

公路桥涵软土路基加固方法探讨

夏 艇

(核工业西南建设集团有限公司, 四川 成都 610031)

摘 要 软土路基在公路桥涵工程中易出现沉降过大、承载力不足等问题, 软土广泛分布区域的公路桥涵工程建设常面临工期延误与成本超支的困境。本文针对公路桥涵场景下的软土路基加固技术, 分析传统方法实操局限, 结合材料革新与工艺优化梳理针对性技术路径。经试验与实操验证, 复合加固技术可有效平衡加固效果与环保要求, 适用于高等级公路桥涵及沿海软土地区基建工程, 可为施工方案的制定提供借鉴。

关键词 公路桥涵; 软土路基; 加固技术; 参数控制; 适配优化

中图分类号: U445.55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.028

0 引言

软土路基低强度、高压缩性的固有特征, 易导致公路桥涵运营期出现桥头跳车、结构开裂等病害, 严重影响通行安全与工程耐久性。现行技术标准中部分加固方法参数设定笼统、场景适配性不足, 传统工艺还面临环保与成本的双重约束, 不少工程因技术选型不当出现二次返工问题。基于行业实操痛点, 本文聚焦软土路基加固的落地路径, 拆解技术细节、优化操作流程, 为工程实践提供技术参考, 破解不同地质条件下加固效果与经济性的平衡难题。

1 软土路基加固技术的基础适配逻辑

1.1 地质勘察与加固目标的精准匹配

地质勘察数据的完整性直接影响加固方案的落地成效, 需重点采集软土厚度、含水率、孔隙比等核心指标。前期工程实践中仅依据规范推荐值设计方案, 实际应用中易出现加固过度或不足的情况, 后续结合现场原位测试数据完成参数优化。勘察过程需覆盖桥涵基础影响范围, 每个测试点间距控制在10米~15米, 确保数据具备现场代表性。但需注意的是, 地质条件的空间变异性可能导致局部数据失真, 可通过加密测试点修正, 加密间距可缩小至5米, 只是加密作业会增加少量勘察工期与成本^[1]。

1.2 加固方法的核心适用边界划分

不同加固技术的适配场景存在显著差异, 工程方案选择需兼顾地质条件与施工条件双重因素。换填法适用于软土厚度小于3米的区域, 但其对填料质量与压实标准要求严格, 料源缺乏地区会大幅提升施工成

本。强夯法施工速度快, 却因振动与噪声污染, 无法在城区及临近构筑物区域应用。排水固结法加固效果稳定, 却需预留充足预压时间, 对工期紧张的项目形成明显制约。从实操层面看, 单一加固方法难以满足复杂地质条件需求, 需根据现场具体情况组合应用, 组合过程中还需考虑各技术的施工衔接性。

1.3 环境约束下的技术选择原则

环保要求已成为加固方案设计的重要考量因素, 传统弃土回填模式面临显著的生态压力。采用工业固废作为加固材料时, 需先完成有害物质含量检测, 确保指标符合现行环保标准。临近水源地施工时, 需避免加固材料渗漏污染水体, 优先选择环保型固化剂, 只是环保型材料的采购成本略高于常规材料。施工过程中产生的扬尘、噪声需控制在限值内, 夜间施工需采取降噪措施, 这些约束条件会增加施工复杂度, 却能显著降低工程的生态影响, 仅需额外投入少量环保监测成本。

2 主流加固技术的实操优化与细节控制

2.1 换填法的施工工艺改进与参数细化

换填法是公路桥涵软土路基加固的基础工艺, 关键通过替换软弱土层、优化压实参数实现承载力精准提升, 实操优化聚焦填料选型、分层施工与质量管控三大环节。参考公路路基施工技术规范, 针对桥涵路基荷载集中、沉降控制严格的特点调整填料标准, 优先选用级配良好的砂石混合料或水泥改良土, 含泥量控制在5%以内(现场试验确定, 检测允许±1%偏差), 最大粒径不超过垫层设计厚度1/3。施工采用分层开挖

作者简介: 夏艇(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程施工。

回填, 每层厚度 30 厘米 (依填料类型可调整 ± 5 厘米), 选用 20 t 振动碾以 2.5 千米 / 小时碾压不少于 4 遍, 压实度达 95% 以上; 换填深度超 1.5 米设台阶式搭接, 搭接宽度 ≥ 0.5 米。前期采用统一压实参数, 发现深层填料压实度不达标, 后通过现场试验调整碾压遍数与速度解决问题。该方法技术成熟、施工便捷, 但软土厚度较大时, 填料用量与开挖深度增加, 会显著提升施工成本、延长工期, 需结合工程经济性综合考量, 部分项目会因成本过高放弃该方案^[2]。

2.2 复合地基法的增强体选型与布置优化

复合地基法通过在软土路基设置增强体, 与天然软土形成协同受力体系, 提升路基承载力与抗沉降能力, 实操优化核心为增强体选型、布置参数与施工质量控制, 工艺流程如图 1 所示。参考建筑地基处理技术规范, 针对公路桥涵路基受力特征适配调整增强体方案, 避免照搬建筑工程参数。碎石桩适配渗透性较好的软土, 可加速孔隙水排出; 水泥土搅拌桩适用于饱和黏性软土, 通过固化反应形成高强度桩体。桩径 550 毫米 (10 组原位测试确定, 施工允许 ± 20 毫米偏差), 桩间距 1.8 米 ~ 2.2 米呈等边三角形布置, 桥涵拐角处需人工微调, 施工效率略有下降。施工控制桩身垂直度偏差 $\leq 1\%$, 桩长穿透软土层并嵌入下卧硬土层 ≥ 0.5 米。前期采用常规搅拌速度, 出现桩身搅拌不均、断桩隐患, 后调整搅提升速率并增加复搅工序解决。该技术加固效果显著, 但施工质量隐蔽性强, 桩身完整性难以直观检测, 抽样检测虽能把控质量, 却存在一定的漏检风险。

2.3 排水固结法的预压系统优化与时效控制

排水固结法通过布设排水系统加速软土孔隙水排出, 促进土体固结, 提升承载力。实操优化重点在于排水系统布置、预压方案设计与时效控制。前期采用单一堆载预压, 固结周期过长无法满足工期要求,

后优化为堆载与真空联合预压方案。排水系统选用宽 100 毫米、厚 4 毫米塑料排水带 (采购允许 ± 2 毫米偏差), 插入深度穿透软土层至下卧硬土层, 间距 1.2 米 ~ 1.5 米, 呈正方形布置。真空预压阶段膜下真空度稳定 ≥ 80 kPa, 采用双层密封膜防止漏气; 堆载预压按 ≤ 20 kPa/d 分 3~4 级加载, 避免超孔隙水压力导致路基失稳。固结时间依监测数据确定, 沉降速率连续 7 天 < 0.5 毫米 / 天、孔隙水压力消散率 $\geq 80\%$ 时停止预压。施工中实时监测沉降与孔隙水压力, 异常时减缓加载或加密排水带, 虽能保障效果但会增加少量材料成本。该方法加固稳定、环保性好, 且对场地要求高, 需预留充足预压空间, 预压周期较长, 不适用于工期极度紧张的工程^[3]。

2.4 新型固化技术的应用与适配调整

新型固废基固化技术以工业固废为主要原料, 搭配专用激发剂制备固化剂, 无需高温煅烧, 兼具环保性与经济性, 适配公路桥涵软土路基低碳加固需求, 实操优化聚焦固化剂配比、搅拌工艺与质量控制^[4]。参考相关研究成果, 针对桥涵路基承载要求调整配比, 固化剂与软土混合比例 10% ~ 15%, 激发剂掺量为固化剂总量的 8% ~ 12%, 确保固化土无侧限抗压强度 ≥ 1.5 MPa。施工采用原位固化工艺, 选用深层搅拌桩机, 搅拌速度 1.2 米 / 分钟、提升速度 0.8 米 / 分钟 (施工允许 ± 0.1 米 / 分钟偏差), 搅拌均匀度 $\geq 90\%$ 。前期发现软土含水率超 40% 时固化效果显著下降, 后增加脱水预处理工序, 将含水率控制在 30% ~ 40%, 虽提升效果但增加少量施工时间。该技术无需大量开挖回填, 施工效率高且实现固废资源化利用, 但对软土含水率、有机质含量敏感, 施工前需开展现场工艺试验确定最优参数, 试验虽需少量投入, 却能避免固化土强度不足的问题。不同公路桥涵软土路基加固技术核心性能对比如表 1 所示。

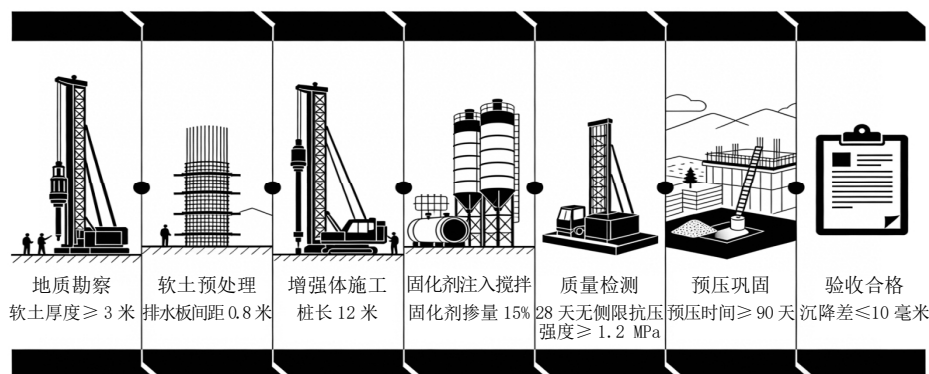


图 1 公路桥涵软土路基复合加固—预压一体化工艺流程图

表 1 公路桥涵软土路基加固技术核心性能对比表

加固技术	适用软土厚度（米）	承载力提升幅度	工期影响	环保性
换填法	≤ 3	30% ~ 50%	较短	一般
复合地基法	3 ~ 10	50% ~ 100%	中等	较好
排水固结法	≥ 5	40% ~ 80%	较长	良好
新型固化法	2 ~ 8	60% ~ 90%	中等	优秀

（注：承载力提升幅度基于天然软土承载力特征值 100 kPa 测算，实际数值受地质条件影响存在 ±10% 偏差。）

3 加固效果的监测与优化调整路径

3.1 监测指标体系的构建与实施

加固效果监测需全面覆盖承载力、沉降、稳定性等核心指标，前期工程实践中仅设置沉降监测点，发现难以全面反映加固质量，后续补充了孔隙水压力与水平位移监测指标。沉降监测采用沉降板，布置间距为 20 米~ 30 米，监测频率为施工期间每 3 天一次、运营初期每月一次。沉降监测数据需实时上传至管控平台，若遇极端天气，监测频率需适当加密，实际操作中存在一定的灵活性^[6]。承载力通过静载荷试验检测，试验点数量不少于总加固面积的 0.5%，试验过程需严格遵循规范要求，避免操作不当导致试验数据失真。孔隙水压力监测采用孔隙水压力计，埋置深度根据软土分层确定，水平位移监测选用测斜仪，布置在路基边缘关键位置。监测数据需实时分析，发现异常及时调整施工参数，如沉降速率超标时需暂停加载，暂停加载会对工期产生一定影响。

3.2 施工过程中的动态优化机制

当沉降速率超过预警值时，需暂停施工或减缓加载速率，待监测指标恢复正常后再逐步复工；在复合地基施工中，若检测发现桩身完整性不足，需调整搅拌参数或增加桩体数量，增加桩体数量会小幅提升工程成本。在排水固结过程中，若孔隙水压力消散缓慢，需加密排水板或延长预压时间，延长预压时间需结合工程工期要求综合考量。从实际操作来看，动态优化机制的落地效果依赖监测人员的专业能力，需开展不少于 3 次的现场实操培训，培训工作需提前规划，避免影响施工进度。该机制能有效规避加固质量问题，却对现场管理的精细化程度提出了更高要求。

3.3 常见问题的处置与预防措施

针对压实度不足的问题，可采用增加碾压遍数或更换压实机械的方式处理；更换压实机械时需考虑设备调配的便捷性。对于桩体缺陷，需采用注浆补强或补打桩体的措施，注浆补强时需控制注浆压力与注浆量，避免二次损伤路基。排水系统出现堵塞时，需及

时清理疏通，必要时更换排水带，更换排水带会增加少量施工工序。在预防措施方面，施工前需进行工艺试验，确定最优参数；施工中加强工序验收，上道工序不合格不得进入下道工序，工序验收会增加少量现场管理工作量。结合行业实际，这些问题的发生多与参数控制不当或施工操作不规范相关，需强化过程管控。但部分地质条件下，即使严格按规范施工，仍可能出现局部加固效果不佳的情况，需预留应急处置方案，如局部注浆补强，应急方案需提前编制并做好材料储备。

4 结束语

本文拆解主流加固技术的操作细节，优化参数控制体系与施工流程，提出复合加固思路与动态调整机制，以期在公路桥涵工程中有效提升加固效果与工程经济性；明确了不同加固技术的适用边界与实操局限，为工程方案选择提供了参考，解决传统技术选型笼统、适配性不足的行业痛点。但软土路基的地质复杂性决定了加固技术仍需持续优化，当前技术在深厚软土加固中仍存在效率偏低的问题，极端恶劣环境下的技术适配性也需进一步提升。同时，现有监测技术的精准度与评价标准的完善度仍有提升空间，现阶段的复合加固技术在深海软土区域的应用，还需更多现场试验验证参数适配性，后续研究可重点围绕这些难点展开技术攻关与试验研究。

参考文献：

[1] 李传信. 公路桥梁中桥涵软土地基施工处理策略研究 [J]. 运输经理世界, 2023(02):70-72.
[2] 杨海峰. 公路桥梁工程中桥涵软土地基施工处理策略研究 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(06):154-155.
[3] 吴登跃. 公路桥梁工程桥涵软土地基施工处理方法 [J]. 工程技术研究, 2020, 05(02):83-84.
[4] 王少林. 软土地基公路桥涵构造物路基过渡段的施工与质量控制 [J]. 交通世界, 2019(15):84-85.
[5] 林淑强. 公路桥梁工程中桥涵软土地基的施工处理方法 [J]. 交通世界, 2019(16):104-105.