

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.081



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



水平循环荷载下珊瑚砂地基中排水刚性桩 的受力机理模型试验研究

黄丽^{1,2}, 汪步鑫³, 杨昕^{1,3}, 邹谭¹, 陈志雄³

(1. 重庆大学溧阳智慧城市研究院, 溧阳 213332; 2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 成都 610041; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 针对岛礁建设中珊瑚砂地基桩基受波浪循环荷载作用的关键问题, 基于 Buckingham π 相似理论设计模型试验, 研制适用于模型试验的排水刚性桩模型, 研究水平静/循环荷载下排水刚性桩的桩土相互作用机理。首先基于静载试验确定排水刚性桩的极限承载力, 发现桩身弯矩峰值位于地基表面以下 2.0~2.8 倍等效桩径处, 且 p - y 曲线斜率随埋深增大而趋缓。随后, 在单向正弦波循环荷载条件下, 对比研究水平循环荷载下排水刚性桩和普通刚性桩动力响应, 结果表明: 普通刚性桩的桩顶位移、弯矩峰值均大于排水刚性桩, 且两者弯矩峰值均出现在地基表面以下 3~4 倍等效桩径处; 普通刚性桩与排水刚性桩 p - y 曲线滞回圈的斜率均随着土层深度的增加而增大, 排水刚性桩土抗力衰减幅度和动刚度衰减幅度均小于普通刚性桩, 但最大土抗力和动刚度则是大于普通刚性桩。

关键词: 珊瑚砂; 循环荷载; 排水刚性桩; 模型试验; p - y 曲线

文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Model tests study on mechanical mechanism of drainage rigid pile in coral sand foundation under horizontal cyclic loading

HUANG Li^{1,2}, WANG Buxin³, YANG Xin^{1,3}, ZOU Tan¹, CHEN Zhixiong³

(1. Institute for Smart City of Chongqing University in Liyang, Liyang 213332, P. R. China; 2. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To address the critical issue of pile foundations in coral sand foundations being subjected to wave-induced cyclic loading during island and reef construction, model tests were designed based on the Buckingham π similarity theory. A drainage rigid pile model suitable for model tests was developed, and the pile-soil interaction mechanism of drainage rigid piles under horizontal static/cyclic loading was investigated through model test methods. Firstly, the ultimate bearing capacity of the drainage rigid pile was determined via static loading tests. It was found that the peak bending moment of the pile shaft occurs at a depth of 2.0 to 2.8 times

收稿日期: 2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(52278331)

作者简介: 黄丽(1981-), 女, 高级工程师, 主要从事工程材料试验和检测研究, E-mail: 13869063@qq.com。

陈志雄(通信作者), 男, 教授, E-mail: chenzhixiong@cqu.edu.cn。

Received: 2025-04-25

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52278331)

Author brief: HUANG Li (1981-), senior engineer, main research interest: engineering material testing, E-mail: 13869063@qq.com.

CHEN Zhixiong (corresponding author), professor, E-mail: chenzhixiong@cqu.edu.cn.

the equivalent pile diameter below the foundation surface, and the slope of the p - y curves flattens with increasing embedment depth. Subsequently, under the condition of unidirectional sinusoidal cyclic loading, a comparative study was conducted on the dynamic responses of drainage rigid piles and conventional rigid piles under horizontal cyclic loading. The results show that: the pile head displacement and extreme bending moment values of conventional rigid piles are all greater than those of drainage rigid piles, and the peak bending moments of both types of piles appear at a depth of 3 to 4 times the equivalent pile diameter below the foundation surface; the slopes of the hysteresis loops of the p - y curves for both conventional rigid piles and drainage rigid piles increase with the increase of soil depth. The attenuation amplitude of soil resistance and dynamic stiffness of drainage rigid piles are both smaller than those of conventional rigid piles, while their maximum soil resistance and dynamic stiffness are greater than those of conventional rigid piles.

Keywords: coral sand; cyclic loading; drainage rigid pile; model test; p - y curve

随着人口的持续增长和社会经济的快速发展,陆地空间与资源承载力日趋饱和,海洋开发成为拓展生存与发展空间的重要方向^[1]。在海洋工程建设中,地基处理是保障工程稳定性的关键环节。珊瑚砂是主要的岛礁地基回填材料^[2],珊瑚礁砂是造礁珊瑚、贝壳、有孔虫等海洋生物骨架沉积的碎屑物。珊瑚砂微观上具有多孔隙(含有内孔隙)、棱角度高、形状不规则等特点,宏观上呈现出颗粒易破碎、高压缩性等不同于陆源硅质砂的特性^[3-6]。桩基础具有稳定性好、差异沉降小、承载力大、能够有效降低地基液化等特点^[7]。因此,珊瑚砂地基中的桩基础受荷响应研究具有重要的工程意义。

海洋区域桩基础受到风、浪、流等水平荷载作用,学者们针对水平受荷桩进行了大量研究。在理论分析方面,Ashour等^[8]根据已有的应变楔(SW)模型理论提出了一种构建 p - y 曲线的新途径,研究结果显示,由SW模型得到的 p - y 曲线与传统的 p - y 曲线匹配度较好,同时SW模型还提供了一种影响 p - y 曲线性质的伴随效应方法;张小玲等^[9]研究了饱和砂土地基在不同弱化程度下的动力特征和弱化系数,基于浅层地基处改进的土楔体理论绕桩流动破坏理论,构建了饱和砂土地基在不同弱化程度下的桩土 p - y 曲线模型。在模型试验方面,Roesen等^[10]对致密饱和砂土进行了室内模型试验,研究了单桩基础在长期横向循环荷载作用下的桩土相互作用,提出了长期循环荷载作用下单桩基础的累积摇摆表达式;曹光伟等^[11]在软黏土中开展了水平循环荷载作用下的大直径单桩的离心机模型试验研究,得到了不同工况下大直径单桩的桩身变形、刚度衰减以及地基中孔压累积的规律,发现桩土系统会随着单向循环荷载幅值的逐渐增大而经历弹性阶段、弹塑性安定阶段、棘轮破坏阶段的现象。在数值模拟方面,Achmus^[12]通过建立三维有限元模型分析循环荷载对海上风电场大直径桩基的影响。研究结果

显示,传统的 p - y 曲线法会低估大直径单桩基础的水平变形;胡安峰等^[13]构建了考虑砂土地基长期循环弱化效应的桩土系统刚度衰减数值模型,引入循环反力比的概念,得到桩土刚度衰减参数,并对初始地基反力模量进行了修正。

水平荷载下桩土相互作用在理论、试验、数值模拟等方面已有大量研究,然而,针对珊瑚砂地基中水平循环荷载下排水刚性桩的桩土相互作用研究较少。笔者基于模型试验方法,确定了水平静力荷载下珊瑚砂地基中排水刚性桩极限水平静力承载力,对比分析了单向循环荷载下珊瑚砂地基中排水刚性桩和普通刚性桩的桩顶位移变化趋势、弯矩分布及 p - y 曲线发展规律。

1 模型试验概况

1.1 相似比尺及试验材料

基于 Buckingham π 相似理论设计模型试验,根据等比例缩尺来进行试验模型的制作。选取几何尺寸、材料密度以及弹性模量为 3 个基本量纲。其中,几何相似比 $C_L=1:15$,试验采用实际工程中的砂(珊瑚砂)来制作地基,材料密度相似比 $C_\rho=1$,此外,取弹性模量相似比 $C_E=1:15$,其他相似比由相似理论导出^[14-15],例如,振动频率的相似比如振动频率的相似比 $S_f=S_L^{-1}S_\rho^{-0.5}$ 为 3.873:1,结果如表 1 所示。

表 1 模型试验相似比

Table 1 Model test similarity ratio

几何尺寸	材料密度	弹性模量	加速度	应力	质量	力	频率
1:15	1	1:15	1	1:15	1:3 375	1:3 375	3.873:1

试验材料采用珊瑚砂,取自中国南海某岛礁,其主要成分为碳酸钙,颗粒比重 G_s 为 2.787,最大干密度为 1.640 g/cm³,最小干密度为 1.300 g/cm³。试验用珊瑚砂颗粒级配,如图 1 所示。由图 1 可知,

试验用珊瑚砂 10%、30%、60% 有效粒径分别为 0.264、0.306、0.403 mm,不均匀系数 C_u 为 1.527,曲率系数 C_c 为 0.880。

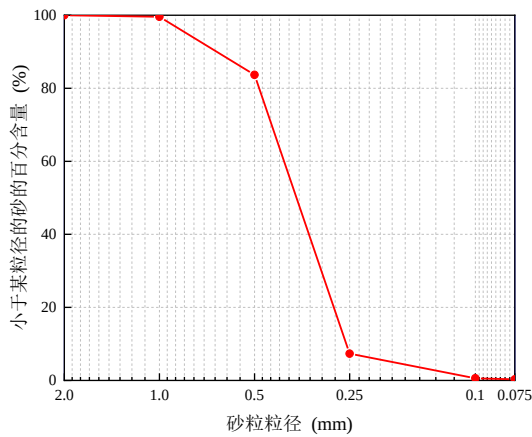


图 1 珊瑚砂颗粒级配曲线

Fig. 1 The grain size distribution curve of coral sand

1.2 模型试验装置

试验用模型箱尺寸为 950 mm×650 mm×1 000 mm(长×宽×高),采用有机玻璃板和型钢框架制作而成,如图 2 所示。采用作动器对模型桩进行加载:在模型箱上安装反力架,随后将作动器固定在反力架上,作动器受控制箱的控制,通过改变控制箱系统上的相关参数,使作动器达到对模型桩进行不同形式加载的目的。采用应变式位移计测试试验加载过程中模型桩位移,测量范围为±25 mm,共测量 3 处桩身位移,分别为地基表面以上 10 mm 处(D1),地基表面以上 100 mm 处(作动器在桩身的加载位置,D2),地基表面以上 190 mm 处(D3)。

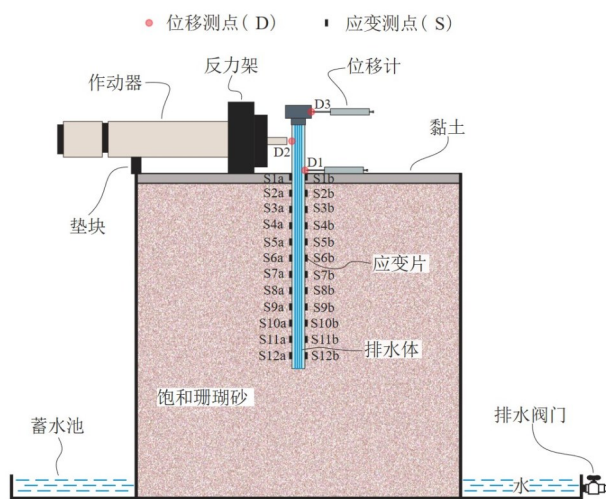


图 2 模型试验箱布置实物图

Fig. 2 Model test chamber layout diagram

试验模型桩选用有机玻璃材料制作^[16],为了满足相似比要求,在桩头位置进行配重处理,即在桩头安装实心圆柱形铁块对模型桩进行配重,桩身长

度为 770 mm,截面尺寸为 40 mm×40 mm 的正方形,弹性模量为 2.3 GPa。试验中对比分析了水平荷载作用下普通刚性桩和排水刚性桩受力响应,排水刚性桩在普通刚性桩桩身两侧设置排水通道,排水通道长、宽、厚分别为 750、20、3 mm,由塑料排水带、细铁丝网和土工布组成,如图 3 所示。应变片沿桩身位移桩身两侧对称粘贴(见图 2),同一侧应变片间距为 50 mm,每根模型桩布置 12 对。模型桩等效桩径为 45.14 mm,试验中,模型桩预埋在模型箱的中间位置,埋深为 600 mm。由于模型桩与模型箱的内壁距离以及模型桩桩底与模型箱底部的距离均大于 5 倍等效桩径,所以可以忽略边界效应的影响^[17]。

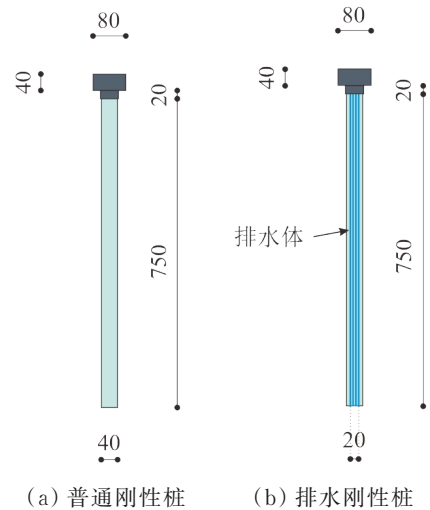


图 3 模型试验桩

Fig. 3 Model test pile

1.3 试验方案

试验共进行 3 种工况:首先研究静力加载条件下排水刚性桩受荷响应及 p - y 曲线,确定单桩水平极限承载力;随后对比分析循环荷载作用下普通刚性桩和排水刚性桩受荷响应及 p - y 曲线。由于海洋环境中荷载的频率主要分布在 0~1 Hz 范围内^[18],所以试验荷载频率采用 0.5 Hz。同时,循环荷载对桩基础的循环效应影响主要集中在大约前 1 000 个循环内^[19],因此,试验循环加载部分进行 1 000 次循环加载。而单向荷载相比于双向荷载能够引起更大的桩土系统侧向位移^[20],所以采用单向循环加载的方式对模型桩进行循环加载,且加载形式为正弦波,具体参数如表 2 所示。

采用分层夯实的方法来制备珊瑚砂地基,制备地基具体步骤如下:1)模型箱内铺设 3 层塑料防水膜,且在模型箱内侧安装两根内径为 40 mm、长 1 200 mm 的 PVC 管用以注水饱和珊瑚砂地基;2)分层夯实珊瑚砂,由下往上一共 10 层,前 9 层每层高

表 2 模型试验工况

Table 2 Model test conditions

工况	加载方式	桩类型	相对密实度/%	荷载幅值/N	加载频率/Hz	循环次数
1	静力	排水刚性桩	70			
2	循环	普通刚性桩	70	50	0.5	1 000
3	循环	排水刚性桩	70	50	0.5	1 000

度为 100 mm,第 10 层高度为 70 mm,当地基第 4 层夯实后,安置模型桩于该层中间位置,同时使用水准仪校正;3)完成夯实后,用抹子将珊瑚砂地基表面抹平;4)通过 PVC 管向珊瑚砂地基中注水,饱和珊瑚砂地基并静置 24 h;5)静置后的饱和珊瑚砂地基上面均匀铺设一层厚度为 50 mm 的饱和粉质黏土作为上覆盖层,并再次静置 24 h。

2 静力加载试验结果分析

静力加载试验使用作动器进行分级施加荷载,每级荷载为 50 N,当 10 min 内桩顶水平位移小于 0.01 mm 且荷载维持时间不小于 30 min 后施加下一级荷载,当桩基础在泥面处的横向位移已经超过 0.1 倍等效桩径,认为此时桩周土体已经破坏。图 4 为桩基在泥面处的横向位移随横向静力荷载的变化,其中,采用桩基在泥面处实际横向位移与等效桩径比值 y/D 表示横向位移。由图 4 可知,水平荷载施加初期,桩基在泥面处的横向位移随荷载的增长呈非线性增长趋势,随后呈线性趋势增加,当加载完第 8 级荷载之后,桩基础在泥面处的横向位移已经超过 0.1 倍等效桩径。

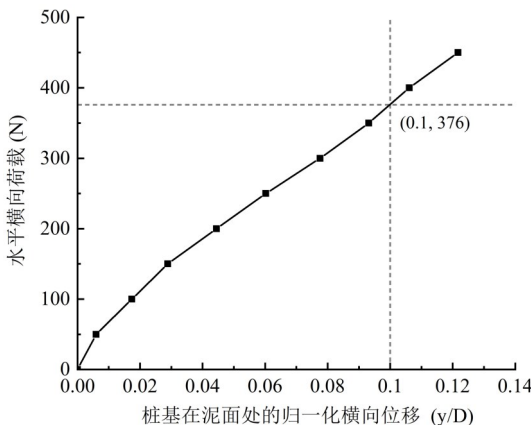


图 4 桩基在泥面处的横向位移随横向静力荷载的变化

Fig. 4 Lateral displacement of piles at the foundation surface as a function of lateral static load

静力加载过程中桩身弯矩分布如图 5 所示。随着荷载的逐级递增,桩身弯矩在不断增大,当荷载超过 300 N 时,增加幅度开始变小。这是因为当水平荷载增大到一定程度时,桩身的变形将达到或者

接近其极限状态,桩身无法承受更大的荷载,桩身的变形就会受到限制,从而使桩身弯矩的增大幅度变小。此外,桩身弯矩的最大值分布在泥面以下 2.0~2.8 倍等效桩径深度处;当荷载逐级增加时,每级荷载对应的桩身弯矩最大值所在位置以及弯矩分布曲线的反弯点均在下移。

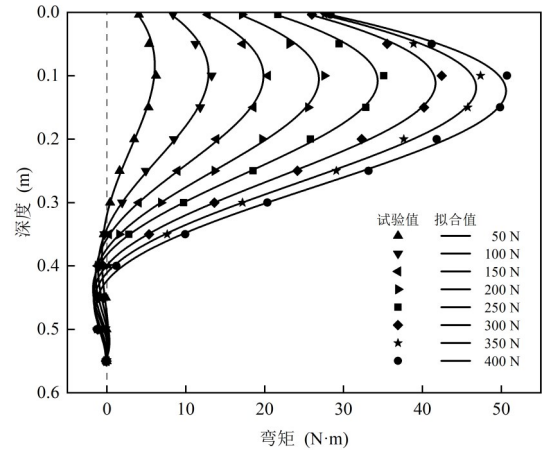


图 5 桩身弯矩分布图

Fig. 5 The pile bending moment distribution diagram

桩身弯矩从地表往下呈现随埋深先增大后减小的原因主要为:1)在地表附近,土体覆盖压力较小,土体抗力较低,土体未能有效限制桩的位移,桩身弯矩随深度增加逐渐增大。2)在桩长约 1/3 处,随着深度增加,土体覆盖压力增大,土体抗力随之提高,土体抗力逐渐抵消桩顶受到的水平作用力,桩截面的剪力在此区域降为零,弯矩达到最大值。3)从剪力为 0 的弯矩最大点往下,土体抗力随埋深进一步增大,剪力开始反向,弯矩因反向剪力的作用开始减小。

采用双曲线型 p - y 曲线模型分析沙土中桩基在水平荷载作用下的响应^[21-22],其表达式为

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k} + \frac{y}{p_u}} \quad (1)$$

式中: k 为地基初始反力模量; p_u 为水平极限土抗力。

朱斌等^[19]结合离心机试验结果,提出了地基初始反力模量和水平极限土抗力的计算公式。

$$p_u = K_p \times \gamma \times z \times D \quad (2)$$

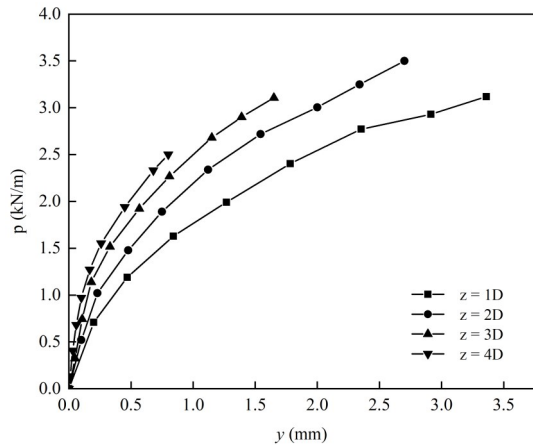
$$k = n_h \times z^\alpha \quad (3)$$

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (4)$$

式中: K_p 为被动土压力系数; z 为地基深度; n_h 为地基反力系数; α 为初始参数,取 0.7。

静力加载 p - y 曲线如图 6 所示。由图 6 可知,随着砂土地基埋深的增加,砂土地基的刚度逐渐增大, p - y 曲线斜率逐渐增大,而 p - y 曲线斜率增大的

幅度逐渐减小。珊瑚砂颗粒高棱角度在浅层易于形成较强的颗粒嵌锁结构,初期刚度增长显著,而随着埋深增加,珊瑚砂颗粒棱角处应力集中加剧其破碎,原有嵌锁结构部分破坏,粒间接触点重新排列,趋向更密实但咬合作用减弱,从而使 p - y 曲线斜率增大幅度逐步放缓,同时随着地基埋深的增加,模型桩周围的珊瑚砂地基具有更大的摩擦力,且对模型桩的约束作用也会逐渐增强。这些因素使模型桩在相同位移下会产生更大的土反力,地基也会具有更大的刚度。然而,随着地基埋深的进一步增加,这些性质的变化可能会逐渐趋于稳定,最终导致地基的侧向刚度逐渐接近于一个稳定值,从而使 p - y 曲线的斜率增大幅度逐渐变小。

图6 静力荷载作用下的 p - y 曲线Fig. 6 The p - y curve under static load

3 循环荷载下排水刚性桩与普通刚性桩对比分析

3.1 桩顶位移与桩身弯矩

图7为循环荷载作用下普通刚性桩与排水刚性桩桩顶位移示意图,其中,工况2为普通刚性桩,工况3为排水刚性桩。普通刚性桩与排水刚性桩的桩顶位移变化曲线形式一致,随着波形为正弦波的水平单向循环荷载的施加,两个桩顶位移均呈现正弦波式变化,并且桩顶位移均在不断增大,当水平荷载加载到第800 s时,桩顶位移几乎达到峰值,后续随着循环荷载的持续施加,两个桩顶位移均变化较小。然而,在整个循环加载过程中,普通刚性桩的桩顶位移要大于排水刚性桩。珊瑚砂因其多孔隙、颗粒形状不规则及易破碎性,在循环荷载下表现出易液化倾向。普通刚性桩无法有效排水,循环荷载产生的超静孔隙水压力在珊瑚砂地基中快速累积,显著降低土体有效应力和抗剪强度,桩周土约束能力急剧下降,从而产生更大的累积桩顶位移,而排水体为超静孔隙水压力的消散提供了路径,有效应

力得以维持,土体抗剪强度和刚度退化较小,抑制了塑性变形累积。另一方面,排水刚性桩的桩-土界面法向接触应力和界面摩擦阻力能够得到充分发挥,增强了桩侧的抗滑能力。因此,排水刚性桩的桩周土对桩的支撑能力更强,表现出更优的位移控制性能。

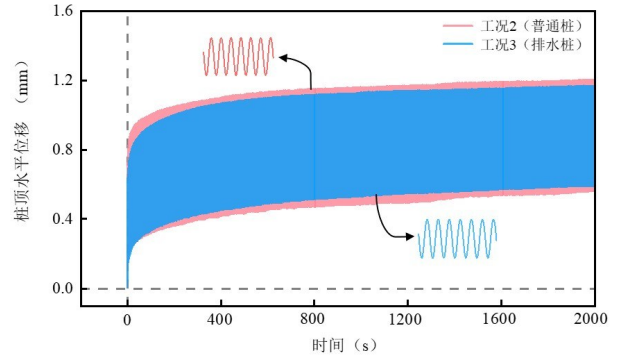


图7 循环荷载下桩顶位移示意图

Fig. 7 Displacement diagram of pile top under cyclic load

图8为工况2、工况3弯矩峰值示意图,其中, $M_{i\max}$ 表示测点 i 处的弯矩峰值, $i=1,2,\dots,12$ 。在各测点处,普通刚性桩的弯矩峰值整体上均大于排水刚性桩,但是,在测点2处,排水刚性桩的弯矩最大值要大于普通刚性桩。此外,两者在各测点处的弯矩峰值沿地基深度变化的峰值均出现在测点4附近(即地基表面以下3~4倍等效桩径深度处)。排水刚性桩的弯矩总体相对普通桩较小的原因与其总体位移较小有关,说明排水刚性桩通过提高桩周土对于桩的约束作用,减小桩的位移,从而减小桩的弯曲和内力。排水条件下桩周土固结密实及有效应力相对较高、土颗粒咬合作用更好,桩-土界面形成更紧密的“硬壳”区域。其进一步限制桩身侧移,使弯矩分布更平缓。而普通桩在循环荷载下桩周

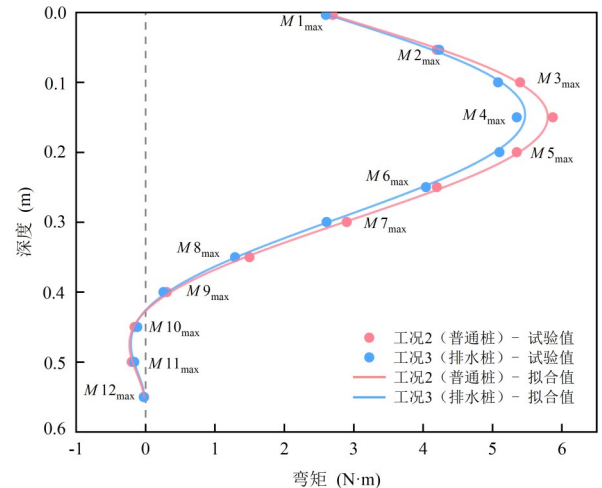


图8 工况2、工况3弯矩峰值示意图

Fig. 8 The schematic diagram of peak bending moment in working conditions 2 and 3

土可能软化,界面摩擦阻力下降,桩身易发生局部脱黏或滑移,加剧弯矩集中。

综合分析图7、图8可知,循环荷载作用下,珊瑚砂骨架会发生不可逆的颗粒重排和潜在的颗粒破碎,导致体积收缩趋势。普通刚性桩的桩身没有排水通道,在其受到水平循环荷载时,珊瑚砂地基中的孔隙水无法排出,导致孔隙水压力积累、增大,从而使有效应力降低,削弱了颗粒间的摩擦咬合作用,导致土体抗剪强度和刚度衰减。这种积累的孔隙水压力会导致桩土界面的摩擦力较小,从而引起较大的桩顶水平位移和桩身弯矩。相比之下,排水刚性桩的桩身设置有排水通道,在加载过程中能够允许珊瑚砂地基中的孔隙水自由排出,这有助于降低孔隙水压力的积累,从而增强了土体的有效应力。有效应力的增加使得桩土界面的摩擦力增大,桩身所受的侧向土压力也相应增大,土体对桩身的侧向约束。这有助于限制桩身的位移和弯矩。因此,排水刚性桩在相同条件下具有较小的桩顶水平位移和桩身弯矩。

此外,珊瑚砂地基具有一定的易液化特征,即在受到循环或者振动荷载时,地基中的珊瑚砂颗粒会失去颗粒间的接触,易形成液态状态,导致地基的强度和刚度明显降低。在这种情况下,普通刚性桩由于无法排水,桩身周围的液化地基会更容易发生流动,进一步增加了桩顶水平位移和桩身弯矩。

然而,在测点2处,排水刚性桩弯矩的最大试验值要略微大于普通刚性桩。这是因为测点2位于黏土层与珊瑚砂层的交界附近。随着水平循环荷载的施加,排水刚性桩周围底部珊瑚砂地基中的孔隙水会随着排水体向上排出,但是珊瑚砂上部覆盖有一层黏土,而黏土的透水性很弱,使得排水刚性桩的排水体不能及时将该处的孔隙水排出,所以使得该处孔隙水积累,形成局部高孔隙水压力区,有效应力降低,土体软化,削弱了该深度处土体对桩身的约束作用,因此,桩身在该截面(测点2)需要承受更大的弯矩以抵抗相同的荷载,最终导致测点2处排水刚性桩的弯矩最大试验值要略微大于普通刚性桩。

3.2 p - y 曲线滞回圈

图9为工况2、工况3的 p - y 曲线滞回圈,其中, D 为等效桩径。由图9可知,工况2和工况3中的 p - y 曲线滞回圈的斜率均随着土层深度的增加而增大。一方面这是因为随着土层深度增加,土体的上覆压力显著增大,土颗粒间的接触力增强,水平变形受到更强的限制。另一方面浅层土体有效应力低,在循环荷载下易发生塑性变形和颗粒重排,导致刚度

更快地退化,其 p - y 曲线滞回圈表现出明显中部收缩变窄的“捏缩效应”。这一现象主要源于土体的塑性累积损伤与孔隙水压力动态演化,主要原因包括:1)刚度退化机制,即随着往复荷载的持续施加,土颗粒发生不可逆颗粒相对移动,结构逐渐破坏,土体刚度软化,曲线斜率持续下降。若孔隙水压力上升使有效应力趋近于零,滞回圈退化为狭窄的“纺锤形”,体现为典型的捏缩效应。2)能量耗散与路径依赖性,捏缩效应反映了卸载-再加载路径中土体抗力的滞后性。卸载时曲线斜率刚度较大,但再加载时斜率显著低于骨干曲线,滞回圈中部形成“平缓段”。这种路径依赖性消耗更多能量,表现为滞回圈包围面积增大。

而深层土体因更高的围压,其塑性变形受到约束,土体行为更接近线弹性状态,表现为滞回圈形状更饱满,加载与卸载路径更接近,斜率较高。以上因素导致了 p - y 曲线滞回圈的斜率随着土体深度的增加而增大。此外,随着埋深的增大,工况2、3的 p - y 曲线滞回圈的面积出现逐渐减小的现象,这是由于在桩土相互作用系统中, p - y 曲线滞回圈的面积代表了土体对水平循环荷载的能量耗散程度,由于深层土体具有较高的刚度,它们能够更有效地耗散水平循环荷载的能量,因此 p - y 曲线滞回圈的面积逐渐减小。

选取图9中各 p - y 曲线滞回圈中土抗力 p 和桩土相对位移 y 的最大值,见表3。综合分析图9和表3可知,在同一深度处,由排水刚性桩组成的桩土相互作用系统的 p - y 曲线滞回圈的面积和最大土抗力 $p_{\max}$ 均大于由普通刚性桩组成的桩土相互作用系统,而最大桩土相对位移则是前者小于后者。发生该现象的原因是,在水平循环荷载作用下,土体中的孔隙水会发生流动,而排水刚性桩的两侧设置有排水体,因此,珊瑚砂地基中的孔隙水就可以更容易地通过排水通道排出地基,而含有普通刚性桩的珊瑚砂地基中的孔隙水则无法排出,从而使含有排水刚性桩的珊瑚砂地基有效应力增大,导致地基土体具有更大的刚度和土抗力,并且减小了土体的侧向变形。

选取每个循环荷载周期内的循环荷载最大值对应的土抗力 p_N (N 为循环次数)来分析水平单向循环荷载作用下土抗力的衰减规律,如图10所示,其中,采用 p_N/p_1 (p_1 为第1循环荷载作用周期内的循环荷载最大值对应的土抗力)对土抗力进行归一化处理。随着荷载循环次数的增加,含有排水刚性桩的工况3中土抗力衰减幅度很小,几乎没有衰减。而普通刚性桩对应的工况2中土抗力衰减就较为明

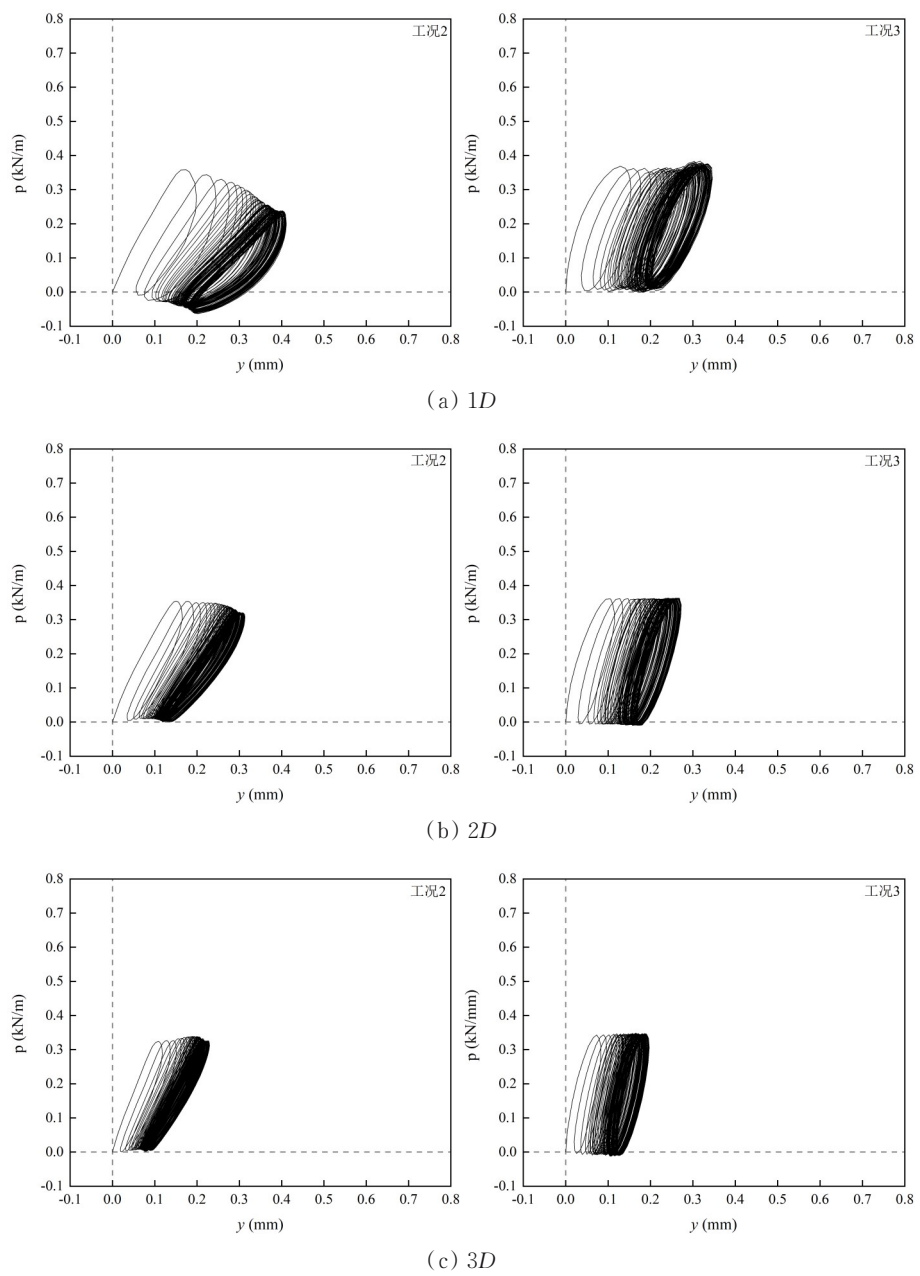


图 9 工况 2、工况 3 的 p - y 曲线滞回圈

Fig. 9 The p - y curve hysteresis loop of working conditions 2 and 3

表 3 最大土抗力和桩土相对位移

Table 3 The maximum soil resistance and pile-soil relative displacement

工况	最大土抗力 $p_{\max}/(\text{kN/m})$			最大桩土相对位移 $y_{\max}/\text{mm}$		
	1D	2D	3D	1D	2D	3D
工况 2	0.361	0.352	0.339	0.409	0.315	0.231
工况 3	0.383	0.364	0.351	0.345	0.275	0.198

显,并且其衰减幅度随着地基埋深的增加逐渐减小,在地基表面以下 1 倍等效桩径处的最终土抗力仅为初始土抗力的 0.6 倍,在 3 倍等效桩径处土抗力衰减幅度较小,与工况 3 较为接近。发生以上现象主要是由于施加的循环荷载幅值较小,且排水刚性桩两侧设置有排水体。在较小的循环荷载作用

下,桩侧土体主要发生的是弹性变形,此外,排水刚性桩两侧的排水体也能及时将地基中的孔隙水排到地基外,使得工况 3 中的珊瑚砂地基在循环荷载下能够保持较高的刚度并维持较大的土抗力。而对于含有普通刚性桩的珊瑚砂地基来说,虽然施加的循环荷载幅值较小,但在地基表面还覆盖有一层透水性极弱的黏土,而普通刚性桩的两侧又没有排水体,从而导致地基中的孔隙水不能排到地基外,更多的是积累在黏土层与珊瑚砂地基的交界处,从而导致其土抗力衰减明显,尤其在最靠近黏土层的 1 倍等效桩径深度处衰减最为严重。因此,随着循环荷载的持续作用,普通刚性桩对应的珊瑚砂地基土抗力衰减幅度大于排水刚性桩,但是这种现象会

随着地基埋深的增大而逐渐减小。

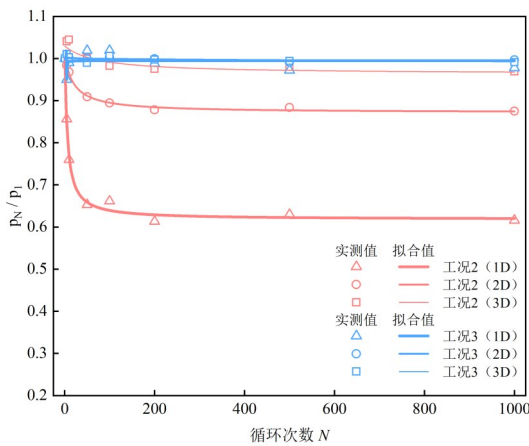


图 10 工况 2、工况 3 土抗力衰减示意图

Fig. 10 The schematic diagram of soil resistance attenuation of working conditions 2 and 3

将第 1 个、第 100 个循环加载周期得到的 p - y 曲线滞回圈的主斜率记为 k_1 、 k_{100} ，定义动刚度的衰减幅度 α_k 为 $(k_1 - k_{100}) \times 100\% / k_1$ ，工况 2、工况 3 的动刚度衰减幅度如图 11 所示。由图 11 可知，工况 2 在

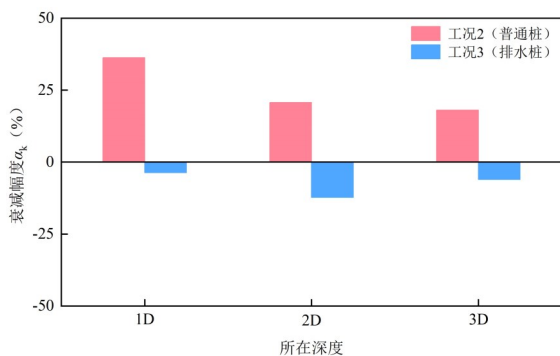


图 11 工况 2、工况 3 动刚度衰减幅度示意图

Fig. 11 The schematic diagram of dynamic stiffness attenuation amplitude in working conditions 2 and 3

1~3 倍等效桩径深度处土体动刚度从第 1 个循环加载到第 100 个循环加载分别衰减了 36.22%、20.68%、18.02%，工况 3 分别衰减了 -3.71%、-12.32%、-6.09%。由此可知，在相同的水平单向循环荷载作用下，同一位置处，普通刚性桩周围土体的动刚度衰减幅度要明显大于排水刚性桩。排水刚性桩对应的工况中动刚度衰减幅度出现了负值，说明在循环荷载作用下，排水刚性桩周围土体的刚度发生增大。以上现象发生的原因一方面可能是由于排水刚性桩的排水体有助于土体的排水固结，循环荷载促使土体体积收缩，有效应力增加。另一方面循环荷载促使土体颗粒重新排列，土颗粒接触点数量增加，形成更稳定的力链网络，同时排水固结使土体孔隙比减小，密实度增加，提升了土体的宏观刚度。此外，工况 2、工况 3 在 1D 深度

处的动刚度衰减幅度要大于 2D、3D 深度，说明接近地基表面的土体在水平循环荷载作用下更容易破坏、丧失承载力。

4 结论

1) 静力加载条件下，桩身弯矩会随着荷载幅值的增加而增大，同时，反弯点会下降，且桩身弯矩最大值出现在地基表面以下 2.0~2.8 倍等效桩径处。通过 p - y 曲线中可以得出随着地基埋深的增大，珊瑚砂地基的刚度也会逐渐增大，且这种增大趋势会逐渐放缓。

2) 水平循环荷载加载条件下，普通刚性桩与排水刚性桩的桩顶位移变化趋势相似，均呈现正弦波式变化，且普通刚性桩的桩顶位移要大于排水刚性桩；普通刚性桩的弯矩峰值大于排水刚性桩，两者在各测点处的弯矩峰值沿地基深度变化的峰值均出现在地基表面以下 3~4 倍等效桩径深度处。

3) 水平循环荷载加载条件下，普通刚性桩与排水刚性桩 p - y 曲线滞回圈的斜率均随着土层深度的增加而增大；在相同荷载下，排水刚性桩土抗力衰减幅度和动刚度衰减幅度均小于普通刚性桩，但最大土抗力和动刚度则是大于普通刚性桩。

4) 排水刚性桩通过集成刚性承载与主动排水功能，显著提升地层桩基稳定性。其施工可行性核心在于解决长期堵塞风险，可以采用钢丝网+无纺布土工布双防护过滤细颗粒，耐蚀排水管抵抗化学/生物淤堵，网状排水通道提供冗余路径，桩顶检修盖支持高压冲洗维护。其应用场景包括：滨海建筑基础（替代刚性桩+碎石桩双体系）、交通设施（桥梁墩台、高铁路基）、能源工程（滩涂电力桩基）、装配式基础升级（结合预制桩基与智能监测）等。

参考文献

- [1] 肖鹏. 微生物温控加固钙质砂动力与液化特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
XIAO P. Study on dynamic and liquefaction characteristics of temperature controlled MICP-treated calcareous sand [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [2] 汪稔, 吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究: 从事珊瑚礁研究 30 年 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 202-207.
WANG R, WU W J. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs: engaged in coral reef research for 30 years [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 202-207. (in Chinese)
- [3] 梁珂, 何杨, 陈国兴. 南沙珊瑚砂的动剪切模量和阻尼

- 比特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 23-31, 38.
- LIANG K, HE Y, CHEN G X. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of coral sand from Nansha Islands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 23-31, 38. (in Chinese)
- [4] 周书, 郭桢, 卢劲锴, 等. 南海西沙典型珊瑚砂岛礁场地地震响应特征影响因素研究[J/OL]. 工程地质学报, 2024: 1-13. (2024-06-17). <https://link.cnki.net/doi/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0414>.
- ZHOU S, GUO Z, LU J K, et al. Study on the seismic response and its influence factors of coral reef island in Xisha islands, South China Sea [J/OL]. Journal of Engineering Geology, 2024: 1-13. (2024-06-17). <https://link.cnki.net/doi/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0414>. (in Chinese)
- [5] 郭桢, 蒲建, 卢劲锴, 等. 南海西沙岛礁非饱和珊瑚砂共振柱-弯曲元试验研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1552-1562.
- GUO Z, PU J, LU J K, et al. Resonant column and bender element tests of unsaturated coral sand on Xisha islands in South China Sea [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1552-1562. (in Chinese)
- [6] 邱筱童, 尹训强, 王桂萱. 考虑不同影响因素的珊瑚岛礁场地地震响应分析[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(1): 131-138.
- QIU X T, YIN X Q, WANG G X. Seismic response analysis of coral island reef site considering different influencing factors [J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(1): 131-138. (in Chinese)
- [7] 王青桥, 韦晓, 王君杰. 桥梁桩基震害特点及其破坏机理[J]. 震灾防御技术, 2009, 4(2): 167-173.
- WANG Q Q, WEI X, WANG J J. Characteristics and mechanisms of earthquake damage of bridge pile foundation [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009, 4(2): 167-173. (in Chinese)
- [8] ASHOUR M, NORRIS G. Modeling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 420-428.
- [9] 张小玲, 朱冬至, 许成顺, 等. 强度弱化条件下饱和砂土地基中桩-土相互作用 p - y 曲线研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2252-2260.
- ZHANG X L, ZHU D Z, XU C S, et al. Research on p - y curves of soil-pile interaction in saturated sand foundation in weakened state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2252-2260. (in Chinese)
- [10] ROESEN H R, IBSEN L B, ANDERSEN L V. Experimental testing of monopiles in sand subjected to one-way long-term cyclic lateral loading [C]//Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.
- [11] 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.
- CAO G W, DING X M, ZHANG D X, et al. Bearing behaviors of large-diameter monopiles in soft clay under horizontal cyclic loading based on centrifugal model tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1574-1585. (in Chinese)
- [12] ACHMUS M. Design of axially and laterally loaded piles for the support of offshore wind energy converters [C]//Proceedings of the Indian Geotechnical Conference GEOTrendz-2010: Mumbai, India, 2010: 92-102.
- [13] 胡安峰, 南博文, 陈缘, 等. 基于沙土刚度衰减模型的修正 p - y 曲线法[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(12): 1316-1323.
- HU A F, NAN B W, CHEN Y, et al. Modified p - y curves method based on degradation stiffness model of sand [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(12): 1316-1323. (in Chinese)
- [14] 凌贤长, 胡庆立, 欧进萍, 等. 土-结爆炸冲击相互作用模爆试验相似设计方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1249-1253.
- LING X C, HU Q L, OU J P, et al. A scale modeling method of simulation explosion test of soil-structure impactive interaction due to exploding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1249-1253. (in Chinese)
- [15] 吴琪, 丁选明, 陈志雄, 等. 不同地震动强度下珊瑚礁砂地基中桩-土-结构地震响应试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 571-580.
- WU Q, DING X M, CHEN Z X, et al. Seismic response of pile-soil-structure in coral sand under different earthquake intensities [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 571-580. (in Chinese)
- [16] 李雨润, 胡森, 邹泽, 等. 对称斜群桩侧向动力响应及 p - y 曲线规律对比试验研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(2): 10-21.
- LI Y R, HU S, ZOU Z, et al. Comparative experimental research on lateral dynamic response and p - y curve rule of symmetrical vertical and batter pile groups [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(2): 10-21. (in Chinese)
- [17] 曹卫平, 谢泽东, 岳亚新, 等. 受水平循环荷载影响的斜桩 p - y 曲线构建及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1594-1604, 1614.
- CAO W P, XIE Z D, YUE Y X, et al. The formation and application of batter pile p - y curve influenced by lateral cyclic load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(5): 1594-1604, 1614. (in Chinese)
- [18] ELLERS F S. Advanced offshore oil platforms [J]. Scientific American, 1982, 246(4): 38-49.

- [19] 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 B, XIONG G, LIU J C, et al. Centrifuge modeling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1807-1815. (in Chinese)
- [20] JEONG S, PARK J, KO J, et al. Analysis of soil resistance on drilled shafts using proposed cyclic p - y curves in weathered soil [J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 12(3): 505-522.
- [21] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C, SAFLEKOU S. Centrifugal testing of laterally loaded piles in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(2): 208-216.
- [22] KIM Y, JEONG S, WON J. Effect of lateral rigidity of offshore piles using proposed p - y curves in marine clay [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2009, 27(1): 53-77.
- (编辑 XXX)