

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.18

汶川地震区跨断层带公路隧道震害形成机理分析

崔光耀¹, 伍修刚¹, 王明年², 林国进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: 为提高震区断层破碎带段隧道结构的抗震性能, 结合震区公路隧道断层破碎带段震害调查资料, 对隧道断层破碎带段震害机理及抗减震对策进行研究。研究表明: 隧道非活动性断层段震害类型与普通段无异, 仅需采取抗震措施进行加固即可, 震害主要由地震惯性力造成, 强制位移影响很小。隧道活动性断层段震害严重, 须进行抗震设防, 造成严重震害的主要影响因素为断层错动, 地震惯性力次之。隧道活动性断层段须采取抗震措施与减震措施相结合的对策共同应对。

关键词: 断层破碎带段; 公路隧道; 地震惯性力; 强制位移; 震害机理

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)02-0108-07

Highway tunnel damage caused by earthquake and its mechanism crossing fault zone in Wenchuan Earthquake Area

CUI Guangyao¹, WU Xiugang¹, WANG Mingnian², LIN Guojin³

(1. College of Architecture and Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Province Transportation Department, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: For improving aseismic performance of highway tunnel fault rupture zone in the seismic area, combining earthquake damage information of highway tunnel fault rupture zone in the seismic area, the study focus on earthquake damage mechanism and aseismic and shock absorption countermeasures. The results show that earthquake damage type is the same of tunnel non-active fault zone and normal section. Tunnel non-active fault zone need to develop seismic fortification measures for seismic fortification. The seismic inertia force is main factor of tunnel non-active fault zone earthquake damage, and forced displacement has little effect. The earthquake damage of tunnel active fault zone is very serious. Tunnel active fault zone need to do seismic fortification. The main factor of earthquake damage of tunnel active fault zone is fault rupture, closely followed by seismic inertia force. Aseismic and shock absorption countermeasures are common used to do seismic fortification of tunnel active fault zone.

Keywords: fault rupture zone; highway tunnel; seismic inertial force; forced displacement; earthquake damage mechanism

收稿日期: 2017-05-24; 修订日期: 2017-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51408008、51478277); 四川省应用基础研究计划项目(2014JY0090、2015JY0166); 四川省交通科技项目(2013A1-5)

第一作者: 崔光耀(1983-), 男, 山东莒南人, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程的教学与研究。E-mail: cyao456@163.com

随着我国西部交通建设的飞速发展,穿越断层隧道不断涌现,如雅康高速新二郎山隧道穿越保凰断裂带,成兰铁路系列隧道穿越龙门山断裂带等。因此,对隧道断层破碎带段震害机理及抗减震对策的研究是非常必要的,也具有重要的现实意义。国内外有关专家、学者对此进行了部分研究^[1-15],主要集中在断层错动作用对地下管线、隧道结构的影响及反应分析;断层错动作用下隧道工程损伤及岩土失效扩展机理;断层倾角、宽度对跨断层隧道错动的反应特性分析;活动断层区隧道的抗断设计对策;隧道断层破碎带段动力响应特征及震害机理;跨断层隧道抗减震模型试验及对策

研究等。本文通过对汶川地震公路隧道断层破碎带段震害资料的统计分析,研究隧道断层破碎带段震害机理及抗减震对策,这对高烈度地震区跨断层隧道的抗震设防具有重要的意义。

1 汶川地震区公路隧道断层破碎带段震害概述

本次汶川地震公路隧道震害调查涉及四川、陕西和甘肃三省,共 56 座隧道。其中跨断层隧道 6 座,分别是友谊隧道、白云顶隧道、紫坪铺隧道、龙洞子隧道、龙溪隧道和酒家垭隧道。6 座跨断层隧道断层破碎带详细情况(调查测量)见表 1。

表 1 断层破碎带详情
Table 1 Detailed description of fault rupture zone

断层名称	设防烈度	地震烈度	断层破碎带宽/m	是否错动	埋深/m	断层倾角/(°)	围岩级别	最严重破坏类型	震害影响段宽/m
酒家垭 F1	7	9	64	是	141	57	V (破碎带);Ⅲ(上下盘)	二衬垮塌	85
友谊 F1	7	10	0.5	是	54	66	V (破碎带);Ⅳ, V (上下盘)	二衬垮塌	50
白云顶 F1	7	10		是	25	42	V (破碎带); V (上下盘)	二衬垮塌	29
紫坪铺 F10	7	11	3	否	242	62	V (破碎带);Ⅳ(上下盘)	二衬开裂	70
龙洞子 F5	7	11	10	是	15		V 破碎带); V (上下盘)	衬砌错台	68
龙溪 F8	7	11	10	是	230	82	V (破碎带); Ⅳ(上下盘)	隧道垮塌	200

1.1 9 度及 9 度以下烈度区隧道断层破碎带段震害

9 度及 9 度以下烈度区仅有酒家垭隧道,其穿越断层破碎带段震害类型主要有衬砌开裂、混凝土掉块、二衬垮塌(图 1)、初支垮塌、施工缝开裂及衬砌渗水等。



图 1 酒家垭隧道二衬垮塌

Fig.1 Secondary lining collapse of Jiujia Ya Tunnel

1.2 9 度以上烈度区隧道断层破碎带段震害

友谊隧道、白云顶隧道、紫坪铺隧道、龙洞子隧道、龙溪隧道处于 9 度以上区域。其穿越断层破碎带段震害类型主要有衬砌开裂、错台(图 2),混凝土剥落,施工缝开裂,初支垮塌、二衬垮塌,围岩垮塌(图 3)等。

相对于普通段隧道结构震害,断层破碎带段隧道结构初支垮塌、二衬垮塌以及围岩垮塌这样严重震害



图 2 白云顶隧道衬砌环向错台

Fig.2 Lining ring dislocation of Baiyunding Tunnel

出现的规模 and 范围大大增加,这严重阻碍了灾后救援和灾后重建。友谊隧道、龙溪隧道穿越断层破碎带段二衬几乎全部垮塌。



图3 龙溪隧道围岩垮塌

Fig. 3 Surrounding rock collapse of Longxi Tunnel

2 非活动性断层段隧道震害机理分析

2.1 研究情况

汶川地震中,非活动性断层隧道仅为紫坪铺隧道,其断层破碎带段最严重的震害类型为二衬开裂,这与普通段隧道震害无异。以紫坪铺隧道 F10 断层破碎带段为研究背景,利用 ANSYS/LS-DYNA 建立有限元模型进行动力分析,计算模型长 203 m,宽 80 m,隧道埋深 100 m,断层位于模型中部,断层宽度为 3 m。初支为 C20 喷射混凝土,厚度为 20 cm;二衬为 C25 模注混凝土,厚度为 35 cm。计算工况见表 2。

表2 计算工况

Table 2 Calculation condition

序号	计算模型	断层情况	围岩级别
A-1	普通段	无断层	IV
A-2	非活动性断层段	倾角 62°, 宽 3 m V (破碎带); IV (上下盘)	

地震波选用汶川地震卧龙测站加速度波,时间间隔为 0.005 s,持时 40 s(截取原波 5~45 s,能量占原波 90% 以上),按 9 度进行标准化,并对加速度时程进行基线校正(图 4)。

2.2 震害机理理论分析

提取拱顶二衬最大主应力峰值、最小安全系数最小值以及合位移峰值(即水平、垂直位移矢量和的峰值)(表 3)。

表3 二衬内力峰值及合位移峰值对比

Table 3 Peak value comparison of secondary lining internal force and resultant displacement

项目	最大主应力 峰值/MPa	最小安全 系数最小值	合位移 峰值/mm
非活动性断层段	1.45	3.1	165.26
普通段	1.25	3.9	164.85
增大量	0.2	-0.8	0.41
百分比/%	增大 16	减小 20.51	增大 0.25

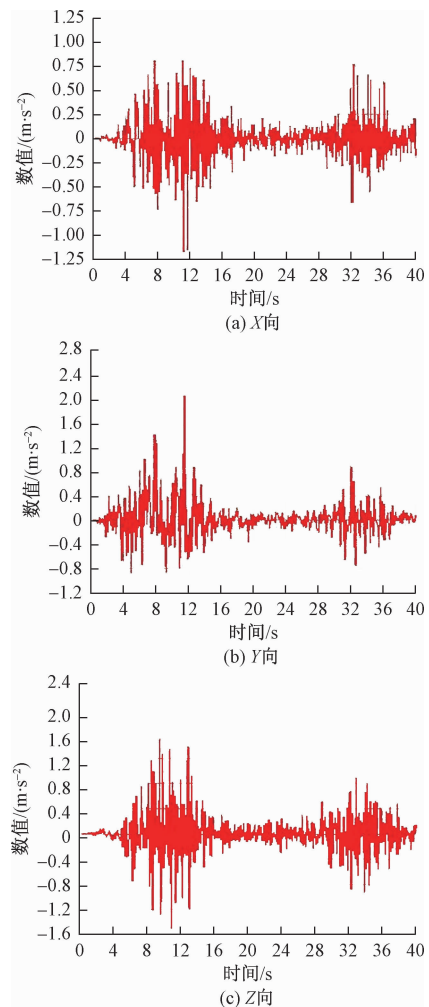


图4 地震波加速度时程曲线

Fig. 4 Acceleration time-history curve of seismic acceleration

由表 3 可知,非活动性断层段最大主应力峰值比普通段大 0.2 MPa,增大 16%;最小安全系数最小值比普通段小 0.8,降低 20.51%;合位移峰值仅比普通段大 0.41 mm,仅增加 0.25%。这说明非活动性断层段隧道震害主要由地震惯性力(地震时,结构物的地震动加速度乘以结构物质量,即为作用在结构物上的地震惯性力)造成,强制位移影响很小。

2.3 典型震害(二衬开裂)机理分析

衬砌裂缝主要有两种,一种是裂纹清晰,有一定走向(图 5);另一种是不能确定裂缝方向,呈片状或网状(图 6)。

第一种衬砌裂缝主要由拉、剪作用引发的开裂。由于二衬为钢筋混凝土/混凝土结构,混凝土抗拉、抗剪强度较低,一旦某位置拉应力或剪应力过大,便会首先在此位置出现裂缝。由于裂缝尽头应力集中现象突出,如拉应力或剪应力再次超过抗拉或抗剪强度,裂缝



图 5 衬砌裂缝裂纹清晰
Fig.5 Clear trend lining crack



图 6 衬砌裂缝成网状交错
Fig.6 Crisscross networked lining crack

会沿原方向进一步发育,进而发展为有一定走向的长裂缝。

第二种裂缝中,呈片状裂缝主要由衬砌弯曲变形造成。当结构受弯时,背向弯曲方向的一侧由于拉应力作用可能出现一条条相互平行的裂缝,开裂方向垂直于弯曲面。呈网状裂缝主要因为破损部位在地震作用下受压且反复运动,生成不同方向的劈裂缝。

3 活动性断层段隧道震害机理分析

3.1 研究情况

汶川地震中,5 座跨断层隧道出现断层错动,造成严重震害。其中,龙溪隧道震害最为严重,出现了围岩垮塌震害(图 3)。以龙溪隧道 F8 断层破碎带段为研究背景,建立计算模型,对活动性断层段隧道震害机理进行研究。模型长 150 m,宽 80 m,埋深 24 m,断层倾角 82° ,断层位于模型中部,断层宽度为 10 m。断层破碎带为 V 级围岩,上下盘岩体为 IV 级围岩。初支为 C20 喷射混凝土,厚度为 20 cm;二衬为 C25 模注混凝土,厚度为 40 cm。地震波同 2.1 节,按 11 度进行标准化。计算工况见表 4。

表 4 计算工况

Table 4 Calculation condition

序号	断层错动	输入地震波
B-1	错动 1.5 m	不输入
B-2	不错动	输入 11 度地震波

B-1 为仅发生断层错动工况;B-2 为断层不错动,仅发生地震震动工况。通过以上两工况进行单因素分析,研究造成活动性断层隧道震害的主要影响因素。监测断面及监测点见图 7、图 8。

断层错动的实现:根据断层性质及参数,计算断层发生错动时岩体水平向和竖直向的运动速度,分别为 V_1 和 V_2 。数值模拟时,给予上盘岩体水平向和竖直向运动速度(V_1 和 V_2),在 V_1 和 V_2 的作用下,断层上盘岩体将沿倾角方向运动。断层错动为黏滑错动,迅速完成。

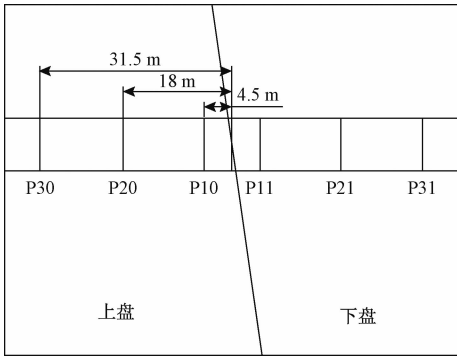


图 7 监测断面布置
Fig.7 Arrangement of testing section

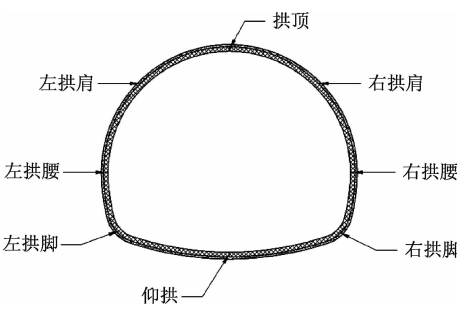


图 8 监测点示意图
Fig.8 Arrangement of measuring point

3.2 震害机理理论分析

(1) 最大剪应力对比

提取两工况各监测断面各监测点最大剪应力峰值进行理论分析(表 5、表 6)。

由表 5、表 6 可知,由断层错动造成的最大剪应力峰值的最大值为 11.636 MPa,位于右拱腰,占地震合作用的 87.45%;由地震惯性力造成的最大剪应力峰

值的最大值为 1.67 MPa,位于右拱腰,占地震合作用的 12.55%。由最大剪应力分析,造成活动性断层隧道震害的主要影响因素为断层错动,地震惯性力次之。

表 5 最大剪应力峰值对比(单位:MPa)

Table 5 Peak value comparison of maximum shearing strength (unit: MPa)

监测点	断层错动影响	地震惯性力影响
拱顶	6.591	1.258
右拱腰	11.636	1.670
左拱腰	11.563	1.574
仰拱	10.379	1.362

表 6 震害影响因素对比

Table 6 Comparison of earthquake damage effect factors

影响因素	断层错动影响	地震惯性力影响
各监测点最大剪应力峰值的最大值/MPa	11.636	1.670
占地震合作用百分比	87.45%	12.55%

(2) 最大主应力对比

提取两工况各监测断面各监测点最大主应力峰值进行理论分析(表 7、表 8)。

表 7 最大主应力峰值对比(单位:MPa)

Table 7 Peak value comparison of maximum principal stress (unit: MPa)

监测点	断层错动影响	地震惯性力影响
拱顶	17.17	3.27
右拱肩	15.44	3.22
右拱腰	10.16	3.70
右拱脚	14.78	5.74
仰拱	17.27	4.06
左拱脚	14.78	6.00
左拱腰	10.16	5.61
左拱肩	15.44	3.38

表 8 震害影响因素对比

Table 8 Comparison of earthquake damage effect factors

影响因素	断层错动影响	地震惯性力影响
各监测点最大主应力峰值的最大值/MPa	17.27	6.00
占地震合作用百分比	74.22%	25.78%

由表 7、表 8 可知,由断层错动造成的最大主应力峰值的最大值为 17.27 MPa,位于仰拱,占地震合作用的 74.22%;由地震惯性力造成的最大主应力峰值的最大值为 6 MPa,位于左拱脚,占地震合作用的 25.78%。由最大主应力分析,造成活动性断层隧道震害的主要影响因素为断层错动,地震惯性力次之。

(3) 最小安全系数对比

提取两工况各监测断面各监测点最小安全系数进行理论分析(表 9)。

表 9 最小安全系数对比

Table 9 Comparison of minimum safety factor

监测断面	断层错动影响	地震惯性力影响	变化百分比(断层错动相对地震惯性力)(负为降低,正为增大)
P31	2.0	1.6	+25%
P21	0.8	1.6	-50%
P11	0.5	1.7	-70.5%
P10	0.6	1.6	-62.5%
P20	0.8	1.7	-52.9%
P30	2.2	1.7	+29.4%

由表 9 可知,在断层错动影响下,离断层越近最小安全系数越小;上盘最小安全系数略小于下盘,这说明上盘受断层错动影响大于下盘。在地震惯性力影响下,上下盘最小安全系数基本不变,与距断层的距离无关。

对比两工况计算结果发现,上下盘远离断层的监测断面(P31、P30),断层错动影响下的最小安全系数大于地震惯性力影响下的最小安全系数,这说明远离断层的隧道结构受断层错动的影响较小,影响程度小于地震惯性力影响。上下盘靠近断层的监测断面(P21、P11、P10、P20),断层错动影响下的最小安全系数远小于地震惯性力影响下的最小安全系数,这说明造成近断层段隧道结构震害的主要影响因素为断层错动,地震惯性力次之。

3.3 典型震害机理分析

(1) 衬砌垮塌

衬砌垮塌严重威胁洞内行车安全,是一种严重的震害类型。汶川地震中,酒家垭隧道、友谊隧道、白云顶隧道和龙溪隧道错动断层段出现了较大面积的衬砌垮塌震害,尤其以龙溪隧道和友谊隧道最为典型(图 9)。

活动性断层段衬砌垮塌,部分段落初支与二衬一同垮塌,主要原因是断层错动使隧道结构遭受巨大的剪切力,隧道结构抵抗不住这样巨大的剪切力,发生剪切破坏,加之地震惯性力、断层破碎带围岩软弱等原因,垮塌进一步扩大,形成衬砌垮塌区。

(2) 衬砌错台

活动性断层段衬砌错台主要由错动断层造成的巨大剪切力影响形成,是衬砌垮塌的初级阶段,再进一步发展,即发育成衬砌垮塌区。汶川地震中,以白云顶隧道(图 2)和龙溪隧道(图 10)最为典型。



图9 龙溪隧道衬砌垮塌

Fig.9 Lining collapse of Longxi Tunnel



图10 龙溪隧道衬砌环向错台

Fig.10 Lining ring dislocation of Longxi Tunnel

4 隧道断层破碎带段抗减震对策

4.1 非活动性断层段隧道抗减震对策

当隧道穿越非活动性断层破碎带时,断层破碎带段需要采取抗震措施进行加固。加固方法有:提高衬砌强度和刚度(增加配筋、提高混凝土标号、采用钢纤维混凝土等),提高围岩强度和刚度(施做锚杆、注浆加固等)。

4.2 活动性断层段隧道抗减震对策

(1)隧道选线应尽量绕避活动性断层破碎带;不能绕避的须进行抗震设防。因断层错动能量巨大,单靠抗震措施无法抵抗,需结合减震措施共同应对。

(2)活动性断层段减震措施主要有:扩大开挖断面、绞接设计、设置减震层、减震缝等等。

5 结论

(1)隧道非活动性断层段震害类型与普通段无异,震害主要由地震惯性力造成,强制位移影响很小。

(2)隧道活动性断层段出现了衬砌错台、衬砌垮塌以及围岩垮塌等严重震害类型,造成严重震害的主要影响因素为断层错动,地震惯性力次之。

(3)隧道非活动性断层段仅需采取抗震措施进行加固即可;隧道活动性断层段须进行抗震设防,抗震措施需结合减震措施共同应对。

参考文献:

- [1] 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院.“5·12”汶川地震灾区高速公路和国省干线公路恢复重建工程调查、检测、评估[R].成都:四川省交通厅公路规划勘察设计研究院,2008.
Highway Planning Survey Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications Department. Investigation, detection and evaluation of the restoration and reconstruction project of highways, national and provincial trunk roads in disaster areas induced by Wenchuan earthquake on May 12, 2008 [R]. Chengdu: Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications Department, 2008.
- [2] 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.
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.
- [3] 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.
- [4] Paul B, Burridge, Ronald E Scott, John E Hall. Centrifuge study of faulting effects tunnel[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(7): 949-967.
- [5] 刘爱文,张素灵,胡聿贤,等.地震断层作用下埋地管线的反应分析[J].地震工程与工程振动,2002,22(2):22-27.
LIU Aiwen, ZHANG Suling, HU Yuxian, et al. A method for analyzing response of buried pipeline due to earthquake fault movement [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2):22-27.
- [6] 王威,任青文.活动断裂对深埋隧洞影响的研究概述[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):175-

- 180.
- WANG Wei, REN Qingwen. General introduction to the effect of active fault on deeply buried tunnel[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1):175-180.
- [7] 蒋树屏,李鹏,林志. 穿越活动断层区隧道的抗断设计对策[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(6):1034-1036+1041.
- JIANG Shuping, LI Peng, LIN Zhi. Design strategies of breaking resistance of tunnels crossing active faults zone[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science) 2008, 27(6): 1034 - 1036 + 1041.
- [8] 赵伯明,刘洋. 断层错动对隧道的影响分析[J]. 华南地震, 2009, 29(1): 33-41.
- ZHAO Boming, LIU Yang. Analysis on effects of fault slip on tunnel [J]. South China Journal of Seismology, 2009, 29(1): 33-41.
- [9] 邵润萌. 断层错动作用下隧道工程损伤及岩土失效扩展机理研究(硕士学位论文)[D]. 北京:北京交通大学,2011.
- SHAO Runmeng. Study on the mechanism of tunnel damage and geotechnical failure propagation due to fault rupture [M. S. Thesis] [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2011.
- [10] 王峥峥,高波,李斌,等. 跨断层隧道振动台模型试验研究 I: 试验方案设计[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 50-55+62.
- WANG Zhengzheng, GAO Bo, LI Bin, et al. Experimental study using a shaking table model for a tunnel passing through faults (Part I): test scheme design[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 50-55+62.
- [11] 臧万军,王峥峥. 山岭隧道洞身段震害规律与地震风险模糊综合评价分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 45-53.
- ZANG Wanjun, WANG Zhengzheng. A fuzzy comprehensive evaluation of the seismic hazard rule and relevant risks for mountain tunnel bodies [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 45-53.
- [12] 何川,李林,张景,等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014,36(3): 427-434.
- HE Chuan, LI Lin, ZHANG Jing, et al. Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(3): 427-434.
- [13] 崔光耀,王明年,于丽,等. 断裂黏滑隧道减震缝减震技术模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(8): 1603-1609.
- CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Model test study of shock absorption joint damping technology of crossing stick-slip fracture tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(8): 1603-1609.
- [14] 方林. 穿越断层隧道震害及减震措施研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- FANG Lin. The Research on seismic damage and shock absorbtion measures of the tunnels through fault [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2009.
- [15] 高峰,石玉成,严松宏,等. 隧道的两种减震措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 222-229.
- GAO Feng, SHI Yucheng, YAN Songhong, et al. Study of two shock absorption measures in tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(2):222-229.