

公路桥梁施工中的软土地基施工技术研究

吴义闯

安徽建工公路桥梁建设集团有限公司 安徽 合肥 230031

【摘要】：公路桥梁建设向复杂地质区域拓展，软土地基因高压缩性、低承载力、强触变性成为工程质量核心制约。本文梳理置换类、加固类、排水固结类三大技术体系，分析各技术适配场景与操作要点，构建“前期勘察→技术选型→过程管控→后期监测”全流程质量体系，探讨智能化融合、绿色化推广、新材料应用趋势。研究表明，精准选型与全流程管控是保障工程安全的关键，为复杂地质施工提供技术支撑。

【关键词】：公路桥梁施工；软土地基；施工技术

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.043

软土地基在公路桥梁施工中易引发基础不均匀沉降、上部结构开裂，严重时威胁工程使用寿命。随着工程向沼泽、滨海等软土集中区域推进，传统处理手段难以适配新需求，技术体系与质量管控的系统性研究愈发迫切。本文通过分析技术要点、明确管控路径，助力解决实际施工中的技术难题。

1 公路桥梁软土地基核心施工技术分类及分析

针对软土地基的工程特性，公路桥梁施工中形成了置换类、加固类、排水固结类三大核心技术体系。

1.1 置换类施工技术

置换类施工技术的核心逻辑是挖除软弱土层、换填优质填料，通过直接替换地基中的软土，从根源上改善地基承载能力，适用于软土厚度较浅、周边优质填料易获取的公路桥梁施工场景，主要包含换填法与抛石挤淤法两类技术。

换填法需遵循精准挖除、分层换填、压实巩固的流程：先依据地质勘察结果确定软土挖除深度，确保清除基础底面以下所有软弱土层，避免残留软土引发后期沉降；再选取高强度、低压缩性、良好透水性的填料，按设计要求分层铺设，每层均需开展压实处理，压实过程需把控机械选型、压实遍数与速度，保障压实度达标。其关键在于填料质量管控和压实效果检测：填料需通过进场检验，杜绝含泥量超标、颗粒级配不合格等问题^[1]；压实后需开展承载力、压缩模量检测，若结果不达标，需调整填料配比或压实参数，确保换填层稳定。

抛石挤淤法适用于软土含水量极高、呈流动状态的场景，原理是利用块石自重将软土挤出地基范围，形成块石垫层。施工时需注重抛石顺序和块石分布：抛石应从地基中部向两侧推进，防止软土单侧堆积导致垫层倾斜，块石需满足强度要求，避免受压破碎，且需及时清理挤出的软土，确保块石充分挤淤。抛石完成后，需检查垫层平整度与密实度，若存在块石架空、垫层不平整等问题，需进行补抛处理或垫层平整作业^[2]。如下图1所示，为换填法与抛石挤淤法的差异图。



图1 换填法与抛石挤淤法的差异图

1.2 加固类施工技术

加固类施工技术聚焦改良软土性质、增强地基整体性，通过物理或化学手段改变软土自身特性，提升其强度与稳定性，适用于软土厚度较大、换填成本过高的公路桥梁施工场景，核心包含水泥土搅拌桩法、高压喷射注浆法、土工合成材料加固法。

水泥土搅拌桩法依靠强制搅拌和化学固化实现加固：利用搅拌机械将水泥浆与软土在地下强制混合，水泥与软土水分发生反应，形成有强度的水泥土桩体，桩体与桩间土构成复合地基。关键控制点为搅拌均匀性、水泥掺量、桩体参数：搅拌需控制机械提升速度与转速，避免出现“夹心层”；水泥掺量需结合软土性质与设计承载力确定，过低易导致强度不足，过高可能引发干缩裂缝；桩长需穿透软土层进入硬土层。施工后需检测单桩承载力、复合地基承载力、桩体完整性，确保质量达标。

高压喷射注浆法通过高压喷射和浆液固化改良软土：用高压注浆泵将固化浆液高压喷射，破坏软土结构并混合，浆液凝固后形成固体，适用于既有桥梁周边软土处理。核心在于喷射参数控制和浆液配比：喷射压力、流量、提升与旋转速度需精准调控，压力过低则浆液扩散范围小，提升过快易导致固体不连续；浆液配比需根据软土含水量调整，含水量高时可加外加剂^[3]。施工中需控制孔位偏差和注浆管垂直度，避免固体偏移，施工后检测固体强度、范围，保障加固效果。

土工合成材料加固法借助材料加筋和土体约束增强稳定性：将高强度土工合成材料铺设于软土地基，利用材料与土颗粒的摩擦力限制土体侧向位移，同时分散上部荷载。关键在于材料选型和铺设工艺：材料需根据地基荷载、软土性质选取，如土工格栅抗拉强度需达标；铺设时需确保平整、牢固固定，避免褶皱、滑动，搭接长度符合规范。铺设后需分层填筑填料，控制填筑速度与碾压强度，防止材料损坏，施工后监测地基沉降量、侧向位移量，评估加固成效。

1.3 排水固结类施工技术

排水固结类施工技术围绕加速水分排出和加载预压固结展开，通过构建排水通道加速软土排水，配合加载促使软土固结，提升承载力，适用于软土含水量高、渗透性低且工期允许的公路桥梁施工场景，主要包括砂井排水法、塑料排水板法、真空预压法。

砂井排水法核心是构建竖向排水通道：在软土地基中按间距打设砂井，砂井加速孔隙水排出，同时配合地表加载增加地基附加应力，促进软土固结。关键在于砂井布置和加载速率控制：砂井按等边三角形或正方形布置，范围超出桥梁基础，确保边缘地基固结；加载采用分级方式，避免加载过快导致地基失稳，每级加载后监测孔隙水压力与沉降量，待压力消散至一定程度再进行下一级。砂料需满足高透水性、良好级配，防止堵塞，施工中控制砂井垂直度、深度，确保排水通道畅通。

塑料排水板法是砂井排水法的改良技术，采用塑料排水板替代砂井，具备施工快、成本低的优势。施工要点为排水板打设和滤膜保护：用专用机械打设排水板，控制打设深度、间距与垂直度，避免滤膜破损导致堵塞；排水板搭接需规范，搭接长度达标，用搭接夹固定。加载预压方式与砂井排水法类似，需根据监测数据调整加载节奏，保障地基稳定固结。

真空预压法通过抽取密封膜下空气形成负压，利用膜内外气压差加速软土水分排出，进而促使软土固结实现加固：在软土地基表面铺设密封膜，抽出膜下空气形成真空，无需堆载材料，适用于场地狭小场景。关键在于密封系统构建和真空度控制：密封膜需铺设多层，周边采用黏土密封沟或压重密封，防止漏气^[4]；真空泵需连续运行，确保膜下真空度稳定。施工中监测真空度、沉降量、孔隙水压力，待地基固结度达标后停止预压，为后续施工提供稳定地基。

2 公路桥梁软土地基施工质量控制要点

软土地基施工质量直接决定公路桥梁工程的安全性与耐久性，需从前期勘察、技术选型、施工过程管控、后期监测四个环节构建完整的质量控制体系。

2.1 前期地质勘察质量控制

前期详细地质勘察是软土地基施工质量控制的前提，其准确性直接决定后续技术选型与参数设计的合理性，需聚焦勘察

范围、勘察深度、指标检测三大核心。勘察范围需覆盖桥梁全线路基及基础区域，同时延伸至周边一定范围，避免遗漏局部软土区域，确保掌握整体地质分布；勘察深度需穿透软土层进入下卧硬土层，明确软土厚度、分层情况，为技术选型提供依据，如换填法需确定挖除深度，搅拌桩法需确定桩长；指标检测需全面，包括软土的天然含水量、孔隙比、压缩系数、抗剪强度等物理力学指标，且检测样本需具有代表性，在软土厚度变化较大区域加密勘察点。此外，勘察报告需详细说明软土的分布特征、工程特性、处理建议，若发现特殊地质条件，需单独标注并提出针对性处理方案，为后续施工提供精准依据。

2.2 施工技术选型质量控制

施工技术选型需遵循因地制宜、经济合理、技术可行原则，避免盲目选型导致质量隐患，需综合考量地质条件、工程要求、环境因素。地质条件方面，软土厚度较浅时优先选用换填法，厚度较大时选用加固类技术，工期允许且软土渗透性低时选用排水固结类技术；工程要求方面，对承载力要求高的区域选用加固类技术，对沉降控制要求高的区域选用排水固结类技术或土工合成材料加固法；环境因素方面，周边存在居民区时避免选用噪音大的技术，场地狭小且无堆载材料时选用真空预压法^[5]。同时，需开展多方案比选，必要时进行现场试施工，验证技术适用性与参数合理性，确保选型科学。

2.3 施工过程质量控制

施工过程是质量控制的核​​心，需从共性管控与专项管控双维度发力，确保操作规范、参数达标。共性管控包括人员管控、设备管控、材料管控：人员需经培训合格上岗，明确岗位职责；设备需定期维护，其关键运行参数（如搅拌桩机的搅拌转速、注浆泵压力）需定期校准，避免因参数异常影响施工质量；材料需严格检验，不合格材料严禁进场。专项管控需针对不同技术制定措施：换填法重点管控挖除深度、填料压实度，挖除深度需检测确认，填料压实度需每层检查；水​​泥土搅拌桩法重点管控水泥掺量、搅拌均匀性，通过计量装置控制掺量，观察桩体颜色判断搅拌均匀性；排水固结类技术重点管控排水通道完整性、加载速率，检查砂井或排水板是否堵塞，根据孔隙水压力调整加载节奏。同时，需做好现场记录，详细记录施工参数、检测结果，便于追溯问题。

2.4 后期监测与验收质量控制

后期监测与验收是验证施工质量的关键，需制定完善方案，确保地基性能达标，涵盖监测内容、验收流程。监测内容包括沉降监测、水平位移监测、孔隙水压力监测：沉降监测在关键部位布设监测点，定期监测直至沉降稳定；水平位移监测在路基边坡布设监测点，防止侧向滑动；孔隙水压力监测通过埋设压力计，为加载速率调整提供依据。验收分施工中期验收与竣工验收：中期验收需检查施工参数、材料质量，合格后方

可进入下一工序^[6]；竣工验收需综合评估监测数据与施工记录，重点检查地基的承载力、沉降量及稳定性，若验收不达标，需分析原因并整改，整改合格后重新验收。

3 公路桥梁软土地基施工技术的发展趋势

随着公路桥梁工程向大跨度、高等级、复杂地质方向发展，以及智能化、绿色化理念在工程领域的深入推进，软土地基施工技术需不断创新与优化。

3.1 智能化技术融合应用

智能化技术将成为软土地基施工的核心发展方向，聚焦施工过程智能化管控、监测数据智能化分析两大维度，重构技术应用模式。BIM 技术将与施工机械深度融合，构建软土地基处理三维模型，实现施工参数的可视化设计与实时管控，如通过 BIM 模型下达施工指令，同时利用机械传感器实时反馈实际参数，当参数偏差超限时自动触发预警；同时，物联网平台将连接所有施工设备，实时监控设备运行状态，实现故障提前预警与远程诊断，减少施工中断。监测环节将引入 AI 算法、大数据技术，自动分析沉降量、孔隙水压力等数据，预测地基最终沉降趋势，替代传统人工分析，提升监测效率与准确性。此外，无人施工技术（如无人搅拌桩机、无人插板机）将逐步应用于恶劣环境，减少人工干预，降低安全风险。

3.2 绿色施工技术推广

绿色化是行业可持续发展的必然要求，软土地基施工技术将从环保型固化材料研发、施工工艺绿色优化双路径推进，实

现低污染、低消耗目标。材料端将研发工业固废固化剂与生物固化剂，替代传统水泥固化剂，减少水泥生产过程中的碳排放，同时实现工业废弃物资源化利用；还将开发可降解土工合成材料，避免传统塑料排水板、土工格栅对土壤的长期污染。工艺端将优化高压喷射注浆法、水泥土搅拌桩法等技术，配套泥浆循环利用系统，减少污水排放；推广真空预压与电渗排水组合工艺，减少堆载材料使用，降低资源消耗，同时控制施工噪音，减少对周边环境的干扰。

3.3 新型材料与组合技术创新

新型材料的应用与组合技术的创新，将突破传统技术局限，提升软土地基处理的适应性与加固效果，形成新型材料应用与组合技术创新的发展格局。材料方面，自修复土工合成材料、导电土工织物将广泛应用；轻质高强填料（如泡沫混凝土、轻质陶粒）将替代传统砂石用于换填，降低地基附加应力，减少软土二次沉降。技术方面，组合技术将成为复杂软土地基处理的主流，如水泥土搅拌桩+土工格栅组合、塑料排水板+真空预压+电渗组合^[7]；同时，深部软土地基处理技术将不断升级，提升对深层软土的处理能力，满足大跨度桥梁基础的高要求。

4 结语

本文明确公路桥梁软土地基需以置换、加固、排水固结技术为核心，通过全流程质量管控化解地质风险。未来需进一步推动“BIM+AI 监测”智能化落地、工业固废固化剂绿色应用，以及多技术组合创新，为复杂软土地基条件下的公路桥梁建设提供更高效的技术方案。

参考文献：

- [1] 熊美军.公路桥梁施工中软土地基施工技术的应用[J].建筑与装饰,2025(16):157-159.
- [2] 成毅.软土地基施工技术在公路桥梁施工中的运用探讨[J].建筑与装饰,2025(7):145-147.
- [3] 赵铁创.公路桥梁施工中软土地基施工技术的应用研究[J].运输经理世界,2024(10):105-107.
- [4] 黄诏南,蒋水平.公路桥梁施工中软土地基施工技术探究[J].智能建筑与工程机械,2024,6(4):13-15.
- [5] 陈茜.公路桥梁施工中的软土地基施工技术要点[J].建筑与装饰,2024(5):142-144.
- [6] 李泽楷,付朝旭.公路桥梁工程施工中软土地基施工技术的有效应用探讨[J].模型世界,2024(13):112-114.
- [7] 麻楠.公路桥梁工程软土地基施工技术研究[J].模型世界,2024(7):120-122.