

文章编号: 1674—8247(2024)02—0032—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 02. 006

高烈度地震区倾斜隧道洞口段抗减震技术研究

赵英伟

(中铁十四局集团第五工程有限公司, 山东 济宁 272117)

摘 要:为提升高烈度地震区倾斜隧道洞口段的抗震性能,依托某隧道工程,利用有限差分数值软件 FLAC3D 研究了注浆加固和减震层的抗减震效果。结果表明:(1)隧道纵向应力极值和位移最大值出现在洞口中间过渡段,监测面内应力极值和位移最大值均出现在衬砌结构拱脚;(2)与无抗减震措施相比,注浆加固与施作减震层均能减少隧道二次衬砌位移差,施作减震层后隧道竖向位移差减少最多,减震效果达到 74.83%;(3)工况 1(无措施)最小主应力峰值最大,为 -28.64 MPa,施作减震层后为 -20.05 MPa,减震效果达到 29.99%;(4)随着隧道纵向长度的增加,最小安全系数先减小后增大,最小值出现在中间过渡段监测面 S3 处;工况 1 安全系数为 1.95,工况 2 为 2.24,但仍低于安全阈值,工况 3 为 2.56,符合安全要求。综合位移、应力和安全系数,采用减震层的抗减震效果优于注浆加固。研究成果可为倾斜隧道洞口段抗减震设计提供参考。

关键词:隧道工程;高烈度地震区;倾斜隧道;洞口段;抗减震措施

中图分类号:U455

文献标志码:A

32

Study on Anti-seismic and Vibration Reduction Techniques for Inclined Tunnel Portal Sections in High Seismic Intensity Zones

ZHAO Yingwei

(The Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway Fourteenth Bureau Group Co., Ltd., Jining 272117, China)

Abstract: To enhance the seismic performance of inclined tunnel portal sections in high seismic intensity zones, this study, based on a specific tunnel project, employed the finite difference numerical software FLAC3D to investigate the effectiveness of grouting reinforcement and vibration damping layers. Findings indicate: (1) The extreme longitudinal stress and maximum displacement occur in the intermediate transition section of the tunnel portal, while the extreme internal stress and maximum displacement are both observed at the skewback of the lining structure. (2) Compared to scenarios without anti-seismic measures, both grouting reinforcement and the implementation of a vibration damping layer reduce the differential displacement of the secondary lining. The vertical displacement difference is most significantly reduced after installing the damping layer, with a vibration reduction effectiveness of 74.83%. (3) The minimum principal stress peak is highest in Condition 1 (with no measures), reaching -28.64 MPa, and decreases to -20.05 MPa after the installation of the damping layer, resulting in a vibration reduction effectiveness of 29.99%. (4) As the longitudinal length of the tunnel increases, the minimum safety factor initially decreases before increasing, reaching its lowest value at monitoring surface S3 in the intermediate transition section. The safety factor is 1.95 for Condition 1, and 2.24 for Condition 2, which although improved, remains below the safety threshold, and rises to 2.56 for Condition 3, meeting safety requirements. Considering displacement, stress, and safety factors, the adoption of a vibration damping layer demonstrates superior anti-

收稿日期:2024-01-08

作者简介:赵英伟(1976-),男,工程师。

引文格式: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.

seismic and vibration reduction performance compared to grouting reinforcement alone. The conclusions provide a valuable reference for the seismic-resistant design of inclined tunnel portal sections.

Key words: tunneling; high seismic intensity zones; inclined tunnels; portal sections; anti-seismic measures

随着西部经济发展的提速,西部人口增长迅速,隧道可为西部城市的稳定发展提供保障。地震中隧道浅埋段衬砌结构震害严重,开展高烈度地震区倾斜隧道洞口段抗减震技术的研究是非常必要的。

近年来,国内地震灾害频发,汶川 8.0 级大地震造成 10 座隧道震害严重^[1];青海门源 6.9 级地震中大梁隧道输水隧洞结构溃散、掉块、边墙内错台,挤压严重段地板隆起近 2 m,拱部大面积坍塌,输水隧洞堵塞导致正洞积水严重^[2]。传统的隧道抗震措施通过增大配筋或增加二次衬砌厚度来提高隧道刚度^[3],或通过围岩注浆约束隧道周围岩土^[4];减震措施以设置减震缝为主^[5]。我国大部分隧道采用新奥法修建,可在初期支护与二次衬砌间或初期支护与围岩间施作减震层^[6],减震层材料一般为橡胶板或泡沫混凝土^[7]。学者探讨了不同环境下减震层最佳厚度^[8-10],部分学者提出了减震层效能评定方法^[11],以上研究对减震层的选择提供了参考。软岩隧道洞口段易受严重地震灾害影响,且在洞口过渡段最为严重^[12]。倾斜隧道洞口段在地震中将遭受更加不利的影响,一是倾斜隧道遭受 SV 波斜入射,隧道动力响应随着入射角度的增大而增大^[13];二是洞口段围岩薄弱,较易产生松动圈,隧道结构变形增大^[14],震中衬砌结构应力极值多出现在拱肩或拱脚处^[15-16]。因此,隧道洞口段的安全不可忽视,抗震性能有待提高,而有关倾斜洞口段减震技术的研究进展缓慢。

本文以某隧道为研究背景,利用有限差分软件 FLAC3D 对该倾斜隧道洞口段进行注浆加固和施作减震层两种抗减震措施的效果进行研究,研究成果可为倾斜隧道洞口段的抗震设防提供参考。

1 工程概况及计算模型

1.1 地质条件

该隧道沿线为低山山前洪积扇地貌,地形平坦、开阔,大致由北向南倾斜,地表土层为第四系上更新统~全新统洪积含碎石粉砂土,结构中等密实。土层下岩层为石炭系下统凝灰质砂岩,局部夹安山岩,岩层产状为 340°~355° SW ∠ 60°~70°,土层与岩层二者界面以 4% 纵坡角度上升。

隧道上覆岩体厚 8~20 m,洞口上覆岩体厚度约 8 m,岩体破碎。隧道洞身均处在强风化岩体内,围岩

裂隙发育,风化严重,以 V 级围岩为主,围岩稳定性较差。

1.2 计算模型

以该隧道某倾斜支洞进口段为研究背景,建立计算模型。围岩和注浆加固区域遵循摩尔-库伦强度准则,隧道初期支护、二次衬砌以及减震层采用弹性模型。模型由上至下依次为碎石土、V 级围岩、IV 级围岩。从 8 m 深洞口处始以 12% 的坡度纵向向下开挖约 50 m,隧道左右两侧宽度均取 3 倍洞径,约 21 m。模型横向宽度合计 55 m,纵向长度 50 m,竖向深度 62 m,底部为 10 m 厚 IV 级基岩。模型边界条件为:静力计算时约束模型四周以及底部约束,上部无约束;动力计算时,模型底部采用静态边界,四周采用自由场边界,上部无约束,1/2 计算模型如图 1 所示。

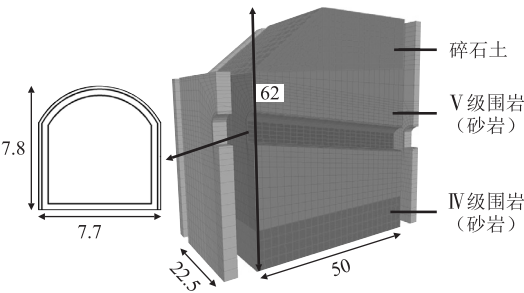


图 1 1/2 计算模型图(m)

1.3 计算工况

本文设置的 3 种工况如表 1 所示。注浆加固通过在隧道周围施作系统锚杆进行注浆,厚度为 3 m;减震层采用工程中常用的橡胶板,施设于初期支护与二次衬砌之间以及二次衬砌仰拱下部,厚度为 0.1 m。

表 1 计算工况表

工况	内容	备注
1(无措施)	无抗减震措施	-
2(注浆加固)	3 m 注浆加固	抗震措施
3(减震层)	施作 10 cm 减震层	减震措施

1.4 物理参数

隧道初期支护使用 C25 喷射混凝土,厚度为 0.2 m,二次衬砌使用 C30 模筑混凝土,厚度为 0.4 m。混凝土参数参考 GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》,土体以及围岩参数由工程设计勘察资料提供,如表 2 所示。

表 2 主要材料物理参数表					
参数	重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa
碎石土	18.0	0.5	0.45	20.0	0.1
V级围岩	20.0	2.0	0.45	22.0	0.2
IV级围岩	22.0	4.0	0.35	35.0	0.5
注浆加固	20.0	2.4	0.35	22.0	0.24
减震层	15.0	0.2	0.2	5.0	5.0
初期支护	23.0	26.0	0.2	—	—
二次衬砌	25.0	30.0	0.2	—	—

1.5 动力荷载

动力荷载为 2008 年汶川地震中卧龙监测站测得的加速度时程地震荷载,按Ⅸ度地震烈度进行标准化,地震荷载加载持续时长 15 s。通过软件进行滤波和基线校正,处理完毕后地震波加速度时程曲线如图 2(以 X 方向为例)。动力阻尼选用局部阻尼,局部阻尼系数为 0.157。

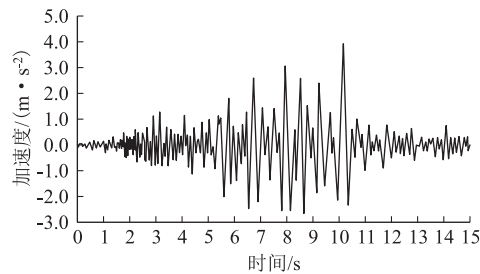


图 2 地震波加速度时程曲线图

1.6 监测点布置

在隧道纵向(0+000~0+050 m)处设置 5 个监测面(S1~S5),如图 3 所示。每个监测面设置 8 个测点,如图 4 所示。

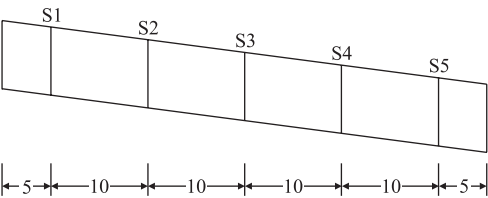


图 3 监测面布置图(m)

2 抗减震效果分析

2.1 结构位移分析

隧道最大位移发生在中间过渡段 S3 监测面附近,监测面内位移最大值多出现在拱脚处。

由二次衬砌拱脚处竖向最大位移和拱顶处竖向最小位移,计算隧道二次衬砌的竖向最大位移差,如表 3 所示。

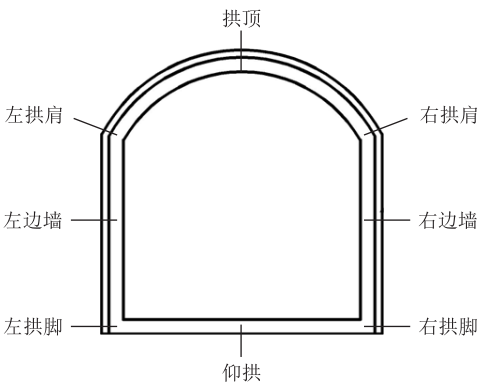


图 4 监测点布置图

工况	竖向位移/mm		
	最大值	最小值	位移差
1(无措施)	21.619	20.617	1.002
2(注浆加固)	21.251	20.512	0.739
3(减震层)	21.072	20.623	0.449

注: 竖向位移差为二次衬砌拱顶与拱脚位移最大值之差

由二次衬砌左右两侧拱脚处横向最大位移和最小位移,得出隧道二次衬砌的横向最大位移差,如表 4 所示。

工况	横向位移/mm		
	最大值	最小值	位移差
1(无措施)	1.331	0.322	1.009
2(注浆加固)	1.176	0.468	0.708
3(减震层)	0.993	0.658	0.335

注: 横向位移差为二次衬砌左、右拱脚位移最大值之差

由表 3、表 4 可知,以工况 1(无抗减震措施)为基准,工况 2 以及工况 3 的最大位移差显著降低。工况 2 的竖向位移差为 0.739 mm,减小了 0.263 mm,减震效果为 26.25%,横向位移差为 0.708 mm,减小了约 0.301 mm,减震效果为 29.83%;工况 3 的竖向位移差为 0.449 mm,减小了 0.555 3 mm,减震效果为 74.83%,横向位移差为 0.335 mm,减小了 0.674 mm,减震效果为 66.79%。由隧道竖向、横向位移差分析结果可知,工况 3 减震效果优于工况 2。

2.2 结构主应力

各工况下隧道二次衬砌大小主应力如图 5、图 6 所示。以工况 1(无抗减震措施)为基准,计算工况 2 和工况 3 的减震效果,结果如表 5 所示。

由图 5、图 6 可知,最大、最小主应力的应力极值出现在拱脚和仰拱处,拱顶以及边墙处应力值最小;随着隧道纵向长度的增加,应力极值先增大后减小,

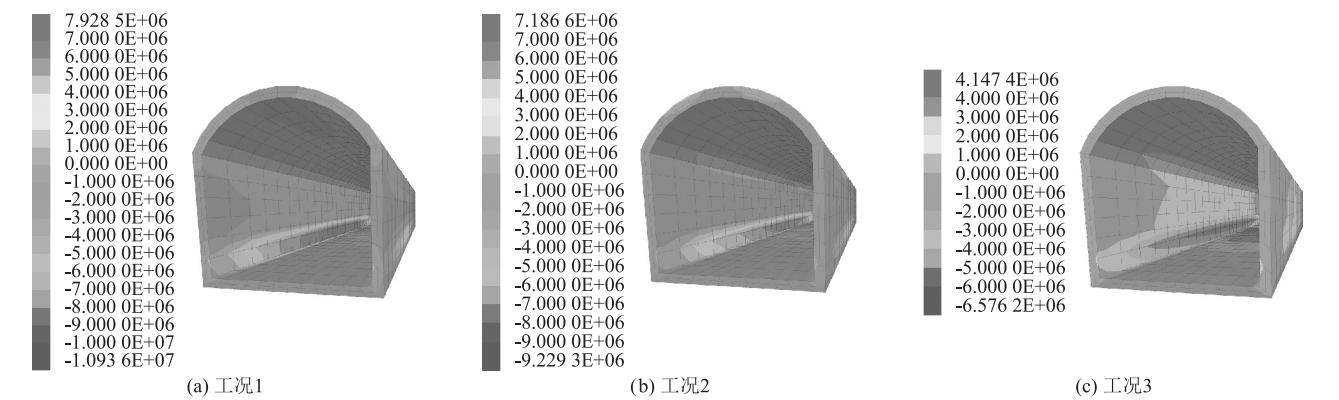


图 5 二次衬砌最大主应力云图(Pa)

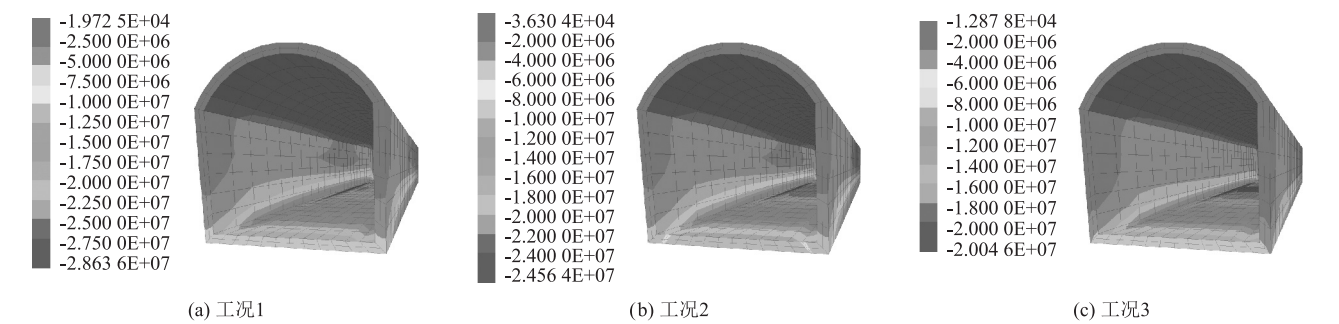


图 6 二次衬砌最小主应力云图(Pa)

表 5 主应力及减震效果表				
工况	最大主应力 /MPa	减震效果 /%	最小主应力 /MPa	减震效果 /%
1(无措施)	7.93	—	−28.64	—
2(注浆加固)	7.19	9.33%	−24.56	14.24
3(减震层)	4.15	42.28%	−20.05	29.99

最大主应力的最大值和最小主应力的最小值都出现在中间过渡段 S3 监测面附近的拱脚处, S3 监测面附近拱脚出现了应力集中。

由表 5 可知,工况 1(无抗减震措施)的最大主应力最大值为 7.93 MPa,最小主应力最小值为 −28.64 MPa。施作抗减震措施后,隧道二次衬砌拱脚应力集中处受力明显改善。工况 2 最大主应力最大值为 7.19 MPa,最小主应力最小值为 −24.56 MPa,较工况 1 最大主应力的应力值减少 9.33%,最小主应力的应力值减少 14.24%;工况 3 最大主应力最大值为 4.15 MPa,最小主应力最小值为 −20.05 MPa,较工况 1 最大主应力的应力值减少 42.28%,最小主应力的应力值减少 29.99%。综合隧道二次衬砌的最大、最小主应力分析结果可知,工况 3 的减震效果优于工况 2。

2.3 结构剪应力

各工况下隧道的最大剪应力如图 7 所示,以工

况 1(无抗减震措施)为基准,计算工况 2 和工况 3 的减震效果,结果如表 6 所示。

表 6 主应力及减震效果表		
工况	最大剪应力/MPa	减震效果/%
1(无措施)	14.35	—
2(注浆加固)	11.47	20.06
3(减震层)	9.27	35.40

由图 7 可知,最大剪应力的最大值出现在中间过渡段 S3 监测面附近拱脚处。工况 1(无抗减震措施)最大剪应力的最大值为 14.35 MPa,施作抗减震措施后,隧道二次衬砌拱脚处最大剪应力显著下降。

由表 6 可知,工况 2 最大剪应力为 11.47 MPa,较工况 1 减少了 20.06%;工况 3 最大剪应力为 9.27 MPa,较工况 1 减少了 35.40%。由隧道二次衬砌的最大剪应力分析可知,工况 3 的减震效果优于工况 2。

2.4 安全系数

计算各监测点的安全系数,可知纵向上安全系数最小值出现在中间过渡段 S3 监测面。S3 监测面的安全系数包络图如图 8 所示。

由图 8 可知,3 种工况下安全系数最小值均出现在拱脚;工况 1 和工况 2 安全系数最大值出现在拱顶处,而工况 3 安全系数最大值出现在边墙处;可以看

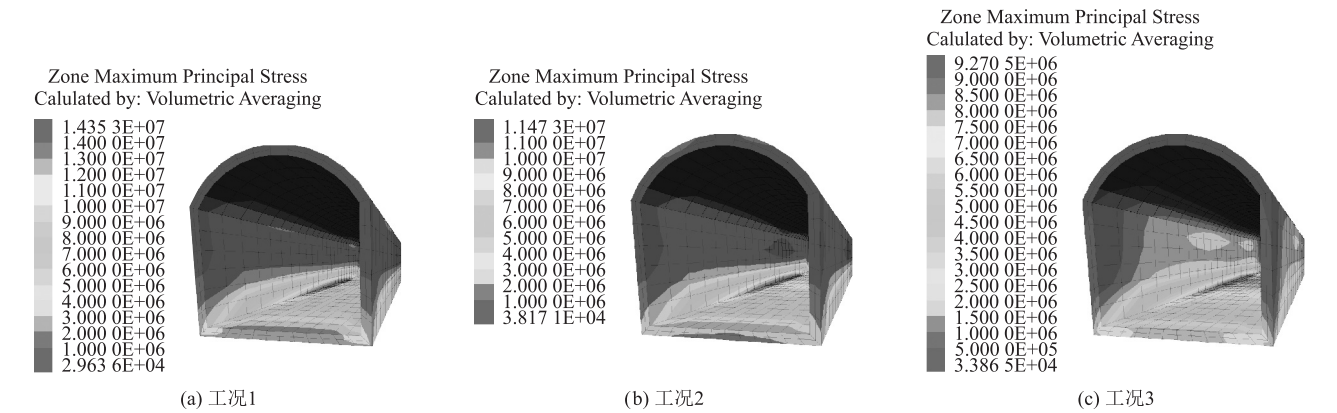


图 7 二次衬砌最大剪应力云图(Pa)

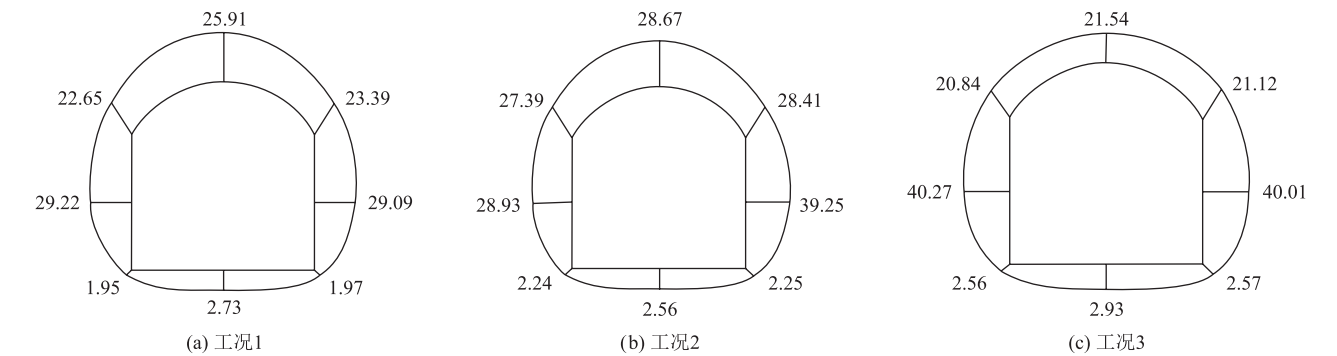


图 8 二次衬砌安全系数包络图

出,工况 3(施作减震层)削弱了隧道二次衬砌拱顶和拱肩安全系数,增强了隧道二次衬砌拱脚、仰拱和边墙处安全系数,使得隧道应力较工况 1 和工况 2 分布更均匀。

选取监测面的最小安全系数表征结构安全状态,如图 9 所示。以工况 1(无抗减震措施)为基准,由最小安全系数计算减震效果,结果如表 7 所示。

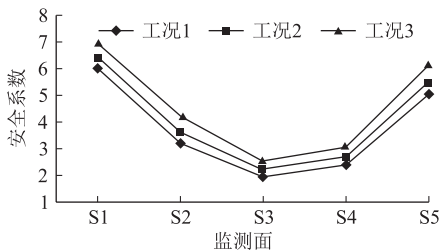


图 9 最小安全系数图

表 7 最小安全系数及减震效果表

监测面	工况 1	工况 2	减震效果/%	工况 3	减震效果/%
S1	6.01	6.48	7.82	6.98	16.14
S2	3.21	3.64	13.39	4.24	32.08
S3	1.95	2.24	14.87	2.56	31.28
S4	2.39	2.76	15.48	3.06	28.03
S5	5.05	5.51	9.11	6.12	21.19

由图 9 可知,随着隧道纵向长度的增加,最小安全系数先减小后增大,最小安全系数的最小值出现在中间过渡段监测面 S3 处,二次衬砌最薄弱位置出现在监测面 S3 附近。

由表 7 可知,工况 2 最小安全系数较工况 1 有所提升,减震效果为 7.82%~15.48%;工况 3 最小安全系数较工况 1 显著上升,减震效果为 16.13%~32.08%。工况 1 最小安全系数为 1.95,工况 2 最小安全系数有所提高,为 2.24,但仍低于安全阈值(2.4),工况 3 最小安全系数为 2.56,符合安全要求。

由图 8、图 9 和表 7 可知,工况 3 抗减震效果优于工况 2,即施作减震层减震效果最好。因此,本工程推荐采用减震层进行抗震设防设计。

3 结论

- (1)对于高烈度地震区倾斜隧道洞口段,隧道纵向上应力极值和位移最大值出现在洞口中间过渡段,且应力极值和位移最大值均出现在衬砌结构拱脚处。
- (2)与无抗减震措施相比,注浆加固与施作减震层均能减少隧道二次衬砌位移差;施作减震层后隧道竖向位移差减少最多,减震效果达到 74.83%;在结构

应力分析中,工况1(无措施)最小主应力峰值最大,为 -28.64 Mpa ,施作减震层后为 -20.05 Mpa ,减震效果达到 29.99% 。

(3)随着隧道纵向长度的增加,最小安全系数先减小后增大,其最小值出现在中间过渡段监测面S3处,工况1为1.95,工况2为2.24但仍低于安全阈值,工况3为2.56,符合安全要求。

(4)综上所述,倾斜隧道洞口段采用减震层的减震效果优于注浆加固措施,推荐依托工程施作减震层措施进行抗震设防设计。

参考文献:

- [1] 崔光耀,伍修刚,王明年,等. 汶川8.0级大地震公路隧道震害调查与震害特征[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 9-16.
CUI Guangyao, WU Xiugang, WANG Mingnian, et al. Earthquake Damages and Characteristics of Highway Tunnels in the 8.0-Magnitude Wenchuan Earthquake [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 9-16.
- [2] 张威,李明,姬云平,等. 青海门源M6.9地震典型隧道破坏特征分析与启示[J]. 地震工程学报, 2022, 44(3): 661-669.
ZHANG Wei, LI Ming, JI Yunping, et al. Analysis and Enlightenment of Typical Failure Characteristics of Tunnels Caused by the Menyuan M6.9 Earthquake in Qinghai Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 661-669.
- [3] 王秋懿,杨奎,毛金龙,等. 九度地震区公路隧道二次衬砌结构抗震综合措施研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 42-49, 66.
WANG Qiuyi, YANG Kui, MAO Jinlong, et al. Study on the Comprehensive Aseismic Measures for the Secondary Lining Structure of Highway Tunnels in Nine-degree Seismic Region [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 42-49, 66.
- [4] 王李斌,崔光耀,荆鸿飞. 高烈度地震区跨断层隧道围岩注浆抗震效果研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(3): 25-29.
WANG Libin, CUI Guangyao, JING Hongfei. Study on Anti-seismic Effect of Surrounding Rock Grouting of Fault-crossing Tunnels in Highly Seismic Area [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 25-29.
- [5] 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(S2): 4113-4121.
WANG Daoyuan, YUAN Jinxiu, ZHU Yongquan, et al. Model Test Study on Earthquake Damage Mechanism of Tunnel at the Junction of Soft and Hard Rocks in High Intensity Area and Damping Joint Damping Technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 4113-4121.
- [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 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.
- [7] 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 Wusheng, CHEN Weizhong, MA Shaosen, et al. Isolation Effect of Foamed Concrete Layer on the Seismic Responses of Tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1027-1036.
- [8] 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.
- [9] 王帅帅,高波. 隧道设置减震层减震机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 592-603.
WANG Shuaishuai, GAO Bo. Damping Mechanism and Shaking Table Test on Mountain Tunnel Linings with Buffer Layers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 592-603.
- [10] 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 Guangyao, WU Xiugang, WANG Mingnian, 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.
- [11] 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.
- [12] 崔光耀,王明年,于丽,等. 汶川地震公路隧道洞口结构震害分析及震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1084-1091.
CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Seismic Damage and Mechanism of Portal Structure of Highway Tunnels in Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1084-1091.
- [13] 张懂懂,刘洋,熊峰,等. P波与SV波斜入射下岩体隧道洞口段地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(24): 278-286.
ZHANG Dongdong, LIU Yang, XIONG Feng, et al. Seismic Response Analysis of Rock Tunnel Near-portal under Oblique Incidence of P Wave and SV Wave [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(24): 278-286.
- [14] 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(S1): 3310-3319.
ZHAO Xu, LI Ruohan, TAO Lianjin, et al. Experimental Study on the Influence of Loose Ring and Damping Layer on Seismic Response of

Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3310 – 3319.

[15] 杨长卫, 张良, 张凯文, 等. 山岭隧道跨断裂带段及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, 2023, 42(4): 993 – 1002.

YANG Changwei, ZHANG Liang, ZHANG Kaiwen, et al. Large Scale Shaking Table Model Test on Seismic Response of Mountain Tunnel Portal Section Passing through Fault Zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 993 – 1002.

[16] 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.

(上接第26页)

载铁路长大坡道区段相邻两牵引变电所的分区所再生制动能量利用系统。进一步的, 计及再生制动能量利用系统的潮流控制原理, 分析了再生制动能量利用系统对牵引供电系统既有保护的影响。最后, 搭建了相应的仿真模型对上述理论研究成果进行了验证, 证明系统运行在两所同时制动、两所同时牵引、一所牵引一所制动的典型工况下, 可以实现削减返送电网有功功率和牵引侧有功功率的目的。

参考文献:

[1] 智慧, 林宗良, 李剑, 等. 高速度铁路牵引供电系统适应性关键技术研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(3): 79 – 83.

ZHI Hui, LIN Zongliang, LI Jian, et al. On the Key Technologies of Adaptability of Traction Power Supply System of Higher-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 79 – 83.

[2] CHOI M E, KIM S W, SEO S W. Energy Management Optimization in a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 463 – 472.

[3] WANG Ke, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. System-level Dynamic Energy Consumption Evaluation for High-speed Railway [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(3): 745 – 757.

[4] 耿安琪, 胡海涛, 张育维, 等. 基于阶梯能量管理的电气化铁路混合储能系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4916 – 4925.

GENG Anqi, HU Haitao, ZHANG Yuwei, et al. Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Electrified Railway Based on Increment Energy Management [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4916 – 4925.

[5] 黄文龙, 胡海涛, 陈俊宇, 等. 枢纽型牵引变电所再生制动能量利用系统能量管理及控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 588 – 598.

HUANG Wenlong, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Energy Management and Control Strategy of Regenerative Braking Energy Utilization System in Hub Traction Substation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 588 – 598.

[6] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模式分解—模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 58 – 65.

LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational Mode Decomposition and Fuzzy Control Strategy of Hybrid Energy Storage for Smoothing Wind Power Outputs [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 58 – 65.

[7] 王继来. 双边贯通供电方式下牵引变电所保护配置研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(2): 90 – 95.

WANG Jilai. Research on the Protection Configuration of Traction Substation in Bilateral Interconnected Power Supply Mode [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(2): 90 – 95.

[8] 李含聪. 混合式牵引供电系统保护方案设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

LI Hancong. Protection Scheme Design of Hybrid Traction Power Supply System [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.