

公路桥梁悬臂浇筑施工工艺优化与质量控制技术

郭乾国

新疆维吾尔自治区交通运输厅规划设计研究中心 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 针对公路桥梁悬臂浇筑施工效率与质量难题, 本文以“逐段浇筑、对称受力”原理为核心, 系统分析施工关键工艺及现存问题。从施工效率视角优化节段划分、混凝土配比等工艺参数, 从结构安全维度重构工序衔接与质量校验流程。构建“准备-工序-监测”全流程质量控制体系, 整合技术参数定位、设备校准、动态监测等关键技术。通过GNSS定位、智能养护等手段实现施工过程精准管控, 有效解决挂篮移位偏差、混凝土开裂等问题, 为大跨度桥梁悬臂浇筑施工提供技术支撑。

关键词: 公路桥梁; 悬臂浇筑施工; 工艺优化; 质量控制技术

引言: 随着公路交通网向山区、跨水域延伸, 大跨度桥梁需求激增, 悬臂浇筑因无需支架、适应性强成为主流工艺。但实际施工中, 工艺协同不足、监测滞后等问题易导致效率低下、结构安全隐患。现有技术多侧重单一环节控制, 缺乏全流程优化思路。基于此, 本文聚焦悬臂浇筑施工工艺优化与质量控制, 结合施工实际挖掘核心问题, 构建针对性技术体系, 旨在提升施工效率与结构耐久性, 契合现代桥梁工程高质量建设需求, 具有重要实践意义。

1 公路桥梁悬臂浇筑施工技术核心原理

公路桥梁悬臂浇筑施工核心原理为“逐段浇筑、对称受力”, 依托临时支撑与预应力技术实现主梁无支架凌空成型, 本质是分节段浇筑混凝土, 以已完成节段为基础向跨中延伸, 适用于大跨度连续梁、刚构桥等。平衡控制是核心支撑, 施工以桥墩为中心对称开展, 需严控两侧节段浇筑重量偏差 $\leq 5\%$ 、进度偏差 ≤ 24 小时, 通过实时监测悬臂端挠度(精度 $\pm 0.1\text{mm}$)、轴线偏移量(精度 $\pm 0.5\text{mm}$)调整施工参数, 保障受力平衡。预应力集成技术是核心保障, 节段混凝土达设计强度后, 按“对称、分级”原则(20%、50%、80%、100%加载梯度)施加预应力, 通过钢束连接各节段, 抵消1.5-2.5MPa自重拉应力, 提升结构刚度与承载力。挂篮为核心设备, 需满足强度安全系数 ≥ 1.5 、刚度变形 $\leq L/4000$ 、稳定性安全系数 ≥ 2.0 , 具备 $\geq 0.5\text{m/min}$ 移动速度, 保障施工连续安全^[1]。

2 公路桥梁悬臂浇筑施工关键工艺及现存问题分析

2.1 核心施工关键工艺

悬臂浇筑施工关键工艺以挂篮作业为核心, 涵盖节段划分、模板安装、混凝土浇筑及预应力施工等环环相扣的环节, 各环节控制精度直接决定施工质量。(1) 节

段划分需结合桥梁跨度、结构受力特性及施工设备能力, 0号段长度通常控制在6-9m(跨径 $\leq 50\text{m}$ 桥梁取6-7m, 跨径50-100m桥梁取8-9m), 以满足挂篮对称安装需求, 悬臂段长度取3-4.5m, 通过增加梁段数量优化预应力配束, 避免大吨位钢束引发局部应力集中, 确保各节段重量偏差 $\leq 3\%$ 以减少施工荷载突变。(2) 模板安装前需清除表面锈迹(锈蚀厚度 $\leq 0.1\text{mm}$)并涂刷脱模剂, 通过调整挂篮锚固系统控制模板标高偏差 $\leq 3\text{mm}$ 、轴线偏差 $\leq 5\text{mm}$, 侧模对拉螺杆扭矩需达350-450N·m消除接缝错台(错台量 $\leq 1\text{mm}$), 堵头模板拉杆焊接强度 $\geq 15\text{MPa}$, 确保预应力管道位置偏差 $\leq 3\text{mm}$ 。(3) 混凝土浇筑采用分层对称推进方式, 每层厚度30-40cm, 控制浇筑速度 $2.5 \pm 0.5\text{m}^3/\text{小时}$, 振捣深度达下层5-8cm且时间维持 25 ± 5 秒; 浇筑后用土工布覆盖保湿, 高温($\geq 35^\circ\text{C}$)设遮阳棚(降温幅度 $\geq 5^\circ\text{C}$)、低温($\leq 5^\circ\text{C}$)加保温层(升温幅度 $\geq 10^\circ\text{C}$), 确保温湿度稳定(相对湿度 $\geq 90\%$)利于强度增长, 浇筑后7天强度达标设计值的60%以上。(4) 预应力施工需待混凝土强度达设计值80%、弹性模量达设计值90%后进行, 按对称分级原则控制张拉力偏差 $\leq \pm 5\%$ 、伸长量偏差 $\leq \pm 6\%$, 张拉完成24小时内采用0.5-0.7MPa压力进行孔道压浆, 浆体流动度控制在10-17s, 确保预应力体系密封性。

2.2 施工现存主要问题

当前悬臂浇筑施工中存在的问题集中于工艺协同性与现场管控两方面。(1) 工艺衔接上, 挂篮移动与模板调整的同步性不足, 易导致节段衔接处出现2-3mm错台, 增加后续修补工作量(单处修补耗时 ≥ 2 小时); 混凝土浇筑与预应力施加的时间间隔控制不当, 若混凝土强度未达标(低于设计值75%)即张拉, 易引发结构开裂(裂缝宽度可达0.15-0.3mm), 强度过高(超过设计值90%)

则延长施工周期2-3天。(2)现场管控中,施工监测数据反馈滞后(滞后时间 ≥ 30 分钟),挠度、轴线等关键参数的实时监测与施工调整存在时间差,难以动态纠正偏差;材料质量波动影响施工质量,砂石骨料级配波动幅度 $\geq 10\%$ 、水泥水化热峰值 $\geq 70^\circ\text{C}$,易导致混凝土收缩开裂(收缩率可达0.0003-0.0005),而预应力钢束锈蚀速率超过0.02mm/年则直接威胁结构安全。施工人员操作规范性不足,振捣不到位(密实度低于95%)、张拉工艺执行偏差(张拉力偏差超 $\pm 8\%$)等人为因素,进一步放大了施工质量风险^[2]。

3 悬臂浇筑施工工艺优化

3.1 基于施工效率的悬臂浇筑工艺参数优化

工艺参数优化依托施工设备性能与结构设计要求,聚焦节段划分、混凝土配比及挂篮运行关键环节,通过精准调控精简工序。(1)节段划分参数:打破均等长度惯例,结合挂篮承载上限($\leq 35\text{t}$)与搅拌站产能($\geq 30\text{m}^3/\text{小时}$)动态调整,节段长度控制在4-5米,单节段混凝土方量稳定在 27 ± 3 立方米,匹配3-4辆8-10 m^3 运输车辆,将待料间隙压缩至 ≤ 30 分钟。(2)混凝土性能参数:选用掺量0.8-1.2%的聚羧酸系高效减水剂优化配合比,水灰比降至0.36-0.39,初凝时间设定为6-8小时适配浇筑周期;控制入模坍落度 $180 \pm 20\text{mm}$ 、扩展度 $\geq 500\text{mm}$,兼顾流动性与和易性,单节段振捣时间缩短20%。(3)挂篮作业参数:采用砂袋分级预压替代传统水箱预压,按设计荷载1.2倍分3级(40%、80%、120%)加载,每级静置30分钟监测变形,预压时间压缩至24小时;优化行走系统,增设导向轮与同步驱动装置,挂篮移位就位时间从8小时缩短至4小时,轴线偏差控制在5mm内,行走速度提升至0.8m/min,提升各环节衔接效率。

3.2 面向结构安全的悬臂浇筑施工流程优化

流程优化以风险防控为核心,重构工序逻辑、强化过程校验,构建“衔接紧密、动态可控”的施工体系。(1)工序衔接流程:建立“混凝土养护-强度检测-预应力张拉”闭环机制,浇筑后启动智能温控养护系统,实时监测核心区温度(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)与强度(每2小时检测1次),强度达设计值80%时触发张拉预警;明确张拉完成且孔道压浆强度达设计值75%后,方可进行挂篮移位,避免结构处于无预应力保护状态(承载力下降40%以上)。(2)质量校验流程:模板安装实施“班组初调+技术精校”双检制,初调后用全站仪(测角精度 $\pm 2''$)复核轴线,精校时用水准仪(精度 $\pm 1\text{mm}$)控制标高,确保偏差 $\leq 3\text{mm}$;混凝土浇筑中嵌入振捣监测,通过手持振捣仪实时记录频率(50-70Hz)与深度,避免漏振或过振。

(3)动态调整流程:实时采集悬臂端挠度、结构应力及环境数据,建立参数关联模型,挠度偏差超3mm时,按偏差值1.2倍自动调整下节段浇筑高度;极端天气优化施工时段,高温($\geq 35^\circ\text{C}$)选择夜间22:00-次日6:00浇筑并控制喷淋降温速率 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{小时}$,低温($\leq 5^\circ\text{C}$)采取保温覆盖并将养护周期延长至21天^[3]。

4 公路桥梁悬臂浇筑施工质量控制关键技术

4.1 施工准备阶段质量奠基技术

施工准备阶段需从技术参数、资源质量、设备校准三方面构建闭环管控,消除前期风险。(1)技术参数精准定位:依据设计图纸与地质报告,采用Midas/Civil有限元软件模拟各节段受力,确定混凝土浇筑重量(偏差 $\leq 2\%$)、张拉控制力(偏差 $\leq \pm 3\%$)等核心参数。针对曲线或变截面梁体,重点核算悬臂端挠度预拱度(取值为计算挠度的1.1-1.2倍),结合温度预留调整量(每 10°C 预留2mm),确保偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内;同步编制施工方案,明确工序衔接标准及关键工序停止点检查要求。(2)资源质量全流程管控:建立材料进场“双检”制,进场前核查资质与合格证,进场后抽样检测——砂石含泥量 $\leq 2\%$ 、针片状含量 $\leq 15\%$ 、压碎值 $\leq 25\%$;水泥选用匹配强度等级的硅酸盐水泥,每200吨检测强度与安定性,初凝时间 ≥ 45 分钟;钢绞线抗拉强度 $\geq 1860\text{MPa}$,无锈蚀裂痕。混凝土采用自动化计量搅拌(精度 $\pm 1\%$),水灰比控制在0.36-0.39,外加剂掺量误差 $\leq 0.5\%$,每工作班制作3组 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 试块追踪强度。(3)施工设备校准调试:挂篮安装后以1.2倍设计荷载砂袋分级预压,每级静置30分钟监测变形(允许变形 $\leq L/4000$);振捣设备调试至频率50-70Hz、有效作用半径 $\leq 30\text{cm}$;张拉设备半年校准一次,采用张拉力与伸长量双控(伸长量偏差 $\leq \pm 6\%$);模板安装前核查平整度(偏差 $\leq 2\text{mm}/\text{m}$),接缝采用密封胶防漏浆。

4.2 核心施工工序质量管控技术

针对挂篮作业、混凝土施工、预应力施加等核心工序,制定专项控制技术确保质量达标。(1)挂篮作业精准控制:移动前核查锚固螺栓扭矩(达设计值1.1倍,400-500 $\text{N} \cdot \text{m}$),采用同步驱动装置控制两侧移动速度差 $\leq 5\text{cm}/\text{min}$;就位后通过全站仪与水准仪联合定位,确保轴线偏差 $\leq 5\text{mm}$ 、标高偏差 $\leq 3\text{mm}$,定位后复核螺栓紧固度。施工中每浇筑30cm混凝土记录一次挠度数据,变形 $\geq 5\text{mm}$ 时立即停工调整。(2)混凝土施工质量控制:采用分层对称浇筑方式,每层厚度30-40cm,两侧悬臂端高度差 $\leq 50\text{cm}$,按“悬臂端向桥墩”方向推进(速度 $\leq 0.5\text{m}/\text{h}$)。振捣选用插入式振捣棒,时间控制在 25 ± 5

秒,插入下层深度 $\geq 5\text{cm}$;浇筑完成后采用土工布覆盖保湿养护 ≥ 14 天,高温设遮阳棚、低温采取保温措施,严控内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$,防止裂缝宽度超过 0.2mm 。(3)预应力施加精细化控制:钢束穿束前用通孔器清理孔道,确保顺直无扭曲。混凝土强度达设计值80%、弹性模量达90%后,按“20%-50%-80%-100%”分级对称张拉,每级静置2分钟观察变形,实时记录张拉力与伸长量(偏差 $\leq \pm 6\%$),超标时核查孔道摩阻(系数 ≤ 0.25)等因素并处理。张拉完成24小时内采用真空辅助压浆技术(真空度 $\leq -0.06\text{MPa}$),控制压浆压力 $0.5\text{--}0.7\text{MPa}$,完成后及时封堵锚具。(4)节段衔接质量控制:相邻节段端面凿毛深度 $\geq 5\text{mm}$ 、面积 $\geq 75\%$,铺设 $1\text{--}2\text{cm}$ 厚水灰比 0.4 的水泥净浆;模板衔接处设定位销,确保轴线对齐、接缝宽度 $\leq 2\text{mm}$;浇筑时加强衔接面振捣,出现 $\geq 0.2\text{mm}$ 缝隙及时压力注浆处理。

4.3 施工过程动态监测控制技术

依托智能化手段实时监测结构状态与环境因素,实现质量问题早发现、早处理。(1)结构变形与应力监测:在悬臂端及跨中每节段布设 ≥ 2 个位移监测点,采用GNSS系统采集挠度数据(精度 $\pm 0.1\text{mm}$),常规每小时1次、浇筑时每15分钟1次,挠度偏差超 3mm 触发预警;梁体关键截面粘贴 ≥ 4 个应变片,应力达设计值90%时停工加固;用全站仪复测轴线偏移(精度 $\pm 2''$),确保偏差 $\leq L/5000$ (L 为跨径)。(2)环境与施工参数监测:安装温湿度传感器(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 5\%\text{RH}$),高温($\geq 35^\circ\text{C}$)夜间浇筑并喷淋降温(幅度 $\geq 5^\circ\text{C}$),低温($\leq 5^\circ\text{C}$)停工采用蒸汽养护(温度 $\geq 10^\circ\text{C}$);混凝土内部埋设温度传

感器(深度为截面厚度 $1/2$),内外温差超 25°C 时调整养护措施(降温速率 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{小时}$)。通过智能平台自动采集浇筑速度、振捣时间等参数,异常时实时提醒调整。(3)质量问题闭环处理:建立监测数据与质量问题联动机制,裂缝 $\leq 0.2\text{mm}$ 时采用环氧树脂封闭, $> 0.2\text{mm}$ 时压力注浆($0.3\text{--}0.5\text{MPa}$);预应力张拉偏差时校准设备并补张拉(不超过设计值5%)。整改后复检合格方可进入下道工序,全程记录形成管控台账^[4]。

结束语:本文围绕公路桥梁悬臂浇筑施工,明确了“对称受力、预应力集成”核心原理,优化了工艺参数与施工流程,建立了全周期质量控制技术体系。通过参数精准调控、工序闭环管理及智能监测应用,有效解决了施工中的效率与安全矛盾。研究表明,科学的工艺优化与精准的质量控制可显著提升施工质量。后续可进一步探索AI算法在监测数据预测中的应用,结合新型材料研发更高效的施工技术,推动悬臂浇筑工艺向智能化、绿色化方向发展。

参考文献:

- [1]何理.高速公路桥梁悬臂挂篮浇筑施工技术应用探讨[J].低碳世界,2025,15(4):133-135.
- [2]袁海龙.基于悬臂浇筑技术的高速公路连续梁桥施工研究[J].工程建设与设计,2025(8):201-203.
- [3]许龙成.连续梁桥悬臂现浇施工技术要点分析[J].工程技术研究,2025,10(9):55-57.
- [4]李磊.跨高速公路连续梁悬臂浇筑法施工技术研究[J].工程技术研究,2024,9(17):40-42.