高墩大跨径钢结构桥梁施工技术 及质量控制要点探析

李 键¹, 陶 玲^{2*}

(1. 四川蜀道高速公路集团有限公司, 四川 成都 610000;
2. 四川成德南高速公路有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要 高墩大跨径钢结构桥梁的施工技术包括空心建造高墩薄壁、平衡悬臂浇筑配重、调整顶推工艺应力以及控制合龙段温度, 需要施工方结合必要的质量控制手段, 保障桥梁结构的安全性达标。本文立足高墩大跨径钢结构桥梁的施工要求, 从高墩大跨径钢结构桥梁施工技术出发, 分别就“精准调控工艺参数”“全程追溯材料性能”“动态纠偏结构变形”等策略, 提出具体实践方法, 旨在深入探讨施工工艺与质量管控的耦合机制, 为在复杂条件下建设高质量的钢结构桥梁提供参考。

关键词 高墩大跨径钢结构桥梁; 平衡悬臂浇筑配重技术; 空心建造高墩薄壁技术; 协调合龙段应力技术

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.16.019

0 引言

高墩大跨径钢结构桥梁能够跨越峡谷等复杂地形, 面临结构稳定性、几何精度与耐久性等多重挑战, 需要在克服高空作业风险的同时, 有效控制各个施工环节的质量, 进而提高结构的服役性能。而传统施工方法在应对各类问题时存在局限性, 要求施工方创新工艺, 并以数字化管控模式提升施工精度。为此, 施工方应探索完善质量控制体系的实践路径, 协同管理施工技术与质量控制目标, 构建能够动态监测施工过程的系统化解决方案。

1 高墩大跨径钢结构桥梁的施工要求

高墩大跨径钢结构桥梁工程要求优先保证高墩与大跨度钢结构的协同受力状态, 并且需要调节平衡非对称荷载, 精准施加水平推力, 以此优化桥墩的应力分布。高墩施工则要求采用翻模、爬模或滑模工艺建造薄壁空心墩, 并配备相应设施, 保障高空作业的效率。在拼装钢结构时, 施工方需要控制构件加工的精度, 使用双面焊工艺完成焊接作业, 避免焊缝夹渣或存在未熔合的缺陷^[1]。浇筑大体积的混凝土时, 则应分层振捣, 并布设冷却水管, 同步使用补偿收缩材料, 以此降低开裂的风险。施工方全程皆需要落实同步配重卸载机制, 保障悬臂段标高与设计线形一致, 并设置封闭式作业平台, 验证临时墩支架的承载能力, 同

时在高风速施工环境强化加固措施。成桥后, 也需持续监测跨中挠度变化, 借助调整预应力的手段, 保障结构的耐久性。

2 高墩大跨径钢结构桥梁施工技术

2.1 平衡悬臂浇筑配重技术

平衡悬臂浇筑配重技术的核心在于借助配重调节稳定结构。该技术采用非对称悬浇工艺, 在边跨悬臂段设置配重块或水箱, 抵消中弯矩差异并保障主梁线形平顺。而顶推技术则借助液压系统, 施加水平推力, 进而调整桥墩的应力分布并减少墩身偏位的风险。合龙段施工阶段, 施工方需在低温时段焊接劲性骨架, 借助临时约束装置固定主梁端部, 并控制热胀冷缩引起的变形, 保证混凝土在浇筑后处于受压终凝状态。在施工全过程中, 均需保持增减配重与延伸悬臂段同步, 借助位移传感器实时监测梁体的标高变化, 以此动态调整配重比例。完成混凝土浇筑工序后, 施工方要分阶段同步卸载配重, 避免因荷载突变, 导致主梁开裂或桥墩应力集中, 并运用双面连续焊缝工艺焊接劲性骨架, 优先处理腹板与翼缘板的连接节点, 提高骨架的整体刚度^[2]。在施工过程中, 施工方也要持续监测环境变化, 动态调整作业时段, 避免外部因素干扰结构的稳定性。

2.2 空心建造高墩薄壁技术

建造高墩薄壁空心技术依托模板工艺, 能有效改

*本文通信作者, E-mail: 504564479@qq.com。

善高墩结构的稳定性,需要施工方使用翻模、爬模或滑模工艺,逐节浇筑薄壁空心墩。具体而言,施工方应借助翻模工艺分层支模,同时借助爬模工艺整体抬升模板,并利用滑模工艺保证墩身的连续性。与此同时,也要借助全站仪实时监测墩身的轴线偏差,并借助千斤调模板位置,保障墩身倾斜度符合规范限值。在高空作业中,施工方要预埋塔吊基座,配置封闭式操作平台,提升材料运输效率,同时选择格构式钢结构支架,以斜撑的方式增强整体刚度。而在施工前,还需完成预压试验,避免支架非弹性变形,同时在墩顶预埋反力架,以此为挂篮底模提供刚性支撑。浇筑混凝土阶段,则要运用分层振捣工艺,控制每层厚度均在振动棒作用的范围内,并在墩身内腔布设冷却水管,在外表面覆盖养护毯,以此控制湿度梯度。

2.3 协调合龙段应力技术

协调合龙段应力技术依托力学平衡卢纶,能够有效控制变形现象,以此保障桥梁结构具有连续性。施工方需要选择昼夜温差较小的施工时段,锁定劲性骨架并借助临时约束装置,固定主梁端部,同时优化焊接顺序,减少残余应力。在浇筑混凝土前,需安装微膨胀补偿收缩材料,而在分层浇筑时,则要控制振捣的深度与密实度,并同步调整配重块的卸载速率。焊接劲性骨架后,施工方要布设温度传感器,以此监测焊缝区域的热循环,同时利用防风棚,降低环境气流的干扰,避免焊接变形。合龙段混凝土终凝后,需分阶段解除临时约束,借助液压千斤顶调整跨中应力分布,消除施工阶段附加的弯矩^[3]。完成施工后,施工方还要持续监测跨桥面的铺装状态,在发现异常后借助预应力钢束二次张拉,以此恢复结构受力的平衡。

2.4 协同控制线形精度技术

协同控制线形精度技术依托多维度监测,有助于施工方动态调整施工方案,以此精准控制桥梁几何形态。具体而言,施工方在施工过程中借助GPS定位系统、全站仪与电子水准仪构建实时监测网络,采集高程、位移与扭转数据,进而建立能够动态预测线形偏差的模型。基于此模型,施工方需要在悬臂浇筑阶段,借助液压千斤顶调节挂篮前支点高度,修正模板预拱度,并使用多级加载工艺,在分阶段施加顶推力的同时监测墩身偏位,运用变形反演算法,优化后续的顶推参数。在安装模板前,需完成预压试验,消除支架的非弹性变形,并在浇筑过程中采用分层振捣工艺,控制混凝土的坍落度,避免因骨料离析导致截面尺寸出现偏差。在墩身施工中,则要使用激光垂准仪校准模板轴线,每浇筑节段后,便复测垂直度,借助微调螺栓纠正累积的误差。锁定合龙段前,施工方应连续监测昼夜温差,

建立温度—线形补偿曲线,以此确定焊接劲性骨架的时机,并优化释放约束力的顺序。

3 提升高墩大跨径钢结构桥梁施工质量的策略

3.1 精准调控工艺参数

施工方应安装高精度的传感器,以此采集液压顶推系统的压力值,并结合算法模型,进一步优化参数组合。在顶推施工阶段,需要采用闭环控制系统,依据滑移轨道变形反馈,动态调整千斤顶的顶推速度。而在焊接作业中,则要建立电流—电压匹配曲线,借助红外热成像仪监测焊缝区域的温度分布,进而调整焊枪的行走速率^[4]。在混凝土浇筑环节,施工方需要借助坍落度仪,实时检测拌合物的流动性,调整振捣棒插入的深度,控制分层浇筑的厚度。拼装挂篮后实施空载试运行,验证行走机构的同步性,并依据试运行结果修正锚固系统的预紧力。

以建立焊接电流、温度梯度及加载速率的动态数据库为例。施工人员需要在焊接作业区域布置高精度电流传感器,实时采集焊机的输出电流、电弧电压及焊缝区域的温度分布数据,并在焊接前,借助红外热成像仪扫描母材的表面温度场,进而依据预设温控阈值,生成焊枪的行走速率指令,以此控制层间温度梯度。与此同时,需要借助超声波探伤仪,检测焊缝内部缺陷,并结合温度分布数据,建立能够反映电流—温度—缺陷关联的模型。在焊接过程中,也要持续采集电流、电压及温度数据,并录入动态数据库,利用机器学习算法挖掘参数与焊缝质量的对应规律,进而生成优化温控阈值模型。加载速率调控则要依据焊接接头应力分布的模拟结果,利用有限元模型反演不同加载条件下的变形趋势,并生成分级加载指令。在施工全过程,施工人员都要基于动态数据库,实时比对实际参数,并触发焊机控制系统,促使其自动修正送丝速度,以此形成“采集数据—迭代模型—修正参数”的闭环调控链。

3.2 全程追溯材料性能

在钢材进场时,施工方需要借助光谱分析仪检测其化学成分,并利用万能试验机,验证屈服强度等指标。针对焊接材料,应完成匹配性试验,利用金相显微镜观察焊缝的微观组织,确认抗拉强度。与此同时,也要在混凝土配合比设计中,掺入抗裂纤维或膨胀剂,并借助坍落度仪,动态优化配比。而在预应力钢绞线进场后,施工方应检测其表面缺陷,在张拉前采用液压传感器标定摩阻系数^[5]。在此过程中,施工方需要建立材料电子档案系统,利用区块链技术记录信息,以此保障数据不可篡改。

以实施钢材进场批次复验制度为例。在钢材运输至堆场后,施工人员需要借助光谱分析仪,扫描其表

面化学成分, 以此检测碳、锰、硫、磷元素含量是否满足规范限值, 同时利用万能试验机拉伸钢材试样, 验证其断后伸长率等指标, 并剔除层状撕裂或冷弯不合格的批次。与此同时, 还要利用磁粉探伤钢材表面, 排查裂纹或锈蚀缺陷情况, 标记超标区域并退场处理。在此过程中, 施工方应引入钢材电子档案系统, 加密采购合同、炉批号信息与检测报告, 并生成唯一识别码, 打印二维码标签后粘贴于钢材的端部。在施工过程中, 施工人员可借助扫描二维码, 调取材料的性能数据, 并在焊接前核对钢材与焊材的匹配性报告, 确认熔敷金属的强度不低于母材标准。在钢材加工下料后, 也要记录构件编号, 并借助激光刻码的方式, 追踪工序流转。在异常批次钢材触发预警后, 应启动封存程序, 并追溯使用同炉批号材料的位置, 依托超声波探伤功能, 复验焊缝与热影响区的性能。

3.3 动态纠偏结构变形

施工前, 施工方需要在墩顶与主梁关键截面布设 GPS 定位基站, 连续采集高程、位移及扭转数据, 并在拼装挂篮后, 实施分级预压试验, 消除支架的弹性变形, 同时记录荷载一位移曲线。在悬臂浇筑阶段, 应借助液压千斤顶调节挂篮的前支点高度, 依据线形监测结果动态修正拱度模板。在顶推施工中, 则要借助多级加载工艺, 分阶段施加顶推力, 并监测墩身的偏位, 优化后续顶推参数。在混凝土终凝后, 则要分阶段解除临时约束, 利用液压千斤顶施加顶推力, 调整跨中的应力分布。

以在挂篮拼装完成后进行预压试验为例。施工方需要安装位移传感器, 并借助应变计监测支架的弹性变形与非弹性形变, 同时利用模拟混凝土浇筑荷载的配重块, 分级加载至设计荷载后持荷观察。在加载过程中, 应实时采集支架的沉降、侧向位移以及应力分布数据, 同时绘制荷载一位移曲线与应力云图, 以此识别薄弱节点。在卸载后, 则要分析残余变形量与非弹性变形的占比, 计算模板的预拱度补偿值, 进而修正挂篮前支点标高, 并优化锚固系统的预紧力。与此同时, 也应在 BIM 平台导入预压数据, 生成三维变形场模型, 以此对比设计线形, 挂篮的行走轨道调整量, 优化模板定位参数。在挂篮空载试运行, 则要复测行走轮组的同步性, 并验证调整后的轨道平顺度, 记录行走阻力的变化趋势, 进一步校准预拱度的修正系数。

3.4 分级防控环境风险

施工方需要依据环境条件制定差异化的应对方案。针对高风速环境, 应在临时墩支架上增设斜撑连杆, 并为塔吊吊装作业启动风速阈值预警系统。在雨季施

工时, 则要搭设防风防潮棚架, 并在焊接区域配置除湿设备, 为混凝土运输罐车加装防雨罩。而在高温时段, 施工方需要调整浇筑时间至夜间, 并在墩身表面覆盖养护毯, 布设自动喷淋系统。在高压线附近施工, 则应借助顶推滑移变轨技术, 基于 BIM 模型模拟设备移动路径, 以此规避净空限制。施工方还要引入监测平台, 实时推送预警信息至施工终端, 并及时触发应急预案。

以根据风速、降雨量划分风险等级为例。施工方需要安装风速仪, 并借助雨量计实时采集气象数据, 进而设定预警触发机制。当风速达到初级预警时, 应在临时墩支架增设斜撑连杆, 并在塔吊吊钩处安装防摆装置, 启用防风缆绳固定高空作业平台。而在风速升至中级预警后, 需要暂停塔吊吊装以及挂篮行走作业, 并在焊接区域搭设移动式防风屏障, 调整混凝土泵车布料杆仰角, 以此降低风阻。与此同时, 在降雨量触发初级预警时, 需要在焊接作业区覆盖防雨棚架, 启动焊条存放箱的加热除湿功能。而在降雨持续增强至中级预警后, 施工方应在基坑周边布设截水沟, 在桥面板预留排水孔疏通积水, 同时在钢结构拼装区域铺设防滑格栅。在此过程中, 施工人员也要实时推送气象监测数据至管理平台, 同步启动应急预案。除此之外, 在复工作业前, 需要复检临时结构的连接节点, 并在降雨预警解除后, 排查电气设备的绝缘性能。

4 结束语

控制高墩大跨径钢结构桥梁的质量需要施工方创新施工技术, 并优化管理体系, 以此高度统一桥梁结构的安全性及精准度。施工方借助动态适配工艺参数, 全周期追溯材料性能, 能够保障施工在复杂条件下的连续性, 同时避免累积施工误差, 显著提高桥梁工程质量。因此, 施工方需要进一步探索集成应用智能化施工设备的方式, 并结合绿色施工工艺, 深化研究材料性能在极端环境下的演变规律, 为建设高质量的高墩大跨径钢结构桥梁提供更系统化的解决方案。

参考文献:

- [1] 王晓晓, 李佳, 彭龙帆, 等. 大跨度公路桥梁施工技术要点及质量控制 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51(12): 127-129.
- [2] 李文. 大跨径连续桥梁施工技术要点及质量控制分析 [J]. 产品可靠性报告, 2024(04): 92-93.
- [3] 李俊义. 高墩施工技术在高速公路桥梁施工中的应用 [J]. 四川建材, 2024, 50(03): 170-171, 174.
- [4] 蔡亚峰. 大跨径连续桥梁施工技术要点及质量控制措施分析 [J]. 运输经理世界, 2023(08): 72-74.
- [5] 陶凯辰. 大跨径连续桥梁施工技术要点及质量控制研究 [J]. 珠江水运, 2023(04): 89-91.