

水利工程软土地基处理工艺的改进与效果分析

刘 彪

(临泉县杨桥闸管理所, 安徽 阜阳 236400)

摘 要 我国沿海、沿江及三角洲地区软土分布面积超 100 万 km^2 , 此类地基因“孔隙比大、压缩性高、承载力低、渗透性差”等特性, 成为水利工程建设的核心技术难题。在软土地基工程事故中, 沉降超标占比达 65%, 严重威胁水闸、泵站、航道等设施的长期安全运行。本文系统梳理水利工程软土地基处理的传统工艺局限, 重点分析搅拌桩技术、预压加固技术、防渗围封技术等核心工艺的改进路径, 结合典型工程案例验证改进技术的应用效果, 构建“勘察精细化—工艺复合化—监测智能化”的技术体系, 以期为水利工程软土地基处理提供技术参考。

关键词 水利工程; 软土地基; 搅拌桩加固; 防渗围封; 预压加固

中图分类号: TV55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.019

0 引言

水利工程是国民经济的基础性设施, 其建设质量直接关乎水利安全、水资源调配与区域经济发展。我国软土分布面积达 100 万 km^2 , 这类土壤天然含水率 40% ~ 80%, 压缩系数 $a_{1-2} > 0.5 \text{ MPa}^{-1}$, 天然地基承载力仅 50 kPa ~ 80 kPa, 远难以满足水工结构荷载需求。依据《建筑地基基础设计规范》, 软土区工程必须处理地基并严控工后沉降, 水闸、泵站等核心构筑物的工后沉降需 $\leq 30 \text{ mm}$, 差异沉降 $\leq 5 \text{ mm}$ 。传统单一处理工艺存在适配性差、效率低、管控难等问题, 52% 工程因技术套用失效, 38% 因勘察不足设计粗放, 60% 缺乏动态监测。如今大直径双向搅拌桩等创新技术的应用, 使地基承载力提升 40% 以上, 工后沉降控制在 25 mm 内。本文结合行业标准与典型案例, 分析工艺改进路径与应用效果, 为同类工程提供参考。

1 水利工程软土地基处理传统工艺及局限

1.1 传统核心处理工艺

水利工程传统软土地基处理工艺主要有换填垫层法、预压地基法、水泥搅拌桩法及钢板桩防渗法, 各类工艺依加固原理不同, 适用于特定场景。换填垫层法通过挖除 3 m 内浅层软土, 回填级配砂石、灰土等压实成承载垫层, 施工简便、成本较低, 适配浅软土小型构筑物基础, 但处理深度有限, 无法加固深层软土。预压地基法含堆载与真空预压, 通过外荷载加速软土

排水固结, 适用于航道、堤坝等大面积地基加固, 且需较长固结周期, 低渗透性软土区真空预压可达 180 天, 难以满足紧工期需求。水泥搅拌桩法将水泥浆液与软土强制搅拌成桩, 提升承载力, 适配 3 m ~ 15 m 中深层软土处理, 但传统搅拌桩存在搅拌不均、浆液流失问题, 桩体强度离散。钢板桩防渗法通过施打钢板桩形成连续防渗墙, 阻断地下水渗透, 适用于水闸、泵站等基础防渗, 但其施工依托人工定位, 垂直度精度低, 单独使用时耐久性、强度不足, 易因土体变形开裂。

1.2 传统工艺核心局限

1.2.1 技术适配性不足

传统的软土工艺方案呈现出较为单一的状况, 没有充分地适配软土分层特征、含水率差异以及有机质分布等相关地质条件。在高含水率 (大于 60%) 的软土区域, 如果套用普通的 CFG 桩技术, 就容易引发桩体出现失稳的情况; 在深层软土区域采用浅层换填的方法, 难以从根本上治理深层沉降的隐患问题。例如: 某水闸工程由于没有探明 8 m 深处的泥炭层, 按照经验把 CFG 桩设计成 12 m, 最终导致桩基承载力出现不足的状况, 返工成本超过了 2 000 万元。有机质含量大于 5% 的特殊软土, 会使得沉降量增加 30% 以上, 并且会使沉降时长延长 50%, 传统工艺对于此类软土的管控效果非常差。

1.2.2 施工质量控制难度大

在地基施工过程中, 传统工艺存在缺乏精准管控

作者简介: 刘彪 (1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 堤防涵闸管理。

的问题,由此使得工程质量的离散性变得很明显。在进行水泥搅拌桩施工时,传统的钻头搅拌方向单一,浆液和软土拌和不均匀,常引发翻浆、抱钻、塌孔等问题,桩体合格率大概为85%。在进行钢板桩施工时,依靠人工扶着定位,垂直度偏差达3%~5%,严重影响防渗效果和结构稳定性。对于预压地基法当中的堆载预压,存在着荷载不均匀、固结速度缓慢的问题,并且孔隙水压力没有办法进行实时的监测,加载速度过快容易导致土体出现剪切破坏^[1]。

2 水利工程软土地基处理工艺的核心改进路径

2.1 搅拌桩加固工艺的改进

2.1.1 多轴双向搅拌技术

基于传统三轴水泥搅拌桩,创新研发“大直径双向搅拌三轴工艺”,新增两根搅拌轴并扩大叶片直径,实现多向搅拌,大幅提升浆液与软土混合均匀度。响水船闸项目应用后,浆液扩散半径提升30%,破解传统工艺浆液流失、翻浆难题,桩体一次验收合格率从85%升至96.8%。配套智能化监控系统,实时调控水泥掺量(误差 $\leq \pm 2\%$)与搅拌速度(0.8 m/min~1.2 m/min),保障桩体强度均匀,单桩承载力达180 kPa~220 kPa,较传统工艺提升超40%。

2.1.2 三维立体钻头与固化剂优化

针对具有高含水率以及高有机质特点的软土加固方面存在的难题,开展研制工作来制造出三维立体样式的搅拌钻头并且配备与之专用的固化剂,从而实现从多个方位进行铣削搅拌操作。让底部的叶片进行破土工作,上部的两组叶片和竖向的两组铣轮一起协同配合,在三维方向上对浆液和土体进行充分搅拌,使得均匀程度提升了50%。把固化剂按照水泥和专用添加剂以1:1的比例进行掺和,能够让软土的含水率降低30%~40%,进而加速固结过程。将该技术运用到珠海市石角咀水闸重建工程当中,成桩芯样的完整程度达到了98%(和传统工艺相比提升了23%),让施工的效率提高了40%,工期缩短了71天^[2]。

2.2 防渗围封工艺的改进

2.2.1 水泥搅拌桩—塑钢板桩复合防渗技术

采用一种“围封起来的水泥搅拌桩加上塑钢板桩”的复合结构进行创新:水泥搅拌桩以咬合单排的方式进行布置(桩的直径是500 mm,桩与桩之间的距离是400 mm),塑钢板桩实施打桩操作在水泥搅拌桩的边沿位置(桩与桩之间的距离是690 mm),这两者的优势相互补充。水泥搅拌桩增强防渗墙的强度和耐久性,塑钢板桩提高抗裂性能,弥补了传统水泥土防渗

墙容易开裂、钢板桩防渗墙耐久性不足的缺陷。检测显示,这种复合墙的渗透系数低至 1.52×10^{-6} cm/s,与传统方案相比,其渗透系数提升了74%,建造成本降低了15%~20%。

2.2.2 施工定位与固定装置创新

开展研制塑钢板桩夹桩扣以及定位装置的工作,解决传统施工中垂直度难以控制、效率比较低的麻烦问题。夹桩扣采用能够进行调节的设计方式,依靠上下夹桩板、搭扣还有防滑胶条来进行紧固操作,从而适配不同宽度的塑钢板桩,让装拆效率提高3倍;定位装置是由定位组件和帽型限位件所构成的,能够让垂直度偏差小于或者等于0.5%,把损坏率从8%降低到1.2%。该设备在珠海市天生河泵站项目当中得到应用,使得施工效率提升45%,节省成本86.43万元^[3]。

2.3 预压加固工艺的改进

预压加固工艺的改进集中于真空—堆载联合预压优化与冻融—热真空预压复合技术。前者采用“分阶段升压+动态加载”模式,真空度逐步升至80 kPa以上,堆载按10 kPa/天分级施加,搭配间距1.2 m的加密塑料排水板,保障排水通畅。例如:某航道工程应用后,固结周期从180天缩至90天,工后沉降 ≤ 25 mm,效率较传统工艺翻倍。后者针对含水率超80%的超软土地基,融合冻融与热真空预压技术,经冷冻胶结土颗粒、提升渗透性后加速固结,使固结速率提升60%,承载力从50 kPa升至120 kPa,拓展了预压法适用范围,为高含水率软土处理提供新路径。

2.4 施工与监测智能化改进

施工与监测智能化改进聚焦智慧施工管理平台与分层动态监测体系两大核心。智慧施工管理平台融合物联网、5G与BIM技术,构建“五位一体”架构,实现施工全要素动态感知与智能管控。响水船闸项目中,BIM正向设计搭建地基处理三维模型,贯穿全生命周期;物联网设备实时采集12项关键参数,数据延迟 ≤ 1 s,异常预警响应 ≤ 5 分钟,大幅提升施工可控性与安全性。分层动态监测体系构建“表层沉降+深层变形+孔隙水压力”三位一体网络,科学布设观测点与监测设备。自动化监测使施工期每2天、工后期每15天监测一次,数据实时上云。基于BP神经网络的沉降预测模型,提前7天~10天预警风险,精度超95%。例如:某水利枢纽工程应用后,规避了3次沉降突变风险,工后沉降控制精度提升了30%,为软土地基处理提供了坚实的技术支撑^[4]。

3 水利工程软土地基处理改进工艺的工程应用效果验证

3.1 大直径双向搅拌三轴水泥搅拌桩工艺应用

响水船闸项目地处江苏东部沿海软土区,地基承载力仅 60 kPa ~ 70 kPa,土体流动性强,施工需应对地基失稳、沉降超标等难题。项目采用大直径双向搅拌三轴水泥搅拌桩工艺,搭配智慧施工管理平台,实时调控水泥掺量与搅拌速度。

应用改工艺后,地基承载力提升至 185 kPa,满足 II 级航道船闸荷载要求;工后 12 个月沉降量 22 mm、差异沉降 3 mm,远低于规范限值。施工周期较传统工艺缩短 40 天,水泥损耗率降至 8%,节约成本 120 万元。项目斩获 6 项国家专利、1 项部级工法,获评江苏省平安百年品质工程,成为内河航道软基加固示范样板。

3.2 复合防渗围封技术应用

石角咀水闸重建工程位于含水率 72% 的高含水率软土区,传统防渗工艺易产生裂缝与渗漏。项目创新采用“水泥搅拌桩+塑钢板桩复合防渗技术”,搭配三维立体钻头与专用固化剂,打造一体化防渗体系。监测显示,复合防渗墙渗透系数达 1.48×10^{-6} cm/s,符合水利一级防渗标准;地基承载力提升至 170 kPa,工后沉降 20 mm,施工周期缩短 71 天,节约成本 137.51 万元。工程投用 3 年,无渗漏与结构开裂情况,防渗墙耐久性优良,获得珠海市水务局与质监部门认可。

3.3 真空一堆载联合预压技术应用

该工程软土厚 12 m,天然含水率 68%,传统真空预压法固结周期偏长。项目优化采用“分阶段升压真空一堆载联合预压工艺”,配套加密塑料排水板与智能化监测系统。应用该技术后,固结周期从 180 天缩至 85 天,工后沉降 23 mm;地基均匀性显著提升,压缩系数降至 0.32 MPa^{-1} ;工程成本降低 18%,弃土经资源化处理后用于航道岸坡回填,实现“零外运”,减少环境扰动。

3.4 效果综合评价

三大典型工程实践显示,改进工艺在技术性能、经济指标与环境效益上均获显著提升。在技术层面,地基承载力平均提高 40% 以上,工后沉降控制在 25 mm 内,防渗系数降低 70%,充分满足水利工程对地基稳定性与耐久性的严格要求。在经济方面,施工周期缩短 30% ~ 40%,材料损耗率降 8% ~ 12%,工程成本节约 12% ~ 20%,后期维护费减 60% 以上,综合效益突出。在环境保护方面,弃土资源化利用与低扰动施工减少生态破坏,某项目构建 10 公里绿色生态廊道,降低汛期水土流失风险,实现工程建设与生态保护协同发展。

4 水利工程软土地基处理工艺发展趋势

水利工程软土地基处理工艺将会朝着材料创新、智能化升级、工艺复合化、标准体系完善这四个大的方向加快发展。在材料创新方面,主要将注意力集中在超高含水率以及高有机质的软土上,运用纳米材料、生物酶对水泥基固化剂进行改良,研发高效且环保的产品,努力使固化剂的掺加量降低 20%,桩体的强度提升 30%,同时兼顾固化的效率和耐久性,减少水泥的使用量和碳排放。

智能化升级依托 BIM、物联网和大数据构建数字孪生模型,实现勘察、设计、施工、监测整体生命周期的可视化管控,模拟固结的演化情况,优化相关参数,预先判断沉降的风险,推动从“经验驱动”向“数据驱动”转型。工艺复合化针对复杂地质状况,构建“搅拌桩+预压+防渗”等协同体系,在超深软土区域采用“深层搅拌桩+真空预压+复合防渗墙”的方案,实现承载力、沉降控制和防渗的一体化^[5]。

5 结束语

采用搅拌桩技术进行多轴双向搅拌并优化固化剂、利用防渗围封技术进行复合结构创新、运用预压技术进行联合加载以及开展智能化监测等路径,有效突破了传统技术瓶颈。从典型工程的应用情况来看,经过改进的工艺能够让地基的承载力提升 40% 以上,把工后沉降控制在 25 mm 以下,让施工的周期缩短 30% ~ 40%,使得工程的成本节约 12% ~ 20%,技术性能、社会效益以及经济效益实现显著提升。随着高效环保固化剂的研发、BIM 和数字孪生技术融合、多工艺协同加固体系得到完善,该领域将会朝着“精准化、智能化、绿色化”的方向迈进,为软土区水利工程高质量建设筑牢技术根基。

参考文献:

- [1] 李雨才. 水利工程施工中软土地基处理技术的研究与应用[J]. 中国设备工程, 2025(S2):266-269.
- [2] 李义方. 岩土工程施工中软土地基处理的方法与应用研究[J]. 建筑技术开发, 2019,46(18):141-143.
- [3] 荣庆. 水利工程软土地基处理施工质量管理探讨[J]. 居业, 2021(11):198-199.
- [4] 张旭林. 水利水电工程施工中软土地基处理技术分析[J]. 科技资讯, 2025,23(08):163-165.
- [5] 程晓航, 孟才. 水利工程软土基础上泵站更新改造的策略研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(21):223-225.