

Research on Quality Control of New Process for Highway Subgrade Grouting Reinforcement

Haiyang Jiang

Binhai County Highway Development Center, Yancheng, Jiangsu, 224500, China

Abstract

To address the issues of non-standard quality control and unstable effects in the new process of highway subgrade grouting reinforcement, this study combines theoretical analysis with practical verification to systematically explore its quality control path. Clarify the core principles and new process characteristics of grouting reinforcement, sort out the key influencing factors such as geological conditions and grouting performance, and disassemble the key points of full-process control including construction preparation (geological investigation, grouting test), core construction (dynamic parameter regulation), and acceptance evaluation (three-dimensional detection). Propose a three-dimensional optimization strategy covering technology, management and monitoring. Research shows that this control system can increase the strength compliance rate of grouting bodies to over 95%, effectively control the settlement of roadbeds, and provide a reference for the quality assurance and efficient application of minimally invasive reinforcement of highway roadbeds.

Keywords

Highway subgrade; Grouting reinforcement; Quality control

公路路基注浆加固新工艺质量控制研究

蒋海洋

滨海县公路事业发展中心，中国·江苏 盐城 224500

摘要

为解决公路路基注浆加固新工艺质量管控不规范、效果不稳定等问题，本研究结合理论分析与实践验证，系统探究其质量控制路径。明确注浆加固核心原理与新工艺特点，梳理地质条件、浆液性能等关键影响因素，拆解施工准备（地质勘察、浆液试验）、核心施工（参数动态调控）、验收评估（三维检测）全流程控制要点。提出技术、管理、监测三维优化策略。研究表明，该管控体系可使注浆体强度达标率超95%，有效控制路基沉降，为公路路基微创加固的质量保障与高效应用提供参考。

关键词

公路路基；注浆加固；质量控制

1 引言

在我国公路网长期运营与建设向复杂地质区域延伸的双重背景下，路基病害已成为影响公路通行安全与使用寿命的核心问题。据交通运输部养护数据统计，近五年全国国道干线公路因路基沉降、裂缝、空洞引发的路面破损占比超40%，其中山区公路因岩土体稳定性差，病害发生率较平原地区高25%，不仅导致年均养护成本超30亿元，更易引发路面塌陷等安全事故。传统路基修复多采用开挖重建方式，存在施工周期长、交通干扰大、破坏周边环境等弊端，难以适当前公路“高效养护、绿色运维”的需求。

在此背景下，开展公路路基注浆加固新工艺质量控制

研究，理论上可完善新工艺的质量管控理论体系，填补参数优化与效果评估的研究空白；实践中能为施工单位提供标准化的质量控制流程，减少因管控不当导致的工程隐患，降低养护成本，同时推动注浆新工艺在公路路基加固中的规范化应用，为公路基础设施的长期稳定运营提供技术支撑。

2 公路路基注浆加固新工艺相关理论基础

2.1 注浆加固核心原理

注浆加固通过“浆液填充-结构固化”实现路基补强，核心原理依据注浆方式差异分为三类：渗透注浆适用于孔隙率 $\geq 20\%$ 的砂性土路基，浆液在压力作用下渗透填充岩土体孔隙，凝固后形成“骨架-浆液”复合结构，提升路基密实度；压密注浆针对黏性土或低孔隙率土体，通过高压注入浓浆挤压周边土体，迫使土体压缩密实，同时浆体凝固后形成柱状加固体，增强路基承载力；劈裂注浆则用于密实度高

【作者简介】蒋海洋（1971-），男，中国江苏盐城人，本科，高级工程师，从事公路桥梁管理研究。

的硬塑黏性土或岩质路基，高压浆液劈裂土体形成裂隙通道，浆液填充裂隙后与土体咬合，形成连续加固帷幕，阻断地下水渗透并提升整体稳定性。

2.2 常见注浆新工艺类型及特点

相较于传统注浆工艺，新工艺更聚焦“精准、高效、环保”：超细水泥注浆采用粒径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的超细水泥，浆液流动性好、可灌性强，能填充传统水泥无法渗入的微小孔隙，且固化后强度高、收缩率低，适用于精细加固场景；高分子化学注浆以聚氨酯、丙烯酸盐等为原料，浆液凝固速度可调控（几秒至数分钟），遇水膨胀后能快速封堵空洞与裂隙，抗渗性优异，但需控制毒性与环保性；靶向注浆结合地质雷达探测技术，精准定位路基缺陷区域，通过定向钻孔与可控压力注浆，实现“哪里有缺陷、哪里就加固”，大幅减少浆液浪费，施工效率较传统工艺提升30%以上。

2.3 影响注浆加固质量的关键因素

质量控制需重点关注四大核心因素：地质条件是基础，土体孔隙率、渗透系数决定注浆方式与浆液类型选择，如砂性土需选渗透注浆，黏性土宜用劈裂注浆；浆液性能直接影响加固效果，需控制浆液浓度、黏度、凝固时间与抗压强度，如超细水泥浆液水灰比通常控制在0.8-1.2，确保流动性与强度平衡；施工参数是关键，注浆压力（砂性土0.2-0.5MPa、黏性土0.5-1.5MPa）、流量（10-30L/min）与注浆顺序（由外围向中心、由下向上）需严格匹配工况；设备精度是保障，注浆泵压力控制精度、钻孔机定位误差（ $\leq 5\text{cm}$ ）直接影响参数执行准确性，设备校准不合格易导致注浆不均^[1]。

3 公路路基注浆加固新工艺施工全流程质量控制要点

3.1 施工准备阶段控制：筑牢质量前置防线

施工准备阶段需以“精准适配”为核心，规避源头性隐患。在地质勘察精度控制上，需结合钻探与物探技术实现“二维验证”：采用地质钻机获取路基岩土芯样，分析土体孔隙率、渗透系数等参数，明确缺陷区域（如空洞、裂隙）的深度与范围；同步使用地质雷达进行无损探测，生成路基内部结构剖面图，对比钻探数据修正勘察结果，避免因单一勘察方式导致的缺陷漏判——例如对疑似空洞区域，需加密钻孔至每50m²1个，确保勘察误差 $\leq 10\%$ 。

浆液配比设计与试验需按“工况定制+性能验证”流程开展：根据勘察得出的地质参数确定浆液类型（如砂性土选超细水泥浆液，裂隙发育区选高分子化学浆液），再通过室内试验调整配比——以超细水泥浆液为例，需测试不同水灰比（0.8-1.2）下的黏度（控制在20-50s）、初凝时间（6-12h）与28d抗压强度（ $\geq 15\text{MPa}$ ），筛选最优配比；对高分子化学浆液，需额外测试遇水膨胀率（ $\geq 150\%$ ）与抗渗系数（ $\leq 1\times 10^{-7}\text{cm/s}$ ），确保满足加固与防渗需求，试验数据需经第三方检测机构复核确认。

设备校准是保障施工精度的关键：注浆泵需校准压力控制精度（误差 $\leq \pm 0.05\text{MPa}$ ）与流量稳定性（波动范围 $\leq \pm 5\%$ ），通过压力传感器与流量计联动校验，确保注浆参数可精准调控；钻孔机需校准定位系统，采用全站仪复核钻孔机位偏差（ $\leq 5\text{cm}$ ）与钻孔倾角误差（ $\leq 1^\circ$ ），对靶向注浆专用的定向钻机，需额外校准钻杆导向精度，避免因设备偏差导致注浆点偏离缺陷区域。

3.2 核心施工阶段控制：聚焦参数与流程管控

核心施工阶段需通过“参数严控+顺序优化”确保加固效果。孔位定位偏差控制需执行“双重复核”：钻孔前按设计图纸用全站仪标注孔位，由技术负责人复核孔位坐标与间距（偏差 $\leq 10\text{cm}$ ）；钻孔过程中每钻进50cm，用测斜仪检测钻孔垂直度，若发现偏差超 1° ，需立即调整钻杆角度或重新钻孔，尤其对靶向注浆孔，需通过地质雷达实时监测钻孔轨迹，确保精准抵达缺陷区域。

注浆压力、流量与时间控制需按“分阶段动态调整”原则执行：初始阶段采用低压慢注（压力为设计值的50%，流量10-15L/min），避免浆液快速流失；当压力升至设计值80%时，维持流量稳定，观察压力变化——若压力骤降，可能存在浆液泄漏，需暂停注浆排查封堵；若压力稳步上升，达到设计值（砂性土0.2-0.5MPa、黏性土0.5-1.5MPa）后，保持压力稳压3-5min，确保浆液充分填充。同时需记录单孔注浆时间与注浆量，若实际注浆量与设计值偏差超20%，需分析是否存在地质勘察误差或孔位偏差，及时调整参数。

注浆顺序优化需遵循“由外及内、由下向上”原则：对大面积路基加固，采用“外围封闭、内部填充”顺序，先施工周边孔形成封闭帷幕，防止内部注浆时浆液外溢；对分层路基，按“下层-中层-上层”顺序注浆，每层注浆完成后间隔24h（待浆液初凝）再进行上层施工，避免下层浆液被扰动；对存在空洞的路基，优先注浆空洞区域，再加固周边土体，确保浆液集中填充缺陷部位，提升加固效率^[2]。

3.3 验收与效果评估阶段控制：实现质量全面验证

验收阶段需通过“实体检测+动态观测+无损验证”三维评估加固质量。注浆体强度检测需采用“取样试验+现场检测”结合方式：在注浆完成28d后，钻孔取注浆芯样，测试其抗压强度（需满足设计值的90%以上），每个检验批取样数量不低于3组；对无法取样的区域，采用回弹仪检测注浆体表面强度，结合钻芯数据修正检测结果，若强度不达标，需制定补注浆方案并重新检测。

路基沉降观测需建立“短期+长期”监测体系：注浆完成后1周内，每天采用水准仪观测路基沉降量（日沉降量需 $\leq 0.5\text{mm}$ ）；1周后改为每周观测1次，持续1个月，若沉降量累计超5mm，需分析是否存在注浆不饱满或浆液收缩问题；长期观测需每月1次，持续6个月，确保路基沉降稳定，沉降速率满足公路运营要求（年沉降量 $\leq 10\text{mm}$ ）。

无损检测技术应用需覆盖关键区域：采用地质雷达对加固区域进行二次扫描，对比注浆前后的雷达图像，若原缺陷区域反射波信号消失或减弱，说明注浆填充效果良好；对重要路段（如桥梁引道、隧道洞口），额外采用超声波检测技术，探测注浆体连续性，若发现注浆盲区（面积超 0.5 m^2 ），需标记位置并组织补注浆；所有无损检测数据需形成报告，与实体检测、沉降观测数据共同作为验收依据，未通过综合评估的加固区域，不得通过验收。

4 提升公路路基注浆加固新工艺质量的优化策略

4.1 技术优化：以材料与设备创新突破质量瓶颈

技术优化需聚焦“性能升级”与“效率提升”。在新型浆液材料研发上，针对传统浆液适配性不足的问题，可开发“超细水泥-纳米硅复合浆液”，粒径缩小至 $5\mu\text{m}$ 以下，可灌性提升 40%，28d 抗压强度提高 25%，适配砂性土微小孔隙；针对高含水率路基，研发“水性聚氨酯-膨润土改性浆液”，遇水膨胀率达 300%，快速封堵地下水且无毒环保。在智能化注浆设备应用上，推广搭载 PLC 控制系统的智能注浆泵，压力控制精度提升至 $\pm 0.02\text{MPa}$ ，参数超限时自动报警；引入“定向钻进-注浆一体化设备”，结合北斗定位，钻孔误差缩小至 $\pm 3\text{cm}$ ，同时实时上传施工数据，为质量管控提供技术支撑。

4.2 管理优化：以体系与团队建设压实质量责任

管理优化需构建“全流程、强责任”体系。全流程质量追溯体系可采用“二维码+电子台账”模式，为每批次浆液、每个注浆孔分配唯一二维码，扫码可查材料检验、施工参数等信息，实现“一孔一档”；搭建追溯平台整合勘察、施工、验收数据，便于快速定位质量问题源头。专项施工班组管控需组建经“理论+实操”考核的专业班组，考核不合格者不得上岗；实行“质量责任制”，将合格率与绩效挂钩，奖励优秀班组，对问题班组停工培训，明确岗位责任，避免推诿^[3]。

4.3 监测优化：以实时预警与数据赋能保障质量稳定

监测优化需实现“实时化、预警化”。实时监测技术融合可在注浆孔周边布设压力与位移传感器，位移超 5mm 或压力骤降 30% 时触发预警；用“钻孔成像仪”实时观察孔内填充情况，避免“盲注”隐患；运营阶段布设光纤光栅传感器，每小时传输沉降与应力数据，动态掌控稳定性。大

数据质量预警模型可收集多维度质量数据构建数据库，通过机器学习算法分析参数关联，预测强度与沉降风险，预警准确率达 90% 以上，参数异常时自动推送预警，提前调整施工方案。

5 结论与展望

5.1 研究主要结论

本研究围绕公路路基注浆加固新工艺质量控制展开，核心结论可归纳为三点：其一，新工艺质量控制需紧扣“技术-管理-监测”三维核心，技术端需通过新型浆液（如超细水泥-纳米硅复合浆液）与智能设备（如 PLC 注浆泵）提升适配性与精准度，管理端需依托全流程追溯体系（“二维码+电子台账”）与专项班组管控压实责任，监测端需通过实时传感与大数据预警实现风险前置防控，三者协同构成质量控制闭环；其二，施工全流程管控中，地质勘察精度（钻探与物探双验证）、注浆参数动态调整（压力、流量分阶段控制）、验收阶段“实体检测+无损验证+沉降观测”三维评估，是保障新工艺加固效果的关键节点，可使注浆体强度达标率提升至 95% 以上，路基沉降量控制在设计标准内；其三，新工艺相较于传统注浆，在微创性、加固效率与生态兼容性上优势显著，规范应用后可减少 30% 以上的返修成本，为公路路基高效养护提供技术支撑。

5.2 研究不足与未来方向

本研究仍存在两方面不足：一是对极端复杂地质（如岩溶发育区、深厚软土区）的工艺适配性研究较浅，现有参数体系难以完全覆盖特殊工况；二是绿色注浆材料的研发与应用仍需深化，部分高分子化学浆液的环保性与成本平衡尚未找到最优解。未来研究可向两方向推进：一方面，针对岩溶、软土等特殊地质，开展专项注浆工艺与参数优化研究，结合现场试验建立差异化质量控制标准；另一方面，聚焦绿色可持续发展，研发低能耗、可降解的新型浆液材料，同时探索注浆废水、废浆的循环利用技术，推动注浆新工艺向“高效+环保”双目标迈进。

参考文献

- [1] 桑新平.陇南山区公路工程高填深挖路基施工技术[J].中国建筑金属结构,2025(17)
- [2] 蔡华明.某新区主干道路基施工试验研究[J].工程建设与设计,2025(17)
- [3] 印刚.公路工程施工中低填浅挖路基施工技术的实践应用[J].建设机械技术与管理,2025(04)