

水工建筑物渗流控制技术研究

曹学锐 陈书郡

云南省水利水电工程有限公司, 云南昆明, 650000;

摘要: 水工建筑物渗流问题直接影响工程安全与运行寿命, 可能引发管涌、流土等灾害, 威胁下游生态与居民安全, 是水利工程建设的核心挑战之一。为系统解决这一问题, 本文以渗流控制为核心, 先概述渗流问题本质, 再分析控制关键难点, 随后从防渗结构设计、地基处理、新型材料、监测技术四方面阐述关键技术, 结合典型案例验证应用效果, 最终为水工建筑物渗流控制提供理论参考与实践指导。

关键词: 水工建筑物; 渗流控制技术; 防渗帷幕; 灌浆加固; 新型材料

DOI: 10.69979/3060-8767.26.01.050

引言

随着水利工程向高坝、大库方向发展, 水工建筑物所处地质条件愈发复杂, 渗流问题引发的工程隐患风险显著提升^[1]。过往工程中, 因防渗设计不足、地基处理不当或材料性能局限, 部分坝体、地基出现渗流量超标、局部渗透破坏等问题, 不仅增加运维成本, 还威胁工程整体安全。在此背景下, 亟需系统研究渗流控制技术, 以适配复杂工程需求, 保障水利工程长期稳定运行。

1 水工建筑物渗流问题的概述

水工建筑物渗流指水流在重力作用下, 透过建筑物本体、地基或两岸岩土体的孔隙、裂隙等通道发生的渗透现象, 广泛存在于坝体、水闸、渠道等各类水利工程中。其渗流形态受岩土体结构、孔隙大小、水流压力等多重因素影响, 常见形式包括坝体自身渗透、坝基垂直渗透及绕坝渗流三类^[2]。渗流问题若未得到有效控制, 会引发一系列危害。一方面, 持续渗流会带走岩土体中的细颗粒, 导致管涌、流土等渗透破坏, 直接削弱建筑物地基与坝体的稳定性; 另一方面, 过量渗流量会造成水资源浪费, 同时可能引发坝体浸润线抬高, 增加坝体滑坡风险, 严重时甚至导致建筑物溃决, 威胁下游人民生命财产与生态环境安全。当前, 随着水利工程向复杂地质区域拓展, 高水头、大跨度工程增多, 渗流问题的复杂性与防控难度进一步提升, 成为制约水利工程安全高效运行的关键因素之一^[3]。

2 水工建筑物渗流控制的主要问题分析

水工建筑物渗流控制面临多维度现实难题, 首要问题是地质条件复杂性带来的设计适配挑战。不同工程场地岩土体的孔隙率、裂隙发育程度差异大, 部分区域存在溶洞、断层等特殊地质构造, 导致渗流通道分布不规则, 传统防渗设计难以精准覆盖所有风险点, 易形成防

渗盲区。

其次是防渗材料与结构的性能局限。既有工程中, 部分防渗帷幕因灌浆不密实存在缝隙, 或心墙材料长期受水流冲刷、化学侵蚀后出现老化开裂, 导致防渗性能衰减; 同时, 截渗墙与地基接触面易因沉降产生渗漏通道, 进一步削弱整体防渗效果^[4]。

最后是渗流监测与应急处置的滞后性。现有监测系统多依赖定点传感器, 对大范围、隐蔽性渗流异常的识别不够及时; 且部分工程缺乏完善的应急方案, 一旦发现渗流隐患, 难以及时采取针对性措施控制险情, 增加了渗透破坏风险^[5]。

3 水工建筑物渗流控制的关键技术

3.1 防渗结构设计技术

3.1.1 心墙与截渗墙结构形式及设计要点

心墙与截渗墙是水工建筑物核心防渗结构, 二者结构形式需结合工程类型与地质条件适配选择。心墙多应用于土石坝, 按材料可分为黏土心墙、沥青混凝土心墙与混凝土心墙, 其中黏土心墙需采用塑性指数 15-25 的优质黏土, 通过分层碾压形成连续防渗体, 厚度需满足渗透比降不超过 4.0 的要求; 沥青混凝土心墙则适用于高寒地区, 采用碾压式施工, 厚度通常控制在 30-50cm, 需设置伸缩缝应对温度变形。

截渗墙常用于坝基与坝肩防渗, 结构形式包括薄型抓斗墙、液压铣槽墙与冲击钻造孔墙, 墙厚根据地质硬度确定, 砂土地基多采用 0.8-1.2m 厚墙体, 岩石地基可减至 0.6-0.8m。其设计需重点把控两方面: 一是墙体嵌入基岩深度, 需深入相对不透水层至少 1.0-2.0m, 杜绝绕墙渗漏; 二是墙体材料强度, 采用 C15-C25 塑性混凝土时, 抗压强度需 $\geq 5 \text{ MPa}$, 渗透系数需 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 同时通过预埋灌浆管预留后期补强通道。

3.1.2 防渗帷幕与防渗层的优化布置

防渗帷幕与防渗层的布置需结合地质勘察数据,形成“立体防渗体系”以阻断渗流通道。防渗帷幕多用于混凝土坝与土石坝坝基,布置时需沿坝轴线连续延伸,覆盖坝基整个渗漏风险区,帷幕深度需穿透透水层至相对不透水层,若遇溶洞、裂隙发育区域,需加深至溶洞底部或裂隙密集带以下1-2m;帷幕孔间距根据岩层透水性确定,强透水层孔距控制在2-3m,弱透水层可放宽至3-5m,同时采用双排或三排孔布置强化防渗效果。

防渗层布置需区分工程类型,土石坝坝体防渗层多与心墙衔接,采用级配砂石与土工膜复合结构,沿坝体横断面全断面铺设,顶部高出设计水位0.5-1.0m,底部嵌入坝基防渗帷幕;渠道防渗层则采用混凝土预制板或沥青涂层,铺设时需设置伸缩缝并填充止水材料,纵向每隔5-10m设一道沉降缝,避免因地基变形导致防渗层开裂,同时在边坡与渠底交接处采用弧形过渡,减少渗流集中。

3.2 地基处理与加固技术

3.2.1 灌浆加固法及施工工艺

灌浆加固法通过向地基岩土体的孔隙、裂隙注入水泥浆、化学浆液等材料,经凝固后填充渗流通道、提高地基密实度与抗渗性,适用于砂卵石地基、裂隙岩体地基等透水层的处理,是水工建筑物地基防渗加固的核心技术之一。其施工工艺需严格遵循“先勘探、后设计、分序施工”原则,主要流程如下:

首先进行钻孔作业,采用回转钻或冲击钻按设计孔位钻进,孔径根据浆液类型确定,水泥灌浆孔直径多为75-110mm,钻孔深度需穿透透水层至相对不透水层0.5-1.0m,同时做好孔壁保护避免塌孔。其次是灌浆分序施工,按“先下游、后上游,先外围、后中间”的顺序分I、II、III序孔施工,通过逐步加密孔位确保浆液均匀扩散;灌浆压力需分级控制,初始压力为设计压力的50%,逐步升压至设计值(通常为0.3-1.5MPa),避免压力骤升导致地基抬动。

最后是质量检测,灌浆结束后采用压水试验检测防渗效果,要求透水率≤1Lu(吕荣),同时通过钻孔取芯观察浆液充填情况,确保加固后的地基渗透系数降至 1×10^{-6} cm/s以下,满足水工建筑物防渗要求。

3.2.2 砂井、堆载预压与化学加固法

砂井、堆载预压与化学加固法是针对不同软弱地基类型的专项处理技术,需根据地基土性质针对性选用。砂井法适用于淤泥质黏土、粉质黏土等饱和软土地基,通过在地基中打设直径30-50cm的砂井(或塑料排水板),形成竖向排水通道,加速地基孔隙水排出,减少后期沉降;砂井间距需按地基固结要求确定,通常为

1.5-3.0m,施工时需避免砂井倾斜或断接,确保排水通畅。

堆载预压法常与砂井法配套使用,通过在地基表面分级施加荷载(如土石、沙袋),使地基土在压力作用下逐渐固结,提高承载力与抗渗性;堆载速率需严格控制,日堆载高度不超过0.5m,避免因荷载增长过快引发地基失稳,预压时间根据地基固结度要求确定,一般为3-6个月。

化学加固法适用于砂土地基或裂隙岩体地基,通过注入环氧树脂、聚氨酯等化学浆液,浆液与地基土发生化学反应后形成固结体,堵塞渗流通道;注浆压力需根据地基渗透性调整(通常为0.2-0.8MPa),浆液浓度需由稀至浓逐步调整,确保浆液均匀扩散,加固后地基渗透系数可降至 1×10^{-7} cm/s以下。

3.2.3 防渗墙与塑性混凝土技术应用

防渗墙与塑性混凝土技术是解决深厚透水地基防渗的核心手段,广泛应用于土石坝坝基、水闸地基等工程场景,尤其适用于砂卵石、松散砂土等复杂地质条件。防渗墙需穿透整个透水层,嵌入下部相对不透水层1.0-2.0m,形成连续封闭的防渗屏障,墙厚根据地质条件与防渗要求确定,通常为0.6-1.2m,施工多采用液压抓斗、冲击钻等成槽工艺,确保槽壁稳定且墙体连续。

塑性混凝土是防渗墙的关键材料,其配比需兼顾防渗性与变形适应性,通常采用水泥、膨润土、砂、石及外加剂配制,抗压强度控制在2-5MPa,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s,弹性模量较低(500-1500MPa),可适应地基不均匀沉降,避免墙体开裂。施工中需严格控制混凝土浇筑速度(不低于2m/h),采用导管法连续浇筑,防止出现冷缝;同时通过超声波检测、钻孔取芯等方式检验墙体完整性,确保防渗墙无孔洞、裂缝等缺陷,满足长期防渗要求。

3.3 新型防渗材料与施工技术

新型防渗材料与施工技术的发展,有效解决了传统技术在复杂工况下的适配难题,显著提升防渗效果与工程效率。在材料方面,高分子复合土工膜应用广泛,其采用聚乙烯与土工布复合而成,厚度2-3mm,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-11}$ cm/s,抗拉伸强度 ≥ 15 kN/m,适用于坝体防渗、渠道衬砌,施工时需采用热焊接工艺,焊缝搭接宽度 ≥ 10 cm,确保无渗漏缝隙。

自修复型防渗涂料是另一类创新材料,以聚氨酯为基材添加微胶囊修复剂,当涂层出现微小裂缝时,微胶囊破裂释放修复剂,自动填补裂缝,适用于混凝土坝表面防渗修补,施工采用喷涂法,涂层厚度控制在0.8-1.2mm,固化后抗渗压力 ≥ 1.5 MPa。

施工技术上,防渗膜机械化铺设技术大幅提升效率,

通过专用铺设机实现膜体展铺、焊接一体化作业，日铺设量可达 5000 m^2 以上，同时配套激光定位系统，确保铺设平整度误差 $\leq 3\text{cm}$ ，减少人工操作带来的质量隐患，适配大跨度、高边坡等复杂工程场景。

3.4 渗流监测与信息化控制技术

渗流监测与信息化控制技术是实现水工建筑物渗流风险动态管控的核心，通过“实时感知-数据传输-智能分析-预警处置”闭环体系，保障工程安全。监测系统由多类传感器构成，渗压计埋设于坝体、坝基关键断面，监测渗透压力，精度达 $\pm 0.1\text{kPa}$ ；量水堰与电磁流量计布设于渗流出口，实时计量渗流量，量程覆盖 $0.1\text{--}100\text{m}^3/\text{h}$ ；位移传感器则监测坝体因渗流引发的沉降与水平位移，分辨率 $\leq 0.1\text{mm}$ 。

数据传输采用无线物联网技术，将监测数据实时上传至云端管控平台，平台搭载渗流数值模拟算法，可自动分析渗流场分布规律，当渗压超设计值 10%、渗流量突增 20% 或位移超预警阈值时，系统立即触发声光报警，并推送处置建议至管理人员终端。同时，平台支持历史数据回溯与趋势预测，为防渗工程维护、加固方案制定提供数据支撑，实现渗流风险的主动防控。

4 典型工程案例分析

4.1 某大型土石坝渗流控制工程案例

某大型土石坝位于西南山区，坝高 120m，坝顶长 850m，坝基为砂卵石层，透水性强，建成初期坝基渗流量达 35L/s ，且下游坝脚出现局部管涌迹象，严重威胁坝体安全。针对该问题，工程采用“防渗帷幕+截渗墙+渗流监测”的综合控制方案。

首先，在坝轴线处施工混凝土防渗帷幕，帷幕深度穿透砂卵石层至下伏微风化岩层 2m，采用双排孔布置，孔距 2.5m，注入水泥-水玻璃双液浆，灌浆压力控制在 0.8-1.2MPa，经压水试验检测，帷幕透水率均 $\leq 0.5\text{Lu}$ 。其次，在下游坝脚处施工塑性混凝土截渗墙，墙厚 0.8m，深度 30m，嵌入基岩 1m，采用液压抓斗成槽工艺，混凝土抗压强度 3MPa，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ 。

同时，布设自动化渗流监测系统，在坝体、坝基共设置 32 个渗压计、15 个渗流量观测孔，实时传输数据。工程完工后，坝基渗流量降至 2.1L/s ，管涌隐患消除，连续 5 年监测数据显示，坝体浸润线稳定在设计高程以下，防渗效果显著，验证了综合渗流控制技术的有效性。

4.2 某混凝土重力坝防渗改造工程

某混凝土重力坝建于 20 世纪 70 年代，坝高 68m、

坝长 420m，主要承担防洪、发电任务。运行后期，坝体出现多处渗漏：一是坝基岩体裂隙发育，渗流量达 $120\text{m}^3/\text{d}$ ，远超设计允许值 ($\leq 30\text{m}^3/\text{d}$)；二是坝体横缝止水老化失效，局部出现渗水痕迹，且浸润线抬高至坝顶以下 18m，威胁坝体稳定。

改造工程针对性采用“帷幕补强+横缝修复+监测升级”综合方案：坝基防渗方面，沿坝轴线布置双排灌浆孔，孔深穿透透水层至微风化岩体 3m，采用水泥-水玻璃双液灌浆，灌浆压力控制在 0.8-1.2MPa，共完成灌浆孔 126 个、灌浆量 850m^3 ，使坝基透水率从 5Lu 降至 0.8Lu ；坝体横缝处理上，拆除老化止水带，更换为铜片-橡胶复合止水结构，缝内填充聚氨酯密封膏，并对缝侧混凝土进行环氧砂浆修补；同时布设自动化监测系统，安装渗压计 32 台、渗流量监测仪 8 套，实现数据实时传输与异常预警。

改造后，坝体渗流量降至 $22\text{m}^3/\text{d}$ ，浸润线回落至设计高程，连续 5 年运行无渗漏异常，不仅保障了工程安全，还降低了运维成本，为同类老旧混凝土坝防渗改造提供了参考。

5 结语

全文系统研究水工建筑物渗流控制，明确渗流问题危害与复杂特性，剖析地质适配、材料性能、监测滞后等关键难题，从防渗结构设计、地基处理、新型材料、信息化监测四方面阐述技术要点，结合土石坝、混凝土重力坝案例验证技术有效性。当前渗流控制已形成“设计-施工-监测”一体化体系，未来需深化材料革新与智能监测融合，增强技术对复杂地质的适配能力，为水利工程长期安全运行筑牢技术基础。

参考文献

- [1] 张文凯. 复杂蚁巢结构对土石坝渗流及稳定性能影响研究[D]. 河南工业大学, 2025.
- [2] 谢海先. 地下水对水电站水工建筑物围岩变形的影响分析[J]. 四川水利, 2022, (S1): 4-7.
- [3] 黄亚斌. 不同板桩结构对水工建筑物渗流的影响研究[J]. 水利技术监督, 2020, (06): 276-279.
- [4] 王晓翠. 水工建筑物基础渗流场数值模拟研究[J]. 居舍, 2018, (26): 218-219.
- [5] 赵月航. 降雨条件下堤坝与穿堤建筑物接触面渗流特性及电场响应特征研究[D]. 山东交通学院, 2025.

作者简介：曹学锐（1991.05-），男，云南楚雄人，汉族，本科学历，工程师，研究方向为水利水电工程施工。