

Improvement and Application of Anti-seepage Technology for Dam Bodies of Medium and Small Reservoirs under Extreme Precipitation Conditions

Deshou Li

Yunnan Yunrun Project Management Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650233, China

Abstract

Against the backdrop of global climate change, extreme precipitation events are characterized by “high intensity, long duration, and suddenness”. Small and medium-sized reservoirs, as key infrastructure for regional flood control and water resource regulation, are facing severe tests to their dam body seepage prevention systems. In China, small and medium-sized reservoirs account for over 95% of the total, and most were built in the mid-20th century. Limited by the construction technology and material performance at that time, the dam bodies generally have problems such as aging of seepage prevention layers, insufficient control of seepage in dam foundations, and development of cracks. Under extreme precipitation, they are prone to risks such as piping, flow soil, and even dam failure. This paper, in combination with the structural characteristics of small and medium-sized reservoir dam bodies (mainly earth dams and masonry dams) and the disaster-causing mechanism of extreme precipitation, systematically expounds the improvement paths of dam body seepage prevention technology from three dimensions: material improvement, process optimization, and technology integration. It provides technical support for the risk elimination and reinforcement of small and medium-sized reservoirs and their safe operation under extreme weather conditions, and helps enhance the disaster resilience of water conservancy infrastructure.

Keywords

extreme precipitation conditions; medium and small-sized reservoirs; dam body seepage prevention technology

极端降水条件下中小型水库坝体防渗技术改进与应用

李德寿

云南云润工程项目管理有限公司, 中国·云南昆明 650233

摘要

全球气候变化背景下, 极端降水事件呈现“高强度、长历时、突发性”特征, 中小型水库作为区域防洪减灾与水资源调控的关键基础设施, 其坝体防渗体系面临严峻考验。我国中小型水库数量占比超95%, 多数建于20世纪中期, 受限于当时建设技术与材料性能, 坝体普遍存在防渗层老化、坝基渗流控制不足、裂缝发育等问题, 极端降水下易引发管涌、流土甚至溃坝风险。本文结合中小型水库坝体结构特性(以土坝、砌石坝为主)与极端降水致灾机理, 从材料改良、工艺优化、技术集成三个维度, 系统阐述坝体防渗技术的改进路径, 为中小型水库除险加固、极端天气下安全运行提供技术支撑, 助力提升水利基础设施的防灾韧性。

关键词

极端降水条件; 中小型水库; 坝体防渗技术

1 引言

传统坝体防渗技术(如单一黏土防渗、普通HDPE膜铺设、常规帷幕灌浆)已难以适配极端降水下的复杂需求: 普通黏土抗裂性差, 极端降水后裂缝渗流量可增至常规值的5-6倍; 单一土工膜抗穿刺能力不足, 坝体变形或冲刷易导致破损; 传统注浆浆液流动性差, 无法填充细微裂缝, 难以

形成连续防渗屏障。因此, 针对中小型水库“资金有限、施工条件受限、运维技术薄弱”的特点, 研发适配极端降水场景的坝体防渗改进技术, 构建“抗渗-抗裂-耐久”一体化的防渗体系, 成为破解中小型水库安全瓶颈、提升水利基础设施防灾韧性的关键课题。

2 极端降水下中小型水库坝体防渗的现实挑战

极端降水对中小型水库坝体防渗的冲击, 本质是“外部强荷载”与“内部结构缺陷”的叠加作用。从气象水文特征看, 极端降水通常伴随12小时降雨量超200mm、过程降

【作者简介】李德寿(1994-), 男, 中国云南保山人, 本科, 工程师, 从事水利工程技术, 水利工程管理研究。

雨量超 300mm 的高强度雨况，导致库水位在短时间内（2-3 天）上升 2-3m，远超常规汛期水位涨幅，对坝体防渗体系形成持续高压作用；同时，强降雨形成的地表径流会直接冲刷坝坡，若防渗层存在裂缝或搭接缺陷，雨水将快速渗入坝体内部，加剧渗流通道发育。据水利部 2023 年中小型水库安全普查数据，我国约 38% 的中小型水库在极端降水期间出现渗流异常，其中土坝水库占比超 70%，砌石坝水库因灰缝老化导致的渗漏问题占比达 62%，凸显传统防渗技术的适应性短板。

从渗流致灾机理分析，极端降水下中小型水库坝体防渗面临三重核心挑战：

其一，土坝坝体浸润线抬高引发渗透破坏。多数中小型土坝采用黏土斜墙防渗，普通黏土在干湿循环作用下易产生纵向或横向裂缝，极端降水导致库水位骤升时，裂缝处渗流量可从常规的 0.5L/s 增至 3L/s 以上，坝体孔隙水压力骤增，当渗流梯度超过 0.25（砂性土）或 0.5（黏性土）的安全阈值时，易引发坝脚管涌、流土；其二，砌石坝灰缝渗漏通道扩展。中小型砌石坝多采用水泥砂浆砌筑，长期运行后灰缝易出现风化、剥落，极端降水下水沿灰缝渗入坝体，形成贯通性渗漏通道，若未及时控制，会导致坝体结构强度下降，甚至出现局部垮塌；其三，坝基深层渗流控制失效。中小型水库坝基多为第四系松散砂卵石层或风化岩层，传统帷幕灌浆因孔距大（2-3m）、浆液扩散范围有限，难以形成连续防渗屏障，极端降水下水沿坝基孔隙或岩层裂隙深层渗漏，导致坝基扬压力系数超 0.8（设计允许值为 0.7），威胁坝体整体稳定性。

此外，中小型水库普遍存在“资金投入有限、施工条件受限、运维技术薄弱”的现实问题，传统防渗技术（如单一黏土防渗、普通土工膜铺设）不仅施工周期长、成本高，且在极端降水下的耐久性与抗风险能力不足，亟需通过技术改进实现“提质、降本、增效”的目标。

3 中小型水库坝体防渗技术的改进方向

针对极端降水下坝体防渗的核心需求，结合中小型水库工程特点，防渗技术改进需聚焦“材料抗渗性提升、工艺适应性优化、技术集成化应用”三大核心，突破传统技术的局限性，构建“坝体-坝基-坝肩”全方位防渗体系。

3.1 改性黏土防渗技术

黏土防渗是中小型土坝的传统技术，但普通黏土存在抗裂性差、渗阻性能易受干湿循环影响的缺陷。改进后的改性黏土防渗技术，通过掺入复合改良剂优化黏土物理力学性能，核心在于解决“裂缝发育”与“渗流过大”两大问题。具体而言，根据坝体黏土特性与防渗需求，分为两类改良方案：

一类是聚丙烯酰胺（PAM）改性黏土，适用于坝体上游斜墙防渗层修复或新建。PAM 作为高分子絮凝剂，以 0.2%-0.5% 的掺量掺入黏土中，通过高分子链的吸附与桥接

作用，增强黏土颗粒间的黏聚力，减少颗粒间隙。室内试验与工程实践表明，此类改性黏土的渗透系数可从普通黏土的 10^{-6} cm/s 降至 10^{-7} cm/s 以下，抗裂性提升 40%-50%，在极端降水导致库水位骤升骤降的场景下，能有效避免黏土层因干湿交替产生裂缝；同时，改性黏土的压实性能优化，分层压实厚度可从 15cm 增至 20-25cm，压实度控制在 $\geq 96\%$ ，施工效率提升 30%，适配中小型水库工期紧张的需求^[1]。

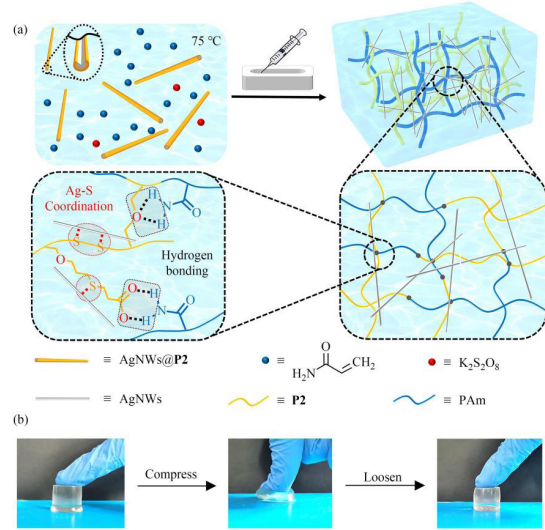


图 1：一种聚丙烯酰胺（PAM）改性黏土的制备

另一类是水泥-膨润土复合改性黏土，适用于坝体压实度不足或坝肩接触带防渗。以 5%-8% 的水泥、3%-5% 的膨润土掺入黏土中，水泥水化反应形成的刚性骨架可提升黏土强度，膨润土的高膨胀性则增强抗渗性。此类改性黏土的 28 天抗压强度可达 1.5-2.0MPa，较普通黏土提升 2-3 倍，在极端降水下能抵御高渗压荷载，避免坝体局部变形引发的防渗层破损。

在工程应用中，改性黏土防渗层的设计需结合坝高与库水位变化：坝高 < 15m 的小型水库，上游斜墙改性黏土铺设厚度可控制在 0.6-0.8m；坝高 15-20m 的中型水库，厚度需增至 0.8-1.0m，并在黏土层与坝体土之间设置过渡层（级配砂石），避免因材料差异产生界面渗漏。施工中需采用分层压实（压路机碾压结合人工夯实），确保达标后方可进行下一层施工，从源头保障防渗效果。

3.2 复合土工膜防渗技术

传统单一土工膜（如 HDPE 膜）在中小型水库应用中，常因抗穿刺能力不足、焊接质量差、紫外线老化等问题，在极端降水冲刷或坝体变形下出现破损。

3.2.1 材料选型

采用“HDPE 膜+非织造土工布”复合结构，HDPE 膜选用厚度 ≥ 1.5 mm 的中密度聚乙烯膜，其拉伸强度 ≥ 20 MPa、断裂伸长率 $\geq 600\%$ ，能抵御坝体轻微变形产生的拉力；非织造土工布选用克重 ≥ 300 g/m² 的涤纶或丙纶土工布，复合于 HDPE 膜的上下两面——上层土工布可防止施