

反覆側向載重對群樁效應影響研究

郭玉樹¹, 吳冠廷², 曾玉修³, 陳景文⁴

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系副教授

² 國立成功大學土木工程學系碩士

³ 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生

⁴ 國立成功大學土木工程學系教授

摘要

風力發電為再生能源中，應用技術較為成熟且發展較為快速的發電方式之一。根據我國環境條件與海事施工能量限制，發展群樁基礎作為離岸風力發電支承基礎為相對較可行的方法之一。由於離岸風機長期承受風力、波浪與海流等側向反覆作用力，基礎承載力隨反覆載重次數增加而下降，進而影響離岸風機整體結構安全。本研究針對埋置於無凝聚性土壤中的群樁基礎受反覆側向載重時之行為進行分析，利用有限元素法軟體 ABAQUS 建立樁土系統數值模型，配合勁度衰減模型(Stiffness Degradation Model)評估側向位移量與反覆載重次數對群樁效率之影響。分析結果顯示，於靜態側向作用力施加時，側向位移量對於群樁效率影響甚鉅。於反覆側向載重施加時，群樁效率（陰影效應）於半對數座標上隨載重次數線性衰減。

關鍵字：群樁、側向載重、群樁效率、反覆載重、離岸風機

ABSTRACT

The wind power has become an important resource of electricity. It is well-developed and is the most rapid-expanded power generation method in all kind of renewable energy as well. Due to the environmental conditions and construction limitations in Taiwan, group pile has been an applicable way to the offshore wind turbine foundation. In this study, we investigated the group pile behavior under cyclic lateral loading in cohesionless soils. We used ABAQUS with finite element method to calculate the response of soil-pile system under offshore conditions. Furthermore, we adopt the Stiffness Degradation Model in this numerical model to consider the loss of soil resistance after cyclic loading caused by winds and waves. Based on the simulation results, group efficiency decrease with the number of loading linearly on a semi-logarithmic coordinates.

Keywords: Group pile, Lateral load, Group efficiency, Cyclic load, Offshore wind turbine

一、緒論

離岸風力發電所需的成本遠高於一般陸域風力發電，故在發展前必進行全面性的評估，包含其發電效率、生態環境衝擊、場址極端環境條件等，以確保營運效益與安全性。離岸風機支撐結構設計、製造及施工成本約佔離岸風機整體開發成本的 20%至 30%，遠高於陸域風機之成本。且離岸風機支撐結構之施工與設計亦受限於現有的碼頭承載力、施工能量、海事工程船隊種類等因素。根據我國當前海

事工程自主施工能量，發展多樁基礎作為離岸風機基礎結構為較可行之方法之一。多樁基礎包括三腳基礎(Tripod foundation)，套管基礎(jacket type foundation)，三樁基礎(tripile foundation)以及群樁平台基礎(group pile platform foundation)，基礎型式如圖 1-1 所示。

群樁中各樁在受到與單樁相同大小的側向載重作用時，會產生大於獨立單樁產生的側向位移(Bogard & Matlock, 1983)；於相同的容許位移量條件下，群

樁中各樁的承载力會因為應力區重疊而降低；群樁中各樁分別可承受的側向載重將小於單樁可承受的側向載重。因此在計算群樁側向承载力時，須進行土壤側向阻抗折減，此種因應力影響區域重疊造成的側向承载力效率降低現象稱為群樁效應 (Group pile effect)。

離岸風機多樁基礎之承载力，除了受到基樁排列方向與土壤條件等因素影響外，風、波、流引致之反覆作用力亦會造成基礎側向承载力改變。現有文獻中並未深入探討反覆載重次數對群樁效率之影響，本研究以數值方法配合 Kuo (2008) 發展之土壤勁度衰減模型 (Stiffness Degradation Model, SDM)，對 2 根基樁組合成的多樁系統施予反覆側向載重，分析反覆載重次數對群樁效率之影響。

二、文獻回顧

2.1 群樁效應

樁基礎受側向載重作用時，基樁將產生側向位移，樁周土壤產生楔形應力影響區，此應力影響區之範圍取決於基樁、土壤勁度以及側向載重大小。工程實務利用樁帽將多根基樁束制在一起，以承受更大之側向載重。當群樁中各樁與鄰樁間之距離小於特定距離時，將產生各樁之應力影響區重疊的現象，進而導致群樁中各樁的受力行爲不同於單樁。

評估群樁側向承载力時需考慮群樁效率的折減，群樁中各樁之側向承载力將小於單一基樁之側向承载力，此一現象稱為群樁效應 (group pile effect)；影響群樁承载力折減程度之因素包含了樁間距、群樁配置、土壤條件以及樁基礎位移量等，目前最常被用來評估群樁受側向載重後整體承载力折減的方式為群樁效率因子 (Group efficiency, G_e)。一般來說，群樁效率可根據全尺寸試驗或模型試驗之結果進行評估，其計算方式如式 2-1，

$$G_e = \frac{(Q_u)_g}{n(Q_u)_s} \quad (2-1)$$

其中 $(Q_u)_g$ 為群樁之極限側向承载力、 n 為群樁之樁數、 $(Q_u)_s$ 為單樁之極限側向承载力。

單樁與群樁中之各樁直徑、樁長、材料、土壤條件皆相同。

2.1.1 邊樁效應

邊樁效應是指當側向載重方向與基樁排列方向垂直時，相鄰的兩樁會因為其側邊被動土壓區重疊，而無法完整發揮樁周土壤側向阻抗，造成群樁的側向承载力降低，如圖 2-1 所示。雖然邊樁效應會隨土壤種類與試驗條件略有差異，但仍可大致歸納出其趨勢，群樁效率會隨樁距增加逐漸提高，當樁距大於 3 至 4 倍樁徑，邊樁效應將不影響樁基礎之側向承载力。

2.1.2 陰影效應

當側向載重方向與基樁排列方向平行時，若樁與樁之間距過小，造成應力影響區域重疊時，則可能產生陰影效應，如圖 2-2 所示。由於在相同樁間距的條件下，陰影效應之應力重疊區通常大於邊樁效應，因此陰影效應對於群樁效率的影響大於邊樁效應。Lieng (1989) 之試驗分析結果顯示，對於埋置於疏鬆砂土中的樁基礎，若排列樁距超過 5 倍樁徑時，群樁系統中的每根基樁可發揮單樁之側向承载力；然而，Saraby (1985) 的試驗結果則顯示，群樁中各樁的樁間距需超過 12 倍的樁徑，群樁中的各樁才能發揮單樁側向承载力。不同試驗條件與土壤種類對於陰影效率之影響有顯著的差異。

三、數值模型

3.1 樁土系統有限元素模型

本研究利用 ABAQUS 有限元素軟體建立樁-土系統數值模型，考慮鋼管樁 $L=20\text{m}$ ，樁徑 $D=1\text{m}$ ，管壁厚度 $t=0.03\text{m}$ ，埋置於緊密無凝聚性土壤。為節省計算時間，本研究根據 Kuo (2008) 之建議以等效實心樁進行模擬。為避免土壤之應力影響範圍觸及模型邊界，導致分析結果與實際現象不符，故本研究根據現有文獻提出之群樁效應影響範圍決定樁土系統數值模型邊界大小，以確保樁基礎受側向力時，土中的應力分布不受邊界影響，如圖 3-1

所示。

樁土系統有限元素模型中，基樁以彈性材料模擬。無凝聚性土壤以非線性彈塑性材料模擬，並遵守莫爾庫倫破壞準則，土壤勁度 E_s 隨平均主應力 σ_m 變化。

$$E_s = \kappa \cdot \sigma_{at} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{at}} \right)^\lambda \quad (3-1)$$

其中， σ_{at} 為大氣壓力，土壤勁度參數 κ 及 λ 可由單向度壓縮試驗求得。

3.2 土壤勁度衰減模型

Kuo (2008) 及 Achmus et al. (2009) 利用其開發之勁度衰減模型 (Stiffness Degradation Model, SDM) 針對無凝聚性土壤中之大口徑單樁基礎受反覆側向作用力下之變形反應進行分析。當樁週土壤受反覆應力作用時，應力-應變曲線如圖 3-2 所示，土壤之割線勁度 E_{sN} 隨作用力次數 N 增加而降低。

無凝聚性土壤在排水條件下受反覆載重時，軸向塑性應變 ε_p^a 隨著反覆載重作用次數增加，軸向塑性應變增加量與土壤緊密程度、初始圍壓及軸向反覆軸向應力 σ_{cyc} 有關。反覆軸向應力作用 N 次後之土壤割線勁度 E_{sN} 可由反覆應力比 X_B 及土壤勁度衰減參數 b_1 、 b_2 求得。反覆應力比 X_B 為每一土壤元素受反覆應力過程中之主應力 σ_1 及發生靜態剪力破壞時之主應力 $\sigma_{1,sf}$ 之比值。樁土系統受側向反覆作用力時，透過土壤勁度衰減模型，可給予樁基礎周圍土壤受反覆應力下之衰減勁度，進而求得基樁受反覆側向載重 N 次後之變形量。

$$\frac{E_{sN}}{E_{s1}} = N^{-b_1(X_B)^{b_2}} \quad (3-2)$$

$$X_B = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1,sf}} \quad (3-3)$$

四、分析結果

4.1 應力影響範圍

圖 4-1 中，考慮側向作用力與基樁排列方向平行之樁土系統，樁間距 s 為 4 倍樁徑 D ，當樁頭側向位移達 0.03 倍樁徑

時，後樁於土壤中造成之應力影響範圍並未與前樁之應力範圍重疊。當樁頭側向位移量達 0.2 倍樁徑時，後樁所發展出的側向應力影響範圍明顯增大，且沿作用力方向延伸，使得前樁與後樁的側向應力影響範圍重疊，如圖 4-2 所示。

若考慮側向作用力與基樁排列方向垂直之樁土系統，樁間距與樁徑比 s/D 為 4 之條件下，當樁頭側向位移達 0.03 倍樁徑時，兩根基樁造成之土壤側向應力影響區域並未重疊，如圖 4-3 所示。當樁頭側向位移量達 0.2 倍樁徑時，圖 4-4 中的數值模型俯視剖面圖顯示兩根基樁造成之土壤側向應力影響區域重疊，且前樁所造成之被動土壓區域明顯大於後樁。本研究建立之多樁系統數值模型，可以明顯標示各樁激發之土壤側向反力分布情形，協助瞭解多樁系統受側向作用力之整體力學行為。

4.2 群樁效率

當樁基礎達到破壞時，其群樁之側向位移量約為 0.15 至 0.2 倍樁徑 (Mokwa, 1999)，故本研究以群樁側向位移量達 0.2 倍樁徑時所施加之側向載重作為群樁的極限載重 (Q_{wg})。圖 4-5 中，考慮側向作用力與基樁排列方向平行之樁土系統時，群樁效率 G_e 隨樁間距 s 增加而提高。對於本研究給定之土壤條件與基樁尺寸，當樁間距 s 大於 9 倍樁徑 D 時，陰影效應將不會造成群樁效率折減。樁間距越小，側向位移量對群樁效率之折減越明顯。

圖 4-6 則為橫向排列下樁間距與群樁效率之關係。群樁效率 G_e 亦隨樁間距 s 增加而提高。當樁間距較小之群樁基礎受到較大之樁頭側向位移時 (0.2D)，邊樁效應造成之群樁效率折減十分明顯。若樁基礎受到較小的樁頭側向位移時 (0.03D)，邊樁效應造成之群樁效率折減則遠小於陰影效應所造成之群樁效率折減。此一結果顯示側向位移量對邊樁效應之影響較為顯著。當樁間距 s 大於 8 倍樁徑 D 時，群樁效率趨近於 1，邊樁效應將不會造成多樁基礎側向承载力折減。

圖 4-7 為反覆載重對群樁效率之影

響關係圖，考慮側向作用力與基樁排列方向平行之樁土系統，不同樁間距條件下，群樁效率隨著反覆次數增加而遞減。於半對數座標上，群樁效率折減隨作用力次數線性衰減。反覆載重作用 10000 次後，群樁效率約折減至靜態載重條件下之的 50% 至 60%，顯示反覆作用力對於群樁基礎之側向承載力影響甚鉅，

五、結論

本研究利用 ABAQUS 軟體建立樁土系統有限元素數值模型，分析樁間距、側向位移量以及反覆載重對群樁效應之影響。利用多樁有限元素數值分析模型可以明顯看出樁周土壤應力變化，有助於釐清群樁效應發生機制。以本研究採用之基樁尺寸與土壤條件 (L=20m, D=1m, dense sand)，當樁間距與樁徑比 $s/D > 9$ 時，邊樁效應及陰影效應所造成之群樁效率折減可以忽略不計。而當施加於群樁樁頭之側向位移較小時，邊樁效應造成之群樁效率折減並不明顯。但同一樁頭位移條件下，陰影效應所造成之群樁效率折減則十分顯著。當群樁基礎受反覆側向載重時，將對陰影效應造成之群樁效率造成大幅折減，使得側向承載力大幅降低。因此，後續進行離岸風基多樁基礎設計時，若樁間距小於 9 倍樁徑，應將反覆載重對群樁效率之影響納入考量，以合理評估多樁基礎之側向承載力。

六、誌謝

本研究感謝科技部前瞻技術產學合作計畫一次世代鋼及其綠色製程與產品創新應用產學合作計畫(2/5) MOST 103-2622-E-006 -037 經費支持

七、參考文獻

[1] Achmus, M., Kuo, Y.-S. and Abdel-Rahman, K. (2009). "Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load," Computers & Geotechnics 36 (2009), p.725-735
 [2] Kuo, Y.-S. (2008). "On the Behavior of Large-Diameter Piles under Cyclic Lateral Load," Ph.D. Dissertation,

Leibniz Universität Hannover.
 [3] Bogard, D., and Matlock, H. (1983). "Procedures for Analysis of Laterally Loaded Pile Groups in Soft Caly," Specialty Conference of Geotechnical Engineering on Offshore Practice, American Society of Civil Engineerings, 499-535.
 [4] Lieng, J. T. (1989) "A Model for Group Behavior of Laterally Loaded Piles." Proc., Offshore Technology Conference, 377-394.
 [5] Saraby, R. W. (1985) "The Behavior of Model Pile Groups Subjected to Lateral Loads," Proc., Canadian Geotechnical Conference, Theory and Practice in Foundation Engineering.
 [6] Mokwa, R. L. (1999). "Investigation of the Resistance of Pile Caps to Lateral Loading," Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

八、表格

表 3-1 樁土模型材料參數

緊密砂		
單位重 γ'	kN/m ³	11
內摩擦角 ϕ'	度	37.5
膨脹角 ψ	度	7.5
柏松比 ν	-	0.25
土壤勁度參數 κ	-	800
土壤勁度參數 λ	-	0.55
回歸參數 b_1	-	0.2
回歸參數 b_2	-	5.76

鋼管樁		
單位重 γ	kN/m ³	7.8
彈性模數 E	kPa	2.1E8
樁長 L	m	20
樁徑 D	m	1
管壁厚 t	m	0.03

九、圖片

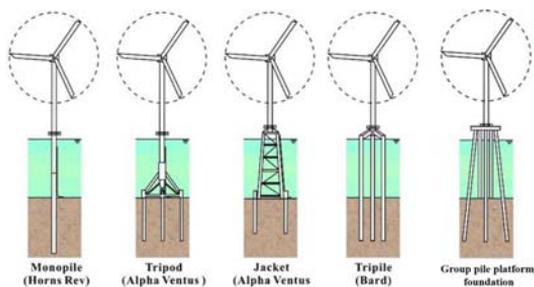
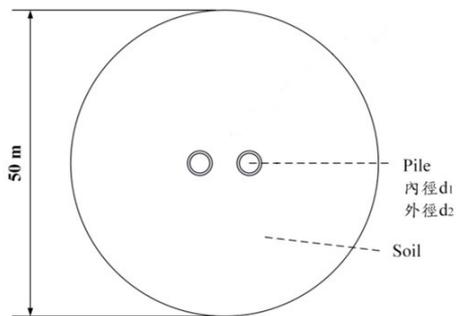
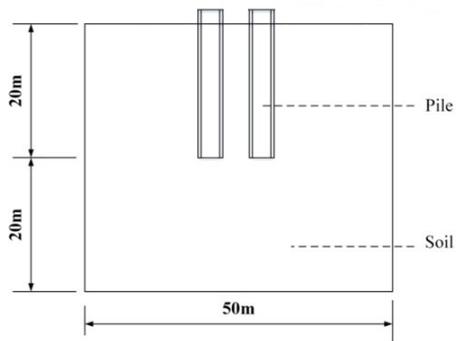


圖 1-1 離岸風機基礎型式



(a) 模型俯視圖



(b) 模型剖面圖

圖 3-1 數值模型示意圖

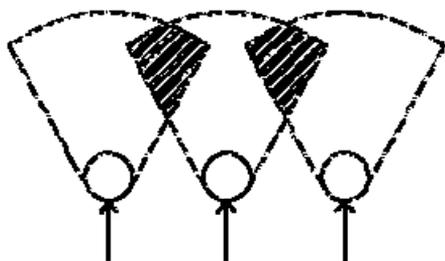


圖 2-1 邊樁效應示意圖

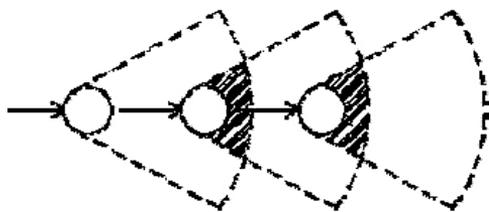


圖 2-2 陰影效應示意圖

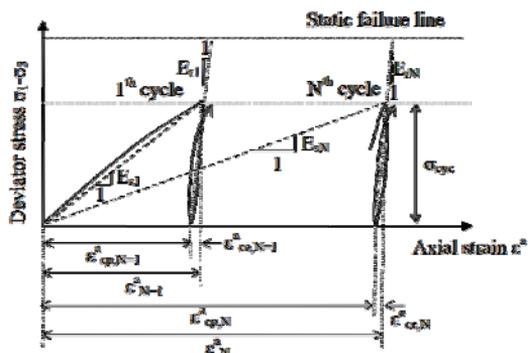


圖 3-2 土壤受反覆應力時之應力與應變關係(Kuo, 2008)

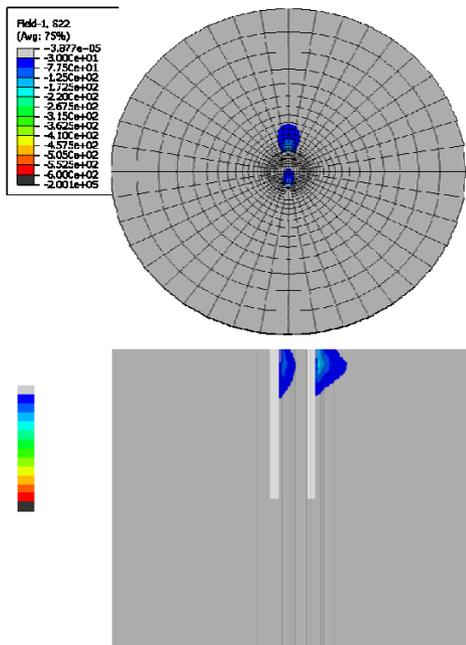


圖 4-1 側向位移量達 0.03 倍樁徑時之陰影效應俯視與剖面側向應力分布 (s/D=4)

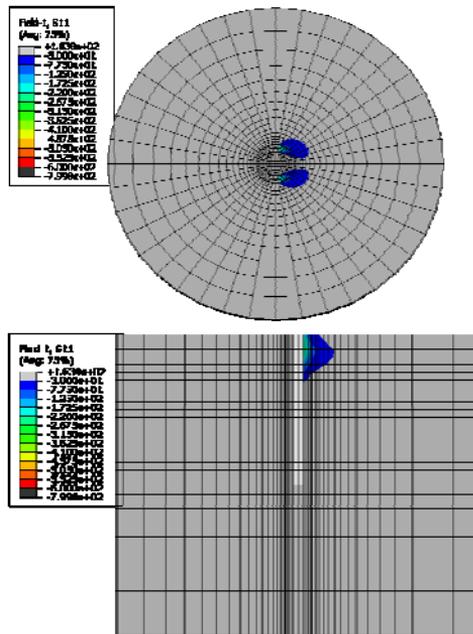


圖 4-3 側向位移量達 0.03 倍樁徑下邊樁效應之俯視與剖面應力分布 (s/D=4)

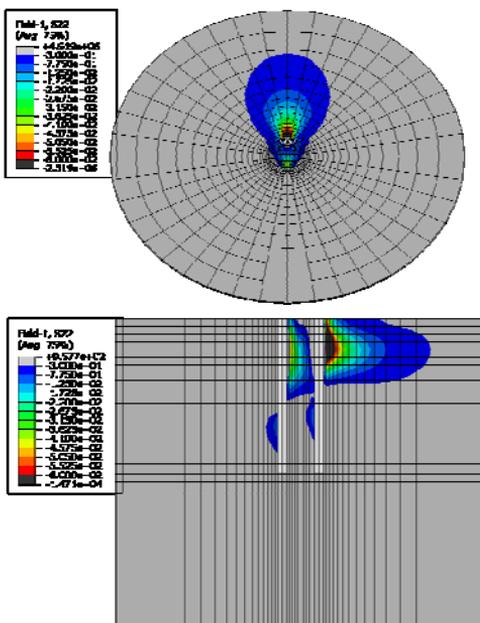


圖 4-2 側向位移量達 0.2 倍樁徑之陰影效應俯視與剖面側向應力分布 (s/D=4)

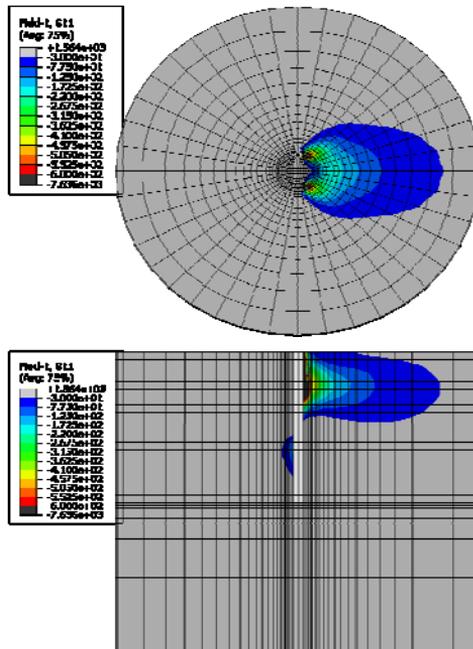


圖 4-4 側向位移量達 0.2 倍樁徑下邊樁效應之俯視與剖面應力分布 (s/D=4)

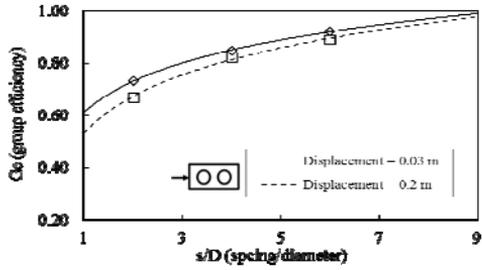


圖 4-5 不同樁間距對群樁效率(陰影效應)之影響

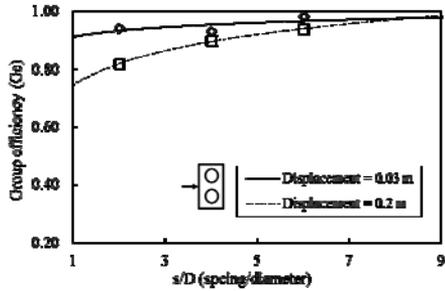


圖 4-6 不同樁間距對群樁效率(邊樁效應)之影響

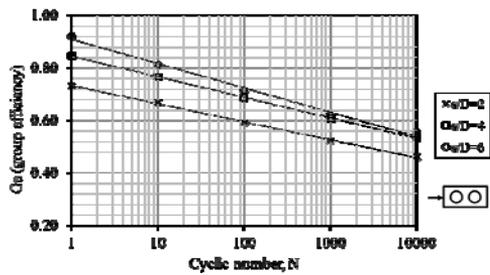


圖 4-7 反覆載重次數對群樁效率(陰影效應)之影響