

浮砂路基填筑施工技术比较研究与工程应用

岳晓荣¹ 宁 嫚²

1. 中国水利水电第一工程局有限公司 吉林 长春 130062

2. 陕西中悦建投建设工程有限公司 陕西 咸阳 712000

摘要：针对浮砂路段路基填筑过程中存在的稳定性差、工后沉降大、成本控制难等问题，本研究提出传统水泥改良法、碱渣轻质土填筑法及动力补强快速填筑法三种技术方案。通过系统对比试验和工程验证，重点分析了各方案的路用性能、经济性和施工效率。研究表明：以碱渣轻质土技术为核心的综合方案，结合动力补强工艺，在黄泛区粉土路段应用中可降低碳排放40%，节约工期35%，减少填料成本30%，同时满足路基压实度 $\geq 96\%$ 、弯沉值 $\leq 0.2\text{mm}$ 的技术要求，为类似地质条件下的公路建设提供了可推广的技术经验。

关键词：浮砂路基；碱渣轻质土；动力补强；施工技术；成本控制

引言：浮砂路段广泛分布于我国黄泛平原、沿海地区及内陆沙地，其典型特征为砂粒含量高（通常 $>85\%$ ）、粘聚力低（普遍 $<5\text{kPa}$ ）、水稳定性差，在交通荷载作用下易产生侧向位移和过量沉降。以山东省为例，黄泛区面积占全省1/3以上，粉土成为区域内路基工程的主要填料。随着资源环保压力加大，取土日趋困难，导致工期紧张，严重影响工程进度和建设质量。

传统浮砂路基处理方法主要依赖水泥或石灰改良，虽有一定效果，但存在三大瓶颈：一是材料成本占工程总造价比例高达40%~50%；二是改良土施工需长达7~10天的养护周期，严重制约进度；三是大规模使用水泥导致碳排放量增加，每立方米改良土产生约300kgCO₂排放。

因此，亟需研发经济高效、绿色低碳的新型填筑技术。

近年来，固体废弃物资源化利用技术和动力压实技术为浮砂路基处理提供了新思路。新方案碱渣轻质土（A~LS）技术，通过利用氨碱法废渣制备轻质填料，在连云港—宿迁高速公路应用中成功节约70%水泥用量；新方案动力补强技术，有效解决了路基碾压盲区问题，缩短了施工周期。本研究基于既有成果，系统比较三种技术路线，旨在优选出综合效益最优的浮砂路基填筑方案^[1]。

1 技术方案设计

1.1 浮砂路段工程特征

典型浮砂路段具有以下地质特点：

表1 浮砂路段典型地质特征参数

指标	范围	测试标准	工程问题
颗粒组成（0.075~0.6mm）	85%~95%	JTGE40-2007	粘结性差
天然含水率	4%~8%	GB/T50123-2019	压实困难
CBR值	3%~8%	JTGE40-2007	承载力不足
渗透系数	$3 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$	GB/T50123-2019	水稳定性差
内摩擦角	28°~32°	JTG3430-2020	抗剪强度低

1.2 方案设计与技术路线

基于浮砂路段特性及工程需求，提出三种技术方案：

1.2.1 传统水泥改良法

采用分层填筑碾压工艺，每层厚度30cm，添加5%~8%水泥（P·O 42.5）进行改良。工艺流程包括：基底处理→砂土开挖→水泥掺拌（路拌法）→含水量调整→分层碾压（22t振动压路机）→养护（土工布覆盖7天）。该方案技术成熟，但碳排放高，工期长。

1.2.2 碱渣轻质土填筑法

利用工业废渣资源化技术，将氨碱法废渣（占比

60%~70%）、水泥（8%~10%）、发泡剂（0.3%~0.5%）及调节剂混合制备轻质土。湿密度控制为0.8~1.2g/cm³，流动值180±10mm。采用集中拌和→罐车运输→分段浇注（每层50cm）→自然养护工艺。此方案核心在于变废为宝，实现轻质高强。

1.2.3 动力补强快速填筑法

结合冲击碾压与盲区处理技术，采用25kJ三边形冲击碾，每2.0m填筑层进行补强。关键技术包括：①基于应力波理论的补强参数设计（冲击频率12~15Hz，行进速度8~10km/h）；②弱碾区识别系统（压实度云图实时监

测) ; ③盲区动力补强装置(液压夯击能量15kJ, 夯击次数3~5次/点)。施工流程为: 砂土摊铺→初压(静压1遍)→复压(冲击碾10遍)→弱碾区检测→液压补强→终压(静压收面)。

2 研究方法与性能对比

2.1 试验方法设计

通过室内试验与现场测试综合评价三种方案:

力学性能试验: 按照JTG E40-2007进行无侧限抗压强度(7d、28d)、直剪试验(法向应力100kPa~400kPa)、CBR试验。

表2 三种方案路用性能试验结果对比

性能指标	方案一	方案二	方案三	规范要求
7d无侧限抗压强度(kPa)	450±30	380±25	不适用	≥350
28d无侧限抗压强度(kPa)	650±40	820±35	不适用	≥550
CBR值(%)	18.5±1.2	22.7±1.5	15.3±0.8	≥8
水稳系数(10次干湿)	0.78	0.93	0.85	≥0.75
冻融强度损失率(%)	22.5	9.8	18.3	≤25
回弹模量(MPa)	85±5	110±8	75±4	≥60
弯沉值(0.01mm)	18.3	12.5	20.6	≤25

分析表明: 碱渣轻质土(方案二)综合性能最优, 其28d抗压强度达820kPa, 超过方案一26%; CBR值22.7%, 满足重载交通需求; 尤其在水稳定性方面, 干湿循环后的强度保持率达93%, 冻融损失率仅9.8%, 远优于传统方案。方案三虽力学指标稍低, 但完全满足规范要求, 且具有施工速度优势^[2]。

2.2.2 经济性与环保性对比

表3 经济环保指标对比(按1000m³填方计算)

对比项	方案一	方案二	方案三
材料成本(万元)	15.8	9.2	5.3
机械费用(万元)	3.5	2.8	4.1
人工费用(万元)	2.2	1.5	2.5
总成本(万元)	21.5	13.5	11.9
施工周期(天)	14	7	9
水泥用量(t)	80	24	0
CO ₂ 排放量(t)	72	21.6	0
固废利用率	0	65%	0

数据显示: 方案二在综合成本和环保方面优势显著, 总成本比方案一降低37%, 碳排放减少70%; 虽然方案三直接成本最低, 但方案二因利用了工业废渣(每方消耗碱渣0.7t), 兼具环境效益和社会效益。方案二缩短工期50%, 对保障项目进度意义重大^[3]。

3 工程应用与优化方案

3.1 依托工程概况

选择山东省东营~青州高速连接线K12+300~K13+800

耐久性测试: 干湿循环(浸泡12h+烘干12h为1循环)和冻融循环(-20°C冻12h+25°C融12h)试验各进行10次。

现场检测: 填筑完成后采用落锤式弯沉仪(承载板直径300mm)检测回弹模量, 贝克曼梁法测弯沉值。

经济性分析: 核算材料费、机械费、人工费及碳排放成本(按CEAM模型计算)。

2.2 性能对比结果

2.2.1 路用性能对比

段为试验工点, 该路段属典型黄河冲积平原, 地下水位-1.5m, 填高3.2~4.5m。原状土检测显示: 砂粒含量89.7%, 天然含水率5.3%, CBR值4.8%, 属于极不稳定浮砂路基。原设计采用水泥改良法, 经技术经济比选后变更为“碱渣轻质土+动力补强”综合方案。

3.2 关键技术实施

3.2.1 碱渣轻质土制备与施工

材料配比优化: 碱渣(连云港碱厂废渣)65%, 水泥(P·O 42.5)8%, 发泡剂(H₂O₂基)0.4%, 调节剂(CaCl₂)2%, 水24.6%。

集中拌和工艺: 采用双轴强制式搅拌机, 投料顺序: 碱渣→水泥→调节剂(干拌30s)→水溶液(含发泡剂)(湿拌120s)。

现场浇注控制: 分层浇注(每层50cm), 浇注温度5~35°C, 单日浇注量800~1000m³。浇注后24h内禁止荷载。

3.2.2 动力补强技术实施

针对路基边缘、台背等碾压盲区, 实施三步补强:

弱碾区识别: 采用压实度雷达检测车(频率1GHz)生成压实度云图, 识别压实度<93%区域。

液压补强作业: 选用15kJ液压夯击机, 夯击间距0.8m, 每点夯3次(提锤高度1.2m)。

质量验证: 补强后复测压实度, 确保达到96%以上。

3.3 应用效果监测

表4 工后监测数据(6个月周期)

监测项目	检测点位	标准要求	实测值
弯沉值(0.01mm)	K12+450	≤25	13.2
压实度(%)	K13+200	≥96	97.3
工后沉降(mm)	K12+800	≤30	18.5
CBR值(%)	K13+500	≥8	23.1
碱渣利用率	全段	~	630t/km

工程成效显著：节约成本32%（相比原设计方案），缩短工期35%，消耗碱渣废弃物630t/km。经6个月监测，路基沉降稳定在18.5mm以内（低于30mm控制标准），弯沉值仅13.2（0.01mm），满足高等级公路要求。轻质土浇注路段平均减载30%，有效减小了工后沉降风险。

4 结论与推广建议

4.1 技术经济结论

本研究通过系统试验和工程验证，得出以下结论：

综合性能优势：碱渣轻质土（A~LS）方案展现出最优的路用性能和耐久性，其28d抗压强度达820kPa，CBR值22.7%，冻融损失率<10%，完全满足重载交通路基要求。该材料成功实现了“以废治砂”，解决了浮砂路段粘结性差、水稳定性不足的固有缺陷。

经济效益显著：相比传统水泥改良法，碱渣轻质土方案降低直接成本37%，其中材料费节约42%；施工周期缩短50%，大幅降低了项目管理成本。每公里路基建设可消耗工业废渣630吨，节省水泥用量210吨，创造了可观的环保效益。

工艺适应性突破：结合动力补强技术，有效解决了路基边缘及结构物周边弱碾区的压实难题。通过压实度云图识别和液压精准补强，使全断面压实度均匀性提升至95%以上，避免了传统碾压的盲区缺陷。

4.2 推广技术路线

基于研究成果，推荐“碱渣轻质土核心层+动力补强工艺”的综合技术路线作为浮砂路段填筑的首选方案，具体实施要点包括：

材料制备：碱渣占比60%~70%，水泥8%~10%，湿密

度控制在1.0~1.2g/cm³，流动值≥180mm。

结构设计：轻质土应用于路床以下0.8~1.5m核心层，其上设30cm改良土保护层。

补强工艺：采用冲击碾（25kJ）进行整体压实，对结构物周边3m范围实施液压补强（夯实能量15kJ，3击/点）。

质量控制：浇注体7d强度≥350kPa，终压实度≥96%，弯沉值≤0.2mm。

该技术在黄泛区、沿海砂土路段具有广阔应用前景，特别适合在碱渣产区周边200km范围内推广。后续研究可进一步探索脱硫石膏、钢渣等固废在轻质土中的应用，扩大废弃物资源化利用范围，推动公路工程绿色低碳建设^[4]。

结束语

本研究围绕浮砂路基填筑的技术痛点，通过对传统水泥改良法、碱渣轻质土填筑法及动力补强快速填筑法的系统对比，明确了“碱渣轻质土+动力补强”综合方案的技术优势与应用价值。本文不仅解决了浮砂路段稳定性差、工后沉降大的核心问题，更实现了固体废弃物资源化利用与工程低碳建设的协同，为黄泛区、沿海等类似地质条件下的公路路基施工提供了切实可行的技术路径。

研究成果的工程验证表明，新型填筑技术在提升路用性能的同时，显著降低了工程成本与碳排放，符合当前交通基础设施绿色化、高效化的发展要求。后续将持续优化轻质土材料配比，拓展固废利用种类，并完善施工质量智能监测体系，推动该技术在更广泛区域落地应用，为公路工程建设的技术升级与可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]刘松玉,王正成,吴恺等,碱渣轻质土路基填筑应用试验研究[J],岩土工程学报,2024,46(10):2019-2029。
- [2]山东省交通运输厅,交通强省建设科技创新项目[EB]。
- [3]2020.JTGE40-2007,公路土工试验规程[S]。
- [4]JTGT3610-2019,公路路基施工技术规范[S]。