



地震對於離岸風機之影響探討

邱覺生／國立成功大學土木工程學系 博士生

朱聖浩／國立成功大學土木工程學系 教授

本文為為探討地震對風機影響，用土壤—結構互制作用及有限元素法對離岸風機（OWT）之支撐結構進行地震、颱風、風和波浪作用進行分析和設計，並包括保守的土壤液化分析。而隨著未來 OWT 朝大功率發電，功率由 5MW 提高到 10MW、15MW 乃至於 20MW，葉片直徑將由 178.8 公尺增加至 254.7 公尺，無論是支撐結構尺寸或是重量都有所提升，故地震力對於海上風機的影響也將劇增。本研究針對不同發電功率的套管式（jacket-type）海上風機進行地震力之分析，透過靜載重、風載重、波浪載重、海流載重和地震載重的三維有限元素分析，以極限設計考量。其結果顯示，地震力設計對於大尺寸的海上風機是不可忽視的。面對多地震與颱風頻繁的台灣海峽，應當採取適合及因地制宜的設計方式，以避免未來風險，降低維修成本與符合經濟效益。

關鍵詞：離岸風機、地震、颱風、土壤液化

前言

無論是在歐美地區或是亞洲，離岸風機（OWT：offshore wind turbine）近年已成為各國競相研究的主題。雖然歐洲在風機的設置取得了領先，而台灣海峽受地形作用成為優良的風場，但地處於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界，受太平洋火環帶影響，地震成了一個無法忽視的外力，再加上颱風的影響，這是與歐洲風機最大不同的考量的兩個重要因素。一些研究人員研究了離岸風機（OWT）在地震力作用下的土壤-結構互制作用（SSI），Boulanger 等人^[1]以動態 p-y 分析方法對地震土-樁-結構相互作用進行一系列動態離心機模型測試。地震加速度峰值範圍為 0.02 到 0.7g，研究結果為實驗提供了支持動態 p-y 分析方法在地震土-樁-結構互制作用的應用。Harte 等人^[2]通過多自由度模型展示了陸上風機的地震反應，結果表明 SSI 可能顯著影響風機結構的模態與頻率。Ku 和 Chien^[3]提出了套管式（Jacket-type）OWT 基礎承受地震力的數值模型，並提出了在不同土壤條件下 OWT 基礎樁的設計程序。Santangelo 等人^[4]研究了 OWT 受到不同地震記錄的影響，並模擬整合進行了比較。Haciefendioglu^[5]透過三

維（3D）有限元素模型模擬風機的反應分析。結果表明，土壤—結構互制作用（SSI）影響風機在地震情況下的行為。他們提出了一種非整合時域分析用於風機在運行條件下的地震評估，同時包括非線性基礎行為。Austin 等人^[6]使用有限元素方法研究了 SSI 對具有不同類型基礎的特定風機地震反應的影響。他們指出，SSI 對風機地震的反應影響並不顯著。Wang 等人^[7]對 OWT 支撐結構在地震、風和海浪作用力下進行了數值分析，結果表明應該考慮地震、風、波浪和海流力的相互作用。Asareh 等人^[8]使用有限元素模型分析了考慮不同地震和風強度的 5 MW NREL 風機，同時對風機的設計進行了結構的脆弱性分析。為了減輕 OWT 的動態反應，一些研究建議在塔頂安裝控制裝置。Zhang 等人^[9]進行分析複合柱式基礎防止土壤液化，該基礎在地震期間提供了良好的土壤抗液化能力。然而在這些研究中，大型風機受地震的影響程度並未被詳細說明。因此，本研究針對 5、10、15 及 20 MW 的套管式（jacket-type）海上風機進行含地震力之分析與鋼構設計，透過靜載重、風載重、波浪載重、海流載重、颱風載重和地震載重的三維有限元素分析，進行鋼結構極限設計。

OWT 支撐結構抗震分析設計方案

為了分析在地震力作用下 OWT 支撐結構的反應，必須考慮風場的地質條件、地震反應譜和土壤結構相互作用 (SSI)。本研究使用 Newmark 直接積分法進行有限元素分析，然後使用 API 鋼構設計法^[10] 找到最佳構件厚度。在模型中使用梁元素模擬上部結構和樁基礎，而基於 Boulanger 等人^[1] 的 p-y、t-z 和 Q-z 單元用於模擬土壤行為。根據 Ju^[11] 等人研究如圖 1 所示的過程如下：

- (1) 輸入每層土壤的材料性質，並獲取某一土壤層的地震反應譜 (seismic response spectrum)。
- (2) 利用反應譜和地面加速度峰值 (PGA)，本文採 Simqke 程式^[12] 隨機產生三個方向的人工地震加速度。
- (3) 使用 SHAKE-91^[13] 程式生成每個土層的加速度場，而步驟 (2) 中提到的某一層的已知加速度場為輸入數據。然後將加速度場積分成位移場，位移場施加到 p-y、t-z 和 Q-z 彈簧端，而另一端連接到基樁。
- (4) 在有限元素分析中，首先進行靜載重的靜力分析，然後在地震、風和波浪整合下進行 Newmark 直接積分的時序分析。

- (5) 在動力分析中，執行 700 秒的動力歷時分析，除去前 100 秒因風機由無變位至正常變位之狀況，每個梁構件在 600 秒分析結果中每時間步長有 12 個內力，取其每個內力各別最大及最小值，以及同時間的其他 11 個的內力，共 24 組梁構件內力。
- (6) 按照 API RP-2A-LRFD 規範設計鋼結構的支撐，根據所有狀況載重的最大設計厚度以確定下一個設計週期的最佳厚度。
- (7) 最佳化設計直到所有截面的厚度變化很小，程式才停止。在這項研究中，七個設計週期足以獲得穩定的最終設計截面尺寸。

在這項研究中，我們使用保守的方法進行土壤液化分析，以初步研究地震期間 OWT 支撐結構的這種影響。流程如下：

- (1) 假定液化的土壤深度 (H_L)，本文使用 20 公尺。
- (2) 所有沙土在地震開始後的一定秒數 (T_L)，在該深度以上液化，而根據 Ju^[11] 研究，土體剛度設置為原始 p-y 和 t-z 曲線的 1/10，並且在零到 T_L 秒之間使用插值。在本研究中，由於本文使用的強烈地震運動，TL 設置為 10 秒。

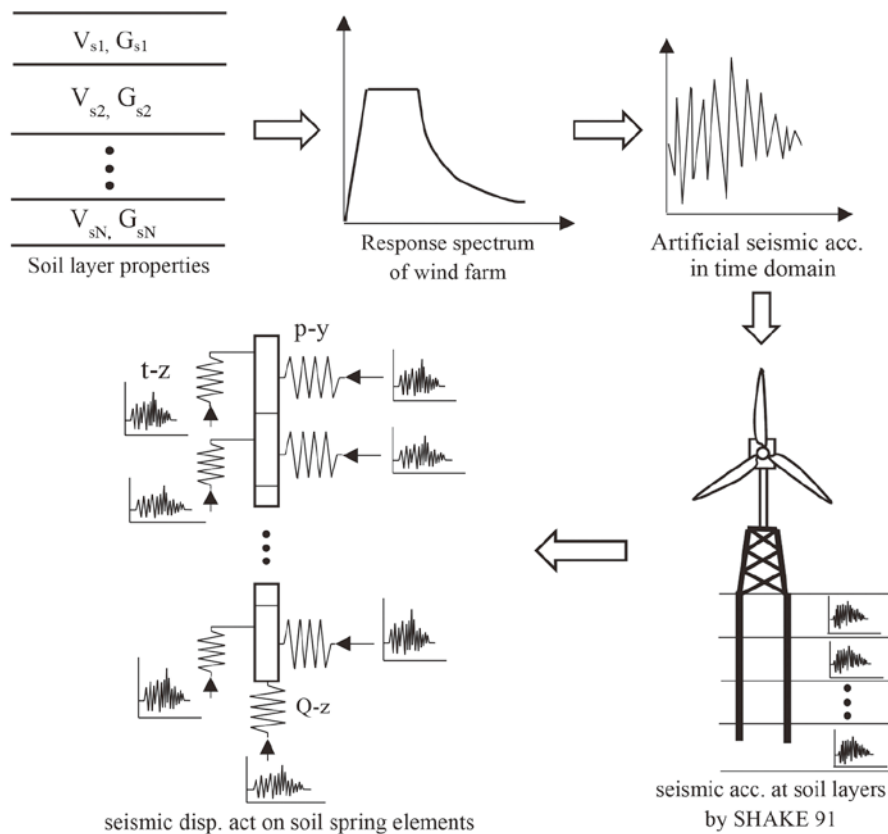


圖 1 根據 Ju^[11] 有限元素方法模擬地震控制 OWT 支撐結構設計流程圖

OWT 環境與地震力作用

地震力載重說明

本文使用圖 2 所示的地震反應譜。設計水平譜加速度係數 S_a 如式 (1) 所示。使用的 $T_0 = 0.5625$ s 和 $S_{DS} = 0.8$ 採用近似台灣海峽的數據。然後使用 Simqke [12] 人工地震軟體生成該反應譜時的地震加速度，對於局部 X 方向的五個地震力，其 PGA (peak ground acceleration) 為 0.32 g，另外在局部 Y 方向為 0.224 g，及 Z 方向為 0.96 g，其中一組如圖 3 所示。

$$S_a = \begin{cases} S_{DS}(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0}) & \text{for } 0 \leq T < T_0 \\ S_{DS} & \text{for } T_0 \leq T < T_s \\ \frac{S_{DI}}{T} & \text{for } 1 \leq T \end{cases} \quad (1)$$

地震加速度作用在海床上。土壤表層和 142 m 深度的土壤性質如表 1 所示，此土層為彰化外海的土壤特性。土壤為砂土，採用插值法求出兩個深度之間的土壤性質。然後使用 SHAKE 91 程式生成每個土層的加速度場。

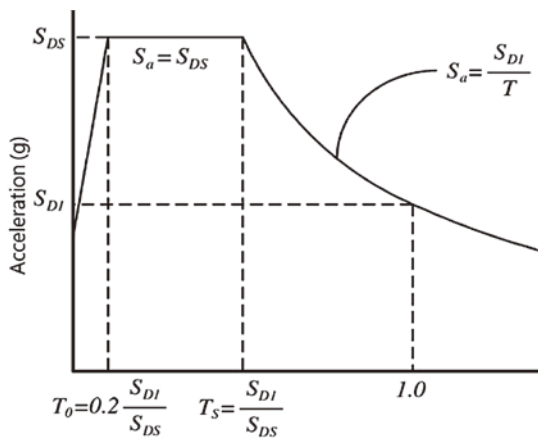
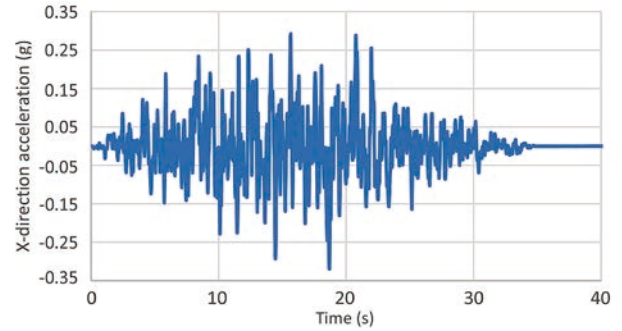


圖 2 地震反應譜

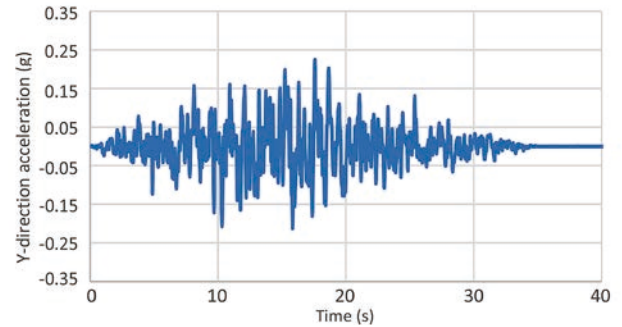
表 1 台灣海峽靠近彰化近海各層土壤性質、土壤表層和 142 m 深度的土壤材料性質

Depth (m)	pult (kN/)	v	c (kN/m ²)	ρ (t/m ³)	Friction angle (°)
0-4	205.2	0.25	0	2	32
4-8	612.0	0.25	0	2	32
8-12	1220.3	0.25	0	2	32
12-27	5297.3	0.25	0	2	32
27-33	7721.7	0.25	0	2	32
33-43	12771.0	0.25	0	2	32
43-142	47490.0	0.25	0	2	32

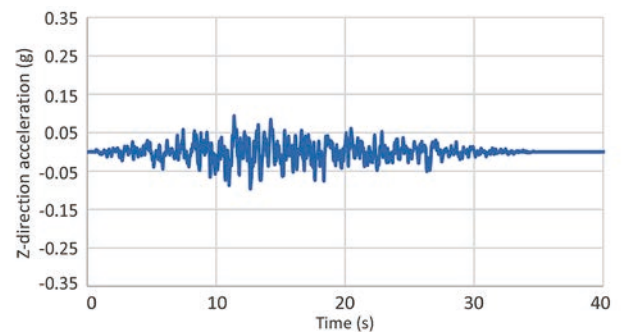
Note: E = Young's modulus, v = Poisson's ratio, and c , ϕ , and ρ = mass density. (pult = the ultimate earth resistance for p-y curve)



(a) X 方向的地震加速度



(b) Y 方向的地震加速度



(c) Z 方向的地震加速度

圖 3 當 $T_s = 0.5625$ 、 $S_{DS} = 0.8$ 人工時間序列地震加速度圖 (PGA 在局部 X、Y 和 Z 方向上分別為 0.32、0.224 和 0.096 g)。

熱帶氣旋 (tropical cyclone) 與颱風說明

熱帶氣旋在台灣稱之為颱風，會造成海洋氣象條件極大的惡劣現象，本研究根據 IEC DLC I.1 & I.2 納入模擬機艙高度 500 年回歸期，10 分鐘平均風速為 $V_{10min,500year} = 72$ m/s 的颱風 (模擬台灣海峽的狀況)，如表 2 所示，換算成地表高度風速約為 49 ~ 52 m/s (風速超過 51 m/s 為強度颱風)，海浪 500 年回歸期的示性波高 $H_s = 14$ m，風速約達中度颱風上限或強度颱風下限，在台灣海峽經常有機會出現這樣的颱風，故本研究將 IEC DLC I.1 & I.2 加入考量，此等載重在 I.2 中要考慮機艙錯位之狀況，是十分嚴峻且符合颱風風向變化快速的考量，若合於此規範，風機應能在此颱風及設定的風速下，直接通過颱風眼牆而沒有損傷。

風作用力與波浪力說明

基於 IEC 61400-3-1^[14] 的風載重、波浪作用力和洋流也用於 OWT 支撐結構的設計。在本文中，基於 TurbSim (Jonkman, 2012)^[15] 來建立風場環境。FAST (Jonkman, 2016)^[16] 評估的 RNA (rotor nacelle assembly) 風作用力與施加到塔頂的三個力和三個力矩有關。基於空氣動力學的塔架和支撐結構的風載重如方程式 (2) 所示。其中， ρ 是空氣的密度， A 是垂直於流動的投影面積， V_0 是垂直於元素的風速， C_D 是阻力係數。

$$F_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_0^2 C_D \quad (2)$$

OWT 支撐結構的海洋環境作用力分別為波浪、海

流和水位。採 Morison 方程評估波浪和海流作用力。根據風場的統計數據，本研究使用的各種波浪條件如表 2 所示，其中包括規則波浪和不規則波浪。對於規則波，使用流線函數理論 (stream line function theory)，對於不規則波，使用二階理論 (2nd-order theory)。根據 IEC 61400-3-1^[14]，地震作用力與其他作用力進行疊加，作用於表 2 狀況顯示如下：(a) 正常發電期間；(b) 緊急停機；(c) 啟動；(d) 正常停機；(e) 緊急停機；(f) 停機期間；(g) 停機與損壞狀態；(h) 停機期間遇到颱風；(i) 正常發電期間的地震造成忽然的電網損失和可能由地震引發的關閉程序；(j) 停機期間的地震造成忽然的電網損失和可能由地震引發的關閉程序。

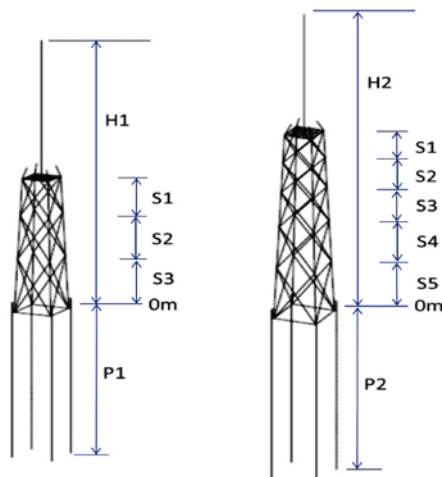
表 2 結構設計中施加的載重 (參考 IEC 61400-3-1 (2019)，波浪為示性波高，為台灣海峽的資料)

Design situation	DLC	Wind condition V _{hub} (m/s)		Waves (m)		Wind dir.	Yaw	Partial safety factor
						Wave dir.		
Power production	1.1	NTM	3 to 25 interval 2	NSS	0.47 to 3.88 interval 0.31	0° 0°	0°	U,1.25
	1.2	NTM	DLC1.1	NSS	DLC1.1	Note _{Ang3} Note _{Ang3}	0°	F,1.0
	1.3	ETM	DLC1.1	NSS	DLC1.1	DLC 1.1	0°	U,1.35
	1.4	ECD	9.4, 11.4, 13.4	NSS	1.6, 1.8, 2.1	ECD 0°	0°	U,1.35
	1.5	EWS	DLC1.1	NSS	DLC1.1	DLC1.1	0°	U,1.35
	1.6	NTM	DLC1.1	SSS	DLC1.1	DLC1.1	0°	1.35
Power production plus occurrence of fault	2.1	NTM	DLC1.1	NSS	DLC1.1	DLC1.1	0°	U,1.35
	2.2	NTM	DLC1.1	NSS	DLC1.1	DLC1.1	0°	U,1.1
	2.3	EOG	9.4 to 13.4 interval 0.5 and 25	NSS	1.6 to 2.1 interval 0.0625 & 3.88	DLC 1.1	0°	U,1.1
	2.5	NWP	DLC1.1	NSS	DLC1.1	DLC1.1	0°	U,1.35
Start-up	3.2	EOG	3, 9.4 to 13.4 interval 0.5 and 25	NSS	0.47, 1.6 to 2.1 interval 0.0625 & 3.88	DLC1.1	0°	U,1.35
	3.3	EDC	DLC3.2	NSS	DLC3.2	ECD 0°	0°	U,1.35
Normal shut down	4.2	NWP	DLC2.3	NSS	DLC2.3	DLC1.1	0°	U,1.35
Emergency shut down	5.1	NTM	DLC2.3	NSS	DLC2.3	DLC1.1	0°	U,1.35
Parked (standing still or idling)	6.1	EWM (T)	57	ESS (H_{s50})	12.7	Note _{Ang} Note _{Ang1}	0°, 4°, 8°	U,1.35
	6.2	EWM (T)	DLC6.1	ESS (H_{s50})	DLC6.1	Note _{Ang} Note _{Ang2}	0° to 180° interval 10°	U,1.1
	6.3	EWM (T)	45.6	ESS (H_{s1})	9	DLC6.2	0°, 10°, 20°	U,1.35
Parked and fault conditions	7.1	EWM (T)	DLC6.3	ESS (H_{s1})	9	DLC6.2	DLC6.2	U,1.1
	7.1A	EWM (T)	DLC6.3	ESS (H_{s1})	9	DLC6.2	0°, 4°, 8°	1.1
Parked (standing still or idling)	I.1	EWM (T)	$V_{10min,500} = 72$	ESS	14	DLC6.2	0°	U,1.0
	I.2	EWM (T)	$V_{10min,500} = 72$	ESS	14	DLC6.2	0° to 180° interval 30°	U,1.0
Power production (Earthquake plus grid loss)	1.8	NTM	$V_{hub} = V_r = 13.4$	NSS	1.6	DLC1.1	0°	U,1.0
Parked (Earthquake plus grid loss)	6.7	NTM	$V_{hub} = 0.7V_{ref} = 39.9$	NSS	$H_s = 0.7$ $H_{s50} = 8.89$	DLC1.1	0°	U,1.0

Note: (1) (T) = Turbulent wind model. (2) V_{hub} = average wind speed at hub height. (3) H_s = significant wave height. (4) Note_{Ang} = 0° to 180° with the interval of 30°. Note_{Ang1} = -30°, -15°, 0°, 15°, or 30° relative to the wind direction. (5) Note_{Ang2} = -30°, 0°, or 30° relative to the wind direction. (6) Note_{Ang3} = 0°, 30°, 60°, or 90°. (7) DLC 2.1 = uncontrolled pitch angle at 300 s. (8) DLC 2.2 = uncontrolled pitch angle at 310, 315, and 320 s for three conditions. (9) DLC 7.1A = fixed pitch angle at 0°, 15°, 30°, 45°, or 60° for five conditions. (10) DLC 1.8 = three different earthquakes from the directions of 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, or 315° under the controlled blade pitches and uncontrolled blade pitches after 15 s of the seismic load. (11) DLC 6.7 = the same as DLC 1.8 with the always parked blade pitches. (12) The wave period is set to $11.1\sqrt{H_s/g}$.

有限元素模型

本文分析了 5 MW 到 20 MW 的四種 OWT 套管式支撐結構，其中海面以下平均深度為 40 m 及 70 m 兩種，土壤為中等偏硬的砂土其內摩擦角 32°。圖 4 跟表 3 顯示了 OWT 支撐結構的有限元素模型，其中截面尺寸是初始設置，最終結果將在經 7 個優化設計週期後確定。結構鋼的降服強度為 345 MPa。鋼的楊氏模量為 204 GPa，波松比為 0.3，鋼密度為 7.9 t/m³。在有限元素分析中，三維的兩節點梁元素用於模擬柱、支撐、樁和塔，四節點板元素用於模擬塔底平台，p-y、t-z 和 Q-z 曲線彈簧用於根據 Boulanger 等人提出之方法模擬土壤 - 結構互制作用^[1]。在初始分析期間，使用統計分析來應用和分析靜載重，例如靜載重和活載重。包括表 2 中的 IEC 61400-3-1 載重，以使用直接積分 Newmark 方法執行極限載重分析，經過 7 個循環的有限元素分析和鋼材設計，獲得了構件截面的最佳尺寸，然後計算了鋼材的總重量。



(a) 5MW-20MW 在 40 公尺水深 OWT 結構 (b) 5MW-20MW 在 70 公尺水深 OWT 結構

圖 4 5MW-20MW 在兩種水深 OWT 結構尺寸 (公尺)

表 3 5MW-20MW 在兩種水深 OWT 結構尺寸

(a) 5MW-20MW 在 40 公尺水深 OWT 結構尺寸 (單位: 公尺)

	5MW	10MW	15MW	20MW
H-1	135	161.55	191.72	199.78
S-1	15	15	15	15
S-2	18	18	18	18
S-3	22	22	22	22
P1	60	70	90	100

(b) 5MW-20MW 在 70 公尺水深 OWT 結構尺寸 (單位: 公尺)

	5MW	10MW	15MW	20MW
H-2	160	186.55	216.72	224.78
S-1	12	12	12	12
S-2	13	13	13	13
S-3	15	15	15	15
S-4	18	18	18	18
S-5	22	22	22	22
P2	60	70	90	100

風力、波浪力與地震力的影響

雖然表 2 所有的載重都會執行結構分析及鋼結構設計，但經由鋼結構設計得到控制載重的影響比率包含了下列幾種情形：

1. DLC 1.4 是在發電過程，具有方向變化的極端連貫陣風 (ECD: extreme coherent gust with direction change)，正常海象 (NSS: normal sea state) 與正常海流模型 (NCM: normal current model)。
2. DLC 5.1 是在緊急停機狀態下，正常海象 (NSS: normal sea state) 與正常湍流模型 (NTM: normal turbulence model)。
3. DLC 6.1 是在停機階段的極端風速模型 (EWM: extreme wind speed mode)，極端海象狀態 (ESS: extreme sea state)，極端海流模型 (ECM: extreme current model)。
4. DLC IEC-I.1&2 是在停機階段遇到熱帶氣旋 (颱風) 的極端風速模型 (EWM)，極端海象 (ESS: extreme sea state) 與極端海流模型 (ECM: extreme current model)。
5. DLC 6.7 是在停機狀態，地震造成忽然的電網損失和可能由地震引發的關閉程序，正常湍流模型 (NTM: normal turbulence model)，正常海象 (NSS)。
6. DLC 1.8a 與 DLC 1.8b 是正常發電過程，地震造成忽然的電網損失和可能由地震引發的關閉程序，正常湍流模型 (NTM: normal turbulence model)，正常海象 (NSS)。

在此定義颱風或地震控制的桿件設計比率 = 此比率的風機結構總用鋼量，其鋼構斷面設計由包含颱風或地震的載重控制。由分析結果表 4 可以看出隨著風機尺寸由 5MW 逐次提高至 10MW、15MW 到 20MW，來自地震控制的桿件設計比率從 0.016 (即 0.0162 的總用鋼量由包含地震的載重控制) 漸次提升至 0.75 甚至 0.89，由此可觀察到地震力尚不至於對 5MW 風機產生很大影響，但隨著朝向大尺寸風機發展趨勢，風機重量越重，地震控制構件厚度影響比率也可以看出有趨向放大，地震力的影響也逐漸加大。雖然在水深 70 公尺深的 20MW 風機，地震控制構件厚度比率降低，但並非是地震影響力下降，而是颱風的影響程度上升，導致地震影響比重降低。而如表 3，DLC 1.4 (發電過程)、DLC 5.1 (緊急停機) 與 DLC 6.1 (停機階段的極端風速模型) 對於控制厚度設計影響之比率遠不及地震力的影響。

表 4 地震、颱風與其他 DLC 控制之桿件厚度比率

風機尺寸	水深深度	全重量 (T)	地震控制之桿件厚度比率	颱風控制之桿件厚度比率	其他 DLC 控制之桿件厚度比率
5MW	40M	2447	0.016	0.984	0
5MW	70M	2860	0.075	0.925	0
10MW	40M	2622	0.096	0.806	0.098
10MW	70M	3624	0.890	0.092	0.018
15MW	40M	4189	0.437	0.538	0.025
15MW	70M	5827	0.753	0.097	0.150
20MW	40M	7347	0.414	0.586	0
20MW	70M	8837	0.513	0.487	0

由圖 5 及圖 6，可以分別看出來自地震控制構件厚度比率之影響，隨風機尺寸的提高，其影響比率增大並逐次提升。另外圖 6，雖然水深 70 公尺的 20MW 風機在地震控制構件厚度比率下降，但可以從圖 6 分析看出，這是因為熱帶氣旋（颱風）的影響開始上升，致使地震力的影響不進則退，但是地震控制構件厚度比率依然保持在 51.38% 以上，而水深 70 公尺的 20MW 風機的高度為 224.78 公尺，這遠比水深 70 公尺的 10MW 風機的高度為 186.55 公尺差了 38.23 公尺，這可能是造成颱風控制桿件厚度比率上升之原因。最後由表 5 和表 6 可以觀察到，地震加上颱風控制之桿件厚度比率幾乎占了 85% 到 100%，也就是說地震與颱風在極限承載考量下是控制台灣海峽風機設計厚度的最主要因素。

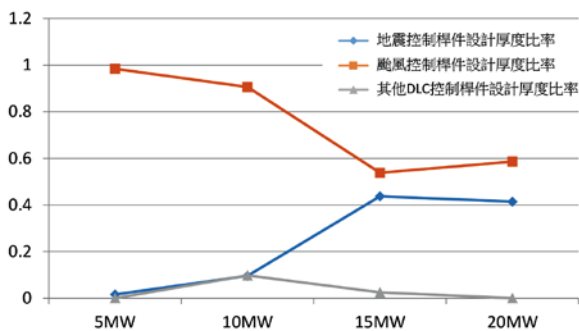


圖 5 設計水深 40M 的各類型尺寸風機，來自地震、颱風與其他 DLC 控制桿件比率比較圖。

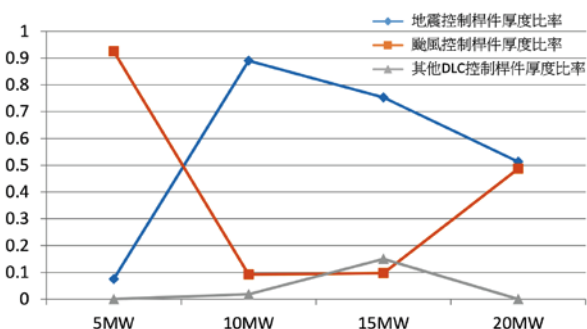


圖 6 設計水深 70M 的各類型尺寸風機，來自地震、颱風與其他 DLC 控制桿件比率比較圖。

表 5 設計水深 40M 地震加颱風與其他 DLC 控制之桿件厚度比率

風機尺寸	基礎深度	地震加颱風控制之桿件厚度比率	其他 DLC 控制之桿件厚度比率
5MW	60M	1.000	0
10MW	70M	0.902	0.098
15MW	90M	0.975	0.025
20MW	100M	1.000	0

表 6 設計水深 70M 地震加颱風與其他 DLC 控制之桿件厚度比率

風機尺寸	基礎深度	地震加颱風控制之桿件厚度比率	其他 DLC 控制之桿件厚度比率
5MW	60M	1	0
10MW	70M	0.982	0.018
15MW	90M	0.850	0.150
20MW	100M	1	0


結論

台灣海峽作為世界優良風場基地，近年招來了許多外國廠商投資 OWT 設置與技術引進，雖然歐洲率先投入 OWT 的領域，發展也日趨成熟，但由前述分析可看出在極限承載設計考量下，地震控制 OWT 結構支撐設計會隨風機尺寸提升而影響增高，處於環太平洋地震帶，地震觸發頻率極高幾乎無法避免，而且每年約有 26.23 個颱風侵襲，更是無法不面對之狀況，然而現階段採用歐洲設計離岸風機的經驗，因其區域不須考量地震及颱風設計因素，並不適合台灣海峽的條件。綜合前述分析結論，地震加上颱風控制之極限設計桿件厚度比率幾乎占了 85% 到 100%，故 OWT 結構支撐設計應當嚴謹考慮地震與颱風的影響，才能因地制宜符合台灣海峽設置 OWT 之真實狀況。

對疲勞載重而言，地震及颱風的因素沒有被考慮在設計載重中。最主要原因是套管式風機結構，其桿件疲勞破壞的最大原因還是在工作載重下，風機葉片以接近均速運轉下，使側撐產生往復的桿件力，造成側撐與大柱連接處的開裂。但到底是那種外力（波浪力、桿件受風力、轉子葉片對塔架產生之彎曲力、或轉子葉片對塔架產生之扭轉力）的影響最大，在文獻中或實務設計界都沒有詳加說明。由 Ju^[17] 最近的研究發現是轉子葉片對塔架產生之扭轉力影響最大，機艙轉動系統使用低剛度和大阻尼可以顯著增加套管式結

構的疲勞壽命，另一重要事項是一定要避免結構固有頻率（尤其是結構垂直轉動的第一個頻率）接近轉子3P頻率的整數倍（1倍、2倍或3倍），而造成共振。

參考文獻

1. Boulanger, R.W., Curras, C.J., Kutter, B.L., Wilson, D.W., and Abghari, A. (1999). Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 125: 750-759.
2. Harte, M., Basu, B., and Nielsen, S. (2014). Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction. *Eng. Struct.* 45: 509-518.
3. Ku, C. and Chien, L. (2016). Modeling of Load Bearing Characteristics of Jacket Foundation Piles for Offshore wind turbines in Taiwan. *Energies* 9: 625.
4. Santangelo, F., Failla, G., Santini, A. and Arena F. (2016). Time-domain uncoupled analyses for seismic assessment of land-based wind turbines. *Eng Struct.* 123:275-299.
5. Haciefendioglu, K. (2012). Stochastic seismic response analysis of offshore wind turbine including fluid-structure-soil interaction. *Struct Design Tall Spec Build.* 12: 867-878.
6. Austin, S. and Jerath, S. (2017). Effect of soil-foundation-structure interaction on seismic response of wind turbines. *Ain Shams Eng. J* 8:323-331.
7. Wang, W., Gao, Z., Li, X. and Moan, T. (2017). Model test and numerical analysis of a multi-pile offshore wind turbine under seismic, wind, wave, and current loads. *J. Offshore Mech Arct of the ASME.*, 139:031901.
8. Asareh, M., Schonberg, W. and Volz, J. (2016). Fragility analysis of a 5-MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method. *Finite Elem Anal Des* 120:57-67.
9. Zhang, P., Xiong, K., Ding, H., and Le, C. (2014). Anti-liquefaction characteristics of composite bucket foundations for offshore wind turbines. *J. Renew Sustain Ener.* 6:053102.
10. American Petroleum Institute (API). (1997). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Load and Resistance Factor Design. API RP 2A-LRFD. Washington: American Petroleum Institute.
11. Ju, S. H. and Huang, Y. C. (2019). Analyses of offshore wind turbine structures with soil-structure interaction under earthquakes. *Ocean Engineering* 187:106190.
12. MIT. SIMQKE (1976): A Program for Artificial Motion Generation: User's Manual and Documentation. M.I.T. Department of Civil Engineering.
13. Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1993). User's manual for SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits, Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California at Davis, Davis, Calif.
14. International Electrotechnical Commission. IEC 61400-3-1. 2019. Wind Turbines—Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines, 1st ed. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
15. Jonkman, B.J. and Kilcher, L. (2012). Turbsim User's Guide; version 1.06.00; National Renewable Energy Laboratory:Golden, CO, USA.
16. Jonkman, B. and Jonkman, J. (2016). FAST v8.15.00a-bjj. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO 80401.
17. Ju, S.H. (2022). Increasing the fatigue life of offshore wind turbine jacket structures using yaw stiffness and damping. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 162: 112458. 



歡迎加入學會



www.ciche.org.tw
下載入會申請書

e-mail: service@ciche.org.tw

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260

土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1~2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。