

文章编号: 1674—8247(2023)01—0007—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 01. 002

# 破碎板岩隧道两台阶带仰拱一次开挖工法特性研究

崔光耀<sup>1</sup> 熊泳<sup>1</sup> 王庆建<sup>2</sup>

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中铁隧道集团四处有限公司, 南宁 530000)

**摘要:**为保证破碎板岩隧道施工的安全性及稳定性,本文以玉磨铁路立新隧道为研究背景,对破碎板岩隧道的破坏特征和工法特性进行了研究。结果表明:(1)破碎板岩隧道的破坏特征可分为应力重分布作用下的层理破坏、重力作用下的块体滑落、掉块导致的大范围塌方3个阶段;(2)两台阶带仰拱一次开挖工法较传统台阶法拱顶沉降最大值减小10.66%,仰拱隆起最大值减小8.22%;开挖阶段最大水平位移值减小7.92%;(3)两台阶带仰拱一次开挖工法下收敛值较传统台阶法有所减小,控制效果为12.22%;(4)在支护完成时,两台阶带仰拱一次开挖工法较传统台阶法最大主应力、最小主应力、最大剪切应力分别减小14.29%、13.33%、13.17%;(5)破碎板岩隧道中两台阶带仰拱一次开挖工法优于传统台阶法。研究成果可为破碎板岩隧道的安全施工提供参考。

**关键词:**破碎板岩;两台阶带仰拱一次开挖工法;破坏特征;数值模拟

**中图分类号:** U455.4 **文献标识码:** A

## Study on the Continuous Two-bench Excavation Method for Inverts of Tunnels in Broken Slate

CUI Guangyao<sup>1</sup> XIONG Yong<sup>1</sup> WANG Qingjian<sup>2</sup>

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. China Railway Tunnel Group, Nanning 530000, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety and stability of the construction of the tunnels in broken slate, a case study of the Lixin Tunnel of Yuxi-Mohan Railway is made to study the failure characteristics and construction method characteristics for the tunnels in broken slate. The results show that: (1) The failure characteristics of tunnels in broken slate can be divided into three stages: bedding failure under stress redistribution, block sliding under gravity, and large-scale collapse caused by block falling. (2) Compared with the conventional benching method, the maximum settlement of the crown excavated with the continuous two-bench excavation method for inverts is reduced by 10.66%, and the maximum uplift of the invert is reduced by 8.22%, and the maximum horizontal displacement in the excavation stage is reduced by 7.92%. (3) The convergence value of the continuous two-bench excavation method for inverts is reduced compared with the conventional benching method with a control effect of 12.22%. (4) When the support is completed, the maximum principal stress, minimum principal stress, and maximum shear stress of the continuous two-bench excavation method for inverts are reduced by 14.29%, 13.33%, and 13.17% respectively compared with those of the conventional benching method. (5) The continuous two-bench excavation method for inverts is superior to the traditional bench cut method

收稿日期: 2022-04-14

作者简介: 崔光耀(1983-),男,博士,教授。

基金项目: 国家自然科学基金(52178378);昆明铁路局科技项目重点课题(K17G43)

引文格式: 崔光耀,熊泳,王庆建. 玉磨铁路破碎板岩隧道两台阶带仰拱一次开挖工法特性研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 7-12.

CUI Guangyao, XIONG Yong, WANG Qingjian. Study on the Continuous Two-bench Excavation Method for Inverts of Tunnels in Broken Slate[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 7-12.

in tunnels of broken slate. The research results can provide a reference for the safe construction of tunnels in broken slates.

**Key words:** broken slate; continuous two-bench excavation method for invert; failure characteristics; numerical simulation

随着我国隧道建设的不断发展,交通选线不可避免地要穿越破碎板岩地带。如何选择合理的开挖技术,保证破碎板岩地带隧道的结构安全稳定是当前亟待解决的问题。

目前,国内外专家学者针对破碎板岩地带隧道的研究主要有:破碎板岩隧道开挖后的大变形机理<sup>[1]</sup>;破碎板岩物理力学性能、蠕变特性研究<sup>[2]</sup>;破碎板岩隧道塌方的处理方案<sup>[3-5]</sup>;破碎板岩隧道的变形特征<sup>[6-8]</sup>;破碎板岩隧道的变形控制技术<sup>[9-10]</sup>。然而,现有研究对于破碎板岩地带隧道的开挖技术优选分析较少。因此,本文以玉磨铁路立新隧道为依托,开展对隧道施工过程中两台阶带仰拱一次开挖工法研究,以保证隧道施工的安全性及稳定性。研究成果可为完善破碎板岩隧道施工技术的发展提供参考。

## 1 破碎板岩隧道破坏特征

破碎板岩隧道破坏特征为:应力重分布作用下的层理破坏、重力作用下的块体滑落、掉块导致的大范围塌方3个阶段。破碎板岩隧道的破坏过程如图1所示。该破坏过程往往会伴随严重的不良地质灾害,例如溜坍、漏砂、拱顶塌落变形、底鼓现象、以及围岩大变形。

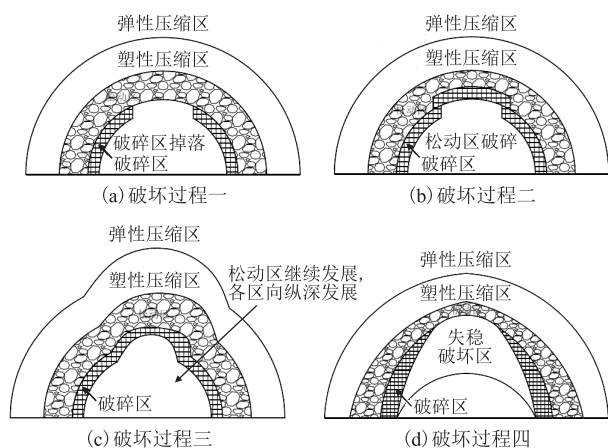


图1 破碎板岩隧道的破坏过程图

总结破碎板岩隧道破坏特征为:

(1)因支护不足,导致破碎板岩掉落,如图1(a)所示,该过程中极易发生拱顶掉块现象。

(2)因围岩应力重分布,松动区破碎板岩间摩擦

力逐渐减小甚至消失,导致此部分围岩成为松散岩体,如图1(b)所示。

(3)松散岩体继续发展,在支护未加强的情况下形成一定范围的坍塌,如图1(c)所示。此时围岩破碎,施工中周围的松散围岩极易发生失稳,从而产生不同程度的溜坍、漏砂现象。

(4)若坍塌范围较大、松散岩体范围继续扩大且未采取围岩加固措施,松散岩体处于不稳定状态,塌方将进一步扩展,如图1(d)所示。此时支护会产生不同程度的大变形,仰拱处产生底鼓现象,边墙向内大幅度变形。

## 2 工法特性研究情况

### 2.1 玉磨铁路立新隧道概况

#### 2.1.1 地质情况

玉磨铁路立新隧道隧址区岩层主要为远古界前震旦系地层,地层岩性较复杂,岩层主要为前震旦系昆阳群落雪组白云岩、板岩夹灰岩,绿汁江组白云岩、灰岩夹板岩,鹅头厂组板岩夹粉砂岩、局部夹炭质千枚岩等。本文研究主要基于立新隧道D1K 65+340~D1K 65+350段(Ⅳ级围岩)展开有限差分数值模拟。

#### 2.1.2 结构设计

立新段隧道结构为复合式衬砌,初支主要采用挂网喷射C25混凝土支护,厚25 cm,二衬采用C25模筑钢筋混凝土,厚50 cm。

### 2.2 计算情况

#### 2.2.1 计算模型

以立新隧道为背景建立计算模型,本构模型为弹塑性模型,屈服准则采用摩尔-库伦准则。模拟地层的范围为横向两端取3~5倍洞径,约60 m,总宽度为120 m;模型高度取3~5倍洞高,约60 m,隧道底部取3~5倍洞高,约60 m,竖向总高度为120 m。计算模型共有17 730个单元,24 212个节点。计算模型边界条件为:左右方向施加水平约束,下边界施加垂直约束,上边界不做约束。

#### 2.2.2 计算参数

以实际勘察资料为依据,立新隧道计算参数如表1所示。

#### 2.2.3 施工方案

表 1 计算模型参数表

类别	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚/ MPa	内摩擦 角/ $^{\circ}$
IV级围岩	20	1.3	0.35	0.2	27
加固圈	18	1.5	0.4	0.23	31
初支	23	20	0.2	—	—
仰拱	23	20	0.2	—	—

根据实际工程情况,拟对传统台阶法和两台阶带仰拱一次开挖工法进行优选分析,具体施工方案如下:

(1)传统台阶法

传统台阶法适用于围岩稳定性较好的工况,具体施作方法为:开挖上台阶及时进行上台阶的初期支护,再开挖下台阶并及时施作下导初期支护,然后再进行仰拱的开挖并及时施作仰拱混凝土、填充混凝土。

(2)两台阶带仰拱一次开挖工法

两台阶带仰拱一次开挖工法主要适用于单线铁路 IV、V 级围岩隧道,考虑到简易台架安放、人员操作空间及机械的最大操作半径,上台阶长度一般控制在 6~7 m。具体施作方法为:二台阶整体爆破,上台阶扒碴并喷射 C25 混凝土,下台阶仰拱出碴,喷射 C25 混凝土,上下台阶同时立拱,施工时采用 40 m 全配套移动栈桥。

两台阶带仰拱一次开挖工法示意如图 2 所示,与传统台阶法相比,两台阶带仰拱一次开挖工法对下台阶及仰拱同时进行开挖,并将仰拱初期支护与下台阶初期支护一并施作,这样可以使支护尽快封闭成环,以防止施工中的灾害产生。

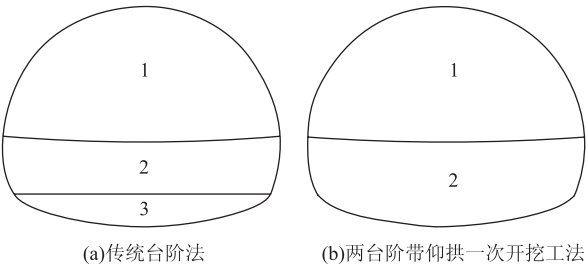


图 2 施工方法示意图

2.2.4 测点布置

为了解施工过程中围岩动态信息,据以判断围岩的稳定状态及施工的合理性,选取拱顶、拱肩、边墙、拱脚以及仰拱等 8 个控制点采集坑道周边位移及初期支护结构内部的受力及位移信息,并计算出上、下收敛值,测点布置如图 3 所示。

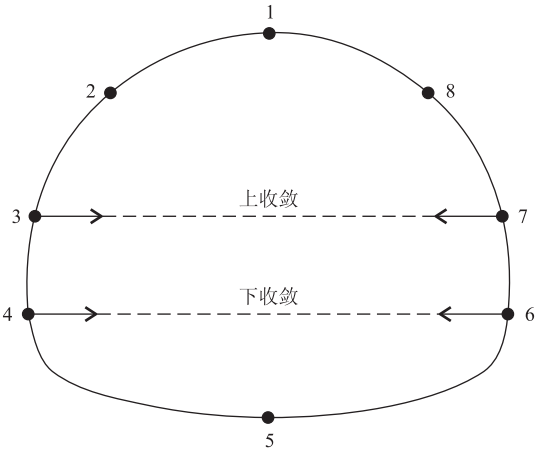


图 3 测点布置图

3 工法位移及力学特性

3.1 位移分析

3.1.1 竖向位移

计算得到的传统台阶法、两台阶带仰拱一次开挖工法的竖向位移云图如图 4 所示,最大拱顶沉降值、最大仰拱隆起值如表 2 和表 3 所示。

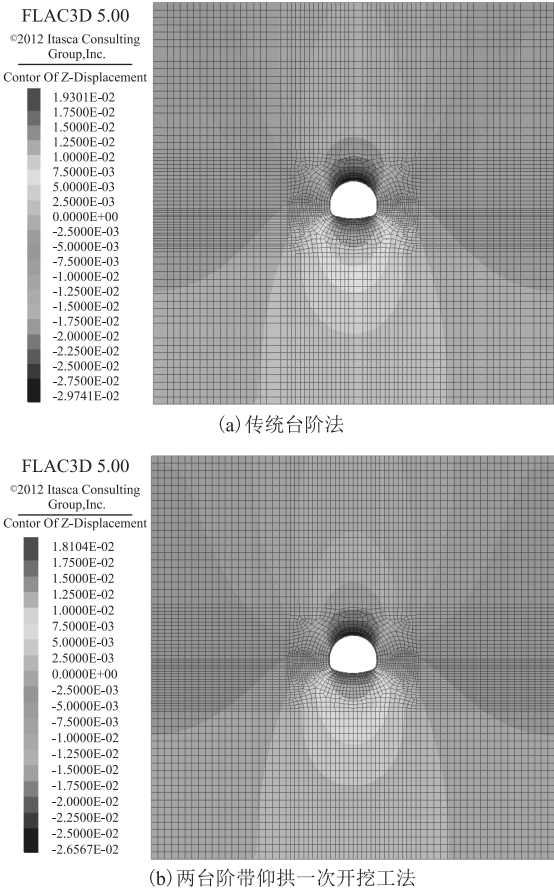


图 4 竖向位移云图

表 2 最大拱顶沉降值表			
施工步骤	传统台阶法/mm	两台阶带仰拱一次开挖工法/mm	控制效果/%
上台阶	22.40	20.67	7.72
下台阶/下台阶带仰拱	27.74	25.34	8.65
支护完成	29.74	26.57	10.66

表 3 最大仰拱隆起值表			
施工步骤	传统台阶法/mm	两台阶带仰拱一次开挖工法/mm	控制效果/%
上台阶	16.28	15.22	6.51
下台阶/下台阶带仰拱	19.93	18.87	5.32
支护完成	19.72	18.10	8.22

由图 4、表 2 及表 3 可知,传统台阶法开挖阶段最大竖向位移值为 29.74 mm,开挖上台阶时最大竖向位移值为 22.4 mm,两台阶带仰拱一次开挖工法所有施工阶段的最大竖向位移值及仰拱隆起均有所减小;两台阶带仰拱一次开挖工法拱顶沉降最大值为 26.57 mm,仰拱隆起最大值为 18.10 mm,较传统台阶法拱顶沉降最大值减小 10.66%,仰拱隆起最大值减小 8.22%。从控制拱顶沉降及仰拱隆起效果看,两台阶带仰拱一次开挖工法优于传统台阶法。

3.1.2 水平位移

计算得到的传统台阶法、两台阶带仰拱一次开挖工法在各施工步骤下的水平位移云图如图 5 所示,最大水平位移值、最大收敛值如表 4 及表 5 所示。

表 4 最大水平位移值表			
施工步骤	传统台阶法/mm	两台阶带仰拱一次开挖工法/mm	控制效果/%
上台阶	16.99	15.83	6.83
下台阶/下台阶带仰拱	20.35	19.45	4.42
支护完成	21.34	19.65	7.92

表 5 最大收敛值表			
收敛位置	传统台阶法/mm	两台阶带仰拱一次开挖工法/mm	控制效果/%
上台阶收敛	43.23	38.62	10.66
下台阶收敛	37.15	32.61	12.22

由图 5 和表 4 可知,传统台阶法开挖阶段最大水平位移值为 21.34 mm,开挖上台阶、下台阶时最大水平位移值分别为 16.99 mm、20.35 mm;两台阶带仰拱一次开挖工法最大水平位移值各施工步骤具有所减小;两台阶带仰拱一次开挖工法最大水平位移值为 19.65 mm,较传统台阶法开挖阶段最大水平位移值减小 7.92%,开挖上台阶、下台阶最大水平位移值分别

减小 6.83%、4.42%。从控制最大水平位移值效果看,两台阶带仰拱一次开挖工法优于传统台阶法。

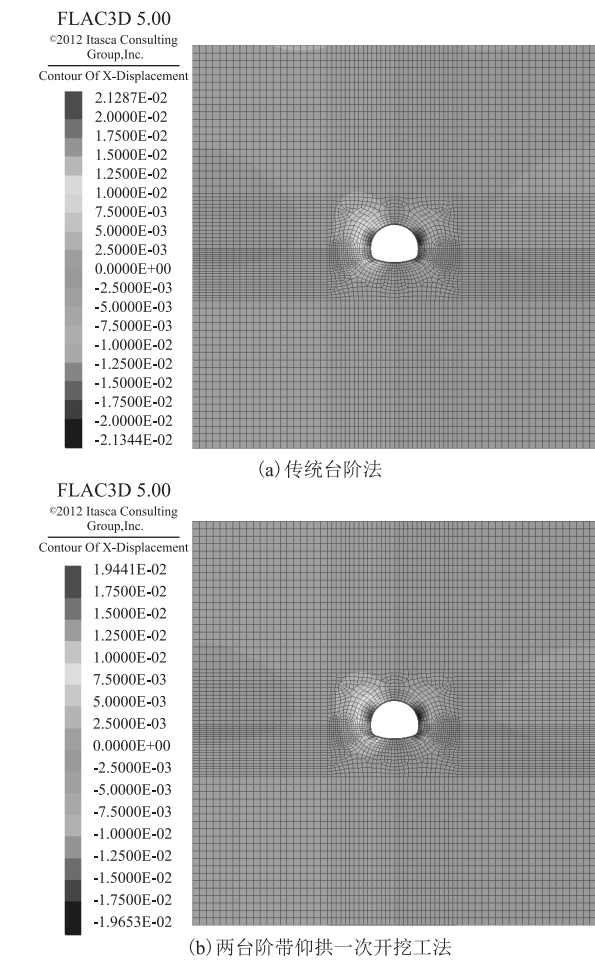


图 5 水平位移云图

由表 5 可知,传统台阶法最大收敛位移位于上收敛,最大值为 43.23 mm,两台阶带仰拱一次开挖工法最大收敛位移位于上收敛,最大值为 38.62 mm,较传统台阶法上收敛值减小 10.66%;两台阶带仰拱一次开挖工法下收敛值较传统台阶法有所减小,控制效果为 12.22%;从控制收敛效果看,两台阶带仰拱一次开挖工法优于传统台阶法。

3.2 应力分析

3.2.1 最大主应力

不同开挖工法的最大主应力云图如图 6 所示,施工过程最大主应力值如表 6 所示。

表 6 施工过程最大主应力值表			
施工阶段	传统台阶法/MPa	两台阶带仰拱一次开挖工法/MPa	控制效果/%
上台阶	0.34	0.31	8.82
下台阶/下台阶带仰拱	0.17	0.16	5.88
支护完成	0.21	0.18	14.29

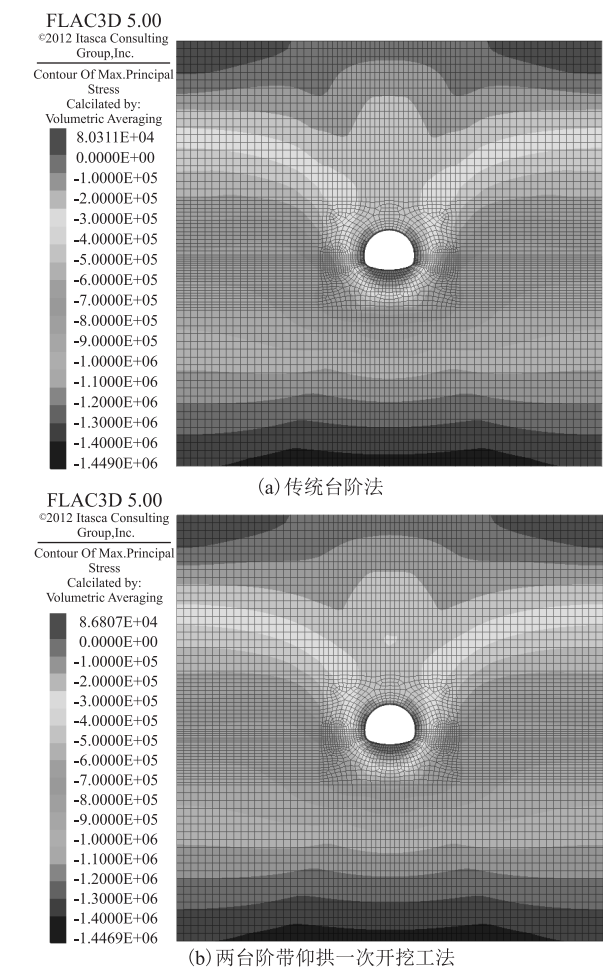


图 6 最大主应力云图

由图 6 和表 6 可知,传统台阶法开挖上台阶、下台阶、支护完成的最大主应力均大于两台阶带仰拱一次开挖工法,分别为 0.34 MPa、0.17 MPa、0.21 MPa;两台阶带仰拱一次开挖工法支护完成时最大主应力为 0.18 MPa,较传统台阶法开挖阶段最大主应力减小 14.29%,开挖上台阶、下台阶最大主应力分别减小 8.82%、5.88%;从控制最大主应力效果看,两台阶带仰拱一次开挖工法明显优于传统台阶法。

3.2.2 最小主应力

不同开挖工法的最小主应力云图如图 7 所示,施工过程最大主应力值如表 7 所示。

表 7 施工过程最小主应力值表			
施工阶段	传统台阶法/MPa	两台阶带仰拱一次开挖工法/MPa	控制效果/%
上台阶	1.16	1.13	2.59
下台阶/下台阶带仰拱	3.90	3.82	2.05
支护完成	4.95	4.29	13.33

由图 7 和表 7 可知,传统台阶法开挖上台阶、

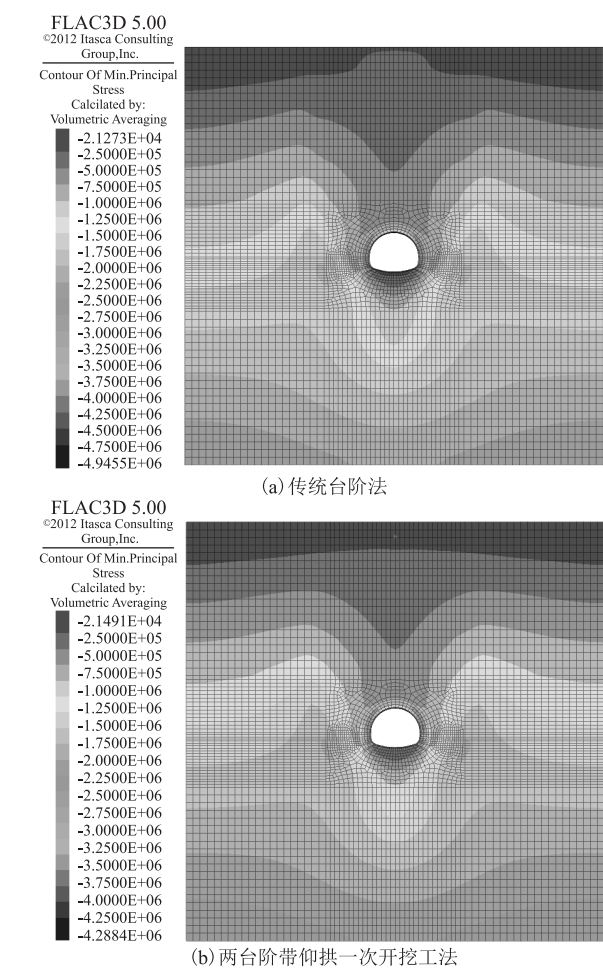


图 7 最小主应力云图

下台阶、支护完成的最小主应力均大于两台阶带仰拱一次开挖工法的最小主应力,分别为 1.16 MPa、3.90 MPa、4.95 MPa;两台阶带仰拱一次开挖工法支护完成时最小主应力为 4.29 MPa,较传统台阶法开挖阶段最小主应力减小 13.33%,开挖上台阶、下台阶最小主应力分别减小 2.59%、2.05%;从控制最小主应力效果看,两台阶带仰拱一次开挖工法优于传统台阶法。

3.2.3 最大剪切应力

不同开挖工法的最大剪切应力云图如图 8 所示,施工过程最大剪切应力如表 8 所示。

表 8 施工过程最大剪切应力值表			
施工阶段	传统台阶法/MPa	两台阶带仰拱一次开挖工法/MPa	控制效果/%
上台阶	0.49	0.43	12.24
下台阶/下台阶带仰拱	1.89	1.83	3.17
支护完成	2.43	2.11	13.17

由图 8 和表 8 可知,传统台阶法开挖上台阶、下

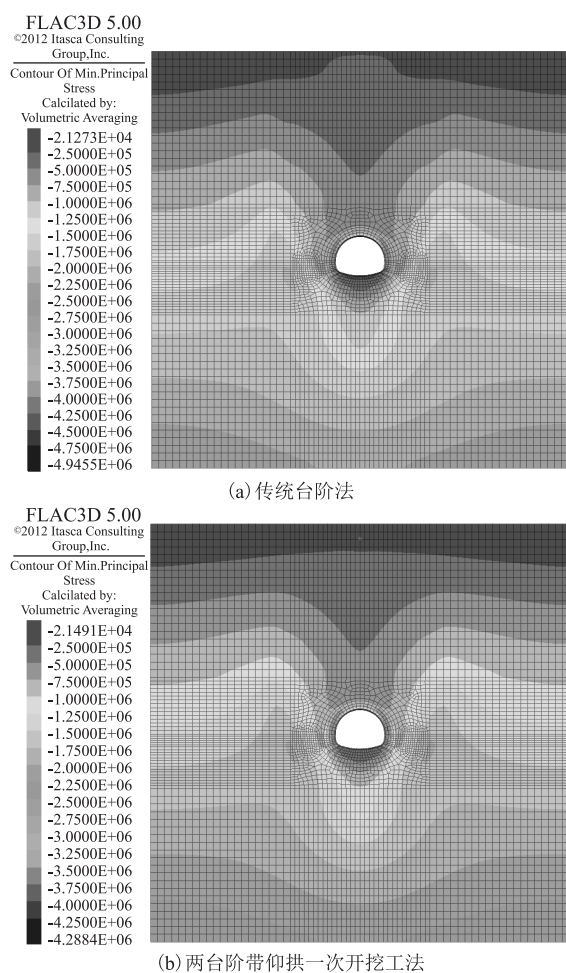


图8 最大剪切应力云图

台阶、支护完成的最大剪切应力均大于两台阶带仰拱一次开挖工法的最大剪切应力,分别为 0.49 MPa、1.89 MPa、2.43 MPa;两台阶带仰拱一次开挖工法支护完成时最大剪切应力为 2.11 MPa,较传统台阶法开挖阶段最大剪切应力减小 13.17%,开挖上台阶、下台阶最大剪切应力分别减小 12.24%、3.17%;从控制最大剪切应力效果看,两台阶带仰拱一次开挖工法明显优于传统台阶法。

## 4 结论

本文玉磨铁路立新隧道为研究背景,对破碎板岩隧道的破坏特征和工法特性进行研究,得到主要研究结论为:

(1) 破碎板岩隧道破坏特征为:应力重分布作用下的层理破坏、重力作用下的块体滑落、掉块导致的大范围塌方。

(2) 两台阶带仰拱一次开挖工法较传统台阶法拱顶沉降最大值减小 10.66%,仰拱隆起最大值减小

8.22%。从竖向位移控制效果看,两台阶带仰拱一次开挖工法优于传统台阶法。

(3) 两台阶带仰拱一次开挖工法较传统台阶法开挖阶段最大水平位移值减小 7.92%。两台阶带仰拱一次开挖工法下收敛值较传统台阶法有所减小,控制效果为 12.22%。

(4) 两台阶带仰拱一次开挖工法支护完成时较传统两台阶法开挖阶段最大主应力减小 14.29%。两台阶带仰拱一次开挖工法支护完成时较传统台阶法支护完成时最小主应力减小 13.33%。两台阶带仰拱一次开挖工法支护完成时较传统台阶法开挖阶段最大剪切应力减小 13.17%。

综上所述,两台阶带仰拱一次开挖工法优于传统台阶法,建议玉磨铁路破碎板岩Ⅳ级围岩段采用两台阶带仰拱一次开挖工法作为施工方案。

## 参考文献:

- [1] 涂瀚. 水平层状围岩隧道稳定性及破坏机理研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 75-79.
- TU Han. Research on the Stability and Failure Mechanism of Horizontal Layered Surrounding Rock Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(9): 75-79.
- [2] 左清军, 吴友银, 闫天玺. 特大断面板岩隧道施工期围岩变形时空效应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 233-243.
- ZUO Qingjun, WU Youyin, YAN Tianxi. Analysis of Time-Space Effect for Surrounding Rock Deformation in Super-Large Cross Section Slate Tunnel during Construction Period [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 233-243.
- [3] 张卫霞. 板岩隧道顺层塌方分析及预防失稳措施研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(S2): 218-224.
- ZHANG Weixia. Study and Countermeasure for Collapse Instability of Tunnel in Slate [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S2): 218-224.
- [4] 骆建军, 陈保忠, 宋扬, 等. 碳化泥质板岩大断面隧道围岩松动圈测试研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 1047-1055.
- LUO Jianjun, CHEN Baozhong, SONG Yang, et al. Experimental Research on Surrounding Rock Loose Circle of Carbide Argillaceous Slate Large Cross Section Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 1047-1055.
- [5] 冯迎军. 碳质板岩隧道塌方处理方案探讨[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 178-181.
- FENG Yingjun. Discussion of the Treatment of Collapse in a Tunnel Passing through Carbonaceous Slate [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 178-181.
- [6] 夏玉云, 姚晨辉, 周奎, 等. 粉砂质板岩隧洞围岩变形破坏特征及稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(3): 105-

(下转第19页)

- Characteristics of Jet Grouting Columns-Analytical Approach [C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. February 15 – 18, 2012, New Orleans, Louisiana, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012 : 2061 – 2070.
- [8] SHEN Shuilong, WANG Zhifeng, HORPIBULSUK S, et al. Jet Grouting with a Newly Developed Technology The Twin-Jet Method [J]. Engineering Geology, 2013, 152(1) : 87 – 95.
- [9] 翁承显. 地铁盾构隧道受高压旋喷桩挤土作用的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- WENG Chengxian. Study on a Subway Shield Tunnel under the Excess Pore Pressure by High-Pressure Jet Grouting [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [10] CHAI Jinchun, MIURA N, KOGA H. Lateral Displacement of Ground Caused by Soil-Cement Column Installation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5) : 623 – 632.
- [11] ZHOU H, LIU H, KONG G, et al. Analytical Solution for Pressure-Controlled Elliptical Cavity Expansion in Elastic-Perfectly Plastic Soil [J]. Géotechnique Letters, 2014, 4(2) : 72 – 78.
- [12] SHEN S L, WANG Z F, CHENG W C. Estimation of Lateral Displacement Induced by Jet Grouting in Clayey Soils [J]. Géotechnique, 2017, 67(7) : 621 – 630.
- [13] LIU Hanlong, ZHOU Hang, KONG Gangqiang, et al. High Pressure Jet-Grouting Column Installation Effect in Soft Soil: Theoretical Model and Field Application [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 88 : 74 – 94.
- [14] 吕若冰, 孔纲强, 沈扬, 等. 既有高速公路高压旋喷桩施工现场监测与数值模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6) : 752 – 757.
- LV Ruobing, KONG Gangqiang, SHEN Yang, et al. Construction Monitoring and Numerical Simulation of Existing Expressway Soft Foundation Treatment by High Pressure Jet Grouted Pile Technique [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6) : 752 – 757.
- [15] 王志丰, 沈水龙, 谢永利. 水平旋喷桩施工引起周围土体变形分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(4) : 1083 – 1088.
- WANG Zhifeng, SHEN Shuilong, XIE Yongli. Analysis of Soil Deformation Caused by Installation of Horizontal Jet Grout Column [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4) : 1083 – 1088.
- [16] 孙晓红, 孔维康, 李晓涛, 等. 双根水平旋喷桩施工地表隆起的计算与模拟[J]. 公路, 2020, 65(7) : 320 – 326.
- SUN Xiaohong, KONG Weikang, LI Xiaotao, et al. Calculation and Simulation of Surface Uplift Caused by Construction of Double Horizontal Jet Grouting Piles [J]. Highway, 2020, 65(7) : 320 – 326.
- [17] 刘志清. 软土地区铁路桥梁桥墩变位原因分析及整治措施[J]. 现代交通技术, 2014, 11(1) : 48 – 50.
- LIU Zhiqing. Cause Analysis and Treatment Measures for Deflection of Railway Bridge Pier in Soft Soil Areas [J]. Modern Transportation Technology, 2014, 11(1) : 48 – 50.

(上接第 12 页)

- 110.
- XIA Yuyun, YAO Chenhui, ZHOU Kui, et al. Deformation Failure Characteristics and Stability of Surrounding Rock of Silty-Slate Tunnel [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(3) : 105 – 110.
- [7] 于家武, 郭新新. 木寨岭公路隧道复合型大变形控制技术与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(9) : 1565 – 1576.
- YU Jiawu, GUO Xinxin. Composite Large Deformation Control Techniques for Muzhailing Highway Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(9) : 1565 – 1576.
- [8] 王明胜. 强风化炭质板岩隧道大变形控制技术研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(7) : 35 – 39.
- WANG Mingsheng. Research on the Large Deformation Control Technology of Strong Weathered Carbonaceous Slate Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(7) : 35 – 39.
- [9] 郭相武, 李彪, 肖仲红. 基于缝合地带软岩隧道大变形机理研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2) : 99 – 105.
- GUO Xiangwu, LI Biao, XIAO Zhonghong. Study on Large Deformation Mechanism of Soft Rock Tunnel in Suture Zone [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2) : 99 – 105.
- [10] 钟扬, 高超, 张海太. 长时间停工条件下炭质板岩地层隧道围岩变形及支护结构补强研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4) : 256 – 260.
- ZHONG Yang, GAO Chao, ZHANG Haitai. Study on Deformation of Surrounding Rock and Reinforcement of Supporting Structure for Carbonaceous Slate Stratum Tunnels during Long-Term Cessation [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4) : 256 – 260.