

文章编号: 1674—8247(2023)04—0013—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.04.003

高地应力软岩隧道大变形机制及控制技术研究综述

崔光耀¹ 韩 驰¹ 王明胜² 王天群³

(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;

3. 北京市政路桥股份有限公司, 北京 100045)

摘 要:高地应力软岩隧道常常会出现大变形灾害,为深入了解软岩隧道大变形的特征与机制,并消除大变形灾害,分析总结了近年来众多专家学者在大变形方面所做的研究,主要有:(1)在大变形的分级与判定方面,实际工程一般以破坏现象和相对位移量来对大变形进行分级,以围岩变形量、相对变形量、应力比等因素为判定依据;(2)大变形的的主要因素有围岩强度、地应力和支护设计,大变形的破坏机制由多种因素共同作用;(3)目前在软岩隧道支护方面的理论成果主要有大变形预测、屈服支护原则、先让后抗理论等,软岩隧道控制技术方面应用范围较广的技术有强支、刚柔并济和联合支护等措施。总结内容可为探索高地应力软岩隧道大变形机制和大变形控制措施提供参考。

关键词:高地应力;软弱围岩;隧道工程;大变形;控制技术

中图分类号:U25

文献标志码:A

Review of Mechanism of Large Deformation in Soft Rock Tunnels with High Geo-stress and Its Control Techniques

13

CUI Guangyao¹ HAN Chi¹ WANG Mingsheng² WANG Tianqun³

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

2. China Railway City Development and Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China;

3. Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: Large deformation disasters often occur in soft rock tunnels with high geo-stress. In order to gain a deeper understanding of the characteristics and mechanisms of large deformations in soft rock tunnels, and to mitigate large deformation disasters, this study analyzes and summarizes the research conducted by numerous experts and scholars in recent years. The main findings are as follows: (1) Regarding the classification and determination of large deformations, practical engineering generally categorizes large deformations based on failure phenomena and relative displacement, with factors such as rock deformation, relative deformation, and stress ratio used as criteria for determination. (2) The main factors contributing to large deformations are rock strength, geo-stress, and support design. The failure mechanism of large deformations is a result of the combined effect of multiple factors. (3) The current theoretical achievements in support for soft rock tunnels mainly include large deformation prediction, yield support

收稿日期:2023-04-18

作者简介:崔光耀(1983-),男,教授。

基金项目:国家自然科学基金项目(52178378)

引文格式:崔光耀,韩驰,王明胜,等.高地应力软岩隧道大变形机制及控制技术研究综述[J].高速铁路技术,2023,14(4):13-18.

CUI Guangyao, HAN Chi, WANG Mingsheng, et al. Review of Mechanism of Large Deformation in Soft Rock Tunnels with High Geo-stress and Its Control Techniques [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4):13-18.

principles, and the theory of yielding before resisting. Widely applied technical measures for controlling large deformations in soft rock tunnels include strong supports, a combination of rigid and flexible supports, and composite support systems. The conclusions provide a reference for exploring the mechanisms of large deformations in soft rock tunnels with high geo-tress and studying effective measures for controlling large deformations.

Key words: high geo-stress; weak rock; tunnel engineering; large deformation; control techniques

复杂山区交通隧道建设是基础设施建设的关键性工程。穿山隧道克服了盘山道路的诸多关键问题,极大缩短路线里程,提高交通的运行效率、克服了艰险山区的地形障碍。随着山区隧道向高地应力区发展,高地应力软岩隧道开始频繁出现,大变形灾害也随之产生。典型案例如兰渝铁路木寨岭隧道,实测最大水平主应力最大值达 27.16 MPa,最大变形量超过 950 mm^[1];青藏铁路关角隧道最大水平主应力最大值约 22 MPa,最大水平收敛变形超过 500 mm^[2]。

目前对于围岩大变形尚未有规范定义,也没有关于实际工程中的围岩大变形设计规范,这主要与遭受大变形隧道的复杂地质情况以及影响大变形的复杂因素有关。当前学者的研究方向主要偏向某一种围岩的变形,一般有挤压性围岩、深埋软岩和膨胀岩类等^[3-4]。大变形的影响因素主要有支护系统的设计强度,设计断面类型以及锚杆类型等主观因素,还有占主导的隧道埋深、地应力大小、围岩岩性以及地下水发育状态等自然客观因素^[5]。许多大变形隧道工程实例表明,不同地质情况下,围岩变形机制以及影响因素有不同的侧重,所采取针对性的大变形控制措施也不尽相同。本文通过分析众多学者在相关方面的研究,对高地应力软岩隧道大变形机制和控制措施进行总结,指出当前高地应力软岩隧道大变形研究中存在的问题。研究成果可为该方向的研究者提供参考。

1 大变形分类及判定标准

1.1 大变形分类

通过对大变形隧道实际工程的典型分析与总结,李永林^[6]以不同控制条件对大变形进行分类,分别为岩体构造控制类、岩体岩性控制类以及人工扰动控制类。

当前实际工程一般以破坏现象以及初期支护相对位移值来对大变形进行分级和定义,而不同实际工程划分的大变形等级也有所不同^[7]。

在我国大变形隧道绝大多数围岩构造为层状围岩的背景下,巩江峰^[8]通过对成昆铁路小相岭隧道现场大变形经验进行总结,根据初期支护监测位移数据以及掌子面软弱夹层的占比,将层状围岩大变形等级

划分为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级,如表1所示。

表1 层状围岩大变形等级划分表

等级	相对变形量/%	顺层型	顺构造线	不顺构造线
Ⅰ级 (微弱)	3~5	软弱层占比 <20%	掌子面内无 软弱层	软弱层占比 <20%
Ⅱ级 (中度)	5~8	软弱层占比 20%~40%	软弱层占比 <20%	软弱层占比 20%~40%
Ⅲ级 (严重)	>8	软弱层占比 >40%	软弱层占比 >20%	软弱层占比 >40%

1.2 大变形判定依据

大变形的判定依据有很多,部分国内专家根据相对变形量、围岩变形量、应力比和原始地应力等指标对大变形进行等级划分。依据现场变形情况,综合相对变形量和地应力大小提出了软岩大变形的分级方案,如表2所示。

表2 高地应力软岩大变形分级方案表

大变形 分级	现场变形情况	$\Sigma H_{max}/$ MPa	相对变 形/%	估判变 形量/cm
Ⅰ级	隧道开挖过程中围岩有较大位移,持续时间较长	<30	1~2	<15
Ⅱ级	隧道位移显著,持续时间长,洞底有隆起现象	30~40	2~4	15~30
Ⅲ级	开挖过程中洞壁位移有剥离现象,位移显著,甚至发生大位移,且持续时间长,洞底有明显隆起现象	40~50	4~8	30~50

国外部分学者对大变形分级进行了研究。E. Hoek^[9]采用岩体强度与原始地应力的相对值作为挤压岩大变形等级划分的依据,并给出了各大变形等级下对应的变形控制支护措施与施工建议,如表3所示。

2 大变形影响因素和机制

2.1 大变形影响因素

通过大变形隧道实际工程的经验积累,高地应力软岩隧道大变形的一般特征表现为:变形速率快、变形累计值大、变形集中部位明显以及变形持续时间长等^[10-11]。这些实际工况总结的变形特征与围岩大变形的的主要影响因素密切相关,同时大变形主要影响因素也是研究人员探索控制围岩大变形技术的侧重方向。高地应力软岩隧道大变形主要影响因素如下

表 3 大变形等级划分及控制措施表			
等级	应力比/%	岩土工程分析	支护系统建议
I 级(简单的掘进问题)	< 1	遵循岩性等级分类对应的隧道支护建议	选择合适的支护锚杆以及适宜的喷射混凝土强度
II 级(轻微挤压问题)	1 ~ 2.5	通过收敛约束法预测围岩塑性区范围提供设计参考	在处理的轻微挤压问题上辅以轻钢或格构梁
III 级(严重挤压问题)	2.5 ~ 5	通常采用二维有限元分析支护单元和开挖顺序, 掌子面稳定性问题还不严重	加速支护安装进度以及增施重型套衬, 严格控制施工质量
IV 级(非常严重的挤压和掌子面稳定性问题)	5 ~ 10	主要是掌子面稳定性问题, 采用二维有限元分析的基础上结合超前支护和掌子面加固分析	喷射混凝土中嵌入钢架进行超前支护和掌子面加固
V 级(极端挤压问题)	> 10	对于这种严重的隧道失稳问题目前最为有效的解决方法是基于现有经验进行判断	采用超前支护和掌子面加固, 极端情况下可能需要屈服支撑

所示。

(1) 围岩强度

围岩强度是影响隧道大变形的重要客观因素之一。海巴洛隧道跨越强风化炭质板岩地层, 岩体节理发育且遇水极易软化, 结构完整度差, 控制措施采用 SF5c 型支护, 通过对锁脚锚管的施作工艺和参数的优化, 最终成功控制了变形^[12]。

(2) 地应力

地应力大小同样是影响隧道大变形的重要客观因素, 兰新铁路大梁隧道地处祁连山及高地应力区, 现场采用先施设格栅后预设套拱的“先柔后刚”控制措施, 在成功控制大变形的前提下同时满足经济性原则^[13]。

(3) 支护设计

支护设计是影响隧道大变形的重要主观因素, 其中包括洞型、钢架及套拱刚度、注浆范围及混凝土等级、衬砌成环时间以及开挖方法等具体因素。杨木高^[14]分析研究了兰渝铁路木寨岭隧道大变形支护, 结果表明大变形严重段落的控制措施须在大变形中度段落的控制措施基础上结合分层施作支护。

由于实际大变形隧道工程存在的影响因素不是单一存在, 针对各实际工程的大变形控制对策也会各有侧重^[15], 受大变形问题严重段落一般需要综合的控制变形体系来应对各不利因素。

2.2 大变形机制

根据专家学者的研究总结, 大变形破坏机制主要是由于开挖导致了原始地应力场的应力重分布^[16], 当隧道穿越极高地应力区, 地应力重分布导致

隧道衬砌受到的压力超过衬砌本身的强度时, 围岩产生塑性变形。

弯曲破坏、剪切和滑动破坏以及完全剪切破坏是围岩变形破坏的 3 类一般力学模型, 徐国文^[17]通过对隧道的大变形现场进行模拟分析, 提出软岩隧道 3 种主要大变形破坏形式:

(1) 隧道裂纹由开挖后急剧增大的切向压力阔拉张开, 此时发育的地下水渗入连通的张开裂隙造成软岩的塑性流动。

(2) 隧道开挖后由于切向压力的增加以及径向应力的降低, 薄层岩板在切向应力的作用下发生弯曲变形直至产生裂纹而破坏。

(3) 隧道开挖后软岩结构面在剪切应力以及自重应力的共同作用下发生剪切滑移, 最终在拱顶处附近形成塌方。

由此可知, 实际工程中的大变形破坏机制主要受地应力重分布的影响, 在地应力重分布的过程中, 软弱围岩发生塑性流动、弯曲变形或剪切滑移, 最终导致大变形的产生。

3 大变形控制技术

软弱围岩由于其自身强度低, 在一定工程背景条件下往往表现出变形量级大、变形发展快的特点, 施工中一旦控制不当, 容易产生支护开裂、侵限现象, 甚至发生塌方。因此, 对于软弱围岩隧道, 合适的控制理论和控制技术对指导设计与施工具有重要意义。

3.1 大变形控制理论成果

3.1.1 大变形预测

预测隧道大变形对隧道设计和施工具有重要的指导作用。Dwivedi^[18]提出利用相关系数为 0.94 的维数修正经验关联式来预测挤压围岩隧道变形, 关联式中包括垂直地应力、支护刚度和隧道半径等控制参数。通过模拟离心试验, Elliot^[19]探讨了材料点法 (MPM) 预测随隧道支护压力变化而诱发的隧道变形, 结果表明, 在不排水抗剪强度预测正确的前提下, 材料点法能够准确预测隧道变形, 包括完整的地面反应曲线。

3.1.2 屈服支护原则

屈服支护原则是国外专家在软岩隧道支护原则方面的主要理论成果。Mezger^[20]对屈服支护原则在隧道穿越挤压岩时的有效性和局限性进行了研究。Weiteng^[21]通过对 FLAC3D 的开发提出了支撑拱的屈服准则, 结果表明, 改进后的数值模拟方法对于预测大变形隧道拱锚联合支护的受力和破坏行为更为可

靠。Karampinos^[22-23]提出了一种利用离散元方法来捕捉层状岩体在高应力和开挖作用下的屈服机理,研究了硬岩隧道围岩挤压变形机理及不同支护结构对围岩挤压的影响,该方法克服了模拟开挖隧道的计算和时间限制。

3.1.3 先让后抗理论

在国内专家对大变形支理论方面的研究中,先让后抗的支理论具有广泛的应用范围。先让后抗^[24]就是在隧道施工过程中,先施作一层柔性支护,利用一次支护的变形、收敛以至局部开裂来释放围岩部分能量,延续一段时间后再用二次支护补强,下台阶与仰拱分别施作,同时采用预留应急套拱等应急支护措施。

3.2 大变形控制技术研究

3.2.1 强支

刘高^[25]根据大变形特征以及机制的分析来修改原支护设计,最终通过木寨岭隧道大变形机制的快速封闭工作面+自进式锚杆以及锚注支护组成的快速“强支”体系成功返修了原支护设计。Aksoy^[26]提出一种不允许变形超过规定变形量的刚性支撑系统(NDSS),结合数值模拟分析确定NDSS变形极限值,最终在安卡拉—伊斯坦布尔高速铁路T-35大变形隧道工程中成功运用。

3.2.2 刚柔并济

曹小平^[27]针对高地应力板状软岩隧道大变形灾害提出了单层初支+双层二衬的支护措施,单层初支在变形初期与围岩共同变形消除围岩部分压力,二衬起到了刚性支护的作用,从而达到控制板状软岩隧道大变形的目的。在堡镇隧道施工过程中初期支护产生严重变形,王水善^[28]采用先柔后刚的支护措施,即先施作钢筋网混凝土、可伸缩性钢架构成的柔性支护,然后施作刚性二衬,有效地控制了围岩变形。

3.2.3 联合支护

戴永浩^[29]等依托大梁隧道工程,通过有限元数值软件,分析隧道围岩位移和应力,提出拱顶超前注浆、拱脚打长锚杆、钢拱架+锚杆+钢筋网协同工作的措施,成功解决了软弱围岩破碎带隧道施工与支护的难题。李岳^[30]对长、短锚杆在软岩大变形隧道中的支护机理进行了研究,提出短锚杆与长锚杆协同在深部围岩中稳定浅部承载拱结构的联合支护体系,并在实际工程中验证了其可行性。

3.3 数值模拟的应用

在数值模拟方面,国内外专家都进行了很多尝试,Yang^[31]通过有限差分法(FDM)对于衬砌在围岩

大变形时的最佳变形处理时机进行了研究,结果表明当岩体变形量达到总变形量的90%时为最佳修复时机。Coggan^[32]通过数值模拟方法研究了隧道顶部岩性和水平地应力大小对于隧道拱顶的稳定性影响,结果表明影响隧道顶部稳定性的重要因素为顶部泥岩厚度。陶志刚^[33]利用FLAC3D数值模拟软件中的Fish语言搭建NPR锚杆虚拟单元,从而得到NPR锚杆力学性能的模拟解,有力证明了小进尺开挖下的NPR锚索支护变形控制技术的有效性。

4 存在问题及展望

在对高地应力软岩隧道施工过程中出现的大变形灾害的研究中,目前还存在一些需要解决的问题。

4.1 大变形分级及判定方法

目前的大变形分级标准都是依据某一具体隧道工程,无法适用于众多不同类型的隧道。同时,现行的规范也无法有效地指导隧道开挖和施作支护,给隧道设计和施工带来较大的困难,只能凭借经验设计,在施工时依据现场情况调整,极大地降低了施工效率,增大了施工成本。因此,形成统一的大变形分级标准和判定方法有利于发展高地应力软岩隧道大变形控制技术。

4.2 大变形机制

高地应力隧道洞室软弱围岩区域,围岩破碎,节理发育,应力分布更为复杂。地应力高的地方容易发生围岩变形,给施工和运营带来极大的安全隐患。当前针对隧道围岩应力分布规律的研究较少,缺少有效的围岩压力的计算方法。因此,探索隧道洞室周围的应力分布规律,特别是软弱围岩区域隧道的应力分布规律,并针对应力较大区域加强支护,可为控制隧道大变形打下坚实的基础。

4.3 大变形控制技术

在西南部隧道工程的建设中,地应力高、围岩软弱,变形时间长、变形量大等一系列难题都给隧道设计、施工和运营带来极大的困难。众多隧道所面临的难题不尽相同,在隧道设计和施工时采取的措施也是各不相同,这不仅延误了工期,还增加了施工成本。因此,建立一套可以解决众多难题且适用于不同条件的高地应力软岩隧道大变形控制技术体系尤为重要。

5 结论

高地应力软岩隧道大变形灾害严重,在设计和施工时,需要对大变形有科学的认识。本文通过对国内外专家的研究进行分析,总结了大变形的研究现状,

得到的主要结论如下:

(1) 高地应力软岩大变形分类标准及划分等级具有多样性。实际大变形隧道工程由于在地质概况、水文发育以及地应力上各有不同,大变形隧道的影响因素及变形机制也各有不同。

(2) 目前对大变形控制技术的研究都是在新奥法的基础上提出的,在软岩隧道支护方面的理论成果主要有大变形预测、屈服支护原则、先让后抗理论等;在软岩隧道控制技术方面,应用范围较广的技术有强支、刚柔并济和联合支护等措施。

(3) 目前对高地应力软岩隧道大变形控制技术的研究还存在一些问题:尚未形成统一的大变形分类标准和判定方法;针对隧道洞室围岩的应力分布规律的研究较少,对高地应力软岩隧道围岩的应力分布规律认识不清;建立一套完整的大变形控制技术体系是亟待解决的难题。

参考文献:

- [1] 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.
- [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] 陈有亮,刘耕云,杜曦,等. 考虑膨胀应力和剪胀的深埋隧道弹塑性解[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2525-2535.
CHEN Youliang, LIU Gengyun, DU Xi, et al. Elastoplastic Solution for a Deep-buried Tunnel Considering Swelling Stress and Dilatancy [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2525-2535.
- [4] 陈子全,何川,吴迪,等. 高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1237-1244.
CHEN Ziquan, HE Chuan, WU Di, et al. Study of Large Deformation Classification Criterion for Layered Soft Rock Tunnels under High Geostress [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6): 1237-1244.
- [5] HØIEN A H, NILSEN B, OLSSON R. Main Aspects of Deformation and Rock Support in Norwegian Road Tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 262-278.
- [6] 李永林,冯学钢,姜云,等. 隧道工程围岩大变形及预测预报研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(5): 46-51, 59.
LI Yonglin, FENG Xuegang, JIANG Yun, et al. Large Deformations Encountered in the Surrounding Rocks of Tunnels and Their Prediction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(5): 46-51, 59.
- [7] 任洋,李天斌,张广洋,等. 高地应力隧道围岩分级 BQ-hg 法的研究及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 449-456.
REN Yang, LI Tianbin, ZHANG Guangyang, et al. Research and Application of BQ-hg Method for Surrounding Rock Classification of Tunnels with High Geostress [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 449-456.
- [8] 巩江峰,朱勇,张广泽. 层状围岩隧道大变形等级判别及处理[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(12): 51-55.
GONG Jiangfeng, ZHU Yong, ZHANG Guangze. The Grade Discrimination of Large Deformation of Layered Surrounding Rock in Tunnel and Its Treatment Countermeasures [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(12): 51-55.
- [9] HOEK E, MARINOS P. Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses [J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000, 32(11): 45-51.
- [10] BROX D, HAGEDORN H. Extreme Deformation and Damage during the Construction of Large Tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(1): 23-28.
- [11] 晏长根,罗鑫,王凯,等. 深埋软岩大变形偏压公路隧道3层支护结构受力变形特征[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 98-107.
YAN Changgen, LUO Xin, WANG Kai, et al. Deformation and Pressure Characteristics of Three-tier Support Structure in Large Deformation Bias Highway Tunnel with Deep Buried Soft Rock [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2): 98-107.
- [12] 张海太,任高攀,万志文,等. 薄层炭质板岩地层隧道围岩大变形特征及支护方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1): 457-464.
ZHANG Haitai, REN Gaopan, WAN Zhiwen, et al. Study on Large Deformation Characteristics and Support Patterns of Thin Layer Carbonaceous Slate Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 457-464.
- [13] 张德华,刘士海,任少强. 高地应力软岩隧道中型钢与格栅支护适应性现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2258-2266.
ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Research on Selection of Steel and Steel Grid for Tunnel Support in Soft Rock with High Geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2258-2266.
- [14] 杨木高. 木寨岭隧道大变形控制技术[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(2): 175-181.
YANG Mugao. Large Deformation Control Techniques for the Muzhailing Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(2): 175-181.
- [15] 尤显明,李沿宗. 极高地应力软岩隧道超前导洞应力释放及多层支护变形控制技术[J]. 隧道建设, 2017, 37(7): 832-837.
YOU Xianming, LI Yanzong. Stress Releasing and Deformation Control Technology of Multilayer Support for Pilot Heading of a Soft Rock Tunnel with Extremely High Ground Stress [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(7): 832-837.

- [16] SAKCALI A, YAVUZ H. Estimation of Radial Deformations around Circular Tunnels in Weak Rock Masses through Numerical Modelling [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123 : 92 – 104.
- [17] 徐国文,何川,代聪,等. 复杂地质条件下软岩隧道大变形破坏机制及开挖方法研究[J]. *现代隧道技术*, 2017, 54(5) : 146 – 154.
- XU Guowen, HE Chuan, DAI Cong, et al. Failure Mechanism and Excavation Method for Soft-rock Tunnels with Large Deformation under Complex Geological Conditions [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2017, 54(5) : 146 – 154.
- [18] DWIVEDI R D, SINGH M, VILADKAR M N, et al. Prediction of Tunnel Deformation in Squeezing Grounds [J]. *Engineering Geology*, 2013, 161 : 55 – 64.
- [19] FERN E J. Modelling Tunnel-induced Deformations with the Material Point Method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111 : 202 – 208.
- [20] MEZGER F, RAMONI M, ANAGNOSTOU G, et al. Evaluation of Higher Capacity Segmental Lining Systems when Tunnelling in Squeezing Rock [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 65 : 200 – 214.
- [21] LI Weiteng, YANG Ning, YANG Bo, et al. An Improved Numerical Simulation Approach for Arch-bolt Supported Tunnels with Large Deformation [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 77 : 1 – 12.
- [22] KARAMPINOS E, HADJIGEORGIOU J, HAZZARD J, et al. Discrete Element Modelling of the Buckling Phenomenon in Deep Hard Rock Mines [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80 : 346 – 356.
- [23] KARAMPINOS E, HADJIGEORGIOU J, TURCOTTE P. Discrete Element Modelling of the Influence of Reinforcement in Structurally Controlled Squeezing Mechanisms in a Hard Rock Mine [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(12) : 4869 – 4892.
- [24] 王英帆,刘钦,胡永志,等. 高地应力软岩隧道大变形监测及支护优化[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(30) : 317 – 323.
- WANG Yingfan, LIU Qin, HU Yongzhi, et al. Large Deformation Monitoring and Support Optimization of Soft Rock Tunnel with High Ground Stress [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(30) : 317 – 323.
- [25] 刘高,张帆宇,李新召,等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(S2) : 5521 – 5526.
- LIU Gao, ZHANG Fanyu, LI Xinzhaoh, et al. Research on Large Deformation and Its Mechanism of Muzhailing Tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(S2) : 5521 – 5526.
- [26] AKSOY C O, OÇUL K, TOPAL İ, et al. Reducing Deformation Effect of Tunnel with Non-deformable Support System by Jointed Rock Mass Model [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40 : 218 – 227.
- [27] 曹小平,张云鹏. 高地应力板状软岩隧道大变形控制试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(1) : 55 – 61.
- CAO Xiaoping, ZHANG Yunpeng. Research on the Large Deformation Controlling of Soft Slate Formation Tunnel with High Ground Stress [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(1) : 55 – 61.
- [28] 王水善. 堡镇隧道软岩高地应力地层大变形控制关键技术[J]. *隧道建设*, 2009, 29(2) : 227 – 231.
- WANG Shuishan. Key Technology to Control Serious Deformations of Soft Rock Stratum with High Ground Stress: Case Study on Baozhen Tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2009, 29(2) : 227 – 231.
- [29] 戴永浩,陈卫忠,田洪铭,等. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2) : 4149 – 4156.
- DAI Yonghao, CHEN Weizhong, TIAN Hongming, et al. Study of Large Deformation and Support Measures of Daliang Tunnel with Soft Surrounding Rockmass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2) : 4149 – 4156.
- [30] 李岳,戴俊,顾寅,等. 大变形隧道长短锚杆支护机理及设计应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(5) : 11 – 15.
- LI Yue, DAI Jun, GU Yin, et al. Support Mechanism and Parameter Design Applications of Long and Short Anchor in Large Deformation Tunnel [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2012, 8(5) : 11 – 15.
- [31] YANG Zhongmin, WU Shunchuan, GAO Yongtao, et al. Time and Technique of Rehabilitation for Large Deformation of Tunnels in Jointed Rock Masses Based on FDM and DEM Numerical Modeling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81 : 669 – 681.
- [32] COGGAN J, GAO Fuqiang, STEAD D, et al. Numerical Modelling of the Effects of Weak Immediate Roof Lithology on Coal Mine Roadway Stability [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 90/91 : 100 – 109.
- [33] 陶志刚,罗森林,李梦楠,等. 层状板岩隧道大变形控制参数优化数值模拟分析及现场试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(3) : 491 – 506.
- TAO Zhigang, LUO Senlin, LI Mengnan, et al. Numerical Simulation Analysis and Field Test of Large Deformation Control Parameters Optimization of Layered Slate Tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(3) : 491 – 506.