

探討本土颱風風況與IEC-EWM風況對風力機受風反應之差異性

王翊碩¹ 羅元隆^{2*}

摘 要

目前風力機在進行設計時，多半採用國際電工委員會International Electronic Commission (IEC)所頒布的國際規範，如IEC 61400-1、61400-3-1、61400-3-2等進行風況參數設定(以下通稱為IEC規範)。然而，IEC規範為根據歐洲風機開發商經過多年經驗累積之結果，其定義的風場參數是否適用於臺灣本土風場尚未可知。由其所規範之風況參數設定而衍伸出的支撐結構設計安全，也就必須進一步驗證方能確保風力機在臺灣風場設計的完善性。本研究利用位於臺灣本島西部沿岸、位於中部的測風塔風場數據進行參數分析，並與IEC國際規範進行比較。為了要能有效探討本土化風場參數與IEC規範之差異性，本研究首先建立風場模擬程式，產生符合本土風場參數之風場歷時資料，以利進行風力機之結構動力分析。接著針對風力機塔柱基底、塔柱頂端、扇葉根部的內力反應及其對應的應力非超越機率分布，指出本土風況與IEC規範之間的差異性是否可能會對結構安全造成之影響。由於風力機主要破壞模式以颱風事件造成損害為主，因此本研究針對EWM (極端風速風況，Extreme Wind Speed Model)風況進行探討，所討論的參數包含平均風速剖面、紊流強度剖面與紊流積分尺度剖面等風場參數。結果顯示，正常風況下的平均風速剖面指數值 α 與IEC 61400-3-1規範所建議的0.14相近。紊流強度參數 β 在扣除掉低風速所造成的誤差外，可假設為0.05至0.06之間。紊流強度剖面的 γ 指數可以假設為0以簡化公式、且表示邊界層高度紊流積分尺度的 λ 值可以假設為150至200公尺左右。風場模擬結果發現，TurbSim模組無法符合IEC規範的剖面分布，反之MATLAB紊流產生法則可以，且兩者的紊流積分尺度剖面顯示出很大的差距。結合風場模擬與風力機模型結構分析，針對塔柱底部、塔柱頂端、以及單根葉片根部分分析所獲得的最大主應力結果顯示NREL的5 MW風力機結構應屬於保守設計。

關鍵詞：風力機，颱風風況，風場特性，結構反應

1. 前 言

由於全球人口日益漸增，對於能源使用的需求大增，而我國所需之能源大多仰賴進口，

因此在國際情勢變化劇烈而可能導致進口能源的狀況不穩定情形下，我國對於化石能源依賴度偏高。近年來，隨著原油飆漲及傳統能源之污染日漸嚴重與化石能源過度使用，使得環保

¹ 國立臺北科技大學土木與防災研究所 研究生

² 國立臺北科技大學土木工程系 副教授

*通訊作者，電話：02-2771-2171#2680，電郵：ylo@mail.ntut.edu.tw

收到日期: 2022年09月20日

修正日期: 2022年12月29日

接受日期: 2023年01月10日

意識抬頭，提升再生能源之利用率變得刻不容緩。而許多再生能源的選擇中，風能及太陽能成為了我國兩大再生能源發展的目標。其中，為了獲取更多風能，離岸風電成為了一種集結安全穩定、效率及潔淨能源供需的有效體系。隨著能源政策的制定及推進，離岸風電的技術和產業，皆是臺灣極力發展的重點。然而，即便離岸風電的技術在歐洲國家已發展成熟，面對臺灣險峻的自然環境及迥然不同於歐洲的生態及地質條件，十分需要建立屬於臺灣本土風場數據之資料庫。

本研究利用此測風塔所監測到的風場數據進行風場特性參數分析，並與IEC規範進行比較，最後定義出屬於臺灣本土之風場設計參數。此外，本研究亦建立風場模擬程式，產生符合本土風場參數之風場歷時資料，以利進行風力機之結構動力分析之探討。依照與國內主要負責支撐結構設計的研究團隊經驗，定常極端風況之EWM(極端風速風況，Extreme Wind Speed Model，本文此後稱EWM)風況多半為主要探討結構效應的對象，因此本研究將針對EWM風況對結構造成之反應進行研究，指出本土颱風風況與IEC-EWM風況之間的差異可能會對結構安全造成之影響。

2. 臺中港測風塔之簡介

臺中港測風塔為我國經濟部標檢局於2016年所建置完成。由於我國在位於彰濱工業區一帶具有最大面積的淺層海底平台，十分適合用以架設固定式基樁，因此臺中港測風塔的就近設置相當具有指標性。臺中港測風塔為因應風力機建置計畫，為確保整個產業鏈之安全及品質，經濟部標準檢驗局在科技部經費支持下所建置。其位置或數據均對於未來設計離岸風電支撐結構的環境變數具有指標式意義。

圖2-1所示為臺中港測風塔地理位置及周圍環境。由圖中可以看出其位置架設於海岸邊，尚未完全脫離陸地上建物以及地形之影響。然而因其依據國際標準IEC 61400所建置，且周遭並無明顯可改變風速風向特性的障礙物，故稱仍相當具有指標性。臺中港測風塔上的設備有風速計、風向計、氣壓計及溫濕度計等各種測試設備。隨時以精度夠高的解析度向控制中心傳送各種不同的資料。「風速計」是採用風杯式風速計，在測風塔高度38、69、100公尺處分別架設兩支風杯式風速計。「風向計」則是採用尾翼式風向計，於35、97公尺處分別架設一支，其量測風向角度為0~360度。氣壓計及溫濕度計則是架設於塔頂處。圖2-2所示為測風塔



圖2-1 臺中港測風塔地理位置及周圍環境

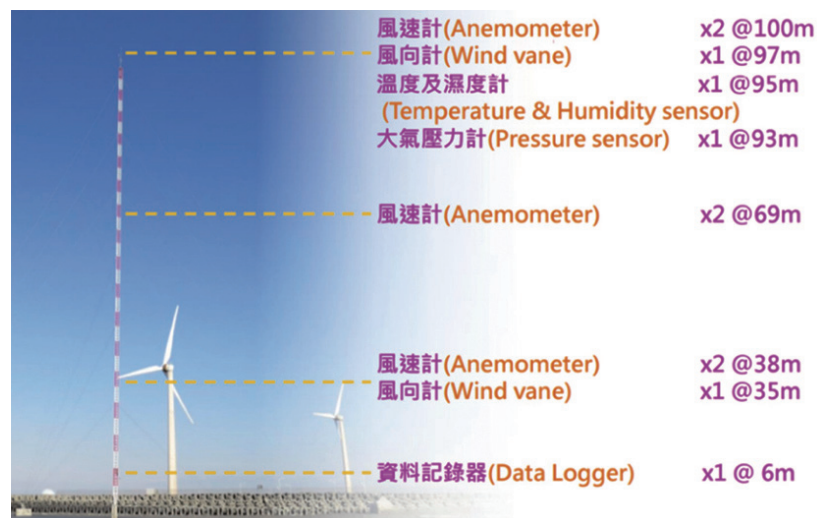


圖2-2 臺中港測風塔照片及相關儀器示意圖(財團法人金屬工業研究發展中心提供)

設備高度示意圖。

3. 測風塔數據前處理

在利用測風塔數據擬合風場特性參數之前，必須針對數據進行前處理，以篩選淘汰錯誤的測量值。這些錯誤測量值顯然是由於儀器設備本身因環境因素造成的問題、抑或測量值超過儀器設備效能範圍所引起的。一般來說，風速數據可分為兩類型進行風場特性參數之擬合。第一類型為十分鐘平均的風速剖面、紊流強度剖面以及紊流積分尺度剖面等三種剖面。第二類型則為一小時長度的擾動風速頻譜與擾動風速交頻譜等兩種頻譜。我國中央氣象局與建築物耐風設計及解說規範均以十分鐘為描述風速的時間平均長度。本研究將測風塔風速數據以十分鐘分段後，針對每一段為基礎進行過篩。根據國內外研究文獻，描述頻譜特性時多以一小時為一段。本研究同樣將測風塔風速數據分段後，以每一段進行過篩。兩大類資料的過篩處理稍微有些不同，但均基於隨機振動學的定常性假設來擬定過篩方式。

3.1 十分鐘分段過篩處理

首先，每一分段中共有600個數據樣本，每一樣本表示為實場一秒鐘所記錄到的瞬時風速(或者說平均一秒鐘的風速)。由於剖面的繪製須採用原始紀錄中位於38、69、100公尺處的風速紀錄，因此表示過篩的對象為此三個高度，均須滿足資料合格方能具備剖面有效性。倘若此分段數據中，三個高度中任何一個高度的風速資料被發現有超過5%的數據樣本量，即30個數據樣本為0，則直接忽略此分段不納入後續分析。再者，由於監測環境多變，數據中難免有儀器誤差產生。此時，從記錄的角度來看，數據通常會表示為單個數值。換句話說，發生誤差期間的整個數據標準差為0。類似現象在實場監測記錄中經常可以發現。此時的錯誤紀錄雖然滿足了第一過篩要求，但並非真實數據，故亦必須過濾掉。同樣的，只要三個高度中有其中一個風速計具備此類型誤差，則整段數據不採納。最後，由於臺中港測風塔數據是以風杯型風速計量測的，當風速過低時，前一時刻的風速往往會因慣性影響下一時刻的風速記錄，從而呈現階梯分佈，如圖3-1所示。根據研究團隊檢視結果，認為必須設定某一門檻值作為過濾條件。在本研究報告中，採以3 m/s之平均風速作為門檻值進行過篩。只要三個高度

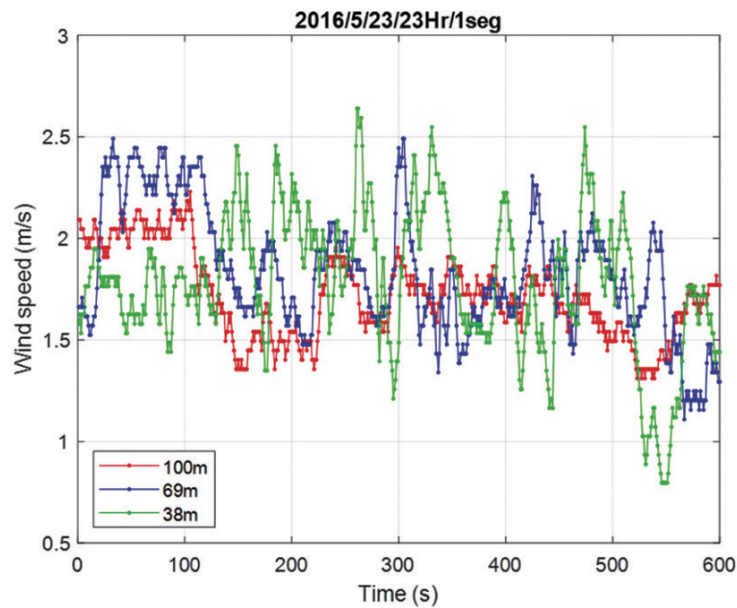


圖3-1 某一段十分鐘的過低風速歷時紀錄

處的風速紀錄中有一個高度的風速計之平均風速值低於門檻值，則整個分段均不納入剖面擬合。

3.2 一小時分段過篩處理

一小時的分段長度有3,600個數據樣本，每個樣本同樣表示實場中1秒。此分段數據除了必須滿足以十分鐘分段篩選的三個要求外，尚必須檢測其是否滿足定常性。此原因在於，進行頻譜擬合時首先須瞭解頻譜計算為定常性假設，因此數據本身若為非定常性數據，則紊流能量隨著時間改變的特性將被時間平均掉，而無法代表其真正特性。故此，若要是能進行頻譜及交頻譜擬合的數據，必須先經過定常性測試。本研究參考過去鄭啟明等(2014)的作法，首先採用Run Test判斷是否該分段具備定常性。若是，則進一步以von Karman擾動風速頻譜以及Davenport交頻譜進行參數擬合；若不是，則先以經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition)過濾掉非定常的殘餘函數(Residual function)部分，再針對剩下來已經滿足定常性假設的訊號進行von Karman擾動風速

頻譜以及Davenport交頻譜的參數擬合。

最後，觀測塔數據有時候會因為儀器停電或者跳電的問題，而發生某段時間毫無紀錄的情境。本研究團隊與淡江大學風工程研究中心研究團隊共同開發以人工智慧類神經技術中的Recurrent Neural Network模式，根據前後紀錄的實場統計參數，以內插方式補足缺失期間之參數，再以紊流產生法(Li *et al.*, 2015)產生每秒一筆之隨機數據，滿足具有連續統計特徵的相關性，以補充原始數據的不足，圖3-2為某一筆資料缺漏與補滿資料後的對比圖。

4. 風場特性參數描述及擬合結果

在此部分內容中，研究團隊介紹三種常見用以描述風場剖面特性的公式，並以實場數據進行參數擬合。由於頻譜及交頻譜的擬合多半符合von Karman頻譜及Davenport交頻譜的分布型態，因此在此文章中暫不列入討論。三種常見的公式分別為平均風速剖面、紊流強度剖面以及紊流積分尺度剖面等三種。

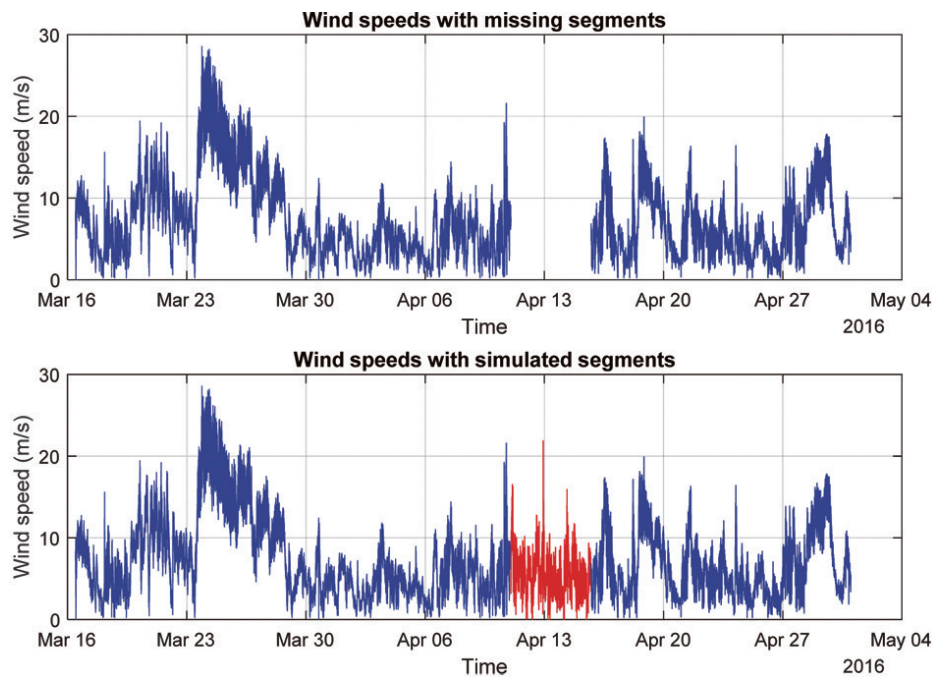


圖3-2 補遺漏前後的比較圖

4.1 平均風速剖面

在中性大氣紊流邊界層中，風速隨高度變化形成風速剖面。一般在廣大且均勻的地況發展下，有兩種經驗公式能描述不同高度上的平均風速分佈，分別為指數律(Power law)及對數律(Logarithmic law)。對於工程設計來說，採用指數律較為簡便並有一定程度的準確性。根據我國建築物耐風設計規範及解說的平均風速剖面公式，可寫為：

$$\left(\frac{U_z}{U_g}\right) = \left(\frac{z}{z_g}\right)^\alpha \quad (4-1)$$

其中 U_z 為某高度 z 的縱向平均風速； U_g 為邊界層高度 z_g 之平均風速； α 取決於地表粗糙度之係數。Davenport (1960)建議 z_g 、 α 之值可依地形之不同，採用表4-1的建議值。

在測風塔的監測資料中，並未量測邊界層高度的平均風速，故可以最高程100公尺處高的平均風速為此公式約化之分母。一般來說，採用指數律的方式描述剖面主要著重在高度50至100公尺以上的剖面形狀，是一種比例上的擬

表4-1 不同地況之指數律參數(Davenport (1960))

地形分類	Davenport	
	α	z_g (m)
開闊地區	0.16	275
鄉鎮地區	0.28	400
都市地區	0.40	520

合，而非風速絕對值，因此可以在不知道邊界層高度的前提下，仍然可以求取指數律的指數用以瞭解風場特性。

4.2 紊流強度剖面

一般接近地表面附近的氣流屬於紊流，風速是由平均風速跟擾動風速所組成其瞬時的速度向量可以分解成縱向、側向及垂直向三方向。當中以縱向速度擾動對結構影響遠大過其他方向。紊流強度為擾動風速均方根值對平均風速之比值，是描述紊流最簡單有效的方法，其表示式可定義如(4-2)：

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{u'(z)^2}}{U(z)} \quad (4-2)$$

其中 $I_u(z)$ 為高度 z 處縱向的紊流強度； $U(z)$ 為

高度 z 處縱向的平均風速； $\sqrt{u'(z)^2}$ 為高度 z 處縱向擾動風速的均方根值。在本研究中，紊流強度剖面參考日本規範(AIJ Recommendations for Loads on Buildings, 2015)以式(4-3)定義之。此式定義與上述式子略有不同，主要是因為紊流強度剖面與平均風速剖面的指數律公式類似，具有反指數分佈的形狀。而且為了減少參數過多造成解析不易，因此僅將紊流強度參數縮減為 β ，作為邊界層高度的基本紊流強度值。

$$I_u(z) = \beta \left(\frac{z}{z_g} \right)^{-\alpha-0.05} \quad (4-3)$$

其中 $I_u(z)$ 為目標高度 z 處之紊流強度； α 為相對於十分鐘平均風速之垂直分佈法則的指數，與地況種類有關，由式(4-1)擬合取得。

4.3 紊流積分尺度剖面

根據蕭葆義(2021)，在流場中任一點的風速擾動，可視為由平均風速帶來許多大小不一的渦流(Eddies)疊加所造成，各種大小渦流均會對該點造成週期性擾動，而紊流尺度便是指流場內渦流大小的統計值。但在實際量測時，量測者難以同時取得流場內各點之瞬時資料，因此利用凍結流場(Frozen field)的觀念，即在一穩定之流場中，單點歷時量測的資料其統計特性可代表，平均流速在同樣時間內流過渦流各點瞬時資料的統計特性。利用此觀念將自相關性函數對時間軸積分時間尺度 T_e (Time scale)，再將其乘上平均風速 U ，即可得紊流長度尺度 L_u^x 。

$$L_u^x = U \times T_e \quad (4-4)$$

$$T_e = \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad (4-5)$$

$$R(\tau) = \frac{\overline{u'(t)u'(t+\tau)}}{\sqrt{u'^2} \sqrt{u'^2}} \quad (4-6)$$

其中 U 為平均風速； T_e 為縱向之尤拉積分時間

尺度； $R(\tau)$ 為尤拉時間自相關函數； $\overline{u'(t)u'(t+\tau)}$ 為兩不同時間之主流向風速擾動值自相關之時間平均值； τ 為時間延遲。在本研究中，同樣參考臺灣規範(建築物耐風設計規範及解說, 2015)、日本規範(AIJ Recommendations for Loads on Buildings, 2015)，紊流積分尺度剖面亦包含指數律指數值，並以兩風場參數 γ 和 λ 作為剖面變化的影響因素。

$$L_u^x(z) = \lambda \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\alpha+\gamma} \quad (4-7)$$

其中 $L_u^x(z)$ 為目標高度 z 處之紊流積分尺度； λ 、 γ 為積分尺度參數，與地況種類有關。此公式為本研究團隊結合兩規範的經驗公式提出。主要原因在於日本規範中，紊流積分尺度以高度 30 公尺為高度約化分母，而且不分地況種類；另外在臺灣規範中，則以 10 公尺為高度約化分母，分為三種地況具有不同指數值。此公式之提出除了希望能以參數表示地況種類的區別外，亦希望能與式(4-1)的平均風速剖面及式(4-3)的紊流強度剖面具有一致性，均以邊界層高度 z_g 作為高度約化分母。一般來說，各國規範提出的紊流積分尺度公式不盡相同，主要是因為紊流積分尺度的評估較難歸納出像平均風速剖面般平順的結果，且對於工程設計來說，不同公式所造成的誤差尚且能在接受的範圍。

以 2016 年 5 月(非颱風期間)及 2016 年 9 月(梅姬颱風期間)作為範例說明。若查看圖 4-1 中兩月份的 100 公尺高程處的十分鐘平均風速分佈圖，則可以發現實際上梅姬颱風所佔比例甚小，倘若未加以區別，則將誤導設計參數的統計結果。圖 4-1 中 2016 年 5 月及 2016 年 9 月所顯示的資料樣本數分別為 3,351 及 3,362 筆十分鐘，小於每個月 30 天應當具備的 4,320 筆，主要原因在於此兩個月中具有少許天數未有紀錄。此圖目的在於強調颱風事件所佔比例遠小於整體比例，必須要根據中央氣象局對於颱風事件的定

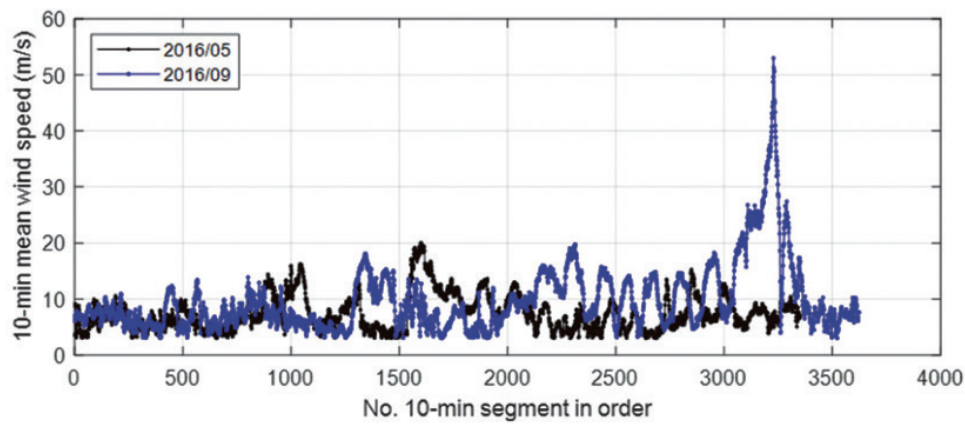
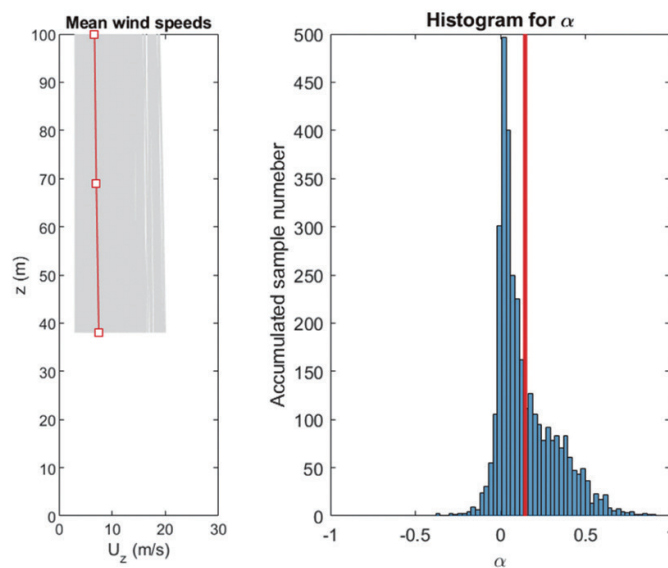


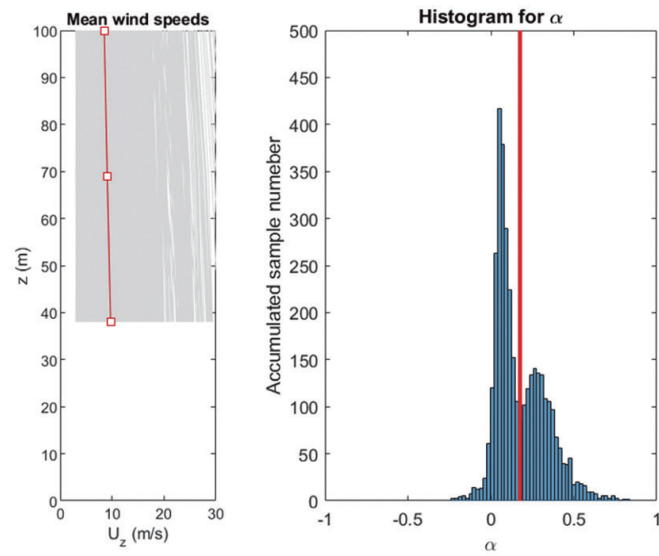
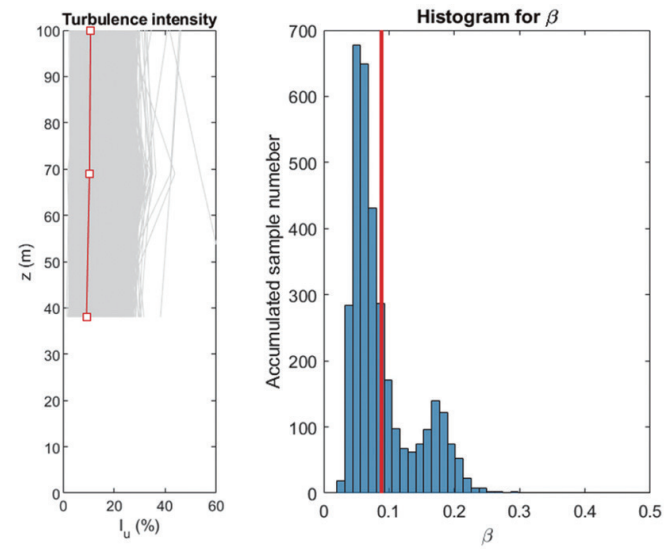
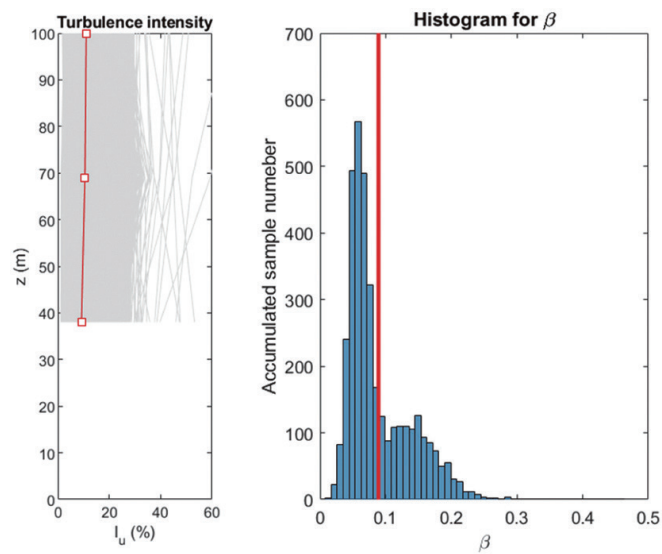
圖4-1 測風塔100公尺處的十分鐘平均風速比較圖

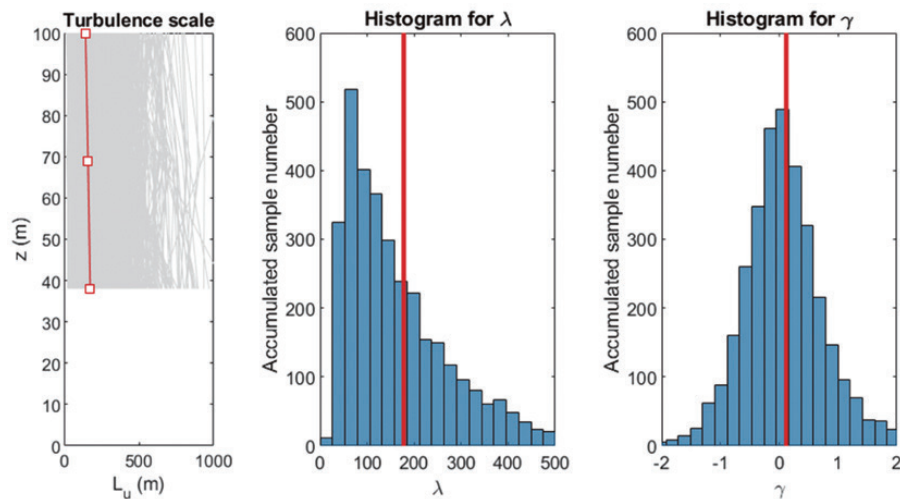
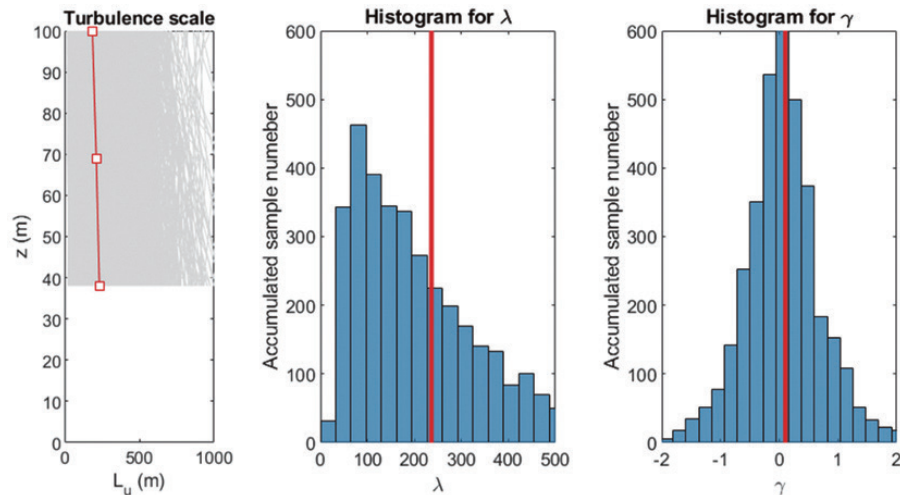
義來做擷取，方能用以比對EWM風況。另外說明，本研究所採用風速資料區間為臺中港測風塔2016年5月起始運作至2021年12月為止。其中有關颱風事件區段的擷取僅採用梅姬颱風事件，主要原因是其他颱風事件所記錄的風速過小，不足以符合EWM風況之設定標準。除了梅姬颱風事件區間的樣本外，其餘區間的樣本均可用於正常風況的比較。

圖4-2、4-3展示了這兩個月範例的平均風速剖面 α 值擬合結果。圖4-4、4-5為針對此兩月份範例的紊流強度剖面進行擬合的 α 值及 β 值結果。圖4-6、4-7為針對此兩月份範例的紊

流積分尺度剖面進行擬合的 γ 值及 λ 值結果。由於此兩月份資料並未分類為颱風期間與非颱風期間，因此屬於混合式的結果探討。從圖4-1得知，實際上梅姬颱風事件所佔的比例在整個9月份資料中僅具約10%左右，對於整體的頻數累積圖形狀影響不大。一般來說，颱風期間所呈現的平均風速剖面指數小於平常期間的指數。兩圖中的平均值(紅線)相差不大，大約在0.12至0.15之間。在圖4-3的9月份資料甚至還有因為低風速資料所造成的過高 α 值擬合結果所形成的一個低峰區。根據研究團隊檢視五個全年期間資料，此一低峰區的存在實為夏季期

圖4-2 2016年5月針對平均風速剖面的 α 值擬合結果統計

圖4-3 2016年9月針對平均風速剖面的 α 值擬合結果統計圖4-4 2016年5月針對紊流強度剖面的 β 值擬合結果統計圖4-5 2016年9月針對紊流強度剖面的 β 值擬合結果統計

圖4-6 2016年5月針對紊流積分尺度剖面的 γ 值及 λ 值擬合結果統計圖4-7 2016年9月針對紊流積分尺度剖面的 γ 值及 λ 值擬合結果統計

間的固定趨勢，冬季則不復存在。以目前IEC 61400-3-1規範而言，離岸風力機所設定的NTM風況即假設為0.14，略低於我國陸域開闊地況的0.15，與圖4-2、4-3觀察相近。根據前風場特性公式，圖4-4及圖4-5的 β 值結果乃是基於事先完成 α 值擬合後，再進行 β 值的擬合結果。從此兩圖結果看來，紊流強度的分布趨勢十分接近，其平均值約莫在0.09不到0.1的附近。根據日本AIJ Recommendations for Loads on Buildings (2015)規範，邊界層高度左右的紊流強度大約在10%左右，這是偏保守的假設。另一方面，研究團隊認為過大的紊流強度是來自於過低的

平均風速所造成，此時過低的風速既不適合用以作為設計使用，亦不適合用以評估紊流強度以及相對應的擾動風速。倘若忽略圖4-4、4-5較高 β 值的低峰區，則可以發現絕大多數的正常風況樣本所顯示的紊流強度將介於0.05至0.06之間。綜合圖4-2至圖4-5的 α 值及 β 值結果，可以發現對於正常風況來說，IEC所假設的 $\alpha = 0.14$ 值及90%分位數擾動風速 σ_1 對照實場結果來說，前者稍嫌不保守，後者則偏保守。必須以大量的動力分析方能驗證我國本土風場特性在正常風況時所造成的結果為保守或非保守，在確定之前，研究團隊認為目前不宜針對正常

風況進行單方面的修訂。最後，圖4-6、4-7所示的 γ 值及 λ 值結果分別代表紊流積分尺度的機率分布尺度以及邊界層高度的紊流積分尺度值。一般來說， γ 值平均值接近0且其分布左右對稱近似高斯。檢視五個全年結果發現， γ 值可假設為0，式(4-7)可以視為遵循 α 值變化的紊流積分尺度分布形狀。再者，比較兩個月份的 λ 值可以發現約為一百多公尺接近兩百公尺左右，跟規範所設定的60公尺差距甚大。檢視全年資料可以發現，實場的紊流積分尺度均較IEC規範為大，且根據研究團隊基於陸域風場特性的瞭解，海域的紊流積分尺度不應與陸域開闊地況的結果差距太大。因此，基於實場數據以及陸域經驗，研究團隊認為紊流積分尺度的特性需要進一步修訂，以避免目前低紊流積分尺度可能造成的不保守風力。此外，由於紊流積分尺度的擬合變異性十分大，主要是因為高度解析度不足所造成，因此研究團隊認為目前無法給出適合的紊流積分尺度建議值。

5. 颱風監測資料與IEC規範中EWM風況之比較

5.1 極端風速模型EWM風況之探討

根據IEC規範，EWM (Extreme Wind Speed Model)風況應為穩定或擾流之風速模型兩種，根據基準風速 V_{ref} 及固定擾流標準差所建立。以臺灣本土自然環境為例，若風力機採用T級標準風速條件，則在極端風速模型中使用 $V_{ref,T}$ 取代 V_{ref} 。

對穩定極端風速模型而言，應使用下列公式以高度 z 為函數計算50年回歸期之極端風速 V_{e50} 及1年回歸期之極端風速 V_{e1} ：

$$V_{e50}(z) = 1.4V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11} \quad (5-1)$$

$$V_{e1}(z) = 0.8V_{e50}(z) \quad (5-2)$$

其中 z_{hub} 為輪轂高度。

對擾流極端風速模型而言，50年與1年回歸期及高度 z 函數之十分鐘平均風速應分別由下列二項公式求得：

$$V_{50}(z) = V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11} \quad (5-3)$$

$$V_1(z) = 0.8V_{50}(z) \quad (5-4)$$

對於穩定極端風速模型及擾流極端風速模型而言，不同之處在於前者直接給出十分鐘風速歷時中的最大風速值，而後者則是定義十分鐘平均風速值，並假設此十分鐘歷時具有縱向擾流標準差，定義為式(5-5)：

$$\sigma_1 = 0.11V_{hub} \quad (5-5)$$

在圖5-1(a)中，將 $V_{50}(z)$ 假設為 $V_{ref,T} = 57$ m/s作為判斷的黑色實線，配合理論的擾動風速紅色實線。過去在歐洲並無遭遇類似像東亞地區的強烈颱風，因此約莫在七、八年前，風力機產業規格中最高耐風等級的五十年回歸期設計風速僅有50 m/s。在2016年9月我國臺中港測風塔觀察到中颱梅姬侵襲造成一百公尺高度超過50 m/s的平均風速後，日本規範隨即更新要求風力機規格必須滿足颱風型風力機的57 m/s。再過一年，風力機開發商才因應亞洲需求發展出以57 m/s的規格，並於最新版2019年的IEC規範中納入。因此，圖5-1(a)中針對設計載重情境為颱風的Design Load Case (DLC) 6.1及6.2，其輪轂高度處的參考風速才假設為57 m/s，便於顯示出本土風況與IEC規範風況的差異。

颱風期間，平均風速大多較高，因此可以比較相對高風速的聚落與理論式的覆蓋率。由圖5-1(a)中可以看到，應用於Design Load Case (DLC) 6.1、6.2時，在同一個平均風速下，理論式給予的擾動風速較高，因此將會預估一個較

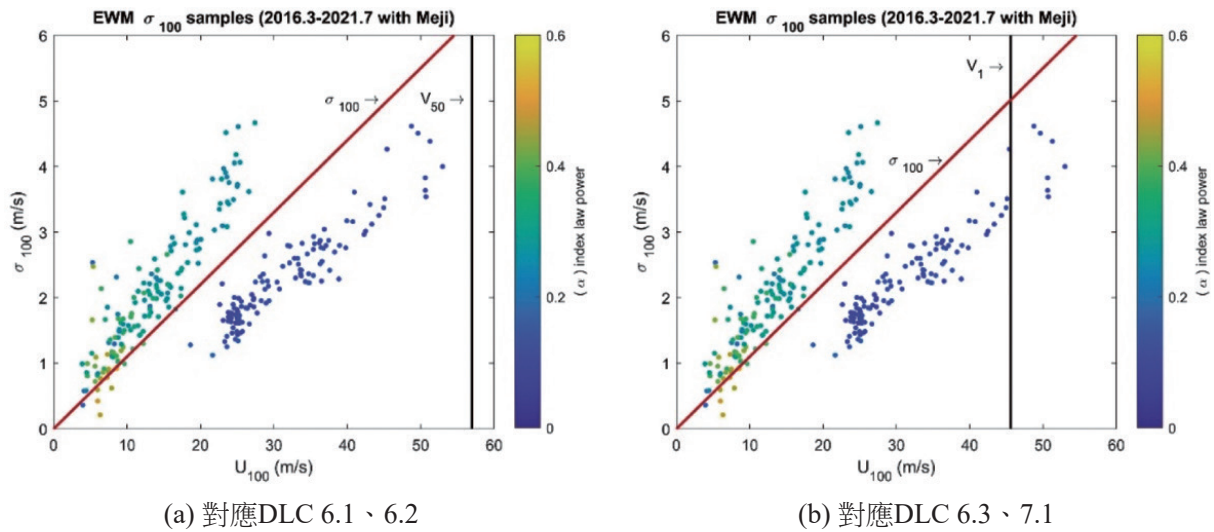


圖5-1 實場參數與EWM風況理論值的比較

高的陣風值。這樣的作法將保證50年回歸期設計風速及其對應擾動風速較高，這是一種保守的設計。由於梅姬颱風最大十分鐘平均風速並未超過50年回歸期57 m/s的門檻，因此可以判斷面對DLC載重要求50年回歸期設計風速下的結果將偏於保守。

接下來，查看應用於Design Load Case (DLC) 6.3、7.1的圖5-1(b)可以看出，颱風梅姬中屬於較高風速的幾個十分鐘平均風速都大於理論值範圍，然而其對應的擾動值則低於理論值，因此綜合下來的陣風風速對於DLC載重要求1年回歸期設計風速下，是有可能發生不保守的結果。過去五年間該颱風資料為具有相對重要影響的事件，因此採用此事件進行分析時，無法形成此地區的非超越機率分佈曲線，因此研究團隊認為在DLC 6.3、7.1載重設計案例時，應可值採用陣風風速數據來進一步討論。

5.2 自行定義風場與TurbSim模組之比較

為了發展適用於本土之極端風速模式，本研究團隊參考Li *et al.* (2015)作法，自主開發MATLAB紊流產生器以產生可自行輸入風

場參數 $(\alpha, \beta, \gamma, \lambda)$ 、von Karman頻譜以及Davenport交頻譜之流場。經過本研究團隊測試，美國再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)所開發之OpenFAST開放程式中的TurbSim模組，只能生成三種IEC規範的風況，分別為NTM (Normal Turbulence Model)、ETM (Extreme Turbulence Model)、以及本研究關注的EWM風況。此外，TurbSim模組不能自行設定流場參數，對於研究本土風況所造成之差異性將會造成侷限。本研究使用MATLAB紊流產生法自行定義風場，接著利用OpenFAST程式的葉片元素理論(Blade Element Momentum Theory, BEM)進行氣動力的計算。以下呈現IEC規範中的EWM風況流場採用MATLAB紊流產生法以及TurbSim模組所產生的風場剖面比較。

從圖5-2的平均風速剖面圖中，可以發現在EWM風況下，TurbSim很明顯輸出不符合IEC規範設定的剖面分布，MATLAB紊流產生法則可以完全符合IEC規範要求。圖5-3的紊流強度剖面圖中，塔柱底部紊流強度的微小差異應該不會產生什麼影響。圖5-4的紊流積分尺度剖面圖中，可以發現採用TurbSim會輸出與IEC規範

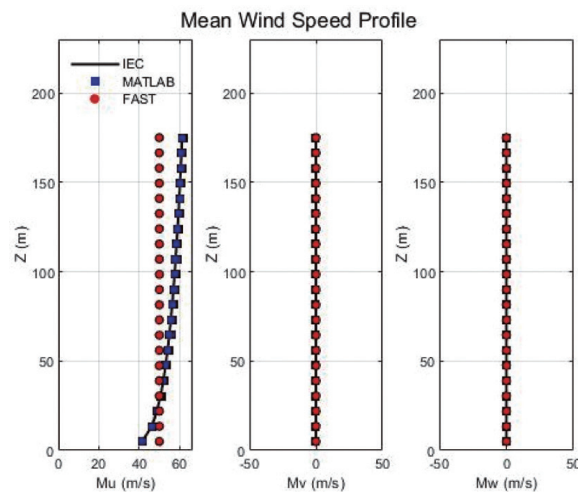


圖5-2 平均風速剖面比較圖

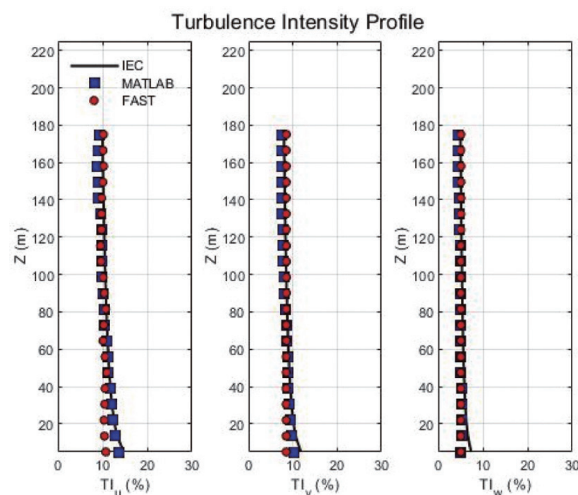


圖5-3 紊流強度剖面比較圖

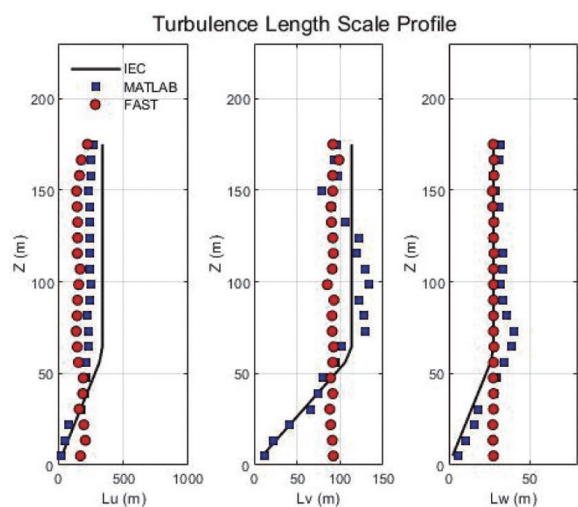


圖5-4 紊流積分尺度剖面比較圖

要求的積分尺度剖面更大的差距，而且這些差異性顯示出TurbSim模組無法針對各高度的紊流

積分尺度給出正確的模擬值。圖5-2至圖5-4講述的是風場特性，繪製的垂直剖面位於風力機的中線位置，也就是通過輪轂中心及塔柱中心的位置並垂直於葉片轉動面。

5.3 EWM風況下的風力機基底反力比較

對於EWM風況來說，最主要為颱風期間的風場特性。此時葉片並不轉動，且葉片Pitch角假設為90度以確保颱風期間產生最低阻力。來流平均風速在輪轂高度可假設為57 m/s。圖5-5所示為風機三個斷面位置以及斷面上四個應力點之位置示意圖。圖5-6至圖5-8分別為隨機一組的塔柱底部、塔柱頂端、以及單根扇葉根部三處的剪力彎矩歷時圖。由上節得知，在EWM風況下，TurbSim模組很明顯輸出不符合IEC規範設定的剖面分布，導致三處桿件的內力反應較MATLAB紊流產生法來的較小。

為了確保上述之差異性，採用相同的風場產生方式重複三十組並進行平均及其標準差的計算，可以獲得表5-1的結果。其中誤差百分比的計算方式為將MATLAB結果減去OpenFAST結果，除以OpenFAST結果後再乘上100%。從表中得知，不論是塔頂、塔底還是單根扇葉葉片根部，MATLAB紊流產生法所產生的風場均

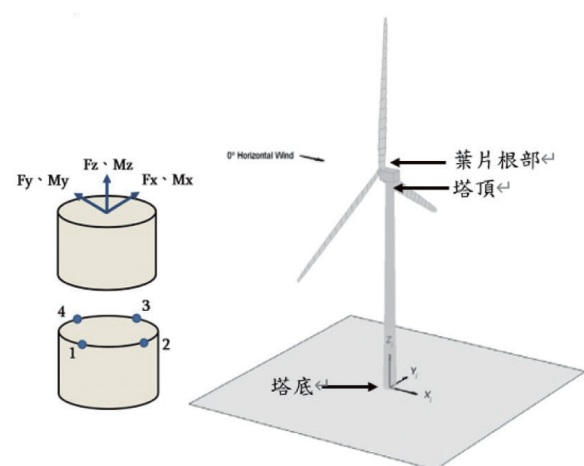
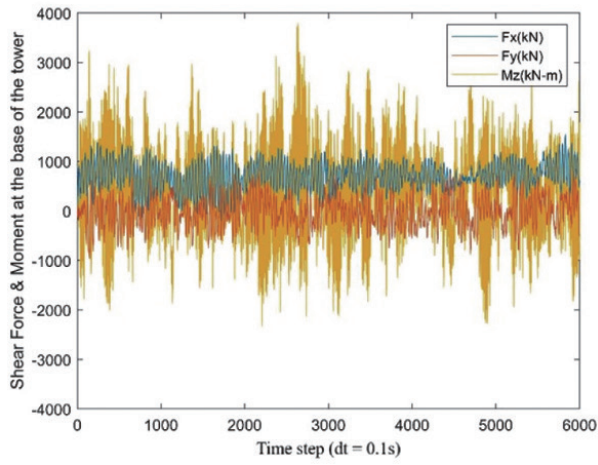
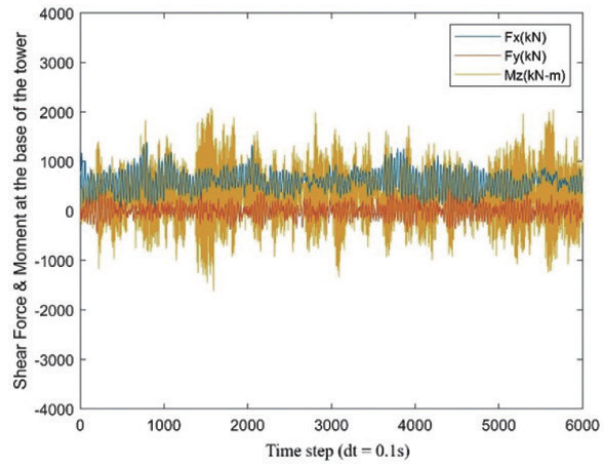


圖5-5 風機三個斷面位置及斷面上四點之示意圖

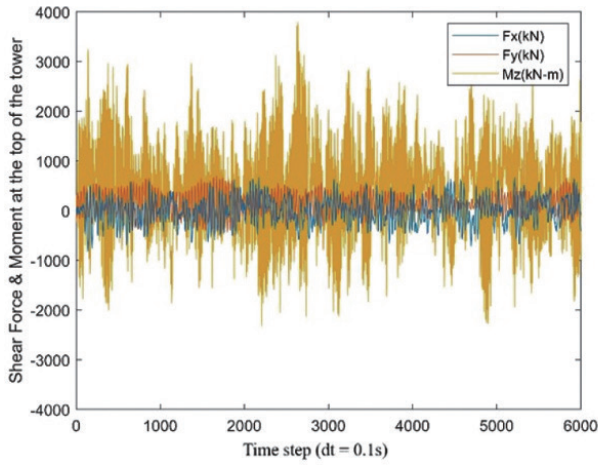


(a) MATLAB紊流產生法

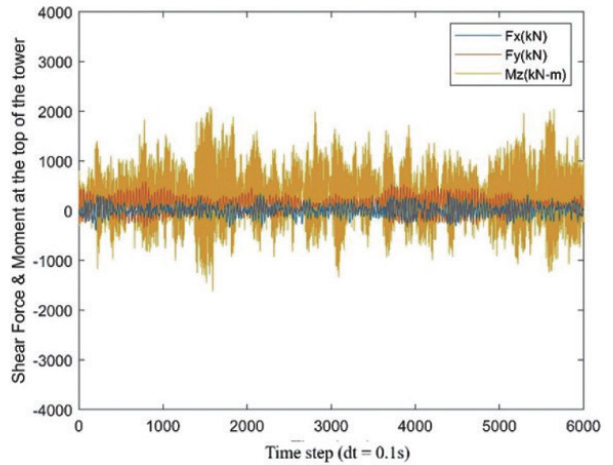


(b) OpenFAST-TurbSim

圖5-6 EWM風況下塔柱基底之剪力彎矩歷時(隨機一組)

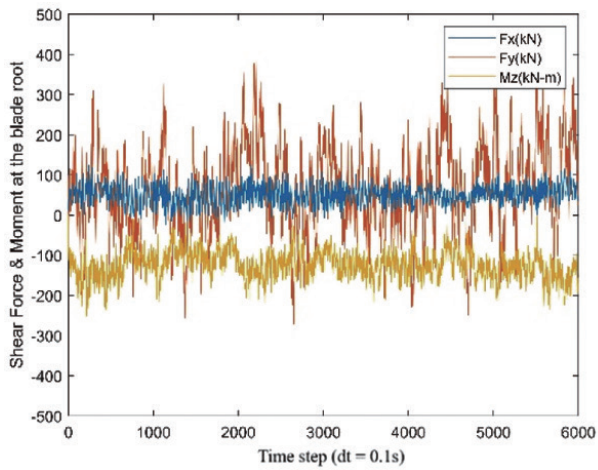


(a) MATLAB紊流產生法

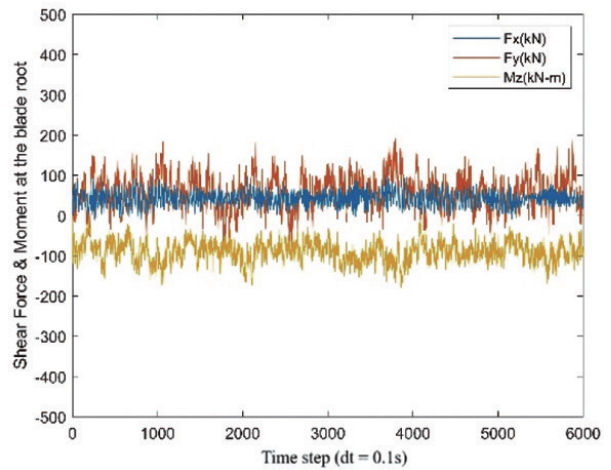


(b) OpenFAST-TurbSim

圖5-7 EWM風況下塔柱頂部之剪力彎矩歷時(隨機一組)



(a) MATLAB紊流產生法



(b) OpenFAST-TurbSim

圖5-8 EWM風況下單根扇葉根部之剪力彎矩歷時(隨機一組)

造成較大的內力反應。

對於EWM風況來說，最主要為颱風期間的風場特性，因此葉片並不轉動，且葉片Pitch角假設為90度，來流平均風速在輪轂高度為57 m/s。根據第二章得知，EWM風況的風場特性在自行模擬產生及OpenFAST模擬產生兩者的差異較大。首先OpenFAST的平均風速剖面並不遵守指數律；再者，由OpenFAST產生的風場僅能設定參考風速為50 m/s，然而以自行模擬產生風場則為57 m/s，原本就較大，因此從表5-1中可以看到自行模擬的結果均大於OpenFAST模擬的結果。此外，OpenFAST模擬的EWM紊流積分尺度亦不甚符合規範，因此也或多或少造成差異。在表5-1中，塔底跟塔柱的橫風向平均風力 F_y 幾乎為零，這是因為當設定EWM風況時，葉片轉動面垂直於來風向，且葉片仰角為90度，在y向上投影面積最小，因此其平均值較小而標準差較大。對於一般煙囪等細長圓形結構物而言，橫風向平均風力幾乎為零，但受到周圍渦散影響而有明顯擾動風力。

5.4 本土颱風及IEC規範之差異性比較

承如上節所述，MATLAB紊流產生法所產

生之EWM風場，在各種風場特性的對比下，包括三個風向的平均風速剖面、紊流強度剖面以及紊流積分尺度剖面，均較OpenFAST的TurbSim模組所產生之EWM風場更佳。在假設相同的風載重計算方式的前提下，也就是均採用OpenFAST的AeroDyn模組來計算氣動力的方式均相同，MATLAB紊流產生法所產生之EWM風場所造成的風力均較高。換言之，研究團隊認為採用TurbSim所獲得之模擬風場值得需要更進一步的評估。

在此節中，研究團隊嘗試採用MATLAB紊流產生法將梅姬颱風期間每一個十分鐘的風場參數並配合von Karman頻譜及Davenport交頻譜，產生出符合實場統計特性的風場歷時。接著同樣採用AeroDyn模組進行氣動力計算，最後進行風力機結構系統的分析。對照組則採用IEC規範中的EWM風況設定進行比較。表5-2條列兩種不同的風場假設條件。由於本研究並非針對不同風力機進行比較，因此在分析的時候，風力機的有限元素模型直接採用NREL所提供的5 MW風力機範例。此範例廣為人知，且風力機機艙高度未達100公尺，故應可適用於本研究作為探討的對象。從表中，風場產生方式為A組時，依據IEC規範的EWM風況產生30

表5-1 EWM風況下風場產生法之差異比較

桿件內力位置	內力	Fx (kN)		Fy (kN)		Mz (kN·m)	
		平均	標準差	平均	標準差	平均	標準差
塔底	MATLAB	634.8	231.4	5.6	196.8	332.8	776.4
	OpenFAST	588.2	182.3	2.4	138.2	307.0	534.9
	Error (%)	7.92	26.93	-/-	42.40	8.40	45.15
塔頂	MATLAB	125.6	177.5	8.8	177.0	366.1	875.0
	OpenFAST	113.2	135.0	5.1	134.6	312.2	642.3
	Error (%)	10.95	31.48	-/-	31.50	17.26	36.23
扇葉葉片根部	MATLAB	22.1	79.0	65.4	-108.0	33.0	22.1
	OpenFAST	18.0	61.8	51.0	-92.4	25.6	18.0
	Error (%)	22.78	27.83	28.24	16.88	28.91	22.78

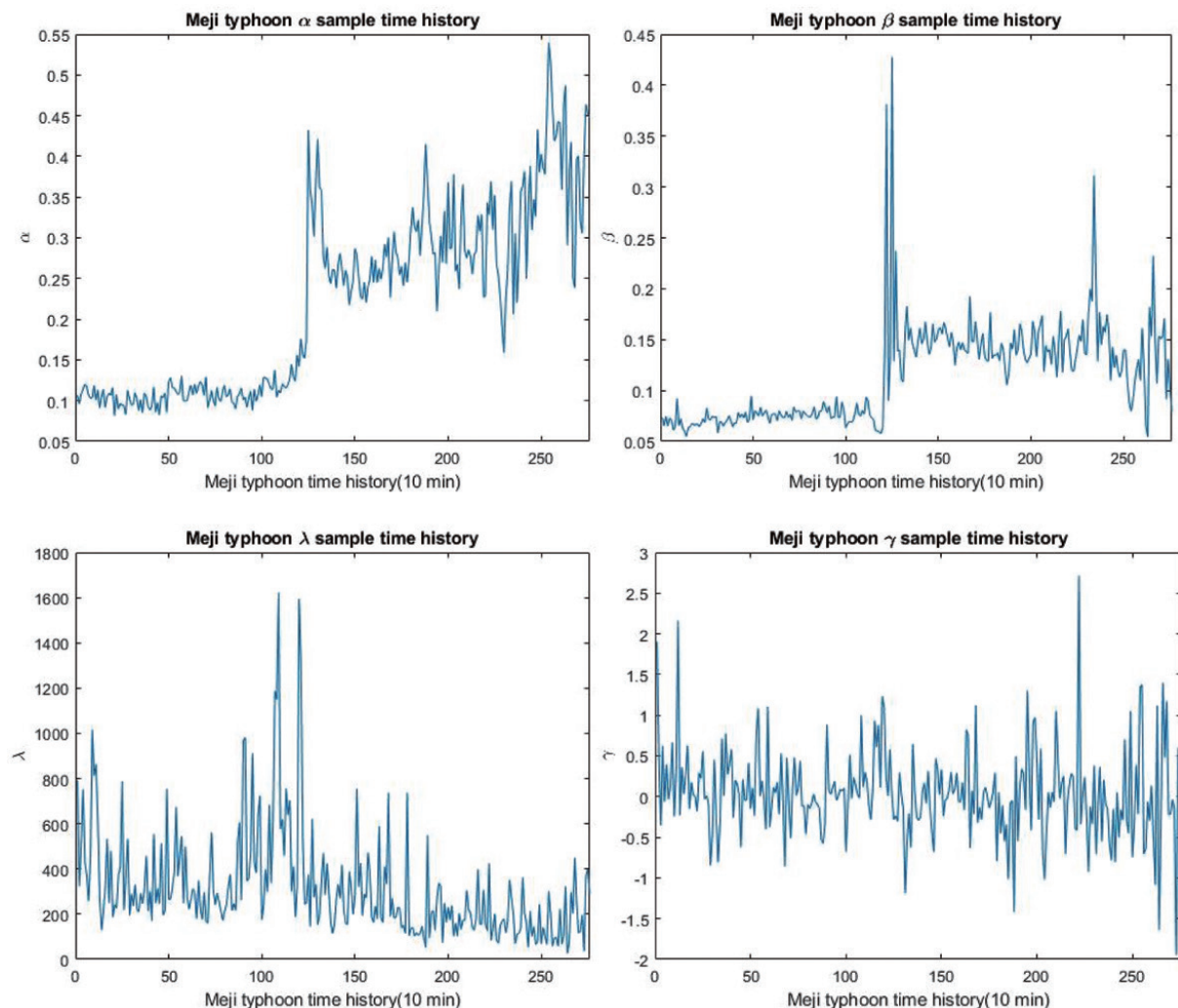
表5-2 風場假設條件分組表

組別	風場假設說明
A	不改變本土風況參數 (IEC規範的EWM風況)
B	梅姬颱風 α 、 β 、 γ 、 λ 同時改變

組風場歷時，將此30組風場，經FAST-AeroDyn讀入後，進行結構動力分析，即可求得內力歷時。為了有效探討反應之差異性，同樣採用塔柱底部、塔柱頂部、以及單根扇葉根部作為對象分析：(1)塔柱基底節點的剪力、彎矩；(2)塔柱頂端節點的剪力、彎矩；(3)扇葉根部節點的剪力、彎矩。然後根據基礎材料力學中，將桿件斷面所受之內力，透過斷面特性及材料特

性，進而轉為應力(包含最大主應力以及最大剪應力)。

求出應力歷時內之最大值後，將30組的應力最大值進行計算統計特性，分別為平均值、標準差、偏態以及峰態。並依據其特性以MATLAB內建的指令隨機產生10,000組應力最大值，計算其累積分布函數。此累積機率分布函數可作為對照組使用。風場產生方式為B組時，則將所有梅姬颱風期間的每一時段的風場參數輸入，再搭配FAST-AeroDyn進行結構分析，探討塔柱基底、塔柱頂端、扇葉根部節點之最大主應力、最大剪應力，繪製累積機率函數圖，並與組別A進行比較，探討是否相對保守。圖5-9為梅姬颱風期間風場特性參數隨著時

圖5-9 梅姬颱風期間風場參數 α 、 β 、 γ 、 λ 時序變化圖

序的變化圖。

圖5-10為塔底點1至點4之最大主應力及最大剪應力累積機率分布函數圖。圖5-11為塔頂點1至點4之最大主應力及最大剪應力累積機率分布函數圖。圖5-12為葉片根部點1至點4之最大主應力及最大剪應力累積機率分布函數圖。圖中所示黑色線為根據IEC規範公式，採用TurbSim模組產生風場所得的極值應力累積機率分布函數圖。紅色線則為MATLAB紊流產生法根據梅姬颱風特性所得的極值應力累積機率分布函數圖。藍色虛線為標示出梅姬颱風期間，

臺中港測風塔100公尺高度處最大十分鐘平均風速的結果。藍色實線則為修正梅姬颱風最大十分鐘平均風速至57 m/s的結果。檢視圖5-10至圖5-12所有的結果顯示，目前NREL所公開的5 MW風力機的設計風力應該屬於保守設計。梅姬颱風期間最大發生應力大致上只到達IEC規範所預想的設定的非超越機率約莫20%，尚且未達到50%的平均值程度。然而，僅以此一颱風紀錄作為風力機結構設計保守與否尚嫌過早。較為嚴謹的作法應在累積足夠數量的颱風事件後，針對風場特性參數的組合機率深入研

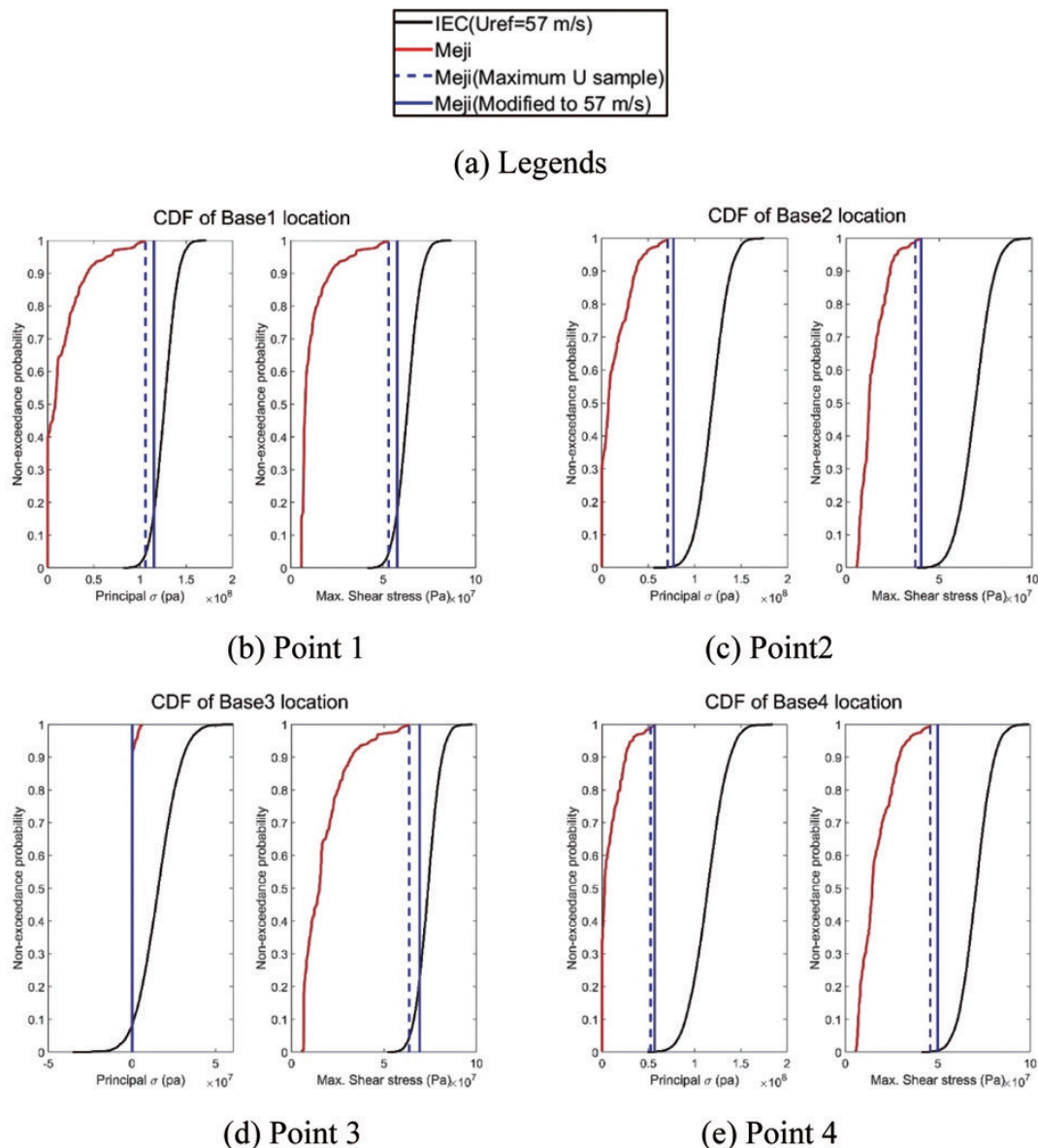


圖5-10 塔底點1至點4之最大主應力及最大剪應力累積分布函數

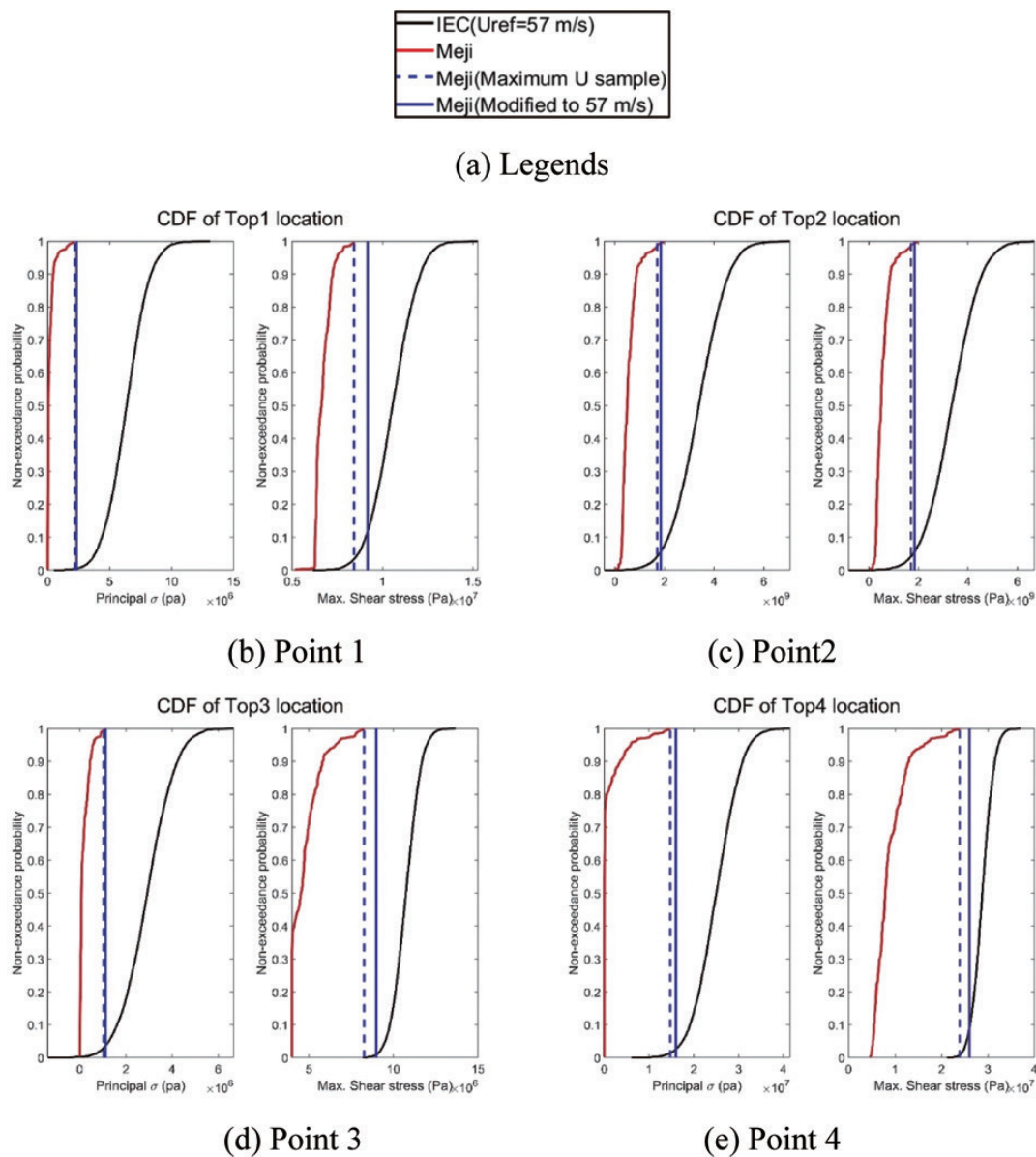


圖5-11 塔頂點1至點4之最大主應力及最大剪應力累積分布函數

究，提高模擬結果的多樣化。此外，考慮到我國多變的颱風路徑，可以推測颱風事件的變異係數可能較大，修正颱風最大風速時亦可能低估了最大發生應力。

6. 結 論

本研究採用臺中港測風塔的風場資料進行本土風場特性的探討。為了能有效以少數的參數代表探討的風場特性，本研究採用指數律作為平均風速剖面的參數公式，並參考我國及日

本耐風設計規範提出紊流強度剖面及紊流積分尺度剖面的參數公式。此外，研究團隊檢視實場中的擾動風速頻譜與擾動風速交頻譜，發現大多資料均與von Karman頻譜及Davenport交頻譜相符，故認為可以採用 α 、 β 、 γ 、 λ 來表示單筆十分鐘空間上的風場特性。結果顯示，正常風況下的平均風速剖面指數值 α 與IEC 61400-3-1規範所建議的0.14相近。紊流強度參數 β 在扣除掉低風速所造成的誤差外，可假設為0.05至0.06之間。紊流強度剖面的 γ 指數可以假設為0以簡化公式、且表示邊界層高度紊流積分尺度

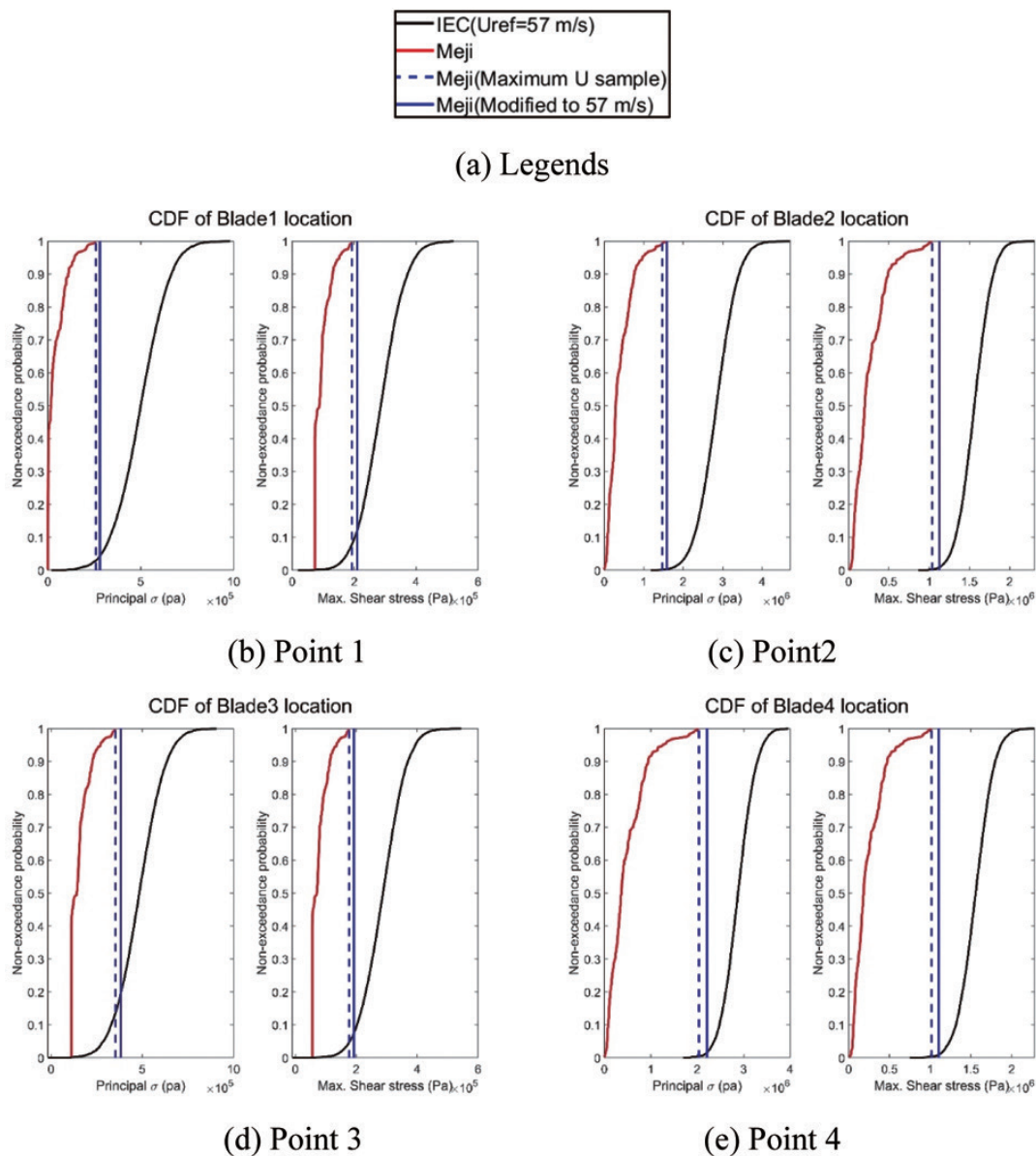


圖5-12 單根扇葉根部點1至點4之最大主應力及最大剪應力累積分布函數

的 λ 值可以假設為150至200公尺左右。由於目前實場資料僅具有一個中高強度的颱風事件，因此目前討論規範修訂的建議值尚嫌過早。

接著本研究比較目前國際間常用的OpenFAST軟體產生風場的TurbSim模組與自行撰寫MATLAB程式模擬的風場。從比較結果發現，同樣是採用EWM風況的設定，TurbSim模組無法符合IEC規範的剖面分布，反之MATLAB紊流產生法則可以。兩者的紊流強度剖面僅具微小差異。然而兩者的紊流積分尺度剖面顯示出很大的差距，顯示出TurbSim模組亦

無法輸出各高度對應的紊流積分尺度值。而以上在平均風速及紊流積分尺度的差異，則在風力機結構模型三處(塔柱底部、塔柱頂端與單根葉片根部)的十分鐘內力歷時上表示出TurbSim模組的內力擾動值偏小，很可能對於後續的動力分析不利。

最後研究團隊將梅姬颱風事件區間的實場數據採用本研究提出的參數公式進行擬合，然後採用以MATLAB程式自行模擬風場的方式產生整個颱風事件的風場歷時進行動力分析，進而與IEC規範中的EWM風況進行比較。同樣根

據風力機結構模型的三處(塔柱底部、塔柱頂端與單根葉片根部)分析所獲得的最大主應力結果，本研究所採用的NREL的5 MW風力機結構應屬於保守設計。最大主應力的累積機率分布圖顯示梅姬颱風期間的最大值大致上只到達IEC規範所預想的20%但未達到50%平均程度。然而研究團隊認為，應在累積足夠數量的颱風事件後，針對風場特性參數的組合機率深入研究，提高模擬結果的多樣化。並考慮我國多變的颱風路徑所造成的變異係數，向上修正颱風最大風速。

本研究嘗試以本土化環境條件研究其與現在規範之差異性。除了將重要的風場特性參數化，並建立風場產生程式產生風場歷時，並進行結構反應比較。然而，本研究尚可進一步改善模擬結果，目前的研究成果採用OpenFAST內建之BEM理論進行快速分析。未來則是針對BEM理論進行探討，採用風洞實驗方式驗證氣動力評估的準確性。研究團隊認為，發展屬於本土化風力機受風作用下的結構分析流程，將有助於針對不同情境去做分析，其中包括極限狀態分析、容許狀態分析以及疲勞分析等等，滾動式針對我國離岸風電規範上提出合理的修正。

參考文獻

- 建築物耐風設計規範及解說，2015年。內政部營建署。
- 鄭啟明、羅元隆、蔡明樹、林金賢、王軍翰與、黃國峰，2014。臺灣地區強風作用時之大氣邊界層特性，第五屆全國風工程學術研討會，桃園中壢。
- 蕭葆義，2020。風工程，五南出版社，臺中。
- AIJ Recommendations for Loads on Buildings, 2015., Architectural Institute of Japan.
- Davenport, A.G., 1965., The relationship of wind structure to wind loading, Proceedings of the Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures, Vol. 1: 53-102, National Physical Laboratory, HMSO, Teddington, London, UK.
- IEC, 2019a. International Standard IEC 61400-1 Edition 4.0 2019-02 Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements, International Electronic Commission, 2019.
- IEC, 2019b International Standard IEC 61400-3-1 Edition 1.0 2019-04 Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines, International Electronic Commission, 2019.
- IEC, 2019c. Technical Specification IEC TS 61400-3-2 Edition 1.0 2019-04 Wind energy generation systems – Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines, International Electronic Commission, 2019.
- Jonkman, J., S., Butterfield, S., W., Musial, W. and G., Scott, G., 2009., Technical Report NREL/TP-500-38060 Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- Li, Y.C., C.M., Cheng, C.M., Y.L., Lo, Y.L., F.M., Fang, F.M., D., Zheng, D., 2015., Simulation of turbulent flows around a prism in suburban terrain inflow based on random flow generation method, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.146, p51-p58. (SCI) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.008>

Investigation Of Wind-induced Responses Due To A Local Typhoon Event And EWM Condition In IEC Codes

Yi-Shou Wang¹ Yuan-Lung Lo^{2*}

ABSTRACT

The current wind turbine design process follows the international standards announced by the International Electronic Commission, such as IEC 61400-1, 61400-3-1, and 61400-3-2. These standards define wind conditions for various design load cases for wind turbines' working conditions. However, these IEC standards are mainly based on European experience. Whether the specified wind conditions meet Taiwan's local meteorological characteristics has not been validated. If so, the structural design for the submarine supporting systems shall be further examined to maintain their safety requirements. In this study, we first look at the local meteorological characteristics by observing the monitoring wind speed data at the 100-m mast installed in Taichung Harbor. To efficiently compare the differences in structural responses due to the local wind effects and the presumed EWM condition, we built up a flow generation algorithm and fit all the wind data with conventional profile models during one monitored typhoon hitting the Taichung Harbor in September 2017. The internal effects of wind loads are obtained by adopting the AeroDyn module based on the blade element momentum theory. Results show that the flow generation algorithm can better describe the wind condition than the OpenFAST TurbSim module. The structural responses caused by the typhoon are still within the 5-MW wind turbine design range based on the EWM condition. However, the importance of accumulating more typhoon events is also mentioned.

Keywords: Wind Turbine, Typhoon Event, Wind Field Characteristics, Structural Response.

¹ Graduate Student, Department of Civil Engineering, National Taipei University of Technology.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Taipei University of Technology.

*Corresponding Author, Phone: +886-2-27712171#2680, E-mail: ylo@mail.ntut.edu.tw

Received Date: September 20, 2022

Revised Date: December 29, 2022

Accepted Date: January 10, 2023