

水泥土防渗墙标准化工艺优化与应用分析

肖邦彦¹ 徐成²

1. 湖南建投水利水电有限公司; 2. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15755

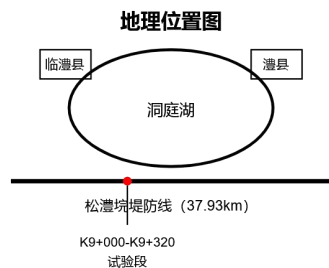
[摘要] 水泥土防渗墙作为堤防工程里重要的防渗措施,其施工工艺的标准化程度会直接影响工程质量与经济效益。传统三轴搅拌桩施工工艺存在施工效率低的问题,还面临质量控制难度大以及成本较高等状况,难以满足现代大型堤防工程建设的需求。五轴搅拌桩机技术的应用为解决这些问题提供了新的技术路径,通过对传统工艺展开深入分析,针对关键技术环节进行系统优化,建立起了标准化的施工工艺流程并确定了最优工艺参数。工程应用表明优化后的工艺在提高施工效率的同时显著改善了防渗墙质量,单机日产能从 350 m³提升到了 550 m³,直接成本降低至 15.45 元/m³,为类似工程提供了重要的技术参考。

[关键词] 水泥土防渗墙; 五轴搅拌桩机; 标准化工艺; 施工优化; 技术经济分析

引言

堤防工程是防洪体系里的重要组成部分,它的防渗性能直接关联人民生命财产安全。水泥土防渗墙凭借良好防渗效果、较低施工成本以及对环境影响小等优点,在堤防防渗工程当中得到广泛应用。随着工程建设规模持续不断地扩大,对施工工艺的标准化程度提出了更高要求,传统三轴搅拌桩施工工艺在大型工程应用时暴露出施工效率偏低、质量控制标准不统一、经济效益有待提升等问题。五轴搅拌桩机技术的发展为水泥土防渗墙施工工艺优化带来新的契机,系统研究五轴搅拌桩机在水泥土防渗墙施工里的应用,建立标准化工艺体系对提高工程质量有重要意义。

1 工程概况



湖南省洞庭湖区重点垸堤防加固一期工程松澧垸项目处在临澧县与澧县境内,其堤防总长度达到了 37.930 千米,水泥土防渗墙总工程量有 52.82 万平方米。工程所在区域地质条件较为复杂,从上面往下依次分布着堤身人工填土层、粉细砂渗漏层以及粉质粘土相对不透水层,其中粉细砂层厚度大概 3.67 米且成为主要渗漏通道。防渗墙设计采用堤身堤基联合防渗的方案,墙体厚度要求不小于 300 毫米,需深入下部不透水层不低于 1.0 米,28 天抗压强度要求不小于 0.3 兆帕,渗透系数要满足 $k \leq 1 \times 10^{-6}$ 厘米每秒的严格标准。工程分 29 个主要施工段来实施,单段长度在 240 米到 6120 米之间变动,为水泥土防渗墙标准化工艺研究提供了理想试验平台(见图 1)。

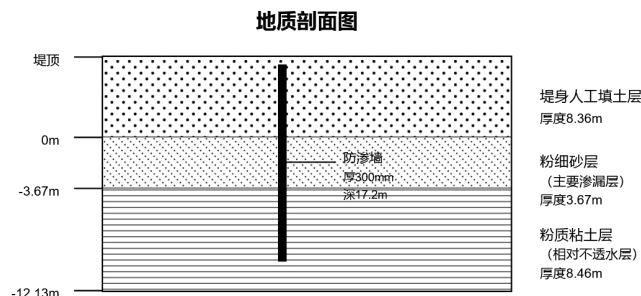


图 1 松澧垸工程地理位置及地质剖面示意图

2 水泥土防渗墙标准化工艺现状分析

2.1 传统三轴搅拌桩施工工艺现状

传统三轴搅拌桩水泥土防渗墙施工工艺是用单机三轴同步搅拌成桩的方式,在钻杆旋转切削土体的时候高压喷射水泥浆液,形成水泥土混合体来实现防渗功能。该工艺一般采用两搅一喷或者三搅一喷的施工流程,把水泥掺量控制在 10%到 15%这个范围之内,成桩直径通常在 400mm 到 600mm 这个区间,单机日产能大概在 350 m³左右^[1]。施工过程依靠人

工来记录各项技术参数,质量控制主要通过现场观察返浆情况以及成桩后开挖检查来验证。该工艺在国内堤防防渗工程当中应用比较广泛,技术相对来说比较成熟,设备操作也较为简便,不过随着工程规模不断扩大以及质量要求逐步提高,其局限性开始逐渐显现。

2.2 施工效率与质量问题分析

传统三轴搅拌桩施工工艺用于大型堤防工程时暴露出很多问题,施工效率偏低成了制约工程进度的关键因素。单机

日产能仅 350 m³致使工期明显延长,直接成本达到 20.57 元/m³难以满足现代化工程建设进度要求,质量控制方面存在着显著不足之处,人工记录参数容易产生各种各样的误差,返浆问题以及卡钻现象会频繁地发生,影响到墙体的连续性难以得到有效保障^[2]。搅拌均匀性很难在施工当中得以保证,局部区域可能出现水泥浆液分布不均现象,桩间搭接质量控制起来存在着较大困难,容易产生渗漏通道,这些问题的存在严重制约传统工艺推广应用。

2.3 工艺标准化发展需求

随着国家对堤防工程建设质量要求持续提高且大规模堤防加固工程开展,水泥土防渗墙施工工艺标准化发展成迫切需求^[3]。现有技术标准体系不够完善,缺少统一施工工艺流程与技术参数控制标准,使得不同施工单位所用工艺参数差异较大。施工过程自动化程度较低,依靠人工操作易产生质量风险,需建立标准化施工流程与自动化控制系统,质量检测手段相对滞后,缺少实时监控技术,不能及时发现施工过程中里的质量问题,成本控制缺乏统一标准,不同地区施工单位的成本差异较大,所以迫切需要开发先进施工工艺并建立完善标准化体系。

3 水泥土防渗墙工艺优化研究

3.1 五轴搅拌桩机技术优化

五轴搅拌桩机技术靠增加搅拌轴数量对传统三轴设备做了全面升级,其有效单幅成墙长度达到 1.625m 让施工能力较传统设备显著提升^[4]。该设备用五个独立搅拌轴同步作业的方式来工作,每个搅拌轴都配有独立动力系统与液压控制系统,能实现精确的转速控制与喷浆压力调节,搅拌轴间距经过了优化设计以此确保相邻桩体间形成良好搭接效果,将搭接宽度控制在 100mm-150mm 范围内有效避免渗漏通道产生。五轴设备依靠多轴协同作业的方式显著提高水泥土混合均匀性,该设备解决了传统设备搅拌不充分这一技术难题。设备配备先进自动记录系统可实时监控下沉速度等关键参数,为质量控制提供可靠的数据支撑,液压步履式行走系统保证设备移位精度使桩位偏差控制在 20mm 以内,满足高精度施工要求。

3.2 施工效率提升工艺设计

五轴搅拌桩机通过对工艺流程进行优化,实现了施工效率的大幅度提升,单机日产能从传统三轴设备的 350 m³提升到了 550 m³,提升幅度达到了 57.1%。设备采用两搅两喷与四搅两喷这两种工艺模式,可根据地层条件以及质量要求进行灵活选择,其中两搅两喷工艺适用于土质条件较好的地段,四搅两喷工艺适用于复杂地层或质量要求较高的区段。下沉

以及提升速度被标准化控制在 0.7m/min-0.8m/min 的范围内,速度偏差控制在 15%以内,以此确保搅拌充分以及成桩质量,自动化控制系统的应用减少了人工操作环节,降低了操作失误的概率,同时提高了施工的连续性,设备移位时间缩短至传统设备的 60%,有效减少了非生产性时间,进一步提升了整体施工效率。

3.3 标准化工艺流程设计

建立标准化工艺流程给五轴搅拌桩机施工提供了科学的作业指导,保证了施工质量的一致性与可控性。两搅两喷工艺流程涵盖定位、搅拌下沉喷浆、复搅喷浆提升与移位这四个基本步骤,整个流程操作简便且效率比较高,四搅两喷工艺流程是在两搅两喷基础上增加了预搅下沉与复搅下沉环节,通过增加搅拌次数提高了水泥土的均匀性,适用于对防渗性能要求更高的工程段。施工前的测量放样采用 GPS 技术来进行精确定位,导向沟槽开挖规格统一设定为 20m×0.5m×1m,为桩机定位与泥浆处理提供了标准化作业条件,桩机就位时采用经纬仪或线锤进行垂直度检测,确保搅拌桩垂直度偏差不超过 0.5%以满足设计要求(见图 2)。

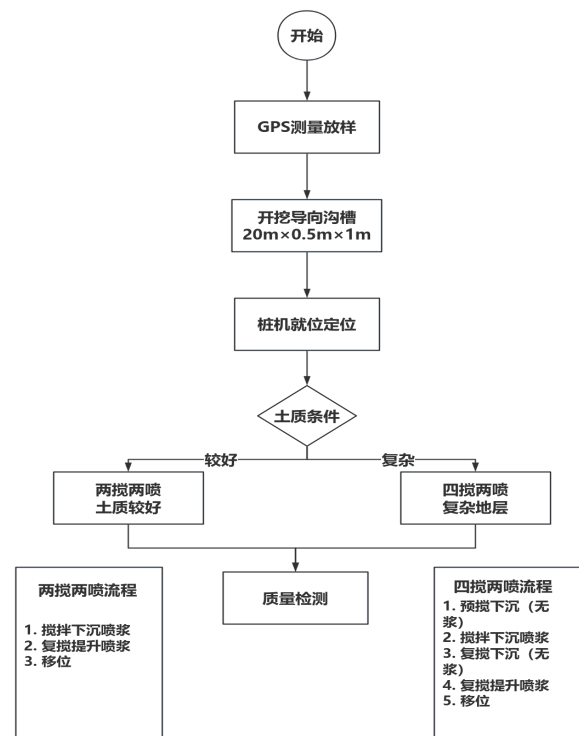


图2 水泥土防渗墙标准化工艺流程图

3.4 工艺参数优化研究

工艺参数优化研究经过系统试验验证后确定了最优施工参数组合,这为标准化施工提供了科学依据,水泥掺量分级控制在 12%-18%的范围之内,依据不同试验段的效果对比分

析确定 15%-16%为最优掺量范围，这样既保证了强度要求又控制了施工成本，返浆量计算采用标准化公式进行量化分析：

$$V=20\times 0.5\times \frac{h}{3}\tag{1}$$

式中：V 为平均每幅墙返浆量（m³）；h 为导槽泥浆深度（m）；20 为导槽长度（m）；0.5 为导槽宽度（m）；3 为每组施工幅数。

渗透系数控制计算公式为：

$$k=\frac{Q\times L}{(A\times H\times t)}\tag{2}$$

式中：k 为渗透系数（cm/s）；Q 为渗透流量（cm³）；L 为试件厚度（cm）；A 为试件截面积（cm²）；H 为水头差（cm）；t 为渗透时间（s）。通过该公式计算确保防渗墙渗透系数满足 $k\leq 1\times 10^{-6}$ cm/s 的设计要求，为工程质量提供了量化控制标准^[5]。

4 优化工艺的工程应用与效益分析

4.1 优化工艺应用实践

五轴搅拌桩机标准化工艺在松澧垸堤防工程里全面应用，该工艺覆盖的堤防总长达到 37.930km，涉及到 29 个主

要的施工段落，工艺试验段 K9+000-K9+320 通过 A 至 E 五个试验段对比分析，确定不同地层条件下的最优施工参数。实际施工过程严格按照标准化工艺流程来执行，土质条件较好的地段采用两搅两喷工艺，复杂地层或质量要求较高的区段应用四搅两喷工艺，水泥掺量控制在 15%-16%的最优范围之内。自动记录系统的广泛应用实现施工过程实时监控以及数据管理，有效提升质量控制水平确保大规模工程实施的一致性与可靠性。

4.2 施工效果与质量评价

优化工艺在工程应用里显著提升了实际效果，施工质量实现了全面性的改善，开挖检查的结果表明墙体直径、桩体搭接还有外观质量都达到了设计要求，墙体均匀性、完整性以及连续性表现良好，不存在蜂窝、孔洞等方面的质量缺陷。芯样抗压强度检测选取 40 个有代表性的芯样开展 28 天龄期试验，检测结果全部都满足设计强度的相关要求，钻孔注水检测 10 孔 20 段的试验结果显示渗透系数均符合 $k\leq 1\times 10^{-6}$ cm/s 的设计标准。整个项目单元工程评定优良率为 95.24%，经过两个汛期的考验已施工的防渗墙段没有险情出现，防渗效果得到了充分性的验证（见表 1）。

表 1 五轴与三轴搅拌桩机施工效果对比表

设备类型	日产能 (m³/台·日)	人工成本 (元/日)	用电成本 (元/日)	直接成本 (元/m²)	单元优良率 (%)	渗透系数达标率 (%)	强度达标率 (%)
三轴搅拌桩机	350	3000	4200	20.57	85.6	92.3	89.7
五轴搅拌桩机	550	3000	5500	15.45	95.24	97.5	97.5
效率提升	+57.1%	0%	+31.0%	-24.9%	+9.64%	+5.2%	+7.8%

4.3 技术经济效益分析

五轴搅拌桩机优化工艺在技术经济效益上收获显著成果，施工效率大幅提升同时实现成本有效控制，单机日产能从传统设备 350 m³提升到 550 m³，提升幅度达到 57.1%直接缩短施工工期 18 天。成本分析显示五轴设备直接成本降至 15.45 元/m²，较传统设备节约成本达 24.9%，仅松澧垸项目就实现成本节约 214503 元。人工成本与用电成本优化配置进一步提升经济效益，设备投资回收期缩短单位工程量综合效益显著提高，为类似大型堤防工程提供经济可行技术方案推动水泥土防渗墙施工技术产业化发展。

结语

水泥土防渗墙标准化工艺优化研究收获显著成果。五轴搅拌桩机技术应用有效解决传统工艺效率低质量控制难等问题，所建立的标准化工艺流程为工程实施提供科学依据。工程应用实践验证优化工艺可行性与先进性，在提高施工效率的同时，保证了工程质量取得良好技术经济效益。该研究成果为类似堤防防渗工程提供重要技术支撑，推动水泥土防渗

墙施工技术发展，未来应继续深化相关技术研究完善工艺标准体系，结合智能化施工技术进一步提升水泥土防渗墙施工自动化水平，为堤防工程建设提供更可靠技术保障。

[参考文献]

[1]仲凯，杨晓飞. 堤防防渗施工技术研究[J]. 长江技术经济，2022，6（02）：104-108.

[2]盛奇，赵建祖. 高喷搭接水泥土防渗墙在水库除险加固中的应用[J]. 甘肃水利水电技术，2022，58（09）：55-58.

[3]王导勇，谢为江，郑建平，等. 集束可控高喷防渗墙技术在洞庭湖区堤防加固应用试验研究[J]. 江西水利科技，2024，50（04）：262-267.

[4]周炼，徐成. TRD 水泥土防渗墙在堤防加固工程防渗处理中的试验研究及应用[J]. 湖南水利水电，2025，（01）：41-44.

[5]张荣成. 防渗墙渗透系数对堤防稳定影响研究[J]. 黑龙江水利科技，2025，53（06）：155-159.