

# 碟形弹簧竖向减震装置的性能试验研究

张玉敏<sup>1</sup>, 苏幼坡<sup>1</sup>, 苏经宇<sup>2</sup>

(1. 河北理工大学 建筑工程学院, 唐山 063009; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:**基础隔震技术是目前应用最广泛的结构控制方法,但是,目前这种技术只是最大限度地减少或隔离水平地震作用,而对竖向地震作用几乎没有影响。为改善隔震技术在隔离竖向地震中的限制,研制了一种由碟形弹簧和粘弹性阻尼器组合而成的碟形弹簧竖向减震装置,并对其进行了在静载和动载作用下的力学性能试验研究,给出了该装置在竖向静力和动力作用下的等效刚度和阻尼比,建立了恢复力模型,试验研究表明,碟形弹簧竖向减震装置能有效的解决竖向大承载力和竖向阻尼的难题,力学性能优良且稳定,加工制作容易,是一种比较理想的竖向减震装置。

**关键词:**碟形弹簧;粘弹性阻尼器;竖向地震等效刚度;等效阻尼比;恢复力特性

中图分类号:TU375 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)06-0051-05

## Mechanical Performance of a Vertical Seismic Isolation System Employing a Dish Spring

ZHANG Yu-min<sup>1</sup>, SU You-po<sup>1</sup>, SU Jing-yu<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, P. R. China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100044, P. R. China)

**Abstract:** The base-isolation technique has been widely used in different countries to reduce seismic disasters during earthquakes. But most of these devices are effective only in horizontal earthquake responses and do not work well in vertical earthquake responses. We propose a vertical seismic isolation system composed of a dish spring and a visco-elastic damper. To study the stiffness and damping performance of this isolation system, a series of tests under static and dynamic loads were performed. The results show that this system is effective in solving problems related to strong vertical bearing capacity and vertical damping of vertical isolation. The system has not only appropriate vertical stiffness and damper performance, but also excellent mechanical performance. In addition, it is compact, easy to manufacture, and can serve as an ideal vertical damping device.

**Key words:** Dish Spring; visco-elastic damper; vertical earthquakes; equivalent stiffness; equivalent damping ratio; resilience property

大量地震震害和研究结果表明,竖向地震对结构物的影响是不能忽视的<sup>[1-2]</sup>,在震中区它的作用有时超过水平地震作用。由于一般建筑结构竖向刚度较大,其竖向基本周期与竖向地震波卓越周期相近,因而结构的竖向震动特性备受关注。基础隔震技术主要解决了水平向的地震减震问题,这方面国内外的研究和应用都比较多,并且有实际工程经受了地震考验,表现出良好隔离地震水平作用的效果。但隔震建筑的强震记

录表明,对于竖向地震反应却基本无减少作用。虽然隔震层除橡胶支座外,有的还附加阻尼器,但由于隔震层一般不能提供竖向的相对运动,因而不能起到隔离或减少竖向地震的作用。利用隔震装置将水平地震作用减弱后,竖向地震作用有可能成为主要的地震作用而引起竖向破坏。因此,研究减轻结构竖向地震反应的装置是很必要的。

为改善隔震装置的竖向减震性能,提出了一种竖

\* 收稿日期:2008-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(50278093)

作者简介:张玉敏(1973-),女,副教授,主要从事工程抗震方面的研究。(E-mail)fenger2356@163.com

苏幼坡(联系人),男,教授,硕士生导师。(Tel)0315-2592518;(E-mail)suyoupo@165e.com

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

向减震装置——碟形弹簧竖向减震装置,并对其进行试验研究和力学性能分析。

1 碟形弹簧竖向减震装置的构造

减震装置采用碟形弹簧作为竖向减震元件,利用碟形弹簧的变刚度特性和耗能能力<sup>[3]</sup>,根据上部结构和场地特性选取不同的组合方式形成合适的竖向刚度,同时在装置内部设置粘弹性阻尼器。其构造形式如图 1 所示:

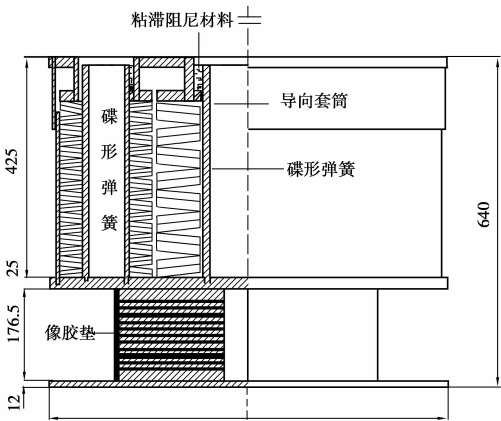


图 1 碟形弹簧竖向减震装置

减震装置中间放一主碟型弹簧组,在直径 550 mm 的圆周上均布几个辅助碟型弹簧组和几个直径为 72 mm 的粘弹性阻尼器。因为碟形弹簧组有中心导向筒,粘弹性阻尼器有芯柱,限制了该装置的水平位移,使得它几乎只能发生竖向位移。并且由于装置有比较小的竖向刚度,能够提供比较合适的竖向阻尼,这一特性正好能对竖向地震起到较好的隔震效果。并且通过碟形弹簧的规格和组合方式调整容易获得所需的刚度,通过调整粘弹性阻尼器的厚度可以获得不同的阻尼比。

2 减震装置的试验设计

2.1 试验模型

为了研究竖向减震装置的力学性能,采用图 2 所示两种竖向减震装置试验模型。模型 1 只有碟形弹簧柱,模型 2 加了粘弹性阻尼器。通过试验比较两种装置性能的不同。在研究结构的振动特性(自振频率与振动模态)时,可以主要保持惯性力与弹性恢复力的相似<sup>[4]</sup>,由于试验中所选模型与原型所用材料一致,在有些情况下,为了保持弹性恢复力的相似,不必严格保持几何相似关系,而可采用更为灵活的处理办法。所以模型设计主要控制了周期和长度比尺的相似。



图 2 模型的竖向性能试验系统

2.2 试验系统

试验加载采用 500 kN 拟动力设备,加载控制和数据采集由计算控制系统完成。试验中采用 BLR-1 应变式力传感器和 YD-21 动态应变仪测量施加力,采用磁致伸缩式精密位移传感器测量试验的位移值,试验的数据由计算机数据采集系统采集并记录计算机中。

2.3 试验方案

(1)静载试验:根据试验设备的特点,采用位移控制的方法,从零开始加载,最大位移加到 48 mm,测量荷载一位移曲线,由此得到装置的竖向刚度。

(2)动载试验:为了检验碟形弹簧竖向减震装置在动载下的刚度性能和阻尼性能。试验中分别采用 0.1~5 Hz 的加载频率,并针对不同的频率给定不同的位移,其中最大振动幅度为 10 mm,最小振动幅度为 2 mm。振动平衡位置分别取预压 25 mm 和 20 mm 两种。

3 减震装置的力学性能试验及分析

3.1 竖向承载力

由于竖向减震装置应放置结构的底部,所以其竖向承载力的大小是保证上部结构安全的先决条件,设计承载力 50 t,相当于实际结构中承载 300 t 左右,此时减震装置的竖向位移为其极限行程的 75%。试验对竖向隔震装置进行了极限承载力试验,从自由状态开始缓慢加载,竖向位移到达 75% 极限行程对应的荷载为 51 t 左右,与理论计算结果基本吻合。

对单片碟形弹簧加载直至压平(即压至其 100% 极限行程),然后缓慢卸载,反复进行 3 次,每次卸载碟形弹簧都可以恢复至原来的高度,并且碟形弹簧没有丝毫的损坏。

根据以上试验可以得出结论,设计合理的碟形弹簧竖向减震装置具有很高的竖向承载力,完全可以满足上部结构在常规荷载作用下的承载力要求。

3.2 静力竖向刚度

两个模型的竖向刚度曲线如图 3 所示,根据这些曲线不难求得减震装置的竖向刚度。

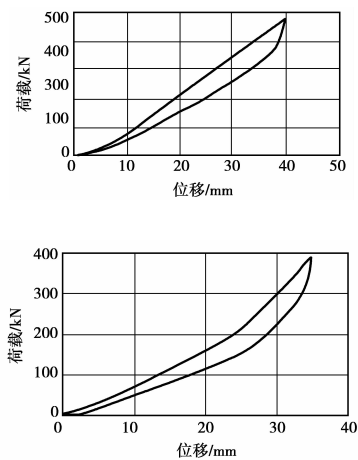


图 3 模型竖向刚度试验曲线

碟形弹簧竖向减震装置的静力加载试验曲线和理论结果<sup>[5]</sup>吻合得很好。在相同位移下试验中装置的承载力较理论值略大(见表 1 和表 2)。

表 1 模型 1 静力竖向刚度的试验与理论对比结果

	竖向承载力 $P/\text{kN}$	竖向刚度 $K/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$
试验值	475.2	11.875
理论值	436.7	11.7
相差	8.8%	1.5%

表 2 模型 2 静力竖向刚度的试验与理论对比结果

	竖向承载力 $P/\text{kN}$	竖向刚度 $K/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$
试验值	382.2	19.914
理论值	343.3	19.7
相差	11.3%	1.1%

3.3 竖向动力等效刚度和等效阻尼比(图 4、图 5)

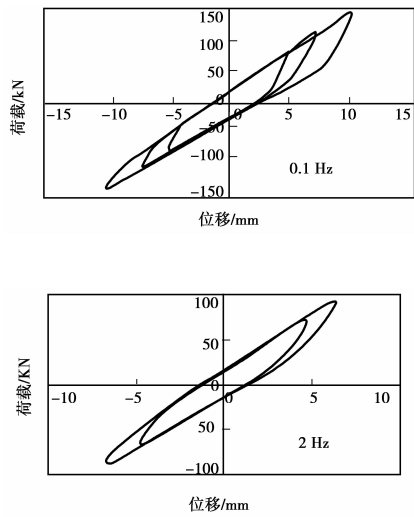


图 4 模型 1 典型滞回曲线

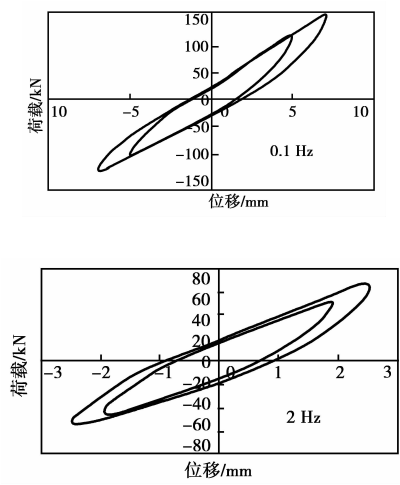


图 5 模型 2 典型滞回曲线

限于篇幅,只给出了 2 个模型在 0.1 Hz 和 2 Hz 的典型滞回曲线,从图中可以看出,模型 1 有一定的阻尼耗能性能,其竖向阻尼比大约 0.12,等效刚度大约为 14 kN/mm,从滞回曲线的形状看,出现了明显的不对称性,主要原因是因为装置 1 的阻尼主要来自于碟形弹簧片之间的摩擦力,而摩擦力的大小跟压力成正比,因此压力大阻尼力大,曲线饱满,而卸载时不存在这种影响。模型 2 由于加了粘弹性阻尼器,其滞回曲线比较丰满,表明阻尼耗能性能较好,从滞回曲线的形状来看,这种竖向减震装置可以简化为双线性模型或退化双线性模型。模型 2 的竖向等效刚度大约为 20~26 kN/mm,等效阻尼比大约为 23%。表 3~6 分别给出了模型 1 和模型 2 的等效刚度和等效阻尼比。其中等效刚度  $k_e$  由式(1)得出,等效阻尼比  $\xi$  由式(2)得出:

$$k_e = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \tag{1}$$

$F_{\max}$ 、 $F_{\min}$  为一个加卸载循环中的最大、最小输出力; $\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$  为一个加卸载循环中的最大、最小位移

$$\xi = \omega_D / 4\pi\omega_S \tag{2}$$

$\omega_D$  为实际力—位移图的面积,也即每周的能量损失;

$\omega_S$  为刚度曲线中力—位移图的面积,即弹性应变能。

表 3 模型 1 的等效阻尼比  $\xi$

		加载频率/ Hz							
位移幅值/mm		0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	
预压 20	10	0.110	0.115	0.120	—	—	—	—	
	7	0.112	0.119	0.130	0.142	—	—	—	
	5	0.128	0.133	0.136	0.145	0.152			
	2.5	—	—	—	—	—	0.173	0.187	
	2	—	—	—	—	—	0.179	—	

续表 3

位移幅值/mm		加载频率/ Hz						
		0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
预压 25	10	0.121	0.128	0.130				
	7	0.126	0.131	0.139	0.149			
	5	0.135	0.146	0.153	0.159			
	2.5	—	—	—	—	0.212	—	—
	2	—	—	—	—	—	0.223	—

表 4 模型 2 的竖向等效阻尼比  $\xi$

位移幅值/mm		位移幅值/ Hz						
		0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
预压 25	7	0.191	0.199	0.212	0.233	—	—	—
	5	0.199	0.221	0.256	0.272	—	—	—
	3	—	—	—	—	0.262		
	2.5	—	—	—	—	—	0.283	
	1.5	—	—	—	—	—	—	0.296

表 5 模型 1 的等效刚度  $k_e$

位移幅值/mm		加载频率/ Hz						
		0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
预压 20	10	14.285	14.712	15.571	—	—	—	—
	7	13.810	14.621	15.433	16.142	—	—	
	5	13.101	14.500	15.411	17.032	17.231		
	2.5	—	—	—	—	—	17.639	18.217
预压 25	10	15.800	16.412	17.103	—	—	—	—
	7	15.423	15.571	15.715	17.857	—	—	—
	5	13.901	15.000	15.521	18.096	18.933	—	—
	2.5	—	—	—	—	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	19.025	

表 6 模型 2 的等效刚度  $k_e$

位移幅值/mm		加载频率/ Hz						
		0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
	7	20.512	20.811	21.036	21.166	—	—	—
	5	20.785	21.103	21.385	21.469	—	—	—
	3	—	—	—	—	23.339		
预压 25	2.5	—	—	—	—	—	25.526	
	1.5	—	—	—	—	—	—	26.068

3.4 频率对阻尼比和刚度的影响

等效阻尼比和等效刚度与频率的关系曲线如图 6 ~7 所示,随着频率的增加,等效刚度和等效阻尼比总体上增大,但增大幅度不十分明显。而从预压 25 mm 和 20 mm 的两种平衡位置来看,刚度和阻尼比的变化

不是很明显。由于计算阻尼比采用的理论是粘滞阻尼理论,而对于给定的粘滞阻尼机理,体系的能量损失将与谐振频率成比例,所以阻尼比和刚度跟频率相关是合理的。但是从试验以及计算结果来看,频率对阻尼比和刚度虽有一定的影响,但不是十分显著,分析其原因是由于减震装置的阻尼不仅仅包括粘滞阻尼,还有弹簧片之间的摩擦带来的库伦阻尼,这种阻尼的影响从常规的计算方法中不能体现出来,但在试验中却能表现,因此基于试验的计算结果会受到其影响,这也证明了粘滞阻尼理论的局限性。

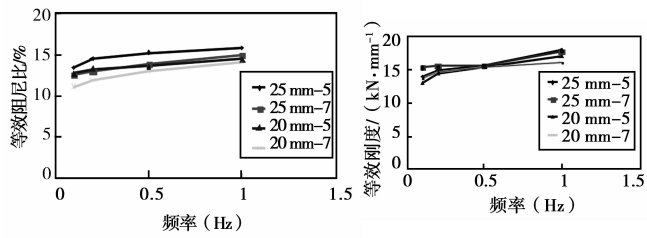


图 6 模型 1 频率对等效阻尼比和刚度的影响曲线

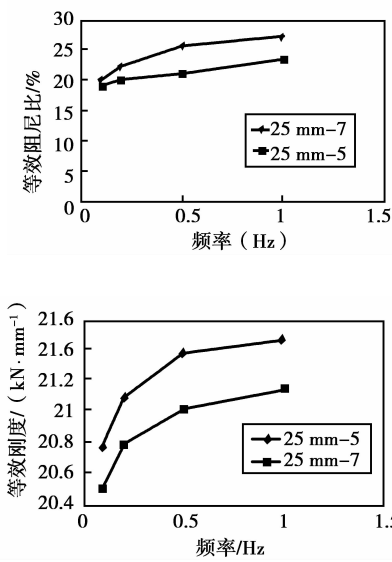


图 7 模型 2 频率对等效刚度的影响曲线

4 竖向减震装置的恢复力模型

根据上述试验结果可以建立竖向减震装置的恢复力模型,根据带有粘弹性阻尼器的碟形弹簧竖向减震装置的滞回特点,可以采用双线性或者退化双线性恢复力模型<sup>[6]</sup>,该文采用退化双线性模型。因为隔震后结构的基本频率一般在 2 Hz 左右,所以以竖向频率为 2 Hz 的滞回曲线为基础建立退化双线性恢复力模型。如图 8 所示;图中的  $K_1$  和  $K_2$  可以通过隔震支座的等效刚度和等效阻尼比很方便地确定<sup>[7-8]</sup>。

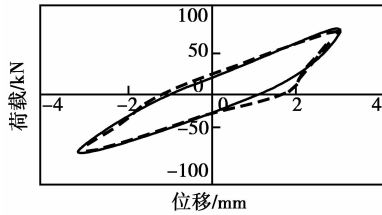


图 8 退化双线性恢复力模型

为了确定退化双线性模型的有关参数,现假设一个弹性阻尼系统的自由振动方程为:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = 0 \quad (1)$$

将方程(1)中左边的第 2、3 两项合并,用  $R(y)$  来表示,则公式变为

$$M\ddot{y} + R(y) = 0 \quad (2)$$

式中:  $R(y) = C\dot{y} + Ky = \bar{K}y$ ,  $\bar{K}$  称为隔震系统的等效刚度,可以用图 8 中的双线性刚度  $k_2$  和  $k_1$  表示。这样,就可以采用图 8 中的虚线描述隔震系统的真实恢复力曲线。为了求得  $k_1$  和  $k_2$ ,引入以下两条假设条件:

- (1) 两个模型系统的周期相同;
- (2) 两个模型系统位移  $y$  与时间  $t$  的特性曲线的包络线保持不变。

根据条件 1,可得

$$\sqrt{\frac{m}{k_1}} + \sqrt{\frac{m}{k_2}} = \frac{2}{\omega \sqrt{1-\xi^2}} \quad (3)$$

根据条件 2,可得

$$\ln\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \frac{-2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (4)$$

由式(3)和(4)联立求解,可以导出退化滞回模型中的两个参数  $k_1$  和  $k_2$ ,即

$$k_2 = \frac{1}{4}k_e(1-\xi^2)(e^\eta + 1) \quad (5)$$

$$k_1 = k_2 e^{-2\eta} \quad (6)$$

式中:  $\eta = \frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$ ,  $k_e$  和  $\xi$  为隔震支座的等效刚度和等效阻尼比。如前所述,它们可以通过减震装置试验确定。

## 5 结 论

1)由碟形弹簧和粘弹性阻尼器组合而成的碟形弹簧竖向减震装置不仅性能优良且稳定,加工制作容易,结构紧凑,除了可以用于建筑结构的竖向基础隔震外,还可以用于机械设备的隔振,是一种比较理想的竖向

减震装置。

2)研究结果表明,碟形弹簧竖向减震装置具有合适的竖向刚度和阻尼,竖向阻尼比可以达到 15%~40%,其静载刚度和承载力与理论计算吻合得较好。比较适宜作为隔离竖向地震的隔震器。

3)减震装置的等效阻尼比和等效刚度随频率的增加略有增大,但增大的幅度不明显。

4)根据试验得到的滞回曲线的特点,确定了碟形弹簧竖向减震装置的恢复力模型——退化双线性。并推导出模型中两个主要参数  $k_1$  和  $k_2$  的计算公式。

5)碟形弹簧竖向减震装置的减震效果尚需下一步的振动台试验来验证。

## 参考文献:

- [1] 白绍良,李正良,袁政强.高层建筑巨型结构体系的竖向地震作用[J].重庆建筑大学学报,1998,20(6):3-6.  
BAI Shao-liang, LI Zheng-liang, YUAN Zheng-qiang. Vertical seismic action on megastructure systems of tall buildings[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1998, 20(6):3-6.
- [2] 赵大鹏,宫必宁,晏成明.大跨度地下结构振动性态试验研究[J].重庆建筑大学学报,2002,24(5):3-6.  
ZHAO Da-peng, GONG Bi-ning, YAN Cheng-ming. Experimental analysis of vibration behavior for large-span underground structure[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(5):3-6.
- [3] 陆文遂.碟形弹簧的计算设计与制造[M].上海:复旦大学出版社,1980:4-5.
- [4] 林皋,朱彤,林蓓.结构动力模型试验的相似技巧[J].大连理工大学学报,2000,40(1):1-8.  
LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity technique for dynamic structural model test [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000,40(1):1-8.
- [5] 张玉敏.碟形弹簧竖向隔震装置的试验研究[D].石家庄:河北理工大学,2005.
- [6] 王松涛,曹资.现代抗震设计方法[M].北京:中国建筑工业出版社,1998:40-46.
- [7] BO Liang, XIONG Shi-shu, TANG Jia-xiang. Wind effects on habitability of base-isolated buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2002, Vol. 90, Issues 12-15:1951-1958.
- [8] B J STONE. The state of the art in the measurement of the stiffness and damping of rolling element bearing[J]. Annals of CIRP. 1982, 31(2): 529.

(编辑 王秀玲)