

文章编号: 0451-0712(2006)11-0048-05

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

# CFRP 索斜拉桥的动力特性分析

梅葵花<sup>1,2</sup>, 吕志涛<sup>2</sup>

(1. 长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室 西安市 710064; 2. 东南大学土木工程学院 南京市 210096)

**摘 要:** 采用 CFRP 拉索是解决传统钢拉索腐蚀退化问题的根本途径, 由于 CFRP 的自重仅为钢材的 1/5, 当跨径很大时, CFRP 索斜拉桥的动力特性与钢索斜拉桥的动力特性会有区别, 为此, 以探索性设计的跨径为 1 000 m 的 CFRP 索斜拉桥和钢索斜拉桥为例, 采用有限元法对比分析了 2 种拉索斜拉桥主要的动力特性, 并研究了成桥初应力对斜拉桥动力特性的影响。鉴于当前对影响斜拉桥动力特性的一些关键参数少有系统研究的状况, 详细分析了不同结构体系、辅助墩设置个数、拉索空间布置型式、边中跨跨径之比等参数, 对 CFRP 索斜拉桥的动力特性的影响, 得出了若干结论, 为 CFRP 索斜拉桥的优化设计提供理论依据。

**关键词:** 斜拉桥; 动力特性; 有限元法; CFRP 拉索; 参数分析

斜拉桥因具有跨越能力大、结构轻巧美观、空气动力稳定性好等优点, 近些年来获得了飞速发展。但是, 目前斜拉桥的发展也面临着一个严峻挑战, 即斜拉索由于特殊的使用条件而极易产生腐蚀退化和振动疲劳问题, 而碳纤维复合材料(CFRP)拉索具有耐腐蚀、耐疲劳的性能优点, 采用 CFRP 拉索将是解决这一课题的根本途径。此外, 随着斜拉桥向特大跨和超大跨的发展, 传统钢拉索由于自重大, 导致拉索的等效弹性模量下降非常快, 拉索的架设难度也越来越大, 以致在超大跨斜拉桥中不能胜任, 而采用轻质、高强的 CFRP 作拉索, 可减轻拉索自重、提高桥梁跨越能力以及减小下部结构尺寸, 从而对降低综合经济指标及施工技术难度具有十分重要的意义。

由于大跨斜拉桥对行车荷载、风荷载、地震作用等更趋敏感, 甚至有时动力荷载成为控制荷载, 因此需要准确地分析其动力行为。目前, 斜拉桥的动力特性研究多是针对某一具体斜拉桥进行<sup>[1,2]</sup>, 而对影响斜拉桥动力特性的一些关键参数, 如结构体系、辅助墩设置个数、拉索空间布置型式、边中跨跨径之比等, 则很少有系统研究, 对于 CFRP 索斜拉桥的动力特性则更少有研究。考虑到目前斜拉桥的建造能力为 1 000 m 级, 本文暂且比较 1 000 m 级时 CFRP 拉索斜拉桥的动力特性及其与钢拉索斜拉桥动力特性的异同。

## 1 动力特性分析方法

斜拉桥动力特性的分析方法一般有解析法和有限元法。解析法将结构作为连续参数系统, 假定某一振型函数, 然后采用能量法求近似解, 各国学者在这方面进行了大量的研究<sup>[3,4]</sup>。解析法虽然可以定性地了解各部分构件对某一振型的贡献, 但由于只能分析低阶的、单一的振型, 加上计算公式比较繁琐, 因此应用受到限制。实际上, 斜拉桥结构复杂, 侧向弯曲和扭转常常耦合在一起, 采用空间有限元法能够反映各种振型之间的相互耦合, 计算结果更加全面和可靠, 因此有限元法得到更广泛的应用。

用有限元法分析结构自由振动时的动力方程为:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = 0 \quad (1)$$

式中:  $[M]$  和  $[K]$  分别为结构的整体质量矩阵和刚度矩阵;  $\{\ddot{U}\}$  和  $\{U\}$  分别为有限元集合体的振动加速度和位移。

令解的形式为:  $\{U\} = \{\varphi\} \sin(\omega t + \alpha)$ , 代入式(1), 得:

$$([K] - \omega^2[M])\{\varphi\} = 0 \quad (2)$$

令上式系数行列式等于零, 即得到特征值方程, 然后可采用行列式搜索法或子空间迭代法等求解方程组, 得到  $n$  个特征根和对应的特征向量。这些特征根的平方根, 即为结构的固有频率  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ; 特

征向量即为结构的振型 $\{\varphi_1\},\{\varphi_2\},\cdots,\{\varphi_n\}$ 。

本文探索性地设计了跨径布置为410 m+1 000 m+410 m 的CFRP 索斜拉桥和钢索斜拉桥,主梁为钢箱梁。结构布置示意如图1 所示,各构件的截面参数见表1。

2 算例分析<sup>[5]</sup>

2.1 算例

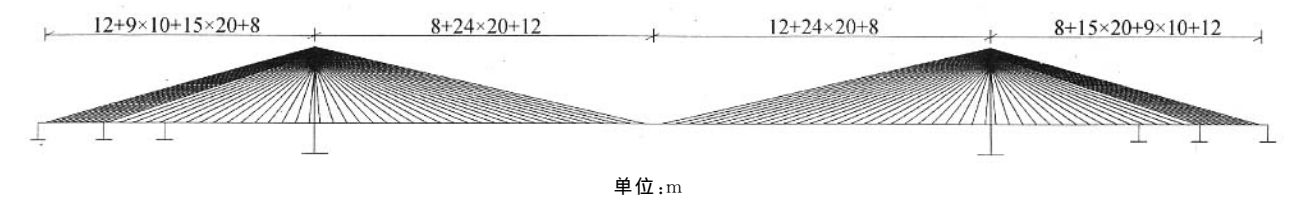


图1 1 000 m 斜拉桥结构布置示意

表1 构件截面参数

构件名	材料	截面面积/m <sup>2</sup>	抗弯惯矩/m <sup>4</sup>	换算容重/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	线胀系数
上塔柱	C55 混凝土	42~63	355~690	26	3.55×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>
中塔柱	C55 混凝土	63~102	690~2 130	26	3.55×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>
下塔柱	C55 混凝土	102~108	1 900~2 310	26	3.55×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>
主梁	16 Mn 钢	1.47~2.31	4.0~6.5	109.9	2.1×10 <sup>5</sup>	1.2×10 <sup>-5</sup>
CFRP 拉索(单根)	CFRP 筋	(0.7~1.25)×10 <sup>-2</sup>	0	16	1.6×10 <sup>5</sup>	0.7×10 <sup>-6</sup>
钢拉索(单根)	高强钢丝	(0.7~1.25)×10 <sup>-2</sup>	0	80	2.0×10 <sup>5</sup>	1.2×10 <sup>-5</sup>

采用 ANSYS 软件进行模态分析,拉索选用 link10 单元模拟,塔、梁选用 beam189 单元模拟。塔梁间纵向弹性约束以及利用橡胶支座形成的横向弹性约束均用 combin14 单元模拟。在边墩和辅助墩处,竖向位移、侧向位移以及绕纵轴的转角位移均受到约束,其余自由度放松。塔底按固端处理。

表2 列出了2 种拉索斜拉桥,考虑和不考虑成桥状态初应力时,前 16 阶振型及相应的频率。

表2 不计拉索振动时 2 种拉索斜拉桥的动力特性

频率/Hz						振型特点
CFRP 索斜拉桥			钢索斜拉桥			
阶数	考虑初应力	不考虑初应力	阶数	考虑初应力	不考虑初应力	
1	0.101 2	0.106 7	1	0.098 8	0.104 5	主梁纵飘+索塔纵弯
2	0.129 0	0.129 2	2	0.124 8	0.125 3	主梁 1 阶侧弯
3	0.202 8	0.204 6	3	0.207 5	0.209 5	主梁 1 阶竖弯
4	0.249 3	0.252 9	4	0.257 5	0.261 4	主梁 2 阶竖弯
5	0.340 3	0.342 9	5	0.333 8	0.336 6	主梁 2 阶侧弯
6	0.346 3	0.355 6	6	0.354 6	0.364 0	主梁 3 阶竖弯
7	0.422 7	0.435 2	7	0.434 6	0.447 0	主梁 4 阶竖弯
8	0.449 3	0.462 1	10	0.461 2	0.473 8	主梁 5 阶竖弯
9	0.477 6	0.479 2	8	0.456 8	0.459 4	两索塔同向侧弯
10	0.480 0	0.481 6	9	0.458 6	0.461 2	两索塔反向侧弯
11	0.515 4	0.532 5	11	0.531 8	0.548 6	主梁 6 阶竖弯
12	0.527 7	0.541 2	13	0.552 9	0.567 5	主梁竖弯
13	0.553 3	0.562 5	12	0.543 2	0.552 9	主梁 1 阶扭转+侧弯
14	0.570 3	0.585 5	14	0.559 5	0.574 3	索塔反向侧弯+主梁扭转
15	0.590 6	0.608 1	16	0.616 0	0.633 8	主梁竖弯
16	0.591 2	0.594 9	15	0.581 6	0.584 9	主梁 1 阶扭转

2.2 计算结果讨论

为检验本文算例初步设计的合理性和计算的可靠性,这里列出 2 座主跨径接近的斜拉桥的主要基频,以资比较。某跨径布置为 284 m+950 m+284 m 的斜拉桥方案<sup>[6]</sup>,侧弯、竖弯和扭转基频分别为 0.168 6 Hz、0.198 9 Hz、0.514 1 Hz;某跨径布置为 450 m+1 000 m+450 m 的斜拉桥方案<sup>[7]</sup>,侧弯、竖弯和扭转基频分别为 0.101 6 Hz、0.184 2 Hz、0.463 0 Hz。可见,本文算例设计是合理的,动力特性计算结果是可信的。

2.2.1 大跨斜拉桥动力特性的一般规律

由表 2 可见,大跨斜拉桥的动力特性具有如下一般规律:

(1)自振周期长,特别是飘浮体系的纵飘周期,基本周期远远超过 5 s,有利于减小地震作用下的内力响应;

(2)频率分布密集,振型表现出明显的三维性和相互耦合的特点,振型参与质量在很高阶时仍具有相当的份额,抗震分析时应让尽可能多的振型参与计算。

2.2.2 初应力的影响

将考虑与不考虑初应力的计算结果进行比较,可以发现不考虑初应力时,频率计算值偏高。这是因为,考虑初应力后,刚度矩阵中将包含几何刚度,虽然考虑拉索初应力后可使结构刚度增大,但主梁和索塔主要受压,考虑它们的初应力后结构刚度将减小。因此,当对动力特性计算精度有较高要求时,如施工图设计阶段的抗风、抗震验算,应考虑成桥初应

力的影响。

2.2.3 2 种拉索斜拉桥动力特性的比较

比较 CFRP 索斜拉桥与钢索斜拉桥前 16 阶的频率,可有如下发现。

(1)CFRP 索斜拉桥的竖弯频率普遍较钢索斜拉桥的相应频率稍低,这是因为,在 1 000 m 跨径时,CFRP 索的等效弹性模量较钢拉索的小,导致对主梁的弹性支承刚度稍小,与静力特性分析一致;不过跨径大于一定值后,可以预计,CFRP 索斜拉桥的竖弯频率将会高于钢索斜拉桥的相应频率。

(2)CFRP 索斜拉桥扭转频率较钢索斜拉桥的稍高,这是由于,虽然 CFRP 拉索提供的应变能较小,但 CFRP 拉索较轻,提供的质量惯矩较小;同样可以预计,随着跨径的增大,由于 CFRP 拉索的等效弹性模量逐渐高于钢拉索的,CFRP 索斜拉桥的扭转频率将会更高于钢索斜拉桥的相应频率,这对提高颤振临界风速有利。

3 CFRP 索斜拉桥动力特性的影响参数分析

3.1 结构体系的影响

为兼顾斜拉桥主梁、索塔的静力和动力反应,针对不同的建桥条件,常选用不同的结构体系。大跨斜拉桥常用的结构体系有全飘浮体系、半飘浮体系、刚构体系和塔梁弹性约束体系。下面比较各种结构体系的动力性能,当为塔梁弹性约束体系时,纵向弹性约束刚度取 12 000 kN/m。表 3 列出了主要的振型及相应的频率。

根据表 3,做如下浅议。

表 3 CFRP 索斜拉桥不同结构体系时的动力特性

全飘浮体系		半飘浮体系		刚构体系		塔梁弹性约束体系		振型特点
阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	
1	0.073 1	1	0.073 1			1	0.106 7	主梁纵飘+索塔纵弯
2	0.129 1	2	0.129 5	1	0.136 5	2	0.129 2	主梁 1 阶侧弯
3	0.204 6	3	0.204 6	2	0.205 0	3	0.204 6	主梁 1 阶竖弯
13	0.562 5	13	0.563 6	15	0.665 0	13	0.562 5	主梁 1 阶扭转+侧弯
15	0.594 9	15	0.598 4	12	0.585 3	15	0.594 9	主梁 1 阶扭转

(1)全飘浮体系与半飘浮体系的各阶频率非常接近,由于纵向未设置约束,它们的一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,但随着跨径的增大,梁端的位移响应会愈来愈大而难以接受。

(2)刚构体系的纵桥向刚度最大,纵飘振型不单

独出现,同时侧弯频率和扭转频率也明显提高,扭频的提高虽然有利于提高颤振临界风速,但刚构体系的温度内力和地震作用下的内力响应会非常大,在跨径超过 1 000 m 的特大跨斜拉桥中应避免采用。

(3)相对于全飘浮或半飘浮体系,塔梁弹性约束体系仅纵飘频率有较大提高,其余各阶频率无明显

变化,显然,塔梁弹性约束体系能同时兼顾斜拉桥的承载力和变形要求,不过,纵向弹性约束刚度需要优化设计,以便兼顾温度、纵向风力和水平地震力作用下结构的内力和位移反应。

3.2 边跨辅助墩设置个数的影响

已有研究表明<sup>[7]</sup>,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,因此若单从静力方面考虑,在条件许可的情况下,宜在边跨设置一定数量的辅助墩。下面分析辅助墩设置个数对结构动力性能的影响,表 4 列出了主要的振型及相应的频率。

表 4 CFRP 索斜拉桥设置不同数量辅助墩时的动力特性

不设辅助墩		1 个辅助墩		2 个辅助墩		3 个辅助墩		振型特点
阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	
1	0.102 3	1	0.106 7	1	0.106 7	1	0.107 6	主梁纵飘+索塔纵弯
2	0.112 1	2	0.128 6	2	0.129 2	2	0.135 1	主梁 1 阶侧弯
3	0.115 1	3	0.167 3	3	0.204 6	3	0.209 4	主梁 1 阶竖弯
7	0.357 8	7	0.376 2					主梁 2 阶竖弯+边跨 主梁 1 阶竖弯
9	0.424 3							边跨主梁同向 1 阶侧弯
12	0.463 9							边跨主梁反向 1 阶侧弯
18	0.562 8	15	0.562 5	13	0.562 5	13	0.563 2	主梁 1 阶扭转+侧弯
21	0.595 6	17	0.594 6	15	0.594 9	15	0.598 0	主梁 1 阶扭转

由表 4 可知,不设置辅助墩时,结构的侧弯和竖弯基频均较低;两边跨各设置 1 个辅助墩后,侧弯和竖弯基频均有明显提高,索塔侧弯和主梁扭转频率无明显改变;设置 2 个辅助墩后,侧弯和竖弯基频进一步提高;但设置 3 个辅助墩后,侧弯和竖弯基频提高不再明显。需要说明的是,侧弯频率的提高是因为在辅助墩处对主梁设置了横向约束,若在辅助墩处不设置横向约束,则辅助墩的设置与否对侧弯频率

不会产生影响。

3.3 拉索空间布置型式的影响

拉索在空间一般布置成单索面或双索面,而双索面又分为平行双索面和倾斜双索面。下面分析平行索面和倾斜索面 2 种布置型式对斜拉桥动力性能的影响,表 5 列出了主要振型及相应的频率,其中平行索面的扭转振型如图 2 所示。

表 5 不同索面型式时 2 种拉索斜拉桥的动力特性

频率/Hz								振型特点
CFRP 索斜拉桥				钢索斜拉桥				
阶数	斜索面	阶数	平行索面	阶数	斜索面	阶数	平行索面	
1	0.106 7	1	0.105 3	1	0.104 5	1	0.103 2	主梁纵飘+索塔纵弯
2	0.129 2	2	0.129 2	2	0.125 3	2	0.125 4	主梁 1 阶侧弯
3	0.204 6	3	0.203 1	3	0.209 5	3	0.208 0	主梁 1 阶竖弯
13	0.562 5			12	0.552 9			主梁 1 阶扭转+侧弯
15	0.594 9	11	0.499 9	15	0.584 9	11	0.488 3	主梁 1 阶扭转

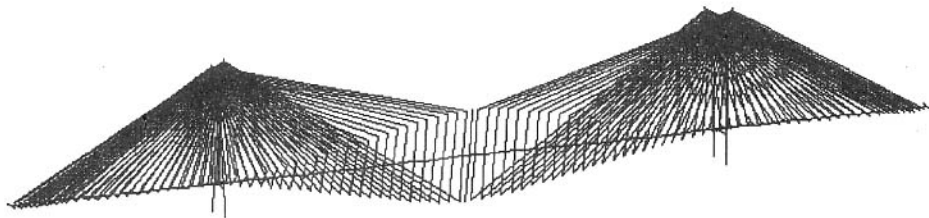


图 2 平行索面斜拉桥的扭转振型



由表 5 可见,平行索面对应的索塔侧弯频率明显降低,这是由于平行索面对应的索塔为H 形索塔,其侧倾刚度不及倒Y 形索塔;此外,斜索面对应的主梁扭转基频较平行索面的高约 20%。这有两个方面的原因,一是倾斜索面的横向水平分力使主梁扭转时伴随有很大的侧向弯曲变形<sup>[4]</sup>;二是对于 H 形索塔的平行双索面布置型式,当主梁扭转变形时,H 形索塔的两塔柱通过反向挠曲来与平行索面的伸缩变形相协调,从而减小拉索提供的抗扭刚度,使主梁的扭转变形更大。

由于扭转基频的提高有利于提高斜拉桥的抗风

稳定性,因此斜索面布置型式在大跨斜拉桥中得到更广泛的应用。对于特大跨斜拉桥,更应选择斜索面布置型式。

3.4 边、中跨跨径之比的影响

边、中跨跨径之比(简称跨比)也常常是一个关键设计参数。选择较小的跨比,可以提高全桥整体刚度,减小活载作用下的中跨跨中挠度,并且,中跨跨中段的施工可以在有后锚的情况下进行,提高施工时长悬臂的稳定性。下面分析不同跨比时 CFRP 索斜拉桥的动力特性,表 6 列出了两种辅助墩设置时前十几阶频率及相应振型。

表 6 CFRP 索斜拉桥不同跨径之比时的动力特性

频率/Hz								振型特点
未设置辅助墩				边跨各设有 2 个辅助墩				
阶数	跨比(0.41)	阶数	跨比(0.49)	阶数	跨比(0.41)	阶数	跨比(0.49)	
1	0.102 3	1	0.102 8	1	0.106 7	1	0.107 5	主梁纵飘+索塔纵弯
2	0.112 1	2	0.106 9	2	0.129 2	2	0.128 9	主梁 1 阶侧弯
3	0.115 1	3	0.108 5	3	0.204 6	3	0.203 2	主梁 1 阶竖弯
7	0.357 8	8	0.352 2					主梁 2 阶竖弯+边跨 主梁 1 阶竖弯
9	0.424 3	7	0.340 9					边跨主梁同向 1 阶侧弯
12	0.463 9	10	0.405 8					边跨主梁反向 1 阶侧弯
18	0.562 8	19	0.562 0	13	0.562 5	13	0.562 0	主梁 1 阶扭转+侧弯
21	0.595 6	21	0.593 8	15	0.594 9	17	0.594 0	主梁 1 阶扭转

由表 6 可见,未设置辅助墩时,较小的跨比可以得到较高的竖弯频率和侧弯频率,尤其对于边跨主梁的竖弯和侧弯振型,频率提高显著,但扭频基本没有改变;设置辅助墩后,跨比对斜拉桥的动力特性的影响不再明显。

4 结语

本文以探索性设计的跨径为 1 000 m 的 CFRP 索斜拉桥和钢索斜拉桥为例,对比分析了 2 种拉索斜拉桥主要的动力特性,并研究了成桥初应力对斜拉桥动力特性的影响;鉴于当前对影响斜拉桥动力特性的一些关键参数少有系统研究的状况,笔者详细分析了不同结构体系、辅助墩设置个数、拉索空间布置型式、边中跨跨径之比等参数对 CFRP 索斜拉桥的动力特性的影响,得出了若干结论,为 CFRP 索斜拉桥的优化设计提供理论依据。

参考文献:

[1] 张金武,李龙安. 武汉白沙洲大桥抗震抗风分析. 桥梁建设[J], 1998, (3).

[2] 蒋正国,叶见曙,吴文清. 鄂黄长江公路大桥抗震设计研究[J]. 公路交通科技, 2000, (4).

[3] Domenico Bruno, Angelo Leonardi. Natural Periods of Long-Span Cable-Stayed Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 1997, 2(3).

[4] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社, 1996.

[5] 梅葵花. CFRP 拉索斜拉桥的研究[D]. 东南大学博士学位论文, 2005.

[6] 龚仁明. 超大跨度斜拉桥方案设计[J]. 同济大学学报, 1999, (2).

[7] 王伯惠. 斜拉桥结构发展和中国经验(上、下册)[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.

文章编号: 0451-0712(2006)11-0053-04

中图分类号: U445.463

文献标识码: B

# 湛江海湾大桥移动模架试验及施工

李国兵

(广东省长大公路工程有限公司 广州市 510620)

**摘 要:** 湛江海湾大桥水中引桥是跨径 50 m 的预应力混凝土连续箱梁, 采用移动模架造桥机施工, 施工难度大, 技术含量高, 移动模架造桥机施工因在工程质量、进度、成本等方面的优势, 可在国内大型跨江、跨海桥梁施工中大力推广。本文重点介绍了针对该桥特点而进行的移动模架造桥机试验及采用的主要施工组织方案。

**关键词:** 移动模架造桥机; 试验; 施工

## 1 工程概况

湛江海湾大桥位于广东省西部的湛江地区, 是广东省省道 S373 线上跨越麻斜海湾的一座特大型桥梁。水中引桥部分为跨径 50 m 的预应力混凝土连续箱梁, 单幅桥面宽度为 12.75 m, 全桥共 68 孔, 采用 4 套自行设计制造的 CDMSS50/1200 移动模架造桥机施工, 移动模架系统见图 1 所示。

## 2 移动模架造桥机试验

我部使用的自行设计制造的 CDMSS50/1200 移动模架造桥机为下承式, 自下而上由托架系统、主梁和横联系统、模板系统、液压系统等组成, 为保证施工安全, 在正式施工前必需对托架系统、主梁和横联系统进行试验。

移动模架造桥机托架试验目的是检验移动模架

收稿日期: 2006-06-18

## Dynamic Characteristics Analysis of Cable-Stayed Bridge with CFRP Cables

MEI Kui-hua<sup>1,2</sup>, LU Zhi-tao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Civil Engineering College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Traditional steel cables are prone to erosion and degeneration, and using CFRP cables is an essential approach to settle this problem. For the deadweight of the CFRP cable is only 20% of that of the steel cable, the dynamic characteristics of the both cable-stayed bridges will be different when span is extra long. The dynamic characteristics of a 1 000 m-span cable-stayed bridge with CFRP cables and another one with steel cables are analyzed contrastively using the finite element method in this paper, and the influence of initial stress on the dynamic characteristics is studied. Currently, the design parameters which influence the dynamic characteristics of the cable-stayed bridge are less studied systemically, so the influences of design parameters, such as structural system, the numbers of auxiliary piers, the layout type of cable-plane, the ratio of side span and main span, on dynamic characteristics of the cable-stayed bridge with CFRP cables are investigated. Some conclusions are indicated, which provides theoretical basis for optimization design.

**Key word:** cable-stayed bridge; dynamic characteristics; finite element method; CFRP cable; parameter analysis