

既有山岭隧道扩建施工关键参数影响分析

张永忠¹, 刘东², 韩健勇^{2,*}, 王庆海², 张荣珍², 崔中全³

(1. 甘肃省武威公路事业发展中心, 武威 733000; 2. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101;
3. 济南中央商务区投资建设集团有限公司, 济南 250101)

摘要:为了给既有隧道扩建的设计和施工提供科学的指导, 依托某既有山岭隧道扩建工程建立三维数值模型, 通过与监测数据对比验证了计算模型的准确性, 然后基于数值模型对施工方案进行了优化分析。研究表明: 在考虑现场施工进度和安全性的前提下, 建议循环进尺为 2.0 m; 锚杆长度与围岩变形呈现负相关, 锚杆纵向间距与围岩变形呈现正相关, 当锚杆纵向间距超过 1.0 m 时, 围岩变形显著增大, 建议采用长度 3.0 m, 纵向间距 1.0 m 的锚杆进行支护。研究结论可为类似的工程提供参考和依据。

关键词:隧道工程; 隧道扩建; 锚杆; 扩挖方案; 数值模拟

中图分类号: U457+.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)01-0082-06

Influence analysis of the key parameters in the expansion construction of existing mountain tunnels

ZHANG Yongzhong¹, LIU Dong², HAN Jianyong^{2,*}, WANG Qinghai²,
ZHANG Rongzhen², CUI Zhongquan³

(1. Wuwei Highway Development Center of Gansu Province, Wuwei 733000, China;
2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;
3. Jinan Central Business District Investment and Construction Group Co. Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: In order to provide scientific guidance for the design and construction of the expansion of existing tunnels, a three-dimensional numerical model was established based on an existing mountain tunnel reconstruction and expansion project. The accuracy of the calculation model was verified by comparing it with the monitoring data, and then the construction plan was analyzed and optimized based on the numerical model. The results show that considering the construction progress and safety on site, the cycle footage is recommended to be 2.0 m. The length of the bolts is negatively correlated with the deformation of the surrounding rock, and the longitudinal spacing of the bolts is positively correlated with the deformation of the surrounding rock. When the longitudinal spacing of the bolts exceeds 1.0 m, the deformation of the surrounding rock increases significantly. It is therefore recommended that anchor rods with a length of 3.0 m and a longitudinal spacing of 1.0 m should be used for

收稿日期: 2023-05-25

基金项目: 甘肃省科技计划项目(22YF7FH224)

作者简介: 张永忠(1969-), 男, 甘肃兰州人。高级工程师, 主要从事公路桥梁隧道设计与施工方面的研究。

E-mail: leomdm@163.com.

* 通信作者: 韩健勇(1990-), 男, 山东德州人。博士, 副研究员, 主要从事岩土隧道方面的研究。E-mail: hanlwb@163.com.

support. The research conclusions can provide reference and basis for similar projects.

Key words: tunnel engineering; tunnel expansion; anchor; expansion scheme; numerical simulation

随着我国地下交通运输业的快速发展,早期建造的隧道已无法满足当下运力需求,亟需新建或对既有隧道进行改扩建。但新建隧道往往周期比较长且造价较高,而将一些老旧落后的既有隧道进行改造升级更加经济、快速,备受国内外专家学者的关注。既有隧道原位扩建是在建成并运营多年的隧道中再进行扩建,需拆除原隧道结构,再扩挖形成大断面隧道^[1]。

在对既有隧道改扩建施工过程中,将不可避免地会对未拆除隧道既有结构以及围岩产生扰动或破坏,如何选择合适的开挖和支护方案,直接影响隧道施工的安全。学者们^[2-4]研究了在施工中保持交通完全畅通情况下扩建隧道的施工及支护方法。赵文团队^[5-7]分析扩挖方法和循环进尺对扩建稳定性的影响,通过围岩环向应力演化特征的现场实测,验证了应力变化量计算式的准确性,并研究了单侧扩建、双侧扩建型式下围岩变形及应力随开挖过程的变化规律。屈希峰等^[8]以金鸡岭隧道扩建项目为依托,利用数值模拟方法得出偏压隧道不同工况下隧道结构力学响应结果。朱钊钊^[9]以黄山洞隧道扩建项目为依托,运用 Midas GTS NX 有限元软件分析了围岩不同因素对塑性区的分布大小、形状轮廓的影响。郑强^[10]以大帽山公路隧道为工程依托,对不同开挖面积、施工顺序及循环进尺等条件下的 CD 工法进行模拟,分析了扩建隧道施工过程中的围岩和支护结构受力特性。

锚杆支护作为一种有效的初期支护技术,在隧道初期支护中已经广泛使用。锚杆支护参数是决定隧道施工过程中围岩稳定的重要因素,值得深入研究。王洪涛等^[11]为研究不同锚固长度对巷道围岩的控制效果,从理论方面推导了锚杆应力分布规律,建立了不同锚固长度下巷道围岩力学分析模型,给出了巷道锚杆支护设计的工程建议措施。李鹏飞等^[12]基于 33 座隧道 68 个监测断面的 282 根锚杆轴力的统计数据,探讨了锚杆轴力的整体分布特征及围岩级别对其的影响规律,讨论了隧道锚杆轴力的时程变化特征及空间分布规律。赵东平等^[13]对近 40 年以来国内外公开发表的隧道锚杆研究论文进行统计和分析,阐述隧道系统锚杆国内外研究现状,揭示隧道系统锚杆研究的薄弱环节。于远祥等^[14]通过将隧道围岩简化为理想弹塑性介质,基于锚杆与围岩的协调变形原理,建立了锚杆与围岩相互作用的力学模型。赵亚军等^[15]用 FLAC 3D 软件对锚杆的长度、间距、预应力值等不同支护参数进行了模拟研究。时常悦等^[16]利用数值分析软件模拟研究了不同锚杆加固范围对围岩稳定性的影响规律,通过对各锚杆加固范围下不同结果指标进行参数对比分析,总结其在不受其他因素影响下的变化规律,给出了锚杆合理的加固范围。

鉴于此,本文依托既有山岭隧道扩建工程建立数值模型,通过现场监测数据对模型进行验证,然后基于数值模型研究分析既有山岭隧道扩建过程中循环进尺对周围环境的影响,锚杆参数对围岩变形的影响,研究结果可以为今后既有隧道扩建工程提供参考。

1 工程概况

既有山岭隧道于 1924 年始建,位于辽宁北票市上园镇、大板镇交界处,起讫里程 K85+696.5—K86+883.6,全长 1187.10 m。既有隧道为浅埋拱形隧道,埋深约 23.5 m,轮廓类马蹄形,衬砌为直墙拱形衬砌,拱部材料采用条石,边墙采用的混凝土强度等级为 C20。原隧道高跨比为 1.47,断面面积为 41.3 m²。扩挖后隧道宽度为 7.15 m,高度为 9.25 m,高跨比为 1.29,断面面积为 64.9 m²。隧道线路所在地区地质构造运动较为显著,间歇性隆起为主要运动特征,该既有隧道线路所揭露地层为表覆第四系全新统残地层(Q_{4el+dl})粗角砾土,下伏侏罗系上统(J₃)泥质砂岩。既有隧道入口如图 1 所示。



图 1 既有隧道入口

2 数值模型建立及验证

2.1 计算模型建立

依托 V 级围岩埋深最大段工程建立三维有限元数值模型,隧道埋深为 22 m,计算模型如图 2 所示,隧道位于模型中部,上至地表、侧壁和拱底到模型边界距离均为 5 倍洞径。从上至下地层依次为粗角砾土、全风化泥质砂岩、强风化泥质砂岩和弱风化泥质砂岩。土体采用摩尔-库伦本构模型,既有隧道衬砌、初期支护、二衬及锚杆采用弹性本构,共计 72 072 个单元,75 081 个节点。模型采取的约束为:上部自由面,下部设置竖向位移约束,左右两侧设置水平位移约束。计算模型地层参数见表 1。

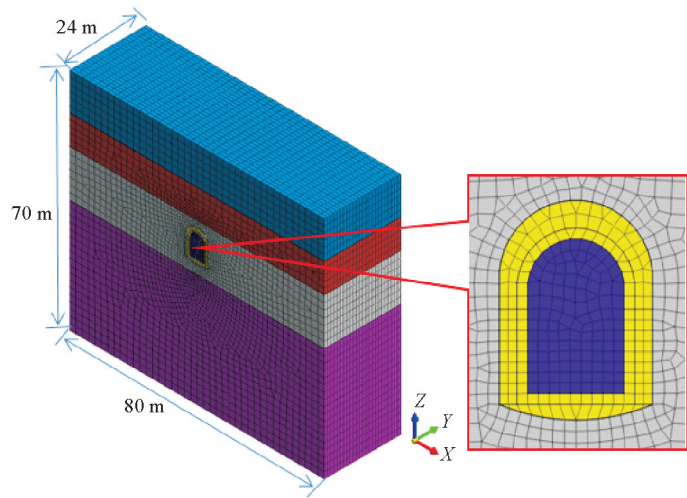


图 2 计算模型

表 1 计算地层模型参数

地层	E/MPa	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/(\text{°})$
粗角砾土	40	19.0	15	20
全风化泥质砂岩	850	19.9	100	21
强风化泥质砂岩	1500	21.2	180	26
弱风化泥质砂岩	3200	22.2	250	35

注: E 为弹性模量; γ 为重度; c 为黏聚力; ϕ 为内摩擦角

2.2 计算模型验证

既有隧道扩建施工期间采用全站仪对拱顶沉降进行监测,施工周期为 16 d,提取拱顶沉降模拟值,与现场监测值进行对比,结果如图 3 所示。由图 3 可知,拱顶沉降模拟值与监测值在施工过程中的变化规律相似,拱顶沉降数值模拟最大值为 5.1 mm,现场实测最大值为 4.8 mm,相差在 6% 以内。由此可见本文建立的数值模型具有一定的准确性,且计算结果偏于安全。

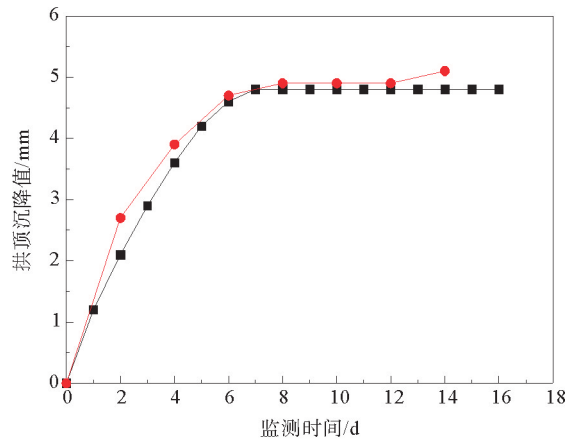


图 3 监测值与模拟值对比

—■— 监测值; —●— 模拟值

3 扩建施工关键参数分析

基于已验证的数值模型,分析既有隧道扩建过程中循环进尺对围岩变形和地表沉降的影响,锚杆长度以及锚杆纵向间距对围岩变形的影响,选择合适的隧道扩建施工方案。

3.1 不同循环进尺影响分析

既有隧道扩挖时,不同的循环进尺对地表沉降及围岩位移影响较大,基于全断面法,对 3 种不同循环进尺(1.0, 2.0, 3.0 m)进行研究。图 4 为不同循环进尺对应的隧道拱顶竖向位移及地表沉降曲线。最大竖向位移均位于隧道口位置处,随着距隧道口距离的增大,拱顶竖向位移逐渐减小,在隧道掌子面处位移产生突变。随着循环进尺的增大,隧道地表沉降及拱顶沉降均出现逐渐增大的趋势。循环进尺过大时,不

利于围岩的稳定性,因此隧道开挖时,应控制循环进尺不能过大,否则容易导致围岩的失稳。

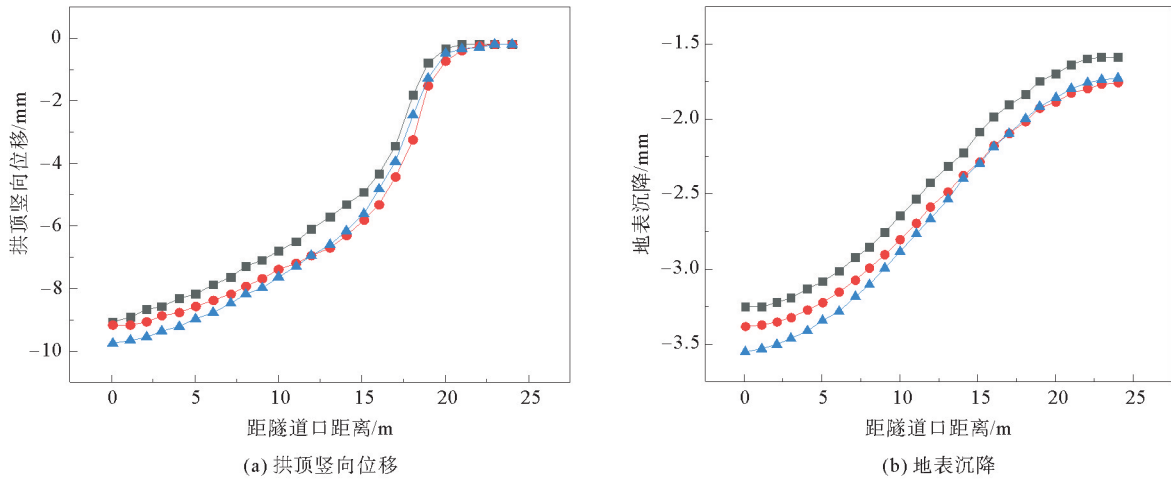


图 4 不同循环进尺下隧道纵剖面竖向位移曲线

—■— 循环进尺 1.0 m; —●— 循环进尺 2.0 m; —▲— 循环进尺 3.0 m

图 5 为不同循环进尺的围岩水平位移变化曲线,循环进尺为 1.0 m 时,最大水平位移为 8.22 mm;循环进尺为 2.0 m 时,最大水平位移为 9.38 mm,较循环进尺为 1.0 m 时增大 14%;循环进尺为 3.0 m 时,最大水平位移为 11.77 mm,较循环进尺为 2.0 m 时增大 25%。随着隧道开挖循环进尺的增加,围岩水平方向位移逐渐增大,且增长速率逐渐变大。循环进尺的确定还应结合实际施工,循环进尺太小则会导致施工过程过于繁琐,因此建议依托既有隧道扩建采用 2.0 m 循环进尺。

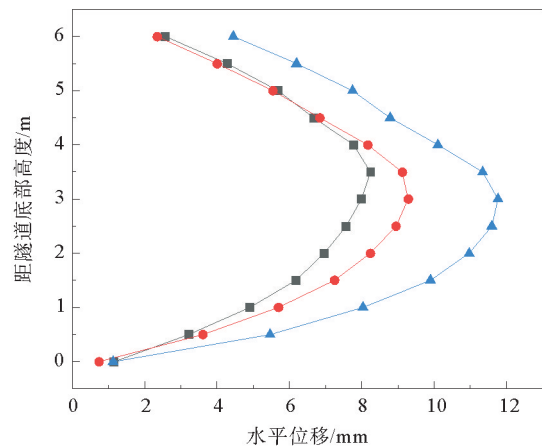


图 5 不同循环进尺隧道围岩水平位移曲线

—■— 循环进尺 1.0 m; —●— 循环进尺 2.0 m; —▲— 循环进尺 3.0 m

3.2 锚杆长度对围岩变形的影响

锚杆长度的确定对于隧道稳定性起到了十分重要的作用。锚杆长度太短,起不到支护的作用,锚杆长度太长,则容易造成材料的浪费。针对扩建既有隧道初期支护中的锚杆长度进行参数优化研究,锚杆长度分别为 2.0,2.5,3.0,3.5 和 4.0 m,纵向间距为 1.0 m。

提取拱顶最大下沉位移、围岩最大水平位移和掌子面挤出位移随锚杆长度的变化结果,见图 6。由图 6(a)可以看出,当锚杆长度为 2.0 m 时,拱顶下沉位移最大,为 11.43 mm。随着锚杆长度的增加,拱顶最大下沉位移逐渐减小,且曲线逐渐趋于平缓,当锚杆长度为 4.0 m 时,拱顶下沉位移最小,为 10.08 mm。当锚杆长度由 2.0 m 增大到 3.0 m 时,位移减小速率较大,拱顶最大下沉位移减小约 9%。锚杆长度由 3.0 m 增大到 4.0 m 时,位移减小速率较小,拱顶最大下沉位移仅减小约 3%。由此可以看出,锚杆长度的增加有利于减小围岩拱顶下沉位移,锚杆长度增大到一定程度,拱顶下沉位移减小不再明显。由图 6(b)可以看出,当锚杆长度为 2.0 m 时,围岩最大水平位移最大,为 13.34 mm。随着锚杆长度的增加,围岩最大水平位移逐渐减小,且曲线逐渐趋于稳定。当锚杆长度超过 3.0 m 时,位移减小不明显。当锚杆长度为 4.0 m 时,围岩最大水平位移最小,为 10.84 mm。当锚杆长度由 2.0 m 增大到 3.0 m 时,位移减小速率较大,围岩最大水平位移减小约 16%。锚杆长度由 3.0 m 增大到 4.0 m 时,位移减小速率较小,围岩最大水平位移仅减小约 3%。可见,锚杆长度的适当增加有利于减小围岩水平位移,当锚杆长度达到一定值时,锚杆长度的增加对围岩的稳定性影响不大。由图 6(c)可以看出,掌子面挤出位移随锚杆长度增

长的变化规律与水平和竖向位移变化规律相似,均为在锚杆长度小于3.0 m时,位移减小速率较大,锚杆长度大于3.0 m时,位移减小不再明显。因此,可以得出,当锚杆长度大于3.0 m时,围岩的整体变形较小。

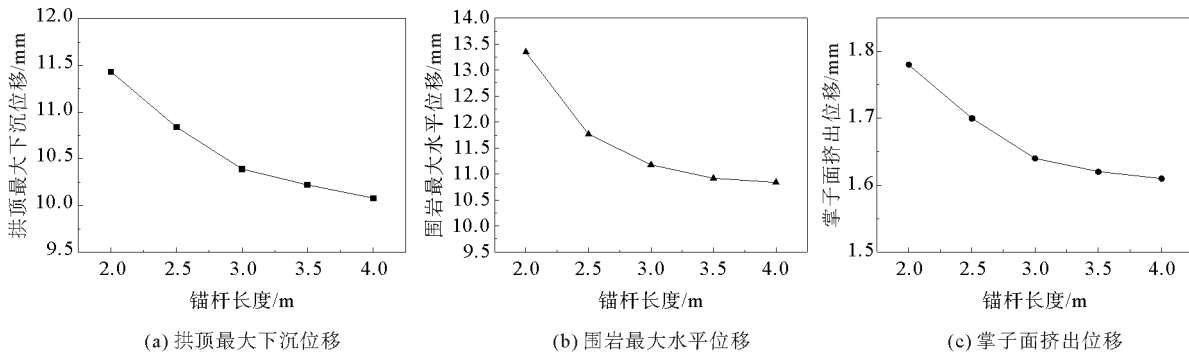


图6 围岩位移随锚杆长度变化

3.3 锚杆纵向间距对围岩变形的影响

在锚杆长度优化的结果上,对锚杆纵向间距进行参数优化研究,将锚杆纵向间距设为0.5,1.0,1.5,2.0,2.5和3.0 m,分析支护参数对围岩变形的影响。

提取拱顶最大下沉位移、围岩最大水平位移和掌子面挤出位移随锚杆纵向间距的变化结果,见图7。由图7(a)可以看出,当锚杆纵向间距为0.5 m时,拱顶最大下沉位移最小,为9.86 mm。随着锚杆纵向间距的增加,拱顶最大下沉位移逐渐增大,且增长速率呈现先增大后减小的趋势,锚杆间距为1.0~2.0 m时增长速率较大,当锚杆纵向间距为3.0 m时,拱顶下沉位移最大,为10.90 mm。由此可以看出,锚杆纵向间距的增加会导致围岩拱顶下沉位移的增加。当锚杆间距较小时,相邻锚杆之间加固范围会产生一定的重叠部分,形成加固拱,加固拱能够有效抵抗围岩变形,因此围岩位移较小。随着锚杆间距的增大,加固拱逐渐消失,因此抵抗变形的能力大大减小。当锚杆间距较大时,锚杆只能起到加固周围岩体的作用,此时锚杆间距的增加对围岩变形的影响程度较小。由图7(b)可以看出,当锚杆纵向间距为0.5 m时,围岩最大水平位移最小,为9.07 mm。随着锚杆纵向间距的增加,围岩最大水平位移逐渐增大,且增长速率在锚杆纵向间距为1.0~1.5 m时最大。当锚杆纵向间距为3.0 m时,围岩最大水平位移最大,为15.11 mm。当锚杆纵向间距由0.5 m增大到1.0 m时,围岩最大水平位移增大约9%。锚杆纵向间距由1.0 m增大到1.5 m时,围岩最大水平位移增大约24%。可见,锚杆纵向间距超过1.0 m时,围岩水平位移将会迅速增大。由图7(c)可以看出,掌子面挤出位移随锚杆纵向间距增长逐渐增大,掌子面挤出位移最大值约2.0 mm。当锚杆间距小于2.5 m时,增长速率呈现先增大后减小的趋势,在锚杆间距为3.0 m时出现位移的突变。因此,综合考虑经济以及施工效率,锚杆纵向间距建议取1.0 m,此时围岩各项位移参数虽不为最优,但在锚杆纵向间距小于1.0 m范围内围岩位移变化速率较小,仍可有效限制围岩变形。

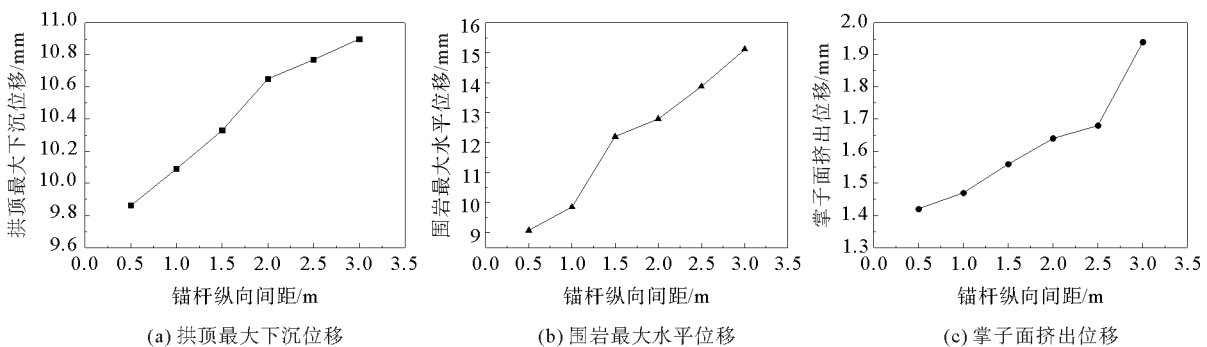


图7 围岩位移随锚杆纵向间距变化

4 结论

本文依托某既有山岭隧道扩建工程,研究了循环进尺对扩建稳定性的影响,从锚杆长度和锚杆纵向间距方面对锚杆支护参数进行了优化研究,得出以下结论:

1) 随着循环进尺的增加,围岩变形逐渐增大,围岩变形增长的速率显著增大。循环进尺的确定还应结合实际施工情况,循环进尺太小会导致施工过程过于繁琐。既有隧道扩建工程循环进尺建议采用2.0 m。

2) 锚杆长度与围岩变形呈现负相关,随着锚杆长度的增加,围岩变形减小速率逐渐减弱,当锚杆长度超过3.0 m时,变形减小不再明显。

3) 锚杆纵向间距与围岩变形呈现正相关,随着锚杆纵向间距的增加,围岩变形的增长速率逐渐变大。当锚杆纵向间距超过1.0 m时,变形显著增大。

因此,针对本文工况,既有隧道扩建工程建议采用长度3.0 m、纵向间距1.0 m的锚杆进行支护,循环进尺为2.0 m进行施工。

参考文献(References):

- [1] 黄伦海,钱七虎.公路隧道大断面改扩建施工开挖方案研究[J].现代隧道技术,2016,53(5):145-153.
HUANG Lunhai, QIAN Qihu. Study on excavation schemes for the redevelopment construction of highway tunnels with large sections[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(5): 145-153.
- [2] TONON F. Methods for enlarging transportation tunnels while keeping tunnels fully operational[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2010, 15(4): 248-271.
- [3] SONG Y, SHI B, HUI L, et al. Study on construction mechanics of in-situ expansion of ultra-large flat tunnel in collapse section of an existing tunnel[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570: 22068.
- [4] MASHIMO H, ISHIMURA T. Technological development of section enlargement for existing tunnels[J]. Tunnels and Underground, 2003, 34(9): 729-736.
- [5] 赵文,王鑫,柏谦.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),2021,42(5):713-719.
ZHAO Wen, WANG Xin, BAI Qian. Construction mechanics of in-situ expansion of the intersection of existing tunnel shaft and main tunnel[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021, 42(5): 713-719.
- [6] 王鑫,赵文,柏谦.原位扩建既有隧道主洞与竖井交叉段扩建型式[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(10):1469-1476.
WANG XIN, ZHAO Wen, BAI Qian. Expansion type of in-situ expansion of the intersection between main tunnel and shaft in the existing tunnel[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(10): 1469-1476.
- [7] 孙大增,赵文,王鑫,等.原位扩建既有隧道围岩应力变化特征[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(4):565-572.
SUN Dazeng, ZHAO Wen, WANG Xin, et al. Stress change characteristics of the existing tunnel surrounding rocks by in-situ expansion[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(4): 565-572.
- [8] 屈希峰,党武娟,刘永红.既有隧道改扩建工程方案研究[J].公路,2014,59(2):206-209.
QU Xifeng, DANG Wujuan, LIU Yonghong. Study on the reconstruction and expansion project of existing tunnel[J]. Highway, 2014, 59(2): 206-209.
- [9] 朱钊钊.既有公路隧道不同扩挖方式围岩塑性区分布研究[D].宜昌:三峡大学,2022.
ZHU Zhaozhao. Study on the distribution of plastic zone of surrounding rock in different expansion methods of existing highway tunnels[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2022.
- [10] 郑强.软弱围岩中特大断面超小净距隧道2扩4施工方法研究[D].厦门:华侨大学,2011.
ZHENG Qiang. Study on construction method of 2 expanded 4 on ultra-soft rock in the large section neighborhood tunnel[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2011.
- [11] 王洪涛,王琦,王富奇,等.不同锚固长度下巷道锚杆力学效应分析及应用[J].煤炭学报,2015,40(3):509-515.
WANG Hongtao, WANG Qi, WANG Fuqi, et al. Mechanical effect analysis of bolts in roadway under different anchoring lengths and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 509-515.
- [12] 李鹏飞,黄靖绪,陈柯屹,等.隧道锚杆轴力时空特征的统计分析[J].现代隧道技术,2021,58(5):227-236.
LI Pengfei, HUANG Jingluo, CHEN Keyi, et al. Statistical analysis on temporal and spatial characteristics of the axial force of anchor bolts in tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 227-236.