

波浪荷载对海上风电筒型基础结构振动响应的影响

陈露露¹, 姜军倪^{2,3}, 刘成果¹, 蔡东¹, 胡德芳¹

(1.响水长江风力发电有限公司, 江苏 盐城 224600; 2.天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 3.长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要:以混凝土弧线段为过渡段的宽浅式筒型基础所受的波浪荷载较大,易对整个海上风电结构体系的振动响应产生影响。针对某海上风电筒型基础结构,文章基于现场实测数据构建了整机有限元模型,通过数值模拟方法分析波浪荷载对海上风电筒型基础结构塔筒顶部振动响应的影响。结果表明:在风机运行过程中,由风荷载所引起的塔筒顶部的振动响应较波浪荷载所引起的响应要大;在浪高较小工况下,相较风荷载,波浪荷载的影响可以忽略;波浪荷载对风机塔筒顶部振动响应的影响随着外界风速及浪高的增大而增大,其对塔筒顶部振动位移响应的影响比振动加速度大。

关键词:海上风电结构;筒型基础;有限元模型;波浪荷载;振动响应

中图分类号:TK81 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5292(2024)06-0774-07

0 引言

随着海上风电的快速发展,其基础型式呈现多样化趋势^[1]。作为一种新型基础型式,宽浅式筒型基础因其良好的承载能力、稳定自浮能力等优势,已逐步在海上风电场内得到应用。作为一种典型的高柔结构^[2],海上风电结构系统的动力响应受波浪荷载的影响较为明显。而宽浅式筒型基础采用混凝土弧线形过渡段,与海水接触面积较大,导致其受到的波浪荷载相对于其他基础明显增加,影响整体结构体系的振动稳定性^[3],有必要针对波浪荷载对风机塔筒顶部振动响应的影响特征与规律开展研究。

对于波浪荷载对海上风电结构振动响应的影响,李德源^[4]以某1.5 MW海上风电结构为例,研究了随机风、浪荷载作用下结构系统振动响应的数值分析方法。陈为飞^[5]建立了1.5 MW海上风机结构的有限元模型,计算了在风、浪联合作用下整个海上风机结构体系所受的总荷载及其动力响应。陈小波^[6]利用海上风机结构简化的动力模型分析了其在随机波浪荷载作用下的动力反应,并研究了波面高程变化对其动力响应的影响。刘红军^[7]采用不同波浪理论分析了波浪荷载作用下风机支撑结构的振动响应。胡丹妮^[8]以某单桩基础

海上风机结构为对象,基于ANSYS软件对海上风机结构在周期性波浪荷载作用下的动力响应进行了较为系统的研究,并计算了单桩基础所受的波浪荷载的大小。Wang P^[9]基于线性衍射波理论计算了某单桩基础海上风机结构所受的波浪荷载,再以此分析了整个海上风机结构体系在风、浪及地震组合动力荷载作用下的响应,并对各影响因素进行了分析。

已有研究主要集中在单桩等基础型式,有关新型筒型基础海上风电结构的研究较少,且未对波浪荷载相较风荷载于风机塔筒顶部振动响应所造成的影响进行具体分析。因此,本文首先基于现场的实测振动数据获得海上风机结构的一阶固有频率;然后构建海上风电筒型基础结构整机的数值模型并进行验证;最后结合风、浪荷载的数值模拟方法,利用所建立的模型分别计算仅波浪作用及风、浪共同作用下海上风机结构塔筒顶部的振动响应,并对受波浪荷载的海上风机塔筒顶部振动响应的影响进行分析。

1 海上风电筒型基础结构原型观测

本文所选某海上风机筒型基础结构位于黄海海域,其基础及塔筒的具体尺寸如图1所示。

在海上风机塔筒顶部布置三向振动位移传感

收稿日期:2022-08-03。

基金项目:中国长江三峡集团公司科研项目(202003126)。

作者简介:陈露露(1991-),女,硕士,工程师,主要从事海上风电项目管理工作。E-mail:chen_lulu@ctg.com.cn

通信作者:姜军倪(1993-),男,博士研究生,研究方向为海上风电结构静动力特性。E-mail:jjn_zjqz@126.com

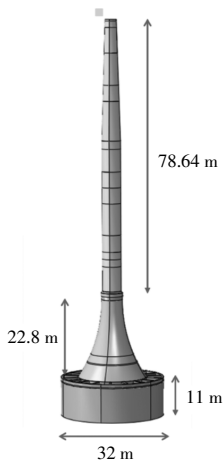


图1 筒型基础及塔筒的具体尺寸

Fig.1 The specific dimensions of the bucket foundation and tower

器。所监测海上风机结构的基本参数如表 1 所示。

表 1 所选海上风机结构的基本参数

Table 1 Basic parameters of selected offshore wind turbine structure

参数	数值
额定功率/MW	3.3
叶片数	3
塔筒质量/t	212.6
转子-机舱质量/t	218.3
轮毂高度/m	92.0
塔筒厚度/mm	15.0~32.0
塔筒直径(底部,上部)/m	5.5~3.3
转子直径/m	140.4
切入、额定、切出风速/m·s ⁻¹	2.5, 10.0, 20.0

所监测风机转速随风速的变化关系如图 2 所示。

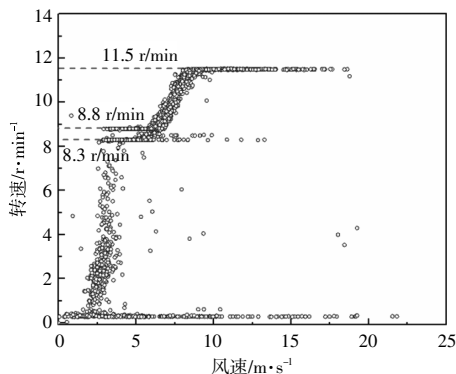


图 2 风机转速随风速的变化关系

Fig.2 The relationship between the rotor speed and wind speed

由图 2 可知,海上风机的额定转速为 11.5 r/min,起始转速为 8.3 r/min。对测试所得典型停机

状态下塔筒顶部振动位移频谱(图 3)进行分析,可以看出,此海上风机结构的一阶频率为 0.35 Hz。

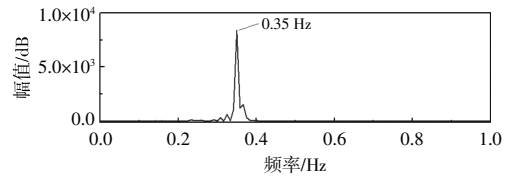


图 3 典型停机工况下振动位移频谱

Fig.3 Vibration displacement spectrogram under typical parked conditions

2 数值模型的建立

2.1 有限元模型

建立的现场实测风机的三维数值模型如图 4 所示。

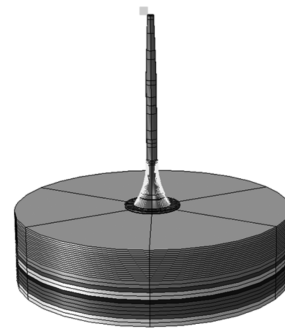


图 4 海上风电筒型基础结构有限元模型

Fig.4 Finite element model of OWT supported by bucket foundation

塔筒和基础钢筒部分使用 S4R 壳单元模拟,预应力混凝土过渡段和基础土体使用 C3D8R 实体单元模拟,建模中结构各部分均采用弹性模型。风机塔筒上部的机舱和叶片在建模过程中简化为一个偏心质量点,筒型基础钢筒的直径为 32 m,筒裙高为 11 m。在动力分析中,整个模型的结构阻尼取 2%^[10],通过 Rayleigh 阻尼的形式施加在整个模型上。基础土体所选直径为 150 m,高为 32.5 m,底部采用全约束,侧向采用反对称边界条件,土体的材料采用 Mohr-Coulomb 模型。基础土体的地质参数如表 2 所示。

表 2 土体的地质参数

Table 2 Geological parameters of the soil

土层	层厚 m	浮容重 kN/m ³	压缩模量 MPa	黏聚力 kPa	内摩擦角 (°)
1	3.5	8.5	3.73	13.0	11.6
2	1.0	9.7	9.39	5.0	33.8
3	1.5	8.7	3.83	22.0	11.9
4	2.0	9.2	7.41	7.0	32.4

续表 2

土层	层厚 m	浮容重 kN/m ³	压缩模量 MPa	黏聚力 kPa	内摩擦角 (°)
5	3.5	9.7	5.53	31.3	15.6
6	9.1	8.3	3.77	18.7	11.0
7	5.9	8.9	6.44	8.4	29.3
8	3.0	8.3	3.77	18.7	11.0
9	3.0	10	5.74	56.5	18.4

2.2 模型验证

对所建立的海上风电筒型基础结构数值模型进行模态分析,结构系统前两阶振型如图 5 所示。



图 5 风机整机有限元模型前两阶振型

Fig.5 The vibration shape of the finite element model of the OWT

由图 5 可知,前两阶模态频率分别为 0.349 Hz 和 1.437 Hz。海上风机结构的振动模态主要以一阶模态为主。基于现场观测塔筒顶部振动数据可识别风机一阶模态频率,并与模态分析的结构一阶固有频率进行对比(表 3)。数值模型计算的一阶固有频率与现场数据识别的风机结构实测一

表 3 结构一阶固有频率对比结果

Table 3 Comparison result of first-order natural frequency of structure

频率阶次	有限元模型/Hz	现场实测/Hz	误差/%
1 阶	0.349	0.350	0.29

阶固有频率基本吻合,说明所构建的有限元模型与现场实际工程等效。

3 风、浪荷载的模拟

3.1 风荷载模拟

环境风速 $V(z, t)$ 可通过平均风速 $\bar{v}(z)$ 和脉动风速 $v(z, t)$ 叠加而成。

$$V(z, t) = \bar{v}(z) + v(z, t) \tag{1}$$

$\bar{v}(z)$ 可通过指数模型进行计算,即:

$$\frac{\bar{v}(z)}{\bar{v}_b} = \left(\frac{z}{z_b} \right)^{\alpha_0} \tag{2}$$

式中: $z, \bar{v}(z)$ 分别为任意高度值和其所对应的平均风速; \bar{v}_b, z_b 分别为标准参考高度处的平均风速和标准参考高度值; α_0 为地表粗糙度系数,本文取 0.12^[11]。

脉动风速基于 Kaimal 谱通过谐波叠加法进行模拟^[12]。

当海上风机处于运行状态时,结构所受的风荷载主要来自于风机叶轮旋转平面和风机塔筒所受的风荷载。风机塔筒部分所受的风荷载 F_i 可通过式(3)进行计算^[13]。

$$F_i = 0.613 \mu_s \mu_z u^2(z, t) A_i \tag{3}$$

式中: μ_s 为形状系数,参照《建筑荷载规范》中的相应规定,并结合风机塔筒相关尺寸,取 0.55; μ_z 为高度系数,本文地面处的粗糙度类别属于 A 类,依据不同塔筒分段高度根据《建筑荷载规范》查得; $u(z, t)$ 为高度 z 处的瞬时风速; A_i 为塔筒在顺风向上的投影面积。

将塔筒平均分为 4 段,假设每段塔筒所受风荷载均匀分布,风荷载等效作用于每段塔筒的形心处。

由于叶轮旋转平面所受风荷载缺少现场风机叶片的详细参数,所受的气动荷载 T 可按式(4)进行计算^[14]。

$$T = \frac{1}{2} C_T \rho_a A_w v^2 \tag{4}$$

式中: C_T 为风机在运行状态下的推力系数,可依据不同的运行风速按图 6 进行选取; ρ_a 为空气密度,取 1.225 kg/m³; A_w 为海上风机叶轮的旋转面积; v 为外界瞬时风速。

将计算所得叶轮旋转平面所受的风荷载施加于风机机头处。

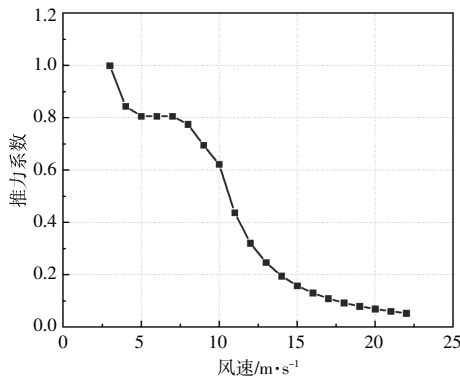


图6 推力系数随外界风速的变化关系

Fig.6 The relationship between the thrust coefficient and the wind speed

以风速 7 m/s 为例,按式(4)计算得到叶轮旋转平面所受到的风荷载时程曲线(图7)。

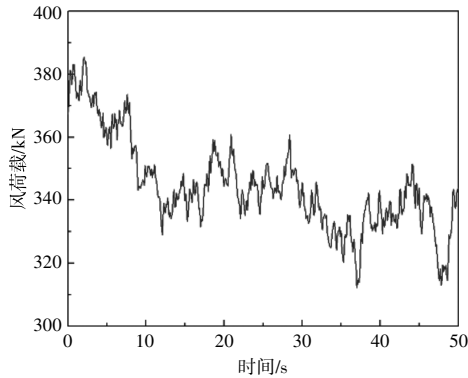


图7 叶轮旋转平面所受风荷载

Fig.7 Wind load on the rotating plane of the turbine

由图7可知,在风速为 7 m/s 的条件下,风机叶轮旋转平面所受到的风荷载为 300~400 kN。

3.2 波浪荷载模拟

对于筒型基础型式,由于其迎水面积较大,所受的波浪荷载较单桩基础更为显著。图8为筒型基础型式所受波浪荷载示意图。

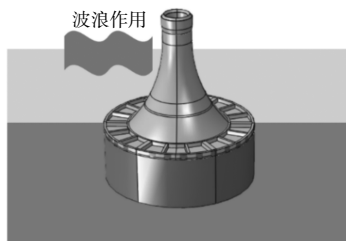


图8 筒型基础波浪荷载作用示意图

Fig.8 Schematic diagram of wave load on bucket foundation

筒型基础所受波浪荷载可通过 JONSWAP 谱进行计算模拟^[10],对于所研究的新型筒型基础海上风电结构,波浪荷载可采用文献[15]中提出的

针对筒型基础的荷载 F_x 计算式进行计算。

$$F_x = \frac{\pi \rho g H}{\cosh kd} \left(\begin{matrix} \sin \omega t \int_0^{d+\eta} a \cos \beta_0 \cosh kz \xi_{1,b} dz + \\ \cos \omega t \int_0^{d+\eta} a \cos \beta_0 \cosh kz \xi_{1,a} dz \end{matrix} \right) \quad (5)$$

式中: $k=2\pi/L$; $\omega=2\pi/T$; H 为入射波高; d 为水深; η 为基础中心处该时刻的波面高度; a 为复合筒型基础距离海床 z 处的半径。

当波高为 0.52 m 时,筒型基础所受波浪荷载如图9所示。

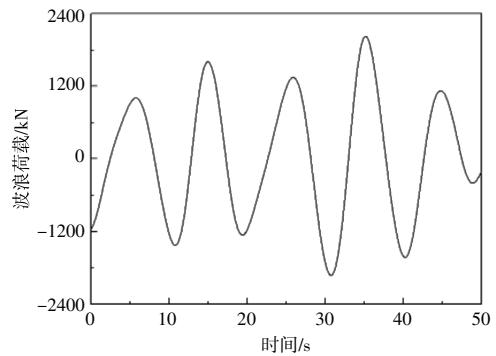


图9 基础所受波浪荷载

Fig.9 Wave load on the foundation

由图9可知,基础所受波浪荷载的最大值可以达到 2 000 kN 左右。计算得到的波浪动力荷载近似施加于基础波浪静荷载的合力作用点处进行计算。

4 计算结果分析

4.1 计算工况的选取

当实际工程中缺少波浪数据时,可根据 GL 规范中相关规定,确定风与浪的对应关系。

$$T_p = \frac{u_{10}}{g} \cdot \frac{1}{0.16} \quad (6)$$

$$H_s = 0.0094 \cdot 0.16^{-\frac{5}{3}} \cdot \frac{u_{10}^2}{g} \quad (7)$$

式中: T_p 为谱峰周期; H_s 为有效波高; u_{10} 为距离海平面 10 m 处的小时平均风速。

假定风与浪的作用方向相同,且均与风机的机舱方向相一致。

此外,还须考虑风机所在海域水深对波浪参数的影响,对式(6),(7)进行修正,最终得到的计算工况如表4所示。

4.2 动力计算结果

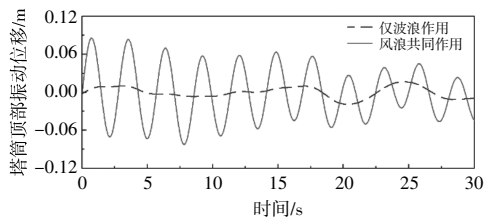
利用所建立的数值模型分别计算表4中3种工况下仅波浪作用及风、浪共同作用下海上风机

表 4 选取的计算工况
Table 4 The selected calculation conditions

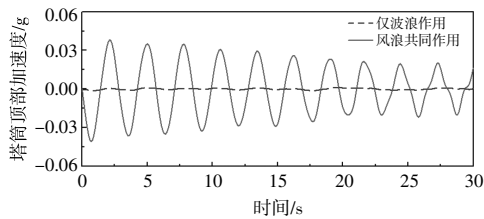
工况	风速/m·s ⁻¹	浪高/m	周期/s
1	5	0.26	2.30
2	7	0.52	3.22
3	9	0.81	4.14

结构塔筒顶部的振动响应(图 10~12),并计算风、浪共同作用相比仅波浪作用振动响应的变化倍数(表 5)。

由图 10~12 及表 5 中的分析结果可知:在 3 种不同的工况下,风、浪共同作用下的振动位移响应最大值及均方根值均可达到仅在波浪荷载作用下响应值的 2.86~4.78 倍,而振动加速度响应可



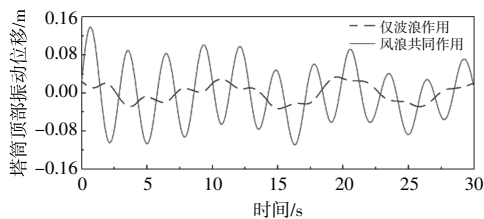
(a) 振动位移



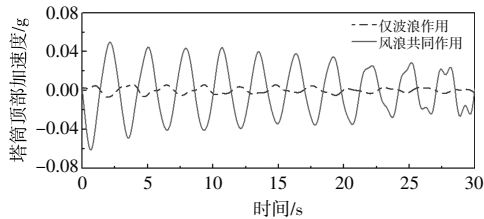
(b) 振动加速度

图 10 工况 1 下塔筒顶部振动响应

Fig.10 Vibration response of tower top under condition 1



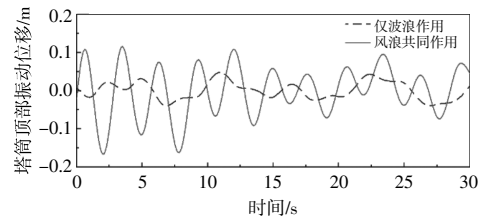
(a) 振动位移



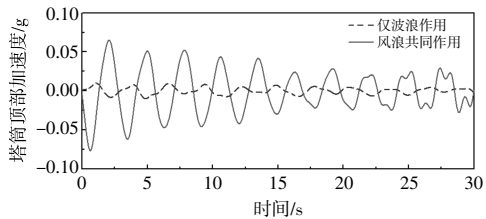
(b) 振动加速度

图 11 工况 2 下塔筒顶部振动响应

Fig.11 Vibration response of tower top under condition 2



(a) 振动位移



(b) 振动加速度

图 12 工况 3 下塔筒顶部振动响应

Fig.12 Vibration response of tower top under condition 3

表 5 各工况塔筒顶部振动响应计算结果

Table 5 Calculation results of different conditions

工况	荷载	振动位移响应 (去均值后)		振动加速度响应	
		均方根	最大值	均方根	最大值
		m	m	g	g
1	仅波浪作用	0.008 8	0.018 9	0.000 6	0.001 3
	风浪共同作用	0.042 1	0.085 6	0.019 9	0.040 9
	变化倍数	4.78	4.53	34.31	31.46
2	仅波浪作用	0.018 8	0.033 8	0.003 0	0.007 0
	风浪共同作用	0.060 6	0.138 5	0.026 9	0.061 2
	变化倍数	3.22	4.10	8.97	8.74
3	仅波浪作用	0.022 9	0.048 1	0.004 3	0.010 1
	风浪共同作用	0.065 5	0.166 6	0.028 8	0.076 9
	变化倍数	2.86	3.46	6.70	7.61

以达到 6.70~34.31 倍;由风荷载所引起的风机塔筒顶部的振动响应要大于波浪荷载所引起的振动响应;波浪荷载对风机塔筒顶部的振动位移及加速度响应均有一定影响,且随着外界风速及浪高的增大,波浪荷载对风机塔筒顶部振动位移响应的影响也越大;对于塔筒顶部的振动加速度响应,在低风速工况下(工况 1),波浪荷载对振动加速度的影响基本可以忽略;随着外界风速及浪高的增大,波浪荷载对风机塔筒顶部振动加速度响应的影响也越大;波浪荷载对海上风机结构塔筒顶部振动位移响应的影响比振动加速度响应大。

5 结论

本文以某筒型基础海上风机结构为研究对象,分析了基础所受波浪荷载对海上风机结构

塔筒顶部振动响应的影响,得到以下结论。

①在海上风机运行过程中,风荷载所引起的塔筒顶部的振动响应较波浪荷载引起的响应大。

②波浪荷载对风机塔筒顶部振动响应的影响随着外界风速及浪高的增大而增大。在低风速浪高较小的工况下,波浪荷载对振动加速度的影响基本可以忽略。

③波浪荷载对海上风电筒型基础结构塔筒顶部振动位移响应的影响比振动加速度响应大。

参考文献:

- [1] Wu X, Hu Y, Li Y, et al. Foundations of offshore wind turbines: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104: 379-393.
- [2] Rahman M, Ong Z C, Chong W T, et al. Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51: 43-54.
- [3] 焦方骞, 张庆河, 张金凤. 新型海上风电复合筒型基础波浪荷载研究[J]. *水道港口*, 2019, 40(5): 518-523.
- [4] 李德源, 刘胜祥, 张湘伟. 海上风力机塔架在风浪联合作用下的动力响应数值分析[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(12): 46-52.
- [5] 陈为飞, 陈水福. 近海风机塔架风浪荷载及其响应分析[J]. *低温建筑技术*, 2010(3): 44-46.
- [6] 陈小波. 随机风浪荷载作用下近海风机塔架动力响应分析[J]. *人民长江*, 2013, 44(9): 75-78.
- [7] 刘红军, 杨奇. 不同波浪理论下风机支撑系统的动力响应[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(4): 668-673.
- [8] 胡丹妮. 波浪荷载作用下海上风机桩基基础与上部结构的动力响应研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [9] Wang P, Zhao M, Du X, et al. Wind, wave and earthquake responses of offshore wind turbine on monopile foundation in clay [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113: 47-57.
- [10] 董霄峰. 海上风机结构振动特性分析与动态参数识别研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [11] Offshore Standard DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures(2011)[S].
- [12] IEC 61400-1, Wind Turbines Part 1: Design Requirements (2005)[S].
- [13] 于通顺, 王海军. 循环荷载下复合筒型基础地基孔隙水压力变化及液化分析 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(3): 820-826.
- [14] 赵悦, 练冲, 练继建, 等. 海上风电筒型结构基础层状地基参数优化反演[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(4): 91-97.
- [15] 于通顺. 复合筒型基础动力响应及冲刷特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

The influence of wave load on the vibration response of the offshore wind turbine supported by bucket foundation

Chen Lulu¹, Jiang Junni^{2,3}, Liu Chengguo¹, Cai Dong¹, Hu Defang¹

(1.Xiangshui Changjiang Wind Power Generation Co.,Ltd., Yancheng 224600, China; 2.School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3.Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The wide shallow bucket foundation with concrete arc transition section is subjected to significantly larger wave loads which will easily affect the vibration response of the entire structural system. For an offshore wind turbine (OWT) supported by bucket foundation, a finite element model of the whole wind turbine was established based on the measured vibration data, and then the influence of wave loads on the vibration response of the tower top of the OWT supported by bucket foundation was simultaneously analyzed through the established finite element model. It is shown in the analysis results that the vibration response of the tower top caused by wind load is greater than that caused by wave load during the operation period. Subsequently, the influence of the wave load can be ignored compared to the wind load when the wave height is small. In addition, the impact of wave loads on the vibration response of the tower top increases with the increase of external wind speed and wave height and the corresponding impact on the vibration displacement response of the tower top is greater than the vibration acceleration.

Keywords: offshore wind turbine structure; bucket foundation; finite element model; wave load; vibration response