

# CFRP与钢组合斜拉索斜拉桥方案研究

熊文<sup>1,2</sup>, 肖汝诚<sup>2</sup>

- (1. 东南大学 交通学院桥梁工程系 桥梁与隧道工程研究所, 210096 南京, wenwen0317@hotmail.com;
2. 同济大学 桥梁工程系, 200092 上海)

**摘要:** 针对现阶段斜拉索设计所面临的难题, 提出了一种新型的基于碳纤维增强塑料(CFRP)与钢组合斜拉索的斜拉桥方案. 该方案将 CFRP 斜拉索与传统钢斜拉索分别应用于斜拉桥恒载活载状态, 发挥 CFRP 材料高强轻质, 钢材料弹性模量大的优势而同时又弥补各自缺点. 介绍了该组合方案的设计方法和关键力学参数, 并利用参数分析给出推荐取值. 通过构造和全桥研究可以得出: 与全钢斜拉索斜拉桥相比, 该组合斜拉索斜拉桥垂度效应小, 自重轻; 而与全 CFRP 斜拉索斜拉桥相比, 其整体刚度大, 价格便宜. 从理论上证明了这种组合斜拉索的力学优势和替代传统钢斜拉索或全 CFRP 斜拉索应用在斜拉桥上的可行性.

**关键词:** 斜拉桥; 组合斜拉索; CFRP 斜拉索; 设计方法; 可行性研究

中图分类号: U448.27 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2011)04-0120-06

## Cable-stayed bridges with CFRP and steel composite stay cables

XIONG Wen<sup>1,2</sup>, XIAO Ru-cheng<sup>2</sup>

- (1. Department of Bridge Engineering, Transportation College, Southeast University, 210096 Nanjing, China, wenwen0317@hotmail.com;
2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China)

**Abstract:** To solve current design problems of long-span stay cables, this paper proposed a new design of cable-stayed bridges with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and steel composite stay cables. In this design, the CFRP stay cables with high strength-to-weight ratio are applied in the dead load condition, where the high strength of stay cables is needed; while the steel stay cables with high stiffness and low cost are applied in the live load condition, where the stiffness of entire bridge is concerned. The design strategies and key design parameters for the proposed cable-stayed bridges were determined and the appropriate values of key design parameters were also suggested based on a parametric study. By comparing, it can be concluded that the proposed composite cable-stayed bridges have less cable sag and lower self-weight than cable-stayed bridges with steel stay cables and meanwhile have more stiffness and lower cost than those with CFRP stay cables. It is proved in this study that the use of CFRP and steel composite stay cables in cable-stayed bridges is feasible and the proposed composite cable-stayed bridges could become an excellent alternative to cable-stayed bridges with steel or CFRP stay cables.

**Key words:** cable-stayed bridges; composite stay cables; CFRP stay cables; design strategy; feasibility study

近几年随着桥梁跨越海峡的需求, 其跨度不断增大, 而深水中悬索桥锚碇难以施工, 大跨度斜拉桥便成为此环境中普遍接受的优选方案. 但是钢斜拉索自重大, 垂度效应明显, 承载效率低的缺

点却制约了斜拉桥跨径的进一步发展<sup>[1-4]</sup>.

碳纤维增强塑料(CFRP)材料具有轻质高强耐腐蚀的特点, 在土木工程中常应用于预应力构件以及结构加固<sup>[5]</sup>. 近几年 MEIER<sup>[6]</sup>、NOIS-TERNIG<sup>[7]</sup>及梅葵花等<sup>[8]</sup>学者提出 CFRP 斜拉索构想以取代传统钢斜拉索, 并设计建造了 CFRP 斜拉索实验桥, 也基本解决了 CFRP 斜拉索锚固困难的施工问题. 但是 CFRP 材料较低的弹性模量

收稿日期: 2009-12-06.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2006AA11Z120).

作者简介: 熊文(1982—), 男, 博士;

肖汝诚(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

导致斜拉桥整体刚度较低,且价格高经济性能差也是其不能广泛应用的重要原因之一<sup>[8]</sup>。

针对这些问题本文提出了一种新型斜拉桥组合方案,基于CFRP与钢组合斜拉索的斜拉桥方案。该方案将CFRP斜拉索与传统钢斜拉索组合应用于不同斜拉桥荷载状态,将各自优势充分发挥并弥补对方缺点。具体来说,将CFRP斜拉索在荷载较大的斜拉桥恒载状态<sup>[2]</sup>安装张拉,发挥其高强轻质的特点;而将钢斜拉索在整体刚度要求较高的斜拉桥活载状态<sup>[2]</sup>安装张拉,发挥其刚度大的特点,并降低斜拉索整体造价。另外由于2种斜拉索分别承载不同荷载,如需要对钢斜拉索进行换索,只需撤出活载即中断交通即可。

文章详细介绍了基于CFRP与钢组合斜拉索斜拉桥的设计方法,并通过参数分析对关键设计参数给出建议取值。从构件角度对该组合斜拉索方案进行研究,并从强度,刚度,几何特性,材料重量以及经济性能等参数与其他传统方案进行对比。通过一座1400 m主跨的基于该组合方案的斜拉桥试设计,从桥梁整体受力方面与传统方案进行对比。研究表明基于CFRP与钢组合斜拉索的斜拉桥方案相对于传统斜拉桥方案具有力学和经济上优势,并从理论上证明了这种新型CFRP与钢组合斜拉索替代传统钢斜拉索或全CFRP斜拉索的可行性。

## 1 CFRP与钢组合斜拉索构件

### 1.1 设计思路

按照组合斜拉索分别载荷的原则,CFRP斜拉索高强轻质,应用于设计荷载大,对承载能力要

求较高的斜拉桥恒载状态;虽然弹性模量较低,但该状态几乎对斜拉索刚度没有要求<sup>[2]</sup>。而斜拉桥活载状态主要承受汽车作用,荷载效应相对于恒载较小,约占25%<sup>[9-10]</sup>;但该状态对斜拉桥整体刚度要求较高,主梁不能有较大竖向变形,所以选择弹性模量较大且价格便宜的钢斜拉索来承担这部分活载。

由于CFRP与钢组合斜拉索分别在不同荷载状态下受力,所以需要CFRP斜拉索与钢斜拉索分别进行设计。具体来说,CFRP斜拉索承受所有恒载包括二期荷载,其索力可以按照普通恒载索力优化方法确定,然后截面面积按强度控制得到,即

$$A_{\text{CFRP}} = F_{\text{CFRP}} / [\sigma] \quad (1)$$

式中: $A_{\text{CFRP}}$ 为CFRP斜拉索截面面积; $F_{\text{CFRP}}$ 为CFRP斜拉索设计索力; $[\sigma]$ 为允许应力。

钢斜拉索在运营前安装张拉以承担活载,按前文所述其截面面积应为刚度控制,将在下节中采用参数分析确定。钢斜拉索的张拉力可按如下确定,即该张拉力用来调整CFRP斜拉索与钢斜拉索之间的索力分配,使张拉钢斜拉索之后CFRP斜拉索部分索力转移至钢斜拉索,进而活载状态CFRP斜拉索索力依然保持与恒载状态相等,即钢斜拉索承担所有活载,理论上实现两种斜拉索分别承担恒载和活载的目的。这一设计目的实现方法将在1.2节参数分析步骤中详细解释。需要说明的是活载状态是一个范围,在实际应用中可以取其一个代表值进行设计。该CFRP与钢组合斜拉索安装张拉流程见图1。

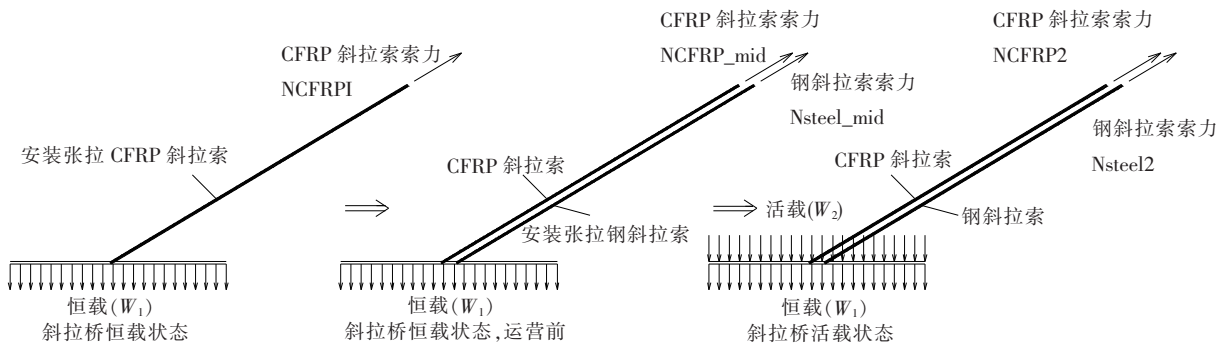


图1 CFRP与钢组合斜拉索安装张拉流程

### 1.2 关键设计参数

由前一节可知钢斜拉索设计按刚度控制,且对张拉力有特殊要求,所以文章将钢斜拉索截面面积 $A_{\text{steel}}$ 以及张拉力 $F_{\text{steel}}$ 定为该CFRP与钢组合斜拉索或基于该组合斜拉索斜拉桥的关键设计参数。文章将采用ANSYS有限元程序对基于该组合方案的4组典型斜拉索进行参数分析,依据分析

结果推荐关键设计参数合理取值。研究对象(斜拉索A~D)几何参数<sup>[11]</sup>如图2所示,CFRP与钢材材料属性以及设计荷载<sup>[11]</sup>见表1。参数分析中令 $A_{\text{steel}}$ 在5% $A_{\text{CFRP}} \sim 100\% A_{\text{CFRP}}$ 之间变化,研究其对斜拉索刚度的影响并综合考虑其他力学因素,具体过程如下(步骤3保证了CFRP斜拉索承担恒载钢斜拉索承担活载的设计目的)。

1) 建立 2 个索单元, 分别模拟 CFRP 和钢斜拉索, 并“杀死”(命令: EKILL) 钢斜拉索单元;

2) 施加恒载, 通过 ANSYS 迭代功能得到 CFRP 斜拉索合理索力  $F_{CFRP}$ , 即索梁相交节点位移为零, 按式(1)得到  $A_{CFRP}$ ;

3) 激活(命令: EALIVE) 钢斜拉索,  $A_{steel}$  在  $5\% A_{CFRP} \sim 100\% A_{CFRP}$  之间变化, 通过 ANSYS 迭代功能迭代钢斜拉索索力至设计索力  $F_{steel}$ , 使张拉钢斜拉索之后 CFRP 斜拉索部分索力转移至钢斜拉索, 保证活载状态下 CFRP 斜拉索索力与恒载状态相同, 即模拟全部恒载 CFRP 斜拉索承担,

全部活载由钢斜拉索承担;

4) 施加活载, 模拟活载状态, 研究该状态  $A_{steel}$  对斜拉索力学特性的影响.

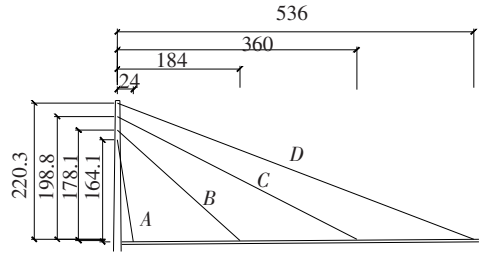


图 2 研究对象斜拉索几何参数 (m)

表 1 CFRP 与钢材料属性及荷载

类型	弹性模量/ ( $N \cdot m^{-2}$ )	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	允许应力 <sup>[10]</sup> / Pa	安全系数 <sup>[10]</sup>	单价 <sup>[8]</sup> / (美元 $\cdot kg^{-1}$ )	恒载(包括二期)/ N	活载(25% 恒载)/ N
钢斜拉索	2.00E+11	7.85E+03	6.68E+08	2.5	2.857	4 667 189.24	1 166 797.31
CFRP 斜拉索	1.37E+11	1.60E+03	1.02E+09	2.5	77.135	4 667 189.24	1 166 797.31

### 1.2.1 钢斜拉索张拉力确定方法

以斜拉索 B 为例, 按照上面介绍的方法, 设计参数计算结果如表 2 所示.

表 2 设计参数计算值

类型	截面面积/ $m^2$	恒载设计索力/N	活载索力/N
CFRP 斜拉索	4.636E-03	4 717 732	4 718 298 ~ 4 722 243
钢 斜拉索	2.318E-03 ~ 4.636E-03	0	1 178 859 ~ 1 178 981

通过比较, 恒载与活载状态 CFRP 斜拉索索力非常相近, 说明已达到该组合斜拉索的设计要求, 此时  $F_{steel}$  值即为推荐钢斜拉索合理张拉力.

### 1.2.2 钢斜拉索截面面积(刚度)确定方法

不同  $A_{steel}$  设计时, 钢斜拉索刚度及承载效率变化情况如图 3 所示.

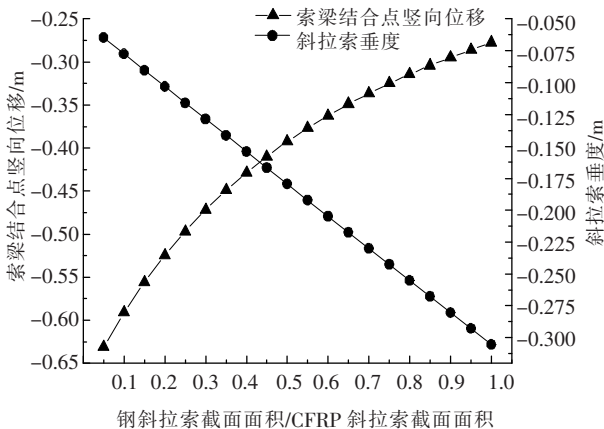


图 3 参数分析结果

由图 3 可知随着  $A_{steel}$  增大, 索梁结合点竖向位移逐渐变小, 即斜拉索刚度逐渐增大; 而同时斜拉索垂度变大, 即斜拉索承载效率降低. 也就是说  $A_{steel}$  的增大会导致两种斜拉索关键力学性能向 2 个不同方向(优和劣)发展. 为兼顾两者, 使 2 种力学性能达到平衡, 文章取 2 条曲线交会处, 即  $A_{steel} = 50\% A_{CFRP}$  作为关键参数  $A_{steel}$  的推荐设计, 此时钢斜拉索的工作应力为 506 MPa, 很接近其允许应力, 材料强度充分达到发挥. 分析斜拉索 A, C, D 可得到完全相同结论.

依照关键设计参数推荐设计, 表 3 列出了斜拉索 A ~ D 的设计截面面积, 并同时列出等荷载作用下对斜拉索 A ~ D 进行全 CFRP, 全钢斜拉索设计的结果, 作为下节中对比分析的对比对象.

### 1.3 对比分析

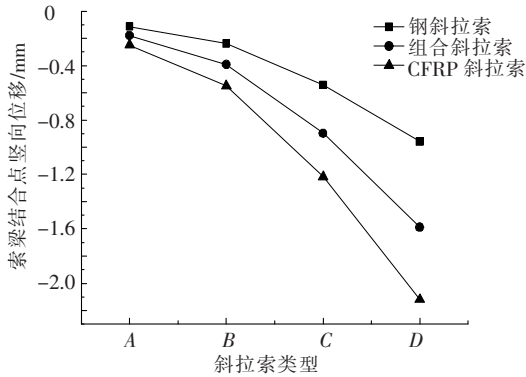
将活载状态该组合斜拉索关键性能与全 CFRP、全钢斜拉索设计对比, 结果见图 4. 与全钢斜拉索相比, 组合斜拉索垂度效应小, 自重轻; 而与全 CFRP 斜拉索相比, 其刚度大, 价格便宜. 这些优势使组合斜拉索具备替代全钢或全 CFRP 斜拉索在斜拉桥中应用的可行性. 需要说明的是, 使用 CFRP 斜拉索虽然可能造成锚具价格的上升但其轻质的特点会减小其他构件的造价.

## 2 CFRP 与钢组合索斜拉桥

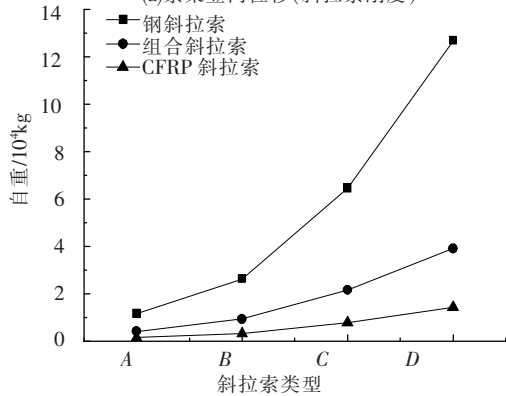
按照提出的 CFRP 与钢组合斜拉索的设计方法, 试设计一座 1 400 m 主跨斜拉桥, 并将该设计与全 CFRP、全钢斜拉索斜拉桥设计进行对比.

表3 设计截面面积

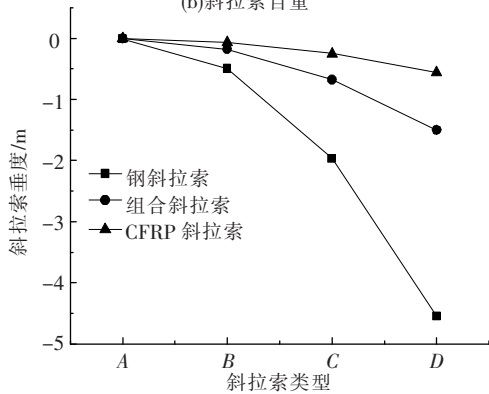
类型	全钢斜拉索截面面积/m <sup>2</sup>	组合斜拉索截面面积/m <sup>2</sup>		全CFRP截面面积/m <sup>2</sup>
		CFRP	钢	
A	9.000E-03	4.636E-03	2.318E-03	5.795E-03
B	1.311E-02	6.616E-03	3.308E-03	8.271E-03
C	2.003E-02	9.563E-03	4.782E-03	1.199E-02
D	2.787E-02	1.223E-02	6.117E-03	1.541E-02



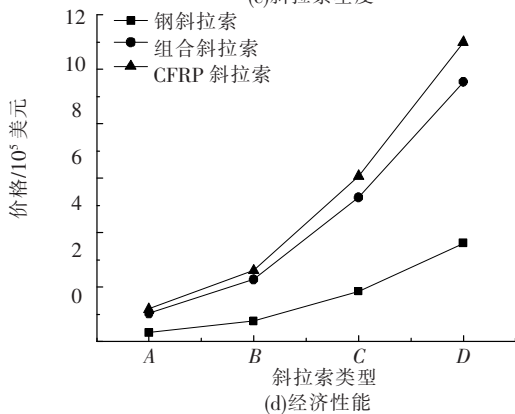
(a)索梁竖向位移(斜拉索刚度)



(b)斜拉索自重



(c)斜拉索垂度



(d)经济性

图4 斜拉索性能比较

### 2.1 组合斜拉索斜拉桥设计

试设计斜拉桥跨径组合为 636 + 1 400 + 636 = 2 672 m,边中跨比为 0.454,边跨设置 3 个辅助墩(图 5(a)).主梁采用扁平钢箱梁,梁高 4.5 m,主梁跨高比为 311;箱梁全宽 41 m(含风嘴),宽高比为 9.1,跨宽比为 34.1,截面特性沿桥轴向变化,分截面 I、II、III 以及 IV,位置标注见图 5(a),具体数值见表 4.桥塔采用“A”型全混凝土桥塔,在锚索区下端设置上横梁,在主梁处设置下横梁.塔全高为 357 m,桥面以上 287 m,高跨比为 0.205,锚索区高度为 74 m(37 × 2 m).桥塔截面尺寸为:纵向宽 11.0 ~ 20.0 m,塔柱顶部结合区(高 15 m)侧向宽 9.0 ~ 11.52 m,分支部分侧向宽度 4.5 ~ 10.0 m;塔柱壁厚 1.0 ~ 1.5 m.斜拉索共 38 × 4 × 2 = 304 根,单索最大长度约 750 m.整个斜拉桥为漂浮体系,活载按双向 8 车道考虑.

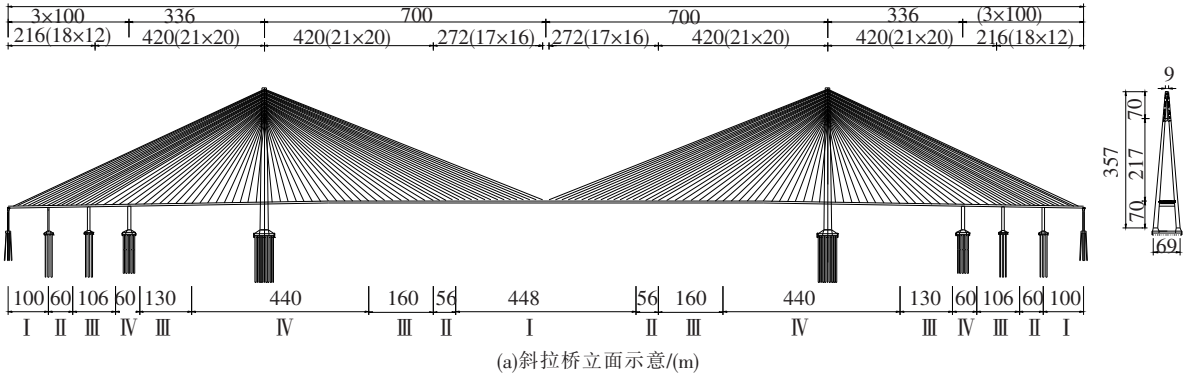
该斜拉桥斜拉索按 CFRP 与钢组合斜拉索进行设计,截面面积如图 5(d) 所示,按前文分析,钢斜拉索面积取 CFRP 斜拉索 50%.CFRP 斜拉索与钢斜拉索张拉力以及不同荷载状态时的索力如图 5(b),(c) 所示,可以看出恒载和活载状态 CFRP 斜拉索索力几乎一样且等于其合理索力,即达到 CFRP 斜拉索只承担恒载的设计目的,既而全部活载由钢斜拉索承担.由图 5(e) 可以看出大部分钢斜拉索工作应力小于允许应力,超出部分经过调整应很容易满足强度要求.CFRP 斜拉索面积由强度控制而定,所以工作应力小于允许应力.

### 2.2 对比分析

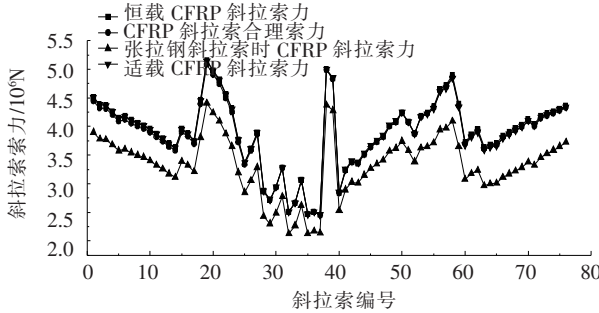
同时按相同条件进行全 CFRP、全钢斜拉索斜拉桥设计,并与 CFRP 与钢组合斜拉索斜拉桥设计进行对比.表 5 列出 3 种斜拉索自重以及造价,可以得出组合斜拉索斜拉桥的斜拉索自重比全钢设计低 175%,而造价比全 CFRP 设计低 15%;斜拉索自重的显著降低可大幅度减小其他部分构件的用料.

由于 3 种设计可用同一合理恒载索力(主梁、主塔、自重荷载、外部约束设计均相同),所以他们的合理恒载状态应该相同,不再列出.斜拉索不同设计对整桥活载状态影响较大,按满跨均布荷载形式布置活载,3 种设计的活载状态见图 6.

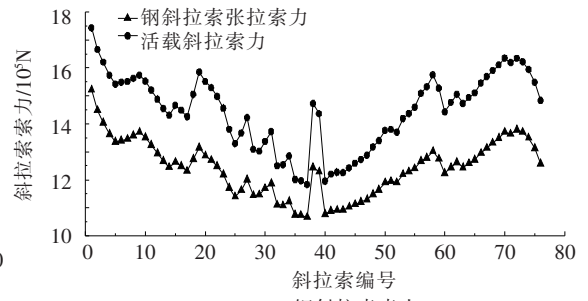
2 627



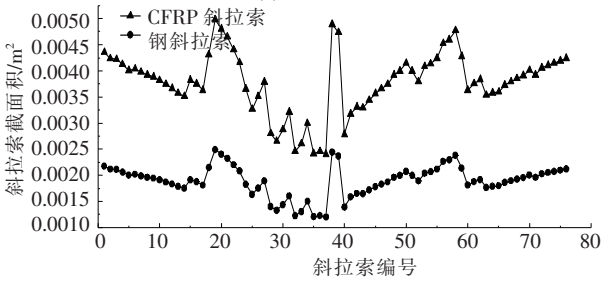
(a)斜拉桥立面示意/(m)



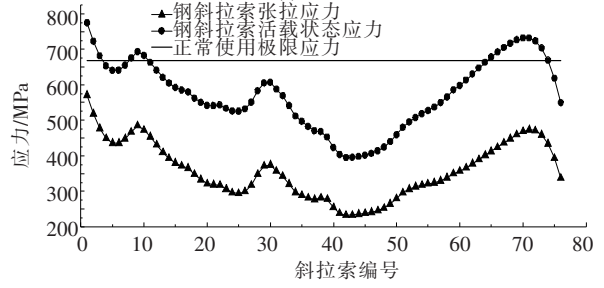
(b)CFRP 斜拉索索力



(c)钢斜拉索索力



(d)斜拉索截面面积



(e)斜拉索工作应力

图 5 CFRP 与钢组合斜拉索斜拉桥设计

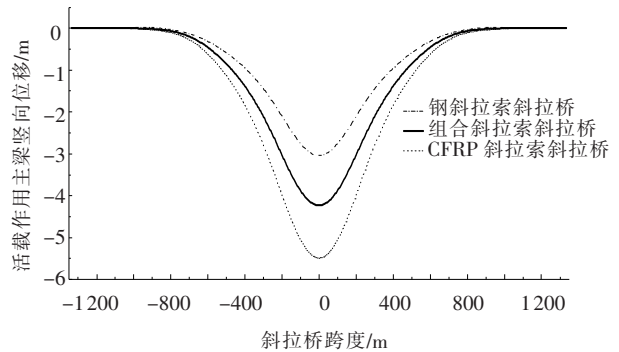
表 4 截面特性

类型	面积/m <sup>2</sup>	面内抗弯惯矩 $I_{y'}/m^4$	面外抗弯惯矩 $I_{z'}/m^4$	抗扭惯矩 $J/m^4$
I	1.688	5.861	235.418	20.076
II	2.016	7.078	281.029	24.361
III	2.360	8.308	332.812	28.793
IV	2.947	10.433	417.841	36.327

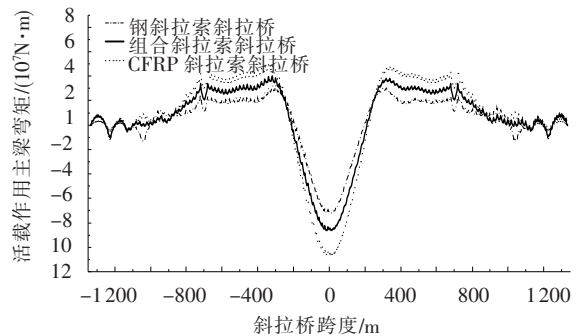
表 5 斜拉索自重造价比较

类型	自重/kg	造价/美元
钢斜拉索	2.035E+06	5.815E+06
组合斜拉索	7.411E+05	1.806E+07
CFRP 斜拉索	2.692E+05	2.076E+07

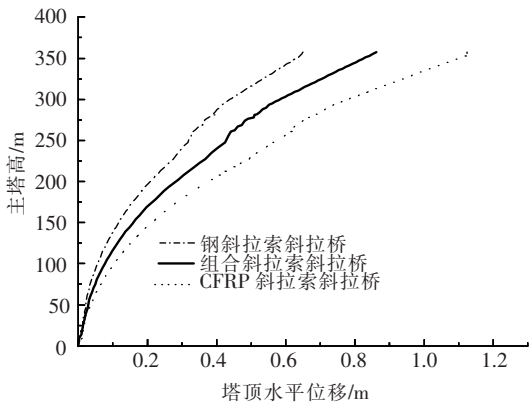
由图 6(a), (b)可以看出在活载作用下,组合斜拉索斜拉桥主梁竖向位移以及弯矩,即整体刚度处于全 CFRP、全钢斜拉索斜拉桥之间.图 6(c)与(d)反映了不同斜拉索设计对主塔刚度的影响,可以看出组合斜拉索的影响依然介于其他 2 种设计之间.即 CFRP 与钢组合斜拉索斜拉桥



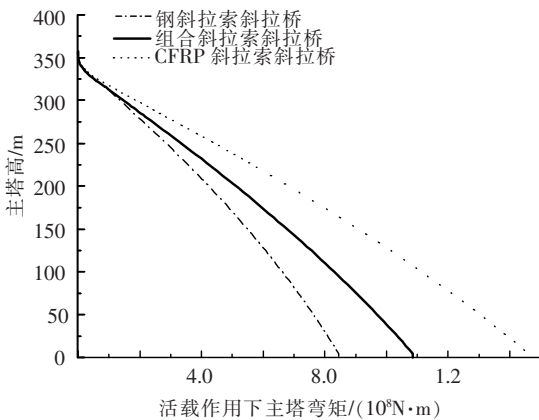
(a)活载作用主梁竖向位移



(b)活载作用主梁弯矩



(c)活载作用下主塔水平位移



(d)活载作用下主塔弯矩

图6 活载状态对比分析

设计在活载状态下可以大大弥补与全钢斜拉索相比全CFRP斜拉索刚度不足的劣势。

通过比较证明了CFRP与钢组合斜拉索斜拉桥方案的优势以及可行性。

### 3 结论

1)与全钢斜拉索斜拉桥相比,CFRP与钢组合斜拉索斜拉桥垂度效应小,自重轻,可适量减小索以外构件的用料。

2)与全CFRP斜拉索斜拉桥相比,CFRP与钢组合斜拉索斜拉桥整体刚度大,价格便宜。

3)通过试设计证明这种新型CFRP与钢组合斜拉索斜拉桥达到预期设计目的,并具有替代传统钢斜拉索或全CFRP斜拉索斜拉桥的可行性。

### 参考文献:

- [1] NAGAI M, FUJINO Y, YAMAGUCHI H, *et al.* Feasibility of a 1,400 m span steel cable-stayed bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9(5): 444-452.
- [2] GIMSIN N J. Cable-supported bridges [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1997: 1-20.
- [3] JAYARAMAN H B, KNUDSON W C. A curved element for the analysis of cable structures [J]. *Computers & Structures*, 1981, 14(3/4): 325-333.
- [4] 苗家武. 超大跨度斜拉桥设计理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [5] NOISTERNIG J F, JUNGWIRTH D. CFRP-tendons for structural application-requirements and developments [C]//2nd International Conference ICCI. Tucson, Arizona: [s. n.], 1998: 115-127.
- [6] MEIER U. Proposal for a carbon fibre reinforced composite bridge across the strait of gibraltar at its narrowest site [J]. *Proc Inst Mech Eng*, 1987, 201(B2): 73-78.
- [7] NOISTERNIG J F. Carbon fibre composites as stay cables for bridges [J]. *Applied Composite Materials*, 2000, 7: 139-150.
- [8] 梅葵花. CFRP拉索斜拉桥的研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [9] 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): 13-120.
- [10] 张治成, 谢旭, 张鹤. 大跨度斜拉桥钢和碳纤维拉索设计安全系数[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2007, 41(9): 1443-1449.
- [11] 王强. 苏通大桥主桥施工控制方法介绍和研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

(编辑 赵丽莹)