

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.02.008

独塔部分地锚式 PC 斜拉桥经济及设计参数研究

赵晓晋^{1,2}, 贺拴海^{1,2}, 胡文亮^{1,2}, 王凌波^{1,2}

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 为得到独塔部分地锚式 PC 斜拉桥的合理设计参数范围, 通过对拉索、主塔、锚碇、主梁的材料用量和造价进行计算, 建立了全桥总造价及单位桥长造价公式, 据此开展了独塔部分地锚式 PC 斜拉桥合理背索自锚比例、锚碇主跨长度比、边主跨比及塔跨比的研究, 并与其他斜拉桥型进行了对比。结果表明: 考虑全桥跨越能力时, 背索自锚比例宜取 0.336 ~ 0.487 范围内的大值, 边主跨比宜取 0.487 ~ 0.544 范围内的小值, 考虑单跨跨越能力时反之; 当主跨跨度较小时, 可取适当小于依据上原则的取值, 当主跨跨度较大时反之; 塔跨比宜取 0.372 左右, 对应的主跨边索倾角为 20.4° 左右, 跨径较小时取较大值, 跨径较大时取较小值, 与其他斜拉桥型无明显区别。独塔部分地锚式 PC 斜拉桥仅在边跨自锚段空间受地形条件限制时经济性能优于独塔常规斜拉桥, 在常规地形并无优势。
关键词: 独塔部分地锚式斜拉桥; 设计参数; 总造价; 单位桥长造价; 背索自锚比例; 锚碇主跨长度比; 边主跨比; 塔跨比

中图分类号: U442; U448.27 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2017)02-0145-08

Cost and design parameter of partially earth-anchored PC cable-stayed bridge with single pylon

ZHAO Xiaojin^{1,2}, HE Shuanhai^{1,2}, HU Wenliang^{1,2}, WANG Lingbo^{1,2}

(1. College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Key Laboratory of Old Bridge Detection and Reinforcement Technology of Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to obtain the reasonable design parameter range of a partially earth-anchored PC cable-stayed bridge with a single pylon, the formulas for the total bridge cost and the cost per unit length of the bridge were obtained through computation of the material dosage and cost of cables, the main pylon, the anchor, and the girder. According to these formulas, the reasonable ratio of the self-anchored length of the side span to the length of the main span, the ratio of the anchor length to the main span length, the side-to-main span ratio, and the ratio of the pylon height to the main span length of the partially earth-anchored PC cable-stayed bridge with a single pylon were studied, and they were compared with those of other cable-stayed bridges. The results show that, considering the spanning capacity of the whole bridge, larger values in the range of 0.336 to 0.487 should be used as the ratio of the self-anchored length of the side span to the length of the main span, and lower values in the range of 0.487 to 0.544 should be used as the side-to-main span ratio. Considering the spanning capacity of the single span, the opposite is the case. Values to some extent lower than those mentioned above are allowed when the main span is smaller, and vice versa. The ratio of the pylon height to the main span length should have a value of about 0.372, and the corresponding main span side-cable inclination is about 20.4°. Larger values can be used when the span is lower, as with other types of cable-stayed bridges. The partially earth-anchored PC cable-stayed bridge with a

收稿日期: 2016-07-29
基金项目: 中国博士后基金(2015M572511)
作者简介: 赵晓晋(1989—), 男, 山西晋中人, 博士研究生, 主要从事桥梁结构体系研究。E-mail: 418336067@qq.com
通信作者: 贺拴海, 教授。E-mail: heshai@chd.edu.cn

single pylon performs better economically than a common cable-stayed bridge with a single pylon only when the self-anchored space of the side span is limited by terrain conditions. It has no advantage in common terrain conditions.

Key words: partially earth-anchored cable-stayed bridge with single pylon; design parameter; total cost; cost per unit length of bridge; ratio of self-anchored length of side span to length of main span; ratio of anchor length to main span length; side-to-main span ratio; ratio of pylon height to main span length

斜拉桥根据索塔在顺桥向的数量,可分为独塔、双塔和多塔斜拉桥;根据边跨锚固形式的不同,可分为自锚斜拉桥、地锚式斜拉桥和部分地锚式斜拉桥。独塔部分地锚式斜拉桥主跨均为自锚,背索部分锚固于边跨主梁,其余的锚固于锚碇或者重力式大体积承台上^[1]。

斜拉桥跨径受抗风稳定性、超长斜拉索的强度、刚度以及塔梁交界处过大的主梁轴力等诸多因素的制约。针对主梁轴力过大的问题,Gimsing 等提出的部分地锚式斜拉桥概念得到广泛的关注^[2-3]。目前,部分地锚式斜拉桥的研究主要集中于大跨径双塔三跨部分地锚式斜拉桥的极限跨径^[4]、设计参数^[5-7]、成桥状态和静力性能^[8-14]、抗风性能以及风荷载下的动力响应及静力稳定性^[15-19]等方面。在经济性能方面,Gimsing 等^[2]提出了一套缆索承重桥梁中缆索系统和桥塔结构材料用量的估算方法,并对悬索桥和斜拉桥的材料用量进行了对比;熊文等^[20]、孙斌等^[21]基于 Gimsing 方法,对超大跨径部分地锚式斜拉桥的经济性能进行了分析。但是,对独塔部分地锚式斜拉桥的研究很少。

独塔部分地锚式斜拉桥常用于中小跨径桥梁,轴力并非主梁设计的控制因素,而且也无法有效减小主梁的轴向压力,因此对其结构体系需要进行独立于双塔部分地锚式斜拉桥的研究。由于锚碇的存在,将独塔部分地锚式 PC 斜拉桥的适应地形限制到有景观需求的 U 形山谷,而相应的也更适宜采用悬臂挂篮现浇的施工方法。另外,从受力及变形的角度,仅有锚碇与主梁固结、主梁受塔柱竖向支撑的体系才能在温度荷载、主跨满布活载等工况使结构满足相关要求。

笔者在 Gimsing 等^[2]方法的基础上考虑了独塔 PC 斜拉桥拉索承担的恒活载比例,推导了独塔部分地锚式 PC 斜拉桥拉索、主塔、锚碇的材料用量公式,并引入材料单价,考虑基础及承台造价占总造价的比例一定,得到全桥总造价,并据此开展了对悬臂挂篮施工的独塔部分地锚式 PC 斜拉桥基于经济性能分析的设计参数研究。

1 材料用量及造价公式推导

1.1 基本假设及计算思路

独塔部分地锚式斜拉桥的结构简图见图 1,图中 h 、 h_0 、 h_1 、 h_2 、 h_3 分别为索塔总高度、下塔柱高度、锚固区下缘高度、边跨自锚拉索塔端锚固区高度、边跨地锚拉索塔端锚固区高度; L_c 、 L_s 、 L_e 分别为主梁的主跨跨径、边跨自锚段跨径和锚碇长度; p 为均布活载集度; q 为主梁自锚段的恒载集度,由一期恒载集度 q_1 及二期恒载集度 q_2 组成。

为便于理论解析做出以下假设:(a)拉索在主梁、主塔及锚碇上均视为等索距布置,且边主跨自锚段索距一致,斜拉索面可简化为连续的索膜;(b)相对于主梁跨径而言,索塔处主梁无索区长度很小,可以忽略不计;(c)主塔锚索区的截面呈线性变化;(d)承台、基础及附属结构造价占总造价的 1/4。

分别计算在固定主梁恒载集度下的拉索、主塔及锚碇材料用量 Q ,调研建设全过程的各构件单价 μ ,则结构总造价 C 及单位桥长造价 D 可表示为

$$C = \sum (\mu Q)$$
$$D = \frac{C}{L_c + L_s}$$

(1)

拉索及主塔主要承受轴力,因此可仅考虑轴力 N 对材料用量 Q 的直接贡献,而弯矩的影响可通过在材料强度中计入安全系数来考虑^[21]:

$$Q = \frac{\rho g N l}{f}$$

(2)

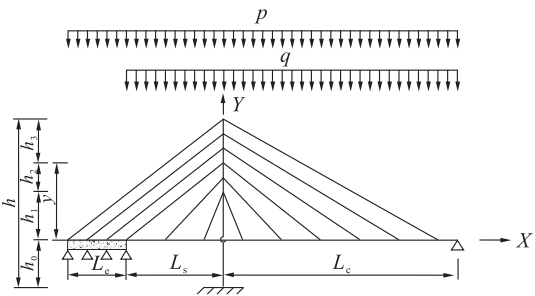


图1 独塔部分地锚式斜拉桥结构简图
Fig.1 Sketch of partially earth-anchored cable-stayed bridge with single pylon

式中: ρ ——材料密度; g ——重力加速度; f ——计入安全系数(广义安全系数,除设计规范中规定的材料安全系数外,还隐含了包括结构弯矩及非线性等因素的影响)的材料强度(容许应力); l ——构件长度。

式(2)计算结果为近似值,但所有计算均基于相同的近似程度,并不影响后续的经济性及设计参数分析结果。锚碇材料用量可通过力矩平衡原理得到。

1.2 各构件材料用量

1.2.1 主跨拉索材料用量

与双塔斜拉桥相比,独塔 PC 斜拉桥跨度小、刚度大。对于独塔 PC 斜拉桥,由拉索承担的活载比例约为 60%;由拉索承担的恒载比例 η 与主跨跨度相关, $L_c = 100\text{ m}$ 时约为 80%, $L_c = 200\text{ m}$ 时约为 95%。

取拉索微元 dx , x 为在梁端的锚固点到上塔柱根部的距离,如图 2 所示。计入拉索自重,主梁自重 q 和均布活载 p 引起的拉索微元对应的索力 dN 可表示为

$$dN = [(\eta q + 0.6p)dx + \frac{\rho_c g}{f_c} l dN] \frac{l}{h_1 + \frac{x(h_2 + h_3)}{L_c}} \quad (3)$$

其中
$$l = \sqrt{\left[h_1 + \frac{x(h_2 + h_3)}{L_c}\right]^2 + x^2}$$

式中: ρ_c ——拉索材料密度; f_c ——计入安全系数的拉索材料强度。

拉索材料用量计算受索形布置的影响。当为辐射形布置时,即 $h_2 + h_3 \rightarrow 0$,将式(3)代入式(2)积分可得拉索材料用量:

$$Q_{cc} = \frac{(\eta q + 0.6p)h_1 f_c}{2\sqrt{h_1 f_c \rho_c g - h_1^2 (\rho_c g)^2}} \ln \left| \frac{L_c - \sqrt{h_1 f_c / (\rho_c g) - h_1^2}}{L_c + \sqrt{h_1 f_c / (\rho_c g) - h_1^2}} \right| - (\eta q + 0.6p)L_c \quad (4)$$

1.2.2 边跨自锚拉索材料用量

将式(4)中 L_c 以 L_s 替换,可得边跨自锚拉索材料用量 Q_{sc} 。

1.2.3 地锚拉索材料用量

当活载仅作用于主跨且满布时,主塔两侧自锚拉索索力对塔梁交界处产生的最大不平衡弯矩 M_e 为

$$M_e = \frac{L_c^2}{2}(\eta q + 0.6p) - \frac{L_s^2}{2}\eta q + \frac{1}{3}L_c Q_{cc} - \frac{1}{3}L_s Q_{sc} \quad (5)$$

根据力矩平衡,假设地锚拉索为两端分别锚固于 L_e 及 h_3 区域 1/3 位置的拉索,可得地锚拉索材料用量为

$$Q_{ec} = \frac{M_e \rho_c g \left[\left(h_1 + h_2 + \frac{2}{3}h_3\right)^2 + \left(\frac{2}{3}L_e + L_s\right)^2 \right]}{\left(h_1 + h_2 + \frac{2}{3}h_3\right) f_c \left(\frac{2}{3}L_e + L_s\right)} \quad (6)$$

1.2.4 主塔材料用量

依据假定计算, $y = h_1$ 处主塔轴力为

$$N_{h_1} = \frac{(\eta q + 0.6p)(L_c + L_s) + Q_{cc} + Q_{sc} + \frac{M_e}{\frac{2}{3}L_e + L_s}}{1 - \frac{\rho_h g (h_2 + h_3)}{2f_h}} \quad (7)$$

式中: ρ_h ——主塔材料密度; f_h ——计入安全系数的主塔材料强度。

锚索区材料用量为

$$Q_{h_1} = \frac{\rho_h g}{2f_h} N_{h_1} (h_2 + h_3) \quad (8)$$

主塔无索区轴力增量等于主塔微元自重,因此:

$$dN_h(y) = \frac{\rho_h g}{f_h} N_h(y) dy \quad (9)$$

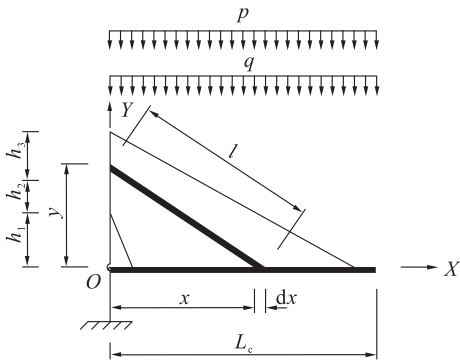


图 2 拉索材料用量计算简图

Fig.2 Sketch of computation of cable material dosage

解得, $y = -h_0$ 处主塔轴力为

$$N_{-h_0} = N_{h_1} \exp \left[\frac{\rho_h g}{f_h} (h_0 + h_1) \right]$$

(10)

无索区材料用量为

$$Q_{-h_0} = \frac{\rho_h g}{2f_h} \left\{ 1 + \exp \left[\frac{\rho_h g}{f_h} (h_0 + h_1) \right] \right\} (h_1 + h_0) N_{h_1}$$

(11)

则主塔材料用量为

$$Q_h = Q_{h_1} + Q_{-h_0} = \frac{\rho_h g}{2f_h} \left\{ 1 + \exp \left[\frac{\rho_h g}{f_h} (h_0 + h_1) \right] \right\} (h_1 + h_0) N_{h_1} + \frac{\rho_h g}{2f_h} N_{h_1} (h_2 + h_3)$$

(12)

1.2.5 锚碇材料用量

独塔部分地锚式斜拉桥的锚碇常与主梁固结,因此抗滑移稳定性及抗倾覆稳定性不作为其控制条件。锚碇所提供的竖向分力最大为 $M_e/(2L_e/3 + L_s)$,作为安全考虑,可认为锚碇材料用量与地锚拉索索力满足以下关系:

$$Q_e = N_e$$

(13)

1.2.6 主梁材料用量

主梁的材料用量直接由主梁恒载集度决定,一期恒载材料用量 Q_{q_1} 、二期恒载材料用量 Q_{q_2} 分别为

$$Q_{q_1} = (L_c + L_s) q_1 \qquad Q_{q_2} = (L_c + L_s) q_2$$

(14)

1.3 计算参数

根据对多座主梁悬臂施工 PC 斜拉桥的调研结果,拉索、主塔、主梁一期恒载、主梁二期恒载及锚碇材料单价依次可取 3 万元/t、0.39 万元/m³、0.44 万元/m³、0.12 万元/m³、0.11 万元/m³;拉索材料密度 ρ_c 及材料强度 f_c 可分别取 8005 kg/m³、534.4 MPa,混凝土材料密度及材料强度可分别取 2651 kg/m³、6.11 MPa;图 1 中, h_0 可取 $h/3$, h_1 可取 L_c/m (m 为自定义参数,为主跨跨径 L_c 与塔柱无索区高度的比值), h_2 可取 $0.6h_1L_s/L_c$, h_3 可取 $0.6h_1(1 - L_s/L_c)$;主跨跨度为 100 m 及 200 m 时,主梁一期恒载集度分别取 440 kN/m、640 kN/m,二期恒载均取 70 kN/m,活载集度均取 34.65 kN/m。

将各参数带入以上所求得各构件造价计算公式并求和可得全桥总造价。

2 基于经济性能分析的参数优化

在活载集度不变,且桥面宽度不变的前提下,以总造价 C 和单位桥长造价 D 为优化目标,研究背索自锚比例、边主跨比及塔跨比的合理区间。

2.1 背索自锚比例及边主跨比

因边跨与主跨自锚段索距一致,边跨自锚段与主跨长度比(L_s/L_c)可代表背索自锚比例。边主跨比可用 $(L_s + L_e)/L_c$ 表示。塔柱无索区高度为主跨跨径 L_c/m ,取 $m = 4$,分别以锚碇长度为主跨长度的 0.5%、10%、15%、20%、25% 计算不同边跨自锚段长度下的总造价及单位桥长造价。计算结果如图 3、图 4 及表 1 所示。

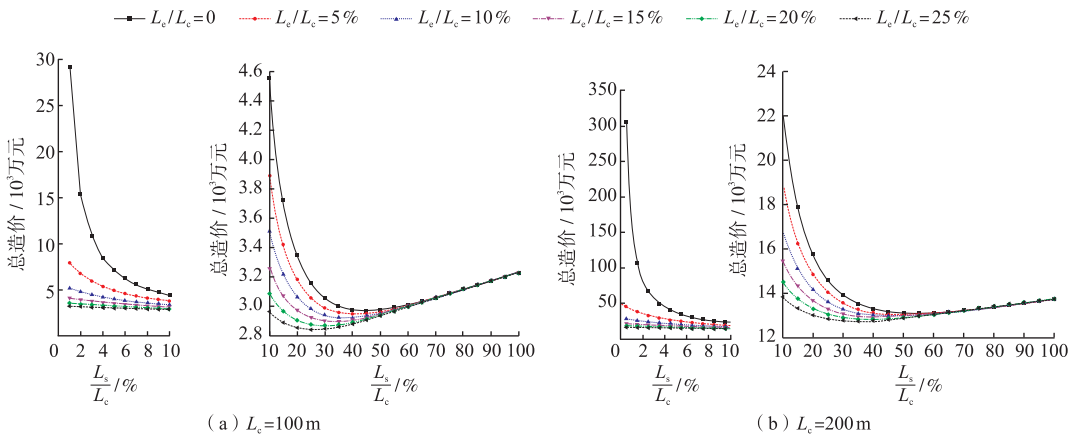


图3 总造价与 L_s 及 L_e 的关系

Fig.3 Relationships between total cost and L_s and L_e

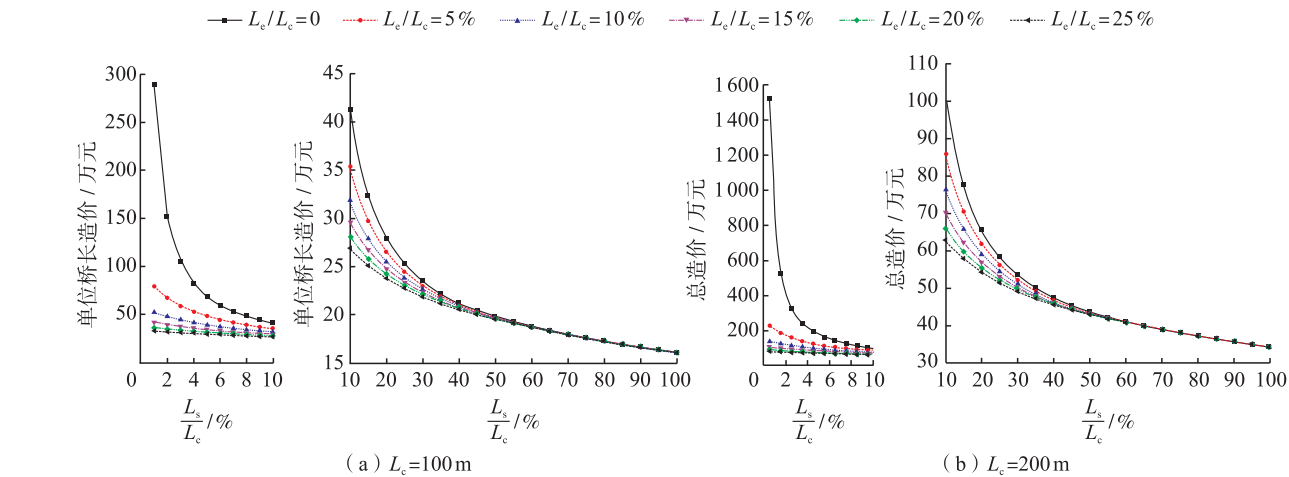


图 4 单位造价与 L_s 及 L_e 的关系

Fig.4 Relationships between cost of per unit length of bridge and L_s and L_e

表 1 总造价最低时背索自锚比例、边主跨比及单位桥长造价

Table 1 Ratio of self-anchored length of side span to length of main span, side-to-main span ratio, and total cost when total cost is minimum

锚碇主跨 长度比/%	背索自锚比例/%		边主跨比/%		最低总造价/万元		单位桥长造价/万元	
	$L_c = 100\text{ m}$	$L_c = 200\text{ m}$	$L_c = 100\text{ m}$	$L_c = 200\text{ m}$	$L_c = 100\text{ m}$	$L_c = 200\text{ m}$	$L_c = 100\text{ m}$	$L_c = 200\text{ m}$
0	45	53.5	45	53.5	2 969	13 099	20.5	42.7
5	41	50	46	55	2 946	13 036	20.9	43.5
10	37	46	47	56	2 921	12 969	21.3	44.4
15	34	42.5	49	57.5	2 895	12 898	21.6	45.3
20	30	38.5	50	58.5	2 868	12 822	22.1	46.3
25	26	34.5	51	59.5	2 840	12 742	22.5	47.4

根据图 3 ~ 4, 背索自锚比例 (L_s/L_c) 一定时, 总造价及单位桥长造价随锚碇主跨长度比 (L_e/L_c) 的增大而降低。 L_e/L_c 一定时, 总造价随 L_s/L_c 的增大先减小后增大; 单位桥长造价随 L_s/L_c 的增大而减小。 当 L_s/L_c 小于一定值时, 总造价及单位桥长造价随其减小增加很快; 当 L_s/L_c 大于一定值时, 总造价及单位桥长造价随 L_s/L_c 的增大受 L_e/L_c 的影响逐渐减小。

统计满足 $D \leq 1.01D_{\min}$ 的 L_s/L_c 及 $(L_s + L_e)/L_c$ 范围见表 2。

由表 2 可见, L_s/L_c 及 $(L_s + L_e)/L_c$ 在以总造价最低时的取值为中心 $\pm 10\%$ 范围内变动时, 总造价变动较小, 且根据表 1 统计结果, 总造价最低时背索自锚比例及边主跨比与锚碇主跨长度比接近线性关系。 因此, 进行线性拟合得到独塔部分地锚式斜拉桥特定锚碇主跨长度比对应的经济背索自锚比例、经济边主跨比计算公式为

$$\frac{L_s}{L_c} = 0.487 - 0.726 \frac{L_e}{L_c}$$
$$\frac{L_s + L_e}{L_c} = 0.487 + 0.274 \frac{L_e}{L_c}$$

(15)

由式(15)可知, 当符合经济性要求时, 背索自锚比例与锚碇主跨长度比成反比, 边主跨比与锚碇主跨长度比成正比, 且 $L_s/L_c \in [0, 0.487]$, $L_e/L_c \in [0, 0.671]$, $(L_s + L_e)/L_c \in [0.487, 0.671]$ 。 计算满足上述条件的不同锚碇主跨长度比对应的总造价及单位桥长造价与最低总造价及单位桥长造价的比值, 如图 5、图 6 所示。

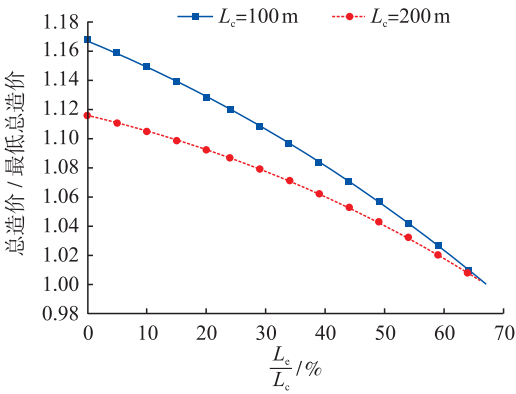


图5 总造价与锚碇主跨长度比的关系

Fig.5 Relationship between total cost and ratio of anchor length to main span length

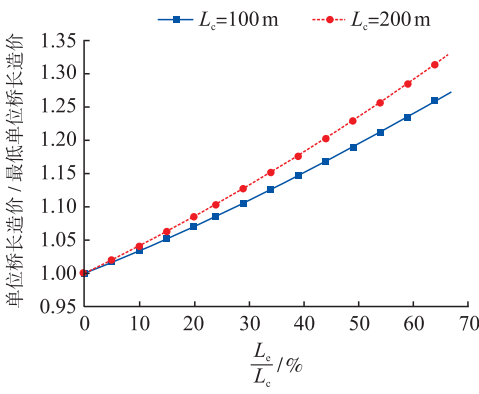


图6 单位桥长造价与锚碇主跨长度比的关系

Fig.6 Relationship between cost per unit length of bridge and ratio of anchor length to main span length

由图5~6可知,当考虑锚碇主跨长度比与背索自锚比例的耦合作用时,总造价随锚碇主跨长度比的增大而降低,单位桥长造价随其增大而增大。因此,仅考虑主跨跨越能力时,较大锚碇主跨长度比、较小背索自锚比例能提高桥梁经济性能;当综合考虑全桥跨越能力时,较小锚碇主跨长度比、较大背索自锚比例能提高桥梁经济性能。

综合考虑桥梁美学性能,根据古典美学中“黄金分割法则”,应满足0.618边跨自锚段长度≥锚碇长度。将此条件带入式(15),可得以下结论:考虑全桥跨越能力时,背索自锚比例宜取0.336~0.487范围的大值,边主跨比宜取0.487~0.544范围的小值,考虑单跨跨越能力时反之;当主跨跨度较小时,可取适当小于依据上原则的取值,当主跨跨度较大时反之。进而可知,独塔部分地锚式PC斜拉桥仅在边跨自锚段空间受地形条件限制时经济性能优于独塔常规斜拉桥,在常规地形并无优势。

2.2 塔跨比

取背索自锚比例0.336,边主跨比0.544,计算1.3中参数 $m=3\sim 8$ 时(塔跨比 $=1.6/m$)的总造价与最低总造价比值,计算结果如图7所示。

根据计算结果,总造价随 m 的增大先减小后增大, $L_c=100\text{ m}$ 时, $m=4.3$ 对应总造价最低, m 取3.6~5.1时总造价小于1.01倍最低总造价; $L_c=200\text{ m}$ 时, $m=4.9$ 对应造价最低, m 取4.3~5.7时总造价小于1.01倍最低总造价。跨度越大,总造价最低时 m 值越大,塔跨比越小。

主梁轴力与塔跨比有关,塔跨比越大,主梁轴力越小。所以,当造价接近时,塔跨比宜取大值,即 m 取小值。因此,当 $L_c=100\text{ m}$ 时, $m\in[3.6,4.3]$,塔跨比 $\in[0.372,0.444]$;当 $L_c=200\text{ m}$ 时, $m\in[4.3,4.9]$,塔跨比 $\in[0.327,0.372]$ 。

综合考虑,塔跨比宜取0.372左右,对应的主跨边索倾角为 20.4° 左右,跨径小时取较大值,跨径大时取较小值。

2.3 锚碇成本

对于部分地锚式斜拉桥,工程条件越不利,锚碇成本越高,合理背索自锚比例(边主跨比)越大,合理塔跨比越大^[21]。独塔部分地锚式PC斜拉桥的适应地形为有景观需求的U形山谷,其锚碇仅可能为岩锚及岸上锚碇。相比双塔三跨部分地锚式斜拉桥(可采用岩锚、岸上锚碇、浅水锚碇及深水锚碇等),其锚碇成本变化范围较小,2.1节及2.2节中所得结论依然成立。

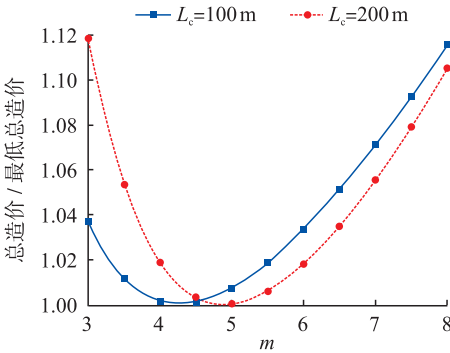


图7 总造价/最低总造价随参数m的变化

Fig.7 Change of ratio of total cost to lowest total cost with parameter m

3 工程实例验证

某独塔部分地锚式 PC 斜拉桥跨径组合为 102 m(主跨,9 m 支架现浇段无索,93 m 悬臂施工节段有索)+27 m(边跨)+17 m(锚碇),主梁一期恒载集度为 414 kN/m,二期恒载集度为 92.6 kN/m,主跨拉索 11 对,边跨拉索 2 对,地锚拉索 5 对。计算结果与实桥数据对比见表 3,地锚拉索材料用量误差最大,误差值为 -6.5%,拉索合计(主梁拉索+地锚拉索)、主塔、锚碇材料用量最大误差值为-2.2%,满足进行经济及设计参数研究的精度要求。

表 3 材料用量计算值与实桥值对比
Table 3 Comparison of calculated and actual material dosages

构 件	计算值/t	实桥值/t	误差/%	构 件	计算值/m³	实桥值/m³	误差/%
主梁拉索	796.2	789.8	-0.8	主 塔	26 078.8	26 270.3	-0.7
地锚拉索	517.1	553	-6.5	锚 碇	68 795.9	68 938.7	-0.2
拉索合计	1313.3	1 342.8	-2.2				

以实桥主跨跨径及恒载集度数据替代 1.3 节中部分参数的取值进行基于经济性的设计参数研究,当固定锚碇长度为 17 m 时,得到总造价最低时边跨跨度为 30 m,原设计边跨跨度 27 m 所对应的总造价比最低总造价大 0.1%;当边跨及锚碇分别取设计长度时,得到总造价最低时的塔跨比为 0.348,对应主跨边索倾角为 19.2°,原设计 22.6°所对应的总造价比最低总造价大 0.9%。满足进行经济及设计参数研究的精度要求。

4 对比分析

将本文得到的合理背索自锚比例、边主跨比及塔跨比与文献[1]、[21]、[3]、[22]进行对比,结果见表 4。

表 4 合理参数范围对比
Table 4 Comparison of reasonable parameter ranges

参数	背索自锚比例	边主跨比	塔跨比	主跨边索角度/(°)
独塔部分地锚式 PC 斜拉桥	0.336 ~ 0.487	0.487 ~ 0.544	0.372	20.4
独塔常规斜拉桥 ^[22]		0.5 ~ 0.8	0.30 ~ 0.45	16.7 ~ 24.2
双塔三跨部分地锚式斜拉桥 ^[3,21]	0.6 ~ 0.7	0.3	0.15 ~ 0.20	16.7 ~ 21.8
双塔三跨 PC 斜拉桥 ^[1]		0.40 ~ 0.45	0.15 ~ 0.25	16.7 ~ 26.6

根据对比结果,独塔部分地锚式 PC 斜拉桥合理背索自锚比例小于双塔三跨部分地锚式斜拉桥,边主跨比小于 2 倍的双塔三跨部分地锚斜拉桥及双塔三跨常规斜拉桥的边中跨比。独塔部分地锚式斜拉桥与其他斜拉桥的主塔及主跨主梁的相关设计参数区别不明显。

5 结 论

- a. 考虑全桥跨越能力时,独塔部分地锚式 PC 斜拉桥背索自锚比例宜取 0.336 ~ 0.487 范围的大值,边主跨比宜取 0.487 ~ 0.544 范围的小值;考虑单跨跨越能力时反之;当主跨跨度较小时,可取适当小于依据上原则的取值,当主跨跨度较大时反之。
- b. 独塔部分地锚式 PC 斜拉桥仅在边跨自锚段空间受地形条件限制时经济性能优于独塔常规斜拉桥,在常规地形并无优势。
- c. 独塔部分地锚式 PC 斜拉桥塔跨比宜取 0.372 左右,对应的主跨边索倾角为 20.4°左右,跨径小时取较大值,跨径大时取较小值,与其他类型斜拉桥无明显区别。

参考文献:

[1] 肖汝诚. 桥梁结构体系[M]. 北京:人民交通出版社,2013.

[2] GIMSING N J,GEORGAKIS C T. Cable supported bridges:concept and design[M]. 3rd Edition. Chichester,UK:John Wiley & Sons ,Ltd,2012.

- [4] 肖汝诚,卫璞,孙斌.大跨度部分地锚斜拉桥力学分析与参数研究[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(5):1097-1103. (XIAO Rucheng, WEI Pu, SUN Bin. Mechanical analysis and parametric study of long-span partially earth-anchored cable-stayed bridge[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2013, 43(5):1097-1103. (in Chinese))
- [4] 孙斌.超千米级斜拉桥结构体系研究[D].上海:同济大学,2008.
- [5] 夏睿杰,贾丽君.部分地锚斜拉桥结构参数分析[J].城市道桥与防洪,2012,164(8):326-330. (XIA Ruijie, JIA Lijun. Structure parameter analysis of partial earth-anchored cable-stayed bridges[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012, 164(8):326-330. (in Chinese))
- [6] ZHANG Liwen, XIAO Rucheng, XIA Ruijie. Mechanical analysis and study on structural parameter of partially earth-anchored cable-stayed bridge part I: mechanical analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 44/45/46/47:1898-1905.
- [7] ZHANG Liwen, XIAO Rucheng, XIA Ruijie. Mechanical analysis and study on structural parameter of partially earth-anchored cable-stayed bridge part II: parametric study[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 44/45/46/47:1906-1912.
- [8] 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,2009,39(3):51-54. (SUN Bin, XIAO Rucheng, JIA Lijun. Trial design of a proposed partially ground-anchored cable-stayed with a main span 1400m[J]. Bridge construction, 2009, 39(3):51-54. (in Chinese))
- [9] SUN Bin, CHENG Jin, XIAO Rucheng. Preliminary design and parametric study of 1400 m partially earth-anchored cable-stayed bridge[J]. Scientia China Technologica, 2010, 53(2):502-511.
- [10] ZHANG Liwen, XIA Ruijie. The reasonable finished dead state research of partially earth-anchored cable-stayed bridge[J]. Advanced Materials Research, 2011, 255/256/257/258/259/260:1319-1325.
- [11] KIM S H, WON J H, CHO K I, et al. Behavior of partially earth anchored cable-stayed bridge considering construction phase and operational phase[J]. Journal of Computer Assisted Learning, 2007, 8(3):163-176.
- [12] SUN Bin, XIAO Rucheng. Optimization of dead load state in earth-anchored cable-stayed bridges[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 22(3):87-94.
- [13] 张力文,夏睿杰,肖汝诚,等.部分地锚式斜拉桥合理成桥状态二阶段确定法[J].深圳大学学报(理工版),2012,29(1):51-55. (ZHANG Liwen, XIA Ruijie, XIAO Rucheng, et al. The two-stage method to determine the reasonable completed status of partially earth-anchored cable-stayed bridge[J]. Journal of Shenzhen University(Science and engineering), 2012, 29(1):51-55. (in Chinese))
- [14] WON J H, PARK S J, YOON J H, et al. Structural effects of partially earth-anchored cable system on medium-span cable-stayed bridges[J]. International Journal of Steel Structures, 2008, 8(3):225-236.
- [15] WON J H, YOON J H, PARK S J, et al. Effects of partially earth-anchored cable system on dynamic wind response of cable-stayed bridges[J]. Wind and Structures, 2008, 11(6):441-453.
- [16] ZHANG Xinjun, YAO Mei. Numerical investigation on the wind stability of super long-span partially earth-anchored cable-stayed bridges[J]. Wind & Structures An International Journal, 2015, 21(4):407-424.
- [17] 孙海凌.超大跨度斜拉桥的结构体系及抗风稳定性研究[D].杭州:浙江工业大学,2013.
- [18] 姚美.超大跨度部分地锚式斜拉桥抗风性能研究[D].杭州:浙江工业大学,2015.
- [19] 陈鑫,聂国隽,贾丽君,等.部分地锚斜拉桥自振频率的近似计算[J].力学季刊,2013,34(4):650-655. (CHEN Xin, NIE Guojun, JIA Lijun, et al. Approximate calculation of nature frequency of partially earth-anchored cable-stayed bridges[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2013, 34(4):650-655. (in Chinese))
- [20] 熊文,孙斌,肖汝诚,等.CFRP与钢组合拉索斜拉桥经济性能分析[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(8):124-129. (XIONG Wen, SUN Bin, XIAO Rucheng, et al. Economic behaviors of cable-stayed bridges with CFRP and steel composite stay cables[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(8):124-129. (in Chinese))
- [21] 孙斌,肖汝诚,CAI C S.部分地锚斜拉桥经济性能分析[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(10):1476-1482 (SUN Bin, XIAO Rucheng, CAI C S. Cost analysis of partially earth-anchored cable-stayed bridge[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(10):1476-1482. (in Chinese))
- [22] 刘士林.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.