

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.04.14

强震区隧道洞口软硬岩交接段围岩注浆 抗震措施效果分析

王泽军¹, 陈铁林¹, 崔光耀², 马军辉³, 张 玉¹

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 3. 中铁七局集团郑州工程有限公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 为提高强震区隧道洞口软硬围岩交接段的地震安全性, 本文依托老鹰窝隧道工程洞口段, 利用有限差分计算软件 FLAC^{3D} 进行三维动力响应分析, 对全环接触注浆、全环间隔注浆两种围岩注浆抗震措施作用效果进行了对比研究。研究表明: (1) 两种注浆方式均能有效减小隧道二衬结构的动力响应内力, 改善隧道结构的受力特性, 从而提高隧道整体的抗震性能; (2) 地震荷载作用下, 软岩隧道动力响应强于硬岩, 且离软硬围岩交界面越近, 响应越大; (3) 从减小衬砌结构响应内力的角度来说, 全环间隔注浆抗震性能优于全环接触注浆。研究成果可为强震区隧道洞口段抗震设计提供参考。

关键词: 隧道工程; 洞口段; 软硬围岩交界面; 接触注浆; 间隔注浆

中图分类号: U452.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)04-0096-07

Aseismic effect of grouting measures for tunnel portal structure at interface between soft and hard rock in high-intensity earthquake zone

WANG Zejun¹, CHEN Tielin¹, CUI Guangyao², MA Junhui³, ZHANG Yu¹

(1. Key Laboratory for Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 3. Zhengzhou Engineering Co., Ltd of China Railway Seventh Group, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract: To improve the seismic safety of tunnel portal with soft and hard rock transition section, dynamic response of Laoyingwo tunnel portal section is simulated by FLAC^{3D}. Based on A comparative study on the seismic effect of two kinds of surrounding rock grouting measures is carried out, including the full circle contact grouting and full annular interval grouting. The results show that: (1) Both two methods can effectively reduce internal force of secondary lining and improve the stress characteristics of lining structure which will enhance the overall seismic performance of the tunnel; (2) Dynamic response in soft rock tunnel is stronger than that of the hard rock and the closer to the interface, the stronger the response is; (3) The full annular interval grouting performs better than the full contact grouting in terms of reducing the structural internal forces. The research results can provide reference for seismic design of tunnel portal section.

Keywords: tunnel engineering; portal section; interface between soft and hard rock; contact grouting; interval grouting

收稿日期: 2017-11-08; 修订日期: 2017-12-18

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8161001)

第一作者: 王泽军(1994-), 男, 安徽黄山人, 硕士研究生, 主要从事隧道及地下工程研究。E-mail: zejunwang@bjtu.edu.cn

通讯作者: 陈铁林(1970-), 男, 安徽天长人, 博士后, 教授, 主要从事隧道及地下工程研究。E-mail: tlchen1@bjtu.edu.cn

0 引言

随着我国西部大开发战略的实施,西部交通基础设施建设蓬勃开展起来。我国西部山区多处于高烈度地震区,强震区交通隧道建设不可避免的大量涌现。隧道洞口段是隧道抗震设防的薄弱环节^[1-4],其震害类型主要包括洞门开裂、端墙破损、崩落土石;洞身内路面隆起,二衬开裂、掉块、渗水,施工缝开裂,防火涂料脱落等等。其主要原因在于该区域一般地质条件差,常常存在软硬围岩交接段,交界面两侧岩体性质差异大,特别是软岩部分由于自身裂隙多、强度低,从而导致抗震能力弱^[5]。如何解决隧道洞口软硬围岩交接段的抗减震问题显得尤为重要。目前,国内对这方面的问题研究较少,崔光耀等^[6-7]通过对汶川地震震害资料的分析,认为洞口段震害主要由强制位移和地震惯性力引起,并提出采用注浆、设置减震层的方式进行防治;邹成路等^[8-9]对穿越不同软硬岩交界面倾角隧道结构进行地震动分析,指出倾角小于 45° 时,地震动对隧道上部结构影响较大,反之,则对下部结构影响较大;王维嘉^[10]对穿越软硬岩交界面时隧道横截面方向围岩的剪应力进行分析,得出在交界面附近,隧道衬砌动剪应力幅值变化较大。综上,目前研究多集中在穿越软硬岩交界面震害作用机理方面,而对于解决这一问题的方法未作详细的说明和论证。

本文以老鹰窝隧道洞口软硬围岩交接段为研究背景,对全环接触注浆^[11-12]和全环间隔注浆^[13-14]两种围岩注浆抗震措施的作用效果进行了对比分析研究,这对于高烈度地震区交通隧道洞口段抗震设防设计具有重要的意义。

1 工程概况

老鹰窝隧道位于云南省半角至新村三级公路上,地震带烈度为IX级。隧道起点中心桩号为K5+865,终点中心桩号为K10+429,设计全长4 564 m。隧道进口边坡下部岩体为白云岩,属岩质侧向坡,边坡岩体稳定性较好;上部为第四系巨厚土质边坡,自然边坡坡度 35° ,地形较平缓,边坡整体稳定性较好,地质建议边坡开挖坡比1:1。隧道围岩为白云岩,微裂隙、断层发育,主要为II~V级围岩。

隧道埋深为45 m,单洞净宽9 m,建筑界限净高5.5 m,洞口段采用削竹式洞门,坡度为1:1。隧道进洞50 m处岩体性质发生突变,由V级围岩转变成III级围岩,软硬岩交界面与水平面大致呈 65° 夹角。初期

支护主要为C20喷射混凝土,厚20 cm,二次衬砌采用C25模筑混凝土,厚40 cm。

2 研究情况

2.1 计算模型

为分析洞口段地震响应情况,综合考虑地形和地质条件,利用有限差分软件FLAC^{3D}进行三维数值分析,计算模型如图1所示。本文中模型长100 m,高80 m,纵向长度为100 m,软硬围岩交界面距离洞口处50 m。软岩部分为V级围岩,硬岩部分为III级围岩,基岩为II级围岩。计算采用Mohr-Coulomb屈服准则以及弹塑性本构模型,山体与衬砌单元用solid45实体单元模拟。

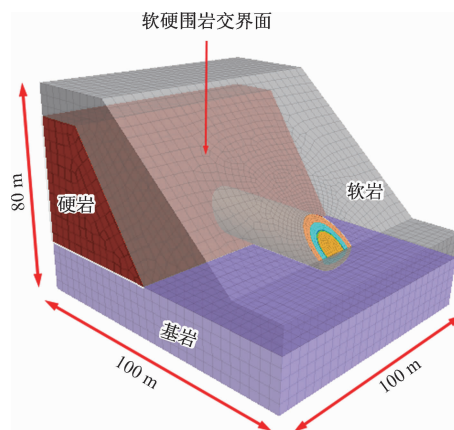


图1 老鹰窝隧道洞口段计算模型

Fig.1 Portal analysis model of Laoyingwo tunnel

2.2 计算工况

全环接触注浆和全环间隔注浆示意图如图2所示。依据现场工程地质条件及工程类比确定间隔区和注浆区的厚度均为2 m,计算工况见表1。

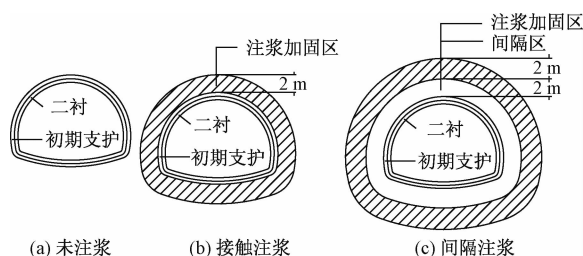


图2 不同注浆方式示意图

Fig.2 Sketch map of different grouting methods

2.3 计算参数

根据地勘报告及《隧道设计细则 JTG TD 70-2010》^[15],确定各岩层数值计算材料参数如表2所示。

表 1 模型计算工况

Table 1 Calculation conditions of the model

类别	工况编号	抗震措施
抗震	k-1	-
	k-2	接触注浆
	k-3	间隔注浆

表 2 计算模型物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of calculation model

岩层名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/MPa	泊松比
基岩(Ⅱ级)	2 400	1 500	50	20 000	0.25
软岩(Ⅴ级)	2 000	500	25	2 000	0.4
硬岩(Ⅲ级)	2 200	900	35	5 000	0.3
注浆圈	2 400			22 000	0.2
初支(C20)	2 500			23 000	0.2
二衬(C25)	2 600			31 000	0.2

2.4 监测布置

为观察注浆加固效果,沿着软硬岩交界面左右各设置 4 个监测断面,监测断面间距为 6 m,如图 3(a)所示;考虑到隧道震害的破坏形式一般发生在拱顶、仰拱、边墙位置,故每个监测断面各设置 4 个监测点,如图 3(b)所示。

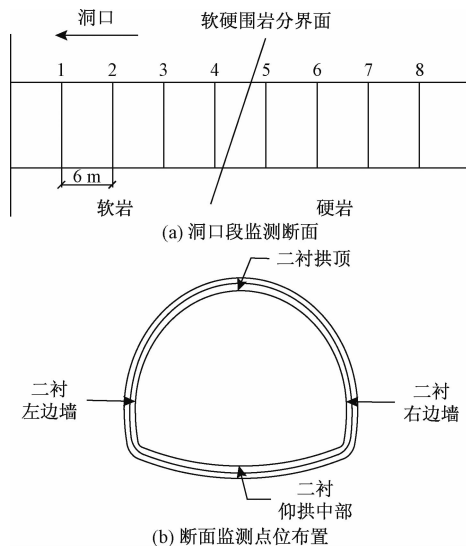


图 3 监测布置图

Fig. 3 Layout of monitoring

2.5 动力荷载及动力边界

FLAC^{3D}动力计算输入的是印度柯伊拉腊地震波,加速度时程时间间隔 0.01 s,持时 12.76 s。使用 SeismoSignal 软件滤波(截去高频部分,地震能量主要集中在低频区)后,结果如图 4 所示。动力计算时同时输入三个方向的地震波加速度时程。

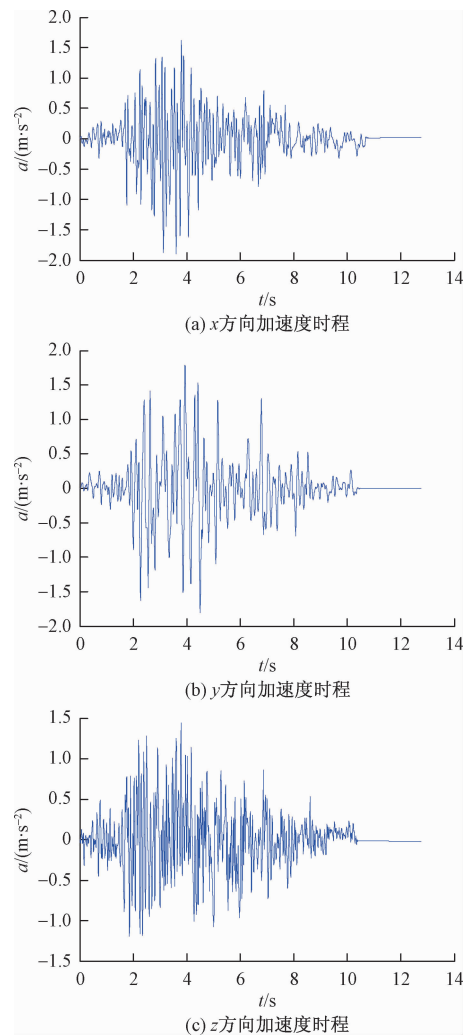


图 4 地震波加速度时程曲线

Fig. 4 The time history curve of seismic acceleration

FLAC^{3D}中阻尼分为 Rayleigh 阻尼、局部阻尼、滞后阻尼三种^[16]。本文采用 Rayleigh 阻尼进行计算,其主要包括体系的基频 $w_{\min}$ 和临界阻尼比 $\xi_{\min}$ 两个参数,根据动力计算结果确定 $w_{\min}$ 约为 6 Hz,临界阻尼比 $\xi_{\min}$ 按照经验取 0.05,边界条件为自由场边界。

3 计算结果分析

3.1 最大主应力

为了表征两种注浆方式对交接段的加固效果,在地震荷载作用下,以未注浆模型中交界面处拱顶点时刻作为分析标准。同时,由于交界面是倾斜的,为简化处理,将 4、5 号监测断面值取平均值作为交界面的最大主应力值,3.2 节结构内力分析中也做类似处理。在工况 k-1 中,软硬围岩交界面处拱顶点由地震荷载产生最大主应力时程曲线如图 5 所示。

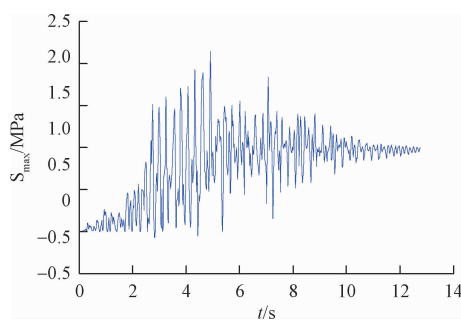


图5 地震荷载下交界面处拱顶点最大主应力时程曲线
Fig. 5 The time history curve of maximum principal stress at the interface of the arc crown under earthquake

由图5可知,当 $t=4.50\text{ s}$ 时,交界面处拱顶点最大主应力达到峰值 2.28 MPa 。在k-1、k-2、k-3三种工况下,各个监测断面上拱顶、仰拱、边墙最大主应力峰值沿隧道纵向分布如图6所示。考虑到二衬左、右边墙对称性,将左、右边墙最大主应力值取平均值作为

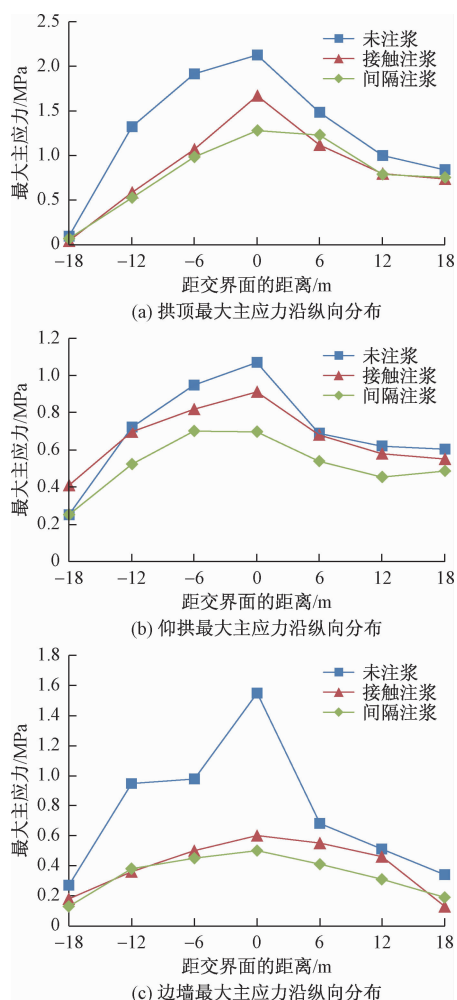


图6 最大主应力峰值沿纵向分布

Fig. 6 The distribution of the maximum peak value of principal stress along the longitudinal direction

边墙的最大主应力值,横坐标中负值表示软岩隧道,正值表示硬岩隧道。

从图6(a)、(b)、(c)可以看出,拱顶、仰拱中部、边墙最大主应力峰值均出现在软硬围岩交界面处,且距离交界面位置越远,最大主应力峰值越小;注浆加固后同一位置 σ_1 峰值都有所减小,交界面附近最大主应力减少幅度最大;软岩内拱顶和边墙的最大主应力峰值减少较明显,其中软岩内边墙 σ_1 峰值注浆后由 1.58 MPa 降至 0.50 MPa ,下降幅值为 68.35% ;硬岩内,隧道各部位 σ_1 峰值也呈下降趋势,但下降幅度较平缓;说明软岩隧道对地震动“敏感性”更强烈,注浆加固对软岩隧道抗震效果优于硬岩。

3.2 结构内力

提取 $t=4.50\text{ s}$ 时刻各监测点的应力,经计算各监测点的动力弯矩值、轴力值、安全系数如图7~9所示。其中边墙值为左、右边墙的平均值,安全系数的计算方式可参考《隧道设计细则 JTG TD 70—2010》。

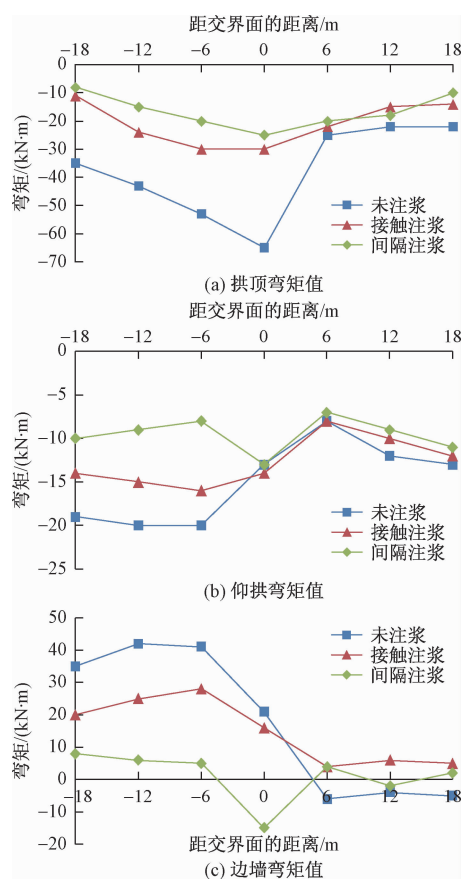


图7 不同工况下弯矩峰值沿纵向分布

Fig. 7 The distribution of peak moment along the longitudinal direction

由图7可知,注浆加固模型相对于未注浆模型而

言,二衬结构相应监测点动力弯矩值整体上均有减小。拱顶位置地震反应最强烈,交界面处拱顶弯矩值由 $-60 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 降至 $-25 \text{ kN}\cdot\text{m}$,降低了 58.33%。值得注意的是,不同工况下,仰拱和边墙的弯矩峰值均出现在软岩隧道内,表明地震对软岩内二衬仰拱和边墙弯矩影响很大,进行衬砌结构设计需引起重视。注浆加固对硬岩隧道二衬弯矩影响较小,地震动作用下,硬岩内二衬弯矩减小较平缓。就减小二衬弯矩的角度而言,间隔注浆优于接触注浆。

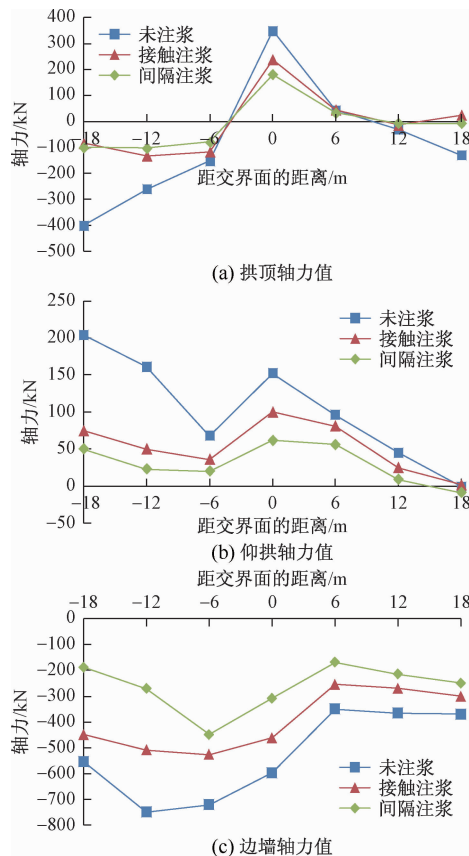


图 8 不同工况下轴力峰值沿纵向分布

Fig. 8 The distribution of peak axial force along the longitudinal direction

从图 8(a)、(b)、(c) 可以看出,采用注浆加固以后,二衬结构各监测点的轴力均有所减小:接触注浆和间隔注浆对于拱顶轴力峰值的作用效果差别不大;而对于仰拱、边墙轴力值的降低,两种注浆方式均表现出良好的效果,交界面处拱顶点轴力值由 350 kN 减小至 181 kN ,仰拱点由 150 kN 减小至 62 kN ,边墙点由 -596 kN 增大至 -308 kN ;未采取抗震措施时,软岩内二衬轴力的动力响应强于硬岩,注浆后软硬岩内变化较接近。考虑对二衬轴力的作用效果,全环间隔注浆优于全环接触注浆。

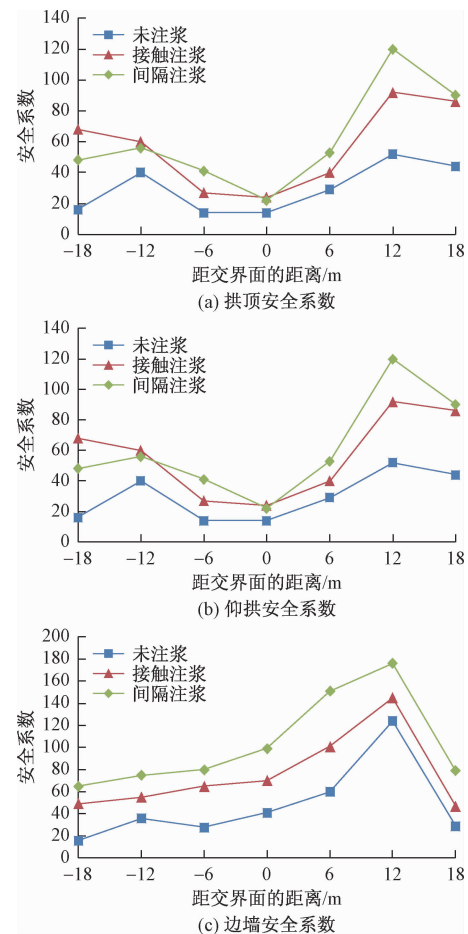


图 9 不同工况下安全系数沿纵向分布

Fig. 9 The distribution of safety factor along the longitudinal direction

在图 9 中,工况 k-2、k-3 相对于 k-1 来说,软岩隧道、硬岩隧道内拱顶、仰拱、边墙安全系数都有明显增大;交界面处除拱顶、边墙增长相对较小外,仰拱安全系数也有大幅度提高,表明注浆对隧道洞口段抗减震效果显著。整体上硬岩内安全系数大于软岩,表明硬岩抗震性优于软岩,安全系数最大值出现在硬岩内 7 号监测断面,注浆后,拱顶、仰拱、边墙最大值分别为 126、178、93(图 10),而软岩内最大值分别为 63、85、25。从增加安全系数的角度来看,间隔注浆优于接触注浆。

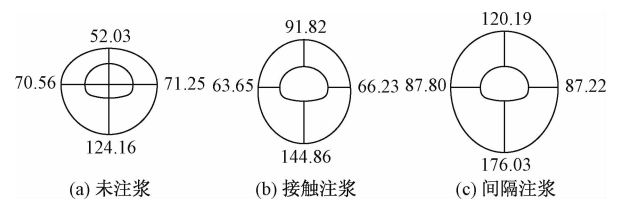


图 10 硬岩内 7 号监测面安全系数图

Fig. 10 Safety factor of #7 monitoring face in hard rock

4 结论

以云南省老鹰窝隧道为工程背景,通过三维数值模拟分析,研究了隧道洞口软硬围岩交接段抗震注浆后二衬的动力响应情况,并基于此对隧道穿越软硬围岩交界面的抗震措施进行了效果分析。主要得出以下结论:

(1)洞口段软岩隧道的动力响应比硬岩更加强烈,即地震作用下软岩的地震动作用更加明显。在隧道的抗震设计中,应加强软岩隧道抗震设防力度。

(2)注浆加固对于隧道的抗震效果显著,能够大幅度地减小地震作用下洞口段隧道拱顶、仰拱、边墙的最大主应力及内力峰值。

(3)隧道洞口段穿越软硬围岩交接面时,隧道注浆方式的不同,对隧道抗震的效果影响较大;全环间隔注浆对隧道抗震性能的提高优于全环接触注浆。

参考文献:

- [1] DOWDING C H, ROZEN A. Damage to rock tunnels from earthquake shaking[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1978, 104(2): 175 - 191.
- [2] 高波,王峥峥,袁松,等.汶川地震隧道震害启示[J].西南交通大学学报,2009,44(3):336 - 341.
GAO Bo, WANG Zhengzheng, YUAN Song, et al. Lessons learnt from damage of highway tunnels in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3):336 - 341.
- [3] 李天斌.汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J].工程地质学报,2008,16(6):742 - 750.
LI Tianbin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6):742 - 750.
- [4] 崔光耀,王明年,林国进,等.汶川地震区典型公路隧道衬砌震害类型统计分析[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(1):122 - 127.
CUI Guangyao, WANG Mingnian, LIN Guojin, et al. Statistical analysis of earthquake damage types of typical highway tunnel lining structure in Wenchuan seismic disastrous area [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1):122 - 127.
- [5] 李育枢.山岭隧道地震动力响应及减震措施研究[D].上海:同济大学,2006.
LI Yushu. Study on earthquake responses and vibration-absorption measures for mountain tunnel [D]. Shanghai:Tongji University, 2006.
- [6] 崔光耀,王明年,于丽,等.汶川地震隧道洞口结构震害分析及震害机理研究[J].岩土工程学报,2013,35(6):1084 - 1091.
CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Analysis of seismic damage and mechanism of portal structure of highway tunnel in Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6):1084 - 1091.
- [7] 崔光耀,王明年,林国进,等.汶川地震隧道洞口段震害机理及抗震对策研究[J].现代隧道技术,2011,48(6):6 - 10 + 22.
CUI Guangyao, WANG Mingnian, LIN Guojin, et al. Study on earthquake damage mechanism and aseismic countermeasure of a highway tunnel portal section in the Wenchuan seismic disastrous area[J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48(6): 6 - 10 + 22.
- [8] 邹成路.穿越软硬交界面隧道洞口结构动力响应及其抗减震措施研究[D].成都:西南交通大学,2014.
ZOU Chenglu. Research on dynamic response and aseismic or shock absorption measures for tunnel portal structure at interface between hard and soft rock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [9] 申玉生,邹成路,靳宗振,等.穿越软硬交界面隧道结构动力响应特性研究[J].现代隧道技术,2015,52(3):95 - 102.
SHEN Yusheng, ZOU Chenglu, JIN Zongzhen, et al. A study of the dynamic response characteristics of a tunnel structure through an interface of soft and hard rock[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3):95 - 102.
- [10] 王维嘉.公路隧道洞口段震害机理及抗减震措施研究[D].成都:西南交通大学,2012.
WANG Weijia. Study on the damage mechanism of tunnel portal section and the anti-damping measures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [11] 王峥峥,王正松,高波.高烈度地震区连拱隧道洞口段抗震措施研究[J].中国公路学报,2011,24(6):80 - 85.
WANG Zhengzheng, WANG Zhengsong, GAO Bo. Research on seismic measures of double-arch tunnel portals in high-intensity earthquake zone [J]. China

- Journal of Transport, 2011, 24(6):80-85.
- [12] 朱正国,余剑涛,隋传毅,等. 高烈度活断层地区隧道结构抗震的综合措施[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6):55-62.
- ZHU Zhengguo, YU Jiantao, SUI Chuanyi, et al. Comprehensive seismic measures for tunnel structure in the area of high intensity active fault[J]. China Railway Science, 2014, 35(6):55-62.
- [13] 申玉生,高波,胡邦,等. 强震区山岭隧道围岩全环间隔注浆预加固的方案研究[J]. 土木工程学报, 2011(S1):186-191.
- SHEN Yusheng, GAO Bo, HU Bang, et al. Study on surrounding rock pre-reinforcement by annular interval grouting of mountain tunnels in a high-intensity earthquake zone [J]. China Civil Engineering Journal, 2011(S1):186-191.
- [14] 王明年,林国进,于丽,等. 隧道抗震与减震[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- WANG Mingnian, LIN Guojin, YU Li, et al. Tunnel seismic and shock absorption [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [15] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路隧道设计细则:JTG/T D70-2010[S].
- CCCC Second Highway Consultants Co Ltd, Guidelines for design of highway tunnel: JTG/T D70-2010[S].
- [16] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- CHEN Yumin, XU Dingping. Introduction to the FLAC /FLAC3D and application cases[M]. Beijing: China Water Power Press, 2013.

(上接第 95 页)

- PENG Wenxiang, ZHAO Minghua, YUAN Haiping, et al. Optimization of parameters of full length grouting bolt support based on Lagrange difference method [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2006(5):1002-1007.
- [7] 吴定略,刘鑫,盛柯,等. 路基沉降对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(6): 756-762.
- WU Dinglue, LIU Xin, SHENG Ke, et al. Numerical analysis of the effect of subgrade settlement on slope stability [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39(6):756-762.
- [8] 高成雷,赵文忠,凌建明,等. 山区公路半填半挖路基沉降控制指标与标准研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1):151-158.
- GAO Chenglei, ZHAO Wenzhong, LING Jianming, et al. Study of index and criterion for settlement control applicable to cut-and-dill subgrade in mountain-highway [J]. Rock and Soil Mechanic, 2014, 35(1):151-158.
- [9] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理(第二版)[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.
- LI Yunyan, HU Chuanrong. Experimental design and data processing (Second Edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.