

水利工程施工中防渗技术的应用与效果评估

韦冬青

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要：本文立足水利工程实践语境，系统梳理了渗流病害的主要表现形式及其力学成因，指出渗透变形与渗漏损失是防渗治理的核心矛盾。以此为基础，将当前主流防渗技术归纳为垂直截渗、水平铺盖、灌浆加固及排水导渗四大类别，分别阐述其技术原理、施工要点与适用条件，并构建了涵盖防渗效果、施工质量、长期稳定性和环境影响的多维度效果评估框架。进而重点讨论施工过程中技术适配选择、工艺参数控制及质量检测手段等关键问题，提出防渗技术应用应从单一工法向“截排结合、刚柔并济、监测贯穿”的系统化模式转变。本文强调，效果评估不应局限于施工期的渗透系数达标检验，更应延伸至运行期的长期性态跟踪与反演分析。研究旨在为水利工程防渗设计与施工提供逻辑清晰、操作性强的技术参考。

关键词：水利工程；防渗技术；灌浆技术；混凝土防渗墙；效果评估

引言

无论是土石坝、混凝土坝、水闸还是堤防工程，一旦防渗体系失效，轻则造成水量损失和扬压力升高，重则引发管涌、流土乃至溃坝灾难。近二十年来，随着基础材料科学、施工装备及检测手段的持续进步，防渗技术已从传统的粘土铺盖、混凝土截水墙拓展至高压喷射灌浆、自凝灰浆防渗墙、土工膜防渗、垂直铺塑、帷幕灌浆以及化学灌浆等多元化技术群。同时，效果评估方法也由单一的水位观测和渗流量监测，发展为结合地球物理探测、数值反演和长期性态评价的综合体系。然而，工程实践中仍存在一些共性倾向：一是技术选择偏重经验类比，缺乏针对工程地质条件和水文特征的精细化适配；二是施工过程控制与质量验收脱节，检测频率和代表性不足；三是效果评估多停留在短期验收指标，对长期渗透稳定性关注不够。

1 水利工程渗流问题与防渗需求分析

1.1 渗流病害的主要表现形式

水利工程中的渗流病害可归纳为渗漏损失和渗透变形两大类。渗漏损失指水体通过地基、坝体或绕坝通道流失的水量，不仅降低工程调蓄效益，还可能抬升下游地下水位，引发浸没灾害。渗透变形则指在渗流力作用下，土体颗粒发生移动或整体结构破坏，具体表现为管涌、流土、接触冲刷和接触流失四种基本形式。管涌发生在无粘性土中，细颗粒在粗颗粒孔隙间被渗流搬运带走，逐步形成贯通的渗流通道；流土则发生在粘性土或级配不良的砂性土中，当向上渗流力超过土体浮容重时，土体表面隆起、开裂甚至浮动。这些病害形式往往相互转化，例如局部管涌如不及时处理，可迅速发展为集中渗漏通道，最终导致结构失稳。

1.2 防渗设计的核心目标与技术逻辑

防渗工程的根本目标可概括为“控制渗流量、降低扬压力、防止渗透变形”。围绕这一目标，技术逻辑上有两条基本路径：一是“截断路径”，即通过垂直防渗体或水平铺盖延长或阻断渗径，减少通过坝基和坝体的渗流量；二是“疏导应力”，即在合理位置设置排水减压设施，可控地释放渗流能量，降低孔隙水压力。两者并非对立关系，成熟的设计往往将截渗与排水有机配合，形成“前截后排”的系统布局^[1]。例如，土石坝心墙与下游贴坡排水的组合，面板坝趾板帷幕灌浆与坝基排水廊道的协同，均是截排结合理念的经典体现。理解这一底层逻辑是正确选择和运用具体防渗技术的前提。

1.3 不同坝型及地基条件下的防渗侧重点

防渗方案必须因“型”制宜、因“地”制宜。土石坝的防渗以坝体心墙或斜墙为核心，辅以坝基防渗帷幕和岸坡绕渗处理，重点在于控制坝体浸润线位置和下游逸出点高程。混凝土坝（含重力坝、拱坝）则主要关注坝基扬压力控制和坝体横缝止水，帷幕灌浆深度和排水孔布置是设计核心。堤防工程的防渗特性更为复杂，既涉及堤身填土密实度，又涉及堤基覆盖层与透水层的关系，常见的是“截水墙+压渗盖重”的综合方案。地基条件方面，基岩裂隙发育程度、覆盖层厚度及透水性、是否存在强透水夹层等，均显著影响防渗措施的选择和参数确定，如基岩帷幕灌浆的孔排数和深度应依据岩体透水率（吕荣值）分级确定，而深厚砂卵石地基则需优先考虑地下连续墙或高喷灌浆。

2 主要防渗技术分类与工艺特征

2.1 垂直防渗技术

垂直防渗核心是在地基或坝体中建造一道竖向阻水屏障,直接截断渗流通道。混凝土防渗墙是最具代表性的垂直防渗形式,槽段式施工采用抓斗或铣槽机开挖槽孔,泥浆固壁,浇筑水下混凝土形成连续墙体,厚度一般为0.4~1.2m,深度可达百米以上。该技术适用于各种地基条件,尤其适用于深厚覆盖层和强透水层,墙体渗透系数可达 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ 量级。高压喷射灌浆技术则是利用高压水、气、浆液切割和搅拌原地基土体,形成圆柱状或板墙状固结体,施工灵活、设备轻便,但桩体直径受土质和压力影响较大,成墙连续性稍逊于防渗墙^[2]。垂直铺塑技术近年来在堤防工程中得到推广,采用专用开槽机在堤身中开出窄槽后铺设土工膜,施工速度快、造价低,但受限于铺膜深度(通常小于15m)和膜体接头的可靠性。

2.2 水平防渗技术

水平防渗以延长渗径、减小渗透比降为主要作用方式,包括上游铺盖和下游压重两大类型。粘土铺盖是在坝基上游侧铺设低渗透性土料,利用其自重和防渗性能延长坝基渗径,降低坝底扬压力,适用于地基透水层不深、有足够滩地长度的情况。铺盖的渗透系数一般要求小于 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$,厚度需满足自身抗浮稳定和防裂要求。土工膜水平防渗则是在坝体上游面或库底铺设合成材料膜,配合保护层使用,其防渗性能优异,但在水压作用下的膜下气胀、膜体锚固和老化问题需专门设计。需要指出的是,水平防渗一般不独立承担主要防渗任务,而是与垂直防渗结合形成空间截渗体系,尤其在岩溶地区和层状地基中效果显著。

2.3 灌浆防渗技术

灌浆技术通过将浆液注入地基裂隙或孔隙中,固化后降低岩土体的渗透性。按灌浆材料可分为水泥灌浆、化学灌浆和混合浆液灌浆。水泥灌浆是最基本的方式,浆液水灰比通常由0.5:1至5:1逐级变换,灌浆压力根据岩体承压能力和覆盖层厚度确定。对于微细裂隙发育的岩体或粉细砂层,普通水泥颗粒难以有效注入,需采用超细水泥或化学浆液(如丙烯酸盐、聚氨酯等),其黏度低、可灌性高。帷幕灌浆是在坝基上游侧布置一排或多排钻孔,形成一道近于垂直的防渗幕,是混凝土坝和土石坝坝基处理的核心工法。灌浆效果的判断依据单位吸水率(吕荣值)的降低幅度,一般要求基岩透水率不大于3~5Lu。施工中需严格控制灌浆压力和浆液变换标准,防止抬动变形和串浆事故。

2.4 排水导渗技术

排水并非直接阻止渗流,而是有组织地引导渗水排

出,以降低坝体浸润线和地基扬压力。常见的型式有褥垫排水、棱体排水、贴坡排水和排水孔幕。褥垫排水是在坝体下游底部铺设水平排水层,将渗水汇集后导出,具有排水效率高、适应不均匀变形的优点,但施工时需与坝体填筑同步进行。棱体排水是设置在下游坝脚的堆石体,兼具支撑坝趾和排水功能。排水孔幕则广泛用于混凝土坝坝基和坝体,通过钻孔形成减压通道,孔距一般为2~3m,孔径50~150mm,需配合反滤层避免坝体细颗粒被带出^[3]。需要强调的是,排水导渗必须与反滤设计紧密结合,若反滤层级配不当,排水设施反而可能成为渗透破坏的策源通道。

3 防渗施工质量控制与检测

3.1 施工准备与地质复核

防渗工程施工前的地质复核是质量控制的第一道关口。由于勘察阶段钻孔有限,施工过程中揭露出新地质现象是常态,需建立地质编录和及时反馈机制。对于防渗墙槽孔施工,槽段划分应结合地基条件变化灵活调整;对于帷幕灌浆,先导孔的压水试验资料是优化孔布置的直接依据。施工前的配合比设计和现场工艺试验不可省略,例如混凝土防渗墙的护壁泥浆性能(比重、黏度、含砂率、失水量)、灌浆浆液的凝结时间和流变特性等,均需通过试验确定适宜参数。地质复核还应查明隐蔽的洞穴、破碎带和透镜体等不良地质体,为局部加密灌浆或加深防渗墙提供依据。

3.2 施工过程关键工艺参数控制

防渗墙施工中,槽孔垂直度偏差一般不超过墙深的0.3%,否则将导致相邻槽段搭接厚度不足,产生渗漏隐患。混凝土浇筑应连续均匀,上升速度不小于2m/h,且导管埋深控制在1~6m之间,避免冷缝和夹泥。高喷灌浆的施工参数(压力、流量、提升速度、旋转速度)需根据地层情况实时调整,砂层中宜适当降低提升速度、增加浆液密度,保证桩径和均匀性。帷幕灌浆中,浆液变换应遵循“先稀后浓、逐级变换”原则,注入率持续不降时需及时调整浆液浓度或添加速凝剂。此外,施工过程中的异常情况(如槽孔坍塌、孔斜超标、灌浆中断、串浆冒浆等)应详细记录并启动预案处置。

3.3 质量检测方法与评价指标

过程检测侧重原材料性能和施工参数记录,如水泥强度、膨润土性能、浆液密度等。事后检测则通过钻孔取芯、压水试验、声波检测和地球物理探测等手段,综合评判防渗体的完整性、均匀性和渗透性。混凝土防渗墙采用钻孔取芯和跨孔声波法检测墙体质量,要求芯样连续完整,渗透系数和抗压强度满足设计指标。高压喷

射灌浆的桩体质量常用钻孔取芯和围井注水试验检验。帷幕灌浆的质量评定以检查孔的压水试验成果为主,要求合格率达到85%以上,且不合格孔段的透水率不超过设计值的150%。值得强调的是,检测孔布置应有针对性地选在地质条件复杂或施工异常部位,而非均匀随机布点,以提高缺陷发现的概率。

4 防渗效果评估体系与技术发展趋势

4.1 防渗效果的多维评估框架

防渗效果的全面评估应当涵盖技术性能、施工质量和长期稳定性三个层次。技术性能指标包括渗流量削减率、坝基扬压力折减系数、浸润线降低幅度等,反映防渗体系是否达到设计预期的水力控制目标。施工质量指标侧重于防渗体的连续性、均匀性和强度参数,这些由施工记录和检测数据综合评判。长期稳定性则涉及防渗材料的耐久性、接头部位的变形适应性、以及水位骤降等极端工况下的抗裂能力^[4]。建议建立涵盖“施工期—蓄水初期—稳定运行期—老化管理期”的全生命周期评价时间轴,不同阶段的评估侧重点应有差异:施工期重在工艺参数和即时检测,蓄水初期关注渗流场变化趋势,运行期则聚焦于长期监测数据的统计分析和异常识别。

4.2 评估方法与技术手段

效果评估的方法可分为直接法和间接法两大类。直接法包括渗流量监测、测压管水位观测、示踪试验等,获取的是防渗体系的整体水力响应信息,具有直观可靠的优点,但难以定位局部缺陷。间接法则借助地质雷达、高密度电法、弹性波层析成像等物探手段,可识别防渗体内部的空洞、夹泥和不密实区域,作为直接法的有效补充。近年来,分布式光纤测温技术逐渐应用于防渗墙和帷幕的渗流监测,利用渗流引起的温度场异常实现分布式渗漏探测,空间分辨率显著提高。此外,基于长期监测数据的趋势分析和统计模型(如回归分析法、时间序列法)有助于区分正常渗流与异常渗流,为安全预警提供量化依据。

4.3 技术发展趋势与前沿方向

当前防渗技术正在向精细化、绿色化和智能化方向

演进。精细化体现为基于渗流场—应力场—温度场耦合分析的靶向设计,使防渗布置与地质条件达到更高程度的空间匹配。绿色化表现为材料层面的革新,包括低碳水泥、矿物掺合料及环保型化学浆液的推广应用,减少水泥用量和化学污染。智能化则涵盖施工过程的自动化控制(如自动灌浆记录仪、智能纠偏系统)以及运行期的实时安全评估平台,通过物联网技术将监测数据接入云平台,实现异常状态的自动预警。需要指出的是,技术创新的价值最终要落实到工程实际效果上,因此效果评估体系本身也需与时俱进,纳入新材料、新工法的专项评价指标。

5 结语

水利工程防渗技术是融合材料、机械、地质与施工组织的多学科协同工程。本文基于渗流控制力学需求,系统梳理垂直防渗、水平防渗、灌浆加固和排水导渗四类核心技术,明确其原理、适用条件与工艺要点,并构建涵盖技术性能、施工质量与长期稳定性的三维评估框架,强调全生命周期评价。研究表明,成功防渗依赖“截排结合、刚柔并济、监测伴随”的系统思维:垂直截渗与排水减压协同、刚性结构与柔性材料互补、施工与长期监测联动。面对复杂工况与更高安全要求,技术人员应在掌握经典工法基础上,融合新材料与信息化监测技术,推动防渗工程从经验主导迈向数据驱动、从静态施工转向动态管控,切实保障水利设施长效安全与效益发挥。

参考文献

- [1]张楚汉,王光纶,金峰.高坝工程防渗排水系统协同设计理论与方法[J].水利学报,2022,53(5):507-518.
- [2]陈祖煜,汪小刚,贾金生.土石坝渗流安全评价与除险加固技术研究进展[J].岩土工程学报,2023,45(3):397-408.
- [3]吴中如,顾冲时,苏怀智.基于大坝安全监测的渗流性态反演评估方法[J].水利水运工程学报,2022,48(4):1-9.
- [4]钮新强,杨启贵,熊泽斌.水利工程全生命周期防渗安全评价体系构建[J].人民长江,2025,56(6):1-10.