

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.01.001

# 台风环境中海上风电管桩基础 动力响应特性研究述评

刘俊伟, 吕伟, 于秀霞

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266500)

**摘要:** 我国海上环境恶劣, 极端天气容易导致风机倒塌。现有研究表明, 台风环境下, “土塞-管桩-桩侧土”的相互作用和动力响应特征, 是决定风电支撑体系服役寿命的关键因素。为深入研究海上风电基础的动力响应, 对土塞的形成机理及其与管桩的相互作用做了基本论述, 介绍了水平荷载下桩土相互作用的研究现状, 探讨了海洋环境下单桩支撑体系固有频率演变和土体循环弱化特性的联系。最后, 总结得出台风环境下敞口桩动力响应研究现状的不足之处, 为今后的研究方向提供了参考。

**关键词:** 海上风电; 单桩; 土塞; 动力响应

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)01-0001-07

## Review on Dynamic Response Characteristics of Offshore Wind Turbine Pipe Pile Foundation in Typhoon Environment

LIU Junwei, LV Wei, YU Xiuxia

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266500, China)

**Abstract:** The wind turbine is usually easy to collapse due to extreme weather. Existing studies show that the interaction and dynamic response characteristics of "soil plug, pipe pile and pile side soil" are key factors to determine the service life of wind power support system in typhoon environment. In order to analyze the dynamic response of offshore wind turbine pipe pile foundation, the formation mechanism of soil plug and its interaction with pipe pile are discussed, the research status of pile-soil interaction under horizontal load is introduced, the relationship between natural frequency evolution of pile support system and cyclic degradation of soil in Marine environment is discussed. Finally, the shortcomings of the current research on the dynamic response of open pile in typhoon environment are summarized, which provides a reference for future research direction.

**Keywords:** offshore wind turbine; pile; soil plug; dynamic response

海上风电是解决能源短缺、改善能源结构的有效途径。我国海上风能资源丰富, 靠近东部城市群负荷中心, 稳步发展海上风电场已列为国家能源战略<sup>[1]</sup>。我国目前规划的海上风电场, 多集中在水深35 m 以内的近海海域, 单桩基础凭借经济性和可靠性成为最优选择<sup>[2]</sup>。我国海上环境恶劣, 东南沿海台风灾害频发。台风及其引起的波浪强度大, 空间和时变特性显著, 已成为风机倒塌的最主要外部因素<sup>[3]</sup>。仅台风“天兔”就造成了“红海湾”风电场25台塔架中的8台倒塌。尤其随着海上风机趋向大型

化, 台风极端环境下支撑体系的动力稳定性问题愈加突出。

风电单桩支撑结构属于动力敏感型体系, 如英国风电工程手册<sup>[4]</sup>中的统计结果(见图1), 其自振频率非常接近涡轮机频率(1P)和叶片穿越频率(2P/3P)以及常规风浪荷载。基础是上部荷载的支撑者, 也是决定自振频率的主导因素。目前海上风电单桩多采用直径3 m~8 m的大直径敞口管桩。管桩沉入海床时部分土体挤入桩孔内, 形成“土塞-管桩-桩侧土”体系。但不同工况时土塞高度不

收稿日期: 2021-11-16

修稿日期: 2021-12-13

基金项目: 山东省优秀青年基金项目(ZR2021YQ31); 国家自然科学基金项目(41772318)

作者简介: 刘俊伟(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: zjuljw@126.com

尽相同,形成的桩-土刚度和界面摩擦特性存在差异,进而影响桩基水平承载性能。在台风环境多自由度循环荷载下,“土塞-管桩-桩侧土”体系发生渐进演变,基础刚度持续变化,支撑体系的自振频率

随之改变<sup>[5]</sup>。改变后的自振频率又有可能与激振荷载频率重合,引起共振而加速疲劳破坏。因此,台风环境下“土塞-管桩-桩侧土”体系的动力响应特性,是决定风电支撑体系服役寿命的关键内部因素。

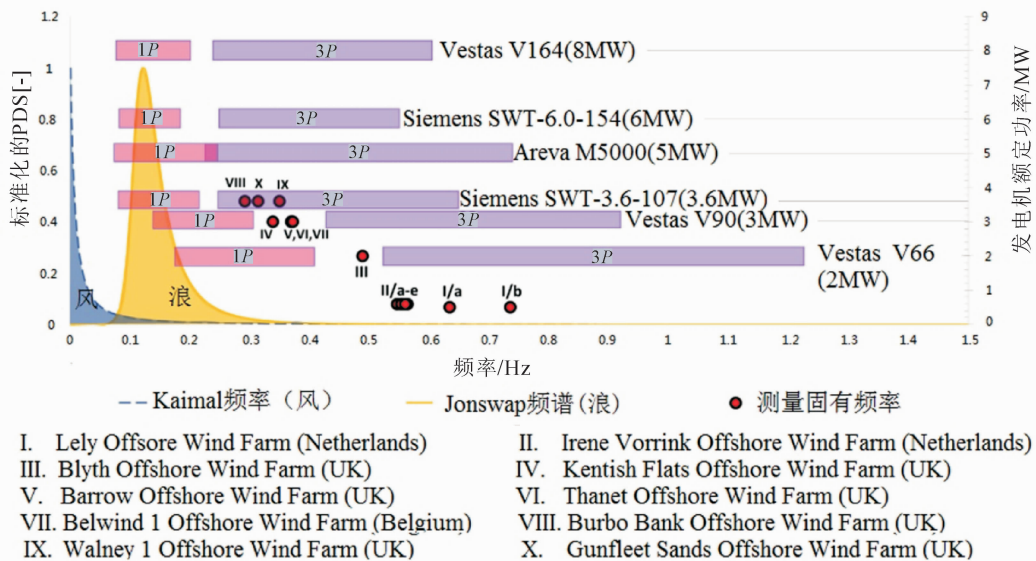


图 1 海上风机频率图

## 1 国内外研究现状及发展动态分析

### 1.1 土塞的形成机理及其与管桩的相互作用

沉桩过程中土塞高度的发展过程是目前国内外关注的热点,也是管桩与土塞相互作用的宏观表征。钢管桩领域, Henke 等<sup>[6]</sup>、Murthy 等<sup>[7]</sup>、Aleksandrova 等<sup>[8]</sup>先后采用原位试验和模型试验,研究了不同沉桩方式、桩身截面和地质条件下土塞发展及物理力学特性的演变过程,并采用土塞增长率(IFR)和土塞率(PLR)指标来量化土塞高度变化及闭塞现象。这些研究表明土塞高度与土体性质、桩径最相关,土塞高度的变化过程制约土塞阻力的大小。

国内学者则更为关注混凝土管桩的土塞效应,雷国辉等<sup>[9]</sup>、张明义等<sup>[10]</sup>采用足尺PHC管桩观测了土塞高度随沉桩过程的动态变化,重点研究了桩身径厚比对土塞高度动态发展规律的影响。周健等<sup>[11]</sup>和曹兆虎等<sup>[12]</sup>则将PIV技术应用到了敞口管桩的模型试验中,分别利用半模试验技术和人工透明土得到了沉桩时土体的位移场。Liu 等<sup>[13]</sup>通过足尺试验研究了土塞的分层性、拱效应及物理力学特性。Wu 等<sup>[14]</sup>提出了附加质量模型,与刘浩等<sup>[15]</sup>考虑土塞的惯性、阻尼效应以及土塞和管桩的位移相位差,研究了土塞对管桩低应变测试试波速的影响。

郑长杰等<sup>[16]</sup>则考虑桩的三维效应,推导了低应变瞬态荷载作用下基桩三维动力响应的解析解,为桩基低应变检测提供了新的依据。

在数值仿真方面,张明义等<sup>[17]</sup>、闫澍旺等<sup>[18]</sup>采用有限元进行了敞口桩贯入的模拟,得到了一些定性的结论。但发现有限元法在处理桩土接触及大变形等问题时存在一定困难。对此,周健等<sup>[11]</sup>、Li 等<sup>[19]</sup>、Zhu 等<sup>[20]</sup>将离散元引入到了敞口桩的模拟仿真中,在解决大变形的同时,从细观尺度研究了沉桩过程中桩-土接触面、土颗粒破碎等细观机理及运动规律。

目前对于管桩与土荷载传递的研究,主要集中在竖向受荷工况下。Randolph 等<sup>[21]</sup>提出了土塞的一维平衡解析公式。Lehane 等<sup>[22]</sup>及 Lee 等<sup>[23]</sup>采用一维分析模型解析了管桩土塞高度对内壁摩擦阻力的影响规律,指出内侧阻力主要由端部以上1倍桩径范围提供。“内外双壁模型桩”试验技术使得内、外侧界面摩擦力得以同时测读<sup>[24-25]</sup>。土塞侧向土压力及内侧摩擦阻力的分布模式逐渐明朗。土塞的形成不仅影响桩端阻力,对桩侧摩擦阻力的影响也不容忽视(Randolph)<sup>[26]</sup>。这在目前国际最为权威的西澳大学UWA<sup>[27]</sup>和香港大学HKU<sup>[28]</sup>等钢管桩设计方法中得以体现,土塞高度指标逐渐被引用到了竖向承载力的计算中。Liu 等<sup>[29-30]</sup>提出了考虑土塞效

应的混凝土管桩竖向承载力计算方法,通过室内试验,探讨不同桩靴形势下开口管桩沉桩过程的力学机制,采用土塞增长率指标 IFR 量化了土塞高度对桩端阻力和侧摩阻力的影响。Fattah 等<sup>[31]</sup>讨论了桩塞的产生和拆除对桩承载力的影响。Liu 等<sup>[32]</sup>建立了考虑了桩和土两种介质竖向和径向位移的轴对称管桩-土相互作用模型,定义土阻系数(SRF)来评价桩身动土阻力。

土塞的动态发展过程复杂,即使对于大直径钢管桩,土塞高度与沉桩深度也并非同步<sup>[33]</sup>,打桩最后阶段也易发生闭塞现象,出现拒锤等工程问题<sup>[34]</sup>。对于层状土,闭塞和开塞可能会发生多次的交替转化,取决于桩端土的阻力与内壁摩阻力的大小关系。Wang 等<sup>[35]</sup>通过管桩在成层土中的现场试验,讨论了土塞对开口管桩对端部和轴部阻力的影响。对于具有强烈空间变异性和成层特性的复杂海床,土塞效应更为复杂。郑俊杰等<sup>[36]</sup>、林军等<sup>[37]</sup>指出土体的这种空间变异特性对基础的承载特性具有显著影响。

关于单一土层中土塞的形成及竖向作用机制的研究日趋丰富,针对层状土的土塞效应也逐渐引起国内外的关注。但在复杂的海洋地质条件下,大直径敞口管桩土塞的形成及其对管桩承载特性的影响规律并无定论,尤其对水平承载特性的作用机制还未引起足够的重视。加之,循环荷载下土塞自身也存在弱化效应,尤其在台风环境高强低频荷载作用下,土塞的弱化效应对大直径管桩动力响应的影响还有待深入研究。

## 1.2 水平静动荷载下桩土相互作用

$p-y$  曲线法是水平荷载下桩土相互作用最常用的理论分析方法,被 API<sup>[38]</sup> 和 DNV<sup>[39]</sup> 所采纳。该方法是 Matlock<sup>[40]</sup> 基于软黏土中细长桩的试验结果所提出的,因此在计算大直径桩时往往会高估刚度,低估侧向变形(朱斌等<sup>[41]</sup>)。对于此,国内外学者分别基于砂土<sup>[42-43]</sup> 和软黏土<sup>[44-45]</sup> 的离心机试验和数值模拟结果,对  $p-y$  曲线进行了一定的修正。目前对于多向循环加载下的  $p-y$  曲线的研究非常有限。Su 等<sup>[46]</sup> 基于边界理论,提出了可以考虑任意加载方向的  $p-y$  曲线,但模型参数较多,且缺少物理意义,标定困难。

针对刚性单桩基础累积变形的试验研究,主要是基于单自由度加载模型试验展开。Leblanc 等<sup>[47]</sup>, Klinkvort 等<sup>[48]</sup> 先后开展了针对砂土的 1 g 室内模型试验和离心机模型试验,结合雨流计数法提出了任意荷载作用后桩基的变形计算方法。何奔等<sup>[49]</sup>、邓涛

等<sup>[50]</sup> 则针对黏性土开展了离心模型试验和现场测试,研究表明影响桩基残余变形的主要因素包括土的超固结比、循环后的重固结、桩的竖向荷载以及桩-土相对刚度等。胡安峰等<sup>[51]</sup>、姜贞强等<sup>[52]</sup> 则采用数值模拟分别分析了桩体鼓胀变形、土体性质、荷载方向等因素对单桩基础累积侧向位移的影响。

实测表明,台风虽作用持时短,但强度大、时空变异复杂。如 2013 年超强台风“天兔”在过境的 13 h 内,“红海湾”风电场附近风速从 33 m/s 迅速增大到 57 m/s,期间风向改变了 270 度<sup>[53-54]</sup>。陈朝晖等<sup>[55]</sup> 对中国台风年鉴长期资料进行了统计分析,对台风关键参数的概率模型进行了拟合度检验,建立了适用于中国东南沿海遭遇台风的概率模型和台风关键参数。台风引起的波浪具有高强度和强非线性,最大的有效波高可高达 16.91 m(如 Katrina 台风)。同时还可能导致畸形波的出现,波浪力的复杂程度要远超出普通波浪,基于 Morison 方程的常规波浪荷载模型(如樊惠燕<sup>[56]</sup>) 已不适用。目前主要采用半经验方法来预测台风期间的有效波高和谱峰频率(如 Ochi<sup>[57]</sup>)。尤其,波浪场与台风场并非共轴,相交角度随时间和空间不断变化,在不同区域表现出不同的特征<sup>[58]</sup>,如图 2、图 3 所示。

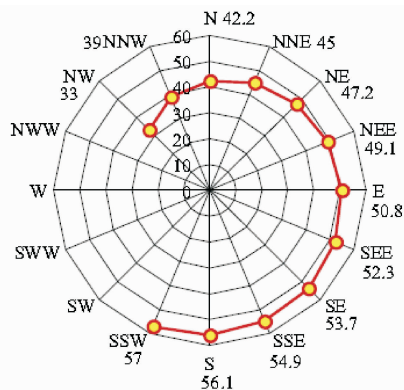


图 2 台风“天兔”阵风风速及风向变化

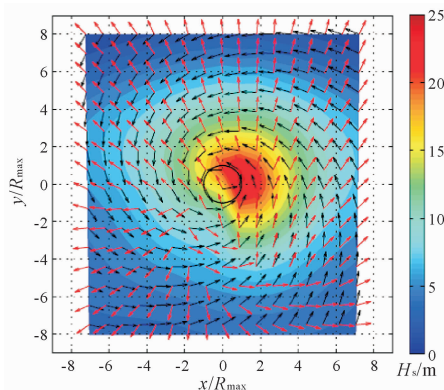


图 3 风向与主波向分布<sup>[68]</sup>

不同风速谱激励下,对风力发电机风致脉动响应有所影响<sup>[59]</sup>。在台风和波浪联合作用下,桩基所受到的水平循环荷载将在时间和空间上联系变化,这必然导致桩基的空间变形特性发生改变,这在有限的规则性多向加载试验中得以验证(如 8 字形、十字形等)<sup>[60-61]</sup>,发现荷载变向确实增加桩基的水平向变形。但针对台风环境中多自由度高强度荷载叠加作用下,敞口大直径管桩与复杂海床之间的相互作用机理,目前尚不清楚,有待开展针对性的研究,以此建立台风环境下复杂土中的“土塞-管桩-桩侧土”循环相互作用定量分析方法。

### 1.3 海洋环境单桩支撑体系固有频率的演变

海洋循环荷载环境下,单桩支撑体系固有频率的演变是桩-土体系在循环荷载下长期相互作用结果的宏观表征。Bhattacharya 等<sup>[4]</sup>在参编的英国海上风电工程手册中进行了统计,发现支撑体系的自振频率与涡轮机转子频率、叶片穿越频率、常规风和浪等环境激振频率十分接近,因此自振频率在服役过程的变化将很有可能导致共振。Hu 等<sup>[62]</sup>对德国 Areva Multibrid M5000 风机进行的长期动力监测试验中就发现这种共振现象。因此,DNV<sup>[7]</sup>规定支撑结构固有频率不应落入涡轮机频率(1P)和叶片穿越频率(2P/3P)及其左右 10% 范围内。

运行期间,支撑体系的自有频率并非一成不变。Kühn<sup>[63]</sup>和 Zaaijer<sup>[64]</sup>报道了 Lely 风电场实测数据,在长期的波浪、支撑结构振动等循环荷载作用下,海上风机支撑结构的自振频率随着服役时间逐渐降低。Bhattacharya 等<sup>[65]</sup>和 Sun<sup>[66]</sup>开展了单桩式风机长期振动模型试验和数值模拟,发现支撑结构的自振频率随循环激振显著降低。然而,Yu 等<sup>[67]</sup>和 Cui 等<sup>[5]</sup>针对砂土中进行的模型试验和数值模拟的结果则与以上成果不同,发现固有频率会随循环次数逐渐增加,将其归因于循环加载引起的桩周砂土的逐渐密实。可见,不同工况下支撑体系自振频率的演变规律并不相同。

单桩支撑体系自振频率演变与土体循环特性密切相关。近年来,国内外学者采用三轴试验和共振柱试验,对砂土和黏性土<sup>[68-70]</sup>的动力特性开展了研究。这些研究表明,影响软黏土特性和变形累积的主要因素包括:初始剪应力、循环应力比、主应力旋转程度、剪切频率以及土体超固结比等。也有少量学者以海床沉积土作为研究对象,如黄茂松等<sup>[71]</sup>、李帅等<sup>[72]</sup>和张炜等<sup>[73]</sup>分别对我国东海饱和软黏土、粉砂和南海粉质黏土的循环特性开展了试验研

究。循环单剪试验的操作更易控制。Rudolph 等<sup>[61]</sup>在多向单剪试验发现,剪切方向改变会增加砂土的累积应变。董金玉等<sup>[74]</sup>针对残积土进行了不同固结压力、不同干密度、不同振动频率下的动单剪试验。刘方成等<sup>[75]</sup>提出了考虑阻尼修正的 D-Pyke 滞回模型,能够更好的模拟土的循环加载过程,可为随机动力荷载作用下土体响应问题分析提供合理的本构行为模拟。冯大阔等<sup>[76]</sup>、Nong 等<sup>[77]</sup>分别研究了法向应力和加载频率对砂土体应变累积和刚度提高的影响。

可见,目前关于自振频率和土体循环弱化的试验研究多是以单一土层作为对象,未提及复杂海床的空间变异性。静力触探(CPT)是量化土体空间特性的有效现场试验手段。目前 CPT- $q_c$  指标已被广泛采纳到敞口管桩竖向承载力的设计中,如西澳大学 UWA 设计方法<sup>[27]</sup>、帝国理工学院 ICP 设计方法<sup>[78]</sup>、香港大学 HKU 设计方法<sup>[28]</sup>。Liu 也针对壁厚较大、内壁粗糙的 PHC 管桩提出了 CPT 竖向承载力设计法<sup>[29]</sup>。但是,目前采用 CPT- $q_c$  指标计算桩基水平承载力的方法非常有限。Suryasentana 等<sup>[79]</sup>采用  $q_c$  指标建立了实体桩  $p$  与  $y$  之间的指数函数关系式。刘路路等<sup>[80]</sup>结合现场测试,提出了考虑土塞效应的开口管桩承载力 CPTU 计算方法。可见,这种以静力触探为基础指标的计算方法开辟了一种全新的桩基水平承载力分析途径。而基于 CPT- $q_c$  的敞口管桩  $p-y$  三维动力曲线及自振频率计算模型还有待提出。

## 2 总结与展望

目前国内外的研究在常规风、浪荷载下单桩基础的长期弱化和动力响应方面成果丰富,但针对台风环境下敞口管桩的动力响应仍然存在诸多未知,体现在以下三个方面:(1) 现有研究大多是针对闭口管桩或是灌注桩展开的,没有涉及土塞的弱化过程及其对管桩水平循环特性的影响,但目前海上风电单桩基础采用的多为敞口管桩;(2) 在建立  $p-y$  曲线等动态响应时未考虑台风的转向、以及台风引起的强非线性波浪叠加作用导致的多自由度大变形循环加载;(3) 现有研究多采用单一土层进行,忽视了海床空间变异性,不同于我国海域的复杂工况。

敞口管桩的动力响应分析关键在于合理模拟“土塞-桩-桩侧土”相互作用,从管桩的沉桩和土塞形成过程为研究起点,充分考虑台风和波浪的真实荷载特征,宏微观相结合来研究复杂海床中风电

敞口管桩在极端海洋环境中的循环弱化及变形过程,无疑将是有效途径。

### 参考文献:

- [1] Chang J, Leung D Y, Wu C Z, et al. A review on the energy production, consumption, and prospect of renewable energy in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2003,7(5):453-468.
- [2] Lau B H. *Cyclic behaviour of monopile foundations for offshore wind turbines in clay* [D]. University of Cambridge, 2015.
- [3] Chou J S, Tu W T. Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011,18(1):295-313.
- [4] Bhattacharya S, Wang L, Liu J W, et al. *Wind Energy: A Hand Book for Onshore and Offshore Turbines* [M]. Elsevier, ISBN 978 - 0-12-809451-8, UK. (Chapter 12) (In Published ).
- [5] Cui L, Bhattacharya S. Soils-structure interaction for monopile supporting OWT[J]. *Engineering and Computational Mechanics*, 2016.
- [6] Henke S, Grabe J. Numerical investigation of soil plugging inside open-ended piles with respect to the installation method[J]. *Acta Geotechnica*, 2008,3(3):215-223.
- [7] Murthy D S, Robinson R G, Rajagopal K. Formation of soil plug in open-ended pipe piles in sandy soils[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018,15(5):1-11.
- [8] Aleksandrova N I, Kondratenko A S. Movement of an open-ended pipe with a soil plug under a longitudinal impact [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020,38(6):1-12.
- [9] 雷国辉,艾英铎,何振兴,等. 粉细砂中敞口 PHC 管桩群桩锤击施工效应[J]. *岩土工程学报*,2012,34(2):294-302.
- [10] 张明义,管金萍,王永洪,等. 开口和闭口对静压 PHC 管桩贯入特性影响试验研究[J]. *中国公路学报*,2020,33(4):32-40.
- [11] 周 健,陈小亮,王冠英,等. 开口管桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*,2012,40(2):173-178.
- [12] 曹兆虎,孔纲强,刘汉龙,等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*,2014,36(8):1564-1568.
- [13] Liu Junwei, Zhang Zhongmiao, Yu Feng. Case history of instrumented jacked open-ended piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012,138(7):801-820.
- [14] Wu W B, Naggar M E, Abdrahem M, et al. New interaction model for vertical dynamic response of pipe piles considering soil plug effect[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017,54(7):987-1001.
- [15] 刘 浩,吴文兵,蒋国盛,等. 土塞效应对管桩低应变测试视波速的影响研究[J]. *岩土工程学报*,2019,41(2):383-389.
- [16] 郑长杰,丁选明,栾鲁宝,等. 低应变瞬态荷载作用下基桩动力响应解析解[J]. *土木工程学报*,2019,52(11):79-85.
- [17] 张明义,邓安福,干腾君. 静力压桩数值模拟的位移贯入法[J]. *岩土力学*,2003,24(1):113-117.
- [18] 闫澍旺,张锡治,刘 润. 海洋石油平台桩基拒锤现象[J]. *天津大学学报*,2007,40(11):1271-1276.
- [19] Li L, Wu W, Liu H, et al. DEM analysis of the plugging effect of open-ended pile during the installation process [J]. *Ocean Engineering*, 2020,220(4):108375.
- [20] Zhu N, Cui L, Liu J, et al. Discrete element simulation on the behavior of open-ended pipe pile under cyclic lateral loading [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021,144(15):106646.
- [21] Randolph M F, Leong E C, Houlsby G T. One-dimensional analysis of soil plugs in pipe pile[J]. *Geotechnique*, 1991,41(4):587-598.
- [22] Lehane B M, Gavin K G. Base resistance of jacked pile in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001,127(6):473-480.
- [23] Lee J, Salgado R, Paik K. Estimation of load capacity of pipe piles in sand based on cone penetration test results[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003,129(6):391-403.
- [24] Paik K, Salgado R. Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003,129(1):46-57.
- [25] Jeong S, Ko J. Inner skin friction of open-ended piles considering the degree of soil plugging [J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016,2(37):1327-1332.
- [26] Randolph M F. Science and empiricism in pile foundation design [J]. *Geotechnique*, 2003,53(10):847-875.
- [27] Lehane B M, Schneider J A, Xu X. The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand[J]. *Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG*, 2005:683-689.

- [28] Yu F, Yang J. Base capacity of open-ended steel pipe piles in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012,138(9):1116-1128.
- [29] Liu J W, Zhang M Y, Yu F. CPT-correlated design method of open-ended concrete pipe pile [J]. *ICE Geotechnical Engineering*, 2016,169(3):240-249.
- [30] 刘俊伟,王立忠,朱娜,等. 开口管桩贯入特性的大尺度模型试验[J]. *工程科学学报*, 2019,41(2):269-277.
- [31] Fattah M Y, Al-Soudani W H S. Bearing capacity of closed and open ended pipe piles installed in loose sand with emphasis on soil plug[J]. *Indian Journal of Geomarine Sciences*, 2016(5):703-724.
- [32] Liu X, Naggari M, Wang K, et al. Dynamic soil resistance to vertical vibration of pipe pile[J]. *Ocean Engineering*, 2020,220(3):108381.
- [33] Paikowsky S G, Whitman R V. The effects of plugging on pile performance and design[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990,27(4):429-440.
- [34] 闫澍旺,张锡治,刘润. 海洋石油平台桩基拒锤现象[J]. *天津大学学报*, 2007,40(11):1271-1276.
- [35] Wang Y, Sang S, Zhang M, et al. Investigation on in-situ test of penetration characteristics of open and closed PHC pipe piles [J]. *Soils and Foundations*, 2021,61(4):960-973.
- [36] 郑俊杰,郭秋菊,郭嘉. 土性空间变异性统计模型的改进[J]. *华中科技大学学报*, 2007,35(2):4-7.
- [37] 林军,蔡国军,邹海峰,等. 基于随机场理论的江苏海相黏土空间变异性评价研究[J]. *岩土工程学报*, 2015,37(7):1278-1287.
- [38] API. *Geotechnical and foundation design considerations* [S]. ANSI/API RP 2GEO, 1st edn. Washington DC, USA: API Publishing Services, 2011.
- [39] DNV (2014). *DNV-OS-J101, Offshore standard. design of offshore wind turbine structures*[S]. Det Norske Veritas, 2014.
- [40] Matlock H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay[J]. *Offshore Technology in Civil Engineering's Hall of Fame Papers from the Early Years*, 1970:77-94.
- [41] 朱斌,熊根,刘晋超,等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2013,35(10):1807-1815.
- [42] Choo Y W, Kim D, Park J H, et al. Lateral response of large-diameter monopiles for offshore wind turbines from centrifuge model tests [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2014,37(1):107-120.
- [43] Choo Y W, Kim D. Experimental development of the p-y relationship for large-diameter offshore monopiles in sands: centrifuge tests[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 142 ( 1 ): 04015058.
- [44] Pradhan, D L. Development of P-Y curves for monopiles in clay using finite element model Plaxis 3D foundation [D]. Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [45] 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*, 2011,137(7):717-729.
- [46] Su D, Yan W M. A multidirectional p-y model for lateral sand-pile interactions [J]. *Soils and Foundations*, 2013,53(2):199-214.
- [47] Leblanc C, Byrne B W, Houlsby G T. Response of stiff piles to random two-way lateral loading [J]. *Géotechnique*, 2010,60(9):715-721.
- [48] Klinkvort R T. *Centrifuge Modelling of Drained Lateral Pile-soil Response* [M]. Technical University of Denmark, 2012.
- [49] 何奔,王欢,洪义,等. 竖向荷载对黏土地基中单桩水平受荷性能的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016,50(7):1221-1229.
- [50] 邓涛,林聪煜,柳志鹏,等. 大位移条件下水平受荷单桩的简明弹塑性计算方法[J]. *岩土力学*, 2020,41(1):95-102.
- [51] 胡安峰,肖志荣,江进华,等. 双向循环荷载下的单桩基础累积侧向位移[J]. *上海交通大学学报*, 2020,54(1):85-91.
- [52] 姜贞强,何奔,单冶钢,等. 黄海海域极端荷载下海上风力机结构累积变形及疲劳性状——3种典型基础对比研究[J]. *太阳能学报*, 2021,42(4):386-395.
- [53] Chen X, Li C, Xu J. Failure investigation on a coastal wind farm damaged by super typhoon: A forensic engineering study[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015,147:132-142.
- [54] Chen X, Xu J Z. Structural failure analysis of wind turbines impacted by super typhoon Usagi[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016,60:391-404.
- [55] 陈朝晖,汤海涛. 台风极值风速的数值模拟及分布模型[J]. *重庆大学学报*, 2008,31(11):1285-1289.
- [56] 樊惠燕. 风浪作用下海上风机单桩基础动力学与疲劳分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [57] Ochi M. *Hurricane Generated Seas* [M]. Elsevier, 2003.
- [58] Hu K, Chen Q. Directional spectra of hurricane-generated waves in the Gulf of Mexico[J]. *Geophysical Re-*

- search Letters, 2011, 38(19):570-583.
- [59] 楚晨晖,陈少林.不同风速谱激励下的风力发电机塔架风致响应及风振系数研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(1):39-45.
- [60] Su D, Wu W L, Du Z Y, et al. Cyclic degradation of a multidirectionally laterally loaded rigid single pile model in compacted clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(5):06014002.
- [61] Rudolph C, Grabe J, Albrecht I. Simple shear tests with a varying shearing direction during cyclic shearing[J]. Géotechnique Letters, 2014, 4(2):102-107.
- [62] Hu W H, Thöns S, Said S, et al. Resonance phenomenon in a wind turbine system under operational conditions[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 12:3619-3626.
- [63] Kühn M. Dynamics and design optimisation of offshore wind energy conversion system[D]. Delft University of Technology, 2001.
- [64] Zaaier M B. Foundation modelling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines[J]. Applied Ocean Research, 2006, 28(1):45-57.
- [65] Bhattacharya S, Nikitas N, Garnsey J, et al. Observed dynamic soil-structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 54:47-60.
- [66] Sun C. Semi-active control of monopile offshore wind turbines under multi-hazards[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 99(15):285-305.
- [67] Yu J, Huang M, Zhang C. Three-dimensional upper-bound analysis for ultimate bearing capacity of laterally loaded rigid pile in undrained clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11):1775-1790.
- [68] 王 军,蔡袁强,潘林有.双向激振下饱和软黏土应变软化现象试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(2):178-185.
- [69] Li L L, Dan H B, Wang L Z. Undrained behavior of natural marine clay under cyclic loading[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(16):1792-1805.
- [70] Wichtmann T, Andersen K H, Sjurson M A, et al. Cyclic tests on high-quality undisturbed block samples of soft marine Norwegian clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(4):400-412.
- [71] 黄茂松,李 帅.长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J].岩土工程学报,2010, 32(10):1491-1498.
- [72] 李 帅,黄茂松.长期循环荷载作用下海洋饱和粉砂的弱化特性[J].同济大学学报(自然科学版),2011, 39(1):25-28.
- [73] 张 炜,李 亚,周松望,等.南海北部区域黏土循环动力特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(7):2413-2423.
- [74] 董金玉,杨兴隆.残坡积土动力特性的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(3):38-42.
- [75] 刘方成,杨 峻,吴孟桃.考虑阻尼修正的 Pyke 滞回模型研究[J].岩土工程学报,2019,41(1):86-94.
- [76] 冯大阔,张建民.法向应力对接触面循环单剪力学特性的影响研究[J].岩土力学,2021,42(1):18-26.
- [77] Nong Z Z, Park S S. Effect of loading frequency on volumetric strain accumulation and stiffness improvement in sand under drained cyclic direct simple shear tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(12):04021159.
- [78] Jardine R, Chow F, Overy R, et al. ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays[M]. London: Thomas Telford, 2005.
- [79] Suryasentana S K, Lehane B M. Numerical derivation of CPT-based p-y curves for piles in sand[J]. Geotechnique, 2014, 64(3):186-194.
- [80] 刘路路,蔡国军,耿功巧,等.考虑土塞效应的开口管桩承载力 CPTU 计算方法[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(2):280-285.

## 特邀作者简介

刘俊伟,教授,博导,英国伦敦大学、剑桥大学访问学者,土木工程学院副院长,山东省优青,“山东省高校青年创新团队”(近海工程防灾减灾)带头人,青岛市拔尖人才,兼任中国地震学会岩土工程防震减灾委员会委员、中国工程建设标准化委员会委员、英国土木工程师学会委员、山东省土木工程学会理事等。出版学术著作和教材各 1 部,参编英国工程手册 1 部,主编、参编标准 3 部;以第一作者(或通讯作者)发表 SCI 收录论文 23 篇、EI 收录论文 32 篇;授权(公开)国际及中国发明专利 22 项,实用新型专利和软件著作权 25 项。

以第一完成人获山东省科技进步二等奖、青岛市科技进步一等奖、中国商业联合会科技进步一等奖、青岛市科技进步二等奖等学术奖励 8 项,以主要完成人获黑龙江省科技进步一等奖、浙江省科技进步三等奖等学术奖励 5 项;主持承担国家自然科学基金 3 项,省部级研究课题 11 项。研究成果在青岛地铁、胶东国际机场、胶州湾跨海大桥、杭州地铁等重大工程建设中做出贡献。