻分佈或其他翼板或加勁板所引起的撓曲應力需要考慮。在塔架鋼管變換斷面處，圓周上的力和力的傾斜產生的彎曲需要考慮，必要時可用加勁環梁，不過大部分之鋼管塔架都不需要。塔架因製造上之缺失或太陽單向照射等因素所造成之傾斜量應考慮0.5%。基礎之不均勻沉陷應考慮0.3%。
- 7.鋼管直徑與厚度之比值應小於 $D/t < \frac{0.45E}{F_y}$ ，當 $D/t < \lambda_p = \frac{0.07E}{F_y}$ ，鋼管斷面為結實斷面，當 $\frac{0.07E}{F_y} < D/t < \lambda_p = \frac{0.31E}{F_y}$ ，鋼管斷面為非結實斷面，當 $D/t > \frac{0.31E}{F_y}$ ，鋼管斷面為細長肢斷面。
- 8.鋼管翼板結合(flange connections)，極限狀態分析中，螺栓的預拉力不需要考慮。但應考慮鋼管翼板之塑性變形。
- 9.強度計算：作用在塔架上的載重包括靜載重、活載重、風力及地震力，所以在進行塔架的強度計算時，要進行上述各種載重組合強度計算。

對於塔架基礎，則要進行基礎最大壓力計算，以確定土壤支承面處之土壤承載能力，使風機安裝在塔架基礎上不會產生沉陷。塔架的活載重強度分析應對包括運動部件

在內的所有風力機部件組成的扭轉系統進行系統扭轉振動特性計算，以確定系統扭轉振動固有頻率。計算時還應考慮基礎和系統阻尼的影響。設計計算的固有頻率值應比風輪葉片實際轉動頻率高20%。對於因風輪旋轉引起振動的情況，應證實塔架（包括基礎）的固有頻率充分遠離轉動風輪的激勵頻率 f_R 。

鋼結構之極限強度設計法應檢核強度極限狀態(Ultimate limit state (ULS))和使用性極限狀態(Serviceability limit state (SLS))；強度極限係指結構之最大承載能力，其與結構之安全性密切相關。使用性極限係指正常使用下其使用功能之極限狀態。設計強度須依其結構型式，在不同載重組合下，可利用彈性分析或非彈性分析決定之。各構材及接頭之設計強度必須大於或等於由因數化載重組合計得之需要強度，設計強度係由標稱強度乘上強度折減因子而得。設計要項[5]如下，

(1)設計受壓強度

受壓斷面所有肢材之寬厚比皆小於或等於 λ_r 者，其設計強度為 ϕP_n 。

$$\text{其中 } \phi = 0.85, \quad P_n = A_g F_{cr} \quad (3.1)$$

$$\text{當 } \lambda_c \leq 1.5, \quad F_{cr} = [\exp(-0.419\lambda_c^2)] F_y \quad (3.2)$$

$$\text{當 } \lambda_c > 1.5, \quad F_{cr} = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y \quad (3.3)$$

$$\text{其中 } \lambda_c = \frac{kl}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (3.4)$$

(2)設計撓曲強度

設計撓曲強度 ϕM_n ， $\phi = 0.9$ ，對圓形鋼管而言，當 D/t 小於 $\frac{0.45E}{F_y}$ 時，其理論強度取塑性彎矩強度或局部挫屈強度之較小值。塑性彎矩強度為 $M_n = M_p = F_y Z$ ，局部挫屈強度為

i. 結實斷面時，不會發生局部挫屈。

$$\text{ii. 非結實斷面, } M_n = \left(\frac{0.021E}{\left(\frac{D}{t}\right)} + F_y \right) S \quad (3.5)$$

$$\text{iii. 細長肢斷面, } M_n = F_{cr} S, \quad F_{cr} = \left(\frac{0.33E}{\left(\frac{D}{t}\right)} \right) S \quad (3.6)$$

(3)對稱構材承受彎矩與軸力交互作用

對稱斷面構材承受彎矩與軸力交互作用時，須滿足公式(3.7)或(3.8)之規定：

當 $\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2$ 時

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1.0 \quad (3.7)$$

當 $\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2$ 時

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} + \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1.0 \quad (3.8)$$

所需之撓曲強度 M_u 可依非彈性二階分析或彈性二階分析來決定。若以一階之彈性分析設計結構，則須利用下述過程計算所需之撓曲強度：

$$M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (3.9)$$

(4) 環狀底板之設計

在極限狀態時塔架圓形鋼管所受之彎矩為 M_u ，軸向壓力為 P_u ，圓形鋼管之斷面模數 S_x ，塔架圓形鋼管所受最大壓應力為

$$f_c = \frac{M_u}{S_x} + \frac{P_u}{A_g} \quad (3.10)$$

如圖3-1所示，取單位長度來分析，其中 $P_u = f_c t$ ，假設環狀底板之寬度為 B ，則作用在底板之壓應力 f_p 為

$$f_p = \frac{P_u}{B} \quad (3.11)$$

底板所受之最大彎矩 M_u 為

$$M_u = 0.5 f_p \left(\frac{B}{2} \right)^2 = \frac{f_p B^2}{8} \quad (3.12)$$

底板需要厚度為 t_p 為

$$t_p = \sqrt{\frac{6M_u}{\phi F_y}} \quad (3.13)$$

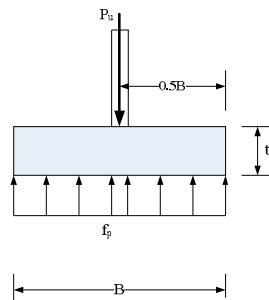


圖3-1 環狀底板設計示意圖

(5) 錨栓設計

塔架圓形鋼管之環狀基礎錨栓設計時，將其視半徑為 R ，厚度為 t 之等值鋼管，其面積為

$$A = 4 \int_0^{\pi/2} R t d\theta = 2\pi R t = N A_s \quad (3.14)$$

上式中 N =錨栓之總數量， A_s =1支錨栓之斷面積。

慣性矩 I_x 為

$$I_x = 4t \int_0^{\pi/2} R^2 \sin^2 \theta d\theta = \pi R^3 t \quad (3.15)$$

斷面模數 S_x 為

$$S_x = \pi R^2 = \frac{N A_s B_b}{4} \quad (3.16)$$

式中 B_b =錨栓之直徑。

在塔架圓形鋼管之彎矩為 M_u 與軸向壓力為 P_u 作用下，1支錨栓所受之拉力 T_u 為

$$T_u = A_s f_s = \left(\frac{M_u}{S_x} - \frac{P_u}{NA_s} \right) A_s \quad (3.17)$$

上式可寫成如下式之設計形式

$$A_s = \frac{1}{F_t} \left(\frac{4M_u}{NB_b} - \frac{P_u}{N} \right) \quad (3.18)$$

式中 F_t = 錨栓之拉力強度。

(6) 螺栓結合之槓槓作用 (prying action)

螺栓接合在受張力作用時可能因接合元件勁度不足造成鋼板局部變形，使部份螺栓所受之力量較平均力量大，若有數排螺栓亦可能造成力量集中於接近作用力之螺栓上，無法由所有螺栓均勻承受外力，此現象稱槓槓作用(圖3-2)[9]。在槓槓作用下螺栓可能受額外之拉力，亦可能因鋼板變形導致螺栓受彎曲變形。當接合受槓槓作用時其破壞可能為螺栓受額外之拉力而斷裂或因鋼板達到極限強度產生撓曲之破壞。

螺栓斷裂破壞控制時，平衡載重 T_0 與螺栓承受力 B 關係式為

$$T = \frac{B}{1 + \frac{\alpha \delta b}{1 + \alpha \delta a}} \quad (3.20)$$

上式中之 $\delta = 1 - d/p$ ，此處 d 為螺栓孔徑， p 為螺栓間距， α 值為若 $\beta > 1$ 則 $\alpha = 1$ ，若 $0 \leq \beta < 1$ 則

$$\alpha = \min \left[\frac{1}{\delta} \left(\frac{\beta}{1 - \beta} \right), 1 \right]$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{B}{T} - 1 \right) \quad , \quad \rho = b'/a' \quad (3.21)$$

所需鋼板厚度為

$$t_{\text{reqd}} \geq \sqrt{\frac{4Tb'}{\phi p F_y (1 + \alpha \delta)}} \quad , \quad \phi = 0.9 \quad (3.22)$$

考慮鋼板變形塑性破壞時 $\alpha = 1$ 所需鋼板厚度為

$$t_{\text{reqd}} = \sqrt{\frac{4Tb'}{\phi p F_y (1 + \delta)}} \quad (3.23)$$

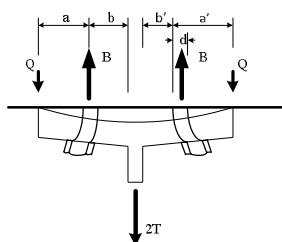


圖3-2 槓槓作用

肆、基礎設計

塔架基礎設計主要考慮因素為(1)穩定問題、(2)承载力問題、(3)沉陷量計算、(4)深基礎。淺基礎之極限承载力應根據建築物基礎構造設計規範[10]，並根據基地調查及土

壤試驗之結果，依下列公式估計之：

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + \gamma_2 D_f N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 0.5\gamma_1 B N_\gamma F_{rs} F_{rd} F_r \quad (4-1)$$

其中 q_u = 極限支承力(tf/m²)， c = 基礎版底面以下之土壤凝聚力(tf/m²)， γ_1 = 基礎版以下B深度範圍內之土壤平均單位重，在地下水位以下者，應為其有效單位重(tf/m³)。 γ_2 = 基礎版底以上之土壤平均單位重，在地下水位以下者，應為其有效單位重(tf/m³)。 D_f = 基礎附近之最低地面至基礎版底面之深度，如鄰近有開挖，須考慮其可能之影響(m)。 B = 矩形基腳之短邊長度，如屬圓形基腳則指其直徑(m)。 L_l = 矩形基腳之長邊長度(m)。 N_c, N_q, N_γ = 支承力因數，由文獻[10]表4.3-1查得。 F_{cs}, F_{qs}, F_{rs} = 形狀影響因素，由文獻[9]表4.3-2查得。 F_{cd}, F_{qd}, F_{rd} = 埋置深度影響因素，由文獻[9]表4.3-2查得。 F_{ci}, F_{qi}, F_{ri} = 載重傾斜影響因素，由文獻[9]表4.3-2查得。

風力發電機塔架之基礎一般採用獨立基腳，將塔架之各種載重傳佈於基礎底面之地層。獨立基腳之彎矩由基礎版承受，並與垂直載重合併計算，其合壓力應以實際承受壓力作用之面積計算，且最大合壓力不得大於建築物基礎構造設計規範[10]第4.3節規定之容許支承力。一般基腳版皆不排放剪力筋，由基腳版混凝土之抗剪強度來抵抗外載重所造成之剪力，而混凝土之抗剪強度最主要與有效深度 d 成正比，即與版厚成正比。在設計基腳厚時，通常受撓曲、梁式剪力與穿孔剪力三項因素所控制[11]。

伍、再生能源風力發電塔架結構設計例

設計例1是採用民國97年9月28日蕃密颱風襲台時，台中港區編號H02風力發電機塔架來分析 [3]。設計所採用之基本資料與假設說明如下：

塔架高度62m，塔架底部直徑4.2m，頂部2.3m，分成三節由上到下分別為19.7m、25m及17.3m，如圖5。塔架鋼板厚25mm，鋼材採用A36鋼，其降伏強度 $F_y = 2.5tf/cm^2$ 。風力發電機為荷蘭Zephyros Z72型，裝載容量為2.0MW，其中(1)發電機重49tf，直徑3.8m，長2.2m；(2)機艙重12tf，長3.5m、寬2.8m、高2.8m；(3)輪殼重19tf，長2.5m、寬2.2m、高2.2m；(4)扇葉3片，每片重5.5tf，長34m，靠近輪殼處之直徑為1.9m，最大寬度為3.1m；合計重為96.5tf，分析時採用120tf。

其他假設說明如下：

1. Z72型之風力等級為(Wind class I and S, according to IEC 61400-1)，該風機損壞時所量測到塔頂之最終瞬間最大風速為54.3m/sec。本例分析採用參考文獻[4]基本設計風速 $V_{10}(c) = 32.5m/sec$ 。地況分類為C，用途係數 $I = 1.1$ 。風力係數為 $C_f = 0.7$ 。陣風因數經計算為 $G_f = 2.212$ 。在塔頂之風速為 $V_{62} = V_{10}(c) \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha = 32.5 \times \left(\frac{62}{10}\right)^{0.15} = 42.7m/sec$

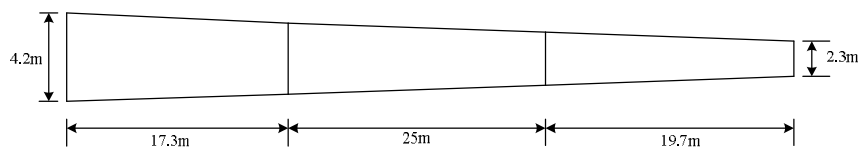


圖5-1 設計例之塔架示意圖

2. 作用在扇葉之風力在高度62m處之風壓依我國風力規範為

$$F = q(z_A)GC_f A_f \quad (5-1)$$

其中

$$q(z) = 0.06 K(z) K_{zt} [I V_{10}(C)]^2 \quad (5-2)$$

風速壓地況係數 $K(z) = 2.774 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} = 1.729$ ， $z = 62.m$ ， $z_g = 300$ ， $\alpha = 0.15$ ， K_{zt} 稱為地形係數，用 1.0，陣風因子採用與塔架相同值為 2.212，因此得風壓力為

$q(z) = 0.06 \times 1.729 \times 1 \times (1.1 \times 32.5)^2 = 133 \text{kgf} / \text{m}^2$ 。參考文獻[12]謂：「目前世界上計算暴風工況時的風輪氣動推力雖有不少公式，但計算結果卻相差很大，究竟哪一個公式的計算結果比較符合實際情況至今尚無定論」。茲將各國計算暴風工況時的風輪氣動推力公式，比較說明如下，

$$(1) \text{蘇聯法捷耶夫公式：} \quad F = 0.08 A_b V_b^2 B_b (\text{kgf}) \quad (5-3)$$

式中 A_b = 扇葉之投影面積(m^2)， V_b = 扇葉中心處之暴風風速， B_b = 扇葉數。

$$(2) \text{荷蘭ECN公式，} \quad F = C_t q A_b B \phi S_0 \quad (N) \quad (5-4)$$

上式中 C_t = 風力係數=1.5， ϕ = 動態係數=1.2； S_0 = 安全係數=1.5；

q = 風壓力，隨高度而變化，其數值可根據表 5.1-1。

表 5-1 荷蘭 ECN 公式 H 與 q 對照表

$H_1(\text{m})$	$q(N/m^2)$	$H_1(\text{m})$	$q(N/m^2)$
10	1020	60	1330
20	1120	70	1360
30	1190	80	1390
40	1250	90	1410
50	1300	100	1430

表中 H_1 ，為風車中心之高度。

(3) 德國 DFVLR 公式

$$F = C_t \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \right) A_b B S_0 \quad (N) \quad (5-5)$$

上式中 C_t = 風力係數=2.2， V = 暴風風速，當高度小於 30m 時，取 $V = 42 \text{m/sec}$ 。

(4) 丹麥公式

$$F = P A_s \quad (N) \quad (5-6)$$

式中 P = 扇葉單位掃掠面積上之平均風壓力，通常取 $P = 300 \text{N/m}^2$ 。

A_s = 扇葉掃掠面積(cm^2)。

(5) 文獻[13]採用下式類似丹麥公式來估計作用在扇葉之風力，

$$F = 0.4 V^2 A_s \quad (N) \quad (5-7)$$

上式 F 之單位為 N 。

(6) 在正常運轉時，作用在扇葉掃掠面積 (A_s) 上的平均壓力可由下式計算(大陸風力發電機組安全要術標準 (GB18451))

$$P = \frac{\rho}{2} C_{FB} V_r^2 \quad (5-8)$$

上式中 $C_{FB} = 8/9$ ， ρ = 空氣密度， V_r = 額定風速(rated wind speed)

因此作用在塔架頂部之風力為，

$$F = PA_s = \frac{V_r^2}{1800} A_s \quad (kN) \quad (5-9)$$

陣風載荷計算時將上述的正常載荷計算之額定風速乘以陣風係數3/5。
換言之，作用在塔架頂部之風力為

$$F = PA_s = \frac{V_r^2}{650} A_s \quad (kN) \quad (5-10)$$

茲以本例扇葉數 $B=3$ ，風車直徑 $D=70.65m$ ，塔頂之風速 $V=42.7m/sec$ ， $A_b=17m^2$ ， $A_s=\pi D^2/4=3.1416(70.65)^2/4=3920m^2$ ，分別以上述各公式計算作用在扇葉之風力如下，

- (a) 蘇聯法捷耶夫公式 $F=0.08 \times 17 \times 42.7^2 \times 3 = 7439kgf$
- (b) 荷蘭ECN公式 $F=1.5 \times 1330 \times 17 \times 3 \times 1.2 \times 1.5 = 183141N = 18669kgf = 18.7tf$
- (c) 德國DFVLR公式 $F=2.2 \times (0.5 \times 1.225 / 9.81 \times 42.0^2) \times 17 \times 3 \times 1.5 = 18535kgf = 18.5tf$
- (d) 丹麥公式 $F=300 / 9.81 \times 3920 = 119878kgf = 120tf$
- (e) $F=0.4 \times 32.5^2 \times 3920 / 9.81 = 168828kgf = 168.8tf$
- (f) 中國大陸 $F=\frac{13^2}{650} \times 3920 / 9.81 = 103.9tf$

從上述比較結果，作用在風車之風力各國之簡化公式差異相當大，其中德國DFVLR與荷蘭ECN公式相近。本研究採用我國之風力規範來計算作用在扇葉與機艙之風力。

假設扇葉與風力作用方向相垂直之投影面積為 $34m \times 0.5m \times 3片=51m^2$ ，並假設作用在扇葉之風力係數 C_f 取1.0，則作用在扇葉之風力為

$$F=133 \times 2.212 \times 1.0 \times 51 = 15000kgf = 15.0tf$$

而作用在機艙之風力(風力係數如圖5-2)為

$$F=133 \times 2.212 \times 1.3 \times (2.8 \times 2.8) = 3000kgf = 3.0tf$$

上述作用在扇葉及機艙風力之作用點假設位於塔架頂機艙之中央，位於塔架頂之上1.4m處。

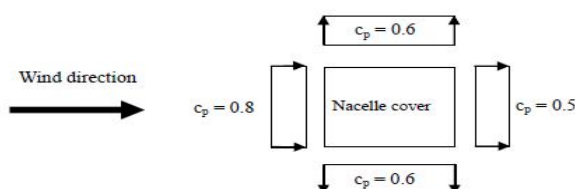


圖5-2作用在機艙之風力係數(參考資料：GL Guideline for the Certification of Wind Turbines, Edition 2010)

3.鋼管厚度25mm，降伏強度 $F_y=2.5tf/cm^2$ ，螺栓採用JIS-F10T。分析採用我國風力規範[4]之台中地區之基本設計風速 $V_{10}(c)=32.5m/sec$ 。地況分類為C，用途係數 $I=1.1$ 。風力係數為 $C_f=0.7$ 。以SAP2000程式分析得塔架之振動頻率為0.463Hz，用途係數 $I=1.1$ 。陣風因子為 $G=2.212$ 。塔架頂在設計風力作用下之位移為0.2593m，為塔架高度之1/239。未超過德國GL公司風機認證設計指引建議值1/200。塔架底部及17.3M處之使用載重與極限載重下之剪力、彎矩與軸向力如表2，極限載重下由風力控制設計。塔架底部鋼管強度檢核結果如下式，

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} = 0.445 < 1.0 \quad (OK)$$

塔架基礎錨栓設計詳表5-3，塔架17.3M處結合螺栓及連接翼板設計詳表5-4。分析考慮槓槓作用(prying action)，螺栓使用109支，需要螺栓直徑2.16cm，需要之翼板厚度為4.7cm。如果使用螺栓直徑為3cm，需要之翼板厚度為4.54cm。台中港區編號H02風力發電機塔架之塔柱主要先於中、下塔架之法蘭(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。依據參考文獻[3]之調查研究，受損螺栓之平均降伏強度 $f_y = 881\text{MPa}$ ，為JIS標準規定值之94%。平均抗拉強度 $f_u = 997\text{MPa}$ ，為JIS標準規定值之96%。從上述之分析比較及22座塔架僅有一座於該次颱風因螺栓斷裂而倒塌，因此研判該事故應屬偶然誤差而非系統誤差所造成。

表5-2 塔架之剪力、彎矩與軸向力

位置	使用載重下			極限載重下 ⁽¹⁾		
	軸向力(tf)	彎矩(tf-m)	剪力(tf)	軸向力(tf)	彎矩 ⁽²⁾ (tf-m)	剪力(tf)
塔架底部	243.3	2128.4	49.5	291.9	3512	79.2
塔架底部(地震力)	243.3	3090	56.4	291.9	3090	56.4
17.3M處	201.6	1367.8	41.8	241.9	2274	66.8

附註：1. 由載重組合1.2D+0.5L+1.6W控制設計， 2. $M_u = B_1M_{m1} + B_2M_{m2}$

表5-3 塔架基礎錨栓設計

塔架基礎錨栓設計	
錨栓數N	128 支
需要錨栓直徑D	2.27 cm
使用螺栓直徑D	3.0 cm
螺栓總共斷面積 A_v	904.78 cm^2

表5-4 塔架17.3M處結合螺栓及連接翼板設計

螺栓數N	109
需要錨栓直徑D	2.16 cm
使用螺栓直徑D	3.0 cm
螺栓間距	10.01cm
需要翼板厚度	4.54cm

設計例2是採用塔架高度為76.2m，風力發電機為荷蘭Zephyros Z72型，裝載容量為2.0MW，分所採用之基本資料與假設說明如下：

- 塔架頂端之側向位移不超過塔架高度之1/200。
- 塔架分成四節，由下到上分別5.2m*0.05m*10m，4.5m*0.045m*30m，4m*0.038m*20m，3.2m*0.025m*16.2m，如圖5.2-1。塔架鋼板採用不同厚度，鋼材採用A36鋼，其降伏強度 $F_y = 2.5\text{tf} / \text{cm}^2$ 。

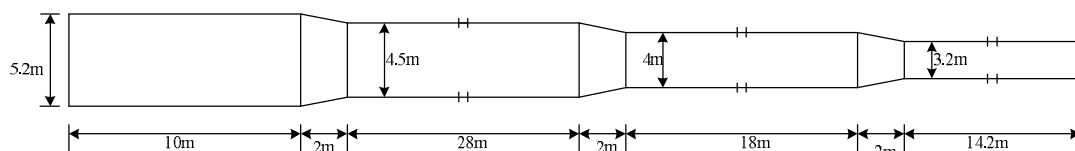


圖5-2 設計例2塔架示意圖

- 荷蘭Zephyros Z72發電機重49tf，直徑3.8m，長2.2m；機艙重12tf，長3.5m、寬2.8m、高2.8m；輪殼重19tf，長2.5m、寬2.2m、高2.2m；扇葉3片，每片重5.5tf，長34m，靠近輪殼處之直徑為1.9m，最大寬度為3.1m；合計重為96.5tf，分析時採用120tf。
- 本例分析採用之我國風力規範，假設風機在花蓮縣，基本設計風速

$V_{10} = 47.5\text{m/sec}$ 。地況分類為C，用途係數 $I=1.1$ 。風力係數為 $C_f = 0.7$ 。陣風因數

為 $G_f = 2.217$ 。在塔頂之風速依公式得

$$V_{76.2} = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha = 47.5 \times \left(\frac{76.2}{10} \right)^{0.15} = 64.4 \text{ m/sec}$$

5. 作用在扇葉之風力在高度76.2m處之風壓依我國風力規範為

$$F = q(z_A) G C_f A_f$$

其中 $q(z) = 0.06 K(z) K_{zt} [I V_{10}(C)]^2$

$$K(z) = 2.774 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} = 1.839 (z=76.2\text{m}), z_g = 300, \alpha = 0.15, K_{zt} \text{ 稱為地形係數, 用}$$

1.0, 陣風因數採用與塔架相同值為2.217, 因此得風壓力為

$$q = 0.06 \times 1.839 \times 1 \times (1.1 \times 47.5)^2 = 301 \text{ kgf/cm}^2$$

假設扇葉與風力作用方向相垂直之投影面積為 $34\text{m} \times 0.5\text{m} \times 3\text{片} = 51\text{m}^2$, 並假設作用在扇葉之風力係數 C_f 取1.0, 則作用在扇葉之風力為

$$F = 301 \times 2.217 \times 1.0 \times 51 = 34033 \text{ kgf} = 34.03 \text{ tf}$$

而作用在機艙之風力為

$$F = 301 \times 2.217 \times 1.3 \times (2.8 \times 2.8) = 6801 \text{ kgf} = 6.80 \text{ tf}$$

上述作用在扇葉及機艙之風力之作用點假設位於塔架頂之上面1.4m處。

6. 以SAP2000程式分析得塔架之振動頻率為0.5953Hz, 用途係數 $I = 1.1$ 。塔架頂在設計風力作用下之位移為0.3579m, 為塔架高度之0.0047, 小於0.005。塔架底部之使用載重與極限載重下之剪力、彎矩與軸向力如表5.2-1, 其中考慮風力發電機運轉時之風力與地震之合併效應, 顯然由風力控制設計。鋼管強度檢核結果如下, 塔架基礎錨栓設計詳表5-6, 塔架17.3M處結合螺栓及連接翼板設計詳表5-7。

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} = 0.485 < 1.0 \quad (\text{OK})$$

表5-5 設計例2塔架之剪力、彎矩與軸向力

位置	使用載重			極限載重 ⁽¹⁾		
	軸向力 (tf)	彎矩 (tf-m)	剪力 (tf)	軸向力 (tf)	彎矩 ⁽²⁾ (tf-m)	剪力 (tf)
塔架底部(風力)	440	7648.3	153.7	528	12546	246.7
塔架底部(地震力)	440	6074.9	101.5	528	6074.9	101.5
25M處 (風力)	301.6	4221.8	123.3	361.9	6935	197.3
塔架底部 ⁽³⁾ (風力+地震力)				528	10955	173
塔架底部 ⁽⁴⁾ (風力+地震力)				528	12208	190

1. 由載重組合1.2D+0.5L+1.6W控制設計, 2. $M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}$

3. 載重組合: 1.2D+1.6*(0.389W)+E, 4. 載重組合: 1.2D+E+1.6W(運轉時塔頂最高風速)

25m/sec)

表5-6 塔架基礎錨栓設計

塔架基礎錨栓設計	
錨栓數N	240 支
需要錨栓直徑D	2.88 cm
使用螺栓直徑D	3.2 cm
螺栓總共斷面積Av	1930 cm ²

表5-7 塔架25M處結合螺栓及連接翼板設計

螺栓數N	120
需要錨栓直徑D	3.25 cm
使用螺栓直徑D	3.6 cm
螺栓間距	11.15cm
需要翼板厚度	6.0cm

設計例3是採用塔架高度為100 m，風力發電機為荷蘭Zephyros Z72型，裝載容量為2.0MW，分所採用之基本資料與假設說明如下：

- 1.塔架頂端之側向位移不超過塔架高度之1/200。
- 2.塔架分成四節，由下到上分別6.5m*0.06m*25 m，6 m*0.055 m *25 m，5.5 m*0.036 m*25m，4.5 m*0.025 m*25 m，如圖5.3-1。

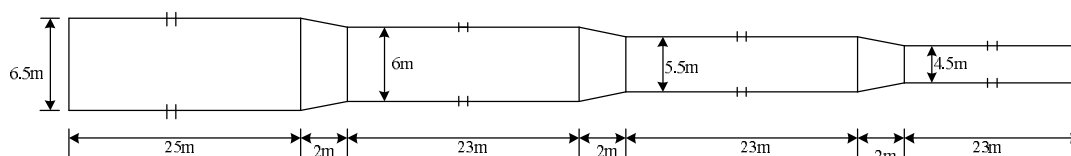


圖5.3-1 設計例3塔架示意圖

- 3.荷蘭Zephyros Z72發電機重49tf，直徑3.8m，長2.2m；機艙重12tf，長3.5m、寬2.8m、高2.8m；輪殼重19tf，長2.5m、寬2.2m、高2.2m；扇葉3片，每片重5.5tf，長34m，靠近輪殼處之直徑為1.9m，最大寬度為3.1m；合計重為96.5tf，分析時採用120tf。
- 4.本例分析採用之我國風力規範，假設風機在花蓮縣，基本設計風速 $V_{10} = 47.5m/sec$ 。地況分類為C，用途係數 $I=1.1$ 。風力係數為 $C_f = 0.7$ 。陣風因數為 $G_f = 2.106$ 。在塔頂之風速依公式得

$$V_{100} = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha} = 47.5 \times \left(\frac{100}{10} \right)^{0.15} = 67.1m/sec$$

- 5.作用在扇葉之風力，於高度100 m處之風壓依我國風力規範為

$$F = q(z_A) G C_f A_f$$

$$\text{其中 } q(z) = 0.06 K(z) K_{zt} [I V_{10}(C)]^2$$

$$K(z) = 2.774 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} = 1.995 (z=100 m), z_g = 300, \alpha = 0.15, K_{zt} \text{稱為地形係數，用1.0，}$$

陣風因數採用與塔架相同值為2.106，因此得風壓力為

$$q = 0.06 \times 1.995 \times 1 \times (1.1 \times 47.5)^2 = 327 \text{ kgf/cm}^2$$

假設扇葉與風力作用方向相垂直之投影面積為 $34 \times 0.5 \times 3 \text{片} = 51 \text{m}^2$ ，並假設作用在扇葉之風力係數取1.0，則作用在扇葉之風力為

$$F = 327 \times 2.106 \times 1.0 \times 51 = 35122 \text{kgf} = 35.12 \text{tf}$$

而作用在機艙之風力為(風力係數取1.3)

$$F = 327 \times 2.106 \times 1.3 \times (2.8 \times 2.8) = 7019 \text{kgf} = 7.02 \text{tf}$$

上述作用在扇葉及機艙之風力之作用點假設位於塔架頂之上面1.4m處。

- 6.以SAP2000程式分析得塔架之振動頻率為0.604Hz，用途係數 $I=1.1$ 。塔架頂在設計風力作用下之位移為0.4181m，為塔架高度之0.0042，小於0.005。塔架底部之使用載重與極

限載重下之剪力、彎矩與軸向力如表5.3-1。鋼管強度檢核結果如表5.3-2，

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} = 0.518 < 1.0 \text{ (OK)}$$

塔架基礎錨栓設計如表5-9，塔架25m處結合螺栓及連接翼板設計如表5-10。

表5.8 設計例3塔架之剪力、彎矩與軸向力

位置	使用載重			極限載重 ⁽¹⁾		
	軸向力 (tf)	彎矩 (tf-m)	剪力 (tf)	軸向力 (tf)	彎矩 ⁽²⁾ (tf-m)	剪力 (tf)
塔架底部(風力)	753.5	15077.5	207.8	904.2	24885	332.5
塔架底部(地震力)	753.5	12952	174.7	753.5	12952	174.7
25M處(風力)	515.2	9438.7	165.6	618.3	15394	265
塔架底部 ⁽³⁾ (風力+地震力)				904.2	22632	304
塔架底部 ⁽⁴⁾ (風力+地震力)				904.2	22170	274.3

1. 由載重組合1.2D+0.5L+1.6W控制設計

$$2. M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}$$

3. 載重組合：1.2D+1.6*(0.389W)+E

4. 載重組合：1.2D+E+1.6W(運轉時塔頂最高風速25m/sec)

表5-9 塔架基礎錨栓設計

塔架基礎錨栓設計	
錨栓數N	250 支
需要錨栓直徑D	3.544 cm
使用螺栓直徑D	3.6 cm
螺栓總共斷面積A _v	2545 cm ²

表5-10 塔架25M處結合螺栓及連接翼板設計

螺栓數N	160
需要錨栓直徑D	3.47 cm
使用螺栓直徑D	3.6 cm
螺栓間距	12.25cm
需要翼板厚度	7.0cm

陸、結論與建議

風能是一種可再生自然能源，就目前的技術發展來看，風力發電已成為綠色能源的主流之一，也是當前技術和經濟上最具商業化規模開發條件的新能源。本研究以靜力分析方法探討風力發電塔架結構設計，進而以案例說明風力發電塔架結構設計，並探討風力發電塔架承受各種載重效應的作用及塔架倒塌損毀之可能因素。從本文得到如下之結論，

1. 風力發電機塔架，在一般情況下大都是由風力所控制，塔架結構設計主要由頂部側向位移量控制，而不是塔架強度控制。
2. 風力發電機塔架所在地之基本設計風速 $V_{10}(c)$ ，依我國風力規範各地均不同，台灣本島最低為南投縣22.5公尺/秒，最大為花蓮縣及屏東縣47.5公尺/秒，台中市32.5公尺/秒，而高空中之梯度風速比基本設計風速大得多。台灣電力公司所要求之設計耐風速(Survival wind speed)70公尺/秒，依據德國勞氏船級社(GL)設計指引，應相當於 $V_{ref}=70$ 公尺/秒，即高度在輪殼(hub)高度，相對於50年回歸期10分鐘之平均風速。從

本研究以荷蘭Zephyros Z72型，裝載容量為2.0MW。塔架高度分別為62m、76.2m及100m，基本設計風速採用47.5公尺/秒時，分析結果顯示，100m之塔架，在100公尺處塔頂之風速為67.1m/sec，尚未達到台灣電力公司所要求之設計耐風速(Survival wind speed)70公尺/秒之要求。顯示依據我國風力規範之基本設計風速 $V_{10}(c)$ 來設計風機塔架，無法滿足有特殊要求等級之風機塔架，應依比例提高基本設計風速 $V_{10}(c)$ 。

3. 從本文之設計例，依我國之地震及風力設計規範，即使在強震區，風機塔架之結構，由風力控制設計。特殊要求等級之設計耐風速，影響風機塔架結構尺寸及造價。
4. 若採用不同的塔架高度分析設計塔架，塔架底部之使用載重與極限載重下之剪力、彎矩與軸向力越高越大。檢核鋼管底部強度、塔架基礎錨栓設計、結合螺栓及連接翼板設計明顯變大，因此塔架所需的建造成本顯然變高。
5. 陣風反應因子乃考慮風速具有隨時間變動的特性，及其對建築物之影響，此因子將順風向造成的動態風壓轉換成等值風壓處理。由於紊流的緣故，風速並非定值，而係以其平均值視為一小時平均風速。本研究以靜力方法來探討風機塔架之結構設計，對於風力之動態反應，應進一步加以探討研究。
6. 台灣位處地震帶上，尤其近斷層附近之風力塔架，除了風力控制外可以加入地震力的作用。若結構受到地震作用，構件在不同的載重組合作用下，斷面仍有可能產生局部挫屈或破壞，因此地震力作用下之動態反應，應進一步加以探討研究。

參考文獻

- [1] 能源政策白皮書，經濟部能源局，2012。
- [2] 綠色能源產業網，<http://www.taiwangreenenergy.org.tw/About/>，綠能產業手冊。
- [3] 周瑞生、涂莞庭、陳正誠、陳瑞華、楊維和，「風力發電機塔架受颱風侵襲倒塌致災原因之探討」，營建管理季刊，春季號，研究論文，2010。
- [4] 內政部營建署，建築物耐風設計規範及解說，臺北，2006。
- [5] 內政部營建署，鋼結構建築物鋼結構設計技術規範，臺北，2000。
- [6] 建築物耐震設計規範及解說，內政部，2011。
- [7] American Institute of Steel Construction (2010), Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings, Chicago, Ill.
- [8] Germanischer Lloyd. (2010). *Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Hamburg, Germany.
- [9] 陳生金，鋼結構設計-極限設計法與容許應力設計法，科技圖書股份有限公司，臺北，2003。
- [10] 內政部營建署，建築物基礎構造設計規範，臺北，2001。
- [11] 內政部營建署，混凝土結構設計規範，臺北，2011。
- [12] 風力發電新技術與發電工程設計、運行、維護及標準規範實用手冊，熊禮儉，中國科技文化出版社，2005。
- [13] Sungjin Lim¹, Changduk Kong^{1,*}, Huynbum Park², "A Study on Optimal Design of Filament Winding Composite Tower for 2 MW Class Horizontal Axis Wind Turbine Systems", *International Journal of Composite Materials* 2013, 3(1): 15-23.