

强降雨条件下隧道洞口边坡开挖渗流特征 以及支护方案研究^①

谢 韬¹, 蔡 军², 范理云², 许胜才²

(1. 广西交通设计集团, 广西 南宁 530029; 2. 贺州学院, 广西 贺州 542899)

摘要: 针对数值模拟软件难以模拟分析强降雨过程中隧道洞口边坡开挖渗流场分布的问题, 依托某隧道洞口边坡工程, 对FLAC^{3D}软件中的FISH语言进行二次开发, 确定降雨渗透过程中不同饱和状态下土体渗透系数值并实时更新降雨入渗的边界条件, 分析了不同降雨时长情况下不同支护方案隧道洞口边坡孔隙水压力、基质吸力分布以及安全稳定性。结果表明, 历经24 h强降雨, 原边坡和采用抗滑桩+锚索支护的边坡表面土体均达到饱和状态, 即从坡脚至坡顶浸润线形成贯通; 而采用台阶型放坡+锚杆支护的边坡仅在坡脚至边坡二级平台处的表面土体达到饱和状态; 降雨过程中采用抗滑桩+锚索支护的隧道洞口边坡与原边坡安全系数的变化规律较为一致, 安全系数均为先快速降低后逐渐趋于稳定, 直至安全系数达到1.2; 而采用台阶型放坡+锚杆支护的边坡安全系数降低幅度较小, 其值基本保持在1.8以上; 在选择隧道洞口边坡工程扩建方案时, 从隧道洞口边坡工程开挖支护方案的安全系数、土方开挖量、总投资等多个角度考虑, 抗滑桩+锚索支护方式优于台阶型放坡+锚杆支护方式。

关键词: 强降雨; 边坡支护; 隧道洞口; 边坡工程; 非饱和土; 渗透系数; 基质吸力

中图分类号: U451 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.003

文章编号: 0253-6099(2023)01-0012-04

Seepage Characteristics of Slope at Tunnel Entrance Under Heavy Rainfall and Its Support Scheme

XIE Tao¹, CAI Jun², FAN Liyun², XU Shengcai²

(1. Guangxi Communications Design Group Co Ltd, Nanning 530029, Guangxi, China; 2. Hezhou University, Hezhou 542899, Guangxi, China)

Abstract: It is difficult to simulate and analyze distribution of seepage field for the slope at the entrance of excavated tunnel during heavy rainfall. Aiming this problem, a slope project at a tunnel entrance was taken for study, and FISH language in the FLAC^{3D} was redeveloped to determine the permeability coefficient of soil under different saturation state during rainfall infiltration, and the boundary conditions for rainfall infiltration were updated in real time. In addition, the pore water pressure, matrix suction distribution, as well as safety and stability of the slope at the tunnel entrance after different support schemes were all analyzed with different rainfall durations. The results showed that after 24 hours of heavy rainfall, the slope before and after a combined support including anti-slide piles and anchor cables all reached saturation state, that is, the saturation line ran through from the foot to the crest of the slope, while the slope, after benching and being supported with bolt, had its surface soil from the foot to the secondary platform of the slope under a saturated state. As for the slope at tunnel entrance supported by anti-slide pile combined with anchor cable, the variation law of its safety factor during rainfall was consistent with that of the slope without support treatment, showing that the factor of safety tended to be stable after an initial rapid decrease, and gradually reached 1.2. As for the slope after benching and being support with bolt, its factor of safety decreased a little and maintained above 1.8. It is concluded that the factor of safety, excavated earthwork quantity and total investment for the support scheme should be taken into consideration before starting a slope engineering at a tunnel entrance, and a combined support scheme including anti-slide pile and anchor cable is superior to the scheme including benching and support with bolt.

① 收稿日期: 2022-08-26

基金项目: 广西自然科学基金(2018GXNSFBA281129, 2020GXNSFBA297163); 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2018KY0559)

作者简介: 谢 韬(1981—), 男, 湖南邵东人, 高级工程师, 主要从事市政道路与公路的设计与研究工作。

通信作者: 蔡 军(1988—), 男, 江西抚州人, 讲师, 主要从事防灾减灾及防护工程方向的教学与研究工作。

Key words: heavy rainfall; slope support; tunnel entrance; slope engineering; unsaturated soil; permeability coefficient; matrix suction

隧道洞口边坡安全稳定性是确保隧道工程正常施工运行的关键。为确保隧道施工过程中洞口边坡安全稳定,需要分析原有边坡在强降雨条件下的安全稳定状况,对处于欠稳定状态的洞口边坡需采取支护措施以确保隧道在服役期间洞口边坡安全稳定^[1-3]。此外,洞口边坡在支护施工过程中极易改变边坡渗流场的分布情况^[4-5],从而影响边坡安全稳定。现有数值模拟软件无法直接计算降雨过程中边坡饱和-非饱和土体的渗透系数,无法直接确定降雨过程中边坡渗流场,需要对数值模拟计算软件进行二次开发。

研究人员在研究降雨条件下边坡的渗流问题时认为边坡土体的渗透系数与土体的饱和程度有关,FLAC^{3D}软件的岩土体渗透系数参数只能设定为常量,不能进行参数化变量的设置。为解决这一问题,文献[6-8]根据土体的土水特征曲线拟合函数、土体饱和渗透系数与非饱和渗透系数之间的关系对FLAC^{3D}软件进行二次编程,实现了边坡在渗流过程中土体单元孔压和渗透系数的实时更新,但并未考虑在强降雨过程中土体基质吸力是否对边坡稳定性有影响。本文以某隧道工程洞口边坡为例,在文献[8-9]编辑的FISH语言程序基础上增加基质吸力对边坡安全系数影响的程序内容,即在计算降雨工况下分析不同支护方案的边坡渗流场分布情况,通过基质吸力修正边坡土体单元的抗剪强度、黏聚力等参数,分析基质吸力对隧道洞口边坡安全稳定的影响程度;并从边坡安全系数、土方开挖量、工程造价等多角度对比优选隧道洞口边坡支护方案。

1 工程概况

某隧道洞口边坡工程表面主要以含砾黏土为主,下伏基岩为中风化灰岩。本隧道工程所处的区域雨季时间较长、降雨强度较大,所以在确定边坡改扩建方案时应考虑降雨入渗对边坡孔压及稳定性的影响。根据隧道洞口边坡工程所处的区域,选取当地强降雨实际情况作为本文分析过程中的降雨条件,即降雨强度10 mm/h、持续降雨时长24 h。边坡岩土体物理力学性质以及土水特征曲线(SWCC)相关参数如表1所示。

隧道洞口边坡高24 m,坡度约为36°,本隧道洞口该段边坡坡体长23 m。根据现行隧道洞口边坡工程设计规范要求以及该隧道洞口边坡工程所处的地质环境,提出了2种隧道洞口边坡支护方案^[10-11]。

表1 岩土体的物理力学参数及SWCC拟合参数

参数名称	单位	参数取值	
		含砾黏土	中风化灰岩
重度	kN/m ³	17	24
泊松比	—	0.3	0.28
变形模量	GPa	0.01	0.2
黏聚力	kPa	35	88
内摩擦角	(°)	18	40
抗拉强度	MPa	0.01	10
饱和渗透系数	cm/s	1.73×10^{-6}	6.51×10^{-7}
孔隙比	—	0.4	0.3
SWCC拟合参数		$\theta_r:10\%; \theta_s:20.8\%; a_f:0.13; n_f:1.94; m_f:0.48$	$\theta_r:10.6\%; \theta_s:23.5\%; a_f:0.03; n_f:1.2; m_f:0.20$

支护方案1:台阶型坡面+锚杆支护加固。台阶型坡面的三级边坡高度均为8 m,边坡坡率依次为1:1、1:1.25和1:1.75,锚杆长18 m,倾角15°,锚杆间距2 m,为避免锚杆出现群锚效应,将锚杆水平间距设置为2 m,所以共需设置锚杆10排,如图1所示。

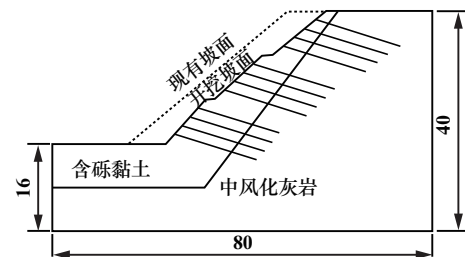


图1 台阶型坡面+锚杆支护方案(单位:m)

支护方案2:抗滑桩+锚索加固。抗滑桩长度设置为12 m,其中6 m为嵌固段,截面尺寸为2 m×1 m,为防止抗滑桩倾覆变形过大,对抗滑桩外露段用锚索进行加固,锚索长21 m,倾角15°,抗滑桩之间间距4.5 m,共需要布设5处抗滑桩+锚索,抗滑桩之间用挡土墙作为过渡进行连接,具体布置情况如图2所示,加固方案所需的构件计算参数如表2所示。

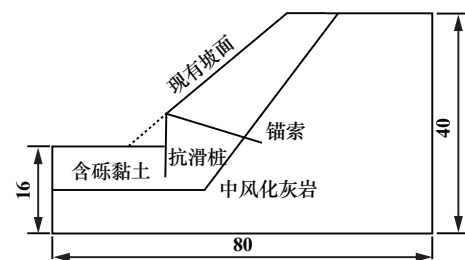


图2 抗滑桩+锚索加固支护方案(单位:m)

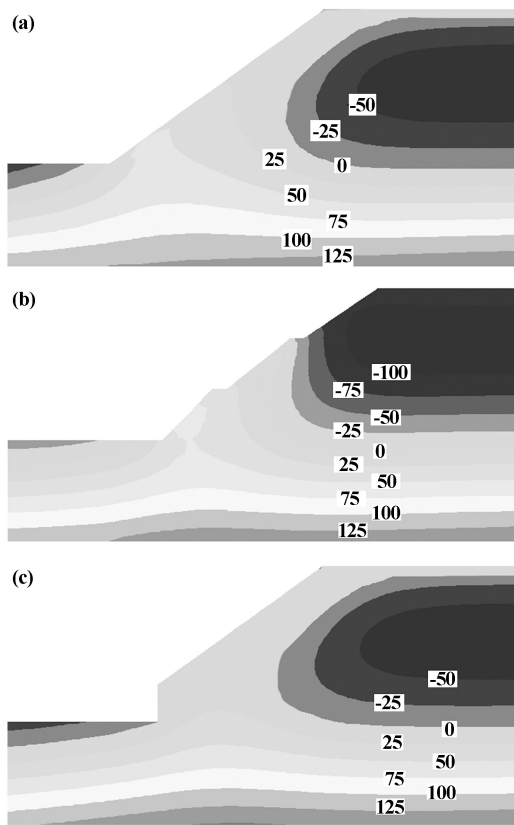
表2 抗滑桩+锚索加固支护方案物理力学参数

支护类型	弹性模量/ GPa	横截面面积/ m ²	泊松比	重度/ (kN·m ⁻³)	直径/ mm
抗滑桩	36	1.13	0.16	27	—
锚杆	200	0.011 3	0.25	—	120
锚索	200	0.000 5	0.25	—	25

2 分析与讨论

2.1 强降雨条件下不同支护方案的隧道洞口边坡渗流场分析

为分析不同支护条件下边坡孔隙水压力变化情况,以拟定的开挖支护方案为依托,利用FLAC^{3D}软件自带的FISH语言进行编程,将降雨强度10 mm/h、持续降雨时长24 h的降雨条件加载在边坡坡面和坡顶处。边坡计算模型地下水位左边界高12 m、右边界高15 m,为进行数值模拟分析,将边坡模型左右两端设置为水平约束,模型前后两侧设置为垂直约束,模型底部设置为固定约束,模型顶部不设置约束,计算分析不同支护方案的边坡与原边坡的孔隙水压力分布情况,结果如图3所示。



(a) 原边坡; (b) 支护方案1边坡; (c) 支护方案2边坡

图3 降雨24 h条件下边坡孔压变化

由图3可知,不同支护方案的边坡在同等降雨条

件下孔隙水压力和基质吸力的变化情况有所不同。原边坡与支护方案2边坡孔压分布情况主要表现为边坡表面和坡顶处均有一定积水,即边坡表面和坡顶土体处于完全饱和状态,并且形成贯通,两者孔压变化规律较为相似,其主要原因是:原边坡含砾黏土层较厚,渗透系数较大;支护方案2边坡在坡脚处已开挖,但由于抗滑桩为不透水材料,抗滑桩附近土体含有大量积水,促使边坡表面积水向坡顶处贯通。

支护方案1边坡从坡底至二级边坡平台处有一定积水,而坡顶积水较少,其原因在于边坡经过开挖之后,边坡含砾黏土层较浅,降雨渗透到坡面含砾黏土层后向中风化灰岩渗透,因中风化灰岩渗透系数比含砾黏土小,开挖之后的坡表面雨水不足以形成积水,也难以在坡表面和坡顶处形成浸润线的贯通。

2.2 强降雨条件下不同支护方案的隧道洞口边坡稳定性分析

选取边坡所处区域的强降雨条件加载在边坡上,计算分析边坡在强降雨条件下边坡的安全稳定情况。由于岩土体存在一定孔隙率,随着降雨时长不断增加,土体含水率随之增加,使得岩土体重度增加。计算分析边坡稳定性时,可通过强度折减法求解边坡安全系数,计算分析时选取原边坡、支护方案1边坡和支护方案2边坡作为研究对象且忽略雨水对边坡冲刷的影响。计算分析过程中,将24 h降雨过程分为4个阶段,每隔6 h计算孔压分布情况和安全系数,在安全系数计算过程中考虑基质吸力对边坡安全性的影响。安全系数变化情况如图4所示。

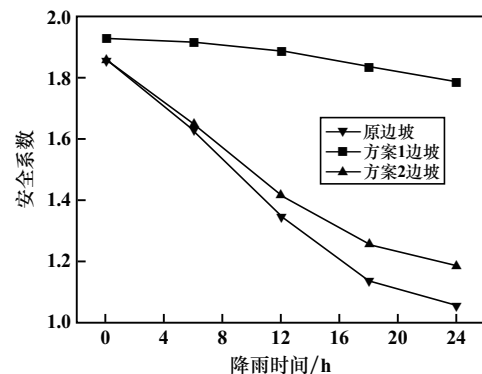


图4 降雨过程边坡安全系数变化曲线

由图4可知,在同等强度降雨条件下,降雨时长24 h的降雨强度对原边坡与支护方案2边坡的安全系数影响较大,其中原边坡安全系数由1.86降至1.08,即边坡由稳定状态向欠稳定状态转变,支护方案2边坡安全系数由1.86降至1.23,降雨过程中边坡持续处于安全稳定状态。持续24 h的强降雨对支护方案1边坡安全

系数影响较小,其安全系数值基本维持在 1.80 以上。

以原边坡为例,降雨前期(0~6 h)与降雨中期(7~18 h),降雨入渗对原边坡稳定性影响较大,降雨后期(18~24 h),边坡安全系数逐渐趋于平缓。

2.3 基质吸力对隧道洞口边坡安全稳定性的影响

为分析基质吸力对边坡安全系数的影响,在计算分析过程中,采用非饱和土强度折减法计算边坡安全系数,计算分析时选取原边坡作为研究对象,具体如图 5 所示。

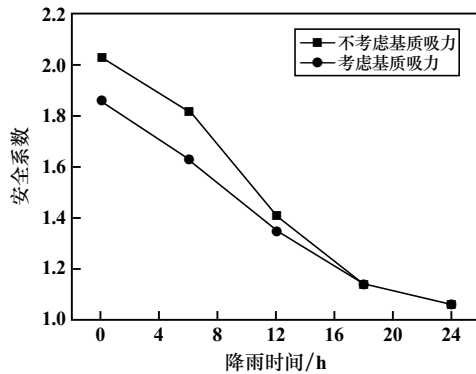


图 5 基质吸力对原边坡安全系数的影响

考虑基质吸力与不考虑基质吸力的边坡安全系数差值从 0.3 逐渐缩减至 0,降雨前期(0~12 h)基质吸力对边坡安全稳定性影响较大,降雨后期(18~24 h)基质吸力对其几乎没有影响。产生该现象的主要原因是降雨前期(0~12 h),边坡表面大部分土体处于非饱和状态,在计算过程中采用强度折减法,考虑非饱和状态下土体的基质吸力对边坡安全系数计算结果具有较大影响;随着降雨时间持续增长,边坡表面土体由非饱和状态逐渐转化为饱和状态,降雨时长 18 h 时,边坡内部土体基本处于饱和状态,基质吸力对边坡安全稳定性的贡献度很小。

3 隧道洞口边坡支护方案对比分析

从支护方案的开挖工程量、总投资、施工周期等方面进一步分析隧道洞口边坡开挖过程支护方案的优劣情况,根据支护方案开挖方法和支护措施的实际情况,计算 2 种支护方案的土方开挖工程量和支护措施工程量,参照工程所在地的清单计价办法,并依据隧道洞口边坡两种支护方案设计图纸,计算支护方案的总投资概算值和施工周期,结果如表 3 所示。

查阅广西壮族自治区相关施工费用定额,可知边坡土石方开挖费用(包干)为 25 元/m³,所以支护方案 1 的土石方开挖费用为 96 439 元,支护方案 2 的土石方开挖费用为 13 622 元。支护方案 1 采用锚杆支护,其支护费

用单价为 130 元/m²,支护费用为 114 546 元;方案 2 抗滑桩支护单价为 1 500 元/m³,支护费用为 207 456 元,挡土墙支护单价为 220 元/m³,支护费用为 13 622 元,支护费用共计 221 078 元。

表 3 隧道洞口边坡开挖支护方案多因素对比

序号	支护方案因素	单位	方案 1	方案 2
1	安全系数	—	1.8	1.2
2	开挖工程量	m ³	3 857.56	544.87
3	总投资	元	210 985	221 078
3.1	开挖费用	元	96 439	13 622
3.2	支护费用	元	114 546	207 456
4	施工周期	d	43	24

综上所述,从隧道洞口边坡工程开挖支护方案的安全系数、开挖工程量、总投资、施工周期等多方面对支护方案进行对比分析可知,隧道洞口边坡开挖的 2 种支护方案安全系数均超过 1.2,处于安全稳定状态,支护方案 1 稳定性略高;在总投资方面,支护方案 1 总造价略低于支护方案 2;在总的开挖工程量和施工周期方面,支护方案 1 处于绝对劣势。综合考虑,本隧道洞口边坡开挖应优先考虑抗滑桩+锚索支护。

4 结 论

1) 历经 24 h 强降雨,采用抗滑桩+锚索支护的边坡坡脚至坡顶表面土体饱和度实现了贯通,同等条件下采用台阶型放坡+锚杆支护的边坡在坡脚至边坡二级平台处的边坡表面土体达到饱和状态。

2) 降雨入渗过程中,采用抗滑桩+锚索支护的边坡安全系数先快速降低后逐渐趋于平稳,安全系数最终为 1.2;采用台阶型放坡+锚杆支护的安全系数变化幅度较小,基本保持在 1.8 以上;在施工周期方面,抗滑桩+锚索支护优于台阶型放坡+锚杆支护。综合考虑,本隧道洞口边坡在扩建施工时应优先考虑抗滑桩+锚索支护方案。

参考文献:

- [1] 张京伍,张海洋,李明东,等. 基于上限理论的孔隙水压力作用下隧道洞口段含裂缝仰坡稳定性分析[J]. 应用数学和力学, 2021, 42(12): 1287-1295.
- [2] 张惠民. 复杂地质条件下大断面隧道洞口段支护参数研究[J]. 公路, 2020, 65(3): 344-348.
- [3] 王占棋,袁海平,韩治勇,等. 暴雨、地震作用下堰沟隧道洞口边坡稳定性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(4): 507-512.

以及过流部件的磨损特性,得出以下结论:

1) 对比矿浆泵内不同部位的磨损情况,发现磨损较严重的位置为蜗壳上半部分及隔舌附近,这是由于蜗壳上半部分有大量高速颗粒与其发生碰撞,且大量颗粒集中在隔舌附近。

2) 矿浆泵泵体磨损随流量增加而增强。这是由于随着流量增加,颗粒速度增大,与壁面碰撞时动能更大。

3) 流量 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,对比了颗粒粒径 5 mm 和 10 mm 时的磨损情况,发现小粒径颗粒工况下磨损更严重。这是由于同样流量下小粒径颗粒从流性更好,速度明显高于大粒径颗粒,小粒径颗粒相对获得较大动能。且小粒径颗粒在泵内发生堵塞的可能性更低,与泵体发生碰撞次数更多。

4) 矿浆泵泵体磨损不仅与碰撞次数相关,也与碰撞前动能有关,更高的碰撞频率和更高的动能造成的损伤更严重。

参考文献:

- [1] Tarodiya R, Gandhi B K. Numerical simulation of a centrifugal slurry pump handling solid-liquid mixture: Effect of solids on flow field and performance[J]. *Advanced Powder Technology*, 2019,30(10):2225-2239.
- [2] Chandel S, Singh S N, Seshadri V. A Comparative Study on the Performance Characteristics of Centrifugal and Progressive Cavity Slurry Pumps with High Concentration Fly Ash Slurries[J]. *Particulate Science & Technology*, 2011,29(4):378-396.
- [3] Bajawi H Y, Salim B, Suhubani Z. Performance of a Centrifugal Slurry Pump[J]. *Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology*, 2014,7(8):1573-1581.

- [4] Tarodiya R, Gandhi B K. Effect of particle size distribution on performance and particle kinetics in a centrifugal slurry pump handling multi-size particulate slurry[J]. *Advanced Powder Technology*, 2020,31(12):4751-4767.
- [5] 曾义聪,陈奇,谢秋敏,等. 颗粒粒径对海洋采场矿泵固液两相流影响的分析[J]. *徐州工程学院学报(自然科学版)*, 2013,28(2):46-52.
- [6] 廖姣,赖喜德,廖功磊,等. 基于固液两相流的离心泵内部流场数值分析[J]. *热能动力工程*, 2017,32(5):95-99.
- [7] FENG Xin, LI Xiangyang, CHENG Jingcai, et al. Numerical simulation of solid-liquid turbulent flow in a stirred tank with a two-phase explicit algebraic stress model[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012,82:272-284.
- [8] 李良超,徐斌,杨军. 基于计算流体力学模拟的下沉与上浮颗粒在搅拌槽内的固液悬浮特性[J]. *机械工程学报*, 2014,50(12):185-191.
- [9] 王长安. 密相液-固两相三维湍流流动的研究及其在泵叶轮内流场计算与分析中的应用[D]. 西安:西安交通大学化工学院, 1996.
- [10] Prasad B K, Prasad S V, Das A A. Mechanisms of material removal and subsurface work hardening during low-stress abrasion of a squeeze-cast aluminium alloy- Al_2O_3 fibre composite [J]. *Materials Science & Engineering A*, 1992,156(2):205-209.
- [11] Itoh K, Nishigaki S, Honda I, et al. Performance of Solid-Liquid Two Phase Jet Pump Vacuuming Up Beach Sand[C]//ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2010:503-509.
- [12] ZHANG Y, LI Y, CUI B, et al. Numerical simulation and analysis of solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013,26(1):53-60.

引用本文:李钟,金伟,王予琪,等. 基于CFD-DEM方法的矿浆泵磨损特性研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(1):16-20.

(上接第15页)

- [4] 宋成年,邓洋,刘德兵,等. 基坑不同水位降速下土石围堰松散粘质边坡渗流特性与开挖稳定性研究[J]. *水电能源科学*, 2021,39(2):69-73.
- [5] 黄叶宁,孙旭曙,迟健,等. 某水电站溢洪道开挖边坡渗流场变化规律及稳定性研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2018,40(6):26-29.
- [6] 张信贵,许胜才,易念平. 基于流固耦合理论的饱和-非饱和土开挖边坡稳定性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2016(3):10-19.
- [7] 谢强,田大浪,刘金辉,等. 土质边坡的饱和-非饱和渗流分析及特殊应力修正[J]. *岩土力学*, 2019,40(3):879-892.
- [8] 蔡军,许胜才. 基于FLAC^{3D}软件FISH语言二次开发的降雨工

- 况下航道工程开挖边坡渗流场的分析[J]. *水电能源科学*, 2021,39(10):156-159.
- [9] 查俊,蔡军,许胜才,等. 基于FLAC^{3D}二次开发的连续强降雨工况路堑高边坡支护效果研究[J]. *矿冶工程*, 2022,42(4):25-29.
- [10] 段跃华,何忠明,李健. 基于FLAC^{3D}的改扩建高速公路高边坡施工方案优选[J]. *公路工程*, 2014,39(3):60-64.
- [11] 唐登科,查明高,程国想. 乐昌至广州高速公路起点改扩建方案研究[J]. *中外公路*, 2012,32(4):5-8.

引用本文:谢韬,蔡军,范理云,等. 强降雨条件下隧道洞口边坡开挖渗流特征以及支护方案研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(1):12-15.