

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240823002

冲刷环境下四桩导管架基础长期循环承载变形特性试验研究*

丁志杰¹, 张浩¹, 杨爱武¹, 郑瀚波², 李林³, 沈盼盼⁴

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
3. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

摘要: 随着风电场场址水深和风机单机容量的逐渐增大, 四桩导管架基础在海上风电中的应用越来越广泛, 确保其在复杂海洋环境的服役安全性已成为我国风电行业亟待解决的关键问题之一。针对砂土中四桩导管架基础-风机结构体系, 考虑风、浪、流带来的局部冲刷和循环荷载联合作用, 设计开展了一系列局部冲刷条件下的长期水平风浪组合循环加载模型试验, 关注不同循环荷载幅值下结构体系的累积倾角和自振频率, 揭示了导管架基础顶部位移随循环加载次数的发展规律, 并绘制出导管架前、后排基桩弯矩和桩身变形曲线随循环次数的演化过程。着重探讨了冲刷深度等因素对海上风机四桩导管架基础长期循环承载变形特性的影响规律, 进而拟合出适用于工程设计的冲刷环境下海上风机四桩导管架基础累积位移简化预测公式。结果表明, 冲刷将显著增大循环受荷四桩导管架基础的累积位移, 最终变形可达冲刷前的2.8倍, 且不利于整个风机结构体系的累积倾角控制; 冲刷与循环荷载的长期联合作用会削弱基础-土相互作用刚度, 改变其动力特性, 使得风机系统的自振频率有所降低, 三倍桩径冲刷深度时降幅可达10%~14%; 随着循环荷载的不断施加, 导管架基桩内力和变形逐渐增大, 最大弯矩点有向下发展的趋势, 而冲刷将加剧这一现象。

关键词: 海上风机; 四桩导管架基础; 局部冲刷; 长期循环加载; 累积变形

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0430-11

Experimental Study on Bearing and Deformation Characteristics of Four-pile Jacket Foundations under Long-term Cyclic Loading in Scour Environment

DING Zhijie¹, ZHANG Hao¹, YANG Aiwu¹, ZHENG Hanbo², LI Lin³, SHEN Panpan⁴

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China

4. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: With the rapid expansion of offshore wind farms into deeper waters and the concurrent increase in wind turbine capacities, the application of four-pile jacket foundations in offshore wind turbines has become increasingly widespread. Ensuring the service safety of these foundations in complex

* 收稿日期: 2024-08-23; 修回日期: 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008246)、中央高校基本科研业务费专项资金(2232024D-19)、上海勘测设计研究院有限公司上海海上风能资源开发利用工程技术研究中心开放课题(FNZX2023KP05)资助

作者简介: 丁志杰(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事桩土相互作用研究。E-mail: 2222180@mail.dhu.edu.cn

通信作者: 杨爱武(1971—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程研究。E-mail: wayyjk@dhu.edu.cn

marine environments has become one of the critical problems urgently to be solved in China's wind power sector. Focusing on the four-pile jacket foundation - wind turbine structural system in sand, considering the combined effects of local scour and cyclic loading caused by wind, waves, and currents, a series of long-term combined horizontal wind-wave cyclic loading model tests in local scour environment were designed and conducted. The cumulative inclination angle and natural frequency of the structural system were analyzed under different cyclic loading amplitudes, revealing the evolution patterns of displacement at the jacket foundation top with the increasing number of cycles. Furthermore, the evolution process of the bending moments and pile deformation curves of both front and rear piles of the jacket with the increasing number of cycles was plotted. The influence of factors such as scour depth on the bearing and deformation characteristics of offshore wind turbines with four-pile jacket foundations under long-term cyclic loading was examined, and a simplified prediction formula was developed to estimate the cumulative displacement of offshore wind turbines with four-pile jacket foundations under scour conditions for engineering design practice. The results demonstrated that the scour significantly increased the cumulative displacement of four-pile jacket foundations under cyclic loading, with final deformation reaching up to 2.8 times compared with that observed in unscoured conditions, thereby hindering effective control of the cumulative inclination angle of the entire wind turbine structural system. The long-term combined effects of scour and cyclic loading weakened the jacket foundation-soil interaction stiffness and altered the dynamic characteristics, consequently reducing the natural frequency of the wind turbine system. At a scour depth equal to three times the pile diameter, the reduction in frequency reached 10% to 14%. Additionally, ongoing cyclic loading gradually increased internal forces and deformation of the jacket piles, with the maximum bending moment point moving downward, a trend significantly intensified by scour. These findings offer critical insights into the design and safety assessment of offshore wind turbines in scour-prone environments.

Keywords: offshore wind turbine; four-pile jacket foundations; local scour; long-term cyclic loading; cumulative deformation

0 引 言

我国海上风电产业起步虽晚,但发展迅猛,并逐步向深水区远岸区域进军。导管架基础结构因其质量较轻、结构刚度较大、对场地条件依赖性低等特点,在深远海域得到了广泛应用^[1]。在20~25年的服役期内,风、浪等海洋环境因素将长期对导管架基础-风机结构体系施加水平方向的循环荷载,这给该结构体系的承载性能带来了极大挑战^[2];此外,海流的作用还会在导管架基桩周围形成局部冲刷坑,进而降低基础结构的稳定性^[3]。鉴于海上风机导管架基础在其服役期间需要满足严苛的承载力和变形限制要求,以保障其长期安全稳定运行^[4],则考虑上述海洋环境因素,探究导管架基础-风机结构体系承载变形特性的演化过程,对于确保风机系统正常服役显得尤为重要。

风浪等循环荷载作用下导管架基础力学响应特性近年来受到越来越多研究者的重视。B.Zhu等^[5]通过离心机试验分析了砂土中导管架基础在长期水平循环荷载作用下的承载特性,揭示了沿边长及对角线方向施加水平循环荷载时的基础荷载-位移响应机制和基桩上的内力和土抗力变化规律;D.Q.Kong等^[6]同样通过离心机试验探讨了不同循环荷载幅值、单向及双向循环荷载类型等因素对导管架基础桩土相互作用的影响。这些试验通常采用简化的环境荷载形式,并将其等效后施加于塔筒的一点。然而,在实际的海洋环境中,风、浪等荷载作用于风机基础-上部结构体系时,不仅作用位置各不相同,且风浪荷载的加载特征也存在差异^[7]。因此,Z.Guo等^[8]采用了两点加载的方式,将水平荷载分别施加在模型的上端和下端,通过试验研究了风机体系在长期循环荷载作用下的位移、自振及桩周土体的剪切应变规律。J.W.Liu等^[9]也在模型试验中采用了顶部和底部两点加载的形式,研究了不同循环荷载幅值及加载频率

对导管架基础的荷载-位移响应以及结构自振频率变化的影响。尽管如此,上述有关四桩导管架基础水平循环承载特性的研究均未考虑局部冲刷的影响,忽略了二者的联合作用。

研究表明局部冲刷将导致埋深下降,进而显著削减基础承载力^[10-11]。贺瑞等^[12]通过模型试验研究了在进行静力加载时,冲刷坑的形态变化、坡度变化等因素对导管架桩基础荷载-位移特性的影响;随后,R.He等^[13]通过半解析理论探讨了存在局部冲刷时,土体特性、桩间距、荷载频率等因素对导管架基础动力特性的影响。然而,上述研究也只单独考虑了冲刷作用,而并未关注冲刷环境下四桩导管架基础的长期循环承载变形特性。

此外,目前开展的1g模型试验或离心机试验大多只能获取有限次数循环荷载后风机基础的累积变形数据,循环次数远少于其生命周期内经历的约 10^7 次循环。因此,W.C.Li等^[14]通过总结等幅横向循环荷载对桩基变形影响的预测函数,建立了第 N 次循环后的累积位移(或累积旋转角度)响应 $y_N(\theta_N)$ 与第一次循环对应的响应 $y_1(\theta_1)$ 的比值与循环次数 N 的关系,可为预测风机体系在长周期运行时的变形趋势提供借鉴。而以此为基础,通过开展冲刷和循环荷载联合作用下导管架基础承载特性的试验研究,建立相应的导管架基础-风机结构体系长期变形预测模型,亦有助于其工程设计。

在已有研究的基础上,进一步考虑局部冲刷和水平循环荷载的长期联合作用,针对砂土地基中由基桩-导管架-上部结构组成的海上风机体系开展室内模型试验,探究了冲刷环境下多点水平循环受荷风机结构体系累积位移和自振频率的演化过程,揭示了桩身弯矩及其水平变形随循环次数的发展规律,进而结合试验结果与经验公式,提出了用于预测冲刷和循环荷载联合作用下导管架基础长期累积变形的预测公式。

1 模型试验

1.1 试验模型与材料

S.Bhattacharya等^[15]总结的基于无量纲参数的相似比例设计关系能够确保模型试验条件与实际工况的相似性。具体包括以下几个方面:

1.几何相似:模型的几何尺寸,如桩径 D 、桩长 L 等,以及导管架和上部塔筒的几何尺寸,对结构性能

有重要影响。在设计时,模型的几何尺寸需要满足特定的比尺关系,例如原型与模型的长径比 L/D 等。

2.质量相似:海上风机从上到下依次由发电机组、塔筒、导管架和桩基础等结构组成,各部分质量不同。设 m_1 为发电机组的总质量, m_2 为塔筒及导管架的质量, m_3 为桩的质量。 $m_1:m_2:m_3$ 需要满足特定的相似设计关系。

3.土体应变相似:模型的材质以及施加的荷载大小对结构运行产生影响。弯矩 M 或力 P 与桩径 D 的关系式 M/GD^3 和 P/GD^2 满足特定的相似设计关系,其中 G 为砂土地基的剪切模量。

4.频率相似:海上风机在运行过程中,结构自振频率通常位于 $1P$ 和 $3P$ 之间以满足“刚-柔”设计需求。在进行模型试验设计时,所施加荷载的频率与结构体系自振频率的比值 F_f/F_n 也需要满足相应的相似设计关系。

在本次试验中,采用的海上风机(Offshore Wind Turbine, OWT)模型比尺为1:100。根据前述的相似比例准则,导管架-风机模型各部分几何参数见表1,无量纲参数的相似设计与其他研究中一些对比情况见表2。

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

部分	长度/mm	直径/mm	壁厚/mm	质量/kg
顶部结构	\	\	\	1.52
塔架	700	50	1	1.55
导管架	300	5-10	2	
桩	500	25	1	0.66

注:导管架长度数值为竖直高度

表2 无量纲模型和原型

Table 2 Dimensionless models and prototype

无量纲组	文献[9]	文献[12]	本文模型
模型比例	1:50	\	1:100
L/D	21	13	20
L/b	5.2	3	3.26
H/D	26	24	28
$m_1:m_2:m_3$	0.72:2.42:1	1.9:10.8:1	2.3:1.55:1
$M/GD^3 \cdot 10^{-3}$	42.6/85.1/128	48	16~80
$P/GD^2 \cdot 10^{-4}$	\	7.1	3.13~15.6
F_f/F_n	0.6-1.2	\	0.29, 0.71

注: G 为土体剪切模量; L 、 D 、 b 分别为基桩的桩长、桩径、壁厚; H 为塔筒的高; M 、 P 分别为所加荷载的弯矩、力; F_f 、 F_n 分别为所加荷载和结构自振的频率; m_1 、 m_2 、 m_3 分别为发电机组、塔筒及导管架、桩基的质量

试验在干砂中进行。试验前,均匀配置的干砂被分层填入模型箱中并压实。试验中使用的砂土

颗粒级配曲线如图1所示,测得中值粒径为0.23 mm,干密度为1.59 g/cm³,砂土的剪切模量通过剪切波速法测量计算为18 MPa,其余砂土参数见表3。砂土剪切模量的测量试验原理如图2所示,将两个加速度计间隔 $l=40$ cm埋入相同深度的砂土中。在两加速度计同侧上方的一定高度处释放金属重物使其做自由落体运动,并与砂土表面的金属板碰撞。产生的剪切波先后经过两个加速度计,并产生如图3所示的剪切波图形。根据时间差值和距离参数计算得到剪切模量 G 。

$$v_s = l / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$G = \rho v_s^2 \quad (2)$$

式中, v_s 表示波速; ρ 表示砂土的密度; t_1 、 t_2 表示两个加速度计接收到剪切波的相对时间, $t_1=0.0070$ s, $t_2=0.0105$ s。

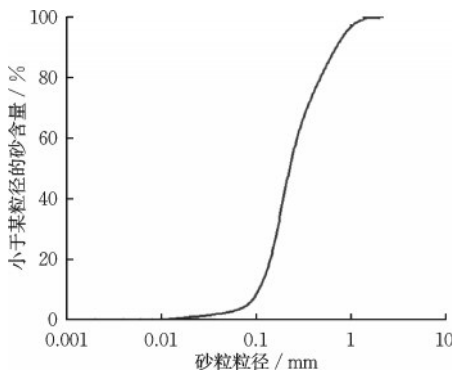


图1 砂土颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of sandy soil

表3 砂土参数指标

Table 3 Parameters of sandy soil

物理参数	值
比重 G_s	2.62
最大孔隙比 e_{max}	0.80
最小孔隙比 e_{min}	0.59
中值粒径 d_{50} /mm	0.23
干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	1.59
相对密度 D_r	0.69
剪切模量 G /MPa	18

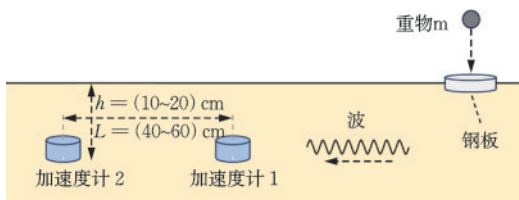


图2 剪切波速法原理

Fig.2 Schematic diagram of shear wave velocity method

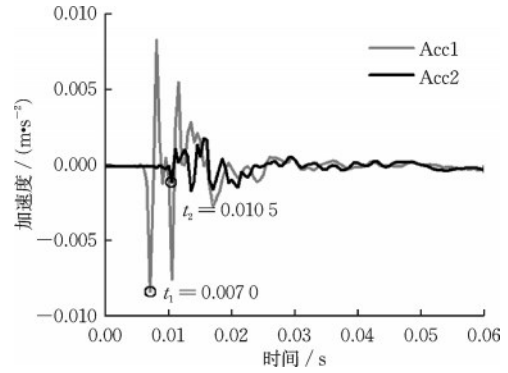


图3 剪切模量测定时的加速度信号

Fig.3 Acceleration signal during shear modulus determination

1.2 加载装置

作用在模型结构上的循环荷载由齿轮循环加载装置在模型的特定高度施加。齿轮循环加载装置的工作原理如图4所示,该装置包含一个电机驱动的主动小齿轮以及两个对称布置的从动大齿轮,在这两个大齿轮上可以放置不同质量的质量块。在齿轮转动过程中会产生向心力。通过调节电机的输入电压来改变电机的转速,进而调整所加荷载的频率和幅值。此外,荷载幅值还可以通过调节所加质量块的质量来进一步调整。

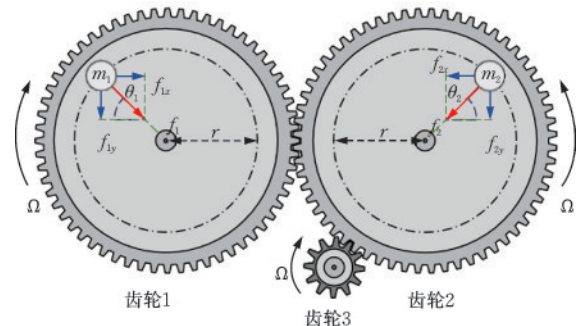


图4 齿轮加载装置示意

Fig.4 Schematic diagram of gear loading device

注: $f_n = mr\omega^2 = 4\pi^2mf^2r$; $f_x = f_n \cdot \cos \theta$; $f_y = f_n \cdot \sin \theta$

本次试验采用了两个齿轮加载装置,一个置于导管架顶部,同时充当顶部集中质量;另一个置于导管架上方150 mm处,用于模拟风、波浪的联合作用。作用在海上风机结构上的复杂荷载力可以简化为简单的正弦波形式的力。波浪荷载的频率较高,如图5(a)所示;风荷载的频率较低,如图5(b)所示;二者的组合荷载可以视为如图5(c)所示的组合荷载,可以看出即使在组合之后,荷载仍表现出周

期变化的趋势。

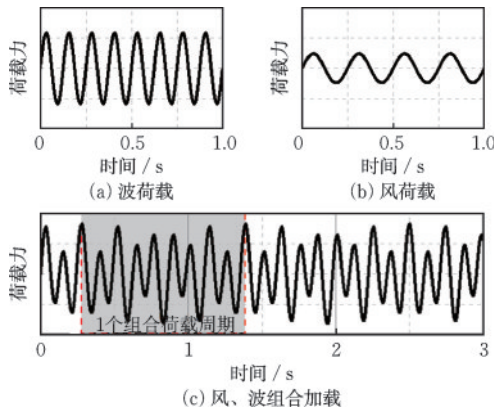


图5 齿轮加载装置荷载—时程

Fig.5 Load-time history curve of gear loading device

1.3 试验布置

OWT模型由基桩、导管架、塔筒以及顶部集中质量组成,前三部分均采用铝合金材料,顶部质量块由顶部加载装置充当。模型被安置在尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)的模型箱中间位置,桩间距为 240 mm ($9.6D$),桩底至模型箱底部的距离为 380 mm ($15.2D$),桩身距离模型箱边壁 375 mm ($15D$),具体的布置示意如图6所示,可以有效避免边界条件对模型试验的影响。

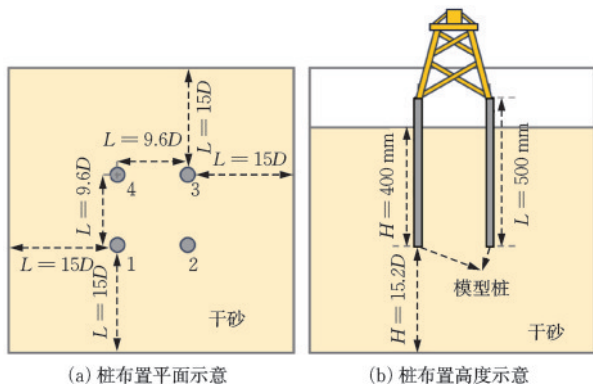


图6 模型桩布置

Fig.6 Model pile layouts

试验通过图7中布置的测量监测仪器,采集了循环荷载作用下OWT模型的横向位移、结构自振频率、以及桩身弯矩等数据。利用DH低频压电式加速度传感器测量时域变化信号,并通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)处理将采集到的时域信号转化为频率能谱图,从而获取结构的自振频率参数。利用OPTEX

CD33-120NV激光位移计监测模型结构的水平位移。所测得的位移信号、加速度信号、受力信号等数据由DH5922D动态采集系统记录。采用全桥连接的BF1K-3AA应变片记录桩身应变的发展,测量数据通过YBY-4010动静态应变测试分析系统进行采集。

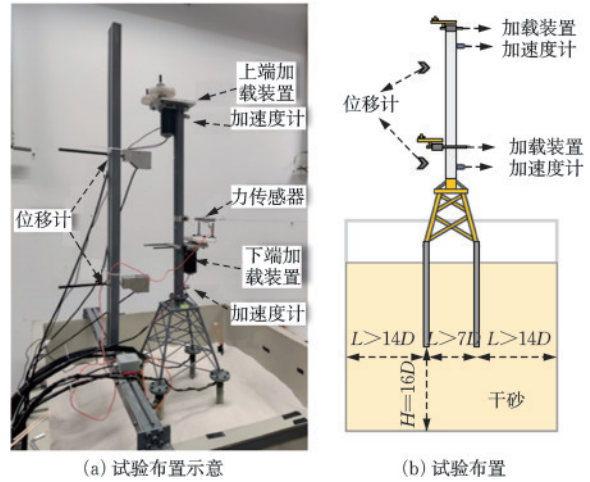


图7 试验布置

Fig.7 Test layouts

1.4 试验工况设计

本次试验主要分为静载试验和循环加载试验两部分。通过静载试验获取OWT模型的极限承载力及倾覆弯矩,并作为后续循环加载试验中循环荷载幅值的取值依据。通过滑轮组和水平布置的钢丝绳装置来给模型施加横向荷载。通过调节悬挂在滑轮下的质量块,实现对模型的逐级加载。每级加载后,荷载维持 10 min 以确保变形达到稳定状态。然后重复上述过程,并持续监测模型的倾斜情况,直到倾斜角度超过最大允许值。

在循环加载试验中,设置了不同循环幅值的循环荷载工况,从中选择累积变形显著的组别进行后续研究。随后重点探究了局部冲刷与循环荷载联合作用对累积倾角的发展、自振频率的迁移以及桩身内力变化的影响。已有研究表明桩基的最大局部冲刷深度通常为桩径的 1.5 倍左右^[13];因此试验中考虑了三种不同的冲刷深度,即 S/D 比值分别为 $1, 2$ 和 3 ,如图8所示。根据文献[12]中的冲刷坑坡度试验结果,本试验将冲刷坑坡度设定为 23° 。各试验组的具体参数见表4。

结构的自振频率是指结构体系固有的振动频

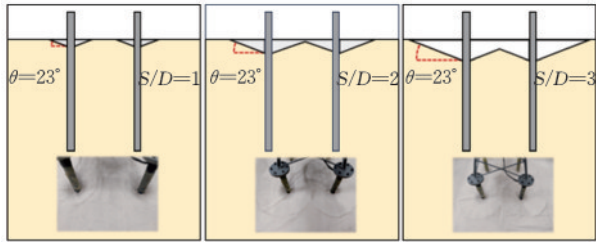


图8 冲刷坑示意图

Fig.8 Schematic diagram of scour holes

表4 试验方案

Table 4 Test schemes

编号	循环荷载比	S/D
C1	0.2	0
C2	0.3	0
C3	0.2	1
C4	0.2	2
C5	0.2	3
C6	0.3	1
C7	0.3	2
C8	0.3	3

率,是结构体系的基本特性之一,可以通过傅里叶幅值谱反映结构振动响应的频率^[16]。在试验过程中,在塔筒的顶部和底部安装了加速度传感器,以监测结构振动时的时域信号。在结构处于静止稳定状态时,通过轻微敲击模型的方式施加一个微小的外部激励。加速度传感器记录到了如图9所示时域加速度信号。通过对这些时域信号进行FFT,得到了如图10所示的加速度计信号频响。图10中第一个峰值对应的频率为一阶自振频率,约为13 Hz;第二个峰值对应的频率为二阶自振频率,约为49 Hz。二阶自振频率大约是一阶自振频率的5倍,这与其他学者的研究结果相符^[17-18]。

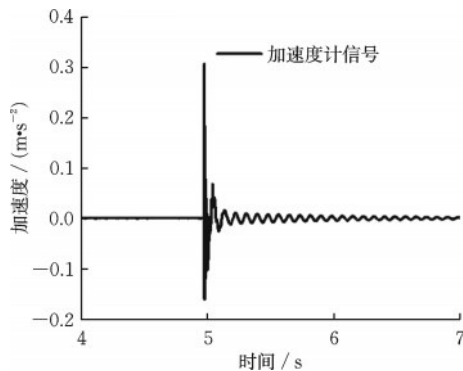


图9 时域加速度

Fig.9 Time-domain diagram of acceleration

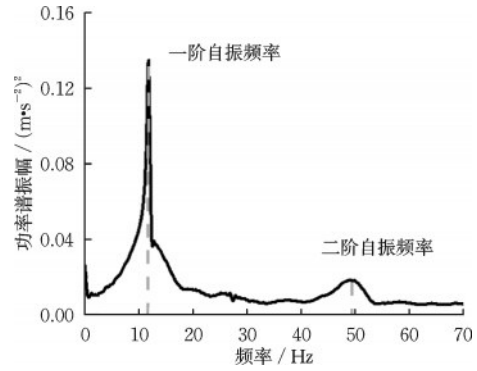


图10 加速度计信号频响

Fig.10 Frequency response diagram of accelerometer signal

2 试验结果讨论

2.1 静载试验

循环工况中的循环荷载幅值 M_{max} 和循环荷载幅值比 ξ_b 是基于静载试验的结果数据确定的。静载试验中,通过钢丝绳和滑轮组装置对风机结构体系分级施加水平静力,直至结构转角超过允许值。如图11所示,确定本试验中模型的极限倾覆弯矩为42.2 Nm。

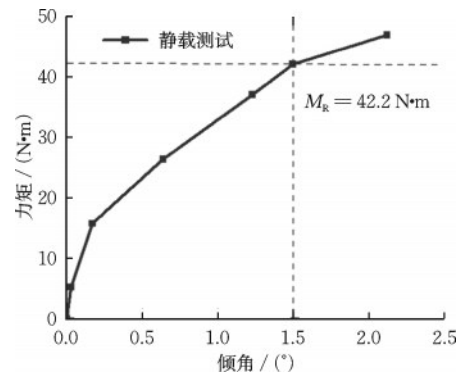


图11 静载极限承载力

Fig.11 Ultimate bearing capacity under static loading

2.2 循环荷载响应

2.2.1 累积变形变化

图12为模型在冲刷深度 S/D 分别为1、2和3时经历10万次循环过程后的荷载—累积倾角曲线。在整个加载过程中,累积倾角变化曲线可以分为快速发展和缓慢增长阶段。在大约前10 000次的循环过程中,累积倾角迅速增长;随着加载次数的增加,桩周土体逐渐致密,在循环后期,累积倾角的变

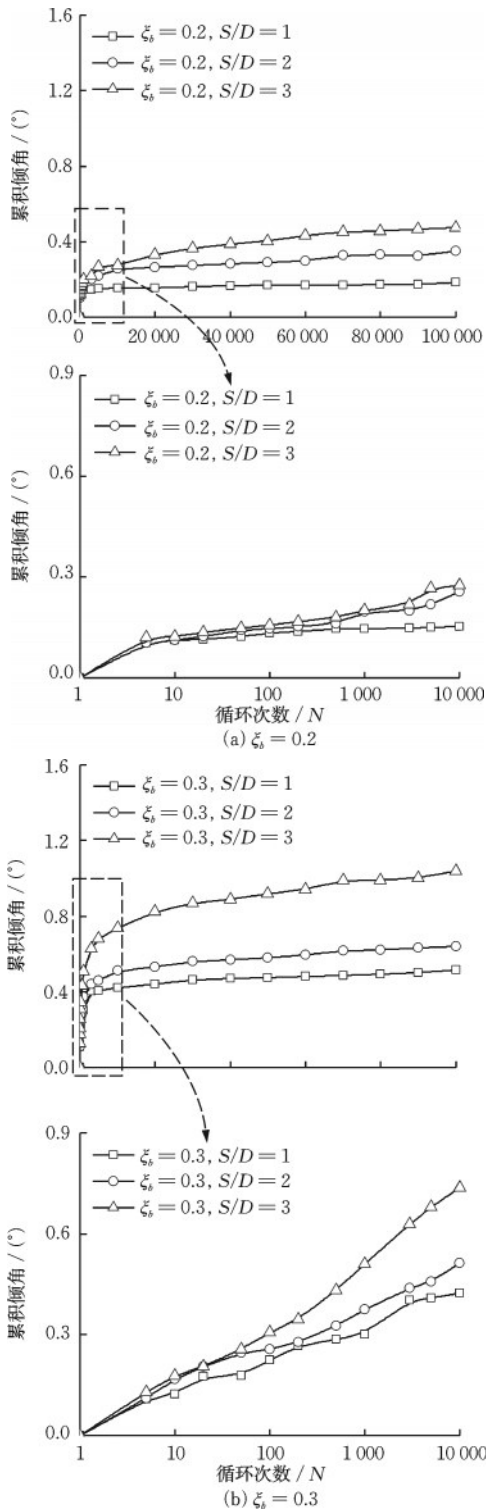


图12 冲刷深度变化时的累积倾角发展

Fig.12 Development of cumulative inclination angle with variations in scour depth

化会趋于平缓。如图12(a)所示,当 $\xi_b=0.2$ 时模型的累积倾角变化逐渐变缓,并且趋于稳定;如图12(b)所示,当 $\xi_b=0.3$ 时,在 $S/D=1,2$ 时累积倾角变化逐渐趋于稳定,而当冲刷深度发展到 $S/D=3$ 时,随着循环次数达到100 000次,风机结构累积倾角仍在

持续增大。这表明冲刷与循环加载联合作用可能导致风机在其全生命周期内产生超过规范限制的累积变形,甚至导致风机结构达到极限破坏状态。此外,当所加荷载的幅值越大,局部冲刷的深度越深时,累积倾角的变化也越明显,且其趋于稳定所需要的循环次数也越多。

图13为导管架顶部在冲刷深度 S/D 分别为1、2和3时的荷载-位移曲线。该部分的变化趋势与累积倾角的变化趋势基本吻合,直观地显示出了OWT模型在受到水平循环荷载作用时的横向位移变化趋势。如图13所示,冲刷使得累积位移大幅增长;当 $\xi_b=0.3$ 时,导管架上部最大累积位移相对于无冲刷时分别增加了1.7、2.0、2.8倍。

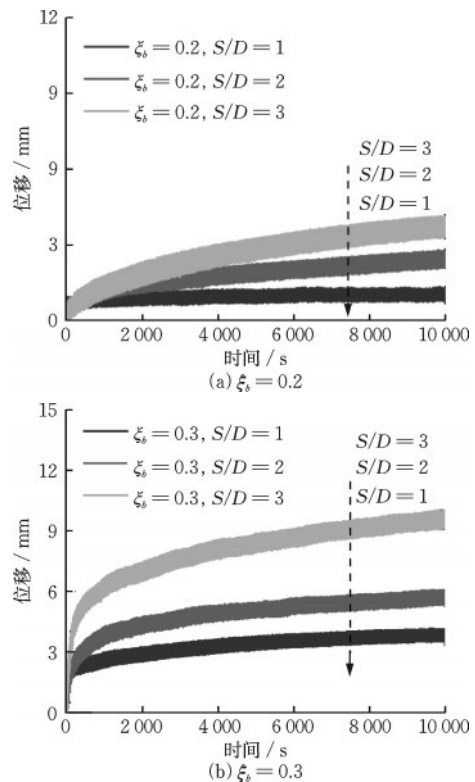


图13 冲刷深度变化时的累积位移发展

Fig.13 Development of cumulative displacement with variations in scour depth

2.2.2 风机体系自振频率变化

图14为不同冲刷深度时导管架基础-风机结构模型自振频率的变化规律。如图所示,局部冲刷坑深度的增加显著降低了体系的自振频率。当冲刷深度达到三倍桩径时,长期循环作用对风机体系的自振频率削减最为明显。在实际工程中,海上风机正常运行状态下的自振频率通常位于 $1P$ 与 $3P$ 之

间,并且这一频率范围的变化非常有限^[19]。如图14所示,在两种不同的循环幅值比下,自振频率的最大降幅为10%和14%。在循环加载的过程中,局部冲刷使模型桩基的出露高度增大,桩土相互作用的刚度降低,从而使结构的自振频率因局部冲刷深度的增加而下降,这表明对于长期服役中的海上风机结构,冲刷和循环荷载联合作用可能导致风机自振频率落入1P区间,有产生共振导致结构损伤或失效的风险。

2.2.3 桩身弯矩变化

图15为冲刷深度 S/D 变化时桩身弯矩随加载次数变化的规律。如图所示,在加载过程中最大弯矩点出现在泥面下125~175 mm ($5D\sim 7D$)处,前排桩的弯矩略大于后排桩。通过对比可知,局部冲刷使最大弯矩点下降,这与D.Q.Kong等^[6]在无冲刷离心机模型试验中提出的观点一致,即桩周土体的渐进应变软化导致最大弯矩点的深度随着 N 的增加而增大。当 $N=20\,000$ 次并继续加载时,弯矩值的生长逐渐放缓;在 $N=60\,000$ 次时,弯矩值逐渐趋于稳定;循环次数 N 变化到100 000次的过程中,两种工况下桩身弯矩最大值点的位置均大约降低了1D深度,这是因为在循环加载过程中,上部土层由于循环荷载的作用逐渐减弱并降低了该部分的承载力;同时下部土层经过荷载重分布承担了更多的荷载,使得桩土相互作用的影响范围扩大,进而引起桩上最大弯矩点位置向下移动。当冲刷与循环加载联合作用时,基桩承受的弯矩将进一步增

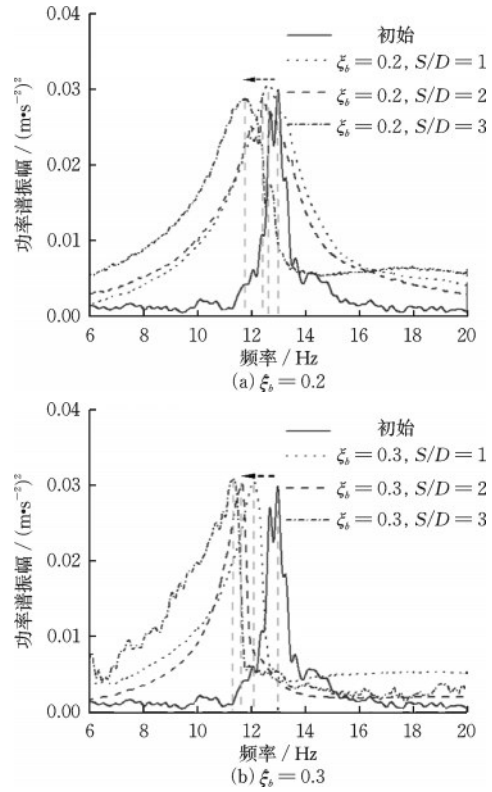


图14 冲刷深度变化时的自振频率迁移

Fig.14 Migration of natural frequency with variations in scour depth

大,这表明在该联合作用下,基桩在加卸载过程中将经受更大的内力变化。因此在风机长期服役过程中,应当更加关注冲刷与循环加载联合作用可能导致的基桩疲劳破坏,以及基础力学性能的显著退化。

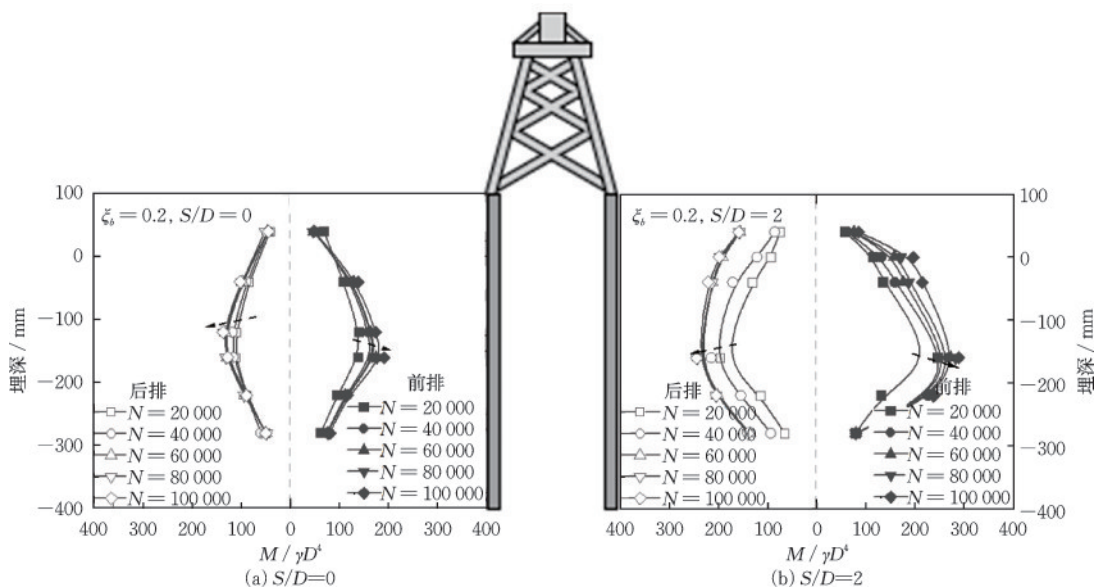


图15 桩身弯矩随循环次数发展

Fig.15 Development of pile bending moment with number of cycles

2.2.4 桩身挠度变化

图16为桩身挠度随循环次数以及冲刷深度变化的规律。通过对弯矩进行6阶多项式拟合,并根据弯矩与横向挠度之间如式(3)所示的关系推导出不同深度的挠度发展曲线^[5-6,20]。

$$M = EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3)$$

式中, E 表示杨氏模量; I 表示转动惯量。

如图16所示,桩身挠度随着循环次数 N 的增加而增大。桩基位于泥面处的挠度最大,随着埋深增

加,桩身挠度逐渐减小;由于土体对桩的阻抗力迅速增加,在达到桩末端之前,约160 mm处挠度逐渐趋近于0,这一变形模式与其他学者研究中观察到的柔性桩变形模式基本符合^[5]。在无冲刷情况下,前后排桩的最大挠度相对于20 000次加载时分别增加了34%、20%;当冲刷深度为 $S/D=2$ 时,前后排桩的最大挠度相对于20 000次加载时分别增加了60%、35%,冲刷深度的增加显著影响了桩身挠度的增大。冲刷与循环荷载联合作用将有可能导致结构超出其允许的变形限制进而失效。

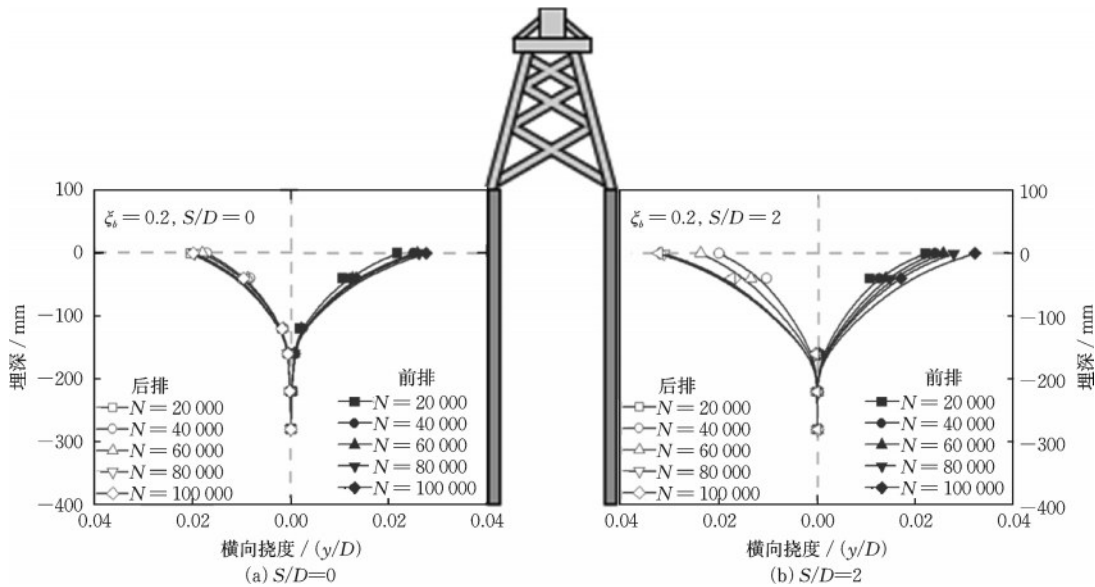


图16 桩身挠度随循环次数发展

Fig.16 Development of pile deflection with number of cycles

2.2.5 导管架基础顶部累积位移预测

为了合理预测导管架基础在其全生命周期内产生的累积变形,有必要基于试验结果提出冲刷条件下的长期累积变形预测公式。W.C.Li等^[14]在F.Li等^[21]和F.Rosquoët等^[22]学者的研究基础上,总结出桩基础的水平循环累积位移与循环次数存在多种函数变化关系。其中一种指数函数形式表示为:

$$Y_N = Y_1 \cdot \alpha \cdot N^\beta \quad (4)$$

式中, α 、 β 为和模型相关的待定参数。

从前期试验结果来看,累积位移与循环次数、循环荷载比、归一化冲刷深度呈正相关。考虑将函数中的参数 α 和 β 分别用式(5)和式(6)表示:

$$\alpha = 1.395 \cdot \frac{M_{\max}}{M_R} \cdot e^{4.01966 \cdot (S/D)} \quad (5)$$

$$\beta = 0.0263 \cdot (S/D) + 0.14429 \quad (6)$$

式中, M_{\max} 表示循环荷载幅值; M_R 表示极限倾覆

弯矩。

将式(5)、式(6)代入式(4)中,得到表示桩身水平位移与加载循环次数的关系式(7):

$$\frac{Y_N}{Y_1} = 1.395 \cdot \frac{M_{\max}}{M_R} \cdot e^{4.01966 \cdot (S/D)} \cdot N^{0.0263 \cdot (S/D) + 0.14429} \quad (7)$$

图17给出了该预测函数与试验结果的对比。可以看出,在循环次数达到十万次时,试验与预测值能够实现良好的吻合。该公式为预测不同冲刷工况下的长期循环荷载对导管架桩基础性能的联合作用提供了一种简便的方法。

图18给出了基于式(7)的 $N=10^7$ 次时长周期循环荷载工况下的桩身累积位移变化规律。由图可知,在大周期工况条件下, Y_N/Y_1 与循环次数呈指数型变化关系。该公式为预测冲刷与长期循环荷载联合作用下海上风机导管架基础全生命周期内的累积变形发展提供了一种简便方法。

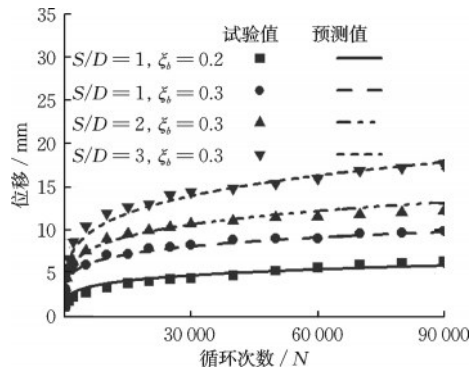


图 17 归一化累积位移随循环次数变化的对比

Fig.17 Comparison of normalized cumulative displacement with number of cycles

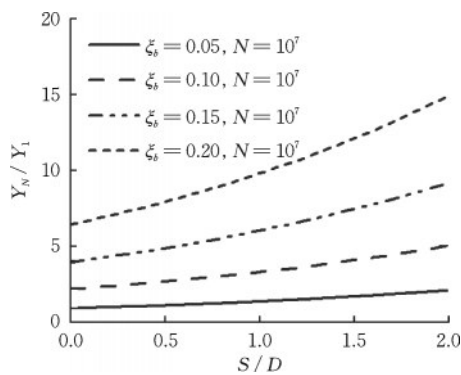


图 18 累积位移随冲刷深度变化预测

Fig.18 Prediction of cumulative displacement with variations in scour depth

3 结论

基于常重力室内模型试验,研究了中密砂排水地基中海上风机导管架基础—上部结构体系在局部冲刷与长期循环荷载联合作用下的累积倾角、位移、自振频率以及内力变化规律。根据试验结果,得出以下结论:

(1)在局部冲刷场地条件下,导管架基础在长期循环荷载的作用下其累积变形显著增加;当 $\xi_b=0.3$ 时,导管架上部最大累积位移相对无冲刷时分别增加了1.7、2.0、2.8倍。

(2)局部冲刷与循环荷载的联合作用使得导管架基础—上部结构体系的自振频率随冲刷深度增大而逐渐降低,并在冲刷深度达到3倍桩径时自振频率降幅最大,可达10%~14%。

(3)在局部冲刷与循环荷载联合作用下,桩身最大弯矩点位于泥面以下5~7倍桩径处;随着循环次数的增加,最大弯矩出现的位置将向下移动约1

倍桩径。此外,前排桩的弯矩及挠度均略大于后排桩。

(4)基于试验数据,提出了一个预测导管架基础累积位移与循环次数、循环荷载比和归一化冲刷深度之间关系的公式。该公式有助于预测在局部冲刷场地条件下,导管架基础在其全生命周期内受风浪循环荷载作用下的累积变形。

参考文献:

- [1] Fowai I, Zhang J H, Sun K, et al. Structural analysis of jacket foundations for offshore wind turbines in transitional water [J]. Brodogradnja, 2021, 72(1): 109-124.
- [2] 张小玲, 刘建秀, 杜修力, 等. 风浪流共同作用下海上风电基础与海床的动力响应分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 658-668.
Zhang X L, Liu J X, Du X L, et al. Dynamic response analysis of offshore wind power foundation and seabed under the combined wind, wave and current loadings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 658-668. (in Chinese)
- [3] Zhang Q, Zhu W X, Gao B, et al. Numerical investigation on horizontal deformation of large diameter monopile under cyclic wave loading with local scour holes [J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 30-59.
- [4] DNVGL ST 0126. Support structures for wind turbines [S]. Norway, Høvik; Det Norske Veritas AS, 2021.
- [5] Zhu B, Wen K, Li T, et al. An experimental study on the lateral pile-soil interaction of offshore tetrapod piled jacket foundations in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 56(11): 1680-1689.
- [6] Kong D Q, Wen K, Zhu B, et al. Centrifuge modeling of cyclic lateral behaviors of a tetrapod piled jacket foundation for offshore wind turbines in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 04019099.
- [7] Abdullahi A, Bhattacharya S, Li C, et al. Long term effect of operating loads on large monopile-supported offshore wind turbines in sand [J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110404.
- [8] Guo Z, Yu L Q, Wang L Z, et al. Model tests on the long-term dynamic performance of offshore wind turbines founded on monopiles in sand [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2015, 137(4): 041902.
- [9] Liu J W, Chen J W, Huang X Y, et al. Model tests on jacking installation and lateral loading performance of

- jacket foundation in sand [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 259: 1-17.
- [10] 范庆来, 马思琪, 陈箫笛, 等. 海洋平台桩腿周围局部冲刷及其对基础承载力的影响 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(6): 1246-1254, 1303.
Fan Q L, Ma S Q, Chen X D, et al. Local scour around pile leg of offshore platform and its influence on foundation bearing capacity [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43 (6) : 1246-1254, 1303. (in Chinese)
- [11] 邹新军, 陈顺, 涂欣瑶, 等. 局部冲刷下砂土中桩-盘复合基础H-T联合承载特性 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(3): 495-505.
Zou X J, Chen S, Tu X Y, et al. Local scour effects on bearing capacities of pile-disc composite foundations under combined H-T loads in sandy soil [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44 (3): 495-505. (in Chinese)
- [12] 贺瑞, 宋俞良, 郑金海. 局部冲坑对导管架刚度影响的模型试验 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5): 66-74.
He R, Song Y L, Zheng J H. Experimental study on the impact of local scour hole on the stiffness of jacket foundation [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(5): 66-74. (in Chinese)
- [13] He R, Zhang J S, Zheng J H. Vertical dynamic interaction factors for offshore thin-walled pipe piles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 145: 46-56.
- [14] Li W C, Gavin K, Igoe D. Field tests to investigate the cyclic response of monopiles in sand [J]. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, 2015, 168(5): 407-421.
- [15] Bhattacharya S, Lombardi D, Muir W D. Similitude relationships for physical modelling of monopile-supported offshore wind turbines [J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2011, 11 (2) : 58-68.
- [16] 杜鹏, 杨阳, 成伟, 等. 基于监测数据和拟静力方法的海上风机地震动力响应分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(3): 560-567.
Du P, Yang Y, Cheng W, et al. Seismic response of offshore wind turbines based on monitoring data and quasi-static calculation [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44 (3) : 560-567. (in Chinese)
- [17] 黄孝义. 砂土中海上导管架式风机群桩基础承载特性研究 [D]: 青岛: 青岛理工大学, 2021.
Huang X Y. Study on bearing characteristics of pile group foundations of offshore jacket wind turbine in sand [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [18] 余璐庆. 海上风机桶形基础安装与支撑结构动力特性研究 [D]: 杭州: 浙江大学, 2014.
Yu L Q. Study on the installation behavior of suction caisson and the dynamic properties of offshore wind turbine structure [D]: Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [19] Nikitas G, Vimalan N J, Bhattacharya S. An innovative cyclic loading device to study long term performance of offshore wind turbines [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 82: 154-160.
- [20] Jeanjean P. Re-assessment of p - y curves for soft clays from centrifuge testing and finite element modeling [Z]. *Offshore Technology Conference*. 2009: OTC-20158-MS.10.4043/20158-MS.
- [21] Li F, Zhu Z Y, Tian P S, et al. The behavior of monopile embedded in sand under scour and cyclic loading conditions [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 40(1): 52-63.
- [22] Rosquoët F, Thorel L, Garnier J, et al. Lateral cyclic loading of sand-installed piles [J]. *Soils and Foundations*, 2007, 47(5): 821-832.

(本文编辑:周小潭)