

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0446

局部冲刷对风机支撑系统承载性能的影响

刘红军^{1,2}, 杨 奇²

(1. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 海上风力发电作为一种绿色能源越来越受到重视, 单桩基础局部冲刷的研究受到广泛关注。建立了不同冲刷深度的海上风机系统模型, 对各模型进行静力、动力分析。结果与前人冲刷模型试验吻合, 随着桩基冲刷深度的增大, 支撑系统的最大水平位移、最大水平应力和最大弯矩值逐渐增加。冲刷深度为两倍桩径时, 最大水平位移、应力及弯矩分别比无冲刷条件下增加了 3.61%、12.7%、10.3%。风机系统的自振频率随冲刷深度的增加而降低, 高阶频率更易受影响。桩基冲刷对风机系统的动力特性有显著影响, 塔顶水平位移时程曲线随冲刷深度不断上移。海上风机设计时必须考虑冲刷对支撑系统承载性能的影响。

关 键 词: 局部冲刷; 单桩基础; 冲刷深度; P - y 曲线; 动力响应

中图分类号: TK 83

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2018)02—0722—06

Influence of local scour on bearing performance of wind turbine supporting system

LIU Hong-jun^{1,2}, YANG Qi²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: As one type of green energy, offshore wind power has been paid more and more attention. There are extensive research focused on local scour of the monopile foundation. In this paper, a model of offshore wind turbine system with different scour depths is established. The static and dynamic analysis of the model is carried out. Results are in good agreement with the previous scouring model test. As the increase of scour depth, the maximum horizontal displacement, the maximum horizontal stress and the maximum bending moment values of the support system increase gradually. When the scour depth is twice the pile diameter, the maximum horizontal displacement, stress and bending moment are increased by 3.61%, 12.7% and 10.3% respectively, comparing to those under the condition without local scour. The natural frequency of the system decreases with increase of scour depth, and frequencies of high order are more susceptible. Scour around pile foundation has a significant impact on dynamic characteristics of system. The horizontal displacement at the top of the tower constantly increases with scour depth. The influence of scour on the bearing performance of the supporting system must be considered in the design of offshore wind turbines.

Keywords: local scour; monopile foundation; scour depth; P - y curves; dynamic response

1 引 言

海上风能已经成为当下最有效最实用的新型可再生能源, 并逐步代替了人们对化石燃料的依赖。因此, 对海上风机系统的研究成为了当务之急^[1]。海上风机基础形式多样, 目前以单桩为主, 因其结构较为简单, 占用面积小, 承载力高, 沉降量小且均匀, 适用范围广, 使用比例高达 60%以上^[2]。

海上风机所处的海洋环境极其复杂, 波流作用

会在桩基周围形成马蹄形漩涡和漩涡脱落, 常常导致桩基周围受到局部冲刷^[3]。目前, 大多数学者对桩基周围局部冲刷的研究主要集中在通过模型试验和数值分析探讨局部冲刷机制以及冲刷深度, 针对局部冲刷对风机支撑系统的承载性能和动力特性影响的研究却很少。Sumer 等^[4]开展了大型水槽、小型水槽以及稳定流单独作用的单桩冲刷模型试验, 测量了冲刷深度、剪切应力并详细描述了冲刷过程, 得到了桩基在波流作用下的冲刷深度 $S/D = S/D$

收稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41572247); 山东省科技攻关资助项目 (No. 2014GGX104007)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572247) and the Science and Technology Research Projects of Shandong Province (2014GGX104007).

第一作者简介: 刘红军, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事海洋岩土方面的研究。E-mail: hongjun@ouc.edu.cn

(θ, Re, k^*, KC) , 其中 S 为冲刷深度, D 为桩径, θ 为希尔兹数, Re 为雷诺数, k^* 为桩基表面粗糙度与桩径的比值, KC 为 Keulegan-Carpenter 数。刘德良等^[5]建立了波浪场、流场、海床剪应力、冲淤形态数值模型, 开展了室内模型试验, 对最大冲刷深度进行测量并探讨了冲刷深度的影响因素。闫澍旺等^[6]研究了不同类型接触单元和土体单元下冲刷后的桩基承载性能的变化规律。Prendergast 等^[7]通过在密砂中进行的单桩冲刷模型试验, 并利用静力触探 (CPT) 和多道面波分析方法 (MASW) 进行原位测试, 得到了砂土刚度指标桩端摩阻力 q_c 和剪切波速度 v , 研究了单桩自振频率与冲刷深度的关系。Whitehouse 等^[8]开展了若干单桩冲刷模型试验, 研究了不同环境下的冲刷过程和冲刷深度, 并得到了有效的防冲刷方案。

针对桩基局部冲刷问题, 本文以黄河三角洲为背景, 通过不断移去桩-土相互作用单元建立不同冲刷深度下的风机系统模型, 并输入 P - y 曲线, 模拟施加波浪、潮流以及风荷载, 研究冲刷对风机支撑系统承载性能的影响, 为海上风机设计提供理论基础。

2 桩基冲刷机制概述

2.1 桩基与波浪相互作用

海上风电场的建立导致桩基改变了周围的海洋环境, 波浪和潮流对桩基的冲击会在桩基的迎流面形成马蹄形漩涡, 在背流面形成漩涡脱落, 如图1所示。马蹄形漩涡和漩涡脱落是造成桩基周围局部冲刷的主要原因^[9]。前人的研究证明这两种涡流作用与波高、波长以及流速有关, 波流耦合作用下的冲刷程度比波浪和潮流单独作用下大。由于波流作用, 桩基两侧和后方分别产生绕流和裂流, 使海床表面的泥沙起动、悬浮、带走, 当带走的泥沙与流入的泥沙量相等时, 达到平衡, 最终在桩基周围形成冲刷坑。

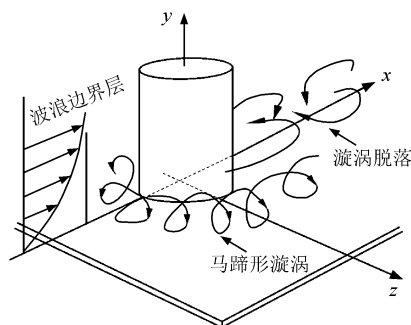


图1 单桩周围的涡流

Fig.1 Vortex around monopile

2.2 桩-土相互作用

海上风机桩基础主要根据美国石油研究院 (API) 建议的 P - y 曲线来设计^[10], P - y 曲线法就是在水平力 H 的作用下, 泥面以下深度 X 处的土反力 P 与该点桩的挠度 y 之间的关系曲线, 基本方程为

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + bP(x, y) = 0 \quad (1)$$

式中: $P(x, y)$ 为地基反力; y 值为挠度; x 值为沿桩身的长度; EI 为桩的抗弯刚度; b 为桩截面的计算宽度。

式 (1) 综合反映了桩周土的非线性、桩的刚度和外载荷作用性质等特点^[11]。王腾等^[12]通过水平荷载下的单桩模型试验, 以 API 砂土的 P - y 曲线表达式为基础, 得到了黄河粉土的 P - y 曲线为

$$P = 1.26 P_u \tanh(kzy / P_u) \quad (2)$$

式中: P_u 为承载力极限; k 为初始地基反力模量; z 为深度。

验证表明, 式 (2) 适用于黄河粉土。本文采用地基反力法应用 Winkler 地基模型, 把桩周土离散为若干单独作用的弹簧, P - y 曲线计算基于式 (2), 桩基及土体参数见下文。

3 风机系统冲刷模型

3.1 风机及环境参数

黄河三角洲拟建 3.6 MW 海上风机发电系统, 风轮和机舱总重为 290 t。海面以上为风机塔架和三叶式风轮, 叶片长度为 65 m, 叶轮直径为 122 m。塔架与过渡段视为整体, 长为 64 m, 直径从 4 m 过渡到 3 m。基础形式采用单桩基础, 设计桩径为 4 m, 壁厚为 55 mm, 桩长为 30 m, 插入海床面以下 20 m, 海床土体主要为粉土, 重度为 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, 土粒相对密度为 2.71, 黏聚力 $c = 12 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 。50 a 一遇的最大风速为 31 m/s^[13], 海水深度为 10 m, 流速在 2.5~40 cm/s, 采用 50 a 一遇的波浪荷载, 通过 water table 输入, 有效波高 6.7 m, 有效周期 8.6 s^[14]。风机叶片材料采用环氧玻璃钢, 其余结构材料均采用同一种钢材。

3.2 不同冲刷深度的有限元模型

模型采用 PIPE16、PIPE59、COMBIN39 和 BEAM188 共 4 种单元类型。PIPE16 单元用于机舱、轮毂和海床面以下桩体结构, 不考虑塑性。PIPE59 用于海床面以上的桩体结构, 可以考虑塑性。COMBIN39 用于模拟桩-土相互作用的关系, 需要输入 P - y 曲线, 通过移去 COMBIN39 单元数来模拟不同的冲刷

深度。BEAM188 用于模拟风机叶片。基于 Melville 等^[15]和 DNV^[16]推荐的设计冲刷深度分别为 $2.4D$ 和

$1.3D$, 本文取最大冲刷深度为 $2D$, 不同冲刷深度的有限元模型如图 2 所示。

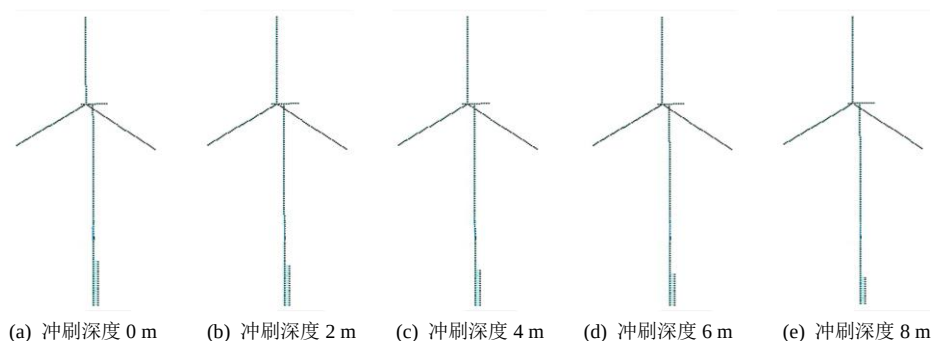


图 2 不同冲刷深度的有限元模型

Fig.2 Finite element models of different scour depths

3.3 模型验证

桩-土相互作用直接采用王腾等^[12]试验得出的 P - y 曲线表达式, 模型合理可靠。模型求解得到黄河三角洲拟建风机的一阶自振频率随冲刷深度 S/D 的变化趋势与 Prendergast 等^[7]极密砂中模型试验所得结果基本一致, 如图 3 所示。图 3 表明有限元解与前人模型试验所得结果基本相同, 虽有一定偏差, 可认为本模型是合理可靠的。

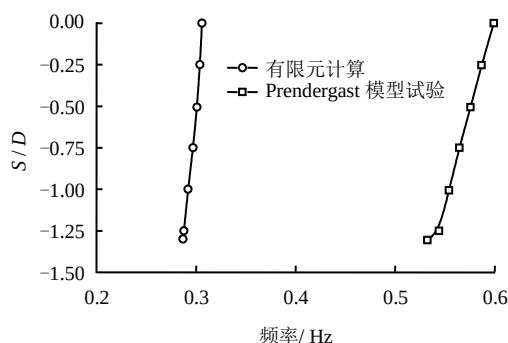


图 3 Prendergast 试验结果与本模型计算结果

Fig.3 Comparison between natural frequency by proposed procedure and experimental result by Prendergast

4 结果分析

4.1 静力分析

风荷载等效为塔顶静荷载, 风速采用 31 m/s , 荷载大小由风压理论计算得到。通过静力求解得到了风机系统变形图、节点水平方向的位移分布、单元的水平应力分布和弯矩沿支撑系统的分布, 如图 4 所示。由于篇幅有限, 本文只列出冲刷深度 $S/D = 1.25$ 时的图形。由图 4 可知, 最大水平位移出现在塔顶, 最大水平应力和最大弯矩均出现在海床面以下 5 m 附近。

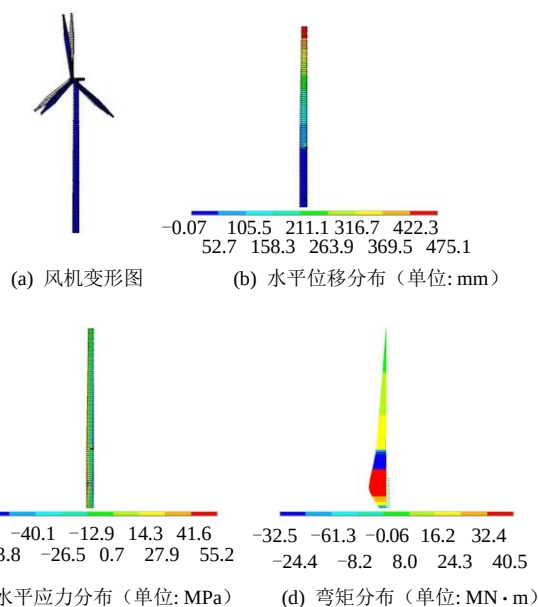


图 4 $S/D = 1.25$ 时的静力求解结果

Fig.4 Static solutions of $S/D = 1.25$

最大水平位移 $U_{x\max}$ 、最大水平应力 $S_{x\max}$ 、最大弯矩 $M_{\max}$ 与冲刷深度 S/D 的关系曲线如图 5 所示。冲刷深度为 0 时, 最大水平位移为 467.5 mm 、最大水平应力为 52.9 MPa 、最大弯矩为 $39 \text{ MN}\cdot\text{m}$; 冲刷深度为 $2D$ 时, 最大水平位移为 484.4 mm 、最大水平应力为 59.6 MPa 、最大弯矩为 $43 \text{ MN}\cdot\text{m}$, 分别比原来增加了 3.61% 、 12.7% 、 10.3% 。图 5 明显反映了支撑系统的最大水平位移、最大水平应力和最大弯矩随着冲刷深度的增加而增大。当 $S/D < 1$ 时, 随着冲刷深度的增大, 三者变化不大; 当 $S/D > 1$ 时, 三者受冲刷深度的影响显著; 对于最大水平位移在 $S/D > 2$ 以后有趋于平衡的趋势。桩基局部冲刷对支撑系统的承载性能是有显著影响的, 在风机设计时应详细分析。

4.2 模态分析

模态分析时采用 Block Lanczos 法, 提取前 5 阶模态, 振型如图 6 所示。风机系统模型在低阶振动时, 主要为叶片的转动和摆动以及塔架的摆动, 在高阶自振时, 才会出现单桩基础的振动。说明局部冲刷对风机系统低阶振动影响较小, 主要表现在高阶振动时的影响, 各阶自振频率与冲刷深度关系如图 7(a)所示。图中可以看出各阶频率随冲刷深度的增加而降低, 前两阶自振频率降低幅度不大, 从第 3 阶开始, 自振频率的降低幅度随着冲刷深度增加变得更明显。各阶自振频率 f_{ij} 与冲刷深度为 0 时的自振频率 f_{i0} 之比 (其中 i 表示阶数, j 表示冲刷深度 S/D) 与冲刷深度的变化关系如图 7(b)所示。

随着冲刷深度的不断增大, 高阶自振频率的 f_{ij}/f_{i0} 值越小, 同样说明支撑系统的自振频率从第 3 阶开始发生明显变化。支撑系统一阶自振频率在风机马达转动频率 1 P (0.22 Hz) 和叶轮扫掠频率 3 P (0.66 Hz) [7] 之间, 不会发生共振, 但随冲刷深度的增大, 一阶自振频率可能降低到 1 P 范围内, 因此, 风机设计时必须考虑冲刷深度对支撑系统自振频率的影响, 才能更好地避免共振现象的发生。

4.3 瞬态分析

瞬态分析采用完全法, 阻尼系数 α 、 β 由模态分析得出的前两阶自振频率求得。前 100 s 响应内不同冲刷深度模型塔顶处水平位移时程曲线如图 8 所示。

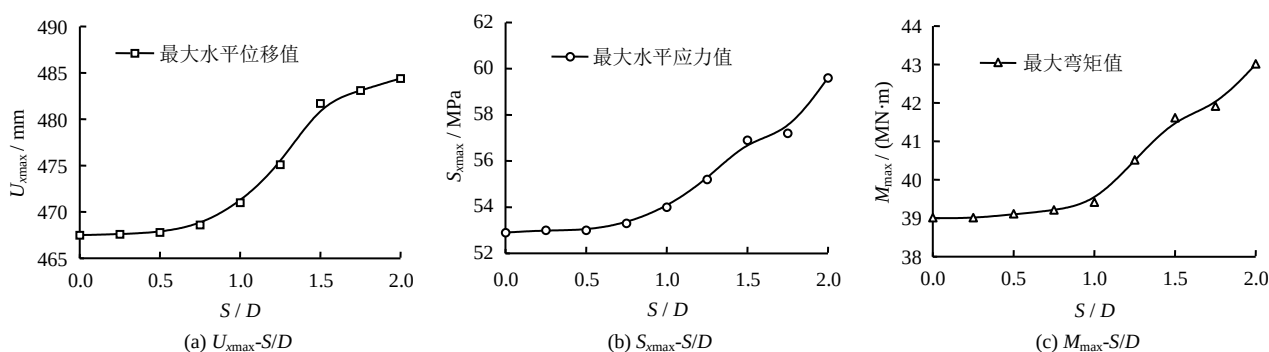


图 5 支撑系统承载性能与冲刷深度关系曲线

Fig.5 Relationships of bearing performance and scour depth

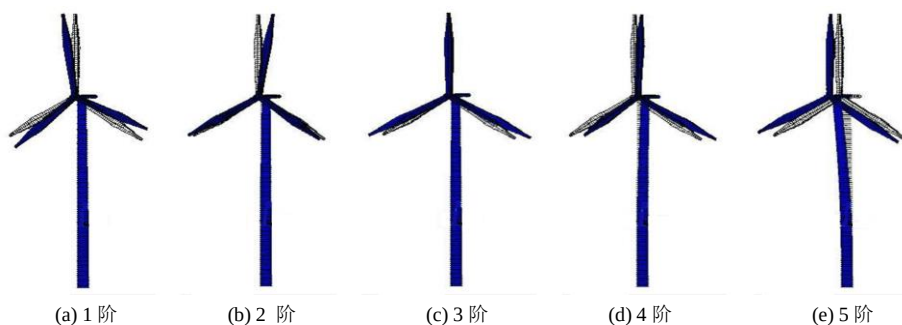


图 6 前 5 阶振型

Fig.6 The first five order modes

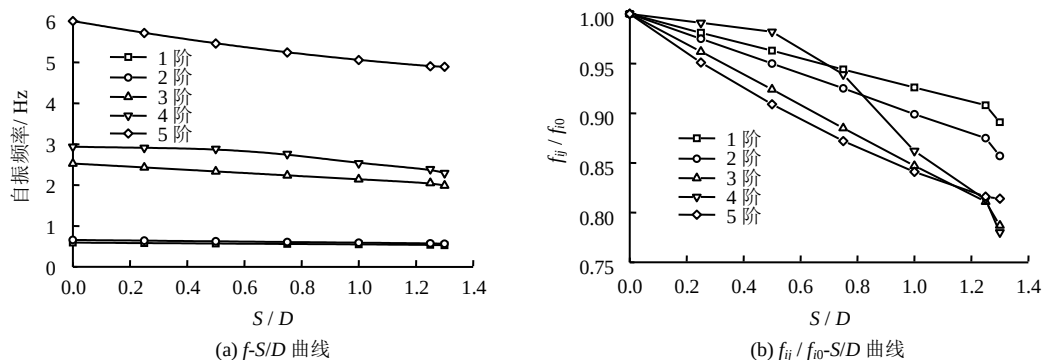


图 7 风机系统频率与冲刷深度的关系

Fig.7 Relationships between nature frequencies of wind turbine and scour depth

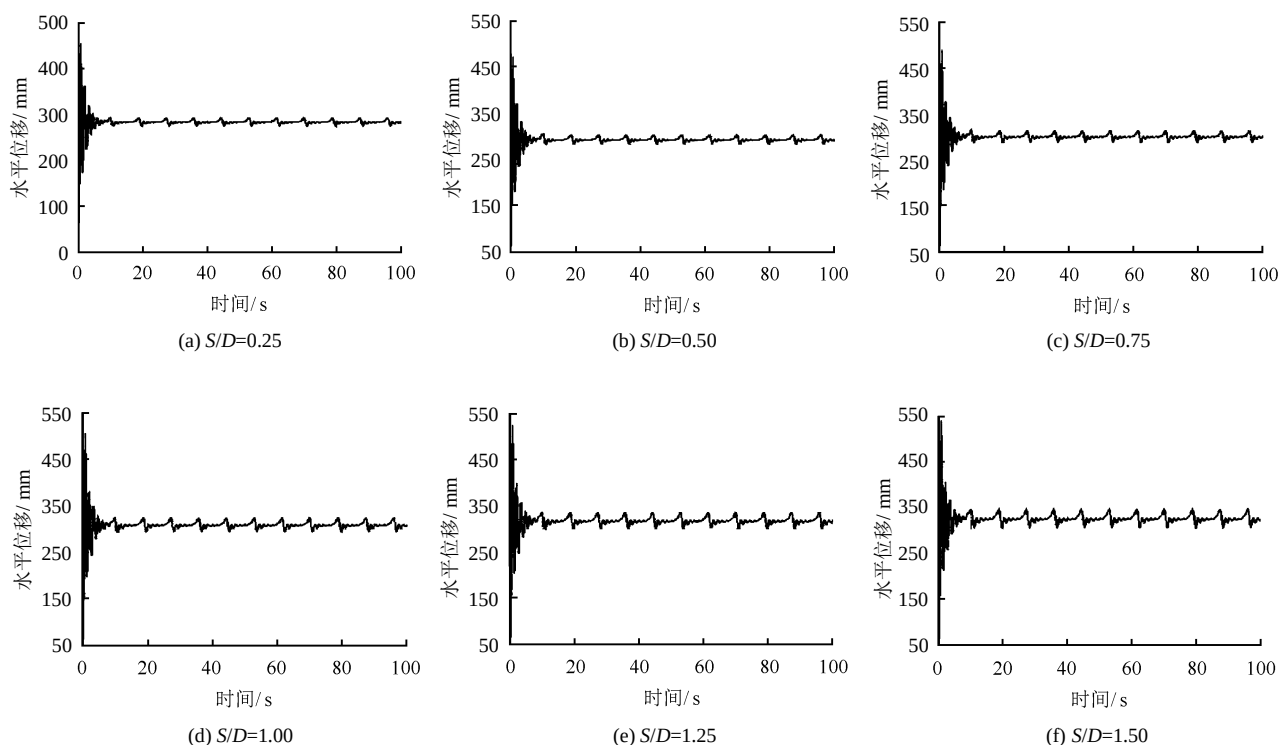


图8 不同冲刷深度下塔顶水平位移时程曲线

Fig.8 Horizontal displacement-time curves of tower top for different scour depths

各模型计算结果均表明,在风荷载、波浪、潮流共同作用下,塔顶处将产生很大的水平位移,塔顶的水平位移相对于其他位置的水平位移更易受影响,在设计时应重点考虑。时程曲线在前期没有规律的变化,后期呈一定波形变化,这是由于在施加荷载时,将风荷载等效为水平静荷载,前期明显是风、浪、流三者共同作用,后期主要是波浪和潮流作用,所以各模型塔顶的最大水平位移出现在前期,分别为 467.1、481.3、492.2、514.9、533.2、542.1 mm。从图 8 还可看出,随着冲刷深度的逐渐增大,整个时程曲线上移,塔顶水平位移不断增大。在风机设计时,必须考虑桩基冲刷对动力特性的影响。

5 结 论

本文通过 ANSYS 有限元分析软件,采用 PIPE16、PIPE59 管单元和 COMBIN39 桩-土相互作用单元和 BEAM188 梁单元,对海上风机系统建立不同冲刷深度的有限元模型并进行了静力、模态、瞬态分析,得出以下结论:

(1) 冲刷深度 $S/D=0$ 到 $S/D=2$,支撑系统的最大水平位移、最大水平应力和最大弯矩值分别比原来增加了 3.61%、12.7%、10.3%,随着冲刷深度的增大,三者逐渐增加,桩基冲刷对海上风机支撑系统的承载性能有一定的削弱,不容忽视。

(2) 不同冲刷深度模型的振型差异不大,风机在低阶振动时对支撑结构的影响不大,主要是叶片、机舱、轮毂和塔架的振动。风机自振频率随冲刷深度增加而降低,风机设计时,考虑桩基冲刷才能更好地避免共振现象的发生。

(3) 塔顶水平位移相对于其他位置的水平位移更易受桩基冲刷的影响。随着冲刷深度的增大,整个塔顶水平位移时程曲线不断上移,最大水平位移不断增加,说明桩基冲刷对风机系统的动力特性有很大影响。

(4) 桩基承载性能的降低是由于局部冲刷致使桩基的有效嵌入深度减小,可以增加桩长以达到防冲刷效果。

参 考 文 献

- [1] 李俊峰. 2012 中国风电发展报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
LI Jun-feng. China wind power development report 2012[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.
- [2] 王淼, 吴云青, 苏萌. 单桩式基础应用于我国海上风电的可行性探讨[J]. 电力建设, 2013, 34(4): 63—66.
WANG Miao, WU Yun-qing, SU Meng. Application of

- single pile foundation in offshore wind power in China[J]. **Electric Power Construction**, 2013, 34(4): 63—66.
- [3] 李林普, 张日向. 波流作用下大直径圆柱体基底周围最大冲刷深度预测[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(5): 676—680.
- LI Lin-pu, ZHANG Ri-xiang. Forecast of the maximum scour depth around vertical cylinders of large diameter combined wave and current action[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2003, 43(5): 676—680.
- [4] SUMER B M, FREDSE J, CHRISTIANSEN N. Scour around vertical pile in waves[J]. **Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering**, 1992, 118(1): 15—31.
- [5] 刘德良, 李玉成, 李林普, 等. 波流作用下大尺度圆柱周围局部冲刷深度简化数值模型[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(6): 866—869.
- LIU De-liang, LI Yu-cheng, LI Lin-pu, et al. A simple numerical model of local scour depth around a large-scale circular cylinder due to combined wave-current action[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2004, 44(6): 866—869.
- [6] 闫澍旺, 高江林, 王成华. 水流冲刷对桩基承载性状影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1458—1464.
- YAN Shu-wang, GAO Jiang-lin, WANG Cheng-hua. Numerical simulation on effect of fluid scour on bearing behavior of pile foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1458—1464.
- [7] PRENDERGAST L J, GAVIN K, DOHERTY P. An investigation into the effect of scour on the natural frequency of an offshore wind turbine[J]. **Ocean Engineering**, 2015, 101: 1—11.
- [8] WHITEHOUSE R J S, SUTHERLAND J, O'BRIAN D. Seabed scour assessment for offshore windfarm[C]//The Proceedings of 3rd International Conference on Scour and Erosion. Gouda, The Netherlands: CURNET, 2006.
- [9] SUMER B M, FREDSE J. Wave scour around a large vertical circular cylinder[J]. **Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering**, 2001, 127(3): 125—134.
- [10] 李洪江, 刘松玉, 童立元. 基于应力增量的单桩 p - y 曲线分析方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2916—2922.
- LI Hong-jiang, LIU Song-yu, TONG Li-yuan. A method for p - y curve of a single pile based on stress increment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2916—2922.
- [11] JEONG S, KIM Y, KIM J. Influence on lateral rigidity of offshore piles using proposed p - y curves[J]. **Ocean Engineering**, 2011, 38: 397—408.
- [12] 王腾, 王天霖. 粉土 p - y 曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1343—1346.
- WANG Teng, WANG Tian-lin. Experimental research on silt p - y curves[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1343—1346.
- [13] 刘晋秀, 江崇波, 范学炜. 黄河三角洲近 40 年来气候变化趋势及异常特征[J]. 海洋预报, 2002, 19(2): 31—35.
- LIU Jin-xiu, JIANG Chong-bo, FAN Xue-wei. The climate change tendency and the abnormal characters of the Yellow River delta in recent 40 years[J]. **Marine Forecasts**, 2002, 19(2): 31—35.
- [14] 刘红军, 王虎, 张民生, 等. 波浪作用下黄河三角洲粉质土海床动力响应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2065—2071.
- LIU Hong-jun, WANG Hu, ZHANG Min-sheng, et al. Analysis of wave-induced dynamic response of silty seabed in Yellow River delta[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 2065—2071.
- [15] MELVILLE B W, SUTHERLAND A J. Design method for local scour at bridge piers[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1988, 114(10): 1210—1226.
- [16] Det Norske Veritas. DNV-OS-J101 Design of offshore wind turbine structure[S]. [S. l.]: Det Norske Veritas, 2004.