



# 非线性波浪荷载下海上风电大直径单桩累积水平位移及卸载刚度试验研究

雷易林, 夏晨涛, 邓雨虹, 刘开富

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 为研究非线性波浪荷载对海上风电大直径单桩累积水平位移及卸载刚度的影响, 开展了一系列室内模型试验, 系统分析了不同一阶谐波荷载幅值、二阶谐波荷载幅值、循环加载频率及循环次数对大直径单桩累积水平位移和卸载刚度的作用规律。结果表明: 一阶谐波荷载幅值、二阶谐波荷载幅值、循环加载频率及循环次数的增加, 均会增加大直径单桩的累积水平位移; 随着循环次数的增加, 卸载刚度逐渐衰减, 一阶谐波荷载幅值的增加将加剧卸载刚度的衰减, 而在相同循环次数下, 二阶谐波荷载幅值越大, 对应的卸载刚度越大; 随着荷载频率的增加, 初始卸载刚度会有所增加, 但卸载刚度随循环次数的衰减程度也会更大。该研究揭示了谐波效应在大直径单桩水平位移累积和卸载刚度退化中的影响, 相关结果可为海上风电大直径单桩在非线形波浪荷载下的长期循环响应评估及设计优化提供试验依据。

**关键词:** 非线性波浪荷载; 大直径单桩; 二阶谐波; 累积水平位移; 卸载刚度

**中图分类号:** TU473.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2026)05-0280-10

**引文格式:** 雷易林, 夏晨涛, 邓雨虹, 等. 非线性波浪荷载下海上风电大直径单桩累积水平位移及卸载刚度试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(3): 280-289.

**Reference Format:** LEI Yilin, XIA Chentao, DENG Yuhong, et al. Experimental investigation on cumulative horizontal displacement and unloading stiffness of large-diameter monopiles for offshore wind turbines under nonlinear wave loads[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(3): 280-289.

## Experimental investigation on cumulative horizontal displacement and unloading stiffness of large-diameter monopiles for offshore wind turbines under nonlinear wave loads

LEI Yilin, XIA Chentao, DENG Yuhong, LIU Kaifu

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To investigate the nonlinear wave loading effects on the cumulative horizontal displacement and unloading stiffness of large-diameter monopiles for offshore wind turbines, a series of laboratory model tests were conducted to quantify the influence of first- and second-harmonic load amplitude, load frequency and number of cycles on cumulative horizontal displacement and unloading stiffness of large-diameter monopiles. The results demonstrate that the increases in first- and second-harmonic load amplitude, load frequency and number of cycles all lead to larger cumulative horizontal displacement of large-diameter monopiles. Unloading stiffness gradually decays with the increase in the number of cycles. An increase in the first-harmonic load amplitude will aggravate the decay of the unloading stiffness. While a larger second-harmonic load amplitude, under the same number of cycles, results in greater unloading

收稿日期: 2025-12-11 网络出版日期: 2026-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52478370, 52078465); 浙江省公益技术应用研究项目(LGG22E080015)

作者简介: 雷易林(2000—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程、海洋土力学方面的研究。

通信作者: 刘开富, E-mail: liukaifu@zstu.edu.cn

stiffness. At higher load frequencies, the initial unloading stiffness increases. However, the subsequent decay of stiffness with number of cycles also becomes more pronounced. This study reveals the influence of harmonic effects on the horizontal displacement accumulation and unloading stiffness degradation of large-diameter monopiles, and the relevant results can provide an experimental basis for assessing the long-term cyclic response and optimizing the design of offshore wind turbine monopiles subjected to nonlinear wave loads.

**Key words:** nonlinear wave loads; large-diameter monopile; second-harmonic; cumulative horizontal displacement; unloading stiffness

## 0 引言

海上风电领域常用的基础类型主要有桩式基础、重力式基础和筒式基础<sup>[1]</sup>。大直径单桩因其经济效益良好且易于安装,已成为海上风电行业使用最为广泛的基础类型之一<sup>[2-3]</sup>。由于海洋环境复杂且气候条件多变,大直径单桩在其服役期间长期承受外部风浪作用,极易产生位移累积并伴随桩身刚度退化,严重影响桩基整体的安全性和稳定性<sup>[4]</sup>,并且非线性波浪荷载的作用也使大直径单桩面临新的挑战<sup>[5]</sup>。在此背景下,有必要针对非线性波浪荷载作用下大直径单桩的累积水平位移及刚度变化规律展开深入研究。

目前,已有不少学者对循环荷载作用下大直径单桩的累积水平位移及刚度变化展开了研究。高鲁超等<sup>[6]</sup>通过软黏土中大直径单桩离心试验,研究了不同荷载条件下大直径单桩的变形特性及刚度变化规律,结果表明双向循环相比于单向循环将引起更大的累积水平位移,且双向循环荷载会加剧刚度弱化。高畅等<sup>[4]</sup>通过数值模拟研究了不同幅值下单桩的累积变形情况,发现在软土中存在循环荷载阈值,低于阈值时单桩的长期累积变形问题可以忽略。邱子宁等<sup>[7]</sup>通过试验与数值模拟结合的方法,研究了软黏土中单桩的循环累积变形规律,结果表明位移累积速率随循环次数的增加先增加而后趋于稳定。龙先润<sup>[8]</sup>通过建立土体动态强化数学模型,分析了循环荷载下单桩的水平承载特性,结果表明基础刚度随着循环次数的增加逐渐衰减。曹光伟等<sup>[9]</sup>通过离心试验研究了软黏土中大直径单桩在循环荷载作用下的响应特性,结果表明单桩的卸载刚度和侧向累积位移均受到荷载幅值和循环次数的影响。这些研究深化了人们对循环荷载下单桩水平位移和刚度变化规律的理解,但现有研究均采用传统简化的正弦波循环加载方式,未充分考虑高阶谐波分量的作用。

在复杂海洋环境下,高阶谐波是影响大直径单桩动力响应的关键因素,其作用不可忽视。Wang

等<sup>[10]</sup>发现作用在单桩上的线性荷载分量占总荷载的比例不足 65%,Zeng 等<sup>[11]</sup>的研究表明,二阶谐波分量可达线性波荷载分量的 16%以上,Chen 等<sup>[12]</sup>的一系列试验进一步证实,高阶非线性波浪荷载可以占到总波浪荷载的 50%以上。上述研究表明,在分析水平循环荷载对单桩的影响时必须充分考虑高阶谐波分量的作用。但目前针对高阶谐波的研究多集中于数值模拟领域,常规室内模型试验研究尚属空白。

为弥补现有研究在非线性波浪荷载中高频谐波效应方面的不足,本文提出了一种新的加载波形,通过叠加 2 个余弦函数将二阶谐波分量纳入加载函数中,在此基础上开展了一系列室内模型试验,系统对比研究了不同一阶谐波荷载幅值、二阶谐波荷载幅值、加载频率以及循环次数下大直径单桩累积水平位移和卸载刚度变化规律,以期为进一步理解非线性波浪荷载下大直径单桩的位移及卸载刚度响应提供试验依据和技术参考。

## 1 模型试验

### 1.1 试验场地及设备

本次试验在浙江理工大学的岩土工程灾变模拟系统中进行,该系统的整体外观如图 1 所示,相关详细描述可参考戴朴修等<sup>[13]</sup>的研究。该系统的模型箱共由左右 2 部分组成,模型箱的整体尺寸为 4.0 m×3.0 m×2.0 m(长×宽×高),中间设有分隔钢板,根据试验规模,本次试验仅采用模型箱的右半部分开展;试验过程中,荷载施加均由固定在加载框架上的伺服作动器完成。伺服作动器分为水平加载作动器和竖向加载作动器 2 部分。在试验过程中,由计算机控制系统控制荷载的施加,并由液压油源控制系统为伺服加载系统提供加载动力,完成试验所需的加载;同时,数据采集系统实时收集试验过程中测得的试验数据。

除上述岩土工程灾变系统外,本次试验所用设备还包括 3 只 LVDT(Linear variable differential transformer)位移传感器,用于测量试验过程中模型桩的水平位移,该位移传感器的实拍图如图 2 所

示。3只LVDT位移传感器的量程分别为1只50 mm,2支100 mm,测量精度均为0.1%。LVDT位

移传感器在模型土填筑完毕后,等距安装在位于模型箱上方的侧梁上。

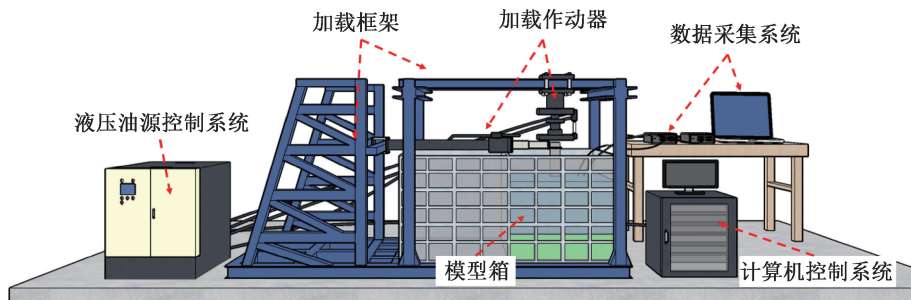


图1 岩土工程灾变模拟系统外观示意图



图2 LVDT位移传感器实拍图

## 1.2 试验用土

为了模拟中国东海典型的近海地层,试验采用由1.0 m厚黏土和0.5 m厚砂土组成的双层土。在土体填筑前,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行了一系列土工试验。图3所示为

砂土颗粒级配曲线,砂土颗粒的不均匀系数为5.78,曲率系数为0.99;表1所示为试验用土的基本物理力学参数。

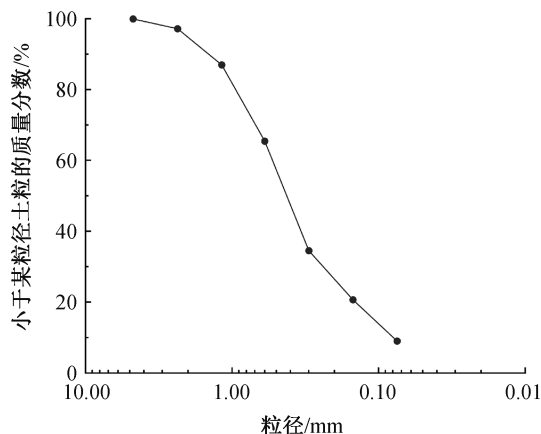


图3 砂土颗粒级配曲线

表1 试验用土的基本物理力学参数

土体类型	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	压缩模量/MPa	液限/%	塑限/%
黏土	1.57	42.1	12.1	10.4	1.46	42.1	19.9
砂土	1.83	7.3	0.0	33.0	24.20		

为了减小土体与模型箱内壁之间的摩擦,尽量避免边界效应对试验结果产生影响,土体填筑前,在模型箱底部和四周内表面铺设了0.5 mm厚的PVC防水膜。为确保填筑土体的均匀性,砂层和黏土层均采用分层法进行填筑,每层土的填筑厚度均为0.1 m。

对于砂土层的填筑,严格控制每层填筑质量为1060 kg,压实后每层的体积为 $0.6 \text{ m}^3$ ,天然密度为 $1.767 \text{ g/cm}^3$ ,控制干密度为 $1.592 \text{ g/cm}^3$ ,相对密度在70%左右。砂土填筑完成后,必须进行表面平整,并静置2 d后再进行黏土层的填筑。

对于黏土层的填筑,考虑到黏土填筑量大且黏性强,难以精确控制每层填筑质量,故在黏土层填筑完成并静置7 d后,利用微型十字板剪切仪在单桩周围不同位置处测定了土体的不排水抗剪强度。

图4展示了黏土层土体的不排水抗剪强度随取土深度的变化曲线,从图中可以看出,不同测点处的土体不排水抗剪强度高度重合,且随深度呈现出显著的线性增长趋势,表明黏土层填筑均匀,验证了土体密度与含水率分布满足试验要求。黏土层静置期间,需在黏土层上方铺设PVC防水膜,以防止静置期间水分的流失。

## 1.3 模型桩及试验布置

本次试验选用桩长60 m、直径6 m、埋深39 m的大直径单桩作为原型。相较于离心试验,1g模型试验从量纲分析的角度无法做到与原型完全相似。LeBlanc等<sup>[14]</sup>指出可以通过无量纲参数建立室内模型试验与现场原型之间的对应关系,为了保证模型试验与现场原型之间的对应关系,结合 $\pi$ 理论<sup>[15-16]</sup>,采用1:30的几何相似比对试验中涉及的相

关物理量进行相似设计。模型试验相关物理量的相似比及量纲如表 2 所示。最终确定模型桩的尺寸为:桩长 2.0 m,直径 0.2 m,壁厚 6.0 mm,埋深 1.3 m。

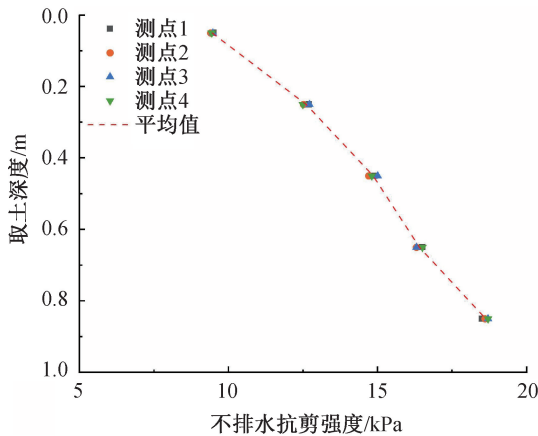


图 4 黏土层土体不排水抗剪强度随深度变化曲线

表 2 模型试验相关物理量相似比及量纲

物理量	相似比(原型/模型)
长度/m	1:30
力/N	1:27000
应力/Pa	1:30
时间/s	1:5
频率/Hz	1.0:0.2

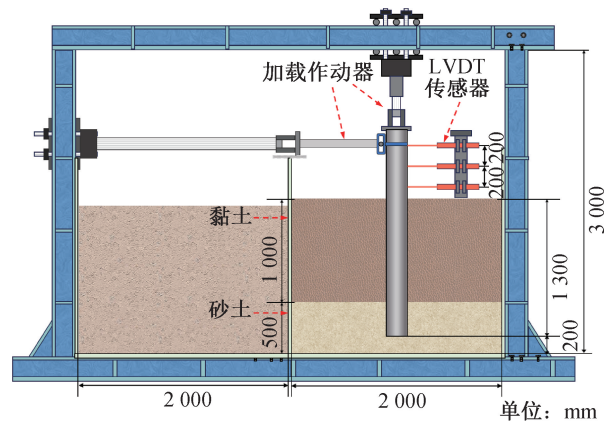
本次试验选用 6061-T6 铝合金作为模型桩的桩身材料,该材料的密度为  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,抗拉强度为 310.0 MPa,屈服强度为 276.0 MPa,泊松比为 0.33,弹性模量为 68.9 GPa。为便于制作及安装,模型桩选用分段式,共分为 4 段,各段之间采用螺纹连接。本次试验所用模型桩的实拍图如图 5 所示。



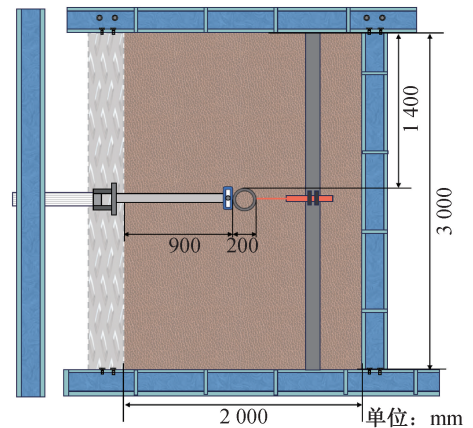
图 5 试验所用模型桩实拍图

当桩的中心到容器壁的距离超过  $5D$  ( $D$  为桩径),且桩端到容器底部的距离大于桩壁厚的 15 倍时,边界效应可以基本忽略不计<sup>[13]</sup>。本次试验的布置图如图 6 所示。将模型桩居中布置于模型箱内,

单桩埋深设定为 1.3 m,保证了模型桩底部距离容器底部大于 0.2 m(大于 15 倍壁厚),桩中心到模型箱内壁的距离大于  $5D$ 。



(a) 剖面图



(b) 平面图

图 6 模型试验布置图

#### 1.4 试验方案

本文的所有测试均在  $1g$  条件下进行。在开展水平循环加载试验前,先进行了 2 次单调静载试验。根据静载试验结果,确定了单桩的水平极限承载力 ( $H_u$ ) 为 3.60 kN,竖向极限承载力 ( $V_u$ ) 为 2.25 kN。在进行循环加载之前,竖向静载以  $0.3V_u$  的定值进行预加载,待静载达到稳定后,再进行水平循环加载。LeBlanc 等<sup>[14]</sup>的研究表明, $10^4$  次循环能够很好地表征大直径单桩在其整个使用寿命期间的承载变形特性,故试验中每小组试验的循环次数设定为  $10^4$  次。

根据 Shi 等<sup>[17]</sup>的研究,非线性波的上升主要来自二阶和三阶谐波<sup>[11]</sup>。而 Chen 等<sup>[12]</sup>的研究结果表明,三阶及更高阶的谐波力都很小,故本文仅考虑二阶谐波的影响。根据 Stokes 波理论,非线性波浪力本质上是由基频分量与高频谐波分量叠加而成,能够较为准确地反映真实非线性波浪荷载。基于经典的 Stokes 二阶波理论和 Gao 等<sup>[18]</sup>的研究,通过

简化设计最终得出 2 项余弦函数叠加形式的加载函数,该加载函数能够精确描述波峰陡峭、波谷平缓的真实波浪特征,最终加载函数如式(1)所示:

$$H = A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(2\omega t) \quad (1)$$

其中: $H$  为水平循环荷载, kN;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为一阶和二阶谐波荷载幅值, kN;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为水平循环加载频率, Hz;  $t$  为时间, s。

为检验本文采用的加载波形与其他常用加载波形(如正弦波)之间的差异,绘制了时域波形对比曲线。为了消除初始相位不同带来的干扰,在绘图前已将常用的正弦波平移至与本文加载波形相同的相位起点。不同非线性强度下的时域波形对比曲线如图 7 所示,从图中可以看出,当非线性较弱时,本文采用的加载波形与其他常用加载波形之间拟合程度较高, $R^2$  达到了 0.99,能够以高相似度涵盖其他常用加载波形。当非线性较强时,本文采用的加载波形所包含的高频畸变信息,用其他常用加载波形难以完全模拟,此时二者之间相似度有了明显削弱, $R^2$  仅达到了 0.92。综上所述,本文采用的加载波形能够较好地模拟真实波浪条件,且与其他常用波形具有较高相似度。

为了便于后续分析,定义了一阶谐波幅值比  $\zeta$  和二阶谐波幅值比  $\eta$ ,如式(2)所示:

$$\begin{cases} \zeta = \frac{A_1}{H_u} \\ \eta = \frac{A_2}{A_1} \end{cases} \quad (2)$$

参考 Zhang 等<sup>[19]</sup>的研究,试验分别取  $\zeta$  为 0.1、0.2 和 0.3。为了对比研究  $\eta$  的影响,根据 Stokes 二阶波理论,并考虑水深分别覆盖浅水及深水情况,取  $\eta$  分别为 0.01、0.06、0.10 和 0.30。根据 Liu 等<sup>[20]</sup>的研究,在风浪的共同作用下,单桩会承受 0.01~1.00 Hz 的循环荷载,而海洋环境中风荷载频率通常低于波浪荷载频率,在常规情况下,波浪荷载频率为 0.10 Hz,故选取 0.10 Hz 作为频率范围的下限。同时为了避免频率过高所引起的任何惯性效应<sup>[21]</sup>,取 1.00 Hz 的一半,即 0.50 Hz 作为频率的上限。根据频率的相似定律,本次试验中的荷载频率将落在 0.50~2.50 Hz 的范围内。最终确定了本次试验的荷载频率分别为 0.50、0.80、1.00、1.20、1.60 Hz 和 2.00 Hz,模型试验分组情况及其参数详见表 3。

表 3 模型试验分组及其参数

测试组	一阶谐波幅值比 $\zeta$	二阶谐波幅值比 $\eta$	荷载频率/Hz	循环次数/次
T1	0.1	0.01	1.0	10000
T2	0.2	0.01	1.0	10000
T3	0.3	0.01	1.0	10000
T4	0.1	0.06	1.0	10000
T5	0.1	0.10	1.0	10000
T6	0.1	0.30	1.0	10000
T7	0.1	0.01	0.5	10000
T8	0.1	0.01	0.8	10000
T9	0.1	0.01	1.2	10000
T10	0.1	0.01	1.6	10000
T11	0.1	0.01	2.0	10000

## 2 非线性荷载作用下大直径单桩累积水平位移分析

### 2.1 一阶谐波幅值比对累积水平位移的影响

当二阶谐波幅值比  $\eta = 0.01$ 、荷载频率  $f = 1.0$  Hz 时,不同一阶谐波幅值比下的累积水平位移随循环次数的变化如图 8 所示。由图 8 可以看出:不同一阶谐波幅值比  $\zeta$  下累积水平位移均随循环次数的增加而增加,且在加载的前期增加更快。随着加载次数的增加,位移增速逐渐减小并趋于稳定,这与高

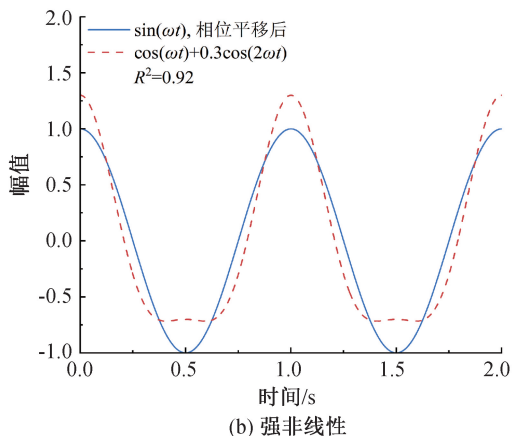
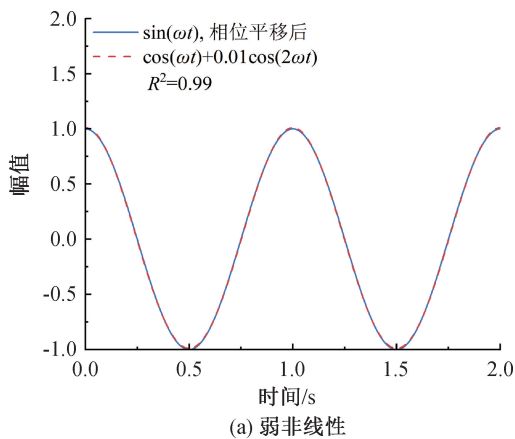


图 7 时域波形对比曲线

畅等<sup>[4]</sup>的试验结果一致。从图 8 还可看出,累积水平位移随着一阶谐波幅值比的增加而增加。当一阶谐波幅值比由 0.1 分别增加至 0.2 和 0.3 时,10000 次循环后的累积水平位移由 2.21 mm 分别增加至 4.48 mm 和 6.33 mm,增幅分别达到了 102.71% 和 186.43%。产生以上现象的原因如下:循环初期,土体在循环荷载作用下,塑性位移迅速累积,但随着循环的推进,土体逐渐达到循环安定状态,位移累积逐渐趋于稳定;随着加载幅值的增大,循环荷载对土体造成的扰动将增加,引起了更大的累积水平位移<sup>[6]</sup>。

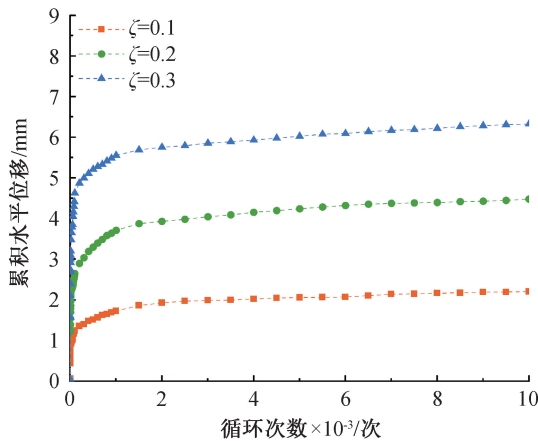


图 8 不同一阶谐波幅值比下大直径单桩累积水平位移随循环次数的变化曲线

## 2.2 二阶谐波幅值比对累积水平位移的影响

当一阶谐波幅值比  $\zeta=0.1$ , 荷载频率  $f=1.0$  Hz 时,不同二阶谐波幅值比下累积水平位移随循环次数的变化如图 9 所示。由图 9 可以看出,累积水平位移随着二阶谐波幅值比的增加而增加。具体而言,当二阶谐波幅值比由 0.01 分别增加至 0.06、0.10 和 0.30 时,10000 次循环后的累积水平位移分别由 2.21 mm 增加至 2.47、2.67 mm 和 3.34 mm,增幅分别为 11.76%、20.81% 和 51.13%。该趋势反映了二阶谐波引入的波形畸变效应。从非线性波动理论角度,Lund<sup>[22]</sup>的研究表明:二阶谐波的引入会对一阶响应产生幅值调制作用,使得总响应波形相较于线性正弦波发生明显畸变,表现为波峰变尖与波谷的钝化,增强波形的非对称性。波谷区域的钝化使得卸载阶段延长,应力释放不充分,引起塑性位移累积的增加;同时,非线性波引起的荷载非对称性也会使土体中孔隙水压力振幅提高<sup>[23]</sup>,对土体造成更大的扰动,引起累积水平位移的增加。基于以上分析,在波浪荷载非线性显著的海域进行单桩设计时,建议在传统累积变形计算的基础上,引入 1.2~1.5 的波形畸变放大系数,以充分预留变形安全裕度。

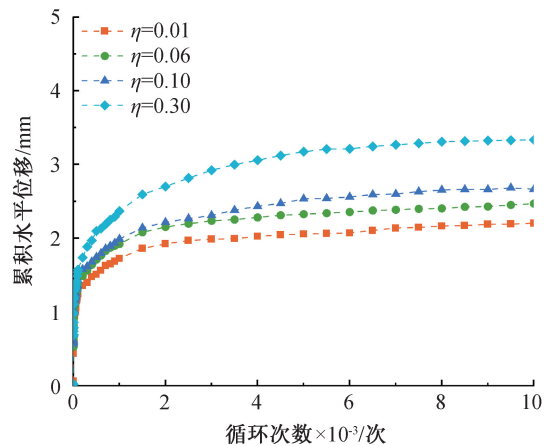


图 9 不同二阶谐波幅值比下大直径单桩累积水平位移随循环次数的变化曲线

## 2.3 荷载频率对累积水平位移的影响

当一阶谐波幅值比  $\zeta=0.1$ , 二阶谐波幅值比  $\eta=0.01$  时,不同加载频率下的累积水平位移随循环次数的变化如图 10 所示。由图 10 可以看出,累积水平位移随循环加载频率的增加而增加。循环 10000 次时,荷载频率为 0.5、0.8、1.0、1.2、1.6 Hz 和 2.0 Hz 下的累积水平位移分别达到了 1.47、1.90、2.21、2.34、2.56 mm 和 2.86 mm。产生以上现象的原因如下:在较低的荷载频率下,单次加载持续时间较长,土体中产生的超静孔隙水压力得以部分消散,有效应力水平得到一定程度的恢复,塑性变形受限;随着加载频率的升高,荷载变化加快,循环间隔显著缩短,土体中产生的超静孔隙水压力在循环加载过程中难以消散且在循环过程中不断累积,加剧了土体的软化<sup>[24]</sup>。有效应力的持续降低,土体刚度和抗剪强度逐步衰减,引起了更大的水平位移。因此,在实际工程中,即便在一阶、二阶谐波较小的情况下,仍应关注高频荷载对孔隙水压力累积和长期位移累积的不利影响。

为了进一步探究各荷载因素对累积水平位移的影响程度,选取了循环 10000 次时的累积水平位移作为响应指标,采用灰色关联度分析方法对各因素进行了重要性排序。以表 3 中的 11 组工况为样本,构造了灰色关联分析序列,其中:将累积水平位移作为参考序列,将一阶谐波幅值比  $\zeta$ 、二阶谐波幅值比  $\eta$  以及荷载频率  $f$  分别组成比较序列。灰色关联度采用式(3)计算:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\delta_{\min} + \rho \delta_{\max}}{\delta_i(k) + \rho \delta_{\max}}, n = 11 \quad (3)$$

其中: $\gamma_i$  为第  $i$  个比较序列与参考序列之间的关联度; $n$  为样本数量; $\delta_i(k)$  为参考序列与第  $i$  个比较

序列在第  $k$  个样本处的绝对差(差序列);  $\delta_{\min}$ 、 $\delta_{\max}$  分别为所有差序列中的最小值和最大值;  $\rho$  为分辨率系数,取 0.5。

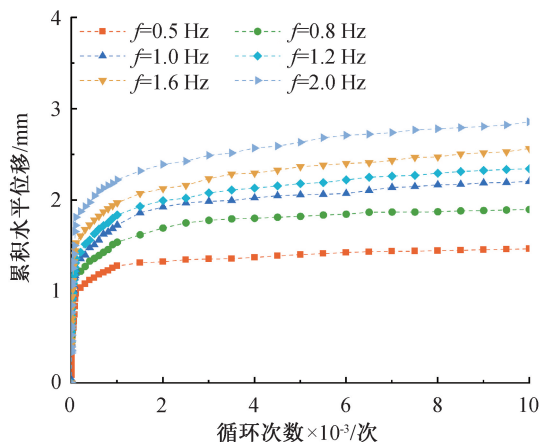


图 10 不同荷载频率下大直径单桩累积水平位移随循环次数的变化曲线

计算结果如图 11 所示,从图中可以看出,3 个荷载因素与累积位移之间均具有较强的关联度,其中:一阶谐波幅值比  $\zeta$  的关联度最大,荷载频率  $f$  次之,二阶谐波幅值比  $\eta$  的关联度最小。

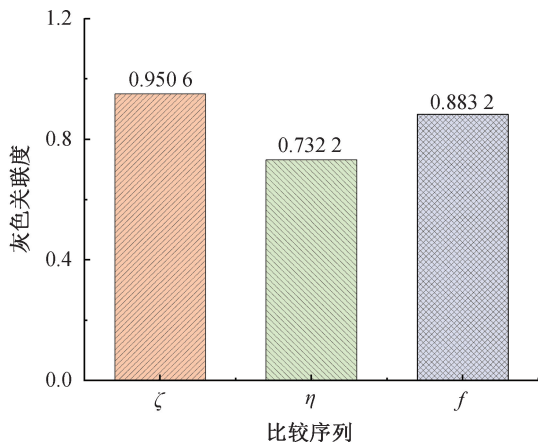


图 11 荷载因素与累积水平位移的灰色关联度分析柱状图

### 3 非线性荷载作用下大直径单桩卸载刚度分析

在循环荷载下土体的刚度将发生显著变化<sup>[25]</sup>,而卸载刚度可以更好地反映大直径单桩在循环荷载下的承载变形特性<sup>[9]</sup>。本文采用卸载刚度作为评估大直径单桩刚度变化的主要指标。卸载刚度( $K_U$ )可用式(4)<sup>[9]</sup>计算:

$$K_U = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (4)$$

其中: $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$  分别为单个循环过程中的最大和最小荷载,kN; $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$  分别为单个循环过程中的最

大和最小位移,mm。

需要特别注意的是,高频谐波的叠加会使加载曲线的波形在波谷处呈现出如图 12 所示的非单调“w”形波动特征,此时对于  $F_{\min}$  和  $y_{\min}$  的取值,若直接选取绝对极小值,不同工况下的取值会发生相位偏移,即不同工况下的取点时间不一致,缺乏可比性。故本文在计算卸载刚度时, $F_{\min}$  和  $y_{\min}$  的取值均选取基频波谷时刻(即“w”形波动的对称轴位置)所对应的荷载值和位移值。

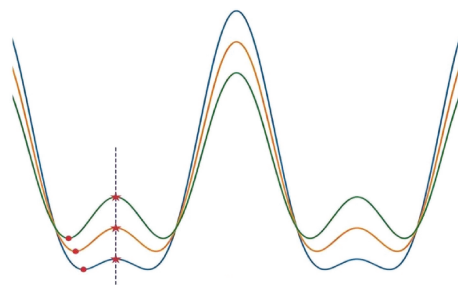


图 12 不同工况下的加载波形示意曲线

#### 3.1 一阶谐波幅值比对卸载刚度的影响

当二阶谐波幅值比  $\eta=0.01$ ,荷载频率  $f=1.0$  Hz 时,不同一阶谐波幅值比下卸载刚度随循环次数的变化曲线如图 13 所示。由图 13 可以看出:不同一阶谐波幅值比下的卸载刚度均随循环次数的增加而逐渐降低,且刚度的衰减在循环前期更快,随着循环次数的增加,刚度衰减逐渐趋于稳定;在相同循环次数下,卸载刚度随着一阶谐波幅值比的增加而降低。如循环 10000 次时,一阶谐波幅值比为 0.1、0.2 和 0.3 下的卸载刚度分别为 0.26、0.25 MN/m 和 0.24 MN/m。产生以上现象的原因如下:大直径单桩在循环荷载作用下的刚度退化主要是由土体的塑性变形引起的<sup>[26]</sup>,循环初期塑性位移随循环次数逐渐累积,但随着循环的进行,土体逐渐达到稳定状态,卸载刚度衰减速率减缓并趋于稳定;更大的水平循环荷载将会对土体造成更大的扰动<sup>[6]</sup>,引起更显著的塑性变形,加剧卸载刚度的退化。

#### 3.2 二阶谐波幅值比对卸载刚度的影响

当一阶谐波幅值比  $\zeta=0.1$ ,荷载频率  $f=1.0$  Hz 时,不同二阶谐波幅值比下卸载刚度随循环次数的变化曲线如图 14 所示。由图 14 可以看出,相同的循环次数下,卸载刚度随二阶谐波幅值比  $\eta$  的增加而增加。如 10000 次循环时,二阶谐波荷载比为 0.01、0.06、0.10 和 0.30 下的卸载刚度分别为 0.26、0.27、0.28 MN/m 和 0.36 MN/m。产生以上现象的原因如下:一方面高频二阶谐波的增加将引入不对称切应力,加速排水过程和有效应力的转

移,促进循环加载过程中固结的发生<sup>[27]</sup>。Lai 等<sup>[21]</sup>的研究也明确表明,循环荷载过程中刚度弱化会在固结过程中得到恢复。另一方面,二阶谐波使波谷钝化,呈现“w”形特征,单桩在卸载阶段将承受小幅加卸载循环。Hu 等<sup>[28]</sup>的研究表明,土体在循环荷载期间频繁发生小幅周期性位移将加速孔隙水压力累积,在后期孔隙水压力消散后,土体刚度因再固结而增强。综上所述,二阶谐波并非仅通过加剧累积变形对桩-土体系造成影响,其引入的高频荷载与非对称特征还可能通过促进固结,在一定条件下提高体系的刚度。在软黏土中单桩的循环受荷问题分析与评估中,应充分考虑高频谐波分量的影响。

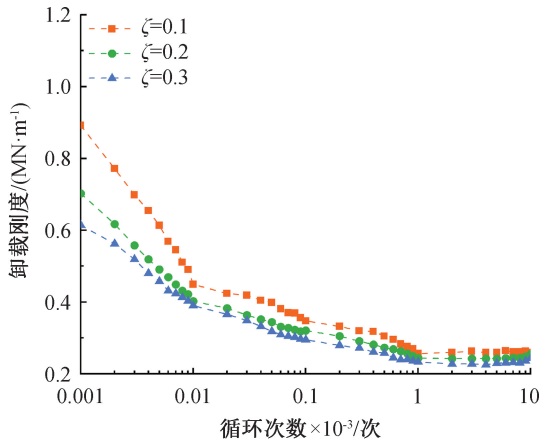


图 13 不同一阶谐波幅值比下大直径单桩卸载刚度随循环次数的变化曲线

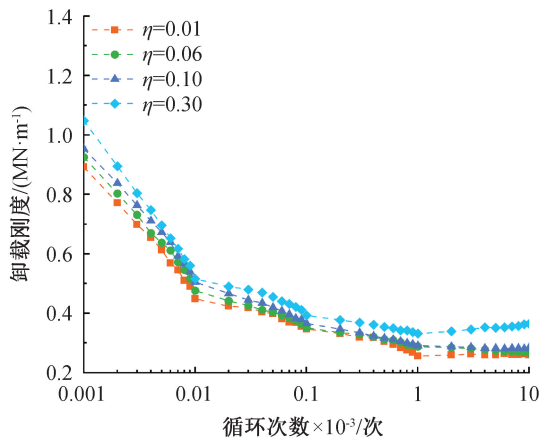


图 14 不同二阶谐波幅值比下大直径单桩卸载刚度随循环次数的变化曲线

### 3.3 荷载频率对卸载刚度的影响

当一阶谐波幅值比  $\zeta = 0.1$ , 二阶谐波幅值比  $\eta = 0.01$  时,不同加载频率下卸载刚度随循环次数的变化曲线如图 15 所示。由图 15 可以看出,在不同的循环加载阶段,卸载刚度随荷载频率的变化趋势有所不同。在循环加载前期(前 10 次循环),卸载

刚度随荷载频率的增加而增加,而后续卸载刚度随循环次数的衰减程度也增加;在循环后期,相同的循环次数下,卸载刚度随荷载频率的增加而降低。如循环 10000 次时,荷载频率为 0.5、0.8、1.0、1.2、1.6 Hz 和 2.0 Hz 下的卸载刚度分别由初始的 0.70、0.81、0.89、0.91、1.03 MN/m 和 1.16 MN/m 衰减至 0.33、0.31、0.26、0.23、0.20 MN/m 和 0.17 MN/m, 衰减幅度分别达到了 52.86%、61.73%、70.79%、74.73%、80.58% 和 85.34%。产生以上现象的原因如下:加载初期随着加载频率的增加,超静孔隙水压力迅速累积,高频二阶谐波的存在加速了超静孔隙水压力的消散。孔隙水压力消散后,土体刚度因再固结而增加。随着循环荷载对土体的持续扰动,超静孔隙水的耗散速率最终小于加载频率<sup>[21]</sup>,引起了更大的刚度衰减。

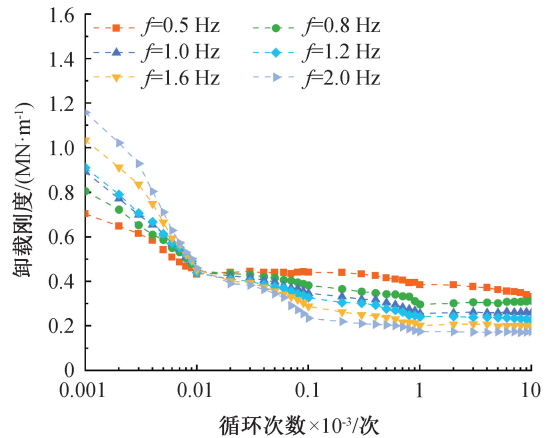


图 15 不同荷载频率下大直径单桩卸载刚度随循环次数的变化曲线

## 4 结论

本文通过一系列室内模型试验,系统分析了非线性波浪荷载作用下大直径单桩累积水平位移及刚度的变化规律,主要结论如下:

a)非线性波浪荷载下,随着一阶谐波幅值比、二阶谐波幅值比及循环荷载频率的增加,大直径单桩的水平位移累积程度均会增加。累积水平位移在循环加载前期增加较快,随后逐渐趋于稳定。该结果表明,荷载幅值、高频谐波及频率的增加均会加剧累积水平位移的发展。其中,当二阶谐波幅值比由 0.01 分别增加至 0.06 和 0.30 时,10000 次循环后的累积位移分别增加了约 12% 和 51%。在波浪荷载非线性显著的海域进行单桩设计时,建议在传统累积变形计算的基础上,引入 1.2~1.5 的波形畸变放大系数,以充分预留变形安全裕度。

b)非线性波浪荷载下,大直径单桩的卸载刚度随循环次数逐渐衰减。相同循环次数下,卸载刚度随着一阶谐波幅值比的增加而降低,随着二阶谐波幅值比的增加而增加。当二阶谐波幅值比由 0.01 分别增加至 0.06 和 0.30 时,10000 次循环后的卸载刚度值分别增加了约 4% 和 39% 这表明,因此在实际工程中应充分考虑高频谐波对卸载刚度产生的影响,单纯考虑刚度衰减而忽略谐波作用引发的循环硬化效应,可能使设计过于保守。

c)随着循环次数的持续增加,大直径单桩的卸载刚度受荷载频率的影响显著。当荷载频率达到 2.0 Hz 时,10000 次循环后,卸载刚度的衰减程度达到了 85%。这说明高频循环荷载加剧了土体的软化,对软黏土中大直径单桩的承载性能具有显著影响。工程中进行长期动力响应分析时,应充分评估高频荷载对刚度衰减的影响。

d)灰色关联度分析表明,一阶谐波幅值比对累积水平位移的影响最大,荷载频率次之,二阶谐波幅值比的影响在三者之中最弱。但三者与累积水平位移之间的关联度均较为显著,工程设计中不应忽略。

本文提出了一种新的加载波形,并基于此开展了一系列室内模型试验,系统揭示了非线性波浪荷载作用下大直径单桩累积水平位移及卸载刚度的变化规律。研究结果可为非线性荷载中高频谐波效应研究提供试验依据,弥补了现有研究的不足,还可为实际工程中大直径单桩在复杂海洋环境下的安全评估与设计优化提供参考。

## 参考文献:

- [1] 周绪红,王宇航,邓然. 海上风电机组浮式基础结构综述[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 100-105.
- [2] 梁超,孙良伟,刘润,等. 基于泥面位移标准的海洋钢管桩基础水平承载力研究[J/OL]. 太阳能学报, 2025; 1-8. (2025-06-23)[2025-10-08]. <https://link.cnki.net/doi/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-2255>.
- [3] 何奔,胡俊,徐普,等. 海上风电大直径中空夹层钢管混凝土组合单桩基础截面尺寸多目标优化[J/OL]. 海洋工程, 2025; 1-9. (2025-05-15)[2025-10-08]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1423.P.20250515.1438.002>.
- [4] 高畅,郭炳川,唐广银,等. 软黏土中海上风电大直径单桩累积变形研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2025, 42(4): 16-23.
- [5] Liu J W, Xu S T, Mao H F, et al. High-frequency resonance of bottom-fixed monopile-supported offshore wind turbines under nonlinear waves[J]. Ocean Engineering, 2025, 340; 122355.
- [6] 高鲁超,戴国亮,张继生,等. 软黏土大直径单桩水平循环加载离心机模型试验[J]. 岩土力学, 2024, 45(8): 2411-2420.
- [7] 邱子宁,许成顺,杨钰荣,等. 不同黏性土循环弱化特征及海上风力机桩基累积位移规律分析[J]. 太阳能学报, 2025, 46(5): 619-628.
- [8] 龙先润. 海上风电大直径单桩基础水平向承载特性研究[J]. 中国新技术新产品, 2024(19): 95-97.
- [9] 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.
- [10] Wang Y Q, Xu F Y, Zhang Z B. Numerical simulation of inline forces on a bottom-mounted circular cylinder under the action of a specific freak wave[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7:585240.
- [11] Zeng X M, Shi W, Feng X Y, et al. Investigation of higher-harmonic wave loads and low-frequency resonance response of floating offshore wind turbine under extreme wave groups[J]. Marine Structures, 2023, 89: 103401.
- [12] Chen L F, Zang J, Taylor P H, et al. An experimental decomposition of nonlinear forces on a surface-piercing column: Stokes-type expansions of the force harmonics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 848: 42-77.
- [13] 戴朴修,刘开富,谢新宇,等. 软基中多向受荷大直径单桩桩土相互作用试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(3): 570-578.
- [14] LeBlanc C, Houlsby G T, Byrne B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading[J]. Géotechnique, 2010, 60(2): 79-90.
- [15] Buckingham E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations[J]. Physical Review, 1914, 4(4): 345-376.
- [16] Buckingham E. The principle of similitude[J]. Nature, 1915, 96(2406): 396-397.
- [17] Shi W, Zeng X M, Feng X Y, et al. Numerical study of higher-harmonic wave loads and runup on monopiles with and without ice-breaking cones based on a phase-inversion method [J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113221.
- [18] Gao X, Ma X Z, Li P D, et al. Nonlinear analytical solution for radiation stress of higher-order Stokes waves on a flat bottom[J]. Ocean Engineering, 2023, 286; 115622.
- [19] Zhang X L, Liu C R, Wang P G, et al. Experimental simulation study on dynamic response of offshore wind power pile foundation under complex marine loadings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 156; 107232.
- [20] Liu K F, Li Y X, Feng W Q, et al. Physical model tests on the lateral cyclic behaviour of monopile in marine clay[J]. Ocean Engineering, 2025, 329; 121114.
- [21] Lai Y Q, Wang L Z, Hong Y, et al. Centrifuge modeling of the cyclic lateral behavior of large-diameter monopiles in soft clay: Effects of episodic cycling and reconsolidation[J]. Ocean Engineering, 2020, 200; 107048.
- [22] Lund F. Second and third harmonic generation of acoustic waves in a nonlinear elastic solid in one space dimension[J]. Journal of Sound and Vibration, 2025, 600; 118895.

- [23] Zhang Z Q, Zhou B H, Li X B, et al. Second-order Stokes wave-induced dynamic response and instantaneous liquefaction in a transversely isotropic and multilayered poroelastic seabed [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1082337.
- [24] 丁智, 郑勇, 魏新江, 等. 不同加载频率及循环应力水平对人工冻融软土动力特性影响试验研究[J]. *铁道学报*, 2020, 42(3): 122-128.
- [25] Liu Z Y, Qian J G, Yaghoubi M, et al. The effects of initial static deviatoric stress on liquefaction and pre-failure deformation characteristics of saturated sand under cyclic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 149: 106870.
- [26] 曹光伟, 欧强, 丁选明, 等. 基于有效应力法的不排水条件下大直径管桩水平循环动力响应数值分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(5): 1905-1915.
- [27] Jeng D S. Effects of wave non-linearity on residual pore pressures in marine sediments[J]. *The Open Civil Engineering Journal*, 2008, 2(1): 63-74.
- [28] Hu A F, Chen Y Y, Wu J T, et al. Experimental study on small-strain stiffness response of soil around monopile under horizontal cyclic loading considering degradation and reconsolidation effects [J]. *Ocean Engineering*, 2026, 343: 123361.

## 团队介绍

刘开富教授团队专注于软黏土力学、桩网复合地基和桩基工程等领域的研究,致力于解决软土地区交通基础设施沉降控制、海洋桩基工程安全等关键难题。团队在国家自然科学基金及浙江省自然科学基金项目等项目的资助下,经过 10 余年的科技攻关,提出了交通荷载下桩网复合地基长期沉降计算方法,揭示了循环荷载下软土地区桩网复合地基的长期沉降机理;提出了循环荷载下海上风电大直径单桩累积变形预测公式,为复杂海洋环境下大直径单桩设计及运营提供依据。团队获省部级科技进步奖 3 项,已授权及申请发明专利 10 余项,出版学术专著 1 部,主编教材 1 部,并在国内外发表学术论文 100 余篇。

(责任编辑:康 锋)