

文章编号 : 0258-2724(2000)05-0501-04

大跨悬索桥施工索塔变形成因分析与监测

刘成龙 , 张德强 , 黄泽纯

(西南交通大学土木工程学院 , 四川 成都 610031)

摘 要 :介绍了大跨悬索桥不同施工阶段索塔变形的成因分析以及索塔变形监测的目的和作用 , 采用了距离差监测法进行索塔变形的监测 , 取得了较好的监测效果 , 对同类桥型的施工具有较大的借鉴作用。

关键词 :悬索桥 ; 索塔 ; 变形 ; 成因分析 ; 监测

中图分类号 : U448.25 **文献标识码 :** A

Cause Analysis and Monitoring of Deformation of the Cable Support Tower of Large Span Suspension Bridge During Construction

LIU Cheng-long , ZHANG De-qiang , HUANG Ze-chun

(School of Civil Eng. , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)

Abstract : The deformation causes of the cable support tower of large span suspension bridge at different construction stages , as well as the purpose and effect of monitoring the cable support tower deformation , are introduced. A distance difference monitoring method is used to monitor the deformation of cable support tower , obtaining a comparatively good result ; and can be taken as a good reference for the same kind of bridge construction.

Key Words : suspension bridge ; cable pylon ; deformation ; cause analysis ; monitoring

90 年代中后期 , 单跨长度超过 600 m 的大跨度悬索桥 , 成为一种跨越大江大河并满足大江大河通航标准的主要桥型 , 如已通车的西陵长江大桥 (跨径 900 m) 和虎门大桥 (跨径 888 m) , 以及正在修建的厦门海沧大桥 (跨径 648 m) 、江阴长江大桥 (跨径 1 358 m) 和重庆鹅公岩大桥 (跨径 600 m) 。大跨径悬索桥的一个共同特点 , 是为满足桥下大吨位轮船的通航净空要求和由于长跨所引起的结构方面的考虑 , 支撑主缆的两索塔距地面垂直高度均在 150 m 左右 , 如此高大的塔状钢筋混凝土建筑物 , 在外界环境的影响下以及在悬索桥上部结构施工 , 即猫道施工、索股牵引和钢箱梁吊装过程中 , 均处在不断的变形之中 , 引起这些变形的原因是什么 ? 变形量有多大、有什么规律 , 是否危及索塔和施工安全 , 应该进行变形的成因分析并进行变形监测 , 以便配合施工 , 为施工决策服务。

大家知道 , 变形监测中的变形量 , 是指监测点在某一施工状态下的空间三维坐标 , 相对于该点在某一基准状态下的三维坐标的坐标差值 , 因此索塔在不同的工况下监测所得的变形量 , 具有不同的含义 , 对施工的指导作用也不一样。本文结合虎门大桥、厦门海沧大桥施工变形监测实践 , 介绍大跨悬索桥不同施工阶段索塔变形的成因分析和变形监测的方法、特点。

1 索塔受日照温差影响的静态变形监测

索塔封顶后上部构造施工前 , 应该对索塔塔顶在日照温差作用下的静态变形进行监测。高大于 150 m 的塔状混凝土建筑物 , 由于日照方向的影响 , 阳面的混凝土温度比阴面混凝土温度高 , 该温差将导致阳面

收稿日期 : 1999-07-15

作者简介 : 刘成龙 (1962 -) , 男 , 副教授 , 硕士。

的混凝土膨胀,而阴面的混凝土收缩,使索塔顶部产生无外力作用下的扭转变形,随着时间推移,日照的方向在周期性地变化,因此这种扭转变形在一日 24 h 内呈周期性变化。

此阶段索塔变形监测的目的,是掌握索塔静态变形的大小和规律,从而获知索塔在一日中变形最小的时间段,并在此时段内放样索塔的几何轴线,测量两锚跨和中跨的跨径,作为主鞍座安装定位和主缆施工线型计算的基准,同时还在此时段内测量索塔顶监测点的基准坐标,作为以后不同工况下索塔变形量计算的依据,因此可以说此阶段索塔的变形监测,是悬索桥施工监控工作的基础。

此阶段的索塔变形具有弹性变形的特征,变形的幅度随高度的增加而增大,在南方地区夏季,塔高 150 m 左右最大变形量约为 ± 4 cm,索塔的静态变形与日照方向及温度变化呈滞后反应的性质,例如在日落后的晚 8~12 h,环境温度已趋于一致,但索塔的静态变形仍在持续进行之中^[1]。

2 猫道施工阶段的索塔变形监测

索塔封顶及主鞍座安装就位后,进入悬索桥猫道施工阶段。在此之前,索塔处于无外力作用的空缆状态,一旦索塔被挂上猫道索,塔顶即受到猫道索锚跨和中跨方向的水平力作用,当作用在塔顶两侧水平力不相等时,索塔即产生顺桥向方向的变形。猫道施工要求作用在索塔上的锚跨方向和中跨方向的水平力应相等,使索塔在猫道施工中不产生顺桥向方向的变形,并保证在设计跨径下的猫道施工垂度。由于锚跨和中跨猫道索荷载不同,以及受张拉力和应力测试误差等因素的影响,作用在索塔两侧水平力很难相等,因此索塔在此施工阶段必然产生变形。如表 1 中第二行数据为某悬索桥猫道架设后实测的的跨径变化和塔顶变形情况,说明此施工阶段索塔产生了变形,而且东西塔的变形量不一致。

表 1 某悬索桥上部构造各个施工阶段跨径变化和塔柱变形

工 况	跨径值/m	跨径变化/mm	东塔变形/mm	西塔变形/mm
裸塔	648.009	基准值	无	无
猫道架设后	647.990	19	向西 19	向西 1
索股牵引后	648.025	35	向东 16	向西 3
吊第一片梁后	647.794	231	向西 97	向东 115
主鞍顶推后	648.046	252	向东 26	向西 11

此阶段索塔变形监测的目的,是监测索塔在猫道施工阶段的变形大小和方向,为猫道索应力控制和垂度调整提供依据。此外,作为主缆施工便道的猫道,其垂度控制也较为严格。猫道过高影响索股牵引,猫道过低,施工又不方便,而猫道垂度是指一定跨径下的垂度,若主塔产生顺桥向方向的变形,则跨径必然随之而变,猫道的垂度也会发生变化。所以此阶段的变形监测,直接为施工服务,是上部构造施工监控的内容之一。此阶段变形监测的特点是作用在索塔上的外力方向已知,不是锚跨方向即为中跨方向,此时的变形量仅为一维,且变形量随作用在塔顶不平衡力的变化而变化。

3 索股牵引阶段的索塔变形监测

猫道施工后进入索股牵引和主缆施工阶段。在索股牵引过程中,索塔在卷扬机牵引力和索股荷载的作用下,产生顺桥方向的动态变形,若把某一根索股从西锚牵引到东锚,当锚头还在西边跨时,西塔和东塔均产生向西的位移变形;当锚头牵引到中跨时,西塔逐渐开始向东侧位移变形,而东塔仍向西位移变形;当锚头到东边跨时,西塔仍继续向东位移变形,东塔则开始向东位移变形。当索股牵引到位后,通过调整索力和垂度以及鞍座的预偏,使索股作用在索塔两侧的水平力相等,从而达到在主缆施工阶段索塔尽可能不偏位的要求。

由于塔较高,其上部的柔性较大,受外力作用易产生变形,但每座悬索桥索塔的动态变形是有限制的,如虎门大桥索塔允许变形的最大值为 300 mm,若变形值超过此值,则可能危及索塔的安全。此外,由于施工误差以及其他难于顾及的因素影响,在主缆施工阶段,同样难于保证索股作用在索塔两侧的水平力相等,因此在索股牵引过程中以及在索股垂度调整阶段,同样应对索塔的变形进行监测,并将监测结果及时反馈给监控

部门以指导施工。如根据索股牵引时索塔变形监测结果 ,决定卷扬机的牵引力和牵引速度 根据索股垂度调整时索塔变形监测结果 ,决定索股调整的垂度值和索股的张力。

此阶段索塔变形监测的特点 ,是既有索股牵引过程中的索塔动态变形监测 ,又有索股垂度调整时的静态变形监测 ,而且变形值是一维的 ,变形方向只能是顺桥向方向。某悬索桥主缆 110 根索股全部牵引结束后 ,实测的跨径变化和塔顶位移情况见表 1 中第三行数据 ,此阶段的跨径变化和索塔变形比猫道施工阶段要大 ,而且方向相反。

4 钢箱梁吊装阶段的索塔变形监测

主缆竣工及索夹、吊索安装后 ,进入悬索桥上部构造施工的最后一个施工阶段——钢箱梁吊装阶段。在钢箱梁吊装过程中 ,由于悬索桥每一块标准钢箱梁重量均在 250 t 左右 ,所以钢箱梁的荷载通过吊索和主缆最终作用在索塔上 ,使索塔产生变形 ;此外 ,由于悬索桥的中跨钢箱梁荷载与边跨钢箱梁荷载不对称 ,在钢箱梁吊装阶段 ,必然使索塔产生中跨方向的位移变形 ,而且这种变形一般很大 ,若不考虑在吊装过程中逐步减弱这种变形 ,则索塔变形必然超过其限值而危及索塔安全 ,为解决这一问题 ,在设计和施工中采用预偏主鞍座后逐步顶推主鞍座的方法 ,以消减钢箱梁吊装时索塔的累计变形 ,使索塔在此施工阶段的变形尽可能地小 ,以确保施工质量和安全。

预偏主鞍座后逐步顶推主鞍座 ,以消减索塔累计变形的原理可用图 1 予以解释。

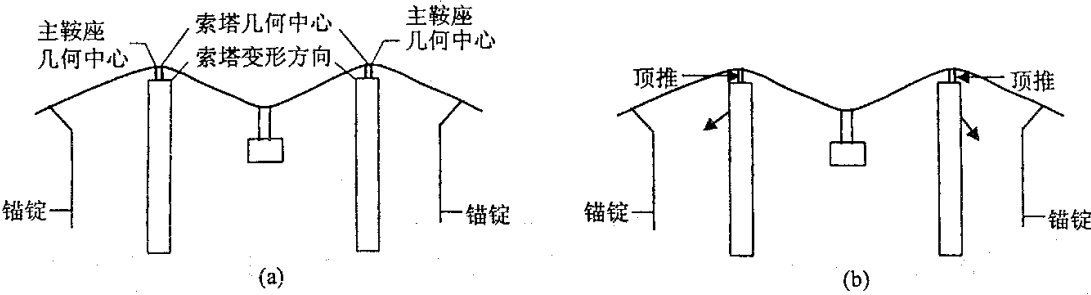


图 1 主鞍座预偏与顶推及其变形方向示意图

图 1(a)中 ,在吊装前预偏主鞍座 ,向两岸侧方向予偏 ,使索塔的几何中心与主鞍座的几何中心不一致 ,吊装中跨某一梁段时 ,东西索塔向中跨方向位移变形。

图 1(b)中 ,东西塔同时向中跨方向顶推主鞍座 ,使两塔上的主鞍座中心相对塔中心移动一定量 ,产生的反作用力使两塔向岸侧移动 ,从而消减由吊装钢箱梁引起的索塔向中跨的变形量。

主鞍座顶推一般分多次完成 ,通常吊装几块钢箱梁后 ,实测塔的变形值 ,据此确定是否顶推主鞍座以及顶推的位移值。由此可见 ,钢箱梁吊装阶段的索塔变形监测有两个目的 ,一是监测吊装过程中的动态变形量 ,以确定起吊速度和确保施工安全 ,二是监测索塔的累计变形量 ,以确定顶推主鞍座的时间及顶推量的大小。

某悬索桥钢箱梁吊装第一片后和主鞍座第一次顶推后的跨径变化和塔顶变形情况见表 1。实测数据表明 ,钢箱吊装和主鞍座顶推所引起的跨径变化和塔顶变形明显比猫道架设和丝股牵引阶段要大的多 ,而且顶推主鞍座对调整跨径和塔柱变形的作用非常有效。

5 索塔变形监测的方法

由以上分析可知 ,除日照温差引起的索塔扭转变形 ,其变形量为二维外 ,猫道施工、索股牵引和钢箱梁吊装所引起的索塔变形 ,其变形量均为一维 ,且变形方向可预先知道 ,此外 ,索塔变形监测 ,既需常规的静态变形监测 ,又需实时的动态变形监测。在选择索塔变形监测方法时 ,应结合上述特点 ,同时要求所选的变形监测方法 ,应简洁、快速、可靠、高效并易于实现。

在国内几座悬索桥施工测量实践中,我们采用一种“距离差监测法”进行索塔的变形监测,取得了较好的监测效果,其原理为:

(1) 场地布设:如图 2 所示,在东西锚的适当位置各布置一个索塔监测的基准点 A 和 D,在东西塔顶的适当位置各布设一个监测点 B 和 C 点,B 和 C 点最好在塔柱的横桥向方向上。这样 S_{BC} 即为两索塔间的跨径。

(2) 观测仪器及观测量:采用目前施工单位或测量单位均已配备的测距精度在 $(2\text{ mm} + 2\text{ }\mu\text{m})$ 以上的测距仪或全站仪两台,分别架设在 A 点和 C 点,A 测站重复测量 AB 间的水平距离,C 测站重复测量 BC 和 CD 间的水平距离,则 AB 间和 CD 间的水平距离变化量即分别是东塔顶和西塔顶的位移变形值。

(3) 变形量计算与观测数据的检核:首先在空缆状态测定 AB、BC 和 CD 间的距离,作为索塔变形监测的基准值 S_{AB}^0 、 S_{BC}^0 和 S_{CD}^0 ,则任一施工状态下东西塔的位移值可按下式计算,式中 S_{AB}^i 和 S_{CD}^i 为不同施工阶段 AB 和 CD 的距离观测值。

东塔: $\Delta S_i = S_{AB}^i - S_{AB}^0$

西塔: $\Delta S_i = S_{CD}^i - S_{CD}^0$

当 $\Delta S_i > 0$,索塔向河侧位移,当 $\Delta S_i < 0$,则索塔向岸侧位移。

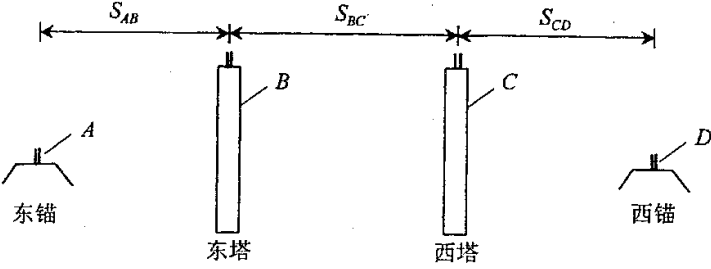


图 2 距离差监测法场地布设示意图

由于索塔的位移变形值为同一段距离的两次观测值之差,因此距离观测过程中的系统误差和部分偶然误差,可在位移变形值的计算中得到大部分的消减,从而使“距离差观测法”具有较高的精度,据理论分析和实践证明,可监测 $\pm 2 \sim \pm 3\text{ mm}$ 以上的变形量^[2]。

由于基准点 A 和 D 之间的距离为固定值,所以每一次监测,观测值应满足以下关系

$$S = S_{AB}^0 + S_{BC}^0 + S_{CD}^0 = S_{AB}^i + S_{BC}^i + S_{CD}^i$$

上式可作为外业观测数据是否可靠的检核公式。

由此可见,“距离差观测法”具有作业原理简单、观测量少、观测时间短和监测结果可靠的特点。

6 结 论

为大跨悬索桥施工服务的索塔变形监测,只有在充分理解不同工况下产生变形的原因、性质和变形监测结果对施工指导作用的前提下,才能制定行之有效的索塔变形监测方法,才能使索塔变形监测更好地为悬索桥上部构造的施工监控提供数据依据,才能达到配合施工、保证施工质量和安全的作用,此外,文中提出的“距离差监测法”,是索塔变形监测的一种较为有效的、易于被施工单位接受的方法。

参考文献:

[1] 瞿国万,刘成龙.虎门悬索桥索塔施工测量控制方法与精度分析[A].中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十二届年会论文集[C].广州,1996:209~215.
[2] 李振伟,刘成龙.汕头岩石大桥施工测量控制[J].公路,1999(1):10~13.