赵雪莲.黏弹性阻尼器稳定性足尺性能试验研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1040-1051.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241223001

ZHAO Xuelian.Experimental study on the stability of full-scale viscoelastic dampers[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1040-1051.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241223001

黏弹性阻尼器稳定性足尺性能试验研究

赵雪莲[1,2]

(1.华东建筑设计研究院有限公司,上海 200011;
2.同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:近年来震害经验表明,阻尼器失稳破坏可能导致严重的工程损失。常规黏弹性阻尼器主要由钢板和黏弹性材料叠层硫化黏结制成,依靠钢板相对运动引起黏弹性材料发生面内剪切变形以耗能,但在实际复杂受力状态下,易因高厚比过大而发生面外失稳。为此,提出一种可提升面外刚度的黏弹性阻尼器,并对新型与常规黏弹性阻尼器开展足尺试验,包括基本力学性能试验、稳定性试验及面外静力推覆试验,系统对比二者的基本力学性能与稳定性能。结果表明:常规黏弹性阻尼器稳定性的试验数据与数值模拟基本一致;新型黏弹性阻尼器的面外刚度可达常规型的11~15倍,说明前者具有优异的稳定性能,可为该阻尼器的工程应用提供试验依据。

关键词:黏弹性阻尼器;阻尼器的稳定性;足尺试验;面外刚度

中图分类号:TU352.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1040-12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20241223001

Experimental study on the stability of full-scale viscoelastic dampers

ZHAO Xuelian[1,2]

(*1.East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200011, China;*
2.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Recent post-earthquake investigations have revealed that instability failure of dampers can cause severe engineering losses. Conventional viscoelastic dampers (VEDs), fabricated by vulcanizing steel plates and viscoelastic material in alternating layers, dissipate energy through shear deformation of the viscoelastic material caused by the relative movement of the steel plates. However, their high height-to-thickness ratio renders them susceptible to out-of-plane instability under complex practical loading conditions. To overcome this limitation, a novel VED with enhanced out-of-plane stiffness is proposed. Full-scale tests were conducted on both the proposed and conventional VEDs, encompassing basic mechanical performance tests, stability tests, and out-of-plane static pushover

收稿日期:2024-12-23

基金项目:国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目(52025083)

第一作者简介:赵雪莲(1981-),女,博士,正高级工程师,主要从事结构抗震及减隔震的设计和研究的工作。E-mail:xuelian_zhao@ecadi.com。

tests. The mechanical properties and out-of-plane stability of the two damper types were systematically compared. The results demonstrate that the critical load, critical frequency, and instability mode of the conventional VED agree well with numerical simulations. Moreover, the proposed VED exhibits an out-of-plane stiffness 11—15 times greater than that of the conventional VED, confirming its excellent stability. This study provides an experimental foundation for the engineering application of the proposed VEDs.

Keywords: viscoelastic damper; damper stability; full-scale test; out-of-plane stiffness

0　引言

在过去数十年中，国内外研究人员对黏弹性阻尼器开展了系统的理论与试验研究，提出了多种力学模型与分析理论，充分验证了其力学性能与减震有效性[1-8]。

当前消能减震技术研究与结构设计工作，多聚焦于阻尼器平面内单向的受力及变形特性，普遍忽视其平面外力学性能与潜在破坏机制。这种简化分析方式无法真实反映消能减震结构在复杂实际受力工况下的本构响应，与结构实际工作状态存在偏差，易给整体结构带来潜在安全风险[9-12]。在历次实际震害中，多次出现阻尼器先于主体结构发生损伤、破坏的现象。例如，2022 年泸定 6.8 级地震中，部分隔震建筑的黏滞阻尼器出现失稳破坏问题，未能持续发挥减震耗能作用，最终造成严重的工程经济损失[13]。

常规黏弹性阻尼器主要是由钢板与黏弹性材料通过叠层硫化黏结工艺制成，依靠钢板间相对运动促使黏弹性材料发生面内剪切变形，进而耗散能量[14-16]。工程应用中，黏弹性阻尼器主要采用两种布置形式：一是设置在结构层间梁处的黏弹性阻尼墙；二是设置在剪力墙连梁部位的黏弹性阻尼连梁（图 1）。在这两种应用背景下，黏弹性阻尼器的本构行为与主体结构密切相关。当其用于层高较高的阻尼墙或跨度较大的阻尼连梁时，其平面外高厚比过大易引发稳定性问题，因此，有必要开展足尺试验，研究其在复杂受力状态下的稳定性能。

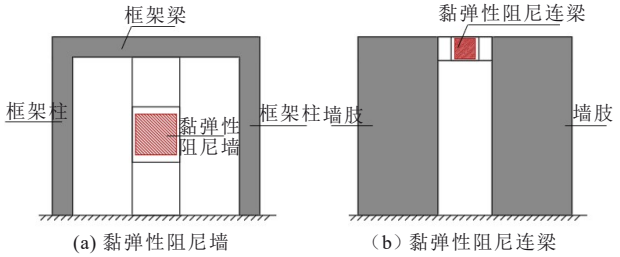


图 1　黏弹性阻尼器常见布置示意图

Fig. 1　Common layout diagram of viscoelastic dampers

为改善黏弹性阻尼器的面外稳定性，提出一种新型黏弹性阻尼器，通过构造措施显著提高其面外刚度。针对新型与常规黏弹性阻尼器分别设计足尺试件，并开展基本力学性能试验、稳定性试验与面外静力推覆试验，系统研究其失稳破坏机理与力学性能变化规律，以期为工程实践提供试验依据与设计参考。

1　可提升面外刚度的黏弹性阻尼器

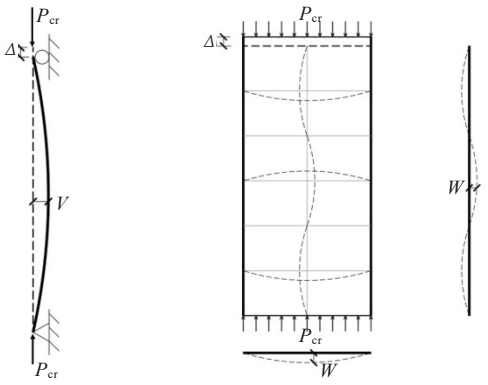
1.1　常规黏弹性阻尼器失稳破坏机理

由于黏弹性阻尼器的构造特征，其黏弹性材料受钢板约束，因此其面外稳定性问题与钢结构的稳定性问题具有一定共性。

钢结构因材料强度高，杆件常设计得相对细长，板件也较为宽薄，在压力作用下易发生失稳。以轴向受压杆件为例，当端部荷载低于临界值 P_{cr} 时，杆件处于稳定平衡状态，仅发生轴向压缩变形 Δ 及面外微小变形 v；一旦荷载达到临界值 P_{cr}，杆件便突然发生屈曲，丧失稳定性。对于四边支承板件，在端部荷载作用下，板件产生轴向压缩变形 Δ 和面外变形 W；荷载达到临界值 P_{cr} 后，板件发生凸曲。由于薄板受边界约束及薄膜效应的作用，屈曲后仍能继续承担荷载，最终可达到稳定分叉失稳状态（图 2）。

板件屈曲区别于杆件屈曲的另一特征在于，板件在发生屈曲后仍具有继续承受更大荷载的能力。板件受压屈曲后的承载能力取决于其宽厚比，在不增加板厚的情况下，若需提高板材的临界应力，则需通过设置加筋肋以减小板幅宽度。

为研究常规黏弹性阻尼器的失稳破坏机理，采用一端固定、一端自由的约束形式对其进行考察。当端部荷载低于临界值 P_{cr} 时，黏弹性材料发生剪切变形，阻尼器整体处于稳定平衡状态；一旦荷载达



(a) 杆件失稳状态 (b) 板件失稳状态

图 2 钢材的屈曲失稳状态

Fig. 2 Buckling instability state of steel

到临界值P_{cr},自由端钢板将发生显著的面外变形,导致相连黏弹性材料因面外变形超出其容许极限而发生撕裂,最终引发失稳破坏。钢板与黏弹性材料间的失稳破坏界面如图3所示。

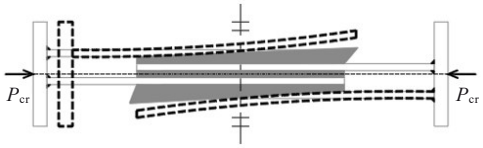


图 3 黏弹性阻尼器的失稳破坏界面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the instability failure interface of viscoelastic damper

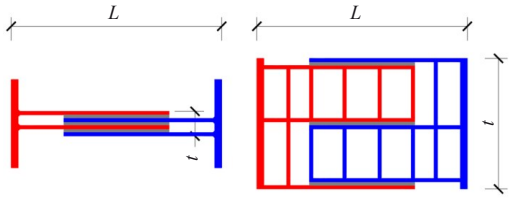
1.2 新型黏弹性阻尼器的原理

在实际工程中,黏弹性阻尼器通常以阻尼连梁或阻尼墙的形式应用。高厚比过大的黏弹性阻尼器,在工作时易发生面外失稳,从而影响其面内耗能性能。若实际条件允许增加黏弹性阻尼器的厚度,可借鉴钢结构格构式构件的设计理念[17],将常规“三明治”构造优化为格构式形式,以提升其面外刚度、节约材料成本,并保障面内耗能能力满足要求。

该新型黏弹性阻尼器的设计基于通过增加厚度以增强其面外刚度的原则见图4,其面外刚度EI与厚度t的三次方成正比,增加厚度t可显著提高黏弹性阻尼器面外刚度EI。

$$EI = E \cdot \frac{1}{12} L t^3 \tag{1}$$

式中:E为黏弹性阻尼器钢材的弹性模量;I为黏弹性阻尼器钢材的面外截面惯性矩;L为黏弹性阻尼器的跨度;t为黏弹性阻尼器的厚度。



(a) 常规阻尼器 (b) 新型阻尼器

图 4 常规与新型阻尼器的对比

Fig. 4 Comparison between conventional and novel dampers

1.3 新型黏弹性阻尼器的构造

一种可提升面外刚度的黏弹性阻尼器[18-19]构造,见图5,其主要由黏弹性材料层(图中①)、横向钢板(图中②)和竖向加劲板(图中③)组成。具体构造如下:在允许的厚度范围内,利用横向钢板与竖向加劲板拼装形成格构式钢构件(图中④),并将黏弹性材料层布置于格构式钢构件的交错界面之间。为便于加工,将钢板与加劲肋设计为规格统一、可反向交错拼装的标准化格构单元。该新型黏弹性阻尼器不仅显著增大了截面惯性矩,同时有效降低了钢材用量,从而在结构性能与经济性两方面体现出显著优势。

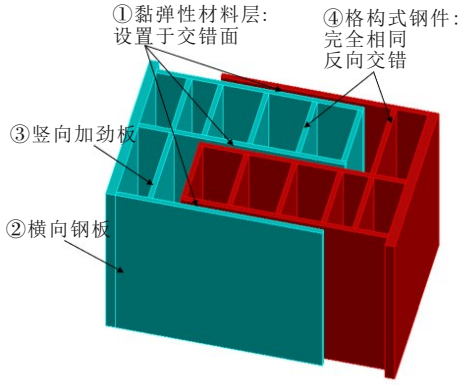


图 5 提升面外刚度的黏弹性阻尼器构造

Fig. 5 Configuration of viscoelastic damper with enhanced out-of-plane stiffness

2 足尺性能试验概述

2.1 试验内容

为考察新型黏弹性阻尼器的面外刚度,将其与常规黏弹性阻尼器进行对比试验,以验证其面外刚度的优越性。试验对象为新型黏弹性阻尼器(高厚比为1.5)和常规黏弹性阻尼器(高厚比为8)两组足尺试件,分别编号为S1.5和S08,其中S1.5和S08分别表示高厚比为1.5和8的黏弹性阻尼器。所开展

的力学试验包括以下内容：

（1）基本力学性能试验：

依据《建筑消能减震技术规程（JGJ 297—2013）》[20]对黏弹性阻尼器力学性能的相关要求，对S1.5和S08试件进行了基本力学试验。试验结果取平均值，用于分析阻尼器的频率、疲劳及温度相关性能。为避免S08试件因高厚比过大发生失稳破坏，在其轴向加载试验中设置了钢支撑。

（2）稳定性试验：

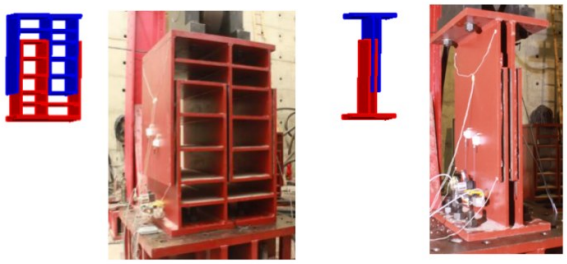
在基本力学性能试验完成后，对阻尼器进行变频率（0.1～1.8 Hz）轴向加载试验，以研究其稳定性能。针对S08试件，稳定性试验在无钢支撑条件下进行。该试验旨在验证数值屈曲分析所获得的临界荷载与试验测得的失稳荷载之间的一致性，并对其失稳形态进行深入分析。

（3）面外静力推覆试验：

为验证所提出的新型黏弹性阻尼器在面外刚度方面的优越性，对一组S1.5和S08试件进行了面外静力推覆试验，以考察二者面外刚度的差异，并将试验结果与数值分析结果进行对比。

2.2　试验对象

本试验研究对象为S1.5和S08试件，每组包含3个相同试件。两组试件所使用的黏弹性材料具有相同的材性和几何尺寸，单层面积尺寸为600 mm（边长）×600 mm（边长），厚度为20 mm，总层数为3层，其构造如图6所示。所有试件钢材采用Q355B，试验与数值分析中所采用的阻尼器几何尺寸完全一致。S1.5和S08试件的详细几何参数分别如图7与图8所示。



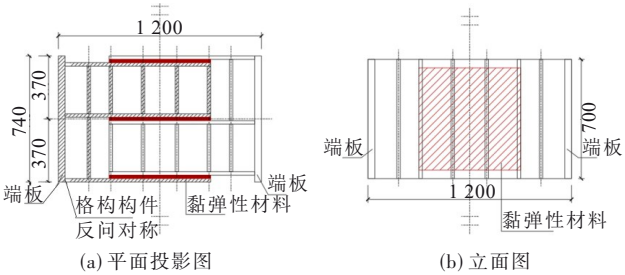
(a) S1.5试件　　(b) S08试件

图6　试验试件

Fig. 6　Test specimens

2.3　试验装置

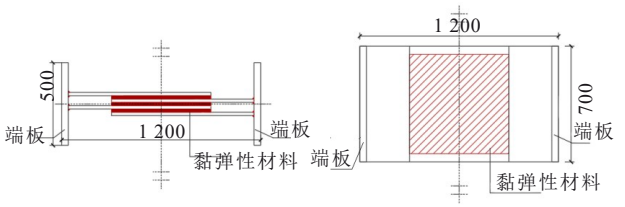
黏弹性阻尼器力学试验于同济大学嘉定校区地震工程实验室进行，加载装置采用100 t伺服作动器，见图9。该作动器主要技术参数如下：工作行程为600 mm，额定推力1 351 kN，额定工作压力28 MPa。



(a) 平面投影图　　(b) 立面图

图7　S1.5试件几何参数（单位：mm）

Fig. 7　Geometric parameters of specimen S1.5 (unit: mm)



(a) 平面投影图　　(b) 立面图

图8　S08试件几何参数（单位：mm）

Fig. 8　Geometric parameters of specimen S08 (unit: mm)



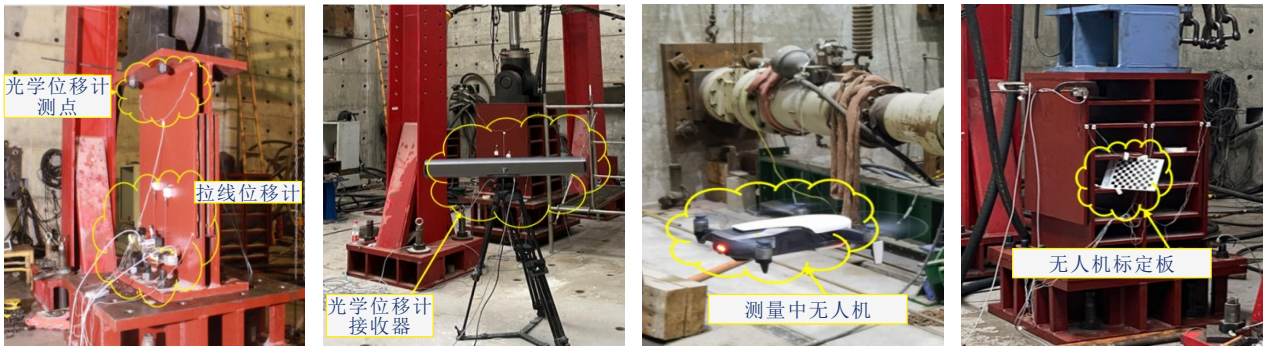
图9　试验加载装置

Fig. 9　Test loading device

试验中使用的测量仪器包括拉线式位移计、光学位移计及无人机。其中，无人机在基本力学试验中作为位移计的辅助测量手段。试验所用测量设备如图10所示。

3　基本力学性能试验

基本力学性能试验主要用于研究黏弹性阻尼器的频率、疲劳及温度相关性能。



(a) 拉线位移计 (b) 光学位移计 (c) 测量中的无人机 (d) 无人机标定板

图 10 试验测量设备

Fig. 10 Test measuring device

3.1 加载制度

试验装置包括反力架、100 t伺服作动器、普通螺栓、基座连接件与锚栓、拉线式位移计及光学位移计。作动器采用竖直布置，频率范围为0.1～1.8 Hz，对应的阻尼器应变范围为25%～150%。试验采用拟动力加载方式，按应变控制并以逐级三角波信号进行加载，每级工况循环5次。基本加载制度[21]如图11所示；相应加载工况列于表1。

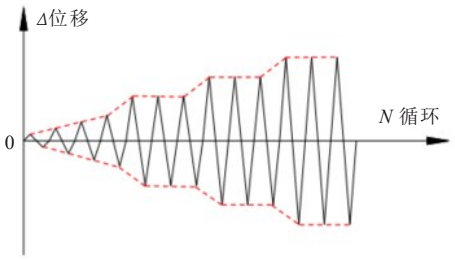


图 11 基本力学性能试验加载制度

Fig. 11 Loading protocol for basic mechanical property tests

表 1 基本力学性能试验加载工况表

Table 1 Loading cases for basic mechanical property tests

应变/%	频率/Hz	加载速度/(mm/s)	测试性能
25～150	0.1	3.14～18.85	变形相关性能
100	0.1～1.8	3.14～201.06	频率相关性能
100（30圈）	0.2、0.4、0.6	25.13～75.40	疲劳性能

3.2 标准工况下的力学指标

标准工况设定为应变幅值100%，加载频率0.2 Hz，常温20 ℃。S1.5试件在标准工况下获得了5次稳定的滞回曲线循环，以第3次循环的滞回曲线得到的结果作为其力学参数。该标准工况下S1.5试件的滞回曲线如图12所示；相应力学指标值列于表2。

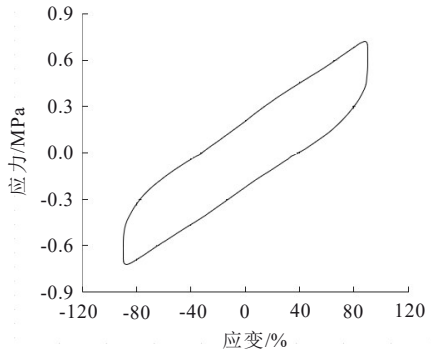


图 12 标准工况下试件S1.5的滞回曲线(0.1 Hz，100%)

Fig. 12 Hysteretic curves of specimen S1.5 under standard loading case (0.1 Hz, 100%)

表 2 标准工况下黏弹性阻尼器的力学指标

Table 2 Mechanical indices of viscoelastic damper under tandard loading case

等效刚度 K_{eq}/(kN/mm)	损耗因子 η	储能剪切模量 G'/MPa	等效黏滞阻尼比 ζ_{eq}
43.17	0.34	0.68	0.21

3.3 频率相关性

在环境温度25 ℃、应变幅值100%条件下，研究了S1.5试件在0.1～1.8 Hz加载频率范围的性能变化规律。其等效刚度、表观剪切模量、损耗因子及等效黏滞阻尼比随频率的变化曲线，如图13所示。

由图13可知，在0.1～2.0 Hz频率范围内，等效刚度与表观剪切模量变化较为平稳，极值与均值之间的偏差率为3%～4%；当加载频率超过1.2 Hz时，损耗因子呈现增长趋势，表明在该频率以上，黏弹性材料将剪切变形转化为热能的效率有所下降。

3.4 疲劳相关性

S1.5试件在0.2 Hz、0.4 Hz及0.6 Hz加载频率

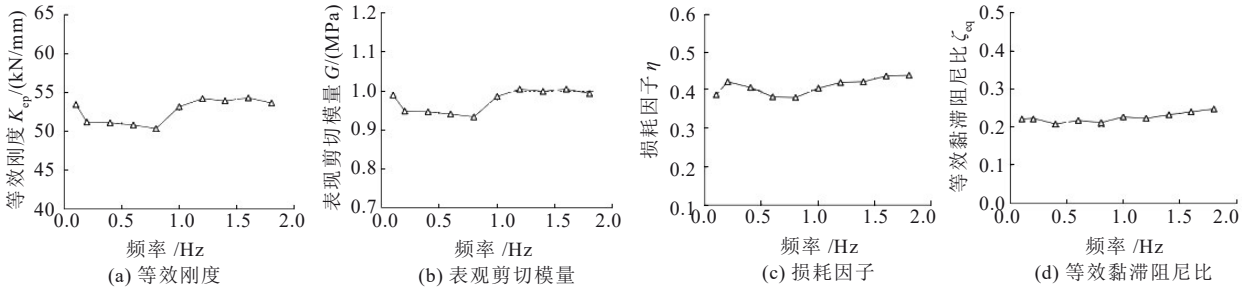


图 13　不同加载频率下试件 S1.5 力学参数变化曲线

Fig. 13　Variation curves of mechanical parameters of specimen S1.5 under different loading frequencies

下疲劳试验所得的滞回曲线吻合良好，未出现明显的滞回曲线面积缩减或低周疲劳现象（图 14）。疲劳加载过程中的第 3 圈与第 30 圈循环性能参数对比列于表 3。

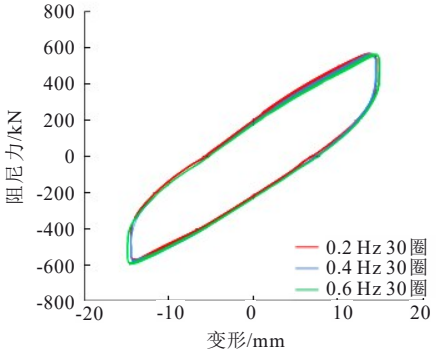


图 14　试件 S1.5 疲劳性能曲线

Fig. 14　Fatigue performance curves of specimen S1.5

疲劳加载试验结果表明，黏弹性阻尼器的等效刚度、表观剪切模量、损耗因子等效黏滞阻尼比的变化较为平稳，第 3 圈与第 30 圈循环的变化率均小于均小于 15%，满足文献[22]对黏弹性阻尼器疲劳性能的相关要求。

3.5　温度相关性

黏弹性材料对环境温度较为敏感，国内外研究人员已对黏弹性阻尼器的温度相关性开展了广泛研究[23]。受客观条件限制，仅针对 1 个月内自然环境温差变化下的温度相关性开展试验。

表 3　S1.5 疲劳试验性能参数

Table 3　Performance parameters of S1.5 under fatigue tests

加载频率及疲劳加载圈数		等效刚度/(kN/mm)	表观剪切模量/MPa	损耗因子 η	等效黏滞阻尼比
0.2 Hz	第 3 圈	39.9	0.74	0.40	0.23
	第 30 圈	38.8	0.72	0.42	0.22
	变化率	2.9%	2.9%	3.6%	7.0%
0.4 Hz	第 3 圈	40.4	0.75	0.41	0.22
	第 30 圈	38.8	0.72	0.38	0.22
	变化率	4.0%	4.0%	6.3%	3.5%
0.6 Hz	第 3 圈	39.9	0.74	0.51	0.25
	第 30 圈	38.4	0.71	0.49	0.24
	变化率	3.9%	3.9%	4.9%	4.9%

在应变幅值为 100% 的条件下，考察了 S1.5 试件在 12～27 ℃环境温度范围内的力学性能变化。分别在 0.2 Hz、1.0 Hz 和 1.6 Hz 三种加载频率下，得出黏弹性阻尼器的等效刚度、表观剪切模量、损耗因子及等效黏滞阻尼比随温度的变化曲线，如图 15 所示。

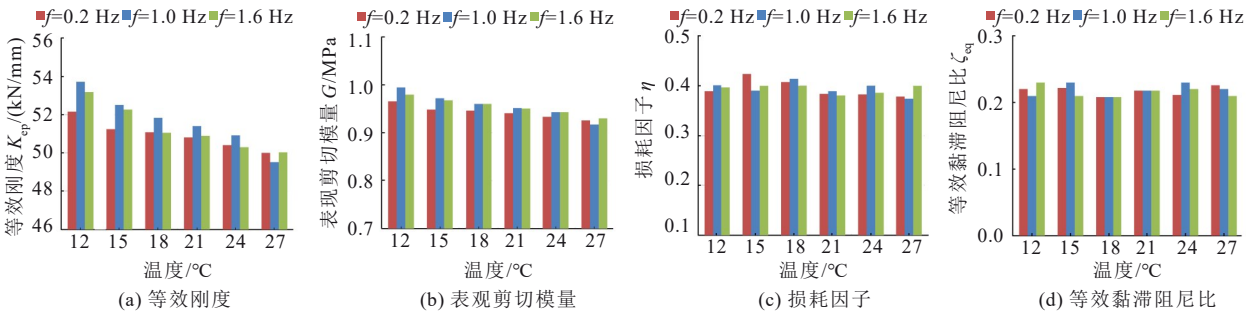


图 15　不同环境温度下 S1.5 试件力学性能参数曲线

Fig. 15　Variation curves of mechanical performance parameters of specimen S1.5 under different ambient temperatures

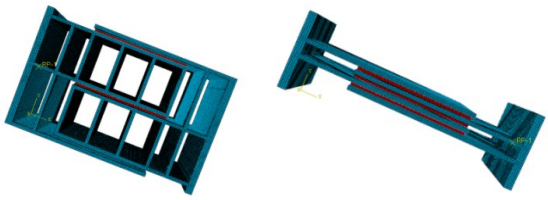
结果表明，在三种加载频率下，等效刚度与表观剪切模量均随着温度升高呈下降趋势，但在不同频率下该趋势的显著程度有所差异。损耗因子与等效黏滞阻尼比随着温度变化均不明显。温度相关性试验表明，温度上升会导致黏弹性材料的刚度与剪切模量出现小幅降低，但其耗能效率指标—损耗因子仍保持在相对稳定的水平。

3.6 力学指标的试验验证

对标准工况下的试验数据与数值模拟及力学模型进行对比分析：

（1）数值模拟

在 ABAQUS/Standard 模块[24]中对 S1.5 试件和 S08 试件开展数值模拟，数值模型见图 16。



（a）S1.5 （b）S08

图 16 试件 S1.5 和试件 S08 数值模型

Fig. 16 Numerical models of specimens S1.5 and S08

黏弹性材料采用 Mooney-Rivlin 材料模型[25]表征橡胶力学行为，材料参数由黏弹性材料性能试验确定，具体数值列于表 4。

表 4 黏弹性材料参数表

Table 4 Material parameters of viscoelastic material

超弹性系数 C_{10}	超弹性系数 C_{01}	超弹性系数 D_1	黏弹性系数 g_{-i}	黏弹性系数 k_{-i}	黏弹性系 $t_{au\text{-}i}$
0.35	3.48×10^{-7}	1.18×10^{-9}	0.856	0	0.089

钢材本构采用双线性随动强化（Kinematic）模型，钢材的弹性模量 $E_S=2.06\times10^5$ MPa，屈服后切线模量 $E_S'=0.02E_S'$，泊松比为 0.3，由钢板材性试验测得屈服强度为 295 MPa，极限强度为 470 MPa。

黏弹性材料使用八节点六面体缩减杂交单元（C3D8RH）模拟，钢材采用八节点六面体线性缩减积分单元（C3D8R）模拟。为准确模拟阻尼器的剪切耗能与屈曲失稳行为，钢板与黏弹性材料的网格尺寸均设置为 20 mm。橡胶与钢材之间的界面采用“Tie”接触，以保证两者协同工作。模型边界条件设置为黏弹性阻尼器一端固定、一端自由。

（2）力学模型

采用 Kelvin 模型[26]描述黏弹性阻尼器的力学行为，该模型由一个弹簧与一个黏壶单元并联组成，分别表征材料的弹性和黏性响应。为更真实地反映黏弹性阻尼器的位移和速度相关性，采用 Bouc-Wen 单元和 Viscous 单元并联的方式模拟其弹性和黏性的滞回性能。其中，Bouc-Wen 单元的力学公式为：

$$\begin{cases} F_W = rkd + (1-r)yz \\ \dot{z} = \begin{cases} k\dot{d}(1-|z|^{\exp})/y & (\dot{d}z>0) \\ kd/y & (\dot{d}z<0) \end{cases} \end{cases} \tag{2}$$

式中：F_W 为 Bouc-Wen 单元阻尼力，单位：kN；d 为变形系数；k 为刚度，单位：kN/mm；r 为屈服刚度比；y 为屈服力，单位：kN；z 为内部滞变系数；exp 为指数。

Viscous 单元的力学公式为：

$$F_M = C\dot{d}^{\alpha} \tag{3}$$

式中：F_M 为 Viscous 单元阻尼力，单位：kN；C 为阻尼系数；α 为阻尼指数。

基于标准工况下 S1.5 试件的滞回曲线，对力学模型进行了参数识别，具体参数列于表 5。

表 5 标准工况下黏弹性阻尼器的力学模型参数

Table 5 Mechanical model parameters of viscoelastic damper under standard loading case

刚度 k/(kN/mm)	屈服力 y/kN	屈服刚度比 r	指数 exp	阻尼系数 C/[kN/(mm/s)$^{\alpha}$]	阻尼指数 a
600	168	0.063	0.4	40	0.2

（3）试验数据、数值模拟与力学模型的对比

以 S1.5 试件为研究对象，在标准工况下将其试验数据、力学模型和数值模拟所得的滞回曲线进行对比，结果如图 17 所示。

从对比结果可知，力学模型与试验数据吻合良好，说明力学模型能够准确反映黏弹性阻尼器的滞回特性；数值模拟与试验数据贴合较好，说明在进行数值模拟与试验数据的对比分析中，黏弹性阻尼器的基本力学性能保持一致。

4 稳定性试验

稳定性试验旨在研究黏弹性阻尼器失稳破坏时的临界荷载、临界频率及对应的失稳形态，并与数值模拟进行对比验证。

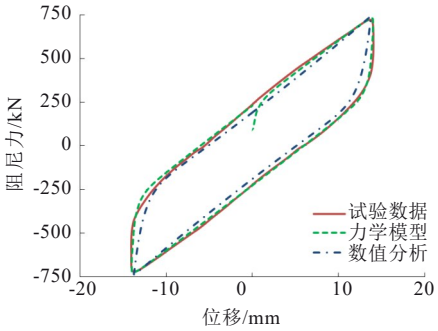


图 17　试验数据、力学模型和数值模拟的滞回曲线

Fig. 17　Hysteretic curves from test data, mechanical model, and numerical simulation

4.1　加载制度

在基本力学性能试验完成后，对阻尼器进行变频(0.1～1.8 Hz)轴向加载试验，以研究其稳定性能。黏弹性阻尼器竖向放置于试验台上，底部固定，顶部为自由端，顶部承受作动器施加的荷载。作动器竖直布置，频率范围为0.1～1.8 Hz，对应阻尼器应变范围为25%～150%。试验为拟动力加载方式，以应变控制结合逐级三角波信号进行加载，每级工况循环5次。稳定性试验装置，见图18；相应加载参数，列于表6。



(a) 试件 S08　　(b) 试件 S1.5

图 18　黏弹性阻尼器的稳定性试验

Fig. 18　Stability test of viscoelastic damper specimens

表 6　稳定性试验加载工况表

Table 6　Loading cases for stability tests

应变 %	频率/Hz	加载速度/(mm/s)	加载值/kN
25～150	0.1	3.14～18.85	176～1 053
100	0.1～1.8	3.14～201.06	702

4.2　失稳破坏临界荷载的试验验证

为验证ABAQUS屈曲分析所得到的失稳临界荷载，对试件开展了稳定性试验。由于S1.5试件采用格构式构造，其面外刚度较大，在整个稳定性试验过程中均未发生失稳破坏。因此，失稳破坏临界荷载的验证主要针对S08试件进行，通过对比其失稳试验数据与失稳数值模拟，以验证稳定性参数化分析的可靠性。

S08试件的稳定性临界荷载试验在0.1 Hz低频条件下进行，应变幅值范围为2%～150%，相应加载工况及试验数据，列于表7。

表 7　试件 S08 失稳破坏的临界荷载试验工况表

Table 7　Loading cases for critical load tests on instability failure of specimen S08

试验工况	加载频率/Hz	加载位移/mm	应变幅值	加载力/kN	试验现象
1	0.1	5	25%	176	试验正常
2	0.1	10	50%	351	受压不饱满
3	0.1	15	75%	527	出现捏拢现象
4	0.1	20	100%	702	出现尖角
8	0.1	25	125%	878	刚度明显降低
11	0.1	30	150%	799	发生失稳破坏

在该频率下对S08试件施加逐级递增的应变加载，所得稳定性试验的滞回曲线，如图19所示。

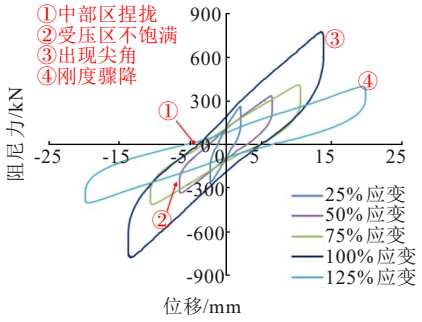
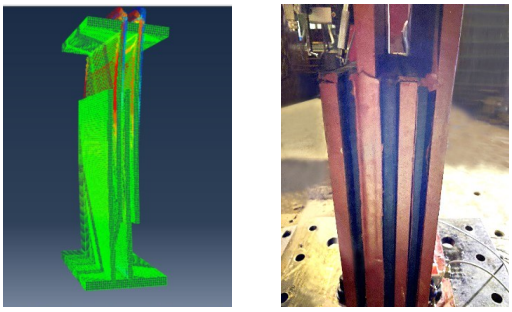


图 19　试件 S08 稳定性临界荷载试验滞回曲线

Fig. 19　Hysteretic curves of specimen S08 from critical load stability tests

由图可知，当加载应变为25%时，试件的滞回曲线形态正常。随着应变增加至50%，滞回曲线在受压区相较于受拉区，出现饱满度下降的现象。当应变进一步提高至75%，曲线在零应力区呈现明显的捏拢效应。应变增至100%时，滞回曲线在极值点附近出现尖角特征。当应变达到125%，阻尼器滞回曲线的等效刚度显著降低，整体包络面积趋于狭长。最终，当应变达到150%，阻尼器因面外变形过大导致黏弹性材料发生撕裂破坏，试验终止。S08试件在数值

模拟与试验中的失稳形态,如图20所示。



(a) 数值模拟 (b) 加载试验

图20 试件S08失稳破坏示意图

Fig. 20 Schematic diagram of instability failure of specimen S08

在数值模拟中,S08试件的屈曲荷载为798 kN,钢板最大应力出现在顶部水平钢板与竖向钢板的交界处。由于黏弹性层作为上下钢板之间的连接介质,其在“三明治”构造区段,承担由上下钢板变形差所引起的剪切变形。失稳破坏过程中,变形差自下而上逐渐累计并增大,最终导致黏弹性层在顶部区域发生撕裂破坏。

在加载试验中,采用在0.1 Hz频率下剪切应变幅值从25%到200%逐级递增的往复加载制度。当剪切应变达到150%,对应荷载为799.2 kN时,S08试件发生失稳破坏,试验终止。失稳破坏表现为阻尼器整体发生面外弯曲变形,加载端产生显著的水平位移与弯曲变形。过大的变形导致黏弹性材料与钢板之间发生明显撕裂,试件未观测到明显残余变形。

因此,从失稳临界荷载与其对应的失稳形态两方面来看,试验结果与数值模拟基本吻合。

4.3 失稳破坏临界频率的试验验证

为研究加载频率对黏弹性阻尼器稳定性的影响,对S08试件开展了失稳破坏临界频率试验。试验在100%应变幅值下进行,频率范围为0.1~0.8 Hz,具体加载工况及试验数据列于表8。

在位移加载保持恒定的条件下,对S08试件进行变频率逐级加载,所得稳定性试验的滞回曲线见图21。

在数值模拟中,对S08试件进行了变频率加载分析。当加载频率为0.4 Hz时,阻尼器的荷载-位移曲线基本保持对称,应变为45%;当频率增至0.6 Hz时,滞回曲线在零应变处出现应力异常增大,受压区曲线饱满度下降,且在受压极值点呈现尖角特征。

表8 试件S08失稳破坏的临界频率试验工况表

Table 8 Loading cases for critical frequency tests on instability failure of specimen S08

试验工况	加载频率/Hz	加载位移/mm	应变幅值/%	计算阻尼力/kN	试验现象
4	0.1	20	100	702	出现捏拢现象
5	0.2	20	100	702	出现捏拢现象
6	0.4	20	100	702	出现捏拢现象
7	0.6	20	100	702	刚度明显降低
12	0.8	20	100	702	发生失稳破坏

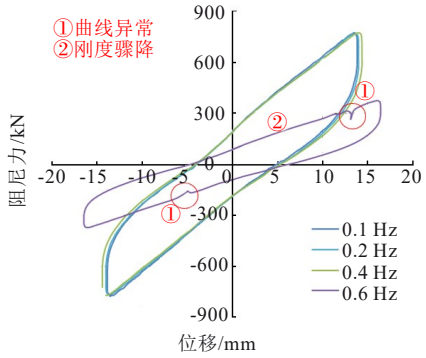


图21 试件S08稳定性临界频率试验滞回曲线

Fig. 21 Hysteretic curves of specimen S08 from critical frequency stability tests

表明在0.6 Hz加载频率下,数值模拟中的黏弹性阻尼器已处在受压失稳状态。

在加载试验中,当加载频率不超过0.4 Hz时,黏弹性阻尼器的滞回曲线未发生明显变化。当频率增至0.6 Hz时,阻尼器滞回曲线的等效刚度显著降低,滞回环趋于狭长,并在局部区域出现异常波动。进一步将频率提高至0.8 Hz时,阻尼器发生失稳破坏,表现为整体面外弯曲变形,加载端产生较大水平位移与弯曲变形,过大的变形导致黏弹性材料与钢板间发生明显撕裂。

结果表明,在0.6 Hz加载频率下,阻尼器所提供的阻尼力已显著降低至0.4 Hz工况下对应值的一半以下,说明其稳定承载力急剧下降,处于接近失稳的临界状态。从失稳临界频率与其对应的失稳形态来看,试验结果与数值模拟基本吻合。

5 面外静力推覆试验

为验证所提出的新型黏弹性阻尼器在面外刚度方面的力学性能优越性,本节对S1.5和S08试件开展了面外静力推覆试验,并将试验结果与数值模拟进行对比研究。

5.1　加载制度

面外静力推覆试验旨在评估黏弹性阻尼器的面外刚度性能。试验对象为S1.5与S08试件，试验装置包括100 t作动器（水平放置）、普通螺栓、基座连接件及锚栓、光学位移计及无人机监测系统。试验采用准静态慢速加载方式，按位移控制施加以每级5 mm的位移增量。S1.5与S08试件的面外推覆试验装置见图22。



(a) 试件S1.5　　(b) 试件S08

图22　面外静力推覆试验

Fig. 22　Out-of-plane static pushover test

5.2　试验现象

在面外静力推覆试验中，S1.5试件因其格构式构造表现出较大的面外刚度，位移加载过程进展缓慢。位移在0～10 mm范围内时，S1.5试件的反力-位移曲线基本呈线性增加，割线刚度维持在8～14.5 kN/mm。由于该试件面外惯性矩较大，其内部反向相交的钢格构产生自锁效应，当位移加载至50 mm时，推进阻力显著增大，随即停止加载。

对于S08试件，位移加载过程较为顺畅（图23），反力-位移关系呈非线性，割线刚度随位移增加而逐渐降低。在0～50 mm位移范围时，割线刚度介于0.8～0.5 kN/mm；位移为50～100 mm时，刚度保持在0.5～0.35 kN/mm；当位移超过100 mm后，荷载基本稳定，刚度趋于0。加载至180 mm时终止试验，此时阻尼器未发生损坏，钢板表现出良好的延性性能。

5.3　面外刚度的试验验证

在面外静力推覆试验中，S1.5与S08试件在控制位移为10、20、30、40及50 mm下的割线刚度对比结果列于表9。在0～50 mm位移范围内，两试件的刚度比随位移呈线性变化，S1.5试件的面外刚度为S08试件的11～15倍，说明前者具有优异的抗失稳能力。此外，S1.5和S08试件面外刚度的数值模拟结果与试验结果进行对比，结果如图24所示。

对比表明，数值模拟基本呈线性变化，而试验结果则表现出较明显的非线性特征。该差异主要源于试验误差以及数值模拟中未考虑钢材初始缺陷与黏弹性材料的压缩变形。



图23　试件S08面外加载过程

Fig. 23　Out-of-plane loading process of specimen S08

表9　面外静力推覆试验下试件S1.5和S08面外刚度对比

Table 9　Comparison of out-of-plane stiffness of specimens S1.5 and S08 under out-of-plane static pushover tests

控制位移/mm	10	20	30	40	50
试件S1.5割线刚度/(kN/mm)	9.35	8.07	7.26	6.46	5.71
试件S08割线刚度/(kN/mm)	0.65	0.61	0.56	0.53	0.50
试件S1.5与S08面外刚度比	14.30	13.18	13.01	12.25	11.37

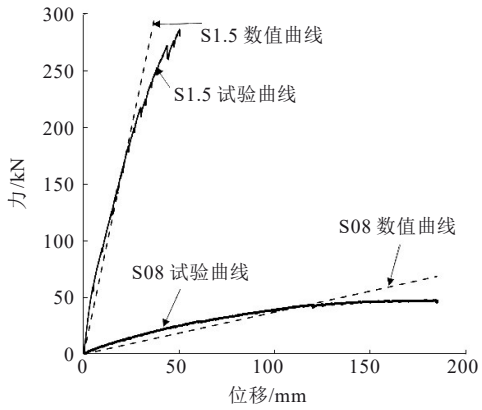


图24　试件S08和S1.5面外刚度对比

Fig. 24　Comparison of out-of-plane stiffness of specimens S08 and S1.5

6　结论

为改善黏弹性阻尼器的面外稳定性，提出一种可提升面外刚度的黏弹性阻尼器，分别对新型与常规黏弹性阻尼器开展了足尺力学试验，包括基本力学性能试验、稳定性试验及面外静力推覆试验，主

要结论如下：

（1）通过基本力学性能试验获取了标准工况下阻尼器的基本力学参数，对比分析了试验、数值模拟与力学模型的滞回行为。结果表明，数值模拟与试验数据贴合较好，说明在进行数值模拟与试验数据的对比分析中，黏弹性阻尼器的基本力学性能保持不变。

（2）在基本力学性能试验中，对足尺试件进行频率、疲劳及温度相关性试验。试验结果满足相关标准中对黏弹性阻尼器力学性能的要求。

（3）稳定性试验重点研究了黏弹性阻尼器失稳破坏时的临界荷载、临界频率及对应的失稳形态。试验与数值模拟基本吻合，验证了数值模拟与试验结果的一致性。

（4）通过面外静力推覆试验对比新型与常规阻尼器的面外刚度，并结合数值模拟进行对比分析。结果表明，两者结果吻合良好；在0～50mm位移范围内，新型阻尼器与常规阻尼器的刚度比呈线性变化，前者面外刚度可达后者的11～15倍，说明了前者具有优异的稳定性能，为该阻尼器的工程实践提供了试验依据与设计参考。

参考文献（References）

[1] 朱晓莹，吴浩，周颖. 附加黏弹性阻尼与金属阻尼耗能的自复位墙结构抗震性能对比分析[J]. 地震工程学报，2022，44(6)：1317-1324.
ZHU Xiaoying，WU Hao，ZHOU Ying. Comparative analysis on seismic performances of self-centering wall structures with viscoelastic and metal dampers[J]. China Earthquake Engineering Journal，2022，44(6)：1317-1324.

[2] HE Z H，XU Z D，XUE J Y，et al. Experimental and theorical investigation on energy dissipation capacity of the viscoelastic limb-like-structure devices[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures，2023，30(10)：2121-2134.

[3] 周颖，龚顺明，吕西林. 带黏弹性阻尼器钢结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报，2014，35(7)：1-10.
ZHOU Ying，GONG Shunming，LÜ Xilin. Study on shaking table test of a steel structure with additional viscoelastic dampers[J]. Journal of Building Structures，2014，35(7)：1-10.

[4] DAI J，GAI P P，XU Z D，et al. A hybrid constitutive model of high-damping viscoelastic materials used for vibration control of civil structures[J]. Engineering Structures，2024，304：117648.

[5] GAI P P，XU Z D，BI Q S，et al. A generalized dynamic analysis method for the linear structural system with viscoelastic elements[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics，2024，24(23)：2450262.

[6] 龚顺明，周颖，吕西林. 带黏弹性阻尼器结构振动台试验设计与数值分析[J]. 地震工程与工程振动，2014，34(1)：224-229.
GONG Shunming，ZHOU Ying，LÜ Xilin. Testing design and numerical analyses of shaking table test on structure added with viscoelastic dampers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2014，34(1)：224-229.

[7] 周颖，刘晓芳，汪盟. 不同耗能特征的黏弹性阻尼器性能对比试验研究[J]. 工程力学，2021，38(增刊1)：167-177.
ZHOU Ying，LIU Xiaofang，WANG Meng. Experimental study on mechanical properties of two types of viscoelastic dampers[J]. Engineering Mechanics，2021，38(Suppl01)：167-177.

[8] XU Y S，XU Z D，GUO Y Q，et al. Dynamic properties and energy dissipation study of sandwich viscoelastic damper considering temperature influence[J]. Buildings，2021，11(10)：470.

[9] 周云，陈清祥，龚晨，等. 消能部件平面外稳定性问题探讨[J]. 建筑结构，2019，49(7)：111-115，121.
ZHOU Yun，CHEN Qingxiang，GONG Chen，et al. Discussion on the out-of-plane problems of energy dissipation components[J]. Building Structure，2019，49(7)：111-115，121.

[10] 周汉杰，陆秀丽，张涛，等. 天津大港小学消能部件面外承载力探讨应用[J]. 工程抗震与加固改造，2017，39(4)：47-54.
ZHOU Hanjie，LU Xiuli，ZHANG Tao，et al. Study on out-of-plane strength capacities of energy dissipation part in Tianjin dagang elementary school project[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting，2017，39(4)：47-54.

[11] ZHAO X L，ZHOU Y，BAO L J. A stability-based energy-dissipation design method of viscoelastic dampers[J]. Engineering Structures，2023，286：116109.

[12] 周云，商城豪，张超. 消能减震技术研究与应用进展[J]. 建筑结构，2019，49(19)：33-48.
ZHOU Yun，SHANG Chenghao，ZHANG Chao. Progress in research and application of energy-dissipated technology[J]. Building Structure，2019，49(19)：33-48.

[13] 曲哲，付皓然，王晓岳. 2022年泸定地震某隔震建筑隔震层及上部结构地震反应分析[J]. 建筑钢结构进展，2022，24(12)：12-21.
QU Zhe，FU Haoran，WANG Xiaoyue. Seismic response analysis of the isolation layer and superstructure of a base-isolated building in the 2022 Luding earthquake，China[J]. Progress in Steel Building Structures，2022，24(12)：12-21.

[14] MAHMOODI P，ROBERTSON L E，YONTAR M，et al. Performance of viscoelastic dampers in World Trade Center Towers[J]. American Society of Civil Engineer，2015，153：a21754.

[15] NIELSEN E J，LAI M L，SOONG T T，et al. Viscoelastic damper overview for seismic and wind applications[J]. Smart Structures and Materials 1996：Passive Damping and Isolation，1996，2720：138-144.

[16] LAI M，LUNSFORD D，KASAI K. Viscoelastic damper：a

damper with linear or nonlinear material [C]//International Association for Earthquake Engineering. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico: Pergamon Press, 1996: 98-105.

[17] 李国跃，吕凤梧．双肢缀板钢格构立柱的整体稳定分析[J]．土木工程学报，2002，35(4)：17-19，35.
LI Guoyue, LÜ Fengwu. The overa：l stabilty of a battened plate column[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 17-19, 35.

[18] 周颖，包联进，赵雪莲．一种解决黏滞阻尼墙平面外刚度的构造和实现方法：CN113585511A [P]. 2021-11-02.
ZHOU Ying, BAO Lianjin, ZHAO Xuelian. A construction and implementation method for solving the out of plane stiffness of viscous damping walls: CN113585511A [P], 2021-11-02.

[19] 周颖，赵雪莲．一种解决平面外刚度的黏弹性阻尼连梁及其设计方法：CN110821036B[P]. 2021-06-08.
ZHOU Ying, ZHAO Xuelian. Viscoelastic damping coupling beam capable of solving out-of-plane stiffness and design method thereof: CN110821036B[P]. 2021-06-08.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部．建筑消能减震技术规程：JGJ 297—2013[S]．北京：建筑工业出版社，2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for seismic energy dissipation of buildings: JGJ 297—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部．建筑抗震试验规程：JGJ/T 101—2015[S]．北京：中国建筑工业出版社，2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部．建筑消能阻尼器：JG/T 209—2012[S]．北京：中国标准出版社，2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Dampers for vibration energy dissipation of buildings: JG/T 209—2012[S]. Beijing: China Standard Press, 2012.

[23] 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): 1955-1973.

[24] Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS analysis user's manual: volume Ⅱ, version 6.11[M]. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2011.

[25] WANG W. Determination for material constants of rubber Mooney-Rivlin model[J]. Rubber Products, 2004, 198(6): 1256-1263.

[26] BRATOSIN D, SIRETEANU T. Hysteretic damping modeling by nonlinear Kelvin-Voigt model[C]//Romanian Academy Proceedings of the Romanian Academy, Series A. Bucharest: Publishing House of the Romanian Academy, 2002: 81-90.

（本文编辑：任　栋）