

DOI: 10.11779/CJGE201711021

# 高烈度地震区黏滑断层隧道减震层减震模型试验研究

崔光耀<sup>1</sup>, 伍修刚<sup>1</sup>, 王明年<sup>2</sup>, 王道远<sup>3, 4</sup>, 朱长安<sup>5</sup>

(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. 河北交通职业技术学院土木工程系, 河北 石家庄 050091; 4. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050091; 5. 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:**为提高高烈度地震区黏滑断层隧道的抗震性能, 依托都汶高速龙溪隧道 F8 黏滑断层段, 开展了不同厚度减震层的大型静力断层黏滑错动试验和强震震动动力试验, 对强震作用下黏滑断层隧道减震层减震技术进行研究。研究表明: 强震作用下断层黏滑错动对隧道上盘部分的影响程度及影响范围均大于下盘部分, 隧道上盘部分是抗震设防设计的重点段落; 隧道设置 10 cm 减震层的减震效果明显优于隧道设置 5 cm 减震层和 15 cm 减震层的减震效果, 推荐布设厚度为 10 cm 的减震层。研究成果对提高高烈度艰险山区穿越黏滑断层隧道的抗震性能提供了技术支撑。

**关键词:** 隧道; 高烈度地震区; 黏滑断层; 减震层; 模型试验

中图分类号: TU470.3; U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)11-2125-07

**作者简介:** 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。

## Model tests on damping of shock absorption layer of stick-slip fracture tunnel in highly seismic areas

CUI Guang-yao<sup>1</sup>, WU Xiu-gang<sup>1</sup>, WANG Ming-nian<sup>2</sup>, WANG Dao-yuan<sup>3, 4</sup>, ZHU Chang-an<sup>5</sup>

(1. School of 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 610031, China; 3. Department of Civil

Engineering, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050091, China; 4. School of Civil Engineering, Shijiazhuang

Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 5. Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Province

Transportation Department, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** To improve the anti-seismic performance of tunnels in highly seismic areas with stick-slip fracture, the strong earthquake vibration dynamic tests on the damping layer of large static bond-slip with different thicknesses are performed based on the section of F8 stick-slip fracture in Longxi tunnel of Dujiangyan-Wenchun expressway under earthquake action. The shock absorption technology is used for the damping layer. The results show that under the action of earthquake, the fault rupture dislocation has greater influence scope and degree on the upper part of the tunnel than on the lower part of the tunnel. The plate part is the focus of the earthquake resistance design. The damping effects of 10 cm thick-shock absorption layer of the tunnel are obviously better than those of 5 cm thick and 15 cm thick shock absorption layers. The 10 cm thick shock absorption layer is thus recommended. The research results may provide the technical support for improving the anti-seismic performance of tunnels across dangerous mountains with stick-slip fracture.

**Key words:** tunnel; highly seismic area; stick-slip fracture; shock absorption layer; model test

## 0 引言

随着中国西部交通基础建设的持续深入发展, 高烈度艰险山区交通生命线提升改造、新线及复线建设蓬勃开展起来, 跨活动断层交通隧道不断涌现, 如在建雅康高速二郎山隧道穿越保凰活动断裂, 成兰快速铁路(按抗震设防 9 度设计)诸隧道、汶马高速鹫鸪山隧道、绵茂路九顶山隧道穿越龙门山活动断裂核心区域等。

强震诱发断层活化而发生黏滑错动, 其耦合作用(强震和黏滑错动)造成隧道及围岩破坏严重, 影响灾后抢通、保通和恢复重建工作。如圣佛那多隧道(美

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51408008, 51478277); 国家十二五科技支撑项目(2012BAK09B06); 河北省自然科学基金项目(E201619002); 四川省应用基础研究计划项目(2014JY0090, 2015JY0166); 北方工业大学青年拔尖人才培养计划项目(XN070017)  
收稿日期: 2016-09-05

国, Sylmar 断层)、丹那隧道(日本, 丹那断层)、稻取隧道(日本, 稻取断层)、龙溪隧道(中国, F8 断层)等<sup>[1-3]</sup>。如何提高强震作用下黏滑断层隧道的结构安全性正日益引起人们的关注。

高烈度地震区黏滑断层隧道需采取抗震与减震相结合的综合措施进行抗震设防设计, 且应以减震措施为主。目前, 减震缝和减震层为隧道减震的两种主要措施。减震层主要采用泡沫混凝土、橡胶基及沥青基材料, 施设于初支和二衬间。国内外相关专家、学者对高烈度地震区黏滑断层隧道的减震技术进行了部分研究, 主要有: 采用波动理论对隧道设置减震层的减震原理及参数敏感性进行了研究<sup>[4-6]</sup>; 从强震震动单因素角度, 利用大型振动台对跨断层隧道的动力特性及抗减震措施进行了研究<sup>[7-10]</sup>; 从断层黏滑错动单因素角度对黏滑断层隧道的减震技术(减震层和减震缝)进行了模型试验研究<sup>[11-12]</sup>; 采用数值模拟(强震震动单因素分析)对跨活动断层隧道的抗减震技术进行了研究<sup>[13-15]</sup>等。综上可知, 目前的研究均从单一因素角度对高烈度地震区黏滑断层隧道的减震技术进行研究。本文依托都汶高速龙溪隧道 F8 黏滑断层段, 利用大型地震模拟试验台和倾斜正断层倾向错动试验箱, 模拟强震震动作用下断层的黏滑错动, 对隧道初支和二衬间设置减震层的减震技术进行研究, 这对提高高烈度艰险山区交通生命线的抗震性能有着重要的意义。

1 试验方案设计

1.1 龙溪隧道 F8 黏滑断层段工程概况

F8 黏滑断层为挤压性断层, 龙溪隧道洞身段(张家山—八角庙)穿 F8 黏滑断层而过, 倾向北, 倾角为 82°, 走向东西。F8 黏滑断层破碎带(摩棱岩、断层泥组成)为 V 级围岩, 宽约为 10 m, 上下盘岩体均为 IV 级围岩。

F8 黏滑断层段隧道衬砌结构设计: 马蹄形断面, 跨度×高=11.90 m×10.14 m; 初支为 C20 喷射混凝土(厚为 20 cm), 二衬为 C25 模注混凝土(厚为 60 cm)。

1.2 试验设备

静力断层黏滑错动试验采用倾斜正断层倾向错动试验箱(长×宽×高=2.5 m×2.5 m×2 m)进行, 上盘为可活动部分, 下盘为固定部分, 断层倾角为 82°。试验箱如图 1 所示。

强震震动试验采用三方向六自由度大型地震模拟试验台(图 2)进行, 试验台基本参数见表 1 所示。



图 1 倾斜正断层倾向错动试验箱

Fig. 1 Chamber for inclined normal fault dislocation



(a) 台面 (b) 作动器

图 2 大型地震模拟试验台

Fig. 2 Test bench for large earthquake simulation

表 1 试验台基本参数

Table 1 Basic parameters of vibration table

参数		数值
台面尺寸(长×宽)/(m×m)		6×6
最大载重/t		60
频率范围/Hz		0.1~100
最大位移/mm	水平	±150
	竖直	±150
最大加速度(满载)/g	水平	1.0
	竖直	0.8
最大加速度(非满载)/g	水平	3.5
	竖直	3.0

试验数据量测传感器主要有电阻应变片、微型压力盒、单向及三方向加速度传感器等。

试验数据采集设备主要有静态应变采集仪、动力应变数据采集及转换系统等。

1.3 试验相似比设计

考虑到试验中隧道的边界效应(隧道跨度为 11.90 m, 试验箱宽为 2.50 m), 几何相似比取为 30。采用石膏混合料模拟衬砌, 考虑到重度相似的配套, 弹模相似比取为 45。为研究方便, 加速度相似比取为 1。根据相似理论, 其他物理量相似比见表 2 所示。

1.4 相似材料及试验箱边界处理

(1) 试验相似材料

采用粉煤灰、机油及河砂等材料的热融混合料模

拟围岩; 采用石膏和成品钢丝网模拟二次衬砌 (厚 2 cm, 石膏比为 0.676); 采用海绵橡胶板模拟减震层 (厚为 1.7 mm, 见图 3); 采用聚乙烯膜模拟初支与二衬间的防水板。

表 2 其他相关物理量相似比

Table 2 Similarity coefficients of other related physical quantities

类型	物理量	相似系数
材料特性	应力	45
	应变	1
	泊松比	1
	内摩擦角	1
	重度	1.5
几何特性	角位移	1
	面积	900
荷载	荷载	40500
	力矩	1215000
动力特性	频率	0.18
	时间	5.477
	速度	5.477
	重力加速度	1
	阻尼	7394
	质量	40500
	刚度	1350



图 3 海绵橡胶板模拟减震层

Fig. 3 Simulation of damping layer using sponge rubber sheet

本文主要研究强震作用下断层黏滑错动对上下盘岩体中隧道的影响及应对措施, 对破碎带段围岩及隧道结构不做研究, 因此采用两层 PVC 塑料板且中间均匀涂以黄油模拟断层黏滑错动的效果。

(2) 试验箱边界处理

在试验箱底面胶结一层碎石用以减小强震震动过程中围岩与箱体间的相对滑移, 在试验箱内部四周边避设置聚苯乙烯泡沫板 (厚为 225 mm) 用以消除边界效应, 在聚苯乙烯泡沫板表面黏贴 6020 膜 (聚氯乙烯薄膜) 用以减小强震震动过程中边界与围岩的摩擦阻力。

1.5 动力荷载及动力特性

(1) 动力荷载

强震震动动力试验采用 2008 年 5·12 汶川地震卧

龙测站实测波 (持时为 164.6 s, 记录间隔为 0.005 s), 经相似变换、滤波和基线校正, 试验加载加速度时程曲线如图 4 所示 (以南北向为例)。

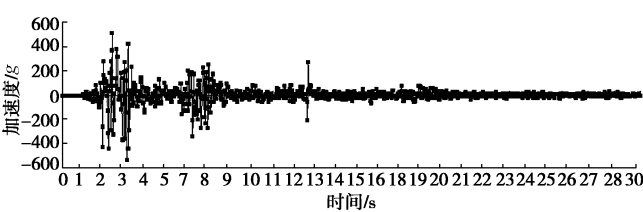


图 4 加速度时程曲线 (南北向)

Fig. 4 Acceleration-time curves (south-north direction)

(2) 动力特性

对试验箱和隧道-围岩模型体系进行模态分析, 对试验加载波进行傅立叶变换, 分析结果见表 3 所示。

表 3 试验系统动力特性

Table 3 Dynamic characteristics of test system (Hz)

试验箱	隧道-围岩 模型体系	试验加载波		
		东西向	南北向	竖向
42.81	7.32	16	17	21

由表 3 可知, 试验箱、隧道-围岩模型体系以及试验加载波的卓越频率皆不相近, 强震震动动力试验过程中不会出现共振现象。

1.6 试验分组及量测布置

(1) 试验分组

文献[4]利用波动理论对强震作用下隧道减震层 (设置于初支与二衬之间) 的参数敏感性及其最优厚度进行了理论研究, 研究结果认为: 低频强震作用下, 隧道减震层的最优厚度为 10 cm。据此, 本次试验分组见表 4 所示。

表 4 试验分组

Table 4 Test grouping

工况	试验内容 (几何相似比 1:30)
1	不采取抗震措施
2	设置厚度为 1.7 mm 的减震层 (模拟 5 cm 减震层)
3	设置厚度为 3.4 mm 的减震层 (模拟 10 cm 减震层)
4	设置厚度为 5.1 mm 的减震层 (模拟 15 cm 减震层)

(2) 量测布置

试验量测断面布置如图 5 所示, 各量测断面测点布置如图 6 所示。在拱顶、边墙中部及仰拱中部布设横向应变片 (Y, 二衬内外侧各 1 片); 在拱顶布设纵向应变片 (ZY, 二衬外表面) 和土压力盒 (T, 初支和围岩之间)。

2 试验过程

试验理想状态应为模拟强震诱发断层发生黏滑滑动的全过程, 但考虑断层发生黏滑错动的不可控性和

发生错动过程中试验台的安全性, 本次试验简化为两步: ①在地震模拟试验台上完成静力断层黏滑错动; ②试验台台面输入强震动力荷载, 完成动力试验。

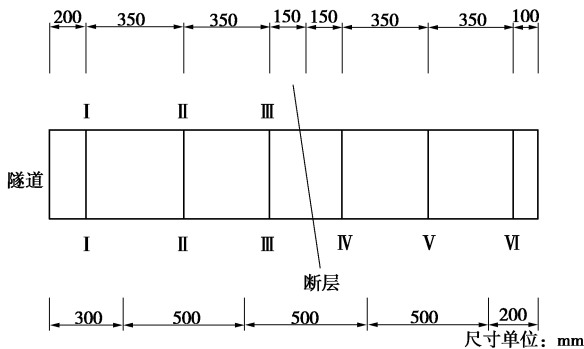


图 5 量测断面  
Fig. 5 Testing sections

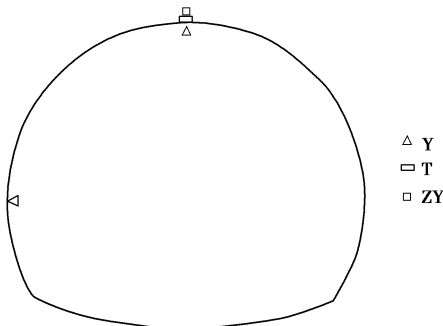


图 6 测点布置  
Fig. 6 Arrangement of measuring points

2.1 静力断层黏滑错动

首先, 将试验箱上盘部分抬升同样高度 (上盘底部四角设置有 4 个 5 t 的千斤顶)。龙溪隧道 F8 黏滑断层在汶川地震中错动约 1.5 m (地表)<sup>[1]</sup>, 故本次试验上盘部分抬升 5 cm。

然后, 填夯围岩相似材料至仰拱底部标高 (0.2 m/夯), 布设二衬模型、减震层及防水板, 施做初支 (石膏掺和料模拟), 继续填夯围岩相似材料至地表。

最后, 同时放下 4 个千斤顶, 上盘部分发生黏滑错动, 静力断层黏滑错动试验完成。

2.2 强震动力试验

首先, 利用钢绞线和限位装置将可活动的上盘部分与下盘固定 (实验箱整体与试验台通过台面 M5 螺栓固定)。

然后, 输入小振幅白噪声信号, 通过分析输出数据检验并调整动力数据采集及转换系统的工作状态。

最后, 输入试验动力加载时程曲线进行动力试验, 并采集试验数据, 强震动力试验完成。

3 试验数据分析

3.1 安全系数

提取 4 种工况各量测断面横向应变片量测数据, 计算结构内力, 拱顶测点静力断层黏滑错动以及强震震动后的最小安全系数如图 7 所示 (上盘为横坐标正数部分, 下盘为横坐标负数部分)。

公路隧道衬砌结构安全系数可按式 (1) 进行计算<sup>[16]</sup>。混凝土矩形截面轴心及偏心受压构件的抗压强度计算式为

$$KN \leq \varphi \alpha R_a b h \quad (1)$$

混凝土矩形截面偏心受压构件的抗拉强度计算式为

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

式中  $K$  为安全系数;  $N$  为轴向力 (kN);  $\varphi$  为构件纵向弯曲系数;  $\alpha$  为轴向力的偏心影响系数;  $R_a$  为混凝土抗压极限强度;  $R_l$  为混凝土抗拉极限强度;  $b$  为截面宽度 (m);  $h$  为截面厚度 (m)。

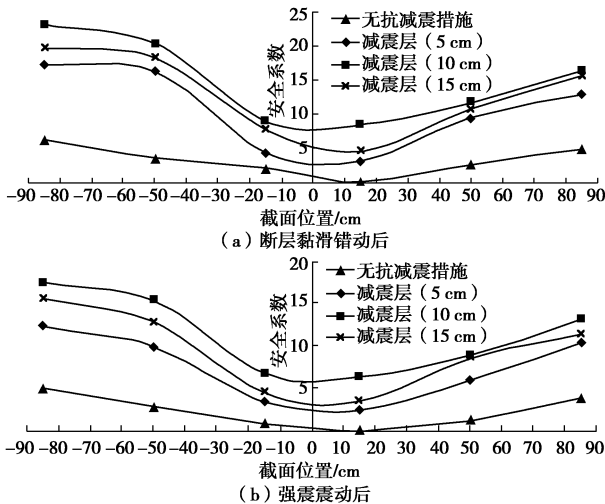


图 7 拱顶最小安全系数

Fig. 7 Minimum safety factors at tunnel vault

由图 7 可知, 上盘部分隧道结构各量测断面拱顶测点最小安全系数明显小于下盘部分, 这说明强震作用下断层黏滑错动对上盘的影响大于下盘部分; 下盘部分在离断层 50 m 后趋于收敛, 上盘部分在离断层 85 m 处仍无收敛迹象, 这说明强震作用下断层黏滑错动对上盘的影响范围远大于下盘部分, 这主要因为活动的上盘部分在错动过程中承受了更多的错动惯性能量造成的。综上可知, 高烈度地震区黏滑断层隧道上盘部分是抗震设防设计的重点段落。

静力断层黏滑错动及强震动力试验后, 设置减震层的工况 (工况 2~4) 各量测断面拱顶测点最小安全系数明显大于不采取抗震措施工况 (工况 1), 减震层的消能减震作用明显; 工况 3 (10 cm 减震层) 拱顶最小安全系数略大于工况 4 (15 cm 减震层), 工况 4 (15 cm 减震层) 拱顶最小安全系数略大于工况 2 (5 cm 减震层)。

3.2 纵向应变

提取 4 种工况各量测断面纵向应变片量测数据, 拱顶测点静力断层黏滑错动以及强震动力试验后纵向应变增加倍数如图 8 所示。

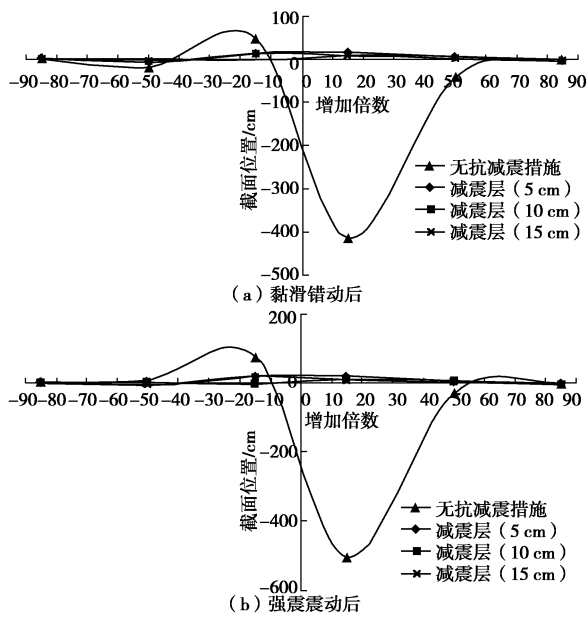


图 8 拱顶纵向应变增加倍数

Fig. 8 Increase multiples of longitudinal strain at tunnel vault

由图 8 可知, 静力断层黏滑错动及强震动力试验后上盘部分隧道结构拱顶纵向应变明显大于下盘部分。距离断层最近的量测断面III和IV拱顶纵向应变的增加倍数最大。

提取静力断层黏滑错动及强震动力试验后拱顶纵向应变增加的最大倍数, 计算其减震效果 (相对不采取抗减震措施的工况 1), 见表 5 所示。

表 5 纵向应变减震效果

工况	断层黏滑错动后		强震震动后	
	最大增加倍数	减震效果/%	最大增加倍数	减震效果/%
1	411.39	—	502.31	—
2	16.32	96.03	20.73	95.87
3	10.06	97.56	12.07	97.60
4	14.46	96.49	17.93	96.43

由图 8 及表 5 可知, 工况 2 (5 cm 减震层) 静力断层黏滑错动以及强震动力试验后拱顶纵向应变最大增加倍数分别为 16.32, 20.73, 减震效果分别为 96.03%, 95.87%; 工况 3 (10 cm 减震层) 静力断层黏滑错动以及强震动力试验后拱顶纵向应变最大增加倍数分别为 10.06, 12.07, 减震效果分别为 97.56%, 97.60%; 工况 4 (15 cm 减震层) 静力断层黏滑错动以及强震动力试验后拱顶纵向应变最大增加倍数分别为 14.46, 17.93, 减震效果分别为 96.49%, 96.43%。

工况 3 (10 cm 减震层) 拱顶纵向应变减震效果明显优于工况 2 (5 cm 减震层) 和工况 4 (15 cm 减震层)。强震震动后, 纵向应变减震效果变化很小 (相对断层黏滑错动后的纵向应变减震效果)。

3.3 接触压力

提取 4 种工况各量测断面土压力盒量测数据, 拱顶测点静力断层黏滑错动以及强震动力试验后接触压力增加倍数如图 9 所示。

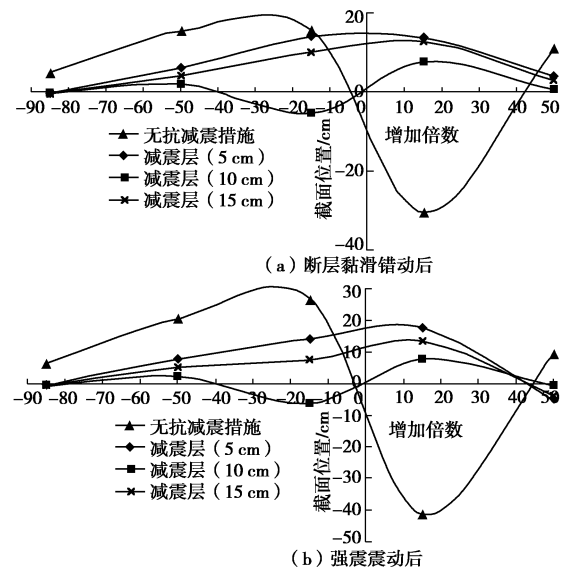


图 9 接触压力增加倍数

Fig. 9 Increase multiples of contact pressure

由图 9 可知, 静力断层黏滑错动及强震动力试验后上盘部分隧道结构拱顶接触压力明显大于下盘部分。距离断层最近的量测断面III和IV拱顶接触压力的增加倍数最大。

提取静力断层黏滑错动及强震动力试验后拱顶接触压力增加的最大倍数, 计算其减震效果 (相对不采取抗减震措施的工况 1), 见表 6 所示。

表 6 接触压力减震效果

工况	断层黏滑错动后		强震震动后	
	最大增加倍数	减震效果/%	最大增加倍数	减震效果/%
1	30.50	—	41.18	—
2	14.03	54.00	17.69	57.04
3	7.61	75.05	8.00	80.57
4	12.82	57.97	13.40	67.46

由图 9 及表 6 可知, 工况 2 (5 cm 减震层) 静力断层黏滑错动以及强震动力试验后拱顶纵向应变最大增加倍数分别为 14.03, 17.69, 减震效果分别为 54.00%, 57.04%; 工况 3 (10 cm 减震层) 静力断层黏滑错动以及强震动力试验后拱顶纵向应变最大增加倍数分别为 7.61 和 8.00, 减震效果分别为 75.05%,

80.57%; 工况 4 (15 cm 减震层) 静力断层黏滑错动以及强震动力试验后拱顶纵向应变最大增加倍数分别为 12.82, 13.40, 减震效果分别为 57.97%, 67.46%。

工况 3 (10 cm 减震层) 拱顶接触压力减震效果明显优于工况 2 (5 cm 减震层) 和工况 4 (15 cm 减震层)。强震震动后, 接触压力减震效果有所提升 (相对断层黏滑错动后的接触压力减震效果)。

### 3.4 减震层厚度优选

减震层的减震效果与减震层刚度、弹性模量及地震波输入频率有关, 存在一个最优厚度。当减震层厚度超过最优厚度, 由于减震层自身质量的问题, 减震效果反而下降<sup>[4]</sup>。

根据结构内力、纵向应变和接触压力的分析比较可知, 工况 3 (10 cm 减震层) 减震效果明显优于工况 2 (5 cm 减震层) 和工况 4 (15 cm 减震层)。高烈度地震区黏滑断层隧道推荐使用厚度为 10 cm 的减震层 (设置于初支和二衬间)。

## 4 结 论

(1) 根据上下盘隧道衬砌结构内力、纵向应变和接触压力分析比较可知, 强震作用下断层黏滑错动对上盘的影响程度以及影响范围均大于下盘部分, 高烈度地震区黏滑断层隧道上盘部分是抗震设防设计的重点段落。

(2) 从纵向应变减震效果看, 断层黏滑错动后减震层的减震效果与强震震动后减震层的减震效果相差无几; 从接触压力减震效果看, 强震震动后减震层的减震效果比断层黏滑错动后减震层的减震效果有所提升。

(3) 根据纵向应变和接触压力减震效果的比较分析可知, 10 cm 减震层减震效果明显优于 5 cm 减震层和 15 cm 减震层的减震效果。因此, 推荐使用厚度为 10 cm 的减震层。

### 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. (in Chinese))
- [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 Zheng-zheng, 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. (in Chinese))
- [3] 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 Guang-yao, WANG Ming-nian, LIN Guo-jin, et al. 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. (in Chinese))
- [4] 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, 48(8): 126 - 131. (WANG Ming-nian, CUI Guang-yao. Study of the mechanism of shock absorption layer in the supporting system of tunnels in highly seismic areas[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 48(8): 126 - 131. (in Chinese))
- [5] 王明年, 崔光耀. 高烈度地震区隧道减震模型的建立及其减震效果模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1884 - 1890. (WANG Ming-nian, CUI Guang-yao. Establishment of tunnel damping model and research on damping effect with model test in highly seismic area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1884 - 1890. (in Chinese))
- [6] 崔光耀. 隧道洞口浅埋段和断裂黏滑段抗震设计计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (CUI Guang-yao. The seismic design calculation method and test study of tunnel shallow-buried portal and rupture stick-slipping section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [6] 王明年, 于丽, 林国进, 等. 公路隧道抗震及减震[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (WANG Ming-nian, YU Li, LIN Guo-jin, et al. Tunnel seismic and shock absorption[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [7] 蒋树屏, 文栋良, 郑升. 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 Shu-ping, WEN Dong-liang, ZHENG Sheng. 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))
- [8] 信春雷, 高波, 王英学, 等. 跨断层隧道可变形抗减震措施振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1041 - 1049. (XIN Chun-lei, GAO Bo, WANG Ying-xue, et al. Shaking



- table tests on deformable aseismic and damping measures for fault-crossing tunnel structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(4): 1041 - 1049. (in Chinese))
- [9] 刘 云, 高 峰. 跨断层隧道动力特性大型振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, **35**(12): 160 - 165. (LIU Yun, GAO Feng. Experimental study on the dynamic characteristics of a tunnel-crossing fault using a shake-table test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, **35**(12): 160 - 165. (in Chinese))
- [10] 日本土木学会. コンクリート標準示方書-耐震設計編[M]. 東京: 鹿島出版会, 1997. (Japan Society of Civil Engineers. Standard specification for concrete seismic design guide[M]. Tokyo: Kajima Publishing, 1997. (in Japanese))
- [11] 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 Guang-yao, WANG Ming-nian, 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. (in Chinese))
- [12] 崔光耀, 王明年, 于 丽, 等. 穿越黏滑错动断层隧道减震层减震技术模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(9): 1753 - 1758. (CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, 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**(9): 1753 - 1758. (in Chinese))
- [13] 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 Zheng-guo, YU Jian-tao, SUI Chuan-yi, 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. (in Chinese))
- [14] 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 Yu-cheng, YAN Song-hong, et al. Study of two shock absorption measures in tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(2): 222 - 229. (in Chinese))
- [15] 孙铁成. 双洞错距山岭隧道洞口段地震动力响应及减震措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (SUN Tie-cheng. Study on earthquake responses and vibration-absorption measures for two-tunnels of mountain tunnel with staggered space[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [16] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 2004. (JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)