

# 離岸風機基礎設計實務

冀樹勇 王天佑 譚志豪

財團法人中興工程顧問社

## 摘要

離岸風力發電為過去十年國際再生能源發展的主流，國內屬起步階段，借助國外案例經驗可加速國內發展。本文從實務應用角度淺論離岸風力基礎設計議題，包括基礎形式之決定、異於一般基礎設計的關鍵程序、支撐結構動力分析、材料疲勞特性與反覆側向荷重對於基礎長期行為反應等。文中透過目前占比七成以上的大口徑單樁基礎形式，進行簡化設計程序介紹，以提供工程實務參考。

**關鍵字：**離岸風機、反覆側向荷重、單樁、疲勞。

## Design Practice of the Foundations of offshore Wind Turbines

Shu-Yung Chi Tian-Yu Wang Chih-Hao Tan

sinotech engineering consultants, inc.

## Abstract

Offshore wind power deployment has become the mainstream in the renewable energy industry in the last decade. It is just the beginning to develop the offshore wind farm in Taiwan and the foreign experience will accelerate the development. In this paper, a state-of-the-practice introduction of the foundation design of offshore wind turbines was presented. The determination of foundation type, the key steps of design process, the dynamic analysis of support structure, the fatigue characteristics of material, and the long-term response of monopile due to cyclic lateral loading were discussed. The design process of monopile foundation based on simplified dynamic model was also presented.

**Key Words :** cross walls , buttresses ,barrettes offshore wind turbine, Cyclic lateral load, Monopile, Fatigue.

## 一、前言

風力發電為零排碳之再生能源，在全球暖化引致氣候變遷環境惡化下，為各國大力推動的潔淨能源方案。2000年至2011年間，全球風力發電總量每三年成長一倍，於2011年達到約238GW，顯見其發展相當迅速。2012年2月行政院核定千架海陸風力機，規劃於2020年完成陸域450架風力機，海域則於2015年至2030年完成600架風力機。2012年7月經濟部能源局公告離岸風力發電系統示範獎勵辦法，預計2015年完成離岸風電示範計畫3案共

計4-6台機組。

離岸風力發展在國內尚屬起步階段，國際離岸風力已發展多年，之前更有多年的海上鑽油平台設置經驗，皆為離岸風力推動重要基礎。在風機的發展上，單一機組額定容量(Rated Power Capacity, RPC)自1980年代的0.01MW、葉片旋翼(Rotor)直徑20公尺，至2011年的機組額定容量7.5MW、葉片旋翼直徑150公尺，且持續向「大」的方向發展，預估2020年風機最大RPC將達20MW、葉片旋翼直徑將達230公尺以上(Arshad and O'Kelly, 2013)。Tong(2010)依據以往風機發展趨勢，歸納葉片旋翼直徑D(m)、支撐結構

頂部風機總重 $M(t)$ 與機組額定容量 $RPC(MW)$ 之關係分別為

$$D = 59.354(RPC)^{0.47} \dots\dots\dots(1)$$

$$M = 55.9216(RPC)^{1.034} \dots\dots\dots(2)$$

國外離岸風機的發展經驗與技術，可提供國內推動離岸風力示範計畫技術上相當的助益。本文主要藉由國外相關技術規範、個案案例與學術文獻，針對離岸風機基礎設計實務，系統化的整理，以提供國內工程界參考。

## 二、離岸風機基礎形式評估

風機結構依據功能與受力不同，分為上部結構、下部結構與基礎。上部結構包括風機本體及塔柱(Tower)，主要承受風力；下部結構包括工作平台及連結塔柱與基礎的轉接段(Transition piece)，主要承受波浪力；基礎則承受來自上、下部結構所傳遞之力及海水流動力。如圖一目前商業應用之離岸風機基礎可分為四個基本類型，分別為：

### 1. 大口徑單樁基礎Monopile

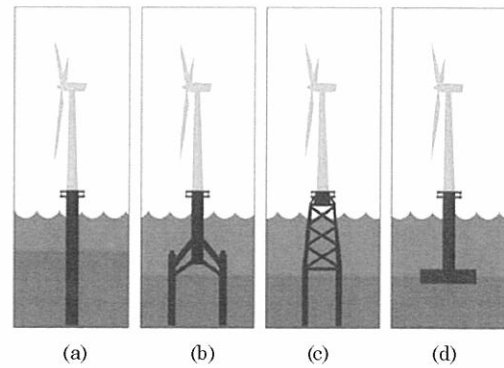
目前75%以上離岸風機所採用之基礎型式，在水深40公尺以內常採用，一般都為空心鋼管，樁徑4~6公尺，重量可達1,000噸。如圖二大口徑單樁基礎風機各組件所示，工作平台以下為單樁風機支撐結構，包括下部結構與樁基礎部分(b)，下部結構大部分為轉接段，含多項附掛於主結構體之附屬設施，皆屬於支撐結構設計範圍。

### 2. 三樁式基礎(Tripod)

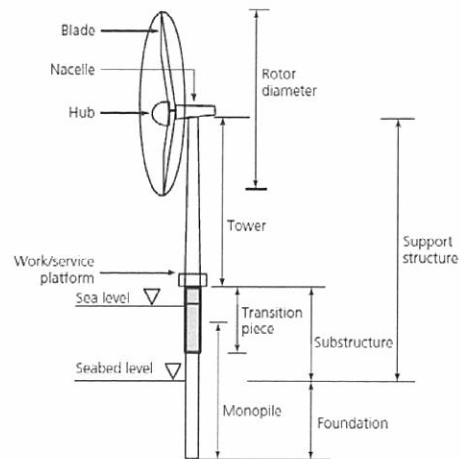
如圖一(b)，由三支斜桿以放射狀方式於主節點連接轉接段，基樁則透過斜桿底部之樁套筒將斜桿固定於海床上，藉此達到較大之承載面積，並提升結構整體勁度及抵抗傾倒彎矩之能力，惟通常結構型式具專利。此基礎型式適用於20~50公尺之水深。

### 3. 桁架基礎(Lattice/ Jacket)

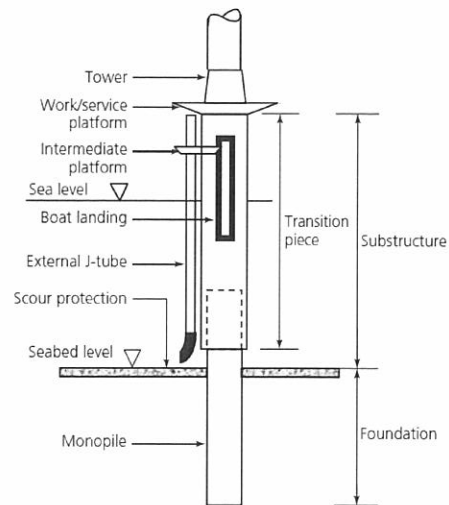
泛指以桁架連接多支撐樁所組合成為之基礎形式，一般由四根主要套管所構成，彼此間以多根交錯之細長連桿相連接(如圖一(c))，可減少基礎所承受之流體力，並因承載



圖一 離岸風力基礎類型(Valk, 2013)



(a) 風機整體結構



(b) 支撐結構(下部結構與基礎)

圖二 大口徑單樁基礎之離岸風機部件組成 (Arshad and O'Kelly, 2013)

面積大及結構靜不定度高，可大幅增加側向勁度及整體穩定性，適用於環境荷重較大或水深較深之情形。海上平台結構多以此型式作為基

礎，以提高安全性並確保平台工作人員安全。

4. 重力式基礎(Gravity)

僅適用於淺海，側向力較小處，優勢為施作簡單，造價便宜。此基礎型式由底部巨大座落於海床面上之混凝土結構所形成(如圖一(d))，藉混凝土自重抵抗外在荷重所造成之側向力及彎矩，使整體風機結構維持穩定。此基礎型式可明顯減少整體結構之懸臂部分，因此受水平力作用下之變形與安全性較高。因屬重力式結構，須有良好之海床承载力，故適用於堅硬岩盤或礫石沉積，且平均水深較淺之海床。

表一為基礎型式選擇項目類別與對應之考量因素。風機設計準則含括所有確保風機安全完整性之外在與內在條件，如荷重特性、允許變形與材料安全係數等；場址特性包括地質條件與環境外力等設計條件；經濟效益與施工性為最重要決定基礎型式的項目，尤其施工性，包括材料、組裝、施工法與施工機具(含運輸船)等，往往也影響到基礎尺寸，在設計時必須列入重要考量因素；環境衝擊主要考量在施工期間之影響，營運維護期則以船隻撞擊與維護安全為主要考量。

表一 風機基礎型式決定因子(Ryu et al., 2012)

項目	考量因素
葉輪機設計準則	沉陷、水平變位、傾角 控制荷重特性 材料與葉輪機安全因子
場址特性	水深與地質條件 設計荷重(風速、浪高、洋流等) 地震與其他條件
經濟效益與施工性	基礎型式易損特性 海水深度限制 材料採購與組裝 海上運輸設備條件 海上施工工期 安全技術層級與專家 施工經驗與施工設備
環境衝擊與美觀	噪音、震動與泥沙懸浮 美學因子(幾何形狀) 維護可及性

### 三、離岸風機設計程序

#### 3.1 設計基準

設計基準(Design basis)主要在界定離岸風場開發商的需求規格與達到其目的的方法，亦即提供設計者所需的依據資訊。風機結

構設計基準考量項目包括：

1. 採用的法規規範、標準與設計安全等級
2. 概述等工程基本資訊
3. 海象等環境資訊
4. 大地工程資訊
5. 結構所受外力荷重
6. 材料與設計評估方法
7. 界面與結構節點
8. 防蝕與塗裝
9. 數值模擬相關議題
10. 其他重要考量議題

#### 3.2 設計規範

因為國際離岸風場開發以歐美較早且技術成熟，故相關設計規範亦以歐美為主，包括挪威驗船協會的 DNV-OS-J101、DNV-OS-J201；國際電力委員會的 IEC 61400-3與美國石油協會的 API RP 2A-WSD 等規範。隨著實際風機商轉所獲得的實務經驗與新的學術研究或重要發現，目前相關規範仍不定期進行改版。

#### 3.3 風機與支撐結構循環設計

一般風機上部結構由風機製造商工程師設計，下部結構與基礎由基礎工程師設計，而上部結構之風機塔柱與下部結構轉接段結合為支撐結構，為使支撐結構設計一致並符合安全標準，故其設計過程包括風機工程師與基礎工程師之循環計算程序，如圖三所示，一個循環包含六個步驟，由步驟1為起始，一般以2-3個循環為原則。圖三中步驟4與步驟5所示之介面，係風機塔柱與下部結構轉接段結合處。

#### 3.4 關鍵程序

離岸風機基礎設計原則為典型之性能設計，其設計準則係由基礎變形控制，而非一般大地工程基礎之極限承载力控制，以大口徑單樁基礎為例，設計準則包括完工後最大容許樁頂轉角，與長期側向荷重作用下之最大容許累積轉角。因為離岸風機結構設計與一般以極限承载力為設計原則的工程設計不同，故本文所提設計程序著重於差異的關鍵步驟，而一般的基礎極限承载力設計方法本文不再贅述。

Tempel (2006) 詳細探討離岸風力支撐結構之設計問題，系統化整理設計流程以往成熟設計流程進行比較，提出四項關鍵程序，如圖四所示之設計程序，離岸風機結構設計關鍵程序包括：(1)依據初步設計資訊所建立的結構動力分析模型；(2)環境資料處理後的設計環境荷重與參數；(3)檢覈極限荷重狀態；及(4)檢覈長期受反覆荷重作用下的疲勞特性。

### 3.5 結構動力分析

在動力分析中，風機結構的模擬必須具有相當的準確性，故必須考慮三項控制結構動力反應的因素：

1. 地層材料特性
2. 樁基礎與風機塔柱幾何形狀
3. 風機重量與慣性矩

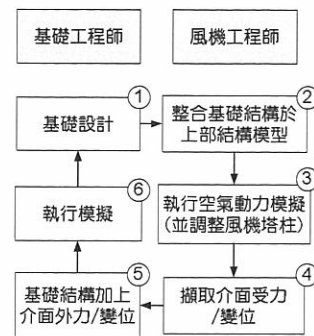
一般在葉片轉速10~20rpm下，轉子第一激發頻率(1P)為0.17~0.33Hz，而三葉片式風機之葉片通過激發頻率(3P)為0.5~1.0Hz。設計風機結構自然頻率除避開風與海浪頻率外，亦應避開上述機械運轉產生之激發頻率，以免產生共振效應，風機結構功率頻譜密度(PSD)圖如圖五所示。故為避免共振效應，風機結構自然頻率應落於三區段，小於1P者(Soft-soft結構)、介於1P與3P者(Soft-stiff結構)、大於3P者(Stiff-stiff結構)。Soft-soft結構撓曲勁度不足，且大部分空氣紊流與海浪作用頻率亦落於同一範圍，故應避開此頻率範圍；Stiff-stiff結構因為勁度過大且造價過高，故設計上亦避免落於此頻率範圍。風機結構初步設計即應以Soft-stiff結構為目標，除風機本身額定容量決定重量與1P、3P機械運轉頻率範圍外，可藉由調整支撐結構尺寸以符合自然頻率落於需求範圍。

依據簡化結構頻率分析結果，可初步計算支撐結構的幾何尺寸，進入更細節的設計分析時，則須仰賴數值分析程式進一步評估，實務上皆採用有限元素(FEM)程式分析。

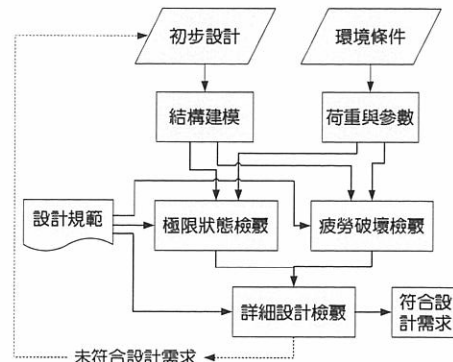
### 3.6 極限狀態

風機結構檢覈極限狀態之目的：

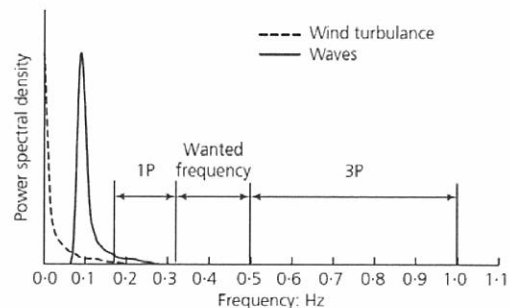
1. 可安全承受所有運轉、暫態或受損狀態下之荷重



圖三 離岸風機支撐結構設計循環



圖四 離岸風機結構設計關鍵程序



圖五 風機結構功率頻譜密度圖(Arshad and O'Kelly, 2013)

2. 確保在結構設計生命週期內均有可接受之安全性
3. 針對人員及環境均可維持可接受之安全性
4. 在結構設計生命週期內針對劣化現象均有足夠之耐久性

分析極限荷重對結構的反應，在規範中係先定義各種荷重，在不同荷重組合狀況下分析極限狀態，並在極限荷重外力作用下，進行結構反應分析。圖六為離岸風機結構極限荷重之參考計算流程。

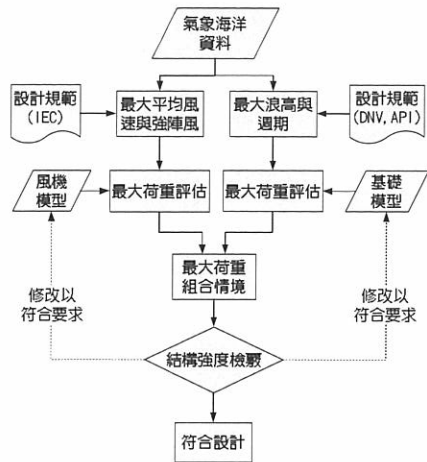
分析之極限狀態(Limit States)包括：

1. Ultimate Limit States(ULS): 承載最大荷重狀態

2. Accidental Limit State(ALS): 在罕見狀況下發生之最大荷重或在意外發生後,受損結構之整體承載能力。

3. Serviceability Limit States(SLS): 正常運轉下安全條件與要求狀態

4. Fatigue Limit States(FLS): 在反覆荷重下引致之疲勞極限狀態



圖六 離岸風機結構極限荷重與反應計算流程

由於離岸風機所處的位置、風場、海象與溫度等條件之不同,因此離岸風機設計時必須特別考量環境荷重(Environmental loads)之影響,包括:風力、波浪力、海流力、潮汐力、地震力、海床沖蝕、海床流動滑移、溫度、鹽度、海洋生物增生及海冰作用(只適用高緯度地區)等環境條件對風機所造成之荷重(DNV-RP-C205)。設計實務上,多將風力荷重與流體動力荷重(hydrodynamic loads)組合考量,如波浪、海流、潮汐及海水位等,並根據不同的再現週期及準則要求設計出數十種環境載重組合以進行設計,至於其他環境荷重則另行考量。以下則針對離岸風機設計主要考量的環境荷重進行摘要說明。

(1)風力荷重(Wind loads)

風對於風機之作用力可分為直接荷重與間接荷重兩部分:1.直接荷重係指空氣動力對葉片所產生的風力荷重及空氣動力對塔柱與機艙所產生之拖曳力;2.間接荷重則泛指因葉片旋轉造成作用於葉片之重力荷重產生依時

變化、旋轉引致之離心力與科氏力、偏航(Yawing)造成的陀螺力(Gyroscopic forces)及風機停機所產生的制動力(Barking force)等間接產生之荷重。因此,為考量風力之間接荷重影響,風機設計必須額外考量的條件包括:塔影效應(Tower shadow)產生的渦流影響、尾流效應(Wake effect)對鄰近風機產生的風能折減(IEC61400-1, Annex D.)、偏航誤差導致之風輪軸線與風向偏差、風機運動與風場的交互作用、以及紊流與陣風之影響等。此外,基於極限設計原則,風力條件可區分為常態風力條件(Normal wind condition)與極端風力條件(Extreme wind condition)兩類。常態風力條件係考量長期且平均的風力條件,而極端風力條件則特別針對風力特性的極值與極端事件進行考量(IEC61400-1)。

(2)波浪荷重(Wave loads)

波浪由深海向海岸傳播時,由於水深變化或遭遇結構物阻擋,波浪會發生變形現象(Wave deformation);波浪變形主要有淺化(Shoaling)、折射(Refraction)、繞射(Diffraction)、反射(Reflection)及碎波(Wave breaking)等現象。實務上,波浪荷重的考量常以具代表性且適用場址條件之波浪理論來描述波浪的運動,常以波高與頻率域週期峰值表示。波浪荷重的大小除與水深有關外,亦與風機結構的尺寸、形狀與基礎型式有密切的關係。若為重力式基礎,則其龐大體積易干擾波浪運動進而產生繞射行為,因此需進行進一步的繞射分析以評估局部與廣域的波浪荷重;至於最常使用的細長型原件基礎型式(如大口徑單樁基礎、三樁基礎及桁架基礎),實務上常以Morison's equation進行波浪荷重評估,透過慣性力與拖曳力計算波浪荷重大小。

(3)海流荷重(Current loads)

海流的主要成因為潮汐、風、與海洋環流,局部的海流亦可能由河川出流、溫差、鹽度差異及暴風浪潮所引致。設計實務上,多以潮汐與風所引致的海流荷重為主要考量,其餘因素則常忽略不計,分別透過潮汐與風所引致之海流流速與海水位高程變化評估海流荷重,而參考基準則藉由蒐集海流長期流速資料

進行統計分析獲得。

(4)海水位荷重(Water level loads)

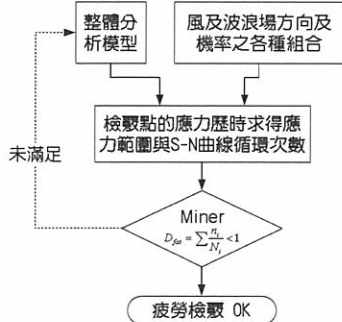
海水位反應了潮汐與暴潮的影響，一般而言，較高的海水位將增加流體靜力荷重(hydrostatic loads)與海流荷重而對風機結構物產生影響。然而，較低的海水位亦有可能導致產生較高的流體動力荷重(hydrodynamic loads)。因此，最高與最低海水位條件皆應評估，以探討是否存在不利的反應。

(5)地震荷重(Earthquake loads)

台灣位處環太平洋地震帶，地震頻繁。因此離岸風機設計須能承受地震荷重作用。耐震設計常以反應譜位移(Response spectral displacement, SD)、反應譜速度(Response spectral velocity, SV)及反應譜加速度(Response spectral acceleration, SA)予以考量。由於垂直向加速度有可能導致風機塔柱發生挫屈(Buckling)，因此需特別加以評估。至於若地震引發海嘯，此部分可被接受的設計是採用該區域水深條件下之最大可能的海水波浪高度進行設計(DNV-OS-J101)。

3.7 疲勞破壞檢覈

風機結構於其生命週期期間，承受反覆之風與波浪的衝擊，其結構材料，尤其是結構接合節點，將產生疲勞現象而導致破壞。設計中對於鋼結構材料疲勞特性檢覈一般皆採經驗法則設計，包括S-N曲線(應力範圍與循環次數關係)與Miner法則，疲勞檢覈流程如圖七所示。



圖七 疲勞檢覈計算流程

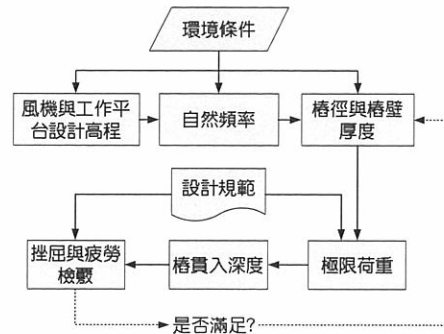
考慮風機結構生命週期所有荷重作用下之應力反應，可求得大量應力時間序列，將應力變化數量 $n_i$ 與對應應力範圍等級 $S_i$ 轉化成格，再透過S-N曲線對每個 $S_i$ 取相關最大容許

應力變化數 $N_i$ ，最後由式(3)Miner法則檢覈疲勞破壞。

$$D_{fat} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} < 1 \dots \dots \dots (3)$$

四、大口徑單樁基礎之簡化設計流程

大口徑單樁基礎(圖二)為目前國際上採用最廣之離岸風機基礎型式，圖八為簡化設計流程，其簡化分析模式之步驟說明如后。



圖八 大口徑單樁基礎設計流程

4.1 設計高程

首先決定工作平台與轉子(Hub)高程，參照圖二，工作平台為轉接段頂端，並為支撐結構與風機塔柱結合點，故其高程非常重要。轉子高程為風力計算依據，且為簡化之風機結構自然頻率重要影響因子。基樁樁頂高程設定在最低潮汐位置(LAT)加上0.5公尺；平台高程為LAT、潮差、暴潮、空氣間隙(Air gap)與靜海水面以上最大浪高之總和；轉子高程為平台高程、風機葉片空隙與葉片旋翼半徑的總和。本項設計高程高度依賴經驗與設計者的設計理念，故並非標準計算方式。

4.2 支撐結構自然頻率

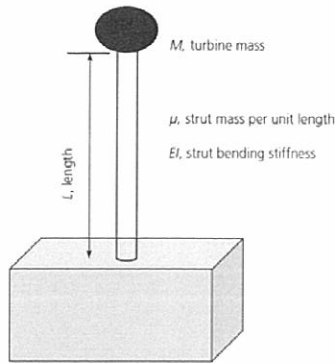
支撐結構自然頻率為離岸風機動態反應之重要參數，以簡化集中質量模式，整體風機結構可以圖九之結構模式表示。

第一自然頻率 $f_{nat}(Hz)$ 可由下式表示(Vugts,2000)

$$f_{nat}^2 \cong \frac{3.04}{4\pi^2} \frac{EI}{(M + 0.227\mu L)L^3} \dots \dots (4)$$

式中M為塔柱頂質量，μ為支撐結構單位長度質量，L為支撐結構長度(m)，EI為支撐結構彎曲勁度(N m<sup>2</sup>)。

自然頻率主要取圖五中Soft-stiff結構範圍，平均支撐結構彎曲勁度即可求得。



圖九 風機結構系統簡化模型(Arshad and O'Kelly, 2013)

### 4.3 幾何尺寸

支撐結構尺寸主要為樁徑與樁壁厚，首先由設定之自然頻率決定樁徑D<sub>MP</sub>，則轉接段直徑為樁徑加上兩倍轉接段壁厚與泥漿連接厚度之和，而樁壁厚與轉接段壁厚初始設定可取樁徑的1/80。

### 4.4 極限荷重

極限荷重係依據規範所定義之各種荷重計算方式，以不同之組合形式臚列各種荷重狀況。表二係依據DNV規範所列5種基本荷重回歸週期組合，其中不考慮浮冰作用。

表二 必須分析之五種基本荷重組合

外力組合	海水位	風力	波浪	海流
1	50年	50年	5年	5年
2	50年	5年	50年	5年
3	50年	5年	5年	50年
4	MWL	5年	-	5年
5	MWL	50年	-	5年

註:MWL 平均海水面高程

### 4.5 基樁貫入深度與穩定性

基樁貫入深度係由樁與周圍地層互制之軸向與側向力作用下之穩定性決定，離岸風機大口徑單樁基礎一般由側向穩定性控制。樁-土側向穩定性互制分析中p-y曲線扮演極為重

要之角色，設計規範中皆有定義不同地質條件採用之p-y曲線模式。透過迭代運算過程調整基樁貫入深度及勁度，直至求得符合設計安全需求之最佳尺寸。

### 4.6 p-y曲線參數推求

#### 1. 現地樁載重試驗

利用現地樁載重試驗，在試驗樁身各個部位裝設應力、應變感測器，推求樁體於各土層受力之變形行為，進而估計各土層等效土壤彈簧之非線性行為，作為數值模擬之依據。此法之優點為直觀，所求取之結果直接反應樁身受行之行為，為最佳之參考，但現地樁載重試驗費用偏高，且側向力通常由較表層之土層承受，較深層之土層通常受力較小，無法推求完整之受力變形曲線。

#### 2. 土壤/岩石孔內變形儀(Pressuremeter)

各品牌之土壤/岩石孔內變形儀設計雖略有差異，但其均係利用現地鑽探時之鑽孔，以特製之封塞器置於試驗區段，在封塞器內加壓，記錄其各壓力下徑向變形或體積變化量，進而推求受壓與變形性間之關係。其結果可反映現地應力下之變形行為，且可求取較深土層/岩層之完整變形曲線。另亦可透過重複加載-卸載行為，求取反覆荷重下之弱化曲線，為實務上最推薦之方法(Yang et al., 2010)。

#### 3. 應用試驗室試驗結果藉力學理論推求

如前述方法均不可得時，最基本方法係利用試驗室單壓、三軸、直剪等試驗之原始資料，藉力學原理推求p-y曲線行為，惟應用此法時須注意各種試驗室試驗之邊界條件，並須針對現地應力狀況，對引用之試驗結果進行適當之調整。

### 4.7 挫屈與疲勞檢覈

挫屈檢核分為整體樑式挫屈與局部殼式挫屈兩種模式，此於鋼結構設計中皆已有相關規範定義與計算方法。樑式挫屈主要檢覈基樁於海床面深度之臨界面應力。

## 五、大口徑單樁基礎於側向反覆荷重下之弱化行為

### 5.1 設計分析現況

離岸風機支撐結構與陸上風機支撐結構最大之差異為離岸風機基礎將持續受到風機運轉、風力、波浪、潮汐等長期反覆側向荷載及地震之短期反覆側向荷載組合作用，若為大口徑單樁基礎，這些側向荷載將使風機基礎逐漸傾斜，當傾斜量超過安全基準時，風機之正常營運即可能產生問題。因此，側向反覆荷載引致之基礎傾斜為影響大口徑單樁基礎離岸風機運轉壽命之關鍵控制因素。

根據以往p-y曲線模式經驗應用於離岸樁基礎設計為外插分析，且並未完整考慮下列設計問題(Achmus et al. 2005, LeBlanc et al. 2010a)：

1. 目前設計規範皆源自於細長或柔性樁的經驗，當樁徑增加至4~6公尺時，則相較於以往經驗屬剛性樁，尤其當基礎地層為砂土時，其樁-土壤互制行為更與柔性樁不同。

2. 反覆載重下之p-y曲線分析法原係評估側向極限載重，而對於設計上遭遇因長期反覆載重造成的單向累積轉角與勁度弱化並未妥善考慮。

3. 目前採用之p-y曲線模式並未考慮基樁施工因素、反覆載重外力特性與反覆載重循環次數。

## 5.2 累積轉角評估

基礎所受長期側向反覆荷重產生的載重循環次數可能達數十萬甚至高達數百萬次，但試驗所做的載重循環次數可能相當有限，故必須有更嚴謹的評估模式，方能掌握更為精確的樁結構行為反應。LeBlanc et al.(2010b)提出長期累積轉角的評估方法與計算流程，採用類似Miner法則，累加各載重循環所產生之轉角增量，檢核其是否超過樁頂容許轉角。目前此法尚處驗證研究階段，需要更多大口徑樁的試驗或案例資料，以確定評估結果的準確性。國際上大部分既有設計規範目前尚未對此提出建議之評估方法，僅德國聯邦海洋與水道署之BSH規範提出指引建議計算方法(BSH, 2010)。

## 六、結論

雖然離岸風力發電單位電力之投資成本約為陸域風力的兩倍以上，相關海事工程施工的困難程度遠大於陸域工程數倍，但因其具有

不受地形影響的穩定風場與較小的開發阻力，故仍為未來再生能源發展的趨勢。

離岸風力基礎設計技術相關的分析、設計程序與規範可參考的不多，故須仰賴更多的案例經驗，惟其發展目前仍為進行式，主要因為開發商對於單一機組額定容量「大」的需求，導致基礎荷重不斷增加；另對於風場開發則不斷朝深水區邁進，導致不同基礎型式的研究成為離岸風力基礎工程研究的顯學。

本文所述設計程序與分析方法並非標準，必須依據個案所訂設計標準，與設計者自身之設計理念而定，然本文最主要目的係希望藉由歸納的淺見，讓國內地工界對於離岸風力基礎工程設計有一初步的了解，並激發工程師對於離岸大地工程的興趣與相關課題的探討。

## 參考文獻

- Achmus, M., Abdel-Rahman, K., and Peralta, P. (2005) "On the Design of Monopile Foundations with respect to Static and Quasi-Static Cyclic Loading." Copenhagen Offshore Wind 2005.
- Arshad, M. and O'Kelly, B. C., (2013) "Offshore wind-turbine structures: a review" Energy, Vol.166, EN4, pp.139-152.
- BSH (2010). Guidance for use of the BSH standard „Design of Offshore Wind Turbines, Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH), Hamburg and Rostock, Germany.
- Det Norske Veritas (DNV): DNV-OS-J101 (2014), Design of offshore wind turbine structure.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2005): IEC6400-1: Wind turbines – Part I, Design requirement.
- LeBlanc, C., Houslyby, G. T. and Byrne, B. W., (2010a) "Response of stiff piles to long term cyclic loading." Géotechnique, Vol.60, No.2, pp. 79-90.
- LeBlanc, C., Byrne, B. W. and Houslyby, G. T., (2010b) "Response of stiff piles to random two-way lateral loading." Géotechnique, Vol.60, No.9, pp. 715-721.
- Ryu, M. S., Kang, K. S. and Lee, J. S., (2012) "A Suggestion for the Foundation Type of Offshore Wind Turbine in the Test Bed on the Basis of Economic and Constructibility Analysis." Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 17-22.
- Tempel, J. V., (2006) "Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines. PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- Tong, W., (2010) Wind Power Generation and Wind Turbine Design. WIT Press, Southampton, UK.
- Vugts, J. H., (2000) "Considerations on the dynamics of support structures for an OWEC", Section Offshore technology, Delft University of Technology, Netherlands.
- Yang, K., Liang, R., and Nusairat, J. (2010) "p-y Curves for Rock and Intermediate Geomaterials Using Pressuremeter Tests." Art of Foundation Engineering Practice: pp. 717-732.