

## 離岸風力支承結構受震反應數值模型開發

胡宣德<sup>1</sup>, 蘇峰堅<sup>2</sup>, 郭思伶<sup>3</sup>

國立成功大學土木工程系教授

國立成功大學水利及海洋工程系博士後助理研究員

國立成功大學土木工程系碩士生

### 摘要

歐洲已大量投入離岸風能之開發，相關之技術已日臻成熟，然而相關之技術無法全部應用於地處地震帶之風場，因此風機支承結構之抗震能力與受震反應為開發位處地震帶之風場重要之工作。本研究應用有限元素分析軟體 ABAQUS，建立考慮樁土互制之單樁基礎風機支承結構受震反應數值模型，支承結構及土壤分別考慮無阻尼及阻尼之影響。支承結構基礎受地震歷時作用，土壤阻尼影響支承結構基礎之受震反應，其中以加速度反應之影響較大，而速度及位移反應較小。結構無阻尼與阻尼對支承結構之受震加速度反應甚鉅。

關鍵字：風力發電、單樁基礎、受震反應

### 一、前言

目前世界各國正積極尋找新的替代能源以解決如天然資源耗竭、傳統能源產生環境汙染等問題。而其中，離岸風力發電為各國積極發展的重點替代能源之一。

陸域風場目前已趨近飽和，歐洲已逐漸開發離岸風能，並有部分風場已正式商轉。台灣西部為世界上優良風場之一，唯台灣的地理條件特殊，和風力發電發展較為積極的歐洲各國不同，台灣地處歐亞板塊和菲律賓海板塊交會地帶，支承結構設計之耐震能力不足，可能導致支承結構毀損。

風機支承結構設計除相關之設計方法外尚須通過相關之驗證流程，耐震驗證方法之開發，亦為開發離岸風場重要之工作，Seidel (2010)建議支承結構基礎之設計認證流程，如圖 1。

風機支承結構受外力作用之反應受到樁土互制效應甚鉅，已有部分學者投入風機支承結構樁土互制相關之研究 Adhikari & Bhattacharya (2012)[1]、Bhattacharya & Adhikari (2011)[3]、Vugts (2000)[5] 及 Zaaijer(2006)[6]。本研究係為發展單樁基礎支承結構受到地震作用之反應有限元素數值模型。考慮單樁支承結構在地震外力作用下，不同土壤阻尼及結構阻尼對支承結構之影響。

### 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，如圖 2 所示。為減因邊界效應可能產生之誤差，土壤之直徑  $D$  為 40 倍樁徑，為 100m。支承結構基礎總長度為 120m，上部結構  $L_s$  為 80m，基礎  $L_f$  為 40m，支承結構厚度  $d$  參考 API(2000)[2] 之經驗公式為 0.03135m。

應用有限元素分析軟體 ABAQUS 建立數值模型，根據外力作用及幾何條件，分析模型簡化為單軸對稱，故取其一半以減少計算的步驟及時間。對稱面之邊界條件為  $y$  軸方向位移為 0。側向之邊界條件於  $x$  軸與  $y$  軸方向位移為 0。底部之邊界條件於  $x$  軸、 $y$  軸與  $z$  軸方向位移為 0。

本研究建立之數值模型考慮樁土互制效應。為使模型之準確性提高，支承結構基礎除其彈性模數與柏松比外，分別考慮支承結構基礎之阻尼比及土壤之阻尼比，支承結構基礎之阻尼比  $\beta$  分別為 0%、2.5%、5% 及 7.5%。土壤阻尼比應有限元素分析軟體 ABAQUS

建立受地震外力數值模型，根據外力作用及幾何條件，分析模型可視為軸對稱，故取其一半以減少計算的步驟及時間。對稱面之邊界條件為 y 軸方向位移為 0。側向之邊界條件於 x 軸與 y 軸方向位移為 0。底部之邊界條件於 x 軸、y 軸與 z 軸方向位移為 0。利用模型計算出每個時間增量土壤最大剪應變及最小剪應變，參考 Seed & Idriss (1970)建議之利用土壤阻尼和剪應變的關係，如圖 3，得土壤阻尼比約為 5%。

支承結構之材料性質，如表 1。土壤之材料性質如表 2。

### 三、分析結果與討論

本研究為開發考慮樁土互制效應單樁基礎離岸風機支承結構受到地震外力作用之反應數值模型。離岸風機支承受受到 x 方向之地震外力作用，考慮不同的土壤及結構阻尼所產生加速度、速度及位移反應。如前述，本研究分別考慮土壤為無阻尼及 5% 阻尼比，支承結構阻尼分別為 0%、2.5%、5% 及 7.5%。土壤無阻尼，支承結構之加速度反應，如圖 4 所示。土壤無阻尼，支承結構之速度反應，如圖 5 所示。土壤無阻尼，支承結構之位移反應，如圖 6 所示。土壤阻尼比 5%，支承結構之加速度反應，如圖 7 所示。土壤阻尼比 5%，支承結構之速度反應，如圖 8 所示。土壤阻尼比 5%，支承結構之位移反應，如圖 9 所示。

綜合上述之分析結果，土壤無阻尼之支承結構最大加速度反應約為 2.5g。考慮土壤 5% 之阻尼，支承結構最大加速度反應約為 0.16g。土壤無阻尼之支承結構最大速度反應約為 2.1m/s。考慮土壤 5% 之阻尼，支承結構最大加速度反應約為 0.6m/s。土壤無阻尼之支承結構最大位移反應約為 0.9m。考慮土壤 5% 之阻尼，支承結構最大位移反應約為 0.85m。

土壤阻尼對結構物受震反應之影響度依序為加速度，再者為速度反應，對於位移反應之影響最小。結構阻尼對於支承結構之反應亦呈現相同之趨勢。

本研究為觀察離岸風機支承結構受地震作用，支承結構各高程之反應，分別將上部支承結構之頂端、中間及底部之受震加速度、速度及位移反應繪製於圖 10、圖 11 及圖 12。於圖 10 之加速反應中，約 3.8 秒處之支承結

構中間之加速度反應大於頂端之加速度反應，於結構設計時，須詳細考慮中間段之強度設計。速度及位移反應並無特殊之反應發生。

### 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，尤其以土壤阻尼之導入對於加速度之反應影響甚大。土壤阻尼之導入對於位移反應之影響甚小。結構無阻尼與阻尼對於加速度反應之影響甚鉅。

#### 4.2 建議

本研究係配合我國離岸風場開發所進行之研究，為減少邊界效應之影響，本研究以加大邊界方式以提高模型之正確性，期望能以更符半無限邊界之方式建立數值模型。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] Zaaier, M. B. (2006). " Foundation Modeling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines", *Applied ocean research*, Vol. 26, pp.45-57.

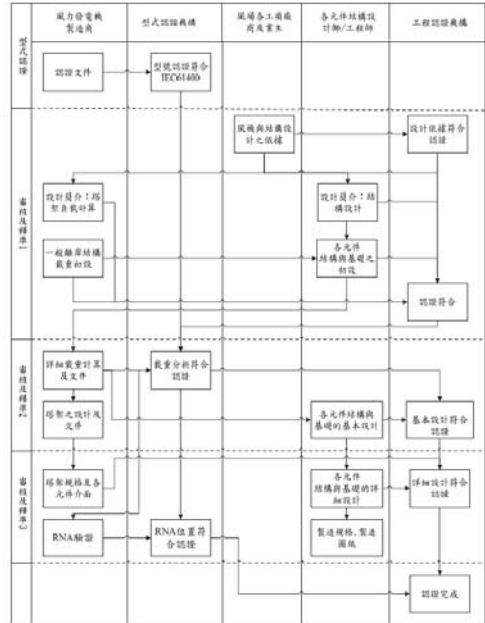


圖 1. 支承結構設計認證方法(Seidel, 2010)

七 致謝

本研究感謝能源國家型科技計畫離岸風力主軸計畫-C2 離岸風機支承結構減震設計與振動預警系統開發 (I) NSC 102-3113-P-006-008 計畫經費支持。

八 表格

表 1 鋼性質

楊氏模數 (GPa)	200	比重 g/cm <sup>3</sup>	8	
柏松比	0.3			
阻尼比 (%)	0	2.5	5	7.5

表 2 土壤性質

楊氏模數 (GPa)	0.02	摩擦角 (°)	31.5
柏松比	0.25	比重 Mg/m <sup>3</sup>	1.75
阻尼比 (%)	0		5

九 圖形

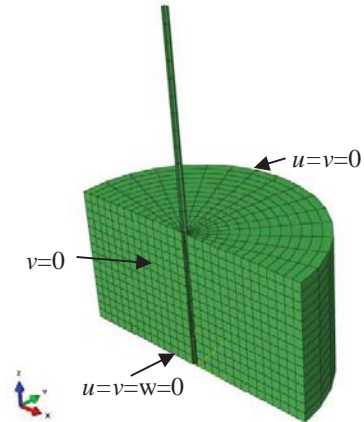


圖 2. 數值模型邊界條件

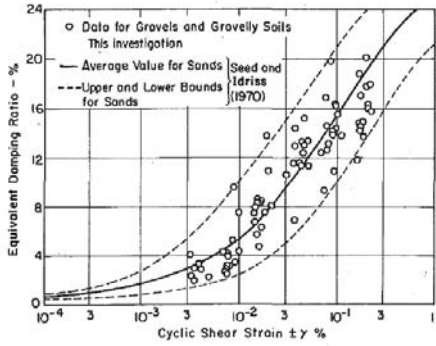


圖 3. 土壤阻尼比與剪應變關係(Seed & Idriss, 1970)

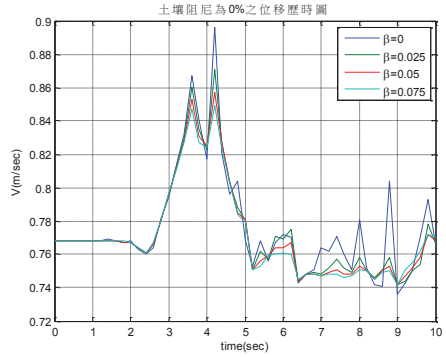


圖 6. 土壤阻尼 0% 位移反應歷時

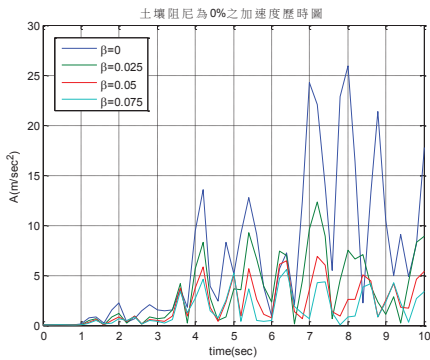


圖 4. 土壤阻尼 0% 加速度反應歷時

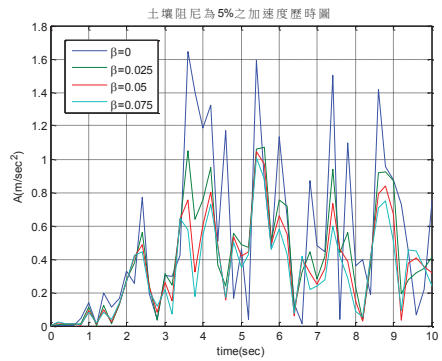


圖 7. 土壤阻尼 5% 加速度反應歷時

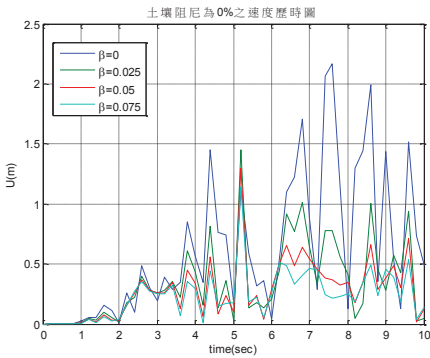


圖 5. 土壤阻尼 0% 速度反應歷時

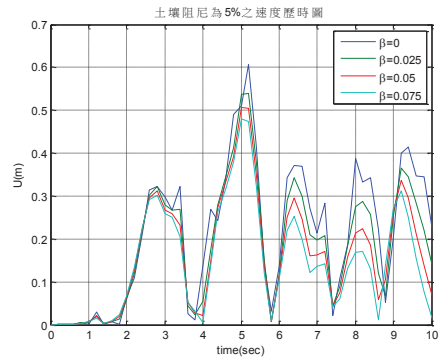


圖 8. 土壤阻尼 5% 速度反應歷時

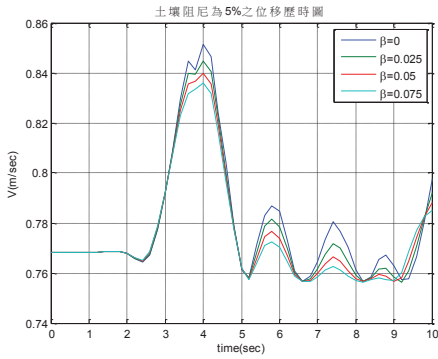


圖 9. 土壤阻尼 5%之位移反應歷時

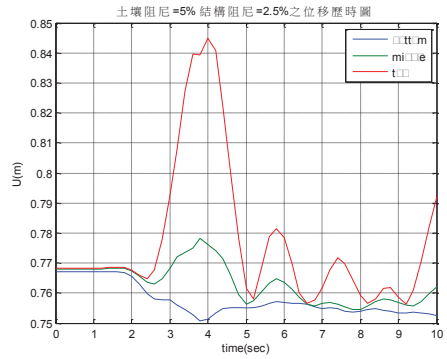


圖 12. 上部支承結構位移反應，土壤阻尼 5%，結構阻尼 2.5%

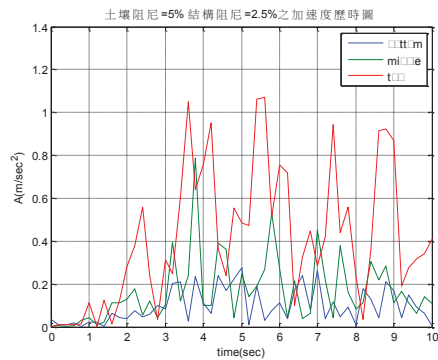


圖 10. 上部支承結構加速度反應，土壤阻尼 5%，結構阻尼 2.5%

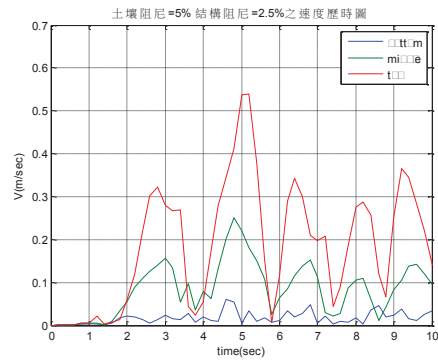


圖 11. 上部支承結構速度反應，土壤阻尼 5%，結構阻尼=2.5%基