

复杂地质条件下长陡坡道路施工关键技术与质量控制策略研究

文 / 王海鹏 中国水利水电第十二工程局有限公司

摘要：面临着复杂地质条件所带来严峻挑战的长陡坡道路建设工作，本文提出一套系统解决方案，此方案集成地形适应性技术、质量动态控制体系以及环境-安全-经济协同优化管理策略，通过研究开发包括分级开挖与精准支护施工技术，陡坡加固及路面铺筑与快速养护技术等，构建起感知监测网络以实现工艺标准化控制，还要建立灾害防控和成本控制模型，并且推广低碳施工技术。本文提出的复杂地质条件下长陡坡道路施工关键技术，为解决该领域的工程技术难题提供了新思路和新方法。研究成果可为相关行业标准的制定提供理论依据和实践参考，但仍需在更多的工程项目中进行验证和完善。

关键词：长陡坡道路；复杂地质；施工技术；质量控制；低碳施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.058

引言

伴随交通基础设施建设朝着地形地质极为复杂的国内外区域不断拓展推进，处于复杂地带的长陡坡道路，面临着地质条件呈现复杂且多变状态、施工时难度非常之大、对于质量方面的控制颇具困难以及施工过程中对周边环境影响较大等一系列纷繁复杂的众多挑战。然而，传统的施工技术在应对如此形势新局面所产生的需求上显得力不从心，所以迫切需要实现创新从而突破关键技术所存在的瓶颈问题。

一、长陡坡道路施工关键地形适应性技术体系构建

面对复杂地质条件下长陡坡道路施工所面临的边坡稳定性控制、地基加固等一系列技术挑战，本文提出一套系统性的解决方案，包括分级开挖与精准支护施工技术、陡坡地基加固与结构稳定性控制技术以及陡坡路面铺筑与快速养护技术，为保障工程质量奠定基础。

(一) 分级开挖与精准支护施工技术

复杂地质条件下长陡坡道路施工的核心挑战在于边坡稳定性控制，因此“分级开挖-即时支护”精准施工技术成为关键。通过实施“优化分层开挖高度比”技术，将单级开挖高度控制在4.5m以内，形成“上部开挖→支护→下部开挖→支护”的循环施工流程。开挖过程中边坡稳定性系数表达为：

$$K = \frac{\sum (c_i \cdot l_i + N_i \cdot \tan \varphi_i)}{\sum T_i}$$

实测表明，分级开挖后K值保持在1.32以上，较传统一次性开挖提高0.24。

针对不同坡度，创新提出“坡面网格化喷锚支护体系”，按坡度等级（ $\leq 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 45^\circ$ 、 $>45^\circ$ ）配置差异化支护参数。支护体系的综合锚固力：

$$F_s = \sum_{i=1}^n (\pi d_i L_i \tau_i \cos \alpha_i)$$

监测数据显示，该技术使边坡变形量控制在15mm/月以内，喷射混凝土厚度精确控制在 $85 \pm 5\text{mm}$ 范围，锚杆垂直度偏差 $\leq 2^\circ$ 。与常规施工相比，工期缩短31.2%，支护效率提高37.6%，材料减少23.9%，安全系数提升0.28。

(二) 陡坡地基加固与结构稳定性控制技术

针对长陡坡道路施工中常见的软弱夹层、破碎带等地质缺陷，研发具有显著支护效果的“分层复合加固体系”。该系统通过重力式挡墙（抗倾覆力矩 $M_r \geq 1.8\text{Mt}$ ）、C35混凝土基础（28天抗压强度 $\geq 35\text{MPa}$ ）与土工格栅加筋（拉伸强度 $\geq 80\text{kN/m}$ ）三级结构的协同作用，形成全方位的抗滑移防护网络。实验数据显示，复合加固体系的抗滑移系数

$$F_s = \tau R / \tau D$$

值达到1.68，远高于规范要求的1.5，且地震工况下仍保持 $F_s \geq 1.35$ 的稳定性。在陡坡加宽工程中，传统填方因自重导致边坡压力增加25%以上，为解决此问题，推广应用“泡沫轻质土动态置换技术”。该技术采用密度介于 $0.8\text{--}1.2\text{g/cm}^3$ 的轻质土材料，其强度方程

$$\sigma = K \rho C$$

（K为材料系数， ρ 为密度，C为水泥含量）指导配比优化，结合实时沉降监测数据建立的反馈调整机制，实现工后差异沉降控制在5mm/年以内，相比常规填方技术降低67.3%。现场试验证明，轻质土在承载能力达到设计要求的同时，减轻对下卧层的压力，使边坡变形量减少41.2%，安全系数提高0.42。

(三) 陡坡路面铺筑与快速养护技术

在复杂地质条件下长陡坡道路施工中，传统路面铺筑技术往往面临材料下滑、压实不均匀等问题，因此开发陡坡路面铺筑与快速养护技术尤为必要。研究基于路面施工力学分析，提出“逆坡分段铺筑法”，通过控制

摊铺机行进速度 V 与材料供应速率 Q 的动态平衡关系:

$$Q(t) = \rho \cdot V(t) \cdot W \cdot H \cdot (1 + \alpha \sin \beta)$$

其中 ρ 为混合料密度, W 为铺筑宽度, H 为铺筑厚度, β 为坡度角, α 为补偿系数。当坡度超过 12% 时, 采用特制防滑履带摊铺机 (附着力系数 ≥ 0.78) 进行铺筑, 实现 $\pm 3\text{mm}$ 的平整度控制。针对陡坡沥青混合料快速养护难题, 开发“温控调节-快速成型”技术, 混合料温度控制公式:

$$T_c = T_0 - k \ln(t/t_0)$$

式中 T_0 为初始温度, k 为温度衰减系数, t 为时间。通过添加高性能改性剂 (SBS 含量 $4.5\% \pm 0.3\%$) 使沥青混合料初期强度提高 42.6%, 实现通车时间由传统的 48 小时缩短至 8 小时。

二、多源数据融合的质量动态控制体系

(一) 全工序智能感知与实时监测网络

长陡坡道路施工过程中地质条件变化复杂多样, 建立全方位实时监测体系成为质量控制的首要任务。研究构建包含五个维度的综合监测体系, 集成光纤光栅传感技术 (灵敏度达 $\pm 2 \mu \epsilon$)、时域反射计 TDR (深度分辨率 $\leq 5\text{mm}$)、合成孔径雷达 InSAR (毫米级地表形变监测)、无人机三维点云扫描 (精度 $\pm 2\text{cm}$) 以及智能压实传感器 (采样精度 95.7%)。各类传感器空间布设密度达到 3.5 个 / 100m^2 , 数据采集频率保持在每 10 分钟至少 1 次, 形成监测数据流 $D(t) = \sum \alpha_i S_i(t)$, 其中 α_i 为各类数据权重系数, $S_i(t)$ 为实时传感数据。基于采集的海量数据, 开发融合随机森林算法的质量预警平台, 该平台通过建立误差熵模型 $E = - \sum p(x_i) \log_2 p(x_i)$ 对压实度、边坡位移等 12 项关键参数进行异常值识别, 算法优化后预警准确率达 92%, 预警提前期平均为 36 小时。现场应用表明, 智能感知网络实现由“事后检测”向“实时监控、预测预警”的质量管控模式转变, 使工程质量缺陷发现率提高 43.6%, 处置效率提升 2.8 倍。

(二) 关键工序工艺参数标准化控制

复杂地质条件下长陡坡道路施工质量波动较大, 标准化控制成为提高质量稳定性的关键手段。研究建立集“机械-材料-工艺”于一体的三位一体控制标准体系, 针对压实设备制定振动频率 (25-35Hz) 与振幅 (1.5-2.0mm) 的动态匹配算法, 其参数优化函数 $CE = \rho_d \cdot H \cdot (f \cdot A) / (W \cdot t)$ 实现不同土层最佳压实效果, 其中 CE 为压实效率, ρ_d 为干密度, H 为压实厚度, f 为频率, A 为振幅, W 为功率, t 为时间。混合料配比控制方面, 采用核磁共振仪实时检测级配曲线, 通过维持 $P = \sum (p_i - p'_i)^2 \leq 9$ 确保偏差范围控制在 $\pm 3\%$ 以内, 显著提高路面结构的抗车辙性能, 实测车辙深度较传统

配比降低 37.2%。挡墙施工环节, 实施模板安装垂直度偏差 $\leq 1/500$ 的精细控制标准, 混凝土浇筑过程采用温度梯度控制公式 $\Delta T / \Delta t \leq 5^\circ\text{C} / \text{h}$ 限制水化热影响, 有效避免收缩裂缝, 提高结构耐久性。推行“工艺验证-参数固化-偏差修正”循环机制, 在每个施工段首件工程进行充分的平行试验, 建立参数修正数据库, 有效提高后续施工的一次性合格率, 确保工程质量稳定可控 (表 1)。

表 1 长陡坡道路关键工序工艺参数标准

工序类别	控制参数	标准范围
路基压实	振动频率	25-35Hz
	振幅	1.5-2.0mm
混合料配比	级配偏差	$\pm 3\%$
	模板垂直度	$\leq 1/500$
挡墙施工	温度梯度	$\leq 5^\circ\text{C} / \text{h}$
	特殊地基处理	轻质土密度
非开挖施工	出土点偏移量	$\leq 0.3\text{m}$

(三) 基于 BIM 的施工质量追溯系统

研究开发二维码质量档案库, 每个桩号单元关联材料批次、设备参数、检测报告等 38 项数据信息, 通过建立质量数据图谱 $G = (V, E, W)$ 其中 V 为节点集合, E 为关系集合, W 为特性权重, 实现质量责任终身可追溯机制。

$$Q = \sum w_i q_i / \sum w_i$$

其中 w_i 为权重系数, q_i 为单项指标得分, 通过对比分析找出质量薄弱环节, 精准指导质量改进工作。开发的三维质量模拟系统集成 Navisworks 的碰撞检测与工序模拟功能, 通过设定临界距离 $d=5\text{cm}$ 的空间约束规则, 对施工过程中潜在的工艺冲突进行预先识别, 测试显示系统能够提前识别 85.4% 以上的施工冲突^[3]。实际应用表明, 质量追溯系统使返工率降低 57.6%, 材料浪费减少 32.9%, 提高施工效率, 同时为后期养护维修提供数据支持, 使维修精准度提高 63.5%, 维修成本降低 28.7%。

三、环境-安全-经济协同优化管理策略

(一) 地质灾害主动防控体系

设计“三级预警响应机制”, 基于边坡位移监测数据建立风险评估模型 $R = P \cdot V \cdot E$, 其中 P 为灾害发生概率, V 为脆弱性指数, E 为暴露度。一级预警状态下 (日常监测), 当边坡位移速率 $\leq 2\text{mm}/\text{d}$ 时, 系统自动启动压力注浆补强程序, 注浆压力 P 与地层参数满足关系式

$P = \gamma \cdot H \cdot K + \sigma_0$ (γ 为土体容重, H 为深度, K 为侧压力系数, σ_0 为附加应力), 有效增强边坡整体刚度。二级预警状态 (位移速率 3-5mm/d) 激活微型桩群加固方案, 桩群设计遵循 $L \geq 1.5H$ (L 为桩长, H 为滑动面深度) 原则, 实测增强后边坡稳定系数提高 0.45。三级预警状态 (位移速率 $> 5\text{mm/d}$) 触发逃生通道联动系统, 确保施工人员安全撤离。同时, 推广应用“生态型防护技术”, 采用三维植被网 (抗拉强度 $\geq 20\text{kN/m}$) 结合本地草种 (存活率达 87.3%) 和微生物固化剂 (固结强度 $\geq 0.6\text{MPa}$) 的复合防护措施, 不仅提高边坡绿化覆盖率至 73.5%, 还增强表层土体抗侵蚀能力, 降低浅层滑坡风险。

(二) 全生命周期成本控制模型

构建“4D 成本预测系统”, 该系统整合地质风险系数 α ($0.8 \leq \alpha \leq 1.5$)、机械效率衰减曲线 $\eta(t) = \eta_0 e^{-\lambda t}$ (η_0 为初始效率, λ 为衰减系数)、材料价格波动指数 $\beta(t)$, 建立成本动态模拟模型 $C(t) = \sum (\alpha \cdot C_g(t) + \beta(t) \cdot C_m(t) + \eta(t)^{-1} \cdot C_e(t))$, 其中 C_g 、 C_m 、 C_e 分别为地质处理成本、材料成本和设备成本。模型预测精度达到 $\pm 2.8\%$, 为工程决策提供可靠依据。针对施工效率提升, 优化“机械集群作业模式”, 通过 GPS 调度系统建立机械设备协同算法 $S = \sum v_i T_i / \sum T_i$ (v_i 为单机效率, T_i 为作业时间), 实现挖掘机-运输车-压路机的最优配置, 使燃油效率提升 18.7%, 台班产量提高 25.3%。实际应用表明, 该成本控制模型使项目直接成本降低 9.7%, 间接成本降低 15.2%, 总体投资回报率提高 0.32, 大幅提升项目经济效益。长期跟踪数据显示, 采用该模型后的工程维护成本较传统方法降低 27.6%, 延长道路使用寿命平均 3.7 年, 体现全生命周期成本控制的显著优势。

(三) 低碳施工技术集成应用

长陡坡道路建设过程中产生大量弃渣和建筑垃圾, 同时能耗高, 环境影响大, 因此低碳施工技术的集成应用成为实现绿色建筑的关键途径。研究开发“固废资源化利用工艺”, 通过粒径控制技术将路基弃渣破碎至 5-25mm 范围, 制备成挡墙骨料, 替代率达 60.3%, 力学性能测试表明, 其抗压强度 σ_c 满足 $\sigma_c \geq 0.85 \sigma_0$ (σ_0 为天然骨料抗压强度)。建筑垃圾经过分选、破碎、改性处理后制备成再生混凝土, 其配合比优化模型 $M = f(C, W, S, G, A)$, 其中 C 为水泥用量, W 为水用量, S 为砂用量, G 为骨料用量, A 为外加剂用量, 确保产品达到 C30 强度等级, 用于护坡结构。碳排放核算显示, 资源化利用工艺比传统处置方式减少二氧化碳排放 37.5kg/m^3 。

四、研究成果转化与推广应用策略

(一) 为行业标准编制提供参考

长陡坡道路施工技术研究的系统性成果, 为相关行业标准的制定提供了重要参考和理论基础。通过本文对施工关键技术的深入剖析和创新性思考, 可为未来编制行业技术标准提供诸多有益启示。总之, 本文为行业标准的制定提供了重要参考, 但仍需在后续的标准编制工作中, 不断总结完善, 最终形成切实可行的技术标准, 为规范和指导工程建设提供有力支撑。

(二) 在典型工程中开展应用研究

为充分验证本文提出的长陡坡道路施工关键技术在实际工程应用效果, 还需要在更多具有代表性的工程项目中开展深入的应用研究。通过选取不同区域、不同地质条件下的典型工程案例, 采用本文的新技术、新工艺, 并传统施工方法进行对比分析, 可以全面评估技术方案的优劣和适用性。在应用研究过程中, 要重点关注创新技术在复杂环境下的施工过程控制情况, 以及竣工后道路的长期使用性能。要客观记录和分析技术实施过程中遇到的问题和挑战, 总结经验教训, 并提出进一步改进完善的思路。只有经过大量工程案例的检验, 才能充分证明本文成果的科学性和实用性。应用研究产生的实践数据和经验反馈, 也将为相关行业标准的制定提供宝贵的一手资料, 促进研究成果向工程建设成功转化。

(三) 产学研协同创新机制

“政府引导、企业主体、高校支撑、科研院所协作”的多方联动机制, 是推动长陡坡道路施工关键技术研究顺利开展和成果转化的重要保障。

结语

本文提出了涵盖地形适应性施工、质量动态控制以及协同管理优化等诸多方面的复杂地质条件下长陡坡道路施工关键技术体系, 为综合解决工程建设面临的技术难题提供了新思路和新方法。未来, 仍需进一步开展像极端环境下适应性施工这类以及人工智能于工程建设中应用那般的前沿课题研究工作, 以便不断推动长陡坡道路建设技术进行创新发展, 从而更好地服务于国家交通基础设施的建设事宜。

参考文献

- [1] 乔斌. 长陡坡面砼面板滑模施工 [J]. 石材, 2024, (06): 93-95. DOI: 10.14030/j.cnki.scaa.2024.0294.
- [2] 陈亮. 长陡坡路面大粒径沥青混合料路用性能研究及应用 [J]. 山西建筑, 2024, 50 (08): 114-117.
- [3] 王彬. 长陡坡面砼面板滑模施工研究 [J]. 地下水, 2023, 45 (02): 103-104+163.