

文章编号: 1007-2993(2025)01-0049-06

微型注浆钢管桩在滑坡应急治理工程中的应用

陈金宏^{1,2} 王彤标¹ 冉章清² 张波²

(1. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州煤设地质工程有限责任公司, 贵州贵阳 550025)

【摘要】 微型钢管桩具有造价低、工期短、布置灵活等优点, 逐渐被应用于滑坡治理工程。然而由于微型钢管桩多为大面积成群布桩, 注浆施工将对地下水自然排泄产生影响, 进而影响滑坡治理效果。因此, 采用微型钢管桩进行滑坡治理时, 应考虑桩群后部坡体地下水排泄问题。以贵州某天然气管道滑坡应急治理工程为例, 通过优化钢管桩平面布置及施工工艺, 在桩群之间合理留设地下水排泄通道, 有效降低了桩群后部的地下水位, 减小了桩后滑坡推力。钢管桩施工完成后, 滑坡整体处于稳定状态, 表明治理方案合理可行, 可为类似滑坡防治工程设计和施工提供借鉴。

【关键词】 微型钢管桩; 滑坡治理; 地下水; 排水通道

【中图分类号】 TU432

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0702

Application of micro-stell grouting steel pipe piles in landslide emergency control project

Chen Jinhong^{1,2} Wang Tongbiao¹ Ran Zhangqing² Zhang Bo²

(1. Guizhou Coal Mine Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Guizhou Coal Design Geological Engineering Co., Ltd., Guiyang 550025, Guizhou, China)

【Abstract】 Micro-steel pipe piles are widely used in landslide control project for their low cost, short construction period, and flexible layout. Due to the fact that most micro steel pipe piles are arranged in large groups, grouting construction will have an impact on the natural discharge of groundwater, leading to an increase in the groundwater level on the slope and thus affecting the effect of landslide control. Therefore, when using micro steel pipe piles for landslide control, the issue of groundwater discharge at the back of the pile group should be considered. Taking the emergency control project of a natural gas pipeline landslide in Guizhou as an example. By optimizing the layout and construction technology of steel pipe piles, a reasonable groundwater drainage channel was reserved between pile groups, effectively reducing the groundwater level at the back of the pile group and reducing the landslide thrust behind the piles. After the completion of steel pipe pile construction, the overall stability of the landslide indicates that the treatment plan is reasonable and feasible, which can provide reference for the design and construction of similar landslide prevention projects.

【Key words】 micro-steel pipe pile; landslide control; groundwater; drainage channel

0 引言

微型钢管桩是指直径小于 300 mm 的一种小直径钻孔灌注桩^[1]。近年来, 随着滑坡治理技术的发展, 微型钢管桩被广泛应用于滑(边)坡治理工程。张小兵等^[2]通过现场试验、理论分析、数值模拟等方法研究了微型钢管桩的破坏模式和承载性能; 周春雷等^[3]结合工程实例, 从钢管规格型号及混凝土强度等级等因素探讨了最优的材料组合和配筋角度, 并提出了钢管桩最优长细比取值建议; 肖成志等^[4]根据注浆微型钢管桩的桩体抗弯荷载试验, 得到钢管直径与桩

体直径的适宜比例关系; 张卫民等^[5]指出钢管桩施工质量控制要点主要包括成孔质量控制、孔位与桩孔倾斜度控制、孔径控制及桩长控制; 潘健等^[6]探讨了注浆钢管桩对滑坡岩土体的挤密加固及抗滑增阻作用, 并提出了一种钢管压力注浆型抗滑挡墙滑坡治理技术; 李舟等^[7]基于弹性地基梁理论, 建立了钢管桩加固边坡的三维力学模型, 并探讨桩土之间的作用关系。

以上研究成果从钢管桩自身强度、施工质量控制及桩土作用关系等方面研究了微型钢管桩的抗滑、

基金项目: 贵州省煤矿安全高效开采技术支撑与服务人才基地基金项目(GMY-RD2022.KJ-009)

作者简介: 陈金宏, 男, 1986 年生, 高级工程师, 主要从事岩土工程及地质灾害防治相关工作。E-mail: 704031412@qq.com

增阻作用,在滑坡治理工程设计中具有很好的参考价值,但是对钢管桩平面布置及排水控制方法的研究较少。

由于微型钢管桩通常为大面积成群布桩,桩孔灌注的浆液将填充周边土体空隙,进而影响坡体后部地下水自然排泄,使水位升高,滑坡推力增大,影响滑坡治理效果。钢管桩注浆对地下水的影响如图1所示。

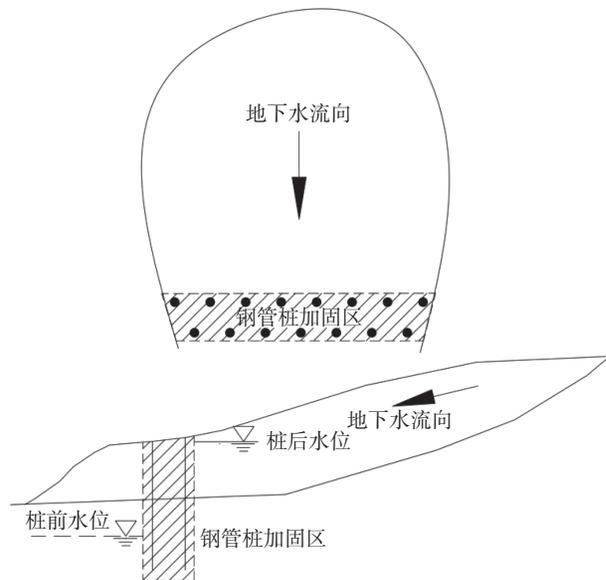


图1 钢管桩注浆对地下水排泄的影响示意图

因此,在采用微型钢管桩进行滑坡治理时,除了桩体自身强度及施工质量外,合理布置桩位,使桩体后部地下水排泄畅通,也是治理方案设计时应当重点考虑的问题。

基于上述分析,本文以贵州正安县某天然气管道滑坡应急治理工程为例,通过优化钢管桩孔位布置及施工工艺,确保桩群前后地下水排泄畅通,实现了预期治理效果,可为类似滑坡应急治理工程设计提供借鉴。

1 滑坡概况

滑坡位于贵州省正安县境内,滑坡所处地形南高北低,地形坡度为 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$,主滑方向为 $NE26^{\circ}$,滑体宽约200 m、长约320 m,滑体物质主要为第四系(Q_4)黏土夹碎石,厚度约10 m,体积约 $32 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑坡规模属于中型,下伏基岩为奥陶系红花园组(O_1t+h)灰岩,主要出露于滑坡区东侧开挖断面及北侧沟谷,岩体呈单斜产出,产状为 $340^{\circ} \angle 16^{\circ}$,构造不发育。

该滑坡属于老滑坡,初始形成时间不详,曾于2020年7月受多日持续降雨影响坡体发生蠕动滑移,坡面部分民房发生开裂。2021年7月初,因敷设天

然气管道于坡体前缘开挖形成高2.0~3.0 m的土质边坡,其倾向 $NE20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,与岩层倾向的夹角为 $46^{\circ} \sim 56^{\circ}$,坡面倾角 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$,由于施工单位长时间未对边坡采取支护措施,导致老滑坡中下部局部复活,在坡面出现多条裂缝,根据现场观测,复活区后缘逐渐向后推移,至2021年9月,复活区纵向长度约50 m。由于老滑坡中上部房屋分布集中,为防止复活区范围进一步扩大,确保坡体中上部居民生命财产安全,需及时对复活区采取应急处置措施。滑坡概貌如图2所示。

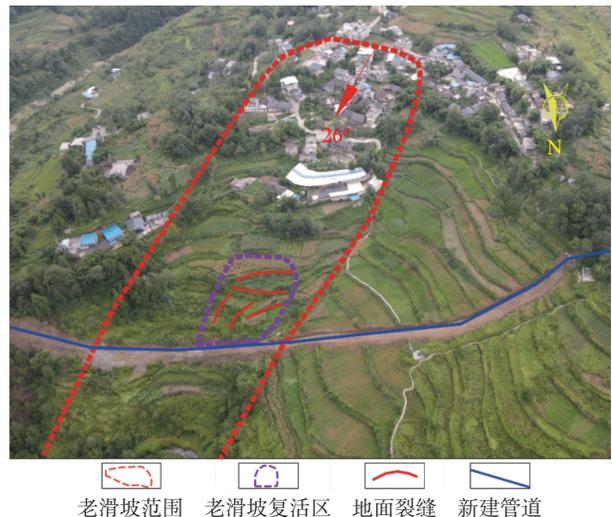


图2 滑坡概貌

2 滑坡成因及推力计算

2.1 滑坡成因分析

根据现场踏勘,滑坡岩土体主要成分为第四系残坡积含碎石黏土(Q_4^{dl+el}),碎石含量约为20%~30%,土体一般呈可塑状。已开挖管沟内局部积水,土体受水体浸泡后软化,自稳能力较差,沟壁时有局部坍塌发生。

从坡体变形特征看,变形区主要位于管沟后部约50 m范围,坡面以不连续张拉裂缝为主,缝宽10.0~20.0 cm,长5.0~15.0 m,延展方向与邻近陡坎走向大致平行,裂缝下坡侧土体下坐明显,裂缝两侧的最大落差约30 cm,管沟前部地表无明显变形迹象。分析认为本次坡体变形仅为局部浅层土体滑移,并非老滑坡整体失稳。

管沟施工在坡体前缘形成了高2.0~3.0 m的土质边坡,由于长时间未进行管沟回填及边坡支护,加之2021年7月至9月正安县发生多日连续降雨,雨水下渗一方面增加了土体自重,另一方面由于地下水位升高,使地下水动水压力与静压力作用加强,滑坡下滑力增大。此外,在地下水软化作用下,滑带土的

抗滑力下降,当坡体下滑力大于抗滑力时,其即发生滑移变形^[8-10]。由于此类大面积滑坡堆积体在纵向上一一般具有较大的物性差异,土体内往往形成多级不连续滑面,因此坡体受外界扰动后易发生局部不连续开裂变形^[11-13],随着局部变形范围的扩大,主滑滑面将随之发生改变,进而增大了坡体整体滑移的风险。

2.2 滑坡推力计算

根据老滑坡复活区裂缝发育特征,采用理正岩土 6.5 按折线滑动法搜索最危险滑面^[14],并据此反算滑带土饱和状态下的物理力学指标,取稳定性系数 $F_s=1.0$,滑体厚度 $h=10.0$ m,饱和重度 $\gamma=20.0$ kN/m³,计算结果见表 1。

表 1 滑带土物理力学参数表

土体名称	饱和重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
黏土夹碎石	20	10	8

采用不平衡推力传递法按下式计算复活区土体在饱和状态下的滑坡推力^[15]。

$$P_i = P_{i-1} \times \psi_{i-1} + T_i - \frac{R_i}{F_{st}} \quad (1)$$

式中: P_i, P_{i-1} 为第 i 滑块及第 $i-1$ 滑块推力; ψ_{i-1} 第 $i-1$ 滑块传递系数; T_i, R_i 分别为第 i 滑块下滑力和抗滑力; F_{st} 为滑坡安全系数,取 $F_{st}=1.25$ 。

滑坡推力计算结果见表 2。

表 2 滑坡推力计算结果

计算区域	计算工况	安全系数 F_{st}	滑坡推力/(kN·m ⁻¹)	剪出口
老滑坡	暴雨工况	1.25	359.2	管沟处
复活区	暴雨工况	1.25	196.7	管沟处

3 应急治理方案

由于复活区裂缝变形日益加剧,且其后缘逐渐向后推移,变形范围不断扩大,老滑坡发生整体滑移的可能性变大,因此,滑坡应急处置方案除了应考虑对复活区进行支挡外,还应考虑防止复活区范围进一步扩大,确保老滑坡中上部居民生命财产安全。

目前常用的滑坡治理方法主要有削坡减载、滑坡岩土体性质改良、支挡、截排水等^[16-17]。由于老滑坡中上部房屋分布集中,复活区位于其中下部,显然不具备削坡条件;岩土体性质改良主要是通过注浆等手段增大滑面(带)岩土抗剪强度指标,以增大其抗滑能力,由于滑坡面积较大,且复活区变形剧烈,采用此法需要布置大量钻孔,施工工期较长,难以在短时间内有效控制复活区变形。经过综合分析后提出了

“微型钢管桩+抗滑挡土墙”综合治理方案,即在管沟处设置一道重力式挡土墙对复活区土体进行支挡;同时在复活区后缘布置 4 排微型钢管桩,以防止变形区范围进一步扩大。治理工程布置及典型剖面见图 3、图 4。

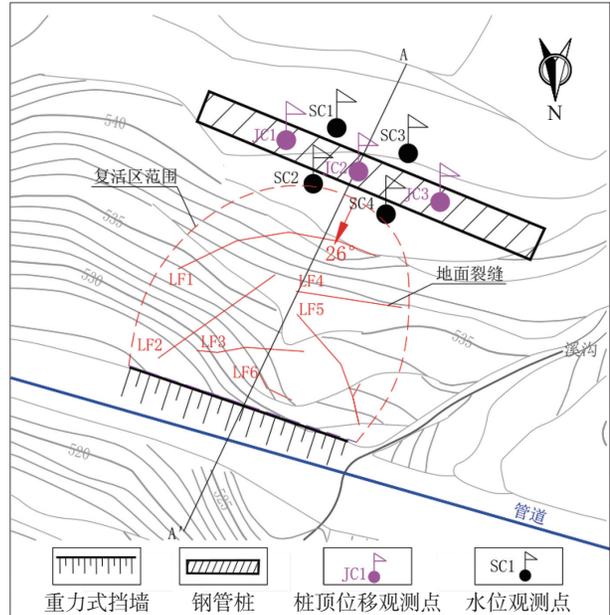


图 3 治理工程平面布置图

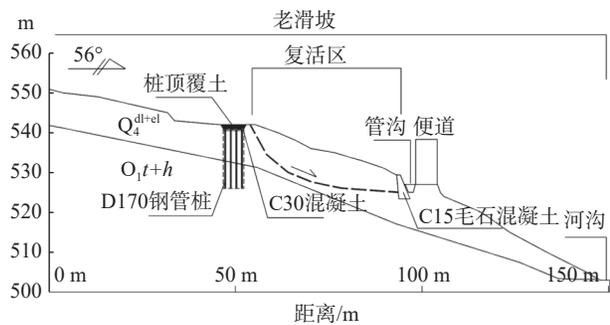


图 4 治理工程剖面图

挡土墙采用毛石混凝土浇筑,底宽 3.0 m,顶宽 1.0 m,墙高 6.0 m,基础埋深 2.0~3.0 m,混凝土强度等级为 C25,根据验算结果,挡土墙抗滑移、抗倾覆稳定性均能满足规范要求。

在老滑坡复活区后缘共布置 4 排钢管桩,采用潜孔钻成孔,孔内插入钢管后进行注浆封闭,钻孔为矩形布置,排距 1.5 m,桩间距 1.0 m,成孔直径为 170 mm,孔深 15.0~16.0 m。钢管采用外径 108 mm、壁厚 4.5 mm 的无缝钢管,管内插入两根 $\phi 25$ 螺纹钢,注浆采用 M30 水泥浆液。相邻桩顶采用 1 根 $\phi 25$ 拉结筋连接以增加桩群整体性,并浇筑 C30 混凝土板封顶,板厚 20 cm,板上覆土 0.8~1.0 m 以恢复场地原始地貌。

在钢管内外均采取压力注浆措施,设计注浆压力为 1.5~2.0 MPa,影响半径为 0.75 m。由于浆液填充周边岩土体空隙,一方面对土体起到胶结加固作用,另一方面也使桩群区域土体形成一个整体,相当于一道截水帷幕,阻碍坡体地下水自然排泄,地下水位将会升高,其在增加滑体自重的同时也会使土体抗剪强度降低、滑坡推力增大,进而影响钢管桩的支护效果。因此,方案需重点考虑桩群后地下水排泄问题。

基于上述分析,设计将钢管桩治理区划分为 5 个区块(编号 A—E),每个区块布置 24 根钢管桩,区块之间留设 3.0 m 过水通道以保障桩后地下水能自然排泄,此外,为了考察治理工程运行效果,在 B, C, D 区块各设一个桩顶位移观测点,并在 B—C 及 C—D 之间的通道前后分别布置一个地下水位观测孔。钢管桩平面布置图及立面图见图 5、图 6。

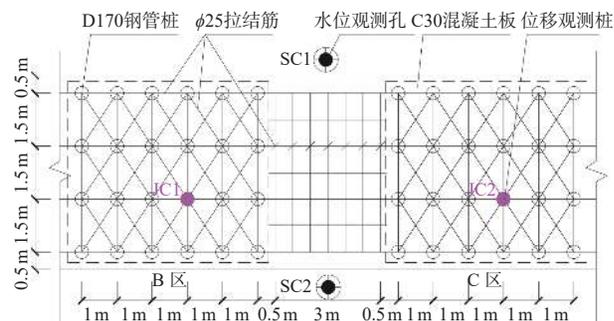


图 5 钢管桩平面示意图

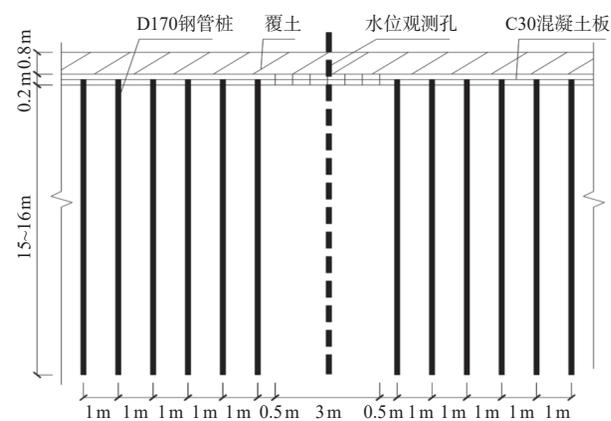


图 6 钢管桩立面示意图

4 施工及监测

钢管桩施工时,钻孔揭露滑体厚 9.3~10.8 m,地下水埋深 7.0~8.9 m,与设计条件基本吻合。根据现场钻孔揭露情况及试验结果,重新对挡土墙及钢管桩的抗滑稳定性进行计算,结果满足规范要求。钢管桩所用钢管强度试验结果见表 3。

钢管桩成孔后,采用 3SNS 高压注浆泵进行浆液灌注,为了确保过水通道范围内的土体空隙不被浆液

表 3 钢管强度参数

材料名称	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%	检验数量 /根
无缝钢管 D108×4.5	344	413	27.5	50

充填,邻近通道的一排桩孔注浆压力调整为 1 MPa,并加入适量速凝剂将注浆影响半径控制在 0.5 m 左右。

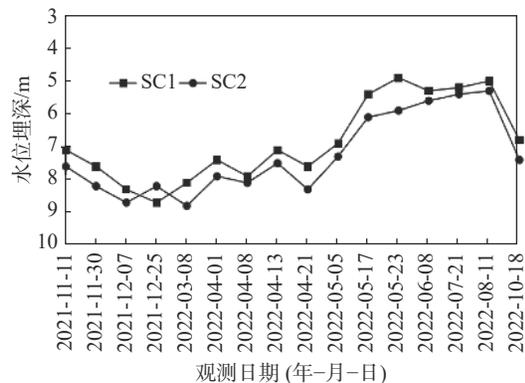
治理工程于 2021 年 11 月开始施工,2022 年 2 月完成全部工程内容并顺利通过初步验收,施工前后钢管桩治理区场地变化如图 7 所示。



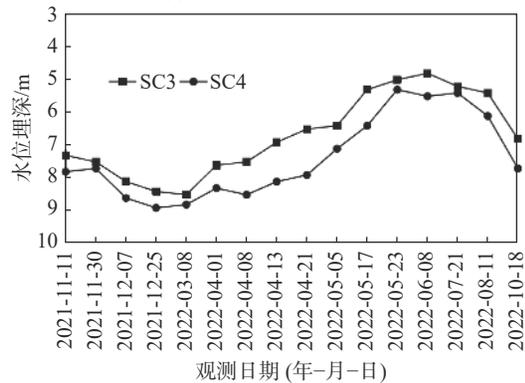
(1) 钻孔施工 (2) 混凝土板浇筑 (3) 桩顶覆土

图 7 施工前后场地照片

为了检验工程治理效果,对钢管桩桩顶位移及桩群前后地下水位变化情况持续观测至 2022 年 10 月,观测结果见图 8、图 9。



(a) SC1、SC2 水位变化曲线



(b) SC3、SC4 水位变化曲线

图 8 钢管桩治理区前后水位变化曲线

由图 8 可知,桩群前后水位变化趋势总体一致,表明桩群之间留设的过水通道起到了良好的排水效

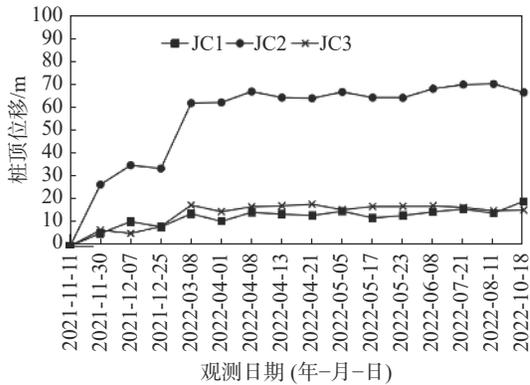


图9 钢管桩桩顶水平位移变化曲线

果, 钢管桩注浆施工未对桩后地下水自然排泄产生不利影响。钢管桩施工后的桩顶位移变化情况见图9, 分析可知, 2021年11月至2022年2月, 钢管桩施工期间坡体仍在持续发生变形, 位于主滑剖面上的观测桩(JC2)桩顶最大水平位移为61.9 mm, 两侧的JC1、JC3水平位移虽呈增大趋势, 但其值均在20 mm以内, 这主要是坡体受管沟开挖影响发生了不连续变形所致^[18]; 自2022年3月钢管桩施工完成后, 桩水平位移增量逐渐减小, 位移变化曲线平缓, 表明钢管桩使用情况正常, 处于稳定状态。钢管桩施工后有效阻止了老滑坡复活区后缘后移, 复活区范围已不再继续扩大, 坡体逐渐趋于稳定。

5 结论

(1) 滑坡治理监测数据及工后效果表明, 采用微型钢管桩可以有效地防止老滑坡复活区范围持续扩大, 结合前缘设置抗滑挡土墙治理措施, 确保了滑坡整体稳定, 治理效果显著。

(2) 为防止钢管桩群因注浆作用形成截水帷幕, 抬升桩后地下水位, 增大滑坡推力, 方案设计时应合理调整钢管桩布置, 在桩群区域留设一定宽度的过水通道, 使桩后地下水排泄畅通, 此为微型钢管桩治理滑坡的关键。

(3) 微型钢管桩具有施工便捷, 对场地影响小等优点, 在交通不便、施工条件和环境较差时, 是滑坡应急治理较为有效的措施。

参 考 文 献

[1] 丁光文, 王 新. 微型桩复合结构在滑坡整治中的应用[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 47-50. (DING G W, WANG X. Application of micropiling compound structure in a landslide treatment engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(1): 47-50. (in Chinese))

[2] 张小兵, 石 磊. 微型钢管桩在大厚度黄土地区的承载

性能研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(1): 91-96. (ZHANG X B, SHI L. Research on the bearing capacity of micro steel pipe pile in loess area with large thickness[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(1): 91-96. (in Chinese))

- [3] 周春雷, 舒中文, 刘 欣, 等. 加筋微型钢管桩配筋优化及受力特征[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13870-13879. (ZHOU C L, SHU Z W, LIU X, et al. Reinforcement optimization and stress characteristics of reinforced micro steel pile[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 13870-13879. (in Chinese))
- [4] 肖成志, 司 雨, 王子寒, 等. 注浆微型钢管桩体抗弯力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(4): 87-96. (XIAO C Z, SI Y, WANG Z H, et al. Flexural mechanical properties of grouted micro-steel-pipe-piles[J]. Journal of architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 87-96. (in Chinese))
- [5] 张卫民, 毛宜宾. 微型钢管群桩及预应力锚索综合加固已有滑坡[J]. 铁道建筑, 2012, 52(2): 72-74. (ZHANG W M, MAO Y B. Comprehensive reinforcement of landslides using micro steel pipe piles and prestressed anchor cables[J]. Railway Engineering, 2012, 52(2): 72-74. (in Chinese))
- [6] 潘 健, 朱姣利, 陈红兵. 广东省韶关某黏质土坡滑坡治理方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 591-594. (PAN J, ZHU J L, CHEN H B. A repairing method for a clay landslide in Shaoguan of Guangdong province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 591-594. (in Chinese))
- [7] 李 舟, 姜暑芳, 陈 洋. 钢管桩在滑坡治理工程中的应用[J]. 铁道建筑, 2012, 52(12): 96-98. (LI Z, JIANG S F, CHEN Y. Application of steel pipe piles in landslide control engineering[J]. Railway Engineering, 2012, 52(12): 96-98. (in Chinese))
- [8] 贺可强. 大型堆积层滑坡的多层滑移规律分析[J]. 金属矿山, 1998, 27(7): 15-18. (HE K Q. An analysis on the multilayered slide law of the large-scale accumulative landslides[J]. Metal Mine, 1998, 27(7): 15-18. (in Chinese))
- [9] 贺可强, 白建业, 王思敬. 降雨诱发型堆积层滑坡的位移动力学特征分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 705-709. (HE K Q, BAI J Y, WANG S J. Analysis of displacement dynamic features of colluvial landslide induced by rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 705-709. (in Chinese))
- [10] 郭 涛, 魏业清, 王 旭. 雨水入渗下土体抗剪强度劣化时残坡积土边坡的稳定性及加固研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(2): 176-182. (GUO T, WEI Y Q, WANG X. Stability analysis and landslide reinforcement

- study for residual and diluvia soil slop under rainfall infiltration[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(2): 176-182. (in Chinese))
- [11] 王卫. 堆积层滑坡发生机理及防治措施[J]. *铁道建筑*, 2015, 55(6): 121-124. (WANG W. Formation mechanism and prevention measures of accumulation landslide[J]. *Railway Engineering*, 2015, 55(6): 121-124. (in Chinese))
- [12] 成国文, 李善涛, 李 晓, 等. 万州近水平地层区堆积层滑坡成因与变形破坏特征[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(3): 304-310. (CHENG G W, LI S T, LI X, et al. Forming causes and deformation-destruction characters of accumulative stratum landslide in horizontal stratum in Wanzhou[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(3): 304-310. (in Chinese))
- [13] 李 雷, 周益民, 田 乐. 云南石门坎水电站业主营地古滑坡特征及稳定性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(3): 26-30. (LI L, ZHOU Y M, TIAN L. The characteristic and stability analysis on the ancient landslide at the Yezhuying hydropower station in Yunnan province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(3): 26-30. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滑坡防治工程勘查规范: GB/T 32864-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for geological investigation of landslide prevention: GB/T 32864-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese))
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 滑坡防治设计规范: GB/T 38509-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. (State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese))
- [16] 贺 强, 雷建和, 陈喜山. 堆积层滑坡的基本特征与防治原则[J]. *黄金*, 1998, 19(11): 28-31. (HE K Q, LEI J H, CHEN X S. Basic characteristics of the landslide of accumulation horizon and its preventive and controlling principle[J]. *Gold*, 1998, 19(11): 28-31. (in Chinese))
- [17] 司胜利. 预应力锚固技术在昆河线 402 滑坡治理工程中的应用[J]. *中国煤炭地质*, 2010, 22(7): 48-51. (SI S L. Application of stressed anchorage technology in Kunming-Hekou railway No. 402 landslide governing engineering[J]. *Coal Geology of China*, 2010, 22(7): 48-51. (in Chinese))
- [18] 陈金宏, 王彤标, 王刘文, 等. 贵州山区堆积层滑坡形成机制及防治措施[J]. *资源环境与工程*, 2023, 37(2): 183-190. (CHEN J H, WANG T B, WANG L W, et al. Formation mechanism and control measures of accumulation landslide in Guizhou mountainous area[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2023, 37(2): 183-190. (in Chinese))

收稿日期: 2023-08-16