

• 防震减灾工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800568

隧道洞口软硬围岩交接段地震响应大型振动台模型试验研究

崔光耀¹, 孟令瀚¹, 张军徽¹, 王明年², 朱长安³

(1.北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144; 2.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;
3.四川省交通运输厅 公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:为提高强震区交通隧道洞口段的地震安全性和结构抗震性能,以汶川地震白云顶隧道进口段为研究背景,开展了隧道洞口软硬围岩交接段地震响应的大型振动台模型试验研究。介绍了试验方案设计,主要包括试验设备、相似设计、动力荷载、动力特性及加载制度。对试验数据进行了分析,主要研究了隧道洞口软硬围岩交接段由硬岩向软岩方向发展过程中隧道结构地震动峰值加速度(PGA)、纵向应变、接触应力及结构内力的空间变化规律。研究结果表明:隧道洞口软硬围岩交接段由硬岩向软岩方向发展,隧道结构 PGA 放大系数由1.04增大至1.68,纵向应变增加倍数由1.09增大至4.29,接触应力增加倍数由6.34增大至32.16,安全系数最小值减小百分比由26.18%增大至53.48%;随着受软岩影响的增大,作用于隧道结构的地震惯性力和强制位移不断增加,致使结构安全性不断降低。研究成果可为高烈度地震区交通隧道抗震设防设计提供参考。

关键词:隧道工程; 洞口段; 软硬围岩交接段; 地震响应特性; 振动台模型试验

中图分类号:U45; TU47

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)06-0084-07

Study on Large-scale Shaking Table Model Test for Seismic Response of Soft and Hard Surrounding Rock Interface Section of Tunnel Portal Part

CUI Guangyao¹, MENG Linghan¹, ZHANG Junhui¹, WANG Mingnian², ZHU Chang'an³

(1.School of Civil Eng., North China Univ. of Technol., Beijing 100144, China;

2.Key Lab. of Transportation Tunnel Eng. of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China;

3.Highway Planning, Survey, Design and Research Inst., Sichuan Province Transportation Dept., Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve the seismic safety and structural seismic performance of portal section of traffic tunnels in meizoseismic area, based on the research background of the Baiyunding tunnel portal in Wenchuan earthquake, a large-scale shaking table model test study on the seismic response of the soft and hard surrounding rock interface section of the tunnel portal was carried out. Firstly, the design of test scheme was introduced, including test equipment, similar design, dynamic load, dynamic characteristics and loading system. Then, the test data was analyzed, and the spatial variation law of peak earthquake acceleration (PGA), longitudinal strain, contact stress and internal force of tunnel structure during the transition from hard rock to soft rock at the soft and hard surrounding rock interface section of the tunnel portal were studied. The results showed that the development of the soft and hard surrounding rock interface section in the tunnel portal was hard rock to soft rock. The magnification factor of PGA increased from 1.04 to 1.68, the increasing multiple of longitudinal strain increased from 1.09 to 4.29, and the increasing multiple of contact stress increased from 6.34 to 32.16, the percentage reduction of minimum safety factor increased from 26.18% to 53.48%. The seismic inertia force and the forced displacement acting on the tunnel structure increased continuously with the influence of soft rock increasing, resulting in the structural safety decreasing continuously. The results of this research can provide a reference for the traffic tunnel design and the seismic fortification in highly seismic regions.

Key words: tunnel engineering; tunnel portal; the soft and hard surrounding rock interface section; seismic response character of tunnel; shaking table model test

收稿日期:2018-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408008);北京市青年拔尖人才培育计划项目资助(1816008);北方工业大学毓优人才支持计划项目资助(18XN012-043; 18XN012-073)

作者简介:崔光耀(1983—),男,副教授,博士。研究方向:隧道与地下空间工程。E-mail: cyao456@163.com

网络出版时间:2018-10-22 17:11:00 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20181019.1318.008.html>

<http://jsuese.ijournals.cn> <http://jsuese.scu.edu.cn>

汶川地震中,隧道软岩洞口段震害较为严重,出现了衬砌开裂、渗水、剥落、掉块等震害,在软硬围岩交接段软岩侧隧道部分甚至出现了衬砌错台、垮塌等严重震害^[1-4]。如G213线都映段白云顶隧道进口K1 020+270~K1 020+300段出现了施工缝开裂、错台,以及衬砌开裂、错台、垮塌等严重震害。此段即位于软硬围岩交接段软岩侧隧道部分(靠近交接面),如图1所示。因此,隧道洞口软硬围岩交接段地震响应特性是目前迫切需要研究的抗震问题之一。

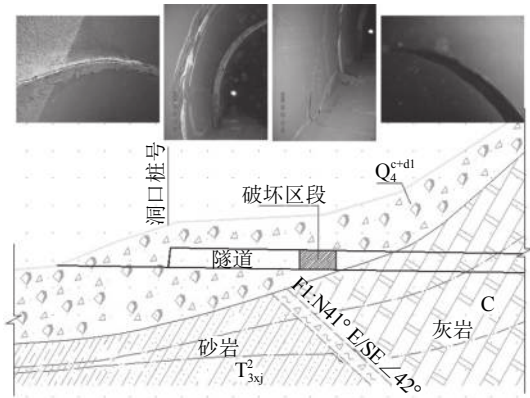


图 1 白云顶隧道进口软硬围岩交接段震害

Fig. 1 Seismic damage of the soft and hard surrounding rock interface section on Baiyunding tunnel portal

目前,国内外学者对软硬围岩交接段地震响应特性进行了部分研究:依托龙溪隧道,采用数值模拟技术对洞口软硬围岩交接段动力响应特性进行研究^[5];依托青岛胶州湾海底隧道,对土岩软硬结合部的震害机理进行研究^[6];依托汶川地震公路隧道震害资料,对洞口和洞身软硬围岩交接段震害机理进行研究^[7-8];采用振动台试验对隧道洞口仰坡地震动力响应规律及破坏机制进行研究^[9];依托嘎隆拉隧道洞口段,采用大型振动台试验,对隧道结构与围岩地震响应规律进行研究^[10];采用大型振动台试验对浅埋偏压隧道洞口段的加速度响应特性、衬砌结构内力分布规律、围岩的地震响应特性进行研究^[11];采用振动台试验对隧道洞口段设置减震层的减震效果进行研究^[12];采用振动台试验对双洞隧道洞口段设置减震层及围岩注浆的抗减震措施作用效果进行研究^[13-14]等。综上,目前研究主要集中于隧道洞口段的地震动力响应、衬砌结构内力分布规律、抗减震措施作用效果等方面;在隧道洞口软硬围岩交接段地震响应特性研究方面,目前主要采用数值模拟技术进行了部分研究,采用大型振动台进行模型试验研究鲜有报道。

以G213线都映段白云顶隧道进口软硬围岩交接段为研究背景,采用3方向、6自由度大型振动台,对其地震响应特性进行研究,得到了隧道洞口软硬围岩交接段由硬岩向软岩方向发展过程中隧道结构地

震动峰值加速度(PGA)、纵向应变、接触应力及结构内力的空间变化规律。这对提高隧道洞口段抗震性能有着重要意义。

1 白云顶隧道进口软硬围岩交接段概况

1.1 地质条件

此段隧道埋深14~30 m,边坡覆盖层为第四系崩坡积层(Q_4^{c+dl}),主要为块碎石土,块石成分灰岩粒径以大于200 mm为主,充填砂质粉土,湿润疏松,属Ⅴ级围岩。覆盖层下部分布三迭系上统须家河组中段(T_{3xj}^2)砂岩和石炭系(C)灰岩。砂岩为浅灰色中粒长石石英砂岩,节理不发育,弱风化,属Ⅱ级围岩;灰岩为厚层块状结构,灰白色,岩性坚硬,属Ⅱ级围岩,如图1所示。

1.2 隧道结构

此段隧道结构为复合式衬砌,马蹄形断面,跨度为11.30 m,高度为9.65 m。初支采用厚25 cm的C20喷射混凝土,二衬采用厚60 cm的C25模筑钢筋混凝土。

2 振动台试验方案设计

2.1 试验设备

试验采用3方向、6自由度的振动台(中国核动力研究设计院)进行,如图2所示。振动台基本参数见表1。



图 2 振动台

Fig. 2 Shaking table

表 1 振动台基本参数

Tab. 1 Basic parameters of shaking

参数名称		参数值
振动台尺寸		6 m×6 m
最大载重/t		60
自由度		6
频率范围/Hz		0.1~100.0
最大位移/mm	水平	±150
	竖直	±150
最大加速度(满载)	水平	1.0g
	竖直	0.8g
最大加速度(非满载)	水平	3.5g
	竖直	3.0g

模型试验箱尺寸为长×宽×高=2.5 m×2.5 m×2 m。试验箱在隧道纵向前后各留有一个隧道外轮廓大小的观测孔。为消除试验箱的边界效应,在试验箱四壁均设置225 mm厚的模塑聚苯乙烯泡沫塑料板;为减小围岩与边界的摩擦阻力,在模塑聚苯乙烯泡沫塑料板上粘贴聚氯乙烯薄膜;为避免振动过程中围岩与试验箱底部钢板的相对滑移,在试验箱底部胶结一层碎石,如图3所示。

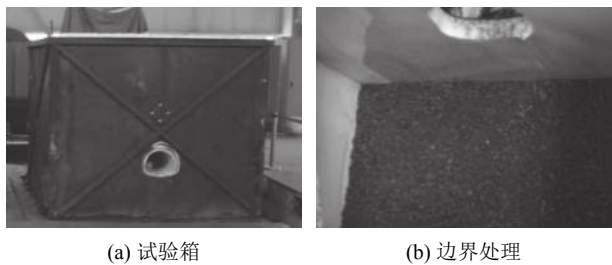


图 3 模型试验箱
Fig. 3 Model test chamber

试验数据采集系统主要包括动力应变数据采集系统和动力应变/ICP数据转换系统,如图4所示。试验用传感器主要有DYB-1微型土压力传感器、TST 1010L单向加速度计、TST1010LS三向加速度计及BE120-5AA电阻应变片。

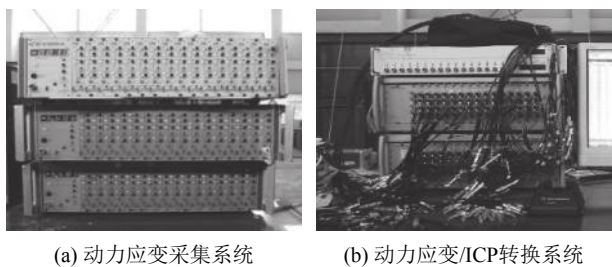


图 4 动力试验数据采集
Fig. 4 Data acquisition of dynamic test

2.2 相似设计及相似材料

考虑尽可能减小试验箱的边界效应,试验箱宽度应大于隧道模型跨度6倍以上,故试验相似比取30;弹性模量相似比取45,加速度相似比取1。其他主要参数相似比可由相似准则推出,见表2。

表 2 试验主要参数的相似比

Tab. 2 Similarity relation of main physical variables in test

参数	相似比	参数	相似比
频率	0.180	应力	45
应变、泊松比、内摩擦角、角位移	1.000	刚度	1 350
质量密度	1.500	阻尼	7 394
时间、速度	5.477	荷载、质量	40 500
线位移	30.000	力矩	1 215 000

围岩采用一定比例的河砂、重晶石粉、粉煤灰、

粗石英砂、细石英砂、松香、凡士林及火车废机油的热融混合料模拟。围岩相似材料基本力学参数见表3。

表 3 围岩相似材料基本力学参数

Tab. 3 Tunnel rock similar material basic mechanical parameters

参数	弹性模量/MPa	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
原型Ⅱ级围岩	21 000~30 000	25.2~26.5	1 500~2 000	52.0~60.0
Ⅱ级围岩相似材料	505.2	17.2	42	53.5
原型Ⅴ级围岩	1 200~2 000	17.0~20.0	20~200	20.0~27.0
Ⅴ级围岩相似材料	29.6	12.6	3.3	24.5

二衬采用膏水比为1.48的石膏掺合料和成品钢丝网模拟,如图5所示。

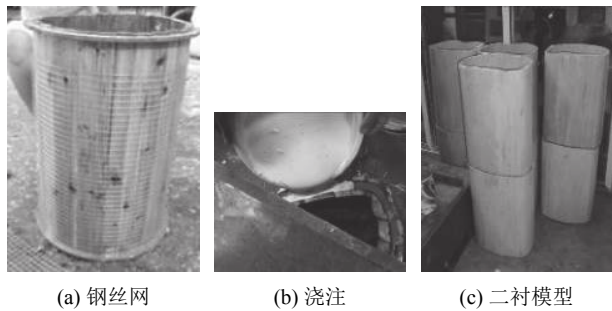


图 5 二衬模型
Fig. 5 Secondary lining model

2.3 监测断面及测点布置

为研究隧道洞口软硬围岩交接段的地震动力响应特性,分别设置软岩监测断面(A断面)、软硬围岩交接监测断面(B~D断面)、硬岩监测断面(E断面)。在各监测断面拱顶外侧布设微型土压力盒(T)和纵向应变片(ZY),在各监测断面仰拱中部内侧布设单向加速度计(J),在各监测断面的拱顶、边墙及仰拱中部内外侧布设横向应变片(Y)。监测断面及监测点布置如图6所示。

因试验箱底面比振动台台面高15 cm,为研究试验箱底面的输出地震波,在试验箱底面中间位置布设三向加速度计。

2.4 试验动力荷载及加载制度

试验动力荷载采用2008年汶川8.0级大地震卧龙测站实测加速度时程,持时164.6 s,纪录间隔为0.005 s。经调幅、相似变换、滤波及基线校正,试验输入7度地震动力荷载,见图7(以东西向为例)。

试验分两次加载。首先,输入小振幅白噪声信号,检验动力试验数据采集系统的工作状态;其后,输入试验地震加速度时程,进行动力试验并采集试验数据。

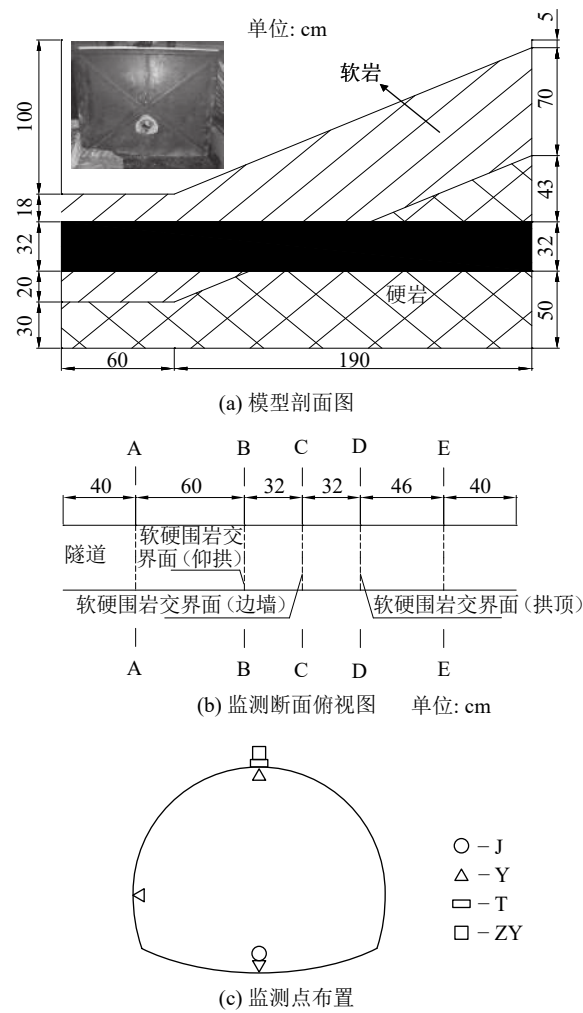


图 6 监测断面及监测点布置

Fig. 6 Arrangement of testing section and measuring point

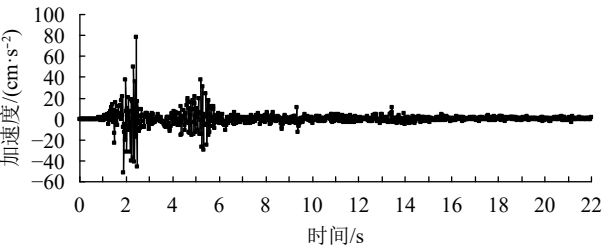


图 7 试验输入加速度时程(东西向)

Fig. 7 Acceleration time history of testing input (east-west direction)

3 试验数据及分析

3.1 地震动峰值加速度(PGA)

提取试验箱底面中间测点及各监测断面仰拱中部测点加速度时程曲线,以试验箱底面中间测点和A断面测点为例(隧道纵向轴线与南北向夹角为52°),如图8所示。

从各测点加速度时程曲线提取其PGA,并计算

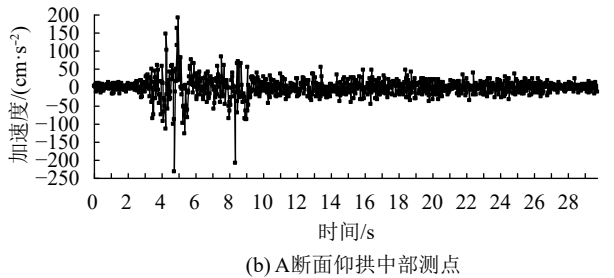
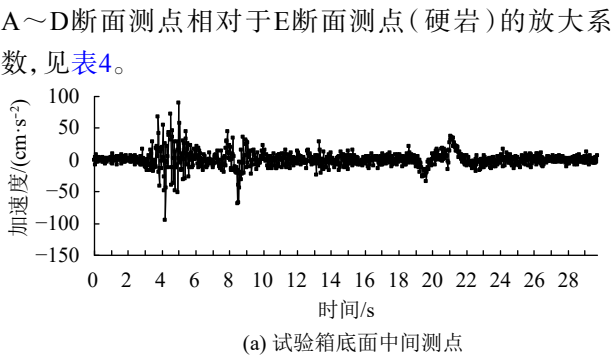


图 8 试验输出加速度时程(南北向)

Fig. 8 Acceleration time history of testing output (south-north direction)

表 4 各测点PGA及放大系数

Tab. 4 PGA and magnification factor of each measuring point

监测断面	PGA/(cm·s ⁻²)	放大系数	备注
A	231	1.97	软岩
B	196	1.68	软硬围岩交接面-仰拱
C	159	1.36	软硬围岩交接面-边墙
D	122	1.04	软硬围岩交接面-拱顶
E	117	—	硬岩

注: 试验箱底面输出地震波PGA为94 cm/s²(南北向)。

由表4可知:

1)由硬岩断面测点(E断面测点)至软岩断面测点(A断面测点),PGA不断增大,由117增大至231 cm/s²。E断面测点PGA比试验箱底面测点增大23 cm/s²,放大系数为1.24。这主要是由临空面放大作用造成的,地震波在硬岩中垂直传播中的放大作用有限。

2)D、C、B断面为软硬围岩交接段监测断面,交接位置分别位于拱顶、边墙、仰拱,受软岩影响逐渐增大,其PGA放大系数也逐渐增大,至软硬围岩交接段结束(B断面),PGA由122增大至196 cm/s²,放大系数也由1.04增大至1.68。这说明除临空面放大作用外,地震波垂直放大作用逐渐增强。A断面为软岩测试断面,其PGA为231 cm/s²,放大系数为1.97,地震波在软岩中垂直放大作用明显。

3)综上所述,受软岩地震波垂直放大作用影响,软硬围岩交接段软岩侧隧道部分PGA远大于硬岩侧

隧道部分,软岩侧隧道结构所受地震惯性力远大于硬岩侧,这是软硬围岩交接段软岩侧隧道部分震害较重的原因之一。

3.2 纵向应变

提取各监测断面拱顶测点纵向应变时程曲线,以C和E断面测点为例,如图9所示。

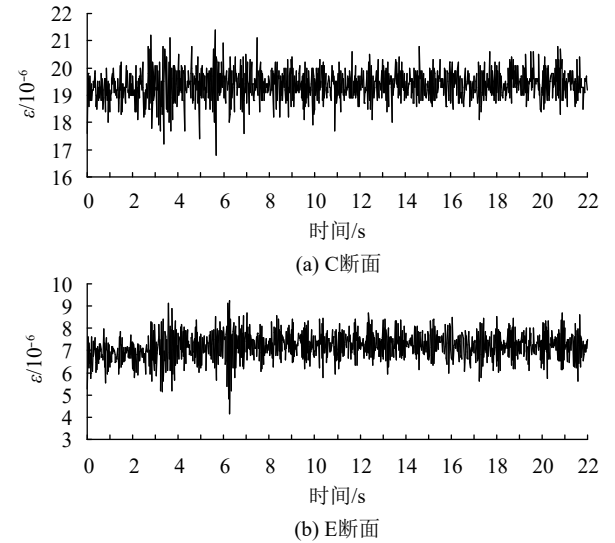


图 9 试验输出纵向应变时程

Fig. 9 Longitudinal strain time history of testing output

从各测点应变时程曲线提取其峰值,并计算A~D断面测点相对于E断面测点(硬岩)的增加倍数,见表5。

表 5 各测点纵向应变及增加倍数
Tab. 5 Longitudinal strain and increasing multiple of each measuring point

监测断面	纵向应变/ 10^{-6}	增加倍数	备注
A	51.23	5.54	软岩
B	39.67	4.29	软硬围岩交接面-仰拱
C	21.42	2.32	软硬围岩交接面-边墙
D	10.07	1.09	软硬围岩交接面-拱顶
E	9.25	—	硬岩

由表5可知:硬岩断面测点(E断面)纵向应变较小,为 9.25×10^{-6} ;软岩断面测点(A断面)纵向应变比硬岩断面测点增加5.54倍,为 51.23×10^{-6} 。D、C、B断面为软硬围岩交接段监测断面,交接位置分别位于拱顶、边墙、仰拱,受软岩影响逐渐增大,纵向应变增加倍数也由1.09增加至4.29。这说明隧道软硬围岩交接段硬岩侧隧道部分强制位移较小,软岩侧隧道部分强制位移较大,这也是软硬围岩交接段软岩侧隧道震害较重的原因之一。

3.3 接触应力

提取各监测断面拱顶测点接触应力时程曲线,以C断面和E断面测点为例,如图10所示。

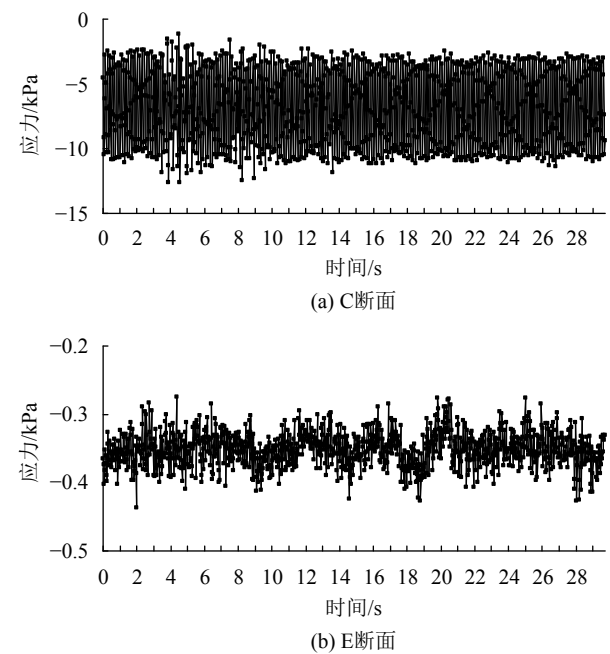


图 10 试验输出接触压力时程

Fig. 10 Contact pressure time history of testing output

从各测点接触压力时程曲线提取其峰值,并计算A~D断面测点相对于E断面测点(硬岩)的增加倍数,见表6。

表 6 各测点接触应力及增加倍数
Tab. 6 Contact stress and increasing multiple of each measuring point

监测断面	接触应力/kPa	增加倍数	备注
A	-15.11	34.34	软岩
B	-14.15	32.16	软硬围岩交接面-仰拱
C	-12.61	28.66	软硬围岩交接面-边墙
D	-2.79	6.34	软硬围岩交接面-拱顶
E	-0.44	—	硬岩

由表6可知:硬岩断面测点(E断面)接触应力很小,为-0.44 kPa;软岩断面测点(A断面)接触应力最大,为-15.11 kPa。D、C、B断面为软硬围岩交接段监测断面,交接位置分别位于拱顶、边墙、仰拱,随着断面软岩范围的增加,其接触应力也逐渐增大,至软硬围岩交接段结束(B断面),接触应力增大至-14.15 kPa,增加倍数为32.16。这说明随着断面软岩范围的增加,隧道支护结构所受地震惯性力和强制位移不断增加,致使接触应力不断增加。

3.4 结构内力

提取各监测断面测点横向应变时程曲线,计算各测点轴力、弯矩及安全系数。隧道支护结构安全系数按文献[15]相关规定(式(1)~(2))进行计算。

混凝土矩形截面轴心及偏心受压构件的抗压强度(式(1))和抗拉强度(式(2)):

$$KN \leq \varphi \alpha R_a b h \tag{1}$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_l b h}{6 e_0 / h - 1} \tag{2}$$

式中： R_a 为混凝土或砌体的抗压极限强度； R_l 为混凝土的抗拉极限强度； K 为安全系数； N 为轴向力，kN； b 为截面宽度，m； h 为截面厚度，m； φ 为构件纵向弯曲系数； α 为轴向力的偏心影响系数。

从各拱顶测点安全系数时程曲线提取其最小值，并计算A~D断面测点相对于E断面测点（硬岩）减小的百分比，见表7。

表 7 各测点安全系数最小值及减小百分比
Tab. 7 Minimum safety factor and percentage reduction of each measuring point

监测断面	安全系数最小值	减小百分比/%	备注
A	8.45	64.78	软岩
B	11.16	53.48	软硬围岩交接面—仰拱
C	14.42	39.89	软硬围岩交接面—边墙
D	17.71	26.18	软硬围岩交接面—拱顶
E	23.99	—	硬岩

由表7可知，硬岩断面测点（E断面）结构安全性最高，安全系数最小值为23.99；沿纵向随着软岩影响的加大，各监测断面测点安全系数最小值不断降低，至A断面（软岩）测点，已降至8.45。各监测断面拱顶测点安全系数最小值沿纵向发展规律，与PGA、纵向应变及接触应力的规律相呼应。D、C、B断面为软硬围岩交接段监测断面，交接位置分别位于拱顶、边墙、仰拱，随着断面软岩范围的增加，其安全系数最小值也逐渐减小，至软硬围岩交接段结束（B断面），安全系数最小值减小至11.16，减小53.48%。这说明随着断面软岩范围的增加，隧道支护结构所受地震惯性力和强制位移不断增加，致使结构安全性不断降低。

4 结 论

- 1) 硬岩隧道结构PGA放大系数主要由临空面放大作用控制；软岩隧道结构PGA放大系数由临空面放大作用和垂直传播放大作用共同控制。隧道洞口软硬围岩交接段由硬岩向软岩方向发展，结构所受地震惯性力不断增大，PGA放大系数由1.04增大至1.68。
- 2) 硬岩隧道结构纵向应变较小，隧道洞口软硬围岩交接段由硬岩向软岩方向发展，结构所受强制位移不断增大，纵向应变增加倍数由1.09增大至4.29。
- 3) 硬岩隧道结构接触应力很小、结构安全性较高，隧道洞口软硬围岩交接段由硬岩向软岩方向发

展，隧道支护结构所受地震惯性力和强制位移不断增加，接触应力增加较快，结构安全性不断降低。接触应力增加倍数由6.34增大至32.16，安全系数最小值减小百分比由26.18%增大至53.48%。

参考文献:

[1] 王明年,于丽,林国进,等.隧道抗震与减震[M].北京:科学出版社,2012.

[2] 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):336–374.[高波,王峥峥,袁松,等.汶川地震公路隧道震害启示[J].[西南交通大学学报](#),2009,44(3):336–374.]

[3] Cui Guangyao,Wang Mingnian,Lin Guojin,et.Statistical analysis of earthquake damage types of typical highway tunnel lining structure in Wenchuan seismic disastrous area[J].[The Chinese Journal of Geological Hazard and Control](#),2011,22(1):122–127.[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.]

[4] Cui Guangyao.The seismic design calculation method and test study of tunnel shallow-buried portal and rupture stick-slipping section[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2012.[崔光耀.隧道洞口浅埋段和断裂粘滑段抗震设计计算方法研究[D].成都:西南交通大学,2012.]

[5] 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 Tunneling Technology](#),2015,52(6):95–102.[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(6):95–102.]

[6] Yin Yunteng,Li Tingchun.Analysis and study of the seismic failure mechanism and aseismic measures of a tunnel structure in the rock-soil interface area[J].[Modern Tunneling Technology](#),2013,50(4):84–91.[殷允腾,李廷春.土岩软硬结合部隧道结构的震害机理分析及抗震研究[J].[现代隧道技术](#),2013,50(4):84–91.]

[7] 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.[崔光耀,王明年,于丽,等.汶川地震公路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.]

[8] Cui Guangyao,Liu Weidong,Ni Songzhi,et al.Analysis of seismic damage and mechanism of general section of highway tunnel in Wenchuan earthquake[J].[Rock and Soil Mechanics](#),2015,36(Supp 2):439–446.[崔光耀,刘维东,倪嵩陟,等.汶川地震公路隧道普通段震害分析及震害机制研究[J].[岩土力学](#),2015,36(增 2):439–446.]

- [9] Tao Lianjin, Li Shulong, Hou Sen, et al. Shaking table test for seismic response in portal section of mountain tunnel[J]. *World Earthquake Engineering*, 2016, 32(4): 7–16. [陶连金, 李书龙, 侯森, 等. 山岭隧道洞口段地震响应振动台模型试验研究[J]. *世界地震工程*, 2016, 32(4): 7–16.]
- [10] Jiang Shuping, Wen Dongliang, Zheng Shengbao. Large-scale shaking table test for seismic response in portal section of Galongla tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 30(4): 649–656. [蒋树屏, 文栋良, 郑升宝. 嘎隆拉隧道洞口段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(4): 649–656.]
- [11] Li Lin, He Chuan, Geng Ping, et al. Study of shaking table model test for seismic response of portal section of shallow unsymmetrical loading tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 30(12): 2540–2548. [李林, 何川, 耿萍, 等. 浅埋偏压洞口段隧道地震响应振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(12): 2540–2548.]
- [12] Shen Yusheng, Gao Bo, Wang Yingxue. Structural dynamic properties analysis for portal part of mountain tunnel in strong earthquake area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 28(Supp1): 3131–3136. [申玉生, 高波, 王英学. 强震区山岭隧道洞口段结构动力特性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊1): 3131–3136.]
- [13] 日本土木学会. コンクリート標準示方書: 耐震設計編[M]. 东京: 鹿岛出版会, 1997.
- [14] Sun Tiecheng, Gao Bo, Wang Zhengzheng. A seismic and seism-reducing modeling study for entrance of two-track tunnels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 2021–2026. [孙铁成, 高波, 王峥峥. 双洞隧道洞口段抗减震模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(7): 2021–2026.]
- [15] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范: JTG D70—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Cui Guangyao, Meng Linghan, Zhang Junhui, et al. Study on large-scale shaking table model test for seismic response of soft and hard surrounding rock interface section of tunnel portal part[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(6): 84–90. [崔光耀, 孟令瀚, 张军徽, 等. 隧道洞口软硬围岩交接段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 84–90.]

(上接第76页)

- [13] Shi Yan, Wang Dongsheng, Han Jianping. Displacement-based design method for bridge bents with buckling-restrained braces (BRBs)[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(7): 62–68. [石岩, 王东升, 韩建平. 设置BRB桥梁排架墩基于位移抗震设计方法[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(7): 62–68.]
- [14] Xiang Nailiang, Cui Xiaxia, Li Jianzhong. Experimental study on sliding friction behavior of laminated rubber bearing and its mechanical model[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(12): 1828–1834. [项乃亮, 崔侠侠, 李建中. 板式橡胶支座滑动摩擦性能试验及其力学模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(12): 1828–1834.]
- [15] Shi Yan, Wang Dongsheng, Sun Zhiguo. Analysis of seismic response of seismically mitigated and isolated bridges subjected to near-fault ground motion[J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(3): 19–24. [石岩, 王东升, 孙治国. 近断层地震动下减隔震桥梁地震反应分析[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(3): 19–24.]
- [16] Muthukumar S, Desroches R. A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2006, 35(7): 811–828.
- [17] Iwata M, Murai M. Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2006, 35(14): 1807–1826.
- [18] Ma Ning, Wu Bin, Ou Jinping. Local buckling design of all-steel buckling restrained brace[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 30(1): 134–139. [马宁, 吴斌, 欧进萍. 全钢防屈曲支撑局部稳定性设计[J]. *工程力学*, 2012, 30(1): 134–139.]

(编辑 李轶楠)

引用格式: Shi Yan, Zhang Zhanhong, Han Jianping, et al. Parametric analysis of seismic performance for bridge bents with buckling-restrained braces (BRBs)[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(6): 71–76. [石岩, 张展宏, 韩建平, 等. 设置BRB的桥梁排架墩抗震性能参数分析[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 71–76.]