

特大跨度斜拉桥施工几何控制原理的数值验证

黄 灿, 卜一之, 张清华

(西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

[摘要] 以苏通长江大桥为研究对象,通过数值仿真分析验证了几何控制原理的正确性。通过对施工过程中临时荷载和环境温度对于结构线形影响的系统分析和研究结果表明,在考虑施工全过程几何非线性影响的条件下,临时荷载及环境温度等因素仅影响施工过程中的结构状态,基本不影响成桥的结构线形和内力状态,几何控制原理适用于超大斜拉桥施工控制,采用几何控制原理能够获得良好的施工控制结果。

[关键词] 斜拉桥;几何控制;几何非线性;数值验证

[中图分类号] U445 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)01-0087-05

1 前言

目前在国内斜拉桥的施工控制方法主要可分为开环控制、闭环控制和自适应控制。而在具体的斜拉桥施工过程中主要采用的是斜拉索的索力控制和主梁标高控制的“双控”方式^[1]。超大跨度斜拉桥结构体系复杂,施工工序繁多,施工工期长,对控制质量要求高,施工控制难度大,多种因素均会导致误差累积,误差调整困难,施工误差更易于导致施工过程和结构运营期的安全隐患,因而对施工控制方法提出了更高的要求。

经过多年的发展,斜拉桥施工控制技术取得了长足进步,在施工控制理论与方法上进行了大量探索,逐步形成了相对完善的施工控制系统,为促进斜拉桥的发展起到了至关重要的作用。但由于超大跨度斜拉桥结构本身的特性及其施工控制面临的挑战,在既有施工控制方法的基础上,结合几何控制、全过程控制等先进的控制理念进一步发展完备的施工控制方法是必要的。几何控制理念在斜拉索索力和主梁标高等几何及物理状态测试难以获得高精度

结果的条件下具有明显优势^[2],其初步研究成果在包括诺曼底大桥和多多罗大桥等多座大跨度斜拉桥施工控制中得到了成功应用,取得了良好的控制结果^[3,4]。国内在跨度 1 088 m 的超大跨度斜拉桥——苏通大桥施工控制中以几何控制和全过程控制为指导原则,发展了基于几何控制的大跨度斜拉桥施工全过程自适应控制系统,成功实现了该桥的高质量施工控制。笔者以苏通大桥为研究对象,通过数值仿真分析验证了几何非线性条件下几何控制原理的正确性。

2 几何控制的基本原理

几何控制是指通过精确控制结构构件的无应力尺寸与形状来达到控制桥梁结构最终线形和内力目的的一类控制方法。其理论基础可以概括为:几何体系一定的弹性结构在某一时刻的内力和变形状态唯一地取决于此刻结构所受的作用体系,而与此前结构构件的安装历程、作用的施加和变迁历程无关。其根本原因在于各时刻的结构内力与变形状态可以由静力平衡方程和变形协调方程唯一地确定,而这

[收稿日期] 2008-11-15

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2006BAG04B03)

[作者简介] 卜一之(1961-),男,北京市人,西南交通大学土木工程学院教授,工学博士,主要研究方向为桥梁结构空间行为及大型桥梁施工控制与健康监测;E-mail:yizhibu@163.com

两类方程又由此时结构的几何体系与作用体系唯一地确定。

从几何控制的理论基础可以看出,几何控制适用于几何体系的弹性结构。由于特大跨度斜拉桥结构体系几何非线性效应非常明显,对于该类结构需验证在施工过程非确定性因素诸如温度变化和临时荷载作用下几何控制原理是否依然适用。

几何控制原理在斜拉桥施工控制中的成功应用有赖于如下基本条件:a. 获取索塔及主梁无应力线形和斜拉索无应力长度时所采用的结构设计参数与施工时的实际结构参数相同;b. 在构件制造和架设拼装过程中不改变关键构件的无应力线形。

上述条件无法满足的条件下可采用自适应控制原理在施工过程中进行相应修正。基于上述两个基本假定,以苏通长江公路大桥为研究对象,考虑施工过程中作用的大小和外界环境温度发生变化为计算分析条件,以数值分析的方式来探讨几何控制在特

大跨度斜拉桥施工控制的适用性。具体分析步骤为:a. 考虑施工全过程几何非线性效应,以结构设计参数为基准状态计算得到的索塔及主梁无应力线形和斜拉索无应力长度的几何指标作为计算分析的初始值;b. 进行施工全过程数值仿真分析,列出中跨合龙前工况对结构状态的影响,并根据几何控制理念进行调整以保证合龙段梁段的几何相对关系并进行中跨合龙;c. 中跨合龙完毕,当调整方式和计算条件恢复到设计基准状态时,列出其相对基准成桥状态下对主梁线形和索塔塔顶偏位的影响。

3 数值验证及其结果分析

采用西南交通大学桥梁工程系研发的大跨度桥梁结构非线性分析系统计算专用分析软件 NLABS,对苏通大桥结构进行仿真分析,其结构离散图如图 1 所示。

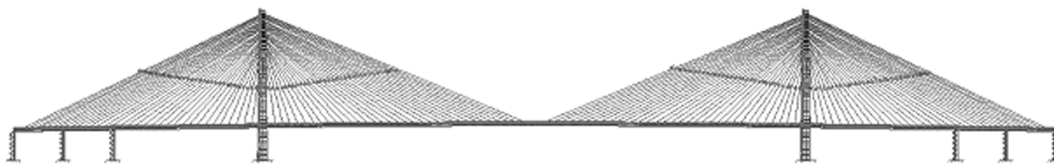


图 1 苏通长江公路大桥结构离散图

Fig. 1 Structural model of Sutong Yangtze River Highway Bridge

3.1 作用施加的大小

由于施工过程中施工临时荷载数目众多,以典型的临时荷载吊机为研究对象。以吊机荷载分别增加 200 kN 和 300 kN 为例进行施工全过程数值仿真分析,在江侧 34 号梁段斜拉索二张完成工况下,30 号梁段至 34 号梁段南北塔江侧各 5 个梁段主梁线形情况如图 2 和图 3 所示。从图 2 和图 3 可看到,当临时荷载吊机增加 200 kN 和 300 kN 时,相对于该工况的基准状态下,对线形的最大影响达到 -77.9 mm 和 -119.3 mm。同时合龙段梁段的几何相对关系与基准状态下明显不一致。根据几何控制基本理念,通过调整斜拉索无应力索长,使得调整后的主梁局部线形符合基准状态下的几何相对关系,调整后的线形如图 2 和图 3 所示。

在成桥工况下,将调整的斜拉索恢复到原来无应力索长值,同时临时荷载也恢复到成桥设计基准状态。在计算条件下,相对于基准成桥状态中跨主

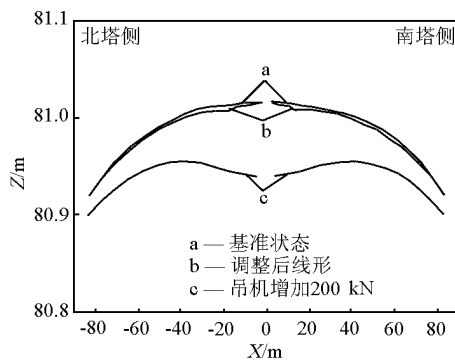


图 2 吊机增加 200 kN 线形及调整后线形情况图

Fig. 2 Geometry comparison between temporary load increased 200 kN and adjustment

梁线形和北索塔塔顶偏位影响量如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 可看到,当临时荷载增加 200 kN 和 300 kN 时,相对于成桥设计基准状态下,对中跨

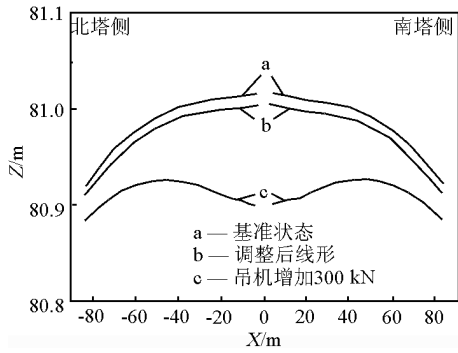


图3 吊机增加 300 kN 线形及调整后线形图

Fig. 3 Geometry comparison between temporary load increased 300 kN and adjustment

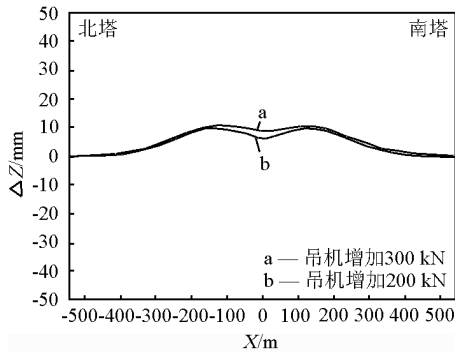


图4 吊机荷载变化对线形影响图

Fig. 4 Impact on geometry by variation of construction temporary load

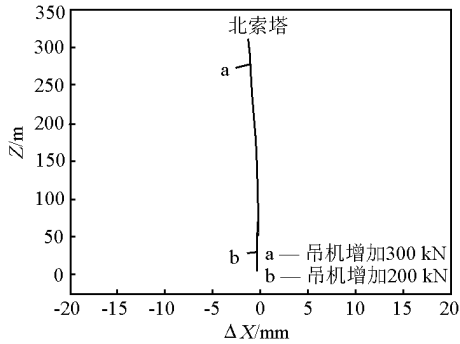


图5 吊机荷载变化对塔偏影响图

Fig. 5 Impact on pylon top deviation

by variation of construction temporary load

线形最大影响仅达到 9.5 mm 和 10.1 mm,塔顶偏位最大影响量仅有 1.1 mm。就主跨为 1 088 m 和索塔高度为 306 m 而言,这部分影响量是非常小的。这部分影响量的存在是由于斜拉索调整合龙段几何相对关系过程中存在的微小偏差和几何非线性的影响所导致,所以施工临时荷载的变化对施工全过程几何控制影响很小。

通过对临时荷载变化条件下施工全过程模拟计算,发现由于临时荷载的增加会导致主梁施工过程中下缘压应力增大的情况。当临时荷载变化很大时,需注意主梁的安全问题。

3.2 环境温度变化

在施工过程中,环境温度是时变的。考虑在中跨合龙段匹配前工况,以环境温度分别变化 $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为计算条件,30 号梁段至 34 号梁段南北塔江侧各 5 个梁段主梁线形情况如图 6 和图 7 所示。

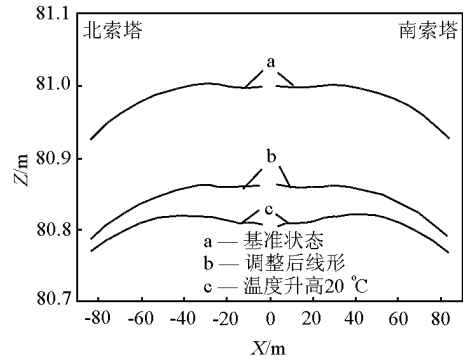


图6 温度升高 20 °C 及调整后线形情况图

Fig. 6 Geometry comparison between temperature increased 20°C and adjustment

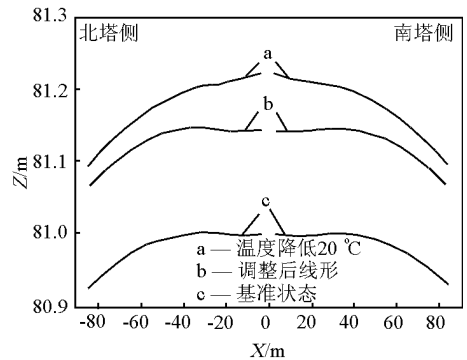


图7 温度降低 20 °C 及调整后线形图

Fig. 7 Geometry comparison between temperature decreased 20 °C and adjustment

由图 6 和图 7 可看出,当环境温度分别变化 $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,相对于该工况的基准状态,该项因素对线形的最大影响达到 -193.5 mm 和 222.1 mm 。由于环境温度的变化,不仅在合龙段梁段的几何相对关系与基准状态下不一致,同时在梁长方面也是如此。根据几何控制基本理念,通过调整斜拉索无应力索长和施加水平力,使得调整后的线形符合基准状态下的几何相对关系,调整后的线形如图 6 和图

7 所示。

在成桥工况下,恢复调整的斜拉索和拆除水平力,同时环境温度也恢复到成桥设计基准状态。在计算条件下,相对于基准成桥状态中跨主梁线形和北索塔塔顶偏位影响量如图 8 和图 9 所示。

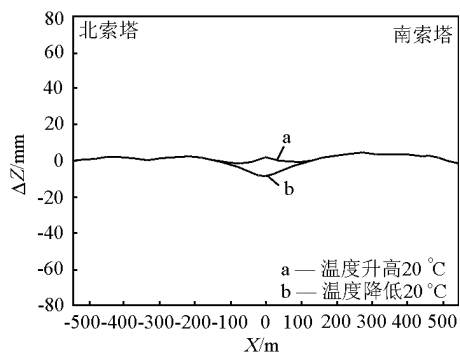


图 8 环境温度变化对中跨线形影响图

Fig. 8 Impact on geometry by variation of temperature

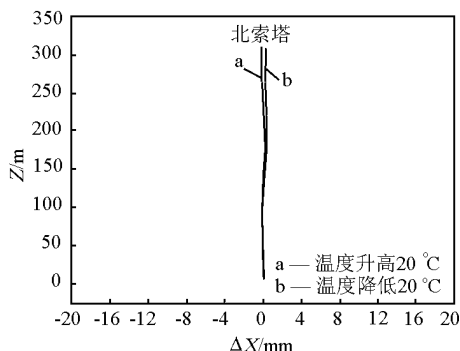


图 9 环境温度变化对塔偏影响图

Fig. 9 Impact on pylon top deviation by variation of temperature

从图 8 和图 9 可看到,当环境温度分别变化 $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,相对于成桥设计基准状态下,对中跨线形最大影响仅达到 5.3 mm 和 -9.2 mm ,塔顶偏位

最大影响量仅有 0.4 mm。这部分影响量是非常小的,所以施工过程中环境温度的变化对施工全过程几何控制影响很小。

4 结语

以苏通长江公路大桥施工全过程几何自适应控制为研究背景,针对特大跨度斜拉桥几何非线性效应的特点,以结构设计参数状态下得到的无应力线形和斜拉索的无应力索长为数值分析的初始值。以作用的大小和环境温度变化作为计算条件进行几何非线性的施工全过程模拟计算,并根据几何控制的基本理念,得到其对施工过程和成桥状态下结构状态的影响量来进行数值分析。通过系统研究可以得出如下结论:

1) 在考虑几何非线性效应的条件下,当施工过程中临时荷载的大小和外界温度变化时,通过调整措施来保证几何相对关系进行中跨合龙。当恢复调整措施和计算条件恢复到设计基准值时,几何控制依然适应于特大斜拉桥几何体系。

2) 作用大小的改变虽然在施工过程中最大单悬臂时对悬臂端线形产生较大的影响,但是在成桥时对线形影响和塔顶偏移影响较小。同时必须考虑由于临时荷载的增加所导致的主梁应力改变问题。

参考文献

- [1] 石雪飞,项海帆. 斜拉桥施工控制方法的分类分析[J]. 同济大学学报,2001,29(1):55-59
- [2] 瞿世鸿,张照霞. 国内超大跨度钢斜拉桥上部结构施工控制探讨[J]. 中外公路,2006,26(1):108-112
- [3] Virloguex M. Design of the Normandie Bridge. Proceedings of the International Conference on Cable-Stayed and Suspension Bridge [J]. IABSE,1994,(1):23-26
- [4] Hirahara N. Erection of Superstructure of Tatra Bridge (Report I) - Tower Erection and Large Block Erection of Deck at Tower[R]. Honshi Technical Report, 1997,21(5):15-20

Numerical verification of geometry control theory of the construction for super-span cable-stayed bridge

Huang Can, Bu Yizhi, Zhang Qinghua

(School of Civil Engineering, South-West JiaoTong University, Chengdu 610031, China)

[**Abstract**] Take Sutong Bridge as the subject investigated, the correctness of the geometry control theory is verified by the numerical simulation analysis. The influences of structural geometric shape induced by temporary loads and temperature field during the construction procedure are investigated. Taking the impact of geometry non-linear during construction into account, the simulation results indicate that only the stage state of the structure during construction is affected and the completion stage state is not affected. Geometry control theory applied to control the super-span cable-stayed bridge construction, and satisfied outcome of construction control can be achieved based on geometry control theory.

[**Key words**] cable-stayed bridge; geometry control; geometrical nonlinear; numerical verification