

基于被动变阻尼变刚度装置组合隔震控制分析*

付伟庆¹, 李 铮¹, 王浩哲¹, 江 东¹, 李 茂²

(1. 青岛理工大学土木工程学院 青岛, 266520)

(2. 阿尔伯特大学土木与环境工程系 埃德蒙顿, T6G2V8)

摘要 将被动变阻尼装置与隔震支座组成新隔震系统时, 由于上部质量大且隔震层刚度小, 高烈度地震下体系存在地震位移响应过大的问题, 如无法对超限位移进行控制将造成装置损坏和控制体系失效。针对此问题, 在被动变阻尼装置的基础上, 结合碟形弹簧具有变刚度、空间需求小以及组合使用灵活的特点, 设计了一种无需能源输入和数据反馈、可同时实现变阻尼和变刚度限位功能的新型装置。首先, 通过不同加载频率与幅值性能试验, 检验了装置的设计可行性和工作性能; 其次, 将其与隔震支座组成组合隔震新体系, 以 20 层 Benchmark 结构为例, 对其与普通隔震、黏滞阻尼器隔震的控制效果进行了对比分析; 最后, 研究了装置主要参数(预留距离、限位刚度、阻尼系数)对控制效果的影响。试验结果表明, 该装置兼具变阻尼耗能 and 变刚度限位功能, 组合隔震新体系对不同烈度地震波和场地波类均有很好的控制效果。

关键词 振动控制; 被动变阻尼变刚度装置; 性能试验; Benchmark 结构; 组合隔震; 减震性能

中图分类号 TU352

引 言

结构振动控制技术能够减轻结构地震反应, 其研究日趋成熟, 并已在实际工程中得到广泛应用^[1-3]。常规被动隔震技术具有构造简单、造价低及可靠性高等优点, 但存在最优控制频域窄和需要限位的局限性^[4-9]。采用磁流变阻尼器的半主动隔震控制虽然有着较好的控制效果, 但是需要外来能源的供给, 造价高且技术复杂, 并在紧急状态时较难保证能源的供给^[10-16]。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, 其兼具被动阻尼器和半主动控制器的特点, 采用机械方式随速度变化动态改变流孔面积, 通过实时调节阻尼系数实现可变阻尼力的输出^[17]。其与隔震支座组成组合隔震系统后, 由于上部结构质量很大而隔震层刚度较小, 高烈度地震下体系存在隔震层位移响应过大的问题。

本研究在被动变阻尼装置的基础上, 设计制作了一种无需能源和数据反馈的被动变阻尼变刚度装置, 该装置由变阻尼和变刚度两部分组成, 兼具耗能和限位的功能。通过不同工况下的性能试验, 验证了装置中两系统的工作性能和协同工作效果。

1 装置构造与原理

1.1 装置设计原理

1.1.1 变阻尼耗能原理

孔隙式黏滞阻尼器阻尼力公式^[18]为

$$F = \frac{\left(\frac{3m+1}{m}\right)^m (R_c^2 - R_p^2)^m \pi k L (R_c^2 - R_p^2 - nr^2)}{r^{(3m+1)}} v^m \quad (1)$$

其中: m 为液体阻尼介质的流动指数; R_c 为阻尼缸体的缸内半径; R_p 为活塞杆直径; r 为阻尼孔半径; n 为阻尼孔个数; L 为阻尼孔长度; k 为液体阻尼介质的稠度系数; v 为活塞相对缸体的运动速度。

$$\text{令 } C = \frac{\left(\frac{3m+1}{m}\right)^m (R_c^2 - R_p^2)^m \pi k L (R_c^2 - R_p^2 - nr^2)}{r^{(3m+1)}},$$

则阻尼力又可写为

$$F = Cv^m \quad (2)$$

阻尼介质常为牛顿流体, 流动指数 $m \approx 1$, 因此有

$$C \propto \frac{1}{r^{(3m+1)}} = \frac{1}{r^4} \quad (3)$$

* 国家自然科学基金资助项目(52178488); 山东省自然科学基金面上资助项目(ZR2025MS932)

收稿日期: 2024-03-11; 修回日期: 2024-07-13

由式(3)可知,阻尼系数 C 与流孔半径 r 的4次幂即阻尼孔面积的平方成反比,若流孔面积增加,则阻尼系数减小。随速度响应实时调节阻尼阀流孔面积,可改变阻尼器的阻尼系数,实现可变阻尼力的输出。

1.1.2 变刚度限位原理

根据胡克定律

$$F_s = K_s u \quad (4)$$

其中: F_s 为变刚度限位力。

变刚度是指在不同阶段具有不同刚度系数,刚度系数 K_s 可写为

$$K_s = \begin{cases} k_1 & (d_0 < |u| \leq d_1, \text{阶段1}) \\ k_1 + k_2 & (d_1 < |u| \leq d_2, \text{阶段2}) \\ \vdots & \\ k_1 + k_2 + \dots + k_i & (d_{i-1} < |u| \leq d_i, \text{阶段}i) \end{cases} \quad (5)$$

其中: u 为活塞相对缸体的位移; k_i 为不同碟簧组的刚度系数; d_{i-1} 为第 i 阶碟簧的工作预留距离。

当 u 达到 d_{i-1} 时,第 i 组碟簧组开始工作。由式(5)可知,刚度系数 K_s 与位移成正比。随着位移的增加,提前预设的多阶梯碟簧陆续投入工作,刚度系数分阶梯增大。根据位移响应实时调节弹簧组个数,可改变装置的刚度系数,实现可变限位力输出。

1.2 装置设计构造

被动变阻尼变刚度装置构造如图1所示,由阻尼缸体、外部管路和控制阀组成。装置变阻尼和变刚度系统通过法兰转接架组装成整体,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,

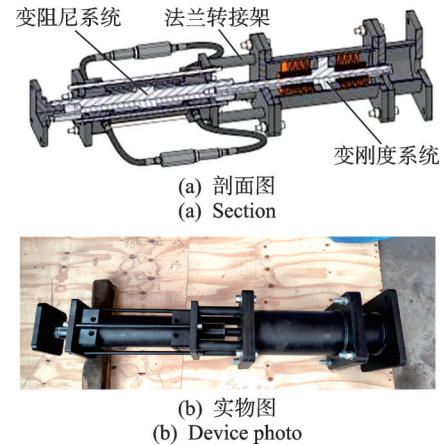


图1 被动变阻尼变刚度装置构造

Fig.1 Construction of passive variable damping variable stiffness device

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。

2 被动变阻尼变刚度装置性能试验

通过装置不同频率和幅值下动力加载试验,测试其变阻尼耗能和变刚度限位性能。

2.1 试验概况

本研究设计了2种变阻尼控制阀和1种变刚度限位碟簧组,其分别与装置主体组合成2种不同型号的试验试件。装置参数见表1。试验采用青岛理工大学结构实验室MTS电液伺服加载系统。试验包括MTS 10 t电液伺服作动器,装置试验加载图如图2所示。

表1 装置参数

Tab. 1 Device parameters

试件	变阻尼控制阀		变刚度限位碟簧组			
	交叉孔型号	数量	内碟簧型号	数量	外碟簧型号	数量
S ₁	12×3	2	φ80×φ41×4×6.2	20	φ80×φ41×4×6.2	8
S ₂	12×5	2	φ80×φ41×4×6.2	20	φ80×φ41×4×6.2	8

对试件S₁和S₂按表2所示的试验工况进行拟动力加载试验。试验按照正弦波规律变化的输入位移 $u(t) = A \sin(2\pi ft)$ 来控制系统加载,其中: A 为加载幅值; f 为加载频率; t 为加载时间。通过改变加载频率和位移幅值,测得相应的阻尼力-位移关系曲线,进而研究被动变阻尼变刚度装置随加载频率、位移幅值变化的力学特性。

S₁试件开孔较小,更容易展示装置在低幅值下

的纯变阻尼耗能效果;S₂试件开口较大,有利于展示在高位置幅值下变刚度和变阻尼的协调出力的情况。

2.2 试验结果与分析

对试件S₁、S₂进行加载,加载幅值分别为70 mm和90 mm,得到在超出变刚度弹簧预留长度后的阻尼力与位移的滞回曲线。变阻尼变刚度试验中S₁、



图 2 装置试验加载图
Fig.2 Test loading setup

表 2 试验工况

Tab.2 Loading protocol

试件	加载频率/Hz	加载幅值/mm	循环
S ₁	0.03, 0.06	± 30, ± 50, ± 70, ± 90	5
S ₂	0.01, 0.02, 0.03, 0.06, 0.14, 0.20	± 30, ± 50, ± 70, ± 90	5

S₂试件不同频率滞回曲线分别如图 3、4 所示。变阻尼变刚度试验中 S₂试件不同频率速度-力曲线如图 5 所示,此时装置同时具有变阻尼耗能 and 变刚度限位功能。

装置在不同工况下的滞回曲线,输出力均在 100 kN 范围内,并且在 100 kN 处形成一个平台。这是由于试验所选用的 MTS 244.22 型液压作动器的额定载荷为 100 kN,随着加载频率和幅值的增加,

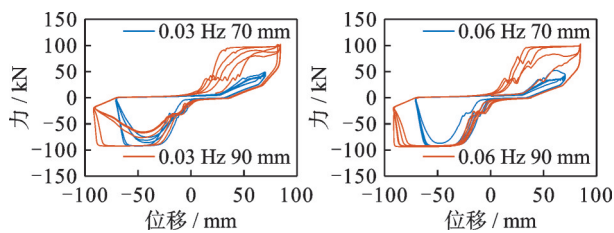


图 3 变阻尼变刚度试验中 S₁试件不同频率滞回曲线
Fig.3 Hysteresis curves of S₁ specimen under different loading frequencies

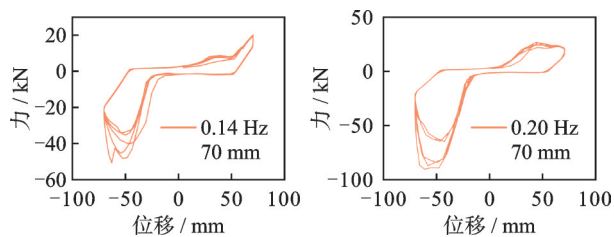


图 4 变阻尼变刚度试验中 S₂试件不同频率滞回曲线
Fig.4 Hysteresis curves of S₂ specimen under different loading frequencies

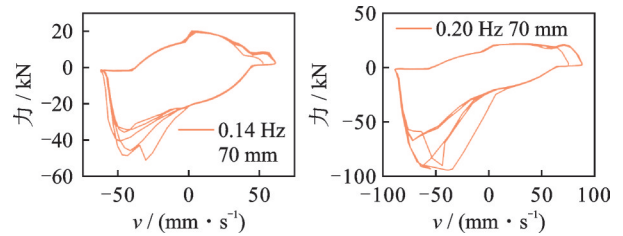


图 5 变阻尼变刚度试验中 S₂试件不同频率速度-力曲线
Fig.5 Force-velocity curves of S₂ specimen under different loading frequencies

装置的输出力超出了加载设备量程所导致。为进一步研究装置的变阻尼变刚度协调状态,避免输出力超限,在对 S₂试件加载时,仅加载到 70 mm 幅值。由于变阻尼耗能系统输出阻尼力的大小主要由阀芯交叉孔的大小决定,因此可考虑增大交叉孔,减小控制力的输出,重新设计控制阀,以适应装置更大输出力的要求。

3 组合隔震新体系控制分析

将被动变阻尼变刚度装置与隔震支座进行组合,放入隔震层中形成一种隔震新体系。利用 Benchmark 模型对组合隔震新体系与常规隔震、黏滞阻尼器组合隔震体系进行控制效果和装置不同参数影响的计算分析。

3.1 Benchmark 模型与组合隔震新体系组成

选取某 20 层抗震钢结构作为计算用结构模型,该 Benchmark 结构主要用于研究和比较各种控制技术的有效性和适用性。

该结构平面尺寸为 30.48 m × 36.58 m,高为 80.77 m,东西方向有 6 跨,南北方向有 5 跨,各跨跨距均为 6.10 m。该结构除首层层高为 5.49 m 外,其他各层层高均为 3.96 m。结构基本参数见表 3。

表 3 结构基本参数

Tab.3 Basic parameters of the structure

层数	质量/kg	剪切刚度/(N·m ⁻¹)
1	5.32 × 10 ⁵	6.0 × 10 ⁹
2	5.65 × 10 ⁵	2.4 × 10 ¹⁰
3~20	5.51 × 10 ⁵	2.4 × 10 ¹⁰

3.2 组合隔震新体系计算模型

3.2.1 装置计算模型

装置通过两阶段实现变阻尼耗能和变刚度限位功能:①变阻尼耗能阶段,通过实时调节阻尼系数输出可变阻尼力;②多阶梯变刚度限位阶段,当最大相

对位移超出临界位移时,利用弹簧组分阶段附加刚度。具体计算公为

$$f_d = \begin{cases} C_{VD}\dot{u} & (|u| \leq d, \text{变阻尼耗能阶段}) \\ C_{VD}\dot{u} + K_{VS}u & (d < |u| \leq d_u, \text{变刚度限位阶段}) \end{cases} \quad (6)$$

其中: f_d 为装置输出力; C_{VD} 为变阻尼系数; K_{VS} 为变刚度系数; u 为活塞相对油缸的位移; \dot{u} 为活塞相对油缸的速度; d 为装置预留行程; d_u 为装置最大行程。

对于阻尼系数,前期试验结果显示,速度与阻尼呈现非线性关系,其斜率即阻尼系数也呈现不断增大的趋势。为了体现变阻尼装置阻尼系数随速度可变的优点,同时为了简化计算,数值计算中选取耗能装置阻尼系数与速度呈线性关系。阻尼系数公式为

$$C_{VD} = a\dot{u} + c_0 \quad (7)$$

其中: a 为变阻尼指数; c_0 为阻尼器的初始阻尼系数,均与装置设计参数有关。

对于变刚度系数,以两阶段为例,在第 1 阶段由自由高度较大的碟形弹簧组限位;在第 2 阶段由内外碟形弹簧组共同限位。变刚度系数计算公式为

$$K_{VS} = \begin{cases} k_1 & (d < |u| \leq d_1, \text{第1阶段}) \\ k_1 + k_2 & (d_1 < |u| \leq d_u, \text{第2阶段}) \end{cases} \quad (8)$$

其中: k_1 、 k_2 分别为第 1 阶和第 2 阶碟形弹簧的刚度系数; d_1 为活塞相对缸体的移动距离。

3.2.2 组合隔震新体系运动方程

为研究组合隔震新体系的控制效果,采用层剪切串联多自由度模型进行分析。根据上述简化分析

模型,结构运动方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) - F_d \quad (9)$$

其中: M 、 C 、 K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; x 、 \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为结构的位移、速度和加速度; $F_d = f_d I$, I 为阻尼器位置矩阵; $F(t)$ 为外部荷载矩阵,当输入为地震动时 $F(t) = -ME\ddot{x}_g$, $E = (1, \dots, 1)^T$ 。

由于隔震层与上部结构不同,两者的阻尼有明显差异,所以采用非比例阻尼模型生成阻尼矩阵。

使用 Simulink 可视化仿真程序进行求解,整个仿真系统主要包括前处理子模块、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、结构参数和装置力学模型参数,输入采用状态方程的状态空间子模块,通过输出子模块输出结构反应的位移、速度和加速度矩阵。

3.3 组合隔震体系控制效果分析

以 Benchmark 模型为基础,对比计算叠层橡胶支座隔震体系 1、普通黏滞阻尼器隔震体系 2 和被动变阻尼变刚度装置隔震体系 3。

选取 El Centro 地震波,将加速度峰值调幅至 7 度罕遇(220 cm/s²)、8 度罕遇(400 cm/s²)及 9 度罕遇(620 cm/s²)。图 6 为不同烈度地震输入下结构顶层加速度时程曲线。El Centro 地震波结构顶层加速度峰值及控制效果见表 4,其隔震层位移峰值见表 5。

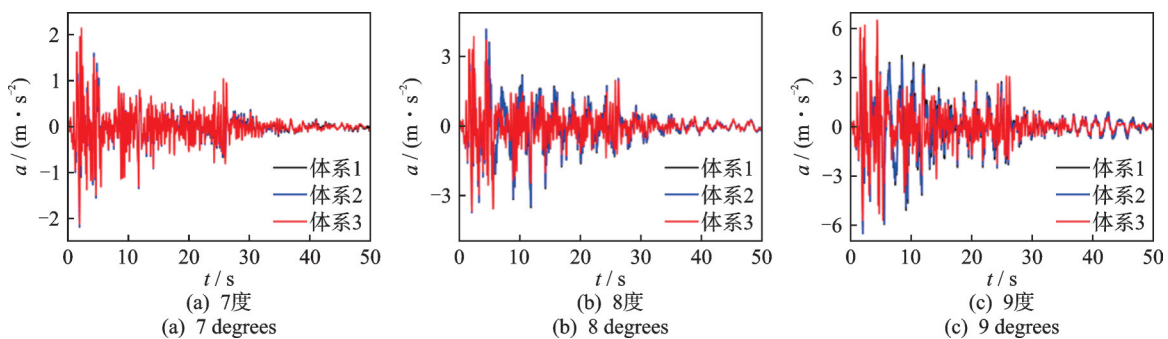


图 6 不同烈度地震下结构顶层加速度时程曲线

Fig.6 Acceleration time history curves of roof under earthquakes with different intensities

表 4 El Centro 地震波结构顶层加速度峰值及控制效果

Tab.4 Peak roof accelerations and corresponding control effects under El Centro

地震烈度	无控	体系 1		体系 2		体系 3	
	$a/(m \cdot s^{-2})$	$a/(m \cdot s^{-2})$	控制率/%	$a/(m \cdot s^{-2})$	控制率/%	$a/(m \cdot s^{-2})$	控制率/%
7 度	6.12	2.18	64.4	2.17	64.5	2.16	64.7
8 度	11.19	4.19	62.6	4.17	62.7	3.86	65.5
9 度	17.41	6.54	62.4	6.52	62.5	6.48	62.8

表5 El Centro地震波隔震层位移峰值

Tab.5 Peak roof displacement under El Centro

地震烈度	体系1	体系2	体系3
7度	0.24	0.17	0.08
8度	0.28	0.27	0.13
9度	0.33	0.31	0.16

可以看出,针对不同烈度地震波输入,在加速度控制效果基本相同的情况下,相对其他2种控制方式,组合隔震新体系对隔震层位移的控制效果更好,可以承受更大烈度地震波输入。

为进一步分析组合隔震新体系对不同类型地震

波的控制效果,选取8度罕遇烈度下典型 Benchmark 标准地震动,对2条远场地震波 El Centro、Hachinohe 和2条近场地震波 Northridge、Kobe 进行控制分析,输入加速度峰值为 400 cm/s^2 。

不同地震波结构顶层加速度时程曲线和隔震层位移时程曲线分别如图7、8所示。其结构顶层加速度峰值及控制效果见表6,隔震层位移峰值见表7。可以看出,基于被动变阻尼变刚度装置的隔震体系相对其他2种隔震体系,针对不同场地类型地震波,在顶层加速度控制效果基本相同的情况下,可更好地限制隔震层位移反应。

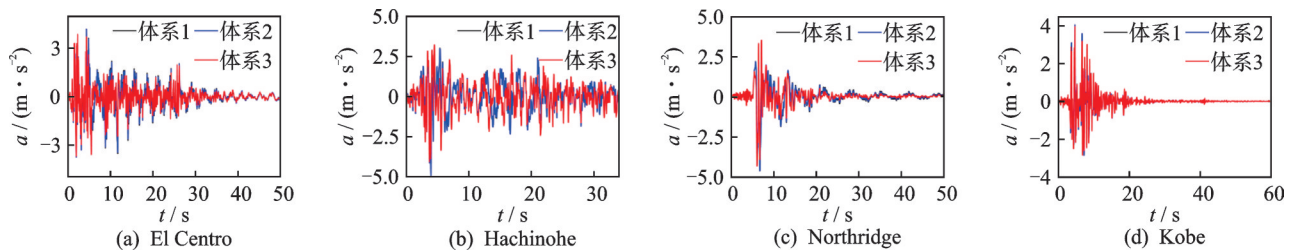


图7 不同地震波结构顶层加速度时程曲线

Fig.7 Acceleration time-history curves of roof under different earthquakes

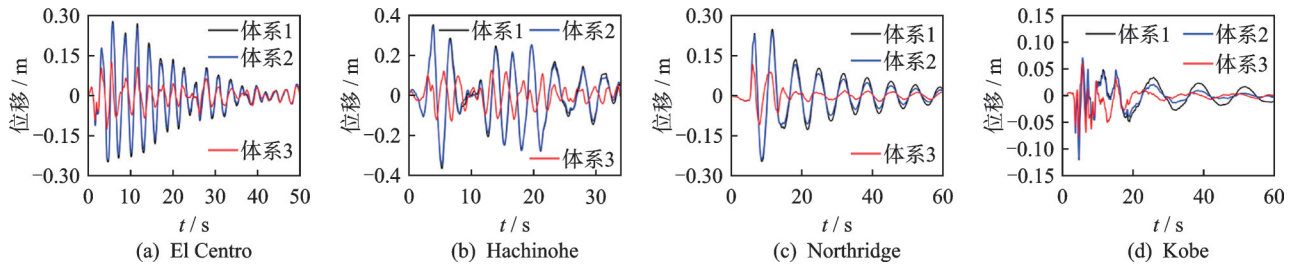


图8 不同地震波结构隔震层位移时程曲线

Fig.8 Displacement time history curves of isolation layer under different earthquakes

表6 不同地震波下结构顶层加速度峰值及控制效果

Tab.6 Peak roof acceleration and corresponding control effect under different earthquakes

地震波	无控	体系1		体系2		体系3	
	$a/(m \cdot s^{-2})$	$a/(m \cdot s^{-2})$	控制率/%	$a/(m \cdot s^{-2})$	控制率/%	$a/(m \cdot s^{-2})$	控制率/%
El Centro	11.19	4.19	62.6	4.17	62.7	3.86	65.5
Hachinohe	11.34	4.92	56.6	4.89	56.9	4.06	64.2
Northridge	13.26	4.62	65.2	4.60	65.3	4.31	67.5
Kobe	12.51	4.03	67.8	4.03	67.8	3.95	68.4

表7 不同地震波下隔震层位移峰值

Tab.7 Peak displacement of isolation layer under different earthquakes

地震波	体系1	体系2	体系3
El Centro	0.20	0.18	0.12
Hachinohe	0.37	0.35	0.15
Northridge	0.25	0.24	0.12
Kobe	0.12	0.12	0.08

4 组合隔震新体系装置控制参数影响分析

4.1 预留长度

以装置工作时限位弹簧首次发生接触开始限位的位置为预留长度,研究装置限位预留长度对隔震层响应的影响。取变刚度限位系统“双折线”刚度比

$k_1:k_2$ 为 1:2,以隔震层刚度为参照,设定第 1 阶限位刚度为 $0.1k_f$,两阶段限位长度比 $d_1:d_2$ 为 1:2。预留长度 D 取不同数值时进行研究,其对结构响应的影响见表 8。

表 8 限位预留长度 D 对结构响应的影响

Tab.8 Effect of limit reservation length D on structural response

工况	预留长度/mm	隔震层位移/mm	顶层加速度/($m \cdot s^{-2}$)
1	40	0.145	4.225
2	50	0.147	4.200
3	60	0.149	4.185
4	70	0.150	4.184
5	80	0.151	4.183

结果显示,在预留长度取值范围区间内,顶层加速度峰值随预留长度的增大而减小,当 D 取值范围在 40~60 mm 内,加速度峰值减小较快,大于 40 mm 时逐渐趋于稳定。较小的限位间距 D 对隔震层位移有较好的限位效果,但会放大上部结构加速度响应。限位预留长度增大时,上部结构响应趋于常值,但限位功能降低。因此,应综合考虑预留长度对隔震层位移、上部结构加速度的影响,选择合理的限位长度。

不同预留距离下阻尼器滞回耗能性能存在一定的差别。预留长度对装置滞回特性的影响如图 9 所示。由图可见,装置在预设限位距离后刚度值发生

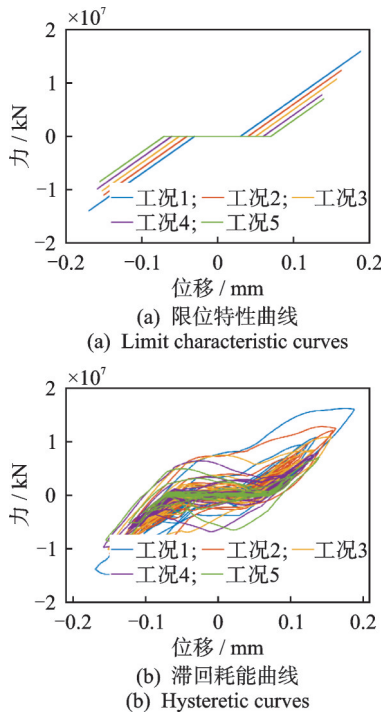


图 9 预留长度对装置滞回特性的影响
Fig.9 Effect of reservation length on hysteresis characteristics of the device

了改变。随着预留间距的减小,装置变刚度限位能力有所增加,而耗能能力有所减弱。

4.2 限位刚度

以隔震层刚度 k_f 为参照,定义装置限位刚度比 $\eta = k/k_f$ 。预留长度 $D=50$ mm 时,限位刚度 k 对结构响应的影响见表 9。结果显示,随着刚度比的增大,隔震层位移峰值减小,顶层加速度峰值有一定放大。因此,应综合考虑隔震层位移和顶层加速度控制要求,选择合理的限位刚度。

表 9 限位刚度 k 对结构响应的影响

Tab.9 Effect of limiting stiffness k on structural response

工况	刚度比	隔震层位移/mm	顶层加速度/($m \cdot s^{-2}$)
1	40	0.145	3.95
2	50	0.138	4.12
3	60	0.131	4.19
4	70	0.125	4.22
5	80	0.121	4.25

限位刚度对装置滞回特性的影响如图 10 所示。由图可见,随着限位刚度的增大,装置滞回环的倾斜程度随之增大,但滞回环面积不变,装置的变刚度部件只附加刚度而不提供阻尼耗能。

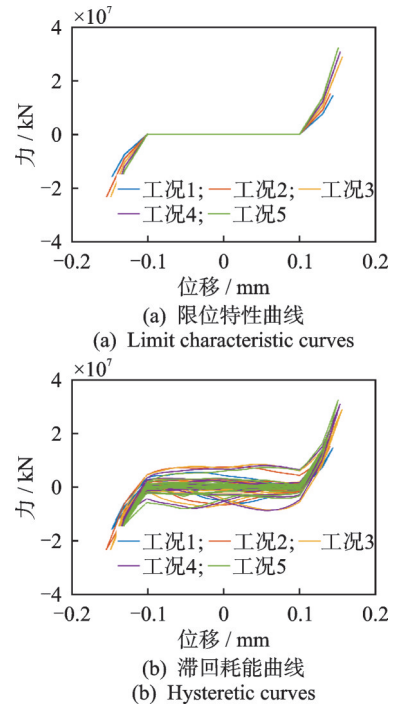


图 10 限位刚度对装置滞回特性的影响
Fig.10 Influence of limit stiffness on hysteresis characteristics of the device

4.3 阻尼系数

根据式(7),数值计算中装置采用阻尼系数 C_{VD}

与速度 \dot{u} 呈线性关系, 即 $C_{VD} = a\dot{u} + c_0$, 因此可通过变阻尼系数 a 体现装置的变阻尼能力。变阻尼系数 a 对结构响应的影响见表 10。

表 10 变阻尼系数 a 对结构响应的影响

Tab.10 Effect of variable damping coefficient a on structural response

工况	变阻尼系数	隔震层位移/mm	顶层加速度/($m \cdot s^{-2}$)
1	1.0×10^7	0.181	3.79
2	1.5×10^7	0.153	3.61
3	2.0×10^7	0.143	3.52
4	2.5×10^7	0.139	3.48
5	3.0×10^7	0.131	3.46

结果表明, 不同变阻尼系数对结构响应控制影响较大。在一定范围内增大变阻尼系数, 有利于降低隔震层最大位移和顶层加速度。阻尼系数对装置滞回特性的影响如图 11 所示。由图可见, 滞回曲线面积随变阻尼系数的增大而逐渐增大。

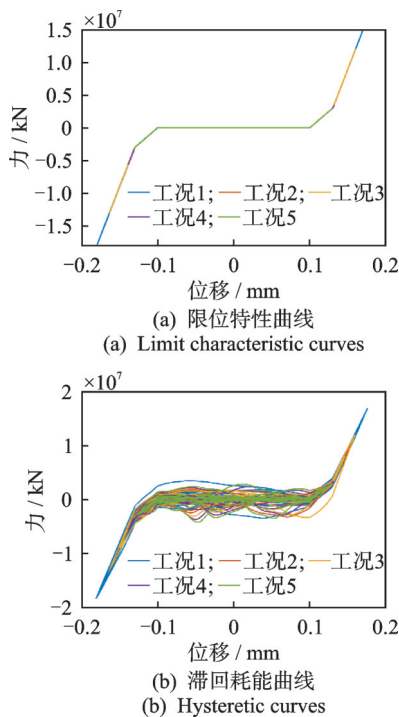


图 11 阻尼系数对装置滞回特性的影响

Fig.11 Influence of damping coefficient on hysteretic characteristics of the device

5 结论

1) 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。通过在阻尼系统油路中加设阀门来控制阻尼介质流量的大小, 实现可

变阻尼力耗能功能。通过设置自由高度不同的碟簧组, 实现可变弹性力限位功能。

2) 对制作加工的被动变阻尼变刚度装置进行了耗能和限位性能试验。结果表明, 装置随速度响应增大输出可变阻尼力, 随位移响应幅值增加输出可变弹性力。在整个加载过程中, 当速度响应最大时, 位移响应较小, 变阻尼系统耗散更多能量; 当位移响应最大值时, 速度响应较小, 装置发挥限位作用限制位移增大, 因此变阻尼变刚度两系统可较好地协同工作。

3) 相对普通隔震结构和设置黏滞阻尼器隔震结构, 基于被动变阻尼变刚度装置的组合隔震新体系可在加速度响应控制基本相同时, 对隔震层位移响应进行更有效的控制, 并对不同烈度和场地波具有更好的控制适用性。

4) 装置预留长度、限位刚度和阻尼系数 3 个参数对控制效果影响明显。预留长度增大, 隔震结构层位移响应增大, 顶层加速度减小; 随着限位刚度增大, 隔震层位移响应减小, 顶层最大加速度增大; 阻尼系数增加可减小隔震层位移。

参 考 文 献

- [1] 欧进萍. 结构振动控制: 主动, 半主动和智能控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-38.
- [2] 周锡元, 阎维明, 杨润林. 建筑结构的隔震、减振和振动控制[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 2-12, 26. ZHOU Xiyuan, YAN Weiming, YANG Runlin. Seismic base isolation, energy dissipation and vibration control of building structures[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(2): 2-12, 26. (in Chinese)
- [3] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 14-25.
- [4] 李爱群, 张志强, 徐庆阳. 建筑减振粘滞阻尼器工程应用新进展[C]//建筑结构杂志首届全国建筑结构技术交流论文集. 北京, 中国: 中国建筑设计研究院, 2006: 739-744.
- [5] 任文杰, 李宏男, 宋钢兵, 等. 新型自复位 SMA 阻尼器对框架结构减震控制的研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 14-20. REN Wenjie, LI Hongnan, SONG Gangbing, et al. Study on seismic response control of frame structure using innovative re-centring SMA damper[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 14-20. (in Chinese)
- [6] 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.

- [7] 刘文光, 方贝舒, 何文福, 等. 隔震支座沿曲面布置的隔震结构动力响应及振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(3): 1-12.
LIU Wenguang, FANG Beishu, HE Wenfu, et al. Study on dynamic response and shaking table test of isolated structure with isolation bearings arranged along curved surface[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(3): 1-12.(in Chinese)
- [8] 刘洁亚, 黄小宁, 王宁, 等. 主余震序列作用下基础隔震结构地震损伤研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(6): 1052-1058.
LIU Jieya, HUANG Xiaoning, WANG Ning, et al. Research on seismic damage of base-isolated structures under mainshock-aftershock sequences [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41 (6) : 1052-1058. (in Chinese)
- [9] 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 Ms6.8 earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 42(6): 1-11.(in Chinese)
- [10] SPENCER J B F, JONHNSON E A, RAMALLO J C. "Smart" isolation for seismic control [J]. JSME International Journal Series C: Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing, 2000, 43(3): 704-711.
- [11] AZAR B F, VELADI H, TALATAHARI S, et al. Optimal design of magnetorheological damper based on tuning Bouc-Wen model parameters using hybrid algorithms [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(3): 867-878.
- [12] 鲁正, 黄志矿. 半主动碰撞耗能技术的减震机理与试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(增刊1): 225-231.
LU Zheng, HUANG Zhikuang. Damping mechanism and experimental study on semi-active impact damping technology [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(supp1): 225-231.(in Chinese)
- [13] 李忠献, 徐龙河. 新型磁流变阻尼器及半主动控制设计理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012:12-14.
- [14] 王焕定, 付伟庆, 张永山, 等. 磁流变智能基础隔震系统的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 880-885.
WANG Huanding, FU Weiqing, ZHANG Yongshan, et al. Test of smart-based isolation system with magnetorheological damper [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(7): 880-885.(in Chinese)
- [15] 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 magnetorheological damper employing pseudo-negative-stiffness control algorithm [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 1-10.(in Chinese)
- [16] 梅真, 高毅超, 郭子雄. 磁流变阻尼器动力性能测试与建模[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3): 553-559.
MEI Zhen, GAO Yichao, GUO Zixiong. Dynamic performance testing and modeling of magnetorheological dampers [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 553-559. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 丁建华, 欧进萍. 油缸孔隙式黏滞阻尼器理论与性能试验[J]. 世界地震工程, 2001, 17(1): 30-35.
DING Jianhua, OU Jinping . Theoretical study and performance experiment for cylinder-with-holes viscous damper [J]. World Earthquake Engineering, 2001, 17(1): 30-35.(in Chinese)



第一作者简介:付伟庆,男,1976年10月生,博士、教授。主要研究方向为结构振动控制。曾发表《PVDD装置多参数性能试验与隔震新体系控制分析》(《振动、测试与诊断》2023年第43卷第1期)等论文。
E-mail: fuweiqing@qut.edu.cn