

基于粒子群算法高地应力软岩隧道支护方案优化

Optimization of Support Scheme for High Ground Stress Soft Rock Tunnel based on Particle Swarm Optimization Algorithm

余文静^{1,2}, 高新强^{1,2,3}, 孔超⁴, 王立川⁵, 赵静波⁵, 关岳卓尔^{1,2}, 董北毅^{1,2}, 朱正国^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 河北省交通工程结构力学行为演变与控制重点实验室,
石家庄 050043; 4. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 绵阳 210000; 5. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

摘 要: 隧道初期支护参数对高地应力软岩大变形隧道的安全施工有重要影响。依托西部地区某高地应力隧道, 采用数值模拟方法和粒子群算法优化支护方案中初期支护的钢拱架纵向间距、锚杆长度、锚杆环、纵向间距、喷射混凝土厚度及强度等参数。结果表明: 为控制初期支护拱顶沉降变形量, 钢架抗弯刚度与钢架纵向间距、锚杆长度与锚杆纵向间距参数取值具有反相关性, 需在一定范围内取值; 综合拱脚和拱顶变形分析, 锚杆长度应大于 3 m, 锚杆纵向间距应小于 1.0 m; 喷射混凝土强度等级及厚度取值偏保守, 可以适当降低。

关键词: 铁路隧道; 高地应力; 初期支护变形; 支护方案优化; 粒子群算法

中图分类号: U455 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0105-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.020

YU Wenjing^{1,2}, GAO Xinqiang^{1,2,3}, KONG Chao⁴, WANG Lichuan⁵, ZHAO Jingbo⁵,
GUAN Yuezhao^{1,2}, DONG Beiyi^{1,2}, ZHU Zhengguo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Hebei Key Laboratory of Mechanics Behavior Evolution and Control of Transport Engineering Structures, Shijiazhuang 050043, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 210000, China;
5. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The initial support parameters have a significant impact on the safe construction of highly stressed soft rock tunnels with large deformations. Based on a highly stressed tunnel in the western region, numerical simulation and particle swarm optimization (PSO) to optimize key parameters of the initial support scheme, such as: steel arch longitudinal spacing, anchor bolt length and circumferential spacing, and shotcrete thickness and strength. The results show that to control the settlement deformation of the initial support arch vault, there is an inverse correlation between the bending stiffness of steel frame and the

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (E202310057)。

作者简介: 余文静 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 隧道与地下工程围岩稳定性。

通信作者: 高新强 (1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 隧道与地下工程围岩稳定性。

收稿日期: 2024-07-03

道桥技术

longitudinal spacing of the steel arch, as well as the length and longitudinal spacing of the anchor. These parameters should be selected within certain ranges; Comprehensive arch foot and vault deformation analysis, anchor length should be longer than 3 m, anchor longitudinal spacing should be less than 1.0 m; the strength grade and thickness of shotcrete are conservative and can be appropriately reduced.

Key words: railway tunnel; high ground stress; initial support deformation; optimization of supporting scheme; particle swarm optimization algorithm

0 引言

高地应力软岩隧道大变形控制是目前隧道工程的热点问题之一^[1],具有施工风险大、整治成本高、处理周期长等工程特点。高地应力软岩隧道在施工和运营阶段易产生初期支护开裂、钢拱架失稳等严重问题,进而诱发二次衬砌挤出开裂导致侵限,使隧道支护结构失效,为后续施工带来极大的安全问题^[2]。初期支护体系失效是大变形工程灾害发生的根本原因^[3]。

通过实际工况监控量测或数值模拟预测确定变形量,对比不同支护方案,确定最合理的支护方案,为高地应力隧道支护方案设计提供参考。李浩等^[4]和牛岩等^[5]以支护体系受力值、隧洞位移值及成本组成多目标函数,采用粒子群算法得到优化方案;王金峰^[6]以多种多元目标优化数学模型优化方案,有效地控制了拱底竖向位移和横向位移;余化彪等^[7]针对软岩大变形隧道以松动圈厚度为控制目标选择锚杆布置的优化方案。

支护体系能直接影响到隧道施工周边围岩的稳定性。对软岩大变形控制研究后,提出支护体系应在确保围岩本身稳定工况下,根据“让压”的施工原则,适当释放变形是确定预留变形量的一个手段^[8],对于隧道大变形灾害防控同样具有重要意义。郭小龙等^[9]以正态分布区间分级划分预留变形量,将其作为评估变形,指导施作时机的重要指标;龚海军等^[10]通过实测围岩变形,判定合适预留变形量,对矮拉山隧道中二台阶施工工法及支护体系的施作时机影响因素分析;王拓新^[11]以改进 BIM 技术模拟出盾构机掘进后的三维变形情况,更直观地反映变形影响范围;张子洋等^[12]提出多级让压,对软岩隧道支护体系的施作提供更加细致的指导。

在实际工程中支护各组成部分不是独立发挥作用,而是协同合作^[13]。单一的、独立的评估初期支

护参数与工程实际不能较好吻合。崔光耀等^[14]以围岩变形量以及围岩塑性区大小为控制目标,评估隧道支护体系强度对围岩变形与塑性区的影响;肖明清等^[15]运用总安全系数法评估多个支护体系协同作用下的支护作用效果。

以西部地区某典型铁路隧道工程为例,提取高地应力软弱围岩不同支护方案下初期支护大变形数据,运用粒子群算法计算极值,再以预留变形量为目标优化支护方案。

1 工程概况

西部某铁路隧道,围岩岩性以火山岩、千枚岩、碎屑岩、板岩为主,岩石内部节理发育,风化程度高。其中Ⅳ级围岩占比 41.3%,Ⅴ级围岩占比 18.6%,隧道周边岩石单轴饱和抗压强度 R_c 平均为 16.98 MPa。

隧道全长为 33.142 km,最大埋深约为 1 500 m,大变形段长度约为 3 090 m,约占全长的 9%,该段最大初始地应力 $\sigma_{\max}$ 约为 120.5 MPa,岩体强度应力比约为 0.14,为极高地应力区隧道。隧道施工断面为马蹄形,净空高度为 14.8 m,跨度为 7.6 m。

2 数值模拟

2.1 建立模型

采用 FLAC 3D 模拟分析隧道开挖及支护后变形特征。围岩及喷射混凝土采用实体单元,钢架及钢支撑采用 beam 单元,锚杆及锁脚锚杆采用 cable 单元。开挖过程划分为 10 个荷载步,讨论不同初期支护方案下的变形。

隧道实际埋深约为 1 000 m,在模型上边界施加 20 MPa 的竖向应力;模型左右两边界限制水平位移,允许垂直位移;下边界限制垂直位移,允许水平位移;上边界自由无约束,模型及约束如图 1 所示。

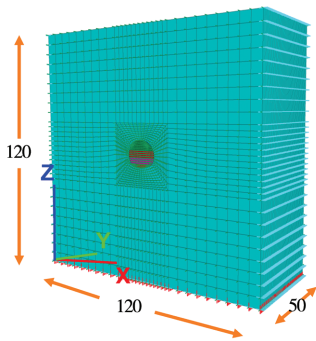


图1 数值模拟模型
Fig.1 Numerical simulation model/m

此段隧道岩体强度应力比约为0.14，属于三级大变形，相应的初期支护参数见表1。围岩参数取TB-10003—2016《铁路隧道设计规范》中建议的V级围岩参数及初期支护中喷射混凝土力学参数，见表2，锚杆、锁脚锚杆及钢架的力学参数见表3。

表1 软岩大变形等级对应预设计方案

Table 1 Pre – design solutions corresponding to large deformation classes in soft rock							
喷射混凝土		钢架		锚杆			预留变形量/cm
强度等级	厚度/cm	型号	纵向间距/m	长度/m	环向间距/m	纵向间距/m	
C35	27	全环 HW200 型	0.6	7	1.2	0.6	
							20 ~ 30

表2 围岩与喷混凝土物理力学参数

名称	重度/(kN/m³)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
V级围岩	20.0	2.00	0.35	27.0	0.20
喷射混凝土	23.0	24.17	0.20		

表3 支护结构物理力学参数

名称	弹性模量/GPa	横截面积/cm²	抗拉力/kN	黏结刚度/(MN/mm)	黏聚力/MPa
锚杆	201	8.038	250	17.5	0.2
锁脚	201	13.847	250	18.0	0.2
钢架	206	35.500			

2.2 计算参数选取

钢架的纵向间距分别取0.6、0.8、1.0、1.2 m，计算参数见表4。钢拱架的模拟如图2所示。喷射混凝土厚度分别选取25、26、27、28、29 cm，强度等级选取C30、C35、C40，不同强度等级的喷射混凝土计算力学参数见表2，强度等级不含盖的按照线性插值计算。锚杆环向间距分别选取1.0、1.2、1.4 m，锚杆纵向间距分别选取0.6、0.9、

1.2、1.5 m，锚杆长度为3~7 m，锚杆按照梅花形交错形式布置。

表4 钢架参数
Table 4 Steel arch parameters

钢架类型	截面积/cm²	极惯性矩/cm⁴	面内惯性矩/cm⁴	面外惯性矩/cm⁴	抗弯刚度/(MN·m²)
I20a	35.50	2 527	158	2 369	4.880
HW150	51.43	3 884	984	2 900	5.974
HW200	64.28	6 370	1 600	4 770	9.969

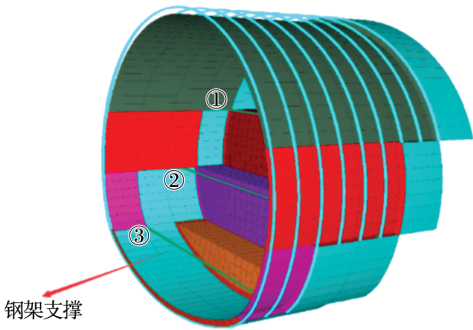


图2 钢架施作
Fig.2 Steel arch construction

考虑水平构造应力显著，整体变形特征表现突出，选取拱顶沉降及拱脚水平收敛量数据进行提取、修正、处理，运用正交试验设计方法设置了18组模拟样本。

3 粒子群算法优化支护参数

3.1 粒子群算法

粒子群算法(PSO)^[11]被用于寻全局优解，首先对所有粒子初始化，计算粒子适应度值，通过全局迭代粒子个体之间的协作和信息共享，有选择地去更新粒子速度及缩小粒子位置，直至找到最优解。相比其他求最优解的算法。此方法搜寻过程中收敛速度快、不易陷入局部最优。以找拱顶沉降量最值为例子，具体流程如图3所示。

3.2 支护方案优化

将支护参数两两组合在一起，以钢架、喷射混凝土以及锚杆其对应属性为一组，绘制两个控制因素下初期支护拱顶沉降量及拱脚水平收敛量的三维视图，以小于三级大变形中预留变形量要求25 cm作为目标，判断支护方案是否安全。利用数据样本，得到各支护参数对初期支护变形量的影响面，并找寻影响面的最大值以确保满足变形约束要求。

道桥技术

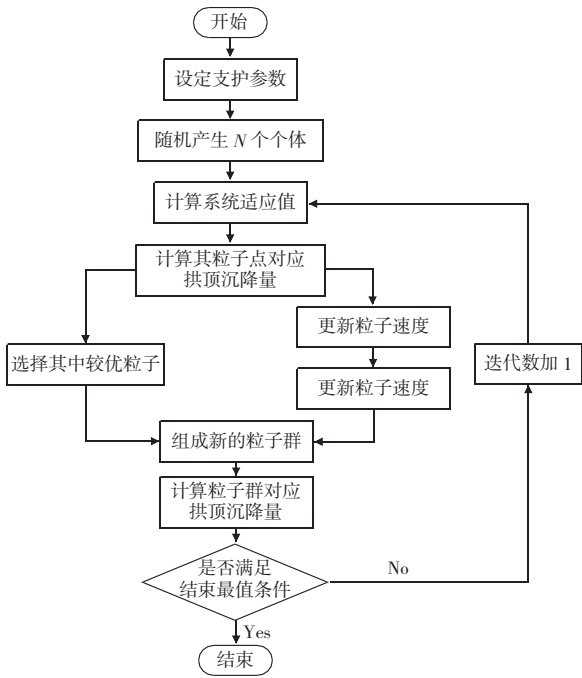


图3 粒子群算法流程

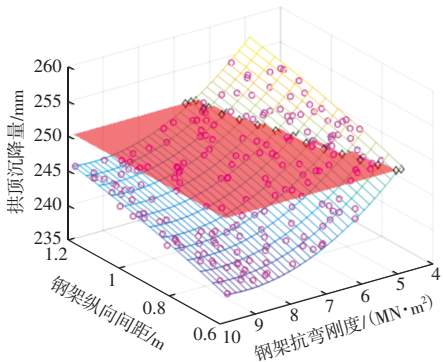
Fig. 3 Flow of the particle swarm optimization algorithm

3.2.1 钢架纵向间距和抗弯刚度

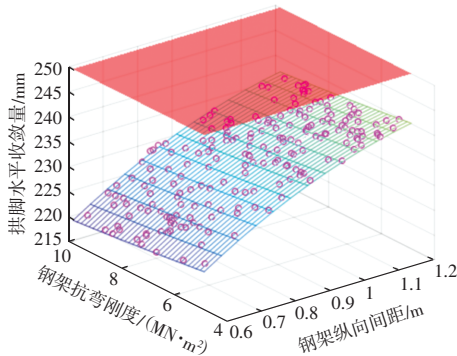
钢架纵向间距及抗弯刚度对拱顶沉降量影响面为凹曲面状，而对拱脚水平收敛量呈近似平面状，如图4所示。

对拱顶分析，当钢架抗弯刚度小于 $5.13 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ 时，钢架纵向间距缩小到最小值 0.6 m ，拱顶变形量仍超过预留变形量。而当钢架纵向间距最大 1.2 m 时，其钢架抗弯刚度应不小于 $7.76 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ 。拱脚处最大水平收敛量为 240.617 mm ，明显小于预留变形量。

钢架抗弯刚度及纵向间距组合对拱顶沉降量影响较小，最值变化量仅为 9.82% ；对拱脚水平收敛量影响较大，最值变化量为 10.12% ，支护参数范围内控制效果较好。



(a) 对拱顶沉降的影响



(b) 对水平收敛的影响

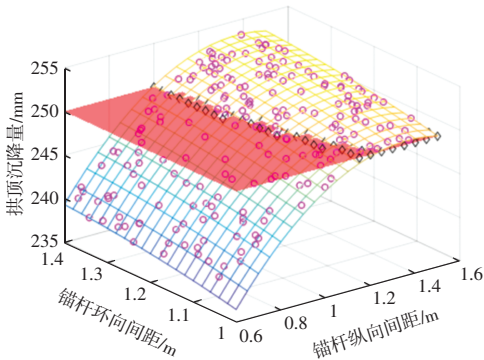
图4 钢架对初期支护变形影响

Fig. 4 The influence of steel frame on deformation of primary support

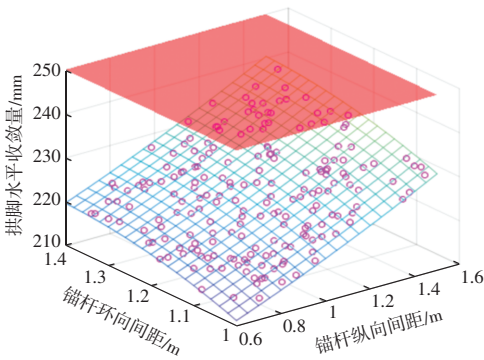
3.2.2 锚杆环向间距与纵向间距

锚杆环、纵向间距对拱顶沉降量影响面为凸曲面状，而对拱脚水平收敛量呈近似凸面状，如图5所示。

对拱顶分析，当锚杆纵向间距大于 1.22 m 时，锚杆环向间距在范围内缩小到最小值 1.0 m ，拱顶变形量仍超过预留变形量。而当锚杆环向间距最大 1.4 m 时，锚杆纵向间距应不大于 0.98 m 。而对拱



(a) 对拱顶沉降的影响



(b) 对水平收敛的影响

图5 锚杆间距对初期支护变形影响

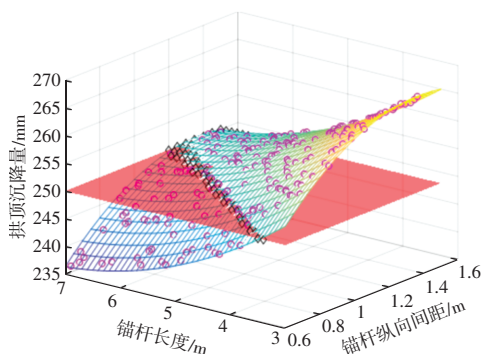
Fig. 5 The influence of bolt spacing on deformation of primary support

脚水平收敛, 在锚杆纵向间距为 1.5 m、锚杆环向间距为 1.4 m 时, 达到最大值 241.135 mm, 明显小于预留变形量。

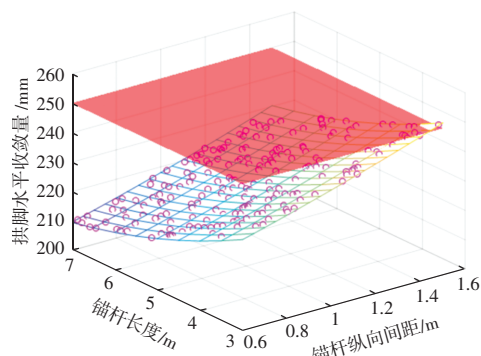
锚杆环、纵向间距组合对拱顶沉降量下最值变化量为 7.66%, 对拱脚水平收敛量下最值变化量为 14.76%, 因此改变锚杆环、纵向间距对拱脚变形比较有效。

3.2.3 锚杆长度、锚杆纵向间距

锚杆长度、纵向间距对拱顶沉降量影响面为凸曲面状, 而对拱脚水平收敛量呈微凹面状, 如图 6 所示。



(a) 对拱顶沉降的影响



(b) 对水平收敛的影响

图 6 锚杆长度及纵向间距对初期支护变形影响
Fig. 6 The influence of bolt length and longitudinal spacing on the deformation of primary support

对拱顶分析, 当锚杆长度小于 3.86 m 时, 锚杆纵向间距缩小到最小值 0.6 m, 拱顶变形量仍超过预留变形量。而当锚杆长度最大 7 m 时, 其锚杆纵向间距应不小于 1.19 m。而对拱脚水平收敛, 其在锚杆纵向间距为 1.5 m、锚杆长度为 3 m 时达最大值 252.121 mm, 仅在此点大于预留变形量。

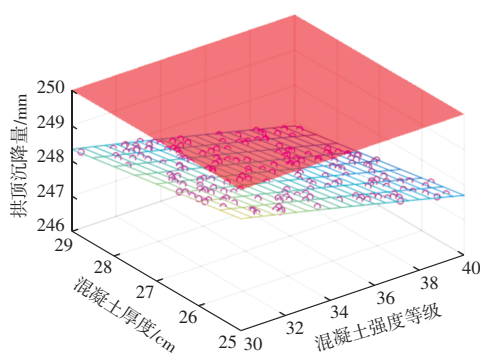
锚杆长度及纵向间距组合对拱顶沉降量最值变化量较大, 为 12.34%; 对拱脚水平收敛量最值变化量较大, 为 20.06%, 因此在参数范围内改变锚杆长

度及纵向间距对变形控制效果较好。

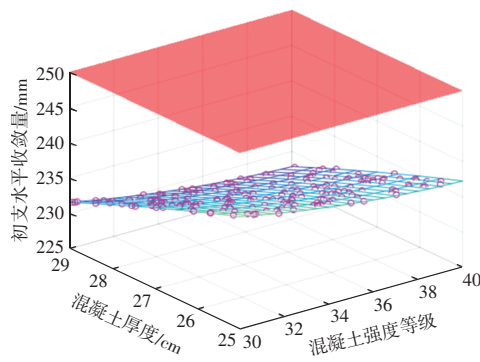
3.2.4 喷射混凝土厚度与强度等级

喷射混凝土对初支变形影响如图 7 所示, 对拱顶沉降影响面呈斜平面状, 对拱脚水平收敛量影响面呈斜平面状。

喷射混凝土厚度为 25 cm、强度等级为 C30 时, 其变形量最大, 拱顶为 249.971 mm, 拱脚为 236.089 mm, 均小于预留变形量, 表明在此喷射混凝土参数下, 满足对变形的控制要求, 可以适当减小厚度及喷射混凝土强度等级。



(a) 对拱顶沉降的影响



(b) 对水平收敛的影响

图 7 喷射混凝土对初期支护变形影响

Fig. 7 The influence of shotcrete on deformation of primary support

喷射混凝土强度等级及厚度组合对拱顶沉降量最值变化量仅为 0.81%, 对拱脚水平收敛量最值变化量为 2.21%, 控制变形能力较弱。

4 结论

基于粒子群算法计算高地应力软岩隧道支护方案的变形极大值, 并优化隧道支护方案, 以预留变形量为控制目标判断设计参数的安全合理性, 得到以下主要结论:

(1) 为控制拱顶沉降变形量, 钢架抗弯刚度应

道桥技术

大于 $5.13 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$, 而当钢架纵向间距增大, 其抗弯刚度应增大。锚杆长度应大于 3.86 m , 锚杆纵向间距应小于 1.0 m 。

(2) 为控制拱脚处水平收敛量, 三级大变形支护方案中钢架及喷射混凝土参数满足变形控制要求。对于锚杆长度为 3.0 m 时, 锚杆纵向间距应小于 1.5 m 。

(3) 喷射混凝土参数取预设支护方案下最小值, 混凝土强度等级为 C30、厚度为 25 cm 时, 拱脚及拱顶变形量均小于预留变形量, 说明支护方案偏于保守, 可以适当降低强度等级或减小混凝土喷射厚度。

(4) 为达到控制变形, 应优先选择改变锚杆长度及纵向间距的参数。

参 考 文 献

- [1] 陈志敏, 张赓旺, 龚军, 等. 宁缠隧道高地应力软岩大变形控制措施研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43 (增刊1): 398-406.
- [2] 邵珠山, 李希, 赵南南, 等. 高地应力软岩隧道初期支护优化研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (5): 99-105.
- [3] 田四明, 王伟, 唐国荣, 等. 川藏铁路隧道工程重大不良地质应对方案探讨 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (5): 697-712.
- [4] 李浩, 王立彬, 王飞球, 等. 高铁隧道支护参数多目标优化研究 [J]. 林业工程学报, 2021, 6 (5): 169-175.
- [5] 牛岩, 韩霖昌, 雷光宇. 基于粒子群算法的圆形隧洞锚喷支护优化 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13 (增刊1): 175-181.
- [6] 王金峰. 基于 PSO-RF-NSGA-II 盾构下穿施工既有隧道变形预测与优化控制 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43 (5): 745-753.
- [7] 余化彪, 周游, 杨竹胜, 等. 软岩大变形隧道最优支护参数选择 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (1): 50-56.
- [8] 陈丽俊, 陈建勋, 罗彦斌, 等. 深埋大跨度绿泥石片岩隧道变形规律及合理预留变形量 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (6): 147-157.
- [9] 郭小龙, 谭忠盛, 喻渝. 成兰铁路软岩隧道大变形控制技术及变形控制基准研究 [J]. 铁道学报, 2022, 44 (3): 86-104.
- [10] 龚海军, 赵耿鹏, 严健, 等. 川藏公路矮拉山隧道大变形特征及其影响因素分析 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (增刊2): 129-136.
- [11] 王拓新. 盾构掘进施工下周围土体变形预测及沉降控制 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (3): 36-40.
- [12] 张子洋, 汪波, 刘金炜, 等. 多级让压支护体系在软岩大变形公路隧道中的应用研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (3): 108-118, 227.
- [13] 张顶立, 孙振宇, 侯艳娟. 隧道支护结构体系及其协同作用 [J]. 力学学报, 2019, 51 (2): 577-593.
- [14] 崔光耀, 陈秦洸, 王明胜, 等. 片理化玄武岩隧道大变形影响因素分析 [J]. 高速铁路技术, 2022, 13 (6): 12-16, 62.
- [15] 肖明清, 徐晨, 谢壁婷. 基于总安全系数法的隧道主动支护体系计算方法研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (2): 43-51.