

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.02.012

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:李启钊,孔德煌,何建涛,席占生.海上风电大直径单桩基础优化研究[J].西安理工大学学报,2023,39(2):272-280.

LI Qizhao, KONG Dehuang, HE Jiantao, XI Zhansheng. Optimal research on monopile for offshore wind farm[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(2):272-280.

海上风电大直径单桩基础优化研究

李启钊,孔德煌,何建涛,席占生

(国核电力规划设计研究院有限公司,北京 100095)

摘要:目前用于海上风电大直径单桩基础设计的 API 规范的 p - y 曲线法低估了土的初始刚度,导致设计过于保守。本文借鉴国际上关于大直径单桩基础桩-土相互作用研究最前沿的 PISA 项目成果,采用能够真实反映大直径单桩基础受力模式的四刚度弹簧来模拟桩-土相互作用,依托国家电投神泉一(二)期工程进行大直径单桩基础的优化研究,在满足频率、应力、变形、疲劳等设计指标的条件下,对单桩基础的入泥深度和壁厚进行了优化,所得设计桩重相比 Ramboll 方法可优化 6%~7%,相比 API 方法可优化 30%以上。

关键词: PISA 方法;单桩基础;设计优化**中图分类号:** TU435**文献标志码:** A**文章编号:** 1006-4710(2023)02-0272-09

Optimal research on monopile for offshore wind farm

LI Qizhao, KONG Dehuang, HE Jiantao, XI Zhansheng

(State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute co., LTD., Beijing 100095, China)

Abstract: Currently, the p - y curve of API specification is used in the design of monopile for offshore underestimated the initial stiffness of soil, resulting in a conservative design. The optimal design of monopile is carried out in SPIC Shenquan I (II) project by the PISA method, which is the most advanced international research on pile-soil interaction of monopile. The pile-soil interaction is simulated by the four-stiffness spring reflecting the stress mode of the monopile. Under the condition of satisfying the design guideline such as freqs., stress, deformation and fatigue, the thickness and the penetration depth of monopile are optimized. In this paper, the pile weight can be optimized by 6%~7% compared with that by the Ramboll method, and by more than 30% compared with that by the API method.

Key words: PISA method; monopile; design optimization

海上风能作为一种新型的可再生能源,具有资源丰富、靠近负荷中心、节省土地资源等优势,是国家鼓励发展的可再生能源。目前海上风电已逐步走向平价上网,设计优化是降低工程造价的重要技术手段,风机基础占风电场总造价的 20%~30%,国内外已建成的海上风电风机基础 75%为单桩基础,因此单桩基础优化设计是重中之重。对于承受风、

浪、流等荷载联合作用的大直径单桩基础而言,桩-土相互作用特性是设计的重点和难点。

目前广泛应用的桩-土相互作用分析方法为美国石油协会 API RP 2A 规范^[1]推荐的 p - y 曲线法,该方法考虑了土的非线性特点,其计算公式是根据现场试桩数据分析推导的,试验的钢管桩直径在 1m 以内。随着单桩直径的增大,国外学者 Dunnivant

收稿日期: 2023-04-03; **网络首发日期:** 2023-05-16**网络首发地址:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230515.1732.006.html>**第一作者:** 李启钊,男,硕士,高级工程师,研究方向为可再生能源、碳达峰、氢能及绿电转化技术。E-mail:liqizhao@hotmail.com**通信作者:** 孔德煌,男,硕士,工程师,研究方向为海上风电结构设计与研究。E-mail:stianowen@126.com

等^[2]、Stevens 等^[3]通过试验研究均发现,桩径效应对 p - y 曲线有明显的影响,特别是 p - y 曲线的初始刚度与桩径密切相关。Damgaard 等^[4]发现,采用规范推荐的 p - y 曲线无法准确预测风机单桩基础的桩顶水平响应,且低估了风机的 1 阶自振频率。

近年来,国内学者针对大直径单桩基础桩-土相互作用特性开展了大量的研究。文献^[5]研究了循环荷载作用下地基刚度和阻尼的变化及其对单桩动力特性的影响。文献^[6]基于 HS 本构模型分析了大直径单桩基础的水平承载力,并与试验结果进行对比,验证了该模型的适用性。文献^[7]通过试验确定了典型海洋软土 HSS 本构模型的强度参数和刚度参数,为设计人员提供了参数取值的科学依据。文献^[8]提出了一种多弹簧桩-土相互作用分析模型,进行了大直径单桩基础水平承载力计算,并与现场试桩试验进行对比,验证了多弹簧模型的适用性。

国际上单桩基础设计经验最为丰富的 Ramboll 公司根据参考文献^[9]、^[10],对 API 规范中的 p - y 曲线的初始刚度进行了修正,提出了更适用于大直径单桩基础的 p - y 曲线。但该方法仍无法真实反映大直径单桩基础的受力模式,导致设计入泥深度偏大。

2016 年欧洲的 PISA 联合产业研究项目通过大量的直径 3m 以上的大直径桩的现场原位试验及有限元分析,提出了一种四刚度的桩-土相互作用特性分析方法。该方法在单桩基础设计时,可通过分布在桩侧及桩端的四种刚度的弹簧,真实反映桩-土相互作用的特性。PISA 项目的研究成果已成功应用于欧洲多个风电场,其中 Triton Knoll 工程设计的单桩重量相比 API 规范方法优化了 30%。目前,PISA 方法虽然在国内暂无工程应用的报道,但其理论是完备的,因此本文将依托国内实际工程项目,应用 PISA 方法进行单桩基础优化研究。

1 PISA 方法

PISA 方法在计算土的水平承载力时,除考虑土的水平抗力之外,还考虑了沿桩侧分布的弯矩、桩底的横向剪力以及桩底的弯矩,能真实地反映大直径单桩基础的受力模式,如图 1 所示。

PISA 项目中选取了英格兰考登(Cowden)的冰碛硬黏土地^[11]、苏格兰博什肯纳(Bothkennar)的软黏土地、法国敦刻尔克(Dunkirk)中密或密实的砂土^[12]进行多组单桩水平静载试验(见图 2),得到了不同场地的土反力曲线数据。He 等^[13]先建立均质砂土、黏土中的三维有限元单桩模型,计算两者

的土反力曲线,再将砂土、黏土的曲线分别导入到一维设计空间中,进行单桩响应分析,验证了在砂土、黏土互层条件下,基于有限元方法分析单桩响应的适用性。Byrne 等^[14]总结了包括考登的冰碛硬黏土、脆性硬塑性黏土(伦敦黏土)、博什肯纳软黏土、不同密实度的敦刻尔克砂土及上述土层混合而成的成层土中的单桩设计方法。结果表明,均质土层中得到的土反力曲线适用于 PISA 一维设计空间中的成层土。

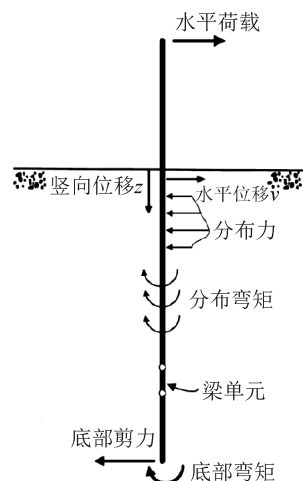


图 1 单桩基础受力模式

Fig. 1 Stress mode of monopile



图 2 单桩水平静载试验

Fig. 2 Horizontal static load test of monopile

PISA 项目通过大量的案例分析得出,同一地质条件下,大直径单桩基础的四刚度土反力曲线的变化规律与单桩参数(桩径、壁厚、入泥深度、悬挑长度等)相关,进而推导出一套多参数的土反力曲线计算公式,其中黏土包含 28 个拟合参数,砂土包含 24 个拟合参数。

当采用 PISA 方法进行单桩基础优化设计时,其土反力曲线的参数需根据实际钻孔的岩土参数建立至少 8 个不同的桩-土有限元模型,并通过计算拟合得出。因此,单桩参数的设定将直接影响拟合结果的准确性,设置合适的单桩参数至关重要。

PISA 方法与 API 规范、Ramboll 方法的优缺点对比如表 1 所示。

表 1 各方法优缺点对比

Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages by each method

| 方法 | 优点 | 缺点 |
|------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|
| API 规范 | 计算参数较少,对地勘要求较低,操作简便。 | 低估了大直径单桩基础的水平承载力,导致设计偏于保守。 |
| Ramboll 方法 | 能一定程度反映大直径单桩基础的尺寸效应,相比 API 规范计算结果更准确,操作简便。 | 仍无法真实反映大直径单桩基础的受力模式,导致设计入泥深度偏大。 |
| PISA 方法 | 能真实反映大直径单桩基础的受力模式,计算结果最准确。 | 计算参数较多,对地勘要求较高,需要做高等土工试验,有限元计算耗时较长。 |

2 土反力曲线参数的拟合

本文通过设置不同的单桩参数(桩径 D 、入泥深度 L 等),建立不同的算例,计算分析其对桩-土作用特性的影响规律。

单桩基础和土体的三维有限元模型见图 3。单桩基础桩径 D 取 7~11m,入泥深度 L 取 30~70m,土体边界条件为土体四周设置水平位移约束,土体底面设置竖向位移约束。综合考虑计算效率和精度,计算模型在土体竖直方向取 $2L$,荷载作用的水平方向取 $25D$,非荷载作用的水平方向取 $6D$,对桩周 $4D$ 范围、桩端 $1D$ 范围内的土体网格加密。

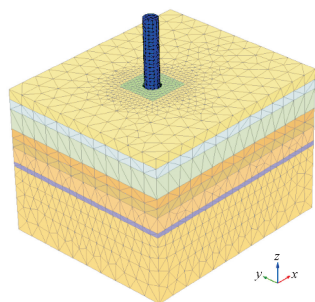
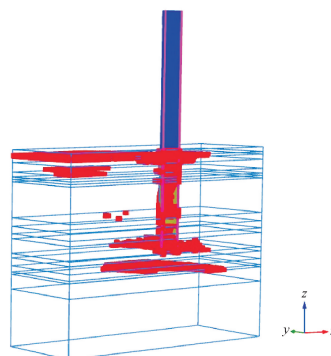


图 3 桩-土有限元模型
Fig.3 Pile-soil FE model

黏土采用 NGI-ADP 本构模型^[15],该本构模型考虑了土的各向异性特点,采用三轴压缩、三轴拉伸、单轴剪切三种试验确定土的不排水抗剪强度及其对应的剪切变形,真实地反映土的受力状态;砂土采用 HSS 本构模型^[16],该本构模型采用邓肯-张(Duncan-Chang)非线性弹性模型来分析土屈服前的应力应变关系,遵循莫尔-库伦强度准则,运用加工硬化定律计算土的塑性变形,引入小应变剪切模量 G_0 来考虑土的初始刚度。

典型工况桩-土有限元分析过程:在桩顶施加

12 480 kN 的水平荷载、1 381 kN·m 的弯矩,分 80 个荷载步逐级施加,直至土体产生塑性破坏。土体最终状态下的塑性区分布如图 4 所示,水平位移如图 5 所示。图 4 中表层和桩端的土体均已破坏,表层土体的水平位移最大,达到 0.22m。



注:红色区域为塑性区。
图 4 土体塑性区
Fig.4 Soil plastic zone

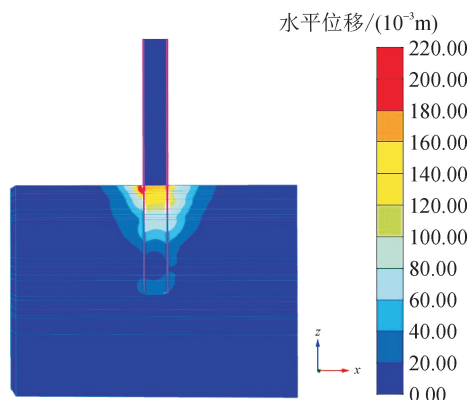


图 5 土体水平位移云图
Fig.5 Cloud picture of the soil horizontal displacement

通过大量有限元算例分析得出极限承载状况下桩侧土体的水平变形规律,如图 6 所示,从图中可以

看出,在水平荷载作用下,当桩侧土体产生较大变形时,基础距泥面 $0.7L \sim 0.8L$ 深度处会产生一个旋转中心。由此可分析出桩侧土体的破坏模式(见图7),即以旋转中心到桩端为半径的圆周范围内的土体会发生整体旋转剪切破坏;圆周以上的土体会发生楔形体剪切破坏;同时桩侧的土体会受到竖向的摩擦力;桩端的土体会发生水平剪切破坏。由此可见,有限元计算得出的桩侧土体在极限荷载作用下的受力模式与 PISA 的四刚度法一致。

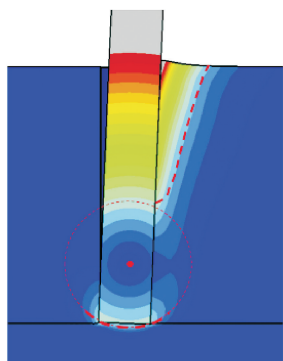


图6 桩侧土体水平变形趋势
Fig. 6 Horizontal deformation trend of the soil around the pile

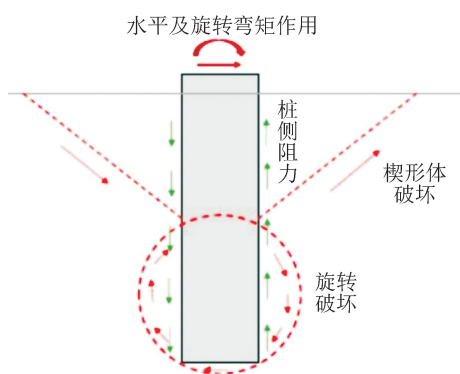


图7 桩侧土体破坏模式
Fig. 7 Failure model of the soil around the pile

通过有限元计算得到表征桩-土作用特性的三组重要曲线:泥面处桩身剪力-水平位移关系曲线(见图8、9)、泥面处桩身弯矩-转角关系曲线(见图8、9)、桩身位移随土层深度变化曲线(见图10)。

通过分析上述曲线得出单桩参数对桩-土作用特性的影响规律。

1) 当土体处于小变形状态时,单桩水平位移随水平力的增大呈线性增大,此时,土体处于弹性状态,直线的斜率可反映土的初始刚度。

2) 当土体处于大变形状态时,单桩水平位移随水平力的增大呈非线性增大,且随着位移增大,曲线

斜率减小,说明土体进入塑性状态,刚度逐渐降低。对于黏性土,当土体处于临界破坏状态时,剪力达到峰值,土体破坏后,剪力降低,而变形急剧增大;对于砂性土,当土体处于临界破坏状态时,曲线出现明显的拐点,土体破坏后,砂土颗粒会发生重分布,土体能继续承载,但土体刚度明显降低。

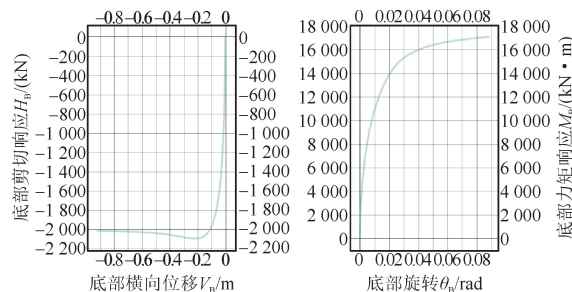


图8 黏性土的单桩土反力曲线
Fig. 8 Soil reaction curve of the monopile in clay

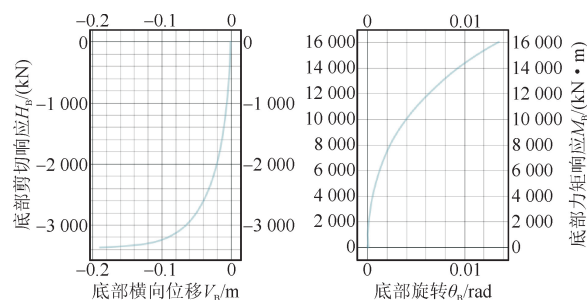
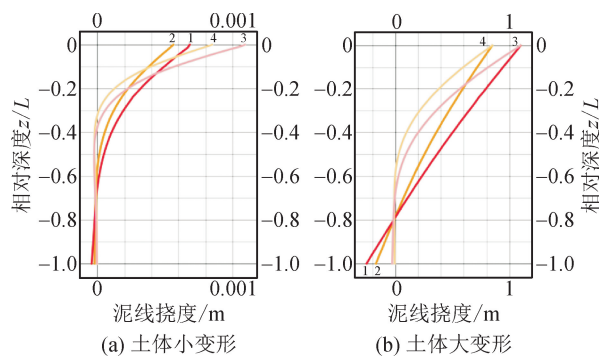


图9 砂性土的单桩土反力曲线
Fig. 9 Soil reaction curve of the monopile in sand



注:1— $L/D=3.64$;2— $L/D=4.71$;
3— $L/D=6.36$;4— $L/D=8.24$ 。

图10 桩身位移随土层深度变化曲线

Fig. 10 Pile displacement curve varying with soil depth

3) 当单桩处于极限承载状态时,桩径越大、入泥深度越深,则土体产生相同变形所需的外力越大,即承载力越高。

4) 无论土体处于何种状态,单桩在土层一定深度处($0.6 < z/L < 0.8$)都有一点位移为0,该点为嵌固点。土体从小变形状态向大变形状态转变的过程中,嵌固点的相对深度不断加大。嵌固点的相对深

度与单桩参数无关,只与土层参数相关。

5) 单桩入泥深度与桩径的比值,即 L/D ,反映了桩的刚度及受力模式。 L/D 越大,如曲线 3 和 4,则单桩越趋近于弹性长桩,即单桩在水平力作用下整体呈弯曲状; L/D 越小,如曲线 1 和 2,则单桩越趋近于刚性短桩,即单桩在水平力作用下整体呈倾斜状。地基刚度也对单桩的受力模式有显著影响。在特定地质条件下,可通过变化不同的 L/D ,建立多个工况进行分析,确定单桩刚柔的界限。

综合上述分析,单桩的承载能力、受力模式等桩-土作用特性与桩径 D 、入泥深度 L 、入泥深度与桩径比 L/D 三个因素相关。因此,在特定地质条件下,针对这三个变量,可设置上、下限,建立 8 个有限元模型的包络空间,根据包络空间的计算结果,拟合土反力曲线的参数,得出包络空间中设计工况的土反力曲线,用于单桩基础的优化设计。

3 PISA 方法的工程验证

滨海项目对 100 个单桩基础的风机机位均进行了整机频率的监测,实测频率见图 11。

滨海项目单桩基础桩径为 5.5m~6.1m,桩长为 60m~75m,壁厚为 50mm~80mm。塔筒直径为 3.12m~5.5m,高度为 73.84m,壁厚为 15mm~57mm。风机重量为 239 t。桩基入泥深度范围内土层主要以粉质黏土、粉土为主,地层参数如表 2 所示。

表 2 滨海项目地层参数

Tab.2 Stratum parameter from Binhai offshore wind farm

| 土层编号 | 土层名称 | 土体有效重度 $\gamma'/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 黏聚力 $C_u/(\text{kPa})$ | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ |
|------|---------|--------------------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| ①-1 | 淤泥质黏土 | 7.0 | 15~18 | |
| ②-1 | 粉质黏土 | 8.5 | 18~20 | |
| ②-2 | 粉土 | 10.0 | | 25~27 |
| ③-2 | 粉质黏土 | 9.1 | 32~35 | |
| ④-2 | 粉土夹粉质黏土 | 9.8 | | 26~28 |
| ⑤-1 | 粉质黏土夹粉土 | 9.3 | 34~38 | |
| ⑦-1 | 粉质黏土 | 10.0 | 65~70 | |

整机频率受地质条件、水深、轮毂高度、风机重量、基础刚度等因素的影响,因此各机位的频率均不相同,变化规律复杂。对于同一风场,各机位的风机

重量和轮毂高度一般相同,本文综合考虑地质条件、水深、基础刚度等因素,选取其中 3 个代表性的机位进行单桩基础频率计算,并与现场实测频率进行对比验证,具体步骤如下。



图 11 滨海项目每个机位周年观测各月最小频率
Fig. 11 Measured minimum frequency for each month of each position from Binhai offshore wind farm

1) 设置桩径 D 、入泥深度 L 、入泥深度与桩径比 L/D 三个变量的上、下限,桩径 D 取 5~8m,入泥深度 L 取 32~50m, L/D 取 4~10。建立 8 个模型的包络空间,进行桩-土有限元计算。

2) 根据第一步的计算结果拟合 PISA 四刚度法的土反力曲线参数,生成包络空间中设计工况的土反力曲线。

3) 将土反力曲线作为带有非线性刚度的土弹簧导入 SACS 14 软件,并建立单桩-塔筒-风机一体化模型(见图 12),进行频率计算。由机舱、轮毂及叶片组成的风机系统可进行 360°偏航,因此风机系

统具有对称性,通常可将其简化为塔筒顶部的一个集中质量点。



图 12 基础-塔筒-风机一体化模型

Fig. 12 Foundation-tower-wind turbine integrated model

4) 采用 API 规范、Ramboll 方法的 p - y 曲线进行单桩频率计算。

5) 对比分析上述各方法的单桩频率,并通过工程实测频率进行验证。

各方法计算的单桩基础频率与实测数据的对比见表 3。

表 3 单桩基础计算频率与实测频率对比

Tab. 3 Comparison of calculated and measured frequency of monopile 单位: Hz

| 机位 | PISA 方法 | API 规范 | Ramboll 方法 | 实测值 |
|------|---------|--------|------------|-------|
| JT71 | 0.314 | 0.305 | 0.311 | 0.342 |
| JT72 | 0.313 | 0.303 | 0.318 | 0.338 |
| JT73 | 0.304 | 0.269 | 0.312 | 0.324 |

通过对比表中的数据可得出以下结论。

1) 由于单桩基础较柔,通常容易接近风机的 1P,进而产生共振,因此单桩基础设计时需选择合适的频率避开风机的 1P。单桩重量越轻,则频率越低,也越接近风机的 1P,因此频率计算的准确性会直接影响桩重。根据以往项目的工程经验,单桩基础计算的频率往往低于实测值,这就导致设计偏于保守。API 规范计算的频率偏低,很大程度上低估了土的刚度;相比 API 规范,PISA 方法与 Ramboll 方法计算的频率均更接近实测频率,且两者仍具有一定的安全裕度。

2) 对比 3 个机位的计算频率与实测频率可知,PISA 方法的计算结果均低于实测值,说明 PISA 方法具有较好的稳定性和可靠性。

4 单桩基础优化设计

本文依托国电投神泉一(二期)工程的典型机位,采用 PISA 方法进行单桩基础优化设计,并与 Ramboll 的设计成果和 API 规范的计算结果进行对比分析。

国家电投揭阳神泉一(二期)海上风电场项目水深范围 33~39 m,场址中心离岸距离约 26 km。安装 13 台单机容量 7.0 MW 的风电机组,总装机容量为 91 MW。基础型式为单桩基础,附属构件包括外平台、内平台、靠船件、外加电流阴极保护系统等,计算时均以附加质量的方式施加至单桩相应的高程位置,同时水下部分考虑附连水质量对结构动力响应的影响。

神泉一项目典型机位单桩基础桩径为 6.0 m~8.8 m,桩长约 100 m,壁厚为 68 mm~95 mm。塔筒直径为 4.145 m~6.0 m,高度为 85.46 m,壁厚为 22 mm~78 mm。风机重量为 431 t。桩基入泥深度范围内土层主要以粉砂、细砂、粉土、粉质黏土为主,地层参数如表 4 所示。

表 4 神泉一项目地层参数

Tab. 4 Stratum parameter from Shenquan I offshore wind farm

| 土层编号 | 土层名称 | 土体有效重度 $\gamma'/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 黏聚力 $C_u/(\text{kPa})$ | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ |
|------|---------|--------------------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| ①-1 | 粉砂混淤泥 | 7.0 | | 29 |
| ①-2 | 粉质黏土夹粉土 | 6.6 | 20 | |
| ② | 粉质黏土 | 7.5 | 45 | |
| ③-1 | 粉砂 | 9.2 | | 31 |
| ③-2 | 细砂 | 10.2 | | 36 |
| ④-1 | 粉质黏土 | 8.5 | 75 | |
| ④-2 | 粉质黏土夹粉土 | 8.6 | 80 | |
| ④-3 | 细砂 | 10.3 | | 37 |

单桩基础的设计工况主要包含极端工况(ULS)、正常运行工况(SLS)、疲劳工况(FLS)和频率计算工况(NFA),针对单桩基础各设计工况的计算结果,进行详细的对比分析。

4.1 ULS

该工况主要进行单桩基础在 50 年一遇极端状况下,风、波浪、海流联合作用时的结构强度、稳定、承载力的验算。结果通过 UC 值(弯曲抗力系数)综合反映,UC 值小于 1,则单桩基础可承受极端状况

下的荷载作用,满足设计要求。

PISA 方法的计算结果见图 13、14,各方法的对比见表 5。从表中数据可知,PISA 方法的结果满足设计要求,且比 Ramboll 方法和 API 规范小。

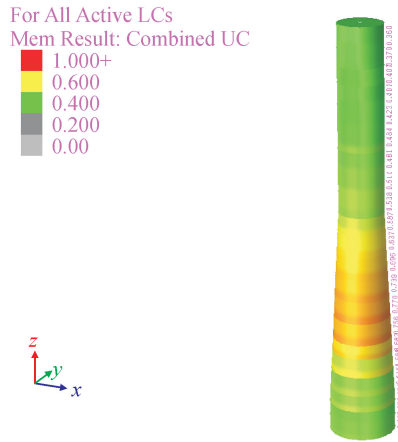
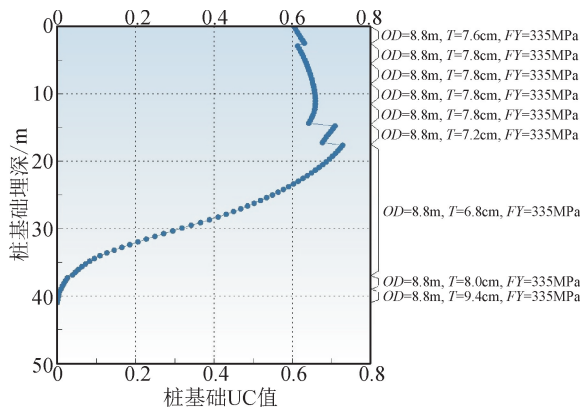


图 13 泥面以上钢管桩的 UC 值
Fig. 13 Pile UC above mudline



注:OD 为桩径;T 为壁厚;FY 为材料屈服强度。

图 14 泥面以下钢管桩的 UC 值
Fig. 14 Pile UC below mudline

表 5 单桩基础 UC 值对比

Tab. 5 Comparison of monopile UC's

| PISA 方法 | API 规范 | Ramboll 方法 |
|---------|--------|------------|
| 0.77 | 0.82 | 0.86 |

4.2 SLS

该工况主要进行单桩基础在风机正常运行状况下泥面处转角的计算,结果需满足规范要求的 0.25° ,即 0.00436 rad 。采用 PISA 方法的计算结果见图 15。从图中数据可知,单桩基础泥面处,即高程 0 m 处的转角为 0.00364 rad ,满足规范要求。

单桩基础的泥面处转角与其入泥深度相关,随着入泥深度增加,转角减小;当入泥达到一定深度,即设计入泥深度时,转角变化很小,趋于稳定。采用

PISA 方法设计的单桩入泥深度为 41 m ,Ramboll 方法为 45.5 m ,API 规范为 52 m 。

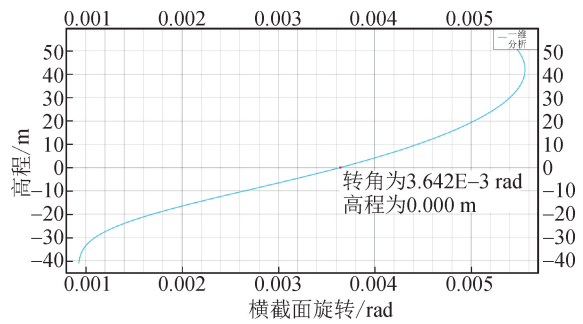


图 15 桩身转角
Fig. 15 Pile rotation

4.3 FLS

该工况主要进行单桩基础在长期循环往复的风机荷载和波浪荷载作用下的疲劳验算。虽然单桩基础无复杂的节点型式,抗疲劳性能好,但其变截面段存在一定的应力集中,在风机、波浪等动力荷载循环作用下,焊缝处会产生累积疲劳损伤,导致结构强度降低,根据简化弹塑性假设和 Miner 累计疲劳综合准则,对其进行疲劳验算。

单桩基础结构无杆件交接部位,计算寻找累积疲劳损伤最大的节点,评估其累计疲劳损伤情况。对于大直径单桩基础,疲劳计算位置选取变截面处,即图 16 中 A、B、C 三个区域。分别计算上述每个位置的风浪联合作用的疲劳损伤和打桩产生的疲劳损伤,再将两者线性叠加,得到累积损伤,用以评估结构的抗疲劳设计安全性。对于疲劳损伤较大部位的焊缝进行打磨处理,S-N 曲线采用 C1 曲线;对于未打磨焊缝的部位,采用 D 曲线。单桩基础疲劳损伤计算结果见表 6,均小于 1,单桩基础结构疲劳寿命可满足设计要求。



图 16 单桩基础疲劳分析关键部位
Fig. 16 Key positions of monopile for fatigue analysis

单桩基础疲劳损伤主要受桩径和壁厚的影响。PISA 方法设计的桩径为 8.8 m ,最大壁厚为 90 mm ;

Ramboll 方法设计的桩径为 8.8 m,最大壁厚为 95 mm;API 规范设计的桩径为 8.8 m,最大壁厚为 110 mm。

表 6 单桩基础关键部位疲劳损伤计算结果
Tab. 6 Calculated fatigue damage of key positions of monopile

| 计算部位 | S-N 曲线 | 风浪联合疲劳损伤 | 打桩疲劳损伤 | 累积损伤 |
|------|--------|----------|--------|------|
| A | C1 | 0.88 | 0.10 | 0.98 |
| B | C1 | 0.83 | 0.10 | 0.93 |
| C | D | 0.73 | 0.10 | 0.83 |

4.4 NFA

该工况主要进行单桩基础的频率计算,计算结果需控制在风机厂家允许的频率范围内,即 0.20 Hz~0.27 Hz 之间。

频率计算需建立基础-塔筒-风机的一体化模型,将叶轮和机舱简化为一个集中质量单元,计算结果见表 7。从表中数据可知,PISA 方法的结果满足设计要求,介于 Ramboll 方法和 API 规范之间,略低于 Ramboll 的结果。若按 API 规范设计,则频率偏低,荷载偏大,导致设计桩重偏大。

表 7 单桩频率对比
Tab. 7 Comparison of monopile frequency
单位:Hz

| PISA 方法 | API 规范 | Ramboll 方法 |
|---------|--------|------------|
| 0.228 | 0.219 | 0.232 |

综上,相比 Ramboll 设计成果,采用 PISA 方法进行单桩基础优化设计,其单桩入泥深度可减少 4.5m,部分筒节壁厚可由 95mm 优化至 90mm,整体桩重大约减轻 100 t,优化后单桩重量约 1 400 t。若采用 API 规范设计,则桩重增加 30%以上。

5 结论

本文对 API 规范的 $p-y$ 曲线法、Ramboll 方法和 PISA 方法进行了深入研究,将这三种方法计算的单桩频率与工程实测频率进行对比,并依托国电投神泉一(二期)工程将三种方法的单桩基础设计成果进行对比分析,主要结论如下。

1) PISA 方法通过分布在桩侧及桩端的四种刚度的弹簧,来模拟桩-土的相互作用,相比 API 规范的 $p-y$ 曲线和 Ramboll 方法,更真实地反映了大直径单桩基础的受力情况。

2) 通过桩径、入泥深度、入泥深度与桩径比 3

个因素控制的 8 个有限元模型的包络空间的计算结果,可以准确拟合 PISA 方法的土反力曲线,用于单桩基础的优化设计。

3) 通过对滨海项目的单桩基础频率的验证,PISA 方法相比 API 规范做了较大程度的优化,但仍具有一定的安全裕度,且稳定性好、可靠性高。

4) 依托国电投神泉一(二期)工程,采用 PISA 方法进行单桩基础优化设计,所设计的单桩重量相比 Ramboll 方法优化了 6%~7%,相比 API 规范优化了 30%以上。

参考文献:

- [1] American Petroleum Institute. Geotechnical and foundation design considerations[S]. Washington, DC: American Petroleum Institute; ANSI/API recommended practice 2GEO first edition, 2014.
- [2] DUNNAVANT T W, O'NEILL M W. Experimental $p-y$ model for submerged, stiff clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989,115(1):95-114.
- [3] STEVENS J B, AUDIBERT J M E. Re-examination of $p-y$ curve formulations[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, Texas, 1979: 397-401.
- [4] DAMGAARD M, BAYAT M, ANDERSEN L V, et al. Assessment of the dynamic behaviour of saturated soil subjected to cyclic loading from offshore monopile wind turbine foundation[J]. Computers and Geotechnics, 2014,61:116-126.
- [5] 龚敏,朱涛,陈守祥,等. 超长期循环荷载作用下海上风机大直径单桩动力特性演变规律研究[J]. 振动与冲击,2023,42(1):259-266.
GONG Min, ZHU Tao, CHEN Shouxian, et al. Evolution of dynamic characteristics of large diameter monopile of offshore wind turbine under ultra-long term cyclic load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(1): 259-266.
- [6] 潘珂珂,翟恩地,许成顺,等. 硬化土本构模型在砂土海上风电大直径单桩基础的应用[J]. 海洋技术学报,2021,40(6):114-122.
PAN Keke, ZHAI Endi, XU Chengshun, et al. Application of hardening soil model in offshore large-diameter monopiles in sand[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(6): 114-122.
- [7] 顾晓强,刘文倩,陈玺元,等. 广东阳江地区海洋软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):41-44.
GU Xiaoqiang, LIU Wenqian, CHEN Xiyuan, et al. Experimental study on HSS model parameters for marine soft soils in Yangjiang, Guangdong Province[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (S2): 41-44.
- [8] 杨林. 大直径单桩风电基础的桩-土相互作用简化弹簧分析模型研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.
YANG Lin. Simplified spring model of pile-soil interaction of large diameter monopile wind turbine foundation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [9] KALLEHAVE D, LEBLANC C, LIINGAARD M A. Modification of the API p-y formulation's initial stiffness for sand[C]//Proceeding of the 7th International Conference on Offshore Site Investigations and Geotechnics-Royal Geographical Society, 2012.
- [10] KAGAWA T, KRAFT L M. Lateral load-deflection relationships of piles subjected to dynamic loadings [J]. Soils and Foundations. 1980, 20: 19-36.
- [11] BYRNE B W, MCADAM R A, BURD H J, et al. Monotonic laterally loaded pile testing in a stiff glacial clay till at Cowden[J]. Géotechnique, 2020, 70(11): 970- 985.
- [12] MCADAM R A, BYRNE B W, HOULSBY G T, et al. Monotonic laterally loaded pile testing in a dense marine sand at Dunkirk[J]. Géotechnique, 2019, 70 (11): 986-998.
- [13] HE Y, BYRNE B W, BURD H J, et al. Application of a numerical-based design method for laterally loaded monopiles in layered soils[C]//Proceeding of the 8th International Conference for Offshore Site Investigation and Geotechnics (OSIG), 2017.
- [14] BYRNE B W, BURD H J, ZDRAVKOVIC L, et al. PISA design methods for offshore wind turbine monopiles[C]// Proceeding of 50th Offshore Technology Conference (OTC), 2019.
- [15] MINGA E, BURD H. Validation of the plaxis modeto 1D model for dense sand[M]. Oxford: Oxford University, 2019.
- [16] MINGA E, BURD H. Validation of the plaxis modeto based on the Cowden till PISA field tests[M]. Oxford: Oxford University, 2019.

(责任编辑 周 蓓)