

# 预应力混凝土连续刚构桥梁施工监控技术分析与有限元模拟研究

吴勇<sup>1,2,3,4</sup>, 宋军<sup>1,2,3,4</sup>, 邬文祥<sup>1,2,3,4</sup>, 陶路<sup>5</sup>, 武志荣<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>云南省建筑科学研究院有限公司, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南省岩土工程技术研究中心, 云南 昆明

<sup>3</sup>云南省建筑结构与新材料企业重点实验室, 云南 昆明

<sup>4</sup>昆明市建筑工程结构安全和新技术重点实验室, 云南 昆明

<sup>5</sup>中铁大桥局集团桥科院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月6日; 录用日期: 2025年3月18日; 发布日期: 2025年6月12日

## 摘要

为确保预应力混凝土连续刚构桥梁在施工阶段的结构安全性和合理性, 本文首先对桥梁进行了长达两年的施工监控。随后, 根据监控数据, 对实测的桥梁线形和应力变化情况与有限元模拟值进行了详细对比分析, 并分析了承台的沉降结果和温度观测数据。研究表明: 在施工阶段, 实测的桥梁线形与有限元模拟值高度一致, 相关性系数达到0.99; 实测的应力结果与有限元模拟值相符, 最大偏差仅为1.96 MPa, 并且未观察到拉应力的出现; 承台在观测期间内表现出较小的沉降量, 所有观测值均在10 mm以内, 并且沉降量呈现逐渐减缓的趋势; 混凝土温度表现出与气温类似的逐时周期变化, 混凝土温度极值的出现时间略滞后于气温, 通常在凌晨7时左右达到最低点, 滞后时间约为1.5小时; 虽然混凝土温度随气温波动, 但其日变化幅度远小于气温的变化幅度, 这主要归因于混凝土的热惰性特性。此外, 本文对于预应力混凝土连续刚构桥梁的施工管理和监控提供了重要的实测与模拟数据, 进一步验证了有限元模拟方法在工程实践中的有效性和准确性。

## 关键词

连续刚构桥, 桥梁施工监控, 变形特性, 应力, 温度梯度

## Analysis of Construction Monitoring Technology and Finite Element Simulation of Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridge

Yong Wu<sup>1,2,3,4</sup>, Jun Song<sup>1,2,3,4</sup>, Wenxiang Wu<sup>1,2,3,4</sup>, Lu Tao<sup>5</sup>, Zhirong Wu<sup>1,2,3,4</sup>

文章引用: 吴勇, 宋军, 邬文祥, 陶路, 武志荣. 预应力混凝土连续刚构桥梁施工监控技术分析与有限元模拟研究[J]. 力学研究, 2025, 14(2): 133-143. DOI: 10.12677/ijm.2025.142013

<sup>1</sup>Yunnan Institute Building Research CO., LTD., Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan Geotechnical Engineering Technology Research Center, Kunming Yunnan

<sup>3</sup>Yunnan Key Laboratory of Building Structure and New Materials, Kunming Yunnan

<sup>4</sup>Kunming Key Laboratory of Structure Safety and New Technology, Kunming Yunnan

<sup>5</sup>Bridge Science Research Institute Ltd., China Railway Major Bridge Engineering Group, Wuhan Hubei

Received: Mar. 6<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 12<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To ensure the structural safety and rationality of prestressed concrete continuous rigid frame bridges during the construction phase, this study first conducted a two-year construction monitoring of the bridge. Subsequently, based on monitoring data, a detailed comparative analysis was conducted between the measured bridge alignment and stress changes and the finite element simulation values, and the settlement results and temperature observation data of the bearing platform were analyzed. The research results indicate that during the construction phase, the measured bridge alignment is highly consistent with the finite element simulation values, with a correlation coefficient of 0.99. The measured stress results are consistent with the finite element simulation values, with a maximum deviation of only 1.96 MPa, and no tensile stress was observed. During the observation period, the abutment showed a small settlement, with all observed values within 10 mm, and the settlement showed a gradually decreasing trend. The temperature of concrete exhibits a periodic change similar to that of air temperature, with the appearance of the extreme temperature of concrete slightly lagging behind the temperature, usually reaching its lowest point around 7 a.m., with a lag time of about 1.5 hours. Although the temperature of concrete fluctuates with temperature, its daily variation is much smaller than that of temperature, which is mainly attributed to the thermal inertness characteristics of concrete. In addition, this article provides important measured and simulated data for the construction management and monitoring of prestressed concrete continuous rigid frame bridges, further verifying the effectiveness and accuracy of the finite element simulation method in engineering practice.

## Keywords

Continuous Rigid Frame Bridge, Bridge Construction Monitoring, Deformation Characteristics, Stress, Temperature Gradient

Copyright © 2025 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

随着我国桥梁建造技术的持续进步, 混凝土桥梁结构正逐步向薄壁、轻型和大跨度方向发展。预应力混凝土连续刚构桥凭借其卓越的性能, 在桥梁建设中得到广泛应用[1]。然而, 在预应力混凝土连续刚构桥的施工阶段, 由于施工期间桥梁结构体系会随着施工阶段的变化而发生相应调整, 工期、环境条件以及材料等因素的影响, 往往难以完全实现设计时的预期条件[2]。诸多桥梁事故表明, 许多事故通常都与施工管理不善有关。因此, 在桥梁的施工和使用阶段, 须对施工过程进行严格控制, 根据设计文件和施工方案进行施工过程计算, 确定桥梁结构的线形、应力、沉降和温度等参数。旨在确保结构在施工过

程中的可靠性和安全性，并且保证桥梁的合龙精度和成桥后的桥面线形与内力符合设计要求[3]。

近年来，许多机构和学者对桥梁施工监控进行了较为充分地研究。王益坚[4]等从理论分析、数值模拟、风洞试验、施工监控多角度出发，分析了杭州运河湾人行桥的结构受力特性、施工难点及应对策略。分析结果表明：施工监控实测数据(包括线形、应力、索力等)与数值仿真分析所得结果高度一致；运营期的监测数据与有限元计算结果相契合。周先念等[5]对全长为 630 m 的人字形异形塔柱钢混组合梁斜拉桥，进行了施工监控、进行了塔柱高程和斜塔肢横向倾斜角度的控制和对主梁的建造线形进行了计算分析。工程实践表明，监测结果与理论计算值相符，线形和应力情况与预期一致，进一步验证了所采用的关键监控技术的有效性。王柏荣[6]围绕双塔双索面混合-组合梁斜拉桥的施工监控仿真分析展开研究，并且构建了有限元模型，对桥梁施工过程中的受力状态、变形情况进行了深入模拟和分析。研究结果表明，通过仿真分析，可以实现对双塔双索面混合-组合梁斜拉桥施工过程的全面监控，为桥梁的顺利建成提供了重要保障。肖政等[7]，以某大跨径预应力混凝土连续刚构桥为例，利用 MIDAS/Civil 有限元软件构建结构模型，并对施工变形和应力实测值、理论值进行对比分析，分析方法可为同类桥型施工质量监控提供参考。

综上所述，大跨径预应力混凝土连续刚构桥在施工期间面临诸多不利因素，如结构线形和应力状态的持续变化、施工条件的变动、混凝土浇筑工艺、温度控制、挂篮定位变形以及预应力张拉等因素，这些因素都可能导致桥梁实际状态与设计要求的偏离。因此，借助有限元分析工具对各施工阶段的结构线形、应力状态和合龙过程进行详尽分析是必要的。通过实测值与理论值的比较，可以评估施工控制误差，从而为类似工程提供相应的参考。

## 2. 依托工程概况

该桥为特大预应力混凝土连续刚构整体式桥梁。左幅桥长 1076 m，右幅桥长 1106 m，主墩墩高分别为 80 m 和 53 m。桥梁起点桩号为 K12 + 100，终点桩号为 K13 + 300。桥跨布置为：左幅  $27 \times 30 + (70 + 120 + 70)$  m 连续 T 梁 + 预应力砼连续刚构，右幅  $28 \times 30 + (70 + 120 + 70)$  m 连续 T 梁 + 预应力砼连续刚构，该桥平面位于  $R = 780$  和  $1450$  的圆曲线及其缓和曲线以及直线段内，纵面位于  $-2.9\%$ 、 $-2.0\%$  的纵坡及其竖曲线内。主桥单幅桥面布置为：0.5 m (护栏) + 9.75 m (行车道) + 0.25 m (护栏)，单幅总宽 10.5 m。主桥上部采用三向预应力混凝土连续刚构，主梁单幅为单箱单室箱形截面。箱梁根部高度 6.8 m，跨中梁高 3.0 m，其间梁高按 1.8 次抛物线变化。大桥整体布置见图 1 所示。

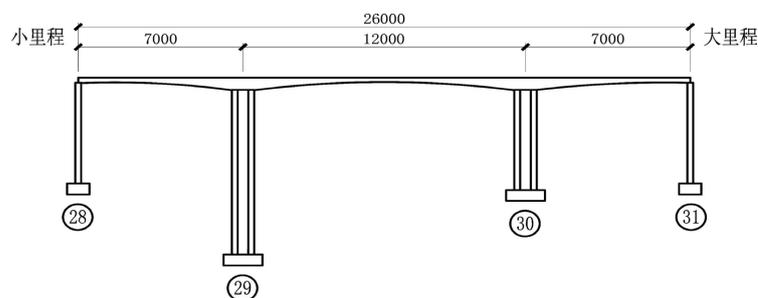


Figure 1. Overall layout of the bridge (Unit: cm)

图 1. 大桥整体布置图(单位: cm)

## 3. 监测主要内容与有限元模型建立

### 3.1. 监测主要内容

通过在施工现场建立实时测量系统，对结构内力、位移(线形)和温度进行实时跟踪测量，是确保主梁

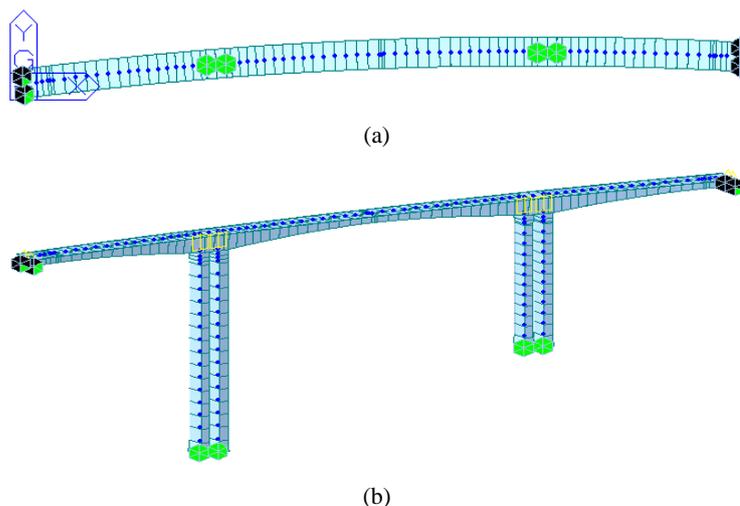
施工过程中结构安全性的重要手段，同时也为监控计算提供了实测结构参数和校核的依据[8]。通过对这些测量数据进行计算、分析和比较，可以评估结构是否符合设计要求，确认结构状态是否与监控目标一致，确保结构处于安全状态，并根据需要进行必要的调整。在桥梁施工阶段，主要存在导致桥梁安全事故的原因包括：线形变形过大、桥梁局部应力超限、墩台沉降较大以及主梁因温度变化引起的应力变化。因此，本桥的施工监测内容主要包括四个方面：主梁几何变形监测、应力监测、主墩承台沉降监测和温度场监测。旨在及时发现并处理施工过程中的结构变化，确保桥梁的施工和使用阶段安全可靠。

### 3.2. 荷载参数

根据桥梁设计资料可知：一期恒载混凝土的容重取为  $26 \text{ kN/m}^3$ ；二期恒载桥面铺装沥青混凝土的容重取为  $27.30 \text{ kN/m}^3$ ，防护栏混凝土容重取为  $21.45 \text{ kN/m}^3$ ，防护栏钢筋容重取为  $1.2 \text{ kN/m}^3$ ，总计为  $(1) + (2) + (3) = 50 \text{ kN/m}^3$ ；纵向预应力按照设计图拟定的施工过程分阶段张拉，并考虑损失效应；收缩和徐变按各自的计算周期考虑；悬臂施工时，挂篮、模板等临时荷载按  $600 \text{ kN}$  计算，作用点距悬臂最前端  $0.5 \text{ m}$ ；合龙支架及模板重量按  $200 \text{ kN}$  考虑；设计活载为公路 I 级，借鉴 AASHTO 关于箱梁计算的方法，考虑箱梁偏载系数  $1.15$ ，纵向折减系数  $0.97$ ；按 2 车道计算时，横向增大系数为  $2 \times 1 \times 1.15 \times 0.97 = 2.231$ ；汽车冲击荷载按《公路桥涵设计通用规范》计算，取值为  $0.05$ 。

### 3.3. 计算模型建立及假定

为确保连续刚构桥主桥在施工过程中，结构受力和变形始终处于安全范围内，成桥后主梁线形符合要求，在桥梁施工阶段需利用有限元软件建立仿真模型预测主桥的几何变形、应力、温度场等。本文采用 Midas/Civil 对结构进行仿真模拟分析。根据桥梁设计资料，混凝土材料弹性模量取  $34,500 \text{ MPa}$ 、泊松比取  $0.2$ ，预应力钢束型号为 1860 级预应力钢束、弹性模量为  $195,000 \text{ MPa}$ 、抗拉标准值为  $1860 \text{ Mpa}$ 、密度为  $7.85 \text{ g/cm}^3$ 、泊松比取  $0.269$ 。全桥共建立 153 个单元，其中 1~79 为梁单元，其余为柱单元，单元网格划分和边界条件如图 2 所示。计算采用以下假定：1) 主桥模型为曲线，考虑纵坡及平面曲线影响；2) 主梁为全预应力构件，不考虑普通钢筋参与结构受力。模型的边界条件采用与施工过程一致，由于缺少支座刚度的资料，故模型中均不考虑弹性边界条件，所有位移边界条件均为刚性约束。

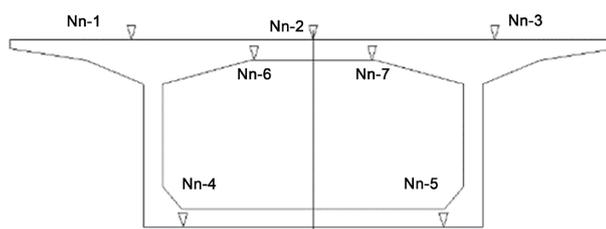


**Figure 2.** Calculation model diagram. (a) Plan view of computational model; (b) Calculation model elevation view  
**图 2.** 计算模型图。(a) 计算模型平面图；(b) 计算模型立面图

## 4. 监测结果分析

### 4.1. 线形测试结果分析

为确保主梁施工过程中的结构安全并为监控计算提供实测数据参考[9], 在每个梁段的端部布置了主梁标高测点, 具体测试截面如图 3 所示。测量设备选用了 WILDNK/2 自动安平水准仪, 其精度为 S1 级, 搭配 3 米的板尺和 5 米的塔尺。主跨跨度与线形关系绘制见图 4, 利用 Origin 软件对试验荷载 - 应变曲线进行拟合分析后得出: 线形 - 跨度曲线平缓光滑, 未观察到明显转折点; 根据线形回归方程显示, 线形与跨度呈现线性变化关系, 表现为一元一次函数式, 实测值与计算值相近, 相关系数为 0.99, 呈现直线分布; 线形实测值与计算值的差距大部分控制在 20 mm 以内, 仅个别点略高于 20 mm, 最大差距为 26 mm。综上所述, 线性测试结果中, 只有少数测点的实测值与理论计算值存在差异。考虑到混凝土的应力易受温度、混凝土收缩、徐变等因素的影响, 再加上测量误差的存在, 少数测点实测值与理论值之间的差异是正常的[10], 并且, 悬臂施工阶段的线形控制基本满足《公路工程质量检验评定标准》[11]的要求。此外, 也验证了本文有限元模拟方法的准确性。



说明:

1. 本图尺寸以m计;
2. “。”“▽”表示标高测点;
3. n表示测点所在处截面编号。

Figure 3. Test section

图 3. 测试截面

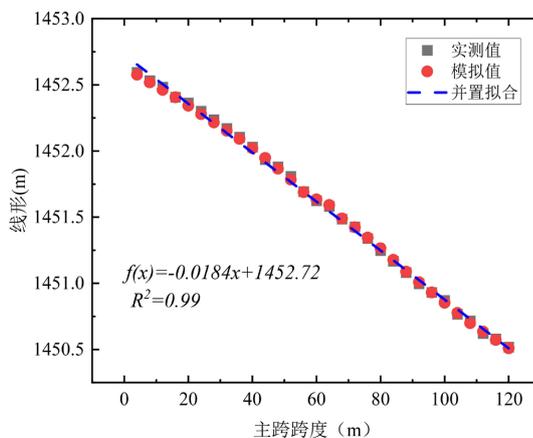


Figure 4. Main span linear relationship diagram

图 4. 主跨跨度 - 线形关系图

### 4.2. 应力测试结果分析

为了分析主梁在施工过程中的应力变化情况, 在全桥共计布置了 9 处应力测试截面(如图 5 所示)。测

试截面的测点布置情况如图 6 所示。测点应变测试仪器采用预埋式钢弦应变如图 7 所示，并且为了保证埋设的钢弦应变计有较高的成活率和测量精度，需对埋设的应变计特殊处理和进行多项检查。在操作中尽可能准确地使钢弦应变计与纵向应力方向保持一致。为防止混凝土浇筑过程中传感器的窜位和角度改变，埋设时用扎丝将传感器较牢捆扎在钢筋上。以边跨 1-1 截面的应力测试为例进行分析，并将结果绘制成表 1。从表 1 的分析可知，有限元模拟值与实测顶板、底板应力值的误差较小，最大值为 1.96 MPa。各阶段截面的实测应力与计算应力相比较吻合，应力变化较为平稳，应力差值均在 2 MPa 以内。实测应力满足规范中规定的最大压应力  $0.70f_{ck} = 0.70 \times 32.4 = 22.68 \text{ MPa}$  的要求，并且未出现拉应力。表明，结构主梁的受力符合设计要求[12]。

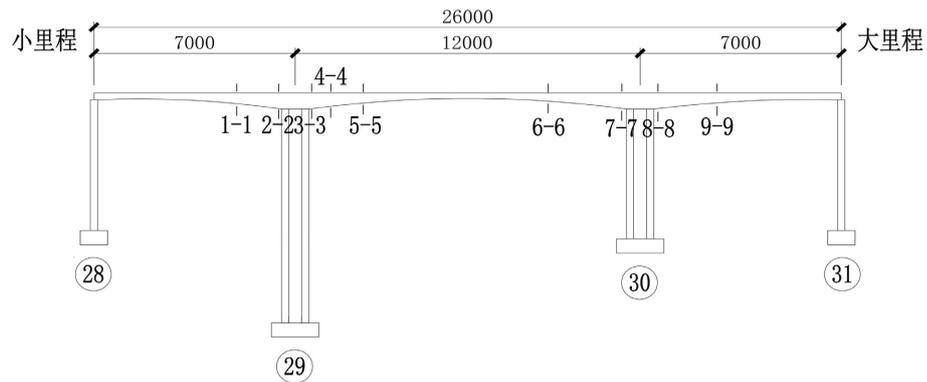


Figure 5. Cross section for stress testing of the entire bridge  
图 5. 全桥应力测试截面

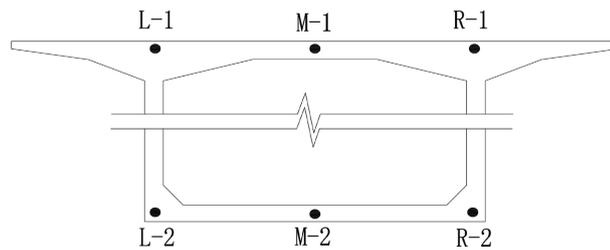


Figure 6. Stress test section  
图 6. 应力测试截面



Figure 7. Pre embedded strain gauge  
图 7. 预埋应变计

**Table 1.** Comparison between edge span stress test results and finite element simulation values**表 1.** 边跨应力测试结果与有限元模拟值对比

施工阶段	计算顶板应力/Mpa	实测顶板应力/Mpa	差值/Mpa	计算底板应力/Mpa	实测底板应力/Mpa	差值
9#块浇筑后	-1.23	-1.46	-0.23	-0.37	0.00	0.37
9#块张拉后	-2.90	-2.60	0.30	-0.23	-1.15	-0.92
10#块浇筑后	-2.37	-3.33	-0.96	-0.86	-1.42	-0.56
10#块张拉后	-3.88	-4.50	-0.62	-0.85	-2.33	-1.48
11#块浇筑后	-3.26	-4.04	-0.78	-1.75	-1.64	0.11
11#块张拉后	-4.78	-4.49	0.29	-1.70	-2.96	-1.26
12#块浇筑后	-3.96	-3.68	0.28	-2.83	-2.42	0.41
12#块张拉后	-5.50	-4.72	0.78	-2.75	-2.36	0.39
13#块浇筑后	-4.48	-4.78	-0.30	-4.10	-2.86	1.24
13#块张拉后	-6.00	-5.64	0.36	-3.99	-3.90	0.09
14#块浇筑后	-4.82	-6.38	-1.56	-5.53	-3.57	1.96
14#块张拉后	-5.65	-6.42	-0.77	-5.47	-4.14	1.33
15#块浇筑后	-4.29	-5.78	-1.49	-7.22	-5.36	1.86
15#块张拉后	-6.29	-6.89	-0.60	-6.74	-5.24	1.50
16#块浇筑后	-5.54	-7.03	-1.49	-8.66	-7.45	1.21
16#块张拉后	-5.42	-6.82	-1.40	-8.69	-7.80	0.89

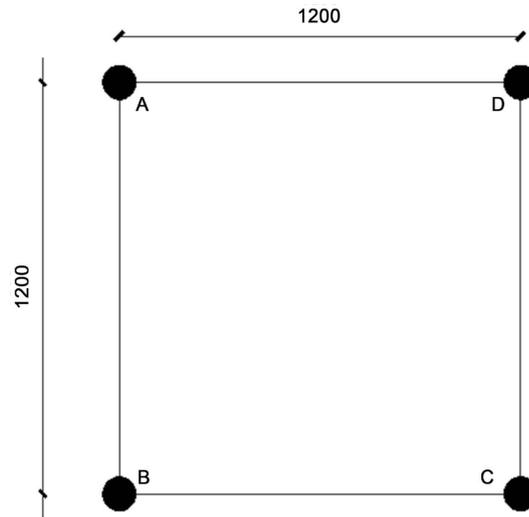
### 4.3. 承台沉降测试结果分析

桥墩承台的沉降会显著影响桥梁的受力、变形和线形，因此进行沉降观测对于确保桥梁的工程质量至关重要。为了监测桥梁施工阶段桥墩承台的沉降量，本文在 29#、30#左右幅各布置了 16 个测点。通过使用大桥两岸的导线控制点，利用自动安平水准仪或全站仪测量了每个控制点的标高，并以首次测得的标高值作为初始值。承台沉降观测控制点设置在承台的四个角点，如图 8 中的 A、B、C 和 D 所示，这些控制点用钢筋  $\phi 16$  预埋，编号需用红油漆标示，并采取适当的保护措施。沉降测试结果绘制于图 9~12 中。通过对现场观测数据进行对比分析，发现：在观测期间，29#墩和 30#墩左右幅承台的沉降量较小，且沉降值均在 10 毫米以内，符合《公路桥涵地基与基础设计规范》的要求[13]。29#墩和 30#墩的最大沉降值均出现在 3 月 14 日至 4 月 26 日之间，并且沉降量呈现逐渐放缓的趋势。

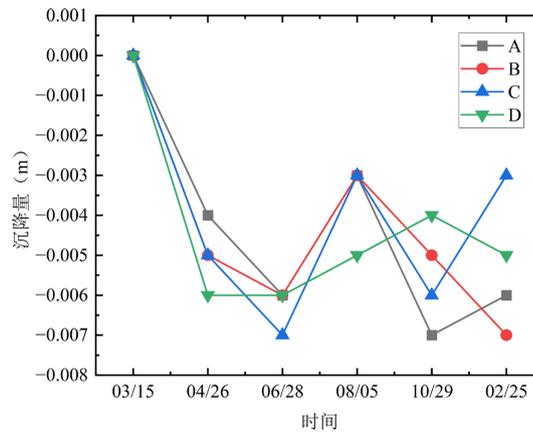
### 4.4. 温度测试结果分析

结构受力状态及线形的变化除与结构外荷载状态等因素有关外，还与结构体系的温度场相关。桥梁结构在桥位处各种环境因素的影响下，其温度场的变化主要体现在长期季节温差和短期体系温差两种形式上。

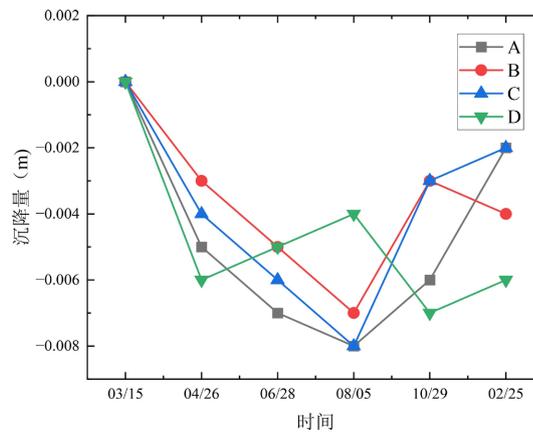
施工期间，随着季节的变换，环境温度升高或降低，导致结构整体温度的变化而产生季节温差；而在日温度变化、尤其是日照的影响下，因混凝土的热传导性能较差而在结构内部形成不均匀的温度场，并产生较大的温度梯度。因此，须在施工过程中对结构的温度场进行监测。一般认为，桥梁沿长度方向的温度变化比较小，因此，现场测试温度不考虑温度沿纵桥向的变化情况，温度场测试断面及测点布置



**Figure 8.** Schematic diagram of control points for settlement observation of bearing platform (unit: cm)  
**图 8.** 承台沉降观测控制点示意图(单位: cm)



**Figure 9.** Settlement of pier cap on the left 29# pier  
**图 9.** 左 29#墩承台沉降



**Figure 10.** Settlement of pier cap on right 29#  
**图 10.** 右 29#墩承台沉降

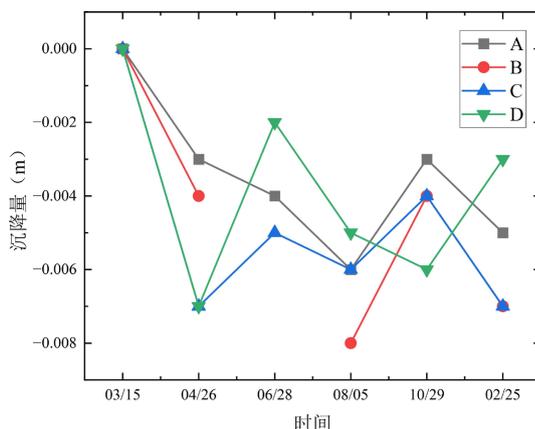


Figure 11. Settlement of pier cap on the left 30# pier  
图 11. 左 30#墩承台沉降

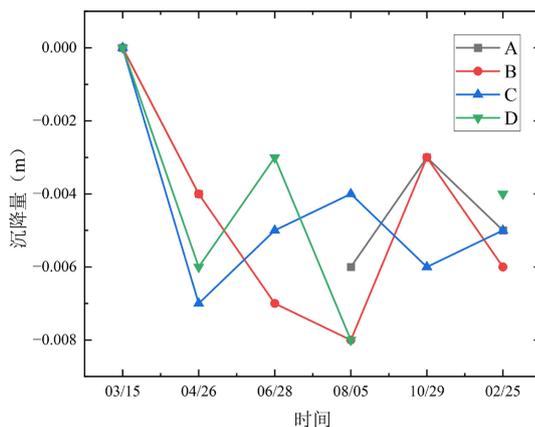


Figure 12. Settlement of pier cap at right 30#  
图 12. 右 30#墩承台沉降

见图 13、测试截面见图 14。测试仪器选用 JMT-36 半导体智能型温度传感器结合点温计进行，其主要性能为：精度  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；稳定性  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；测量范围  $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ ；线性误差  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ；其测量结果可不受接长导线长度影响。将 A-A 截面、B-B 截面温度测试结果绘制于图 15、图 16。通过对图 15、图 16 现场观测数据对比分析可知：混凝土温度与气温一样，呈现逐时周期变化；逐时周期变化时，混凝土温度极值出现时间滞后于气温，约在凌晨 7 时左右最低，滞后气温约 1.5 小时；混凝土温度随气温波动而波动，但日变化幅度远小于气温；由于混凝土的热惰性，混凝土平均温度一般高于日平均气温。

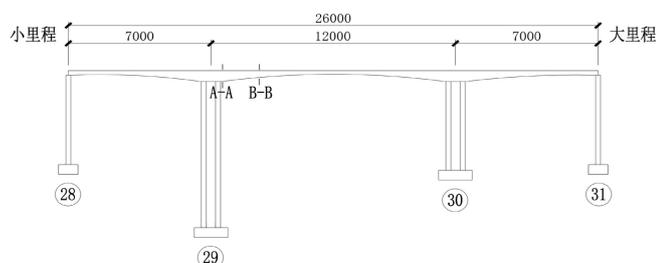


Figure 13. Schematic diagram of temperature test section  
图 13. 温度测试截面示意图

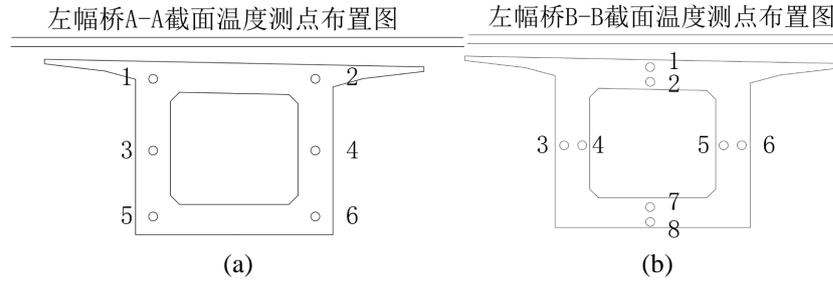


Figure 14. Schematic diagram of temperature measuring points  
图 14. 温度测点示意图

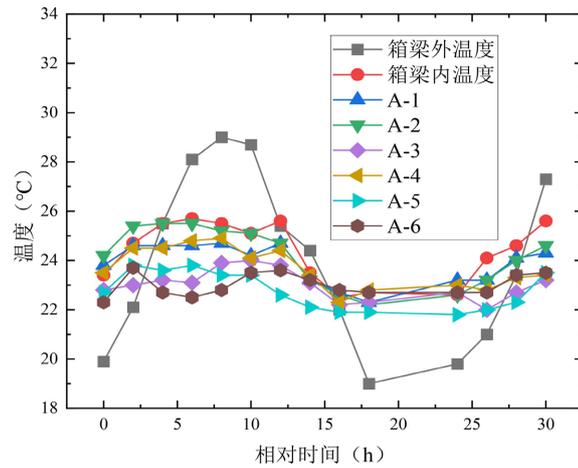


Figure 15. Schematic diagram of temperature changes in section A-A  
图 15. A-A 截面温度变化示意图

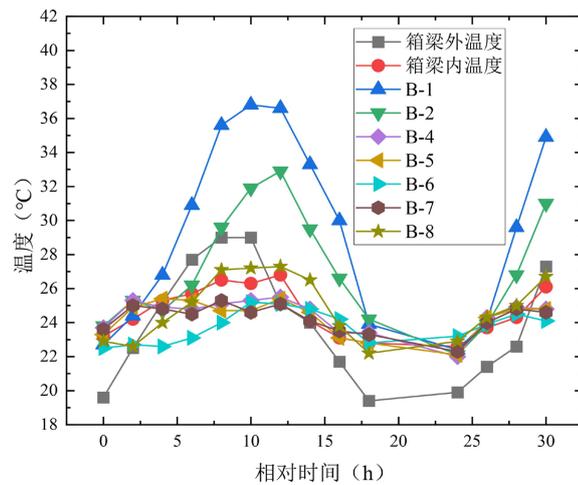


Figure 16. Schematic diagram of temperature change in section B-B  
图 16. B-B 截面温度变化示意图

### 5. 结论

本文对预应力混凝土连续刚构桥梁进行了长达两年的施工监控。并根据监控资料，将实测桥梁线形

和应力变化情况与有限元模拟值进行了对比分析, 将承台沉降结果与温度观测结果进行了分析, 主要结论如下:

1) 在桥梁施工阶段, 实测的桥梁线形与有限元模拟值高度吻合, 相关性系数达到 0.99。实测的应力结果与有限元模拟值也相符, 最大偏差仅为 1.96 MPa, 且未出现拉应力, 验证了有限元模拟方法的准确性。

2) 在观测期间, 29#墩和 30#墩周围承台的沉降量较小, 所有观测值均在 10 mm 以内。最大的沉降值出现在 3 月 14 日至 4 月 26 日之间, 并且沉降量显示出逐渐减缓的趋势。

3) 混凝土温度表现出与气温类似的逐时周期变化。当气温逐时变化时, 混凝土温度极值出现的时间比气温稍晚, 大约在凌晨 7 时左右达到最低点, 滞后气温约 1.5 小时。混凝土温度随气温波动, 但其日变化幅度远小于气温变化幅度。由于混凝土的热惰性, 混凝土的日平均温度通常高于日平均气温。

4) 此外, 本桥的施工监控结果与有限元模拟值一致, 桥梁的线形和应力情况符合预期。进一步证明了施工监控技术的有效性, 对于类似结构桥梁的监控提供了相应参考。

## 基金项目

云南省科学技术厅项目高速公路桥梁隧道试验检测条件平台建设 2019DC014。

## 参考文献

- [1] 中国交通运输年鉴 2022[M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2022.
- [2] 王雪峰, 王伟民. 多跨连续刚构桥合龙方案优化分析[J]. 建筑机械, 2024(5): 89-93+97.
- [3] 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.
- [4] 王益坚, 司雨楠, 梁亚华. 反向芬克式桁架桥施工分析与监控技术[J]. 浙江建筑, 2024, 41(3): 40-45.
- [5] 周先念, 卞佳, 朱帆. 人字形异形塔柱钢混组合梁斜拉桥施工监控技术[J]. 公路, 2024(6): 128-133.
- [6] 王柏荣. 双塔双索面混合-组合梁斜拉桥施工监控仿真分析[J]. 价值工程, 2024, 43(15): 152-155.
- [7] 肖政, 郭斐. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥施工监控探讨[J]. 交通世界, 2024(12): 113-115.
- [8] 王忠彬. 武汉鹦鹉洲长江大桥上部结构施工监控技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 100-105.
- [9] 李清泉, 陈睿哲, 涂伟, 等. 基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变实时测量方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1834-1843.
- [10] 刘建琦. 大跨径连续刚构桥施工控制及敏感性分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. JTG F80/1-2004 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, 2004.
- [12] 宋士新. 大跨度连续刚构桥梁施工控制关键问题分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTG D63-2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.