

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.09.019

# 黏滞阻尼器和隔震支座加固既有房屋的抗震性能对比

汪会<sup>1</sup>, 王伟强<sup>2</sup>, 陈道政<sup>1,3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037; 3. 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:**文章以某 6 层框架结构为例, 选取与场地条件相匹配的地震波作为激励, 在 ETABS 结构分析软件中建立原结构、布置黏滞阻尼器、布置隔震支座、混合布置黏滞阻尼器与隔震支座 4 个有限元模型。首先通过试算确定黏滞阻尼器和隔震支座的型号、数量与布置, 使 2 种结构在多遇地震作用下的最大水平位移相近。在此基础上对比分析 4 个模型在地震作用下的层间位移角、层间剪力、最大加速度等地震响应, 比较 2 种构件的加固效果。分析结果表明, 框架结构中基础隔震对结构地震反应的控制效果优于黏滞阻尼器, 而两者混合布置使用能进一步提高加固性能。

**关键词:**框架结构; 黏滞阻尼器; 隔震支座; 时程分析; 滞回曲线

**中图分类号:** TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)09-1283-07

## Comparative analysis of seismic performance of existing building reinforced with viscous damper and seismic isolation bearing

WANG Hui<sup>1</sup>, WANG Weiqiang<sup>2</sup>, CHEN Daozheng<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Taking a six-layer frame structure as an example, this paper selects seismic waves that match the site conditions as the excitation, and establishes four finite element models in the ETABS structural analysis software: the original structure, the structure with viscous damper, the structure with seismic isolation bearing, and the structure integrating viscous damper and seismic isolation bearing. The type, number and arrangement of viscous damper and seismic isolation bearing are determined by trial calculation to achieve comparable maximum horizontal displacements under the action of frequent earthquakes. On this basis, the seismic response of the four models such as interlaminar displacement angle, interlaminar shear force and maximum acceleration under the action of earthquake is compared and analyzed, and the reinforcement effect of the two components is compared. The analysis results show that the control effect of base seismic isolation on the seismic response of frame structure is better than that of the viscous damper. The hybrid arrangement of the two can further improve the reinforcement performance.

**Key words:** frame structure; viscous damper; seismic isolation bearing; time history analysis; hysteresis curve

在我国现在使用的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(简称抗震规范)中对一般建筑的具体设防要求是“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”。

但是地震能量作用到建筑上的分配方式与刚度有关, 刚度越大的结构受到地震作用越大, 结构刚度小, 便会分配到较小的地震作用。如果提高建筑

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-07-10

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(2020EEVL0417)

作者简介: 汪会(1999—), 男, 安徽黄山人, 合肥工业大学硕士生;

陈道政(1964—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: cdztai@163.com.

物的抗震承载力,就要对梁柱的截面进行加大,容易增加结构的刚度,增大结构受到的地震作用,造成恶性循环。因此,近年来抗震防灾方式开始从“抗”逐渐向隔震和消能减震方向发展。其中隔震技术是一种新型的建筑结构消能减震的方式,该技术是在建筑基础与上部结构之间或上部结构的某一层柱的顶部设置隔震装置,减少地震作用向上部结构传递的能量,从而削弱地震作用对建筑结构的影响<sup>[1]</sup>。与传统抗震技术相比,隔震技术有建筑物震后损坏小、防护对象多、适用范围广、更加经济等明显的优势。黏滞阻尼器是一种速度相关型消能阻尼器,其作用原理是利用黏滞材料运动时产生的黏滞阻尼耗散能量,主要由缸体、活塞和黏滞材料组成。黏滞阻尼器主要是为结构提供一定的附加阻尼比,减小结构承受的地震作用。通过对消能减震装置进行设计计算,提高结构的总阻尼比到预定值从而有效减小结构振动,并且在不同的激励频率下也能发挥良好效果,同时黏滞阻尼器并不会影响结构的总体刚度。

目前,我国对黏滞阻尼器和基础隔震技术的研究和使用也逐渐成熟。文献[2]研究某隔震结构的抗震性能,发现结构位移主要集中在隔震层,从而降低上部结构位移;文献[3]研究基础隔震的隔震层参数选取等问题,表明橡胶隔震支座的隔震性能与支座的初始刚度及屈服刚度比密切相关;文献[4]研究针对黏滞阻尼器减震结构的一种实用设计方法,给出具体的设计流程和内容的框架;文献[5]研究黏滞阻尼器加固的多层框架结构,在地震作用下其层间位移角和层间剪力都显著降低,可有效增强结构的安全性能。

本文以某实际框架结构为研究对象,选取黏滞阻尼器和隔震支座展开研究。通过调整 2 种构件的参数和布置,使其在多遇地震下采用 2 种减震方案的结构相对于原结构减少的结构最大位移相等,在此基础上对比分析结构在多遇和罕遇地震作用下的楼层剪力、层间位移角等地震响应,总结 2 种构件抗震效果,为结构减震设计提供参考。

## 1 工程概况及布置方案

### 1.1 工程概况

本工程为某实际加固改造项目,该楼为 6 层现浇钢筋混凝土框架结构。该结构的底层层高为 5.0 m,标准层层高 3.6 m。柱截面底层的尺寸为 600 mm × 600 mm, 2~5 层的为 500 mm × 500 mm, 6 层的为 400 mm × 400 mm;梁截面底

层的尺寸为 250 mm × 550 mm, 2~5 层的为 250 mm × 500 mm, 6 层的为 200 mm × 500 mm;混凝土板厚 100 mm。柱混凝土强度为 C40,梁、板混凝土强度为 C30,受力筋均取 HRB400 钢筋,箍筋选用 HPB300 钢筋。抗震设防烈度为 8 度 (0.20g),设计地震分组第 1 组,抗震等级二级,场地类别为 II 类,场地特征周期为 0.45 s。结构标准层平面布置图如图 1 所示。

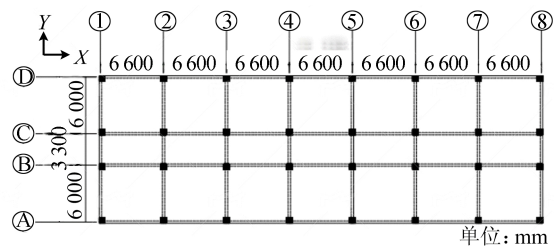


图 1 结构标准层平面布置图

### 1.2 隔震支座的选取及布置

经过对本工程结构分析研究,选择将隔震层设置在基础顶面以上,根据上部结构的荷载大小在基础顶面处设置隔震支座,将上部结构与基础通过隔震支座隔离开,达到由隔震支座耗散地震能量、减小上部结构地震的目的。

本工程将共 32 个型号为 LNR600 的隔震支座放置在基础顶,每根柱下布置单个隔震支座,其形心与上部框架柱截面形心重合,隔震支座具体参数见表 1 所列,布置示意图如图 2 所示。

表 1 隔震支座的主要参数

参数	数值
$S_1$	26.0
$S_2$	5.4
$K_v / (\text{kN}/\text{mm})$	3 000
$K_{eq} / (\text{kN}/\text{mm})$	1.66
$T_1 / \text{mm}$	160
$H / \text{mm}$	231

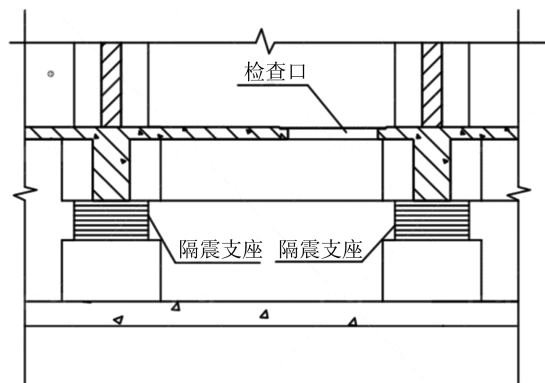


图 2 隔震支座布置示意图

在 ETABS 中使用连接单元 Rubber Isolater 模拟橡胶隔震支座,其中设置连接单元的 U1 方向为线性属性,U2、U3 方向为非线性属性。

### 1.3 黏滞阻尼器的选取及布置

为充分发挥黏滞阻尼器耗散输入结构的地震能量作用,并控制多遇地震下结构的最大位移与隔震方案相近。经调整试算阻尼器的参数和布置,最终确定在楼层的 2~6 层布置黏滞阻尼器。同一跨布置的黏滞阻尼器,做到沿楼层高度方向连续,合计共 20 个。ETABS 软件中使用连接单元 Damper 来模拟黏滞阻尼器。黏滞阻尼器具体参数见表 2 所列,连接示意图如图 3 所示。

表 2 黏滞阻尼器具体参数

参数	阻尼系数/(kN·s/m)	刚度/(kN/m)	速度指数
数值	1 000	$1 \times 10^6$	0.3

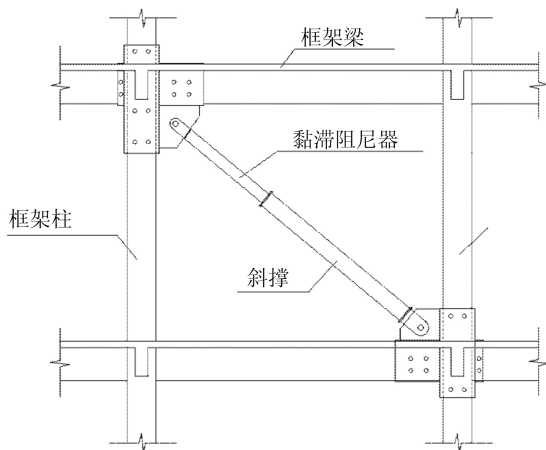
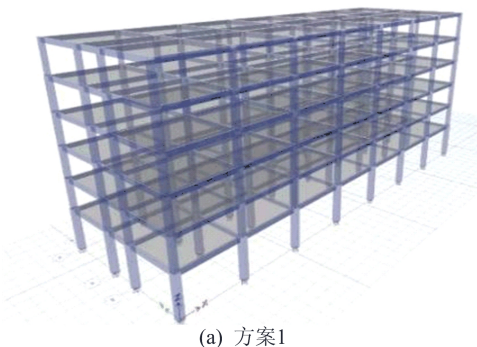


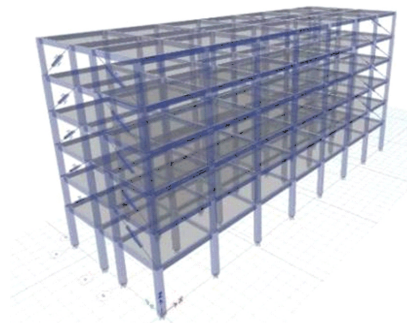
图 3 黏滞阻尼器连接示意图

### 1.4 有限元模型的建立

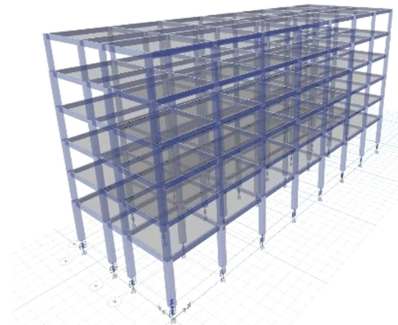
综上所述,以上文确定的参数及布置方式,采用 ETABS 软件共建立了原结构(方案 1)、单独设置黏滞阻尼器结构(方案 2)、单独设置隔震支座结构(方案 3)以及混合布置黏滞阻尼器与隔震支座(方案 4)共 4 个有限元模型,如图 4 所示。



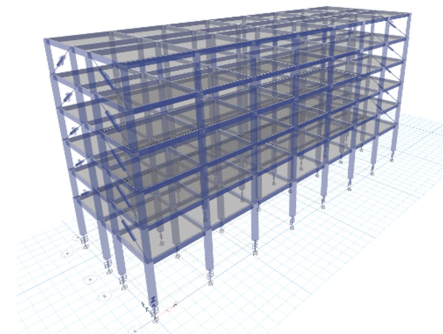
(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3



(d) 方案4

图 4 4 种方案下的 ETABS 模型

其中框架梁、柱采用线单元,楼板采用膜单元,并定义了荷载。

以 1 层为例,ETABS 中定义梁、柱的截面尺寸和楼板厚度的具体参数如图 5 所示。



(a) 1层梁



(b) 1层柱



(c) 楼板

图 5 ETABS 中部分梁、柱和楼板的具体参数

对结构进行模态分析可知,结构的 1 阶振型为 Y 向平动。由于 Y 向刚度较 X 向刚度小很多,因此仅考虑 Y 向的地震作用。

### 1.5 地震波的选择

采用时程分析法时,应根据建筑场地类别和

设计地震分组选用合适的实际地震记录和人工模拟的加速度时程曲线,其中实际地震记录的数量不应少于总数的 2/3。根据本工程地震信息等条件,本文拟采用 EI Centro 天然波、Lanzhou 天然波和 1 条人工波对 3 个有限元模型进行地震能量输入。

依据《建筑抗震设计规范》要求,依次验证这 3 条地震波的有效持续时间、模型的底部剪力 and 模型前 3 阶周期所对应的地震影响系数均满足要求。在 ETABS 软件中需通过调整比例系数来控制时程函数在时间范围内的函数值大小,以满足规范所规定的加速度有效峰值的要求<sup>[6]</sup>。

## 2 地震响应分析对比

### 2.1 多遇地震下的地震响应

该建筑的抗震设防烈度为 8 度(0.20g),根据《建筑抗震设计规范》规定,地震动加速度峰值在多遇地震时为 70 cm/s<sup>2</sup>。

综合考虑结构线弹性、阻尼器的非线性,采用快速非线性分析法对模型进行多遇地震下的分析<sup>[7]</sup>。在加速度峰值为 70 cm/s<sup>2</sup> 的 EI Centro 波、Lanzhou 波和人工波作用下,对前 3 种方案进行地震响应分析,加速度响应如图 6 所示,层间位移角响应如图 7 所示,结构的最大位移见表 3 所列。

由表 3 可知,基础隔震结构和黏滞阻尼器结构在多遇地震作用下的最大位移大致相近,满足规范要求。

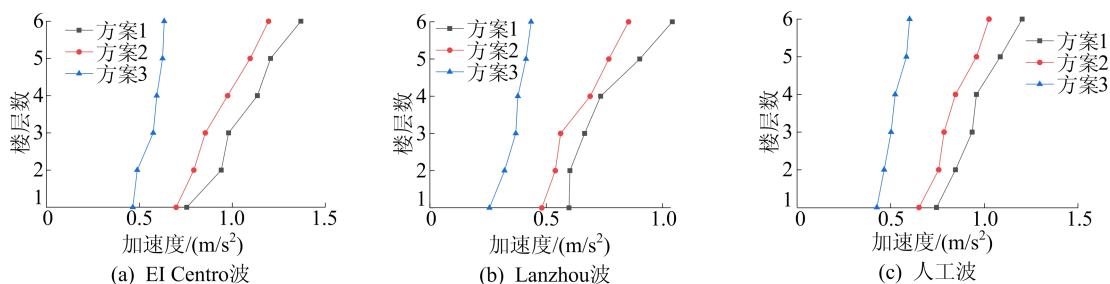


图 6 3 种方案在多遇地震下的加速度响应

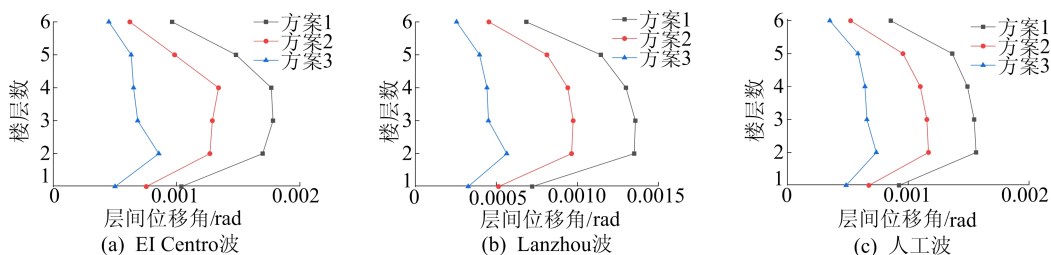


图 7 3 种方案在多遇地震下的层间位移角响应

从图 6 可以看出,对于不同的模型,在多遇地震作用下加速度的大小与楼层数呈正相关。在 Lanzhou 波作用下,黏滞阻尼器结构的最大加速度降幅为 18.0%,与原结构相比得到了一定的改善,但是减少量不够明显;而隔震结构最大加速度降幅达到 58.2%,减少量较为显著,随着楼层的增加,加速度的变化较为平稳。

表 3 多遇地震下各结构最大位移 单位:mm

地震波	EI Centro 波	Lanzhou 波	人工波
方案 1	26.3	18.2	22.4
方案 2	16.0	11.2	13.6
方案 3	15.5	10.7	13.2

从图 7 可以看出,前 3 个模型在第 2 层处的层间位移角增加量较大,这是由于第 2 层处梁柱尺寸发生变化,竖向刚度发生突变<sup>[8-9]</sup>。黏滞阻尼器结构相比较于原结构,其层间位移角减少量最大为 29.1%,总体变化趋势与原结构相似;隔震结构层间位移角减少量最大达到了 65.4%,因此隔震支座更易控制结构层间位移角响应。

多遇地震作用下各结构基底剪力、最大加速度及最大加速度的降幅见表 4 所列。从表 4 可以看出:相比较于原结构,布置黏滞阻尼器结构和布置隔震支座结构的最大加速度和基底剪力大小均得到一定程度的控制;相比较于方案 1,方案 2 最

大加速度的降幅在 12.7%~18.0%,方案 3 最大加速度的降幅在 49.8%~58.2%。由此可得隔震支座减少地震下结构最大加速度的效果更理想。

表 4 多遇地震作用下各结构基底剪力、最大加速度及降幅

地震波	方案	基底剪力/kN	最大加速度/(m/s <sup>2</sup> )	最大加速度降幅/%
EI Centro 波	方案 1	6 215	1.369	
	方案 2	4 982	1.195	12.7
	方案 3	2 563	0.634	53.7
Lanzhou 波	方案 1	4 785	1.042	
	方案 2	3 564	0.854	18.0
	方案 3	1 658	0.435	58.2
人工波	方案 1	5 028	1.202	
	方案 2	4 624	1.025	14.7
	方案 3	2 855	0.603	49.8

### 2.2 罕遇地震下的地震响应

据《建筑抗震设计规范》规定,罕遇地震时钢筋混凝土框架结构的层间位移角限值为 1/50,地震动加速度峰值为 400 cm/s<sup>2</sup>。在加速度峰值为 400 cm/s<sup>2</sup> 的 EI Centro 波、Lanzhou 波和人工波的作用下,对 4 种方案进行地震作用分析,结构的层间剪力响应如图 8 所示,层间位移角响应如图 9 所示。

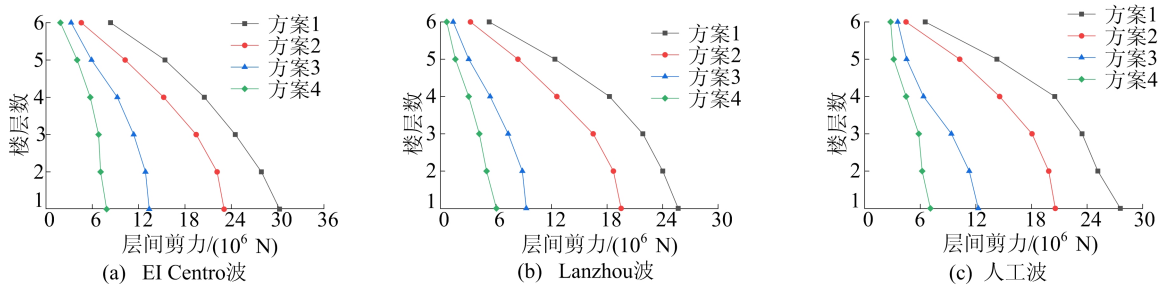


图 8 4 种方案在罕遇地震下的层间剪力响应

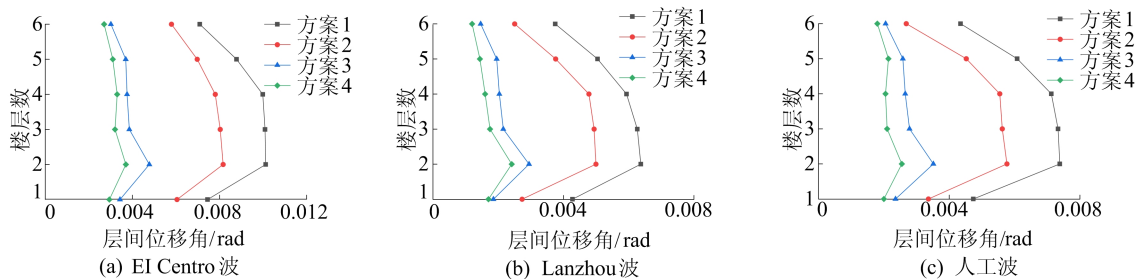


图 9 4 种方案在罕遇地震下的层间位移角变化响应

从图 8 可以看出,对于不同模型,在罕遇地震作用下随着楼层数的增加,层间剪力均在逐渐减

少。在 3 条地震波的作用下,隔震结构和黏滞阻尼器结构的层间剪力均得到了有效控制,其中在

Lanzhou 波的作用下,黏滞阻尼器结构的基底剪力较原结构减少了 24.0%,隔震结构的基底剪力较原结构减少了 63.9%,混合布置结构较原结构减少了 74.0%。因此混合布置隔震支座与黏滞阻尼器结构对地震作用的控制效果更为显著。

从图 9 可以看出,在加速度峰值  $400 \text{ cm/s}^2$  的 EI Centro 波作用下,原结构的最大层间位移角为  $1/98$ ,接近于限值  $1/50$ 。黏滞阻尼器结构的最大层间位移角为  $1/123$ ,相较于原结构降低了 19.2%;隔震结构最大层间位移角为  $1/209$ ,比原结构降低了 52.7%。从抗震效果上来看,隔震结构的抗震效果要远远优于黏滞阻尼器结构。混合布置结构的最大层间位移角为  $1/270$ ,较原结构降低了 62.5%,优于单独布置黏滞阻尼器和隔震支座的结构。

罕遇地震作用下各结构基底剪力、最大加速度及其降幅见表 5 所列。从表 5 可以看出:黏滞阻尼器结构最大加速度比原结构降低了 35.4%~44.8%,隔震结构的最大加速度比原结构降低了 71.1%~74.9%,而混合布置结构的最大加速度降幅达到 74.3%~78.1%;4 种方案下的最大加速度均出现在第 6 层,变化趋势与多遇地震相似。其中隔震结构与混合布置结构的层间位移角随着楼层分布更为均匀,结构的薄弱层现象明显改善,抗震性能显著提高。

表 5 罕遇地震作用下各结构基底剪力、最大加速度及其降幅

地震波	方案	基底剪力/kN	最大加速度/( $\text{m/s}^2$ )	最大加速度降幅/%
EI Centro 波	方案 1	30 256	8.037	
	方案 2	23 062	4.421	44.8
	方案 3	13 368	2.013	74.9
	方案 4	7 857	1.754	78.1
Lanzhou 波	方案 1	25 694	5.959	
	方案 2	19 523	3.851	35.4
	方案 3	9 265	1.725	71.1
	方案 4	6 042	1.526	74.3
人工波	方案 1	27 592	7.236	
	方案 2	20 569	4.626	36.1
	方案 3	12 258	1.954	73.0
	方案 4	7 094	1.664	77.0

### 3 隔震支座和黏滞阻尼器耗能性能

方案 3 在罕遇地震 Lanzhou 波作用下部分隔震支座的滞回曲线如图 10 所示。由图 10 可知,在罕遇地震作用下隔震支座具有饱满的滞回

曲线,整体呈梭形。说明地震时大部分的地震能量被隔震支座吸收,只有小部分可以传递到上部结构,有效保护了上部结构不受地震损坏。

方案 2 在罕遇地震 Lanzhou 波作用下部分黏滞阻尼器的滞回曲线如图 11 所示。

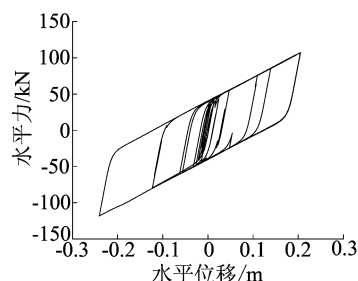


图 10 罕遇地震作用下隔震支座的滞回曲线

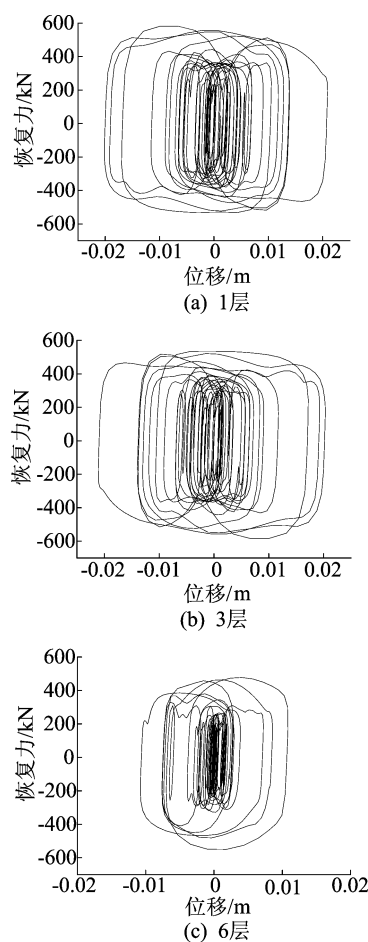


图 11 罕遇地震作用下黏滞阻尼器的滞回曲线

由图 11 可知,在罕遇地震作用下黏滞阻尼器的滞回曲线呈回字形,具有图形饱满的特点。说明黏滞阻尼器在结构中的耗能效果显著,耗散地震能量的性能较强,使结构的抗震储备得到提高。

(下转第 1296 页)

- 期水化热效应的控制研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 52-59.
- [13] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-13.
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard test method for chemical shrinkage of hydraulic cement paste: ASTM C 1608[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2007: 1-4.
- [15] 魏莹. 基于不同粒径分布的低熟料矿渣水泥水化特性和孔结构特性[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1796-1800.
- [16] YAO Y, YANG D W, ZENG J L, et al. Influences of fly ash and fluorgypsum on the hydration heat and compressive strength of cement[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011, 106(3): 869-874.
- [17] 苏英, 卢敏, 贺行洋, 等. 大掺量矿渣-水泥复合胶凝材料反应动力学研究[J]. 混凝土, 2019(8): 107-107, 111.
- [18] 吴福飞, 董双快, 赵振华, 等. 矿物掺合料对水泥基材料化学收缩与光谱性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 177-184.
- [19] 周文芳. 复合水泥净浆化学收缩影响因素研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [20] LI K, ZENG Q, LUO M, et al. Effect of self-desiccation on the pore structure of paste and mortar incorporating 70% GGBS[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 329-337.
- [21] CHOI Y C, KIM J, CHOI S. Mercury intrusion porosimetry characterization of micropore structures of high-strength cement pastes incorporating high volume ground granulated blast-furnace slag[J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 96-103.
- [22] 杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 等. 粉煤灰地聚物砂浆早期强度的影响参数研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 162-169.
- [23] ORTEGA J M, ALBALADEJO A, PASTOR J L, et al. Influence of using slag cement on the microstructure and durability related properties of cement grouts for micropiles[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 84-93.
- [24] 贺行洋, 张晨, 苏英, 等. 大掺量矿渣-水泥复合胶凝材料体系的性能研究[J]. 混凝土, 2019(9): 83-87.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1296 页)

#### 4 结 论

本文以实际工程为研究对象, 建立 4 个计算模型, 对黏滞阻尼器和隔震支座的减震性能展开研究。在两者多遇地震时结构最大位移相近的基础上, 通过对比分析多遇地震和罕遇地震时各种方案的最大加速度、层间位移角等地震响应, 得出以下结论:

1) 在多遇地震作用下, 增设黏滞阻尼器能减少结构的部分地震响应, 而隔震结构对结构的最大加速度和层间位移角的减震能力优于黏滞阻尼器。

2) 在罕遇地震作用下, 黏滞阻尼器和隔震支座均能有效减小结构的楼层剪力和层间位移角等地震响应。其中黏滞阻尼器结构对层间位移角和楼层剪力的减震效果不如隔震结构明显; 而混合布置方案对地震作用的控制效果优于单独布置黏滞阻尼器和隔震支座方案。

3) 黏滞阻尼器与隔震支座在大震下能够正常工作并发挥耗散能量的作用, 使结构抗震性能得到较大提升, 从而减轻了结构主要构件的损伤。

#### [参 考 文 献]

- [1] 佟道林. 高烈度地区某框架结构的隔震分析与设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(1): 138-143.
- [2] 胥玉祥, 朱玉华, 卢文胜. 云南省博物馆新馆隔震结构模拟地震振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(10): 39-47.
- [3] 田洁, 张俊发, 刘云贺, 等. 铅芯橡胶支座基础隔震体系参数优化配置研究[J]. 世界地震工程, 2003(1): 158-163.
- [4] 翁大根, 张超, 吕西林, 等. 附加黏滞阻尼器减震结构实用设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 80-88.
- [5] 闫锋, 吕西林. 附加与不附加黏滞阻尼墙的 RC 框架对比振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(5): 8-16.
- [6] 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: 31-47.
- [7] 魏新强, 安贵仓, 唐晓琳. 兰州某中学教学楼隔震加固设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(11): 54-59.
- [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] 屈涛, 卫文, 古静欣. 某学院楼减隔震方案比选与设计[J]. 建筑结构, 2022, 52(21): 139-143.

(责任编辑 吴亮)