

# 西郊大桥悬臂浇筑施工线形及应力控制

吴雨航<sup>1</sup>, 王景春<sup>1</sup>, 王利军<sup>2</sup>, 牛 星<sup>1</sup>, 饶晨捷<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 中建铁路投资建设集团有限公司, 北京 100032)

**摘要:**连续刚构桥采用挂篮悬臂浇筑施工需经历长期复杂的过程及结构体系的转换, 为保证成桥线形和结构受力满足设计要求, 必须在桥梁施工过程中对结构的线形和内力进行有效监测与控制。以西郊大桥为工程背景, 采用 Midas Civil 建立了全桥的数值分析模型, 并构建了桥梁线形和应力监控体系, 对施工全过程进行分析。结果表明, 锚下张拉控制应力、温度场变化、混凝土容重及收缩徐变为主要状态因素, 施工中应加强对这些因素的控制。采用的监控手段确保了合龙口相对高差、桥梁轴线横向偏差、主梁变形及应力满足设计要求。

**关键词:**桥梁工程; 悬臂施工; 敏感性分析; 施工监控

**中图分类号:** U445 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)01-0026-06

## 1 工程概况

西郊大桥位于阳泉市平定县石门口乡南向村西约 50 m 处, 上跨 G20 太旧高速以及 G307。桥梁全长 910 m, 第二联为变截面预应力混凝土连续刚构桥, 孔跨布置为 47 m+88 m+47 m, 如图 1 所示。上部结构采用直腹板单箱三室箱梁, 箱梁顶宽 24.5 m, 底宽 21.5 m, 合龙段处箱梁中心高度 2.5 m, 顶板厚 0.3 m、底板厚 0.3 m; 0 号块中心高度为 5.5 m, 顶板厚 0.5 m, 底板厚 0.8 m, 梁高及底板厚度均按 1.8 次曲线由跨中向 0 号块根部变化。本桥 2 个 T 构对称悬臂浇筑施工, 每个 T 构有 11 个悬浇段, 0 号块长 10 m, 1 号~6 号梁段长 3 m, 7 号梁段长 3.5 m, 8 号~11 号梁端长 4 m, 边跨现浇段 4.5 m, 中跨合龙段 3 m。15 号墩悬臂施工阶段划分如图 2 所示。

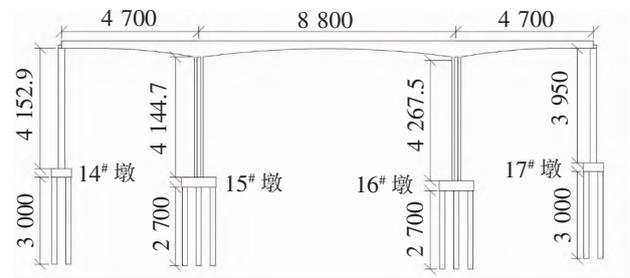


图 1 桥梁立面图(单位:cm)

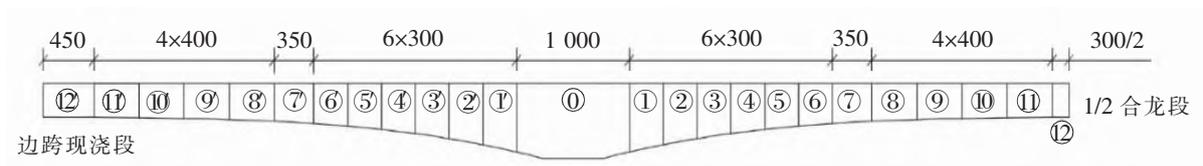


图 2 西郊大桥施工节段划分(单位:cm)

本桥采用先边跨后中跨的合龙方案, 施工至最大悬臂阶段后, 利用挂篮和托架立模浇筑边跨现浇段, 张拉预应力, 完成边跨合龙, 然后安装中跨合龙段吊杆及刚性支撑进行中跨合龙。该施工方案能够优化主梁受力与变形, 可降低控制风险<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2021-11-22 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20210244

基金项目: 河北省重点研发计划项目(19275410D)

作者简介: 吴雨航(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向为桥梁施工控制、计算分析。E-mail: 2328727337@qq.com

吴雨航, 王景春, 王利军, 等. 西郊大桥悬臂浇筑施工线形及应力控制[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022, 35(1): 26-31.

## 2 监控体系建立

桥梁施工控制包括结构的变形和应力,目的是为了确各阶段实测值与理论值吻合,施工完工时桥梁能够达到理想的状态<sup>[2-4]</sup>。但在实际施工过程中,理论值与实测值往往存在偏差,造成这种情况的主要原因是结构理论计算中的设计参数与实际不一致,因此需适时根据实测数据进行参数识别、误差修正、模型更新调整,保证结构的线形和内力误差在一个合理的范围内,符合设计要求。根据国内外桥梁施工监控研究和实践,建立西郊大桥连续刚构桥施工监控体系,如图 3 所示<sup>[5-7]</sup>。该系统中包括建立理论值数据库、实测值数据库、误差分析、参数辨识、参数修正等主要内容。

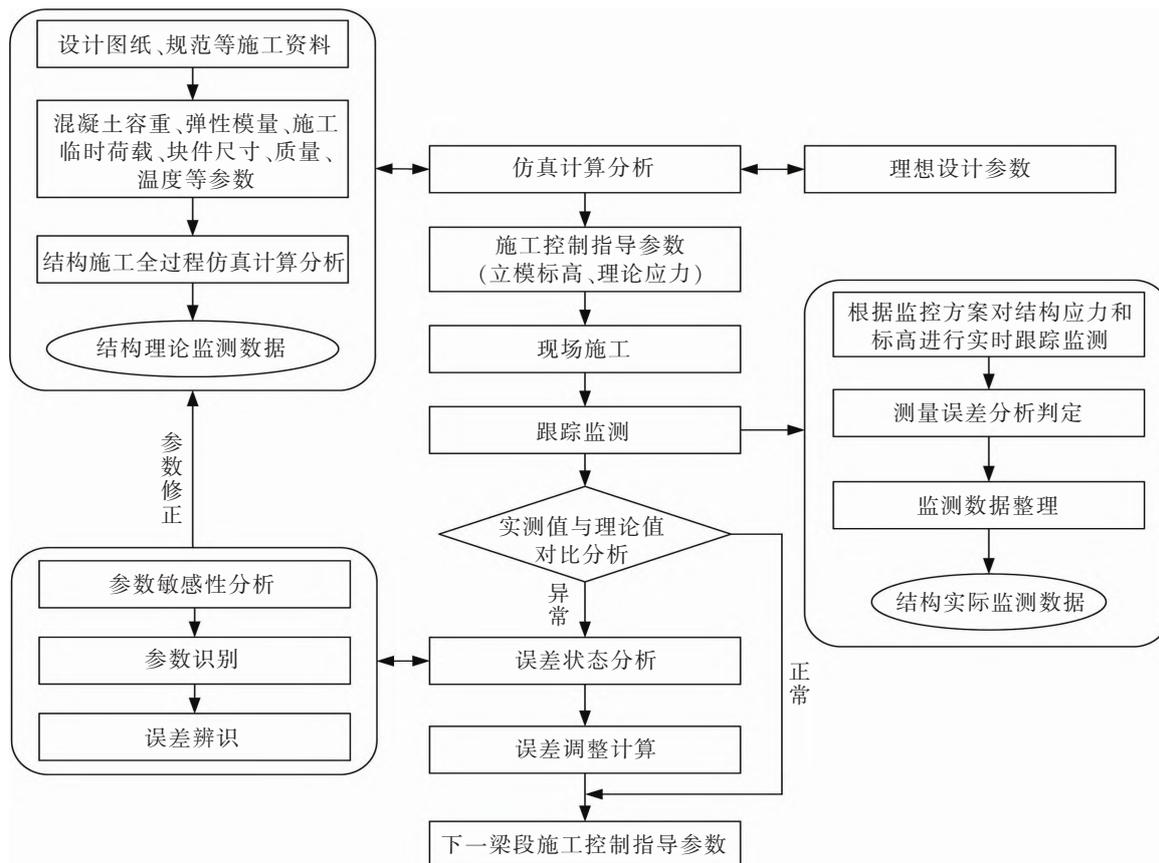


图 3 西郊大桥监控系统

## 3 有限元模型建立

利用有限元软件 Midas Civil 对西郊大桥进行仿真分析,研究各施工阶段主梁的内力和变形。采用梁单元模拟主梁和桥墩,全桥共计 205 个节点,198 个单元。15# 桥墩和 16# 桥墩采用固定支座与地面连接,桥墩与上部结构采用刚性连接进行墩梁固结模拟,边跨现浇段采用受压的弹性连接进行模拟。将全桥施工过程分成了 28 个计算阶段,全桥数值分析模型如图 4 所示。

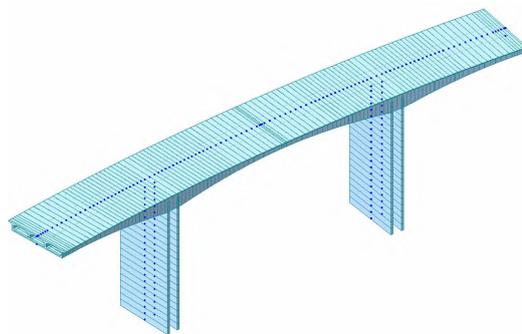


图 4 西郊大桥有限元模型

## 4 敏感性分析

桥梁施工控制是一项复杂的系统工程,不同参数对同一座桥梁结构的力学状态的影响程度是不同

的,同一参数对不同的桥梁结构体系的影响也不同,因此,必须对桥梁参数进行敏感性分析<sup>[8-9]</sup>,根据参数对桥梁结构力学状态影响程度大小确定出主要状态参数和次要状态参数,从而在施工过程加强主要状态参数的监测和控制。本文重点分析 8 个参数,分别是混凝土容重、弹性模量、收缩徐变、锚下张拉控制应力、管道摩阻、管道偏差、整体温差、局部温差<sup>[10-11]</sup>对桥梁结构变形和应力的影响。

分析时,首先根据桥梁图纸、规范等施工资料选取各参数基准值,对桥梁施工过程进行数值模拟分析,计算此基准状态下桥梁结构变形与应力,在此基础上将各参数分别单独变化 $\pm 10\%$ ,重新进行有限元模拟分析,计算成桥状态主梁挠度和应力与基准状态下最大差值百分比绝对值。计算结果如表 1 所示。

表 1 参数变化对桥梁成桥状态影响

参数名称	线形最大变化/%	应力最大变化/%
混凝土容重	18.2	9.6
混凝土弹性模量	4.8	1.2
收缩徐变	6.5	11.9
锚下张拉控制应力	38.6	24.3
管道摩阻	2.1	0.9
管道偏差	1.6	0.9
局部温差	6.8	28.4
整体温差	14.5	6.8

由计算结果知,成桥阶段,主梁线形对锚下张拉控制应力最为敏感,其次是混凝土容重、整体温差、局部温差和混凝土收缩徐变。局部温差对主梁应力影响最大,其次是锚下张拉控制应力、混凝土收缩徐变、混凝土容重和整体温差。因此,锚下张拉控制应力、温度场变化、混凝土容重和混凝土收缩徐变为主要状态参数,应加强其在施工过程中的控制,适时根据实测标高和应力反馈进行参数修正,更新桥梁数值分析模型。

## 5 施工监控实施

### 5.1 线形监控

线形控制主要是严格控制箱梁各截面的纵向挠度和横向偏差。当出现偏差且误差可调整时,立即进行校正分析并制定方案,为下一梁段更准确施工做好准备。立模标高的控制是线形监控的重难点,计算时需考虑结构自重、预应力、二期恒载、混凝土收缩徐变、温度场变化、施工临时荷载等诸多因素的影响,因此桥梁施工时需设有一定的预拱度。根据实践经验及以往研究成果,立模标高计算公式如下<sup>[12]</sup>

$$H_{lm}^i = H_{sj}^i + f_{ygd}^i + f_{gl}^i \quad (1)$$

$$f_{ygd}^i = f_1 + f_2 \quad (2)$$

式中, $H_{lm}^i$ 为*i*阶段立模标高; $H_{sj}^i$ 为*i*阶段设计标高; $f_{ygd}^i$ 为*i*阶段预拱度; $f_{gl}^i$ 为*i*阶段挂篮变形,通过现场预压试验获得; $f_1$ 为施工预拱度,取施工阶段结构变形的负数,通过 Midas Civil 计算获取; $f_2$ 为成桥预拱度,根据实践经验,中跨跨中最大预拱度 $f_{c2}$ 取 $L/1500$ ,边跨最大预拱度取 $f_{c2}/4$ ,位置在 $3L/8$ 处, $L$ 为中跨跨径,其余各点预拱度按余弦曲线进行分配<sup>[13]</sup>。经计算,误差修正,西郊大桥(47+88+47)m 悬臂施工成桥阶段变形、成桥预拱度和预设挠度(未含挂篮变形)如图 5 所示。

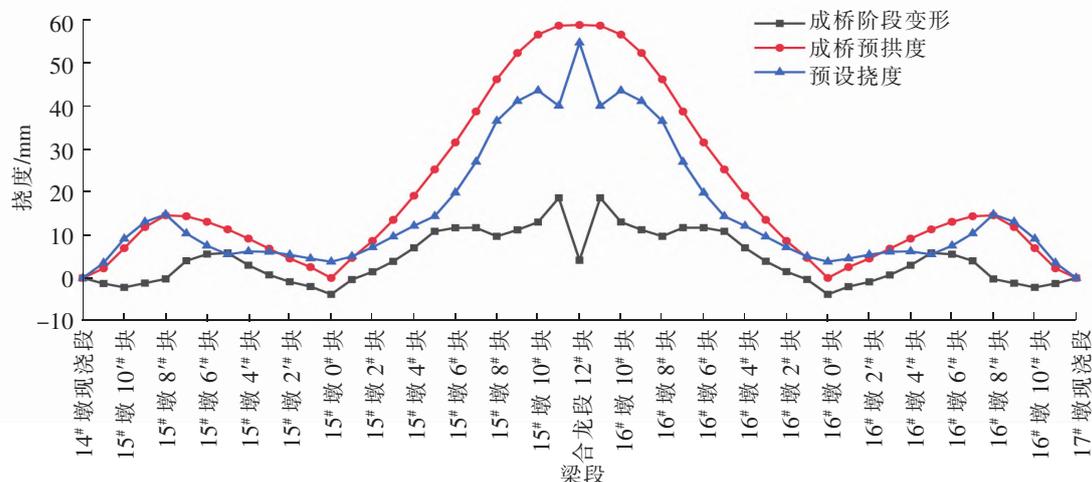


图 5 悬浇段预设挠度

箱梁各节段高程测点布置如图 6 所示,为保证线形控制精度,每一悬臂浇筑施工节段测量 4 个工况,即调整挂篮模板、浇筑混凝土后、张拉预应力后及挂篮移动后。控制误差参照现行公路相关规范和本桥施工监控方案。截至目前,全桥合龙完成,尚未铺装二期恒载。施工至最大悬臂阶段时,中跨、边跨合龙口底板高程差和箱梁轴心横向偏差如表 2 所示。由表 2 知,合龙口两侧相对高差最大 12 mm,横向偏差控制在 8 mm 内,合龙精度较高,满足监控要求。桥梁合龙后,对桥梁裸梁进行联测,桥面测点 A、B、C 实际标高如图 7 所示,各测点与理论标高差值如图 8 所示。由图 7 知,各测点走势一致,未出现标高突变点,线形较为平顺。由图 8 知,成桥状态桥面测点标高误差在 -15~15 mm,线形控制效果较好,满足设计要求。

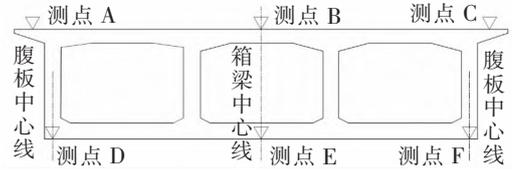


图 6 线形控制测点

表 2 合龙口误差

位置	相对高程差			横向偏差	
	测点 D	测点 E	测点 F	测点 B	测点 E
小里程边跨	8	9	3	8	5
中跨	11	12	11	5	6
大里程边跨	7	1	9	7	4

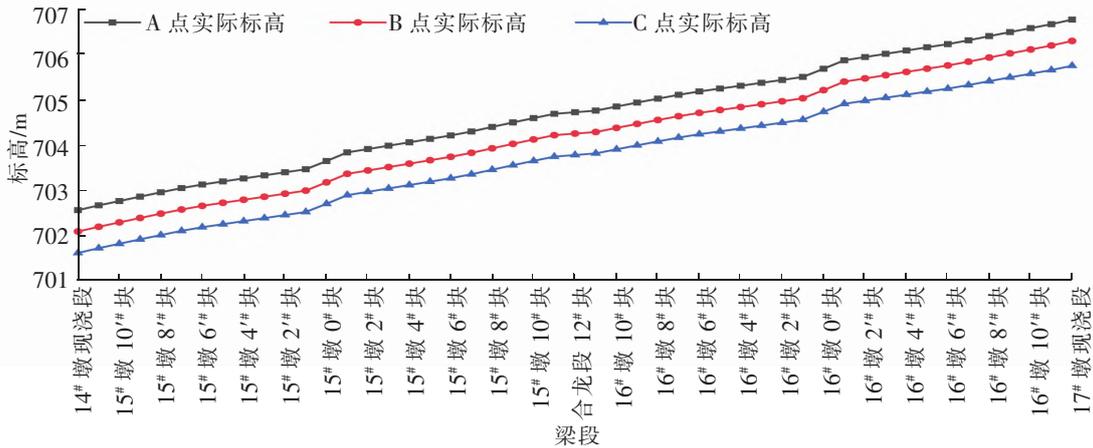


图 7 桥梁合龙后桥面测点标高

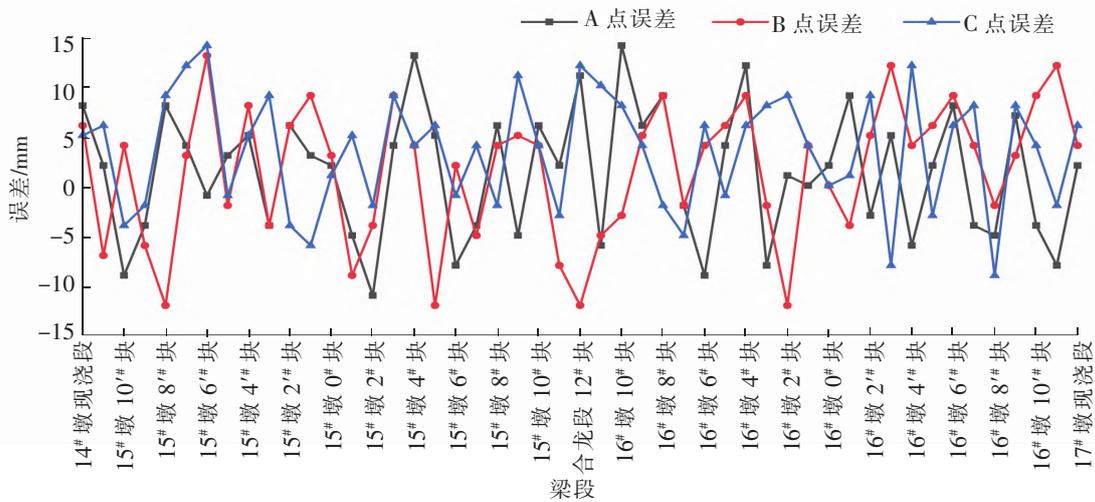


图 8 各测点误差

### 5.2 应力监控

进行应力监控时需在绑扎钢筋后混凝土浇筑前预埋传感器,通过测试传感器应变大小及混凝土实际弹

模量,根据公式  $\sigma = \epsilon E$  计算出实际应力,并与有限元计算得到的最不利应力理论值进行对比。本桥选取了0#块两侧截面、L/2 截面、L/4 截面、边跨合龙段及中跨合龙段共计 11 个控制截面,每个截面布置 8 个传感器,如图 9 所示,全桥共布置 88 个传感器。每一悬臂浇筑施工节段均测量 4 个工况,即传感器绑扎完成、浇筑混凝土后、张拉预应力后及挂篮移动后。以 15#墩 0#块右侧截面位置为例分析西郊大桥中跨合龙后截面应力,结果如图 10 所示,顶板误差和底板误差如图 11 所示。由图 10 知,实测应力值与理论应力值走势基本一致,顶板实测压应力最大 14.27 MPa,底板实测压应力最大 4.78 MPa,最大拉应力 0.26 MPa。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》,本桥混凝土压应力满足  $\sigma_{cc}' \leq 0.7f_{ck}' = 22.68$  MPa,拉应力满足  $\sigma_{\sigma}' \leq 0.7f_{tk}' = 1.85$  MPa。由图 11 知,最大误差控制在 0.5 MPa,应力误差较小。监控结果表明,西郊大桥施工安全,未出现异常情况。

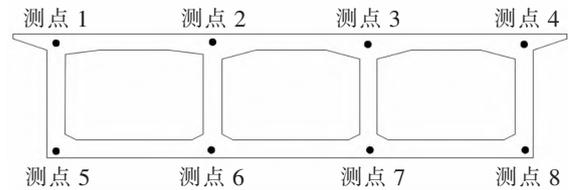


图 9 应力测点布置

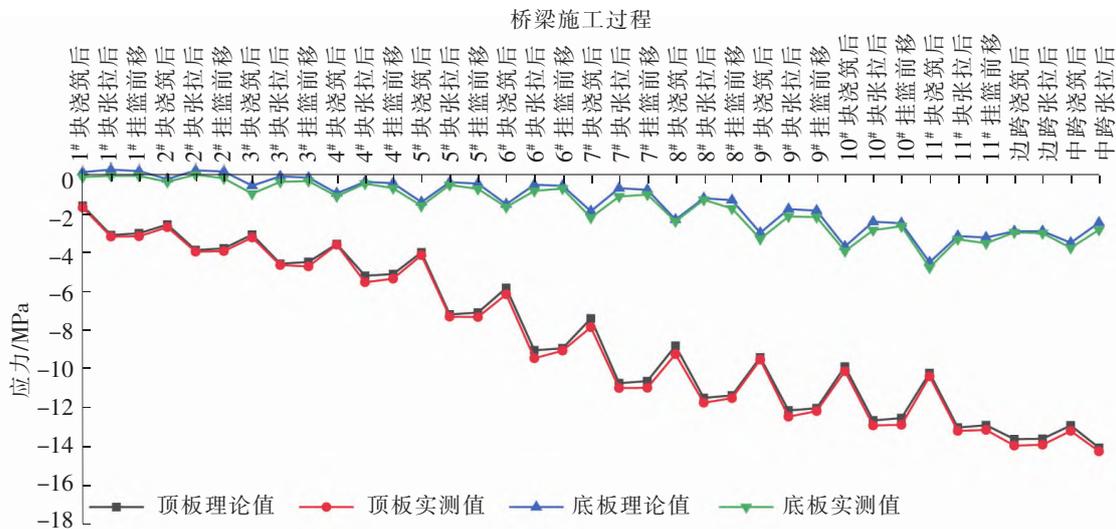


图 10 15#墩 0#块截面应力对比

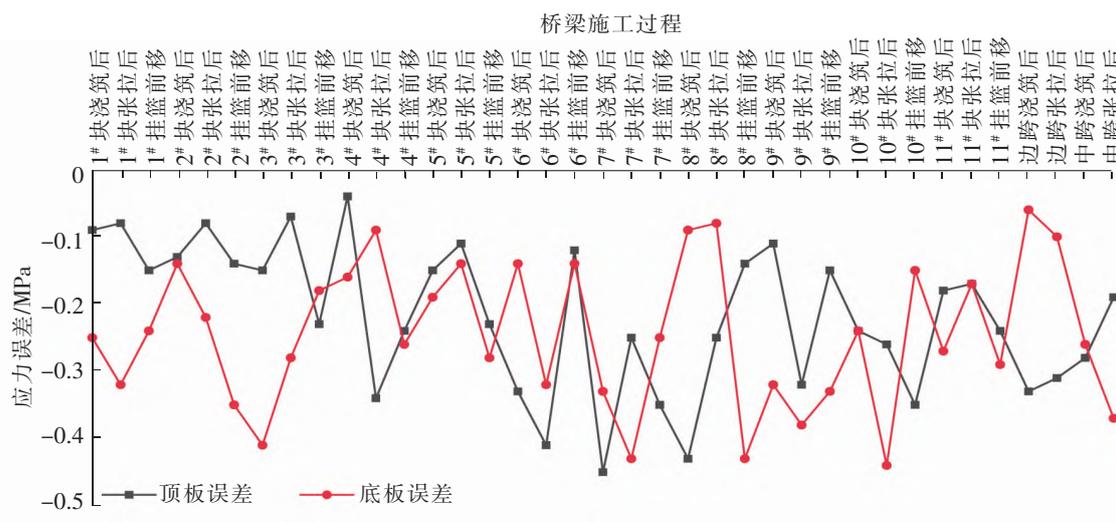


图 11 顶板底板应力误差

### 6 结论

- (1) 悬臂浇筑过程中,锚下张拉控制应力、温度场变化、混凝土容重及混凝土收缩徐变等参数对桥梁

结构线形和应力影响较大,其他因素影响较小。需要注意的是,外部因素温度场变化的影响可通过人为控制测试时间避开或减小,监控过程中应重点关注其余 3 个影响较大的参数,适时修正,更新计算模型,确保施工过程中结构变形、应力与理论计算值吻合。

(2) 桥梁最大悬臂状态合龙口两侧底板高程差最大 12 mm,平面偏差最大 8 mm,全桥合龙后桥面高程误差 $-15\sim 15$  mm,桥梁几何线形平顺;主梁实测应力与理论计算规律基本一致且满足规范要求,误差控制在 0.5 MPa。施工监控结果表明,基于本文建立的施工监控体系,西郊大桥线形和应力满足规范和设计要求,相关分析可为同类型公路桥施工监控提供参考。

## 参 考 文 献

- [1]李坊森,袁正学. 预应力智能张拉技术在现浇箱梁施工中的应用[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2018,31(S2): 185-188.
- [2]Yu X M, Chen D W. Construction control techniques for closure of steel truss girder of Yachi River Bridge on Guiyang-Qian'xi expressway[J]. Bridge Const,2017,47(6): 101-115.
- [3]任虹昌,陈乐平,骆钦东,等. 文泰高速葛溪大桥主梁悬臂施工分析[J]. 桥梁建设,2021,51(5):138-143.
- [4]拓守俭,文杰. 杨泗港快速通道青菱段跨铁路斜拉桥施工控制[J]. 世界桥梁,2021,49(3):58-63.
- [5]谢明志,张涛,杨永清,等. 快速铁路大跨连续梁桥施工监控及控制体系研究[J]. 铁道标准设计,2017,61(12):59-64.
- [6]Qin S, Wei K, Qin J, et al. Stress-free-state based structural analysis and construction control theory for staged construction bridges[J]. Advances in Bridge Engineering, 2020, 1(1): 1-16.
- [7]郝俊芳,伍星. 某下承式钢桁架拱桥施工控制技术[J]. 公路,2020,65(11):188-193.
- [8]姜增国,张孝千,汪勋松. 基于均匀设计的刚构桥施工控制参数敏感性分析[J]. 中外公路,2018,38(5):112-115.
- [9]关伟. 下承式悬链线钢管混凝土拱桥空间稳定性参数敏感性分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33(1): 14-19.
- [10]谢海龙. 遗传算法在桥梁有限元模型修正中的应用[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2018,31(1):33-38.
- [11]刘东霞,单德山,浦贵安. 高速特大桥预应力连续梁桥悬臂施工控制研究[J]. 公路工程,2018,43(3):136-140.
- [12]滕树元. 滇南山区高墩大跨连续刚构桥施工线形控制[J]. 铁道建筑,2018,58(4):37-40.
- [13]杨相平,赵建祥. 高墩大跨度连续刚构桥悬臂施工线形和应力控制研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(3):525-528.

## Alignment and Stress Control of Cantilever Casting Construction of Xijiao Bridge

Wu Yuhang<sup>1</sup>, Wang Jingchun<sup>1</sup>, Wang Lijun<sup>2</sup>, Niu Xing<sup>1</sup>, Rao Chenjie<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. China Construction Railway Investment and Construction Group Co. Ltd., Beijing 100032, China)

**Abstract:** Continuous rigid frame bridge cantilever casting with a hanging basket requires a long and complicated process and structural system conversion. In order to ensure that the bridge alignment and structural stress meet the design requirements, it is necessary to effectively monitor and control the alignment and internal force of the structure during the bridge construction process. Taking the Xijiao Bridge as the engineering background, this paper used Midas Civil to establish a numerical analysis model of the entire bridge, and established a bridge alignment and stress monitoring system to analyze the entire construction process. The results show that the tension control stress, temperature field change, concrete bulk density and shrinkage under the anchor become the main state factors, and construction control of these factors should be strengthened. The monitoring methods adopted ensure that the relative height difference, bridge axis lateral deviation, main beam deformation and stress of the closing opening meet the design requirements.

**Key words:** bridge engineering; cantilever construction; sensitivity analysis; construction monitoring