

DOI: 10.11779/CJGE201808018

断裂黏滑错动下隧道减错措施作用效果模型试验研究

王道远^{1,2,3}, 崔光耀⁴, 袁金秀^{*2}, 朱永全^{1,3}, 朱正国¹, 李冬², 王洪凡²

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北交通职业技术学院土木工程系, 河北 石家庄 050091;

3. 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; 4. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144)

摘要: 以某隧道工程为依托, 开展断裂黏滑错动下隧道减错措施大型模型试验。通过分析纵向应变、接触压力和衬砌安全系数, 对无减错措施、仅设置减错层、仅二衬设置减错缝、二衬设置减错缝与影响区段二衬增厚、初支与二衬交错设置减错缝以及组合措施 6 种工况进行对比研究。结果表明: 断裂黏滑错动对上盘的影响范围和剧烈程度均大于下盘; 不同工况减错措施对纵向变形、接触压力以及结构受力控制水平分别为 $A \ll C \approx D \approx B < E < F$, $A \ll B < D < C \approx E \approx F$, $A \ll D < C \approx E < B < F$; 刚柔并济设计理念下“减错缝+增加影响区段二衬厚度”方案不宜采用, 铰接设计理念下“减错层+交错设缝”组合措施可有效保障依托隧道黏滑错动后衬砌结构的安全。研究结论对高烈度区交通隧道穿越断裂黏滑段减错技术具有重要的意义。

关键词: 隧道; 断裂黏滑; 减错措施; 交错设缝; 模型试验

中图分类号: TU470.3; U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)08-1515-07

作者简介: 王道远(1982-), 男, 副教授, 主要从事隧道与地下工程的教学与研究工作。E-mail: wtg-888@163.com。

Model tests on effect of dislocation reducing measures of stick-slip fault of tunnels

WANG Dao-yuan^{1, 2, 3}, CUI Guang-yao⁴, YUAN Jin-xiu², ZHU Yong-quan^{1, 3}, ZHU Zheng-guo¹, LI Dong²,
WANG Hong-fan²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Department of Civil Engineering, Hebei

Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050091, China; 3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering,

Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 4. School of Civil Engineering, North China University of

Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Based on a tunnel project, large-scale model tests are carried out on anti-seismic and damping measures for dislocation of stick-slip fault. By analyzing longitudinal strain, contact pressure and safety factor of linings, the anti-seismic and damping effects are comparatively studied under six kinds of working conditions of A (no dislocation reducing measures), B (dislocation reducing layer), C (dislocation reducing joint for secondary lining), D (dislocation reducing joint and increasing thickness for secondary lining), E (interleaving setting of dislocation reducing joint) and F (combined dislocation reducing measures). The results show that the scope of the impact and intensity of stick-slip dislocation on hanging wall is greater than that on footwall. The control effect of the longitudinal deformation from low to high is $A \ll C \approx D \approx B < E < F$, that of the contact pressure is $A \ll B < D < C \approx E \approx F$, and that of the structural stress is $A \ll D < C \approx E < B < F$. The scheme of condition D under the design concept of being rigid and flexible should not be adopted, and the safety of linings of tunnel after stick-slip can be effectively guaranteed by the combined measures of “dislocation reducing layer and staggered dislocation reducing joint”. The research results may be of important significance for the anti-seismic technology in rail communication of lifeline engineering in high intensity earthquake areas.

Key words: tunnel; stick-slip fault; dislocation reducing measure; interleaving setting of dislocation reducing joint; model test

0 引言

地震活动断裂的运动模式是影响工程稳定性及结构安全性的重要因素, 其运动形式可分为蠕滑和黏滑两种。蠕滑强调断裂形成的持续滑动特性, 黏滑则强

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408008, 51478277); 四川省应用基础研究计划项目(2014JY0090, 2015JY0166); 河北省自然科学基金项目(E201619002); 河北省人才工程培养经费资助科研项目(A201500116); 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(QN2016240); 北方工业大学青年拔尖人才培养计划项目(XN131)
收稿日期: 2017-04-26
*通讯作者(E-mail: xiugirl2007@163.com)

调断裂形成的突发滑动特性,地震断裂即为黏滑断裂,黏滑断裂对中国交通隧道建设和运营安全影响巨大。

跨越断裂黏滑段隧道震害主要受控于黏滑错动因素,地震震动影响次之^[1-3]。国内外学者开展了大量关于跨越断层抗减震机理、措施及设防长度研究,获得了丰富成果。Russo 等^[4]依托土耳其穿越 BAKACAK 活动性断层的 BOLU 隧道,开展了小衬砌节段比柔性抗错断铰链作用效果分析。Vafeian 等^[5]依托西腊 Koohrangs 水工隧道,对不同节段长度抗错断效果进行了分析。王帅帅等^[6]基于波动理论探讨了 SV 波作用下断层减震层的作用机理,明确了剪切破坏是断层破碎带隧道结构失效的主要形式;耿萍等^[7-8]通过理论分析和震动模型试验,指出断层影响具有区域性,其影响范围约为 3.5 倍洞跨;蒋树屏等^[9]依托嘎隆拉隧道开展了洞口段减震缝和减震层作用效果的模型试验,获得了减震缝和减震层的设置对结构的地震反应频谱无影响,但能降低约 45%的减震率的结论;信春雷等^[10-11]以龙洞子隧道为原型开展了振动台模型试验,确定了套管式可变形结构减震效果较减震缝优势明显,但需结合实际提高支护混凝土强度;刘学增等^[12-14]开展了 60°,75° 正逆断层黏滑错动机理和影响规律试验研究,获得了黏滑错动后上下盘围岩压力变化规律、影响分区及容许最大错动位移量。崔光耀等^[15-16]开展了断裂黏滑条件下减错层和减震缝模型试验,推荐最优减错层厚度为 10 cm,最优设缝间隔为 12 m;王道远等^[17-18]采用数值计算手段对交错设缝作用效果进行了初步探讨,指出交错设缝措施能有效降低围岩塌方段 35%的主应力。

上述研究对隧道跨越断裂黏滑段具有较好的指导意义和工程应用价值,但已有研究成果多仅仅针对单一设置减错层或减错缝开展研究,而关于减错层、二衬设置减错缝、二衬设置减错缝与增加影响区段二衬厚度、初支与二衬交错设置减错缝及其它组合减错措施对比研究较少,不同情况下孰优孰劣,减错效果差别有多大。上述问题尚需做进一步深入探讨和研究。本文在已获得的最优减错层和最优减错缝设置长度的基础上进一步开展断裂黏滑隧道减错措施作用效果大型模型试验研究,以期对不同减错措施组合效果给出相应评价,为跨越断裂黏滑段隧道减错措施设置提供参考和借鉴。

1 依托工程概况

某隧道工程位于 VII 度地震烈度区,隧道由南向北依次穿越雅玛里克断裂(f2)、八钢—石化隐伏断裂

(f4)、九家湾断裂(f5)和西山断裂(f7)等,具体如表 1 所示。断层破碎带以断层角砾、断层泥为主,局部可见有碎裂岩,岩层陡立、挤压揉痕明显,断裂带两侧为 IV 级围岩(围岩重度 γ 为 21 kN·m⁻³,内摩擦角 φ 为 31°,黏聚力 c 为 0.23 MPa、弹性模量 E 为 1.3 GPa),断裂带内为 V 级围岩。隧道断面为马蹄形,跨度 8.573 m,高度 9.120 m,初支和二衬厚度分别为 30,60 cm。

表 1 断裂情况

Table 1 Situations of fracture

断层名称	断层性质	倾角/(°)
八钢—石化隐伏断裂	逆断层	75
九家湾第一条	正断层	80
九家湾断层组第二条北支	正断层	50
九家湾断层组第二条南支	正断层	70
九家湾断层组第三条	正断层	70
九家湾断层组第四条	正断层	60
西山断裂北支	逆断层	45
西山断裂南支	逆断层	45
雅玛里克断裂	逆断层	70

2 模型试验设计

2.1 试验目的及分组

通过断裂黏滑隧道错动试验,监测二次衬砌内力、纵向应变、初期支护和二次衬砌间接触压力等,分析不同减错措施及组合条件下减错效果优劣。在已有研究成果的基础上,本试验过程中减错层厚度取最优厚度 10 cm,减错缝距离(考虑二衬模板台车长度)取 12 m,具体分组情况如表 2 所示,二衬设置减错缝与增加影响区段二衬厚度如图 1 所示,初支与二衬交错设置减错缝如图 2 所示。

表 2 试验分组

Table 2 Test groups

工况	内容
A	无减错措施
B	仅设置减错层
C	仅二衬设置减错缝
D	二衬设置减错缝+增加影响区二衬厚度
E	交错设缝(初支与二衬交错设置减错缝)
F	组合措施(减错层+交错设缝)

2.2 模型试验参数设计

根据相似理论和研究目的,在几何尺寸、应力、弹模等参数中,选取几何相似和弹性模量相似两个独立参数,其他参数均依据此推出。

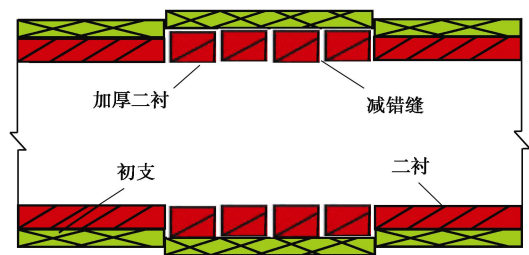


图 1 减错缝+二衬增厚示意

Fig. 1 Sketch of dislocation-reducing joint and increasing thickness for secondary linings

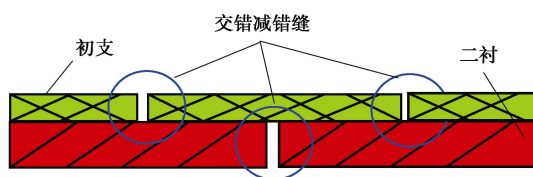


图 2 交错设缝示意

Fig. 2 Sketch of interleaving setting dislocation reducing joint

考虑模型箱的尺寸和边界效应, 确定模型试验的几何相似比为 30 : 1, 弹模相似比为 45 : 1, 其它主要物理量相似关系为: 应变相似比为 1 : 1, 应力相似比为 45 : 1, 质量密度相似比为 1.5 : 1。

2.3 模型试验设备与材料

试验采用自行开发的试验装置, 如图 3 所示, 装置由支撑系统、加载系统和量测系统组成, 箱体尺寸为: 长×宽×高=2.5 m×2.5 m×1.5 m, 两侧设观测窗, 根据正断层运动特点, 将试验箱分为上盘(下降盘)和下盘(固定盘)两部分, 保持下盘不动, 通过千斤顶升降释放以实现上盘下降, 重点保证错动过程中上下盘之间接触与实际断层错动的相似性, 本次试验断层倾角设置为 70°。

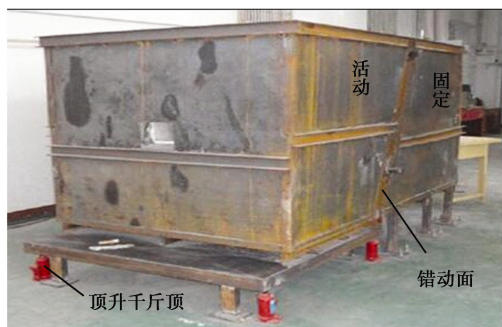


图 3 模型试验箱

Fig. 3 Chamber of tests

初支采用石膏模拟、二衬采用钢丝和石膏模拟、防水层采用聚乙烯膜模拟、减错层采用海绵橡胶板模拟(防水层布置于初支侧、减错层布置于二衬侧, 且两者密贴)、黏滑断层的错动采用中间涂抹黄油的两层

PVC 板模拟、数据监测采用 Bx120-8AA 型应变片和微型压力盒、围岩相似材料为重晶石、石英砂、石膏和水的混合料, 原料配比经正交实验进行确定, 经过多次配比试验最终得出的材料合理配合比及物理力学参数见表 3。

表 3 围岩相似材料配比及测试结果

Table 3 Test results and similar material ratios of surrounding rock

材料质量配比/%					试验结果		
重晶石	石英砂	石膏	水	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	密度/(g·cm ⁻³)
43.3	43.3	6.7	6.7	5.3	30.5	29.6	1.4

隧道二衬为 C25 混凝土(弹性模量 3.0×10^4 MPa), 由弹性模量相似比得到二衬相似材料弹性模量应为 659 MPa; 二衬结构模型的相似材料选用石膏, 通过正交试验选用膏水比为 1.55 的相似材料, 其弹模为 660.83 MPa。具体试验制品及设备如图 4 所示。



图 4 试验制品及设备

Fig. 4 Products and equipments of tests

2.4 监测断面和测点布设

根据减错层、减错缝设置情况, 确定试验监测断

面如图 5 (a)、(b) 所示。在各监测断面选定拱顶、边墙和仰拱布设横向应变片 H (内外侧对称布置)、纵向应变片 L (内外侧对称布置) 和微型压力盒 S (围岩与初期支护间布设), 具体监测点布置见图 5 (c)。

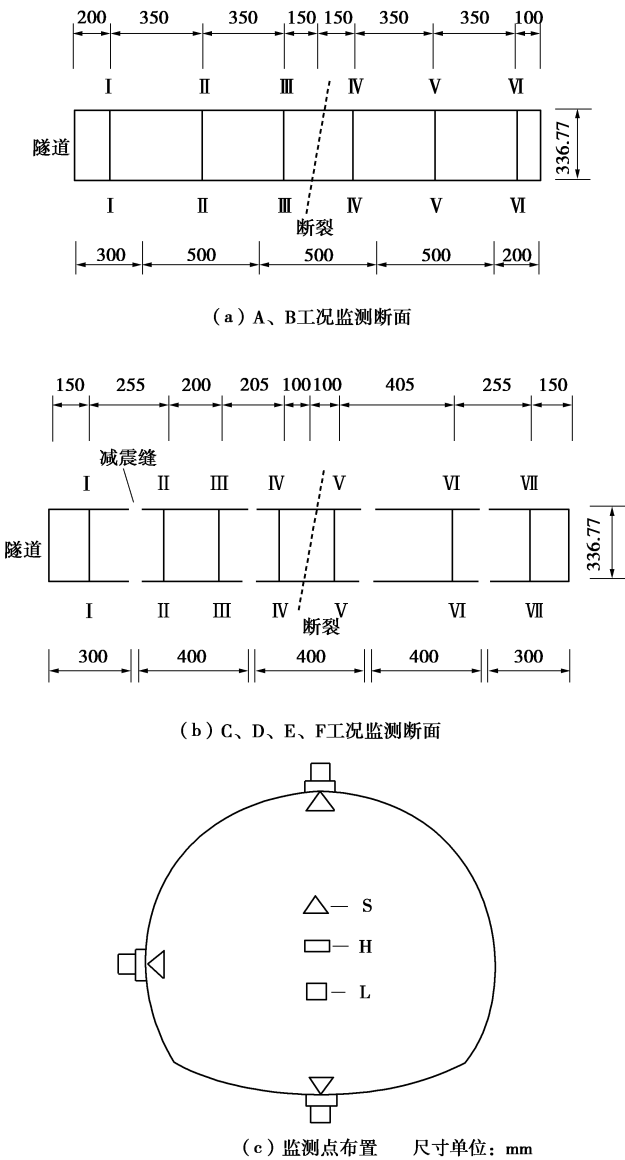


图 5 监测断面及监测点布设

Fig. 5 Layout of monitoring sections and points

2.5 试验关键环节实施

试验关键环节包括减错层设置、减错缝设置、隧道模型的浇筑、围岩相似材料的堆填、应变片和压力盒的布设以及断裂黏滑错动的实现等。

减错层设置: 减错层采用 3.6 mm 厚的海绵橡胶铺设于初支与二衬之间以模拟隧道实际厚 10 cm 的减错层。

减错缝设置: 在铺设衬砌前, 用锯条按 0.4 m 衬砌节段锯出 3 mm 的缝宽以模拟实际状态下的减错缝。

二衬增厚设置: 在用模具模注二衬时, 二衬厚度较原设计模型增厚 4 mm, 以模拟影响区段衬砌刚度增大工况。

断裂黏滑的实现: 根据依托隧道工程预测百年可能发生黏滑错动量 (1.5 m), 试验模拟错动量取 5 cm。通过活动上盘底部 4 个预先安设的千斤顶将上盘顶升 5 cm 高度, 待衬砌埋设、量测设备安装及填土等完成后, 同时释放 4 个顶升的千斤顶顶力, 上盘下降实现断裂黏滑错动。

3 试验结果分析

3.1 断裂黏滑错动后纵向应变

将断裂黏滑错动后隧道拱顶纵向应变增大倍数 (错动后纵向应变与错动前纵向应变比值) 绘制于图 6 中, 竖轴左侧为下盘, 右侧为上盘。

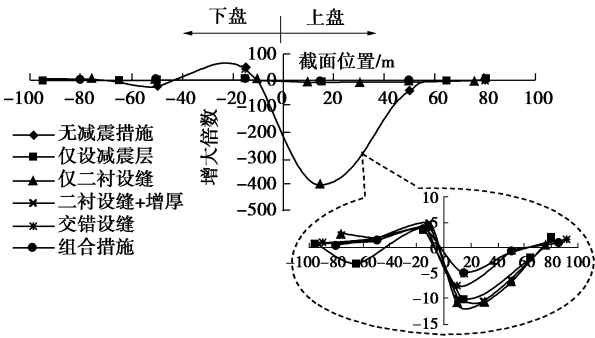


图 6 错动后拱顶纵向应变

Fig. 6 Longitudinal strains of vault after fault slip

将采取一种减错措施下纵向应变增大倍数同无减错措施 (或其他减错措施) 下增大倍数之差与后者的比值定义为纵向应变降低率:

$$\eta_z = \left| \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_a}{\varepsilon_a} \right| \quad (1)$$

式中 η_z 为纵向应变降低率; ε_b 为一种减错措施下纵向应变增大倍数; ε_a 为另一种减错措施下或无减错措施纵向应变增加倍数。

断裂黏滑错动后不同减错措施下纵向应变降低率如表 4 所示。

表 4 拱顶纵向应变增大倍数及降低率

Table 4 Increase multiples and decrease rates of vault longitudinal strain

试验工况	最大纵向应变增大倍数	相对于无减错措施纵向应变降低率/%	相邻试验工况间纵向应变降低率/%
A	411.39	—	—
C	10.59	97.42	—
D	10.46	97.45	1.23
B	10.05	97.55	3.92
E	7.58	98.16	24.58
F	5.06	98.77	33.25

从图 6 和表 4 可以看出: ①断裂黏滑错动后活动上盘纵向应变均大于固定下盘纵向应变, 上下盘受断裂黏滑影响剧烈范围均位于断裂附近, 并且错动对上盘影响范围较下盘显著; ②无论采用哪种抗减错措施均能有效控制纵向应变增大倍数, 其纵向应变降低率在 97% 以上; ③工况 B (仅设减错层)、C (仅二衬设减错缝) 和工况 D (二衬设减错缝+增厚) 对纵向应变降低率差值在 5.0% 以内, 可近似认为效果相当。但工况 E (交错设缝) 和 F (减错层+交错设缝) 较工况 B (或 C 或 D) 效果显著, 工况 E 相对于工况 B 纵向应变降低率为 24.58%, 工况 F 相对于工况 E 纵向应变降低率为 33.25%。上述分析表明: 6 种试验工况对断裂黏滑错动下纵向应变控制由劣到优顺序为 $A \ll C \approx D \approx B < E < F$ 。

3.2 断裂黏滑错动后接触压力

同纵向应变分析类似, 将断裂黏滑错动后隧道拱顶接触压力增大倍数 (错动后接触压力与错动前接触压力比值) 绘制于图 7 中。

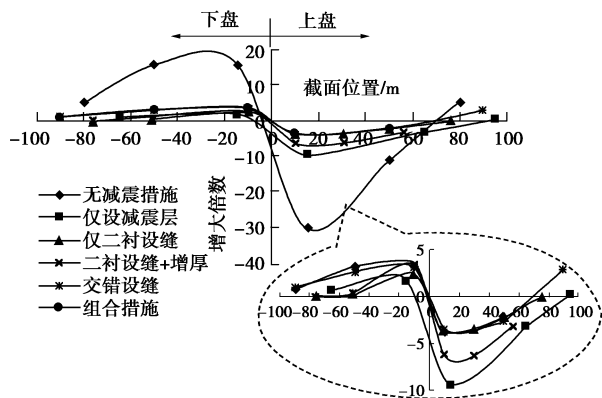


图 7 错动后拱顶接触压力

Fig. 7 Contact pressures of vault after fault slip

将采取一种减错措施下接触压力增大倍数同无减错措施 (或其他减错措施) 下增大倍数之差与后者的比值定义为接触压力降低率:

$$\eta_p = \left| \frac{p_b - p_a}{p_a} \right| \quad (2)$$

式中 η_p 为接触压力降低率; p_b 为一种减错措施下接触压力增大倍数; p_a 为另一种减错措施下或无减错措施接触压力增加倍数。

断裂黏滑错动后不同减错措施下接触压力降低率如表 5 所示。

图 7 和表 5 表明: ①断裂黏滑错动后上盘接触压力的大小、范围均大于下盘且上下盘受断裂黏滑错动影响剧烈范围均位于断裂附近; ②相对于无减错措施工况 A 而言, 工况 B (仅设减错层)、工况 D (二衬设缝+增厚)、C (仅二衬设减错缝)、E (交错设缝)、

F (减错层+交错设缝) 最大接触压力降低率分别为 68.89%, 79.93%, 88.43%, 88.46%, 89.02%, 说明采取任何一种减错措施都能较为有效的减小接触压力; ③仅设置二衬减错缝的工况 C 相对于刚柔并济设计理念下的工况 D, 其接触压力降低率提高 42.32%, 说明当发生黏滑错动时刚柔并济设计理念下的工况 D 会促使衬砌结构承受更大载荷; ④工况 E 相对于工况 C 接触压力降低率为 0.28%, 工况 F 相对于工况 E 接触压力降低率为 4.83%, 说明工况 C、E、F 三者在控制黏滑错动后接触压力效果相当, 但需注意的是这三者较工况 B (仅设置减错层) 能有效降低 60% 以上接触压力。上述分析表明: 6 种试验工况对断裂黏滑错动下接触压力控制由劣到优顺序为 $A \ll B < D < C \approx E \approx F$ 。

表 5 拱顶接触压力增大倍数及降低率

Table 5 Increase multiples and decrease rates of vault contact pressure

试验工况	最大接触压力相对于无减错措施接触压力增大倍数	相邻试验工况间接触压力降低率/%	接触压力降低率/%
A	30.50	—	—
B	9.49	68.89	—
D	6.12	79.93	35.51
C	3.53	88.43	42.32
E	3.52	88.46	0.28
F	3.35	89.02	4.83

3.3 断裂黏滑错动后结构安全系数

黏滑错动试验中纵向应变和接触压力最大值均位于错动面附近, 故分析断裂黏滑错动条件下结构受力时仅关注错动面两侧监测面内监测点, 提取监测点横向内外表面应变, 进而获得对应位置衬砌结构内力, 根据规范^[19]推荐方法计算断面主要位置安全系数及安全系数增大倍数罗列于表 6。

表 6 错动面附近上下盘最小安全系数及增大倍数

Table 6 Minimum safety factors and increase multiples of section near slip fault

位置	A	B	D	C	E	F
上盘(距错动最近观测断面)	0.19	1.42	0.84	1.00	1.01	2.38
下盘(距错动最近观测断面)	0.31	1.76	1.01	1.24	1.27	2.70
安全系数增大倍数	1(1)	7.2(5.6)	4.4(3.3)	5.1(3.9)	5.2(4.0)	12.2(8.6)

注: 安全系数增大倍数为采取减错措施安全系数与不采取减错措施安全系数比值; ()内为下盘安全系数增大倍数。

从表 6 可以看出: ①断裂黏滑错动后, 工况 A、

B、D、C、E、F 下距离错动面最近观测断面上下盘安全系数分别为 0.19(0.31)、1.42(1.76)、0.84(1.01)、1.00(1.24)、1.01(1.27)、2.38(2.70)，错动后上盘安全系数均小于下盘，说明断裂黏滑错动对上盘隧道结构影响大于下盘；②刚柔并济设计理念下工况 D 衬砌结构安全系数并未因为二衬厚度的增加而相应增大，其安全系数较不增加二衬厚度的工况 C 小；③单项减错措施不能保证依托隧道工程发生断层错动时结构安全，但组合措施可以极大地提高隧道安全系数（上下盘安全系数分别达 2.38 和 2.70），能保证隧道结构的安全；④断裂黏滑错动后，工况 B、C、D、E、F 相对无减错措施工况 A 安全系数增大倍数分别为 7.2(5.6)、5.1(3.9)、4.4(3.3)、5.2(4.0)、12.2(8.6)，说明从隧道结构安全系数来看，组合减错措施效果最好，减错层次之，之后是减错缝，“减错缝+增厚二衬”刚柔并济设计效果最差。具体由劣到优顺序为 $A \ll D < C \approx E < B < F$ 。

4 结 论

本文通过正断层黏滑错动模型试验下隧道结构受力、纵向应变和接触压力量测与分析，获得以下 4 点结论。

(1) 上盘受断裂黏滑错动影响范围和剧烈程度均大于下盘，故断裂黏滑错动下上盘是隧道抗错断控制重点。

(2) 不同抗减错措施对纵向变形作用效果由劣到优顺序为 $A \ll C \approx D \approx B < E < F$ ；不同抗减错措施对接触压力作用效果由劣到优顺序为 $A \ll B < D < C \approx E \approx F$ ；不同抗减错措施对错动下结构安全控制从劣到优顺序为 $A \ll D < C \approx E < B < F$ 。

(3) 增加结构刚度(二衬厚度)不利于提高衬砌结构抗减错能力，刚柔并济设计理念下的“减错缝+增加二衬厚度”措施不建议采用。

(4) 为依托隧道工程百年预测位错量下断裂黏滑错动可能产生的垮塌，推荐采取“减错层+交错设缝”组合措施以确保衬砌结构的安全。

参考文献:

[1] 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))

[2] 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))

[3] 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))

[4] RUSSO M, GERMANI G, AMBERG W. Design and construction of large tunnel through active faults: a recent application[C]// International Conference of Tunneling and Underground Space Use. Istanbul, 2002: 16 - 18.

[5] SHAHIDI A R, VAFAEIAN M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining(for Koohrang-III tunnel)[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005(20): 213 - 221.

[6] 王帅帅, 高波, 隋传毅, 等. 减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1086 - 1092. (WANG Shuai-shuai, GAO Bo, SUI Chuan-yi, et al. Mechanism of shock absorption layer and shaking table tests on shaking absorption technology of tunnel across fault[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1086 - 1092. (in Chinese))

[7] 耿萍. 铁路隧道抗震计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. (GENG Ping. Research on the seismic calculation method of railway tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))

[8] 耿萍, 何悦, 何川, 等. 穿越断层破碎带隧道合理抗震设防长度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 358 - 365. (GENG Ping, HE Yue, HE Chuan, et al. Research on reasonable aseismic fortified length for tunnel through fault fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 358 - 365. (in Chinese))

[9] 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]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 649 - 656. (in Chinese))

[10] 信春雷, 高波, 周佳媚, 等. 跨断层隧道抗减震措施性

- 能振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1414 - 1422. (XIN Chun-lei, GAO Bo, ZHOU Jia-mei, et al. Shaking table tests on performances of anti-seismic and damping measures for fault-crossing tunnel structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1414 - 1422. (in Chinese))
- [11] 信春雷, 高波, 王英学, 等. 跨断层隧道可变形抗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, 2011, **32**(9): 2709 - 2714. (in Chinese))
- [12] 刘学增, 王煦霖, 林亮伦. 60° 倾角正断层黏滑错动对山岭隧道影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(2): 121 - 128. (LIU Xue-zeng, WANG Xu-lin, LIN Liang-lun. Model experimental study on influence of normal fault with 60° dip angle stick-slip dislocation on mountain tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(2): 121 - 128. (in Chinese))
- [13] 刘学增, 林亮伦. 75° 倾角逆断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2523 - 2530. (LIU Xue-zeng, LIN Liang-lun. Research on model experiment of effect of thrust fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 252 - 2530. (in Chinese))
- [14] 刘学增, 王煦霖, 林亮伦. 75° 倾角正断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1714 - 1720. (LIU Xue-zeng, WANG Xu-lin, LIN Liang-lun. Model experiment on effect of normal fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1714 - 1720. (in Chinese))
- [15] 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. Model tests on damping shake technology of shock absorption layer of tunnels crossing stick-slip faults[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1753 - 1758. (in Chinese))
- [16] 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 tests 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))
- [17] 王道远, 崔光耀, 袁金秀, 等. 强震区隧道施工塌方段震害机理及处治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(2): 414 - 422. (WANG Dao-yuan, CUI Guang-yao, YUAN Jin-xiu, et al. Research on seismic damage mechanism and treatment technologies of construction landslide section of the highway tunnel in highly seismic region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(2): 414 - 422. (in Chinese))
- [18] 王道远, 袁金秀, 朱永全, 等. 高烈度区软硬岩交界段隧道震害机制及减震缝减震技术模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(增刊 2): 2523 - 2530. (WANG Dao-yuan, YUAN Jin-xiu, ZHU Yong-quan, et al. Mechanism of seismic damage and mode test on absorption joint damping technology of tunnel across junction of soft and hard rock in highly seismic area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S2): 252 - 2530. (in Chinese))
- [19] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 2004. (JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. 2004. (in Chinese))