

竖向循环荷载对钙质砂中群桩基础承载特性影响

陆科宁

苏州科技大学土木工程学院 江苏苏州 215009

摘要: 本研究针对南海岛礁钙质砂地基中群桩在竖向循环荷载下的承载特性展开系统探究。通过室内模型试验与数值模拟相结合的方法,揭示了钙质砂地基中群桩的力学响应机制。模型试验表明:静载作用下群桩 Q-S 曲线呈现准线性、过渡和破坏三阶段特征,极限承载力达 250N,高荷载阶段侧摩阻力衰减而桩端阻力显著增强;循环荷载作用下,累积塑性变形随荷载比增大呈非线性增长,S-N 曲线显示沉降速率由快趋缓,高荷载比工况下增幅达 18%。

关键词: 钙质砂;群桩基础;模型试验

1 研究背景

南海岛礁工程受钙质砂特殊岩土特性制约,其高孔隙率、低抗剪强度(较石英砂低 30%~50%)及显著颗粒破碎特征^[1-4]易引发桩基贯入失稳等问题。针对海洋群桩多向循环荷载作用下的承载机制缺失,既有研究多聚焦于单桩静载特性^[5-15]。本文通过耦合物理-数值模型,系统揭示钙质砂群桩体系在竖向循环荷载下的应力路径依赖性、非线性荷载传递规律及渐进失效模式,构建特殊岩土介质中群桩循环承载理论框架,为深基础工程优化提供科学依据。

2 试验概括

2.1 实验材料

本次试验主要模拟群桩在钙质砂中的动力特性。

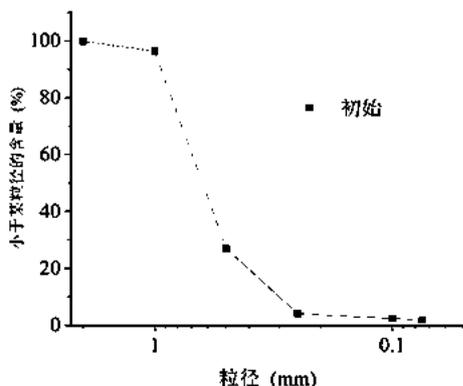


图1 级配曲线图

本次试验使用钙质砂为未胶结松散珊瑚碎屑沉积物。在网上购置并进行配比,钙质砂颗粒粒径均小于 5mm,不均匀系数 $C_u=1.97$, 曲率系数 $C_c=4.90$, 比重 $G_s=2.80$, 最大

孔隙比 $e_{max}=1.13$, 最小孔隙比 $e_{min}=0.77$ 。试验所用钙质砂含水率为 5.23%, 颗分曲线分别见图 1。

2.2 试验方案

本研究模型桩参数为:桩径 20mm、壁厚 2mm、桩长 500mm、埋深 400mm,采用铝合金材料(弹性模量 71GPa)制备中空薄壁桩体,通过桩端铁片焊接工艺消除土塞效应(构造详见图 2)。基于群桩抗弯刚度控制与边界效应抑制原则,承台尺寸设计为 260mm×260mm×20mm 铝合金板,桩端嵌入深度 10mm,实现桩-承台刚性固结。



图2 模型桩图

本试验加载系统采用多自由度激振试验装置,主体由伺服液压作动器与四柱式反力框架构成。系统具备 10kN 峰值动载输出能力,通过作动器集成的高精度位移反馈系统,可精准调控荷载幅值、加载频率、加载速率及循环次数等核心控制参数,并同步记录荷载-位移时程数据。数据采集架构由工控计算机与 DNDAS 动态信号采集系统构成,基于以太网通讯协议实现应变信号的同步采集与远程传输,确保

测试数据的实时性与完整性。实验设备如图 3 所示。

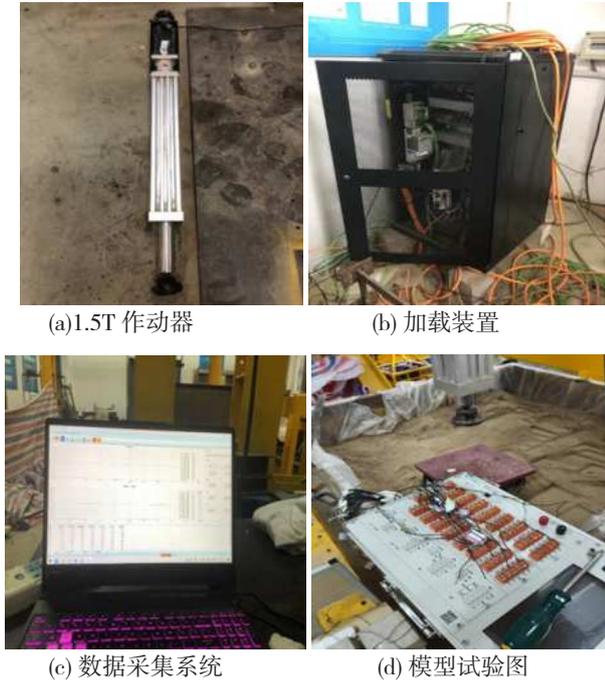


图 3 设备试验图

应变监测网络仅布设在六根基桩的选定基准桩位(如图 4 所示),通过六根基桩共计布设 24 对应变片监测单元实现参量采集。

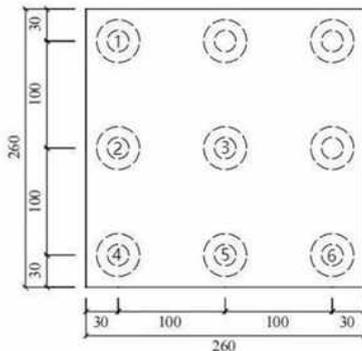


图 4 测试桩布置示意图

加载方案分为静力与循环两类:

静力加载:以极限承载力 475N 的 1/10 为级差实施分级加载,每级荷载持荷至位移收敛(监测周期 5~60min),通过稳定判据确定群桩极限承载力。

循环加载:采用 1Hz 频率模拟低频自重荷载,设置恒载比 $\lambda = 0.2$ 、动载比 $M=0.15\sim 0.55$ (波形见图 5),单工况循环次数 2000 次。终止条件包括:累计沉降 $> 40\text{mm}$ 、荷载-沉降曲线缓变、沉降量达前级 2 倍或桩端阻力未充分发展时

沉降 $> 80\text{mm}$ (加载方案见表 1)。

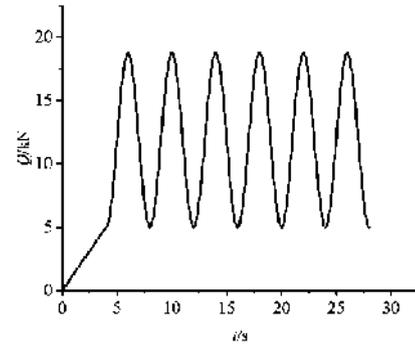


图 5 测试桩布置示意图

表 1 模型试验加载方案

荷载类型	荷载特点	循环次数
静荷载	确定极限承载力 Q_u	—
	$M=0.15$	2000
	$M=0.25$	2000
动荷载	$M=0.35$	2000
	$M=0.45$	2000
	$M=0.55$	2000

3 试验成果分析

3.1 静载下 Q-S 曲线总体特征分析

(基于荷载-位移(Q-S)曲线特征,可划分为三个阶段:准线性阶段($0 \leq Q < 150\text{N}$)呈现初始高刚度特性,位移随荷载近似线性增长(斜率恒定);过渡阶段($150 \leq Q < 250\text{N}$)位移增速提升 3.2 倍,非线性特征显著, $Q=250\text{N}$ 时累计沉降 1.31mm(较 $Q=200\text{N}$ 增幅 59.7%),反映桩周土体剪胀或局部破坏前兆;破坏阶段($Q \geq 250\text{N}$)位移急剧上升, $Q=300\text{N}$ 时沉降量达 2.3mm(较 $Q=250\text{N}$ 增幅 90.8%),表明土体抗剪强度达到临界状态。

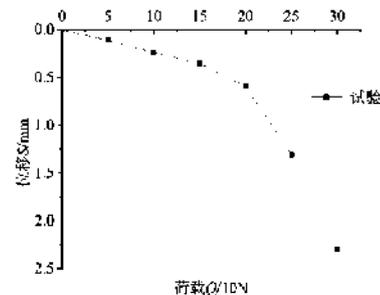


图 6 静荷载试验的 Q-S 曲线图

3.2 静载下桩身平均轴力传递特性

本节基于提供的实验数据,分析了在不同静荷载(50N、100N、150N、200N、250N、300N)作用下,群桩在不同桩深(190mm、290mm、390mm、490mm)条件下的桩身平均轴力分布和平均侧摩阻力特性。探讨荷载传递的规律以及各桩在荷载传递中的作用。桩身平均轴力沿桩深轴力分布特征如图6。

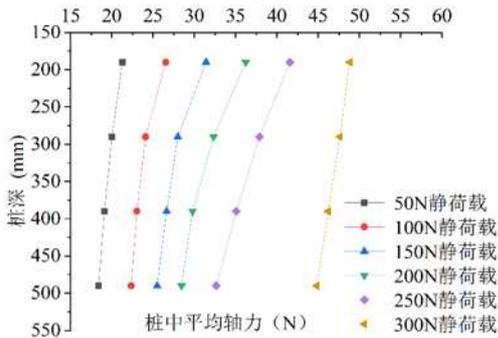


图6 桩身平均轴力沿桩深轴力分布特征如

试验数据表明,桩顶轴力沿深度呈递减分布,衰减速率较缓。桩顶作为直接受荷区域,轴力峰值源于初始位移激发的桩侧摩阻力优先发挥。轴力梯度分析显示:深度190mm与490mm处轴力差异小于30%,印证桩侧摩阻力整体较弱,荷载主要由桩端阻力承担。

3.3 静载下桩侧摩平均阻力传递特性分析

静载试验中桩侧摩阻力呈现深度非线性分布特征(图7),浅层(140-240mm)侧摩阻力随荷载呈先增后减趋势。200N荷载时,240mm深度侧摩阻力达619.38Pa,较140mm(423.62Pa)提升46.2%,反映中部土体剪胀效应与钙质砂破碎共同作用下的摩阻力强化现象。。

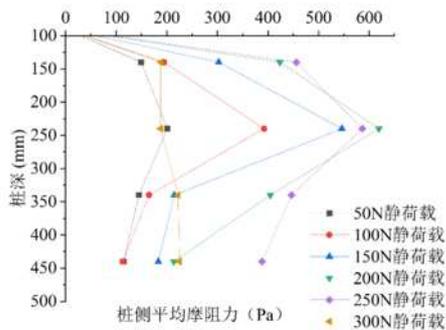


图7 不同静荷载下桩侧平均摩阻力随深度的变化

3.4 循环荷载下的时程曲线分析

循环荷载作用下的时程曲线能够直观揭示试样在不同行为阶段下的受力变形规律及其演化特性。图3-3所示为循环荷载比($M=0.15、0.25、0.35、0.45、0.55$ 条件下的荷载-位移关系,其中横轴表示时间(单位:秒),纵轴表示位移(单位:毫米)。基于图中数据,可以归纳以下主要规律和现象,并对其力学意义进行深入探讨。

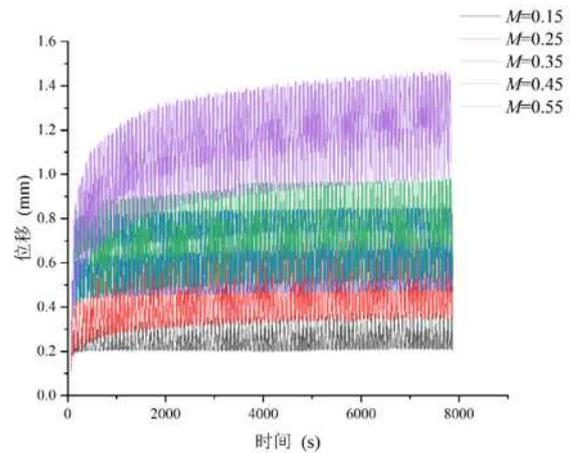


图8 不同循环荷载比的时程图

循环荷载比(M)显著调控材料位移响应及变形机制:随 M 增大,位移幅值与累积变形量非线性递增。 $M \leq 0.15$ 时位移呈线性特征,弹性变形占比 $> 95\%$; $M=0.25-0.45$ 时塑性变形占比升至 $30\%-60\%$,滞回环面积扩展; $M=0.55$ 时塑性变形占比 $> 75\%$, $Q-S$ 曲线由线性转为非线性。位移振幅演化分为初期波动($N < 50$,材料结构重组)与稳定阶段($N > 200$,动态平衡态),位移速率渐趋稳定。该研究为循环荷载下材料本构模型优化提供了理论支撑。

3.5 循环荷载下的S-N曲线分析

循环荷载作用下的S-N曲线直观地反映了材料在不同行为阶段的受力变形规律及其损伤演化特性。图9显示了不同循环荷载条件下的荷载-位移关系曲线,其中横轴为循环次数,纵轴为位移(单位:毫米)。基于图中数据,可以总结并分析以下主要规律和现象,以揭示试样在循环荷载作用下的关键力学行为。

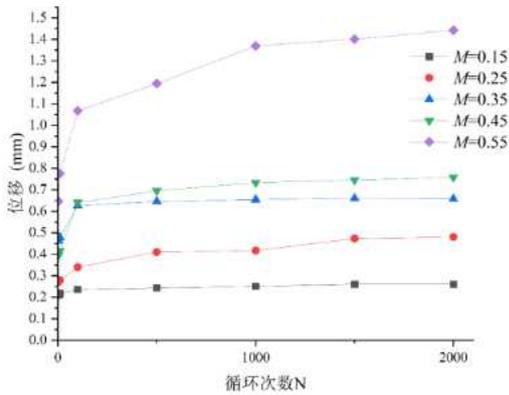


图9 循环荷载下的S-N图

试验结果表明,群桩沉降演化呈现显著的循环次数(N)与动荷载比(M)双控特性:沉降量随N增加呈初期增速显著(N<50)、后期渐趋平缓(N>200)的非线性增长规律,主要由于初期钙质胶结破坏与桩土界面结构重组引发不可逆变形积累,后期系统进入动态平衡状态。对比分析发现,低荷载比(M≤0.25)时沉降增量不足总变形的15%,土体以弹性变形为主;当M≥0.35时沉降增幅提升至40%~65%,对应桩身塑性压缩及桩周土体剪切滑移现象。值得关注的是,M=0.55工况下塑性变形贡献度达80%以上,表明高荷载比诱发桩土接触面形成连续塑性区,导致滞后效应强化与累积沉降不可逆性加剧。该规律揭示了循环荷载作用下群桩基础渐进破坏机制。

3.6 循环荷载下的桩身平均侧摩阻力分析

由图10可得,桩基侧摩阻力在循环荷载作用下的演变呈现以下特征:

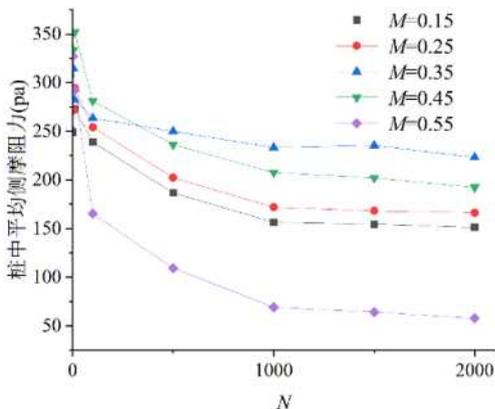


图10 桩中平均侧摩阻力在不同动荷载比下的变化图

桩侧摩阻力衰减速率与动荷载比(M)、循环次数(N)呈三阶段非线性演化:快速衰减期(N≤500,M=0.55时衰减率64.39%)、过渡稳定期(500<N≤1500)及长期稳定期(N>1500)。M≤0.45时,水平应力增量与颗粒破碎动态平衡,摩阻力降幅收敛至8%~12%;M=0.15、0.25工况因桩身沉降不足引发颗粒破碎主导的持续弱化。极端荷载(M=0.55)在N=100即触发界面失稳及破碎链式反应,衰减速率较常规工况提高2.3~3.1倍,揭示高幅值荷载对接触状态的突变效应。

4 结论

本文通过静/循环荷载试验揭示钙质砂群桩荷载传递机制:群桩效应源于桩-土-承台体系协同作用,非线性荷载传递与损伤累积主导力学响应。主要结论如下:

(1) 本文通过静/循环荷载试验揭示钙质砂群桩荷载传递机制:群桩效应源于桩-土-承台体系协同作用,非线性荷载传递与损伤累积主导力学响应。

(2) 循环荷载下累积沉降随M、N非线性增长,M=0.55时沉降量较M=0.15工况增加18.6%,M≥0.45时侧摩阻力呈指数衰减(N=500时降幅64.39%),归因于颗粒破碎引发的界面弱化。

(3) 循环荷载下累积沉降随M、N非线性增长,M=0.55时沉降量较M=0.15工况增加18.6%,M≥0.45时侧摩阻力呈指数衰减(N=500时降幅64.39%),归因于颗粒破碎引发的界面弱化。

研究成果为岛礁桩基设计提供理论依据,后续需结合离散元-有限元耦合方法构建破碎度-摩擦系数关联模型。

参考文献:

- [1] 刘崇权,汪稔.钙质砂物理力学性质初探[J].岩土力学,1998,19(1):32-7.
- [2] 刘崇权,杨志强,汪稔.钙质土力学性质研究现状与发展[J].岩土力学,1995,16(4):74-83.
- [3] 吴京平,楼志刚.钙质土的基本特性.第七届土力学及基础工程学术会议论文集[C].北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [4] 汪轶群.钙质砂宏观力学特性试验及离散元模拟[D].浙江大学,2016.
- [5] 单华刚.珊瑚礁钙质土中桩基工程承载性状研究[D].中国科学院武汉岩土力学研究所,2000.

- [6] 初晓锋,李志刚,汪稔,etal. 钙质砂中锚定物锚固性能的试验研究[J]. 岩土力学,2002,(03):368-71.
- [7] 虞海珍,汪稔,赵文光,etal. 波浪荷载下钙质砂孔压增长特性的试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2006,(11):86-9.
- [8] 王丽,鲁晓兵,时忠民. 钙质砂地基中桶形基础水平动载响应实验研究[J]. 工程力学,2010,27(02):193-203.
- [9] 江浩,汪稔,吕颖慧,etal. 钙质砂中群桩模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3023-8.
- [10] 江浩,汪稔,吕颖慧,etal. 钙质砂中模型桩的试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(03):780-4.
- [11] 秦月,孟庆山,汪稔,etal. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(06):1714-20+36.
- [12] 杨超,江浩,岳健,etal. 钙质砂中桩基承载性状的模型试验研究[J]. 长江科学院院报,2017,34(01):87-90.
- [13] 王新志,湛民,魏厚振,etal. 车辆荷载作用下钙质砂路基的动态响应试验研究[J]. 岩土力学,2018,39(11):4093-101.
- [14] 饶佩森,李丹,孟庆山,etal. 循环荷载作用下钙质砂地基土压力分布特征研究[J]. 岩土力学,2021,42(06):1579-86+600..
- [15] 王帅,雷学文,孟庆山,等. 竖向循环荷载下钙质砂单桩沉降特性模型试验研究[J]. 长江科学院院报,2021,38(6):9.

作者简介: 陆科宁(1999—),男,硕士研究生学历,土木水利岩土工程方向