

Mechanical Properties and Application Studies of the New High Damping Viscoelastic Damper

Chen Liang, Yong Yuan*, Xiaoxing Xu

School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China

Email address:

liangchen197@hust.edu.cn (Chen Liang), yuanyonghuagong@gmail.com (Yong Yuan), xuxx@hust.edu.cn (Xiaoxing Xu)

*Corresponding author

To cite this article:

Chen Liang, Yong Yuan, Xiaoxing Xu. Mechanical Properties and Application Studies of the New High Damping Viscoelastic Damper. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 3, 2022, pp. 160-167. doi: 10.11648/j.sd.20221003.23

Received: May 8, 2022; Accepted: May 31, 2022; Published: June 1, 2022

Abstract: Restricted by the properties of viscoelastic materials, the energy dissipation capability of traditional viscoelastic dampers is poor, resulting in the need to use a larger number of dampers to achieve a certain damping effect in practical engineering. In this paper, a new viscoelastic material was developed. The damping properties of viscoelastic material were improved by adding special damping material into natural rubber. Firstly, the shear properties of the new high damping viscoelastic damper full-scale specimens made of this material were tested, and the shear mechanical properties of the damper were investigated. Secondly, through basic mechanical properties tests of the scale specimen under different conditions, the variation of mechanical performance parameter of the damper such as equivalent damping ratio and equivalent shear modulus were studied. Further, in order to accurately simulate the mechanical properties of the damper, the nonlinear four-element constitutive model is established, and the parameters in the model are identified by multi-step relaxation test and fast shear test. Finally, the engineering application research of the vibration control effect of the damper is carried out. Research results show that the new high damping viscoelastic damper has excellent energy dissipation performance, and its mechanical properties remain stable under large shear strain; The mechanical properties of the damper are strain dependent and the loading frequency has little influence on its performance; The nonlinear four-element constitutive model can accurately simulate the shear mechanical properties of the damper; engineering application analysis results show that the new high-damping viscoelastic damper has a good vibration control effect.

Keywords: Viscoelastic Damper, Mechanical Properties, High Damping, Constitutive Model, Vibration Control

新型高耗能粘弹性阻尼器力学性能及应用研究

梁琛, 袁涌*, 许笑星

华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉, 中国

邮箱

liangchen197@hust.edu.cn (梁琛), yuanyonghuagong@gmail.com (袁涌), xuxx@hust.edu.cn (许笑星)

摘要: 受粘弹性材料性能的约束, 传统粘弹性阻尼器单位面积耗能能力较弱, 实际工程中需要使用数量较大的阻尼器才能达到可观的减震效果。本文研制了一种新型粘弹性材料, 通过在天然橡胶中加入特殊阻尼材料改善了粘弹性材料的耗能性能。首先, 对基于该材料制作的新型高耗能粘弹性阻尼器足尺试件进行剪切性能测试, 考察了该阻尼器的剪切力学性能。其次, 对阻尼器缩尺试件进行不同工况下的基本力学试验, 研究了等效阻尼比、等效剪切模量等力学性能指标变化规律。进一步, 为准确模拟该阻尼器剪切力学特性, 建立了非线性四单元本构模型, 利用多步松弛试验、快速剪切试验对模型中的参数进行识别。最后对该阻尼器的减震效果进行了工程应用研究。结果表明: 新型高耗能粘

弹性阻尼器具有优良的耗能能力,在较大剪应变下力学性能仍保持稳定;该阻尼器具有应变相关性,加载频率对其性能影响较小;非线性四单元本构模型能准确地模拟该阻尼器的剪切力学性能;工程实例分析结果表明新型高耗能粘弹性阻尼器减震效果良好。

关键词: 粘弹性阻尼器, 力学性能, 高耗能, 本构模型, 振动控制

1. 引言

近年来地震灾害频发,造成了巨大的人员伤亡和财产损失。开发力学性能更加优良的减震装置用于建筑结构抗震显得尤其迫切。粘弹性阻尼器是一种通过粘弹性材料的剪切变形进行滞回耗能的被动减震装置,相比其它类型减震装置,其具有构造简单、价格低廉、性能稳定等优势[1]。

1969年,粘弹性阻尼器首次在结构工程中得到应用,纽约世贸中心两座塔楼共安装了10000余个粘弹性阻尼器以减少塔楼的风振响应[2]。1993年,一栋13层钢结构建筑采用粘弹性阻尼器进行了抗震加固,分析表明该建筑的地震响应减小了40%以上[3]。此后粘弹性阻尼器被广泛应用于结构的地震响应控制。为明晰粘弹性阻尼器的力学性能,国内外学者[4-11]对粘弹性阻尼器进行了大量试验研究,明确了影响粘弹性阻尼器性能的主要因素是应变幅值和激励频率。为了将粘弹性阻尼器更好的应用于工程抗震,近年来许多学者对其性能进行了研究和改良。Christopoulos C等[12]开发了一种粘弹性耦合阻尼器,其极限剪切应变为300%,当应变小于100%时,阻尼器的减震效果并不明显。徐赵东等[13]对丁腈橡胶(NBR)基和硅橡胶(SR)基两种橡胶基体粘弹性阻尼器进行了理论和试验研究,研究表明丁腈橡胶(NBR)基体阻尼器最大等效阻尼比为22%,但阻尼器性能受激励频率的影响较大;硅橡胶(SR)基体阻尼器的力学性能比丁腈橡胶(NBR)基体阻尼器性能更加稳定,但耗能能力较弱,在100%应变下等效阻尼比为11%。周颖等[14]对一种新型强非线性粘弹性阻尼器的力学性能进行了试验研究,结果表明该阻尼器在50~300%的应变范围内耗能较好,其最大等效阻尼比达到30%。周云等[15, 16]对某新型高阻尼粘弹性阻尼器在0~240%剪应变范围内的力学进行了试验研究,结果表现该阻尼器滞回曲线饱满,力学性能稳定。

受粘弹性材料性能的约束,传统粘弹性阻尼器单位面积耗能能力较弱且变形较小,其等效阻尼比通常小于30%。实际工程中须要使用数量较大的阻尼器才能达到一定的减震效果;关于粘弹性阻尼器在剪应变大于300%的性能研究鲜有报道。为进一步改善粘弹性阻尼器的力学性能,本文制备了一种新型粘弹性材料,基于该材料制作而成的新型高耗能粘弹性阻尼器具有更加优良的耗能及变形能力。该阻尼器最大等效阻尼比可达38%,极限剪应变达700%以上,在0%~350%的剪切应变范围内能有效地耗散能量,可同时用于减小结构的风振和地震响应。为明晰该阻尼器的力学性能,对阻尼器缩尺试件进行剪切力学性能试验研究。进一步研究发现,该阻尼器在初次加载时

会产生屈服应力,且屈服应力与应变速率有关。提出了一种非线性四单元本构模型模拟该阻尼器的力学性能,利用多步松弛试验和循环剪切试验对本构模型中的参数进行了识别,通过不同应变速率的剪切试验对本构模型进行了验证。最后对一栋5层框架结构进行了减震效果仿真分析。

2. 阻尼器足尺试件性能测试

本文通过在天然橡胶中加入特殊阻尼材料改善了粘弹性材料的耗能性能,研发了一种新型粘弹性材料,基于该材料设计并制作了新型高耗能粘弹性阻尼器足尺试件,并通过足尺试件性能测试来考察该阻尼器的剪切性能。足尺试件由两层粘弹性和三层钢板通过硫化工艺夹合而成,其中粘弹性体尺寸为600×800mm²,厚度10mm,试件构造如图1所示。足尺试验采用5000kN液压作动器加载,如图2所示。以剪应变幅值为控制变量对足尺试件进行正弦激励加载,加载频率1.0Hz,环境温度20℃。

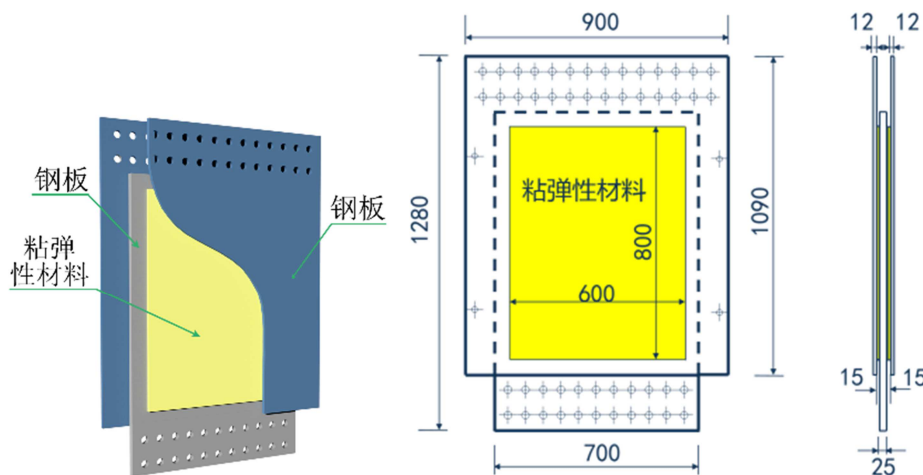


图1 新型高耗能粘弹性阻尼器构造。

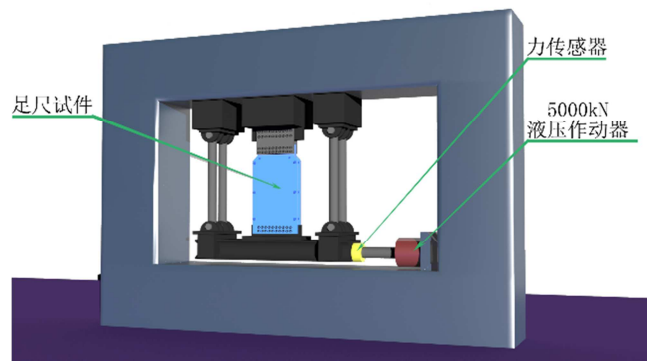


图2 足尺试件加载示意图。

足尺试件测试滞回曲线如图3所示。由图3可见在不同剪切应变幅值下，阻尼器的滞回曲线均饱满、稳定。说明该阻尼在50%~350%的应变范围内都有较强的耗能能力。通过极限剪切试验考察了足尺试件的剪切变形性能，试验结果如图4所示。阻尼器极限剪应变可达700%，变形能力显著。

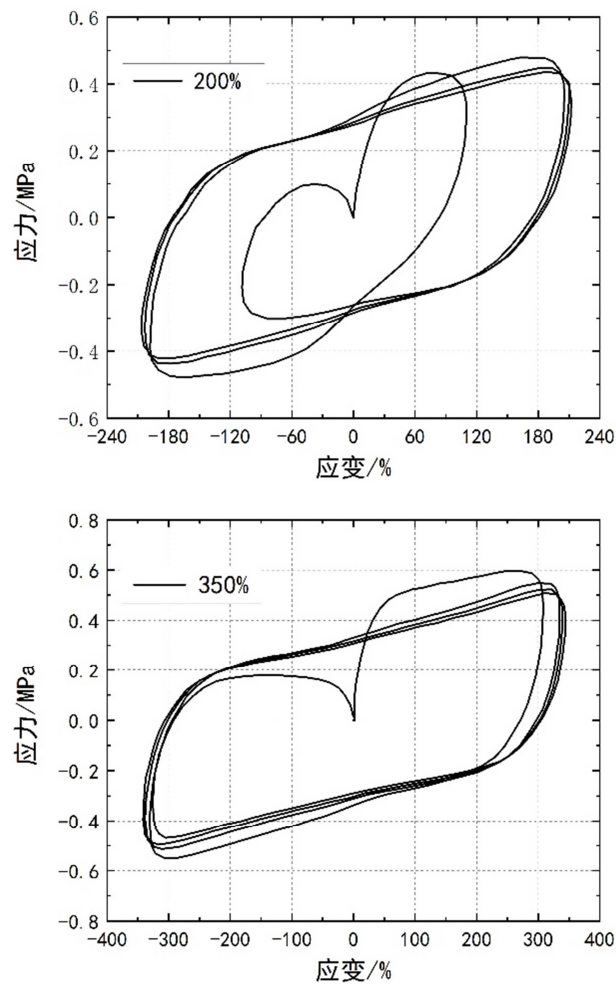
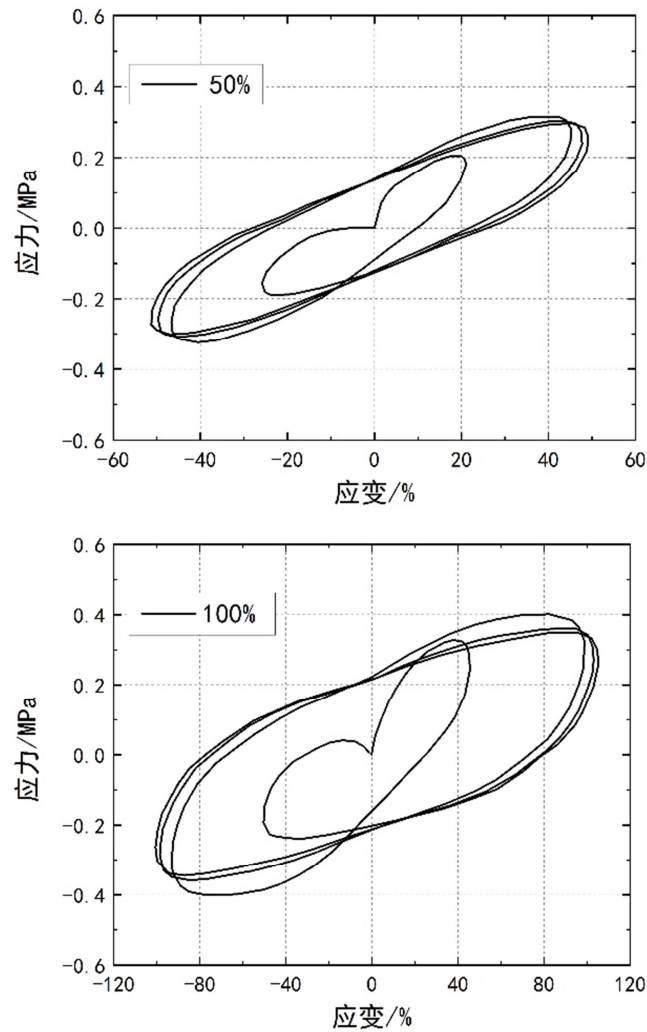


图3 足尺试件循环剪切滞回曲线。

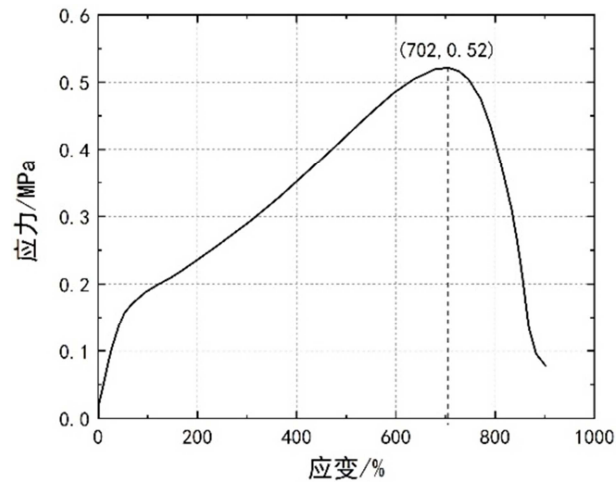


图4 极限剪切试验曲线。

3. 缩尺试件基本力学性能试验研究

考虑到粘弹性阻尼器的耗能、刚度、剪力等性能随粘弹性体的尺寸呈线性变化，粘弹性阻尼器的力学性能可由缩尺试件的试验结果换算得到。为明晰新型高耗能粘弹性

阻尼器在不同工况下的力学性能，同时简化试验，基本力学试验均采用缩尺试件进行，以等效阻尼比 h_{eq} 和等效刚度 K_{eq} 为性能指标研究该阻尼器基本力学性能。

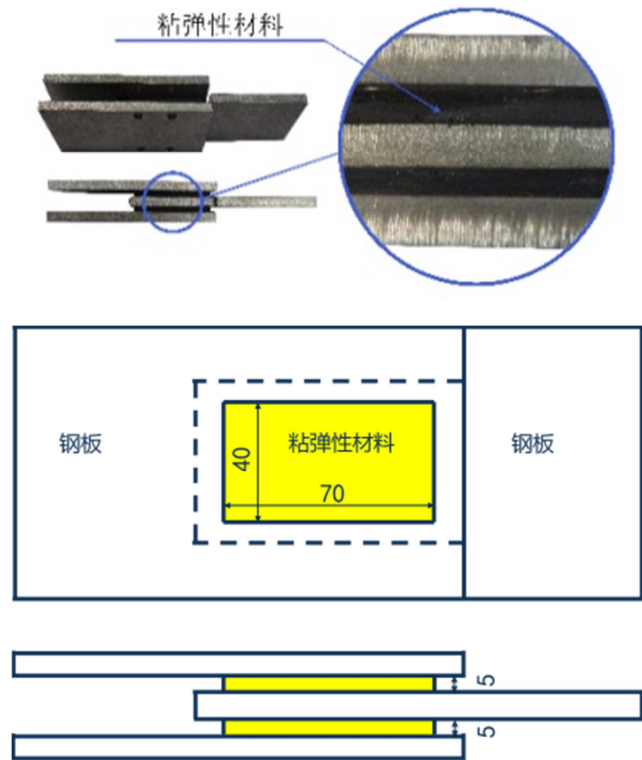


图5 缩尺试件实物图及构造尺寸。

3.1. 试件及试验工况

采用二片剪切型缩尺阻尼器试件，如图5所示。粘弹性体剪切面积为 $40\times 70\text{mm}^2$ ，厚度为5mm。采用Zwick Roell-Z020万能材料试验机进行试验加载，如图6所示。对No.1试件进行应变相关性试验，对No.2试件进行频率相关性试验，试验工况详见表1，环境温度 20°C 。

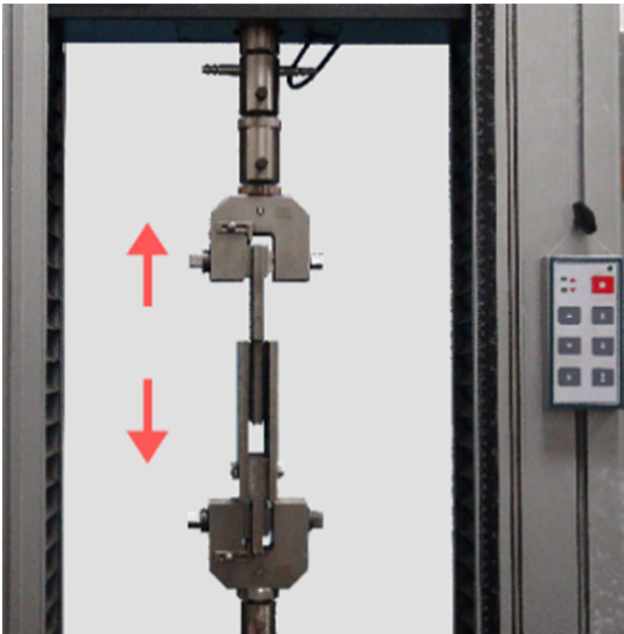


图6 缩尺试验加载图。

表1 缩尺试件试验工况。

试件编号	加载频率 (Hz)	应变幅值 (%)	加载圈数	试验内容
No.1	0.2	25,50,100,150,200,300	5	应变相关性
No.2	0.05,0.1,0.2,0.5,0.8	100	5	频率相关性

3.2. 试验结果及分析

3.2.1. 应变相关性

图7显示了阻尼器第3圈剪切滞回曲线，图8为试验结果。从图7可见，阻尼器在不同应变幅值下的滞回曲线均很饱满。等效阻尼比随应变的增大而增大，应变幅值为300%时，等效阻尼比可达38.1%，当剪应变为100%时，等效阻尼比仍可达26.1%。在25%小应变情况下，其等效阻尼比为14.5%，依然具有可观的消能减震性能。

等效刚度随应变的增大而减小，当剪应变由25%增大至300%，等效刚度减小530%，表明随着剪应变增大，该阻尼器产生附加刚度将急剧减小。结果表明，该阻尼器具有良好的耗能能力，其力学性能与应变相关，变形越大耗能越强，在25%小变形下也能提供可观的阻尼耗能，能同时适用于结构的地震及风振响应控制。

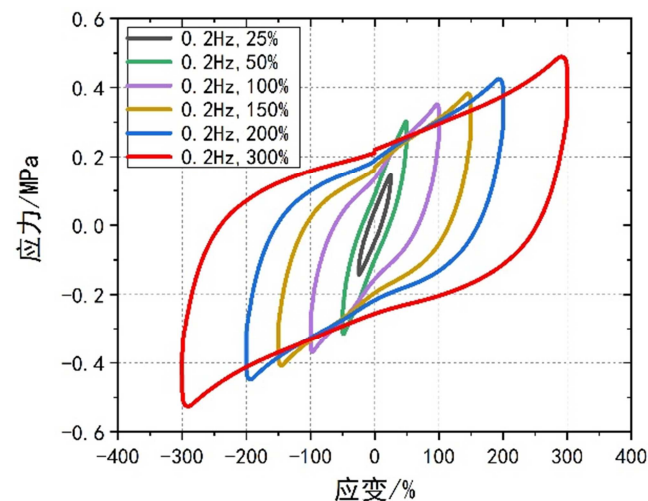


图7 应变相关性试验滞回曲线。

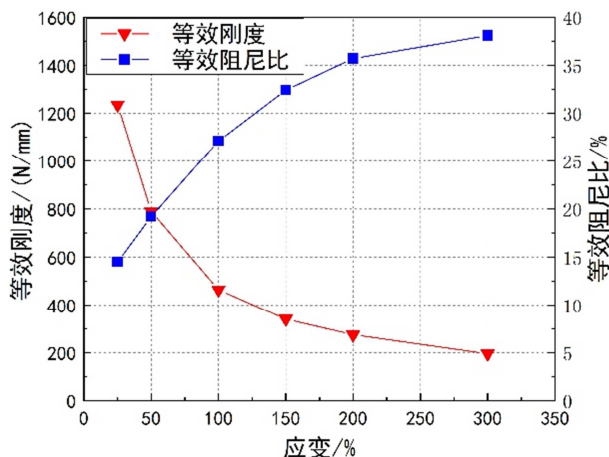


图8 应变相关性试验结果。

3.2.2. 频率相关性

频率相关性试验滞回曲线及结果如图9、图10所示。实验结果表明，粘弹性材料的等效刚度和等效阻尼比随加载频率的均有略微增大。随着频率增高，阻尼器耗能能力略有增强。与0.2Hz相比较，其余各工况等效阻尼器变化在25%以内，等效刚度变化在7%以内。表明加载频率对该阻尼器力学性能影响较小。

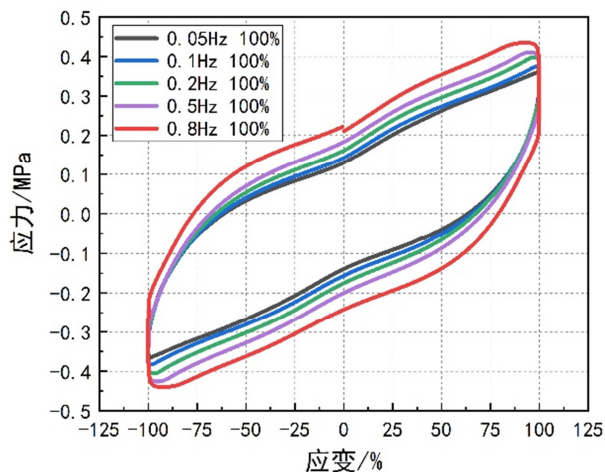


图9 频率相关性试验滞回曲线。

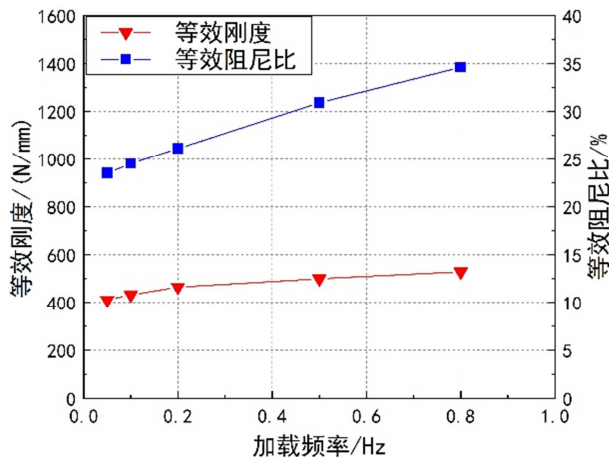


图10 频率相关性试验结果。

4. 剪切力学本构模型

4.1. 模型建立

根据粘弹性材料基本力学性能试验结果，发现该材料具有明显的应变相关性。进一步研究发现该材料在初始加载时会产生屈服应力，且屈服应力大小与加载速率相关。为了精确模拟材料的力学性能，提出了非线性四单元本构模型。如图11所示，该模型由超弹性弹簧单元K1、线性弹簧单元K2、非线性阻尼单元C1和非线性阻尼单元C2组成。非线性四单元本构模型剪应力 τ (MPa) 与剪应变 γ (%) 及剪应变速度 $\dot{\gamma}$ (1/s)的关系式如下：

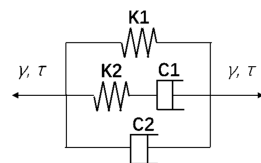


图11 非线性四单元本构模型。

$$\tau_1 = C_1 \gamma + C_2 \gamma^2 + C_3 \gamma^3 + C_4 \gamma^4 \quad (1)$$

$$\tau_2 = \dot{\gamma} n (1 - \exp(-E \dot{\gamma} / \dot{\gamma} n)) \quad (2)$$

$$n = \alpha_1 |\dot{\gamma}|^{\beta_1} \quad (3)$$

参数 E_0 为阻尼器的初始剪切刚度，初始状态下当阻尼器被快速剪切时，黏壶单元C1还未产生形变被视为刚体，去除单元K1对本构模型剪切刚度的贡献可得参数 E ：

$$E = E_0 - C_1 \quad (4)$$

$$\tau_3 = 0.05 \dot{\gamma}^{(\alpha_2 \exp(\beta_2 \dot{\gamma}))} \quad (5)$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad (6)$$

4.2. 参数识别

参数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 通过缩尺试件多步松弛试验识别，试验曲线如图12所示。参数 E 通过快速剪切试验识别，如图13所示。其余参数通过不同速率下的循环剪切试验识别，参数识别结果如表2所示。

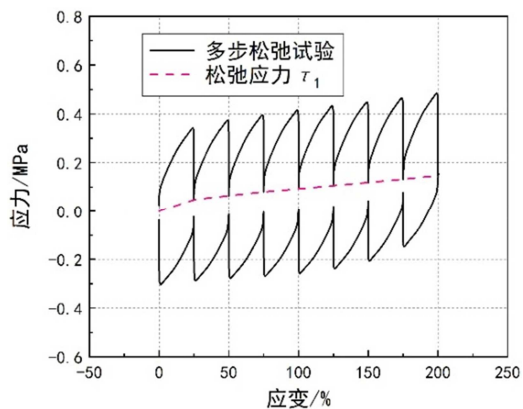


图12 多步松弛试验曲线。

表2 参数识别结果。

C_1/Mpa	C_2/Mpa	C_3/Mpa	C_4/Mpa	E/Mpa	α_1	β_1	α_2	β_2
0.2936	-0.3407	0.1879	-0.0350	0.9551	0.2557	0.2930	0.2271	0.4558

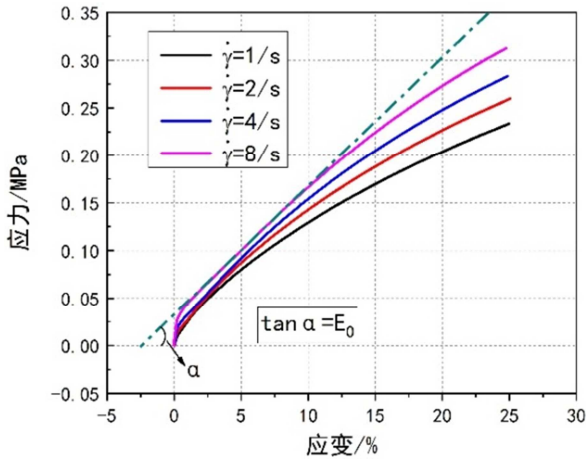


图13 快速剪切试验曲线。

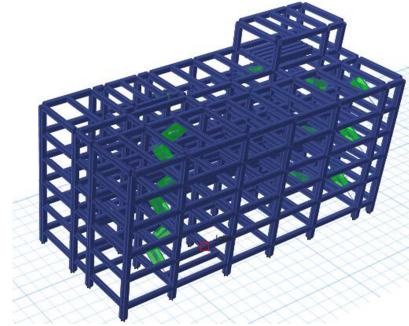


图14 分析模型。

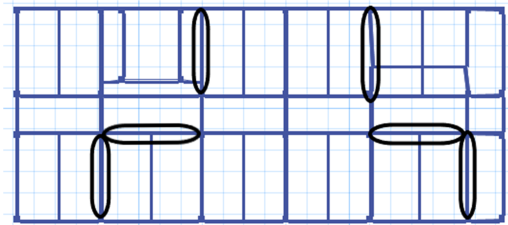


图15 阻尼器平面布置图。

5. 减震分析

5.1. 工程概况

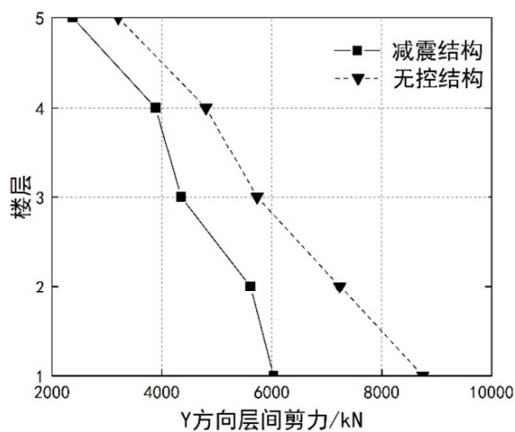
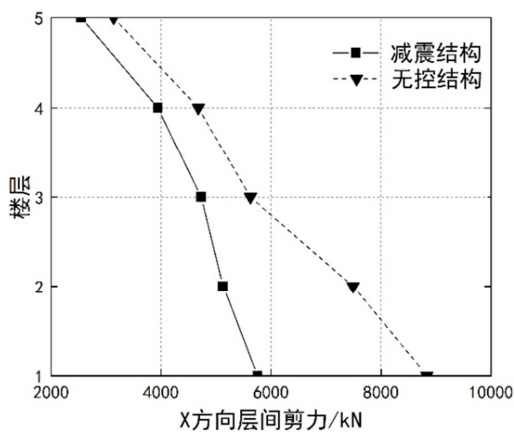
如图14所示,对一栋五层框架结构的单体教学楼建筑进行减震分析。该建筑位于山东省临沂市,采用钢筋混凝土框架结构形式,结构抗震设防烈度为八度,设计基本加速度为0.3g,属乙类建筑设计地震分组为第一组,特征周期为0.4s,建筑场地类别为乙类,采用ETABS对结构模型进行分析。新型高耗能粘弹性阻尼器的布置方案为:1、3、5层分别在X布置2个阻尼器,在Y向布置4个阻尼器,如图15所示。将未布置阻尼器的结构称为无控结构,将布置了阻尼器的结构称为减震结构。

5.2. 地震波选取

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)的选波要求[17],选出适用本工程的2条天然波和1条人工波。采用双向地震波输入法,取三条波计算结果的包络值作为结构响应结果。

5.3. 分析结果

通过Etabs软件对无控结构和减震结构在多遇地震和罕遇地震下进行时程分析,得到结构的动力响应如图16和图17所示。通过对比分析可知,多遇地震作用下,结构的基底剪力减少34.8%,最大层间位移角减小57.6%,多数楼层的层间位移减小35%以上;罕遇地震作用下,结构的基底剪力减小18.6%,最大层间位移角减小44.3%,多数楼层的层间位移减小25%以上。根据《建筑消能减震规程》(JGJ297-2013)条文6.3.2的规定[18],计算得到上述罕遇地震下结构有限附加阻尼比为6.1%。表明新型高耗能粘弹性阻尼器为结构提供了较大的附件阻尼。采用该阻尼器进行减震设计后,结构在多遇地震和罕遇地震下的减震控制均取得了良好效果。



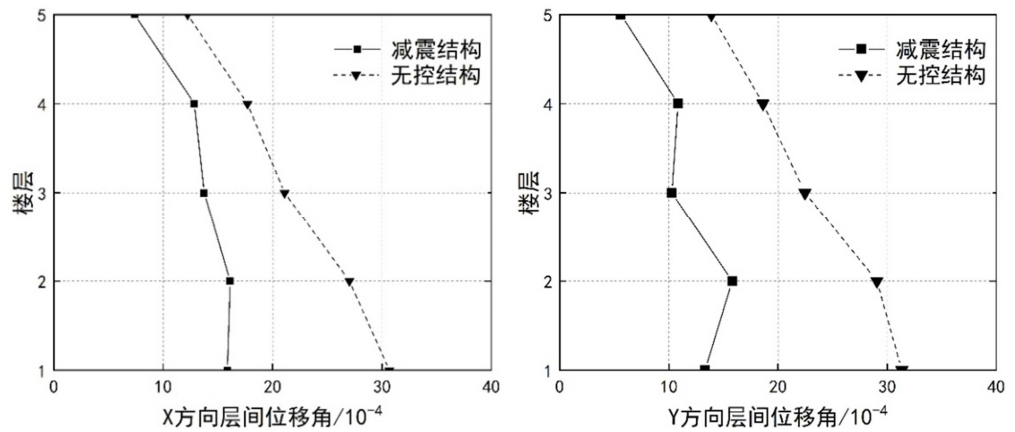


图16 多遇地震时程分析结果。

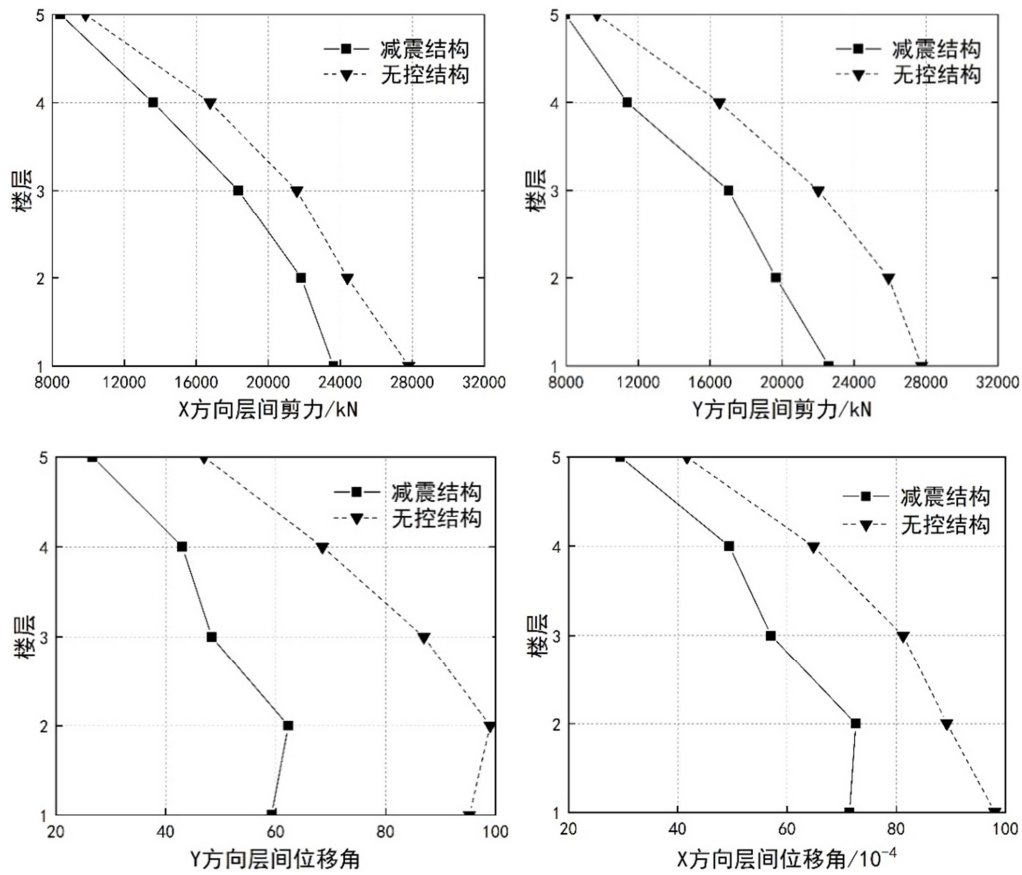


图17 罕遇地震时程分析结果。

6. 结论

本文研发了一种新型粘弹性材料，对基于该材料制作的新型高耗能粘弹性阻尼器进行了力学性能试验研究，并建立了非线性四单元本构模型模拟该阻尼器力学性能，通过工程实例分析了该阻尼器减震效果。得出以下结论：

(1) 新型高耗能粘弹性阻尼器滞回曲线饱满，力学性能稳定。耗能能力显著，其最大等效阻尼比可达38%。

- (2) 新型高耗能粘弹性阻尼器剪切变形性能良好，极限剪切应变达700%以上，在350%大应变下力学性能保持稳定，在25%的小应变条件下也具备可观的耗能减震性能。
- (3) 新型高耗能粘弹性阻尼器应变相关性明显，变形越大耗能性能越强，加载频率对阻尼器的性能影响较小。
- (4) 五层框架结构减震分析结果表明，装有高耗能粘弹性阻尼器的结构在多遇和罕遇地震作用下均有明显的减震效果。

本中优点在于研发了一种对具有高耗能特点的新型粘弹性阻尼器, 并对其进行了剪切力学性能试验研究。充分考虑了应变, 频率对阻尼器性能的影响, 明确了该阻尼器的基本力学性能。后续研究工作可以针对温度对该阻尼器力学性能的影响继续开展更加深入的理论与试验研究。并可以进一步针对该阻尼器在高层结构及其他高耸建筑的减震控制领域做应用研究。

致谢

本文为国家自然科学基金面上项目《自适应基础隔震结构在近断层脉冲型地震作用下的隔震控制机理与失效模式研究》(No.51778261)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 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。
- [2] Mahmoodi P, Robertson LE, Yontar M, Moy C, Feld L. Performance of viscoelastic dampers in world trade center towers [J]. *Dynamics of Structures*, 1987: 632–644.
- [3] Croseby PE, Kelly JM and Singh JP (1994) Utilizing viscoelastic dampers in the seismic retrofit of a thirteen story steel framed building[C]. *Proceedings of ASCE Structure Congress XII*. Atlanta, Georgia. Vol. 2, 1286–1291, 1994.
- [4] Edmond J. Nielsen, Ming L Lai, T. T. Soong, et al. Viscoelastic damper overview for seismic and wind applications [C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, pp 2720, 1996.
- [5] Zhang R H, Soong T T, Mahmoodi P. Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 18 (3): 389-396.
- [6] 周娴,潘文,王道航,等.芳纶网橡胶复合粘弹阻尼器性能研究[J].*防灾减灾工程学报*, 2021. Tsai C S. Temperature Effect of Viscoelastic Dampers during Earthquakes [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120 (2): 394-409.
- [7] 周娜敏,潘文,王道航,等.新型复合粘弹阻尼器不同加载波下的性能研究[J].*工业安全与环保*, 2021.周云, 徐赵东,邓雪松.粘弹性阻尼器的性能试验研究[J].*振动与冲击*, 2001, 020(003): 76-78。
- [8] 周娴,潘文,王道航,等.新型粘弹阻尼器滞回曲线研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2019,45(6):3. Xu Z D. Earthquake Mitigation Study on Viscoelastic Dampers for Reinforced Concrete Structures [J]. *Journal of Vibration & Control*, 2007, 13 (1): 29-43。
- [9] 郭通.粘弹性阻尼层减振与动力吸振技术对比研究[J].*装备环境工程*, 2021, 18 (2): 5。
- [10] 韩淼,姜浩,杜红凯,等.网架屋盖附加粘弹性阻尼器减振分析[J].*工程抗震与加固改造*,2021,43 (6): 8。
- [11] 张敏,付熊,陈钰雪,等.设置粘弹性阻尼器耗能框架结构随机振动分析[J]. *应用力学学报*, 2021, 38 (5): 10。
- [12] Christopoulos C, Montgomery M. Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high - rise buildings [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 42 (15): 2217-2233.
- [13] Gong, Shunming, Zhou, Ying. Experimental study and numerical simulation on a new type of viscoelastic damper with strong nonlinear characteristics [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2016, 24 (4).
- [14] 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): 04016051.
- [15] 周云,松本達治,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(7期): 92-99。
- [16] 周云,松本达治,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, 000 (007): 1-7。
- [17] GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2010。
- [18] JGJ297-2013,建筑消能减震规程[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2013。