

缆索吊装系统索力误差分析

徐峰¹,宋军玺¹,张峰²,高磊²

(1.中交四公局第二工程有限公司,北京市 101149;2.山东大学 岩土与结构工程研究中心,山东 济南 250061)

摘要:缆索吊装方法是大跨钢管混凝土拱桥施工的常用方法,缆索是主要的受力构件,有必要进行计算分析和施工监测。该文以乌梅河特大桥为例,开展缆索吊装系统的索力计算方法研究,对计算跨径为300 m的上承式钢管混凝土拱桥的400 m悬索跨径缆索进行实桥索力计算分析和现场测试,验算单根索索力,分析计算和实测误差。结果表明:索力计算值和实测值总体偏差约8%,由于计算值是取跨中的最大索力状态,故黄平岸吊装节段总体偏差平均值较小;除计算值误差外,缆索吊装施工塔架处索鞍的反向摩擦力、吊装过程中温度变化、缆索卡扣与缆索的滑移也会影响索力测试结果,经修正后,索力测试值与计算值总体偏差减小;吊重滑行至跨中时,后锚索锚碇处的索力最大。

关键词:钢管混凝土拱桥;缆索吊装;索力计算;施工监测;误差分析

中图分类号:U442

文献标志码:A

0 引言

缆索吊装系统常以塔架和悬索作为主要的受力构件,利用天车来回在悬索上移动来运输重物。其跨度大、结构简单、效率高,对于穿越山谷、河流等桥梁建设具有良好的适用性。20世纪70年代,缆索吊装系统就被应用于桥梁工程施工,此后在悬索桥和拱桥施工中经历了长足发展。

主跨为600 m的重庆鹅公岩大桥^[1],主跨为900 m单跨双铰钢桁架加劲梁悬索桥四渡河大桥^[2],主跨为636 m单跨双铰钢桁梁悬索北盘江大桥^[3],主跨为338 m的预应力钢筋混凝土加劲板梁悬索桥西溪大桥等将缆索吊装技术应用于施工。钢管混凝土拱桥具有变形能力强、抗腐蚀、耐久性好、工期短的特点,是大跨拱桥比较理想的构造形式,而缆索吊装法也是该类桥型常用的建造方法。

缆索吊装利用主缆承受吊重,同时也可以作为跑车的运行轨道,安装于跑车上的起吊装置和牵引装置将节段起吊并运输至设计位置。缆索是整个吊装系统的关键。

目前缆索索力的测试方法主要有压力表法、压

力传感器法、频率法、磁通量法、缆索伸长测量法^[4-5]。现有索力计算引入简化方法,需要对计算结果进行修正。尽管熊杰^[6]提出温度变化对索力测量有影响,但仅提出在索力测量时控制温度变化,并没有形成温差变化对索力的修正成果。目前还未有考虑现场多因素影响下的索力计算研究,影响了计算的精度。就此,本文在理论分析的基础上,开展缆索吊装系统的索力计算方法研究,对计算跨径为300 m上承式钢管混凝土拱桥的400 m悬索跨径缆索进行实桥索力计算分析和现场测试,验算单根索索力,主要考虑索鞍的反向摩擦力和温度变化的影响,进行索力误差分析,提高索力计算的精度。

1 索力计算方法

主索是缆索吊中最重要的受力构件。对其计算时一般认为索是完全柔性的,仅承受轴向拉力;其变形和荷载符合线性关系,且截面面积不因荷载变化而发生改变^[7]。基于已有成果^[8-9],本文对索力计算方法进行研究。

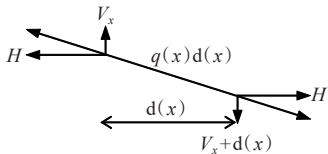
1.1 平衡微分方程

取索上 $d(x)$ 微段进行受力分析(图1)。

收稿日期:2022-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51108249)

作者简介:徐峰,男,大学本科,高级工程师.E-mail:373595817@qq.com

图1 索上 $d(x)$ 微段受力分析

由平衡条件 $\sum F_y = 0$ 得:

$$-V_x + V_{x+d(x)} + q(x)d(x) = 0 \quad (1)$$

$$V_x = H \cdot \frac{dy}{dx} \quad (2)$$

$$V_{x+d(x)} = V_x + dV = H \frac{dy}{dx} + \frac{d}{dx} \left(H \frac{dy}{dx} \right) dx \quad (3)$$

进而得到:

$$H \frac{d^2 y}{dx^2} = -q(x) \quad (4)$$

该式即为主索在竖向荷载 $q(x)$ 的平衡微分方程。

1.2 均布荷载作用下主索水平分力

对主跨区段采用抛物线理论进行分析,假定主索端点之间的荷载沿连线均匀分布,即可用图2表示。

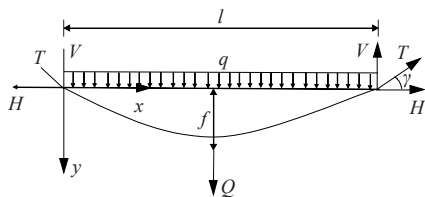


图2 主跨区段受力分布

故均布荷载作用下平衡微分方程可以写成:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{q}{H} \quad (5)$$

为求知主索线形,对该微分方程进行积分,即:

$$y = -\frac{q}{2H} x^2 + C_1 x + C_2 \quad (6)$$

将边界条件: $x=0, y=0; x=l$ (主索端点距离), $y=0$; 代入得均布自重荷载作用下主索线形方程:

$$y = -\frac{q}{2H} x^2 + \frac{ql}{2H} x \quad (7)$$

令 $x = \frac{l}{2}, y = f$ (主索跨中垂度), 求得主索水平分力为:

$$H = \frac{ql^2}{8f} \quad (8)$$

1.3 集中荷载作用下主索受力

在空索假定基础上,在距离索A端 l_0 处的 x 点作

用一竖向集中荷载 Q (图2)。根据静力平衡条件可知, A、B两点的和力矩均为0, 可得:

$$V_A = \frac{ql}{2} + \frac{Q(l-l_0)}{l} \quad (9)$$

$$V_B = \frac{ql}{2} + \frac{Ql_0}{l} \quad (10)$$

进而得到:

$$V_A = H \frac{f_x}{l_0} - \frac{ql_0}{2} \quad (11)$$

由式(9)和式(11)求得索的 x 点垂度, 即:

$$f_x = \left(\frac{q}{2} + \frac{Q}{l} \right) \frac{l_0(l-l_0)}{H} \quad (12)$$

将式(12)重新改写成主索的水平分力表达式, 即:

$$H = \left(\frac{q}{2} + \frac{Q}{l} \right) \frac{l_0(l-l_0)}{f_x} \quad (13)$$

集中载荷作用在跨中时, 主索的垂度和水平张力均最大:

$$H_m = \frac{ql^2}{8f} + \frac{Ql}{4f} \quad (14)$$

根据文献[10], 主索的抛物线方程可以写成:

$$y = \frac{4fx(l-x)}{l^2} \quad (15)$$

则主索斜率可以表示为:

$$\tan \gamma = \frac{4f}{l} - \frac{8f}{l^2} x \quad (16)$$

索塔处主索的斜率即为 $\tan \gamma_0 = \frac{4f}{l}$, 故索塔处主

索竖向力:

$$V = H_m \tan \gamma_0 = 2l + Q \quad (17)$$

后锚索锚碇处的水平分力等于塔顶的水平分力, 锚碇处竖向分力为塔顶处缆索的竖向拉力减去后锚索的无应力自重。因而, 求解后锚索锚碇处的索力即转化为求解后锚索的无应力自重。

1.4 后锚索无应力自重

主索长度计算公式为:

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx \quad (18)$$

对式(18)进行积分, 则索长度可以表示为:

$$S = \int_A^B ds = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx \quad (19)$$

对式(19)进行级数展开可得主索有应力长度^[11]:

$$S = l + \frac{c^2}{2l} + \frac{q^2 l^3}{24H^2} \quad (20)$$

主索弹性伸长量 ΔS 为:

$$\Delta S = \int \frac{Tds}{EA} = \int_0^x \frac{Hds/dx}{EA} dx = \int_0^x \frac{Hds}{EA} = \frac{HS}{EA} \quad (21)$$

则主索的无应力长度 S_0 可由上述两者作差:

$$S_0 = S - \Delta S = S - \frac{HS}{EA} \quad (22)$$

带入式(21)求得主索无应力长度 S_0 :

$$S_0 = \left(1 - \frac{H}{EA}\right) \left(l + \frac{c^2}{2l} + \frac{q^2 l^3}{24H^2}\right) \quad (23)$$

由式(24)可得后锚索的无应力自重,即:

$$G = qS_0 \quad (24)$$

由此,后锚索锚碇处的索力即可求得。

1.5 后锚索拉力增量

相较缆索均布荷载自重产生的后锚索拉力,集中荷载作用在跨中时的拉力增量可通过式(25)求解:

$$\Delta T = \frac{H_m - H}{\cos \beta} = \frac{\frac{ql^2}{8f} + \frac{Ql}{4f} - \frac{ql^2}{8f}}{\cos \beta} = \frac{Ql}{4f \cos \beta} \quad (25)$$

式中: β 为后锚索与水平面的夹角。

2 索力计算分析

2.1 工程概况

乌梅河特大桥主桥采用计算跨径为 300 m 的上

承式钢管混凝土变截面拱桥,拱轴线采用悬链线,拱轴系数为 1.55,矢跨比为 1/5,矢高 60 m。半幅主拱圈采用 3 榀空间桁架结构,截面采用等宽度变高度,断面高度从拱顶 5 m 变化到拱脚 9 m(中到中),半幅每榀拱肋横向间距 5 m,两幅桥拱肋之间距离 7 m。半幅桥拱肋之间设置横梁,两幅桥之间设置 K 字撑。上下弦拱肋均采用等截面钢管,不同部位采用不同厚度。钢管拱肋对接接头采用内法兰盘栓接、管外焊接的形式进行连接。管内灌注 C55 自密实补偿收缩混凝土。

主桥采用斜拉扣挂缆索吊装系统施工。缆索吊装系统由起吊安装缆索吊机、斜拉扣挂系统和平衡稳定系统三部分组成。

起吊安装缆索吊机由主承重索、吊塔、吊塔纵向风缆、吊锚、起吊、牵引、动力机械等部分组成;斜拉扣挂系统由拱圈上锚固点、钢绞线扣索、扣塔前后平衡索、扣索锚梁和扣索张拉端等部分组成;平衡稳定系统由拱圈上锚固点、钢丝绳风缆、地锚等部分组成。

为减少缆索吊机设备投入,降低工程成本,加快施工周期,将 8#、12#墩作为施工的吊塔平台,交界墩设置扣索锚梁。吊塔采用钢管杆件拼装成双柱式门塔,塔柱中部设横系梁,顶部设盖梁;扣塔采用钢管杆件拼装成全焊接门式格构柱,塔脚固结。缆索吊装平面图如图 3 所示。

2.2 单根索张力设计验算

吊装系统计算参数如表 1 所示。

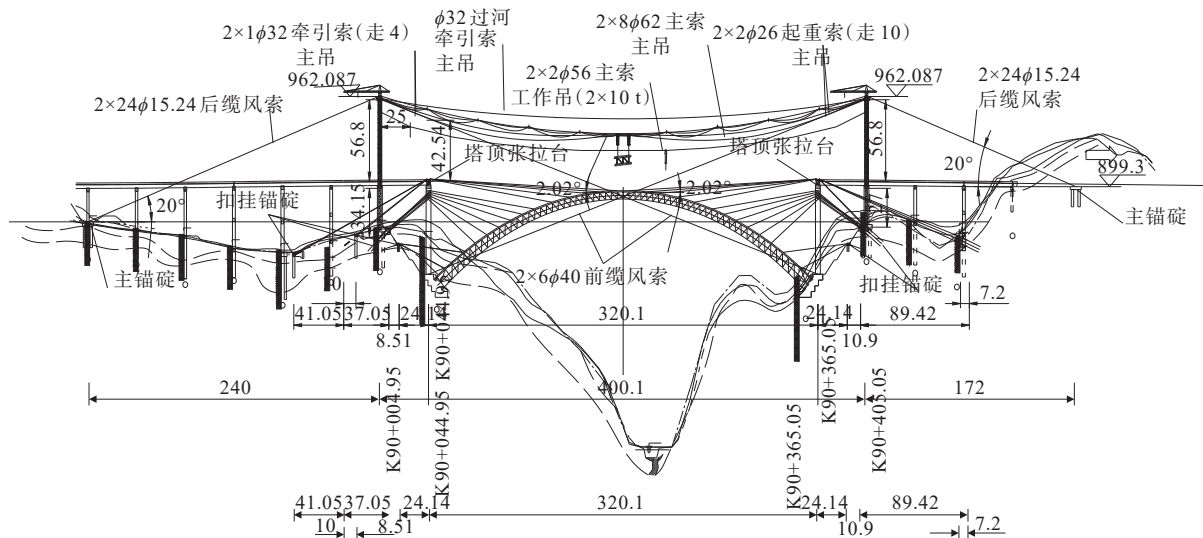


图3 缆索吊装平面图(单位:m)

表 1 计算参数

物理量	含义	单位	数值
q	主索空索荷载集度	kN/m	1.9
l	主索两端点水平距离	m	400.1
f	主索跨中垂度	m	27.0
H_g	主索空索状态水平力	kN	1 404.4
Q	最大吊重(0.5倍拱肋重量)	kN	855.0
H	集中荷载下主索水平分力	kN	4 571.9
$\tan \nu_0$	索塔处主索斜率		0.27
V	集中荷载下主索竖向分力	kN	1 655.2
E	主索弹性模量	N/m ²	2.0E+11
A	主索面积	m ²	0.0
c_g	贵阳主塔到锚碇高差	m	91.0
c_h	黄平主塔到锚碇高差	m	56.8
l_g	贵阳主塔到锚碇距离	m	249.9
l_h	黄平主塔到锚碇距离	m	156.0
$\cos \beta$	后缆索夹角余弦值		0.94
S_{g0}	贵阳后缆索无应力长度	m	267.7
S_{h0}	黄平后缆索无应力长度	m	166.7
G_g	贵阳后缆索无应力自重	kN	507.3
G_h	黄平后缆索无应力自重	kN	315.8
V_g	贵阳锚碇处竖向分力	kN	1 147.9
V_h	黄平锚碇处竖向分力	kN	1 339.4
T_g	贵阳锚碇处合力	kN	4 713.8
T_h	黄平锚碇处合力	kN	4 764.0

则单根索最大张拉力为 595.5 kN (4 764/8 kN), 远小于索设计强度 3 802 kN ($\pi R^2 \sigma_d$)。

3 现场测试

3.1 缆索吊装系统

主承重索索力监测采用高精度位移计、动态综合采集模块和无线传输系统实现。通过测试承重索固定索长范围内的长度变化反推应变变量,进而得到主承重索的索力变化量,即:

$$\Delta T_{\text{test}} = EA \frac{\Delta s}{s_0} \quad (26)$$

式中: Δs 为吊装过程中规定索长范围内位移变化量; s_0 为固定索长。

在桥梁双侧分别布置 4 个位移传感器,利用高精度位移计、动态综合采集模块和无线传输系统实现采集。传感器布置方案如图 4、5 所示。

采用远程监测系统实现对吊装过程主索索力的实时监测。该系统是一个集结构分析计算、计算机技术、大数据云平台、通信技术、网络技术、传感器技

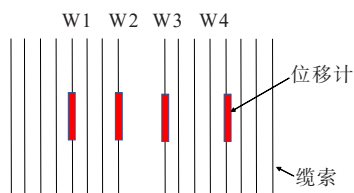
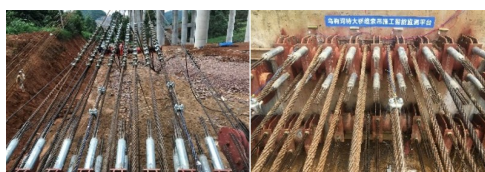


图 4 传感器布置



(a) 绳扣和高精度位移计布置



(b) 测点布置



(c) 动态综合采集模块及系统

图 5 主承重索索力监测现场图

术等高新技术于一体的综合系统工程。通过 5G 技术将数据上传云端,并可进行实时分析处理。

3.2 测试结果及分析

各吊装节段的重量如表 2 所示,主索采用 $2 \times 8\phi 62$ 钢丝绳,16 根索通过 2 个或 4 个吊点吊装拱肋节段。

3.2.1 测试结果和试验结果比较

根据本文计算方法分别得到两岸单根缆索的索力计算值,采用本文测试方法得到索力实测值,结果比较见表 2。可以看出:除两测点偏差较大(贵阳岸 4、5),其他测点最大误差约 20%,贵阳岸平均偏差 8%,由于黄平岸吊装阶段经过跨中,故偏差平均值较小(图 6 和表 2)。

3.2.2 误差分析

分析影响本文缆索吊施工和测试结果的因素有:

(1) 前述计算方法并未考虑两塔架处索鞍的反向摩擦力(图 7),而摩擦力的存在会导致后缆索的索力减小。因而理论计算应减去该部分因摩擦引起的拉力。

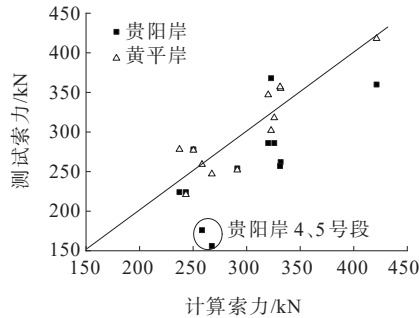


图6 测试索力和计算索力比较

表2 测试结果和计算结果比较

节段 编号	重量/ t	ΔT / kN	ΔT_{test} (贵)/kN	偏差	ΔT_{test} (黄)/ kN	偏差
1	171.0	421.3	360	0.15	418	0.01
2	129.9	320.1	286	0.11	347	-0.08
3	118.2	291.3	254	0.13	252	0.13
4	108.6	267.5	156	—	247	0.08
5	104.8	258.3	176	—	259	0.00
6	101.6	250.3	278	-0.11	277	-0.11
7	98.7	243.3	224	0.08	221	0.09
8	96.3	237.3	224	0.06	278	-0.17
9	134.6	331.7	262	0.21	341	-0.03
10	134.4	331.2	257	0.22	289	0.13
11	132.2	325.8	278	0.15	295	0.09
12	131.0	322.8	368	-0.14	302	0.06
平均值				0.08		0.02

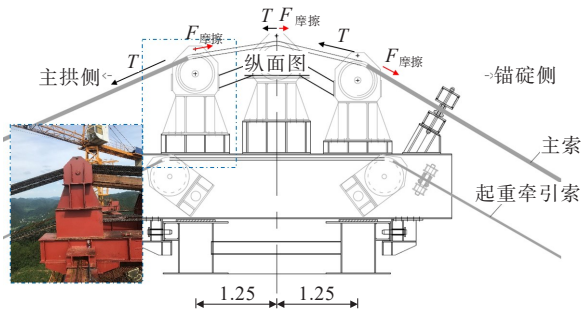


图7 塔架索鞍处受力分析(单位:m)

将塔架的受力模式简化为悬臂梁受水平集中荷载作用,缆索与塔架索鞍的摩擦力引起塔架的偏位。在塔架顶部安装北斗位移测试系统测试吊装过程中的塔架实时偏位,并对最大偏位进行统计。则产生偏位所需的水平力为:

$$H_1 = m \frac{\omega E_1 I_{y1}}{h^3} \tag{27}$$

式中: m 为塔架钢管柱数量, $m=12$; ω 为塔架最大偏位; E_1 为弹性模量; I_{y1} 为等效抗弯刚度, $I_{y1}=I_y+b^2 A_1$, $I_y=\frac{\pi D^4}{64}(1-\alpha^4)$, D 为塔柱钢管半径(图8); α 为塔柱钢管空心占比; A_1 为单个钢管柱有效面积, $A_1=\pi D^2(1-\alpha^2)$; h 为塔架高度, $h=56\text{ m}$ 。

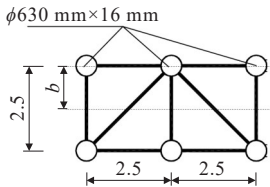


图8 塔架钢管柱(除钢管直径为mm外,其余单位:m)

则该水平力引起的后锚索索力变化为:

$$\Delta T_1 = \frac{H_1}{\cos \beta} \tag{28}$$

(2) 吊装过程中温度变化还会导致缆索的拉伸或缩短,温差产生的后锚索拉力为:

$$\Delta T_2 = \zeta \Delta t EA \tag{29}$$

式中: ζ 为缆索线膨胀系数, $\zeta=1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

因此,修正后的后锚索索力计算值可以表示为:

$$\Delta T_r = \Delta T - \Delta T_1 - \Delta T_2 \tag{30}$$

将塔架最大偏位和温差变化进行统计(表3),计算其分别引起的索力变化,最终得到修正后的后锚索索力计算值。

表3 索力测试值与计算修正值对比

节段编号	w/mm	$\Delta T_1/\text{kN}$	$\Delta t/^\circ\text{C}$		$\Delta T_2/\text{kN}$		ΔT_r (贵阳岸)/kN	偏差	ΔT_r (黄平岸)/kN	偏差
			贵阳岸	黄平岸	贵阳岸	黄平岸				
1	132.0	17.9	3.3	0.2	20.9	1.3	383	-0.06	402	0.04
2	95.0	12.9	0.8	0.2	5.1	1.3	302	-0.05	306	0.13
3	78.0	10.6	2.6	0.5	16.5	3.2	264	-0.04	278	-0.09
4	80.0	10.8	0.9	0.2	5.7	1.3	251	—	255	-0.03
5	86.5	11.7	0.1	-1.3	0.6	-8.2	246	—	255	0.02
6	61.5	8.3	1.1	-0.2	7.0	-1.3	235	0.18	243	0.14
7	63.5	8.6	-0.2	0.3	-1.3	1.9	236	-0.05	233	-0.05
8	74.5	10.1	0.7	-7.9	4.4	-50.1	223	0.01	277	0.00
9	145.0	19.6	0.2	0.6	1.3	3.8	311	-0.16	308	0.11

续表 3

节段编号	w/mm	$\Delta T_1/\text{kN}$	$\Delta t/^\circ\text{C}$		$\Delta T_2/\text{kN}$		$\Delta T_r(\text{贵阳岸})/\text{kN}$	偏差	$\Delta T_r(\text{黄平岸})/\text{kN}$	偏差
			贵阳岸	黄平岸	贵阳岸	黄平岸				
10	145.0	19.6	0.1	0.3	0.6	1.9	311	-0.17	310	-0.07
11	143.0	19.4	7.4	1.9	46.9	12.0	260	0.07	294	0.00
12	121.5	16.5	-7.2	0.4	-45.6	2.5	352	-0.06	304	0.04
平均值								0.02		0.02

从表 3 可以看出:塔偏引起的索力变化约占 4.5%;贵阳 11[#]、12[#],黄平 8[#]节段吊装过程中温度变化较大,引起索力较大变化,经修正后偏差明显减小,其他吊装过程温差影响较小。经修正后,索力测试值与计算值总体偏差减小。

(3) 缆索卡扣尽管已通过电动扳手锚固良好,但在吊装过程中,缆索仍可能存在微小滑移,导致固定索长范围内缆索变形过小,进而造成索力实测值偏小。

3.2.3 吊装全过程分析

以黄平上游 9[#]段为例,分析吊装过程中主索受力情况(图 9)。吊装准备阶段,主索索力为 0;从起吊点至跨中阶段,主索索力不断增加,直至跨中达到最大索力;从跨中到拱肋设计位置阶段,索力减小;拱肋安装时索力不发生变化;拆除吊点,索力减小。

若吊装靠近贵阳端拱肋,则不会达到计算索力最大值,在吊装至拱肋设计位置时即达到最高索力(图 10)。

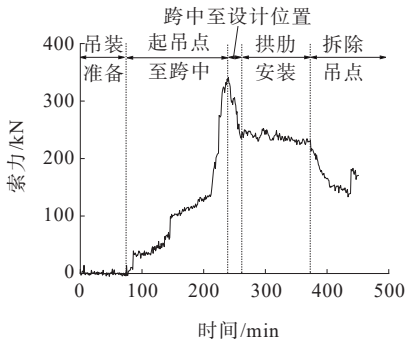


图 9 吊装全过程主索受力分析(黄平岸上游 9[#]段)

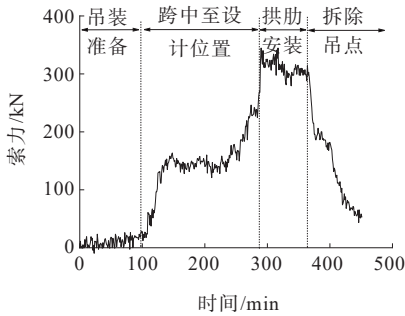


图 10 吊装全过程主索受力分析(贵阳岸上游 12[#]段)

4 结 论

本文开展缆索吊装系统的索力计算方法研究,进行实桥索力计算分析和现场测试,主要得出以下结论:

(1) 采用本文索力计算方法得到索力计算值和实测值总体偏差约 8%;由于计算值取跨中的最大索力状态,故黄平岸吊装节段总体偏差平均值较小。

(2) 除计算值误差外,缆索吊施工塔架处索鞍的反向摩擦力、吊装过程中温度变化、缆索卡扣与缆索的滑移也会影响索力测试结果,经修正后,索力测试值与计算值总体偏差减小。

(3) 测试结果表明:吊重滑行至跨中时,后锚索锚碇处的索力最大。

参考文献:

[1] 杨寿忠.重庆鹅公岩悬索桥主梁索道吊装方案设计[J].市政技术,2005,23(5):285-287.

[2] 李德钦,包建武,鲜正洪,等.900 m 大跨径缆索吊验算及荷载试验[J].公路与汽运,2009(1):131-133,151.

[3] 郭吉平.北盘江大桥缆吊系统及钢桁梁安装关键技术[J].世界桥梁,2011,39(6):22-25.

[4] 郝超,裴岷山,强士中.斜拉桥索力测试新方法:磁通量法[J].公路,2000,45(11):30-31.

[5] 段波,曾德荣,卢江.关于斜拉桥索力测定的分析[J].重庆交通学院学报,2005,24(4):6-8,12.

[6] 熊杰.矮塔斜拉桥施工控制及索力误差分析[D].成都:西南交通大学,2009.

[7] 张志国.悬索计算理论与应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.

[8] 罗亭.拱桥缆索吊装施工索力简化计算方法[J].公路工程,2016,41(3):122-124,140.

[9] 陈璨.千米级悬索桥缆索吊系统性能分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.

[10] 沈世钊,徐崇宝,赵臣.悬索结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.

[11] 李真颜.长寿长江二桥缆索吊装系统力学性能分析研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.