

離岸風機結構與樁土互制之有限元素自振分析

胡宣德、葉鼎盛、楊騏
國立成功大學土木工程系

摘要

離岸風力發電為目前最具代表性之再生能源之一，其低汙染、低成本、對環境之低衝擊性成為各國積極發展的重要能源。但因離岸風場存在許多環境負載且需考量與歐洲不同之地質條件與受震反應。除對離岸風機結構做基本結構設計以及耐震技術考量，於結構受震時之最大反應亦需有較精確之模擬，避免結構受外在刺激時達共振反應，因此研究中將分析離岸風機結構之自然振動頻率。

本研究採以ABAQUS有限元素軟體進行樁土互制高度非線性行為分析，模擬離岸風機結構之自然振動頻率。藉由美國石油協會(API)所建議之土壤反力及位移關係轉換為土壤彈簧進行簡易模擬，藉此求得離岸風機結構之自然振動頻率。而為驗證土壤彈簧之可行性，研究中將採以有樁土互制之有限元素模型與土壤彈簧模型對土壤反力以及位移進行分析，最後以風機結構於樁土互制行為下之無限元素混合模型與土壤彈簧模型之自然振動頻率比較，以作為結構設計之用。

關鍵字：離岸風機、無限元素、自振頻率、土壤彈簧

ABSTRACT

In recent years, nations over the world are actively looking for new alternative energy due to environmental problems caused by traditional energy, and wind power is one of the alternative energy that many countries are developing actively. As the farms on land have gone developed, European countries whose wind power techniques are more developed began to develop offshore wind power. In addition to consider the structure design and seismic design of offshore wind turbine structures, the maximum response also need to have more accurate simulation during earthquake. To avoid the resonance of the structure, we will analysis the natural frequency of the offshore wind turbine.

In this study, the Abaqus finite element program is used to calculate the fundamental frequency of offshore wind turbine supporting structure considering the nonlinear behavior of soil. In order to study the soil-structure intersection, the soil is modeled by infinite element. The numerical results are tested against the empirical equation proposed by API and good agreements are obtained.

Keywords: offshore wind turbine, infinite element, natural frequency, soil spring

一、研究動機與目的

自工業革命以來，因能源與經濟互相的互相帶動下，致使能源大量消耗，其中人類主要仰賴的能源為傳統不可再生資源，近年來，在全球發展低碳經濟的背景下，隨著日益嚴重的電力使用，因此，目前世界各國

正積極尋找新的替代能源代替傳統的高耗能、高汙染資源所產生的問題。新能源的方向為再生能源，主要有風力、水力、太陽能.....等，而風力發電對環境的低汙染性及低成本等特性已成為各國積極發展的重要能源之一，但因風力發電轉換效率並不能將

所有動能加以轉換，其效率僅約20%~30%，因此需要穩定風場的區域才能有效率地藉由風力發電產生能源，其中台灣位於季風地區，蘊含豐富的風能資源，根據4C Offshore (2014)所做的世界風速資料統計，台灣的風力場址條件相當優渥，如**錯誤！找不到參照來源。**，因此我國自民國90年起積極推展風力發電，迄民國102年底止已有相當輝煌的成果。

台灣地狹人稠且山地佔本島面積居多，陸域風力場址有限，且陸域風場所造成的噪音、光影及居民抗爭等問題成為考量因素，因此離岸風場的開發成為取代陸域風場的解決途徑，唯台灣的地理條件較為特殊，於欲開發西部沿岸的地層條件主要為軟弱砂黏土所構成，且因台灣地理位置為環太平洋地震帶，位於歐亞板塊與菲律賓板塊交界處，屬於地震頻繁區域，與目前風力發電較為發達且不具有軟弱地層及地震影響的歐洲各國相較之下，對於風機設計上需有較嚴苛的技術，其支承結構設計相對重要。

而在離岸設置風機的情況下，所產生的環境載重亦會有不同種類的頻率，隨著風機結構物與外在環境載重亦或地震之輸入頻率重合時，結構物的反應將產生遠大於元所估計的程度，即為共振現象。若風機結構產生共振，致使風機在過大的外在刺激下超過負荷而損毀，其維修經費甚高，因此設計上必須避免此現象。而為避免離岸風機結構與外在之輸入頻率達共振之現象，本研究將以此作為探討之目的。

二、研究方法

離岸風機結構於考慮到工址及環境條件等不同的情況下所產生不同之樁土束制條件，將有可能影響風機結構之自然振動頻率，因此本研究試以單一土壤條件簡化模擬離岸風機結構之自然振動頻率大小，作為複雜土層條件下之探討。

本文採以美國石油協會(API)所建議之非線性土壤行為轉換為土壤彈簧之性質，藉由模態分析求得離岸風機結構之自然振動頻率，並以非線性動力分析作為模態分析的正確性。而雖然美國石油協會(API)所建議的經驗公式乃為蒐集許多學者依現地試驗所得的回歸公式，但土壤彈簧的基本假設條件認定彈簧間為獨立不相關，因此本研

究將藉由有限元素軟體 ABAQUS 能對土壤之非線性效應以及樁基礎與土壤之高度非線性行為進行模擬，對離岸風機結構之自然振動頻率進行分析。

考量土壤之高度非線性行為，本研究將先以有限元素之樁土互制模型與土壤彈簧模型於靜態外力的情況下，比較其中差異以求得其合理與其勘用性。再由結構受動態外力之情況，藉由無限元素模型之無限域模擬情況求得離岸風機結構之自然振動頻率，以避免於有限元素之樁土互制模型中，因動態外力所產生的能量波傳至人工斷面邊界之情況而造成自然振動頻率求解失真的情況。

三、有限元素模型

樁基礎承受載重時，主要可分為側向荷載以及軸向荷載傳遞至土壤，藉由土壤所產生之反力以及基樁之變位行為達到平衡，而當樁基礎受力時，樁對土壤所產的推擠行為，會造成樁土介面間有滑動甚至分離的現象，加上土壤材料本身為非線性材料，與樁基礎的材料性質並不相同，因此樁土間的互作用具有高度之非線性行為。若藉由彈性分析法並無法完全模擬前述之行為，甚至會有忽略高度非線性行為之現象，因此無法使用彈性分析法進行分析。至於土壤反力法，雖有許多學者提出以線彈性土壤反力法為基礎歸納出的理論解來模擬樁土互制行為，且已被廣為使用。但因離岸風機所設置的海域土層結構較陸域複雜，且具較多環境載重的因素影響下，本研究於土壤反力法的部份以美國石油協會(API)所歸納整理而得的半經驗公式進行分析，最後採用有限元素法進行模擬，期許藉由有限元素法精確模擬各種複雜之情況，包含土層變異性、樁土介面行為、樁土間之高度非線性行為等因素，與 API 規範所採納並進行設計的規範一同比較，作為研究分析可信度之探討。

分析風機模型之自然振動頻率時，考量風機結構於土壤無限元素混合模型中進行模態分析時，其模態分析會同時考量風機結構以及土壤結構兩者，所求得解並非風機結構本身之自然振動頻率，因此研究中藉由頻率響應函數求得風機結構在不同頻率下其最大反應。然而，因所採用的樁基礎屬群樁，必然考慮群樁效應問題，當以不同外

力大小進行自然振動頻率分析時，若外力量級過大將使土壤間產生群樁效應，非線性土壤之勁度衰減，弱化結構束制，所求得之自然振動頻率將有所影響，因此分析時必須考量在風機結構受外力時其群樁基礎反應。而為確定無限元素混合模型之可行性，研究中先考量以風機結構於有限元素模型中受靜態載重分析，再將無限元素模型與有限元素模型做一比較。以作為風機結構於無限元素模型求解自然振動頻率的分析基礎。

另外，風機結構於土壤彈簧模型中求解自然振動頻率，以模態分析求得其自然振動頻率大小為何，再藉由非線性動力對模態分析結果進行確認。群樁效應問題於土壤彈簧模型中亦為需考量，而依 API 規範採納許多相關研究，建議當樁距小於八倍樁徑時，必須考量群樁效應，進行土壤彈簧折減。本研究所採用的風機模型樁間中心距為 20 公尺，樁徑為 1.829 公尺，分析樁與樁之淨間距約為 10 倍樁徑，因此於土壤彈簧模型中不考量群樁效應折減係數。圖 1 為於 Abaqus 中所建立的風機結構示意圖。

四、材料參數

本研究材料參數主要分為兩種，第一種屬於風機結構部分，由於風機結構目前不考慮上部結構接頭部分之材料性質，純以鋼的材料性質設定，且與土壤互制的情況下，風機結構暫不考慮其塑性行為，因此風機主結構部份以線彈性之鋼材為主。土壤部份因考慮其塑性模型與其楊氏係數之待定值，其楊氏係數與所選擇之土壤材料性質有關，本研究目前採以均質之中等緊密砂作為分析依據，如表 1。

另外，在分析土壤受動力反應時，必須給予適當的材料阻尼才能有效模擬系統於動態行為中之反應，研究中採以黏滯阻尼做為土壤動力性質之模擬，而於 Abaqus 中所採用的阻尼形式為 Rayleigh Damping，其將多自由度系統的阻尼矩陣以質量矩陣[M]以及勁度矩陣[K]兩者以線性比例組合而成。其中， α 為質量比例常數， β 為勁度比例常數，而對多自由度系統而言，阻尼比的形式應與系統頻率有關。

Rayleigh Damping 的唯一解應以主要的兩階自然振動頻率進行比例常數之求解，但於土壤模型中，前兩階自然振動頻率

所對應的有效振態質量佔總體質量過低，因此，為求得假設所需之土壤阻尼比，需先將土壤進行模態分析，以有效參與質量達一定可信度下的自然振動頻率作為分析依據，以最小二乘法找出最適合的 α 與 β 作為

Rayleigh Damping 所需之係數。本研究提取土壤結構前 100 階自然振動頻率作為分析依據，並考量其所對應的有效振態質量，確定所提取的有效振態質量佔總質量的九成以上，藉由 Abaqus 分析求得土壤結構總質量及所對應的有效振態質量總和於 x 向、y 向及 z 向如表 2 所示。

由表 2 可知，雖於 z 向的有效振態質量分配略低，但其仍超過總質量的九成比例，故本研究採取以前 100 階所計算出之土壤自然振動頻率作為 Rayleigh Damping 的計算依據，最後藉由最小二乘法求得 α 與 β 分別為 0.4096 及 0.005126，而藉由最小二乘法所得之結論已有 95% 之信賴區間，因此可認為擬合結果為可接受範圍。

五、土壤彈簧法

採以美國石油協會所建議之 API 規範所建議的公式時，必須考量土壤彈簧的有效範圍，本研究主要以每單位深度的樁長作為彈簧建立基礎，有鑑於採用模型的鋼管樁長度為 45 m，因此沿樁周高程 -0.5 m、-1.5 m、-2.5 m 直至 -44.5 m，分別於樁之側向設立側向土壤彈簧、沿樁表面於軸向的垂向摩擦彈簧以及高程處 -45m 的樁底處設置承載彈簧三種土壤彈簧。

一般而言，針對非凝聚性土壤討論，認為土壤材料不可承受拉力，因此在土壤彈簧的設定上，僅於土壤承受壓力時，土壤彈簧才有作用，而考慮到分析模型為三維的情況下，建立 $p-y$ 側向土壤彈簧時，應同時考量水平面 x 向與 y 向均存在土壤彈簧，因此單樁於水平面時，應建構四根 $p-y$ 土壤彈簧。而考量摩擦彈簧時，考量樁基礎承受軸壓時，樁周應能均佈抵抗樁土間的摩擦行為，因此本研究在樁周的截斷面上，均勻設置四根垂向摩擦彈簧。樁底承載彈簧僅需考量樁底位置，並不需與前述之側向土壤彈簧與垂向摩擦彈簧考量於單位深度下皆須建立彈簧之行為，但因樁底承載彈簧設置時，考量樁基礎為鋼管樁，因此必須 Coupling

Constraint 的接觸行為詳加處理彈簧設置。

土壤彈簧於 ABAQUS 中建置時，考量彈簧為非線性行為，不可以定值土壤彈簧作為近似模擬，因此建置非線性土壤彈簧時，須先建立彈簧的相對參考點於模型當中，藉由 ABAQUS 中針對不同自由度數至下的連接特性進行設定。本研究採用連接非線性彈簧部分為 ABAQUS 中的 Axial Connector，藉以輸入外力與變位的關係計算土壤彈簧的非線性行為，而因前述所說明以單位深度下建構非線性土壤彈簧為建構原則下，側向土壤彈簧僅需乘以樁之單位長 1 m，即可得外力與位移的關係，但垂向摩擦彈簧需引用 API 規範所建議的 $t-z$ 曲線轉換為外力與位移的關係，始能設定於模型中，應力轉換時可藉由單位長所含的面積與應力相乘得到該深度下摩擦反力 f 與位移的關係，又因土壤彈簧於同一深度下分為四根垂向土壤彈簧。

樁底承載彈簧如同前述的垂向摩擦彈簧，需藉由 API 規範所建議的 $q-z$ 曲線進行轉換，但不同的是樁底僅需設置一根承載彈簧，因此將樁底應力乘以鋼管樁之斷面積後，即可得樁底反力與位移的關係曲線。

依前述土壤模型的模式依序建立土壤彈簧後，應可於模型中建立出 1444 根土壤彈簧，藉此模擬風機結構於樁基礎中的土壤互制行為。

六、分析結果

為求得風機結構達穩態之最大位移反應，研究中以外力施加時間長為 30 秒作為分析依據，如風機結構於土壤彈簧模型下之非線性動力求解手段。圖 2 為當外力大小為 1kN 時的風機結構頻率響應函數，由圖中可知風機結構之最大反應約略為 0.3Hz，其結構物之週期約略為 3.3 秒。而觀察結構物於 0.3Hz 之外力頻率時之塔頂位移反應及土深 0.5 公尺處之土壤應力反應，如圖 3、圖 4，反應行為皆隨時間遞增有發散之趨勢，即為共振反應。

當外力頻率增加至 10kN 時，結構物之最大反應依舊約在頻率為 0.3Hz 時發生，如圖 5，而由圖 6、圖 7 中可明顯看出，當結構物之外力大小量級很小時，結構物之反應行為依舊不變，隨時間而產生遞增之趨勢，以上述兩種外力大小作為結構物自然振

動頻率之求解形式，可找出結構物在微小擾動狀態下之自然振動頻率。

為探討當樁土間互制行為達高度非線性時，風機結構塔頂之最大反應，研究中求得外力大小為 1000kN 時，塔頂之頻率響應函數，如圖 8。從圖中可明顯看出當風機結構塔頂位移達穩態後之最大位移反應並不如前述微小擾動下於頻率 0.3Hz 時達最大反應，最大反應有下降之趨勢，其反應約於 0.23Hz~0.27Hz 時，風機塔頂之位移達最大反應。換言之，當風機結構以不同外力形式進行結構物之最大反應分析時，僅能藉由微小擾動時求得風機結構本身之自振頻率。但當外力大小漸增時，樁土間互制行為達高度非線性之特性，其風機結構樁基礎束制以有弱化現象。若樁土間實已達高度非線性之狀態，則風機結構承受某一外在刺激下之最大反應，並不如微小擾動狀態下之頻率，而有下降的趨勢。

藉由非線性動力求解風機結構於土壤彈簧模型下之共振反應，其風機塔頂之位移反應與風機結構於無限元素混合模型中之位移反應差異甚大。探討其土壤彈簧行為與無限元素混合模型之土壤材料皆為非線性行為，差異來源應為雖土壤彈簧設定上僅於受壓時才有反力行為，與土壤元素相同，但當樁基礎受動態反覆載重作用時，載重方向改變，另一側土壤彈簧即發揮效用，亦即動態載重施加時，皆有土壤彈簧產生反力抑制樁基礎。但當土壤元素受到較大量級外力時，其載重方向改變瞬間，其樁後土壤與樁身之間存在間隙，且土壤元素的回復性不如土壤彈簧，因而造成於淺層土壤處之樁基礎並非隨動態反覆載重作用時皆有土壤元素產生反力抑制樁基礎，使得淺層土壤處所提供的土壤阻抗不如預期，抑制風機結構於共振頻率下之位移反應。

七、結論

考慮單樁基礎於樁頭受一側向載重時，分別考量有限元素與土壤彈簧模型，得出以數值模擬真實樁土互制之有限元素模型其樁身之側向位移均較土壤彈簧模型大，觀察土壤之 $p-y$ 曲線可知土壤彈簧有高估土壤初始勁度的現象，樁土互制之有限元素模型具合理性。

於靜態載重作用下，依前人之相關實

驗認為當樁距 7 倍樁徑時不具有群樁效應，而依美國石油協會(API)建議考量群樁效應時，樁距應小於樁徑之 8 倍。而本研究所採用之離岸風機模型樁距約為樁距之 10 倍，且由有限元素模型模擬之結果明顯看出，群樁基礎於樁頭承受相同之側向載重時，其樁身變位均相同，總側向載重高達 20MN 亦無所差異，因此研究採用之離岸風機結構無須考量群樁效應及其折減問題。

考量離岸風機受動態載重分析時，為避免能量於人工斷面邊界反射之問題，須以無限元素混合模型分析非線性動力之行為，分析前需對無限元素混合模型與有限元素模型結果進行比較，確認模型可行性。再藉由微小擾動求得離岸風機結構之自然振動頻率為 0.3Hz。

依模態分析求得風機結構於土壤彈簧模型下之自然振動頻率為 0.3316Hz，其差異可歸因於以微小擾動求得離岸風機之自然振動頻率時，土壤彈簧之 $p-y$ 曲線有高估土壤初始勁度之疑慮，因此以較高之勁度所求得之自然振動頻率必然較真實數值模擬高，設計上須做一折減考量。

依較大載重量級分析離岸風機結構於無限元素混合模型之自然振動頻率時，考量土壤進入高度非線性行為，土壤反力無法與結構物產生共振行為，抑制結構物最大反應，且考量依無限元素混合模型模擬樁土間之動態反應時，土壤元素之動態回復力無法如土壤彈簧一般，有降低土壤反力之疑慮。因此當載重量級過大時，離岸風機結構之最大反應與自然振動頻率下的反應有所差異，但以過大的載重量級求得的風機結構塔頂最大反應並非為原結構於初始狀態下之自然振動頻率。

八、參考文獻

[1] Adami, N. (2013). Development of an ACIP pile-specific load-displacement model.

[2] Ahn, K. K., Kim, H. T. (2005). Group Effects in Pile Group under Lateral Loading. Journal of the Korean Geotechnical Society, 21(2), 47-55.

[3] Carswell, W. (2012). Probabilistic analysis of offshore wind turbine soil-structure interaction (Doctoral dissertation,

University of Massachusetts Amherst).

[4] Chang, B. K. (2003). Simplified procedure for analysis of laterally loaded single piles and pile groups (Doctoral dissertation, University of Hawaii at Manoa).

[5] Chandrasekaran, S. S., Boominathan, A., Dodagoudar, G. R. (2013). Dynamic Response of Laterally Loaded Pile Groups in Clay. Journal of Earthquake Engineering, 17(1), 33-53.

[6] Clough, R. W., Penzien, J. (1975). Dynamics of structures (No. Monograph).

[7] Das, B., Sobhan, K. (2013). Principles of geotechnical engineering. Cengage Learning.

[8] Dassault Systèmes Corporation, SIMULIA Abaqus Analysis User's Manuals, Theory Manuals and Example Problems Manuals, Version 6.14, France, 2014

[9] Elshafey, A. A., Haddara, M. R., Marzouk, H. (2009). Dynamic response of offshore jacket structures under random loads. Marine Structures, 22(3), 504-521.

[10] Finn, W. L. (2004). Characterizing pile foundations for evaluation of performance based seismic design of critical lifeline structures. In 13th World Conference on Earthquake Engineering.

[11] Hajjalilue-Bonab, M., Levacher, D., Chazelas, J. L., Kaynia, A. M. (2014). Experimental study on the dynamic behavior of laterally loaded single pile. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 66, 157-166.

[12] Hashash, Y. M., Park, D. (2002). Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(7), 611-624.

[13] Huang, J. W. (2011). Development of modified py curves for Winkler Analysis to characterize the lateral load behavior of a single pile embedded in improved soft clay.

[14] Khari, M., Kassim, K. A., Adnan, A. (2014). Development of Curves of Laterally Loaded Piles in Cohesionless Soil. The Scientific World Journal, 2014.

[15] Kim, H. J., Mission, J. L. C., Park, I. S.

- (2007). Analysis of static axial load capacity of single piles and large diameter shafts using nonlinear load transfer curves. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 11(6), 285-292.
- [16] Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. *Offshore Technology in Civil Engineering's Hall of Fame Papers from the Early Years*, 77-94.
- [17] Malhotra, S. (2007). Design and construction considerations for offshore wind turbine foundations. In *ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (pp. 635-647). American Society of Mechanical Engineers.
- [18] Malhotra Sanjeev, (2007). "Selection, Design and Construction Guidelines for Offshore Wind Turbine Foundations," PB Research & Innovation Report.
- [19] Mokwa, R. L. (1999). Investigation of the resistance of pile caps to lateral loading.
- [20] Mosher, R. L., Dawkins, W. P. (2000). Theoretical manual for pile foundations (No. ERDC/ITL-TR-00-5). ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS INFORMATION TECHNOLOGY LAB.
- [21] Mostafa, Y. E., El Naggar, M. H. (2004). Response of fixed offshore platforms to wave and current loading including soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(4), 357-368.
- [22] Naggar, M. H. E., Bentley, K. J. (2000). Dynamic analysis for laterally loaded piles and dynamic p-y curves. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6), 1166-1183.
- [23] Nogami, T. (1987). *Dynamic Response of Pile Foundations—Experiment, Analysis and Observation*. ASCE.
- [24] Passon, P., Branner, K. (2014). Load calculation methods for offshore wind turbine foundations. *Ships and Offshore Structures*, 9(4), 433-449.
- [25] Poulos, H. G. (1971a). Behavior of Laterally Loaded Piles: I -Single Piles, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.97, SM5, May, pp.711-731.
- [26] Poulos, H. G. (1971b). Behavior of Laterally Loaded Piles: II -Single Piles, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.97, SM5, May, pp.733-751.
- [27] Reese, L. C., Cox, W. R., Koop, F. D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. *Offshore Technology in Civil Engineering Hall of Fame Papers from the Early Years*, 95-105.
- [28] Reese, L. C., Cox, W. R., Koop, F. D. (1975). Field testing and analysis of laterally loaded piles on stiff clay. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- [29] Reese, L. C., Wang, S. T., Arrellaga, J. A., Hendrix, J., Vasquez, L., "Group 7.0 user's Manual," ENSOFT, Inc
- [30] RP2A-WSD, A. P. I. (2000). Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design—. In *Twenty-*.
- [31] Ruesta, P. F., Townsend, F. C. (1997). Evaluation of laterally loaded pile group at Roosevelt Bridge. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(12), 1153-1161.
- [32] Ruiz, M. E. (2005). Study of axially loaded post grouted drilled shafts using CPT based load transfer curves (Doctoral dissertation, University of Puerto Rico mayagüez campus).
- [33] Shi, W., Park, H., Han, J., Na, S., Kim, C. (2013). A study on the effect of different modeling parameters on the dynamic response of a jacket-type offshore wind turbine in the Korean Southwest Sea. *Renewable Energy*, 58, 50-59.
- [34] Tak Kim, B., Kim, N. K., Jin Lee, W., Su Kim, Y. (2004). Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 416-425.
- [35] Van Buren, E., Muskulus, M. (2012). Improving pile foundation models for use in bottom-fixed offshore wind turbine applications. *Energy Procedia*, 24, 363-370.

- [36] Vorpahl, F., Popko, W., Kaufer, D. (2011). Description of a basic model of the "UpWind reference jacket" for code comparison in the OC4 project under IEA Wind Annex 30. Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology IWES.
- [37] Wu, G., Finn, W. L. (1997). Dynamic elastic analysis of pile foundations using finite element method in the frequency domain. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(1), 34-43.
- [38] 4C Offshore, <http://www.4coffshore.com/windfarms/windspeeds.aspx>
- [39] 日本道路協會 (1996), 「道路橋示方書・同解説」。
- [40] 刘红石. (1999). Rayleigh 阻尼比例系数的确定. *噪声与振动控制*, (6), 21-22.
- [41] 朱惠君(2000), 「側向荷重樁非線性反應分析」, 國立臺灣大學土木工程學系博士論文。
- [42] 內政部建築研究所 (2001), 「建築物基礎構造設計規範」, 營建雜誌社。
- [43] 薛朝光(2004), 「場鑄單/群樁側向荷載非線性行為研究」, 國立海洋大學河海工程研究所博士學位論文。
- [44] 陳正興, 邱俊翔 (2006), 「側向荷載群樁之 p-y 曲線修正方法」, 中國土木水利工程學刊, 第 18 卷, 第 3 期, 第 325-335 頁。
- [45] 崔宏环, 张立群, 赵国景. (2006). 深基坑开挖中双排桩支护的的三维有限元模拟. *岩土力学*, 27(4), 662-666.
- [46] 邵国鑫, 屠永清, 沈洪. (2008). 泡沫铝填充钢管构件阻尼性能的试验研究. *煤矿机械*, 29(2), 49-52.
- [47] 费康, 张建伟. (2009). ABAQUS 在岩土工程中的应用. 中国水利水电出版社。
- [48] 曹金凤-石亦平(2009), ABAQUS 有限元分析常见问题解答. 机械工业出版社。
- [49] 王騰, 王天霖. (2009). 粉土 p-y 曲线的试验研究. *岩土力学*, 30(5), 1343-1346.
- [50] 張智鈞(2010), 「群樁效應之三維數值反應分析」, 國立中央大學土木工程學系碩士論文。
- [51] 戚玉亮, 冯紫良, 余俊, 刘成. (2010). 泰州大桥北塔群桩基础三维动力非线性抗震计算研究. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*.
- [52] 吳俊寬(2011), 「離岸風機海底基樁設計之研究」, 國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系碩士學位論文。
- [53] 阳栋, 王志亮. (2012). 基于无限元和波场分离法的地震响应数值分析. *同济大学学报: 自然科学版*, 40(8), 1129-1134.
- [54] 杨大昱, 袁奇, 吴聪. (2012). 单桩式海上风力机支撑结构强度振动分析. *西安交通大学学报*, 46(7), 26-31.
- [55] 代汝林, 李忠芳, 王姣. (2012). 基于 ABAQUS 的初始地应力平衡方法研究. *重庆工商大学学报: 自然科学版*, 29(9), 76-81.
- [56] 汪优, 刘建华, 王星华, & 蔡君君. (2012). 软土地层桥梁群桩基础桩土共同作用性状的非线性有限元分析. *岩土力学*, 33(3), 945-951.
- [57] 李雨润, 孙伟民, 张建华, 袁晓铭, & 张中乐. (2014). 地震作用下群桩水平动力响应特性及 PY 曲线试验研究. *地震工程学报*, 36(3), 468-475.

九、表格

表 1 材料參數

OWT (Offshore wind turbine)	
Young's Modulus E	2E+8 kpa
Unit Weight γ	8 tf / m ³
Poisson's Ratio ν	0.3
Soil	
Young's Modulus E	30100 kpa
Unit Weight γ	1.75 tf / m ³
Poisson's Ratio ν	0.32
Mohr Coulomb Plastic Coefficients	
Friction Angle ϕ'	31.5
Dilation Angle ψ	27.6
Cohesion c	0
Abs Plastic Strain	0

表 2 有效振態質量比例

	x component	y component	z component
有效振態質量	307090.00	307090.00	295589.00
結構總質量	318937.50	318937.50	318937.50
比例	96.283%	96.285%	92.679%

十、圖片

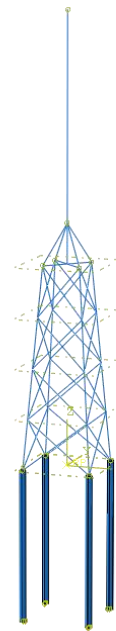


圖 1 風機結構示意圖

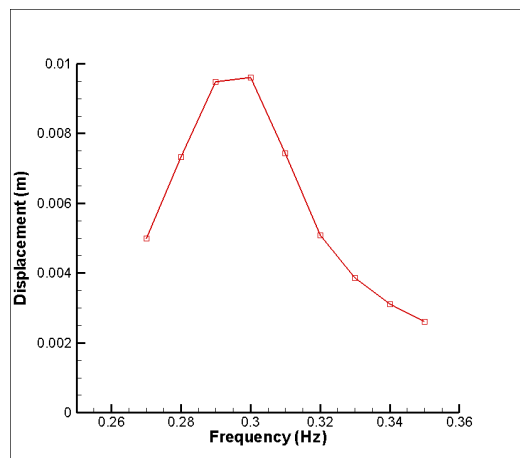


圖 2 風機結構於外力大小為 1kN 下之頻率響應函數

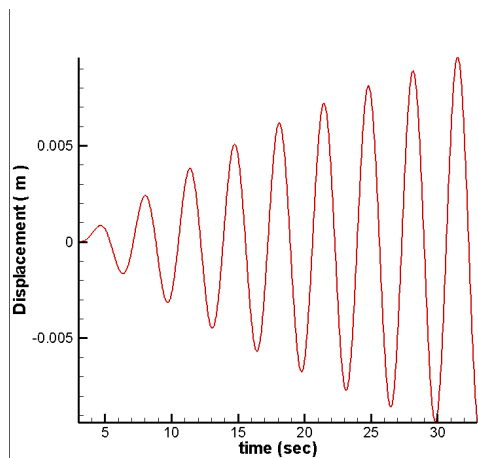


圖 3 0.3Hz 頻率下受 1kN 外力之塔頂位移反應

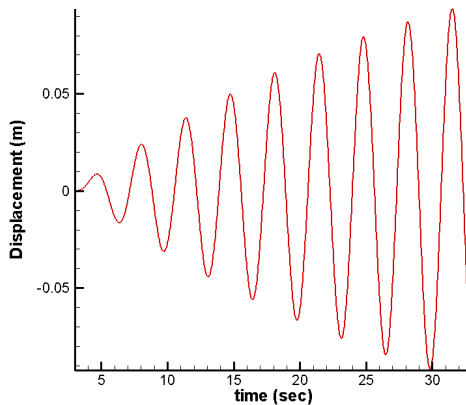


圖 6 0.3Hz 頻率下受 10kN 外力之塔頂位移反應

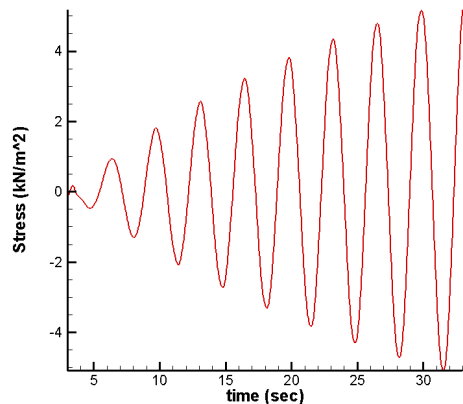


圖 4 0.3Hz 頻率下受 1kN 外力之土深 0.5m 位移反應

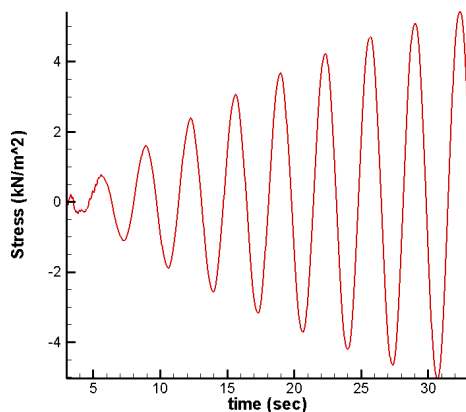


圖 7 0.3Hz 頻率下受 10kN 外力之土深 0.5m 位移反應

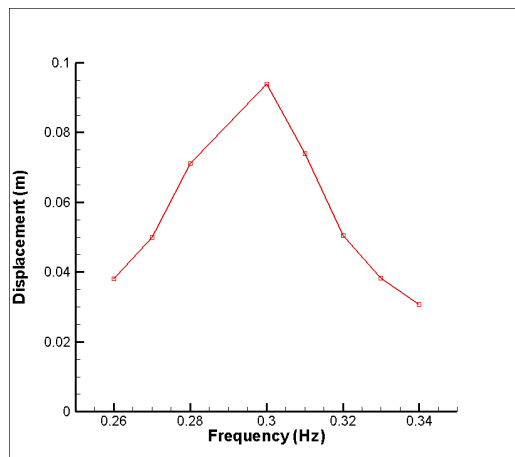


圖 5 風機結構於外力大小為 10kN 下之頻率響應函數

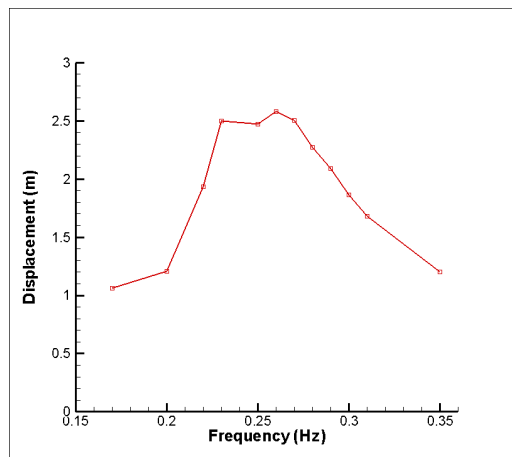


圖 8 風機結構於外力大小為 1000kN 下之頻率響應函數