

断层错动隧道地震响应规律及减震模拟研究

甘星球¹ 徐锋¹ 王晓伟¹ 李沛¹ 彭述权² 祁彬溪² 樊玲² 王凡²

(1 中交第一航务工程局有限公司,天津 300461;2 中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘要 文章以内马铁路一期项目三标段2号隧道为工程依托,运用ANSYS软件建模,对断层错动和地震作用下隧道地震响应及减震措施进行模拟研究。结果表明:在竖直方向断层位错作用和水平方向的地震作用下,隧道侧壁的地震响应均最为明显;断层错动导致隧道在重力作用以及地震作用下发生应力重分布,其中主应力极值、X-位移极值和最大加速度明显增加,加速度增加幅度最大;断层错动和地震作用下隧道地震响应随减震层阻尼比增加而明显减小,较大阻尼比的减震层可以有效降低断层错动导致的隧道地震响应的应力、位移和加速度增加幅度;砂-橡胶混合物和砾石-橡胶混合物,配合土工格室加筋是一种潜在合适的隧道减震材料。

关键词 铁路隧道 断层错动 地震响应 数值计算 应力 阻尼比 减震

中图分类号:U452.2*8 **文献标识码:**A

1 引言

近年来,我国基础设施建设持续投入和大力发展,山岭铁路隧道建设数量不断增多,穿越断层破碎带的铁路隧道抗震设计也日益受到重视。

针对此问题,国内外学者做了大量研究。张楠^[1]采用隧道模型试验研究断层位于不同位置时对隧道围岩稳定性的影响,结果表明,在有侧限压缩条件下,隧道围岩的破坏主要受岩体条件控制,断层对隧道围岩稳定性的影响非常明显。吕海英^[2]采用物理模型试验以及数值模拟等方法,对含断层隧道围岩在外力作用下的渐进破坏机理进行了深入的研究,得出隧道围岩破坏主要集中于断层附近,并在断层与隧道交界处首先开裂。黄生文等^[3]通过不同的断层与隧道的位置关系,对断层所在区段的围岩应力状态进行数值模拟分析,总结断层地带大跨度隧道围岩应力的分布规律。朱长安等^[4]采用反应时程分析方法研究了穿越断层破碎带隧道纵向地震响应规律,并分析了不同断层倾角对隧道结构的动力响应规律。可以看出,目前针对隧道断层破碎带抗震的研究,主要是以数值模拟分析为主,对于断层滑移

错位的影响和减震措施的研究还尚有欠缺。

肯尼亚内罗毕—马拉巴标准轨铁路(内马铁路)一期项目三标段位于Kapiti高原向东非大裂谷过渡地带。该标段隧道具有围岩破碎、张性断层较多等特点。2号隧道位于地震多发地带,且穿过断层破碎带,洞身范围内发育有一条正断层,与线路夹角为89°,未来百年可能发生的垂直位错量为0.2 m。该项目属于中国海外“一带一路”项目,有较高的建设要求和关注度。

综上所述,基于东非大裂谷这一特殊地质情况,以及考虑到其地质活动作用的相关隧道抗震施工技术研究尚未见报道,文章建立合适的数值模型进行断层位错和地震的模拟,并探究了合适的减震层参数。模拟结果将有利于该工程的建设,并对含断层铁路工程具有参考意义。

2 内马铁路隧道工程概述

东非大裂谷是一个正在活动着的大裂谷,地质作用活跃。该断裂由始于大约3 000万年前的非洲板块和印度洋板块张裂拉伸形成,断裂下陷运动、地

修改稿返回日期:2020-06-23

基金项目:穿越东非大裂谷铁路设计和建造关键技术研究。

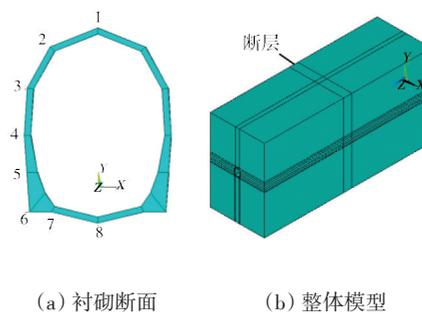
作者简介:甘星球(1976-),男,硕士,高级工程师,主要从事隧道工程施工技术及风险防控领域的研究工作,E-mail:1045938440@qq.com。

震和火山、分化和搬运、地裂缝等地质作用活跃。断裂带内构造复杂,形成了多级断层,断层厚度一般比较大,达十至几十米。

在地质作用活跃的东非大裂谷内修筑铁路隧道具有较大的难度和极高的社会关注度。肯尼亚内罗毕—马拉巴标准轨铁路(内马铁路)作为我国“一带一路”的项目,受到全世界关注。该铁路一期项目三标段位于非洲 Kapiti 高原向东非大裂谷过渡地带,属于东非大裂谷东翼区,地形起伏较大,受到东非大裂谷活跃的地质作用影响显著,隧道修筑具有较大的难度。合理设计隧道穿越断层破碎带在地震作用下的抗减震措施,是生产实践的必然要求。

3 数值建模

采用 ANSYS 建模分析隧道地震作用动力响应。隧道断面为高 9.0 m,宽约 6.2 m 的马蹄形,隧道衬砌断面模型如图 1(a)所示。数值模型周围岩层尺寸为 99 m(高)×62.8 m(宽)×200 m(长),以满足边界尺寸的要求。隧道衬砌材料为 C45 混凝土。定义 X 方向为宽, Y 方向为高, Z 方向为长。岩层和衬砌均采用 SOILD45 单元。



(a) 衬砌断面 (b) 整体模型

图 1 隧道有限元模型

Fig.1 Finite element model of a tunnel

实际工程中,周围土层主要分为两种,强风化粗面岩和弱风化粗面岩,且存在断层。故以隧道中心点高度为分界面,上部围岩选为强风化粗面岩,下部围岩选为弱风化粗面岩,并被断层分隔^[5,6],断层距洞口 95 m,与隧道交角为 90°,厚度为 10 m。围岩材料采用 Drucker-Prager 准则分析土体单元的应力和变形,主要参数如表 1 所示。整体模型如图 1(b)所示。

模型底部固支, Y 方向与 X 方向均施加水平约束,上部边界自由。破碎带位置的衬砌结构断面关键点如图 1(a)所示。

表 1 模型材料参数

Table 1 Parameters of model materials

材料类型	弹性模量 /MPa	粘结力 /MPa	剪切角 /($^{\circ}$)	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度 /MPa	泊松比	阻尼比
强风化粗面岩	6 500	0.5	30	2 400	34	0.32	0.01
弱风化粗面岩	6 500	1	45	2 400	64	0.28	0.01
断层破碎带	2 000	0.4	24	2 200	32	0.3	0.01
C45 混凝土	35 000	5	55	2 500	45	0.2	0.02

本次模拟采用美国 EI-centro 地震波实测数据,在模型 X 方向一侧输入,时间间隔为 0.02 s,其水平加速度时程曲线如图 2 所示。地震波总时长 50 s,考虑到计算方便,计算总时长取前 2 s,地震波能量未全部到达,但对于计算结果的参考性影响较小。

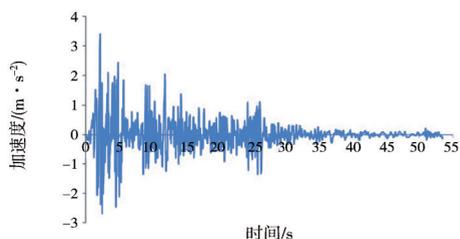


图 2 水平加速度时程曲线

Fig.2 Curve of horizontal acceleration

4 数值计算与结果分析

4.1 断层位错对衬砌结构稳定的影响

洞身范围内正断层未来百年可能发生的垂直位错量为 0.2 m,取 20 年估计总位错量为 0.04 m^[7,8]。衬砌整体第三主应力分布和断层处隧道衬砌关键点值对比如图 3、表 2 所示。

由图 3 可知,断层位错时,隧道整体应力发生应力重分布,断层位置两侧隧道衬砌侧壁应力集中,容易发生破坏。隧道最大应力由静止作用下的 6 MPa 增加至 12.6 MPa。由表 2 可见,断层竖直向下发生 0.04 m 位错时,断层处隧道衬砌竖向位移增加,第三主应力增加明显,拱侧 4 号节点应力增幅最大达 69.46%,1 号节点位移增幅达 42.62%。

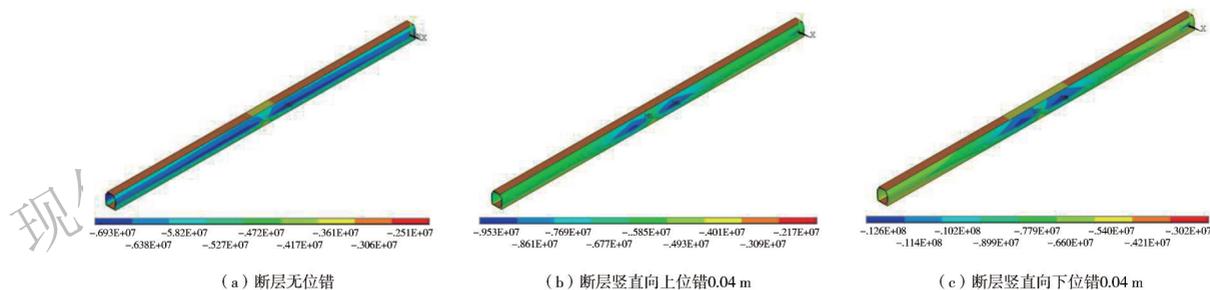


图3 衬砌第三主应力分布对比

Fig.3 Comparison of third principle stress distribution in lining

表2 断层竖直向下位错0.04 m时隧道衬砌关键点应力、位移值

Table 2 Stress and displacement values at key points of tunnel lining when the fault is dislocated vertically downward by 0.04 m

节点编号		1	2	3	4	5	6	7	8
无断层位错	第三主应力/MPa	4.37	3.56	5.87	5.37	3.98	3.16	3.27	3.48
	Y-位移/mm	0.122	0.122	0.119	0.115	0.113	0.113	0.112	0.112
断层位错 0.04 m	第三主应力/MPa	5.51	4.56	9.63	9.10	6.35	3.74	3.43	3.66
	Y-位移/mm	0.174	0.173	0.167	0.160	0.156	0.155	0.154	0.154
增幅	第三主应力增幅/(%)	26.09	28.09	64.05	69.46	59.55	18.35	4.89	5.17
	Y-位移增幅/(%)	42.62	41.80	40.34	39.13	38.05	37.17	37.50	37.50

4.2 断层错动和地震作用下隧道响应

在0.04 s时,在地震波作用下的衬砌第三主应力分布如图4所示。

由图4可知:水平地震波作用下,无断层错动情况下,0.04 s时刻最大应力位于拱脚,有断层错动情况下,该时刻最大应力位于拱腰。0.1 s时,断层位错和地震作用下断层衬砌应力和位移接近极大值,无断层错动和断层错动0.04 m隧道衬砌关键点极大值对比分析见表3。由表3可知:断层错动导致隧道主应力极值、X-位移极值和最大加速度明显增加,3

号节点增幅最大,其增幅分别达到39.28%、40%和4.47倍。

4.3 减震层对隧道地震响应影响

为研究减震层对隧道衬砌的影响,在隧道外侧布置厚40 cm的混凝土减震层,强度参数与围岩的强度参数一致^[9-14],其阻尼比分别为0.01,0.05,0.1,0.3,0.5。

断层处衬砌4号节点在无断层错动和断层错动0.04 m作用的地震响应结果分别见图5和图6。由图5和图6可知:0.1 s时刻隧道地震响应最明显。

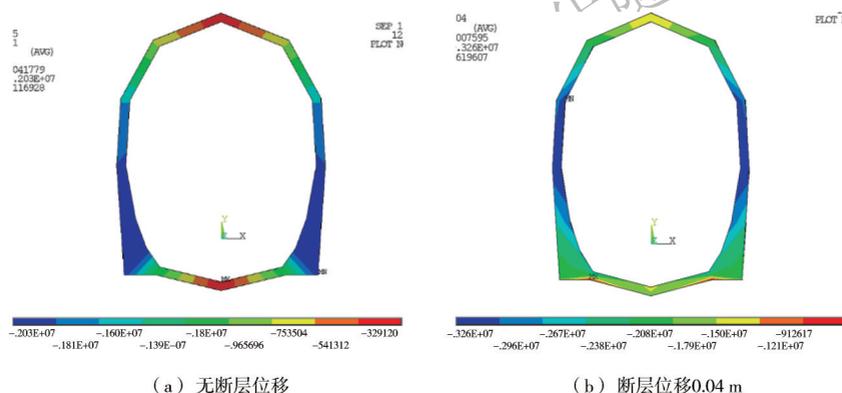


图4 地震作用下衬砌应力分布云图

Fig.4 Contour of lining stress distribution under seismic action

表3 地震作用下隧道衬砌内侧关键点极大值

Table 3 Extreme values of critical points at inner side of tunnel lining under seismic action

节点编号		1	2	3	4	5	6	7	8
无断层位移	主应力极值/MPa	10.71	6.75	10.31	16.03	13.03	13.30	12.64	8.82
	X-位移极值/mm	0.08	0.35	0.35	0.53	0.41	0.39	0.33	0.11
	X-加速度极值/(m/s ²)	1.46	0.91	1.47	2.72	1.74	1.63	0.97	1.34
断层位移 0.04 m	主应力极值/MPa	9.44	7.77	14.36	16.92	12.04	9.93	7.42	6.85
	X-位移极值/mm	0.11	0.39	0.49	0.66	0.55	0.44	0.38	0.15
	X-加速度极值/(m/s ²)	6.33	4.36	8.04	12.57	8.46	7.17	5.67	7.02
增幅	主应力极值增幅/(%)	-11.86	15.11	39.28	5.55	-7.60	-25.34	-41.30	-22.34
	X-位移极值增幅/(%)	37.50	11.43	40.00	24.53	34.15	12.82	15.15	36.36
	X-加速度增幅/倍	3.34	3.79	4.47	3.62	3.86	3.40	4.85	4.24

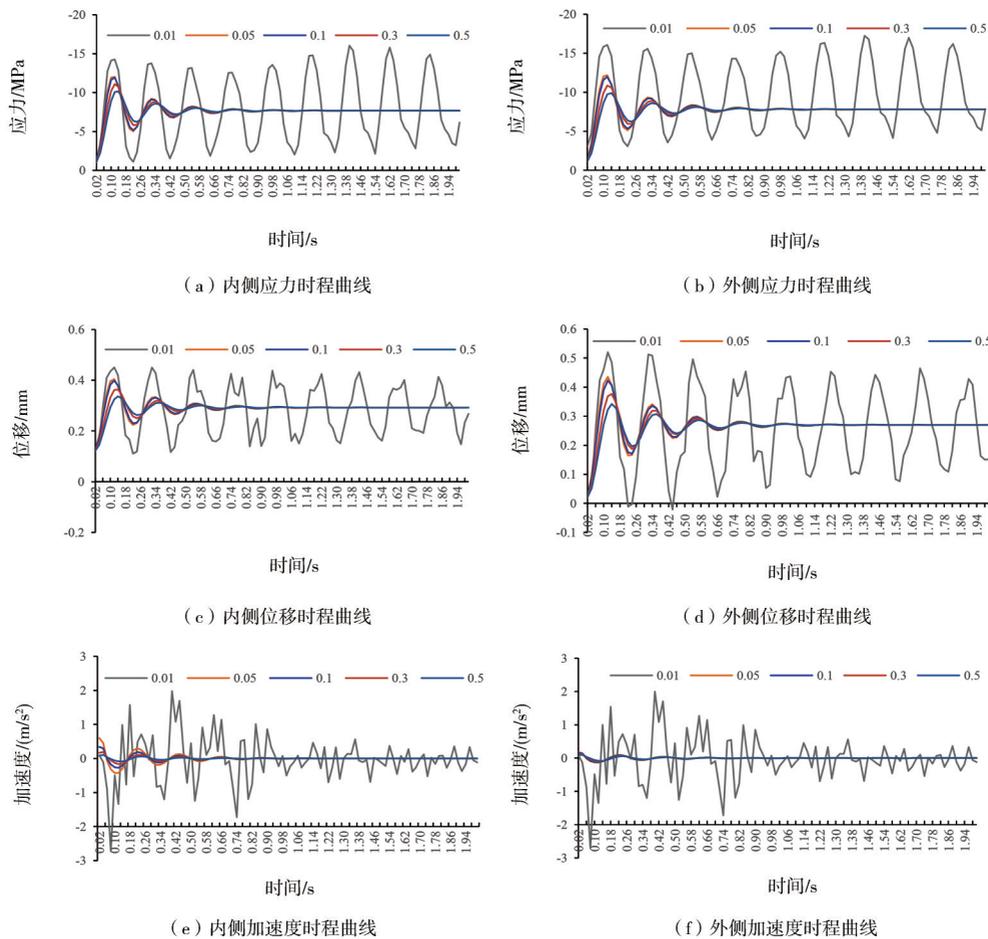


图5 无断层错动作用下阻尼影响的4号点时程曲线

Fig.5 Time-history curves of seismic response at Point 4 with damping effect under no fault dislocation

随着阻尼比增加,4号节点衬砌内外侧应力、位移和加速度随地震时间增加而明显减小,阻尼比为0.05能明显减小最大应力、位移和加速度幅值。设置了减震层后,断层错动导致的隧道地震响应的应力、位移和加速度增加幅度减小。

因此,在隧道抗震中,应当选用高阻尼混凝土或

其它高阻尼材料,阻尼比大约在0.05~0.3时即可有很好的减震效果。隧道的常用减震材料包括高性能橡胶,橡胶改性混凝土,橡胶颗粒-砂混合物等(SRM)^[15,16]等。高性能橡胶具有高阻尼比、高抗压、高抗剪强度特点。橡胶改性混凝土阻尼比最大约为0.05,仍属于较低的水平^[17,18]。砂-橡胶混合物

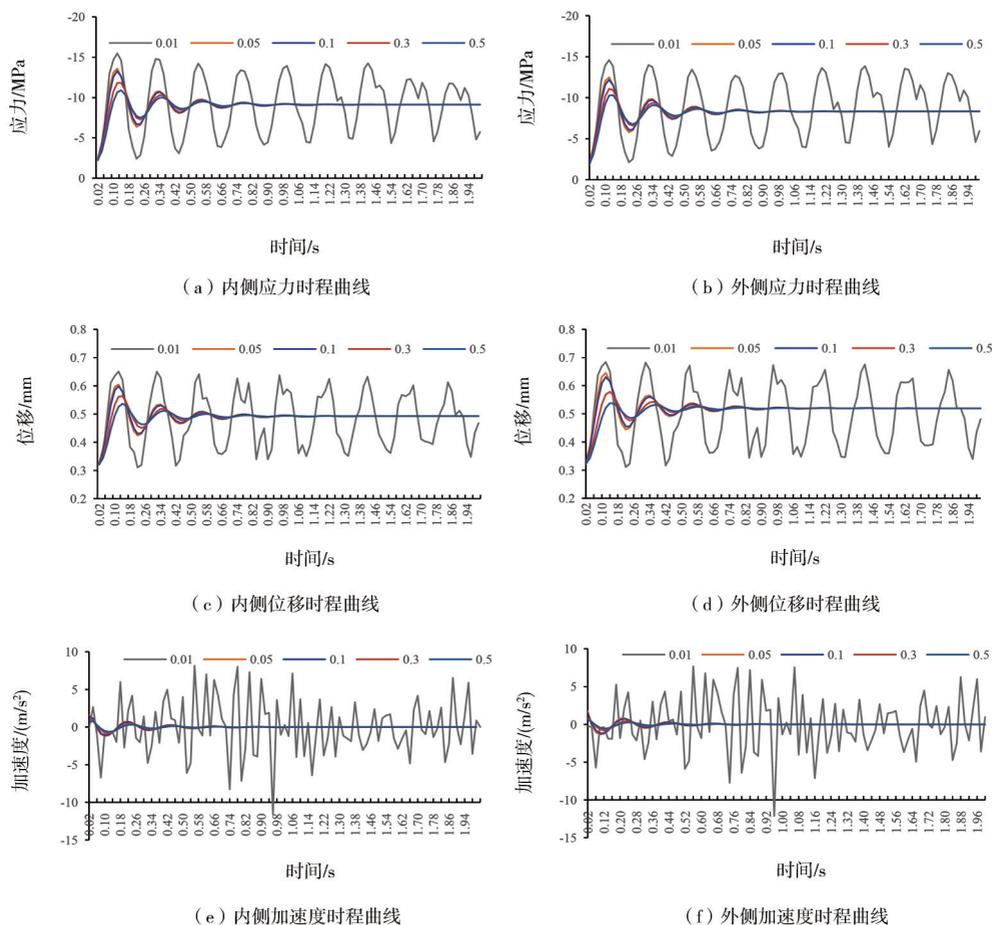


图6 有断层错动作用下阻尼影响的4号点时程曲线

Fig.6 Time-history curves of seismic response at Point 4 with damping effect under fault dislocation

(SRM)和砾石-橡胶混合物(GRM)作为一种廉价吸能材料,拥有较好的强度和较大阻尼(0.14~0.22),配合土工格室加筋^[19-21],可有效改善其各向同性的情况,可作为合适的减震材料。

5 结论

本文以内马铁路一期项目三标段2号隧道为工程背景,通过建立有限元模型,确定了其相应的参数。通过数值计算分析了隧道衬砌在断层位错与地震作用下衬砌结构关键点的应力、位移和加速度等地震影响规律及减震层对隧道地震响应影响,得到如下结论:

(1) 在竖直方向断层位错作用和水平方向的地

震作用下,隧道侧壁的地震响应均最为明显。

(2) 断层错动导致隧道在重力作用以及地震作用下发生应力重分布,其中主应力极值、X-位移极值和最大加速度明显增加,其中加速度增加幅度最大。

(3) 断层错动和地震作用下隧道地震响应随减震层阻尼比增加而明显减小。

(4) 较大阻尼比的减震层可以有效降低断层错动导致的隧道地震响应的应力、位移和加速度增加幅度。

(5) 砂-橡胶混合物和砾石-橡胶混合物,配合土工格室加筋是一种潜在合适的隧道减震材料。

参考文献

References

[1] 张楠. 大窑沟二号隧道围岩稳定性模型实验研究及数值分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

ZHANG Nan. Model Test and Numerical Analysis on Surrounding Rocks Stability of Dayaogou 2nd Tunnel [D]. Shenyang: Northeast University, 2008.

- [2] 吕海英. 临近断层隧道围岩失稳破坏机制试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
LV Haiying. Experimental Study on the Failure Mechanism of Surrounding Rock of Tunnels Adjacent to Faults[D]. Beijing Jiaotong University, 2009.
- [3] 黄生文, 司铁汉, 陈文胜, 等. 断层对大跨度隧道围岩应力影响的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3788-3793.
HUANG Shengwen, SI Tiehan, CHEN Wensheng, et al. Finite Element Analyses of Influence of Fault on Large-Span Tunnel Surrounding Rock Stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3788-3793.
- [4] 朱长安. 断层破碎带隧道地震动力响应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
ZHU Changan. Analysis of Seismic Dynamic Response of Tunnels in Fault Fractured Zone [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [5] 李旭升. 高烈度地震区行波效应下断层对隧道的动力影响和加固措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
LI Xusheng. Study on Dynamic Impact of Faults on Tunnels and Reinforcement Measures under Traveling Wave Effect in High Seismic Intensity Region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [6] 文栋良. 高烈度地震区隧道洞口段地震动力响应及减震措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
WEN Dongliang. Study on Seismic Dynamic Response of Tunnel Entrance Section in High Intensity Seismic Zone and Seismic Reduction Measures[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [7] BAKER B, WOHLNBERG J. Structure and Evolution of the Kenya Rift Valley[J]. Nature, 1971, 229(5286): 538-542.
- [8] MACDONALD R. Petrological Evidence Regarding the Evolution of the Kenya Rift Valley[J]. Tectonophysics, 1994, 236(1-4): 373-390.
- [9] 熊良宵, 李天斌, 杨林德. 隧道两种减震措施的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 36-40.
XIONG Liangxiao, LI Tianbin, YANG Linde. Numerical Analysis of Twoshock Absorption Measures of Tunnel[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(4): 36-40.
- [10] 袁帅. 浅埋隧道地震动力响应分析及减震措施研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
YUAN Shuai. Analysis of Seismic Dynamic Response of Shallow-depth Tunnels and Study on Seismic Reduction Measures[D]. WuHan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [11] 王明年, 崔光耀. 高烈度地震区隧道设置减震层的减震原理研究[J]. 土木工程学报, 2011(8): 126-131.
WANG Mingnian, CUI Guangyao. Study on the Shock Absorption Principle of Setting Shock Absorption Layer in Tunnels in High Intensity Seismic Area[J]. China Civil Engineering Journal, 2011(8): 126-131.
- [12] 卢妙娟. 隧道减震层减震效果的研究[J]. 消防界(电子版), 2016(7): 14+29.
LU Miaojuan. Study on the Seismic Absorbing Effect of Tunnel Shock Absorbing Layer[J]. Fire Fighting World, 2016(7): 14+29.
- [13] 崔光耀, 王雪来, 左奎现, 等. 强震区高岩温隧道刚柔并济综合减灾技术研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 98-103.
CUI Guangyao, WANG Xuelai, ZUO Kuixian, et al. Study on Rigid and Flexible Compound Disaster Reduction Technology for the Tunnel with High Rock Temperature in Meizoseismic Area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 98-103.
- [14] 徐华, 李天斌. 隧道不同减震层的地震动力响应与减震效果分析[J]. 土木工程学报, 2011(增1): 201-208.
XU Hua, LI Tianbin. Seismic Dynamic Response and Damping Effect Analysis of Different Damping Layers in Tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2011(S1): 201-208.
- [15] 梁威, 杨青芳, 薛丹, 等. 减震用橡胶材料及其应用[J]. 合成橡胶工业, 2006(4): 313-316.
LIANG Wei, YANG Qingfang, XUE Dan, et al. Shock Absorbing Rubbers and Their Applications [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2006(4): 313-316.
- [16] 朱玉华, 艾方亮, 任祥香, 等. 厚层铅芯橡胶支座力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1189-1194+1233.
ZHU Yuhua, AI Fangliang, REN Xiangxiang, et al. Mechanical Properties of Thick Lead-Rubber Bearings[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(9): 1189-1194+1233.
- [17] 范小春, 袁海庆, 卢哲安. 层布式钢纤维橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(7): 46-48.
FAN Xiaochun, YUAN Haiqing, LU Zhean. Experimental Research on Mechanical Properties of Layered Steel Fiber Reinforced Rubber Concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(7): 46-48.
- [18] 柯国军, 郭长青, 胡绍全, 等. 混凝土阻尼比研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(1): 35-40.
KE Guojun, GUO Changqing, HU Shaoquan, et al. Study on the Damping Ratio of Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(1): 35-40.

- [19] 尚守平, 岁小溪, 周志锦, 等. 橡胶颗粒-砂混合物动剪切模量的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 377-381.
SHANG Shouping, SUI Xiaoxi, ZHOU Zhijin, et al. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus of Rubber-sand Mixture[J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31(2): 377-381.
- [20] 岁小溪. 橡胶颗粒-砂混合物的隔震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
SUI Xiaoxi. Study on Isolation Performance of Rubber Particle-sand Mixture[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [21] 刘方成, 任东滨, 刘娜, 等. 土工格室加筋橡胶砂垫层隔震效果数值分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增1): 109-118.
LIU Fangcheng, REN Dongbin, LIU Na, et al. Numerical Analysis of Seismic Isolation Effect of Geocell Reinforced Rubber Sand Cushion[J]. Journal of Civil Engineering, 2015, 48(S1): 109-118.

Simulation Study on Seismic Response Laws and Seismic Mitigation Measures of Tunnels under Fault Dislocation

GAN Xingqiu¹ XU Feng¹ WANG Xiaowei¹ LI Pei¹ PENG Shuquan² QI Binxi² FAN Ling² WANG Fan²
(1 CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300461; 2 School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract Taking the No.2 tunnel of the Lot 3 of the Phase I project of Nairobi-Malaba Railway as the background, this paper uses the ANSYS software to conduct numerical modeling for the simulation study of the seismic response and seismic mitigation measures of tunnels under fault dislocation and seismic action. The results show that the seismic response of the tunnel sidewalls is the most obvious both under the action of fault dislocation in the vertical direction and the seismic action in the horizontal direction; fault dislocation leads to stress redistribution in the tunnel under the effect of gravity as well as seismic action, where the principle stress extreme value, X -displacement extreme value and maximum acceleration increase obviously, with the largest increase in acceleration; the seismic response of the tunnel under fault dislocation and seismic action decreases obviously with increasing of damping ratio of the shock mitigation layers, and a shock mitigation layer with larger damping ratio can effectively reduce the extent of increase in the stress, displacement and acceleration induced by the seismic response of the tunnel due to fault dislocation; sand-rubber mixture and gravel-rubber mixture, in combination with geocell reinforcement, are potentially suitable seismic mitigation materials for tunnels.

Keywords Railway tunnel; Fault dislocation; Seismic response; Numerical calculation; Stress; Damping ratio; Shock mitigation