

全风化花岗岩浅埋偏压隧道进洞技术与力学特性研究

李冬生, 潘元贵, 郑余朝

Technology and mechanical properties of a shallow-buried biased tunnel approaching in fully weathered granite: A case study of Xiangsi Mountain tunnel

LI Dongsheng, PAN Yuanguai, and ZHENG Yuchao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全风化花岗岩地层中高固相离析浆液灌浆机理研究

A study of grouting mechanism of high solid phase segregation grout in fully weathered granite

赵钰, 郑洪, 曹函, 林飞, 王旭斌, 贺茉莉 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 78-88

深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例

A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: taking one tunnel of the Zhengwan line as an example

胡炜, 谭信荣, 蒋尧, 毛坚强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 60-68

西安地裂缝地段浅埋暗挖地铁隧道施工沉降规律

Settlement rules of shallow-buried metro tunnel construction in the Xi'an ground fissure section

徐明祥, 黄强兵, 王庆兵, 李明镠, 雷建 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 161-170

深埋小净距多线平行盾构掘进相互作用分析

An analysis of interaction of deep buried close approaching multi-line parallel shield tunneling

付钊, 柯宁静, 卢康明, 郭萧阳, 张孟喜 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 44-54

斜井盾构掘进时富水围岩变形特性模拟分析

A study of the rich-water ground rock deformation features as shield tunneling along with inclined shaft

马君伟, 王贤能, 林明博 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 126-131

非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟

Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil

蔡沛辰, 阙云, 李显 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 54-63



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401032

李冬生, 潘元贵, 郑余朝. 全风化花岗岩浅埋偏压隧道进洞技术与力学特性研究——以相思山隧道为例[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 214-227.

LI Dongsheng, PAN Yuangui, ZHENG Yuchao. Technology and mechanical properties of a shallow-buried biased tunnel approaching in fully weathered granite: A case study of Xiangsi Mountain tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 214-227.

全风化花岗岩浅埋偏压隧道进洞技术与 力学特性研究 ——以相思山隧道为例

李冬生¹, 潘元贵², 郑余朝²

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308;

2. 西南交通大学土木工程学院交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 隧道洞口作为隧道的咽喉部位, 时常存在浅埋偏压和围岩稳定性较差的问题。全风化花岗岩具有结构松散、自身稳定性较差、遇水易软化崩解的特点。然而, 目前针对全风化花岗岩浅埋偏压隧道洞口稳定性的研究还不够全面, 亟需提出一种适用于全风化花岗岩浅埋偏压隧道的进洞技术, 来解决这类隧道洞口易失稳的问题。为了研究全风化花岗岩浅埋偏压隧道洞口的稳定性, 以广东省新兴县相思山隧道为研究案例, 选定三台阶七步环形开挖预留核心土法作为隧道的进洞方法, 并根据选定的进洞方法, 通过数值模拟手段来分析围岩位移和支护内力的变化特征。研究发现, 在隧道深埋侧采用锚杆格梁和方格型骨架护坡能使边仰坡的安全系数提高 64.6%, 相较于传统方法, 在隧道进洞处和边坡坡脚设置锚固桩能提高浅埋侧 13.7% 和 10.1% 的抵抗力。由于受到深埋侧土体的挤压, 隧道表现出向浅埋侧水平位移的趋势。初支的监测位移与数值模拟结果相差较小, 最大差值仅为 6.5 mm, 位于拱顶处, 最小差值为 2.6 mm, 位于右墙脚处。采用三台阶七步环形开挖预留核心土法, 配合深埋和浅埋侧不同的支护措施能有效地提高全风化花岗岩浅埋偏压隧道的稳定性。研究结果可以为类似隧道工程的设计施工提供数据支持和工程借鉴。

关键词: 全风化花岗岩; 浅埋偏压隧道; 数值模拟; 围岩位移; 支护内力

中图分类号: U451.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0214-14

Technology and mechanical properties of a shallow-buried biased tunnel approaching in fully weathered granite: A case study of Xiangsi Mountain tunnel

LI Dongsheng¹, PAN Yuangui², ZHENG Yuchao²

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of MOE, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: As a critical part of a tunnel, the tunnel entrance often encounters issues of shallow burial under bias pressure and poor stability of the surrounding rock. Completely weathered granite is characterized by a loose

收稿日期: 2024-01-15; 修订日期: 2024-06-05

投稿网址: www.swdzcgdz.com

第一作者: 李冬生(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下和隧道工程设计与研究工作。E-mail: 47387935@qq.com

通讯作者: 郑余朝(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下工程科研与教学工作。E-mail: zhengyc218@126.com

structure, poor intrinsic stability, and a tendency to soften and disintegrate when exposed to water. However, the knowledge on the stability of shallow-buried, biased tunnels in weathered granite is not completely understood. There is a pressing need to develop an appropriate tunneling technique to address the instability commonly encountered at tunnel portals in such conditions. Based on the Xiangsi Mountain tunnel in Xinxing county, Guangdong Province, this study analyzed the stability of tunnel entrances in shallow-buried and biased-pressure environments with completely weathered granite. Numerical simulations with tunneling method of three-step, seven-sequence circular excavation with core soil reservation were conducted to analyze the displacement of surrounding rock and the variation characteristics of internal support force. The results show that using anchor rod lattice beams and square frame slope protection on the deeply buried side can increase the safety factor of the side slope by 64.6%. Compared to traditional methods, installing anchor piles at the tunnel entrance and the slope toe can enhance resistance on the shallowly buried side by 13.7% and 10.1%, respectively. Due to compression from the deeply buried side, the tunnel tends to displace horizontally towards the shallowly buried side. The monitored displacement of the initial support closely matches the numerical simulation results, with a maximum difference of only 6.5 mm at the vault and a minimum difference of 2.6 mm at the right wall foot. The three-bench, seven-step circular excavation method with reserved core soil, combined with different support measures for the deep and shallow sides, can effectively improve the stability of shallow-buried biased tunnels in completely weathered granite. This study provides data support and engineering references for the design and construction of similar tunnel projects.

Keywords: completely weathered granite; shallow burial tunnel with unsymmetrical pressure; numerical simulation; displacement of the surrounding rock; internal force of the support

全风化花岗岩具有自身稳定性差且遇水易软化崩解等特点,在隧道工程中时常会导致一些灾害问题。浅埋偏压会造成隧道两侧的不均匀受力,从而导致隧道支护受到损害。当全风化花岗岩和浅埋偏压两种不利因素同时出现时,隧道围岩的承载能力以及支护结构的稳定性将显著降低,围岩大变形和支护失稳的概率显著上升。因此,非常有必要针对全风化花岗岩浅埋偏压隧道的进洞方法、围岩稳定性及支护内力进行研究。

近年来,国内外学者对全风化花岗岩的物理力学性质以及相对应的工程问题和处治措施开展了大量研究。其中,赵建军等^[1]发现固结压力增大会导致全风化花岗岩的压缩系数和固结系数逐渐减小。全风化花岗岩中含水率增加会明显削弱抗剪强度、黏聚力以及摩擦角^[2]。除含水率外,花岗岩的剪胀性还受应力路径、土壤吸力和应力状态的影响^[3-4]。由于全风化花岗岩脆弱的物理力学性质,时常会导致一系列工程问题。如,罗家寨隧道出口 150 m 范围内先后三次在不同时间不同里程发生塌方事故^[5];在盾构隧道施工过程中,全风化花岗岩地层周围建筑物出现了不同程度的横向位移和垂直位移^[6]。

在浅埋偏压隧道进洞技术方面,赵金鹏等^[7]提出

施作长管棚需要预留 1 倍洞径的起始端;邓永杰^[8]提出先进行地表边坡的预加固;宋青会^[9]发现浅埋偏压隧道的主要灾害类型,并总结了致灾机理。在泥质页岩偏压隧道支护结构的受力特征方面,陈娱等^[10]发现位于山体较高一侧支护结构受力明显较大;徐前卫等^[11]指出浅埋偏压隧道围岩变形和初期支护的受力都具有明显的非对称性;Lei 等^[12]发现随着偏压角度逐渐增大,隧道浅侧和深侧围岩的压力差逐渐变大;Zhang 等^[13]、牟智恒等^[14]发现采用注浆和根据监测数据实时调整 CRD 工法能有效控制浅埋下穿隧道的地表沉降。在偏压隧道围岩破坏机理方面,胡炜等^[15]发现围岩塑性区与围岩位移场偏压分布特征之间存在关系;严涛等^[16]采用解析法对浅埋偏压隧道围岩压力进行计算,发现深埋侧相对误差比浅埋侧小;白强强等^[17]依据合理拱轴线对偏压隧道的最优断面开展研究,极大改善了衬砌结构的受力状况;Panji 等^[18]采用边界元法分析浅埋偏压隧道的稳定性,发现偏心荷载对周围隧道的应力模式有很大影响;黄明利等^[19]发现在富水花岗岩地层中,隧道衬砌受压变受拉的阶段出现越早,发生受拉破坏越早;隧道围压稳定性还受岩层倾角影响,岩层倾角增大会导致隧道围岩变形从岩层弯曲变形逐渐向顺层面滑移变形转变^[20]。浅埋偏压

隧道洞口的稳定性是隧道研究中的关键问题^[21-23]。陈航等^[24]采用BP神经网络来分析隧道的塌方机理,陈秋雨等^[25]分析软岩中存在的大变形问题,余浪浪等^[26]研究隧道爆破开挖诱发的围岩损伤。

综上所述,现阶段针对洞口覆盖较厚全风化花岗岩层的浅埋偏压隧道的研究还不够全面,特别是对隧道支护力学特性的研究尚显单一。本文考虑多方面因素的影响,重点研究此类隧道的进洞方法,以及在这种进洞方法下围岩位移和洞内支护内力的变化特征。

1 工程背景

1.1 工程概况

相思山隧道是新建广州至湛江高铁线路中的一段隧道,位于广东省新兴县。该隧道为单洞双线设计,设计行车速度为350 km/h,起讫里程为DK129+383.00—DK129+693.62,全长310.62 m,属于短隧道。图1展示了相思山隧道的地理位置。隧道区域处于低山丘陵地貌,地表起伏较大,最大相对高差可达60 m。

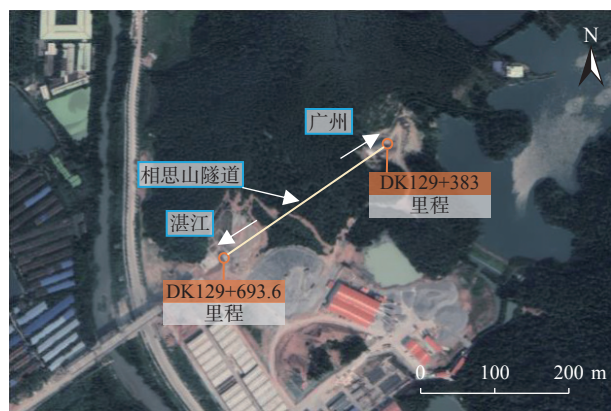


图1 相思山隧道地理位置

Fig. 1 Location of Xiangsi Mountain tunnel

隧道纵断面如图2所示。研究区域的覆盖层下伏基岩为燕山期花岗岩,特征为粗中粒花岗结构和块状

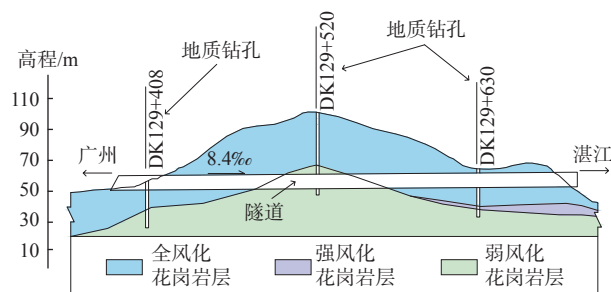


图2 相思山隧道纵断面

Fig. 2 Longitudinal section of Xiangsi Mountain tunnel

构造。主要矿物成分包括黑云母、长石和角闪石,占总成分的70%~80%,而石英约占10%。岩体节理发育,倾角分别为33°和75°。

全风化层呈硬塑土状,由于差异风化,层中存在多层强风化及弱风化层,其总厚度为10~40 m,属于Ⅲ级硬土。强风化层表现为碎块状及角砾状,晶粒大多风化呈暗色且无光泽,轻微敲击即会破碎,属于Ⅳ级软石。弱风化带则属于Ⅴ级次坚石。

1.2 水文地质条件

隧道的进出口主要通过沟水进行排泄,沟水受大气降水补给,并向低洼处排泄。隧道洞身所在山体植被茂密,全风化层分布广泛且厚度较大,局部有强风化层出露。全风化层以上主要为土壤孔隙水,多处于径流状态,受地表降雨控制。全风化层以下为基岩裂隙水,其中强风化层和弱风化层作为透水及储水介质,在沟槽处出露形成泉水,动态变化较小。主要的水源补给来自附近山体的侧向补给,径流途径主要为岩层中的孔隙裂隙通道,并向低处排泄。地下水系统较为发育,受季节性和大气降雨的影响较大。

2 隧道进洞方法研究

2.1 进洞辅助工程措施

降雨和围岩渗漏会显著影响隧道围岩的偏压效应。雨水入渗导致全风化花岗岩崩解,岩体强度显著降低,洞口浅埋侧的边坡容易失稳垮塌。边坡垮塌后,隧道浅埋侧的埋深减小,浅埋侧与深埋侧的应力差进一步增大,隧道所受的不平衡力和偏压作用均增大。因此,在隧道进洞处及边坡坡脚设置锚固桩,加固坡脚并提高隧道浅埋侧的抵抗力,一方面可以防止降雨时边坡失稳,另一方面可以弱化偏压影响。此外,在洞身上部覆盖层极浅的段落,采用地表注浆并配合横向长管棚的措施。

2.1.1 边坡防护措施

隧道进洞端的边仰坡采用刷坡方法进行处理,结合挖掘机械和浅层爆破进行开挖,开挖坡率为1:1.5。坡面从下至上的一级和二级永久性边仰坡采用锚杆格梁防护,锚杆长度为10 m;第三级永久性边仰坡则采用方格型骨架护坡。

当边仰坡未施作支护时,仰坡先出现失稳,边仰坡稳定性由仰坡控制,安全系数为1.270,边仰坡处于基本稳定状态;当边仰坡施作支护后,边坡先出现失稳,边仰坡稳定性由边坡控制,此时安全系数提高至2.091,较未支护状态下提升了64.6%。

2.1.2 锚固桩加固措施

在里程 DK129+685—DK129+694 处设置 1—3 号锚固桩,在里程 DK129+682 处设置 4—7 号锚固桩。1—7 号锚固桩的布置、截面尺寸及桩长参数如图 3 所示。相较于传统方法,在隧道进洞处以及边坡坡脚设置锚固桩能提高浅埋侧 13.7% 和 10.1% 的抵抗力。

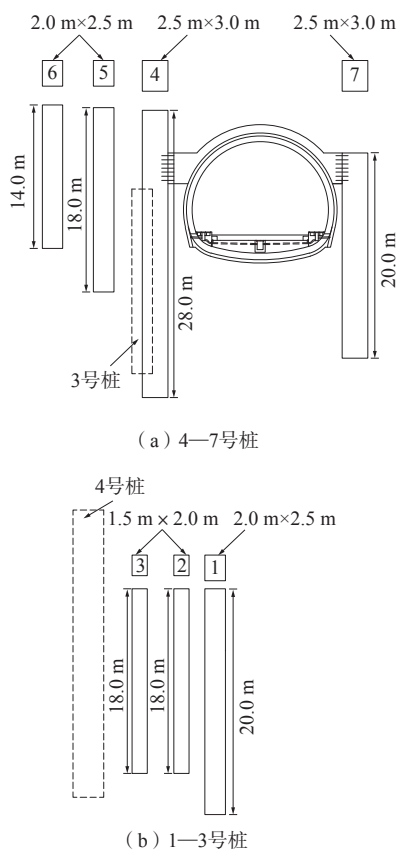


图 3 锚固桩布置示意图

Fig. 3 Schematic layout of anchored piles

2.1.3 洞口护拱设计

在里程 DK129+677—DK129+685 段采用护拱暗挖法施工。护拱结构为 C35 钢筋混凝土,厚度为 80 cm。在里程 DK129+681—DK129+685 段,拱部 170°范围内

设置护拱;在里程 DK129+680—DK129+681 段,拱部 140°范围内设置护拱;在里程 DK129+677—DK129+680 段,拱部 60°范围内设置护拱。隧道护拱布置情况如图 4 所示。

2.2 隧道暗洞断面设计与进洞开挖方法

2.2.1 隧道进洞段暗洞断面设计

隧道衬砌结构按照新奥法原理采用复合式衬砌(图 5)。初期支护使用 I22a 型钢拱架,间距为 0.6 m,喷射混凝土采用 C25 早强混凝土,厚度为 28 cm。二次衬砌的拱墙和仰拱均采用 C35 钢筋混凝土,二次衬砌仰拱厚度为 65 cm,拱墙厚度为 55 cm,仰拱采用 C20 素混凝土填充。拱部及边墙锚杆采用直径 22 mm 的组合中空锚杆,长度为 4 m,间距为 1.2 m(环向)×1.0 m(纵向)。锁脚锚管直径为 50 mm,长度为 4 m,纵向间距为 1 m。

2.2.2 隧道进洞段开挖方法

进洞段采用三台阶七步环形开挖预留核心土法进行开挖。该方法不仅确保了施工进度,同时还能有效预防掌子面的坍塌。具体的设计图见图 6。

3 隧道施工过程数值模拟

3.1 隧道模型建立

采用有限差分软件 FLAC3D 进行施工过程的数值模拟。相思山隧道现场地形复杂,洞口埋深较浅且受地形偏压影响。为使数值计算更贴近实际情况,根据工程资料中的地形等高线构建了接近实际情况的地表环境。为尽可能消除边界效应并提高计算效率,最终确定模型尺寸为 120.00 m×150.00 m(长×宽),最大高度为 103.60 m。模型中隧道的纵向长度为 100.00 m,最大开挖跨度为 14.96 m,最大开挖高度为 12.64 m。

图 7 展示了三维数值模型的整体尺寸和隧道尺寸。该数值模型共包含 203 789 个单元和 117 111 个节点,地层主要分为 3 层:全风化花岗岩、强风化花

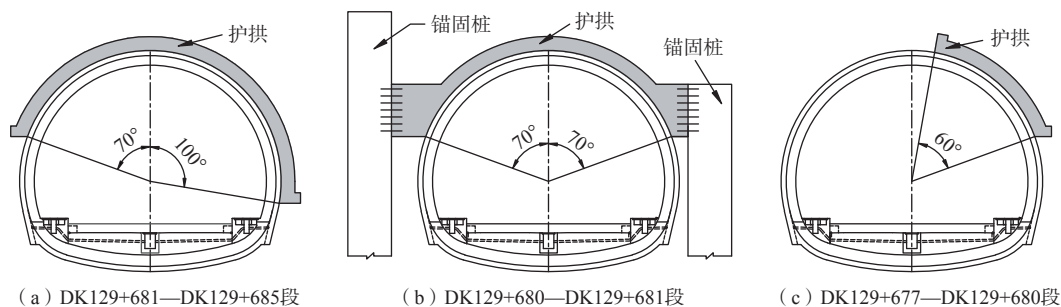


图 4 隧道护拱设计图

Fig. 4 Tunnel arch protection design

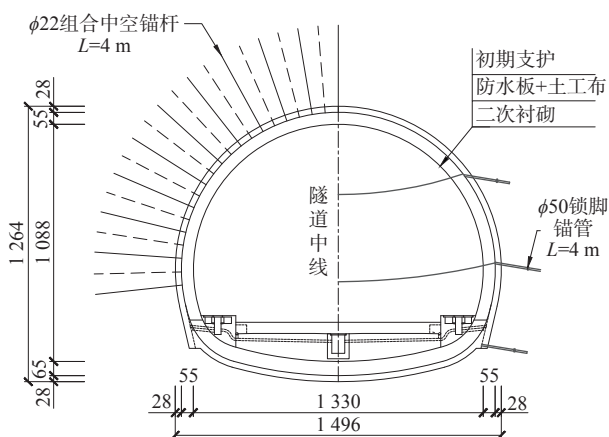


图5 隧道进洞段暗洞断面设计图

Fig. 5 Cross-section of tunnel approach

注: 图中除直径以毫米计外, 其余均以厘米计; ϕ 为直径; L 为长度。

岗岩和弱风化花岗岩。所建隧道的起讫里程分别为 DK129+685 和 DK129+585。图 8 中主要包括大管棚和中管棚的注浆加固圈、护拱、锚固桩以及钻孔灌注桩。在计算过程中, 隧道二次衬砌、锚杆、管棚和小导管均采用结构单元进行模拟, 而地层、锚固桩、钻孔灌注桩、隧道初期支护和注浆加固区则采用实体单元进行模拟。

由于小导管注浆加固区相对较小且规则, 可直接在 FLAC3D 中选该区域进行注浆加固模拟, 因此未单独建立小导管的注浆加固区。注浆加固区的参数基于本工程的特点、参考众多相似工程案例来确定, 可通过调整围岩参数来实现注浆加固效果。

建模过程中各结构尺寸均遵照工程设计资料进行建模, 为确定管棚注浆加固区, 根据众多工程案例^[27-29], 其厚度可以由式(1)确定:

$$D = 2 \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad (1)$$

式中: D ——注浆加固区厚度/m;

R ——浆液扩散半径/m, 取相邻钢花管中心距的 0.65 倍;

S ——2 个相邻注浆孔的间距/m。

边界约束条件: 对模型前后左右 4 个面以及底面的法向进行约束, 模型顶面为自由面。

图 9 是模拟隧道开挖流程图, 根据工程设计资料, 模拟中采用三台阶七步法进行隧道开挖, 开挖循环进尺为 1 m。

3.2 确定本构模型和选取计算参数

模型中的地层主要由全风化、强风化和弱风化花岗岩层组成。假定围岩为各向同性的理想弹塑性体, 采用莫尔-库仑弹塑性本构模型进行模拟。注浆加固区也采用莫尔-库仑弹塑性本构模型, 隧道二次衬砌、锚固桩和护拱等混凝土材料则选用弹性模型, 采用空模型模拟隧道的开挖。

表 1 列出了地层和注浆加固区的物理力学参数, 结合地勘钻孔资料和试验结果, 可以得到各地层的物理力学参数。模型中超前支护的注浆加固区位于全风化花岗岩层, 可以通过提高注浆加固区的物理力学参数来模拟注浆加固的效果。

隧道初期支护采用壳单元进行模拟, 将钢拱架和喷射混凝土层视作一个整体, 根据等刚度原则, 将钢拱架和喷射混凝土层的弹性模量以及容重进行折算。初期支护弹性模量的折算公式为:

$$E = E_c + \frac{S_g \times E_g}{S_c} \quad (2)$$

式中: E ——折算后初期支护的弹性模量/GPa;

E_c ——原喷射混凝土的弹性模量/GPa;

E_g ——钢拱架的弹性模量/GPa;

S_g ——钢拱架的截面面积/m²;

S_c ——喷射混凝土截面面积。

初期支护喷层容重的折算公式为:

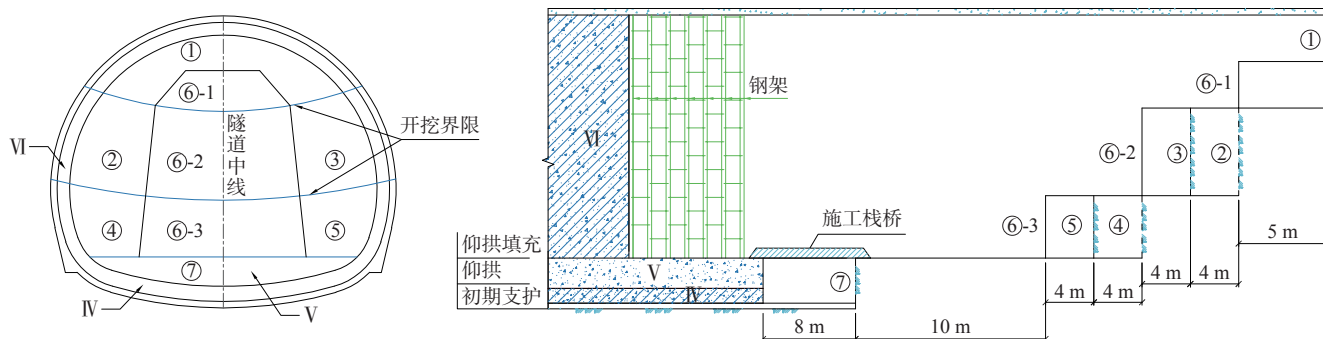


图6 三台阶七步环形开挖预留核心土法设计图

Fig. 6 Design of the three-step, seven-step circular excavation method with reserved core soils

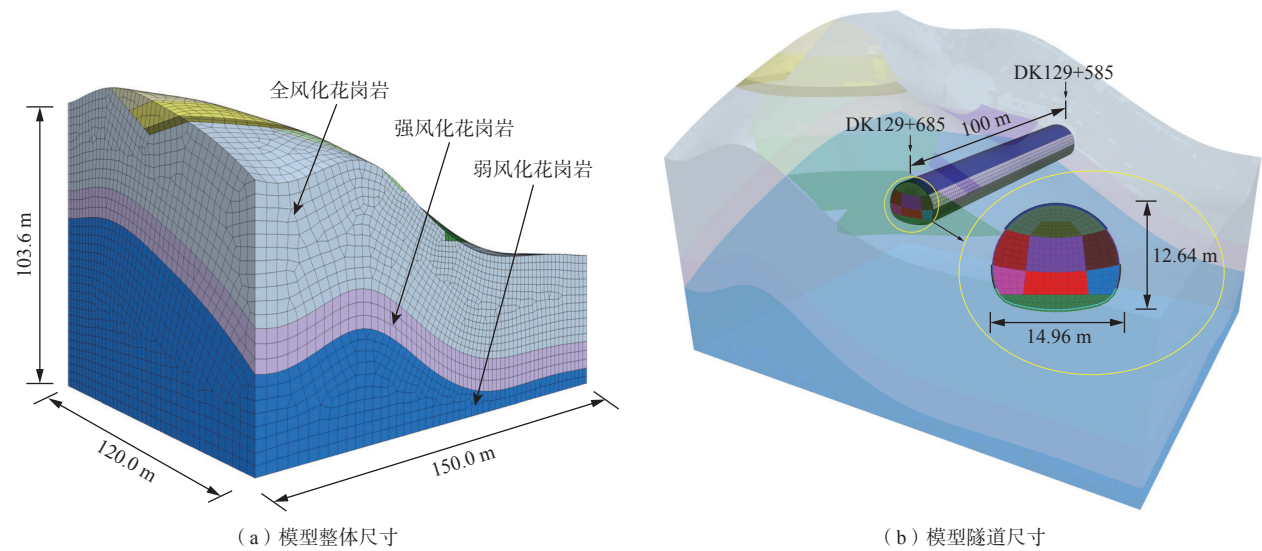


图 7 三维数值模拟模型图
Fig. 7 3D numerical simulation model

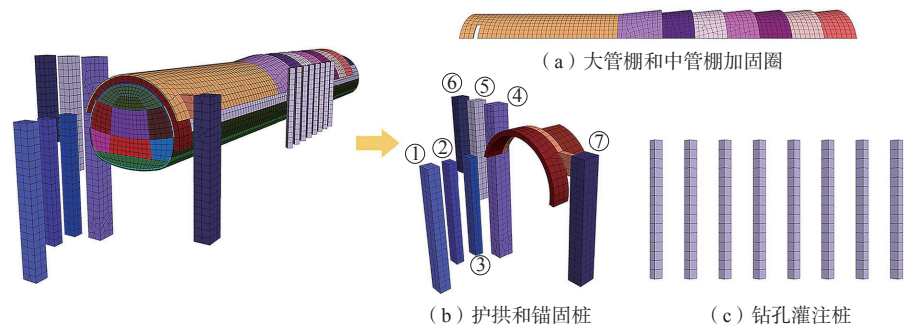


图 8 数值模拟模型内部结构图
Fig. 8 Internal structure of the numerical simulation model

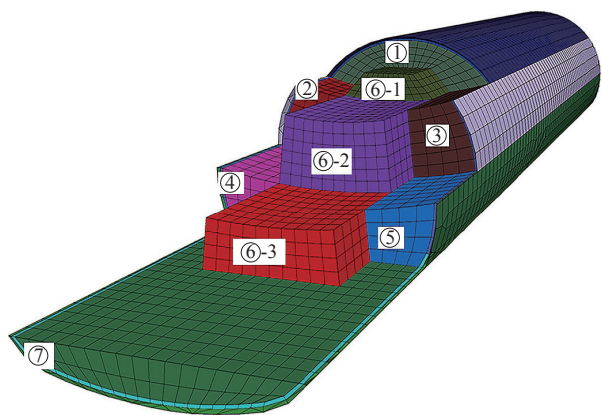


图 9 模拟隧道开挖流程图
Fig. 9 Simulated tunnel excavation flowchart

$$\gamma = \gamma_c + \frac{nA}{b} (\gamma_g - \gamma_c) \tag{3}$$

式中: γ ——折算后初期支护的容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);
 γ_c ——原喷射混凝土的容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);
 γ_g ——钢拱架的容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

表 1 地层及注浆加固区物理力学参数					
Table 1 Physical and mechanical parameters of the stratum and grouted reinforcement zone					
风化程度	容重 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	黏聚力 /MPa	摩擦角 /($^{\circ}$)	泊松比
全风化花岗岩	18.33	0.026	0.023	15.66	0.32
强风化花岗岩	22.50	0.240	0.090	28.00	0.28
弱风化花岗岩	26.30	9.110	3.540	42.96	0.24
管棚注浆加固区	21.63	0.186	0.062	24.80	0.25

n ——每延米钢拱架数量;
 A ——钢拱架截面面积/ m^2 ;
 b ——喷射混凝土厚度/ m 。

经过计算, 支护材料的参数如表 2 所示。

3.3 确定监测点位

为了更直观地反映计算过程中围岩的变形以及支护受力特征, 选取如图 10 所示的 10 个监测点, 监测围岩位移和结构内力。由于模型纵向上的地形复杂多变, 单一横断面很难完全反映模拟的整体情况, 因

表 2 支护材料参数

Table 2 Parameters of support material

支护类型	混凝土等级	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
初期支护	C25	23.4	26.1	0.2
二次衬砌	C35	25	31.5	0.2
仰拱填充	C20	23	25.5	0.2
护拱	C35	25	31.5	0.2
锚固桩	C35	25	31.5	0.2
钻孔桩	C35	25	31.5	0.2

此在模型的纵向上选取了 3 个横断面进行监测。它们的里程分别为 DK129+664(距离洞口 20 m)、DK129+634(距离洞口 50 m)和 DK129+614(距离洞口 70 m)。

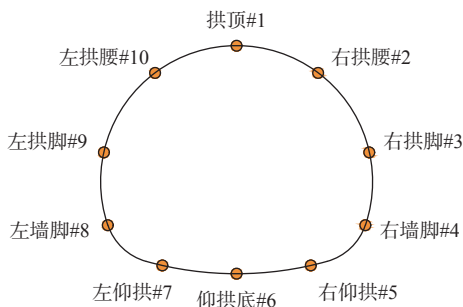


图 10 数值模拟中的监测点布置

Fig. 10 Monitoring sites in the numerical simulation

4 数值模拟结果分析

4.1 围岩位移分析

由于不同断面处地形存在差异,导致不同断面处围岩位移特征有所不同。选取 3 个不同的断面,通过分析不同断面处的隧道竖向沉降、洞周水平位移以及位移矢量总结出相思山隧道围岩变形特征。

4.1.1 隧道竖向沉降分析

图 11 展示了 3 个不同断面处的竖向沉降云图。在图中,向上的位移表示为正值,向下的位移表示为负值。隧道完全贯通后,3 个不同断面的整体竖向位移趋势相似。在隧道拱部和底部位置,竖向位移明

显,并且在偏压的影响下,隧道拱部的最大沉降均出现在更靠近深埋侧。具体而言,DK129+665、DK129+635、DK129+615 断面的隧道拱部范围内的最大沉降值分别为 58.8、54.5、89.2 mm,而隧道底部范围内的最大隆起值分别为 33.2、39.1、42.2 mm。尽管这 3 个断面的隧底隆起值相近,但隧道拱部的最大沉降值存在明显差异。具体而言,DK129+635 断面相对于其他两个断面,隧道拱部的沉降最小,但受到的偏压影响最为显著;DK129+615 断面的隧道拱部沉降较 DK129+635 断面增加了 63.7%。

以上差异的形成是多种因素的综合结果,包括地表横坡坡度、隧道埋深、土石分界面与隧道的相对位置以及超前支护形式等。横坡坡度越大,地形导致的偏压作用越明显,隧道受到的偏压影响也就越明显;隧道埋深越浅,加之隧道断面处于隧道中部,远离隧道洞口,因此隧道拱部的沉降也会相应减小。在 3 个断面中,DK129+635 断面的横坡坡度最大,隧道埋深最浅,并且位于隧道中部,因此受偏压影响最为显著,但隧道拱部的沉降却最小。

图 12 是隧道纵向最大拱顶沉降图。从整体趋势上看,隧道拱顶呈现出先增加后减小再增加的趋势。在洞口段隧道的拱顶沉降较小,洞口处的沉降值为 2.2 mm。表明该隧道施工采用的进洞方法较为有效地控制了洞口段的拱顶沉降,起到了预防洞口坍塌的作用。

随着隧道分步开挖的不断推进,围岩的竖向位移也在不断变化。图 13 显示了 3 个不同断面处隧道竖向位移随着隧道分步开挖而变化的曲线图。从图中可以观察到,隧道的上半部分(拱顶、拱腰、拱脚)呈现向下的竖向位移,而隧道的下半部分(墙脚、仰拱)则呈现向上的竖向位移。3 个断面的竖向位移发展趋势相似,沉降值的增长趋势呈现出先快速增加,然后在二次衬砌完工后逐渐趋于稳定;而隆起值的增长趋势也是先快速增加,然后在施作前一环二次衬砌的仰

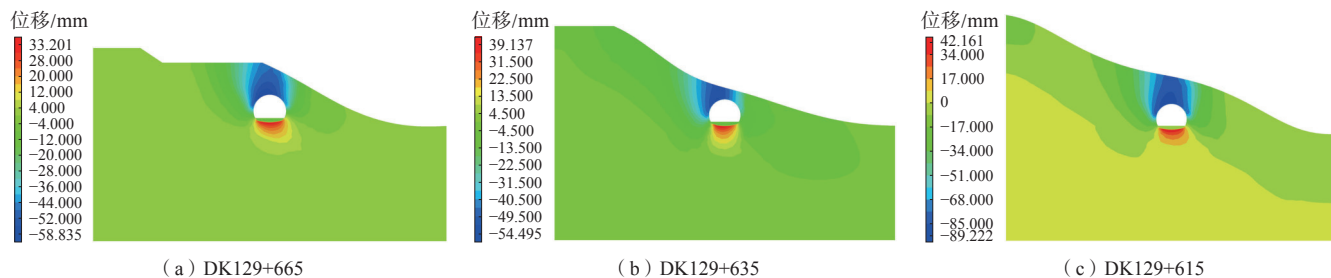


图 11 不同断面处的竖向沉降图

Fig. 11 Vertical displacements at different cross-sections

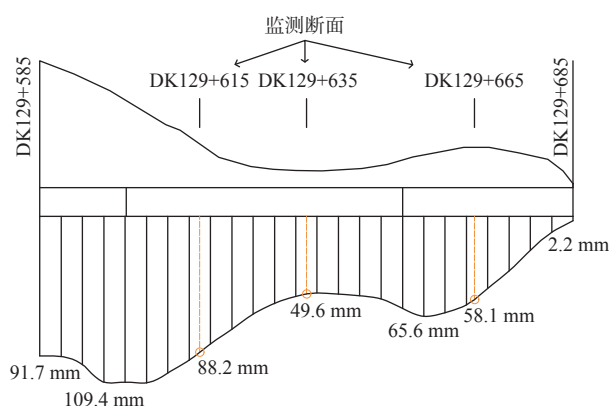


图 12 隧道开挖过程纵向最大拱顶沉降图

Fig. 12 Maximum longitudinal vault settlement during tunnel excavation

拱以及仰拱填充后,隆起值出现一定程度的下降,同样在二次衬砌完工后逐渐趋于稳定。

DK129+665 断面最终呈现沉降的部位包括拱顶、左右拱腰、左右拱脚以及左墙脚,而最终呈现隆起的部位包括仰拱和右墙脚;其最大沉降值和最大隆起值分别为 58.9 mm 和 33.3 mm,分别出现在左拱腰和仰拱底。在 DK129+635 断面,最终呈现沉降的部位同样包括拱顶、左右拱腰、左右拱脚以及左右墙脚,而最终呈现隆起的部位仅限于仰拱范围;其最大沉降值和最大隆起值分别为 54.9 mm 和 38.7 mm,同样分别出现在左拱腰和仰拱底。在 DK129+615 断面,最终呈现沉降的部位与之前相似,而最终呈现隆起的部位仍为仰拱范围;其最大沉降值和最大隆起值分别为 88.6 mm 和 42.4 mm,同样出现在左拱腰和仰拱底。由于偏压的影响,导致隧道左半部分(深埋侧)的竖向位移普遍大于右半部分(浅埋侧)。

4.1.2 隧道水平位移分析

图 14 是 3 个不同断面处的水平位移云图,图中向右的位移表示为正值,向左的位移表示为负值。由云图可知,在隧道的左墙脚附近、右仰拱附近、右拱腰附近以及隧道左上方坡面的位置呈现出明显的水平位移。隧道上方的围岩在偏压的影响下向右滑动,而隧道下方的围岩则呈现向左位移的趋势,整体呈现偏转的现象。其中,3 个断面的最大向右水平位移依次为 15.6, 24.1, 31.2 mm,最大向左水平位移依次为 13.4, -4.5, -20.9 mm,而隧道左上方坡面的最大水平位移依次为 25.8, 30.9, 39.6 mm。

隧道产生的水平位移主要向右,而向左的水平位移多发生在隧道仰拱以及右墙脚处。向右的水平位移在数值上明显大于向左的水平位移,表明隧道更倾

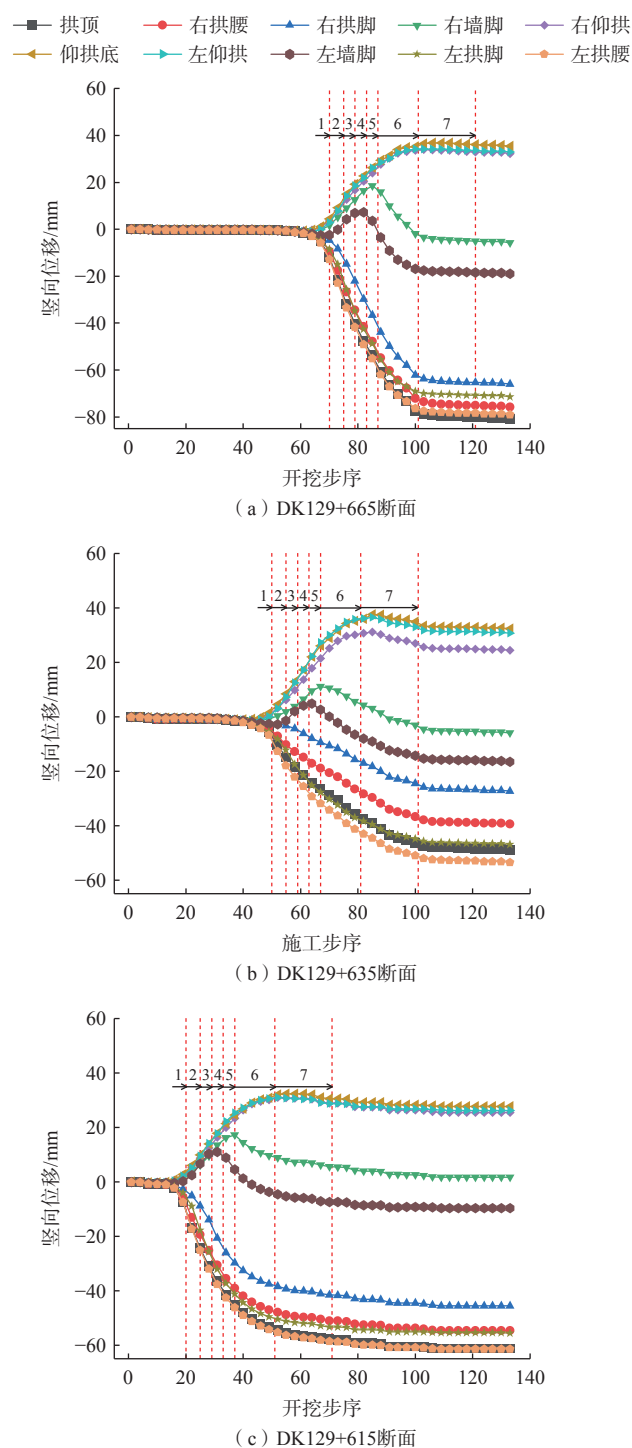


图 13 不同断面处分步开挖竖向位移变化的曲线图

Fig. 13 Vertical displacement variation of stepwise excavation at different cross-sections

注: 1 为上台阶开挖至监测断面; 2、3 为中台阶左、右侧开挖至监测断面; 4、5 为下台阶左、右侧开挖至监测断面; 6 为仰拱开挖至监测断面; 7 为施作二衬仰拱及仰拱填充。

向于向浅埋侧水平移动。这种现象的产生主要是由于形成的偏压作用,使得深埋侧的水平应力大于浅埋侧。此外,浅埋侧位于斜坡的临空面,缺乏支挡,也促

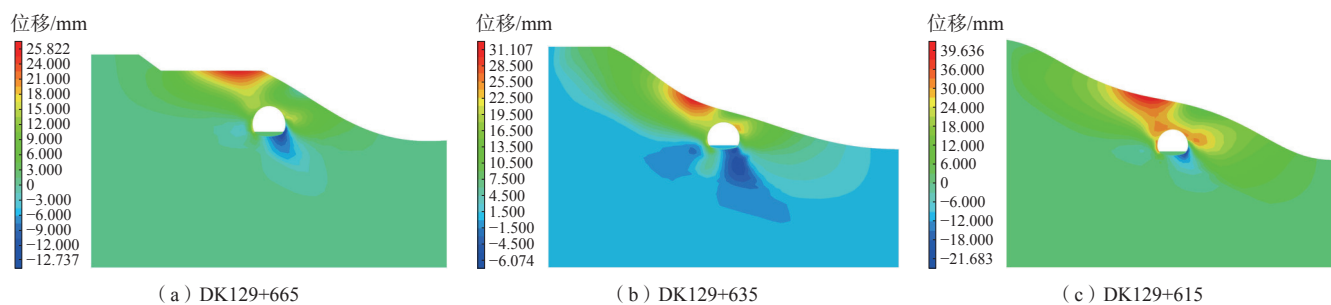


图 14 不同断面处水平位移图

Fig. 14 Horizontal displacements at different cross-sections

使隧道向浅埋侧水平移动。

4.1.3 位移矢量分析

图 15 是不同断面处的位移矢量图。结合位移量图可以更清楚地观察到偏压对隧道的影响。3 个断面的最大总位移分别为 59.1, 58.1, 92.2 mm, 深埋侧土

体的位移箭头指向隧道, 表明深埋侧土体对隧道有明显的挤压, 在隧道的左拱腰处有明显偏向浅埋侧的位移趋势。从整体上看, 隧道拱部的位移明显大于隧道底部, 并且图中位移箭头更多指向浅埋侧, 表明隧道有向浅埋侧位移的趋势。

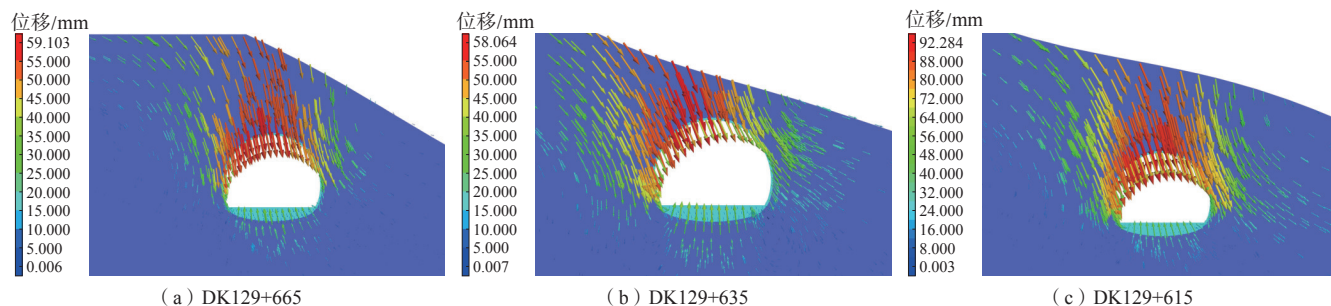


图 15 不同断面处的位移矢量图

Fig. 15 Displacement vectors at different cross-sections

4.2 初期支护内力分析

隧道初期支护的结构内力是评判隧道安全性的重要指标, 同时还可以借助内力图分析隧道初期支护的受力特征。在数值模拟中提取衬砌内外侧实体单元质心处的应力 (σ_x 、 σ_z 、 τ_{xz}), 利用式(4)计算监测断面的法向应力^[30]:

$$\sigma_v = l^2 \sigma_x + m^2 \sigma_z + 2lm\tau_{xz} \quad (4)$$

式中: σ_v ——法向应力/MPa;

σ_x 、 σ_z 、 τ_{xz} ——实体单元质心处的应力分量/MPa;

l 、 m —— x 、 z 轴截面外法线的方向余弦。

根据平截面假设, 采用插值法获得截面内外边缘的内缘应力 σ_i 和外缘应力 σ_o , 再利用材料力学公式(5)和(6)计算得到弯矩和轴力:

$$M = \frac{1}{12}(\sigma_i - \sigma_o)bh^2 \quad (5)$$

$$N = \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_o)bh \quad (6)$$

式中: M ——弯矩/(kN·m);

N ——轴力/kN;

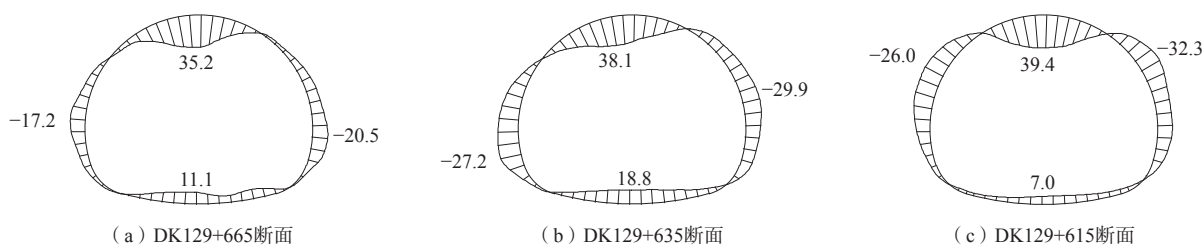
b ——衬砌单元纵向长度/m, 此处 b 取 1 m;

h ——衬砌单元的厚度/m。

最后, 再通过弯矩和轴力计算得到初支的安全系数。

4.2.1 初期支护弯矩

图 16 是 3 个不同断面处隧道初支最终的弯矩图。从图中可以看出, 3 个断面的正弯矩都主要集中在拱顶及仰拱处, 负弯矩主要分布在两侧边墙。其中, DK129+665 断面最大正弯矩为 35.2 kN·m, 出现在拱顶处, 最大负弯矩为 -20.5 kN·m, 出现在右拱脚与右墙脚之间。DK129+635 断面最大正弯矩为 38.1 kN·m, 出现在拱顶偏左, 最大负弯矩为 -29.9 kN·m, 出现在右拱脚处。DK129+615 断面最大正弯矩为 39.4 kN·m, 出现在拱顶偏右, 最大负弯矩为 -32.3 kN·m, 出现在右拱腰与右拱脚之间。

图 16 不同断面处初期支护最终弯矩图 (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)Fig. 16 Final bending moments of initial support at different sections (unit: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

3 个断面最大正弯矩均出现在拱顶范围,而最大负弯矩均出现在右边墙,并且仰拱部分的弯矩较小。相比之下,DK129+665 和 DK129+615 断面受到偏压的影响较小,弯矩分布较对称,DK129+635 断面受到偏压的影响最大,弯矩呈现出一定的非对称性。导致这种现象的原因有以下 3 点:

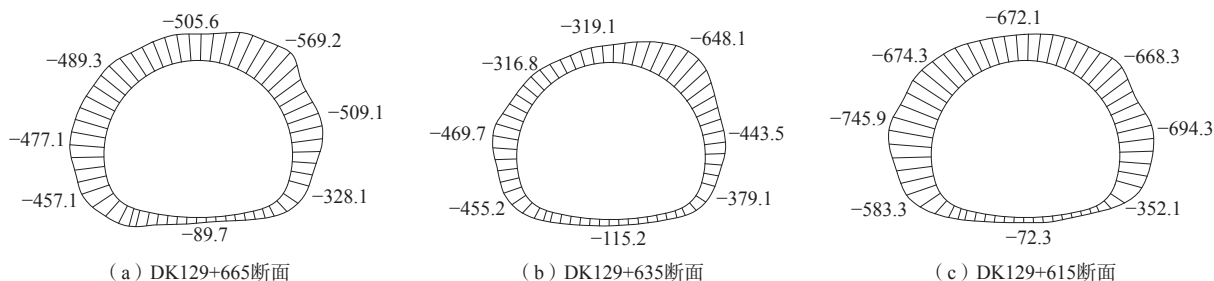
(1)DK129+665 断面的特点是更靠近洞口,而隧道施工前对洞口深埋一侧边坡进行了开挖,可以看作对深埋一侧进行了卸载,导致洞口处偏压被削弱。

(2)DK129+615 断面处距离洞口较远,隧道埋深更大,地表横坡坡度先缓后陡,这些因素都削弱了地形偏压对隧道衬砌受力的影响。

(3)DK129+635 断面的特点是受到较大偏压的影响,而且此处理深较浅,拱顶围岩成拱能力差,地表横坡坡度先陡后缓,该断面初支最大正弯矩位于深埋一侧,整体表现出更明显的非对称性。

4.2.2 初期支护轴力

图 17 是 3 个不同断面处隧道初支最终的轴力图,从隧道初支的轴力分布中可以更明显看出,初支拱顶及边墙部分轴力较大,仰拱处轴力较小,整体上呈现出“上大下小”的分布特征。其中,DK129+665 断面最大轴力为-569.2 kN,出现在右拱腰。DK129+635 断面最大轴力为-648.1 kN,出现在右拱腰。DK129+615 断面最大轴力为-745.9 kN,出现在左拱脚。

图 17 不同断面处初期支护最终轴力图 (单位: kN)Fig. 17 Final axial forces of initial support at different sections (unit: kN)

从轴力图可以发现,DK129+665 断面和 DK129+615 断面的轴力分布较均匀,未表现出明显的非对称分布特征,但是 DK129+665 断面轴力整体大于 DK129+615 断面,表明隧道埋深越大,衬砌结构轴力也越大。而 DK129+635 断面右拱腰附近的轴力明显较大,整体表现出更明显的非对称性。

隧道埋深越大,衬砌结构所受的地应力也就越大,DK129+665 断面的埋深是 3 个断面中最大的,其所受地应力相对较高,断面衬砌结构上的轴力自然最大。DK129+635 断面横坡斜率最大,地形偏压作用影响最显著,断面深埋侧应力明显大于浅埋侧,导致右拱腰附近的轴力明显较大。

4.2.3 初期支护安全系数

图 18 是 3 个不同断面处隧道初支最终的安全系数图。从图中可以发现,初支拱顶及边墙的安全系数明显小于仰拱部分,整体呈现出“上小下大”的分布特征。规范规定,如果钢筋混凝土的破坏是由于钢筋达到计算强度或混凝土达到抗压或抗剪极限强度则安全系数允许值为 2.00,3 个断面的安全系数均大于允许值,说明隧道整体安全性较好。其中,DK129+665 断面安全系数最小值为 9.30,出现在拱顶处;DK129+635 断面安全系数最小值为 9.44,出现在右拱腰处;DK129+615 断面安全系数最小值为 8.20,出现在拱顶处。

DK129+665、DK129+615 断面的安全系数最小值

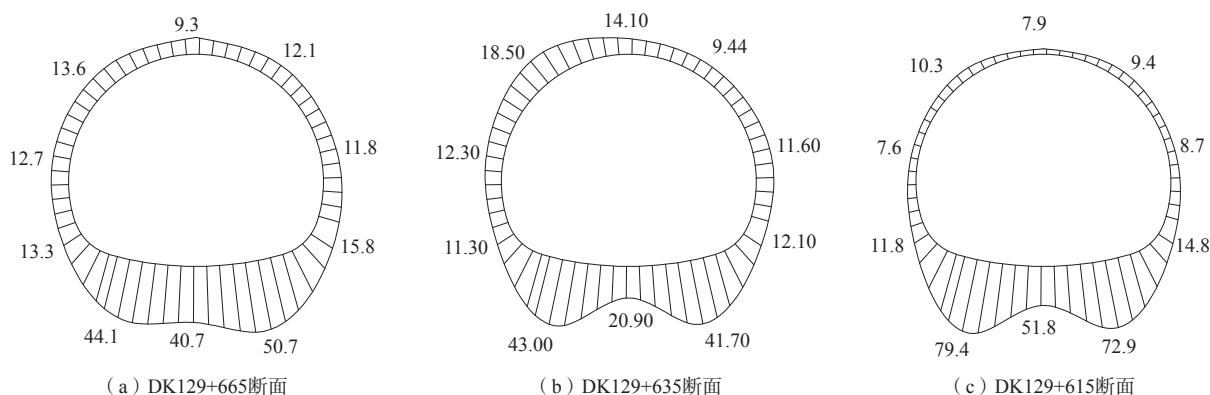
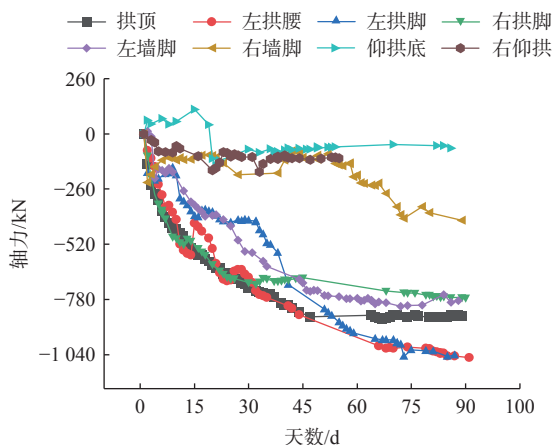


图 18 不同断面处初期支护安全系数图

Fig. 18 Safety factors of initial support at different cross sections

均出现在拱顶处,而 DK129+635 断面的安全系数最小值出现在右拱腰处,造成差异的原因为:(1)DK129+665、DK129+615 断面处所受的偏压作用相对较轻,弯矩和轴力的共同作用在拱顶处最大,导致此处安全系数最小;(2)DK129+635 断面横坡斜率最大,地形偏压作用影响最显著,弯矩和轴力的共同作用在右拱腰处最大,此处安全系数最小。

图 19 是现场 90 d 内初期支护的轴力时程曲线。轴力最大值为 1 053.5 kN,出现在左拱腰处。从图中可以看出,轴力的增长速率较缓,轴力持续增加,70 d 后才逐渐稳定。

图 19 初期支护轴力时程曲线
Fig. 19 Initial support axial force time

4.3 现场监测值与模拟值对比分析

浅埋偏压隧道洞口段的地表地形复杂多变,单纯采用数值模拟对现场施工进行分析,比较理想化,与实际情况不完全相符。而现场监测能够弥补数值模拟存在的一些不足,是检验施工质量与安全性的可靠手段,根据现场监测的及时反馈,可以有针对性地进行隧道施工设计。现场监测也存在局限性,不论是在

安装监测仪器还是进行数据监测的时候,都会存在一定误差。所以结合数值模拟结果和现场监测数据,二者相互验证,才能够得到相对可靠的数据和结论。

为监测相思山隧道施工期间衬砌结构的受力变化,保证隧道施工安全,在现场设置 3 个监测断面,分别位于里程 DK129+615、DK129+590、DK129+570 处。以下主要针对 DK129+615 断面的监测数据进行分析,重点分析初支受力特性,并与数值模拟中 DK129+615 断面的初支受力进行对比。如图 20 所示,整个断面一共布置 10 个初支混凝土应变计,其中,拱墙 7 个测点、仰拱 3 个测点。

该断面右拱腰和左仰拱内侧的监测仪器由于现场施工被损坏,无法进行监测,其余 8 个测点均能正常监测,这 8 个测点中,初期支护最大正弯矩为 31.5 kN·m,出现在拱顶处,最大负弯矩为 -25.2 kN·m,轴力最大值为 1 053.5 kN,出现在左拱腰处。

如图 21(a)(b)所示,将数值模拟得到的初支内力与现场实测得到的初支内力进行比较。除去已损坏的右拱腰测点和左仰拱测点外,在拱顶、左拱腰、左拱脚、右拱脚、左墙脚、右仰拱以及仰拱底处,初支弯矩的模拟值和现场值相差较小,仅在右墙脚处出现了一定的偏差。在右拱脚、右墙脚、右仰拱以及仰拱底处,初支轴力的模拟值和现场值较吻合,而在隧道左半部分的拱顶、左拱腰、左拱脚以及左墙脚处,初支轴力的现场值略大于模拟值,但在趋势上二者保持一致。图 21(c)是现场监测位移与数值模拟得到的位移对比分析图。8 个现场监测点中,最大沉降位移值为 88.6 mm,位于左拱腰,最大隆起位移值为 42.4 mm,位于仰拱底。

将数值模拟得到的位移与现场监测的位移进行对比分析,除去已破坏的 2 个监测点,其余监测点上

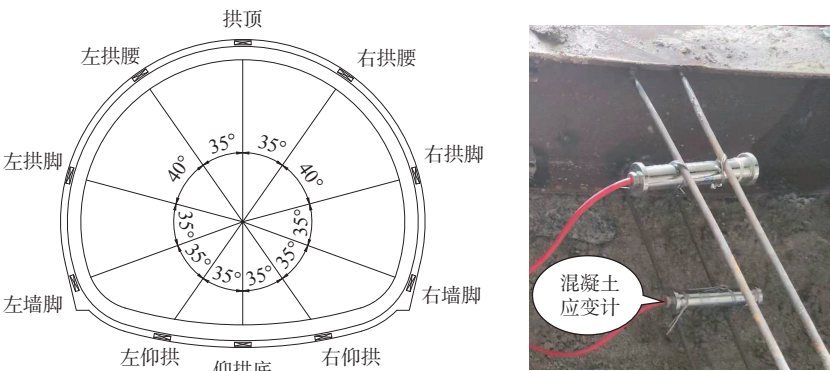


图 20 初支混凝土应变计布置示意图
Fig. 20 Schematic layout of initial concrete strain gauges

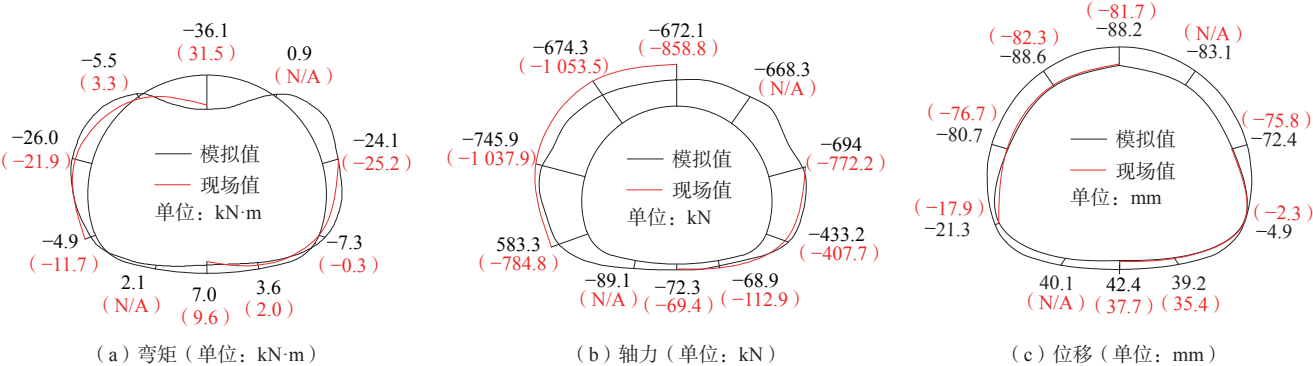


图 21 初支内力、位移对比
Fig. 21 Comparison of initial internal forces and displacements
注: 图中 N/A 表示监测点位损坏。

的位移值与模拟值相差较小, 最大差值仅为 6.5 mm, 位于拱顶处, 最小差值为 2.6 mm, 位于右墙脚处。

5 结论

- (1) 深埋侧采用锚杆格梁防护和方格型骨架护坡使得安全系数提高 64.6%; 相较于传统方法, 在隧道进洞处以及边坡坡脚设置锚固桩能提高浅埋侧 13.7% 和 10.1% 的抵抗力。
- (2) 隧道最大沉降值与埋深呈正相关关系, 隧道深埋侧的沉降普遍大于浅埋侧。隧道上方围岩向右滑移, 隧道下方围岩向左位移, 整体呈现偏转现象, 表现出向浅埋侧水平位移的趋势。
- (3) 隧道初期支护中的最大正弯矩、最大负弯矩和最大轴力均随埋深增大而增加, 最大正弯矩均出现在拱顶范围, 最大负弯矩均出现在浅埋侧边墙, 最大轴力分布在右拱腰和左拱脚处。

参考文献 (References) :

[1] 赵建军, 王思敬, 尚彦军, 等. 香港全风化花岗岩的固

结特性 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 85 - 88. [ZHAO Jianjun, WANG Sijing, SHANG Yanjun, et al. Consolidation characteristics of completely decomposed granite in Hong Kong [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(1): 85 - 88. (in Chinese with English abstract)]

[2] LIU Pan, LIN Jinhong, WANG Yang, et al. Effect of moisture content on the shear behaviour of a completely decomposed granite: an experimental study [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 6631422.

[3] LEE S H, CHUNG C K, SONG Y W, et al. Relationship between chemical weathering indices and shear strength of highly and completely weathered granite in south Korea [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(3): 911.

[4] KUMRUZZAMAN M, YIN Jianhua. Influences of principal stress direction and intermediate principal stress on the stress-strain-strength behaviour of completely decomposed granite [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(2): 164 - 179.

[5] 陈德金. 全风化花岗岩隧道塌方灾害致灾机理研究 [J]. *土工基础*, 2021, 35(2): 194 - 198. [CHEN

- Dejin. Tunnel collapse hazards in completely and strongly weathered granite[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2021, 35(2): 194 – 198. (in Chinese with English abstract)]
- [6] CUI Qinglong, WU Huaina, SHEN Shuilong, et al. Protection of neighbour buildings due to construction of shield tunnel in mixed ground with sand over weathered granite[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 458.
- [7] 赵金鹏, 谭忠盛, 梁文广, 等. 超浅埋大跨隧道管棚支护机理及效果分析 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(增刊 1): 87 – 96. [ZHAO Jinpeng, TAN Zhongsheng, LIANG Wenguang, et al. Support mechanism and effect analysis of an umbrella arch in a super shallow-buried large-span tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(Sup1): 87 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 邓永杰. 浅埋偏压大跨度隧道洞口段进洞技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013. [DENG Yongjie. Study on entrance technology of large-span shallow tunnel portal under unsymmetric pressure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 宋青会. 浅埋偏压隧道洞口段施工地质灾害分析及处治 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(3): 93 – 96. [SONG Qinghui. Analysis and treatment of geological hazards in construction of shallow bias tunnel portal sections[J]. *Highway Transportation Science and Technology(Applied Technology Edition)*, 2019, 15(3): 93 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈娱, 张成良, 王海强. 浅埋偏压连拱隧道现场监测与结构受力分析研究 [J]. 力学与实践, 2016, 38(4): 391 – 397. [CHEN Yu, ZHANG Chengliang, WANG Haiqiang. On-site supervision measure and the structural force analysis of shallow multi-arch tunnel under complicated geological conditions[J]. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(4): 391 – 397. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 徐前卫, 程盼盼, 苏培森, 等. 浅埋偏压隧道进洞施工力学特性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1311 – 1318. [XU Qianwei, CHENG Panpan, SU Peisen, et al. Study on construction mechanical properties of the shallow tunnel entrance under unsymmetrical pressure[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(5): 1311 – 1318. (in Chinese with English abstract)]
- [12] LEI Mingfeng, PENG Limin, SHI Chenghua. Model test to investigate the failure mechanisms and lining stress characteristics of shallow buried tunnels under unsymmetrical loading[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 46: 64 – 75.
- [13] ZHANG Lin, PAN Yuanguai, CHEN Kezhu, et al. The effect of CRD method and auxiliary construction on surface settlement in shallow-buried tunnels[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 998717.
- [14] 牟智恒, 严涛, 田明杰, 等. 邻路基变坡条件下浅埋偏压隧道施工工法及合理开挖工序研究 [J]. 土木工程学报, 2017(增刊 2): 203 – 208. [MOU Zhiheng, YAN Tao, TIAN Mingjie, et al. Research on the construction method and reasonable excavation sequence of shallow tunnel with unsymmetrical loadings adjacent to changing roadbed slope[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017(Sup2): 203 – 208. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 胡炜, 谭信荣, 蒋尧, 等. 深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 60 – 68. [HU Wei, TAN Xinrong, JIANG Yao, et al. A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: Taking one tunnel of the Zhengwan line as an example[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 60 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 严涛, 李坤杰, 牟智恒, 等. 变坡条件下浅埋偏压隧道围岩压力解析法 [J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 531 – 536. [YAN Tao, LI Kunjie, MOU Zhiheng, et al. Analytical method for calculation of surrounding rock pressure of shallow-buried and unsymmetrically loaded tunnel adjacent to variable slope[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(3): 531 – 536. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 白强强, 陈健. 基于合理拱轴线的偏压隧道最优断面研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊 1): 3160 – 3168. [BAI Qiangqiang, CHEN Jian. Study on the optimal shape of biased-pressure tunnel based on rational arch axis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(Sup1): 3160 – 3168. (in Chinese with English abstract)]
- [18] PANJI M, KOOHSARI H, ADAMPIRA M, et al. Stability analysis of shallow tunnels subjected to eccentric loads by a boundary element method[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(4): 480 – 488.

- [19] 黄明利,姚夏壹,谭忠盛,等.富水风化花岗岩地层深竖井衬砌破坏特征研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(增刊1):433-440. [HUANG Mingli, YAO Xiayi, TAN Zhongsheng, et al. Study on failure characteristic of deep shaft lining in water-rich weathered granite stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(Sup1): 433-440. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王登科,骆建军,文绍全,等.岩层倾角对层状偏压隧道围岩稳定性影响分析[J].北京交通大学学报,2022,46(3):95-102. [WANG Dengke, LUO Jianjun, WEN Shaoquan, et al. Influence analysis of rock dip angle on surrounding rock stability of layered unsymmetrical-loaded tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(3): 95-102. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 刘云雨,奚魏征,潘屹,等.软岩浅埋偏压隧道洞口二衬裂缝形成机理及处理措施力学分析[J].公路,2022,67(5):285-291. [LIU Yunyu, XI Weizheng, PAN Yi, et al. Mechanical analysis of crack formation mechanism and treatment measures in the second lining of soft rock tunnel entrance under unsymmetrical pressure[J]. Highway, 2022, 67(5): 285-291. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 宋战平,裴佳锋,潘红伟,等.浅埋偏压隧道洞口段超前大管棚支护效果分析[J].现代隧道技术,2022,59(6):86-96. [SONG Zhanping, PEI Jiafeng, PAN Hongwei, et al. Analysis on the support effect of advance large pipe umbrella at portal section of shallow tunnel under unsymmetrical load[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(6): 86-96. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 高景明,冯世展,黄光友,等.高山融雪对浅埋偏压小净距隧道边坡稳定性的影响及处置措施[J].力学与实践,2024,46(4):786-795. [GAO Jingming, FENG Shizhan, HUANG Guangyou, et al. The influence of alpine snow melting on the stability of shallow buried bias pressure and small clear distance tunnel slope and its treatment measures[J]. Mechanics in Engineering, 2024, 46(4): 786-795. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈航,张贝贝,旷华江,等.基于BP神经网络反演分析的隧道塌方机理研究[J].水文地质工程地质,2023,50(3):149-158. [CHEN Hang, ZHANG Beibei, KUANG Huajiang, et al. A study of the tunnel collapse mechanism based on the BP neural network inversion analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 149-158. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 陈秋雨,黄璐,潘虎,等.径向让压系统对软岩隧道围岩力学特性影响研究[J].水文地质工程地质,2024,51(4):146-156. [CHEN Qiuyu, HUANG Lu, PAN Hu, et al. Enhancing mechanical characteristics of soft rock tunnel surrounding rock through radial yield pressure system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 146-156. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 余浪浪,王志亮,汪书敏,等.深部隧道爆破开挖诱发围岩损伤与扰动效应数值分析[J].水文地质工程地质,2023,50(5):117-123. [YU Langlang, WANG Zhiliang, WANG Shumin, et al. Numerical analysis of damage and disturbance effect of surrounding rocks induced by deep tunnel blast excavation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 117-123. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 郑滔.软弱破碎地层中浅埋偏压隧道的管棚预支护研究[D].重庆:重庆交通大学,2020. [ZHENG Tao. Research on pre-support of pipe shed in shallow buried bias tunnel in weak fractured stratum[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 陶祥令,马金荣,张昌伟,等.下穿道路隧道浅埋暗挖管棚支护参数及优化设计研究[J].中国科技论文,2016,11(1):66-70. [TAO Xiangling, MA Jinrong, ZHANG Changwei, et al. Study on the parameters and optimum design for pipe roof reinforcement of the shallow buried road tunnels[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(1): 66-70. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 曹成威,石钰锋,詹涛,等.考虑动态施工超长管棚预支护力学特性及参数影响分析[J].中国安全生产科学技术,2022,18(6):98-104. [CAO Chengwei, SHI Yufeng, ZHAN Tao, et al. Analysis on mechanical characteristics and parameter influence of pre-support for ultra-long pipe shed considering dynamic construction[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(6): 98-104. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 王浩,刘洋,赖孝辉,等.富水隧道施工期及运营期衬砌结构力学特性研究[J].公路,2021,66(1):322-329. [WANG Hao, LIU Yang, LAI Xiaohui, et al. Research on mechanical characteristics of lining structure for enriched water tunnel during construction and operation period[J]. Highway, 2021, 66(1): 322-329. (in Chinese with English abstract)]