

几何非线性效应下的 CFRP 索斜拉桥动力特性

刘荣桂,郭 青,陈 蓓,蔡东升,朱 敏

(江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013)

摘 要:为研究 CFRP 索斜拉桥与钢索斜拉桥的静动力特性的区别,分别讨论以南京长江三桥为原型的跨径为 648 m 的 CFRP 索斜拉桥和钢索斜拉桥,采用有限元法对比分析了考虑几何非线性效应的 CFRP 索及钢索斜拉桥的主要静动力性能,并对对比分析了垂度效应、大变形及梁-柱效应对这 2 种斜拉桥的静动力性能的影响。最后分析了不同的结构体系、辅助墩设置个数等参数对 CFRP 索斜拉桥的动力特性的影响。研究表明:垂度效应对 CFRP 索斜拉桥的静动力性能影响较小,对钢索斜拉桥静动力性能影响显著;大变形及梁-柱效应对 2 种斜拉桥的静动力性能影响较大,计算时不可忽略该效应;所得结论可为长大跨斜拉桥的分析计算提供一定的参考。

关键词:桥梁工程;斜拉桥;CFRP;几何非线性;有限元分析

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

CFRP cable-stayed bridge's dynamic properties with geometric nonlinear effect considered

LIU Rong-gui, GUO Qing, CHEN Bei, CAI Dong-sheng, ZHU Min

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: To study the difference of static and dynamic properties between CFRP cable-stayed bridges and steel cable-stayed bridges, the finite element method was used to analyze the CFRP cable-stayed bridge and steel cable-stayed bridge's static and dynamic properties with geometric nonlinear effect considered. With the third Nanjing Yangtze River Bridge with a span of 648 m as the prototype the influences of sag effect, large deformation effect and beam-column effect on two kinds of cable-stayed bridges' static and dynamic performance were compared. Different systems of structure and different numbers of auxiliary piers' influence on CFRP cable-stayed bridge's dynamic properties were analyzed. The results show that the influence of sag effect on CFRP cable-stayed bridge's static and dynamic performance is small, but appreciable on steel cable-stayed bridge; the influences of large deformation effect and beam-column effect on these two kinds of cable-stayed bridges' static and dynamic properties are relatively bigger and these effects cannot be ignored in calculation; these conclusions can provide references for long span cable-stayed bridges' analysis. 5 tabs, 4 figs, 12 refs.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge; CFRP; geometric nonlinearity; finite element analysis

0 引 言

随着全球经济的高速发展,各国开始构思以桥梁形式跨越海湾或海峡,斜拉桥结构因其在经济、结构、造型美观等方面的独特优点受到青睐^[1]。然而,随着斜拉桥跨径的增大,也面临着诸多难题。碳纤维复合材料(CFRP)具有耐腐蚀、耐疲劳、轻质、高强的优点,用作斜拉桥的拉索能充分发挥材料的性能优势,在未来斜拉桥建设中有着良好的应用前景^[2-3]。梅葵花等对 CFRP 索斜拉桥是否考虑初应力下的动力特性进行了分析^[4];程韶红对应用 CFRP 索的斜拉桥进行了动力特性和抗风稳定性的分析,但分析对象的斜拉桥跨度只有 400 多 m^[5];张新军等对超大跨度 CFRP 索斜拉桥分别采用了拉索的等强度和等轴向刚度的替换方法进行了力学性能分析^[6]。但是以上学者均未对考虑几何非线性效应的大跨度 CFRP 索斜拉桥进行动力特性分析。为此,本文以主跨为 648 m 的斜拉桥为例,对考虑几何非线性效应的 CFRP 索和钢索斜拉桥的静力特性、动力特性进行系统的分析与比较,探讨 CFRP 索在超大跨斜拉桥中应用的可行性。

1 有限元模型的验证

江苏大学人行天桥是中国首座采用 CFRP 拉索的斜拉桥,该试验桥采用塔梁固结体系,近似可认为是具有多点弹性支撑的不对称悬臂结构。基于此,采用大型商用有限元软件 ADINA,建立该试验桥的三维梁壳杆系有限元计算模型,如图 1 所示。本课题组基于环境激励作用下的脉动法试验基础上,验证建立的斜拉桥模型的准确性^[7]。

斜拉桥自振频率的计算值、实测值见表 1,由表 1 可见计算结果和试验结果比较接近。

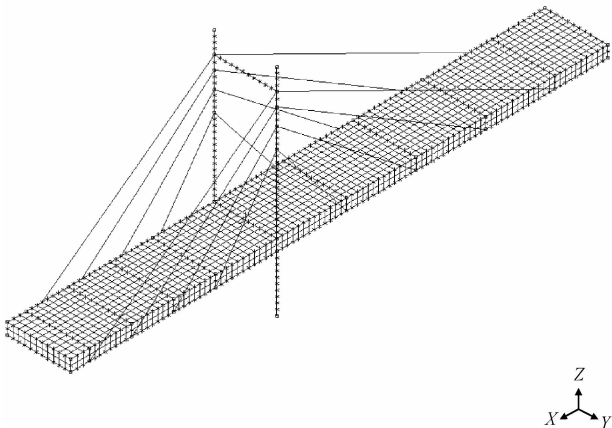


图 1 中国首座 CFRP 索斜拉桥动力分析的有限元模型
Fig. 1 Finite element model for dynamic analysis of first domestic CFRP bridge

由表 1 可知,该试验桥自振频率的模拟值与实测值较接近,各阶振型吻合良好,故可以利用有限元软件 ADINA 建立的三维梁壳杆系有限元计算模型模拟实际结构。

2 计算模型

以南京长江三桥为参考对象,建立斜拉桥有限元模型,CFRP 索和钢索的替换采用等轴向刚度准则^[7],比较几何非线性作用下大跨度 CFRP 索斜拉桥和钢索斜拉桥的静动力特性的异同。

使用有限元分析软件 ADINA 建立主跨 648 m 的斜拉桥梁杆系结构分析的有限元模型,如下页图 2 所示。其中主、次梁采用 Beam 梁单元,拉索采用 Truss 杆单元,且设置为仅受拉。X、Y、Z 轴分别表示纵桥向、横桥向和竖向。塔梁之间通过设置竖向支座连接,支座采用 Spring 弹簧单元模拟。

根据等轴向刚度换索准则,将钢索更换为 CFRP 索,则有公式为

$$A_c E_c = A_s E_s \tag{1}$$

式中: A_c 、 A_s 分别为碳纤维索和钢索的截面积; E_c 、 E_s 分别为碳纤维索和钢索的弹性模量^[4]。

3 斜拉桥的几何非线性影响因素

斜拉桥的结构分析和一般桥梁的结构分析相比较,几何非线性的影响尤为突出,可概括为 3 个效应^[4,8-9]。

(1)垂度效应。即缆索自重垂度引起的缆索拉力与变形之间的非线性关系。斜拉桥分析时通常采

表 1 试验桥固有特性计算值与实测值对比

Tab. 1 Comparison between calculation and test results of inherent characteristics of testbridge

振型阶次/阶	振型特点	频率值/Hz	
		实测值	模拟值
1	主、边跨桥面反对称平动	2.625	2.736
2	主跨桥面 1 阶竖弯	2.875	2.656
3	塔柱侧向弯曲	3.500	3.595
4	塔柱纵弯	4.375	4.977
5	主、边跨桥面对称平动	5.000	5.077
6	主跨桥面 1 阶扭转	6.125	7.868
7	边跨桥面 1 阶竖弯	8.000	7.747

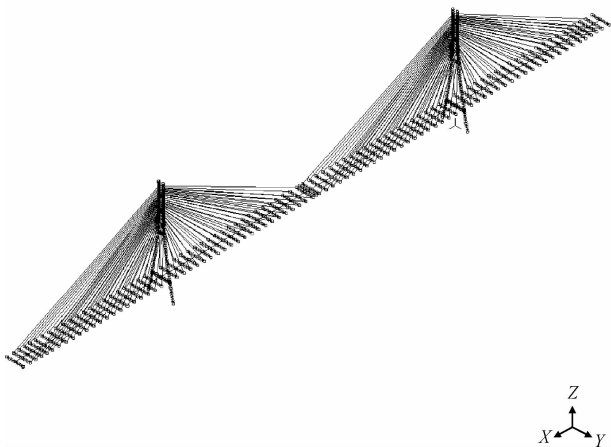


图 2 结构静动力分析的有限元模型

Fig. 2 Finite element model for static and dynamic analysis of structure

用 Ernst 等效弹性模量公式来考虑自重引起的拉索垂度效应。

$$E_{eq} = \frac{E_0}{1 + (\gamma l)^2 E_0 / 12 \sigma^3}$$

(2)

表 2 非线性静力分析比较

Tab. 2 Comparison of nonlinear static analyses

分析描述	忽略垂度效应			忽略大变形及梁-柱效应			考虑所有非线性效应		
	边跨跨中竖向位移/m	主跨跨中竖向位移/m	塔顶水平位移/m	边跨跨中竖向位移/m	主跨跨中竖向位移/m	塔顶水平位移/m	边跨跨中竖向位移/m	主跨跨中竖向位移/m	塔顶水平位移/m
CFRP 索	0.083 3	−2.968	0.983 4	0.083 6	−2.970	0.984 3	0.116 5	−3.201	1.019 8
钢索	0.094 6	−2.777	0.921 4	0.249 5	−2.708	0.865 2	0.286 1	−2.912	0.999 4

3.1.1 斜拉索垂度效应的影响

比较忽略垂度效应和考虑所有非线性效应的计算结果可知,在自重作用下,不考虑垂度效应的计算结果相对于考虑垂度效应的非线性计算结果偏小,计算结果偏不安全,故进行有限元计算时,不可忽略垂度效应;对比 CFRP 拉索和钢拉索可知,采用 CFRP 拉索时,不考虑垂度效应与考虑所有非线性效应的计算结果偏差较钢拉索的计算结果偏差较小,说明 CFRP 拉索的垂度效应较钢拉索小。

3.1.2 大变形及梁-柱效应的影响

比较忽略大变形及梁-柱效应和考虑所有非线性效应的计算结果可知,忽略大变形效应和梁-柱效应对 CFRP 索斜拉桥和钢索斜拉桥的计算结果影响均较大,并使计算结果偏小,结构偏于不安全,故进行有限元计算时,不可忽略大变形及梁-柱效应。

3.1.3 2 种拉索计算结果的比较

从表 2 可以看出,采用 CFRP 拉索时位移的绝对值较采用钢索时大,说明上述 CFRP 索斜拉桥的整体

式中: E_{eq} 为等效弹性模量; E_0 为原弹性模量; γ 为拉索材料重度; l 为斜拉索的水平投影长度; σ 为斜拉索的应力。

(2)梁-柱效应。由于缆索力的作用,主梁和索塔不仅承受弯矩,还将产生很大的轴向力,在主梁和索塔变形过程中,由于轴向力和弯矩相互影响就会产生梁-柱效应,使整个斜拉桥结构表现出几何非线性行为。

(3)大位移效应。即大位移产生的结构几何形状变化引起的几何非线性效应。

3.1 非线性静力分析

对该斜拉桥在重力作用下,忽略垂度效应,忽略大变形及梁-柱效应和考虑所有非线性效应时,对该斜拉桥边跨跨中竖向位移、主跨跨中竖向位移和塔顶水平位移的计算结果加以比较,做出定量分析。

根据表 2,讨论几何非线性对 2 种拉索斜拉桥结构行为的影响。

刚度小于钢索斜拉桥,这是由于 CFRP 材料的弹性模量较钢材低约 20%,导致 CFRP 索斜拉桥的整体刚度比钢索斜拉桥的低^[10]。但随着跨度的增大,钢索的垂度效应越来越显著,而 CFRP 索的垂度效应却很小,如下页图 3、图 4 所示。当 CFRP 索的等效弹性模量大于钢索的等效弹性模量时,根据式(2),取 $E_{eqC} > E_{eqS}$ 时,其中斜拉索的应力分别取 CFRP 材料和钢材的许用应力,可知其倾斜度最大、离索塔最远、靠跨中的拉索的水平投影长度 $l > 500$ m。故当斜拉桥跨径 $L = 2l > 1\,000$ m 时,CFRP 索斜拉桥的等效弹性模量 E_{eqC} 会比钢索斜拉桥的等效弹性模量 E_{eqS} 大。

3.2 非线性动力分析

利用有限元法将结构离散为具有有限个自由度的计算模型。由于阻尼对结构自振特性的影响较小,因此在求解结构的自振频率和振型时,通常可以忽略阻尼影响。假设结构具有 n 个自由度,那么该体系的自振可以用以下方程表示

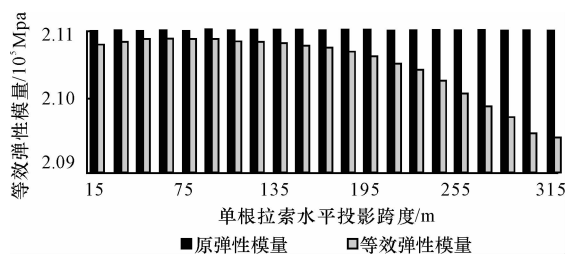


图 3 钢索等效弹性模量随跨度衰减

Fig. 3 Sim dietrich of steel cable’s equivalent elastic modulus with increase of cable’s span

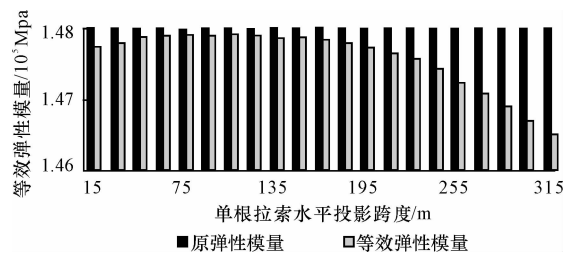


图 4 CFRP 索等效弹性模量随跨度衰减

Fig. 4 Sim dietrich of CFRP cable’s equivalent elastic modulus with increase of cable’s span

表 3 自振频率与振型的对比

Tab. 3 Comparison of natural frequencies and vibrational modes

阶次/阶	2 种拉索的自振频率/Hz						振型特点
	CFRP 索			钢索			
	忽略垂度效应	忽略大变形及梁-柱效应	考虑所有非线性效应	忽略垂度效应	忽略大变形及梁-柱效应	考虑所有非线性效应	
1	0.118 53	0.112 39	0.118 53	0.121 29	0.112 24	0.118 48	1 阶对称横弯
2	0.126 34	0.120 64	0.126 34	0.136 86	0.122 23	0.128 03	1 阶对称竖弯
3	0.175 07	0.170 53	0.175 06	0.186 09	0.172 21	0.176 78	2 阶反对称竖弯
4	0.273 73	0.271 90	0.273 72	0.294 47	0.276 17	0.278 31	3 阶对称竖弯
5	0.311 93	0.309 56	0.311 93	0.313 19	0.309 40	0.311 82	2 阶反对称横弯
14	0.600 38	0.600 21	0.600 39	0.610 86	0.603 11	0.603 92	南塔塔柱侧弯
17	0.735 06	0.735 05	0.735 05	0.745 31	0.737 12	0.735 02	北塔塔柱侧弯
30(28)	1.313 65	1.313 41	1.313 65	1.098 79	1.090 08	1.090 38	1 阶扭转
31	1.352 29	1.351 86	1.352 28	1.320 72	1.350 95	1.351 54	两边跨对称竖弯

注:括号中的数字表示钢索模型对应的阶次。

(1)斜拉索垂度效应的影响。比较忽略垂度效应和考虑所有非线性效应的计算结果可知,对于 CFRP 索斜拉桥,不考虑垂度效应的计算结果和考虑所有非线性效应的计算结果基本一致,说明 CFRP 索斜拉桥的垂度效应很小;对于钢索斜拉桥,不考虑垂度效应的计算结果和考虑所有非线性效应的计算结果相比偏大,说明钢索斜拉桥的垂度效应较大,不考虑钢索斜拉桥的垂度效应会使计算结果偏不安全。

(2)大变形及梁-柱效应的影响。比较忽略大变

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{U}(t)=0 \tag{3}$$

式中: \mathbf{M} 为结构总质量矩阵; \mathbf{K} 为结构总刚度矩阵; $\mathbf{U}(t)$ 为结构体系节点位移矢量; ω 为结构的固有频率。

同上述 n 个自由度的振动模型相对应的特征方程可表示为

$$(\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M})\mathbf{U}=0 \tag{4}$$

因为位移是任意的,故应满足

$$|\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M}|=0 \tag{5}$$

式(5)为特征值方程,通常采用子空间迭代法即可求出结构的自振频率和相应振型。

结构动力特性计算采用通用空间有限元分析软件 ADINA 进行,表 3 为 2 种索斜拉桥忽略垂度效应,忽略大变形及梁-柱和考虑所有非线性效应时的自振频率和相应振型特征。

由表 3 可以看出,大跨斜拉桥主要以周期长、间隔短的振型为主。下面讨论几何非线性对 2 种拉索斜拉桥结构动力行为的影响。

形及梁-柱效应和考虑所有非线性效应的计算结果可知,忽略大变形效应和梁-柱效应对 CFRP 索斜拉桥和钢索斜拉桥都有显著影响,故计算时不可忽略大变形及梁-柱效应。

(3)2 种拉索计算结果比较。从表 3 可以看出,采用 CFRP 拉索时斜拉桥的 1 阶自振频率较钢索斜拉桥大,说明采取 CFRP 索可以提高斜拉桥的基频,而第 3、4、5 阶自振频率较钢索有所降低,但降低的有限,可以忽略。之后 CFRP 索斜拉桥各阶自振频率较钢索斜拉桥大,尤其是 1 阶扭转频率的提高,

可以提高斜拉桥的静力扭转发散临界风速和颤振临界风速,说明 CFRP 索的应用对斜拉桥的自振频率有提高作用,并有利于斜拉桥结构抵抗低频激励和提高桥梁的抗风性能。

此外,随着跨度的增大,由于钢索的垂度效应越来越显著,而 CFRP 索的垂度效应却很小,故可以推论,在大于某个跨度以后,CFRP 索斜拉桥的整体刚度将会比钢索斜拉桥的大。CFRP 索大跨度斜拉桥的各阶自振频率将明显高于钢索斜拉桥,故对于大跨度斜拉桥,采用 CFRP 材料作为拉索,有利于斜拉桥结构抵抗低频激励。

4 CFRP 索斜拉桥动力特性的影响参数分析

研究斜拉桥在不同边界条件下的动力特性,对斜拉桥结构的选型及抗震设计意义重大。

4.1 结构体系的影响

大跨斜拉桥常用的结构体系有飘浮体系、支承体系、塔梁固结体系、刚构体系。由于刚构体系主梁固结处负弯矩较大,较适合于单塔斜拉桥^[11],故本文不加以讨论。下面比较前 3 种结构体系的动力性能,表 4 列出了部分振型及相应频率。

表 4 CFRP 索斜拉桥不同结构体系的动力特性

Tab. 4 CFRP cable-stayed bridge's dynamic properties with different structure systems

阶次/ 阶	自振频率/Hz			振型特点
	飘浮体系	支承体系	塔梁固结体系	
1	0.117 63	0.118 53	0.136 65	1 阶对称横弯
2	0.126 21	0.126 34	0.191 91	1 阶对称竖弯
3	0.175 03	0.175 06	0.289 57	2 阶反对称竖弯
4	0.273 70	0.273 72	0.314 89	3 阶对称竖弯
5(6)	0.310 83	0.311 93	0.353 32	2 阶反对称横弯

注:括号中的数字表示飘浮体系模型对应的阶次。

由表 4 可以看出,飘浮体系与支承体系的各阶频率非常接近,它们的 1 阶纵飘频率都非常小,这有利于减小结构在水平地震力作用下的内力响应。塔梁固结体系与飘浮体系及支承体系相比较而言,由于主塔处对主梁提供了强大的约束作用,故主梁的刚度得到大幅提高,CFRP 索斜拉桥的自振频率得以提高。由于塔梁固结体系的塔、梁、索的全部重量都由支座传给桥墩,故桥墩支点要承受很大的压力,支座的吨位要求很大,需要采用特制支座,在构思阶段应广泛比较,选取较为合适的体系。

4.2 边跨辅助墩设置及辅助墩个数的影响

由于边跨设置辅助墩对斜拉桥主梁和索塔在活载作用下的受力性能有利,可以改善塔、梁的内力状态,减小塔顶水平位移和主梁跨中挠度,因此单从静力方面考虑,在条件许可的情况下,宜在边跨设置一定数量的辅助墩^[11],本文分析辅助墩设置个数对结构动力性能的影响,表 5 列出了部分振型及相应的频率。

表 5 设置不同数量辅助墩时 CFRP 索斜拉桥的动力特性

Tab. 5 CFRP cable-stayed bridge's dynamic properties with different numbers of auxiliary piers

阶次/ 阶	自振频率/Hz			振型特点
	未设置 辅助墩	设置 1 个 辅助墩	设置 2 个 辅助墩	
1	0.118 53	0.123 55	0.124 37	1 阶对称横弯
2	0.126 34	0.139 93	0.140 09	1 阶对称竖弯
3	0.175 06	0.193 82	0.193 95	2 阶反对称竖弯
4	0.273 72	0.299 77	0.299 93	3 阶对称竖弯
5	0.311 93	0.319 15	0.328 86	2 阶反对称横弯

由表 5 可以看出,未设置辅助墩的 CFRP 索斜拉桥自振频率明显低于设置辅助墩的 CFRP 索斜拉桥,说明设置辅助墩可以大大提高斜拉桥的总体刚度。辅助墩对整体振型的出现顺序影响并不大,比较设置 1 个辅助墩和设置 2 个辅助墩的自振频率可知,对于已设置 1 个辅助墩的斜拉桥,再增加辅助墩个数可以提高桥梁的自振频率,但是影响效果有限,故要根据实际情况,选择合适数量的辅助墩^[12]。

5 结 语

(1)有限元分析软件 ADINA 建立的斜拉桥梁壳杆系结构分析的有限元模型,模型自振频率的模拟值与实测值较接近,各阶振型吻合良好,可利用有限元软件建立计算模型模拟实际结构。

(2)考虑 3 种几何非线性效应,其中垂度效应对 CFRP 索斜拉桥的静动力性能影响较小,对钢索斜拉桥的静动力性能影响较大,大变形效应和梁-柱效应对 2 种斜拉桥静动力影响均较大,对传统钢索斜拉桥进行计算时,不可忽略这 3 种非线性效应。

(3)由于 CFRP 拉索的弹性模量较钢材的小,所以在一定跨度内,自重作用下 CFRP 索斜拉桥边跨跨中、主跨跨中和塔顶水平位移大于钢索斜拉桥的相应值。但随着斜拉桥跨径的增大,由于钢索斜拉桥的垂度效应较 CFRP 索斜拉桥大,故在超过一定跨径之后,CFRP 索斜拉桥的等效弹性模量会比

钢索斜拉桥的大。使用 CFRP 材料替换传统钢索材料对超大跨度斜拉桥的静动力性能均有提升。

(4) 飘浮体系与支承体系的各阶频率非常接近, 塔梁固结体系同飘浮体系及支承体系相比较而言, 自振频率得到提高, 但需要采用特制支座, 在构思阶段应广泛比较, 选取较为合适的体系。

(5) 未设置辅助墩的 CFRP 索斜拉桥自振频率明显低于设置 1 个辅助墩的 CFRP 索斜拉桥, 但随着辅助墩数目的增大, 再增加辅助墩对 CFRP 索斜拉桥的动力性能的影响则不再显著; 辅助墩对整体振型的出现顺序影响并不大, 设计时应根据实际情况, 设置合适数目的辅助墩。

参考文献:

References:

- [1] 项海帆, 陈艾荣.《公路桥梁抗风设计规范》概要及大跨桥梁抗风对策[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第十四届全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2000: 41-46.
XIANG Hai-fan, CHEN Ai-rong. Summary of design specification for highway bridges and wind resistant measures of large span bridge[C]//Bridge and Structural Engineering Branch of China Civil Engineering Society. The 14th National Conference on Bridge. Beijing: China Communications Press, 2000: 41-46. (in Chinese)
- [2] 杨允表, 石洞. 复合材料在桥梁工程中的应用[J]. 桥梁建设, 1997(4): 1-4.
YANG Yun-biao, SHI Dong. Application of composite materials in bridge engineering[J]. Bridge Construction, 1997(4): 1-4. (in Chinese)
- [3] 孙杰, 孙峙华, 胡荣根. 碳纤维复合材料在桥梁工程中应用及其前景[J]. 公路交通技术, 2004(1): 46-60.
SUN Jie, SUN Zhi-hua, HU Rong-gen. Application of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) to bridge engineering and prospects of CFRP[J]. Technology of Highway and Transport, 2004(1): 46-60. (in Chinese)
- [4] 梅葵花, 吕志涛. CFRP 拉索斜拉桥的动力特性分析[J]. 公路, 2006(11): 48-52.
MEI Kui-hua, LU Zhi-tao. Dynamic characteristics analysis of cable-stayed bridge with CFRP cables[J]. Highway, 2006(11): 48-52. (in Chinese)

- [5] Chen S H. Structural and aerodynamic stability analysis of long-span cable-stayed bridges [D]. Ottawa: Carleton University, 1999.
- [6] 张新军, 应磊东. 超大跨度 CFRP 索斜拉桥的力学性能分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(10): 74-78. .
ZHANG Xin-jun, YING Lei-dong. Mechanical properties of super long-span cable-stayed bridges using CFRP cable[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(10): 74-78. (in Chinese)
- [7] 周士金. CFRP 拉索斜拉桥的动力分析与地震响应控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
ZHOU Shi-jin. Dynamic analysis and seismic response control research of the cable stayed bridge with CFRP cables [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- [8] 梅葵花. 1 000 m 级 CFRP 索斜拉桥静力特性分析[J]. 世界桥梁, 2007(4): 47-50.
MEI Kui-hua. Analysis of static behavior of cable-stayed bridge used with CFRP cables and with span length greater than 1 000 meters[J]. World Bridges, 2007(4): 47-50. (in Chinese)
- [9] 吴振. 超大跨 CFRP 拉索斜拉桥力学性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2011.
WU Zhen. Mechanics performance analysis of the super-span cable-stayed bridge with CFRP cables [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [10] 梅葵花, 吕志涛. CFRP 拉索斜拉桥的静力特性分析[J]. 工业建筑, 2004, 17(2): 43-45.
MEI Kui-hua, LU Zhi-tao. Static characteristic analysis of CFRP cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 43-45. (in Chinese)
- [11] 王伯惠. 斜拉桥结构发展和中国经验[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
WANG Bo-hui. Development of cable-stayed bridge structure and experience of China [M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)
- [12] 刘士林, 王似舜. 斜拉桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
LIU Shi-lin, WANG Si-shun. Design of cable-stayed bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)

