

CFRP 拉索预应力超高性能混凝土斜拉桥力学性能分析

方志¹, 任亮^{1,2}, 凡凤红¹

(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013)

[摘要] 为了探讨碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)和超高性能活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)在超大跨度斜拉桥中应用的可行性,以主跨 1 008 m 的大跨度钢主梁斜拉桥设计方案为例,采用拉索的等强度原则将原桥钢索替换成 CFRP 索,考虑截面刚度、截面应力和局部稳定等要求,将原桥钢主梁替换成 RPC 主梁,拟订了一座等跨度的 CFRP 拉索、RPC 主梁斜拉桥方案。采用有限元法分别对两种方案结构的静力特性、动力特性、稳定性能以及抗风性能等进行了分析与比较。结果表明:从结构受力性能角度而言,采用超高性能混凝土主梁和 CFRP 拉索构成千米级跨度混凝土斜拉桥的结构体系是可行的。

[关键词] 斜拉桥;碳纤维(CFRP);活性粉末混凝土;力学性能

[中图分类号] TU398 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)07-0053-07

1 前言

混凝土斜拉桥以其耐久好、造价和维护费用相对较低等优势已成为大跨桥梁结构中一种非常具有竞争力的桥型。但因普通混凝土的比强度较低,使得现有采用普通混凝土主梁斜拉桥的适用跨径一般在 500 m 以内,更大跨径的斜拉桥多采用钢-混凝土叠合梁或钢梁。因此,提高混凝土斜拉桥的跨越能力、扩展混凝土斜拉桥的应用范围一直倍受关注。轻质、高强、耐久性好的超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)以及高级复合材料的出现,为超大跨度混凝土斜拉桥的成功修建提供了可能。

作为 UHPC 中的一员, RPC 具有强度高、韧性和耐久性能优异等特点,且在热养护条件下几乎没有收缩,在长期荷载作用下的徐变也很小(仅为普通混凝土的 1/10 左右)^[1]。特别是其抗压比强

度(抗压强度与密度之比)较高,约为普通混凝土的 7 倍、普通钢材的 2 倍。在具有相同抗弯能力的前提下, RPC 结构的重量仅为普通混凝土结构的 1/2 ~ 1/3,几乎与钢结构相近,因此非常适于构成超大跨径混凝土斜拉桥的主梁。

对于超大跨度斜拉桥,如果采用传统的钢制斜拉索,其自重将较大,使得其等效弹性模量随着跨度的增加而急剧下降,同时钢索的耐腐蚀性能较差,对结构耐久性的影响也不容忽视。CFRP 的出现为这一问题的解决提供了途径。与传统钢索相比, CFRP 索具有更高的抗拉比强度(抗拉强度与密度之比)和比刚度(弹性模量与密度之比),且具有良好的耐腐蚀性能和抗疲劳性能,非常适于构成大跨度斜拉桥的拉索^[2]。目前已有不少学者对 CFRP 拉索、钢主梁斜拉桥的性能进行了分析和研究,结果均表明采用 CFRP 拉索具有明显的优越性^[3-8]。但迄今对采用 CFRP 拉索、RPC 主梁的特大跨径混凝土斜拉

[收稿日期] 2011-04-06

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51078134);江西省自然科学基金资助项目(20114BAB206010);江西省教育厅科技项目(GJJ11449)

[作者简介] 方志(1963—),男,湖北黄冈市人,湖南大学教授、博士生导师,长期从事桥梁结构和工程力学研究;E-mail:fangzhi@hnu.edu.cn

桥结构性能的研究还鲜见文献报道。

基于 RPC 和 CFRP 的优越性能,文章以主跨 1 008 m 的斜拉桥设计方案为例,采用拉索的等强度原则将原桥的钢索替换成 CFRP 索,考虑结构受力性能要求,将原桥的钢主梁替换成 RPC 主梁,拟订了一座等跨度的 CFRP 拉索、RPC 主梁斜拉桥方案,分别对原方案和新方案的静力特性、动力特性、稳定性以及抗风性能等进行了分析与比较,从结构受力性能角度探讨了 CFRP 拉索预应力超高性能混凝土特大跨径斜拉桥结构应用的可行性。

2 结构方案拟定

2.1 钢索钢主梁斜拉桥方案

参考主跨 816 m 的荆岳长江公路大桥的设计^[9],初拟一座主跨 1 008 m 的钢索、钢主梁斜拉桥设计方案,其总体布置如图 1 所示。基于结构受力,在索塔每侧 126 m 范围内对主梁截面予以加强,主梁截面如图 2 所示。H 形索塔采用钢筋混凝土结构,混凝土强度等级为 C50,其截面如图 3 所示。中跨和边跨钢箱梁顺桥向标准梁段索距为 15 m,边跨尾索区标准索距取为 13 m,拉索平面内按扇形布置,采用上下游平行的双索面,每个索面由 33 对拉索组成,全桥共 4 × 66 根斜拉索。拉索的材料参数取值见表 1,截面面积和成桥索力见图 4 和图 5。

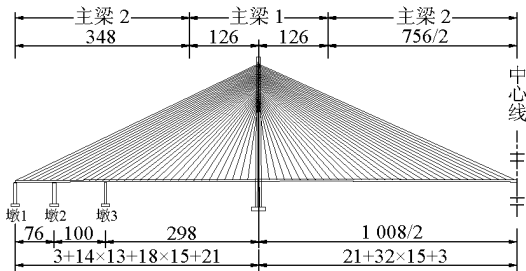


图 1 斜拉桥总体布置 (单位:m)

Fig. 1 General arrangement of cable-stayed bridge (unit: m)

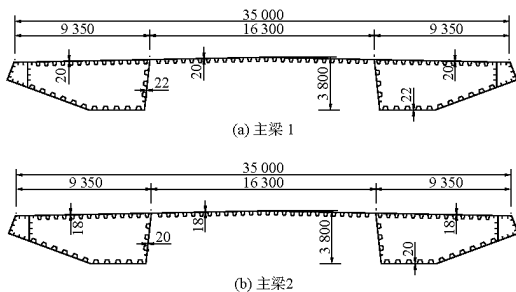
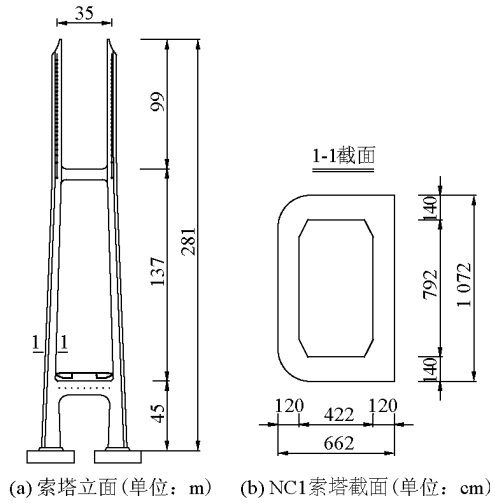


图 2 钢主梁截面 (单位:mm)

Fig. 2 The section of steel girder (unit: mm)



(a) 索塔立面 (单位: m) (b) NC1 索塔截面 (单位: cm)

图 3 索塔及截面

Fig. 3 Figure and section of the tower

表 1 材料特性

Table 1 Material characteristics

| 项目 | 钢索 | 钢箱梁 | C50 混凝土 | CFRP | RPC |
|--------------------------|-------|-------|---------|-------|------|
| 弹性模量/GPa | 195 | 200 | 34.5 | 160 | 50 |
| 抗压强度/MPa | — | 345 | 32.4 | — | 130 |
| 抗拉强度/MPa | 1 770 | 345 | 2.65 | 2 500 | 16 |
| 容重/(kg·m ⁻³) | 78.5 | 78.5 | 23 | 15 | 23 |
| 泊桑比 γ | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.28 | 0.18 |
| 安全系数 ^[1,10] | 2.5 | 2 | 2 | 2.5 | 2 |
| 允许压应力/MPa | — | 172.5 | 16.2 | — | 65 |
| 允许拉应力/MPa | 708 | 172.5 | 1.325 | 1 000 | 11 |
| 线膨胀系数/×10 ⁻⁵ | 1.2 | 1.2 | 1 | 0.06 | 1 |

注:钢箱梁为 Q345 D 钢对应的材料参数

2.2 CFRP 索 RPC 主梁斜拉桥方案

为保证 RPC 主梁与钢箱梁具有相近的抗风性能, RPC 主梁截面高度及形状保持不变。为满足桥面板在车辆荷载作用下的受力要求,在 RPC 主梁桥面板下设 5 道小纵梁,同时每对斜拉索与主梁相交处设主横隔梁,主横隔梁间每隔 3.75 m 再设一道次横隔梁,使桥面板变为受力性能更好的双向板肋梁体系。RPC 主梁 2 桥面板厚度为 100 mm;小纵梁高 350 mm,宽度为 200 mm;次横隔梁高 1 200 mm,宽度为 200 mm。主横隔梁位于拉索与主梁相交处,高度取 3 800 mm,与主梁同高,宽度取 300 mm。为减轻自重,在不影响受力的情况下在主横隔梁中间开孔,根据受力要求其开孔率取为 30 % 左右。考虑抗剪及局部稳定的要求,拟定箱梁腹板厚度为

150 mm,底板厚度为 100 mm。与原方案相同,RPC 主梁 1 也进行了相应的截面加强,RPC 主梁截面如图 6 所示。考虑 RPC 箱梁采用预制拼装施工,梁内预应力筋的布置为在底板与腹板的倒角处布置 4 束预应力筋,在顶板与肋梁处布置 7 束预应力筋,每束

预应力筋由 5 根直径为 12.5 mm 的碳纤维绞线组成(单根张拉力为 184 kN),采用体内索的形式布置。全桥合拢后在跨中合拢段和边跨辅助墩位置处布置后期体外碳纤维绞线预应力索。

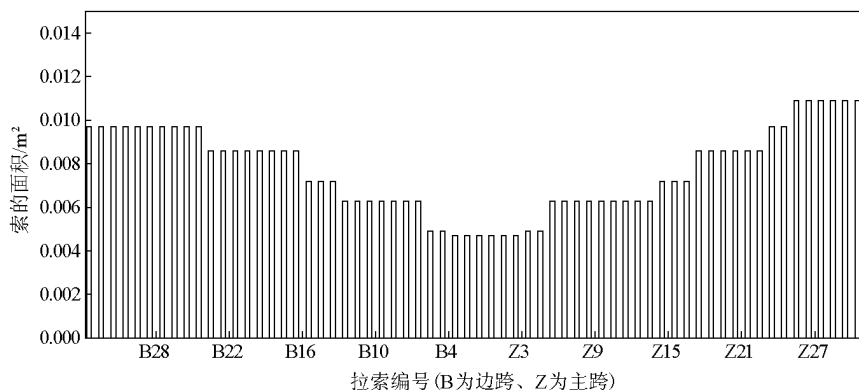


图 4 拉索截面面积

Fig. 4 Sectional area of the cables

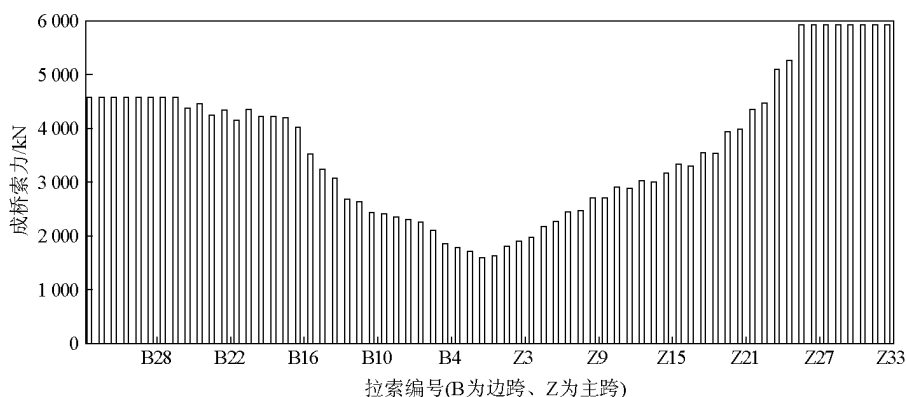


图 5 拉索成桥索力

Fig. 5 Cable tensions of bridge construction

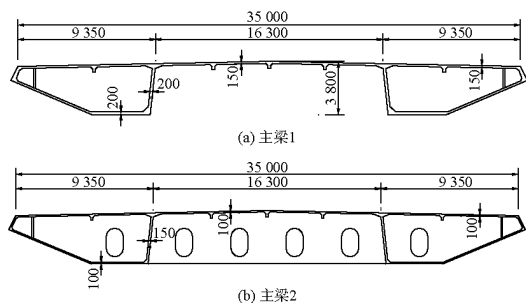


图 6 RPC 主梁标准截面(单位:mm)

Fig. 6 The section of RPC girder (unit: mm)

表 2 列出了主梁、索塔及拉索替换前后的特征

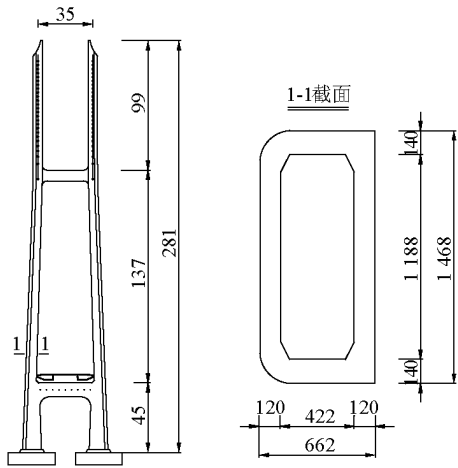
值。其中用来替换钢索的 CFRP 索采用等强度原则确定截面面积,主塔考虑刚度和稳定要求,新方案对普通混凝土索塔进行了加强,加强后截面用 NC2 表示,如图 7 所示。表 3 为主梁、索塔及拉索截面替换前后特性值对比。从表 3 中可以看出,主梁在采用 RPC 材料后,RPC 主梁 1 的轴向抗压刚度(EA)、竖向抗弯刚度(E_{Iy})、横向抗弯刚度(E_{Iz})及抗扭刚度(E_{It})与钢主梁 1 相近,RPC 主梁 2 各值均较钢主梁 2 的相应值小。而 CFRP 索替换钢索后其自重仅为原钢索的 0.21,在考虑索的垂度效应后 CFRP 索轴向刚度约为原钢索的 0.81~1.02,并未出现明显下降,说明 CFRP 索具有较高的比刚度。

表2 主梁、索塔及拉索截面替换前后特性值

Table 2 Characteristic value of the girder, tower and cables before and after replacement

| 截面 | A/m^2 | I_{xx}/m^4 | I_{yy}/m^4 | I_{zz}/m^4 |
|----------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 钢主梁 1 | 2 | 9 | 4.5 | 274.41 |
| 钢主梁 2 | 2.18 | 10.1 | 4.79 | 294.32 |
| RPC 主梁 1 | 7.55 | 27.43 | 14.18 | 983.89 |
| RPC 主梁 2 | 11.56 | 40.38 | 22.27 | 1545.08 |
| NC1 主塔 | 26.77 | 246.69 | 204.58 | 109 |
| NC2 主塔 | 36.89 | 448.16 | 619.63 | 163.65 |
| 钢拉索 | $(0.46 \sim 1.09) \times 10^{-2}$ | — | — | — |
| CFRP 索 | $(0.33 \sim 0.77) \times 10^{-2}$ | — | — | — |

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



(a) 索塔立面(单位: m) (b) NC2索塔截面(单位: cm)

图7 替换后索塔及截面

Fig. 7 Figuration and section of the tower after replacement

表3 主梁、索塔及拉索截面替换前后特性值对比

Table 3 The comparison of characteristic values of the girder, tower and cables before and after replacement

| 项目 | r_G | r_{EA} | $r_{I_{xx}}$ | $r_{I_{yy}}$ | $r_{I_{zz}}$ |
|--------------------|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| RPC 主梁 1/ 钢主梁 1 | 2 | 1.19 | 0.9 | 1.05 | 1.18 |
| RPC 主梁 2/ 钢主梁 2 | 1.5 | 0.85 | 0.69 | 0.71 | 0.81 |
| NC2 主塔/ NC1 主塔 | 1.38 | 1.38 | 1.82 | 3.03 | 1.5 |
| CFRP 索/ 钢拉索 | 0.21 | 0.81 ~ 1.02 | — | — | — |

注: r_G 为单位长度重量比; r_{EA} 为轴向刚度比, 考虑了 CFRP 索与钢拉索的垂度效应; $r_{I_{xx}}$ 、 $r_{I_{yy}}$ 和 $r_{I_{zz}}$ 分别为相应的截面惯性矩之比

3 静力分析

考虑结构的几何非线性, 对原方案和新方案进行静力特性分析。分析时, 桥面铺装、护栏等二期恒载取为 70 kN/m, 使用荷载根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)^[11] 规定选取, 其中汽车荷载采用公路 I 级, 并考虑主梁和拉索温升 30 °C, 温降 20 °C。

3.1 汽车荷载作用下主梁挠度

汽车荷载作用下主梁挠度如图 8 所示(图中仅给出半桥的结果)。由图 8 可知, 钢主梁和 RPC 主梁跨中挠度幅值分别为 1.09 m 和 1.11 m, 两者相近且均未超过规范容许的 2.61 m (钢斜拉桥的 $L/400$) 和 2.09 m (混凝土斜拉桥的 $L/500$)^[12] (L 为主跨跨度)。CFRP 索、RPC 主梁斜拉桥的结构刚度能够很好地满足使用要求。

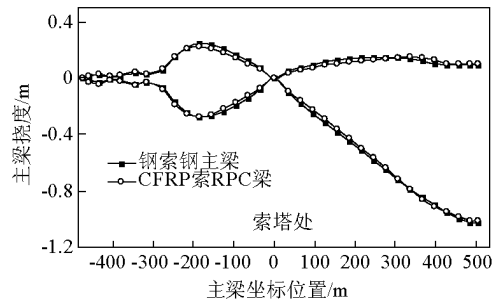


图8 汽车荷载作用下主梁挠度

Fig. 8 Deflection of the girder under moving vehicle loading

3.2 温度荷载作用下的主梁挠度

图 9、图 10 分别为拉索和主梁单元温升 30 °C 作用下的主梁位移。从图 9 中可以看出, 钢拉索在温升 30 °C 后主梁挠度幅值为 0.8 m, 而 CFRP 拉索温升 30 °C 后主梁挠度幅值只有 0.04 m, 为钢拉索的 1/20。这是由于 CFRP 材料的线膨胀系数不及钢材的 1/10, 对温度变化不敏感所致。图 10 中钢主梁温升 30 °C 后主梁幅值为 0.64 m, RPC 主梁相应幅值为 0.51 m, 两者相差不大, 但钢主梁相对于 RPC 主梁对温度更敏感。

3.3 承载能力极限状态组合下内力包络图

承载能力极限状态内力组合下, 主梁轴力、弯矩包络图分别如图 11 和图 12 所示。从图中可以看出, RPC 主梁的轴力大于钢主梁轴力, 这与 RPC 主梁替换钢主梁后自重增大相一致, 而跨中和边跨无索区, 因为施加了后期预应力, 其轴力会产生突变。两种结构的弯矩包络图基本一致。

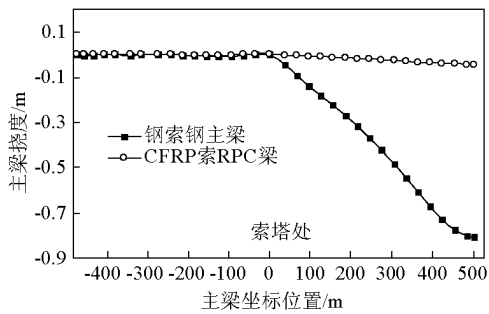


图9 拉索温升 30 °C 主梁位移

Fig. 9 Deflection of the girder after temperature rise of the cables of 30 °C

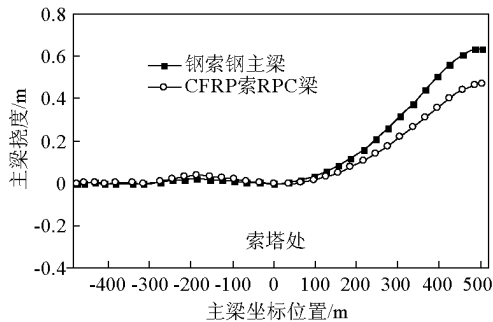


图10 主梁温升 30 °C 主梁位移

Fig. 10 Deflection of the girder after temperature rise of main girder of 30 °C

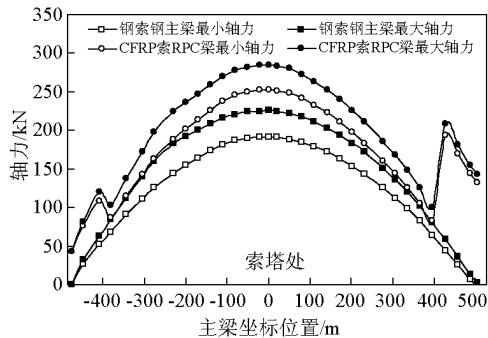


图11 主梁轴力包络图

Fig. 11 Envelope diagram of axial force of the girder

3.4 正常使用极限状态应力分析

正常使用极限状态下主梁的应力包络图如图13所示。其中钢主梁最大和最小应力分别为147.1 MPa(压应力为正)和-26.0 MPa(拉应力为负),RPC主梁最大和最小应力分别为42.2 MPa和

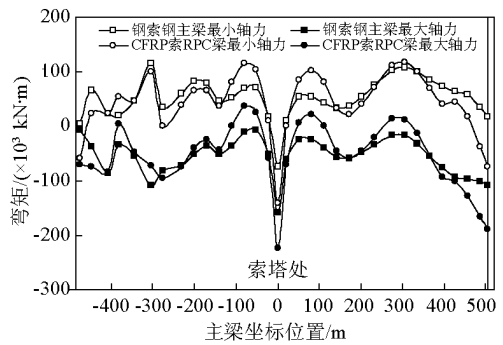


图12 主梁弯矩包络图

Fig. 12 Envelope diagram of bending moment of the girder

5.69 MPa,均为压应力(由于边跨及跨中无索区均布置了体外CFRP筋预应力束,未出现拉应力),其值小于表1中列出的RPC材料的允许压应力。此外,从图13中可以看出RPC主梁与钢主梁相比应力分布更均匀。

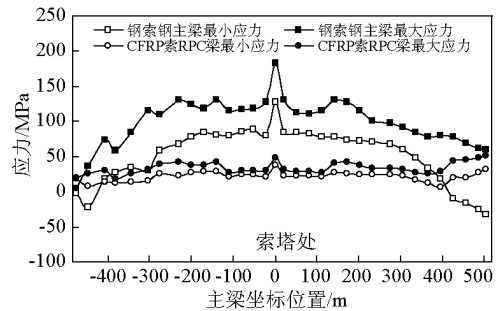


图13 主梁的应力包络图

Fig. 13 Envelope diagram of stress of the girder

4 模态分析

考虑结构的几何非线性,对原方案和新方案成桥状态结构进行了模态分析,得到了结构的自振频率,与结构抗风和抗震密切相关的自振频率见表4。从表4可以看出,CFRP索、RPC主梁斜拉桥各振型频率与原钢索、钢主梁斜拉桥总体相差不大,但新材料斜拉桥基频有所增大。这是由于新方案相对原方案在索塔顺桥向进行了截面加强,而一阶纵漂的刚度主要由索塔顺桥向刚度控制的缘故。

表 4 结构自振频率

Table 4 Natural vibration frequency of the structure

| 振型描述 | 钢索、钢主梁 | CFRP 索、RPC 主梁 |
|--------|--------|---------------|
| 纵漂 | 0.070 | 0.097 |
| 主梁一阶侧弯 | 0.129 | 0.122 |
| 主塔一阶面外 | 0.194 | 0.193 |
| 主梁一阶竖弯 | 0.201 | 0.196 |
| 主梁二阶竖弯 | 0.254 | 0.238 |
| 主梁二阶侧弯 | 0.369 | 0.323 |
| 主梁一阶扭转 | 0.547 | 0.550 |
| 主梁二阶扭转 | 0.651 | 0.624 |

5 稳定分析

采用弹性稳定分析方法,分别按全桥结构自重、结构自重+二期恒载的倍数加载,得到两种方案稳定安全系数,见表5。从表5可以看出,两种斜拉桥方案的稳定系数都满足规范要求的大于4的要求,而CFRP索、RPC主梁斜拉桥的稳定安全系数与钢索、钢主梁斜拉桥相比明显增大。这是由于CFRP索替换钢索后,CFRP索较高的比刚度改善了斜拉桥的纵向受力,同时新方案中对索塔截面顺桥向进行了加强,增大了主塔刚度,使稳定系数得以提高。

表 5 结构整体稳定安全系数

Table 5 Safety factor of overall stability of the structure

| 分析工况 | 钢索、钢主梁 | CFRP 索、RPC 主梁 |
|-----------|--------|---------------|
| 结构自重 | 4.68 | 8.28 |
| 结构自重+二期恒载 | 4.07 | 7.03 |

6 静风性能分析

在0°风攻角下,考虑静风荷载作用下结构的响应,对应原方案和新方案两种情况下主梁的横桥向位移和扭转角如图14和图15所示。分析采用设计基准风速36.9 m/s及风洞试验测得的主梁断面三分力系数来确定风荷载^[9]。由图14和图15可知,两种结构在风荷载作用下主梁横桥向位移和扭转角基本一致,且其值均较小,满足规范要求。说明CFRP索、RPC主梁超大跨径混凝土斜拉桥具有良好的抗风性能。

7 结语

文章以主跨1 008 m的钢索、钢主梁斜拉桥设计方案为例,采用等强度原则将钢索替换成CFRP

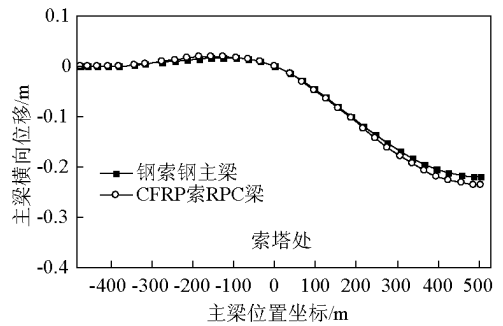


图 14 风荷载下主梁横桥向位移

Fig. 14 Transversal displacement of the girder under wind load

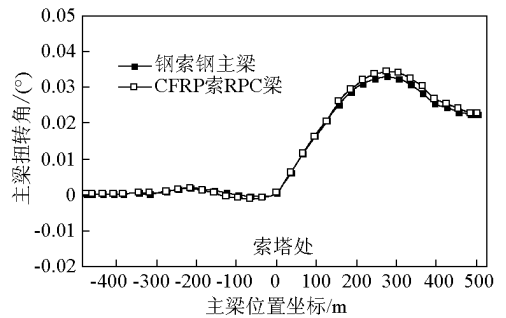


图 15 风荷载下主梁扭转角

Fig. 15 The torsion angle of the girder under wind load

索,考虑截面刚度、截面受力和局部稳定等要求设计了RPC主梁截面,形成了一种基于高性能材料的特大跨径混凝土斜拉桥结构体系,采用有限元法对原方案和新方案斜拉桥的静力特性、动力特性、稳定性及抗风性能等进行了分析与比较,得到如下结论。

1) 超大跨度斜拉桥主梁和拉索采用新材料后,静力性能均能满足规范要求,而且在某些方面主梁受力性能更优于钢斜拉桥。

2) 两种斜拉桥结构体系模态响应相差不大,新方案基频较原方案有所增大。

3) 采用弹性稳定分析方法分析两种斜拉桥结构体系的稳定性能,特大跨径斜拉桥拉索和主梁采用新材料后,稳定系数有所提高。

4) 特大跨度CFRP索、RPC主梁斜拉桥静风荷载效应较小,能满足抗风要求。

综上所述,从力学性能角度而言,采用RPC主梁、CFRP拉索所构成的超大跨度混凝土斜拉桥结构体系具有良好的结构受力性能,具备实际应用的可行性。

参考文献

- [1] Richard P, Cheyetez M. Reactive powder concrete with high ductility and 200 ~ 800 MPa compressive strength [J]. ACI SP144, 1997 (3) :507 - 518.
- [2] Konno S, Noro T, Yamazaki S, et al. Material properties of carbon fiber cables for cable supported bridges [J]. Bridge and Foundation Engineering, 1999, 99(9) :29 - 32.
- [3] Fang Z, Fan F H. Behaviors of super long-span cable-stayed bridge with ultra high performance concrete (UHPC) girder [C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts (ISSEYE - 10). Beijing: Science Press, 2008 : 1717 - 1721.
- [4] 方志, 杨剑. FRP 和 RPC 在土木工程中的研究及应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4) :54 - 61.
- [5] 苟昌焕, 谢旭, 高金盛, 等. 应用碳纤维索的大跨度斜拉桥静力学特性分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2005, 39(1) : 137 - 142.
- [6] 梅葵花, 吕志涛. CFRP 在超大跨悬索桥和斜拉桥中的应用前景 [J]. 桥梁建设, 2002, 16(2) :75 - 78.
- [7] 李晓莉. CFRP 材料在超大跨度斜拉桥拉索中的应用研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2) : 30 - 33.
- [8] 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 - 77.
- [9] 卢柯, 杨建龙, 丁望星. 荆岳长江公路大桥主桥主梁计算研究 [J]. 交通科技, 2009, 236(5) :7 - 9.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [12] 中华人民共和国交通部. JTG/T D65-01—2007 公路斜拉桥设计规范细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

Behaviors of super-long span prestressed cable-stayed bridge with CFRP cables and UHPC girder

Fang Zhi¹, Ren Liang^{1,2}, Fan Fenghong¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

[Abstract] To discuss the applicability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) cables and reactive powder concrete (RPC) in super-long span cable-stayed bridges, taking a 1 008 m cable-stayed bridge using steel girder and steel cables as example, a cable-stayed bridge with the same span using RPC (reactive powder concrete) as the girder and advanced composite material CFRP (carbon fiber reinforced polymer) as the cable was designed, in which the cable cross section was determined by the principles of equivalent cable strength and the beam cross section was determined considering the stiffness, shear capacity and local stability. Based on the method of finite element analysis, the comparative study of these two structures on their static properties, dynamic properties, stability and wind resistance were carried out. The results show that it is feasible for using RPC as the girder and CFRP as the cable so as to form a highly efficient, durable cable-stayed bridge of concrete structure and make its applicable span reach about 1 000 m long.

[Key words] cable-stayed bridge; CFRP; RPC; mechanical properties