

文章编号:1673-2049(2014)03-0045-07

混凝土自锚式悬索桥过程控制状态分析

任 伟¹, 盖轶婷², 王 锦^{1,3}

(1. 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;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075;

3. 深圳市公路交通工程试验检测中心, 广东 深圳 518049)

摘要:以某主跨156 m的5跨连续双塔双索面自锚式预应力混凝土悬索桥为背景,根据该类桥型的建造特点,讨论了加劲梁、猫道、成桥主缆线形、空缆线形、吊索张拉、索鞍顶推等的控制及分析方法。应用数值分析方法提出了单元选取、边界条件设置、荷载选取、工况模拟的方法。运用上述方法完成了依托桥梁的过程控制,取得了最终成桥主缆高程偏差仅为3.9 cm,吊索索力相对误差小于4%,主塔偏位最大偏差仅为2.1 cm和主梁高程误差仅为6.6 cm的良好控制效果。研究结果表明:所提出的分析方法考虑问题全面,具有较好的控制效果。

关键词:桥梁工程;混凝土自锚式悬索桥;主塔;索力;过程控制

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

Analysis of Process Control State About Concrete Self-anchored Suspension Bridge

REN Wei¹, GAI Yi-ting², WANG Jin^{1,3}

(1. Key Laboratory of Bridge Detection & Reinforcement Technology of Ministry of Communications, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an 710075,

Shaanxi, China; 3. Shenzhen Traffic Construction Engineering Test & Detection Center, Shenzhen 518049, Guangdong, China)

Abstract: Aimed at the problems of analysis for concrete self-anchored suspension bridge, a main span 156 m five-span prestressed concrete double tower and double cable plane self-anchored suspension bridge was taken as the example bridge. According to the bridge construction process, control and analysis methods were discussed, such as stiffening beam, catwalk, main cable shape, unloaded cable shape, suspender tensioning, saddle pre-offset, etc. Using the numerical analysis method, the unit selection, boundary conditions setting, load selection and condition simulation were proposed. Process control of the bridge was completed applying the above methods and good control effect was got, such as final cable elevation deviation was 3.9 cm, relative error of suspender cable force was less than 4%, main tower deviation was 2.1 cm and main girder elevation error was 6.6 cm. The study results show that the proposed analysis method takes into account the problems comprehensively, has good control effect.

Key words: bridge engineering; concrete self-anchored suspension bridge; main tower; cable

收稿日期:2014-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51308056);广东省交通运输厅科技项目(2011-02-034);山西省软科学研究项目(2011-1-38);交通运输部应用基础研究项目(2012 319 812 100);陕西省交通运输厅交通科研项目(14-17k)

作者简介:任 伟(1975-),男,陕西西安人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:rw@chd.edu.cn。

force; process control

0 引言

悬索桥是目前跨越能力最强的桥型,其最早的理论雏形形成于 19 世纪 20 年代,是由法国学者乃维首先提出的。在此基础上兰金于 20 世纪 50 年代提出了弹性理论,后来经斯坦曼的整理修正形成了近代的标准弹性理论公式^[1]。但是用该理论体系计算大跨径悬索桥时,因为没有考虑几何非线性等问题的影响,造成计算误差较大。

19 世纪 80 年代,Ritter 和 Melan 等针对几何非线性对内力的影响问题进行系统的研究,提出挠度理论体系。自此悬索桥的跨径突破 1 000 m,打开了近代悬索桥的大门^[2-3]。20 世纪 60 年代,随着数值分析方法的出现,Brotton 首次将有限元方法用到悬索桥的结构计算中,大大提高了悬索桥的计算精度和效率^[4]。

混凝土自锚式悬索桥相对常规悬索桥不需要较大的锚块,造价较低,在景观桥梁中,越来越受到人们的青睐。但是,由于其结构受力较复杂,主梁承受较大的轴力,所以无论在建造过程中还是运营阶段,它不仅具有一般悬索桥的非线性特性,而且由于主梁中巨大的轴向压力更进一步增加了结构的非线性。本文中笔者以某主跨 156 m 的 5 跨连续双塔双索面自锚式预应力混凝土悬索桥为例,通过对该桥建造过程的仿真分析,系统地研究了混凝土自锚式悬索桥的计算方法,以期对今后该类桥型的分析、设计以及建造提供参考^[5]。

1 控制分析

自锚式悬索桥属高次超静定结构,在施工过程中要经历多次体系转换。此外,悬索桥的主缆属于柔性结构,其几何非线性效应明显,这些因素使得自锚式悬索桥在整个施工过程中,其结构内力始终处于复杂的动态变化过程中,所以施工过程中的内力控制对最终的结构状态起着决定性作用^[6-7]。因此,对整个施工控制过程进行详细的分析计算至关重要,分析内容主要包括以下几方面。

1.1 加劲梁架设的控制计算

混凝土自锚式悬索桥主梁为了达到设计线形,不仅要设置竖向预变位(向上或向下),还要根据主梁所受的主缆水平分力、混凝土收缩徐变和预应力

的作用,设置纵向预偏位。在进行结构分析时,应结合最终成桥状态的内力和线形,给出主梁的竖向预变位和纵向预偏位。此阶段的结构分析应注重以下内容:①主梁的预拱度分析;②支点(如桥墩和临时支撑)的压缩变形分析;③控制截面的应力分析;④主梁控制点(吊杆等位置)的纵向位移分析。

1.2 猫道架设的过程分析

猫道是主缆架设、吊索安装必不可少的施工平台,同时由于自重的存在,也增加了后续施工的控制难度。在猫道、索股施工前,应对桥塔、锚块坐标进行详细测量,作为分析的初始条件。在施工过程中,应不断更新模型数据库,并给出承重索架设、通道架设等关键阶段的承重索线形、塔顶变位的实时动态数据,作为过程控制的理论对比值。

1.3 主缆架设的控制计算

主缆线形是桥梁整体状况最关键的参数,影响混凝土自锚式悬索桥主缆线形的因素较多,如主塔变位、温度、混凝土主梁收缩徐变、主缆吊索张力偏差、索夹位置偏差等。

1.3.1 成桥线形计算方法

主缆线形在成桥状态时接近抛物线,但是由于主缆有自重荷载,而且吊索索力、索夹质量也并非全桥一致,故应采用分段悬链线计算悬索桥时较为精确。主缆分段悬链线如图 1 所示,分段主缆只受沿缆方向的自重荷载 q 和节点荷载 F_{xi}, F_{yi} 。图 1 中, x_i, y_i 均为悬链线位置坐标, l 为水平投影长度, P_i 为第 i 段吊索索力, H_1, H_2 分别为第 1 段、第 2 段吊索水平分力, V_1 为竖向分力, h_i 为分段悬链线高差, h 为高度, T_1, T_2 分别为第 1 段、第 2 段吊索切向力, l_i 为第 i 段水平投影长度。

主缆分段悬链线方程为

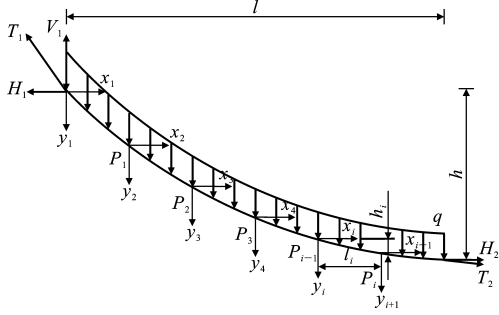


图 1 主缆分段悬链线

Fig. 1 Segmental Catenary of Main Cable

$$\left. \begin{aligned} y_i &= \frac{1}{c} \cosh(cx_i + a_i) + b_i \\ c &= -\frac{q}{H} \\ a_i &= \operatorname{arsinh}\left(\frac{h_i c}{2 \sinh(cl_i/2)}\right) - \frac{cl_i}{2} \\ b_i &= -\frac{1}{c} \cosh(a_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= -H_2 \\ V_i &= q \sum_{i=1}^n s_i + \sum_{i=1}^n P_i + H_2 \tan(\theta_2) \\ s_i &= \int_0^{l_i} ds = \frac{1}{c} [\sinh(cl_i + a_i) - \sinh(a_i)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: H 为水平分力; V_i 为竖向分力; θ_i 为第 i 段倾角; s_i 为第 i 段吊索索长; c, a_i, b_i 均为系数。

分段悬链线高差 h_i 满足以下条件

$$\sum_{i=1}^n h_j = h \quad (3)$$

按边界条件可得

$$H[\sinh(cl_i + a_i) - \sinh(a_{i+1})] = P_i \quad (4)$$

运用上述方法,即可以计算出成桥主缆线形及其长度。

1.3.2 空缆线形计算

空缆线形的计算步骤如下:①根据成桥线形和成桥缆力求出主缆无应力长度;②假定吊杆间缆形为悬链线,计算出各吊杆间主缆长度;③根据索鞍预偏量、主梁和主塔弹性压缩以及索股无应力长度等计算出空缆线形^[8]。

1.3.3 索股长度计算

索股长度由以下4个部分组成:①桥塔锚固点到散索套长度;②从散索套到边跨索鞍的长度;③中跨索鞍之间的长度;④索鞍处圆弧索的长度。

得出主缆无应力长度后,可计算出中心索股长度,再根据中心索股和截面其他索股的几何关系,即可求出其余索股的长度^[8]。

基准索股的坐标和线形是其余索股架设的参考点,在确定基准索股时,首先要求出中心索股与其相对应的几何关系,然后求出基准索股的关键点坐标(线形)。其余索股的架设应以基准索股为参考,按“若即若离”的原则架设。

1.4 吊索的控制计算

1.4.1 吊索无应力长度

在主缆索股施工完成后,主缆线形就已确定。在后续施工中,吊索长度就成了影响和控制成桥线形、内力的关键参数。因此,在确定空缆线形后,需

要重新计算吊索的制作长度^[9]。

吊索无应力长度的确定方法是根据成桥状态的吊索索力和吊索弹性模量,并计入主梁浇筑误差、主缆架设误差等因素综合得出。

1.4.2 索夹放样

在主缆架设完成后,根据主缆线形和成桥线形的要求反算出各跨主缆的无应力长度,并根据实际架设的空缆线形和当前最准确的后续恒载情况计算出索夹的坐标。索夹放样时,首先计算出索夹的理论位置,然后根据实际温度的影响、主塔偏位及主缆架设误差来调整索夹的实际放样位置。

1.4.3 吊索张拉计算

成桥状态吊索索力的确定主要考虑主梁的受力状态^[10],吊索索力确定及调整遵循下列原则:

(1)吊索索力张拉、调整的每一阶段,各部件均应满足强度、刚度和稳定性的要求。

(2)尽量少用临时接长拉杆,张拉调整的次数也尽量少。

(3)张拉及调索过程要保证桥塔和主梁的受力安全,并尽量减少索鞍顶推次数。

1.5 索鞍顶推

索鞍顶推主要是为了释放桥塔的不平衡水平力,为减少索鞍顶推次数,一般在索鞍安装时就根据后续工况事先设置预偏量。索鞍的预偏设置及其顶推时机是根据桥塔的承载能力和其施工过程中桥塔的应力控制要求确定。索鞍顶推时机的确定采用试算的方法,当桥塔水平位移接近容许值时,应进行索鞍顶推以释放塔顶水平位移,从而达到释放多余弯曲应力的目的。

2 过程仿真分析

依托桥梁为1座主跨156 m的双塔双索面自锚式PC悬索桥,跨径布置为40 m+80 m+156 m+80 m+40 m,桥梁全宽37.5 m,设计荷载为公路-I级。全桥共有2根主缆,中心距24.5 m吊索纵向间距6 m,桥型布置如图2所示。

2.1 数值模型

本文中采用商用有限元程序MIDAS进行大变形数值分析,全桥共划分节点414个,单元316个。有限元模型如图3所示。

2.1.1 单元选取

主缆和吊索采用桁架单元建立,关闭其承压功能;主梁采用梁单元建立,鱼刺梁形式。吊索与主梁采用刚性连接;主塔采用梁单元建立,阶段划分与施

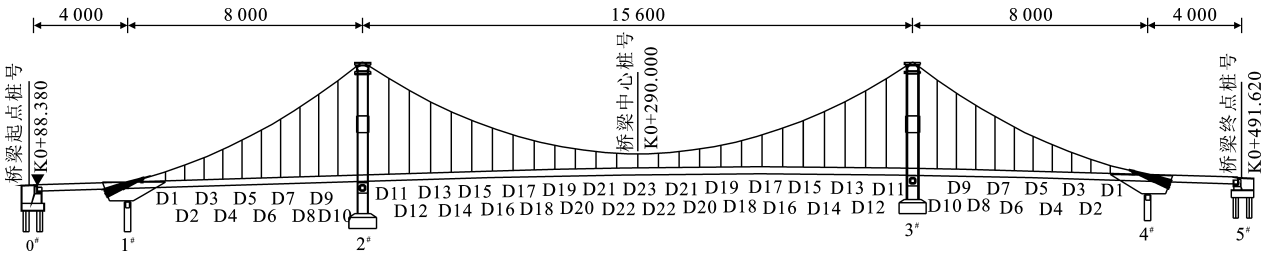


图 2 桥型布置(单位:cm)
Fig. 2 Bridge Layout (Unit:cm)



图 3 有限元模型
Fig. 3 Finite Element Model

工节段相同;支架(满堂支架)采用只受压弹性支撑。

2.1.2 边界条件

主塔底部及主梁与下吊索之间采用固接模拟,主梁与支架采用只受压弹性支架模拟,主缆与主梁采用刚性连接模拟。主缆与塔顶之间索鞍模拟采用释放纵桥向约束的刚性连接,主要边界条件如图 4 所示。

2.1.3 荷载模拟

永久作用包括结构自重、混凝土收缩徐变、预应力等。可变作用包括汽车荷载、温度作用、人群等,其中汽车荷载按双向 6 车道考虑,并计入冲击和车道折减系数等。

2.2 施工工况模拟

该桥施工大体分为以下 6 个工况:工况 1,主塔滑模施工,见图 5(a);工况 2,现浇混凝土主梁,满堂支架法施工,见图 5(b);工况 3,主缆及索夹安装,见图 5(c);工况 4,吊索张拉施工,见图 5(d);工况 5,主梁支架拆除,见图 5(e);工况 6,二期荷载施加,成桥,见图 5(f)。

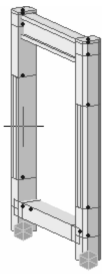
3 分析结果及对比

3.1 主塔

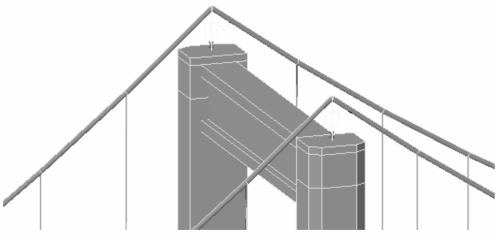
3.1.1 主塔偏位

由于主塔轴力的作用,收缩徐变会使主塔产生难以恢复的压缩变形,所以在施工期间要将这一部分变形预留出来(预抛高设置)。本文中依托桥梁主塔预抛高值分别为:2# 桥塔 15 mm;3# 桥塔 18 mm。

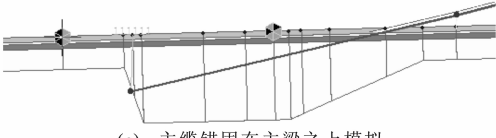
此外,由于混凝土收缩徐变及缆索松弛的作用,随着桥龄的增长,该桥主塔会向跨中方向偏移。本文中计算以 10 年后主塔处于轴心受压状态为原则,



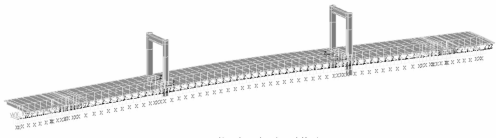
(a) 主塔单元和边界模拟



(b) 索鞍单元和边界模拟



(c) 主缆锚固在主梁之上模拟



(d) 满堂支架模拟

图 4 边界条件

Fig. 4 Boundary Conditions

在主塔平面内设置预偏位,预偏位实测值与理论值的比较见表 1,其中实测值和理论值均偏向边跨。

3.1.2 主塔应力

主塔为钢筋混凝土结构,其施工全过程的应力测试选用埋入式混凝土应变计和配套的巡检仪进行,全桥主塔共埋置应变计 48 个。在桥梁施工全过程中,以仿真分析及实测值均不出现拉应力为结构分析及控制原则。

3.2 主梁

经分析计算可知,由于主梁轴向压力的存在,使得主梁存在向跨中方向偏移的现象(压缩变位),最

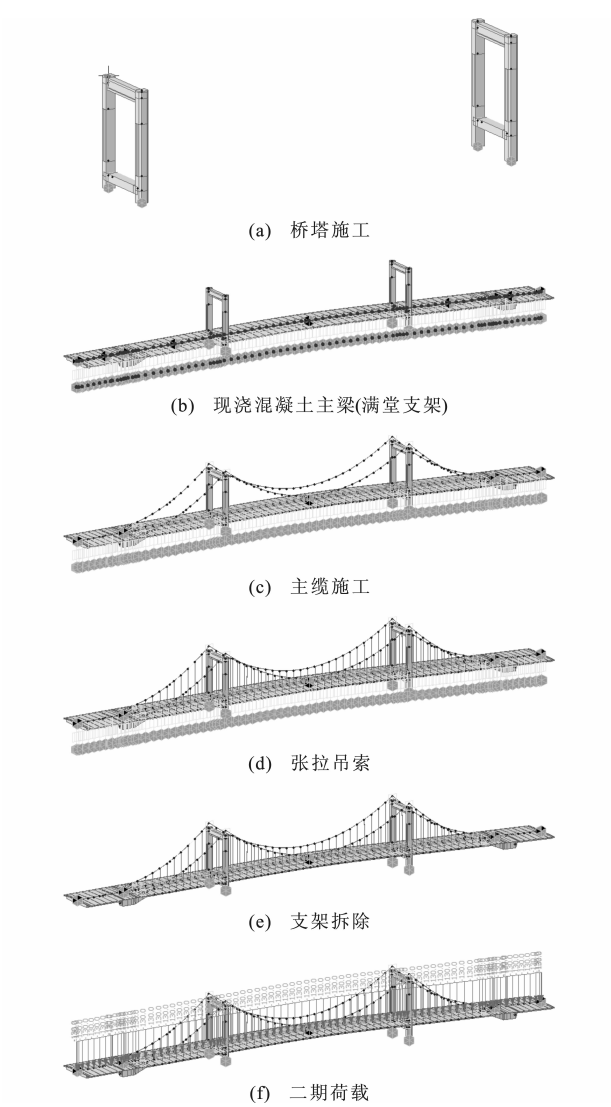


图 5 施工阶段
Fig. 5 Construction Stages

表 1 主塔偏位 Tab. 1 Deviation of Main Tower			cm
桥塔位置	预偏位实测值	预偏位理论值	
2# 南塔	6.5	5.2	
2# 北塔	7.3	5.2	
3# 南塔	5.4	5.4	
3# 北塔	4.6	5.4	

大位移发生在锚块处,为 9.47 cm,如图 6(a)所示。

图 6(b)为工况 6 作用下的主梁竖向变位。从图 6(b)可以看出:主跨竖向变位为向下(需要向上设置预抛变位),80 m 边跨变位为向上(需要向下设置预抛变位),40 m 辅跨变位为向下(需要向上设置预变位);中跨跨中变位较大,达到 9.92 cm。

在吊索张拉调整完成后,对全桥各吊点处主梁标高、各跨跨中主缆标高、桥塔偏位、散索套位置进行全面复测,最终主梁高程误差仅为 6.6 cm,如图 7

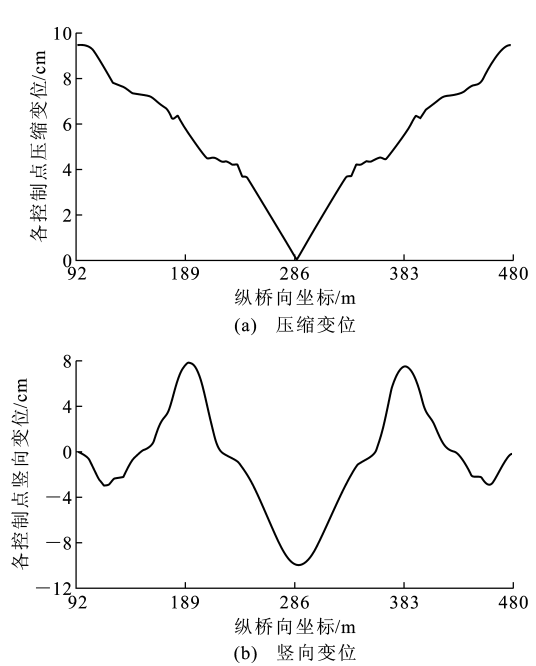


图 6 主梁预偏示意
Fig. 6 Pre-deviation Schematics of Main Girder

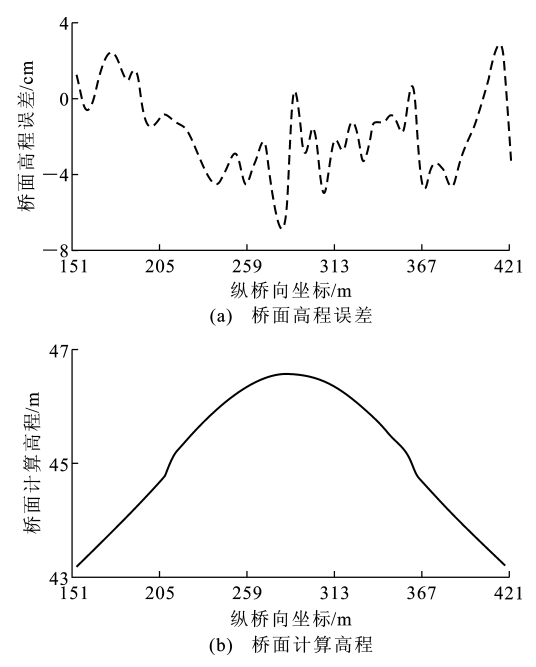


图 7 桥面高程
Fig. 7 Bridge Deck Elevations

所示。

3.3 主 缆

3.3.1 主缆线形

最终空缆线形与成桥主缆线形结果对比如图 8 所示,主缆主跨垂度变化为 1.34 m。成桥后主缆高程偏差最大值为 3.9 cm,如图 9 所示。

3.3.2 基准索股线形放样

本文基准索股定为 1# 索股,中心索股为 19# 索

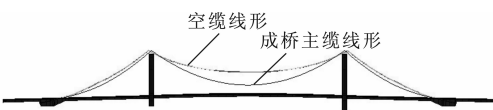


图 8 空缆线形和成桥主缆线形对比

Fig. 8 Comparison of Unloaded and Loaded Cable Shapes

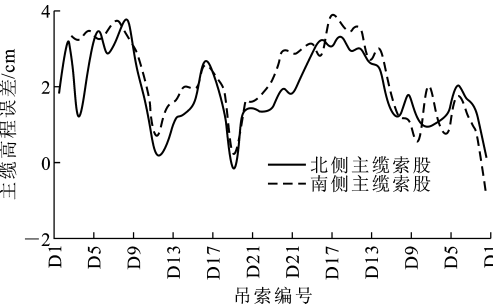
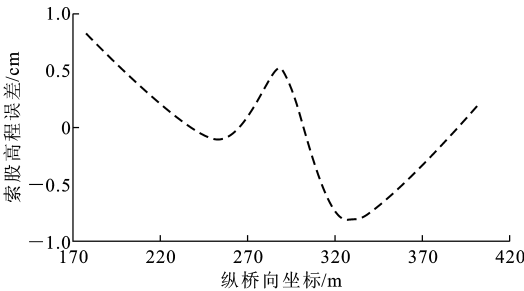


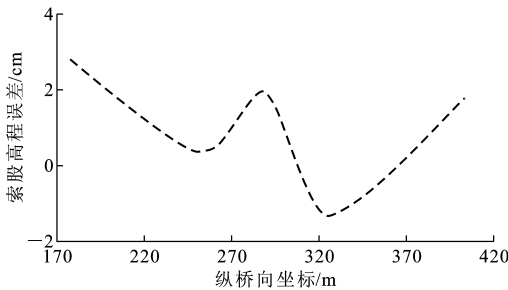
图 9 主缆高程误差

Fig. 9 Errors of Main Cable Height

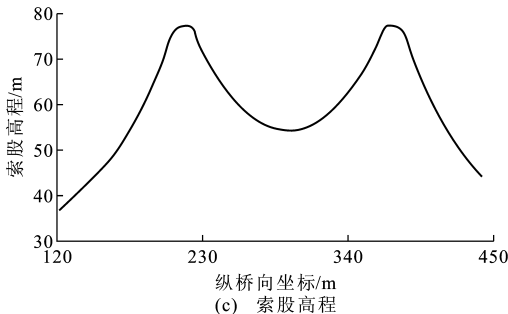
股,基准索股高程及其误差如图 10 所示。



(a) 北侧基准索股线形高程误差



(b) 南侧基准索股线形高程误差



(c) 索股高程

图 10 基准索股线形

Fig. 10 Datum Strand Shapes

3.3.3 主缆索股力

为了长期观测主缆索股力,在 1[#],7[#],19[#],37[#] 索股处安装了 16 个压力环测量缆力,压力环设置在

锚块的索股锚头处,其成桥索股力理论值与实测值对比如表 2 所示。

表 2 索股力对比

Tab. 2 Comparison of Cable Forces

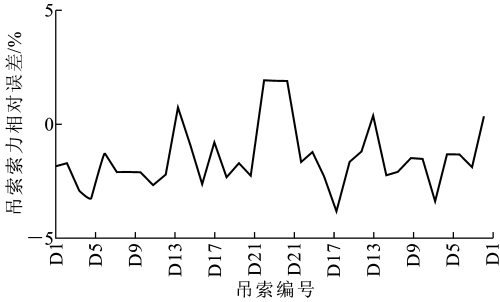
索股 编号	实测索股力/ kN	实测索股 应力/MPa	理论索股力/ kN	理论索股 应力/MPa
1 [#]	1 136	456	1 106	444
	1 187	476		
	1 121	450		
	1 101	442		
7 [#]	1 102	442	1 106	444
	1 137	456		
	1 058	424		
	1 145	459		
19 [#]	1 051	422	1 106	444
	1 087	436		
	1 142	458		
	1 058	424		
37 [#]	1 167	468	1 106	444
	1 104	443		
	1 251	502		
	1 189	477		

注:每组索力 4 个值分别指 2 根主缆的两侧测点测值。

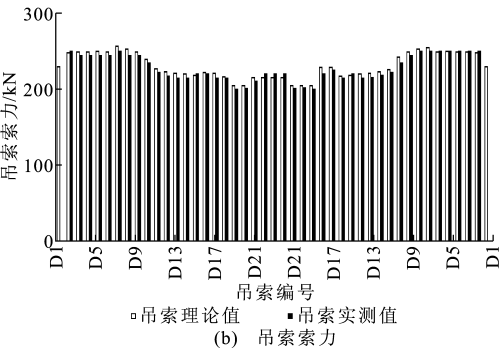
3.4 吊 索

3.4.1 吊索索力

全桥吊索索力理论值、实测值及其相对误差如图 11 所示,索夹高程及其误差如图 12 所示。



(a) 吊索索力相对误差



(b) 吊索索力

图 11 吊索索力及相对误差

Fig. 11 Suspender Cable Force and Relative Error

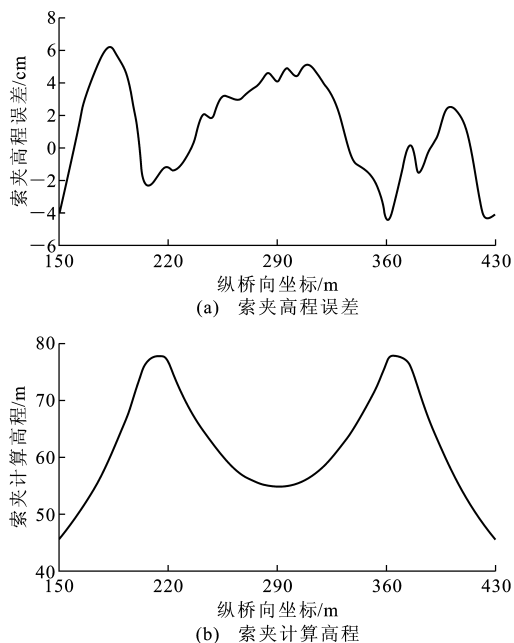


图12 索夹高程及误差

Fig. 12 Cable Clamp Height and Errors

4 结语

本文中以某主跨156 m的5跨双塔双索面自锚式预应力混凝土悬索桥为背景,根据该类桥型的施工工序,探讨了加劲梁、猫道、成桥主缆线形、空缆线形、吊索张拉、索鞍顶推等控制及分析方法;运用上述方法完成了依托桥梁的过程控制,最终成桥主缆高程偏差最大值仅为3.9 cm,吊索索力相对误差小于4%,索夹高程最大误差仅为6.1 cm,主塔偏位最大偏差仅为2.1 cm,主梁高程误差仅为6.6 cm。上述对比数据表明,本文中所用分析方法考虑问题全面,控制效果良好。

参考文献:

References:

[1] SUN J, MANZANAREZ R, NADER M. Design of Looping Cable Anchorage System for New San Francisco-Oakland Bay Bridge Main Suspension Span[J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(6): 315-324.

[2] WOLLMANN G P. Preliminary Analysis of Suspension Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(4): 227-233.

[3] 向中富,徐君兰,代正宏. 悬索桥施工控制分析的恒定无应力索长迭代法[J]. 重庆交通学院学报, 2000, 19(3): 16-21.

XIANG Zhong-fu, XU Jun-lan, DAI Zheng-hong. The Alternate Calculation Method of Constant Cable-length in Non-stress for the Structural Analysis of Suspension Bridges[J]. Journal of Chongqing Jiao-

tong Institute, 2000, 19(3): 16-21.

[4] 李小珍,胡大琳,陈祥宝. 大跨度悬索桥施工状态的计算机仿真分析[J]. 中国公路学报, 1998, 11(4): 64-69.

LI Xiao-zhen, HU Da-lin, CHEN Xiang-bao. Computer Simulation Analysis of Long Span Suspension Bridge's Construction State[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(4): 64-69.

[5] 王锦. 混凝土自锚式悬索桥施工仿真计算及吊索张拉优化[D]. 西安:长安大学, 2010.

WANG Jin. Simulation and Sling Tension Optimization for the Construction of Concrete Self-anchored Suspension Bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

[6] 邱文亮,张哲. 自锚式悬索桥施工中的吊索张拉方法研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(4): 552-556.

QIU Wen-liang, ZHANG Zhe. Study of Scheme of Tensing Hangers in Construction of Self-anchored Suspension Bridge[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(4): 552-556.

[7] 肖海波,俞亚南,高庆丰. 自锚式悬索桥主缆成桥线形分析[J]. 浙江大学学报:工学版, 2004, 38(11): 1470-1473.

XIAO Hai-bo, YU Ya-nan, GAO Qing-feng. Analysis of Finished Main Cable Shape of Self-anchored Suspension Bridges[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(11): 1470-1473.

[8] 唐茂林,沈锐利,强士中. 大跨度悬索桥丝股架设线形计算的精确方法[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(3): 303-307.

TANG Mao-lin, SHEN Rui-li, QIANG Shi-zhong. An Accurate Calculation Method for Erecting Curves of Wire Strands of Long Suspension Bridges[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(3): 303-307.

[9] 狄谨,武隽. 自锚式悬索桥主缆线形计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 38-43.

DI Jin, WU Jun. Calculation Methods for Cable Curve of Self-anchored Suspension Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 38-43.

[10] 韩艳,陈政清,罗世东,等. 自锚式悬索桥空间主缆线形的计算方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2007, 34(12): 20-25.

HAN Yan, CHEN Zheng-qing, LUO Shi-dong, et al. Calculation Method for the Shape-finding of Self-anchored Suspension Bridge with Spatial Cables[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34(12): 20-25.