

一种聚合阻尼耗能结构理论模型与地震响应研究

何文福¹, 徐运林¹, 戴柳丝¹, 尚 峰¹, TAKAFUMI Miyama²

(1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 帝冢山大学建筑空间设计系, 奈良 631-8585)

摘要: 针对高层框架核心筒剪力墙结构体系在地震作用下层间位移小, 阻尼器难以发挥较好耗能作用的问题, 基于内核心筒和外围框架结构的变形特点, 在框架核心筒的聚合变形位置设置位移放大大型高效阻尼器(SDA), 形成了聚合阻尼耗能结构体系(NSD)。分析了位移放大阻尼器的耗能力学性能, 提出了普通型黏滞阻尼器(VD)和放大大型黏滞阻尼器的阻尼力及耗能理论公式。设计制作了 3 倍位移放大大型黏滞阻尼器和普通黏滞阻尼器的试验模型, 进行正弦波往复加载试验, 得到不同试验工况下黏滞阻尼器的滞回耗能曲线, 并将理论曲线与试验曲线进行了对比, 验证了力学模型的正确性; 对比 SDA 与 VD 的耗能效果, 得出在相同位移下, SDA 比 VD 滞回曲线更加饱满, 耗能更为显著。进一步对一栋聚合阻尼耗能结构进行地震响应分析, 结果表明与传统结构相比, 聚合阻尼耗能结构具有良好的减震性能。

关键词: 剪力墙结构体系; 聚合阻尼; 耗能减震层; 地震响应; 位移放大

中图分类号: TU398⁺.2; TU973.3⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)03-0748-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.03.017

引 言

地震给人类造成的生命财产损失主要是由于建筑物的损坏倒塌造成的^[1], 因此减轻建筑物的损坏成为科学工作者努力的目标。传统的结构抗震设计依靠改善结构的延性以提高结构的抗震能力, 但随着高层建筑向着日益增高和高强轻质的方向发展, 仅仅依靠结构本身的抗震能力难以满足安全性和舒适性要求^[2-3]。因此, 寻求一种行之有效的结构控制方法一直是土木工程领域的一个重要课题。为解决这一问题, 结构振动控制技术应运而生, 其通过在结构中引入控制理论和控制机构, 利用非承重的控制装置产生控制力与结构共同抵御外部动荷载的作用, 以减小结构动力响应^[4]。自 20 世纪 70 年代以来, 种类众多的消能减震技术相继被提出, 在众多的阻尼器中, 应用最多的是黏滞阻尼器^[5]、黏弹性阻尼器^[6]和摩擦阻尼器。

在建筑结构中, 阻尼器一般布置在层间位移较大处, 但有些结构例如框架剪力墙结构, 由于层间位移差较小, 在一定程度上制约了阻尼器性能的充分发挥^[7]。因此针对此问题, 带位移放大装置的阻尼器应运而生^[8]。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, 从而提高阻尼器耗能, 减少了结构的地震与风振反应。Constantinou 等^[10]率先提出了基于连杆机构的位移放大系统, 并应用在一些实际工程中。Ribakov 等^[11]提出一种杠杆式的位移放大装置, 通过连接梁柱节点的杠杆臂放大结构的层间位移, 并传递至阻尼器中, 产生较大的耗能作用。Berton 等^[12]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切实可行。Watakabe 等^[13]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^[14]提出了一种由放大杠杆并联附加在黏滞阻尼墙中的位移放大装置, 并对设置位移放大大型阻尼墙的新型减震结构进行理论和振动台试验研究。

在以上的研究中, 对新型耗能阻尼器研究较多, 但是缺乏关于新结构形式的研究, 本文在此基础上, 提出了一种新的结构控制系统。此结构系统由三部分组成, 分别是内核心筒、外围框架结构、耗能减震层。内核心筒和外围框架结构通过布置在其中的耗能减震层相连。减震层中布置了位移放大高效阻尼器, 该结构阻尼器的耗能效率相比传统的框架剪力墙结构有很大的提升。然后针对此结构进行地震时程分析, 进一步验证该结构的减震效果。

收稿日期: 2021-10-07; **修订日期:** 2021-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078287); 广西省重点研发计划项目(桂科 AB19259011); 上海宝冶集团重大课题(RD2020-98); 柳州市科技计划项目(2020GBCA0403)。

1 聚合阻尼耗能结构

本文提出的聚合阻尼耗能结构如图1所示。在此结构下部,内核心筒和外围框架结构分开,核心筒以及外围框架结构建立在基础之上,两者通过布置

在减震层中的水平向阻尼器相连,在阻尼层还布置了支撑竖向荷载的滑动支座。由于在结构下部框架和核心筒分开会使结构在建筑功能上不连续,针对这种问题,可以在结构下部框架与核心筒之间布置可以滑动的楼板,使结构在地震作用下轻微错动的时候不影响建筑的使用功能。

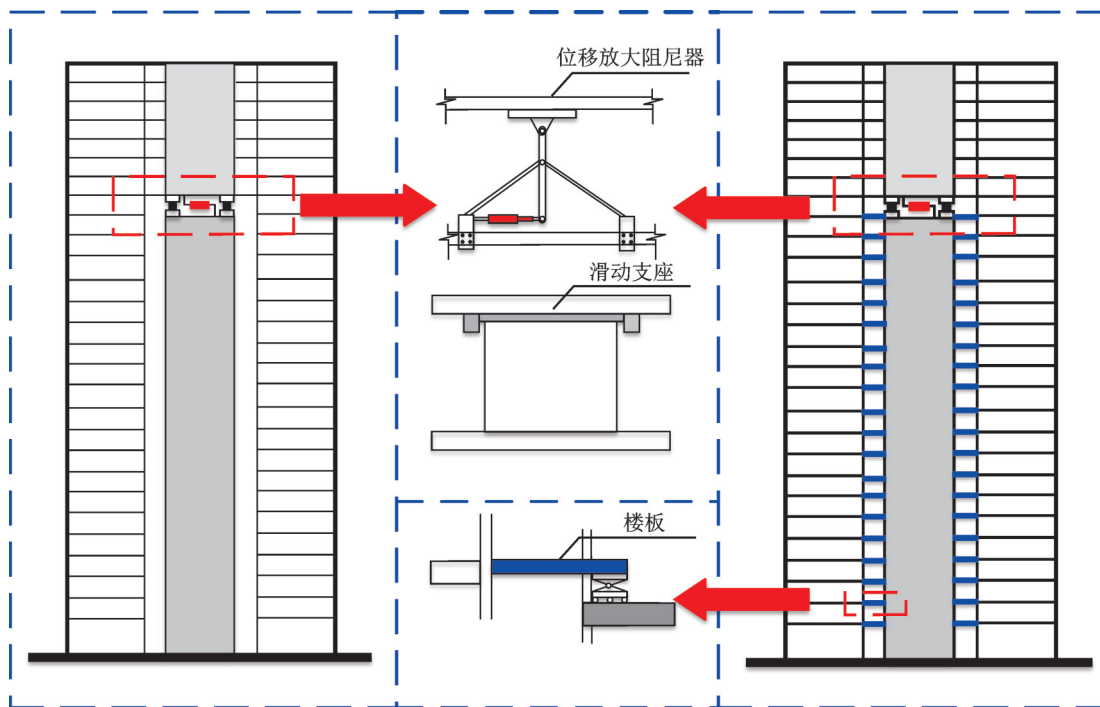


图1 聚合阻尼耗能结构

Fig. 1 Energy dissipation structure with damping concentration system

聚合阻尼耗能结构体系的工作原理为:由于两子结构的质量和刚度都有差异,在地震作用下两结构的地震响应不一致,结构对应各层的位移、速度和加速度都不一样,会产生相对的运动,为此提出利用被动控制系统在减震层设置阻尼减震装置。这样可以利用相邻结构之间的相对运动驱动耗能装置做功,可耗散输入结构中的地震能量,从而减小结构的地震反应。该方案既利用了耗能装置能提高结构阻尼的优势,也避免了耗能装置应用时常见的困难,如占用建筑物的使用空间、影响建筑使用功能、以及破坏建筑内部美观等。利用阻尼器将核心筒结构和框架结构连成一体以充分发挥阻尼器的耗能特性。由于结构自身刚度存在差异,在地震作用下,框架和核心筒产生一定的位移差,阻尼器能充分发挥其耗能的作用,从而达到保护结构主体的目的。

2 聚合阻尼耗能结构力学性能分析

图2是聚合阻尼耗能结构在地震作用下的变形示意图,地震作用下阻尼减震层处有较大的位移差。在阻尼减震层中布置位移放大高效阻尼器,当耗能

减震层产生相对位移时,根据杠杆原理,安装的阻尼器两端的相对位移将得到数倍的放大,阻尼器变形如图3所示。图3中的 m 为结构质量, k 为结构刚度, u 为结构层间位移, η 为杠杆放大倍数, c_v 为阻尼器阻尼系数, c 为结构阻尼系数。通过放大上下连接板的相对位移,同时也放大了阻尼器两端的相对速度,以增加其耗能力。

黏滞阻尼器的阻尼力和公式可简化为:

$$F = C_a \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (1)$$

式中 F 表示阻尼力; C_a 表示黏滞阻尼器的阻尼系数; $\operatorname{sgn}(\bullet)$ 表示符号函数; α 为阻尼指数; u 表示阻尼器两端的相对位移。

阻尼器在一个周期 T 内所消耗的能量为:

$$E = \oint F du = \int_0^T F \dot{u} dt = \int_0^{2\pi} C_a |\dot{u}|^{1+\alpha} dt \quad (2)$$

式(2)积分可简化为:

$$E_D = \pi \beta_a C_a \omega^a u_0^{1+\alpha} \quad (3)$$

式中 β_a 是与阻尼指数 α 有关的函数,表示为:

$$\beta_a = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2(1 + \frac{\alpha}{2})}{\pi \Gamma(2 + \alpha)} \quad (4)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

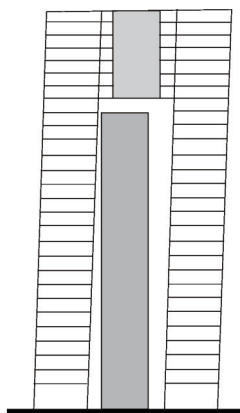


图 2 结构变形图

Fig. 2 Structural deformation diagram

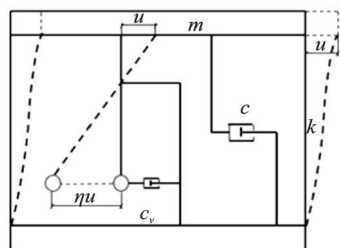


图 3 阻尼器变形图

Fig. 3 Damper deformation diagram

阻尼器的位移和速度可分别表示为:

$$u = u_0 \sin(\omega t), \dot{u} = \omega u_0 \cos(\omega t) \quad (5)$$

对于黏滞阻尼器附加放大倍数为 η 倍的放大装置,阻尼器的相对位移 $u' = \eta u$, 相对速度 $\dot{u}' = \eta \dot{u}$, 并将其代入式(1), 得到放大型黏滞阻尼器的阻尼力为:

$$F_1 = C_a \operatorname{sgn}(\dot{u}') |\dot{u}'|^\alpha = -\eta^\alpha C_a \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (6)$$

根据杠杆放大原理, 杠杆动力臂端的力应为力臂端出力的一 η 倍, 力臂端出力即为阻尼器出力, 则减震系统的阻尼力 F' 和耗能 E' 可分别表示为:

$$F' = -\eta \cdot F_1 = \eta^{1+\alpha} C_a \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (7)$$

$$E' = F' \cdot u' = \eta^{1+\alpha} \pi \beta_a C_a \omega^\alpha u_0^{1+\alpha} \quad (8)$$

定义 $\lambda_a = \pi \beta_a$, κ 为阻尼器阻尼力放大系数, χ 为阻尼器消耗能量放大系数, 则 κ 和 χ 可分别表示为:

$$\kappa = \frac{F'}{F} = \frac{\eta^{1+\alpha} C_a \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha}{C_a \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha} = \eta^{1+\alpha} \quad (9)$$

$$\chi = \frac{E'}{E} = \frac{\eta^{1+\alpha} \lambda_a C_a \omega^\alpha u_0^{1+\alpha}}{\lambda_a C_a \omega^\alpha u_0^{1+\alpha}} = \eta^{1+\alpha} \quad (10)$$

可知, 附加位移放大机构(放大倍数为 η) 的高效耗能阻尼器减震系统的阻尼力和耗能能力均是普通黏滞阻尼器的 $\eta^{1+\alpha}$ 倍。

由高效耗能阻尼器的耗能原理可知, 当阻尼器

的行程扩大时, 阻尼器的阻尼力以及耗能也会增大。

聚合阻尼耗能结构体系相对于传统的框架剪力墙结构, 也有放大阻尼器行程的效果, 多遇地震下钢筋混凝土框架层间位移角限值为 $\frac{1}{550}$, 框架剪力墙结构为 $\frac{1}{800}$, 剪力墙为 $\frac{1}{1000}$ 。为简化计算, 假定在同一工况下框架剪力墙结构与聚合阻尼结构的层间位移角均处于规范限值, 楼层的高度为 h 。

此时框架剪力墙原结构层间位移为 $\frac{1}{800}h$, 聚合阻尼结构由框架结构与剪力墙耦合而成, 减震层所在的楼层位移与减震层所在的楼层有关, 假定结构为 32 层, 减震层设置在 26 层, 此时减震层处的楼层位移为 $26 \times (\frac{1}{550} - \frac{1}{1000})h = \frac{17}{800}h$ 。减震层处位移为框架剪力墙结构的 17 倍, 单个阻尼器的耗能为框架剪力墙结构的 $17^{1+\alpha}$ 倍。可知在聚合阻尼结构减震层处有较大的位移差, 相较于传统的框架剪力墙结构可极大地提高阻尼器的耗能效果。

3 高效耗能阻尼器试验

3.1 试验模型介绍

为了验证 SDA 的放大效果, 对模型装置进行静力加载试验, 试验加载的模型为 VD 和 SDA 两套装置, 试验所采用筒式黏滞阻尼器阻尼系数 C_a 为 32 kN/(m/s), 阻尼指数 α 为 0.42。阻尼器力学性能参数如表 1 所示。试验所采用设备为 100 kN 水平液压力试验机, 最大作动速度为 0.565 m/s。为配合试验设备, 设计试验方案如图 4(a) 所示, 现场加载图如图 4(b) 所示。

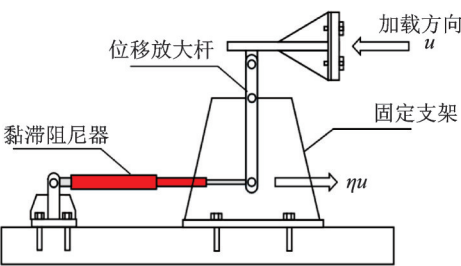
表 1 阻尼器力学性能参数

Tab. 1 Mechanical performance parameters of damper

阻尼器	阻尼系数/[kN·(m ^{0.42} ·s ^{-0.42})]	阻尼指数	放大倍数
VD	32	0.42	1
SDA	32	0.42	3

3.2 加载工况

试验采用位移控制的正弦加载, 每种工况均加载 5 圈, 试验记录了不同工况下的阻尼力和位移值, 并得到了相应的滞回曲线; 取第 3 圈滞回曲线的数据用于确定阻尼器的性能指标, 试验工况如表 2 所示。



(a) 试验设计方案图
(a) Experimental design scheme diagram



(b) 现场加载图
(b) Experimental loading diagram

图 4 试验设计方案与加载图

Fig. 4 Experimental design scheme and loading diagram

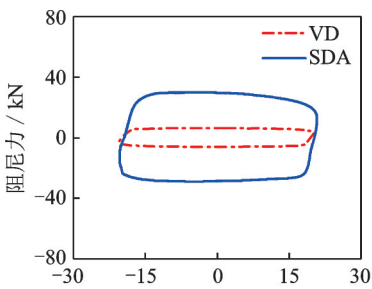
表 2 加载工况
Tab. 2 Loading conditions

阻尼器	加载 工况	加载频率/ Hz	位移幅值/ mm	速度幅值/ (mm·s ⁻¹)	加载 圈数
VD	1	0.13	60	50.0	5
	2	0.27		100.0	
	3	0.40		150.0	
	4	0.53		200.0	
	5	0.80		300.0	
SDA	6	0.13	20	16.7	5
	7	0.27		33.3	
	8	0.40		50.0	
	9	0.53		66.7	
	10	0.80		100.0	
	11	0.40	20	50	45

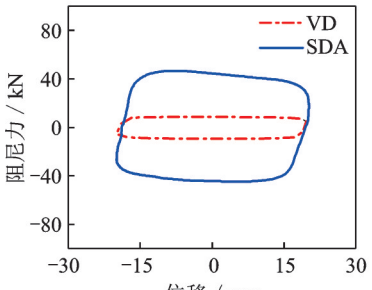
3.3 试验结果

图 5 是加载位移为 20 mm,加载频率分别为 0.13,0.4 和 0.8 Hz 时 VD 和 SDA 的试验滞回曲线。比较图 5(a),(b)和(c)可以得出,当加载位移恒定时,随着加载频率的增加,放大型黏滞阻尼器和普通阻尼器的阻尼力峰值随之增加。通过对二者滞回曲线的比较,放大型阻尼器的阻尼力与滞回曲线面积数倍于普通型,且放大型黏滞阻尼器的滞回耗能曲线较饱满,说明附加位移放大装置后,阻尼器的性能大大提升。

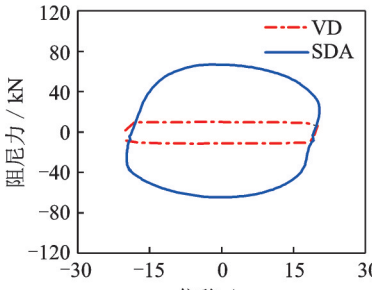
图 6 是加载位移为 20 mm,加载频率分别为 0.13,0.4 和 0.8 Hz 时 VD 的试验曲线与理论曲线的对比。试验结果显示,VD 的试验曲线饱满,耗能情况良好。比较图 6(a),(b)和(c)可以得出,在加载位



(a) 0.13 Hz



(b) 0.4 Hz



(c) 0.8 Hz

图 5 两种阻尼器滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison of hysteresis curves of two kinds of viscous damper

移一定的情况下,随着加载频率(速度)的增加,阻尼力与耗能逐渐增加,阻尼器呈明显速度相关性。试验曲线与理论曲线整体吻合良好。

图 7 是加载位移为 20 mm,加载频率分别为 0.13,0.4 和 0.8 Hz 时 SDA 的试验曲线与理论曲线的对比。对比两种滞回曲线可以发现,试验滞回曲线的形状轮廓与理论值基本吻合,试验最大阻尼力与理论预测基本一致。相比普通型阻尼器滞回曲线与理论曲线,放大型阻尼器滞回曲线具有一定斜率,其原因主要是放大装置存在一定的间隙与弹性变形,但曲线表现出的偏差较小,可认为对放大型阻尼器的整体性能与耗能效果影响不大,放大型阻尼器整体性能与理论模型吻合。

表 3 给出了 SDA 和 VD 的阻尼力及耗能对比,在加载频率分别为 0.13,0.4 和 0.8 Hz 时,SDA 最大阻尼力分别为 VD 的 4.60,4.82 和 5.71 倍,平均为 5.04 倍;耗能分别为 4.73,4.76 和 5.26 倍,平均为 4.92 倍,附加放大装置后系统阻尼力与耗能均有大幅增加。

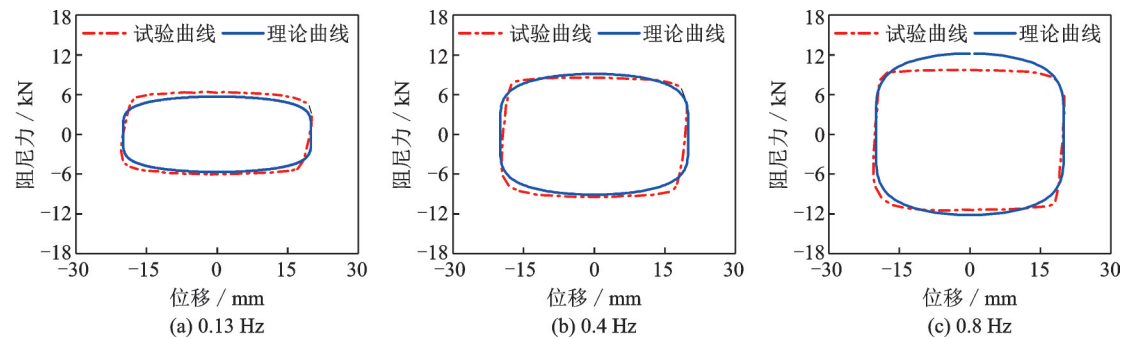


图 6 普通阻尼器曲线拟合的对比
Fig. 6 Comparison of fitting curve of ordinary VD

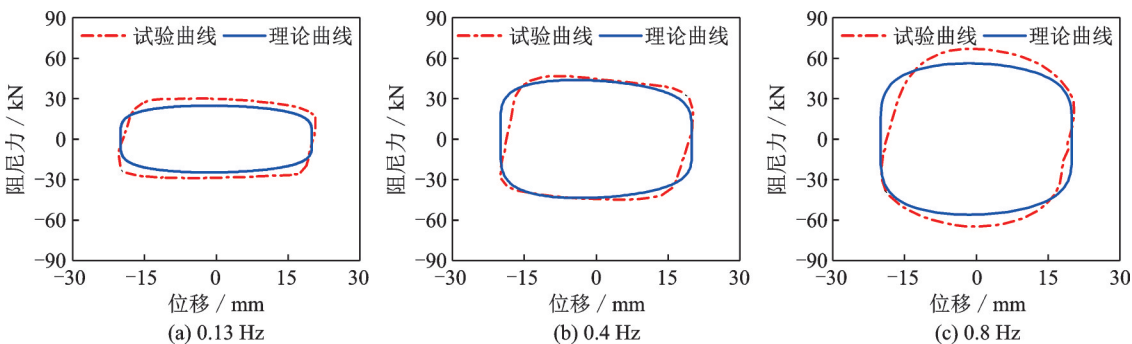


图 7 位移放大型黏滞阻尼器曲线拟合对比
Fig. 7 Comparison of fitting curve of SDA

表 3 阻尼力及耗能对比
Tab. 3 Comparison of damping force and energy consumption

频率/Hz	阻尼力/kN		耗能/(N·m)	
	VD 试验	SDA 试验	VD 试验	SDA 试验
0.13	6.41	29.50	456	2159
0.40	9.50	45.80	659	3140
0.80	11.54	65.85	809	4258

表 4 显示了 VD 和 SDA 力学性能的理论值和试验结果的比较。VD 的阻尼力误差在 0.35%~7.58% 之间,耗能误差在 0.7%~8.18% 之间,阻尼力与能耗的平均误差分别为 3.63% 与 3.18%。SDA 的阻尼力误差在 0.02%~16.17% 之间,能耗误差在 4.30%~24.14% 之间,阻尼力与能耗的平均误差为 9.27% 与 9.15%。以 0.4 Hz 的加载频率为例,VD 的阻尼力和耗散能的误差分别为 0.35% 和 1.21%,SDA 的误差分别为 8.99% 和 4.30%。VD 的阻尼力与能耗的误差均在 10% 以内,VD 的试验结果与理论值均有较高吻合度。SDA 的试验结果与理论值的偏差相比于 VD 稍大,这是因为在进行位移放大型阻尼器的试验过程中,放大杠杆承担较大荷载,会产生微小的弹性变形;同时为了保证机构变形协调,支点轴处以槽形孔连接,支点轴提拉运动以及销轴与轴孔运动时候的摩擦均会产生试验误差。试验中为减小可控的误差,可以使用刚度较大的杠杠,销轴与轴孔的连接处使用硅脂润滑以减少摩擦误差。

表 4 VD 与 SDA 试验结果与理论值对比
Tab. 4 Comparison of test results and theoretical values of VD and SDA

阻尼器	工况	阻尼力			耗能		
		试验结果/kN	理论值/kN	误差/%	试验结果/kJ	理论值/kJ	误差/%
VD	1	9.76	9.02	7.58	2.2	2.02	8.18
	2	12.32	12.26	0.49	2.82	2.74	2.84
	3	14.41	14.43	0.35	3.31	3.27	1.21
	4	17.17	16.27	5.24	3.73	3.62	2.95
	5	20.25	19.34	4.49	4.26	4.29	0.70
	平均值			3.63			3.18
SDA	6	37.76	34.38	8.95	2.86	2.69	5.94
	7	46.72	41.01	12.22	3.68	3.45	6.25
	8	50.06	45.56	8.99	3.49	3.64	4.30
	9	66.86	56.05	16.17	4.67	4.43	5.14
	10	40.87	40.86	0.02	0.58	0.72	24.14
	平均值			9.27			9.15

4 数值分析

4.1 结构模型与减震方案

为了研究结构的减震效果,分别建立了未加减震装置的框架-核心筒结构(Regular Structure,简称 RS)、框架-核心筒结构阻尼器传统布置(Regular

Structure-Damper,简称 RSD)、聚合耗能结构体系(New Structure-Damper,简称 NSD)。三种模型的框架与核心筒部分构件参数均一致,作为区别,RS 的框架部分与剪力墙部分完全相连,是一个整体;RSD 为在 RS 中加入上文所提的位移放大阻尼器,阻尼器的布置方式为传统的逐层布置;NSD 为聚合

阻尼的耗能体系,结构为 32 层,耗能减震层设置在第 26 层。主体结构总高度为 115 m,长 48 m,宽 48 m。框架柱截面为 1000 mm×1000 mm,框架梁截面为 400 mm×800 mm,核心筒剪力墙厚 300 mm。所有数值分析均采用非线性动力时程分析。三种结构的结构模型图如图 8 所示。

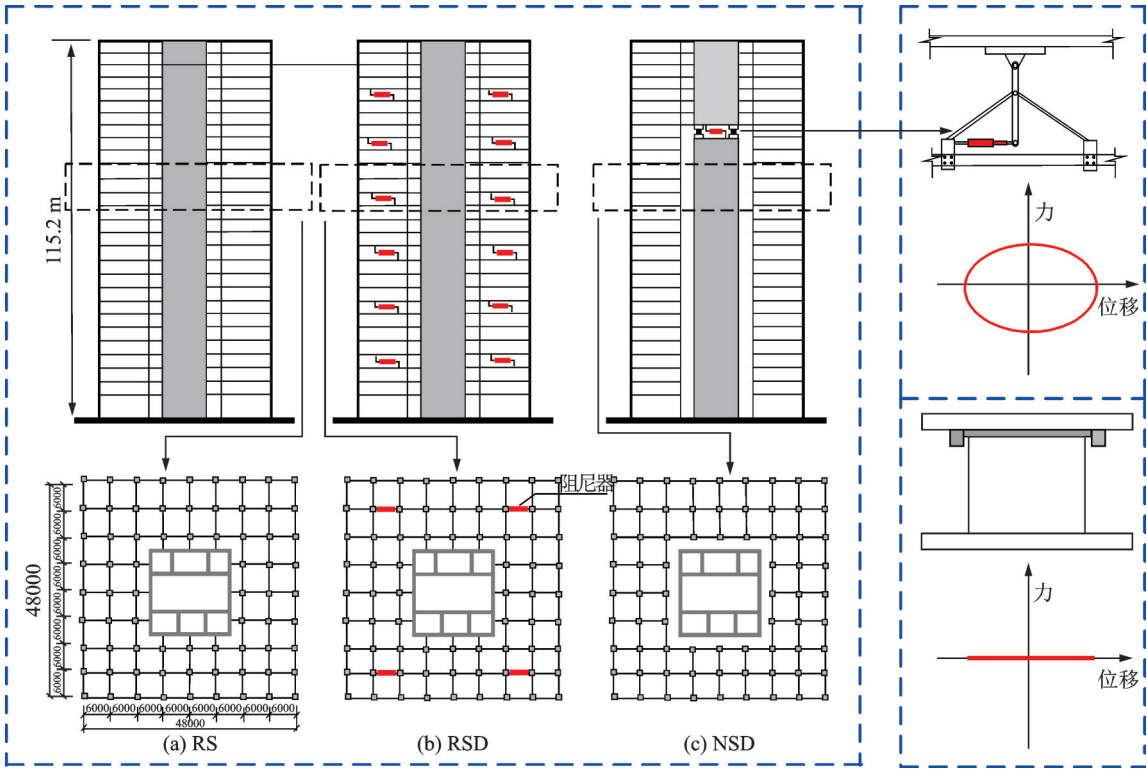


图 8 结构模型图

Fig. 8 Structural model diagram

本方案中均采用带位移放大装置的黏滞阻尼器,利用位移放大装置增加阻尼器的行程和运动速度,利用黏滞材料的阻尼特性来耗散地震能量。阻尼器参数包括:阻尼系数、阻尼指数。此次计算中的阻尼系数取 $500\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.45}$,阻尼指数取 0.45。位移放大装置放大系数为 3,RSD 减震结构的阻尼器布置遵循“四周、均匀、分散、对称”的原则,阻尼器均匀布置在传统的框架剪力墙结构上,NSD 减震结构在耗能减震层处楼层的相对位移和速度较大,故将阻尼器布置于耗能减震层处。各阻尼器均附加在结构 X 向,不同方案的阻尼器参数如表 5 所示。

表 5 阻尼器参数
Tab. 5 The parameters of the dampers

模型	阻尼系数/ [kN·(m·s ⁻¹) ^{0.45}]	阻尼 指数	布置楼层	数量
RSD	500	0.45	第 25,22,19,16, 13,10,7,4 层	48 个
NSD	500	0.45	第 26 层减震层	4 个

4.2 地震波的选择

时程分析法是对建筑结构的运动微分方程直接进行逐步积分求解的一种动力分析方法。由时程分析可以计算得到结构在任意时刻的位移、速度和加速度反应。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[15]5.1.2 条规定:采用时程分析法时,应按建筑物场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线,其中实际强震记录的数量不应少于总数的 2/3。多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符。本工程时程分析时共选用了 7 条时程曲线,5 条实际强震记录和 2 条人工模拟的加速度时程曲线,7 条时程反应谱与规范反应谱曲线对比如图 9 所示。

5 结构响应

5.1 楼层响应图

传统的框架-核心筒结构(RS)与框架-核心筒结

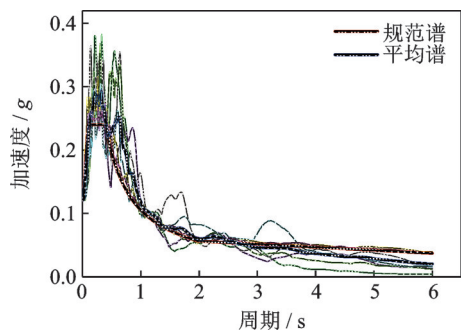


图9 时程反应谱与规范反应谱对比

Fig. 9 Comparison between time history response spectrum and standard response spectrum

构阻尼器传统布置(RSD)、聚合耗能结构(NSD)在相同的7条地震波作用下分别进行了动力时程分析,对三个模型的楼层位移、层间位移角、楼层加速度和层间剪力等地震响应取平均值进行对比,如图10所示,以考察聚合阻尼结构的减震性能。

图10可以看出各减震指标中,有控结构(RSD, NSD)均优于无控结构(RS),说明有控结构可以明显地降低建筑在地震作用下的响应,达到消能减震的效果。

图10(a)给出三个结构层间位移平均值沿楼层的分布规律曲线。可以看出,在设防地震作用下,RS,RSD与NSD的外框架层位移相差不大,楼层位

移的变化规律相同,曲线比较平滑,NSD的核心筒在减震层处有明显的位移差。NSD中黏滞阻尼器为结构提供附加阻尼比,起到了减震作用,减震层处由于刚度的突变导致其层位移也发生突变,而其他楼层刚度均匀,楼层位移连续变化。

图10(b)给出三个结构层间位移角平均值沿楼层的分布规律曲线,除NSD结构外框架在底部第6层以外,其余部分的层间位移角均小于RSD结构,聚合阻尼结构核心筒在第26层的层间位移角用虚线表示,因为此层为耗能减震层,核心筒在此部分结构上不连续。

图10(c)给出三个结构加速度平均值沿楼层的分布规律曲线。可以看出,NSD对其外框架与核心筒均有良好的减震效果,NSD外框架部分加速度响应小于RSD,NSD核心筒部分除第25层阻尼层和底部3层之外,加速度响应也均小于RSD,可以看出聚合阻尼结构在加速度的控制方面明显优于传统的框架核心筒结构。

图10(d)给出三个模型楼层剪力平均值沿楼层的分布规律曲线。可以看出,对于楼层剪力的控制,NSD优于RSD,聚合阻尼结构可以有效控制结构的楼层剪力,降低结构所受的地震力,在最大楼层剪力处,有控结构比无控结构减小幅度达到41.4%。

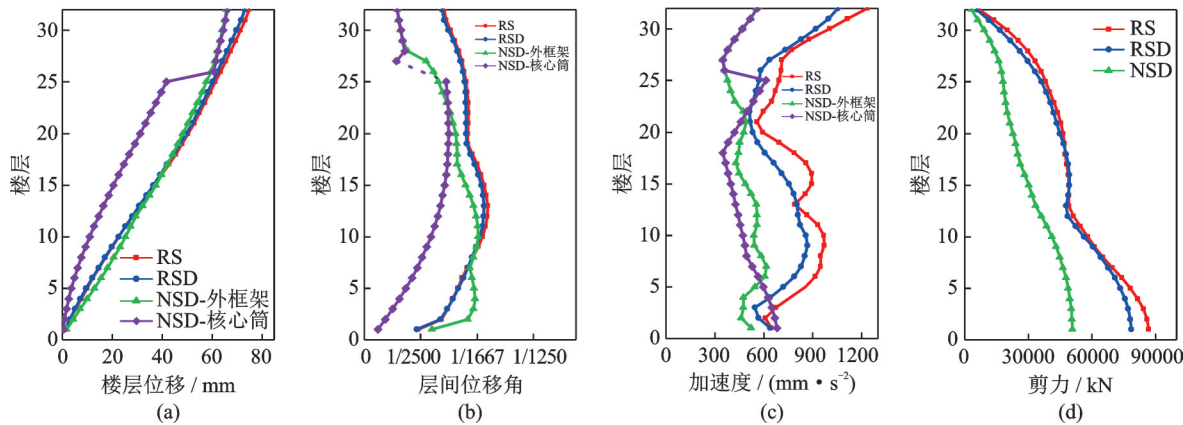


图10 楼层响应图

Fig. 10 Floor response diagram

图11(a)给出三个结构顶层位移的时程图,RS与RSD在同一时间(9.12 s)分别达到其位移最大值

76.00 mm和74.76 mm,NSD在12.88 s达到位移最大值66.96 mm;RSD与NSD相对于RS,其顶层位移分

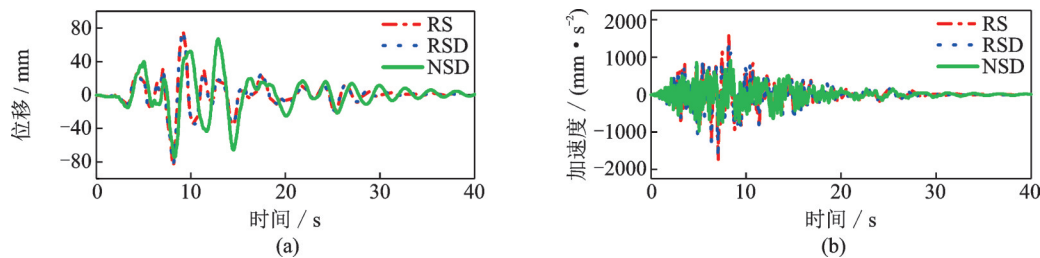


图11 结构时程曲线对比

Fig. 11 Comparison of time history curves of structures

别减小了1.6%和13.2%。图11(b)给出三个结构顶层加速度的时程图,三个结构的顶部最大加速度分别为1667.85,1423.08,904.98 mm/s²,RSD与NSD相对于RS,其顶层最大加速度分别减小了14.6%和45.7%。

5.2 结构耗能

取RSD在第25层的K63阻尼器和NSD在减震层处的K3阻尼器,绘制El-Centro波作用下荷载-位移曲线如图12(a),(b)所示。由RSD与NSD阻尼器单元的荷载-位移曲线看出,滞回曲线为典型速度相关型阻尼器耗能过程,且呈不规则椭圆形状,滞回

环饱满,表现出良好的消能减震性能。K63阻尼器变形幅值为3.36 mm,最大出力为86 kN;而K3阻尼器的变形幅值为166 mm,最大出力为320 kN。可以看出,聚合阻尼结构的减震层在地震作用下阻尼器变形增大,黏滞阻尼器产生的阻尼也增大,消耗大量输入结构的地震能量而保护主体结构安全,使结构达到“小震经济、中震不坏、大震可修”的抗震设计目标。图12(c),(d)给出了RSD和NSD在El-Centro波作用下的能量时程曲线。从图中可以看出,NSD虽然布置了较少的阻尼器,但是相对于RSD,其非线性黏滞阻尼器耗能占有很大比例,耗能作用突出。

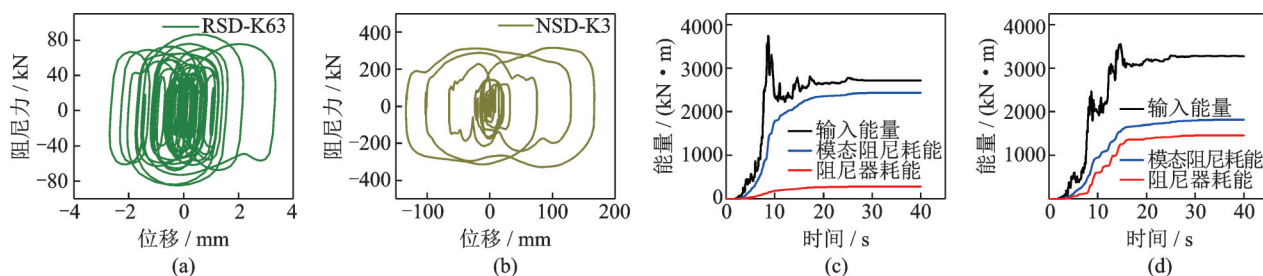


图12 结构耗能图

Fig. 12 Energy consumption diagram of structures

6 结论

本文提出了一种聚合阻尼耗能结构,构建了该结构的理论模型。对布置在其中的耗能装置位移放大黏滞阻尼器进行了理论分析以及模型试验。最后进行了聚合阻尼结构的地震响应分析,得到主要结论如下:

(1) 聚合阻尼耗能结构体系相比与传统的框架剪力墙结构,其在减震层处的位移差较大,是传统框架剪力墙结构层间位移差的数倍。

(2) 构建了位移放大阻尼器的力学模型,完成了3倍放大阻尼器和普通阻尼器的性能对比试验,试验滞回曲线与理论预测基本吻合,SDA的峰值出力为VD的4.60~5.71倍,耗能为VD的4.73~5.26倍。

(3) 对传统的框架-核心筒结构、传统框架-核心筒结构附加阻尼器耗能装置、聚合阻尼结构附加耗能装置进行地震响应分析,NSD结构在阻尼减震层处有较大的层间位移差,附加48组阻尼器的RSD结构的减震效果不及附加4组阻尼器的NSD结构,相比于传统框架-核心筒结构,聚合阻尼结构能有效耗散地震能量,降低楼层剪力,减小结构地震响应(位移、加速度),表现出优秀的抗震性能。

参考文献:

- [1] 阎维明,周福霖,谭平. 土木工程结构振动控制的研究进展[J]. 世界地震工程, 1997, 13(2): 8-20.
Yan Weiming, Zhou Fulin, Tan Ping. Development of vibration control for civil engineering structures[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1997, 13(2): 8-20.
- [2] 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等. 汶川M_s8.0地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597-629.
Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jianqing, et al. Wenchuan M_s8.0 earthquake surface rupture zones and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 597-629.
- [3] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.
Yin Yueping. Research on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444.
- [4] Soong T T, Dargush G F. 结构工程中的被动耗能系统[M]. 董平,译. 北京: 科学出版社, 2005.
Soong T T, Dargush G F. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering[M]. Dong Ping, Translated. Beijing: Science Press, 2005.
- [5] 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
- [6] Zhang R H, Soong T T. Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992, 118(5): 1375-1392.
- [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 dampers in high rise buildings[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(4): 135-140.
- [8] 徐景洪, 包海念, 姜程曦, 等. 位移放大型阻尼器研究进展[J]. 建筑结构, 2020(S2): 318-321.
- Xu J H, Bao H N, Jiang C X, et al. Progress in the re-search of displacement-discharging dampers [J]. Building Structures, 2020(S2): 318-321.
- [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[A]. 第一届全国结构控制会议论文集[C]. 承德. 1998.
- Chen Yueming, Liu Ji. Experimental study on lever vis-coelastic damper and controlled structure[A]. Proceedings of the First National Conference on Structural Control[C]. Chengde. 1998.
- [10] Constantinou M C, Tsopelas P, Hammel W, et al. Toggle-brace-damper seismic energy dissipation system [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(2): 105-112.
- [11] Ribakov Y, Reinhorn A M. Design of amplified struc-tural damping using optimal considerations [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129 (10) : 1422-1427.
- [12] Berton Stefano, Bolander J E. Amplification system for supplemental damping devices in seismic applications [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 131(6): 979-983.
- [13] Watakabe Tomoyoshi, Fujita Satoshi. Research and de-velopment of vibration control device suitable for de-tached houses by using displacement amplification mech-anism [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2009, 3(3): 368-379.
- [14] 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. Dy-namic tests and numerical response analysis of new ener-gy dissipated structures with displacement amplification damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28 (4): 601-609.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规-范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Developmet, PRC. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture and Buiding Press, 2010.

Theoretical model and seismic responses of structure equipped with concentrated damping system

HE Wen-fu¹, XU Yun-lin¹, DAI Liu-si¹, SHANG Feng¹, TAKAFUMI Miyama²

(1.School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2.Department of Architecture and Space Design, Tezukayama University, Nara 631-8585, Japan)

Abstract: Due to the small interlayer displacement of the high-rise frame shear wall structure system under earthquake, the damper is difficult to play a good role in energy dissipation. Based on the deformation characteristics of core tube and peripheral frame structure, a high efficiency displacement amplification damper (SDA) is set at the position where the deformation of the core tube of the frame is concentrated, and a new energy dissipation structure with damping concentration system (NSD) is proposed. The energy dissipation mechanical properties of SDA are analyzed, and the damping force and energy dissipation theoretical formulas of the ordinary viscous damper (VD) and SDA are proposed. SDA with magnification of 3 times and VD are designed and fabricated, and the reciprocating loading test is carried out under the action of sine wave, the hysteretic energy dissipation curves of viscous dampers under different test conditions are analyzed. The theoretical curves are compared with the test curves to verify the correctness of the mechanical model. Comparing the energy dissipation effects of SDA and VD, it is concluded that under the same displacement, SDA has a fuller hysteresis curve and more significant energy dissipation than VD. Further, the seismic response of a NSD is analyzed, the results show that the NSD has good damping performance compared with the traditional structure.

Key words: shear wall structure system; damping concentration; energy dissipation storey; seismic response; displacement amplifying

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

通讯作者: 戴柳丝(1989—),女,博士,副教授。电话:13817858238; E-mail: liusidai@shu.edu.cn。