

# 離岸風機單樁基礎支撐結構受載重反應 數值分析

胡宣德、王俊堯、蘇峰堅、郭思伶

國立成功大學土木工程系

## 摘要

隨著科技不斷進步，各國對能源需求不斷增加，但傳統能源產生的環境問題難以解決，各國莫不致力於尋找新的替代能源，其中相對低汙染的風力發電為世界積極發展的綠能之一。台灣擁有超過 2,000 平方公里的強風區域可供開發風能，但陸域風場因地狹人稠而逐漸飽和，離岸風場即成為最好的解決方法。相對於歐洲國家的離岸風場，台灣位處於地震帶，因此風機在結構設計階段的幾何尺寸設計、驗證技術開發及運轉中受震預警皆必須由支撐結構受震反應分析做評估依據。本研究使用有限元素分析軟體 Abaqus 分析在不同週期地震基底加速作用下離岸風機單樁基礎支撐結構之反應。為了提高分析結果之效率及準確性，將在數值模型中使用無限邊界元素以降低邊界效應的影響。在動態分析中，土壤莫爾庫倫破壞準則參數之施加，對分析結果影響甚大。此外較長周期的外力，會使基樁頂部的相對位移變大。

關鍵字：有限元素分析、無限邊界元素、單樁

## 1.前言

隨著科技不斷進步，各國對能源需求不斷增加，但傳統能源產生的環境問題如：核能發電的核廢料處理及火力發電的空氣汙染，而台灣的能源自產率低落，有 97% 的能源都必須仰賴進口[1]，消耗性能源的枯竭導致物價飛漲的時刻，發展替代能源的工作更是刻不容緩。在各國尋求新的替代能源以解決能源短缺的問題時，相對低汙染的風力發電為世界積極發展的綠能之一。

台灣年平均風速大於 4 m/s，且在沿海、高山及離島地區的強風區域超過 2,000 平方公里[2]，其中陸上風能因為人口密集及地勢之影響，可供開發的風能約為 100 萬千瓦以上；海上風能方面，則因台灣是海島地形，西海岸約有 200 萬千瓦以上，而澎湖群島更是年平均風速更超過 8 m/s，年滿載小時更可達 3,500 hr 以上，如果再包括離島陸域區域和離岸型風力發電，合計至少超過 300 萬千瓦的裝置容量[3]。

在歐洲離岸風力發電以發展十餘年，因其沒有颱風跟地震等的天然災害侵襲，所以可以放心利用離岸風力發電技術[4-6]，但台灣地處歐亞板塊及菲律賓板塊之交界，常常頻繁的發生地震，因此相較歐洲的風機設計，支承結構之受震反應分析更為重要。

本文使用非線性有限元素分析軟體 Abaqus[7] 分析在不同週期地震基底加速作用下離岸風機單樁基礎支撐結構之反應。數值分析中考慮土壤動態勁度與動態阻尼樁土互制效應。Abaqus 分析土壤受到外力作用時，所設定的邊界條件會造成邊界效應，為減少邊界效應的影響，須將土壤半徑加大至最佳樁土半徑比，但土壤半徑加大時會造成元素量的增加進而增加分析時間，為了提高分析結果之效率及準確性，將在數值模型中使用無限邊界元素以降低邊界效應的影響。

## 2. 研究方法

為探討離岸風機單樁基礎支撐結構受載重之樁頂位移變化，利用 Abaqus 建立樁土互制有限元素模型，模型由單樁支撐結構及土壤組成。考慮單樁支撐結構為均質線彈性材料，土壤為均質非線性材料，施加不同靜態外力於單樁基礎頂端，用以找出最佳樁土半徑比減低邊界效應對分析結果之影響。

將土壤簡化為相互獨立之彈簧與阻尼，用以模擬土壤與結構之互制作用，並使用莫爾—庫倫破壞準則，使其更接近真實土壤之材料性質。使用無限元素及有限元素建立樁土互制無限元素模型，將其受靜態載重作用分析結果和有限元素模型所得之結果相比。施加不同頻率之動態外力於基礎底端，探討不同外力頻率對單樁頂部位移之影響。但本研究尚未考慮海水及風力等外力可能造成之互制效應。

### 2.1 元素選擇

有限元素將採用六面體實體元素，因其對於造型規則之結構能保持元素外型穩定，不會有過大的歪斜與扭曲，防止產生妨礙分析收斂之銳角或鈍角，且可方便網格劃分與提高分析精度及改善元素接觸分析時的收斂情況。在六面體元素中常見的元素為 C3D8、C3D8I、C3D8R 及 C3D20R[7]。為避免產生剪力閉鎖，因此應採用降階積分之 C3D8R 或 C3D20R 元素，但本研究將採用無限元素來分析，因此考慮無限元素及有限元素節點之連續性，故採用一階元素 C3D8R 作為分析元素。

分析無限域問題時，為求解方便常忽略影響過小之無限遠處結構，但將造成邊界條件設定無法完全模擬真實情況，並可能在進行分析時，邊界網格反射多餘能量使其進入分析區域，進而影響分析結果，此種現象即為邊界效應，此效應會影響分析結果之精確性。透過使用無限元素(infinite element)進行分析即可避免邊界效應產生，也可大幅減少為模擬無限域而使用之大量有限元素，進而縮短運算時間，因此在外圍及底層之土壤皆採用無限元素 CIN3D8。

為提供合理的無限域之解，無限元素模型受外力作用時，需指定其極點位置。以三維線性無限元素為例，其元素節點組成為四條從極點往軸向延伸

之線段，每條線段上各有兩個節點，其一需位於無限元素及有限元素之交界(node finite)，另一節點則需位於往無限域方向之延伸線段上(node infinite)如圖 1 所示。

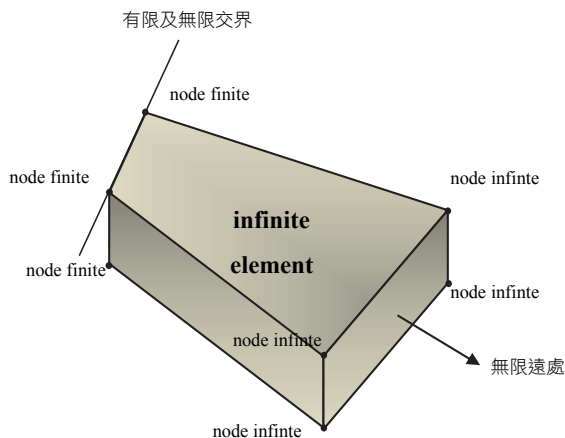


圖 1 無限元素節點設定

### 2.2 材料性質

風機基礎模型由單樁支撐結構及土壤組成，其中單樁支撐結構常為直徑 2 至 5 m 的大口徑鋼管，因此本研究採用 ASTM A36 鋼作為單樁基礎的材料，其抗拉強度為 400~550 N/mm<sup>2</sup>，楊氏模數(Young's modulus)為 200 GPa，密度為 8 t/m<sup>3</sup>，柏松比(Poisson's ratio)為 0.3，Abaqus 鋼材料參數設定如表 1 所示。

工程上常用土壤彈簧與阻尼來簡化分析結構物與土壤的互制行為，此法將結構物周圍土壤簡化成相互獨立之彈簧與阻尼，用以模擬土壤與結構之互制作用。而台灣風況良好之離岸風場多位處西部沿海，以彰濱工業區為例，其地質可歸類於砂質土壤[8]，因此本研究採用粉質砂土做為單樁基礎支撐結構土壤所使用之材料，其楊氏模數(Young's modulus)為 0.02 GPa，密度為 1.75 t/m<sup>3</sup>，柏松比(Poisson's ratio)為 0.25， $\phi$ 角為 31.5°。土壤阻尼比則是先建立無限元素土壤模型用以計算動態外力作用下有限元素土壤之剪應變，根據圖 2，Seed and Idriss [9]建議之砂土及礫石阻尼比，可得土壤受動態基底外力作用下之土壤阻尼比，在本研究中土壤阻尼比為 5%。Abaqus 有限元素土壤材料參數設定如表 2 所示，無限元素土壤材料參數設定如表 3 所示。

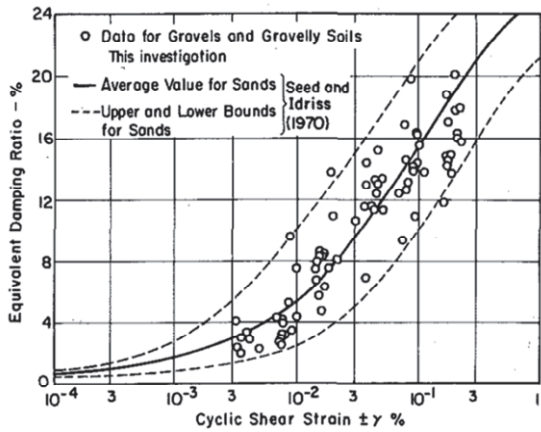


圖 2 砂土及礫石之阻尼比(Seed and Idriss, 1986)

表 1 鋼材料性質

Property	Value in metric unit
$E_{\text{steel}}$ (GPa)	200
$\rho_{\text{steel}}$ ( $\text{t/m}^3$ )	8
$\nu_{\text{steel}}$	0.3

表 2 有限元素土壤材料性質

Property	Value in metric unit
$E_{\text{soil}}$ (GPa)	0.02
$\rho_{\text{soil}}$ ( $\text{t/m}^3$ )	1.75
$\nu_{\text{soil}}$	0.25
Damping (%)	5
$\Phi(^{\circ})$	31.5
c	0.1

表 3 無限元素土壤材料性質

Property	Value in metric unit
$E_{\text{soil}}$ (GPa)	0.02
$\rho_{\text{soil}}$ ( $\text{t/m}^3$ )	1.75
$\nu_{\text{soil}}$	0.25
Damping (%)	5

### 2.3 模型設置

樁土互制有限元素模型其模型尺寸為：基樁上部結構  $L_s$  長度為 80m，下部結構  $L_f$  長度為 40m，單樁直徑  $R$  為 2.5m，支承結構管壁厚度  $d$  參考 API (2000) [10] 之經驗公式為 0.03135m。為減少因邊界

效應可能產生之誤差，土壤直徑  $D_{\text{soil}}$  考慮為十五倍、三十三倍、六十倍、一百倍、兩百倍及三百倍樁徑六種尺寸，分別為 37.5m、82.5m、150m、250m、500m、750m。樁土交界處使用 tie constraint 為接觸條件。動態外力及靜態外力加載方向均為  $x$  方向，根據外力作用方向及幾何模型條件，分析模型可視為以  $x-z$  平面為對稱面之對稱，取其一半分析以減少計算分析時間。對稱面之邊界條件為  $y$  軸方向位移自由度為 0。考慮土壤於無限遠處之  $x$  方向及  $y$  方向轉角及位移皆為 0，於  $z$  方向則會受土壤自重之影響，側向之邊界條件為  $x$  軸與  $y$  軸方向位移自由度為 0。考慮土壤於底層之  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三方向轉角及位移為 0，底部之邊界條件於  $x$  軸、 $y$  軸與  $z$  軸方向位移自由度皆為 0。如圖 3 所示。

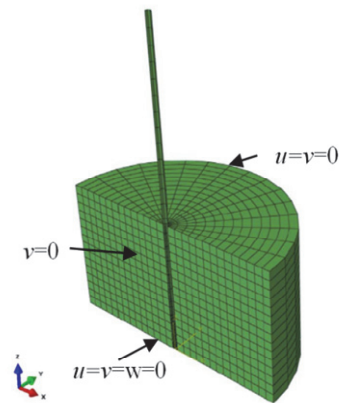


圖 3 樁土互制有限元素模型邊界條件

樁土互制無限元素模型之基樁上部結構  $L_s$  長度為 80m，下部結構  $L_f$  長度為 40m，單樁直徑  $R$  為 1.25m，支承結構厚度  $d$  參考 API (2000) 之經驗公式為 0.03135m，如圖 4 所示。根據 Abaqus theory manual [7]，無限元素土壤無法反應塑性變形，因為無限元素之材料參數只能設定線彈性材料參數而無法設定塑性材料參數。為避免無限元素土壤產生塑性變形，考慮有限元素土壤之直徑，使其受外力作用時之塑性變形範圍不大於有限元素土壤直徑。經由樁土互制有限元素模型測試，有限元素土壤直徑由六十倍樁土半徑比之樁土互制有限元素模型受動態基底外力作用時其塑性範圍影響區域所決定，由圖 5 可得，當有限元素模型受動態基底外力作用時，其土壤產生塑性變形範圍為樁徑之三十二倍，故此分

析中採用有限元素土壤直徑  $D_{fin}$  為 41.25m。土壤外圍及底層皆為無限元素，根據 Abaqus theory manual，無限元素須與交界處之有限元素於軸向之網格大小相同方能進行分析。有限元素軸向之網格大小由中心沿軸向外逐漸變大，最外圍有限元素軸向網格尺寸為 6m，因無限元素網格需和交界處之有限元素網格大小相同，故無限元素軸向網格大小  $D_{inf}$  為 6m。樁土交界處使用 tie constraint 為接觸條件。動態外力及靜態外力加載方向均為 x 方向，根據外力作用方向及幾何模型條件，分析模型可視為以 x-z 平面為對稱面之對稱，取其一半分析以減少計算分析時間。對稱面之邊界條件為 y 軸方向位移自由度為 0。根據 Abaqus example problems manual [7]，無限元素不需設定邊界條件。模型之邊界條件如圖 6 所示。

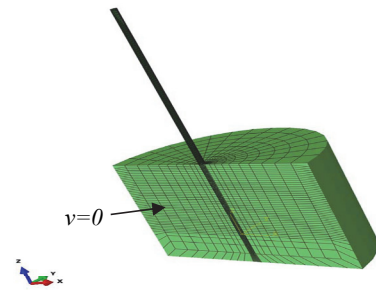


圖 6 樁土互制無限元素模型邊界條件

### 3.分析結果與討論

#### 3.1 基礎受靜態外力

靜態分析在於探討不同樁土半徑比之有限元素模型，其基樁頂部受不同靜態集中力作用後，基樁頂部 x 方向位移與土壤邊界應力之值，藉此找出受靜態外力之有限元素模型最佳樁土半徑比。

以靜態集中外力 1,000 N 及 5,000 N 觀之，施加集中外力 1,000 N 於基樁頂部，不同樁土半徑比之模型其 x 方向位移之值差距甚小，應力分析結果則是於一百倍樁土半徑比後漸趨於定值。若以土壤邊界應力之值來看，其土壤邊界應力於六十倍樁土半徑比後趨於定值，如表 4 所示。考慮基樁應力、位移及土壤邊界應力之分析結果，以一百倍樁土半徑比做為基樁頂端受 1,000 N 集中外力之有限元素分析模型。施加集中外力 5,000 N 於基樁頂部，除三十三倍樁徑比外，剩餘樁土半徑比之模型其 x 方向位移之值皆差距甚小，樁頂位移於兩百倍樁土半徑比後趨於定值，應力分析結果則是於一百倍樁土半徑比後漸趨於定值，如表 5 所示。其土壤邊界應力於兩百倍樁土半徑比後趨於定值，考慮基樁應力、位移及土壤邊界應力之分析結果，以兩百倍樁土半徑比做為基樁頂端受 5,000 N 集中外力之有限元素分析模型。

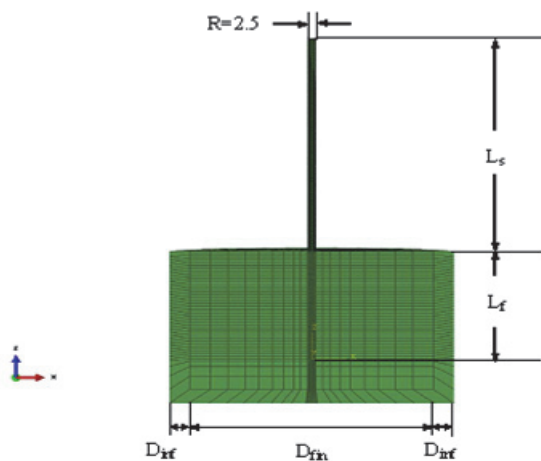


圖 4 樁土互制無限元素模型尺寸

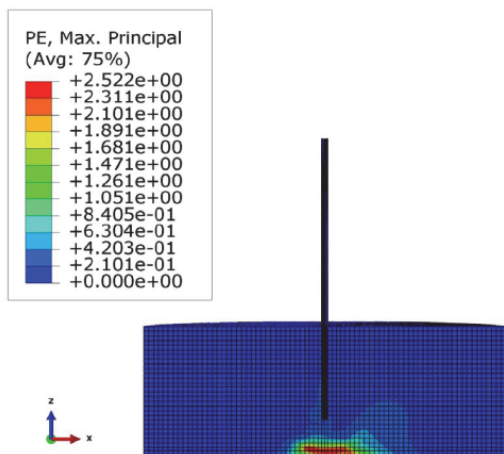


圖 5 樁土互制有限元素模型(60D)受動態外力含莫爾庫倫及阻尼塑性變形

表 4 施加靜態外力 1,000N 其邊界應力分析結果

樁土半徑比	邊界應力(kPa)
15	-2.08422E-02
33	-1.88317E-03
60	-1.86606E-04
100	-6.29739E-05
200	-6.10585E-06

表 5 施加靜態外力 5,000 N 其邊界應力分析結果

樁土半徑比	邊界應力(kPa)
33	-9.41587E-03
60	-9.33028E-04
100	-3.14870E-04
200	-3.05293E-05
300	-2.64115E-06

靜態集中外力 1,000 N 施加於基樁頂端，以一百倍樁土半徑比做為有限元素分析模型。靜態集中外力 5,000 N 施加於基樁頂端，以兩百倍樁土半徑比作為有限元素分析模型。比較有限元素及無限元素模型 x 方向之應力和位移，進而考慮使用無限元素模型取代有限元素模型進行分析，以避免邊界效應產生及縮短模型運算時間。由表 6 及表 7 可看出，受靜態集中外力作用時有限及無限元素模型之位移反應差異甚小，但兩者應力分析結果則有較為顯著之差異，推估此結果為邊界效應產生之反力所致，因無限元素無邊界效應產生之反力，故以無限元素所獲致之結果較正確。

### 3.2 基礎受動態外力

為簡化模型，不考慮地震波在土壤中傳遞之效應，將周圍土壤元素視為土壤彈簧。考慮動態外力為均部單頻動態外力，施加外力於單樁基礎底部。

使用無限元素進行分析不但能避免邊界效應產生影響分析結果，還可大幅減少為模擬無限域而使用之大量有限元素，進而縮短運算時間。由表 8 所得結果可知，進行動態分析時，使用有限元素模型進行分析其分析時間為 12,386 秒，而使用無限元素模型進行分析其分析時間可縮短至 699 秒，有限元素分析時間為無限元素的 17.7 倍，兩者運算時間相差甚巨。

進行動態分析時，樁頂輸入外力之歷時圖如圖 7 所示。當土壤為線彈性材料時，土壤阻尼之設置對其分析結果影響甚微，如圖 8 所示。考慮莫爾一庫倫破壞準則為砂土重要性質之一，故於樁土互制無限元素模型裡需設定有限元素土壤為考慮莫爾一庫倫破壞之塑性材料，其與線彈性土壤材料進行動態分析之結果差異甚大，如圖 9 所示。在動態外力

作用下，部分土壤材料會產生塑性變形，未設置土壤阻尼之塑性模型其位移量會有漸大之趨勢。此外，塑性材料未設置阻尼之模型分析所得之位移量過大需做適當修正使其合理，考慮模型之準確性後選用塑性材料及土壤阻尼比為 5% 之無限元素模型為後續分析之模型。

當外力週期逐漸變長，基樁頂部之 x 方向相對位移也會隨之逐漸變大。長週期外力施加時，其受行行為與靜力行為較為相似，如圖 10 所示。當外力緩慢且持續往同一方向施加，而土壤材料又進入塑性範圍時，其土壤會產生過大變形導致樁頂相對位移的增加，如圖 11 所示。

表 6 靜態分析之有限元素及無限元素模型 x 方向位移  
單位：公尺

外力	1,000 N		5,000 N	
	一百倍樁土半徑比有限元素模型	無限元素模型	兩百倍樁土半徑比有限元素模型	無限元素模型
樁頂 (z=120m)	0.012401	0.012305	0.060989	0.061525
地表 (z=40m)	1.3963E-04	1.3882E-04	6.9472E-04	6.9408E-04
樁底 (z=0m)	0	0	0	0

表 7 靜態分析之有限元素及無限元素模型 x 方向應力  
單位：kPa

外力	1,000 N		5,000 N	
	一百倍樁土半徑比有限元素模型	無限元素模型	兩百倍樁土半徑比有限元素模型	無限元素模型
樁頂	1.8921	1.5548	6.9657	7.7739
地表	-0.8391	-0.78817	-3.2611	-3.9408
樁底	-0.03044	-0.01992	-0.21011	-0.09959

表 8 動態分析有限元素及無限元素模型之 Abaqus 運算時間

	有限元素模型	無限元素模型
CPU time (sec)	12,386	699

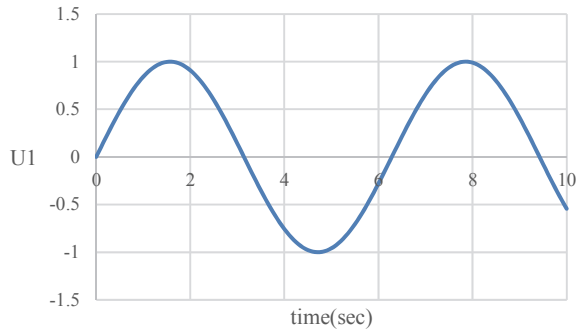


圖 7 輸入外力之歷時圖

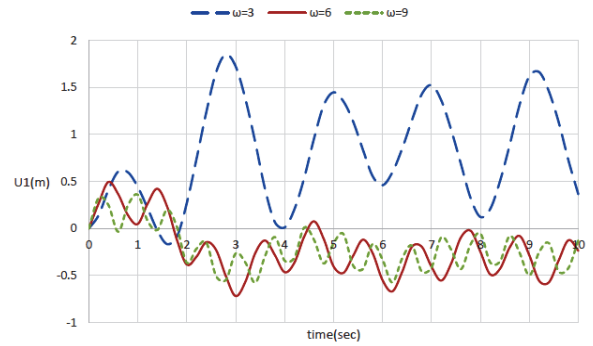


圖 11 施加短週期外力其樁頂 x 方向相對位移歷時圖

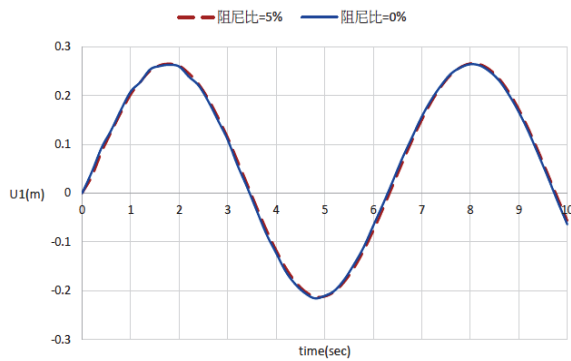


圖 8 土壤為線性材料，不同阻尼比之樁頂 x 方向相對位移歷時圖

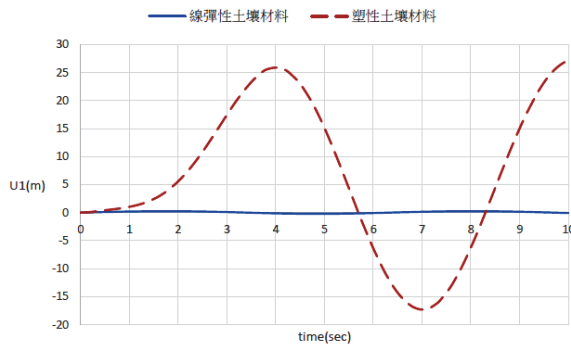


圖 9 不同土壤材料，阻尼比為 0%之樁頂 x 方向相對位移歷時圖

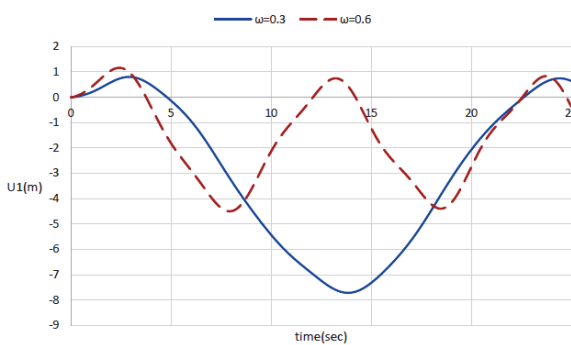


圖 10 施加長週期外力其樁頂 x 方向相對位移歷時圖

#### 4. 結論

地處地震帶之風場其基礎支承結構之受震反應分析為風場開發成敗之重要因素，應用本研究所建立之樁土互制無限元素模型，因邊界效應對於靜態分析之影響甚小，因此在靜態反應使用無限元素模型其效果並不顯著，但進行動態分析時使用無限元素模型取代有限元素模型進行分析，可以藉由使用無限元素達到防止邊界效應之發生，進而使結果更為精確，且無限元素也可減少整體模型之元素量並降低模型計算時間。

在使用動態分析時，當土壤為線彈性材料時，可以考慮忽略土壤阻尼，因土壤阻尼之有無對分析結果影響不大。於樁土互制無限元素模型需設定有限元素土壤為考慮莫爾一庫倫破壞之塑性材料時，其與線彈性土壤材料進行動態分析之結果差異甚大。此外，較長周期的外力，會使基樁頂部的相對位移變大。

#### 參考文獻

1. 葉泰和、陳秋平，風力機擷取風能比較分析，九三年節約能源論文發表會論文專輯，第 342~361 頁，2004 年。
2. 江懷德、呂威賢、羅聖宗、顏志偉，我國離岸式風力發電場發展之可行性評估，太陽能及新能源學刊，第八卷、第二期，2003 年 12 月。
3. 江懷德、陳美蘭，達成我國 2010 年風力發電目標之推動方案，風能應用研討會論文集，2004 年。
4. Chang, T. J., "Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan.", Renewable Energy 28, pp.851-871, 2002.

5. Saranyasontorn, K. and Manuel L., "Design loads for wind turbines using the environmental contour method.", 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 9-12, 2006.
6. Wang Y., Y. Xia and X. Liu, "Establishing robust short-term distributions of load extremes of offshore wind turbines.", *Renewable Energy* 57, pp.606-619, 2013.
7. Dassault Systèmes Corporation. SIMULIA Abaqus Analysis User's Manuals, Theory Manuals and Example Problems Manuals, Version 6.14, 2014, France.
8. 萬大土壤技術顧問有限公司, 「彰濱海域地質調查研究地質調查鑽探試驗分析工作」, 財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心, 2012。
9. Seed, H., Wong, R., Idriss, I., and Tokimatsu, K., "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils.", *J. Geotech. Engrg.*, Vol.112(11), pp. 1016-1032., 1986.
10. American Petroleum Institute (API), 2000. Recommended Practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms- working stress design. API Recommended Practice 2A-WSD (RP2A-WSD), 21st edition, Dallas.

### **Numerical Analysis of Supporting Structure for Offshore Wind Turbine on Monopile Foundation Subjected to External Loads**

Hsuan-Teh Hu, Chung-Yao Wang, Feng-Chien Su, Si-Ling Kuo

Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University

#### **Abstract**

As technology continues to progress, nations over the world increase demand for energy. Due to environmental problems caused by traditional energy

are difficult to solve, states is committed to looking for new alternative energy, wherein the wind power is the relatively low pollution of the green energy that nations over the world are developing actively. There is more than 2000 square kilometers of strong wind area in Taiwan for developing wind power. The offshore wind farm is the best solution for the land wind farm increasingly saturated. With respect to offshore wind farms in European, Taiwan is located in a seismic zone. The wind turbine must be evaluated by the basis of analysis of the seismic response of the support structure, for geometric dimensioning during structure designing, developing testing techniques and seismic alarm during operation in the structural design stage.

This research is applied Abaqus software, a tool for finite element analysis to analyze the reaction of monopole support structure of offshore wind turbines in the different period of acceleration of the earthquake basement. In order to increase the efficiency and accuracy of analysis result, infinite element will be used in numerical model to reduce the boundary effect.

In dynamic analysis, there is a great impact on the results of the analysis for the soil parameters of Mohr Coulomb failure criterion, and soil damping or not. Furthermore, the longer period of external forces, the relative displacement of the top of the foundation pile is larger.

Keywords: finite element analysis, infinite element, single pile