

基于 FLAC3D 的边坡开挖对下穿隧道的影响及稳定性研究

王伟杨

(宁波大学岩石力学研究所,浙江 宁波 315211)

[摘要] 以黄土岭隧道改路基边坡开挖工程为研究对象,利用 FLAC3D 有限元软件建立边坡下穿隧道三维模型。采用应变软化本构模型对边坡进行分步开挖计算,研究分析了边坡开挖对下穿隧道结构拱顶、左右拱腰、左右边墙以及底板各部位位移、主应力以及安全系数等方面的影响。研究结果表明:第4~8级边坡开挖数值模型计算得出的隧道各部位变形、应力水平及安全系数均在允许范围内。将数值模拟计算得出的隧道拱顶变形趋势与现场实测结果对比,实测结果与数值模拟结果接近,上部边坡开挖对隧道结构安全稳定性的影响较小。

[关键词] 隧道;边坡;衬砌;应变软化;数值模拟

[中图分类号] U451

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0027-06

Research on Influence and Stability of Slope Excavation on Underpass Tunnels Based on FLAC3D

WANG Weiyang

(Rock Mechanics Institute, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: Taking the slope excavation project of the Huangtuling tunnel converted to subgrade as the research object, a three-dimensional model of the slope underpassing the tunnel was established using the FLAC3D finite element software. The strain-softening constitutive model was adopted to perform step-by-step excavation calculations for the slope. The influence of the slope excavation on the displacement, principal stress, and safety factor of various parts of the underpassing tunnel structure including the vault, left and right spandrels, left and right sidewalls, and the bottom slab was studied and analyzed. The research results indicate that the deformation, stress levels, and safety factors of various tunnel sections, calculated from the numerical models for the excavation of slopes from the fourth to the eighth level, are all within the permissible limits. Comparing the deformation trend of the tunnel vault obtained from simulation with the field monitoring results shows that the measured results are close to the simulation results. The excavation of the upper slope has a relatively minor impact on the safety and stability of the tunnel structure.

Keywords: tunnels; slope; linings; strain softening; simulation

0 引言

为改善隧道通行条件,增加通行能力,需对既有隧道进行改建或扩建。对于地质较差、原位扩建施工难度较大、造价较高的隧道,综合考虑多种施工方案,可采用隧道改路基的形式改善通行条件^[1]。传统隧道上部边坡开挖需对交通进行断流,以确保施工安全。然而,这种断流会给交通系统带

来诸多不便,包括交通拥堵、时间浪费、环境污染等。因此,研究如何在隧道上部边坡开挖的过程中减小对交通流的影响,具有重要的现实意义与应用价值。

许多学者对邻近既有隧道的岩土体工程与既有隧道结构的相互作用进行了研究,如章海明^[2]分析了高边坡开挖对下部隧道衬砌的应力及安全系数的影响,说明边坡开挖会对既有隧道安全性造成一定风险;赵东平等^[3]分析边坡开挖和爆破振动对

[作者简介] 王伟杨,硕士研究生,E-mail: 2211110043@nbu.edu.cn

[收稿日期] 2025-06-20

既有隧道的影响,发现边坡开挖会对邻近既有隧道结构产生剪应力集中和侧移变形等不利影响;杨光等^[4]结合实例与仿真模拟分析了边坡开挖与爆破施工对既有铁路隧道结构的影响,边坡开挖产生的剪应力对既有隧道衬砌有较大影响;Causse 等^[5]分析了不同情况下上部边坡冰川卸荷对隧道结构的影响;刘洪洲^[6]通过有限元计算为近距离路堑开挖对铁路隧道结构的影响进行分析评估,为工程可行性提供了依据和建议;王开阳^[7]通过数值模拟研究新建上跨隧道对下方既有铁路隧道围岩变形、结构受力及安全系数的影响;部分学者^[8-10]通过数值模拟结合现场实测的方法研究了基坑开挖对临近既有隧道的影响,研究结果表明基坑开挖对既有隧道产生了应力集中、隆起变形等不利影响;在施工过程中采取有效的加固措施对于控制工程施工中结构的变形和安全性具有积极作用^[11-14]。对于控制既有隧道的应力和变形,满足既有隧道安全性和稳定性要求,需要根据工程实际采取合理的加固措施。

黄土岭隧道岩体具有明显的软化特征,本文以黄土岭隧道改扩建工程为例,研究在采取加固措施的情况下,上部边坡开挖对下部隧道结构稳定性和安全性的影响,总结隧道结构变形、主应力变化规律,判定隧道结构在不同的开挖阶段是否处于安全稳定状态,从而为实际工程是否需要对隧道进行交通断流提供参考。

1 工程概况

黄土岭隧道为分离式隧道,左右线采用高低路基,左侧最大埋深约 36m、右侧最大埋深约 63m。黄土岭隧道改扩建工程拟将双向四车道改为双向 8 车道,既有黄土岭隧道地质较差,在北侧洞身施工过程中发生过塌方,两侧原位扩挖风险较大且左侧已无拓宽空间。因此,根据黄土岭隧道改扩建总体方案,将北侧既有隧道改为路基。黄土岭隧道改挖方路基段桩号为 Y6K50+945.000—Y6K51+534.000,路段长约 589m。边坡现状为自然山体,地形西高东低,朝向近东方向,地形表现为上陡下缓,自然坡度为 15°~20°,地表植被发育。

边坡自上而下可分为 4 层,场地上部坡积层含角砾、碎石粉质黏土,局部夹块石,块径 1~2m;其下为全风化辉长岩,风化强烈,呈砂砾状或含砾黏性土状,坡积层和全风化层厚 10~15m;最下部为弱风化层,以中风化辉长岩为主,节理裂隙较为发育,岩体较完整,工程地质性质良好,隧道围岩基本为中风化辉长岩。

为了减小对隧道路段交通的影响,开挖上部四到八级边坡时隧道保持通车状况。该路段受侵蚀剥蚀作用强烈且地表水汇流多,边坡开挖后覆盖层和全风化层的自稳定性差,若不及时加固易发生滑塌。边坡逐级开挖,开挖后及时进行坡面防护,边坡加固方案如图 1 所示。在右侧第 8 级和第 7 级边坡底部区域分别采用 20m 和 19m 的抗滑桩预加固,桩径 1.5m,桩间距为 4m,桩底置于中风化辉长岩中;在右侧第 7 级边坡开挖中部区域采用长 15m、间距 3m、排距 2m 的 φ32 钢筋锚杆支护,在右侧第 6 级边坡开挖中部区域采用长 12m、间距 3m、排距 2m 的 φ32 钢筋锚杆支护,在右侧第 5 级边坡开挖中部区域采用长 9m、间距 2m、排距 2m 的 φ32 钢筋锚杆支护,在右侧第 3 级和第 1 级边坡以及左侧第 1 级边坡开挖中部区域采用长 6m、间距 2m、排距 2m 的 φ25 钢筋锚杆支护。

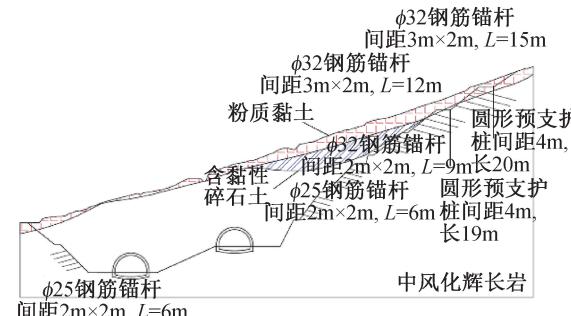


图 1 模型地层分布及加固措施

Fig. 1 Model stratum distribution and reinforcement measures

2 数值模拟

2.1 本构模型

在 FLAC3D 有限元软件中,应变软化模型以莫尔-库仑模型为基础,弹性阶段应变软化模型与莫尔-库仑模型的应力应变关系是相同的线性关系,仅有弹性应变。在到达屈服点后,随着应变的增加,应力逐渐减小,总应变为弹性应变和塑性应变之和,材料的黏聚力、内摩擦角、抗拉强度等均随塑性应变的累加而降低。应变软化模型与莫尔-库仑模型计算得到的围岩位移总体趋势一致,但应变软化模型计算得到的位移量明显大于莫尔-库仑模型^[15]。鉴于地质勘察资料中表明工程岩体具有较明显的软化特征,因此采用应变软化模型可更合理地反映围岩真实的稳定状态。

2.2 计算模型

根据工程资料建立相应的三维计算模型,如图 2 所示。模型尺寸整体长 182m、宽 50m、最高有 82m,隧道半径 6m,衬砌厚度 0.85m。围岩采用应

变软化模型,隧道衬砌和仰拱采用弹性本构模型。计算模型采用六面体等参单元和部分四面体退化单元模拟,共剖分单元 319 285 个,结点 168 083 个。模型坡面自由,四周限制法向位移,底部固定。本模型采用的物理力学参数和岩石应变软化参数如表 1,2 所示。

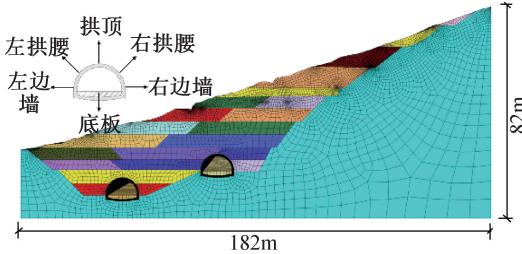


图 2 边坡开挖三维模型

Fig. 2 3D model of slope excavation

表 1 模型物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of model

材料	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉质黏土	6.0	0.25	30	13.5
碎石土	9.0	0.35	20	25.0
中风化辉长岩	50.0	0.15	200	45.0
隧道衬砌	28.0	0.20	—	—
仰拱	25.5	0.20	—	—

表 2 岩石应变软化参数

Table 2 Parameters of rock strain softening

塑性 剪切 应变	粉质黏土		碎石土		中风化辉长岩	
	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
0	30	13.5	20	25	200	45
0.05	270	12.5	18	23	180	44
0.10	20	11.0	12	19	100	40
1.00	20	11.0	12	19	100	40

在数值模拟过程中,边坡开挖采用分步开挖,共分为 21 个开挖步,按从上到下、从左到右的顺序依次开挖,边坡开挖一级防护。为了研究边坡开挖对下穿隧道结构安全的影响,分别在左右 2 个隧道衬砌与围岩交界处布置监测点。每个隧道布置 6 个监测点,分别位于隧道拱顶和左右两侧拱腰,左右两侧边墙以及隧道底板中部 6 个位置。

3 计算结果与分析

3.1 位移变化

第 4~8 级边坡开挖完成后的模型位移云图如图 3 所示。边坡开挖导致土体卸荷,坡面回弹较明显,最大位移位于开挖边坡的坡角处,模型整体位移变化量较小,最大变形量仅 0.16mm。由于支护体的控制作用,上部边坡开挖对下穿隧道结构影响较小,最大变形量仅为 10^{-5} m 数量级。

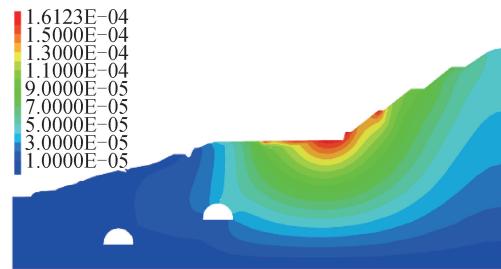


图 3 边坡开挖位移云图(单位:m)

Fig. 3 Cloud map of landslide excavation displacement (unit:m)

依据 JTJ 3370. 1—2018《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》,模型隧道竖向位移和水平位移允许变形值分别为 5.7,4.2mm。随着边坡逐级开挖,隧道左右洞衬砌结构各部位竖向位移和水平位移变化规律如图 4 所示。由图 4 可知,随着上部边坡的开挖,隧道衬砌结构拱顶、左右拱腰、左右边墙及底板都会受到一定的影响,产生向开挖坡面方向的变形,说明边坡开挖引起隧道周围土体的应力重分布,从而引发隧道衬砌结构产生变形,但衬砌结构变形量远低于规范的允许变形量,隧道运营期间进行上部土体的开挖基本不会影响衬砌结构的安全性。

隧道右洞比左洞产生的变形量大,这是由于边坡开挖工程位于隧道右上方,边坡开挖引起围岩的扰动对右洞影响更大,从而使右洞产生较大的横向位移和竖向位移。同样,相比右拱腰和右边墙,隧道左拱腰和左边墙的水平和竖向位移较小,距离边坡开挖工程较远的左洞左边墙和底板的变形量几乎为 0。

3.2 主应力变化

第 4~8 级边坡开挖前后隧道衬砌最大主应力和最小主应力的变化规律对比如图 5,6 所示,符号规定受拉为正、受压为负。根据《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》隧道衬砌(C25)抗压与抗拉极限强度分别为 16.5,1.8MPa。

边坡开挖前,隧道左右洞埋深分别约为 36,63m,隧道左右洞应力分布相差不大,应力最大处为右侧隧道右边墙底部,最大主应力值可达 1.64MPa。边坡开挖后,由于上部土体卸荷,隧道区域的应力减少,右侧隧道距离挖方土体更近,所以右侧隧道应力变化比左侧更明显,右侧隧道最大主应力降低约 0.1MPa,最小主应力降低约 0.15MPa;左侧隧道最大主应力降低约 0.02MPa,最小主应力降低约 0.01MPa。由于下穿隧道上部荷载的不对称性导致隧道结构出现偏压,右侧隧道的偏压情况更明显。

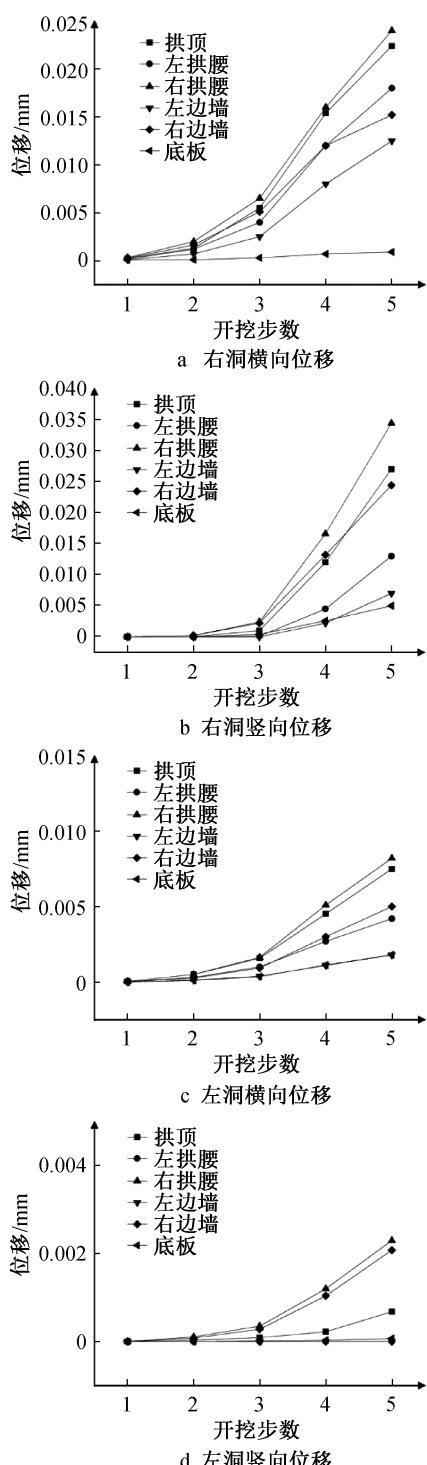


图 4 隧道衬砌结构各部位位移变化规律
Fig. 4 Tunnel lining structure displacement variation patterns of various parts

开挖前隧道衬砌结构受力均表现为压应力,且远远小于衬砌结构的极限抗压强度,仅隧道底板受拉,拉应力约为 0.14 MPa,远远小于隧道衬砌结构的极限抗拉强度。随着边坡开挖,衬砌整体应力逐渐减小,且隧道衬砌的偏压情况有所改善,最大与最小主应力峰值均未超过规范规定的衬砌抗拉与抗

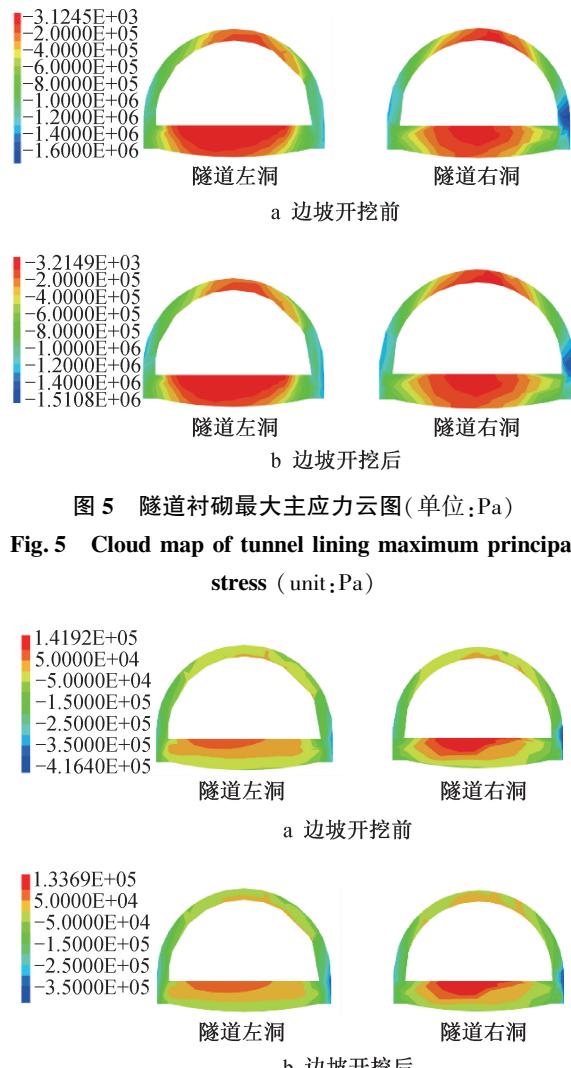


图 5 隧道衬砌最大主应力云图(单位:Pa)

Fig. 5 Cloud map of tunnel lining maximum principal stress (unit:Pa)

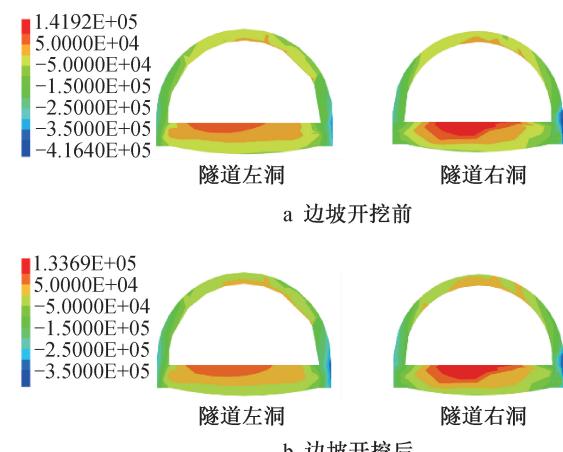


图 6 隧道衬砌最小主应力云图(单位:Pa)

Fig. 6 Cloud map of tunnel lining minimum principal stress (unit:Pa)

压强度,说明隧道衬砌结构未发生拉压破坏,隧道衬砌结构处于安全状态,上部边坡开挖不影响下穿隧道交通的正常运行。

3.3 隧道结构安全系数

为了更直观地判断隧道衬砌结构是否处于安全状态,采用容许应力法求解下穿隧道衬砌结构的安全系数。根据《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》中衬砌计算的规定:钢筋混凝土衬砌结构在永久荷载和基本可变荷载作用下,混凝土达到抗压极限强度破坏和抗拉极限强度破坏所采用的安全系数应分别为 2.4,3.6。

上部边坡开挖过程中,下穿隧道左右两侧各部位受压,最小安全系数为 12.08,位于右洞右边墙,大于规范所要求的混凝土达到抗压强度破坏的最小安全系数 2.4,表明隧道衬砌结构在开挖过程中均处于安全状态。

3.4 实测结果对比

为保证隧道通车状况下能安全运营,在第4~8级边坡开挖时,在隧道布置监测点,监测隧道结构变形。根据现场监测数据,隧道拱顶的水平、竖向位移实测值与模拟值如图7所示。

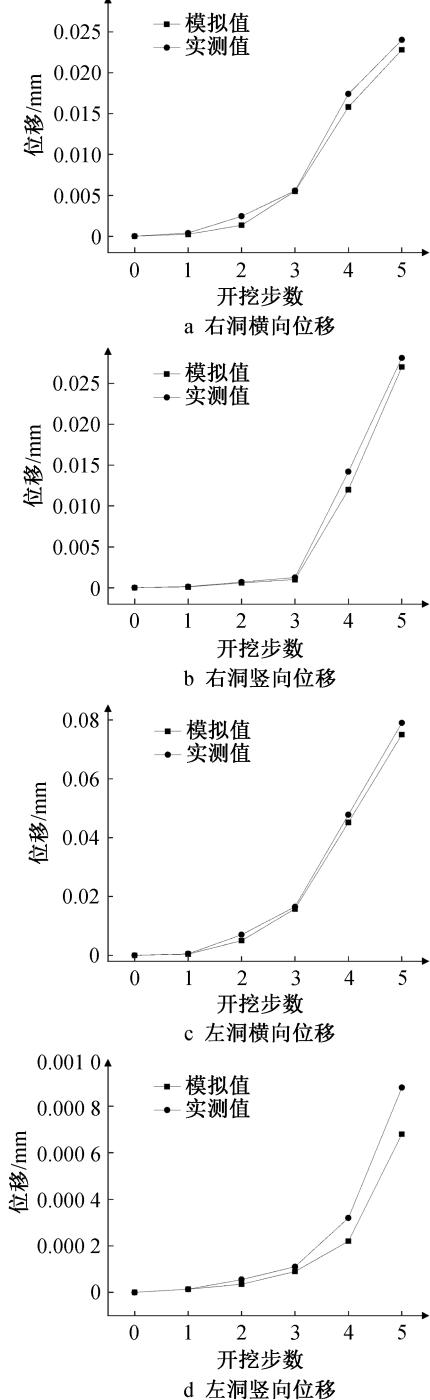


图7 隧道拱顶位移实测值与模拟值对比

Fig. 7 Comparison of measured and simulated displacement values at the tunnel crown

隧道拱顶位移模拟结果与实测结果变化趋势基本吻合,实测结果略大于模拟结果,这是由于数值模拟假定开挖为理想工况,未考虑地下岩体裂缝

和地下水等对实际工程的影响。最大误差<0.002mm,误差结果在可控范围内。通过对比拱顶数值模型与实测变形量,验证了数值模型的合理性,数值模拟可为下一步边坡开挖工程安全性提供理论依据。

3.5 边坡开挖至路基结果

第4~8级边坡开挖模拟结果与实测结果吻合,在FLAC3D中将边坡下穿隧道模型开挖至路基并拆除隧道衬砌,开挖完成后的模型位移特征云图如图8所示,由于边坡开挖深度较大,边坡整体出现开挖回弹,最大变形出现在第1~3级边坡坡脚处,最大位移为0.26mm。边坡塑性区也出现在第1~3级边坡的坡面和坡角处,这可能是由于此处采用的锚杆长度较小,支护措施对开挖引起的破碎岩体锚固不充分,可能导致产生边坡滑移面。为了预防工程安全隐患的产生,应依据施工方案在边坡平台及坡顶设置位移观测桩及深层倾斜孔,加强对边坡变形的监测,在未施作支护的一级边坡可使用喷射混凝土和柔性防护网进行支护,确保未来路基运营过程的安全。

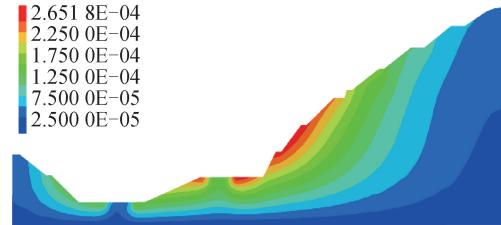


图8 边坡开挖至路基位移云图(单位:m)

Fig. 8 Cloud map of landslide excavation to subgrade displacement (unit:m)

4 结语

1)隧道衬砌拱顶、左右拱腰和左右边墙的竖向位移和水平位移均随边坡逐级开挖增大,隧道底板受影响较小;右侧隧道受边坡开挖影响更大,位移峰值位于右侧隧道的右拱腰,隧道衬砌结构各部位位移均未超过允许值;隧道主应力值随边坡开挖减小,隧道底板受拉,其余部位受压,主应力峰值均远小于抗拉与抗压极限强度,开挖过程中衬砌结构最小安全系数为12.08,衬砌结构处于安全状态。

2)采用锚杆和预支护桩进行支护能够有效改善边坡整体应力状态和变形,在隧道通车状况下对上部第4~8级边坡进行开挖,隧道结构安全性较高。

3)在边坡开挖至一级坡面时,由于边坡开挖深度较大,边坡坡面及坡脚由于土体卸荷产生回弹,应当加强边坡的监测,及时调整开挖速度并及时施

工设计要求中的支护措施,保证隧道改路基工程的安全性,防止工程安全隐患的产生。

参考文献:

- [1] 华文龙,邵京,李海光.隧道改路基工程难点研究及对策[J].交通科技,2019(5):29-31.
HUA W L,SHAO J,LI H G. Research on difficulties of subgrade engineering changed from tunnel solutions and countermeasures [J]. Transportation science & technology,2019(5):29-31.
- [2] 章海明.超高边坡开挖对既有隧道衬砌结构安全影响分析[J].山西交通科技,2023(2):93-96.
ZHANG H M. Influence analysis of excavation of ultra-high slope on lining structure safety of existing tunnel [J]. Shanxi science & technology of transportation,2023(2):93-96.
- [3] 赵东平,王明年,贾玲利.路堑边坡开挖对邻近既有隧道影响研究[J].岩土力学,2009,30(5):1399-1402,1408.
ZHAO D P, WANG M N, JIA L L. Research on influence of excavating road trench slope on adjacent existing tunnel [J]. Rock and soil mechanics,2009,30(5):1399-1402,1408.
- [4] 杨光,李盼.路堑边坡开挖对邻近既有铁路隧道影响分析[J].世界科技研究与发展,2016,38(1):71-75,156.
YANG G, LI P. Analysis on influence of cut slope excavation on nearby existing railway tunnel [J]. World sci-tech R & D,2016, 38(1):71-75,156.
- [5] CAUSSE L, COJEAN R, FLEURISSON J A. Interaction between tunnel and unstable slope-Influence of time-dependent behavior of a tunnel excavation in a deep-seated gravitational slope deformation [J]. Tunnelling and underground space technology ,2015,50:270-281.
- [6] 刘洪洲.南京疏港公路近距离路堑开挖对栖霞山铁路隧道结构的影响研究[J].公路,2003,48(5):142-146.
LIU H Z. Research on effect of excavation of highway through cut on structure of a neighbouring railway tunnel [J]. Highway, 2003, 48(5):142-146.
- [7] 王开阳.新建上跨公路隧道对既有下方铁路隧道结构安全影响分析[J].国防交通工程与技术,2024,22(1):52-55,92.
WANG K Y. The structural safety analysis of overcrossing construction of a newly-built highway tunnel on existing railway tunnel [J]. Traffic engineering and technology for national defence,2024,22(1):52-55,92.
- [8] 陈震,王希勇,吕小军,等.基坑开挖卸载对下部地铁的作用分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(4):508-512.
CHEN Z, WANG X Y, LÜ X J, et al. Research on the effect of unloading by pit excavation on subway [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2012, 35 (4): 508-512.
- [9] 吉茂杰,刘国彬.开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(5):531-535.
JI M J, LIU G B. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation [J]. Journal of Tongji University(natural science), 2001,29(5):531-535.
- [10] 许胜寒.基坑施工对邻近曲线隧道的影响研究[J].广东土木与建筑,2024,31(3):42-44,60.
XU S H. Research on the influence of foundation pit construction on adjacent curved tunnel [J]. Guangdong architecture civil engineering,2024,31(3):42-44,60.
- [11] 张巧明,付雄,刘冬东,等.高边坡下穿隧道施工应力分布及抗滑桩优化研究[J].施工技术(中英文),2023,52(12):9-15.
ZHANG Q M, FU X, LIU D D, et al. Stress distribution and anti-slide pile optimization of tunnel construction under high slope [J]. Construction technology,2023,52(12):9-15.
- [12] 李世文.高速公路路堑高边坡稳定性分析及支护措施研究[J].公路工程,2018,43(5):163-168.
LI S W. Stability analysis and support measures of cutting slope high side slope of expressway [J]. Highway engineering,2018,43 (5):163-168.
- [13] 匡波.路堑高边坡的稳定性分析与开挖支护数值模拟[D].长沙:长沙理工大学,2009.
KUANG B. Stability analysis and numerical simulation of excavation support for high road cut slopes [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2009.
- [14] 宋修广,张思峰,李英勇.路堑高边坡开挖、锚固数值模拟及稳定性分析[J].公路交通科技,2005,22(4):38-40.
SONG X G, ZHANG S F, LI Y Y. Stability analysis and simulation of excavation and reinforcement of high slope of expressway [J]. Journal of highway and transportation research and development,2005,22(4):38-40.
- [15] 王凯,刁心宏,赖建英,等. FLAC3D 应变软化与摩尔库伦模型工程应用对比[J].中国科技论文,2015,10(1):55-59,63.
WANG K, DIAO X H, LAI J Y, et al. Engineering application comparison of strain softening model and Mohr-Columb model in FLAC3D [J]. China sciencepaper,2015,10(1):55-59,63.