

某独斜塔地锚式预应力混凝土(PC) 斜拉桥塔柱倾角优化分析

赵晓晋, 王凌波, 沈传东, 周先功

(长安大学旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 西安 710064)

摘 要: 为了研究独塔地锚式预应力混凝土(prestressed concrete, PC) 斜拉桥塔柱倾角的合理取值范围, 采用非线性回归的方法, 通过对某斜塔柱进行受力分析, 得到最小塔柱倾角近似计算公式; 推导拉索、锚碇、主梁、主塔的材料用量计算公式, 并引入材料单价系数, 对总造价与塔柱倾角及地锚背索倾角的关系进行分析, 得到经济塔柱倾角近似计算公式. 结果表明: 独斜塔地锚式 PC 斜拉桥最小塔柱倾角随主跨边索倾角的增大而增大, 随轴力作用下容许压应力绝对值的增大而减小; 经济塔柱倾角受地锚背索倾角及轴力作用下容许压应力的影响, 地锚背索倾角及轴力作用下容许压应力绝对值越小, 经济塔柱倾角越大; 地锚背索倾角在一定范围内, 总造价随塔柱倾角的减小先减小后增大, 减小地锚背索倾角, 可降低总造价; 塔柱倾角 α 不宜小于 60° , 地锚背索倾角 θ 不宜小于 43° .

关键词: 桥梁工程; 独斜塔地锚式预应力混凝土(PC) 斜拉桥; 塔柱倾角; 非线性回归; 材料用量; 总造价

中图分类号: U 442; U 448. 27

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2017) 02 - 0261 - 08

doi: 10. 11936/bjtxb2016060014

Pylon Inclination Optimized Analysis of One Single Inclined Pylon Earth-anchored Prestressed Concrete (PC) Cable-stayed Bridge

ZHAO Xiaojin, WANG Lingbo, SHEN Chuandong, ZHOU Xiangong

(Key Laboratory of Old Bridge Detection Reinforcement Technology Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study the pylon inclination's appropriate range of single inclined pylon earth-anchored prestressed concrete (PC) cable-stayed bridge, an approximate formula about minimum inclination of pylon was obtained by the nonlinear regression analysis methods and stress analysis of inclined pylon. The equations for material amounts of the cables, anchor, main beam and pylon were derived. The approximate formula about economical inclination of pylon was obtained by introducing the cost of per unit weight or volume of each material and the relationship between the cost of the entire bridge and the factors (the inclination of pylon and the inclination of earth-anchored cables) was analyzed. Results show that firstly, as for single inclined pylon earth-anchored cable-stayed bridge, the minimum inclination of pylon increases when the inclination of side cables at main span increases, and decreases when the allowable compression stress absolute value under the action of axial force increases. Secondly, the economical inclination of pylon is influenced by the inclination of earth-anchored cables and the allowable compression stress under the action of axial force. The economical inclination of pylon increases when the inclination of earth-anchored cables and the allowable compression stress absolute value under the action of axial force decrease. Thirdly, when the inclination of earth-anchored cables is within a given range, the cost of the entire bridge initially decreases, but then turns to increase with the

收稿日期: 2016-06-07

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2016JM5030); 中国博士后基金科技资助项目(2015M572511)

作者简介: 赵晓晋(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁结构体系方面的研究, E-mail: 418336067@qq. com

decline of inclination of pylon. Decreasing the inclination of earth-anchored cables is beneficial to reducing the cost of the entire bridge. Finally, the inclination of pylon should be greater than 60° and the inclination of earth-anchored cables should be greater than 43° .

Key words: bridge engineering; single inclined pylon earth-anchored prestressed concrete (PC) cable-stayed bridge; pylon inclination; nonlinear regression; material amounts; total cost

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,可分为自锚式、地锚式和部分地锚式斜拉桥。独斜塔地锚式斜拉桥主塔倾斜,主跨均为自锚,背索均锚固于锚碇或者重力式大体积承台上^[1]。

斜拉桥跨径增长受到抗风稳定性、超长斜拉索强度和刚度以及塔梁交界处过大的主梁轴力等诸多因素的制约^[2]。针对主梁轴力过大的问题,Gimsing等^[3]提出的部分地锚式斜拉桥概念得到广泛的关注^[4]。近年来,国内外学者对部分地锚斜拉桥进行了大量的研究工作^[5-14],从经济性及受力合理性方面提出了大跨度部分地锚斜拉桥的合理设计参数范围。

随着现代化城市、道路、景观的发展,桥梁美学越来越受到人们的重视和关注,多座独斜塔斜拉桥应运而生。独斜塔斜拉桥依靠倾斜塔柱自重弯矩平衡主梁恒活载弯矩,并为主梁提供轴向力以平衡拉索作用于主梁的水平分力,因而斜塔的设计^[15-17]和施工^[18]成为该类斜拉桥的研究重点。在已建斜塔

斜拉桥中,西班牙塞维利亚 Alamillo 桥主塔倾角 58° ,哈尔滨太阳桥主塔倾角 60° ,长沙洪山大桥主塔倾角 58° 。独斜塔地锚式斜拉桥在无背索斜拉桥的基础上增加了背索及锚碇,可减小主塔的倾斜度,降低设计及施工难度,以其独特的美学思想和科学的受力体系,越来越受到桥梁界的关注。

本文以某独斜塔地锚式预应力混凝土 (prestressed concrete, PC) 斜拉桥为工程背景,在确定主梁参数下,忽略索、塔横向布置形式,进行了基于经济性能分析的合理塔柱倾角及影响因素研究。

1 工程背景

某独斜塔地锚式斜拉桥,为 170 m 单跨地锚式扇形双索面 PC 斜拉桥。主梁的基本断面形式是边主梁,主梁顶面全宽 29 m,梁高 2.5 m,一期、二期恒载集度分别为 $g_1 = 542.5 \text{ kN/m}$, $g_2 = 86.3 \text{ kN/m}$,活载集度为 $p = 34.65 \text{ kN/m}$ 。采用“人”形主塔,与水平向成 71.57° 。桥型整体布置如图 1 所示。

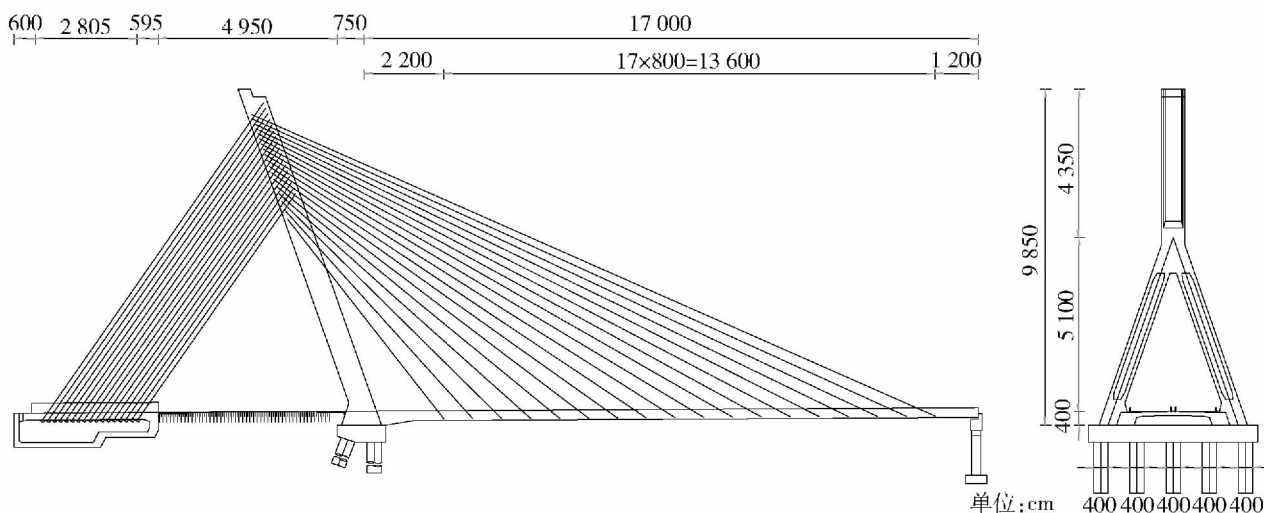


图 1 背景工程整体布置图

Fig. 1 Overall layout of background project

2 材料用量及造价公式推导

2.1 基本体系及计算思路

独斜塔地锚式斜拉桥可简化为图 2 所示结构。

图中: h 为索塔的总高度; h_0 为索塔的承台高度; h_1 为索塔的锚固区下缘的高度; h_2 为索塔的锚固区高度; L_c 为主梁跨径; L_s 为锚碇与主梁距离; L_e 为锚碇长度; g 为主梁恒载集度, g ; p 为活载集度。

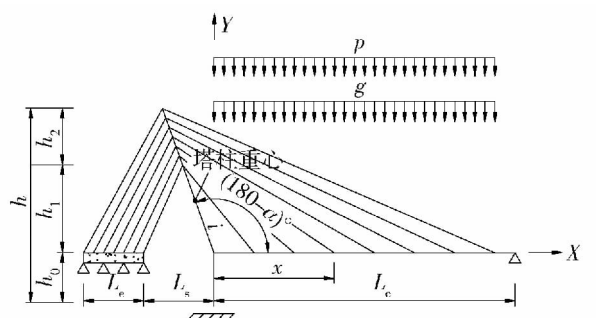


图2 一般结构简图

Fig. 2 Sketch of general structure

为便于理论解析作出以下假设:

1) 拉索在主梁、主塔及地锚上均为等索距布置,斜拉索面可简化为连续的索膜。

2) 相对于主梁跨径而言,塔根主梁无索区长度很小,可以忽略不计。

3) 主跨梁端竖向支反力 ≥ 0 ,与梁端无索区自重抵消,且相对整个主跨而言无索区长度很小。

4) 基础及承台造价受地质条件影响较大,研究对象常出现于需要单跨跨越的峡谷或河道,多为陆地基础,可认为基础造价占总造价的 $1/5$ 。

分别计算跨内拉索、地锚背索、主梁、锚锭及斜塔柱的材料用量。拉索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,得到拉索造价 C 为

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

式中: μ 为材料单价; γ 为材料容重; f 为计入安全系数(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 为构件长度。该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果^[12]。

计算时,主跨边索倾角为 φ ,塔柱倾角为 a ,背索平均倾角为 θ ,有关系式

$$\begin{cases} L_c = (h_1 + h_2) [\cot \varphi - \cot a] \\ L_s + L_c = (h_1 + h_2) [\cot \theta + \cot a] \\ L_s + 2L_c/3 = (h_1 + 2h_2/3) [\cot \theta + \cot a] \end{cases} \quad (2)$$

2.2 各构件材料用量

2.2.1 跨内拉索材料用量

取拉索微元 dx , x 为在梁端的锚固点到塔柱根部的距离,见图3。计入拉索自重,主梁自重 g 和

均布活载 p 引起的拉索微元对应的索力 dN 可表示为

$$dN = \left[(g + p) dx + \frac{\gamma_c l dN}{f_c} \right] \frac{l}{h_1 + x h_2 / L_c}$$

$$l = \sqrt{(h_1 + x h_2 / L_c)^2 + [x + (h_1 + x h_2 / L_c) \tan a]^2} \quad (3)$$

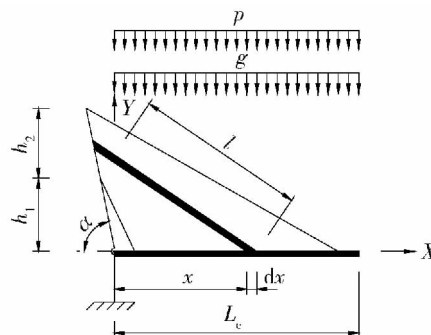


图3 拉索材料用量计算简图

Fig. 3 Calculation diagram of cable consumption

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 $h_2 = 0$,将式(3)带入式(1)积分可得拉索材料用量计算公式及不考虑拉索自重时的计算公式为

$$Q_{cc} = \frac{(g + p) h_1 f_c}{2 \sqrt{h_1 f_c \gamma_c - h_1^2 \gamma_c^2}} \cdot \ln \left[1 + \frac{L_c}{\sqrt{(h_1 f_c - h_1^2 \gamma_c) / \gamma_c - h_1 / \tan a - L_c}} \right] \cdot \left[1 + \frac{L_c}{\sqrt{(h_1 f_c - h_1^2 \gamma_c) / \gamma_c + h_1 / \tan a}} \right] - (g_c + p) L_c \quad (4)$$

$$Q_{cc} = \frac{(g + p) \gamma_c}{f_c h_1} \left[\frac{L_c^3}{3} + \frac{h_1^2 L_c}{\sin^2 a} + \frac{h_1 L_c^2}{\tan a} \right] \quad (5)$$

在式(4)(5)中

$$h_1 = h - h_0$$

当为竖琴形布置时,即 $h_1 = 0$,可得拉索材料用量计算公式及不考虑拉索自重时的计算公式

$$Q_{cc} = - (g_c + p) L_c - \frac{(g_c + p) L_c f_c}{h_2 \gamma_c \left\{ 1 + \left[\frac{1}{\tan a} + \frac{L_c}{h_2} \right]^2 \right\}}$$

$$\ln \left| 1 - h_2 \gamma_c \left\{ 1 + \left[\frac{1}{\tan a} + \frac{L_c}{h_2} \right]^2 \right\} / f_c \right| \quad (6)$$

$$Q_{cc} = \frac{(g+p)\gamma_c L_c h_2}{2f_c} \left\{ 1 + \left[\frac{1}{\tan a} + \frac{L_c}{h_2} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

式(6)(7)中

$$h_2 = h - h_0$$

2.2.2 地锚拉索材料用量

当活载仅作用于中跨且满布时,塔梁结合处两侧的最大不平衡弯矩 M_e (本文所有弯矩均以顺时针方向为正) 为

$$M_e = \frac{L_c^2}{2} (g+p) + \frac{1}{3} L_c Q_{cc} - Q_h \frac{h_1 + h_2}{2 \tan a} + \frac{Q_{cc}}{2} (h_1 + 2h_2/3) \cos a \quad (8)$$

因相对主塔、主梁而言,拉索自重较小,其产生的弯矩所占比例较小,则式(8)可简化为

$$M_e = \frac{L_c^2}{2} (g+p) - Q_h \frac{h_1 + h_2}{2 \tan a} \quad (9)$$

根据力矩平衡,假设地锚拉索的合力作用点为锚锭长度 L_e 、塔柱锚固区高度 h_2 区域的 $1/3$ 位置,可得地锚拉索的合力为

$$N_e = \frac{M_e}{h_1 + 2h_2/3} \cdot \frac{\sqrt{(h_1 + 2h_2/3)^2 + \left[2L_e/3 + L_s - \frac{h_1 + 2h_2/3}{\tan a} \right]^2}}{2L_e/3 + L_s} \quad (10)$$

则其地锚拉索材料用量为

$$Q_e = \frac{M_e \gamma_c}{(h_1 + 2h_2/3) f_c} \cdot \frac{(h_1 + 2h_2/3)^2 + \left[2L_e/3 + L_s - \frac{h_1 + 2h_2/3}{\tan a} \right]^2}{2L_e/3 + L_s} \quad (11)$$

2.2.3 锚锭材料用量

根据《公路桥涵地基与基础设计规范》^[9],锚锭须满足抗滑移和抗倾覆稳定性的要求。抗倾覆稳定性主要与锚锭结构的布置形式有关,抗滑移稳定性与基底摩擦系数、土侧压力及锚锭的结构布置有关。与常规悬索桥锚锭相比,地锚式斜拉桥锚锭受力较小,在材料用量不变的情况下,均可通过相关构造措施解决。

实际工程中锚锭材料用量及造价受地质条件影响较大,其所提供的竖向分力最大为

$$M_e / (2L_e/3 + L_s)$$

为安全考虑,取竖向安全系数为 k_e ,可认为

$$Q_e = k_e \frac{M_e}{2L_e/3 + L_s} \quad (12)$$

2.2.4 主塔材料用量

独斜塔地锚式 PC 斜拉桥主塔为压弯构件,假设拉索按照在实际锚固区域 $1/3$ 位置处集中锚固的辐射形布置^[9],在自重、斜拉索作用下主塔的弯矩如图 4 所示。

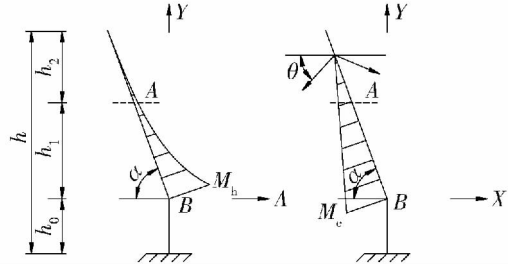


图 4 斜塔柱在自重及斜拉索索力作用下的弯矩图

Fig. 4 Moment sketch of inclined Pylon under self-weight and cable force

假设主塔沿塔轴线的恒载集度为 g_h 且 $h_2/h_1 = \alpha$,则自重作用下主塔自重对塔根的弯矩 M_h 为

$$M_h = -\frac{1}{2} g_h \cos a \left[\frac{1+\alpha}{\sin a} \right]^2 h_1^2 \quad (13)$$

忽略基础及主梁为主塔提供的弯矩,以 $M_B = 0$ 为边界条件,记拉索作用下塔根处弯矩为 M_c ,则 $M_h = M_c$ 。由此可得地锚拉索提供的 B 点弯矩 M_e 为

$$M_e = -\frac{1}{2} g_h \cos a \left[\frac{1+\alpha}{\sin a} \right]^2 h_1^2 + \frac{1}{2} (1+\alpha)^2 h_1^2 \left[\frac{1}{\tan \varphi} - \frac{1}{\tan a} \right]^2 (g+p) \quad (14)$$

$x \in [-h_1/\tan a, 0]$ 时,塔柱无索区弯矩 M_x 为

$$M_x = M_c \frac{2\alpha h_1/3 + h_1 + x \tan a}{2\alpha h_1/3 + h_1} - \frac{1}{2} g_h \cos a \left[\frac{h_1 + \alpha h_1 + x \tan a}{\sin a} \right]^2 = \frac{1}{2} g_h \frac{\cos a}{\sin^2 a} \left\{ \frac{2\alpha h_1/3 + h_1 + x \tan a}{2\alpha h_1/3 + h_1} (1+\alpha)^2 h_1^2 - [h_1 + \alpha h_1 + x \tan a]^2 \right\} \quad (15)$$

式(15)对 x 求导可得

$$M_x = \frac{1}{2} g_h \frac{\cos a}{\sin^2 a} \left\{ \frac{\tan a}{2\alpha h_1/3 + h_1} (1+\alpha)^2 h_1^2 + 2 \tan a [h_1 + \alpha h_1 + x \tan a] \right\} \quad (16)$$

可知,当

$$x = -\frac{(1+\alpha)h_1(1+\alpha/3)}{(4\alpha/3+2)\tan a} \quad (17)$$

时,得到最大弯矩 $M_{\max}$ 。

塔柱轴力由塔柱自重轴力 N_h 、主跨拉索轴力轴向分力 N_{ec} 、背索轴力轴向分力 N_{ec} 组成。可求得 $x \in [-h_1/\tan a, 0]$ 时,各 x 对应塔柱截面轴力 N_x 分量为

$$N_{ec} = -(g+p)(1+\alpha)h_1 \left[\frac{1}{\tan \varphi} - \frac{1}{\tan a} \right] \cdot \left\{ \sin a + \cos a \left[\frac{1}{3\tan a} + \frac{2+2\alpha}{3\tan \varphi} \right] / \left(1 + \frac{2\alpha}{3} \right) \right\} \quad (18)$$

$$N_{ec} = -\frac{M_e}{\left(\frac{2}{3}\alpha + 1 \right) h_1 \left[\frac{1}{\tan \theta} + \frac{1}{\tan a} \right] \left[\sin a + \frac{\cos a}{\tan \theta} \right]} \quad (19)$$

$$N_h = -g_h [1+\alpha] h_1 + x \tan a \quad (20)$$

由此,可得

$$N_x = N_{ec} + N_{ec} + N_h$$

本文轴力均以压为负,拉为正。

对5座矩形截面主塔斜拉桥的塔柱标准断面进行统计,弯曲截面系数 W 与截面面积 A 的比值通常为1.2~1.5,当塔柱较高且抗弯要求较高时取大值。因此,对于独斜塔地锚式斜拉桥的斜塔柱,可以认为 $W = KA$ ($K = 1.5$ m 为平衡量纲及体现数值比例的参数)以简化主塔材料用量计算。无索区各断面应力可表示为

$$\sigma_x = \frac{N_x \pm M_x / (K)}{g_h / \gamma_h} \quad (21)$$

当以不出现拉应力为控制条件时,有

$$M_x / (K) \leq -N_x = -(N_{ec} + N_{ec} + N_h)$$

进而可得

$$g_{h,\max} = \frac{-N_{ec} - N_{ec}}{M_x / (K) / g_{h,\max} + N_h / g_{h,\max}} \quad (22)$$

式中 x 以式(17)确定。

设

$$A_1 = \frac{M_x}{Kg_{h,\max}} + \frac{N_h}{g_{h,\max}} \quad (23)$$

$$B_1 = -\frac{\sin a + \cos a \cot \theta}{\left(\frac{2}{3}\alpha + 1 \right) h_1 [\cot \theta + \cot a]}$$

则可得

$$g_{h,\max} = \frac{-\frac{N_{ec}}{A_1} + \frac{1}{2}L_c^2(g+p)\frac{B_1}{A_1}}{1 + \frac{1}{2}\cos a \left[\frac{1+\alpha}{\sin a} \right]^2 h_1^2 \frac{B_1}{A_1}} \quad (24)$$

当以轴向压力产生的应力为控制条件时,有

$$g_{h,\min} = \frac{N_{ec} + N_{ec}}{f_h / \gamma_h - N_h / g_{h,\min}} \quad (25)$$

式中 $x = 0, f_h$ 为斜塔柱在轴力作用下的容许应力值。设

$$A_2 = \frac{N_{ec}}{f_h / \gamma_h - N_h / g_{h,\min}} \quad (26)$$

$$B_2 = -\frac{\sin a + \cos a \cot \theta}{\left(\frac{2}{3}\alpha + 1 \right) h_1 [\cot \theta + \cot a] (f_h / \gamma_h - N_h / g_{h,\min})}$$

则可得

$$g_{h,\min} = \frac{A_2 - \frac{1}{2}L_c^2(g+p)\frac{B_2}{A_2}}{1 - \frac{1}{2}\cos a \left[\frac{1+\alpha}{\sin a} \right]^2 h_1^2 \frac{B_2}{A_2}} \quad (27)$$

根据式(24)(27),当 $g_{h,\min} = g_{h,\max}$ 时,塔柱受正弯矩侧轴力产生的压应力等于弯矩产生的压应力,可认为此时的塔柱倾角 a 为最小塔柱倾角 $a_{\min}$ 。当 $a \geq a_{\min}$ 时,塔柱用量 Q_h 计算公式为

$$Q_h = \frac{(1+\alpha)h_1}{\sin a} g_{h,\min} \quad (28)$$

2.3 计算参数

以背景工程的主塔确定的参数取值如表1所示。根据对多座PC斜拉桥的调研成果,其他参数取值如表2^[2]所示。

将表中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。

表1 根据背景工程确定的计算参数

Table 1 Calculation parameter from background project

L_c/m	$g_1/(kN \cdot m^{-1})$	$g_2/(kN \cdot m^{-1})$	$p/(kN \cdot m^{-1})$	h_2/h_1	k_e
170	542.5	86.3	34.65	0.6	2

表 2 根据调研确定的计算参数
Table 2 Calculation parameter from investigation

$\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$f/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\mu/(\text{万元}\cdot\text{m}^{-3})$					基础造价/ 总造价
			拉索	主塔	主梁一期	主梁二期	地锚	
78.5	668 000	26	24.03	0.55	0.41	0.12	0.11	1/5

3 基于经济性能的参数优化

根据第 2 节中推导公式,以总造价为优化目标,研究经济塔柱倾角 α 、地锚背索倾角 θ 与总造价 D 的关系. 计算中,跨内拉索索面认为辐射形布置.

3.1 最小塔柱倾角

根据式(24)(27),满足 $g_{h,\max} = g_{h,\min}$ 的塔柱倾角 α 为最小塔柱倾角 $\alpha_{\min}$. 可知, $\alpha_{\min}$ 的取值与主跨边索倾角 φ 、轴力作用下塔柱容许应力 f_h 有关. 统计 φ 取 $20^\circ \sim 25^\circ$, f_h 取 $5 \sim 12 \text{ MPa}$ 所对应的最小塔柱倾角(精度为 0.5°),如图 5 所示.

最小塔柱倾角 $\alpha_{\min}$ 随主跨边索倾角 φ 的增大而增大,随轴力作用下塔柱容许应力 f_h 的绝对值的增大而减小, $\alpha_{\min}$ 随 f_h 减小的减小量逐渐降低. 根据图 5 数据进行非线性二次函数回归,得到最小塔柱倾角数值的近似计算公式为(κ 为 -1 MPa , ρ 为 1° ,下同):

$$\alpha_{\min} = 0.1215(f_h/\kappa)^2 + [0.0838(\varphi/\rho) - 5.7597] \cdot (f_h/\kappa) + 1.2289(\varphi/\rho) + 59.1539 \quad (29)$$

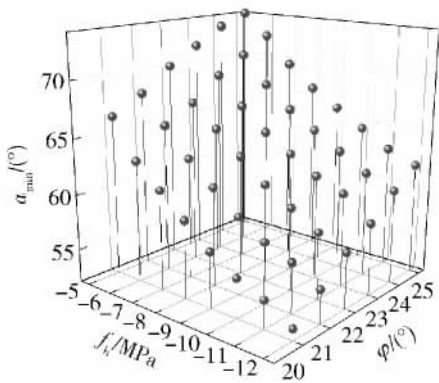


图 5 $\alpha_{\min}$ 随 φ 及 f_h 的变化

Fig. 5 Change of $\alpha_{\min}$ along with the change of φ and f_h

3.2 经济塔柱倾角

当主跨边索倾角相同时,斜塔斜拉桥主跨拉索较直塔斜拉桥长,垂度效应大,拉索效率低. 因此,主跨边索倾角应取较大值. 以边索倾角为 25° , $f_h = -10 \text{ MPa}$ 分别取不同的地锚背索倾角进行计算,分析塔柱倾角与总造价的关系. 根据统计结果,最小塔柱倾角为 64.5° (精度为 0.5°); 塔柱倾角在 $64.5^\circ \sim 90.0^\circ$ 范围内,当地锚背索倾角取 64.5° 时,总造价随塔柱倾角的减小而单调减小; 当地锚背索倾角取 41.9° 时,总造价随塔柱倾角的减小而单调增大; 地锚背索倾角取二者之间时,总造价随塔柱倾角的减小而先减小后增大. 图 6 示意了地锚背索倾角取 41.9° 、 45.0° 、 50.0° 、 55.0° 、 60.0° 、 64.5° 时,总造价 D 随塔柱倾角 α 的变化.

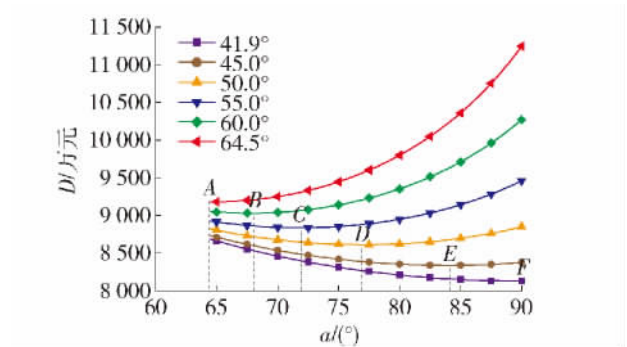


图 6 总造价随塔柱倾角 α 及地锚背索倾角 θ 的变化

Fig. 6 Total cost change along with the change of pylon inclination α and the inclination θ of earth-anchored cables

图 6 中, $A \sim F$ 点分别为不同地锚背索倾角下取得最低总造价时的塔柱倾角. 各点的地锚背索倾角、塔柱倾角及总造价如表 3 所示.

表 3 不同地锚背索倾角总造价最低时参数

Table 3 Parameter of minimum total cost to different inclination of earth-anchored cables

$\theta/(\circ)$	41.9	45.0	50.0	55.0	60.0	64.5
$\alpha/(\circ)$	90.0	84.0	77.0	72.0	67.5	64.5
$D/\text{万元}$	8 131	8 339	8 613	8 839	9 032	9 183

以表3中数据进行非线性二次函数回归,可得不同地锚背索倾角 θ 对应的经济塔柱倾角 α 及最低总造价 D .

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.0287(\theta/\rho)^2 - 4.1548(\theta/\rho) + 213.33, \\ D &= -0.8254(\theta/\rho)^2 + 133.84(\theta/\rho) + 3979.5 \end{aligned} \quad (30)$$

由图6及式(30)可知,地锚背索倾角越小,经济塔柱倾角越大,所对应的总造价越低.

以上述方法,在 $f_h = -8 \text{ MPa}$, $f_h = -12 \text{ MPa}$ 时进行计算,可知容许压应力 f_h 的绝对值越小,计算所得经济塔柱倾角 α 越大. $f_h = -8 \text{ MPa}$,地锚背索倾角 θ 确定时, α 比式(30)计算结果大 $1.0^\circ \sim 2.5^\circ$; $f_h = 12 \text{ MPa}$,地锚背索倾角 θ 确定时, α 比式(30)计算结果小 $0.5^\circ \sim 2.0^\circ$. 经统计,经济塔柱倾角误差为 $(-2.0^\circ, 2.5^\circ)$ 时,总造价误差最大为 0.2% ,且 θ 越小误差越小. 因此,考虑 f_h 影响后经济塔柱倾角 α 近似计算公式为

$$\alpha = 0.0287(\theta/\rho)^2 - 4.1548(\theta/\rho) + 213.33 - 1.0(f_h/\kappa - 10) \quad (31)$$

由式(2)可知,当 L_c 与 $L_s + 2L_e/3$ 确定时,可得 α 与 θ 关系为

$$\frac{\cot \theta + \cot \alpha}{\cot \varphi - \cot \alpha} = \frac{L_s + L_e}{L_c} \approx \frac{L_s + 2L_e/3}{L_c} \quad (32)$$

综上所述,因地锚与塔根距离多受地形条件限制,当主跨跨径及地锚与塔根距离确定时,可得到地锚背索倾角 θ 及相应经济塔柱倾角 α . 此外,经济塔柱倾角 α 不宜小于 60° ,地锚背索倾角 θ 不宜小于 43° .

4 结论

基于以上背景工程的受力性能及经济性能分析,通过非线性回归得到了独斜塔地锚式PC斜拉桥最小塔柱倾角受主跨边索倾角及轴力作用下容许应力影响的近似计算公式,以及经济塔柱倾角受地锚背索倾角及轴力作用下容许应力影响的近似计算公式,并得到的以下结论:

- 1) 独斜塔地锚式PC斜拉桥最小塔柱倾角随主跨边索倾角的增大而增大,随轴力作用下容许压应力绝对值的增大而减小.
- 2) 经济塔柱倾角受地锚背索倾角及轴力作用下容许应力的影响,地锚背索倾角及轴力作用下容许压应力绝对值越小,经济塔柱倾角越大.
- 3) 地锚背索倾角在一定范围内,总造价随塔柱倾角的减小先减小后增大,减小地锚背索倾角,可降低总造价.

低总造价.

- 4) 经济塔柱倾角 α 不宜小于 60° ,地锚背索倾角 θ 不宜小于 43° .

参考文献:

- [1] 肖汝成. 桥梁结构体系 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [2] 王伯惠. 斜拉桥的极限跨径 [J]. 公路, 2002(3): 46-53.
- [3] WANG B H. The limit span of cable-stayed bridge [J]. Highway, 2002(3): 46-53. (in Chinese)
- [4] GIMSING N J, GEORGALOS C T. Cable supported bridges: concept and design [M]. 3th Ed. Chichester, UK: Wiley, 2012.
- [5] 肖汝成, 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.
- [6] XIAO R C, WEI P, SUN B. 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)
- [7] 孙斌. 超千米级斜拉桥结构体系研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008: 9-11.
- [8] SUN B. Research in structural systems of super-kilometer cable-stayed bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2008: 9-11. (in Chinese)
- [9] MULLER J. The bi-stayed bridge concept: overview of wind engineering problem [C] // Proc of the 1st International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges, Copenhagen, Denmark, February, 19-21, 1992. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1992: 237-245.
- [10] SUN B, CHENG J, XIAO R C. Preliminary design and parametric study of a 1400m partially earth-anchored cable-stayed bridge [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2010, 53(2): 502-511.
- [11] 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.
- [12] ZHANG L W, XIAO R C, XIA R J. Mechanical analysis and study on structural parameter of partially earth-anchored cable-stayed bridge part I: mechanical analysis [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44: 1898-190.
- [13] 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.
- [[1] 孙海凌. 超大跨度斜拉桥的结构体系及抗风稳定性研究 [J]. 杭州: 浙江工业大学, 2013: 24-76.
SUN H L. Study on the wind stability of super long-span cable-stayed bridges [J]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013: 24-76. (in Chinese)
- [[2] 孙斌, 肖汝成, 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 B, XIAO R C, 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)
- [[3] 孙斌, 肖汝成, 贾丽君. 主跨 1 400 m 部分地锚式斜拉桥方案试设计 [J]. 桥梁建设, 2009, 29(3): 51-54.
SUN B, XIAO R C, JIA L J. Trial design of a proposed partially ground-anchored cable-stayed with a main span 1 400 m [J]. Bridge Construction, 2009, 39(3): 51-54. (in Chinese)
- [[4] 熊文, 孙斌, 肖汝成, 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 W, SUN B, XIAO R C, 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)
- [[5] 包龙生, 卢月, 王福春, 等. 三索面地锚式斜拉桥静力计算分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(1): 51-59.
BAO L S, LU Y, WANG F C, et al. The static calculation analysis of the three cable plane earth anchored cable-stayed bridge [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(1): 51-59. (in Chinese)
- [[6] 颜东煌, 何颖文, 许红胜. 长沙洪山大桥桥塔倾角对其成桥状态的影响 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005, 2(3): 7-10.
YAN D H, HE Y W, XU H S. The influence to finished state of the bridge of Hongshan bridge pylon's dip angle [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 2(3): 7-10. (in Chinese)
- [[7] 陈爱军, 邵旭东. 无背索竖琴式斜拉桥合理结构体系分析 [J]. 中外公路, 2009, 29(4): 89-95.
CHEN A J, SHAO X D. Reasonable structural systems analysis of harp-shaped cable-stayed without back stay [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2009, 29(4): 89-95. (in Chinese)
- [[8] 刘世明, 刘永健, 琚明杰. 无背索曲塔曲梁斜拉桥施工优化 [J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 68-74, 80.
LIU S M, LIU Y J, JU M J. Construction optimization of curved-pylon and curved-girder cable-stayed bridge without back stay [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11): 68-74, 80. (in Chinese)
- [[9] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范. JTG D63—2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 24-26.

(责任编辑 郑筱梅)