

文章编号: 1000-4750(2015)01-0176-08

桥梁拉索用CFRP线材阻尼特性 试验研究和理论分析

李晓章, 谢 旭, 张 鹤

(浙江大学土木系, 杭州 310058)

摘 要: 为获得用于桥梁的CFRP拉索的阻尼特性, 用自由衰减振动试验方法测试了CFRP线材(CFRP丝)和高强度钢丝的阻尼值, 根据应变能比例阻尼理论分析了其弯曲变形的能量损失系数。通过不同振动频率条件下的测试结果比较了CFRP丝和钢丝的阻尼特性及其与振幅之间的相关性。结果表明, 两种材料的振动阻尼均随应变幅值的增加而单调增加, 但两者的变化趋势有差异。在同一应变幅值条件下, CFRP丝的实测阻尼值比高强钢丝的小。高强钢丝的能量损失系数与振幅无关, 验证了能量损失理论对高强钢丝材料的阻尼计算的适用性。但CFRP丝的能量损失系数实测结果较离散, 且与振幅有一定相关性, 在特定振幅范围内可采用能量损失理论计算CFRP丝的阻尼。

关键词: 斜拉索; CFRP丝; 高强钢丝; 阻尼; 能量损失系数

中图分类号: U448.27 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0724

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES ON THE DAMPING PROPERTIES OF CFRP WIRES USED IN BRIDGE CABLES

LI Xiao-zhang, XIE Xu, ZHANG He

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to evaluate the damping of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) cables used in bridges, the free vibration of a CFRP wire has been tested, and the loss factor of bending strain energy has been discussed according to the energy-based evaluation of modal damping. By performing a test at different frequency conditions, the relationship between the damping and the vibration amplitude of CFRP and steel wires has been studied. According to the experimental results, the damping increases with the vibration amplitude. However, the variation patterns of the damping-vibration amplitude curves are observed to be different between CFRP and steel wires. The damping of the CFRP wire is smaller than that of the steel wire while the strain amplitude is similar. The energy-based evaluation is proved to be efficient for the calculation of damping of steel wire, because the energy loss factor is found to be independent of the vibration amplitude of steel wire. For CFRP wire, the tested energy loss factors are not as regular as those of the steel wire. However, the energy-based evaluation could also be used to estimate the damping of CFRP wire while the vibration amplitude is distributed in a certain range.

Key words: stay cables; CFRP wire; steel wire; damping; energy loss factor

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, 简称 CFRP)具有自重轻、强度高、耐久性

好的优点。迄今, 国内外学者对这种材料在土木工程中的应用予以了关注, 并进行了大量研究^[1-9]。

收稿日期: 2013-08-06; 修改日期: 2014-05-19

基金项目: 国家基金面上项目(51378460, 51108412)

通讯作者: 谢 旭(1963-), 男, 浙江人, 教授, 博士, 从事桥梁结构研究(E-mail: xiexu@zju.edu.cn).

作者简介: 李晓章(1987-), 男, 云南人, 博士生, 从事桥梁结构研究(E-mail: 11012018@zju.edu.cn);

张 鹤(1982-), 女, 新疆人, 讲师, 博士, 从事桥梁结构研究(E-mail: zjuzhanghe@zju.edu.cn).

谢旭等^[10-14]对 CFRP 索在大跨度缆索桥梁中的应用可行性进行了一系列理论及试验研究工作, 确认了使用 CFRP 索的斜拉桥在静力、动力方面均能够满足桥梁使用需要。尽管 CFRP 索在经济性指标方面还没有形成竞争优势, 制造工艺也尚未成熟, 但其优异的力学性能以及耐久性能在特殊环境下具有很高的应用价值。

索结构作为一种张紧状态下使用的柔性结构, 在风等外力作用下容易发生有害的振动, 影响结构整体的使用性、耐久性和安全性。因此, 索结构的阻尼特性一直受到关注, 如 Hard 等^[15]通过自由衰减振动的方法对电缆的阻尼特性进行了试验研究; Yamaguchi 等^[16-19]通过试验以及基于能量耗散理论研究了桥梁用缆索的振型阻尼特性; Kukureka 等^[20]利用共振放大法实测了光纤电缆的阻尼; Zheng 等^[21-22]通过斜拉索缩尺模型的试验研究, 提出用复合阻尼模型拟合模态阻尼的方法。

CFRP 拉索作为一种新的桥梁结构材料, 阻尼特性还没有得到充分研究。Kady 等^[23]对无初应力的钢索和 CFRP 拉索进行了弯曲振动试验, 研究了钢索和 CFRP 拉索的能量消耗特性; 谢旭等^[24]通过试验研究了钢索和 CFRP 索的阻尼特性, 并探讨了在小振幅振动条件下拉索的阻尼评价方法。但已有工作均没有对初应力、振幅等参数对 CFRP 材料的能量损失特性的影响进行较系统的研究。

为了进一步研究 CFRP 拉索的阻尼特性, 本文以制造拉索的 CFRP 线材和高强度钢丝为对象, 通过不同振动频率、不同初应力条件下的自由衰减振动试验, 测试其阻尼特性, 并根据应变能比例阻尼理论分析这两种材料的能量损失系数及其基本特征, 为 CFRP 索结构的阻尼评估提供基础资料。

1 振动试验装置及实测结果

1.1 试验情况

本文选取日本东京制钢株式会社生产的 CFCC Φ 5 线材(本文称之为“CFRP 丝”)以及 PCS Φ 5.16(高强钢丝)进行试验。该 CFCC 产品是由碳纤维和环氧树脂复合而成的, 将直径约为 7 μ m 的碳纤维丝捻成直径约为 5mm 的圆截面线形材料。CFCC 线材具有优越的工作性能: 其比重为 1.6, 约为钢材的 1/5; 松弛率为 1.3%, 与钢材相当; 疲劳强度为 780MPa, 优于钢材。在耐受性方面, CFCC 可承受 130 $^{\circ}$ C 高温; 耐酸性能优于钢材; 耐碱性能

则与钢材相当。表 1 为两种试验丝的力学特性比较, E/GPa 、 $w/(\text{g}/\text{m})$ 、 D/mm 、 A/mm^2 、 σ_u/MPa 、 $\alpha/(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ 分别为试验丝的弹性模量、线密度、直径、面积、极限强度以及线膨胀系数。

表 1 试验用 CFRP 丝及钢丝的力学特性

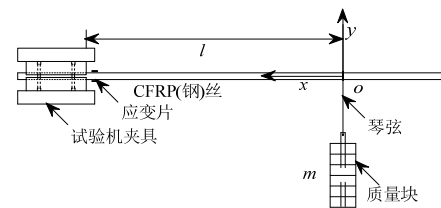
Table 1 Mechanical property of wire specimens

试验材料	E/GPa	$w/(\text{g}/\text{m})$	D/mm	A/mm^2	σ_u/MPa	$\alpha/(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
CFRP 线材	152	29.9	5.00	15.2	2980	0.6
高强钢丝	204	163.8	5.16	20.9	1999	12.0

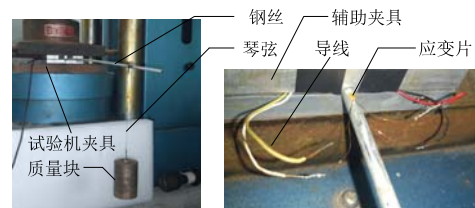
图 1 为试验装置示意图、试验现场以及试验试件的图片。试件一端用定制的辅助夹具夹住, 然后再固定在试验机上。为了增加自由衰减振动时间以及分析初始应力对材料阻尼的影响, 在单丝距离固定端 l 的位置用琴弦悬挂重物 m , 通过施加强制位移的方法让单丝发生自由衰减振动, 记录悬臂丝的自由振动衰减过程, 以此推断试验材料的阻尼。

对动应变进行数据采集, 采样频率为 500Hz。应变片粘贴在固定端附近, 这样布置测点一方面是因为该点的应变最大, 另一方面可以减少导线对阻尼实测结果的影响。

另外, 图 1(a)中的 x 、 y 为后面系统应变能计算时所用的坐标系。



(a) 试验装置示意图



(b) 试验装置照片



(c) CFRP 丝和钢丝

图 1 单丝自由振动试验装置

Fig.1 Schematic diagram and photos for experimental set up of wires

为了比较振动频率以及初应力对材料阻尼的影响, 试验通过改变质量块大小以及悬挂位置进行多工况测试。试验工况如表 2 所示。为了消除试验过程中偶然因素的影响, 每一工况重复多次, 然后再对多组数据进行数据处理。

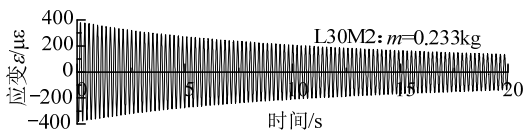
表 2 试验工况
Table 2 Test conditions

工况	m / kg	l / cm
L25M4	0.477	25
L30M2	0.233	
L30M3	0.340	
L30M4	0.477	30
L30M5	0.554	
L30M6	0.662	
L35M4	0.477	35

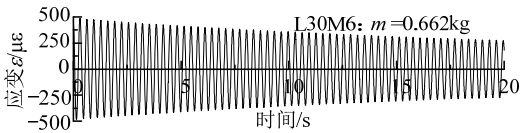
1.2 试验结果

1.2.1 不同悬挂质量的阻尼实测结果

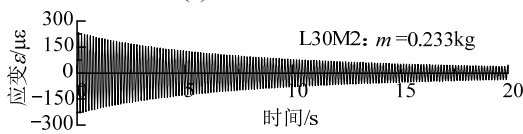
这里选取表 2 中悬挂位置 $l=30\text{cm}$ 的 5 个不同质量的工况进行比较。图 2(a)、图 2(b)给出了两种材料的单丝自由衰减振动试验前 20s 的应变时程, 图 2(c)、图 2(d)给出了 5 个工况的频谱分析结果。图中横轴 t/s 为时间, f/Hz 为频率; 纵轴 $\varepsilon/\mu\varepsilon$ 为丝的应变。



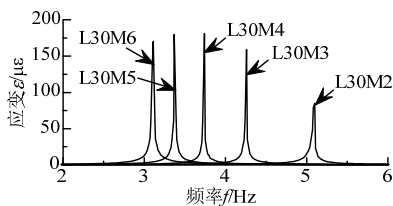
(a) CFRP 丝时程



(b) 高强钢丝时程



(c) CFRP 丝振动频谱



(d) 高强钢丝振动频谱

图 2 不同悬挂质量的单丝自由衰减振动

Fig.2 Free decay of the tested wires with different mass

对比自由衰减振动结果可以发现, 当悬挂质量大时, 频率低, 衰减时间长。另外还可以看出, 弹性模量较大的高强钢丝衰减要比 CFRP 丝快。

根据自由衰减振动曲线可以得到结构的阻尼比 ξ 为:

$$\xi \doteq \frac{1}{2\pi k} \ln \frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta\varepsilon_{n+k}} \quad (1)$$

式中, $\Delta\varepsilon_n/\mu\varepsilon$, $\Delta\varepsilon_{n+k}/\mu\varepsilon$ 分别表示自由衰减振动第 n 个周期和第 $n+k$ 个周期的应变幅值。对不同应变幅值求解 ξ , 即可得到结构阻尼比随应变振幅的变化关系。

图 3 为不同悬挂质量的阻尼比-应变幅值关系, 散点表示实测结果, 曲线表示对应的拟合结果。CFRP 丝用 2 次多项式进行拟合, 高强钢丝则用两个一次多项式相除的有理函数进行拟合, 其形式为:

$$\xi = a + \frac{b\Delta\varepsilon}{2c + \Delta\varepsilon} \quad (2)$$

这里, a 、 b 、 c 是拟合参数。

对原始实测数据进行处理时, 发现当应变幅值趋向于 $0\mu\varepsilon$ 时, 两种丝的阻尼比趋向于一个介于 $0.0005\sim 0.001$ 的常数项, 而没有收敛为 0, 可以认为该常数项是试验装置、测试误差引起的。在后续的数据处理中, 扣除了该常数项。由图 3 可知, CFRP 丝和高强钢丝的阻尼比均随着应变振幅的增加而单调增加。应变幅值在 $0\mu\varepsilon\sim 500\mu\varepsilon$ 的变化范围内, CFRP 丝的阻尼比在 $0\sim 0.0015$ 变化, 而高强钢丝的阻尼比在 $0\sim 0.003$ 变化。在同一工况同一应变幅值条件下, CFRP 丝的阻尼比小于高强钢丝。两种线材的阻尼比随应变振幅变化的趋势有明显差异, CFRP 的阻尼比在应变幅值较小时阻尼变化较慢, 在应变幅值较大时阻尼变化较快, 拟合曲线呈下凸。而高强钢丝则与之相反, 其拟合曲线呈上凸。此外, 同一线材在不同悬挂质量工况下的阻尼-应变幅值关系曲线存在差异: 振幅越大, 悬挂质量越小的工况相应测得的阻尼越大。

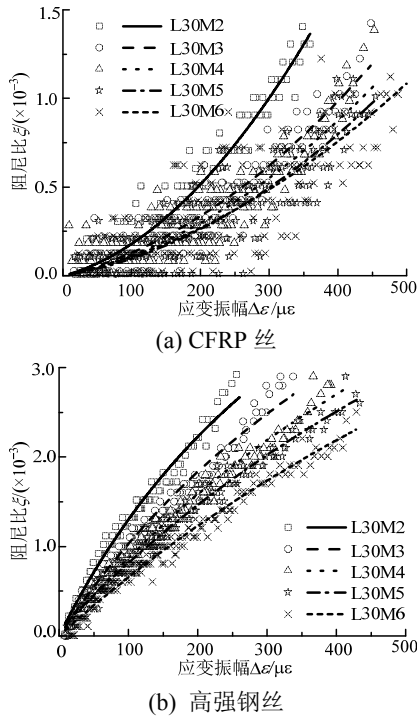


图3 不同悬挂重量的单丝阻尼比-应变振幅关系
Fig.3 Damping ratio- strain amplitude curve of the tested wires with different mass

对应变时程曲线进行微分可以得到应变速率的时程曲线。根据衰减运动中速度和位移的微分关系，阻尼比 ξ 还可以按下式进行计算得到：

$$\xi = \frac{1}{2\pi k} \ln \frac{\Delta \dot{\epsilon}_n}{\Delta \dot{\epsilon}_{n+k}} \quad (3)$$

式中， $\Delta \dot{\epsilon}_n / (\mu\epsilon/s)$ 、 $\Delta \dot{\epsilon}_{n+k} / (\mu\epsilon/s)$ 分别表示自由衰减振动第 n 周期和第 $n+k$ 周期的应变速率幅值。

图4给出阻尼比与应变速率幅值的关系实测散点及其拟合曲线结果。从图4可以看出，应变速率幅值在 $0\mu\epsilon/s \sim 12000\mu\epsilon/s$ 的变化范围内，CFRP 丝的阻尼比在 $0 \sim 0.0015$ 之间近似线性变化；应变速率幅值在 $0\mu\epsilon/s \sim 15000\mu\epsilon/s$ 的变化范围内，高强钢丝的阻尼比在 $0 \sim 0.003$ 之间线性变化，其斜率大于 CFRP 丝。比较不同悬挂质量试验工况下的拟合结果发现，两种线材的阻尼比与应变速率的相关关系非常一致。

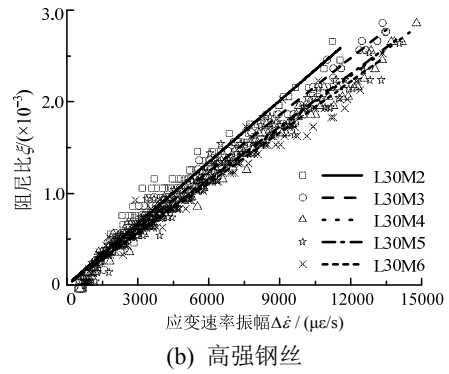
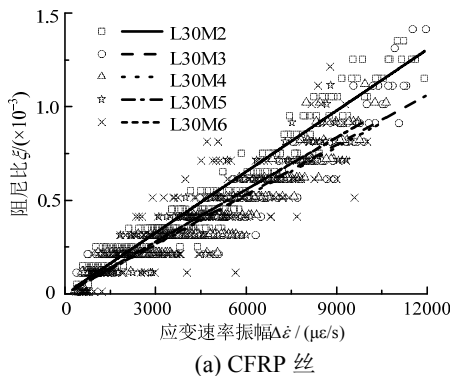
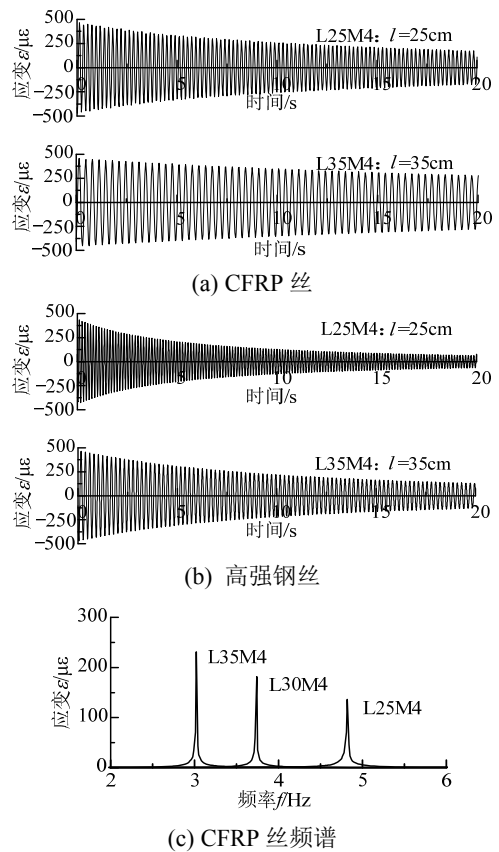


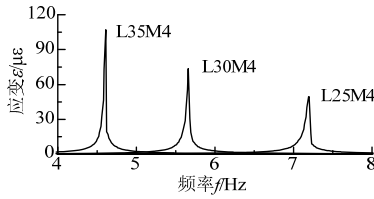
图4 不同悬挂质量的单丝阻尼比-应变速率振幅关系
Fig.4 Damping ratio- strain rate amplitude curve of the tested wires with different mass

从上述结果可知，相对于应变而言，阻尼比与应变速率的比例关系更为显著。

1.2.2 不同悬挂位置的阻尼实测结果

选取表2中质量为 $m=0.447\text{kg}$ 的3个不同悬挂位置的试验结果进行比较。图5(a)、图5(b)分别给出两种线材 $l=25\text{cm}$ (悬臂最短) 和 $l=35\text{cm}$ (悬臂最长) 时自由衰减振动试验应变时程，图5(c)、图5(d)给出了3个工况的频谱分析结果。从频谱图可知，悬臂越长，频率越低，从而使相应的衰减时间过程延长。另外，其频谱结果显示所有工况的振动衰减都是单一模态过程，其结果可用于单模态阻尼比的测算。

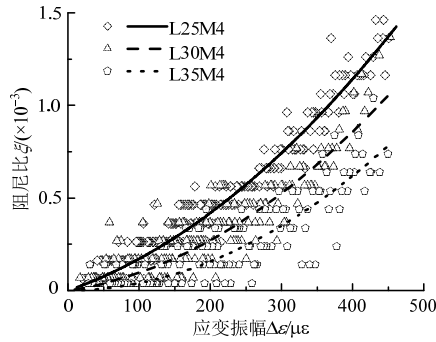




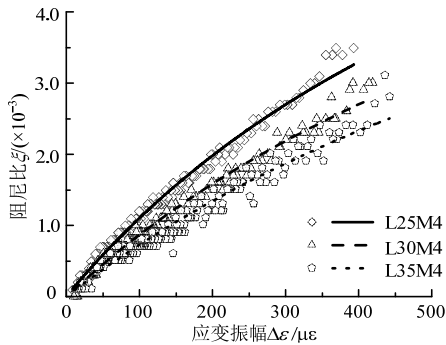
(d) 高强钢丝频谱

图 5 不同悬挂位置的单丝自由衰减振动
Fig.5 Free decay of the tested wires with different hanging position

图 6 为不同悬挂位置的试验结果及其拟合曲线。由结果可知，质量块悬挂位置越靠近悬臂固定端，相应的阻尼比实测结果越大。



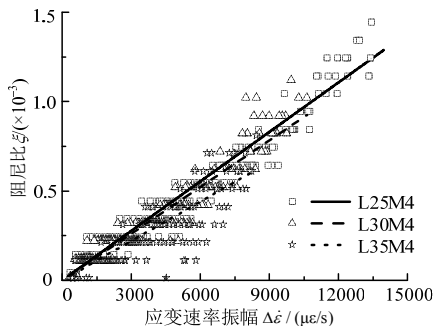
(a) CFRP 丝



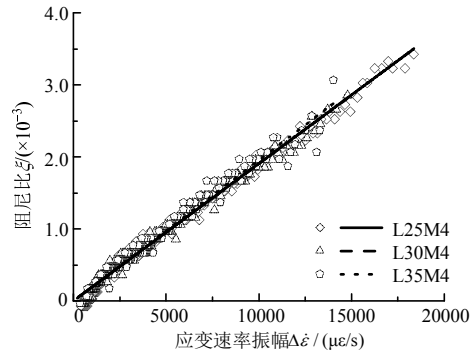
(b) 高强钢丝

图 6 不同悬挂位置的单丝阻尼比-应变振幅关系
Fig.6 Damping ratio- strain amplitude curve of the tested wires with different hanging position

图 7 给出两种线材阻尼比与应变速率幅值的关系及线性拟合结果。可以看到，不同悬挂位置工况的拟合曲线基本一致，阻尼随应变速率振幅线性变化。



(a) CFRP 丝



(b) 高强钢丝

图 7 不同悬挂位置的单丝阻尼比-应变速率振幅关系
Fig.7 Damping ratio- strain rate amplitude curve of the tested wires with different hanging position

2 阻尼特性理论分析

阻尼是振动过程中的能量耗散。阻尼比 ζ 可以通过下式计算得到^[25]：

$$\zeta = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (4)$$

式中： $\Delta W/(N \cdot m)$ 为一个振动周期中的能量耗散； $W/(N \cdot m)$ 为总势能。

材料的能量损失系数 η 定义为：

$$\eta = \frac{\Delta W}{2\pi V} \quad (5)$$

式中： $V/(N \cdot m)$ 为振幅对应的最大应变势能。因此， ΔW 可根据应变势能以及能量损失系数计算得到，即：

$$\Delta W = 2\pi\eta V \quad (6)$$

于是阻尼比可以写成：

$$\zeta = \frac{1}{2} \eta \frac{V}{W} \quad (7)$$

由于单丝悬挂重物发生弯曲变形，存在初始应力。因此势能 W 包括初始势能 W_0 和振动应变能 V 两个部分，即：

$$W = W_0 + V \quad (8)$$

按图 1 所示的单丝坐标系以及图 8 所示的应力应变之间的关系，初始弯曲势能 W_0 和应变能 V 可表示成下列形式：

$$\begin{cases} W_0 = \int_{\Omega} E \varepsilon_0(x, y, z) \Delta \varepsilon(x, y, z) d\Omega \\ V = \int_{\Omega} \frac{1}{2} E (\Delta \varepsilon(x, y, z))^2 d\Omega \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\varepsilon_0(x, y, z)/\mu\epsilon$ 为初始弯曲应变； $\Delta \varepsilon(x, y, z)/\mu\epsilon$ 为单丝振动达到最大振幅时的应变增量。 Ω/m^3 在图 1 中，表示试验丝从坐标原点 O 到固定端之间的体积。

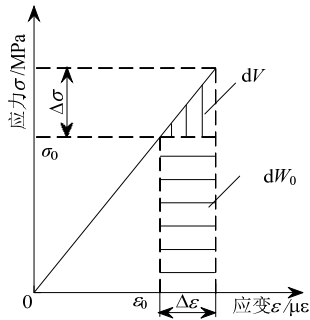


图 8 试验丝单位体积的初应力势能 W_0 和应变能 V
Fig.8 The initial potential energy W_0 and strain energy V per unit volume for the tested wire

将式(9)积分并化简,可以得到如下表达式:

$$\begin{cases} W_0 = \frac{\pi E l r^2}{12} \varepsilon_0 \Delta \varepsilon \\ V = \frac{\pi E l r^2}{24} [\Delta \varepsilon]^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: E /(N/m²), l /m, r /m 分别表示试验丝的弹性模量,质量块位置的悬臂长度,以及丝的半径; $\varepsilon_0/\mu\varepsilon$ 和 $\Delta\varepsilon/\mu\varepsilon$ 分别为应变测点处(应变最大点)的初始弯曲应变和应变幅值。

将式(8)代入式(7),得到单丝的阻尼计算式:

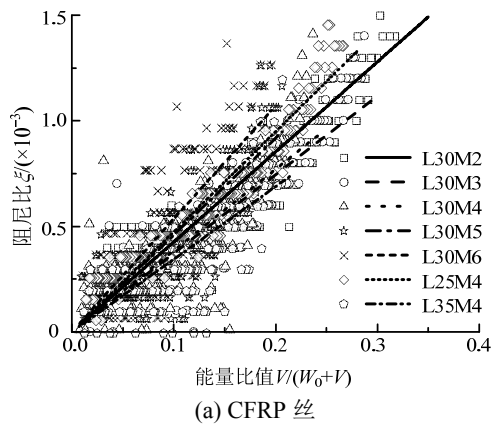
$$\xi = \frac{1}{2} \eta \frac{V}{W_0 + V} \quad (11)$$

式中,无量纲的能量比值参数可以表示为:

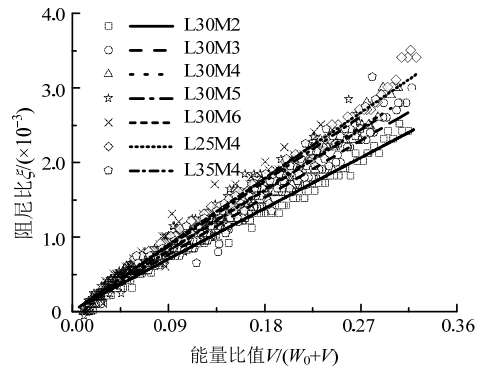
$$\frac{V}{W_0 + V} = \frac{\Delta \varepsilon}{2\varepsilon_0 + \Delta \varepsilon} \quad (12)$$

为得到能量损失系数,将所有试验工况的 ξ - $\Delta\varepsilon$ 关系曲线转换成 ξ - $V/(W_0+V)$ 关系曲线,结果如图 9 所示。

结果显示,不同工况下得到线性拟合的存在细微差异,该差异可能是材料本身特性引起,也可能是由于试验产生的误差。我们期望材料的能量损失系数是一个常量,即不同工况的斜率相同。



(a) CFRP 丝



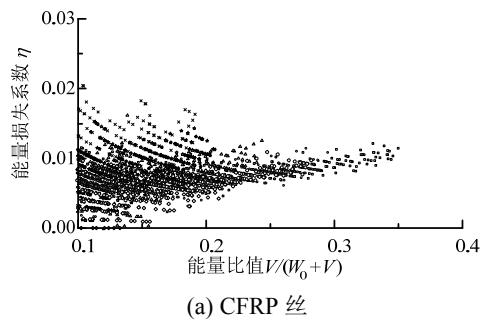
(b) 高强钢丝

图 9 ξ - $V/(W_0+V)$ 关系

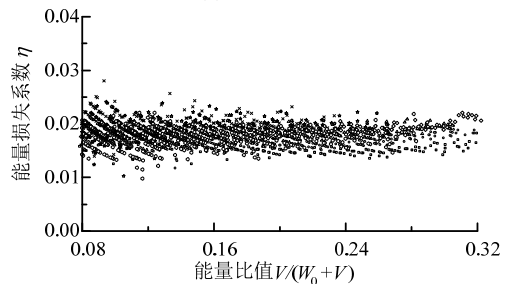
Fig.9 ξ - $V/(W_0+V)$ curve

图 10 给出本文所有工况的 η - $V/(W_0+V)$ 关系。由于当 $V/(W_0+V)$ 较小时,测试系统的绝对误差将对能量损失系数的计算产生显著的影响。所以,CFRP 丝取 $V/(W_0+V) \geq 0.1$ 的数据结果,高强钢丝取 $V/(W_0+V) \geq 0.08$ 时的数据结果进行分析。

从图 10 可以看出,不同试验工况下,高强钢丝测得的能量损失系数密集于 0.016~0.022 范围内,并且独立于 $V/(W_0+V)$ 。而 CFRP 丝的结果则比较离散, $V/(W_0+V)$ 值越小, η 越离散,值在 0.00~0.02 范围分布,随着 $V/(W_0+V)$ 的增加, η 略有增加,且离散性明显减弱。相对而言,高强钢丝材料较均匀,能量损失系数实测结果比较一致。目前 CFRP 线材的阻尼特性试验资料较少,推断 CFRP 丝能量损失系数离散的原因还需要更多实测数据的积累。



(a) CFRP 丝

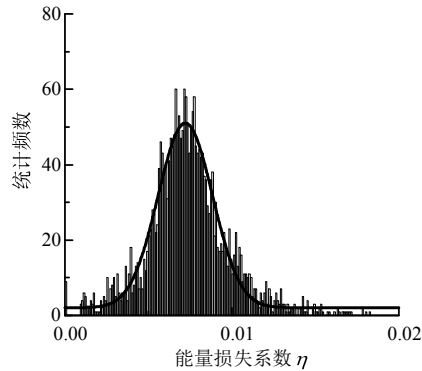


(b) 高强钢丝

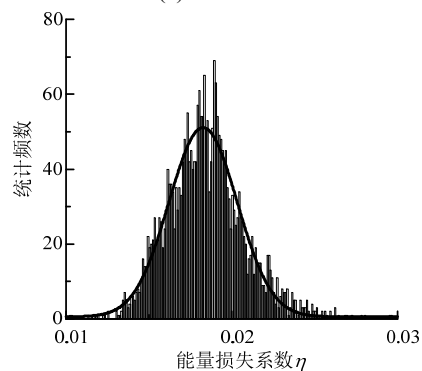
图 10 η - $V/(W_0+V)$ 关系

Fig.10 η - $V/(W_0+V)$ curve

假定 η 的测试结果是随机独立的, 对其进行统计分析, 可以绘制 η 的分布直方图, 并用高斯分布进行拟合, 结果如图 11。拟合结果表明, η 的实测值服从高斯分布。CFRP 丝的 η 实测均值为 0.00721, 方差为 0.00326; 高强钢丝的 η 实测均值为 0.01827, 方差为 0.00412, 表明 CFRP 丝的能量损失系数小于高强钢丝的能量损失系数。



(a) CFRP 丝



(b) 高强钢丝

图 11 η 的统计分布Fig.11 Statistical distribution of η

Kady 测得 CFRP 拉索和钢拉索的能量损失系数为 0.05 左右^[23]; 而文献^[24]根据应变能阻尼理论按能量损失系数取 0.05 计算得到的拉索阻尼值与实测结果相符^[24]。而本文试验结果显示, 不论是 CFRP 丝还是高强钢丝, 其能量损失系数均远小于拉索的能量损失系数值 0.05。这表明, 拉索振动时线材之间的摩擦引起的能量耗散占较大的比例, 用材料的能量耗散推算拉索整体的阻尼特性, 仍有不少问题需要探索。

3 结论

本文对用于桥梁拉索的 CFRP 丝和高强钢丝进行了单丝弯曲振动衰减试验, 研究对比了两种线材的阻尼特性, 并根据应变能比例阻尼理论得到了 CFRP 丝的能量损失系数, 为 CFRP 索结构的阻尼

评估提供基础资料。根据试验研究和数据分析结果, 可以得到以下几点结论:

(1) 无论是 CFRP 丝还是高强钢丝, 其振动阻尼都具有随振幅的增大而单调增加的趋势。并且两者与应变速率幅值的相关关系基本可以认为是线性相关。

(2) 高强钢丝的阻尼比较 CFRP 丝大, 并且与振幅的相关性较明显, 离散性小。

(3) 高强钢丝的能量损失系数与振幅无关; CFRP 丝的能量损失系数比较离散, 且与振幅微弱相关性, 随振幅略有增大。

(4) 根据统计分析的结果, 高强钢丝的能量损失系数为 0.01827, CFRP 丝的则为 0.00721。两种材料的能量损失系数值均小于拉索的能量损失系数值 0.05, 这表明拉索的阻尼成分中材料的应变能阻尼只占其中一部分。

参考文献:

- [1] Meier U. Structural tensile elements made of advanced composite materials [J]. Structural Engineering International, 1999, 99(4): 281—285.
- [2] Erki M A, Rizkalla S H. Anchorages for FRP reinforcement [J]. Concrete International, 1993, 15(6): 54—59.
- [3] Roos F, Noisternig J F. CFRP-tendons-development and testing [C]// Proceedings of IABSE Conference, Cable-Stayed Bridges-Past, Present and Future. Malm, Sweden: IABSE, 1999: 643—650.
- [4] Cheng S H, Lau D T. Impact of using CFRP cables on the dynamic behavior of cable-stayed bridges [C]// IABSE Symposium Report. Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering. Budapest, Hungary: IABSE, 2006: 19—26.
- [5] 陈小英, 李唐宁, 黄音, 等. 波形齿夹具张拉 CFRP 带的力学性能试验研究及夹具体系设计[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 187—194.
Chen Xiaoying, Li Tangning, Huang Yin, et al. Experimental research on mechanical property of pulling CFRP belt with wave-shaped-gear clamp and design of clamp system [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 187—194. (in Chinese)
- [6] 侯苏伟, 叶华文, 强士中, 等. CFRP 主缆在鞍座及索夹处的抗弯折性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 128—133.
Hou Suwei, Ye huawen, Qiang Shizhong, et al. Study on bending properties of CFRP cable in saddle and cable clamp [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(5): 128—133. (in Chinese)
- [7] 叶勇, 郭子雄. CFRP 筋夹板式锚具锚固性能试验研究

- [J]. 工程力学, 2012, 29(8): 172—179.
- Ye Yong, Guo Zixiong. Experimental research on the performance of clamping anchors for CFRP rods [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8): 172—179. (in Chinese)
- [8] 徐礼华, 许锋, 曾浩, 等. CFRP 筋体外加固铁路预应力混凝土简支梁桥设计及试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 89—96.
- Xu Lihua, Xu Feng, Zeng Hao, et al. The design and test study on prestressed railway concrete beam bridge strengthened by externally draped CFRP tendons [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2): 89—96. (in Chinese)
- [9] 宗周红, 程怡, 黄学漾, 等. CFRP 板加固 RC&PPC 梁抗剪性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 236—246.
- Zong Zhouhong, Cheng Yi, Huang Xueyang, et al. Experimental study on shear properties of reinforced concrete (RC) and partial prestressed concrete (PPC) beams strengthened with externally bonded CFRP strips [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(6): 236—246. (in Chinese)
- [10] 谢旭, 朱越峰. CFRP 拉索设计对大跨度斜拉桥力学特性的影响[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 113—120.
- Xie Xu, Zhu Yuefeng. Study on behavior of long-span CFRP cable-stayed bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(11): 113—120. (in Chinese)
- [11] 谢旭, 张鹤, 朱越峰. 柔性 CFRP 索在横向风荷载作用下的振动特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(1): 145—151.
- Xie Xu, Zhang He, Zhu Yuefeng. Dynamic characteristics of CFRP cables under lateral wind load [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(1): 145—151. (in Chinese)
- [12] 苟昌焕, 谢旭, 高金盛, 等. 应用碳纤维索的大跨度斜拉桥静力学特性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 137—142.
- Gou Changhuan, Xie Xu, Gao Chinsheng, et al. Static behavior of long-span cable-stayed bridges using carbon fiber composite cable [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(1): 137—142. (in Chinese)
- [13] 张治成, 谢旭, 张鹤. 大跨度斜拉桥拉索设计方法以及碳纤维索的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(9): 39—46.
- Zhang Zhicheng, Xie Xu, Zhang He. Study on safety factor of cables and application of CFRP cables in long-span cable-stayed bridges [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, 41(9): 39—46. (in Chinese)
- [14] 谢旭, 朱越峰, 申永刚. 大跨度钢索和 CFRP 索斜拉桥车桥耦合振动研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 53—61.
- Xie Xu, Zhu Yuefeng, Shen Yonggang. Study on vibration of long-span cable-stayed bridge with steel and CFRP cables due to moving vehicles [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(1): 53—61.
- [15] Hard A R, Holben R D. Application of the vibration decay test to transmission line conductors [J]. *Power Application and Systems, IEEE Transactions on*, 1967, *Power Application and Systems*, 86(2): 189—195.
- [16] Yamaguchi H, Fujino Y. Modal damping of flexibility oscillation in suspended cables [J]. *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE*, 1987, 4(2): 413—421.
- [17] Yamaguchi H, Adhikari R. Energy-based evaluation of modal damping in structural cables with and without damping treatment [J]. *Journal of Sound and Vibration*. 1995, 181(1): 71—83.
- [18] Yamaguchi H, Ito M. Mode-dependence of structural damping in cable-stayed bridges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 72: 289—300.
- [19] Yamaguchi H, Alauddin M d, Poovarodom N. Dynamic characteristics and vibration control of a cable system with substructural interactions [J]. *Engineering Structure*, 2001, 23(10): 1348—1358.
- [20] Wei C Y, Kukureka S N. Evaluation of damping and elastic properties of composites and composite structures by the resonance technique [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(15): 3785—3792.
- [21] 郑罡, 徐兴, 高赞明, 倪一清. 斜拉索阻尼特性的试验研究[J]. 公路交通技术, 2002, 4: 35—39.
- Zheng G, Xu X, KO J M, Ni Y Q. Experimental study on damping characteristics of stay cables [J]. *Technology of highway and transport*, 2002, 4: 35—39. (in Chinese)
- [22] Zheng G, Ni Y Q, KO J M, Xu X. Tension-dependent internal damping of a cable model [J]. *Key Engineering Materials*. 2003, 243: 415—420.
- [23] Kady H M, Arockiasamy M, Samaan S H, et al. Damping characteristics of carbon fiber composite cables for application in cable-stayed bridges [C]// *Proceedings of IABSE Conference, Cable-Stayed Bridges-Past, Present and Future*. Malm, Sweden: IABSE, 1999.
- [24] 谢旭, 中村一史, 前田研一, 张治成, 榎本刚. CFRP 拉索阻尼特性实验研究和理论分析[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 205—211.
- Xie Xu, Nakamura H, Maeda K, Zhang Zhicheng, Enomoto T. Theoretical analysis and experimental test on damping characteristics of CFRP stay cables. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(3): 205—211. (in Chinese)
- [25] Clough R W, Penzien J. *Dynamics of structures* [M]. Berkeley: Computer & Structures. Inc, 1995: 56—57.