

何沛丰, 宿文姬, 牛富俊. 水平循环荷载作用下海上风电桩累积变形研究综述[J]. 华南地震, 2019, 39 (3): 127-132. [HE Peifeng, SU Wenji, NIU Fujun. Review of the Research on the Cumulative Deformation of the Offshore Wind Power Piles under Lateral Cyclic Loading[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3): 127-132]

水平循环荷载作用下海上风电桩累积变形研究综述

何沛丰^{1,2}, 宿文姬^{1,2}, 牛富俊^{1,2}

(1. 华南理工大学, 广州 510641; 2. 华南理工大学 华南岩土工程研究院, 广州 510640)

摘要: 综述了水平循环荷载作用下海上风力发电桩基础累积变形的特征及现状, 总结了国内外针对海上桩基累积变形的三种常用试验方法: 基于 $p-y$ 曲线的修正法、基于试验的经验拟合法与数值分析方法, 并且分析了各类方法的优势与值得商榷的地方, 探索实际环境的众多因素对理论的影响, 指出该领域的发展趋势是模型统一化、不饱和状态、桩-土等多因素耦合作用下的风电桩累积变形研究, 进而利用风电桩的累积变形理论来完善海洋能源工程的设计施工。

关键词: 水平循环荷载; 风电桩; 累积变形

中图分类号: TU473.1+2 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2019)03-0127-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.019

Review of the Research on the Cumulative Deformation of the Offshore Wind Power Piles under Lateral Cyclic Loading

HE Peifeng^{1,2}, SU Wenji^{1,2}, NIU Fujun^{1,2}

(1. South China university of technology, Guangzhou 510640, China; 2. South China Institute of Geotechnical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper presents a review of the characteristics and status of cumulative deformation of offshore wind power pile foundation under lateral cyclic load, and summarizes three commonly used test methods for cumulative deformation of offshore pile foundation at home and abroad: a correction method based on $p-y$ Curves, based on the empirical fitting method and numerical analysis method. This paper also analyzes the advantages and problems of such methods, explores the influence of many factors of the actual environment on the theory and points out that the trend of development in this field is the unification of models, unsaturated state and pile-soil coupling. Then the cumulative deformation theory of wind power pile is used to perfect the design and construction of ocean energy engineering.

Keywords: Lateral cyclic load; Wind-electric pile; Cumulative deformation

收稿日期: 2019-03-19

作者简介: 何沛丰(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋岩土工程研究。

E-mail: he-peifeng@qq.com.

0 引言

根据世界气象组织理论上的初步估计, 仅用无污染的风能资源就可以满足世界的能源需求。然而在开采过程中, 海上风电桩需要承受来自强风、波浪等侧向循环荷载, 这可能会导致桩基的永久性侧向变形, 而桩基的转角不能超过 0.25° , 否则风电基础则无法如期服役。因此关于水平循环荷载作用下海上风电桩反应性状的研究进程与总结具有重要意义。

为了研究水平循环荷载作用下海上风电桩其反应性状及完善其设计方法, 近年来, 不同国家的海洋岩土学者基于模拟或现场试验及数值模拟等手段开展了一系列的工作。据不完全统计, 欧美国家目前进行的项目中, 和海上风电桩研究相关的就有 23 项, 例如劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 对纽约和马萨诸塞州沿海水域的海上桩基研究。而我国东部沿海城市在建以及拟建的海上风力发电项目共超过 24 个。当前水平循环荷载作用下海上桩基累计变形机理研究所采用的主要方法有 3 大类: $p-y$ 曲线参数修正法、经验拟合模型法和数值分析。本文将对上述 3 类方法进行综述。

1 试验方法现状

1.1 $p-y$ 曲线参数修正法研究现状

$p-y$ 曲线是目前海上桩基设计以及研究应用最多的水平受荷非线性方法, 于 1970 年 Matlock 等^[1]最早提出了在饱和粘性土中桩基水平循环受荷的 $p-y$

曲线的具体形式, 随后许多学者根据现场试验提出了各类土的 $p-y$ 曲线。但现有的 $p-y$ 曲线却是基于小直径桩现场实验推导出来的, 从而导致了学术界存在众多的争论, 其中主要有: 海上风电大直径桩是否能够基于 $p-y$ 曲线的优化形式进行计算和设计、 $p-y$ 曲线法缺少简便的方法来分析桩基础的累积变形发展规律。因此, 以下则针对此课题分别综述国内外的 $p-y$ 曲线的发展情况。

1.1.1 国外试验方法及 $p-y$ 曲线现状

从十九世纪 70 年代始, 海上大直径桩的研究逐渐成为国外研究人员的重要课题之一。Reese^[2]等在 Portland 进行了侧向循环荷载作用下小直径桩 ($d=610\text{ mm}$) 的 $p-y$ 曲线研究, 运用经验折减的方法修正了 $p-y$ 曲线, 进而提出水平循环荷载作用下桩基的累积变形理论。后来此理论方法被 API 规范 (2010) 所采纳, 并广泛应用于海洋平台的桩基础设计。但是该修正方法仅由小直径桩研究得出, 且未考虑循环次数的影响。

Long 等在 Florida 的桥墩实验中, 发现得到的实际数据与 Reese 等修正的 $p-y$ 曲线不相符合, 从而分别对 34 根桩基进行水平循环荷载试验进而引进了同时考虑循环次数、打桩方式、土体特性及荷载类型等因素的弱化因子对 $p-y$ 曲线进行了修正。但由于试验循环次数较少, 无法准确预示桩基寿命期内正常服役的情况。一直到二十世纪初, 得益于海上风电技术的蓬勃发展, $p-y$ 曲线法在国际上得到了极大的推广与应用, 从而推动研究人员对其研究不断深入, 并对已有的曲线做了一些改进。 $p-y$ 曲线改进形式的发展如表 1 所示。

表 1 水平循环荷载作用下桩基 $p-y$ 曲线的发展

Table 1 The development of pile foundation $p-y$ curve under laterally cyclic load

场地状况	模型类别	模型表达式	研究方法	参考文献
砂土	多段线与曲线组合模型	$P_a=k_h y_a \frac{z}{d}, P_b=P_u \frac{B}{A}$	现场试验	Reese 等 ^[2]
砂与粘土	曲线模型	$P_w=2.5k_p r x d_p, q_w=2.5k_p r x$	模型试验	Dawson 等 ^[4]
砂土	双折线模型	$P_k=\frac{nk_0 y z d}{\sqrt{1/\sin\varphi+1/(3-4\nu)}}$	模型试验	Scott ^[5]
砂土	抛物线模型	$P=Rd(\frac{z}{z_0})^n(\frac{y}{d})^m$	模型试验	Wesselin 等 ^[6]
粘土	双曲线模型	$P=\frac{y}{1/k_t+y/p_u}, p_w=(1-\lambda_n) p_u, \lambda_n=\frac{y_1}{0.2D} \log n$	模型试验	S.S.Rajashree 等 ^[7]

(转下表)

(接表 1)

场地状况	模型类别	模型表达式	研究方法	参考文献
砂土	双曲线模型	$P = \frac{y}{1/k_{im} + y/p_u}, p_u = k_p \gamma z^n d$	模型试验	Kim B.T. 等 ^[8]
砂土	正切曲线模型	$P = A \cdot \min(p_{us}(z), p_{ud}(z)) \cdot \tanh\left(\frac{kz}{A \cdot \min(p_{us}(z), p_{ud}(z))}\right)^y$	模型实验	Etienne A. Alderlieste ^[9]

S.S.Rajashree 等^[7]借鉴 Georgiadis 等^[10]提出的静力 $p-y$ 曲线, 通过引入衰减系数来考虑海上桩桩径、静载桩身位移以及循环次数的影响来修正了 $p-y$ 曲线。Rosquoet 等^[11]通过离心机试验考虑了土样密实度和荷载幅值变化的影响, 建立了循环荷载峰值和次数对海上桩基累积变形表达式, 并且提出了循环幅值 p 乘子对 $p-y$ 曲线的影响。D.M. Dewaikar 等^[12]也修正的 $p-y$ 曲线表达式且与 Matlock 等^[1]的现场试验数据进行比较, 结果内力图吻合较好。

1.1.2 国内试验方法及 $p-y$ 曲线现状

我国关于水平循环荷载作用下海上风电桩的研究起步相对较晚, 并且缺乏相关现场试验数据。目前《港口工程桩基规范》(JTS167-4-20102)附录 D 上建议的 $p-y$ 曲线分析法, 但其并未考虑水平循环荷载的作用。国内相对较早着手研究此课题的有南京水利科学研究院, 例如高明^[13]等通过在饱和砂土中模拟了管桩在侧向静载、单向循环、双向循环与简谐动载情况下的反应性状, 且与砂质软粘土中现场试验的比较, 从而得到海上桩基在软粘土与砂性土的 $p-y$ 曲线的通用无量纲表达式, 如下式:

$$p/p_u = \eta(y/y_0)(1+y/y_0)^{-1} \quad (1)$$

式中: η —修正系数, $\eta=1+x/d_p$

但是当时缺乏现场试验资料, 海洋桩与地基土系统在水平循环荷载下的刚度变化是否能完全用这些参数的变化所反映, 尚有待进一步试验来验证或修正。近年来, 浙江大学软弱土与环境土工教育部的重点实验室进行了众多水平荷载作用下循环海上桩基的反应性状研究, 如浙江省舟山市的海洋风力发电厂和广东省桂山岛海上风电场等。朱斌等^[14]在软粘土上的两根大直径深桩进行现场加载试验, 提出了引入循环弱化模型的双曲线型的 $p-y$ 曲线, 同时也得出 API 规范算得的极限土体压力与桩周土初始刚度均偏小。

而上海大学和同济大学合作的国家基金项目

负责人武亚军^[15], 对目前的 API 规范的 3 个关键参数进行了重新定义和合理的取值, 并且改进了 Rosquoet^[11]对 $p-y$ 曲线的修正, 结果表明修正方法的计算结果与实测值吻合很好。李记忠^[16]等利用现有孔隙水压力的发展模型, 建立了长期循环荷载作用下弱化饱和黏土的 $p-y$ 曲线。

总体来说, $p-y$ 曲线参数修正法目前根据大直径桩现场试验修正鲜有研究, 是否适用于海上风电桩基本这种大直径桩仍有待验证, 且循环次数最多的离心试验仅在 104 次以内, 而现实海上桩基在服役期间需承受 108 次风浪荷载的冲击。

1.2 经验拟合模型法研究现状

经验拟合模型法是基于室内外模型试验的一种经验拟合方法, 建立起循环累积变形与静态荷载作用下的变形、循环次数的经验函数关系。基于修正 $p-y$ 曲线的方法无法考虑循环荷载特性、现场施工条件等因素对桩基循环累积变形的影响。相关学者基于现场桩基试验、常重力模型试验和超重力离心模拟试验等方法提出了不同类型的水平循环受荷桩累积变形理论。

通过大量的室内的模拟试验研究发现: 在侧向循环荷载作用下, 桩基循环累积变形 y_N 与荷载循环次数 N 、初始桩基变形 y_1 存在一定的函数关系:

$$y_N = f(N, y_1) \quad (2)$$

基于上述函数关系式, 如果已知静力荷载作用下桩基变形 y_1 , 那么根据模拟实验的循环次数 N 就可以得到桩基循环累积变形 y_N 。而关于此方法的发展进程具体如表 2。

LeBlanc 等^[19]基于一系列常重力(1g)模型试验, 针对半刚性桩开展了多组单向与双向循环加载试验, 指出桩基循环累积变形 y_N 与荷载循环次数 N 、初始桩基变形 y_1 是指数关系。Bienen 等^[20]考虑到在寿命期间海上桩基大部分是在低振幅负载下工作, 因此产生的累积位移变形较小, 使得桩基循环累积变形 y_N 与荷载循环次数 N 、初始桩基变形

表 2 经验拟合模型法的发展
Table 2 Development of empirical fitting Model method

场地状况	模型类别	循环次数	模型表达式	研究方法	参考文献
砂土	对数	5×10 ¹	$y_N=y_1 \times (1+t \ln N), t=0.18 \times (\Delta F/F_{max})$	超重力离心模拟试验	Verdure 等 ^[17]
砂土	指数	1×10 ⁴	$\frac{y_N}{L} = (\frac{H}{\gamma L^3} \times \frac{h}{L})^{\alpha} \cdot N^m \cdot f(\frac{L}{d} \cdot \frac{EI}{\gamma L^5}, n)$	常重力模型试验	P.Peralta 等 ^[18]
砂土	指数	6×10 ⁴	$\theta_N = \theta_c (1 - T_b \cdot T_c \cdot N^{0.31})$	常重力模型试验	LeBlanc 等 ^[19]
砂土	对数	1×10 ³	$y_N = y_1 \times (1 + t_b \cdot \ln(\frac{N}{2} + 1)), t_b = 0.05 \times \frac{N-1}{N}$	超重力离心模拟试验	Bienen 等 ^[20]
砂土	指数	5×10 ³	$y_N = y_1 N^{\alpha}, \alpha = T_b(\xi_b) \cdot T_c(\xi_c),$ $T_b(\xi_b) = 0.61 \xi_b - 0.013,$ $T_c(\xi_c) = (\xi_c + 0.63)(\xi_c - 1)(\xi_c + 1.64)$	超重力离心模拟试验	Klinkvort 等 ^[21]
砂土	指数	6×10 ³	$y_N = 1.78 \eta_b^2 N^{0.15}$	常重力模型试验	吴金标 ^[22]
粘土	指数	5×10 ³	$y_N = \alpha y_1 \cdot (1 - A e^{-N^k})$	常重力模型试验	张勋等

y_1 的指数或对数关系不会有显著差异。在高振幅负载下，LeBlanc 等^[19]认为指数表达式不适合用于在较低周期数来描述累积响应，却可在较高的循环数情况下拟合该行为。但研究没有足够高周期的数据以建立代表长期低振幅负载的累积变形特征。

总之，不同学者由于其试验环境、试验土样、循环荷载特性等试验条件的差异，所得到的经验模型函数不尽相同，指数型和对数型表达式二者的计算结果相差较大，目前学术界对该经验函数的形式未形成共识，且上述所提出的相关模型目前并没有一个模型能完全考虑施工工艺、循环特性和土体性质等对海上桩基的循环累积变形，对于桩基的累积变形发展模型还有待进一步研究。

2 数值分析方法现状

由于现场或室内试验的操作复杂、周期长和试验所需费用高，且难以实现循环次数高达到 10⁸ 次以上。因此采用数值分析的方法能较好的克服以上缺点并且可方便地比较各类因素对海上桩基累积变形的影响，例如桩径大小、循环荷载特性、桩周土特点和桩基性能等因素。通过分析桩侧土抗力的分布状况，可分析水平循环荷载作用下海上风电桩的累积变形机理，从而发展出相应的设计方法。

刘冰雪^[24]利用 ABAQUS 软件对桩基础承载力的性能分析，探讨了在单调荷载以及复合荷载作用下的桩径、桩周土模量、桩间距和桩端土模量等因素对承载力的影响，揭示了海上桩基的承载

力特性，但其不足之处是缺少对大直径桩和群桩等其他桩基础的研究。尤汉强等^[25]深入分析了桩周土的非线性以及其极限抗力的退化和桩土脱开效应对桩-土耦合作用的影响，揭示了在水平循环荷载作用下大直径桩基的累积变形特点，但欠考虑地基土层之间的联系且人为规定了桩土脱开的深度。吴金标^[22]针对软粘土近海潮间带地基采用 ABAQUS 软件中的 mohr-coolomb 弹塑性本构模型研究了水平循环荷载作用下海上风电桩基的承载变形特点，注意到土体的切线刚度会随着循环次数的增加而下降，中上部土层的下降程度比中下部土层大。

Depina 等^[26]在各种不同弹性模量的土体中，采用刚度衰减模型分析弹性模量的出现概率对于桩基累积变形的影响，结果表明随着循环的进行桩基变形会持续累积，土体刚度衰减越慢越能减小桩基变形。董爱民^[27]基于水平循环荷载作用下桩周土刚度折减模型，对有限差分程序 FLAC3D 二次开发得到了在水平循环荷载作用下的土体刚度衰减规律，探讨了水平荷载幅值的影响水平的桩基循环累积变形发展规律，从而提出了砂性海床条件下大直径桩基循环累积变形预测模型。李涛^[28]采用数值软件 SCAS 分析砂性土中在水平循环荷载作用下导管架基础特性，发现 API 规范建议的 $p-y$ 曲线斜率偏大，则会导致其计算出的承载力偏大，对于工程设计而言偏不安全。章刘洋^[29]利用有限元软件对广东桂山海上风力发电项目的大直径桩基现场试桩进行分析，结果表明海上桩基的承载力和其变形的控制主要依赖于土体的初始刚度 k_{ini} ，

并且基于 ABAQUS 平台编程利用 Python 语言开发了可参数化建模的桩-土耦合作用的分析软件。

总的来说,目前数值分析在海洋桩基工程中的应用已经非常广泛,主要研究的方向是影响桩基累积变形的因素和采用三维数值软件对桩-土耦合作用的分析,但模型精度的高低与桩和土体特性的数学模型是否合适,与模型参数确定的精度如何,与模型的网格划分和边界条件准确有着很大的联系。因此,目前有限元方法的模型众多,其有效性还需要可靠的现场试验或者来验证。

3 现有理论及不足之处

目前取得的研究成果主要在累积变形规律、影响因素和模型建立等方面。

在累积变形规律和影响因素方面,根据多年研究人员总结的工程经验和各类模型试验的结果,取得了相应的成果:①Reese 等提出的桩基的变形理论基本能反映真实状况,在此基础上不少学者也建立相关理论或提出了有针对性的修正方法;②通过引入弱化因子来间接考虑沉桩方法、循环次数、桩周土特性及荷载特点等因素,此方法不仅考虑周到且简洁方便;③采用数值分析的方法可考虑模型试验所考虑不周的各种因素的影响,从而提出或校正桩基循环累积变形发展规律。

目前,模型建立主要是通过室内模型试验来建立的,同时结合少量现场试验的结果来研究,从而研究人员采用 $p-y$ 曲线参数修正法、经验拟合模型法和数值分析提出各种理论和模型,取得了一致的结论:①海上桩基由于其直径大,寿命期内需经受 10^8 次以上的水平循环荷载的作用,不能直接使用传统的 $p-y$ 曲线,且经反复论证,认为通过引入弱化因子的双曲线模型更适合于大直径海上风电桩;② $p-y$ 曲线统一化的说法得到广泛认同,如基于粘性土和砂性土的 $p-y$ 曲线采用无量纲方法统一描述,现已有所涉及,但有待通过结合试验方法和现场试验来确定其有效性;③经验拟合模型可考虑施工工艺和循环特性的影响,普遍认为桩基循环累积变形 y_N 与荷载循环次数 N 、初始桩基变形 y_1 之间的关系为指数关系;④数值分析方法填补了前两种方法的某些盲区,如土体非线性特性、土体极限抗力退化、地基刚度和循环次数的影响。

当现有研究仍存在以下几个主要问题:

①现普遍使用的 API 和 DNV 规范仅通过一个

衰减因子来考虑桩基的累积变形这一重要因素,但是由于海洋环境以及循环特性的差异,所得到的经验拟合模型不尽相同,目前学术界对经验拟合模型的形式并未达成共识。

②目前许多学者对基于小直径水平受荷桩基推导出的 $p-y$ 曲线开展了一系列的研究分析,提出了考虑众多因素的 $p-y$ 曲线修改模型,初步涉及到了非饱和状态,而由于现场试验困难,相应桩基实测资料十分稀缺,绝大部分模型仅由数值分析方法来印证其模型的准确程度,且未能找到一个简洁可靠的模型以供实际工程设计参考。

③由于海洋环境复杂多变,对于 $p-y$ 曲线的研究目前尚无一个广泛认可的修正模型,目前相关人员对于 $p-y$ 曲线的研究逐渐倾向于统一化,但对于不同的海洋环境以及不同的条件设施是否能对 $p-y$ 曲线进行统一化处理仍需进一步研究,同时也缺少一个成熟的数值分析模型来较好地描述桩土之间的相互作用。

④目前大多数学者仅仅针对桩基参数特征或土体参数特征的单一影响,而对桩-土耦合作用机理的研究则有所涉及,但未有得到普遍应用的模型,在此理论上很有必要对桩-土耦合循环累积变形发展规律进一步深入研究,且尚未对水平循环荷载作用下的桩基累积变形机理进行较为深入的探讨。

参考文献:

- [1] Matlock H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay [C]//Proceedings of the 11th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1970: 577-594.
- [2] Reese L C, Cox W R, Koop F D. Analysis of laterally loaded piles in sand [C]// 6th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1974: 473-485.
- [3] Long J H, Vanneste G. Effects of cyclic lateral loads on piles in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(1): 225-244.
- [4] Dawson M T. Lateral load capacity of piles [J]. Highway Research Record, 1970, 333: 104-112.
- [5] Scott R F. Analysis of centrifuge pile tests: Simulation of pile driving [R]. Washington D C: American Petroleum Institute, 1980.
- [6] Wesselink B D, Murff J D, Randolph M F, et al. Analysis of centrifuge model test data from laterally loaded piles in calcareous sand. Engineering for calcareous sediments [M]. Rotterdam: Balkema, 1988, 1: 261-270.
- [7] S.S.Rajashree&Sundaravadivelu. Degradation Model for

- One-way Cyclic Lateral Load on Piles in Soft Clay [J]. Computers and Geotechnics, 1996, 19(4): 289-300
- [8] Kim B T, Kim N K, Lee W J, et al. Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4): 416-425.
- [9] Alderlieste E A, Experimental modelling of lateral loads on large diameter mono-pile foundations in sand [D]. Civil Engineering at Delft University of Technology, 2011
- [10] Georgiadis M, Anagnostopoulos C, and Safiekou S. Cyclic lateral loading of piles in soft clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992(23): 47-59
- [11] Rosquoet F, Thorel L, Gamier J, Canepa Y. Lateral cyclic loading of sand-installed piles [J]. Soils and foundations, 2007, 47(5): 821-832.
- [12] D.M. Dewaikar, S. V. padmavathi, R.S. Salimath. Ultimate Lateral Load of a Pile in Soft Clay under Cyclic Loading [C]/The 12th International Conference of International Association for Computer Methods Advances in Geomechanics (IACMAG). Goa, India, 2008.
- [13] 高明, 陈锦珍, 郑国芳, 等. 桩在侧向静、动、循环荷载下的性能研究及 $p-y$ 曲线建议公式 [J]. 海洋工程, 1988, 6(3): 34-4.
- [14] 朱斌, 杨永垚, 余振刚, 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.
- [15] 武亚军, 卢晨阳, 李卫超, 等. 应用于海洋工程中水平受荷桩特性分析的修正 $p-y$ 曲线模型 [J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(5): 511-518.
- [16] 李记忠, 王晓蕾, 张海荣, 等. 水平循环荷载作用下弱化饱和黏土的 $p-y$ 曲线 [J]. 中国海洋平台, 2017, 32(3): 36-42
- [17] Verdure L, Garnier J, Levacher D. Lateral cyclic loading of single piles in sand [J]. International journal of physical modelling in geotechnics, 2003, 3(3): 17-28.
- [18] P. Peralta, M. Achmus. An experimental investigation of piles in sand subjected to lateral cyclic loads [C]. Physical Modelling in Geotechnics, 2010, 985-990.
- [19] Leblanc C, Houslyby G T, Byren B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading [J], Geotechnique, 2010, 60: 70-90.
- [20] Bienen B, Dührkop J, Grabe J, et al. Response of piles with wings to monotonic and cyclic lateral loading in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 138(3): 364-375.
- [21] Klinkvort R T, Hededal O. Lateral response of monopile supporting an offshore wind turbine [J]. Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering, 2013, 166(2): 147-158.
- [22] 吴金标, 单桩基础模型试验和三维数值分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [23] 张勋, 黄茂松, 胡志平. 砂土中单桩水平循环累积变形特性模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1-10.
- [24] 刘冰雪, 海上风机桩基础承载特性的三维有限元分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [25] 尤汉强, 杨敏, 循环荷载下海洋风机单桩基础简化分析模型 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 13-16.
- [26] Depina I, Le T M H, Eiksund G, et al. Behavior of cyclically loaded monopile foundations for offshore wind turbines in heterogeneous sands [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 266-277.
- [27] 董爱民. 风电桩基础水平承载力研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- [28] 李涛. 近海风机导管架基础水平受荷特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [29] 章刘洋. 地基对大直径桩的水平静力和循环抗力数值分析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.