

大跨径桥梁悬臂浇筑施工线形控制关键技术研究

晁向阳

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

摘要：本文以荥阳某跨渠大桥为研究对象，通过现场实测数据采集、动态监测系统构建及多源数据融合分析，系统研究大跨径预应力混凝土连续梁悬臂浇筑施工线形控制关键技术。研究提出基于动态预拱度调整的线形控制方法，结合温度效应补偿、施工工艺优化、智能监测预警等措施，实现成桥线形偏差控制在 $\pm 6\text{mm}$ 以内的目标。本文详细阐述施工监测体系构建、预应力损失精确计算、混凝土收缩徐变时变效应分析、温度-应力耦合效应控制等核心技术，并通过工程实践验证了方法的有效性，为同类工程提供了可复制的技术方案。

关键词：大跨径桥梁；悬臂浇筑；线形控制；施工监测；温度补偿

1 工程概况与施工挑战深度解析

1.1 工程全貌与战略意义

该工程位于荥阳市科学大道与总干渠交叉处，桥梁全长289.0m，采用(77m+135m+77m)三跨预应力混凝土连续梁结构，桥宽7.0m，设计基准期100年、安全等级一级，主梁为单箱单室变截面箱梁，梁高从支点处向跨中以1.7次抛物线过渡形成独特空间曲线结构；桥址区属冲洪积倾斜平原，地势西高东低，地层为土岩双层结构，上覆多系地层、下伏第三系粘土岩，各土体单元承载力特征值不同，地下水属第四系孔隙潜水，为 HCO_3^- - $\text{Ca}-\text{Mg}$ 型淡水，对混凝土无腐蚀性。

1.2 施工难点分析

本工程面临多重施工挑战，需通过技术创新实现精准控制：（1）大跨径悬臂浇筑控制：135m主跨需通过挂篮悬臂浇筑施工，节段最大重量达128t，线形控制精度要求高。需解决挂篮系统稳定性、混凝土浇筑均匀性、预应力张拉同步性等问题^[1]。（2）复杂地质条件：粉土层承载力低，需进行桩基施工质量控制，确保单桩承载力 $\geq 6000\text{kN}$ 。需优化桩基施工工艺，控制桩基沉降量 $\leq 10\text{mm}$ ，确保桥梁整体稳定性。（3）温度效应显著：季节温差达 30°C ，日温差达 15°C ，温度梯度引起结构变形明显。需建立完善的温度监测与补偿系统，控制温度引起的线形偏差 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。（4）预应力系统复杂：纵向预应力钢绞线采用9 $\varphi 15.2$ 、12 $\varphi 15.2$ 和15 $\varphi 15.2$ 三种类型的低松弛钢绞线，分别对应采用YJM15-9、YJM15-12和YJM15-15的圆锚体系，主梁竖向预应力和墩顶主梁0#块横向预应力采用JL32mm高强精轧螺纹钢筋，JLM-32锚具。需优化张拉工艺，确保有效预应力 $\geq 95\%$ 设计值，控制预应力损失 $\leq 5\%$ 。

2 施工阶段划分与控制目标细化

根据桥梁结构特点，将施工过程划分为0#块施工、悬臂浇筑、合龙段施工三个主要阶段，每个阶段设置明确的线形控制目标：

表1 线形控制目标

施工阶段	高程偏差控制目标	轴线偏差控制目标	应力控制目标
0#块施工	$\leq \pm 3\text{mm}$	$\leq \pm 2\text{mm}$	关键截面应力 $\leq 0.7\text{fpk}$
悬臂浇筑	每节段 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，累计 $\leq \pm 8\text{mm}$	每节段 $\leq \pm 1.5\text{mm}$ ，累计 $\leq \pm 6\text{mm}$	有效预应力 $\geq 97\%$ 设计值
合龙段施工	$\leq \pm 4\text{mm}$	$\leq \pm 1.5\text{mm}$	合龙温度应力 $\leq 3\text{MPa}$

3 施工监测与控制系统构建

3.1 精密测量控制系统深度设计

建立全站仪测量系统与精密水准测量系统相结合的监测网络^[2]。采用徕卡TS30全站仪进行轴线控制，测量精度达到1秒级，测距精度 $\pm 0.5\text{mm}$ 。精密水准仪采用蔡司Dini12，测量精度达到 $0.3\text{mm}/\text{km}$ 。建立独立测量控制网，采用GPSRTK技术进行控制点布设，确保测量基准稳定可靠。

3.1.1 测量控制点布设方案

在桥墩顶部布设4个测量控制点，形成控制网。控制点采用强制对中装置，确保测量精度。在0#块、1/4跨、1/2跨、3/4跨等关键截面布设监测点，监测高程、轴线等参数。监测点采用不锈钢标志，埋设深度 $\geq 0.5\text{m}$ ，确保稳定可靠。

3.1.2 实时监测数据采集与处理

通过自动化监测系统实现实时数据采集，采样频率1次/小时。数据通过4G网络传输至监控中心，进行实时处理与分析。当监测数据超出预警值时，系统自动报警，提醒施工人员采取措施。数据处理采用最小二乘法进行

拟合, 优化预拱度设置。

3.2 应力监测系统深度设计

在关键截面布置钢筋计、混凝土应变计等传感器, 实时监测施工阶段应力状态。传感器布置方案:

顶板: 表面3个测点, 深度5cm、10cm各1个测点, 采用振弦式钢筋计

底板: 表面3个测点, 深度5cm、10cm各1个测点, 采用光纤光栅应变计

腹板: 表面3个测点, 深度5cm、10cm各1个测点, 采用电阻应变片

通过无线传输系统实现数据实时采集与分析, 为线形调整提供依据。当应力超出预警值时, 系统自动报警, 提醒施工人员调整预应力张拉力或混凝土浇筑量。

3.3 动态预拱度调整系统深度设计

建立基于最小二乘法的预拱度动态调整模型, 考虑施工阶段划分、混凝土收缩徐变、预应力损失、温度效应等因素。通过迭代计算确定最优预拱度设置方案。基于最小二乘法的预拱度优化模型为:

$$\min_{i=1}^{nn} \left[\delta_{obs,i} - (\delta_{cal,i} + \delta_{T,i} + \delta_{s,i}) \right]^2$$

式中: $\delta_{obs,i}$ 为第*i*节段实测高程偏差 (mm), $\delta_{cal,i}$ 为理论计算预拱度 (mm), $\delta_{T,i}$ 为温度预拱度 (mm), $\delta_{s,i}$ 为收缩徐变预拱度 (mm)。

3.3.1 预拱度计算模型优化

预拱度计算模型考虑以下因素: 施工阶段划分: 0#块施工、悬臂浇筑、合龙段施工混凝土收缩徐变: 采用CEB-FIPMC90模型, 考虑时变效应预应力损失: 分项计算法, 考虑锚固损失、摩擦损失等温度效应: 温度-变形关系模型, 考虑温度梯度影响通过最小二乘法拟合实测数据与理论计算值, 优化预拱度设置。预拱度值根据施工监测数据动态调整, 确保线形控制精度。

3.3.2 预拱度调整策略精细化

根据施工监测数据, 采用动态调整策略优化预拱度设置。具体措施包括: 调整挂篮前移量: 根据监测数据调整挂篮前移量, 控制线形偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ 调整混凝土浇筑量: 根据监测数据调整混凝土浇筑量, 控制线形偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ 调整预应力张拉力: 根据监测数据调整预应力张拉力, 控制线形偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$

4 施工工艺优化与质量控制

4.1 挂篮系统设计

设计高精度挂篮系统, 确保施工阶段线形稳定。挂篮系统采用轨道滑动式系统, 实现精准定位。通过激光测距仪实时监测挂篮位置, 确保挂篮定位精度 $\leq \pm 1\text{mm}$ 。

4.1.1 挂篮结构优化

采用菱形挂篮, 主桁架采用H型钢, 强度高、刚度大。挂篮底部设置可调支腿, 实现高程调整。挂篮前吊带采用精轧螺纹钢, 强度高、变形小。挂篮系统重量控制在45t以内, 确保施工安全。

4.1.2 挂篮行走系统优化

挂篮行走系统采用液压滑动系统, 实现平稳行走。通过液压缸控制挂篮行走速度, 确保行走精度 $\leq \pm 1\text{mm}$ 。挂篮行走过程中, 通过激光测距仪实时监测挂篮位置, 确保定位精度。挂篮行走速度控制在0.5m/h以内, 确保施工安全。

4.2 混凝土浇筑控制优化

优化混凝土配合比, 控制混凝土坍落度与扩展度^[3]。采用分层浇筑工艺, 确保混凝土均匀密实。通过温度监测系统控制混凝土入模温度, 减少温度裂缝产生。

4.2.1 混凝土配合比优化

混凝土配合比设计考虑强度、工作性、耐久性等因素。采用P·O42.5水泥, 掺加粉煤灰、矿粉等掺合料, 降低水化热。配合比设计参数: 水泥用量: 320kg/m³; 粉煤灰用量: 90kg/m³; 矿粉用量: 80kg/m³; 砂率: 42%; 水胶比: 0.33。混凝土坍落度控制在180±20mm, 扩展度控制在500±50mm, 确保混凝土工作性满足施工要求。

4.2.2 混凝土浇筑工艺优化

采用分层浇筑工艺, 每层厚度30cm。浇筑过程中, 采用插入式振捣器振捣, 确保混凝土密实。通过温度监测系统控制混凝土入模温度, 夏季 $\leq 30^\circ\text{C}$, 冬季 $\geq 10^\circ\text{C}$ 。浇筑过程中, 实时监测混凝土温度, 确保温度梯度 $\leq 5^\circ\text{C}/\text{m}$, 减少温度裂缝产生。

4.3 预应力张拉控制优化

建立智能张拉系统, 实现预应力张拉过程的精准控制。通过应力监测系统实时反馈张拉状态, 确保有效预应力满足设计要求。

4.3.1 智能张拉系统设计

智能张拉系统采用液压张拉千斤顶, 通过压力传感器实时监测张拉力。系统具有自动校准、数据存储、远程监控等功能。张拉过程中, 系统自动控制张拉速度, 确保张拉力平稳上升。张拉力控制误差 $\leq \pm 0.5\%$, 伸长量控制误差 $\leq \pm 3\%$ 。

4.3.2 张拉工艺优化

采用双控法进行预应力张拉, 即控制张拉力和伸长量。张拉过程中, 通过应力监测系统实时监测关键截面应力状态, 确保应力不超过设计值。张拉顺序按照设计要求进行, 确保预应力分布均匀。张拉完成后, 进行锚

固效果检测，确保锚固可靠。

5 施工案例具体分析与效果评价

5.1 施工过程线形控制实例

以本工程为例，详细分析悬臂浇筑施工全过程线形控制效果。通过实时监测数据与理论计算值的对比分析，验证线形控制技术的有效性。

5.1.1 0#块施工控制分析

0#块施工采用高精度测量控制系统，实现高程偏差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，轴线偏差 $\leq \pm 1.5\text{mm}$ 的优质控制效果^[4]。通过优化混凝土配合比与预应力张拉工艺，确保0#块线形精度满足后续施工要求。实测数据表明：高程偏差最大值 $+1.8\text{mm}$ ，最小值 -1.2mm ，均方根误差 1.2mm ；轴线偏差最大值 $+0.9\text{mm}$ ，最小值 -0.6mm ，均方根误差 0.7mm ；应力状态满足设计要求，关键截面应力 $\leq 0.7\text{fpk}$ 。

5.1.2 悬臂浇筑阶段控制分析

在悬臂浇筑阶段，通过动态调整预拱度设置与施工工艺参数，实现每节段高程偏差 $\leq \pm 1.5\text{mm}$ ，累计偏差 $\leq \pm 6\text{mm}$ 的优质控制效果。通过温度监测系统实时补偿温度效应，确保线形稳定。实测数据表明：高程偏差最大值 $+5.8\text{mm}$ ，最小值 -5.2mm ，均方根误差 2.8mm ；轴线偏差最大值 $+2.3\text{mm}$ ，最小值 -1.9mm ，均方根误差 1.6mm ；应力状态满足设计要求，有效预应力 $\geq 97\%$ 设计值。

5.1.3 合龙段施工控制分析

合龙段施工采用精密测量与应力监测双重控制策略，实现高程偏差 $\leq \pm 3\text{mm}$ ，轴线偏差 $\leq \pm 1.2\text{mm}$ 的优质控制效果。通过优化合龙温度与预应力张拉工艺，确保合龙段线形精度满足设计要求。实测数据表明：高程偏差最大值 $+2.9\text{mm}$ ，最小值 -2.5mm ，均方根误差 1.8mm ；轴线偏差最大值 $+1.1\text{mm}$ ，最小值 -0.9mm ，均方根误差 0.7mm ；应力状态满足设计要求，合龙温度应力 $\leq 3\text{MPa}$ 。

5.2 线形控制效果综合评价

通过成桥线形检测，验证线形控制技术的有效性。实测结果表明，成桥线形偏差控制在 $\pm 6\text{mm}$ 以内，远优于设计要求的 $\pm 20\text{mm}$ 精度标准。

5.2.1 高程控制效果评价

成桥高程偏差最大值为 $+5.8\text{mm}$ ，最小值为 -5.2mm ，均方根误差为 2.8mm 。高程偏差分布符合正态分布，95%置信区间为 $\pm 5.6\text{mm}$ ，满足设计要求。高程控制效果良好，线形平滑，无显著偏差。

5.2.2 轴线控制效果评价

成桥轴线偏差最大值为 $+2.3\text{mm}$ ，最小值为 -1.9mm ，均方根误差为 1.6mm 。轴线偏差分布符合正态分布，95%置信区间为 $\pm 3.2\text{mm}$ ，满足设计要求。轴线控制效果良好，线形顺直，无显著偏差。

5.2.3 应力控制效果评价

成桥应力状态满足设计要求，关键截面应力水平控制在允许范围内。实测应力最大值 14.5MPa ，最小值 -7.8MPa ，均在设计允许范围内。无超应力现象发生，结构安全可靠。应力控制效果良好，预应力分布均匀，结构受力合理。

6 结语

本文系统研究了大跨径桥梁悬臂浇筑施工线形控制关键技术，通过理论分析、数值模拟与工程实践相结合的方法，提出了适用于复杂地质条件下的线形控制方法体系。研究结果表明，通过优化施工阶段划分、动态调整预拱度、强化温度效应补偿等措施，可有效控制成桥线形偏差在 $\pm 6\text{mm}$ 以内，满足设计要求。本文提出的技术方法为同类工程提供了可复制的技术方案，具有显著的经济效益与社会效益。

参考文献：

- [1]王海宾.大跨径预应力连续梁桥施工控制探讨[J].黑龙江交通科技,2023,46(04):87-89.
- [2]于松波.大跨径预应力混凝土连续刚构桥悬臂施工线形控制分析[J].黑龙江交通科技,2021,44(11):108-110.
- [3]梁峰.高速铁路大跨径连续梁桥悬臂施工控制关键技术研究[J].建筑技术开发,2019,46(13):49-50.
- [4]徐木旺.大跨径悬臂浇筑桥梁施工线形监控[J].山西建筑,2017,43(15):162-163.