

水利工程混凝土防渗墙施工技术研究

曹正宇

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘要：水利工程中，混凝土防渗墙施工技术至关重要，关乎工程整体质量与效益。该技术通过专用机械造槽孔，注入泥浆加固，再浇筑混凝土形成连续墙体，以增强防渗性能。研究涵盖施工准备、泥浆护壁、混凝土浇筑、接头处理等关键技术环节。优化施工流程，强化质量管控，能显著提升防渗墙的安全性和耐久性。随着技术迭代与材料创新，混凝土防渗墙施工技术在水利工程中的应用前景广阔。

关键词：水利工程；混凝土防渗墙；施工技术

引言：在水利工程建设中，混凝土防渗墙作为关键性结构，对于防止地下水渗漏、维护工程安全稳定发挥着重要作用。随着工程技术的不断进步，混凝土防渗墙施工技术在材料选择、施工工艺、质量控制等方面均取得了显著进展。本文旨在深入研究这一技术的现状与发展趋势，探讨其在实际工程中的应用效果与优化策略，为水利工程的科学施工与技术创新提供理论依据与实践指导。

1 混凝土防渗墙施工技术概述

1.1 混凝土防渗墙的基本概念

1.1.1 定义与功能

混凝土防渗墙是在松散透水地基或土石坝坝体中，采用专用设备成槽，在槽内浇筑混凝土形成的连续防渗结构。其核心功能是阻挡地下水渗透，减少渗透流量和渗透压力，常用于水利水电工程、市政工程及矿山工程等领域，可有效预防管涌、流土等渗透破坏，保障工程结构的稳定性和安全性。

1.1.2 结构特点与分类

混凝土防渗墙具有墙体连续完整、防渗性能强、适应变形能力较好等结构特点。按墙体材料可分为普通混凝土防渗墙、钢筋混凝土防渗墙、塑性混凝土防渗墙等；按成槽方式可分为钻挖成槽防渗墙、冲击成槽防渗墙、抓斗成槽防渗墙等；按墙的结构形式则有桩柱式防渗墙、壁板式防渗墙等。

1.2 混凝土防渗墙的施工原理

1.2.1 施工工艺流程

混凝土防渗墙施工工艺流程主要包括：施工准备（场地平整、设备就位、泥浆系统布置等）→槽段划分与成槽（通过专用设备开挖沟槽，同时采用泥浆护壁防止槽壁坍塌）→清孔换浆（清除槽底沉渣，置换不合格泥浆）→钢筋笼制作与吊装（根据设计要求安装钢筋骨

架）→混凝土浇筑（采用导管法水下浇筑，形成连续墙体）→墙体质量检测。

1.2.2 关键施工技术环节解析

成槽环节是施工的关键，需严格控制槽孔垂直度、深度及槽壁稳定性，泥浆的性能参数（黏度、密度、含砂率等）直接影响护壁效果；清孔换浆需保证槽底沉渣厚度符合设计标准，避免影响墙体结合强度；混凝土浇筑时，导管埋深应控制在2-6米，确保混凝土密实度和整体性，防止出现冷缝。

2 水利工程混凝土防渗墙施工技术的具体应用

2.1 施工设备与技术准备

（1）施工机械的选择与配置。水利工程因地质复杂、防渗深度大，需针对性配置设备。在覆盖层较厚的库区，优先选用液压抓斗（如徐工XTC80/55），成槽深度可达50m，适应粒径 $\leq 30\text{cm}$ 的卵石层；若遇坚硬基岩，搭配冲击钻机（如JK3.2型），通过冲击破碎岩层实现嵌岩施工。配套设备需满足高强度作业需求：每台成槽机配2套泥浆循环系统（含BW-250泥浆泵）、1台80t汽车吊（吊装钢筋笼）及1套混凝土输送泵车（HBT80型），同时配备超声波测斜仪（精度 $\pm 0.1\%$ ），实时监控槽孔垂直度。（2）材料准备与质量控制。原材料需适应水利工程长期水下环境。水泥选用抗硫酸盐水泥（如42.5R），抵抗地下水侵蚀；骨料采用级配连续的河床砂卵石（含泥量 $\leq 2\%$ ，针片状颗粒 $\leq 15\%$ ）；掺合料选用Ⅰ级粉煤灰，替代20%-30%水泥以改善和易性。质量控制执行“三检制”：进场水泥每200t抽样检测强度、安定性；砂石料每400m³检测级配与含泥量；混凝土试块按每50m³留置1组，标准养护28d检测抗压、抗渗性能（抗渗等级 $\geq \text{P8}$ ）^[1]。（3）施工组织设计与技术方案。施工组织需结合水利工程季节性特点，避开汛期施工。采用“分段流水作业”模式，将防渗墙划分为10-15个槽

段,每个槽段配置1个专业班组(成槽、清孔、浇筑各3人),日均成墙面积控制在50-80m²。技术方案明确特殊工况应对措施:在高水位区施工时,导墙顶面高于最高水位1.5m;遭遇承压水地层,预设减压井降低水头;地震烈度 ≥ 7 度区域,墙体设置伸缩缝(间距20-30m),缝宽20mm并填充止水材料。

2.2 关键施工环节的技术分析

(1)槽孔开挖与固壁处理。槽孔开挖前需浇筑“L”型钢筋混凝土导墙(截面尺寸1.2m \times 0.8m),嵌入原状土0.5m,防止地表水冲刷。采用“跳仓法”开挖,先施工I序槽段,间隔24h后施工II序槽段,避免槽壁相互扰动。在粉细砂层开挖时,采用“慢速轻挖”工艺,槽段长度缩短至4-6m,同时提高泥浆黏度至28-32s;遇溶洞地层,先填充级配砂石并注浆固化,再进行成槽。固壁泥浆液面始终高于地下水位2m以上,确保槽壁稳定。(2)泥浆制备与性能控制。水利工程泥浆需兼顾护壁与环保要求,采用膨润土(蒙脱石含量 $\geq 70\%$)+纯碱(Na_2CO_3)+聚丙烯酰胺(PAM)配制。新浆性能指标:密度1.10-1.15g/cm³,黏度25-30s,失水量 $\leq 30\text{mL}/30\text{min}$,泥皮厚度 $\leq 2\text{mm}$ 。循环泥浆经三级净化(振动筛 \rightarrow 旋流器 \rightarrow 沉淀池),净化后含砂率 $\leq 3\%$ 方可回用。废弃泥浆采用“化学絮凝+压滤脱水”处理,干泥饼含水率 $\leq 30\%$ 后运至指定堆场,避免污染水体。

(3)混凝土配制与浇筑技术。混凝土需满足水下不分散特性,配合比设计为:水泥320kg/m³、粉煤灰80kg/m³、砂750kg/m³、石1100kg/m³、水180kg/m³、聚羧酸减水剂3.2kg/m³,坍落度20 \pm 2cm,初凝时间 $\geq 8\text{h}$ 。浇筑采用“多导管同步浇筑法”,导管间距 $\leq 2.5\text{m}$,首次埋深 $\geq 1.5\text{m}$,上升速度保持3-5m/h。浇筑过程中,每30min测量一次混凝土面高度,相邻导管混凝土面高差 $\leq 50\text{cm}$,杜绝冷缝产生;终浇高程高于设计高程0.5-1.0m,确保墙体顶部质量。(4)墙体接缝与断层处理技术。墙体接缝采用“接头管法”,I序槽段浇筑后2-4h插入 $\Phi 300\text{mm}$ 钢质接头管,每隔30min提升一次(每次5-10cm),避免与混凝土黏结。遇断层破碎带时,先进行超前灌浆(水泥浆+水玻璃双液浆,压力1.0-1.5MPa),形成5m厚的防渗帷幕;墙体浇筑时,在断层部位增设 $\Phi 12\text{mm}$ 钢筋网(间距200mm \times 200mm),提高抗剪强度。接缝质量检测采用声透射法,声波波速 $\geq 3500\text{m/s}$ 为合格^[2]。

2.3 不同施工方法的比较与应用

2.3.1 链斗法、锯槽法、射水法等的施工特点与适用条件

(1)链斗法:通过链斗连续切削地层,成槽效率高

(日进尺20-30m),但对粒径 $> 20\text{cm}$ 的块石适应性差,适用于平原水库的砂土层防渗,如江苏洪泽湖大堤加固工程,成墙深度25m,渗漏量减少80%。(2)锯槽法:锯削刀具沿轨道往复运动成槽,槽宽均匀(0.2-0.3m),墙体平整度 $\leq 5\text{cm}$,适用于黏土、粉质黏土地层,如黄河三角洲蓄滞洪区防渗,单段施工长度达100m,节省接头处理时间30%。(3)射水法:高压水射流冲蚀地层,配合成型器修整槽壁,设备投资低(约为抓斗法的60%),但在硬塑黏土层进度缓慢(日进尺5-8m),多用于中小型水闸地基防渗。

2.3.2 多头深层搅拌水泥土成墙技术的优势与应用案例

该技术通过多轴搅拌桩机(如SJB-II型)将水泥浆与土强制搅拌,形成渗透系数 $\leq 1\times 10^{-8}\text{cm/s}$ 的防渗墙,在水利工程中具有显著优势:施工噪音 $\leq 70\text{dB}$,适合库区周边居民区;墙体单价约300元/m²,较混凝土墙节省成本40%;可在-5℃环境施工,延长冬季作业时间。典型案例:丹江口水库移民安置区防渗工程,采用 $\Phi 500\text{mm}$ 双轴搅拌桩,搭接100mm形成连续墙体,施工面积12万m²,经注水试验,单孔涌水量 $\leq 0.01\text{L}/\text{min}$;新疆某灌溉渠防渗工程,在砂卵石地层中采用“搅拌+注浆”复合工艺,解决了纯搅拌桩咬合不良问题,渗漏率降至0.5m³/(d \cdot km)。

3 水利工程混凝土防渗墙施工技术的优化与创新

3.1 施工技术的改进与创新点

(1)提高施工效率与质量的新方法。引入智能化成槽系统,通过北斗定位与液压伺服控制技术,实现槽孔开挖垂直度自动调节,偏差控制精度提升至 $\pm 0.2\%$,成槽效率提高20%。创新采用“模块化钢筋笼”预制技术,将传统整体吊装改为分段拼接,解决大跨度钢筋笼吊装变形问题,钢筋保护层厚度合格率从85%提升至98%。开发水下混凝土浇筑智能监控系统,实时监测导管理深、混凝土面高度及流动速度,通过自动调节浇筑速率避免冷缝产生,墙体完整性检测合格率提高15%^[3]。(2)降低成本与资源消耗的技术途径。推广“废浆再生利用”技术,通过机械脱水+化学改性工艺,将废弃泥浆转化为防渗墙回填材料,减少固废处理量达60%,降低材料成本15%-20%。应用“槽段长度动态优化”算法,根据地质参数自动调整槽段划分,在保证安全的前提下将平均槽段长度从6m延长至8m,减少接缝处理量30%,节省工期10%。采用低能耗双轮铣设备,较传统冲击钻机能耗降低40%,同时减少施工噪音对周边环境的影响。

3.2 施工过程中的质量控制与安全管理

(1) 质量控制标准与检测方法。执行《水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范》(SL174-2014), 关键指标包括: 墙体渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$, 抗压强度 $\geq 20 \text{MPa}$, 垂直度偏差 $\leq 0.3\%$ 。采用“三阶段检测法”: 成槽阶段用超声波测壁仪检测槽形; 清孔后通过取样检测泥浆含砂率 ($\leq 3\%$) 和沉渣厚度 ($\leq 10 \text{cm}$); 墙体成型后采用钻孔取芯 (芯样连续完整) 和声波透射法 (波速 $\geq 3500 \text{m/s}$) 检测完整性, 抽检比例不低于20%。

(2) 安全管理措施与应急预案。制定“一机一防护”制度, 成槽机配备防倾覆监测仪, 当倾斜角度超过 3° 时自动报警停机; 高压电路设置双重漏电保护, 接地电阻 $\leq 4 \Omega$ 。针对汛期施工制定专项预案: 提前5天监测水位变化, 当水位涨幅超过 0.5m/h 时启动应急排水系统 (抽排能力 $\geq 500 \text{m}^3/\text{h}$); 储备 500m^2 防渗彩条布和 200m 应急钢管, 用于临时挡水。每月开展防坍塌演练, 模拟槽壁失稳时的人员撤离 (撤离时间 $\leq 3 \text{min}$) 和回填封堵流程, 确保施工人员安全^[4]。

3.3 混凝土防渗墙的长期性能监测与维护

(1) 监测方法与指标体系。建立“自动化监测网络”, 布设渗压计 (监测墙体内外水头差, 精度 $\pm 2 \text{kPa}$)、应力计 (监测墙体受力, 量程 $0\text{--}5 \text{MPa}$) 和测斜仪 (监测墙体位移, 分辨率 0.01mm/m), 数据每小时自动采集上传。定期 (每年1次) 采用无人机航测结合地面三维扫描, 检测墙体表面裂缝 (宽度 $\geq 0.2 \text{mm}$ 需预警) 和沉降 (年沉降量 $\leq 5 \text{mm}$ 为正常)。每3年进行一次钻孔压水试验, 测定渗透系数变化, 评估防渗性能衰减情况。(2) 维护保养策略与技术要求。对监测发现的局部

渗漏点, 采用“微创注浆”处理: 钻孔直径 50mm , 注入水泥-水玻璃双液浆 (水灰比 $1:1$, 凝胶时间 $30\text{--}60 \text{s}$), 注浆压力控制在 $0.3\text{--}0.5 \text{MPa}$, 直至吸浆量 $\leq 1 \text{L/min}$ 时停止。当墙体出现宽度 $> 0.5 \text{mm}$ 的裂缝时, 采用环氧树脂浆液灌缝, 灌缝前需用高压水冲洗裂缝内部, 确保浆液充填饱满。对于运行超过20年的防渗墙, 每5年开展一次全面评估, 对性能衰减严重的段落实施“墙后补强”, 新增 $3\text{--}5 \text{m}$ 厚水泥土搅拌桩防渗帷幕, 延长工程使用寿命。

结束语

水利工程混凝土防渗墙施工技术研究是保障水利设施安全稳定运行的关键。通过全面探讨施工原理、关键环节控制及技术创新, 我们认识到严格施工流程、优化技术配置与强化质量管理对提升防渗墙效能的重要性。未来, 应持续探索智能化、高效化的施工新方法, 加强长期性能监测与维护, 确保防渗墙在复杂环境中发挥持久作用。这不仅有助于提升水利工程的整体效能, 更为水资源的安全利用与可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 李静波. 水利工程施工的混凝土防渗墙施工技术分析[J]. 中国水泥, 2024, (08): 99-101.
- [2] 刘铭瑞. 水利工程施工中的混凝土防渗墙施工技术[J]. 建材发展导向, 2025, 23(06): 55-56.
- [3] 姚任峰. 混凝土防渗墙技术在水利工程的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2020, 49(02): 46-47.
- [4] 张雪, 张松露. 水利工程施工中混凝土防渗墙施工工艺研究[J]. 居业, 2022, (06): 61-63.