

基于高性能材料的大跨径斜拉桥抗风性能分析*

张志田[†], 吴涛, 方志

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了研究活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)和碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)在大跨径斜拉桥中应用的可行性,以主跨1100 m的钢斜拉索、钢主梁、普通混凝土索塔斜拉桥设计方案为基础,构造了一座同等布置形式的CFRP拉索、RPC主梁、RPC索塔斜拉桥方案。采用有限元法对2种方案斜拉桥的动力特性、抗风性能等进行了分析和比较。结果表明:2种方案结构的自振基频相差不大,CFRP索RPC主梁斜拉桥的主梁颤振稳定性有所提高,其抖振响应位移较钢索钢主梁斜拉桥明显降低。CFRP拉索的自振频率达钢斜拉索的2倍;与钢斜拉索相比,CFRP拉索涡振幅值有所增大,但整体而言2种方案斜拉索的涡振幅值均很小,不影响其安全;CFRP拉索的风雨激振振幅不到钢斜拉索的1/2,且前者与风雨激振相关的临界风速较后者有所提高。应用高性能材料RPC与CFRP的大跨径斜拉桥整体抗风性能优于传统的钢斜拉索钢主梁斜拉桥,从抗风性能角度而言,将高性能材料RPC与CFRP应用于大跨径斜拉桥中是可行的。

关键词:斜拉桥;活性粉末混凝土;碳纤维;动力特性;抗风性能

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Wind-resistance Performance Analysis of Long Span Cable Stayed Bridge Using High Performance Materials

ZHANG Zhitian[†], WU Tao, FANG Zhi

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to investigate the applicability of reactive powder concrete (RPC) and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in long span cable-stayed bridges, two cable-stayed bridges with the same span-length, 1100m, are designed for comparison. One is composed of steel stay cables, steel main girder, and ordinary concrete tower, while the other is composed of CFRP cable, RPC main girder and RPC tower. Dynamic properties and wind-resistant performances of the two schemes are analyzed and compared by using the finite element method. The results show that the two schemes show insignificant differences in fundamental natural frequencies, but the flutter stabilities for the RPC girder of the bridge with CFRP cable, RPC main girder and RPC tower is improved. The buffeting response displacement can be much reduced when the RPC girder and CFRP stay cables are employed. Natural frequencies of CFRP cables reach as high as 2 times of those of the steel cables. Compared with the steel cable, the vortex-induced vibrating amplitude of CFRP cables increases. However, the amplitudes of both schemes are very small, and hence they could have no effects on the structural safety. Rain-wind vibration amplitudes of CFRP ca-

* 收稿日期:2017-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078134), National Natural Science Foundation of China(51078134)

作者简介:张志田(1974-),男,湖南新化人,湖南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: zhangzhitian@hnu.edu.cn

bles can be as low as half of those of the steel cables. Moreover, critical wind speeds of the former are higher than the latter. In general, as far as the wind-resistant performance is concerned, RPC and CFRP can have an advantage over the traditional 3409 steel material in applications to long span cable-stayed bridges. In view of this point, it is feasible to apply high-performance materials, RPC and CFRP, to long span cable-stayed bridges.

Key words: cable-stayed bridge; RPC; CFRP; dynamic property; wind-resistant performance

斜拉桥凭借其良好的结构受力体系和跨越能力,已成为大跨径桥梁设计中的优选.现有大跨斜拉桥的主梁多采用普通混凝土梁、钢结构主梁或混合梁,斜拉索多采用传统的钢绞线或平行钢丝.然而,普通混凝土的比强度低,仅适用于中小跨径斜拉桥的主梁;钢结构主梁存在耐腐蚀性差、风致振动幅度大、造价和维护费用高等问题;由于钢斜拉索的自重大,其等效弹性模量较低,且钢斜拉索的抗疲劳性能和耐腐蚀性差,不利于结构的耐久性.以上诸多限制都严重制约着大跨径斜拉桥的发展.强度高、耐久性能好的RPC以及CFRP的出现,为大跨径斜拉桥的发展提供了一个新的方向.

RPC的强度高、韧性及耐久性能好,且在加温加压养护条件下几乎没有收缩,在永久荷载作用下的徐变效应也很小^[1],其抗压比强度约为普通混凝土的4倍、普通钢材的2倍.RPC结构的承重比(结构承重与结构质量之比)为普通混凝土结构的2~3倍,与钢结构相当.因此,RPC非常适用于大跨径桥梁.目前,RPC在工程中的应用还局限于小跨径桥梁,对其在大跨桥梁中的应用仅有部分学者^[2-3]进行了静力可行性的探讨,研究表明,RPC箱梁作为大跨径斜拉桥的主梁满足静力要求,但是其动力特性及抗风性能还有待进一步研究.

CFRP拉索具有较高的抗拉比强度(约为钢斜拉索的7倍)和比刚度(约为钢斜拉索的4倍),且抗疲劳性能和耐腐蚀性能优异,是传统钢斜拉索的理想替代品.目前已有部分学者对CFRP拉索的结构受力性能展开了研究,研究结果表明:在大跨斜拉桥结构中,CFRP拉索较钢斜拉索具有明显的优越性^[4-6].但迄今关于CFRP拉索对大跨径斜拉桥抗风性能的影响还鲜见文献报道.

基于RPC和CFRP的优异性能,以主跨1100m的钢斜拉索、钢主梁、普通混凝土索塔斜拉桥设计方案为基础,采取一定的替换原则,将钢结构主梁替换为RPC主梁,普通混凝土索塔替换为RPC索塔,将

钢斜拉索替换为CFRP拉索,构造了一座同等布置形式的CFRP拉索、RPC主梁、RPC索塔斜拉桥方案,并对2种方案斜拉桥整体及拉索的动力特性、抗风性能等进行了分析和比较,从结构抗风性能角度研究了高性能材料RPC与CFRP应用于大跨径斜拉桥结构中的可行性.

1 结构方案的拟定

1.1 钢索钢主梁普通混凝土索塔斜拉桥方案:SSN

参考苏通长江大桥的结构设计,拟定了一座主跨1100m的钢斜拉索、钢主梁、普通混凝土索塔斜拉桥(以下简称“SSN方案”),结构整体布置如图1所示.钢主梁截面如图2所示,主梁采用扁平钢箱梁,梁高4m,全宽41m,考虑结构受力,对索塔附近的主梁截面进行加强.索塔采用倒Y型C50普通混凝土索塔.主梁顺桥向标准段索距为16m,边跨尾索区索距为12m,拉索按空间双索面布置,全桥共4×68根斜拉索.材料参数取值见表1.

1.2 CFRP索RPC主梁RPC索塔斜拉桥方案:CRR

CFRP索RPC主梁方案以SSN方案为基础,对其斜拉索、主梁和索塔按一定的原则进行替换,并对成桥索力进行优化,构成了一座新的CFRP拉索、RPC主梁、RPC索塔斜拉桥(以下简称“CRR方案”).

RPC主梁外形与钢主梁保持一致,以保证二者具有相同的气动外形.RPC主梁截面如图3所示,采用单箱四室箱梁,标准梁段纵桥向每隔4m设一道横隔板,厚度取15cm,为减轻自重,横隔板开孔率40%;两相邻横隔板之间设一道次横隔梁,次横隔梁厚度取15cm,顶板位置次横隔梁高度取45cm,底板和腹板位置次横隔梁高度取35cm;相邻腹板之间设置两道纵向加劲肋,其横向间距为2.95m,纵向加劲肋厚度取15cm,高度与次横隔梁同高;考虑腹板局部稳定性要求,每道中腹板左右各设置一道纵肋,肋高35cm,厚度取9cm.

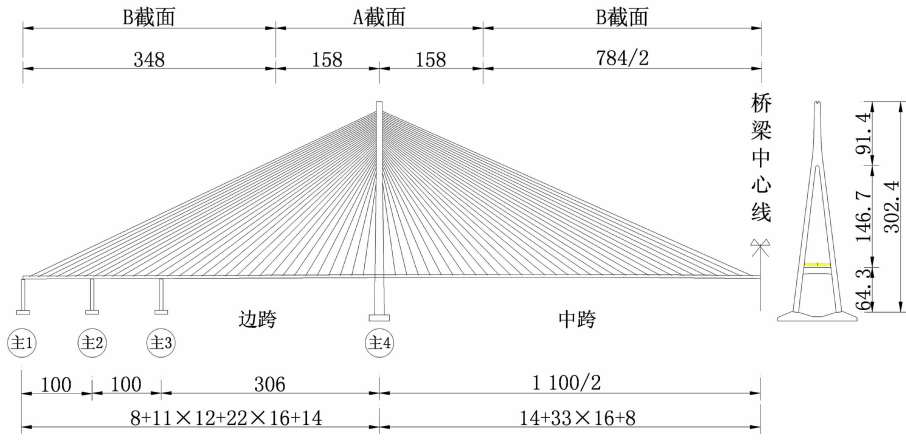


图 1 斜拉桥总体布置(单位:m)
Fig. 1 General layout of the cable-stayed bridge (unit: m)

表 1 材料特性
Tab. 1 Material characteristics

| 材料 | 弹性模量 /GPa | 抗压强度 标准值/MPa | 抗拉强度 标准值/MPa | 容重 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 泊松比 γ | 抗压强度 设计值/MPa | 抗拉强度 设计值/MPa | 线膨胀 系数/ 10^{-5} |
|--------|-----------|--------------|--------------|---|--------------|--------------|--------------|-------------------|
| 钢索 | 195 | — | 1 770 | 78.5 | 0.30 | — | 708 | 1.2 |
| 钢箱梁 | 200 | 345 | 345 | 78.5 | 0.30 | 246 | 246 | 1.2 |
| C50 | 34.5 | 32.4 | 2.65 | 25.0 | 0.20 | 22.4 | 1.83 | 1.0 |
| CFRP | 147 | — | 2 550 | 15.0 | 0.28 | — | 850 | 0.07 |
| RPC160 | 45 | 96 | 9.6 | 23.0 | 0.20 | 64 | 6.4 | 1.0 |

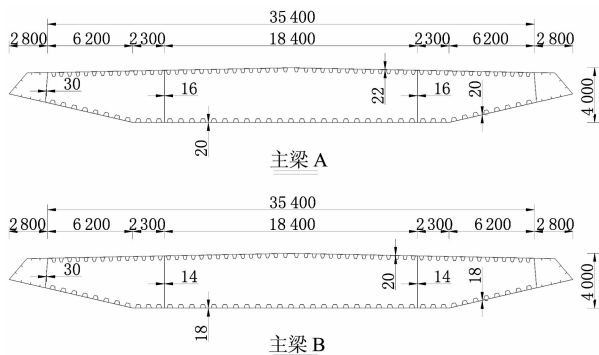


图 2 钢主梁截面(单位:mm)
Fig. 2 The section of steel girder (unit: mm)

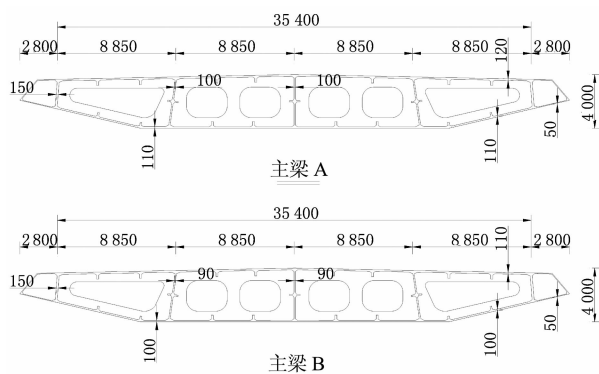


图 3 RPC 主梁截面(单位:mm)
Fig. 3 The section of RPC girder (unit: mm)

制. RPC 主梁替换钢主梁后主梁恒载和斜拉索索力将会有所增大,这对索塔的受力及刚度要求更高,因此对索塔的替换采用等截面替换,即仅将 SSN 方案索塔的 C50 混凝土替换成 RPC 材料.

斜拉索替换采用等强度替换原则,考虑 CFRP 材料为脆性材料,CFRP 索安全系数取 3.0(钢斜拉索安全系数取 2.5),替换后 CFRP 索截面面积约为对应钢斜拉索的 83%. 经索力优化后 2 种方案的成桥索力如图 4 所示,CRR 方案 CFRP 拉索索力较 SSN 方案钢斜拉索有所增大,这主要是由于主梁恒载增大的缘故.

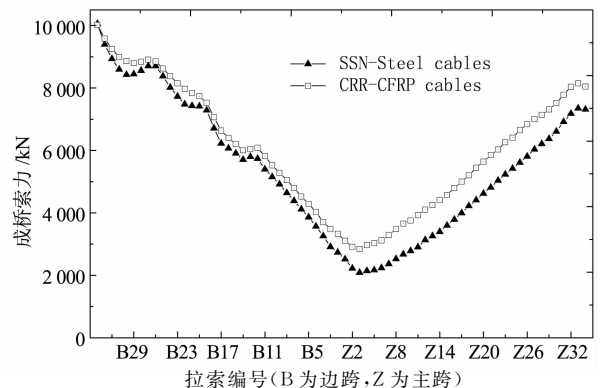


图 4 拉索成桥索力
Fig. 4 Cable tensions of the bridge in operation

斜拉桥索塔的设计以结构受力和刚度要求控

CRR 方案与 SSN 方案主体结构截面特性见表 2,主体结构特性值对比见表 3. CRR 方案主梁恒载较 SSN 方案增大了 29%,抗扭刚度增大了 20%左右,主梁轴向刚度、竖向抗弯刚度及横向抗弯刚度与 SSN 方案相近;CRR 方案 CFRP 拉索自重仅为 SSN 方案钢索的 16%,考虑垂度效应后前者仅部分拉索有效刚度较后者有所降低,说明 CFRP 索具有较高的比刚度;由于材料性能的提高,CRR 方案 RPC 索塔较 SSN 方案普通混凝土索塔允许应力提高了 2 倍,刚度提高了 30%.

表 2 主梁和拉索截面特性值

Tab. 2 Characteristics of the girder and cables

| 截面 | A /m ² | I _{xx} /m ⁴ | I _{yy} /m ⁴ | I _{zz} /m ⁴ |
|----------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 钢主梁 A | 2.63 | 19.78 | 7.07 | 336.4 |
| 钢主梁 B | 2.47 | 18.06 | 6.58 | 319.98 |
| RPC 主梁 A | 11.5 | 96.82 | 29.52 | 1483.57 |
| RPC 主梁 B | 10.79 | 89.01 | 27.48 | 1409.28 |
| 钢拉索 | (0.93~1.96) × 10 ⁻² | — | — | — |
| CFRP 索 | (0.78~1.63) × 10 ⁻² | — | — | — |

注:A为截面面积;I_{xx}为扭转惯性矩;I_{yy}为竖向抗弯惯性矩;I_{zz}为横向抗弯惯性矩.

表 3 CRR 方案与 SSN 方案主体结构特性值对比

Tab. 3 Comparison of the main structure characteristics between CRR and SSN schemes

| 截面 | r _W | r _{EA} | r _{GIsx} | r _{El_{yy}} | r _{El_{zz}} |
|-------------------|----------------|-----------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| RPC 主梁 A/钢主梁 A | 1.29 | 0.98 | 1.19 | 0.94 | 0.99 |
| RPC 主梁 B/钢主梁 B | 1.29 | 0.98 | 1.20 | 0.94 | 0.99 |
| CRR 方案索塔/SSN 方案索塔 | 0.92 | 1.30 | 1.30 | 1.30 | 1.30 |
| CFRP 索/钢拉索 | 0.16 | 0.76~1.16 | — | — | — |

注:表中 r_W为主梁恒载比;r_{EA}为轴向刚度比,考虑了斜拉索的垂度效应;r_{GIsx}、r_{El_{yy}}和 r_{El_{zz}}分别为相应截面刚度比.

在汽车荷载作用下,SSN 方案与 CRR 方案主梁跨中最大挠度分别为-0.895 m、-0.979 m,二者均未超过规范^[7]对应的容许值 2.75 m(钢主梁斜拉桥为 L/400)和 2.2 m(混凝土主梁斜拉桥为 L/500),故 2 种方案斜拉桥的整体刚度满足正常使用要求.

由于国内目前尚无成熟的 RPC 设计规范,参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》,按 A 类部分预应力混凝土构件对 CRR 方案主梁及索塔的正截面应力和抗裂进行验算. 根据规范^[7],在运营状态下,斜拉索的容许应力不超过 0.4 倍材料强度标准值. CRR 方案在正常使用极限状态下主体结构正截面的应力及其限值见表 4. 结果表明,RPC 主梁、RPC 索塔、CFRP 索均满足应力要求且有较高的安全储备,CRR 方案具备静力可行性.

2 结构动力特性

桥梁的动力特性主要指结构的固有频率、振型、

阻尼等,它们是结构本身固有的,由结构的类型、刚度、质量分布以及边界条件等决定的. 正确分析动力特性是进行结构抗风、抗震性能分析的基础.

表 4 CRR 方案主体结构应力

Tab. 4 Stress of the main structure of CRR scheme

| 主体结构 | 应力验算 | | 抗裂验算 | | | |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 标准组 合/MPa | 应力限 值/MPa | 短期组 合/MPa | 应力限 值/MPa | 长期组 合/MPa | 应力限 值/MPa |
| RPC 主梁 | -28.3~0 | -48.0 | -27.4~0 | 6.7 | -26.4~0 | 0 |
| RPC 索塔 | -13.9~0 | -48.0 | -13.2~0 | 6.7 | -12.5~0 | 0 |
| CFRP 索 | 378~635 | 1 020 | — | — | — | — |

注:应力以受压为负,受拉为正.

2.1 整体动力特性分析

考虑斜拉桥结构的几何非线性,对 SSN 方案和 CRR 方案结构在恒载状态下进行了模态分析,结构的自振频率见表 5.

表 5 结构振动频率

Tab. 5 Natural frequencies of the structure Hz

| 振型 | SSN 方案 | CRR 方案 |
|-----------|--------|--------|
| 纵飘 | 0.065 | 0.070 |
| 主梁一阶对称侧弯 | 0.104 | 0.097 |
| 主梁一阶对称竖弯 | 0.198 | 0.169 |
| 主梁一阶反对称竖弯 | 0.246 | 0.205 |
| 主梁一阶反对称侧弯 | 0.297 | 0.272 |
| 索塔侧弯 | 0.334 | 0.435 |
| 主梁二阶对称竖弯 | 0.335 | 0.296 |
| 主梁二阶反对称竖弯 | 0.401 | 0.353 |
| 主梁一阶对称扭转 | 0.533 | 0.548 |
| 主梁一阶反对称扭转 | 0.827 | 0.758 |

CRR 方案前两阶主梁竖弯和侧弯振型频率较 SSN 方案有所降低,这是由于 RPC 主梁竖向和横向的抗弯刚度较钢主梁低的缘故. 因 RPC 索塔刚度较同等截面普通混凝土索塔刚度提高了 30%,CRR 方案索塔侧弯频率较 SSN 方案高,但一阶纵飘频率前者仅略高于后者,这是因为 CRR 方案恒载的增大对索塔的纵向刚度要求更高. CRR 方案一阶对称扭转频率略高于 SSN 方案,但其一阶反对称扭转频率却低于 SSN 方案. 前两阶振型频率,CRR 方案除索塔侧弯频率较 SSN 方案有大幅提高外,结构其他振型频率较 SSN 方案相差不大.

2.2 斜拉索动力特性分析

考虑斜拉桥结构整体受力,计算得到 SSN 方案钢索与 CRR 方案 CFRP 索的自振基频如图 5 所示,由于斜拉索面内和面外振动的频率相近,这里仅给出了其面内自振频率.

结果表明,SSN 方案钢索与 CRR 方案 CFRP 索自振频率分别在 0.204~0.812 Hz、0.490~1.859 Hz 之间. 由于 CFRP 索自重轻,其自振频率是对应钢索的 2 倍之多,分布范围也比钢索广,这将

使拉索和桥梁之间的耦合振动现象更不容易发生。排除结构方案及索力的影响,其他相关研究^[4]也表明,取相同的拉索安全系数时,CFRP 索自振频率约为钢索的 2 倍。

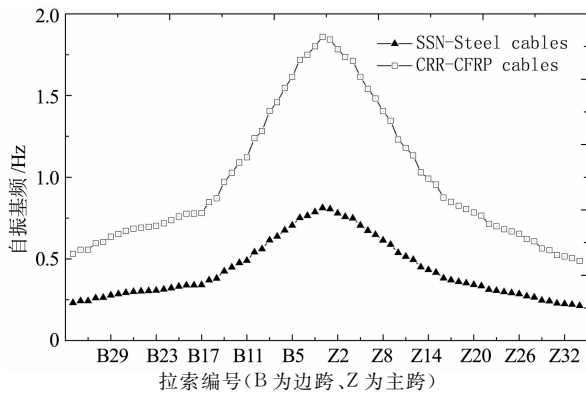


图 5 斜拉索自振基频

Fig. 5 Fundamental natural frequencies of the cables

3 主梁抗风性能分析

3.1 颤振稳定性分析

按《公路桥梁抗风设计规范》,对 SSN 方案和 CRR 方案主梁进行颤振稳定性分析。

根据苏通大桥相关设计资料,取主跨跨径 1 100 m 斜拉桥所在地的基本风速 $U_{10} = 38.9$ m/s。设计基准风速 $U_d = K_1 U_{10}$,按 A 类地表粗糙度类型,取地表粗糙度系数 $\alpha = 0.12$,桥面高度 $Z = 60$ m,风速高度变化修正系数 $K_1 = 1.46$,则 $U_d = 56.8$ m/s。

根据规范^[8],斜拉桥主梁的颤振检验风速计算公式为 $[U_{cr}] = 1.2\mu_f U_d$,风速脉动修正系数取 $\mu_f = 1.2$,则 $[U_{cr}] = 81.8$ m/s。

颤振临界风速可按式(1)计算:

$$U_{cr} = \eta_s \eta_a U_{co}, \quad (1)$$

$$U_{co} = 2.5 \sqrt{\mu \frac{r}{b}} f_t B. \quad (2)$$

式中参数含义及取值见表 6。

表 6 颤振临界风速
Tab. 6 Critical flutter wind speeds

| 截面 | SSN 方案 | CRR 方案 |
|------------------------------------|--------|--------|
| 形状系数 η_s | 0.7 | 0.8 |
| 攻角效应系数 η_a | 0.8 | 0.8 |
| 结构与空气的密度比 μ | 20.04 | 26.89 |
| 主梁截面惯性半径 r /m | 11.49 | 11.54 |
| 桥面宽度 B /m | 38.4 | 38.4 |
| 桥面半桥宽 b /m | 19.2 | 19.2 |
| 主梁对称扭转基频 f_t /Hz | 0.533 | 0.548 |
| 平板颤振临界风速 $U_{co}/(m \cdot s^{-1})$ | 177.2 | 211.5 |
| 桥梁颤振临界风速 $U_{cr}/(m \cdot s^{-1})$ | 99.2 | 135.4 |

经计算,SSN 方案与 CRR 方案主梁的颤振临界风速 U_{cr} 分别为 99.2 m/s、135.4 m/s,二者均大于颤振检验风速 81.8 m/s,CRR 方案较 SSN 方案主梁的颤振稳定性大幅提高。

3.2 抖振响应分析

大跨度桥梁抖振时域分析可分为以下 3 个环节:桥梁风场的模拟、气动力表达、抖振响应计算。根据以往大跨径斜拉桥抖振时域分析结果^[9]:桥塔风效应和拉索风效应对主梁的振动影响不大,故仅考虑主梁风场。

3.2.1 桥梁风场的模拟

取桥址所在地基本风速 $U_{10} = 38.9$ m/s,桥面高程平均风速约为 50 m/s。采用稳定性较强、精度高的谐波合成法模拟脉动风速时程。风场模拟采用 Deodatis^[10]提出的谱表示方法。参考我国《公路桥梁抗风设计指南》,水平顺风向(或桥梁横向)的目标脉动风速谱选用 Kaimal 谱(见式(3)),竖向目标脉动风速谱选用 Panofsky 谱(见式(4)),不考虑水平横风向(或桥梁纵向)脉动风荷载作用。脉动风速功率谱为:

$$\frac{nS_u(n)}{(u^*)^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}}, \quad (3)$$

$$\frac{nS_w(n)}{(u^*)^2} = \frac{6f}{(1+4f)^2}. \quad (4)$$

式中: n 为脉动风速分量的频率; u^* 为空气流动剪切速度; $f = nZ/U(Z)$, $U(Z)$ 为高度 Z 处的平均风速。

脉动风数值模拟参数设定见表 7。

表 7 脉动风数值模拟参数设定
Tab. 7 Parameters of the turbulent wind field

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|---------|-------|-------------------------------|----------|
| 跨度/m | 2 112 | 上限频率/(rad · s ⁻¹) | 10 π |
| 模拟点间距/m | 28 | 频率分段 | 2 048 |
| 地表粗糙度/m | 0.01 | 采样时间间隔/s | 0.1 |
| 风剖面指数 | 0.12 | 模拟时程长度/s | 1500 |

3.2.2 气动力表达

采用 Davenport 抖振力模型^[11],自然风中紊流在桥梁主梁单位长度引起的抖振力可表示为:

$$D_b(x,t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_D \frac{u(x,t)}{U} + C_D \frac{w(x,t)}{U} \right], \quad (5)$$

$$L_b(x,t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_L \frac{u(x,t)}{U} + (C_L + C_D) \frac{w(x,t)}{U} \right], \quad (6)$$

$$M_b(x,t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[2C_M \frac{u(x,t)}{U} + C_M \frac{w(x,t)}{U} \right]. \quad (7)$$

式中： ρ 为空气密度； C_L 、 C_D 、 C_M 分别为升力、阻力与升力矩系数。两种方案的主梁与苏通大桥主梁气动外形一致，故静力三分力系数取苏通大桥主梁节段模型试验结果^[12]，如图6所示； C_L' 、 C_D' 、 C_M' 分别为升力、阻力与升力矩系数对攻角 α 的导数； U 为平均风速； u 、 w 分别为水平向及垂直向的脉动风速。

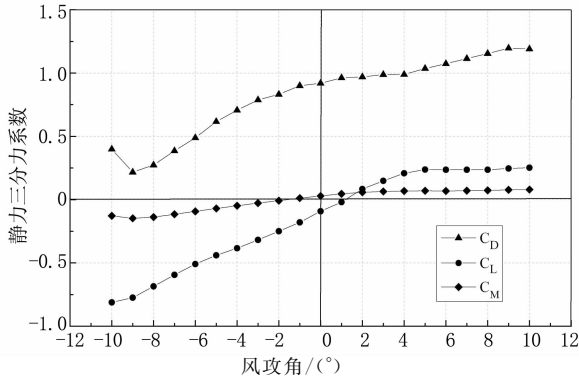
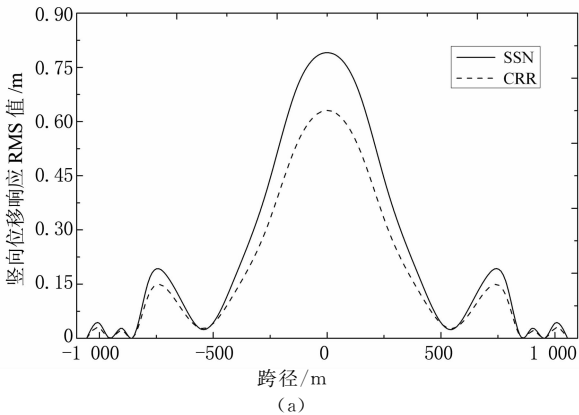


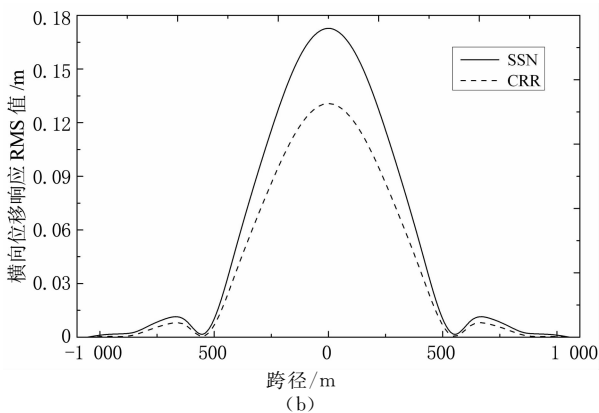
图6 静力三分力系数
Fig. 6 Aerostatic force coefficients

3.2.3 抖振响应分析结果

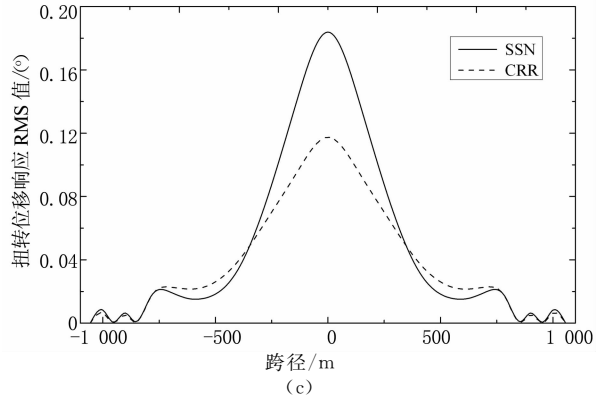
CRR方案与SSN方案的主梁抖振位移RMS值沿桥跨变化情况如图7所示。CRR方案主梁竖向和横向位移RMS值较SSN方案有所降低，扭转位移RMS值除索塔位置小幅提高外，整体也呈降



(a)



(b)



(c)

图7 主梁抖振位移RMS值
Fig. 7 RMS values of buffeting of the bridge deck

低趋势；CRR方案抖振响应位移RMS值沿全桥分布更加均匀，利于主梁的变形和受力。

按照Davenport提出的峰值因子计算公式^[13]：

$$g = \sqrt{2 \log_e(vT)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \log_e(vT)}} \quad (8)$$

式中： v 为振动频率； T 为达到峰值所需要的时间周期。

若取 $T=600$ s，则主梁跨中抖振响应RMS值和抖振振幅见表8。当平均风速为50 m/s时，CRR方案主梁跨中在竖向、横向及扭转方向上的抖振位移幅值较SSN方案分别降低了21%、25%、36%，因抖振位移RMS值大致与风速的二次方成正比，在高速时，这一差距将更加明显。

表8 主梁跨中最大位移抖振响应
Tab. 8 Maximum buffeting responses of main girder in midspan

| | | 竖向响应 /m | 横向响应 /m | 扭转响应 /(°) |
|-------|-------|------------|------------|--------------|
| 抖振RMS | SSN方案 | 0.790 8 | 0.172 8 | 0.183 9 |
| | CRR方案 | 0.630 9 | 0.130 7 | 0.117 5 |
| 抖振振幅 | SSN方案 | 2.59 | 0.53 | 0.66 |
| | CRR方案 | 2.04 | 0.40 | 0.42 |

4 斜拉索风致振动

4.1 涡激振动

斜拉索发生涡激共振的风速为^[11]：

$$U_{cr} = \frac{f_s D}{S_t} \quad (9)$$

式中： D 为拉索直径； f_s 为拉索某阶自振频率； S_t 为斯托罗哈数，对于实际的圆柱体应用， S_t 可取0.2。

2种结构方案的斜拉索长度在142~581 m之间。SSN方案斜拉索直径为129~178 mm，相关的一阶固有频率为0.812~0.204 Hz，按式(9)，对于最短拉索，与一阶模态锁定出现有关的临界风速为0.5 m/s；CRR方案斜拉索直径为120~165 mm，相

关一阶固有频率为 1.859~0.490 Hz,最短拉索一阶锁定的临界风速为 1.1 m/s,较 SSN 方案有所增大,但该风速对于提供斜拉索振动所需的巨大能量而言明显过低。

影响结构涡激振动的主要因素是大型湍流的强度和结构阻尼,其特征是无量纲参数斯柯顿数^[11]:

$$S_c = \frac{2\delta m}{\rho D^2} \quad (10)$$

式中:结构阻尼的对数衰减量 $\delta = 2\pi\xi$, ξ 为结构的阻尼系数; m 为斜拉索每延米质量。当斯柯顿数大于 20 时,发生锁定现象的风险并不存在,相反,若 S_c 值小于 10,则锁定的风险非常大。

基于确保 S_c 值大于 20 的原则,按式(10)估算避免涡激振动所需的阻尼系数。SSN 方案所需阻尼系数为 0.03%,CRR 方案为 0.16%,对于这两种方案,即便无阻尼器装置的斜拉索亦很容易满足阻尼系数的要求。

根据 Griffin 等人^[14]求得的涡激振动幅度 y_0 计算公式如下:

$$\frac{y_0}{D} = \frac{1.29}{[1 + 0.43(2\pi S_c^2)^{3.35}]} \quad (11)$$

在 S_c 等于 0.2 时式(11)如图 8 所示。SSN 方案与 CRR 方案最短斜拉索一阶振型阻尼比分别为 0.12%、0.26%,对应的 S_c 数分别为 74.4、30.9,对应的最大涡激振动幅度分别为 0.001D、0.009D,几乎可以忽略。

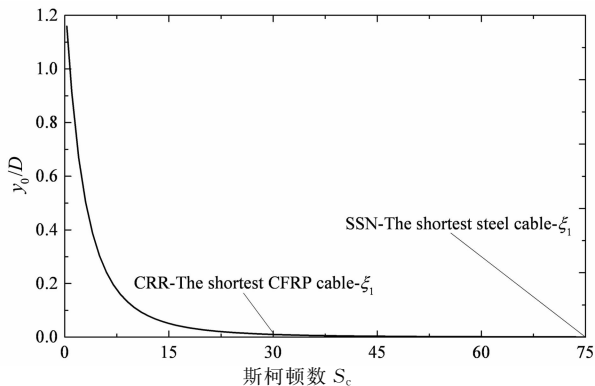


图 8 拉索涡激振幅与 S_c 的关系

Fig. 8 Relationship between vortex induced amplitude and S_c values of cables

4.2 风雨激振

根据斜拉索风雨激振振动特性,选取 2 种结构方案的主跨最长拉索 Z34 号索作为研究对象。风雨激振振幅可按式(12)(13)计算^[6,15]:

$$\left(\omega_e \cdot \frac{y_0}{U}\right)^2 = \frac{8}{d^3 C_y / d\alpha^3} \left(-\frac{dC_y}{d\alpha} - \frac{4\xi_1 m \omega_e}{\rho U D}\right), \quad (12)$$

$$\xi_i = \frac{c}{4\pi m f_s} \quad (13)$$

式中: ω_e 为拉索固有圆频率,rad; y_0 为拉索振幅; D 为拉索直径; U 为风速; m 为拉索单位长度质量; ρ 为空气密度; C_y 为垂直方向的荷载系数; α 为相对风攻角; $dC_y/d\alpha$ 和 $d^3 C_y/d\alpha^3$ 两个分量分别取-0.8和 54, ξ_i 为没有外加阻尼装置时按黏性阻尼计算得到的斜拉索振型阻尼比,黏性阻尼系数 c 取 $1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$; f_s 为拉索固有频率,Hz。

CRR 方案与 SSN 方案 Z34 号拉索前三阶振动模态固有频率及振型阻尼比见表 9。

表 9 Z34 号拉索前三阶振动频率及振型阻尼比
Tab. 9 First three order natural frequencies and modal damping ratios of the Z34 cable

| 模态 | SSN 方案 | | | CRR 方案 | | |
|----|--------------------|---------------------------|---------------|--------------------|---------------------------|---------------|
| | 频率 f_s/Hz | 圆频率 ω_e/rad | 振型阻尼比 ξ_i | 频率 f_s/Hz | 圆频率 ω_e/rad | 振型阻尼比 ξ_i |
| 1 | 0.204 | 1.282 | 0.002 5 | 0.490 | 3.081 | 0.006 5 |
| 2 | 0.408 | 2.562 | 0.001 2 | 0.982 | 6.170 | 0.003 2 |
| 3 | 0.616 | 3.867 | 0.000 8 | 1.481 | 9.303 | 0.002 1 |

将式(12)应用到 SSN 方案和 CRR 方案的 Z34 号斜拉索上,针对拉索的前三阶振动模态,得到拉索风雨激振振幅与风速的关系如图 9 所示。Z34 号拉索前三阶振动模态,SSN 方案在风速约为 12.7 m/s 时开始发生较为明显的风雨激振,CRR 方案在风速约为 14 m/s 时才开始发生明显的风雨激振。同一阶振动模态,相同风速时,CRR 方案斜拉索风雨激振振幅较 SSN 方案大幅降低,前者只有后者的 1/4~1/2。随着风速的增大,振幅变化渐缓,且高阶模态振幅变化较低阶模态缓慢,同一阶模态,CRR 方案较 SSN 方案振幅变化缓慢。

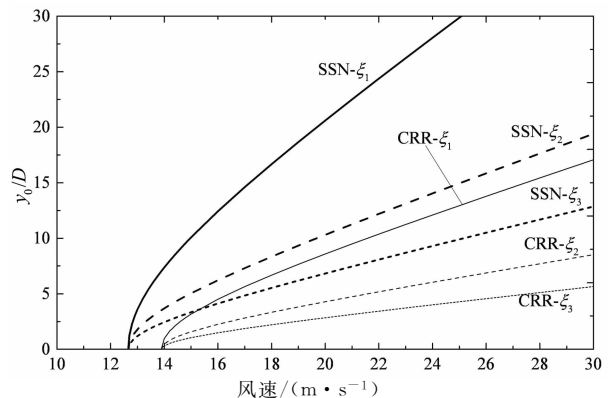


图 9 Z34 号拉索风雨激振振幅与风速关系
Fig. 9 Relationship between wind induced vibration amplitude and wind speed of Z34 cable

5 结 论

以主跨 1 100 m 的钢斜拉索、钢主梁、普通混凝土索塔斜拉桥设计方案为基础,考虑斜拉桥的结构受力特点、刚度及局部稳定等要求进行了 RPC 箱梁截面的设计,采用 RPC 材料替换了索塔和普通混凝土,按照等强度原则将钢斜拉索替换为 CFRP 拉索,形成了一种新的大跨径斜拉桥结构方案,并对 SSN 方案和 CRR 方案的动力特性和抗风性能进行了分析比较,得到如下结论:

1) 2 种方案的斜拉桥模态特性相差不大,CRR 方案基频较 SSN 方案有所增大;CRR 方案 CFRP 拉索的自振频率较 SSN 方案钢斜拉索得到有效提高及分散,大大减小了拉索与桥梁产生耦合振动现象的概率。

2) 定性分析表明,CRR 方案颤振临界风速比 SSN 方案有所提高;定量分析表明,CRR 方案主梁抖振振幅较 SSN 方案降低了 0~36%,有利于结构受力和变形。

3) 跟钢斜拉索相比,CFRP 拉索涡振幅值有所增大,但整体而言 2 种方案的涡振幅值均很小,不影响斜拉索的安全;CFRP 拉索发生风雨激振的振幅不到对应钢斜拉索的 1/2,且前者与风雨激振相关的临界风速较后者也有较大的提高。

综上所述,本文所设计的基于高性能材料的大跨径斜拉桥结构体系满足静力要求,其整体抗风性能优于传统材料斜拉桥,RPC 与 CFRP 在大跨径斜拉桥中的应用是可行的。

参 考 文 献

- [1] RICHARD P, CHEYTEZY M. Reactive powder concretes with high ductility and 200~800MPa compressive strength [C]// MEHTA P K. ACI SP-144: Concrete Technology: Past, Present, and Future. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 1997:507-518.
- [2] 王飞, 方志. 大跨活性粉末混凝土连续刚构桥的性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(4):6-12.
WANG F, FANG Z. Performance research on long-span RPC concrete continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2009, 36(4):6-12. (In Chinese)
- [3] 方志, 任亮, 凡凤红. CFRP 拉索预应力超高性能混凝土斜拉桥力学性能分析[J]. 中国工程科学, 2012, 14(7):53-59.
FANG Z, REN L, FAN F H. Analysis of mechanical properties of high performance concrete cable stayed bridge with CFRP cables[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(7):53-59. (In Chinese)
- [4] 谢旭, 朱越峰. CFRP 拉索设计对大跨度斜拉桥力学特性的影

- 响[J]. 工程力学, 2007, 24(11):113-120.
- XIE X, ZHU Y F. Study on behavior of long-span CFRP cable-stayed bridges [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11):113-120. (In Chinese)
- [5] 康厚军, 赵跃宇, 朱志辉, 等. 强迫激励下 CFRP 斜拉索面内分叉特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(9):8-13.
KANG H J, ZHAO Y Y, ZHU Z H, *et al.* In-plane bifurcation behavior of inclined CFRP cable subject to external excitation[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2014, 41(9):8-13. (In Chinese)
- [6] 谢旭, 张鹤, 申永刚. 钢和 CFRP 拉索的振型阻尼特性研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3):151-157.
XIE X, ZHANG H, SHEN Y G. Study on characteristics of modal damping of steel and CFRP stay cables [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3):151-157. (In Chinese)
- [7] JTG/T D65-01-2007 公路斜拉桥设计细则[S]. 北京:人民交通出版社, 2007:6-11.
JTG/T D65-01-2007 Design specification for highway cable stayed bridge [S]. Beijing: China Communications Press, 2007:6-11. (In Chinese)
- [8] JTG/T D60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004:21-22.
JTG/T D60-01-2004 Code for wind resistant design of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2004:21-22. (In Chinese)
- [9] 韩万水, 陈艾荣, 胡晓伦. 大跨度斜拉桥抖振时域分析理论实例验证及影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6):66-71.
HAN W S, CHEN A R, HU X L. Verification of time-domain buffeting theory and analysis of influence factors for long-span cable-stayed bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6):66-71. (In Chinese)
- [10] DEODATIS G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(8):778-787.
- [11] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2005:102-104.
CHEN Z Q. Bridge wind engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2005:102-140. (In Chinese)
- [12] 任亮. 基于高性能材料的千米级跨径混凝土斜拉桥力学性能研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2013:83-84.
REN L. The study of super-long span concrete cable-stayed bridge based high performance materials[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2013:83-84. (In Chinese)
- [13] DAVENPORT A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading [J]. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, 1964, 28(2):187-196.
- [14] GRIFFIN O M, SKOP R A, RAMBERG S E. The resonant, vortex-excited vibrations of structures and cable systems [C]// Proceedings in Offshore Technology Conference. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1975:731-744.
- [15] GEURTS C P W, STAALDUINEN P C VAN. Estimation of the effects of rain-wind induced vibration in the design stage of inclined cables[C]// Proceedings 10th International Conference on Wind Engineering. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University, 1999:885-892.