

考虑冲刷的单桩式海上风力机动力响应研究

綦元敏, 闫康昊, 黄丹, 姜冬菊
(河海大学力学与材料学院, 江苏南京 211100)

摘要: 为了研究复杂海洋环境下桩周冲刷对海上风力机动力响应的影响, 以美国可再生能源实验室 5 MW 海上风力机为研究对象, 建立风力机塔架-单桩-土体有限元模型, 计入风浪和地震荷载对冲刷情况下的单桩式海上风力机进行动力响应研究。对比分析不同冲刷深度以及冲刷坡角对风力机系统固有频率和动力响应的影响。研究表明: 当冲刷深度增加到二倍桩径时, 风力机一阶固有频率降低至转子 1P 频率附近, 容易引起共振; 在风浪荷载以及风浪、地震联合荷载作用下, 冲刷坡角不变, 风力机最大位移与弯矩随着冲刷深度增加而增大, 疏松土质条件下的增量大于紧密土; 保持冲刷深度不变, 冲刷坡角的变化对风力机动力响应影响较小。

关键词: 单桩式海上风力机; 动力响应; 冲刷; 地震; 有限元

中图分类号: TK83 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2023.08.016

[引用本文格式] 綦元敏, 闫康昊, 黄丹, 等. 考虑冲刷的单桩式海上风力机动力响应研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(8): 125-132. QI Yuan-min, YAN Kang-hao, HUANG Dan, et al. Research on dynamic response of monopile offshore wind turbines considering scour [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 125-132.

Research on Dynamic Response of Monopile Offshore Wind Turbines considering Scour

QI Yuan-min, YAN Kang-hao, HUANG Dan, JIANG Dong-ju
(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, China, Post Code: 211100)

Abstract: In order to study the impact of pile scour on the dynamic response of offshore wind turbines in complex marine environment, taking the 5 MW offshore wind turbine of the National Renewable Energy Laboratory (NREL) as an example, the finite element model of wind turbine tower-monopile-soil was established. Considering the wind wave and seismic load, the dynamic response of the monopile offshore wind turbine was investigated under scour conditions. The effects of different scour depth and scour slope angle on natural frequency and dynamic response of wind turbine system were analyzed comparatively. Research shows that as the scour depth increases to twice the pile diameter, the first-order natural frequency of the wind turbine decreases to the vicinity of the one-phase (1P) frequency of rotor, which is easy to cause resonance; under the action of wind wave load and combined wind wave and seismic load, the scour slope angle is unchanged, and the maximum displacement and bending moment of the wind turbine increase with the increase of scour depth, and the increment in loose soil is greater than that in dense soil; the change of scour slope angle has little effect on the dynamic response of wind turbine while

收稿日期: 2022-10-17; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(12072104); 国家重点研发计划(2018YFC0406703)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (12072104); National Key Research and Development Program of China (2018YFC0406703)

作者简介: 綦元敏(1998-), 男, 河海大学硕士研究生.

通讯作者: 黄丹(1979-), 男, 河海大学教授.

the scour depth remains unchanged.

Key words: monopile offshore wind turbines, dynamic responses, scour, seismic, finite element

引 言

海上风能资源丰富、风速稳定,对其利用与开发已成为未来可再生能源领域发展的必然趋势^[1]。我国大多数沿海地区处于地震带交汇处,地震频发,随着风能产业的不断发展,许多风电场将建在地震活跃区域^[2-3],风力机将承受风浪、地震等动力荷载。同时,海水冲刷作用会放大动力荷载的影响^[4]。因此,研究冲刷条件下海上风力机的动力响应具有重要的工程意义。

近年来,已有学者对风力机的冲刷以及动力响应问题开展相关研究。薛九天等人^[5]通过对比分析冲刷前后桩基础的承载力情况,发现桩基础承载性能受冲刷影响显著。何泓男^[6]和张冬冬等人^[7]通过建立室内模型实验和有限元桩土模型,分析了冲刷坑参数对桩基承载力和自振频率的影响。胡丹等人^[8]通过测量冲刷条件下单桩承载力,研究了冲刷对单桩承载力的影响。陈琛等人^[9]研究了冲刷对风力机自振频率的影响,并针对风力机自振频率对风力机基础进行优化设计。Guan 等人^[10]在水槽试验中研究了单桩冲刷过程与振动之间的相互作用。Prendergast 等人^[11]通过砂土中的小尺度模型试验,测量了冲刷条件下风力机固有频率的变化,总结了冲刷对固有频率偏移的影响。宋波等人^[12]通过现场监测发现冲刷对风力机振幅影响明显,数值模拟结果表明,冲刷使得桩基础自振周期增大,对风力机动力响应影响较大。Jiang 等人^[13]提出了一种评估风力机地震响应的方法,研究了冲刷尺寸和沙子相对密度对海上风力机动力响应的影响。然而,现有研究大多集中在冲刷条件对风力机静力承载情况以及自振频率的影响,对风浪、地震等动力荷载作用下海上风力机响应情况的影响仍有待进一步研究,且冲刷条件下风力机动力响应的深入研究对于海上风力机的结构优化也具有重要意义。

本文以美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)5 MW 海上风力机为研究对象,建立风力机塔架-单桩-土体系统有

限元分析模型,结合 FAST 平台分析风、浪荷载,对风力机进行动力响应和模态分析,研究了不同冲刷深度及冲刷坡角对海上风力机固有频率与动力响应的影响。

1 数值模型

1.1 结构建模

NREL 5 MW 海上风力机具体参数如表 1 所示。塔顶和塔底外直径分别为 3.87 和 6 m,壁厚分别为 0.019 和 0.027 m。从塔底到塔顶,外径和壁厚呈线性减小。单桩总长度为 66 m,其中 20 m 在水下,36 m 在海底,另有 10 m 在平均海平面以上。

表 1 NREL 5 MW 风力机几何参数和材料特性
Tab. 1 Geometry and material properties of NREL 5 MW wind turbine

参数	数值
额定功率/MW	5
额定风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	11.4
额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	12.1
风轮直径/m	126
轮毂直径/m	3
塔架高度/m	77.6
塔架直径/m	3.87~6
轮毂质量/kg	56 780
叶片质量/kg	17 740
机舱质量/kg	240 000
塔架壁厚/m	0.019~0.027
泊松比	0.3
弹性模量/GPa	210
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 850
土中的桩长/m	36
桩径/m	6
桩壁厚/m	0.06

将塔架顶部风电机组机舱和叶片所组成的局部系统简化为质点^[14],由 NREL 5 MW 风力机参数可知机舱等结构的质心位置及转动惯量^[15],如表 2 所示。集中质量点与塔顶通过耦合约束,使两部分保持相同自由度。

表 2 塔顶机舱与风轮的集中质量点参数

Tab.2 Concentrated mass point parameters of tower nacelle and wind rotor

质量/kg	距塔顶中心相对位置/m			转动惯量/kg·m ²					
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>xx</i>	<i>yy</i>	<i>zz</i>	<i>xy</i>	<i>xz</i>	<i>yz</i>
3.5×10 ⁵	-0.413 77	0	1.966 98	4.370×10 ⁷	2.353×10 ⁷	2.542×10 ⁷	0	1.169×10 ⁶	0

1.2 土体建模

为考虑不同土体条件对动力响应的影响,选用紧密土与疏松土两种土体^[16],并采用摩尔库伦本构模型^[17]进行模拟,模型参数如表 3 所示。土体半径取 60 m,厚度取 80 m,该模型尺寸可以忽略土体边界的影响^[18]。采用主从接触算法并定义接触对的形式来模拟桩土之间的相互作用。法向接触采用硬接触(Hard),切向采用摩尔-库仑摩擦罚函数,界面滑动摩擦系数选取 $u = \tan(0.75\varphi)$,其中 φ 为土的摩擦角。

表 3 模型参数

Tab.3 Model parameters

土体	密度/ kg·m ⁻³	弹性模量/ MPa	泊松比	摩擦角/ (°)	粘聚力/ kPa
紧密土	1 939.0	50	0.35	37	5
疏松土	1 428.6	20	0.30	28	1

1.3 冲刷建模

根据挪威船级社规范规定,桩周冲刷坑的最大深度等于 1.3 倍桩直径^[19]。在实际的海洋环境中,波浪、水流和潮汐的共存会导致一个极其复杂的时变冲刷交互过程^[20-21]。由于控制冲刷过程的各种参数存在不确定性,因此很难准确预测冲刷深度及冲刷坡角^[11],并且潜在的极端天气条件也会加剧冲刷的不确定性。考虑到这些不确定性,如图 1 所示,冲刷深度 S 为 $0.5D \sim 2D$,增量 $0.5D$ (D 为桩直径)。冲刷角 θ 为 $20^\circ \sim 60^\circ$,间隔为 20° 。冲刷通过去除冲刷线以上相应土壤表示。整体装配模型如图 2 所示。

1.4 模型验证

为验证所建立模型,采用 Lanczos 方法对海上风力机进行模态分析。表 4 为风力机前两阶振型的自振频率 f_0 。从表中数据可见,本文模型所得结果

与文献[22]模型误差均在 5% 以内,具有良好的一致性。

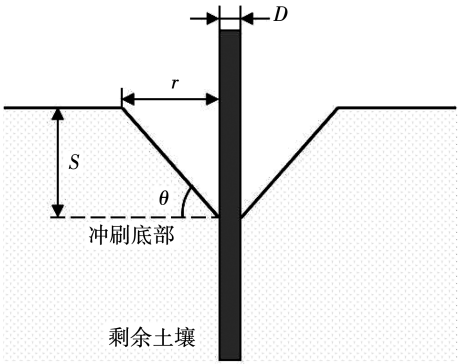


图 1 单桩基础局部冲刷

Fig.1 Local scour of monopile foundation

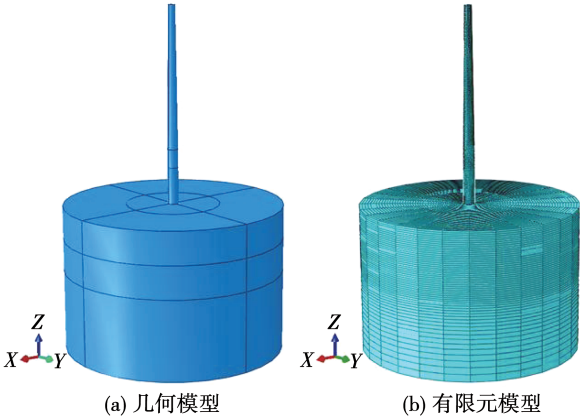


图 2 装配模型

Fig.2 Assembly model

表 4 NREL 5 MW 单桩式海上风力机自振频率

Tab.4 Natural frequencies of NREL 5 MW monopile offshore wind turbine

振型	本文模型 f_0 /Hz	文献[22]模型 f_0 /Hz
1 阶前后向(<i>x</i>)	0.241	0.249
1 阶侧向(<i>y</i>)	0.239	0.248
2 阶前后向(<i>x</i>)	1.506	1.534
2 阶侧向(<i>y</i>)	1.335	1.383

2 荷载计算

2.1 气动荷载

风力机气动荷载使用叶素动量理论进行计算,将叶片由三维简化为二维。根据叶片翼型气动特性求解叶片单位长度气动荷载,沿叶片长度方向进行积分可得整体风轮荷载^[23]。

单位长度叶片的推力分量与扭矩分量为:

$$dT = \frac{1}{2} \rho c \frac{(\omega r (1 + a'))^2}{\cos^2 \varphi} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) dr \quad (1)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho c \frac{v^2 (1 - a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi - C_d \sin \varphi) dr \quad (2)$$

式中: dT —推力分量, N; dM —扭矩分量, N · m; ρ —空气密度, kg/m³; c —翼型弦长, m; ω —风轮转速, rad/s; r —局部半径, m; φ —流动角, rad; C_l —升力系数; C_d —阻力系数; v —湍流风来流速度, m/s; a —轴向诱导因子; a' —切向诱导因子。

本文采用 NREL 开发的 Turbsim 软件生成计算风域。运用基于叶素动量理论方法的 FAST 软件求得额定风速为 11.4 m/s 时的风轮推力,如图 3 所示。以集中荷载的形式将风轮推力和弯矩加载至塔筒顶部的集中质量点上。

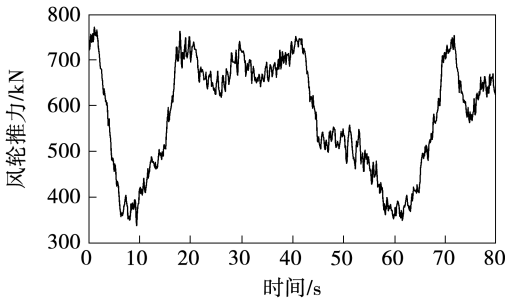


图 3 风轮推力时程曲线

Fig. 3 Wind wheel thrust time history curve

2.2 波浪荷载

风力机基础受到海洋中波浪和海流的作用。单桩基础直径相对于波浪的波长较小,可将单桩视为小直径桩柱结构。计算波浪力时采用 Morison 方程进行求解,单位长度波流力为:

$$f(t) = \frac{1}{2} C_a \rho' D u(t) |u(t)| + \frac{1}{4} C_m \rho' D^2 \dot{a}(t) \quad (3)$$

式中: $f(t)$ —单位长度波流力, N; C_a —拖曳力系数; C_m —惯性力系数; ρ' —海水密度, kg/m³; D —桩直径, m; u —水质点速度, m/s; $\dot{a}$ —水质点加速度, m/s²。

通过 FAST 求得桩基础波浪推力,如图 4 所示。

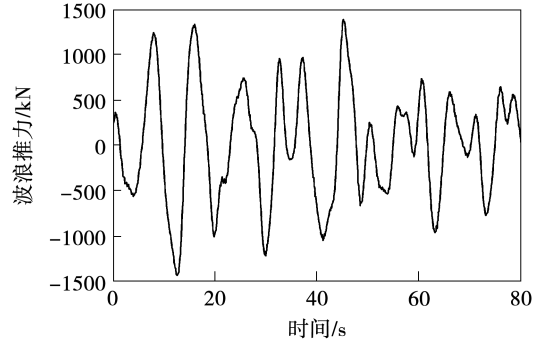


图 4 波浪推力时程曲线

Fig. 4 Wave thrust time history curve

2.3 地震荷载

地震选用太平洋地震工程研究中心数据库中的 Chi-Chi 地震,其地震加速度时程曲线如图 5 所示。地震加速度由 CHY065 站台测得,峰值加速度缩放为 0.3 g。

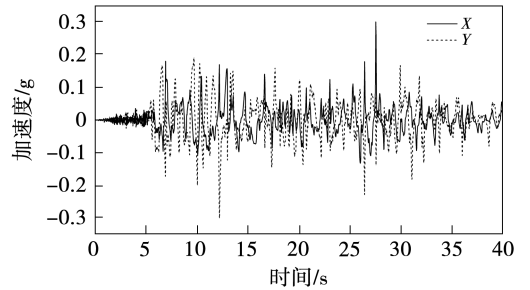


图 5 地震加速度时程曲线

Fig. 5 Seismic acceleration time history curve

3 结果分析

3.1 考虑冲刷的风力机固有频率分析

一阶模态频率对海上风力机的设计至关重要^[11]。为防止共振,风力机 1 阶模态频率应落在转子频率($1P=0.115 \sim 0.2$ Hz)和叶片通过频率($3P=0.345 \sim 0.6$ Hz)之间^[24]。图 6 为不同冲刷深度下的 1 阶前后固有频率 f_{1x} 。从图 6 中可见, f_{1x} 随着冲刷深度的增加而减小。当冲刷深度从 0 扩展到 $2D$

时,紧密土 f_{1x} 减小了约 10.0%,频率减小到 0.220 2;疏松土中 f_{1x} 减小约 11.2%,频率减小到 0.209 6。NREL 5 MW 风力机第一固有频率最小避开率为 5% (0.21 ~ 0.33 Hz)^[25],风力机在紧密土中的频率非常接近避开频率,而在疏松土中已经小于避开频率,这意味着风力机结构可能会受到叶片旋转、风浪荷载的激励而产生共振。为了保证结构的安全,需要对海上风力机的固有频率进行周期性监测。

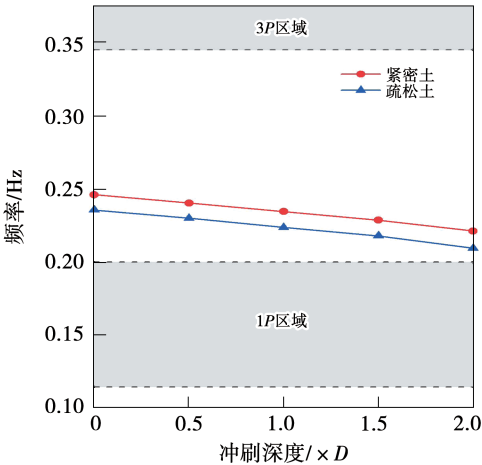


图 6 不同冲刷和土壤条件下的 1 阶固有频率

Fig. 6 One-phase natural frequency under different scour and soil conditions

3.2 冲刷条件下风浪荷载响应分析

考虑风浪联合荷载作用下,冲刷深度对最大位移和弯矩的影响(冲刷坡角与土体内摩擦角相等,紧密土为 37°,疏松土为 28°)。图 7 和图 8 为紧密土和疏松土沿风力机高度方向的最大位移和弯矩包络线。由图 7 可知,在紧密土中,随着冲刷深度增加到 D 和 $2D$,塔顶最大位移分别增加了约 11.9% 和 34.0%,最大弯矩分别增加了 13.9% 和 34.6%,最大弯矩出现在泥线附近。对于疏松土中的风力机,如图 8 所示,当冲刷深度增加到 D 和 $2D$ 时,塔顶处的位移分别增加了约 15.5% 和 59.6%。最大弯矩出现在泥线附近,分别增加 15.5% 和 51.6%。对于疏松土,最大位移与最大弯矩一般大于紧密土,且随着冲刷深度增加,位移与弯矩增量大于紧密土。

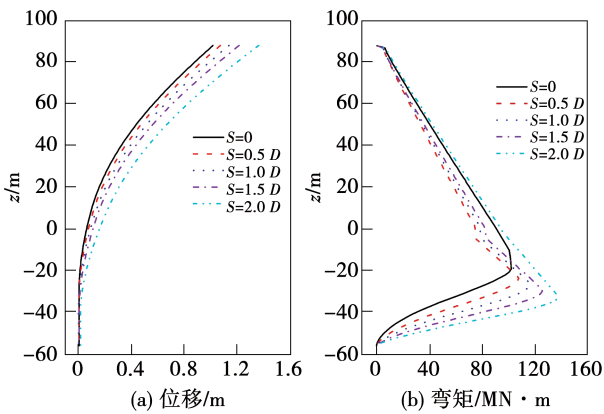


图 7 风浪荷载作用下不同冲刷深度紧密土中风力机响应包络线

Fig. 7 Response envelope of wind turbine in dense soil subjected to wind wave loadings under different scour depths

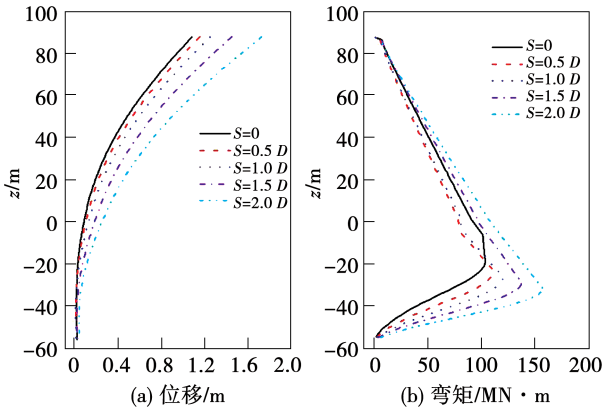


图 8 风浪荷载作用下不同冲刷深度疏松土中风力机响应包络线

Fig. 8 Response envelope of wind turbine in loose soil subjected to wind wave loadings under different scour depths

3.3 冲刷条件下风浪-地震联合荷载响应分析

保持冲刷坡角为土体内摩擦角(紧密土为 37°,疏松土为 28°),在不同冲刷深度下,对风力机施加风浪-地震联合荷载。图 9 和图 10 为不同土体条件下的位移和弯矩响应包络线结果。在紧密土中,随着冲刷深度增加到 $D, 2D$,塔顶的最大位移增加了约 12.5% 和 18.9%。最大弯矩分别增加了 15.8% 和 17.9%,最大弯矩同样出现在泥线附近。对于疏松土中的风力机,如图 10 所示,冲刷深度为

D 和 $2D$ 时,塔顶处的位移增加了约 14.3% 和 26.9%,最大弯矩分别增加 22.9% 和 39.7%。与冲刷条件下风浪荷载单独作用的结果比较可以看出,地震荷载对风力机位移和弯矩响应的影响更大。

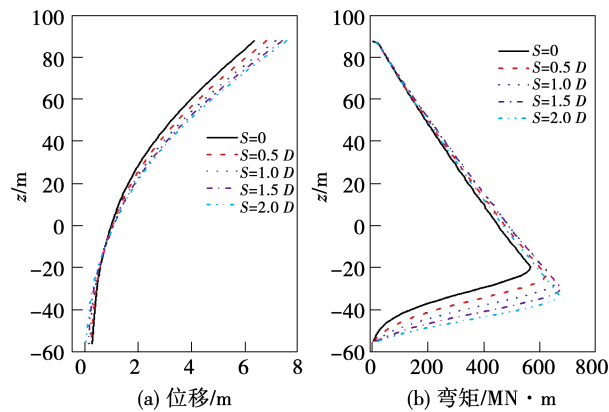


图 9 风浪地震荷载作用下不同冲刷深度紧密土中风力机响应包络线

Fig. 9 Response envelope of wind turbine in dense soil subjected to wind wave seismic loadings under different scour depths

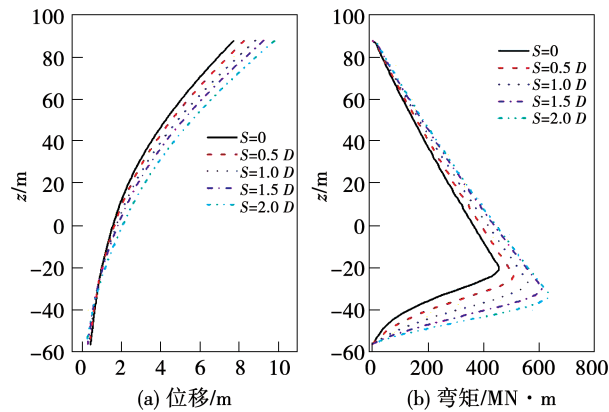


图 10 风浪地震荷载作用下不同冲刷深度疏松土中风力机响应包络线

Fig. 10 Response envelope of wind turbine in loose soil subjected to wind wave seismic loadings under different scour depths

3.4 冲刷坡角对风力机动力响应影响分析

如图 11 所示,仅考虑风浪荷载作用,当冲刷坡角从 20° 增加到 40° 和 60° 时,最大位移分别增加 2.9% 和 0.95%。最大弯矩分别增加 1.6% 和 1.3%。如图 12 所示,考虑风浪-地震联合荷载作

用,当冲刷坡角从 20° 增加到 40° 和 60° 时,最大位移分别增加 4.6% 和 5.5%,最大弯矩分别增加 5.7% 和 7.5%。冲刷坡角增大会导致最大位移和最大弯矩增加,但增量均在 8% 以内。由此表明,冲刷坡角对风力机动力响应的影响较小。

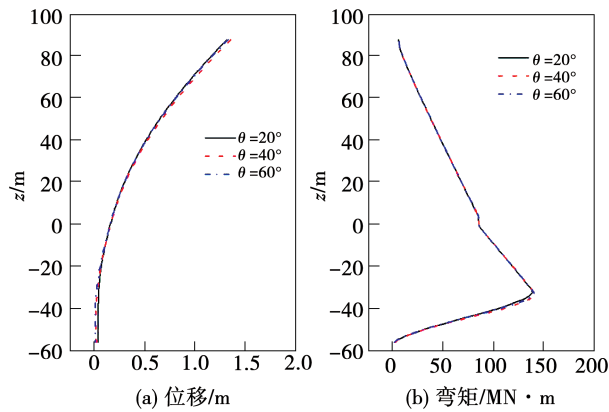


图 11 风浪荷载作用下不同冲刷坡角风力机响应包络线

Fig. 11 Response envelope of wind turbine subjected to wind wave loadings under different scour slope angles

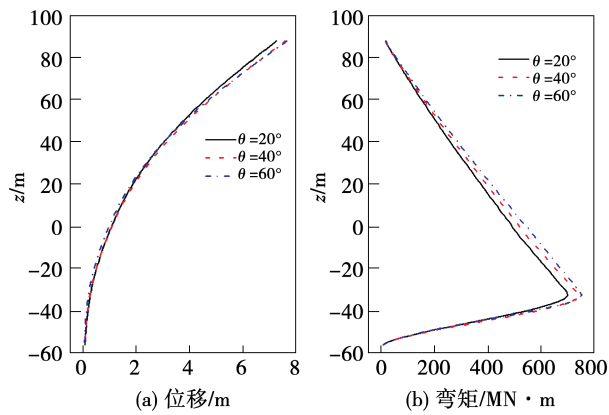


图 12 风浪地震荷载作用下不同冲刷坡角风力机响应包络线

Fig. 12 Response envelope of wind turbine subjected to wind wave seismic loadings under different scour slope angles

4 结 论

以 NREL 5 MW 风力机为研究对象,建立海上风力机和土体有限元模型,通过 FAST 计算风轮推

力和波浪推力,土体底部施加地震加速度荷载,对考虑冲刷条件下的海上风力机进行结构模态分析和动力响应分析,得出以下结论:

(1) 风力机系统的固有频率受冲刷深度的影响较明显,冲刷深度增加使风力机一阶频率降低;当局部冲刷深度增加为 $2D$,风力机系统的一阶频率下降 10% 以上,接近风力机转子 $1P$ 频率,风力机在疏松土中的频率无法满足风力机的最小避开率(5%)要求,容易引起共振。

(2) 风浪荷载作用下,随着冲刷深度的增加,风力机位移、弯矩逐渐增大。不同紧密程度的土体风力机响应值略有差别,但响应变化趋势相同,疏松土受影响更明显。

(3) 风浪地震荷载下,最大位移出现在塔顶位置,最大弯矩出现在泥线附近。冲刷坡角不变时,随着冲刷深度的增加,塔顶最大位移和桩身最大弯矩均不断增大;疏松土中位移与弯矩增量大于紧密土;地震荷载相较于风浪荷载而言,对动力响应影响更大。

(4) 保持冲刷深度不变,冲刷坡角增大则最大位移与弯矩增加,但增量较小,小于 8%。

参考文献:

- [1] DAI S, HAN B, WANG B, et al. Influence of soil scour on lateral behavior of large-diameter offshore wind-turbine monopile and corresponding scour monitoring method [J]. Ocean Engineering, 2021, 239: 109809.
- [2] ZHENG Xiang-yuan, LI Hong-bin, RONG Wei-dong, et al. Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: an experimental study [J]. Marine Structures, 2015, 44: 125 – 141.
- [3] 闫阳天, 杨 阳, 李 春, 等. 基于土 - 结构耦合作用的风力机塔架地震动力学响应分析 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(9): 115 – 122.
YAN Yang-tian, YANG Yang, LI Chun, et al. Analysis of seismic dynamic response of wind turbine based on soil-structure interaction [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(9): 115 – 122.
- [4] JIANG Wen-yu, LIN Chen, SUN Min. Seismic responses of monopile-supported offshore wind turbines in soft clays under scoured conditions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021,

- 142: 106549.
- [5] 薛九天, 王 伟, 杨 敏. 海水冲刷效应对海上风机桩基承载性能的影响分析 [J]. 建筑科学, 2012, 28(S1): 84 – 88.
XUE Jiu-tian, WANG Wei, YANG Min. Analysis of scour effect on bearing performance of offshore wind turbine pile foundation [J]. Building Science, 2012, 28(S1): 84 – 88.
- [6] 何泓男. 冲刷作用下桥梁桩基承载性能演化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
HE Hong-nan. The evolutional study on bearing performance of bridge pile foundation under scour condition [D]. Nanjing: South-east University, 2015.
- [7] 张冬冬, 程 晔, 商红磊, 等. 冲刷引起的土体变化对海上风电结构自振频率的影响研究 [J]. 特种结构, 2017, 34(2): 8 – 12.
ZHANG Dong-dong, CHENG Ye, SHANG Hong-lei, et al. Effects of scour on natural frequencies of offshore wind turbine structures [J]. Special Structures, 2017, 34(2): 8 – 12.
- [8] 胡 丹, 李 芬, 张开银. 冲刷作用下单桩水平承载特性试验研究及数值模拟 [J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 263 – 266.
HU Dan, LI Fen, ZHANG Kai-yin. Experiment on the lateral load capacity of single piles under scour conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 263 – 266.
- [9] 陈 琛, 马宏旺, 李玉韬, 等. 冲刷对海上风电单桩基础自振频率影响的研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 16 – 22.
CHEN Chen, MA Hong-wang, LI Yu-tao, et al. Effects of scour on the natural frequency of offshore wind turbine structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 16 – 22.
- [10] GUAN D, CHIEW Y M, MELVILLE B W, et al. Current-induced scour at monopile foundations subjected to lateral vibrations [J]. Coastal Engineering, 2019, 144: 15 – 21.
- [11] PREDERGAST 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.
- [12] 宋 波, 赵伟娜, 双 妙. 冲刷深度对海上风电塔架地震动力响应的影响分析 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(10): 1351 – 1359.
SONG Bo, ZHAO Wei-na, SHUANG Miao. Analysis of the influence of scour depth on the dynamic response of offshore wind turbine towers under earthquake action [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(10): 1351 – 1359.
- [13] JIANG Wen-yu, LIN Chen. Lateral responses of monopile-supported offshore wind turbines in sands under combined effects of scour and earthquakes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 155: 107193.
- [14] NB/T 10105-2018, 海上风电场工程风电机组基础设计规范 [S].

NB/T 10105-2018, Code for design of wind turbine foundations for offshore wind power projects[S].

[15] 闫阳天,岳敏楠,李 春,等. 基于 ABAQUS 地震激励下风力机结构损伤分析[J]. 热能动力工程,2020,35(2):244-253. YAN Yang-tian, YUE Min-nan, LI Chun, et al. Structural damage analysis of wind turbine based on ABAQUS earthquake excitation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2):244-253.

[16] SAGGU R, CHAKRABORTY T. Cyclic thermo-mechanical analysis of energy piles in sand[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(2):321-342.

[17] 费 康, 彭 劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2017. FEI Kang, PENG Jie. Detailed examples of ABAQUS geotechnical engineering[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2017.

[18] 刘晋超,熊 根,朱 斌,等. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性[J]. 岩土力学, 2015, 36(2):591-599. LIU Jin-chao, XIONG Gen, ZHU Bin, et al. Bearing capacity and deflection behaviors of large diameter monopile foundations in sand seabed [J]. Rock and Soil Mechanics. 2015, 36(2):591-599.

[19] DNV-OS-J101, Design of offshore wind turbine structures[S].

[20] QI Wen-gang, GAO Fu-ping. Equilibrium scour depth at offshore monopile foundation in combined waves and current[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(5):1030-1039.

[21] CHORTIS G, ASKARINEJAD A, PRENDERGAST L J, et al. Influence of scour depth and type on p - y curves for monopiles in sand under monotonic lateral loading in a geotechnical centrifuge[J]. Ocean Engineering, 2020, 197:106838.

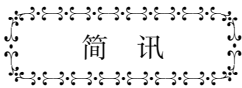
[22] YANG Yang, BASHIR M, LI Chun, et al. Analysis of seismic behaviour of an offshore wind turbine with a flexible foundation[J]. Ocean Engineering, 2019, 178:215-228.

[23] 莫仁杰. 海上风机桩式基础灌浆连接段可靠性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017. MO Ren-jie. Research on reliability of grouted connection for offshore wind turbine pile foundations[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[24] BHATTACHARYA S, NIKITAS N, GAMSEY J, et al. Observed dynamic soil - structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 54:47-60.

[25] GENTILS T, WANG L, KOLIOS A. Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm[J]. Applied Energy, 2017, 199:187-204.

(姜雪梅 编辑)



简 讯

世界七大航空制造商的首席技术官发表声明

据官网报道,十多年前,航空工业是全球第一个制定减排目标的行业。50 多年来,开发节油型飞机技术一直是航空工业的一个首要任务。随着客户对全球航空旅行需求的增加,更多地采用可持续航空燃料(SAF)有助于减轻航空运输业的二氧化碳排放量的预计增长。

- 通过在 3 个关键领域的工作,可提供减少航空运输业的碳排放所需的技术方案:
 - 开发先进的飞机和推进技术,在保持行业安全 and 质量标准的同时实现净零碳排放;
 - 改进飞机操作和基础设施;
 - 支持加速获得和采用 SAF 的政策和措施。
- 增加 SAF 的生产和利用是到 2050 年实现航空运输业二氧化碳净零排放目标的关键一步。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.rolls-royce.com>)