

文章编号:1671-8879(2015)02-0107-07

断层破碎带段隧道结构二衬 防垮塌抗震配筋技术

崔光耀¹, 赵 清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 土木工程学院, 四川 成都 610031;
3. 四川省交通厅 公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:为改变断层破碎带段隧道结构抗震“大震偏弱”的现状,提出了二衬防垮塌单层配筋抗震技术,并建立了断层破碎带段隧道结构二衬防垮塌抗震配筋准则。在汶川地震隧道震害资料分析的基础上,主要采用有限差分数值模拟技术,对罕遇烈度情况下错动断层与非错动断层 2 种情况进行研究,确定了断层破碎带段隧道结构二衬防垮塌抗震配筋等级及范围。研究表明:断层错动条件下,上盘距离断层 $2D$ (隧道跨度 D) 范围内和下盘距离断层 $1.5D$ 范围内,二衬需双层配筋;上盘距断层 $2D \sim 3D$ 范围内和下盘距离断层 $1.5D \sim 2.5D$ 范围内,二衬需采用单层配筋。非错动断层条件下,设防烈度 7 度时,无需采用抗减震措施进行设防;设防烈度 8 度时,两侧距断层 $1D$ 范围内需采用单层配筋;设防烈度 9 度时,两侧距断层约 $2.5D$ 范围内需采用单层配筋。研究成果对断层破碎带段隧道结构抗减震技术的发展具有重要意义。

关键词:隧道工程;防垮塌抗震配筋技术;单层配筋;断层破碎带段隧道结构;罕遇烈度

中图分类号:U451 **文献标志码:**A

Aseismic reinforcement technology of second liner collapse control of tunnel structure in fault rupture zone

CUI Guang-yao¹, ZHAO Qing¹, WANG Ming-nian², LIN Guo-jin³

(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. Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications
Department, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to change the weak aseismic behavior of tunnel structure in fault rupture zone under large earthquakes, the aseismic reinforcement technology of second liner collapse control was proposed. And the aseismic reinforcement criterion of second liner collapse control of tunnel structure of fault rupture zone was established. This paper studies the fault movement and fault non-movement on the case of rare earthquake by using the finite difference numerical simulation technology based on the data analysis of tunnel damage of the earthquake in Wenchuan. And the aseismic reinforcement scope and level of second liner collapse control of tunnel structure of fault

收稿日期:2014-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51408008);国家“十二五”科技支撑项目(2012BAK09B06);

交通运输部西部交通建设科技项目(2008 318 000 26, 2008 318 000 98)

作者简介:崔光耀(1983-),男,山东莒南人,讲师,工学博士,E-mail:cyao456@163.com。

rupture zone were determined. The results show that second liner needs to apply double-layer reinforcement between $2D$ section from hanging fault and $1.5D$ section from footwall fault under the condition of fault movement. And second liner needs to apply monolayer reinforcement between $2D$ to $3D$ section from hanging fault and $1.5D$ to $2.5D$ section from footwall fault. Under fault non-movement conditions, second liner needs not to apply anti-seismic and seismic-relieving measures at the earthquake intensity of 7 degree; second liner needs to apply monolayer reinforcement between $1D$ section from side fault at the earthquake intensity of 8 degree; second liner needs to apply double-layer reinforcement between $2.5D$ section from side fault at the earthquake intensity of 9 degree. These results are significant to the anti-seismic and seismic-relieving technology development of tunnel structure in fault rupture zone. 5 tabs, 14 figs, 14 refs.

Key words: tunnel engineering; aseismic reinforcement technology of collapse control; monolayer reinforcement; tunnel structure in fault rupture zone; rare earthquake intensity

0 引言

穿越断层隧道其断层破碎带段隧道结构是抗震设防的重点部位。按活动方式,断层分为活动断层和非活动断层 2 种^[1-2]。

中国公路隧道抗震设防现行规范是《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004—89),规范中未规定隧道断层破碎带段为抗震设防地段^[3]。中国铁路隧道抗震设防现行规范是《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006),规范中规定了隧道断层破碎带段为抗震设防地段,但未明确抗震设防范围^[4]。目前,公路或铁路隧道断层破碎带段均采用复合式衬砌,二衬双层配筋(受力配筋)进行抗震设防,设防段长度依工程地质情况及设计经验确定。

汶川地震前,中国隧道未经历过破坏性地震的考验。隧道遭遇的一般为多遇烈度或设防烈度地震,隧道断层破碎带段均为轻微震害或无震害,震时无断层错动情况发生^[5]。汶川地震中,中国隧道首次出现了严重破坏的震害,龙溪隧道 F8 断层震时发生错动,引起围岩垮塌,导致隧道堵塞。断层破碎带两侧衬砌垮塌严重^[6-7]。

由上可知,多遇烈度或设防烈度情况下,现行隧道抗震设防设计是偏于安全的;罕遇烈度情况下,活动断层易发生错动,引起严重震害,断层两侧发生大面积二衬垮塌,危害洞内人员和车辆安全。也即现行断层破碎带段隧道结构抗震处于“大震偏弱”的状态。隧道断层破碎带大震时易发生错动,需采取抗震与减震相结合的措施进行设防,尽可能减少垮塌范围,减小垮塌程度;断层破碎带两侧需采用何种措施进行设防,才能达到大震时不发生二衬垮塌,这是

一个难点。为解决这一问题,引入单层配筋抗震技术,与传统的双层配筋抗震技术相配合,共同进行抗震设防设计。

目前,用于断层破碎带段隧道结构的工程抗震措施主要有:注浆加固围岩、提高衬砌刚度、采用新型衬砌材料等。例如,王铮铮等采用非线性理论对跨断层段隧道结构减震层减震技术进行了研究^[8-9];王明年等采用振动理论和波动理论建立了隧道减震模型,并对减震层减震原理进行了研究^[10-11];崔光耀等采用大型振动台模型试验方法对穿越黏滑断层段隧道结构减震缝及减震层减震技术进行了研究^[12-13];王明年等采用数值分析对围岩注浆加固技术及钢纤维混凝土衬砌材料抗震技术进行了研究^[2,14]。但是,对罕遇烈度情况下断层破碎带段隧道结构的抗减震技术研究很少。为此,本文依托汶川地震隧道震害,采用双层配筋和单层配筋相配合的抗震配筋技术,对罕遇烈度情况下断层破碎带段隧道结构二衬防垮塌抗震配筋技术进行研究,这对断层破碎带段隧道结构抗减震技术的发展具有重要的意义。

1 断层破碎带段隧道结构防垮塌抗震配筋准则

1.1 断层破碎带段隧道结构

采用对隧道逐段绘制震害展示图的方法,展开对汶川地震隧道震害的调查。通过研究断层破碎带及其附近段震害展示图发现,断层破碎带及两侧一定范围比临近区段震害类型严重、震害面积明显增加。在震害展示图上将此范围标示出来,此范围称为断层破碎带震害影响段隧道结构,简称“断层破碎

带段隧道结构”,如图 1 所示。

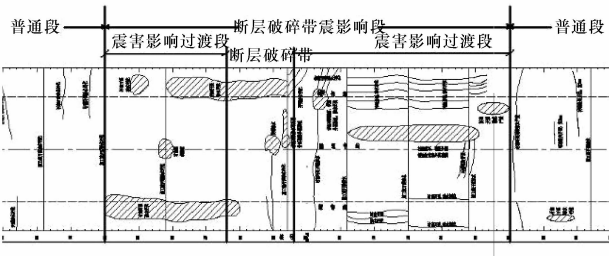


图 1 隧道断层破碎带震害影响段
Fig. 1 Seismic damage section of tunnel in fault rupture zone

1.2 单层配筋

单层配筋指仅在二衬临空面侧布置钢筋,其作用主要是环箍和拉扯震时碎裂的混凝土块,尽可能减小震时二衬垮塌的范围和程度,保护洞内人员和车辆的安全。单层配筋与双层配筋的区别:单层配筋是构造配筋;双层配筋是受力配筋。单层配筋构造示意如图 2 所示。

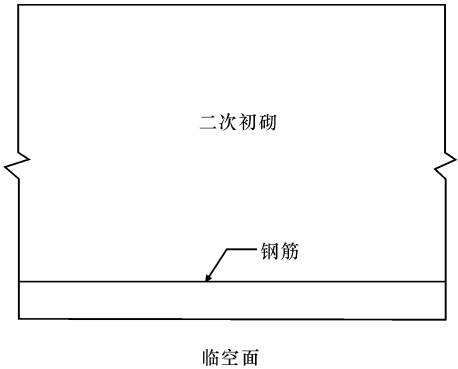


图 2 二衬单层配筋示意
Fig. 2 Monolayer reinforcement sketch of second liner

1.3 防垮塌抗震配筋准则

中国公路和铁路隧道抗震设防现行规范对二衬结构强度验算要求是一致的,见表 1^[3-4]。

表 1 结构强度安全系数
Tab. 1 Safety factor of structural strength

破坏原因	荷载组合	
混凝土或石砌体达到抗压极限强度	1.8	2.0
混凝土达到抗拉极限强度	2.5	
钢筋达到设计强度或混凝土达到抗压极限强度	1.5	
混凝土达到抗拉极限强度(主拉应力)	1.8	

由表 1 可知,当衬砌结构安全系数大于素混凝土规定值时,不需要采取抗减震措施进行设防;当衬砌结构安全系数小于素混凝土规定值,同时大于钢筋混凝土规定值时,需采用二衬横向单层配筋并结合现行拱部纵向构造配筋方式进行抗震设防;当衬

砌结构安全系数小于钢筋混凝土规定值时,需采用二衬双层配筋进行抗震设防。故断层破碎带段隧道结构二衬防垮塌抗震配筋准则如表 2 所示。

表 2 二衬防垮塌抗震配筋准则
Tab. 2 Aseismic reinforcement criteria of second liner collapse control

级别	分级标准(受拉控制)	分级标准(受压控制)	采取措施
A	安全系数>2.5	安全系数>1.8	不配筋
B	1.8<安全系数≤2.5	1.5<安全系数≤1.8	单层配筋
C	安全系数≤1.8	安全系数≤1.5	双层配筋

级别 B 采取横向单层配筋与拱部纵向构造配筋相结合的配筋技术,主要目的是:在多遇烈度或设防烈度地震情况下,可满足结构安全的设防目的;在罕遇烈度地震情况下,可实现防止二衬垮塌,危害震时洞内人员和车辆安全的目的。

2 研究情况

2.1 计算模型及参数

为了分析断层破碎带段隧道结构二衬抗震配筋(双层配筋和单层配筋)适用范围,建立三维计算模型,采用有限差分数值计算方法进行计算分析。计算模型长 200 m,宽 80 m,隧道顶至模型顶面为 100 m,隧道仰拱至模型底面 40 m,隧道跨度 10 m。断层破碎带宽 1 m,与隧道正交,倾角为 82°,断层处于模型中部,如图 3 所示。

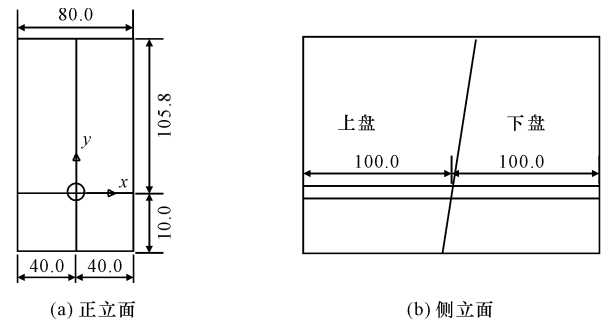


图 3 计算模型示意
Fig. 3 Sketch of calculation model

隧道初支厚 20 cm,为 C20 喷射混凝土;二衬厚 40 cm,为 C25 模注混凝土。断层破碎带为 V 级围岩,断层两侧为 IV 级围岩。初支与岩体采用实体单元模拟,二衬采用 SHELL 壳单元模拟。计算模型物理力学参数见下页表 3。表中 γ 为重度, c 为黏聚力, φ 为摩擦角, E 为弹性模量, μ 为泊松比。

计算模型采用 Mohr-Coulomb 强度准则、理想弹塑性本构模型、自由场边界以及 Rayleigh 阻尼。Rayleigh 阻尼基频 ω_{\min} 为 7.2 Hz,临界阻尼比 ξ_{\min}

表 3 计算模型物理力学参数

Tab. 3 Physico-mechanical parameters of model					
地层名称	材料参数				
	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/MPa	μ
Ⅳ级围岩	22	600	35	5 000	0.33
Ⅴ级围岩	20	50	20	1 000	0.45
初期支护	22			23 000	0.20
二次衬砌	25			31 000	0.20

为 0.05。

2.2 计算工况

在引起穿越错动断层隧道震害的因素中,断层错动是主要因素,地震震动为次要因素^[1-2]。故对震时发生断层错动的断层破碎带段隧道结构二衬抗震配筋技术研究,仅考虑断层错动因素。根据烈度概率分布分析,设防烈度比多遇烈度大 1.55 度,罕遇烈度比设防烈度大 1 度^[1-2]。

故研究断层破碎带段隧道结构二衬抗震配筋适用范围的计算工况见表 4。

表 4 计算工况

Tab. 4 Calculation condition

序号	断层是否错动	错动量/cm	
J-1	错动	5	
序号	断层是否错动	设防烈度/度	计算输入烈度(罕遇烈度)/度
J-2	不错动	7	8
J-3		8	9
J-4		9	10

断层错动的实现:经计算,给予上盘岩体水平和竖直向运动速度分别为 V_1 和 V_2 ,在 V_1 和 V_2 的作用下,上盘岩体将沿断层倾角方向,相对于下盘岩体做向上的错动。错动为粘滑错动,迅速完成。

2.3 地震动参数

选用 5.12 汶川 8.0 级地震卧龙测站地震波,按 8、9、10 度烈度进行标准化,并截取 5~45 s 地震波(能量占 90%以上)进行基线校正。基线校正后的加速度时程曲线如图 4 所示(以 9 度为例)。

2.4 监测断面及测点

计算模型每隔 10 m 设置监测断面,共设 21 个监测断面,如图 5 所示;每断面设 8 个测点,如下页图 6 所示。

3 断层破碎带段隧道结构防垮塌抗震配筋适用范围

3.1 错动断层

提取每个监测断面各测点的轴力和弯矩时程曲线,计算出每个监测断面各测点的最小安全系数时程曲线,挑选出每个监测断面最小安全系数的最小

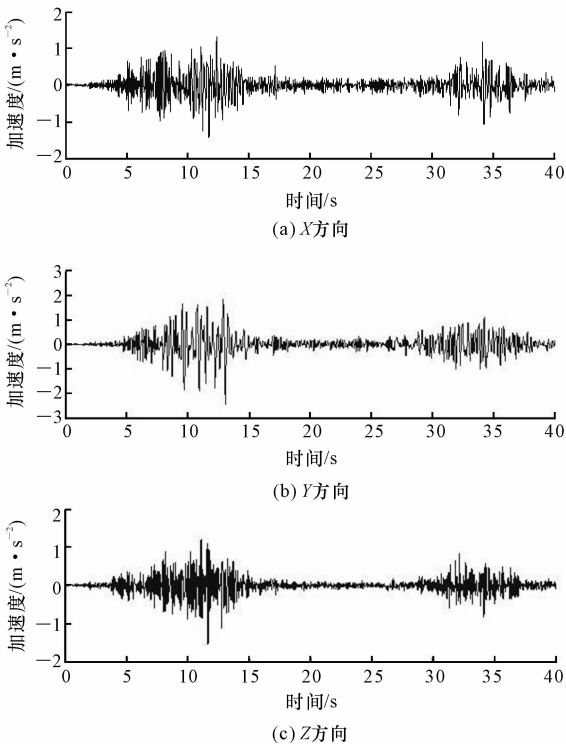


图 4 加速度时程曲线

Fig. 4 Acceleration-time curve

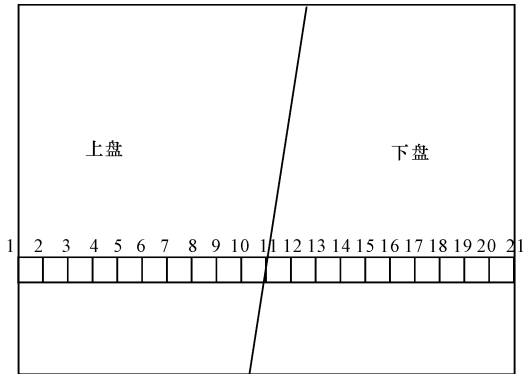


图 5 监测断面布置

Fig. 5 Arrangement of testing section

值,绘制各监测断面最小安全系数最小值沿隧道纵向分布图,如下页图 7、图 8 所示。

由图 7、图 8 可知,断层错动后,上盘隧道距断层 18 m 范围内和下盘隧道距断层 12 m 范围内衬砌安全系数小于素混凝土规定值,二衬需双层配筋进行抗震设防。由于断层错动能量巨大,单靠抗震技术不能完全解决,须采取一定的减震措施(如设置减震缝、减震层等)相配合进行共同防治。

断层错动后,上盘隧道距断层 18~31 m 范围内和下盘隧道距离断层 12~26 m 范围内衬砌安全系数介于钢筋混凝土和素混凝土规定值之间,需采用单层配筋抗震措施。

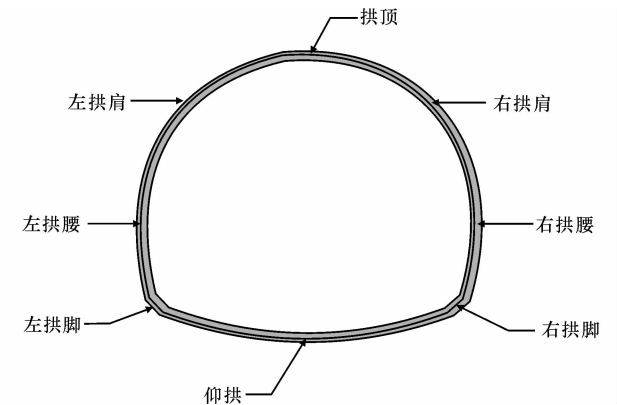


图 6 监测点示意

Fig. 6 Arrangement of measuring point

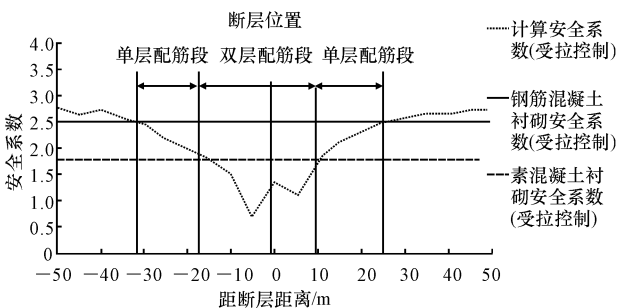


图 7 受拉控制(断层错动)

Fig. 7 Tension control (fault movement)

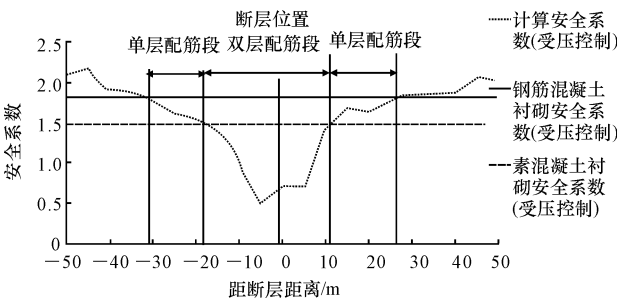


图 8 受压控制(断层错动)

Fig. 8 Compression control (fault movement)

3.2 非错动断层

3.2.1 设防烈度 7 度

设防烈度 7 度时,各监测断面最小安全系数最小值沿隧道纵向分布,见图 9、图 10。

由图 9、图 10 可知,设防烈度 7 度条件下,二衬动力安全系数均大于素混凝土规定值,无需采用抗震措施进行设防。

3.2.2 设防烈度 8 度

设防烈度 8 度时,各监测断面最小安全系数最小值沿隧道纵向分布,见图 11、图 12。

由图 11、图 12 可知,设防烈度 8 度条件下,两侧距断层约 10 m 范围内衬砌动力安全系数介于钢筋混凝土和素混凝土规定值之间,需采用单层配筋

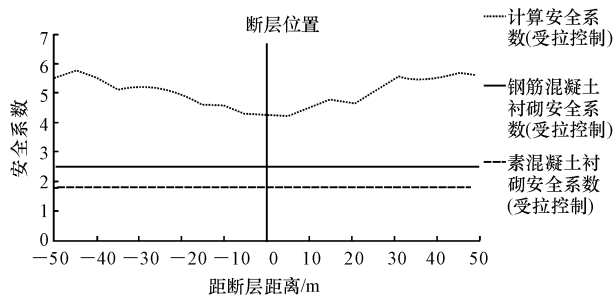


图 9 受拉控制(设防烈度 7 度)

Fig. 9 Tension control (7 degree seismic intensity)

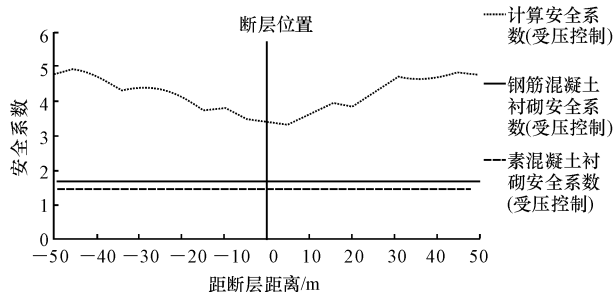


图 10 受压控制(设防烈度 7 度)

Fig. 10 Compression control (7 degree seismic intensity)

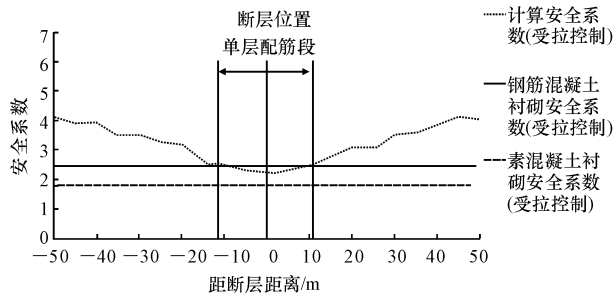


图 11 受拉控制(设防烈度 8 度)

Fig. 11 Tension control (8 degree seismic intensity)

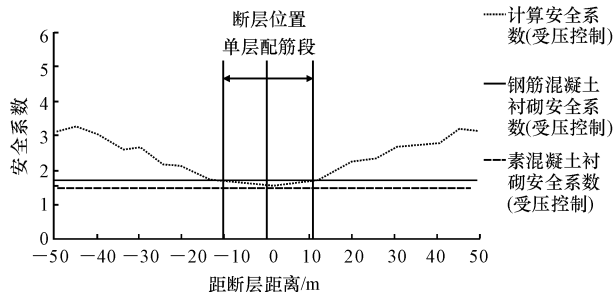


图 12 受压控制(设防烈度 8 度)

Fig. 12 Compression control (8 degree seismic intensity)

抗震措施。

3.2.3 设防烈度 9 度

设防烈度 9 度时,各监测断面最小安全系数最小值沿隧道纵向分布,见下页图 13、图 14。

由图 13、图 14 可知,设防烈度 9 度条件下,两侧距断层约 25 m 范围内衬砌动力安全系数介于钢

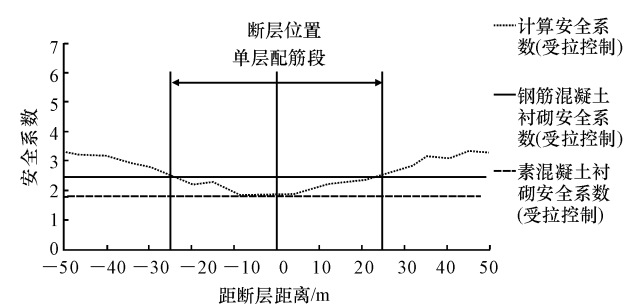


图 13 受拉控制(设防烈度 9 度)

Fig. 13 Tension control (9 degree seismic intensity)

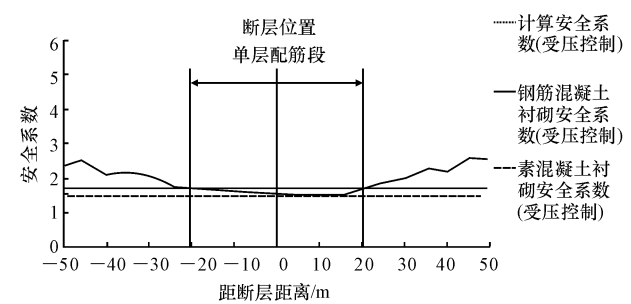


图 14 受压控制(设防烈度 9 度)

Fig. 14 Compression control (9 degree seismic intensity)

筋混凝土和素混凝土规定值之间,需采用单层配筋抗震措施。

3.3 适用范围

综合考虑断层破碎带段隧道结构抗震设防的安全性及施工方便性,断层破碎带段隧道结构二衬防垮塌抗震配筋适用范围见表 5。

表 5 二衬防垮塌抗震配筋适用范围

Tab. 5 Aseismic reinforcement scope of second liner collapse control			
是否错动	设防烈度/度	断层破碎带	断层震害影响过渡段 (D 为隧道跨度)
错动		双层配筋	上盘 2D 范围内双层配筋, 2.0D~3.5D 范围内单层配筋; 下盘 1.5D 范围内双层配筋, 1.5D~3.0D 范围内单层配筋
非错动	7		
	8	单层配筋	1.0D 范围内单层配筋
	9	单层配筋	2.5D 范围内单层配筋

4 结 语

(1)提出了隧道二衬防垮塌单层配筋抗震技术。建立了断层破碎带段隧道结构二衬防垮塌抗震配筋准则。

(2)断层错动条件下,上盘距离断层 2D 范围内和下盘距离断层 1.5D 范围内,二衬需双层配筋并采取一定的减震措施相配合进行共同设防;上盘距断层 2D 至 3D 范围内和下盘距断层 1.5D 至

2.5D 范围内,二衬需采用单层配筋进行抗震设防。
(3)非错动断层条件下:① 设防烈度 7 度情况下,断层破碎带段隧道结构无需采用抗减震措施进行设防;② 设防烈度 8 度情况下,两侧距断层 1D 范围内需采用单层配筋抗震措施;③ 设防烈度 9 度情况下,两侧距断层约 2.5D 范围内需采用单层配筋抗震措施。
(4)本文对断层破碎带段隧道结构二衬防垮塌单层配筋技术进行了探索和现场应用,二衬防垮塌单层配筋的力学机理及构造要求还需进一步研究。

参考文献:
References:

[1] 崔光耀. 隧道洞口浅埋段和断裂粘滑段抗震设计计算方法及试验研究[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)
[2] 王明年,于 丽,林国进,等. 公路隧道抗震与减震[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)
[3] JTJ 004—89, 公路工程抗震设计规范 [S].
JTJ 004—89, Specifications of earthquake resistant design for highway engineering[S]. (in Chinese)
[4] GB 50111—2006, 铁路工程抗震设计规范 [S].
GB 50111—2006, Code for seismic design of railway engineering[S]. (in Chinese)
[5] 王照华,唐建华,宋宏伟. 隧道震害特征及其影响因素[J]. 山西建筑,2007,33(11):263-264.
WANG Zhao-hua, TANG Jian-hua, SONG Hong-wei. Study on tunnel performances due to seismic damage and influencing factors [J]. Shanxi Architecture, 2007,33(11):263-264. (in Chinese)
[6] 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)
[7] 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)
- [8] 王铮铮. 跨断层隧道结构非线性地震损伤反应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- WANG Zheng-zheng. Nonlinear seismic damage response of tunnel structure across fault[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [9] Wang Z Z, Gao B, Jiang Y J, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(2): 546-558.
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 孙铁成, 高波, 叶朝良. 地下结构抗震减震措施与研究方法探讨[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(3): 1-5, 10.
- SUN Tie-cheng, GAO Bo, YE Zhao-liang. Discussion on anti-seismic and seismic-relieving measures and corresponding research methods for underground structures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(3): 1-5, 10. (in Chinese)
-
- (上接第96页)
- ZHOU Xiao-yu, CHEN Ai-rong, MA Ru-jin. Numerical simulation of energy dissipation mechanism on falling rocks protection nets[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(6): 61-66. (in Chinese)
- [6] Philippe B R, Yehya T, Laurent D, et al. Finite element modeling of concrete protection structures submitted to rock impact[C]//ASCE. 16th ASCE Engineering Mechanics Conference. Seattle: ASCE, 2003: 267-279.
- [7] Nicot F, Cambou B, Mazzoleni G. Design of rockfall restraining nets from a discrete element modelling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(2): 99-118.
- [8] Spadari M, Giacomini A, Buzzi O, et al. Prediction of the bullet effect for rockfall barriers: a scaling approach. [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(10): 131-144.
- [9] Del C, Garca N, Castroresno D, et al. Non-linear analysis of cable networks by FEM and experimental validation[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2009, 86(2): 301-313.
- [10] Paola B, Claudio O, Daniele P. Full-scale testing of draped nets for rock fall protection [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(3): 306-317.
- [11] Daniel C F, Luisq, Elena B F, et al. Design and evaluation of two laboratory tests for the nets of a flexible anchored slope stabilization system[J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, 32(4): 1-10.
- [12] 杜正国, 蒯安林, 刘荣华, 等. 结构力学教程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- DU Zheng-guo, LIN An-lin, LIU Rong-hua, et al. Structural mechanics[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006. (in Chinese)
- [13] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 基于落石计算的半刚性拦石墙设计[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 17-22.
- YE Si-qiao, CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Design of semi-rigid rockfall barrier wall based on rockfall simulation[J]. China Railway Science, 2008, 29(2): 17-22. (in Chinese)
- [14] Livermore software technology corporation (LSTC). LS-DYNA keyword user's manual volume I [R]. Livermore: LSTC, 2007.