

预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑 施工质量控制关键点分析

贾长洋

(安徽省海陆通建设有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 预应力混凝土连续梁桥在现代交通基础设施中广泛应用, 悬臂浇筑法是其关键施工技术, 施工过程复杂且质量控制要求高。针对悬臂浇筑施工中存在的质量风险, 本文系统分析了其质量控制的关键环节, 围绕施工准备与基础控制、悬臂浇筑过程核心控制、特殊工况与关键节点控制三个维度展开, 具体涵盖0号块施工、挂篮系统验收、模板线形控制、混凝土浇筑与养护、预应力张拉、合龙段施工及体系转换等核心控制点。分析结果表明, 严格控制挂篮性能、精确实施线形监控、确保混凝土与预应力施工质量、精细操作合龙及体系转换过程, 是保障预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工质量、实现结构安全与线形达标的决定性因素。

关键词 预应力混凝土; 连续梁桥; 悬臂浇筑; 质量控制; 挂篮预压

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.034

0 引言

预应力混凝土连续梁桥凭借其跨越能力大、结构刚度好、行车平顺性高等显著优势, 在现代公路与铁路交通网络建设中占据重要地位。悬臂浇筑施工作为该桥型的关键建造方法, 通过挂篮设备实现桥梁结构向跨中对称逐段延伸, 特别适用于跨越深谷、河流或既有交通线路等复杂施工环境。然而悬臂浇筑过程涉及挂篮安装与行走、混凝土分段浇筑、预应力张拉、体系转换及合龙等复杂工序, 施工环节相互关联且技术难度高。挂篮系统的安全稳定、模板定位的精确性、混凝土材料性能的均匀性、预应力施加的准确性以及施工过程中的结构线形与应力状态控制, 均直接影响成桥质量与长期服役性能。任一环节的质量缺陷均可能引发结构裂缝、线形偏差、预应力损失甚至安全事故, 造成不可逆的工程损失。因此, 系统识别并严格控制悬臂浇筑施工全过程的关键质量控制点, 对保障桥梁结构安全可靠、线形流畅美观、耐久性能优良具有决定性意义。

1 施工准备基础控制

1.1 0号块施工质量控制

支架预压试验采用分级加载机制, 初始加载至20%设计荷载观测基础沉降, 后续按40%、60%、80%、100%、120%五级递增, 每级持荷期间每小时记录支架沉降数据直至变形稳定, 连续2小时沉降量 $\leq 0.1\text{ mm}$ ^[1]。典型预压数据显示, 非弹性变形主要集中于前三级加载, 占总变形70%, 弹性变形量约5 mm需在模板标高中补偿。

混凝土浇筑采用“先底板、再腹板、后顶板”的顺序, 底板厚度30 cm时坍落度控制在 $180\pm 20\text{ mm}$, 腹板因钢筋密集采用自密实混凝土扩展度 $\geq 650\text{ mm}$ ^[2]。振捣时避开预应力管道10 cm以上, 采用附着式振捣器辅助腹板振捣。养护阶段建立自动喷淋系统, 环境温度低于5℃时启用蒸汽养护, 升温速率 $\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, 恒温阶段控制60℃以内。预应力管道安装后采用内衬塑料管保证孔道通畅, 锚垫板后螺旋筋与网片钢筋焊接固定, 防止张拉局部承压破坏^[3]。

1.2 挂篮系统安装

挂篮主桁架采用双片三角桁架结构, 销轴连接间隙 $\leq 0.5\text{ mm}$, 安装后检测主桁中心线偏差 $\leq L/5\ 000$, L为跨度。底篮前后横梁设置10 mm预拱度, 吊带采用40Cr合金钢调质处理, 安装时用扭矩扳手控制预紧力至设计值 $\pm 5\%$ 。锚固系统精轧螺纹钢施加30%预应力消除间隙, 锚具夹片外露量统一为2~3 mm^[4]。预压试验采用砂袋或水箱模拟节段混凝土重量, 荷载分布按底板60%、顶板30%、翼缘板10%配置, 分级加载至最大施工荷载的130%。变形监测点布置于主桁前端、底篮四角及吊带连接处, 激光测距仪精度0.1 mm^[5]。典型预压数据表明, 主桁前端弹性变形8~12 mm, 与跨度正相关, 非弹性变形约2 mm需在首次浇筑前消除。荷载持荷24小时后变形稳定方可卸载, 变形观测记录表需包含时间—荷载—变形量对应关系, 作为后续节段立模标高动态调整的依据, 挂篮预压荷载分级及变形观测记录表如表1所示。

2 悬臂浇筑过程核心控制

2.1 模板安装

线形控制需建立实时反馈系统,典型测点布置于节段前端底板中心线、两侧翼缘板边缘及腹板顶部,形成空间坐标监测网络。挂篮前端变形值通过预压试验数据插值确定,例如跨度 40 m 挂篮前端弹性变形约 10 mm,需在立模时预先抬高补偿。已浇梁段变形监测发现,混凝土收缩徐变导致 3 天内产生 2~3 mm 挠度,需在立模计算中引入时间修正系数 $kt=1.0+0.05\ln(t)$, t 为浇筑后天数。模板安装后使用激光测距仪校验截面尺寸,腹板厚度容许偏差 +5 mm/-0 mm,顶板宽度偏差 $\leq \pm 10$ mm。施工中遇 6 级以上大风或温差超过 15 ℃时暂停调整作业,避免环境干扰导致测量失真,桥梁线形监控测点布置示意图如图 1 所示。

2.2 混凝土浇筑

混凝土采用 C50~C60 强度等级,胶凝材料总量 480~520 kg/m³,水胶比 0.30~0.33,掺入 25%~30% 粉煤灰及 8%~12% 膨胀剂控制收缩率 $\leq 300 \times 10^{-6}$ 。拌合物出机坍落度 180±20 mm,2 h 坍落度损失 ≤ 30 mm,初凝时间 ≥ 8 h 以满足分层浇筑需求。浇筑按“悬臂根部→端部”斜向分层推进,每层厚度 ≤ 30 cm,腹板区采用 $\Phi 50$ mm 高频振捣棒间距 40 cm 插入振捣,插

入深度穿透下层混凝土 5 cm^[6]。顶板混凝土收面采用激光整平机控制标高偏差 ≤ 3 mm。养护阶段覆盖复合土工布自动喷淋,水温与混凝土表面温差 ≤ 15 ℃,养护 7 天内表面湿度 $\geq 95\%$ 。重点监控腹板与底板倒角处,该区域易因应力集中产生温度裂缝,采用红外热成像仪控制内外温差 ≤ 20 ℃。混凝土原材料质量控制中水泥入罐温度需严控 ≤ 60 ℃,粗骨料采用 5~20 mm 连续级配碎石且针片状含量 $\leq 8\%$,细骨料细度模数稳定在 2.6 ± 0.2 。拌合阶段实施二级投料工艺,粉煤灰与膨胀剂经计量系统误差 $\leq 1\%$ 后与水泥同步投料,高效减水剂延迟 30 s 加入避免坍落度异常损失。腹板加腋区等钢筋密集部位采用 $\Phi 30$ mm 小型振捣棒配合模板附着式振捣器,振动频率提升至 12 000 次/分钟确保骨料无架空;倒角处初凝前实施二次抹压消除表面微裂缝,终凝后立即喷涂养护成膜剂形成密闭保水层。温度监控系统在倒角区预埋三层无线温度传感器,分别距表面 5 cm、25 cm 及 45 cm,当监测点温差达 18 ℃时自动启动雾化喷淋系统进行梯度降温,同时采用热流密度计检测混凝土散热速率 ≤ 45 W/m²。新浇节段与已硬化混凝土接茬面处理采用高压水枪冲毛露出粗骨料,并在浇筑前沿界面涂刷 1.2 kg/m² 水泥净浆增强粘结强度,接缝处额外增设 50 cm 宽钢丝网片抵抗收缩应力。

表 1 挂篮预压荷载分级及变形观测记录表

荷载阶段	荷载值 (kN)	持荷开始时间	持荷结束时间	主桁前端变形 (mm)	底篮左前角变形 (mm)	底篮右前角变形 (mm)
20%	850	8:00	10:00	1.2	0.8	0.9
50%	2 125	10:30	12:30	3.8	2.1	2.3
80%	3 400	13:00	15:00	6.5	3.7	3.9
100%	4 250	15:30	次日 8:00	8.1	4.6	4.8
120%	5 100	8:30	次日 8:30	9.7	5.5	5.7
卸载后	0	—	—	+0.3 (残余变形)	0.2	0.2

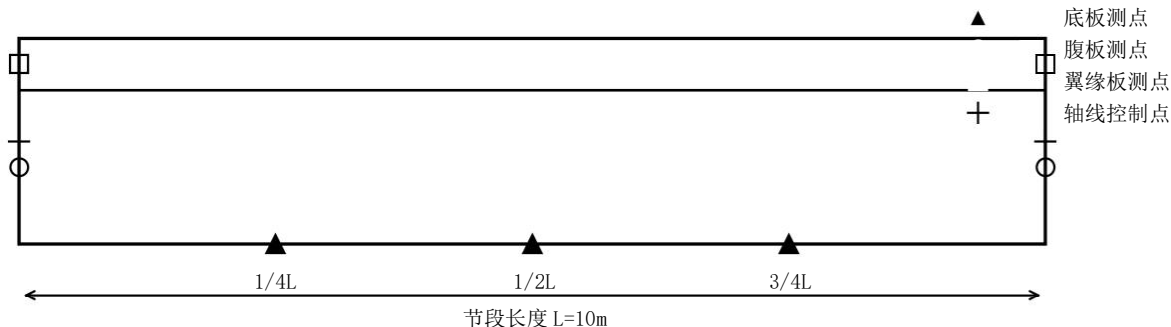


图 1 桥梁线形监控测点布置示意图

2.3 预应力施工质量控制

预应力管道采用 $\Phi 90$ mm 金属波纹管, 坐标偏差 ≤ 5 mm, 每米设置 U 形定位钢筋。钢绞线穿束前涂抹专用润滑剂减少摩阻损失, 穿束后采用风压 0.5 MPa 压缩空气清孔。张拉实施应力与伸长值双控, 理论伸长值计算基于胡克定律:

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{A \cdot E}$$

其中 P 为张拉力 (kN), L 为钢束有效长度 (m), A 为钢绞线截面积 ($140 \text{ mm}^2/\text{束}$), E 为弹性模量 ($1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$)。张拉分 $0 \rightarrow 0.2 \sigma_{\text{con}} \rightarrow 1.0 \sigma_{\text{con}}$ (持荷 5 min) $\rightarrow$ 锚固四级进行, 实测伸长值与理论值偏差控制在 $\pm 6\%$ 以内。孔道压浆采用真空辅助工艺, 浆液水胶比 $0.27 \sim 0.30$, 流动度 $25 \sim 30 \text{ s}$, 压浆压力 $0.5 \sim 0.7 \text{ MPa}$ 持荷 3 min。锚具槽内涂刷环氧树脂后采用 C50 微膨胀混凝土封锚, 保护层厚度 $\geq 50 \text{ mm}$ 。

3 特殊工况关键节点控制

3.1 合龙段施工控制

劲性骨架安装前需对合龙口进行 48 小时连续监测, 每 2 小时记录温度—宽度变化曲线, 确定宽度最小值出现时段作为锁定窗口。骨架与预埋钢板采用坡口焊全熔透连接, 焊缝高度 $\geq 16 \text{ mm}$ 并 100% 超声波探伤。配重水箱沿悬臂端对称布置, 容积误差 $\leq 1\%$, 通过液位传感器实时监控重量变化^[7]。混凝土浇筑前在合龙段两端设置可调节顶推装置, 施加 $200 \sim 500 \text{ kN}$ 预压力消除残余变形。浇筑过程监测悬臂端挠度变化, 采用变频泵控制浇筑速度, 使两侧悬臂端挠度差始终 $\leq 3 \text{ mm}$ 。初凝后立即覆盖双层保温棉, 控制降温速率 $\leq 2 \text{ }^\circ\text{C/h}$, 避免温度应力裂缝。张拉合龙束时采用交替分级张拉策略, 先施加 50% 控制应力平衡两侧内力, 再补张至 100%, 避免应力集中。

3.2 体系转换控制

临时支座解除遵循“先边跨后中跨、先次后主”的顺序, 千斤顶布置于永久支座两侧, 顶升力按设计反力的 120% 分级施加。每级顶升 5 mm 持荷 10 分钟, 同步采集梁体挠度、支座位移及应变数据, 控制相邻墩顶升高差 $\leq 2 \text{ mm}$ 。永久支座注浆采用无收缩环氧砂浆, 流动度 $\geq 300 \text{ mm}$, 注浆压力 0.2 MPa 持续至溢浆孔流出均匀浆体。转换过程中重点监测墩顶负弯矩区, 预埋振弦式应变计显示混凝土压应力增量 $\leq 3 \text{ MPa}$, 超出阈值时暂停施工调整顶升方案^[8]。成桥后 72 小时内进行全桥线形复测, 标高偏差验收标准为 $\pm L/5000$ (L 为跨径), 轴线偏差 $\leq 10 \text{ mm}$, 确保结构体系平稳

过渡至设计受力状态。体系转换过程中千斤顶同步控制实施高精度液压伺服系统, 相邻墩顶升高差动态监测采用激光位移传感器配合倾角仪, 采样频率 100 Hz, 确保实时偏差 $\leq 2 \text{ mm}$; 永久支座注浆前基面处理达到 Sa2.5 级喷砂粗糙度, 环氧砂浆添加纳米二氧化硅填料提升抗收缩性能, 注浆后 24 小时内埋设湿度传感器验证浆体固化均匀性。墩顶负弯矩区监测网络集成振弦式应变计与分布式光纤系统, 每 10 分钟采集混凝土微应变数据, 当压应力增量达 2.5 MPa 时自动预警并切换至冗余顶升单元, 避免局部应力集中引发结构损伤。

4 结束语

预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工质量控制系统性分析表明, 从 0 号块支架预压消除非弹性变形、挂篮系统弹性变形精确补偿, 到悬臂节段线形动态调整中融合历史挠度与实时监测数据, 再到混凝土配合比优化与预应力张拉双控实施, 直至合龙段劲性骨架锁定与体系转换的荷载平稳转移, 各环节质量控制关键点构成紧密衔接的技术链条。本文提出的挂篮预压分级加载机制、线形监测点网络布置方案、合龙温差补偿策略及体系转换顶升同步控制标准, 为工程实践提供了可量化的操作指南。这些控制要点的有效落实, 能显著降低结构裂缝发生概率, 将成桥线形偏差控制在 $L/5000$ 以内, 确保预应力有效传递率 $\geq 95\%$, 从而提升桥梁全寿命周期的安全性与耐久性。研究成果对规范悬臂浇筑施工工艺、预防质量事故、推动桥梁工程精细化建造具有实践参考价值。

参考文献:

- [1] 肖旭. 参数敏感性分析在预应力混凝土连续梁桥施工监控中的应用[J]. 西部交通科技, 2025(02):167-170,174.
- [2] 戴金顺. 大跨径预应力混凝土连续梁桥的施工控制研究[J]. 工程技术研究, 2025,10(04):122-124.
- [3] 张庆国. 基于有限元的预应力混凝土连续梁桥数值模拟与现场监测研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2025,43(02):123-127.
- [4] 田立群. 预应力混凝土连续梁桥悬臂现浇施工及质量控制研究[J]. 工程建设与设计, 2025(01):181-183.
- [5] 蒋洪涛, 孙铭辉, 王明. 大跨度预应力混凝土连续梁桥施工高程控制[J]. 山东交通科技, 2024(06):80-82,86.
- [6] 吴国军. 预应力混凝土连续梁桥悬臂施工控制研究[J]. 建筑机械, 2024(11):214-217.
- [7] 杜春伟. 预应力混凝土连续梁桥悬臂现浇施工技术研究[J]. 混凝土世界, 2024(10):56-59.
- [8] 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.