

水利水电工程施工中的防渗技术研究与应用

刘应涛

四川尚金建设项目管理有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i2.12917

[摘要] 随着水利水电工程规模扩大,防渗技术成为工程安全运行的关键环节。水利工程渗漏导致水资源浪费、结构稳定性下降、工程寿命缩短等问题。针对不同地质条件,帷幕灌浆、混凝土防渗墙、高压喷射灌浆、复合土工膜等技术各具特点。实践表明,混凝土防渗墙在岩溶区域渗透系数降低达92%,复合土工膜在土石坝应用渗漏量减少87.6%。防渗技术选型需综合考虑地质条件、工程特性、经济因素等要素。科学施工工艺与严格质量控制是防渗效果保障,完善监测体系则为长期安全运行提供支撑。优化防渗技术应用,对提高水利水电工程安全性、延长使用寿命具有重要意义。

[关键词] 水利水电工程; 防渗技术; 帷幕灌浆; 混凝土防渗墙; 复合土工膜

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research and application of anti-seepage technology in water conservancy and hydropower engineering construction

Yingtao Liu

Sichuan Shangjin Construction Project Management Co., LTD

[Abstract] With the expansion of the scale of water conservancy and hydropower projects, anti-seepage technology has become a key link in the safe operation of the project. The leakage of water conservancy project leads to the waste of water resources, the decline of structural stability and the shortening of project life. According to different geological conditions, curtain grouting, concrete cutoff wall, high pressure jet grouting, composite geomembrane and other technologies have their own characteristics. The practice shows that the permeability coefficient of concrete cure-off wall in karst area is reduced by 92%, and the leakage of composite geomemofilm in earth-rock dam is reduced by 87.6%. The selection of anti-seepage technology should consider geological conditions, engineering characteristics, economic factors and other factors. Scientific construction technology and strict quality control are the guarantee of anti-seepage effect, and perfect monitoring system provides support for long-term safe operation. Optimizing the application of anti-seepage technology is of great significance to improve the safety and prolong the service life of water conservancy and hydropower projects.

[Key words] water conservancy and hydropower engineering; Anti-seepage technology; Curtain grouting; Concrete cutoff wall; Composite geomembrane

水利水电工程是国民经济发展基础设施,渗漏问题却严重威胁工程安全运行。随着大型水利水电工程建设数量增加,地质条件日趋复杂,传统防渗技术面临新挑战。渗漏不仅造成水资源流失,还可能引发管涌、流土、滑坡等安全事故,甚至导致工程失效。防渗技术经历从单一材料到复合结构,从简单工艺到精细施工的发展历程,已形成多种技术并存互补格局。深入研究防渗技术原理、特点、适用条件,探索施工工艺优化途径,评估应用效果,对提升工程质量、保障长期安全、发挥经济效益具有重要意义。防渗技术创新发展将持续推动水利水电工程建设进步。

1 水利水电工程防渗技术概述

水利水电工程渗漏问题主要表现为基础渗漏、接缝渗漏和结构裂缝渗漏三大类型。基础渗漏多发生于地质条件复杂区域,如岩溶发育地带或断层破碎带,渗透水流通过地基岩土体间隙流动,导致地基承载力下降、侵蚀管涌形成^[1]。接缝渗漏则常见于混凝土结构与岩基、土石结构与混凝土结构的连接部位,应力集中导致接触面开裂形成渗漏通道。结构裂缝渗漏主要因温度变化、荷载作用等引起混凝土收缩开裂所致。大坝工程中严重渗漏会导致扬压力增大、坝体稳定性降低;渠道工程渗漏则造

成输水损失、灌溉效率降低;地下厂房渗漏影响设备运行安全。防渗需求逐步从单纯控制渗漏量发展为兼顾结构安全性、工程耐久性和生态环境保护的综合要求。

2 水利水电防渗技术

2.1 帷幕灌浆防渗技术

帷幕灌浆防渗技术通过钻孔向地基岩土体裂隙、空洞注入水泥浆液或化学浆液,形成连续防渗帷幕,切断渗水通道(图1所示)。该技术适用于岩溶发育区、断层破碎带等复杂地质条件,具有适应性强、施工设备轻便灵活的特点。灌浆材料主要包括纯水泥浆、水泥-粘土浆、水泥-砂浆及各类化学浆液^[2]。灌浆孔布置常采用单排、双排或多排形式,孔距一般为1.5-3.0m。帷幕灌浆施工关键在于孔位布置、钻进质量、灌浆参数控制和封孔处理,灌浆压力一般为0.5-3.0MPa,灌浆终止标准通常采用压力标准和吸浆量标准相结合确定。帷幕灌浆采用分段压力灌浆法,灌浆顺序遵循“先深后浅、先高压后低压、先低浓度后高浓度”原则。检查孔设置比例通常为10-15%,用于检验灌浆质量。实践表明,帷幕灌浆后地基渗透系数可降低2-3个数量级,在大型水库、水电站工程中效果显著,但存在灌浆盲区和短期效应问题,需与其他防渗技术结合应用。

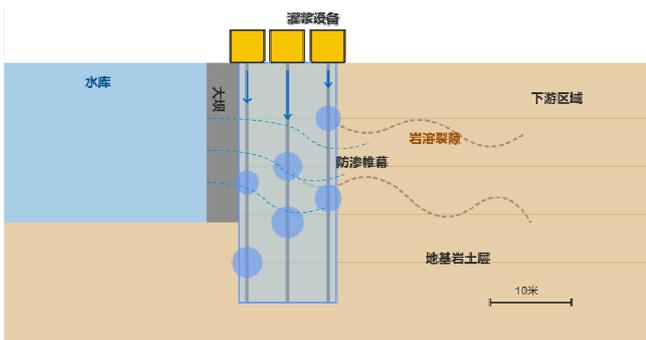


图1 帷幕灌浆防渗技术示意图

2.2 混凝土防渗墙技术

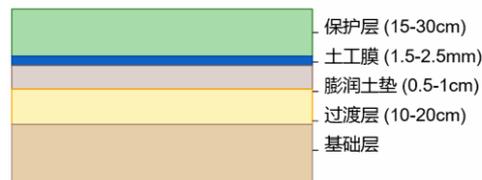
混凝土防渗墙技术是在地基中开挖槽孔,灌注混凝土形成连续刚性防渗体的技术。其优势在于防渗效果可靠、耐久性好、抗变形能力强。施工方法主要分为泥浆护壁法和干作业法,常见工艺包括单元法、多头深槽法和连续墙法。墙体材料多采用塑性混凝土,掺入膨润土提高流动性和抗裂性,一般渗透系数达 10^{-7} - 10^{-8} cm/s。混凝土防渗墙的设计关键是确定墙深、墙厚和材料配比^[3]。墙深应满足“入岩深度不小于2m”或“入隔水层深度不小于1.5m”要求;墙厚与施工设备、地质条件、水压力等因素相关;材料配比需平衡强度、变形性与防渗性能。该技术适用于砂卵石层、软土层等松散覆盖层,墙深可达100m以上,墙厚一般为0.6-1.2m。施工中应控制成槽垂直度、接头处理和混凝土拌合质量,防止产生缝隙和夹泥。在高水头工程中,混凝土防渗墙通常与帷幕灌浆配合使用,形成“墙-帷”组合防渗系统,既解决深厚覆盖层渗透问题,又处理下伏基岩渗漏通道。

2.3 高压喷射灌浆防渗技术

高压喷射灌浆防渗技术利用高压设备将浆液以20-40MPa压力喷射,切割破坏土体结构,与土体混合形成固结体。根据喷射介质不同,分为单液法(仅喷射浆液)、双液法(浆液与压缩空气)和三液法(浆液、压缩空气与水)。喷射参数控制是技术核心,包括喷射压力、提升速度、旋转速度和浆液配比等。形成的搅拌桩直径在砂土中可达1.8-2.5m,黏土中为1.2-1.8m。灌浆浆液主要由水泥、水、外加剂组成,水灰比一般为0.8-1.0,外加剂添加量为水泥重量的0.5-2.0%。桩体搭接率通常控制在20-30%,确保防渗体连续性。该技术特别适用于深厚松散地层和结构物下方、周边狭小空间的防渗处理,具有施工速度快、扰动小、适应性强的特点。在坝基防渗、渠道防渗和建筑物基础加固中应用广泛,防渗效果显著,固结体渗透系数可降至 10^{-6} cm/s以下。施工质量控制应注重钻孔定位精度、垂直度控制和喷射参数的实时监测,防止桩体脱空、夹泥和强度不均匀问题。

2.4 复合土工膜防渗技术

复合土工膜防渗技术采用高分子合成材料制成的柔性防渗屏障,包括HDPE膜、PVC膜、EPDM膜等多种类型。HDPE膜耐化学腐蚀性强,使用寿命可达50年以上;PVC膜柔韧性好,适应变形能力强;EPDM膜抗紫外线性能优异。复合土工膜厚度通常为0.75-2.5mm,主要技术指标包括抗拉强度(≥ 15 MPa)、断裂伸长率($\geq 500\%$)、撕裂强度(≥ 80 N/mm)和耐静水压性(≥ 0.5 MPa)。复合土工膜通常与膨润土垫层、保护层组合应用,构成“垫层-土工膜-保护层”三明治结构(如图2所示)。其防渗性能优异,渗透系数低至 10^{-12} - 10^{-13} cm/s,且重量轻、施工速度快、造价相对低廉。施工过程重点关注基面处理、焊接质量控制和防护层铺设。基面处理要求平整度偏差小于3cm/3m,焊接方式包括热熔焊和热风焊,接缝搭接宽度不小于10cm,焊缝渗漏率控制在1%以下。该技术广泛应用于面板堆石坝、土石坝上游防渗和渠道防渗工程,但需注意抗老化、抗穿刺和接缝处理等问题。新型复合土工膜材料不断涌现,如自修复土工膜、纳米复合土工膜等,进一步提高了适应性和耐久性。



土工膜材料特性:

- HDPE膜: 抗化学腐蚀性强
- PVC膜: 柔韧性好, 适应变形
- 渗透系数: 10^{-12} - 10^{-13} cm/s
- 抗拉强度: ≥ 15 MPa
- 使用寿命: 30-50年

施工关键点:

- 基面平整度要求: ≤ 3 cm/3m
- 焊接搭接宽度: ≥ 10 cm
- 焊缝渗漏率: $\leq 1\%$
- 坡面铺设: 顺坡避免褶皱

图2 复合土工膜防渗技术结构示意图

3 防渗技术在工程中的应用

3.1 防渗技术设计与选型

防渗技术设计与选型必须基于工程地质条件、水文地质特

征、结构类型及工程规模等因素综合确定。设计阶段需明确防渗目标,通常要求将渗透系数降至 10^{-6} cm/s以下,或渗漏量控制在规范允许范围内^[4]。大型水库大坝多采用“帷幕灌浆+混凝土防渗墙”组合防渗体系,中小型水电站则以单一防渗技术为主。砂卵石层厚度大于20m时宜采用混凝土防渗墙;岩溶发育区域适宜应用帷幕灌浆;局部渗漏处理适合高压喷射灌浆;渠道防渗则优选复合土工膜技术。选型时应注重技术经济比较,综合考虑防渗效果、施工难度、工期要求、投资规模及后期维护成本等因素。防渗设计需与主体结构设计相协调,确保防渗体与周边结构衔接紧密,防止产生新的渗漏通道。

3.2 防渗技术施工工艺与质量控制

防渗技术施工工艺精细化和质量控制标准化是工程成败关键。帷幕灌浆施工应严格控制钻孔偏斜率不超过1%,浆液配比精度误差控制在±2%以内,灌浆压力波动范围限制在±0.2MPa。混凝土防渗墙槽孔垂直度偏差应控制在1/300以内,相邻单元接头错位不超过5cm,混凝土浇筑温度控制在5-30℃。高压喷射灌浆提升速度应保持匀速,速率控制在20-30cm/min,喷射压力稳定控制在±2MPa范围内。复合土工膜铺设要求基面平整度偏差小于3cm/3m,焊缝搭接宽度不小于10cm,焊接强度不低于母材强度的85%。质量控制措施包括原材料检验、过程监控和完工验收三个环节,采用静水压试验、钻孔抽芯、声波透射等方法评价防渗体连续性和完整性。施工全过程应建立质量跟踪档案,实施质量责任制和技术交底制度。

3.3 防渗工程监测与维护管理

防渗工程监测与维护管理是确保工程长期安全运行的重要保障。监测系统设计应覆盖渗流压力、浸润线位置、渗漏量变化等关键指标,常用监测设备包括渗压计、测斜仪、位移计、渗流量计和水位观测井等。监测点布置原则为重点部位密、一般部位疏,监测频率分为施工期、蓄水初期和运行期三个阶段,分别采用高频、中频和常规监测。监测数据采集与传输应采用自动化系统,建立实时预警机制。维护管理工作包括定期巡检、数据分析和及时处理三个环节。巡检周期一般为汛期每日一次,非汛期每周一次。发现异常渗漏时,应立即采取应急措施,包括局部补强、裂缝灌浆或降低水位等。防渗工程维护档案应完整记录检查结果、处理方案和实施效果。

3.4 防渗技术应用效果评价与优化措施

防渗技术应用效果评价采用多指标综合评价体系,包括技术指标、经济指标和环境指标(如表1)。技术指标主要评价渗透系数降低率、渗漏量减少率和防渗体完整性,其中渗透系数降低率达到95%以上、渗漏量减少90%以上为优良标准。经济指标评价单位面积防渗成本、维护费用占总投资比例和投资回收期,一般控制维护费用占总投资比例不超过2%。环境指标关注防渗

材料环保性、施工过程扰动程度和对水生态系统影响。综合评价结果显示,大型水库混凝土防渗墙技术综合效益最高,中小型渠道工程复合土工膜防渗性价比最优。防渗技术优化措施主要包括材料改进、工艺创新和管理提升三个方面。材料改进方向为研发高性能混凝土、纳米改性灌浆材料和自修复复合土工膜;工艺创新重点为精准定位技术、智能压力控制系统和非开挖修复技术;管理提升措施包括建立全过程质量控制体系和完善防渗效果评价标准。

表1 不同防渗技术实施前后效果对比

防渗技术类型	实施前渗透系数 (cm/s)	实施后渗透系数 (cm/s)	降低率 (%)	实施前渗漏量 (L/s · km ²)	实施后渗漏量 (L/s · km ²)	减少率 (%)
帷幕灌浆	5.2×10^{-3}	3.8×10^{-6}	99.9	48.5	5.2	89.3
混凝土防渗墙	4.7×10^{-3}	2.1×10^{-7}	99.9	42.3	2.8	93.4
高压喷射灌浆	3.8×10^{-3}	4.6×10^{-6}	99.8	35.6	4.9	86.2
复合土工膜	6.4×10^{-3}	5.2×10^{-12}	99.9	58.7	1.8	96.9

4 结语

水利水电工程防渗技术经历长期实践发展,帷幕灌浆、混凝土防渗墙、高压喷射灌浆、复合土工膜等技术已日臻成熟。技术选择需立足工程特性,综合考虑地质条件、施工难度、工期要求、投资效益等因素。防渗施工关键在于工艺标准化、过程精细化、监督系统化,严格质量控制确保防渗效果。工程建成后,完善监测体系对及时发现渗漏隐患、评估防渗效果至关重要。防渗技术优化应强化材料改进、工艺创新、设备升级、管理精细化,降低成本提高效益。多种防渗技术合理组合应用将成为未来发展方向,推动水利水电工程安全稳定运行,为国民经济持续发展提供可靠保障。

[参考文献]

- [1]徐毅峰,梁焱汉.水利工程防渗技术的前沿探讨与工程实践[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(04):202-204.
- [2]娅.水利工程中的农田灌溉防渗渠道衬砌施工技术[J].农业开发与装备,2024,(12):220-222.
- [3]李联河.水利工程施工中渗水原因及防渗技术研究[J].水上安全,2024,(23):169-171.
- [4]胡忠军.水利工程施工中防渗技术的运用探索[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(34):114-116.

作者简介:

刘应涛(1986--),男,汉族,四川广汉市人,本科,水利水电工程师,研究方向:水利水电施工。