

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221117002

山岭隧道衬砌-减震层体系动力响应研究*

赵旭¹, 袁昀¹, 黎若寒², 黄景琦³, 于兆源⁴

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083; 4. 北京城建北方集团有限公司, 北京 101399)

摘要: 为了探寻隧道设置减震层时影响减震层减震性能的关键因素, 建立了设置减震层的隧道有限元数值模型, 将数值模型与振动台试验进行对比, 验证了数值模型的可靠性。改变减震层设计参数和围岩条件, 通过对隧道结构的主应变、相对变形率以及围岩的塑性区进行分析, 研究不同参数条件下减震层的减震效果。结果表明: 设置减震层后隧道加速度响应的传递函数在 15~30 Hz 频段范围内减小, 说明减震层通过吸收地震波中的高频成分, 减小地震波能量向隧道的传递, 进而减小隧道的地震响应。参数分析结果表明: 减震层弹性模量越小厚度越大, 减震层的减震效果越加明显, 但隧道结构的相对变形率也随之上升。相比于增加减震层厚度, 降低减震层弹性模量对减震效果的提升更为显著。在坚硬围岩中的设置减震层相比于软弱围岩减震效果更显著。

关键词: 隧道工程; 减震层; 减震性能; 数值计算; 动力响应

中图分类号: U461; TP308 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0343-10

Research on Dynamic Response of Lining-Damping Layer System in Mountain Tunnel

ZHAO Xu¹, YUAN Yun¹, LI Ruohan², HUANG Jingqi³, YU Zhaoyuan⁴

(1. The key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Beijing Urban Construction North Group, Beijing 101399, China)

Abstract: In order to explore the key factors that affect the damping performance of tunnels with damping layers, a finite element numerical model for such tunnels was established. The model's reliability was verified by comparing with results from shaking table tests. By changing the design parameters of the damping layer and surrounding rock conditions, and analyzing the principal strain, relative deformation rate, and plastic zone of the tunnel structure, the layer's damping effects under different parameters were studied. The results showed that the transfer function of the tunnel acceleration response decreased within the frequency range of 15~30 Hz after the installation of the damping layer. It indicated that the damping layer reduced the transmission of seismic wave energy to the tunnel by absorbing the

* 收稿日期: 2022-11-17; 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3004304)资助

作者简介: 赵旭(1976—), 女, 副教授。主要从事隧道与地下工程方面的研究。E-mail: zhaoxu@bjut.edu.cn

通讯作者: 黎若寒(1995—), 男, 博士研究生。研究方向为隧道及地下结构抗震。E-mail: lirh@tongji.edu.cn

high-frequency components of the seismic waves, thereby reducing the tunnel's seismic response. Parameter analysis indicated that a damping layer with a lower elastic modulus and greater thickness had a more pronounced damping effect. However, this also led to an increase in the relative deformation rate of the tunnel structure. Compared with increasing the thickness of the damping layer, reducing its elastic modulus could improve its damping effect more significantly. The damping layer was more effective in hard surrounding rock than in soft surrounding rock.

Keywords: tunnel engineering; damping layer; damping performance; numerical calculation; dynamic response

0 引言

我国位于环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震活动强度大、频度高,加上基础设施的建设发展与有限土地资源间的矛盾,因此许多建筑结构不可避免地建设于高烈度地震区或不良地质条件段。虽然相比于地上结构而言,地下结构一般具有更好的抗震性能,但在近几年数次强震中,特别是在集集地震^[1],汶川地震^[2],熊本地震^[3]当中,均在震后调查发现隧道穿越不良地质条件段,并且在地震后发生了严重的破坏,所以隧道等地下结构在强震时的抗震性能也尤为重要。隧道工程作为重要的生命线工程,确保其在地震时不发生大规模严重破坏,是灾后救援顺利开展的重要条件之一。因此,开展强震区隧道工程的抗减震技术的研究具有现实意义。

地下结构的抗减震措施可以从抗震和减震两个角度出发^[4-5]。隧道结构抗震目前主要是通过增强衬砌的强度和刚度,以提高衬砌抵抗围岩变形的能力。而减震措施主要为设置减震缝或减震层等结构以消耗或吸收围岩传递给隧道衬砌的能量。目前,在地下结构抗减震措施研究中,合理的减震构造措施带来的减震效果更加显著^[6-7],对隧道结构而言,周围设置减震层是一种有效便捷的减震措施,相当于隧道结构设置阻尼层以吸引地震能量^[8]。

减震层作为隧道结构减震措施中简单且高效的方法,明确其中影响减震层减震性能的关键因素尤为重要。崔光耀等^[9-10]开展跨断层山岭隧道下不同厚度减震层的震动试验,试验结果表明减震层厚度存在一个最优值。信春雷等^[11]通过数值模拟和振动台试验,研究了围岩-减震层-衬砌系统的地震

响应,分析了减震层材料和几何参数对减震性能的影响。王立新等^[12]通过数值模拟研究了地铁车站设置减震层的动力响应,研究结果表明材料的变形模量为影响减震性能的主要因素。赵武胜等^[13]采用数值模拟研究了减震层剪切模量、厚度及减震层-衬砌界面特性对减震层性能的影响。禹海涛等^[14]推导了设有减震层的深埋圆形隧道地震响应解析解,分析表明减震层的弹性模量和厚度对减震的效果影响显著。崔光耀等^[15]采用有限差分数值软件研究了在跨断层隧道不同位置处设置减震层的减震效果,数值模拟结果表明减震层设置于初衬与围岩间的减震效果优于设置于初衬与二衬间。高峰等^[16]采用有限元方法研究了减震层的阻尼效应和适用条件,坚硬的围岩场地下,减震层能有效减小隧道结构的地震响应。陈之毅等^[17]研究了不同频率地震波对设有减震层的矩形隧道抗震性能的影响。范凯祥等^[18]通过隧道穿越软硬围岩段振动台试验,试验结果表明减震层厚度存在一个最优值,可以使其通过吸收更多低频组分来降低隧道动力响应。王帅帅等^[19-20]推导了平面SV波垂直入射下围岩-减震层-衬砌的动应力集中系数,分析表明减震层对低频波具有较好的减震效果。综上所述,在隧道设置减震层减震效果的研究中,大多讨论了减震层自身物理力学参数以及不同围岩等级等外部条件因素对减震性能的影响,但对于不同减震层参数,不同地层条件下各影响因素间的重要程度还尚未有所研究。因此,本文通过建立马蹄形山岭隧道设置减震层的数值模型,再经由振动台试验验证数值模型的可靠性,分析不同减震层参数和围岩条件对减震效果的影响,讨论减震层实现减震效果的原因,得到减震层自身的最优化参数设计依据。

1 数值模型的建立与验证

1.1 数值模型建立

采用ABAQUS有限元计算软件进行数值模拟,整体数值计算模型如图1所示,隧道为马蹄形截面的山岭公路隧道,整体模型宽度为350 m,高度为250 m,埋深为175 m。隧道衬砌结构跨度为12.5 m,高度为10.3 m,厚度为0.7 m,减震层布置于围岩与衬砌之间,厚度为0.5 m。数值模拟中,围岩采用弹塑性摩尔-库伦本构模型,减震层采用线弹性模型,衬砌为C30混凝土,采用混凝土塑性损伤模型以模拟混凝土的非线性行为^[21],数值模拟中各材料物理力学参数见表1。

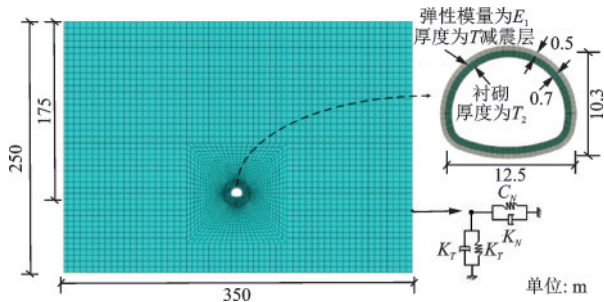


图1 有限元计算模型

Fig.1 Finite element model (FEM)

表1 模型材料参数

Table 1 Model material parameters

介质	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松 比	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力 /kPa
围岩	20	2	0.39	27	200
衬砌	25	30	0.2	—	—
减震层	10	0.3	0.38	—	—

在近场波动有限元分析方法中,为了模拟半无限介质对近场分析区域的辐射阻尼效应,需要对从半无限介质中截取出的有限元模型应用人工边界条件。其中粘弹性人工边界可以有效地模拟无限和半无限介质中的辐射阻尼和弹性恢复行为,本文中采用由X.L.Du^[22-23]等人提出的粘弹性人工边界,在有限元模型的底部及两侧设置粘弹性人工边界,如图1所示。

1.2 数值模型验证

采用在前期研究中已开展的隧道设置减震层

的振动台模型试验^[24]来验证本次数值模拟方法的可靠性。由于正弦波的波形相较简明,可用于试验与数值的对比验证,所以选取振动台试验中频率为2 Hz,加速度峰值为0.4g的正弦波工况数据与数值模型结果进行对比验证。

1.2.1 加速度响应对比

选取衬砌结构仰拱以及与仰拱相同高度的围岩两个位置处的加速度响应进行对比,其中试验和数值中衬砌仰拱位置处的加速度时程曲线如图2所示,与之相同高度的围岩处加速度时程曲线如图3所示。

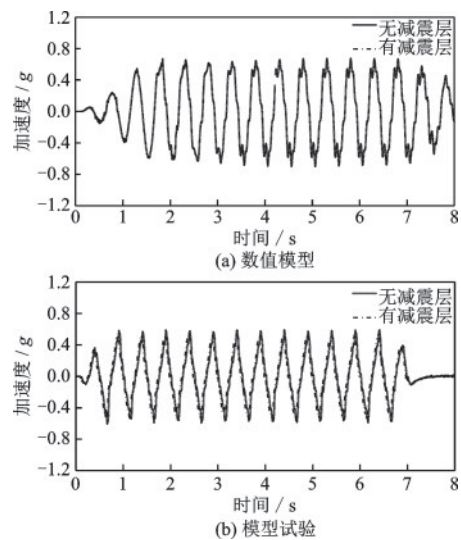


图2 有无减震层隧道仰拱加速度对比

Fig.2 Comparison of tunnel invert acceleration with and without damping layer

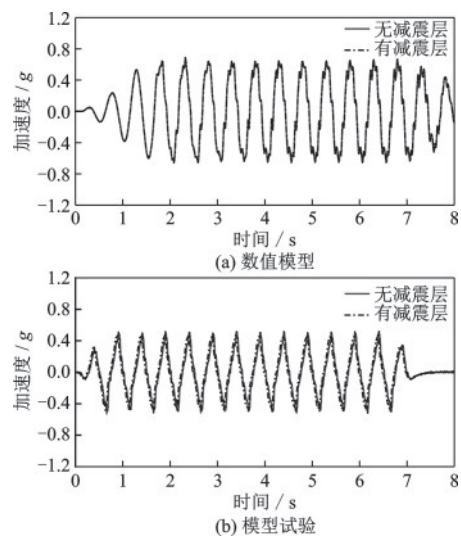


图3 有无减震层围岩处加速度对比

Fig.3 Comparison of acceleration at surrounding rock with or without damping layer

对比仰拱与相同高度处围岩的加速度峰值响应,无减震层工况下,数值模型中仰拱处相比围岩处加速度峰值放大6.5%,模型试验中仰拱处相比围岩处加速度峰值放大14.1%,数值与试验中仰拱相对于相同高度围岩处加速度峰值都出现放大,两者的误差为7.6%。有减震层工况下,数值仰拱处相比围岩处加速度峰值放大7.3%,试验仰拱处相比围岩处加速度峰值放大13.6%,两者误差为6.3%。

1.2.2 应变响应对比

选取衬砌结构拱肩和拱脚两个应变响应最大的位置进行分析。为便于分析地震动带来的应变响应,这里仅考虑由地震动产生的附加应变。图4和图5为数值模型和模型试验中衬砌拱肩和拱脚的附加应变时程曲线。

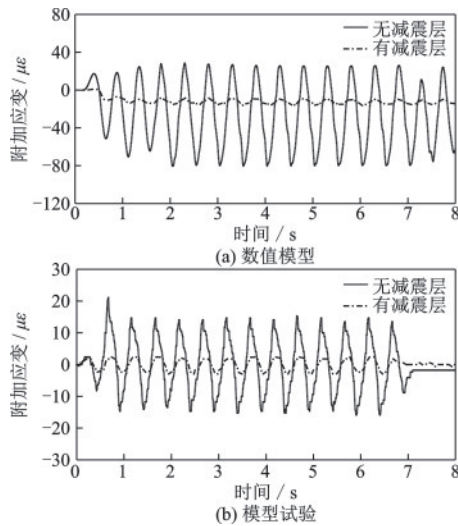


图4 有无减震层衬砌拱肩附加应变对比

Fig.4 Comparison of additional strain at arch shoulder lining with or without damping layer

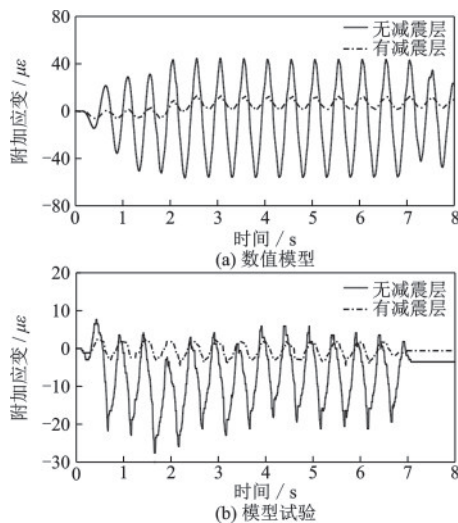


图5 有无减震层衬砌拱脚附加应变对比

Fig.5 Comparison of additional strain at arch foot lining with and without damping layer

可以发现,数值模拟与模型试验中减震层的设置都能有效降低结构的附加应变响应,对于衬砌拱肩处,数值模型中设置减震层后最大附加应变峰值减小79%,振动台试验中减小86%,对于衬砌拱脚处,数值模型中设置减震层后最大附加应变峰值减小77%,振动台试验中减小83%。虽然由于数值与模型试验存在各自的误差,隧道衬砌结构的应变响应结果在数值上存在一定的差异,但设置减震层后带来的减震效果趋势相同,数值模拟与模型试验两者的最大误差为7%,同时两者在总体上的响应规律也基本相似。通过对隧道设置减震层时的数值模拟和模型试验中加速度响应和应变响应对比分析,看出该数值模拟方法能够有效地反应隧道设置减震层时结构的地震响应,说明本文中所采用的数值计算模型可靠有效。

2 隧道设置减震层的减震效果分析

为合理地分析隧道减震层在不同情况下的适用性,在上述隧道设置减震层的数值模型基础上,通过建立考虑以下不同参数设置的数值模型,(1)减震层自身因素:减震层弹性模量以及厚度;(2)场地条件:不同围岩等级,来分析衬砌结构各位置处的最大主应变,隧道衬砌系统的传递函数和围岩的等效塑性应变。目前,在对类似隧道的圆形地下结构抗震性能评价中,衬砌结构的径向变形率较多作为结构的抗震性能指标。因此,本文参考梅贤丞等^[25]采用的马蹄形隧道变形指标,相对变形率 U 以研究减震层在不同环境下的适用性。

$$U = \frac{\sqrt{|\Delta h_1 - \Delta v_1|^2 + |\Delta h_2 - \Delta v_2|^2}}{l} \quad (1)$$

式中, U 为相对变形率; h_1, h_2 分别为左拱脚处的水平向和竖向位移; v_1, v_2 分别为右拱肩处的水平向和竖向位移; l 为左拱脚与右拱肩的初始直线距离。

选取汶川地震卧龙波前20s作为输入地震波由模型底部垂直入射,卧龙波加速度时程曲线和傅里叶谱曲线如图6所示。

2.1 减震层弹性模量

E_1/E_2 为减震层弹性模量与围岩弹性模量之比,当 $E_1/E_2=1$ 时,表明此时的衬砌结构处于无减震层设置的情况。数值模拟中控制围岩的弹性模量不变,通过改变减震层的弹性模量,对减震层弹性模量对减震效果的影响进行分析,其他参数设置

同1.1节。衬砌拱顶、两侧拱肩、两侧拱腰、两侧拱脚以及仰拱处最大主应变峰值随 E_1/E_2 变化规律如图7所示。

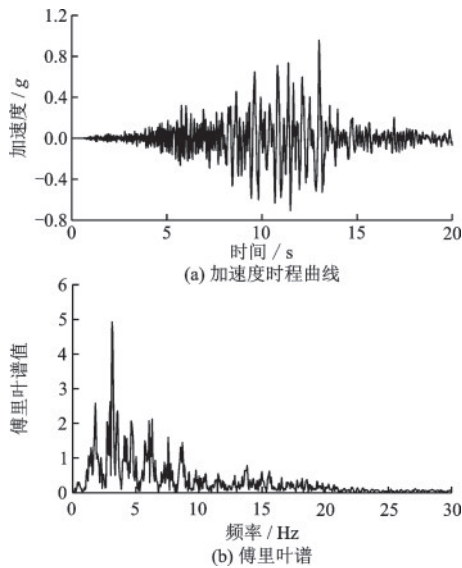


图6 卧龙波
Fig.6 Wolong wave

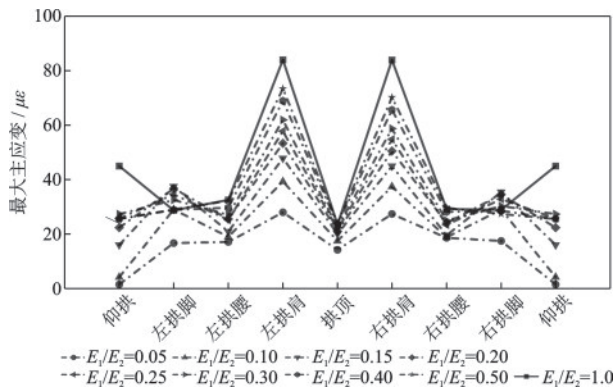


图7 不同 E_1/E_2 下衬砌的最大主应变峰值曲线
Fig.7 Maximum principal strain peak curves of linings with different elastic modulus ratios

可以发现衬砌结构的最大地震响应出现在拱肩位置处,在设置减震层后拱肩处的最大主应变峰值明显减小,虽然衬砌拱脚处最大主应变峰值会略微增加,但在设置减震层后衬砌结构各位置之间的最大主应变差值会降低,有利于结构的整体变形。将拱肩处有无减震层最大主应变峰值之比 $S_{max}/S_{0,max}$ 随弹性模量之比 E_1/E_2 变化情况绘于图8,可以看出当随着弹性模量比 E_1/E_2 减小时, $S_{max}/S_{0,max}$ 也随着降低,并且下降趋势越加明显,弹性模量比在小于0.1时减震效果的提升效率明显增加,表明减震层在具有充分柔性后,能起到更好的减震效果。

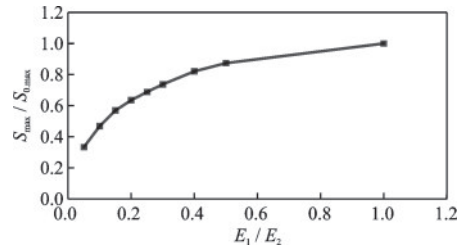


图8 最大主应变比 $S_{max}/S_{0,max}$ 随 E_1/E_2 变化曲线
Fig.8 Variation curve of maximum principal strain ratio with the elastic modulus ratios

传递函数指的是结构系统响应中输出信号的拉普拉斯变换与输入信号的拉普拉斯变换之比,能够描述结构系统的动态响应特性,为了进一步分析减震层变化时隧道结构的动力响应差异,本文选取拱肩处的加速度响应为系统输出信号,地震动加速度为输入信号。图9显示了不同弹性模量比下有减震层与无减震层时传递函数的变化趋势,当 $E_1/E_2=1$ 时表示此时为无减震层设置。从图9可以看出,随着减震层弹性模量的减小,传递函数在15~30 Hz范围内开始逐渐下降,减震层弹性模量越大越接近无减震层工况,这表明在相同条件下,减震层的弹性模量越小时减震效果越好是因为柔性减震层在地震动传播时能够过滤掉地震波中的高频成分,减小地震波能量向隧道的传递,以实现减震作用。

图10显示了4种不同弹性模量比下围岩塑性区分布,4种情况下围岩塑性区主要分布在衬砌的拱脚段与仰拱段。当 E_1/E_2 从0.5减小到0.3时,围

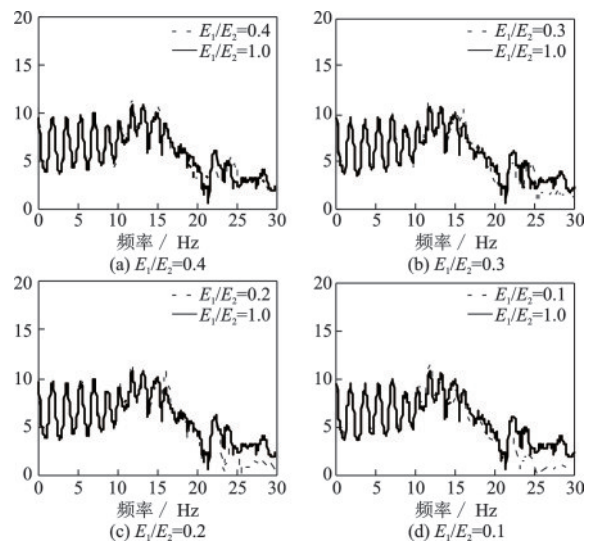


图9 不同 E_1/E_2 下衬砌拱肩处传递函数
Fig.9 Transfer function at the arch shoulder of linings with different elastic modulus ratios

岩塑性区稍微有所减小,而当 E_1/E_2 从0.15减小到0.05时,围岩塑性区的发展明显降低,在0.05的弹性模量比下时围岩周围已无明显塑性区域,说明当减震层具有足够柔性时,在地震荷载作用下,围岩与衬砌之间的柔性减震层能够充分吸收围岩变形以减小围岩压力,从而减弱围岩的塑性区发展以及衬砌所受的围岩压力。

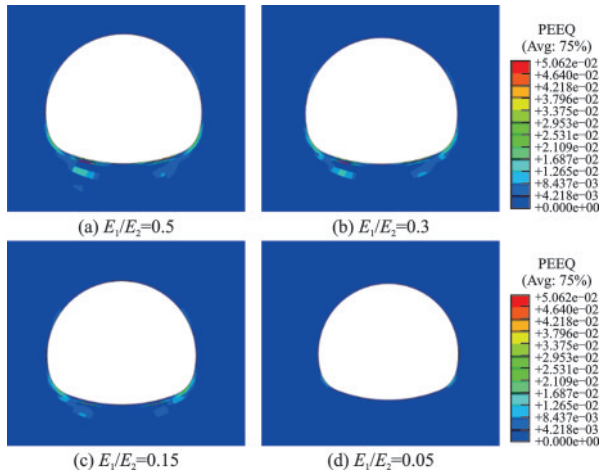


图10 不同 E_1/E_2 下围岩的等效塑性应变
Fig.10 Equivalent plastic strain of surrounding rock with different elastic modulus ratios

$U_{max}/U_{0,max}$ 为有无减震层时衬砌的最大相对变形率之比, $U_{max}/U_{0,max}$ 随 E_1/E_2 的变化曲线如图11所示。可以发现,当随着 E_1/E_2 的减小,衬砌的相对变形率逐渐变大,并且增加的趋势越加明显,在弹模比低于0.05后相对变形率会快速增大,这说明虽然减震层的设置会减小衬砌的最大主应变,但相对变形率会相应增大,弹模比存在一个最小限值。

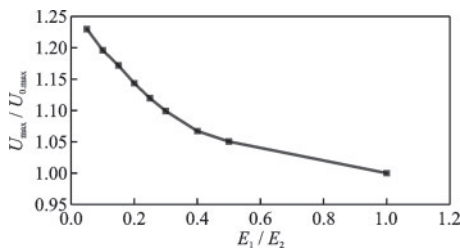


图11 相对变形率 $U_{max}/U_{0,max}$ 随 E_1/E_2 变化曲线
Fig.11 Variation curve of relative deformation rate with different elastic modulus ratios

2.2 减震层厚度

T_1/T_2 为减震层厚度与衬砌厚度之比,当时 $T_1/T_2=0$ 表明隧道没有设置减震层。通过控制衬

砌厚度不变,改变减震层厚度分析厚度对减震层减震效果的影响,其他参数设置同1.1节。衬砌拱顶、两侧拱肩、两侧拱腰、两侧拱脚以及仰拱处最大主应变峰值随 T_1/T_2 变化规律如图12所示。

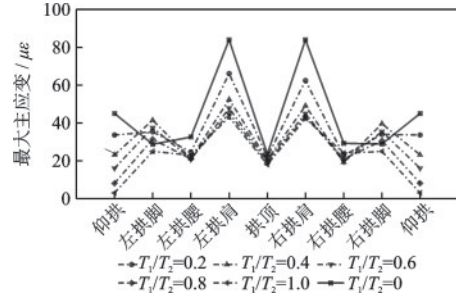


图12 不同 T_1/T_2 下衬砌的最大主应变峰值曲线
Fig.12 Maximum principal strain peak curves of linings with different thickness ratios

可以发现当减震层厚度增大时,衬砌地震响应最大的拱肩处的最大主应变峰值逐渐减小,将拱肩处的最大主应变之比 $S_{max}/S_{0,max}$ 随厚度比变化曲线绘于图13,发现厚度比 T_1/T_2 增大时, $S_{max}/S_{0,max}$ 的减小趋势开始逐渐放缓,当厚度比大于0.4后最大主应变的减小效率明显降低,小于减小弹性模量所起到的效果。因此,相比减小弹性模量对应变减小的效率,虽然较厚的减震层相比厚度小的减震层能有着更好的减震效果,但是在考虑增加厚度所带来的施工风险与成本,以及减小减震层弹性模量可行性高易于实现,建议实际工程中控制减震层的厚度,弹性模量在对减震效果提升中起到更加重要的作用,优先考虑优化减震层材料的弹性模量,以达到更好的减震效果。

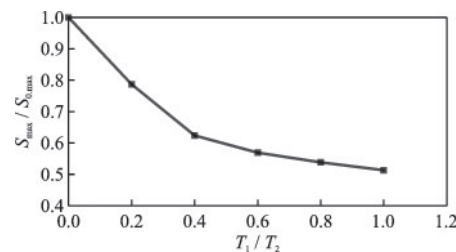


图13 有无减震层 $S_{max}/S_{0,max}$ 随 T_1/T_2 变化曲线
Fig.13 Variation curve of maximum principal strain ratio under different thickness ratios with or without damping layer

图14显示了不同厚度比下有减震层与无减震层时传递函数的变化趋势,当 $T_1/T_2=0$ 时表示此时为无减震层设置。从图可以看出,随着减震层厚

度的增加,传递函数在15~30 Hz范围内开始逐渐下降,这说明减震层厚度越大减震效果越好是因为增加减震层厚度可以使其在地震动传播时过滤掉地震波中的高频成分,以达到减震的效果。

图15显示了4种不同厚度比下围岩塑性区分布,4种情况下围岩塑性区主要分布在衬砌的拱顶段与仰拱段。同时,当随着 T_1/T_2 的逐渐增大,围岩的塑性区范围开始变小,表明增加减震厚度能降低围岩的等效塑性应变。厚度比 $T_1/T_2=0.2$ 时,减震层减弱围岩塑性区的发展并不明显,当 T_1/T_2 增大到0.8,为 $T_1/T_2=0.2$ 的4倍时,围岩塑性区的范围才有一定的减小。这说明只有当减震层的厚度足够时,在地震荷载作用下减震层才能充分吸收围岩

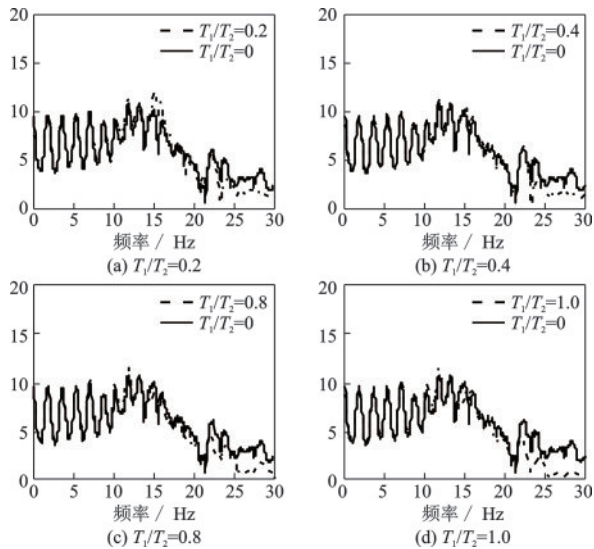


图14 不同 T_1/T_2 下衬砌拱肩处传递函数

Fig.14 Transfer function at the arch shoulder of linings with different thickness ratios

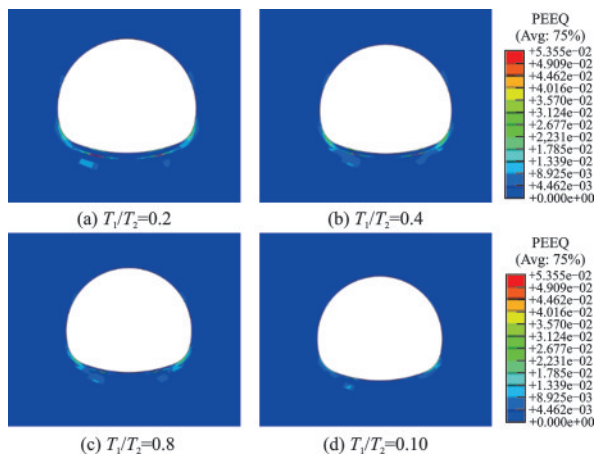


图15 不同 T_1/T_2 下围岩的等效塑性应变

Fig.15 Equivalent plastic strain of surrounding rock with different thickness ratios

变形以减小围岩压力,从而减弱围岩的塑性区发展。但相比于减小弹性模量,即使厚度比增大到0.8后围岩塑性区也还是有一定范围,从减小围岩塑性区来看,增加厚度的效果也不如减小弹性模量,更加说明弹性模量在对减震效果提升中的重要性。

$U_{max}/U_{0,max}$ 随 T_1/T_2 的变化曲线如图16所示。可以看出随着 T_1/T_2 的增大,衬砌的相对变形率逐渐变大,这说明减震层厚度的增加会导致更大的径向变形,同时考虑到增加减震层厚度所带来的应变减小量的提升并不显著,所以在对于采用减震层隧道的抗震设计上,要充分考虑其变形能力,应当控制减震层厚度。

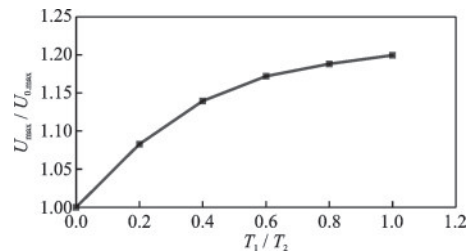


图16 相对变形率 $U_{max}/U_{0,max}$ 随 T_1/T_2 变化曲线

Fig.16 Relative deformation rate curve under different thickness ratios

2.3 围岩等级

在不同围岩材料对减震层减震效果影响的参数分析中,分别设置3种不同的围岩材料工况,以研究不同围岩条件下对减震层减震性能的影响,具体的围岩条件参数见表2,其他参数设置同1.1节。不同围岩参数下衬砌的拱顶、两侧拱肩、两侧拱腰、两侧拱脚以及仰拱处最大主应变峰值如图17所示。

表2 围岩材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock materials

围岩条件	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa
围岩1	20	1.5	0.39	24	100
围岩2	22	6	0.32	35	700
围岩3	23	13	0.27	40	1000

图17中点划线表示有减震层工况,实线表示无减震层工况。由图可以看出,对于埋置于围岩1条件中的隧道,设置减震层后的减震效果比较有限,衬砌应变响应的最大位置处设置减震层后降低约

35%。而对于围岩3条件时,在设置减震层后减震效果比较明显,设置减震层后相比无减震层设置时的最大主应变减小的比例为77%,可能是因为在地震作用下相对软质的围岩条件1对隧道的约束能力已经不足,因此在设置减震层后并不能带来明显的减震效果。

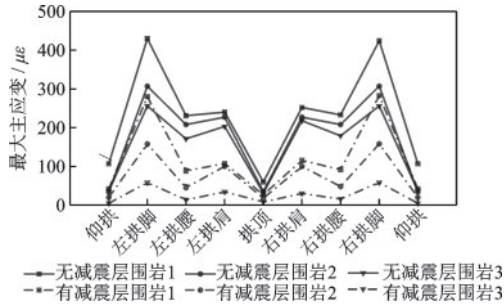


图17 不同围岩条件下衬砌最大主应变峰值曲线
Fig.17 Maximum principal strain peak curves of linings under different surrounding rock conditions

将不同围岩条件下拱脚位置处有无减震层最大主应变峰值之比 $S_{max}/S_{0,max}$ 绘于图18,可以看出当围岩条件从围岩1变化为围岩3时,也就是当围岩条件逐渐变好时, $S_{max}/S_{0,max}$ 的比值也随之减小,表明减震层在硬质围岩中时能有更明显的减震效果。

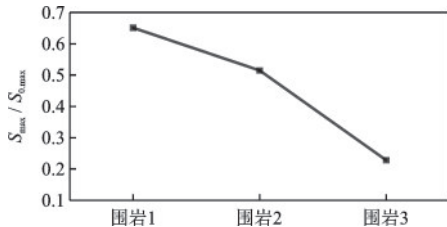


图18 不同围岩条件下最大主应变比 $S_{max}/S_{0,max}$
Fig.18 Maximum principal strain ratios under different surrounding rock conditions

图19显示了围岩1与围岩2条件下的等效塑性区分布。可以看出,当围岩条件较差时围岩的塑性区分布范围较大,设置减震层后同样能够很好减弱围岩的塑性区发展。当围岩2条件时,无减震层设置时围岩已经没有明显的塑性区发展,所以设置减震层后并未有减弱效果的表现。不同围岩条件下的 $U_{max}/U_{0,max}$ 曲线如图20所示。可以看出当围岩条件从围岩3到围岩1时,隧道设置减震层后衬砌的相对变形率会逐渐增大。这说明围岩特性也是影响减震性能的重要因素,在围岩条件较差时单一

设置减震层作为减震措施并不合适,此时进行隧道结构的抗减震设计可以考虑同时对围岩进行注浆加固控制以达到最优的减震效果^[26]。

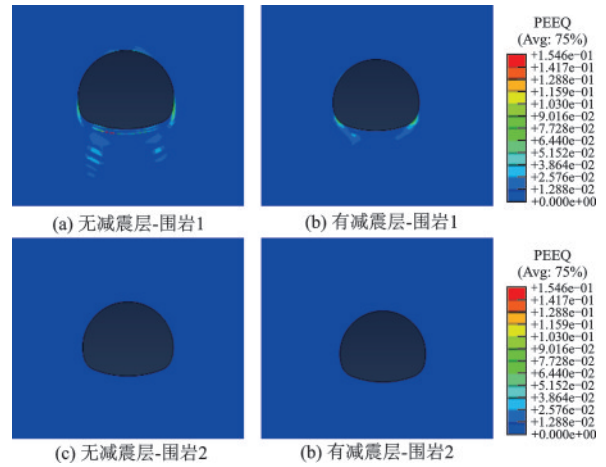


图19 不同围岩条件下的等效塑性应变
Fig.19 Equivalent plastic strain under different surrounding rock conditions

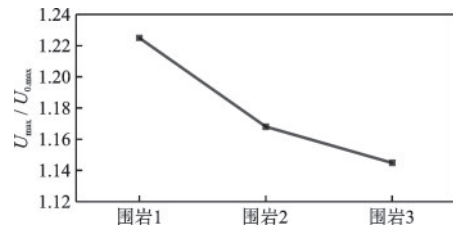


图20 不同围岩条件下相对变形率 $U_{max}/U_{0,max}$
Fig.20 Relative deformation rate curve under different surrounding rock conditions

3 结论

本文首先采用振动台试验数据验证数值模型的可靠性,然后进行数值模拟探讨了减震层弹性模量、厚度以及不同围岩条件下隧道设置减震层的地震响应规律,发现减震层弹性模量对减震层减震性能的影响更大,减震层在不同围岩条件下的减震效果不同,具体结论如下:

(1) 设置减震层能有效降低衬砌结构地震响应,减震层与围岩弹性模量比值越小,减震层厚度越大,衬砌结构的最大主应变越小。建议实际工程中控制减震层与围岩弹性模量比在0.05~0.1之间,与衬砌厚度比不宜超过0.4。

(2) 相比于减小减震层弹性模量,增加厚度所提高减震性能的效率随厚度增加而快速降低,同时

考虑到两者在施工过程中的可操作性,弹性模量对提升减震性能更加关键,在隧道抗震设计中,应当首先考虑减震层的材料属性。

(3) 减震层能够一定程度上在地震动传播时过滤掉地震波中的高频成分,减小地震波能量向隧道的传递,以实现减震作用。

(4) 减震层在坚硬围岩条件下相比于软弱围岩具有更好的减震性能,对于软弱围岩情况下单一设置减震层作为减震措施可能并不合适,可以考虑同时对围岩进行注浆加固控制。

参考文献:

- [1] Wang W L, Wang T T, Su J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16: 133-150.
- [2] Lai J X, He S Y, Qiu J L, et al. Characteristics of seismic disasters and aseismic measures of tunnels in Wenchuan earthquake [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(2): 1-19.
- [3] Zhang X P, Jiang Y J, Sugimoto Satoshi. Seismic damage assessment of mountain tunnel: A case study on the Tawarayama tunnel due to the 2016 Kumamoto Earthquake [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2018, 71: 138-148.
- [4] Xin C L, Wang Z Z, Zhou J M, et al. Shaking table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2019, 88: 1-15.
- [5] Shen Y S, Wang Z Z, Yu J, et al. Shaking table test on flexible joints of mountain tunnels passing through normal fault [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2020, 98: 103299.
- [6] Wang Z Z, Jiang Y J, Zhu C A. Seismic energy response and damage evolution of tunnel lining structures [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 23(6): 758-770.
- [7] He J P, Chen W Z, Zhao W S, et al. Numerical test on polystyrene tunnel seismic-isolation material [J]. *Polish Journal of Chemical Technology*, 2016, 18(3): 122-127.
- [8] 信春雷,高波,周佳媚,等.跨断层隧道设置常规抗减震措施振动台试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2014, 33(10): 2047-2055.

- Xin C L, Gao B, Zhou J M, et al. Shaking table test study on setting conventional anti-shock measures in cross fault tunnel [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(10): 2047-2055. (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. Experimental study on shock absorption model of viscous slip fault tunnel in high intensity earthquake zone [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39 (11) : 2125-2131. (in Chinese)
- [10] 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 G Y, Wang M N, Yu L, et al. Model test study on seismic absorbing technology of tunnel through viscous slip staggered fault [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(9): 1753-1758. (in Chinese)
- [11] Xin C L, Wang Z Z, Yu J. The evaluation on shock absorption performance of buffer layer around the cross section of tunnel lining [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 131: 106032.
- [12] 王立新,范飞飞,汪珂,等.地铁车站不同减震层的减震机理及性能分析[J].*铁道标准设计*, 2022, 66(5) : 131-139.
- Wang L X, Fan F F, Wang K, et al. Damping mechanism and performance analysis of different damping layers in subway station [J]. *Railway Standard Design*, 2022, 66(5): 131-139. (in Chinese)
- [13] 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. Damping mechanism of foam concrete tunnel damping layer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3) : 1027-1036. (in Chinese)
- [14] Yu H T, Wang Q. Analytical solution for deep circular tunnels covered by an isolation coating layer subjected to far-field shear stresses [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2021, 115: 104026.
- [15] 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. Research on shock absorption technology of cross fault tunnel in high intensity mountainous area [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019, 41(2) : 286-291. (in Chinese)

- [16] 高峰,石玉成,严松宏,等.隧道的两种减震措施研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2): 222-229.
Gao F, Shi Y C, Yan S H, et al. The two shock absorption measures research of the tunnel[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 222-229. (in Chinese)
- [17] Chen Z Y, Shen H. Dynamic centrifuge tests on isolation mechanism of tunnels subjected to seismic shaking [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2014, 42: 67-77.
- [18] 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.
Fan K X, Shen Y S, Gao B, et al. Shaking table test of setting shock absorbing layer through soft and hard surrounding rock tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 109-120. (in Chinese)
- [19] 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 S S, Gao B. Tunnel damping layer damping mechanism research[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 592-603. (in Chinese)
- [20] 王帅帅,高波,隋传毅,等.减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究[J].岩土工程学报,2015, 37(6): 1086-1092.
Wang S S, Gao B, Sui C Y, et al. Shaking table test study on damping principle of damping layer and damping technology of cross-fault tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1086-1092. (in Chinese)
- [21] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [22] Du X L, Zhao M. A local time-domain transmitting boundary for simulating cylindrical elastic wave propagation in infinite media[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(10): 937-946.
- [23] 杜修力,赵密,王进廷.近场波动模拟的人工应力边界条件[J].力学学报,2006,38(1): 49-56.
Du X L, Zhao M, Wang J T. Artificial stress boundary conditions for near-field wave simulation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56. (in Chinese)
- [24] 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1): 3310-3319.
Zhao X, Li R H, Tao L J, et al. Experimental study on the influence of loosening circle and damping layer on the seismic response of tunnel[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup1): 3310-3319. (in Chinese)
- [25] 梅贤丞,崔臻,盛谦.近断层/远场地震动作用下隧道结构易损性研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2): 344-354.
Mei X C, Cui Z, Sheng Q. Study on structural vulnerability of tunnel under near fault/far field vibration [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 344-354. (in Chinese)
- [26] 赵旭,代志杰,黎若寒,等.考虑围岩松动圈的隧道抗减震措施[J].北京工业大学学报,2020,46(9): 1027-1038.
Zhao X, Dai Z J, Li R H, et al. Anti-shock measures of tunnel considering loose zone of surrounding rock [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(9): 1027-1038. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)