

# CFRP 索斜拉桥动态特性的有限元分析及动态试验

蔡东升, 刘荣桂, 许 飞, 周士金

(江苏大学理学院, 江苏镇江 212013)

[摘要] 介绍了国内首座 CFRP 索斜拉桥的工程概况;建立了该桥的三维空间梁壳杆系有限元动态分析模型,进行了结构动态特性有限元分析;进行了环境激励下国内首座 CFRP 索斜拉桥结构动态特性的测试,结合试验结果对国内首座 CFRP 索斜拉桥的动态特性进行了分析。同时,将实桥动态试验结果与有限元动态特性分析结果进行了对比分析。结果表明,有限元动态特性分析的低阶频率和振型与试验测得的频率与振型结果基本吻合。笔者等试验及相关研究分析结论可为 CFRP 索桥梁的动态建模、动态特性分析、抗震抗风设计及 CFRP 新型缆索材料在桥梁工程中的进一步推广应用提供一定的参考依据。

[关键词] CFRP 索斜拉桥;动态特性;有限元分析;环境激励;动态试验

[中图分类号] TU311.3;U448.27 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)02-0016-06

## 1 前言

随着全球经济的高速发展,人们对交通快捷和便利的要求越来越高,不少国家开始构思和实施以桥梁形式跨越海湾或海峡<sup>[1]</sup>。长大跨缆索体系桥梁(斜拉桥和悬索桥)因其在经济、结构、造型美学等诸多方面的独特优点,越来越受到公众和设计者的青睐。在长大跨桥梁结构中,由于传统钢缆索自重应力占其容许应力的比例较大,其承载效率及跨越能力受到一定的限制。碳纤维复合材料 CFRP (carbon fiber reinforced plastics)是由有机纤维在惰性气体中经高温碳化而成,具有不锈蚀、无磁性、比强度高、优良的可作为缆索构件的性能。以 CFRP 之类的新型缆索材料替代传统钢索的研究既是各国学者的热点课题<sup>[2-6]</sup>,也是长大跨桥梁结构的发展趋势。多年来,在国家“八六三”计划和国家自然科学基金委员会的大力支持下,江苏大学与东南大学等有关单位合作,在碳纤维(CFRP)预应力结构应用研究方面,取得了阶段性的研究成果,2005年6月,由东南大学、江苏大学和北京特希达科技有限公

司共同研制的我国第一座 CFRP 索独塔双索面钢筋混凝土斜拉试验桥(总长近 55 m)在江苏大学校内建成<sup>[7,8]</sup>,为 CFRP 索桥梁结构的应用基础研究创造了良好的条件。CFRP 索桥梁结构存在自重较轻等因素引起 CFRP 索桥梁的动态特性与传统钢缆索体系桥梁存在一定差异,由于结构的动态特性(自振频率、振型、阻尼)是桥梁抗震、抗风、车桥耦合振动分析的基础,因而建立适合 CFRP 索桥梁结构的动态分析有限元模型,进行 CFRP 索实桥结构的动态特性分析及其试验,是 CFRP 材料应用于桥梁缆索构件亟待解决的问题<sup>[9-12]</sup>。为此,课题组于 2008 年 8 月中旬进行了实桥动态试验,并借助有限元分析通用软件 ANSYS 建立了空间梁壳杆系有限元动态分析模型,进行结构动态特性分析,与试验结果进行对比分析、相互校核,以期得到具有一定参考价值的研究成果。

## 2 CFRP 索斜拉桥工程概况

江苏大学西山 CFRP 索斜拉桥人行天桥(见图 1)位于校本部西区,为连接 9~16 号学生公寓与学

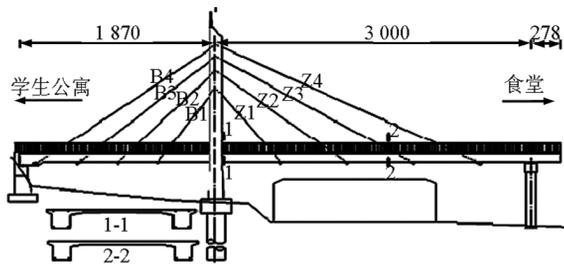
[收稿日期] 2008-12-29

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50678074)

[作者简介] 刘荣桂(1957-),男,江苏江都市人,江苏大学教授,博士生导师,主要研究方向为混凝土结构耐久性、CFRP 材料应用研究;  
E-mail:liurg@ujs.edu.cn

生食堂的人行天桥,与下穿公路呈 76.5°斜交。桥为独塔双索面钢筋混凝土斜拉桥,为国内首座采用 CFRP 斜拉索的新型斜拉桥。跨径布置为 30 m + 18.4 m,采用塔梁墩固结体系,索塔为双柱式。桥梁全宽 6.8 m,其中人行道宽 5.0 m,索塔两侧各布置 4 对斜拉索。斜拉索采用日本三菱化学株式会社 (Mitsubishi Chemical Corporation) 生产的 Leadline 系列碳纤维复合材料 (CFRP) 拉索及相应配套的锚具,CFRP 筋材的密度为 1 600 kg/m<sup>3</sup>,受拉弹性模量

为 147 GPa,标准强度为 2 300 MPa,允许应力取 0.35 倍的标准强度。CFRP 拉索外包桔红色 PVC 护套。根据计算,该桥采用 3 种类型的斜拉索,即 16 - D8 (B4), 11 - D8 (B3, Z2, Z3, Z4) 和 6 - D8 (其他)。斜拉索在主跨主梁上的索距为 6.3 m,在边跨主梁上的索距为 3.8 m,在索塔上的索距由上至下分别为 1.2, 1.5, 1.8 m。斜拉索在主梁处设为锚固端,在塔上设为张拉端。



(a)总体布置图(单位:cm)

(b)实桥外观

图 1 江苏大学 CFRP 索斜拉桥概况

Fig. 1 Survey of the cable-stayed bridge using CFRP cables in Jiangsu University

### 3 CFRP 索斜拉桥有限元动态分析模型

Fleming 和 Egeseli 以及 Abdel - Chaffa 对斜拉桥做过大量的线性和非线性动力分析,认为用线性理论分析得到的结果是可以接受的<sup>[13,14]</sup>。忽略结构阻尼的影响,采用有限元法计算结构自振频率和振型的公式为:

$$[-\omega_i^2 [M] + [K]] \{\varphi\}_i = \{0\}$$

式中,  $\omega_i$  为第阶自振频率(特征值);  $\{\varphi\}_i$  为第  $i$  阶自振振型向量;  $[M]$ ,  $[K]$  分别为结构的整体质量矩阵和刚度矩阵。

有限元动态建模应在与实际物理模型尽量相似的前提下力求简洁,尽可能的缩短计算时间。为此,笔者等未采用传统斜拉桥的鱼刺骨建模方法,建立了更接近于实际的 CFRP 索梁壳杆系空间有限元动态分析模型,具体的建模方法为:将桥梁结构离散为基于实桥设计尺寸的一系列具有适当质量和刚度的单元(见图 2),其中,建模塔柱均离散为梁单元 (BEAM4),全桥共计 85 个;CFRP 索离散为杆单元 (LINK10),全桥共计 16 个;桥面和主梁离散为壳单元 (SHELL63),全桥共计 2 242 个。索与塔、梁的连接采取耦合的方式进行模拟。索的截面与实际尺寸一致,初始应变根据实测索力计算得到;主塔与承台连接处嵌固,梁端约束横向位移和纵向位移,释放转

动自由度。基本的建模参数如下:主塔、主梁及桥面层混凝土弹性模量为  $3.25 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>、密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>、泊松比为 0.17;CFRP 索弹性模量为  $1.47 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>、密度为 1 600 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.25。

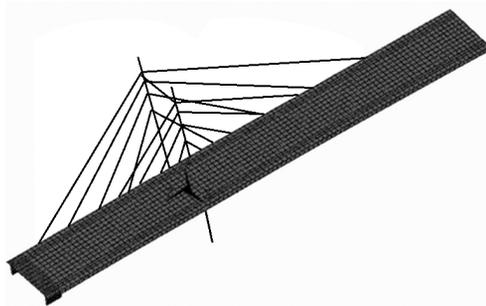


图 2 CFRP 索斜拉桥有限元动态分析模型

Fig. 2 Finite element dynamic analysis model of CFRP cable-stayed bridge

### 4 CFRP 索斜拉桥自振特性测试

环境激励法利用结构由于外界各种因素所引起的微小而不规则的振动(脉动)来确定结构的动力特性。由于脉动是因外界不规则的干扰所引起,具有较丰富的频率成分,而结构的固有频率的谐量是脉动的主要成分。同时脉动响应包含的频率相当丰富,且不需要任何激励设备,适用于测量结构整体的

自振特性,除非环境激励过小,才需采用人为激励,因此笔者等利用脉动法进行了 CFRP 索斜拉桥自振特性的测试。

#### 4.1 测试方案

在桥梁动力测试中,振型的测量是测试的技术难点之一。结构的振型是结构相应于各阶固有频率的振型形式,一个振动系统振型的数目与其自由度相等。但是,桥梁结构的基频对结构的动力分析才是重要的,对其更复杂的动力分析问题,也仅需前几阶固有频率,即低阶振型对桥梁结构动力分析是重要的。此次脉动测试是通过超低频加速度传感器拾取大桥各测量部位的环境振动响应,测试时设定某一位置固定参考点,通过多次移动传感器位置得到全桥的振动响应,由脉动测试理论识别结构的模态参数。测试过程中,每次测试只采集一个移动测试点和对应的固定参考点的测试信号,以避免测试过程中可能出现传感器信号的时间不一致问题;同时

将参考点传感器与桥梁主体结构可靠连接以解决参考点信号漂移的问题。

#### 4.2 测试系统及测试参数

测振系统采用中国地震局力学研究所研制的 941-B 型 6 通道超低频测振仪,该仪器是一种用于超低频或低频振动测量的多功能仪器,主要用于地面和结构物的脉动测量,相对应的 941-B 型拾振器采用无源闭环伺服技术,具有良好的超低频和低频特性。数据采集、分析系统采用南京安正信号调理仪及其 CRAS 振动及动态信号采集分析软件。测试参数为:数据块长度为 1 024;8 次平均;矩形时间窗处理函数;分析频率为 50 Hz,频率分辨率 0.125 Hz;触发方式为自由运行;电压范围为程控放大 16 倍 ( $\pm 312.5$  mV);校正因子按传感器灵敏度乘放大系数输入;工程单位为 mm/S;测量方向为横向和竖向。图 3 为现场实测相关图片。

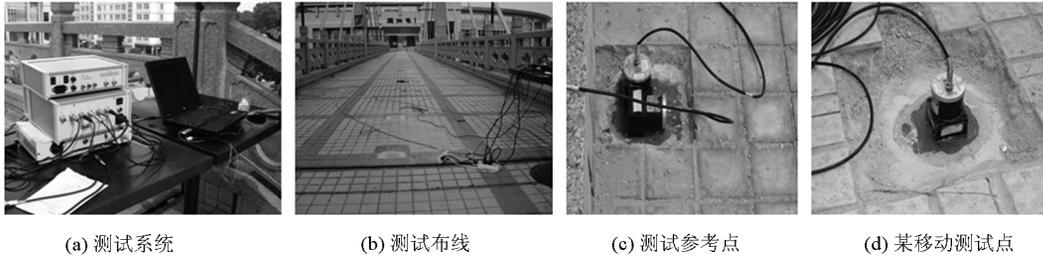


图 3 测试现场相关图片

Fig. 3 Related pictures of the test scene

#### 4.3 测点的布置

为了精确获得桥梁竖向振动、扭转振动、横向振动的振动形式,同时考虑测试方案的操作难度,此

次测试将传感器(941-BH 和 941-BV)布置在桥面,根据脉动测试理论,结合前期有限元预分析的结果,选择 C41 点为参考点,传感器布置见图 4。

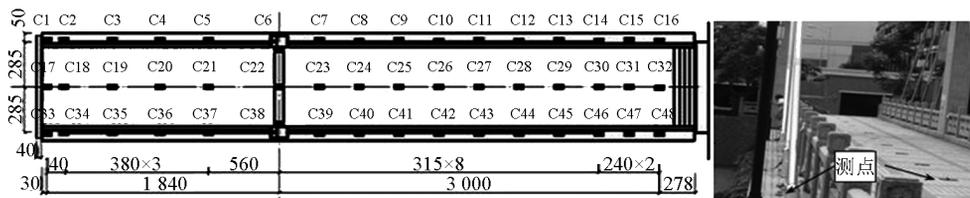


图 4 测点布置图

Fig. 4 Distribution of test points

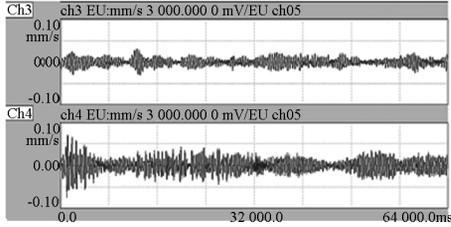
#### 4.4 测试结果

在上述脉动测试方案下,脉动测试速度信号时程曲线及全部响应点信号自功率谱集总平均见图 5。

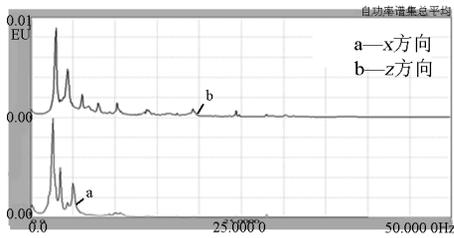
由于 CFRP 索斜拉桥属于小阻尼系统,当结构

体系的固有圆频率  $\omega$  与外部环境激励圆频率  $\bar{\omega}$  很接近时将会出现“拍”的现象<sup>[15]</sup>。由图 5(a)可知,在测试中,可明显的看到结构响应这种“拍”的现象,表明上述的测试方案能得到进行结构动态分析的良好测试信号;由图 5(b)可知,CFRP 索斜拉桥在低频段自功率谱集总平均图中有明显的峰值,脉

动测试结果能较好的反应出结构的部分自振频率；同时由自功率谱集总平均图可知，该 CFRP 索斜拉桥在低频段又表现出较明显密集模态特征，表明该 CFRP 索斜拉桥结构在受到低频外部激励时，其响应存在强耦合性，响应性态复杂。



(a) 脉动测试信号



(b) 全部响应点信号的自功率谱集总平均

图 5 脉动测试信号及全部响应点信号的自功率谱集总平均

Fig. 5 Pulsation test signal and self-power-spectrum lump average of all response curves

## 5 有限元动态分析和动态测试结果对比分析

利用前述建立的 CFRP 索斜拉桥三维空间有限元动态分析模型，利用 ANSYS 程序进行计算，获得该斜拉桥与试验对应的 8 阶振动频率及相应振型，结果见表 1，图 6 为各阶理论计算频率振型与试验频率振型对比图。

表 1 CFRP 索斜拉桥振动频率、振型的计算和实测结果表

Table 1 Computation and test results table about frequencies and modes of CFRP cable-stayed bridge

阶次	频率/Hz			振型描述
	计算值	实测值	误差/%	
1	2.511	2.625	4.34	索塔侧弯
2	2.804	2.875	2.47	主梁反对称竖弯
3	4.356	4.375	0.43	主梁对称竖弯
4	5.753	6.125	6.07	主梁反对称扭转
5(6)	8.023	8.000	0.29	边跨主梁对称竖弯索塔纵弯
6(9)	10.158	10.25	0.90	主跨主梁反对称竖弯索塔纵弯
7(10)	12.510	13.872	9.84	主跨主梁 2 阶扭转
8(16)	20.053	19.25	4.17	主梁高阶竖弯

注：表中阶次列括号内的数字为理论计算频率阶次

由表 1 可知，笔者等所建 CFRP 索梁壳杆系有限元动态分析模型在低阶分析结论与试验实测结果较为吻合，该模型可为 CFRP 索桥梁结构的竖向基频计算和抗震及抗风设计提供一定的参考依据。

由表 1 和图 6 可得出国内首座 CFRP 索斜拉桥动态特性的相关结论如下：

1) 对该 CFRP 索斜拉桥，由于桥梁实际结构两跨不对称，结构动态特性具有明显的不对称性，理论计算和实测结果都很好地的反映出这种不对称性。

2) CFRP 索斜拉桥前 4 阶空间振动形态(梁竖弯、塔侧弯、梁扭转)单纯，在结构抗震分析时，适合采用反应谱法进行分析。

3) 由于塔梁采用固接，主梁在索塔出存在强扭转约束，该桥边跨和主跨之间的扭转耦合效应在塔梁固接处被大大削弱，在振型中出现明显的单跨扭转振型。

4) 由于该桥索塔柔度相对主梁较大，索塔的一阶侧弯振型出现的比主梁要早。

5) 竖向基频试验结果 2.875 Hz 与我国《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 60-01-2004)规定的同等跨度的传统钢索斜拉桥的竖向弯曲基频 2.5 Hz ( $f_b = 150/L$ )存在的差异较小，但扭转基频 6.125 Hz 与规范计算结果 2.19 Hz ( $f_t = C/\sqrt{L}$ )差异很大，因而 CFRP 索斜拉桥扭转基频在目前研究阶段仍需通过实桥试验获得。

## 6 结语

高性能 CFRP 索应用于缆索体系桥梁结果目前仍处于研究开发阶段。笔者等在实桥试验的基础上，给出了国内首座 CFRP 索斜拉桥的相关动态特性；对比分析了笔者所建空间 CFRP 索梁壳杆系斜拉桥有限元动态分析结果，分析结果表明，空间梁壳杆系有限元动态分析模型在 CFRP 索斜拉桥主梁竖弯基频及扭转基频计算结果与现场实测结果有较好的吻合性，表明空间梁壳杆系有限元动态分析模型可用于此类结构的抗震及抗风动态分析。文章研究分析结果可为同类型桥梁的动态建模、动态特性分析、抗震抗风设计及 CFRP 新型缆索材料在桥梁工程中的进一步推广应用提供一定的参考依据。

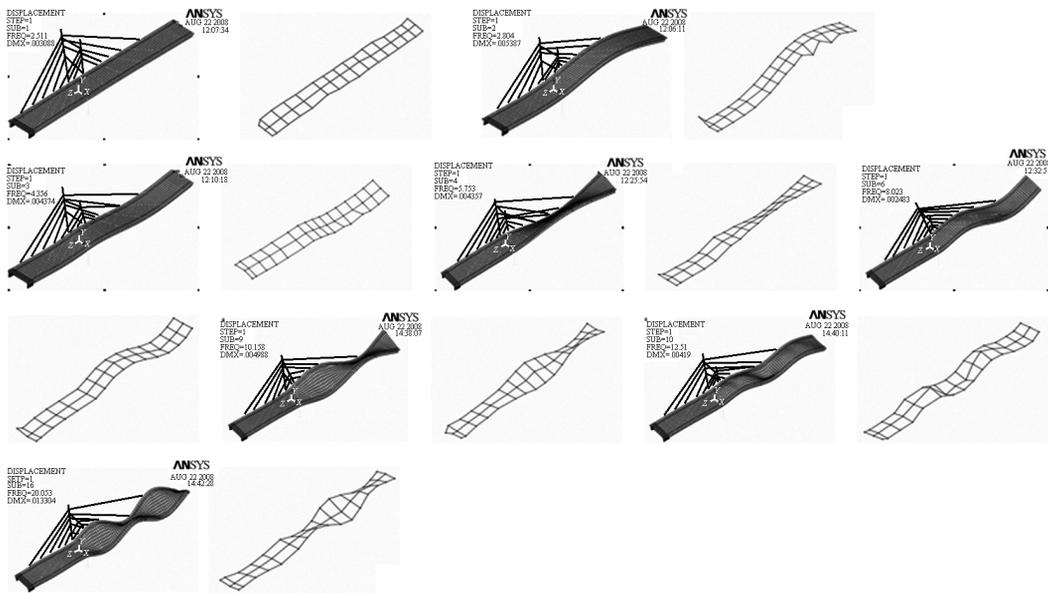


图6 各阶理论计算频率振型与试验频率振型对比图

Fig. 6 Frequencies and modes contrast between theoretical calculation and test of each step

参考文献

[1] 项海帆. 21 世纪世界桥梁工程的展望[J]. 土木工程学报, 2000,33(3):1-6

[2] 刘荣桂,李成绩,龚向华,等. 碳纤维斜拉索的动力参数特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008,40(08):1284-1288

[3] 刘荣桂,李成绩,蒋峰,等. 碳纤维斜拉索的静力参数特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008,40(04):615-619

[4] Winkler N, Klein P. Carbon fiber products (CFRP) a construction material for the next century [A]. Proceedings of the 13th FIP Congress[C]. Amsterdam: A. A. Balkema Publishers, 1998:69-72

[5] Grace, Nabil F. Navarre, et al. Design construction of bridge street bridge - first CFRP bridge in the United States[J]. PCI JOURNAL, 2002,47(5):20-35

[6] 梅葵花,吕志涛. CFRP 在超大跨悬索桥和斜拉桥中的应用前景[J]. 桥梁建设,2002,02:75-78

[7] 吕志涛,梅葵花. 国内首座 CFRP 索斜拉桥的研究[J]. 土木工程学报,2007,40(1):54-59

[8] 梅葵花. CFRP 拉索斜拉桥的研究[D]. 南京:东南大学,2005

[9] Keiichiro, Tohgo, Shuji Nakagawa, et al. Fatigue behavior of CFRP cross - ply laminates under on - axis and off - axis cyclic loading[J]. International Journal of Fatigue. 2006,28(10):1254-1262

[10] Kawai, Masamichi, Honda, et al. Off - axis fatigue behavior of cross - Ply CFRP laminates at room temperature and ply - by - ply basis fatigue analyses[J]. A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. 2005,71(7):1065-1072

[11] Tohgo, Keiichiro, Nakagawa, et al. Damage behavior and life prediction in CFRP cross - ply laminates under fatigue loading [J]. A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. 2006,72(7):1041-1048

[12] Kawai M, Maki N. Fatigue strengths of cross - ply CFRP laminates at room and high temperatures and its phenomenological modeling[J]. International Journal of Fatigue, 2006,28(10):1297-1306

[13] Fleming J F, Egeseli E A. Dynamic behavior of a cable - stayed bridge [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982, 8 :1 - 16

[14] Nazmy A S, Abedel - Chaffar A M. Nonlinear earth - quake response analysis of long - span cable - stayed bridges theory [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics , 1990 ,19 :45 - 62

[15] Timoshenko S . Vibration Problems in Engineering [M]. John Wiley & Sons,1974:47-78

# Finite element analysis and dynamic test of dynamic properties of the cable stayed bridge using CFRP cables

Cai Dongsheng, Liu Ronggui, Xu Fei, Zhou Shijin

(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

[ **Abstract** ] An engineering survey of the first cable – stayed bridge using CFRP cables was firstly introduced ; then a three – dimensional computational finite element dynamic model based on beam elements ,shell elements and bar elements of above CFRP cable stayed bridge was modeled and a structure dynamic property analysis was put up ; lastly a dynamic property test under ambient excitation was put up to analyze the dynamic characteristics of the first cable – stayed bridge using CFRP cables in China , at the same time , a contrast analysis between test results and calculational results of finite element method was presented. The analysis result shows the low order vibratory frequency and mode are basically tallied between test results and calculational results of finite element method. The test and analysis results of this paper could provide reference for dynamic modeling and characteristic analyzing , seismic and wind loads resistance designing of CFRP cable – stayed bridge ,also it could provide reference for the further engineering application of CFRP material used as cables on bridge structure by all means.

[ **Key words** ] CFRP cable stayed bridge ; dynamic property ; finite element analysis ; ambient excitation ; dynamic test