

连续梁桥悬臂浇筑施工线形控制要点分析

鲁 涛 束文阳

安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司 安徽 合肥 230088

【摘 要】：针对连续梁桥悬臂浇筑施工中普遍存在的线形超标、工况参数失准、环境扰动干扰等问题，系统剖析线形偏差的理论计算、施工工艺及监测体系三大核心成因。结合现场施工实际条件，提出参数本地化修正、标准化工序管控、动态实时监测调控的全套精细化控制技术对策，并依托合肥地区多项大跨度连续梁桥工程开展实践验证。结果表明，该套控制技术可有效抑制施工线形误差累积，将桥梁合龙偏差、梁体标高误差严格控制在规范限值内，大幅提升成桥线形平顺度与结构受力稳定性，可为同类桥梁施工线形管控提供技术借鉴。

【关键词】：连续梁桥；悬臂浇筑；线形控制；施工工艺；动态监测

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.028

1 引言

预应力混凝土连续梁桥凭借刚度大、行车平顺、结构耐久性强等优势，广泛应用于大跨度公路、铁路桥梁工程中。悬臂浇筑施工是连续梁桥主流施工工艺，具备适应性强、施工灵活、不间断通航通车的特点。但该施工方式为逐段悬臂成型，梁体线形易受施工工艺、结构计算、外部环境等多维度因素干扰，极易产生累积形变偏差，直接影响桥梁合龙质量与后期运营安全。为有效解决悬臂浇筑施工线形管控难题，依托实际工程工况，系统梳理线形控制现存问题，剖析偏差产生机理，针对性制定精细化管控技术措施，以此提升大跨度连续梁桥施工成型质量。

2 连续梁桥悬臂浇筑线形控制现存问题

（1）主梁线形偏差超标问题：连续梁桥悬臂浇筑施工过程中，主梁线形偏差超标是最为普遍的施工质量问题，主要体现在各悬臂浇筑节段标高、轴线位置与设计参数存在明显偏差，相邻梁段衔接处出现错台、起伏不平的现象，部分桥梁还会出现左右幅线形不对称、整体平顺度不达标的情况。挂篮预压处理不彻底会残留非弹性变形，弹性变形参数取值与实际工况不符，造成各节段预拱度设置失衡，直接引发梁体标高偏差超限。混凝土浇筑后产生的收缩徐变效应、预应力张拉过程中的应力损失与锚固滑移，会持续改变梁体受力形态与结构形变状态，进一步加剧线形偏差。施工现场温度交变、不对称施工荷载堆积以及模板定位精度不足等多重因素叠加，会让微小偏差不断累积放大，最终超出规范允许误差范围，严重影响桥梁后续合龙施工精度与成桥整体线形质量。

（2）施工工况参数管控失准问题：施工工况参数管控失准是连续梁桥悬臂浇筑线形偏差的核心诱因之一，各类施工核心参数的动态偏差会持续影响梁体成型线形。挂篮浇筑施工阶段，梁段自重、挂篮变形、预应力张拉力度、梁体温度应力等

关键工况参数常出现实测数值与设计数值偏差现象^[1]。混凝土浇筑过程中，不同梁段浇筑方量存在细微偏差，造成梁体实际自重荷载与理论荷载不匹配，引发梁体竖向挠度异常。挂篮弹性及非弹性变形参数未依据现场施工环境实时校准，固定取值的参数标准无法适配不同施工阶段的受力状态。预应力张拉的伸长量、张拉应力控制精度不足，加之昼夜温差、箱梁内外温差产生的温度参数波动，会改变梁体应力分布与形变状态，持续累积线形误差，破坏悬臂梁段线形的平顺性与准确性。

（3）环境因素引发线形扰动问题：连续梁桥悬臂浇筑施工处于露天作业状态，自然环境的动态变化会持续对梁体结构产生扰动，诱发各类线形偏差问题。日照辐射会使箱梁顶板与底板、腹板产生不均匀温度梯度，造成梁体局部热胀冷缩变形，引发悬臂端上拱或下挠的不规则位移，昼夜温差与季节性温度波动还会持续放大这种变形差值，干扰梁段高程与轴线精度。施工现场的风力荷载会作用于悬挑状态的梁体与挂篮结构，产生水平和竖向微幅振动与偏移，导致浇筑成型的梁段轴线出现细微偏位。空气湿度的持续变化会影响混凝土硬化进程，高湿度或干燥环境会改变混凝土收缩变形速率，使各节段梁体产生差异化形变，多类环境因素叠加后会造成线形误差逐层累积，大幅降低整体线形控制精度。

3 悬臂浇筑线形偏差成因机理分析

3.1 结构设计与理论计算误差成因

连续梁桥悬臂浇筑的理论计算依托各类结构设计参数与仿真模型开展，参数取值的精准度直接决定线形计算结果的贴合度（见图1）。桥梁结构设计阶段对混凝土弹性模量、容重、收缩徐变系数等核心参数，多采用行业规范推荐的标准取值，未结合施工现场原材料性能、拌合工艺及养护环境的实际差异进行微调，参数固有偏差会贯穿整体计算过程。数值计算模型为适配运算需求，会对桥梁结构进行适度简化，忽略箱梁局部

构造、预应力管道布置偏差、支座细微形变等细部结构影响，同时无法精准模拟施工阶段温度场的瞬时变化与结构受力的动态耦合效应，使得理论计算的梁体标高、转角数据与实际施工状态存在固有差值，逐步引发梁体线形偏移。

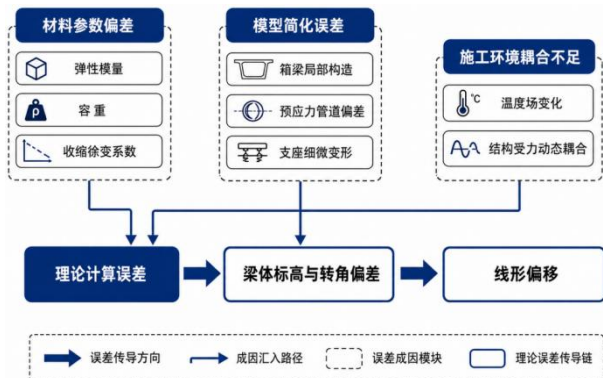


图1 梁体线形偏移理论计算误差传导机理图

3.2 现场施工工艺不规范成因

连续梁桥悬臂浇筑作业中，模板安装、钢筋布设、混凝土浇筑及预应力张拉等核心工序的工艺执行偏差，均会引发桥梁线形偏移问题。模板拼装阶段，模板平整度、标高及轴线定位精度未契合设计标准，模板支撑体系紧固力度不均、锚固点位偏移，会造成梁体浇筑成型后尺寸及线形出现原始偏差。混凝土浇筑环节，布料厚度不均匀、振捣作业疏密不一，易使梁体混凝土密实度存在区域差异，结构自重应力分布失衡，诱发梁体竖向挠度与水平偏移^[2]。预应力施工阶段，钢绞线穿束位置偏差、张拉回缩量控制不严、压浆饱满度不足，会改变梁体预设应力状态，致使悬臂段梁体收缩变形异常，逐步累积形成持续性线形偏差。

3.3 监测体系不完善诱发偏差成因

连续梁桥悬臂浇筑施工中，监测体系的布设缺陷与运维不规范，会直接造成桥梁线形数据采集失真，进而引发结构线形偏差。监测点位的布设未贴合梁体悬臂受力及变形规律，关键断面、挠度观测点、高程监测点布设密度不足或点位偏移，无法精准捕捉梁体阶段性形变数据。监测设备未按规范完成定期校验与校准，水准仪、全站仪等观测设备存在精度损耗，长期使用产生系统误差，导致实测高程、轴线数据与实际工况不符。同时，监测频次未匹配悬臂浇筑施工工序节奏，节段浇筑、预应力张拉、挂篮前移等关键工况缺少实时监测，遗漏梁体瞬时形变参数，滞后的监测数据无法反馈结构真实变形状态，逐步累积形成不可逆的线形偏差。

4 连续梁桥悬臂浇筑线形控制关键技术对策

4.1 优化施工前期理论计算参数

连续梁桥悬臂浇筑施工前期需精准核定各类理论计算参

数，依托桥梁结构设计规范与现场实际工况完成参数修正与取值优化，规避参数偏差引发的线形偏移问题。针对混凝土材料参数，需结合施工现场砂石、水泥原材料性能及养护环境，精准测定混凝土弹性模量、收缩徐变系数及容重，摒弃通用标准取值模式，匹配现场实体材料特性^[3]。针对结构受力与变形参数，需细化挂篮自重、施工临时荷载、预应力张拉损失等核心参数的计算取值，精准核算挂篮变形差值、预应力孔道摩擦损失及锚具回缩损失。同时结合桥梁跨度、梁段分段长度及悬臂浇筑施工节律，修正温度应力、沉降变形相关计算参数，让所有理论计算参数贴合现场施工条件，保障结构变形计算、线形预拱度设置的精准度，为后续悬臂浇筑线形调控提供精准的理论数据支撑。

4.2 规范悬臂浇筑现场施工工艺

连续梁桥悬臂浇筑施工规范化是保证梁体线形平顺、控制变形偏差的关键，全部工序须严格遵循桥梁施工规范与线形专项控制要求。挂篮就位后完成精细调校与预压检测，根据预压变形数据修正立模标高，综合梁体自重、预应力作用、混凝土收缩徐变及施工临时荷载，科学设定各节段预拱度^[4]。模板安装精准定位底板、侧模与翼缘板空间坐标，匹配测点设计参数，保证接缝密实、板面平整，防止错台、漏浆造成梁体外形畸变。混凝土采用对称分层连续浇筑，管控分层厚度与浇筑速度，保证桥墩两侧悬臂施工同步推进，削弱偏心荷载带来的挠曲变形。梁段浇筑完成及预应力张拉前后持续监测标高与轴线，对比实测线形与理论值，根据偏差动态优化后续施工参数；同步规范开展混凝土养护，稳固梁体成型质量，依托全过程工序管控，最大限度降低施工偏差对线形控制精度的不利影响。

4.3 建立动态实时监测调控体系

全过程动态实时监测调控体系依托高精度监测设备布设于桥梁主梁悬臂端部、节段接缝及挂篮关键受力位置，针对悬臂浇筑施工全过程的梁体挠度、轴线位移、顶面高程、结构应力及温差变形等核心线形指标进行持续性数据采集。系统整合现场温度、风速、施工荷载等环境与工况参数，实现各类影响线形精度的数据同步收录与动态更新，依托专用数据处理算法对采集信息进行筛选校正与对比分析，精准识别施工过程中产生的细微线形偏差。结合连续梁桥分段浇筑的施工特性，系统可依据设计线形参数与前期施工成型数据，实时输出对应节段的线形修正参数，同步对接现场施工工序完成偏差动态修正，实现各施工节段线形数据的实时把控与动态调整，有效抑制多节段施工累积变形误差，保障桥梁线形施工精度的稳定性与连续性。

5 线形控制技术工程应用与效果验证

5.1 工程线形控制方案落地实施

连续梁桥悬臂浇筑施工线形控制专项方案的落地执行,需围绕挂篮安装校准、模板定位、混凝土浇筑及预应力张拉等关键工序建立标准化作业流程。方案将整体线形控制指标分解至各悬臂梁段施工工序,设定每节段立模高程、轴线偏差、预拱度等核心参数的具体执行标准。挂篮就位后须完成预压试验,依据预压所得变形数据修正模板立模标高,综合梁体自重、预应力张拉、收缩徐变及施工荷载等多重因素精准设置节段预拱度。模板安装须精准控制底板、侧模及翼缘板空间坐标,确保拼接严密平整^[5]。混凝土浇筑遵循对称分层、均匀连续原则,控制浇筑速率,保持桥墩两侧悬臂进度同步,严控偏心荷载引发的挠曲变形。各工序间落实交接核验,每轮悬臂浇筑作业完成后对线形状态进行复核,确保施工全过程线形控制的标准化推进。

5.2 施工全过程线形偏差整改

合肥地区大跨度连续梁桥悬臂浇筑施工中,线形偏差整改贯穿于整个施工周期。以南淝河大桥主桥(60m+100m+60m)为例,每一节段按立模、混凝土浇筑、预应力张拉三种工况对主梁挠度进行独立测量,实测数据与理论值逐段比对,当张拉后梁端测点标高与监控预报标高偏差超过±20mm时即启动整改程序。偏差整改并非孤立纠偏,而是通过已施工节段的实测挠度数据修正后续立模标高预测值,采用灰色系统GM(1,1)模型对挂篮变形等不确定因素进行动态预测,预测误差控制在0.8%以内。南淝河大桥左、右幅箱梁6个合龙口底板相对高差均控制在10mm以下;合肥跨G312国道(72+128+72)m连续梁桥中跨合龙段高程与中线偏差控制在毫米级;合肥肥东县某48m+85m+51m连续梁桥左右幅跨中合龙误差分别控制在1mm和6mm,成桥后各控制截面标高误差均小于20mm,见表1。

表1 南淝河大桥线形偏差控制指标与实测数据

项目指标	控制目标/ 允许偏差	实测/控制结果
------	---------------	---------

合龙口底板相对高差	≤10 mm	左、右幅共6个合龙口的底板相对高差均控制在10 mm以下
轴线偏差(左幅)	±10 mm	最大值9.0 mm
轴线偏差(右幅)	±10 mm	最大值10.0 mm
立模标高抽查偏差	±5 mm	个别点最大值15 mm(经调整后符合要求)
成桥后控制截面标高误差	≤20 mm	均小于20 mm

5.3 线形控制施工质量效果核验

线形控制施工质量效果核验以合龙精度与成桥线形误差作为核心评判指标。依托合肥肥东县主跨85米的三跨预应力混凝土变截面连续梁桥项目,挂篮定位标高相对预报数值偏差可维持在5毫米区间。桥梁左幅中跨合龙段小型钢、大型钢截面理论标对应23.722米、23.721米,现场实测数值为23.714米、23.727米,偏差数值分别为-8毫米、+6毫米,右幅中跨合龙段实测偏差处于-4毫米至+6毫米区间。全桥左右幅跨中合龙段偏差数值均符合10毫米工程限值标准,各墩梁体控制截面标高实测数据与设计高程偏差±20毫米规范限值,各类块段底板标高均可契合设计线形要求。各控制截面应力实测数据贴合理论变化规律,数值偏差整体偏小,桥梁结构受力状态与线形控制匹配度良好,整体线形平顺、结构运行稳定。

6 结语

连续梁桥悬臂浇筑施工线形偏差受理论计算、施工工艺、环境扰动及监测管控等多重因素耦合影响,是制约桥梁施工质量的关键问题。通过优化现场适配性理论计算参数、规范全流程悬臂浇筑施工工艺、搭建动态实时监测调控体系,可从源头有效管控各类线形误差,抑制偏差累积。多项工程实践表明,系统化、精细化的线形控制技术可严格把控桥梁合龙精度与成桥线形指标,保障梁体受力状态稳定。相关管控对策可为同类大跨度连续梁桥悬臂浇筑施工的线形质量管控提供技术参考,助力提升桥梁工程施工标准化与精准化水平。

参考文献:

- [1] 董鹏.高速铁路连续梁桥悬臂浇筑施工线形控制施工技术[J].智能城市,2021,7(17):131-132.
- [2] 黄长溪.大跨径连续梁桥悬臂施工线形控制技术研究[J].交通世界,2025,(12):158-160.
- [3] 夏力,黄新,李建慧.高速铁路连续梁桥悬臂浇筑施工线形控制[J].建设科技,2020,(21):125-129.
- [4] 曾烜.悬臂浇筑法连续梁桥预应力张拉端施工质量控制技术[J].国防交通工程与技术,2021,19(S1):101-103.
- [5] 温慧梅.连续梁桥单悬臂施工线形控制研究[J].工程技术研究,2024,9(19):141-143.