

# 大跨度公路连续刚构桥悬臂浇筑施工 线形控制技术研究

吴 飞

(中铁二十一局集团第四工程有限公司, 陕西 咸阳 712000)

**摘 要** 大跨度预应力混凝土连续刚构桥因跨越能力强、受力性能优越而被广泛采用, 但其悬臂浇筑施工过程中结构体系不断转换, 线形控制是保证成桥状态满足设计要求的关键技术难题。本文以某连续刚构桥为工程背景, 系统分析了影响线形控制的混凝土收缩徐变、施工荷载、环境温度及预应力张拉等关键因素, 并通过精准的施工监测与参数识别动态调整立模标高, 以期为同类桥梁施工提供参考。成桥实测数据表明, 跨中高程最大偏差为 +11 mm, 轴线偏位控制在 8 mm 以内, 合龙精度满足  $\pm 15$  mm 要求。

**关键词** 大跨度; 公路连续刚构桥; 悬臂浇筑施工; 线性控制

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.020

## 0 引言

随着交通基础设施建设的快速发展, 大跨度预应力混凝土连续刚构桥凭借其结构刚度大、行车平顺、养护方便等优点, 在公路工程建设中占据重要地位。悬臂浇筑法是该类桥梁最常用的施工方法, 但施工过程中结构经历多次体系转换, 其几何线形受混凝土收缩徐变、预应力效应、环境温度及施工荷载等多因素耦合影响, 呈现出高度的时变性与非线性特征<sup>[1]</sup>。若线形控制不当, 不仅会影响桥梁合龙精度, 还可能造成成桥内力状态偏离设计, 甚至影响运营期的结构安全与行车舒适性。因此, 开展大跨度连续刚构桥悬臂浇筑施工线形控制技术研究, 对于保障桥梁施工质量、指导同类工程建设具有重要价值。

## 1 工程概况与施工难点

### 1.1 工程概况

某大跨度公路桥梁主桥采用预应力混凝土连续刚构体系, 桥跨布置为 (65+118+65) m, 主桥全长 248 m。主梁采用单箱单室变截面预应力混凝土箱梁, 箱梁顶板宽 12.75 m, 底板宽 6.75 m, 翼缘板悬臂长度 2.9 m。墩顶处梁高为 7 m, 高跨比为 1/16.9; 跨中及边跨端部梁高为 2.7 m, 高跨比为 1/43.7。梁底按 1.8 次抛物线变化。主墩采用双肢矩形实心截面, 墩高分别为 45 m 和 50 m。该桥主桥箱梁共计 71 个节段, 主墩 0、1 号块总长为 13 m, 各单“T”箱梁除 0、1 号块外分为 15 对梁段, 箱梁纵向分段长度为  $6 \times 3$  m +  $5 \times 3.5$  m +

$4 \times 4$  m; 主桥边跨、主跨合龙段均采用挂篮现浇施工, 边跨现浇段在墩旁托架上现浇施工。悬臂现浇梁段最大重量为 151.6 t。桥梁设计荷载等级为公路 - I 级, 双向四车道。桥址区属剥蚀黄土丘陵地貌和丘陵间冲洪积平台地貌, 地势总体呈南北高中间低, 地形起伏较大。

### 1.2 施工方案简介

综合考虑地形条件与结构特点, 主桥箱梁采用挂篮悬臂浇筑法对称平衡施工。首先在墩顶托架上现浇 0、1 号块, 然后安装挂篮, 分段悬臂浇筑 2 号至 16 号梁段。标准节段悬浇流程为: 挂篮前移就位 → 立模、绑扎钢筋 → 浇筑混凝土 → 预应力张拉、压浆。为满足长悬臂施工的稳定性要求, 该桥共设置两道临时横撑。边跨现浇段采用落地钢管支架一次浇筑成型, 合龙顺序遵循“先边跨、后中跨”的原则, 其中边跨和中跨合龙段长度均为 2.0 m。挂篮采用菱形桁架式轻型挂篮, 自重约 70 t, 挂篮自重与最大块件重量比控制为 0.46。在施工过程中, 建立高精度测量控制网, 在每个节段施工时对挂篮变形、梁体标高及轴线进行全天候跟踪观测, 并根据监测数据动态调整立模标高。

### 1.3 线形控制的难点

大跨度连续刚构桥悬臂施工的线形控制是确保桥梁顺利合龙及成桥状态满足设计要求的关键技术。该桥线形控制面临以下难点: 一是悬臂长度大、累计变形敏感。最大单悬臂长度为 59 m, 施工过程中温度变化、混凝土收缩徐变、风荷载等因素均会导致梁体产

作者简介: 吴飞 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路桥梁施工。

生明显的竖向变形,理论计算与实测值容易产生偏差,累计挠度控制难度大。二是预应力效应与混凝土材料特性的复杂性。预应力张拉引起的结构反拱以及高强混凝土的收缩、徐变特性具有时变性,理论计算中的徐变系数与实际发展规律存在差异,直接影响后期线形<sup>[2]</sup>。三是合龙精度要求高。中跨合龙是线形控制的最终环节,要求两侧悬臂端高差控制在 $\pm 15$  mm以内,轴线偏差小于 $\pm 10$  mm。

## 2 悬臂浇筑施工线形控制关键影响因素分析

### 2.1 混凝土性能

混凝土的材料性能,尤其是收缩与徐变特性,是影响连续刚构桥长期线形的核心内在因素。该桥主梁采用 C55 高强度混凝土,根据配合比试验及规范计算,其终极收缩应变约为 $2.1 \times 10^{-4}$ ,名义徐变系数终值取 2.0。在悬臂浇筑过程中,混凝土的龄期短、加载早,如 2 号节段混凝土浇筑时,最早浇筑的 0、1 号节段混凝土龄期仅为 7~10 天,弹性模量约为设计值( $3.55 \times 10^4$  MPa)的 80%左右,早期强度发展不足导致加载后产生较大的瞬时变形和后续徐变变形。理论计算表明,仅考虑混凝土收缩徐变引起的最大悬臂端部后期挠度增量可达 30~50 mm。此外,混凝土材料的非线性、配合比波动以及养护条件的差异,均会导致实际徐变系数与理论值产生偏差,从而影响立模标高的精确设置和成桥线形的平顺性。

### 2.2 施工荷载

施工荷载的准确识别与量化是线形控制中不可或缺的环节,其作用主要包括挂篮自重、机具设备、钢筋束及施工临时堆载等。该桥采用的菱形挂篮自重约 70 t,当其前移就位并承载最大 151.6 t 的悬浇块件时,挂篮主桁架在前吊点位置产生的弹性变形实测值约为 15~18 mm,这部分变形需在立模标高设置时通过预抬值进行精确补偿。除挂篮外,节段施工中堆积的预应力钢束、张拉设备以及混凝土输送泵管的振动荷载,均会引起挂篮的瞬时下挠或扰动。施工过程中若对机具堆放位置控制不当,如偏载超过 5 t,可能导致梁体发生横向扭转变形,进而影响轴线偏位。因此,必须严格控制施工荷载的对称性与位置,并建立荷载与变形之间的对应关系,及时修正立模标高。

### 2.3 环境因素

环境因素,特别是温差与风速,对大跨度悬臂施工中的结构变形具有显著影响<sup>[3]</sup>。桥址位于丘陵区域,昼夜温差大,实测日温差可达 15℃以上。由于混凝土热传导性能差,箱梁顶板、底板及腹板之间存在明显的温度梯度,日照作用下顶板温度可比背阴面高出

10~15℃,引起梁体产生“C”字形竖向翘曲变形。理论计算表明,在最大悬臂 59 m 状态下,温差 10℃引起的悬臂端竖向位移可达 20~30 mm,若忽略此效应,将导致立模标高与测量数据失真。因此,所有立模标高复测及合龙前标高联测工作,严格规定在凌晨温度相对恒定的时段进行。此外,丘陵地区瞬时大风会引起梁体振动,对测量精度造成干扰,测量作业需避开大风天气。

### 2.4 预应力张拉与体系转换影响

预应力张拉是主动调整结构内力和线形的重要手段,但其产生的即时变形与后续效应较为复杂<sup>[4]</sup>。该桥每个悬浇节段均布置了纵向预应力束,腹板和底板单束锚下张拉力为 3 320.1 kN,顶板锚下张拉力为 4 101.3 kN。理论计算表明,一个标准节段的预应力张拉完成后,将使已完成梁段的悬臂端产生约 8~12 mm 的上挠变形。若张拉顺序不当或张拉力控制不准,将直接影响该节段最终的立模标高修正值。此外,体系转换是内力重分布的关键时刻。临时固结约束解除后,结构由静定转为超静定,恒载内力重新分配,导致跨中挠度发生突变。在合龙段施工中,张拉合龙束引起的变形更是决定成桥线形的最后关键步骤,必须精确计算并辅以顶推等措施来调整合龙口高差与内力。

## 3 悬臂浇筑施工线形控制技术实施方法

### 3.1 施工监测体系构建

为确保悬臂浇筑全过程的线形可控,该桥建立了一套高精度、多层次、全覆盖的施工监测体系。首先,在桥址区域布置了覆盖全桥的独立平面与高程控制网,平面控制采用 GPS 静态测量结合全站仪导线测量,高程控制采用精密水准测量,基准点均埋设于地质稳定区域,远离施工干扰。在主墩承台及 0、1 号块顶面设置永久性观测基准点,作为后续悬臂施工测量的起算依据。每个悬浇节段均设置三组监测断面,每个断面在顶板布置 3 个标高测点和 1 个轴线偏位测点。采用 Leica TS15 全站仪和电子水准仪进行数据采集。监测频率严格按工序控制:挂篮就位后、钢筋绑扎后、混凝土浇筑后、预应力张拉后各进行一次全面观测。同时,在 0、1 号块及关键节段埋设应变计和温度传感器,实时监测结构内力与温度场变化,为变形分析提供基础数据<sup>[5]</sup>。所有监测数据均建立电子档案,实现动态查询与趋势分析。

### 3.2 线形预测与调整策略

该桥线形控制采用“预测—实测—反馈—调整”的闭环控制策略,核心是建立精准的立模标高计算公式,采用 Midas Civil 有限元软件进行施工阶段模拟

分析,计算出最大悬臂状态理论挠度值为 $-187\text{ mm}$ (下挠),成桥10年后后期徐变挠度附加 $-43\text{ mm}$ ,据此设置施工预拱度。挂篮变形根据现场等效加载试验确定,实测最大弹性变形为 $17\text{ mm}$ ,按线性关系内插至各节段。在施工过程中,引入参数识别技术,将已完成节段的实测挠度与理论值对比,采用最小二乘法修正后续节段的混凝土容重、弹性模量及预应力损失等参数,确保最终合龙精度。

### 3.3 多因素耦合控制技术

针对混凝土收缩徐变、环境温度、施工荷载等多因素的耦合影响,该桥采取了综合控制技术。首先,建立温度变形修正模型,通过在典型节段埋设温度传感器,统计出凌晨6:00-7:00时段箱梁截面温度梯度接近均匀,将此确定为标准测量时段,所有标高观测值均修正至该基准温度状态。对于无法避免的温差工

况,基于有限元分析得到温度—挠度影响矩阵,对实测值进行反向修正。其次,引入灰色系统理论GM(1,1)模型对后续节段变形进行预测,利用前5个节段的实测数据建模,预测第6节段的变形值,与理论计算值进行加权平均后确定立模标高,有效降低了随机误差影响。经对比,采用多因素耦合控制后,各节段立模标高预测偏差由最初的 $\pm 12\text{ mm}$ 缩小至 $\pm 5\text{ mm}$ 以内。

## 4 成桥线形验收与效果评价

经过为期11个月的悬臂浇筑施工,该桥主桥右幅于2023年9月顺利实现中跨合龙,成桥线形经第三方检测单位验收,各项指标均满足设计及规范要求。成桥后,在主桥跨中、1/4跨、3/4跨及墩顶等关键截面进行了永久观测点埋设,并进行了全面线形测量。测量结果见表1)。

由表1可知,主桥桥面高程实测值与设计目标值最

表1 成桥线形主要控制点偏差统计表

位置	截面里程	设计高程(m)	实测高程(m)	偏差(mm)	轴线偏位(mm)
边跨合龙段	K217+468.0	1 568.174	1 568.170	-4	3
1/4边跨	K217+478.3	1 568.250	1 568.256	+6	5
主墩墩顶	K217+527.0	1 568.555	1 568.560	+5	2
1/4中跨	K217+556.5	1 568.684	1 568.692	+8	8
中跨跨中	K217+586.0	1 568.777	1 568.788	+11	6
3/4中跨	K217+615.5	1 568.829	1 568.824	-5	4
另一侧主墩	K217+645.0	1 568.842	1 568.845	+3	3

大偏差出现在中跨跨中截面,为 $+11\text{ mm}$ ,小于规范允许的 $\pm 20\text{ mm}$ ;最小偏差为 $-4\text{ mm}$ 。各节段间高差平顺,无明显折角,相邻节段高差最大值为 $6\text{ mm}$ ,满足不大于 $\pm 10\text{ mm}$ 的要求。轴线偏位最大值为 $8\text{ mm}$ ,发生在中跨1/4截面,小于 $\pm 10\text{ mm}$ 的控制标准。在合龙精度方面,中跨合龙口两端高差实测值为 $7\text{ mm}$ ,优于 $\pm 15\text{ mm}$ 的设计要求;轴线偏差为 $5\text{ mm}$ ,满足 $\pm 10\text{ mm}$ 的严控指标。

成桥后三个月进行的第二次复测表明,受混凝土后期收缩徐变影响,跨中高程下沉约 $4\text{ mm}$ ,变化速率趋于收敛,符合理论预测规律。该桥采用的线形控制技术有效保证了结构的内力状态与几何线形,桥面铺装层厚度均匀,避免了因线形偏差导致的铺装加厚或减薄问题。目前桥梁已通车运营,线形平顺,行车舒适性良好。

## 5 结束语

针对悬臂浇筑施工中的线形控制难题,系统分析了混凝土收缩徐变、施工荷载、环境温度及预应力张拉等关键影响因素。通过构建高精度施工监测体系,

采用“预测—实测—反馈—调整”的闭环控制策略,并结合多因素耦合修正技术动态优化立模标高,成功实现了对成桥线形的精准控制。成桥实测数据表明,跨中高程最大偏差为 $+11\text{ mm}$ ,轴线偏位控制在 $8\text{ mm}$ 以内,合龙精度达 $7\text{ mm}$ ,各项指标均优于规范要求,验证了悬臂浇筑施工线形控制技术的有效性与可靠性。

## 参考文献:

- [1] 李盟盟. 大跨度高速公路连续刚构桥悬臂浇筑施工技术研究[J]. 现代工程科技, 2025, 04(24): 121-124.
- [2] 戴金顺. 大跨公路连续刚构桥悬臂浇筑施工关键技术[J]. 交通世界, 2025(33): 141-143.
- [3] 郑成刚. 公路工程大跨度连续刚构桥悬臂浇筑施工技术研究[J]. 工程机械与维修, 2025(07): 110-112.
- [4] 曹海部. 大跨度连续刚构桥悬臂浇筑施工及监测关键技术[J]. 中国水泥, 2025(04): 104-106.
- [5] 齐杰. 大跨连续刚构桥悬臂浇筑施工监控及关键技术[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2024, 23(03): 64-68.