

## 柔性矮塔斜拉桥的设计实践与优化分析

汪学著<sup>1</sup>, 孙 勇<sup>1</sup>, 许志英<sup>2</sup>

(1. 杭州城乡建设设计院有限公司, 杭州 310004; 2. 浙江科技学院 建筑工程学院, 杭州 310023)

**摘 要:** 介绍了柔性矮塔斜拉桥的概念及设计, 并对影响其结构静力行为的几个重要参数——主梁与主塔无索区长度及初索力进行了研究分析。分析过程采用通用平面杆系计算软件桥梁博士建模, 通过变化主梁、主塔无索区长度及初索力的取值得到相应桥梁的结构行为, 经过对比分析选定合理的参数取值, 得出了一些具有一定参考价值的结论。

**关键词:** 柔性矮塔斜拉桥; 无索区长度; 初索力

**中图分类号:** U448.27

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2011)01-0054-04

## Design experience and optimization analysis of flexible low-pylon cable-stayed bridge

WANG Xue-zhu<sup>1</sup>, SUN Yong<sup>1</sup>, XU Zhi-ying<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Urban and Rural Construction Design Co., Ltd., Hangzhou 310004, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** We introduce the concept and design of flexible low-pylon cable-stayed bridge, and analyze some important parameters such as the length of non-stayed cable segment of the main girder and the tower, which affect the mechanical behavior of this kind of bridge. Structural behaviors of the corresponding bridge are obtained by changing the length of noncable area and first cable force value of the main girder and tower. Reasonable parameters values are determined through comparative analysis, and some conclusions with reference value are presented.

**Key words:** flexible low-pylon cable-stayed bridge; the length of non-stayed cable segment; original cable tension

矮塔斜拉桥是介于连续梁与斜拉桥之间的一种桥梁形式, 其力学行为跟这两种桥型既有联系又有区别。连续梁以梁直接承受弯矩、剪力来承受竖向荷载, 斜拉桥以塔梁的受压、索的受拉来抵抗荷载<sup>[1]</sup>; 而矮塔斜拉桥则通过梁的受弯、受压, 索的受拉来承受竖向荷载。这种桥型相当于将连续梁主梁内的一部分预

**收稿日期:** 2010-03-18

**作者简介:** 汪学著(1969—), 男, 安徽庐江人, 高级工程师, 主要从事桥梁结构设计与理论研究。

应力索转移到桥塔,索鞍相当于体外预应力索的转向点,因而也被称为超配量预应力梁桥,这种体系解决了梁体内预应力筋配置效率不高和空间不足的问题,同时还可减少主梁截面积,有着明显的经济意义。就活载结构效率来说,普通斜拉桥由于活载引起的拉索应力增量较大,其疲劳问题较突出,因而规范规定拉索的安全系数高于梁桥预应力筋的安全系数 1.67。据统计,已建矮塔斜拉桥的活载分担量大致相当于普通斜拉桥的 30%。矮塔斜拉桥具有显著特点,与普通斜拉桥相比,具有塔矮、梁刚、应力幅小等特点。

虽然矮塔斜拉桥出现得较晚(1994 年日本建成世界上第一座矮塔斜拉桥——小田原港桥),但因其显著的经济效益与景观特点,近年来已在世界范围得到了很大的发展<sup>[2]</sup>。矮塔斜拉桥随着索、梁、塔三者的刚度比变化呈现出或柔或刚的特性<sup>[2]</sup>。当塔较矮时,其力学行为则接近连续梁桥,结构刚度较大,称为刚性矮塔斜拉桥。到目前为止,中国修建的大部分矮塔斜拉桥皆为刚性矮塔斜拉桥,例如芜湖长江大桥及福建漳州战备桥。而当塔加高时,则接近普通斜拉桥,整体表现出柔性,称为柔性矮塔斜拉桥。本文就柔性矮塔斜拉桥的设计实例——青弋江大桥作简单介绍,并对影响柔性矮塔斜拉桥的重要参数进行分析。

## 1 青弋江大桥工程概况

青弋江大桥位于安徽泾县,跨越青弋江,其跨径布置为:70 m×2,主桥横断面布置(1.2+3.5+15.0+3.5+1.2)m。主梁采用双边箱断面,梁高 2.5 m。拉索通过分丝管式索鞍两端锚固于主梁。桥面以上塔高 27.8 m,顶索距桥面中心 20.5 m,具有明显的柔性矮塔斜拉桥特征。全桥为塔梁分离的飘浮体系。桥型布置图见图 1,主梁形式见图 2、3。

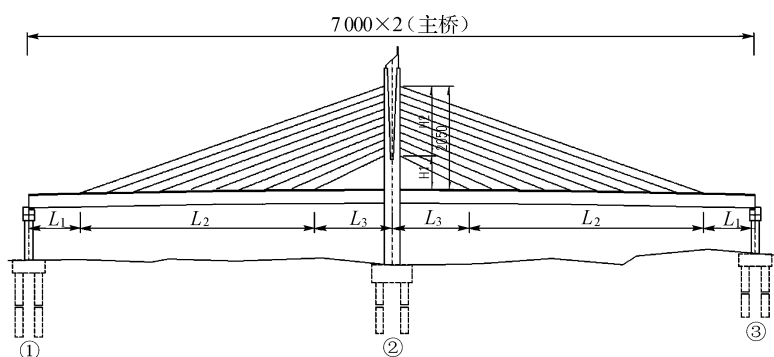


图 1 桥型布置图(单位:cm)

Fig. 1 Configuration of Qingyijiang bridge

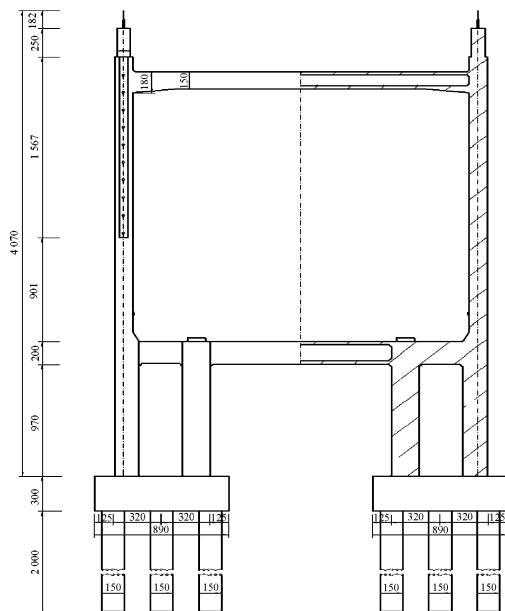


图 2 主塔立面图

Fig. 2 Elevation of bridge tower

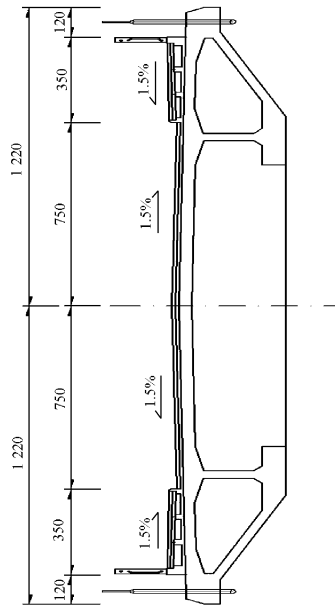


图 3 主梁断面图(单位:cm)

Fig. 3 Cross section of main beam

## 2 矮塔斜拉桥的参数分析

矮塔斜拉桥的力学行为很大程度上取决于索、梁、塔三者的刚度比,而梁上无索区长度、索塔结构高度

等参数也有显著影响,本桥主梁是通过设置支座下的墩柱直接传到基础,塔的刚度对主梁并无明显影响,故本文主要对梁上无索区长度、塔上无索区的长度以及拉索的初索力进行分析。

### 2.1 梁上无索区长度分析

矮塔斜拉桥由于塔相对较矮,活载作用下塔顶水平位移及塔根的弯矩和轴力均较小,不控制设计。本研究选取主梁挠度、主梁塔根部位弯矩及索力作为优化目标。

无索区长度指图 1 中的  $L_1$  与  $L_3$ 。限于篇幅,本文仅对  $L_3$  进行分析。为了便于比较分析的结果,仅改变索的间距; $L_1$  的长度,索、梁、塔的刚度及全桥的基本尺寸皆不变。显然, $L_3$  的变化范围在 0 与  $70-L_1$  之间。当固定  $L_1$  索距从 6 m 变化到 3 m 时,主梁最大挠度、斜拉索最大索力的计算结果如图 4 所示。

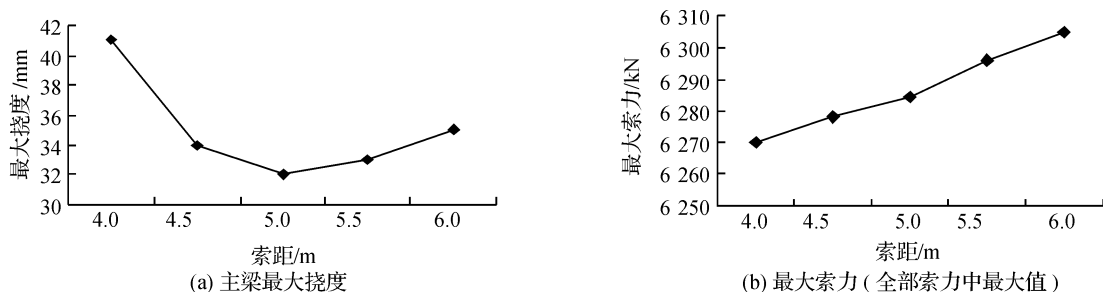


图 4 塔上无索区长度对结构的影响

Fig. 4 Effect of length of non-stayed cable segment of tower

从图 4 中可以看出:当索距从 4 m 变化到 6 m 时,主梁的最大挠度先小后大,在索距为 5 m 时挠度最小;而最大索力则从 6 270 kN 到 6 305 kN,变化不是特别明显。综合分析,当索距为 5 m 时,主梁变形小,说明主梁此时配筋较易实现且索力最大值适中,即拉索分担活载作用亦较为明显;故索距取为 5 m。

### 2.2 塔上无索区分析

索在塔上的锚固位置变化引起拉索与塔轴线夹角的变化,进而影响斜拉索水平、竖向分力的比值。普通斜拉桥夹角一般较矮塔斜拉桥小。对于本桥来说,由于最上面一根索的高度基本固定,故对塔上无索区的分析即是对图 1 中的  $H_2$  进行优化分析。分析时索在梁上位置固定,仅对塔上索距进行变化。当塔上索距从 1.2 m 变化到 1.8 m 时,桥梁计算结果如表 1 所示。

表 1 塔上无索区变化对桥梁结构的影响结果

Table 1 Result of change of length of non-stayed cable segment of tower

索距/m	最大挠度/mm	总索力的竖向分量/kN
1.2	11	23 263.6
1.4	15	22 587.6
1.5	18	22 190.2
1.6	24	21 741.3
1.8	36	20 714.7

### 2.3 拉索初索力分析

典型矮塔斜拉桥的拉索主要作用是充当体外预应力、改善主梁受力性能,而普通斜拉桥的拉索则以承受荷载为主<sup>[4]</sup>;对于柔性矮塔斜拉桥来说,拉索作用介于上述两种类型之间。初索力对于成桥结构的力学性能有着重要的影响,因此有必要对拉索初索力进行优化。优化的目的是要确定一组初索力,使结构在成桥荷载作用下某种反应受力性能的目标函数达到最小。合理初索力并非绝对,不同的优化目标与计算方法将得到不同的计算结果。

#### 2.3.1 基于影响矩阵的拉索初张力优化模型

取初张力为变量,以各索的单位初张力分别作用于无应力状态的结构,得到对主梁各单元弯矩的影响值而组成影响矩阵。可设  $\{x\}$  为斜拉索初张力列阵; $\{p\}$  为斜拉索索力列阵; $\{M\}$  为主梁各单元杆端弯矩列阵  $\{M_1^L \ M_1^R \ \cdots \ M_m^L \ M_m^R\}^T$ ,  $M_i^L$ 、 $M_i^R$  分别为第  $i$  号单元左、右端弯矩。

$$\{P\} = \{P_D\} + [A_P]\{x\} \quad (1)$$

$$\{M\} = \{M_D\} + [A_M]\{x\} \quad (2)$$

其中: $\{P_D\}$  和  $\{M_D\}$  分别为恒载作用下的索力列阵和主梁各单元杆端弯矩列阵, $D$  为恒载; $[A_P]$  和  $[A_M]$  分别

为索力影响矩阵和主梁各单元杆端弯矩影响矩阵,即单位初张力作用下的索力和主梁各单元杆端弯矩<sup>[3,5]</sup>。

对该桥来说,本桥主塔纵向截面受索鞍分丝管最小弯曲半径限制,计算可知主塔的内力远未达到材料极限;且主梁轴力与剪力不控制设计,因此可只取主梁弯曲应变能作为优化目标函数。由于主梁各单元均为等截面,即单元的弹性模量不变,则主梁的弯曲应变能可简化为:

$$U = \{x\}^T [G] \{x\} + 2\{F\} \{x\} + D \quad (3)$$

其中:  $G = [A_M]^T [B] [A_M]$ ;  $F = [M_D]^T [B] [A_M]$ ;  $D = [M_D]^T [B] [M_D]$ ;  $[B]$  为单元柔度对弯矩的加权系数矩阵<sup>[3]</sup>。

### 2.3.2 优化约束条件

对于实际桥梁设计中,还需考虑拉索索力的构造要求,即需要求解有约束条件的斜拉索初索力<sup>[3,5]</sup>。显然,首先要保证索力大于0,拉索处于受力绷紧状态,即:

$$\{x\} \geq 0$$

$$\{P_D\} + \{A_P\} \{x\} \geq \{P_{\min}\}$$

其中  $\{P_{\min}\}$  为活载作用下拉索可能产生的最大拉力。

通过梯度投影法求解,可得到优化的斜拉索初索力及原设计初索力对比结果见表2,设计索力与优化索力条件下成桥恒载主梁主要截面弯矩对比见表3。

### 2.3.3 分析小结

从斜拉索初索力分析结果可以看出,优化索力条件下,主梁主要截面弯矩减少,恒载作用下主梁弯矩图更为平顺。由于优化索力与设计索力相差不大且在材料强度允许范围内,因此索力优化能够在一定程度上改善主梁受力性能。

## 3 结 语

对于柔性矮塔斜拉桥来说,无索区的长度、初索力的大小是影响其力学行为的重要参数,因此对这些参数进行优化分析具有重要意义。通过对青弋江大桥的参数进行分析,得到以下几个结论:对本桥来说,梁上索距为5 m时,主梁挠度较小;当固

定塔最上方的一根索的位置,索距从1.2 m变化到1.8 m时,主梁挠度经历了从小到大的变化过程,且随着索距的增大,挠度的变化有从平缓到急剧的趋势;对初索力进行优化是十分有必要的,在不改变主梁配筋与拉索截面积的前提下,通过调整初索力可以改善主梁弯矩分布,使主梁弯矩更为平顺。

### 参考文献:

- [1] 周孟波,刘自明,王邦楣.斜拉桥手册[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 雷俊卿.大跨度桥梁结构理论与应用[M].北京:清华大学出版社/北京交通大学出版社,2007.
- [3] 蔺鹏臻,孙红红,刘凤奎.小西湖矮塔斜拉桥的特征参数研究[J].公路交通科技,2005(10):56-59.
- [4] 欧阳永金.矮塔斜拉桥结构参数分析[J].钢结构,2006(4):38-42.
- [5] 王学明,李平.矮塔斜拉桥初索力优化[J].铁道工程学报,2005(4):39-42.
- [6] 杨焯,周水兴.斜拉桥施工阶段初张力索力计算方法研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2008(1):32-36.

表2 斜拉索初索力及成桥恒载索力

Table 2 Original cable tension and dead load cable tension of built bridge

索号	初索力		恒载索力	
	优化初索力	设计初索力	优化恒载索力	设计恒载索力
C1	2 530	2 600	2 467	2 540
C2	2 588	2 600	2 581	2 560
C3	2 634	2 600	2 669	2 644
C4	2 665	2 600	2 728	2 674
C5	2 684	2 600	2 762	2 691
C6	2 692	2 600	2 775	2 698
C7	2 682	2 600	2 754	2 687
C8	2 652	2 600	2 695	2 658
C9	2 601	2 600	2 593	2 605
C10	2 528	2 600	2 451	2 533
Σ	26 255	26 000	26 475	26 329

表3 主梁主要截面弯矩对比图

Table 3 Comparison of moment of main section of beam

截面位置/ m	原设计弯矩/ (kN · m)	优化后弯矩/ (kN · m)
0	-56 629	-52 667
17	73 528	71 099
42	133 959	131 672
62	66 787	63 768