

公路施工过程中的质量控制与关键技术研究

陈依山

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要:公路作为国家基础设施的核心组成部分,其施工质量直接关系到交通运输的安全性、效率与可持续性。本文聚焦公路施工过程,系统构建质量控制理论体系,深度剖析路基压实、沥青路面摊铺等关键技术的实施要点。通过整合数字化监控、智能算法等前沿技术,提出基于全生命周期管理的质量控制新模式,为提升公路工程整体质量提供理论支撑与技术路径。研究表明,科学的质量控制体系与关键技术优化可显著降低公路全寿命周期成本,提高道路服务水平与耐久性。

关键词:公路施工;质量控制体系;关键技术;数字化监控;全生命周期管理

引言

公路工程具有建设周期长、技术复杂度高、环境影响因素多等显著特征。据交通运输部统计,截至2024年底,我国公路总里程达620万公里,其中高速公路里程突破18万公里,形成全球最大的高速公路网络。然而,早期建设的部分公路因施工质量缺陷,已出现车辙、裂缝、沉降等典型病害,导致年均维修成本超过1500亿元,不仅造成巨大经济损失,更直接威胁行车安全。以某省2024年道路事故调查为例,因路面不平整引发的交通事故占比达28%,其中76%与施工质量控制不足相关。因此,构建系统化的质量控制体系,突破关键施工技术瓶颈,已成为推动公路工程高质量发展的核心命题。

1 公路施工质量控制体系构建

1.1 全过程质量控制框架

质量控制需贯穿公路施工全生命周期,形成“事前预防-事中控制-事后改进”的闭环管理体系,其核心要素包括:

1.1.1 事前预防机制

(1)材料准入控制:建立材料性能数据库,对沥青、水泥、钢材等主要材料实施动态管理。通过实验室模拟与现场试验相结合的方式,确定材料关键性能指标阈值。例如,沥青针入度应控制在60-80(0.1mm),软化点不低于48℃,延度不小于100cm。(2)设计优化验证:采用BIM技术建立三维模型,进行施工可行性分析^[1]。重点验证结构层厚度、排水系统设计、边坡稳定性等关键参数,提前发现设计缺陷。研究表明,BIM技术应用可使设计变更率降低40%以上。(3)施工方案评审:组织专家对特殊地质处理、大跨径桥梁施工等关键工序进行专

项论证,制定风险防控预案。

1.1.2 事中控制体系

(1)工序标准化管理:制定《公路施工工序操作指南》,明确各环节技术要求与验收标准。例如,路基填筑应遵循“三阶段、四区段、八流程”工艺,每层压实厚度不超过30cm,压实度需满足重型击实标准。(2)实时监测系统:集成物联网传感器、无人机巡检等技术,实现施工参数动态采集。在沥青摊铺过程中,通过红外热成像仪监测温度场分布,确保摊铺温度波动范围控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内。(3)多级验收制度:实施“班组自检-工序互检-质检员专检-监理抽检-第三方检测”五级验收机制,关键工序合格率需达到100%方可进入下一阶段。

1.1.3 事后改进机制

(1)质量缺陷追溯:建立施工过程数字档案,利用区块链技术确保数据不可篡改。当质量缺陷发生时,可快速定位问题环节与责任主体。(2)持续改进机制:定期召开质量分析会,运用PDCA循环方法优化施工工艺。例如,通过分析压实度检测数据,动态调整压路机碾压参数。(3)全生命周期维护:制定基于BIM的养护计划,预留维修接口与材料储备,延长道路使用寿命。

1.2 数字化监控系统应用

数字化技术为质量控制提供全新范式,其核心模块包括:

1.2.1 材料管理模块

采用RFID芯片与二维码技术,实现材料全生命周期追溯。从进场检验、库存管理到使用记录,所有信息实时上传至云平台。开发材料性能预测模型,基于历史数据与机器学习算法,提前预警材料性能衰减趋势^[2]。例如,通过分析水泥安定性检测数据,预测混凝土强度发展规律。

1.2.2 施工监控模块

作者简介:陈依山(1990-2),男,汉,河南开封,本科学历,中级工程师,研究方向:路桥项目管理

在施工设备上安装智能传感器,实时采集压实度、平整度、摊铺温度等关键参数。系统自动生成质量热力图,精准定位质量薄弱区域。应用计算机视觉技术,通过摄像头捕捉施工画面,利用深度学习算法识别违规操作行为。例如,检测摊铺机速度是否超限、压路机停机位置是否合规。

1.2.3 人员管理模块

采用人脸识别与定位技术,记录施工人员操作轨迹与工时分配。结合AI算法分析工作效率与技能水平,为培训提供数据支持。建立操作行为数据库,通过模式识别技术发现潜在质量风险。例如,识别出某操作员在特定工序中频繁出现违规动作,及时进行针对性培训。

2 公路施工过程中的质量控制的关键施工技术优化研究

2.1 路基压实技术

路基压实质量直接影响道路承载能力与使用寿命,其优化方向包括:

2.1.1 材料改良技术

(1) 复合改良剂研发:针对高液限黏土塑性指数高、水稳定性差的问题,研发石灰-水泥-粉煤灰三元复合改良剂。通过正交试验确定最佳配比:石灰6%+水泥2%+粉煤灰12%,使改良土CBR值从3.5提升至9.2,满足重交通荷载要求。微观测试表明,该配比下土体形成以硅酸钙凝胶为主的水化产物网络,显著增强颗粒间胶结作用。(2) 新型固化剂应用:开发离子交换型土壤固化剂,其活性成分通过置换土颗粒表面吸附水膜中的阳离子,改变双电层结构,使土体由亲水性转变为疏水性^[3]。实验室测试显示,固化土7天无侧限抗压强度达2.5MPa,水稳定性提升40%,且具有早期强度高(24h强度达1.0MPa)、环境适应性强(-10℃~50℃均可施工)等优势。(3) 工业废料资源化:探索钢渣、矿渣等工业废料在路基填筑中的应用。经磁选除铁、陈化稳定处理后的钢渣,其洛杉矶磨耗值 $\leq 25\%$,压碎值 $\leq 22\%$,满足路基填料技术要求。工程实践表明,钢渣填筑路基的回弹模量较传统碎石提高15%-20%,且可降低工程造价25%以上。

2.1.2 分层压实工艺

(1) 四阶段八步法压实工艺:初压阶段:采用静压2遍(速度2-3km/h),配备凸块式压路机消除表面不平整,为后续压实创造良好条件。复压阶段:振动碾压4遍(振幅0.8-1.2mm可调,频率35-40Hz),根据填料类型动态调整参数,确保压实能量精准传递。终压阶段:胶轮压路机碾压2遍,通过揉压作用消除轮迹并提高表面密实度,形成致密防水层。收光阶段:钢轮压路机低速碾压1

遍,改善表面平整度,为防排水层施工提供优质基面。严格控制每层压实厚度20-25cm,采用灌砂法与核子密度仪双重检测,压实度合格率需达98%以上。(2) 三维压实控制技术:集成GPS定位、惯性导航及压力传感系统,构建压路机三维压实轨迹模型。通过实时监测碾压速度、遍数、搭接宽度等参数,自动生成压实质量热力图,指导施工人员对薄弱区域进行补压,确保压实均匀性。

2.1.3 智能压实系统

(1) 连续压实控制(CCC)技术:在压路机上安装压实度连续检测仪,基于振动轮加速度信号分析,实时计算压实质量值(CMV)。当CMV达到预设阈值时,系统自动调整振动频率、振幅及行驶速度,实现压实参数动态优化。工程应用显示,该技术可减少重复碾压20%以上,压实度离散性降低35%。(2) 数字孪生压实管理:构建BIM+GIS数字孪生平台,集成地质雷达探测、压实监测等数据,建立路基压实三维数字模型。通过机器学习算法预测不同工况下的压实效果,为施工方案优化提供决策支持。试点项目表明,该技术可使路基不均匀沉降控制在3cm以内,显著提升道路耐久性。

2.2 沥青路面摊铺技术

沥青路面施工质量直接影响行车舒适性与耐久性,其技术优化要点包括:

2.2.1 混合料设计优化

(1) 级配优化与性能验证:采用旋转压实仪(SGC)模拟实际压实过程,确定SMA-13改性沥青混合料最佳油石比5.5%-6.0%,空隙率控制在4.0%-5.5%。通过汉堡车辙试验验证,动稳定度达7200次/mm以上,满足重载交通需求。添加0.3%玄武岩纤维稳定剂,形成三维增强网络,使冻融劈裂强度比提高至85%以上,有效抑制水损害发展。(2) 温拌沥青技术应用:研发Sasobit温拌剂,通过降低沥青粘度实现施工温度下降15-20℃。实验室测试表明,温拌混合料在130℃摊铺温度下,其压实性能与热拌混合料(160℃)相当,且有害气体排放减少30%,符合绿色施工要求。

2.2.2 摊铺工艺控制

(1) 温度梯度管理系统:建立“出料-运输-摊铺-碾压”全链条温度控制体系:出料温度165-175℃,到场温度 $\geq 160^\circ\text{C}$,摊铺温度 $\geq 155^\circ\text{C}$,碾压终了温度不低于110℃。采用红外测温仪与热成像仪实时监控,对超温或低温混合料自动预警,确保压实质量^[4]。(2) 非接触式平衡梁技术:研发激光扫描+超声波传感复合型平衡梁,实现摊铺厚度动态调整。通过PID控制算法,使摊铺速度稳定在2-3m/min,波动范围 $\pm 0.5\text{m/min}$,配合“走钢丝+

滑靴”复合控制方式，路面平整度标准差控制在0.8mm以内。

2.2.3 接缝处理技术

纵向接缝采用热接缝工艺，两台摊铺机前后间距控制在5-10m，梯队作业时搭接宽度不小于15cm。横向接缝采用平接缝，切割断面涂刷粘层油，碾压时压路机位于已压实层上，伸入新铺层15-20cm，每碾压一遍向新铺层移动15-20cm，直至全部在新铺层上为止。

2.3 特殊地质处理技术

针对软土、膨胀土等特殊地质条件，需采用综合处理方案：

2.3.1 真空-堆载联合预压

铺设70-80cm砂垫层作为水平排水通道，打设塑料排水板（间距1.0-1.5m，深度15-25m）。

铺设3层密封膜，抽真空至80-90kPa后进行堆载预

压，加载速率控制在0.3-0.8m/d，使地基沉降量减少50%-70%。

2.3.2 水泥搅拌桩复合地基

采用“四搅两喷”工艺，桩径0.5-0.8m，间距1.0-1.5m，正方形或梅花形布置。通过无侧限抗压试验确定最佳水泥掺量（15%-20%），28天强度需达到设计要求的1.2倍以上。

2.3.3 轻质路堤技术

在桥头过渡段采用泡沫轻质土填筑，容重控制在5-8kN/m³，压缩模量达10-20MPa。与常规填筑相比，工后沉降减少70%-85%，有效解决桥头跳车问题。

3 质量通病防治策略

3.1 常见质量通病及成因

公路工程常见质量通病可分为六大类，其成因与影响如下：

表1 公路工程常见质量通病

通病类型	表现形式	主要成因	影响程度
路基沉降	不均匀沉降、局部塌陷	软基处理不到位、填筑材料不良	★★★★★
路面裂缝	横向裂缝、纵向裂缝、网裂	温度应力、基层反射、荷载作用	★★★★☆
车辙	永久变形、波浪拥包	沥青高温稳定性不足、压实不够	★★★★☆
桥头跳车	路面高差突变、行车颠簸	台背回填不密实、地基沉降	★★★★☆
排水不畅	积水、边坡冲刷	排水系统设计不合理、施工缺陷	★★★☆☆
防护损坏	挡墙开裂、护坡坍塌	基础处理不当、材料强度不足	★★★☆☆

3.2 系统化防治措施

3.2.1 材料控制策略

建立材料性能动态评估体系，定期更新材料标准。例如，根据气候分区调整沥青PG等级，寒冷地区采用PG64-22，高温地区采用PG76-22。推广应用新型环保材料，如温拌沥青（施工温度降低20-30℃）、橡胶粉改性沥青（提高抗裂性能）。

3.2.2 工艺优化方向

开发智能化施工设备，如自动调平摊铺机、智能压路机，减少人为因素影响。推广装配式施工工艺，提高构件预制精度与安装质量。例如，预制装配式涵洞可缩短工期30%以上。

3.2.3 过程监控强化

应用区块链技术建立质量追溯系统，确保数据不可篡改。每个施工环节生成唯一数字凭证，实现全链条质量管控。开发质量预警模型，基于历史数据与实时监测信息，提前预测质量风险。例如，当压实度连续3次检测值低于标准值时，系统自动发出预警。

4 结语

研究结论表明，构建“数字化+标准化”质量控制体系可提前发现质量缺陷、提升验收合格率；关键施工技术优化显著提升工程质量；质量通病防治贯彻“预防为主”原则可降低病害发生率与全寿命周期成本。未来展望包括研发智能化施工装备，推广新型材料，建立基于BIM+GIS的数字孪生平台实现全生命周期管理，制定绿色施工标准。公路施工质量控制需多维度持续发力，随着“交通强国”战略推进，公路建设向智能化等方向迈进，本研究为行业高质量发展提供支撑与路径。

参考文献

[1]冀文俊.公路工程施工过程中的质量控制与管理[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(10):103-105.
[2]郑立.公路工程施工过程中路基质量控制技术研究[J].运输经理世界,2024,(06):44-46.
[3]唐志玉.公路工程施工过程中的质量控制与管理刍议[J].质量与市场,2021,(01):94-95.
[4]马临平.公路桥梁施工过程中的技术管理与质量控制措施[J].运输经理世界,2022,(02):51-53.