

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.014

芳纶网橡胶复合粘弹阻尼器性能研究*

周 娴^{1,2}, 潘 文^{1,2}, 王道航^{1,2}, 黄兆明³

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省抗震工程技术研究中心, 云南 昆明 650500;
3. 云南震安减震科技股份有限公司, 云南 昆明 650041)

摘要: 在橡胶中加入芳纶网制成新型的复合粘弹阻尼器, 对其进行疲劳试验、变形相关性试验和频率相关性试验, 并研究新型阻尼器的最大剪应力、存储剪切模量和等效阻尼比等指标的性能变化规律。研究表明: 该新型复合阻尼器力学性能稳定、阻尼器承受的最大剪应力增大、抗疲劳性能良好、该阻尼器的储存剪切模量和等效阻尼比受变形幅值的影响较大, 受加载频率影响较小。根据试验屈服点和硬化点, 采用 Matlab 建立双线性和多线性模型, 模拟结果与试验结果拟合良好。

关键词: 粘弹阻尼器; 芳纶网; 力学性能; 双线性模型; 多线性模型

中图分类号: TU317.1; TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0118-07

Research on Properties of Aramid Mesh and Rubber Composite Viscoelastic Damper

ZHOU Xian^{1,2}, PAN Wen^{1,2}, WANG Daohang^{1,2}, HUANG Zhaoming³

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics of Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Engineering Structure Seismic Mitigation and Isolation Technique Engineering Research Center of Yunnan Province, Kunming 650500, China;
3. Yunnan Quakesafe Seismic Isolation Technologies Co., Ltd., Kunming 650041, China)

Abstract: A new type of composite viscoelastic damper was made by adding aramid fiber mesh to rubber, and fatigue test, deformation correlation test and frequency correlation test were carried out on the viscoelastic damper. The maximum shear stress, stored shear modulus and equivalent damping ratio of the new damper were studied. The results show that the new composite damper has stable mechanical properties, and the maximum shear stress of the damper is increased. In addition, the fatigue resistance is good. The storage shear modulus and equivalent damping ratio of the damper are greatly affected by the deformation amplitude, and are less affected by the loading frequency. According to the yield point and hardening point in the test, the bilinear and multi-linear models were established by MATLAB, and the simulation results were well fitted with the experimental results.

Keywords: viscoelastic damper; aramid fiber mesh; mechanical properties; bilinear model; multi-linear models

* 收稿日期: 2019-01-19; 修回日期: 2019-05-29

作者简介: 周娴(1994—), 女, 硕士研究生。主要从事工程防灾减灾研究。E-mail: 783169008@qq.com

通讯作者: 潘文(1968—), 男, 教授, 博导。主要从事工程防灾减灾研究。E-mail: postmaster@163.cn

引言

粘弹性阻尼器是一种被动减震(振)控制装置,其主要依靠粘弹性材料的滞回耗能特性来减小结构的动力反应,从而达到减震(振)的目的^[1]。D.A. Foutch等^[2]对一个钢筋混凝土结构进行了振动台试验,试验结果表明,在同样地震力作用下,未安装粘弹性阻尼器的结构发生了脆性破坏;安装粘弹性阻尼器的结构模型的裂缝比未安装粘弹性阻尼器的结构模型要少。徐赵东等^[3]对某一装有粘弹性阻尼器的缩尺比例为1/5的三层钢筋混凝土框架结构进行振动台试验,研究表明粘弹性阻尼结构具有良好的抗震性能;周颖等^[4]对带粘弹性阻尼器的钢结构进行了振动台试验研究,通过对结构动力特性和结构响应的对比分析,研究了粘弹性阻尼器的减震效果和耗能特征。目前,国内外专家学者对其进行了一系列研究,取得了很多研究成果,但现在仍存在着以下问题:①目前所研制的国产粘弹性材料损耗因子普遍较低;②对粘弹性阻尼器的性能试验研究不够系统,针对粘弹性阻尼器的疲劳性能、耐久性能的研究涉及较少;③缺乏一个简明且准确地描述粘弹性阻尼器力学性能的计算模型;④根据实际的结构形式和使用环境进行粘弹性阻尼器的结构优化设计;⑤对粘弹性阻尼减震结构的设计理论和研究方法研究不够深入^[5]。通常,用于粘弹性阻尼器中的粘弹性材料大多为橡胶,而橡胶的弹性模量较低,在外力的作用下极易产生变形,故试验将粘弹性材料做成由织物增强材料和韧性橡胶组成的复合材料,它具有变形范围较大,承载能力较高,耐疲劳性能良好的特点。橡胶制品中的织物增强材料改善了橡胶制品的耐撕裂、耐磨损、耐疲劳等物理性能,在橡胶中加入芳纶网,芳纶纤维不仅具有高强度和高模量,而且具有密度低和耐磨性好等优点^[6]。

1 材料特性

1.1 橡胶

试验所用橡胶来自云南震安减震科技股份有限公司,是以天然橡胶为基料,按一定配比且加入配合剂,经塑炼-混炼-压延-模压-硫化等工序制成。

硫化胶物理性能参数见表1。

表1 硫化胶物理性能

Table 1 Physical properties of vulcanized rubber

测试项	结果
邵尔A硬度/度	64
拉伸强度/MPa	11.3
100%定伸应力/MPa	0.85
300%定伸应力/MPa	2.04
拉断伸长率/%	726
扯断永久变形/%	78

1.2 芳纶网

试验采用的芳纶网如图1所示,网孔为菱形,短对角边长为4 mm,长对角边长为5 mm,孔隙率为70.4%,芳纶纤维直径为1 mm,面密度为115.41 g/m²,其拉伸强度为19.92 MPa。

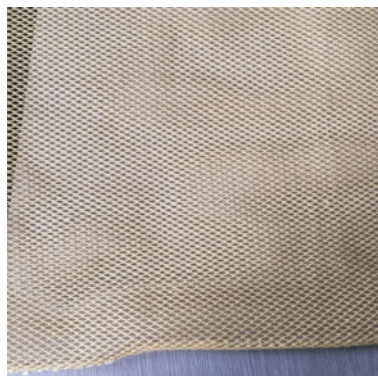


图1 芳纶网

Fig. 1 Aramid fiber mesh

2 试验概况

2.1 试验前准备及试件设计

试验开始前需对芳纶网进行预处理,芳纶网的预处理包括:清洗-烘干-喷胶三个过程,首先将芳纶网在清洗液中洗净,且置于110℃的恒温烘箱中烘干,然后正反两面各喷两次胶,每次喷胶都需将芳纶网均匀喷满,最后将其放置于密封袋中保存备用。

该试验的粘弹阻尼器试件是将复合粘弹材料硫化于两块钢板之间而制成剪切型粘弹阻尼器,试件尺寸根据国家标准《硫化橡胶与金属粘接拉伸剪

切强度测定方法》^[7]来确定,规范标准如图2所示,采用Q235钢板,钢板宽25 mm,长90 mm,中间复合材料平面尺寸为25 mm×25 mm,厚为6 mm,复合材料的硫化采用阜新翰帮机械制造有限公司制造的XLB-DQ400×400×2平板硫化机,硫化温度为150℃,每模硫化时间为30 min,压力为151 MPa,最后将制成的试件静置于温度为23±2℃,湿度为64.5±2%RH的恒温房中24 h。

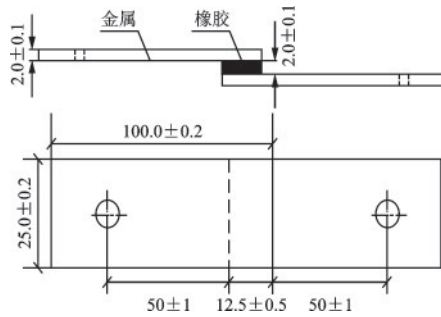


图2 规范标准

Fig. 2 Standard drawing

2.2 试验方案

试验采用在橡胶中加入不同层数芳纶网制成的阻尼器与只含橡胶制成的阻尼器作对照试验,芳纶网层数分别为4、6、8、10层,对应试件编号分别为4VX、6VX、8VX、10VX,只含橡胶的试件编号为B,每层芳纶网平面尺寸均为25 mm×6 mm,和橡胶叠合在一起,组成复合粘弹阻尼材料,最终阻尼器试样及受力方向如图3所示,以10VX为例。



图3 阻尼器试样及受力方向

Fig. 3 Damper sample and direction of force

试验采用拟动力、阻尼器性能试验系统,该装置最大加载力为1 500 kN,最大行程为500 mm,最大加载速度为1 m/s,工作频率范围为0~40 Hz。因试验所用试样较小,故采取外接力传感器和位移

传感器的方法对粘弹阻尼器进行性能测试,试件与力传感器相连后再与仪器连接,并在其上方设置位移传感器,如图4所示。试验中对5种试样均进行变形相关性、频率相关性、抗疲劳性能测试,加载速度根据不同试验加载频率来确定,并持续加载到每个试验循环次数结束为止,加载荷载大小以达到试验所需应变大小为标准。变形相关性和抗疲劳性能的所有试样均保持同一频率,只改变每种试样的应变;频率相关性所有试样均保持同一应变,只改变每种试样的频率。三者均测力与位移的关系和各项力学性能指标,每个试验项目每种试样均做3个试样测试,结果求其平均值,试验方案详见表2。



图4 试验加载

Fig. 4 Loading test

表2 试验方案

Table 2 Test scheme

实验项目	工况	频率 f /Hz	应变变形/%	循环次数/次
变形相关性	1	0.1	50	8
	2		100	
	3		150	
	4		200	
	5		250	
	6		300	
频率相关性	7	0.03	200	5
	8	0.1		
	9	0.3		
	10	0.5		
	11	0.8		
	12	1		
	13	2		
	14	3		
疲劳	15	0.1	200	30
	16		300	

注:试验结果取3个试件第3圈的平均值

3 试验结果与分析

3.1 试验现象

工况 16 试验中, 试件 6VX 和 8VX 有边缘局部脱胶现象, 而试件 10VX 则从中间脱胶, 试件完全破坏, 损坏试件如图 5 所示。除工况 16 外, 其余工况试件均无破损情况, 仍保持试件完整性。



图 5 损坏的试件

Fig.5 Damaged specimen

3.2 变形相关性

通过试验可得出不同类型阻尼器在不同应变下的滞回曲线, 图 6 对比了试件 B 和试件 4VX。由

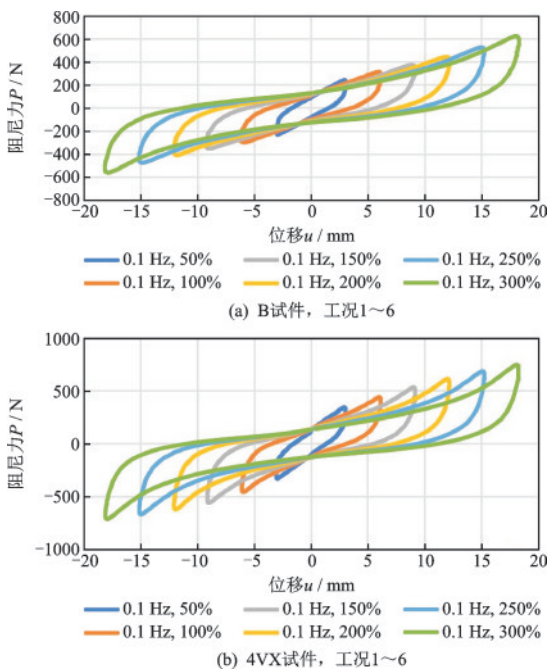


图 6 不同类型阻尼器在不同应变下的滞回曲线

Fig.6 Hysteresis curves of different types of dampers under different strains

图 6 可看出, 因阻尼器类型不同, 阻尼器在不同应变下的滞回曲线也不尽相同。虽滞回曲线有明显差异, 但都稳定、圆滑饱满且规律一致。从图 6 中不难看出, 只含有橡胶的阻尼器在不同应变下的滞回曲线紧密贴合, 而加了芳纶网的复合阻尼器, 滞回曲线成发散状, 有明显的上翘趋势, 这是阻尼器在受力过程中硬化提前导致的。

图 7 为不同类型的粘弹阻尼器各项力学性能指标的变形相关性规律。由图 7(a) 可知, 随着表观剪应变的增大, 阻尼器的最大剪应力也不断提高, 且加了芳纶网的试件最大剪应力较试件 B 明显提高。由图 7(b) 可知, 随着表观剪应变的增大, 阻尼器的存储剪切模量迅速降低, 试件 B 在剪应变超过 200% 之后, 存储剪切模量趋于稳定, 而含有芳纶网的试样仍在衰减, 但于总体存储剪切模量而言, 无论衰减阶段还是平稳阶段, 都远远高于试件 B。从图 7(c) 中可看出, 随着表观剪应变的增大, 阻尼器的等效粘滞阻尼比均呈下降趋势, 200% 剪应变以前, 试件 B 衰减缓慢, 含有芳纶网的试件衰减迅速, 在 200%~300%, 试件 B 衰减迅速, 含有芳纶网的试

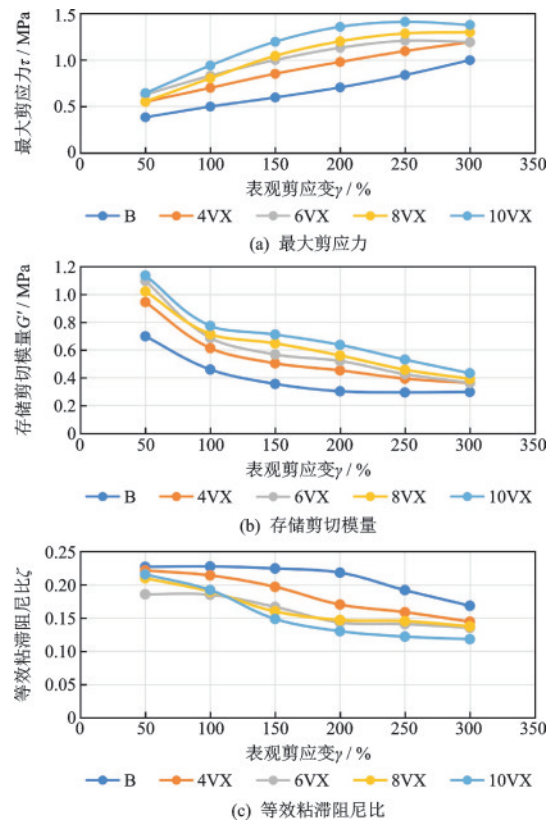


图 7 不同类型阻尼器力学性能指标的变形相关性规律

Fig.7 Deformation correlation of mechanical parameters of different types of dampers

件衰减缓慢。

综上可知,变形对所有阻尼器力学性能指标的影响明显,在阻尼器中加入芳纶网能明显提高阻尼器承受的剪应力和存储剪切模量,且其在较大应变下,耗能能力较试件B更为稳定。

其中,表观剪应变 $\gamma = u_0/t$; u_0 为阻尼器的剪切位移, t 为橡胶层厚度;

存储剪切模量 $G' = \tau'/\gamma$; 其中 $\tau' = P'/A$, P' 为阻尼器在峰值位移时对应的阻尼力;

等效粘滞阻尼比 $\zeta = \Delta W / (4\pi W)$; 其中 ΔW 为阻尼器滞回曲线某一圈的面积, $W = Pu_0/2$ 为阻尼器对应该圈的最大存储应变能;

表观剪切模量 $G_p = \epsilon_{\max} / \gamma$; 其中 ϵ_{\max} 为该圈的最大应力^[8]。

3.3 频率相关性

图8为不同类型阻尼器力学性能指标的频率相关性规律,从图8(a)、(b)可看出含有芳纶网的复合阻尼器最大剪应力、存储剪切模量在0.03~0.1 Hz衰减迅速,衰减率在17%左右,0.1 Hz之后基本稳定,而只含橡胶的阻尼器基本趋于稳定;由图8(c)

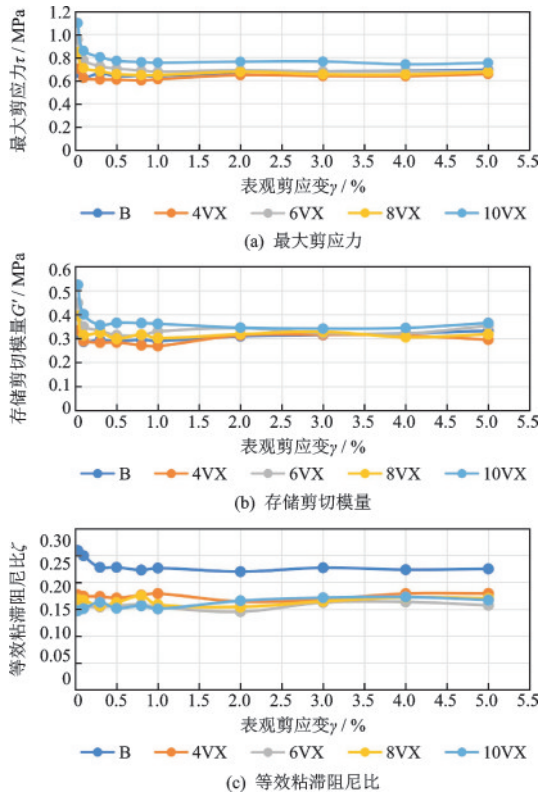


图8 不同类型阻尼器力学性能指标的频率相关性规律
Fig.8 Frequency correlation of mechanical parameters of different types of dampers

可看出,含有芳纶网的复合阻尼器等效粘滞阻尼比保持平稳状态,而只含橡胶的阻尼器在0.03~0.3 Hz衰减迅速,衰减率在13%左右,0.3 Hz之后基本稳定。

综上所述,加载频率对该试验中不同类型阻尼器影响不大,阻尼器力学性能在不同频率下保持稳定,基本没有变化。

3.4 疲劳性能

由试验可得出剪应变分别为200%与300%的不同类型阻尼器的疲劳性能试验的滞回曲线,以200%为例,如图9可知,阻尼器在经过30圈的疲劳试验后,滞回曲线仍保持形状稳定,含有芳纶网的复合阻尼器虽有上翘趋势,但滞回曲线始终保持圆滑与饱满状态,由此可见其力学性能稳定。

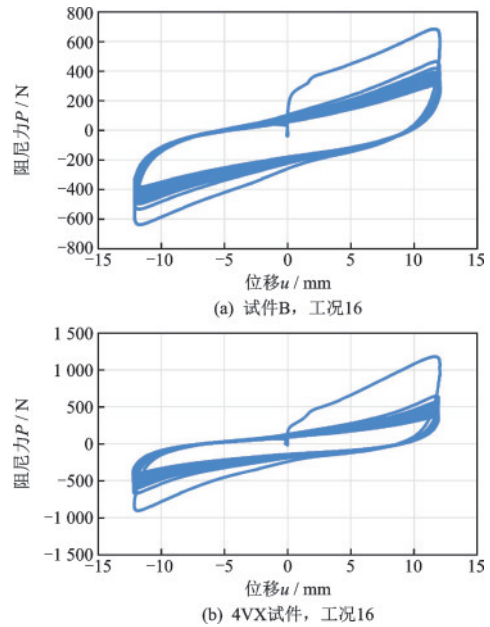


图9 不同类型阻尼器的疲劳性能试验的滞回曲线
Fig.9 Hysteresis curves of fatigue performance tests for different types of dampers

图10为不同类型阻尼器力学性能指标随加载圈数变化的抗疲劳性能规律,剪应变以200%为例。由图(a)、(b)与(c)可看出,阻尼器的最大剪应力、存储剪切模量随着抗疲劳试验圈数的增加而衰减,只含橡胶的阻尼器各项力学性能指标最大衰减率达到26.4%,含有芳纶网的复合阻尼器各项力学性能指标最大衰减率达到38.8%,但含有芳纶网的复合阻尼器整体性能优于只含橡胶的阻尼器。

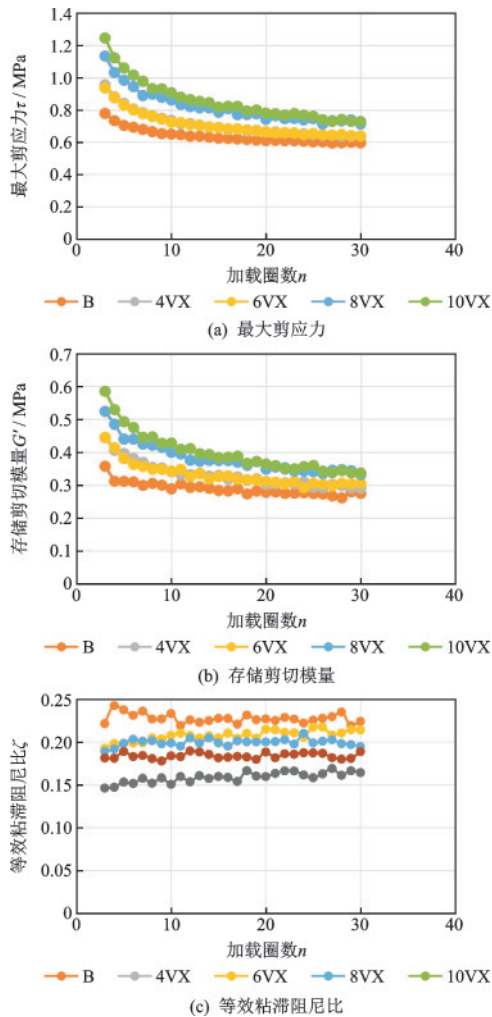


图10 不同类型阻尼器力学性能指标随加载圈数变化的疲劳性能规律

Fig. 10 Fatigue behavior of different types of dampers varying with the number of loading cycles

4 线性模型

4.1 模型公式

根据试验屈服点和硬化点,将试验模拟为双线性性和多线性模型^[9-13],且以试验加载阶段有无硬化点来区分两种模型。试验屈服点选取方法:因材料无明显屈服点,故采用优化算法来找取最优解,该试验用 Matlab 来使模拟耗能等于试验耗能,由此得到弹性模量,从而找到屈服点。硬化点选取方法:对于此类强非线性曲线,试验采取将其应力应变归一化后,分别作应力-时间图、应变-时间图,两条曲线第三周期的第一个交点即为硬化点。

双线性模型计算公式如下:

$$y_1(x) = \left(1 - \frac{G}{G_p}\right)Kx \pm \gamma G \quad (1)$$

$$x = \pm \frac{\gamma G_p}{K} \quad (2)$$

多线性模型计算公式如下:

$$y_1(x) = \frac{\beta - \gamma G}{\alpha}x \pm \gamma G \quad (3)$$

$$y_2(x) = \left(\frac{K\gamma G_p - K\beta}{\gamma G_p - K\alpha}\right)x \mp \frac{\gamma G_p(K\alpha - \beta)}{\gamma G_p - K\alpha} \quad (4)$$

$$x = \pm \frac{\gamma G_p}{K} \quad (5)$$

式中, K 为滞回曲线最大应力与其对应应变的比值; G 为损耗剪切模量; G_p 为表观剪切模量; γ 为表观剪应变; (α, β) 为硬化点坐标。

公式(1)、(2)适用于加载段还未出现硬化点的滞回曲线,公式(3)、(4)、(5)适用于加载段还未到最大值时已出现硬化点的滞回曲线。(1)式中,“+”表示正向加载段,“-”表示反向加载段;(2)式中,“+”表示正向卸载段,“-”表示反向卸载;(3)式中,“+”表示正向加载还未到硬化点段,“-”表示反向加载还未到硬化点段;(4)式中,“+”表示硬化点到最大应力点正向加载段,“-”表示硬化点到最大应力点反向加载段;(5)式中,“+”表示正向卸载段,“-”表示反向卸载。以 B 和 4VX 为例,B 试件应变达到 250% 时才出现硬化点,故 50%、100%、150%、200% 应变均满足式(1)和(2);4VX 试件应变为 150% 时已出现硬化点,则 150%、200%、250%、300% 应变满足式(3)、(4)和(5)。

4.2 结果对比

在 Matlab 中采用双线性模型和多线性模型对试验结果进行编程模拟,其模拟结果与试验结果的对比如图 11 所示(以 50% 和 250% 为例)。采用上述两种模型,所得到的各个物理量与原始数据得到的物理量差值均小于 15%,在《建筑消能减震技术规程》^[14]允许范围之内,模拟结果与试验结果拟合良好。

5 结论

将含有芳纶网的复合阻尼器与只含橡胶的阻尼器作试验比较,得出结论如下:

(1)含芳纶网的复合阻尼器滞回曲线光滑饱

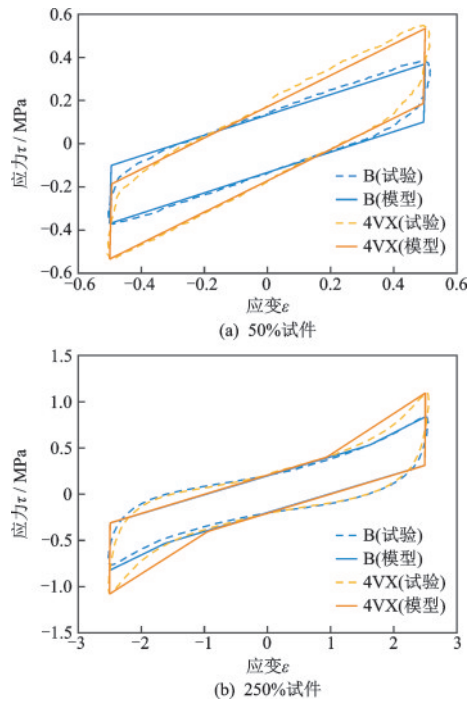


图 11 模拟结果与实验结果对比

Fig.11 Comparison between simulated and experimental results

满,主要受变形相关性试验和抗疲劳性能试验的影响,与只含橡胶的阻尼器相似。

(2)含芳纶网的复合阻尼器最大剪应力和存储剪切模量均优于只含橡胶的阻尼器,但等效粘滞阻尼比略低于后者。

(3)根据试验屈服点和硬化点,可采用 Matlab 建立的双线性和多线性模型,模拟结果与试验结果拟合良好。

参考文献:

- [1] 周云.粘弹性阻尼减震结构设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2006:1-59.
Zhou Y.Design of metallic energy dissipation structure [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006:1-59. (in Chinese)
- [2] Foutch D A, Wood S L, Brady P A. Seismic retrofit of nonductile reinforced concrete frames using viscoelastic dampers [A]. ATC-17-1 on Seismic Isolation, Passive Energy, Dissipation and active control, 1993: 2.
- [3] 徐赵东,赵鸿铁,沈亚鹏,等.粘弹性阻尼结构的振动台试验[J].建筑结构学报,2001,22(5):6-10.
Xu Zh D, Zhao H T, Shen Y P, et al. The shaking table test of viscoelastic structure[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(5): 6-10.
- [4] 周颖,龚顺明,吕西林.带粘弹性阻尼器钢结构振动台

研究[J].建筑结构学报,2014,35(7):1-10.

Zhou Y, Gong Sh M, Lyu X L. Study on shaking table test of a steel structure with additional viscoelastic dampers [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (7): 1-10. (in Chinese)

- [5] 廖亚新.不同基体材料粘弹性阻尼器的试验研究[D].南京:东南大学,2015.
Liao Y X. Experimental study on viscoelastic dampers with different matrix materials [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [6] 李鑫陵.芳纶 1313 织物及其增强硅橡胶复合材料的性能研究[D].杭州:浙江理工大学,2010.
Li X L. Properties on aramid 1313 fabric and the compound silastic rubber composite material with this fabric [D]. Hanzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2010. (in Chinese)
- [7] 硫化橡胶与金属粘接拉伸剪切强度测定方法:GB/T 13936—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
Rubber, vulcanized—Method for determination of strength properties of adhesive to metal in shear by tension loading: GB/T 13936—2014 [S]. Beijing: China Standards Press, 2014. (in Chinese)
- [8] 周云,松本连治,田中和宏,等.新型高阻尼黏弹性阻尼器性能试验研究[J].工程力学,2016, 33(7): 92-99.
Zhou Y, Tatsuji Matsumoto, Kazuhiro Tanaka, et al. Research on experimental properties of novel high damping viscoelastic dampers [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(7): 92-99. (in Chinese)
- [9] 周云,徐赵东,邓雪松.铅粘弹性阻尼器的计算模型[J].地震工程与工程振动,2000,20(1):120-124.
Zhou Y, Xu Zh D, Deng X S. Calculating models of lead viscoelastic damper [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(1): 120-124. (in Chinese)
- [10] 王玉璋,潘鹏,邓开来,等.高阻尼黏弹性橡胶连梁阻尼器力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(3): 158-163.
Wang Y Zh, Pan P, Deng K L, et al. Experimental study on high-damping viscoelastic rubber coupling beam damper [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 158-163. (in Chinese)
- [11] 周云,松本连治,田中和宏,等.高阻尼黏弹性阻尼器性能与力学模型研究[J].振动与冲击,2015,34(7):1-7.
Zhou Y, Tatsuji Matsumoto, Kazuhiro Tanaka, et al. Performance and mechanical model of high damping viscoelastic dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(7): 1-7. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)

(下转第 132 页)