

水利施工中软土地基处理技术改进方向研究

朱永静 张学飞^(通讯作者) 马建

云南辰再建筑工程有限公司 云南昆明 650000

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19764

[摘要] 软土地基因有高含水量、低承载力以及大压缩性等特性，成为制约水利工程施工质量与安全的关键瓶颈。本文鉴于现有软土地基处理技术在效果均匀性、环境协调性以及复杂地质适配性方面存在的局限性，系统地提出了以智能化监测控制、绿色材料革新以及复合技术优化为核心的改进方向，并且结合当前物联网、工业固废利用等热门技术，构建出高效且低碳的处理技术体系。依靠对数字化融合与低碳技术体系化等未来趋势展开分析，为水利工程软土地基处理技术的升级提供理论与实践方面的参考，帮助工程建设达成质量提升与生态保护的双重目标。

[关键词] 水利施工；软土地基；智能化监测；绿色固化材料；复合处理技术

一、引言

水利工程是防洪减灾、保障水资源控制的重要设施，其施工质量直接影响工程长期运行和区域安全。在我国东南沿海、江河湖泊周边等软土广泛分布地区，软土地基由淤泥、淤泥质土等构成，天然含水率通常超过40%，孔隙比大于1.0，抗剪强度低于20kPa。这种特性使地基在承受上部结构重量时易出现不均匀沉降、剪切破坏等问题。传统处理方法如换填法、排水固结法等虽有一定应用经验，但随着水利工程向大型、深水方向发展，以及“双碳”目标和生态保护要求的提高，现有技术逐渐显现出许多不足。因此，准确识别技术局限、探索改进方向、预测发展趋势，对推动水利施工技术发展、保障工程安全具有重要意义。

二、现有软土地基处理技术的局限性分析

2.1 处理效果不均匀，质量控制精度不足

传统软土地基处理技术大多靠经验施工，缺少对全过程参数的精确控制，使得地基加固效果有明显的空间差异。以水泥搅拌桩技术来说，传统单轴搅拌设备因为搅拌翼板数量少、动力输出不稳定，在深度超过15m的软土层里容易出现浆液分布不均匀的情况，桩体芯样强度变异系数能达到0.35以上，部分地方强度甚至比设计值低60%^[1]。在排水固结法里，砂井布置间距和加载速率都只按规范经验取值，不能根据土层含水率的实时变化调整，常常出现局部超固结或者固结不够的问题，引发后期沉降差超过30mm/m。这种不均匀性不但降低地基整体承载能力，还会让水利构筑物如堤坝、水闸出现裂缝，增加渗漏风险。不同技术的局限有不同特点，具体参数对比见表1。

表1 传统软土地基处理技术核心局限性对比表

处理技术	核心局限表现	强度变异系数	后期沉降差
单轴水泥搅拌桩	深层搅拌不均，浆液分布失衡	0.30-0.45	25—40mm/m
砂井排水固结法	固结速率调控滞后，区域差异大	-	30—55mm/m
换填法	深层处理受限，界面结合不良	0.15-0.25	15—30mm/m

2.2 材料与工艺粗放，环境承载压力突出

现有技术在材料选择和施工方法上大多有高能耗、高污染的问题，这与生态水利建设理念不符。传统化学加固法把水泥、石灰当作主要固化剂，生产每吨水泥会产生0.86吨碳

排放，而且固化剂掺量要达到软土质量的15% - 20%，这不但增加工程成本，还会因碱性物质渗透使周边土壤和地下水受到污染。换填法要把大量软土运出去填埋，同时从别的地方调优质填料，每立方米软土的运输成本达250元，还会引

扬尘、水土流失等次生环境问题。在杭州湾某水利工程里, 仅软土外运就让周边水体悬浮物浓度超标 3 倍。另外, 传统工艺里固化剂和软土的反应效率低, 约 30% 的材料没有充分参与胶凝反应, 这既造成资源浪费, 又降低了地基长期稳定性。

2.3 技术适配性单一, 复杂地质应对不足

水利工程常遇到深厚软土、夹层软土等复杂地质状况, 现有技术多是为单一地质情况设计, 缺少灵活适应的能力。对于厚度超过 30m 的深厚软土地基, 传统桩基加固法要用超长桩体, 这会使施工设备功率不够、桩身垂直度偏差超过 1%, 在长江某堤防工程里, 因桩体倾斜导致的返工率达 20%。当软土层中有砂质夹层时, 排水固结法的砂井容易堵塞, 使固结时间延长 50% 以上; 强夯法则因夹层承载力突然变化, 引发地表不均匀隆起。这种单一技术适应性的缺陷, 让工程需采用多种技术叠加, 这不仅增加施工难度, 还可能因技术间配合不好, 导致地基出现应力集中, 降低整体承载能力^[2]。

三、水利施工中软土地基处理技术改进方向

3.1 智能化监测与精准控制技术升级

针对传统技术质量控制精度不足的问题, 依托物联网、人工智能技术构建全流程智控体系成为核心改进方向。通过在搅拌桩机、压路机等设备上安装光纤光栅传感器、压电陶瓷传感器, 实时采集桩长、延米灰量、钻进速度、浆液密度等关键参数, 将数据传输延迟控制在 500ms 以内, 结合“多参数分层智能控浆技术”实现“钻进速度快多送浆、慢则少送”的动态调节。引入北斗高精度定位系统, 将桩位定位精度提升至±3 厘米, 有效杜绝漏桩、偏位问题, 在乍嘉苏改扩建工程中, 该技术使人力成本降低 50% 以上。在沉降监测环节, 采用压差式静力水准仪实现分钟级连续监测, 精度达亚毫米级, 同时基于 BP 神经网络算法建立沉降预测模型, 结合历史数据科学研判工后沉降趋势, 为施工参数调整提供精准依据。智能化技术的应用, 使桩体水泥掺量均匀性提升 15%, 显著改善处理效果的空间一致性 (见表 2)。

表 2 软土地基智能化与传统监测技术参数对比表

监测指标	传统技术	智能化技术	性能提升幅度
桩位定位精度	±15 厘米	±3 厘米	80%
沉降监测精度	±1 毫米	±0.1 毫米	90%
参数响应时间	5 分钟	0.5 分钟	90%
施工成本	100 元/立方米	65 元/立方米	35%

3.2 绿色环保材料与生态化处理革新

为破解传统技术的环境瓶颈, 以工业固废利用为核心的绿色材料研发与原位固化技术成为改进重点。采用冶炼渣、粉煤灰等工业固废, 搭配电石渣、工业废碱等激发剂, 研发新型固废基绿色凝胶材料, 其生产无需高温煅烧, 每吨材料碳排放较传统水泥减少 0.57 吨, 降碳率达 92%, 成本降低 25% 以上。通过“干法+湿法+原位固化”组合工艺, 直接将现场软土与绿色凝胶材料混合, 制成流态固化土或轻质固化土, 在宁波地铁配套水利工程中, 该技术使 360 万立方米流塑性工程渣土实现资源化利用, 避免异地堆放污染。针对软土承载力低的特性, 在固化土中引入微气泡或 EPS 颗粒制备轻质填料, 使复合地基附加应力减少 50%, 竖向承载力提升 38.3%, 沉降量缩小 23%。同时, 研发全波场弹性波检测装备, 实现桩基完整性毫米级精准检测, 检测效率达 33 平方米/分钟, 为绿色材料应用效果提供可靠保障。

3.3 复合地基处理技术的优化组合

针对复杂地质适配性差的问题, 通过多种技术协同优化形成复合处理体系, 实现优势互补。对于深厚软土地基, 采用“CFG 桩+真空预压”复合技术, CFG 桩承担主要竖向荷载, 真空预压加速软土排水固结, 两者协同使地基承载力提升幅度较单一技术增加 40%, 处理深度拓展至 50m 以上。在含砂质夹层的软土地基中, 应用“多层互剪搅拌桩+高压旋喷桩”组合工艺, 多层互剪搅拌桩通过多翼翼板实现土体均匀搅拌, 高压旋喷桩在夹层区域形成强化体, 有效解决浆液扩散受阻问题, 使固结时间缩短 60%。建立基于地质参数的复合技术选型模型, 通过勘察数据自动匹配最优技术组合, 在杭州湾跨海大桥连接线水利工程中, 该模型使技术适配准确率达

92%，大幅降低施工风险^[3]。此外，优化施工工序衔接，将桩基施工与排水系统布设同步进行，减少工序间隔时间30%，提升施工效率的同时避免地基二次扰动。

四、水利施工中软土地基处理技术未来发展趋势

4.1 数字化与智能化技术深度融合

未来软土地基处理将向“数字孪生+智能决策”全流程管控发展，通过BIM技术构建地基处理数字模型，集成勘察、设计、施工、监测全阶段数据，实现物理实体与数字模型的实时映射。引入5G+边缘计算技术，解决施工现场多设备协同的数据传输延迟问题，使智能调控指令响应时间控制在100ms以内。基于大数据分析建立施工效果预测数据库，结合不同区域软土特性、气候条件形成个性化处理方案，实现“一地一策”精准设计。在运维阶段，通过数字孪生模型实时监测地基变形，结合AI算法预判潜在风险，提前发出预警并自动生成加固建议，推动水利工程软土地基处理从“施工控制”向“全生命周期管控”转型。

4.2 低碳节能技术体系化发展

在“双碳”目标引领下，软土地基处理将形成涵盖材料研发、施工工艺、效果评估的全链条低碳技术体系。材料方面，重点发展负碳固化材料，通过固碳技术将CO₂转化为碳酸盐类成分融入胶凝体系，实现碳排放中和甚至负排放。施工设备向电动化、节能化升级，研发大功率电动搅拌桩机，能耗较传统柴油设备降低40%，噪声污染减少60%。建立碳足迹监测系统，实时统计材料生产、设备运行等环节碳排放数据，结合碳汇计算实现施工全过程碳平衡管控。此外，推广模块化施工技术，通过工厂预制复合桩体、现场快速安装，减少现场作业时间与能源消耗，推动水利工程软土地基处理实现环保效益与经济效益的统一^[4]。

4.3 高性能材料与新型工艺协同创新

未来软土地基处理技术将聚焦“材料性能升级+工艺适配优化”的协同创新路径，针对水利工程中深厚软土、高含水率、强侵蚀等复杂地质条件，突破传统技术瓶颈。材料领域将重点研发多功能复合固化剂，通过纳米改性、微生物矿化

等技术，实现固化剂兼具早期强度高、后期稳定性好、耐盐蚀/冻融等特性，使软土固化后无侧限抗压强度提升30%以上，且具备自修复、抗渗漏等附加功能，适配沿海围堤、水库堤坝等长期服役场景。在工艺领域，会积极推广新型组合加固技术，像是“真空预压-电渗固结-深层搅拌”一体化的工艺方式，借助多场耦合的作用，可加快软土的排水固结进程，与传统单一工艺相比，其施工效率提高了50%，处理深度突破了50米，足以契合超深软土地基的加固需求，还会探索微波加固、超声辅助固结等非接触式新型工艺在工程中的应用。针对狭窄作业空间、邻近敏感构筑物等情况，达成低扰动、高精度的加固效果。

五、结语

水利施工中软土地基处理技术的改进和发展，是保证工程质量、落实生态建设理念的主要需求。现有技术在处理均匀程度、环境适应性和地质匹配性方面有局限，已难以满足大型、绿色水利工程建设需要。通过智能监测控制提高施工准确度，用绿色材料创新减少环境影响，以复合技术组合增强地质匹配能力，是当前技术改进的主要方法。未来，随着数字化和低碳技术深入结合，软土地基处理将实现从“经验引导”到“数据引导”、从“污染处理”到“生态友好”的转变。相关技术的研发和使用，不仅能有效解决软土地基施工问题，还能为水利工程高质量发展提供技术帮助，助力达成水资源安全保障和生态环境保护的双重任务。

[参考文献]

- [1] 吴菲菲, 朱步纲, 黄佃贵. 水利工程施工中软土地基处理技术研究[J]. 水上安全, 2024, (07): 190-192.
- [2] 张传佳. 水利工程施工中软土地基处理技术[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (06): 144-146.
- [3] 陈安乐. 关于水利工程软土地基勘察及处理技术探讨[J]. 建材发展导向, 2023, 21(24): 42-44.
- [4] 洪伟城. 水利大坝施工过程中软土地基处理方法分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(17): 220-222.