

崔光耀,魏杭杭,王明年.黏滑断层隧道刚柔并济抗减错技术研究[J].地震工程学报,2021,43(2):380-385.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.380

CUI Guangyao, WEI Hanghang, WANG Mingnian. Rigid and Flexible Compound Anti-dislocation Reducing Technology for Stick-slip Fault Tunnels[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 380-385. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.380

## 黏滑断层隧道刚柔并济抗减错技术研究

崔光耀<sup>1</sup>, 魏杭杭<sup>1</sup>, 王明年<sup>2,3</sup>

(1. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

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)

**摘要:**为提高强震区黏滑断层隧道的结构安全性和稳定性,以都汶高速友谊隧道 F1 黏滑断层段为研究背景,对黏滑断层隧道采用刚柔并济抗减错技术进行研究。研究表明:采用结构加强措施抵抗断层黏滑错动影响,结构位移抗减错效果不显著,结构内力的平均抗减错效果在 23%~33% 之间;施设减错层有利于消减断层黏滑错动对隧道结构的影响,其拱顶沉降、边墙收敛抗减错效果分别达到 20% 以上,结构内力平均抗减错效果在 37%~47% 之间,优于结构加强措施;刚柔并济抗减错措施在抵抗及消减断层黏滑错动影响方面效果显著,其拱顶沉降、边墙收敛抗减错效果均能达到 30% 以上,而结构内力平均抗减错效果达到 80% 以上。研究成果可为强震区黏滑断层隧道抗震减灾设防设计提供参考。

**关键词:** 隧道工程; 断层黏滑错动; 结构加强; 减错层; 抗减错

**中图分类号:** U452.28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2021)02-0380-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.380

## Rigid and Flexible Compound Anti-dislocation Reducing Technology for Stick-slip Fault Tunnels

CUI Guangyao<sup>1</sup>, WEI Hanghang<sup>1</sup>, WANG Mingnian<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** To improve the safety and stability of stick-slip fault tunnels in a meizoseismal area, the rigid and flexible compound anti-reducing dislocation technology for stick-slip fault tunnels was analyzed in this paper on the basis of the stick-slip fault F1 of Youyi tunnel in the Dujiangyan

**收稿日期:** 2019-03-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51408008);北京市青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201704013);北京市属高校基本科研业务费项目(110052971921/061);北方工业大学毓优人才支持计划项目(18XN012-043)

**第一作者简介:** 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研究。E-mail:cyao456@163.com。

**通信作者:** 魏杭杭(1997-),男,河南漯河人,硕士研究生,主要从事隧道与地下工程研究。E-mail:weihang1403608805@163.com。

—Wenchuan highway. After structure reinforcement measures were taken to resist the influence of fault stick-slip dislocation, the anti-reducing dislocation effect of structural displacement is not obvious, and the average anti-reducing dislocation effect of structural internal force is between 23%—33%. Setting the dislocation reducing layer can help reduce the influence of fault stick-slip dislocation. The anti-reducing dislocation effect of vault settlement and sidewall convergence are over 20%, while the average anti-reducing dislocation effect of structural internal force is between 37%—47%, better than the structural reinforcement measures. Rigid and flexible compound measures have good effects; the anti-reducing dislocation effect of vault settlement and sidewall convergence is over 30%, and the average anti-reducing dislocation effect of structural internal force is more than 80%. The results can provide a reference for the design of seismic disaster prevention and control for stick-slip fault tunnels in meizoseismal areas.

**Keywords:** tunnel engineering; fault stick-slip dislocation; structure reinforcement; dislocation reducing layer; anti-dislocation reducing

## 0 引言

我国西部山区地质条件复杂,地震活动频繁,断裂构造发育。随着西部交通基础建设的蓬勃发展,致使穿越黏滑断层隧道大量涌现,如在建川藏高速系列隧道、大瑞铁路系列隧道等。在汶川地震中,都映高速穿越黏滑断层系列隧道洞身主体结构破坏严重,甚至出现衬砌垮塌、围岩垮塌的严重震害(图 1),严重影响灾后生命线抢通、救援及恢复重建工作<sup>[1-2]</sup>①。如何提高断层黏滑错动时隧道结构的安全性和稳定性是亟待研究和解决的关键技术问题之一。



图 1 龙溪隧道黏滑断层段隧道整体垮塌

Fig.1 Overall collapse of stick-slip fracture section of Longxi tunnel

断层黏滑错动和强震震动是造成强震区黏滑断层隧道震害的主要影响因素,其中断层黏滑错动影响较大,强震震动影响次之。目前黏滑断层隧道抗错断措施主要有抗错和减错两种,围岩加强、结构加

强为抗错措施;二衬设置减错缝及初支与二衬之间设置减错层为减错措施。由于采用单一设防措施难以有效抵抗或消减断层黏滑错动的作用,本文提出采用刚柔并济抗减错措施(二衬加强+初支与二衬之间设置减错层)予以设防。

国内外有关专家、学者对黏滑断层隧道抗减错技术做了部分研究,主要有:对穿越活动断层隧道震害机理进行了研究<sup>[3-4]</sup>;依托实际工程,通过模型试验对断层错动下隧道抗错断力学机制及破坏机理进行了研究<sup>[5-6]</sup>;通过模型试验对断层错动下围岩与隧道结构的位移和应力变化进行了研究<sup>[7-9]</sup>;对不同倾角断层黏滑错动作用下隧道支护结构的受力特性进行了研究<sup>[10-13]</sup>;利用模型试验与数值模拟对黏滑断层隧道设置减错缝和减错层的减错技术进行了研究<sup>[14-17]</sup>。以上研究在黏滑断层隧道断层致灾机理、减错技术方面做了部分研究,而在黏滑断层隧道采用结构加强与设置减错措施综合设防方面研究很少。本文以都汶高速友谊隧道 F1 黏滑断层段为研究背景,对黏滑断层隧道采用刚柔并济抗减错措施(二衬加强+初支与二衬之间设置减错层)进行研究,这对黏滑断层隧道抗减错技术的发展有着重要的意义。

## 1 友谊隧道 F1 黏滑断层段工程概况

### 1.1 工程地质

隧址区位于纸厂沟与小桃沟之间的山体内部,受

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.成都:四川省交通厅公路规划勘察设计研究院,2008.

断层和岩性影响,节理裂隙较发育,岩体较破碎。

F1 黏滑断层为挤压性逆断层,隧道洞身穿 F1 黏滑断层而过,走向 NE,倾向 NW,倾角  $60^\circ$ ,破碎带宽度  $0.5\sim 2.0$  m,延伸长度约 1 km,断层破碎带主要由糜棱岩、碎块岩组成,V 级围岩,在里程 K1028+259.8 处与路线斜交。断层破碎带上盘岩体主要由砂岩组成,岩体较为完整,强度较高,属于 IV 级围岩,下盘主要由第四系崩坡堆积层的块碎石土和强、中风化岩石组成,岩体完整性较差,属于 V 级围岩。

## 1.2 支护结构设计

隧道支护结构为复合式衬砌,跨度 9.4 m,高度 8.0 m;隧道初支采用厚度为 25 cm 的 C25 喷射混凝土,二衬采用厚度为 40 cm 的 C25 模筑混凝土。

## 2 研究情况

### 2.1 计算模型

依托友谊隧道 F1 黏滑断层段建立计算模型,隧道埋深为 40 m,隧底围岩厚 40 m,左右两侧宽度取 5 倍隧道跨度约 60 m,纵向开挖长度 100 m,断层错动距离为 10 cm。本文主要研究上下盘岩体中隧道结构受黏滑断层错动作用的影响及对策,对破碎带段围岩及结构不做研究,加之破碎带较窄,故简化为平面。计算模型如图 2 所示。错动模拟采用的边界条件是以下盘为固定盘,以上盘为活动盘,通过在上盘施加位移荷载来模拟断层错动。

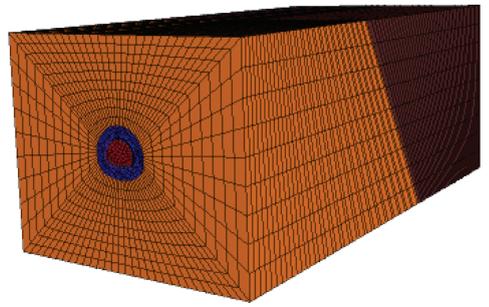


图 2 计算模型

Fig.2 Calculation model

### 2.2 计算工况

为研究黏滑断层隧道采用刚柔并济抗减错措施的抗减错效果,隧道二衬分别采用 C25 ( $E$  为 28 GPa)和 C35 ( $E$  为 31.5 GPa)混凝土,在初支与二衬间设施减错层。计算工况列于表 1。

表 1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

工况	计算内容
1	二衬混凝土为 C25,不设减错层
2	二衬混凝土为 C35,不设减错层
3	二衬混凝土为 C25,初支与二衬之间设施减错层
4	二衬混凝土为 C35,初支与二衬之间设施减错层

### 2.3 计算参数

施工中减错层一般采用橡胶板,厚度取 10 cm<sup>[13]</sup>;围岩根据勘测资料选取 V 级围岩。计算模型物理学参数列于表 2。

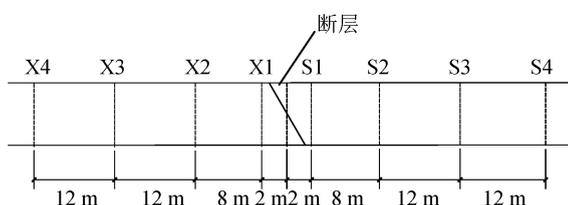
### 2.4 监测布置

监测布置如图 3 所示。

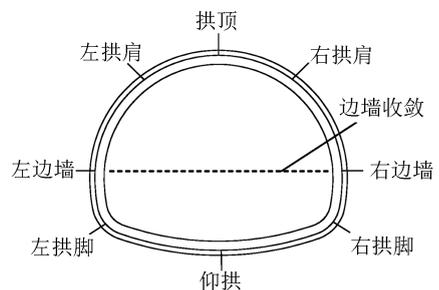
表 2 计算模型参数

Table 2 Parameters of calculation model

参数	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
围岩	20	1.5	0.4	0.1	24
C25 喷射混凝土	22	23	0.2	-	-
C25 模筑混凝土	25	28	0.2	-	-
减错层	10	0.3	0.45	0.5	5



(a) 监测断面布置



(b) 测点布置

图 3 监测布置

Fig.3 Arrangement of monitoring

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 结构位移

提取各 X1、S1 黏滑错动完成时监测断面计算数据,进行结构位移分析。

##### 3.1.1 拱顶沉降

各监测断面的拱顶沉降列于表 3。

表 3 监测断面拱顶沉降(单位:m)

距断层距离 /m	工况			
	1	2	3	4
-2	0.282	0.279	0.187	0.181
2	0.353	0.352	0.234	0.229

注:上盘距断层距离为正,下盘距断层为负

由表 3 可知:

(1) 各工况靠近断层监测断面上盘拱顶沉降均大于下盘拱顶沉降,其中工况 1 靠近断层监测断面拱顶沉降最大,分别为 0.282 m、0.353 m。

(2) 工况 2 相对于工况 1,拱顶沉降略微减小,说明结构加强对拱顶沉降的控制效果一般。

(3) 工况 3 相对于工况 1、工况 4 相对于工况 2,拱顶沉降明显减小,抗减错效果分别达到 33% 以上。

(4) 工况 4 靠近断层监测断面拱顶沉降最小,分别为 0.181 m、0.229 m,相对于工况 1 抗减错效果达到 36% 以上,因此可知,采用刚柔并济抗减错措施能有效控制隧道拱顶沉降。

##### 3.1.2 边墙收敛

各监测断面的边墙收敛值列于表 4。

表 4 监测断面边墙收敛值(单位:m)

Table 4 The sidewall convergence of monitoring section (Unit:m)

距断层距离 /m	工况			
	1	2	3	4
-2	0.016	0.015	0.013	0.011
2	0.023	0.021	0.017	0.016

由表 4 可知:

(1) 各工况靠近断层监测断面上盘边墙收敛均大于下盘边墙收敛。

(2) 工况 2 相对于工况 1,边墙收敛略微减小,说明结构加强对边墙收敛的控制效果一般。

(3) 工况 3 相对于工况 1、工况 4 相对于工况 2,边墙收敛明显减小,抗减错效果分别达到 20% 以上。

(4) 工况 4 靠近断层监测断面边墙收敛最小,分别为 0.011 m、0.016 m,相对于工况 1 的抗减错效果达到 30% 以上,因此可知,采用刚柔并济抗减错措施能有效控制隧道边墙收敛。

#### 3.2 结构内力

提取各工况黏滑错动完成时各监测断面计算数据,进行内力分析。

##### (1) 轴力

各监测断面最大轴力值列于表 5。

表 5 监测断面最大轴力(单位:kN)

Table 5 Maximum axial force of monitoring section (Unit:kN)

工况	距断层距离/m							
	-34	-22	-10	-2	2	10	22	34
1	-2 200	-6 468	-9 754	-14 884	-13 376	-13 341	-9 551	-3 702
2	-2 656	-7 263	-10 782	-16 400	-14 700	-14 564	-10 793	-4 512
3	-2 484	-3 917	-5 738	11 195	11 878	-8 436	-5 116	-2 363
4	-2 770	-4 381	-6 153	11 369	12 487	-9 196	-5 765	-2 686

注:距断层距离正值为上盘,负值为下盘,其他同理。

由表 5 可知,工况 1、2 各监测断面最大轴力均呈现压应力状态,且沿隧道纵向分布趋势相似,最大轴力值均出现在下盘靠近断层断面,其中工况 1 值为 -14 884 kN,工况 2 值为 -16 400 kN。工况 3、4 靠近断层断面(X1、S1)最大轴力呈现拉应力状态,其余各监测断面最大轴力均呈现压应力状态;两工况最大轴力值均出现在上盘靠近断层断面,其中工况 3 值为 11 878 kN,工况 4 值为 12 487 kN。随着上下盘断面与断层的距离增大,断面最大轴力呈下降趋势。

从数值上整体来看,工况 2 监测断面最大轴力值大于工况 1,工况 4 的则大于工况 3,说明通过结构加强不能降低隧道结构所受最大轴力;工况 3 监测断面最大轴力值小于工况 1,工况 4 的则小于工况 2,说明通过设施减错层能有效降低隧道结构所受最大轴力;工况 4 监测断面最大轴力值远小于工况 1,说明采用刚柔并济抗减错措施能有效降低隧道结构所受最大轴力。

##### (2) 弯矩

各监测断面最大弯矩值列于表 6。

由表 6 可知,各工况监测断面最大弯矩值均出现在下盘靠近断层断面,其中工况 2 最大,值为 -240.5 kN·m,工况 3 次之,值为 236.0 kN·m,工况 1 最小,值为 -217.6 kN·m。随着监测断面与断层的距离增大,工况 1、2 隧道下盘最大弯矩呈下降趋

势,上盘最大弯矩先下降然后上升;工况 3、4 隧道上下盘最大弯矩均呈下降趋势。工况 1、2 监测断面最大弯矩均表现为外侧受拉;工况 3、4 下盘靠近断层断面处表现为内侧受拉,其余均表现为外侧受拉。

表 6 监测断面最大弯矩(单位:kN·m)

Table 6 Maximum bending moment of monitoring section (Unit:kN·m)

工况	距断层距离/m							
	-34	-22	-10	-2	2	10	22	34
1	-24.5	-60.2	-142.1	-217.6	-185.0	-121.9	-45.1	-126.7
2	-29.2	-67.6	-157.6	-240.5	-205.3	-137.2	-52.4	-135.6
3	-48.0	-88.0	-155.0	236.0	-182.0	-165.0	-114.0	-91.0
4	-55.0	-99.8	-173.3	234.1	-206.3	-184.1	-127.3	-101.4

从数值上整体来看,工况 2 监测断面最大弯矩值大于工况 1,工况 4 监测断面最大弯矩值大于工况 3,说明通过结构加强不能降低隧道结构所受最大弯矩;工况 3 监测断面最大弯矩值大于工况 1,说明通过设施减错层不能降低隧道结构所受最大弯矩;工况 4 监测断面最大弯矩值远大于工况 1,说明采用刚柔并济抗减错措施不能降低隧道结构所受最大弯矩。

### (3) 结构安全系数

提取各工况错动完成时各监测断面计算数据进行安全系数分析,衬砌结构安全系数按照式(1)~

(2) 计算<sup>[14]</sup>,各工况监测断面最小安全系数列于表 7。根据安全系数计算平均抗减错效果,如表 8 所列。

安全系数:

$$KN \leq \varphi \alpha R_a bh \quad (1)$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_1 bh}{6e_0/h - 1} \quad (2)$$

式中: $b$  为截面宽度,取 1 m; $h$  为截面厚度; $E$  为弹性模量; $N$  为结构轴力; $R_a$  为混凝土抗压极限强度; $R_1$  为混凝土抗拉极限强度; $K$  为安全系数; $\varphi$  为构件纵向弯曲系数; $\alpha$  为轴向力偏心影响系数。

表 7 监测断面最小安全系数

Table 7 Minimum safety factor of monitoring section

工况	距断层距离/m							
	-34	-22	-10	-2	2	10	22	34
1	5.68	1.93	1.28	0.84	0.93	0.94	1.31	3.38
2	6.59	2.41	1.62	1.06	1.19	1.20	1.62	3.88
3	3.08	3.19	2.17	1.12	1.06	1.11	2.44	5.29
4	3.43	4.00	2.84	1.54	1.40	1.90	3.04	6.51

表 8 平均抗减错效果

Table 8 Average effect of anti-reducing dislocation

工况	2	3	4
平均抗减错效果/(%相对工况 1)	23.46	37.15	81.27
平均抗减错效果/(%相对工况 2)	-	10.91	46.25
平均抗减错效果/(%相对工况 3)	-	-	32.01

由表 7 可知,各工况监测断面最小安全系数沿隧道纵向分布趋势相似,最小值均出现在靠近断层断面(X1、S1),其中工况 1 最小,值为 0.84,工况 2、3 次之,均为 1.06,工况 4 最大,值为 1.40。随着上下盘断面与断层的距离增大,断面最小安全系数整体呈增大趋势,且距离断层同间距下,上盘安全系数整体较下盘小,断层黏滑错动对隧道上盘的影响远大于下盘。

从数值上整体来看,工况 2、3 监测断面最小安全系数值大于工况 1,其中工况 3 远大于工况 2,说明通过设施减错层消减断层黏滑错动对隧道结构的影响优于结构加强措施抵抗其影响;工况 4 监测断面最小安全系数值远大于工况 1,说明采用刚柔并济抗减错措施抵抗及消减断层黏滑错动的作用方面效果显著。

由表 8 可知,从平均抗减错效果来看,工况 2 相

对工况 1 平均抗减错效果为 23.46%, 工况 4 相对工况 3 平均抗减错效果为 32.01%, 即采用结构加强措施抵抗断层黏滑错动的平均抗减错效果在 23%~33% 间; 工况 3 相对工况 1 平均抗减错效果为 37.15%, 工况 4 相对工况 2 平均抗减错效果为 46.25%, 即设置减错层有利于消减断层黏滑错动对隧道结构的影响, 平均抗减错效果在 37%~47% 间, 优于结构加强措施; 同时采用刚柔并济抗减错措施在抵抗及消减断层黏滑错动影响方面效果显著, 平均抗减错效果为 81.27%。

## 4 结论

(1) 采用结构加强抵抗断层黏滑错动对隧道结构位移影响较小, 对结构内力的影响较大, 其平均抗减错效果在 23%~33% 间。

(2) 采用设置减错层消减断层黏滑错动对隧道拱顶沉降、边墙收敛的抗减错效果分别达到 20% 以上, 对其结构内力的影响平均抗减错效果在 37%~47% 间。

(3) 刚柔并济抗减错措施在抵抗及消减断层黏滑错动影响方面效果显著, 拱顶沉降、边墙收敛抗减错效果分别达到 30% 以上, 结构内力平均抗减错效果达到 80% 以上。

## 参考文献 (References)

[1] 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): 336-341, 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): 336-341, 374.

[2] 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 Guangyao, WANG Mingnian, LIN Guojin, 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.

[3] 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.

[4] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 汶川地震断层破碎带段隧道结构震害分析及震害机理研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 122-127.  
CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Study on the

Characteristics and Mechanism of Seismic Damage for Tunnel Structures on Fault Rupture Zone in Wenchuan Seismic Disastrous Area[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 122-127.

- [5] 王道远, 李粮余, 袁金秀, 等. 逆断层黏滑错动下隧道抗错断力学机制研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 62-66.  
WANG Daoyuan, LI Liangyu, YUAN Jinxiu, et al. Research on the Mechanical Response of Dislocation Fracture of Tunnel under Stick-Slip of Reverse Fault[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(6): 62-66.
- [6] 伍修刚. 强震区黏滑断层隧道破坏机理及控制技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2019.
- [7] 徐前卫, 程盼盼, 朱合华, 等. 跨断层隧道围岩渐进性破坏模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 433-445.  
XU Qianwei, CHENG Panpan, ZHU Hehua, et al. Experimental Study and Numerical Simulation on Progressive Failure Characteristics of the Fault-Crossing Tunnel Surrounding Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 433-445.
- [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] 林亮伦. 正断层粘滑错动对山岭隧道影响的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [10] 蒋建平, 章杨松. 正断层倾角变化对其下盘隧道围岩影响的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 596-601.  
JIANG Jianping, ZHANG Yangsong. Study on the Influence of Dip Angles of Normal Fault on Tunnel Surrounding Rocks in the Fault Footwall[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(4): 596-601.
- [11] 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 Xuezeng, LIN Lianglun. 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): 2523-2530.
- [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 Xuezeng, WANG Xulin, LIN Lianglun. 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.
- [13] 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 Chunlei, GAO Bo, WANG Yingxue, 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.

- [26] 中华人民共和国铁道部.铁路工程抗震设计规范:GB 50111-2006[M].2009 年版.北京:中国计划出版社,2009.
- [27] 雷晓燕.轨道动力学模型与数值方法研究进展[J].华东交通大学学报,2011,28(3):1-12.  
LEI Xiaoyan.Progress in the Development of Track Dynamic Models and Associated Numerical Methods[J].Journal of East China Jiaotong University,2011,28(3):1-12.
- [28] 边学成,陈云敏.列车荷载作用下轨道和地基的动响应分析[J].力学学报,2005,37(4):477-484.  
BIAN Xuecheng,CHEN Yunmin.Dynamic Analysis of Track and Ground Coupled System with High-speed Train Loads [J].Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechani, 2005,37(4):477-484.
- [29] 何俊锋.2.5 维有限元法分析列车运行引起的地面动力特性及沉降[D].上海:同济大学,2009.  
HE Junfeng.Analyses of Ground Dynamic Responses and Settlement by 2.5D FEM for Moving Trains [D]. Shanghai: Tongji University,2009.

\*\*\*\*\*  
(上接第 385 页)

- [14] 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.
- [15] 崔光耀,伍修刚,王明年,等.黏滑断层隧道减错措施参数对减错效果的影响分析[J].震灾防御技术,2018,13(3):502-511.  
CUI Guangyao,WU Xiugang,WANG Mingnian,et al.Analysis of Influence of Parameters of Reducing Measures on the Effect of Reducing Dislocation on Tunnels Crossing Stick-Slip Faults[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018,13(3):502-511.
- [16] 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 Guangyao,WANG Mingnian,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.
- [17] 中华人民共和国交通部.公路隧道设计规范:JTG D70—2004 [S].北京:人民交通出版社,2004,  
Ministry of Transport of the People's Republic of China.Ministry of Transport of the People's Republic of China.Code for Design of Road Tunne: JTG D70—2004 [S]. Beijing: China Communications Press,2004.