

文章编号:1673-9469(2025)04-0016-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.003

软黏土中海上风电大直径单桩累积变形研究

高畅¹,郭炳川¹,唐广银¹,梁超²,闫航航²,刘润^{2*}

(1. 中国船级社海洋工程技术中心,天津 300457;

2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室,天津 300072)

摘要: 海上风电单桩的长期累积变形特性是设计中需重点考虑的关键问题,而现有规范未能考虑循环次数与循环幅值对单桩累积变形的影响。针对这一问题,通过数值分析,并结合自定义场变量子程序,研究了不同循环幅值作用下不同单桩尺寸的累积变形情况。具体结论如下:在软土中存在循环荷载阈值,当循环幅值 $\xi \leq 0.2$ 时,单桩在循环荷载作用下的长期累积变形问题可忽略;而当循环幅值为0.4和0.6时,单桩会产生明显的累积变形,且变形呈幂函数规律逐渐增大,增速随循环次数的增加而减缓;当桩长一定时,累积变形随桩径增加而增加;当桩径一定时,增加桩长能有效减少累积变形的产生。然而,当循环幅值为0.4时存在桩长阈值,即当长径比 $L/D \geq 15$ 后再增加桩长将无法进一步减少累积变形;同一桩径在200次循环荷载作用下,循环幅值为0.6时产生的累积变形是循环幅值为0.4时的6倍。

关键词: 海上风电;单桩基础;累积变形;子程序;循环阈值

中图分类号: TU471.8

文献标识码: A

Study on Cumulative Deformation of Offshore Wind Power Large Diameter Monopile in Soft Clay Soil

GAO Chang¹, GUO Bingchuan¹, TANG Guangyin¹, LIANG Chao², YAN Hanghang², LIU Run^{2*}

(1. Offshore Engineering Technology Center of China Classification Society, Tianjin 300457, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation,

Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The long-term cumulative deformation characteristics of offshore wind turbine monopile foundations are key issues that need to be considered in design. However, existing standards do not take into account the impact of the number of cycles and the amplitude of cycles on the cumulative deformation of monopiles. To address this issue, this study conducts numerical analysis and uses a custom field variable subroutine to investigate the cumulative deformation of monopiles with different sizes under different cyclic amplitudes. The specific conclusions are as follows: A threshold for cyclic loading exists in soft soil. When the cyclic amplitude $\xi \leq 0.2$, the long-term cumulative deformation of monopiles under cyclic loading can be neglected. However, when the cyclic amplitudes are 0.4 and 0.6, the monopile undergoes significant cumulative deformation, and the deformation increases according to a power function, with the rate of increase slowing down as the number of cycles increases. When the pile length is fixed, the cumulative deformation increases as the pile diameter increases. When the pile diameter is fixed, increasing the pile length effectively reduces the occurrence of cumulative deformation. However, when the cyclic amplitude is 0.4, a pile length threshold exists. Specifically, when $L/D \geq 15$, further increasing the pile length will not reduce the cumulative deformation. Under 200 cycles of loading, the

收稿日期:2024-05-20

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51825904)

第一作者:高畅(1981—),女,天津人,硕士,高级工程师,主要从事海上新能源方向研究。

* 通信作者:刘润(1974—),女,天津人,博士,教授,主要从事海洋土力学与海洋新能源方向的研究。

cumulative deformation generated by a cyclic amplitude of 0.6 is six times that generated by a cyclic amplitude of 0.4 for the same pile diameter.

Key words: offshore wind power; monopile foundation; cumulative deformation; subroutine; cyclic threshold

海上风能在低碳能源转型中发挥着重要作用,近年来在我国迅速发展^[1]。单桩基础因其经济性和施工便利性被广泛应用,尤其在欧洲,超过80%的海上风机采用单桩基础。然而,单桩基础在风、浪等循环荷载作用下会发生长期变形,影响其承载力和稳定性。根据 DNV 规范^[2],风机在服役期间,单桩基础的累积转角不得超过 0.25°,否则可能导致风力转子无法正常运行。目前常用的 API 循环 p - y 曲线法^[3]未考虑循环荷载次数和幅值对单桩的影响。随着桩径增大,桩的刚性增加,破坏模式发生变化,因此该方法存在局限性,尚缺乏有效的评估手段。

针对上述问题,国内外学者通过现场试验、离心机试验和小比尺模型试验研究风电单桩基础的长期累积变形。Poulos^[4]研究表明,桩周土体刚度和强度会随循环次数增加而衰减,并给出土体弱化因子的计算曲线,还基于 p - y 曲线法提出了桩基水平循环累积变形的预测方法。Dunnivant 等^[5]通过现场试验提出了土抗力随循环次数减少的循环 p - y 模型。朱斌等^[6-7]通过现场试验,提出了与循环应力有关的弱化因子,来考虑循环 p - y 曲线,从而可计算单桩在长期循环荷载作用下的横向响应。总的来说,现场试验循环次数较少,可重复性较差。曹光伟等^[8]通过离心机循环试验给出了桩顶循环累积变形的计算公式。Khemakhem 等^[9]基于超固结黏土中桩循环受荷离心机试验结果,提出用幂函数形式来预测黏土中桩头累积变形发展趋势。He 等^[10]基于离心机试验,验证了 Khemakhem 推荐的幂函数形式在循环荷载幅值较小的情况下比较合理,但是当循环幅值增加到 0.6 倍极限承载力时,桩头位移随循环次数的增加更符合线性变化。Zhang 等^[11-12]通过开展饱和黏土的离心机试验,分别得出了刚性桩和半刚性桩侧土体刚度循环弱化与土体累积塑性应变的关系。此外,Liang 等^[13-17]通过小比尺模型试验对砂土地基中桩基础的长期累积变形进行了研究,并提出了有价值的预测方法。但小比尺模型试验仍存在一定的局限性,即由于试验尺度的限制,模型中无法完全模拟实际桩基的复杂地质条件及其与周围土体的相互作用

,可能导致试验结果与真实工程情况存在一定偏差。

由于现场和离心机试验的循环次数受到限制,且小比尺模型试验无法准确反映土体的真实应力状态。因此,本文将采用 ABAQUS 有限元软件和随动硬化模型模拟软黏土在循环加载中的承载特性,研究不同循环荷载幅值、桩径和桩长下单桩的循环承载特性,揭示循环幅值对单桩累积变形的影响,为海上风电单桩在循环荷载作用下的累积变形预测提供新思路。

1 单桩极限承载力确定

1.1 有限元模型的建立

在采用有限元软件 ABAQUS 进行数值计算的过程中,桩基础采用线弹性模型来模拟,土体采用基于 Mises 屈服准则的随动硬化模型^[18]进行模拟。随动硬化模型能够合理模拟海洋软黏土不排水行为。为了实现软黏土在循环过程中的弱化,在自定义场变量子程序中采用如下土体循环弱化模型:

$$S_u = (\delta_{rem} + (1 - \delta_{rem})e^{-3\xi/\xi_{95}})S_{u0} \quad (1)$$

$$E_s = (\delta_{rem} + (1 - \delta_{rem})e^{-3\xi/\xi_{95}})E_{s0} \quad (2)$$

式中: S_{u0} 为土体初始不排水抗剪强度, kPa; S_u 为弱化后的土体不排水抗剪强度, kPa; δ_{rem} 为完全重塑土的抗剪强度与初始土体的抗剪强度比值,即土体灵敏度的倒数; ξ 为循环加载时土体中累积的塑性应变; ξ_{95} 为土体发生 95% 重塑时所对应的累积塑性应变; E_{s0} 为土体初始弹性模量, kPa; E_s 为弱化后的土体弹性模量, kPa。

在模拟过程中,选用目前常见的海洋土作为土体,其不排水抗剪强度 S_u 随泥面以下深度 z 线性增长。为了模拟软黏土的不排水行为,泊松比取 0.49。单桩基础采用开口钢管桩,土体和钢管桩详细的物理力学参数如表 1 所示。

为研究不同桩径 D 、不同桩长 L 在循环荷载作用下的累积变形行为,选取了不同的钢管桩尺寸进行数值模拟,钢管桩的壁厚 t 均取 $0.015D$,有限元模型所需钢管桩的详细尺寸参数如表 2 所示。

表 1 土体和桩物理力学参数表

Tab. 1 Table of physical and mechanical parameters of soil and pile

| 名称 | 有效容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量 /kPa | 泊松比 | 黏聚力 /kPa | 内摩擦角 /($^\circ$) |
|-----|---|-------------------|------|-------------|-----------------------|
| 黏土 | 6.0 | $400s_u$ | 0.49 | $0.1+1.1z$ | 0 |
| 钢管桩 | 68.5 | 2.1×10^8 | 0.30 | — | — |

表 2 钢管桩模型参数表

Tab. 2 Table of steel pipe pile model parameters

| 桩径/m | 桩长/m | 壁厚/mm |
|------|----------------|-------|
| 4 | 24, 40, 60, 90 | 60 |
| 6 | 24, 40, 60, 90 | 90 |
| 8 | 24, 40, 60, 90 | 120 |
| 10 | 24, 40, 60, 90 | 150 |

鉴于荷载和模型的对称性,为了节约计算时间,采用半对称模型模拟桩-土相互作用,如图 1 所示。钢管桩和土体均采用 8 节点实体单元(C3D8R)。为了消除边界效应的影响,模型径向边界范围取 $20D$ 、竖向边界范围取 $L+5D$ 。土体采用单精度的网格划分方式对尺寸进行控制,即在桩土接触较近的区域采取加密网格处理。土体底部采用固定边界条件,即 $u_x = u_y = u_z = 0$;土体侧面采用横向约束条件,即 $u_x = u_y = 0$;此外,将土体在 $y=0$ 处的桩土对称面位移设为 0,即 $u_y = 0$ 。

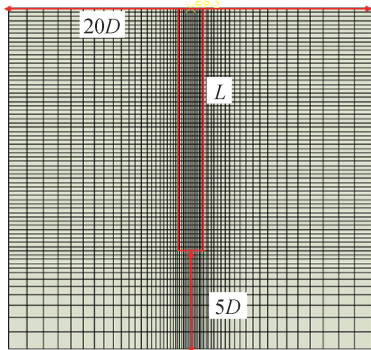


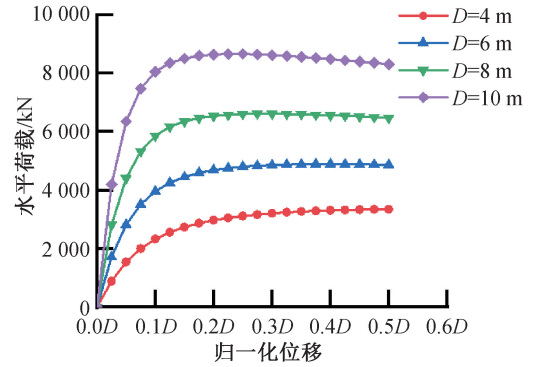
图 1 桩土半对称有限元模型图示

Fig. 1 The diagram of pile-soil semi-symmetric finite element model

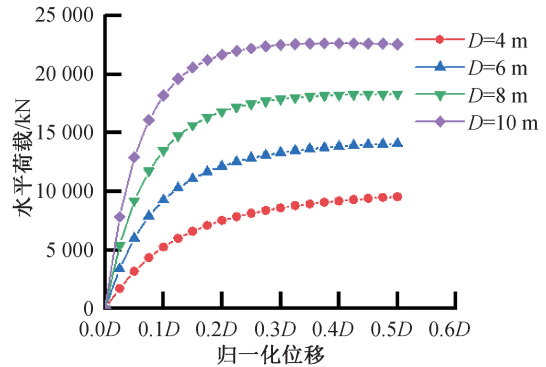
钢管桩与土体界面之间建立面-面接触关系(允许分离),其中,钢管桩表面较硬设为主面,土体表面较软设为从面,法向接触采用硬接触方式,切向接触采用罚函数法,桩土接触摩擦系数取 0.3。桩顶位于泥面处,钢管桩在泥面处建立加载面,并建立特征点,然后将特征点与加载截面进行耦合,采用位移加载方式,对特征点施加 $0.5D$ 的水平位移。

1.2 不同工况的模型计算结果

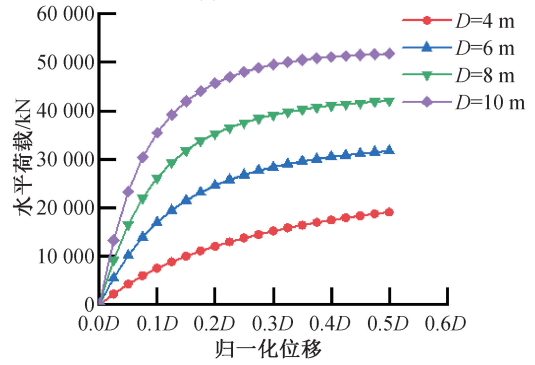
通过对表 2 中不同工况的三维桩土相互作用数值模型进行计算求解,并绘制不同工况的荷载位移曲线进行汇总,如图 2 所示。



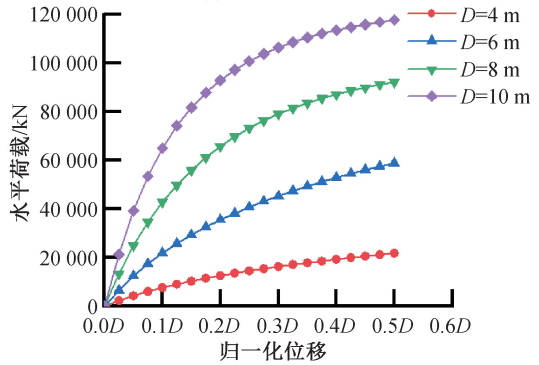
(a) 桩长 $L=24$ m



(b) 桩长 $L=40$ m



(c) 桩长 $L=60$ m



(d) 桩长 $L=90$ m

图 2 不同桩长、不同桩径时的荷载位移曲线

Fig. 2 Load displacement curve with different pile length and diameters

由图 2 可知,不同工况时桩的荷载位移曲线没有明显的拐点,呈现出渐进破坏的特征,将桩顶水平加载位移为 $0.1D$ 时的水平承载力视为单桩水平极限承载力 F_{ult} [19]。基于此方法,可以确定不同工况时的单桩水平极限承载力,如表 3 所示。

表 3 不同工况时单桩水平极限承载力

Tab. 3 Table of steel pipe pile model parameters

| 桩长/m | 单桩水平极限承载力/kN | | | |
|------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | $D=4\text{ m}$ | $D=6\text{ m}$ | $D=8\text{ m}$ | $D=10\text{ m}$ |
| 24 | 2 325.9 | 3 959.2 | 5 867.1 | 8 063.9 |
| 40 | 5 253.6 | 9 263.9 | 13 510.1 | 18 203.4 |
| 60 | 7 494.8 | 16 954.6 | 26 162.8 | 35 432.4 |
| 90 | 7 717.2 | 21 916.8 | 42 828.6 | 64 889.8 |

2 循环幅值对桩基累积变形的影响

为研究不同循环幅值 ξ 对桩基础累积变形的影响,定义 $\xi = F/F_{ult}$, 其中 F 为作用在单桩上的水平循环荷载, F_{ult} 为单桩的极限水平荷载。选择 ξ 值分别为 0.2、0.4、0.6, 并对单桩施加双向循环荷载, 选取海上常见的循环荷载频率为 0.1 Hz。由于在 ξ 为 0.2 作用下单桩对桩周围土体扰动较小, 为了更好地反映桩顶累积变形规律, 提取了循环 1、10、20、30、40、80、120、160、200 次时的桩顶位移。在 ξ 为 0.4 和 0.6 作用下, 单桩对桩周围土体扰动较大, 桩顶累积变形也更加明显。因此, 在这两种情况下, 仅提取了循环 40、80、120、160、200 次时的桩顶位移, 用以分析 ξ 对累积变形的影响。

2.1 循环幅值为 0.2 时对桩基累积变形的影响

由图 3 可知, 在前 40 次的循环中, 随着循环次数的增加, 累积变形逐渐增大。对不同工况下的离散累积变形数据进行拟合, 结果符合双曲线函数。这表明, 随着循环次数的增加, 累积变形的增长速率逐渐减小。在 ξ 为 0.2 的情况下, 所有工况的模型在前 40 次循环中都达到了累积变形的峰值, 而在随后的循环加载中, 累积变形则保持不变。此外, 与桩基尺寸相比, 前 40 次循环中产生的累积变形几乎可以忽略不计。因此, 可以得出结论: 对于海上风电单桩基础, 存在一个阈值, 即当 ξ 不大于 0.2 时, 单桩基础在循环载荷作用下的长期累积变形问题可忽略。

2.2 循环幅值为 0.4 时对桩基累积变形的影响

由图 4 可知, 在 ξ 为 0.4 的作用下, 桩顶产生

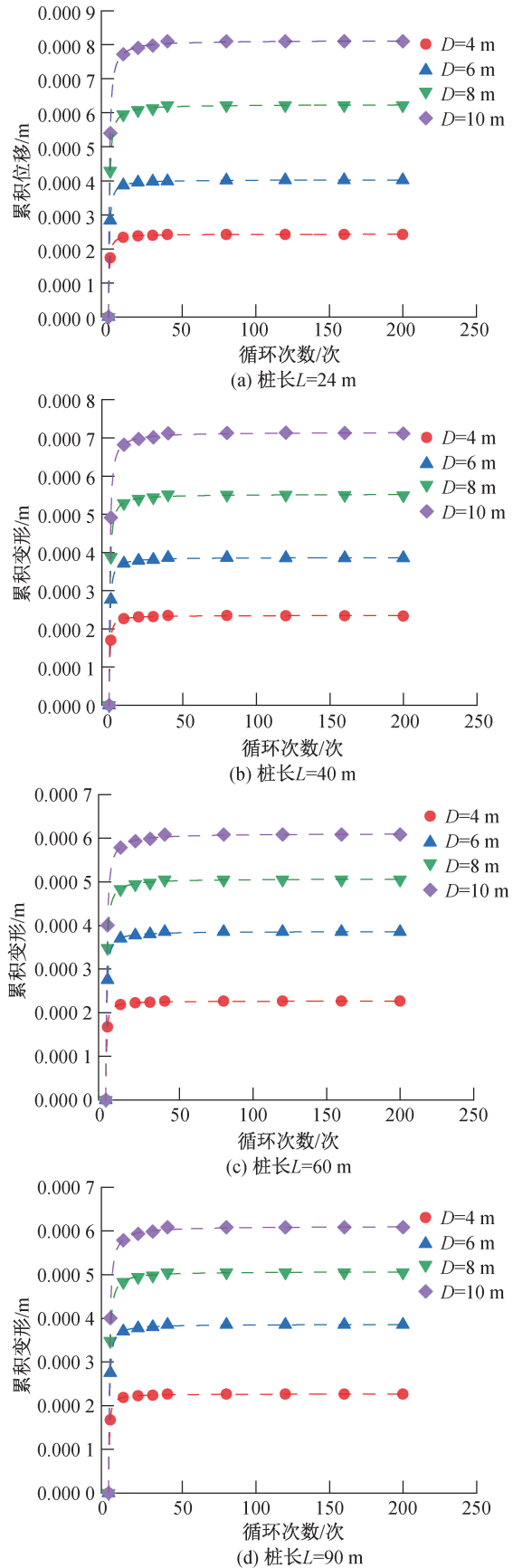


图 3 不同桩长、不同直径时累积变形随循环次数的变化
Fig. 3 The changes of cumulative deformation with the number of cycles under different pile length and diameters

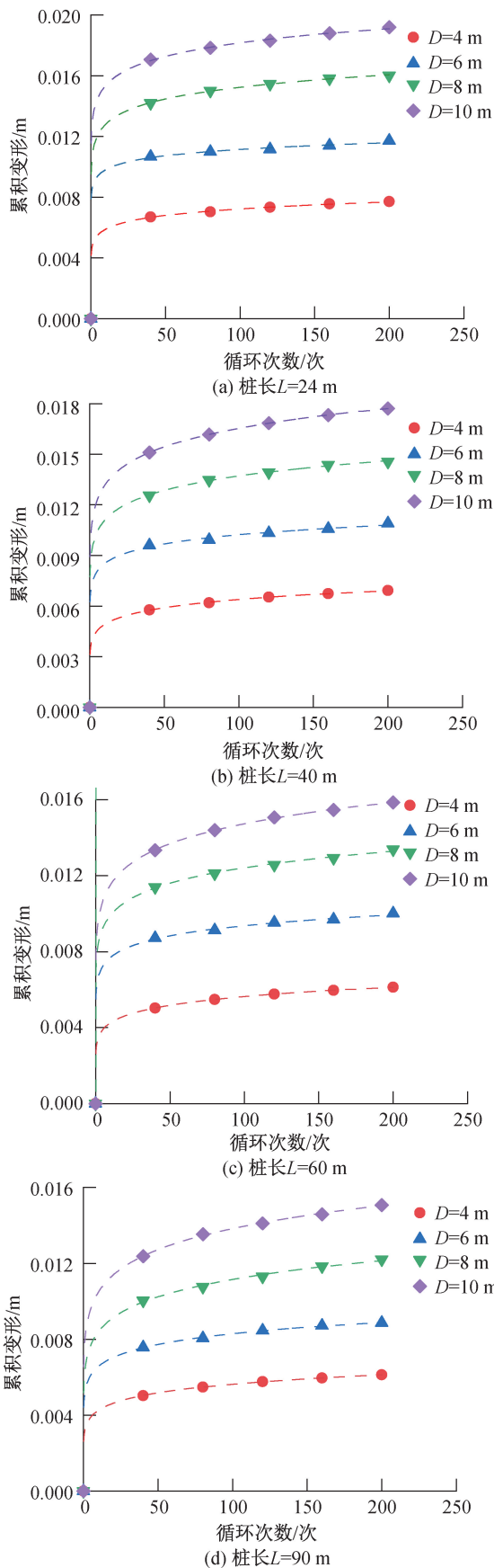


图4 不同桩长、不同桩径时累积变形随循环次数的变化
Fig. 4 The changes of cumulative deformation with the number of cycles under different pile lengths and pile diameters

了明显的累积变形,且随着循环次数的增加,累积变形呈幂函数关系逐渐增大。图中的虚线是对离散数据进行幂函数拟合($y = aN^b$)得到的。在前40次循环中,桩顶的累积变形增加速率显著,之后随着循环次数的增加,桩顶累积变形以平稳的速率增加。当桩长一定时,随着桩径的增大,桩顶的累积变形逐渐增大。这是因为在循环荷载的作用下,桩径的增大会使单桩对桩周围土体的扰动更大,导致土体的塑性应变累积更加明显。与此同时,当桩径一定时,随着桩长的增加,桩顶累积变形逐渐减少。图5显示了在相同桩径(4 m和6 m)下,不同桩长时桩顶循环累积变形随循环次数 N 变化的影响。由图可知,当桩径不变时,增加桩长可以有效减少桩顶的累积变形。然而,当桩长增加到一定程度,即 $L/D \geq 15$ 时,进一步增加桩长将无法显著减少桩顶的循环累积变形。这是因为随着桩长的增加,单桩的 L/D 比增大,单桩逐渐从刚性桩或半刚性桩转变为柔性桩。由于桩身下部的嵌固作用,土体的扰动范围减少,从而导致桩顶的累积变形减少。一旦桩体变为柔性桩,继续增加桩长不会再显著改变桩土相互作用的范围,因此桩顶的累积变形也不会再减少。

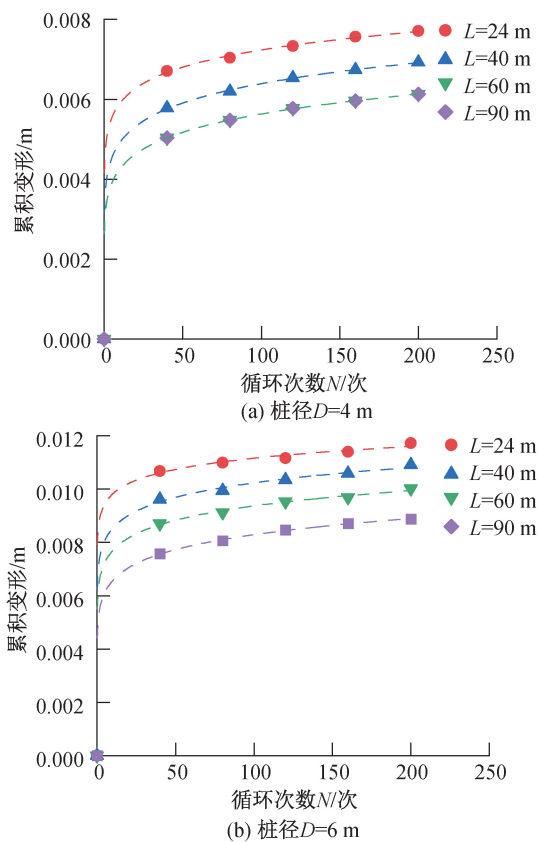


图5 不同桩径、不同桩长时累积变形随循环次数的变化
Fig. 5 The changes of cumulative deformation with the number of cycles under different pile diameters and pile lengths

2.3 循环幅值为 0.6 时对桩基累积变形的影响

当 $\xi=0.6$ 时,将不同工况时桩顶不同循环次数后的累积变形进行整理汇总,如图 6 所示。

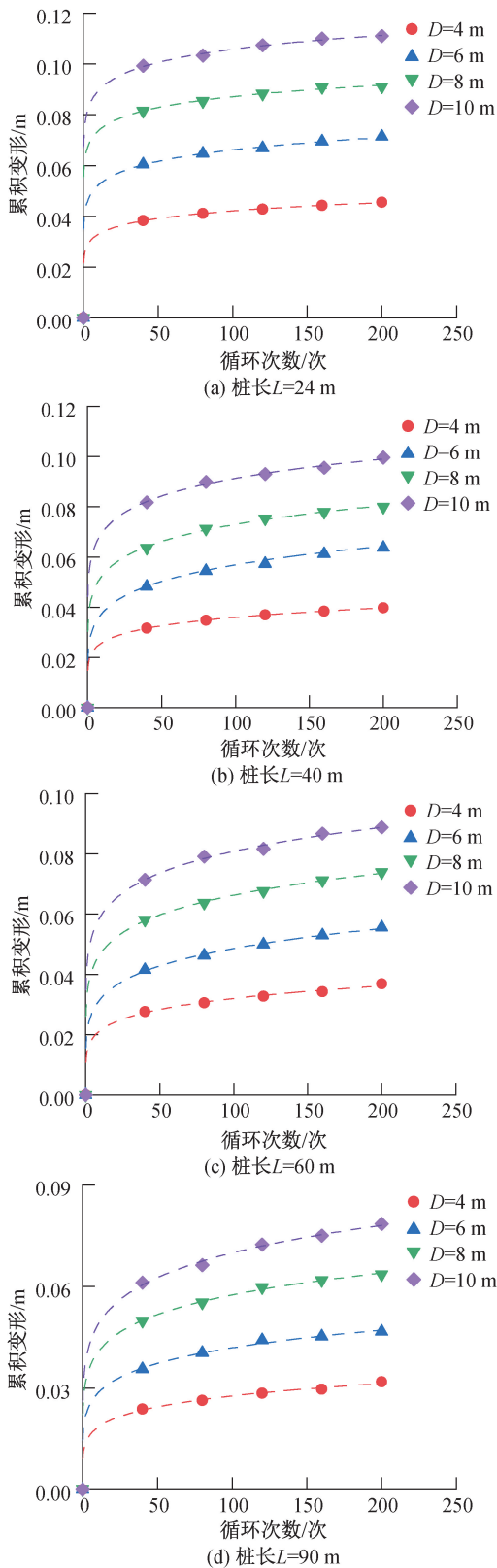


图 6 不同桩长、不同桩径时累积变形随循环次数的变化
Fig. 6 The changes of cumulative deformation with the number of cycles under different pile lengths and pile diameters

由图 6 可知,与 ξ 为 0.4 时不同尺寸桩顶的累积变形相比, ξ 为 0.6 时桩顶的累积变形更加明显,并且随着循环次数的增加,循环累积变形呈幂函数逐渐增大。其增长速率随着循环次数的增加而逐渐减小。当桩长一定时,随着桩径的增加,桩顶的循环累积变形逐渐增加,但增幅逐渐减小;当桩径一定时,随着桩长的增加,桩顶的循环累积变形逐渐减少。图 7 为提取同一桩径 4 m、不同桩长时桩顶的累积变形随循环次数 N 的变化情况。由图可知,当桩径一定时,增加桩长可以有效减少桩顶的循环累积变形。然而,与 ξ 为 0.4 时的桩顶累积变形相比,未出现桩长阈值的现象,即使继续增加桩长,桩顶的循环累积变形仍然能有效减少。其原因可能在于循环荷载幅值较大,荷载的传递深度更大,导致土体的扰动范围更广,桩顶累积变形更难稳定。因此,单桩基础需要更大的埋深才能实现稳定的累积变形。

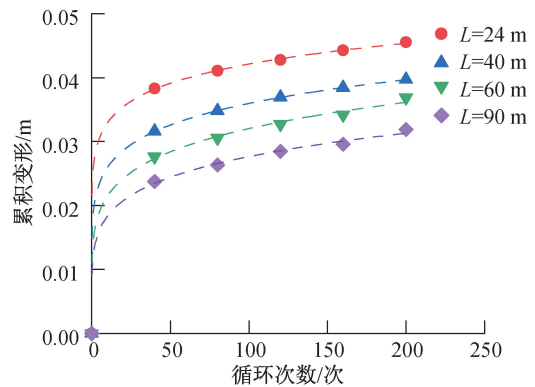


图 7 不同桩长下,桩径 $D=4\text{ m}$ 时累积变形随循环次数的变化
Fig. 7 The changes of cumulative deformation with the number of cycles for different pile lengths when the pile diameter $D=4\text{ m}$

为了对比不同 ξ 对桩顶循环累积变形的影响,以桩长 $L=24\text{ m}$ 为例,比较了 $\xi=0.4$ 和 $\xi=0.6$ 情况下,不同桩径时在 200 次循环内累积变化的情况,如图 8 所示。通过对图中数据的对比分析可以看出,在 200 次循环荷载作用下,对于相同桩径,当 ξ 为 0.6 时,桩顶的循环累积变形是 ξ 为 0.4 的 6 倍。

3 累积变形预测方法

为预测在 ξ 为 0.4 和 0.6 作用下,不同桩基尺寸的桩顶累积变形情况。首先对同一桩长不同桩径时的累积变形用桩径进行归一化处理。为了节

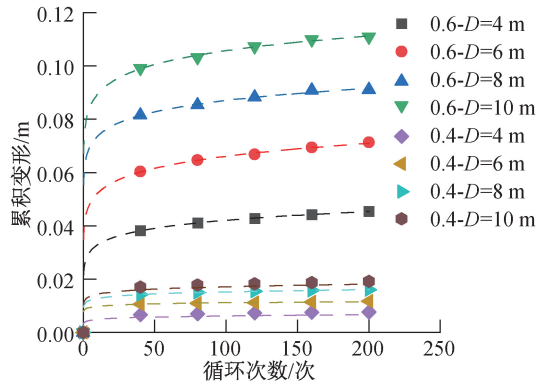


图8 不同桩径、不同幅值下,桩长 $L=4\text{ m}$ 时
累计位移对比

Fig. 8 Cumulative deformation comparison with different pile diameters and amplitudes for $L=24\text{ m}$

约篇幅,此处仅展示了 ξ 为 0.4 时,桩长为 24 m 和 40 m 的归一化结果。图中的曲线为对离散归一化数据进行的幂函数拟合,如图 9 所示,其他归一化情况也类似。

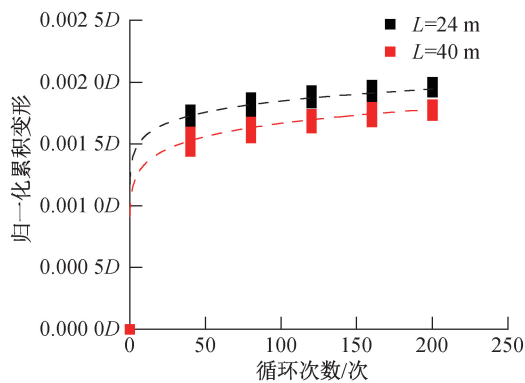


图9 桩长 $L=24\text{ m}$ 和 40 m 时不同桩径的
累积变形归一化处理

Fig. 9 Cumulative deformation normalization treatment of different pile diameters when pile length $L=24\text{ m}$ and 40 m

通过对不同的归一化幂函数曲线的系数 a 和 b 随桩长的变化进行拟合,如图 10 和图 11 所示,可以得到在 ξ 为 0.4 和 0.6 作用下,不同桩基尺寸的桩顶累积变形的计算公式。

$$y = a \times D \times N^b \quad (3)$$

$$a = 0.004L^{-0.378}, b = 0.027L^{0.327}, \xi = 0.4 \quad (4)$$

$$a = 0.053L^{-0.636}, b = 0.044L^{0.318}, \xi = 0.6 \quad (5)$$

4 结论

本文通过数值软件 ABAQUS,采用随动硬化模型模拟饱和黏土体的不排水行为。同时结合自定义场变量子程序实现土体的循环弱化,研究了海

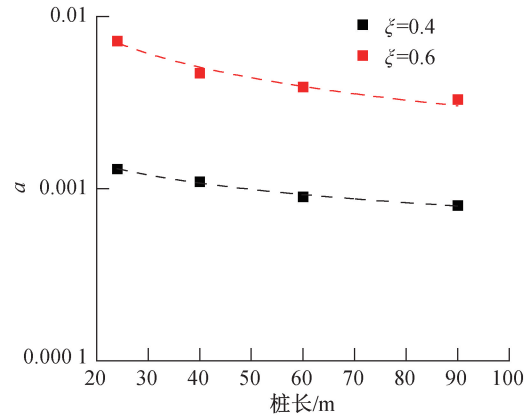


图 10 参数 a 随桩长的变化

Fig. 10 Variation of parameter a with pile length

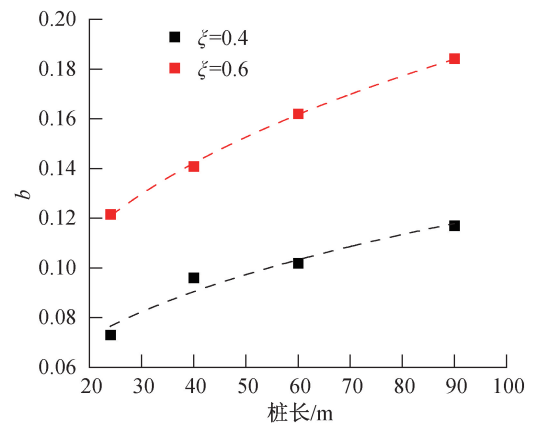


图 11 参数 b 随桩长的变化

Fig. 11 Variation of parameter b with pile length

上风电不同尺寸桩基在不同循环幅值作用下的桩顶累积变形行为。主要结论如下:

1) 对于软黏土中的单桩基础,存在一个循环荷载阈值。当 $\xi \leq 0.2$ 时,可忽略单桩基础在循环荷载作用下的长期累积变形问题。

2) 在循环荷载作用下,随着循环次数的增加,桩顶累积变形呈幂函数逐渐增大,且增速随循环次数增加逐渐降低。同时,给出了 ξ 为 0.4 和 0.6 时的累积变形预测幂函数公式。

3) 当桩长 L 一定时,随着桩径的增加,桩顶的累积变形逐渐增大;而当桩径一定时,增加 L 能够有效减少桩顶的累积变形。然而,对于 ξ 为 0.4,当桩长增加到 $L/D \geq 15$ 时,桩顶的累积变形不再显著减少。

4) 在 200 次循环荷载作用下,对于相同桩径,循环幅值为 0.6 时桩顶的循环累积变形是循环幅值为 0.4 的 6 倍。

参考文献:

- [1] 刘润, 宋毅然, 练继建, 等. 成层土中海上风电筒型基础竖向承载影响深度研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 1-8.
LIU R, SONG Y R, LIAN J J, et al. Research on vertical bearing depth of bucket foundation for offshore wind turbines in laminated soil[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(4): 1-8.
- [2] DNV. Design of Offshore Wind Turbine Structures Offshore Standard; DNV-OS-J101 [S]. Norway: Høvik, 2014.
- [3] American Petroleum Institute. Recommended practice planning, designing, and constructing fixed offshore platforms-working stress design; API 2A-WSD [S]. Washington D. C.: American Petroleum Institute, 2011.
- [4] POULOS H G. Single pile response to cyclic lateral load [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108(3): 355-375.
- [5] 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.
- [6] 朱斌, 杨永垚, 于振刚, 等. 海洋高桩基础水平单调及循环加载现场试验[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1028-1037.
ZHU B, YANG Y Y, YU Z G, et al. Field tests on lateral monotonic and cyclic loadings of offshore elevated piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1028-1037.
- [7] ZHU B, ZHU Z J, LI T, et al. Field tests of offshore driven piles subjected to lateral monotonic and cyclic loads in soft clay[J]. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng, 2017, 143(5): 05017003.
- [8] 曹光伟, 丁选明, 张鼎新, 等. 水平循环荷载下软黏土大直径单桩承载性状离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(8): 1574-1585.
CAO G W, DING X M, ZHANG D X, et al. Bearing behaviors of large-diameter monopiles in soft clay under horizontal cyclic loading based on centrifugal model tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1574-1585.
- [9] KHEMAKHEM M, CHENAF N, GARNIER J, et al. Development of degradation laws for describing the cyclic lateral response of piles in clay[C]. Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies-Present and Future. Society of Underwater Technology, 2012.
- [10] HE B, WANG L Z, HONG Y. Field testing of one-way and two-way cyclic lateral responses of single and jet-grouting reinforced piles in soft clay[J]. Acta Geotechnique, 2017, 12(5): 1021-1034.
- [11] ZHANG C, WHITE D, RANDOLPH M. Centrifuge modeling of the cyclic lateral response of a rigid pile in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 131(7): 717-729.
- [12] HONG Y, HE B, WANG L, et al. Cyclic lateral response and failure mechanisms of a semi-rigid pile in soft clay: centrifuge tests and numerical modelling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(6): 806-824.
- [13] LIANG R, YUAN Y, FU D F, et al. Cyclic response of monopile-supported offshore wind turbines under wind and wave loading in sand[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, 39(10): 1230-1243.
- [14] ABADIE C N, BYRNE B W, HOULSBY G T. Rigid pile response to cyclic lateral loading: laboratory tests [J]. Geotechnique, 2019, 69(10): 863-876.
- [15] LEBLANC C, HOULSBY G T, BYRNE B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading [J]. Geotechnique, 2010, 60(2): 79-90.
- [16] ACHMUS M, KUO Y S, ABDEL-RAHMAN K. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 725-735.
- [17] CUÉLLAR P. Pile foundations for offshore wind turbines: numerical and experimental investigations on the behaviour under short-term and long-term cyclic loading [D]. Berlin: Technische Universität Berlin, 2011.
- [18] YUAN Y. Research on marine soil and its influences on bearing capacity of the bucket foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [19] YANG Q J, GAO Y F, KONG D Q, et al. Centrifuge modelling of lateral loading behavior of a "semi-rigid" monopile in soft clay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(10): 1205-1216.

(责任编辑 周雪梅)