

CFRP与钢组合拉索斜拉桥经济性能分析

熊文^{1,2}, 孙斌², 肖汝诚², C. S. CAI³

(1. 东南大学 交通学院, 桥梁工程系, 210096 南京, wenwen0317@hotmail.com; 2. 同济大学 桥梁工程系, 200092 上海;
3. 路易斯安那州立大学 土木与环境工程系, 70803 美国 巴吞鲁日)

摘要: 为克服大跨径斜拉桥整体刚度降低, 提出一种新型斜拉桥方案, 即 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥, 介绍碳纤维增强塑料 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥的设计理念, 并提出斜拉索构造以及斜拉桥结构的设计方法, 研究了 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥经济性能, 并推导出该类斜拉桥的材料用量与造价公式. 基于所推导公式, 对其跨长、塔高以及价格比分别进行经济性能参数分析, 得到 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥的经济性能变化规律, 为该类斜拉桥设计提供理论依据, 从理论上证明 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥的经济性能优势和未来替代传统斜拉索应用在斜拉桥上的可行性.

关键词: 斜拉桥; 组合拉索; CFRP 斜拉索; 经济性能; 造价公式; 参数分析

中图分类号: U448.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)08-0124-06

Economic behaviors of cable-stayed bridges with CFRP and steel composite stay cables

XIONG Wen^{1,2}, SUN Bin², XIAO Ru-cheng², C. S. CAI³

(1. Department of Bridge Engineering, School of Transportation, Southeast University, 210096 Nanjing, China, wenwen0317@hotmail.com; 2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, 70803 Baton Rouge, LA, United States)

Abstract: To solve current stiffness problems of long-span cable-stayed bridges, a new cable-stayed bridge with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and steel composite stay cables was proposed. Firstly, the design strategies and procedures for the proposed cable-stayed bridges were introduced. The equations to calculate the material amounts and costs of the proposed cable-stayed bridges were also derived. By doing this, the economic behaviors of the composite bridges, which were the emphasis of this paper, were then studied. A parametric study with regard to span length, pylon height, and cost ratio (the cost ratio of CFRP stay cables to steel stay cables) was finally conducted, which determined the developing trend of economic behaviors. It is proved in this study that the application of CFRP and steel composite stay cables in cable-stayed bridges is feasible from the economic viewpoint and the proposed composite cable-stayed bridges could become an excellent alternative to the traditional cable-stayed bridges in the future.

Key words: cable-stayed bridges; composite stay cables; CFRP stay cables; economic behaviors; cost equations; parametric study

斜拉索等效刚度大幅度降低是斜拉桥跨径发展过程中需要面对的核心技术问题之一^[1-6]. 现

阶段钢斜拉索自重大, 垂度效应明显, 斜拉索等效刚度随跨径的增大而迅速降低^[3,5,7]. 碳纤维增强塑料 (CFRP) 材料轻质、高强、耐腐蚀, 但较低的弹性模量同时也限制了 CFRP 斜拉索等效刚度的提高^[8-10]. 因此如何高效提高大跨径斜拉索等效刚度进而提高斜拉桥整体刚度便成为近期的研究热点^[1-4]. CFRP 与钢组合拉索斜拉桥正是针对大

收稿日期: 2010-03-10.

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.

跨径斜拉桥整体刚度(斜拉索等效刚度)不足而提出的一种新型斜拉桥组合方案^[1]. 该方案将 CFRP 斜拉索与传统钢斜拉索同时应用于斜拉桥中,组合 2 种材料高强轻质及弹性模量高的优点,既充分发挥(保留)CFRP 与钢应用于斜拉索的性能优势,又避免其对结构整体刚度产生负面影响,以达到提高斜拉桥整体刚度的设计目的. 文献[1]中详细分析了组合斜拉索的构造设计以及力学性能,并提出了 3 种组合拉索斜拉桥设计原则与思路,但并未对其经济性能进行进一步分析. 而一般认为 CFRP 材料价格昂贵,采用其进行组合结构设计可能会使造价大幅度增加. 故经济性能被认为是组合拉索斜拉桥设计中的关键因素之一,有必要对其进行深入研究. 本文首先介绍 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥的设计理念,继而对该组合拉索斜拉桥各构件材料用量以及造价进行详细公式推导. 基于推导出的公式进行桥梁结构经济性能参数分析,以此得出其相应变化规律并指导设计,同时将结果与传统方案进行对比. 研究结果从经济性能角度再次证明了这种新型 CFRP 与钢组合拉索替代传统拉索应用于斜拉桥中的可行性.

1 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥设计理念

钢斜拉索自重大,等效刚度低,已不再适合主跨大于 1 000 m 的大跨径斜拉桥^[1]. CFRP 斜拉索弹性模量较低(1.37×10^{11} N/m²),等效刚度只有当斜拉索跨径增至 1 500 m 之后才能优于钢斜拉索^[10]. 故对于一般大跨径斜拉桥来说,单一材料斜拉索已不能满足桥梁结构的刚度要求. 如图 1 所示,CFRP 与钢组合拉索斜拉桥通过将 CFRP 斜拉索与钢斜拉索同时应用于斜拉桥中来达到提高斜拉索等效刚度的设计目的. 具体来说,CFRP 斜拉索发挥 CFRP 材料轻质、高强、耐腐蚀的特点,弥补钢斜拉索自重大的劣势;钢斜拉索发挥其弹性模量高的优势,可以进一步有效提高组合斜拉索等效弹性模量. 另外,还可以通过适当增大斜拉索安全系数(即增大斜拉索截面面积)来额外提高 CFRP 与钢组合拉索的等效刚度. 相对单一材料斜拉索方案,组合拉索可通过组合 2 种材料斜拉索达到增大截面面积同时提高弹性模量而不明显增加自重的设计目的.

图 1 中, A_{steel} 与 A_{CFRP} 分别表示钢斜拉索与 CFRP 斜拉索截面面积, F_1 与 F_2 分别表示钢斜拉索与 CFRP 斜拉索张拉索力, w_1 与 w_2 分别表示该梁段所承受恒载与活载. 定义面积比为 $\rho =$

$A_{\text{CFRP}} / (A_{\text{CFRP}} + A_{\text{steel}})$, 该面积比数值直接影响组合拉索的力学性能,故确定其为组合拉索的关键设计参数. 文献[1]针对该设计参数做了大量参数分析,并根据不同设计情况分别给出建议数值. 一般来说,当斜拉索跨径较短时(小于 500 m),适合全钢斜拉索($\rho = 0$),而当跨径非常长时(大于 1 500 m),适合采用全 CFRP 斜拉索($\rho = 1$),而两者之间是 CFRP 与钢组合拉索的合理适用范围. 即近塔处全钢斜拉索,远塔全 CFRP 斜拉索,介于两者之间采用 CFRP 与钢组合拉索,以充分发挥各自优势,如图 2 所示. 文献[1]已经证明了其力学性能特别是刚度方面的明显优势,并针对不同设计情况详细给出各自适用面积比,下面将对其经济性能进行深入研究.

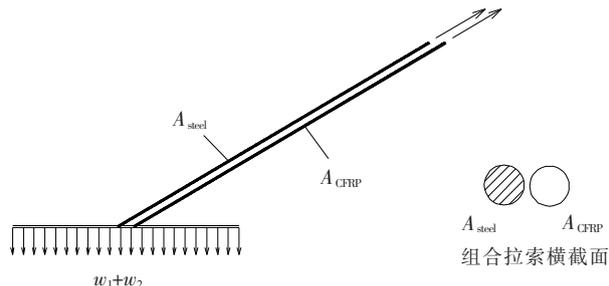


图 1 CFRP 与钢组合拉索

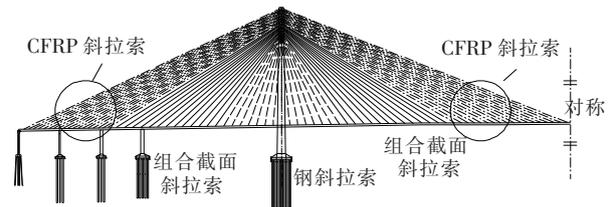


图 2 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥

2 材料用量及造价公式推导

将图 2 所示结构划分为斜拉索、主梁、塔柱、基础等几个部分. 通过推导各部分材料用量,求和得到结构总材料用量,继而得到总造价.

2.1 斜拉索材料用量

假设斜拉桥结构全长为 l ,主跨为 l_m ,边跨为 l_s ,主梁上斜拉索锚固点间距为 λ_a ,塔上间距为 λ_b . 主梁以上塔高为 h ,主梁以下塔高为 h_1 ,主塔有索区塔高 h_b ,主梁以上主塔无索区塔高 h_a . 承受均布恒载 w ,等效均布活载 p ,斜拉索自重 γ . 再令斜拉索承受作用于长度等于斜拉索锚固点间距 λ_a 的均布恒载 w 、均布活载 p ,每根斜拉索自重为 $\gamma_x A_{x,i} a_i / \cos \psi_i$ (该假设满足材料估算阶段计算精度^[3]),按图 3 受力图可得每根斜拉索索力为

$$T_{x,i} = [(w + p)\lambda_a + \gamma_x A_{x,i} a_i / \cos \psi_i] / \sin \psi_i. \quad (1)$$

故截面面积为

$$A_{x,i} = \frac{(w+p)\lambda_a \cos \psi_i}{\sigma_x \sin \psi_i \cos \psi_i - \gamma_x a_i} \quad (2)$$

式中: σ_x 为斜拉索应力, γ_x 为斜拉索密度.

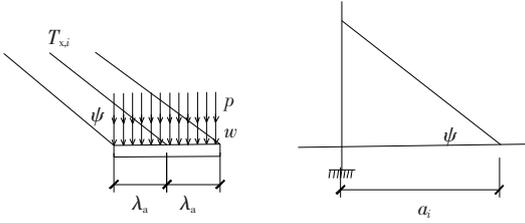


图3 单根斜拉索面积计算

2.1.1 单个边跨斜拉索材料用量 Q_s

斜拉索可近似处理为一端在 l_s 范围内、另一端在 h_b 范围内连续均匀布置的斜拉索面, 对式(2)微分可得

$$dA_{x,i} = \frac{(w+p)dx \frac{x}{\sqrt{x^2 + (h_a + h_b x/l_s)^2}}}{\sigma_x \frac{x(h_a + h_b x/l_s)}{\sqrt{x^2 + (h_a + h_b x/l_s)^2}} - \gamma_x x} \quad (3)$$

对式(3)进行积分, 并令 $h_b = 0$, 相当于全部斜拉索锚固在塔顶的辐射型体系:

$$Q_s = \frac{\gamma_x}{\sigma_x}(w+p) \left[\frac{1}{5} \frac{\gamma_x}{\sigma_x} l_s \left(\frac{l_s}{h_a} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(1 + 2 \frac{\gamma_x h_a}{\sigma_x} \right) \left(\frac{l_s}{h_a} \right)^3 + \left(1 + \frac{\gamma_x h_a}{\sigma_x} \right) \frac{l_s}{h_a} \right] h_a^2 \quad (4)$$

令 $h_a = 0$, 相当全部斜拉索平行布置的竖琴式体系:

$$Q_s = \frac{\gamma_x}{\sigma_x}(w+p) \frac{l_s^2 + h_b^2}{l_s h_b} \left(\frac{1}{2} + \frac{\gamma_x}{\sigma_x} \frac{l_s^2 + h_b^2}{3 h_b} \right) l_s^2 \quad (5)$$

若均不为零(常规体系), 积分后可得

$$Q_s = \frac{\gamma_x}{\sigma_x}(w+p) \left\{ \left(\frac{l_s}{h_b} \right)^3 \left[h_a^2 \ln \left(1 + \frac{h_b}{h_a} \right) - h_b h_a + \frac{1}{2} h_b^2 \right] + l_s \left(h_a + \frac{1}{2} h_b \right) \right\} \quad (6)$$

2.1.2 单个主跨斜拉索材料用量 Q_m

将 l_s 换成 $l_m/2$ 按上述计算过程得到 1/2 主跨斜拉索总用钢量 Q_m . 至此, 全桥斜拉索材料总用量为

$$Q = 2(Q_m + Q_s) \quad (7)$$

2.1.3 组合拉索总材料用量

根据组合拉索斜拉桥设计思路, 对于组合截面拉索(边跨 $l_{sc1} - l_{sc2}$, 主跨 $l'_{sc1} - l'_{sc2}$), 按式(6)得

$$Q_{s(com)} = Q_s(\rho\gamma_{CFRP} + (1-\rho)\gamma_{steel}\rho\sigma_{CFRP} +$$

$$(1-\rho)\sigma_{steel}w + p).$$

$$Q_{m(com)} = Q_m(\rho\gamma_{CFRP} + (1-\rho)\gamma_{steel}\rho\sigma_{CFRP} + (1-\rho)\sigma_{steel}w + p).$$

对于近塔处钢斜拉索(边跨 $0 - l_{sc1}$, 主跨 $0 - l'_{sc1}$):

$$Q_{s(steel)} = Q_s(\gamma_{steel}, \sigma_{steel}, l_{sc1}, w + p).$$

对于远塔处 CFRP 斜拉索(边跨 $l_{sc2} - l_s$, 主跨 $l'_{sc2} - l_m/2$):

$$Q_{s(CFRP)} = Q_s(\gamma_{CFRP}, \sigma_{CFRP}, l_s, w + p) - Q_s(\gamma_{CFRP}, \sigma_{CFRP}, l_{sc2}, w + p).$$

同理将 l_s, l_{sc1}, l_{sc2} 换成 $l_m/2, l'_{sc1}, l'_{sc2}$ 参照上述计算过程得到 1/2 主跨斜拉索材料用量. 故 1/2 主跨, 边跨斜拉索总材料用量为

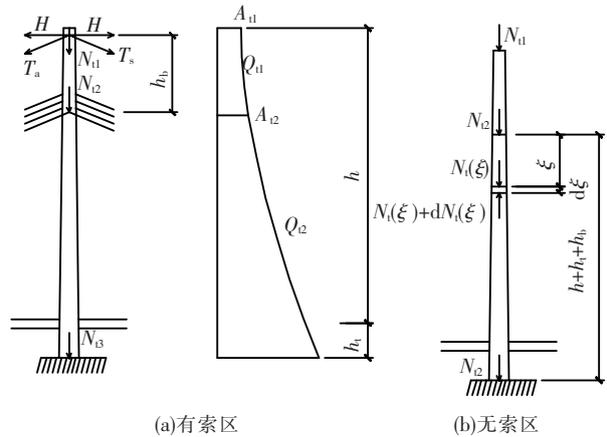
$$Q_s = Q_{s(com)} + Q_{s(steel)} + Q_{s(CFRP)},$$

$$Q_m = Q_{m(com)} + Q_{m(steel)} + Q_{m(CFRP)}.$$

代入式(7)即得到组合拉索总材料用量.

2.2 塔柱材料用量

将塔柱简化为轴心受压构件计算, 如图4所示. 假定: 1) 锚索区塔柱横截面积呈线性变化. 塔顶处为 A_{t1} , 由主缆竖向分力确定; 锚索区下端为 A_{t2} , 由该处承受轴向压力确定. 2) 塔柱无索区作为顶点作用集中力的等强度轴心受压柱计算.



(a) 有索区

(b) 无索区

图4 塔柱材料用量计算

锚索区塔柱材料用量

$$Q_{t1} = \frac{1}{2} \gamma_t (A_{t1} + A_{t2}) h_b,$$

$$A_{t1} = N_{t1} / \sigma_t = H(\tan \alpha + \tan \beta) / \sigma_t.$$

式中: N_{t1} 为塔顶集中力; γ_t 为塔柱材料密度; α, β 分别为左右两边斜拉索倾角; σ_t 为塔柱使用材料允许抗压应力; 其他变量见图4.

作用在锚索区下端轴力 N_{t2} 等于 N_{t1} 与斜拉索所承担的结构重量之和, 可得

$$N_{t2} - N_{t1} = (w+p)(l_s + l_m/2) + Q_s + Q_m + Q_{t1}.$$

$$Q_{t1} = \gamma_t h_b \left(\frac{N_{t1}}{\sigma_t} + \frac{N_{t2}}{\sigma_t} \right) / 2,$$

$$N_{12} = \frac{(w+p)(l_s+l_m/2)+Q_s+Q_m+\gamma_l h_b \frac{N_{11}}{\sigma_1}}{(1-\frac{\gamma_l h_b}{2\sigma_1})} + N_{11}.$$

由图 4(无索区),有

$$N_1(\xi) + dN_1(\xi) = N_1(\xi) + \frac{\gamma_l}{\sigma_1} N_1(\xi) d\xi.$$

代入边界条件: $\xi = 0, N_1(0) = N_{12}$, 解得

$$N_1(\xi) = N_{12} \exp\left(\frac{\gamma_l \xi}{\sigma_1}\right).$$

继而得到无索区材料用量

$$Q_{12} = N_{13} - N_{12} = N_{12} \left\{ \exp\left[\frac{\gamma_l}{\sigma_1}(h+h_t-h_b)\right] - 1 \right\}.$$

所以塔柱总重量为 $Q_t = Q_{11} + Q_{12}$.

设主梁平均梁重 w , 简化得到主梁材料用量为

$$Q_z = w(2l_s + l_m).$$

由式(20)可得主塔基础承受的竖向力为

$$N_{13} = N_{12} \exp\left[\frac{\gamma_l}{\sigma_1}(h+h_t-h_b)\right].$$

又因为半桥结构总竖向反力为

$$W = (w+p)\left(l_s + \frac{l_m}{2}\right) + Q_s + Q_m + Q_t.$$

可得边墩(辅助墩)基础竖向反力为

$$N_b = W - N_{13}.$$

引入比例系数得主塔及边墩基础材料用量分别为

$$Q_j = k_j N_{13},$$

$$Q_b = k_b N_b.$$

2.3 组合拉索斜拉桥造价

总造价为

$$P = 2\mu_x(Q_m + Q_s) + 2\mu_t Q_t + \mu_z Q_z + 2\mu_j Q_j + 2\mu_b Q_b.$$

式中: μ 为各种材料单价。

3 经济性能设计参数分析

基于以上造价公式,对主跨(边跨)长度、塔高及材料价格比(CFRP 斜拉索价格与钢斜拉索价格之比)进行参数分析,考察设计参数变化对组合拉索斜拉桥(考虑 $\rho = 0.25, 0.50, 0.75$)经济性能影响规律,并列全 CFRP 斜拉索与传统钢斜拉索斜拉桥方案造价进行对比。针对 CFRP 材料价格不断降低的发展趋势^[10],主跨长度、塔高进行的参数分析是按照 CFRP 斜拉索材料单价 10 倍于钢斜拉索单价(现阶段近似 27 倍)进行的;

而其他价格比可参考针对价格比的参数分析结果。分析中所采用的主要计算参数如表 1 所示,各参数数值满足材料估算阶段计算精度。

表 1 斜拉桥造价基本参数

名称	符号	取值
钢斜拉索材料密度	γ_{steel}	78.50 kN/m ³
CFRP 斜拉索材料密度	γ_{CFRP}	16.00 kN/m ³
主塔材料密度	γ_t	26.00 kN/m ³
斜拉索在主梁锚固点间距	λ_a	17.58 m
斜拉索在塔柱锚固点间距	λ_b	2.00 m
钢斜拉索材料安全系数	ρ_{steel}	5.00
CFRP 斜拉索材料安全系数	ρ_{CFRP}	5.00
钢斜拉索材料容许应力	σ_{steel}	334.00 MPa
CFRP 斜拉索材料容许应力	σ_{CFRP}	510.00 MPa
塔柱材料容许应力	σ_t	15.50 MPa/2.9
斜拉桥钢梁恒载集度	w	267.40 kN/m
全桥二期恒载	w'	70.00 kN/m
活载集度	p	48.30 kN/m
钢斜拉索材料单价	μ_{steel}	20.00 元/kg
CFRP 斜拉索材料单价(现阶段)	μ_{CFRP}	539.95 元/kg
CFRP 斜拉索材料单价(10:1)	μ_{CFRP}	200.00 元/kg
CFRP 斜拉索材料单价(5:1)	μ_{CFRP}	100.00 元/kg
斜拉桥钢梁单价	μ_z	22.43 元/kg
塔柱材料单价	μ_b	1.68 元/kg
主塔基础、桥墩材料单价	μ_j	1.21 元/kg
桥墩材料用量比例系数	k_b	4.00
主塔基础材料用量比例系数	k_j	4.00

3.1 主跨跨径

本节考虑斜拉桥主跨跨径变化范围为 400 ~ 4 000 m,边跨以及主塔高度按与主跨比例为 0.45 和 0.14 相应变化。为适当增大斜拉索等效刚度,按前面介绍方法,斜拉索安全系数取 5.0。通过计算可得 5 种斜拉桥方案造价随主跨跨径增大的变化情况,如图 5 所示(主梁保持不变)。

由图 5 可以看出,当价格比为 10:1 时,组合拉索造价随主跨跨径增大而增加,且增幅不断增大,当跨径增至一定长度,组合拉索造价将低于全钢斜拉索;钢斜拉索自重远远大于 CFRP 斜拉索自重,随主跨跨径增大,钢斜拉索自重急剧增大,组合拉索斜拉桥主塔及基础造价将远远小于全钢拉索斜拉桥;组合拉索斜拉桥总造价随跨径增大而增大,且随跨径增大造价增加趋势加剧,此时面积比越大斜拉桥总造价越低,并远远低于全钢斜拉索;当跨径显著增大,组合拉索斜拉桥造价将高于全 CFRP 斜拉索,但需要说明的是只要主

跨跨径不大于 2 800 m,组合拉索斜拉桥依然在力学上占优势^[1].

3.2 主塔塔高

以主跨跨径 1 400m,边跨 636 m 为例,主塔高度在 357 m 基础上增减 50 m 来考察塔高对该 5 种斜拉桥方案经济性能影响规律.按已设定材料价格比(101),计算结果见图 6,其他跨径亦可得出相似结果.

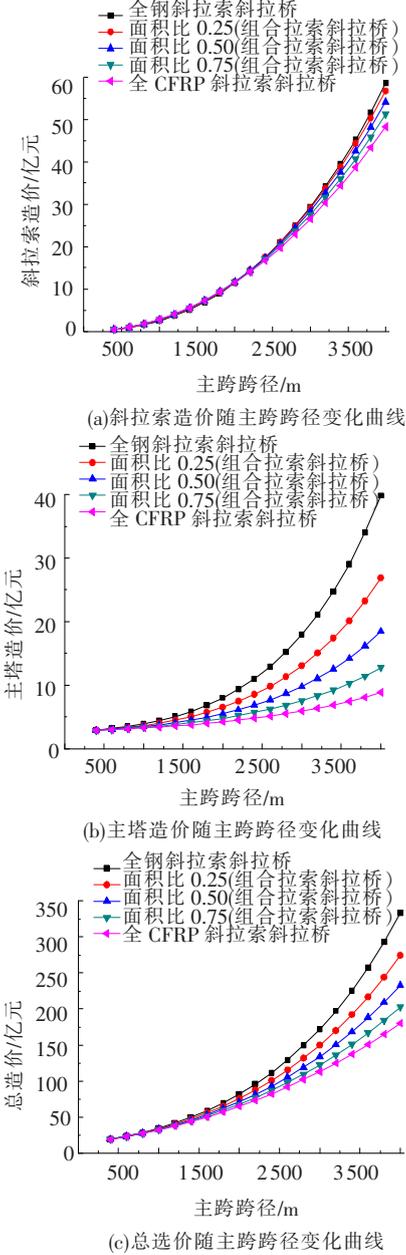


图 5 造价随主跨跨径变化曲线

图 6 得出主塔高度增大时结构造价变化规律:1)塔高增大,斜拉索倾角增大,相同竖向力作用下总斜拉索力减小,即斜拉索设计面积变小;虽然斜拉索长度有所增大,但 5 种斜拉桥方案斜拉索造价仍随塔高增大而减小;组合拉索面积比越大造价越高. 2)主塔竖向力基本不变,仅主塔高

度增大,故主塔造价均增大,基础造价与主塔造价变化规律相同. 3)总造价随塔高的增大而增大. 4)无论塔高变化,组合拉索斜拉桥方案造价均介于全 CFRP 与全钢斜拉索方案之间,除了斜拉索造价本身,面积比越大造价越低.

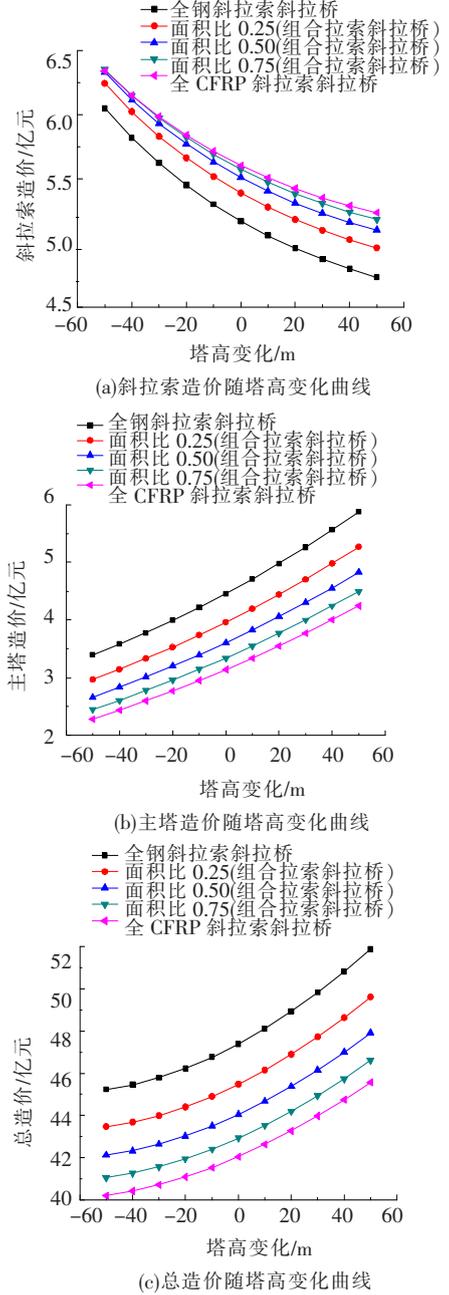


图 6 造价随塔高变化曲线

3.3 价格比

以主跨跨径 1 400 m,边跨 636 m,主塔高度 357 m 为例,用相同的方法亦得出组合拉索斜拉桥经济性能与价格比之间的关系曲线,如图 7 所示,其他跨径亦可得出相似结论.

由图 7 可以看出:1)斜拉桥总造价与价格比存在很大关联,按当今价格比(27:1),全钢拉索斜拉桥最优,其次是面积比较小的组合拉索斜拉

桥,最差是全 CFRP 拉索斜拉桥;但当价格比下降至 10:1 以下时,经济性能优劣将会发生变化,CFRP 斜拉索面积比越大斜拉桥总造价越低,即 10:1 是一个重要的比例,它是组合斜拉索经济性能优越与否的转折点。2) 随价格比降低,组合拉索方案面积比越大,斜拉索造价占总造价比例降低越迅速。3) CFRP 斜拉索质量较轻,可以预计随组合拉索方案面积比增加,基础造价也随之降低。4) 现阶段 CFRP 斜拉索造价依然很高,同等条件

下依不同面积比较钢斜拉索造价提高 1~3 倍,而使斜拉桥总造价提高 1~1.3 倍。但随着材料科学的发展,价格比仅需降至 10:1 以下,CFRP 与钢组合拉索斜拉桥不仅将具有力学上足够优势,还将具有良好经济性能,是斜拉桥优选方案之一。

4 结 论

1) 研究了 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥的经济性能,推导出该类斜拉桥的材料用量与造价公式。

2) 按照该类斜拉桥的设计理念,针对其跨长、塔高以及面积比进行了参数分析,得到 CFRP 与钢组合拉索斜拉桥的经济性能变化规律,可为未来该类斜拉桥经济性能设计提供理论依据。

3) CFRP 与钢组合拉索斜拉桥除了在力学上相对全钢或全 CFRP 拉索斜拉桥有明显优势外,在经济性能方面也明显优于传统钢拉索斜拉桥,价格比小于 101。

参 考 文 献:

[1]熊文. CFRP 与钢组合斜拉索设计理论研究[D]. 上海:同济大学,2009.
 [2]孙斌,肖汝诚,贾丽君. 主跨 1400m 部分地锚式斜拉桥方案试设计[J]. 桥梁建设,2009(3):51-54.
 [3]GIMSIN N J. Cable-supported bridges[M]. 2nd ed. New York:John Wiley & Sons, 1997.
 [4]王伯惠. 斜拉桥增大跨径的技术措施[J]. 公路,2003(2):1-13.
 [5]苗家武. 超大跨度斜拉桥设计理论研究[D]. 上海:同济大学,2006.
 [6]林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
 [7]NAGAI M, FUJINO Y, YAMAGUCHI H, et al. Feasibility of a 1400m span steel cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 444-452.
 [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): 73-78.
 [9]NOISTERNIG J F. Carbon fibre composites as stay cables for bridges [J]. Applied Composite Materials, 2000, 7: 139-150.
 [10]梅葵花. CFRP 拉索斜拉桥的研究[D]. 南京:东南大学,2005.

(编辑 魏希柱)

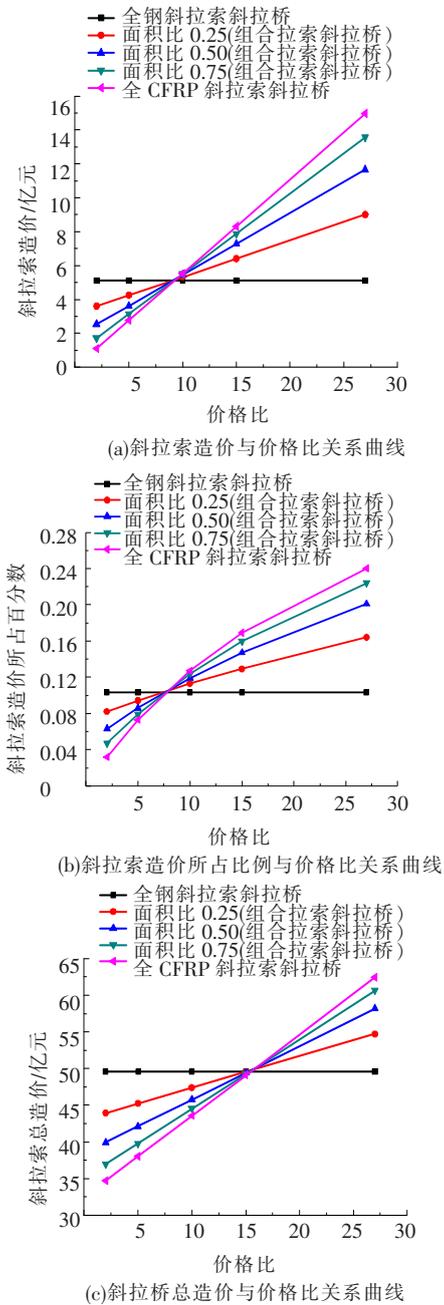


图 7 造价与价格比关系曲线