

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.15

地震高烈度区隧道软硬围岩交接段减震层 减震效果分析

崔光耀¹, 麻建飞¹, 肖 剑²

(1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 2. 中冶交通建设集团有限公司, 北京 100011)

摘要:为提高位于地震高烈度区隧道软硬围岩交接段的抗震性能,本文以某铁路隧道为研究背景,利用有限元差分软件FLAC^{3D}对隧道软硬围岩交接段不同位置设施减震层的减震效果进行了分析,结果表明:(1)减震层施设于围岩与初支之间的横竖向位移减震效果为25.16%和6.82%,最大、小主应力减震效果为60.46%、54.65%,最大剪应力减震效果为66.97%,最小安全系数减震效果为45.90%~58.71%;(2)减震层施设于初支和二衬之间横竖向位移减震效果为0.79%和0.62%,最大、小主应力减震效果为68.14%、12.71%,最大剪应力减震效果为35.84%,最小安全系数减震效果为29.51%~51.66%。研究成果可为类似工程抗震设防设计提供参考。

关键词:高烈度地震区;隧道工程;软硬围岩交接段;减震层

中图分类号:U45

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2020)04-0113-08

Effectiveness of damping control technology of shock-absorbing layer of soft and hard surrounding rock junctions of tunnels in high-intensity earthquake zone

CUI Guangyao¹, MA Jianfei¹, XIAO Jian²

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

2. MCC Communication Construction Group Co., Ltd, Beijing 100011, China)

Abstract: In order to improve the damping performance of soft and hard surrounding rock junctions of tunnels in high-intensity earthquake zones, a railway tunnel was studied as an example, the finite difference software FLAC^{3D} is adopted to study the effect of shock-absorbing layer at different locations of soft and hard surrounding rock junctions in the tunnel. The result shows that: while the shock-absorbing layer is placed between the surrounding rock and the primary support, the shock absorption effect of horizontal and vertical displacement is 25.16% and 6.82% respectively, the shock absorption effect of maximum and small principal stress is 60.46% and 54.65%, the shock absorption effect of the maximum shear stress is 66.97%, the shock absorption effect of the minimum safety factor is 45.90% to 58.71%; while the shock-absorbing layer is placed between the primary support and the secondary lining, the shock absorption effect of horizontal and vertical displacement is 0.79% and 0.62% respectively, the shock absorption effect of maximum and small principal stress is 68.14% and 12.71%, the shock absorption effect of the maximum shear stress is 35.84%, the shock absorption effect of the minimum safety factor is 29.51% to 51.66%. The research results can provide reference for anti-seismic design of similar engineering.

收稿日期: 2020-01-11; 修订日期: 2020-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408008)

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

通讯作者: 麻建飞(1997-),男,甘肃武威人,硕士,主要从事隧道与地下工程的研究。E-mail: majfncut@163.com

Keywords: high-intensity earthquake zone; tunnel engineering; soft and hard surrounding rock junctions; shock-absorbing layer

0 引言

随着我国西部山区轨道交通快速发展,越来越多的铁路隧道需要穿越地震高烈度区,而这些隧道中往往出现软硬围岩交接段。因此,为了提高地震高烈度区隧道抗震设防性能,对地震高烈度区软硬围岩交接段减震层减震技术研究是非常有必要的。

目前国内外专家、学者对于隧道减震层减震技术研究主要有:对隧道减震层减震机制的研究^[1-4],对于高烈度地震区跨断层隧道的减震技术研究^[5-8],对处于黏滑带、高岩温隧道的减震层研究^[9-10]。上述专家、学者的研究主要集中在减震层减震机理、跨越断层及破碎带等隧道减震效果等方面,对地震高烈度区隧道软硬围岩交接段减震层的减震技术研究较少。

本文以某铁路隧道为研究背景,利用有限元差分软件对地震高烈度区隧道软硬围岩交接段减震层减震技术进行了研究,研究结果可为类似工程抗震设防及后期运营提供参考。

1 某铁路隧道软硬围岩交接段概况

1.1 地质条件

该铁路隧道地处青、藏、滇、缅、印尼巨型“歹”字型构造西支中段与三江经向构造带中南段及南岭纬向构造带西延部分的复合部位。隧址区主要穿越全风化变粒岩、强风化变粒岩、中等风化变粒岩,全风化、强风化变粒岩围岩级别以Ⅳ、Ⅴ级为主,中等风化变粒岩围岩以Ⅲ、Ⅳ级为主。该标段工程区地震动峰值加速度为 0.20 g,地震动反应谱特征周期为 0.45 s,抗震设防烈度为 8 度。

1.2 支护结构设计

该铁路隧道软硬围岩交接段支护结构采用复合式衬砌,曲墙带仰拱式。初支采用 C25 喷射混凝土,厚度 25 cm,二次衬砌采用 C25 模注混凝土,厚度为 45 cm。

2 研究情况

2.1 计算模型

结合该铁路隧道工程资料,建立有限差分计算模型,模型为弹塑性模型,屈服准则取 Mohr-Coulomb 屈服准则。隧道纵向开挖深度取 100 m,左右两侧宽度

均取 5~8 倍洞径,约为 50 m,隧道埋深取 50 m,隧道底部基岩厚度取从模型底部往上 20 m。模型上、下盘分别为Ⅴ和Ⅲ级围岩,软硬围岩交接面倾角为 68°,与隧道正交。

计算模型的约束条件为:静力计算时模型上部边界无约束,模型四周与下边界全约束,下边界与上边界无约束;动力计算时底部采用静态边界,模型四周采用自由场边界。计算模型如图 1 所示。

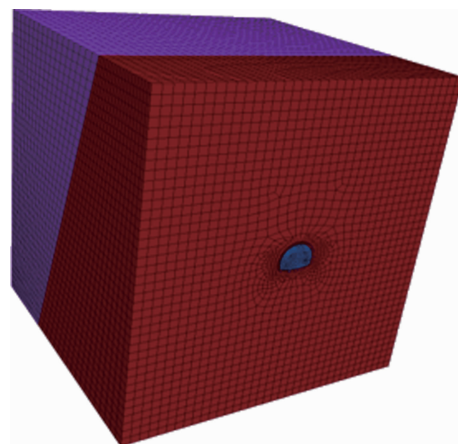


图 1 计算模型图

Fig.1 Calculation model

2.2 计算参数

隧道工程中减震层常选用海绵橡胶板、泡沫混凝土及沥青砂等材料。减震层与防水板铺设于初支和二衬之间,两者共同铺设于初支内表面。本文选用工程中常用的海绵橡胶板作为减震层材料,围岩物理力学参数由地勘资料提供,计算材料见表 1 所示。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

参数	重度/ (kN·m ⁻³)	弹性 模量/GPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ MPa
Ⅲ级围岩	24.0	15.0	0.3	45.0	1.0
Ⅴ级围岩	20.0	2.0	0.4	25.0	0.2
Ⅱ级围岩	25.0	20.0	0.2	50.0	1.5
初支	22.0	25.0	0.2	—	—
二衬	25.0	28.0	0.2	—	—
减震层	10.0	0.3	0.5	0.5	5.0

2.3 计算工况

为研究隧道软硬围岩交接段减震层铺设不同位置减震效果的差异,计算工况分别取不设置减震层(工况 1)、初支与围岩之间设置减震层(工况 2)和初支与

二衬之间设置减震层(工况 3),如表 2 所示,以工况 1 为参照对比分析施加减震层后结构的位移、应力、内力等变化。减震层厚度取 10 cm^[1]。

表 2 计算工况
Table 2 Calculation conditions

工况	计算内容	减震层厚度/cm
1	不设减震层	-
2	初支与围岩间设减震层	10
3	初支与二衬间设减震层	10

2.4 动力参数

模型中模拟力学阻尼采用局部阻尼,阻尼系数为 0.157 1。常规动力加载,三个方向(*x, y, z*)的地震波通过模型底部往上部结构传递。本隧道抗震设防烈度为 8 度,地震动峰值加速度为 0.20 *g*,地震波选取四川卧龙站加速度波,按 9 度地震烈度标准化,持续时间为 15 s。使用滤波软件对地震波进行滤波和基线矫正处理,处理后的地震波加速度时程曲线(以 *x* 方向为例)如图 2 所示。

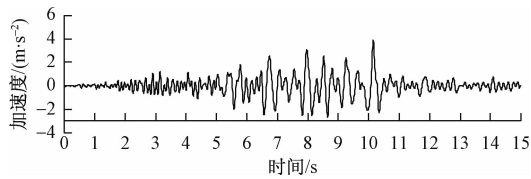


图 2 加速度时程曲线
Fig. 2 Acceleration time history curve

2.5 测点布置

本模型中沿隧道纵向取 7 个监测断面,Ⅲ级围岩和 V 级围岩交接面处为 S4 监测断面,前后各取 3 个监测断面,间隔 10 m,监测断面布置如图 3 所示。在各监测断面的拱顶、右拱肩、右边墙、右拱脚、仰拱、左拱脚、左边墙、左拱肩 8 个位置设置监测点,监测点布置如图 4 所示。

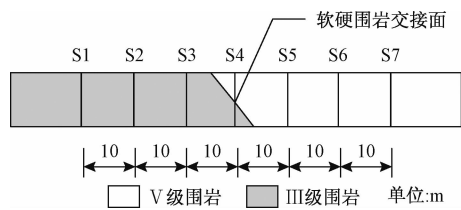


图 3 监测断面布置
Fig. 3 Monitoring section layout

3 减震效果分析

分别提取三种工况下二衬结构的位移、主应力、最

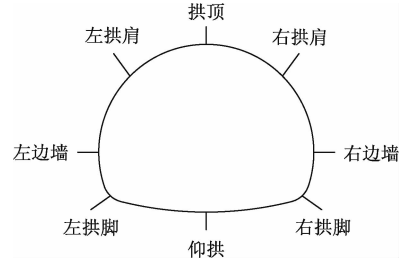


图 4 测点布置
Fig. 4 Arrangement of measuring points

大剪应力和结构内力分析结果,以工况 1(不设置减震层)为参照,计算设置了减震层的两种工况下的结构位移、主应力、最大剪应力和结构内力的变化,由此得到减震层的减震效果。

3.1 结构位移分析

三种计算工况下的二衬结构位移云图如图 5 ~ 图 6 所示,施加了减震层后二衬结构位移变化及减震层减震效果见表 3 所示。

由图 5、图 6 可知,二衬结构竖向位移最大值发生在软硬围岩交接段的 V 级围岩部分末端,二衬结构的横向位移最大值发生在软硬围岩交接段 V 级围岩部分拱脚处。提取结构的各工况下的结构位移最大值,计算结构位移表示的减震效果并汇总至表 3,计算公式如下:

$$\rho_D = \frac{D_{前} - D_{后}}{D_{前}} \tag{1}$$

式中: ρ_D ——结构最大位移减震效果;
 $D_{前}$ ——未采用减震层的结构的最大位移;
 $D_{后}$ ——采用减震层后结构的最大位移。

表 3 二衬结构横、竖向位移
Table 3 Horizontal and vertical displacement of secondary lining

工况	横向位移		竖向位移	
	最大值/mm	减震效果/%	最大值/mm	减震效果/%
1	18.84	-	17.73	-
2	14.10	25.16	16.52	6.82
3	18.69	0.79	17.62	0.62

由表 3 可知,二衬结构位移最大值相较于工况 1(不施加减震层),工况 2(减震层施加于初支和围岩之间)二衬结构横向位移最大值减小 4.74 mm,减震效果为 25.16%,竖向位移最大值减小 1.21 mm,减震效果为 6.82%;工况 3(减震层施加于初支和二衬之间)横向位移最大值减小 0.15 mm,减震效果为 0.79%,竖向位移最大值减小 0.11 mm,减震效果为 0.62%。减

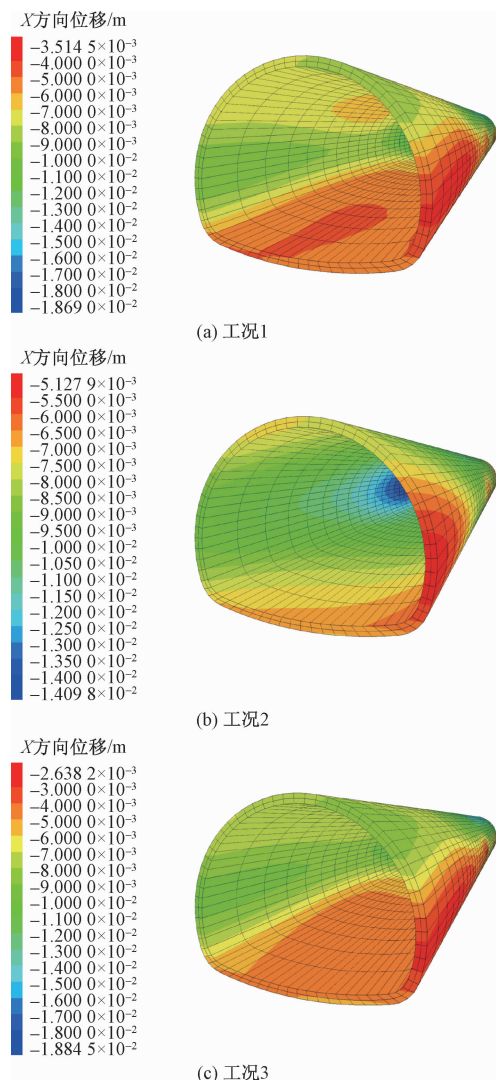


图5 二衬结构横向位移云图

Fig. 5 Lateral displacement cloud diagram of secondary lining

震层施设于初支与围岩之间的减震效果优于减震层施设于初支和二衬之间。

3.2 结构主应力分析

三种工况下二衬结构的最大主应力云图和最小主应力云图如图7所示。

由图7可知,二衬结构最大主应力最大值发生在软硬围岩交接段的交接面处。工况1(未施加减震层)时最大主应力最大值发生在结构拱顶和仰拱处,施加了减震层后,工况2和工况3最大主应力最大值则只发生在二衬结构的拱顶处。

由图8可知,最小主应力最大值发生在二衬结构拱顶和仰拱处,施加了减震层后,工况2和工况3最小主应力最大值在云图上的集中区域明显减小。

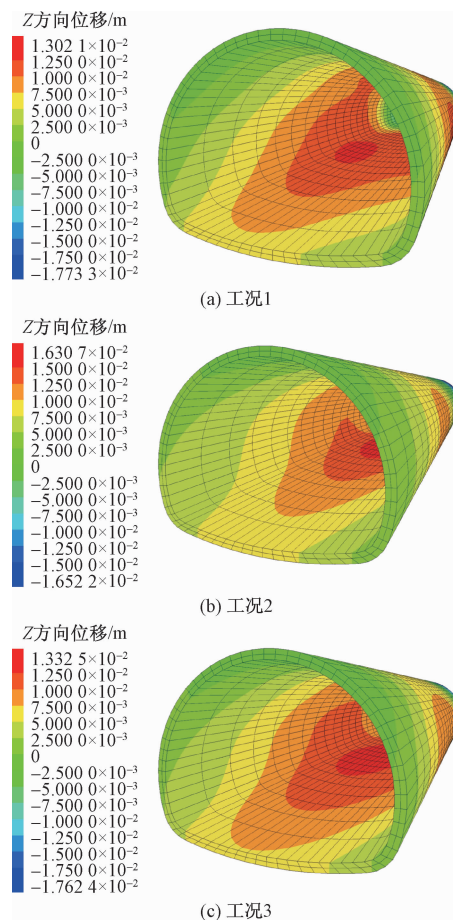


图6 二衬结构竖向位移云图

Fig. 6 Vertical displacement cloud diagram of secondary lining

以工况1为参照,计算工况2和工况3的最大主应力、最小主应力变化值和减震效果并汇总至表4,主应力所表示的减震效果计算公式为:

$$\rho_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{前}} - \sigma_{\text{后}}}{\sigma_{\text{前}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ρ_{σ} ——主应力减震效果;

$\sigma_{\text{前}}$ ——未采用减震层的结构的主应力极值;

$\sigma_{\text{后}}$ ——采用了减震层后结构的主应力极值。

表4 二衬结构主应力

Table 4 Principal stress of secondary lining structure

工况	最大主应力/MPa		最小主应力/MPa	
	最大值	减震效果/%	最大值	减震效果/%
1	14.72	—	22.26	—
2	5.82	60.46	10.05	54.65
3	4.69	68.14	19.43	12.71

由表4可知,相比于不设置减震层,设置减震层后二衬结构的最大主应力和最小主应力均有明显的减

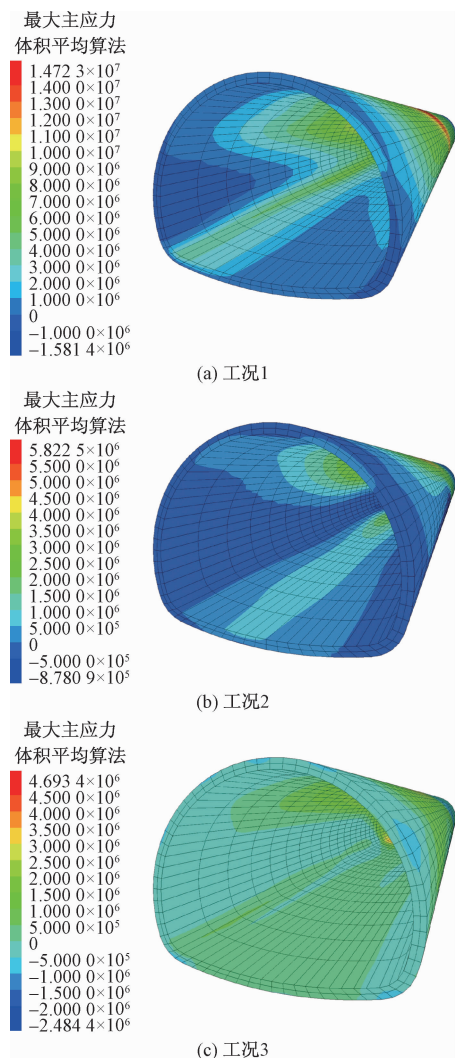


图7 二衬结构最大主应力云图

Fig.7 Maximum principal stress cloud diagram of the secondary lining

小。结构最大主应力最大值在工况2、工况3分别减小8.9 MPa、10.03 MPa, 减震效果分别为60.46%、68.14%; 结构最小主应力最大值在工况2、工况3下分别减小12.21 MPa、2.83 MPa, 减震效果为54.65%、12.71%。

3.3 结构最大剪应力

三种工况下二衬结构最大剪应力云图如图9所示。

由图9可知, 二衬结构最大剪应力最大值集中在软硬围岩交接段交接面处的拱脚处及软岩(V级围岩)段拱脚处, 在施加了减震层后, 工况2最大剪应力最大值只集中在软硬围岩交接面处拱脚位置处, 工况3最大剪应力最大值则依旧集中于软硬围岩交接面处的拱脚处和软岩(V级围岩)拱脚处。工况2和工况3

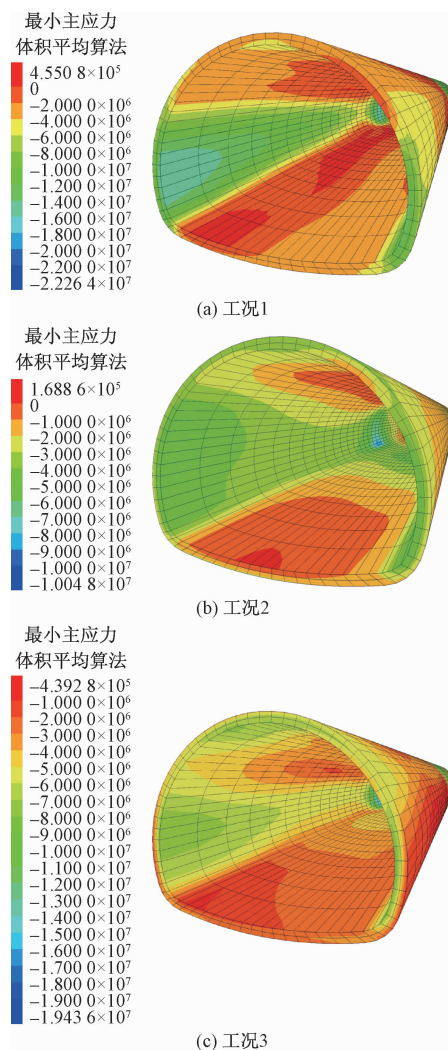


图8 二衬结构最小主应力云图

Fig.8 Minimum principal stress cloud diagram of the secondary lining

在施加减震层后最大剪应力最大值的集中区域范围相较于不施加减震层的工况1均有所减小, 且工况2的变化幅度要明显优于工况3。

以工况1为参照, 结合二衬结构最大剪应力云图, 计算结构最大剪应力变化和相对工况1的变化范围, 由公式(3)计算剪应力所表示的减震效果, 计算结果见表5。

$$\rho_{\tau} = \frac{\tau_{\text{前}} - \tau_{\text{后}}}{\tau_{\text{前}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ρ_{τ} ——最大剪应力减震效果;

$\tau_{\text{前}}$ ——未采用减震层的结构的最大剪应力;

$\tau_{\text{后}}$ ——采用了减震层后结构的最大剪应力。

由表5可知, 相比于不设置减震层的工况1, 施加了减震层的工况2和工况3二衬结构的最大剪应力的

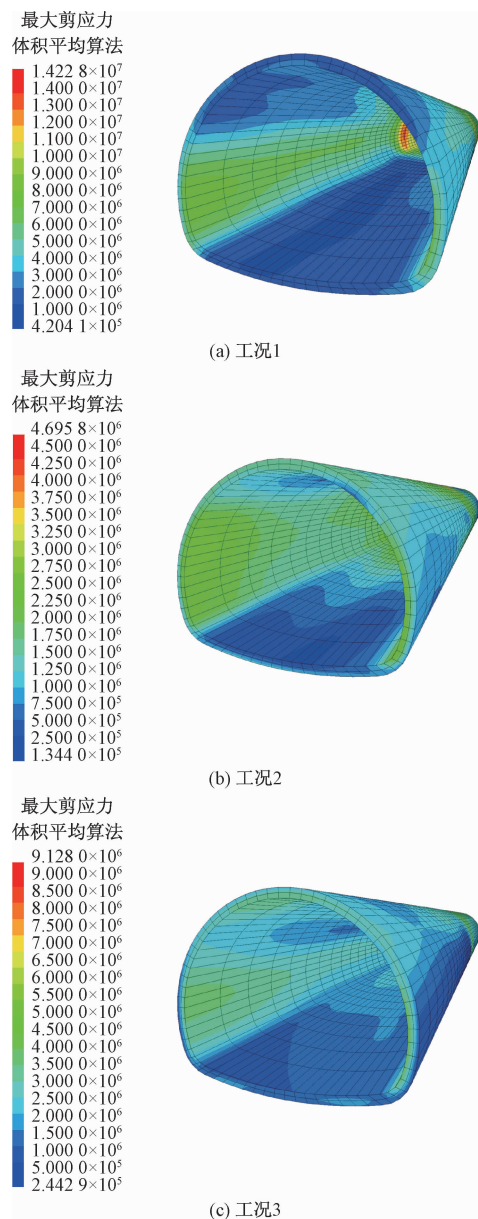


图9 二衬结构最大剪应力云图

Fig.9 Cloud diagram of the maximum shear stress of the secondary lining

最大值均有明显减小,工况2、工况3的最大剪应力最大值相比于工况1减小9.53 MPa、5.1 MPa,减震效果分别为66.97%、38.84%。

表5 二衬结构最大剪应力

Table 5 Maximum shear stress of secondary lining structure

工况	最大剪应力/MPa	
	最大值	减震效果/%
1	14.23	—
2	4.70	66.97
3	9.13	35.84

由以上分析可知,对于二衬结构的最大剪应力,在

初支和围岩之间设置减震层的效果明显优于在初支和二衬之间设置减震层。

3.4 结构内力分析

提取不同工况下各监测面二衬结构的内力数据,利用公式(4)、(5)计算不同时步下的8个测点的最小安全系数^[11],取监测面测点的最小安全系数的最小值,绘制二衬结构最小安全系数图如图10所示。

二衬结构安全系数计算公式:

$$KN \leq \varphi \alpha R_a bh \quad (4)$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_t bh}{6 e_0/h - 1} \quad (5)$$

式中:K——安全系数;

N——轴向力/kN;

φ ——构件纵向弯曲系数;

α ——轴向力偏心影响系数;

R_a ——混凝土抗压极限强度;

R_t ——混凝土抗拉极限强度;

b——截面宽度,取1 m;

h——截面厚度。

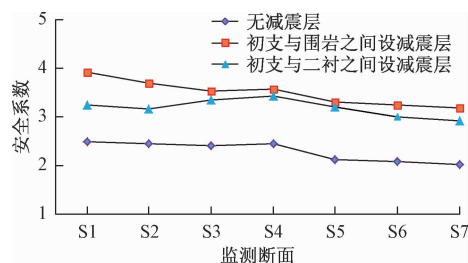


图10 二衬结构各监测断面最小安全系数

Fig.10 Minimum safety factor for each monitoring section of the secondary lining

由图10可知:

(1)三种工况下最小安全系数的最小值均出现在软硬围岩(V级围岩)段的S7监测面,最小安全系数的最大值均出现在硬岩段的S1断面处。

(2)相较于工况1(无减震层),施加了减震层的工况2和工况3的最小安全系数有明显提升,且工况2(减震层施设于初支于围岩之间)的减震效果明显优于工况3(减震层施设于初支与二衬)的减震效果。

由结构内力和最小安全系数图,以工况1为参照,计算在施加减震层后二衬结构减震效果,计算公式见公式(6),计算结果见表6。

$$\rho_K = \frac{K_{后} - K_{前}}{K_{前}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: ρ_K ——安全系数减震效果;

$K_{前}$ ——未采用减震层的结构最小安全系数;
 $K_{后}$ ——采用减震层后结构最小安全系数。

表 6 二衬结构监测断面最小安全系数

Table 6 Minimum safety factor for monitoring section of secondary lining structure

监测断面	最小安全系数		减震效果/%	最小安全系数		减震效果/%
	工况 1	工况 2 (相对于工况 1)		工况 3	(相对于工况 1)	
S1	2.48	3.91	57.66	3.25	31.05	
S2	2.44	3.69	51.23	3.16	29.51	
S3	2.40	3.53	47.08	3.35	39.58	
S4	2.44	3.56	45.90	3.43	40.57	
S5	2.11	3.30	56.40	3.20	51.66	
S6	2.07	3.24	56.52	3.00	44.93	
S7	2.01	3.19	58.71	2.92	45.27	

由表 6 可知,相比于无减震层的工况 1,施加了减震层的工况 2 和工况 3 的监测断面的最小安全系数的最小值均有明显增大。减震层施设于围岩和初支之间的工况 2 的最小安全系数减震效果为 45.90% ~ 58.71%,减震层设置于初支与二衬之间的工况 3 的监测断面最小安全系数的减震效果为 29.51% ~ 51.66%。

4 结论

(1)施加减震层后隧道二衬的结构最大位移、主应力、剪应力及结构内力均有所减小,都起到了不同程度的减震效果;

(2)结构位移方面,在初支和围岩之间施加减震层后二衬结构的横向位移、竖向位移分别减小 25.16%、6.82%,在初支和二衬之间施加减震层后二衬结构的横向位移、竖向位移分别减小 0.79%、0.62%;对于结构位移的影响,减震层施加于围岩和初支间的减震效果要优于施加于初支和二衬之间的减震效果;

(3)结构主应力方面,在初支和围岩之间施加减震层后二衬结构的最大主应力、最小主应力分别减小 60.46%、54.65%,在初支和二衬之间施加了减震层后二衬结构的最大主应力、最小主应力分别减小 68.14%、12.71%;对于结构最大主应力的影响,减震层施加于初支和二衬之间的效果要略优于施加于初支与围岩之间,对于结构的最小主应力,减震层施加于初支和围岩之间的减震效果要优于减震层施加于初支和二衬之间的效果。

(4)结构剪应力方面,在初支和围岩之间施加减震层后二衬结构的最大剪应力减小 66.97%,在初支

和二衬之间施加减震层后二衬结构的最大剪应力减小 35.84%;对于结构的剪应力,减震层施设于初支和围岩的减震效果要优于减震层施设于初支和二衬之间;

(5)结构内力方面,在初支和围岩之间施加减震层后二衬结构的最小安全系数的最小值增大 45.90% ~ 58.71%,在初支和二衬之间施加减震层后二衬结构的最小安全系数的最小值增大 29.51% ~ 51.66%;结构内力方面,减震层施加于围岩与初支之间的减震效果要优于减震层施加于初支与二衬之间;

(6)综上所述,地震高烈度区隧道软硬围岩交接段在初支和围岩之间设置减震层的减震效果优于在初支和二衬之间设置减震层的减震效果。

参考文献:

[1] 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, 44(8):126-131. [WANG M N, CUI G Y. Study of the mechanism of shock absorption layer in the supporting system of tunnels in highly seismic areas [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 126-131. (in Chinese)]

[2] 高文立,吕涛,杨明松. 高烈度地震区山岭隧道设置减震层的地震动力响应及减震效果分析[J]. 工程与建设, 2018, 32(3):371-376. [GAO W L, LYU T, YANG M S. Seismic dynamic response and damping effect analysis of the earthquake zone in the high intensity earthquake zone[J]. Engineering and Construction, 2018, 32(3): 371-376. (in Chinese)]

[3] 赵旭,黎若寒,陶连金,等. 松动圈及减震层对隧道地震响应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 1):3310-3319. [ZHAO X, LI R H, TAO L J, et al. Shaking table tests of influences on tunnel seismic response from loosen zone and buffer layers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup1): 3310-3319. (in Chinese)]

[4] 赵武胜,陈卫忠,马少森,等. 泡沫混凝土隧道减震层减震机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1027-1036. [ZHAO W S, CHEN W Z, MA S S, et al. Isolation effect of foamed concrete layer on the seismic responses of tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1027-1036. (in Chinese)]

[5] 崔光耀,伍修刚,王明年,等. 汶川地震区跨断层带公路隧道震害形成机理分析[J]. 中国地质灾害

- 与防治学报, 2018, 29(2):108-114. [CUI G Y, WU X G, WANG M N, et al. Highway tunnel damage caused by earthquake and its mechanism crossing fault zone in Wenchuan Earthquake Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2):108-114. (in Chinese)]
- [6] 崔光耀, 纪磊, 荆鸿飞. 高烈度艰险山区跨断层隧道减震层减震技术研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(2):286-291. [CUI G Y, JI L, JING H F. Damping shake technology of the shock absorption layer of fault-crossing tunnels in a dangerous mountainous area with high-intensity earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2):286-291. (in Chinese)]
- [7] 方林, 郭瑞, 郑波, 等. 跨断裂地铁隧道地震动力响应特征研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3):72-77. [FANG L, GUO R, ZHENG B, et al. Research on the seismic dynamic response characteristics of metro tunnels across faults[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3):72-77. (in Chinese)]
- [8] 王芳其. 穿越次级断层隧道地震动力响应及减震层效果分析[J]. 公路交通技术, 2018, 34(2):68-74. [WANG F Q. Analysis on seismic dynamic response and effect of shock absorption layer of tunnels passing through the secondary fault[J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34(2):68-74. (in Chinese)]
- [9] 崔光耀, 伍修刚, 王明年, 等. 高烈度地震区黏滑断层隧道减震层减震模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11):2125-2131. [CUI G Y, WU X G, WANG M N, et al. Model tests on damping of shock absorption layer of stick-slip fracture tunnel in highly seismic areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11):2125-2131. (in Chinese)]
- [10] 崔光耀, 王雪来, 左奎现, 等. 强震区高岩温隧道刚柔并济综合减灾技术研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5):98-103. [CUI G Y, WANG X L, ZUO K X, et al. Study on rigid and flexible compound disaster reduction technology for the tunnel with high rock temperature in meizoseismal area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5):98-103. (in Chinese)]
- [11] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范:TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017. [Railway & Train Standard of the People's Republic of China. Code for design of railway tunnel:TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)]

(上接第 106 页)

- [16] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10):1717-1733. [ZHU J J, LI Z W, HU J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1717-1733. (in Chinese)]
- [17] LANARI R, MORA O, MANUNTA M, et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(7):1377-1386.
- [18] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1):8-20.
- [19] SOLARI L, CIAMPALINI A, RASPINI F, et al. PSInSAR analysis in the Pisa urban area (Italy): a case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2):120.
- [20] 何秀凤, 何敏. InSAR 对地观测数据处理方法与综合测量[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [HE X F, HE M. Data processing method and comprehensive measurement of InSAR Earth Observation[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [21] 刘志敏, 李永生, 张景发, 等. 基于 SBAS-InSAR 的长治矿区地表形变监测[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3):37-42. [LIU Z M, LI Y S, ZHANG J F, et al. An analysis of surface deformation in the Changzhi mining area using small baseline InSAR[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(3):37-42. (in Chinese)]