

三塔斜拉桥上部结构施工监控技术

宋亚格¹, 刘 进²

¹华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

²中建交通建设集团有限公司河南分公司, 河南 郑州

收稿日期: 2024年10月19日; 录用日期: 2024年11月13日; 发布日期: 2024年11月22日

摘 要

斜拉桥施工控制是保证成桥达到理想受力状态的重要环节。本文以沱邑大桥为研究对象, 模拟计算施工全过程并获得各施工阶段的理想状态, 对索塔应力及线形、拉索索力、主梁应力及线形、大气及结构温度进行实时检测, 通过实测结果分析与理论计算结果对比, 分析施工误差状态并及时进行安全度评估及有效调整, 保证结构的受力和变形始终处于安全的范围内, 使成桥后的主梁线形与结构内力接近设计的理想状态。

关键词

斜拉桥, 施工监控, 施工监控内容, 施工监控方法

Construction Monitoring Technology of Superstructure of Three-Tower Cable-Stayed Bridge

Yage Song¹, Jin Liu²

¹School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou Henan

²China Construction Transportation Construction Group Co., Ltd., Henan Branch, Zhengzhou Henan

Received: Oct. 19th, 2024; accepted: Nov. 13th, 2024; published: Nov. 22nd, 2024

Abstract

The construction control of cable-stayed bridge is an important link to ensure that the bridge reaches the ideal stress state. In this paper, the Fengyi Bridge is taken as the research object, the whole construction process is simulated and calculated, and the ideal state of each construction

文章引用: 宋亚格, 刘进. 三塔斜拉桥上部结构施工监控技术[J]. 土木工程, 2024, 13(11): 2091-2100.

DOI: 10.12677/hjce.2024.1311228

stage is obtained, and the stress and alignment of the cable tower, the cable force, the stress and alignment of the main beam, the atmosphere and the structural temperature are detected in real time, and the construction error state is analyzed through the comparison of the measured results and the theoretical calculation results, and the safety assessment and effective adjustment are carried out in time to ensure that the force and deformation of the structure are always within the safe range, so that the linear shape of the main beam and the internal force of the structure after the bridge is close to the ideal state of the design.

Keywords

Cable-Stayed Bridge, Construction Monitoring, Monitor Content, Construction Monitoring Method

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着桥梁结构复杂化及施工技术的发展,施工监控技术在大跨度桥梁工程中的应用愈发重要。特别是在三塔斜拉桥上部结构的施工过程中,施工监控技术不仅能够实时反馈结构受力与变形情况,还能通过数据分析进行预判和调控,确保施工安全与精度。国内外学者在施工监控方面的研究进展,主要集中于多源传感器技术的应用[1]、监控数据的实时处理与反馈[2]以及智能化施工监控系统的开发[3],这些研究极大推动了桥梁施工监控的智能化和精细化发展。

本文通过对沔阳大桥施工过程中的索力、线形、应力、温度进行监测,对桥面标高进行测量及复核,对斜拉索张力误差、桥面标高、索力误差进行分析与调整跟踪计算分析,对成桥状态进行预测及反馈控制分析,修正在施工过程中各种影响成桥目标的参数误差对成桥目标的影响,确保成桥后结构内力和线形满足设计要求。

2. 工程概况

沔阳大桥全长 526 m,为三塔钢箱梁斜拉桥,跨径布置(87+176+176+87)m。结构体系采用带弹性限位的漂浮体系。主梁采用全焊钢箱梁,采用双边箱结构,两箱之间设横梁连接。顶面总宽 57 m,底面总宽 43.9 m,两边箱室宽 9.9 m,内外腹板均采用直腹板;箱室外侧设悬臂,悬臂长 4.25 m;截面顶面中间 50 m 范围 1.5%的双向横坡,两侧 3.5 m 人行道范围设 1.5%反坡,底板采用平坡。斜拉索采用空间扇形索面布置,全桥共 108 根,每个桥塔处设计 18 对。主梁纵向拉索间距均为 9.0 m,拉索在主梁上的横向锚固点间距 48.5 m;塔上锚固点竖向间距 3.0 m。本桥共 3 个桥塔,主塔采用变截面圆形塔柱,主塔总高 89.27~94.99m,其中桥面以上塔高 74.5 m。塔顶处塔身外径 5 m,梁底位置塔身外径 6 m,中间呈线性变化;梁底以下塔身按 1:16 坡率线形变化值塔底。主塔采用钢结构-混凝土结构混合塔,其中塔顶及斜拉索锚固区采用钢塔,钢塔总高 35m;中塔柱及下塔柱采用混凝土塔,钢混分界位置设钢混结合段,结合段长 1.6 m。上塔柱长 35 m,塔柱直径 5 m~5.449 m,采用焊接圆形截面,塔身壁厚 36 mm,内侧均布 24 个高 300 mm 的 T 型加劲肋。

由于本项目是大跨径漂浮体系三塔钢箱梁斜拉桥,大桥主要受力构件数量多,主梁及索塔横桥向间距非常大,主梁、主塔受力和变形空间效应明显。此外,施工过程体系转换多、结构受力与成桥状态差异大,其上部结构采用多工序、多阶段施工,因此若不对施工过程进行控制,结构内力和线形的最终状

态很难达到设计要求[4]。为建成高质美观的桥梁，施工控制是绝不可少的。

3. 施工步骤

沅邑大桥施工流程可概括为：墩基施工→主塔施工→预制钢箱梁的施工→张拉拉索→附属设施施工→索力二次调整。其中墩基础自左至右分别命名为 P1、P2、P3，如图 1 所示。具体施工步骤为：依次施工 P1、P2、P3 墩基础，翻模施工上方混凝土塔柱[5]，适时施工桥台台身。拼装钢梁，焊接除合龙段外钢梁。施工主塔，安装斜拉索，按监控指令自塔柱向跨中逐根张拉斜拉索；斜拉索索力二次调整；精确安装桥端限位弹簧及桥台抗震措施；安装伸缩缝；通车荷载试验；全桥竣工验收，竣工验收后的大桥纵断面图如图 2 所示。

施工过程中，存在体系转换多，结构受力与成桥状态差异大等问题。如何设置合理的主塔主梁施工预拱度、优化拉索索力张拉大小及顺序；怎样调整与控制线形以及合龙口，这就需要对全桥施工过程进行精确模拟与计算分析，并结合现场检测数据反馈，确保结构最终达到确定的成桥目标状态。

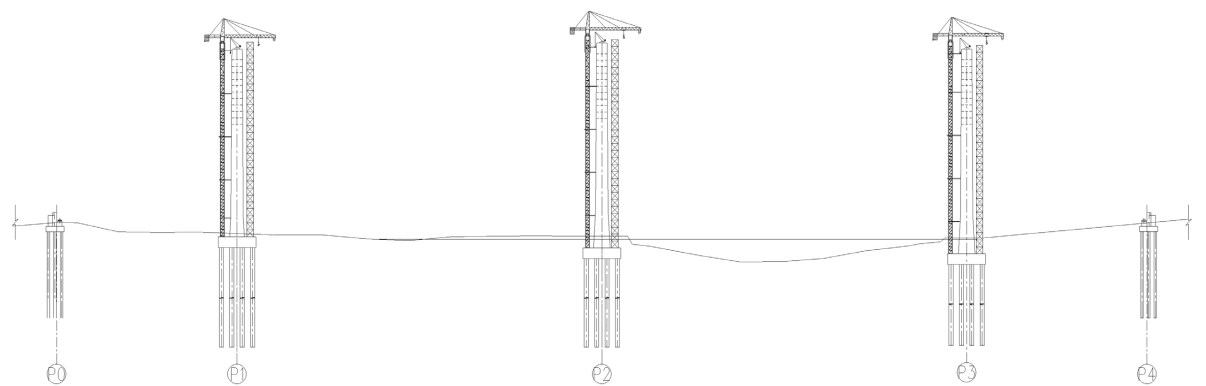


Figure 1. Construction of concrete main tower
图 1. 混凝土主塔施工

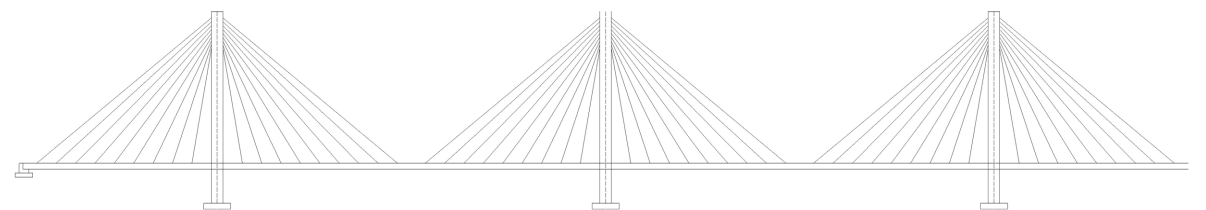


Figure 2. Longitudinal section of Fengyi Bridge
图 2. 沅邑大桥纵断面图

4. 施工监控的目的

桥梁施工监控是确保桥梁施工宏观质量的关键。本项目施工工艺复杂多样，混凝土索塔浇筑、钢索塔拼装、主梁拼装、斜拉索张拉等[6]，施工质量管控难度大。而且本项目是大跨径漂浮体系三塔钢箱梁斜拉桥，受力构件数量多，主梁及索塔横桥向间距非常大，主梁、主塔受力和变形空间效应明显。此外，施工过程中体系转换多、结构受力与成桥状态差异大，其上部结构采用多工序、多阶段施工[7]，因此若不对施工过程进行控制，结构内力和线形的最终状态很难达到设计要求。

通过施工监控，施工中每一阶段的结构内力和变形都可以预计，通过监测各施工阶段结构的实际内力和变形，并与理论计算值比较，从而完全可以跟踪掌握施工进度和发展情况。当发现施工过程中监测

的实际值与计算的预计值相差过大时, 可以及时进行检查和原因分析, 解决问题后再继续施工, 避免事故的出现。

施工监控的原则与方法

参考多座桥梁施工监控的工作经验, 结合桥梁的实际施工特点, 确定了三塔钢箱梁斜拉桥施工监控的指导原则: 以拉索索力、变形、安全性控制综合考虑。基于此原则以及多年的施工控制实践经验, 在该桥梁的施工控制方面提出了自适应控制的方法。在闭环反馈控制基础上, 再加上一个系统辨识过程, 使整个系统升级为自适应控制系统。

由于本项目对结构内力以及变形的控制精度要求很高, 故拟严格按照“施工→监测→判断→修正→预告→施工”的循环过程, 综合采用参数识别修正法、预测控制法和最大宽容度法同时进行控制。在每一工况返回结构的量测数据之后, 要对这些数据进行综合分析和判断, 了解已存在的误差, 同时进行误差原因分析。在这一基础上, 将产生误差的原因尽量予以消除, 给出下一个工况的施工控制指令, 使现场施工形成良性循环, 如图 3 所示。

此外, 施工过程中的结构行为分析采用有限元程序, 运用循环迭代逼近分析、前进分析的方法进行结构计算; 计算软件拟采用 MIDAS/CIVIL 2021 和桥梁博士 V4.10 版, 同时采用 ANSYS 软件进行复核计算, 所建立的有限元模型如图 4 所示。

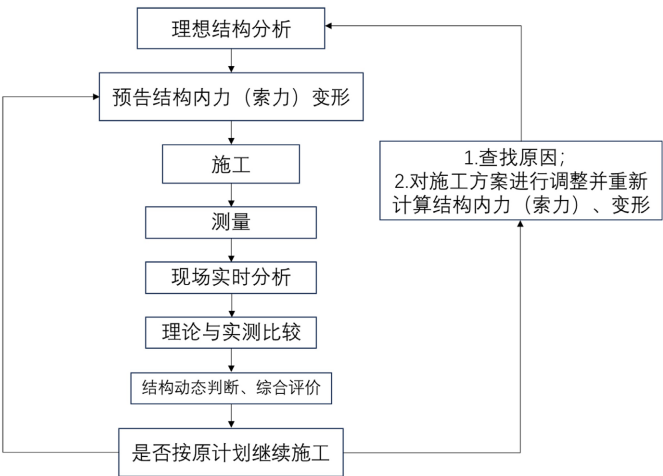


Figure 3. Bridge construction monitoring program diagram
图 3. 桥梁施工监控程序图

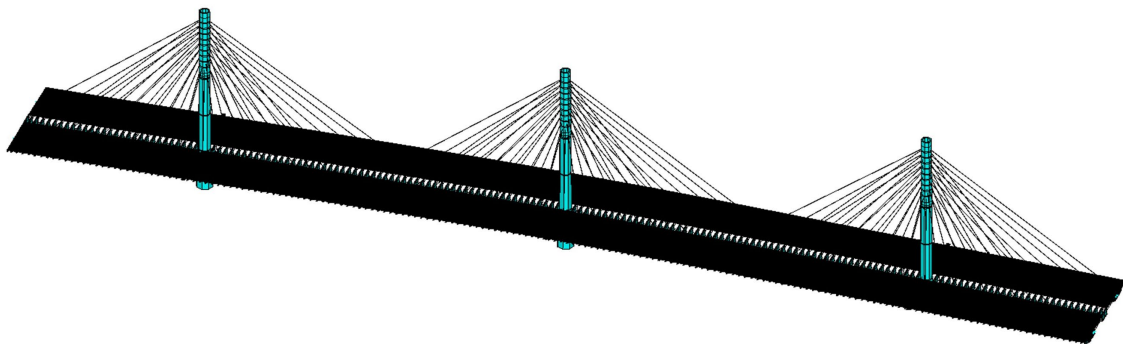


Figure 4. Finite element model of fengyi bridge
图 4. 沔阳大桥有限元模型

5. 施工监测实施内容

施工过程内力与变形的监测是斜拉桥施工控制系统中获取反馈的必要组成部分, 施工监测实施内容包括索力监测、线形监测、应力监测、温度监测。通过对其进行全程监测, 及时掌握结构的线形、应力变化情况, 并与理论计算进行比对分析, 用于指导现场施工, 以确保施工过程精度满足要求[8]。

5.1. 索力监测

(1) 测试方法: 采用频谱分析法进行索力监测, 监控使用振动采集分析仪及压电式加速度传感器进行测试。以三方数据汇总后, 进行分析识别, 确定实际索力值。与理论值进行比较, 作出“全桥拉索索力一览表”, 通过对表的分析, 可了解每一根拉索, 每一个计算节点实际与理论的偏差。当偏差较大时, 可以通过“平差调杆”予以调节, 以免误差积累至后面的施工阶段。

(2) 测试状态和数量: 拉索张拉工况下, 测试已张拉的拉索的索力; 每张拉对称的两对拉索后, 对全桥拉索索力作一次统测; 在拆除临时支墩前后对全桥索力作一次统测; 在合龙前后对全桥拉索索力作一次统测; 在施加二期恒载前后对全桥拉索索力作一次统测; 二次调索工况下, 每张拉对称两对拉索后, 对全桥拉索索力作一次统测在调索后对全桥拉索索力作一次统测。具体测点布置图如图 5 所示。

(3) 测试流程: 采用脉动法(或称频谱分析法), 利用附着在拉索上的高灵敏度传感器拾取拉索在环境振动激励下的振动信号, 经过滤波、放大和频谱分析, 再根据频谱图来确定拉索的自振频率, 然后根据自振频率与拉索索力的关系确定拉索索力。

(4) 测试时间: 每根拉索张拉后测量当前阶段的拉索索力, 每个节段主梁完成、斜拉索张拉后测量所有已施工的斜拉索索力。对于关键工况或有异常情况的工况必要时进行已完成全部拉索索力通测, 同时兼顾温度的影响, 选择在日出前(温度相对恒定)完成。

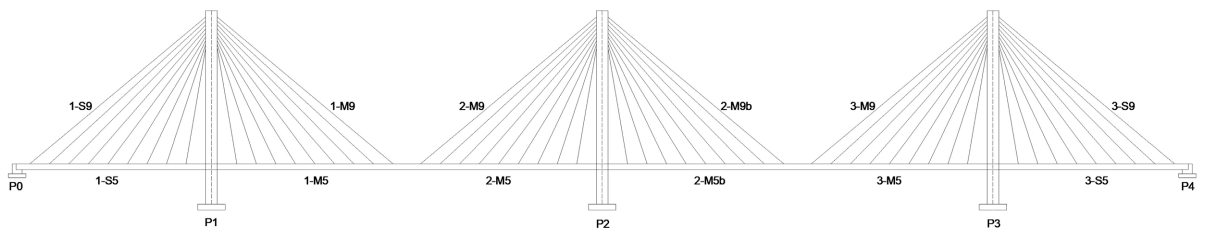


Figure 5. Layout of the cable force measurement point

图 5. 拉索索力测点布置图

5.2. 线形检测

5.2.1. 主塔线性检测

主塔线形监测主要包括基础沉降、主塔偏位、主塔高程及分肢塔柱倾斜度。用瑞士徕卡(Leica) DNA03 精密电子水准仪测量主梁高程; 用瑞士徕卡(Leica) TCA2003 自动全站仪测量塔顶的位移和主梁轴线偏位, 并根据环境温度进行坐标修正。在施工过程中, 线形监测与索力测试同步, 主梁测点布置在梁体的几何定位点上。

(1) 主塔基础沉降监测

每个主塔承台上布置 4 个观测点, 如图 6 所示, 三个主塔承台共布设 12 个沉降观测点, 实际沉降观测点采用沉降观测钉进行标识, 如图 7 所示。沉降观测点监测采用精密水准仪进行测量。由于主塔沉降

相对缓慢,主塔施工期间测试频率为每月一次。主梁施工期间,约半个月至一个月观测一次,或每施工 2 到 3 个梁段观测一次,确保梁段定位准确性。

(2) 主塔高程及偏位

主塔偏位监测包括顺桥向和横桥向两个方向偏位值的测量。高程监测主要是确保施工和成桥状态下结构的几何高度满足设计要求,保证索塔安装位置的准确。施工期高程测点布设:在每个塔柱每个节段布设 2 个高程定位和坐标定位点,具体测点数量根据节段数量确定。偏位测点布设:索塔施工完成后,在索塔顶部以及 1/2 高度位置的上(或下)游布置一个永久的索塔三维坐标观测点,设置三棱镜,固定在塔壁上,全桥共设 6 个。

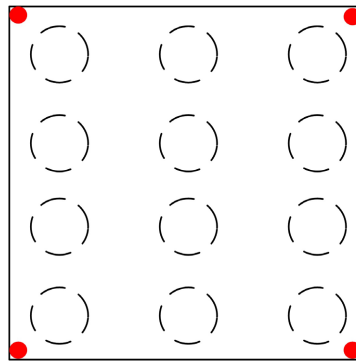


Figure 6. Layout of the main tower survey point
图 6. 主塔测点布置图



Figure 7. Observation marker map of settlement points
图 7. 沉降点观测标志图

主塔完成后用全站仪测量主塔各变形测点的三维坐标值,通过坐标值的变化得到该测点处塔顶的偏位及塔身垂直度,塔顶偏位监测采用坐标法。仪器架设在桥轴线上一点,后视基准控制点,再瞄准桥塔上的棱镜,测出塔顶测点的三维坐标。每一测试工况下的变位即为测试值与初始值的差值。

5.2.2. 主梁线性检测

斜拉桥主梁线形监测是保证大桥达到设计预期目标的关键,本次斜拉桥的主梁线形监测包括主梁高程监测、轴线监测及横坡监测。

(1) 主梁高程监测方法及测点布置

主梁高程一般采用几何水准测量法钢箱梁安装定位阶段高程测点纵桥向一般设置在各梁段端部后退 50cm 处,横向布置在机动车道防撞护栏内侧、主梁腹板与顶板交界处以及人行道护栏内侧,每个钢箱梁

节段共计 8 个高程测点，测点布置如图 8 所示。钢箱梁安装完成后线形变化监测点布置在边墩以及塔根部所处位置的断面处，测点布置如图 9、图 10 所示。

(2) 主梁轴线监测方法及测点布置

中线测量和高程测量的测点一般均应布置在主梁顶面上。观测点断面间距应根据主梁长度确定。一般情况下，在梁体应力、温度测量断面必须设点，其它部位可酌情确定，测点布置如图 11 所示。根据现架设段的中线标志，采用测小角法直接以全站仪测其偏角[9]。

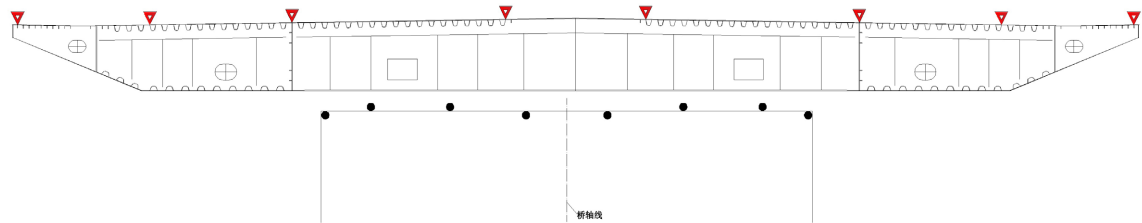


Figure 8. Schematic diagram of the layout of the elevation measurement point in the installation and positioning stage of the steel box girder
图 8. 钢箱梁安装定位阶段高程测点布置示意图

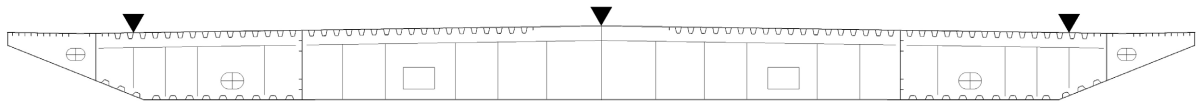


Figure 9. Schematic diagram of the layout of the linear change monitoring point after the installation of the steel box girder (cross section)
图 9. 钢箱梁安装完成后线形变化监测点布置示意图(横断面)

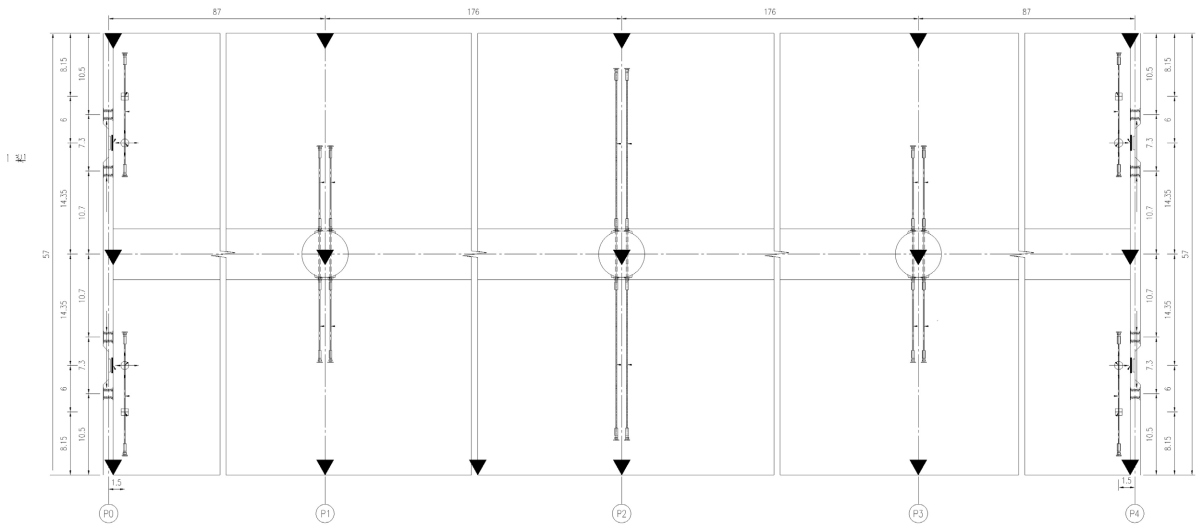


Figure 10. Schematic diagram of the layout of linear change monitoring points after the installation of steel box girder (plan)
图 10. 钢箱梁安装完成后线形变化监测点布置示意图(平面图)

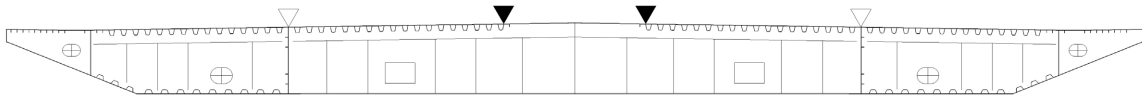


Figure 11. Schematic diagram of the layout of the axis measurement points of each assembling section of the main beam
图 11. 主梁各拼装节段轴线测点布置示意图

5.2.3. 线形监测要求

- (1) 测试要求：严格控制施工临时荷载，材料堆放要求定点、定量；线形测量工作由施工方进行，同时监理方进行监督；所有观测记录须注明施工阶段、日期、时间、天气、气温、桥面特殊施工荷载和其他突变因素。
- (2) 观测时间：施工测试受温度影响较大，测试应在一天气温平稳时段进行，本桥宜选择在夏季凌晨4点~6点之间，冬季凌晨2点~7点之间进行，所有测试项目应基本同时进行；在主梁施工期间选择有代表性的时间对温度进行24小时连续观测。
- (3) 精度要求：高程测量的精度要求为1 mm。主梁轴线偏位测量的精度要求2 mm/60 m。
- (4) 线形评估：每个梁段安装完成后均结合理论值及实时监测数据对主梁线形进行评估分析，找出测试及理论分析误差，进行误差回归分析，修正理论计算及下节段坐标预测值。
- (5) 线形控制的实施：施工控制测量相关的数据表格分为施工监控数据表和施工测量数据表两种。施工监控数据表由施工监控单位在相应的施工阶段前填写，并经设计代表和监理代表认可后，作为施工指令提供给施工单位施工。施工测量数据表由监控单位在相应施工阶段完成测量任务后填写，报监理核查备案。

5.3. 应力检测

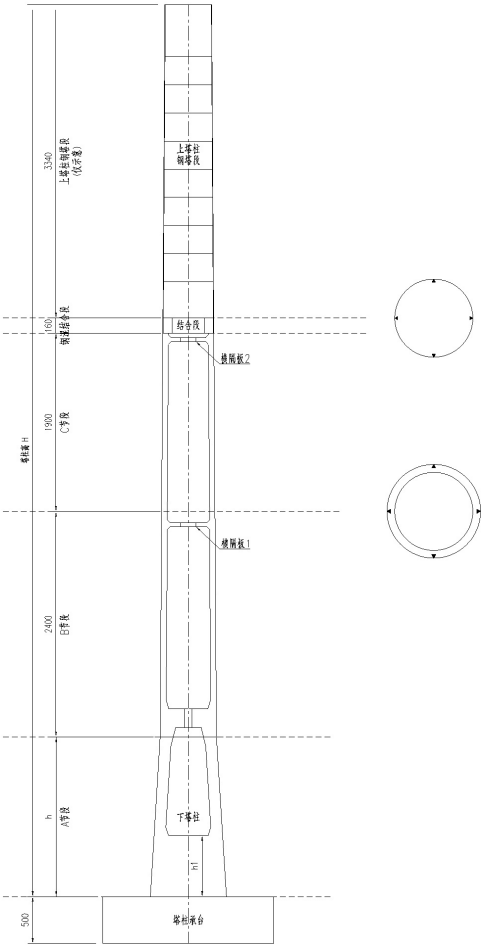


Figure 12. Schematic diagram of the layout of stress measurement points in the section of the main tower
图 12. 主塔断面应力测点布置示意图

应力监测通过在主梁、主塔的控制断面处布设应力测试元件, 以观测在施工过程中这些截面的应力变化和应力分布情况。主要监测主塔纵向应力以及主梁纵向、横向应力。

(1) 测试仪器: 考虑到长期监测的数据稳定性和数据采集的方便程度, 在混凝土索塔控制截面的测试点处布设振弦式应变计, 在钢索塔与混凝土索塔交接区域布设钢结构表面应变计, 钢箱梁的应力应变测试点处布设钢结构表面应变计, 同时测试温度, 均采用综合测试仪读取测量数据。

(2) 测点布置: 主梁、主塔的监测截面及测点布置是根据施工各阶段主梁和主塔的内力分布特点综合确定, 能充分反映主梁和主塔应力的纵向分布规律和横向变化情况。根据设计与施工控制分析的理论计算结果选择施工过程中应力控制截面测量结构的应力应变初步拟定在全桥主塔各布设 2 个应力测试控制截面, 分别布设在混凝土索塔下塔柱根部距承台顶 50 cm 附近 1-1 截面以及钢索塔与混凝土索塔交接区上方 50cm 附近 2-2 截面, 每个断面布设 4 个传感器, 如图 12 所示。

初步拟定在全桥共布设 11 个主梁应力测试控制截面 S1、S2、S4-S5、S7、S9 截面顶板、底板共布设 10 个纵向应力传感器, 桥塔处 S3、S6、S8 截面附近在箱梁顶板、底板上布置 10 个纵向、4 个横向应力传感器, S1、S5、S7、S9 截面横梁横向中部底面各布设 1 个横向应力传感器, 全桥合计 106 个主梁应力测点, 如图 13、图 14 所示。

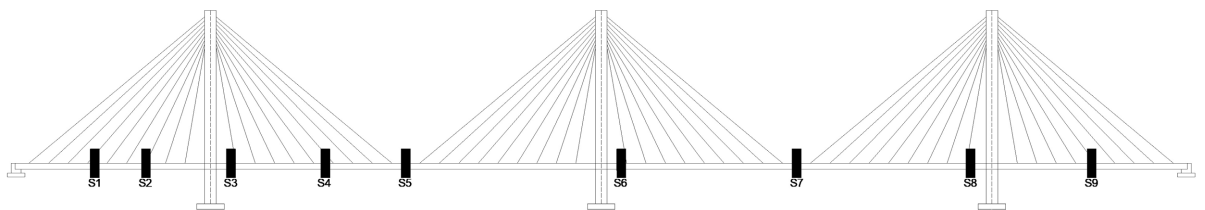


Figure 13. Schematic diagram of the cross-sectional layout of the stress measurement point of the main beam (test section)
图 13. 主梁应力测点横断面布置示意图(测试断面)



Figure 14. Schematic diagram of cross-sectional layout of stress measurement points of main beam (S3, S6, S8 sections)
图 14. 主梁应力测点横断面布置示意图(S3、S6、S8 截面)

5.4. 温度检测

温度现场测量包括主梁截面的温度场测量、主塔截面的温度场测量以及温度对主梁标高、拉索索力、塔顶偏位、相关截面的应力应变的影响测量。

测试仪器和方法: 索塔混凝土中温度测试选用温度传感器, 钢箱梁及钢索塔温度的测试采用点触式温度计, 同时结合应力测点处温度测试结果比对。所有应力测点中均带有温度传感器, 在应力测试的同时进行温度监控。温度监控分辨率 0.1℃。主梁和主塔的温度测试采用在测试断面预埋测量元件(热敏电阻), 用数值万用表测量热敏电阻的电阻值, 然后根据电阻与温度的标定曲线, 由所测电阻推算出温度值。

测点布置: 体系温度: 测试主塔内、外, 主梁内、外大气温度。主梁: 温度测点位置同应力测点。

6. 结论

通过对沔阳大桥进行施工监控, 得出如下结论:

(1) 施工监控在大跨度斜拉桥施工中具有关键作用, 通过施工监控, 可以准确了解桥梁的线形、索力

变化及应力状态, 保证在各施工阶段桥梁的受力状况处于可控状态, 保证桥梁施工安全;

(2) 本工程在进行施工监控时, 采用了自适应法施工控制原理。根据实际监控结果对理论计算模型进行不断修正, 准确地掌握了桥梁的施工状况并进行施工控制, 保证了施工过程中结构的应力和变形符合规范要求;

(3) 在进行施工监控时, 采用了“线形”、“索力”双控的原则, 在主梁悬臂浇筑阶段以“线形”为主, “索力”为辅, 合龙阶段以“索力”为主, “线形”为辅, 两者配合进行, 全面地对桥梁结构状态进行施工控制。

参考文献

- [1] 王俯标. 多跨预应力混凝土刚构—连续梁组合桥施工监控与仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [2] 唐云清. 大跨度连续箱梁桥施工监控技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [3] 周科成, 杜先顺, 丁文松, 等. 独塔单索面钢-混组合斜拉桥施工监控方法[J]. 云南水力发电, 2022, 38(9): 230-232.
- [4] 中华人民共和国建设部. JTG/T3650-01-2022 公路桥梁施工监控技术规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. JTGF80/1-2004 公路工程质量检验评定标准. 第一册. 土建工程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [6] 中交一公局集团有限公司. JTG/T3650-2020 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ11-2011 城市桥梁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T233-2015 城市桥梁检测与评定技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [9] 重庆交通科研设计院有限公司. JTG/T3365-01-2020 公路斜拉桥设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.