

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.013

水平循环荷载下嵌岩单桩基础受力特性试验研究

袁煜晖^{1,2}, 贺瑞^{1,2}, 朱元张³

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 三峡新能源海上风电运维江苏有限公司, 江苏 盐城 224055)

摘要: 为保障嵌岩单桩基础海上风机的长期安全运行, 试验研究了嵌岩单桩基础与土质地基单桩基础的受力特性差异, 通过室内1g模型试验分析了地层性质、荷载条件对桩基承载力与受力特性的影响规律。结果表明: 对于长径比较小的单桩基础, 底部嵌岩时桩基水平刚度和承载力较无嵌岩情况提升显著; 水平单调循环加载作用下, 桩顶累积位移在开始的数十个循环中快速发展, 后期逐渐趋于稳定; 底部嵌岩时, 桩顶的累积位移存在平衡状态; 循环加载初期, 桩基刚度均随循环荷载作用次数增加而增大, 主要表现为砂土的振密效应, 砂土密实后, 结构刚度基本稳定; 在循环荷载幅值较大时, 强风化地基中的桩-岩界面在加载后期损伤脱离, 桩基刚度有所下降; 水平加载试验中, 底部嵌岩单桩桩身弯矩最大位置始终高于无嵌岩情况; 无论嵌岩与否, 桩身最大弯矩位置均随荷载循环加载次数增加而有所下降; 对于嵌入不同风化程度岩石的单桩, 循环加载后再静力加载至桩基破坏, 其最终破坏模式存在明显差异。

关键词: 海上风电; 嵌岩单桩; 循环荷载; 模型试验; $p-y$ 曲线

中图分类号: TU473.1; P752

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)06-0097-10

Experimental study on characteristics of rock-socketed monopile under lateral cyclic loads

YUAN Yuhui^{1,2}, HE Rui^{1,2}, ZHU Yuanzhang³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Three Gorges New Energy Offshore Wind Power Operation and Maintenance Jiangsu Co., Ltd., Yancheng 224055, China)

Abstract: To ensure the secure and prolonged operation of offshore wind turbines with rock-socketed monopile foundation, an experiment investigation is carried out to study the mechanical distinctions between such foundations and soil-based alternatives. The study involves an indoor 1g model test to analyze the impact of stratigraphic property and loading condition on both the bearing capacity and mechanical properties of the rock-socketed pile. The research reveals that: The horizontal stiffness and bearing capacity of a rock-socketed monopile is significantly higher than that of a pure sand one with relatively a small length to diameter ratio. Under the horizontal monotonic cyclic loading, the cumulative displacement of the pile top develops rapidly in tens of cycles at the beginning, and tends to be stable in the later cycles; an equilibrium state exists for the cumulative pile-top displacement of rock-socketed monopiles. At the early stage of the cyclic loading, the stiffness of the pile foundation increases with the number of cyclic loads, mainly due to the vibrational density effect of sand, and the structural stiffness is basically stable after the sand is compacted. When the cyclic load amplitude is relatively large, the pile-rock interface is damaged and detached in the heavily weathered rock at the late loading stage, and the stiffness of the structure decreases. In the horizontal loading tests, the position of maximum bending moment of a rock-socketed monopile is always higher than that of a pure sand one, and the position of maximum bending moment of a pile decreases with the increase of cyclic loads whether the monopile is rock-socketed or not. A destructive static loading test is conducted subsequent to the cyclic loading tests, and the ultimate failure mode of the foundation obviously varies for the monopiles socketed in weathering rocks of different degrees.

Key words: offshore wind turbine; rock-socketed pile; cyclic load; model test; $p-y$ curve

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879097, 52271272)

作者简介: 袁煜晖(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事大直径嵌岩单桩基础研究。E-mail: yyh810@yeah.net

通信作者: 贺瑞(1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事海底基础动力特性研究。E-mail: herui@hhu.edu.cn

引用本文: 袁煜晖, 贺瑞, 朱元张. 水平循环荷载下嵌岩单桩基础受力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 97-106.

YUAN Yuhui, HE Rui, ZHU Yuanzhang. Experimental study on characteristics of rock-socketed monopile under lateral cyclic loads[J].

Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 97-106.

为发展清洁能源,我国在“十四五”时期规划了大量的海上风电场项目。海上风机受到海洋环境复杂的往复荷载作用,其基础结构的稳定性对风机的安全运行具有至关重要的作用。考虑地质条件、建设成本与施工工艺等因素,海上风机的大直径嵌岩单桩基础在我国的广东、福建等岩基海域有着广泛应用。

目前,土质海床中大直径单桩基础的研究已经较为成熟。对于大直径单桩基础承载力、累积变形与受力特性等问题的研究,主要通过数值模拟^[1-5]与物理试验进行。常见的试验研究方法可分为现场试验、离心机试验与室内1g模型试验三类:①现场试验的结果可靠性较高,但其周期较长,成本高昂,且试验所受干扰因素较多。已有的风机大直径单桩基础现场试验多在均质砂土与黏土地基中开展。现场水平荷载试验研究^[6-9]发现,单桩设计时广泛应用的 p - y 曲线法(p 为桩周土抗力, y 为桩周土的水平位移)对大直径单桩基础的刚度有所低估,需考虑桩底剪力、桩周竖向应力等其他因素^[6,10-11]对结构刚度的贡献。②离心机试验能够在室内模拟接近现场的应力条件,但价格昂贵,且可持续运行时间短,难以进行长期循环加载试验^[12]。故目前的离心机试验仍主要应用于大直径单桩静力极限承载力与小循环次数下的刚度衰减问题^[13-17]。朱斌等^[18]通过离心机试验研究了砂土中大直径单桩在水平循环荷载作用下的受力特性,并基于双曲线型 p - y 曲线分析了水平受荷大直径单桩的内力和变形,获得了考虑循环次数的大直径单桩循环 p - y 曲线,提出了循环应力比相关的 p - y 曲线循环弱化因子。③室内1g模型试验是目前大直径单桩研究中采用较多的方法。室内1g模型试验中的应力水平远小于现场试验与离心机试验,但由于其成本较低、实施简单,且能够实现各种形式的长期加载,因此在土质地基的大直径单桩研究中应用广泛^[19-25]。目前,研究主要针对土体性质、荷载幅值、荷载作用方式与荷载循环次数等因素对基础刚度的影响。Richards等^[26]开展了一系列的室内1g模型试验与离心机试验,研究对比了不同应力条件下水平循环受荷桩的受力特性,结果表明室内1g模型试验结果对桩基的累积位移与结构刚度衰减有所高估,但其整体规律与高应力条件相同。

嵌岩桩的受力特性与土质地基单桩不同,土质海床中的大直径单桩研究成果也不适用于嵌岩单桩。目前岩基海域中嵌岩单桩的研究相对较少,已有研究多集中于竖向荷载^[27-30];赵明华等^[31]分析了嵌岩桩桩径、桩-岩模量比、剪胀角对嵌岩桩荷载传递的影响,对嵌岩桩的承载力设计提出了相关建议。嵌岩桩的水平荷载试验多局限于静力荷载^[32-34];劳伟康等^[35]研究了1.4 m直径钢管嵌岩桩的水平静力承载力,在桩底发现了较大的应力集中现象,在长期循环荷载作用下,应力集中现象可能会导致残余变形增大;王建华等^[36]通过现场试验结合数值模拟,分析了水平静力荷载作用下的大直径钢管混凝土桩的承载力特性,试验结果表明嵌岩段对桩基水平承载力起主要贡献作用,且土-岩交界面处存在应力集中现象,该处岩体的刚度与强度衰减对桩基的稳定性影响很大。目前循环荷载作用下嵌岩单桩的力学特性演化规律研究较为缺乏^[37-38]。Choo等^[39]采用离心机试验开展了上覆砂土的嵌岩单桩模型试验研究,研究结果表明传统的 p - y 曲线法并不适用于嵌岩单桩受力特性的预测;其对循环荷载条件也有所探究,但循环次数有限,且未对不同影响因素做出理论方面的分析。在风机的全寿命周期内,长期循环荷载作用下桩基的受力特性演化会对风机的安全运行产生很大影响,故应对水平循环荷载作用下大直径嵌岩单桩的受力特性演化规律进行深入研究。

本文采用1g模型试验研究了循环荷载作用下嵌岩单桩受力特性,将海洋环境下的风浪流荷载近似考虑为低频的单调简谐循环荷载^[26,40-42],探究了荷载幅值、循环次数等因素对桩基累积位移、荷载-位移关系和桩身最大弯矩的影响规律,分析了单向水平受荷嵌岩基础的承载力变化情况与岩体的最终破坏模式。

1 试验方法

1.1 试验模型参数

试验采用的模型桩为Burbo Bank 3.6MW海上风机单桩基础的1:100几何缩尺模型,其相关参数见表1。为避免浇筑相似岩体时对桩体内部产生影响,桩底通过满焊进行封闭。

桩岩刚度比是影响桩-岩相互作用的重要因素,因此试验中嵌岩段相似岩体的强度需要谨慎设计,以满足试验的桩岩刚度比与原型条件相似。

表1 模型桩与原型桩的参数
Table 1 Parameter comparison between model pile and prototype pile

桩类型	桩径/m	桩长/m	壁厚/cm	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa
原型桩	5	72	7	7 800	210
模型桩	0.06	0.9	0.05	7 800	210

参考《实验岩石力学》^[43]及马博^[44]的试验结果,采用质量比为10 : 1 : 1 的砂、水泥、石膏制作相似材料以模拟中风化岩石,并养护 21 d 到达预期强度;采用质量比为 8 : 1 : 1 的砂、高岭土、石膏制作相似材料以模拟强风化岩石,养护 14 d 到达预期强度。为保证每组试验相似材料的强度相近,同一配比的相似材料采用大搅拌机一起搅拌,充分搅拌均匀后在模型箱内振捣至不再下降,然后进行养护。表 2 为强、中风化花岗岩的相似材料与原型材料的参数,试验的桩岩相对刚度比符合相似条件。

Ovesen 等^[46-47]研究发现,动力加载试验中,当受荷载结构距土体边界最短距离不小于 3 倍结构本身外径时,边界效应的影响不再明显;本文试验中,模型桩下端与试验土槽底部距离为 3*D* (*D* 为模型桩外径),与试验土槽侧壁距离为 5*D*,边界效应的影响较小。嵌岩段上层覆盖砂土,砂土的级配曲线如图 1 所示,最大干密度为 1.56 g/cm³,最小干密度为 1.28 g/cm³。试验中的砂土密实度为 90%,砂土天然干密度为 1.53 g/cm³。

试验所用模型桩桩身应变片布置如图 2 所示,在桩底附近每间隔 3 cm 布置应变片,其余应变片间隔 6 cm (1*D*) 布置,桩顶附近布置温度补偿片。应变片选用 120-3AA 型应力传感器,电阻值为 120 Ω,灵敏度系数为 2.0%,以 1/4 桥的桥路连接方式接入数采系统。

表 2 模型相似材料与原型材料^[45]的参数

Table 2 Comparison of parameters between similar material and prototype material^[45]

风化程度	弹性模量/MPa		桩岩刚度比	
	原型材料	相似材料	原型材料	相似材料
强风化	50 ~ 100	31.3	11.6 ~ 23.1	21.96
中风化	100 ~ 500	93.7	2.31 ~ 11.6	7.33

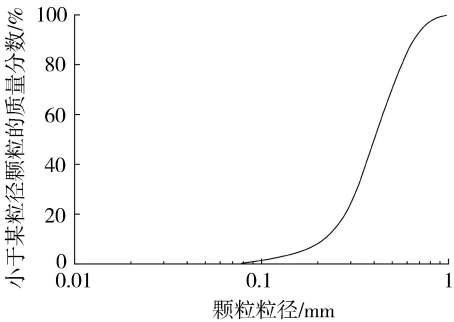


图 1 模型砂土级配曲线

Fig.1 Particle gradation curve of model sand



图 2 模型桩桩身应变片布置

Fig.2 Strain gauge arrangement on model pile

1.2 试验装置

试验通过自制的循环加载装置进行循环加载试验,该循环加载装置是对汪明元等^[48]装置的改进,通过电机带动加载质量块的旋转,以实现 0.1 ~ 1 Hz 频率范围内的简谐循环加载,通过调整质量块大小控制循环荷载的幅值。以 DH3820N 动态采集仪作为信号采集器采集循环加载阶段力、位移和加速度等动力信号;采集器应变量程为±50 000×10⁻⁶,最小分辨率为 0.5×10⁻⁶。数据采集所用拉压力传感器量程为 500 N,灵敏度为 10 mV/N,以全桥方式接入 DH3820N 动态采集仪测量实时荷载(图 3);位移传感器量程为 20 cm,灵敏度为 0.2 mV/mm,通过半桥方式接入采集仪测量实时位移。

试验相似材料岩体在 60 cm × 60 cm × 24 cm (长 × 宽 × 高) 的木制箱体内现浇,模型桩在凝固之前固定在箱体中央,嵌岩深度 1*D* (6 cm) (图 3),凝固后养护。岩体上覆盖砂土,上层土体所处模型箱体内部尺寸为 60 cm × 60 cm × 80 cm。砂土使用重锤进行分层

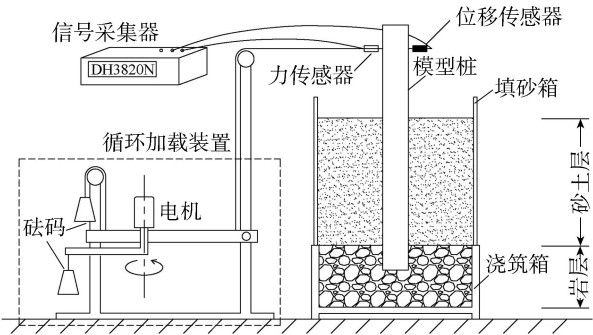


图 3 试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of test layout

夯实,每3 cm 厚度夯实一次,夯实30 cm 厚砂土的质量为165.24 kg。为便于浇筑的嵌岩模型与上层覆盖砂土的装卸,采用底部透空的填砂箱来装填砂土。试验开展前将填砂箱箱体置于模拟岩石浇筑箱上方,并完成砂土装填。试验装置示意图如图3所示。

1.3 试验方案

为研究循环荷载引起的桩基力学特性变化,每一组次均设置相应的水平静力试验作为对比。试验探究了地基类型(强风化岩石、中风化岩石、纯砂)与循环荷载特性(荷载幅值、循环次数)等条件对单桩受力特性的影响。近似于实际海上风机单桩基础的受荷情况,试验中模型桩上的加载位置位于砂面以上18 cm(3*D*)处。试验中依次进行水平静力、循环加载试验,每组试验结束后挖出砂土并观察嵌岩段的岩体损伤情况,再重新装土夯实进行试验。试验共设置11组,具体方案见表3。

表3 试验方案
Table 3 Test schemes

方案编号	试验内容	地基类型	嵌岩深度	砂土深度	ξ_b	ξ	F_u/N	循环加载次数
P1-1	水平静力	强风化岩石	1 <i>D</i>	5 <i>D</i>			301	
P1-2	水平循环	强风化岩石	1 <i>D</i>	5 <i>D</i>	0.421	0.187		1 015
P1-3	水平循环	强风化岩石	1 <i>D</i>	5 <i>D</i>	0.708	0.353		508
P1-4	水平循环	强风化岩石	1 <i>D</i>	5 <i>D</i>	0.955	0.302		327
P2-1	水平静力	中风化岩石	1 <i>D</i>	5 <i>D</i>			365	
P2-2	水平循环	中风化岩石	1 <i>D</i>	5 <i>D</i>	0.351	0.141		978
P2-3	水平循环	中风化岩石	1 <i>D</i>	5 <i>D</i>	0.679	0.213		587
P2-4	水平循环	中风化岩石	1 <i>D</i>	5 <i>D</i>	0.975	0.146		348
P3-1	水平静力	纯砂		6 <i>D</i>			168	
P3-2	水平循环	纯砂		6 <i>D</i>	0.446	0.109		1 069
P3-3	水平循环	纯砂		6 <i>D</i>	0.714	0.167		849

注: $\xi_b = F_{\max}/F_u$, $\xi = F_{\min}/F_{\max}$, ξ_b 、 ξ 为循环荷载比, $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 分别为循环荷载最大值和最小值, F_u 为桩基的水平静力极限承载力;静力试验中,定义桩基在加载位置处产生0.1*D*位移为桩基破坏条件;加载位置处位移到达0.1*D*时,对应的静力荷载大小即为 F_u 。

2 试验结果与分析

2.1 水平静力试验

由图4可知,随着地基强度提高, F_u 提高,嵌岩单桩比纯砂单桩提升超过90%,中风化岩石地基比强风化岩石地基提升约20%。

由图5可知(F 为桩顶水平静力荷载),在达到 F_u 前,不同地基中桩身弯矩曲线分布规律均未发生明显变化;嵌岩地基中弯矩最大值均出现在砂面下约2*D*深度处,而纯砂地基中弯矩最大值出现在砂面下约3*D*深度处。

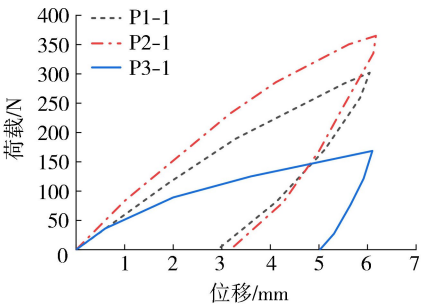


图4 水平静力试验荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves in static loading tests

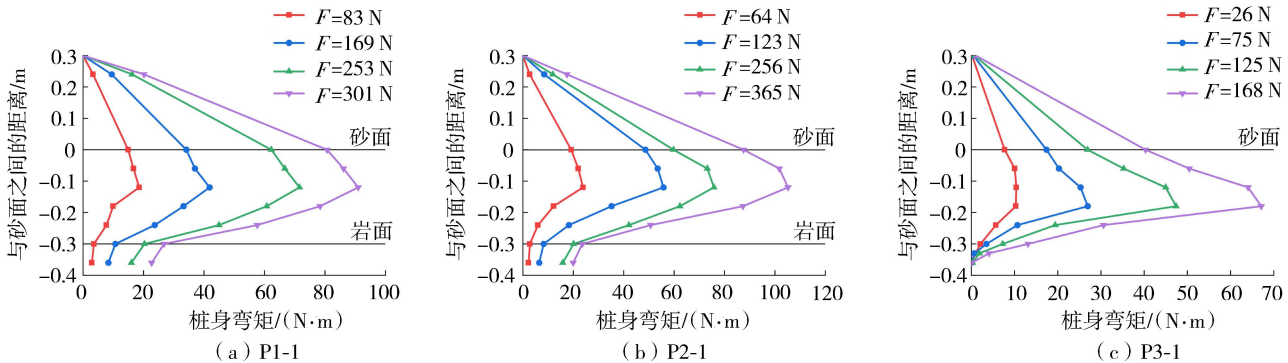


图5 水平静力试验桩身弯矩

Fig.5 Bending moment of monopiles in static loading tests

2.2 循环加载试验

2.2.1 桩顶累积位移

单桩基础的桩顶累积水平位移(y_N)是风机设计的重要参数,嵌岩单桩和砂土单桩的 y_N 发展规律有所不同(图 6)。纯砂地基中, y_N 随单向循环荷载循环次数(N)的增加不断增长;嵌岩地基中,约前 20 次循环加载中, y_N 增长迅速,之后逐渐进入稳定阶段,随着 N 的增加不再显著变化;图 6(a)中,P1-4 试验的 y_N 在循环加载后期仍然有所增长,原因在于 P1-4 试验中较大的循环荷载幅值可能导致了强度相对较低的强风化地基桩-岩界面岩体的损伤,从而引起了结构的刚度衰减。

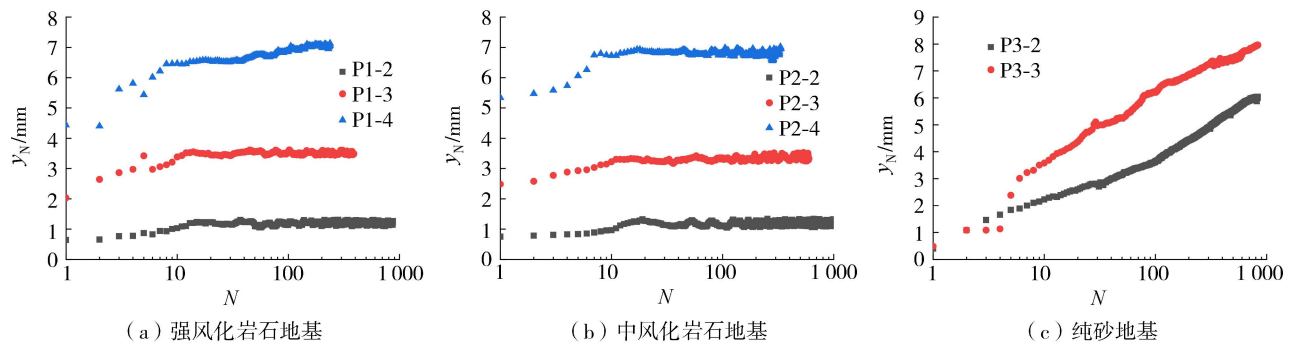


图 6 桩顶循环累积位移曲线
Fig. 6 Cyclic cumulative displacement curve of pile top

2.2.2 桩顶荷载-位移关系

由图 7 可知,滞回曲线随着 N 增加向右移,体现了 y_N 随 N 增加而增大的趋势;滞回圈间的移动距离随荷载幅值的增大也明显增大,说明 y_N 的发展速度也随着荷载幅值的增大而加快;在纯砂地基中,随着 N 的增加砂土逐渐密实,滞回曲线斜率在循环加载 10 次后显著增大,基础刚度增大,土体行为从弹塑性向弹性阶段转化,滞回圈逐渐缩小,荷载-位移关系由开始的非线性逐渐向线性转化;纯砂地基中单桩的桩顶水平位移在循环加载初期增长较快,在 1000 次的循环加载过程中,桩顶水平位移始终随 N 的增加而逐渐增长。嵌岩情况下各阶段荷载-位移基本呈线性关系,说明桩-岩结构部分始终处于近弹性阶段,嵌岩段为基础刚度增大发挥了重要作用;同时滞回圈的减小说明了上覆砂土同样存在密实化的趋势,土体行为从弹塑性向弹性阶段发展;随着 N 增加,滞回曲线斜率总体不变或略微减小,嵌岩基础刚度有衰减的趋势。

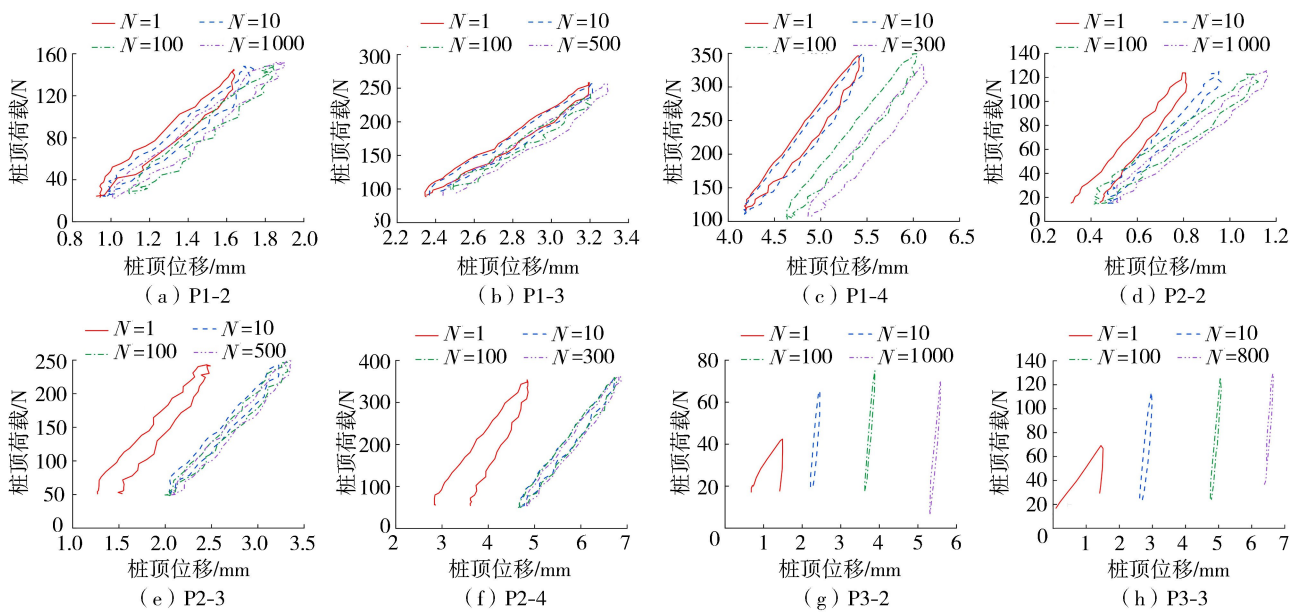


图 7 桩顶滞回曲线
Fig. 7 Hysteretic curve of pile top

2.2.3 桩身最大弯矩

由图8可知,P1-2、P1-3、P2-2和P2-3试验中,桩身最大弯矩所在砂层深度稳定在砂面以下约2*D*处,未发现明显改变;而在P1-4和P2-4试验中桩身最大弯矩所在深度在循环加载后改变,随着*N*的增加,最大弯矩所在深度由2*D*下移至3*D*深度附近;纯砂地基中,最大弯矩所在深度随*N*的增加下降更加明显,约1000次加载后最大弯矩位置从3*D*下降至4.5*D*深度附近;桩身最大弯矩值始终随*N*增加而增大。

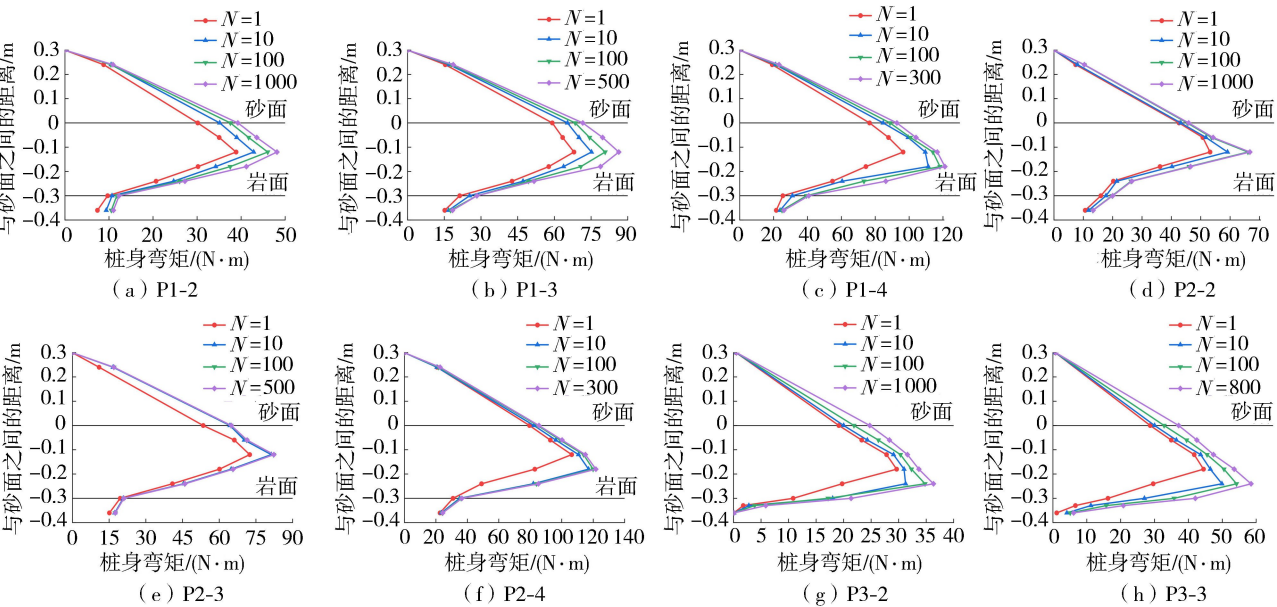


图8 循环加载桩身弯矩
Fig.8 Bending moment of monopiles during cyclic loading

2.3 *p-y* 曲线分析

2.3.1 静力荷载 *p-y* 曲线

p-y 曲线法是桩基分析常用简化方法,桩身水平位移、弯矩和桩周土反力之间存在如下的关系^[32,39]:

$$p = d^2M/dx^2 \tag{1}$$

$$y = \iint (M/EI) dx dx \tag{2}$$

式中:*x* 为沿桩基埋深方向坐标;*M* 为桩身弯矩;*E* 为材料弹性模量;*I* 为截面惯性矩。

通过高阶多项式函数(式(3))对桩身实测弯矩进行拟合^[49],以方便求导和积分,从而得到桩周土反力和桩身位移。

$$M = c_1 + c_2x + c_3x^2 + \cdots + c_mx^{m-1} \tag{3}$$

式中 *c*、*m* 为多项式拟合系数。

根据砂面和桩顶的边界条件:由砂面处桩身实测弯矩,可知 *c*₁ = *M*_{*x*=0};由砂面处土抗力为0,得到 *c*₃ = (*d*²*M/dx*²)_{*x*=0}/2=0。本文根据实测应变的数值,采用5次多项式,得到了较好的桩身弯矩拟合结果。由式(1)(2),通过 Matlab 编写 *p-y* 曲线计算程序,结果取绝对值,得到水平静力试验的桩身 *p-y* 曲线。由图9可知,随着深度的增加,土体的刚度随之增大;嵌岩地基中,岩层刚度显著大于砂土层。

2.3.2 循环荷载 *p-y* 曲线

采用与获得静力 *p-y* 曲线相同的方法,通过桩身弯矩计算得到循环加载全过程中不同深度的 *p-y* 曲线,如图10所示,图10中不同深度处的 *p-y* 曲线的变化幅度不同,变化幅度越大的位置,土层的刚度变化也越明显,岩层位置的刚度变化显著小于砂土;桩身水平位移在整个循环过程中都持续增大。

2.4 岩体损伤分析

嵌岩单桩嵌岩段的损伤程度对其承载能力具有重要影响。每组循环加载试验后挖出箱体内的砂土,并拆除四周箱壁,清理岩面砂土,观察嵌岩段桩周岩体的损伤程度。循环荷载幅值较小时,桩周末观察到岩体损伤。图11(a)为强风化岩石地基中P1-4试验后的桩周岩体,可以看到在大幅值的循环加载试验后,桩-岩

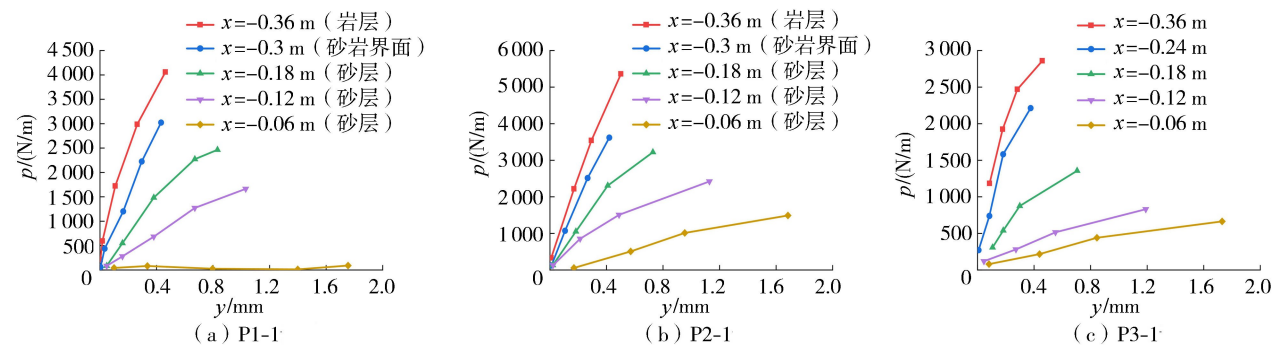


图 9 水平静力 p - y 曲线
Fig.9 Horizontal static p - y curves

接触面产生了大约 1 mm 宽的脱开缝。图 11(b) 为中风化岩石地基中 P2-4 试验后的桩周岩体, 岩体同样未观察到明显的损伤。

2.5 岩体破坏模式

循环加载试验后, 取未发生损伤的桩基模型再次进行静力加载试验, 加载至桩基完全破坏, 加载结束后挖去砂土, 撤去填砂箱体。由图 12 可知, 强风化和中风化岩石地基的破坏模式有所不同, 强风化岩石地基中距桩心约 $2D$ 范围内的岩体沿着从桩底发展的整体滑移剪切破坏, 类似于密实的砂土或硬黏土中的整体剪切破坏模式; 中风化岩石地基中则是桩周岩体的局部压剪破碎; 不同地基中的最终破坏区域均出现在桩后(与加载方向相反的方向)及桩侧后方。

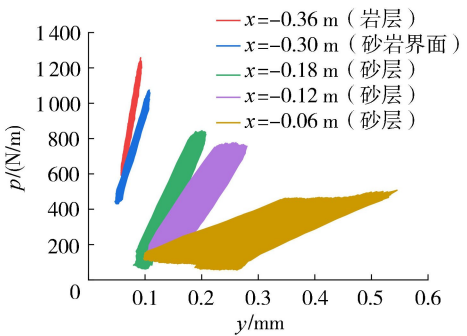


图 10 水平循环加载 p - y 曲线 (P2-2)
Fig.10 p - y curve of horizontal cyclic loading (P2-2)

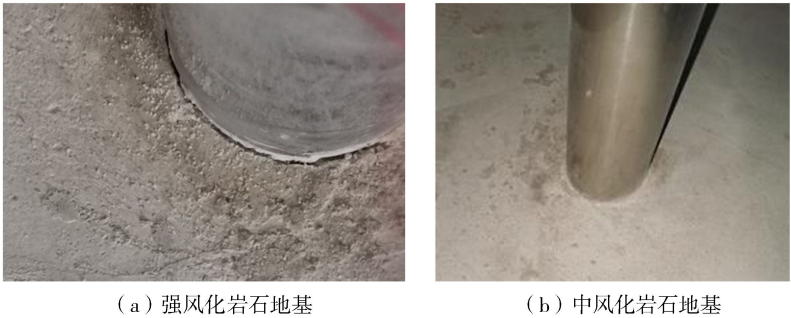


图 11 试验后桩周岩体
Fig.11 Rock mass around pile after tests

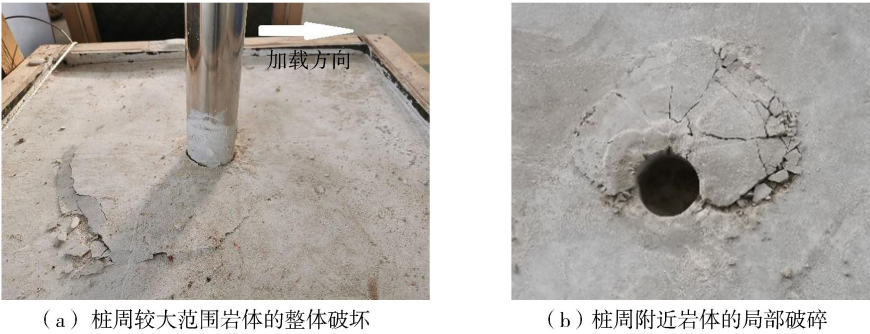


图 12 岩体破坏模式
Fig.12 Failure modes of rock mass

3 结 论

- a. 嵌岩单桩的水平极限承载力较纯砂地基中提升显著,强风化岩石地基嵌岩单桩的极限承载力相较于纯砂单桩提升超过 90%,中风化岩石地基中比强风化岩石地基中提升约 20%。
- b. 纯砂地基中,桩顶累积位移随循环荷载循环次数的增加不断增大,在循环加载后期逐渐趋于稳定;而在嵌岩地基中,由于嵌岩段的承载作用,桩顶累积位移在循环次数到达约 20 次后基本稳定,且桩顶累积位移小于纯砂地基情况。
- c. 在循环加载初期,由于砂土振密效应,不同地基中的桩基刚度均随循环次数的增加而呈增大趋势,这一趋势在纯砂地基中更为明显;嵌岩情况下,强风化岩石中桩-岩界面在循环荷载后期产生了损伤,界面脱离,基础刚度也随之略有减小。
- d. 水平静力试验结果中,嵌岩地基中桩身的弯矩最大位置比纯砂地基中高约 1D。循环荷载下,桩身最大弯矩随循环次数的增加而增大。在纯砂地基中,桩身弯矩最大位置随循环荷载次数增加有所下降,在循环加载约 10 次后其位置下降约 1.5D;而在嵌岩地基中,较小的循环荷载幅值并不会引起桩身最大弯矩位置的变化,在循环荷载比接近于 1 时,同样约 10 次循环加载之后,桩身最大弯矩位置发生约 1D 的下降。
- e. 对于大直径水平受荷嵌岩单桩,在循环加载过程中,桩身 $p-y$ 曲线发生变化,岩层 $p-y$ 曲线变化很小,砂土层 $p-y$ 曲线变化较大,砂土层刚度随循环次数增加有所增大。
- f. 在 90% 承载力幅值的循环荷载加载试验后期,强风化地基桩岩接触面发生破坏;静力加载破坏试验中,不同风化程度地基中的岩石破坏模式不同。

参考文献:

[1] 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.

[2] BISOI S, HALDAR S. Dynamic analysis of offshore wind turbine in clay considering soil-monopile-tower interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 63: 19-35.

[3] WANG Lizhong, LAI Yongqing, HONG Yi, et al. A unified lateral soil reaction model for monopiles in soft clay considering various length-to-diameter (L/D) ratios[J]. Ocean Engineering, 2020, 212: 107492.

[4] 贺瑞, 朱元张, 张继生, 等. 地震作用下大直径嵌岩单桩动力响应数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 66-76. (HE Rui, ZHU Yuanzhang, ZHANG Jisheng, et al. Numerical analysis of dynamic response of large-diameter rock-socketed monopiles under seismic loads[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 66-76. (in Chinese))

[5] 刘永莉, 刘志杰, 巴军涛, 等. 桩承载力反向自平衡试桩法数值模拟分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 81-87. (LIU Yongli, LIU Zhijie, BA Juntao, et al. Numerical simulation analysis of reverse self-balanced test method for pile bearing capacity[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4): 81-87. (in Chinese))

[6] KIM Y, JEONG S. Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2): 248-257.

[7] HOKMABADI A S, FAKHER A, FATAHI B. Full scale lateral behaviour of monopiles in granular marine soils[J]. Marine Structures, 2012, 29(1): 198-210.

[8] RAHMANI A, TAIEBAT M, FINN W D L, et al. Evaluation of $p-y$ springs for nonlinear static and seismic soil-pile interaction analysis under lateral loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 438-447.

[9] 鲍金虎, 苏静波, 吴锋, 等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及 $p-y$ 曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 127-134. (BAO Jinhu, SU Jingbo, WU Feng, et al. Field horizontal loading test and $p-y$ curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay groundsill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 127-134. (in Chinese))

[10] YANG K, LIANG R. Methods for deriving $p-y$ curves from instrumented lateral load tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(1): 31-38.

[11] LI Weichao, ZHU Bitang, YANG Min. Static response of monopile to lateral load in overconsolidated dense sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(7): 04017026.

[12] ZHU F Y, O' LOUGHLIN C D, BIENEN B, et al. The response of suction caissons to long-term lateral cyclic loading in single-

layer and layered seabeds[J]. Géotechnique,2018,68(8):729-741.

[13] 王富强,荣冰,张嘎,等. 水平循环荷载下风电机组基础离心模型试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(7):1926-1930. (WANG Fuqiang, RONG Bing, ZHANG Ga, et al. Centrifugal model test of pile foundation for wind power unit under cyclic lateral loading[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(7):1926-1930. (in Chinese))

[14] ZHANG Chenrong, 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.

[15] HONG Y, HE B, WANG L Z, et al. Cyclic lateral response and failure mechanisms of semi-rigid pile in soft clay: centrifuge tests and numerical modelling[J]. Canadian Geotechnical Journal,2017,54(6):806-824.

[16] WANG Xuefei, ZENG Xiangwu, YANG Xu, et al. Feasibility study of offshore wind turbines with hybrid monopile foundation based on centrifuge modeling[J]. Applied Energy,2018,209:127-139.

[17] TRUONG P, LEHANE B M, ZANIA V, et al. Empirical approach based on centrifuge testing for cyclic deformations of laterally loaded piles in sand[J]. Géotechnique,2019,69(2):133-145.

[18] 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. (ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jinchao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(10):1807-1815. (in Chinese))

[19] PERALTA P, ACHMUS M. An experimental investigation of piles in sand subjected to lateral cyclic loads[C]//SPRINGMAN S, LAUE J, SEWARD L. Physical Modelling in Geotechnics, Two Volume Set. London: CRC Press, 2010:985-990.

[20] ALBIKER J, ACHMUS M, FRICK D. et al. 1g model tests on the displacement accumulation of large-diameter piles under cyclic lateral loading[J]. Geotechnical Testing Journal,2017,40(2):173-184.

[21] RATHOD D, NIGITHA D, KRISHNANUNNI K T. Experimental investigation of the behavior of monopile under asymmetric two-way cyclic lateral loads[J]. International Journal of Geomechanics,2021,21(3):6021001.

[22] ABADIE C N. Cyclic lateral loading of monopile foundations in cohesionless soils[D]. Oxford: University of Oxford, 2015.

[23] 俞剑,黄茂松,张陈蓉. 黏土中两种不同直径单桩水平循环加载模型试验与分析[J]. 岩土力学,2016,37(4):973-980. (YU Jian, HUANG Maosong, ZHANG Chenrong. Model tests and analysis of single piles with two different diameters subjected to cyclic lateral loadings in clay[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(4):973-980. (in Chinese))

[24] GUO Zhen, YU Luqing, WANG Lizhong, 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.

[25] 王欢. 砂土海床大直径单桩基础和桶形基础水平受荷特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.

[26] RICHARDS I A, BRANSBY M F, BYRNE B W, et al. Effect of stress level on response of model monopile to cyclic lateral loading in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2021,147(3):04021002.

[27] 张建新,吴东云,杜海金. 嵌岩桩承载性状和破坏模式的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(2):320-323. (ZHANG Jianxin, WU Dongyun, DU Haijin. Testing study on bearing behaviours and failure mode of rock-socketed pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(2):320-323. (in Chinese))

[28] OMER J R, ROBINSON R B, DELPAK R, et al. Large-scale pile tests in Mercia mudstone: data analysis and evaluation of current design methods[J]. Geotechnical & Geological Engineering,2003,21(3):167-200.

[29] AKGÜNER C, KIRKIT M. Axial bearing capacity of socketed single cast-in-place piles[J]. Soils and Foundations,2012,52(1):59-68.

[30] XING Haofeng, ZHANG Zhen, MENG Minghui, et al. Centrifuge tests of superlarge-diameter rock-socketed piles and their bearing characteristics[J]. Journal of Bridge Engineering,2014,19(6):04014010.

[31] 赵明华,雷勇,刘晓明. 基于桩-岩结构面特性的嵌岩桩荷载传递分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):103-110. (ZHAO Minghua, LEI Yong, LIU Xiaoming. Analysis of load transfer of rock-socketed piles based on characteristics of pile-rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(1):103-110. (in Chinese))

[32] HE Rui, ZHU Tao, MA Bo, et al. Lateral static stiffness of offshore monopile socketed in soft rock[J]. Marine Structures,2022,86:103302

[33] SINGH A P, BHANDARI T, AYOTHIRAMAN R, et al. Numerical analysis of rock-socketed piles under combined vertical-lateral loading[J]. Procedia Engineering,2017,191:776-784.

[34] CHEN J J, WANG J H, KE X, et al. Behavior of large-diameter rock-socketed piles under lateral loads[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering,2021,21(4):323-329.

[35] 劳伟康,周立运,王钊. 大直径柔性钢管嵌岩桩水平承载力试验与理论分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(10):

1770-1777. (LAO Weikang, ZHOU Liyun, WANG Zhao. Field test and theoretical analysis on flexible large-diameter rock-socketed steel pipe piles under lateral load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1770-1777. (in Chinese))

[36] 王建华, 陈锦剑, 柯学. 水平荷载下大直径嵌岩桩的承载力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1194-1198. (WANG Jianhua, CHEN Jinjian, KE Xue. Characteristics of large diameter rock-socketed piles under lateral loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1194-1198. (in Chinese))

[37] HE Rui, JI Ji, ZHANG Jisheng, et al. Dynamic impedances of offshore rock-socketed monopiles[J]. Journal of Marine and Science Engineering, 2019, 7(5): 134.

[38] FENG Lingyun, LYU Wei, CHEN Shuiyue, et al. Field tests of rock-socketed monopile in coastal area subjected to lateral cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 164: 107616.

[39] 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, 2016, 142(1): 04015058.

[40] FUTAI M M, DONG Jing, HAIGH S K, et al. Dynamic response of monopiles in sand using centrifuge modelling[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 90-103.

[41] LIN Jie, GUO Yakun. Numerical investigation of non-cohesive seabed response around a mono-pile by crossing wave-current[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(1): 57-68.

[42] CHEN Songgui, GONG Enyu, ZHAO Xu, et al. Large-scale experimental study on scour around offshore wind monopiles under irregular waves[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(1): 40-46.

[43] 林韵梅. 实验岩石力学: 模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.

[44] 马博. 海上风机嵌岩单桩侧向静刚度研究[D]. 南京: 河海大学, 2020.

[45] 校建东, 林毅峰. 海上风电机组大直径嵌岩单桩基础结构设计关键参数的研究[J]. 太阳能, 2019(7): 64-68. (XIAO Jiandong, LIN Yifeng. Study on key parameters of large diameter rock-socketed single pile foundation structure design for offshore wind turbines[J]. Solar Energy, 2019(7): 64-68. (in Chinese))

[46] OVESEN N K. The use of physical models in design: the scaling law relationship[C]//Proceedings of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brighton: British Geotechnical Society, 1979: 318-323.

[47] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80-86. (XU Guangming, ZHANG Weimin. A study of size effect and boundary effect in centrifugal tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: British Geotechnical Society, 1996, 18(3): 80-86. (in Chinese))

[48] 汪明元, 吴金标, 张建经, 等. 一种适用于室内模型试验的循环加载装置研制及试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1145-1151. (WANG Mingyuan, WU Jinbiao, ZHANG Jianjing, et al. Development of a cyclic loading instrument for laboratory model test and its experimental study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1145-1151. (in Chinese))

[49] KONG L G, ZHANG L M. Rate-controlled lateral-load pile tests using a robotic manipulator in centrifuge[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(3): 192-201.

(收稿日期: 2023-12-11 编辑: 刘晓艳)

(上接第52页)

[17] 黄君宝, 肖厅厅, 孙志林, 等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 441-446. (HUANG Junbao, XIAO Tingting, SUN Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5): 441-446. (in Chinese))

[18] 张功瑾, 杨明金, 王任超, 等. 长江口水沙条件对丁坝群坝田淤积的影响研究[J]. 水文, 2020, 40(6): 24-30. (ZHANG Gongjin, YANG Mingjin, WANG Renchao, et al. Research on the influence of water and sediment conditions in Yangtze River Estuary on deposition in the fields among spur dikes[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(6): 24-30. (in Chinese))

[19] 张功瑾, 罗小峰, 路川藤, 等. 潮汐河口坝田长宽比对泥沙淤积特征影响试验研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 29-36. (ZHANG Gongjin, LUO Xiaofeng, LU Chuanteng, et al. Experimental analysis of the effect of changing the length-width ratio of dam fields on sediment deposition[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(4): 29-36. (in Chinese))

[20] 杨旭亮, 戚蓝, 曾庆达, 等. 双丁坝间流场及局部冲刷的数值模拟研究[J]. 水力发电, 2020, 46(11): 56-60. (YANG Xuliang, QI Lan, ZENG Qingda. Study on numerical simulation of flow field and local scour between double spur dikes[J]. Water Power, 2020, 46(11): 56-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-12-18 编辑: 熊水斌)