

基于被动变阻尼变刚度装置组合隔震 新体系性能化设计方法

李铮, 付伟庆, 王浩哲

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 被动变阻尼变刚度装置是一种无需外部能源输入和反馈控制的装置, 具有变阻尼耗能和变刚度限位功能。当与隔震支座组合使用时, 这种装置构成了一种新的隔震体系, 能够有效控制不同类型和烈度大小的地震波。根据性能化设计理论, 提出了针对组合隔震体系的设计方法, 通过该方法可以完成隔震层中被动变阻尼变刚度装置和隔震支座的参数设计工作。研究还提供了完整的设计流程和详细的设计过程说明, 并通过工程实例验证了设计方法的可行性和有效性。这种性能设计方法可以广泛应用于组合隔震新体系的工程设计领域, 为相关工程提供了一种可靠的设计方法和技术支持。通过这种先进的设计方法, 可使结构能够更好地应对地震带来的灾害, 保障结构的安全性和稳定性。

关键词: 被动变阻尼变刚度装置; 组合隔震体系; 性能设计方法; 控制效果

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Performance design method of a new combined isolation system based on passive variable damping variable stiffness device

LI Zheng, FU Weiqing, WANG Haozhe

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: Passive variable damping and stiffness device is a device that does not require external energy input and feedback control, and has the functions of variable damping energy consumption and variable stiffness limit. By combined with isolation bearings, this device forms a new isolation system that can effectively control seismic waves of different types and intensities. Based on the theory of performance-based design, a design method for composite isolation systems has been proposed. Through this method, the parameter design of passive variable damping and stiffness devices and isolation bearings in the isolation layer can be completed. The study also provided a complete design process and detailed explanation of the design process, and verified the feasibility and effectiveness of the design method through engineering examples. This performance design method can be widely applied in the engineering design field of composite isolation new systems, providing a reliable design method and technical support for related engineering. Through this advanced design method, the structure can better cope with disasters caused by earthquakes, ensuring the safety and stability of the structure.

Key words: passive variable damping variable stiffness device; combined isolation system; performance design method; control effect

收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178488)

作者简介: 李铮(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构振动控制研究。E-mail: li-zheng@live.cn

通讯作者: 付伟庆(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构振动控制研究。E-mail: fuweiqing@qut.edu.cn

0 引言

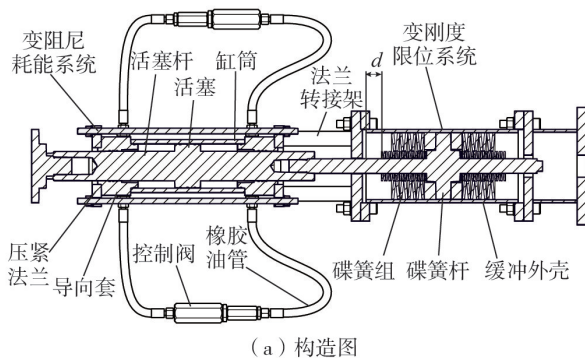
常规被动隔震技术存在最优控制频域窄和需限位的局限性^[1-6],采用磁流变阻尼器的半主动隔震控制效果好,但需外部能源输入和响应数据反馈控制^[7-10]。被动变阻尼装置是一种在黏滞阻尼器的基础上改进发展而来的新型耗能装置,其采用机械方式随速度变化动态改变流孔面积,实时调节阻尼系数的方式实现可变阻尼力的输出^[11-13]。但其在使用中存在位移反应过大的问题,如无法对超限位移进行控制会造成装置损坏。针对这一问题,在被动变阻尼装置的基础上,设计制作了一种新型被动变阻尼变刚度装置,该装置由变阻尼系统和变刚度系统两部分组成,兼具耗能和限位的功能。

将被动变阻尼装置与隔震支座组成组合隔震新体系,可对不同类型和烈度地震波进行有效控制。研究基于性能设计方法理论,提出一种适用于该组合隔震新体系的设计方法,给出满足各级控制目标的完整设计流程,通过工程实例验证设计方法的有效性。

1 被动变阻尼变刚度装置构造原理

1.1 装置设计构造

被动变阻尼变刚度装置(图1)由变阻尼耗能系统和变刚度限位系统两部分组成。变阻尼耗能系统和变刚度限位系统通过法兰转接架组装成一个整体,变阻尼耗能系统的活塞杆与变刚度限位系统的碟簧杆同轴心,并且通过螺纹连接在一起协同工作。为了方便拆卸维修,装置其他零部件也均通过螺纹、法兰等机械方式组装在一起。



(a) 构造图



(b) 实物图

图1 被动变阻尼变刚度装置

Fig.1 Passive variable damping variable stiffness device

1.2 装置工作原理

根据装置由变阻尼耗能系统和变刚度限位系统两部分组成的构造特点,装置的工作状态可分为变阻尼耗能状态和变刚度限位状态。

1.2.1 变阻尼耗能状态

设定变刚度碟簧组首次发挥作用时的距离为预留距离 d ,如图1所示。当活塞相对缸筒位移小于预留距离时,装置处于变阻尼耗能状态。活塞将缸筒分为左右2个腔体,2个腔体内充满黏滞流体阻尼材料。活塞上设阻尼通道,当阻尼器工作时,随着活塞相对油缸往复运动,黏滞流体材料从高压腔体经过外置油管控制阀流往低压腔体。在黏滞流体流经控制阀时,受到控制阀交叉孔的约束产生阻尼力,随着交叉孔大小的改变输出可变阻尼力。当活塞移动速度增大到一定阈值,流入口处的液体压力大于弹簧的预压力时,活动阀芯后的弹簧被压缩,交叉孔的面积开始变小。当活塞移动速度变小时,流入口处的液体压力也变小,弹簧压力得到释放,交叉孔的面积相应变大,阻尼器的黏滞系数变小,输出的阻尼力变小。这样就实现了阻尼力输出随速度响应的连续可变^[11-13]。

1.2.2 变刚度限位状态

以装置受拉为例介绍装置的工作状态:装置活塞相对缸筒往复运动中,当位移超出限位预留距离时,变阻尼系统继续发挥作用的同时,变刚度限位系统开始发挥作用,固定于碟簧杆支座上的第一阶碟簧组端面与连接

法兰接触,压缩第一阶碟簧组发挥第一阶段变刚度限位作用。随着位移继续增加,第一阶碟簧组端面接触的同时,第二阶碟簧组也与连接法兰接触,此时 2 组并联在一起的碟簧组共同发挥作用,发挥第二阶段限位作用。

1.3 装置性能试验

为研究被动变阻尼变刚度装置变阻尼系统和变刚度系统设计的可行性,以及 2 个系统的协同工作情况对装置进行了性能试验。试验采用位移控制的正弦曲线加载。频率为 0.01 Hz、位移幅值为 30~90 mm 加载工况下的滞回曲线如图 2 所示;频率为 0.06 Hz、位移幅值为 30~90 mm 加载工况下的滞回曲线如图 3 所示。

由图 2 可知,在往复加载过程中,滞回曲线发生倾斜,说明装置变刚度系统能够附加刚度,且随着加载位移幅值的提高,图中滞回曲线的斜率也随之继续增大,试验结果所反映趋势与装置设计中 2 个阶段变刚度设计目标基本一致。因此实现了装置变刚度的预期功能。

由图 3 可知,试验设计中阀芯弹簧不存在预压力,加载后滞回曲线逐渐出现凸起,此时活动阀芯运动,交叉孔面积减小,黏滞阻尼系数增大引起阻尼力变大。在相同加载频率下,随着输入位移幅值的增加或者在相同加载幅值下,随着加载频率的增加,交叉孔面积不断减小,滞回曲线逐渐饱满,这与变阻尼系统随速度增大阻尼力逐渐增大的设计想法一致,试验结果表明,装置变阻尼系统实现了设计要求的变阻尼耗能功能。

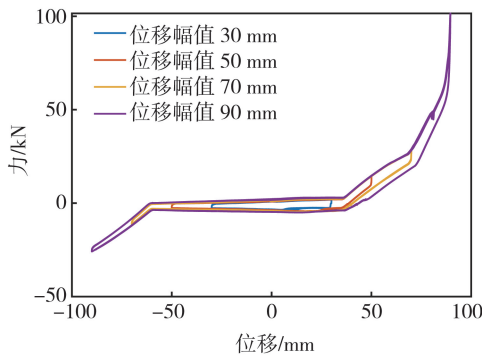


图 2 0.01 Hz 不同幅值滞回曲线

Fig. 2 0.01 Hz hysteretic curves of different amplitude

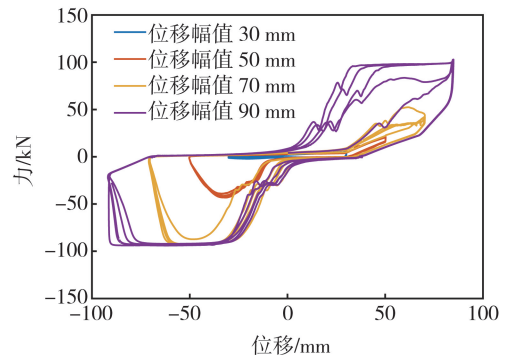


图 3 0.06 Hz 不同幅值滞回曲线

Fig. 3 0.06 Hz hysteretic curves of different amplitude

2 组合隔震新体系性能化设计方法

2.1 组合隔震新体系的组成

被动变阻尼变刚度装置组合隔震体系是将被动变阻尼变刚度装置作为隔震系统的一部分,与隔震支座共同组成新的隔震体系,如图 4 所示。体系中的两部分协同工作,来实现隔震效能,达到保护上部结构的目的。

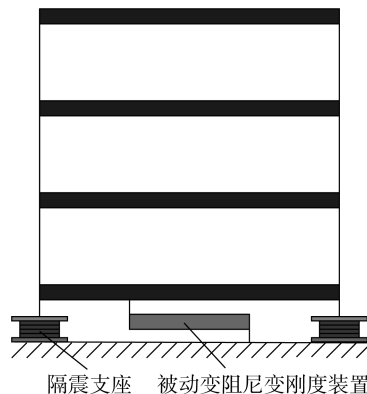


图 4 组合隔震新体系示意图

Fig. 4 New combined isolation system diagram

2.2 性能目标和性能水准的设定

组合隔震新体系的抗震性能目标应综合考虑地震作用水准、建筑结构的重要性和经济效益等各项因素选定。参考 GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》^[14]中给出的性能目标,设定组合隔震新体系抗震性能

目标如表1所示,其中每个性能目标均与指定地震地面运动下的结构抗震性能水准相对应。设定各级抗震性能水准所要求性能状态如表2所示。

表1 组合隔震新体系性能设计目标

Table 1 Performance design objectives of new combined isolation system

地震作用水准	性能水准		
	水准1	水准2	水准3
多遇地震	A	—	—
设防地震	B	A	—
罕遇地震	C	B	A

表2 各性能水准及预期震后性能状态

Table 2 Performance levels and expected post-earthquake performance status

性能水准	预期震后性能状态
水准1	隔震装置可能发生轻度损伤,无需维修可继续工作,隔震层功能基本不受影响
水准2	基本运行
水准3	生命安全
	隔震装置发生中度损伤,极少数装置破坏,但整体仍具承载力,隔震层功能受扰

表1中给出了三类性能目标:

1)性能目标A为基本性能目标,即在多遇地震作用水准下能够充分运行、设防地震作用水准下能够基本运行、大震作用水准下确保生命安全。该性能目标是最基本的性能目标,适用于大多数一般使用条件下的建筑。

2)性能目标B为重要性能目标,即在设防地震作用下能够充分运行,罕遇地震作用下保证能够基本运行。该性能目标适用于重要性程度高或遭受地震破坏后产生较大危害的建筑。

3)性能目标C为特殊性能目标,即在罕遇地震作用下也要保证充分运行。该性能目标是最高等级的性能目标,适用于对安全需求极高的建筑。

2.3 性能目标和性能水准隔震量化值

具体实施性能设计方法,用于工程设计,需要将定性描述的性能水准转化为具体的设计参数。性能目标的量化直接影响性能设计方法的有效性和可行性。力、能量、位移和加速度等可以反映结构性能水准。组合隔震新体系控制主要与地震作用下隔震层的变形和上部结构的使用舒适度有关。在现有规范、规程的基础上,结合被动变阻尼变刚度组合隔震新体系性能特点,选择隔震层位移和楼层加速度作为控制指标,将定性的性能目标进行如下定量描述。

1)隔震层位移限值

参考规范GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》^[14]、CES 126—2001《叠层橡胶支座隔震技术规程》^[15]、对隔震支座最大水平位移所做规定,同时考虑新型组合隔震体系中隔震支座和新型阻尼器的协同工作特点,对隔震层在不同性能水准下的隔震层位移限值的建议取值如表3所示。其中 D 为隔震支座直径。

2)楼层加速度限值

GB/T 17742—2020《中国地震烈度表》^[16]对不同水平方向地震动参数下人的感觉做出了规定,JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[17]给出了不同风振加速度下人的舒适度感受。参考以上规范规程中影响建筑使用舒适度的加速度数值,考虑组合隔震新体系的特点,建议组合隔震新体系楼层最大加速度的限值如表4所示。

表3 不同水准下的隔震层位移限值

Table 3 Displacement limit of isolation

性能指标	layer at different levels			mm
	性能水准			
	水准1	水准2	水准3	
隔震层位移	0.05D	0.20D	0.45D	

表4 不同水准下的楼层加速度限值

Table 4 Acceleration limit of

性能指标	floor at different levels			m/s ²
	性能水准			
	水准1	水准2	水准3	
楼层加速度	0.25	0.65	2.50	

2.4 组合隔震体系性能化设计方法

根据被动变阻尼变刚度装置的性能特点和性能化设计理论,提出了组合隔震体系满足不同控制目标的性能化设计方法。首先对结构进行初步设计,主要依照现有规范规程中的设计方法,把被动变阻尼变刚度装置作为提高结构性能的一种手段,根据已经明确的性能目标来完成装置和支座的参数设计。整个设计过程进行了装置各级阻尼系数和限位刚度参数的设计,设计流程如图5所示。

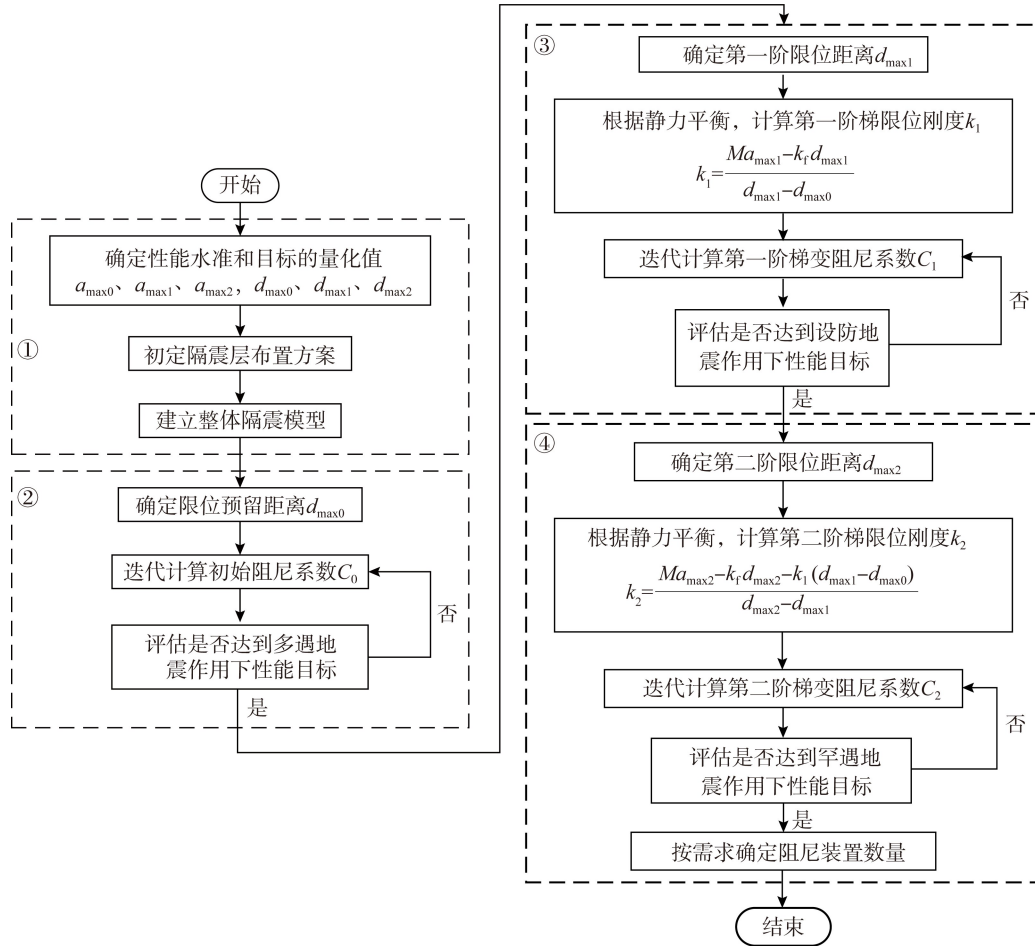


图 5 设计方法流程图

Fig. 5 Flow chart of design method

根据所给设计流程,设计过程主要分为 4 步,主要步骤如下:

1) 综合考虑技术、经济、建筑安全性与使用性能确定设防目标和性能水准及其量化值。根据我国 GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》、CECS 126—2001《叠层橡胶支座隔震技术规程》对叠层支座竖向平均压应力限值的要求,初定隔震层布置方案。为便于后续迭代计算建立整体隔震模型,针对普通隔震结构,可根据实际情况采用多自由体系进行迭代。根据地震烈度、场地类别、设计地震分组选择地震波。

2) 选取表 3 中水准 1“充分运行”时的位移限值作为限位装置发挥作用限位预留距离 d_{max0} ,输入阻尼系数计算程序如图 5,通过迭代确定使结构满足设防地震作用下水准 1“充分运行”目标下的阻尼系数 C_0 。

3) 选取表 3 中水准 2“基本运行”时的隔震位移限值作为限位装置发挥作用的第一阶限位距离 d_{max1} ;选取表 4 中水准 2“基本运行”时的层加速度限值 a_{max1} ,通过静力平衡,按式(1)计算第一阶限位刚度 k_1 。

$$k_1 = \frac{Ma_{max1} - k_f d_{max1}}{d_{max1} - d_{max0}} \quad (1)$$

将 d_{max1} 和 k_1 输入阻尼系数计算程序,通过迭代确定使结构满足设防地震作用下“基本运行”目标的阻尼系数 C_1 。

4) 选取表 3 中水准 3“生命安全”指标时的隔震位移限值作为第二阶限位距离 d_{max2} ;选取表 4“生命安全”指标时的层加速度限值 a_{max2} ,通过静力平衡,按式(2)计算第二阶限位刚度 k_2 。

$$k_2 = \frac{Ma_{max2} - k_f d_{max2} - k_1 (d_{max1} - d_{max0})}{d_{max2} - d_{max1}} \quad (2)$$

将 d_{max1} 、 d_{max2} 、 k_1 、 k_2 输入阻尼系数计算程序,通过迭代确定结构满足设防地震作用下“基本运行”目标的阻尼系数 C_2 。

装置数量的确定受到隔震层空间的影响,变阻尼部分的控制阀的数量增减受空间影响小,变刚度限位弹簧组受空间影响大,最终决定装置数量。因此,按照 GB/T 1972—2005《碟形弹簧》^[18] 中的要求考虑弹簧组

的数量和个数。

图6为阻尼系数计算程序,通过MATLAB/Simulink平台搭建。整个程序包括前处理子模块、状态空间子模块、装置力学模型子模块和结果输出子模块。在结构已选定的条件下,前处理子模块调用地震波数据,结构参数以及装置力学模型参数 $d_{\max i}, k_i$,输入到采用状态方程的状态空间子模块,最后通过结果输出子模块输出各阶段阻尼系数 C_i 的数值。

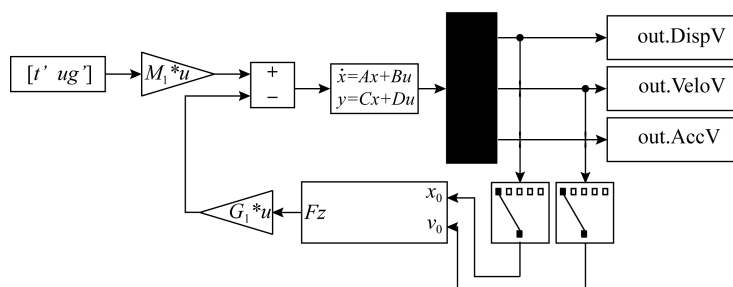


图6 MATLAB/Simulink 计算平台建构

Fig. 6 Construction of MATLAB/Simulink computing platform

3 组合隔震体系性能化设计方法应用

3.1 工程概况

采用日本建筑学会《建筑隔震设计指南》^[19]中给出的结构。该结构为5层隔震钢框架结构(图7),结构质量分布均匀,刚度分布为梯形,最上层刚度为下层刚度的1/2,基本周期为0.3 s。结构各层具体参数如表5所示。

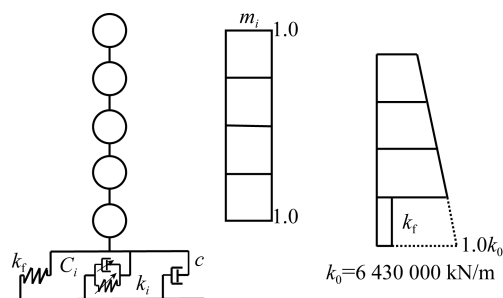


图7 结构模型

Fig. 7 Structural model

表5 结构参数

Table 5 Structural parameters

层数	质量/($\times 10^3$ kg)	刚度/(kN/m)
一层	980	6 430 000
二层	980	5 626 250
三层	980	4 822 500
四层	980	4 018 759
五层	980	3 215 000

3.2 设计方法应用

1) 根据表1确定性能设防目标及其量化值,给出当该建筑遭遇本地区8度地震时,基本性能目标A,即多遇地震作用水准下能够充分运行、设防地震作用水准下能够基本运行、大震作用水准下确保生命安全。

隔震层设计最大位移设定为35 cm,橡胶支座最小直径为设计位移的2倍,即取隔震支座直径700 mm,最大荷载处采用直径900 mm橡胶支座,各橡胶支座承受的压应力约为12 N/mm²。设计直径700 mm和900 mm支座各4个,支座压应力验算:9 600 kN \times 5层/(6 362 \times 4+3 848 \times 4)=11.8 N/mm²。因此满足支座竖向应力12 MPa控制要求。直径700 mm支座的水平刚度为1 130 kN/mm,直径900 mm支座水平刚度为1 870 kN/mm。

隔震层总水平刚度为

$$\sum k_f = 1 130 \times 4 + 1 870 \times 4 = 12 000 \text{ kN/mm} \quad (3)$$

隔震结构基本周期为

$$T_f = 2\pi \sqrt{M/k_f} = 2 \times 3.14 \times \sqrt{980 \times 5/12 000} = 4.01 \text{ s} \quad (4)$$

2) 根据表3给出的“充分运行”时性能指标,限位预留距离装置 $d_{\max 0} = 0.05D = 35$ mm;通过阻尼系数计算程序,最终选取初始阻尼系数 $C_0 = 1.54 \times 10^2$ (kN \cdot s/m)。多遇地震作用下隔震层及上部结构响应如图8和图9所示,装置耗能滞回曲线如图10所示。

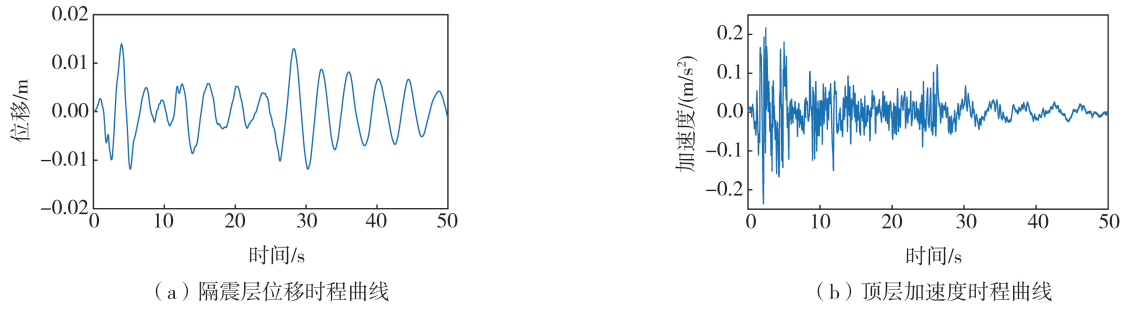


图 8 多遇地震作用下结构响应曲线

Fig. 8 Structural response curves under frequent earthquakes

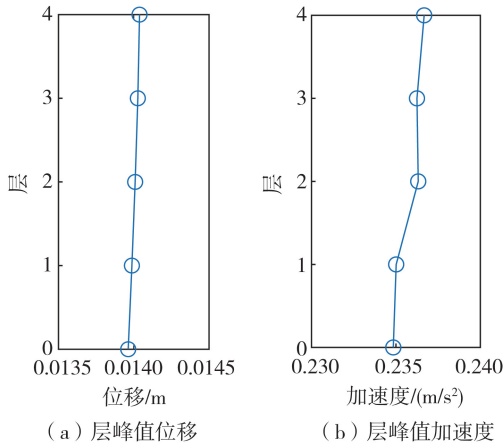


图 9 多遇地震作用下结构层峰值响应曲线

Fig. 9 Peak response curves of structural layer under frequent earthquakes

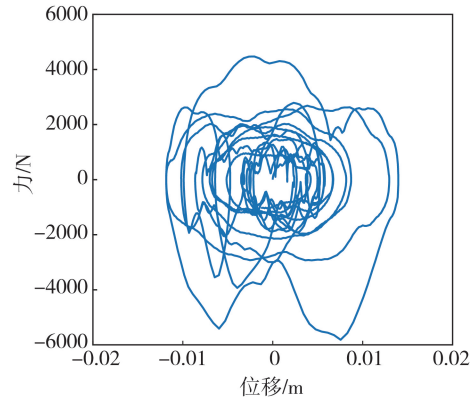


图 10 多遇地震下装置滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curves of device under frequent earthquakes

3) 根据表 3、表 4 给出的“基本运行”时位移 d_{max1} 、加速度 a_{max1} 性能指标,第一阶限位距离 $d_{max1} = 0.2D = 140 \text{ mm}$,由静力平衡,计算第一阶限位刚度 k_1 为

$$k_1 = \frac{Ma_{max1} - k_1 d_{max1}}{d_{max1} - d_{max0}} = 1.93 \times 10^4 \text{ kN/m} \quad (5)$$

将 d_{max1} 、 k_1 输入阻尼系数计算程序,评估是否满足预设性能目标,通过迭代计算,最终选取第一阶段变阻尼系数 $C_1 = 4.62 \times 10^2 (\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m})$ 。设防地震作用下隔震层及上部结构响应如图 11 和图 12 所示,装置耗能滞回曲线如图 13 所示。

4) 根据表 3、表 4 给出的“生命安全”时位移 d_{max2} 、加速度 a_{max2} 性能指标,第二阶限位距离 $d_{max2} = 0.45D = 315 \text{ mm}$;由静力平衡得到第二阶限位刚度:

$$k_2 = \frac{Ma_{max2} - k_1 d_{max2} - k_1 (d_{max1} - d_{max0})}{d_{max2} - d_{max1}} = 3.20 \times 10^4 \text{ kN/m} \quad (6)$$

将 d_{max1} 、 d_{max2} 、 k_1 、 k_2 输入阻尼系数计算程序,评估是否满足预设性能目标,通过迭代计算,最终选取第二阶段变阻尼系数 $C_2 = 1.23 \times 10^3 (\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m})$ 。罕遇地震作用下隔震层及上部结构响应如图 14 和图 15 所示,装置耗能滞回曲线如图 16 所示。

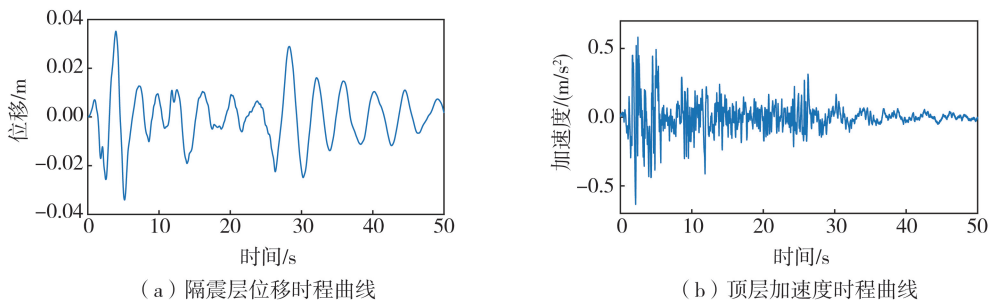


图 11 设防地震作用下结构响应曲线

Fig. 11 Structural response curves under fortifying earthquakes

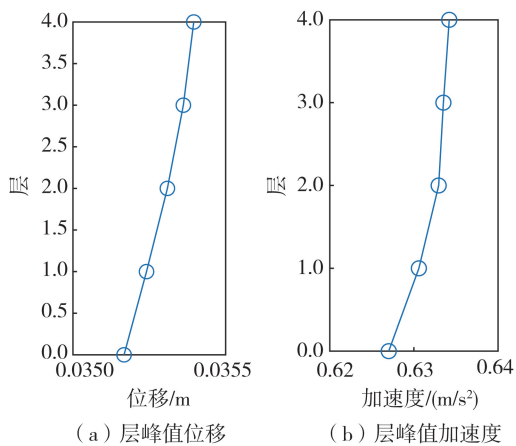


图 12 设防地震作用下结构层峰值响应曲线

Fig. 12 Peak response curves of structural layer under fortifying earthquakes

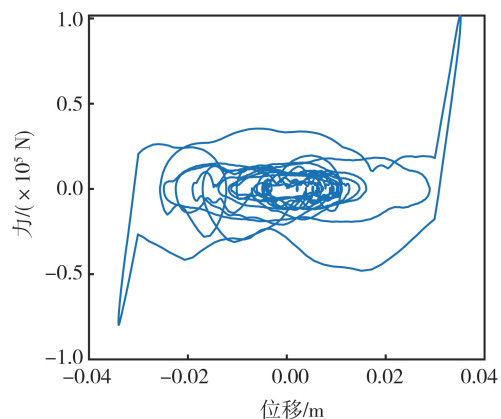
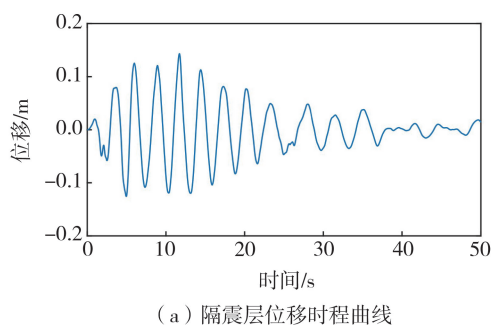
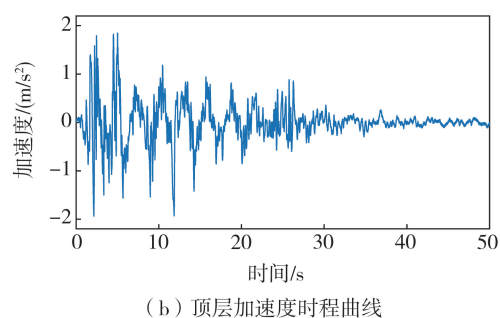


图 13 设防地震下装置滞回曲线

Fig. 13 Hysteretic curves of device under fortifying earthquakes



(a) 隔震层位移时程曲线



(b) 顶层加速度时程曲线

图 14 罕遇地震作用下结构响应曲线

Fig. 14 Structural response curves under rare earthquakes

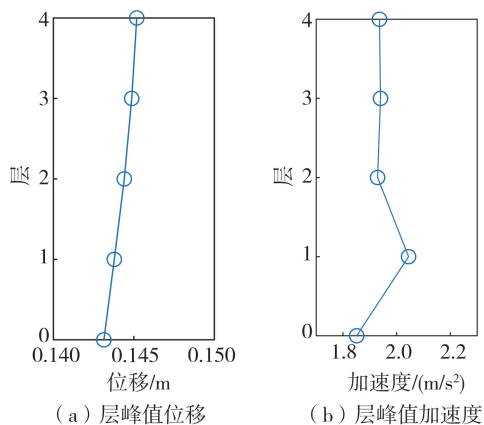


图 15 罕遇地震作用下结构层峰值响应曲线

Fig. 15 Peak response curves of structural layer under rare earthquakes

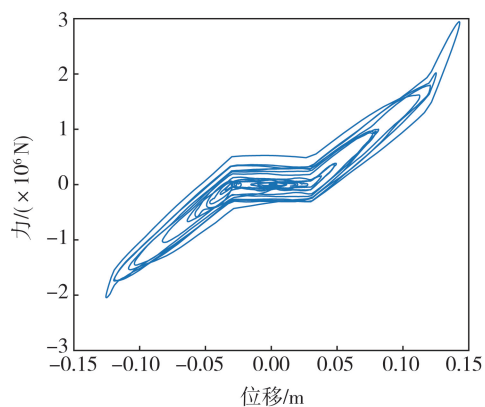


图 16 罕遇地震下装置滞回曲线

Fig. 16 Hysteretic curves of device under rare earthquakes

按照设计说明要求,根据以上限位刚度系数计算值,参考 GB/T 1972—2005《碟形弹簧》中对碟簧尺寸、数量和载荷大小的要求,综合考虑变阻尼部分数量,最终设计被动变阻尼变刚度装置数量为 12 个。

4 结论

1) 针对被动变阻尼变刚度装置组合隔震体系能够有效控制不同类型和烈度地震波的特点,基于性能设计理论提出了一种适用于组合隔震新体系的性能化设计方法。这一方法的关键在于通过合理设计被动变阻尼变刚度装置和隔震支座的参数,使其在地震发生时能够发挥最佳效果,提高建筑物或结构的抗震性能。

2)详细描述了性能化设计方法的完整流程和相关说明。通过对一个工程实例进行的性能化设计过程,证明了该设计方法的可行性和有效性。实践证明,通过这种设计方法,可以实现预先设定的各级抗震性能目标,从而为建筑物或结构在地震中的安全性提供可靠保障。

3)这种性能化设计方法的优势在于其针对性强,能够根据具体的工程需求和地震环境特点进行定制化设计,从而最大程度地提升隔震体系的整体性能。通过该方法,可以更加有效地应对不同类型和烈度的地震波,确保结构在地震中具有更好的抗震性能和安全性。这种性能化设计方法在组合隔震新体系的工程设计应用中具有广泛的应用前景和重要意义。

参考文献:

- [1] JANGID R S, KELLY J M. Base isolation for near-fault motions[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001, 30(5): 691-707.
- [2] MAVROEIDIS G P, DONG G, PAPAGEORGIOU A S. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(9): 1023-1049.
- [3] DU H K, WANG Y D, HAN M, et al. Experimental seismic performance of a base-isolated building with displacement limiters[J]. *Engineering Structures*, 2021, 244: 112811.
- [4] 杜红凯, 韩淼, 籍嘉浩, 等. 刚性限位对基础隔震结构动力响应影响试验研究[J]. *建筑结构*, 2023, 53(3): 15-20.
DU Hongkai, HAN Miao, JI Jiahao, et al. Experimental study on influence of rigid deformation limitation on dynamic response of base isolation structures[J]. *Building Structure*, 2023, 53(3): 15-20. (in Chinese)
- [5] 戴君武, 柏文, 周宝峰, 等. 从泸定 6.8 级地震看建筑隔震技术发展亟待解决的问题[J]. *地震工程与工程振动*, 2022, 42(6): 1-11.
DAI Junwu, BAI Wen, ZHOU Baofeng, et al. Urgent problems need to be solved in the development of seismic base isolation for buildings from the Luding M_s 6.8 earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2022, 42(6): 1-11. (in Chinese)
- [6] 王嘉雯, 刘文光, 陈睦锋, 等. 考虑支座硬化与碰撞的隔震结构易损性分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(1): 119-127.
WANG Jiawen, LIU Wenguang, CHEN Mufeng, et al. Fragility analysis of isolation structures considering the hardening and collusion of bearings[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(1): 119-127. (in Chinese)
- [7] YOSHIOKA H, RAMALLO J C, SPENCER B F Jr. "Smart" base isolation strategies employing magnetorheological dampers[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(5): 540-551.
- [8] 石运东, 韦鑫, 丁阳, 等. 三维隔震单层球面网壳结构频率相关变阻尼半主动控制[J]. *地震工程与工程振动*, 2022, 42(1): 143-153.
SHI Yundong, WEI Xin, DING Yang, et al. Semi-active control with frequency dependent variable damping for three-dimensional isolated single-layer spherical reticulated shell structure[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2022, 42(1): 143-153. (in Chinese)
- [9] 熊高波, 杨仁猛, 邹清明. 基于液压传感技术的智能型隔震橡胶支座的性能研究[J]. *预应力技术*, 2016, (2): 16-17.
XIONG Gaobo, YANG Remeng, ZOU Qingming. Performance of intelligent isolation rubber bearing based on hydraulic sensing technology[J]. *Prestress Technology*, 2016, (2): 16-17. (in Chinese)
- [10] 龚微, 熊世树, 谭平, 等. 拟负刚度磁流变智能隔震系统振动台试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(12): 1-10.
GONG Wei, XIONG Shishu, TAN Ping, et al. Shaking table test of smart isolation system with magneto-rheological damper employing pseudo-negative-stiffness control algorithm[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(12): 1-10. (in Chinese)
- [11] 付伟庆, 李茂, 张春巍. 被动变阻尼耗能装置的设计与性能试验研究[J]. *振动工程学报*, 2020, 33(5): 869-876.
FU Weiqing, LI Mao, ZHANG Chunwei. Design and performance experiment on passive variable damping energy dissipation device[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(5): 869-876. (in Chinese)
- [12] 付伟庆, 李茂, 李通, 等. 多阶梯被动变阻尼装置设计、试验及结构风振控制分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(6): 225-233.
FU Weiqing, LI Mao, LI Tong, et al. Design, performance test and structural wind vibration control analysis of multi-stage variable damping device[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(6): 225-233. (in Chinese)
- [13] 付伟庆, 李茂, 李通, 等. 多阶梯被动变阻尼装置高层建筑风振控制性能化设计方法[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(5): 47-55.
FU Weiqing, LI Mao, LI Tong, et al. Performance-based design method for wind-induced vibration control of high-rise building with multi-stage passive variable damping device[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(5): 47-55. (in Chinese)
- [14] GB/T 51408—2021 建筑隔震设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
GB/T 51408—2021 Standard for seismic isolation design of building[S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)
- [15] CECS 126—2001 叠层橡胶支座隔震技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
CECS 126—2001 Technical specification for seismic-isolation with laminated rubber bearing isolators[S]. Beijing: China Planning Press, 2001. (in Chinese)
- [16] GB/T 17742—2020 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
GB/T 17742—2020 The Chinese seismic intensity scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [17] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
JGJ 3—2010 Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [18] GB/T 1972—2005 碟形弹簧[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
GB/T 1972—2005 Disc spring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. (in Chinese)
- [19] 日本建筑学会. 隔震结构设计指南[M]. 刘文光译. 北京: 地震出版社, 2005.
AIJ. Recommendation for the design of base isolated buildings[M]. LIU Wenguang translated. Beijing: Seismological Press, 2005. (in Chinese)