

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.06.002

不同施工工法对断层隧道的力学响应分析

商贝贝¹, 梁国栋¹, 王琳琦²

(1. 中国电建集团河南省电力勘测设计院有限公司, 河南 郑州 450007;

2. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 断层破碎带是隧道施工中常见的不良地质构造, 在断层破碎带附近施工时常常会引发围岩失稳甚至塌方等问题。因此依托某高速公路隧道, 利用FLAC3D建立三维分析模型, 研究施工方法对隧道围岩稳定和支护结构的影响, 计算结果表明: 在3种施工工法下, 断层破碎带位置围岩的拱顶沉降值和拱底隆起值显著大于围岩正常段的, 同时初期支护结构在断层破碎带和围岩正常段交界处的受力最大。环形开挖预留核心土工法施工引起的拱顶沉降最大值为51.45 mm, 拱底隆起最大值为121.25 mm, 初期支护结构的主应力最大值为15.27 MPa, 各项数据均优于其余两种工法的对应值, 表明该工法对保持围岩稳定效果最佳。现场监测结果也表明断层破碎带附近的拱顶沉降值要大于围岩正常段的拱顶沉降值, 在现场施工中要加强断层破碎带位置处的监测并做好安全措施。

关键词: 隧道; 数值模拟; 施工工法; 沉降

中图分类号: TU94⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)06-0009-06

引文格式: 商贝贝, 梁国栋, 王琳琦. 不同施工工法对断层隧道的力学响应分析[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(6): 9-14.

Research on Mechanical Response Analysis of Fault Tunnels by Different Excavation Methods

SHANG Beibei¹, LIANG Guodong¹, WANG Linqi²

(1. China Power Construction Group Henan Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China;

2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Characterized with its common unfavorable geological structure in tunnel construction, fault fracture zone often brings about instability or even collapse of surrounding rock during construction near the fault fracture zone. In view of a study of its impact on the stability of tunnel surrounding rock and support structure, a three-dimensional analysis model has thus been established using FLAC3D based on a certain highway tunnel. The calculation results indicate that under the three construction methods, the settlement value of the arch top and the uplift value of the arch bottom of the surrounding rock at the location of the fault fracture zone are significantly greater than those in the normal section of the surrounding rock. Meanwhile, the initial support structure bears the maximum force at the junction of the fault fracture zone and the normal section of the surrounding rock. The maximum vault settlement value of the arch crown caused by the construction of the reserved core geotechnical method for annular excavation is 51.45 mm, the maximum uplift value of arch bottom is 121.25 mm, and the maximum principal stress of the initial support structure is

收稿日期: 2022-08-09

作者简介: 商贝贝(1995-), 女, 河南郑州人, 中国电建集团河南省电力勘测设计院有限公司工程师, 硕士, 主要研究方向为岩土数值模拟计算, E-mail: 2567469196@qq.com

通信作者: 梁国栋(1995-), 男, 山东济南人, 中国电建集团河南省电力勘测设计院有限公司工程师, 硕士, 主要研究方向为隧道监测与数值模拟, E-mail: 946265194@qq.com

15.27 MPa. All data are superior to the other two construction methods, indicating that this proposed method achieves the best effect on maintaining the stability of surrounding rock. It is suggested that the monitoring and measurement be strengthened of the location of fault fracture zones during on-site construction, with further safety measures to be taken.

Keywords: tunnel; numerical simulation; construction method; settlement

1 研究背景

随着经济的快速发展,越来越多的长大隧道在国内建成并投入使用,在隧道快速建设过程中,隧道围岩稳定性分析也逐渐引起重视,长大隧道从山体内部经过时,会不可避免地经过一些不良地质构造,如岩溶、断层、破碎带等,这些常见的不利构造,不仅会增加隧道施工的复杂性,也会带来较大的安全隐患。因此,隧道施工如何安全顺畅地穿越断层破碎带成为目前亟待解决的问题。

为研究断层破碎带对隧道稳定性的影响,学者们对此做了大量的研究,并取得了一定的研究成果。在数值模拟方面,黄锋等^[1]依托港珠澳大桥南湾隧道,采用离散元方法模拟了断层破碎带对隧道周围围岩稳定性的影响。张少强等^[2]以云南某穿越断层的隧道工程为背景,采用FLAC3D建立了数值模型,研究了不同断层倾角、断层倾向和衬砌厚度对隧道变形的影响。杨青莹^[3]通过建立数值模型,研究了断层宽度和倾角对隧道周围围岩的力学扰动影响。杨绪祥等^[4]采用数值计算方法,研究了隧道穿越断层时,不同衬砌材料情况下断层错动量、断层倾角和断层厚度等参数对隧道衬砌力学响应的影响规律。祁文睿等^[5]对某穿越断层隧道采取探地雷达、超前地质钻孔等方法进行地质预报,并构建了一套基于全站仪、反光片和三维激光扫描于一体的隧道破碎围岩综合实时监控量测系统,可用于精准监测隧道实时变形。龚林金等^[6]以水阳高速胜利隧道穿越破碎带工程为例,采用现场监测和数值模拟相结合的方法,对不同倾角情况下隧道穿越断层时的力学变形规律进行了研究。王飞等^[7]以西南地区某深埋穿越破碎带隧道工程为例,通过对现场数据进行分析并结合数值模拟试验,对隧道初衬变形规律和周边收敛规律进行了研究。此外,模型试验更具有直观性,也是分析隧道工程的重要手段。李玉生等^[8]通过室内试验研究了隧道穿越破碎带时的隧道变形机理。汪杰等^[9]通过试验研究了不同倾角的节理岩体发生破坏时的规律。王天强等^[10]以滇中引水输水隧道为背景,通过开展室内试验,研究了隧洞在走滑断层错动作用下的力学变化规律。杜修力等^[11]采用自主研发

的用于模拟走滑断层运动的试验装置,分析了走滑断层运动下岩体的破裂特性。李翰源等^[12]开展了隐伏断层错动对隧道影响的模型试验,并研究了隧道纵向受力特征和断层错动的关系。颜永斌等^[13]基于筒仓理论并考虑断层破碎带的围岩特性,建立了断层破碎带内隧道纵向荷载的计算模型,并开展了数值模拟和室内模型试验,结合模拟结果和试验结果对理论分析结果进行了验证。

综上所述,现阶段研究主要集中于隧道穿越断层过程中的围岩变形破坏机理研究,对于同一断层下如何选取合适的施工工法研究较少。为进一步研究不同施工工法情况下,隧道经过断层破碎带时隧道围岩的变形特征,通过建立数值分析模型,研究了隧道在经过断层破碎带时不同施工工法情况下围岩的变形特征和支护结构的力学位移响应,得出的结论可以用于指导施工,提高隧道在断层破碎带时的安全性。

2 隧道工程概况

本研究所依托的隧道项目为某高速公路的控制性工程,其开挖直径为11.9 m,平均埋深约300 m,断层面面向北倾斜,其宽度约45 m,与隧道的夹角为30°。隧址区域东高西低,褶皱及断裂构造发育良好,地表植被茂密,沿隧道走向断层两侧岩体以IV级围岩为主,断层破碎带岩体主要为V级围岩。根据现场地质勘察资料及相关力学试验,可得各级围岩力学参数取值,如表1所示。

表1 围岩力学参数表

参数名称	参数取值	
	围岩IV	围岩V
容重 / (kN·m ⁻³)	21	19.2
泊松比	0.32	0.35
弹性模量 /GPa	5	2.1
摩擦角 / (°)	36	28
黏聚力 /kPa	700	300

3 计算模型与工况介绍

3.1 计算模型

结合现场实际情况,首先在Midas GTS NX中建

立网格模型, 然后导入 FLAC3D 中进行计算分析, 隧道计算模型如图 1 所示。图中红色部分为正常围岩段, 蓝色部分为断层破碎带。考虑边界影响并结合圣维南原理, 设定模型在水平方向长度为 80 m (x 方向), 开挖方向长度为 100 m (y 方向), 重力方向长度为 80 m (z 方向), 在模型顶部施加均布荷载模拟上覆岩体自重。边界条件为约束模型左右两侧水平位移、前后两侧水平位移和约束模型底部竖向位移。

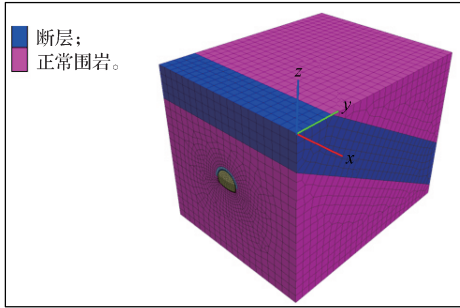


图 1 隧道计算模型示意图
Fig.1 Tunnel calculation model diagram

该隧道初期支护所采用的喷射混凝土的型号为 C20, 厚度为 25 cm, 支护锚杆直径为 25 mm, 长度为 3.5 m, 间距均为 1.2 m, 钢拱架采用 I22 工字钢, 间距为 50 cm。模拟过程中对工字钢进行简化处理, 根据等效轴向刚度原理, 将工字钢和喷射混凝土的强度综合考虑, 其等效弹性模量为

$$E = \frac{E_a(S \cdot d - A) + E_b A}{ld} \quad (1)$$

式中: E 为等效混凝土弹性模量; E_a 为喷射混凝土弹性模量; E_b 为钢拱架弹性模量; S 为钢拱架纵向间距; d 为混凝土喷射厚度; A 为钢拱架截面积; l 为锚杆长度。

对于岩体单元, 其本构采用摩尔库伦本构, 锚杆采用 cable 单元模拟, 初衬采用 shell 单元模拟。

3.2 计算工况

为研究隧道施工过程中穿越断层破碎带时各工法的优劣性, 分别采用台阶法、CRD 法 (交叉中隔壁法) 和环形开挖预留核心土法 3 种不同的施工工法进行研究, 3 种计算模型如图 2 所示, 各工法的施工步骤如下:

1) 台阶法。上台阶与下台阶的间隔为 5 m, 先开挖上台阶, 施作对应的初衬和锚杆结构, 然后开挖下台阶, 并施作下台阶对应的支护结构。上台阶开挖 20 m 后施作二衬, 不断循环上述过程直到开挖结束。

2) CRD 法。该法将隧道断面分为 4 个区域, 每个区域沿开挖方向的间隔距离均为 5 m, 施工顺序依

次为左上区域、左下区域、右上区域、右下区域, 每次开挖一定区域后均及时施作相应的支护结构。

3) 环形开挖预留核心土法。该法将隧道断面分为 5 个区域, 每个区域沿开挖方向的间隔同样为 5 m, 施工顺序依次为左侧区域、右侧区域、顶部区域、中部区域、底部区域, 同样在每次开挖完一定区域后施作相应的支护结构。

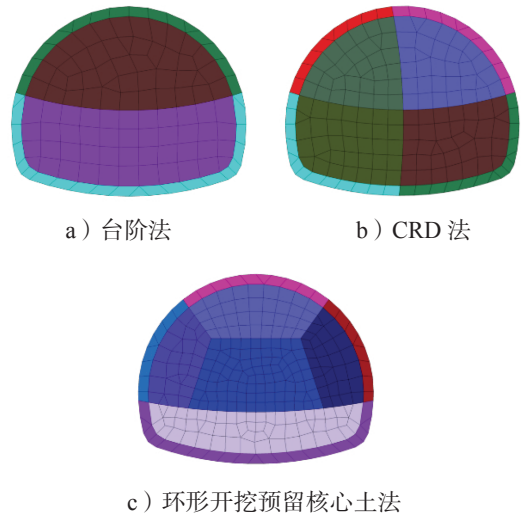


图 2 不同施工工法的计算模型
Fig.2 Calculation model of different construction methods

选取的研究断面为 $x=0$ m 所在的平面, 如图 3 所示, 该平面正好处于模型拱顶与拱底连线位置处, 蓝色部分仍为断层破碎带区域, 前后两侧区域为非断层位置, 即正常围岩段。

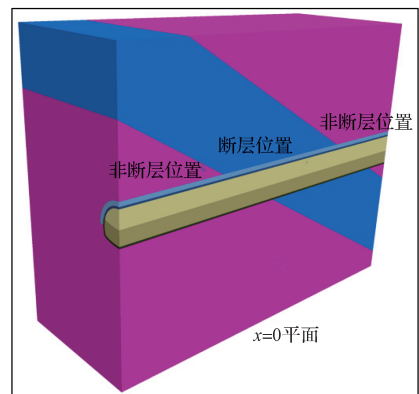
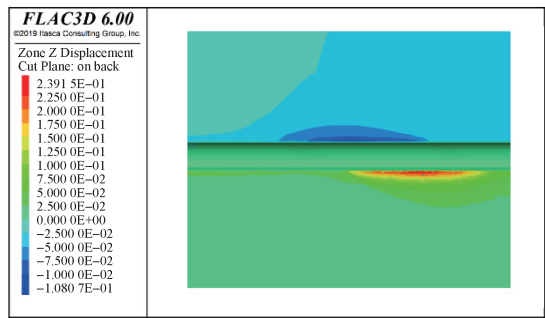


图 3 模型 $x=0$ m 处的平面视图
Fig.3 Model plane view at $x=0$ m

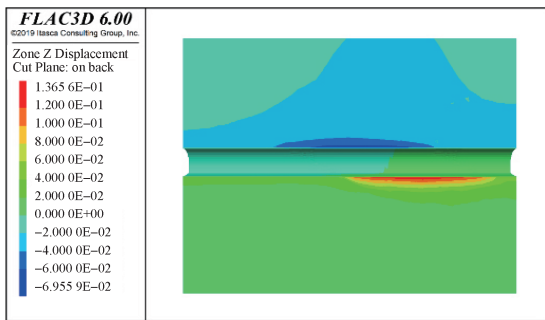
4 计算结果与分析

4.1 围岩竖向位移分析

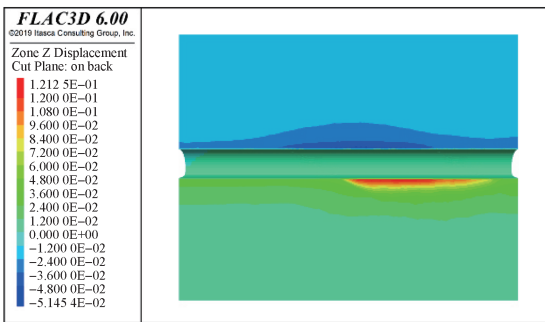
图 4 为 3 种工法下 $x=0$ 平面位置处的竖向位移剖面图, 从图中可以看出 3 种工法在断层位置处的竖向



a) 台阶法



b) CRD 法



c) 环形开挖预留核心土法

图4 不同施工工法下 $x=0$ 位置处 竖向沉降剖面图

Fig. 4 Vertical settlement profile at $x=0$ under different construction methods



位移值均明显大于非断层位置处的对应值。

图4a为采用台阶法施工后最终的竖向位移图，可看出断层处的拱顶最大竖向沉降为108.07 mm，拱底隆起值最大为239.15 mm。

图4b为采用CRD工法施工后最终的竖向沉降云图，其拱顶沉降值最大为69.56 mm，拱底隆起最大值为136.56 mm，可以看到采用CRD工法对断层造成的扰动要明显小于台阶法施工对断层产生的扰动，采用CRD工法得到的拱顶沉降值比台阶法得到的拱顶沉降值约降低了35.6%，CRD工法下的拱底隆起值比台阶法下的拱底隆起值约降低了42.9%。

图4c为采用环形开挖预留核心土工法得到的最

终竖向沉降云图，其拱顶沉降最大值为51.45 mm，拱底隆起最大值为121.25 mm。对比台阶法和CRD法，该工法拱顶沉降值分别降低了52.39%和26.04%，拱底隆起值分别降低了49.30%和11.2%。通过数据对比，可以明显看出，采用环形开挖预留核心土工法对断层附近的围岩扰动影响是最小的，安全性最佳，这主要是因为环形开挖预留核心土每次开挖的土体范围最小，对围岩的扰动最小，符合“短开挖，早支护”的施工原则，故建议在断层位置采用环形开挖预留核心土工法进行施工。

表2给出了各施工工法下拱顶沉降和拱底隆起的位移最大值。

表2 不同施工工法下拱顶及拱底最大竖向位移

Table 2 Maximum vertical displacement of arch top and bottom under different construction methods

施工工法	最大竖向位移 /mm	
	拱顶沉降值	拱底隆起值
台阶法	108.07	239.15
CRD 法	69.56	136.56
环形开挖预留核心土法	51.45	121.25

为研究拱顶位置处竖向沉降在隧道推进过程中的变化情况，在断层中部隧道拱顶以上2 m位置处设置一处监测点。计算结果表明，3种施工工法所反映的规律基本一致，如图5所示。隧道开挖初始阶段，监测点均处于稳定状态，可视为无位移变化，当开挖位置接近监测点时，沉降曲线迅速发展，沉降值迅速增大，当周围围岩应力释放完毕后，监测点位移变化趋于平缓并达到稳定值。

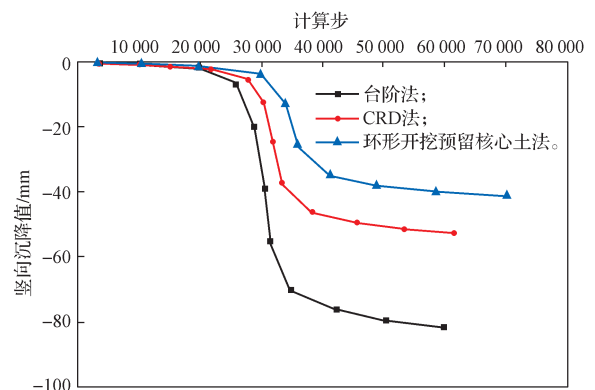


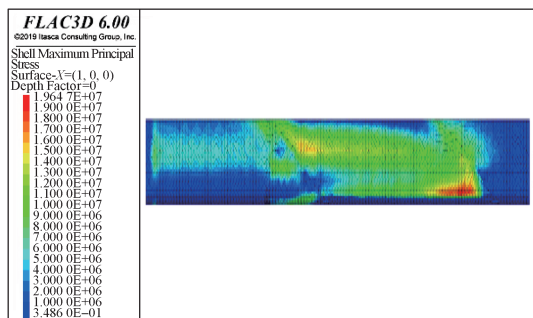
图5 不同施工工法下断层中部拱顶竖向沉降趋势图

Fig. 5 Vertical settlement trend of the central arch of the vault under different construction methods

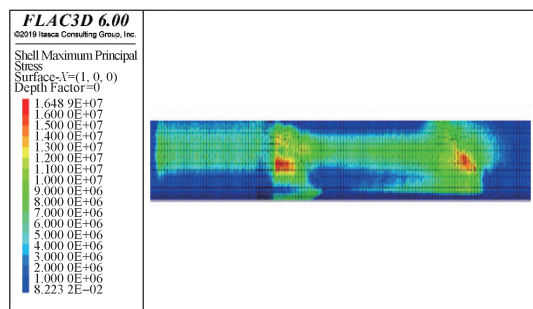
4.2 初衬结构应力分析

为研究不同施工工法下初衬结构的应力分布规律，对3种施工工法下初衬结构的最大主应力云图进

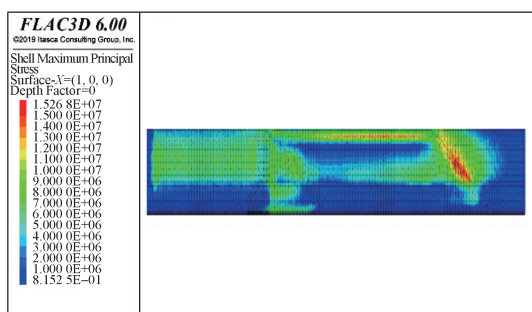
行了分析。图 6 为各工法初衬结构对应的最大主应力云图。



a) 台阶法



b) CRD 法



c) 环形开挖预留核心土法

图 6 不同施工工法下初衬最大主应力云图

Fig. 6 Maximum principal stress nephogram of the primary lining under different construction methods



彩图

5 现场监测结果与分析

图 7 分别为 ZK2+658 和 ZK2+ 681 两处断面拱顶位置的实测沉降曲线, 其中, ZK2+658 断面位于断层破碎带前方, 围岩等级为 IV 级围岩, ZK2+681 断面处于断层破碎带中部位置, 其围岩等级为 V 级围岩。从图中可以看出, ZK2+658 断面的最终沉降值约为 52 mm, ZK2+681 断面的最终沉降值约为 82 mm, 断层破碎带的存在致使断层附近的隧道拱顶沉降大于非断层位置。从图中还可以看出, 在 20~60 d 范围内, 拱顶的沉降速较快, 60 d 之后的沉降速度逐

渐减小, 表明隧道应力大部分已释放完毕, 隧道变形趋于稳定。

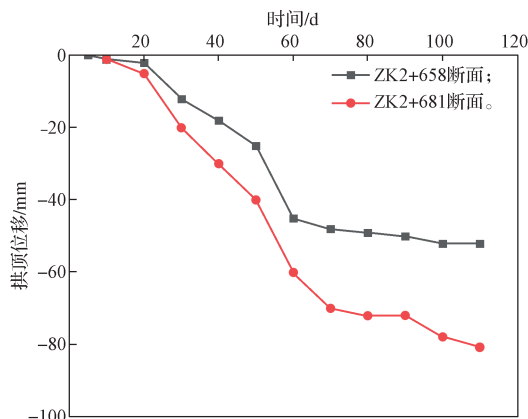


图 7 不同断面拱顶沉降监测曲线

Fig. 7 Settlement monitoring curves at the arch roof of different sections

6 结论

采用 FLAC3D 对隧道穿越断层破碎带进行了数值模拟, 主要得到以下结论:

- 1) 通过分析 3 种工法下的断层剖面沉降云图, 发现采用环形开挖预留核心土工法施工造成的拱顶沉降值和拱底隆起值最小, 对隧道周围的围岩扰动最小。
- 2) 隧道中部位置拱顶沉降的迅速发展主要发生在施工经过该监测点位置时, 在施工未到达监测点位置时和围岩应力释放完毕后竖向沉降均为平缓变化, 采用环形开挖预留核心土施工得到的初衬结构应力集中程度最小, 安全性更高。
- 3) 现场监测数据表明, 由于断层破碎带的存在会使得拱顶位置处的沉降增大, 隧道变形增大, 增加了隧道施工的风险性, 因此在断层破碎带附近施工时, 要增加监测频率, 及时施作支护结构。

参考文献:

[1] 黄 锋, 董广法, 李天勇, 等. 断层破碎带隧道围岩稳定性的离散元模拟研究 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7429-7440.
HUANG Feng, DONG Guangfa, LI Tianyong, et al. Study on Discrete Element Simulation of Tunnel Surrounding Rock Stability with Fault Fracture Zone[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(18): 7429-7440.

[2] 张少强, 侯圣均, 江传彬, 等. 走滑断层错动作用下隧道变形的数值分析 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊 1): 418-424.
ZHANG Shaoqiang, HOU Shengjun, JIANG

- Chuanbin, et al. Numerical Analysis of Tunnel Deformation Under the Slip of Strike-Slip Fault[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(S1): 418-424.
- [3] 杨青莹. 富水断层破碎带对隧道围岩稳定性的影响[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(8): 148-153.
- YANG Qingying. Influence of Water-Rich Fault Fracture Zone on Stability of Tunnel Surrounding Rock[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(8): 148-153.
- [4] 杨绪祥, 任志华, 文锦诚, 等. 正断层错动下山岭隧道衬砌结构力学响应分析[J]. *公路*, 2022, 67(4): 378-385.
- YANG Xuxiang, REN Zhihua, WEN Jincheng, et al. Mechanical Response Analysis of Lining Structure of Mountain Tunnel Under Normal Fault Dislocation[J]. *Highway*, 2022, 67(4): 378-385.
- [5] 祁文睿, 高永涛. 公路隧道穿越软弱破碎围岩综合施工及监测技术研究[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(11): 88-96, 105.
- QI Wenrui, GAO Yongtao. Study on Comprehensive Construction and Monitoring Technology of Highway Tunnel Crossing Weak and Fractured Surrounding Rock[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(11): 88-96, 105.
- [6] 龚林金, 任锐, 王亚琼, 等. 隧道斜穿不同倾角断层破碎带围岩变形特征分析[J]. *公路*, 2021, 66(7): 313-319.
- GONG Linjin, REN Rui, WANG Yaqiong, et al. Analysis on Deformation Characteristics of Surrounding Rock of Tunnel Crossing Fault Fracture Zone with Different Dip Angles[J]. *Highway*, 2021, 66(7): 313-319.
- [7] 王飞, 高明忠, 林文明, 等. 深埋穿越破碎带隧道衬砌变形规律研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(增刊1): 232-240.
- WANG Fei, GAO Mingzhong, LIN Wenming, et al. Study on Deformation Law of Tunnel Lining Deeply Buried Through Broken Zone[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(S1): 232-240.
- [8] 李玉生, 翁贤杰, 王人杰, 等. 隧道穿越断层破碎带突水突泥机理模拟试验研究[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(12): 89-99.
- LI Yusheng, WENG Xianjie, WANG Renjie, et al. Experimental Study on Simulating Mechanism of Water and Mud Inrush in Tunnel Crossing Fault Fracture Zone[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(12): 89-99.
- [9] 汪杰, 宋卫东, 付建新. 考虑节理倾角的岩体损伤本构模型及强度准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2253-2263.
- WANG Jie, SONG Weidong, FU Jianxin. A Damage Constitutive Model and Strength Criterion of Rock Mass Considering the Dip Angle of Joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2253-2263.
- [10] 王天强, 崔臻, 盛谦, 等. 走滑断层作用下跨断层隧洞错断模型试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(3): 597-605.
- WANG Tianqiang, CUI Zhen, SHENG Qian, et al. Experimental Study on Dislocation Model of Cross-Fault Tunnel Under Strike-Slip Fault[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(3): 597-605.
- [11] 杜修力, 汪振, 赵密, 等. 穿越走滑断层的山岭隧道抗错断铰接设计试验研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(5): 97-106.
- DU Xiuli, WANG Zhen, ZHAO Mi, et al. Experimental Study on Articulated Design of Mountain Tunnel Crossing Strike-Slip Fault Zones[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(5): 97-106.
- [12] 李瀚源, 李兴高, 马明哲, 等. 隐伏断层错动对盾构隧道影响的模型试验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(4): 631-639.
- LI Hanyuan, LI Xinggao, MA Mingzhe, et al. Model Experimental Study on Influence of Buried Fault Dislocation on Shield Tunnel[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(4): 631-639.
- [13] 颀永斌, 董建华. 断层破碎带内隧道纵向受荷特征和变形分析[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(11): 211-224.
- XIE Yongbin, DONG Jianhua. Analysis of Longitudinal Deformation and Stress Characteristics of Tunnel Crossing Fault Fracture Zone[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(11): 211-224.

(责任编辑: 姜利民)