

文章编号: 0451-0712(2006)12-0005-04

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

# 应用碳纤维索的大跨径斜拉桥抗风性能研究

张新军, 应磊东

(浙江工业大学建筑工程学院 杭州市 310014)

**摘 要:** 为了探讨碳纤维复合材料在大跨径斜拉桥中应用的可能性,以拉索等轴向刚度为原则,拟定了一座主跨为 500 m 的应用碳纤维索的大跨径斜拉桥,并运用三维非线性计算理论进行了动力特性、静风特性和空气动力稳定性分析。分析结果表明大跨径斜拉桥采用碳纤维索后:(1)结构的自振频率有所提高;(2)静风作用下结构变形增大,但其静风性能却与钢索斜拉桥基本一致;(3)空气动力稳定性与钢索斜拉桥基本一致。因此从抗风性能角度而言,大跨径斜拉桥采用碳纤维索是可行的,但是拉索截面尺寸应采用等轴向刚度原则来确定。

**关键词:** 大跨径斜拉桥; 碳纤维索; 动力特性; 静风特性; 空气动力稳定性

20 世纪末,世界上先后建成了 2 座创跨径记录的大跨径斜拉桥,一座是主跨为 856 m 的法国诺曼底(Normandie)桥,另一座是主跨为 890 m 的日本多多罗(Tatara)桥。目前,跨径超过 1 000 m 的斜拉桥,即中国江苏苏通大桥(主跨 1 088 m)、香港昂船洲(Stonecutters)桥(主跨 1 018 m),分别于 2003 年 6 月及 2004 年 5 月动工兴建,2 座桥均计划在 2008 年建成。进入 21 世纪后,世界桥梁工程将进入跨海连岛工程建设的新时期,斜拉桥的跨径仍在继续增大。世界上主要是在亚洲,还有多座大跨径斜拉桥正在规划中,其中不乏有主跨超过 1 000 m 的超大跨径斜

拉桥<sup>[1]</sup>。斜拉桥作为柔性结构其拉索的力学特性对结构刚度和承载能力有较大的影响,克服拉索垂度产生的不利因素以及减轻拉索腐蚀和疲劳对桥梁耐久性的影响,是大跨径斜拉桥结构设计和建成后维护管理的重要课题。

为了减小拉索的垂度并提高结构的耐久性,本来使用在宇宙、航空领域的碳纤维等新材料在斜拉桥中开始了实验性的应用。与钢材相比,碳纤维材料(简称 CFRP)具有强度高、自重轻、抗腐蚀、抗疲劳、耐久性好等优点,而且徐变和松弛等重要指标均优于钢材,弹性模量选择范围大,温度变形小。虽然还

收稿日期: 2006-05-18

## Design and Calculation of Main Cable of Fumin Bridge in Tianjin City

ZHOU Yong-tao, LI Yi-qian, TU Jin-ping, JIA Jie-feng

(Bridge Technology Co., LTD, China Road and Bridge Group, Beijing 100102, China)

**Abstract:** According to the mechanical characters of the main cable of self-anchored suspension bridge with spatial cables, the calculation and analysis are carried out and the reliability of the calculation and analysis method is verified by the Fumin Bridge in Tianjin City. The design and calculation of the main cable of the Fumin Bridge is good exploration to construct self-anchored suspension bridge with spatial cables in future and some experiences are accumulated.

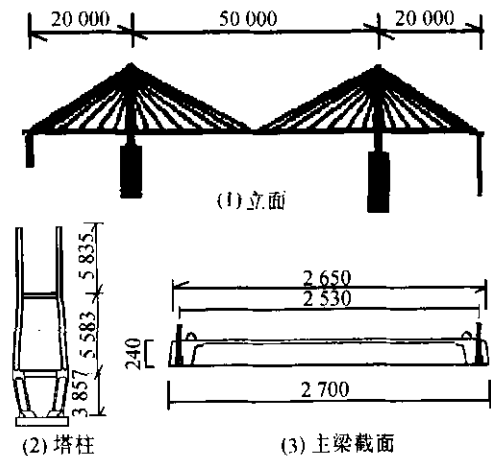
**Key words:** suspension bridge; main cable of self-anchored suspension bridge with spatial cables; mechanical character of main cables; design and calculation method

存在材料昂贵和剪切强度低等缺点,但随着 CFRP 产量的增加和新锚固技术的开发应用,不少问题已逐渐得到解决,CFRP 将是一种很有应用前景的材料。国外已成功地采用 CFRP 拉索替换钢斜拉索,并建造了试验性质的人行斜拉桥,国内关于 CFRP 材料的应用研究还主要集中在加固方面,目前还没有 CFRP 作斜拉索的研究报道。

谢旭、苟昌焕、梅葵花等人对碳纤维斜拉索和应用碳纤维索的大跨径斜拉桥静力学和动力特性进行了研究,但未涉及抗风性能的研究。斜拉桥是一种大跨柔性结构,对风的作用比较敏感,其抗风性能是影响结构设计的重要因素。程韶红<sup>[6]</sup>也对应用碳纤维索的斜拉桥进行了动力特性和颤振稳定性分析,但分析时没有考虑风与结构耦合作用的非线性影响。为此,本文以荆沙长江大桥为工程背景,以等轴向刚度为准则,拟定了一座同等跨径应用碳纤维索的斜拉桥,并运用 3 维非线性抗风分析方法进行了空气静力和动力稳定性分析。通过与同跨径钢索斜拉桥的比较,从抗风性能角度探讨了碳纤维索在大跨径斜拉桥中应用的可行性。

### 1 桥梁简介

本文以已建成的荆沙长江大桥为工程背景,该桥为 200 m+500 m+200 m 的 3 跨双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,其总体布置见图 1 所示。主梁采用宽为 27 m,高为 2.0 m 的分离式边主梁断面,H 形桥塔塔高约 137 m。在有限元分析时,主梁采用三梁式计算模型,以计入主梁约束扭转刚度的影响。



单位:cm

图 1 荆沙长江大桥总体布置

以该桥为基础,采用拉索的等轴向刚度原则,拟定了一座同等跨径布置采用碳纤维索的斜拉桥。除斜拉索不同外,其余设计资料均相同。拉索的截面积按下式计算:

$$E_{CFRP}A_{CFRP}=E_SA_S$$

式中: $E_{CFRP}$ 和 $E_S$ 分别为碳纤维拉索和钢拉索的弹性模量; $A_{CFRP}$ 和 $A_S$ 分别为碳纤维拉索和钢拉索的截面积。

### 2 动力特性

采用基于子空间迭代法的动力特性有限元分析程序,考虑结构的几何非线性因素,计算了成桥状态结构的前 10 阶振型,其中桥面主梁的振型情况如表 1 所示。

表 1 结构的自振频率

振型序号	钢索/Hz	碳纤维索/Hz	振型形状
2	0.184 1	0.187 0	一阶正对称竖弯
3	0.247 2	0.251 0	一阶反对称竖弯
4	0.352 0	0.357 6	一阶正对称侧弯
5	0.395 1	0.406 5	一阶正对称扭转
6	0.443 5	0.455 7	二阶正对称竖弯
9	0.510 5	0.516 4	二阶反对称竖弯
10	0.520 2	0.533 2	一阶反对称扭转

从表 1 的比较可以看出,采用碳纤维索后,结构的自振频率都有所提高,增幅都在 5% 以内。自振频率的提高主要得益于结构质量的下降。由于在碳纤维索截面尺寸确定时应用了等轴向刚度的方法,因此 2 座桥梁的结构整体刚度基本接近,但是单位长度碳纤维索的质量却只有钢索的 0.235 倍。伴随着结构整体质量的降低,使得与之成反比的结构自振频率因此而提高。

### 3 空气静力特性

由风洞试验结果可知,该桥在负的风攻角情况下较为不利。因此,在 0°和-3°风攻角下,采用三维非线性空气静力分析程序进行了随风速增加的空气静力分析。分析时,桥面主梁考虑了静风荷载的阻力、升力和升力矩三个分量的共同作用,相应的静力三分力系数取自该桥的节段模型风洞试验结果;斜拉索和桥塔仅考虑阻力分量的作用,斜拉索的阻力系数为 0.7,桥塔的阻力系数为 2.0。跨中处主梁的侧向、竖向以及扭转位移随风速增加的变化趋势如图 2 和图 3 所示。

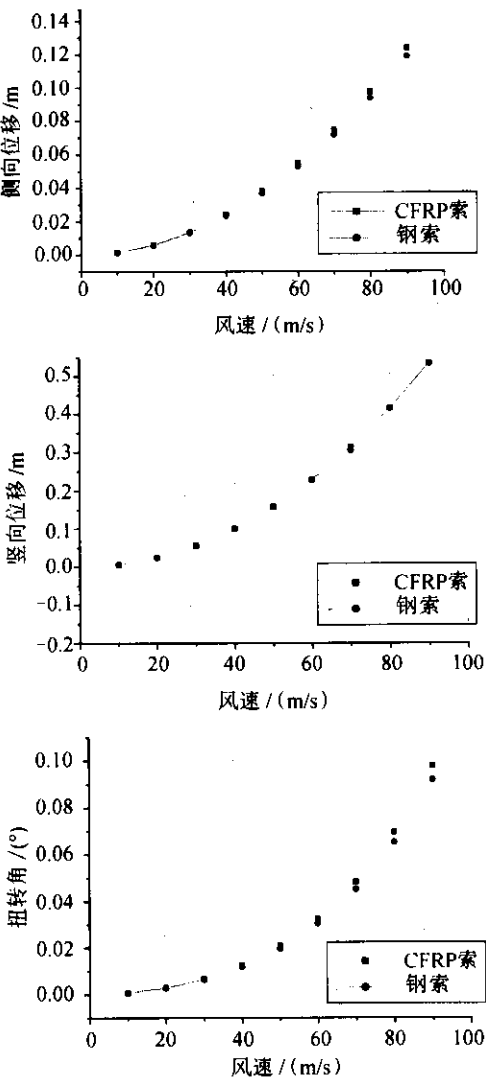


图2 0°风攻角时跨中处主梁位移随风速增加的变化趋势

从图2和图3的比较可以看到,采用碳纤维拉索后,结构的侧向、竖向和扭转位移都有所增大。采用碳纤维索后,拉索的截面积增大了18.2%,拉索直径相应地增加了8.72%。随着拉索直径的增大,作用在拉索上静力风荷载的阻力分量随之增加,结构的位移因而增大。由于采用了等轴向刚度的方法来确定碳纤维拉索的截面尺寸,2种情况的结构刚度基本相同,所以二者的位移还是比较一致。因而,说明了二者的静风性能基本相同。

因此从静风性能角度而言,斜拉桥采用碳纤维拉索是可行的。

4 空气动力稳定性

采用三维非线性空气动力稳定性分析程序,在

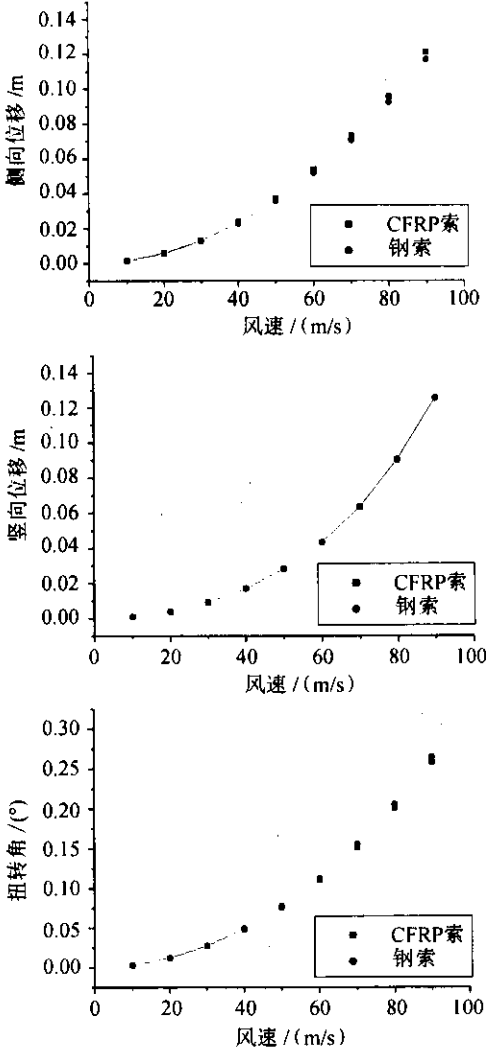


图3 ±3°风攻角时跨中处主梁位移随风速增加的变化趋势

0°和±3°风攻角下,对应用钢索和碳纤维索的斜拉桥进行了空气动力稳定性分析,空气动力失稳的临界风速见表2。分析时,桥面主梁的气动导数取该桥节段模型风洞试验结果<sup>[7]</sup>,并考虑了结构前10阶振型的参与,结构的阻尼比为1.0%。

表2 空气动力失稳临界风速 m/s

风攻角	钢索	碳纤维索
-3°	75.5	75.0
0°	87.4	87.0
+3°	93.1	91.0

可以看到,采用碳纤维索后,由于结构的整体质量有所下降,导致了与之平方根成正比的空气动力失稳临界风速的降低,但总体还是非常一致的。因

此,说明了在空气动力稳定性方面,采用碳纤维索也是可行的。

## 5 结语

本文以荆沙长江大桥为背景,以拉索等轴向刚度为原则,拟定了一座等跨径采用碳纤维索的斜拉桥。通过对这两座桥的动力特性、静风特性和空气动力稳定性的分析和比较,得到了以下几点主要结论。

(1)采用碳纤维索后,由于结构的整体质量略有减小,结构的自振频率有所提高。

(2)在静力和动力风荷载作用下,应用碳纤维索与钢索的斜拉桥其抗风性能基本保持一致。因此,说明了在目前的跨径情况下,采用碳纤维索是可行的。但是对于更大跨径桥梁,则有待于进一步的研究。

(3)在确定碳纤维索的截面尺寸时,应当采用等轴向刚度的原则。

## 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).

[2] 梅葵花,吕志涛. CFRP 在超大跨径悬索桥和斜拉桥中的应用前景[J]. 桥梁建设, 2002, (2).

[3] 谢旭,高金盛,苟昌焕,黄剑源. 应用碳纤维索的大跨径斜拉桥结构振动特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(5).

[4] 苟昌焕,谢旭,高金盛,黄剑源. 应用碳纤维索的大跨径斜拉桥静力学特性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1).

[5] 梅葵花,吕志涛. CFRP 斜拉索的静力特性分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2).

[6] CHEN Shao-hong. Structural and aerodynamic stability analysis of longspan cable-stayed bridges [D]. Carleton University, Ottawa, Canada, 1999.

[7] 宋锦忠. 荆沙长江公路大桥主桥抗风研究[R]. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 1998.

[8] ZHANG Xin-jun, SUN Bing-nan, XIANG Hai-fan. Nonlinear Aerostatic and Aerodynamic Analysis of Long-span Cable-stayed Bridges Considering Wind-structure Interactions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90 (9).

[9] JTG/T D60—01—2004, 公路桥梁抗风设计规范[S].

# Research on Wind Resistance Behavior of long Span Cable-Stayed Bridges with Carbon Fiber Reinforced Polymer Stay Cables

ZHANG Xin-jun, YING Lei-dong

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** To gain possibility of the application of carbon fiber reinforced polymer(CFRP) stay cables used in long-span cable-stayed bridges, a 500 m cable-stayed bridge model with CFRP stay cables is established. The equivalent axial stiffness, the dynamic behavior, the aerostatic behavior and aerodynamic stability of the bridge are analyzed by 3D nonlinear analysis. The results show that after CFRP stay cables are used in long-span cable-stayed bridges: (1) structural natural frequencies are slightly increased; (2) under the static wind action, structural deformation is increased, however its aerostatic behavior is basically the same as that of the bridge with steel stay cables; (3) its aerodynamic stability is very identical to the bridge with steel cables. Therefore as far as the wind resistance is considered, the use of CFRP stay cables in long-span cable-stayed bridges is feasible, and the stay cable's section should be determined by the equivalent axial stiffness.

**Key words:** long span cable-stayed bridge; CFRP stay cable; dynamic behavior; aerostatic behavior; aerodynamic stability