

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.016

黏滞与金属阻尼器协同工作于 加固工程的减震性能研究

白丹阳¹, 陈道政^{1,2}, 王鹏程¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:文章基于现有黏滞阻尼器和金属阻尼器的研究,以安徽某住院门诊楼实际加固项目为研究对象,提出单独布置黏滞阻尼器、单独布置金属阻尼器、混合布置黏滞与金属阻尼器的 3 种加固方案;开展各方案在多遇和罕遇地震下的动力时程分析,综合减震前后层间位移、最大加速度等参数,研究黏滞阻尼器和金属阻尼器协同工作减震性能的优劣;基于协同工作方案进一步分析加固后的能量耗散情况以及阻尼器滞回曲线,研究其在实际工程中的具体减震效果。结果表明:2 种阻尼器同时应用于加固工程时,合理的混合布置方案对结构的减震效果有显著提升,并且可以利用 2 种阻尼器的耗能特性实现分阶段耗能,耗能表现优异。

关键词:黏滞阻尼器;金属阻尼器;消能减震;时程分析;加固方案

中图分类号:TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)02-0246-06

An investigation of damping performance of co-working of viscous and metal dampers in reinforcement engineering

BAI Danyang¹, CHEN Daozheng^{1,2}, WANG Pengcheng¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: Based on the existing research on viscous dampers and metal dampers, taking the actual reinforcement project of an inpatient and outpatient building in Anhui Province as the research object, this paper puts forward three reinforcement schemes, namely separate arrangement of viscous dampers, separate arrangement of metal dampers and mixed arrangement of viscous and metal dampers. The dynamic time history analysis of each scheme under frequent and rare earthquakes is carried out, and the parameters such as inter-story displacement and maximum acceleration before and after damping are integrated, exploring the advantages and disadvantages of the damping performance of viscous damper and metal damper working together. Finally, based on the cooperative work scheme, the energy dissipation after reinforcement and the hysteretic curve of damper are further analyzed to explore its specific damping effect in practical engineering. The results show that when the two dampers are applied to the reinforcement engineering at the same time, the reasonable mixed arrangement scheme can significantly improve the seismic mitigation effect of the structure, and can make full use of the energy dissipation characteristics of the two dampers to achieve phased energy dissipation, with excellent energy dissipation performance.

Key words: viscous damper; metal damper; seismic energy dissipation; time history analysis; reinforcement scheme

收稿日期:2022-04-22;修回日期:2022-05-30

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本业务费专项资助项目(2020EEEVL0417)

作者简介:白丹阳(1998—),男,安徽肥东人,合肥工业大学硕士生;

陈道政(1964—),男,安徽肥东人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

随着消能减震技术的不断发展,阻尼器的种类和布置方式也日渐繁多,在既有建筑的加固改造中应用十分广泛。常见的阻尼器按耗能机理的不同分为速度相关型和位移相关型2种,速度型相关阻尼器的耗能能力与流体挤压或剪切速率密切相关,速度越大时,耗能能力越强,主要有黏滞阻尼器、油阻尼器、黏弹性阻尼器等类型。位移相关型阻尼器的耗能能力与材料屈服后的高延性变形相关,主要有金属阻尼器、摩擦阻尼器等类型。

本文选取速度型阻尼器中具有代表性的杆式黏滞阻尼器和位移型阻尼器中的金属软钢阻尼器进行研究。黏滞阻尼器和金属阻尼器在多遇和罕遇地震下的敏感程度不同,耗能机理也有差别。金属阻尼器在多遇地震下以提供刚度为主,加速度控制有限;罕遇地震下其结构充分屈服而耗能,加速度控制效果增强^[1]。黏滞阻尼器在小震下即可滞回耗能,为结构提供附加阻尼且近乎不提供附加刚度。现有研究已知结构采用相同的布置方式时,黏滞阻尼器的减震效果明显优于金属阻尼器^[2],但黏滞阻尼器价格和维护成本均高于金属阻尼器,因此研究两者组合作用和单一作用于结构时的减震性能差异对降低结构抗震经济支出及结构抗震性能优化有很大意义。本文以安徽某住院门诊楼实际加固项目为研究对象,利用ETABS软件建立布置2种不同阻尼器的3种方案的结构模型,并将3种方案分别进行多遇和罕遇地震下的动力时程分析,对比分析各方案的减震性能差异,并进一步分析混合布置方案的能量耗散情况,评价其在实际工程的具体减震效果。

1 阻尼器的介绍及工作原理

黏滞阻尼器是一种工程中常用的减震装置,由缸筒、黏滞液体、活塞、导杆以及阻尼孔组成^[3]。导杆与外部控制器相连,当外部结构发生振动时,导杆引导活塞在缸筒腔体内作往复运动,在这个过程中黏滞液体通过阻尼孔在活塞两侧自由流动,产生阻尼力,将动能以热能形式耗散。

金属阻尼器主要由各种金属材料制造而成,如软钢、低屈服点钢和铅以及形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)等,其耗能减震原理是将阻尼器与主体结构连接的支座视为刚性域,使阻尼器只存在剪切变形^[4]。在小震作用下,金属阻尼器处于弹性工作阶段,可以为结构提供附加刚度,但是不会吸收能量。在大震作用下,金属阻尼器会在主体结构发生塑性变形前进一步屈

服,而后进入弹塑性工作阶段,通过滞回变形去消耗地震动输入的能量^[5]。

2 工程概况与减震方案

2.1 工程概况

本工程为安徽某医院门诊住院楼,原为高层厂房(未竣工验收),现被收购作为门诊住院楼,地上15层,地下1层,建筑高度为60.5m,框架-剪力墙结构,一层层高4.2m,其余层高4.0m,抗震设防为7度,设计地震分组为第1组,设计基本地震加速度为0.10g,建筑场地类别为二类,设计特征周期为0.35g。本项目属改建医院医疗建筑,按照我国《建筑工程抗震设防分类标准》中的相关规定,加固后建筑物根据其使用功能归为乙类建筑,设防类别从原厂房建筑对应的标准设防提升至重点设防,需要按建筑所在地的地震设防烈度提高一度的标准进行抗震措施的加强,另外,依据地方建设主管部门要求,乙类建筑设计基本地震加速度值提高一档,取为0.15g。

2.2 减震加固方案

本工程由于使用功能的改变使得建筑物从丙类厂房更新为乙类医院,相应的框架和剪力墙抗震等级从二级提高至一级,采用传统的对结构构件直接加固的方法难以解决抗震构造措施不满足新要求的问题,如锚固长度不足、箍筋直径偏小等。同时,既有结构设计采用基本地震加速度值为0.10g,现改造后使用值为0.15g,较原来有显著增大,仅通过增大构件截面、外包型钢、粘贴钢板等方法进行加固设计,工程量大、工期长、成本高、加固效果不明显,而且会影响建筑的正常使用。因此本工程选择采用减震加固方案,结合建筑更新后的使用功能,在合适的位置布置阻尼器,从能量原理上通过提高结构阻尼比,减小主体结构在地震作用下的振动响应,控制结构的预期变形,大幅度提高抗震性能。

根据金属阻尼器以及黏滞阻尼器工作原理,并结合原结构动力特性,为研究2种阻尼器布置方式对减震性能的影响,提出以下3种加固方案:

- 1) 方案1。采用逐层均匀布置的方法,在1~15层均布置黏滞阻尼器。
- 2) 方案2。1~15层均布置金属阻尼器。
- 3) 方案3。1~15层每层混合布置黏滞与金属阻尼器。

以上3个方案阻尼器的层内平面布置应沿结构2个主轴方向(X、Y方向)均匀设置,使结构在

2 个主轴方向的动力特性相近。其中,方案 3 的确定原则为:位移型消能部件宜设置在变形较大的位置,采用试算的方式确定金属阻尼器的布置楼层。首先对原结构进行反应谱分析,确定层间位移角最大的楼层为 7 层,将阻尼器布置于该楼层;其次对布置了金属阻尼器的结构进行反应谱分析,确定层间位移角最大的楼层为 5 层,将阻尼器布置于该楼层,再按此方法,依次迭代布置金属阻尼器。速度型消能部件宜布置于层间相对速度较大的楼层,通过对上述设置了金属阻尼器的结构进行时程分析,确定相对速度较大的楼层为顶层及其相邻楼层,同时金属阻尼器对楼层提供附加刚度,从而增大了楼层刚度,导致设置阻尼器楼层的上部楼层速度增大,增大地震反应。因此将黏滞阻尼器布置于这些楼层。

在本工程中,为使阻尼器加装最小程度影响原结构的空 间使用,金属阻尼器和黏滞阻尼器设计均采用墙式连接安装在新建隔墙内部,新建隔墙长度设计值为 1 500 mm,厚度为 200 mm,高度同层高,占用空间小且便于维护,如图 1 所示。当采用墙式连接时,位移型阻尼器可优先布置在靠近柱边位置,速度型阻尼器可优先布置在跨中位置。最终得

到阻尼器的标准层平面布置图,如图 2 所示。

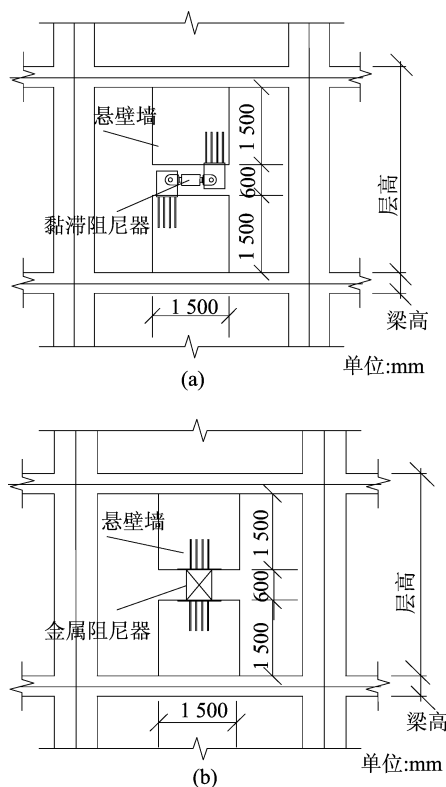


图 1 2 种阻尼器墙式连接示意图

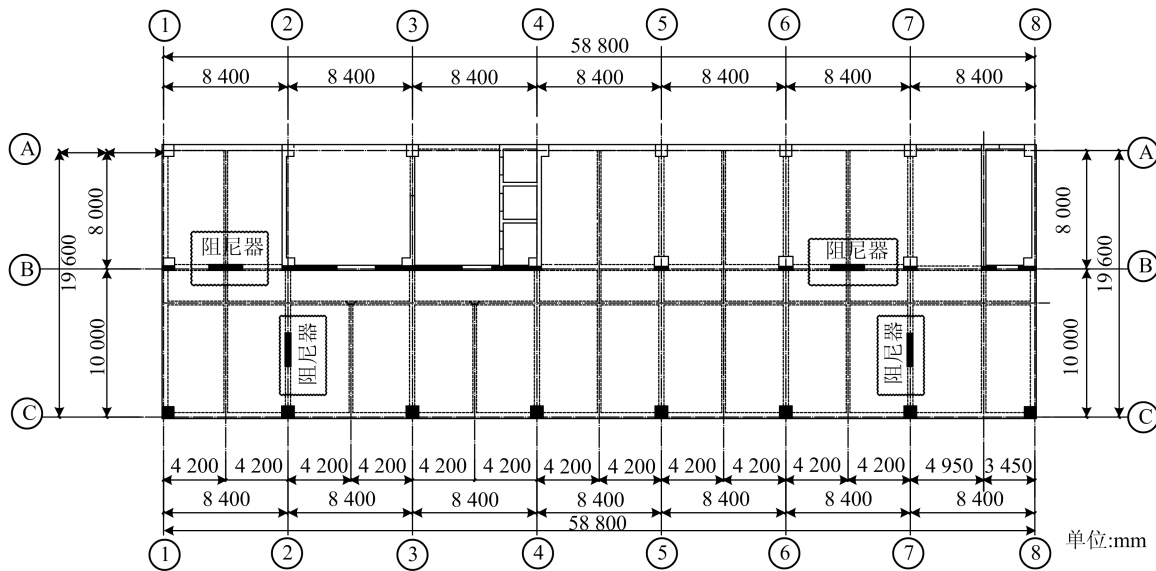


图 2 阻尼器标准层平面布置图

2.3 阻尼器参数选取

黏滞阻尼器参数见表 1 所列。

方向	每层数量	阻尼指数 $C/(kN \cdot s/m)$	阻尼指数 α
X 方向	2	1 500	0.3
Y 方向	2	2 000	0.3

金属阻尼器参数见表 2 所列。

方向	每层数量	初始刚度 $K_d/(kN/m)$	屈服后刚度比	屈服指数
X 方向	2	620 000	0.02	10
Y 方向	2	620 000	0.02	10

3 有限元模型的建立与分析

3.1 ETABS 模型的建立与地震波的选取

根据原结构的构件信息和主要参数,在 ETABS 软件中先建立不布置阻尼器的原结构弹性模型,其中,梁柱构件、楼板、剪力墙分别采用框架单元、膜单元和薄壳进行模拟,并进行属性修正和刚度折减。因为本工程地下室周边土层条件良好,地下室顶板满足作为上部结构嵌固端的条件,所以忽略地下室对于上部结构分析计算的影响,建模只保留地上结构 1~15 层。原结构的弹性分析 ETABS 模型如图 3 所示。

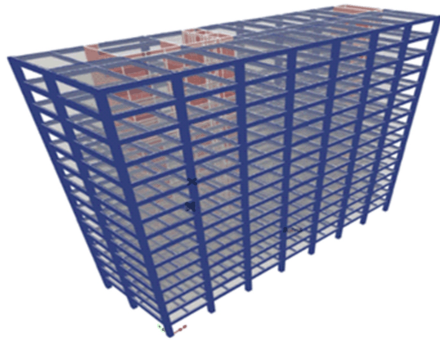


图 3 原结构的 ETABS 模型

根据以上 3 种布置方案用 ETABS 分别建立不同的减震模型,其中黏滞阻尼器连接类型采用基于 Maxwell 模型^[6]的 Damper · Exponential,金属阻尼器的连接类型采用 Plastic(Wen)单元。

采用时程分析时,根据本工程场地土及地震信息等条件,拟采用 RSN40 地震波输入,其加速度峰值为 1 cm/s^2 ,时间间隔为 0.005 s 。通过对波在频域内的综合调整,将多遇地震下加速度时程峰值调到 55 cm/s^2 ,罕遇地震加速度时程最大值调至 310 cm/s^2 ,使得其地震加速度时程峰值与文献[7]相对应的时程分析所用地震加速度时程的最大值一致。

3.2 模态分析

对原结构模型进行模态分析,原结构前 3 阶振型分别为 X 方向平动、Y 方向平动和扭转振型,自振周期分别为 1.355 、 1.335 、 1.176 s ,计算得周期比为 $1.176/1.355=0.867 < 0.9$,且结构 X、Y 方向质量参与系数累计之和分别为 97.6% 、 96.8% ,均大于 90% ,满足规范中对结构有效质量系数的要求。综上所述,可以认为原结构模型性能反应合理。

3.3 多遇地震下时程分析

多遇地震下采用快速非线性时程分析法进行分析,3 种方案在 RSN40 地震波作用下加固前后最大层间位移角及楼层总位移结果见表 3 所列。

表 3 最大层间位移角、总位移

方案	最大层间位移角/rad		总位移/mm	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
原结构	1/1 257	1/1 041	303.17	296.62
方案 1	1/3 363	1/2 764	108.38	114.07
方案 2	1/1 600	1/1 497	236.18	206.71
方案 3	1/3 176	1/2 625	112.27	124.04

在地震波作用下原结构和 3 种方案在 X、Y 方向的各层层间位移角变化趋势如图 4 所示。

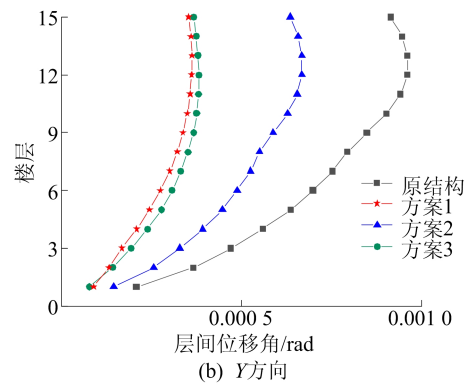
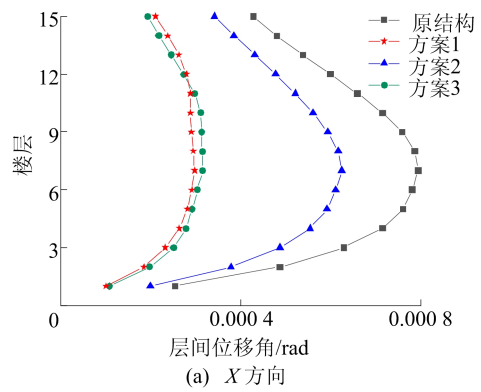


图 4 多遇地震地震波作用下层间位移角的变化

由表 3 可知,相比原结构,3 种方案的楼层最大层间位移角和楼层总位移都有显著降低,其中方案 1 的层间位移角降幅最大,方案 2 降幅最小,方案 3 介于方案 1 和方案 2 之间,且与方案 1 更为接近。这是由于在小震作用下,黏滞阻尼器可立即启动耗能,而金属阻尼器却无法屈服耗能,只能为结构提供刚度。混合布置黏滞与金属阻尼器既可以增大结构刚度,又能保证结构在小震下也产生耗能。因此在多遇地震下,方案 2 的减震效

果不如方案 1、方案 3。混合布置方案下在 X、Y 方向最大层间位移角相比原结构分别降低 60.41%、60.31%。

3.4 罕遇地震下时程分析

罕遇地震下采用弹塑性时程分析进行分析,在 RSN40 地震波作用下,得到其层间位移角变化如图 5 所示。

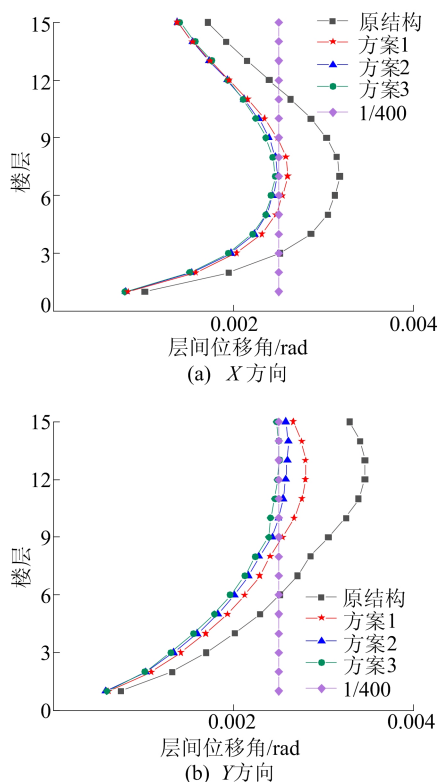


图 5 罕遇地震地震波作用下层间位移角的变化

从图 5 可以看出,3 种方案在罕遇地震下的减震效果十分突出,但方案 1 降低层间位移角的能力要低于方案 2、方案 3。另外,方案 1 在 2 个方向的最大层间位移角均超过规范规定的 1/400 限值,方案 2 在 Y 方向不满足,只有方案 3 在 2 个方向均达到目标要求,减震性能最优。这是由于在罕遇地震下,金属阻尼器可以充分屈服耗能,而黏滞阻尼器虽然也可进行耗能,但无法提供额外刚度。因此 2 种阻尼器混合布置的方案既能进行充分耗能,又能为结构提供一定的刚度,减震效果更为优越。

地震作用时,结构的最大加速度直接影响到建筑的振动响应^[8],最大加速度越小,高层建筑舒适度越高,结构性能越好^[9]。3 种方案在罕遇地震下结构最大加速度见表 4 所列。由表 4 可知,相比于原结构,方案 1、方案 3 的顶点最大加速度

明显减少,且降幅较为接近。方案 3 在 X、Y 方向减震率分别达到 23.9%、25.1%。

由以上分析可知,无论在多遇还是罕遇地震下,方案 3 都有很优越的减震效果,因此在同层混合布置 2 种阻尼器,可以充分发挥 2 种阻尼器的各自作用,使得其不同阶段各尽其能,达到最佳的减震效果。

表 4 顶点最大加速度 单位:m/s²

方案	X 方向	Y 方向
原结构	5.21	5.54
方案 1	3.92	4.13
方案 2	4.50	4.63
方案 3	3.96	4.15

4 结构耗能减震特性研究

4.1 附加等效阻尼比的计算

在减震结构的设计和研究中,常用等效阻尼比表示减震装置对结构减震耗能作用的大小。本工程采用累积能量比值法计算消能部件对结构附加的等效阻尼比^[9],累积能量比值法计算原理是通过结构固有阻尼比、对应的能量耗散大小和所有阻尼器耗散能量大小,来推算结构的附加等效阻尼比 ξ_a ,计算公式如下:

$$\xi_a = \frac{\omega_d}{\omega_1} \xi_1$$

其中: ω_d 为阻尼器耗能; ω_1 为模态耗能; ξ_1 为模态阻尼比。

通过 ETABS 导出的能量数据可得混合布置方案下的结构在 RSN40 地震波下模态阻尼总耗能 X 方向为 113.7 kN·m、Y 方向为 121.5 kN·m;阻尼器总耗能 X 方向为 152.63 kN·m、Y 方向为 117.93 kN·m。 ξ_1 取 0.05,进一步计算附加阻尼比 X 方向为 6.7%、Y 方向为 5.0%。由于本工程结构形状规整,可取 X、Y 方向中的较小值作为阻尼器为结构提供的 ξ_a ,即 ξ_a 为 5.0%。

4.2 罕遇地震下阻尼器滞回曲线

为了考察阻尼器在罕遇地震下的性能表现,分别选取 1 个黏滞阻尼器和 1 个金属阻尼器的滞回曲线进行分析,如图 6 所示。

由图 6 可知,金属阻尼器的滞回曲线呈“梭”字型,阻尼器最大出力 100 kN 左右,最大位移约 30 mm;黏滞阻尼器呈“回”字型,阻尼器最大出力为 600 kN 左右,最大位移约 8 mm。2 种阻尼器位移均未超过楼层最大位移限值,证明 2 种阻尼

器在罕遇地震中依旧可以起到很好的耗散能量的作用,保护主体结构。

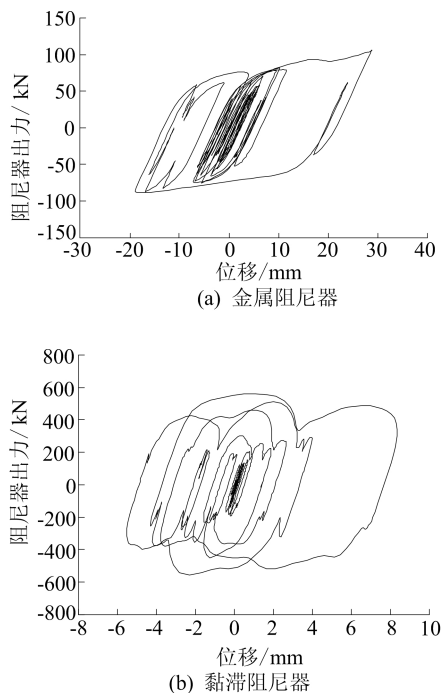


图6 RSN40波下阻尼器的滞回曲线

5 结 论

本文以实际工程为依托建立计算模型,分析金属阻尼器和黏滞阻尼器同时应用于框架-剪力墙结构加固时的减震性能,对比混合布置方案与单一阻尼器布置方案在多遇地震及罕遇地震下的层间位移角变化,并对混合布置方案下的结构进行耗能分析,得出以下结论:

1) 无论在多遇还是罕遇地震作用下,结构附加金属阻尼器或是黏滞阻尼器后以层间位移角为代表的位移指标均有显著减小,在多遇地震下,单独布置黏滞阻尼器的减震效果明显优于单独布置金属阻尼器;罕遇地震下,单独布置金属阻尼器的减震效果略优于单独布置黏滞阻尼器。

2) 在实际工程中,黏滞阻尼器和金属阻尼器可以很好地协同工作,利用振型分解反应谱法对

结构进行弹性地震响应分析,得到各个楼层层间变形模式和速度分布模式,按照层间变形和速度的分布混合布置阻尼器和设定参数可以使两者协同工作的减震效果优于单独布置某一种阻尼器。

3) 在同层混合布置黏滞与金属阻尼器,可以实现在多遇地震下,黏滞阻尼器进行耗能,金属阻尼器提供结构刚度;在罕遇地震下,金属阻尼器提供刚度的同时充分屈服与黏滞阻尼器协同耗能,从而达到分阶段耗能联合减震的目的。本工程中采用混合布置方案后,在多遇地震下可实现约60%的层间位移降幅,在罕遇地震下可降低约25%的最大加速度,且可以达到规范规定的最大层间位移控制目标。进一步分析此方案,可知其在多遇地震下可提供5%的附加等效阻尼比,在罕遇地震下阻尼器滞回曲线饱满,能量耗散表现优异。

[参 考 文 献]

- [1] 马乐阳. 位移相关型和速度相关型阻尼器耗能特征对比研究[J]. 安徽建筑, 2017, 24(1): 88-91.
- [2] 马腾飞. 金属阻尼器与黏滞阻尼器兼用结构的减震性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- [3] 丛戎. 既有RC框架基于黏滞阻尼器的抗震加固设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [4] 庞博士. 金属阻尼器在框架剪力墙结构中的应用研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2021.
- [5] 杨明飞, 徐赵东. 金属阻尼器的试验研究与应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2014, 34(3): 1-5.
- [6] 魏琰, 郑久建, 韦承基. 论黏滞阻尼器减震结构及其抗震设计方法[J]. 建筑结构, 2004, 34(10): 10-16.
- [7] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 60-72.
- [8] 陈道政, 黄冬冬. 基础隔震与黏滞阻尼器减震性能对比研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(24): 58-62, 73.
- [9] 王扬帆, 陈道政. VDW在框架结构中的减震性能分析及工程应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 259-266.

(责任编辑 张 镛)