

公路工程路基施工技术及其质量控制研究

任学起

内蒙古路桥集团有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010050

DOI:10.61369/ERA.2026060044

摘 要：针对高等级公路路堤工程材料质量差、沉降难以把控以及高精度施工的问题，在高等级公路路堤工程中提出应用复合改良材料、智能压实技术和信息化施工监测方法。通过高液限粘粒土改良、水泥-粉煤灰复合体系和填石路堤方法，使得无侧限抗压强度提高了2~3倍、压实率在95%~99%，并且沉降量不大于25mm。在智能监控方面采用GNSS定位系统、物联网传感器、无人机LiDAR技术对施工厚度、振幅指标及边坡变形进行实时跟踪。该技术的应用有效的改善了施工工艺，提升了路堤结构的稳定性和耐久性，也增强了其对抗恶劣环境的能力，给建设高精度、高可靠性的公路提供了可行性技术支持。

关 键 词：路基施工；复合改良材料；智能压实技术；数字化监测；填石路基

Research on Construction Technology and Quality Control of Roadbed in Highway Engineering

Ren Xueqi

Inner Mongolia Road and Bridge Group Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010050

Abstract： In response to the problems of poor material quality, difficult settlement control, and high-precision construction in high-grade highway embankment projects, the application of composite improved materials, intelligent compaction technology, and information-based construction monitoring methods is proposed in high-grade highway embankment projects. Through the improvement of high liquid limit clayey soil, the cement-fly ash composite system, and the fill stone embankment method, the unconfined compressive strength has been increased by 2 to 3 times, the compaction rate is between 95% and 99%, and the settlement is no more than 25 mm. In terms of intelligent monitoring, GNSS positioning systems, Internet of Things sensors, and unmanned aerial vehicle LiDAR technology are used to track the construction thickness, amplitude indicators, and slope deformation in real time. The application of this technology effectively improves the construction process, enhances the stability and durability of the embankment structure, and also increases its ability to withstand harsh environments, providing feasible technical support for the construction of high-precision and high-reliability highways.

Keywords： roadbed construction; composite improved materials; intelligent compaction technology; digital monitoring; fill stone embankment

引言

高等级公路建设中路基的承载力、稳定性关系到道路的使用时间以及安全程度，在复杂的地质条件之下传统的施工技术不能做到精准把控，易造成路面不平整、坡面失衡以及出现持续的病害问题等现象的发生。利用复合改良剂增强土体强度，运用智能化碾压技术及信息化监控的方式，大大提高了施工精确度及碾压均匀度。对填方路基与智能化施工工艺进行改进能够解决软土地基、地层水丰富区域、复杂地貌等问题。本文会对施工创新技术、质量管理机制以及环境保护措施等方面进行详细阐述，以便为精准化、稳定化的路基工程提供技术支持和可行性方案。

一、路基施工技术创新研究

（一）新型路基材料与复合改良技术

公路路基材料选择和改善对于路基整体承载能力、稳定性和耐久性起着至关重要的作用。在高速公路上广泛使用高塑性粘

土、粉土、砂土等天然原状土的时候应对其进行物理改良或化学添加剂处理以改善路基材料的性能特点；复合改良技术主要有水泥-粉煤灰、石灰-粉煤灰、高分子改性材料等复合体系，在对软土和湿陷性黄土等地质条件较差的地基进行改良以后可以使改良后的土的无侧限抗压强度达到原来土体的2.0~3.5倍，并使内

摩擦角增加 $3^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ，压缩模量增加1.8~2.7倍，从而大大提高了其承载能力和变形控制能力。复合改良材料颗粒级配以及掺量应根据现场土体的物理化学性能合理的设计搭配方案，来保证改良土层厚度及强度符合设计标准的要求；例如对于沿海地区的软基处理，复合材料掺量一般控制在8%~15%，从而达到持久稳定性和抗侵蚀性的标准。通过对材料微观形貌的研究可以大大降低湿陷性黄土地基施工完成后沉降的问题，并能增强路面结构的耐久能力、整体性、耐疲劳程度等^[1]。

（二）施工机械化与自动化技术应用

近年来道路建设机械化水平不断提升，大吨位推土机、液压挖掘机及智能化压路机等已经普及开来。智能化压实技术(Intelligent Compaction, IC)应用多频率振荡器、GPS测控及GIS系统对施工路面实施精确测定及实时监控管理，压实程度可始终保持在95%~99%之间，并利用无线通讯技术传输至管理中心端予以实时管控并做出相应改进及评定。机械化施工设备有惯导系统(INS)及RTK-GNSS引导下的土方机械，用于土方挖掘及平整达到厘米级精度控制要求。在复杂的地势地貌下，安装了激光扫描仪以及地形识别装置的全自动的推土机能精确地控制到 $\pm 5\text{cm}$ 的误差，在同等条件下比传统的由人力来掌握要精确地高出30%~40%，施工现场机械设备群之间利用了5g网络连接来达到联动的效果并且可以持续工作24个小时不间断的施工，从而使得工效提高了20%~30%，这便是机械化的自动化技术减少了人为误差提高了工作的统一性并可以通过对数据进行分析来达到全程可控的质量管控。

（三）施工工艺优化与智能化流程

施工工艺改进在于过程管控以及深化的信息融合，在于路基填筑与碾压工序中应用智能化检测仪器和精密测控装置，能够对压实次数、振幅、温度、湿度等相关数值做到即时测量及回送，压实控制参数由闭环调节机制来调节，如借助物联网手段使压实机传感器测得的数据时时传送到施工现场管理系统，则能在设定的压实误差为 $\pm 0.5\%$ 范围之内做到自动纠偏；将施工BIM模型同现场感知网结合在一起，构成数字化双体施工智能管理系统，对工程项目进度管控、质量控制以及危险信号进行综合监管。另外，使用无人机LiDAR扫描仪以5~10cm精度周期性扫描施工地形，可以快速得到三维地貌地图并对比设计模型计算变形误差，为下一步工序调整提供参考依据；根据施工过程自动化建立工艺参数库，针对不同的岩土类型以及不同类型材料的施工工艺做出大数据分析模型，有利于标准化施工方案的制订和施工工艺的标准化程度以及精确度^[2]。

二、路基施工质量控制体系

（一）全过程质量监控方法

路基工程全过程中质控包括了材料选择、地基处理、填筑压实以及表面整修等方面，利用在线监控加现场检验的方式保障压实度、厚度以及含水量等都达到相关标准，在《公路工程路基施工规范》(JTG B01-2014)的基础上，压实度不低于95%~100%，每500m²取样不少于5处，使用核子密度仪或者夯实锤法测定；填筑层厚一般控制在20~30cm之间，含水量误差 $\pm 2\%$ ，对于软基处置处则采取沉降观测桩的方法，每周测一次沉降

值，精确至 $\pm 1\text{mm}$ ，累计沉降达到设计允许值的50%时要及时调整施工工艺。施工资料由施工现场移动设备传送到管理系统中实现对现场施工进行实时记录及过程检验形成闭环管理模式确保路基工程所有施工阶段的质量可控及可追溯性。

（二）智能检测与监测技术

信息化检测手段主要有地质雷达(GPR)、多点振动力测量以及无人机航测等，结合传感器网络和大数据分析技术可以实时了解路基状况；地质雷达可以探知路基内部空洞及密实度以及上下垫层之间的粘结状况，探测误差为 $\pm 5\text{cm}$ ，探测深度达2m；振动力测量通过安装加速度计在压路机上以及路基表面，在每分钟采集50个样本，记录下振动力大小与频率曲线，方便后期判断是否压实均匀；无人机航测配合LiDAR扫描产生三维点云图，精度高达 $\pm 10\text{cm}$ ，可以定期观测施工结束后的表面高差以及边坡稳定程度。信息传送是用5G网络+云平台的方式，在线制作质量报告并且自动标识问题点，作为工程整改的数据支撑。

（三）风险识别与质量预警机制

路基工程的风险有沉降过大、边坡滑移失稳、强度不够等问题，在此通过对质量指标以及检测数据建立风险辨识算法模型。沉降警报使用累计沉降速率门限，在一周内沉降速率大于设计值的0.5倍就报警。边坡稳定性的监测依靠的是倾斜仪和应变仪获得的最新的变形数值，如果临界位移达到设计规定的5毫米就发出警告。材料质量不合格通过含水率、密度、抗压强度等方面来判定是否超标，超出正负百分之五的数据录入为风险档案。报警系统与施工管理系统相结合，让异常信息可以及时传播并作出相应的决定，保证了工程施工的安全及路基长久的稳定性，也为之后的维护保养等提供了参考依据^[3]。

三、路基施工中的环境与安全控制

（一）施工对环境影响及减缓措施

路基工程施工产生的扬尘、噪声以及地表水扰动、土体碾压造成的生态环境扰动为主要环境问题。扬尘浓度采用工地现场PM10检测仪进行测定，规范要求不大于 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；喷雾洒水装置覆盖率达到85%以上；铺筑碎石基层20cm厚度减少机械车辆扬尘。噪声监测点布置在作业区边界处，每小时采集一次，噪声强度小于等于75dB(A)。雨期施工要开设边坡排水槽与沉淀池，排水管道直径为一般选取 $\phi 300\text{—}500\text{mm}$ ，确保水流清澈以及沉渣截留比率大于等于80%。针对生态脆弱地区，在施工范围内宽度控制在设计宽度70%之内，实施植被临时覆盖，维持土体结构的稳定性以及水土流失小于等于50吨/平方公里·年，施工材料运输路径与堆料场进行合理布置以减少重机械的运行频率至20%以下，减轻对外围环境破坏。

（二）安全施工规范与智能管理

工程安全管理包括边坡防护，机械设备使用，人员工作，施工意外预防四个方面，边坡观测采用倾角仪以及应变片进行监测，每隔10米设一个点，预警界限是5毫米；机械设备的操作使用智能化管理系统，对整个施工现场的液压抓斗挖掘机、推土机以及压路机电控部分进行实时的定位监控和载荷监控，数据每秒收集一次；高空作业人员佩戴的安全带与智能定位手环连接，当距离危险区不足一米发出声光警报。劳务班组严格执行《公路工

程施工安全技术规范》(JTG F10-2011)的规定,在现场全天候不间断的进行巡视检查,发现隐患及时上传至平台并予以销号处理。利用数字系统集成机械设备状况、环境监控以及工作人员情况,做到对风险进行预警、对于事故发生能够及时处理以及施工行为可以查询回溯等管理措施。

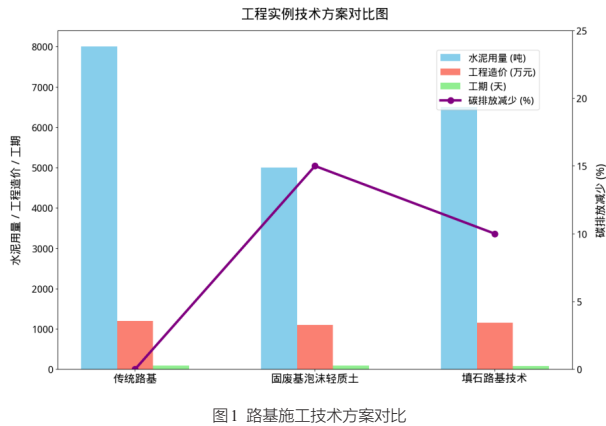
（三）可持续施工技术探索

可持续路基施工技术主要是节约能源、减排碳、提高持久稳定性,在回填中运用再生材料,以粉煤灰、废弃混凝土、工业副产品废渣等代替20%~30%左右的天然砂砾,且压实度大于或等于95%;机械运用液压动力回收装置,节约油料15%左右,碳排放降低12%左右;边坡、路肩用生态防护方法,草植覆盖率大于或等于80%,防洪能力达到设计洪水频率1/10年的水平;水土保持措施有多个层次的沉淀池及排水沟,拦截率 $\geq 85\%$,减小施工期水土流失。利用工程建设全生命周期信息化管理可以优化机械设备行驶路线,节约工期10%~15%,在满足施工误差 $\pm 2\text{cm}$ 的要求下达到工程经济性和环保性的双重最优解^[4]。

四、路基施工技术创新的应用与效果评估

（一）工程实例分析与施工效果验证

汉口到阳逻江北快速路项目为解决高地下水位、软土地基的问题而采取的填石路基的施工方法。本项目共填筑石方路基长度为12.5 km,其填筑层厚度 $0.8\text{ m} \pm 0.05\text{ m}$,用当地散石料代替不良土质进行填筑,降低了对于传统的土方材料的需求的同时增加了路面抗渗性。路基完成以后使用全站仪和GNSS复核高程,施工段落最终沉降量不大于25 mm,符合设计要求的30 mm的标准。填石层内渗流系数为 $1.2 \times 10^{-3}\text{ m/s}$,远远大于一般土壤的渗流系数(10^{-5} m/s),加快地表水排出速度,减小了施工阶段的积水可能性,增强路基底部稳定性和强度,这表明在复杂地质条件下填石路基技术可以做到精细化施工以及优质的工程质量。图1所示。



参考文献

[1] 刘敏. 公路工程高填方路基施工技术及其质量研究 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (05) : 64-66.
[2] 杨涛. 公路路基标准化施工技术及其质量控制措施探讨 [J]. 中国标准化, 2022, (24) : 210-212.
[3] 刘中兰, 牟映衡. 高速公路填石路基施工技术和质量管理研究 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (14) : 85-87.
[4] 赖冠斌. 市政公路工程路基路面施工技术及其质量管理措施 [J]. 工程与建设, 2023, 37 (02) : 689 - 691.
[5] 耿亚明. 山区公路路基施工关键技术及质保措施研究 [J]. 交通世界, 2023, (28): 127-129.

（二）技术经济性分析与成本优化

针对同类型高速公路建设项目来讲,在运用工业固废复合材料技术可以大幅削减建设成本以及节约资源,例如在某一高速公路上使用固废衍生泡沫轻质土取代一定数量的水泥,每公里填筑节省水泥可达3000t左右,节约建筑费用大约100万元人民币之多,并消耗工业固体废物达10万吨。同时也可以调整材料供应链及环保目标值。此材料容重处于 $0.6\sim 1.2\text{g/cm}^3$ 之间,7天抗压强度是 $1.0 \sim 4.8\text{MPa}$ 以上,超出了一部分规定标准,另外360天抗压结果相较28天提升了约1.6~2.0倍。具有较好的耐久性能。另外,采用此种材料替代减少了常规土石方运输、材料购买费用在总施工费用中的占比约有8%~12%^[5]。如表1所示。

表1 技术经济性对比 (单位: 每公里)
注: 数据根据项目施工纪实与技术推广资料整理

技术方案	水泥用量 (吨)	工程造价 (万元)	工期 (天)	环境指标 (碳排放减少)
传统路基	8000	1200	90	基线
固废基泡沫轻质土	5000	1100	88	↓约15%
填石路基技术	6500	1150	85	↓约10%

（三）对比分析：传统工艺与创新技术

传统路基工程中处理软弱地基、高填路堤时常常会使用大量的机械碾压和人工复测,其压实密度也基本保持在92%~95%,并且对于沉降差异性和排水效果方面也不够完善。但是经过智能化压实调控以及新材料的研发之后,其压实密度能够达到95%~99%,震动频次、行驶速率等相关信息也可以做到精确到正负0.2%,而且施工的一致性和压实均匀性的程度也大大加强。智能监控以及数字化工序使得每层厚度误差范围缩小到了正负0.03m之内,要比传统的正负0.05m要严格许多。新技术应用于复杂的地层上对于强夯、深层挤密桩的处理方式更加合理而且有效,使得工程完成后路基沉降总体不超过了5 cm的范围,在一些项目当中甚至达到了 $\leq 3\text{ cm}$ 水平以下,进而增强了公路的耐久性能和服务年限。

五、结语

路基施工创新及质量管理覆盖材料选择、机械化作业以及信息化管理各个阶段,运用复合改良材料、填石路基工艺技术、智能监控等措施,达到施工准确度 $\pm 0.05\text{ m}$ 、压实度95%~99%、沉降量不大于25 mm的目标;智能化、绿色施工工艺提高了项目建设水平以及对自然环境的适应能力,在减少环境污染的同时节约了能源资源消耗,给予高速公路工程建设高效、低碳环保的解决方案和技术参考。