

泥-砂岩混合地层隧道施工围岩稳定性数值模拟分析^①

周军强, 凌涛, 龙明华, 彭学军, 孙望成

(中铁五局集团第一工程有限责任公司, 湖南长沙 410117)

摘要: 为了研究富含孔隙水的泥-砂岩复杂地层隧道围岩稳定性, 以青岛8号线泥-砂岩混合地层富水暗挖隧道为例, 模拟了3种不同孔隙水情况下的围岩变形及应力演化规律, 获得了隧道竖直位移(顶板下沉量)、水平位移(边墙移近量)、竖直应力、水平应力以及剪切应力的最大值。并将3种不同孔隙水情况下的数值模拟结果应用到青岛8号线隧道施工中, 通过现场监测发现隧道顶板及边墙围岩变形均控制在安全范围内, 该数值模拟结果在青岛8号线施工中具有较好的参考作用。

关键词: 隧道施工; 泥-砂岩地层; 孔隙水; 数值模拟; 围岩稳定性

中图分类号: U451

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.008

文章编号: 0253-6099(2023)01-0035-05

Numerical Simulation of Surrounding Rock Stability During Construction of Tunnel with Mud-Containing Sandstone Stratum

ZHOU Junqiang, LING Tao, LONG Minghua, PENG Xuejun, SUN Wangcheng

(China Railway Fifth Bureau Group First Engineering Co Ltd, Changsha 410117, Hunan, China)

Abstract: Qingdao Metro Line 8 was taken as an example for studying the surrounding rock stability of underground tunnel in mud-containing sandstone stratum with pore water. Based on the analysis of deformation and stress evolution law of surrounding rock by simulating three different pore water conditions, the maximum values of vertical displacement (roof subsidence), horizontal displacement (side walls moving closer), vertical stress, horizontal stress and shear stress of the tunnel were finally obtained. The numerical simulation results of tunnel with three kinds of pore water content were applied to the tunnel construction for Qingdao Metro Line 8, and the on-site monitoring results show the deformation of surrounding rock of tunnel roof and side wall is all controlled within the safety range. It is shown that such numerical simulation results provide good reference for the construction of Qingdao Metro Line 8.

Key words: tunnel construction; mud-containing sandstone stratum; pore water; numerical simulation; surrounding rock stability

隧道作为一种隐蔽性构筑物,在我国交通建设中起着重要作用,截止到2021年,我国建成的铁路隧道已有16 125座,公路隧道已有18 746座^[1-3]。虽然我国隧道建设取得了很大成就,但在施工中隧道常因地层复杂、孔隙水处理措施不当等发生塌方等事故^[4-5]。因此,研究泥-砂岩混合地层富水隧道围岩变形具有重要的工程意义和科学价值。

国内外许多学者对隧道围岩变形及其稳定性进行了广泛研究,并取得许多对隧道工程施工有指导价值的成果^[6-11],但关于泥-砂岩富含孔隙水的复杂地层隧道研究甚少。许多工程实践表明,泥-砂岩富水混合地

层条件下的隧道施工极易发生塌方等事故^[12-14]。本文以青岛8号线隧道为工程背景,研究泥-砂岩混合地层富水隧道围岩变形规律及其稳定性,可为青岛8号线隧道以及类似隧道施工提供理论参考。

1 工程概况

青岛8号线暗挖隧道位于山东省青岛市胶州区域内,隧道区属低山地貌,地形起伏大,沟谷切割较深。隧道地质、水文条件极为复杂,围岩以IV级为主。隧道埋深较大,地下水极为丰富,施工中存在坍塌及突水、突泥、岩爆等风险,施工难度较大。隧道下穿细砂

① 收稿日期: 2022-09-13

基金项目: 长沙市雨花区科技计划项目(YHKJ-2020-CZ-08)

作者简介: 周军强(1974—),男,湖南长沙人,高级工程师,主要研究方向为隧道及地下工程。

通信作者: 凌涛(1988—),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要研究方向为隧道及地下工程。

岩、粉砂岩、泥岩、砂质泥岩,净高5 m、净宽6 m,泥-砂岩富水隧道断面破坏模式计算模型如图1所示。根据现场试验结果可获得岩体容重 γ 、抗拉强度 σ_t 、弹性模量 E 和泊松比 ν 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等参数取值,如表1所示。

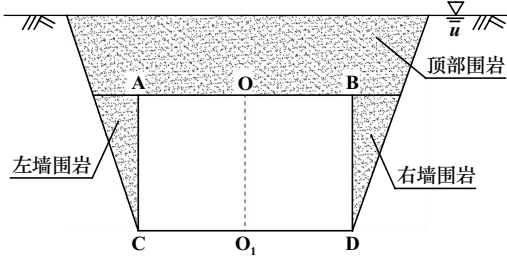


图1 泥-砂岩富水隧道断面破坏模式计算模型

表1 隧道围岩物理力学参数

地层名称	厚度/m	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_t/MPa	E/GPa	ν	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$
细砂岩	10.2	21.7	2.25	1.790	0.14	2.25	28.87
粉砂岩	6.3	20.4	1.62	1.307	0.19	1.16	33.72
泥岩	5.0	20.5	1.01	1.192	0.21	1.32	24.52
砂质泥岩	8.5	21.3	0.87	1.098	0.34	1.08	24.48

2 建立模型

将隧道近似为矩形断面,采用FLAC^{3D}建立泥-砂岩混合地层富水隧道三维数值模型,如图2所示。模型由27 000个单元和30 176个节点构成,模型前后、左

右及底部均为约束边界,顶面为自由边界。由式(1)~(2)将弹性模量 E 和泊松比 ν 转换成体积模量 K 和剪切模量 G ,如表2所示。并针对隧道不同区域段提出3种孔隙水情况,如表3所示。

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

式中 K 为体积模量, GPa; E 为剪切模量, GPa; ν 为泊松比。

表2 隧道围岩体积模量及剪切模量

地层名称	K/GPa	G/GPa
细砂岩	0.80	0.81
粉砂岩	5.26	0.43
泥岩	0.69	0.49
砂质泥岩	1.14	0.41

表3 不同孔隙水类型下的涌水情况

孔隙水类型	涌水情况	孔隙水压力系数
1	涌水量较小	$r_u = 0.1$
2	涌水量正常	$r_u = 0.3$
3	涌水量较大	$r_u = 0.5$

3 结果分析

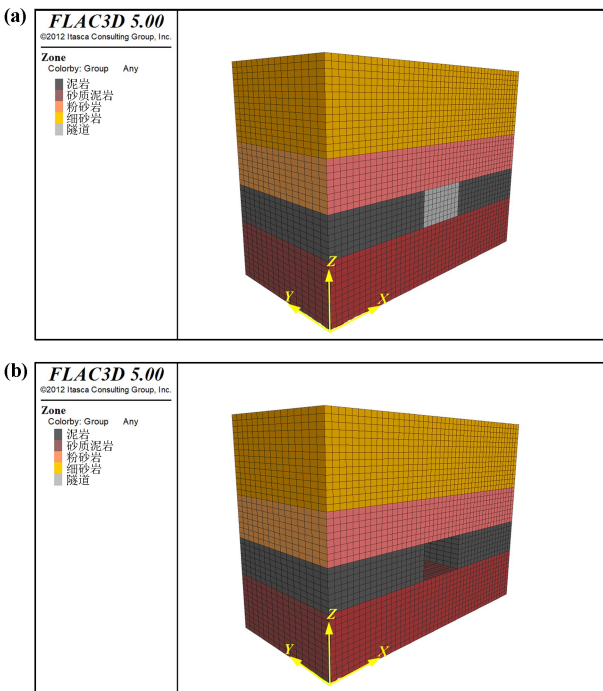
3.1 位移分析

3.1.1 竖直位移

不同孔隙水情况下的竖直位移云图如图3所示。涌水量较小、涌水量正常及涌水量较大时,隧道顶部竖直位移量分别为14.82 mm、40.72 mm及92.96 mm。这说明,隧道涌水量对隧道顶板位移量影响较大,涌水量越大,隧道顶部围岩富含孔隙水量越多,孔隙水压力越大,顶板承受的竖向荷载增大,当超过顶板承载极限时则会发生塌方事故。因此,对富水隧道顶板施工提出如下建议:①及时采用合理降、排水措施,降低隧道顶部围岩裂隙中孔隙水含量,减少孔隙水压力对隧道顶板稳定性的影响,防止因孔隙水造成的隧道顶板塌方事故;②采用注浆、锚杆、锚索、喷混凝土等对隧道顶板进行加固,提高隧道顶板围岩承载稳定性,避免孔隙水压力对顶板的破坏。

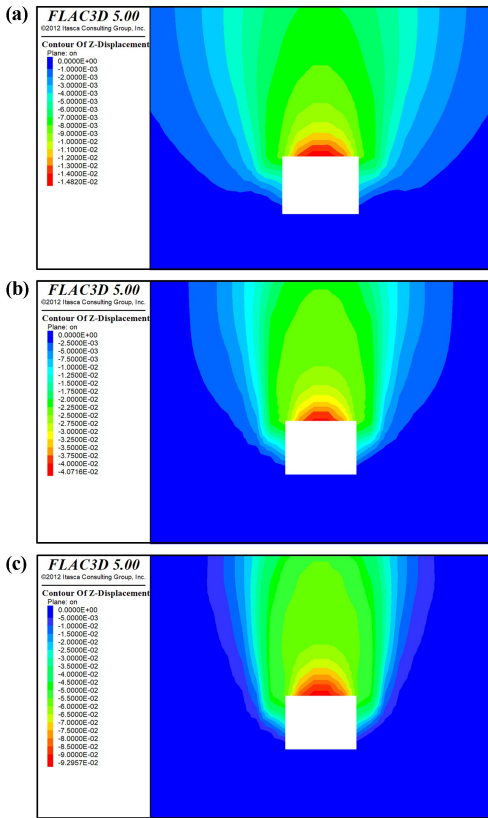
3.1.2 水平位移

不同孔隙水情况下的水平位移云图如图4所示。涌水量较小、涌水量正常、涌水量较大时的最大水平位移量分别为6.99、18.38、40.72 mm。由此可见,隧道涌水量对边墙稳定性也有较大影响,隧道涌水量越大,隧道

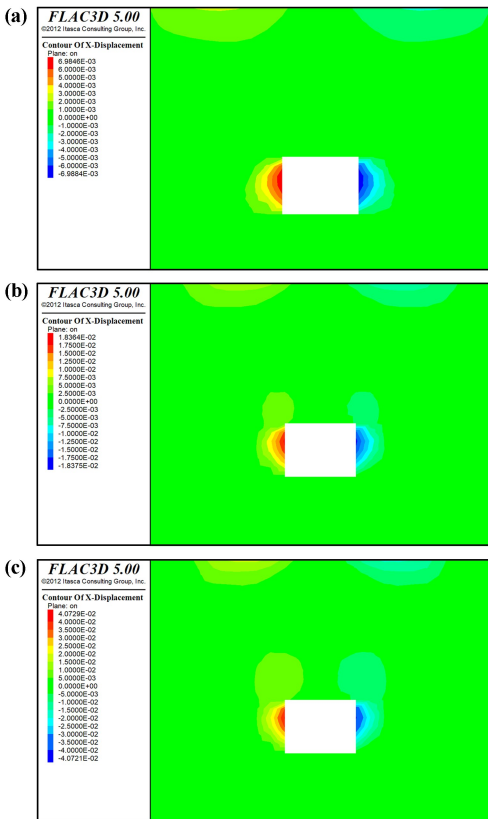


(a) 开挖前; (b) 开挖后

图2 泥-砂岩混合地层富水隧道三维数值模型



(a) 涌水量较小; (b) 涌水量正常; (c) 涌水量较大
图 3 不同孔隙水情况下的竖直位移云图



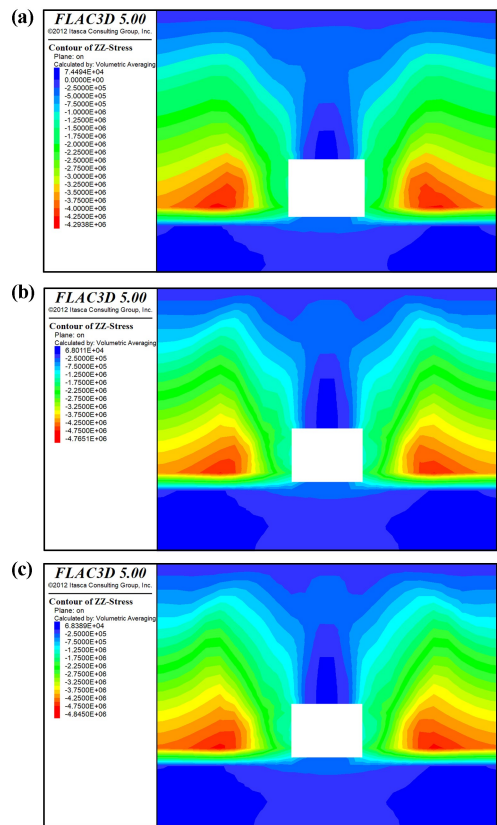
(a) 涌水量较小; (b) 涌水量正常; (c) 涌水量较大
图 4 不同孔隙水情况下的水平位移云图

两侧的孔隙水压力越大,作用在隧道边墙的水平应力和剪切应力增大,超过隧道边墙承载极限值则会发生片帮事故。因此,对富水隧道边墙施工提出如下建议:① 对于隧道边墙涌水量较大的区段,应及时采取降、排水措施降低隧道两侧边墙的孔隙水含量,避免因孔隙水压力而造成隧道两侧边墙破坏;② 采用锚杆、锚索、注浆、喷混凝土等措施加固隧道边墙,提高隧道边墙围岩自身的承载能力和稳定性,避免因孔隙水压力造成片帮事故。

3.2 应力分析

3.2.1 竖直应力

不同孔隙水情况下的竖直应力云图如图 5 所示,隧道涌水量较小、涌水量正常及涌水量较大时的竖直方向最大应力分别为 4.29 MPa、4.77 MPa 及 4.85 MPa。随着涌水量增加,隧道顶部围岩裂隙中的孔隙水含量增加,作用在隧道顶板的孔隙水压力增大,隧道顶板下沉变形量增大,即竖直方向位移量增加。因此,在富水隧道施工中应采取措施避免孔隙水对隧道顶板围岩稳定性的影响。

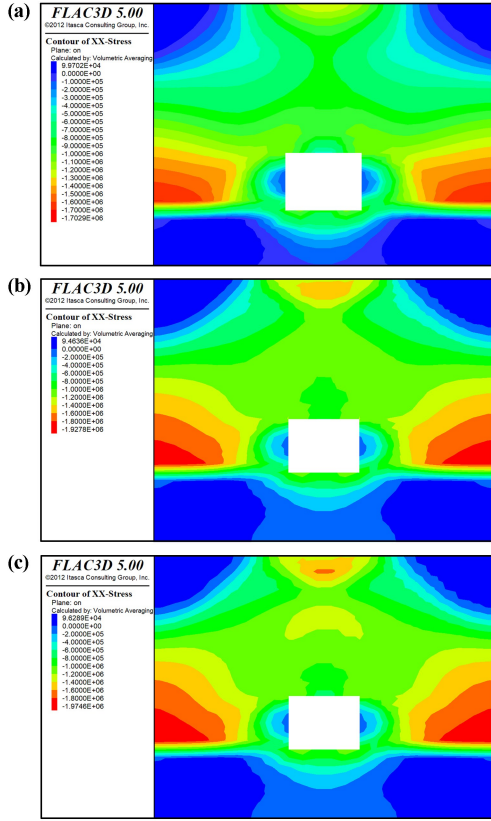


(a) 涌水量较小; (b) 涌水量正常; (c) 涌水量较大
图 5 不同孔隙水情况下的竖直应力云图

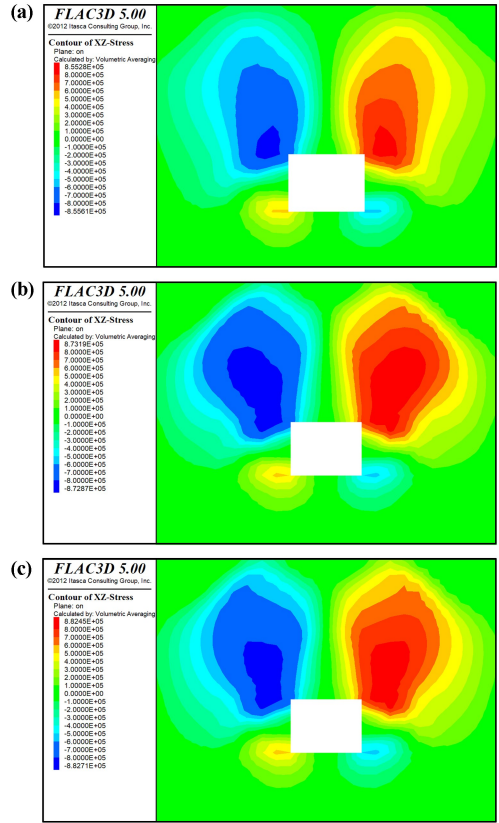
3.2.2 水平应力

不同孔隙水情况下的水平应力云图如图 6 所示。涌水量较小、涌水量正常及涌水量较大时的隧道最大水平应力分别为 1.70 MPa、1.93 MPa 及 1.97 MPa。随

随着隧道涌水量增加,隧道两侧边墙区域围岩裂隙中孔隙水含量增大,作用在左右边墙的孔隙水压力增大,导致水平应力增大。在隧道施工中应采取注浆、卸压等措施加固边墙,防止水平应力过大造成隧道边墙破坏。



(a) 涌水量较小; (b) 涌水量正常; (c) 涌水量较大
图6 不同孔隙水情况下的水平应力云图



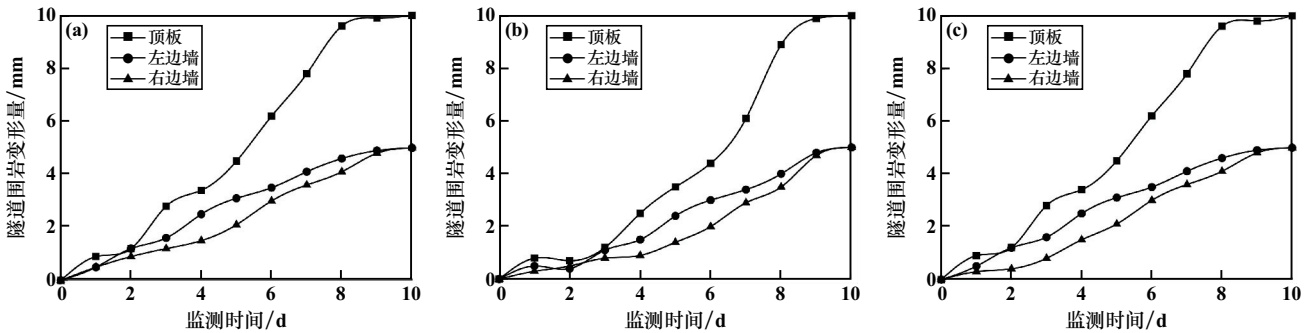
(a) 涌水量较小; (b) 涌水量正常; (c) 涌水量较大
图7 不同孔隙水情况下的剪切应力云图

4 工程应用

根据青岛8号线泥-砂岩富水暗挖隧道地质条件及施工实际,将3种孔隙水情况下的数值模拟结果分别应用到隧道涌水量较小、涌水量正常、涌水量较大3个区段。对隧道顶板、左、右边墙进行监测,结果如图8所示。发现3种涌水量情况下隧道顶板围岩变形量均在10 mm以内、左右边墙变形量均在5 mm以内。由《公路隧道施工技术规范》^[15]要求可知,顶板和边墙围岩变形量均在安全范围内,隧道围岩得到了良好控制,达到了较好的施工效果。

3.2.3 剪切应力

不同孔隙水情况下的剪切应力云图如图7所示。涌水量较小、涌水量正常以及涌水量较大时的最大剪切应力分别为0.85 MPa、0.87 MPa和0.88 MPa。随着隧道涌水量增大,隧道围岩孔隙水压力增大,进而导致隧道剪切应力增大。因此,在富水隧道施工中应时刻关注涌水量,防止涌水量过大对隧道造成破坏。



(a) 涌水量较小; (b) 涌水量正常; (c) 涌水量较大
图8 不同孔隙水情况下隧道变形监测曲线

5 结 论

1) 孔隙水对隧道顶板、边墙位移量有较大影响,围岩富含的孔隙水越大,隧道竖直和水平位移量越大,隧道极易发生塌方及边墙破坏事故。因此,建议在富水隧道施工中采取降、排水措施及时处理孔隙水,并采用注浆、喷混凝土等措施加固隧道围岩,避免隧道发生塌方等突发性重大事故。

2) 随着隧道围岩孔隙水压力增大,隧道竖直应力、水平应力、剪切应力增大,隧道极易发生变形甚至破坏。

3) 将数值模拟结果应用到青岛8号线泥-砂岩富水暗挖隧道施工中,通过现场监测发现,3种孔隙水情况下隧道顶板围岩变形量均在10 mm以内、左右边墙变形量均在5 mm以内,隧道围岩得到了良好控制,达到了较好的施工效果。

参考文献:

- [1] 洪开荣,冯欢欢. 中国公路隧道近10年的发展趋势与思考[J]. 中国公路学报, 2020,33(12):62-76.
- [2] 汪学清,刘爽,李秋燕,等. 基于K折交叉验证的SVM隧道围岩分级判别[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):126-128.
- [3] 刘浩,武强,李万宝,等. 隧道工程全生命周期安全保障“24”字方针[J]. 隧道建设(中英文), 2021,41(S1):75-82.
- [4] 王飞飞,田春艳,任青阳,等. 地下复杂采空区引起地表塌陷渐进发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):22-25.

(上接第34页)

振动速度进行预测,结果表明,爆破设计应重点考虑振源临近台阶造成的影响。

4) 边坡岩体结构面是影响边坡岩体质量的重要因素,同时对爆破振动传播起到关键作用。研究矿山灰岩边坡的爆破振动影响时,应重点考虑岩体结构面、灰岩地区特殊地质条件的影响。

参考文献:

- [1] GB 51016—2014. 非煤露天矿边坡工程技术规范[S].
- [2] GB 6722—2014. 爆破安全规程[S].
- [3] 唐海,马谕杰,夏祥,等. 负高差地形爆破振动规律研究[J]. 工程爆破, 2021,27(5):16-25.
- [4] 叶明班,高文学,曹晓立,等. 爆炸荷载下岩质边坡动力响应规律研究[J]. 爆破, 2019,36(4):31-36.
- [5] 季金铭,高文学,曹晓立,等. 高陡边坡动力响应研究[J]. 爆破, 2020,37(2):1-7.
- [6] 安胜杰,易吉祥,池恩安,等. 爆破地震波传播规律试验研究[J]. 爆破, 2021,38(2):32-36.

- [5] 何川,刘四进,张玉春,等. 水下隧道衬砌结构服役安全及其保障对策思考[J]. 中国工程科学, 2017,19(6):44-51.
- [6] Goel M D, Verma S, Mandal J, et al. Effect of blast inside tunnel on surrounding soil mass, tunnel lining, and superstructure for varying shapes of tunnels[J]. Underground Space, 2021,6(6):619-635.
- [7] WANG F N, GUO Z B, QIAO X B, et al. Large deformation mechanism of thin-layered carbonaceous slate and energy coupling support technology of NPR anchor cable in Minxian Tunnel: A case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,117:104151.
- [8] 韩伟歌,崔振东,涂新斌,等. 不同层理面角度在层状岩体隧道围岩变形中的响应特征研究[J]. 工程地质学报, 2021,29(5):1267-1275.
- [9] 李照众,王浩,畅翔宇,等. 基于组合模型的高铁隧道围岩收敛变形预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021,51(5):851-858.
- [10] 彭鹏,张顶立,孙振宇. 含软弱夹层隧道围岩变形特性与加固参数设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(11):2260-2272.
- [11] 常刚,牌立芳,庞伟军,等. 深埋硬岩组合隧道围岩开挖变形影响研究[J]. 现代隧道技术, 2021,58(5):73-77.
- [12] 王伟星,盛斌,韩侃,等. 降雨对浅埋黄土隧道围岩沉降变形影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021,17(4):1132-1136.
- [13] 刘平,刘池,王洪涛,等. 富水砂层影响下隧道围岩变形破坏机制的数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2020,57(4):74-81.
- [14] 王志杰,徐君祥,徐海岩,等. 第四系富水红砂岩地层隧道围岩变形特征研究[J]. 铁道工程学报, 2018,35(9):54-60.
- [15] JTG F60—2009, 公路隧道施工技术规范[S].

引用本文:周军强,凌涛,龙明华,等. 泥-砂岩混合地层隧道施工围岩稳定性数值模拟分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):35-39.

- [7] 周后友,池恩安,欧阳天云,等. 爆破荷载作用下露天边坡稳定性分析[J]. 爆破, 2021,38(2):80-87.
- [8] 孙冰,罗志业,曾晟,等. 爆破振动影响因素及控制技术现状[J]. 矿业安全与环保, 2021,48(6):1-6.
- [9] 张袁娟,孔德增. 不同岩性对爆破振动效应影响研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(5):6-8.
- [10] 蒋楠,周传波,平雯,等. 岩质边坡爆破振动速度高程效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014,45(1):237-243.
- [11] 何梦,陈金,张家兆,等. 岩石场地爆破振动衰减模型及减隔振效应研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):120-125.
- [12] 卢宏力. 大高差起伏地形露天爆破地震效应及其预测控制[D]. 湘潭:湖南科技大学土木工程学院, 2019.
- [13] 林海松. 高边坡爆破振动传播规律及其控制技术[J]. 工程爆破, 2020,26(2):69-74.
- [14] 张小军. 台阶爆破振动高程效应理论研究及应用[D]. 北京:北京科技大学土木与资源工程学院, 2021.

引用本文:付俊,周军,徐继刘,等. 露天矿山石灰岩边坡爆破振动特性及规律研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):32-34.