doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.202412240002
引用格式:何敏,李龙起. 穿越串珠状溶洞群桩结构水平承载试验研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2026,51(5):87-95.
Citation: He Min, Li Longqi. Experimental study on horizontal bearing capacity of pile structures passing through beaded Karst cave clusters[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science),2026,51(5):87-95.

穿越串珠状溶洞群桩结构水平承载试验研究

何　敏,李龙起*
(成都理工大学 环境与土木工程学院,四川 成都 610059)

摘要: 为研究串珠状溶洞对群桩水平承载特性的影响,以广西南玉高速铁路工程建设为依托,通过室内模型试验,深入探讨了该特殊地质条件下群桩的承载力特征. 研究结果表明:随着溶洞数量的增加,桩基承载机制呈现出由摩擦型向端承型转变的趋势. 桩身弯矩沿深度分布呈现典型的抛物线形态,其中 1# 角桩弯矩值最大,2# 边桩次之,3# 中桩最小;弯矩极值主要出现在岩土分界面处,且其变化范围局限于第二层溶洞底板上部区域,而在第二层溶洞及其以下部位,弯矩值趋近于零. 试验数据进一步表明:在恒定桩顶水平荷载作用下,桩身水平位移、弯矩及侧摩阻力均与溶洞数量呈正相关关系,而群桩整体水平承载力则随溶洞数量的增加而显著降低.

关键词: 桩基工程;群桩基础;水平荷载;岩溶区
中图分类号:U238;U443.15　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-855X(2026)05-0087-09

Experimental study on horizontal bearing capacity of pile structures passing through beaded Karst cave clusters

He Min, Li Longqi*
(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: To investigate the influence of beaded Karst caves on the horizontal bearing characteristics of pile groups, this study conducted indoor model tests based on the Guangxi Nanyu High-speed Railway Project. The research thoroughly explored the bearing capacity features of pile groups under this special geological condition. The results demonstrate that with increasing numbers of Karst caves, the pile foundation's bearing mechanism shows a transition trend from friction-type to end-bearing-type behavior. The bending moment distribution along the pile depth exhibits a typical parabolic pattern, where the maximum bending moment occurs at the 1# corner pile, followed by the 2# edge pile, with the minimum value observed at the 3# center pile. The extreme bending moment values predominantly emerge at the rock-soil interface, with their variation range confined to the area above the second-layer cave floor. Notably, the bending moment values approach zero beneath the second-layer Karst cave. Furthermore, experimental data reveal that under constant horizontal loading at the pile head, the horizontal displacement, bending moment, and side friction resistance of piles all show positive correlations with Karst cave quantity, while the overall horizontal bearing capacity of pile groups decreases significantly as cave numbers increase.

Keywords: pile foundation engineering; group pile foundation; horizontal load; Karst

收稿日期:2024-12-24. **基金项目**:国家自然科学基金项目(42277149).
作者简介:何敏(1999-),女,硕士. 主要研究方向:地基工程. **E-mail**:1962527902@qq.com
通信作者:李龙起(1986-),男,博士,教授,博士生导师. 主要研究方向:边坡和地基工程. **E-mail**:287820171@qq.com

0 引 言

随着我国西南部地区基础设施建设的蓬勃发展,尤其是在岩溶区域,桥梁路基与钻井平台等领域的进步尤为显著.然而由于溶洞普遍具有难以察觉的隐蔽性和形态万千的多样性,使得在这些特殊地质条件下建设的桥梁桩基,相较于常规环境下的桩基,在承载性能方面展现出了显著且复杂的差异.特别是在岩溶强烈发育的山区地带,为了确保桥梁结构能够有效抵御垂直及水平方向的荷载,常需要将桩基深入嵌入到坚硬的岩体中,这一需求不仅极大地提升了桩基选型与设计的复杂性,同时也对施工过程中的安全性和稳定性构成了严峻挑战[1-3].因此,深入开展岩溶区域桩基水平承载特性的研究,对于保障工程质量和施工安全,具有不可忽视的重要工程价值.

张浦阳等[4]运用ABAQUS有限元软件分析嵌岩桩水平承载力、变形以及荷载传递等规律,发现弯矩最大处始终位于岩-土交界面上.刘林等[5]通过现场水平承载试验研究嵌岩桩的力学性质,得出嵌岩深度越大,最大弯矩值则会减小,桩侧土刚度会显著影响弯矩值分布的结论;牟冬辉等[6]利用FLAC^{3D}有限元软件分析水平荷载对嵌岩桩承载特性的影响,发现嵌岩深度和桩径对水平承载力影响较大,呈正相关;王多垠等[7]通过大比尺模型试验研究横向荷载作用下嵌岩桩变形问题,发现弯矩最大值出现在入岩深度90%处;赵明华等[8]、袁炳祥等[9]、贺国京等[10]分析水平受荷单桩的承载力特性;上述学者对嵌岩桩的水平承载特性进行了集中研究.在岩溶的影响方面,李龙起等[11]、周德泉等[12]通过ABAQUS有限元软件分析溶洞数量对单桩承载力的影响,发现在相同荷载下,溶洞数量越多,弯矩、沉降越大;陈慧芸等[13-15]通过离心机试验研究在不同的溶洞条件下岩溶区单桩竖向承载特性;雷勇等[16-17]通过室内模型试验研究穿越串珠状溶洞单桩的极限承载力和承载特性.

目前学者研究大多集中在嵌岩桩的水平承载特性以及岩溶区单桩竖向承载特性,而对于穿越多层溶洞的群桩水平承载特性尚未明晰,岩溶区群桩水平承载能力的应用发挥受到制约.本文以广西南玉铁路桥梁桩基工程建设为依托,利用物理模型试验,探讨不同溶洞数量群桩桩顶受水平荷载作用下桩身弯矩、侧摩阻力、桩身位移等的变化规律.

1 物理模型试验

1.1 原形工点概况

本文原型工点取自南玉铁路跨黎湛特大桥某桥墩下的群桩基础,地理坐标为东经109°39′~110°14′、北纬22°33′~23°02′,桥址位于兴业县东南侧,主要跨越324国道和黎湛铁路,桥址区属于残丘洼地,较为平坦.承台尺寸为22.0 m×22.0 m×3.5 m(长×宽×高);桩基采用钻孔灌注,基桩设计长度为58 m,桩径为3 m,桩间距为4.5 m,桩数为3×3.工点所在地层共两层,从上往下依次为砂岩(厚10 m)和中风化灰岩(厚48 m).基本参数如表1所示.

表1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layers

地层	密度/(kg·m^{-3})	黏聚力 c/kPa	压缩模量 E/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
土层	1 860	0.03	8.48	27.8	0.23
灰岩	2 300~2 500	3.5~8.5	2.1~8.2	33~46	0.23~0.32

1.2 模型试验

本次室内模型试验的模型箱尺寸为1.2 m×0.6 m×1.0 m(长×宽×高),采用机械设备连接伺服电缸驱动设备进行加卸载水平荷载,将群桩模型固定在玻璃槽内,进行4组物理模型试验,工况分别为:群桩未刺穿溶洞、群桩刺穿单溶洞、群桩刺穿双溶洞、群桩刺穿三溶洞.基岩层采用分层填筑,保证基岩层中产生过多的空洞影响强度,在距离承台顶10 cm处换为土层模拟材料填充至桩顶.在承台顶逐级施加水平荷载,通过模拟试验,揭示在不同溶洞数量条件下群桩的桩身弯矩、承台顶位移、侧摩阻力的变化规律.

1.3 模型材料

铝合金管具有强度高、压缩性小等特点,其泊松比与混凝土比较接近,因此本次实验选用铝合金管作为模型桩的材料代替混凝土桩,最终模型桩的长度为 0.58 m、桩径为 0.03 m、弹性模量为 70 GPa. 每根基桩需要粘贴 10 个应变片,用 502 胶水对称粘贴 5 组应变片,再用 703 硅橡胶进行防水处理. 为准确测量基桩的弯矩、侧摩阻力,在承台底、桩端、溶洞上部、溶洞中间、溶洞下侧粘贴应变片,其他位置均匀布置应变片. 溶洞空腔采用 EPS 塑料球,将塑料球切割成溶洞形状,并嵌套在模型桩上指定位置,如图 1 所示. 再将一定长度的 PVC 管粘贴在溶洞模型上. 原型工点处的土体分为上部土层和下部中风化灰岩层. 由于上层土体在地基中占比较少,对试验影响较小,所以上层土体采用同等重度的土体材料,下层的中风化灰岩层采用模拟材料,在物理试验中,模拟材料的弹性模量、强度、黏聚力为考虑因素,本文借鉴了文献[13 - 14]对模拟材料的研究结果设置配比,再通过实验筛选出适合模拟土层材料配比,其配比为,河沙:水泥:石膏:水 =7.5:1:1.5:2.5.



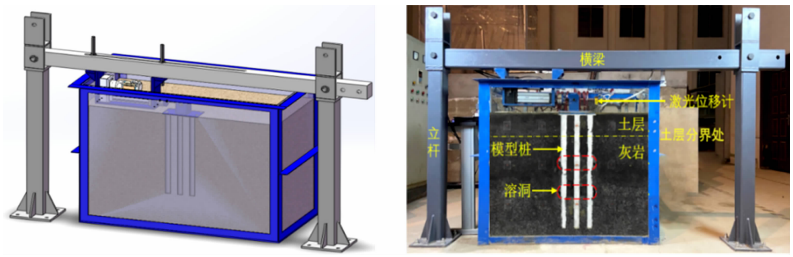
(a)应变片粘贴　(b)溶洞模型制作　(c)溶洞模型定位

图 1　试验前期准备

Fig. 1　Preparations before the experiment

1.4 试验工况与加载方案

试验前期准备过程中,将处理后的模型桩与加载装置紧贴在钢化玻璃一侧,再采用分层填筑的方式填筑土层至桩顶,为了更加方便地观察桩侧位移,在分层填筑过程中,土样与玻璃壁内侧放置一层标记砂,在桩端、溶洞、承台底附近放置土压力计测土压力. 试验准备完成后将模型静置 24 h,然后通过 PVC 管注射解胶剂溶解 EPS 塑料,使 EPS 塑料模拟溶洞转变为空洞,如图 2 所示.



(a)试验加载装置　(b)室内试验

图 2　物理试验

Fig. 2　Physical Experiment

本次缩尺试验加载参考技术规范[18],采用慢速加载法,分 5 级加载,施加荷载后,每隔 30 min 读数一次,当 60 min 内桩顶沉降量不大于 0.01 mm,说明已经到达稳定状态,并继续施加下一级荷载,到最大荷载 3 000 N 后停止加载.

2 有限元模拟

2.1 模型尺寸

利用 ABAQUS 有限元模拟软件建立数值模型,模型尺寸为 1.10 m × 0.55 m × 1.16 m(长 × 宽 × 高),以消除边界条件,对模型四周以及底部进行法向固定约束;对于桩土接触部分,采用 Hertz 接触理论,桩体设置为主面,土体设置为从面,摩擦系数因子为 0.38,法向设置为硬接触;群桩采用线弹性模型,土体部分采用摩尔库伦弹塑性模型,三维有限元模型如图 3 所示.

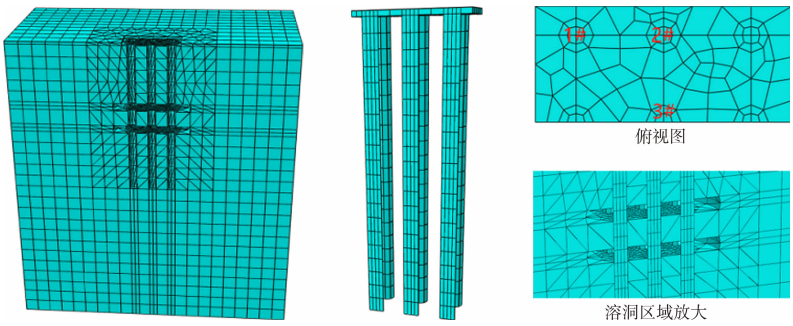


图 3　基础模型

Fig. 3　Diagram of the underlying model

2.2 有限元模拟工况

有限元模拟工况如表 2 所示,有限元模拟工况分为 4 组,工况①~②为物理试验与有限元数值模拟对比,工况⑥为不同溶洞数量变化对群桩承载特性影响.

表 2 有限元模拟工况

Tab. 2 Finite element simulation of operating conditions

工况	高度	半径	溶洞数量/个	工况	高度	半径	溶洞数量/个
①	2d	5d	2	④	2d	5d	1
②	2d	5d	2	⑤	2d	5d	2
③	2d	5d	0	⑥	2d	5d	3

注:表中 d 为桩直径.

2.3 试验数据与数值模拟对比

图 4 为横向荷载作用下,群桩承台顶荷载 - 沉降曲线(工况①),由图 4 可知,试验所得的沉降值略小于数值模拟值,整体上两者结果比较吻合.

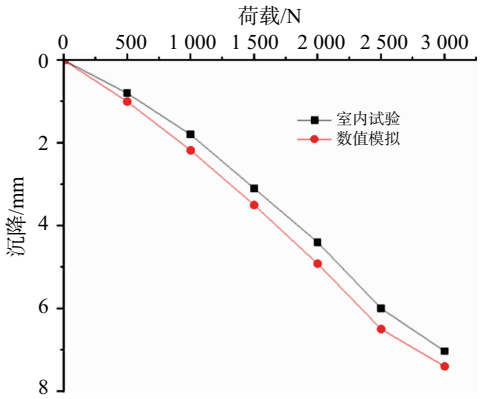


图 4 承台顶横向荷载 - 沉降曲线

Fig. 4 Lateral load settlement curve at the top of the bearing platform

3 试验结果分析与讨论

3.1 桩顶水平位移

图 5 为不同溶洞数量下群桩荷载位移对比曲线,由图 5 可知,承台顶的水平位移与荷载呈线性关系,在加载初期,土体处于弹性状态,承台顶位移随着水平荷载的增大而线性增大. 随着荷载增大,承台附近桩周土体变形由弹性转变为塑性,土体位移逐渐变大. 在相同水平荷载作用下,溶洞数量越多群桩桩顶水平位移越大;群桩承台顶的水平位移随着水平荷载的增大而增大. 在 2 500 N 水平荷载下,无溶洞基桩承台顶水平位移为 5.71 mm,一个溶洞基桩承台顶水平位移 6.00 mm;两个溶洞基桩承台顶水平位移为 6.40 mm;三个溶洞基桩承台顶水平位移为 6.80 mm,水平位移分别增大了 5.08%、12.08%、19.09%,群桩的水平承载力随着溶洞数量的增多而降低.

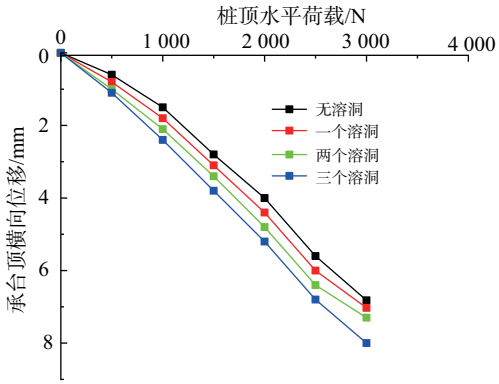


图 5 不同溶洞数量下群桩荷载位移对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of group pile load displacement under different number of Karst caves

3.2 群桩弯矩响应

桩身弯矩 M 可由桩身同一截面两侧拉、压应变差求得,计算公式如下:

$$M = EI\Delta\varepsilon_i / d \tag{1}$$

式中:EI 为桩身抗弯刚度,N · m^2;$\Delta\varepsilon_i$ 为桩身两侧拉压应变差值;d 为模型桩内径,m.

由图 6 可知:

1)在溶洞数量变化方面,桩身弯矩表现出相同的规律,桩顶部分出现负值,随着深度的增加,弯矩迅速增大,群桩的桩身弯矩峰值出现在岩土交界处(0.15 m),此处的截面最危险,在穿越前两个溶洞后,弯矩值在逐渐减小并接近于 0. 对比不同水平荷载下桩身弯矩变化情况,群桩桩身弯矩随着桩顶水平荷载的增大而增加,施加的水平荷载越大,桩身弯矩也在增加,桩身弯矩变化规律和文献[10]中嵌岩桩水平承载力变化规律一致.

2)当桩顶荷载为 3 000 N 时,对比图 6(a)~6(d)可知,在无溶洞基桩中,1$^{\#}$角桩在 0.15 m 处的桩身弯矩值为 16.65 N · m,在单溶洞基桩中,1$^{\#}$角桩在 0.15 m 处的桩身弯矩值为 17.1 N · m,在双溶洞基桩

中,1#角桩在 0.15 m 处的桩身弯矩值为 23.44 N·m,在三溶洞基桩中,1#角桩在 0.15 m 处的桩身弯矩值为 25 N·m,在相同的水平荷载作用下,桩身弯矩峰值随着溶洞数量的增加而增大,溶洞数量超过两个后,弯矩值增幅会减小,但整体来说,溶洞数量越多,桩身弯矩在岩土交界处的值越大,越容易发生弯曲破坏,在实际工程中,应加强溶洞处的钢筋布置,以防止弯曲破坏.

3)角桩的弯矩最大,其次是边桩,最后是中桩,1 000 N 荷载下、2 000 N 荷载下、3 000 N 荷载下,以图 6(d)为例,桩顶水平荷载为 1 000 N 时,1#桩的弯矩值为 4.79 N·m,2#桩的弯矩值为 2.28 N·m,3#桩的弯矩值为 2.21 N·m,1#桩和 3#桩的弯矩差值为 2.58 N·m;桩顶水平荷载为 2 000 N 时,1#桩的弯矩值为 13.62 N·m,2#桩的弯矩值为 6.29 N·m,3#桩的弯矩值为 6.09 N·m,1#桩和 3#桩的弯矩差值为 7.53 N·m;桩顶水平荷载为 3 000 N 时,1#桩的弯矩值为 25 N·m,2#桩的弯矩值为 10.4 N·m,3#桩的弯矩值为 10.6 N·m,1#桩和 3#桩的弯矩差值为 14.4 N·m. 可以发现,在相同的水平荷载下,1#角桩弯矩明显高于 2#边桩和 3#中桩;随着荷载的增加,各基桩弯矩峰值也在增加,1#角桩与 3#中桩的弯矩差值逐渐增大,各基桩桩顶的水平荷载分担更加不均匀.

3.3 桩身侧移

由图 7 可知,桩身位移最大值均出现在桩顶位置,在土体深度 1.5 m 以内桩身侧移呈线性减小,再往下桩身位移呈非线性减小,这一现象与文献[19]的研究结果较为符合. 桩身侧移会随着水平荷载增加而增大,位移主要集中在上部土层,下部岩体的桩身位移较少,在实际施工过程中,可通过注浆法改善上部土层的强度提高桩体整体承载能力.

当水平荷载为 3 000 N 时,1#桩基在不同溶洞条件下的桩顶位移分别为 6.82、7.03、7.25、7.4 mm,桩顶位移差值为 0.21、0.22、0.15 mm. 可以看出,在相同的水平荷载作用下,各桩基桩身侧移均随着溶洞数量的增加而增加,1#角桩桩身侧移 > 2#边桩 > 3#中桩. 溶洞数量会影响桩顶位移以及桩身变形,在工程设计施工时,可以适当增加桩身刚度,以解决桩身变形过大的问题.

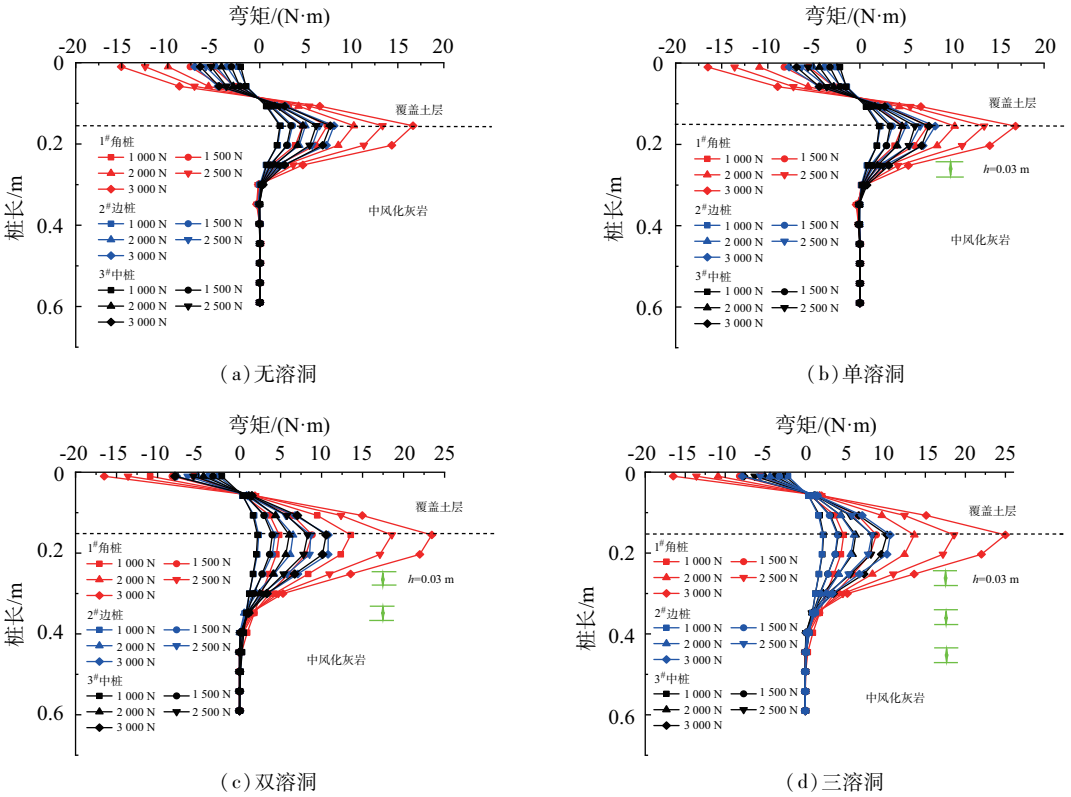


图 6　不同溶洞数量对桩身弯矩的影响

Fig. 6　Influence of different number of Karst caves on the bending moment of the pile body

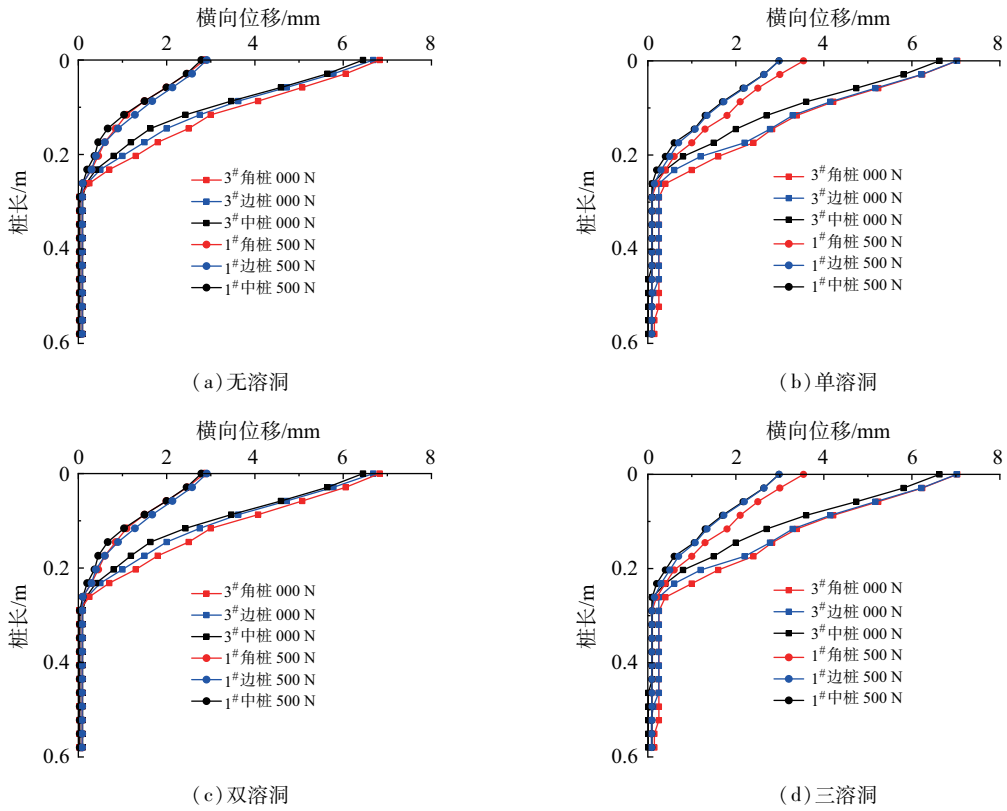


图 7 不同溶洞数量对桩身侧移的影响

Fig. 7 Influence of different number of Karst caves on the lateral displacement of the pile

3.4 侧摩阻力

桩身某微段的侧摩阻力可通过该处桩身轴力计算得出,将各微段的摩阻力汇总后可以得到桩身侧摩阻力. 以力的平衡原理为前提,桩侧摩阻力的计算公式为:

$$\tau_{ij}=\frac{N_i-N_j}{\pi DL_{ij}} \tag{2}$$

式中:τ_{ij}为 i 应变片与 j 应变片间的平均摩阻力,Pa;N_i 和 N_j 为应变片 i、j 对应位置的截面轴力,N;D 为桩径,m;L_{ij}是应变片 i、j 间的距离,m.

穿越不同溶洞数量群桩侧摩阻力分布规律如图 8 所示. 由图 8 可知,由于溶洞原因会导致群桩侧摩阻力发生改变,在溶洞附近会出现多处极值,群桩侧摩阻力在嵌岩处(0.15 m)出现最大值,是由于中风化灰岩层强度更大,故在侧摩阻力在分界处发生突变,溶洞范围内侧摩阻力为 0,然后随着深度逐渐减小. 无论是覆盖层范围内还是中风化灰岩层范围内,随着深度的增加,侧摩阻力均呈现三角形变化.

随着桩顶水平荷载的增加,同一深度处的侧摩阻力逐渐增加,1#桩的侧摩阻力最大,3#桩侧摩阻力最小,是由于角桩承担的荷载更多、轴力更大,侧摩阻力就越大. 随着溶洞数量的增加,在相同的水平荷载作用下,同一深度处侧摩阻力会变大,当溶洞数量超过两个后,其侧摩阻力小幅增大,其原因是溶洞数量增加,桩周附近受挤压的土体变少,桩身受荷载影响,土体位移变大,变形也更大,侧摩阻力发挥更充分,但其侧摩阻力的发挥有上限.

3.5 荷载分担比

图 9 为桩基穿越不同溶洞数量时桩端阻力与桩侧阻力所占极限荷载值的比值,可以看出,随着溶洞数量的增加,桩端阻力比值在不断增加,而桩侧阻力比值在不断减小,在无溶洞地基中,桩端阻力分担为 25.2%,当溶洞数量由一个增加至两个时,桩侧阻力与桩端阻力变化不大,在三溶洞地基中,桩端阻力迅速增加至 48.2%,桩侧阻力占比迅速减小,其原因是随着溶洞数量的增加,桩周土体变少,桩身侧摩阻力发

挥有限,更多的力传递到桩端,群桩由摩擦桩逐渐向端承桩转变.

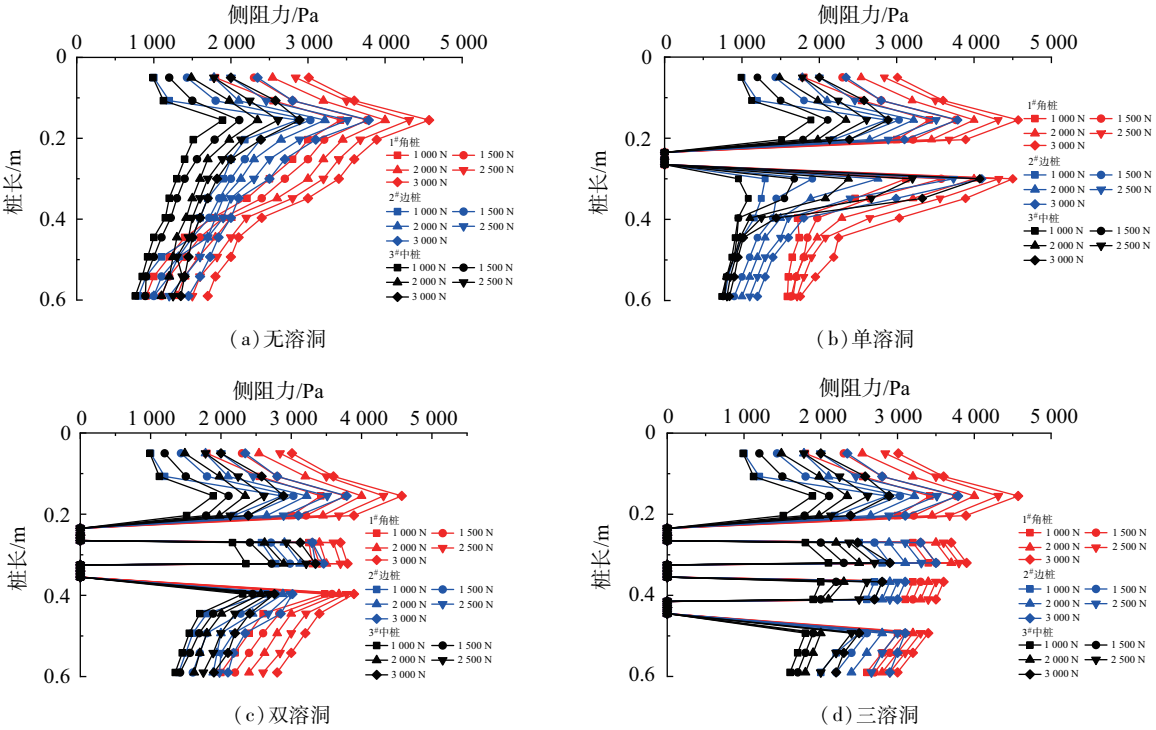


图 8　不同溶洞数量对桩身侧摩阻力的影响

Fig. 8　Effect of different number of Karst caves on the lateral frictional resistance of the pile

穿越溶洞数量分别为无溶洞、单溶洞、双溶洞和三溶洞的群桩分级荷载下桩侧阻力与桩端阻力占桩顶荷载的分担比如图 10 所示. 由于图中曲线规律比较相似,故选取双溶洞的试验进行分析,由图 10(c)可知,随着桩顶水平荷载的不断增加,桩端分担比不断增加,加载初期桩端分担比为 29.2%,当水平荷载施加到 3 000 N 时,桩端分担比达到最大值 70.8%,图 10(c)中显示桩端分担比与桩侧分担比的交点为 2 000 N附近,这说明当桩顶水平荷载低于 2 000 N 时,桩顶荷载大多由桩侧阻力分担,传递到桩底的荷载较少,当荷载大于 2 000 N 时,桩侧阻力先于桩端阻力发挥,桩端阻力发挥所需要的位移大于桩侧阻力发挥所需要的位移,桩顶水平荷载大多由桩端阻力分担,这与文献[17]桩端荷载分担比所得到的规律较为相似.

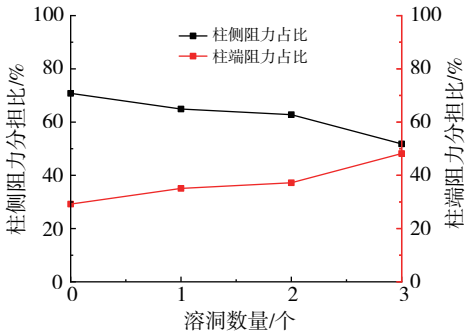


图 9　溶洞数量变化下桩侧阻力和桩端阻力分担比变化曲线

Fig. 9 Curves of the changes in the proportion of side friction and end resistance of the pile under different number of Karst caves

4 结 论

本文通过物理实验方法对群桩水平承载力特性进行分析研究,探讨了溶洞数量变化对桩基极限承载力的影响,得到主要结论如下:

1)随着溶洞数量的增加,弯矩曲线整体呈现抛物线型分布特征. 其中:1#角桩的弯矩值最大,2#边桩次之,3#中桩弯矩值最小. 弯矩最大值出现在岩土分界处,表明该截面为最危险截面. 值得注意的是,弯矩变化主要发生在第二层溶洞及其底板以上区域,而在第二层溶洞及其以下位置,弯矩值基本趋近于零.

2)溶洞数量对桩基水平位移具有显著不利影响. 分析表明,桩身位移变化主要集中于第一个溶洞上

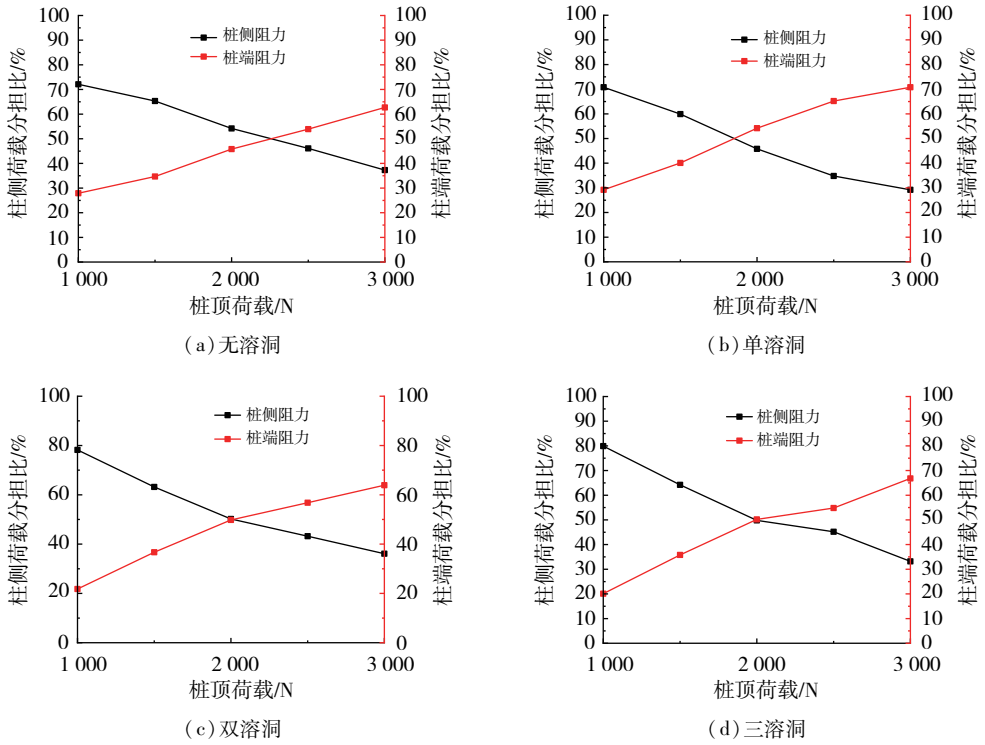


图 10 侧阻与端阻分担比变化曲线

Fig. 10 Curves of the proportion of side resistance and end resistance

方区域,而溶洞下方桩身位移较小甚至可忽略不计. 在相同桩顶水平荷载作用下,桩身水平位移、桩身弯矩及桩身侧摩阻力均随溶洞数量的增加而显著增大,相应地,群桩水平承载力则呈现递减趋势.

3)随着溶洞数量的增加,群桩桩基的受力特性发生明显转变,由摩擦桩逐渐向端承桩过渡. 具体表现为:桩端阻力分担比从 25.2% 显著提升至 48.2%,而桩侧阻力分担比则从 74.8% 下降至 51.8%,两者呈现此消彼长的变化趋势. 此外,随着桩顶水平荷载的持续增加,桩端分担比不断增大,桩端阻力逐渐取代桩侧阻力成为承担桩顶水平荷载的主要受力机制.

参考文献:

[1] 刘自强,马洪生,牟云娟. 节理裂隙发育岩溶地基数值模拟稳定性分析[J]. 中国岩溶,2022,41(1):100 – 110.
Liu Z Q,Ma H S,Mou Y J. Numerical simulation analysis and evaluation of stability of the karst foundation with developed joints and fissures[J]. Carsologica Sinica,2022,41(1):100 – 110.

[2] 肖鸿斌,金耀岷. 深埋串珠状溶洞的超高层基础设计案例分析[J]. 中国岩溶,2023,42(2):382 – 390.
Xiao H B,Jin Y M. Case study on super high – rise foundation design of the deep – buried beaded karst cave[J]. Carsologica Sinica,2023,42(2):382 – 390.

[3] 吴迪,李艾文,李丹,等. 岩溶路基加筋防塌治理的简化设计方法[J]. 中国岩溶,2023,42(3):538 – 547.
Wu D,Li A W,Li D,et al. Simplified design method of reinforcement treatment for karst subgrade collapse[J]. Carsologica Sinica,2023,42(3):538 – 547.

[4] 张浦阳,董宏季,乐丛欢,等. 海上风机嵌岩桩水平承载特性有限元分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(1):132 – 138.
Zhang P Y,Dong H J,Le C H,et al. Finite element analysis of the horizontal load – bearing characteristics of offshore wind turbine rock – socketed piles[J]. Journal of Harbin Engineering University,2021,42(1):132 – 138.

[5] 刘林,肖立,李翔宇,等. 水平荷载作用下大直径嵌岩桩力学特性研究[J]. 土木工程学报,2023,56(S2):44 – 49.
Liu L,Xiao L,Li X Y,et al. Mechanical behaviours of large – diameter rock – socketed piles under horizontal loads[J]. China Civil Engineering Journal,2023,56(S2):44 – 49.

[6] 牟冬辉,乾增珍,谢子璐,等. 嵌岩桩水平承载性能影响因素模拟分析[C]//2021 年全国工程地质学术年会论文集. 科

学出版社,2021:393 – 400.
Mou D H,Qian Z Z,Xie Z L,et al. Simulation analysis of factors affecting the horizontal bearing of rock – socketed piles[C]// Proceedings of the 2021 National Engineering Geology Academic Annual Meeting. Beijing,Science Press,2021:393 – 400.
[7] 王多垠,兰超,何光春,等. 内河港口大直径嵌岩灌注桩横向承载性能室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(9):1307 – 1313.
Wang D Y,Lan C,He G C,et al. Researches on lateral support behavior of large diameter rock – socketed cast – in – place piles at river port by laboratory model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(9):1307 – 1313.
[8] 赵明华,汪优,黄靓. 水平受荷桩的非线性无网格法分析[J]. 岩土工程学报,2007,29(6):907 – 912.
Zhao M H,Wang Y,Huang L. Nonlinear analysis of meshless method for piles under horizontal load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(6):907 – 912.
[9] 袁炳祥,樊立韬,李志杰,等. 层状地基中水平受荷桩 – 土相互作用试验[J]. 中国公路学报,2022,35(11):62 – 72.
Yuan B X,Fan L T,Li Z J,et al. Experimental study on pile – soil interaction under horizontal load in layered foundation[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(11):62 – 72.
[10] 贺国京,杨汶东,易锦. 多层岩溶区大直径桩在水平荷载下的数值分析[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(8):154 – 158.
He G J,Yang W D,Yi J. Numerical analysis of horizontal load in multilayer karst area with large diameter pile[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2012,32(8):154 – 158.
[11] 李龙起,徐雷,胡忠良,等. 串珠状溶洞对超长桩基荷载传递特性的影响[J]. 建筑结构,2023,53(S2):2401 – 2405.
Li L Q,Xu L,Hu Z L,et al. Influence of beaded cave on load transfer characteristics of super long pile foundation[J]. Building Structure,2023,53(S2):2401 – 2405.
[12] 周德泉,海军,刘宏利,等. 串珠状溶洞数量影响灌注桩顶部水平受拉特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(1):67 – 78.
Zhou D Q,Hai J,Liu H L,et al. Experimental study on influence of number of beaded karst caves on top horizontal tensile characteristics of cast – in – place piles[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2024,51(1):67 – 78.
[13] 陈慧芸,冯忠居,夏承明,等. 溶洞型基桩承载特性离心试验及承载力计算方法[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(3):856 – 866.
Chen H Y,Feng Z J,Xia C M,et al. Bearing characteristic centrifugal test and bearing capacity calculation method of pile passing through karst cave[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(3):856 – 866.
[14] 李宇杰,冯忠居,何静斌,等. 考虑坡度效应的穿越溶洞桩基竖向承载特性离心试验[J/OL]. 工程力学,1 – 10(2024 – 11 – 26)[2026 – 10 – 10]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20241206.1147.002.
Li Y J, Feng Z J, He J B, et al. Centrifugal test on vertical load carrying characteristics of pile foundation crossing karst cave considering slope effect[J/OL]. Engineering Mechanics,1 – 10(2024 – 11 – 26)[2026 – 10 – 10]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20241206.1147.002.
[15] 陈慧芸,冯忠居,蔡杰,等. 串珠状溶洞影响下桩基竖向承载特性离心试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(6):83 – 92.
Chen H Y,Feng Z J,Cai J,et al. Centrifugal test on vertical bearing characteristics of pile foundation affected by beaded Caverns[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2023,55(6):83 – 92.
[16] 雷勇,陈于斯,谭豪,等. 下伏空洞桥梁群桩桩端岩层极限承载力计算方法研究[J]. 岩土力学,2023,44(12):3339 – 3348.
Lei Y,Chen Y S,Tan H,et al. Calculation method of ultimate bearing capacity for rock layer of pile tip of bridge pile groups with underground karst cave[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(12):3339 – 3348.
[17] 雷勇,李鹏甲,刘泽宇,等. 岩溶区穿越溶洞桩基极限承载力及破坏模式试验研究[J]. 应用力学学报,2023,40(6):1343 – 1353.
Lei Y,Li P J,Liu Z Y,et al. Experimental study on ultimate bearing capacity and failure mode of pile foundation crossing karst cave in karst areas[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2023,40(6):1343 – 1353.
[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106 – 2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
[19] 王怀德. 刚性短桩基础水平承载性能及数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
Wang H D. Study on the horizontal bearing performance and numerical simulation of rigid short pile foundations [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2015.

(编　辑:王丽娟)