

Construction Control Technology of Cable-stayed Continuous Girder Bridge without Backstays

Zeng Yu Yafeng Wang

Shaanxi Transportation Holding Group Tongyu Transportation Research Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710118, China

Abstract

As a special type of cable-stayed bridge, the cable-stayed bridge without back cables has a beautiful and spectacular shape, making it particularly suitable for urban landscape bridges and landmark buildings. Continuous beam bridges, as the most common type of bridge with the strongest adaptability, when combined with cable-stayed systems without back cables, enhance their crossing ability and enhance their aesthetic appeal. The paper is based on the under construction Xianyang Weihe River Bridge, which is a cable-stayed continuous beam composite system bridge without back cables. Firstly, the bridge overview and construction technology are introduced, and then the methods and principles of modern bridge construction control technology are introduced. Using the finite element software Midas/Civil, establish a reasonable discrete model, simulate and analyze the actual construction conditions of the bridge, calculate the construction control data of the bridge, and use it as the theoretical basis for bridge construction control. Summarize the key and difficult points of bridge construction monitoring, and provide engineering experience for similar projects.

Keywords

cable-stayed bridge without backstays; steel bridge; construction control; simulation calculation

无背索斜拉—连续梁组合体系桥的施工控制技术

余曾 王亚凤

陕西交控通宇交通研究有限公司, 中国·陕西 西安 710118

摘要

无背索斜拉桥作为一种特殊的斜拉桥, 桥型优美壮观, 尤为适合作为城市景观桥和城市地标建筑。连续梁桥作为最常见的适应能力最强的桥型, 与无背索斜拉体系组合后, 增强了跨越能力, 增加了美感。论文依托在建咸阳渭河大桥, 结构形式为无背索斜拉—连续梁组合体系桥, 先介绍桥梁概况和施工工艺, 然后介绍现代桥梁施工控制技术的方法原理。运用有限元软件Midas/Civil建立合理的离散模型, 对桥梁实际施工工况进行模拟分析, 计算桥梁的施工控制数据, 作为桥梁施工控制的理论依据。总结桥梁施工监控的重难点, 为类似项目提供工程经验。

关键词

无背索斜拉桥; 钢桥; 施工控制; 仿真计算

1 引言

论文依托在建咸阳渭河大桥, 结构形式为无背索斜拉—连续梁组合体系桥, 桥型轻盈结构美观大气, 现代感强烈, 又与渭河河道景观交融协调。桥型的特殊导致监控控制工作复杂, 所以更需要重视桥梁施工控制技术, 保障桥梁顺利施工。

斜拉桥是由主塔、主梁、斜拉索以及下部结构组成的一种跨越能力强的桥型, 车辆荷载作用在主梁上再经斜拉索

传递至主塔的受力体系。而无背索斜拉桥作为一种特殊结构的斜拉桥, 一般只有单面斜拉索, 是由斜拉桥演变而来的一种非对称的斜拉桥, 桥型独特富有现代美感^[1]。这种新型的桥梁结构形式在中国常常被用作地标性建筑运用在城市景观桥梁上。本项目结构形式为无背索斜拉—连续梁组合体系桥, 又进一步在无背索斜拉桥的基础上演变而来, 是无背索斜拉桥的又一次创新, 增加了该种桥型的跨越能力和适应性, 是城市地标建筑的新选择、新方案^[2]。

论文结合桥梁施工方案, 通过全过程仿真模拟施工控制计算分析, 准确把握桥梁施工控制的重难点, 为施工控制提供理论指导依据。

【课题项目】大跨径桥梁施工控制与健康监测一体化研究与应用。

【作者简介】余曾(1989-), 男, 中国山西运城人, 本科, 工程师, 从事桥梁施工控制、桥梁检测、桥梁养护研究。

2 桥梁概述及主要施工流程

2.1 桥梁概述

本项目跨渭河大桥主桥采用无背索斜拉—连续梁组合

体系，塔梁固结，支座支承。采用 140+110+140=390m 的跨径组合，主梁宽度为 39.2m。主梁采用变高度连续钢箱梁。道路等级为城市主干路，设计速度 60km/h，横向布置为双向六车道。

桥塔呈倒 V 形，固结于主梁顶面上，理论固结点与分孔线水平距离 10m；立面上其轴线与水平面的夹角为 62.2°；结构最高点与桥面的竖向高度 75.478m。在桥塔平面内，倒 V 型桥塔的单肢塔柱轴线长 87.048m，与水平面夹角约 76.84°；塔柱在塔顶处通过塔冠横梁相连。桥塔根据截面变化自下而上依次为等截面段、变截面段。桥塔为钢-砼组合桥塔，截面呈八边形，靠边跨侧舱室填充 C60 自密实无收缩混凝土，内设置抗剪连接件。如图 1、图 2 所示。

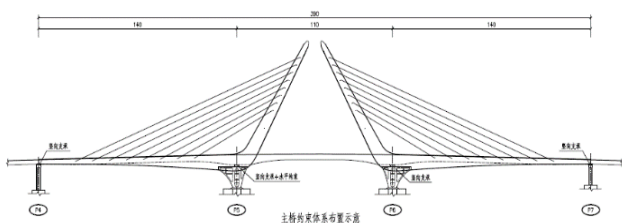


图 1 主桥立面布置图 (单位: m)

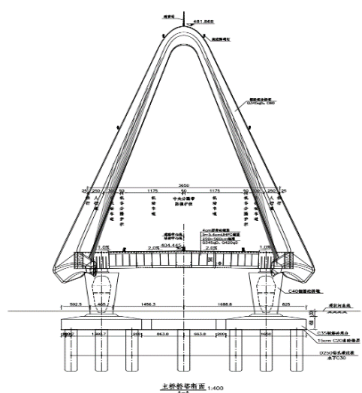


图 2 主塔立面布置图 (单位: cm)

2.2 主要施工流程

主梁采用少支点支架法分节段吊装，主塔采用满堂支架法分节段吊装。主纵梁在拼装接长后，经过架桥机完成钢梁安装。钢梁纵向吊装后先进行横向焊接，形成整体后各节段间再进行纵向焊接。单个塔柱施工分段共计 21 节，塔冠 2 节，全桥共计 94 节。钢塔安装采用同侧大小里程对称、左右两侧对称的方式搭设支架并进行对称安装。

3 施工控制的原理及方法

3.1 施工控制的原理

主梁和主塔均采用支架法施工，此种方法导致施工后没有调整的方法或措施，施工精度决定控制误差，因此对于本项目宜采用开环控制的思路，施工监控的关键是监督控制计算的准确性^[3]，在施工开始前要充分分析施工过程中可能出现的情况，包括工况的小范围变更、临时荷载的变化、

温度效应的不确定性、施工工期的不确定性等，制定相应的控制措施及目标值，在实际的施工过程中进行实测比对分析，从而达到预期的目标。

3.2 施工控制的方法

3.2.1 控制内容

根据本桥主梁结构总体刚度较小的特点，确定如下控制内容：①主梁标高控制。主梁的高程是本项目施工控制的重点，且对于本项目，由于主梁刚度较小，当索力与主梁高程同时不满足要求时，以主梁高程控制为主，斜拉索索力控制为辅。②斜拉索索力控制。本桥的主梁线刚度较低，斜拉索索力值基本取决于主梁重力分布规律，斜拉索索力的误差不会太大，但是大的索力误差将使主梁应力超限，因此索力仍然必须作为控制目标。③主梁的轴线控制。本项目位于渭河河道，风荷载不能忽略，且主梁支架位于河道内，受河流冲刷影响，可能导致主梁轴线出现偏位，所以主梁轴线是本项目的监测参数之一。④主梁的梁长控制。本桥主跨节段较多，长度较长，且主梁为钢结构对温度效应较为敏感，容易造成两侧误差，施工过程要注意梁长控制。焊缝收缩控制、合龙温度对梁长的影响。

3.2.2 主梁施工阶段监测内容

桥梁的施工监控控制完全基于实际桥梁各相关参数的监测结果，根据监测结果的比对评价从而掌握结构的动态。结构监测参数主要分为三类：一是结构的变形状态；二是结构的内力状态；三是结构的温度场。共有如下项目：①主梁各箱梁节段的高程观测；②主梁各箱梁节段的轴线、长度观测；③主塔基础沉降观测及主塔顶面位移监测；④斜拉索索力全工况监测；⑤主梁重点敏感截面应力跟踪监测；⑥塔柱关键截面应力跟踪观测；⑦梁、塔、索温度场观测。

4 施工控制理论计算

4.1 有限元建模

渭河大桥的全过程有限元模拟计算采用桥梁领域常用的有限元软件 MIDAS/Civil。主桥合理离散成 5650 个单元，2443 个节点，其中梁单元 4730 个，索单元 32 个，桥面板单元 888 个。

通过 Civil 自带的边界条件来模拟实桥的边界条件；通过节点力、单元力等方式进行斜拉索初拉力、临时荷载、二期铺装等。全桥的坐标系顺桥向为 X 轴方向，横桥向为 Y 轴方向，竖向为 Z 轴方向。渭河大桥有限元离散模型如图 3 所示。

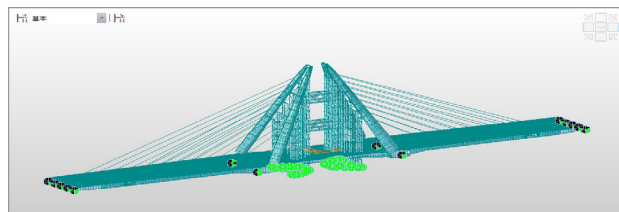


图 3 渭河大桥有限元计算模型离散图

过全过程模拟计算，优化施工工序，并与相关单位充分沟通，最终确认了 67 个模拟工况，具体模拟工况见表 1。

表 1 模拟工况表

编号	工况
1	支架安装主梁
2	浇筑主梁钢混结合段混凝土
3	主梁焊接合龙
4	安装主塔 T3 节段
5	安装主塔 T4 节段
6	安装主塔 T5 节段
7	灌注 T3~T5 湿重
8	主塔 T3~T5 混凝土刚度形成
9	安装主塔 T6
10	安装主塔 T7
11	灌注 T6、T7 混凝土湿重
12	主塔 T6、T7 混凝土刚度形成
13	安装主塔 T8
14	安装主塔 T9
15	灌注 T8、T9 混凝土湿重
16	主塔 T8、T9 刚度形成
17	安装主塔临时支架
18	安装主塔 T10
19	安装主塔 T11
20	灌注 T10、T11 混凝土湿重
21	主塔 T10、T11 混凝土刚度形成
22	安装主塔 T12
23	安装主塔 T13
24	灌注 T12、T13 混凝土湿重
25	主塔 T12、T13 刚度形成
26	安装主塔 T14
27	安装主塔 T15
28	安装主塔 T16
29	灌注 T14、T15 混凝土湿重
30	主塔 T14、T15 混凝土刚度形成
31	安装主塔 T17
32	灌注主塔 T16、T17 混凝土湿重
33	主塔 T16、T17 混凝土刚度形成
34	安装主塔 T18
35	安装主塔 T19
36	灌注 T18、T19 混凝土湿重
37	主塔 T18、T19 混凝土刚度形成
38	安装主塔 T20
39	安装主塔 T21
40	安装主塔 T22
41	灌注 T20、T21 混凝土湿重
42	主塔 T20、T21 混凝土刚度形成
43	灌注 T22 主塔湿重
44	主塔 T22 混凝土刚度形成
45	安装 T23 主塔及横梁

编号	工况
46	安装主塔塔冠装饰
47	安装主塔变截面装饰板
48	一张拉索 8#
49	一张拉索 7#
50	一张拉索 6#
51	一张拉索 5#
52	一张拉索 4#
53	一张拉索 3#
54	一张拉索 2#
55	一张拉索 1#
56	二张拉索 8
57	二张拉索 7
58	二张拉索 6
59	二张拉索 5
60	二张拉索 4
61	二张拉索 3
62	二张拉索 2
63	二张拉索 1
64	拆塔支架
65	拆除主梁支架
66	主梁装饰板安装
67	二期施工

4.2 主桥成桥目标计算

本项目主桥成桥目标包括主梁成桥线形和主塔成桥线形，成桥预拱度按照恒载预拱度和 1/2 活载预拱度之和来考虑。主梁、主塔制造预拱度计算结果如图 4、图 5 所示。

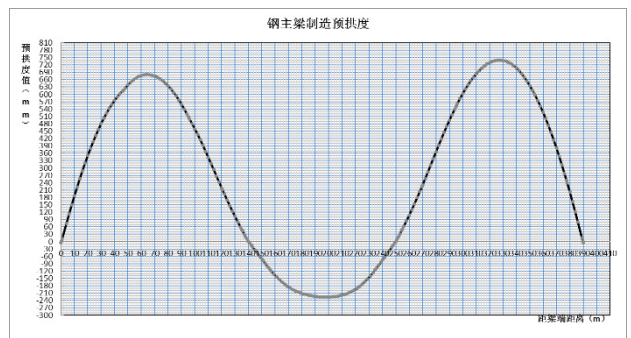


图 4 渭河大桥主桥钢主梁制造预拱度图

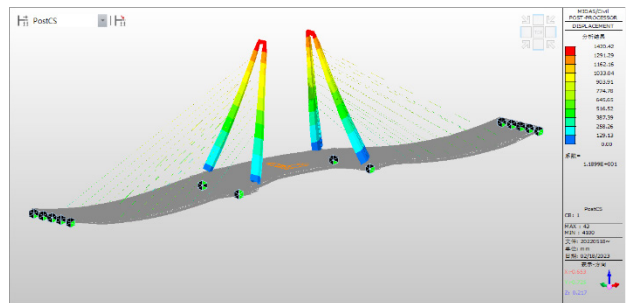


图 5 渭河大桥主塔制造预拱度图

4.3 斜拉索下料尺寸计算

在斜拉索下料前对主梁锚点实际坐标和主塔锚点实际坐标进行测量,充分考虑实桥安装误差、成桥预拱度、理论计算误差等因素计算斜拉索弦长,然后考虑拉索弹性伸长量修正和垂度修正,得出设计温度下斜拉索的实际下料长度。在斜拉索加工阶段还要考虑加工厂加工温度与设计温度间的偏差进行索长修正。表2仅对斜拉索锚点间无应力长度进行计算,对于斜拉索索头构造上的长度,还要跟拉索加工单位确认解决。

5 施工控制重难点分析

5.1 主梁线形控制重难点

由于主梁采用支架法施工,虽然前期进行了预压,但支点沉降的不确定性使主梁线形始终存在误差,尤其是涉水的河床内支架。为保证主梁线形误差最小化,在实际主梁安装后仅进行横向间焊接,对纵向节段间仅采用马板点焊,待全桥主梁吊装完成后,支点沉降也已充分释放,再次通过千斤顶对各节段主梁标高进行微调后焊接。

由于主梁刚度较小,在后期斜拉索张拉过程中还能进一步对主梁线形整体进行二次优化。

除了常规的测量手段,以上两项措施可以保证主梁线形在规范要求的误差范围内。

5.2 主塔线形控制重难点

渭河桥主塔为异形八边形形状,且与主梁有空间夹角,在实际定位放样的过程中,各角点的定位坐标各不相同,定位技术复杂^[4]。需采用BIM技术进行空间坐标计算,辅助安装定位。具体注意事项如下:①确定主塔加工分段方式及分段长度,确定各节段轴心坐标并与施工单位核对。②主塔与主梁刚接,需修正主塔预偏数据后确定主塔各节段轴心定位坐标。③与钢结构加工单位确定主塔各节段加工几何尺寸;加工单位一般会采用小节段以直代曲方式加工各节段钢梁,所以各节段几何形状及形心会与简化后实际节段长度绘制的三维图不匹配;宜以钢结构加工单位数据为准。④确定各节段几何尺寸与定位轴心坐标后,在三维软件里试拼装钢梁节段,根据施工方式明确节段间对齐原则。本项目对齐原则为:第一个T3节段以底面形心为准;后续节段以各边线不重合且焊缝宽度不大于规范要求值为原则进行拼装,误差积累过大后进行切配后再继续施工^[5]。⑤现场实际安装过程中以节段X方向轴线角度为主,高程为辅,保证索导管角度正确,避免斜拉索与索导管方向不一致无法安装。

5.3 斜拉索下料控制重难点

由于实桥主梁安装精度、主塔安装误差等原因,应根据主梁主塔当前工况下的实测误差对理论拉索下料长度进行修正,最大化减小拉索下料误差。

表2 拉索无应力长度表

拉索编号	L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08
型号	ST15-31	ST15-31	ST15-31	ST15-31	ST15-31	ST15-31	ST15-31	ST15-31
成桥索力(kN)	2087	2247	2461	2552	2507	2374	2246	2186
弦长(m)	174.367	158.585	142.774	127.014	111.278	95.561	79.891	64.289
斜拉索夹角(°)	22.981	23.504	24.126	24.801	25.609	26.66	28.113	30.286
拉索单位重(kg/m)	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4	38.4
拉索面积(cm ²)	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4
无应力长度(m)	173.933	158.158	142.351	126.624	110.942	95.287	79.675	64.119

6 结语

论文结合渭河大桥的施工建设,对本项目无背索斜拉—连续梁组合体系桥的施工控制工作进行研究,包括主桥结构的特点,主桥的刚度、内力状态,施工控制涉及的方法、目的、控制目标以及施工控制意义,对施工控制过程中遇到的问题进行分析整理,总结了相关控制经验,具体研究结果如下:①对于本项目,有限元模拟计算采用正装迭代法,该方法与实际施工工序逻辑吻合,数据后处理也较为方便,可对本项目的施工控制通过理论依据。应用开环控制法对主梁和桥塔的下料线形、斜拉索的无应力下料尺寸进行计算并提交控制数据。②总结了当前施工控制过程中的重难点,给出了工程实际问题的优化及修正方案。除了与设计单位交流对接来保证计算模型的准确性外,在实际施工控制过程中对主梁支架不均匀沉降采用后续微调的方式修正;对斜拉索无应力下料

长度进行实测后修正下料;对异性空间主塔的定位提出可实施的测量定位方案等。

参考文献

- [1] 章曾焕.哈尔滨太阳桥无背索斜拉桥设计要点[C]//中国公路学会桥梁和结构工程学会2002年全国桥梁学术会议,2002:12.
- [2] 李欣.轨道交通无背索斜拉桥受力分析与施工监控[D].上海:同济大学,2024.
- [3] 张清晨.无背索斜拉桥施工监控参数敏感性分析[J].低温建筑技术,2016,38(7):91-94.
- [4] 王上.合肥市铜陵路无背索斜拉桥施工监控要点[J].安徽建筑,2005,12(5):69-70.
- [5] 石雪飞.斜拉桥结构参数估计及施工控制系统[D].上海:同济大学,1999.