

DOI: 10.11779/CJGE2023S10055

海上风电大直径钢管桩溜桩承载力计算方法研究

沈锦宁¹, 钱 龙², 石锐龙¹, 杨奕涛², 何 奔¹, 杨仲轩²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司浙江省深远海风电技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311100; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 桩基础被广泛应用于近海工程, 如海上风电机组多采用大直径钢管桩, 但由于桩和锤的重量很大, 在沉桩过程中可能会发生溜桩现象, 溜桩容易对桩和桩锤造成损伤, 严重影响打桩的效率, 还可能造成严重的安全事故。因此分析出现溜桩现象的原因, 给出合理的承载力计算方法是具有现实意义的。对溜桩的过程和原因进行了分析; 用基于 CPT 的 ICP-05 和 UWA-05 设计方法对海上风电大直径钢管桩在自由入泥深度和溜桩深度的土的承载力进行了分析计算, 发现 ICP-05 方法在计算自由入泥深度的承载力时的结果比较理想; 针对溜桩现象, 提出了一种基于影响区概念的折减优化公式, 通过计算溜桩深度的承载力验证了优化设计方法的合理性。

关键词: 大直径桩; 沉桩; 溜桩; 承载力计算

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0158-04

作者简介: 沈锦宁(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事海上风电风机基础结构设计及研究工作。E-mail: shen_jn@hdec.com。

Prediction for pile running of large-diameter steel pipes pile for offshore wind power

SHEN Jinning¹, QIAN Long², SHI Ruilong¹, YANG Yitao², HE Ben¹, YANG Zhongxuan²

(1. Huadong Engineering Corporation Limited, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Deep Sea Wind Power Technology, Hangzhou 311100, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The pile foundation is widely used in offshore engineering, for example, the large-diameter steel pipe pile is mostly used in offshore wind motor. However, due to the large weight of piles and hammers, the phenomenon of pile running may occur in the process of pile driving, which is easy to damage the piles and hammers, seriously affecting the efficiency of pile driving, and may cause serious safety accidents. Therefore, it is of practical significance to analyze the causes of pile running and propose a reasonable calculation method of bearing capacity. The mechanism of pile running is investigated. The cone penetration tests-based ICP-05 and UWA-05 design methods are used to analyze and calculate the bearing capacity of large-diameter steel pipe piles of offshore wind power at the depth of pile running. It is found that the ICP-05 method is ideal in calculating the bearing capacity of the large-diameter steel pipe piles of offshore wind power. A reduction optimization formula based on the concept of influence zone is proposed, and the rationality of the optimization design method is verified by calculating the bearing capacity of pile-running depth.

Key words: large-diameter pile; pile driving; pile running; bearing capacity calculation

0 引 言

随着科学技术的不断发展, 人们对能源的开发逐渐从陆地扩展到海洋, 风能作为一种清洁的可再生能源, 逐渐成为世界各国能源开发的重点。也正是因为海上风能的开发, 大直径钢管桩在海洋结构桩基工程中得到了广泛应用。

但大直径钢管桩在沉桩过程中可能会发生溜桩的现象, 这是打桩施工过程中的一种极端现象。溜桩现象是指沉桩过程中桩在桩身自重或者桩锤组合重量作用下, 在某次锤击或振动之后, 桩突然自动下沉一定

深度的现象。溜桩的发生容易对桩和桩锤造成损伤, 严重影响了打桩的效率, 增加了打桩的成本, 如果溜桩的速度过快, 还可能导致打桩船的侧翻, 造成严重的安全事故。并且溜桩现象还会造成项目人员对土质勘察数据的质疑, 无法保证桩基的安全性和稳定性。虽然国内外已对桩基贯入特性与承载力特性有了较为详实的研究, 但对于海洋桩基工程中出现的打桩过程中溜桩问题, 现有的计算方法与经验理论并不能很好

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52271294)

收稿日期: 2023-07-06

地解决。同时, 现在的设计方法多是根据标准静载试验获得的, 适用于静态或准静态过程, 不适用于像溜桩这类的动态过程。

本文首先对溜桩的机理进行解释, 然后介绍基于 CPT 的溜桩承载力计算方法, 之后在此基础上对设计方法进行动态的强度折减修正, 最后通过工程实例验证修正前后的计算精度, 从而完善或改进现有桩基承载力计算理论。

1 溜桩机理分析

1.1 溜桩现象及原因

溜桩现象根据其处于打桩的不同阶段, 大致可以分为两类: 一类是在打桩初期由于桩身自重或者桩锤组合重在没有锤击的情况下的自由贯入; 另一类是在打桩过程中的突然贯入, 通常是在桩从高承载力的土层进入低承载力的土层时发生的^[1]。

对于第一类溜桩即打桩初期的自由贯入, 由于没有锤击能量的影响, 通常贯入速度不大。并且这种溜桩原理明确, 即桩在入泥一定深度后在桩侧摩阻力和桩端阻力的共同作用下与桩身自重或桩锤组合重量达到静力平衡。根据已知的桩的自重、桩径、管桩的壁厚等信息, 以及打桩时的土层信息, 可以比较明确地求出入泥深度。并且这类溜桩一般不会对施工造成太大影响, 施工中通常已经考虑了这种初始贯入。

桩从坚硬土层进入软弱土层后, 总土阻力突然下降从而发生第二类溜桩。而且随着溜桩深度的发展, 虽然桩侧摩阻力的面积逐渐增大, 但是溜桩这一动态过程会导致桩周土受到扰动, 土的强度降低, 甚至会导致桩侧摩阻力不断变小。溜桩通常会在桩穿过粘土层进入砂土层后, 桩端阻力迅速增长, 溜桩速度逐渐慢下来的情况下停止。

综上溜桩现象产生的主要原因是打桩场地的土体中有较厚的软弱粘土层。桩从其上层的坚硬土层进入软弱土层, 桩端阻力减小, 桩侧摩阻力由于土体受扰动而减小, 导致土体承载力不足以支撑桩身自重, 发生溜桩现象。

1.2 溜桩判断条件

溜桩的判断条件是比较明确的, 目前主要是用受力平衡的原理来判断是否发生溜桩。当土的承载力满足以下条件时, 即有可能发生溜桩: ①小于桩身自重; ②小于桩锤组合重; ③小于桩锤组合自重与锤击能量产生的惯性力之和。因此, 对于海上风电, 能否准确计算土的承载力是判断溜桩是否发生的关键。

2 溜桩承载力计算方法分析

2.1 溜桩承载力计算方法

根据 API 规范, 单桩竖向承载力 Q_c 由桩侧摩阻力 Q_f 和桩端阻力 Q_b 组成, 其计算公式为

$$Q_c = Q_f + Q_b = \tau_f A_s + q_b A_b \quad (1)$$

式中: τ_f 为单位桩侧摩阻力; A_s 为桩侧表面积; q_b 为单位面积桩端承载力; A_b 为桩端横截面积。

如今在海洋工程中应用较为广泛的是已被 API 规范收录的 4 种基于 CPT 的设计方法 (ICP-05、UWA-05、Fugro-05 和 NGI-05), 相对于传统的 API 方法而言, 4 种主流基于 CPT 的设计方法预测效果更加合理, 经济性更强, 本文主要介绍 ICP-05 和 UWA-05 两种设计方法。

ICP-05 设计方法是由 Jardine 等^[2]提出。对于海洋桩, 忽略桩侧土剪胀造成的应力增长, 故其单位桩侧摩阻力计算公式为

$$\tau_f = a \left[0.023 b q_c \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{0.10} \max \left(\frac{h}{R^*}, 8 \right)^{-0.40} \right] \tan \delta_f \quad (2)$$

式中: a 为工况参数, 对于拉力作用下的开口桩取 0.9, 其他情况取 1.0; b 也是工况参数, 对拉力作用下的桩取 0.8, 压力作用下取 1.0; q_c 为锥尖阻力; p_a 为参考应力值, 取为 100 kPa; σ'_{v0} 表示竖向有效应力; h 为桩入土的深度; R^* 为等效桩半径; δ_f 为界面摩擦角。ICP-05 方法认为单位面积桩端阻力 q_b 与 $q_{c,avg}$ (桩尖 $\pm 1.5D$ 范围内 q_c 的平均值) 的比值与桩径 D 有关, 此外还需考虑桩的开闭口情况和土塞情况。

对于闭口桩:

$$q_b / q_{c,avg} = \max \left[1 - 0.5 \log \left(\frac{D}{D_{CPT}} \right), 0.3 \right] \quad (3)$$

对于开口桩, 判断有土塞的方法如下, 当内径 $D_i \geq 2.0(D_r - 0.3)$ 或 $D_i \geq 0.083 D_{CPT} (q_{c,avg} / p_a)$ 时, 其视为无土塞, 否则为完全土塞。

对于无土塞的开口桩:

$$q_b / q_{c,avg} = A_r = 1 - (D_i / D)^2 \quad (4)$$

对于完全土塞的开口桩:

$$q_b / q_{c,avg} = \max \left[0.5 - 0.25 \log \left(\frac{D}{D_{CPT}} \right), 0.15, A_r \right] \quad (5)$$

UWA-05 设计方法由 Lehane 等^[3]提出。UWA-05 方法考虑了更多承载力的影响因素: 包括成桩过程中的土体滑移, 管桩的土塞效应等, 因此计算公式也相对复杂, 其侧摩阻力为

$$\tau_f = \frac{f_t}{f_c} \left[0.03 q_c A_{r,eff}^{0.3} \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{0.13} \max \left(\frac{h}{D}, 2 \right)^{-0.50} \right] \tan \delta_f \quad (6)$$

式中: f_t / f_c 为加载方向因子, 受压时为 1, 受拉时为 0.75; $A_{r,eff}$ 为有效面积比。

关于桩端阻力, 对于闭口桩

$$q_b / q_{c,avg} = 0.6 \quad (7)$$

对于开口桩

$$q_b / q_{c,avg} = 0.15 + 0.45 A_{r,eff} \quad (8)$$

式中: $q_{c,avg}$ 取 Dutch 平均值^[4], 考虑从桩尖下方 $4D$ 到桩尖上方 $8D$ 范围内。

2.2 溜桩承载力计算方法修正

要对以上两种设计方法进行合理的折减修正, 主要考虑的就是溜桩过程中土体受扰动情况。李飒等^[5]通过相关研究表明桩侧摩阻力与桩的相对深度有关, 并根据桩在不同位置处的影响程度的不同将桩侧摩阻力划分为完全影响区, 部分影响区和无影响区 3 个部分, 因此本研究考虑相对深度并对桩侧摩阻力的修正为

$$\tau = \beta \tau_f \quad (9)$$

$$\beta = c \left(\frac{z}{H} \right)^a \left(\frac{H}{H_c} \right)^b \quad (10)$$

式中: τ 为修正后的单位桩侧摩阻力; a , b , c 为折减修正系数; z 为土体深度; H 为溜桩停止时的深度; H_c 为溜桩停止时持力层所在的深度。

对于桩端阻力, 若 $q_{c,avg}$ 仍采用桩尖 $\pm 1.5D$ 范围内 q_c 的平均值, 计算的范围过大, 不能准确表示桩尖的平均锥尖阻力。因此, 考虑用一种基于 CPT 的新型统一打入桩承载力设计方法中提到的等效直径^[6] D_{eq} 来替代原设计方法中计算平均锥尖阻力的 D 。

$$D_{eq} = D A_{re}^{0.5} \quad (11)$$

同时考虑减小其在承载力计算中的贡献, 以满足实际沉桩记录中并不会出现二次溜桩的情况。即

$$q = n q_b \quad (12)$$

式中: q 为修正后的单位桩端阻力, n 为折减修正系数。根据东海某海上风电工程的沉桩报告中记录的 6 套溜桩的实测数据, 并对李飒提出的影响区折减系数, 不断调整折减系数的取值, 使计算的到的承载力 Q 与桩净重的比值的均值接近于 1, 并且使其变异系数 COV 最小, 同时检查各项系数使其满足实际的物理意义, 最终分析得到

$$\beta = 1.9 \left(\frac{z}{H} \right)^4 \left(\frac{H}{H_c} \right)^3 \quad (13)$$

$$q = 0.1 q_b \quad (14)$$

3 工程案例验证

3.1 案例情况

本研究主要搜集了 9 组桩的溜桩信息进行验证, 包括大连市庄河海域某海上风电项目中的 3 根桩、南海某导管架平台的一根钢管桩^[7-8]发生的 3 次溜桩现象, 以及海阳市南侧海域海上风电项目中的 3 根桩。

3.2 承载力计算结果与分析

结合实际工程选取的土体参数以及实测的 CPT 数据, 考虑 $q_{c,avg}$ 计算的修正, 用 ICP-05 和 UWA-05 设计方法计算出各根桩在自由入泥深度和溜桩深时的总承载力, 将计算得到的承载力 Q 与桩净重 G 相比较。以上各计算方法在不同计算深度的 Q/G 值的均值 μ 及其变异系数 COV (S/μ) 整理如下表 1。

表 1 Q/G 值的均值 μ 及变异系数 COV

计算深度	计算方法	μ	COV
自由入泥深度	ICP-05	1.12	0.26
	UWA-05	2.01	0.27
溜桩深度	ICP-05	3.15	0.47
	UWA-05	3.68	0.35

从表 1 中可以看出, 用 ICP-05 方法计算自由入泥深度时的承载力与桩净重是相近的, 并且变异系数很小, 说明用 ICP-05 方法来计算大直径桩的承载力是合理可靠的。而对于 UWA-05 方法, 其在自由入泥深度的承载力计算结果是偏大的, 偏大的部分主要来自于桩端阻力, 这可能与设计方法中计算 $q_{c,avg}$ 所用的 Dutch 方法对大直径桩的适用性有关。而对于溜桩深度的计算结果, 由于这些设计方法都是考虑的静承载力, 没有考虑打桩过程、溜桩过程中土受到扰动而承载力降低的情况, 因此在溜桩深度的计算结果都是比桩净重大得多的, 需要对其进行合理的折减修正, 使其更好地符合实际的溜桩情况。

采用之前定义的修正公式, 再次计算各桩在溜桩深度的承载力, 其所得结果如表 2。

表 2 修正公式计算 Q/G 值的均值 μ 及变异系数 COV

设计方法	μ	COV
ICP-05	0.84	0.20
UWA-05	0.78	0.15

可以发现, 采用修正方法计算后其整体精度都得到了改善。用修正的 ICP-05 设计方法在溜桩深度计算得到的承载力与桩净重是相近的, 满足溜桩的判断条件, 变异系数也不大。但是修正后的 UWA 方法的总承载力的计算结果是偏小的, 并且其在自由入泥深度的计算结果也不尽理想, 说明用 UWA-05 设计方法来计算海上风电大直径桩的溜桩问题可能是不太合适的, 而 ICP-05 方法的计算结果是比较令人满意的, 用该设计方法及其修正公式来分析海上风电大直径桩的溜桩问题是较为合理的。

4 结 论

(1) 用基于 CPT 的 ICP-05 和 UWA-05 设计方法对海上风电大直径钢管桩在自由入泥深度和溜桩深度的土的承载力进行分析计算, 发现 ICP-05 方法在计算自由入泥深度的承载力时的结果比较理想。

(2) 针对溜桩现象, 提出了一种基于影响区概念的动态折减公式, 通过计算分析验证了该优化设计方法的合理性。

本文的研究结论文溜桩承载力计算方法提供了新的思路, 但由于验证优化设计方法所用的海上风电大直径钢管桩的溜桩案例数较少 (9 组), 若有更多实际工程案例来进行验证可以增加优化设计方法的合理性和可靠度。

参考文献:

- [1] 董 伟. 海洋采油平台大直径超长桩动力沉桩分析方法研究[D]. 天津: 天津大学, . (DONG Wei. Study on Dynamic Pile Sinking Analysis Method of Large Diameter and Ultra-Long Pile on Offshore Oil Production Platform[D]. Tianjin: Tianjin University, . (in Chinese))
- [2] JARDINE R. ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays[M]. London: Thomas Telford, 2005.
- [3] LEHANE B M, SCHNEIDER J A, XU X. The UWA-05 methods for prediction of axial capacity of piles in sand[C]// Proc 1st Int Symp on Frontiers in Offshore Geotechnics, University of Western Australia, Perth, 2005: 683-689.
- [4] LEHANE B M, SCHNEIDER J A, XU X. A Review of Design Methods for Offshore Driven Piles in Siliceous Sand[R]. Perth: The University of Western Australia, 2005.
- [5] 李 飒, 吴兴州, 王耀存, 等. 打桩过程中考虑溜桩影响的土阻力研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1150-1157. (LI Sa, WU Xingzhou, WANG Yaocun, et al. Soil resistance to driving considering effect of pile running on pile installation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1150-1157. (in Chinese))
- [6] LEHANE B, LIU Z, et al. A new CPT-based axial pile capacity design method for driven piles in sand[C]// Proc 4th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Austin, Texas, USA, 2020: 462-477
- [7] 贾沼霖, 闫澍旺, 杨爱武, 等. 静力触探在大直径超长桩溜桩分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊 1): 3274-3282. (JIA Zhaolin, YAN Shuwang, YANG Aiwu, et al. Application of cone penetration test for the analysis of pile-Run of long and large diameter piles in offshore geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 3274-3282. (in Chinese))
- [8] 闫澍旺, 贺小青, 贾沼霖, 等. 海洋工程中大直径超长桩极端贯入特性研究[J]. 工程勘察, 2017, **45**(2): 1-9. (YAN Shuwang, HE Xiaoqing, JIA Zhaolin, et al. Study on extreme penetration characteristics of large-diameter and super-long piles in ocean engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, **45**(2): 1-9. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)