

斜拉桥模拟试验平台的振动特性测试及分析

陈 冲, 时云飞, 刘小锋, 陈跃华, 张 刚, 胡海刚, 冯志敏*

(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 以宁波某跨海大桥为原型, 结合桥梁激励系统、传感器、数据采集处理系统和拉索-阻尼减振系统, 搭建斜拉桥振动试验平台, 并模拟不同车辆载荷及行驶速度工况下的拉索振动响应试验; 同时, 分别利用液压阻尼器和橡胶阻尼器对斜拉索振动的抑制效果进行分析。结果表明, 斜拉索振动幅度随车辆行驶速度、载重的增加而变大; 橡胶阻尼器对长拉索减振效果明显好于液压阻尼器, 而对中、短斜拉索减振效果的差异性不明显。试验结果可为斜拉索振动特性研究和阻尼器的工程应用提供参考。

关键词: 斜拉索; 试验模型; 激励器; 试验平台; 阻尼器; 振动特性

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 02-0089-07

拉索作为斜拉桥主要受力构件, 极易在风雨和交通载荷环境下发生有害振动^[1-2], 加强对斜拉索的振动规律研究和动态检测分析, 以提高斜拉桥的安全性和稳定性也越来越多地受到重视。鉴于在斜拉桥的运行现场开展拉索振动机理和测试分析研究十分困难, 因此, 模型试验已成为对斜拉索振动测试的重要方法之一^[3]。

陈常松等^[4]利用相似理论对岳阳洞庭湖三塔斜拉桥模型进行分析, 探讨理论与实际模型下各物理量的相似比值。罗泽辉^[5]结合宁波甬江大桥的实际工程结构, 设计出斜拉桥模型, 并验证了其可靠性。Zhao 等^[6]基于真实桥梁构建全桥测试模型, 并验证该模型的准确性。周林仁等^[7]搭建山东滨州黄河公路大桥的实验室模型通过试验平台监测斜拉桥结构健康问题。兰惠清等^[8]设计了斜拉索桥模型, 并对其进行了静力学分析。孙测世等^[9]为研究斜拉索振动中的“跳跃”现象, 根据动力相似理论设计斜拉索模型。王海龙等^[10]建立了一种准确而可靠的基准有限元模型, 用以监测与检测斜拉桥索力、位移等相关参数。詹胜等^[11]设计一种新型拉索振动试验平台, 模拟出实际拉索振动状态并进行了试验研究。张令弥等^[12]设计了一种分离试验

方法, 方便在风洞内进行全桥模型动态试验。以上研究大多集中在斜拉桥模型结构性振动问题和独立拉索平台试验, 而对在桥梁模型试验平台上开展车辆载荷、斜拉索减振研究涉及较少。

本文运用相似性理论^[13], 在研制斜拉桥试验模型基础上, 搭建一个具有振动信号传感检测、外部激励与阻尼减振、数据收集与分析处理功能的斜拉桥模拟振动试验检测平台, 通过调节多台激励器的位置、频率和振幅, 开展模拟不同车辆运行状态下的拉索振动规律试验研究, 对比分析斜拉索与液压阻尼器、橡胶阻尼器耦合结构的振动特性, 试验结果可为斜拉索振动特性的规律研究和桥梁安全性预测提供一种新的方法手段。

1 斜拉桥振动试验平台

斜拉桥振动试验平台由斜拉桥试验模型、外部振动激励系统、阻尼减振系统、传感器和数据采集分析处理系统等组成。

1.1 斜拉桥振动试验模型

以宁波某跨海大桥为原型桥, 根据相似性原理设计缩尺试验模型。空间尺寸选择合适的模型缩尺比为 1:100, 桥梁主体结构采用不锈钢材料,

收稿日期: 2021-05-19.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51675286); 浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2018R405090)。

第一作者: 陈冲(1994-), 男, 安徽滁州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 斜拉索振动及轮机工程。E-mail: 1142127937@qq.com

*通信作者: 冯志敏(1960-), 男, 浙江宁波人, 博导/教授, 主要研究方向: 海洋结构工程状态监测及控制。E-mail: fengzhimin@nbu.edu.cn

斜拉索为钢绞线. 斜拉桥整体静力采用杆系有限元法^[14]进行简化, 对其刚度矩阵方程进行量纲分析, 获得试验模型的静力相似关系. 由于斜拉桥结构较为复杂, 在外部风雨环境和桥面激励载荷作用下, 其振动规律难以用解析方程式表达, 因此在考虑常用影响结构动力特性的物理量后, 采用 π 定理分析动力相似关系, 推导出斜拉桥试验模型物理量的相似常数.

1.2 斜拉桥振动试验平台

1.2.1 车辆运行状态模拟

当车辆在斜拉桥面上行驶时, 由于其自身的固有频率, 往往会因惯性力而产生简谐力^[15]. 据此, 在斜拉桥试验模型上安装多台能够输出简谐波的JZK-10 激振器, 并通过调节激振器安装位置、激振频率和激振幅值等条件, 模拟不同车流、车速和车载的运行状态. 当车辆以速度 u 经过空间频率为 n 的路面时, 车辆与路面间的相互激励时间频率为 $f = nu$ ^[16]. 我国常用公路路面空间频率为 0.1 m^{-1} , 车辆最大行驶速度一般限定在 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[17-18].

试验中, 选用 DG4062 信号发生器调节控制激振器的激励频率, 模拟车辆行驶速度. 由动力学相似关系, 等效计算桥梁所受的车辆载荷, 调节激振器的激振幅值来模拟车辆载荷的动态变化.

1.2.2 传感器与数据采集系统

振动试验检测平台中相关测量信息主要包括静态和动态斜拉索索力、斜拉索动态振动信号等. 斜拉桥的索力对试验模型的成桥和斜拉索自身动态特性以及振动规律会产生很大的影响, 选用 DYLY-108 拉力传感器测量斜拉索索力. 每根拉索的上端部与斜拉桥塔连接处安装拉力传感器, 各拉力传感器分别接入 DH3820 应变采集仪, 实现平台上全部拉索索力数据的实时采集与储存.

选择 CA-YD-181-10 加速度传感器测量斜拉索中点加速度, 传感器通过微型卡扣固定在斜拉索上, 由输出线路接入 DH5922 数据采集仪, 实现拉索振动时加速度数据的实时采集和记录.

相关的试验器件和测试仪器型号和生产企业详见表 1.

1.2.3 斜拉索-阻尼减振系统

目前, 斜拉索减振常用方法是在斜拉索上安装外置式阻尼器, 但在复杂环境下, 斜拉索耦合结

表 1 测试仪器表

测试仪器	生产企业	型号
信号发生器	北京普源精电科技	DG4062
信号放大器	江苏联能电子技术	YE5872A
激振器	江苏联能电子技术	JZK-10
拉力传感器	蚌埠大洋传感系统工程	DYLY-108
应变采集仪	江苏东华测试技术股份	DH382
加速度传感器	江苏东华测试技术股份	CA-YD-181-10
数据采集仪	江苏东华测试技术股份	DH5922

构特性的不确定性易造成减振效果出现差异. 因此, 通过在斜拉索上安装不同类型的外置式阻尼器, 同时搭建斜拉索-阻尼器的减振系统, 以探究斜拉索-阻尼器的耦合振动特性和不同阻尼器的减振效果.

试验中选用 HYD 型液压阻尼器和 YU 型橡胶阻尼器 2 种类型阻尼器(图 1). 液压阻尼器的阻尼系数 $80 \text{ Ns} \cdot \text{mm}^{-1}$, 阻尼力 200 N , 行程 $\pm 15 \text{ mm}$, 低速行走阻力 10 N ; 橡胶阻尼器的阻尼力 200 N , 行程 $\pm 15 \text{ mm}$, 低速行走阻力 10 N .



图 1 试验所用的液压阻尼器(左)与橡胶阻尼器(右)

1.3 斜拉桥振动特性测试分析

振动试验检测平台工作示意图如图 2 所示, 实体检测平台如图 3 所示. 检测方法: (1)通过多台激振器输出振动信号, 将激励振动信号传递给斜拉桥试验模型的桥面结构上, 以模拟不同车辆在桥面上行驶时产生的各种振动状态; (2)利用索力传感器和加速度传感器分别对斜拉索索力及振动信号进行采集, 并由数据采集仪进行处理, 由此实现斜拉桥试验平台上的拉索振动特性和索力变化检测试验.

1.3.1 斜拉索振动特性

在各斜拉索中点位置布置加速度传感器. 首先选择试验模型中的拉索 S2 为研究对象, 在拉索上采用激励力锤进行敲击, 采集激励力和振动响应信号, 通过 DHDAS 实时数据采集与分析软件得

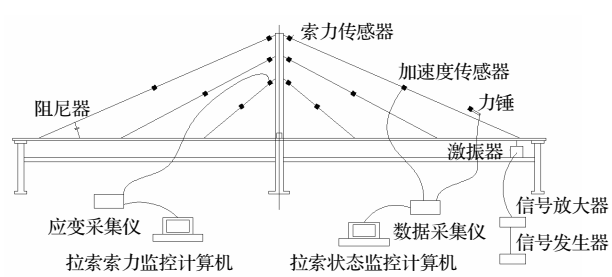


图 2 斜拉桥振动试验检测平台示意图



图 3 斜拉桥振动试验检测平台实物图

到频响函数矩阵. 然后, 用相同方法依次测试其他拉索的振动频响特性, 相关数据见表 2.

根据测试的振动频响特性数据可知, 斜拉索振动特性测试中各拉索一阶振动频率与原型桥对应拉索的振动频率误差均小于 1%, 前五阶振动频率误差均在 5% 以下, 基本符合相似性关系. 由此可见, 试验模型中斜拉索振动特性能够较好地反映原型桥拉索振动模式.

1.3.2 建模与有限元分析

斜拉桥模型属于大型的复杂结构, 通常使用 ANSYS 有限元软件中的 APDL 建立三维空间实体的有限元模型. 对于一个较为复杂的结构来说, 有限元建模时需根据实体模型的材料来选择不同的单元. 由于斜拉桥桥塔体积较大, 因此采用实体单元 solid45 模拟; 而桥面较薄, 在有限元中则采用 shell181 单元模拟; 斜拉索在结构中受到拉索的拉力作用, 但 ANSYS 软件中并没有可直接描述拉索的单元, 因此采用等效模量法修正拉索弹性模量后的 link10 单元模拟, 最终建模结果如图 4 所示. 此外, 有限元模态与实桥模态^[19]的对比结果见表 3.

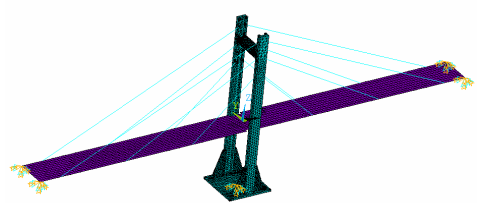


图 4 斜拉桥模型的三维有限元模型

1.3.3 整体桥梁频响特性

在斜拉桥振动试验模型平台搭建完成以后, 通过调整控制拉索索力大小达到成桥设计状态, 对斜拉桥整体试验模型进行振动特性测试, 以验证模型设计的准确性. 选择激振器激励方法对整

表 2 拉索振动频率特征参数

S1 拉索				S2 拉索				S3 拉索			
阶次	原型桥拉索频率/Hz	模型拉索频率/Hz	误差/%	阶次	原型桥拉索频率/Hz	模型拉索频率/Hz	误差/%	阶次	原型桥拉索频率/Hz	模型拉索频率/Hz	误差/%
1	1.378 2	13.750	0.2	1	0.779 3	7.750	0.6	1	0.520 7	5.250	0.8
2	2.935 2	30.000	2.2	2	1.649 6	15.500	6.0	2	1.083 7	10.375	4.3
3	4.144 2	41.250	0.4	3	2.328 1	23.000	1.2	3	1.529 4	15.000	1.9
4	5.834 5	60.000	2.8	4	3.278 9	31.750	3.2	4	2.154 2	20.625	4.3
5	6.898 3	71.250	3.3	5	3.875 3	37.625	2.9	5	2.545 6	25.000	1.8

表 3 有限元计算模态

阶次	实桥模态	实桥振型	相似比	有限元模态	误差值/%	有限元振型
1	0.463 7	梁竖弯	10	4.594 9	0.9	梁竖弯
2	0.661 8	梁竖弯	10	7.655 1	15.7	梁竖弯
3	1.001 5	梁竖弯	10	10.785 0	7.7	梁竖弯
4	1.049 8	梁竖弯	10	10.869 0	3.5	梁竖弯
5	1.147 4	梁竖弯	10	12.176 0	6.1	梁竖弯

体桥面结构进行外部激励,其振动信息通过布置在桥面上的加速度传感器采集,并进行分析处理。

原型桥梁相关参数的实测值与试验模型测试结果见表4,由表4数据可知,试验模型前四阶振动频率的误差相对较小。

表4 斜拉桥振动试验平台误差分析

阶次	原型桥		试验模型桥	
	实测频率/ Hz	相似关系 转化/Hz	试验频率/ Hz	误差/%
1	0.463 7	4.637	4.750	2.4
2	0.661 8	6.618	7.000	5.7
3	1.001 5	10.015	9.250	7.6
4	1.049 8	10.498	11.000	4.8
5	1.147 4	11.474	12.625	10.0

2 斜拉桥振动特性试验

2.1 不同车辆激励下斜拉索振动特性

利用多台激振器模拟车辆行驶对桥梁的振动激励,实际试验中主要检测斜拉索中点的振动响应特性。试验中选择不同斜拉索,通过采集拉索中点处的振动信息数据进行对比分析。试验模型上3根斜拉索几何尺寸及其相关参数见表5。

表5 3根拉索几何尺寸及其物理参数

拉索 编号	计算长 度/m	直径/ mm	弹性模量/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	线密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	索力/ N
S1	0.89	4.00	1.93×10^5	0.533	320.0
S2	1.67	4.00	1.93×10^5	0.625	423.3
S3	2.31	4.00	1.93×10^5	1.010	586.6

根据中国汽车质量分级可知,小型车辆质量约1t,轻型货车质量 $\leq 6\text{t}$,中型货车质量 $\leq 14\text{t}$ 。实验中选择车辆最高限速 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,并根据需求选择不同车辆的流量、载荷和车速进行综合对比试验。

2.1.1 车速与载重对拉索振动影响

为探究车辆行驶速度对斜拉索振动影响,选取桥梁上长拉索为研究对象,对在同一激励力下模拟相同车辆载重,并以不同激励频率下车辆模拟行驶速度 $10\sim 80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,对斜拉索中点的振动特性规律进行检测试验。

为探究车辆载荷对斜拉索振动的影响,以同一激励频率下模拟相同车辆行驶速度,以不同激

励力模拟车辆载荷 $1\sim 10\text{ t}$,对斜拉索中点的振动特性规律进行检测试验。激振器安装于斜拉索桥面下方,通过调节控制信号发生器、信号放大器的激励条件进行试验。

斜拉索振动时中点最大位移值(振幅)以及速度、载重变化规律如图5、图6所示。由图可知,斜拉索中点最大位移值(振幅)随着车速的增加而变大,当车辆行驶速度达到 $60\sim 70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时振动最大;同时,斜拉索振幅也随车辆载重增加而不断变大。因此,车辆在斜拉桥上行驶时,考虑到车速过大容易受到横风和拉索振幅过大等因素影响,应严格控制车辆速度,结合设计桥梁工程实际,一般控制在 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下;并且车辆行驶在桥梁上时,可以通过动态称重和监测手段严格控制载重量,有效改善斜拉索的振动特性,提高桥梁的安全可靠性。

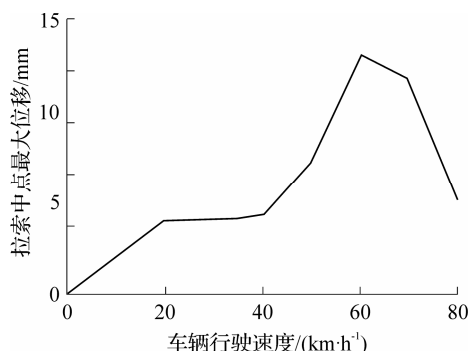


图5 斜拉索中点最大位移—速度变化

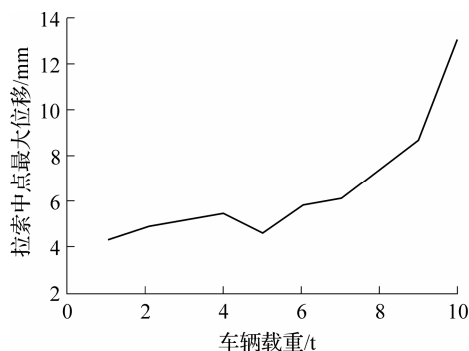


图6 斜拉索中点最大位移—载重变化

2.1.2 不同拉索对外部激励响应

斜拉桥上一般有数十根拉索,每根拉索的几何尺寸和物理参数都各不相同,张拉时产生的斜拉索索力也不尽相同。在振动试验检测平台上,给予斜拉索与桥面连接端部施加相同的激励力,即模拟相同载重的车辆行驶时对各根斜拉索产生的振动响应,分析对比不同长度的斜拉索振动特性

规律. 试验中分别选择模拟车重为 8、9、10 t 中型货车以 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 行驶速度时, 其中 3 根斜拉索产生的振动影响, 振动响应试验示意如图 7 所示.

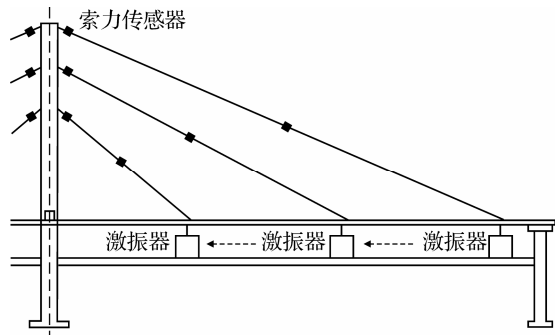


图 7 斜拉索振动响应试验示意图

由于拉索长度各不相同, 通常采用拉索中点相对位移大小表示振动程度, 即斜拉索中点位移幅值占拉索长度的比例, $\delta = (\theta / L) \times 100\%$, 其中, θ 为拉索中点最大位移值, L 为拉索索长. 3 根拉索相对位移的试验结果见表 6.

表 6 拉索中点相对位移最大值

外部载 荷/t	θ/mm			$\delta/\%$		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
8	0.38	2.59	7.39	0.04	0.15	0.30
9	0.77	3.58	8.65	0.09	0.21	0.35
10	1.20	4.46	13.08	0.13	0.27	0.53

由表 6 可知, 不同拉索在相同外界激励环境下, 斜拉索最大相对位移值随拉索长度增大而变大. 斜拉索较短时, 相对振动幅度仅为 $0.04\% \sim 0.13\%$, 而长索可达 $0.30\% \sim 0.53\%$. 由此可见, 斜拉桥上长拉索振动受外力作用影响更大, 需要加强对长拉索振动状态的动态监测、定期检查与维护保养.

2.1.3 车流对拉索振动影响

桥梁上同向行驶的车辆间应保持一定距离, 以确保行车安全, 当多辆车以不同间距行驶(即车流)时, 对桥梁振动造成的激励效果各不相同, 斜拉索的振动响应也随之发生变化. 在斜拉桥振动试验检测平台上选择布置多台激振器实施同步激励, 以模拟不同车流对斜拉桥振动的激励效果, 观察车流变化对拉索的振动状态及索力影响.

机动车辆行驶安全距离一般要求以 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车速行驶时的最小安全距离为 60 m. 试验中假设前后车辆类型相同, 模拟车距为 40、50 和 60 m 时

的振动情况. 通过相似关系确定激振器间隔距离为 40~60 cm. 激振器试验装置如图 8 所示.



图 8 车流振动试验装置

不同车流下, 斜拉索中点振动位移幅值、索力值及与模拟单车行驶时的比较结果见表 7. 由表可知, 随着激振器间隔距离增大(即车流减少), 斜拉索振幅与索力值相应减小; 当间距为 40 cm 时, 同侧 2 台激振器产生的振动幅度相比单台激振器产生的振动幅度约增加 20%; 当间距为 50~60 cm 时, 振动幅度增加 $14\% \sim 10\%$. 最大索力值也随着车间距的增大呈下降趋势. 因此, 在车辆行驶时, 保持较大的行车距离有利于减小对斜拉桥的危害.

表 7 斜拉索最大振幅与最大索力值对照

车辆间 距/cm	小型车辆		轻型货车	
	拉索最大 振幅/mm	最大索力 值/N	拉索最大 振幅/mm	最大索力 值/N
40	5.225	595.179	6.692	611.188
50	4.902	593.953	6.357	607.111
60	4.659	591.022	6.291	604.022
单激励点	4.339	591.631	5.509	606.401

2.2 斜拉索-阻尼器耦合结构减振特性

2.2.1 斜拉索-液压阻尼器耦合结构

在斜拉桥振动试验检测平台的单侧拉索上安装液压阻尼器, 通过对比相同激励环境下未安装液压阻尼器时拉索的振动状态, 分析对拉索的振动影响效果, 以及对不同长度拉索振动影响的差异性. 试验中首先模拟 6、7、8 t 的 3 种车辆以 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时速通过斜拉桥时引起的拉索振动, 采集相关振动信息; 然后, 在单侧拉索上安装液压阻尼器, 在相同激励条件下重复上述振动试验.

不同长度在相同激励环境下, 有或无安装液压阻尼器的振动位移幅值如图 9 所示. 试验表明,

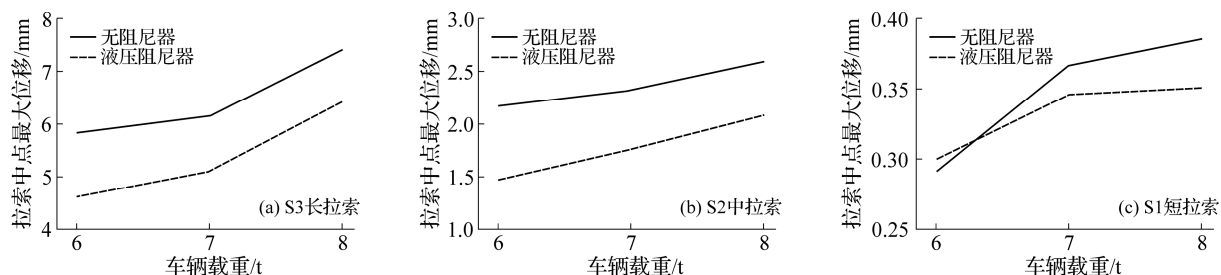


图9 安装液压阻尼器时, 拉索振动的最大位移值变化情况

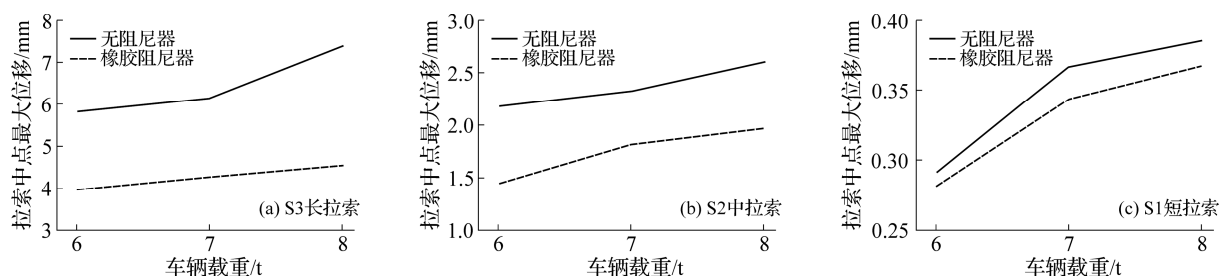


图10 安装橡胶阻尼器时, 拉索振动的最大位移值变化情况

液压阻尼器对试验检测平台上拉索振动具有较好的抑制效果, 与工程桥梁上液压阻尼器效果相同, 能够有效减缓拉索振动. 同时, 对不同长度的拉索其减振效果并不一致, 液压阻尼器对长索的平均减振效果为 16.9%, 中索平均减振效果为 25.2%, 而对短索的减振程度影响较小. 因此, 液压阻尼器对中长拉索减振效果相对较好, 在工程中可考虑安装液压阻尼器.

2.2.2 斜拉索-橡胶阻尼器耦合结构

与液压阻尼器相同, 在振动试验检测平台的单侧拉索上安装橡胶阻尼器进行减振特性试验, 并且与未安装阻尼器的拉索振动结果进行对比分析. 试验条件与液压阻尼器试验相同.

不同长度在相同激励环境下, 有或无安装橡胶阻尼器的振动位移幅值如图 10 所示. 结果表明, 橡胶阻尼器同样对试验检测平台上拉索振动具有较好的抑制效果. 但对不同长度的拉索而言, 橡胶阻尼器对长索的减振效果明显好于液压阻尼器, 平均减振效果为 32.5%; 对中等长度拉索的减振效果与液压阻尼器基本相同为 25.3%. 可见, 橡胶阻尼器对长索的振动抑制效果更好, 工程中可选用橡胶阻尼器对长拉索进行耦合减振.

3 结论

通过搭建斜拉桥试验检测平台和相关振动特

性试验, 可得出以下结论:

(1)以原型桥为基础, 依据相似性理论设计斜拉桥试验模型, 搭建具有振动激励、信号检测、数据采集和分析处理功能和斜拉索耦合减振装置的试验检测平台, 是研究分析斜拉桥和拉索振动特性的一种重要试验方法.

(2)单向车辆载荷工况下, 斜拉索的振动幅度随着车速、车流、车载增加而变大, 需要控制车辆运行状态, 以减少对斜拉索的振动影响. 对长索的相对振动幅度 0.3%~0.53%, 影响明显大于短索.

(3)斜拉索-阻尼器耦合作用对斜拉索振动具有振动抑制效果, 在相同试验条件下, 橡胶阻尼器对斜拉索减振效果为 20%~35%, 效果好于液压阻尼器. 2 种阻尼器对长索的减振效果差异性十分明显, 试验结果对相关阻尼器研制和工程应用具有参考价值.

参考文献:

- [1] Caracoglia L, Zuo D L. Effectiveness of cable networks of various configurations in suppressing stay-cable vibration[J]. Engineering Structures, 2009, 31(12):2851-2864.
- [2] Zuo D L, Jones N P. Interpretation of field observations of wind- and rain-wind-induced stay cable vibrations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(2):73-87.

- [3] 项贻强, 吴孙尧, 段元锋. 基于刚度相似原理的斜拉桥模型设计方法[J]. 实验力学, 2010, 25(4):438-444.
- [4] 陈常松, 颜东煌, 田仲初, 等. 岳阳洞庭湖大桥模型动力相似理论分析[J]. 桥梁建设, 2002, 32(1):48-51.
- [5] 罗泽辉. 斜拉桥联塔结构行为模型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [6] Zhao Y, Zhou Y J, Sun J. Design of static test model for three-tower cable-stayed self-anchored suspension composed bridge[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243/244/245/246/247/248/249:1528-1535.
- [7] 周林仁, 欧进萍, 杨鸥, 等. 大跨斜拉桥结构健康监测实验室模型试验平台[J]. 实验力学, 2012, 27(6):20-29.
- [8] 兰惠清, 汝继星, 张平. 相似理论的斜拉索管桥力学特性研究[J]. 石油化工设备, 2013, 42(6):1-5.
- [9] 孙测世, 康厚军, 赵珏冰, 等. 斜拉索非线性振动跳跃过程实验研究[J]. 固体力学学报, 2015, 36(5):429-435.
- [10] 王海龙, 刘杰, 王新敏, 等. 建立斜拉桥基准有限元模型的新方法与实践[J]. 振动测试与诊断, 2014, 34(3):458-462; 588.
- [11] 詹胜, 徐幼麟, 沈其民, 等. 斜拉桥拉索风雨振动试验新装置[C]//第15届全国结构工程学术会议论文集(第III册). 焦作, 2006:137-142.
- [12] 张令弥, 刘福强. 大跨径斜拉桥相似模型结构动态特性试验的分离模态法[J]. 振动、测试与诊断, 1999, 19(2):128-132.
- [13] 严仁军, 谢吉林, 张海燕, 等. 快速组合火车渡轮模型实验研究[J]. 船舶工程, 2003, 25(3):8-11.
- [14] 王美, 丁勇, 葛炜祎, 等. 奉化江大桥结构稳定性有限元分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2011, 24(1):91-94.
- [15] 付英. 基础激励下桥梁斜拉索振动分析与控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [16] 李皓玉. 车辆与路面相互作用下路面结构动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [17] 栾兆兵. 公路路面不平度引起车辆振动响应分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2013(30):22-23.
- [18] GB7031-1986, 车辆振动输入路面平度表示方法[S].
- [19] 郑荣跃, 吕忠达, 许凯明, 等. 宁波招宝山大桥基于模型修正的动力分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(5):52-56.

Vibration characteristics test and analysis of cable-stayed bridge simulation test platform

CHEN Chong, SHI Yunfei, LIU Xiaofeng, CHEN Yuehua, ZHANG Gang, HU Haigang, FENG Zhimin*

(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China)

Abstract: Taking a sea crossing bridge in Ningbo as the prototype, a cable-stayed bridge vibration test platform is built by combining the bridge excitation system, sensor and data acquisition and processing system and cable damping vibration reduction system, and its vibration characteristics are tested and analyzed. The vibration response tests of stay cables under different vehicle loads and driving speeds are simulated to analyze and test the suppression effect of hydraulic damper and rubber damper on the vibration of stay cables. The results show that the vibration amplitude of stay cable increases with the increase of vehicle speed and load, and decreases with the decrease of vehicle flow. Under the same working conditions, the damping effect of rubber damper on long stay cable is better than that of hydraulic damper, and there is little difference between the two types of dampers on medium and short stay cables. The test results exhibit reference value for the study of vibration characteristics of stay cables and the engineering application of dampers.

Key words: cable-stayed; test model; vibrator; test platform; damper; vibration characteristics

(责任编辑 章践立)