

基于群桩基础改进的变径微型桩承载特征研究

任光明, 李海涛, 王必杨, 范荣全, 董 斌, 罗 毅

Bearing characteristics of variable diameter micropile based on the improvement of group pile foundation

REN Guangming, LI Haitao, WANG Biyang, FAN Rongquan, DONG Bin, and LUO Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

岩溶区建筑场地桩基平均入岩高程预测

An analysis of the average entering-rock height of grouped piles at building sites in a karst terrain

曹贤发, 刘之葵, 李海玲 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 119-125

桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

杨卫波, 张来军, 汪峰 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 176-185

考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析

Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction

张玲, 朱幸仁, 欧强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 72-80

基于能量法的轴横向荷载作用下单桩受力变形分析

Deformation analysis of pile under combined axial and lateral loads by using the energy method

张玲, 陈金海, 欧强 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 81-91

双排桩双梁组合支护刚度计算的改进与位移分析

Improved calculation of the rigidity of double-row piles and double-beam composite support and displacement analysis under different soil properties

宫凤梧, 刘晨, 郭文娟, 李晨光, 封占英, 张银铂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 109-116

竹节桩复合地基沉桩施工超孔隙水压力研究

A study of the excess pore water pressure during pile-sinking construction of nodular pile composite foundation

叶俊能, 周晔, 朱瑶宏, 刘干斌 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 103-103



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304050

任光明, 李海涛, 王必杨, 等. 基于群桩基础改进的变径微型桩承载特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 90-100.
REN Guangming, LI Haitao, WANG Biyang, et al. Bearing characteristics of variable diameter micropile based on the improvement of group pile foundation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 90-100.

基于群桩基础改进的变径微型桩承载特征研究

任光明¹, 李海涛¹, 王必杨¹, 范荣全², 董 斌², 罗 毅²

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 为改善输电杆塔微型桩基础的承载特性、降低用料成本, 提出基于微型群桩改进的变径微型桩基础型式。通过高原山区等截面微型群桩原型试验与数值反演模型相互验证, 对 3 种变径微型单桩进行模拟, 并与微型群桩承载效果进行对比分析, 揭示变径微型桩的承载特征与变形机理。结果表明: 微型群桩基础(2×2 单桩)由于承台和群桩效应的影响, 其抗压和抗拔承载力分别大于和小于对应的单桩承载力总和; 双扩径微型桩(扩径部分直径=2×等截面桩身直径)的极限抗拔和抗压承载力约为等截面微型桩的 3.8 倍和 2.7 倍, 土体变形集中于扩径部位, 且变形量较大, 表现为多支点摩擦-端承桩特性; 于桩顶增设承台可有效改善双扩径单桩的下压及水平承载性能, 与未增设承台相比, 承载力分别提高了 2.1 倍和 2.2 倍。研究表明, 通过扩展部分桩径并增设承台使微型单桩性能提升至等截面群桩水平的方法可行, 对送变电建设具有工程意义。

关键词: 送变电工程; 等截面微型群桩; 原型试验; 数值模拟; 变径微型桩; 承载力特征

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)02-0090-11

Bearing characteristics of variable diameter micropile based on the improvement of group pile foundation

REN Guangming¹, LI Haitao¹, WANG Biyang¹, FAN Rongquan², DONG Bin², LUO Yi²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059 China; 2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu, Sichuan 610041 China)

Abstract: To improve the load-bearing of transmission tower micropile foundation and reduce the material cost, a modified variable diameter micropile foundation type based on group micropile is proposed in this study. The bearing characteristics and deformation mechanism of variable diameter miniature pile were revealed by simulation with three kinds of variable diameter miniature micropiles and comparison with the bearing effect of micropile group pile, using the prototype test and numerical inversion model of micropile group pile with equal section in the highland mountainous area. The results show that the compressive and pullout bearing capacities of micropile group foundation (2×2 single pile) are greater and less than the total of corresponding single pile bearing capacity, respectively, due to the effect of bearing platform and group pile effect. The ultimate pullout and compressive bearing capacities of double diameter-extended micropile (the diameter of the dilated part = 2 × the

收稿日期: 2023-04-19; 修订日期: 2023-06-18

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGSCAB00JSJS1900683; SGSCDZ00JSJS2100272)

第一作者: 任光明(1964—), 男, 硕士, 教授, 主要从事工程地质与岩土工程的研究工作。E-mail: rengmgcr@163.com

通讯作者: 李海涛(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程的研究。E-mail: 1965347983@qq.com

diameter of the equal) is approximately 3.8 times and 2.7 times of the equal section micropile. The soil deformation is concentrated in the dilated part with large deformation value, which presents the characteristics of multi-fulcrum friction-end bearing pile. The addition of cap can improve the downward pressure and horizontal bearing capacity of double-expanded micropile effectively, which increase 2.1 times and 2.2 times compared to that in the situation of no cap, respectively. This study indicates that improving the performance of single micropile to the level of equal section group micropiles by extending part of the pile diameter is feasible and has engineering significance for the transmission and substation construction.

Keywords: electricity transmission; equal section micropile group; prototype test; numerical simulation; variable diameter micropile; characteristics of bearing capacity

随着我国西部地区电力工程的迅速发展,山区输变电工程日益增多,常见的杆塔基础多为方量较大的灌注桩基础,但由于山区地质条件复杂,这类基础施工机具笨重,搬运困难,会造成人力、物力资源的浪费。微型桩因其体积小,施工灵活,造价较低,被逐渐应用于输变电工程中^[1-3]。但微型单桩基础的抗拔性能较差,通过实践表明,变径桩可以显著提高桩基的抗拔承载力^[4-5]。

近年来,国内外学者采用原型试验、物理模拟及数值模拟方法对微型桩及变径桩的承载特征进行了大量研究并取得了一定的成果。对于微型桩承载特征方面,Kyung等^[6]基于模型试验对倾斜微型桩进行了竖向及侧向荷载的分担比及承载机理研究,验证了倾斜微型桩对工程应用的积极作用。Zhang等^[7]基于原位荷载试验与数值模拟结合的方法研究微型桩对红层软岩路基的加固作用,得出微型群桩基础对土体的上拔隆起变形控制有显著效果。武玉萍等^[8]通过开展黄土地基微型桩的原位抗水平静载试验,得到多种控制因素对微型桩水平承载力的影响,揭示其抗水平承载特性。张爱军等^[9]结合试验和数值分析得出黄土地基微型群桩桩间距建议值和抗拔群桩效应系数。对于变径桩承载特征方面,Yin等^[10]基于现场试验研究了挤扩桩在黏土复合地基中的承载力,验证了挤压支盘桩加固黏土复合地基的可行性。Lin等^[11]基于模型与现场试验研究了砂土中扩底桩的扩大头对桩周土体的影响,提出一种砂土中计算扩底桩极限抗拔承载力的新方法。李飞等^[12]结合模型试验与离散元数值模拟对扩底桩在不同持力层厚度下的抗拔承载力进行研究,揭示了砂土在扩底桩作用下的内部变形及接触力变化特征。王钦科等^[13]采取理论分析与模型试验相结合的方法研究嵌岩扩底桩的破坏模式,提出了基于极限平衡法的嵌岩扩底桩极限抗拔承载力计算

方法。随着复合型支护体系的发展,一些学者对于微型桩结构上的改进也进行了相关研究,Wang等^[14]和Jang等^[15]提出了通过喷射注浆形成部分放大剪切键的波形微型桩形式,与传统微型桩相比,其具有更高的承载能力,证明了通过改变微型桩结构形式从而提高承载力的合理性,也为本文后续研究提供了实践基础。

前人的研究对于认识微型桩及变径桩的承载机理及工程应用起到了有利的推动作用。然而,目前的研究多集中于2种不同桩型承载特性研究,对于变径桩和微型桩结合的杆塔基础研究很少。因此,本文在一般微型桩的基础上,提出变径微型桩基础型式。为探明变径微型桩的变形机理,在高原山区微型群桩基础原型试验及对变径微型桩荷载传递机理研究的基础上,利用有限差分软件FLAC^{3D}进行不同荷载条件下的变径微型桩承载特征研究,以期选取最优方案,为输电线路塔基设计提供参考。

1 微型群桩现场试验

1.1 试验概况

试验场地位于四川省阿坝州某山区缓坡平台部位,场区海拔在2 000 m以上,区内分布较广且具有一定厚度的地层是含碎石粉土层,部分塔基直接位于该土层内。结合现场勘探数据和室内土工试验可知,试验场地勘探范围内的地层岩性较为简单,主要分为第四系的粉土质砾石层和粉土质砂石层。对钻孔揭露的2种地基土进行取样,其颗粒级配曲线见图1,上层土中砾石含量大于50%,小于0.075 mm的细砾含量为15.56%,粉粒含量大于黏粒含量,不均匀系数(C_u)为79,曲率系数(C_c)为1.034,属级配良好粉土质砾。下层土中粒度成分以砂类土为主,小于0.075 mm的细粒含量为30.13%,粉粒含量大于黏粒含量, $C_u=89$, $C_c=0.625$,属于级配不良的粉土质砂。

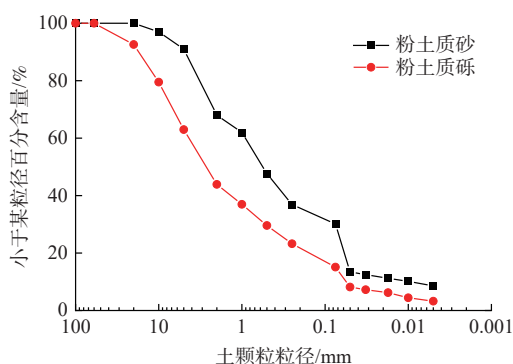


图 1 土体颗粒分析曲线

Fig. 1 Grain-size analysis

场地内不同土层物理力学参数见表 1。随深度变化,地基土基本物理性质变化程度不大,物理力学性质存在一定空间差异性。0~3 m 深度的粉土质砾黏聚力范围为 12.50~14.89 kPa,内摩擦角为 25.6°~28.45°,随深度增加抗剪强度参数有微弱增大趋势。3~8 m 深度的粉土质砂层与粉土质砾强度参数存在较大差异,黏聚力相对较大,平均值为 22.04 kPa,内摩擦角相对较小,平均值为 16.46°。现场调查及钻探揭示,场区地下水埋深较大,埋深大于 10 m。

表 1 试验场地土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers at the test site

试样 编号	取样 深度/m	含水率 /%	塑性 指数	压缩模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
1-1	0~3.0	22.94	12.5	14.9	0.33	12.50	25.60
1-2	0~3.0	20.12	13.0	15.3	0.32	14.89	28.45
2-1	3.0~3.9	19.89	11.6	18.8	0.30	20.47	15.05
3-1	5.2~6.2	22.18	14.5	19.4	0.29	23.08	17.39
3-2	5.2~6.2	21.86	14.8	21.5	0.30	23.61	17.87
4-1	8.0~9.0	24.43	15.1	15.4	0.32	17.18	30.49

为比较不同荷载对微型群桩杆塔基础承载特性的影响,对 3 组试验群桩基础分别进行抗压(S1)、抗拔(S2)和抗水平(S3)荷载试验。每个群桩基础由 4 根等截面单桩、承台及承台上部立柱组成,其中单桩桩长 7 m,桩身直径 0.3 m,桩间距为 0.9 m,桩顶承台尺寸为 1.8 m×1.8 m×0.6 m,立柱尺寸为 1.0 m×1.0 m×1.5 m,采用小型旋挖机挖孔灌注的方式浇筑试验桩。由于试验经费的限制,在承台下各单桩不同埋深(桩顶下 1 m、桩中、桩端上 1 m)对称布设 6 个钢筋应力计,以保证桩身顶部、中部及底部的轴力得以监测,同时保证各土层桩身部分至少有一对钢筋应力计,以监测不同土层桩身的轴力分布及变化情况,其具体布设如图 2 所示。

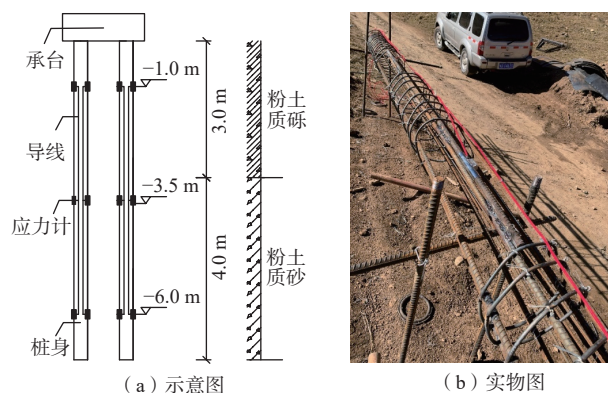
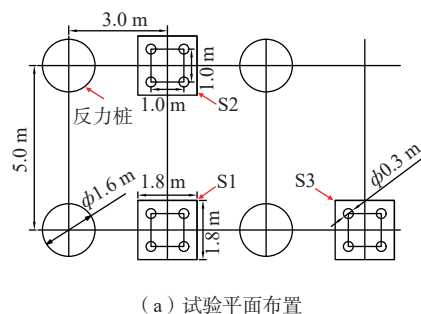


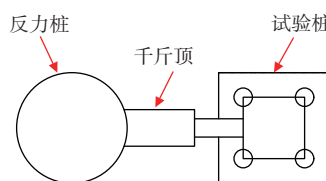
图 2 应力计布设

Fig. 2 Stressmeter layout

试验由桩径 1.6 m、桩长 8 m 的反力桩提供支座反力,并采用人工挖孔灌注桩的方式浇筑,试验所用桩身混凝土强度等级均为 C35。3 种试验加载装置及现场平面布置如图 3 所示。



(a) 试验平面布置



(b) 水平静载试验装置



(c) 竖向静载试验装置

图 3 试验加载装置及平面布置

Fig. 3 Test loading device and its layout

1.2 试验加载过程及结果分析

试验根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106—2014)[16]中规定的慢速维持荷载法对群桩基础进行加载,下压荷载分 10 级施加,每级荷载为 300 kN,上

拔及水平荷载分 8 级施加,每级荷载分别为 200 kN 和 150 kN。试验过程中,荷载加至基础破坏时终止试验,并规定陡降起始点对应荷载或沉降位移达到 30 mm 为破坏标准,而水平方向常取桩于地面处位移 10 mm(对于水平位移敏感的建筑物取 6 mm)所对应的水平荷载作为该桩的水平极限承载力。试验结果表明,等截面群桩基础 3 种方向的极限荷载分别为 2 900 kN(抗压)、1 200 kN(抗拔)和 620 kN(抗水平)。其下压、上拔和水平荷载加至极限的土体破坏形式分别见图 4,场地土层表面裂纹较发育,抗压试验中,承台轻微下陷,抗拔和抗水平试验中,承台侧裂纹较明显,有被拔起的趋势。桩身轴力、侧摩阻力随埋深的

分布见图 5,荷载-位移曲线如图 6 所示。

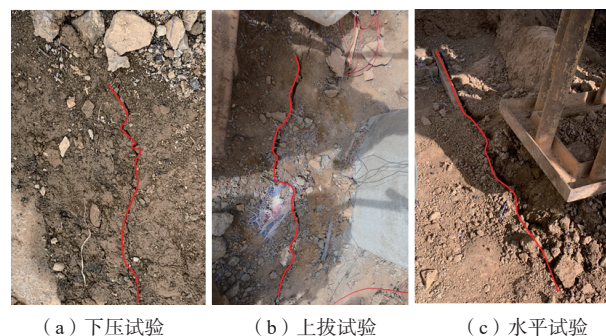


图 4 桩周土体裂隙发育

Fig. 4 Development of soil fracture around the pile

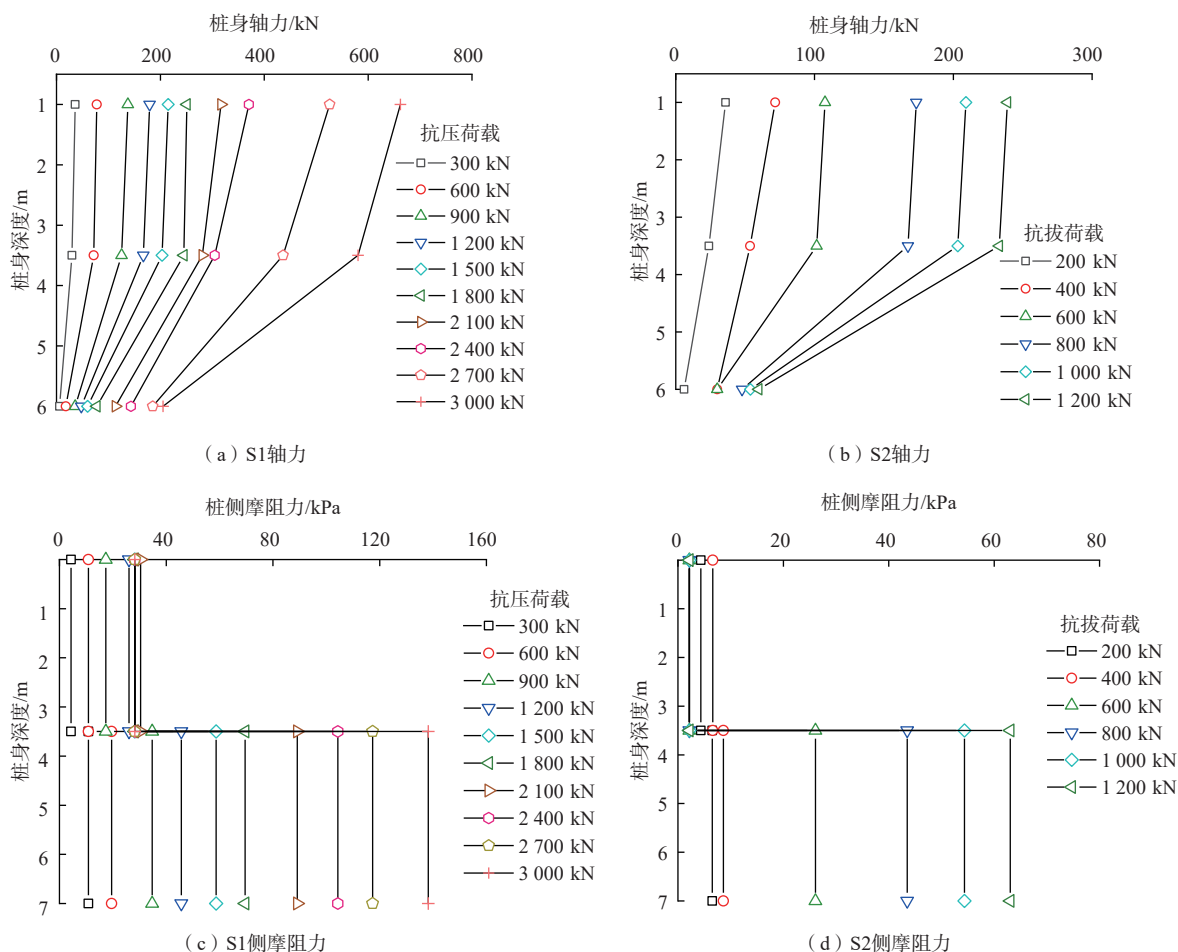


图 5 桩身轴力分布和桩侧摩阻力曲线

Fig. 5 Distribution of pile axial force and pile side friction resistance

由图 5(a)(b)可知,抗拔和抗压荷载较小时,桩身轴力分布较为均匀。随着顶部荷载的增加,桩身轴力沿深度方向逐渐衰减,下部轴力变化幅度较大,且变化幅度随着荷载的增加而逐渐增大,上部轴力变化较小,桩身轴力曲线斜率的变化对应着侧摩阻力的发

挥。如图 5(c)(d)所示,顶部抗拔和抗压荷载较小时,桩侧摩阻力沿着桩身变化幅度较小,随着顶部荷载的增加,上部侧摩阻力缓慢增大到极限侧摩阻力后有所降低,出现了软化现象,尤其在施加抗拔荷载时较为明显,此部分桩土之间发生了相对滑移;随着荷载的

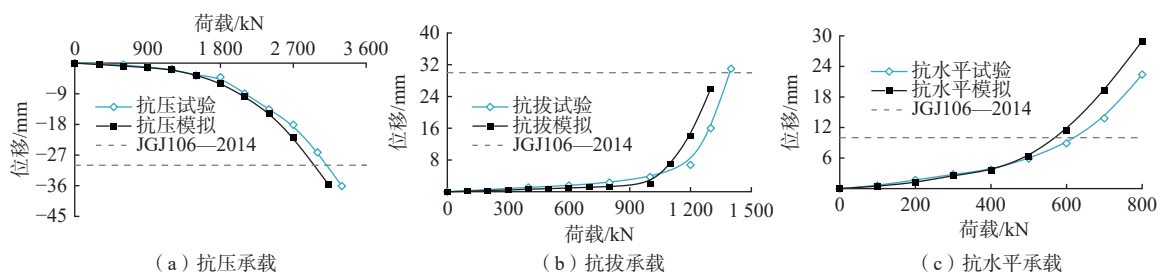


图 6 荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Relationship between load and displacement

进一步增大,上部侧摩阻力变化较小,下部侧摩阻力逐渐发挥作用以抵消顶部荷载,直至达到极限状态,这表明侧摩阻力的传递是从上到下逐渐增大的。

2 微型群桩承载性能的数值模拟研究

2.1 反演模型的建立

本文采用数值分析软件 FLAC^{3D} 对微型桩基础进行建模分析,定量评价微型桩承载作用效果。为了后续变径微型桩模拟的准确性,首先进行微型群桩原型试验的数值反演计算。考虑到微型桩长度和边界效应的影响,水平计算宽度取承台宽度的 6.6 倍,计算深度取 2 倍桩身长度,模型尺寸为 12 m×12 m×15 m。土体本构模型采用摩尔-库伦弹塑性模型,桩体本构模型采用弹性模型^[17-18],为了直观反映桩土之间的作用效果,桩体与土体均采用实体单元模拟,桩土之间建立接触面单元^[19-20]。为避免应力集中,上拔和下压荷载均施加在承台上部立柱顶部,水平荷载施加在立柱侧面。于模型侧面施加法向位移约束,底部施加固定约束,模型上表面为自由表面,概化土层及桩体模型如图 7 所示,土体和桩体的计算参数如表 2 所示。

为了模拟与现场试验相似的土体应力情况,需要

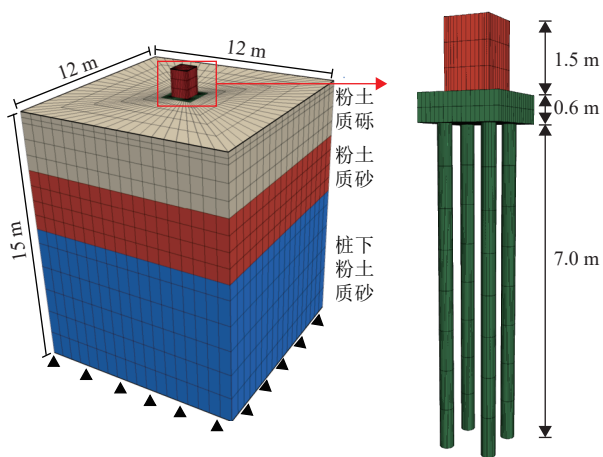


图 7 地基土及微型群桩模型

Fig. 7 Models of foundation soil and micropile groups

表 2 土体和桩体计算参数取值

Table 2 Parameters of soil and pile

名称	深度 /m	密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	内摩擦 /($^{\circ}$)	黏聚力 /kPa
粉土质砾	0~3	2.09	4.9	0.32	27.03	13.70
粉土质砂	>3	2.13	8.2	0.30	16.77	21.39
桩体		2.50	31.5	0.20		

对地基土体进行初始地应力平衡,确定土体的侧压力系数(k),为准确计算土工结构的应力变形提供基础^[21]。土体侧压力系数可根据土体泊松比(μ)大致算出,其换算关系为 $k=\mu/(1-\mu)$ 。本试验场地中,粉土质砾及粉土质砂的 k 值分别为 0.49, 0.45,故模型整体侧压力系数介于两者之间,通过多次试算得到对应的 $k=0.48$ 。

2.2 试验与反演结果对比分析

对现场试验 3 种加载方式下的群桩基础进行数值反演计算,并与试验结果对比可知(图 6),当上拔荷载达到 1 200 kN 时,群桩抗拔试验的荷载-位移曲线存在突变点,表明此时桩土之间发生了相对滑动;群桩抗压及抗水平荷载-位移曲线较平缓,极限承载力均取规范标准破坏位移下对应的荷载值。由反演结果与试验结果对比可知,模拟的位移值稍大于试验结果,分析原因主要为:

(1)在数值模拟中,通过赋予接触单元刚度模拟桩土相邻结构之间的空隙,并假设接触面刚度在弹性阶段保持不变,导致模拟结果偏大,但实际情况下桩土间“接触刚度”随着荷载的施加而减小。

(2)水平加载试验中,千斤顶前端连接传力桶,由于连接点处力的传递有损失,导致试验水平位移在加载后期增长较小。

(3)现场试验中,反力桩与试验桩的挖孔浇筑过程一般存在土体扰动和误差。

但总体来说,反演结果与试验的荷载-位移曲线趋势较为吻合,表明此数值模型能够真实地反映微型群桩基础的真实工况。

3 变径微型桩承载特性研究

考虑到杆塔基础施工的复杂性, 群桩基础的多桩连接与运输较为不便, 而经实践验证, 变径桩可以显著提高桩基的抗拔承载力^[22-23]。结合目前的施工工艺以及经济效应等因素, 综合考虑选取不会破坏土体的静力状态, 且不易产生应力集中的钟形扩底变径形式^[24], 并与微型桩结合, 从而达到提升杆塔基础抗拔性能的目的。

本文研究的变径微型桩施工过程为(图 8a): 首先采用短螺旋钻机钻孔至上部等截面深度, 然后利用下部地基土撑开扩大头钻头, 进行扩大头部分成孔施工, 最后放置钢筋并灌浆浇筑(重点对扩大头部分进行额外加压注浆), 扩大头成孔是变径微型桩安装的重要步骤, 其成孔质量决定了后续浇筑及桩身抗拔性能。在实际工程中, 地基土层大部分都是不均匀的, 而短螺旋钻机搭配特制钻头可以在任意深度进行扩孔, 故工程中可根据土体持力层部分灵活调整扩大头位置, 确保满足承载力要求。相比于微型群桩基础, 变径微型桩简化了施工步骤, 具有更快的施工效率, 且钢筋与砂浆的用料更少, 综合对比下, 其经济效益更高。

图 8(b)为变径微型桩的施工效果和承载机理概念图, 可以根据需求调整扩大头间距, 从而设立多个

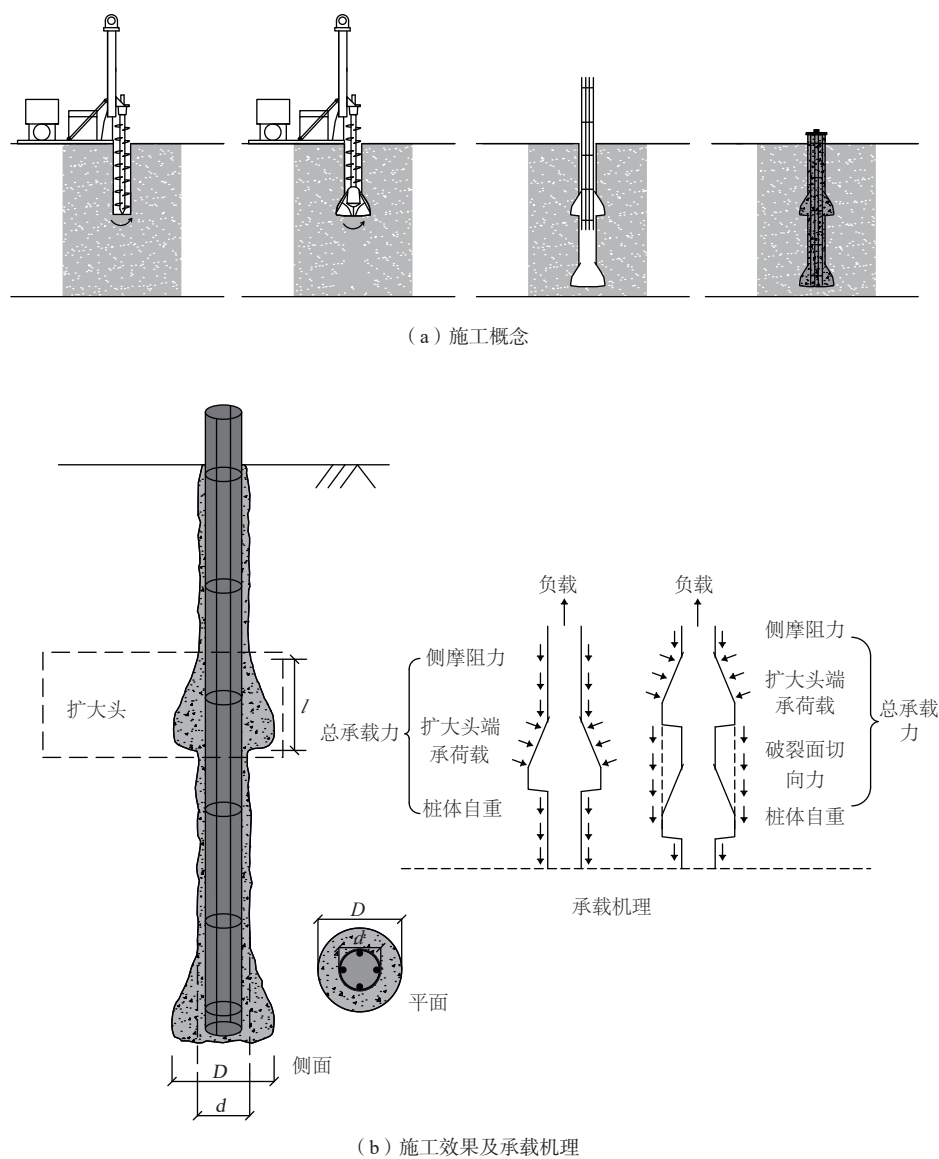


图 8 变径微型桩施工概念和变径微型桩施工效果及承载机理

Fig. 8 Construction concept, construction effect, and bearing mechanism of variable diameter micropile

注: l 为扩大头部分长度; d 为等截面部分直径; D 为扩大头部分直径。

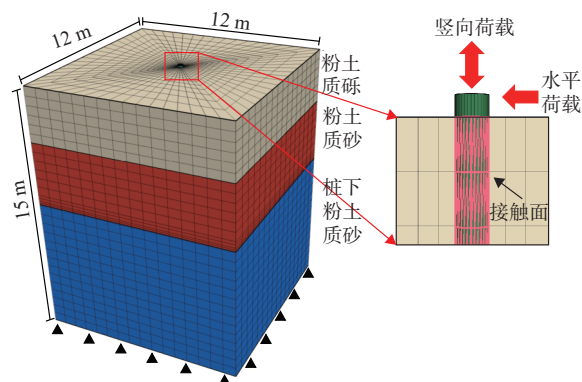
变径部分。其受上拔荷载后的荷载传递机理与大直径扩孔桩类似,承载力由等截面桩身侧摩阻力和扩大头部分承担,图中显示了变径微型桩 2 种可能的承载机理模式。

由于变径微型桩原型试验较复杂、价格昂贵,且工期较长,故本次将采取数值模拟的方法对几种变径桩型的受力和变形特征进行研究,为后续变径微型桩原型试验提供参考。根据扩底桩的相关研究表明,当等截面桩径与扩大头直径之比为 1.5~2.0 时,桩基承载力显著增加^[25]。由于微型桩桩径较小,实际应用中,扩径部分桩径不宜过大(理论上不超过 $2.5d$),故结合已研制的微型桩扩底钻头,见图 9(c),选取扩径部分桩径为 $2d$,其扩径形式如图 9(d)所示。同时,为了与等截面桩进行对比,在桩长不变的前提下,将采取增加扩径数量的方法进行研究,但考虑到具体施工应用中,较多的扩径数量会加大施工难度,导致成桩困难,实用性不高。综上所述,本文建立了 3 种变径微型单桩模型,分别为等截面微型桩(用于对比)、扩底微型桩和双扩径微型桩(底部+中部),3 种桩的桩土模型如图 9(a)(b)所示。

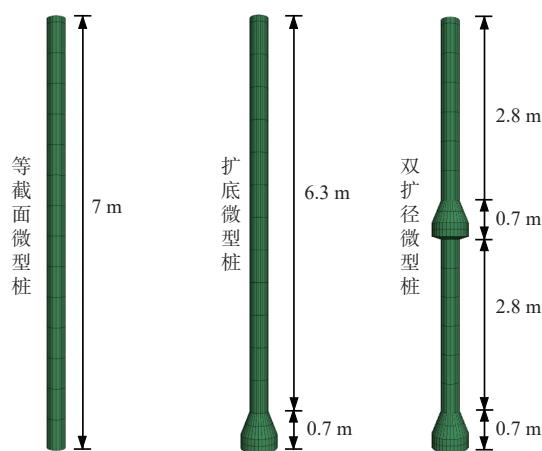
在数值模拟中,对 3 种变径微型桩分别施加上拔、下压和水平荷载,水平荷载施加在上部露出的部分桩体侧面。

3.1 变径微型桩上拔承载特征分析

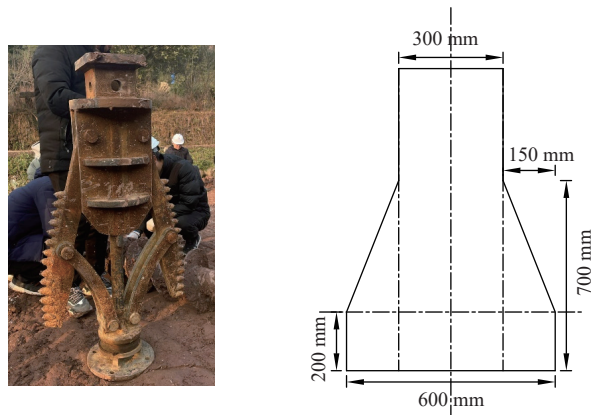
等截面微型桩极限抗拔承载力为 325 kN,荷载-上拔位移曲线有突变点,见图 10(a),对应位移值为 2.39 mm,其位移云图中土体位移分布较均匀(中下部位移值稍大)。扩底微型桩极限抗拔承载力为 820 kN,荷载-位移曲线较平缓,地基土发生较大位移的部位均为扩径部分及扩径上部土体,表现为单支点的端承-摩擦桩特性,且扩径部分出现明显的“拱桥”现象,说明此时在该部位有卸荷作用。双扩径微型桩极限抗拔承载力为 1 220 kN,荷载-位移曲线更为平缓,且两个扩径部分及上方土体位移值较大,表现为双支点的端承-摩擦桩特性。对比等截面微型单桩,扩底微型桩极限抗拔承载力提高约 2.5 倍,双扩径微型桩提高约 3.8 倍。现场群桩基础极限抗拔承载力为 1 200 kN,小于 4 倍的单桩承载力,其原因为:上拔试验中的承台作用不突出,只承台侧提供侧摩阻力,而群桩基础的桩间距较小,桩间土体相互作用,存在群桩效应,使整体抗拔效果下降。对比双扩径微型单桩与群桩基础的抗拔作用效果,两者的极限抗拔承载力较为接近,但群桩基础荷载-位移曲线仍存在明显的突变点。



(a) 变径微型桩桩土模型



(b) 变径微型桩桩体模型



(c) 微型桩扩底钻头

(d) 钻头扩径形式

图 9 变径微型桩模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the variable diameter micropile model

3.2 变径微型桩下压承载特征分析

当荷载达到 440 kN 时,等截面微型桩的荷载-沉降曲线同样存在突变点,见图 10(b),此时位移值为 3.50 mm,通过位移云图可知,等截面桩在极限荷载作用下表现出局部剪切破坏的现象,且土体位移分布较均匀。扩底微型桩的荷载-沉降曲线较平缓,极限承

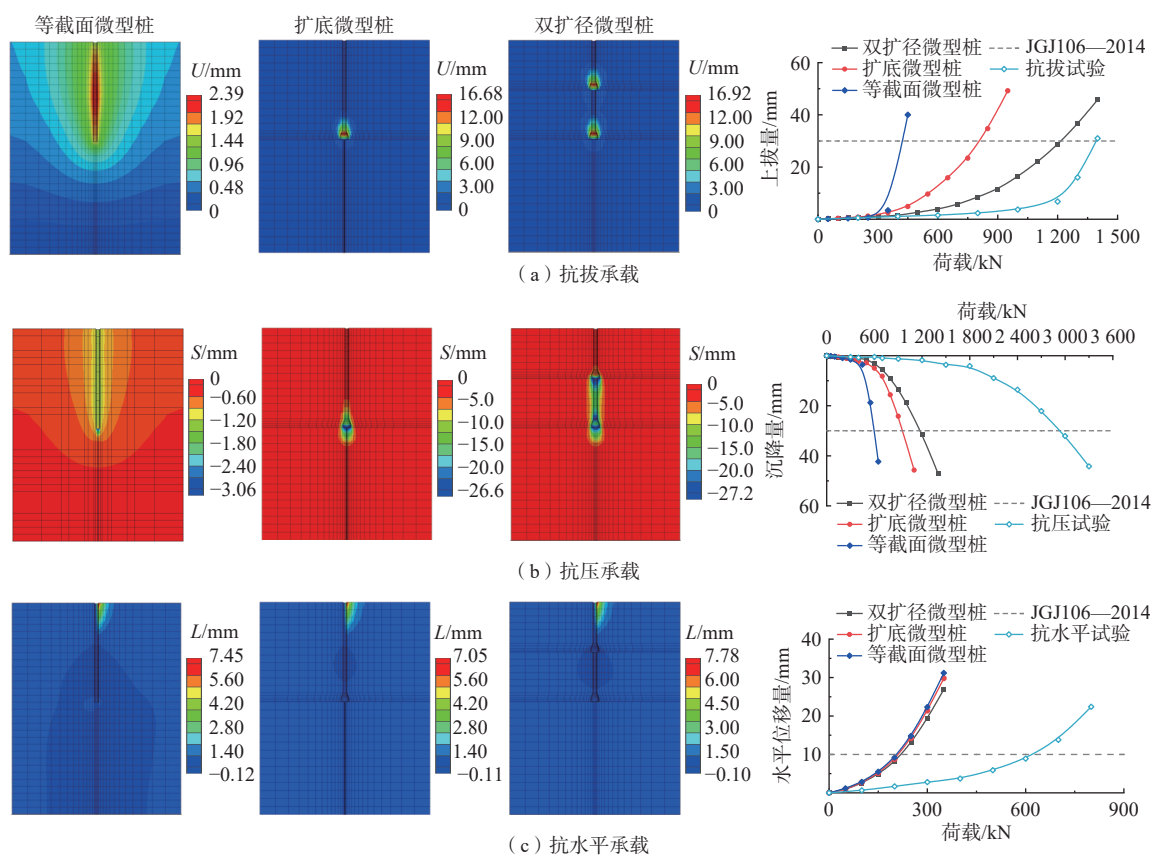


图 10 变径微型桩抗拔、抗压和抗水平承载特征研究

Fig. 10 Pull-out, compressive, and horizontal load bearing characteristics of variable diameter micropile

注: U 为上拔荷载下的土体位移量; S 为下压荷载下的土体位移量; L 为水平荷载下的土体位移量。

载力为 950 kN, 其位移云图中可以看出, 扩径部位及下方距桩端有一定深度范围内的土体位移值较大, 扩径部分发挥了较大作用, 而桩侧地基土部分未出现较显著的变形和位移, 有局部剪切破坏现象, 由摩擦桩转换为摩擦-端承桩。双扩径微型桩的荷载-沉降曲线更加平缓, 其极限承载力为 1 190 kN, 从位移云图可知, 桩侧土体位移较大, 表现为 2 支点的摩擦-端承桩特性, 2 个扩径部分土体变形值均较大, 且第 1 个扩径下方的土体及桩端土体均发生明显压缩。由于变径部分承担了一部分荷载, 且会迫使桩周土进一步发挥作用, 对比单根等截面微型桩, 扩底微型桩的极限抗压承载力提高约 2.2 倍, 双扩径微型桩提高约 2.7 倍, 故变径微型桩极限抗压性能要优于等截面微型桩。现场试验群桩基础的极限承载力为 2 900 kN, 大于 4 倍的单桩承载力, 其原因为承台结构发挥抗压作用, 承担了较大部分荷载。对比双扩径微型单桩与群桩基础的极限抗压承载力可知, 两者在数值上仍有较大差距, 与抗拔性能提升程度相比, 变径微型桩对桩基抗压极限承载力的提升有限。

3.3 变径微型桩水平承载特征分析

3 种微型桩的水平极限承载力区别不大, 均为 210 kN 左右, 且土体位移均发生在桩侧土体表层, 桩体存在一定的挠度, 下部土体由于受到桩体挤压产生与上部土体相反的位移趋势, 见图 10(c)。而群桩基础的水平极限承载力为 620 kN, 提高了约 3.0 倍, 同样由于群桩效应, 小于 4 倍的单桩承载力。结果表明, 变径微型桩对水平承载性能的提升不明显。

3.4 增设承台后变径微型桩承载特征

上述研究表明, 变径微型桩的竖向承载性能有较大提升, 相比与抗拔承载力, 其抗压承载力提升有限, 与群桩基础仍有较大差距, 而变径微型单桩的水平承载力提升较小。针对此问题, 可以通过于桩顶增设承台改善, 其承台尺寸与现场试验群桩基础承台尺寸一致(图 11), 增设承台后双扩径微型桩的承载特征曲线如图 12 所示。

增设承台后的双扩径微型桩承载力有较大提升, 其抗压承载力为 2 500 kN, 抗水平承载力为 490 kN, 与不加承台的双扩径微型单桩相比, 分别提高了 2.1 倍

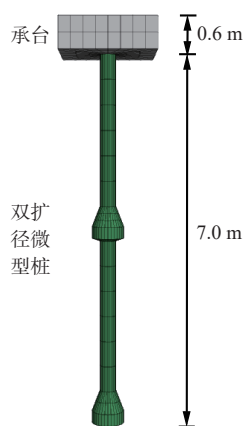


图 11 双扩径微型桩+承台

Fig. 11 Double-expanded micropile and pile cap

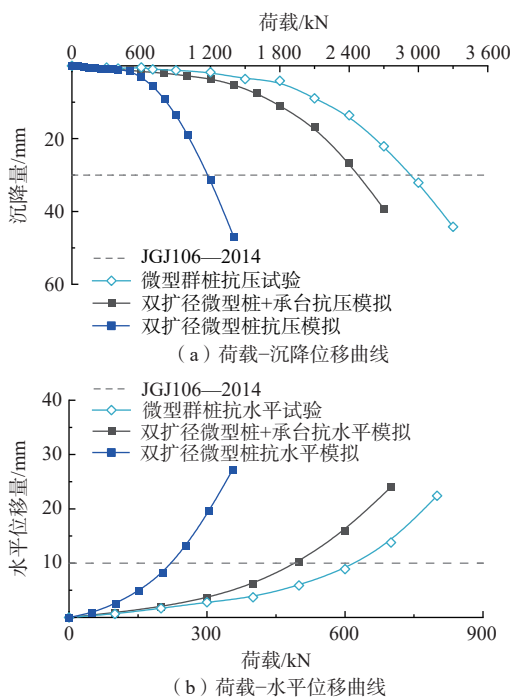


图 12 双扩径微型桩+承台承载特征研究

Fig. 12 Bearing characteristics of double-expanded micropile and pile cap

和 2.2 倍(图 12)。将文中所提的几种变径类型微型单桩与微型群桩基础的承载性能进行对比,如图 13 所示,结果表明,通过变径及增加变径数量可显著提高微型桩基础的抗拔承载力,其中双扩径微型单桩抗拔承载力与群桩基础接近;增设承台后,双扩径微型单桩的抗压和抗水平承载力有明显增加,其整体承载力水平接近微型群桩基础。

4 结论

(1)由于承台和群桩效应的影响,微型群桩基础(2×2 单桩)的抗压和抗拔承载力分别大于和小于对应

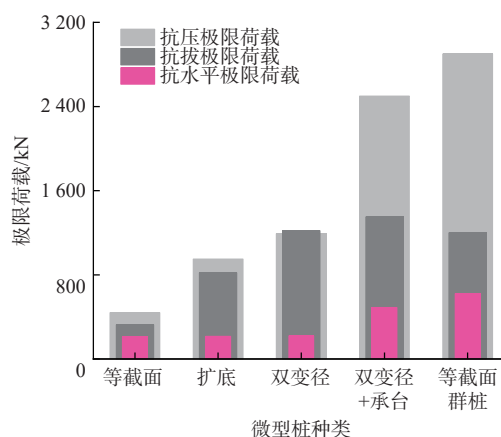


图 13 微型桩极限承载力对比

Fig. 13 Comparison of ultimate bearing capacity in different micropiles

的单桩承载力总和。数值反演与试验结果基本吻合,验证了数值模拟研究微型桩基础承载规律的可行性。

(2)通过数值模拟分析,变径微型单桩的抗拔和抗压性能显著大于等截面微型单桩,其提升效果随着扩径部位的增加而增大。其中双扩径微型单桩的抗拔和抗压极限承载力分别是等截面微型单桩的 3.8 倍和 2.7 倍,由摩擦桩变为多支点摩擦-端承桩,土体变形集中于扩径部位,且变形量较大。

(3)通过变径及增加变径数量对于微型桩基础的抗拔性能提升较为明显。双扩径微型单桩的上拔极限承载力接近等截面群桩,两者的荷载-上拔位移曲线分别为“缓变形”和“陡变型”。

(4)于桩顶增设承台可有效改善双扩径单桩下压及水平极限承载力不足的问题,与未增设承台相比,2 个方向的承载力分别提高了 2.1 倍和 2.2 倍。从施工安全和经济成本上考虑,通过双扩径+承台使微型单桩性能提升至等截面群桩水平的方法是可行的,较好地解决了设备运输及群桩基础施工复杂的问题。

参考文献 (References) :

- [1] 崔强,郭超溢,张楷,等.薄壁锥端注浆微型钢管桩抗拔承载特性的现场试验[J].工程科学与技术,2021,53(5): 21-31. [CUI Qiang, GUO Chaoyi, ZHANG Kai, et al. Field test on the uplift bearing characteristics of thin-walled cone-end grouting micro-steel pipe pile[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(5): 21-31. (in Chinese with English abstract)]
- [2] SHENG Mingqiang, QIAN Zengzhen, YANG Wenzhi, et al. Field compression and uplift tests on micropiles in collapsible loess under completely-soaked and saturated

- conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(12): 2258 – 2264.
- [3] KIM D, KIM G, KIM I, et al. Assessment of load sharing behavior for micropiled rafts installed with inclined condition[J]. *Engineering Structures*, 2018, 172: 780 – 788.
- [4] YANG Yongsan, QIU Liuchao. MPM simulation of uplift resistance of enlarged base piles in sand[J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(5): 1322 – 1330.
- [5] 常林越, 王卫东, 吴江斌. 基于极限承载力试验的扩底抗拔桩承载特性数值模拟分析 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊 1): 657 – 663. [CHANG Linyue, WANG Weidong, WU Jiangbin. Numerical simulation analysis of uplift behavior of enlarged base piles based on uplift ultimate bearing capacity tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup 1): 657 – 663. (in Chinese with English abstract)]
- [6] KYUNG D, KIM D, KIM G, et al. Vertical load-carrying behavior and design models for micropiles considering foundation configuration conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(2): 234 – 247.
- [7] ZHANG Rui, LUO Hui, LIU Zhengnan, et al. Study on anti-uplift effect of micro-steel-pipe pile on red-bedded soft rock subgrade[J]. *Sustainability*, 2022, 14(19): 1 – 22.
- [8] 武玉萍, 付红安, 王佳佳, 等. 黄土地基微型桩水平承载力及群桩效应研究 [J]. *应用力学学报*, 2022, 39(3): 543 – 553. [WU Yuping, FU Hongan, WANG Jiajia, et al. Horizontal bearing capacity and pile group effect of micro-pile on loess ground[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2022, 39(3): 543 – 553. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张爱军, 付红安, 王佳佳, 等. 黄土地基微型群桩抗拔承载力及群桩效应研究 [J]. *建筑结构*, 2022, 52(24): 120 – 125. [ZHANG Aijun, FU Hongan, WANG Jiajia, et al. Study on uplift bearing capacity and group pile effect of micro-pile group in loess foundation[J]. *Building Structure*, 2022, 52(24): 120 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [10] YIN Lianzhong, FAN Xiaoguang, WANG Songjiang. A study on application of squeezed branch pile in clay soil foundation[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 61: 012091.
- [11] LIN J G, HSU S Y, LIN S S. The new method to evaluate the uplift capacity of belled piles in sandy soil[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2015, 23(4): 523 – 533.
- [12] 李飞, 杨俊杰, 宋琦, 等. 多层土地基扩底抗拔桩离散元颗粒流研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(11): 2859 – 2869. [LI Fei, YANG Junjie, SONG Qi, et al. Study on discrete element particle flow of multi-layered groundbased expanded bottom uplift pile[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(11): 2859 – 2869. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王钦科, 马建林, 陈文龙, 等. 上覆土嵌岩扩底桩抗拔承载特性离心模型试验及计算方法研究 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(9): 3405 – 3415. [WANG Qinke, MA Jianlin, CHEN Wenlong, et al. Centrifugal model tests and calculation method of uplift bearing capacity of rock-socketed pedestal pile overburden soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3405 – 3415. (in Chinese with English abstract)]
- [14] WANG Chengcan, HAN J T, KIM S. A field study on the load sharing behavior of a micropiled raft underpinned by a waveform micropile[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, 59(7): 1175 – 1187.
- [15] JANG Y E, HAN J T. Analysis of the shape effect on the axial performance of a waveform micropile by centrifuge model tests[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(2): 505 – 518.
- [16] 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. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014. (in Chinese)]
- [17] 闫玉平, 肖世国. 双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 55 – 63. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. A calculation method for thrust on the fore piles of double-row stabilizing piles used to reinforce landslides[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 55 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李龙起, 邓小雪, 张帅, 等. 非均匀地基中倾斜群桩竖向承载特性及群桩效应研究 [J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(4): 97 – 107. [LI Longqi, DENG Xiaoxue, ZHANG Shuai, et al. Study on vertical bearing capacity and pile group effect of inclined pile foundation in inhomogeneous strata[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(4): 97 – 107. (in Chinese with English abstract)]

- English abstract)]
- [19] 董青青, 梁小丛. 考虑桩-土非线性接触的自平衡桩基测试有限元分析 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 73 – 78. [DONG Qingqing, LIANG Xiacong. Analysis of self-balance pile test based on finite element method considering pile-soil non-linear contact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 73 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 唐孟雄, 凌造, 刘春林, 等. 桩端型式对嵌岩随钻跟管桩承载性能的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊 1): 3053-3062. [TANG Mengxiong, LING Zao, LIU Chunlin, et al. Influence of pile toe type on bearing capacity of rock-socketed DPC piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Sup 1): 3053-3062. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 司壹恒, 刘干斌, 周晔, 等. 静止土压力系数原位测试装置设计及应用研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 79 – 85. [SI Yiheng, LIU Ganbin, ZHOU Ye, et al. Design and application of an *in situ* test device for the static earth pressure coefficient[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 79 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [22] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A. The influence of soil reinforcement on the uplift behaviour of belled piles embedded in sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19(1): 1 – 22.
- [23] WANG Le, ZHANG Puyang, DING Hongyan, et al. The uplift capacity of single-plate helical pile in shallow dense sand including the influence of installation[J]. *Marine Structures*, 2020, 71: 102697.
- [24] LEI Jiangtao, ZHOU Zhijun, HAN Dandan, et al. Centrifuge model tests and settlement calculation of belled and multi-belled piles in loess area[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 161: 107425.
- [25] PETER J A, LAKSHMANAN N, DEVADAS MANOHARAN P. Investigations on the static behavior of self-compacting concrete under-reamed piles[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(3): 408 – 414.

编辑: 刘真真