

基于刚度及经济的 CFRP 与钢组合拉索设计理论

熊文^{1,2}, 肖汝诚¹, C. S. Cai^{2,3}

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 路易斯安那州立大学 土木与环境工程系, 巴吞鲁日 70803;
3. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 基于钢斜拉索、碳纤维增强塑料(CFRP)斜拉索适用跨径研究结果, 针对 1 400~2 800 m 主跨斜拉桥整体刚度不足提出一种新型结构方案, 即基于刚度及经济性能的 CFRP 与钢组合拉索方案. 该方案将 CFRP 斜拉索与传统钢斜拉索同时应用于斜拉桥中, 将 2 种材料高强轻质及弹性模量高的优点进行组合, 以充分提高斜拉索的等效刚度, 进而提高斜拉桥的整体刚度. 详细介绍该组合方案设计思路与方法, 通过比较等效刚度以及经济性能给出 2 种材料斜拉索推荐组合比例. 最后, 通过一座 1 400 m 主跨 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥试设计说明该方案相对传统方案整体刚度上的优势, 证明其工程应用的可行性, 是主跨为 1 400~2 800 m 斜拉桥的优选方案之一.

关键词: 组合拉索; 碳纤维增强塑料(CFRP)斜拉索; 刚度; 经济性能; 斜拉桥; 可行性研究

中图分类号: U 448.27

文献标识码: A

Design of CFRP and Steel Composite Stay Cables Based on Stiffness and Economic Behavior

XIONG Wen^{1,2}, XIAO Rucheng¹, C. S. Cai^{2,3}

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: Based on the study of appropriate spans for using steel or carbon fiber reinforced polymer (CFRP) stay cables, this paper proposes a new design of CFRP and steel composite stay cables to deal with the drawback of low stiffness, especially for the cable-stayed bridges with main spans of 1 400~2 800 m. More specifically, the CFRP stay cables with

high strength-to-weight ratio and steel stay cables with high elastic modulus are combined together for application in cable stayed bridges, which can increase the equivalent stiffness of stay cables and then improve the entire stiffness of bridges. The design strategies for the composite cable-stayed bridges are proposed in detail. Then through a parametric study concerning the equivalent stiffness and economical behavior, the proper area ratio between CFRP and steel stay cables are also proposed. Finally, the feasibility of the proposed stay cables is discussed through a case study of a cable stayed bridge with 1 400 m main span. The proposed composite stay cables demonstrate a high equivalent stiffness, which is an excellent selection for bridges with main spans of 1 400~2 800 m.

Key words: composite stay cables; carbon fiber reinforced polymer (CFRP) stay cables; stiffness; economical behavior; cable-stayed bridges; feasibility study

超长钢斜拉索自重大、垂度效应明显、承载效率低、等效弹性模量小, 制约了斜拉桥跨径的进一步发展^[1-4]. 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或结构加固^[5-6]. 近几年有学者提出 CFRP 斜拉索构想, 以取代传统钢斜拉索^[7-9], 并设计建造了 CFRP 斜拉索实验桥^[10]. 但一般认为, 由于 CFRP 材料较低的弹性模量, CFRP 斜拉索必须达到相当长度后, 相比钢斜拉索才能显示出等效刚度上的绝对优势, 其次 CFRP 材料价格昂贵也使其不宜应用于常规跨径斜拉索中^[10].

1 400~2 800 m 主跨斜拉桥是近期研究热点, 无论钢斜拉索方案或 CFRP 斜拉索方案均已存在研

收稿日期: 2009-09-28

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA11Z120)

第一作者: 熊文(1982—), 男, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构体系、构造及设计理论, 桥梁结构健康监测, 新材料工程应用.
E-mail: wenwen0317@hotmail.com

通讯作者: 肖汝诚(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构设计理论、计算理论以及桥梁结构体系.
E-mail: xiaorc@tongji.edu.cn

究成果^[3,10].但上述成果同时表明,在该跨度内仍使用钢斜拉索已显现出不少缺点;而 CFRP 斜拉索似乎还未达到充分发挥其优势(等效刚度大)的应用跨度,力学性能提高不显著,造价却大幅度提高.

针对该问题,笔者在斜拉桥主跨 1 400~2 800 m 内提出一种基于刚度及经济性能的新型斜拉索组合方案,即 CFRP 与钢组合拉索方案.该方案将 CFRP 斜拉索与传统钢斜拉索同时应用于斜拉桥中,将 2 种材料高强轻质及弹性模量高的优点进行组合,以充分提高斜拉索的等效刚度,进而提高斜拉桥的整体刚度.具体实施时,可分恒载及后期荷载工况分别张拉 2 种材料斜拉索,使 2 种材料斜拉索优势得到进一步充分发挥.

笔者首先采用参数分析从等效刚度角度推导出钢斜拉索与 CFRP 斜拉索各自适用跨径及极限跨径,进而提出 CFRP 与钢组合拉索方案,其适用跨径介于钢斜拉索与 CFRP 斜拉索之间.详细介绍该组合方案设计思路与方法,通过比较等效刚度以及经济性能给出 2 种材料斜拉索推荐组合比例,并给出建议张拉方案.最后,通过一座 1 400 m 主跨 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥试设计,说明该方案相对传统方案整体刚度上的优势,证明其工程应用的可行性,

是主跨为 1 400~2 800 m 斜拉桥的优选方案之一.

1 斜拉索等效刚度分析

斜拉索等效刚度是大跨度斜拉桥结构的重要参数之一,整桥刚度以及承载效率基本取决于斜拉索的等效刚度.采用参数分析研究钢、CFRP 斜拉索等效刚度 E_qA (其中 E_q 为等效弹性模量、 A 为截面面积)随跨径增大的变化规律,并以此给出各自适用跨径与极限跨径.

为使 2 种材料(钢与 CFRP)斜拉索适用跨径具有可比性,计算时采用相同的斜拉索安全系数(2.5).2 种斜拉索设计索力相等,工作应力达到各自材料的设计强度,并以此确定截面面积.

双塔三跨斜拉桥塔高与主跨之比宜取 0.20~0.25(塔高与半跨之比 0.40~0.50),外索的水平倾角一般不小于 22°,为不失一般性,2 种材料各取斜率分别为 0.3,0.4,0.5 的斜拉索为研究对象.计算模型设计参数见表 1.参数分析计算结果见图 1,由于计算结果非常接近,斜率为 0.3,0.4,0.5 的钢或 CFRP 斜拉索计算曲线几乎在图中显示为同一位置.

表 1 钢、CFRP 斜拉索计算模型参数^[10]

Tab.1 Parameter values for analysis of steel,CFRP stay cables^[10]

斜拉索	斜拉索斜率	水平投影长度/m	安全系数	设计索力/ 10 ⁶ N	设计强度/ 10 ⁸ Pa	截面面积/ 10 ⁻³ m ²	密度/ (10 ³ kg·m ⁻³)	弹性模量/ (10 ¹¹ N·m ⁻²)
钢	0.3,0.4,0.5	50~5 000	2.5	5.102	6.68	9.74	7.85	2.00
CFRP	0.3,0.4,0.5	50~30 000	2.5	5.102	10.20	6.38	1.60	1.37

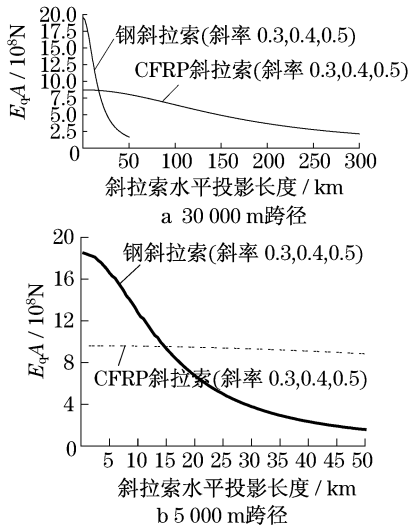


图 1 CFRP 斜拉索与钢斜拉索等效刚度比较
Fig.1 Comparison of equivalent stiffness between CFRP and steel stay cables

由图 1 可以看出,由于钢弹性模量比 CFRP 材料大,故斜拉索跨径较小时,钢斜拉索等效刚度大于 CFRP 斜拉索;但由于钢斜拉索自重较大,垂度效应明显,等效刚度会随跨径的增大而快速降低,再综合考虑斜拉索的承载效率,一般认为 700 m 为钢斜拉索适用跨径上限,计算得到此时等效刚度减小 28%、承载效率(索力竖向分力与索力之比)降低 20%、自重应力已经达到钢斜拉索允许应力的 15%(以斜拉索斜率 0.4 计算结果为例).

而当斜拉索跨径大于 1 400 m 时,钢斜拉索等效刚度已明显下降,CFRP 斜拉索等效刚度开始大幅度高于钢斜拉索,跨径 1 400 m 可认为是 CFRP 斜拉索适用跨径下限.由图 1a 知,当 CFRP 斜拉索跨径达到 5 000 m 时,此时等效刚度减小 20%,下降速度开始加快,承载效率降低 15%,自重应力已经达到

CFRP 斜拉索允许应力的 10% (以斜拉索斜率 0.4 计算结果为例), 可看作 CFRP 斜拉索适用跨径的上限. 即 CFRP 斜拉索适用跨径为 1 400~5 000 m.

另外, 钢斜拉索 5 000 m 而 CFRP 斜拉索 30 000 m 时几乎丧失全部等效刚度, 达到各自的理论极限跨径. 事实上, 笔者针对不同斜拉索索力, 对 3 500~6 500 kN 索力 (基本概括斜拉索索力可能的设计数值) 分别进行了相同分析, 亦得到相同结论.

按上述分析可得, 近期研究热点 1 400~2 800 m 主跨斜拉桥 (斜拉索水平投影长度为 700 m~1 400 m) 恰好介于 2 种材料斜拉索适用跨径之间. 在该跨径内, 钢斜拉索由于自重增大等效刚度大幅度降低已不再适合应用; 而 CFRP 斜拉索由于较低的弹性模量, 等效刚度在该跨径内还未高于钢斜拉索. 但需要注意的是, CFRP 斜拉索高强轻质却是提高其等效刚度的关键因素, 是跨径进一步增大时 CFRP 斜拉索等效刚度最终大于钢斜拉索的重要原因.

针对该问题, 笔者探讨将 2 种材料斜拉索以组合形式应用于该跨径内的组合结构方案, 以同时发挥钢斜拉索弹性模量高以及 CFRP 高强轻质的特点, 充分提高斜拉索等效刚度, 进而提高整桥刚度.

2 CFRP 与钢组合拉索设计思路

对单一材料斜拉索, 按强度设计斜拉索面积 (满足强度设计要求) 后, 提高斜拉索等效刚度的唯一途径就是放大斜拉索安全系数, 即增加截面面积, 但是该方法往往会同时增加自重, 一定范围内却降低等效刚度. 而对于组合拉索, 却可以使用一种材料斜拉索满足强度要求后通过组合另一种材料斜拉索来达到增大截面面积的目的, 进而通过增大弹性模量或减小自重的方法来更有效地提高斜拉索等效刚度. 从构造上来说, CFRP 与钢组合拉索仅需将 2 种不同材料斜拉索安装在斜拉桥的同一位置即可实现其构造组合, 具体形式详见下文; 同一位置不同材料斜拉索可各自锚固在主梁的不同梁高位置.

以设计斜率 0.4 水平投影长度 700 m 的斜拉索为研究对象 (考虑到实际设计需求, 暂取研究跨径的下限进行研究, 设计索力与第 1 节相同), 采用参数分析对这 4 种提高斜拉索等效刚度的方案进行对比分析, 并给出推荐组合方式. 方案 1 为钢斜拉索, 方案 2 为 CFRP 斜拉索, 方案 3 为钢斜拉索组合 CFRP 斜拉索, 方案 4 为 CFRP 斜拉索组合钢斜拉索, 其

中, 方案 1 与方案 3 满足强度设计的钢斜拉索面积为 0.010 m^2 ; 方案 2 与方案 4 满足强度设计的 CFRP 斜拉索面积为 0.006 m^2 . 4 种比较方案具体见表 2.

表 2 方案描述

Tab.2 Proposals of stay cables

方案	增大截面面积/ m^2	面积增量
1	0.010~0.050	0.04
2	0.006~0.046	0.04
3	0.001(钢)	0(钢), 0~0.04(CFRP)
4	0.006(CFRP)	0(CFRP), 0~0.04(钢)

方案 1 与方案 3 在相同钢斜拉索截面面积基础上增大截面面积, 而方案 2 与方案 4 在相同 CFRP 斜拉索截面面积基础上增大截面面积, 故在方案 1 与方案 3、方案 2 与方案 4 之间进行对比. 4 种方案随面积增大斜拉索等效刚度变化情况见图 2.

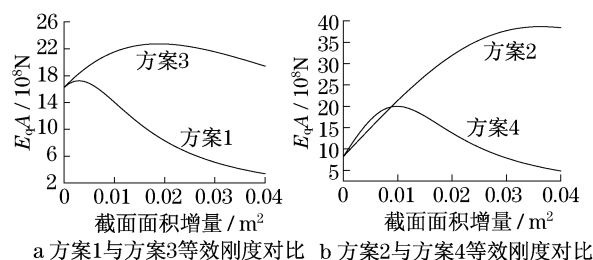


图 2 斜拉索等效刚度比较

Fig.2 Comparison for equivalent stiffness

由图 2 得, 方案 3 增加斜拉索等效刚度的效果比方案 1 明显, 且最大等效刚度在面积增量在 $0.010 \sim 0.025$ 时达到; 而当截面面积增量小于 0.100 时, 方案 4 斜拉索等效刚度大于方案 2; 当截面面积增量大于 0.100 时, 方案 2 斜拉索等效刚度大于方案 4.

由于现阶段 CFRP 材料价格昂贵, 所以有必要对组合拉索的经济性能进行研究. 同时 CFRP 材料价格也会随材料科学的发展而不断降低, 故研究经济性时还需考虑到价格的时变性. 按 CFRP 材料与钢材料价格比等于 27:1 (现状)^[10], 20:1, 15:1, 10:1, 8:1, 5:1, 2:1, 1:1 八种情况对 4 种方案单位价格等效刚度进行了对比分析, 分析结果见图 3.

由图 3 知, 不同价格比下, 当截面面积增量小于交叉点时, 方案 1 单位价格等效刚度大, 即方案 1 优于方案 3; 大于交叉点时, 方案 3 优于方案 1. 且随着价格比不断降低, 交叉点数值也逐渐减小 (见表 3). 当价格比降至 5:1 及以下时, 交叉点已不存在, 此时方案 3 远远优于方案 1.

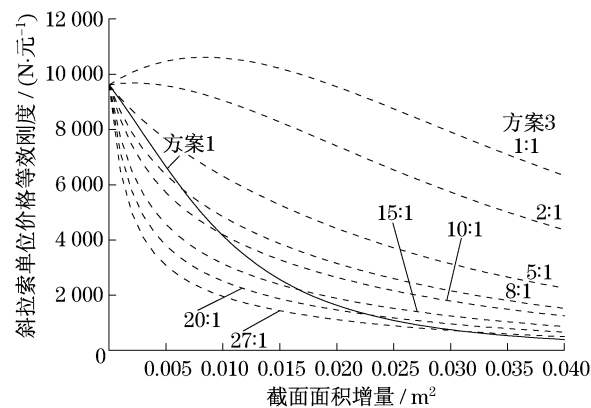


图 3 方案 1 与方案 3 单位价格等效刚度对比
Fig.3 Comparison for stiffness-cost ratios between Plan 1 and Plan 3

表 3 方案 1 与方案 3 单位价格等效刚度对比
Tab.3 Comparison for stiffness-cost ratios between Plan 1 and Plan 3

价格比	交叉点	价格比	交叉点	价格比	交叉点
27 : 1	0.032	10 : 1	0.011	2 : 1	
20 : 1	0.022	8 : 1	0.007	1 : 1	
15 : 1	0.016	5 : 1			

图 4 中关键点 A 代表单位价格等效刚度最大,截面面积增量小于关键点 B 时,表明方案 4 单位价格等效刚度大,即方案 4 优于方案 2;而大于关键点 B 时,方案 2 优于方案 4. 这 2 个关键点均随着价格比减小而变小(见表 4). 当价格比下降至 2 : 1 及以下时,该关键点已不存在,方案 1 远优于方案 2.

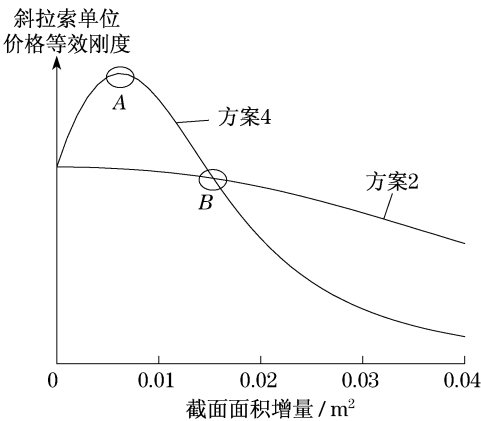


图 4 方案 2 与方案 4 单位价格等效刚度对比
Fig.4 Comparison for stiffness-cost ratios between Plan 2 and Plan 4

表 4 方案 2 与方案 4 单位价格等效刚度对比
Tab.4 Comparison for stiffness-cost ratios between Plan 2 and Plan 4

价格比	关键点 A	关键点 B	价格比	关键点 A	关键点 B
27 : 1	0.008 0	0.022 5	8 : 1	0.006 0	0.013 5
20 : 1	0.007 5	0.020 0	5 : 1	0.005 0	0.009 0
15 : 1	0.007 0	0.017 5	2 : 1		
10 : 0	0.006 5	0.015 0	1 : 1		

综合以上分析结果,当组合方案中等效刚度以及单位价格等效刚度均大幅度优于对比方案时,确定为本例中的合理组合方式,如表 5 所示. 其中, A_{steel} , A_{CFRP} 分别表示为钢和 CFRP 的截面面积.

表 5 合理组合方式

Tab.5 Appropriate composite methods

价格比	方案 3 最优组合			方案 4 最优组合		
	$A_{\text{steel}}/\text{m}^{-2}$	$A_{\text{CFRP}}/\text{m}^{-2}$	$A_{\text{CFRP}}/A_{\text{steel}}$	$A_{\text{CFRP}}/\text{m}^{-2}$	$A_{\text{steel}}/\text{m}^{-2}$	$A_{\text{CFRP}}/A_{\text{steel}}$
27 : 1	0.010 0	0.032 0	3.20 : 1.00	0.006 0	0.008 0	0.75 : 1.00
20 : 1	0.010 0	0.022 0	2.20 : 1.00	0.006 0	0.007 5	0.80 : 1.00
15 : 1	0.010 0	0.016 0	1.60 : 1.00	0.006 0	0.007 0	0.86 : 1.00
10 : 1	0.010 0	0.011 0	1.10 : 1.00	0.006 0	0.006 5	0.90 : 1.00
8 : 1	0.010 0	0.007 0	0.70 : 1.00	0.006 0	0.006 0	1.00 : 1.00
5 : 1	0.010 0	任意		0.006 0	0.005 0	1.20 : 1.00
2 : 1	0.010 0	任意		0.006 0		
1 : 1	0.010 0	任意		0.006 0		

由表 5 可知,随 CFRP 材料价格降低,最优组合方案所对应的面积增加量不断减小. 具体应用时,2 种材料的面积比可根据实际情况参考表 5 选取.

另外,笔者还分别对 400 m 与 1 200 m 跨径的斜拉索进行了相同分析. 可以得出,斜拉索跨径减小会使 2 种组合方案最优组合所对应的面积增量略有

增大,方案 1 等效刚度在面积增量较小时反而略优于方案 3,而方案 4 优于方案 2 的面积范围却逐渐扩大,这说明此跨径钢斜拉索由于自重引起的等效刚度降低有所减弱;相反,斜拉索跨径增大会使 2 种组合方案最优组合所对应的面积增量略有减小,CFRP 斜拉索在等效刚度方面的优势愈显明显. 当按不同

斜拉索索力进行相同分析时亦可得出类似结论。

需要说明的是,组合方案3与方案4是针对1 400~2 800 m主跨斜拉桥(斜拉索水平投影长度为700 m~1 400 m)的2种相对于不同对象(单一材料钢斜拉索或CFRP斜拉索)的优选方案,但实质均是以组合2种材料优势来充分提高斜拉索等效刚度.若将4种方案等效刚度绘于同一张图中(见图5),可见组合方案中方案3的等效刚度更大些,笔者推荐按方案3的思路进行组合拉索设计。

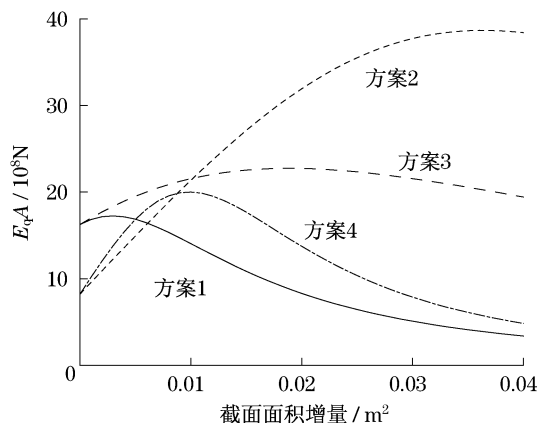


图5 4种方案等效刚度比较

Fig.5 Comparison for equivalent stiffness of four proposals

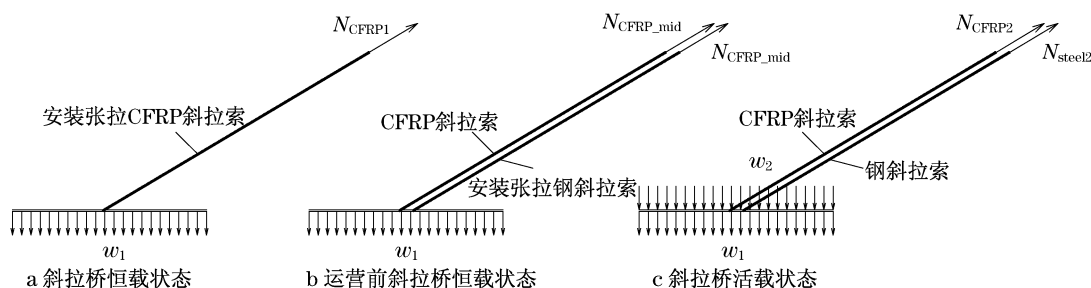


图6 CFRP与钢组合拉索安装张拉流程

Fig.6 Proposed design method of CFRP and steel composite stay cables

斜拉索斜拉桥按传统设计方法进行设计(强度控制)对比。

4.1 设计参数

斜拉桥跨径组合为636.0 m+1 400.0 m+636.0 m=2 672.0 m,边中跨比为0.454,边跨设置3个辅助墩(图7)。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41.0 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7,具体数值见表6。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

3 CFRP与钢组合拉索张拉方案

针对2种材料的特点提出针对该CFRP与钢组合拉索的张拉方案。此方案中,由于CFRP斜拉索高强轻质,且无论按方案3或方案4设计均满足强度要求,故将其张拉于设计荷载大、对承载能力要求较高的斜拉桥恒载状态。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%左右^[2,12];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。该不同斜拉索分荷载工况载荷的设计目的是通过张拉索力的大小来实现的,即先张拉CFRP斜拉索以完全承受恒载,后于运营前张拉钢斜拉索。该CFRP与钢组合拉索安装张拉流程见图6,图中 W_1 为恒载, W_2 为活载, N'_{CFRP1} , N_{CFRP_mid} , N_{CFRP2} 为不同阶段CFRP斜拉索索力, N_{steel_mid} , N_{steel2} 为不同阶段钢斜拉索索力。

4 设计实例

考虑到实际设计需求,取研究跨径的下限进行研究。按CFRP与钢组合拉索方案,试设计一座1 400 m主跨斜拉桥,并将设计结果与单一材料CFRP或钢

357.0 m,桥面以上287.0 m,高跨比为0.205,锚索区高度为74.0 m(即37.0 m×2)。桥塔截面尺寸为:纵向宽11.0~20.0 m,塔柱顶部结合区(高15.0 m)侧向宽9.0~11.5 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 $38 \times 4 \times 2 = 304$ 根,单索最大长度约750.0 m。整个斜拉桥为漂浮体系,活载按双向8车道考虑。

斜拉桥中斜拉索按CFRP与钢组合拉索并采用方案3进行设计。若设CFRP与钢价格比为10:1,则截面面积如图8所示, A_{CFRP} 与 A_{steel} 比值近似取1.1。

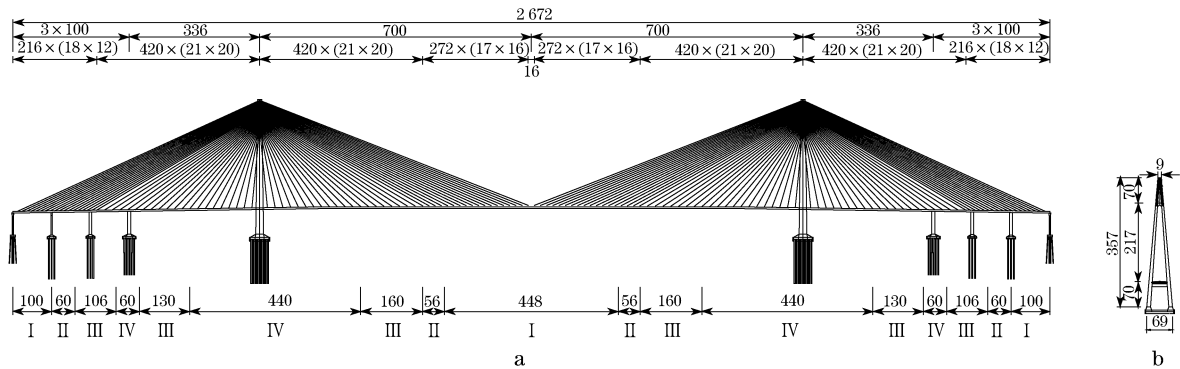


图 7 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥设计(单位:m)

Fig.7 Design of CFRP and steel composite cable-stayed bridge(unit:m)

表 6 截面特性

Tab.6 Property of cross-sections of girder

截面类型	面积 A/ m ²	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

4.2 设计对比

对比方案为相同条件按传统设计方法(强度控制)设计单一材料CFRP或钢斜拉索斜拉桥恒载状

态优化结果相似,仅列出 3 种设计的活载状态(按满跨均布荷载形式布置),如图 9 所示.

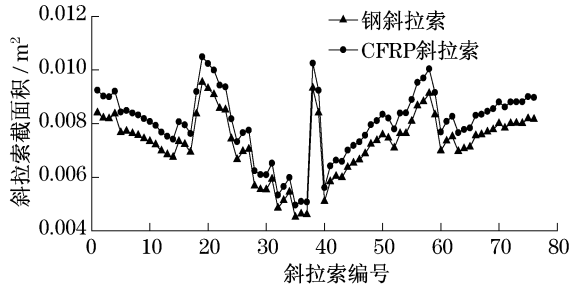
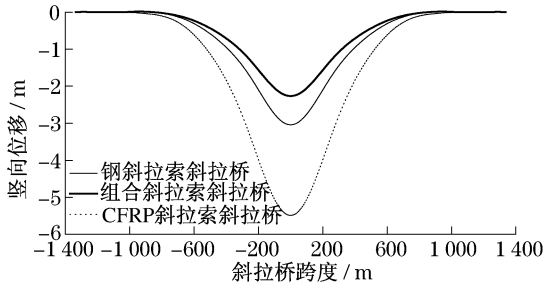
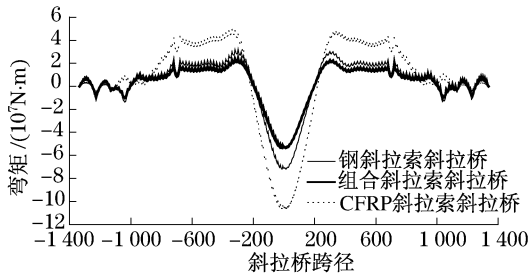


图 8 斜拉索截面面积

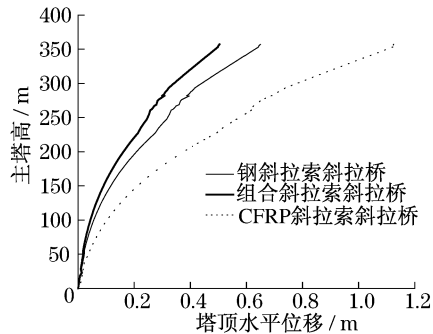
Fig.8 Cross-section areas of stay cables



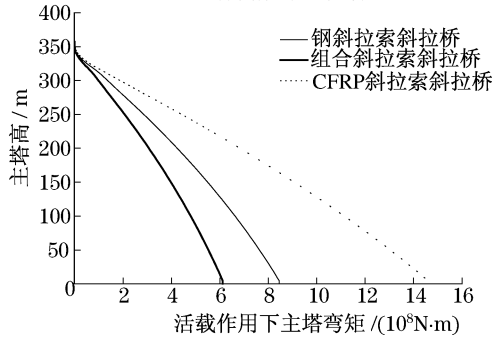
a 活载作用主梁竖向位移



b 活载作用主梁弯矩



c 活载作用塔顶水平位移



d 活载作用主塔弯矩

图 9 活载状态对比分析

Fig.9 Comparative study of bridge behaviors under the live loads

由图9见在活载作用下,组合拉索斜拉桥主梁竖向位移及弯矩均比单一材料斜拉索设计要小,桥梁整体刚度得到较大提高.这种整体刚度的提升也明显地减小了主塔的塔顶水平位移与塔底弯矩.

另外,3种方案斜拉索承载效率(斜拉索索梁处斜率改变量占原斜率百分数)与垂度效应对比见图10~11,可见,虽然组合方案截面增大近1倍,但是斜拉索承载效率以及垂度效应并未得以大幅度降低,均与传统钢斜拉索设计相近,而承载效率甚至还高于钢斜拉索设计.说明组合方案在等效刚度得到大幅度提升的同时并未造成其他力学性能的降低.

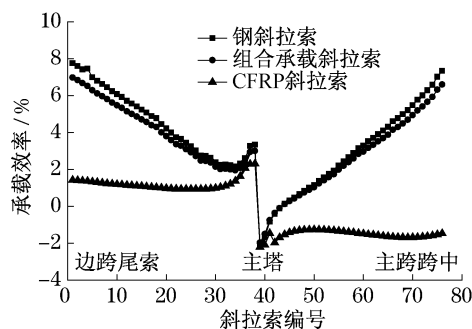


图10 斜拉索承载效率对比

Fig.10 Comparison for load-carrying efficiency

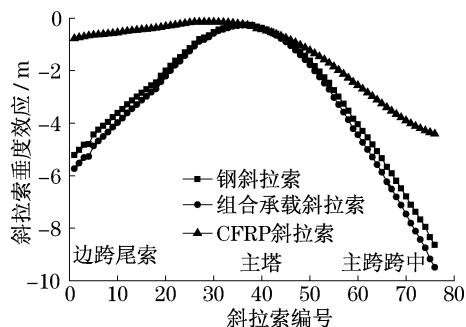


图11 斜拉索垂度效应对比

Fig.11 Comparison for cable sag effect

综合以上对比分析,说明基于刚度及经济性能的CFRP与钢组合拉索方案在1400~2800 m主跨内相对于传统方案较大提升了斜拉索等效刚度,大幅提高大跨度斜拉桥的整体刚度,同时明显减小结构内力,证明该方案应用于大跨径斜拉桥中的优势.

5 结论与展望

从等效刚度角度研究了钢斜拉索与CFRP斜拉

索的合理适用跨径,针对1400~2800 m主跨斜拉桥提出基于刚度及经济性能的CFRP与钢组合拉索方案,详细介绍了该方案设计方法和关键力学参数,并通过比较等效刚度以及经济性给出2种材料斜拉索推荐组合比例.张拉该组合拉索时,可将CFRP斜拉索与传统钢斜拉索张拉于不同斜拉桥荷载状态,以便更充分发挥各自优势.通过一座1400 m组合拉索斜拉桥试设计与单一材料CFRP或钢拉索斜拉桥按传统设计方法设计(强度控制)进行对比,证明了这种新型CFRP与钢组合拉索可达到预期设计目的,并具有替代传统钢斜拉索或全CFRP斜拉索的可行性.

参考文献:

- [1] Irvine H M. Cable structures [M]. Cambridge: The MIT Press, 1981.
- [2] Gimsing N J. Cable-supported bridges [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [3] Nagai M, Fujino Y, Yamaguchi H, et al. Feasibility of a 1400 m span steel cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 444.
- [4] Ahmadi-Kashani K, Bell A J. The analysis of cables subject to uniformly distributed loads [J]. Engineering Structures, 1988, 10: 1744.
- [5] 朱宏. 新型FRP筋预应力混凝土结构的研究[D]. 南京: 东南大学土木学院, 2004.
ZHU Hong. Study on concrete structure prestressed with FRP tendons [D]. Nanjing: Southeast University. Department of Civil Engineering, 2004.
- [6] Almusallam T H, Al-Salloum Y A. Ultimate strength prediction for RC beams externally strengthened by composite materials [J]. Composite: Part B, 2001, 32(7): 609.
- [7] Maeda K I, Morizono Y, Nakamura H, et al. Applicability of CFRP cables to ultra long-span suspension bridges [R/CD]. Cable-Supported Bridges-Challenging Technical Limits, IABSE Conference. Seoul: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2001.
- [8] 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.
- [9] Noisternig J F. Carbon fibre composites as stay cables for bridges [J]. Applied Composite Materials, 2000, 7: 139.
- [10] 梅葵花. CFRP拉索斜拉桥的研究[D]. 南京: 东南大学土木学院, 2005.
MEI Kuihua. Study on cable-stayed bridges with CFRP [D]. Nanjing: Southeast University. Department of Civil Engineering, 2005.