

文章编号: 1674-599X(2020)04-0081-07

木寨岭高应力软岩隧道三台阶法数值模拟

肖光书¹, 陈党辉¹, 郑超²

(1. 福建路桥建设有限公司, 福建 福州 350002; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘 要: 为解决木寨岭隧道的高应力软岩大变形的施工难题, 对现场三台阶法施工进行了数值模拟。分析了开挖后的围岩变形特征及围岩应力状态。研究表明: 围岩变形以预收敛变形为主, 掌子面变形较大。施工过程中, 加大围岩超前支护, 控制掌子面变形和围岩预收敛变形的发生。该结果可为类似软岩大变形隧道施工提供借鉴。

关键词: 隧道工程; 变形特征; 高地应力软岩; 三台阶法; 数值模拟

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.012

Study on three-bench method of muzhailing soft rock tunnel under high ground stress by numerical simulation

XIAO Guang-shu¹, CHEN Dang-hui¹, ZHENG Chao²

(1. Fujian Road and Bridge Construction Co., Ltd., Fuzhou 350002, China;

2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: In order to solve the problem of large deformation in Muzhailing tunnel caused by soft rock under high ground stress, the numerical simulation was carried out to study the three-bench method. The characteristics of surrounding rock were grasped by analyzing the deformation and stress state of the surrounding rock after excavation. The results show that the main deformation of the surrounding rock has happened before the tunnel face comes and the deformation of tunnel face was large, which might become one of the main reasons lead to the large deformation of surrounding rock. Therefore, the advanced support of the surrounding rock needs to be strengthened during the excavation of tunnel to control the pre-deformation of surrounding rock and the deformation of tunnel face. The results of study can provide a reference for the similar construction of soft rock tunnels with large deformation.

Key words: tunnel engineering; characteristics of deformation; soft rock under high ground stress; three-bench method; numerical simulation

山岭隧道建设工程随着公路、铁路建设水平的不断提高日益增多。但隧道穿越的地质条件更加复杂, 如高地应力软岩大变形问题。该问题十分常见, 困扰着许多工程建设者^[1-3]。针对该类围岩隧道, 国内主要采用三台阶法、CD法、CRD法和单/双侧壁导坑法等方法进行施工^[4]。不同的施工方法具有不同的特点和适用范围。许多学者通过现场监测和数值模拟等方法对软弱围岩隧道施工工法进行了

研究。陈国中^[5]等人采用数值模拟方法, 得到了CRD法合理的施工工序, 并应用于南华一号隧道进洞施工, 有效控制了围岩变形。王茜^[6]等人以大坪尾隧道入口段为工程依托, 采用数值模拟方法, 探讨了不同施工方法应用于小净距隧道穿越断层破碎带时对围岩稳定性的影响。贾晓旭^[7]等人以雁口山隧道为研究对象, 采用数值模拟和现场监测相结合的方法, 对CD法和台阶法在软弱围岩隧道中的

收稿日期: 2020-04-19

作者简介: 肖光书(1965-), 男, 福建路桥建设有限公司高级工程师。

子面围岩松动掉块,严重时会发生失稳坍塌。同时,初支结构的开裂破坏多在掌子面位置或距离掌子面不远处,随即发生。该现象产生的原因:①可能是由于掌子面挤出变形过大,减小了掌子面对其周边围岩的空间约束作用,加剧了初期支护结构的受力;②围岩很可能在掌子面出现之前已经发生了较大的变形,从而丧失了自承能力,导致围岩应力重新分布过程中,承载的主体由围岩转变为支护结构,致使支护结构受力过大,出现开裂甚至破坏。由文献[14]可知,在软弱围岩隧道中,围岩的预收敛变形可达到全变形的50%以上,是拱顶坍塌和大变形的主因之一。常规的监测只针对掌子面后方围岩,对掌子面前方围岩变形和掌子面围岩变形的监测较少,无法掌握掌子面前方围岩变形和掌子面围岩变形的具体情况,因而难以制定有针对性的支护措施。数值分析方法作为隧道开挖变形特征分析的主要手段之一,已广泛应用于隧道现场施工模拟,并取得了较好效果。因此,为掌握围岩变形特征,对现场采用三台阶法进行数值模拟。同时,通过与全断面法进行对比,分析三台阶法对围岩变形的影响。

3 数值模型及相关参数

3.1 计算模型

隧道平均埋深约为520 m。为简化计算,建立模型时,取隧道上部埋深40 m,其余埋深影响通过模型边界施加土覆土层自重进行等效考虑。为避免边界约束效应影响数值计算结果,取左、右边界与隧道中心线距离为4倍的开挖跨径,底部边界与隧道底面的距离为3倍的开挖跨径,建立模型尺寸为116 m×50 m×90 m。模型总单元数为396 800个,总节点数为387 729个。模型四周和底面采用位移边界条件,施加法向位移约束,顶面为自由边界,数值计算中假定围岩服从Mohr-Coulomb屈服准则。

围岩参数根据木寨岭公路隧道的相关勘察资料和《公路隧道设计规范(JTGD70-2004)》规定进行选取。围岩重度取27.69 kN/m³,弹性模量取5.762 GPa,泊松比取0.34,黏聚力取0.05 MPa,内摩擦角取27.5°。初始高地应力状态的模拟,按照快速应力边界条件法^[15],结合地勘资料,给出最大主

应力、最小主应力的线性回归方程和应力方向。在模型前、后、左、右边界,施加大小相等、方向相反的应力,生成的水平地应力如图2所示。模拟生成的地应力状态与现场实际地应力状态较为接近。

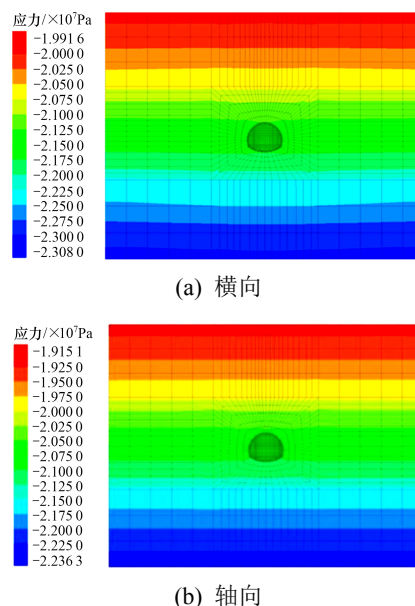


图2 水平地应力云图

Fig.2 Cloud map of horizontal in-site stress

3.2 支护结构及施工过程模拟

初支混凝土喷层采用Shell单元模拟。拱架作用采用等效刚度法进行折算,并加入Shell单元进行考虑。模拟时,重度取25 kN/m³,弹性模量取50 GPa,泊松比取0.2,厚度取28 cm。径向锚杆、径向小导管均采用Cable单元进行模拟,弹性模量取210 GPa,单位长度水泥浆黏聚力取 2×10^5 ,单位长度水泥浆刚度取 1.75×10^7 。径向小导管的模拟直径为42 mm,抗拉强度为450 MPa,而径向锚杆的模拟直径为25 mm,抗拉强度为200 MPa。三台阶临时仰拱采用与初支混凝土喷层相同的Shell单元模拟,并通过共享ID号实现相互连接,共同受力,不考虑二次衬砌作用。

三台阶法开挖示意图如图3所示。开挖每循环进尺为2 m,其模拟步骤为:开挖上台阶I,施作初期支护①和临时仰拱②;开挖中台阶II,施作初期支护③和临时仰拱④;开挖下台阶III,施作初期支护⑤和临时仰拱⑥。模拟中,不考虑初期支护的施作时间。为了与三台阶法对隧道开挖变形的影响进行对比分析,采用同样的施工参数对隧道施工全断面开挖进行模拟。模拟中生成的衬砌结构模型如

图 4 所示。

4 数值模拟结果

4.1 围岩变形分析

为研究三台阶法开挖对围岩变形的影响，在模型中部 $y=26\text{ m}$ 断面处，拱顶、拱腰和掌子面的位置布设监测点，得到全断面开挖和三台阶开挖的拱顶沉降、水平变形随开挖步变化曲线和掌子面挤出变形曲线，如图 5~7 所示。

4.1.1 隧道拱顶、拱腰变形分析

从图 5 中可以看出，全断面开挖隧道时，拱顶

最大沉降量为 64.22 mm 。采用三台阶法，其开挖拱顶的最大沉降量降低至 36.37 mm ，沉降量减少约 43.4% 。以沉降变形的突变点作为界定隧道开挖的主要影响范围的依据。全断面开挖时，会对掌子面前方约 10 m 范围内未开挖土体和掌子面后方约 4 m 范围内已成形洞室的拱顶沉降变形产生较大的影响。而采用三台阶法施工时，隧道拱顶沉降变形主要受上台阶施工影响。对掌子面前方未开挖土体拱顶沉降的影响范围缩小 4 m 左右，相较于全断面开挖时的减小约 60% 。对掌子面后方已成形洞室的影响范围维持在 4 m ，中、下台阶施工对拱顶沉降变形的影响较小。

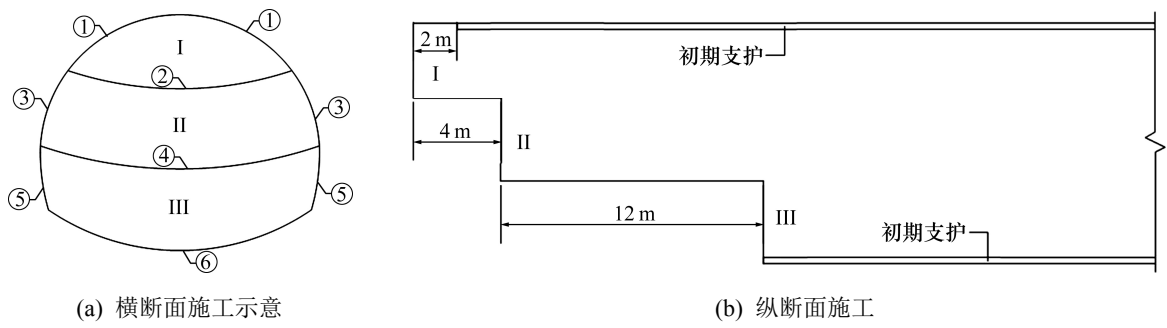


图 3 三台阶法开挖示意

Fig.3 Schematic diagram of three-bench method

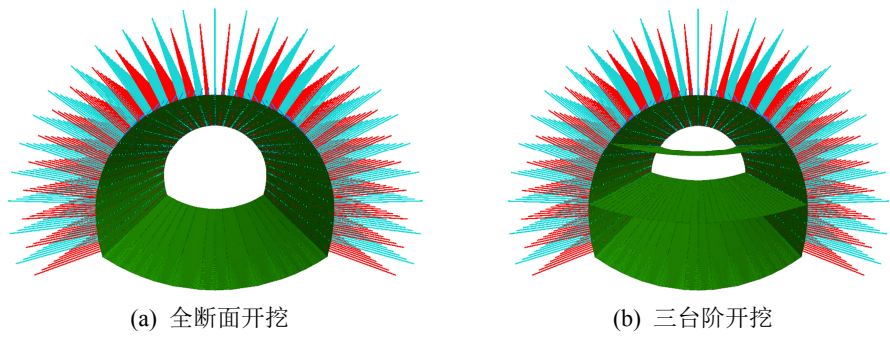


图 4 衬砌结构模型

Fig.4 The model of lining structure

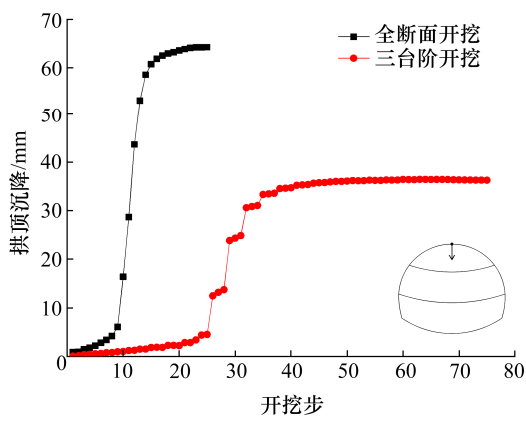


图 5 拱顶沉降随开挖步变化曲线

Fig.5 The settlement of the vault during the excavation

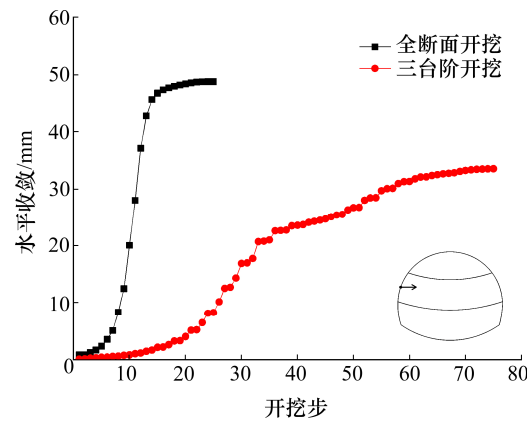


图 6 水平变形随开挖步变化曲线

Fig.6 The horizontal settlement during the excavation

从图6中可以看出,采用全断面开挖隧道时,拱腰最大水平收敛量为48.81 mm;采用三台阶法开挖时,最大水平收敛量为33.55 mm,减少了约31.3%。同样,以变形的突变点作为界定掌子面位置处开挖的主要影响范围的依据。全断面开挖时,会对掌子面前方约14 m范围内未开挖土体和掌子面后方约4 m范围内已形成洞室的水平变形产生较大的影响。而采用三台阶法开挖时,对于掌子面前方未开挖土体水平变形的主要影响范围,缩小8 m左右,相较于全断面开挖减少约50%,对掌子面后方的主要影响范围维持在4 m。

三台阶法将隧道断面划分为各个小断面进行施工,并采用临时仰拱闭合初期支护。虽然增加了施工步骤,围岩受扰动次数增多,但是小断面施工控制了围岩应力的释放过程,加之临时仰拱,增强了初支的承载能力,使得围岩突变变形量和开挖对掌子面前方土体的影响范围显著减小。

隧道开挖后,围岩变形按照发生时与掌子面间的位置关系,可分为掌子面前方的预收敛变形和掌子面后方洞室的收敛变形。以拱顶沉降为例,采用全断面法开挖时,围岩预收敛变形占全变形的82.7%。而采用三台阶法开挖时,这一数值将降低至65.7%。从现场变形控制表明:掌子面前方的预收敛变形在现场难以测得,根据预收敛变形的测量结果,动态调整支护结构参数很难实现。因此,降低预收敛变形在全变形中的占比,将变形发生过程集中于较易控制的掌子面后方的施工过程中,对隧道变形的控制更有利。

虽然采用三台阶法降低了预收敛变形在全变形中的占比,但仍达到了65.7%,很可能诱发掌子面拱顶坍塌和大变形。表明:现场施工需要重视对隧道围岩的超前支护,控制预收敛变形的发生,保护围岩强度。

4.1.2 掌子面挤出变形分析

掌子面挤出变形量指隧道掌子面向已成洞室内的水平变形,是衡量隧道掌子面稳定的重要指标。根据 $y=26$ m断面处隧道掌子面中轴线方向上监测点的变形数据,得到掌子面挤出变形量随掌子面高度变化的关系,如图7所示。

在图7中,三台阶开挖掌子面挤出变形曲线a,b,c,分别为上台阶刚开挖至 $y=26$ m断面时、受中台阶开挖扰动后、继续受下台阶开挖扰动后的掌子面

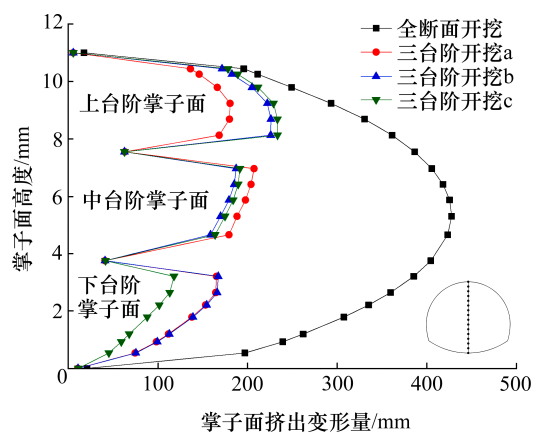


图7 掌子面挤出变形

Fig.7 The deformation of the tunnel face

挤出变形曲线。

从图7中可以看出,全断面开挖时,由于受到开挖轮廓线周围岩体的约束作用,掌子面挤出变形曲线呈现出中间大,两边小的分布形态,挤出变形位于中心点位置,最大值为427.47 mm。采用三台阶法开挖时,当上台阶掌子面刚到达监测断面时,掌子面挤出变形最大值位于中台阶顶部,其值为207.19 mm。受中台阶开挖扰动影响之后,掌子面挤出变形最大位置转移至上台阶底部,其值为225.68 mm。较中台阶开挖之前,上台阶挤出变形的最大值增长近25%。然后,受到下台阶开挖扰动的影响,掌子面挤出最大值的位置,虽未发生转移,但进一步增大至233.27 mm,增长幅度较小,约3%。

以掌子面挤出变形的最大值对掌子面变形程度进行评价。采用三台阶法开挖时,掌子面挤出变形减少了45.5%,但变形值仍达到了233.27 mm。隧道掌子面将面临失稳风险,施工时,需要采取充分的掌子面支护措施,以增强掌子面的稳定性。同时,需要注意的是各台阶施工之间的相互扰动作用对掌子面稳定性的影响程度较大。施工过程中,可以通过控制爆破参数,加长台阶等措施,减少扰动造成的不利影响。

4.2 围岩应力状态分析

全断面开挖和三台阶法开挖产生的围岩最大主应力和最小主应力云图,如图8所示。

从图8中可以看出,采用全断面开挖时,围岩应力重分布后,产生的最大主应力为20.86 MPa,最小主应力为35.11 MPa;在拱脚位置处,产生应力集中。采用三台阶法开挖时,产生的最大主应力为16.29 MPa,最小主应力为30.34 MPa;临时仰拱

的拱脚位置处,产生应力集中;对最大主应力和最小主应力的限制量分别为13.59%、21.91%;可以减小围岩的最大主应力值和最小主应力值。但是,临

时仰拱的拱脚位置发生应力集中。因此,施工过程中,需要对临时仰拱的拱脚位置进行补强,以增强拱脚位置的承载能力。

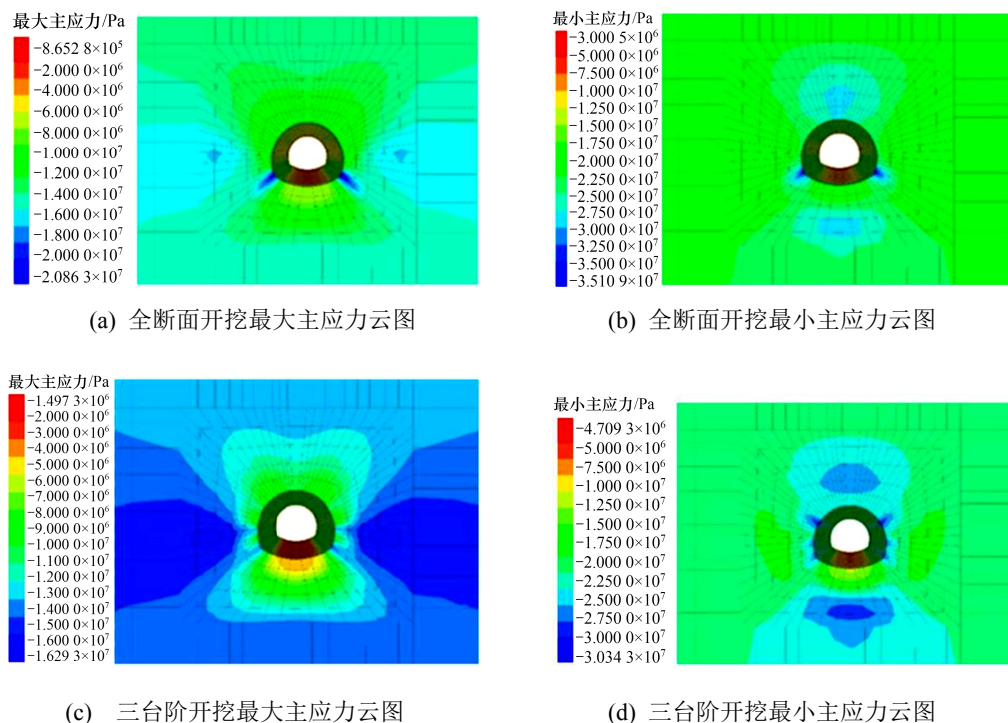


图8 隧道围岩主应力云图

Fig.8 The cloud map of principal stress tunnel

5 结论

针对渭武高速公路木寨岭隧道施工过程中围岩变形特征难以掌握的问题,采用三台阶法对现场施工,借助FLAC^{3D}有限差分软件进行数值模拟,通过对围岩变形和围岩应力状态的分析,得出的结论为:

1) 产生的预收敛变形在全变形中的占比超过了50%,是诱发掌子面拱顶坍塌和大变形的主因之一。因此,现场施工需加强围岩超前支护,控制预收敛变形的发生,保护围岩强度。

2) 虽然对掌子面的变形能起到一定限制作用,但掌子面变形仍较大,稳定性难以保证。现场施工时,需要尽量减小各台阶之间的相互扰动,并辅以掌子面锚杆等变形控制措施,以增强掌子面的稳定性。

3) 临时仰拱的拱脚位置会产生应力集中。施工过程中,需对拱脚位置进行适当补强。

参考文献(References):

- [1] 王小林,黄彦波.中外高地应力软岩隧道大变形工程技术措施对比分析——以兰渝铁路木寨岭隧道与瑞士圣哥达基线隧道为例[J].隧道建设,2018,38(10):1621-1629. (WANG Xiao-lin,HUANG Yan-bo.Comparison of large deformation control technologies for soft rock tunnel with high ground stress between china and foreign countries: a case study of Muzhailing tunnel on Lanzhou-Chongqing railway in China and saint gotthard base tunnel in switzerland[J].Tunnel Construction,2018,38(10):1621-1629.(in Chinese))
- [2] 肖广智.我国几类特殊地质条件铁路隧道修建问题与对策概述[J].隧道建设,2019,39(11):1748-1758.(XIAO Guang-zhi.Problems of railway tunnel construction under some special geological conditions in China and their countermeasures[J].Tunnel Construction,2019,39(11):1748-1758.(in Chinese))
- [3] 魏来,刘钦,黄沛.高地应力软岩隧道大变形机理及控制对策研究综述[J].公路,2017(7):297-306.(WEI Lai,LIU Qin,HUANG Pei.Research progress on large deformation mechanism and control countermeasures of soft rock

- tunnel in high ground stress[J].Highway,2017(7):297–306.(in Chinese))
- [4] 黄俊,梁庆国,岳琳琳,等.高地应力软岩隧道不同施工方法数值模拟变形分析研究[J].铁道标准设计,2018,62(5):116–119,128.(HUANG Jun,LIANG Qing-guo,YUE Lin-lin,et al.Numerical simulation analysis of high ground stress soft rock tunnel deformation subject to different construction methods[J].Railway Standard Design,2018,62(5):116–119,128.(in Chinese))
- [5] 陈国中,徐前卫,程盼盼,等.红层软岩隧道 CRD 法进洞施工合理工序研究[J].铁道建筑,2016(8):69–72,82.(CHEN Guo-zhong,XU Qian-wei,CHENG Pan-pan, et al. Study on reasonable construction process in entrance section of red layer soft rock tunnel with CRD(Cross Diaphragm) method[J].Railway Engineering,2016(8):69–72,82. (in Chinese))
- [6] 王茜,凌同华,刘唐利,等.穿越断层破碎带隧道入口段施工数值模拟[J].交通科学与工程,2019,35(4):78–84.(WANG Qian, LING Tong-hua, LIU Tang-li, et al. Numerical simulation of construction method of tunnel entrance section throughing fractured fault zone[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(4):78–84.(in Chinese))
- [7] 贾晓旭,赵玉成.软弱围岩隧道 CD 法和台阶法施工力学行为分析[J].铁道标准设计,2016,60(7):121–125.(JIA Xiao-xu,ZHAO Yu-cheng.Analysis of mechanical behavior of tunneling in weak surrounding rock by CD method and benching method[J].Railway Standard Design,2016,60(7):121–125. (in Chinese))
- [8] 孙韶峰.古迹坪隧道进口浅埋黄土层进洞施工技术[J].现代隧道技术,2012,49(4):83–88.(SUN Shao-feng. Construction technique for the Gujiping tunnel portal section in shallow-buried loess[J].Modern Tunnelling Technology,2012,49(4):83–88.(in Chinese))
- [9] 刘聪,彭立敏,雷明锋,等.大拱脚三台阶法开挖浅埋软弱红黏土隧道的力学特性及适用性研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(8):2006–2017.(LIU Cong,PENG Li-min,LEI Ming-feng,et al.Applicability & mechanical characteristics of shallow buried soft red clay tunnel under 3-step benching tunneling method with large arch feet[J].Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(8):2006–2017.(in Chinese))
- [10] 段长高,杨杰.循环进尺对大断面浅埋隧道稳定性的影响[J].公路工程,2019,44(3):128–132.(DUAN Chang-gao, YANG Jie.Effect of cyclic length on stability of large section shallow buried tunnel[J].Highway Engineering,2019,44(3):128–132.(in Chinese))
- [11] 耿启军,屈振荣,蔡国庆,等.三台阶大拱脚临时仰拱法与微台阶法在砂质黄土隧道中的适用性对比分析[J].铁道建筑,2019,59(11):67–69.(GENG Qi-jun,QU Zhen-rong,CAI Guo-qing,et al.Applicability comparative analysis of the three-step large arch foot temporary inverted arch method and micro step method in sandy loess tunnel[J].Railway Engineering,2019,59(11):67–69. (in Chinese))
- [12] 李沿宗,尤显明,赵爽.极高地应力软岩隧道贯通段变形控制方案研究—以兰渝铁路木寨岭隧道为例[J].隧道建设,2017,37(9):1146–1152.(LI Yan-zong,YOU Xian-ming,ZHAO Shuang.Study of deformation control scheme of breakthrough section of soft rock Muzhailing tunnel on Lanzhou-Chongqing railway with extremely high ground stress[J].Tunnel Construction,2017,37(9):1146–1152.(in Chinese))
- [13] 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.(LYU Xian-fu,ZHAO Zhan-qun, WEI Xing-xing.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.(in Chinese))
- [14] 关宝树.软弱围岩隧道变形及其控制技术[J].隧道建设,2011,31(1):1–17.(GUAN Bao-shu.Deformation of tunnels with soft surrounding rocks and its control[J]. Tunnel Construction,2011,31(1):1–17.(in Chinese))
- [15] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,2013.6.(CHEN Yu-min,XU Ding-ping.Foundation and engineering examples of FLAC/FLAC^{3D} (The second edition)[M].Beijing:China Water & Power Press,2013.(in Chinese))