

富水玄武岩夹凝灰岩隧道围岩变形机制与施工技术研究

卫亚科

中铁十二局集团有限公司,山西 太原 030024



摘要:为解决富水玄武岩夹凝灰岩单洞大断面隧道在设计施工过程中存在的工法和支护参数确定等技术难题,依托云南新建高速铁路隧道项目,采用工程调研、现场监测和数值模拟等方法,开展富水玄武岩夹凝灰岩隧道围岩变形机制分析。研究结果表明:与三台阶开挖法相比,采用两台阶快速封闭成环的施工方法,通过迅速封闭初支,围岩变形得到有效控制,拱顶下降速率较小,约为37.9 mm,有效抑制了拱底进一步变形;两台阶法上导和中导监测点的净空收敛值是三台阶法的3.3倍,下导监测点的净空收敛值小于三台阶法。地下水主要沿着掌子面和各级台阶面渗出,两台阶法开挖时泄压范围和程度较小,拱顶上方存在大面积的高压区。两台阶法配合机械化施工技术,月平均施工进度提高约一倍。

关键词:玄武岩夹凝灰岩;高速铁路隧道;现场监测;围岩变形;施工技术

中图分类号:U25 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-1009-11 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.120

引用格式:卫亚科.富水玄武岩夹凝灰岩隧道围岩变形机制与施工技术研究[J].黄金科学技术,2025,33(5):1009-1019.WEI Yake.Study on Surrounding Rock Deformation Mechanism and Construction Technology of Water-rich Basalt with Tuff Tunnel[J].Gold Science and Technology,2025,33(5):1009-1019.

我国西南山区地层复杂多变,特别是云南地区玄武岩与凝灰岩接触带,玄武岩节理裂隙发育,地表水通过裂缝向下渗透,极大地降低了围岩力学性能,易出现隧底承载力不足、塌方、涌水突泥和初支大变形等问题,给铁路隧道建设带来极大的安全隐患(Sun et al, 2023; Song et al, 2025)。隧道开挖工法经过长期的实践与发展,针对不同的隧道围岩等级,形成了较为全面的施工工法体系。《铁路隧道设计规范》(TB10003-2016)规定:IV级围岩推荐采用台阶法或分部开挖法(国家铁路局,2017)。在两台阶法、两台阶预留核心土法、三台阶法、三台阶预留核心土法和CD法(Cross Diaphragm Method)等不同开挖方法在软岩地层变截面铁路隧道围岩变形控

制中,三台阶预留核心土法可有效控制围岩变形(普红祥等,2023;梁淦波等,2024)。

城市深埋特大断面隧道结构可采用交叉中隔墙法、台阶法和双侧壁导坑法3种分部开挖法,其中双侧壁导坑法施工后隧道围岩位移较小,整体结构安全稳定(朱鹏霖等,2022)。在土砂分界地层隧道施工中,双侧壁导坑法最为适用(王志杰等,2021)。双侧壁导坑法在双向八车道连拱隧道IV、V级围岩隧道中可以充分地发挥围岩和初期衬砌的自承能力(许崇帮等,2009)。与CD法相比,三台阶法施工效率高,但围岩塑性区大,稳定性低(黄小明等,2023)。在IV级围岩小净距隧道施工中,上下台阶法为IV级围岩条件下陡坡小净距隧道的合理

收稿日期:2025-02-27;修订日期:2025-06-22

基金项目:重庆市自然科学基金项目“重庆地区强降雨诱发碎裂节理化软岩浅埋隧道大变形失稳演化机理研究”(编号:CSTB2023NSCQ-MSX0082)和住房和城乡建设部研究开发项目“城市复杂环境扰动因素对既有建筑多维度安全风险评价技术研究”(编号:2022-K-040)联合资助

作者简介:卫亚科(1983—),男,甘肃平凉人,高级工程师,从事岩土工程和地下工程等施工技术及工程管理工作。E-mail:wei_yake@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

施工方法(张其来等,2016)。在高地应力场软岩隧道中,三台阶法对围岩的扰动较小(代聪等,2020)。在富水隧道中,微台阶法则更为适用(鲁军纪等,2023;Shao et al,2025;Wang et al,2025)。穿越软岩破碎带超大断面隧道采用台阶法有利于控制收敛变形,沉降变形相差较小(李利平等,2012;刘聪等,2018;刘宽等,2024)。随着工程建设技术不断发展,全断面法在破碎围岩隧道开挖施工中逐渐得到推广(田佳等,2012;Huang et al,2019;赵文等,2021),在小断面(50 m²)的IV级围岩隧道中可使用全断面法(莫振谨,2018)。在软弱围岩中,宜采用机械化全断面施工法,减少对围岩的扰动(于丽等,2018)。在隧道全断面开挖中,处理好掌子面前方的“待挖核心体”是控制此类隧道整体稳定性的关键(梅志荣等,2008)。同时,地层特性对全断面施工装备性能也有显著影响(Jain et al,2014)。

现有研究虽在隧道开挖工法与常规地层适应性方面有一定积累,但针对西南山区尤其是云南玄武岩与凝灰岩接触带特殊地质条件的研究存在明显不足,缺乏不同工法对涌水突泥、围岩大变形等难题的系统研究,工法性能的量化对比与评价体系不完善,难以满足该区域复杂地质条件下的工程需求。本文依托云南新建高速铁路隧道工程,采用现场调研、施工监测和数值计算,对比分析两台阶一次快速封闭成环开挖方法和三台阶法在富水玄武岩夹凝灰岩地层隧道施工中的适用性,为富水玄武岩夹凝灰岩隧道的快速建造提供参考。

1 工程概况

云南某高速铁路隧道为单洞双线大断面隧道,开挖断面面积约为150 m²,全长为16.46 km。隧道穿越云贵高原滇东北山区,隧道岩性以玄武岩和凝灰岩为主,玄武岩和凝灰岩软弱结合面和密集构造节理面交错组合,导致围岩整体稳定性极差。DK574+000~DK574+750区段为二叠系安山玄武岩,穿越FW₇断层和塘塘地断层,隧道地质条件如图1所示。

根据掌子面地质素描报告,DK574+270掌子面(断面A)岩性为青灰和黄褐色玄武岩。岩体节理裂隙发育,呈块石和碎石状,主要测得一组节理,产

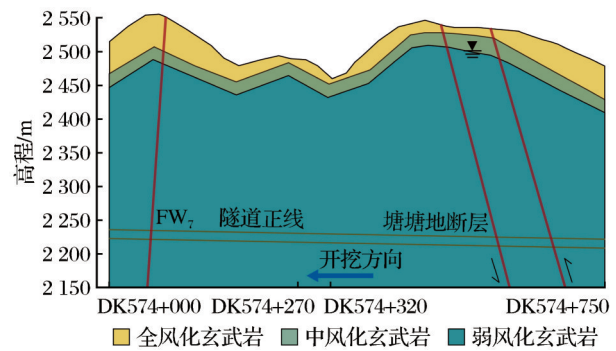


图1 隧道地质概况

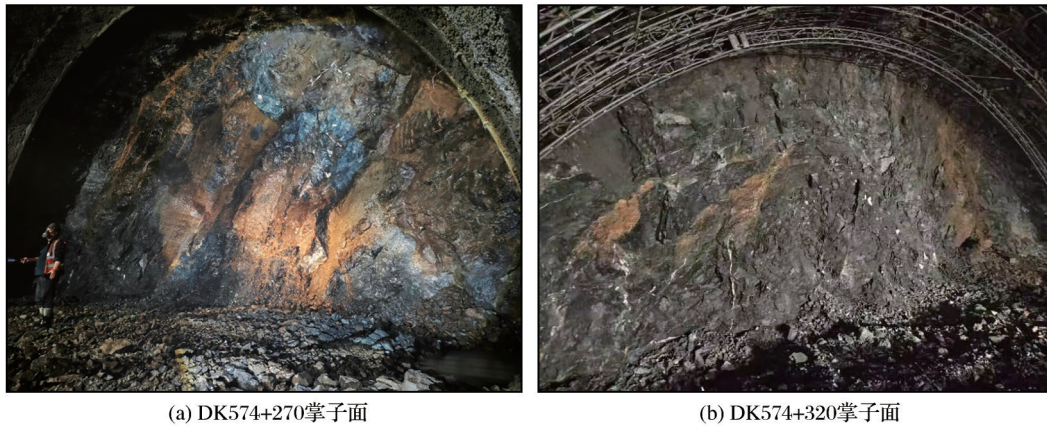
Fig. 1 Overview of tunnel geology

状为J1:N53°W/76°N,节理面为泥质填充,掌子面湿润,右拱腰及拱顶处线状出水。DK574+320掌子面(断面B)岩性为青灰和黄褐色玄武岩,弱风化,岩体较破碎,呈块石和碎石状。节理裂隙较发育,主要测得一组节理,产状为J1:N38°W/58°N,泥质充填,掌子面湿润,右拱腰及拱顶处线状出水,如图2所示。断面A采用两台阶法施工,断面B采用三台阶法施工。掌子面超前支护采用φ42超前小导管(隧道中心150°范围),长度为4.5 m,环向间距为50 cm,外插角为10°,水平搭接150 cm。初期支护中,拱墙采用长度为3.5 m的φ22锚杆支护,间距为1.2 m;钢架为4C22格栅,间距为1 m;喷射C25混凝土,厚度为25 cm。隧道断面参数及支护参数见图3。

2 围岩变形监测

为了监测施工过程中的围岩变形,确保施工安全,对围岩的拱顶沉降和净空收敛进行监测。除了设置拱顶沉降监测点外,当采用两台阶开挖方式时,在上下台阶处各设一条水平测线。当采用三台阶开挖方式时,在上、中、下台阶处各设一条水平测线,如图4所示。根据监测点现场监控量测得到位移变形量数据,绘制单洞双线隧道段断面A和断面B监测点位移变形量随时间的变化曲线,如图5所示。隧道开挖后,围岩应力重分布,初支未及时封闭成环,围岩变形量增长较快。当掌子面开挖15 d后,初支形成闭环,变形量最终趋于收敛。

采用两台阶方法开挖时,上台阶开挖完成后,及时施工上台阶初支,相对于三台阶开挖方法,拱顶下降速率较小。但是,随着掌子面继续开挖,2种



(a) DK574+270掌子面

(b) DK574+320掌子面

图2 掌子面围岩

Fig. 2 Surrounding rock of palm surface

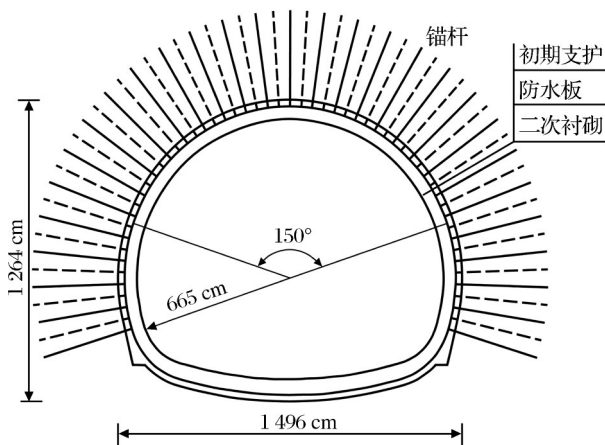
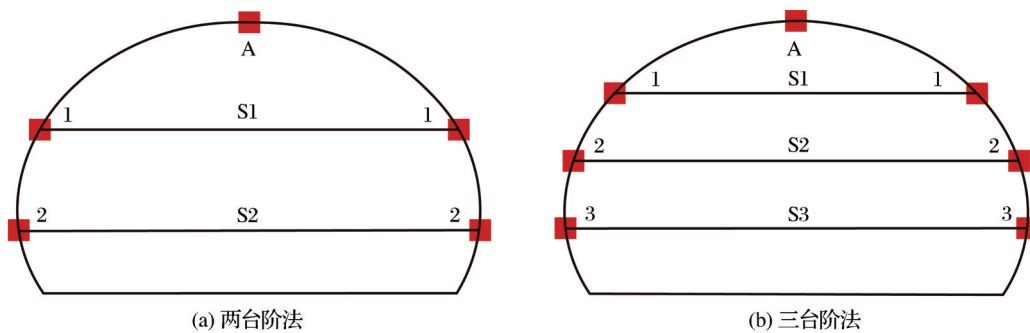


图3 隧道断面图

Fig. 3 Cross section diagram of the tunnel

方式的拱顶沉降收敛值相差较小,约为38.5 mm。采用三台阶法开挖时,施工工序复杂,效率较低,围岩暴露时间延长,导致下导净空收敛值较大。两台阶法测线S1对应的跨度大于三台阶法,上台阶开挖后,上导净空收敛值大于三台阶法。采用三台阶法开挖时,开挖中台阶时变形量明显增大,而当隧道下台阶开挖时,洞周变形又有所增加,变形速率仍较大,但随着仰拱衬砌施工完后,监测断面的水平收敛及拱顶下沉量趋于收敛。现场实地监控量测数据表明,两台阶开挖法中仰拱快速封闭成环,控制变形效果较好,能够满足该隧道位移控制要求,隧道围岩在开挖过程中不产生过大变形。



(a) 两台阶法

(b) 三台阶法

图4 隧道围岩变形测点布置图

Fig. 4 Measuring point layout of tunnel surrounding rock deformation

3 流固耦合数值分析

3.1 流固耦合计算方法

流固耦合计算过程采用有限差分法,流体在岩

土体基质中渗流,服从达西渗流定律,且满足 Biot 方程,计算过程主要涉及以下方程(李地元等,2007):

(1)平衡方程。对于小变形情况,流体质点平衡方程为

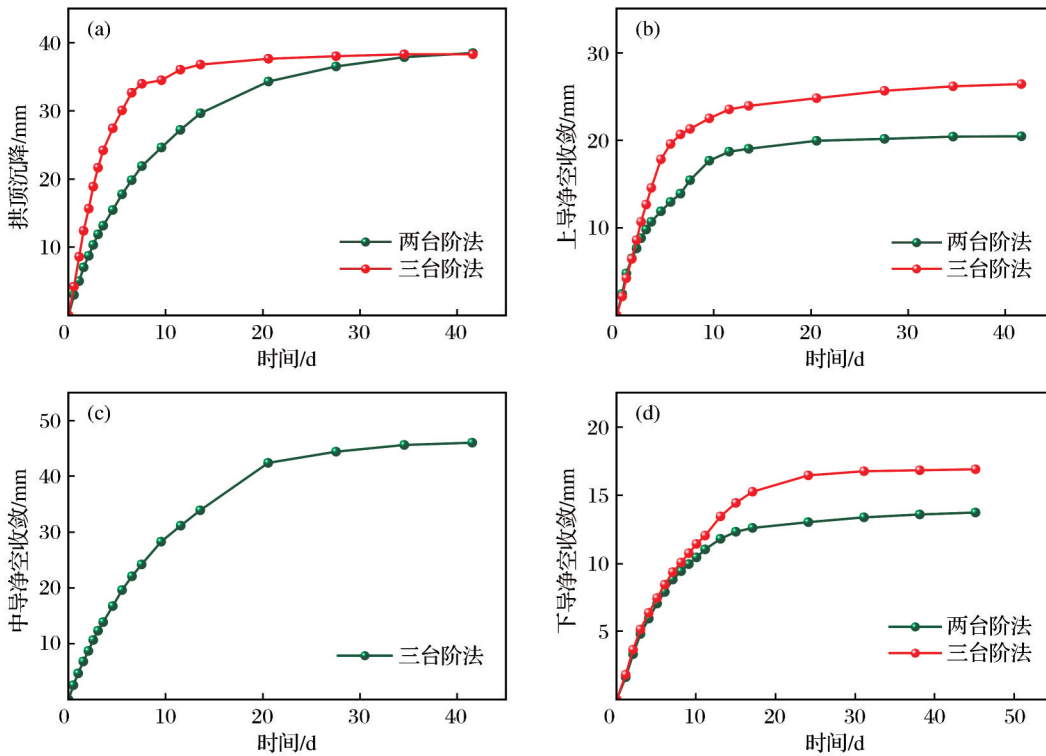


图5 现场监测围岩变形时程曲线

Fig. 5 On-site monitoring time history curves of surrounding rock deformation

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

式中： $-q_{i,i}$ 为渗流速度(m/s)； q_v 为流体源强度(s^{-1})； s 为单位体积孔隙介质的流体体积变化量。

对于饱和岩土体，则有：

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中： M 为比奥模量(N/m^2)； p 为孔隙水压力(Pa)； α 为比奥系数； ε 为体积应变； T 为温度($^{\circ}C$)； β 为热膨胀系数($^{\circ}C^{-1}$)。

动量平衡方程为

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (3)$$

式中： $\sigma_{ij,j}$ 为应力张量的散度； ρ 为体积密度(kg/m^3)， $\rho = (1-n)\rho_s + \rho_w$ ，其中， ρ_s 和 ρ_w 分别为固体和液体的密度， n 为多孔介质孔隙率； g_i (1,2,3)为重力加速度的3个分量(m/s^2)； v_i (1,2,3)为质点运动速度的3个分量(m/s)。

(2) 运动方程。流体渗流过程采用达西定律表征，均质各向同性的固体和常密度流体运动方程为

$$q_i = -k(p - \rho_w x_j g_j)_{,i} \quad (4)$$

式中： k 为基质的渗透系数[$m^2/(Pa \cdot s)$]。

(3) 本构方程。孔隙介质体积发生变化，导致孔隙压力变化，同时孔隙压力变化也造成孔隙介质体积变化。孔隙介质本构方程的增量形式为

$$\Delta \sigma_{ij} + \alpha \Delta p \delta_{ij} = H_{ij}(\sigma_{ij}, \Delta \xi_{ij}) \quad (5)$$

式中： σ_{ij} 为应力张量； $\Delta \sigma_{ij}$ 为应力增量； Δp 为孔隙水压力增量； δ_{ij} 为Kronecher因子； H_{ij} 为给定函数； $\Delta \xi_{ij}$ 为总应变增量。

(4) 相容方程。应变率和速度梯度的关系式为

$$\dot{\xi}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (6)$$

(5) 边界条件。流固耦合计算过程中包括4种孔压边界条件：固定孔压边界，给定边界外法线方向流速分量，不透水边界，透水边界。其中，透水边界采用如下形式：

$$q_n = h(p - \rho_e) \quad (7)$$

式中： q_n 为边界外法线方向流速分量； h 为渗漏系数[$m^3/(N \cdot s)$]； ρ_e 为渗流出口处孔隙压力。

3.2 隧道台阶法开挖数值模型

为了进一步验证不同分部开挖工法在富水玄武岩夹凝灰岩地层中的适用性，结合FLAC^{3D}有限

差分计算方法,建立隧道里程在DK574+245~DK574+345范围的流固耦合数值模型,如图6所示。模型尺寸为100 m×70 m×70 m(长×宽×高)。玄武岩的物理力学参数通过室内试验和工程经验确定,岩体采用理想弹塑性模型,遵循摩尔-库伦屈服准则,衬砌采用弹性模型,具体参数见表1。小导管和锚

杆分别采用梁单元和杆单元模拟,尺寸与实际工程一致(图6)。隧道地层的地下水位接近于地表,数值模型中将水位设置在模型上表面。隧道上覆226.27 m岩体以附加荷载的形式施加在模型上表面。在模型四周和底部施加法向位移约束,并进行地应力平衡,计算结果如图7所示。

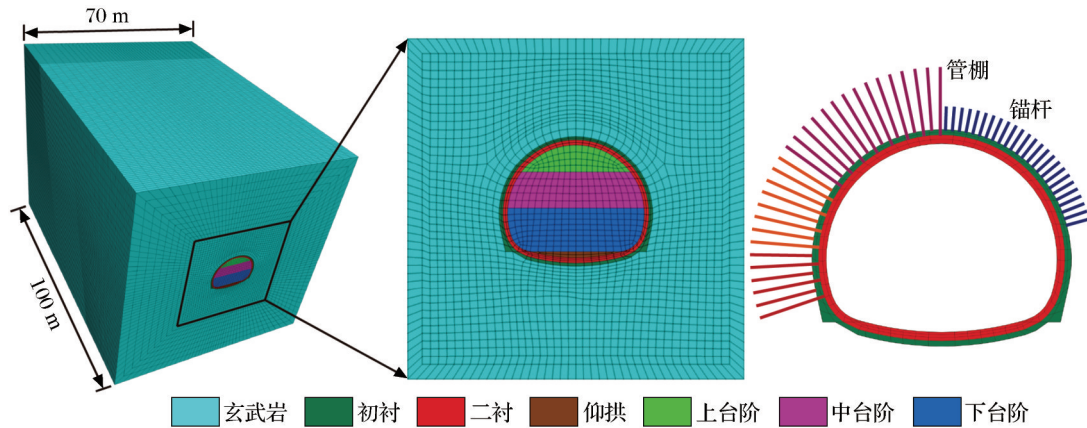


图6 隧道数值模型

Fig. 6 Numerical model of tunnel

表1 围岩与支护结构计算参数

Table 1 Calculation parameters of surrounding rock and supporting structure

| 名称 | 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 黏聚力/MPa | 摩擦角/($^{\circ}$) |
|--------|--------------------------------------|----------|------|---------|--------------------|
| 玄武岩 | 2 050 | 1 420 | 0.36 | 0.19 | 30.6 |
| 小导管注浆区 | 2 340 | 4 460 | 0.32 | 0.70 | 50.0 |
| 初衬 | 2 500 | 2 650 | 0.20 | | |
| 二衬 | 2 500 | 2 500 | 0.22 | | |

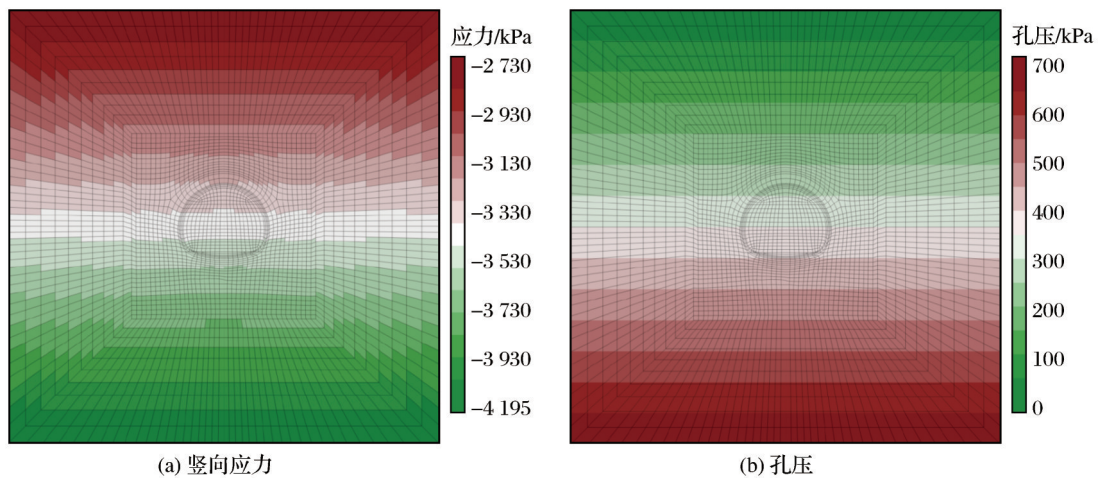


图7 地应力平衡结果

Fig. 7 Balance results of ground stress

3.3 围岩变形分析

依据现场施工工序,断面A采用两台阶法施工,下台阶和仰拱同时开挖,并及时封闭初支。断面B采用三台阶法施工,三台阶法按照上台阶、中台阶右侧、中台阶左侧、下台阶右侧、下台阶左侧和仰拱的顺序开挖。每一个开挖循环进尺1.5 m。提

取断面A和断面B在隧道开挖过程中的围岩变形数据,绘制变形时程曲线如图8所示。通过调整围岩力学参数,使掌子面拱顶沉降与监测结果相互验证,掌子面三处水平净空收敛的变化规律与监测结果基本一致,但是由于现场围岩分布的离散性,在数值上存在一定差异,数值计算模型基本可行。

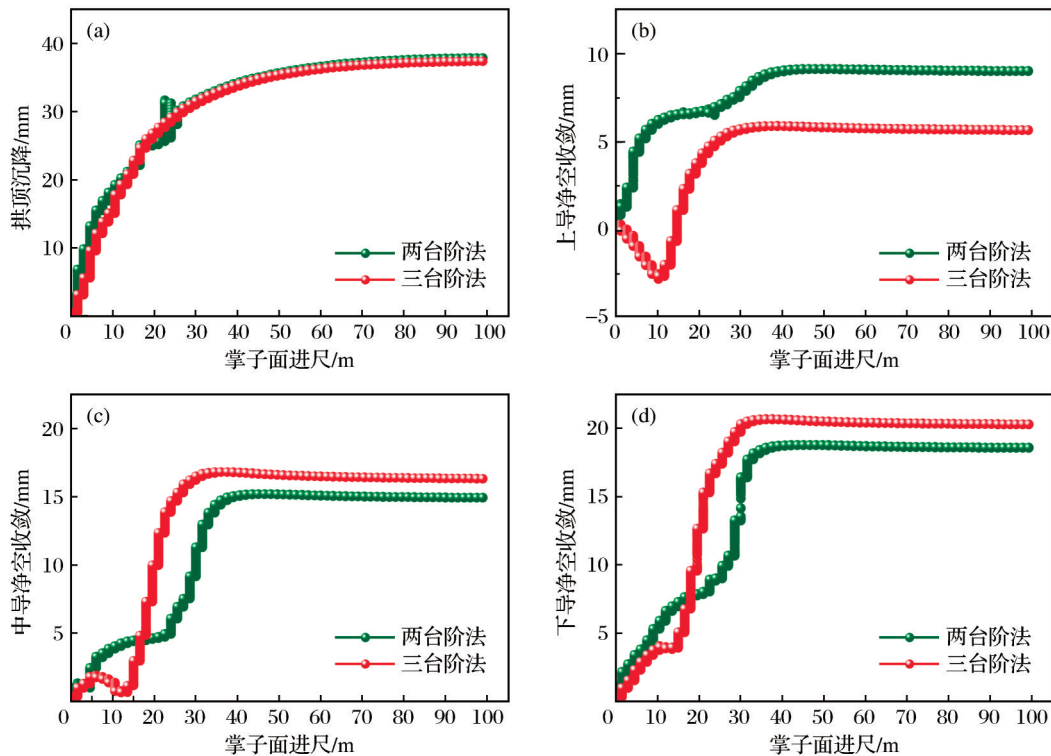


图8 数值计算围岩变形时程曲线

Fig. 8 Numerically calculated time history curves of surrounding rock deformation

隧道开挖后,围岩由于卸荷作用出现应力重分布,围岩变形方向指向已开挖区域,隧道掌子面顶板向下沉降,待开挖区域向上变形,掌子面水平净空变小,如图9所示。在上台阶开挖后,围岩松动区较小,尤其是三台阶开挖施工中,影响范围更为有限,两台阶法和三台阶法的拱顶沉降分别为28.5 mm和13.9 mm,2种开挖工法最终的拱顶变形值基本一致,分别为37.9 mm和37.4 mm。随着掌子面继续开挖,两台阶法施工速度快,拱底松动土体开挖后,迅速封闭初支,有效限制了拱底进一步变形,最终拱底变形较三台阶法小。

在掌子面开挖过程中,水平变形主要集中在开挖区域的拱脚和拱腰处,如图10所示。上台阶开

挖后,水平最大变形分别为7.5 mm和2.3 mm。随着掌子面继续开挖,水平位移最大位置向下移动,分布在拱墙处,同时影响区域向外侧呈蝶形扩展。

由于两台阶法上台阶开挖量与三台阶法上台阶和中台阶的开挖量相当,两台阶法中上导和中导监测点的净空收敛值和收敛速率均大于三台阶法。但是,在两台阶法中,下台阶与仰拱同时开挖并施工相应位置的初支,下导的净空收敛值小于三台阶法。

3.4 地下水渗流分析

隧道穿越富水地层,在隧道分部开挖数值计算过程中,每个分部开挖后,开展流固耦合计算,隧道孔压分布如图11所示,隧道开挖后形成明显的降

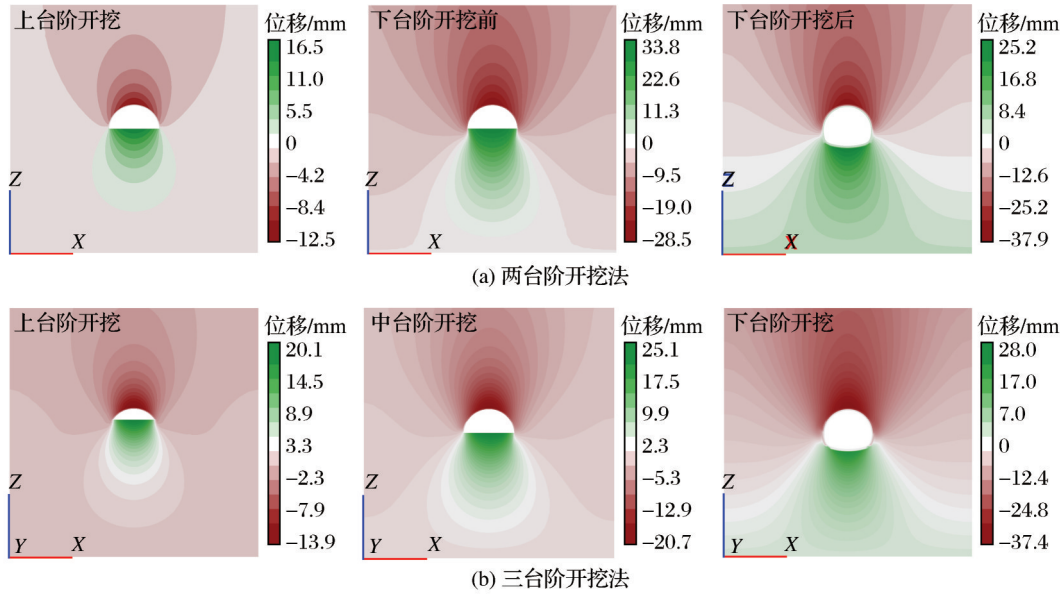


图9 围岩沉降

Fig. 9 Settlement of surrounding rock

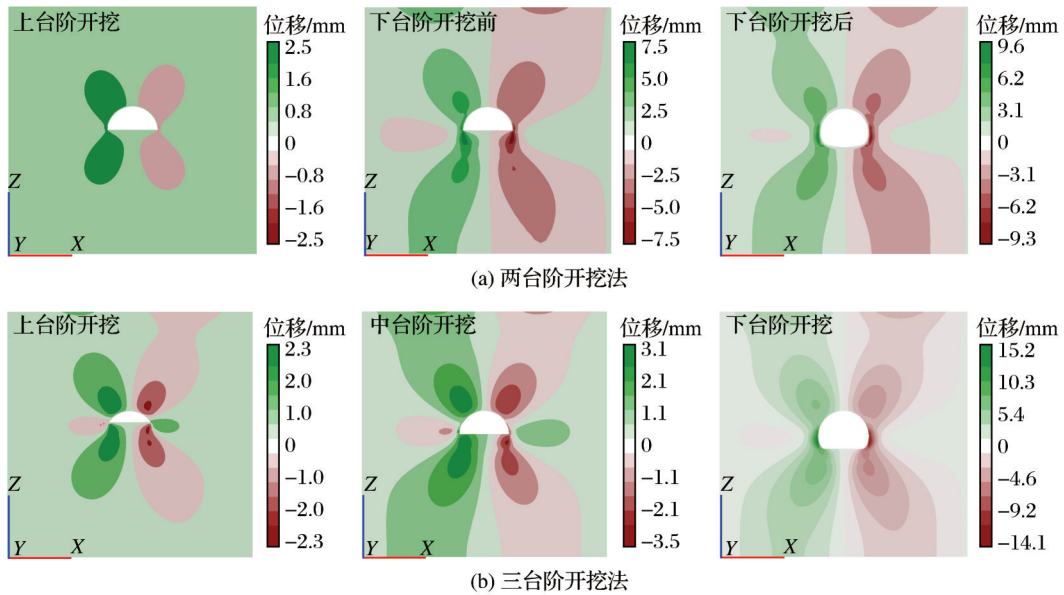


图10 围岩水平变形

Fig. 10 Horizontal deformation of surrounding rock

水漏斗。由于对隧道顶部进行了超前小导管注浆,并及时施工初期支护,地下水主要沿着掌子面和各级台阶面渗出。现场开挖过程中掌子面出水状况如图12所示,可以看到掌子面出现渗水,局部出现涌水现象。由孔压的纵断面和横断面分布规律可知,两台阶法施工中的初支封闭时间短,泄压范围和程度较三台阶法小,但是拱顶上方存在大面积的

高压区,为减少衬砌结构受力,可增加排水管将水引入边沟。

4 施工工效评价

通过对富水段落增加超前水平探孔,兼做隧道围岩泄水孔以及在初支背后增加盲管对围岩渗水

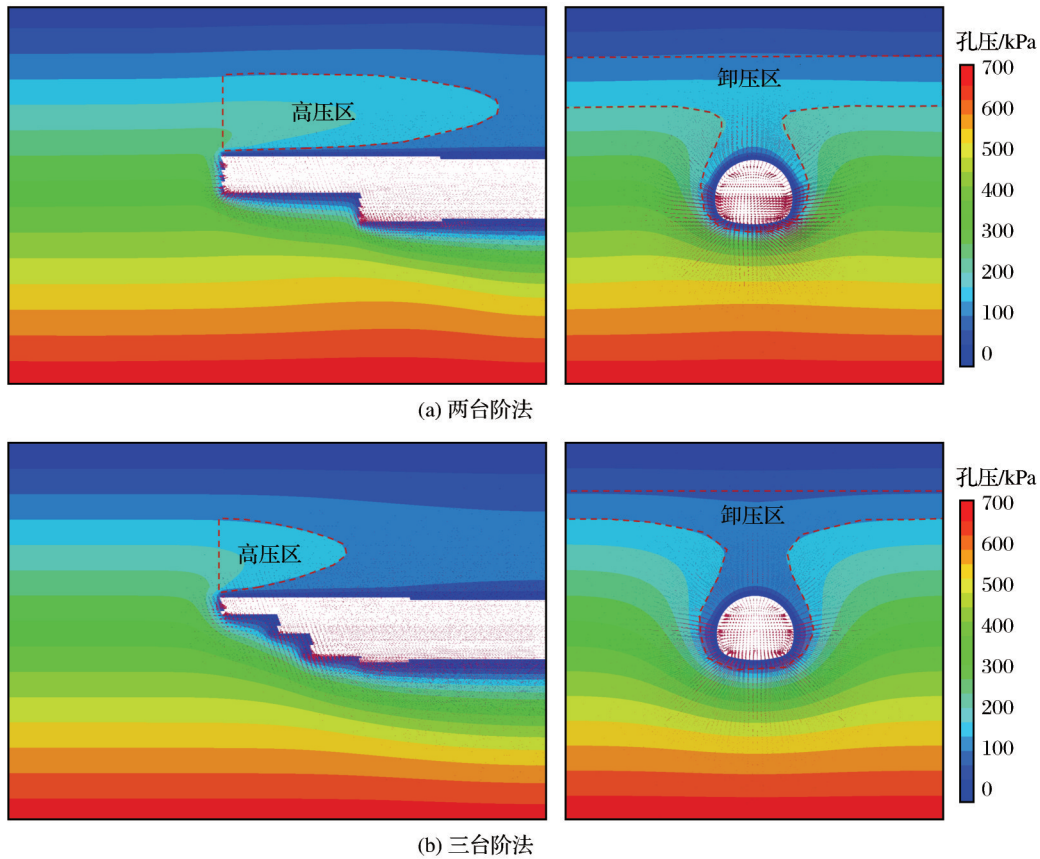


图 11 隧道孔压分布

Fig. 11 Pore pressure distribution of tunnel

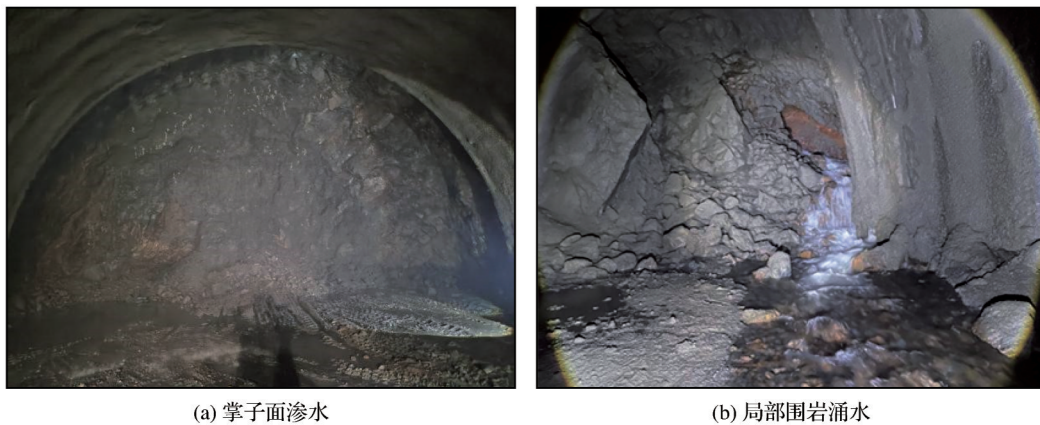


图 12 围岩涌水状况

Fig. 12 Water gushing condition of surrounding rock

集中引排措施释放围岩水压,保障施工安全。对比两台阶快速封闭成环的开挖方法和早期揭示玄武岩夹凝灰岩地质的三台阶施工方法,两台阶快速封闭成环的施工方法有效控制了开挖后围岩变形。2023年1月初首次揭示玄武岩夹凝灰岩地质时,掌

子面处于IV级围岩段落,开挖工法采用三台阶法,2023年1~6月月平均施工进度仅为66 m,极大影响了施工进度。采用两台阶快速封闭成环的开挖方法,同时采用大型机械化成套装备施工,2023年8~11月月平均施工进度为121 m,施工进度提升明

显,如图13所示。该高速铁路隧道采用两台阶一次快速封闭成环快速施工技术,遵守“超前探、明地质、泄水压、固围岩、短进尺、强支护、快成环、勤量测”的施工控制要点及施工原则,实现了富水玄武岩夹凝灰岩隧道施工安全、平稳和快速的目的。

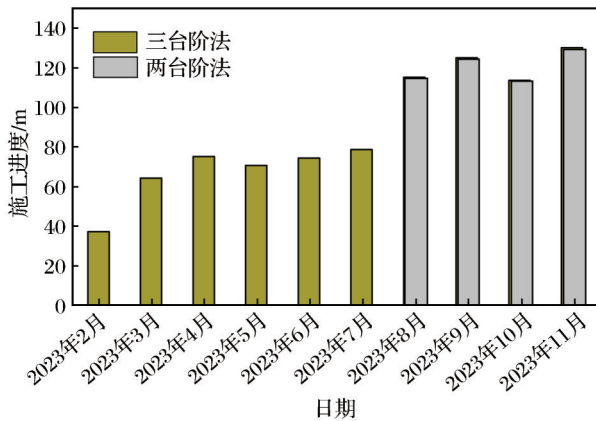


图13 掌子面施工进度

Fig. 13 Construction progress of palm surface

5 结论

(1)采用两台阶法开挖时,上台阶开挖完后,及时施工上台阶初支,相对于三台阶开挖方法,拱顶下降速率较小。随着掌子面继续开挖,2种开挖工艺的拱顶沉降收敛值相差较小,约为38.5 mm。两台阶法施工速度快,拱底松动土体开挖后,通过迅速封闭初支,有效抑制了拱底进一步变形。

(2)在掌子面开挖过程中,水平变形主要集中在开挖区域的拱脚和拱腰处。掌子面开挖完后,水平位移最大位置向下移动,分布在拱墙处,同时开挖卸荷影响区域向外侧呈蝶形扩展。两台阶法中上导和中导监测点的净空收敛值和收敛速率均大于三台阶法,下导的净空收敛值小于三台阶法。两台阶开挖法中仰拱可快速封闭成环,控制变形效果较好。

(3)隧道穿越富水地层,开挖后形成明显的降水漏斗,地下水主要沿着掌子面和各级台阶面渗出,两台阶法施工中的初支封闭时间短,泄压范围和程度较三台阶法小,拱顶上方存在大面积的高压区。

(4)采用两台阶快速封闭成环的开挖方法,同时采用大型机械化成套装备施工,遵守“超前探、明

地质、泄水压、固围岩、短进尺、强支护、快成环、勤量测”的施工原则,有效控制了开挖后围岩变形,月平均施工进度提高约一倍。

参考文献(References):

- Huang F, Wang Y, Wen Y B, et al, 2019. The deformation and failure analysis of rock mass around tunnel by coupling finite difference method and discrete element method[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 49(4): 421-436.
- Jain P, Naithani A K, Singh T N, 2014. Performance characteristics of tunnel boring machine in basalt and pyroclastic rocks of Deccan traps—a case study[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1): 36-47.
- Shao Y J, Ma G W, Zhang W, 2025. Large-scale 3D printed model test on seepage distribution in water diversion tunnel and surrounding fractured rock [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 158: 106389.
- Song Z C, Jing P Y, Nie L C, et al, 2025. Comprehensive identification and assessment of clastic rock and water-bearing breccia for water and mud inrush in tunnel: a case study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 155: 106156.
- Sun Z Y, Zhang D L, Fang Q, et al, 2023. Analysis of interaction between tunnel support system and surrounding rock for underwater mined tunnels considering the combined effect of blasting damage and seepage pressure [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 141: 105314.
- Wang P F, Zhang Q Y, Duan K, et al, 2025. Geo-mechanical model test on synergistic seepage control in a deeply buried water diversion tunnel under hydro-mechanical coupling conditions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 159: 106516.
- 代聪,何川,刘川昆,等,2020. 开挖工法对高地应力场软岩隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J]. *现代隧道技术*, 57(4): 141-149.
- Dai Cong, He Chuan, Liu Chuankun, et al, 2020. Model test study on influence of excavation methods on stability of surrounding rocks of the soft rock tunnel in high geostress field[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 57(4): 141-149.
- 国家铁路局,2017. 铁路隧道设计规范: TB 10003-2016[S]. 北京: 中国铁道出版社. National Railway Administration of the People's Republic of China, 2017. Code for design of railway tunnel: TB 10003-2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House.

- 黄小明,包世波,霍文星,等,2023.扁平特大断面隧道三台阶法、CD法开挖对比分析[J].公路,68(4):401-409. Huang Xiaoming, Bao Shibo, Huo Wenxing, et al, 2023. Comparative analysis of excavation of flat extra-large cross-section tunnel by three-step method and CD method [J]. Highway, 68(4):401-409.
- 李地元,李夕兵,张伟,等,2007.基于流固耦合理论的连拱隧道围岩稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,26(5):1056-1064. Li Di Yuan, Li Xibing, Zhang Wei, et al, 2007. Stability analysis of surrounding rock of multi-arch tunnel based on coupled fluid-solid theorem [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(5):1056-1064.
- 李利平,李术才,赵勇,等,2012.超大断面隧道软弱破碎围岩空间变形机制与荷载释放演化规律[J].岩石力学与工程学报,31(10):2109-2118. Li Liping, Li Shucai, Zhao Yong, et al, 2012. Spatial deformation mechanism and load release evolution law of surrounding rock during construction of super-large section tunnel with soft broken surrounding rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(10):2109-2118.
- 梁淦波,杨宝锋,祝鑫,2024.深汕西改扩建工程超大跨公路隧道设计与实践[J].隧道建设(中英文),44(增刊1):301-310. Liang Ganbo, Yang Baofeng, Zhu Xin, 2024. Design and practice of super-large span tunnel for Shenzhen-Shantou western expressway extension project [J]. Tunnel Construction, 44(Suppl.1):301-310.
- 刘聪,李术才,周宗青,等,2018.复杂地层超大断面隧道施工围岩力学特征模型试验[J].岩土力学,39(9):3495-3504. Liu Cong, Li Shucai, Zhou Zongqing, et al, 2018. Model test on mechanical characteristics of surrounding rock during construction process of super-large section tunnel in complex strata [J]. Rock and Soil Mechanics, 39(9):3495-3504.
- 刘宽,莫冠旺,李响,等,2024.超大断面扁平结构隧道施工参数优化研究[J].黄金科学技术,32(2):330-344. Liu Kuan, Mo Guanwang, Li Xiang, et al, 2024. Optimization of the construction parameters of super-large section flat structure tunnel [J]. Gold Science and Technology, 32(2):330-344.
- 鲁军纪,程鑫,闫小兵,等,2023.台阶法施工时台阶长度对富水隧道稳定性影响研究[J].矿冶工程,43(6):29-33,40. Lu Junji, Cheng Xin, Yan Xiaobing, et al, 2023. Influence of bench length in benching excavation on stability of tunnels in water-rich ground [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 43(6):29-33,40.
- 梅志荣,陈涛,2008.高速铁路隧道全断面预加固技术的应用研究[J].隧道建设,28(5):542-547. Mei Zhirong, Chen Tao, 2008. Research on application of full-face pre-reinforcing technology in high speed railway tunnel [J]. Tunnel Construction, 28(5):542-547.
- 莫振谨,2018.不同围岩级别下的隧道洞身开挖施工方法分析[J].西部交通科技,(8):151-155. Mo Zhenjin, 2018. Analysis of tunnel excavation construction method under different surrounding rock classifications [J]. Western China Communications Science & Technology, (8):151-155.
- 普红祥,郭德平,姚超凡,等,2023.软岩地层变截面铁路隧道开挖方法适应性试验研究[J].现代隧道技术,60(增刊1):104-111. Pu Hongxiang, Guo Deping, Yao Chaofan, et al, 2023. Experimental study on adaptability of excavation methods for railway tunnel with variable cross section in soft rock strata [J]. Modern Tunnelling Technology, 60(Suppl.1):104-111.
- 田佳,刘军,王改鹏,2012.三台阶七步法在大断面浅埋偏压软弱围岩隧道中的应用[J].隧道建设,32(增刊1):85-89. Tian Jia, Liu Jun, Wang Gaipeng, 2012. Application of three-bench seven-step excavation method in tunnels with large cross-section, shallow cover and asymmetrically-loaded soft and weak surrounding rocks [J]. Tunnel Construction, 32(Suppl.1):85-89.
- 王志杰,李金宜,徐海岩,等,2021.富水土砂分界地层隧道施工工法研究[J].铁道科学与工程学报,18(10):2660-2670. Wang Zhijie, Li Jinyi, Xu Haiyan, et al, 2021. Study on construction method of rich-water tunnel in soil-sand boundary stratum [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 18(10):2660-2670.
- 许崇帮,夏才初,朱合华,2009.双向八车道连拱隧道施工方案优化分析[J].岩石力学与工程学报,28(1):66-73. Xu Chongbang, Xia Caichu, Zhu Hehua, 2009. Optimum analysis of construction scheme of multi-arch tunnel with eight traffic lanes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(1):66-73.
- 于丽,蔡闽金,2018.郑万高铁隧道大型机械化配套全断面法施工围岩—支护结构相互作用力学特性研究[J].隧道建设(中英文),38(8):1316-1323. Yu Li, Cai Minjin, 2018. Study of mechanical properties of interaction between surrounding rock and supporting structure of Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway tunnel constructed by full-section method with large-scale machinery [J]. Tunnel Construction, 38(8):1316-1323.
- 张其来,金立丰,2016.大偏压小净距隧道施工方法分析[J].

- 公路工程, 41(4): 166-170. Zhang Qilai, Jin Lifeng, 2016. Analysis on reasonable construction method of steep slope tunnels with small interval [J]. Highway Engineering, 41(4): 166-170.
- 赵文, 王鑫, 柏谦, 2021. 原位扩建既有隧道竖井与主洞交叉段施工力学 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 42(5): 713-719. Zhao Wen, Wang Xin, Bai Qian, 2021. Construction mechanics of in situ expansion of the intersection of existing tunnel shaft and main tunnel [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 42(5): 713-719.
- 朱鹏霖, 申玉生, 连正, 等, 2022. 重庆深埋特大断面隧道变形特征及施工工法比选 [J]. 铁道建筑, 62(10): 122-125. Zhu Penglin, Shen Yusheng, Lian Zheng, et al, 2022. Deformation characteristics and construction method comparison of deep-buried super-large section tunnel in Chongqing City [J]. Railway Engineering, 62(10): 122-125.

Study on Surrounding Rock Deformation Mechanism and Construction Technology of Water-rich Basalt with Tuff Tunnel

WEI Yake

China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract: To address the technical challenges associated with the design and construction of large-section single tunnels in water-rich basalt with tuff strata, such as the determination of construction methods and support parameters, a comprehensive study was conducted. This study was based on a new high-speed railway tunnel project in Yunnan Province and employed engineering investigation, field monitoring, and numerical simulation to examine the deformation and control technology of the surrounding rock. The results indicate the following: (1) Implementing initial support immediately after excavating the upper bench using the two-bench method significantly reduces the crown settlement rate, achieving a final settlement of approximately 38.5 mm, thereby effectively limiting further deformation of the arch base. (2) During excavation, horizontal deformation is concentrated at the arch foot and waist. After excavation, the maximum horizontal displacement shifts downward to the arch wall, with the affected area expanding outward in a butterfly-like pattern. In the two-bench method, the monitoring points at the upper and middle benches exhibit greater clearance convergence values and rates compared to the three-bench method, whereas the lower bench shows smaller values. Additionally, the rapid closure of the invert in the two-bench method results in superior deformation control. (3) Tunneling through strata with high water content creates a dewatering funnel, where groundwater seeps out along the tunnel face and benches. The two-bench method reduces the initial support closure time, leading to decreased dewatering. However, it results in the formation of a high-pressure zone above the crown. (4) The installation of additional drainage pipes can mitigate the load on the lining structure. Furthermore, the integration of mechanized construction techniques with the two-bench method has approximately doubled the average monthly construction progress.

Key words: basalt with tuff; high-speed railway tunnel; field monitoring; surrounding rock deformation; construction technique