

文章编号: 1674—8247(2022)06—0012—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2022.06.003

片理化玄武岩隧道大变形影响因素分析

崔光耀¹ 陈秦泷¹ 王明胜² 祁家所¹

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中铁城市发展投资集团有限公司, 成都 610000)

摘要:为研究片理化玄武岩隧道的大变形影响因素,本文依托某隧道片理化玄武岩段,通过数值模拟分别对不同埋深、支护强度和围岩级别条件下的围岩变形进行分析。研究表明:(1)地应力、支护强度和围岩级别是片理化玄武岩隧道大变形的主要影响因素;(2)当地应力增大时,洞周各部位围岩变形量增大,围岩塑性区范围扩大;(3)当隧道支护强度增强时,洞周各部位围岩变形量减小,围岩塑性区缩小;(4)当围岩级别增大时,洞周各部位围岩变形量增大,围岩塑性区扩大。研究成果可为片理化玄武岩隧道大变形控制研究提供借鉴。

关键词:隧道工程;片理化玄武岩;大变形;影响因素;影响规律

中图分类号:U451+.2 **文献标识码:**A

On Impact Factors of Large Deformation of Tunnels in Schistose Basalt

CUI Guangyao¹ CHEN Qinlong¹ WANG Mingsheng² QI Jiasuo¹

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

2. China Railway Urban Development Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to study the impact factors of large deformation of tunnels in schistose basalt, this paper analyzes the deformation of surrounding rock under different burial depths, support strengths, and surrounding rock grades through numerical simulation based on a case study of the schistose basalt section of a tunnel. The results show that:

(1) Terrestrial stress, support strength, and surrounding rock grade are the main impact factors of large deformation of tunnels in schistose basalt. (2) When the terrestrial stress increases, the deformation of surrounding rocks around the tunnel increases, and the scope of the plastic zone of surrounding rocks is expanded. (3) When the strength of tunnel support is enhanced, the deformation of surrounding rock at various parts around the tunnel decreases, and the plastic zone of surrounding rock decreases. (4) When the grade of surrounding rock increases, the deformation of surrounding rock around the tunnel increases, and the plastic zone of surrounding rock expands. The research results can provide a reference for the study of the control of large deformation of tunnels in schistose basalt.

Key words: tunnel engineering; schistose basalt; large deformation; impact factors; impact law

随着越来越多的隧道穿越高地应力区,围岩大变形灾害开始频繁出现^[1],如青藏铁路关角隧道^[2]最大水平收敛超过500 mm,给现场施工带来极大的

困难;兰渝铁路木寨岭隧道^[3]施工中最大变形量达1 300 mm,变形速率超过680 mm/d,多次出现二衬开裂;丽香铁路中义隧道最大累计变形超过500 mm,导

收稿日期:2022-04-18

作者简介:崔光耀(1983-),男,博士,教授。

引文格式:崔光耀,陈秦泷,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.

CUI Guangyao, CHEN Qinlong, WANG Mingsheng, et al. On Impact Factors of Large Deformation of Tunnels in Schistose Basalt[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6):12-16.

致施工严重受阻。

目前,国内外学者对隧道大变形已经做了大量的分析和研究。在大变形影响因素方面,李磊^[4]通过理论分析和数值模拟,发现高应力陡倾层状软岩小间距隧道大变形灾害是围岩产状、构造应力、近接施工、围岩强度等多重因素耦合的结果;杨会军^[5]对影响复杂条件下长大隧道围岩变形的施工因素进行分析,认为施工对隧道的围岩变形影响显著,其中开挖初期影响最大;朱浩波^[6]从支护时机、支护厚度、围岩强度和埋深4个方面分析了围岩的变化规律;王智超^[7]通过数值模拟研究了锚喷厚度和开挖速度对软弱围岩的变形影响,结果表明锚喷厚度对围岩水平收敛影响微弱,而开挖速度在短期内对围岩变形影响明显,对围岩长期变形的影响较小;杨成忠^[8]分析了隧道施工过程中围岩变形规律,得出了不同围岩等级、断面尺寸和施工工法对隧道变形的影响。以上研究结果表明,隧道大变形是地应力、地层岩性、支护强度、地质构造和施工因素等条件综合作用的结果^[9-10]。

部分学者认为地应力、地层岩性、支护强度等条件是高地应力隧道大变形发生的主要原因,其中围岩级别至关重要,支护强度次之^[11-15]。为研究片理化玄武岩隧道大变形影响因素,本文采用FLAC3D数值模拟软件对不同埋深、支护强度和围岩级别条件下的围岩变形进行对比分析。研究了片理化玄武岩隧道的变形规律。

1 工程背景

1.1 地质情况

该隧道属于滇藏铁路控制工程,全长14 745 m,最大埋深为1 250 m,跨越1条断裂带,该断裂带受我国南北向地震带影响较大,构造运动强烈。隧道围岩主要为片理化玄武岩,结构面呈张开状,围岩强度低。通过铅直孔水压致裂法测得隧道最大水平主应力最大值为28.16 MPa,最大水平主应力最小值9.35 MPa,属于高地应力区。

1.2 原隧道支护

该隧道的开挖工法为双台阶法,隧道断面为边墙小曲率的A型衬砌断面,初支采用厚22 cm的C25喷射混凝土,钢拱架为间隔0.8 m的I18型工字钢;二衬为厚度为45 cm的C35混凝土。

2 研究概况

2.1 大变形影响因素

该隧道施工过程中,部分区段大变形灾害严重,

通过调查研究确定影响大变形的主要因素有:

(1) 埋深大

隧道工程平导段平均埋深780 m,最大埋深1 050 m。该段实测地应力侧压系数平均为1.74,最大水平地应力平均为23.45 MPa。

(2) 支护结构设计不合理

该隧道主洞室原设计为IV级锚喷I型支护,直墙圆拱洞形,钢拱架强度较低,不能有效提高围岩承载力,无法有效地控制围岩挤压性变形。

(3) 围岩破碎

隧道围岩岩性以玄武岩(片理化)为主,节理、裂隙发育。结构面填充物以绿泥石、蒙脱石为主,绿泥石遇水软化严重。围岩裂隙水较发育,围岩强度应力比小于0.12。

由以上分析可知,该隧道围岩大变形的影响因素主要是埋深、支护强度和围岩级别。本文借助FLAC3D分别研究不同埋深、支护强度和围岩级别对大变形的影响效果。

2.2 建立模型

采用数值软件FLAC3D建立计算模型,模型宽为隧道洞径的7倍,约50 m,纵向深度为12 m,模型高50 m(实际隧道埋深较大,以施加地应力模拟实际埋深)。模型边界条件为:四周设置法向约束,底面设置全约束,顶面无约束。模型中围岩采摩尔-库伦准则,网格单元采用弹塑性材料,初支和二衬的网格单元采用粘弹性材料。隧道开挖支护过程采用蠕变cpow模型进行计算分析。计算模型如图1所示。

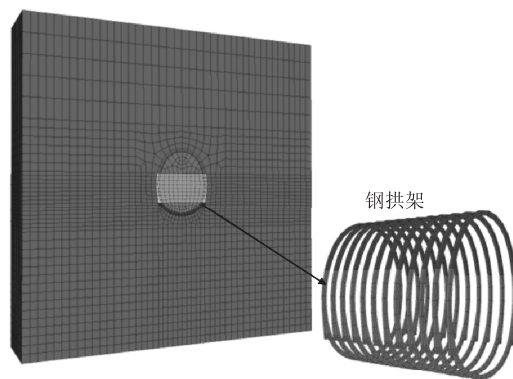


图1 隧道模型图

2.3 研究分组及计算参数

2.3.1 地应力影响分析

该隧道埋深在600~1 000 m之间,分别对埋深600 m、800 m、1 000 m的隧道的围岩变形和塑性区分布进行比较分析。方案分组及各方案地应力状态如

表1所示。

表1 不同埋深下地应力状态表

方案	埋深/ m	垂直应力/ MPa	水平主应力最大值/ MPa	水平主应力最小值/ MPa
1	600	1.51	17.26	9.35
2	800	1.75	22.25	12.37
3	1 000	2.10	28.16	16.27

隧道围岩为片理化玄武岩,初支为C25喷射混凝土+钢拱架,混凝土厚度为22 cm,钢拱架为I18型工字钢;二衬为C35混凝土,厚度为45 cm,具体参数如表2所示。

表2 模型计算参数表

材料	重度/(kN/m ³)	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	粘聚力/ MPa
围岩	27	1.3	0.26	33	0.74
初支	31.5	30	0.3	—	—
二衬	30	35	0.2	—	—

2.3.2 支护强度影响分析

根据原隧道支护设计,对3种不同的支护强度进行研究,分析研究支护强度对隧道大变形的影响规律,分组如表3所示,计算参数如表4所示。

表3 各方案支护参数表

方案	支护参数
A	C25喷射混凝土+I18工字钢
B	C30喷射混凝土+I18工字钢
C	C30喷射混凝土+H175工字钢

表4 各支护方案计算参数表

方案	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
A	26.5	28.0	0.2
B	31.5	30.0	0.3
C	33.0	31.5	0.2

2.3.3 围岩级别影响分析

该段隧道围岩主要为片理化玄武岩,岩性软弱,物理力学性能极差,且裂隙水较为发育,属于V级围岩。为研究不同围岩级别下软岩隧道变形规律,将该软岩隧道围岩取为Ⅲ级围岩、Ⅳ级围岩以及V级围岩(片理化玄武岩),研究分组及计算参数如表5所示。

2.4 监测布置

监测面设置在隧道中间部位,因隧道采用双台阶法开挖,故在上、下台阶设置收敛测线,上台阶设置拱顶沉降测点,测点分布如图2所示。

表5 研究分组及围岩计算参数表

分组	围岩级别	重度/ (kN/m ³)	弹性模 量/GPa	内摩擦 角/(°)	泊松比	粘聚 力/MPa
a	Ⅲ级	24.0	13.0	44.5	0.275	1.1
b	Ⅳ级	22.0	5.0	35	0.3	0.5
c	V级(片理 化玄武岩)	27.0	1.3	33	0.26	0.74

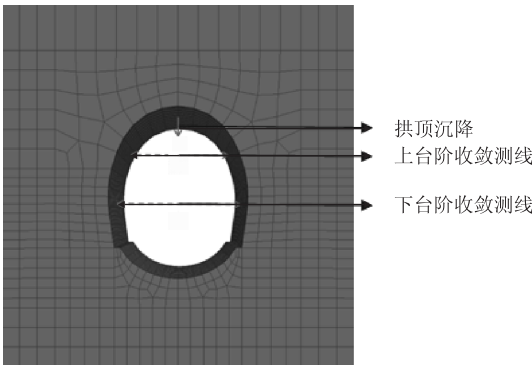


图2 测点分布图

3 数值模拟结果分析

3.1 地应力影响分析

3.1.1 围岩变形分析

提取拱顶沉降、上台阶收敛和下台阶收敛数据,绘制隧道变形量与埋深的关系特征曲线,如图3所示。

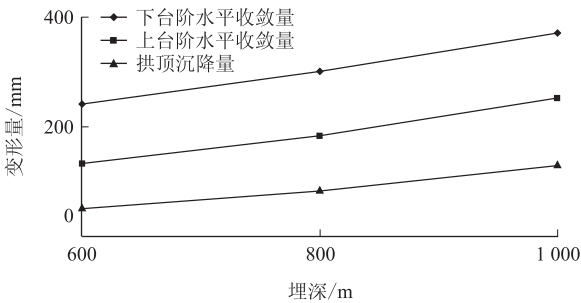


图3 不同埋深的围岩变形特征曲线图

由图3可知,隧道各部位围岩变形量随隧道埋深增加而增大,基本呈线性上升。方案B拱顶沉降量为8.36 mm,较方案A增大59.85%;方案C拱顶沉降量为13.16 mm,较方案2增大57.41%;方案B上台阶水平收敛量为18.24 mm,下台阶水平收敛量为30.14 mm,较方案A分别增大38.71%和24.96%;方案C上台阶水平收敛量为25.23 mm,下台阶水平收敛量为37.10 mm,较方案2分别增大39.97%和23.10%。

3.1.2 围岩塑性区分析

提取各组方案开挖支护完成后的塑性区范围分布,如图4所示。

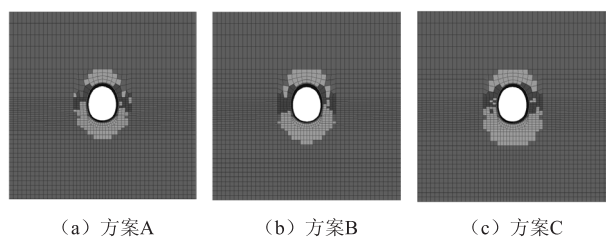


图4 不同埋深的塑性区分布图

由图4可知,支护完成后,围岩塑性区出现在隧道附近,且围岩塑性区范围与隧道地应力状态呈正相关;围岩塑性区分布范围随着地应力不断增加而持续扩增;围岩塑性区主要增大部位为隧道仰拱及边墙处,方案C围岩塑性区范围最大;当隧道埋深较大时,隧道主要破坏形式为剪切破坏。

综上所述,地应力是软岩隧道变形影响的主要因素,隧道洞周围岩变形量随着隧道所受地应力增大而增大,且围岩变形量增大幅度基本相同;围岩塑性区分布范围随着隧道埋深的增大而扩大。

3.2 支护强度影响分析

3.2.1 围岩变形分析

提取拱顶沉降、上台阶收敛和下台阶收敛数据,绘制监测变形量与支护强度的关系特征曲线,如图5所示。

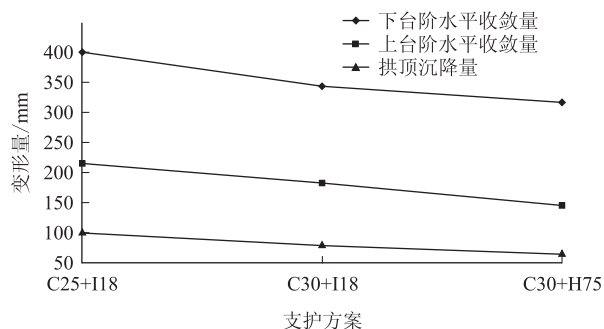


图5 不同支护强度的围岩变形特征曲线图

由图5可知,监测点变形量随支护强度增强而减小。方案B拱顶沉降量为8.06 mm,与方案A相比减小20.67%,上台阶水平收敛量为18.23 mm,与方案A相比减小15.01%,下台阶水平收敛量为34.24 mm,与方案A相比减小14.08%;方案C拱顶沉降量为6.56 mm,与方案B相比减小18.61%,上台阶水平收敛量为14.41 mm,与方案B相比减小

20.95%,下台阶水平收敛量为31.61 mm,与方案B相比减小7.68%;隧道洞周各部位围岩变形量随着隧道支护强度的增强而出现不同程度减小,上、下台阶水平收敛量显著下降。

3.2.2 围岩塑性区分析

提取各组方案开挖支护完成后的塑性区分布,如图6所示。

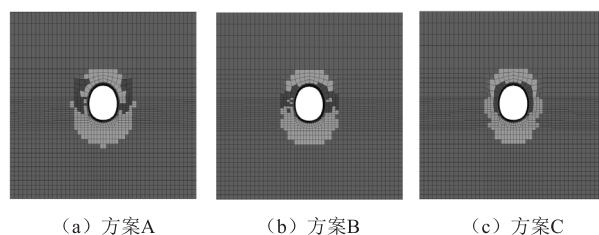


图6 不同支护强度的塑性区分布图

由图6可知,隧道洞周均出现了不同大小的塑性变形区域,方案3塑性分布区最小。围岩塑性区范围与支护强度呈负相关,围岩塑性区范围内剪切破坏的破坏范围随隧道支护强度增强而减小,且剪切破坏范围逐渐向隧道靠近,围岩塑性区轮廓随支护强度增强而逐渐不均匀,围岩塑性区减小部位主要集中在边墙以及拱肩处。

综上所述,软岩变形受支护强度影响尤为明显,隧道洞周各部位围岩变形量随着隧道支护强度的增强而以一定幅度减小,围岩塑性区分布范围随着隧道支护强度加强而缩小。

3.3 围岩级别影响分析

3.3.1 围岩变形分析

提取拱顶沉降、上台阶收敛和下台阶收敛数据并绘制关系特征曲线,如图7所示。

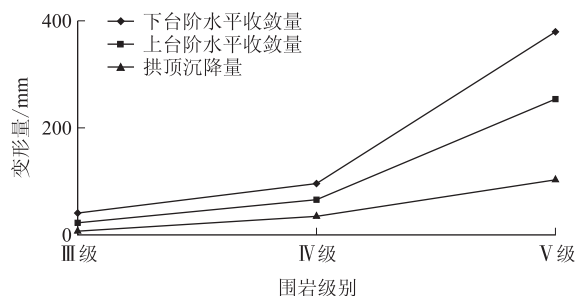


图7 不同围岩级别的围岩变形特征曲线图

由图7可知,围岩变形量受围岩级别影响较大,围岩各部位变形量随着围岩级别的提高而明显提升;围岩级别为V级围岩时,变形量提升最明显;相较于方案A,方案B拱顶沉降量、上台阶水平收敛量

和下台阶水平收敛量依次增大 371.62%、199.54%和 139.34% ;相较于方案 B,方案 C 拱顶沉降量、上台阶水平收敛量和下台阶水平收敛量依次增大 191.12%、286.61%和 299.89% ;当隧道所处围岩级别提高时,隧道洞周各部位围岩变形量不断增大。

3.3.2 围岩塑性区分析

提取各组方案开挖支护完成后的塑性区范围分布,如图 8 所示。

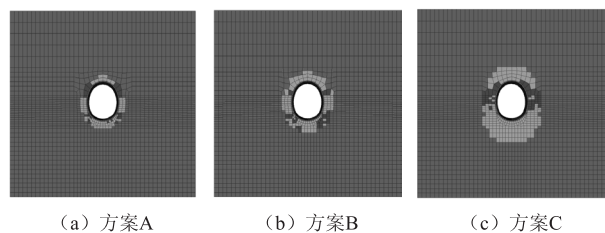


图 8 不同围岩级别的塑性区分布图

由图 8 可知,隧道支护完成后洞周均出现了塑性变形区域。衬砌各部位围岩塑性区范围随围岩级别增大而扩大,围岩塑性区主要增大部位为隧道仰拱及边墙处;围岩塑性区范围内剪切破坏的破坏范围随之扩大;方案 C 围岩塑性区范围最大;随着围岩级别增大,围岩塑性区轮廓逐渐均匀。

综上所述,围岩级别对隧道洞周围岩变形量的影响十分明显,隧道洞周各部位围岩变形量随围岩级别增加而增大。围岩塑性区分布范围具有伴随围岩级别提升而扩大的特征。

4 结论

本文依托某隧道片理化玄武岩段,通过数值模拟分别对不同埋深、支护强度和围岩级别下的围岩变形进行分析,得出以下主要结论:

(1)在该片理化玄武岩隧道施工过程中,由于围岩软弱、地应力高、支护结构设计不合理,隧道支护过程中沿洞周出现了塑性区;沿围岩深度方向,塑性区不断将应力向弹性区转移;沿洞内方向,塑性区不断变形以降低所承受的应力,围岩产生较大的变形。

(2)从地应力方面来看,当地应力增大时,洞周围岩变形量提升明显,基本呈线性增加;围岩塑性区分布范围随地应力增大而扩大,围岩塑性区主要增大部位为隧道仰拱及边墙处。

(3)从支护强度方面来看,隧道洞周围岩变形量随着围岩支护强度的增强而减小;围岩塑性区分布范围伴随支护强度加强而缩小,围岩塑性区减小部位主要集中在边墙以及拱肩处。

(4)从围岩级别方面来看,围岩变形量受围岩级别影响较大,围岩各部位变形量随着围岩级别的提高而明显提升,围岩塑性区分布范围伴随围岩级别提高而扩大。

参考文献:

- [1] 祁家所. 片理化玄武岩隧道大变形控制技术研究[D]. 北京:北方工业大学, 2021.
QI Jiasuo. Study on Control Technology of Schistose Basalt Tunnel under Large Deformation [D]. Beijing: North China University of Technology, 2021.
- [2] 陈绍华. 青藏铁路西格二线关角隧道关键技术[J]. 隧道建设, 2016, 36(3): 355-372.
CHEN Shaohua. Key Construction Technologies for Guanjiao Tunnel on Xining-Golmud 2nd Line of Qinghai-Tibet Railway [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(3): 355-372.
- [3] 何春保,舒丽红. 兰渝铁路高地应力软岩隧道变形机理和施工控制[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(5): 68-73.
HE Chunbao, SHU Lihong. Deformation Mechanization and Construction Control of High Ground Stresses Soft Rock Tunnel in Lanzhou-Chongqing Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(5): 68-73.
- [4] 李磊,谭忠盛,郭小龙,等. 挤压陡倾千枚岩地层小净距隧道大变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 276-286.
LI Lei, TAN Zhongsheng, GUO Xiaolong, et al. Research on Large Deformation of Tunnels with Small Intervals in Squeezing Steeply Dipping Phyllite Strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 276-286.
- [5] 杨会军,王梦恕. 隧道围岩变形影响因素分析[J]. 铁道学报, 2006, 28(3): 92-96.
YANG Huijun, WANG Mengshu. Analysis on Construction Factors of Surrounding Rock Deformation in Tunneling Works [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(3): 92-96.
- [6] 朱浩波,栗威. 高速铁路隧道围岩变形影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 306-310.
ZHU Haobo, SU Wei. Analysis of Tunnel Deformation Influence Factors Based on High-Speed Railway Tunnels [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 306-310.
- [7] 王智超,周黎,张学兵,等. 隧道软弱围岩变形时效性表征及影响因素分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 146-154.
WANG Zhichao, ZHOU Li, ZHANG Xuebing, et al. Characterization and Influence Factors of the Time-Dependent Behaviors of Soft Surrounding Rock [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 146-154.
- [8] 杨成忠,吴宇健,王威,等. 大断面软岩隧道开挖空间效应影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 511-519.
YANG Chengzhong, WU Yujian, WANG Wei, et al. Analysis on Influence of Spacial Effect on Excavation of Soft Rock Tunnel with Large Cross Section [J]. Chinese Journal of Underground Space and

(下转第 62 页)

- [2] 高欣梅. 对规范中铁路桥梁桩基计算方法的补充[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(3): 58–61.
GAO Xinmei. Supplement to Calculation Method for Bridge Pile Foundation in Railway Code [J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(3): 58–61.
- [3] 孟繁增. 临近地面荷载对桩基础竖向位移影响的简化计算[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 29–33.
MENG Fanzeng. A Simplified Calculation to Analyze Effect of Short-Distance Ground Loading on Vertical Deformation of Pile Foundation [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 29–33.
- [4] 王旭东, 黄力平, 阮永平, 徐建龙. 基坑工程中地基土水平抗力比例系数 m 值的反分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1998(2): 48–54.
WANG Xudong, HUANG Liping, RUAN Yongping, et al. Back Analysing m Value of Subgrade Reaction in Excavation [J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1998(2): 48–54.
- [5] 李俊, 强士中, 李小珍. 地基系数的比例系数 m 的确定[J]. 铁道标准设计, 2004, 48(11): 83–85.
LI Jun, QIANG Shizhong, LI Xiaozhen. Determination of Proportion Coefficient m of Foundation Coefficient [J]. Railway Standard Design, 2004, 48(11): 83–85.
- [6] Finnó Richard J. Supported Excavations. Observational Method and Inverse Modeling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(7): 826–836.
- [7] 楼晓明, 吴昊, 黄江枫. 基于 $p-y$ 曲线确定饱和黏性土地基比例系数[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2206–2212.
LOU Xiaoming, WU Hao, HUANG Jiangfeng. Determination of Slope Coefficient of Subgrade Reaction of Saturated Clay Based on $P-y$ Curve [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2206–2212.
- [8] 张蕾, 李凤丽, 张瑞, 等. 一种地基土水平抗力系数的比例系数 m 的计算方法[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 202–208.
ZHANG Lei, LI Fengli, ZHANG Rui, et al. A Method for Calculating Proportional Coefficient of Horizontal Resistance Coefficient of Foundation Soil [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(4): 202–208.
- [9] 郭海强, 罗一农, 邱永平, 等. 地基比例系数 m 值对比研究[J]. 路基工程, 2019(4): 1–6.
GUO Haiqiang, LUO Yinong, QIU Yongping, et al. Contrastive Study on m Value of Proportional Coefficient of Foundation Coefficient [J]. Subgrade Engineering, 2019(4): 1–6.
- [10] TB 10093–2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].
TB 10093–2017 Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert [S].

(上接第16页)

- Engineering, 2021, 17(2): 511–519.
- [9] 张广泽, 邓建辉, 王栋, 等. 隧道围岩构造软岩大变形发生机理及分级方法[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 1–12.
ZHANG Guangze, DENG Jianhui, WANG Dong, et al. Mechanism and Classification of Tectonic-Induced Large Deformation of Soft Rock Tunnels [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 1–12.
- [10] 于景飞, 周文朋, 许有俊. 软弱围岩大变形治理措施有效性分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(33): 307–312.
YU Jingfei, ZHOU Wenpeng, XU Youjun. Analysis on Effectiveness of Treatment Measures of Large Deformation of Weak Surrounding Rock [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(33): 307–312.
- [11] 廖俊. 毛羽山隧道软岩大变形特征及原因分析[J]. 铁道建筑, 2013, 53(8): 79–81.
LIAO Jun. Characteristics of Large Deformation of Soft Rock and Causes Analysis on the Maoyushan Tunnel [J]. Railway Engineering, 2013, 53(8): 79–81.
- [12] 杨星智. 大梁隧道大变形发生机理及特性分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 813–819.
YANG Xingzhi. Analysis on Mechanism and Characteristics of Large Deformation in Daliang Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 813–819.
- [13] 李国良, 李宁. 挤压性围岩隧道若干基本问题探讨[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 1–6.
LI Guoliang, LI Ning. Discussion of Tunnelling in Squeezed Surrounding Rock [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(1): 1–6.
- [14] 吕显福, 赵占群, 魏星星. 高地应力软岩隧道大变形机理及控制措施探讨: 以木寨岭隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 227–231.
LV Xianfu, ZHAO Zhanqun, WEI Xingxing. Discussion of the Large Deformation Mechanism and Control Measures for a Soft Rock Tunnel under High Ground Stress: a Case Study of the Muzhailing Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 227–231.
- [15] 陈建勋, 陈丽俊, 罗彦斌, 等. 大跨度绿泥石片岩隧道大变形机理与控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 93–106.
CHEN Jianxun, CHEN Lijun, LUO Yanbin, et al. Mechanism and Control Method of Large Deformation for Large-Span Chlorite Schist Tunnel [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 93–106.