

部分地锚斜拉桥经济性能分析

孙 斌¹, 肖汝诚¹, CAI C S^{2,3}

(1. 同济大学 土木工程学院, 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: 将部分地锚斜拉桥分为拉索、主塔、主梁、锚碇、基础等五部分, 分别推导了其材料用量计算公式, 引入材料单价系数, 得到了全桥总造价和单位桥面面积造价。据此开展了该桥型经济性能参数研究, 得到了主要结构参数的最优取值, 即地锚与中跨跨径之比为 0.3~0.4, 边中跨比为 0.40~0.45, 塔跨比为 0.15~0.20。对比结果表明, 随锚碇处地质条件不同, 在主跨跨径超过 800~1 600 m 后, 部分地锚斜拉桥的经济性能优于全自锚斜拉桥。

关键词: 部分地锚斜拉桥; 经济性能分析; 材料用量; 参数; 地锚与中跨跨径之比

中图分类号: U442; U448.27

文献标志码: A

Cost Analysis of Partially Earth-anchored Cable-stayed Bridge

SUN Bin¹, XIAO Rucheng¹, CAI C S^{2,3}

(1. College of Civil 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: The equations for material amounts of all structural parts in partially earth-anchored cable-stayed bridges were derived, including the stay cables, pylons, girders, anchorages, and foundations. The cost of both the entire bridge and per unit area of the deck was obtained by introducing the cost of per unit weight of each material. Then, parametric studies were performed from an economic behavior perspective, and the proposed parameter values were obtained as: the ratio of the earth-anchored girder length to the main span length is 0.3 to 0.4; the ratio of the side span length to the total self-anchored girder length in the main span is 0.40 to 0.45; and the ratio of the height of the pylon above the girder to the main span length is 0.15 to 0.2. The

comparison of results shows that the partially earth-anchored cable-stayed bridge is more economical than the fully self-anchored cable-stayed bridge with a main span length over 800~1 600 m, of which the threshold depends on the geological conditions at the anchorages.

Key words: partially earth-anchored cable-stayed bridge; cost analysis; material amounts; parametric; earth-anchored part length

由于相对于悬索桥具有经济优势, 或者为了跨越不适宜修建大型锚碇的地理环境, 桥梁工程师们一直致力于不断扩大斜拉桥的适用跨径。鉴于全自锚斜拉桥在进入超千米领域后遇到结构稳定性低、施工期悬臂长度大、经济性能低等难题, 国内外学者开展了对部分地锚斜拉桥的初步研究。丹麦 Gimsing^[1]、法国 Muller J^[2] 等对该桥型的结构体系和施工方案进行了构思, 笔者在前期研究中也开展了试设计和结构性能初步研究^[3-4]。既有研究表明, 部分地锚斜拉桥在结构设计及施工方法上是可行的, 且相对于同跨径全自锚斜拉桥具有主梁压力减小、稳定性提高、结构刚度增大等优点。

对于超大跨度领域内的缆索桥梁结构选型还必须考虑其经济性能, 为此, Gimsing^[1] 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料进行了对比。笔者曾利用该方法对斜拉-悬吊协作体系进行了分析, 取得了良好效果^[5]。本文在 Gimsing 方法的基础上推导部分地锚斜拉桥各结构部分的材料用量, 引入材料单价后得到全桥总造价和单位桥面面积造价公式, 并据此对部分地锚斜拉桥开展经济性能研究并进行参数分析, 获得了一些有益的结论。

收稿日期: 2012-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51008223)

第一作者: 孙 斌(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为大跨度桥梁结构理论. E-mail: sunbin@tongji.edu.cn

1 材料用量及造价公式推导

1.1 基本体系及计算思路

一般地,部分地锚斜拉桥可简化为图 1 所示结构.主跨跨径 l_m 可分为自锚部分 l_{sc} 和地锚部分 l_{ec} ,对应的主梁结构自重(一期恒载)分别为 g_{sc} 和 g_{ec} ;边跨跨径 l_{ac} 全部为自锚结构,主梁自重为 g_{ac} ;边跨地锚拉索的平均水平和垂直投影长度分别为 l_b 和 h_b .在主塔上,自锚和地锚拉索的锚固区高度分别为 h_{sa} 和 h_{ea} ,主梁以上和以下主塔无索区高度分别为 h_t 和 h_n .

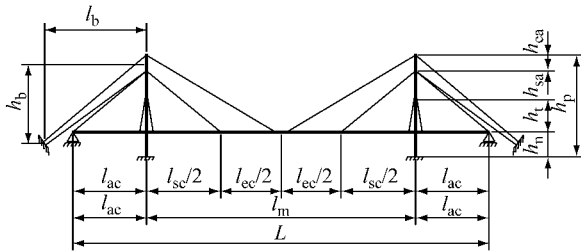


图 1 部分地锚斜拉桥一般结构简图

Fig.1 Partially earth-anchored cable-stayed bridge

将全桥结构分为拉索、主塔、主梁、锚碇、基础等五部分,可分别计算其材料用量.由于斜拉桥各构件均为承受轴力为主的构件,因此作为估算,可仅考虑轴力 N 对材料用量 Q 的贡献,而弯矩的影响可通过在材料强度中计入安全系数来考虑.由此,各结构部分材料用量 Q 均可表达为如下形式:

$$Q = \frac{\gamma}{f} N l \quad (1)$$

式中: γ 为材料容重; f 为计入安全系数的材料强度(容许应力); l 为构件长度.进一步计入材料单价 μ 即可得到各结构部分的造价 C .

$$C = \mu Q \quad (2)$$

估算中考虑的桥面荷载除主梁自重外,还包括桥面系自重(二期恒载) g_2 和均布活载 p .为表达精炼,下文变量中下标的 a, c, f, g, p 分别代表锚碇、拉索、基础、主梁、主塔.

需要说明的是,式(1) f 中计入的安全系数是一个广义的安全系数,除设计规范中规定的材料安全系数外,还隐含包括了结构弯矩及大跨度桥梁中非线性等因素的影响.因此,本文得到的造价数值仅是一个近似数字,但所有计算均基于相同的近似程度,并不影响后续参数分析及桥型经济性对比结论的可靠性.

1.2 拉索材料用量

根据部位不同又可将拉索细分为主跨自锚拉索、边跨自锚拉索、主跨地锚拉索、边跨自锚背索、边跨地锚拉索五部分,对应的变量下标分别为 sc, ec, ac, bs, be.

1.2.1 主跨自锚拉索材料用量

如图 2 所示,主跨自锚拉索可视为两端分别在 $l_{sc}/2$ 和 h_{sa} 范围内连续布置的拉索索面.取拉索微元 dx , x 为在梁端的锚固点到主塔的距离,计入拉索自重,主梁自重 g_{sc} 和均布活载 p 引起的拉索微元对应的索力 dN 可表示为:

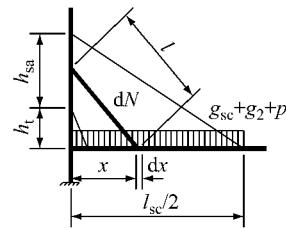


图 2 拉索材料用量计算简图

Fig.2 Quantity of stay cables

$$dN = \left[(g_{sc} + g_2 + p) dx + \frac{\gamma_c}{f_c} l dN \right] \frac{l}{h_t + 2h_{sa}x/l_{sc}} \quad (3)$$

$$l = \sqrt{x^2 + (h_t + 2h_{sa}x/l_{sc})^2} \quad (4)$$

因此

$$dN = \frac{(g_{sc} + g_2 + p)l}{h_t + 2h_{sa}x/l_{sc}} dx \left[1 - \frac{\gamma_c l^2}{f_c (h_t + 2h_{sa}x/l_{sc})} \right]^{-1} \approx \frac{(g_{sc} + g_2 + p)l}{h_t + 2h_{sa}x/l_{sc}} \left[1 + \frac{\gamma_c l^2}{f_c (h_t + 2h_{sa}x/l_{sc})} \right] dx \quad (5)$$

由式(1)积分后可得到该部分拉索材料用量为

$$Q_{sc} = \frac{\gamma_c}{f_c} (g_{sc} + g_2 + p) \left(\frac{l_{sc}}{2} \right)^2 \left\{ \frac{\gamma_c l_{sc}}{2f_c} \left(\frac{l_{sc}}{2h_{sa}} \right)^2 \left(\frac{h_t}{h_{sa}} \right)^3 \cdot \left[1 - 4 \ln \left(1 + \frac{h_{sa}}{h_t} \right) - \frac{1}{1 + h_{sa}/h_t} + \frac{3h_{sa}}{h_t} - \left(\frac{h_{sa}}{h_t} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{h_{sa}}{h_t} \right)^3 \right] + \frac{l_{sc}}{2h_{sa}} \left(\frac{h_t}{h_{sa}} \right)^2 \left[\ln \left(1 + \frac{h_{sa}}{h_t} \right) - \frac{h_{sa}}{h_t} + \frac{1}{2} \left(\frac{h_{sa}}{h_t} \right)^2 + \frac{2\gamma_c h_{sa}}{3f_c} \left(\frac{h_{sa}}{h_t} \right)^2 \right] + \frac{2h_t h_t}{l_{sc} h_{sa}} \left[\frac{\gamma_c h_{sa}}{f_c} + \frac{h_{sa}}{h_t} + \frac{\gamma_c h_{sa} h_{sa}}{f_c h_t} + \frac{1}{2} \left(\frac{h_{sa}}{h_t} \right)^2 + \frac{\gamma_c h_{sa}}{3f_c} \left(\frac{h_{sa}}{h_t} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

在式(6)中,可令 h_{sa} 或 h_t 趋向于零而得到特殊情况下的拉索用量表达式.令 $h_{sa} \rightarrow 0$,相当于全部拉索锚固在主塔上同一点的辐射体系.

$$Q_{sc} = \frac{\gamma_c}{f_c} (g_{sc} + g_2 + p) h_t^2 \left[\frac{1}{5} \cdot \frac{\gamma_c l_{sc}}{2f_c} \left(\frac{l_{sc}}{2h_t} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(1 + \frac{2\gamma_c h_t}{f_c} \right) \left(\frac{l_{sc}}{2h_t} \right)^3 + \left(1 + \frac{\gamma_c h_t}{f_c} \right) \frac{l_{sc}}{2h_t} \right] \quad (7)$$

令 $h_t \rightarrow 0$, 相当于全部拉索平行布置的竖琴体系.

$$Q_{sc} = \frac{\gamma_c}{f_c} (g_{sc} + g_2 + p) \left(\frac{l_{sc}}{2}\right)^2 \left(\frac{l_{sc}}{2h_{sa}} + \frac{2h_{sa}}{l_{sc}}\right) \left[\frac{1}{2} + \frac{\gamma_c l_{sc}}{6f_c} \left(\frac{l_{sc}}{2h_{sa}} + \frac{2h_{sa}}{l_{sc}}\right)\right] \quad (8)$$

式(7)、式(8)与文献[1]分别对辐射体系和竖琴体系计算得到的结果完全相同.

上述公式较为复杂, 如果在计算过程中不计拉索自重影响, 式(6)~(8)可分别简化为

$$Q_{sc} = \frac{\gamma_c}{f_c} (g_{sc} + g_2 + p) \left(\frac{l_{sc}}{2}\right)^2 \left\{ \frac{2h_t + h_{sa}}{l_{sc}} + \frac{l_{sc}}{2h_{sa}} \left(\frac{h_t}{h_{sa}}\right)^2 \left[\ln\left(1 + \frac{h_{sa}}{h_t}\right) - \frac{h_{sa}}{h_t} + \frac{1}{2} \left(\frac{h_{sa}}{h_t}\right)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

$$Q_{sc} = \frac{\gamma_c}{f_c} (g_{sc} + g_2 + p) \left(\frac{l_{sc}}{2}\right)^2 \left(\frac{2h_t}{l_{sc}} + \frac{l_{sc}}{6h_t}\right) \quad (10)$$

$$Q_{sc} = \frac{\gamma_c}{f_c} (g_{sc} + g_2 + p) \left(\frac{l_{sc}}{2}\right)^2 \left(\frac{h_{sa}}{l_{sc}} + \frac{l_{sc}}{4h_{sa}}\right) \quad (11)$$

1.2.2 边跨自锚拉索材料用量

边跨自锚拉索材料用量 Q_{ac} 计算过程与主跨自锚拉索完全相同, 在式(6)~(11)中以 l_{ac} 替代 $l_{sc}/2$, g_{ac} 替代 g_{sc} 即可, 这里不再列出.

1.2.3 主跨地锚拉索材料用量

主跨地锚拉索材料用量 Q_{ec} 可由 $l_m/2$ 范围内的“大索面”材料用量扣除 $l_{sc}/2$ 范围内的“小索面”材料用量得到, 计算中 $l_{sc}/2$ 范围内主梁自重也采用 g_{ec} 即可. 具体表达式也不再列出.

1.2.4 边跨自锚背索材料用量

在传统全自锚斜拉桥中, 要在边跨最外侧设背索(锚索)来保持主塔内的弯矩平衡. 在部分地锚斜拉桥中也可以设置该拉索来维持自锚部分的弯矩平衡.

活载只作用在主跨且满布时, 主塔两侧自锚拉索拉力对塔梁交界处产生最大不平衡弯矩为

$$M_{bs} = \frac{1}{8} (g_{sc} + g_2 + p) l_{sc}^2 - \frac{1}{2} (g_{ac} + g_2) l_{ac}^2 + \frac{1}{6} Q_{sc} l_{sc} - \frac{1}{3} Q_{ac} l_{ac} \quad (12)$$

由此得到自锚背索的拉力和材料用量分别为

$$N_{bs} = \frac{M_{bs}}{h_t + h_{sa}} \sqrt{1 + \left(\frac{h_t + h_{sa}}{l_{ac}}\right)^2} \quad (13)$$

$$Q_{bs} = \frac{\gamma_c}{f_c} M_{bs} \left(\frac{l_{ac}}{h_t + h_{sa}} + \frac{h_t + h_{sa}}{l_{ac}}\right) \quad (14)$$

1.2.5 边跨地锚拉索材料用量

如果未设自锚背索, 则主塔中的全部不平衡弯矩均需由地锚拉索承担, 最大不平衡弯矩为

$$M_{be} = \frac{1}{8} (g_{ec} + g_2 + p) l_{ec} (2l_{sc} + l_{ec}) + \frac{1}{8} (g_{sc} + g_2 + p) l_{sc}^2 - \frac{1}{2} (g_{ac} + g_2) l_{ac}^2 + \frac{1}{4} Q_{ec} (l_{sc} + l_{ec}) + \frac{1}{6} Q_{sc} l_{sc} - \frac{1}{3} Q_{ac} l_{ac} \quad (15)$$

如果已设自锚背索, 则仅需考虑主跨地锚部分荷载对塔梁交界处产生的弯矩 M_{be} .

$$M_{be} = \frac{1}{8} (g_{ec} + g_2 + p) l_{ec} (2l_{sc} + l_{ec}) + \frac{1}{4} Q_{ec} (l_{sc} + l_{ec}) \quad (16)$$

由此得到地锚拉索的拉力和材料用量分别为

$$N_{be} = \frac{M_{be}}{h_t + h_{sa} + \frac{1}{2} h_{ea}} \sqrt{1 + (h_b/l_b)^2} \quad (17)$$

$$Q_{be} = \frac{\gamma_c}{f_c} \frac{l_b}{h_t + h_{sa} + \frac{1}{2} h_{ea}} M_{be} [1 + (h_b/l_b)^2] \quad (18)$$

1.3 主塔材料用量

将主塔简化为轴心受压柱, 并假定: 锚索区的主塔截面呈线性变化. 塔顶处轴力为零, 因此截面面积也为零; 锚索区下端截面面积 A_p 由该处承受的压力 N_{p0} 确定. 主塔无索区作为顶点作用集中力 N_p 的等强度柱计算. 见图 3, 图中 ξ 为计算截面到拉索锚固区上端的高度差.

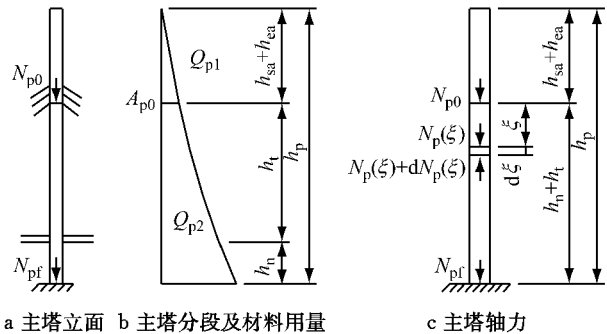


图 3 主塔材料用量计算简图

Fig. 3 Quantity of pylons

(1) 锚索区主塔材料用量. 作用在锚索区下端的轴力 N_{p0} 等于斜拉部分承担的结构荷载、自锚背索竖向分力、地锚拉索竖向分力及锚索区主塔重量之和, 即

$$N_{p0} = (g_{ac} + g_2 + p) l_{ac} + (g_{sc} + g_2 + p) l_{sc}/2 + (g_{ec} + g_2 + p) l_{ec}/2 + Q_{ac} + Q_{sc} + Q_{ec} + \frac{M_{bs}}{l_{ac}} + \frac{M_{be}}{h_t + h_{sa} + \frac{1}{2} h_{ea}} \frac{h_b}{l_b} + \frac{\gamma_p}{2f_p} N_{p0} (h_{sa} + h_{ea}) \quad (19)$$

可得锚索区下端轴力和锚索区主塔材料用量分别为

$$N_{p0} = [(g_{ac} + g_2 + p)l_{ac} + (g_{sc} + g_2 + p)l_{sc}/2 + (g_{ec} + g_2 + p)l_{ec}/2 + Q_{ac} + Q_{sc} + Q_{ec} + \frac{M_{bs}}{l_a} + \frac{M_{be}}{h_t + h_{sa} + \frac{1}{2}h_{ea}}] / [1 - \frac{\gamma_p}{2f_p}(h_{sa} + h_{ea})] \quad (20)$$

$$Q_{p1} = \frac{\gamma_p}{2f_p} N_{p0} (h_{sa} + h_{ea}) \quad (21)$$

(2)主塔无索区材料用量. 无索区轴力增量等于主塔微元自重, 因此

$$dN_p(\xi) = \frac{\gamma_p}{f_p} N_p(\xi) d\xi \quad (22)$$

解得

$$N_p(\xi) = N_{p0} \exp\left(\frac{\gamma_p}{f_p} \xi\right) \quad (23)$$

因此, 无索区材料用量为

$$Q_{p2} = N_{pf} - N_{p0} = N_{p0} \left\{ \exp\left[\frac{\gamma_p}{f_p}(h_n + h_t)\right] - 1 \right\} \quad (24)$$

叠加式(21), 得到主塔材料总用量为

$$Q_p = N_{p0} \left\{ \frac{\gamma_p}{2f_p}(h_{sa} + h_{ea}) + \exp\left[\frac{\gamma_p}{f_p}(h_n + h_t)\right] - 1 \right\} \quad (25)$$

1.4 主梁材料用量

主梁材料用量(半桥)如式(26)所示. 对主梁自重均布荷载的详细讨论见第 2 节.

$$Q_g = g_{ac}l_{ac} + g_{sc}l_{sc}/2 + g_{ec}l_{ec}/2 \quad (26)$$

桥面系材料用量(半桥)为

$$Q_{g2} = g_2(l_{ac} + l_{sc}/2 + l_{ec}/2) \quad (27)$$

1.5 锚碇材料用量

实际工程中锚碇结构、材料用量及造价影响因素众多, 差异很大. 作为估算, 研究中引入单一比例系数 k_a 来考虑各种因素的影响, 得到锚碇材料用量与所承受的地锚拉索索力的关系为

$$Q_a = k_a N_{be} \quad (28)$$

1.6 基础材料用量

主塔基础反力由式(23)确定:

$$N_{pf} = N_{p0} \exp\left[\frac{\gamma_p}{f_p}(h_n + h_t)\right] \quad (29)$$

边墩承担自锚背索索力, 其反力可表示为

$$N_b = M_{bs}/l_{ac} \quad (30)$$

引入比例系数 k_f 得到全桥基础材料用量为

$$Q_f = k_f(N_{pf} + N_b) \quad (31)$$

1.7 全桥总造价

至此已计算得到各部分结构的材料用量, 引入对应的材料单价, 可得到全桥总造价为

$$C = 2[\mu_c(Q_{sc} + Q_{ac} + Q_{ec} + Q_{bs} + Q_{be}) + \mu_p Q_p + \mu_g Q_g + \mu_{g2} Q_{g2} + \mu_a Q_a + \mu_f Q_f] \quad (32)$$

还可以得到单位桥面面积造价为

$$C_u = C/(BL) \quad (33)$$

式中: B 为桥面宽度; L 为全桥总长.

2 主梁自重

上述推导中均认为各段主梁自重均布荷载为确定值, 实际上该值显然要随跨径大小发生变化. 仍然采用图 2 所示计算简图, 主跨自锚部分主梁自重应满足式(34):

$$\frac{(f_g/\gamma_g)dg_{sc}}{(g_{sc} + g_2 + p)dx} = \frac{x}{h_t + 2h_{sa}x/l_{sc}} \quad (34)$$

求解后得到:

$$g_{sc}(x) = \left\{ \exp\left[\frac{\gamma_g}{f_g} \frac{l_{sc}}{2h_{sa}} \left(\frac{l_{sc}}{2} - x + \frac{h_t l_{sc}}{2h_{sa}} \cdot \ln \frac{2x/l_{sc} + h_t/h_{sa}}{1 + h_t/h_{sa}}\right)\right] - 1 \right\} (g_2 + p) \quad (35)$$

相应地也可得到其他各段主梁的类似表达式. 然而, 如果在第 1 节各式中直接引入式(35), 计算将过于复杂. 另一方面, 式(35)得到的主梁自重最小值为零, 事实上由于承受弯矩、局部受力、构造、抗风等多种因素, 主梁至少要具有一定的最小截面尺寸. 因此, 在保留式(35)中的指数形式和相关参数前提下, 结合实桥和设计方案调研成果, 拟合出主梁自重平均值为

$$g_{sc} = \left\{ 0.6 \exp\left[\frac{\gamma_g l_{sc}^2}{4f_g(h_t + h_{sa})}\right] + 0.8 \right\} (g_2 + p) \quad (36)$$

类似地, 可写出其他梁段自重为

$$g_{ec} = \left\{ 0.6 \exp\left[\frac{\gamma_g l_{ec}(l_{sc} + l_{ec})}{4f_g(h_t + h_{sa} + h_{ea})}\right] + 0.8 \right\} (g_2 + p) \quad (37)$$

$$g_{ac} = \left\{ 0.6 \exp\left[\frac{\gamma_g l_{ac}(l_{sc} - l_{ac})}{f_g(h_t + h_{sa})}\right] + 0.8 \right\} (g_2 + p) \quad (38)$$

3 部分地锚斜拉桥经济性性能

3.1 参数

根据实际桥梁和设计方案调研成果, 确定各参数取值如表 1 所示.

3.2 拉索自重对拉索材料用量的影响

由第 1 节各式可知, 不考虑拉索自重时得到的拉索材料用量偏小. 误差比例与主跨跨径 l_m 、地锚

与中跨跨径之比 $\alpha=l_{ec}/l_m$ 的关系如图 4 所示。

表 1 计算参数

Tab.1 Parameters

$\gamma_c/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_p/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_g/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	f_c/MPa	f_p/MPa	f_g/MPa	$g_2/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$p/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
78.5	26.0	78.5	534.4	6.11	156.1	70	48.30
$\mu_c/(\text{万元} \cdot \text{t}^{-1})$	$\mu_p/(\text{万元} \cdot \text{m}^{-3})$	$\mu_g/(\text{万元} \cdot \text{t}^{-1})$	$\mu_{g2}/(\text{万元} \cdot \text{t}^{-1})$	$\mu_a/(\text{万元} \cdot \text{m}^{-3})$	$\mu_t/(\text{万元} \cdot \text{m}^{-3})$	k_a	
3.00	0.39	2.00	0.50	0.260	0.312	1.0 (岩锚), 3.0 (岸上) 6.0 (浅水), 8.0 (深水)	
k_f	h_{sa}	h_{ca}	h_b	l_b	h_n/m	B/m	
1.8	$(1/16)l_{sc}$	$(1/16)l_{ec}$	$h_p - (1/2)h_{ca}$	$h_p/\tan 30^\circ$	70	34.5	

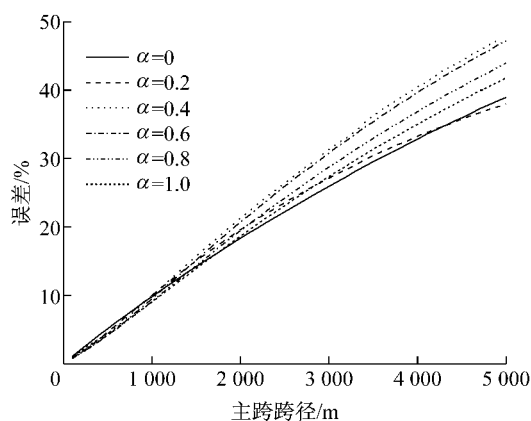


图 4 不考虑拉索自重的拉索材料用量误差

Fig.4 Errors of stay cables quantity without taking into account the self-weight

可以看出误差比例基本与主跨跨径成正比,对于未来若干年内较为关注的主跨跨径 1 200~2 000 m 范围,误差达到 11.0%~21.3%。因此在计算拉索材料用量时必须计入其自重的影响。

3.3 经济性能参数

分别以总造价和单位桥面面积造价为优化目标,在主跨跨径 200~5 000 m 范围内进行了部分地锚斜拉桥经济性能参数研究。考虑的结构参数包括: α 、边中跨比、塔跨比。

3.3.1 地锚与中跨跨径之比

取主跨 $\alpha=0$ (传统全自锚斜拉桥), 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 (全地锚斜拉桥), 计算得到总造价和单位桥面面积造价变化规律如图 5、图 6 所示。

采用有地锚结构可以减小桥梁总长度,因此有利于降低总造价;而对于单位桥面面积造价,趋势正好相反。因此,图 5、图 6 中不同 α 曲线之间的对比关系不同:对于总造价,总是全自锚斜拉桥最高。跨径低于 1 100 m 时,全地锚斜拉桥最低,但有地锚结构之间差距不大;跨径超过 1 100 m 后, α 取 0.4 时造价最低;对于单位桥面面积造价,总是全地锚斜拉桥最高。跨径低于 1 000 m 时,全自锚斜拉桥最低,且 α 不同时单位造价差别较大;跨径在

1 000~2 300 m 之间时, α 取 0.2 时造价最低;跨径超过 2 300 m 后, α 取 0.4 时造价最低。

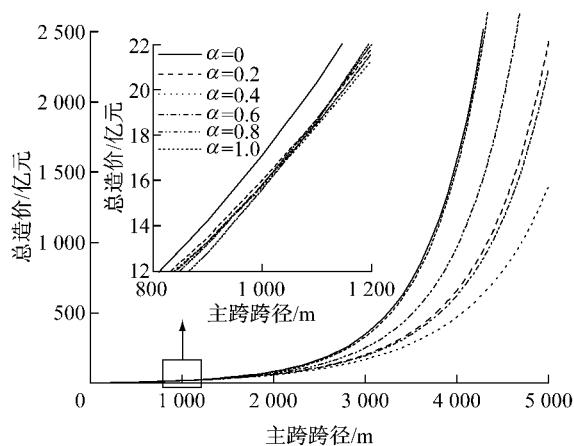


图 5 总造价与主跨跨径关系

Fig.5 Variation of total cost with span length

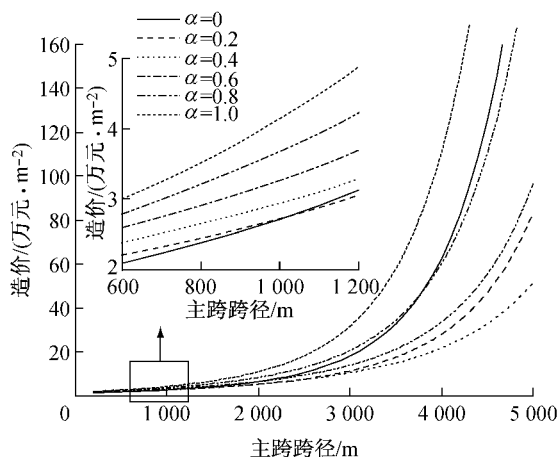


图 6 单位桥面面积造价与主跨跨径关系

Fig.6 Variation of unit cost with span length

图 5、图 6 大致说明了不同地锚段比例对应的造价差别幅度,更进一步,令 α 在 0~1 之间自由变化可得到最优 α 与主跨跨径的对应关系,如图 7 所示。可以看出,跨径在 1 000 m 以下时,最低总造价对应的 α 为 1,表明全地锚斜拉桥造价最低;跨径超过 1 000 m 后,最优 α 几乎不变,为 39% 左右。而单位

桥面面积造价最低时,跨径低于 800 m 时最优 α 为零,表明全自锚斜拉桥为最优结构;跨径超过 800 m 后, α 逐渐增大,表明部分地锚斜拉桥造价较低.在跨径 1 200~2 000 m 范围,最优 α 约为 16%~28%;跨径超过 2 000 m 后,最优 α 逐渐趋近于总价最低时的数值.

综合考虑,建议 α 取值为 30%~40%.

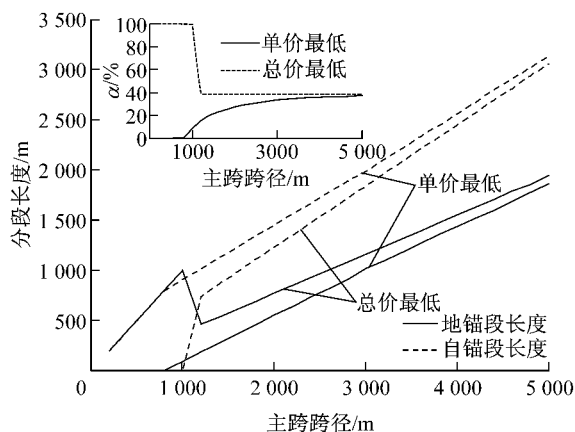


图 7 最低造价对应的分段长度、 α 与主跨跨径关系

Fig.7 Variation of earth-anchored girder length and ratio with span length at minimum cost

3.3.2 边中跨比

令边跨跨径与主跨自锚段总长之比 l_{ac}/l_{sc} 在 0.05~0.50 之间自由变化,可得到最优边中跨比与主跨跨径的对应关系如图 8 所示.

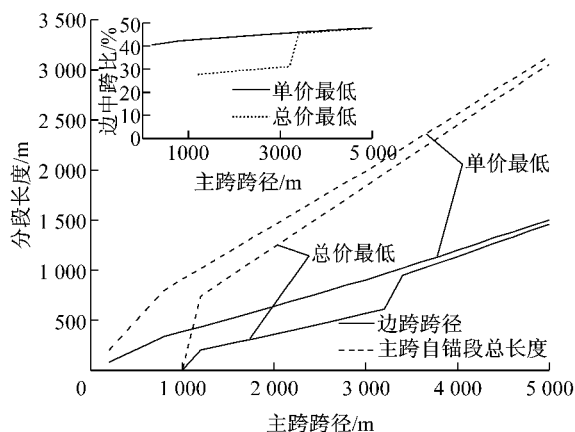


图 8 最低造价对应的分段长度、边中跨比与主跨跨径关系

Fig.8 Variation of side span length and ratio with span length at minimum cost

采用较小的边中跨比可以减小桥梁总长度,因此有利于降低总造价;而对于单位桥面面积造价,趋势相反.图 8 表明,最低单价对应的边中跨比一直保持在 41%~48% 范围内,而最低总造价对应的

边中跨比变化较大,可分为 3 个区间:由于跨径在 1 000 m 以下时全地锚斜拉桥总造价最低(图 7),因此总价最低对应的边中跨比缺少该区间数值;主跨跨径在 1 000~3 200 m 之间时,最优边中跨比较小,约为 28%~31%;跨径超过 3 200 m 后,最优边中跨比突变到约 46%~48%,与最低单价对应数值几乎相同.突变的原因可解释如下:为了保证主塔内弯矩的平衡,可增大边跨以减小不平衡弯矩,或增大自锚背索.当自锚背索的造价增幅大于加长边跨的造价增幅时,最优边中跨比发生突变.

计算结果还表明,在跨径 1 000~5 000 m 范围内,不同边中跨比对应的最低总造价差别仅为 10% 左右,而最低单价差别可达到约 38%~48%,因此建议采用 40%~45% 左右的较大边中跨比,在获得较低单价的同时总造价增幅并不大.

3.3.3 塔跨比

令桥面以上主塔高度与主跨跨径之比 $(h_p - h_n)/l_m$ 在 0.05~0.50 之间自由变化,可得到最优塔跨比与主跨跨径的对应关系,如图 9 所示.

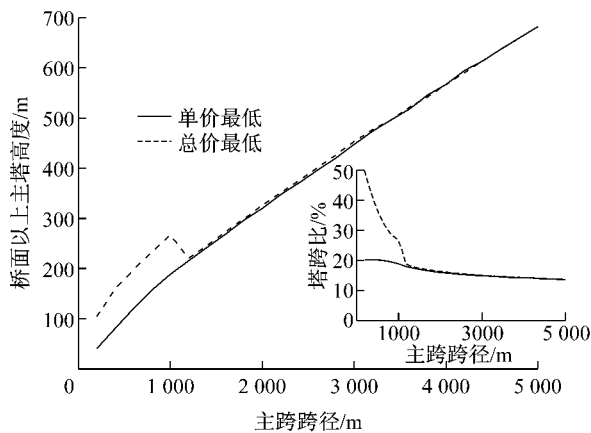


图 9 最低造价对应的塔高、塔跨比与主跨跨径关系

Fig.9 Variation of pylon's height and ratio with span length at minimum cost

最低单价对应的塔跨比随着跨径增长略有降低,在 14%~20% 范围内,而最低总造价对应的塔跨比变化较大,可分为 2 个区间:由于跨径在 1 000 m 以下时全地锚斜拉桥总造价最低(图 7),采用较高主塔可以增大主跨拉索倾角,进而减小边跨地锚拉索索力和锚碇锚固力,同时主塔高度及造价增加并不多,因此对应的塔跨比数值较大,由 200 m 时的约 50% 过渡到 1 000 m 时的约 19%;主跨跨径超过 1 000 m 后,最优塔跨比接近最低单价对应数值,在 14%~19% 范围内.

因此建议塔跨比取值为 15%~20%,对应的主

跨跨中拉索倾角约为 $17^{\circ}\sim 22^{\circ}$ ，并在跨径较小时取大值。

3.4 不同锚碇条件的影响

3.3 节中均假定工程条件为浅水锚碇，不同工程条件下的计算结果表明，锚碇材料用量比例系数变化时最优边中跨比和塔跨比的变化较小，而最优 α 变化显著，如图 10 所示。

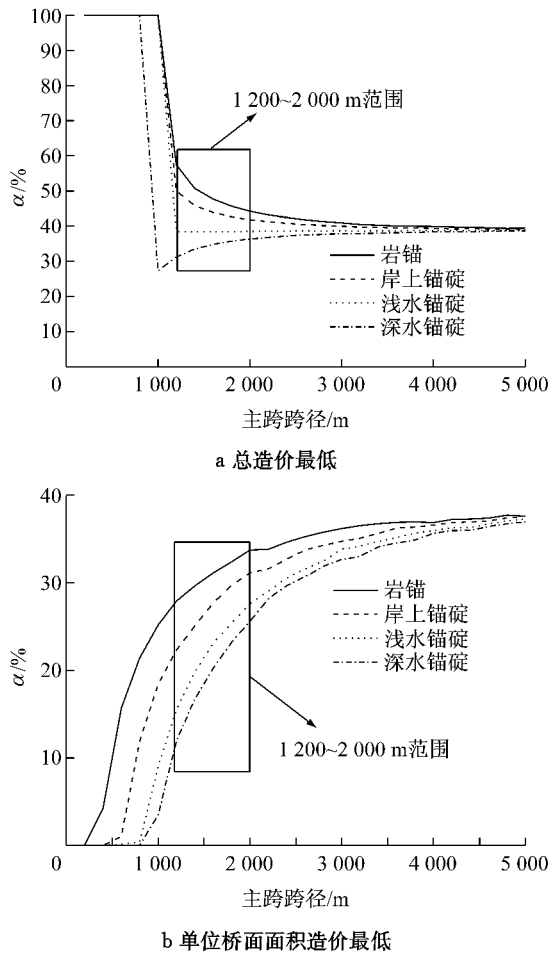


图 10 最优 α 与主跨跨径关系

Fig. 10 Variation of optimized earth-anchored ratio with span length

可以看到，工程条件越不利，得到的最优 α 越低。在跨径较大范围，最优 α 数值逐渐接近，最终取值均在 40% 左右。而在跨径较小的范围内，特别是在 1 200~2 000 m 范围，总造价最低时 α 相差约 8.0%~26.0%，单价最低时相差约 8.2%~16.0%。因此须根据具体工程条件进行进一步仔细研究。

3.5 部分地锚斜拉桥与全自锚斜拉桥的对比

为进一步对比部分地锚斜拉桥与全自锚斜拉桥的经济性能，限定 α 为 0.4，而边中跨比和塔跨比仍可以自由变化，计算得到各工程条件下主跨跨径

200~5 000 m 范围内的部分地锚斜拉桥最优全桥总造价和单位桥面面积造价与全自锚斜拉桥的对比如图 11 所示。

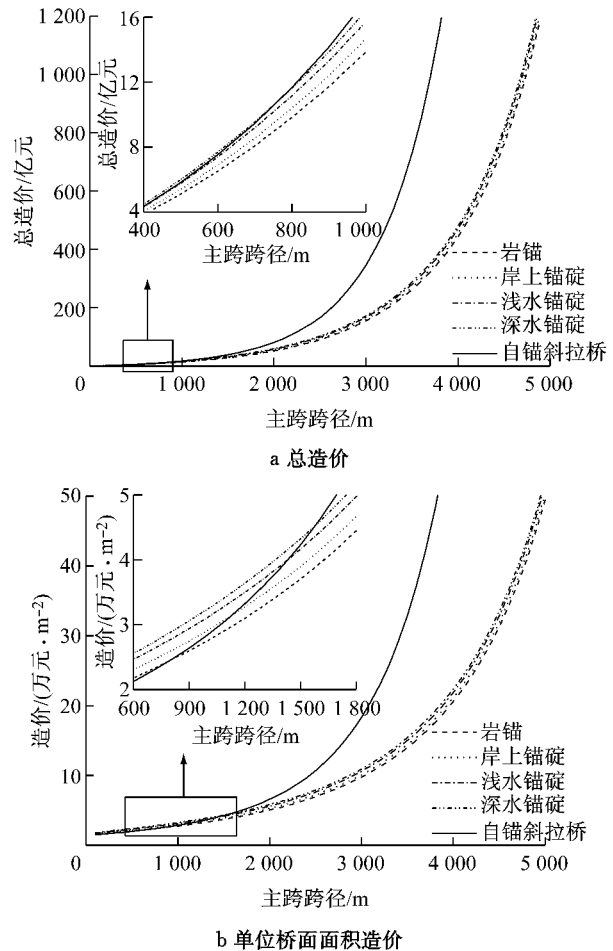


图 11 造价与主跨跨径关系

Fig. 11 Variation of cost with span length

由于桥梁总长度最大，全自锚斜拉桥总造价也最高，仅在 800 m 以下时略低于岩石锚碇的部分地锚斜拉桥。而在单位桥面面积造价方面，全自锚斜拉桥造价在中小跨径范围较低，但增速较快，分别在约 800, 1 100, 1 400, 1 600 m 处超过岩锚、岸上锚碇、浅水锚碇、深水锚碇部分地锚斜拉桥，表明在各种工程条件下部分地锚斜拉桥都成为经济性较优结构。

4 结论

推导了部分地锚斜拉桥各部分结构及全桥的材料用量及造价表达式，据此开展了经济性能参数研究，并与全自锚斜拉桥进行对比，研究得到的主要结论如下：

(下转第 1489 页)