

文章编号:0451-0712(2006)04-0129-06

中图分类号:U441.3

文献标识码:A

# 高阻尼橡胶剪切性能试验与 拉索减振器设计研究

曲立清<sup>1</sup>, 孙汝蛟<sup>2</sup>

(1. 青岛海湾大桥工程项目建设办公室 青岛市 266108; 2. 同济大学桥梁工程系 上海市 200092)

**摘 要:** 鉴于目前实桥上高阻尼橡胶圈是利用的高阻尼橡胶的挤压性能,而不是耗能更好的剪切性能,材料利用率低,本文通过高阻尼橡胶减振器试件剪切性能试验,获得了频率、应变幅值、厚度等各种参数对高阻尼橡胶减振器试件的影响规律,并利用高阻尼橡胶剪切耗能优于挤压耗能的特性,提出了一种简便可行的外置式拉索减振器的设计方法;最后讨论了减振器刚度、安装位置、橡胶材料、拉索长度等参数对减振效果的影响。

**关键词:** 斜拉索; 剪切型减振器; 高阻尼橡胶

斜拉桥主要受力构件的拉索,由于质量小、刚度大、阻尼小,对支座及风雨导致的振动极为敏感,常常引发长时间的大幅振动。斜拉索的振动不仅会给行人带来不舒适感,同时也会使斜拉索产生疲劳,加速斜拉索防腐系统的破坏,严重地影响拉索的寿命。各国桥梁工作者都在致力于斜拉索振动控制的研究,提出了各种不同的减振措施(减振器、辅助索以及气动措施)。由于减振器方式相对目前的技术理论条件而言较为经济、简单且有效,在工程实践中得到了广泛应用。高阻尼橡胶这种粘弹性材料具有很高的阻尼特性,其剪切耗能性能优于挤压性能,但目前国内大部分已修建的斜拉桥是利用挤压耗能的高阻尼橡胶圈,材料利用率低,减振效果不理想。而利用剪切耗能的高阻尼橡胶剪切型阻尼器的应用与研究才刚刚开始,因此,研究高阻尼橡胶减振器的剪切性能和设计方法,对于抑制斜拉索振动从而延长斜拉桥使用寿命具有现实意义。

高阻尼橡胶剪切型减振器是通过与拉索做同步运动的插板带动高阻尼橡胶件(外置减振器)来耗散拉索的振动能量,如图1所示。利用一个减振器就能控制拉索面内与面外两个方向的振动。同时,高阻尼橡胶剪切型减振器构造简单,易于加工安装,对新建桥梁安装方便,对已建桥梁加装也比较容易。所以随着橡胶阻尼性能的改进,高阻尼橡胶剪切型减振器在拉索制振方面有着广泛的使用价值。

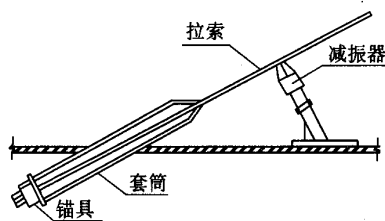


图1 安装外置式高阻尼橡胶剪切型减振器的拉索构造

## 1 高阻尼橡胶剪切性能试验

### 1.1 试验原理

根据文献[1],粘弹性材料的性能常用储能刚度  $K'_d$ (或储能弹簧常数  $K'$ )、损耗因子  $\beta$  和每圈耗能  $E_d$  来表示,可通过下式得出:

$$K'_d = \frac{m \cdot G' \cdot A}{t} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{G''}{G'} \quad (2)$$

$$E_d = \Delta W \cdot V = (\pi \gamma_0^2 G'') \cdot (mAt) \quad (3)$$

式中:  $G'$ 、 $G''$  为粘弹性材料的储能模量和耗能模量;  $m$  为粘弹性层数;  $V$  为粘弹性材料的体积;  $\gamma_0$  为最大剪应变;  $A$ 、 $t$  分别为粘弹性层的剪切面积和厚度。

粘弹性试件可以用开尔文模型来描述其力学性能<sup>[1]</sup>,它是将粘弹性阻尼模拟成一个弹性元件和粘壶元件相互并联而成,其本构方程为:

$\tau = A\dot{\gamma} + B\dot{\gamma}$  (4)

式中： $\tau$ 、 $\gamma$  分别为粘弹性材料的剪切应力和剪切应变； $A$ 、 $B$  分别为由粘弹性材料性能确定的系数。

根据上述本构关系，可以写出粘弹性试件的力—位移关系为：

$$F = K'u + \frac{\beta \cdot K'}{\omega} \cdot \dot{u}$$
 (5)

在正弦位移的激励下，有  $u = u_0 \sin \omega t$ ，将其代入上式可得：

$$\left[ \frac{F - K'u}{\beta K' u_0} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{u}}{u_0} \right]^2 = 1$$
 (6)

此方程为椭圆方程，如图 2 所示，图中及式中， $F_0$  为试件的最大力； $u_0$  为最大位移； $F_1$  为在最大位移  $u_0$  处的阻尼力； $F_2$  为在 0 位移处的阻尼力 ( $F_2 = \beta K' u_0$ )； $K'$  为试件的储能刚度 ( $K' = F_1 / u_0$ )。

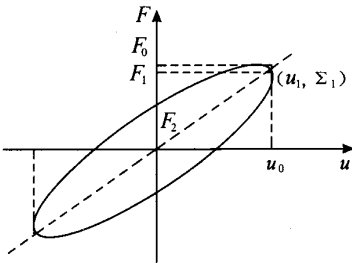


图 2 粘弹性试件的力—位移关系

由试验可以测知  $F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_2$  及  $u_0$  值，粘弹性阻尼试件的参数  $m$ 、 $A$  及  $t$  已知，由式(1)、式(2)和式(3)可得：

$$G' = \frac{F_1 t}{m A u_0}$$
 (7)

$$\beta = \frac{F_2}{F_1}$$
 (8)

$$G'' = \beta G'$$
 (9)

$$E_d = m \cdot \pi \cdot G'' \cdot A u_0^2 / t$$
 (10)

根据高阻尼尼橡胶减振器试件的试验滞回曲线，通过式(7)～式(10)，可以计算出试件的各项特性参数：储能剪切模量  $G'$ 、耗能剪切模量  $G''$ 、损耗因子  $\beta$  及每圈耗能  $E_d$ 。

1.2 试验方案

本次试验所用阻尼器试件构造如图 3 所示，试件由高阻尼尼橡胶材料和约束钢板组成，做成了面积相同，但形状和厚度不同的各种试件，试件的设计参数见表 1，加载系统示意如图 4 所示。

1.3 试验结果及分析

通过试验，得到不同工况下的不同试件的力—



图 3 试件样图

表 1 高阻尼尼橡胶试件的设计参数

项目	正方形试件				圆环形式件			
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
面积 <i>s</i> /cm <sup>2</sup>	100	100	100	100	100	100	100	100
厚度 <i>t</i> /mm	10	20	30	40	10	20	30	40

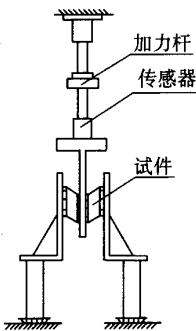


图 4 加载系统示意

位移滞回曲线。表 2 是各种工况下不同型号的试件特性参数的计算结果，以供分析高阻尼尼橡胶减振器的性能。

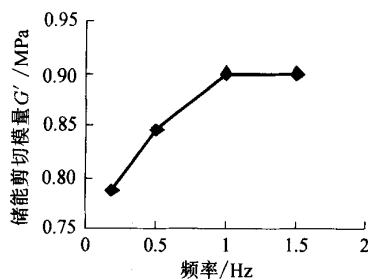
表 2 不同工况下高阻尼尼橡胶试件特性参数的计算结果

型号	频率 <i>f</i> Hz	应变幅值 %	储能剪切模量 <i>G'</i> MPa	耗能剪切模量 <i>G''</i> MPa	损耗因子 $\beta$	每圈耗能 $\frac{E_d}{N \cdot m}$
R <sub>4</sub>	0.2	75	0.788	0.174	0.221	242.3
	0.5	75	0.845	0.236	0.280	344.2
	1.0	75	0.900	0.260	0.289	379.5
	1.5	75	0.899	0.311	0.347	375.7
	1.0	25	1.254	0.431	0.344	71.1
	1.0	50	1.074	0.373	0.347	232.9
	1.0	100	0.831	0.172	0.207	393.6
	1.0	25	1.21	0.485	0.401	65.7
C <sub>4</sub>	1.0	50	0.949	0.339	0.357	193.6
	1.0	75	0.770	0.269	0.350	353.7
R <sub>2</sub>	1.0	25	1.05	0.428	0.406	44.2
R <sub>3</sub>	1.0	25	1.135	0.451	0.397	60.2

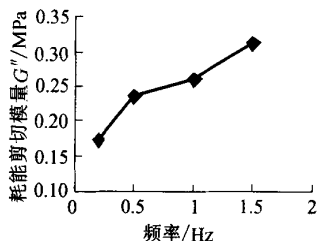
### 1.3.1 频率对高阻尼橡胶减振器剪切性能的影响

对  $R_4$  试件在应变幅值  $\gamma$  为 75%, 振动频率  $f$  分别为 0.2 Hz、0.5 Hz、1.0 Hz、1.5 Hz 的情况下, 计

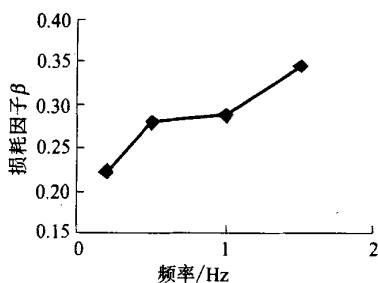
算出阻尼器试件的各项特性参数, 并将计算结果与频率的关系绘成图形如图 5 所示。



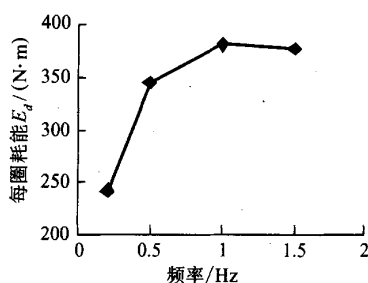
(1) 储能剪切模量随频率的变化关系



(2) 耗能剪切模量随频率的变化关系



(3) 损耗因子随频率的变化关系



(4) 每圈耗能随频率的变化关系

图5 频率对剪切性能的影响

由图 5 可以看出, 高阻尼橡胶减振器试件的储能剪切模量  $G'$  随着频率的升高而升高, 在应变幅值  $\gamma = 75\%$  时,  $G'$  由 0.2 Hz 时的 0.788 MPa 上升到 1.5 Hz 时的 0.899 MPa; 损耗因子  $\beta$  由 0.221 上升到 0.347; 耗能剪切模量  $G''$  和每圈耗能同样随着频率的升高而升高。由此可知频率对高阻尼橡胶剪切型减振器耗能性能有一定的影响。

### 1.3.2 应变幅值对高阻尼橡胶减振器剪切性能的影响

对  $R_4$  试件在振动频率  $f$  为 1 Hz, 应变幅值  $\gamma$  分别为 25%、50%、75%、100% 的情况下, 计算出阻尼器试件的各项特性参数, 并将计算结果与频率的关系绘成图形, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 高阻尼橡胶剪切型减振器试件的储能剪切模量  $G'$ 、耗能剪切模量  $G''$  和损耗因子  $\beta$  都是随着应变幅值的增大而减小, 而每圈耗能  $E_d$  随着应变幅值的增大而增大, 这主要是因为剪切位移增大, 每圈耗能必然就增大。

### 1.3.3 厚度、形状对高阻尼橡胶减振器剪切性能的影响

$R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  试件在振动频率为 1 Hz, 应变幅值为

25% 的情况下, 计算出阻尼器试件的各项特性参数 (见表 2), 可以看出, 高阻尼橡胶层的厚度对高阻尼橡胶减振器的耗能性能的影响并不大, 由于其主要的性能参数储能剪切模量  $G'$ 、耗能剪切模量  $G''$  和损耗因子  $\beta$  与厚度并无大的关系, 每圈耗能  $E_d$  与体积成正比, 因此橡胶材料层厚一些, 自然会增加每圈耗能, 但在实际工程应用中, 如果橡胶材料层太厚, 会导致在振动过程中热量难以散发, 因此粘弹性层不宜太厚。对  $C_4$  和  $R_4$  试件各项参数比较可知, 在面积、厚度、激励频率、应变幅值等相同的情况下, 主要的性能参数储能剪切模量  $G'$ 、耗能剪切模量  $G''$  和损耗因子  $\beta$  与形状的关系较小, 所以在工程使用中由其他条件来决定。

## 2 高阻尼橡胶剪切型拉索减振器设计

### 2.1 设计原理

根据文献[2]和文献[3], 高阻尼橡胶的复数刚度可表示为:

$$K^* = K(u + iv) \quad (11)$$

$$\text{其中: } u = \frac{4-r^2}{4+r^2}, v = \frac{4r}{4+r^2}$$

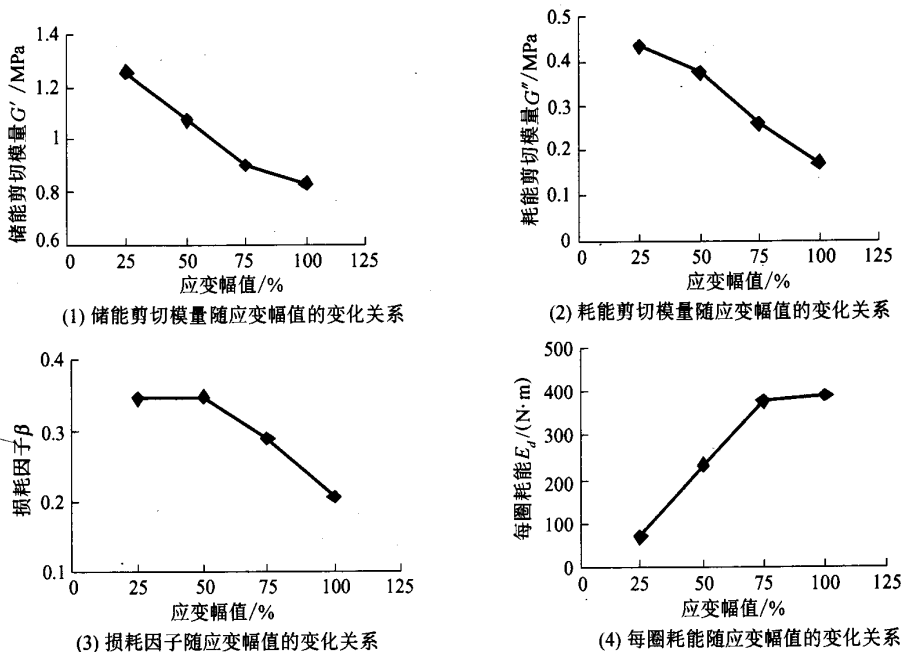


图6 应变幅值对剪切性能的影响

式中:  $r$  为高阻尼橡胶的内摩擦系数, 是橡胶材料的自身特性, 也是衡量阻尼材料耗散振动能量的指标之一。由文献[4]可知, 材料的损耗因子  $\beta = \frac{4r}{4-r^2}$ ,  $\beta$  表示每周振动所消耗的振动能量与最大应变能(位能)之比值,  $\beta$  可以通过试验得到。

$K$  为高阻尼橡胶的绝对弹簧常数(或弹性刚度), 指复数弹簧常数的绝对值。

同时可知:

$$K = \frac{GA}{t} \quad (12)$$

其中:  $G$  为高阻尼橡胶的绝对剪切弹性模量;  $A$  为高阻尼橡胶构件的面积;  $t$  为高阻尼橡胶构件的厚度。

根据文献[2]和文献[3]可知拉索安装减振器后, 其各阶对数衰减率  $\delta$  与减振器的等价阻尼  $c$  有如下关系:

$$\delta = \frac{\pi \{ \phi(x_c) \}^2}{M \omega_n} \cdot c \quad (13)$$

又因  $c = \frac{K \cdot v}{\omega_n} e^{-0.72\alpha(K \cdot v/\omega_n)^{(2/7)}}$ , 得到以下拉索各阶振动模态的对数衰减率  $\delta$  的近似公式:

$$\delta = \frac{\pi \{ \phi(x_c) \}^2}{M \omega_n} \times \frac{K \cdot v}{\omega_n} e^{-0.72\alpha(K \cdot v/\omega_n)^{(2/7)}} \quad (14)$$

其中:  $\alpha = \omega_n x_c (L - x_c) / TL$ ;  $T$  为拉索的张力;  $L$  为索长;  $x_c$  为减振器离锚固端的距离;  $M$  为索(等效

或张紧弦)的一阶模态的等效质量,  $M = 0.5 \mu L$ ;  $\omega_n$

为索的  $n$  阶振动频率,  $\omega_n = \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ ;  $\mu$  为索的单位长度质量;  $\phi(x_c)$  为减振器位置处  $n$  阶振型的正则坐标值,  $\phi(x_c) = \sin(n\pi x_c / L)$ 。

对式(14)中  $K$  微分并求最大值可得:

$$K_{opt} = \frac{1}{0.72\alpha} \times \frac{\omega_n \gamma}{2v} \quad (15)$$

$$\delta_{max} = \frac{\{ \phi(x_c) \}^2}{n^2 \pi \frac{x_c}{L} (1 - \frac{x_c}{L})} \times \frac{\gamma}{2} \quad (16)$$

根据上述计算过程编制成程序, 可绘制成对数衰减率  $\delta$  与减振器弹性刚度值  $K$  的关系曲线, 如图7所示。根据制振目标确定  $K$  值, 然后依据式(12)选定减振器的厚度和面积。由式(15)、式(16)可知, 拉索安置上减振器后, 各阶最佳弹性刚度值的大小与拉索的振动模态无关。

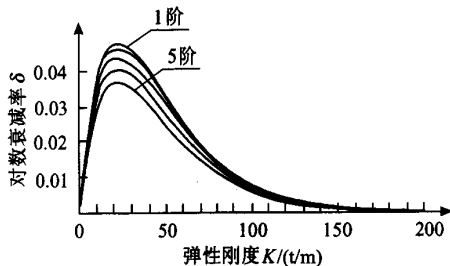


图7 某索前5阶对数衰减率与弹性刚度值的关系

如果对数衰减率  $\delta$  达不到减振的要求,则应抬高减振器的安装高度也可改变高阻尼橡胶材料,直到满足为止。

## 2.2 设计参数对减振效果的影响

### 2.2.1 减振器刚度

对于高阻尼橡胶减振器,一旦高阻尼橡胶材料确定了,在某一温度和频率下,高阻尼橡胶材料的绝对剪切弹性模量  $G$  和损耗因子  $\beta$  就确定下来了。从式(12)可以看出,影响高阻尼橡胶减振器工作性能的参数就是所用粘弹性层的剪切面积  $A$  和厚度  $t$ ,但是由式(14)或对数衰减率与弹性刚度之间的关系曲线可知,达到减振效果的减振器弹性刚度有一个取值范围,弹性刚度  $K$  值太大或太小所对应的对数衰减率都将变小,所以  $K$  在一定的取值范围内,面积越大,厚度越小,减震效果越好。但厚度减小了,由于材料极限剪切应变的限制,所以限制了阻尼器的剪切位移幅值,从而限制了减振器的耗能能力,因此厚度也不能太小;另一方面,面积过大,厚度过小,会导致减振器的刚度过大,这样将减振器安于结构中,会因其刚度过大而起不到耗能减振作用,因此面积也不能过大。为了使减振器充分发挥减振耗能作用,对减振器的设计面积  $A$  和厚度  $t$  应有一最优值。

### 2.2.2 安装位置的影响

由于场地条件的限制及景观的要求,减振器不可能安装在拉索距桥面太高的地方。合理的安装位置应是既能达到有效地减振效果,又能与周围景观相协调。例如某索长度为 212.21 m,单位长度质量为 42 kg/m,索力为 315 t,减振器所用高阻尼橡胶的  $\beta=0.42$ ,图 8 是减振器安装在不同位置的一阶对数衰减率与弹性刚度值的关系图。

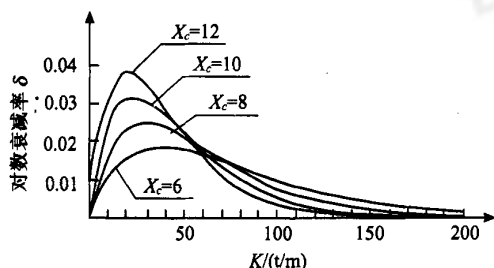


图 8 安装位置不同时拉索一阶对数衰减率与弹性刚度之间的关系

从图 8 中可以得出安装位置  $x_c$  越高,最大对数衰减率也越大,这主要是因为安装位置越高,减振器橡胶层应变幅值越大,能量耗散的更多。但是拉索的

安装位置从景观上考虑又不能太高,所以在景观允许的情况下,尽可能地往高处安装,如果景观上受到限制,就必须改用阻尼性能更好的橡胶材料。值得注意的是,如果减振器安装在某阶振型的不动点处,则减振器对该阶不起作用,其对数衰减率也将变为零。

### 2.2.3 材料的影响

利用高阻尼橡胶材料耗散振动能量,从而达到拉索阻尼减振的目的,是阻尼设计中最核心的问题。因此在进行减振器的设计时,要求所使用高阻尼橡胶阻尼材料要具备良好的性能,必须满足以下几个条件:

(1)高阻尼橡胶材料的损耗因子峰值  $\beta_{max}$  要尽可能的高,且峰值温度应靠近拉索的工作环境温度;

(2)尽量选取损耗因子  $\beta$  和损耗模量  $G''$  较大的高阻尼橡胶材料;

(3)具有防油污、烟雾、霉菌、不燃烧等性能;

(4)不容易老化,必须具有良好的抗疲劳性能,在长期运营过程中,能够始终有效地控制桥梁的振动。

例如上例改用内摩擦系数  $r$  为 0.6 和 0.8 的高阻尼橡胶,可得到拉索的对数衰减率与弹性刚度值的比较图,如图 9 所示,可知随着材料内摩擦系数的提高,拉索的对数衰减率也有大幅提高。

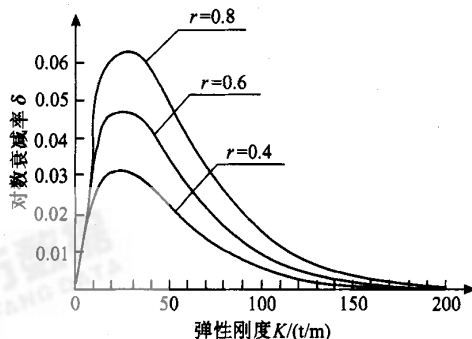


图 9 不同材料拉索对数衰减率与弹性刚度之间的关系(一阶)

### 2.2.4 拉索长度对减振效果的影响

以武汉军山大桥上的 A3、A8、A14 和 A18 拉索为例,说明拉索不同长度对剪切型外置减振器的影响,拉索参数见表 3。

表 3 武汉军山大桥拉索参数

索号	索长/m	索力/t	单位长度质量/(kg/m)
A3	92.767	197.0	32.9
A8	140.050	234.8	42.0
A14	205.068	308.4	49.2
A18	250.793	427.1	76.4



图10是A3、A8、A14和A18拉索的减振器安装在同一位置处,高阻尼橡胶内摩擦系数 $\gamma=0.4$ 时,拉索前5阶的最大对数衰减率的比较结果。从图中可以得出,随着振动频率的增加无论是长索还是短索,最大对数衰减率都有降低的趋势,这说明剪切型高阻尼橡胶减振器对于低阶的风雨振和较低阶的涡激振是有效的,但对于拉索振动中高达十几阶的振动成份减振效果比较小;从中还可以得出对于短索适当的安装位置会达到比较好的减振效果,对于200 m以上的长索,阶数的变化对拉索减振效果的影响不大。

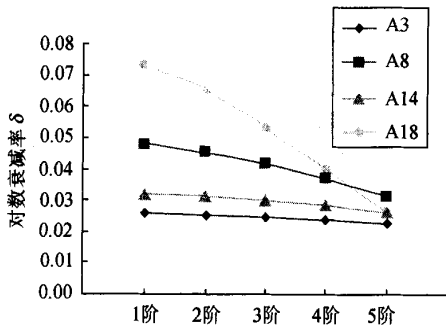


图10 不同拉索在同一位置处的  
各阶最大对数衰减率比较

### 3 结论

通过以上分析总结有以下结论:

(1)利用高阻尼橡胶剪切耗能优于挤压耗能的减振器,具有构造简单、造价低廉、安装方便、耗能力高等优点,可用于斜拉桥的拉索减振中;

(2)在一定范围内,厚度的增加虽然可以增加其耗能,但从减振器的设计中可以看到,阻尼层的厚度和面积存在一定的优化关系;

(3)拉索安上减振器后,各阶最佳弹性刚度值的大小与拉索的振动模态无关;

(4)减振器的安装位置对减振效果影响很大,减振器安装位置距拉索在梁端锚固位置越远,拉索的减振效果越好;

(5)高阻尼橡胶剪切型减振器对于低阶的风雨振和较低阶的涡激振是有效的,但对于拉索振动中高达十几阶的振动成份减振效果比较小。

### 参考文献:

- [1] 徐赵东,等. 粘弹性阻尼结构的现代控制理论分析[J]. 建筑科技大学学报, 2000, 32(2).
- [2] 高減衰ゴムを用いたケーブル制振用ダンパーに関する研究. 日本土木学会第46回年次学术讲演会(平成3年9月).
- [3] 高減衰材を用いたケーブル制振装置. 日本土木学会第48回年次学术讲演会(平成5年9月).
- [4] 孙汝蛟. 高阻尼橡胶剪切型拉索减振器的研究. 长安大学, 2003.

## Test of Shear Capacity of High Damping Rubber and Research on Design of Stay Cable Dampers

QU Li-qing<sup>1</sup>, SUN Ru-jiao<sup>2</sup>

(1. Headquarters of Gulf Bridge of Qingdao, Qingdao 266108, China;

2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In view of the high damping rubber rings use the press capability of high damping rubber on the solid bridge at present, the utilization ratio of materials is low. The high damping rubber stay cable damper is put forward. By way of shearing capability test of the high damping rubber damper specimens, the laws of effects concerning frequencies, strain range and layer's thickness on the behavior of damper specimens are obtained. With the shearing capability over the press one of high damping rubber in energy dissipation, one kind of simple and practicable design method of outer damper is presented. Last, the influence of several parameters like damper rigidity, installation, rubber materials, length of cable on the damping effects are discussed.

**Key words:** stay cable; shearing type damper; high damping rubber