

離岸風力發電機群樁基礎受側向載重變形分析

蘇峰堅^{1,2}, 黃迪瑩³

¹國立成功大學機械工程學系

²國立成功大學能源科技與策略研究中心

³國立成功大學水利及海洋工程學系

摘要

離岸風機支承結構設置於海洋中，常年受到海浪及風之反覆載重，海床土壤因反覆載重作用使土壤性質改變，進而影響土壤之承載力。本研究係為發展群樁基礎支承結構受到反覆載重作用變形有限元素數值模型所進行之前期研究。本研究係針對離岸風機支承結構受到不同強度側向靜態載重之變形，並將土壤視為非均質材料，土壤勁度為應力之函數，並應用有限元素數值軟體 ABAQUS 計算離岸風機群樁基礎支承結構設置於緊密砂質土壤，受到靜態側向載重作用，支承結構所產生之變形。

關鍵字：離岸風力發電、支承結構、群樁基礎、反覆載重

ABSTRACT

The offshore wind turbine is installed in the ocean and subjected to cyclically wave and wind loading in operating. The property of soil changed due to cyclically loading and the loading capacity of soil is changed with changed property of soil. In order to develop the numerical method to calculate the deformation of supporting structure of offshore wind turbine subjected to cyclically lateral loading, this study is the preliminary study. In the study, the displacement of supporting structure subjected to different loading is perform and the property of soil is not homogeneous, the stiffness of soil is depends on stress. The finite element analysis software ABAQUS is applied to calculate the deformation of supporting structure of offshore wind turbine installed in dense sand, subjected to static lateral loading.

Keywords : offshore wind energy, supporting structure, group pile foundation, cyclically loading

一 前言

全球正面臨天然資源逐漸耗竭的問題，開發新的替代能源為各國努力的目標，其中離岸風力發電為歐洲各國積極發展之替代能源之一。我國為開發離岸風力能，由行政院國家科學委員會成立「能源國家型科技計畫離岸風力主軸計畫」，投入對離岸風能的相關研究之規劃及產業發展研究，第一期程將於 101 年完成，102 年到 105 年為規劃為第二期程，對於先導型離岸風場進行相關研究。為鼓勵民間參與離岸風場開發，自 98 年 7 月起相繼頒布「再生能源發展條例」、「再生能源發電設備示範獎勵辦法」，更於 101 年 3 月進一步成立「千架海陸風力機計劃推動辦公室」。

離岸風機設置於海中，支承結構須面臨長期之風與浪等反覆載重，反覆載重作用導致土壤之承載力降低，以致於支承結構變位過大，甚致倒塌。目前離岸風機常用之基礎型式包括大口徑單樁基礎、三腳基礎、Jacket 基礎、負壓沉箱、基礎重力式基礎與三樁基礎，如圖 1。

大口徑單樁基礎結構簡單、佔地面積小，現有之離岸風場以單樁基礎為最常採用之基礎型式之一（能源國家型科技計畫離岸風力主軸計畫-B3 期末報告，2011），然而評估我國對於大口徑單樁基礎施工能量不足，因此採用群樁基礎為最適合使用於我國離岸風場之開發。本研究係為發展群樁基礎支承結構受到反覆載重作用變形有限元素數值模型所進行之前期研究。考慮離岸風機支承結

到不同強度側向靜態載重之變形，並將土壤視為非均質材料，土壤勁度為應力之函數。

二 土壤勁度衰減模型

本研究為能使數值分析結果更加符實際之土壤條件，考慮土壤勁度為應力的函數，如式(1)

$$E_s = \kappa \sigma_{at} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{at}} \right)^\lambda \quad (1)$$

式中 E_s 為土壤勁度

σ_{at} 為大氣壓應力 $100kN/m^2$

σ_z 為有效覆土壓應力

κ 與 λ 為與土壤密度相關係數

若考慮離岸風機支承結構長期受到反覆載重作用，土壤勁度隨著反覆載重次數增加逐漸降低，如圖 2。Kuo et al.(2009)提出土壤勁度隨著反覆載重次數增加而降低之土壤勁度衰減模型法(Stiffness degradation model, SDM)，並應用於單樁基礎受到反覆載重變形分析。Kuo et al.(2009)建議之方法模擬群樁基礎受到反覆載作用之變形。考慮土壤於樁身自重、上部結構自重與設備重量之土壤初始應力狀態，以此初始應狀態之最大主應力 $\sigma_{1,0}$ 與土壤破壞時之最大主應力 $\sigma_{1,f}$ 比值為初使反覆應力比 $X^{(0)}$ ，如式(2)。風機支承結構受到側向靜態載重之反覆應力最大主應力 $\sigma_{1,1}$ 與土壤破壞時之最大主應力 $\sigma_{1,f}$ 比值為靜態載重反覆應力比 $X^{(1)}$ ，如式(3)。土壤壤受側向載重應力狀態，如圖 3。

$$X^{(0)} = \frac{\sigma_{1,0}}{\sigma_{1,f}} \quad (2)$$

式中 $X^{(0)}$ 為初始反覆應力比

$\sigma_{1,0}$ 為初始應力狀態最大主應力

$\sigma_{1,f}$ 為土壤破壞時最大主應力

$$X^{(1)} = \frac{\sigma_{1,1}}{\sigma_{1,f}} \quad (3)$$

式中 $X^{(1)}$ 為側向靜態載重反覆應力比

$\sigma_{1,1}$ 為受側向靜態載重之反覆應力最大主應力

由上述之初始反覆應力比與側向靜態載重反覆應力比可得特徵反覆應力比 X_c ，如式

(4)。將式(4)之特徵反覆應力比代入式(5)可得土壤受到反覆載重次數 N 次之割線勁度。

$$X_c = \frac{X^{(1)} - X^{(0)}}{1 - X^{(0)}} \quad (4)$$

式中 X_c 為特徵反覆應力比

$$\frac{E_{s,N}}{E_{s,1}} = \frac{\varepsilon_{p,N=1}^a}{\varepsilon_{p,N}^a} = N^{-b_1(X_c)^{b_2}} \quad (5)$$

式中 $E_{s,N}$ 為反覆應力 N 次下的割線勁度

$E_{s,1}$ 為第一次反覆荷載下之割線勁度

$\varepsilon_{p,N=1}^a$ 為土壤受三軸應力下之軸向塑性應變

$\varepsilon_{p,N}^a$ 為第 N 次反覆載重下的軸向塑性應變

b_1, b_2 為迴歸參數，須根據土壤之動三軸試驗獲得

三 有限元素模型分析

本研究為發展群樁基礎離岸風機支承結構受到反覆載重作用變形分析之前期研究。考慮一 3MW 之離岸風機，葉片、與發電設備約為 300 噸，群樁基礎離岸風機支承結構受到靜態側向載重作用變形分析，本分析模型尚未將海水之效應加以考慮。考慮群樁基礎設置於緊密砂質土壤，土壤之性質如表 1。式(1)中之 κ 與 λ 分別採用 625 與 0.5。式(5)迴歸參數 b_1 與 b_2 分別為 0.12 與 0.32。

本研究中，支承結構平台為 RC 構造，厚度為 0.5m，由 9 根直徑 2m 之鋼管樁支撐。考慮邊界效應與群樁之可能產生之互制效應，群樁之最外為與邊界之距離約為 17 倍樁徑，樁與樁之間距離約為 6 倍樁徑。樁徑為 2m 之群樁基礎之配置如圖 4。圖 5 為離岸風機群樁基礎之立面圖。

應用有限元素分析軟體建立數值模型，根據幾何條件與載重條件，分析模型為軸對稱，因此取二分之一分析，如圖 6。對稱面之邊界條件 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。如圖 6。

四 模擬結果與討論

本研究為模擬離岸風機支承結構受到反覆載重作用變形分析之先期研究，考慮離岸風機受到側向靜態載重 10kN、100kN 與 1000kN 的側向作用力，所產生之側向變形分別為 1cm、3.7cm 及 5.5cm，如圖 6。各種載重條件與位移關係圖，如圖 7。圖中顯示，側向載重由 10kN 增加至 100kN 之勁度大於側向載重由 100kN 增加至 1000kN 之勁度。當支承結構受到較小載重時，土壤未受到破壞，因此導致受到較小載重時勁度較高。當載重增大，部分土壤已破壞承載力降低，因此受到較大載重時勁度較低。歐洲對於離岸風機支承基礎容許變形量通常以旋轉角為建議值，容許旋轉角為 0.5°，換言之，以圖 5 所示之支承結構，位於平台處之容許位移量約 24cm，由圖 8 估計，此風機之側向容許承載力約為 200kN。

五 結論與未來展望

離岸風機支承結構變形過大可能造成運轉中之風機損壞，因此風機支承結構完成初步設計後，如何預估考慮實際土壤效應對風機支承結構變形之影響十分重要，本研究之目的為發展一可靠之數值模型法以估計離岸風機支承結構於側向載重作用之變形。

離岸風機支承結構長期受到反覆載重作用，易造成土壤之性質發生變化，本研究僅就風機支承結構受到側向靜態載重作用之變形建立數值模型，尚未考慮反覆載重之效應以及未將海水效應加以考慮。為求能建立適用於離岸風機支承結構長期受到反覆載重作用之數值模型，考慮反覆載重為未來之發展重點。

六 參考文獻

- [1] Lymon C. Reese & William F. Van Impe, "Single piles and pile groups under lateral loading", A. A. Balkema Rotterdam, 2001, ISBN 9058093409
- [2] Achmus, M., Kuo, Y.-S. and Abdel-Rahman, K., "Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load," *Computers & Geotechnics*, Vol.36, No.5, 2009, pp. 725-735.
- [3] Saglamer A., "Model study of lateral loaded single piles," The measurement, selection and use of design parameters in geotechnical engineering : proceedings of

the Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, England Vol. 2, 1979, pp. 115- 120.

- [4] Kuo, Y.-S., "On the behavior of large-diameter piles under cyclic lateral load," Ph.D. thesis, Heft 65, Leibniz Universität Hannover, 2008
- [5] Simulia, "ABAQUS User's manual", 2012

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-B3 先導型離岸風電場風機結構與海底基礎 NSC 101-3113-P-006 -016 及國立成功大學邁向頂尖大學計畫經費支持。

八 表格

摩擦角 (°)	土壤單位重 kN/m ³	比重	初始地盤反力模數 kN/m ³
37.5	11	2.65	30000

表 1 緊密砂質土壤性質

九 圖形

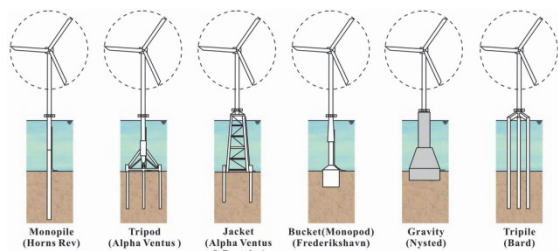


圖 1 離岸風機常用基礎 (Kuo,2012)

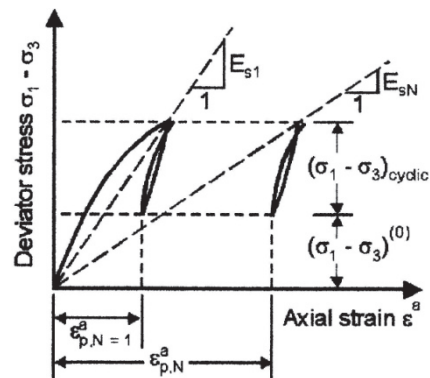


圖 2 土壤勁度衰減 (Kuo et al., 2009)

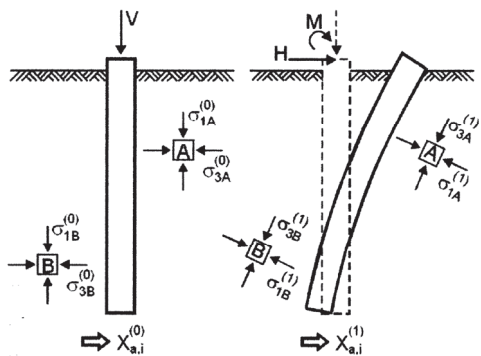


圖 3 土壤受側向載重應力狀態(Kuo et al., 2009)

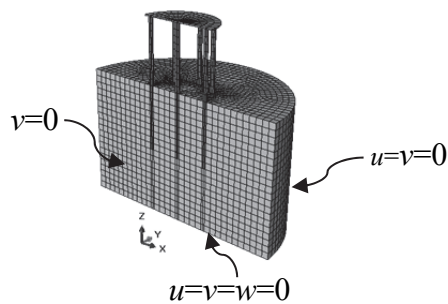


圖 6 數值模型邊界條件

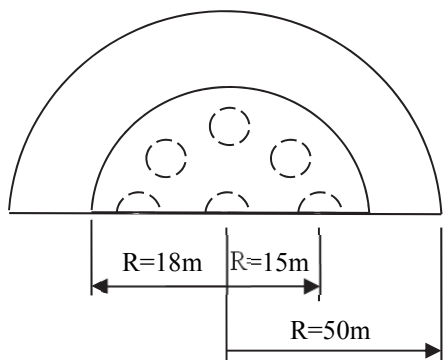


圖 4 群樁基礎配置(未按比例)

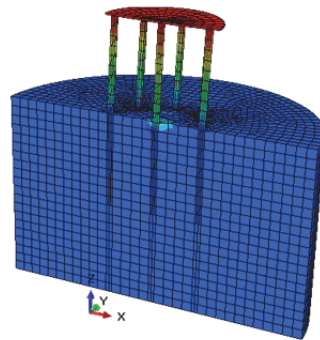


圖 7 群樁基礎受力變形圖

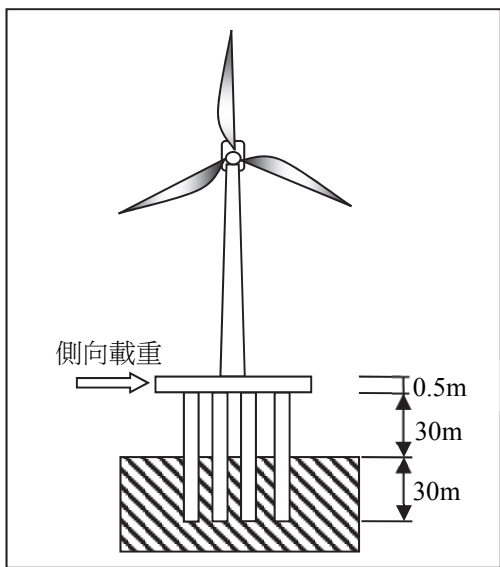


圖 5 離岸風機群樁基礎之立面圖(未按比例)

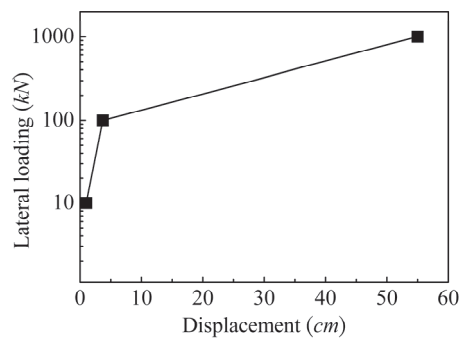


圖 8 群樁基礎側向載重與位移關係圖