

# FRP、钢箱梁斜拉桥抖振性能分析与比较

白玉磊<sup>1,2</sup>, 戴建国<sup>2</sup>, 欧进萍<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学, 辽宁大连 116024; 2. 香港理工大学土木工程系, 香港)

**摘要:** 基于某三跨钢箱梁斜拉桥的设计方案以及静力荷载作用下刚度等效的假设, 类比设计了一座 FRP 斜拉桥。其桥面板、主梁以及斜拉索均采用 FRP 材料, 桥塔采用传统的钢筋混凝土结构。采用谐波合成法模拟了主梁上各点的随机脉动风速时程, 基于准定常假定, 将脉动风速时程转化为抖振力时程, 采用 ANSYS 软件对 FRP 斜拉桥进行抖振时域分析, 并与钢箱梁斜拉桥进行对比。结果表明, FRP 斜拉桥在抖振载作用下主梁竖向刚度与钢箱梁斜拉桥相比, 有一定程度的减小, 但 FRP 斜拉桥的竖向位移只是略有增加, 总体易满足位移限值的要求。

**关键词:** FRP 斜拉桥; 谐波合成法; 脉动风速; 抖振响应; 时域分析

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2011)05-0053-05

## 1 引言

20 世纪末期以来, 我国的大跨度桥梁建设步入了飞速发展的时期, 悬索桥和斜拉桥都不断刷新世界记录。与此同时, 以往已建成的桥梁在使用过程中腐蚀和疲劳耐久性问题已经显现, 严重威胁着桥梁结构的使用寿命, 也给新建桥梁的设计带来了许多挑战。FRP 材料因轻质、高强及其卓越的耐腐蚀性能, 近 20 年来在土木工程中已逐步得到广泛应用。

FRP 材料轻质高强的特点能很大程度上减轻桥梁的自重, 非常适合桥梁大跨径发展的需要。但是大跨度桥梁, 尤其是跨海大桥的设计中, 不可避免会遇到风致振动的问题。由于采用新型 FRP 材料后桥梁自重的减轻, 可能会增加桥梁对风的敏感性, 目前对 FRP 结构有关这方面的探讨还十分有限。本文尝试设计了一种 FRP 新型斜拉桥结构体系(其桥面板、主梁和斜拉索均采用 FRP 材料, 但桥塔采用传统的钢筋混凝土结构), 以此结构体系为基础, 研究 FRP 斜拉桥的抖振性能并与钢箱梁斜拉桥的抖振性能进行对比, 考察 FRP 斜拉桥对风荷载的敏感性。

## 2 FRP 斜拉桥的设计方案

### 2.1 某三跨钢箱梁斜拉桥的原设计方案

某桥为三塔斜拉桥, 跨径布置为 84 + 300 + 300 + 84m, 主梁为流线型钢箱梁, 宽 28m, 高 2.8m, 桥塔采用钢筋混凝土结构。其全桥模型示意图和主梁截

面的示意图分别见图 1 和图 2。

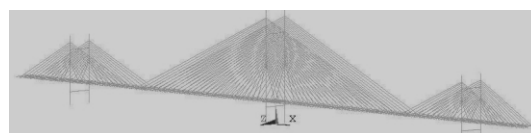


图 1 某三跨斜拉桥的模型

Fig. 1 Sketch of a three-span steel box girder cable-stayed bridge

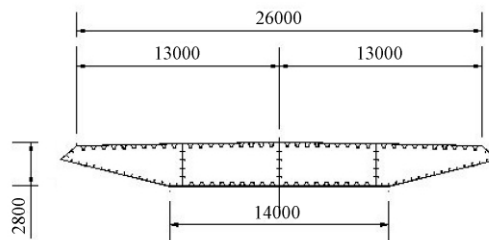


图 2 钢箱梁主梁的截面(单位: mm)

Fig. 2 Section of the main steel box girder (unit: mm)

### 2.2 FRP 斜拉索的替换方案

采用张新军<sup>[1,2]</sup>提出的等效刚度的方法, 用 FRP 斜拉索替换原来的钢绞线的斜拉索。等效刚度法的原理如式(1)所示。

$$E_{CFRP} A_{CFRP} = E_{steel} A_{steel} \quad (1)$$

其中,  $E_{CFRP}$ ,  $E_{steel}$  分别为 CFRP 索和钢索的弹性模量;  $A_{CFRP}$ ,  $A_{steel}$  分别为 CFRP 索和钢索的截面积。两种索的参数取值见表 1。

收稿日期: 2011-04-20

作者简介: 白玉磊(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为 FRP 在土木工程中的应用。

表1 拉索的材料特性

Table 1 Material properties of cables

项目	钢索	CFRP索
容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	77.0	16.0
抗拉强度/MPa	1960	2450
容许应力/MPa	980	980
弹性模量/GPa	200	160

### 2.3 FRP 桥面板的设计

在现有 FRP 桥面板的研究<sup>[4-6]</sup>基础上,以变形作为设计目标,设计了 FRP 桥面板,作为直接承受车辆荷载的构件。并对构件的受力性能进行分析和验算,详细见文献[3],这里仅给出最后的设计结果。

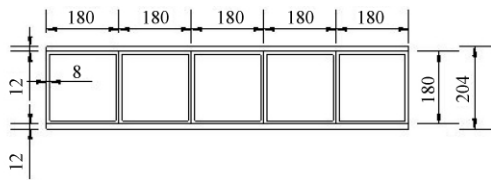


图3 桥面板主要尺寸图(单位: mm)

Fig. 3 The dimension of the bridge deck (unit: mm)

### 2.4 FRP 箱梁的设计

在前面设计的桥面板的基础上进行 FRP 箱梁的设计,以 2.1 中的钢箱梁三跨斜拉桥为基础,采用等效刚度的方法,拟定 FRP 箱梁的设计方案。相对于钢箱梁,FRP 材料的密度为钢材的 20% 左右,因此,活载在全部荷载中所占比重较大。本文采用挠度控制设计方法,即假设两种材料的桥梁在恒载和活载的共同作用下,跨中挠度相等。这种挠度控制的设计方法本质上等同于刚度控制的设计方法。FRP 箱梁的设计目标是选取最优的刚度和自重的平衡点<sup>[3]</sup>。

表2 主梁材料基本特性

Table 2 Material properties of the main girder

项目	钢材	FRP
密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	7800	1600
弹性模量 $E/\text{GPa}$	205.9	64

在 FRP 箱梁的设计中还综合考虑了以下两个方面:

(1) 已有 FRP 研究者对梁的设计<sup>[7]</sup>和现有 FRP 型材的规格。因为这决定该箱梁的可加工性。此

外,为提高断面的抗风性能,采用 FRP 桥梁封护系统<sup>[6]</sup>,形成一个整体的流线型箱梁截面;

(2) 因为断面的升力系数、阻力系数以及扭矩系数等只和截面的形状有关,而和截面的材料无关,为了在后文的计算比较中用同一组系数进行计算比较,FRP 箱梁的外形尺寸和钢箱梁的外形尺寸保持一致。

在考虑了上述所有因素的基础上,对 FRP 箱梁进行设计以及对 FRP 桥进行整体静力分析,用计算所得挠度和钢箱梁桥的挠度进行比较,使二者趋于一致,其过程是一个不断试算和优化的过程,设计得到的 FRP 箱梁断面如图 4 所示。用于结构的整体计算的截面几何特性如表 3 所示。

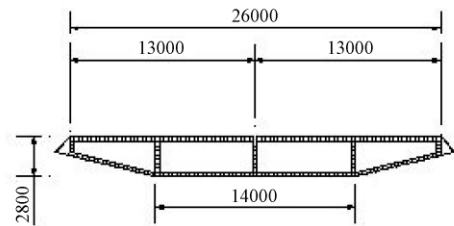


图4 FRP 主梁断面图(单位: mm)

Fig. 4 Section of the FRP main girder (unit: mm)

表3 箱梁的几何特性对比

Table 3 Geometric properties of two types of box girders

项目	钢箱梁	CFRP 箱梁
面积/ $\text{m}^2$	1.2892	2.9678
高度/m	2.8	2.8
宽度/m	26	26
惯性矩(竖向)/ $\text{m}^4$	1.6572	3.8436
惯性矩(横向)/ $\text{m}^4$	72.3359	203.6578
扭转惯性矩/ $\text{m}^4$	3.336	8.012

## 3 FRP 斜拉桥桥位处脉动风场的模拟

脉动风实际上是三维的风紊流,其种类有顺风向、横风向和竖直向三种。目前一般的做法是仅讨论顺风向脉动风和竖直向脉动风对结构的作用,而忽略二者之间的相关性,即对顺风向和竖直向脉动风速分别进行独立模拟,然后叠加作用在结构上<sup>[8]</sup>。

桥梁周围某一方向的脉动风速是一个一维多变量的随机场,可以用一组零均值且具有各态历经性的平稳高斯过程模拟。目前国内外风速时程模拟的

主要方法有谐波合成法(WAWS)和线性滤波器法两大类<sup>[9-13]</sup>。

本文采用谐波合成法(WAWS)对上述的三跨FRP及钢斜拉桥的随机风场进行模拟,风谱采用规范中规定的Kaimal谱<sup>[14]</sup>。本文为简化起见,主要研究桥面承受的脉动风,故只模拟桥面高度处的脉动风而不模拟桥塔的风场。就大跨度斜拉桥而言,其整个主梁一般处于同一高度,当沿跨向地貌特征变化不大时,通常可认为沿主梁布置的各模拟点具有相同的平均风速和脉动风速自谱。

本文研究的三跨斜拉桥桥面高度为24.397m,沿主梁方向,每隔16m选一个模拟点,这样沿纵向总共有49个模拟点。模拟点的分布如图5所示。风速模拟中采用的参数见表4。

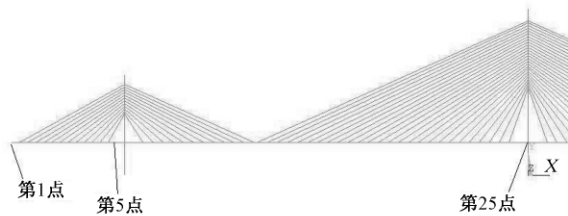


图5 主梁风速模拟点示意图

Fig. 5 Sketch of positions for simulated points of wind velocity on the main girder

表4 模拟脉动风速时程时用的参数

Table 4 Parameters for simulating the turbulent wind field

项目	单位	数值
地面粗糙度系数 $\alpha$	—	0.16
粗糙长度 $Z_0$	m	0.003
10m 高度平均风速	m/s	27.2
截断频率	Hz	2
频率等分段数	—	1024
时间点的个数	—	2048
模拟时间间隔	s	0.25
模拟点数	—	49
衰减系数 $C_x$	—	8
衰减系数 $C_y$	—	16
衰减系数 $C_z$	—	10

利用MATLAB编制了谐波合成法的计算机程序,获得49个模拟点各自的脉动时程曲线,再经过频域的转换,得到相应的功率谱曲线,与目标谱进行比较,查看模拟的效果,从图6可以看出,模拟的结

果可信度较高。其风速时程模拟的结果如图7、图8所示。利用类似方法亦可获得各点竖向脉动风速的时程曲线。竖直向的风速时程幅值通常要小于水平脉动风速的幅值。

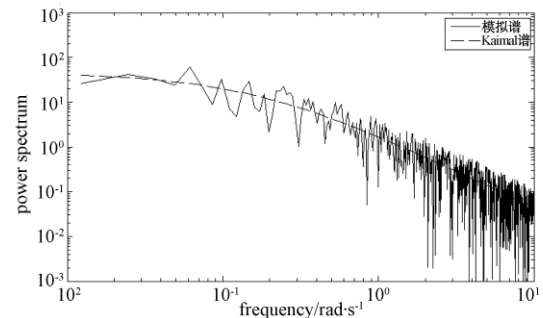


图6 模拟点1的水平脉动风速功率谱曲线

Fig. 6 Power spectral density functions for No. 1 point

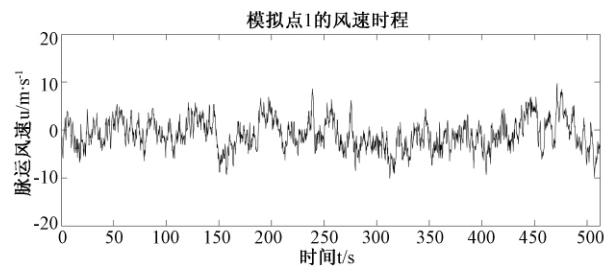


图7 模拟点1的水平风速时程曲线

Fig. 7 Generated sample for horizontal wind velocity at No. 1 point

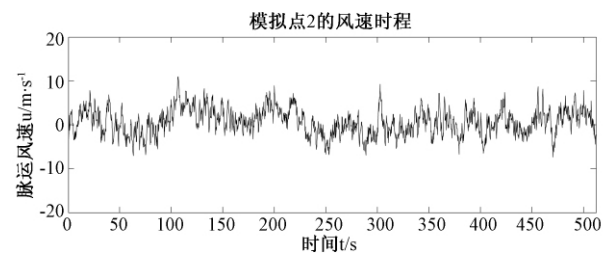


图8 模拟点2的水平风速时程曲线

Fig. 8 Generated sample for horizontal wind velocity at No. 2 point

## 4 抖振力的计算

目前大多数风致抖振时域计算仍基于准定常气动力理论来完成。按照准定常假定,风作用在桥梁主梁上的瞬时气动力可以分解为静力项、抖振力项和耦合自激力项。本文的计算中不考虑静风力和气动耦合产生的自激力,虽相对粗略,但认为可以满足本文比较分析计算的目的<sup>[14]</sup>。抖振力的计算基于Davenport抖振力模型,其表达方式如下:

$$\left. \begin{aligned} L_b(t) &= \frac{1}{2}\rho U^2 B [2C_L(\frac{u(t)}{U}) + (C'_L + C_D \frac{w(t)}{U})] \\ D_b(t) &= \frac{1}{2}\rho U^2 B [2C_D(\frac{u(t)}{U}) + C'_D \frac{w(t)}{U}] \\ M_b(t) &= \frac{1}{2}\rho U^2 B^2 [2C_M(\frac{u(t)}{U}) + C'_M \frac{w(t)}{U}] \end{aligned} \right\} (2)$$

其中  $L_b(t)$ 、 $D_b(t)$ 、 $M_b(t)$  分别为单位长度上所受的升力、阻力和升力矩； $C_L$ 、 $C_D$ 、 $C_M$  分别为升力、阻力与升力矩系数； $C'_L$ 、 $C'_D$ 、 $C'_M$  分别为升力、阻力与升力矩系数对攻角  $\alpha$  的导数； $u$ 、 $w$  为水平向及垂直向的脉动风速。

对三跨 FRP 和钢斜拉桥，建立了有限元模型，由前面模拟的风速时程曲线和抖振力的计算公式，可以得到各个加载点的抖振力时程曲线。在计算各个节点上对应的脉动风荷载时，由于风场模拟考虑了脉动风场的空间相关性，所以计算获得的脉动风荷载也具有空间相关性，主梁上每个加载点的抖振力计算中均采用与之相近的风场模拟点模拟出来的脉动风速时程。所以，主梁上各点的抖振力各不相同，具有空间相关性。脉动风荷载空间相关性的处理方法如图 9 所示。

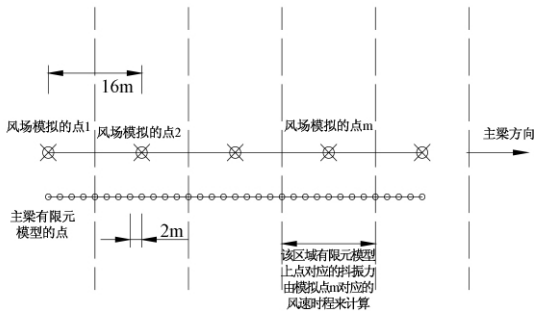


图 9 抖振力空间相关性的处理方法  
Fig. 9 Processing method to treat spatial correlations of the turbulent wind load

### 5 FRP 斜拉桥抖振时域分析

结构在抖振力作用下的运动方程为：

$$M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = F_b \quad (3)$$

式中  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为结构的质量、阻尼与刚度矩阵； $Z$  为结构节点位移向量； $F_b$  表示节点的抖振力向量。

将已有的抖振力时程施加于 FRP 斜拉桥的有限元模型上，利用 ANSYS 进行时程分析并编制相应的后处理程序，即可得到斜拉桥的抖振时域响应（见图 10），在计算中考虑了结构几何非线性的影响。

采用同样方法，亦可得到钢箱梁斜拉桥的抖振时域响应（见图 11）。

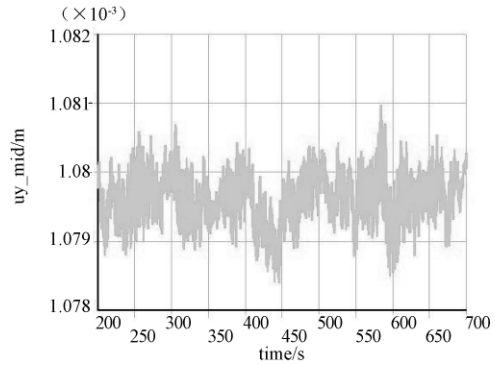


图 10 FRP 桥主梁跨中节点的竖向位移时程曲线  
Fig. 10 Time-history curve of the vertical displacement for the mid span of FRP bridge

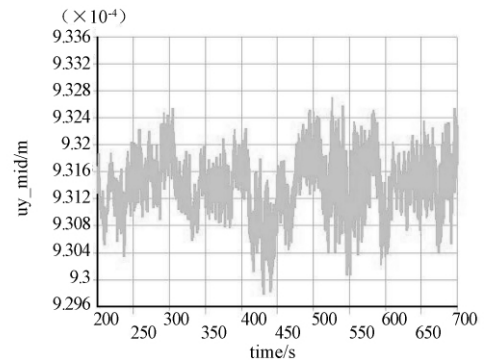


图 11 钢桥主梁跨中节点的竖向位移时程曲线  
Fig. 11 Time-history curve of the vertical displacement for the mid span of steel bridge

比较两种桥型的计算结果，可以发现，相对钢桥来说，FRP 斜拉桥的竖向位移略有增加（约 13%），但扭转位移几乎没有变化，其主要原因在于主梁的竖向刚度随着 FRP 桥梁质量的减小有一定程度的减小，但总体来说，和钢梁相比，位移的变化很小，易满足位移限值的要求。

### 6 结 论

本文研究了一种 FRP 新型斜拉桥结构体系，介绍了其斜拉索、桥面板以及箱梁的设计方法。采用谐波合成法，模拟了斜拉桥桥位处的脉动风场。采用 Daveport 抖振力计算方法，在不考虑自激力作用的前提下，利用 ANSYS 分析平台，对 FRP 斜拉桥进行非线性抖振时域分析。结果表明，在抖振作用下，相对传统的钢箱梁斜拉桥，FRP 斜拉桥刚度相对减小，但总体来说，对脉动风荷载的敏感性增加不显著。

## 参考文献

- [1] 张新军. 应用 CFRP 索缆索支撑桥梁的抗风稳定性分析[C]. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集, 大连, 2007: 540-545.
- [2] 张新军. 应用 FRP 索缆索支撑桥的抗风性能[J]. 浙江工业大学学报, 2008, 36(5): 572-577.
- [3] 白玉磊. FRP 斜拉桥抗风性能初探[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2009.
- [4] Aizi Zhou. Stiffness and strength of fiber reinforced polymer composite bridge deck systems [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [5] 王言磊. FRP-混凝土组合梁/桥面结构试验、分析与设计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2008.
- [6] 冯鹏. 新型 FRP 空心桥面板的设计开发与受力性能研究[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2004.
- [7] S Meiarashi, I Nishizaki, T Kishima. Life-cycle cost of all FRP suspension bridge [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE 2002, (11): 206-214.
- [8] 胡亮, 李黎, 彭元诚等. 大跨度桥梁抖振时域分析的程序化方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 59-64.
- [9] 孙振. 建筑结构风荷载的计算机模拟与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2007.
- [10] 王之宏. 风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 44-52.
- [11] 胡雪莲, 李正良, 晏致涛. 大跨度桥梁结构风荷载模拟研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(4): 63-67.
- [12] 李永乐, 周述华, 强士中. 大跨度斜拉桥三维脉动风场模拟[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 60-66.
- [13] 曹映泓, 项海帆, 周颖. 大跨度桥梁随机风场的模拟[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 72-78.
- [14] 中交公路规划设计院. 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [15] 杨咏漪, 廖海黎, 李永乐. 基于 ANSYS 的斜拉桥抖振时域时域分析方法[J]. 空气动力学学报, 2004, 22(4): 457-460.

## A COMPARATIVE STUDY OF THE BUFFETING PROPERTIES OF FRP AND STEEL BOX GIRDER CABLE-STAYED BRIDGES

BAI Yu-lei<sup>1,2</sup>, DAI Jian-guo<sup>2</sup>, OU Jin-ping<sup>1</sup>

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** In this paper, the time domain buffeting analysis of a three-span FRP cable-stayed bridge ("FRP bridge" hereafter for brevity) is conducted. The FRP cable-stayed bridge has FRP deck systems, FRP main girders and FRP cables, it is formed based on the design scheme of a steel streamline shaped box girder cable-stayed bridge ("steel bridge" hereafter for brevity) and the equivalent stiffness method. For cost effectiveness, the bridge tower is still made of traditional reinforced concrete. The wind field of the bridge is simulated and the turbulent wind speed time series are obtained based on the WAWS (Weighted Amplitude Wave Superposition) method. Afterwards, the turbulent wind speed time series are transformed to buffet force time series using the quasi-steady hypothesis. The buffeting analysis result of the FRP bridge is compared with that of the steel bridge. The analytical results reveal that compared with the steel bridge, the vertical stiffness of FRP cable-stayed bridge is decreased to a certain extent, and as a consequent, the vertical displacement of the FRP bridge is slightly increased but still within the displacement limit.

**Key words:** FRP cable-stayed bridge; WAWS method; turbulent wind speed; buffeting response; time domain analysis