

斜拉桥施工控制中索长误差的修正方法研究

黄蓁,陈常松*

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为了使斜拉桥施工过程中斜拉索的索长误差得到有效修正,该文提出以斜拉索锚杯外露量为误差控制指标的修正方法,从施工控制的角度分析斜拉索的弹性模量、温度效应以及锚点坐标等因素对索长误差的影响,然后通过对制造索长和锚固端螺母位置的调整达到误差修正的目的。在嘉鱼长江公路大桥中的应用结果表明:这一方法提高了斜拉索张拉完成后的实际锚杯外露量与理论值的吻合度,使螺母能够位于锚杯的有效螺纹区域,确保了该桥主梁悬臂架设过程中斜拉索安装与张拉的高效实施。

关键词:斜拉桥;斜拉索;索长误差;锚杯外露量;误差修正

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

0 引言

在斜拉桥的拉索施工中,斜拉索实际索长与理论索长之间不可避免地存在误差。当斜拉索张拉完

成且张拉端的锚杯套上螺母时,比较张拉端实际锚杯外露量(锚杯超出螺母的长度)与理论值便可得知具体的索长误差。张拉斜拉索时,若斜拉索偏长,则需要在原有垫板之上再加垫板才能锚固;若斜拉索偏短,锚杯外露量偏小,螺母最终只能位于锚杯尾部

- 高速公路病害检测信息化技术研究[J].中外公路,2020,40(2):300-306.
- [8] 高俊祥.基于图像处理和机器学习的桥梁检测新技术研究[D].南京:东南大学,2018.
- [9] 苏琦,刘佰鑫,王权权,等.基于多旋翼无人机的桥梁外观检测技术及工程应用研究[J].预应力技术,2017(5):7-11.
- [10] 陈榕峰,徐群丽,秦凯强.桥梁裂缝智能检测系统的研究新进展[J].公路,2019,64(5):101-105.
- [11] 李灏天,陈晓冬,徐怀远,等.基于Bilateral-Frangi滤波的桥梁裂缝检测算法[J].激光与光电子学进展,2019,56(18):170-176.
- [12] 周志祥,姜腾蛟,唐亮,等.移动式三维激光扫描系统在桥面全息变形监测的应用研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(5):1078-1091.
- [13] 缪盾,吴竞.基于AgisoftPhotoscan的图像三维重建及精度研究[J].测绘工程,2017,26(8):41-44.
- [14] 董湘婉,袁向荣,任张晨,等.数字图像技术在三等跨连续梁振动分析中的运用[J].实验室研究与探索,2018,37(3):14-16.
- [15] SMEC South Africa.Provision of consulting services for the design and construction supervision of informal area metering within eThekweni municipality[J].Civil Engineering,2019,27(11):33.
- [16] 姚华,杜松.近景摄影测量技术应用于桥梁检测的试验研究[J].北方交通,2019(5):43-45,49.
- [17] 段浪.基于数码相机的桥梁缺陷尺寸测量技术研究[C]//中国土木工程学会2016年学术年会论文集,2016:347-356.
- [18] 魏文龙,刘森森.基于轻量化神经网络的桥梁裂缝识别检测[J].南方农机,2020,51(21):125-126.
- [19] 项小伟.近景摄影辅助倾斜摄影的影像匹配及三维建模研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [20] 李良福,冯建云,宋睿.基于图像重生成的桥梁裂缝检测方法研究[J].光电子·激光,2019,30(12):1298-1308.

收稿日期:2022-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678070)

作者简介:黄蓁,男,博士研究生.E-mail:37679609@qq.com

*通信作者:陈常松,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:1343471153@qq.com

区域(该螺纹区域的内侧为空心凹槽,其强度与抗疲劳性能不如锚杯的实心区域)。以上两种情况均会影响斜拉索锚固效果和安全性。在索长误差过大时,张拉完成后甚至无法正常锚固,严重影响斜拉索安装和张拉的效率,所以在斜拉索张拉前应预估拉索误差量并采取修正措施。

目前,已有许多学者对斜拉索进行了多方面较深入的研究。秦顺全^[1]提出了无应力状态法,通过确定斜拉索的无应力索长以得到斜拉索的张拉力;颜东煌^[2]基于最小二乘法提出了斜拉桥合理施工状态的正装迭代算法,确定斜拉桥施工期间的中间索力。学者们在后续斜拉索计算理论研究中,引入了悬链线索单元,提高了索力和无应力索长的计算精度^[3-8]。同时对索力的现场测试方法也进行了研究对比,最常用的频率法不断被完善,并衍生出了一些新的索力测试方法^[9-14]。还有众多文献中提供了索力测量的参数敏感性分析结果以及索力确定的优化方法^[15-20]。

上述研究涉及斜拉索的索力计算理论与测量方法,但对斜拉索长度误差的分析与修正方法的研究尚不充分。本文以嘉鱼长江公路大桥为背景,先用设计无应力索长作为张拉控制参数进行求解斜拉索张拉控制力,考虑收缩、徐变以及几何非线性后再反复迭代,得到一组合理施工状态下新的无应力索长,然后把最终得到的无应力索长作为斜拉索的制造下料长度。但计算模型中无应力索长的计算参数与实际情况存在差别,以致在实际施工中出现索长误差。本文分析索长误差的产生原因,提出具体的修正方法,并通过实桥应用验证其可行性。

1 索长误差修正原理

索长误差修正的目的是斜拉索张拉至最终索长时螺母能够整体位于锚杯的螺纹有效长度区间内,即索长误差修正实质上就是控制锚杯外露量的偏差。

1.1 斜拉索锚固原理

斜拉索张拉完成后,将螺母套入锚杯,螺母与垫板紧密贴合便可达到锚固效果。嘉鱼长江公路大桥的斜拉索张拉端与锚固端的锚具结构尺寸一致,斜拉索锚具结构示意如图1所示,图中: A 为锚杯凹槽深度; B 为螺母高度; C 为锚杯长度; D 为锚杯外露量

(锚固端为 D_0 ,张拉端为 D_1); L_k 为螺纹有效长度。

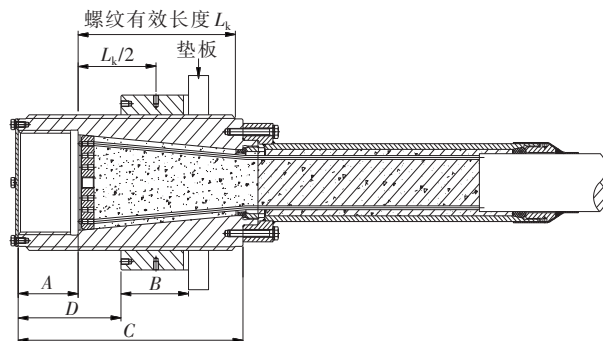


图1 斜拉索锚具结构示意图

锚杯凹槽的作用是安装连接杆,对斜拉索进行牵引或者张拉。由于锚杯凹槽区域是空心的,所以锚杯表面的凹槽区域螺纹与实心段螺纹的受力性能不同,则螺母应尽量避免安装在锚杯凹槽外表面的螺纹区域。锚固时,螺母的目标位置为 $L_k/2$ 处,而由于索长误差的存在,螺母的实际位置具有不确定性,但要尽可能使螺母整体位于螺纹有效长度 L_k (实心段)范围内。螺母的目标位置决定了锚杯外露量 D 的理论值,张拉完成后用钢尺测得实际 D 值,相比较后即可得到索长误差。

不同规格斜拉索的锚具尺寸不同。嘉鱼长江公路大桥斜拉索锚杯的螺纹有效长度为31.5~46.2 cm,螺母高度为13.5~20 cm。可见螺母的可移动范围约为20 cm,所以索长误差范围非常有限。

1.2 索长误差分类

索长误差可分为无应力索长制造误差、斜拉索伸长量误差以及外界条件造成的误差。

(1) 无应力索长制造误差

当成品索小于200 m时,制造误差不允许超过0.02 m;当成品索大于200 m时,制造误差不允许超过 $(L_0/20\,000+0.01)$ m,其中 L_0 为基准温度下的无应力索长。嘉鱼长江公路大桥索长最大值为494.636 m,平均索长为278.888 m,索长最大制造误差不可超过3.5 cm,平均误差不可超过2.4 cm。制造方在斜拉索出厂前会精准测量一次斜拉索的无应力索长,将这一次测得的索长值作为斜拉索实际索长,并记录制造长度误差。

(2) 斜拉索伸长量误差

斜拉索张拉受力后的索长误差由无应力索长误差与伸长量误差共同组成,伸长量误差只能在斜拉

索张拉完成后通过测量锚杯外露量得知。伸长量误差与成品索的弹性模量有关。

(3) 外界条件造成的误差

现场安装斜拉索时,温度、主梁重量和锚点位置的偏差,也会使张拉端锚杯外露量产生偏差。

造成索长误差的原因较多,在施工控制中应充分考虑每一种原因造成的影响,使斜拉索的施工控制精细化。

2 索长误差影响因素分析

斜拉索安装施工时,导致索长误差的主要原因是斜拉索弹性模量、温度以及锚点位置等因素的不确定性。通过调整计算模型中索长计算参数获得新的无应力索长,与原来的无应力索长进行比较,进而分析具体的影响量。

2.1 斜拉索弹性模量对索长的影响

斜拉索弹性模量的差异会影响其张拉后的伸长量。嘉鱼长江公路大桥的斜拉索有LPES7-121至LPES7-301共10种规格,制索厂会对成品索进行张拉试验,测得斜拉索的弹性模量,其中每种规格的斜拉索测试3根。从实际的弹性模量测试结果可知:参与测试的成品索中弹性模量最小值、最大值和平均值分别为 1.92×10^5 MPa、 2.08×10^5 MPa、 2.03×10^5 MPa。

该桥的前期计算模型中斜拉索的弹性模量设置为 1.95×10^5 MPa,所以实际弹性模量比原始计算参数更大。则把原始计算模型中斜拉索弹性模量依次改为 1.99×10^5 MPa、 2.03×10^5 MPa和 2.08×10^5 MPa。将3种情况下计算得到的无应力索长与原始无应力索长(即斜拉索弹模计算参数为 1.95×10^5 MPa时得到的无应力索长)进行比较,结果如图2所示。

由图2可知:当弹性模量为 1.99×10^5 MPa时,对索长影响的最大值为2.3 cm,平均值为1.2 cm;当弹性模量为 2.03×10^5 MPa时,对索长影响的最大值为4.4 cm,平均值为2.4 cm;当弹性模量为 2.08×10^5 MPa时,对索长影响的最大值为7.0 cm,平均值为3.8 cm。可见弹性模量越大,对索长影响越大。

2.2 温度对索长的影响

温差对索长影响也较为显著。嘉鱼长江公路大桥的设计基准温度为 15°C ,而在斜拉索生产和安装过程中的实际温度与基准温度是不同的。计算模型中

得到的无应力索长为 15°C 时的索长,现将该索长分别换算成 5°C 、 23°C 和 30°C 情况下的索长,比较换算后的索长与基准温度下索长的差值,结果如图3所示。

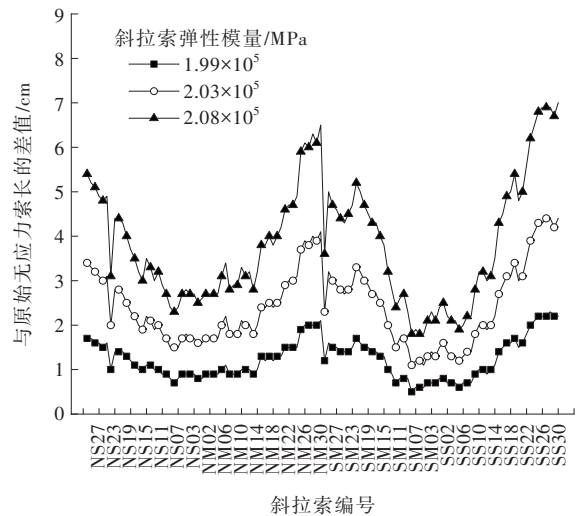


图2 不同弹模的索长与原始索长差值图

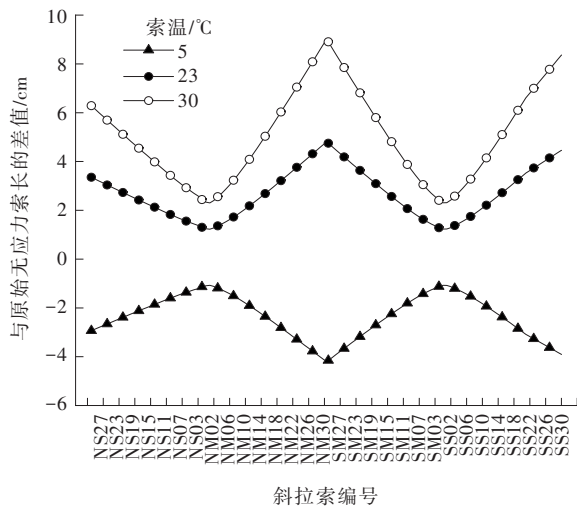


图3 不同温度的索长与原始索长差值图

由图3可知:当索温为 5°C 时,对索长影响的最大值为4.2 cm,平均值为2.3 cm;当索温为 23°C 时,对索长影响的最大值为4.7 cm,平均值为2.6 cm;当索温为 30°C 时,对索长影响的最大值为8.9 cm,平均值为5.0 cm。可见索温越高,对索长影响越大。

2.3 锚点位置对索长的影响

斜拉桥挂索施工时,斜拉索的实际锚点位置与计算模型中的理论锚点位置可能存在差异。锚点位置出现偏差会直接影响张拉端锚杯外露量。斜拉索锚点分为梁端锚点和塔端锚点。梁端锚点的位置跟随主梁位置移动,主梁节段在高精度定位完成的

况下,梁端锚点位置是基本准确的。如有细微误差,则来自于主梁长度方向的制造误差,所以梁端锚点偏差不会太大。

锚点位置偏差主要来源于塔端锚点。首先塔端的斜拉索锚固构件(如索导管、钢锚梁、齿块)定位时会产生误差导致锚点误差。考虑现场施工放样的准确性,定位时的锚点误差最大可达 1.5 cm,甚至 2 cm;而且锚点定位时会设置预抬量,预抬量只是计算理论值,与索塔实际的沉降量会有偏差。后期通过观测塔顶棱镜几何位置,可得到主塔实际沉降量与理论值的差别。对索长大于 200 m 的索塔,其差值可能超过 2 cm;梁悬臂架设过程中会存在临时的不平衡荷载,从而引起的塔偏量也会导致锚点位置偏差。该部分的锚点误差受到主塔实际刚度的影响,对索长大于 200 m 的索塔,在施工过程中主塔的顺桥向实际偏位与理论值的最大差值达 3 cm,甚至更多。所以塔端锚点的高程和里程方向的误差一般为 $-3 \sim 3$ cm。

根据上述产生锚点位置偏差的原因,通过修改计算模型中的塔端锚点 Z 坐标(高程)和 X 坐标(里程)模拟锚点位置的偏差,将新得到的无应力索长值与原始无应力索长进行比较,结果如图 4、5 所示。

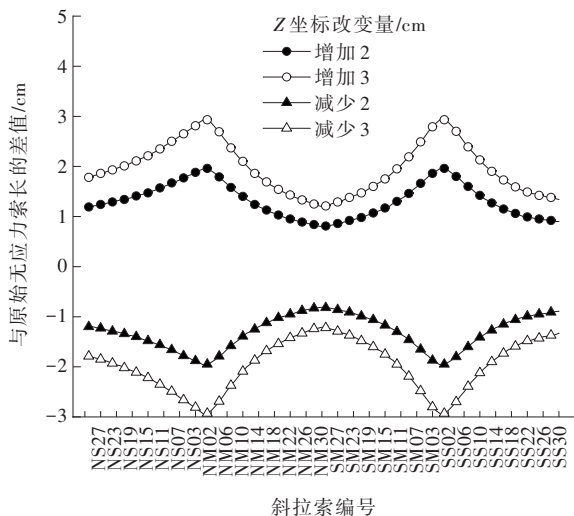


图 4 改变塔端锚点 Z 坐标后的索长差值

由图 4 可知:塔端锚点的 Z 坐标变化对长索影响较小,索越短影响越大。Z 坐标变化 2 cm 或 3 cm 时,对无应力索长影响量最大值为 2.9 cm。

由图 5 可知:塔端锚点的 X 坐标变化对越长的索影响越大。X 坐标变化 2 cm 或 3 cm 时,对无应力索长的影响量最大值为 2.8 cm。若同时考虑 Z 坐标和

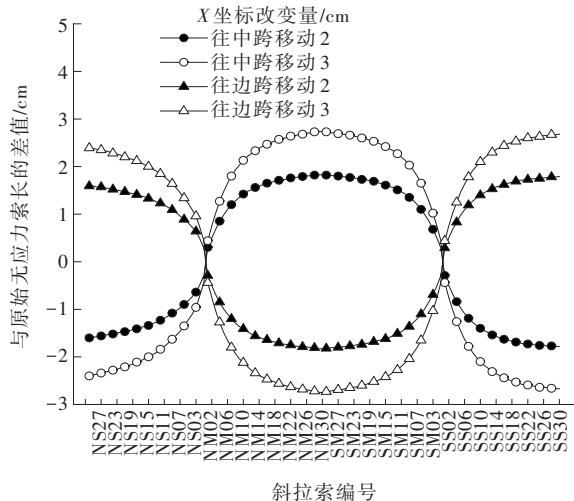


图 5 改变塔端锚点 X 坐标后的索长差值

X 坐标的偏差,可对无应力索长产生 4 cm 以上的误差,所以锚点位置偏差对索长的影响不可忽视。

综合考虑各变量对索长的影响,其中包括弹性模量、温度、锚点位置和制造误差等,索长误差在最不利情况下会超过 20 cm。由此可见,在斜拉索的现场安装和张拉时,必须提前计算每根索的长度误差,判断误差是否会影响拉索的正常锚固,必要时应该采取相应的控制措施。

3 索长误差修正方法与应用结果

湖北嘉鱼长江公路大桥主桥为主跨 920 m 的双塔七跨连续不对称混合梁斜拉桥,跨度组合为 $(70+85+72+73)$ m + 920 m + $(330+100)$ m,全长 1 650 m。北边跨采用预应力混凝土箱梁,中跨和南边跨采用钢箱梁。斜拉索为双空间索布置,采用低松弛高强平行钢丝成品索,全桥共设 4×30 对斜拉索,总计 240 根。桥型布置如图 6 所示。

3.1 误差修正分析

索长误差不可能完全消除,当斜拉索的索力张拉到位且锚固完成时,张拉端的螺母不会刚好能位于螺纹有效长度 L_k 的 $1/2$ 处。实际情况中,螺母的位置只要不超过锚杯的螺纹有效长度 L_k 的范围,即达到最好的锚固效果。

如果要使螺母整体位于螺纹有效长度 L_k 区域内,根据螺母可移动范围计算,锚杯外露量的偏差不能超过 $\pm(L_k/2 - B/2)$ 。根据该桥各种规格锚具尺寸可算出 $(L_k/2 - B/2)$ 值共 9 种,其中最小值 9 cm,

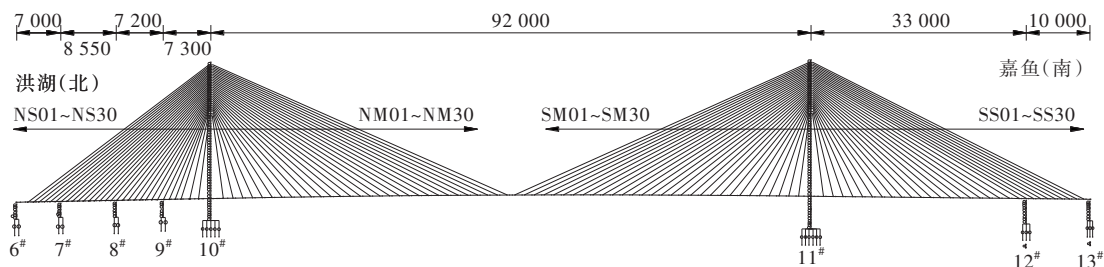


图6 嘉鱼长江公路大桥主桥桥型布置图(单位:cm)

最大值为13 cm。所以对于短索,张拉端的索长误差不能超过 ± 9 cm;对于长索,张拉端的索长误差不能超过 ± 13 cm。所以索长误差允许值很小,应当提前分析影响因素,若索长超过限值,应对锚固端锚杯外露量 D_0 进行调整,中和索长误差,防止全部索长误差由张拉端单独承担。

3.2 索长误差修正方法

在主梁重量明确、张拉控制力计算精确以及索力测试仪器读数准确的前提下,索长误差修正方法主要分为以下3个部分。

(1) 弹性模量引起的索长误差修正

在制造斜拉索时会在每种规格斜拉索中选出3根测试弹性模量。工厂分5个批次生产240根斜拉索,每个生产批次都会测得若干个斜拉索弹性模量数值,根据之前生产批次测得的弹性模量数据后一批拉索制造索长的调整。即分析已经测得的弹性模量数据后修改原始计算模型里的弹性模量参数,算出新的无应力索长将其作为后一个生产批次的制造索长。

但是第一批的斜拉索生产前还没有实测的斜拉索弹性模量数据,无法提前修正第一批斜拉索的制造索长。第一批斜拉索应当测量3根1#索(全桥共8根1#索)的弹性模量,分析实测弹性模量数据后算出1#索的张拉端锚杯外露量的影响量,从而提前调整锚固端的锚杯外露量 D_0 。1#索安装完成后,安装第一批斜拉索中的其他拉索时,均可参照已测得1#索实际弹性模量调整 D_0 值。

(2) 温度引起的索长误差修正

工厂制造斜拉索时需要对长度测量数据进行温度修正,但是制索工厂的测温仪器通常只能测量斜拉索表面温度,甚至直接将室内温度当作实际索温

来进行温度修正。但其实室内温度或索体表面温度与索体内温度存在差异,尤其是制索过程中的热挤PE护套会使索温提升较多。而热挤PE护套之后的工序就是精下料,精下料决定了斜拉索的实际长度。如果制索厂没有考虑生产斜拉索各工序的时间间隔,在热挤PE护套后,索体内的温度尚未与室温一致,这样测得的索体表面温度可能会比索体内的温度低很多。如果按照此时的索体表面温度修正索长的温差影响并进行精下料,就会导致斜拉索的实际长度偏短。因此实际制索过程中应该避免出现类似的情况。

现场安装斜拉索时,索体温度和大气温度存在差异,应制作测温索模拟索温。现场安装斜拉索一般选择在光线较好的白天,而在夜晚温度场均匀的条件下进行张拉控制。白天安装斜拉索需确定锚固端螺母的位置,应提前通过索温的实测数据预测张拉时的索温。若预测值与基准温度不同,则首先确保张拉力的准确调整,然后计算张拉后的索长影响量,再对 D_0 进行调整。

(3) 锚点位置引起的索长误差修正

该桥索塔为倒Y形。在塔顶、上塔柱与中塔柱交界处、下横梁3处塔壁上各安装一个测量棱镜,用来观测施工过程中索塔的沉降值与塔偏值。在每次斜拉索张拉前,通过比较3个测点的实测值与理论值的偏差,计算张拉端锚点位置坐标偏差引起的索长误差。索塔建设过程中会产生锚点定位误差,误差数据应当及时记录并保存。斜拉索张拉时,综合统计得到锚点偏差对张拉端锚杯外露量 D_1 的影响量,然后调整锚固端锚杯外露量 D_0 。

3.3 索长误差控制结果

根据以上方法对嘉鱼长江公路大桥斜拉索的索

长误差进行控制。全桥所有斜拉索安装到位后,张拉端实际的锚杯外露量 D_1 与理论值的差值如图 7 所示。

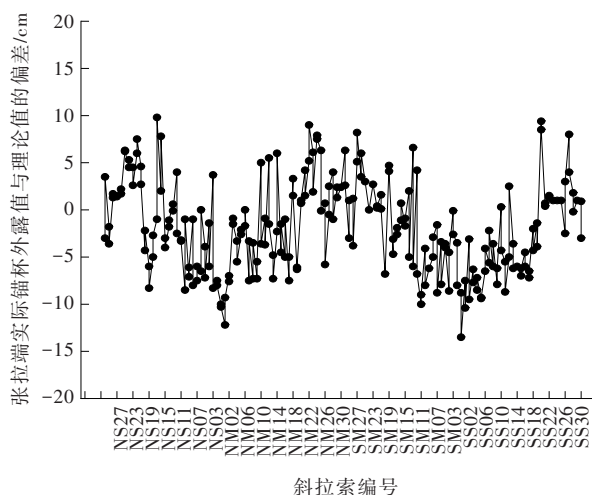


图 7 张拉端锚杯外露量 D_1 差值

由图 7 可知:张拉端锚杯外露量 D_1 的差值基本控制在 ± 10 cm 以内。由于该桥在最初安装斜拉索时没有调整锚固端的锚杯外露量 D_0 , 所以有 2 根 1# 索的张拉端锚杯外露量偏差较大, 导致张拉端螺母超出了锚杯螺纹有效长度范围, 但仅超出 2 cm 左右。其余斜拉索的张拉端和锚固端的螺母均位于螺纹有效长度区域内, 全桥斜拉索锚固时均未出现加垫板的情况, 说明索长误差得到了有效控制。

4 结论

(1) 经分析, 由于多因素的影响同时存在, 斜拉桥的索长误差可能会较大, 对长索的影响更加明显。分析索长误差应贯穿斜拉索生产至张拉完成的全过程, 从多方面考虑索长误差的影响因素, 可较准确地计算具体误差。

(2) 索长误差控制是斜拉桥施工控制中的必要环节。本文方法以锚杯外露量为指标控制索长误差, 并在千米级跨度斜拉桥的应用中证实了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 秦顺全. 斜拉桥安装无应力状态控制法[J]. 桥梁建设, 2003, 33(2): 31-34.
- [2] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [3] 郝超, 裴岷山, 强士中. 大跨度斜拉桥拉索无应力长度的计算方法比较[J]. 重庆交通大学学报, 2001, 20(3): 1-3.
- [4] 刘涛. 异形桥塔斜拉桥无应力索长确定及施工监控研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [5] 汪峰, 刘沐宇. 斜拉桥无应力索长的精确求解方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(7): 49-52.
- [6] 王健, 杨雨豪. 斜拉桥无应力索长实用迭代算法[J]. 城市道桥与防洪, 2020(2): 150-153, 18.
- [7] 陈常松. 超大跨度斜拉桥施工全过程几何非线性精细分析理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [8] 李炎, 陈常松, 董道福. 斜拉桥施工控制张拉力的计算方法研究[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 157-161.
- [9] 方志, 张智勇. 斜拉桥的索力测试[J]. 中国公路学报, 1997, 10(1): 51-58.
- [10] 杨圣洁, 邓年春, 王晓琳, 等. 钢棒型短吊杆索力测试方法的比较分析[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(2): 382-388.
- [11] 张宇航, 苏成, 邓逸川. 基于欧拉运动放大算法的桥梁索力测试方法研究[J]. 图学学报, 2021, 42(6): 941-947.
- [12] 刘晨凯. 基于模态识别的短吊杆索力测试方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [13] 郑昱, 倪一清, 高赞明, 等. 斜拉索张力测试和参数评估的理论和应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 64-69.
- [14] 贺修泽, 付晓宁. 斜拉索的索力测试[J]. 中外公路, 2002, 22(6): 38-39.
- [15] 孙鹏, 肖军, 李松. 基于多目标优化的多塔特大斜拉桥索力优化研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 78-82.
- [16] 王九公. 海域大跨度双塔双索面斜拉桥索力优化与控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [17] 杨洪福. 大跨度组合梁斜拉桥施工控制参数的敏感性分析[J]. 交通科技, 2017(6): 31-34.
- [18] 吴信亮, 李惠成, 王兵见. 施工期预应力混凝土宽箱单索面斜拉桥参数敏感性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(1): 256-259.
- [19] 魏建东. 斜拉索各参数取值对索力测定结果的影响[J]. 力学与实践, 2004, 26(4): 42-44.
- [20] 陈璐, 陈小佳. 多段索异形塔斜拉桥施工阶段索力计算[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 143-148.