

双隧道开挖进尺对其掌子面稳定现场监测和数值分析

——以安石隧道为例

杨 曦¹, 赵智辉², 刘跃成³, 周 创³, 康跃明², 范明外¹

(1. 云南航天工程物探检测股份有限公司, 昆明 650217; 2. 中煤科工集团 重庆研究院有限公司, 重庆 400039;
3. 云南交投集团投资有限公司, 云南 云县 675800)

摘要:以云县至凤庆高速公路隧道工程为背景,提出采用现场监测和数值分析结合的可行性研究方案。通过数值分析与实际工程对掌子面的位移进行研究。详细分析不同开挖进尺情况下掌子面前方不同位置处的岩层位移变化规律后,发现掌子面开挖进尺与掌子面前方岩层变形规律,开挖进尺越大,对其掌子面的稳定越不利,同时发现掌子面岩层可以提供一部分阻力,阻止掌子面前方岩体朝掌子面移动,以及掌子面上方岩层的重力势能作用。提出红线开挖进尺的确定方法和现场实际开挖进尺的确定准则;讨论了施工过程中掌子面前方岩层存在的挤出现象,表明采用红线开挖进尺乘以安全系数更能保证现场的施工安全。

关键词:掌子面进尺;现场实验;围岩稳定;阻遏效应

中图分类号:U25 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0357-06

近几年,随着隧道开挖工程深度的加大,隧道围岩的稳定,特别是隧道掌子面的稳定,对隧道开挖工程的安全进行起到重要作用^[1-5]。在开挖过程中开挖进尺对其掌子面围岩的稳定起到决定性作用之一^[6-9]。因此,如何简单有效地确定隧道开挖进尺是隧道工程中亟待解决的问题之一^[9]。

目前,针对隧道开挖后掌子面稳定研究的理论较为成熟,部分学者基于数值模拟、试验手段等方法对其进行了相关研究。但对其开挖进尺对其稳定性的影响研究较少。Senent 等^[10],计算了 Hoek-Brown 非线性破坏准则表征的裂隙岩体中隧道掌子面坍塌压力并且采用数值 3D 有限差分程序识别出沿破坏面法向应力分布的足够近似。Shao 等^[11]提出了一种基于工作室内压力场面几何特征的 EPB 隧道掌子面稳定性分析新的数值方法,可实时分析掌子面前方地面主动和被动土压力的变化情况。该机制为确保 EPB 隧道施工安全和自动控制提供了依据。Zou 等^[12]提出了基于极限分析方法的改进三维旋转破坏模型和基于极限平衡方法的改进楔棱柱模型并且评估了几何、岩土参数和加载条件对隧道掌子面稳定性的影响。王俊等^[13]、王志

杰等^[14]采用极限平衡法分析了维持稳定的最小极限支护压力,计算得到的极限支护压力随着摩擦角的增大呈非线性减小,随着黏聚力的增大呈线性减小,随着埋深与隧道直径的比值减小。安永林等^[15]、贺祚等^[16]应用有限元模拟和强度折减相结合的方法,得出安全厚度随抗压强度、抗拉强度和抗渗系数增大而减小,随岩溶水压力、隧道开挖高度和开挖宽度增大而增大。黄俊等^[17-20]通过分析影响掌子面稳定性的主要因素提出掌子面稳定安全系数关于材料强度参数与施工条件参数的隐函数。上述研究中未对于掌子面进尺对掌子面围岩稳定研究,在实际隧道开挖中不仅要考虑地质环境等条件,还要考虑开挖进尺对其的影响。

因此,基于现场试验和数值模拟研究开挖进尺对掌子面前后方围岩的变形影响规律,提出红线开挖进尺的确定方法和现场实际开挖进尺的确定准则,并与实测数据进行对比分析;讨论了施工过程中掌子面前方岩层存在的挤出现象。

1 工程概况

在建云县至凤庆高速公路的安石隧道位于凤庆县凤山镇安石村-勐佑镇中河村,为分离式特长隧道,

收稿日期:2021-09-07

基金项目:云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交科教便[2020]59)。

作者简介:杨曦(1982—),男,河北保定人,云南航天工程物探检测股份有限公司,高级工程师,博士研究生,研究方向为工程地质勘探和数据正反演。

在建隧道呈曲线形展布,隧道最大埋深约 453.11 m。

隧道围岩为前奥陶系石英片岩、绢云母石英片岩、云母片岩,见呈互层状或渐变过渡赋存,属较软岩。岩体破碎呈碎裂状结构,岩石矿物定向排列,片理发育,受构造挤压作用明显。岩层产状倾向 140°~150°,倾角 30°~50°,部分芯样照片如图 1 所示。

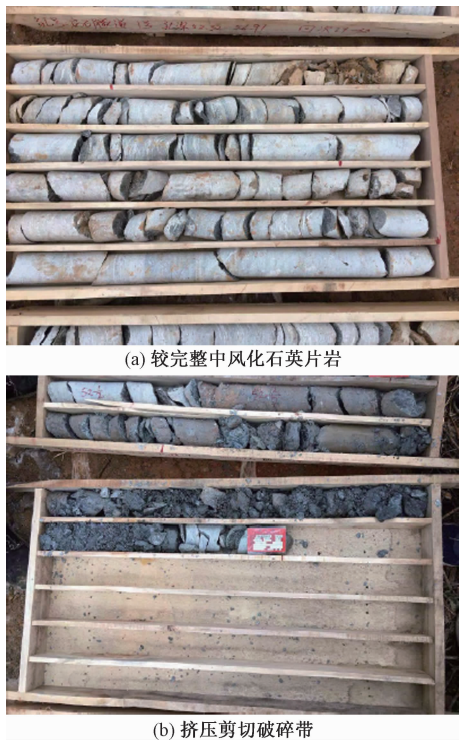


图 1 部分芯样照片

2 监测试验

2.1 现场试验确定

对隧洞拱顶下沉量及下沉速度、边墙水平收敛量及收敛速度进行观测,为判断开挖进尺对围岩的稳定性、支护的强度的影响程度提供依据。拱顶下沉和隧道周边净空收敛都采用全站仪进行监测,测点布设示意图和现场监测如图 2 所示。

2.2 拱顶沉降监测结果分析

如图 3(a)和图 3(b)所示,分别对应现场掌子面日开挖进尺 3 m 和 2 m 工况下拱顶沉降值。可看出日开挖进尺 3 m 工况下拱顶累计沉降值和增长速率大于日开挖进尺 2 m 工况下拱顶累计沉降值和增长速率。从图中还可看出,开挖进尺越大,对其掌子面后方围岩稳定越不利,让其从开挖后应力释放造成的不稳定状态到二次平衡后的稳定状态所需要的时间更长,开挖造成的扰动作用更大。因此在施工过程中,要时刻根据现场岩层条件和施工



图 2 现场监测试验图

工艺等来合理选取开挖进尺大小,以保证隧道工程的安全施工。

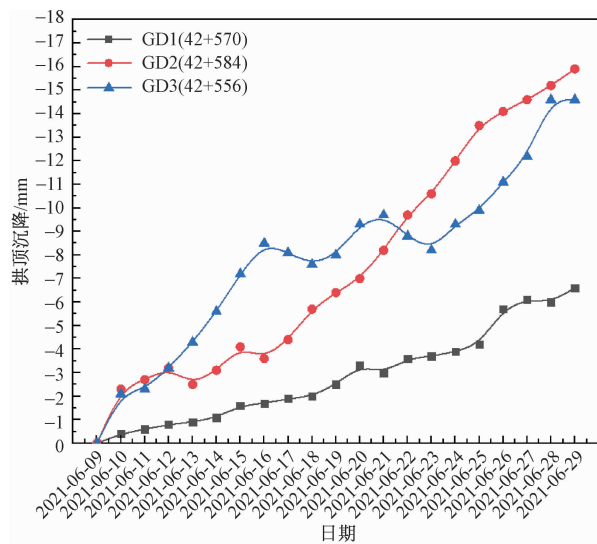
2.3 净空收敛监测结果分析

如图 4(a)和图 4(b)所示,分别对应现场掌子面日开挖进尺 3 m 和 2 m 工况下对应的净空收敛值。可看出日开挖进尺 3 m 工况下净空收敛值和增长速率大于日开挖进尺 2 m 工况下净空收敛值和增长速率,近似大于 3 倍值。从图中还可看出,开挖进尺越大,对其掌子面后方围岩拱腰影响程度要远大于对其围岩拱顶部位,分析其原因,主要是因为拱效应的存在,造成对隧道拱顶部影响程度要小于拱腰。

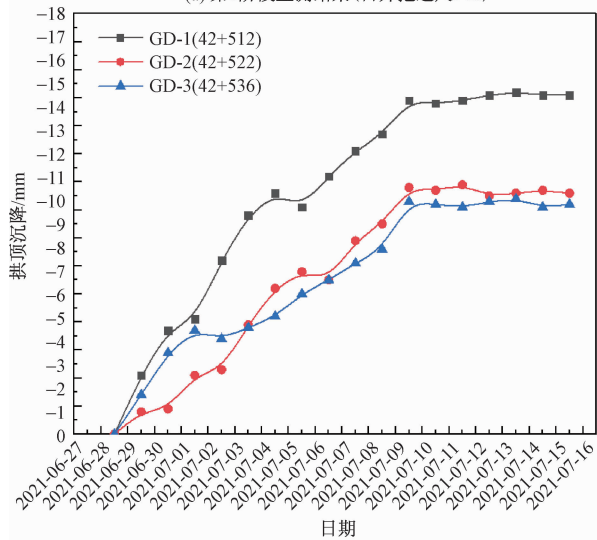
3 岩体变形分析

3.1 掌子面坍塌和变形分析

造成掌子面坍塌原因主要分为两大类,一类为掌子面地质条件复杂,一类为施工扰动造成掌子面围岩不稳定。地质条件的复杂主要包括地层岩性条件较差,如岩层抗侧压系数较低、岩层较为破碎、岩层为遇水软化岩石等情况;另一类为地质构造复杂,例如掌子面前方为断层且倾角较大以及水文条件复杂,裂隙水和孔隙水含量丰富且很容易得到补充。施工扰动往往也是造成掌子面坍塌主要原因之一。在施工过程中,若采用爆破开挖,则需考虑

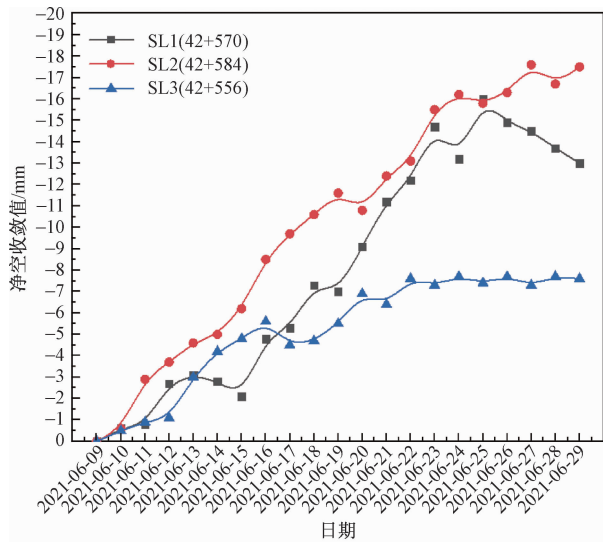


(a) 第1阶段监测结果(日开挖进尺3 m)

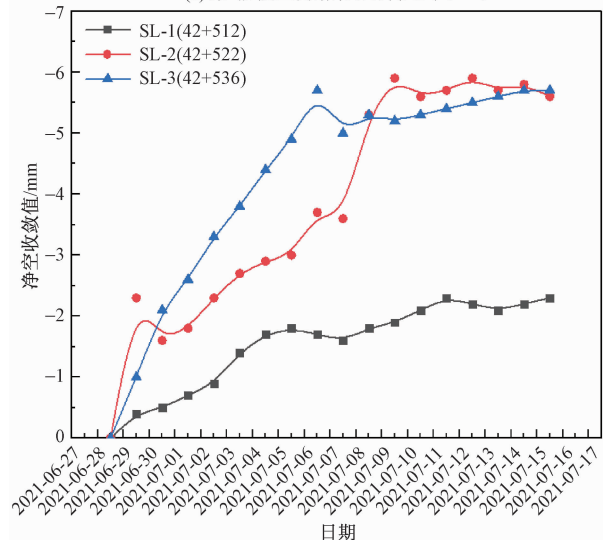


(b) 第2阶段监测结果(日开挖进尺2 m)

图 3 拱顶沉降监测结果



(a) 第1阶段监测结果(日开挖进尺3 m)



(b) 第2阶段监测结果(日开挖进尺2 m)

图 4 净空收敛监测结果

爆破造成岩层的松动以及破裂影响,若开挖进尺过大必然要求药量加大,对掌子面前后方围岩造成过大的扰动,影响其稳定性,造成掌子面前后方围岩松动,造成坍塌施工发生。

3.2 掌子面变形分析

根据 FLAC^{3D}模拟在开挖进尺 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6 m 等工况下,掌子面前后岩层变形情况。本次数值模拟按照现场实际施工顺序来进行计算,开挖方式采用上下台阶开挖,先开挖后初衬最后进行二衬支护顺序进行。

为了更好地展示开挖后掌子面变形情况,采用掌子面变形放大 200 倍方式,如图 5 所示。从图中可以看出隧道岩层开挖完成后,掌子面向前突出变形,且变形最大位置靠近掌子面中心位置。从图 6 中可以看出,掌子面的岩层变形基本上随开挖进尺

距离的增加而增加,且增长速率明显分两个阶段,增长阶段和快速增长阶段。笔者把此转折点称为红线开挖进尺,对应图中的开挖进尺 4 m。

从开挖进尺和变形量图 6 中可以发现,后开挖隧道掌子面变形值大于先开挖隧道。分析其中的原因是在实际的开挖过程中随着先开挖隧道的施工,对其后开挖隧道围岩造成扰动,使其造成掌子面变形值加大。后开挖施工隧道在施工过程中对周围土体扰动较大,造成的原因是先施工隧道对其岩层的扰动造成岩层裂隙增多,孔隙水释放造成空隙水压降低,围岩的自稳压力降低,但其后施工隧道水危害降低。

3.3 掌子面前方岩体变形

从到掌子面距离与变形量图 7 中可以看出,掌子面前方岩层变形值随到掌子面距离的增加而减

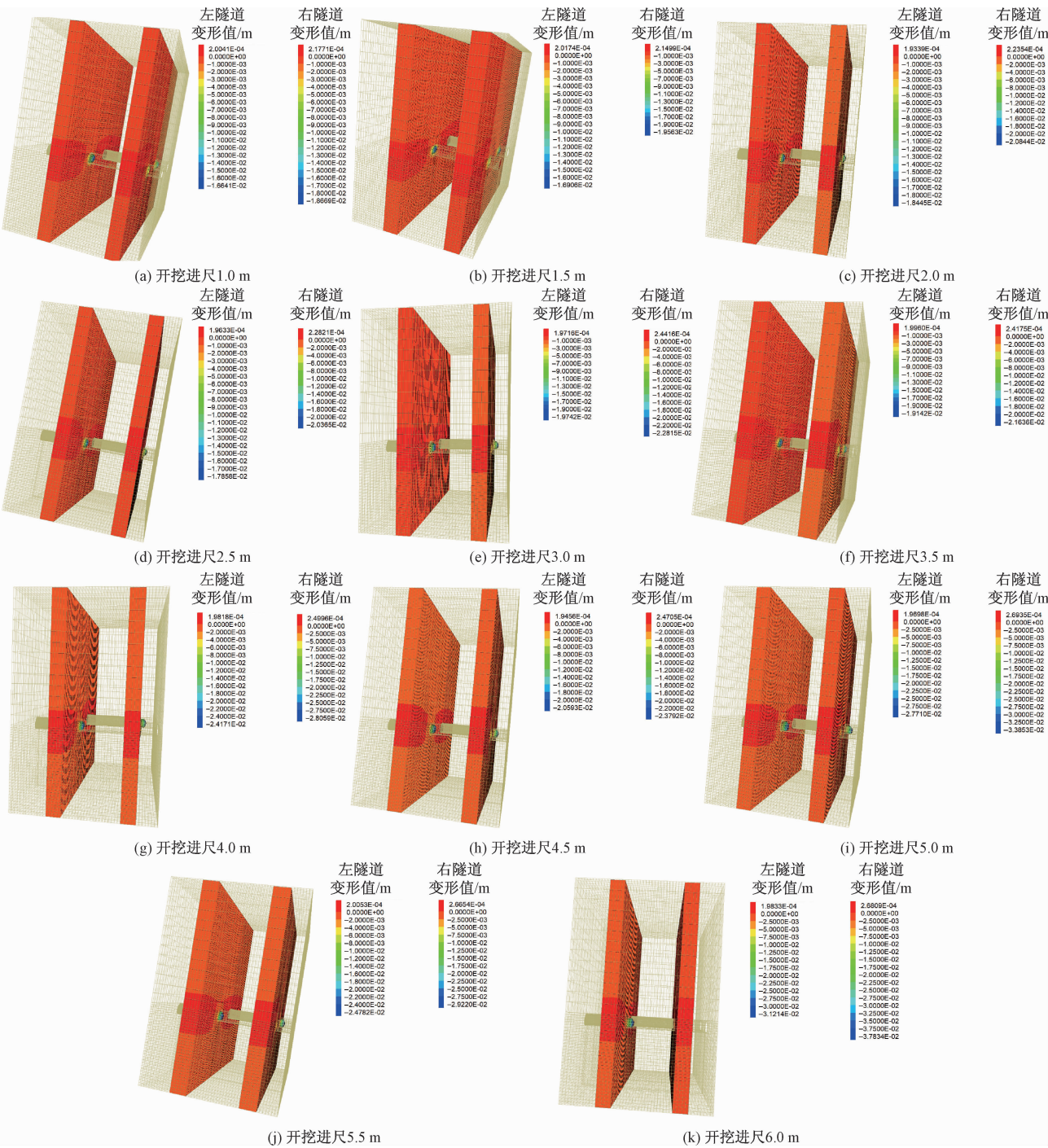


图 5 开挖进尺和变形量三维图

少。造成这种现象的原因是岩层与岩层间存在阻力,对其岩层向掌子面方向变形起到了阻碍作用,距离掌子面的距离越大,对其造成的阻力值越大,从而发生的变形值越小。

通过以上分析,采用开挖进尺 2 m 最为安全,安全系数为 0.5,在保证的开挖进度的情况下,也防止了掌子面坍塌事故的发生,保证了现场安全施工。

4 结论

1) 隧道岩层开挖完成后,掌子面向前突出变

形,且变形最大位置靠近掌子面中心位置。因此,在掌子面开挖施工过程中,要重点观测掌子面中心变形,防止灾害发生。

2) 掌子面的岩层变形基本上随开挖进尺距离的增加而增加,且增长速率明显分两个阶段,增长阶段和快速增长阶段。笔者把此转折点称为红线开挖进尺。因此在计算掌子面变形值时应重点确定此转折点,把此转折点作为开挖进尺红线。

3) 掌子面前方岩层变形值随到掌子面距离的

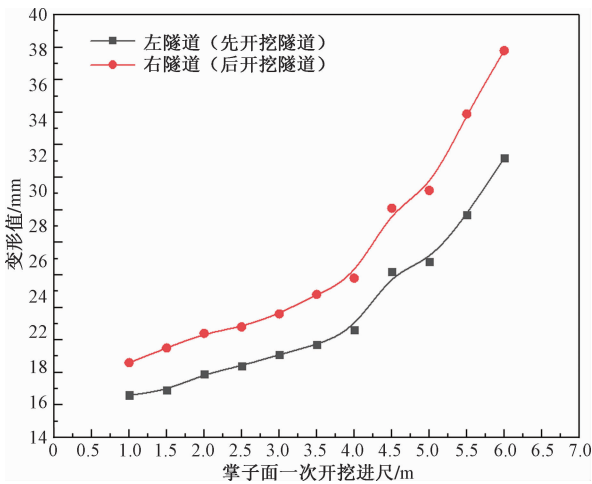


图 6 开挖进尺和变形量

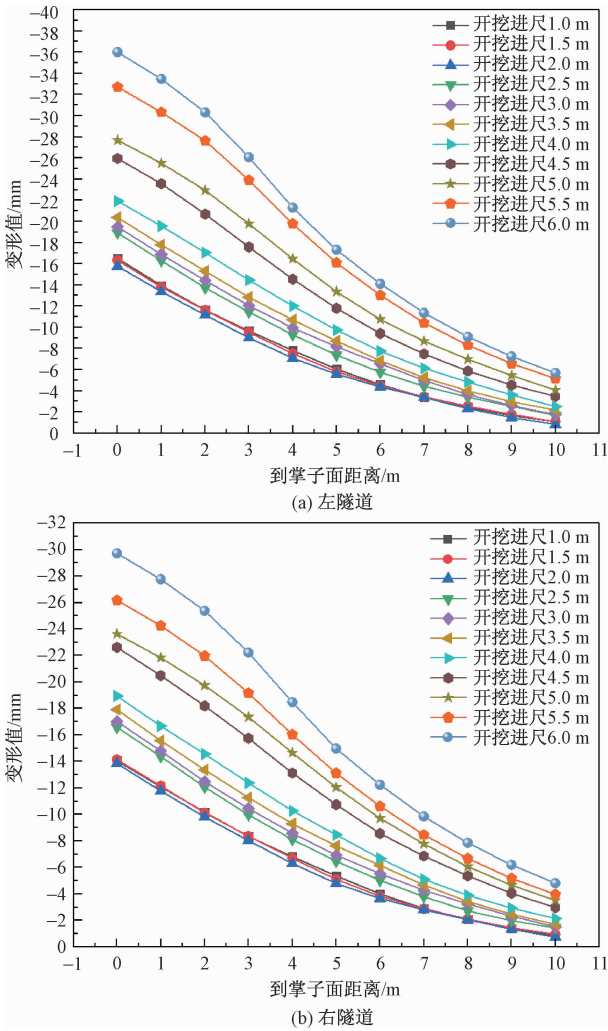


图 7 到掌子面距离与变形量

增加而减少。造成这种现象的原因的是岩层与岩层间存在阻力,对其岩层向掌子面方向变形起到了阻碍作用。

4)通过现场对掌子面后方岩层的变化量进行监测,通过此观测值来指导现场施工,对其保证安全起到了重要作用。

5)通过以上分析,采用开挖进尺 2 m 最为安全,安全系数为 0.5,在保证的开挖进度的情况下,也防止了掌子面坍塌事故的发生,保证了现场安全施工。对今后的隧道开挖工程开挖进尺方案的确定有一定的指导意义。

参考文献

[1] 刘大刚,姚萌,张霄,郑万高铁大断面岩质隧道掌子面稳定性评价及控制措施[J]. 隧道建设,2018,38(8):1311-1315.

[2] 朱举,乔春生,宋仪,等. 基于突变理论的第三系弱胶结砾岩掌子面稳定性[J]. 东南大学学报(自然科学版),2019,49(2):321-327.

[3] 万涛,王中荣,郭晓炜,等. 大直径矩形顶管开挖面极限支护力计算方法[J]. 科学技术与工程,2021,21(22):9563-9569.

[4] 郑泽源,施成华,雷明锋,等. 营盘路湘江隧道断层破碎带段施工掌子面稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2012,9(5):59-64.

[5] 陈峥,何平,颜杜民,等. 超前支护下隧道掌子面稳定性极上限分析[J]. 岩土力学,2019,40(6):2154-2162.

[6] 王秉勇,王建奇,王伟星,等. 黄土塬区浅埋大断面隧道掌子面失稳机理研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(1):67-72.

[7] 甄正,葛忻声,王菁悦,等. 流固耦合作用下盾构下穿高架桥稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(22):9605-9614.

[8] 王志杰,高靖遥,张鹏,等. 基于突变理论的高压岩溶隧道掌子面稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):95-103.

[9] 张光武. 基于筒仓理论的近接断层掌子面稳定分析模型[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(S2):663-668.

[10] SENENT S, MOLLON G, JIMENEZ R. Tunnel face stability in heavily fractured rock masses that follow the Hoek-Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2013,60:440-451.

[11] SHAO C, LAN D S. Tunnel face stability analysis based on pressure field surface's normal vector for earth pressure balanced shield[J]. International Journal of Modeling, Identification and Control,2012,17(2):048-060.

[12] ZOU J F, CHEN G H, QIAN Z H. Tunnel face stability in cohesion-frictional soils considering the soil arching effect by improved failure models[J]. Computers and Geotechnics,2019,106:014-021.

[13] 王俊,何川,王闯,等. 砂土地层土压盾构隧道施工掌子面稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(1):177-185.

[14] 王志杰,吴凡,王如磊,等. 深埋风积沙地层隧道掌子面

[15] 安永林,李佳豪,曹前,等. 上软下硬地层隧道掌子面稳定性及塌方形态[J]. 中国铁道科学,2019,40(1):79-87.

[16] 贺祚,杨栋,陈顿,等. 砂土条件下加固隧道掌子面稳定性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(2):468-475.

[17] 黄俊,党发宁,周磊,等. 关于土体隧道掌子面开挖稳定性的量化探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3127-3137.

[18] 方江华,姜平伟,郭朋亮,等. 富水砂层大断面暗挖隧道施工地层演化[J]. 科学技术与工程,2021,21(20):8621-8628.

[19] 杨波,王海亮,褚夫蛟,等. 盾构隧道联络道爆破施工优化[J]. 科学技术与工程,2021,21(20):8663-8669.

[20] 邓小龙,孙光吉,俞永华,等. 滇东北深埋特长公路隧道工程区地应力场研究[J]. 工程地质学报,2021,29(3):862-870.

Field Monitoring and Numerical Analysis of Tunnel Face
Stability by Double Tunnel Excavation Footage:
Taking Anshi Tunnel as an example

YANG Xi¹, ZHAO Zhihui², LIU Yuecheng³, ZHOU Chuang³, KANG Yueming², FAN Mingwai¹

(1. Yunnan Aerospace Engineering Geophysical Detection Co.,Ltd.,Kunming 650217,China;
2. CCTEG Chongqing Research Institute,Chongqing 400039,China;
3. Yunnan Trading Group Investment Co.,Ltd.,Yunxian Yunnan 675800,China)

Abstract: Based on the tunnel project of Yunxian-Fengqing Expressway, a feasibility study scheme combining field monitoring and numerical analysis is proposed. The displacement of the palm surface is studied by numerical analysis and practical engineering. After a detailed analysis of the rock displacement variation at different positions in front of the face under different excavation footage, it is found that the excavation footage of the face and the deformation law of the rock in front of the face. The greater the excavation footage is the more unfavorable to the stability of the face. At the same time, it is found that the rock in the face can provide some resistance to prevent the rock in front of the face from moving towards the face and the gravitational potential energy of the rock above the face. The determination method of red line excavation footage and the determination criterion of actual excavation footage on site are proposed. The extrusion phenomenon of the rock stratum in front of the working face in the construction process is discussed, indicating that the red line excavation footage multiplied by the safety factor can better ensure the safe construction of the site.

Keywords: footage on the palm;field experiment;surrounding rock is stable;repression effect