

预应力混凝土连续梁桥施工控制分析

苏兆叶

中国葛洲坝集团路桥工程有限公司 湖北 宜昌 443000

摘要: 预应力混凝土连续梁桥悬臂施工工序复杂, 受力与线形动态变化显著, 施工控制是保障成桥质量的核心。本文依托桥梁施工控制基础理论, 围绕挂篮施工、混凝土浇筑、预应力张拉、合龙施工等关键工序展开管控分析, 结合MidasCivil数值模拟与现场监测数据, 剖析参数、施工、理论三类误差成因, 提出线形、应力、稳定性全方位优化管控措施, 可为同类桥梁施工质量控制提供参考。

关键词: 预应力混凝土; 连续梁桥; 施工控制

引言: 预应力混凝土连续梁桥凭借刚度大、变形小、行车平顺性佳等优势, 被广泛应用于交通建设工程。该桥梁多采用悬臂分节段施工, 施工过程中存在体系转换频繁、应力线形易偏差、结构稳定性风险突出等问题。为规避施工质量缺陷与结构安全隐患, 规范施工全过程管控, 本文系统梳理其施工控制理论与关键工序要点, 结合监测与数值模拟手段分析施工误差, 制定精细化控制优化方案。

1 预应力混凝土连续梁桥施工控制基础理论

1.1 结构受力与变形基本原理

(1) 预应力混凝土结构受力机理、预压应力传递规律: 该结构核心受力机理为通过预应力筋张拉, 人为向梁体混凝土施加预压应力, 抵消运营阶段荷载产生的拉应力, 避免混凝土开裂。预压应力沿预应力筋线形逐步传递, 从张拉端向锚固端扩散, 随混凝土固结收缩、预应力筋松弛产生小幅应力损耗, 整体呈均匀衰减的传递特征。(2) 连续梁桥施工阶段变形、挠度及内力变化特性: 桥梁采用分节段施工, 施工过程中梁体自重、挂篮荷载、预应力作用会持续改变结构内力分布。各节段浇筑、张拉工序会引发阶段性挠度变形, 呈现分段累积、动态变化的特点, 同时结构内力会随体系转换不断重分布, 最终形成整体受力体系。

1.2 施工控制核心内容

(1) 线形控制: 核心管控立模标高精准设置、各施工节段线形平顺度, 动态修正施工偏差, 保障节段衔接顺畅, 最终实现成桥整体线形符合设计要求, 避免出现起伏、偏移等问题。(2) 应力控制: 全程监测主梁截面混凝土应力与预应力筋张拉应力, 严格管控张拉吨位、伸长值, 杜绝超张拉、欠张拉问题, 确保梁体应力处于规范限值, 防止结构出现应力损伤。(3) 稳定控制: 重点防控施工阶段挂篮滑移、倾覆风险, 实时监测梁体整

体受力状态, 排查结构失稳隐患, 保障施工全过程挂篮与梁体结构的整体稳定性^[1]。

1.3 常用施工控制方法

(1) 开环、闭环控制法: 开环控制依据理论参数预设施工方案, 无实时修正环节, 适用于地形、工况简单的桥梁施工; 闭环控制依托实时监测数据动态调整施工参数, 适配工况复杂的施工场景。(2) 自适应施工控制法: 具备参数自适应修正、误差动态补偿的技术优势, 可自动修正理论计算与实际施工的偏差, 应用流程为数据监测、参数分析、模型修正、施工优化, 是连续梁桥主流控制技术。

2 预应力混凝土连续梁桥施工关键工序控制分析

2.1 挂篮施工与模板线形控制

(1) 挂篮安装、预压试验流程及变形量测定方法: 挂篮是悬臂施工的核心承重设备, 安装前需核查构件尺寸、焊缝质量与连接件完整性, 严格按照拼装顺序完成主桁架、底模平台、锚固系统及行走系统的安装, 安装后全面检查锚固可靠性与整体垂直度。挂篮预压试验是消除非弹性变形、测定弹性变形的关键工序, 多采用沙袋、水箱分级加载方式, 模拟最大节段施工荷载。加载过程分级进行, 每级荷载稳压一定时间后观测记录数据, 满载稳压后分级卸载, 通过对比加载、卸载前后的标高数据, 精准测算出挂篮非弹性变形与弹性变形数值, 为后续立模标高计算提供基础参数^[2]。(2) 模板安装精度管控、立模标高计算与动态调整方法: 模板安装需重点把控平整度、垂直度及拼缝严密性, 严控模板错台、缝隙漏浆等问题, 确保梁体截面尺寸符合设计要求。立模标高需结合设计标高、挂篮弹性变形、混凝土收缩徐变、预应力张拉变形及施工温差等多项参数综合计算。施工过程中受环境温度、荷载变化、施工误差等因素影响, 线形易出现偏差, 需依托实时监测数据, 对

后续节段立模标高进行动态修正,逐步消除累积偏差,保障梁体线形平顺连贯。

2.2 混凝土浇筑施工控制

(1) 混凝土配比、浇筑顺序、振捣工艺质量控制要点:桥梁主梁混凝土需采用高强度、低收缩的专用配比,严格控制水胶比、骨料级配及外加剂掺量,保证混凝土强度、和易性与密实度达标。浇筑遵循“对称分层、循序渐进”的原则,从挂篮前端向根部分层浇筑,避免单侧荷载过大造成挂篮偏移、梁体受力不均。振捣采用插入式振捣器,把控振捣间距与深度,杜绝漏振、过振问题,防止出现蜂窝、麻面、空洞等质量缺陷,确保梁体混凝土整体密实均匀。(2) 混凝土收缩徐变特性对梁体变形的影响及防控措施:混凝土收缩徐变是引发梁体后期变形、线形偏差的重要因素。混凝土硬化过程中的收缩会造成梁体表层收缩变形,长期徐变则会在预应力与恒载作用下引发梁体持续下挠,导致成桥线形超标、结构内力偏移。防控需从源头把控,优化混凝土配比,减少水泥用量、掺入优质粉煤灰;严格控制浇筑温度,做好浇筑后保温保湿养护;同时优化施工工序,合理安排张拉时机,降低收缩徐变对梁体线形和结构受力的不利影响^[3]。

2.3 预应力张拉施工控制

(1) 预应力筋穿束、张拉设备标定与参数设定:预应力筋穿束前需清理孔道杂物、检查钢绞线外观质量,采用人工或机械匀速穿束,避免钢绞线缠绕、破损。张拉设备需定期送检标定,千斤顶、油压表配套校验,确保设备精度满足施工规范要求。施工前根据设计张拉力、梁体结构尺寸及钢绞线参数,精准设定张拉控制应力、理论伸长值等核心参数,杜绝参数设置偏差引发施工质量问题的。(2) 分级张拉工艺、张拉力与伸长量双控标准:施工采用分级张拉工艺,按照初张拉、分级升压、稳压、锚固的流程施工,逐级施加张拉力,保证预应力均匀传递。施工严格执行双控标准,以张拉力控制为主、伸长值校核为辅,实际伸长值与理论伸长值偏差需控制在规范允许范围内,若偏差超标,立即暂停施工,排查孔道摩擦、钢绞线异常等问题,整改完成后方可继续施工^[4]。(3) 预应力损失类型、产生原因及补偿控制措施:预应力损失主要包括孔道摩擦损失、锚具变形损失、钢绞线松弛损失及混凝土收缩徐变损失。其中,孔道摩擦损失源于钢绞线与孔道壁的摩擦阻力,锚具损失由锚固压缩变形导致,松弛与收缩徐变损失为材料固有特性引发。施工中可通过优化孔道线形、打磨孔道内壁减少摩擦损失;选用高品质锚具,规范锚固操作

降低锚具变形损失;同时结合实测损失数据,适当超张拉补偿预应力损耗,保障预应力施加效果达标。

2.4 合龙段施工控制

(1) 合龙时机、温度选取及配重管控要求:合龙是连续梁桥体系转换的关键工序,需选取气温稳定的夜间低温时段施工,规避高温温差引发的梁体伸缩变形。合龙时机需结合施工进度、梁体变形监测数据确定,保证两端梁体线形、标高匹配。合龙前需在两端梁体设置对称配重,模拟后期施工荷载,平衡梁体悬臂受力状态,抑制合龙段施工过程中的挠度突变,保障合龙精度。

(2) 合龙段混凝土浇筑、预应力张拉及体系转换控制要点:合龙段混凝土需选用微膨胀、低收缩专用混凝土,快速完成浇筑、振捣及养护作业,缩短施工间隔,避免新旧混凝土结合面出现裂缝。混凝土强度达到设计标准后,及时进行合龙段预应力张拉,遵循分级张拉、对称张拉原则,确保预应力均匀受力。张拉完成后逐步拆除临时锚固装置,完成桥梁体系转换,实现悬臂施工状态向连续梁整体受力体系的平稳过渡,保障桥梁整体结构稳定性。

3 预应力混凝土连续梁桥施工监测、误差分析与控制优化

3.1 施工监测方案设计

(1) 线形监测:保障成桥平顺性。测点对称布设于主梁悬臂节段、墩顶、合龙段等关键位置,覆盖梁顶、梁底控制断面。正常施工状态下每节段施工及预应力张拉后各测一次,温度变化大或合龙施工时加密频次。采用高精度水准仪、全站仪测量标高与轴线偏位,同步记录环境温度与工况,为线形调控提供依据。(2) 应力监测:依托振弦式应力传感器开展全过程监测。传感器优先布设于墩顶、跨中、预应力锚固区等应力集中断面,严格控制安装工艺。定期采集应力数据,对比设计理论值,分析受力变化规律,识别应力异常或超限问题,预判结构风险,保障梁体安全。(3) 稳定性监测:以梁体位移、墩身沉降及整体变形为核心,跟踪悬臂施工中竖向挠度、水平位移与桥墩沉降变化。通过全天候动态监测,捕捉挂篮行走、混凝土浇筑、预应力张拉等关键工序的结构变形数据,判断梁体与墩身的稳定状态,防控悬臂端位移超标及不均匀沉降引发的失稳隐患。

3.2 施工控制数值模拟分析

(1) 基于MidasCivil的桥梁施工阶段模型构建:依托MidasCivil有限元软件建立桥梁精细化数值模型,依据桥梁设计参数定义主梁、桥墩、挂篮等构件材料属性与截面特性。严格按照实际施工工序,模拟挂篮拼装、节

段浇筑、预应力张拉、体系转换、合龙施工等全过程工况,精准赋值自重、预应力、施工荷载、温度作用等参数,保证模型与实际施工状态高度契合。(2)各施工阶段内力、线形模拟结果与理论值对比分析:模型构建完成后,计算输出各施工阶段主梁内力、截面应力、节段挠度等模拟数据,将数值模拟结果与设计理论值、现场实测数据进行多维度对比。分析数据偏差规律,明确施工过程中内力重分布、线形变化的变化特征,验证施工方案合理性,同时为误差溯源与参数修正提供数据支撑。

3.3 施工误差来源与成因分析

(1)参数误差:参数误差主要源于工程材料与环境变量的不确定性,混凝土弹性模量、容重、收缩徐变参数与理论取值存在偏差,钢绞线松弛性能存在个体差异。同时,施工现场昼夜温差、日照温度梯度变化,以及施工临时荷载取值预估偏差,都会导致结构受力与变形偏离理论计算状态,产生初始参数误差。(2)施工误差:施工误差属于现场实操性误差,人工立模定位、张拉操作、振捣养护的精细化程度不足,易造成工序偏差。此外,全站仪、千斤顶等施工监测设备精度损耗、未及时标定,以及各施工工序衔接不顺畅、施工节奏把控不当,会持续累积偏差,影响桥梁施工精度^[5]。(3)理论误差:理论误差源于计算模型的局限性,数值建模过程中会对结构边界条件、复杂受力状态进行简化处理,无法完全还原施工现场复杂工况。同时,部分计算参数采用规范通用取值,未结合现场材料、施工实际情况动态修正,导致理论计算与工程实际存在固有偏差。

3.4 施工控制优化措施

(1)线形偏差动态修正、立模标高实时调整策略:建立线形动态调控机制,基于现场监测数据与数值模拟结果,实时分析节段线形偏差。针对已出现的挠度、轴线偏位偏差,对后续节段立模标高进行反向修正,抵消累积施工误差,同时结合温度变化规律选择适宜立模时

段,保障成桥线形平顺达标。(2)预应力张拉精度优化、应力偏差防控方案:严格落实张拉设备定期标定制度,优化分级张拉工艺流程,规范穿束、张拉、锚固全流程操作。采用张拉力与伸长量双控模式,针对预应力损耗偏差及时开展补偿张拉,精准把控梁体截面应力,杜绝应力超限、预应力不足等问题,提升预应力施工精度。(3)施工全过程精细化管控与质量保障体系构建:完善施工全过程管控机制,细化各工序施工标准与监测要求,落实专人专项监测、数据实时归档制度。优化材料进场检验、设备运维、工序验收流程,建立监测、分析、修正、复核的闭环管控体系,从源头减少施工误差,全面提升桥梁施工质量与结构稳定性。

结束语

本文系统完成了预应力混凝土连续梁桥施工控制的全流程分析,明确了各关键工序的管控重点与施工误差核心成因,形成了集监测、模拟、纠偏、优化于一体的闭环控制体系。通过精细化管控可有效改善梁体线形、精准控制结构应力、保障施工整体稳定。研究成果有效解决了悬臂施工中的常见质量偏差问题,对提升连续梁桥施工质量与结构耐久性具有实际工程应用价值。

参考文献

- [1]周学甫,杨斌.大跨度预应力混凝土连续梁桥施工控制[J].工程技术研究,2025,10(19):169-171.
- [2]傅海华,胡敏.大跨度预应力混凝土连续梁桥施工控制技术应用研究[J].建筑机械,2023,14(8):101-107.
- [3]王洪涛.大跨度预应力混凝土连续梁桥施工控制研究[J].民营科技,2023,18(4):115-118.
- [4]查李剑.大跨径预应力混凝土连续梁桥施工监控技术研究[J].价值工程,2025,44(1):62-64.
- [5]田火锋.悬臂现浇预应力混凝土连续梁桥施工技术研究[J].交通世界,2024,7(24):113-115.