

位移放大型黏弹性减震系统力学模型与地震响应分析

刘文光, 吴铭智, 何文福, 许浩

(上海大学土木工程系, 上海 200444)

摘要: 针对消能减震结构在层间位移较小时耗能效率欠佳的问题, 提出了一种可将结构层间位移放大的黏弹性阻尼器, 并建立了位移放大型阻尼系统的力学模型, 完成了位移放大 2.5 倍的黏弹性阻尼器和普通黏弹阻尼器的力学性能对比试验, 最后通过算例分析探讨了不同减震结构的地震响应。所提出的力学模型与试验结果吻合。位移放大型阻尼器的出力和耗能相比普通阻尼器被有效地放大。多遇地震下, 附加位移放大型黏弹性阻尼器减震结构的附加阻尼比显著提升, 阻尼耗能是普通减震结构的 1.98 倍。

关键词: 位移放大; 黏弹性阻尼器; 力学模型; 地震响应

中图分类号: TU311.3; TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)04-0783-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.04.001

引言

随着地震的频发, 耗能减震技术^[1-3]受到国内外研究者的重视。目前国内外学者已经开发了多种不同类型和不同构造的耗能减震装置^[4-6]。由于耗能减震技术研究和应用的历史较短, 在一些工程应用中, 如钢筋混凝土剪力墙结构、钢支撑体系及木框架结构, 其在小震下的弹性位移不足, 使耗能装置未能发挥作用, 甚至无法启动^[7]。

将位移放大装置应用于耗能装置中^[8], 不仅能通过放大相对位移和相对速度来增加阻尼器的耗能, 且能增大阻尼器在最大位移处的阻尼力。在一定程度上可解决上述问题。为此国内外学者开展了一系列的研究。陈月明等^[9]提出一种带有梯形杠杆摆的黏弹性阻尼器, 在框架中设置人字形支撑, 依据杠杆原理将层间位移放大几倍, 将该放大量传递给黏弹性阻尼材料进而减少了结构的地震与风振反应。Berton 等^[10]采用齿条齿轮放大装置来放大结构传给阻尼墙的位移, 通过试验研究证明了齿条齿轮放大装置的有效性。Watakabe 等^[11]提出一种管形黏弹性阻尼器, 研究表明带位移放大功能的管形阻尼器对结构振动响应的控制效果较好。刘文光等^[12]提出了一种带位移放大杠杆的黏滞阻尼墙装置, 并进行了理论和振动台试验研究, 验证了该装置增效

减震效果。韩建平等^[13]为了解决结构层间位移较小使阻尼器无法发挥效果的问题, 提出使用齿轮机构放大的流体黏滞阻尼器, 分析表明安装此阻尼器的结构层间位移有不同程度的减小, 效果优于普通黏滞阻尼器。

综上, 位移放大系统能更有效地降低结构动力响应, 达到充分耗能的效果。然而针对基于杠杆原理的位移放大型黏弹性阻尼器的理论推导及数值模拟简化分析方法还有待进一步研究。本文提出一种位移放大型黏弹阻尼器, 并进行了理论分析, 设计制作了 2.5 倍位移放大装置的黏弹性阻尼器和普通阻尼器试验模型, 完成了力学性能试验。最后针对布置不同类型阻尼器的某框架减震结构, 进行地震响应对比分析, 重点研究位移放大型黏弹性减震系统的减震效果。

1 阻尼器构造与力学模型

1.1 装置构造

位移放大型黏弹性阻尼器主要由位移放大机构、支点轴、连接板、阻尼器外钢板和活动钢板等组成。如图 1(a) 所示。在层间位移较小情况下, 放大其相对位移和相对速度, 从而产生更大的阻尼力, 提高耗能效果。

图1(b)为位移放大型黏弹性阻尼器工作原理图,在激励荷载作用下,结构的层间位移 u 通过位移

放大机构放大后作用于阻尼器的活动钢板,使阻尼器的相对位移增大到 ηu ,提升其耗能能力。

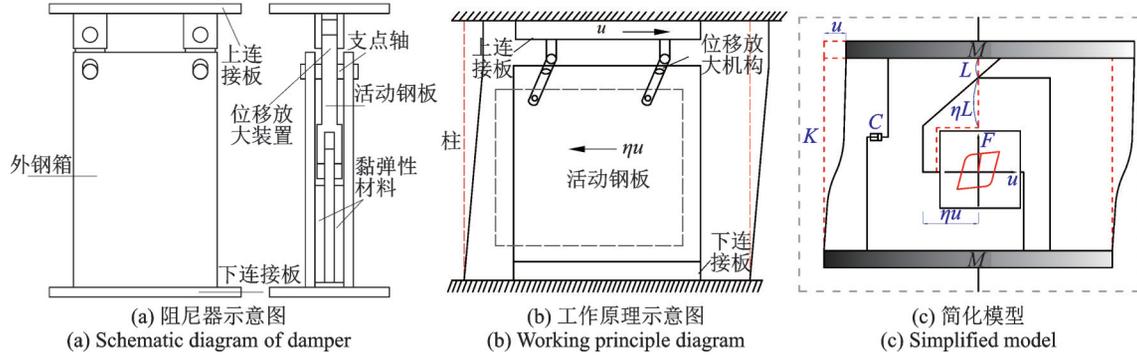


图1 位移放大型黏弹性阻尼器示意图、工作原理图及简化模型图

Fig. 1 Schematic diagram, working principle diagram and simplified model diagram of displacement-amplified viscoelastic damper

1.2 位移放大型黏弹性阻尼器的理论分析

位移放大型黏弹性阻尼器采用高阻尼黏弹性材料,利用高阻尼黏弹性材料的阻尼器其滞回曲线呈双线性特征,可采用通用 Bouc-Wen^[14]计算模型模拟其滞回曲线。

Bouc-Wen模型的计算公式如下:

$$F = rkd + (1 - r)\sigma_y z \quad (1)$$

$$\dot{z} = A\dot{d} - \alpha|d|z|z|^{n-1} - \beta d|z|^n \quad (2)$$

式中 k 表示初始弹性刚度; d 表示阻尼器两端相对位移; σ_y 表示屈服力; r 表示屈服后刚度对初始弹性刚度 k 的比值; z 表示内部滞后变量,此变量范围为 $|z| \leq 1$,其中 $|z| = 1$ 代表屈服面。 α, β, A 和 n 分别为滞回曲线控制参数。

高阻尼黏弹性阻尼器的阻尼力及耗能公式可分别表示为:

$$F = rku + (1 - r)\sigma_y z \quad (3)$$

$$E = F \cdot u = [rku + (1 - r)\sigma_y z] \cdot u \quad (4)$$

式中 F 表示阻尼力; E 表示消耗的能量; u 表示结构层间位移。图1(c)为位移放大型黏弹性阻尼器的简化力学模型。图中 M, K, C 分别表示原结构楼层的质量、刚度和阻尼, L 和 ηL 分别为位移放大机构上、下部分的长度, η 为位移放大机构的放大倍率; ηu 表示位移放大倍率为 η 倍的位移放大型黏弹性阻尼器的运动位移。

放大倍率为 η 的位移放大型黏弹性阻尼器,内钢板阻尼力计算公式为:

$$F' = r'k'\eta u + (1 - r')\sigma'_y z \quad (5)$$

式中 k' 为位移放大型黏弹性阻尼器初始弹性刚度; r' 为屈服后刚度对初始弹性刚度 k' 的比值; σ'_y 为屈服力。位移放大型黏弹性阻尼器初始弹性刚度

k' 、屈服力 σ'_y 为一定值,不随加载位移及频率的变化而变化,即:

$$\sigma'_y = \sigma_y \quad (6)$$

$$r' = r \quad (7)$$

$$k' = k \quad (8)$$

将式(6)~(8)代入式(5),得:

$$F' = rk\eta u + (1 - r)\sigma_y z \quad (9)$$

对于位移放大型黏弹性阻尼器,根据位移放大力学原理,其阻尼力表示为:

$$F_\eta = \eta F' = rk\eta^2 u + (1 - r)\eta\sigma_y z \quad (10)$$

令: $k_{eq} = \eta^2 k, r = r_{eq}, \sigma_{yeq} = \eta\sigma_y$,式(10)可表示为:

$$F_\eta = rk_{eq} u + (1 - r)\sigma_{yeq} z \quad (11)$$

因此位移放大型黏弹性阻尼器阻尼力和耗能公式可分别表示为:

$$F_\eta = rk_{eq} u + (1 - r)\sigma_{yeq} z \quad (12)$$

$$E_\eta = F_\eta \eta u \quad (13)$$

1.3 不同放大倍率下力学模型对比

为了分析不同放大倍率下位移放大型黏弹性阻尼器的情况,分别针对普通黏弹性阻尼器和放大倍率为2倍、2.5倍及3倍的位移放大型黏弹性阻尼器进行受力分析。分析参数如下: $u_0 = 10 \text{ mm}, f = 0.1 \text{ Hz}, k = 88.23 \text{ kN/mm}, r = 0.0204, \sigma_y = 14.28 \text{ kN}, u = u_0 \times \sin(2\pi ft)$ 。分析结果如图2(a)所示,位移放大型黏弹性阻尼器表现出了显著的双线性滞回特征,且放大倍率越高滞回曲线越饱满。图2(b)为不同放大倍率下位移放大型黏弹性阻尼器的刚度、阻尼力及耗能对比,随着放大倍率 η 的增大,阻尼力、刚度及耗能的放大倍数也随之提高,并且在不同放大倍率下,阻尼力

和刚度的放大倍数呈现一致性,以近似线性规律放大。当放大倍率为 3 时,位移放大型黏弹性阻尼

器单圈滞回面积为普通阻尼器的 2.65 倍,体现出了良好的耗能能力。

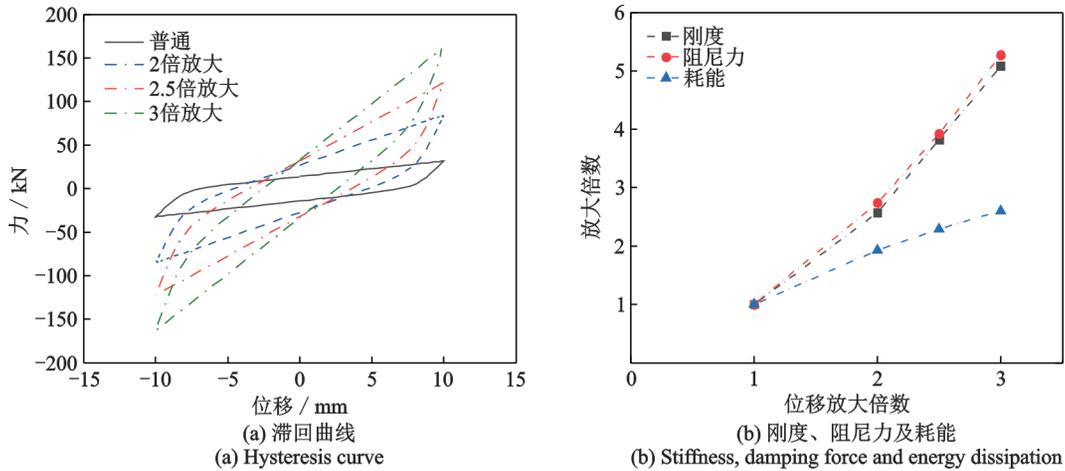


图 2 阻尼器滞回曲线、刚度、阻尼力及耗能对比

Fig. 2 Comparison of damper hysteresis curve, stiffness, damping force and energy dissipation

2 模型装置力学性能试验

2.1 试验概况

本试验采用电液伺服压剪试验系统进行加载,作动器水平最大输出力为 1000 kN,最大工程行程为 ±1200 mm。加载设备如图 3 所示。加载方式为位移控制的正弦波循环加载。阻尼器上连接板与作动器固定连接,通过伺服作动器自身的位移控制反馈值作为加载目标值,进行位移控制的正弦加载。



图 3 加载装置图

Fig. 3 Loading device diagram

为配合试验设备,设计了位移放大型黏弹性阻尼器,阻尼器长为 400 mm,宽为 150 mm,高为 605 mm。由 Q345 钢板焊接而成,M12.9 级螺栓连接。位移放大型黏弹性阻尼器其他参数如表 1 所示。试件模型尺寸如图 4 所示。加工完成后的普通黏弹性

阻尼器和位移放大型黏弹性阻尼器实物图如图 5 所示。其中,位移放大装置的构造为两根杠杆。每根杠杆上有三个螺栓孔,分别通过螺栓将杠杆固定于上连接板、外钢板的支点孔和活动钢板。

表 1 阻尼器参数

Tab. 1 Damper parameter

总尺寸/mm ³	橡胶剪切模量/MPa	活动钢板尺寸/mm ³
400×150×650	0.5	300×275×20
位移放大装置尺寸/mm ³	橡胶层尺寸/mm ³	外钢板尺寸/mm ³
328×62×52	300×200×20	300×485×20

为了分析位移放大型黏弹阻尼器和普通阻尼器的力学性能特点。工况设计保证各种参量等间隔增加,试验加载位移分别为 ±5 mm, ±7.5 mm, ±10 mm, ±15 mm, ±20 mm,加载频率为 0.1 Hz。其中,位移放大型阻尼器的放大倍率为 2.5 倍,试验所用的高阻尼黏弹性材料弹性模量为 0.5 MPa,尺寸为 300 mm×200 mm,厚度为 20 mm。

2.2 试验结果及分析

位移放大型黏弹性阻尼器在大变形过程中没有出现黏弹性材料外鼓,撕裂现象,并能回到原始位置,没有出现明显的残余变形,再次加载时还能达到最大变形位置,表明阻尼器具有良好的大变形能力和自恢复能力。

2.2.1 力学性能分析

表 2 给出了位移放大型黏弹性阻尼器和普通黏

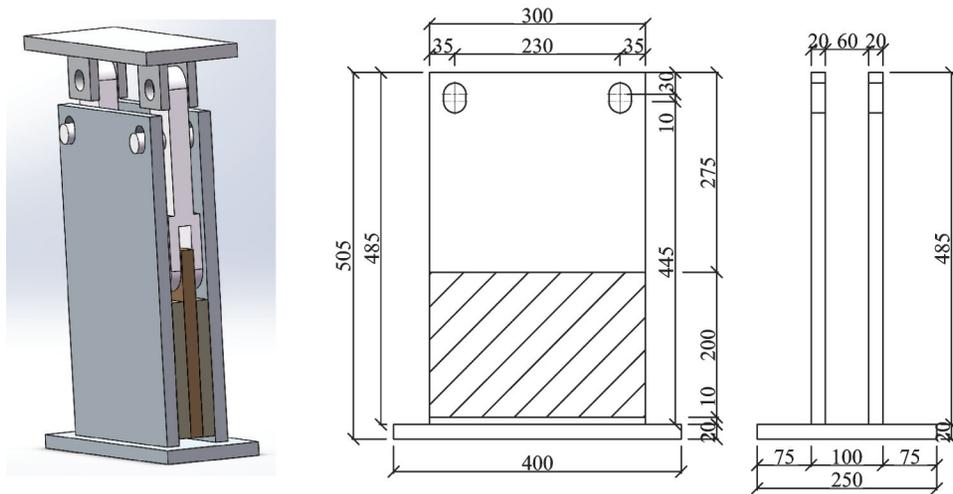


图4 模型尺寸示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic of model size(Unit: mm)

(a) 普通阻尼器实物图
(a) Physical map of ordinary damper(b) 放大型阻尼器实物图
(b) Physical map of displacement amplified damper

图5 阻尼器实物图

Fig. 5 Pictures of dampers

弹性阻尼器在不同工况下的阻尼力、刚度及耗能结果,在相同加载位移幅值下位移放大型阻尼器的刚度、阻尼力及耗能能力比普通阻尼器有显著提升。加载位移幅值为 5, 7.5, 10, 15, 20 mm 时,位移放大型阻尼器与普通阻尼器的刚度之比分别为 4.26, 4.16, 4.21, 4.00, 3.56, 平均放大 4.04 倍;阻尼力之比分别为 4.22, 4.15, 4.20, 3.99, 3.55, 平均放大 4.02 倍;耗能之比分别为 1.74, 2.02, 2.32, 2.44, 2.37, 平均放大 2.18 倍。且随着加载位移幅值的增加,2.5 倍位移放大型黏弹性阻尼器的阻尼力和耗能有显著的提升。

图 6 给出了不同位移幅值加载工况下 2.5 倍位

移放大型黏弹性阻尼器和普通黏弹性阻尼器滞回曲线对比效果。当加载频率恒定时,随位移加载幅值的增加,2.5 倍位移放大型黏弹性阻尼器的阻尼力远大于普通黏弹性阻尼器,且滞回曲线更为饱满,耗能能力显著提升。位移放大型黏弹性阻尼器的滞回曲线表现出了显著的双线性滞回特性,在较大位移作用下,曲线更为饱满,具有良好的耗能效果,体现出黏弹性材料在剪切变形中发挥了良好的作用;在卸载与重复加载过程中,滞回曲线有明显的圆弧过渡段,体现出黏弹性材料的性能。

2.2.2 试验结果与理论模型对比

根据前文提出的 Bouc-Wen 模型,以及通过文献[15]中的相关推导,可得出 Bouc-Wen 模型的相关公式,并编写了相应程序,程序中模型的控制参数为: $\alpha = 0.5, \beta = 0.5, n = 1, A = 1$, 模型中的其他参数如表 3 所示。

表 4 和 5 分别给出普通黏弹性阻尼器和位移放大型黏弹性的试验值与理论分析的对比结果,其力学模型与试验结果吻合,误差均在 10% 以内。其中,位移放大型黏弹性阻尼器的刚度、阻尼力与耗能的误差分别为 2.98%, 4.70%, 5.70%。普通阻尼器的刚度、阻尼力与耗能的误差分别为 5.31%, 3.30%, 7.43%。

图 7 给出了刚度、阻尼力及耗能随加载位移幅值的变化规律。在不同位移幅值下,普通阻尼器和位移放大型阻尼器的试验值与理论值吻合。随位移加载幅值的增加阻尼器刚度减小,其阻尼力及耗能能力显著增加,且位移放大型阻尼器增加幅值远大于普通阻尼器。

表 2 分析结果

Tab. 2 Analysis results

位移幅值/mm	普通阻尼器			2.5倍位移放大型阻尼器			刚度比	阻尼力比	耗能比
	刚度 $K/$ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	阻尼力 $F/$ kN	耗能 $E/$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	刚度 $K/$ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	阻尼力 $F/$ kN	耗能 $E/$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)			
5	3.35	17.69	174.32	14.27	74.62	303.96	4.26	4.22	1.74
7.5	3.26	25.69	349.58	13.55	106.60	705.72	4.16	4.15	2.02
10	3.01	31.54	517.93	12.68	132.49	1199.85	4.21	4.20	2.32
15	2.69	42.32	919.08	10.76	168.76	2238.88	4.00	3.99	2.44
20	2.50	52.34	1382.19	8.89	185.97	3274.02	3.56	3.55	2.37
						平均值	4.04	4.02	2.18

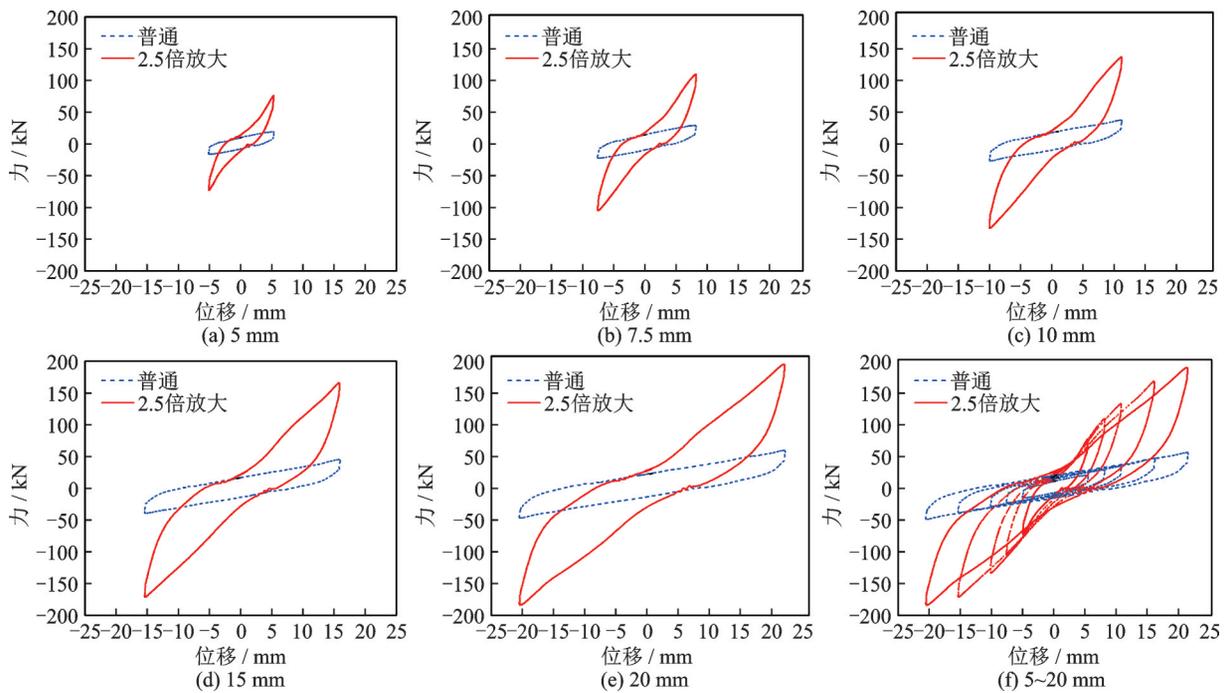


图 6 两种阻尼器试验滞回曲线对比

Fig. 6 The comparison of hysteretic curves of the two dampers

表 3 Bouc-wen 模型力学参数

Tab. 3 Mechanical parameters of Bouc-Wen model

阻尼器参数	普通	放大
初始刚度 $k/$ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	88	550
屈服力 $\sigma_y/$ kN	16.18	40.45
屈服后刚度比 r	0.0204	0.0204
位移放大倍率	—	2.5

图 8 和 9 给出了普通阻尼器和位移放大型阻尼器在不同工况下试验和理论滞回曲线的对比结果,最大阻尼力与滞回面积的试验值与理论值基本一致。其中,位移放大型阻尼器滞回曲线与理论值在小位移段和卸载段存在一定偏差,原因为在小位移段,黏弹性材料存在非线性变形及螺栓连接存在缝隙,但对整体耗能和刚度影响不大。

3 黏弹性减震结构地震响应分析

3.1 工程概况

选取某框架结构进行地震响应分析。该结构首层楼高 4.5 m,其余各楼层高度均为 3.6 m。第一层到第六层的框架柱截面的截面尺寸为 600 mm×600 mm。七至十层框架柱的截面尺寸为 500 mm×500 mm。梁截面尺寸为 300 mm×700 mm。柱采用 C40 混凝土,梁、板均采用 C35 混凝土,受力主筋采用 HRB335。结构总重 5440.95 t。抗震设防烈度为 8 度,设计地震分组为第二组,场地类别为 II 类场地。

按照《抗震规范》要求,时程分析过程中采用一

表 4 普通阻尼器试验值和理论值对比

Tab. 4 Comparison of experimental and theoretical values of ordinary dampers

位移幅值/mm	刚度 $K/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$		误差/%	阻尼力 F/kN		误差/%	耗能 $E/(\text{N}\cdot\text{m})$		误差/%
	试验值	理论值		试验值	理论值		试验值	理论值	
5	3.35	3.71	9.70	17.69	19.4	8.81	174.32	162.15	7.51
7.5	3.26	3.59	9.19	25.69	26.59	3.38	349.58	318.22	9.85
10	3.01	3.11	3.22	31.54	32.59	3.22	517.93	489.02	5.91
15	2.69	2.77	2.89	42.32	42.78	1.08	919.08	842.32	9.11
20	2.5	2.54	1.57	52.34	52.33	0.02	1382.19	1319.56	4.75
	平均值		5.31	平均值		3.30	平均值		7.43

表 5 位移放大型阻尼器试验值和理论值对比

Tab. 5 Comparison of experimental and theoretical values of displacement-amplified dampers

位移幅值/mm	刚度 $K/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$		误差	阻尼力 F/kN		误差	耗能 $E/(\text{N}\cdot\text{m})$		误差
	试验值	理论值		试验值	理论值		试验值	理论值	
5	14.27	13.96	2.17%	74.62	67.92	8.98%	303.96	275.83	9.25%
7.5	13.55	13.35	1.48%	106.60	104.08	2.36%	705.72	707.62	0.27%
10	12.68	12.24	3.47%	132.49	126.82	4.28%	1199.85	1316.19	9.70%
15	10.76	10.14	5.76%	168.76	158.10	6.32%	2238.88	2311.40	3.24%
20	8.89	9.07	2.02%	185.97	183.05	1.57%	3274.02	3472.12	6.05%
	平均值		2.98%	平均值		4.70%	平均值		5.70%

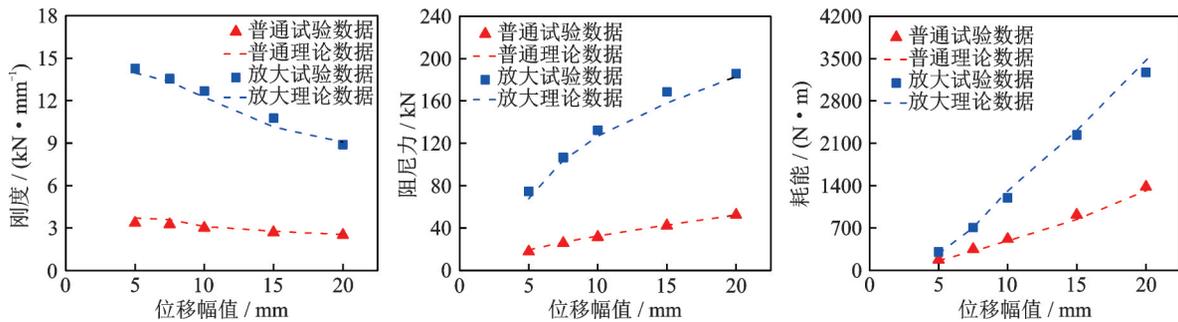


图 7 普通阻尼器与位移放大型阻尼器力学性能的试验和理论值对比

Fig. 7 Experimental and theoretical values of mechanical properties of ordinary dampers and displacement-amplified dampers

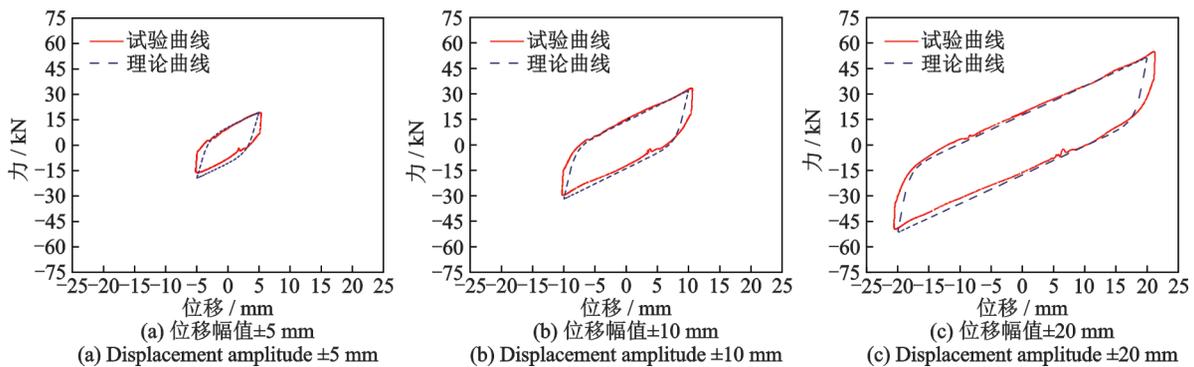


图 8 普通阻尼器曲线拟合的对比

Fig. 8 Comparison of ordinary damper fitting curves

条人工波、两条天然波：RH2波、TH2波、TH57波，地震动输入峰值为70 Gal。

为研究位移放大型黏弹性阻尼器的减震效果，分别对原框架结构 (Original Frame Structure,

OFS)、采用普通黏弹性阻尼器的减震结构 (Viscoelastic Damping Structure, VDS)、采用附加 2.5 倍位移放大装置的黏弹性阻尼减震结构 (Viscoelastic Damping Structure with Displacement Amplification

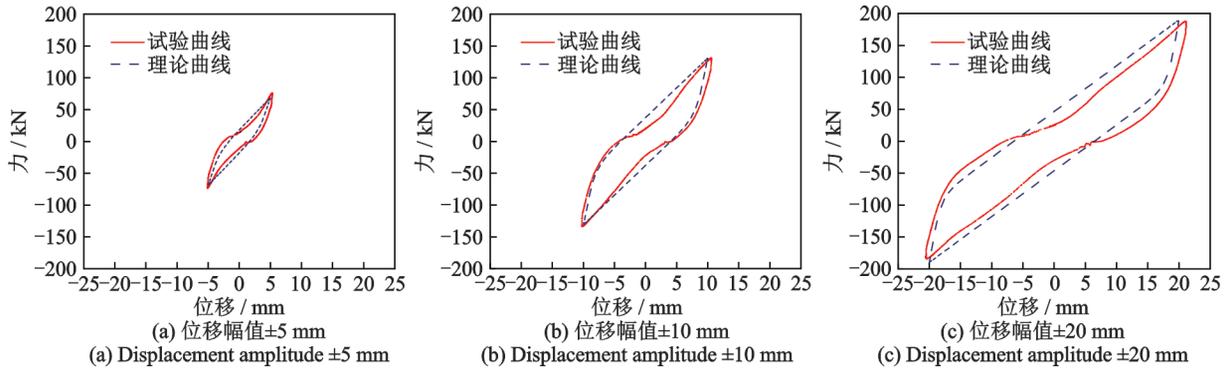


图9 位移放大型阻尼器曲线拟合的对比

Fig. 9 Comparison of fitting curves of displacement-amplified dampers

Device, AVDS)进行动力响应分析。阻尼器布置方案如图10所示。两种方案阻尼器布置位置相同。在1~10层沿X方向,每层布置4片,共40片,沿Y

方向,每层的边跨布置2片阻尼器,共40片。不同方案的阻尼器参数如表6所示。

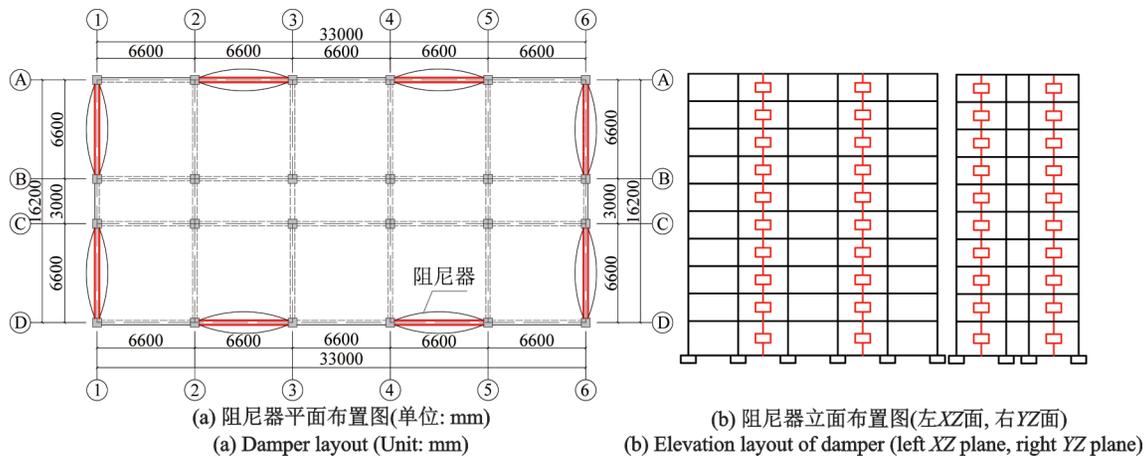


图10 阻尼器布置图

Fig. 10 Damper layout

表6 阻尼器参数表

Tab. 6 Damper parameters

阻尼器参数	OFS	VDS	AVDS
刚度 $k/(kN \cdot mm^{-1})$	—	995	6218.75
屈服力 σ_y/kN	—	40	100
屈服后刚度比	—	0.0024	0.0024
屈服指数	—	0.3	0.3
位移放大倍率	—	—	2.5

黏弹性阻尼器同时具有刚度特性和阻尼特性,因此结构自振周期有所减小。表7为结构在三种不同方案下的自振周期。由表中数据可得,框架结构在加入阻尼器及附加放大装置的阻尼器后,结构的第1阶自振周期由未使用阻尼器时的1.135 s减少到0.952 s。

3.2 减震效应分析

图11(a),(b)给出了不同布置方案下平均层间位移角的对比。AVDS系统的层间位移角较VDS

表7 结构自振周期

Tab. 7 The structural natural vibration period

振型阶次	周期/s		
	OFS	VDS	AVDS
1	1.135	0.958	0.952
2	1.104	0.941	0.936
3	1.028	0.749	0.742

系统在X向和Y向结构减震率分别提高2.26倍和2.10倍。其中,VDS,和AVDS的减震结构的层间位移在X向的平均减震率分别为23.98%,54.18%,在Y向的平均减震率分别为22.98%,48.41%。

图11(c),(d)给出了不同布置方案下结构层间剪力对比结果。为考察结构本身的地震受力情况,此处呈现的剪力数据为结构梁柱的层间剪力,未考虑阻尼器出力对结构剪力的贡献。即结构梁柱层间剪力=结构总剪力-阻尼器出力。AVDS系统的层间剪力较VDS系统在X向和Y向的结构减震率分别提高2.05倍和2.17倍。其中,VDS和AVDS的减

震结构的层间位移在 X 向的平均减震率分别为 22.58%, 46.31%, 在 Y 向平均减震率分别为 22.71%, 49.12%。

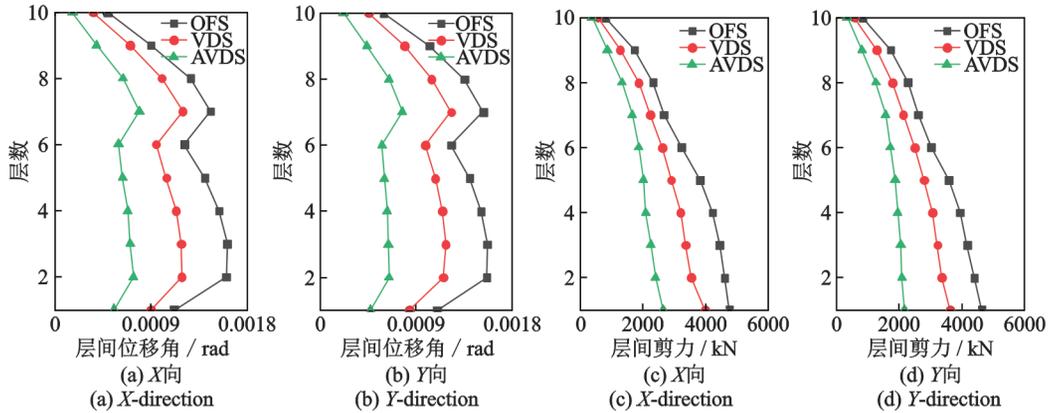


图 11 多遇地震下结构层间位移角及结构层间剪力比较

Fig. 11 Comparison of drifts and shear forces under frequent earthquakes

3.3 位移放大型黏弹性阻尼器耗能分析

表 8 给出了不同地震动作用下 VDS 和 AVDS 的耗能分析结果。附加 2.5 倍位移放大装置后, AVDS 的刚度、阻尼力和耗能显著提升。其中, 阻尼器最大阻尼力平均放大 2.97 倍, 最大刚度平均放大 2.89 倍, 阻尼器耗能平均放大 1.98 倍。

表 9 给出了不同工况下结构的附加阻尼比分析结果, 相比 VDS 结构, AVDS 结构的附加阻尼比在 X 向提升 2.8 倍, 在 Y 向提升 2.7 倍。VDS, AVDS

模型的 X 向附加阻尼比平均值分别为 6.90%, 19.27%; Y 向分别为 8.40%, 22.71%。

表 9 附加阻尼比的对比

Tab. 9 Comparison of additional damping ratios

地震波	VDS		AVDS	
	X	Y	X	Y
RH2	6.71%	8.45%	19.84%	23.60%
TH2	6.63%	9.01%	19.24%	22.71%
TH57	7.34%	7.75%	18.73%	21.82%
平均值	6.90%	8.40%	19.27%	22.71%
提高倍数	—	—	2.80	2.70

表 8 阻尼器耗能分析结果

Tab. 8 The analysis results of damper energy consumption

地震波	阻尼力 F / kN		刚度 K / (kN·mm ⁻¹)		耗能 E / (N·m)	
	VDS	AVDS	VDS	AVDS	VDS	AVDS
RH2	45.94	135.56	18.39	54.03	3242.38	7693.72
TH2	48.07	145.82	15.75	43.46	4265.65	6696.23
TH57	46.37	136.21	18.74	55.86	3489.51	6957.10
提高倍数	2.97		2.89		1.98	

图 12 给出了位于结构第 3 层的阻尼器在不同地震动作用下的滞回曲线, AVDS 系统的耗能能力显著大于 VDS 系统。多遇地震作用下, AVDS 系统即可发挥出可观的耗能减震效果, 结构附加阻尼比最高可达到 20% 以上。位移放大型黏弹性减震系统在小震下即可进入工作状态, 提供稳定的耗能能力, 增强结构的抗震安全性。

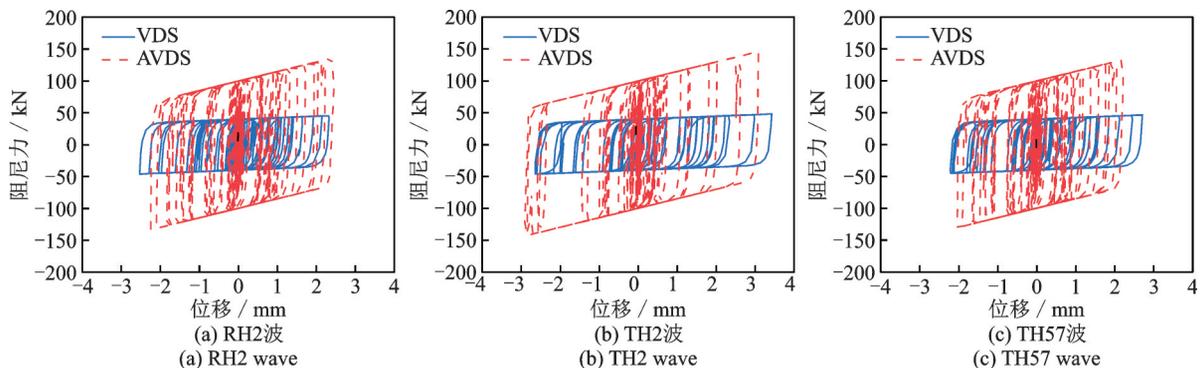


图 12 不同地震波作用下阻尼器滞回曲线比较

Fig. 12 Comparison of hysteretic curves of damper under different seismic waves

图13给出了RH2波作用下不同方案的阻尼器滞回累计耗能和结构振型阻尼耗能对比。AVDS的阻尼器耗能能力为VDS的1.4倍,且ADS结构消耗的能量最少,说明附加位移放大系统的黏弹性阻尼器更有效地耗散了地震输入能量,保护了主体结构。

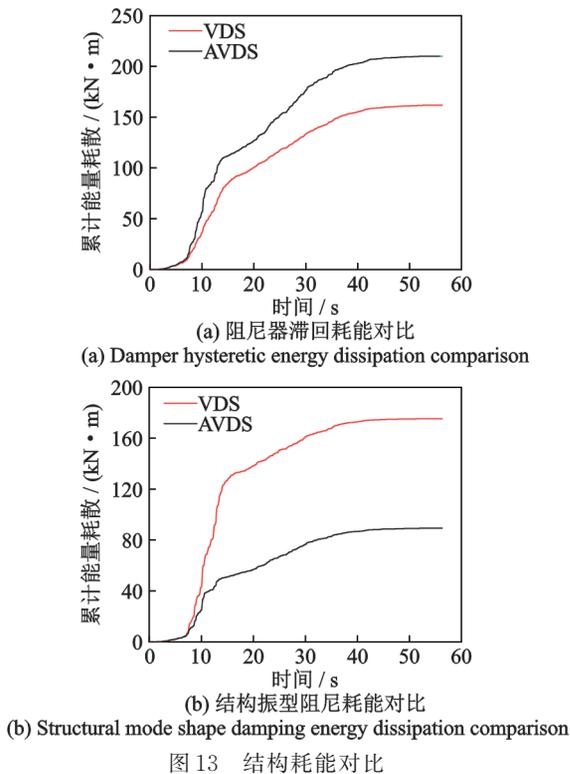


Fig. 13 Comparison of structural energy consumption

4 结论

本文提出一种位移放大型黏弹性阻尼器,并完成了理论构建、模型试验和地震响应分析,结论如下:

(1)提出了一种通过附加杠杆装置可放大结构层间位移的黏弹性阻尼器,建立了位移放大型黏弹性阻尼器的力学模型。位移放大2.5倍的阻尼器,其阻尼力、刚度、耗能分别放大3.70倍、3.72倍及2.39倍,进一步讨论了不同放大倍率下阻尼器性能变化趋势。

(2)完成了位移放大2.5倍的黏弹性阻尼器和普通黏弹性阻尼器的力学性能对比试验,相比普通阻尼器,位移放大型阻尼器的阻尼力平均放大4.02倍,刚度平均放大4.04倍,耗能平均放大2.18倍。试验得到的阻尼器刚度、耗能及阻尼力数值与理论误差均在10%以内。

(3)进行了布置不同阻尼器结构的地震响应分析,在多遇地震作用下,位移放大型减震结构的附加阻尼比为20.99%,放大了2.75倍,阻尼器耗能放大了1.98倍。

参考文献:

- [1] Yao J T. Concept of structural control [J]. ASCE Journal of the Structural Division, 1972, 98(ST7): 1567-1574.
- [2] 李宏男. 中国结构控制的研究与应用[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 107-112.
Li Hongnan. Research and application of structural control in China [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1999, 19(1): 107-112.
- [3] 李宏男, 李忠献, 祁皓. 结构振动与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Li Hongnan, Li Zhongxian, Qi Ai. Structural Dynamics and Control [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [4] Cherry S, Filiatrault A. Seismic response control of buildings using friction dampers [J]. Earthquake Spectra, 1993, 9(3): 447-466.
- [5] Soong T T, Dargush G F. Passive Energy Dissipation on Systems in Structure Engineering [M]. New York: John Wiley & Sons. Inc., 1997.
- [6] McNamara R J, Taylor D P. Fluid viscous dampers for high-rise buildings [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2003, 12(2): 145-154.
- [7] 汪志昊, 陈政清. 高层建筑结构中粘滞阻尼器的新型安装方式[J]. 世界地震工程, 2010, 26(4): 135-140.
Wang Zhihao, Chen Zhengqing. New installations of viscous damper in high rise building [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(4): 135-140.
- [8] Ribakov Y, Reinhorn A M. Design of amplified structural damping using optimal considerations [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(10): 1422-1427.
- [9] 陈月明, 刘季. 杠杆黏弹性阻尼器及其受控制结构的试验研究[C]. 第一届全国结构控制会议论文集, 承德, 1998.
Chen Yueming, Liu Ji. Experimental study on lever viscoelastic damper and controlled structure [C]. Proceedings of the First National Conference on Structural Control, Chengde, 1998.
- [10] Berton Stefano, Bolander John E. Amplification system for supplemental damping devices in seismic applications [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005,

- 131(6):979-983.
- [11] Watakabe Tomoyoshi, Fujita Satoshi. Research and development of vibration control device suitable for detached houses by using displacement amplification mechanism [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2009, 3(3):368-379.
- [12] 刘文光,董秀玲,何文福,等.位移放大型阻尼墙减震结构的模型试验与数值分析[J].振动工程学报,2015,28(4):601-609.
Liu Wenguang, Dong Xiuling, He Wenfu, et al. Dynamic tests and numerical response analysis of new energy dissipated structures based on displacement amplification device[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(4):601-609.
- [13] 韩建平,靳旭.具位移放大机制的流体黏滞阻尼器性能及减震效果分析[J].地震工程与工程震动,2016,36(2):85-92.
Han Jianping, Jin Xu. Investigation on performance and seismic mitigation effect of fluid viscous damper with displacement amplification mechanism [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36(2):85-92.
- [14] Bouc R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis [C]. Proceeding of the 4th Conference on Nonlinear Oscillations. Prague, Czechoslovakia, 1967
- [15] 吴从晓.高位转换耗能减震结构体系分析研究[D].广州:广州大学,2007.
Wu Congxiao. Analytical studies on the system of high-level transfer structure with energy dissipated device [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2007.

Mechanical model and seismic response analysis of large displacement viscoelastic damping system

LIU Wen-guang, WU Ming-zhi, HE Wen-fu, XU Hao

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: For the problem of poor energy consumption efficiency of energy dissipation structures when the interlayer displacement is small, a viscoelastic damper that can amplify the interlayer displacement of the structure is proposed, and the mechanical model of the displacement-amplified damping system is established. A comparative test of the mechanical properties of a viscoelastic damper with a displacement magnification of 2.5 times and an ordinary viscoelastic damper is carried out. The seismic response of different damping structures is analyzed through a calculation example. The proposed mechanical model is consistent with the experimental results. Compared with ordinary dampers, the output and energy dissipation of displacement-amplified dampers are effectively amplified. Under frequent earthquakes, the additional damping ratio of the additional displacement-amplified viscoelastic damping structure is significantly improved, and the damping energy dissipation is 1.98 times that of the ordinary damping structure.

Key words: displacement amplification; viscoelastic damper; mechanical model; seismic response

作者简介: 刘文光(1968—),男,博士,教授。电话:13701888336; E-mail: liuwg@aliyun.com。

通讯作者: 何文福(1979—),男,博士,副教授。电话:13795219128; E-mail: howunfu@shu.edu.cn。