

海上风电场高桩承台群桩基础平台的设计研究

王 森¹, 武东宽², 李近元^{1,4}, 祝 亮¹, 陈晓军¹, 刘建民³, 赵乐川⁵

(1. 中能电力科技开发有限公司, 北京 100034; 2. 龙源电力集团股份有限公司, 北京 100034; 3. 湖南龙源风力发电有限公司, 湖南 长沙 410004; 4. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083; 5. 福建龙源海上风力发电有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 针对国内海上风电基础设计没有统一的规范及标准, 为提升海上风电基础设计建设的水平, 通过对东南沿海某海域海上风电基础的设计进行了有限元计算分析论证, 验证了群桩高承台结构设计方案的设计方法和设计参数。分析结果表明该设计的最大应力主要发生在塔筒底座与承台接触部位及钢管桩与承台连接段, 应在连接部位加强措施处理; 基础竖直位移较小, 水平位移相对较大; 分界部位应力较集中, 刚度不能顺畅过渡, 可考虑填充碎石土等方法加强。本研究对海上风电基础设计技术的研究与探索, 可为将来制定中国海上风电行业标准提供可靠的依据, 对中国未来大批量的海上风电能源的开发有着重要意义。

关键词: 海上风电; 风电基础; 基础设计; 有限元; 群桩

中图分类号: TU357 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)10-0114-07

DOI: 10.11759/hyxx20190705002

我国东南沿海地区海床上部地层多为海积和冲洪积层, 土层物理力学性质较差, 承载力低且厚度分布不均匀, 下伏层中风化岩层分布不规则, 起伏变化较大, 适合采用高桩混凝土承台基础, 此种基础形式借鉴了港口工程中靠船墩和跨海大桥桥墩的桩基础形式, 由群桩和承台组成, 采用传统的海上施工设备和工艺, 国内施工经验丰富, 嵌岩桩施工实现可靠度高, 稳定性好, 施工工艺成熟^[1]。

海上风电风机基础形式中单桩基础只适合工程地质情况较好的有良好地基承载力的浅水区域, 而我国东南沿海地区水深较深, 海床面下有较厚的黏土层, 承载力较差, 抵抗水平荷载能力不能满足设计要求, 所以该海区多采用高桩承台群桩基础, 桩基础采用钢管桩^[2]。本文针对该地区的工程地质环境条件, 进行了高桩承台群桩基础设计研究, 以探索复杂地质环境下的海上风机基础设计建设。

1 高桩承台群桩基础设计理论及方法

1.1 荷载分析

1.1.1 风荷载

上部风机承受风荷载作用传递至塔筒底的荷载, 如图1所示, 即为基础结构设计所需的风机荷载, 3个方向的弯矩 M_x 、 M_y 、 M_z , 3个方向的轴力 F_x 、 F_y 、

F_z , 可根据风机制造厂家资料, 直接获得计算所需荷载依据。

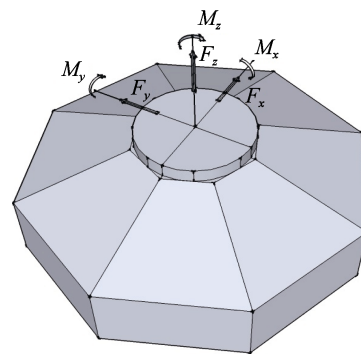


图1 塔筒底部风机荷载

Fig. 1 Load of the fan in the bottom of the tube

1.1.2 波浪力

对于多柱式平台, 柱的直径与波长之比很小, 即:

$$D/L=1.8/48.9=0.0368 < 0.2.$$

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776016)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41776016]

作者简介: 王森(1982-), 男, 北京人, 高级工程师, 主要从事风电开发技术方面的研究工作, E-mail: miao.wang.z@chnenergy.com.cn; 李近元(1984-), 通信作者, 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事海底地形地貌、海上风电开发技术、海洋工程地质等方面的工作, E-mail: lijinyuan84@126.com

对于这种小直径构件主要采用莫里森-奥布赖恩 (Morison-O.Brien) 所提出的方法。本文中斜桩倾角较小, 不考虑斜桩的影响, 当波面高程相对于水深而言较小可以忽略不计时, 忽略群桩效应^[3]。

作用于静水面上 z 处的波浪力(如图 2)采用 Morison-O.Brien 公式为:

$$p(z,t) = \frac{\rho}{2} C_D D |u| u + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{du(z,t)}{dt}, \quad (1)$$

式中: ρ 为海水密度, kg/m^3 ; D 为桩直径, m ; C_D 为速度力系数, 取 $1.2^{[4]}$; C_M 为惯性力系数, 取 $2.0^{[4]}$ 。

作用于桩体任意高度 z 出的水平波浪力为:

$$f_H = f_D + f_I =$$

$$p(z,t) \frac{1}{2} C_D \rho_W u |u| dz + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial U}{\partial t} dz, \quad (2)$$

式中: f_D 为水平拖曳力; f_I 为水平惯性力。

沿桩体全高的总波浪力为:

$$F_H = \int_{-d}^{\eta} \left(\frac{1}{2} C_D \rho_W u |u| + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial U}{\partial t} \right) dz, \quad (3)$$

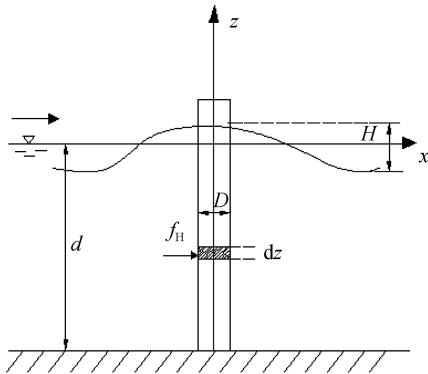


图 2 小直径直桩波浪力计算示意图

Fig. 2 Schematic of wave force on a small-diameter pile

1.1.3 潮流力

设计潮流为 1.38 m/s , 单独考虑海流的作用时, 由于海流不会引起水质点的加速度, 因此只需根据 Morison 方程中忽略惯性力条件下求解即可^[5]。

作用于水底面上高度 z 处的正向波浪力计算公式:

$$F = \frac{1}{2} \rho_W C_D u^2 D, \quad (4)$$

1.1.4 荷载组合

1) 承载能力极限状态工况

γ_0 [1.2 自重+1.4 风荷载(极端荷载)+0.7(1.5 潮流力+1.5 波浪力)]

2) 正常使用极限状态工况

自重+0.6(风荷载(正常运行)+潮流力+波浪力)

1.2 群桩高承台基础设计

根据我国目前设计和施工经验, 以及位于我国东南沿海的莆田地区水文地质资料, 宜采用 8 根小角度外倾斜高桩承台基础, 桩型采用直径 1.8 m 钢管桩, 桩靴深入花岗岩层 7 m 左右, 可满足端承桩承载力要求, 根据荷载工况进行竖向抗压和抗拔承载力计算。

1) 嵌岩桩单桩轴向抗压承载力设计值可按下列式计算:

$$Q_{cd} = \frac{U_1 \sum \xi_{fi} q_{fi} l_i}{\gamma_{cs}} + \frac{U_2 \xi_s f_{rk} h_r + \xi_p f_{rk} A}{\gamma_{cR}}, \quad (5)$$

式中: Q_{cd} 为嵌岩桩单桩轴向抗压承载力设计值(kN); U_1 、 U_2 为分别为覆盖层桩身周长(m)和嵌岩段桩身周长(m); ξ_{fi} 为桩周第 i 层土的侧阻力计算系数, $D > 1.0 \text{ m}$ 时, 岩面以上 10 m 范围内的覆盖层, 取 $0.5 \sim 0.7$, 10 m 以上覆盖层取 1.0 , D 为覆盖层中桩的外径; q_{fi} 为桩周第 i 层土的单位面积侧阻力标准值(kPa); l_i 为桩穿过第 i 层土的长度(m); γ_{cs} 为覆盖层单桩轴向抗压承载力分项系数; ξ_s 、 ξ_p 分别为嵌岩段侧阻力和端阻力计算系数, 与嵌岩径比有关; f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值(kPa); h_r 为桩身嵌入基岩的长度(m); A 为嵌岩段桩端面积; γ_{cR} 为嵌岩段单桩轴向抗压承载力分项系数。

2) 单桩抗拔极限承载力按下列公式计算:

$$T_d = \frac{1}{\gamma_R} \left(U \sum \xi_i q_{fi} l_i + G \cos \alpha \right), \quad (6)$$

式中: γ_R 为单桩抗拔承载力分项系数; ξ_i 为折减系数; U 为桩身界面周长(m); q_{fi} 、 l_i 同式(5); G 为桩重力(kN), 水下部分按浮重力计; α 为桩轴线与垂线夹角($^\circ$)。

3) 承受水平力或力矩作用可采用 p - y 曲线法进行计算, 承受水平力或力矩作用的桩侧土体压应力满足下列要求:

$$\sigma_{h/3} \leq \frac{4}{\cos \varphi} \left(\frac{\gamma}{3} h \tan \varphi + c \right) \eta, \quad (7)$$

$$\sigma_h \leq \frac{4}{\cos \varphi} (\gamma h \tan \varphi + c) \eta, \quad (8)$$

$$\eta = 1 - 0.8 \frac{M_g}{M}, \quad (9)$$

式中: $\sigma_{h/3}$ 、 σ_h 为泥面以下 $h/3$ 处和 h 处土的水平压应力(kN/m^2); φ 为土的内摩擦角($^\circ$); γ 为土的容重(kN/m^3); c 为土的黏聚力(kN/m^2); h 为桩的入土深度(m); η 为考虑总荷载重恒载所占的比例的影响系数; M_g 为恒

载对桩底中心产生的力矩(kN·m); M 为总荷载对桩底产生的力矩(kN·m)。

4) 嵌岩端按固接设计时, 嵌岩深度不应小于计算嵌岩深度, 计算嵌岩深度按下式计算:

$$h'_r \geq \frac{4.23V_d + \sqrt{17.92V_d^2 + 12.7\beta f_{rk}M_d D'}}{\beta f_{rk}D'}, \quad (10)$$

式中 h'_r 为计算嵌岩深度; V_d 为基岩顶面处桩身剪力设计值; β 为系数, 取 0.2~1.0; f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值(kPa); M_d 为基岩顶面处桩身弯矩设计值(kN·m); D 为嵌岩段桩身直径(m)。

5) 承受拔力的桩基础, 应同时验算群桩基础呈整体破坏和呈非整体破坏时基桩抗拔承载力, 计算应符合极限状态计算式如下:

$$N_{ik} \leq \frac{T_{gk}}{2} + G_{gp}, \quad (11)$$

$$N_{ik} \leq \frac{T_{uk}}{2} + G_p, \quad (12)$$

式中 N_{ik} 为荷载效应标准组合下基桩拔力; T_{uk} 、 T_{gk} 分别为群桩呈整体破坏和非整体破坏时基桩的抗拔极限承载力标准值; G_{gp} 为群桩基础所包围的桩土总自重除以总桩数, 地下水位以下取浮重度; G_p 为基桩自重, 地下水位以下取浮重度。

2 工程案例

2.1 工程背景

福建莆田某海上风电项目地区, 该项目所在区 100 年一遇 10 min 最大风速即设计风速取 40 m/s。属浅海湾地貌, 水深 10~30 m, 场地上覆第四系冲海积层, 下伏基岩为燕山晚期花岗岩。

2.2 工程地质资料

本工程按 A 类地貌考虑, 上部结构为钢结构。在该海区进行工程地质勘查后, 得到工程区土及桩侧摩和桩端摩擦阻力参数见表 1。

表 1 土的参数表

Tab. 1 Summary table of soil parameters

土层名称	凝聚力/kPa	摩擦角/(°)	侧摩阻力/kPa	端摩阻力/kPa	比重
黏土	54	16.3	65~75	2 500~3 000	2.73
砂土	11	29.3	50~70	3 800~4 000	2.70
全风化花岗岩	2	32.6	70~75	3 000~3 600	2.67

2.3 水文地质资料

场地水文地质概况: 拟建海区场位海水化学类型为高矿化度的氯化钠(钾)型水(Cl^- , Na^+ , K^+), 对混凝土结构具中等腐蚀性; 对混凝土结构中的钢筋、钢结构在干湿交替的情况下具强腐蚀性, 在长期浸水情况下则具弱腐蚀性。

2.4 工程海洋水文条件

2.4.1 潮汐

1) 基面关系

根据对工程海区水文观测的实测数据, 对工程场区长期潮位站为期 1 年的逐时潮位资料进行调和计算, 得到的基面关系如图 3 所示。

2) 设计潮位

根据长期潮位站实测潮位资料绘制潮位历时累积频率曲线, 将历时累积频率 1%潮位作为设计高水位(3.81 m), 将历时累积频率 98%的潮位作为设计低水位(-3.15 m)。

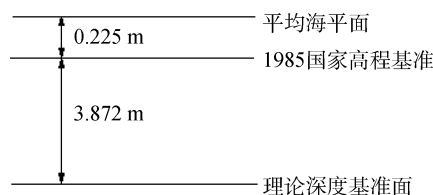


图 3 基面关系示意图

Fig. 3 Schematic showing the relationship of basal planes

按照《海港水文规范》(JTS 145-2-2013)附录 C 极端水位的近似计算方法, 查取附近平潭站和崇武站的极端高水位为 1.3 m, 极端低水位为 -1.0 m。因此, 可得工程场区的极端高、低水位分别为 5.11 m 和 -4.15 m(1985 国家高程基准)。

2.4.2 波浪

1) 波浪特征

该海域全年有效波高(H_s)平均值为 0.80 m, 最大波高(H_{max})最大值为 13.56 m; 周期(T_a)平均值为 3.85 s, 最大值为 8.87 s。从 H_s 平均值看, 总体较小, 在 0.47~1.16 m 之间。 T_a 的平均值在 3.38~5.70 s, 最大值在 5.00~8.87 s。

2) 设计波浪要素

设计波要素代表点位置见图 4, 计算结果见表 2。

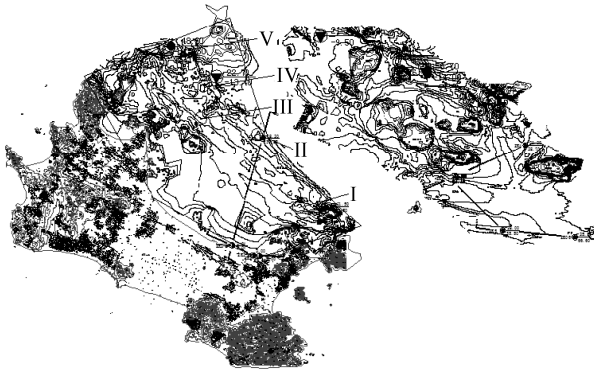


图 4 设计波浪要素代表点位置

Fig. 4 Location of representative points in the design of wave elements

表 2 该地区 III 点位置 50 年一遇设计波浪要素

Tab. 2 Design wave parameters with a 50-year frequency in location III of the region

水位	传入波向	$H_1/(\%/m)$	$H_4/(\%/m)$	$H_5/(\%/m)$	$H_{13}/(\%/m)$	\bar{H}/m	\bar{T}/s	L/m
极端高水位	ENE	5.36	4.58	4.44	3.75	2.42	8.34	94.01
	E	5.27	4.50	4.36	3.69	2.37	8.55	97.52
	ESE	4.98	4.25	4.11	3.47	2.23	8.68	99.51
	SE	4.56	3.89	3.76	3.17	2.03	10.59	129.86
	SSE	3.07	2.59	2.51	2.10	1.33	8.49	96.51
极端低水位	ENE	3.09	2.64	2.56	2.17	1.40	8.26	74.95
	E	2.96	2.53	2.45	2.07	1.34	8.60	78.79
	ESE	2.85	2.44	2.36	1.99	1.29	8.69	79.73
	SE	2.41	2.05	1.98	1.67	1.07	10.59	100.45
	SSE	1.74	1.48	1.43	1.19	0.76	8.46	77.28

表 3 基础承载能力极限状态荷载

Tab. 3 Foundation design loads in the ultimate state

参数	参数单位	参数数值
轮毂高度	m	90.0
支持力	kN	4 550
切向力	kN	2 090
倾复力矩	kN·m	169 600
扭矩	kN·m	10 920

表 4 基础正常使用极限状态基础设计荷载

Tab. 4 Foundation design loads in the normal operation state

参数	参数单位	数值
轮毂高度	m	90.0
支持力	kN	4 550
切向力	kN	1 280
倾复力矩	kN·m	115 200
扭矩	kN·m	13 710

2.4.3 海流

工程场区及附近大潮期间平均流速在 0.29~0.70 m/s。工程场区及附近大潮期间最大流速为 1.33 m/s, 对应流向为 100°。

2.5 风机荷载

该工程采用西门子生产的单机容量为 4.0 MW 的 SWT4.0-130S 离岸型风电机组。设计荷载参数由西门子厂家提供。如表 3、表 4 所示。

2.6 基础设计方案

根据风机发电机组荷载参数、当地地质地貌、海洋环境条件以及港口工程施工经验, 初步设计选择群桩数目为 8 根的高桩承台群桩基础, 承台直径 14 m, 厚度 5 m, 桩型为端承桩, 桩径 1.8 m, 桩长 50 m

的高端承台群桩基础结构, 其中泥面以上部分为填芯混凝土钢管桩, 泥面以下采用空心钢管桩。

应用上述高桩承台群桩基础设计理论及方法, 经结构设计方法计算分析, 可以满足工程结构要求。

3 基础结构设计方案的数值模拟验证分析

3.1 数值模拟参数设置

利用 ANSYS 有限元软件进行模拟计算分析, 采用承载能力极限状态荷载参数进行强度校核, 正常使用极限状态荷载参数对刚度进行验证。承台采用 solid45 单元模拟, 桩采用 beam188 单元模拟, 桩土作用采用 p-y 曲线法进行处理^[6], 应用 combin139 弹簧单元对其模拟。

根据设计文件结构分析建模如图 5 所示, 桩土

作用 p - y 曲线如图 6、图 7 所示。

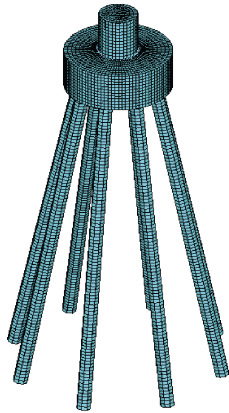


图 5 风电基础有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the basis of wind farm

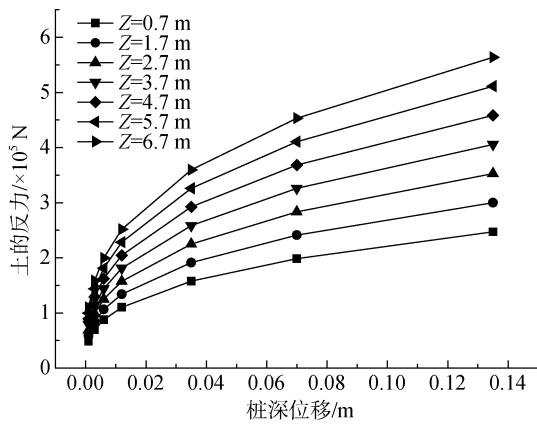


图 6 黏土层 p - y 典型曲线

Fig. 6 Typical curve of p - y in clay

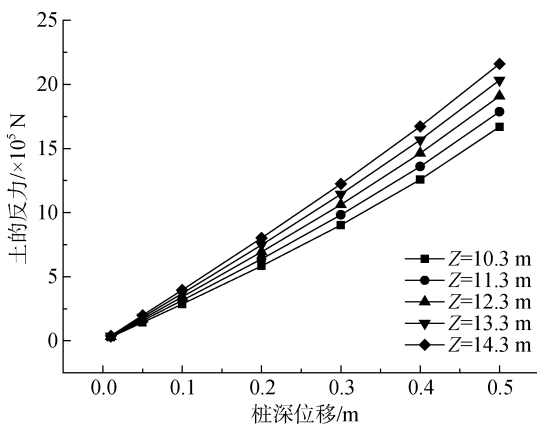


图 7 砂土层 p - y 典型曲线

Fig. 7 Typical curve of p - y in sand

3.2 结构内力分析

3.2.1 承台

由图 8、图 9 承台应力分布状态及大小可以看出：

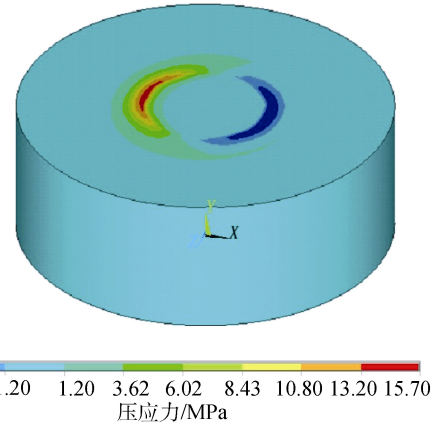


图 8 承台压应力云图

Fig. 8 Cloud picture of compressive stress on a bearing platform

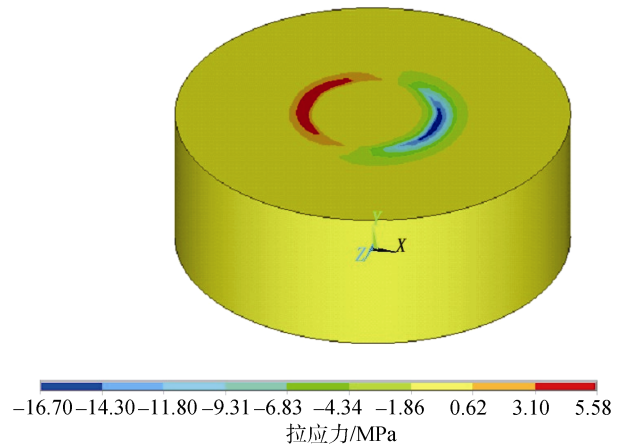


图 9 承台拉应力云图

Fig. 9 Cloud picture of tensile stress on a bearing platform

1) 承台中最大拉应力与最大压应力都出现在与过渡段和桩接触部位；

2) 承台混凝土整体最大压应力为 15.7 MPa，小于 C40 混凝土的抗压强度 19.1 MPa，说明混凝土承台的承载力可以达到要求；

3) 承台整体局部拉应力达到 5.58 MPa，出现在过渡段与承台连接部位，而该位置是由贯穿承台基础的预埋件与过渡段连接，可以充分避免该位置出现拉应力，所以该处拉应力不予考虑。

3.2.2 钢管桩

由图 10、图 11 钢管桩应力分布状态及大小可以看出：

1) 钢管桩中最大应力为 91.3 MPa，出现在钢管桩的填充混凝土与非填充混凝土分界部位，小于设计所选用的 Q345 钢管的强度设计有效值 295 MPa，钢管桩处于安全状态。

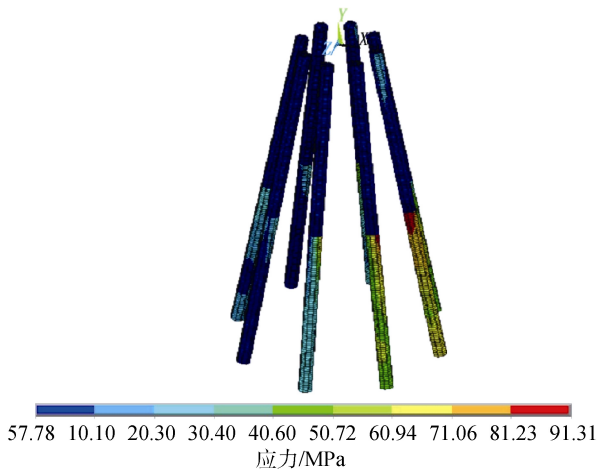


图 10 钢管桩应力云图

Fig. 10 Cloud picture of stress on steel piles

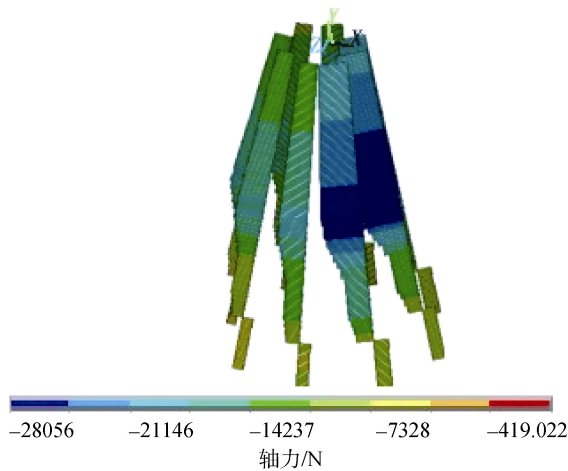


图 11 钢管桩轴力图

Fig. 11 Axial force diagram of a steel pile

2) 桩的最大轴向压力为 24 628 N, 小于规范允许值 56 280.9 N, 最大轴向拉力为 3 036 N, 小于规范允许值 11 560 N, 满足钢管桩基础设计要求。

3.3 结构变形位移分析

桩深-位移曲线如图 12 所示, 基础变形计算结果见表 5。

由结构变形位移计算结果可以看出:

1) 承台基础的最大水平位移为 16.5 mm, 小于设计水平位移容许值 150 mm, 竖直最大沉降为 5.8 mm, 远小于规范规定地基允许沉降值 100 mm;

2) 承台基础的转角位 0.001 881 rad, 其正切值为 0.001 81, 小于规范允许值 0.003;

3) 位移最大位置发生在承台及桩顶部位, 完全符合结构位移特点。

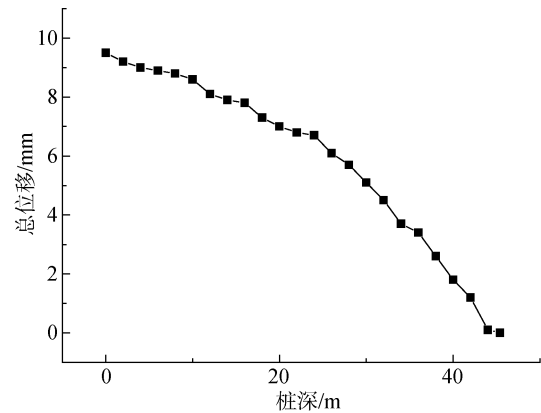


图 12 桩深-位移曲线

Fig. 12 Depth-displacement curve of a pile

表 5 风机基础变形计算结果表

Tab. 5 Results of deformation on the basis of wind electron

项目	最大总位移/mm	最大水平位移/mm	最大竖直位移/mm	最大转角正切/rad
计算值	18.85	16.5	5.8	0.001 81
规范允许值	规范无明确要求	150	100	0.003

4 结论

依据对工程海区海洋工程地勘实测数据及水文实测数据, 通过对海上群桩高承台结构设计方案通过有限元软件模拟计算分析, 得出以下结论。

1) 该方案满足承载力强度设计要求, 混凝土承台压应力和拉应力均可保证后期设备投产后正常运行, 最大应力主要发生在塔筒底座与承台接触部位及钢管桩与承台连接段, 所以在连接部位应做加强措施处理, 保证在正常使用过程中抗疲劳破坏损伤;

2) 承台基础竖直位移较小, 水平位移相对较大, 位移较大位置主要发生在承台上, 但均能满足规范刚度和变形要求;

3) 由于钢管桩采用了部分填充混凝土, 部分空心结构, 通过计算结果可以看出, 由于桩体界面突变, 在该分界部位应力较集中, 刚度不能顺畅过渡, 容易造成该钢管桩产生局部破坏, 且该地区为沿海台风多发地区, 所以应对局部构造均作加强过渡处理, 可考虑填充碎石土等方法, 以防止由于局部破坏而影响使用寿命。

参考文献:

- [1] 张忠中. 高桩承台在福建海上风机基础的应用[J]. 水利科技, 2015(1): 56-58.
Zhang Zhongzhong. The application of high bearing platform of wind turbine in Fujian offshore[J]. Hydraulic Science and Technology, 2015(1): 56-58.
- [2] 王伟, 杨敏. 海上风电机组地基基础设计理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 105-107.
Wang Wei, Yang Min. The theory and engineering application of foundation design in offshore wind turbine[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 105-107.
- [3] 何岩松, 王健飞, 赵怀宇, 等. 海上风机荷载计算及组合研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(增刊 2): 412-416.
He Yansong, Wang Jianfei, Zhao Huaiyu, et al. Research of load calculation and load combination for wind turbine generator system of beach-shallow sea[J]. Building Structure, 2012, 42(S2): 412-416.
- [4] 戴国亮, 龚维明, 沈景宁, 等. 东海大桥海上风电场基础波浪理论分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 457-461.
Dai Guoliang, Gong Weiming, Shen Jingning, et al. The wave theory analysis for the foundation of Donghai Bridge Offshore Wind Farm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(zk1): 457-461.
- [5] 王伟, 杨敏. 海上风电机组基础结构设计关键技术问题与讨论[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 242-248.
Wang Wei, Yang Min. The key technical problems and discussion of foundation structural design in offshore wind turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 242-248.
- [6] DNV-OS-J101: 2007, Design of offshore wind turbine structure[S].

Research for the design of the basis with pile group and high bearing platform of offshore wind farm

WANG Miao¹, WU Dong-kuan², LI Jin-yuan^{1, 4}, ZHU Liang¹, CHEN Xiao-jun¹, LIU Jian-min³, ZHAO Le-chuan⁵

(1. China Longyuan Power Group Co., Ltd., Beijing 100034, China; 2. Zhong Neng Power-Tech Development Co., Ltd., Beijing 100034, China; 3. Hunan Longyuan Wind Power Generation Co., Ltd., Changsha 410004, China; 4. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083 China; 5. Fujian Longyuan Offshore Wind Power Generation Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Received: Jul. 5, 2019

Key words: offshore wind turbine; wind turbine platform; design; finite element; pile group

Abstract: Wind power generation is an important aspect of renewable energy. With the advancement of green technology, offshore wind power has become a novel engineering hot spot in recent years. The main problems that remain to be solved are the design and of offshore wind energy facilities themselves. Offshore wind energy technology in European countries, where it developed relatively quickly, is the most often used reference in China; however, China currently depends on the design and construction standards used in hydropower construction and on offshore oil-drilling platforms, and offshore wind power standards are as yet unformed. After finite element calculation analysis and demonstration with the design of an offshore wind turbine platform, the methods and parameters of design can be verified. Technological research and practical exploration of offshore wind farm can provide a reliable basis for making Chinese offshore wind turbine the industry standard, and it will be of important value for the exploitation of mass offshore wind energy in the future in China.

(本文编辑: 刘珊珊)