

公路桥梁施工技术及质量控制研究

贾明伟

新疆路桥建设集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要:公路桥梁作为现代交通体系的核心枢纽,其施工质量直接关系到国家基础设施安全与人民群众生命财产安全。随着城市化进程加速与交通需求激增,桥梁建设面临技术复杂度提升、施工环境多样化等挑战。本文从施工工艺创新、材料质量控制、质量管理体系构建三个维度展开研究,结合行业规范与技术发展趋势,提出系统性解决方案。研究表明,通过优化施工工艺流程、强化材料全生命周期管理、完善三级质量管控体系,可有效降低桥梁结构病害发生率,提升工程耐久性与安全性,为行业高质量发展提供理论支撑。

关键词:公路桥梁;施工技术;质量控制;混凝土配合比;全生命周期管理

引言

公路桥梁建设是衡量国家综合交通能力的重要指标。截至2025年,我国公路桥梁总数已突破120万座,其中特大型桥梁占比达18%,技术复杂度与施工难度持续攀升。然而,工程实践中仍存在混凝土开裂、预应力损失、钢筋锈蚀等质量通病,导致部分桥梁在运营5-10年内即出现结构性损伤。据交通运输部统计,2024年因施工质量问题引发的桥梁维修费用占年度养护预算的32%,暴露出传统施工模式与质量管控体系的局限性。在此背景下,本研究聚焦施工技术创新与质量控制体系的协同优化,通过分析技术发展脉络与行业痛点,提出基于数字化监控、精细化施工、标准化管理的质量提升路径,为构建“品质工程”提供理论指导与实践参考。

1 公路桥梁施工技术的核心要素与挑战

1.1 基础施工技术的关键控制点

桥梁基础施工是质量控制的源头,其稳定性直接影响上部结构安全。深基坑开挖需根据地质条件选择支护方式:在软土地基中,宜采用排桩加内支撑体系,通过数值模拟优化桩径(800~1200mm)、桩距(1.5-2.0倍桩径)等参数;在岩质地基中,可采用锚杆喷射混凝土支护,控制锚杆倾角 15° - 25° ,注浆压力0.5-1.0MPa^[1]。钻孔灌注桩施工需严格把控成孔质量,采用泥浆循环系统维持孔壁稳定,泥浆比重控制在 $1.05\sim 1.25\text{g/cm}^3$,黏度18~28s。清孔后需检测沉渣厚度,摩擦桩应 $\leq 100\text{mm}$,端承桩应 $\leq 50\text{mm}$,确保桩端承载力有效发挥。

1.2 上部结构施工的技术突破

预应力施工是控制结构变形的关键环节。张拉工艺应遵循“双控”原则,以应力控制为主(误差 $\leq \pm 1.5\%$),伸长量校核为辅(误差 $\leq \pm 6\%$)。对于后张法构件,孔道压浆需在张拉完成后48h内进行,采用真

空辅助压浆工艺时,真空度应稳定在-0.06至-0.10MPa,压浆压力0.5-0.7MPa,持压时间 $\geq 2\text{min}$ 。悬臂浇筑施工需建立线性控制体系,通过标高测量(每节段不少于3点)、应力监测(埋设振弦式传感器)双参数反馈,结合温度影响修正(每升高 1°C 标高调整1~2mm),实现合龙段高差 $\leq 20\text{mm}$ 。

1.3 新材料与新工艺的应用趋势

高性能混凝土(HPC)的推广显著提升桥梁耐久性。通过优化矿物掺合料比例(粉煤灰15%~30%、硅灰1%~5%),可降低水化热30%~50%,减少温度裂缝风险。配合减水剂(掺量0.8%~1.5%)与引气剂(掺量0.01%~0.03%),使混凝土工作性满足泵送要求(坍落度180~220mm),同时抗冻融循环次数达300次以上。装配式桥梁技术通过工厂化预制与现场拼装,实现施工效率与质量的双重提升。节段拼装工艺需控制胶接缝厚度(1~2mm)、拼接面平整度($\leq 0.5\text{mm}$),采用环氧树脂胶时,环境温度应控制在 $5\sim 30^{\circ}\text{C}$,湿度 $\leq 85\%$,确保粘接强度 $\geq 3.0\text{MPa}$ 。

2 公路桥梁施工质量控制体系的构建

2.1 原材料质量的全生命周期管理

2.1.1 采购环节控制

建立供应商分级管理制度,依据ISO9001质量管理体系对水泥、钢材等主要材料供应商进行动态评估。水泥需检测强度等级(不低于42.5级)、初凝时间($\geq 45\text{min}$)、终凝时间($\leq 600\text{min}$)等指标;钢筋应满足屈服强度(HPB300 $\geq 300\text{MPa}$ 、HRB400 $\geq 400\text{MPa}$)、抗拉强度($\geq 540\text{MPa}$)、伸长率($\geq 16\%$)等要求^[2]。通过区块链技术实现原材料从生产到使用的全流程追溯,确保可追溯性达100%。

2.1.2 进场检验标准

严格执行《公路工程桥涵施工技术规范》(JTG/T3650-2020)要求,对混凝土用砂实施细度模数(2.3-3.0)含泥量($\leq 3\%$)、泥块含量($\leq 1\%$)三控;石子针片状含量($\leq 15\%$)、压碎值指标($\leq 10\%$)双控。外加剂需检测减水率($\geq 25\%$)、氯离子含量($\leq 0.1\%$)、碱含量($\leq 0.7\%$)等参数。采用快速检测设备(如X射线荧光光谱仪)实现化学成分分析,检测周期由传统48小时缩短至2小时内。

2.1.3 存储条件优化

水泥库房需设置温湿度控制系统(温度 $\leq 30^{\circ}\text{C}$,湿度 $\leq 60\%$),采用防潮垫层(高度 $\geq 300\text{mm}$)与遮盖措施,防止结块变质。钢材存储应分类分区,垫木间距控制在1.5~2.0m,防止变形。外加剂存储需避免阳光直射,环境温度控制在5-35 $^{\circ}\text{C}$,不同品种外加剂应分仓存放,防止交叉污染。

2.2 施工过程的质量动态监控

2.2.1 混凝土施工控制

浇筑工艺需遵循“分层振捣、快插慢拔”原则,振捣棒插入深度应超过下层混凝土50~100mm,每点振捣时间20~30s,以混凝土表面泛浆、无气泡排出为度。大体积混凝土施工需埋设冷却水管(间距1.0~1.5m),通过循环水将内部温度控制在70 $^{\circ}\text{C}$ 以内,内外温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ 。采用物联网传感器实时监测入模温度(5-30 $^{\circ}\text{C}$)、坍落度(设计值 $\pm 20\text{mm}$)等参数,超限自动报警。

2.2.2 预应力施工控制

张拉设备需定期校准(每6个月或200次使用),油压表精度不低于0.4级。千斤顶与压力表配套标定,建立压力-张拉力对应关系曲线。张拉顺序应遵循对称、同步原则,对于曲线预应力筋,需从跨中向支座分段张拉^[3]。锚具夹片需检测硬度(HRC55-60)、锚固效率系数(≥ 0.95),安装时夹片间隙应均匀,外露长度一致(2~3mm)。

2.2.3 结构变形监测

建立三维坐标监测网络,对关键截面实施应力-应变双参数监控。采用全站仪(精度 $\pm 1\text{mm}$)定期测量结构位移,结合振弦式传感器(分辨率 $1\mu\epsilon$)监测应力变化。对于斜拉桥、悬索桥等特殊结构,需增设索力监测系统(精度 $\pm 1\%$)、温度补偿装置,实现施工期结构状态实时评估。监测数据应通过4G/5G网络实时传输至云端平台,生成变形曲线与预警报告。

2.3 质量验收与缺陷修复机制

2.3.1 分项工程验收标准

基础工程需满足承载力特征值 \geq 设计值1.2倍、沉降

量 $\leq 3\text{mm/d}$ 的验收条件;上部结构需通过静载试验(荷载效率0.8-1.0)与动载试验(冲击系数 ≤ 1.3)双重验证。预应力构件需检测孔道压浆密实度(采用冲击回波法,密实度 $\geq 95\%$)、锚具回缩量($\leq 6\text{mm}$)。桥面铺装层需满足平整度(IRI $\leq 2.0\text{m/km}$)、抗滑值(BPN ≥ 55)等指标。

2.3.2 缺陷分类处理流程

建立裂缝(宽度 $\geq 0.15\text{mm}$)、蜂窝(面积 $\geq 0.01\text{m}^2$)、预应力损失($\geq 5\%$)等缺陷的分级处理机制。对于宽度0.15~0.3mm的裂缝,采用压力灌浆法修复,浆体强度应高于原构件10MPa;对于宽度 $> 0.3\text{mm}$ 的裂缝,需凿除至坚实混凝土面,采用环氧砂浆或钢板补强。蜂窝缺陷应清除松散部分,用高一等级混凝土填补,表面抹平压光。

2.3.3 质量追溯与责任认定

应用RFID技术对构件实施唯一标识,记录施工班组、操作人员、检测数据等信息。建立质量追溯系统,实现从原材料进场到成品交付的全流程数据关联。当发生质量问题时,通过扫描构件二维码可快速定位责任环节,结合视频监控记录(存储周期 ≥ 3 年)与检测报告,48小时内完成责任认定,显著提升质量事故处理效率。

3 公路桥梁施工质量提升的对策建议

3.1 技术创新驱动质量升级

推广BIM+GIS技术,构建三维数字孪生模型,实现施工方案可视化模拟与碰撞检测,减少设计变更率40%以上。通过模拟分析优化钢筋布置、预应力管道走向,提前发现空间冲突问题。研发智能施工装备,如自动振捣机器人(振捣频率可调100~300次/min)、3D打印模板系统(精度 $\pm 0.5\text{mm}$),提升施工精度与效率^[4]。开发无人机巡检系统,搭载高清相机与红外热成像仪,实现结构表面缺陷自动识别。建立材料基因库,通过大数据分析优化混凝土配合比,降低水泥用量15%~20%。研究纳米材料(如纳米SiO₂)对混凝土性能的影响,开发高强、自修复型智能混凝土。

3.2 标准化管理体系构建

制定《公路桥梁施工质量管控指南》,明确各工序质量验收标准与责任主体。编制标准化施工手册,规范钢筋加工(弯曲半径 $\geq 4d$)、模板安装(垂直度 $\leq 3\text{mm}$)、混凝土养护(覆盖保湿 $\geq 14\text{d}$)等关键操作。推行“首件工程认可制”,通过样板引路规范后续施工。首件工程需经业主、监理、施工三方联合验收,形成质量标准样板,后续施工对照执行,确保工序质量一致性。建立质量信用评价体系,将企业质量表现与市场

准入挂钩。对连续三年质量评级为A级的企业，在投标时给予加分；对发生重大质量事故的企业，列入黑名单，限制参与招投标。

3.3 人员能力建设路径

实施“工匠计划”，通过技能比武、导师带徒等方式培育高素质产业工人。设立国家级桥梁施工技能大师工作室，开展预应力张拉、混凝土浇筑等专项技能培训，每年培养高级技工不少于5000名。开发VR施工模拟系统，构建虚拟施工环境，开展沉浸式安全与质量培训。通过模拟塌方、高空坠落等事故场景，提升操作人员应急处置能力，培训合格率提升至95%以上。建立技术人员继续教育平台，定期更新行业规范与技术标准知识。开发在线学习系统，设置混凝土配合比设计、预应力计算等专项课程，要求技术人员每年完成40学时继续教育，持续提升专业能力。

4 典型工程案例

4.1 某跨海大桥施工质量控制实践

该桥全长8.2公里，主跨680米，采用钢箱梁斜拉桥结构。施工期间面临强腐蚀环境（Cl⁻浓度3500mg/L）、8级大风等挑战。通过以下措施实现质量目标：（1）耐久性设计优化：采用C60海工混凝土，掺入12%矿粉与3%阻锈剂，使混凝土抗碳化深度（28天）降至1.5mm，较普通混凝土提升2倍。（2）钢箱梁制造精度控制：引入激光切割与机器人焊接技术，将板单元对接错边量控制在0.5mm以内，较传统工艺精度提升4倍。通过全桥拼装模拟，消除累积误差32mm。（3）斜拉索安装质量控制：采用张拉-索力双控工艺，配合磁通量传感器实时监测索力变化。通过温度补偿算法，将索力测量误差由±5%降至±1.5%。

4.2 某山区高速公路桥梁施工难题破解

该桥位于V级围岩地段，桥墩高度达85米，存在岩爆、渗水等地质风险。采取以下技术方案：（1）深基坑

支护体系创新：采用“排桩+预应力锚索+混凝土支撑”复合支护结构，通过数值模拟优化锚索倾角（25°）与间距（2.0m），使基坑变形量控制在15mm以内。（2）高墩垂直度控制：应用激光铅直仪与全站仪联合测量系统，建立三维坐标控制网。通过分段浇筑（每段高度≤4m）与临时预应力索调整，将墩身垂直度偏差控制在1/3000以内。（3）岩溶地段桩基施工：采用“钢护筒跟进+冲击钻成孔”工艺，配合超声波探伤仪检测桩身完整性。通过注浆加固溶洞（水泥-水玻璃双液浆），使单桩承载力特征值达到设计值的1.2倍。

5 结语

公路桥梁施工质量管控是系统性工程，需从技术革新、管理优化、人员培养三方面协同推进。本研究通过分析关键施工技术与质量控制要点，结合行业规范与技术发展趋势，提出数字化、精细化、标准化的解决方案。未来，随着5G、物联网、人工智能等技术的深度应用，桥梁施工将向智能化、绿色化方向演进，为构建“品质工程”提供更强技术支撑。建议行业主管部门加快制定智能建造标准体系，推动新技术、新工艺的规模化应用，全面提升我国公路桥梁建设质量水平，助力交通强国战略实施。

参考文献

- [1]王亨.公路桥梁施工关键技术及质量控制[J].汽车周刊,2025,(08):143-145.
- [2]陈龙.大跨度公路桥梁施工技术要点及质量控制[J].汽车周刊,2025,(07):81-83.
- [3]刘倩.高速公路桥梁施工技术与质量控制措施分析[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流论文集.浙江中科正旭工程管理有限公司;2025:286-288.
- [4]张清哲.高速公路桥梁施工技术要点与质量控制分析[J].汽车周刊,2025,(06):132-134.