

一种新型黏弹性材料的力学性能试验研究

李卫勇¹, 陈长海², 张雷¹

(1.陕西省高速公路建设集团公司, 陕西 西安 710061; 2.陕西省交通规划设计研究院)

摘要: 该文对一种新型黏弹性材料进行了力学性能的试验研究。通过对不同尺寸规格的新型黏弹性体进行正弦波和地震作用的加载, 研究该材料的尺寸相关性。通过对新型黏弹性体进行不同应变幅值、不同加载频率、不同温度下的力学性能试验, 研究该材料在不同工况下的等效剪切模量、等效阻尼比等力学性能及其变化规律。并对该材料进行了老化性能试验。结果表明: 该新型黏弹性材料具有极强的耗能能力和良好的剪切变形能力, 该材料在200%剪应变下等效阻尼比可达40%以上, 在400%剪应变下力学性能仍保持稳定。该新型黏弹性材料不具备尺寸相关性, 其力学性能与应变幅值明显相关、与加载频率相关性不大、与温度相关性较小。该材料抗老化性能良好。

关键词: 新型黏弹性材料; 力学性能; 等效剪切模量; 等效阻尼比

地震作为一种自然现象, 产生的灾害严重威胁着人类生命财产安全。同时, 伴随产生的火灾、滑坡、海啸等次生灾害, 对抗震救灾带来不便。由于地震的随机性, 目前还不能准确估计未来地震作用的强度和特性, 按传统抗震方法设计的结构不具备自我调节功能, 很可能在地震作用下不满足安全性能要求而产生严重破坏。减震技术是指在结构的连接部之间设置阻尼器等耗能减震装置, 通过耗能减震装置产生弹塑性滞回变形来耗能或吸收地震输入结构中的能量, 以减轻或抑制结构的地震反应。

黏弹性阻尼器是一种有效的被动减震(振)控制装置, 通过黏弹性体的滞回耗能特性, 给结构提供附加阻尼, 减小结构的动力反应, 以达到减震(振)的目的。黏弹性阻尼材料应用于土木工程结构始于1969年, 纽约世贸大厦安装近万个黏弹性阻尼装置以减小风振, 随后黏弹性阻尼装置在高层结构的抗风设计中得到了广泛应用。与风振控制相比, 黏弹性阻尼在结构减震控制中的应用较少, 其主要原因有以下两个方面: ①黏弹性阻尼材料的剪切变形能力有限, 不适用于结构大变形的工程抗震设计; ②黏弹性阻尼材料的耗能能力有限, 实际工程中需要使用大量的黏弹性阻尼器才能达到一定的减震效果。

为了将黏弹性阻尼器更好地应用于结构物的抗震, 国内外学者对黏弹性阻尼装置进行了试验研究。

Chang、Soong T T、Tsai 等对黏弹性阻尼装置在不同温度、不同应变幅值、不同激励频率下进行了正弦激励试验, 大量的试验结果表明: 应变幅值、激励频率和温度是影响黏弹性阻尼器性能的主要因素; Kasai 等利用振动台试验对分别安装了不同类型阻尼装置的5层足尺钢框架进行了试验研究, 对比分析了黏弹性阻尼装置和其他类型阻尼装置的减震效果; 欧进萍、吴波等对不同形式的国产黏弹性材料阻尼装置进行了力学性能试验, 研究了其主要性能指标——剪切模量、损耗因子的变化规律; 徐赵东对基于不同橡胶基体的两种黏弹性阻尼装置进行了试验研究; 周云等对某种高阻尼黏弹性阻尼装置的力学性能及其力学模型进行了分析研究。

受黏弹性材料性能的限制, 大部分黏弹性阻尼装置的耗能能力有限, 其等效阻尼比通常小于20%, 且已有的研究主要针对黏弹性体在300%剪应变以内的试验研究, 针对黏弹性材料在大变形下的研究报道较少。该文对一种新型黏弹性材料制作的阻尼装置——TRC黏弹性阻尼装置进行了力学性能试验研究。首先通过对不同尺寸的阻尼装置进行正弦波和地震作用的加载, 明确新型黏弹性材料的尺寸相关性; 其次通过不同工况下的力学性能试验, 研究该新型黏弹性材料在变形、加载频率、温度等方面的相关性; 最后通过老化试验考察该材料的老化性能。

收稿日期: 2019-06-14(修改稿)

作者简介: 李卫勇, 男, 高级工程师, E-mail: 956102707@qq.com

1 新型黏弹性体的性能试验概况

1.1 TRC 黏弹性阻尼装置的基本构造和原理

TRC 黏弹性阻尼装置 (Total Response Control Damper) 是一种对由于震动产生的加速度与位移进行控制的黏弹性阻尼装置,由钢板和新型的黏弹性体黏结而成。在构造物由于震动发生变形时,阻尼装置钢板中间的黏弹性体产生剪应变,将震动能量转换为其他形式,从而实现抑制结构振动,减少结构损伤。其基本构造如图 1 所示。

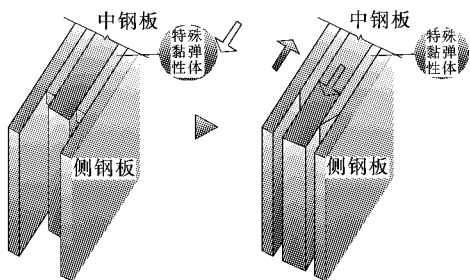


图 1 黏弹性阻尼装置的基本构造和原理

1.2 试件设计

试验采用两片剪切型黏弹性阻尼装置试件,试件由两层新型黏弹性体通过硫化处理与三块钢板连接而成。此次试验共采用 1 个 TRC 黏弹性阻尼装置足尺试件(编号 TRC.1)和 9 个缩尺试件(编号 NO.1~NO.9),足尺试件黏弹性体的平面尺寸为 800 mm×600 mm,厚度 10 mm;缩尺试件黏弹性体的平面尺寸为 80 mm×70 mm,厚度 5 mm,缩尺试件的形状和规格如图 2 所示。

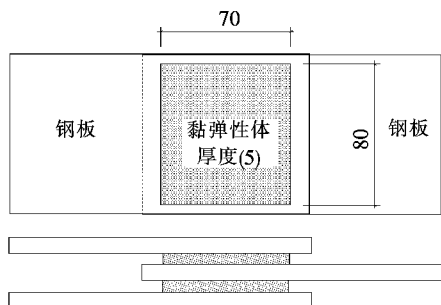


图 2 缩尺试件的形状和规格(单位:mm)

1.3 加载方案

采用 100 t 电液伺服系统和 2 t 电液伺服作动器分别对足尺试件和缩尺试件进行力学性能试验。

对 TRC 黏弹性阻尼装置足尺试件和 NO.1 缩尺

试件在正弦波和地震作用下进行试验,研究新型黏弹性体的尺寸相关性。对 NO.2~NO.9 试件进行正弦激励加载,加载圈数 5 圈。试验测量内容为黏弹性阻尼器的阻尼力和剪切位移。采用变量控制法,以剪切位移、加载频率、环境温度等为变量分别进行控制加载。除温度相关性试验外,其他试验均在 20 ℃ 常温下进行。加载方案见表 1。

为研究新型黏弹性体的变形相关性,在环境温度 20 ℃、加载频率 1.0 Hz 情况下对 NO.2 试件进行不同应变幅值的循环剪切试验,各工况加载 5 圈。加载位移幅值分别为 2.5、5、10、15、20 mm,其中对应应变幅值分别为 50%、100%、200%、300%、400%。

为研究新型黏弹性体的加载频率相关性,对 NO.3 试件进行不同加载频率下的循环剪切试验,各工况加载应变幅值均为 400%,加载 5 圈。加载频率分别为 0.2、0.33、0.5、1、2 Hz。

为研究新型黏弹性体的温度相关性,先将 NO.4、NO.5、NO.6 试件置于温度箱内进行温度控制。在环境温度分别达到 0、10、20、30、40 ℃ 时进行黏弹性体温度相关性试验。3 个试件分别在 0.33、0.5、1 Hz 加载频率下进行循环加载,各工况加载应变幅值均为 300%,加载 5 圈。

为考察新型黏弹性体的抗老化性能,对 NO.7、NO.8、NO.9 试件进行热老化试验。其中 3 个试件老化温度分别设置为 50、60、70 ℃,老化时间最长为 4 个月。将老化后试件在环境温度 20 ℃、应变幅值 100%、加载频率 1 Hz 条件下进行加载。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

各工况下的试验结果显示,加载前后新型黏弹性体未发生材料破坏,且与钢板黏结完好。在每个工况加载结束后,新型黏弹性体表面温度略有上升,将试件静置 20 min 左右,新型黏弹性体表面温度可恢复至加载前的温度。

2.2 新型黏弹性体的尺寸相关性

在正弦激励和地震作用下,对黏弹性阻尼器足尺试件(黏弹性体尺寸:800 mm×600 mm×10 mm)和缩尺试件(黏弹性体尺寸:80 mm×70 mm×5 mm)进行尺寸相关性试验,结果如表 2 所示。可见足尺试件与缩尺试件的对应关系良好。

表 1 加载方案

试件 编号	试验 工况	加载频 率/Hz	应变幅 值/%	位移幅 值/mm	加载 圈数	试验温 度/℃	试验内容
TRC.1	1	1	200	20	5	20	尺寸相关性
	2		300	30	地震波	20	尺寸相关性
NO.1	3	1	200	10	5	20	尺寸相关性
	4		300	15	地震波	20	尺寸相关性
NO.2	5	1	50	2.5	5	20	变形相关性
	6	1	100	5	5	20	变形相关性
	7	1	200	10	5	20	变形相关性
	8	1	300	15	5	20	变形相关性
	9	1	400	20	5	20	变形相关性
NO.3	10	0.2	200	10	5	20	频率相关性
	11	0.33	200	10	5	20	频率相关性
	12	0.50	200	10	5	20	频率相关性
	13	1	200	10	5	20	频率相关性
	14	2	200	10	5	20	频率相关性
NO.4	15	0.33	300	15	5	0、10、20、30、40	温度相关性
NO.5	16	0.50	300	15	5	0、10、20、30、40	温度相关性
NO.6	17	1	300	15	5	0、10、20、30、40	温度相关性
NO.7	18	0.50	100	5	5	50	老化性能
NO.8	19	0.50	100	5	5	60	老化性能
NO.9	20	0.50	100	5	5	70	老化性能

注：黏弹性阻尼装置试件在每个工况结束后静置 20 min。

表 2 尺寸相关性试验结果

试件号	加载频 率/Hz	应变幅 值/%	等效剪切模 量 G/MPa	等效阻尼比 $h_{eq}/\%$	试验差值 = $\left(1 - \frac{\text{缩尺试验值}}{\text{足尺试验值}}\right)/\%$			
					等效剪切模量		等效阻尼比	
					正弦波	地震波	正弦波	地震波
TRC.1	1	200	0.235	43	0.85	0.68	0	2.8
NO.1	1	200	0.233	43				
TRC.1	EL—Centro 波	300	0.146	35				
NO.1	EL—Centro 波	300	0.145	34				

由此推断,缩尺试件表现出的力学性能完全适用于实际 TRC 黏弹性阻尼器。为简化试验,其余试验均采用缩尺试件进行。

2.3 新型黏弹性体的变形相关性

黏弹性阻尼器的性能可以用剪应变、最大剪应力、等效剪切模量和等效阻尼比来表征。等效剪切模量用来描述黏弹性体的刚度大小,等效阻尼比用来衡量黏弹性体的耗能能力,相应定义如下:

- (1) 剪应变 $\gamma = u_0/t$, u_0 为黏弹性体的剪切位移, t 为黏弹性体层的厚度。
- (2) 最大剪应力 $\tau = P/A$, P 为黏弹性体的最大阻尼力, A 为黏弹性体的剪切面积。
- (3) 等效剪切模量 $G = \tau/\gamma$, τ 为黏弹性材料在最大剪切变形时对应的剪应力。
- (4) 等效阻尼比 $h_{eq} = \Delta W/(4\pi W)$, ΔW 为黏弹性材料剪切试验一圈滞回曲线所包络的面积, $W =$

$Pu_0/2$ 为黏弹性体在最大剪切位移时对应的应变能。

新型黏弹性体各项性能指标的取值均来自第 3 圈试验数据的实测值。图 3 为应变幅值对新型黏弹性体等效剪切模量和等效阻尼比的影响曲线。由图 3 可见:① 等效剪切模量与应变幅值成反比,并在应变幅值 200%~400% 的范围内趋于平缓;② 等效阻尼比随着应变幅值的增加先增大后减小,在应变幅值为 200% 时等效阻尼比 h_{eq} 达到最大值 43%,当应变幅值到达 400% 时等效阻尼比 h_{eq} 也可达 35% 以上。

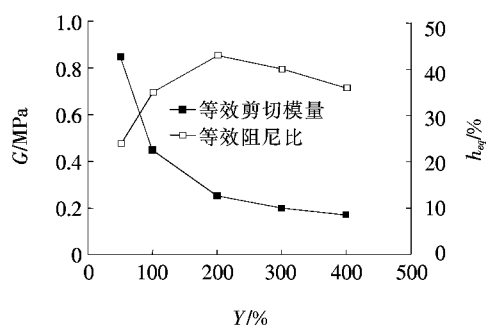


图 3 等效剪切模量、等效阻尼比的变形相关性 ($f=1$ Hz)

表明该新型黏弹性材料具有极强的耗能能力和良好的剪切变形能力。该新型黏弹性材料具有明显的变形相关性,随着剪切变形的增加,新型黏弹性体的刚度不断减小,耗能能力先增强而后缓慢减弱,应变幅值为 200% 时该材料耗能能力最为显著。

2.4 新型黏弹性体的频率相关性

在 0.2、0.33、0.5、1、2 Hz 5 种频率下,对新型黏弹性体进行频率相关性试验。图 4 为加载频率对新型黏弹性体等效剪切模量和等效阻尼比的影响曲线。

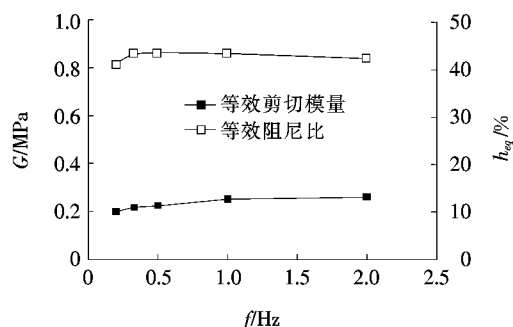


图 4 等效剪切模量、等效阻尼比的频率相关性 ($Y=200\%$)

由图 4 可以看出:① 随着加载频率的增加,等效剪切模量略有增加,各工况下的等效剪切模量与标准频率 1 Hz 相比变化幅度均在 10% 以内;② 随着频率的增加,等效阻尼比随着加载频率的增加先增大后减

小,各工况下的等效阻尼比与标准频率 1 Hz 相比变化幅度均在 12% 以内。

表明该新型黏弹性材料的力学性能与频率相关性较小。在 0.2~2 Hz 范围内,频率的变化对新型黏弹性体的力学性能影响并不明显。

2.5 新型黏弹性体的温度相关性

温度对新型黏弹性体的等效剪切模量、等效阻尼比的影响曲线见图 5、6。

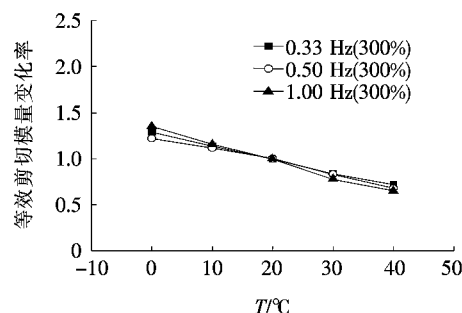


图 5 等效剪切模量的温度相关性

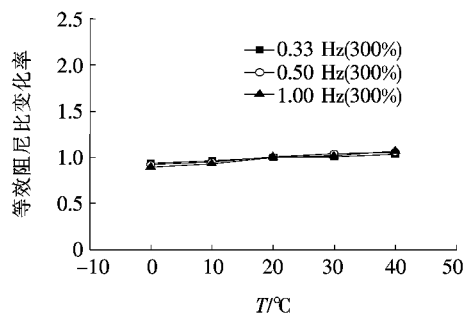


图 6 等效阻尼比的温度相关性

由图 5、6 可见:在同一频率下随着温度的升高,新型黏弹性材料刚度减小、耗能能力略有增强。以 20 °C 为标准温度,±10 °C 内等效阻尼比的变化在 8% 以内。表明在 0~40 °C 范围内,温度的变化对新型黏弹性体的力学性能影响不大。

2.6 新型黏弹性体的抗老化性能

图 7、8 为不同老化温度下等效剪切模量、等效阻尼比的变化率随老化时间的变化关系,可以看到等效剪切模量和等效阻尼比在每个试验温度下均与老化时间的对数呈线性关系。

采用阿伦尼乌斯方程式 (Arrhenius Theory) 进行新型黏弹性体的性能推算。如表 3 所示,推算得到新型黏弹性体在环境温度分别为 10、20、30 °C 正常使用 100 年后,等效剪切模量的变化率均在 4% 以内,等效阻尼比的变化率均在 6% 以内,该新型黏弹性材料具有良好的抗老化性能。

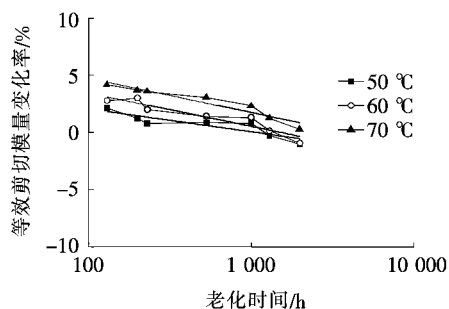


图 7 等效剪切模量变化率

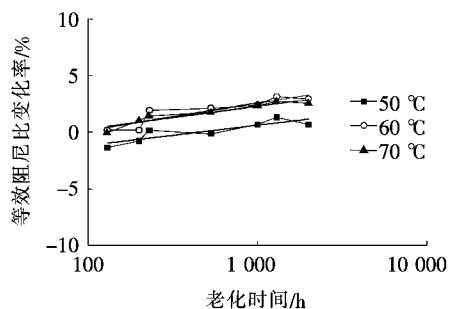


图 8 等效阻尼比变化率

表 3 性能推算结果

环境温 度/°C	等效剪切模量变化率/%		等效阻尼比变化率/%	
	60 年	100 年	60 年	100 年
10	+0.9	+1.2	-4.8	-5.1
20	+1.8	+2.1	-4.9	-5.2
30	+2.9	+3.2	-5.1	-5.4

3 结论

通过对新型黏弹性材料进行试验研究,得出以下结论:

(1) 该新型黏弹性材料不具备尺寸相关性,具有极强的耗能能力和良好的变形能力。该材料在 200% 剪应变下等效阻尼比可达 40% 以上,当剪应变达到 400% 时其力学性能仍保持稳定。

(2) 该新型黏弹性材料的力学性能与应变幅值相关性明显,与加载频率相关性不大,与温度相关性较小。随着应变幅值的增加,该材料的耗能能力先增强后缓慢减弱。加载频率和温度的变化对新型黏弹性材料的各项力学指标影响不大。

(3) 新型黏弹性材料具有良好的抗老化性能。

参考文献:

- [1] Chang K C, Soong T T, Lai M L, et al. Viscoelastic Dampers as Energy Dissipation Devices for Seismic Applications[J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3): 371—387.
- [2] 周云. 粘弹性阻尼减震结构设计理论及应用[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2013.
- [3] Mahmoodi P, Robertson LE, Yontar M, et al. Performance of Viscoelastic Dampers in World Trade Center Towers[J]. Dynamics of Structures, 1987: 632—644.
- [4] Chang K C, Soong T T, Oh S T, et al. Effect of Ambient Temperature on Viscoelastically Damped Structure [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(7): 1 955—1 973.
- [5] Oh S T. Seismic Behavior of a 2/5 Scale Steel Structure with Added Viscoelastic Dampers[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(7): 1 955—1 973.
- [6] Shen K L, Soong T T, Chang K C, et al. Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Frame with Added Viscoelastic Dampers[J]. Engineering Structures, 1995, 17(5): 372—380.
- [7] Tsai C. S. Applications of Viscoelastic Dampers to High-Rise Buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(12): 1 222—1 233.
- [8] Tsai C S. Temperature Effect of Viscoelastic Dampers during Earthquakes[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(2): 394—409.
- [9] Kasai K, Ito H, Ooki Y, et al. Full-Scale Shake Table Tests of 5-Story Steel Building with Various Dampers [J]. Proc, 2010.
- [10] 欧进萍, 邹向阳. 粘弹性耗能器的性能试验研究[J]. 振动与冲击, 1999(3).
- [11] 吴波, 郭安薪. 粘弹性阻尼器的性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998(2).
- [12] Xu Z D, Liao Y X, Ge T, et al. Experimental and Theoretical Study of Viscoelastic Dampers with Different Matrix Rubbers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(8).
- [13] 周云, 松本達治, 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(7).
- [14] JG/T 209—2012 建筑消能阻尼器[S].
- [15] Aprile A, Inaudi J A, Kelly J M. Evolutionary Model of Viscoelastic Dampers for Structural Applications [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(6): 551—560.