

新型 SMA 隔震支座动载性能试验研究

邓宗才, 孙宏俊, 刘春国, 牛 坤, 邓洪亮

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022)

[摘要] 以提高 SMA 利用率为目的, 设计了几种不同形式的 SMA 橡胶支座并进行了耗能试验。研究了水平位移幅值、水平加载频率以及竖向荷载等因素对 SMA 橡胶支座水平刚度、耗能量以及阻尼等基本力学性能的影响, 结果表明, 新型的 SMA 橡胶支座均可有效提高橡胶支座的耗能性能和回复能力, 并为 SMA 橡胶支座优化设计提供了依据。

[关键词] 形状记忆合金; 隔震支座; 初始刚度; 滞回耗能; 等效阻尼比

[中图分类号] TG113 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)12-0061-08

形状记忆合金 (shape memory alloy, 简称 SMA) 是一种智能材料, 具有独特的超弹性、形状记忆效应以及优异的滞回耗能特性。1991 年, Graeser 首先将 SMA 用作结构隔震耗能材料^[1], 后来很多学者对 SMA 作为耗能减震材料进行了研究^[2~5], 研究表明, SMA 可以用于土木工程结构被动、主动、半主动控制。SMA 与普通橡胶支座结合, 可增大橡胶支座的初始刚度、阻尼以及控制最大变形量等。对如何优化布置 SMA 于橡胶支座中的已有研究很少, SMA 的利用率不高, SMA 的超弹性性能未得到充分利用。笔者对几种不同布置方式的 SMA 橡胶支座的滞回耗能特性进行了试验对比, 以确定 SMA 在橡胶支座中更合理的布置形式, 达到优化设计的目的。

1 SMA 橡胶支座的耗能机理与试件构造

1.1 SMA 橡胶支座的耗能机理及其优点

隔震支座应具备较小的水平刚度以延长结构周期, 减小结构响应, 达到隔震的目的。同时还应具备较高的初始刚度以控制风反应和抵御微震作用; 具备良好的耗能能力, 以加速结构响应的衰减; 限制最大变形量以保证上部结构正常使用。普通橡胶

支座具有较小的水平刚度, 延长结构自振周期效果明显, 但是橡胶支座初始刚度低, 耗能能力差^[6]。SMA 与橡胶支座组成一个整体后, 可有效解决上述问题。在较小荷载作用下, 奥氏体 SMA 丝弹性模量大, 应变很小; 应力水平不足以诱发马氏体相变, 提高了隔震支座的初始刚度, 在风反应和微震作用下, SMA 隔震支座只产生很小的相对位移。在一般地震荷载作用下, SMA 橡胶支座变形增大, 应力诱发 SMA 马氏体相变, SMA 丝弹性模量减小, 隔震支座中 SMA 屈服, 屈服后刚度相对初始刚度减小, 延长结构自振周期, 达到减震隔震的目的。在较大的地震荷载作用下, SMA 橡胶支座变形进一步增大, SMA 丝马氏体相变完成, 并进入马氏体相变结束后的强化阶段, 弹性模量突然增大, 隔震支座水平刚度增大, 限制支座变形, 防止上部结构位移过大, 保障震后修复及使用。SMA 支座每一个加卸载循环, SMA 产生一个超弹性迟滞环, 往复循环, 耗散地震能量, 减轻地震对结构的破坏。

2.2 SMA 橡胶支座的构造

试验所用为圆形板式橡胶支座, 直径 80 mm, 高度 58 mm, 其中含有 15 层橡胶层, 14 层钢板, 每层厚度均为 2 mm, 普通橡胶支座编号 PT。镍

[收稿日期] 2005-06-16; **[修回日期]** 2005-07-28

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50378006)

[作者简介] 邓宗才 (1961-), 男, 陕西扶风县人, 博士, 北京工业大学建工学院教授

钛合金丝直径 1.8 mm, 奥氏体状态下弹性模量约 70 GPa, 抗拉强度大于 1 000 MPa。

设计了 4 种 SMA 橡胶支座模型并进行试验, 如图 1 所示, 分别编号为 HL, SX, SP 和 JC。其中 HL, SX, SP 支座由笔者自行研究设计, JC 支座参考了文献[3]。HL 支座中 SMA 丝两端固定连接于同一钢板, SMA 丝中部绕过固定在对面钢板上的滑轮; SX 支座中 SMA 丝竖向布置在橡胶支座的 4 个角; SP 支座中 SMA 丝通过 2 个单向铰摇臂连接, 摇臂一端铰接在支座底部钢板上, 另一端紧

贴支座上部钢板, 当支座上下钢板发生相对位移时, 一个摇臂受阻静止不动, 而另外一个摇臂则受支座上部钢板推挤而向外运动, 从而拉伸 SMA 丝; JC 支座中 SMA 丝交叉固定在橡胶支座上下钢板之间。由于丝材只能承拉而不能承压, 所以 HL, SX 和 SP 支座在 SMA 无预应力的情况下, 只要上下钢板发生水平相对位移时, SMA 丝始终处于受拉伸长状态, 构造上避免了 SMA 丝受压, 提高了 SMA 的利用率。

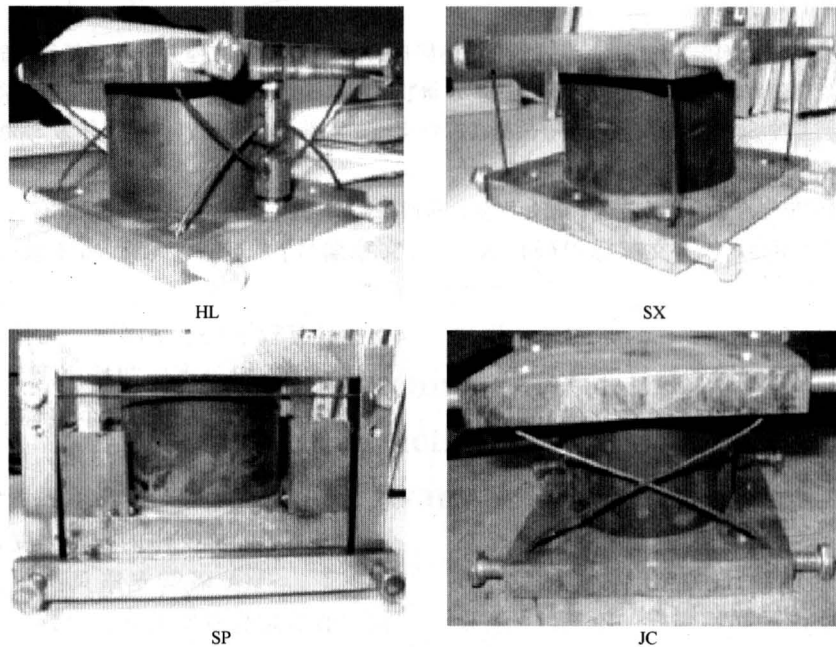


图 1 试验所用的 4 种 SMA 橡胶支座

Fig.1 4 seismic isolation bearings with SMA wires in the experiment

2 试验概况

2.1 试验目的

了解 4 种 SMA 橡胶支座的受力过程与耗能机理; 研究 SMA 在不同布置方式下 SMA 橡胶支座的初始刚度、耗能能力以及等效阻尼比, 分析各自的优劣性; 讨论位移幅值、水平加载频率以及竖向荷载变化对 SMA 橡胶支座滞回耗能性能的影响。

2.2 试验加载方案

试验在北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室进行。竖向用 100 kN 千斤顶加载; 水平方向为 ± 500 kN 的液压伺服作动器按正弦波循环加载, 采用位移控制方式, 位移传感器量程为 ± 25 mm。传感器连接到 wave book 512 动态数据

采集系统进行数据采集。不同结构形式的 SMA 橡胶支座在相同水平位移下引起 SMA 拉伸应变不同, 考虑到 SMA 的超弹性应变控制在 6% 以内, 各支座允许最大位移量亦不同。按照相等支座位移引起 SMA 变形相近的原则, 将 4 种 SMA 橡胶支座分为两组分别对比试验。其中 HL 支座与 SX 支座一组, SP 支座与 JC 支座一组。加载方案见表 1。

3 试验结果与讨论分析

3.1 隔震支座的滞回特性

试验得到的各种 SMA 支座典型的力—位移滞回曲线如图 2~图 6 所示, SMA 橡胶支座在同样加载条件下的滞回曲线的对比见图 7~图 8。

表 1 SMA 隔震支座试验加载方案

Table 1 Loading plan of seismic isolation bearings with SMA wires

支座类型	位移幅值/mm	水平加载频率/Hz	竖向荷载/kN
PT	8, 15	0.02, 0.1, 0.5	20, 30, 40
HL	8, 15, 20	0.02, 0.1, 0.5	20, 30, 40
SX	8, 15, 20	0.02, 0.1, 0.5	20, 30, 40
SP	3, 6, 8	0.1, 0.5, 1	20, 30, 40
JC	3, 6, 8	0.1, 0.5, 1	20, 30, 40

注：HL 支座事先施加了 1% 左右的预应变，使 SMA 处于张紧状态

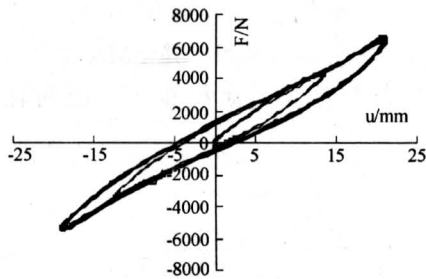


图 2 SX 支座在 30 kN, 0.1 Hz 下的滞回曲线

Fig.2 Hysteresis curve of SX bearing under 30 kN, 0.1 Hz

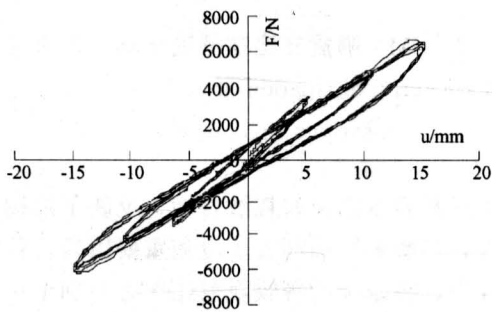


图 3 HL 支座在 20 kN, 0.1 Hz 下的滞回曲线

Fig.3 Hysteresis curve of HL bearing under 20 kN, 0.1 Hz

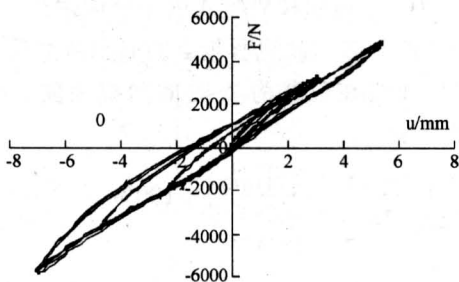


图 4 JC 支座在 40 kN, 0.1 Hz 下的滞回曲线

Fig.4 Hysteresis curve of JC bearing under 40 kN, 0.1 Hz

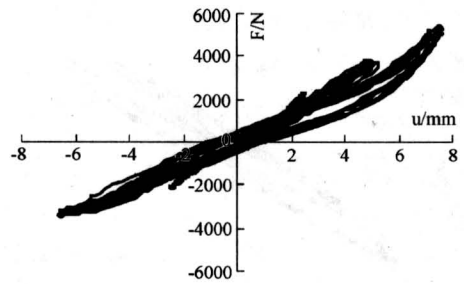


图 5 SP 支座在 40 kN, 0.1 Hz 下的滞回曲线

Fig.5 Hysteresis curve of SP bearing under 40 kN, 0.1 Hz

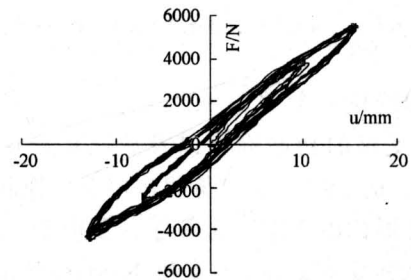


图 6 PT 支座在 20 kN, 0.02 Hz 下的滞回曲线

Fig.6 Hysteresis curve of PT bearing under 40 kN, 0.02 Hz

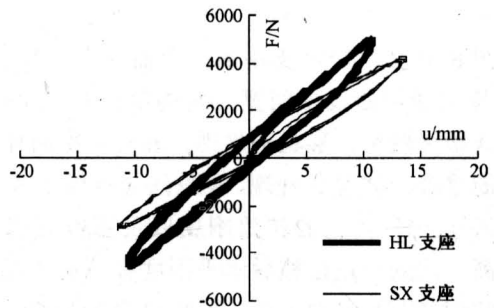


图 7 HL 支座与 SX 支座在 20 kN, 0.1 Hz 的滞回曲线对比

Fig.7 Hysteresis curve between HL bearing and SX bearing under 20 kN, 0.1 Hz

普通橡胶支座没有明显的初始水平刚度，且水平刚度随位移变化不大，总体上水平刚度较小^[6]。由图 2~图 6 可见，SMA 的加入增强了橡胶支座的水平回复力；SMA 橡胶支座的初始刚度明显增大，屈服后水平刚度有较大幅度降低，可满足隔震支座低刚度的要求。

由图 7 可见，HL 支座滞回曲线比 SX 支座饱满，类似铅芯橡胶支座的双线性滞回曲线；SX 支

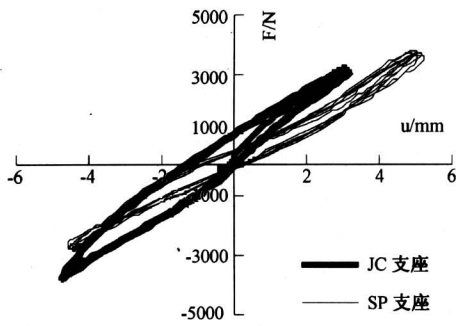


图8 SP支座与JC支座在40 kN, 0.1 Hz的
滞回曲线对比

Fig.8 Hysteresis curve between SP bearing
and JC bearing under 40 kN, 0.1 Hz

座滞回曲线中间部分与HL支座近似, 而两端略尖; HL支座的初始刚度以及屈服后刚度均大于SX支座。这是因为竖向荷载作用下, 橡胶支座产生竖向变形, 由于HL支座存在预应变, SMA仍然处于张紧状态, 而SX支座中SMA丝由于没有初始预应变, SMA丝处于松弛状态, 需要达到一定水平位移后方起作用; 水平位移对SX支座中SMA丝的伸长变形影响较小, 且在位移较小的情况下与水平向的夹角很大, 可提供的水平回复力小。

图8中JC与SP支座的滞回曲线有较大差别。JC支座的滞回曲线中间宽, 两端窄; SP支座的滞回曲线始终较窄, 形状不规则, 并且多次循环的曲线不能重合, 试验后发现SMA丝与摇臂的连接发生了滑移。JC支座的初始刚度以及屈服后刚度均比较高, 达到一定位移后水平刚度有一定增大。水平位移对JC支座中SMA的伸长变形影响很大, 且SMA与水平向夹角较小, 可提供的水平回复力大, 随着水平位移增大, SMA与水平向的夹角越来越小, 水平回复力逐渐增大。

4种SMA橡胶支座试验结果表明:

1) 位移幅值改变, SMA橡胶支座的滞回曲线形状变化不大。对于同一种SMA橡胶支座, 不同位移幅值在加载阶段的荷载一位移曲线基本重合, 只是随位移幅值的大小而相应的拉长或缩短, 宽度基本不变。由于本试验设计位移幅值较小, SMA没有达到马氏体完成后的强化阶段, 所以未出现SMA橡胶支座水平刚度突然增大的现象。

2) 在试验频率范围(0.02~1 Hz)内, 频率改变对橡胶支座的影响极为微小^[7], 对于SMA,

加载频率增大也就意味着加载的速率增大, SMA的相变应力随之增长, 引起刚度增大。试验证明, 频率增大, SMA橡胶支座初始水平刚度略有增大。

3) 随着竖向荷载增大, 普通橡胶支座水平刚度减小^[8], SMA丝受支座的竖向变形影响, 造成松弛或预应变水平降低。试验结果证明, 竖向荷载增大, SMA橡胶支座水平刚度减小。

3.2 SMA橡胶支座的滞回耗能特性

3.2.1 SMA橡胶支座耗能性能的评定方法及试验结果 反复荷载作用下, SMA橡胶支座每经过一个循环, 所吸收或消耗的能量称为SMA橡胶支座的单位循环耗能量。如图9所示, 滞回环DEFBGHD所围成的面积, 是SMA橡胶支座在一个循环中的耗能量, 面积越大, 说明耗能性能越好。

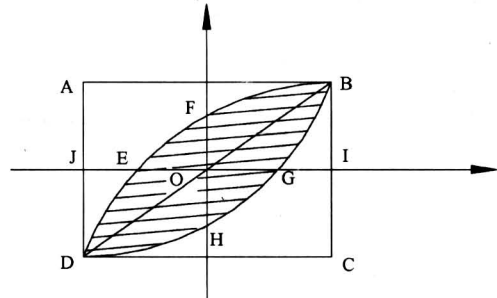


图9 SMA隔震支座在一次循环中的耗能

Fig.9 Energy dissipation of SMA seismic isolation bearings in a circulation

阻尼是表示能量的耗散性能, 反映了结构的动力特性, 是影响结构动力反应的重要因素。目前抗震设计中, 将系统的等效阻尼比作为判别结构耗能能力的重要指标。等效阻尼比计算公式如下^[9]:

$$\xi = \frac{W_c}{2\pi k_s \Delta^2} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, ξ 表示橡胶支座的等效阻尼比, W_c 表示每一个循环滞回曲线所包含的面积即耗能量, k_s 表示滞回曲线在位移为 Δ 时的割线刚度。经过化简得到^[10]:

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{S_{EFBGE} + S_{DEGHD}}{S_{\Delta OBI} + S_{\Delta ODJ}} \right) \times 100\% = \frac{\beta}{2\pi} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, β 为耗能系数, S_{EFBGE} 和 S_{DEGHD} 分别为曲线EFBGE和DEGHD围成的面积, $S_{\Delta OBI}$ 和 $S_{\Delta ODJ}$ 分别为三角形OBI和三角形ODJ的面积。

各种支座的耗能参数列于表2~6。

表 2 普通橡胶支座的耗能参数表

Table 2 Energy dissipation parameters of common rubber bearing

竖向荷载/kN	水平加载频率/Hz	位移幅值/mm	耗能量/N·mm	耗能系数	等效粘滞阻尼/%
20	0.02	8 (7.29)	6 364.1	0.335	5.33
		15 (12.94)	16 102.1	0.309	4.93
	0.1	8 (7.64)	5 434.2	0.252	4.01
		15 (13.25)	16 647.6	0.278	4.43
	0.5	8 (8.33)	11 437.7	0.372	5.92
		0.02	8 (7.44)	6 405.8	0.31
30	0.02	15 (13.98)	25 667.3	0.398	6.33
		8 (7.53)	8451.8	0.363	5.78
	0.1	15 (14.23)	29 861.4	0.433	6.9
		0.5	8 (7.84)	10 910.1	0.407
	0.02	8 (8.47)	10 858.3	0.369	5.87
		15 (14.25)	27 406.3	0.404	6.44
40	0.1	8 (8.61)	10 961.7	0.365	5.82
		15 (14.20)	29 851.5	0.409	6.51
	0.5	8 (7.90)	11 462.3	0.394	6.28

注：括号内为试验得到的正负向位移的平均值，耗能系数和等效粘滞阻尼按实际位移计算所得结果

表 3 HL 支座的耗能参数

Table 3 Energy dissipation parameters of HL bearing

竖向荷载/kN	水平加载频率/Hz	位移幅值/mm	耗能量/N·mm	耗能系数	等效阻尼比/%	
20	0.02	8 (5.63)	7 805.6	0.414	6.59	
		15 (10.07)	2 0281.4	0.475	7.55	
	0.1	20 (14.79)	38 380.8	0.469	7.46	
		8 (5.83)	8 436.7	0.401	6.39	
	0.5	15 (10.54)	22 265.6	0.440	7.01	
		20 (14.38)	43 250.5	0.448	7.14	
	30	0.02	8 (5.30)	7 814.9	0.432	6.88
			8 (5.81)	8 019.4	0.414	6.59
		0.1	15 (10.29)	21 582.3	0.474	7.55
			20 (14.47)	40 951.9	0.503	8.00
		0.5	8 (5.89)	9 119.0	0.413	6.57
			0.1	15 (10.59)	23 950.4	0.456
40	0.02	20 (15.03)	45 319.2	0.486	7.74	
		8 (5.22)	9 110.9	0.500	7.97	
	0.1	8 (5.85)	10 053.5	0.474	7.54	
		15 (11.17)	31 487.8*	0.596	9.48*	
	0.5	20 (14.14)	41 126.5	0.531	8.45	
		8 (5.69)	9 755.9	0.448	7.14	
	0.1	15 (10.85)	28 242.6	0.484	7.70	
		20 (14.89)	4 530.84	0.474	7.54	
	0.5	8 (5.24)	8 419.9	0.448	7.14	

* 表示数据偏差较大，不计入结果分析。下表均同

表 4 SX 支座的耗能参数

Table 4 Energy dissipation parameters of SX bearing

竖向荷载/kN	水平加载频率/Hz	位移幅值/mm	耗能量/N·mm	耗能系数	等效阻尼比/%
20	0.02	8 (6.57)	5 510.3	0.316	5.02
		15 (12.97)	19 582.9	0.324	5.15
	0.1	20 (19.13)	50 974.0	0.413	6.57
		15 (12.56)	22 604.2	0.490	7.80
	0.02	20 (19.59)	48 657.6	0.418	6.65
		15 (12.53)	20 830.0	0.445	7.08
30	0.02	20 (19.51)	54 321.3	0.432	6.87
		15 (12.98)	28 392.2	0.556	8.5
	0.1	20 (19.90)	56 781.9	0.467	7.44
		15 (13.15)	30 768.4	0.542	8.62
	0.02	20 (20.93)	61 613.7	0.467	7.43
		15 (13.03)	31 129.6	0.571	9.09
0.1	20 (20.03)	64 757.3	0.518	8.25	

表 5 SP 支座的耗能参数表

Table 5 Energy dissipation parameters of SP bearing

竖向荷载/kN	水平加载频率/Hz	位移幅值/mm	耗能量/N·mm	耗能系数	等效阻尼比/%	
20	0.1	3 (3.03)	1 035.2	0.141	2.24	
		6 (4.35)	2 667.9	0.193	3.07	
	0.5	8 (6.56)	6 600.8	0.253	4.03	
		3 (2.53)	1 072.9	0.23	3.54	
	1	6 (4.80)	2 958.8	0.228	3.64	
		3 (2.41)	1 223.0	0.289	4.60	
	30	0.1	6 (4.62)	3 155.3	0.241	3.83
			3 (2.43)	1 037.7	0.166	2.65
		0.5	6 (4.77)	3 414.0	0.234	3.72
			8 (6.95)	6 625.7	0.228	3.63
		1	3 (2.59)	1 108.1	0.209	3.32
			6 (4.45)	3 007.2	0.226	3.59
40	0.1	3 (2.50)	979.6	0.190	3.02	
		6 (4.91)	4 018.7	0.255	4.06	
	0.5	3 (2.49)	1 217.3	0.219	3.48	
		6 (4.66)	4 086.6	0.262	4.17	
	1	8 (7.01)	8 030.9	0.255	4.06	
		3 (2.61)	1 287.8	0.196	3.11	
	0.5	6 (4.92)	5 785.6	0.349	5.56	
		3 (2.63)	928.7	0.164	2.61	
	1	6 (4.74)	3 987.6	0.240	3.82	

表6 JC支座的耗能参数表

Table 6 Energy dissipation parameters of JC bearing

竖向 荷载/kN	水平加载 频率/Hz	位移幅 值/mm	耗能量/ N·mm	耗能系数	等效阻 尼比/%
20	0.1	3 (2.65)	2 520.4	0.311	4.95
		6 (6.03)	11 386.1	0.362	5.76
		8 (6.14)	10 683.4	0.347	5.51
	0.5	3 (2.48)	2 521.4	0.491	7.81
		6 (3.79)	6 135.2	0.486	7.73
		8 (6.09)	9 786.4	0.314	5.00
	1	3 (2.14)	2 538.5	0.566	9.01*
		6 (3.95)	5 318.3	0.393	6.25
		3 (2.60)	2 002.8	0.372	5.92
		6 (3.92)	5 406.5	0.412	6.56
		8 (6.14)	10 325.1	0.318	5.07
		3 (2.56)	2 690.8	0.509	8.10
30	0.5	6 (4.11)	5 637.1	0.399	6.36
		8 (6.30)	9 610.3	0.292	4.65
		3 (2.10)	2 182.7	0.480	7.64
	1	6 (4.06)	5 890.9	0.396	6.31
		3 (2.18)	2 259.6	0.480	7.65
		6 (3.91)	5 781.0	0.411	6.54
40	0.1	8 (6.18)	11 015.5	0.328	5.22
		3 (2.31)*	—	—	—
		6 (4.08)	5 802.3	0.377	6.00
	0.5	8 (6.08)	12 566.1	0.366	5.83
		3 (2.02)	2 548.3	0.539	8.58
		6 (4.04)	6 327.2	0.397	6.32

3.2.2 各种因素对 SMA 橡胶支座耗能性能的影响 笔者考虑了水平位移幅值、水平加载频率以及竖向荷载等因素对 SMA 橡胶支座耗能性能的影响。

试验结果表明,同一种 SMA 橡胶支座,位移幅值是影响 SMA 橡胶支座耗能量与等效阻尼比的最主要因素;SMA 橡胶支座耗能量基本与其位移幅值呈线性增大关系。这是由于 SMA 随应变幅值增加,单位循环耗能增大,等效阻尼随着应变幅值的增加逐渐线性增大;橡胶支座随位移增大,滞回环宽度改变不大,但是长度增大,耗能量增大。除 JC 支座外,其他支座的等效阻尼比随位移幅值增大呈非线性增大规律,主要是由于耗能量增大,而水平刚度基本稳定的缘故。JC 支座的等效阻尼比

随位移幅值增大有所减小,主要是其水平割线刚度随位移增大而增大的缘故,这与 SMA 丝布置方式关系密切。

在试验频率范围(0.02~1 Hz)内,随着水平加载频率的增大,各种支座的耗能量均有所增大,但是等效阻尼比变化规律不尽相同。HL 支座的等效阻尼比随频率增大略有降低, SX 支座略有增大, SP 支座总体变化不大, JC 支座呈减小趋势。原因是各种 SMA 橡胶支座的构造方式对频率适应性不同,使水平刚度变化规律不同,从而引起等效阻尼比变化规律不同。可见, SMA 橡胶支座的构造对其性能有很大影响。

竖向荷载增大, SMA 橡胶支座耗能量以及等效阻尼比略有增大。竖向荷载对 SMA 隔震支座的影响分为两个部分:一是竖向荷载对橡胶支座本身性能的影响;二是竖向变形对 SMA 丝的影响。竖向荷载增大,普通橡胶支座耗能量增大,水平刚度减小,等效阻尼比增大; SMA 橡胶支座中的 SMA 丝的松弛或者预应力水平降低,影响 SMA 丝发挥作用。如能对 SMA 丝施加一定预应变,可有效提高 SMA 橡胶支座的性能。

SMA 橡胶支座的耗能特性随位移幅值、水平加载频率以及竖向荷载的变化不同于普通橡胶支座,也不同于 SMA 丝,更不是两者的简单叠加。SMA 橡胶支座构造方式不同,耗能规律不同。本试验中,普通支座的等效阻尼比标准差为 0.81, SMA 橡胶支座中 HL 支座的等效阻尼比最稳定,标准差仅为 0.54,但 SX 支座、SP 支座以及 JC 支座等效阻尼比标准差分别为 1.09, 0.73 和 1.13。对 SMA 施加一定的初始预应变可有效降低橡胶支座竖向变形对耗能的影响,以提高 SMA 橡胶支座耗能的稳定性。

图 10~图 13 描述了 4 种 SMA 橡胶支座在同样加载条件下的耗能特性变化规律。由图可见,同样条件下, HL 支座的耗能量以及等效阻尼比均高于 SX 支座, JC 支座优于 SP 支座。SP 支座中 SMA 的滑移是影响其耗能性能的主要原因。

4 结论

1) SMA 与普通橡胶支座复合可有效提高普通橡胶支座的初始刚度、单位循环耗能量以及等效阻尼比,增强支座耗能稳定性。

2) SMA 在橡胶支座中的布置方式是影响其动

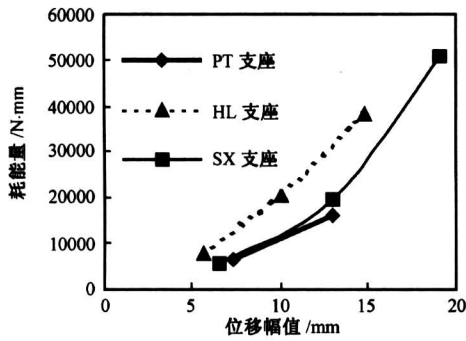


图 10 PT, HL 与 SX 支座在 20 kN, 0.02 Hz 下单位循环耗能量随位移变化趋势图

Fig.10 Energy dissipation in one circulation among PT, HL and SX bearing under 20 kN, 0.02 Hz

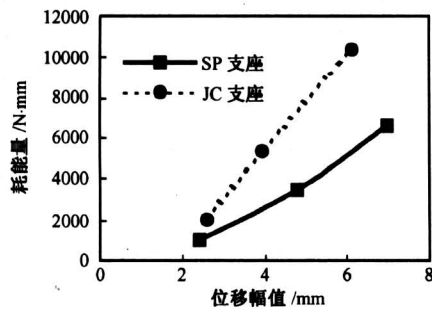


图 11 SP 支座与 JC 支座在 20 kN, 0.1 Hz 下单位循环耗能量随位移变化趋势图

Fig.11 Energy dissipation in one circulation between SP bearing and JC bearing under 20 kN, 0.1 Hz

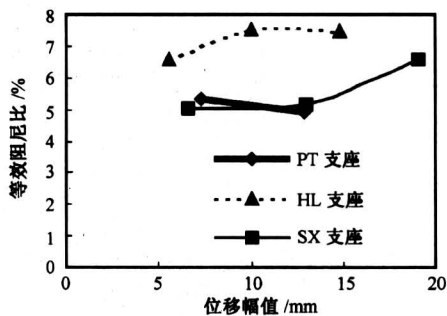


图 12 PT, HL 与 SX 支座在 20 kN, 0.02 Hz 下等效阻尼比随位移变化趋势图

Fig.12 Equivalent damping ratio among PT, HL and SX bearing under 20 kN, 0.02 Hz

载特性的最主要因素。SMA 丝在橡胶支座中的布置形式不同，支座初始刚度、单位循环耗能以及等效阻尼比等参数变化规律有较大不同，稳定性也不同。两组 SMA 支座总体情况是 HL 支座优于 SX

支座，JC 支座优于 SP 支座，可根据支座要求的最大位移进行选择。

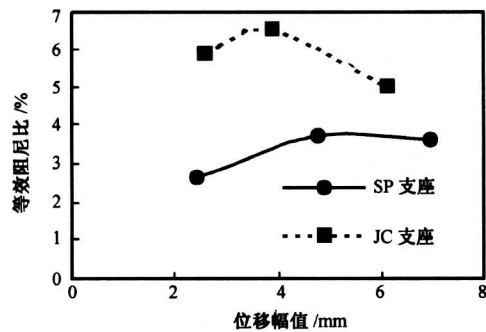


图 13 SP 支座与 JC 支座在 20 kN, 0.1 Hz 下等效阻尼比随位移变化趋势图

Fig.13 Equivalent damping ratio between SP bearing and JC bearing under 20 kN, 0.1 Hz

3) 对于同一种 SMA 橡胶支座，位移幅值对支座性能影响最大；在一定频率范围内 (0.02 Hz~1 Hz)，SMA 支座性能变化不大；竖向荷载使 SMA 丝松弛或预应力水平降低，对 SMA 施加预应力可提高 SMA 的利用率。

4) SMA 丝与橡胶支座钢板的连接问题需要特别关注，避免 SMA 丝发生滑移，影响支座性能。

参考文献

[1] Graesser E J, Cozzarelli F A. Shape memory alloys as a new materials for aseismic isolation [J] . J Eng Mech. ASCE, 1991, 117 (11): 2590~2608

[2] 欧进萍. 结构振动控制——主动半主动与智能控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2003

[3] 薛素铎, 周 乾. SMA—橡胶复合支座在空间网壳结构中的隔震研究 [J]. 北京工业大学学报, 2004; 30 (2): 176~179

[4] 李彬双. 一种新型 SMA—橡胶支座及在网壳结构中的隔震研究 [D]. 北京工业大学工学硕士学位论文, 2004

[5] Krzysztof Wilde, Paolo Gardoni, Yozo Fujino. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges [J]. Engineering Structures, 2000; 22: 222~229

[6] 日本免震构造协会. 图解隔震结构入门 [M]. 北京: 科学出版社, 1998

[7] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001

[8] 倪立峰, 李爱群, 左晓宝. 工程结构的 SMA 超弹性阻尼研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2003; 33 (2): 168~171

- [9] Mauro Dolce, Donatello Cardone, Roberto Marnetto. SMA re-centering devices for seismic isolation of civil structures [C]. Proceedings of SPIE, 2001, Vol. 4330: 238~249
- [10] 周云, 刘季. 双环软钢耗能器的试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 1998; 18 (2): 117~123

Dynamical Experiment Research on New Seismic Isolation Bearings with SMA Wires

Deng Zongcai, Sun Hongjun, Liu Chunguo, Niu Kun, Deng Hongliang

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

[Abstract] As the aim of improving the utilization ratio of SMAs in SMA-rubber seismic isolation bearings, several different SMA-rubber seismic isolation bearings were designed, and energy dissipation experiments were done. The factors which affect the level stiffness, energy dissipation and equivalent damping ratio of SMA-rubber seismic isolation bearings including level displacement amplitude, level loading frequency and vertical load were studied. Result showed that the new SMA-rubber seismic isolation bearings have better hysteresis and energy dissipation capabilities. It provided the base to optimize the SMA-rubber seismic isolation bearings.

[Key words] shape memory alloy; seismic isolation bearings; initial stiffness; hysteresis energy dissipation; equivalent damping ratio

《中国工程科学》2006 年第 8 卷第 1 期要目预告

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 对我国工程科技人才育用战略的思考 …… 赵少奎 | 埋地热油管道运行参数的准周期变化 …… 崔慧 |
| 节地节投资节油 70% 彻底不堵车城市 | 一种分形图像编码的新方法 …… 王秀妮等 |
| 新模式 …… 董国良 | 基于 4D CAD 的大型桥梁施工进度系统 |
| 物质流分析的跟踪观察法 …… 陆钟武 | 仿真研究 …… 张正峰等 |
| 时滞系统的辨识及 NARMA 模型的修正 …… | 智能数学模型在物流供应链中的应用 …… 白煜超 |
| …………… 王冬青 | 多径瑞利衰落信道下 AQAM 系统最佳信噪比 |
| 一种损伤演化方程的建立和几种层裂 | 门限值的研究 …… 高欢芹等 |
| 准则的推导 …… 曹结东等 | 组分含量对水基热气溶胶灭火剂燃速影响 |
| 基于迭代算法的有源电力滤波器谐波 | 规律的研究 …… 周晓猛等 |
| 电流实时检测新方法 …… 李自成等 | 旅客机环境控制系统优化研究 …… 方林等 |
| 零方程湍流模型在列车车厢内气流数值 | 运用自组织竞争网络进行气体定性分析 |
| 模拟中的应用 …… 杨培志 | 的研究 …… 太惠玲等 |