

穿越软硬围岩隧道设置减震层振动台试验研究

范凯祥¹ 申玉生¹ 高波¹ 郑清¹ 闫高明¹ 王帅帅^{1,2} 黄海峰¹

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川成都 610031; 2. 中交第二公路工程局有限公司, 陕西西安 710065)

摘要: 以西部高烈度地震区浅埋公路隧道为依托, 通过大型振动台模型试验, 研究隧道穿越软硬围岩段在地震荷载作用下设置减震层的动力响应特性, 并采用数值模拟方法对试验结果进行验证分析。试验及数值计算结果表明, 从洞身段来看, 减震层厚度存在最优值; 从穿越软硬围岩段来看, 增加减震层厚度可降低隧道沿纵向的动力响应差异, 但加速度峰值会有所上升; 拱顶围岩和隧道衬砌结构加速度响应频谱曲线均表现出“三峰值”现象, 设置减震层并不会显著改变围岩频谱特性, 衬砌结构也不显著体现自振特性, 其响应主要取决于所穿越围岩的动力特性; 减震层处于最优值时可通过吸收更多的低频组分来降低隧道的动力响应; 设置减震层可显著降低二衬动应力, 但会使初支动应力呈现不同程度的放大, 随减震层厚度的增加, 二衬动应力先减小后增大, 初支动应力先增大, 后呈降低趋势; 通过观察衬砌破坏形态, 隧道拱顶、拱脚和仰拱易发生开裂, 设置减震层后, 仰拱相对容易发生破坏, 应给予重点关注。研究成果可为西部高烈度地震区浅埋隧道抗震设计提供参考。

关键词: 隧道工程; 减震层; 地震动力响应; 软硬围岩交界面; 振动台试验

中图分类号: U452.2⁺8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)09-0109-13

Shaking table test on damping layer applied in tunnel crossing soft and hard surrounding rock

Fan Kaixiang¹ Shen Yusheng¹ Gao Bo¹ Zheng Qing¹ Yan Gaoming¹ Wang Shuaishuai^{1,2} Huang Haifeng¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: A certain case of a shallow road tunnel in high-intensity area of western China is taken as an example, the dynamic response characteristics of tunnel trunk and the segment crossing the hard-soft interface were studied based on the large-scaled shaking table tests and verified by the numerical simulation. The results show that there is an optimal thickness of damping layer for tunnel trunk and the soft-hard rock section. The increase of the thickness of damping layer will reduce the differences in the dynamic response toward the longitudinal direction. The acceleration response spectrum curves of the tunnel crown surrounding rock and lining show the phenomenon of “three peaks”. Spectral features of the surrounding rock can not be changed significantly by installing damping layer. The responses of the lining mainly depend on the dynamic feature of the outside rock without reflecting its self-vibration characteristics distinctly. The dynamic responses of tunnel can be reduced by absorbing low-frequency components with the damping layer of optimal value. The setting of the damping layer can significantly reduce the stress of the second lining with different degrees of amplification in initial support. With the increase of the thickness of the damping layer, the dynamic stress of the second lining decreases first and then increases while that of initial support shows the opposite trend. By observing the damage form of lining, it is found that the crown, arch foot, and arch of the tunnel are easy to crack. After installing the damping layer,

基金项目: 国家自然科学基金(51678501, 51778540)、“十三五”国家重点研发计划(2016YFB1200401)

作者简介: 范凯祥, 博士研究生

通信作者: 申玉生, 博士, 副教授

收稿日期: 2018-11-01

the invert arch is relatively easy to crack, so more attention should be paid. The research results can provide a reference for aseismic design of shallow tunnels in the western high-intensity earthquake area.

Keywords: tunnel engineering; damping layer; seismic dynamic response; hard-soft interface; shaking table test

E-mail: ffx0706@my.swjtu.edu.cn

引 言

我国地处于环太平洋地震带上,地震活动频繁而强烈,全国城市有一半位于基本烈度为Ⅶ度或Ⅶ度以上的地震区。自1995年的日本阪神地震,1999年我国台湾集集地震,2008年汶川地震和2013雅安地震发生以来,大量地下结构发生破坏,颠覆了地下结构是具有天然良好抗震性能的传统观念,同时也促进了各国学者对高烈度地震区隧道及地下结构抗减震技术问题的重新理解和认识,推动了地下工程的抗震分析和评价理论的进步和发展^[1-2]。

目前隧道及地下工程抗震问题的研究手段主要包括原型观测、理论分析及模型试验等。由于震害现场原型观测数据有限,针对隧道抗减震机理及措施的研究主要集中在理论分析和振动台模型试验上。解析法在地下结构抗减震机理分析方面有着数值法不可替代的作用,同时也是检验数值法精度的重要手段,在理论分析方面,Pao^[3]采用波函数展开法研究了无限空间中洞室及单层衬砌隧道在弹性波入射下的动应力集中问题。Davis^[4]、Lee^[5-6]推导了SH和SV波入射下圆形隧道的动应力集中问题,并分析了柔性管道在实际地震波作用下的动力响应规律。随后,国内众多学者^[7-11]基于波函数展开法推导了隧道在Rayleigh波、P波和SV波散射下的不同地下结构形式的衬砌动应力集中问题,推动了地下结构地震动力学理论分析的发展。

近年来国内外学者开展了众多大比例尺振动台模型试验研究,主要包括对隧道结构地震动响应、土-结构相互作用机理和隧道工程抗减震措施等方面的研究。T. Iwatate^[12-13]等对阪神地震中大车站和区间隧道震害分析,开展了振动台试验,研究了地下结构的破坏机理,结果表明车站的倒塌根本原因在于中心柱的抗剪载荷不足;Masoud^[14]通过数值模拟和振动台试验研究了圆形地铁隧道对地表的放大效应,结果表明隧道对建于其上的低周期建筑的动力响应影响较大;Mohammad^[15]通过离心机试验研究了矩形隧道结构动力响应规律,结果表明隧道结构的存在会放大地表长周期组分和削弱地表低周

期组分;Wang^[16]通过振动台试验研究了隧道-土-地表结构系统相互作用下的地震动力响应,分析认为隧道的存在会在一定程度上削弱地震波向地表传播,会降低地表结构的动力响应;Yuan^[17]研发了一种用于模拟长隧道多点振动台试验的节段式模型箱,实现了离散多点振动台输入到连续非一致输入的等效转换,可用于模型长隧道行波效应;张景^[18]通过数值模拟和振动台试验研究了软硬突变地层盾构隧道纵向地震响应特性;崔光耀^[19]通过模型试验研究了黏滑断层错动和地震震动条件下的隧道响应特性,并验证了减震层厚度存在最优值;王峥峥^[20-21]通过振动台模型试验研究了跨断层隧道地震动力响应,结果表明隧道设置减震层后整体抗震性能明显提高,并且衬砌沿隧道纵向和横向受力都趋于均匀,特别是仰拱拉应力状态得到了改善;侯森^[22]通过振动台试验研究了减震层在地震过程中对隧道衬砌及围岩仰坡动力响应的影响,验证了设置减震层可以有效减弱洞口段衬砌加速度与位移的放大效应。

综上所述,隧道设置减震层可以降低地震荷载作用下衬砌的内力峰值,既有文献已经通过解析法验证了减震层厚度存在最优值区间^[7,23],即减震层与衬砌厚度比处于某范围内时,衬砌动应力集中系数最小,减震层最优厚度的确定是隧道抗震设计中的关键环节,而众多研究中考虑减震层厚度、弹性模量或隧道穿越不良地段等条件对减震效果的影响并不多见,因此,本文依托西部高烈度地震区某浅埋公路隧道工程,通过振动台试验和数值模拟研究了隧道穿越软硬围岩设置不同减震层厚度下围岩和衬砌结构的动力响应,研究成果可为西部高烈度地震区浅埋隧道抗震设计提供参考。

1 试验方案设计

1.1 振动台装置

试验采用西南交通大学陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室振动台,该振动台由美国MTS公司定制生产,振动台参数指标如图1所示,振动台技术指标及参数如表1所示。

1.2 试验内容

本文作者基于波动力学理论^[7,23],利用 Fourier-

Bessel 函数展开法求解了 SV 波入射下浅埋隧道复合式衬砌结构“二衬-减震层-初衬-围岩”系统的动应力集中解析解, 结果表明减震层厚度取值为洞径的 1/40~1/20 时, 二次衬砌动应力集中系数最小, 有利于保护二次衬砌。由于该解析解具有严格的理论推导过程, 可分析问题的本质, 但缺乏试验验证。鉴于此, 为验证该解析解的正确性与适用性, 考虑隧道在 V 级围岩段和隧道穿越 IV 级、V 级围岩段的动力响应两种情况下, 本次振动台试验的主要内容为: 隧道穿越软硬围岩段 (IV、V 级围岩) 在不设置减震层、设置减震层厚 1cm (约为洞径的 1/30) 和设置减震层厚 2cm (约为洞径的 1/15) 3 种工况下, 研究衬砌结构和围岩的地震动响应规律。

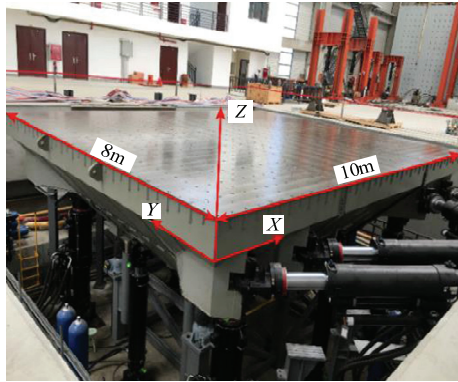


图 1 试验振动台
Fig.1 Shaking table

表 1 振动台系统主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of shaking table

技术指标	技术参数
台面尺寸 (m×m)	8.0×10.0
频率范围 (Hz)	0.1~50
振动自由度数	三向六自由度
台面最大有效负载 (t)	160
台面最大位移 (mm)	水平: ±800 竖向: ±400
台面最大速度 (mm/s)	水平: ±1200 竖向: ±1000
台面满载最大加速度 (g)	水平: 1.2 竖向: 1.0
最大容许倾覆力矩 (kN·m)	6000

1.3 模型相似材料参数

(1) 试验相似比

考虑到的模型箱尺寸、振动台承载能力、试验成本等问题, 试验采用重力失真模型。按照隧道原型尺寸进行相似换算, 确定振动台模型基本相似比: 几何相似比 $C_l = l_m / l_p = 1/30$, 弹性模量相似比 $C_E = E_m / E_p = 1/45$, 密度相似比 $C_\rho = \rho_m / \rho_p = 1/1.5$,

其他相似比依据 Buckingham 定理相似关系得到, 具体值如表 2 所示。

表 2 振动台试验物理量相似关系

Table 2 Shaking table physical similarity

物理量	相似关系	相似比
长度 l	$C_l = l_m / l_p$	1/30
应变 ε	$C_\varepsilon = 1$	1
弹性模量 E	$C_E = E_m / E_p$	1/45
泊松比 μ	$C_\mu = 1$	1
时间 t	$C_t = C_l(C_\rho / C_E)^{1/2}$	1/5.5
加速度 a	$C_a = C_E / (C_l C_\rho)$	1

(2) 衬砌相似材料

实际隧道衬砌材料为 C30 混凝土, 初衬厚度为 24cm, 二衬厚度为 50cm, 根据刚度等效原则进行换算, 确定初衬厚度为 1cm, 二衬厚度为 2cm。选用水、石膏、硅藻土、石英砂和重晶石作为隧道衬砌的相似材料^[20,24], 根据动力试验中相似比的要求及经济性, 采用正交试验方法进行相似材料配比设计, 制作圆柱形试件, 通过单轴抗压试验, 测试模型材料的弹性模量和泊松比, 如图 2 所示。最终选择满足相似比要求的配合比为, 水: 石膏: 硅藻土: 石英砂: 重晶石=1: 0.6: 0.2: 0.1: 0.4, 衬砌相似材料物理力学参数及相似度如表 3 所示。



(a) 试样



(b) 单轴抗压试验

图 2 不同配合比衬砌试样单轴抗压试验

Fig.2 Uniaxial compression test of lining samples with different mix ratios

表 3 衬砌材料相似度

Table 3 Lining material similarity

项目	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	强度 (MPa)
原型值	2400	30	20.1
模型值	1600	0.67	0.45
试验值	1700	1.0	0.53
相似程度	满足	接近	满足

(3) 围岩相似材料

围岩相似材料选择一定比例的粉煤灰、河沙和机油的混合物来模拟^[20,24]，对不同配比的混合材料进行直剪试验，测定围岩相似材料的密度、弹性模量、内聚力、内摩擦角等物理力学参数，得到满足试验相似比要求的配合比，其中IV级围岩为粉煤灰：河沙：机油=50：40：10，V级围岩为粉煤灰：河沙：机油为=45：40：15。围岩相似材料物理力学参数及相似度如表4所示。

表 4 围岩材料相似度

Table 4 Similarity of surrounding rock material

参数		密度	黏聚力	摩擦角	弹性模量
		(kg/m ³)	(kPa)	(°)	(GPa)
IV级围岩	原型值	2100	135	38	10
	模型值	1400	3	38	0.22
	试验值	1300	1.3	33	0.06
	相似程度	满足	接近	满足	接近
V级围岩	原型值	1700	50	27	1.5
	模型值	1133	1.1	27	0.03
	试验值	1100	0.6	25	0.02
	相似程度	满足	接近	满足	满足

(4) 减震层相似材料

既有文献研究表明^[23]，减震层材料弹性模量不宜低于围岩弹性模量的 1/100，根据围岩模型值来选择减震层材料的弹性模量应不低于 2.2MPa，因此减震层材料选择为 B1 橡塑海绵，密度为 60kg/m³，弹性模量为 2.38MPa，泊松比为 0.3，可满足模型试验要求。

1.4 复合式衬砌“二衬-减震层-初支-围岩”系统

目前关于隧道设置减震层的振动台试验中多采用“二衬-减震层-围岩”系统^[19,21-22,25]，未考虑初期支护的影响，而在实际工程中，隧道多在质量较差的围岩（V级围岩）地段和穿越断层破碎带等地段设置减震层，初期支护的设置是必不可少的，而且理论解析表明^[7,23]，初期支护的设置对减震层减震效果影响是显著的，因此为真实还原实际隧道工程中减震层的设置，本文采用“二衬-初支-围岩”和“二衬-减震层-初支-围岩”系统，分阶段支模浇筑双层衬砌，具体制作流程如图3所示。其中，减震层的制作过程如下：

(1) 根据既有初衬模型几何条件，剪裁厚度为 1cm，长度为衬砌外周长、高度为初衬厚的橡塑海绵，如图4(a)所示。

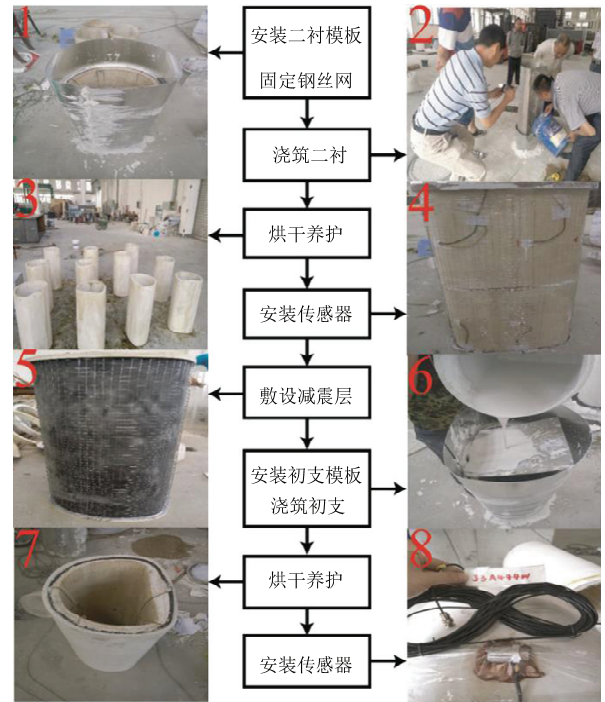


图 3 “二衬-减震层-初支-围岩”系统制作流程
Fig.3 “Secondary lining-shock absorbing layer-initial lining-surrounding rock” system production process

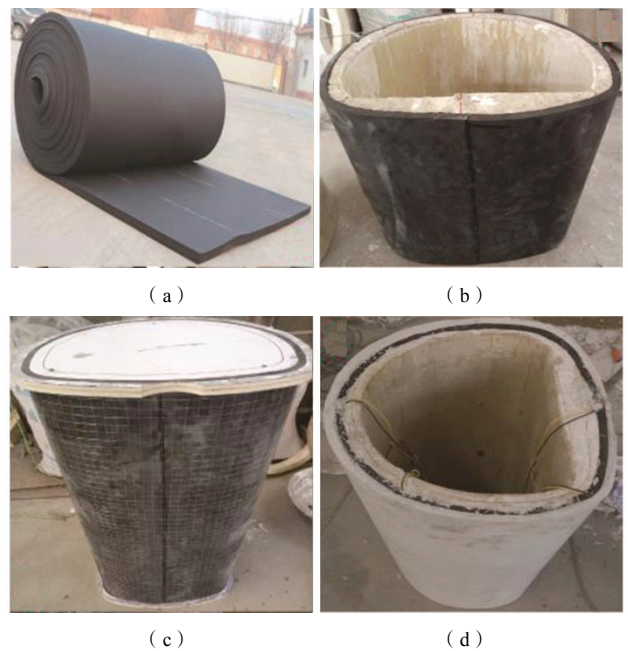


图 4 减震层制作流程
Fig.4 Shock absorbing layer production process

(2) 将剪裁好的橡塑海绵包裹在衬砌模型外，用 502 胶水将橡塑海绵接头处黏接牢固，保证减震层与衬砌完全接触，原则为既不松弛，也不过紧，如图4(b)所示。

(3) 在减震层外安装钢丝网，固定外模板，

浇筑二衬，如图 4 (c)、图 4 (d) 所示。

(4) 减震层厚度为 2cm 的情况，可分两次剪裁厚度为 1cm 的橡塑海绵，需要注意的是，第 2 层橡塑海绵的外周长应参考第 1 层橡塑海绵的外周长来换算，可保证减震层与减震层之间、减震层与衬砌之间均完全接触，其他步骤与要求同上。

1.5 模型箱设计

模型箱是振动台试验模型的载体，要求具有足够的强度和刚度，而且其自振频率应满足不会与模型内部体系自振频率发生共振的要求。试验模型箱由钢板和角钢焊接而成，在模型箱纵向端部预留高约 1.5m 的矩形窗口，用以模型填筑过程中人员和材料的进出。在模型箱四周侧壁各内衬 10cm 的泡沫塑料板，模拟自由场边界，吸收散射地震波能量，减小边界效应。在隧道纵向两侧敷设一层聚苯乙烯薄膜，以减小模型箱对土体的约束。在模型底部铺筑一层厚 10cm 的水泥砂浆，用以增大模型土与模型箱底部的摩擦力，避免地震波激振过程中二者发生相对滑移，如图 5 所示。

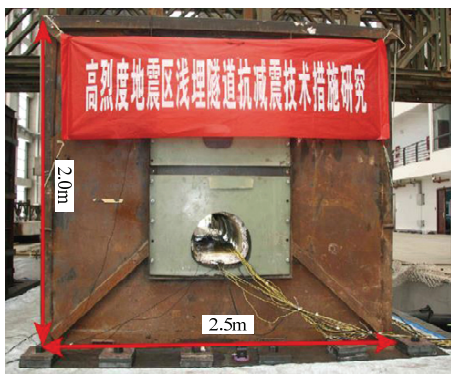


图 5 模型箱
Fig.5 Model box

1.6 数据采集与传感器布设

1.6.1 监测信息与传感器类型

试验数据采集系统主要由美国 MTS 公司生产的高性能动态信号采集仪来完成，同时使用配套的 MTS Areopro 数据采集软件进行数据采集。传感器类型包括：应变、加速度、差动式位移和激光位移 4 种。该数据采集系统共 192 个输入通道，每个通道可独立采样，也可独立设置采样频率，试验采样频率为 256Hz。该系统可同时采集加速度、位移和应变等数据。

试验的监测信息包括在激振过程中隧道衬砌结构、围岩和振动台面的加速度值，衬砌结构的应变值。传感器分别选用加速度传感器和电阻应变传感器。其中，衬砌结构和围岩内采用压电式加速度传感器，型号为 TST120A500，振动台面采用磁电式加速度传感器，型号为 TST125H，应变传感器采用高精度箔式纸基电阻应变片，型号为 120-10AA，应变片栅长为 10.0mm×3.8mm，电阻值为(120 ± 1)Ω。

1.6.2 传感器布置

本次试验传感器主要采用加速度计和应变片，用来监测隧道衬砌内外部加速度和应变的动力响应。在模型试验之前，通过试验工况的数值模拟结果，初步确定隧道衬砌在地震过程中动力响应较大的位置。据此，试验中监测断面分为主监测断面和辅监测断面（图 6），其中主监测断面为 2-2、3-3 断面，主要用于监测隧道洞身段和穿越软硬围岩段的动力响应，辅监测断面为 1-1、4-4 断面，主要用于监测隧道洞身段的动力响应和验证泡沫板边界的有效性。

加速度计垂直于隧道轴线布置且与激震方向平

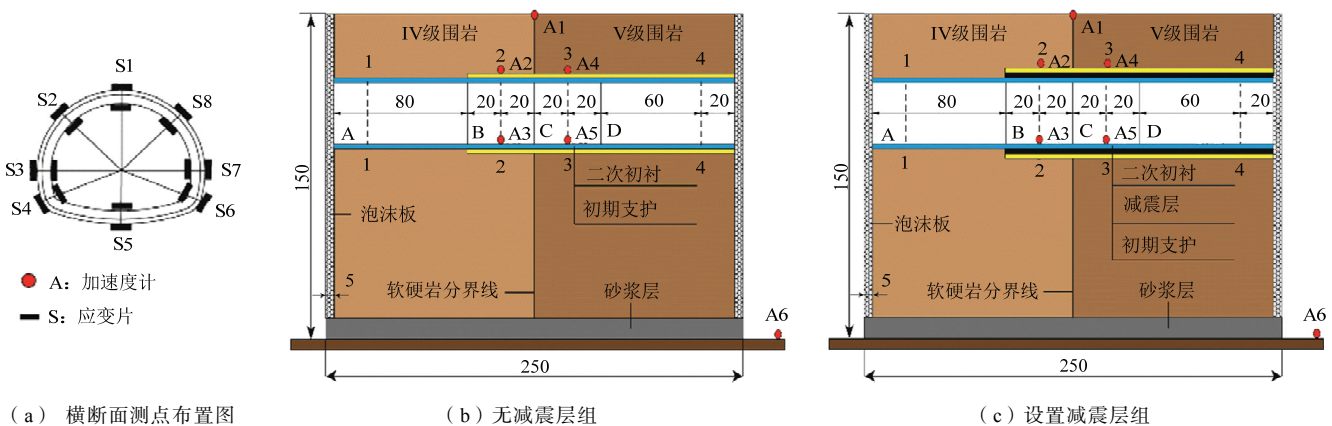


图 6 模型监测点布置及试验方案 (单位: cm)
Fig.6 Model monitoring point layout and test plan (units: cm)

行，以编号 A 表示。其中，1 号加速度计用于监测地表围岩的动力响应，判断加速度放大效应。2、3 号加速度计用于监测Ⅳ级围岩内隧道衬砌结构的动力响应。4、5 号加速度计用于监测Ⅴ级围岩内隧道衬砌结构的动力响应。6 号加速度计用于监测振动台面反馈的加速度响应。

应变片在 4 个监测断面隧道拱顶、拱肩、拱脚和仰拱内外环向布置，以编号 S 表示（图 6（a））。

1.7 试验地震波输入与加载方案

试验动力加载采用茂县地震波 EW 向分量作为台面输入（图 7），与隧道轴线垂直的水平方向进行激震，选择原地震波 20~165s 期间的地震波，加速度峰值和持时均按照时间相似比 1 : 5.5 进行压缩。地震动的加速度峰值按照 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 由小到大逐级增加，分别模拟不同加速度条件下隧道结构的动力响应过程。地震波加速度时程曲线如图 7 所示（以峰值加速度为 0.4g 为例，相当Ⅸ度地震），地震波能量在时间域上主要集中在前 10s 内，

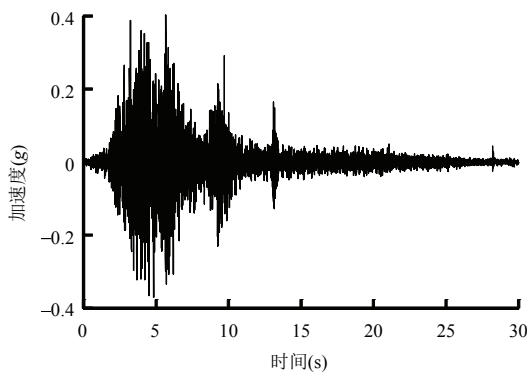


图 7 地震波加速度时程曲线

Fig.7 Acceleration time-history curve of earthquake wave

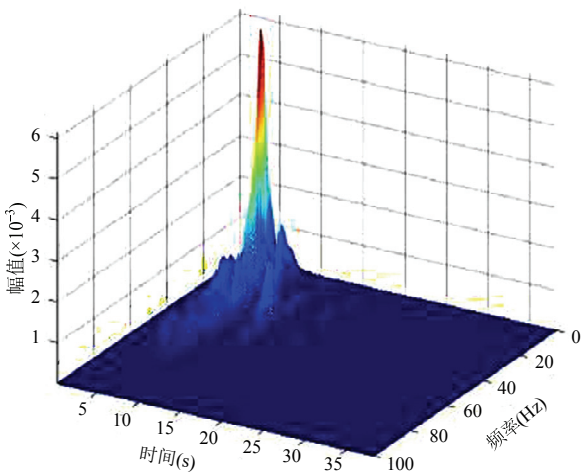


图 8 地震波时频分解三维图

Fig.8 Time-frequency decomposition of seismic wave

在频率域上主要集中在 15Hz 内，如图 8 所示。

1.8 数值模拟验证

为与试验数据对比分析，采用快速有限差分软件 FLAC^{3D} 对试验的 3 种工况进行动力时程数值模拟。隧道埋深、尺寸、材料参数、测点布置等均与试验相同，模型地表距隧道中心约为 2 倍洞径，模型左右边界距隧道中心约为 3 倍洞径，满足理论假设^[23]。

围岩、衬砌和减震层均采用实体单元，围岩采用摩尔-库伦弹塑性本构模型，衬砌和减震层采用线弹性模型，四周边界采用自由场边界，底部边界采用黏性边界，通过在底部输入垂直于洞轴向的剪切应力波实现地震动输入，动力计算采用瑞利阻尼，临界阻尼比取 5%，模型如图 9 所示。

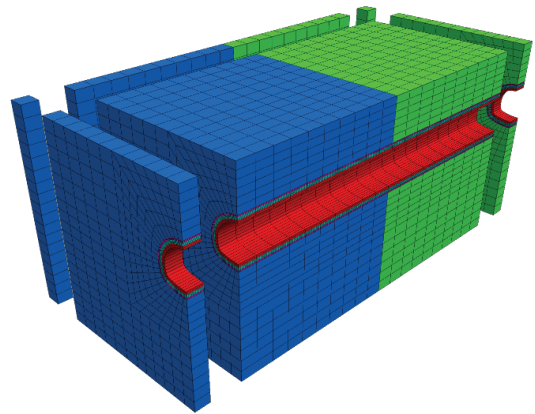


图 9 数值模拟 1/2 模型

Fig.9 Numerical simulation 1/2 model

1.9 误差处理与分析

模型试验由于相似，制作精度要求很高，与实际比，会存在各方面的误差，因此，本文针对以下 6 个方面对试验过程和结果进行了误差处理与分析：

（1）试验系统误差。本次振动台试验所有软硬件系统均采购美国美特斯 MTS 公司，地震波输入经过 3 次以上迭代后，振动台再现地震波精度为 98% 以上，可满足试验要求。

（2）结构模型试验可信性。试验根据破坏性试验目的设计，按照相似理论进行配制不同材料，并对相似材料进行多组力学试验，其力学参数误差均控制在 5% 浮动范围内，可满足试验要求。

（3）试验数据处理。由于数采设备噪声及环境噪声的影响，试验数据包含一定组分的噪声，对分析结果造成一定的误差。本文利用小波滤波降噪原理，采用 MATLAB 工具箱中的 SYM 族小波与 DB 小波对试验数据进行降噪滤波处理，与数值结

果计算对比,滤波效果良好,保留了 20Hz 以上的地震动细节,误差可满足试验要求。

(4) 应变片温度误差控制。试验中对每一环工作片设置一对温度补偿片,在数据处理过程中进行补偿分析,可消除温度变化引起的误差,满足试验要求。

(5) 应变片湿度误差控制。衬砌表面涂刷薄清漆进行防潮处理,同时在应变片外表面涂刷一层薄硅胶,可消除因湿度变化引起的误差,满足试验要求。

(6) 长导线误差控制。由于振动台尺寸较大,模型箱距离数据采集系统较远,试验均采用铜制六芯线,且线路固定在结构和地面上,可消除导线分布电容相差过大和在试验过程中因晃动过大而导致的误差,可满足试验要求。

2 围岩动力响应

2.1 模型箱边界效应验证

刚性模型箱侧壁对土体产生较大的约束作用,且地震过程中地震波会在刚性侧壁多次反射,影响试验精度,因此试验中在模型箱四周设置 10cm 厚的泡沫板以减少刚性侧壁对土体的约束,同时吸收反射地震波,模拟自由场边界。由于数值模拟中采用自由场边界,因此为检验泡沫板边界的有效性,可通过对比 A2、A4 实测加速度频谱曲线与数值模拟加速度频谱特性曲线来验证,如图 10、图 11 所示,从图中可以看出,3 组工况下 A2、A4 加速度实测频谱曲线与数值模拟频谱曲线吻合良好,说明刚性侧壁边界效应基本消除,泡沫板在本次试验中

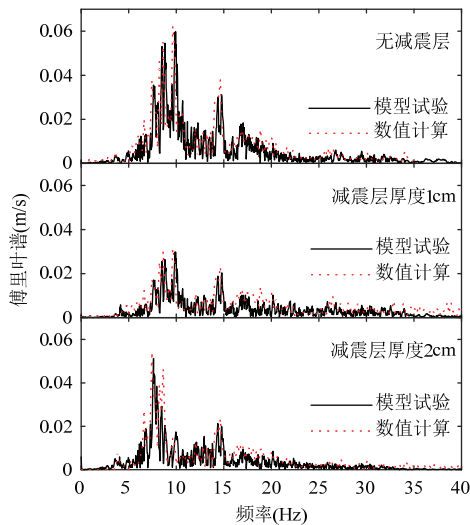


图 10 A2 加速度频谱曲线

Fig.10 Acceleration spectrum curve of A2

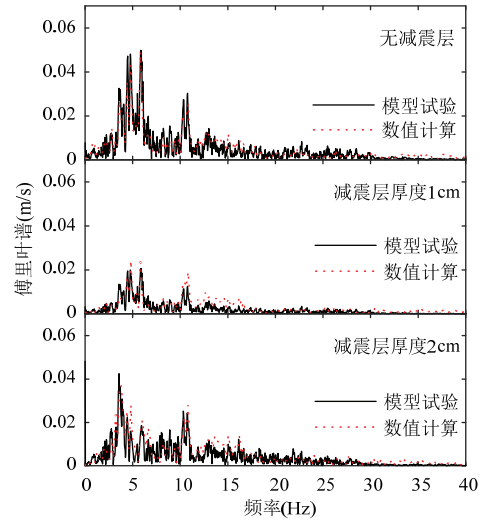


图 11 A4 加速度频谱曲线

Fig.11 Acceleration spectrum curve of A4

可用来模拟自由场边界。

2.2 围岩加速度响应

隧道抗震研究的重点是地震下围岩的失稳防治^[26]。因此,在穿越软硬围岩的地质条件下,为研究隧道设置减震层对不同围岩动力响应特性的影响,提取IV级围岩 2-2 断面拱顶处 A2 加速度计和V级围岩 3-3 断面拱顶处 A4 加速度计实测数据进行对比分析,如图 12 所示。

图 12 给出了 A2 和 A4 加速度时程曲线。可以看出,A2 和 A4 三组工况下的动力响应规律基本一致,在无减震层时,围岩动力响应最大,减震层厚度 2cm 时次之,减震层厚度 1cm 时最小,A2 (A4) 峰值加速度分别为 0.37(0.31) g >0.23(0.22) g >0.17(0.13) g 。说明设置减震层可以有效降低隧道拱顶

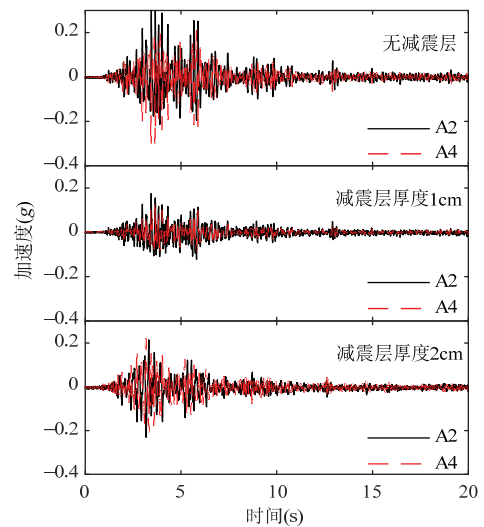


图 12 A2 和 A4 加速度时程曲线

Fig.12 Acceleration time-history curves of A2 and A4

围岩动力响应，且随着减震层厚度的增加，拱顶围岩动力响应呈现先降低后增加的趋势；对比 3 组工况下的 A2 和 A4 加速度峰值响应，可以发现 A2 加速度计峰值均要高于 A4，即硬岩段拱顶围岩的动力响应高于软岩段拱顶围岩的动力响应，表现为无减震层时差别最大，减震层厚度 1cm 时次之，减震层厚度 2cm 时最小，如表 5 所示，因此，从洞身段来看，减震层厚度存在最优值，而从穿越软硬围岩段来看，增加减震层厚度可降低隧道沿纵向的动力响应差异。

表 5 A2 和 A4 加速度峰值

Table 5 Peaks acceleration of A2 and A4

参数	无减震层	减震层 1cm	减震层 2cm
A2	0.37	0.17	0.23
A4	0.31	0.15	0.22
差异率	16%	11%	1.4%

注：差异率=(A2-A4)/A2。

隧道结构无减震层时，IV 级围岩完整性相对较好，弹性模量高、阻尼比低、地震波从底部向上传播过程中能量损失小，衬砌结构与围岩刚度匹配较好，隧道易于追随围岩振动，二者相对位移小，因此 IV 级围岩拱顶处动力响应会高于 V 级围岩；当增加减震层厚度时，由于减震层本身弹性模量低，阻尼比高，地震波在向上传播过程中减震层可吸收部分能量，且减震层厚度越大，耗能越高，穿越软硬围岩段的相对位移差就会越小，因此表现为二者动力响应逐渐趋于一致。

进一步分析设置不同减震层厚度下软硬围岩的频谱特性，对 A2、A4 加速度时程数据进行傅里叶变换得到加速度频谱曲线，如图 13 所示。

可以看出隧道拱顶围岩的动力频谱特性：

(1) A2 和 A4 加速度频谱曲线波形相似，但不同工况下的傅里叶谱峰值有所差别。与加速度时程曲线峰值规律相同，频谱峰值在无减震层时最大，减震层厚度 2cm 时次之，减震层厚度 1cm 时最小。说明隧道设置减震层对围岩频谱特性影响较小，但会对频谱幅值产生一定影响，其中最优减震层厚度（1cm）对低频组分具有良好的吸收效果，即最优减震层厚度可通过吸收更多的低频组分来降低隧道的动力响应。

(2) 从 3 组工况 A2 加速度频谱曲线可以看出，无减震层时呈现“三峰值”，第一峰值范围为 7~10Hz，第二峰值范围为 14~15Hz，第三峰值范围为 16~17Hz；减震层 1cm 时主要呈现“双峰值”，

第三峰值表现不突出；减震层 2cm 时呈现“双峰值”，第三峰值基本消失。通过对比试验数据与数值计算结果，如图 10 所示，二者吻合性良好，数值计算结果峰值均略高于试验值，但误差不超过一个数量级，可认为试验结果可信^[27]。因此可以推断 IV 级围岩卓越频率在 7~10Hz，同理根据 A4 加速度频谱曲线可知，V 级围岩卓越频率在 4~6Hz，如图 11 所示。分析频谱曲线“三峰值”现象成因，与均质地层不同，穿越软硬围岩地段动力响应相对复杂，且隧道为浅埋，同时受两种不同地层动力特性和地表反射波的影响，频谱曲线表现为“叠加效应”，进一步分析可知，第一峰值表现为地层的卓越频率，第二、第三峰值表现为“叠加效应”，且随减震层厚度的增加，高频成分更易被吸收，因此第二、三峰值逐渐削弱，甚至消失。

(3) 对比 A2、A4 加速度频谱曲线及相应围岩卓越频率可知，围岩对低频成分均有放大效应，对高于 20Hz 的高频成分具有抑制作用。IV 级围岩卓越频率高于 V 级围岩卓越频率，在频谱曲线上表现为 A2 频谱曲线相对 A4 频谱曲线向右“平移”，说明围岩卓越频率随强度和剪切刚度的增加而增加，且高频成分明显相对丰富，体现了围岩的非线性特性，与既有文献结论一致^[21,26]。

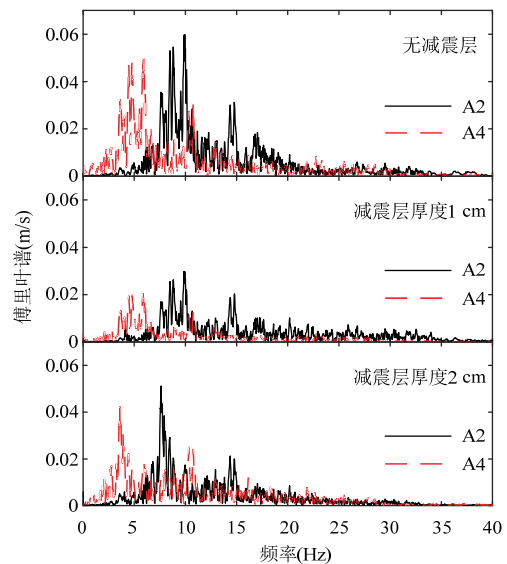


图 13 A2 和 A4 加速度频谱曲线

Fig.13 Acceleration spectrum curves of A2 and A4

3 衬砌结构动力响应

3.1 衬砌加速度响应

图 14 给出了 3 组工况下 A3 和 A5 的加速度时

程曲线。可以看出，二衬加速度时程曲线和拱顶围岩加速度时程曲线类似，即在无减震层时，二衬动力响应最大，减震层厚度 2cm 时次之，减震层厚度 1cm 时最小，A3 (A5) 峰值加速度为 $0.31(0.25)g > 0.25(0.22)g > 0.15(0.17)g$ 。说明设置减震层可有效降低二衬内部加速度响应，且随着减震层厚度的增加，二衬动力响应呈现先降低后增加的趋势，与拱顶围岩动力响应规律一致，说明在隧道洞身段（即软岩段或硬岩段）所设置减震层的厚度存在最优区间，当厚度超过最优区间，会使二衬和围岩动力响应产生不同程度的放大。

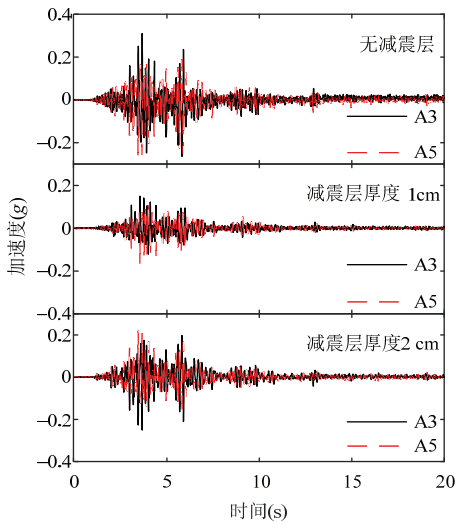


图 14 A3 和 A5 加速度时程曲线

Fig.14 Acceleration time history curves of A3 and A5

图 15 给出了 3 组工况下穿越软硬围岩段二衬仰拱和拱顶围岩的加速度峰值数据，通过对比可知，在无减震层时二衬仰拱 A3 和 A5 加速度峰值差为 $0.05g$ ，拱顶围岩 A2 和 A4 加速度峰值差为 $0.06g$ ；在减震层 1cm 时，A3 和 A5 加速度峰值差为 $0.02g$ ，A2 和 A4 加速度峰值差为 $0.04g$ ；在减震层 2cm 时，A3 和 A5 加速度峰值差为 $0.03g$ ，A2 和 A4 加速度峰值差为 $0.01g$ ，即二衬仰拱、拱顶围岩在软硬围岩段的加速度峰值差大小关系为：无减震层 > 减震层 1cm > 减震层 2cm，说明增加减震层厚度可以降低隧道在穿越软硬围岩段的动力响应差异，使二衬结构的动力响应趋于一致，从而可降低衬砌和围岩的相对位移，使沿隧道轴向的受力更加合理，但会使洞身段的加速度峰值有所上升。

图 16 给出 A3 和 A5 加速度频谱曲线，可以看出 3 组工况下二衬仰拱频谱特性与拱顶围岩频谱特性（图 13）基本一致，仅在幅值上略有差别。在无

减震层时呈现“三峰值”现象，且随减震层厚度的增加，第三峰值逐渐减弱，仅体现“双峰值”，表明二衬频谱特性同样受到软硬围岩不同动力特性的影响而产生“叠加效应”。

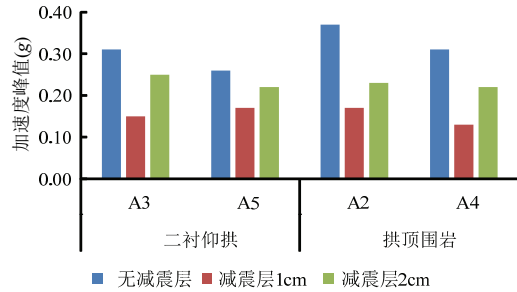


图 15 加速度峰值对比

Fig.15 Contrast of peak acceleration

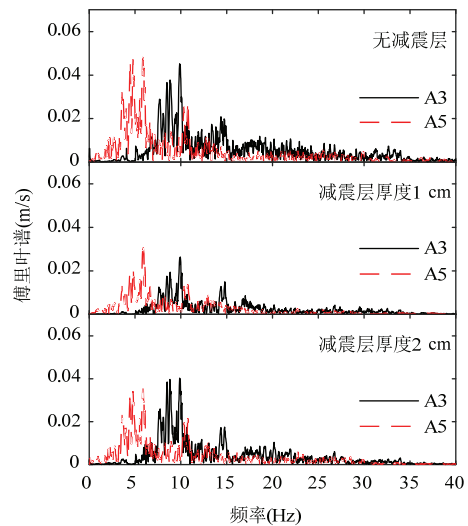


图 16 A3 和 A5 加速度频谱曲线

Fig.16 Acceleration spectrum curves of A3 and A5

既有文献[18, 26]表明，无减震措施条件下，隧道结构在地震过程中并不体现自振特性，通过试验分析可知，隧道结构在设置减震层条件下同样不显著体现自振特性，主要取决于所穿越围岩的动力特性。

3.2 衬砌动应力集中

通过监测隧道二衬和初支的动应变幅值，已知衬砌结构的弹性模量，可以计算出各监测点的环向动应力幅值。图 17 给出了 V 级围岩内 3-3 断面各监测点的动应力幅值，可以看出，无减震层时，各监测点二衬动应力均高于初支动应力，二衬拱脚和初支拱肩处应力幅值相对较高；减震层 1cm 时，二衬动应力大幅度降低，初支动应力均增大，拱脚处增幅显著；减震层 2cm 时，二衬动应力整体均增大，拱脚、仰拱处较为明显，初支动应力除拱顶有较大

增幅外，其他位置基本保持不变。

由此可以看出，隧道设置减震层可显著降低二衬动应力，但会使初支动应力呈现不同程度的放大，具体表现为，随减震层厚度的增加，二衬动应力先减小后增大，初支动应力逐渐增大，数值计算结果表现更为明显，如图 18 所示，其中动应力幅值数值计算结果比试验高 30%~50%，但计算结果与试验测试结果的表现规律是一致的。

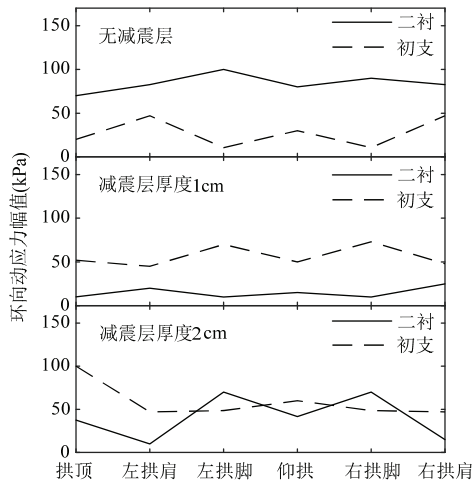


图 17 动应力幅值 (模型试验)

Fig.17 Dynamic stress amplitude (model test)

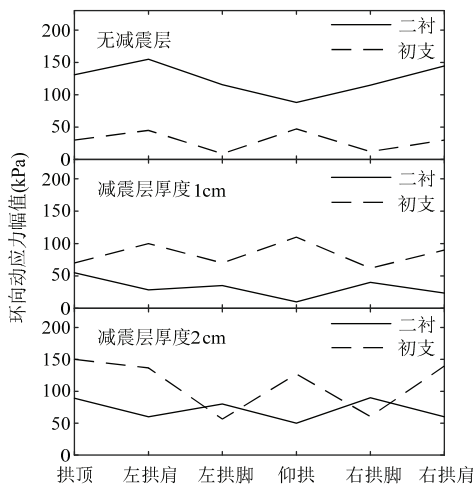


图 18 动应力幅值 (数值模拟)

Fig.18 Dynamic stress amplitude (numerical simulation)

隧道不设置减震层时，围岩、初支、二衬可认为是连续介质，相对位移小，在二衬临空面存在入射波与反射波“叠加效应”，因此二衬动应力高于初支动应力，从试验和数值模拟结果来看，二衬动应力是初支动应力的 2~3 倍；设置减震层后，由于减震层弹性模量低，阻尼比大，允许初支和二衬之间

发生一定的剪切变形，可吸收部分地震波能量，而初支和减震层之间发生刚度突变，则初支会产生入射波和反射波的“叠加效应”，因此二衬动应力会降低，而初支动应力会增大；随着减震层厚度的增加，减震层本身在动力作用下的变形会增大，导致初支和二衬均产生较大的变形和内力。

图 19 给出了文献[23]隧道二衬和初支的动应力集中系数解析解，其中减震层厚/洞径=1/40 相当于试验中减震层厚 1cm，减震层厚/洞径=1/10 相当于试验中减震层厚 2cm，可以看出随减震层厚度的增加，二衬动应力集中系数先减小后增大，初支动应力集中系数先增大，后呈降低趋势，与试验和数值模拟结果规律基本一致的，即从洞身段来看，减震层厚度存在最优值。文献[23]与试验的区别主要在于，文献假设隧道为圆形，且不考虑重力，动应力集中系数分布具有对称性，表现为共轭 45°方向最大，而模型试验和数值计算隧道为多心圆，拱脚处具有几何突变，因此试验结果表现为拱脚和拱肩动应力幅值具有一定差异，且在重力作用下，拱顶和仰拱动应力并不为零。

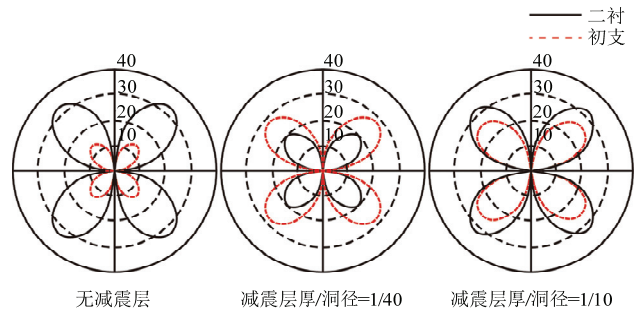


图 19 动应力集中系数解析解

Fig.19 Seismic wave time-frequency decomposition

3.3 衬砌结构破坏形态

试验采用全程摄像记录，对震前、震中和震后的模型系统破坏进行全程监测。试验结束后，对模型围岩地表和衬砌结构挖出前后的破坏形态进行描述。取 V 级围岩中 C 节段衬砌的破坏形态进行分析，如图 20~图 22 所示。

无减震层时破坏形态如图 20 所示，可以看出拱顶、左拱脚、右拱脚和仰拱出现了纵向贯通裂缝，初期支护外侧拱脚均出现大面积掉块；减震层厚度为 1cm 时破坏形态如图 21 所示，二次衬砌内部右拱脚出现局部开裂、仰拱局部隆起，除此二衬内部无贯通裂缝，其他部位并未见明显裂缝；减震层厚度为 2cm 破坏形态如图 22 所示，二次衬砌内部仰

拱出现局部纵向裂缝，右拱脚出现贯通裂缝，左拱脚出现局部纵向裂缝。

对比 3 组试验的破坏形态可以明显看出，设置减震层可以大幅降低衬砌结构的裂缝数量，减震层厚度为 1cm 时的衬砌完整性明显优于减震层厚度为 2cm 时的，说明减震层厚度增加至一定程度后对衬砌结构受力反而不利，验证了最优减震层厚度的存在。同时，通过衬砌结构的破坏形态可以看出，在地震荷载作用下，隧道拱顶、拱脚和仰拱易发生开裂，设置减震层后，仰拱相对更容易发生破坏，在隧道抗震设计中应给予重点关注。

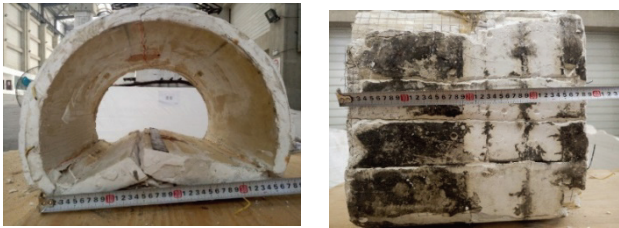


图 20 无减震措施隧道结构破坏情况

Fig.20 Damage of tunnel structure without damping layer



图 21 减震层厚 1cm 隧道结构破坏情况

Fig.21 Damage of tunnel structure with 1cm damping layer



图 22 减震层厚 2cm 隧道结构破坏情况

Fig.22 Damage of tunnel structure with 2cm damping layer

4 结论

以西部高烈度地震区浅埋公路隧道为依托，通过振动台试验和数值模拟，对地震动垂直于隧道轴向输入时，在无减震措施、设置减震层厚度（1cm）和设置减震层厚度（2cm）3 组工况下，隧道穿越软

硬围岩的地震动响应规律进行研究，得到以下结论：

（1）从洞身段来看，减震层厚度存在最优值；从穿越软硬围岩段来看，增加减震层厚度可降低隧道沿纵向的动力响应差异，使衬砌的动力响应趋于一致，但加速度峰值会有所上升。

（2）设置减震层并不会显著改变围岩频谱特性，衬砌结构也不显著体现自振特性，其响应主要取决于所穿越围岩的动力特性；减震层处于最优值时可通过吸收更多的低频组分来降低隧道的动力响应。

（3）与均质地层不同，穿越软硬围岩段浅埋隧道同时受两种不同地层动力特性和地表反射波的影响而产生“叠加效应”，衬砌和围岩加速度频谱曲线表现出“三峰值”现象。

（4）隧道设置减震层可显著降低二衬动应力，但会使初支动应力呈现不同程度的放大，随减震层厚度的增加，二衬动应力先减小后增大，初支动应力先增大，后呈降低趋势。

（5）通过观测衬砌结构的破坏形态发现，在地震荷载作用下，隧道拱顶、拱脚和仰拱易发生开裂，设置减震层后，仰拱相对更容易发生破坏，在隧道抗震设计中应给予重点关注。

参考文献

- [1] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(4): 247-293
- [2] 陈卫忠, 宋万鹏, 赵武胜, 等. 地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(2): 310-325 (Chen Weizhong, Song Wanpeng, Zhao Wusheng, et al. Research progress of seismic analysis methods and performance evaluation in underground engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(2): 310-325 (in Chinese))
- [3] Pao Y H, Mow C C, Achenbach J D. Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations [M]. New York: Crane, Russak & Company, 1973
- [4] Davis C A, Lee V W, Bardet J P. Transverse response of underground cavities and pipes to incident SV waves [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001, 30(3): 383-410
- [5] Lee V W, Trifunac M D, Asce A M. Response of tunnels to incident SH-waves [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1979, 105(4): 643-659
- [6] Lee V W, Cao H. Diffraction of SV waves by circular canyons of various depths [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1989, 115(9): 2035-2056
- [7] 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 (in Chinese))
- [8] 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 Shuaishuai, Gao Bo, Sui Chuanyi, et al. Mechanism of shock absorption layer and shaking table tests on shaking absorption technology of tunnel across fault [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1086-1092 (in Chinese))
- [9] 梁建文, 纪晓东. 地下衬砌洞室对 Rayleigh 波的放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 24-31 (Liang Jianwen, Ji Xiaodong. Amplification of Rayleigh waves due to underground lined cavities [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 24-31 (in Chinese))
- [10] 纪晓东, 梁建文, 杨建江. 地下圆形衬砌洞室在平面 P 波和 SV 波入射下动应力集中问题的级数解[J]. 天津大学学报, 2006, 39(5): 511-517 (Ji Xiaodong, Liang Jianwen, Yang Jianjiang. On dynamic stress concentration of an underground cylindrical lined cavity subjected to incident plane P and SV waves [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(5): 511-517 (in Chinese))
- [11] 钟启凯. 地下圆形组合衬砌洞室在地震波下的动力反应分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2009 (Zhong Qikai. Dynamic response analysis of underground cylindrical composite-lining cavern subjected to seismic waves [D]. Changsha: Hunan University, 2009 (in Chinese))
- [12] Iwatate T, Kobayashi Y, Kusu H, et al. Investigation and shaking table tests of subway structures of the hyogoken-nanbu earthquake [C]//New Zealand Society for Earthquake Engineering. New Zealand, 2000
- [13] Che A, Iwatate T. Shaking table test and numerical simulation of seismic response of subway structures [C]// 7th International Conference on Structures under Shock and Impact (SUSI VII). Montreal, Canada, 2002: 367-376
- [14] Moghadam M R, Mohammad H B. Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: shaking table testing and numerical simulation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 83(4): 81-97
- [15] Baziar M H, Moghadam M R, Kim D S, et al. Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 44(9): 10-22
- [16] Wang Guobo, Yuan Mingzhi, Miao Yu, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 76(6): 145-159
- [17] Yuan Yong, Yu Haitao, Li Chong, et al. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings—Part I: theory and validation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 108(5): 177-186
- [18] 张景, 何川, 耿萍, 等. 穿越软硬突变地层盾构隧道纵向地震响应振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 68-77 (Zhang Jing, He Chuan, Geng Ping, et al. Shaking table tests on longitudinal seismic response of shield tunnel through soft-hard stratum junction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 68-77 (in Chinese))
- [19] 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 Rock Mechanics and Engineering, 2017, 39(11): 2125-2131 (in Chinese))
- [20] 王峥峥, 高波, 李斌, 等. 跨断层隧道振动台模型试验研究 I: 试验方案设计[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 50-55 (Wang Zhengzheng, Gao Bo, Li Bin, et al. Experimental study using a shaking table model for a tunnel passing through faults (Part I): test scheme design [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 50-55 (in Chinese))
- [21] 王峥峥, 李斌, 高波, 等. 跨断层隧道振动台模型试验研究 II: 试验成果分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 105-109 (Wang Zhengzheng, Li Bin, Gao Bo, et al. Experimental study using a shaking table model for a tunnel passing through faults (Part II): test result analysis [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 105-109 (in Chinese))
- [22] 侯森, 陶连金, 李书龙, 等. 山岭隧道洞口段设置减震层的振动台模型试验研究[J]. 世界地震工程, 2014, 30(3): 187-195 (Hou Sen, Tao Lianjin, Li Shulong, et al. Shaking table test for dynamic response in portal section of mountain tunnel with shock absorption layer [J]. World Earthquake on Engineering, 2014, 30(3): 187-195 (in Chinese))
- [23] 王帅帅. 基于波动力学理论浅埋隧道减震层力学机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017 (Wang Shuaishuai. Damping mechanism study of shallow tunnel with shock absorption layer based on wave motion theory in strong earthquake region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese))
- [24] 王峥峥. 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 Zhengzheng. Nonlinear seismic damage response of tunnel structure across fault [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009 (in Chinese))
- [25] 耿萍, 唐金良, 权乾龙, 等. 穿越断层破碎带隧道设置减震层的振动台模型试验[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(6): 2520-2526 (Geng Ping, Tang Jinliang, Quan Qianlong, et al. Shaking table test for tunnel with shock absorption layer though fault zone [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(6): 2520-2526 (in Chinese))
- [26] 蒋树屏, 文栋良, 郑升宝. 嘎隆拉隧道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, 2011, 30(4): 649-656 (Jiang Shuping, Wen Dongliang, Zheng Shengbao. Large-scale shaking table test for seismic response in portal section of galongla tunnel [J].

- 南京:东南大学, 2011
- [4] 杨明. 大都市区轨道交通线网模式与布局研究[D]. 南京: 东南大学, 2014 (Yang Ming. Research on the pattern and planning of metropolitan rail transit network [D]. Nanjing: Southeast University, 2014 (in Chinese))
- [5] Dicesare F. A system analysis approach to urban rapid transit guide way location [D]. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University, 1970
- [6] Church R L, Clifford T J. Discussion of 'environmental optimization of power lines' by Economides and Sharifi [J]. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 1979, 105(2): 438-439
- [7] Garcia R, Mesa J A, Marín A, et al. Analysis of the parameters of transfers in rapid transit network design [C]//5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS'05). Germany, 2006
- [8] Marín Á, García-Ródenas R. Location of infrastructure in urban railway networks [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(5): 1461-1477
- [9] Canca D, De-Los-Santos A, Laporte G, et al. A general rapid network design, line planning and fleet investment integrated model [J]. Annals of Operations Research, 2014, 246(1/2): 127-144
- [10] López-ramos F, Codina E, Marín Á, et al. Integrated approach to network design and frequency setting problem in railway rapid transit systems [J]. Computers & Operations Research, 2017, 80: 128-146
- [11] 沈景炎. 客运强度与城市轨道交通线网的合理规模[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(7): 3 (Shen Jingyan. Passenger transport intensity and rational scale of rail transit network [J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(7): 3 (in Chinese))
- [12] 刘迁, 许双牛, 吴爽, 等. 我国城市轨道交通线网规划实践与思考[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015 (Liu Qian, Xu Shuangniu, Wu Shuang, et al. The urban rail transit network planning practice and thinking [M]. Beijing: China Communications Press, 2015 (in Chinese))
- [13] 吴小萍, 陈秀方. 城市轨道交通网络规划理论方法研究进展[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 111-117 (Wu Xiaoping, Chen Xiufang. Progress of study on urban mass transit network planning theory and methodology [J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 111-117 (in Chinese))

柴树山 (1990—), 男, 博士研究生。主要从事城市轨道交通线网规划方面的研究。

梁青槐 (1967—), 男, 博士, 教授。主要从事城市轨道交通线网规划与线路设计方面的研究。

周 宇 (1989—), 男, 硕士研究生。主要从事城市轨道交通线网规划方面的研究。

王 恒 (1994—), 男, 硕士研究生。主要从事城市轨道交通线网规划方面的研究。

(上接第 120 页)

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 649-656 (in Chinese))
- [27] 杨果林, 申权, 杨啸, 等. 基覆边坡支撑结构的加速度放大系数数值与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 374-381 (Yang Guolin, Shen Quan, Yang Xiao, et al. Numerical and experimental study on amplification coefficient of acceleration of retaining structures of bedrock and overburden layer slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 374-381 (in Chinese))

范凯祥 (1988—), 男, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程抗减震方面的研究。

申玉生 (1976—), 男, 博士, 副教授。主要从事隧道及地下工程施工力学及抗减震方面的研究。

高 波 (1957—), 男, 博士, 教授。主要从事隧道及地下工程施工力学、高速铁路空气动力学以及抗减震方面的研究。

郑 清 (1986—), 男, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程抗减震方面的研究。

闫高明 (1992—), 男, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程抗减震方面的研究。

王帅帅 (1988—), 男, 博士, 高级工程师。主要从事隧道及地下工程施工力学以及抗减震方面的生产与研究。

黄海峰 (1993—), 男, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程抗减震方面的研究。