

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.04.008

约束阻尼衬砌结构的减震效果试验研究

蔺子涵^{1,2}, 杨逸帆^{1,2}, 梅贤丞^{1,2}, 崔臻^{1,2,3}, 曹俊^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 暨南大学 重大工程灾害与控制教育部重点实验室, 广东 广州 510632)

摘要: 为了验证约束阻尼衬砌结构的减震性能, 探究约束阻尼衬砌结构阻尼层厚度及其结构形态对约束阻尼曲梁及直梁结构阻尼性能的影响规律, 结合工程实际, 设计并制作了不同厚度及结构形态的约束阻尼曲梁与直梁结构, 进行力锤单点锤击试验。基于 DASP-V11 系列分析系统中的时域、自谱和倍频程谱分析板块, 获得不同约束阻尼结构的时域波形图、复合损耗因子、阻尼比、振动总级值等振动特性曲线, 对比分析了不同阻尼层厚度及阻尼层形态条件下约束阻尼曲梁及直梁结构的振动特性。试验结果表明: 设有阻尼减震层能够提升结构的减震性能; 在现有的工况设置中结构阻尼性能与阻尼层厚度成正比关系; 相比于平整型约束阻尼结构, 镂空型结构的阻尼减震性能更佳; 约束阻尼曲梁结构相较于约束阻尼直梁结构表现出更佳的减震效果。

关键词: 衬砌结构; 约束阻尼结构; 减震层; 力锤冲击试验

中图分类号: U451⁺.4; U452.2⁺8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1144(2022)04-0048-10

Experimental Study of the Damping Effect of Constrained Damped Lining Structure

LIN Zihan^{1,2}, YANG Yifan^{1,2}, MEI Xiancheng^{1,2}, CUI Zhen^{1,2,3}, CAO Jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. MOE Key Lab of Disaster Forecast and Control in Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

Abstract: In order to verify the damping performance of the constrained damping lining structure and investigate the influence of the damping layer thickness and its structural form on the damping performance of the curved and straight beam-like constrained damping structures, the curved and straight beam-like damping structures with different thicknesses and structural forms were designed and fabricated for hammering vibration tests. Based on the time domain analysis, self-spectrum analysis and octave spectrum analysis modules of DASP-V11 series analysis system, the time domain waveform, composite loss factor, damping ratio, total vibration level value and other vibration characteristics of the structures were obtained. The vibration characteristics of curved and straight beam-like damping structures under different thickness and structural forms of damping layer were compared. The results show that the damping performance of the structure can be improved by providing a damping layer; the damping performance of the structure is proportional to the thickness of the damping layer in the existing working conditions; the damping performance of the skeleton type restrained damping structure is better than that of the flat type restrained damping structure; the restrained damping curved structure shows a better damping effect than that of the restrained damping straight beam structure.

Keywords: lining structure; constrained damping structure; damping layer; hammer impact test

收稿日期: 2022-04-12

修稿日期: 2022-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079133); 中国科学院青年创新促进会, 暨南大学“重大工程灾害与控制”开放基金项目(20200904002); 中国科学院大学生创新实践训练计划; 国家自然科学基金重大项目课题(51991393)

作者简介: 蔺子涵(2001—), 女, 本科在读, 所学专业为地下工程防灾减灾。E-mail: linzihan_2022@163.com

通讯作者: 崔臻(1986—), 男, 博士, 研究员, 主要从事地下工程防灾减灾等方面研究工作。E-mail: zcui@whrsm.ac.cn

地震灾害严重威胁着道路、桥梁、隧道等交通基础设施建设。以往震害资料表明^[1-3],隧道结构在历年地震中大肆遭受损坏,使得国家经济财产受到严重损失,人民生命安全受到严重威胁。国内外学者针对不同特征的隧道开展了大量震害机理和抗减震措施的相关研究,吴广盛^[4]基于 ANSYS 有限元数值模型,模拟了有无减震层的隧道条件,并探讨了不同因素对减震层减震效果的影响;孙铁成等^[5]针对双洞隧道洞口段有无减震层的条件进行了振动台模型模拟试验,得到设置减震层对围岩破坏程度有所减轻的结论;信春雷等^[6]基于振动台模型试验研究分析了跨断层隧道的洞身段不同减震措施的减震效果,对比分析减震缝、减震层和无抗减震措施条件下的动力响应特征,得到减震层的减震效果好于减震缝措施的结论;Kim D S 等^[7]通过理论分析,研究了隧道隔震层的减震效果及不同因素的影响效果。孙常新等^[8]分析了影响隧道在地震作用下的破坏因素,分别探究了不同围岩等级、不同结构形式和不同埋深等条件下隧道结构在地震中的破坏机理。可见,在横断面上采用恰当的减震、隔震设计,是有效提高隧洞在地震作用下结构安全的重要措施,需要开展深入研究。

约束阻尼减震结构作为基于粘弹性阻尼理论的一种减震隔振结构,其原理是当体系受力产生形变时,由于基层-阻尼层接触面和阻尼层-约束层接触面之间受力状况的差异,导致阻尼层上下表面产生不同的应力应变,从而阻尼层发生剪切变形,与此同时阻尼层也会发生拉、压变形,从而耗散更多的能量^[9-10],达到减震的效果。目前,在桥梁建筑抗震领域及汽车减振降噪等领域内,约束阻尼减震结构的运用均获得了极大的发展和成功,例如,刘全民等^[11]提出了一种约束阻尼层桥梁车致振动与结构噪声理论计算方法,探究了约束阻尼层参数对高速铁路钢桁结合梁桥噪声的影响规律。鞠家辉^[12]通过单点锤击法,研究了针对路面工程的约束阻尼结构中阻尼材料和阻尼层厚度对约束阻尼结构的阻尼性能影响。王立聪^[13]基于某汽车的车身结构,建立了针对汽车模型的约束阻尼结构的建模方式,并开展了车身结构的 NVH 性能仿真分析,进行了设置约束阻尼结构的车身传递函数稳健性优化分析。但是对于地下隧道工程的抗震设计,约束阻尼结构的研究仅停留在早期学者提出复合阻尼减震层结构的减震设计设想阶段,尚未开展系统深入的研究。如崔

光耀^[14]建立了基于地形效应的山岭隧道洞口浅埋段地动峰值加速度确定方法及隧道洞口浅埋段纵向和断裂粘滑隧道抗震设计计算方法,并对采用减缝或减层的六种方式进行了静力错动模型试验研究,得出二衬设减震缝(12 m)的减震方式效果最好。

因此,本文基于约束阻尼理论,将约束阻尼结构应用于地下隧道工程,制作代表隧道衬砌结构的约束阻尼曲梁构件模型,开展系统的材料力学与力锤动力冲击试验,对比分析了不同阻尼层厚度及其结构形态对曲梁及直梁状约束阻尼结构阻尼减震性能的影响,试验结果可为隧道地下工程抗震结构设计提供理论和数据支撑。

1 试验概况

本文依托于川藏铁路控制性重点工程折多山隧道,结合工程场地特性,代表性地选取了折多山隧道中弧形隧道与矩形隧道部分进行模拟研究。折多山隧道地处四川省康定市,属于我国西部强震区,该地区地震基本烈度高达Ⅷ度。本文提出一种适用于地下隧道工程的约束阻尼减震衬砌结构,通过分别设计与制作约束阻尼曲梁与直梁结构对折多山隧道的弧形隧道部分与矩形隧道部分进行模拟。本试验以振动理论为基础,采用力锤单点锤击振动试验的研究方法,并使用 DASP-V11 系列分析系统对实验数据进行分析及对比。

1.1 试验材料制备

本试验采用的约束阻尼曲梁结构如图 1 所示,由约束层、基层及阻尼层三部分构成,三者由内向外依次紧密粘结从而形成约束阻尼耗能结构。其中试验中阻尼层材料选用自行研发的橡胶-砂混凝土材料,该材料由橡胶颗粒、砂和水泥浇筑而成,其配比为橡胶:砂:水泥=1:1:1.333。橡胶颗粒由废弃轮胎研磨而来,并通过标准土工筛筛至粒径为 0.075 mm~0.250 mm。所用砂来自天然清洁的河流,也采用土工筛进行筛分为 0.5 mm~1.0 mm 粒径,并将筛分后的砂置于 120℃ 的干燥箱内进行 8 h 以上的烘干,使其保持干燥。所选水泥为 I 型普通硅酸盐水泥(I-OPC),该水泥的 28 d 抗压强度为 42.5 MPa,符合《水工混凝土试验规程》^[15](SL/T 352—2020)要求。橡胶-砂混凝土制作及性能测试过程如图 2 所示。阻尼层的橡胶-砂混凝土材料的力学性能测试结果如表 1 所示。约束层及基层材料均为混凝土,由试验室配置,其材料配比为水:水泥:砂:

石子 =0.38:1.00:1.11:2.72。在上述混凝土配比下的立方体试样在标准养护条件下 28 d 后,通过室内试验测得的抗压强度为 31.46 MPa,弹性模量为 30.25 GPa,因此强度等级满足 C30 要求。

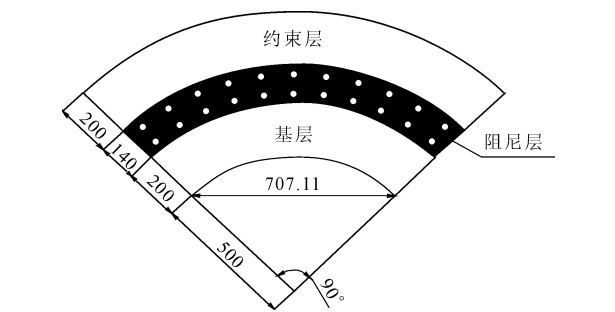


图 1 约束阻尼曲梁结构尺寸(单位:mm)

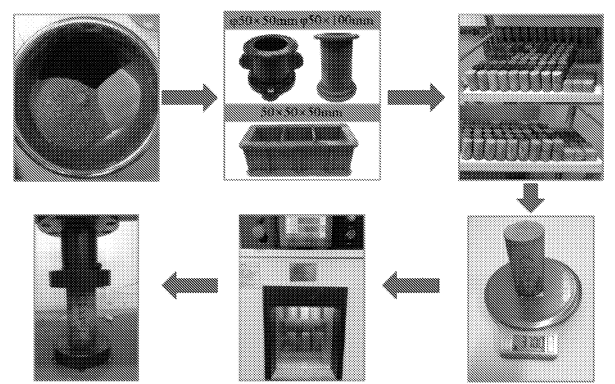


图 2 橡胶-砂混凝土制作及性能测试

表 1 阻尼层橡胶混凝土材料力学性能参数表

材料	E /MPa	UCS /MPa	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	c /MPa	φ /($^{\circ}$)	f_t /MPa
橡胶混凝土	42.06	1.41	1.148	1.07	62.30	0.43

1.2 试验方案

分别制作模具浇筑约束阻尼结构的基层,阻尼层,约束层并进行养护。通过拼合各结构层得到约束阻尼结构,并在各结构层间均匀涂抹潮湿沙子使得各结构层间接触紧密。本试验共设置两种阻尼结构:约束阻尼曲梁结构与约束阻尼直梁结构,同时分别将阻尼层浇筑时未埋设塑料管、埋设一排塑料管、埋设两排塑料管形成的无孔阻尼层、一排孔阻尼层及两排孔阻尼层称为阻尼层平整型、镂空 I 型与镂空 II 型三种不同形态的阻尼层结构。试验共设有 13 个工况,如表 2、表 3 所示,其中全部工况基层及约束层厚度皆为 200 mm。通过对比不同阻尼层结构形态和阻尼层厚度来分析各工况条件下约束阻尼

结构的阻尼性能。

表 2 约束阻尼曲梁结构工况设计

工况	阻尼减震层厚度/mm	阻尼减震层
1	—	无(对照组)
2	60	
3	100	平整型
4	140	
5	60	
6	100	镂空 I 型
7	140	
8	100	镂空 II 型
9	140	

表 3 约束阻尼直梁结构工况设计

工况	阻尼减震层厚度/mm	阻尼减震层
10	—	无(对照组)
11	100	平整型
12	100	镂空 I 型
13	100	镂空 II 型

1.3 监测方案

用型号为 Inv-9314 的聚能力锤进行单点锤击试验;采用型号为 Inv-3062T 的 24 位动态信号采集仪和型号为 Inv-9828 的加速度传感器采集结构振动的加速度信号和应变信号。

由于结构试件质量体积较大,同时避免地面接触对测试结果的影响,浇筑前在结构两端放置两块木方作为垫层支座。按照图 3 及图 4 所示方式布置采样传感器及连接各设备,其中测点位于结构下表面,激振点位于结构上表面。设备连接完成后,加速度采集仪的 1 号通道将采集力锤的信号数据,加速度采集仪的 2 号、3 号、4 号通道分别采集模型底部测点 1、测点 2 和测点 3 的加速度传感器的信号,同时锤击试验的开始条件设置为多次出发,次数选择为 3 次,力锤锤头材料为尼龙头,同时敲击时尽量保持每次的敲击力度相近,并且避免连击。

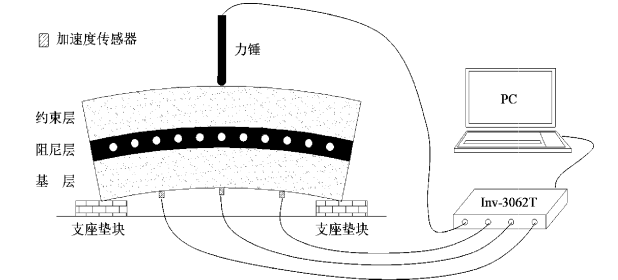


图 3 单点锤击试验示意图

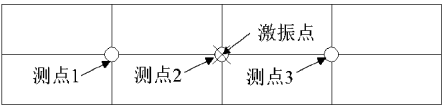


图 4 测点及激振点位置示意图

2 约束阻尼曲梁结构阻尼性能分析

基于 DASP-V11 系列分析系统中的时域分析、自谱分析、倍频程谱分析模块,对锤击振动试验数据进行处理,获得约束阻尼结构的时域波形图、复合损耗因子、阻尼比和振动总级值曲线等振动特性。同时通过设计不同厚度及结构形态的弧形阻尼层来对比分析不同约束阻尼曲梁结构的阻尼性能,研究阻尼层厚度及其结构形态对约束阻尼曲梁结构阻尼性能的影响规律。

在对每个工况进行试验数据采集时,为了减少在冲击结构时不同冲击力对试验结果的影响,每个工况分别进行 3 次冲击,选取相近冲击力的试验结果进行分析讨论。对于工况 1—工况 9 的约束阻尼曲梁结构,各工况结构冲击时冲击力锤的自谱曲线如图 5 所示。同由图可知,各个工况受力锤冲击时力锤激励的主要输出频率在 1 Hz ~ 10 Hz 范围内,与工程结构受地震动激励的主要影响频率相近,符合试验模拟考虑结构受地震动影响的要求。

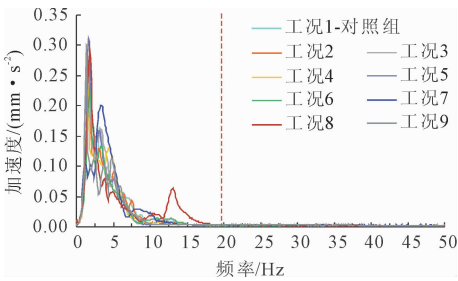


图 5 各曲梁工况结构冲击时力锤自谱曲线

2.1 时域分析

时域分析是最基本的信号分析方法之一,它直观的给出了信号在最初状态时的时域波形。可以对信号从时间域上进行分析,可以分析信号随时间的变化规律以及在每个时间点的幅值大小。

在对各个结构进行时域分析时,得到具有代表性的测点 2 的时域波形图。进行对比分析不同阻尼层厚度及其结构形态对加速度幅值的影响规律。结构振动加速度幅值越小,表明减振效果越好。

2.1.1 阻尼层厚度的影响

为了能够对比不同阻尼层厚度对约束阻尼曲梁

结构阻尼性能的影响,得到如图 6 和图 7 所示不同阻尼层厚度的约束阻尼结构 2 号测点的时域波形图及加速度幅值对比图。由图 6、图 7 可知,工况 1 对照组的振动加速度幅值为 13.38 mm/s²。相比于对照组,无论平整型阻尼层还是镂空 I 型及镂空 II 型阻尼层不同厚度条件下的约束阻尼结构的振动加速度幅值均有所减小。同时对于三种不同阻尼层形态,均呈现出阻尼层厚度越大,结构振动加速度幅值越小,其中 60 mm 厚阻尼层结构振动加速度幅值平均下降了 7.14%,为 12.42 mm/s²;100 mm 厚阻尼层结构振动加速度幅值平均下降了 14.08%,为 11.50 mm/s²;140 mm 厚阻尼层结构振动加速度幅值平均下降了 24.02%,为 10.17 mm/s²;综合上述分析可知,阻尼减震层的存在能明显降低结构的振动加速度,增强结构的阻尼性能,同时由现有工况数量设置可知,阻尼层厚度与约束阻尼曲梁结构阻尼性能成正比关系,但在实际工程中需同时考虑阻尼层厚度对结构支护强度的影响。

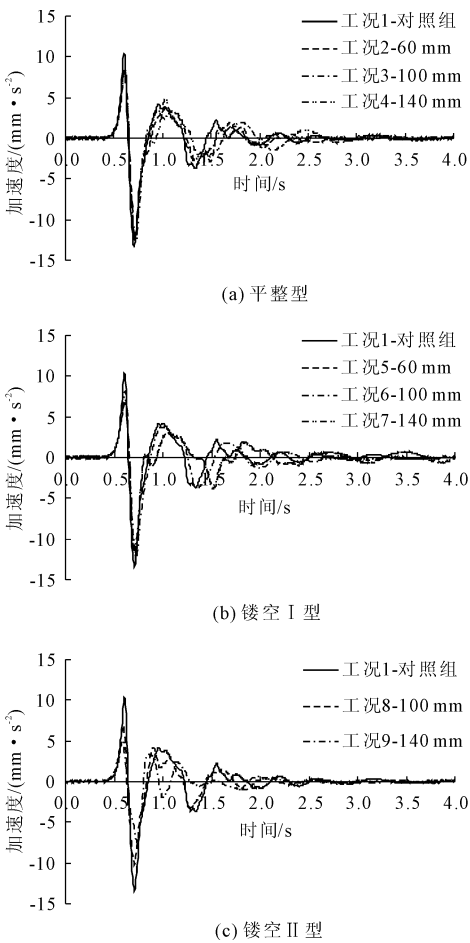


图 6 不同阻尼层厚度工况 2 号监测点加速度时程曲线

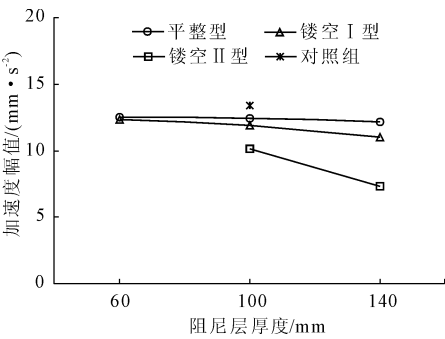


图 7 不同阻尼层厚度 2 号监测点加速度幅值对比

2.1.2 阻尼层结构形态的影响

为了能够对比不同阻尼层结构形态对约束阻尼结构阻尼性能的影响,得到如图 8 和图 9 所示平整型、镂空 I 型和镂空 II 型阻尼层结构 2 号测点的时域波形图及加速度幅值对比图。由图 8、图 9 可知,相比于工况 1 对照组结构的时域分析试验结果,不同的阻尼层厚度条件下,均呈现出镂空 II 型阻尼层结构的振动加速度幅值 < 空 I 型阻尼层结构 < 平整型阻尼层结构 < 对照组结构。以对照组为参照,相比于平整型阻尼层结构,3 种不同阻尼层厚度的镂空 I 型阻尼层结构的振动加速度幅值平均多下降了 4.76%,对应的镂空 I 型阻尼层结构的振动加速度幅值为 12.30 mm/s²,11.88 mm/s² 和 11.05 mm/s²,而平整型阻尼层结构的振动加速度幅值为 12.55 mm/s²,12.47 mm/s² 和 11.05 mm/s²;同时 3 种不同阻尼层厚度的镂空 II 型阻尼层结构的振动加速度幅值比镂空 I 型阻尼层结构平均多下降了 20.50%,其中 100 mm 厚和 140 mm 厚的镂空 II 型阻尼层结构的振动加速度幅值为 10.14 mm/s² 和 7.31 mm/s²。综合上述分析可知,结构的阻尼性能与阻尼层结构的不同形态有关。并且,相同条件下,镂空 II 型约束阻尼结构比镂空 I 型和平整型约束阻尼结构具有更佳的阻尼性能。

2.2 自谱分析

对于一个振动信号或其它类型的随机信号,有时为了研究其内在规律,需要分析随机信号的周期性,这就需要将信号从时域变换到频域,得到的频谱中每个频率都对应信号的一个周期谐波分量。自谱分析就是对一个信号进行频谱分析。在自谱分析模块中可以通过 INV 频率阻尼计法得到结构的复合损耗因子及阻尼比^[16]。

进行对比分析不同阻尼层厚度及其结构形态的复合损耗因子及阻尼比,结构复合损耗因子及阻尼比越大,表明减振效果越好。

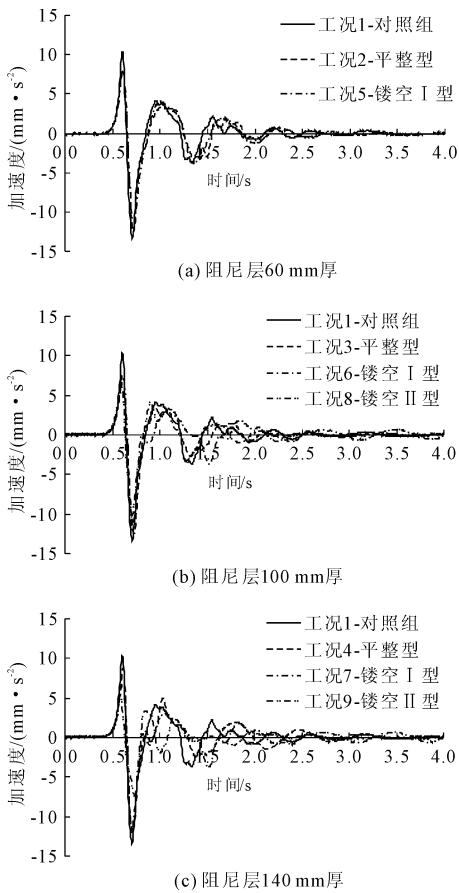


图 8 不同阻尼层形态结构 2 号监测点加速度时程曲线

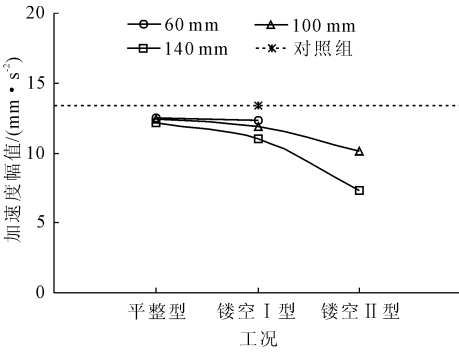


图 9 不同阻尼层形态结构 2 号监测点加速度幅值对比

2.2.1 阻尼层厚度的影响

不同阻尼层厚度工况结构的复合损耗因子及阻尼比分布如图 10 所示。由图 10 可知,相对于工况 1 对照组的结构,设置有阻尼层结构的工况 2—工况 9 的复合损耗因子及阻尼比均有所增大。再次表明阻尼层的设置可以提高结构的阻尼性能。同时不同形态的阻尼层条件下,结构复合损耗因子和阻尼比随阻尼层厚度变化的影响规律具有相同趋势。即随着结构阻尼层厚度的增大,三种弧形阻尼层结构中的复合损耗因子和阻尼比均增大。其中,对于 60 mm 厚阻尼层结构,复合损耗因子比对照组结构平

均增大了 16.54%,而阻尼比也平均增大了 16.39%;同时对于 100 mm 厚阻尼层结构,复合损耗因子比对照组结构平均增大了 39.87%,而阻尼比平均增大了 39.80%;最后对于 140 mm 厚的阻尼层结构,复合损耗因子比对照组结构平均增大了 54.62%,阻尼比增大了 51.97%。综合上述分析可知,阻尼减震层的存在能明显提高约束阻尼曲梁结构的阻尼性能,但与前文时域分析结果一致,由于现有工况数量设置有限,在实际工程中仍需同时考虑阻尼层厚度对结构支护强度的影响。

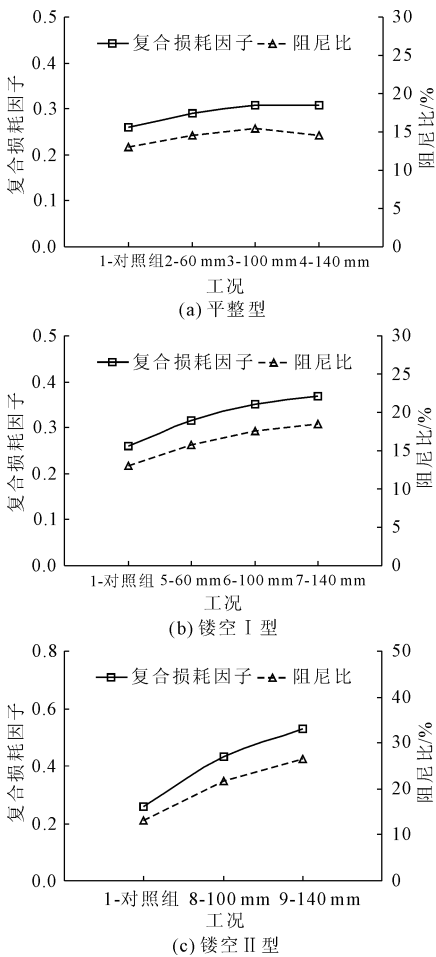


图 10 不同阻尼层厚度结构复合损耗因子及阻尼比分布

2.2.2 阻尼层结构形态的影响

不同阻尼层结构形态工况结构的复合损耗因子及阻尼比分布如图 11 所示。由图 11 可知,相对于工况 1 对照组结构分析试验结果,不同阻尼层厚度条件下,均呈现出镂空 II 型阻尼层结构的复合损耗因子和阻尼比 > 镂空 I 型阻尼层结构 > 平整型阻尼层结构 > 对照组结构。以对照组为参照,相比于平整型阻尼层结构,3 种不同阻尼层厚度的镂空 I 型阻尼层结构的复合损耗因子分别多提高了 10.00%, 16.15% 和 23.08%,对应的镂空 I 型阻尼层结构的

复合损耗因子为 0.32,0.35 和 0.37,而平整型阻尼层结构的复合损耗因子为 0.29,0.31 和 0.31;同时,3 种不同阻尼层厚度的镂空 I 型阻尼层结构的阻尼比比对照组结构分别多提高了 10.06%, 16.26% 和 30.54%,对应的镂空 I 型阻尼层结构的阻尼比为 15.80%,17.51% 和 18.44%,而平整型阻尼层结构的复合损耗因子为 0.29,0.31 和 0.31;而相比于镂空 I 型阻尼层结构,100 mm 及 140 mm 厚阻尼层的镂空 II 型阻尼层结构的复合损耗因子分别多提高了 31.92% 和 61.15%,对应的镂空 II 型阻尼层结构的复合损耗因子为 0.43 和 0.53;同时,2 种不同阻尼层厚度的镂空 II 型阻尼层结构的阻尼比分别多提高了 31.91% 和 61.13%,对应的镂空 II 型阻尼层结构的阻尼比为 21.66% 和 26.39%;综合上述分析可知,与前文时域分析结果一致,结构的阻尼性能与阻尼层结构的不同形态有关。相同条件下,镂空 II 型约束阻尼结构比镂空 I 型和平整型约束阻尼结构的阻尼性能更佳。

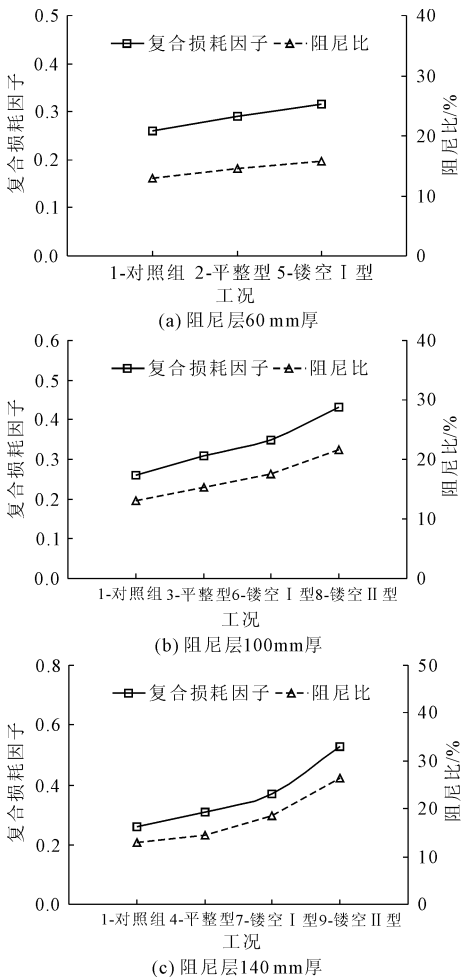


图 11 不同阻尼层形态结构结构复合损耗因子及阻尼比分布

2.3 倍频程谱分析

对振动信号的频谱分析,除了传递函数分析外,通常还采用倍频程谱分析方法。常用的倍频程分析包括 $1/3$ 倍频程谱和 $1/1$ 倍频程谱,二者分别将频谱按 $1/3$ 倍和 $1/1$ 倍的关系划分频带计算各频带内的谱值。本实验选取 $1/3$ 倍频程谱进行计算。工程中通常使用级值来表示振动的大小^[17]。振动信号的总级值称为振动级,简称振级,单位为分贝 (dB)。结构振动总级值是表征结构振动强弱的重要参量,也是评价阻尼结构减振效果的重要指标。

在倍频程谱分析模块中点选全程分析(平均计算)、线性平均、显示总级值等选项得到结构不同测点处振动总级值^[17]。对每个工况结构进行锤击试验,每个结构可以得到 3 个测点不同的振动总级值,通过计算 3 个测点振动总级值的平均数为结构整体的振动总级值。振动总级值越小,表明结构减振效果越好。

2.3.1 阻尼层厚度的影响

不同阻尼层厚度工况结构的振动总级值分布如图 12 所示。由图 12 可知,相对于工况 1 对照组的结构的振动总级值为 114.52 dB,设置有阻尼层结构的工况 2 ~ 工况 9 结构的振动总级值均有所减小。再次验证了阻尼层的设置可以提高结构的阻尼减震性能。在三种不同阻尼层形态结构中,60 mm 厚约束阻尼结构的振动总级值比对照组平均下降了 0.33%;而 100 mm 厚约束阻尼结构的振动总级值比对照组平均下降了 1.25%;140 mm 厚约束阻尼结构的振动总级值比对照组平均下降了 2.49%;三种厚度约束阻尼结构的振动总级值分别为 114.14 dB、113.09 dB、111.67 dB;由上述结果可知,阻尼减震层的存在能减小结构振动总级值,即阻尼层能明显提高约束阻尼曲梁结构的阻尼减震性能,同时与前文时域分析结果一致,在现有工况数量设置中,不同阻尼层结构形态条件下,阻尼层厚度与约束阻尼结构阻尼性能成正比关系,但在实际工程中由于阻尼层厚度的增加会减弱结构的支撑强度,因此需要谨慎选择阻尼层厚度。

2.3.2 阻尼层结构形态的影响

不同阻尼层结构形态工况结构的振动总级值分布如图 13 所示。由图 13 可知,相对于工况 1 对照组结构的振动总级值,不同阻尼层厚度条件下,均呈现出镂空 II 型阻尼层结构的振动总级值 < 镂空 I 型阻尼层结构 < 平整型阻尼层结构 < 对照组结构。以对照组为参考,相比于平整型阻尼层结构,三种厚度

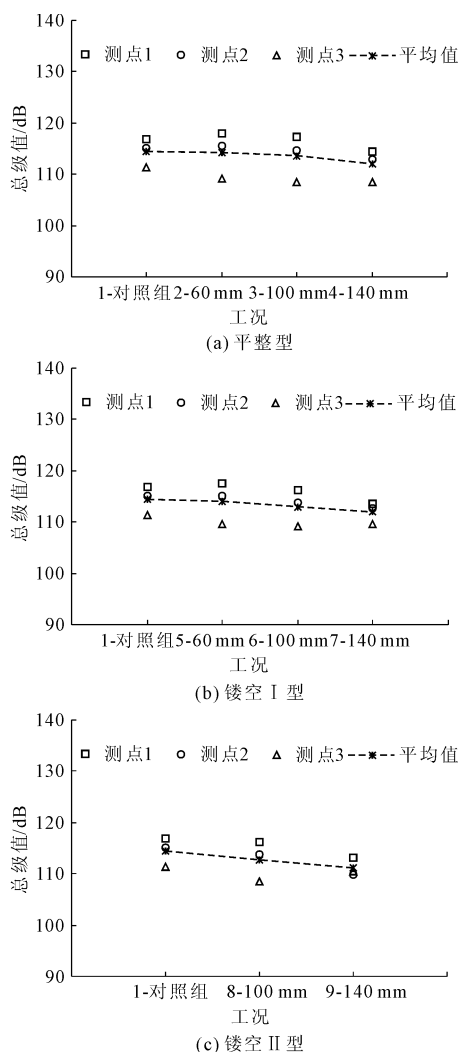


图 12 不同阻尼层厚度结构振动总级值分布

的镂空 I 型阻尼层结构的振动总级值分别多下降了 0.13%, 0.48% 和 0.03%, 对应的镂空 II 型阻尼层结构的振动总级值为 114.07, 112.98 和 111.92, 而平整型阻尼层结构的振动总级值为 114.21, 113.53 和 111.95; 而 100 mm 和 140 mm 厚的镂空 II 型阻尼层结构的振动总级值分别多下降了 0.67% 和 0.72%, 对应的镂空 II 型阻尼层结构的振动总级值为 112.76 和 111.13; 综合上述分析可知, 与前文时域分析结果一致, 不同阻尼层结构形态对约束阻尼结构的阻尼性能具有一定的影响, 在相同条件下, 镂空型约束阻尼结构比平整型约束阻尼结构的阻尼性能更佳。

3 约束阻尼直梁结构阻尼性能研究

基于 DASP - V11 系列分析系统中的时域分析、自谱分析、和倍频程谱分析模块, 对约束阻尼直梁结

构锤击振动试验数据进行处理,得到结构的时域波形、复合损耗因子、阻尼比、振动总级值等振动特性。通过设计不同厚度及结构形态的直梁阻尼层,研究直梁阻尼层结构形态及阻尼层厚度对直梁约束阻尼结构阻尼性能的影响规律。

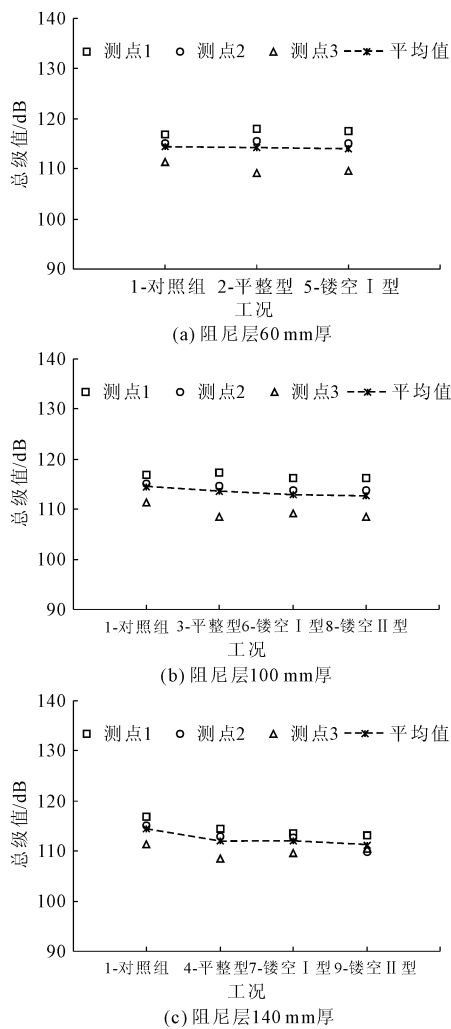


图 13 不同阻尼层形态结构结构振动总级值分布

与上述约束阻尼曲梁结构工况一致,在试验数据采集时,每个工况分别进行 3 次冲击,取相近冲击力的试验结果进行分析讨论。对于工况 10 ~ 工况 13 的直梁约束阻尼结构,各工况结构冲击时冲击力锤的自谱曲线如图 14 所示。由图 14 可知,各个工况受力锤冲击时力锤激励的主要输出频率同样在 1 Hz ~ 10 Hz 范围内,符合试验模拟考虑结构受地震动影响的要求。

3.1 时域分析

在对各个直梁结构进行时域分析时,得到具有代表性的测点 2 的时域波形图。进行对比分析不同阻尼层结构形态对加速度幅值的影响规律。

不同阻尼层结构形态的直梁约束阻尼结构 2 号测点的时域波形图及加速度幅值对比图如图 15、图 16 所示。由图 15、图 16 可知,三种不同阻尼层结构形态的约束阻尼直梁结构中,镂空 II 型阻尼层结构的振动加速度幅值 < 镂空 I 型阻尼层结构 < 平整型阻尼层结构 < 对照组结构。其中,各直梁约束阻尼结构中对对照组即工况 10 的振动加速度幅值为 19.94 mm/s^2 ,平整型阻尼层直梁结构的振动加速度幅值为 18.95 mm/s^2 ,镂空 I 型阻尼层直梁结构的振动加速度幅值为 14.79 mm/s^2 ,而镂空 II 型阻尼层直梁结构的振动加速度幅值为 13.30 mm/s^2 ;表明在约束阻尼直梁结构中,镂空 II 型约束阻尼结构的阻尼性能也最优。

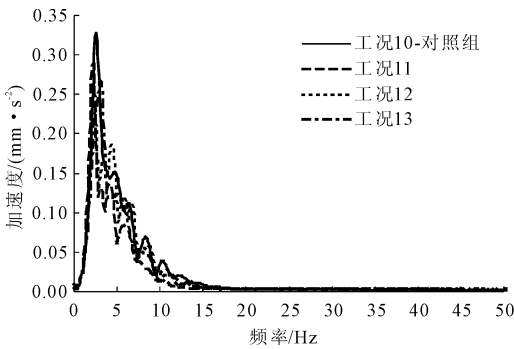


图 14 各直梁结构冲击时力锤自谱曲线

同时对比分析相同阻尼层厚度条件下,不同阻尼层结构形态对约束阻尼直梁与曲梁结构的振动加速度幅值的影响。由图可知,对于平整型阻尼层,约束阻尼曲梁结构的振动加速度幅值下降率大于约束阻尼直梁,分别为 6.83% 和 5.00%;而镂空 I 型和镂空 II 型阻尼层中,约束阻尼直梁振动加速度幅值下降率大约约束阻尼曲梁结构,其中直梁的下降率分别为 25.83% 和 33.33%,曲梁结构的下降率分别为 11.18% 和 24.22%。

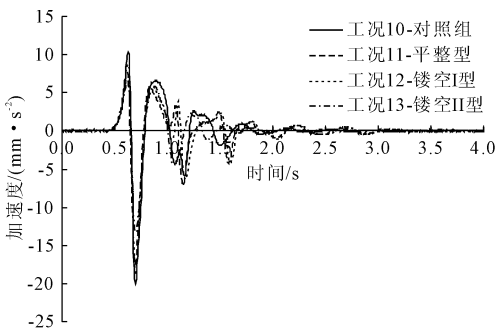


图 15 不同阻尼层形态的直梁结构 2 号监测点
加速度时程曲线

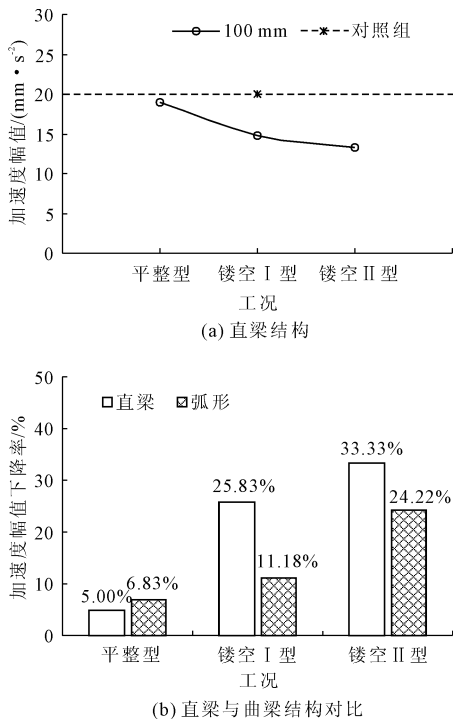


图 16 不同阻尼层形态的直梁结构 2 号监测点
加速度幅值对比

3.2 自谱分析

通过对各个结构进行自谱分析后,可以得到各个结构的复合损耗因子和阻尼比分布情况。

图 17 展示了不同阻尼层形态条件下约束阻尼直梁与曲梁结构的复合损耗因子及阻尼比的情况。由图 17 可知,对于约束阻尼直梁与曲梁结构,三种不同阻尼层形态下约束阻尼结构的复合损耗因子及阻尼比的变化趋势相同,即镂空 II 型阻尼层结构的损耗因子和阻尼比 > 大于镂空 I 型 > 平整型且均 > 各自的对照组结构。同时,每种不同阻尼层形态中约束阻尼曲梁结构的复合损耗因子及阻尼比均大于相应地约束阻尼直梁。其中,平整型的约束阻尼曲梁结构的复合损耗因子和阻尼比分别为 0.31 和 15.39%,而直梁分别为 0.23 和 11.43%,镂空 I 型的约束阻尼直梁结构的复合损耗因子和阻尼比分别为 0.35 和 17.51%,而直梁分别为 0.26 和 13.01%,镂空 II 型的约束阻尼曲梁结构的复合损耗因子和阻尼比分别为 0.43 和 21.66%,而直梁分别为 0.36 和 17.75%,表明相比于直梁,约束阻尼结构在曲梁结构中具有更好的阻尼减震表现。

3.3 倍频程谱分析

在倍频程谱分析模块中点选全程分析(平均计算)、线性平均、显示总级值等选项得到结构不同测点处振动总级值。通过对每个工况结构进行进行锤

击试验,每个结构可以得到 3 各测点不同的振动总级值,通过计算 3 个测点振动总级值的平均数为结构整体的振动总级值。

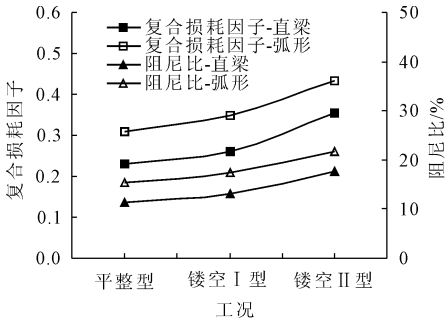


图 17 不同阻尼层形态的直梁与曲梁结构复合损耗因子及阻尼比对比

图 18 描述了不同阻尼层形态条件下约束阻尼直梁与曲梁结构的振动总级值对比结果。

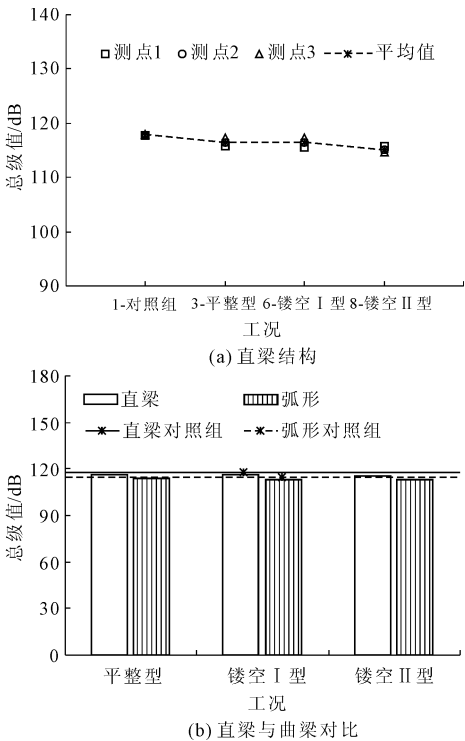


图 18 不同阻尼层形态的直梁与曲梁振动总级值对比

由图 18 可知,三种不同阻尼层结构形态的约束阻尼直梁结构中,镂空 II 型阻尼层结构的振动总级值 < 小于镂空 I 型阻尼层结构 < 平整型阻尼层结构 < 对照组结构。其中,各直梁约束阻尼结构中对照组即工况 10 的振动总级值为 117.83 dB,平整型阻尼层直梁结构的振动总级值为 116.53 dB,镂空 I 型阻尼层直梁结构的振动总级值为 116.48 dB,而镂空 II 型阻尼层直梁结构的振动总级值为 115.20

dB;表明在约束阻尼直梁结构中,镂空Ⅱ型约束阻尼结构的减振效果最好。同时可以看出,三种不同阻尼层形态的约束阻尼曲梁结构的振动总级值均小于相应结构的约束阻尼直梁结构,再次表明约束阻尼结构在曲梁结构中具有更好的减振性能。

4 结 论

本文针对约束阻尼衬砌结构的减震性能问题,制作约束阻尼曲梁与直梁结构模型开展动力冲击试验,研究阻尼减震层结构及其厚度、形态、曲率半径的动力响应特征。通过研究动力试验中的时域曲线、自谱分析及倍频程谱分析,得到以下结论:

(1) 三种不同参量的分析中均验证了设有阻尼减震层能够提升结构的阻尼的减震性能,同时在现有的工况设置中结构阻尼性能与阻尼层厚度成正比关系,但在实际工程中由于阻尼层会减弱结构的支撑强度,因此需要谨慎选择阻尼层厚度。

(2) 对比不同阻尼层结构形态的约束阻尼结构结果发现,相同阻尼层厚度条件下,相比于平整型约束阻尼结构,镂空型约束阻尼结构的阻尼减震性能更佳,并且镂空Ⅱ型的约束阻尼结构的减震性能最佳。

(3) 同时对比约束阻尼曲梁和直梁结构试验结果发现,约束阻尼结构在曲梁结构中表现出更佳的减震效果。在所有工况中,140 mm厚的弧形镂空Ⅱ型约束阻尼减震结构的阻尼减震性能最佳。

(4) 本文作为对约束阻尼衬砌减震结构的初步探索,采用试验手段验证了约束阻尼衬砌减震结构的减震性能。目前,基于试验结果的数值仿真模拟及结构优化设计工作正在进一步开展。

参考文献:

[1] Samata S, Ohuchi H, Matsuda T. A study of the damage of subway structures during the 1995 Hanshin - Awaji earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 223-239.

[2] 王文礼, 苏灼谨, 林峻弘, 等. 台湾集集大地震山岳隧道受损情形之探讨[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(2): 52-60.

[3] 钱七虎, 何川, 晏启祥. 隧道工程动力响应特性与汶川地震隧道震害分析及启示[C]//汶川大地震工程震害调查分析与研究, 北京: 科学出版社, 2009.

[4] 吴广盛. 基于数值模拟对隧道减震层的研究[J]. 交通世界, 2021(24): 30-31.

[5] 孙铁成, 高波, 王峥峥. 双洞隧道洞口段抗减震模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2021-2026.

[6] 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.

[7] Kim D S, Konagai K. Seismic isolation effect of a tunnel covered with coating material[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 437-443.

[8] 孙常新, 吕晓春. 基于改进动力强度折减法的隧道地震破坏机理探讨[J]. 现代隧道技术, 2014(6): 41-49.

[9] 王宝柱, 黄微波. 聚醚型聚氨酯的阻尼性能[J]. 合成橡胶工业, 2004, 5(27): 309-313.

[10] 黄微波, 杨宇润, 刘东晖. 聚醚氨酯结构与阻尼性能的研究(Ⅰ)[J]. 高分子材料科学与工程, 1995(2): 102-105.

[11] 刘全民, 李小珍, 张迅, 等. 钢桁结合梁桥约束阻尼层减振降噪方法研究[J]. 铁道学报, 2018(12): 130-136.

[12] 鞠家辉. 粘弹阻尼材料及路面约束阻尼结构阻尼性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.

[13] 王立聪. 基于约束阻尼结构的车身 NVH 性能分析与优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.

[14] 崔光耀. 隧道洞口浅埋段和断裂粘滑段抗震设计计算方法及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[15] 水工混凝土试验规程: SL/T 352—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

[16] 杨仁雄. 火灾下整体结构中梁的振动特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[17] 陈凯华. 粘弹阻尼材料及其异型约束阻尼结构阻尼性能的实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.