

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.05.005

破碎围岩山岭隧道施工稳定监测及数值模拟

祝方才¹, 晏仁¹, 赖国森², 张刚², 黄国星², 尚亚新²

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中铁北京工程局集团第二工程有限公司, 湖南 长沙 410116)

摘要: 以某高速公路破碎围岩隧道大变形为工程背景, 并以现场调查、数值模拟和现场监测为手段, 提出了三台阶七步开挖仰拱紧跟工法。利用 Midas GTS 建立了三台阶七步开挖法的两个数值模型, 结合地质勘查和室内试验数据进行了隧道大变形分析, 并将新工法的模拟结果与监测数据进行了对比分析。研究表明, 所提工法中的仰拱紧跟技术对变形控制起到了较好的作用, 不仅可以有效控制隧道施工中的大变形问题, 且能缩短工期, 提高施工效率, 节省工程造价。

关键词: 破碎岩体; 三台阶七步开挖仰拱紧跟法; 数值模拟; 大变形控制

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)05-0034-08

引文格式: 祝方才, 晏仁, 赖国森, 等. 破碎围岩山岭隧道施工稳定监测及数值模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(5): 34-41.

Construction Stability Monitoring and Numerical Simulation of Mountain Tunnels with Weak Rocks

ZHU Fangcai¹, YAN Ren¹, LAI Guosen², ZHANG Gang², HUANG Guoxing², SHANG Yaxing²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. 2nd Engineering Co. Ltd., China Railway Beijing Engineering Group Co. Ltd., Changsha 410116, China)

Abstract: Taking the large deformation of a highway tunnel with weak rocks as the engineering background, a three-bench seven-step excavation inverted arch following construction method has thus been proposed by means of an on-site investigation, a numerical simulation and an on-site monitoring. Two numerical models of a three-bench, seven-step excavation method are established by using Midas GTS, followed by an analysis of the large deformation of the tunnel in combination with the geological exploration and laboratory test data, with the simulation results of the new construction method compared with that of the monitoring data. The research results show that the inverted arch following technology in the proposed construction method plays an important role in the deformation control, which can not only effectively control the large deformation found in tunnel construction, but also shorten the construction period, thus improving the construction efficiency and saving the project cost as well.

Keywords: weak rocks; three-bench seven-step excavation inverted arch close following method; numerical simulation; large deformation control

收稿日期: 2022-01-20

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目 (2022JJ50087)

作者简介: 祝方才 (1972-), 男, 湖北公安人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为边坡与隧道,

E-mail: zhufangcai@163.com

0 引言

软弱破碎围岩隧道往往存在多种不良地质,在开挖后难以形成承载拱,易发生隧道塌方、仰坡失稳等事故,而选择合理的开挖和支护方法是保证隧道施工安全的关键。

K. F. Bizjak 等^[1]应用三维收敛性测量技术,对斯洛文尼亚高速公路隧道段的衬砌、围岩的受力、变形等进行了监测,并且对其进行了稳定性分析。李国良等^[2]对乌鞘岭特长隧洞岭脊段大变形的快速开挖、快速支护、快速封闭、适时衬砌等施工工艺进行了改进,取得了较好的效果。G. Galli 等^[3]通过数值仿真,探讨了隧道施工过程中衬砌与围岩之间的相互影响。李廷春^[4]通过增加支护刚度、合理预留变形、长锚杆、多重支护、超短阶梯等常规技术,对毛羽隧道的大变形进行了有效的控制。许光磊^[5]通过数值试验,研究了不同的开挖方式对软弱围岩隧道的影响,并且得到了合理的施工参数。路刚^[6]通过现场监测,对三台阶七步开挖法平行线流水开挖造成的地表沉降变形和围岩变形特点等进行了分析。黄沛等^[7]运用数值模拟,分析了三台阶七步法施工中围岩洞周收敛、拱顶下沉等情况。刘招伟等^[8]通过分析三台阶(带仰拱)和二台阶(带仰拱)施工工艺,提出了台阶法(带仰拱)一次开挖施工技术,通过实例验证后,认为该方案能较好地解决软岩隧道步距超标、变形侵限等问题。马栋等^[9]研究发现,初期支护仰拱快速封闭时,控制初期支护仰拱与掌子面的距离(小于20 m)能够有效抑制隧洞变形。Liang X. T. 等^[10]采用优化施工参数、分级变形控制、长短锚杆组合等措施,有效降低了大法师隧道变形,确保其施工安全和施工进度。Yuan Q. 等^[11]采用临时支撑(横向支撑和竖向支撑)注浆锚管喷射-混合协调支护同时施工管棚,并且对支护进行了优化,即采用对超前小导管进行加密,增设临时仰拱、锁脚锚管等措施,成功处理了塌方大变形段。Wan F. 等^[12]分析了台阶法施工条件下软弱破碎围岩变形的破坏特征,发现超前变形是台阶法稳定性控制的关键。

前人的研究成果为我国隧道工程的设计积累了宝贵的经验,截至当前,三台阶七步开挖法的研究成果较多,而三台阶七步开挖仰拱紧跟+联合支护方法的研究成果相对较少。因此,本文拟引入该方法至云南某公路隧道施工当中,通过现场实测及数值模拟等手段,验证所提方法的合理性及对大变形控制的有效性。

1 工程概况

云南某高速公路隧道为双线四车道隧道,该隧道的左右幅总长约为4 246.2 m。其中,左幅隧道位于 $R=1\ 110\text{ m}$ 、 $R=1\ 110\text{ m}$ 的S型曲线上,隧道所在路段纵坡为 -1.84% 、 -2.20% 、 0.50% ,最小埋深约为58 m;最大埋深约为295 m;右幅起止里程为K100+300~K102+434,长约为2 134 m,位于 $R=1\ 280\text{ m}$ 、 $R=1\ 107.35\text{ m}$ 的S型曲线上,隧道所在路段纵坡为 -2.52% 、 -2.20% 、 0.50% ,最小埋深约为78 m;最大埋深约为296 m。图1所示为该隧道的地质纵坡面图。

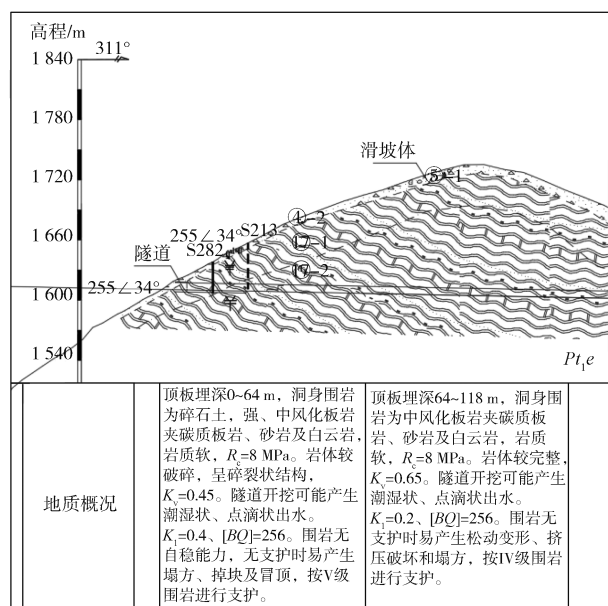


图1 隧道地质纵坡面图

Fig. 1 Geological longitudinal slope of the tunnel

由图1所示隧道地质纵坡面图可以得知,该隧道穿越的围岩主要为V级围岩,并且处于滑坡体下方,由碎石土,强、中风化板岩,夹炭质板岩、砂岩及白云岩组成,岩质较软,岩体较为破碎,呈碎裂状结构,如图2所示。

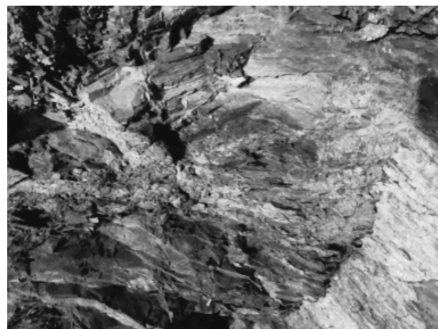


图2 隧道内破碎岩体结构图

Fig. 2 Structural diagram of broken rocks in the tunnel

隧道地区的地下水可被划分为疏松岩型空隙水

和基岩岩溶裂缝水,而松散岩型孔隙水则多产于粉质黏土、碎石土的空隙中。近距离观察掌子面后,发现该隧道内部岩石为碳质板岩,并且破碎情况较为严重,带有风化现象,岩块潮湿且易碎,可用手掰断,拱顶渗水呈滴状,渗水速度较快,如图 3 所示。



图 3 隧道内掌子面岩体渗水图

Fig. 3 Water seepage diagram of rock mass on the tunnel face

隧道开挖采用三台阶七步开挖法,因围岩为 V 级软弱破碎围岩,这种围岩强度较低,胶结程度较差,岩体结构破碎,节理裂隙发育,受风化作用明显,围岩自稳性能较差,易受施工扰动。在施工过程中发现,隧道初支变形较大,仰拱施工后初支出现了严重收敛。过大的沉降导致了 ZK100+304~350 段 46 m 及 YK100+307~341 段 34 m 初支段侵限至二衬范围(如图 4 所示),最大位移达 0.7 m。



图 4 初支大变形侵限实景图

Fig. 4 Actual map of the large deformation and limit invasion of the initial support

2 三台阶七步开挖仰拱紧跟施工方法介绍

在穿越软弱围岩时,由于围岩总体强度较低,自稳性能较差,且在开挖后不稳定。在开挖过程中,拱顶和局部应力集中很容易发生坍塌,极易造成隧道结构失稳,给施工带来困难。

根据新奥法原理,在隧道施工中,根据施工能力和现场的地质情况,对施工方案进行了改进,提出采

用三台阶七步开挖仰拱紧跟加上联合支护方法,以缩短工作面暴露的时间和面积;通过仰拱紧跟锁住隧道底部,仰拱紧跟间距为 10 m 以下,而后及时施作边墙和拱部,形成闭环;及早封闭底板,控制围岩大变形现象。

三台阶七步开挖仰拱紧跟法施工示意图见图 5,图中数字为施工顺序号。

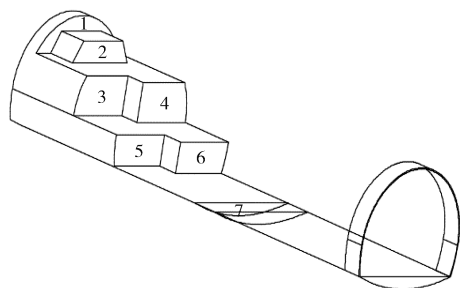


图 5 三台阶七步开挖仰拱紧跟法施工示意图

Fig. 5 Construction diagram of the inverted arch following method for the three-bench, seven-step excavation

三台阶七步开挖仰拱紧跟法具体的开挖施工顺序如下:开挖上台阶 1→核心土 2→左中台阶 3→右中台阶 4→左下台阶 5→右下台阶 6→仰拱 7。V 级围岩开挖支护主要采用挖机开挖,平行作业工序如下:上台阶初喷、打锚杆、立架、挂网工序与出碴工序同时进行,上台阶喷砼与中台阶、下台阶初喷、打锚杆、立架、挂网同时进行。中、下台阶分左右侧错开距离进行开挖。V 级围岩上台阶每次开挖一榀拱架,中台阶及下台阶每次开挖两榀拱架,仰拱开挖每次开挖 6 m。每次支护完成后,下循环开始施工,施工时控制好上中下台阶长度,一般控制在 3~5 m,仰拱紧跟间距为 10 m 以下。

3 数值模拟

为验证三台阶七步开挖仰拱紧跟法在破碎围岩隧道施工过程中的影响,本研究用 Midas GTS/NX 建立了两个模型,一个采用传统的三台阶七步开挖法(仰拱间距为 24 m)、另一个采用三台阶七步开挖仰拱紧跟法(仰拱紧跟间距为 9 m),其他的支护措施和材料参数都一样,通过数值模拟结果对比分析围岩变形情况,以期为工程施工提供参考。

3.1 数值模型的建立

本文根据地质勘察资料给出的平面图、断面图以及钻孔数据,建立仿真三维模型。在仿真软件中,岩土体材料采用各向同性 Mohr-Coulomb 本构模型,初期支护采用弹性本构模型、二衬采用实体单元。计算过程中,采用不占空间厚度的 shell 单元模拟隧

道的初喷混凝土,并采用等效刚度法将钢筋网刚度折合成初衬喷射混凝土中^[13],用梁单元模拟钢拱架、植入式梁模拟超前大管棚、植入式桁架模拟超前小导管和锚杆,力学参数见表1。

表1 材料力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of materials

材料	E/GPa	ν	$\Gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	C/kPa	$\Phi/(\circ)$
初衬喷混	26	0.20	24.0		
二衬喷混	30	0.20	24.0		
锚杆	195	0.28	78.5		
钢拱架	210	0.28	78.5		
管棚	210	0.33	76.9		
粉质黏土	0.004 8	0.30	18.5	20	25.0
强风化板岩	0.79	0.20	22.0	66	28.0
中风化板岩	1.0	0.25	23.0	117	24.7
碎石土	0.003 3	0.175	23.0	15	21.0

本研究建立的分析模型如图6和图7所示,模型单元数为284 571个;左右边界约束了 X 方向自由度,底部约束 Z 方向自由度,前后面约束 Y 方向自由度。

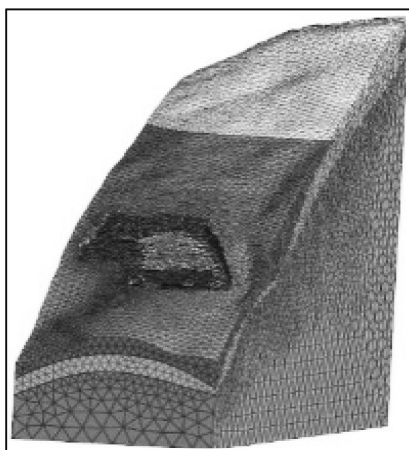


图6 隧道数值分析模型

Fig. 6 Tunnel numerical analysis model

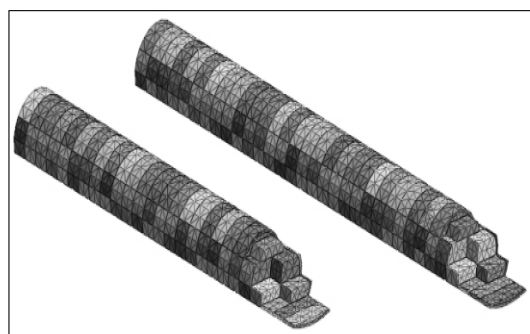


图7 三台阶七步开挖仰拱紧跟法分析模型

Fig. 7 Analysis model of the inverted arch following method of the three-bench, seven-step excavation

等效刚度法的计算公式如下:

$$E = E_0 + A_g E_g / A_c$$

式中: E 和 E_0 分别为折算后和折算前喷射混凝土的

弹性模量;

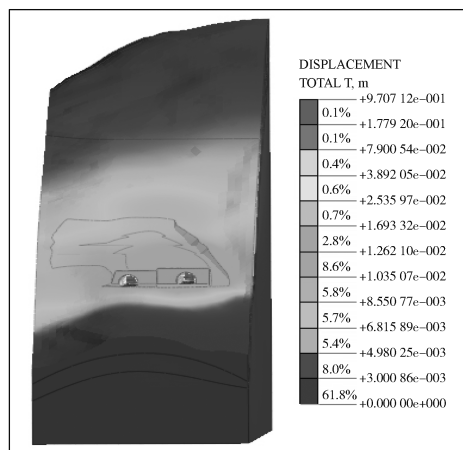
A_g 和 A_c 分别为钢筋网和喷射混凝土的横截面积;

E_g 为钢筋网的弹性模量。

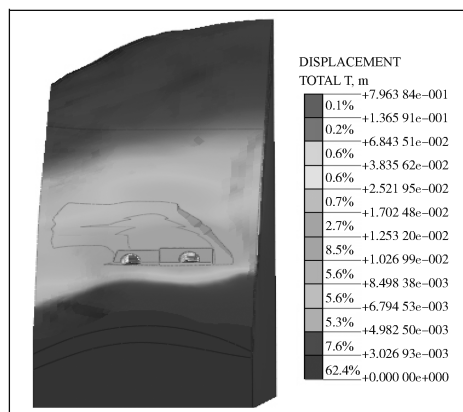
3.2 数值模拟结果与实际监测结果分析

3.2.1 不同施工方法的模拟结果分析

三台阶七步开挖法的总位移云图如图8所示。



a) 传统方法开挖



b) 仰拱紧跟方法开挖

图8 三台阶七步开挖法总位移云图

Fig. 8 Nephogram of total displacement of the three-bench seven-step excavation method

通过对比传统三台阶七步开挖法和三台阶七步开挖仰拱紧跟法的数值模拟计算结果,可知在同一施工步中,传统的三台阶七步开挖法的最大总位移为0.971 m(图8a),该结果与施工现场的变形情况相近;而本文提出的三台阶七步开挖仰拱紧跟法的最大总位移为0.796 m(图8b),比传统的三台阶七步开挖法总位移减少了0.175 m。

隧道的三台阶七步开挖法水平收敛对比曲线如图9所示。由图可知,三台阶七步开挖仰拱紧跟法的左腰和右腰的水平位移都比传统的三台阶七步开挖法要小,在开挖下台阶时,水平位移收敛较快。虽然水

平位移随着仰拱开挖增大,但仰拱封闭后围岩趋于稳定,水平位移有所收敛。

如图 11 所示。

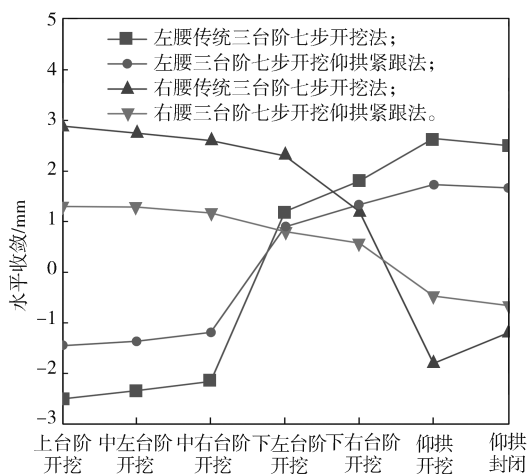


图 9 三台阶七步开挖法水平收敛对比曲线

Fig. 9 Horizontal convergence comparison curves of the three-bench seven-step excavation method

不同开挖方式下,隧道的二衬应力对比曲线如图 10 所示。

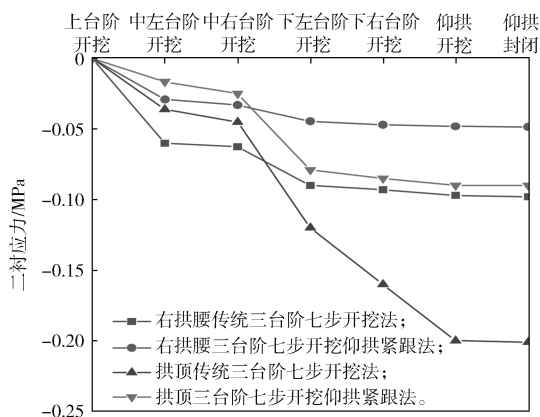


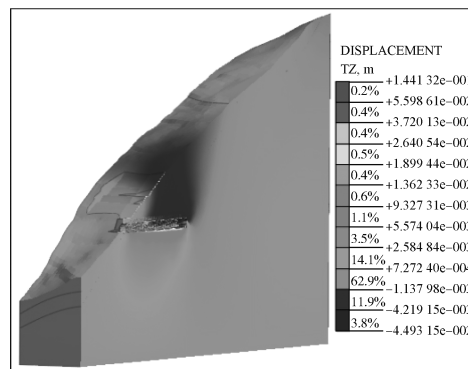
图 10 不同开挖方式下二衬应力对比曲线

Fig. 10 Stress comparison curves of secondary lining under different excavation methods

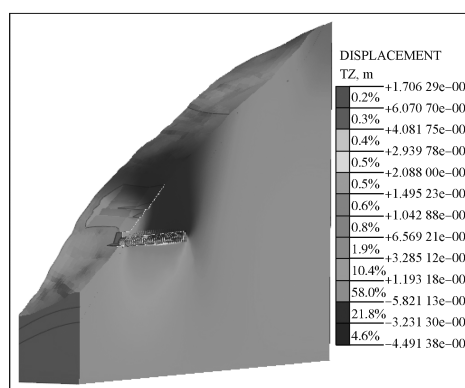
由图 10 所示曲线可知,传统的三台阶七步开挖法和三台阶七步开挖仰拱紧跟法二衬拱顶和右拱腰都受压(拉正压负);随着开挖步进行,二衬应力逐步增大,但采用三台阶七步开挖仰拱紧跟法的二衬应力值要小于传统三台阶七步开挖法的。且在下台阶开挖后,传统三台阶七步开挖法的二衬应力变化值要大于三台阶七步开挖仰拱紧跟法的变化值。

由总位移变化值、水平收敛情况和二衬应力对比分析可知,三台阶七步开挖仰拱紧跟法控制大变形的效果比传统方法要好。

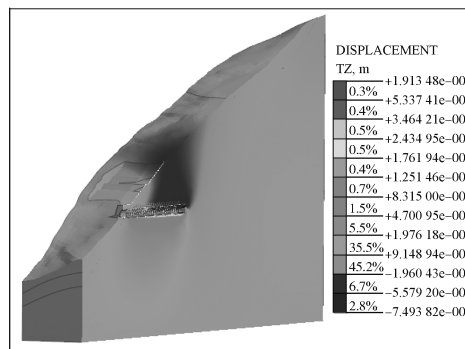
为了进一步分析三台阶七步开挖仰拱紧跟工法随开挖步进行时的拱顶沉降情况,获取了不同的施工阶段三台阶七步开挖仰拱紧跟法的拱顶沉降云图,



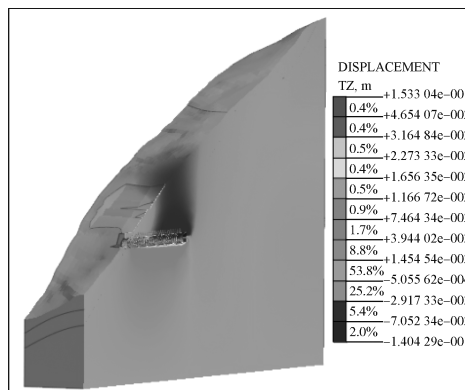
a) 上台阶开挖



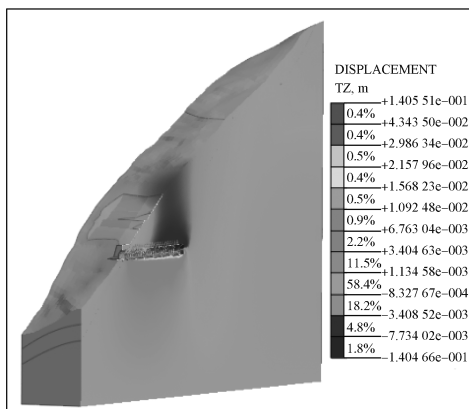
b) 中台阶开挖



c) 下台阶开挖



d) 仰拱开挖



e) 仰拱浇筑完成

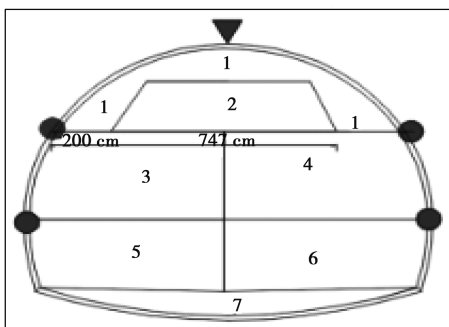
图 11 不同施工阶段三台阶七步开挖仰拱紧跟法的拱顶沉降云图

Fig. 11 Cloud diagram of settlement of the three-bench seven-step excavation inverted arch following method in different construction stages

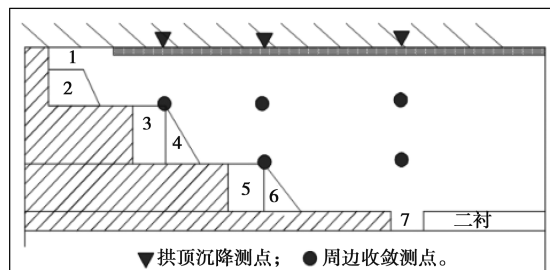
由图 11 所示拱顶沉降云图可以得知,随着上、中、下台阶和仰拱的开挖,隧道的最大竖向位移出现在拱顶和拱底,拱顶沉降位移变化逐渐增大,拱顶沉降最大值为 14.1 cm,沉降变化量最大的为下台阶开挖阶段,约沉降了 6.5 cm;其次为上台阶开挖阶段,沉降了约 4.5 cm,中台阶开挖阶段的拱顶沉降量相对较小;仰拱浇筑完成后,围岩稳定,拱顶沉降量很小。因此在破碎围岩隧道开挖中,应尽量缩短上台阶和下台阶的开挖时间,仰拱紧跟,尽早成环,缩短工期,稳定围岩以控制住大变形。

3.2.2 三台阶七步开挖仰拱紧跟法数值模拟与现场监测结果对比分析

为进一步验证提出的三台阶七步开挖仰拱紧跟法的效果,在云南某隧道后期的施工中采取新的方法并进行了监控测量,监测主要采用半断面测点布置法,监测隧道开挖不同施工步对周边收敛和拱顶下沉的影响。监测点布置在右洞里程为 YK100+867 断面位置,如图 12 所示。监控设备如表 2 所示,现场安装情况如图 13 所示。



a) 隧道横断面布置示意图



b) 隧道纵断面布置示意图

图 12 监测点布置位置示意图

Fig. 12 Layout of monitoring points

表 2 监测设备一览表

Table 2 List of monitoring equipment

序号	测试仪器	监测值	仪器数量	布置位置	备注
1	表面应变计	初支的表面应变	3	拱顶、左肩、右肩	因施工左、右肩仪器被破坏
2	钢筋计	二衬钢筋应力	4	拱顶、左肩、右肩、左腰	
3	土压力盒	二衬压力	3	拱顶、左腰、右腰	因施工左腰仪器被破坏



a) 表面应变计



b) 钢筋计



c) 压力盒

图 13 现场设备安装示意图

Fig. 13 Installation drawing of field equipment

根据监测得出的应变结果,通过换算,得到拱顶沉降的位移随开挖步进行的曲线和数值模拟结果对比,如图14所示。

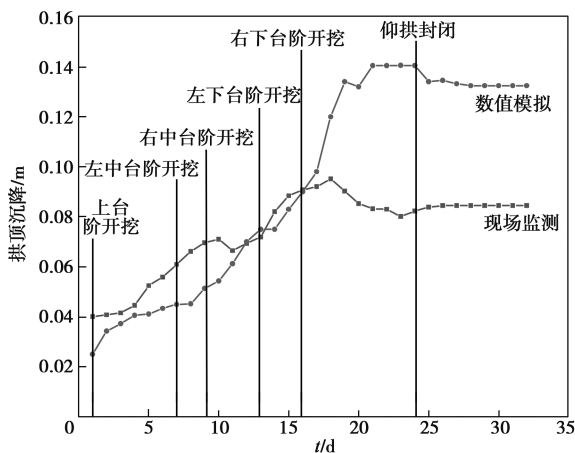


图14 拱顶沉降数据随开挖步变化的数值模拟与现场监测结果对比图

Fig. 14 Comparison chart of the numerical simulation and field monitoring results of arch crown settlement data varying with excavation steps

由图14可知,采用三台阶七步开挖仰拱紧跟法现场监测数据和数值模拟所得趋势基本一致,在下台阶和上台阶开挖时的变形最大,在仰拱封闭成环后围岩稳定,拱顶沉降变化不大,数值模拟的值比现场稍大。说明破碎围岩开挖采用三台阶七步开挖紧跟法可有效控制住大变形。

二衬钢筋应力随开挖步变化情况如图15所示。

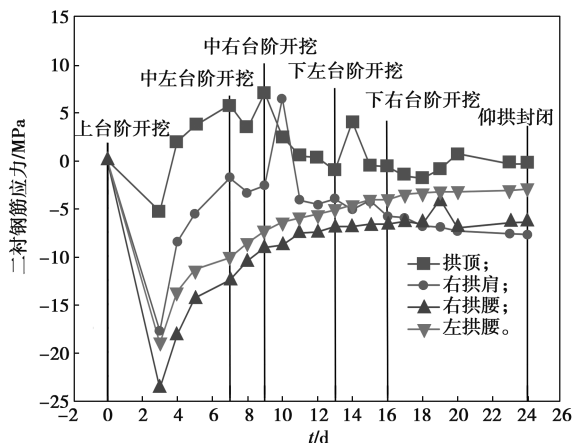


图15 隧道不同部位的二衬钢筋应力随开挖步变化曲线

Fig. 15 Stress curves of the secondary lining reinforcement in different parts of tunnel with excavation steps

由图15可知,二衬钢筋的应力随各开挖步的进行,先增加而后趋于稳定,在仰拱封闭后隧道围岩的变形基本稳定。拱顶部钢筋的应力最后稳定在0 MPa左右,而左拱腰的钢筋应力最后稳定在-7 MPa(负

代表受压),而右边墙和右拱腰的钢筋应力最后均稳定在-9 MPa左右。

隧道不同部位的二衬压力随开挖步变化情况如图16所示。

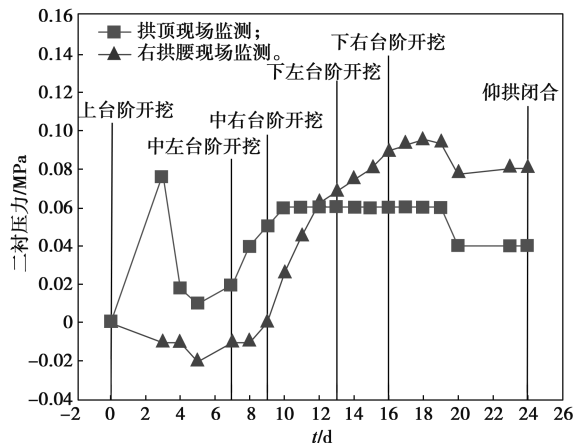


图16 隧道不同部位的二衬压力随开挖步变化曲线

Fig. 16 Variation curves of the secondary lining pressure at different parts of tunnel with excavation steps

由图16可知,二衬拱顶压力随着开挖步的进行而缓慢增大,增大幅度较小,约为0.16 MPa,最后趋于稳定。右拱腰的压力随着时间的增长而缓慢增加,增加幅度也较小,约为0.12 MPa,最后趋于稳定。由二衬压力盒监测数据可知,围岩压力在仰拱闭合后基本稳定。

通过现场监测结果对比分析,印证了三台阶七步开挖仰拱紧跟法数值模拟符合实际,拱顶沉降在运行范围之内(设计允许控制拱顶沉降值为15 cm),钢筋应力和二衬压力值也都在控制值内,且采用三台阶七步开挖仰拱紧跟法在一个工作循环内现场施工时间比传统三台阶七步开挖法约可缩短5 d,证明此方法不仅控制住了大变形,且提高了施工效率,节省了工程建造资金,适用于V级破碎围岩的开挖施工。

4 结论

通过以上研究与分析,可得出如下结论:

1) 传统的三台阶七步开挖法对V级破碎围岩大变形控制效果不佳,而三台阶七步开挖仰拱紧跟法(仰拱紧跟间距为10 m以下)能有效控制住大变形,缩短工期;

2) 三台阶七步开挖仰拱紧跟法可以多作业面平行作业,减少工作面裸露在外的时间,便于快速施工,仰拱紧跟可以加快成环,及早封闭底板而控制围岩变形;

3) 通过Midas GTS建立三维数值模型,模拟了

三台阶七步开挖仰拱紧跟法施工过程,数值计算结果与监测结果具有一致性。

参考文献:

- [1] BIZJAK K F, PETKOVŠEK B. Displacement Analysis of Tunnel Support in Soft Rock Around a Shallow Highway Tunnel at Golovec[J]. *Engineering Geology*, 2004, 75(1): 89-106.
- [2] 李国良, 朱永全. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术[J]. *铁道工程学报*, 2008, 25(3): 54-59.
LI Guoliang, ZHU Yongquan. Control Technology for Large Deformation of Highland Stressed Weak Rock in Wushaoling Tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008, 25(3): 54-59.
- [3] GALLI G, GRIMALDI A, LEONARDI A. Three-Dimensional Modelling of Tunnel Excavation and Lining[J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31(3): 171-183.
- [4] 李廷春. 毛羽山隧道高地应力软岩大变形施工控制技术[J]. *现代隧道技术*, 2011, 48(2): 59-67.
LI Tingchun. Large Deformation Control Technology for Maoyushan Tunnel in Soft Rock Under High In-Situ Stresses[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2011, 48(2): 59-67.
- [5] 许光磊. 软弱围岩隧道不同开挖方法施工力学响应数值模拟[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
XU Guanglei. The Numerical Analysis on Constructional Mechanical Responses of the Weak Surrounding Rock in Tunnel by Excavation Methods[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [6] 路刚. 三台阶七步开挖法黄土铁路隧道围岩变形规律研究[J]. *土工基础*, 2012, 26(6): 54-58.
LU Gang. Surrounding Rock Mass Deformation of Tunnel in Loess Constructed Using Three-Benches-Seven-Steps Excavation Method[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2012, 26(6): 54-58.
- [7] 黄沛, 王华峰, 邓祥辉. 大断面隧道三台阶七步开挖法仿真分析[J]. *工程勘察*, 2018, 46(1): 9-14.
HUANG Pei, WANG Huafeng, DENG Xianghui. Numerical Simulation of the Large Cross-Section Tunnel Excavation by 3-Bench and 7-Step Method[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2018, 46(1): 9-14.
- [8] 刘招伟, 李建华. 台阶法(带仰拱)一次开挖施工技术在软岩隧道中的应用[J]. *隧道建设*, 2018, 38(2): 287-294.
LIU Zhaowei, LI Jianhua. Application of One-Time Excavation Method of Bench and Inverted Arch to Soft Rock Tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 2018, 38(2): 287-294.
- [9] 马栋, 孙毅, 王武现, 等. 高地应力软岩隧道大变形控制关键技术[J]. *隧道建设*, 2021, 41(10): 1634-1643.
MA Dong, SUN Yi, WANG Wuxian, et al. Key Technologies for Controlling Large Deformation of Soft Rock Tunnels with High Geostress[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(10): 1634-1643.
- [10] LIANG X T, SHI Z R. Treatment Technology for Large Deformation of Tunnel Passing Through Soft and Fragmented Zone[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2011(1): 012042.
- [11] YUAN Q, CHEN S H, XIAO J, et al. Research on Large Deformation Mechanism and Countermeasures of Shallow Buried Soft Rock Tunnel with Abundant Water[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 783(1): 012004.
- [12] WAN F, FU C T, ZHOU C W, et al. Analysis of Deformation and Failure Characteristics of Soft and Broken Surrounding Rocks of Super-Large Section Tunnel Constructed Using Benchining Tunneling Method[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 769(3): 032058.
- [13] 喻军, 刘松玉. 隧道洞口边坡变形控制与数值分析[J]. *浙江工业大学学报*, 2012, 40(1): 101-105.
YU Jun, LIU Songyu. Numerical Analysis and Control of the Deformation of the Slope at the Entrance of Tunnel[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2012, 40(1): 101-105.

(责任编辑: 廖友媛)