

文章编号: 1674—8247(2024)04—0056—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 04. 011

## 强震区浅埋偏压隧道洞口段减震层减震效果分析

何子阳<sup>1</sup> 庄永香<sup>2</sup> 郭艳军<sup>3</sup> 崔光耀<sup>1</sup> 许崇庆<sup>1</sup>

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 莒南县园林环卫保障服务中心, 山东 临沂 276600;

3. 四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610041)

**摘 要:** 依托某铁路隧道洞口段, 利用 FLAC3D 软件研究隧道施设不同厚度减震层的减震效果。结果表明: (1) 与不设减震层相比, 施设 5 cm 减震层后, 二衬结构最大、最小主应力分别减小了 26. 05%、21. 57%, 竖向、纵向位移分别减小了 74. 68%、36. 13%, 竖向位移差减小了 0. 32 mm, 最小安全系数平均提高了 50. 46%; (2) 施设 10 cm 减震层后, 二衬结构最大主应力增大了 134. 45%, 最小主应力减小了 26. 70%, 竖向、纵向位移分别减小了 70. 80%、26. 89%, 竖向位移差增大了 1. 85 mm, 最小安全系数平均提高了 11. 10%; (3) 施设 15 cm 减震层后, 二衬结构最大、最小主应力分别减小了 45. 38%、25. 16%, 竖向、纵向位移分别减小了 70. 89%、13. 45%, 竖向位移差增大了 1. 89 mm, 最小安全系数平均提高了 12. 56%; (4) 衬砌与围岩之间施设 5 cm 减震效果优于施设 10 cm、15 cm 减震层的减震效果。研究成果可为隧道洞口浅埋偏压段减震技术的发展提供参考。

**关键词:** 隧道工程; 强震区; 洞口段; 浅埋; 偏压; 减震层

**中图分类号:** U45 **文献标志码:** A

56

## Analysis on the Seismic Response Reduction of Shock Absorption Layer in the Shallow and Unsymmetrical Pressure Section of Tunnel Portal in Strong Earthquake Area

HE Ziyang<sup>1</sup> ZHUANG Yongxiang<sup>2</sup> GUO Yanjun<sup>3</sup> CUI Guangyao<sup>1</sup> XU Chongqing<sup>1</sup>

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

2. Junan County Garden Sanitation Support Service Center, Linyi 276600, China;

3. PowerChina Sichuan Electric Power Engineering Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on a railway tunnel portal section, this study utilizes FLAC3D to analyze the damping effect of different thicknesses of damping layers applied between the liner and the surrounding rock. The results show that: (1) Compared with no seismic damping layer, after applying a 5 cm damping layer, the maximum and minimum principal stresses of the secondary lining structure are reduced by 26. 05% and 21. 57%, the vertical and longitudinal displacements are reduced by 74. 68% and 36. 13%, the vertical displacement difference is reduced by 0. 32 mm, and the minimum safety factor is increased by 50. 46% on average. (2) After applying a 10 cm damping layer, the maximum principal stress of the secondary lining structure increases by 134. 45%, the minimum principal stress decreases by 26. 70%, the vertical and longitudinal displacements decrease by 70. 80% and 26. 89%, the vertical displacement difference increases

收稿日期: 2023-05-19

作者简介: 何子阳(1999-), 男, 研究生。

基金项目: 北京市大学生科学研究与创业行动计划项目(23XN262-187)

引文格式: 何子阳, 庄永香, 郭艳军, 等. 强震区浅埋偏压隧道洞口段减震层减震效果分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 56-62.

HE Ziyang, ZHUANG Yongxiang, GUO Yanjun, et al. Analysis on the Seismic Response Reduction of Shock Absorption Layer in the Shallow and Unsymmetrical Pressure Section of Tunnel Portal in Strong Earthquake Area[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 56-62.

by 1.85 mm, and the minimum safety factor increases by 11.10% on average. (3) After applying 15 cm damping layer, the maximum and minimum principal stresses of the secondary lining structure decrease by 45.38% and 25.16% respectively, vertical and longitudinal displacements were reduced by 70.89% and 13.45% respectively, vertical displacement difference increased by 1.89 mm, and minimum safety factor increases by 12.56% on average. (4) The seismic damping effect of applying 5 cm between the liner and the surrounding rock is better than that of 10 cm and 15 cm damping layers. The results can be used as a reference for the development of shock absorption technology in shallow tunnel portal.

**Key words:** tunnel engineering; strong earthquake area; portal section; shallow-buried; unsymmetrical pressure; shock absorption layer

我国经济正处于蓬勃发展的时期,交通网络渐渐覆盖西南地区。西南地区普遍多山,地质条件复杂,部分隧道洞口段表现出浅埋、偏压等特点,围岩自稳能力不足<sup>[1-2]</sup>,抗震能力较差<sup>[3-8]</sup>,采取减震措施来提高浅埋偏压隧道洞口段的震时安全性是非常有必要的。

在初支与围岩间设置减震层可提高隧道洞口段抗-减震性能<sup>[9-10]</sup>。王明年<sup>[11]</sup>等指出减震层在消减地震能量的作用非常明显,隧道结构承受的能量减小,隧道结构的地震反应减小。范凯祥<sup>[12]</sup>等依托西部某高烈度地区浅埋公路隧道进行大型振动台试验研究,发现设置减震层能有效吸收围岩对隧道的振动效应,降低二衬结构的动力响应;但减震层存在最优值,超过最优值限值,减震效果降低。闻毓民<sup>[13]</sup>等设计了隧道衬砌结构减震层效能评定方法的振动台试验,精确了减震层效能评定方法。对于浅埋偏压隧道地震动力响应以及减震措施的研究,关振长<sup>[14]</sup>等通过数值模拟和模型试验对照验证,揭示了特大断面偏压条件下的地震动态响应特性。王赶<sup>[15]</sup>等由极限平衡法原理,推导出在水平地震力条件下浅埋偏压小净距隧道围岩压力的计算公式。赵富发<sup>[16]</sup>等通过缩尺振动台

试验对橡胶减震层的减震特性和隧道加速度规律进行探究。

综上所述,关于隧道洞口段抗减震技术和浅埋偏压隧道震时衬砌响应都有较深入的研究,但对于强震区浅埋偏压隧道洞口段设置减震层后减震效果的研究相对较少。本文依托某铁路隧道洞口段工程,对强震区浅埋偏压隧道洞口段设置5 cm、10 cm、15 cm减震层的减震效果进行研究。研究成果可为隧道洞口浅埋偏压段的震时安全性研究提供参考。

## 1 工程概况

某拟建隧道地处中国西南部和东南亚地区的青藏滇缅印尼歹字型构造中部。经地勘调查,地层主要由第四系残破积层( $Q4^{el+dl}$ )、下古生界高黎贡山群层( $Pz_1gl$ )、喜山期黑云母花岗岩( $\gamma 52$ )构成。该隧道洞口段地层主要为古生界高黎贡山群全、强风化变粒岩,属极软岩,粒状变晶结构,块状构造,岩性为V级围岩。该隧道纵向与多个陡坡走势方向近乎垂直,洞口段埋深较浅且上部土体压力分布不均,地震作用下易受灾害影响,隧道位置及隧道洞口示意如图1所示。

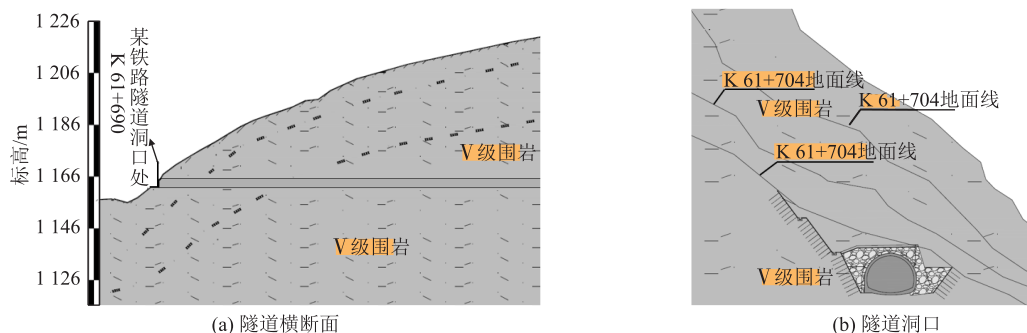


图1 某铁路隧道洞口段图

## 2 研究情况

### 2.1 计算模型

以里程K 61+716处隧道洞口段为例,通过

FLAC3D建立计算模型,模型围岩遵循摩尔-库仑强度准则。隧道纵向长2 m,洞宽13.5 m,隧道至右侧边界30 m,至左侧边界40 m,隧道洞口段偏压倾角 $45^\circ$ ,且边坡至隧道最短距离约12.8 m。隧道洞口初

支采用 C25 喷射混凝土, 厚 25 cm, 二衬采用 C30 模筑钢筋混凝土, 厚 45 cm, 减震层位于初支与围岩之间。静力计算时, 模型四周法向约束, 下边界全约束, 上边界无约束。动力计算时, 模型底部为静态边界, 四周为自由场边界。

2.2 计算参数

隧道工程减震材料有泡沫混凝土、海绵橡胶板、沥青材料等。本文减震层采用密度小、弹性和屈挠性优异海绵橡胶板作为减震材料。超前支护采用超前小导管对围岩 3 m 范围内进行超前注浆。计算参数如表 1 所示。

表 1 计算模型参数表

计算参数	重度 /(kN/m)	弹性模量 /GPa	黏聚力 /MPa	泊松比	内摩擦角 /(°)
V 级围岩	20.0	2.0	0.20	0.40	25.0
II 级围岩	25.0	20.0	1.50	0.20	50.0
减震层	10.0	0.3	5.00	0.45	0.5
超前支护	1 820.0	165.0	39.00	0.35	34.0
初支	22.0	26.0	—	0.20	—
二衬	25.0	32.0	—	0.20	—

2.3 计算工况

减震层施设在初支与围岩之间, 如图 2 所示, 工况 1 不设减震层; 工况 2 设置 5 cm 减震层; 工况 3 设置 10 cm 减震层; 工况 4 设置 15 cm 减震层。

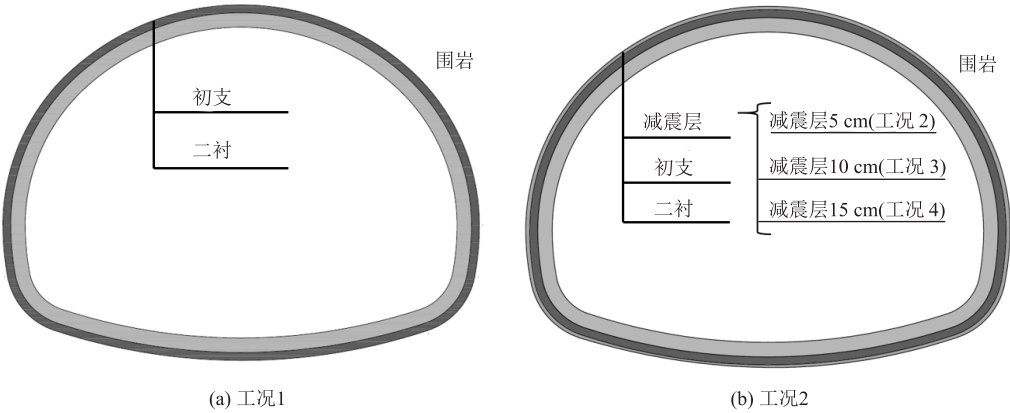


图 2 减震层布置图

2.4 动力参数

地震波采用汶川地震卧龙测站所测加速度波, 标准化后地震烈度为Ⅷ度, 从模型底部向上部传递, 持续 15 s。该地震波进行滤波处理和基线校正后的地震波加速度时程曲线如图 3 所示(以 z 向为例)。

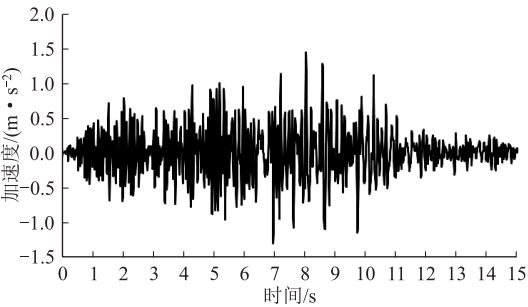


图 3 z 方向加速度时程曲线图

2.5 测点布置

在隧道二衬拱顶、右拱肩、右边墙、右拱脚、左拱肩、左边墙、左拱脚、仰拱 8 个位置处布置监测点, 如图 4 所示。

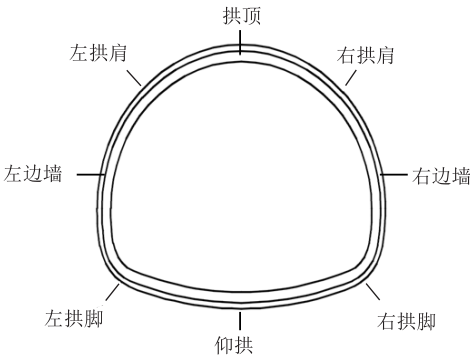


图 4 监测点布置图

3 减震效果分析

3.1 结构主应力分析

提取隧道洞口段二衬结构最大、最小主应力图, 如图 5、图 6 所示。

以工况 1 (不设减震层) 为基准, 计算工况 2~ 工况 4 的应力减震效果, 如表 2 所示。

由图 5、图 6 及表 2 可知, 该隧道洞口浅埋偏

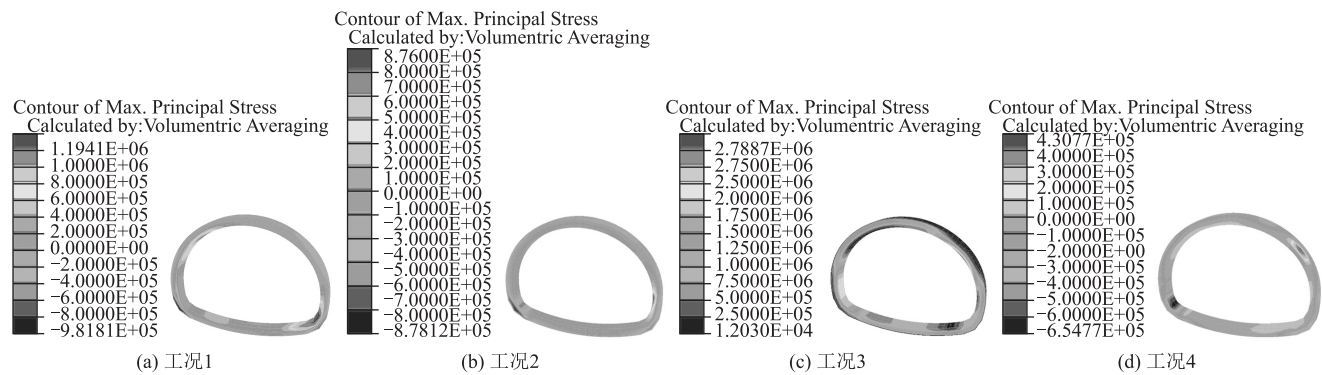


图 5 二衬最大主应力图

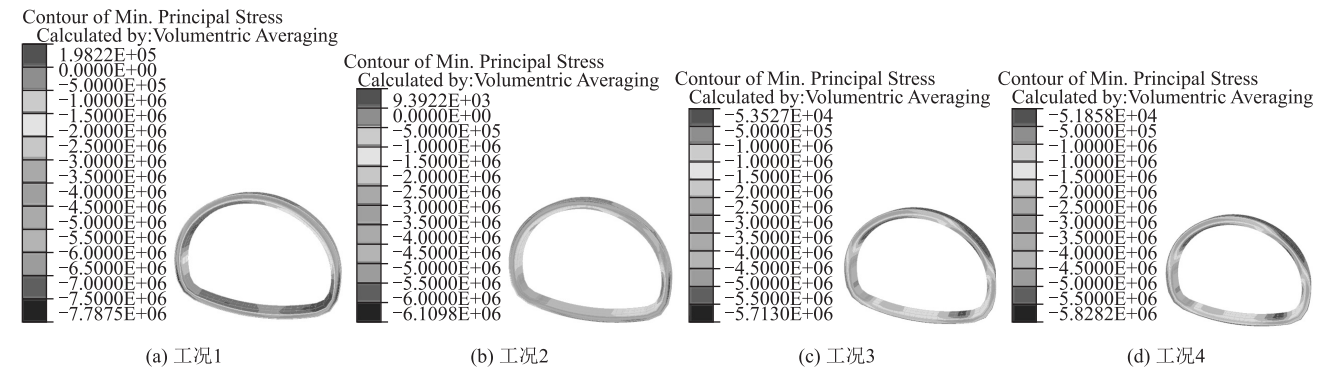


图 6 二衬最小主应力图

表 2 各工况主应力及减震效果表				
工况	最大主应力		最小主应力	
	应力值/MPa	减震效果/%	应力值/MPa	减震效果/%
1	1.19	-	-7.79	-
2	0.88	26.05	-6.11	21.57
3	2.79	-134.45	-5.71	26.70
4	0.65	45.38	-5.83	25.16

压段采用设置减震层后,部分工况减震效果达到了较好的效果。工况 1 二衬结构的最大主应力值为 1.19 MPa,最小主应力为 -7.79 MPa。工况 2 二衬结构的最大主应力为 0.88 MPa,相较工况 1 减少 0.31 MPa,减震效果为 26.05 % ;最小主应力为 -6.11 MPa,相较工况 1 减少 1.68 MPa,

减震效果为 21.57 %。工况 3 二衬结构的最大主应力为 2.79 MPa,相较工况 1 增加 1.60 MPa;最小主应力为 -5.71 MPa,相较工况 1 减少 2.08 MPa,减震效果为 26.70 %。工况 4 二衬结构的最大主应力为 0.65 MPa,相较工况 1 减少 0.54 MPa,减震效果为 45.38 %,最小主应力为 -5.83 MPa,相较工况 1 减少 1.96 MPa,减震效果为 25.16 %。综上所述,工况 2、工况 4 的减震效果优于工况 3 的减震效果,工况 4 的减震效果优于工况 2 的减震效果。即施设 5 cm 减震层和 15 cm 减震层均能提高该隧道洞口段的减震性能。

3.2 结构位移分析

提取该隧道洞口段各工况的二衬结构位移云图,如图 7、图 8 所示。

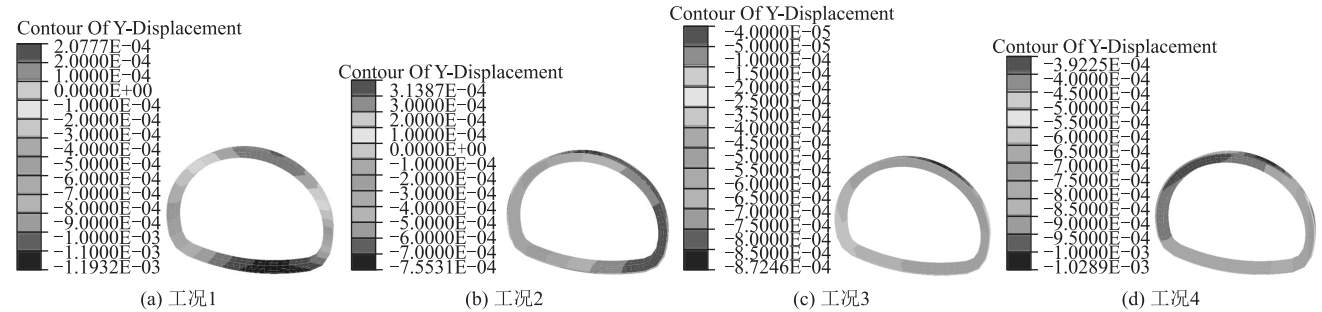


图 7 二衬纵向位移图

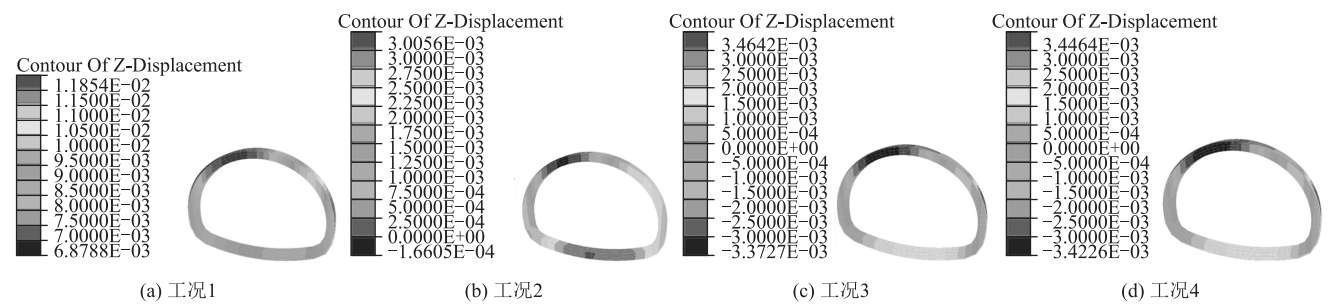


图 8 二衬竖向位移图

以工况 1 (不设减震层) 为基准, 计算工况 2 ~ 工况 4 的位移减震效果, 结果如表 3 所示。

表 3 纵向、竖向最大位移及减震效果表

工况	纵向位移		竖向位移	
	最大值/mm	减震效果/%	最大值/mm	减震效果/%
1	1.19	—	11.85	—
2	0.76	36.13	3.00	74.68
3	0.87	26.89	3.46	70.80
4	1.03	13.45	3.45	70.89

由图 7、图 8 和表 3 可知, 该隧道洞口浅埋偏压段设施减震层后, 二衬结构纵向、竖向位移最大值均有减少。相较于工况 1, 工况 2 的纵向最大位移, 减少 0.43 mm, 减震效果为 36.13%; 工况 3 的纵向最大位移减少 0.32 mm, 减震效果为 26.89%; 工况 4 的纵向最大位移减少 0.16 mm, 减震效果为 13.45%。工况 2 的竖向最大位移减少 8.85 mm, 减震效果为 74.68%; 工况 3 的竖向最大位移减少 8.39 mm, 减震效果为 70.80%; 工况 4 的竖向最大位移减少 8.40 mm, 减震效果为 70.89%。竖向位移差如表 4 所示。

表 4 竖向位移差表

工况	竖向位移/mm		
	最大值	最小值	位移差
1	11.85	6.87	4.98
2	3.00	-1.66	4.66
3	3.46	-3.37	6.83
4	3.45	-3.42	6.87

由表 4 可知, 由隧道二衬结构的竖向位移最大值与最小值得到竖向位移差。相较于工况 1, 工况 2 竖向位移差减少 0.32 mm, 工况 3 竖向位移差增大 1.85 mm, 工况 3 竖向位移差增大 1.89 mm。工况 2 竖向位移差减少, 而工况 3 及工况 4 的竖向位移差均有所增加。

综上所述, 工况 2 的减震效果最佳, 即施設 5 cm 减震层优于施設 10 cm、15 cm 减震层。

3.3 结构安全系数分析

以工况 2 拱顶为例, 绘制拱顶应变时程曲线, 如图 9 所示。

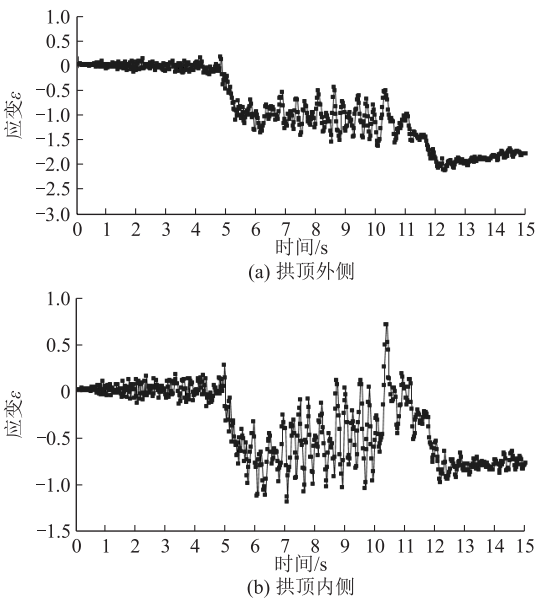


图 9 拱顶内外侧应变时程曲线图(工况 2)

由式(1)、式(2) 计算二衬结构轴力及弯矩, 以工况 2 拱顶为例, 绘制内力时程曲线图。由式(3)、式(4) 计算二衬结构安全系数<sup>[17]</sup>, 如图 10 所示。

二衬结构的轴力、弯矩值公式为:

$$N = \frac{1}{2}E(\varepsilon_{\text{内}} + \varepsilon_{\text{外}})bh \tag{1}$$

$$M = \frac{1}{12}E(\varepsilon_{\text{内}} + \varepsilon_{\text{外}})bh^2 \tag{2}$$

式中:  $N$ ——轴力(kN);  
 $M$ ——弯矩(kN·m);  
 $b$ ——截面宽度(m);  
 $h$ ——截面厚度(m);  
 $\varepsilon_{\text{内}}、\varepsilon_{\text{外}}$ ——结构内、外侧应变;  
 $E$ ——弹性模量(GPa)。

二衬结构安全系数表达为:

$$KN \leq \varphi \alpha R_a bh \tag{3}$$

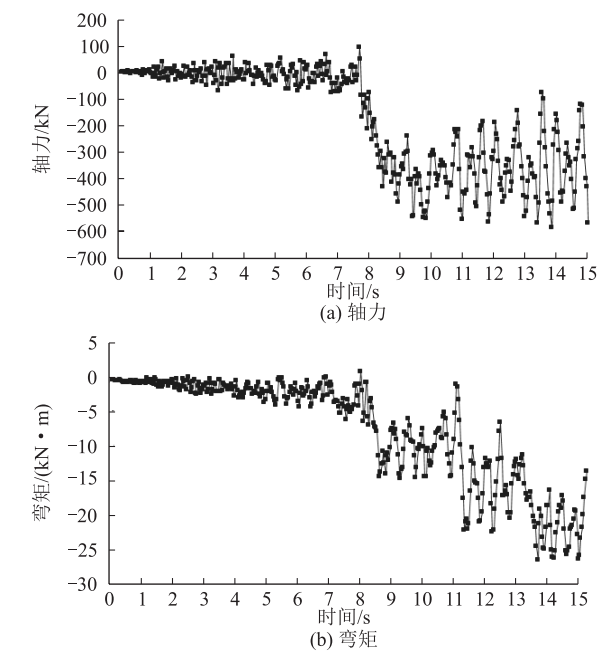


图 10 拱顶处内力时程曲线图(工况 2)

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_1 b h}{6 e_0 / h - 1}$$

(4)

式中:  $K$ ——安全系数;  
 $N$ ——轴力( kN );  
 $\varphi$ ——构件纵向弯曲系数;  
 $\alpha$ ——轴向力偏心影响系数;  
 $R_a$ ——混凝土抗压极限强度( MPa );  
 $R_l$ ——混凝土抗拉极限强度( MPa )。

绘制各监测点最小安全系数图,如图 11 所示;各监测点安全系数最小值,如表 5 所示;计算各监测点的减震效果如表 6 所示。

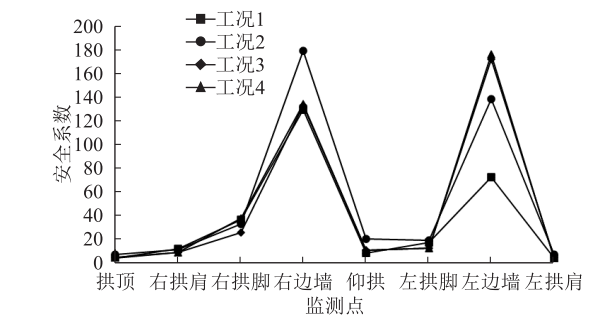


图 11 各监测点最小安全系数图

由图 11、表 5 及表 6 可知,不同厚度的减震层减震效果不同。工况 2( 铺设 5 cm 减震层)减震效果最佳,平均减震效果为 50.46% ;工况 3( 铺设 10 cm 减震层)减震效果不佳,平均减震效果为 11.10% ;工况 4( 铺设 15 cm 减震层),减震效果不佳,平均减震效果为 12.56%。

表 5 二衬结构各监测点安全系数表

测点位置	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
拱顶	4.180	7.087	4.416	4.186
右拱肩	12.002	11.222	8.563	8.523
右拱脚	36.130	32.590	25.397	37.562
右边墙	128.840	178.690	132.440	133.518
仰拱	8.474	20.437	10.297	10.492
左拱脚	17.070	18.893	12.558	12.406
左边墙	72.350	137.779	171.078	175.667
左拱肩	4.197	7.112	4.498	3.461

表 6 二衬结构各工况减震效果表( % )

测点位置	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
拱顶	-	69.55	5.65	0.14
右拱肩	-	- 6.50	- 28.65	- 28.99
右拱脚	-	- 9.80	- 29.71	3.96
右边墙	-	38.69	2.79	3.63
仰拱	-	141.17	21.51	23.81
左拱脚	-	10.68	- 26.43	- 27.32
左边墙	-	90.43	136.46	142.80
左拱肩	-	69.45	7.17	- 17.54
平均减震效果	-	50.46	11.10	12.56

工况 1 二衬结构薄弱处为拱顶和左拱肩,安全系数仅有 4.18 和 4.197。工况 2 和工况 3 右拱脚和右拱肩处,较工况 1 安全系数均有降低,但是工况 2 拱顶和左拱肩处安全系数较工况 1 增大 2.907 和 2.915,减震效果为 69.55% 和 69.45%,工况 3 拱顶和左拱肩处安全系数较工况 1 增大 0.236 和 0.301,减震效果为 5.65% 和 7.17% ;工况 2 和工况 3 均提高二衬结构薄弱处安全性;工况 4 左拱肩处安全系数减小 0.736,减震效果为 - 17.54%,说明工况 4 削弱二衬结构薄弱处的安全性。

推测工况 3 及工况 4 安全系数减小的原因为:减震层厚度超过某一限值时,震时围岩变形增大,进而导致二衬位移变大,二衬结构薄弱处(拱顶、左拱肩)应力增大。综上所述,工况 2 的减震效果最佳,即铺设 5 cm 减震层优于铺设 10 cm、15 cm 减震层。

4 结论

(1) 与工况 1( 不设减震层)相比,工况 2 和工况 4 的最大主应力减震效果为 26.05%、45.38%,工况 3 的最大主应力减震效果为 - 134.45% ;工况 2 ~ 工况 4 的最小主应力减震效果分别为 21.57%、26.70%、25.16%。

(2) 与工况 1( 不设减震层)相比,由二衬结构纵向位移变化可知,工况 2 ~ 工况 4 的减震效果分别为 36.13%、26.89%、13.45% ;由二衬结构竖向位移变

化可知,工况2~工况4的减震效果分别为74.68%、70.80%、70.89%。

(3) 施设减震层可对二衬不同位置的安全系数进行调整,具有不同程度的减震效果,且工况2效果最佳。与工况1(不设减震层)相比,工况2的平均减震效果为50.46%;工况3的平均减震效果为11.10%;工况4的平均减震效果为12.56%。

综上所述,对于具有偏压浅埋特点的隧道洞口,采用施设减震层的减震措施后,减震层厚度存在一个合理的限值,超过这个限值,对结构安全性不利。分析表明工况2(施设5 cm 减震层)的减震效果优于工况3(施设10 cm 减震层)和工况4(施设15 cm 减震层)的减震效果。建议该工程采用施设5 cm 减震层的减震措施。

参考文献:

[1] 宋战平,裴佳锋,潘红伟,等. 浅埋偏压隧道洞口段超前大管棚支护效果分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(6): 86-96.  
SONG Zhanping, PEI Jiafeng, PAN Hongwei, et al. Analysis on the Support Effect of Advance Large Pipe Umbrella at Portal Section of Shallow Tunnel under Unsymmetrical Load [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(6): 86-96.

[2] 贾元霞. 高速铁路浅埋偏压隧道安全进洞方案研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1): 22-28.  
JIA Yuanxia. A Safe Entrance Scheme of Shallow Buried Bias Tunnels on High-speed Railways [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 22-28.

[3] 皇民,赵玉如,苑俊杰,等. 浅埋双洞错距山岭隧道洞口段地震响应试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(3): 96-104, 113.  
HUANG Min, ZHAO Yuru, YUAN Junjie, et al. Experimental Study on Seismic Response of Portal Section of Shallow Buried Double Staggered Mountain Tunnels [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(3): 96-104, 113.

[4] 任洋,李天斌,赖林. 强震区隧道洞口段边坡动力响应特征离心振动台试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1605-1612, 1624.  
REN Yang, LI Tianbin, LAI Lin. Centrifugal Shaking Table Test on Dynamic Response Characteristics of Tunnel Entrance Slope in Strong Earthquake Area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1605-1612, 1624.

[5] 邢渝遥,谢义正. 不同净距下浅埋分岔隧道力学行为研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4): 87-92.  
XING Yuyao, XIE Yizheng. Study on Mechanical Behavior of Shallow-buried Bifurcation Tunnels with Different Clear Distances [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 87-92.

[6] 梁庆国,陈克霖,熊玉莲,等. 地震动作用下隧道洞口段破坏特征试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1): 122-131.  
LIANG Qingguo, CHEN Kelin, XIONG Yulian, et al. Experimental

Study on Failure Characteristics of Tunnel Portal under Ground Motion [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1): 122-131.

[7] 蒋梦新,邱枫博,刘久明,等. 强震区隧道洞口段刚柔并济抗震技术研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 16-20.  
JIANG Mengxin, QIU Fengbo, LIU Jiuming, et al. Study on Rigid and Flexible Anti-seismic Technology for Tunnel Portal Sections in Meizoseismic Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 16-20.

[8] 王泽军,陈铁林,崔光耀,等. 强震区隧道洞口软硬岩交接段围岩注浆抗震措施效果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 96-102.  
WANG Zejun, CHEN Tielin, CUI Guangyao, et al. Aseismic Effect of Grouting Measures for Tunnel Portal Structure at Interface between Soft and Hard Rock in High-intensity Earthquake Zone [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 96-102.

[9] 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 Guangyao, JI Lei, JING Hongfei. 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.

[10] 赵英伟. 高烈度地震区倾斜隧道洞口段抗减震技术研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(2): 32-38.  
ZHAO Yingwei. Study on Anti-seismic and Vibration Reduction Techniques for Inclined Tunnel Portal Sections in High Seismic Intensity Zones [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 32-38.

[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, 44(8): 126-131.  
WANG Mingnian, CUI Guangyao. 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.

[12] 范凯祥,申玉生,高波,等. 穿越软硬围岩隧道设置减震层振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 109-120, 128.  
FAN Kaixiang, SHEN Yusheng, GAO Bo, et al. Shaking Table Test on Damping Layer Applied in Tunnel Crossing Soft and Hard Surrounding Rock [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 109-120, 128.

[13] 闻毓民,信春雷,申玉生,等. 隧道衬砌结构减震层效能评定方法的振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(5): 197-207.  
WEN Yumin, XIN Chunlei, SHEN Yusheng, et al. Shaking Table Tests for Effectiveness Evaluation Method of Damping Layer of Tunnel Lining Structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(5): 197-207.

[14] 关振长,朱凌枫,乔梁,等. 偏压条件下特大断面隧道地震动态响应的数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(4): 927-938.

- Properties of Super High-strength and High Performance Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6): 49–55.
- [4] 阎培渝. 超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J]. 混凝土世界, 2010(9): 36–41.
- YAN Peiyu. Research and Development in UHPC[J]. China Concrete, 2010(9): 36–41.
- [5] 魏林. 超高性能混凝土在沪通长江大桥上的应用[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(5): 85–89.
- WEI Lin. Application of Ultra-high Performance Concrete in Shanghai-Nantong Yangtze River Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(5): 85–89.
- [6] 孙宗磊,李恩良. 包银高铁乌海黄河桥主桥方案研究[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(1): 75–84.
- SUN Zonglei, LI Enliang. Study on Main Bridge Scheme of Wuhai Yellow River Bridge of Baotou-Yinchuan High-speed Railway[J]. China Railway Science, 2022, 43(1): 75–84.
- [7] 李瑞俊. C55聚丙烯纤维高性能混凝土在铁路桥梁主体结构中应用技术研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(3): 29–35.
- LI Ruijun. Applied Research on C55 Polypropylene Fiber Reinforced High Performance Concrete in Railway Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(3): 29–35.
- [8] 姚又琳,邵旭东. 大跨径钢—UHPC 轻型组合梁斜拉桥力学与经济性能研究[J]. 公路工程, 2018, 43(1): 20–24.
- YAO Youlin, SHAO Xudong. Economic and Mechanical Properties of Large Span Cable-stayed Bridges with Lightweight Steel-UHPC Composite Beam[J]. Highway Engineering, 2018, 43(1): 20–24.
- [9] 刘琛. 高速铁路 UHPC 试验箱梁的设计与施工研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(8): 89–92.
- LIU Chen. Design and Construction Research of UHPC Test Box Girders for High-speed Railway[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(8): 89–92.
- [10] 赵秋,陈平,陈宝春,等. 装配式钢—UHPC 组合桥面板试设计及性能研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 94–99.
- ZHAO Qiu, CHEN Ping, CHEN Baochun, et al. Study of Trial Design and Performance of Assembled Steel and UHPC Composite Bridge Deck[J]. Bridge Construction, 2018, 48(1): 94–99.
- [11] 杨剑,方志. 超高性能混凝土梁正截面承载力[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 23–30.
- YANG Jian, FANG Zhi. Normal Section Bearing Capacity of Ultra High Performance Concrete Beam[J]. China Railway Science, 2009, 30(2): 23–30.
- [12] 吴美艳,周尚猛. 超高性能混凝土组合钢桥面承载性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 25–29.
- WU Meiyun, ZHOU Shangmeng. Test Study of Bearing Capacity of Ultra-high Performance Concrete and Steel Composite Bridge Deck[J]. Bridge Construction, 2017, 47(3): 25–29.
- [13] 李晓波. 铁路混凝土桥梁耐久性设计研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 49–52.
- LI Xiaobo. Study on Durability Design of Concrete Bridge of the Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 49–52.
- [14] 陈春红,陈浩锋. 环氧沥青混凝土钢桥面铺装疲劳寿命研究[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 301–304.
- CHEN Chunhong, CHEN Haofeng. Study on Fatigue Life of Epoxy Asphalt Concrete Steel Bridge Deck Pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(3): 301–304.
- [15] 艾宗良,马庭林,袁明,等. 环氧沥青混凝土柔性防水保护层在铁路钢桥上的应用[J]. 钢结构, 2013, 28(4): 41–45.
- AI Zongliang, MA Tinglin, YUAN Ming, et al. The Application of Epoxy Asphalt Concrete Flexible Waterproof Protective Layer in Railway Steel Bridges[J]. Steel Construction, 2013, 28(4): 41–45.
- [16] 徐斌,王仁贵,徐速,等. ECO 改性聚氨酯混凝土铺装层力学仿真分析[J]. 公路, 2022, 67(12): 131–135.
- XU Bin, WANG Rengui, XU Su, et al. Mechanical Simulation Analysis of ECO Modified Polyurethane Concrete Pavement[J]. Highway, 2022, 67(12): 131–135.

(上接第 62 页)

- GUAN Zhenchang, ZHU Lingfeng, QIAO Liang, et al. Seismic Responses of Large-section Tunnel with Unsymmetrical Loading Based on Numerical Simulations[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4): 927–938.
- [15] 王赶,杜建明,房倩,等. 水平地震力作用下浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算方法研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 133–139.
- WANG Gan, DU Jianming, FANG Qian, et al. Calculation Method of Surrounding Rock Pressure of Shallow Tunnels with Small Spacing under Horizontal Seismic and Unsymmetrical Loads[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9): 133–139.
- [16] 赵富发,江学良,杨慧,等. 橡胶减震层对浅埋偏压隧道地震加速度响应影响的试验研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1622–1628.
- ZHAO Fufa, JIANG Xueliang, YANG Hui, et al. Experimental Study on the Influence of Rubber Shock Absorbing Layer on Seismic Acceleration Response of Shallow Buried Bias Tunnel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(4): 1622–1628.
- [17] TB 10003–2016 铁路隧道设计规范[S].
- TB 10003–2016 Code for Design of Railway Tunnel[S].