

離岸風機單樁基礎支撐結構受載重反應數值分析

胡宣德¹，蘇峰堅²，郭思伶³

國立成功大學土木工程系教授¹

國立成功大學土木工程系博士後研究員²

國立成功大學土木工程系碩士生³

摘要

近年世界各國為解決因傳統能源產生的環境問題正積極尋找新的替代能源，風力發電的低污染性為各國積極發展的重點替代能源之一。因陸域風場的飽和，風能技術發展較為成熟之歐洲各國逐轉往開發離岸風能。風機支撐結構受震反應分析為結構設計階段幾何尺寸設計、驗證技術開發及運轉中受震預警之評估依據。本研究應用非線性有限元素分析軟體 ABAQUS，分析離岸風機單樁基礎支撐結構受不同週期地震基底加速作用之反應。並應用無限元素於數值模型以提高分析之效率及準確性。土壤莫爾庫倫破壞參數之施加對動態分析影響甚巨，未考慮土壤動態阻尼與考慮土壤動態阻尼之分析結果差異甚巨。外力週期逐漸變長，基樁頂部之相對位移也會隨之變大。

關鍵字：風力發電、單樁基礎、受震反應、無限邊界元素

一、前言

目前世界各國正積極尋找新的替代能源以解決核能發電核廢料、火力發電空氣污染等傳統能源產生的環境問題。風力發電對環境的低污染性及低環境成本等特性使其成為各國積極發展的重點替代能源之一。但因陸域風場目前已趨近飽和，風能技術發展較為成熟之歐洲各國逐轉往開發離岸風能，並有部分風場已正式商轉。相對於陸域風場易造成的居民抗爭及噪音等問題在離岸風場所引起的爭議較小，且海域風況也較陸域穩定等種種原因，離岸風能的使用為目前風能開發的趨勢之一。

台灣西部海域為世界上優良風場之一，唯台灣的地理條件較特殊處為其位於歐亞板塊及菲律賓海板塊之交界，因此常有頻繁的地震發生，相較於風力發電發展較為發達的歐洲各國，支承結構設計之受震反應分析相對重要。

除了耐震技術的提升，耐震技術的驗證方法也是極為重要的流程。當地震外力施加於基礎底部時，該地震強度是否會因上部結構產生過大的反應進而影響到風力發電機的安全性及發電量的穩定性，基礎

受不同頻率之地震外力反應數值分析為本研究的研究重點。

本文應用有限元素分析軟體 ABAQUS，分析離岸風機單樁基礎支撐結構受不同週期地震基底加速作用之反應，單樁基礎支撐結構目前已廣泛應用於歐洲各大風場。數值分析考慮土壤動態勁度與動態阻尼樁土互制效應。為提高分析之效率及準確性，使用無限邊界元素於數值分析模型。土壤莫爾庫倫破壞參數之施加影響加速度反應甚巨，未考慮土壤動態阻尼與考慮土壤動態阻尼之加速度反應差距甚巨。

土壤在受到外力作用時，ABAQUS 分析軟體所設定之邊界條件會造成邊界效應的產生，因此須將土壤半徑加大至最佳樁土半徑比以減少邊界效應的影響，土壤半徑加大時會造成元素量的增加進而增加分析時間。因此使用無限邊界元素減少整體元素量進而縮短運算時間為本研究之目的。

二、有限元素模型

本研究為發展單樁基礎離岸風機支承結構受地震外力作用之反應數值模型。考慮單樁基礎埋置於土壤中，受到地震外力作用產生之加速度、速度及位移反應。本研究尚未考慮海水及風力等外力可能造成之互制效應。

考慮樁土互制之離岸風機受震反應數值模型，樁土互制有限元素模型其基樁上部結構 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) 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_{soil} 考慮為六十倍樁徑 150m。

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 1 所示。

考慮樁土互制之離岸風機受震反應數值模型，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。

根據 ABAQUS theory manual，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，故無限元素土壤無法反應塑性變形。建立樁土互制無限元素模型時需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。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 2 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。有限土壤元素其網格由中心沿軸向向外逐漸變大，用以避免相鄰之兩元素因其網格大小差異過大而影響分析結果。有限元素軸向之網格大小由中心沿軸向向外逐漸變大，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。

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，無限元素不需設定邊界條件。模型之邊界條件如圖 3 所示。

三、分析結果與討論

離岸風機支承結構設計為風場開發成敗之重要因素，尤其地處地震帶之風場其基礎支承結構之受震反應分析更為重要。本研究所建立之樁土互制無限元素模型藉由無限元素的應用以達到防止邊界效應之發生進而使結果更為精確。使用無限元素取代有限元素其優點為無限元素可避免邊界效應產生，進而提高模型計算之準確性，使用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。

比較受靜態集中力之樁土互制有限及無限元素模型分析結果，可得兩者受靜態力後樁頂 x 方向位移差異甚小，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分析時間。如表 4 所示。

邊界效應對於靜態分析之影響甚小，進行動態分析時，有限元素模型及無限元素模型兩者基樁頂部 x 方向位移反應相差甚巨。如圖 4 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 5 所示。考慮莫爾—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—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 7 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，其受力行為與靜力行為較為相似，如圖 9 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 10 所示。

四、結論與建議

離岸風機支承結構設計為風場開發成敗之重要因素，尤其地處地震帶之風場其支承結構耐震設計更加重要。

4.1 結論

支承結構受震反應受到結構阻尼及土壤阻尼，尤其以土壤阻尼及土壤彈簧之導入對於分析結果影響甚大。無限元素及有限元素之使用對於分析結果和時間影像甚鉅。

4.2 建議

本研究係配合我國離岸風場開發所進行之研究，本研究目前之材料性質以線性行為模擬，後續之研究期望以更符合材料之工程特性進行。

六 參考文獻

[1] Adhikari, S., and Bhattacharya, S. (2012) “Dynamic Analysis of Wind Turbine Towers on Flexible Foundations”, *Shock and Vibrations*, vol. 19, pp.37-56

[2] 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.

[3] Bhattacharya, S., and Adhikari, S. (2011) “Experimental Validation of Soil-Structure Interaction of Offshore Wind Turbines”, *Soil dynamics and earthquake engineering*, vol. 31, pp.805-816.

[4] Seed, H., Wong, R., Idriss, I., and Tokimatsu, K. (1986). ”Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils.”*J. Geotech. Engrg.*, Vol.112(11), pp. 1016-1032.

[5] Vugts, J. H. (2000) “*Considerations on the Dynamics of Support Structures for an OWEC*”, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, Section Offshore Technology .

[6] Zaaijer, M. B. (2006). “Foundation Modeling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines”, *Applied ocean research*, Vol. 26, pp.45-57.

七 表格

表 1 鋼性質

Property	Value in metric unit
E_{steel} (GPa)	200
ρ_{steel} (t/m^3)	8
ν_{steel}	0.3

表 2 有限元素土壤性質

Property	Value in metric unit
E_{soil} (GPa)	0.02
ρ_{soil} (t/m^3)	1.75
ν_{soil}	0.25
Damping(%)	0、5
ϕ ($^\circ$)	31.5
c (GPa)	0.1

表 3 無限元素土壤性質

Property	Value in metric unit
E_{soil} (GPa)	0.02
ρ_{soil} (t/m^3)	1.75
ν_{soil}	0.25
Damping(%)	0、5

表 4 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	1000N		5000N	
	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	0.0124 01	0.01230 49	0.0609 89	0.0615 247
地表	1.3962 6E-04	1.38816 E-04	6.9471 7E-04	6.9407 9E-04
樁底	0	0	0	0

表 5 動態分析有限元素及無限元素模型之 ABAQUS 運算時間

CPU time (sec)	有限元素模 型	無限元素模 型
		12386

九 圖形

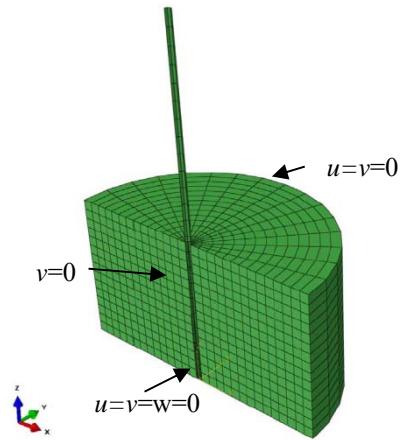


圖 1. 有限元素模型邊界條件

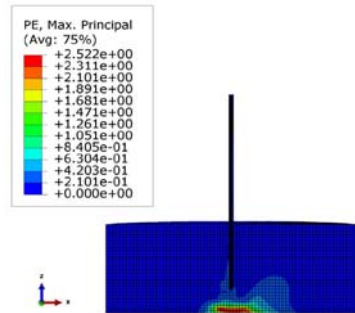


圖 2. 樁土互制有限元素模型(60D)受動態外力含莫爾庫倫及阻尼塑性變形

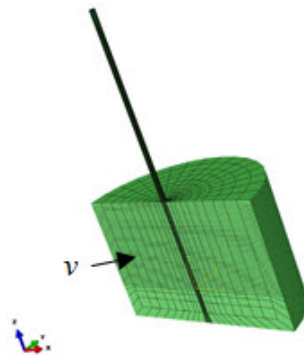


圖 3. 無限元素模型邊界條件

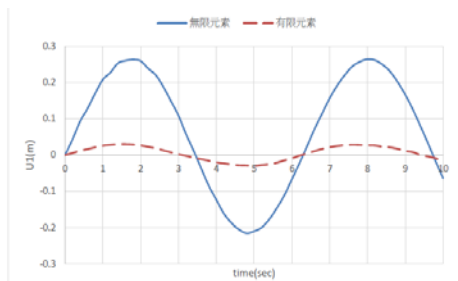


圖 4. 動態外力施加於樁頂之有限元素及無限元素模型樁頂 x 方向相對位移歷時圖

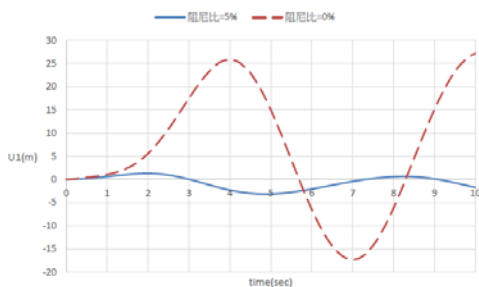


圖 8. 土壤為塑性材料，不同阻尼比之樁頂 x 方向相對位移歷時圖

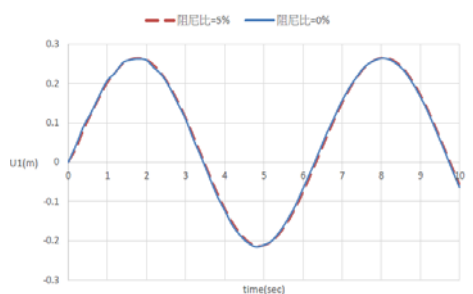


圖 5. 土壤為線性材料，不同組尼比之樁頂 x 方向相對位移歷時圖

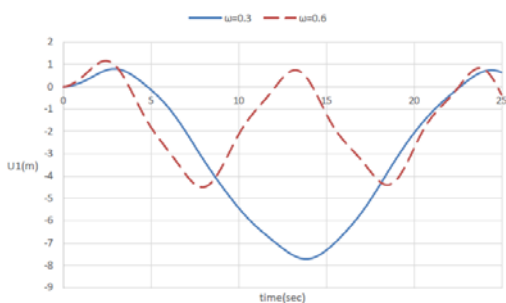


圖 9. 施加長週期外力其樁頂 x 方向相對位移歷時圖

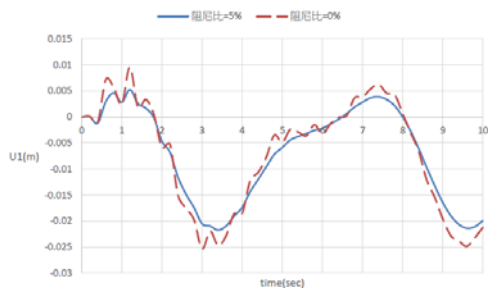


圖 6. 土壤為線性材料，不同組尼比之樁頂 x 方向絕對位移歷時圖

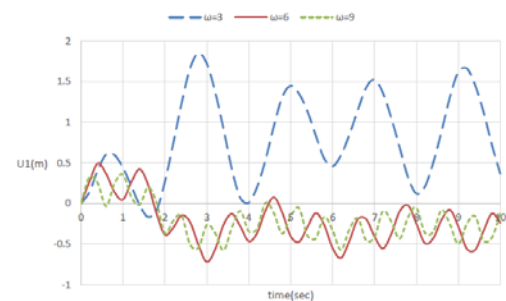


圖 10. 施加短週期外力其樁頂 x 方向相對位移歷時圖

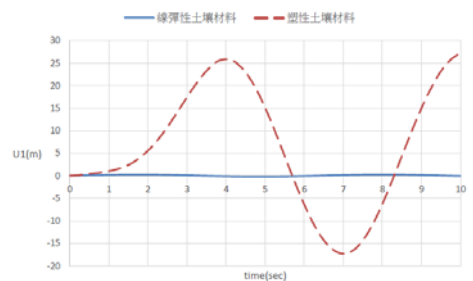


圖 7. 不同土壤材料，組尼比為 0% 之樁頂 x 方向相對位移歷時圖