双排微型桩及框架结构加固皮带廊地基的应用*

陈耀煌[1]，王发刚[1,2,3]，虎万杰[2]，郑广斌[1]，苏伟[1]，黄腾骁[1]

（1.紫金矿业集团股份有限公司， 福建 上杭县 364200；
2.紫金（长沙）工程技术有限公司， 湖南 长沙 410017；
3.低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室， 福建 上杭县 364204）

摘要：针对塞尔维亚紫金铜业有限公司MS矿南露天采场矿石运输皮带廊S2—S3段地基开裂变形问题，开展了地基裂缝现状调查、地基岩性勘察和地基变形监测。分析认为地基岩性差是导致皮带廊地基开裂变形的主要原因，皮带廊自身荷载和运行振动、采矿爆破振动、降雨降雪等也是诱发地基开裂变形的重要因素。为保障该皮带廊的地基稳定性，提出了采用双排微型桩和框架结构加固地基的处理方案。监测结果表明，在采取加固措施前，皮带廊S2—S3段地基在持续沉降，紧邻皮带廊的西侧边坡出现了滑移的趋势；实施加固措施后，取得了良好的加固效果，此皮带廊地基的开裂变形趋势得到了抑制，有效地控制了裂缝的发育和扩展，提升了地基的整体性和承载力，有效控制裂缝的扩展传导。研究结果可为类似的岩土工程加固治理提供参考。

关键词：皮带廊地基；地基开裂沉降；双排微型桩；框架结构；变形监测

中图分类号：TD561；TU473.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)07-0185-06

Application of Double-Row Micro-Piles and Frame Structures to Reinforce the Belt Corridor Foundation

CHEN Yaohuang[1], *WANG Fagang* [1,2,3], *HU Wanjie*[2], *ZHENG Guangbin*[1], *SU Wei*[1], *HUANG Tengxiao*[1]

(1.Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang, Fujian 364200, China;
2.Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410017, China;
3.State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-Grade Refractory Gold Ores, Shanghang, Fujian 364204, China)

Abstract: In order to solve the problem of foundation cracking and deformation of the ore transportation conveyor belt system in S2-S3 section, which are located in the southern open-pit of the MS Mine of Serbia Zijin Copper Doo, a survey on the current status of foundation cracks, geological investigation, and monitoring of foundation deformation was conducted. It is found that poor rock properties are the main cause of cracking and deformation in the belt corridor foundation. The self-load and operation vibration of the belt corridor, mining blasting vibration, rainfall and snowfall are also important factors that induce foundation cracking and deformation. To ensure the stability of the belt corridor foundation, a treatment scheme was proposed to reinforce the foundation using double-row micro-piles and frame structures. The monitoring results indicate that before taking reinforcement measures, the belt corridor foundation of the S2-S3 section is continuously declining, and the west slope adjacent to the belt corridor shows a trend of sliding. After implementing reinforcement measures, good reinforcement effects is achieved, and the cracking and deformation trend of the belt corridor foundation is suppressed, effectively controlling the development and expansion of cracks, improving the overall integrity and bearing capacity of the foundation, and effectively controlling the propagation and transmission of cracks. The research results can provide a reference for similar geotechnical engineering reinforcement and treatment.

Key words: Belt corridor foundation, Cracking and deformation of foundation, Double-row micro-piles, Frame structure, Deformation monitoring

0 引言

既有设施由于下部基础岩性差、上部结构荷载等原因，可能出现地基拉裂失稳、不均匀沉降及塌陷等问题[1]，使得现有地基不能满足既有设施的实际使用需求。但直接拆除或搬迁既有设施会造成巨大

* **收稿日期**：2024-09-07
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2903902)；紫金矿业集团科技计划项目(5401KY2024050003)
作者简介：陈耀煌(1985—)，男，福建永定人，博士，高级工程师，主要从事岩石力学与边坡稳定性研究。E-mail：chen_yaohuang@zijinmining.com
通信作者：王发刚(1997—)，男，贵州盘州人，硕士，工程师，主要从事岩土工程灾害防控研究。E-mail：wangfagang007@163.com

的经济损失和大量的时间浪费,对此更多的方法是采取地基加固的方式以满足相应需求[2]。目前工程项目中,基础托换加固法、基础底面积加宽法、加深基础法、树根桩法、灌浆加固法和锚杆静压法等[3-7]都是比较成熟的地基加固技术。

微型桩是一种由钻孔灌注或压力注浆的小口径(一般小于 300 mm)、大长径比(一般大于 30)的非位移桩[8],因其具有施工场地适用性强、便捷高效、对岩土体扰动小和施工速度快等独特技术优势,近年来在基础沉降加固和边坡滑塌治理等岩土工程领域中得到了广泛运用[9-10]。自 20 世纪 90 年代开始,国内外学者通过现场测试、物理相似模型试验、数值模拟和理论分析,对微型桩的加固规律进行了大量的研究[11]。BORTHAKUR 等[12]就不同变量对微型桩群承载能力的影响程度进行研究,建立了微型桩承载能力的经验计算公式。张力等[13]基于现场试验与数值模拟,对微型桩结构的变形特性、抗滑机理进行了分析研究。王飞等[14]研究了地震作用下微型桩加固土质边坡的作用效果,发现微型桩对增强边坡的整体结构性和稳定性具有显著作用。刘建维等[15]提出了微型桩、预应力锚杆、土钉墙相结合的复合支护体系。夏峻等[16]研究表明,黄土地基微型桩的竖向承载性能主要取决于桩侧摩阻力,桩长对抗拔、抗压极限承载力的影响较桩径显著。马彦军等[17]探究了不同形式微型桩加固下的滑坡-管道系统相互作用机制和破坏演变过程。张军舰等[18]提出采用基于侧向刚度折减的弹性支点法来计算围护结构内力,并通过考虑纵筋销栓作用来计算等效梁抗剪承载力。

目前微型桩及桩群的研究已取得丰硕成果,但微型桩因结构整体性和加固能力较弱,不能很好适用于复杂工程地质条件下的岩土体加固,所以双排或多排微型桩及框架结构开始逐步应用于复杂工程中。此外,微型桩加固研究多集中于理论研究,而在工程应用研究方面稍显滞后,限制了其应用成果形成与推广应用。

为此,在塞尔维亚紫金铜业有限公司 MS 矿南露天采场矿石运输皮带廊 S2—S3 段开展了双排微型桩及框架结构的工程应用研究。为保障皮带廊的安全稳定,设计采用双排微型桩及框架结构对开裂地基进行桩群加固,提高了皮带廊地基的整体性和承载能力,解决该工程面临的地基开裂变形难题。

1 工程概况

塞尔维亚紫金铜业有限公司 MS 矿位于塞尔维亚 Majdanpek 市,距离首都贝尔格莱德公路约 180 km,是紫金矿业 2018 年从当地 RTB 公司收购的矿山。该矿的资源量巨大,现已形成南、北两个露天采场,采用汽车+破碎站+胶带运输机的矿石运输方案。南露天采场的矿石先由汽车运至破碎站,再采用胶带运送至选厂,中间设有 S2、S3 等转运站。目前,胶带运输的皮带廊 S2—S3 段布置在采场西侧梁脊上,长度约 640 m,东临采场西边坡,西边距小 PEK 河的直线距离为 150 m。

南露天采场转运站 S2—S3 段皮带廊地基因受到地形、岩性条件等因素影响,在靠近转运站 S3 一端产生大量沿皮带廊走向的纵向裂缝,裂缝宽度为 10～30 cm、长度为 1～10 m,严重威胁皮带廊的安全稳定。为进一步了解裂缝情况,开展了裂缝延伸、张开度等测量调查。现场调查发现,一是裂缝沿着皮带廊底部水泥基底延伸,使得水泥基底形成 10 cm 左右的张开口;二是与皮带廊斜交方向的地基形成张开裂缝,且两侧高低不一,表明地基存在沉降变形。S2—S3 段开裂区域及现场裂缝调查如图 1 所示。

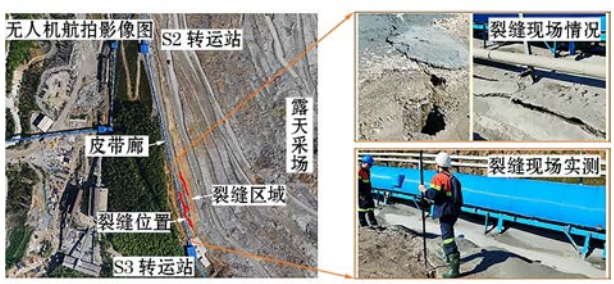


图 1 S2—S3 段开裂区域及现场裂缝调查

Fig.1 S2-S3 cracking area and on-site crack investigation

地基发生开裂破坏以来,矿山采取了多种处置措施,包括:为避免 S3 转运站以上高地势降雨汇水持续汇入裂缝区域,导致岩土体物理力学性质弱化,在靠皮带廊修筑了排水沟,以便将降雨汇水及时疏排;向裂缝灌注大量混凝土,充填裂缝内部和岩土体裂隙,提高裂缝区域的完整性;借助合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术监测外侧边坡变形,分析地基变形趋势。

SAR 监测数据显示,S2—S3 皮带廊下的采场西边坡坡顶区域变形量存在持续负向增长。以 2024 年 3—4 月边坡监测数据为例(如图 2 所示),近 1 个月内变形量持续负向增长,变形量较大。变

形速度起伏也较大,特别是3月25日至4月5日以及4月5日至4月30日期间,速度波动明显,最大日变形速度为3月28日的14.67 mm/d。S2—S3皮带廊外侧边坡持续的负向变形说明该区域正在持续的沉降或西帮边坡有向西侧滑移趋势,很可能对西侧运输皮带的正常运行造成影响。

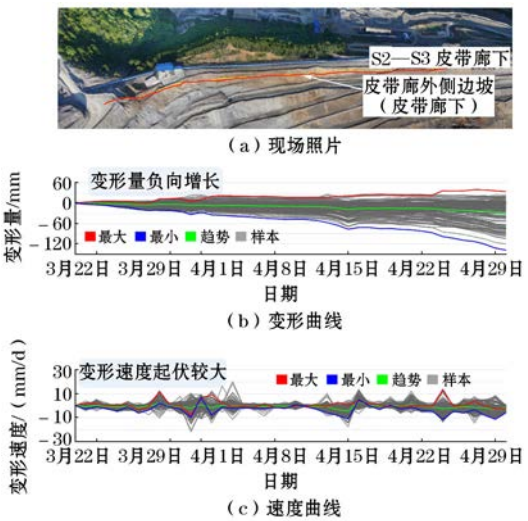


图2 2024年3—4月边坡雷达监测数据

Fig.2 Radar monitoring datas of the slope in March to April 2024

2 开裂机理分析

根据现场勘察,裂缝主要受到地形、岩性条件等影响,导致地基沉降变形并产生裂缝。为分析地层岩性,在拟加固区域施工了1个钻孔,钻孔揭露的地层岩性从上到下主要为回填土、强风化片麻岩和中风化片麻岩。

回填土:褐黄、灰褐色,结构松散至稍密,主要由碎石、块石夹黏性土、中粗砂组成,回填固结时间约5 a,层厚约为12.5 m。

强风化片麻岩:暗灰色,结构松散至稍密,胶结程度一般,整体极破碎,岩心以碎屑、碎块状为主,极少量短柱状,呈不规则分布,RQD值为0,遇水极易软化成泥状。

中风化片麻岩:灰白、灰黑色为主,结构稍密至致密,石膏、泥质充填,岩心较破碎至较完整,整体完整性一般,以柱状、块状为主,节理、裂隙发育,RQD值为30%~80%,长时间遇水易软化。

从钻孔揭露的情况可知,开裂区域的岩性条件较差,浅部表层为回填土和强风化片麻岩,且皮带廊建设之初,回填土沉降固结时间并不充分,导致地基承载力弱,是本区域产生裂缝的主要原因。其次,皮带廊坐落在梁脊上,一侧为露天采场西边坡,在露天采场持续向下采剥过程中,西侧已经形成超过300 m的高边坡,而另一侧为自然山坡,高差约为60 m,两侧边坡存在坡体向下的滑移势能,这也是导致皮带廊地基沿自身走向开裂的原因。此外,皮带廊自身的荷载、运输作业与生产爆破产生的振动,以及降雨、降雪等亦是开裂持续扩展的诱发因素。

由此可见,S2—S3段的裂缝形成机制复杂,是地基岩性差、地形条件不利、动态荷载和自然气候综合叠加作用下产生的。根据矿山规划,短期内皮带廊不会迁址,因此亟需对裂缝区域进行加固治理,抑制裂缝的发育和扩展,避免对皮带廊的安全运输造成影响。

3 双排微型桩及框架结构加固方案

结合此治理区域和微型桩的特点,同时考虑到矿山现有设备和材料供应可满足施工需求,设计采用双排微型桩及框架结构加固的方案治理皮带廊地基开裂,如图3所示。

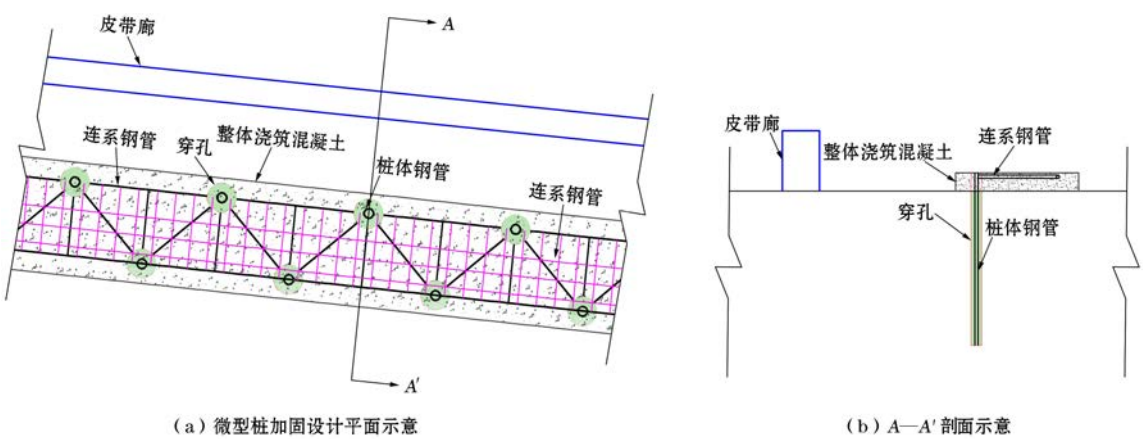


图3 双排微型桩及框架结构加固设计方案

Fig.3 Design scheme of double-row micro-piles and frame structure reinforcement

3.1 方案设计

双排微型桩及框架结构加固方案可分为测量放样、穿孔、放管、灌浆、连系焊接和整体浇筑等 6 个步骤。测量放样是在需要加固的区域布设两排微型桩的位置。微型抗滑桩的设计孔径为 150 mm,孔深为 25 m,孔间距为 3 m,排间距为 1.5 m,采用“梅花形”布置,穿孔采用潜孔钻机。放管是在孔内下放一根直径为 50 mm、壁厚为 4 mm 的钢管,并超出孔口 30 cm,利用矿山废置钢管作为微型桩桩体,以便降低成本。灌浆是向孔内灌注水泥砂浆,使桩体与孔内周边岩土体紧密贴合,建议注浆水灰比控制在 0.35～0.4,采用细石混凝土,强度不低于 C30。连系焊接钢管焊接和 Φ8 mm 的钢筋焊接,首先在桩体间进行钢管焊接,连系钢管距地面 25 cm,采用钢筋在连系钢管上按照 1～1.5 m 的间距布设焊接,实现桩群连接。整体浇筑是采用 C25 混凝土整体浇筑成矮挡墙,挡墙高 35 cm,混凝土保护层厚 20 cm,墙体上每隔 20 m 设置一条伸缩缝,缝宽 20 mm。横向钢管、钢筋连系和矮挡墙构建成微型桩的框架结构(见图 3)。

3.2 加固施工过程

双排微型桩及框架结构加固方案的现场施工流程为:平整场地→测量放样→孔距定位→钻机穿孔→下放钢管→灌浆→连系焊接→C25 混凝土矮挡墙浇筑。

(1) 钻孔施工前,将皮带廊外侧堆置的土石拦挡墙清除,并清理坡眉浮石松渣和地表覆土层,尽量保证微型桩布置区域地基平整,防止后期浇筑的连系梁出现变形与扭曲。

(2) 采用实时动态定位技术,按照设计点位进行放样,并放置标志,便于钻机穿孔。

(3) 潜孔钻机就位后,按照由 S2—S3 的方向开始钻孔,按设计孔位逐孔钻进,用时 7 d,穿孔 107 个。

(4) 穿孔推进一定距离后,开始下放钢管、灌浆,要求下放一定数量的钻孔钢管后及时灌浆,以防钻孔坍塌而造成灌浆不够密实,用时 4 d 完成桩体灌浆施工。

(5) 前述工作完成后,对加固区域再次进行平基,然后施工框架结构,包含连系钢管焊接、绑扎钢筋和整体浇筑,其中整体浇筑时每间隔 20 m 设置一条伸缩缝,用时 4 d 完成框架结构的施工。

双排微型桩及框架结构加固施工整体用时 15 d,全部施工设备、材料均为矿山自有,实现了施工材料与人员的快速组织调配和施工时间与质量的把控。

4 加固效果分析

为了检验双排微型桩及框架结构加固方案实施后皮带廊 S2—S3 段地基变形情况,在施工后进行了长期人工观察,区域内未见明显的裂缝发育扩展,框架结构矮挡墙亦未见有微裂缝产生,经与加固前裂缝进行对比,加固施工后,整体裂缝持续发展的趋势得到了较为明显的控制。加固后的现场实际情况如图 4 所示。



图 4 加固后的现场效果

Fig.4 On-site effect after reinforcement

边坡 SAR 监测数据表明,采用双排微型桩及框架结构加固后,靠皮带廊的边坡较为稳固,未触发预警。2024 年 8 月边坡的监测数据如图 5 所示,该区域变形量相对平稳,呈现缓慢变形趋势,最大累计正变形量约为 64 mm,最大累计负变形量约为 −42 mm;日变形速度基本稳定,处于 −10～10 mm/d 之间。对比双排微型桩及框架结构加固前后,外侧变形量由持续负向增长转为相对平稳的缓慢增长,日变形速度也从明显波动转为基本稳定。

究其原因,在双排微型桩及框架结构加固下,提升了地基岩土体的整体联系,抑制了裂缝不断萌生及扩展传导,约束了下层地基的水平位移和垂直位移,提高了地基承载力。

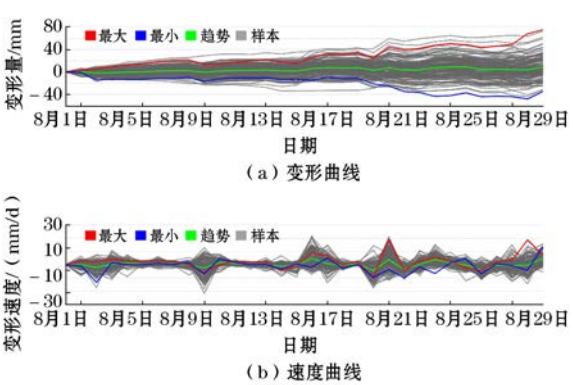


图 5 2024 年 8 月边坡监测数据

Fig.5 Slope monitoring datas in August 2024

5 结论

针对MS矿南露天采场运输皮带廊S2—S3段地基开裂变形影响皮带廊安全稳定运输的问题,结合现场调查与原因分析,提出并实施了双排微型桩及框架结构加固方案,增加了地基基础的整体性,使得裂缝增生扩展得以控制,得出如下结论。

(1) 通过现场勘察、裂缝调查,发现裂缝主要沿皮带廊走向产生,宽约10～30 cm,长约1～10 m,产生裂缝的主要原因为地基沉降。钻孔岩心揭露地层岩性主要为回填土、强风化片麻岩和中风化片麻岩,岩性条件差。

(2) 地基裂缝的形成机制复杂,主要是地基岩性差导致了沉降变形,两侧坡体地形形成的侧向拉伸,以及皮带廊自身荷载和振动、生产爆破振动和自然降雨降雪等也是诱发地基开裂的因素。

(3) 实施双排微型桩及框架结构加固治理后,未见有明显的裂缝发育和扩展,表明皮带廊地基稳定性得到了较好的控制。外侧边坡雷达监测数据表明,加固后外侧变形量与变形速度都较为稳定,亦佐证了双排微型桩及框架结构的加固效果良好。

参考文献(References):

[1] 孙训海,佟建兴,杨新辉,等.微型桩在软土地基加固工程中的应用[J].岩土工程学报,2017,39(增刊2):91-94.
SUN Xunhai, TONG Jianxing, YANG Xinhui, et al. Application of micro-piles in reinforcement of soft soil area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(Suppl.2):91-94.

[2] 孔纲强,于江华,任连伟,等.微型钢管桩加固既有基础变形特性现场试验[J].建筑科学与工程学报,2022,39(5):222-231.
KONG Gangqiang, YU Jianghua, REN Lianwei, et al. Field test on deformation characteristics of existing foundation reinforced by micro steel pipe pile[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2022,39(5):222-231.

[3] 谢石连,张弘,陈锡宝,等.大长径比锚杆静压桩在厂房基础托换加固中的应用[J].世界地震工程,2013,29(1):87-91.
XIE Shilian, ZHANG Hong, CHEN Xibao, et al. Application of anchor rod static pressure piles with large length-diameter ratio to strengthenging and underpinning foundation of certain factory building[J]. World Earthquake Engineering,2013,29(1):87-91.

[4] 成潇博,姚华彦,汪明武,等.树根桩与预应力桩联合加固边坡稳定分析[J].水利水运工程学报,2024(1):129-137.
CHENG Xiaobo, YAO Huayan, WANG Mingwu, et al. Analysis of the stability and sensitivity of slope reinforcement using combined root piles and prestressed piles[J]. Hydro-Science and Engineering,2024(1):129-137.

[5] 赵廷华,申鲁,买巨喆,等.高压旋喷灌浆加固超深富水砂层试验研究[J].人民黄河,2023,45(9):147-150+156.
ZHAO Tinghua, SHEN Lu, MAI Juzhe, et al. Experimental study on reinforcement in deep sand layer by high pressure rotary jet grouting[J]. Yellow River,2023,45(9):147-150+156.

[6] 曾二贤,程述一,伍林伟,等.土-岩组合地基变截面锚杆承载性能与机制研究[J].岩土力学,2024,45(7):2117-2128.
ZENG Erxian, CHENG Shuyi, WU Linwei, et al. Bearing behavior and mechanism of variable-section anchors in soil-rock composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(7):2117-2128.

[7] 郑刚,张军辉,章定文,等.地基处理技术现状与发展[J].土木工程学报,2024,57(7):51-70.
ZHENG Gang, ZHANG Junhui, ZHANG Dingwen, et al. State-of-the-art of ground improvement technologies[J]. China Civil Engineering Journal,2024,57(7):51-70.

[8] 马鹏杰,芮瑞,曹先振,等.微型桩加固长大缓倾裂隙土边坡模型试验[J].岩土力学,2023,44(6):1695-1707.
MA Pengjie, RUI Rui, CAO Xianzhen, et al. Model tests of micropile-reinforced soil slope with long and gently inclined fissures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(6): 1695-1707.

[9] 张院生,雷云超,强小俊,等.多排微型桩框架结构加固边坡离心模型试验研究[J].岩土力学,2023,44(7):1983-1994.
ZHANG Yuansheng, LEI Yunchao, QIANG Xiaojun, et al. Centrifugal model test of slope reinforced by multi-row micro-pile frame structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023,44(7):1983-1994.

[10] 孙志亮,孔令伟,王勇,等.悬臂挡墙-微型桩加固填土边坡地震响应特征研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(10):2109-2123.
SUN Zhiliang, KONG Lingwei, WANG Yong, et al. Study on seismic response characteristics of a micropile-reinforced filled slope behind a cantilever retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(10): 2109-2123.

[11] 周玮宁,李子曦,张嘎.成层地基微型桩加固浅基础的离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(增刊1):81-85.
ZHOU Weining, LI Zixi, ZHANG Ga. Centrifugal model tests on micro-pile-reinforced shallow foundation in layered soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024, 46(Suppl.1):81-85.

[12] BORTHAKUR N, DEY A K, et al. Evaluation of group capacity of micro-pile in soft clayey soil from experimental analysis using SVM-based prediction model[J]. International Journal of Geomechanics,2020,20(3):4020008.

[13] 张力,赵振宇,刘力璇,等.基于现场试验与数值模拟的微型桩设计参数优化[J].北京交通大学学报,2019,43(4):52-57.

ZHANG Li, ZHAO Zhenyu, LIU Lixuan, et al. Design parameters optimization of micro-pile based on field test and numerical simulation [J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2019,43(4):52-57.

[14] 王飞,吴红刚,郭春香,等.基于加速度响应的微型桩加固土质边坡效果评价[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊2):3812-3821.
WANG Fei, WU Honggang, GUO Chunxiang, et al. Evaluation of soil slope reinforced by micro-piles based on acceleration response[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(Suppl.2):3812-3821.

[15] 刘建维,杨再兴,王忍.微型桩复合土钉墙对狭小深基坑的应用分析[J].中国安全生产科学技术,2019,15(增刊1):106-110.
LIU Jianwei, YANG Zaixing, WANG Ren, et al. Application analysis of composite soil nailing wall with micro-piles to narrow and deep foundation pit[J]. Journal of Safety Science and Technology,2019,15(Suppl.1):106-110.

[16] 夏峻,白汗章,王佳佳,等.黄土地基微型桩基础上拔及下压承载性能研究[J].应用力学学报,2023,40(2):340-349.
XIA Jun, BAI Hanzhang, WANG Jiajia, et al. Uplift and press bearing capacity of micro-pile foundation for transmission line on loess ground[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2023,40(2):340-349.

[17] 马彦军,吴红刚,秦昌乐,等.山区斜坡中微型桩及油气管道变形机制模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(3):728-741.
MA Yanjun, WU Honggang, QIN Changle, et al. Model experimental study on deformation mechanism of micro piles and oil-gas pipelines in mountain slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(3):728-741.

[18] 张军舰,张勇,隋倩倩.微型钢管桩内接于灌注桩围护结构计算方法探讨[J].岩土力学,2024,45(3):867-877.
ZHANG Junjian, ZHANG Yong, SUI Qianqian, et al. Discussion of the calculation method of enclosure structure of "micro-steel pipe pile internally connected into concrete pile"[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(3):867-877.