

DOI: 10.11779/CJGE2020S1006

复合桶型风电基础姿态监测与模拟

关云飞¹, 韩 迅^{*1}, 曹永勇², 刘永刚³, 唐 译¹, 朱 洵¹, 张 晨¹, 李鹏飞⁴

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 上海市市政工程建设发展有限公司, 上海 200025;
3. 江苏道达风电设备科技有限公司, 江苏 南通 226000; 4. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘 要: 复合桶型基础是一种新型风电基础结构, 其稳定性需要进一步验证。结合三峡大丰海上风电场建设工程开展原位监测, 基于多向倾角自动化监测系统并结合数值模拟, 研究了结构在安装运行过程中的倾角和姿态变化规律。结果表明复合桶型基础在复合荷载和风机运行工况下是稳定的, 最大倾角满足不超过 0.5° 的稳定性条件。风机在安装下沉期间的倾角波动幅度和频率较大, 该阶段的稳定性监测和控制是重点。随着安装完成, 风机姿态逐渐趋于稳定, 并在风浪流荷载作用下缓慢演变, 其演变路径规律可以反映出复合桶型基础的力学响应特性。

关键词: 复合桶型基础; 风电; 倾角监测; 数值模拟

中图分类号: TU196 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0027-05

作者简介: 关云飞(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事海洋岩土工程及土与结构相互作用机理研究工作。E-mail: yfguan@nhri.cn.

Attitude monitoring and simulation of composite bucket foundation of wind turbine

GUAN Yun-fei¹, HAN Xun¹, CAO Yong-yong², LIU Yong-gang³, TANG Yi¹, ZHU Xun¹, ZHANG Chen¹, LI Peng-fei⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200025, China; 3. Jiangsu Daoda Wind Power Engineering Technology Co., Ltd., Nantong 226000, China; 4. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The composite bucket foundation is a new type of wind power infrastructure, and its stability needs to be further verified. The in-situ monitoring of the construction project of Dafeng Offshore Wind Power Plant by China Three Gorges Corporation is carried out. Based on the multi-directional inclination automatic monitoring system and numerical simulation, the variation rules of the inclination and attitude of the structures in the process of installation and operation are studied. The results show that the composite bucket foundation under compound loads and fan operation is stable, and the largest inclination meets the condition of the stability of less than 0.5° . The amplitude and frequency of angle fluctuation are relatively large during sinking installation, which is the key stage of stability monitoring and control. With the completion of installation, the attitude of wind turbine gradually tends to be stable, and slowly evolves under the action of wind, waves and currents. The evolution path laws can reflect the mechanical response characteristics of the composite bucket foundation.

Key words: composite bucket foundation; wind power; inclination monitoring; numerical analysis

0 引 言

桶型基础是一种上端封闭、底端开口的大直径薄壁结构, 具有承载力高、造价低、施工简便等优点, 可以适用相对更深的水域和更大的风机^[1]。与码头、防波堤、钻井平台等传统海洋结构物不同, 海上风电基础除了承受来自风机和塔筒的传递的竖向荷载外, 还主要承受由风、波浪、海流等引起的巨大水平荷载和弯矩, 而后者也是导致风机变形过大或失稳的主要原因^[2]。针对中国近海风电场的风力条件和地质特点, 一种便于海上快速施工建造、抗倾覆能力强、适用多种地基土质的新型海上风电基础结构——宽浅式多隔

舱复合桶型基础被研发应用。与传统的窄深型桶型基础不同, 复合桶型基础是一种直径超大、入土相对较浅的宽浅式桶型基础, 该基础可以实现“生产—组装—安装”的一体化设计施工。

目前复合桶型基础的工程应用时间相对较短, 仍然有大量的理论问题有待解决。刘永刚等^[3]、练继建

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609147); 南京水利科学研究院基金项目(Y319006, Y317011, Y319012); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800741); 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017cyjAX0353)

收稿日期: 2020-06-04

*通信作者 (E-mail: xhan@nhri.cn)

等^[4]通过模型试验、数值模拟和理论分析研究了桶型基础在承载能力极限状态下的特性,包括水平承载特性、抗弯承载特性土压力分布规律以及旋转中心变化等。实际海上风机在运行过程中,为保证风机的正常使用须严格控制其运行过程中最大倾角,因此对海上风电基础的变形控制至关重要。英国 Thornton Bank 的重力式基础设计时倾角要求控制在 0.25° 内^[5]。挪威船级社 DNV 规范规定,海上风电基础容许总倾角包括安装过程和运行过程两部分,要求控制在为 0.5° 以内,其中安装过程中容许倾角为 0.25° ^[6]。在中国,规范规定风电基础计入施工误差后,基础顶位置整个运行期内循环累计总倾角不应超过 0.5° ^[7]。

本文结合三峡大丰海上风电场建设工程开展原位监测,基于多向倾角自动化监测系统数据进行数据自动采集和远程传输,实现对海上风电基础的不均匀沉降和倾角的观测,并结合数值模拟,研究了结构在运行过程中的倾角和姿态变化规律,为新型复合桶型基础结构稳定性控制提供建议。

1 原位监测概况

1.1 海上风电场气象和地质条件

大丰海上风电项目位于江苏省盐城市大丰区东沙沙洲北侧的小北槽-太平沙海域,风电场区域测风塔实测数据统计如下:

本工程风电场 85 m 高度年平均风速为 7.48 m/s,风功率密度为 441 W/m^2 ; 50 m 高度年平均风速为 7.04 m/s,风功率密度为 358 W/m^2 。冬、春季风速较大,3月、4月为大风月,秋季风速较小,9月、10月为小风月。统计多年平均各风向频率,主导风向为 ESE,占 9%。风电场风速日变幅不大,风功率密度变化规律与风速一致。考虑 95% 保证率时,大丰海上风塔 90 m 高度 50 年一遇最大风速为 37.3 m/s。大丰气象站多年风向玫瑰图如图 1 所示。

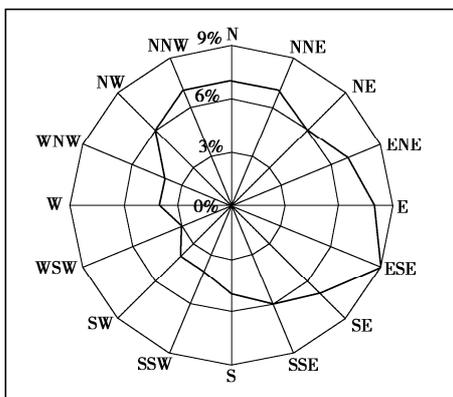


图 1 大丰气象站多年风向玫瑰图 ($C=6\%$)

Fig. 1 Rose map of perennial wind at Dafeng Weather Station ($C=6\%$)

该工程场区土质主要由粉土粉砂、淤泥质粉质黏土、粉细砂和黏性土组成,具有层理性、结构松散,孔隙度大。风机机位处表层具有较厚的软弱淤泥质粉质黏土层,达 7.5 m,鉴于海上风机正常运行时是基于倾角进行控制,对宽浅式桶型基础的在该类地质条件的使用效果需要长期监测。

1.2 基础结构

该 6.45 MW 风电机组转轮直径约 171 m,轮毂高度约 105.5 m,机组通过塔筒安装在复合桶型基础上,其结构如图 2 所示,其中曲面过渡段(上部、黄色)和基础底板(中部、浅灰色)均为混凝土结构,利用高达模板整体浇筑而成。下部钢桶为圆柱结构,钢桶内部由分舱板相隔为 7 个等边的蜂窝状隔舱。



图 2 复合桶型基础现场结构图

Fig. 2 Drawing of field structure of composite bucket foundation

2 结构整体变形监测系统

2.1 桶型基础结构倾角测量

拟采用的结构倾角测量仪器利用预先埋设于下桶盖板的双轴倾角仪进行监测。与单轴倾角仪相比,双轴倾角仪可以测量两个方向上的倾斜变化。拟采用 ELT-15 型双向倾角仪,该仪器的量程为 $\pm 15^\circ$,灵敏度 < 10 弧秒,精度为 $\pm 0.1\% \text{FS}$,适用的温度范围为 $-20^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$,通过选配专用的支架,可精确测量结构的倾斜角度。该仪器的基本原理是:当结构物产生倾斜变形,通过安装支架传递给倾斜仪。倾斜仪内装有伺服传感器,当发生倾斜变化时,倾斜角度与输出的电量呈对应关系,即可测出被测结构物的倾斜角度,同时它的测量值可显示出以零点为基准值的倾斜角及变化的正负方向。倾斜仪可布设为一个测量单元独立工作,亦可多支连点布设测出被测结构物的各段倾斜量,以此将结构物的整体变位曲线描述出来,倾角仪的安装布置图如图 3 所示。

2.2 自动化监测系统

倾角监测采用分布式监测系统,该系统根据监测仪器测量原理配置了系列智能数据采集模块,可接入

多种类型传感器, 支持多种通讯方式, 具有自诊断功能、多级备份和防雷抗干扰保护措施, 能适应水工恶劣环境, 具有在线监控、离线分析、安全管理、网络系统管理、数据库管理、远程控制与管理等功能, 包括数据的人工/自动采集、在线快速安全评估、性能离线分析、模型建立与管理、预测预报、工程文档信息、测值及图形图像管理、报表/图形制作、辅助工具、帮助系统、远程通信与控制等监控和管理的内容, 如图 4 所示。

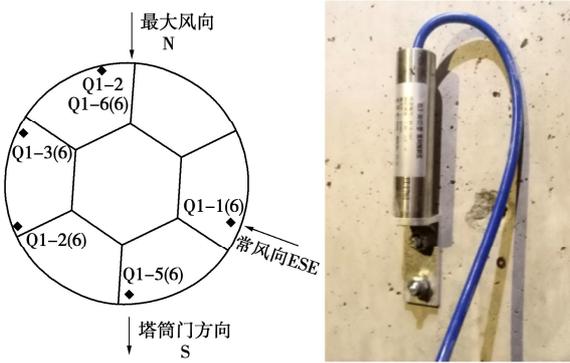


图 3 倾角仪的安装布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of installation of inclinometers

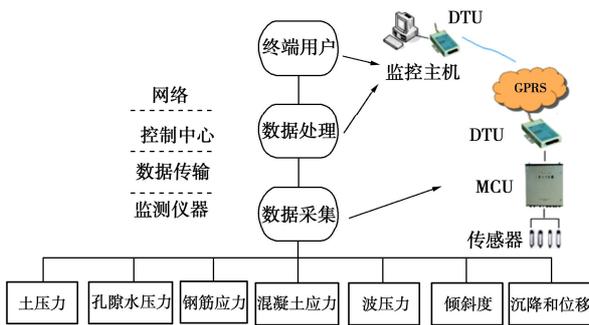


图 4 复合桶型风电基础自动化监测系统运行图^[8]

Fig. 4 Operating chart of automatic monitoring system for composite bucket foundation of wind turbine

3 监测与模拟分析

3.1 倾角仪的观测结果

图 5 为 6.45 MW 风机复合桶型基础自安装起至 2020 年 3 月 1 日倾角随时间的变化趋势图, 其中内插图为基础安装下沉阶段的倾角变化情况。从图 5 中可以看出复合桶型基础运行至今的倾角均未超过规范阈值 (0.5°), 这表明桶型基础整体仍处于稳定姿态运行状态。通过对比发现, 不同位置测点的倾角随时间变化趋势存在差异。对于 Q1-1 (6) 测点, 倾角随时间呈现出先快速, 最终趋于稳定的变化趋势, 最终 Q1-1 (6) 测点倾角稳定在 -0.05° 左右。注意到, Q1-1 (6) 测点倾角在监测初期出现了明显的波动, 这主要是由于安装过程中桶型的下沉姿态发生了变化。对于 Q1-2 (6)

测点, 倾角先快速变化到 -0.5° 左右, 随后随着时间推移逐渐向正向发展, 这说明该测点位置结构在运行期受力发生了改变, 最终逐渐稳定在 $+0.025^\circ$ 左右, 总体来看测点位置的倾角变化不大, 对结构稳定性影响较小。

图 6 给基于两个正交方向的倾角变化给出了复合桶型基础垂直姿态的演变路径图, 图 6 中 4 个象限分别代表了桶型基础倾斜的 4 个方向。可以看到结构姿态点从下沉开始在第三象限中演变, 倾斜度逐渐增大, 在 2019 年 9 月 8 日出现拐点, 路径沿着 Q1-2 (6) 正向变化, Q1-2 (6) 方向倾角逐渐减小, 在 2019 年 10 月 20 日左右, 路径从第三象限进入第二象限, 说明桶型基础在受到复杂的风浪流荷载作用下倾斜趋势发生改变, 并逐步稳定。

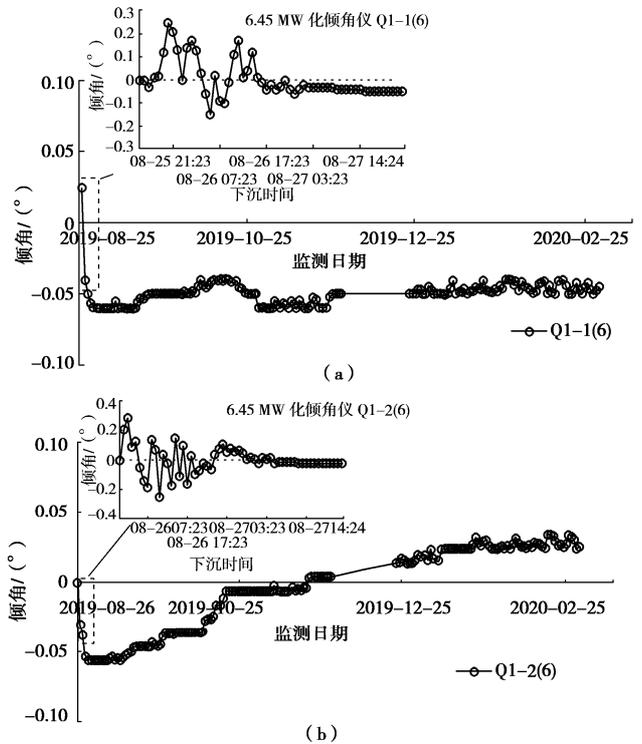


图 5 倾角随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curves of dip angle with time

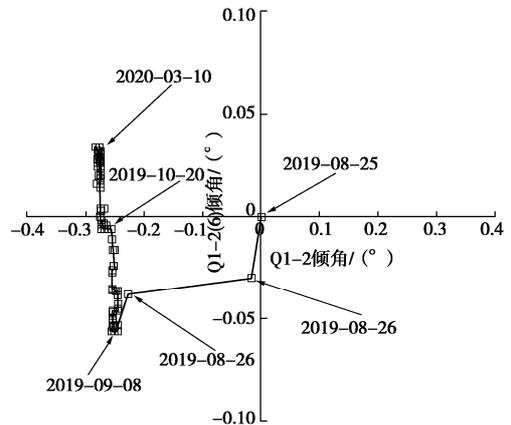


图 6 复合桶型基础姿态演变路径

Fig. 6 Attitude evolution paths of composite bucket foundation

表1 各土层土性参数

Table 1 Parameters of soil layers

土样	c/kPa	φ_0	$\Delta\varphi$	R_f	K	K_{ur}	n	c_d	r_d	n_d
淤泥	3	27.2	1.48	0.87	23.0	46	0.87	0.083	0.133	0.53
粉质黏土	2	31.5	3.4	0.7	67.5	135	0.7	0.038	0.35	0.73

3.2 数值模拟分析

运用自主开发的有限元软件 NABFUW1.0^[9]分析海上风电桶式基础结构在风浪流复杂荷载作用下与地基土的相互作用问题,首先需要建立整体结构的有限元模型。将过渡段结构简化为圆桶型,同时对风机叶片进行了简化,假定作用于风机叶片的风荷载等效作用于固定叶片的机舱上,模型尺寸与实际结构尺寸相同。假定地基土分两层,上层为淤泥,厚度为10 m,重度为16.8 kN/m³,内摩擦角6.6°;下层为粉质黏土,厚度为26 m,重度为19.2 kN/m³,内摩擦角17.5°。采用南水模型模拟地基土的应力-应变关系^[10],具体参数取值通过三轴试验获得,如表1所示。考虑最不利的荷载情况,假定风荷载和浪流荷载对风电结构的作用方向一致,将问题简化为二维轴对称问题。有限元网格剖面图如图7所示,建立的地基土模型直径为90 m,深度为36 m。对于桶式基础结构、过渡段以及塔桶,均采用实体单元模拟,运用线弹性模型模拟应力-应变关系,假定弹性模量为一个较大值,不考虑风电结构本身的变形。有限元模拟时在桶壁和隔仓壁外围设置接触面单元,桶体和接触面单元的弹性模型参数取值如表2所示。有限元网格上边界为自由边界,下边界和左右两侧边界设置不排水条件,左右边界设置水平向约束,下边界在水平向和竖直向均设置约束。计算的得到的整体结构水平位移和竖向位移分布如图8,9所示。

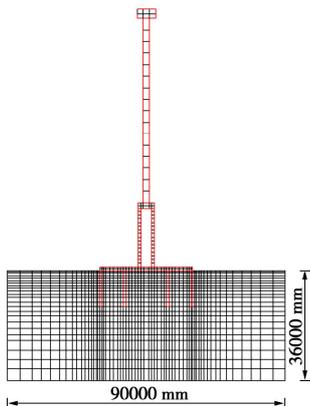


图7 有限元网格剖面图

Fig. 7 Profile of finite element mesh

在风荷载和浪流荷载的联合作用下,海上风电结构整体沿着荷载方向发生了平移及转动,转动中心在桶体下部土体内。最大水平位移为73.1 cm,发生在风机机舱顶部,桶式基础顶部水平位移为3.4 cm,底部

水平位移为-6.4 cm(方向与荷载方向相反)。由于整体发生了转动,整体结构略微发生了下沉,桶式基础上部结构的竖向位移约为-3~-3.4 cm,基础面向荷载方向的桶壁顶端由于转动发生了向上的位移,位移量约为9 cm,基础背向荷载方向的桶壁顶端发生了向下的位移,位移量为-15.6 cm,基础结构的差异沉降为24.6 cm。在极端风荷载和浪流荷载的作用下,整体结构沿着荷载方向发生倾斜,倾斜角为0.47°,小于设计允许值0.5°。

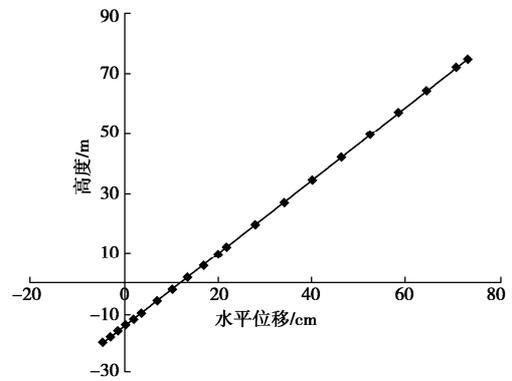


图8 水平位移随高度分布

Fig. 8 Horizontal displacements with respect to height

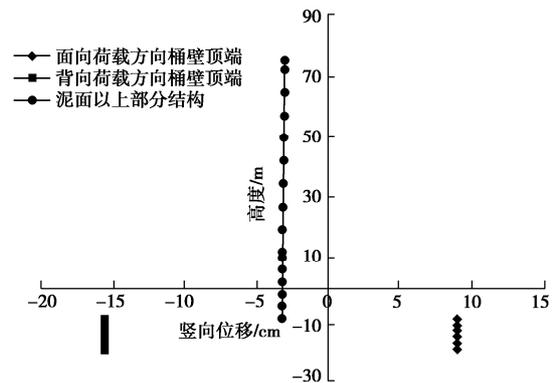


图9 竖向位移随高度分布

Fig. 9 Vertical displacements with respect to height

表2 桶体和接触面单元弹性模型参数

Table 2 Model parameters of bucket and interface elements

名称	E/MPa	ν	G/MPa	K/MPa
桶体	30000	0.27	11811	21739
接触面单元	500	0.3	192	417

4 结论与建议

本文利用复合桶型风电基础自动化监测系统对风

浪流荷载在桶型基础的倾角进行了监测, 并结合数值模拟进行了稳定性分析, 结论如下:

(1) 复合桶型基础在复合荷载和风机运行工况下是稳定的, 最大倾角满足不超过 0.5° 的稳定性条件。

(2) 风机在安装下沉期间的倾角波动幅度和频率较大, 因此在该阶段的稳定性监测和控制是重点之一。

(3) 随着安装完成, 风机姿态逐渐趋于稳定, 并在风浪流荷载作用下缓慢演变, 其演变路径规律可以反映出复合桶型基础的力学响应特性。

参考文献:

- [1] 肖 忠, 葛博瑞, 王元战, 等. 十字形内隔板对桶型基础各单向承载力和破坏模式的影响分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(11): 3136 - 3144. (XIAO Zhong, GE BO-rui, WANG Yuan-zhan, et al. Influence of cruciform inner clapboards on uniaxial bearing capacity and failure mode of bucket foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(11): 3136 - 3144. (in Chinese))
- [2] WANG X F, ZENG X W, LI J L, et al. A review on recent advancements of substructures for offshore wind turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2018, **158**: 103 - 119.
- [3] 刘永刚, 丁红岩, 张浦阳. 淤泥质黏土中复合桶型基础水平承载力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(12): 2315 - 2321. (LIU Yong-gang, DING Hong-yan, ZHANG Pu-yang. Model tests on bearing capacity of composite bucket foundation in clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(12): 2315 - 2321. (in Chinese))
- [4] 练继建, 贺 蔚, 吴慕丹, 等. 带分舱板海上风电桶型基础承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(10): 2746 - 2752. (LIAN Ji-jian, HE Wei, WU Mu-dan, et al. Experimental study of bearing characteristic of bucket foundation of offshore wind turbine with bulkheads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(10): 2746 - 2752. (in Chinese))
- [5] PEIRE K, NONNEMAN H, BOSSCHEM E. Gravity base foundations for the Thornton Bank Offshore Wind Farm[J]. Terra et Aqua, 2009, **115**: 19 - 29.
- [6] DET NORSKE VERITAS. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2007.
- [7] 海上风电场工程风电机组基础设计规范: NB/T 10105—2018[S]. 2019. (Basic Design Specification for Wind Turbine of Offshore Wind Farm Project: NB/T 10105—2018[S]. 2019. (in Chinese))
- [8] 曹永勇, 关云飞, 李文轩. 光电编码器在深水离岸结构沉降测量中的应用[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 1): 187 - 191. (CAO Yong-yong, GUAN Yun-fei, LI Wen-xuan. Application of photoelectric encoder in measurement of deepwater offshore structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 187 - 191. (in Chinese))
- [9] 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院. 波浪荷载作用下桶式基础结构与地基相互作用分析软件 NABFUW1.0 [CP/CD]. 2019SR1068768. (Nanjing Hydraulic and Research Institute. Analysis software of interaction between bucket-foundation structure and foundation under wave load NABFUW1.0 [CP/CD]. 2019SR1068768. (in Chinese))
- [10] 蔡正银, 武颖利, 关云飞. 港口工程数值仿真技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019. (CAI Zheng-yin, WU Ying-li, GUAN Yun-fei. Numerical Simulation Technology of Port Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)