

隧道软岩洞口段纤维混凝土衬砌抗震性能研究*

崔光耀¹, 王雪来¹, 王明年²

(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 成都, 610031)

摘要 为了进一步提高强震区隧道软岩洞口段的震时安全性, 依托白云顶隧道进口段工程, 对采用钢纤维混凝土二衬、玄武岩纤维混凝土二衬和钢筋混凝土二衬的隧道软岩洞口段进行了大型振动台动力模型试验。试验结果表明: 采用纤维混凝土二衬提高了支护结构的强度及韧性, 可有效提高隧道结构的震时安全性; 硬岩段隧道结构安全性由运动相互作用控制, 采用纤维混凝土二衬, 隧道结构所承受的地震惯性力变化很小, 安全系数最小值提高较大, 最高增长了71.07%; 软岩段隧道结构安全性由运动相互作用和地震惯性相互作用共同控制, 采用纤维混凝土二衬对于抵抗隧道结构所承受的地震惯性力作用明显, 安全系数最小值最高增长了30.40%。该研究成果可为强震区软岩洞口段的抗震设防设计提供参考。

关键词 隧道工程; 洞口段; 抗震性能; 钢纤维混凝土; 玄武岩纤维混凝土; 模型试验

中图分类号 TH82; TU91

引言

地震造成地下结构严重破坏, 特别是浅埋地下结构及隧道软岩洞口段^[1-2], 因此, 隧道软岩洞口段抗减震技术是目前迫切需要研究的关键技术问题之一。造成隧道软岩洞口段震害的主要因素是地震惯性相互作用, 次要因素是运动相互作用。采用结构加强抗震措施是降低隧道软岩洞口段震害的途径之一。震害调查表明, 隧道结构横断面破坏主要是沿共轭45°方向循环往复拉压变形造成的^[3]。因此, 结构加强抗震措施应重点提高隧道结构的抗拉、抗剪、抗折及抗压强度。纤维混凝土具有增强、增韧及阻裂等优点, 目前应用较广是钢纤维混凝土。玄武岩纤维具有良好的相容性、热稳定性、化学稳定性和耐腐蚀性, 且其价格低廉、无机环保, 能有效提高混凝土的强度和韧性^[4]。

国内外学者对隧道软岩洞口段抗减震技术进行了研究。文献[5]研究了汶川地震公路隧道洞口段的震害特征和震害机理。文献[6-7]依托嘎隆拉隧道和白云顶隧道, 对隧道洞口段地震动力响应特性进行了振动台模型试验研究。文献[8]对采用减震

措施(减震层和减震缝)的隧道洞口段进行了振动台模型试验研究。文献[9]运用模型试验对隧道洞口段采用刚柔相济(二衬加强+铺设减震缝)抗减震措施的作用效果进行研究。文献[10]采用试件及模型试验, 对玄武岩纤维混凝土的基本力学特性及隧道衬砌的静力承载特性进行了研究。以上是针对隧道软岩洞口段减震措施进行了振动台模型试验研究, 在抗震措施方面采用振动台模型试验进行研究的报道较少。笔者依托白云顶隧道进口段, 采用三方向、六自由度大型振动台, 对纤维混凝土衬砌的抗震性能进行研究, 这对提高高烈度艰险山区交通隧道的抗震性能有重要意义。

1 白云顶隧道进口段工程概况

白云顶隧道进口段覆盖层为第四系崩坡积层(Q_4^{c+d}), V级围岩, 以块碎石土为主, 充填砂质粉土。覆盖层下部主要为砂岩(三迭系上统须家河组, T_3^{sj})和灰岩(石炭系, C)。砂岩节理不发育, 弱风化, 为浅灰色中粒石英砂岩, 为II级围岩。灰岩岩性坚硬, 厚层块状结构, 也为II级围岩。

白云顶隧道进口段为马蹄形断面, 跨度为

* 国家自然科学基金资助项目(51408008);北京市青年拔尖人才培养计划资助项目(CIT&TCD201704013);北京市属高校基本科研业务费资助项目(110052971921/061)
收稿日期: 2018-09-05;修回日期: 2019-03-13

11.30m,高度为 9.65m。衬砌结构采用复合式衬砌,初支采用厚度为 25cm 的 C20 喷射混凝土,二衬采用厚度为 60cm 的 C25 模筑钢筋混凝土(直径为 20mm、间距为 25cm 的钢筋网)。

2 振动台模型试验方案设计

2.1 试验分组及设备

为研究纤维混凝土衬砌的地震动力响应特性及抗震性能,试验分组如表 1 所示。

表 1 试验分组
Tab.1 Test grouping

工况	试验内容
1	二衬结构采用 C25 的钢筋混凝土
2	二衬结构采用 CF25 的钢纤维混凝土(steel fiber reinforced concrete,简称 SFRC)
3	二衬结构采用 CF25 的玄武岩纤维混凝土(basalt fiber reinforced concrete,简称 BFRC)

采用三方向、六自由度大型振动台进行试验,自制试验箱长×宽×高为 2.5m×2.5m×2m。试验设备如图 1 所示。振动台最大载重为 60t,最大频率范围为 0.1~100Hz,基本参数如表 2 所示。

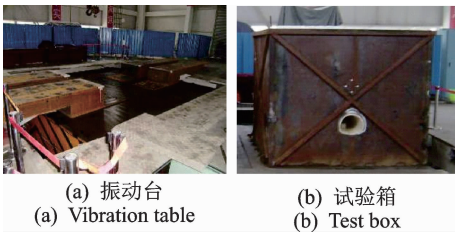


图 1 试验设备

Fig.1 Test equipment

表 2 振动台基本参数

Tab.2 Basic parameters of shaking table

参数	数值
台面尺寸/m	6×6(长×宽)
最大水平位移/mm	±150
最大竖直位移/mm	±150
最大水平加速度/g	1(满载),3.5(非满载)
最大竖直加速度/g	0.8(满载),3(非满载)

试验测试传感器主要有:三向加速度计(TST1010LS)、单向加速度计(TST1010L)、电阻应变片(BE120-5AA)和微型土压力盒(DYB-1)。数据采集主要通过动力试验数据采集系统进行,如图 2 所示。

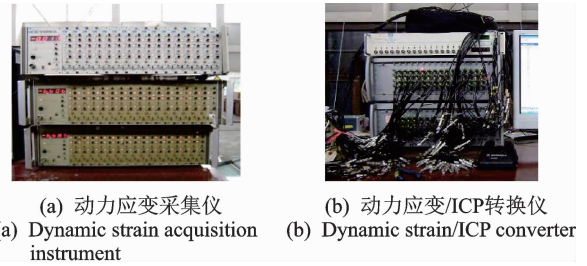


图 2 动力试验数据采集系统

Fig.2 Dynamic test data acquisition system

2.2 相似设计及相似材料

工程隧道断面尺寸为 11.30 m×9.65 m(跨度×高度),考虑到试验边界效应并结合试验箱尺寸,本次试验几何相似比为 30,加速度相似比为 1,弹性模量相似比为 45。其他相关参数相似比可由相似准则推导得出,如表 3 所示。

表 3 其他相关参数相似比

Tab.3 Similarity relation of other related physical variables

参数	相似比
内摩擦角/应变/泊松比/角位移	1
容重	1.5
时间/速度	5.477
应力/黏聚力	45
荷载/质量	40 500
力矩	1 215 000

围岩相似材料通过正交试验确定各组分量配比为机油:河砂:粉煤灰=1:3:6。围岩相似材料基本力学参数如表 4 所示。

表 4 围岩相似材料基本力学参数

Tab.4 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/(°)	
II 级	原型	23 000~ 32 500	25~27	1 500~ 2 100	50~60
	相似材料	524.1	17.2	37.4	51.5
V 级	原型	1 400~ 2 000	17~20	20~200	20~27
	相似材料	30.3	12.6	3.3	24.5

试验采用膏水比为 1.458 的石膏混合料模拟 C25 钢筋混凝土,钢筋网采用双层成品钢丝网模拟(钢丝直径为 0.8mm)。采用膏水比分别为 1.701 和 1.637 的石膏混合料模拟 CF25 的钢纤维混凝土和玄武岩纤维混凝土,采用特制试验用

纤维(水溶性佳密克丝钢纤维和聚源玄武岩纤维)模拟实际纤维,如图3所示。衬砌模型的物理力学参数如表5所示。试验采用汶川8.0级大地震卧龙测站实测波,持续时间时为164.6s,记录时间间隔为0.005s。经调幅(9度)、相似变换、滤波和基线校正,加速度时程曲线如图4所示(以东西向为例)。

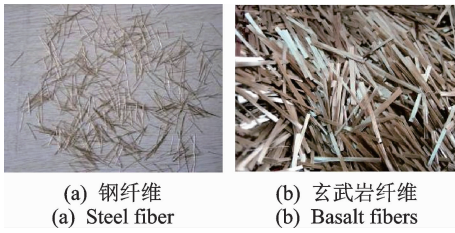


图3 试验用纤维
Fig.3 Experimental fiber

表5 衬砌模型物理力学参数

Tab.5 Physico-mechanical parameters of lining model

材料		弹性模量/ MPa	容重/ (kN·m ⁻³)	泊松比
钢筋混凝土衬砌	原型	29 500	25.0	0.2
	相似材料	671.3	16.9	0.2
SFRC 衬砌	原型	29 500	25.0	0.2
	相似材料	694.2	17.9	0.2
BFRC 衬砌	原型	29 500	25.0	0.2
	相似材料	689.7	17.1	0.2

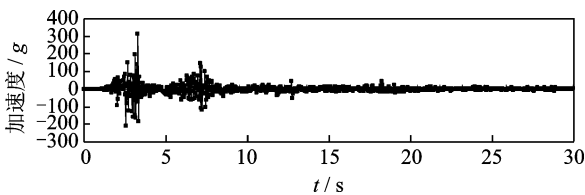


图4 试验动力荷载
Fig.4 Test dynamic load

2.3 监测断面及监测点布置

为了研究隧道洞口段纤维混凝土衬砌的地震动响应特性及抗震效果,在软岩段设置监测断面A,在软硬围岩交接段设置监测断面B,C,D(交接位置分别为仰拱、边墙及拱顶),在硬岩段设置监测断面E。在各监测断面拱顶测点外侧布置微型土压力盒和纵向应变片,在仰拱中部测点内侧布置单向加速度计,在拱顶、边墙及仰拱中部测点的内外侧成对布置横向应变片。监测断面及监测点布置如图5所示。

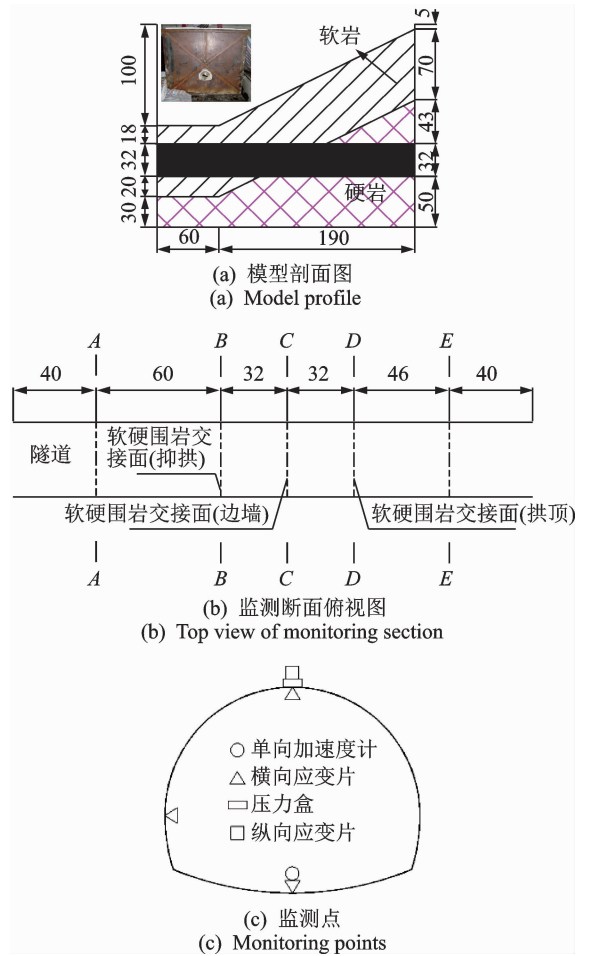


图5 监测断面及监测点布置(单位:cm)
Fig.5 Arrangement of measuring section and point (unit:cm)

3 模型试验结果及数据分析

3.1 地震动峰值加速度

试验后提取各工况仰拱中部测点加速度时程曲线,如图6所示(以工况1的A断面为例)。

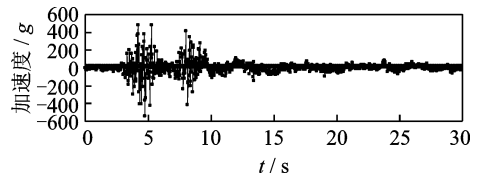


图6 试验输出加速度时程曲线
Fig.6 Acceleration time history of testing output

提取各测点的地震动峰值加速度(peak ground acceleration,简称PGA),如图7所示。计算工况2的SFRC和工况3的BFRC各测点PGA增大百分比(相对工况1),如表6所示。由图6~7及表6可知:

1) 各测点3种工况PGA由高至低依次为:工况2(SFRC)、工况3(BFRC)、工况1(钢混)。3种工

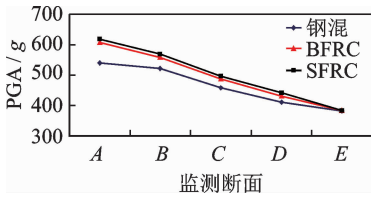


图 7 地震动峰值加速度

Fig. 7 Peak acceleration of ground motion

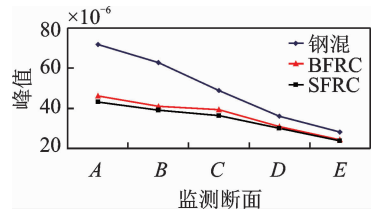


图 8 纵向应变峰值

Fig. 8 Longitudinal strain peak

表 6 地震动峰值加速度增大百分比

Tab. 6 Increased percentage of PGA %

监测断面	工况 2(SFRC)	工况 3(BFRC)
A	14.63	12.59
B	9.40	7.29
C	8.30	6.33
D	7.54	4.87
E	0.79	0.79

表 7 纵向应变峰值减小百分比

Tab. 7 Decrease percentage of longitudinal strain peak %

监测断面	工况 2(SFRC)	工况 3(BFRC)
A	39.69	35.68
B	37.66	34.71
C	25.44	19.75
D	16.71	14.34
E	15.21	13.79

况 PGA 由硬岩向软岩洞口发展,其变化规律基本一致。硬岩监测断面(E 断面)测点 PGA 较小,随着断面软岩范围的扩大,PGA 也逐渐增大,至软岩监测断面(A 断面),其测点 PGA 最大。硬岩段隧道结构 PGA 主要受临空面放大作用控制,传播放大作用影响很小;软岩段隧道结构 PGA 同时受临空面放大作用和传播放大作用控制。

2) 在硬岩监测断面(E 断面)测点,3 种工况 PGA 基本无变化,工况 2,3 仅比工况 1 增大 0.79%。主要原因是:硬岩的强度与隧道支护结构相近,工况 2,3 提高支护结构强度有限,且提高后仍与硬岩相差不大,当地震波传播至硬岩-支护结构界面时,其 PGA 界面放大作用变化很小。故硬岩段隧道支护结构强度的提高对其 PGA 的增大,影响较小。

3) 随着断面软岩范围的扩大,工况 2,3 测点 PGA 增大百分比不断增加,至软岩监测断面(A 断面),PGA 增大百分比达到最大,工况 2 达到 14.63%,工况 3 达到 12.59%。主要原因是软岩强度远小于隧道支护结构,工况 2,3 提高支护结构强度后,差距进一步扩大,当地震波传播至软岩-支护结构界面时,其 PGA 界面放大作用进一步增强。故软岩段隧道支护结构强度越大,其 PGA 增大百分比越高。

3.2 纵向应变

试验后提取各工况拱顶测点纵向应变时程曲线的峰值,如图 8 所示。计算工况 2(SFRC)和工况 3(BFRC)各测点纵向应变峰值的减小百分比(相对工况 1),如表 7 所示。由图 8 及表 7 可知:

1) 3 种工况隧道衬砌结构纵向应变峰值由高至

低依次为工况 1(钢混)、工况 3(BFRC)、工况 2(SFRC)。3 种工况纵向应变峰值由硬岩向软岩洞口发展,其变化规律基本一致。硬岩监测断面(E 断面)测点纵向应变峰值较小,随着断面软岩范围的扩大,纵向应变峰值也逐渐增大,至软岩监测断面(A 断面),其测点纵向应变峰值达到最大。

2) 在硬岩监测断面(E 断面)测点,3 种工况纵向应变峰值差别不大,工况 2 比工况 1 减小了 15.21%,工况 3 减小了 13.79%。主要原因是在硬岩段,硬岩与隧道结构运动相互作用较大,地震惯性相互作用可忽略,隧道结构受硬岩约束较强,结构纵向应变较小。工况 2,3 提高了支护结构的强度和韧性,对进一步改善硬岩与隧道结构的共同运动性,作用不明显。

3) 随着断面软岩范围的扩大,工况 2,3 测点纵向应变峰值减小百分比不断增加,至软岩监测断面(A 断面),纵向应变峰值减小百分比达到最大,工况 2 达到 39.69%,工况 3 达到 35.68%。主要原因是在软岩段,虽然软岩与隧道结构的运动相互作用仍远大于地震惯性相互作用,但地震惯性相互作用已不可忽略,且已成为造成隧道结构变形破坏的重要因素。工况 2,3 提高了支护结构的强度和韧性,对抵抗软岩与隧道结构的地震惯性相互作用,效果明显,软岩段测点纵向应变峰值减小明显。

3.3 接触应力

试验后提取各工况拱顶测点接触应力峰值曲线,如图 9 所示。计算工况 2(SFRC)和工况 3

(BFRC)各测点接触应力峰值的增大百分比(相对工况1),如表8所示。由图9及表8可知:

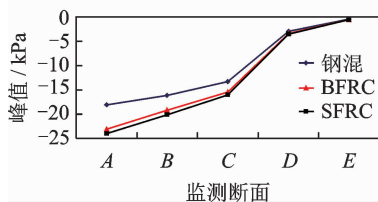


图9 接触应力峰值

Fig.9 Contact stress peak

表8 接触应力峰值增大百分比

Tab.8 Increased percentage of contact stress

监测断面	工况2(SFRC)	工况3(BFRC)	%
A	32.58	27.39	
B	24.71	19.26	
C	20.78	16.64	
D	17.39	14.05	
E	13.77	9.78	

1) 3种工况隧道衬砌结构接触应力峰值由高至低依次为工况2(SFRC)、工况3(BFRC)、工况1(钢混)。3种工况接触应力峰值由硬岩向软岩洞口发展,其变化规律基本一致。硬岩监测断面(E断面)测点接触应力峰值较小,随着断面软岩范围的扩大,接触应力峰值也逐渐增大,至软岩监测断面(A断面),其测点接触应力峰值达到最大。

2) 在硬岩监测断面(E断面)测点,3种工况接触应力峰值差别不大,工况2比工况1增大了13.77%,工况3增大了9.78%。主要原因是在硬岩段围岩应力释放较小,工况2,3提高了支护结构的强度和韧性,但其限制围岩应力释放的作用有限。

3) 随着断面软岩范围的扩大,工况2,3测点接触应力峰值增大百分比不断增加,至软岩监测断面(A断面),接触应力峰值增大百分比达到最大,工况2达到32.58%,工况3达到27.39%。主要原因是在软岩段,围岩应力释放较大,工况2,3提高了支护结构的强度和韧性,有利地限制了围岩应力的释放,造成了软岩段测点接触应力峰值明显增大。

3.4 安全系数

试验后提取各工况测点二衬内外侧横向应变片的量测数据,计算各测点截面的安全系数,如图10所示(以工况3的C断面拱顶测点为例)。结构安全系数按文献[11]相关规定进行计算。

提取各工况各拱顶测点安全系数最小值,如

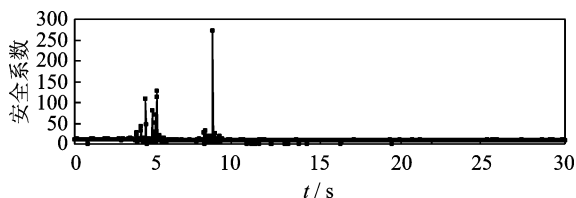


图10 安全系数时程曲线

Fig.10 Safety factor time history

图11所示。计算工况2(SFRC)和工况3(BFRC)各测点安全系数最小值的增大百分比(相对工况1),如表9所示。由图10~11及表9可知:

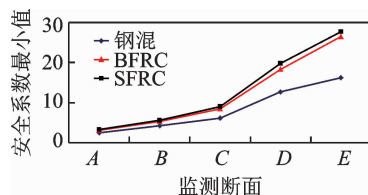


图11 安全系数最小值

Fig.11 Minimum safety factor

表9 安全系数最小值增大百分比

Tab.9 Increased percentage of minimum safety factor

监测断面	工况2(SFRC)	工况3(BFRC)	%
A	30.40	22.80	
B	34.38	26.44	
C	44.19	36.29	
D	55.86	43.67	
E	71.07	63.17	

1) 3种工况隧道衬砌结构安全系数最小值由高至低依次为工况2(SFRC)、工况3(BFRC)、工况1(钢混)。工况2,3安全系数最小值相差无几,工况2略大于工况3。硬岩监测断面(E断面)测点安全系数最小值最大,随着断面软岩范围的增加,安全系数最小值逐渐降低,至软岩监测断面(A断面),其测点安全系数最小值最小。

2) 在硬岩监测断面(E断面)测点,3种工况安全系数最小值差别较大,工况2比工况1增大了71.07%,工况3增大了63.17%。主要原因是在硬岩段,隧道结构安全性由运动相互作用控制,地震惯性相互作用可忽略。工况2,3提高了支护结构的强度和韧性,硬岩与隧道结构的运动相互作用变化很小,结构所承受的地震惯性力变化也很小(PGA仅增大了0.79%),故硬岩段隧道结构安全系数最小值提高较大。

3) 随着断面软岩范围的扩大,工况2,3测点安全系数最小值增大百分比不断减小,至软岩监测断

面(A断面),安全系数最小值增大百分比达到最小,工况2达到30.40%,工况3达到22.80%。主要原因是在软岩段,隧道结构的安全性由软岩与隧道结构的运动相互作用和地震惯性相互作用共同控制。工况2,3提高了支护结构的强度和韧性,对抵抗隧道结构所承受的地震惯性力作用明显,造成软岩段隧道结构安全系数最小值增大百分比小于硬岩段。

4 结 论

1) 隧道软岩洞口段采用纤维混凝土二衬,强度和韧性均得到不同程度的提高。硬岩段隧道结构PGA基本无变化,纵向应变峰值减少较小,接触压力峰值增大也较小;随着断面软岩范围的增加,PGA及接触压力峰值增大百分比、纵向应变峰值减小百分比不断提高。软岩段隧道结构PGA增大百分比最高为14.63%,接触压力峰值增大百分比最高为32.58%,纵向应变峰值减小百分比最高为39.69%。

2) 硬岩段隧道结构安全性由运动相互作用控制。采用纤维混凝土二衬提高了支护结构的强度及韧性,硬岩与隧道结构的运动相互作用变化很小,结构所承受的地震惯性力变化也很小,故硬岩段隧道结构安全系数最小值提高较大。

3) 软岩段隧道结构的安全性由运动相互作用和地震惯性相互作用共同控制。采用纤维混凝土二衬提高了支护结构的强度及韧性,这对抵抗隧道结构所承受的地震惯性力作用明显。

4) 隧道软岩洞口段采用纤维混凝土二衬,改善了支护结构的强度和韧性,提高了结构的震时安全性。工况2(SFRC)在提高软岩洞口段隧道结构安全性方面,略优于工况3(BFRC)。

参 考 文 献

- [1] OKIMURA T, TAKADA S, KOID T H. Outline of the great Hanshin earthquake, Japan 1995[J]. Natural Hazards, 1996, 14(1): 39-71.
- [2] 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院. “5.12”汶川特大地震四川灾区国道干线公路检测评估技术总结[R]. 成都:四川省交通厅, 2008.
- [3] 王明年,于丽,林国进,等. 隧道抗震与减震[M]. 北京:科学出版社, 2012:67-74.
- [4] 彭苗,黄浩雄,廖清河,等. 玄武岩纤维混凝土基本力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2012, 33(1): 74-75. PENG Miao, HUANG Haoxiong, LIAO Qinghe, et al. Test study on basic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete[J]. Concrete, 2012, 33(1): 74-75. (in Chinese)

- [5] 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. 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. (in Chinese)
- [6] 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. 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. (in Chinese)
- [7] 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. 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. (in Chinese)
- [8] 侯森,陶连金,李书龙,等. 山岭隧道洞口段设置减震层的振动台模型试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 30(3): 187-195. HOU Sen, TAO Lianjin, LI Shulong, et al. Shaking table test for seismic response in portal section of mountain tunnel[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(3): 187-195. (in Chinese)
- [9] 崔光耀,纪磊,王明年,等. 高烈度地震区隧道洞口段刚柔相济抗震模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 92-97. CUI Guangyao, JI Lei, WANG Mingnian, et al. Shock absorber with rigid-flexible combination model tests for tunnel opening section in high intensity seismic areas[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 92-97. (in Chinese)
- [10] 崔光耀,王道远,倪高陟,等. 玄武岩纤维混凝土隧道衬砌承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 311-318. CUI Guangyao, WANG Daoyuan, NI Songzhi, et al. Model tests on bearing characteristics of basalt fiber-reinforced concrete tunnel linings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 311-318. (in Chinese)
- [11] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.



第一作者简介:崔光耀,男,1983年12月生,博士、副教授。主要研究方向为隧道及地下工程抗震减震及抗错断理论的教学与研究。曾发表《高烈度艰险山区交通隧道抗震减灾关键技术研究》(北京:中国建材工业出版社,2018年)等论著。E-mail: cyao456@163.com