

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.011

风机预应力锚杆基础长期承载力 特性评价方法研究

周建华^{1,2}, 贾国武³, 周先进³, 张金接^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 北京中水科工程总公司, 北京 100044;
3. 中国水电建设集团 如东新能源有限公司, 江苏 南通 226407)

摘要: 近年来, 预应力锚杆基础以其独有的特点, 在风机基础中得到越来越广泛的应用。复杂荷载作用下预应力锚杆基础长期承载性能对风机安全运行和风电场效益的发挥、锚杆预应力设计及维护策略的制定具有十分重要的意义。通过结合风机设计荷载、基础锚杆预应力监测数据及有限元软件建立的三维模型, 计算任意时刻锚杆基础承载力, 实现了对其长期承载性能的评价。对现场监测风机评价表明, 设计预应力下基础两年内承载力均满足相应要求, 且具有一定安全裕度, 可以适当延长锚杆预应力复打周期。评价结果与现场风机实际情况较为一致, 验证了该评价方法具有一定的适用性。

关键词: 锚杆基础; 锚杆预应力; 有限元模型; 长期承载性能

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)06-0056-06

Evaluation Method for Long-term Bearing Capacity of Wind Turbine Prestressed Anchor Bolt Foundation

ZHOU Jianhua^{1,2}, JIA Guowu³, ZHOU Xianjin³, ZHANG Jinjie^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;
2. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100044, China;
3. SINOHYDRO Rudong Renewable Energy Co. Ltd., Nantong, Jiangsu 226407, China)

Abstract: In recent years, the prestressed anchor bolt foundation has been widely used in wind turbine foundations due to its unique characteristics. The long-term bearing capacity of prestressed anchor foundation under complex loads is of great significance to the safe operation of wind turbine and the benefit of wind farm, the design value of prestressed anchor bolt and the formulation of maintenance strategy. By combining the design load of the wind turbine, based on the prestress monitoring results of the foundation anchor and the three-dimensional model of the anchor foundation established by the finite element software, the bearing capacity of the anchor foundation at any time is calculated, and the long-term bearing performance of the anchor foundation is evaluated. The evaluation results show that the bearing capacity of the foundation under the prestressing design meets the corresponding design requirements within two years, and has a certain safety margin. The evaluation results are consistent with the actual situation of the on-site wind turbine foundations, which verifies that the method has certain applicability.

Keywords: anchor bolt foundation; prestressed anchor; finite element model; long-term bearing capacity

近几年,我国已经成为全球风电装机容量第一大国,在大规模开发风电的同时,风电设备技术和风电场开发技术也日臻完善和发展。风机基础是保证风

力发电机组安全稳定运行的一个重要因素,其相应设计、施工工艺也得到较快发展。在我国,传统风机基础型式均含有基础环,但基础环连接存在基础刚

度、强度突变以及耐久性等问题,部分风电场陆续出现基础环松动问题,严重影响风机安全运行状态和发电效率。相比之下,预应力锚杆基础具有基础结构刚度和强度均匀、整体性好、耐久性好、经济性好与建设周期短等特点^[1-3],解决了传统风机基础环连接的天然缺陷,在风机基础中的应用日趋广泛。现阶段,单机容量 1.5 MW 及以上容量的风机塔筒与基础连接主要采用预应力锚杆基础^[4-7]。预应力锚杆作为预应力基础最主要的受力构件,锚杆预应力损失对于基础长期承载特性会产生影响,而复杂荷载作用下预应力锚杆基础长期承载性能还未进行过专门研究,缺少相应的研究资料和方法,导致无法对风机运行过程中基础安全状态进行评估,影响了风机的安全运行和风电场效益的发挥,同时增加了基础的设计和应用风险。

本文结合江苏潮间带某风机设计荷载工况和基础锚杆预应力现场监测结果,使用 ABAQUS 有限元计算软件建立锚杆基础三维模型,对不同阶段锚杆预应力作用下锚杆基础承载力进行了计算,分析研究锚杆基础的长期承载力特性,并据此对基础安全性进行了评价。

1 工程概况

为检验本文论述的预应力锚杆基础长期承载力评价方法的可行性,特选取江苏某潮间带风电场 28 # 风机作为研究对象。根据风机的设计资料,风机采用低桩高台柱圆形承台混凝土基础,混凝土强度等级为 C40,抗冻等级为 F250;基础总厚度为 8.1 m,圆形承台外径 5.8 m;基础所承受的主要载荷为风机和塔筒等的自重以及外部风载,根据风机设计资料,风机塔筒—基础界面处极限荷载如表 1 所示。

表 1 28 # 风机设计极限荷载

荷载分类	竖向力 N/kN	剪切力 Q/kN	倾覆弯矩 M/(kN·m)	扭矩 T /(kN·m)
极限荷载	2800	1110	83000	9500
安全系数	1.00	1.35	1.35	1.35

风机塔筒与基础之间的连接采用预应力锚杆组件结构,锚杆组件包含上锚板、下锚板及锚杆。锚杆分两圈沿锚板圆周均匀布置,每圈布置 80 根,共 160 根。锚板直径 4.18 m,预应力锚杆单根长度 7.62 m,采用 8.8 级 M42 高强锚杆,屈服强度平均值 840 MPa。根据设计要求,锚杆设计张拉力 400 kN($\sigma_0 =$

336 MPa),即锚杆预拉力控制值为锚杆材料屈服强度的 0.4 倍, $\sigma_0 = 0.4\sigma_s$;风机正常运行后,每年至少进行一次锚杆预应力应力松弛检查,发现应力松弛及时补张拉。

为揭示基础锚杆在风机运行过程中的预应力变化情况,为后续长期承载力评价提供数据支撑,选取 28 # 风机 4 根锚杆(共布置 4 支传感器)进行应力监测,监测锚杆间隔 90°(19 根锚杆),均布分布于基础范围内,可以反映各方向荷载变化对于锚杆预应力的影响,以适应风机受 360°方向重复荷载和大偏心受拉荷载的特点。监测仪器布置如图 1 所示。

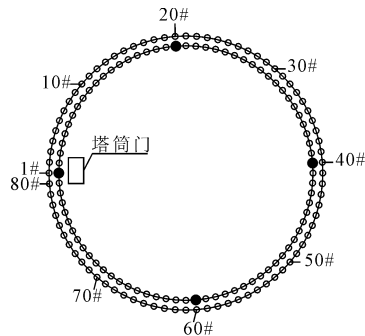


图 1 传感器安装位置图(●表示安装传感器位置)

采用美国 FUTEK 公司生产的中空型应变式压力传感器 LTH350 进行监测,该仪器特别适用于各种复杂工况下高精度连续监测领域,以保证监测数据的连续性和可靠性。传感器主要性能指标参数如表 2 所示。

表 2 传感器主要性能指标参数

标准量程 T	灵敏度 S	精度 /%FS	温度范围 /°C	供电电压 /V	直径× 高度/mm	耐冲击 /g
60	<0.01	±0.01	-20~ +60	12	Φ108×35	4000

2 锚杆预应力监测数据分析

在锚杆初次加压前完成传感器安装,锚杆加压后即开始监测,整个监测过程从 2015 年 12 月 15 日 10:00 开始,至 2017 年 11 月 20 日 10:00 结束。监测期内,4 支传感器监测数据序列均无缺失,无明显异常情况,数据完整性良好。监测周期内各锚杆 30 min 平均预应力值及预拉力损失值随时间的变化过程曲线如图 2、图 3 所示。

(1) 3 # 监测锚杆初始预应力监测值最大,其值为 380.5 kN,4 # 监测锚杆初始预应力监测值最小,为 370.8 kN。

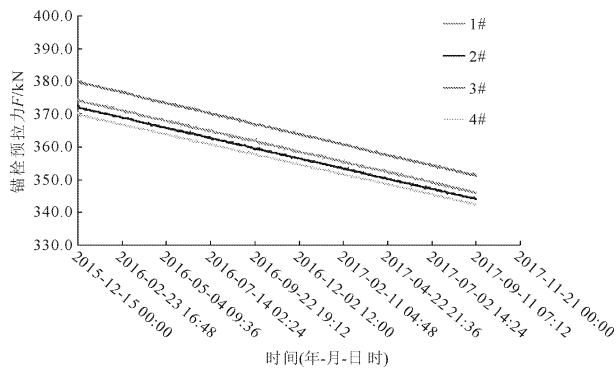


图 2 各监测锚杆 30 min 平均预拉力变化过程曲线

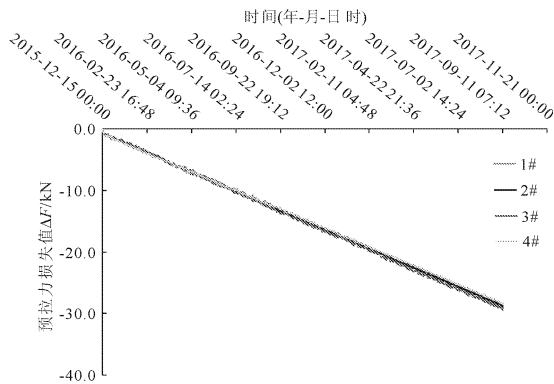


图 3 各监测锚杆预拉力损失值变化过程曲线

(2) 监测期末, 3 # 锚杆预应力损失值最大, 为 32.4 kN, 约占初始预应力的 8.53%; 4 # 锚杆预应力损失值最小, 为 31.2 kN, 约占初始预应力的 8.40%; 四根锚杆预应力损失平均值为 31.8 kN, 预应力损失百分比平均值为 8.48%, 预应力松弛速率平均值为 0.0445 kN/d。

(3) 监测期内, 锚杆预应力都在小范围内波动, 但基本都呈直线下降趋势, 拟合得到的下降趋势线斜率较小, 平均值约为 -0.0442 , 趋势线对于监测数据的确定系数 R^2 平均值约为 0.99988。

(4) 对各监测数据进行拟合, 得到预应力保留比例与加载时间的函数关系, 如式(1)所示:

$$f(t) = -0.1585e^{7.903 \times 10^{-6}t} + 1.157e^{-2.97 \times 10^{-6}t} \quad (1)$$

利用上式, 结合锚杆初始预应力, 便可得到后续任意时刻锚杆的预应力, 为基础承载力性能分析提供基础。

3 锚杆基础承载性能数值模拟研究

3.1 基础有限元模型

(1) 模型尺寸的确定。本文利用 ABAQUS 软件对整个基础进行建模, 模型相关尺寸, 通过参考基础相关设计及施工资料进行确定。根据风机基础设计

资料, 外部及风机自身荷载直接作用于基础顶面 T 型法兰中心位置, 风机锚杆基础结构参数如表 3 所示。

表 3 锚杆基础结构参数表

基础结构	外径 /m	内径 /m	厚度 /m	孔径 /m
上部圆柱形承台	5.800	—	5.800	—
下部锥台形承台	20.000(底部)	—	3.300	—
T 形法兰(上锚板)	4.500	3.860	0.060	—
高强灌浆层	4.650	3.710	0.100	—
锚杆	2.175	2.005	—	0.050
下锚板	4.500	3.860	0.060	—

(2) 模型材料计算参数选取。参考基础相关设计及施工资料, 确定基础模型计算参数, 如表 4 所示。

表 4 模型材料计算参数

类别	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	屈服应力 σ_s/MPa	线胀系数 $\alpha/^\circ\text{C}$
锚杆	210.0	0.25	7850	840.0	1×10^{-5}
锚板	210.0	0.25	7850	840.0	—
高强灌浆层	40.0	0.20	2400	65.0	—
混凝土	32.5	0.20	2400	19.1	—

锚杆基础中各种型号、规格的钢筋配置密集, 在有限元计算中若将钢筋与混凝土分别划分单元, 会导致有限元模型的建立和计算过程比较复杂。相应研究表明^[8-10], 在有限元模拟分析中, 可以将复合材料细观力学的等效模量方法加以修正后应用于具有线弹性性质的钢筋混凝土材料, 钢筋混凝土构件配筋率的变化影响其弹性模量的取值, 进而影响结构力学性能、动力特性。以构件的配筋率为变量, 推导可得基于弯曲刚度 EI 等效原理的等效弹性模量理论解析解, 结合锚杆基础配筋率、截面尺寸等设计参数, 可以通过计算得到基础钢筋混凝土的等效弹性模量。建模过程中把钢筋混凝土作为一种复合弹性材料考虑, 在保证真实模拟材料力学性能的同时, 极大简化了有限元模型建立和计算过程。

(3) 接触与约束设置。根据基础各部分间的相互作用, 在模型中设置了以下关系:

① 上、下锚板与锚杆的作用采用绑定约束。

② 上锚板与高强层上表面、高强层下表面与混凝土表面及下锚板上、下表面、侧面与混凝土层均采用面与面力学接触设置。

(4) 加载及边界条件设置。根据对基础各部位受荷及位移情况,在模型中设置了以下边界条件:

① 基础下部为 PHC 管桩,能承受较大作用力,故基础下表面固定,三个方向均不发生位移和转动。

② 基础混凝土下部圆锥台侧面固定水平位移及转动,可以发生竖直方向移动。

③ 在基础顶部中心位置设置参考点,该点与上锚板之间采用耦合约束建立联系,限制参考点与上锚板间的位移和转动,使参考点上的力能均匀作用于上锚板,在该参考点上施加集中的水平力、竖向力及 xy 方向的倾覆力矩(设计荷载如表 1 所示)。

④ 混凝土基础上施加均布的体积力模拟基础的重力。

⑤ 锚杆预应力采用线胀系数法设置^[11-13],对于杆件预定义初始温度场,温度 = 应力/(弹性模量 × 线胀系数),定义初始温度后即可完成锚杆轴力的施加。

(5) 模型单元选择。为使模型能够尽量反映实际结构的受荷特性,结合 ABAQUS 有限元软件中相应单元特点^[14-15],在模型中主要涉及了两种单元:

① 锚杆采用 TRUSS 单元中的 T3D2 单元来模拟,杆单元能够承受沿着杆方向的拉力和压力,与预应力锚杆受力性能相同。

② 锚板和混凝土等其它结构均采用实体 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)来模拟。

(6) 应力屈服准则。根据材料力学及相应研究成果,模型中材料主要涉及两种屈服准则:

① 对于混凝土及钢筋混凝土等等脆性材料,适用于最大主应力破坏准则,若最大主应力大于混凝土的抗拉强度,则认为混凝土发生开裂破坏。

② 对于锚杆和锚板等弹塑性材料,适用于 Mises 屈服准则判断材料是否屈服。

网格剖分完成后基础模型如图 4 所示。

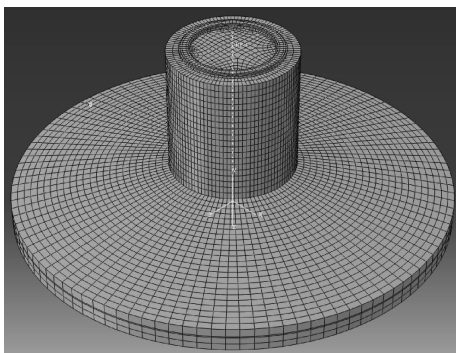


图 4 基础模型图

3.2 模拟计算成果分析

对模型进行模拟计算,可得在设计极限荷载和锚杆预拉力作用下基础各部位受力及位移变形情况,锚杆等效应力及竖向位移图、高强灌浆层第一主应力及第三主应力云图、基础混凝土第一主应力及第三主应力云图如图 5—图 10 所示。根据应力分布云图,可以得到高强灌浆层下部附近区域、下锚板上、下部附近区域等应力,相应区域混凝土第一主应力变化曲线如图 11—图 13 所示。

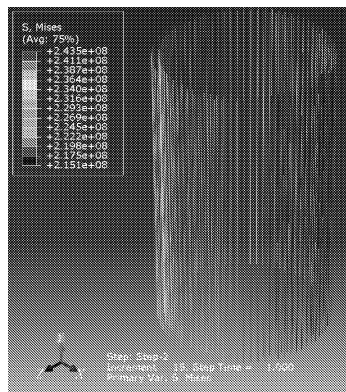


图 5 锚杆等效应力云图

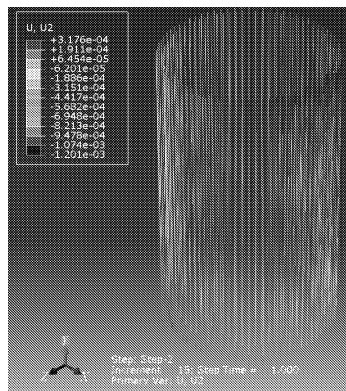


图 6 锚杆竖向位移云图

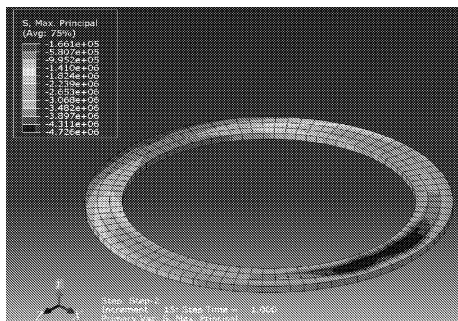


图 7 高强灌浆层第一主应力云图

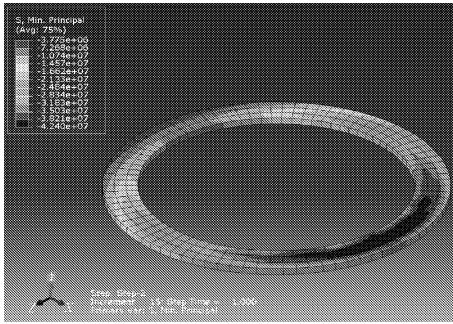


图 8 高强灌浆层第三主应力云图

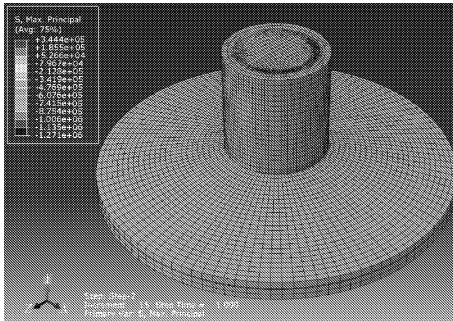


图 9 基础混凝土第一主应力云图

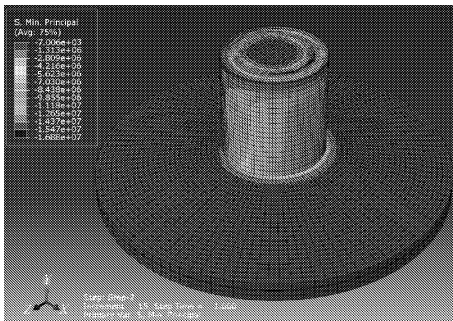


图 10 基础混凝土第三主应力云图

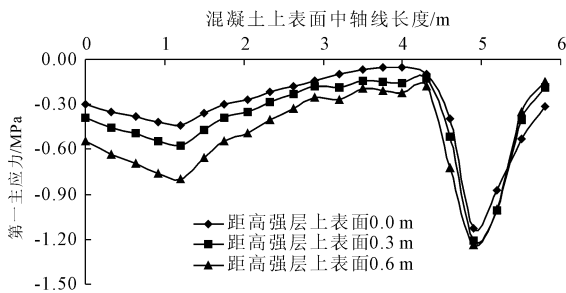


图 11 高强灌浆层下部附近区域混凝土第一主应力变化曲线

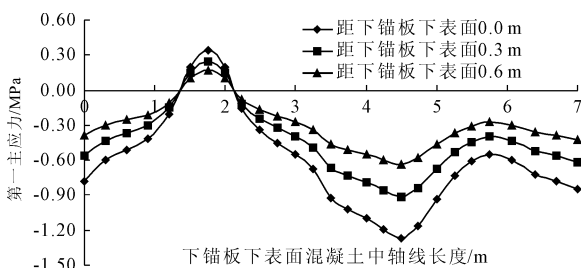


图 12 下锚板下部附近区域混凝土第一主应力变化曲线

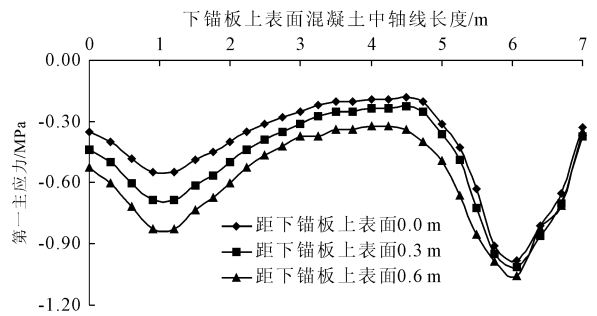


图 13 下锚板上部附近区域混凝土第一主应力变化曲线

分析以上各图,可以得到如下结论:

(1) 锚杆均受到拉应力作用,最大值为 243.5 MPa,最小值为 215.1 MPa,最大值发生在弯矩作用方向指向位置处锚杆上,最小值发生在作用方向背离位置处的锚杆上。施加预应力后锚杆最大向上位移为 3.176×10^{-4} m,最大向下位移为 1.201×10^{-3} m,每根锚杆基本上为下部受拉,上部受压,对整根锚杆而言,变形较为均匀。

(2) 高强灌浆层最小压应力(第一主应力)为 0.16 MPa,发生在高强灌浆层受拉侧外边缘,第一主应力均为压应力,说明高强灌浆层始终处于受压状态;最大压应力(第三主应力)为 42.4 MPa,发生在高强灌浆层受压侧外边缘;高强灌浆料抗压强度为 65 MPa,满足极限荷载下基础承载性能要求。

(3) 基础混凝土主要处于受压状态,最大压应力为 16.9 MPa,根据混凝土相应规范^[16],C40 混凝土设计轴心抗压强度 19.1 MPa,满足极限荷载下基础承载性能要求;混凝土基础第一主应力最大值为 0.34 MPa,发生在下锚板附近以下 0.3 m 范围内混凝土区域;高强灌浆层下部 0.3 m 范围内部分混凝土第一主应力接近于零。

由于高强灌浆层和混凝土、锚板和混凝土间存在结构变化,造成锚板附近深度约 0.6 m 区域内的混凝土应力集中,受到一定拉应力作用,相应区域混凝土较容易发生张拉破坏,对基础承载性能影响较大。根据混凝土相应规范,C40 抗拉强度设计值为 1.71 MPa,大于基础混凝土最大第一主应力 0.34 MPa,故基础混凝土满足极限荷载下基础承载性能要求。

锚杆预应力施加后基础各部位受力情况如表 5 所示。

综上所述,在设计锚杆预应力作用下,基础各部位受力较为均匀,相互间应力变化较平缓;锚杆基础各部位承载应力情况满足相应材料设计强度要求,即锚杆基础满足极限荷载下承载性能要求。

表5 基础各部位第一主应力及第三主应力最大值表

部位	第一主应力 /MPa	第三主应力 /MPa	抗拉强度设计值 /MPa	抗压强度设计值 /MPa
高强灌浆层	-0.16	-42.4	2.50	65.0
高强灌浆层下部混凝土	-0.05	-16.9	1.71	19.1
下锚板上部区域混凝土	-0.18	-15.3	1.71	19.1
下锚板下部区域混凝土	0.34	-15.3	1.71	19.1

4 锚杆基础长期承载性能评价

锚杆预应力会随着加载时间增长而逐渐衰减,锚杆预应力损失对基础承载性能产生影响,故设计要求风机运行一年后必须对锚杆预应力进行复打。根据对风机锚杆预应力监测数据的分析,两年后锚杆预应力损失百分比平均值约为8.5%,其中4#监测锚杆预拉力值最低,为339.6 kN。以该锚杆的预应力保留值作为基础所有锚杆预应力,利用有限元模型计算极限荷载作用下锚杆基础的受力情况,并与各部位设计值进行比较,验证基础是否满足承载要求,以此来评价基础长期承载性能。

在极限荷载作用下,基础相应部位承受应力最大值仍小于或接近相应材料强度设计值,基础各部分承载力均满足相应要求,故在设计预应力下锚杆基础两年内的承载力均满足设计要求,能够保证风机安全运行,且具有一定的安全裕度。通过现场风机基础振动、倾斜以及发电量等情况,也说明风机两年来运行状态安全,与评价结论较为一致。根据长期承载性能评价结果,锚杆预拉力复打周期可适当放宽至两年。

5 结论

(1) 通过对于锚杆预应力现场监测数据进行合理的拟合,得到锚杆预应力损失与时间的函数关系,有了任意时刻锚杆预应力值,再结合风机极限荷载作用下锚杆基础承载特性数值计算成果,即可得到相应时刻锚杆基础的受力情况,进而对基础长期承载性能进行分析评价。

(2) 针对江苏潮间带风机长期承载特性评价的结果表明,设计预应力下锚杆基础两年内的承载力均满足相应材料设计强度要求,且具有一定的安全裕度,能够保证风机安全运行,且锚杆基础整体受力

较为均匀,各部位应力变化较平缓。评价结果与现场风机实际状态较为一致。

(3) 该方法具有一定的适用性,可以为风机基础安全性能评估提供依据,同时对于基础锚杆预应力设计值及维护策略的制定具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 沈永强. 浅谈预应力锚杆风机基础的结构设计[J]. 工程设计施工与管理, 2016, 20(10): 83-86.
- [2] 风电机组地基基础设计规定: FD 003—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [3] 刘 嫔, 张立英, 崔振磊. 风电机组预应力锚栓基础局部承压分析[J]. 西北水电, 2015, 16(6): 99-101.
- [4] 李振作. 中欧预应力重力式风机基础设计方法分析与比较[J]. 山西建筑, 2014, 40(21): 69-71.
- [5] 张万祥, 刘洪海, 于春来. 新型风力发电机组梁板式预应力锚栓基础应用[J]. 风能, 2012, 4(5): 84-86.
- [6] 黄冬平, 何桂荣. 风力发电塔基础预应力锚栓的抗疲劳性能研究[J]. 特种结构, 2011, 28(5): 13-16.
- [7] 田伟辉, 张 峰, 崔振磊. “风机锚杆基础结构设计及锚杆组件材料采购打捆”的设计管理[J]. 西北水电, 2015(6): 97-99.
- [8] 孔丹丹, 赵颖华, 王 萍, 等. 钢筋混凝土材料有限元分析中的等效模量方法[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(3): 199-204.
- [9] 屈铁军, 徐 建, 石云兴. 基于有限元方法和测试结果确定钢筋混凝土构件的弹性模量[J]. 混凝土, 2015(7): 136-142.
- [10] 屈铁军, 徐 建, 石云兴. 不同受力状态的钢筋混凝土构件的等效弹性模量[J]. 混凝土, 2016(11): 119-123.
- [11] 庄 茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 221-228.
- [12] 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 185-195.
- [13] 周新刚, 孔 会. 某风机钢筋混凝土基础破坏实例及有限元分析[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 116-121.
- [14] 刘增荣, 武世刚, 张珊珊, 等. 黄土高原地区风力发电结构-承台-桩基数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 221-226.
- [15] 杨 龙, 石炎炎, 苑晨阳. 预应力锚杆基础非线性抗拔承载力研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 89-94.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 12-16.