

中小型水库除险加固工程中坝体防渗技术的应用效果分析

毛盾 刘成凯

长江水利委员会陆水试验枢纽管理局, 中国·湖北 赤壁 437300

摘要: 随着我国农村水利工程体系的不断完善, 中小型水库在防洪、灌溉、供水和生态保护等领域的作用日益突出。但由于建库年代久远、设计标准偏低、维护管理不善等多种因素, 大量中小型水库存在不同程度的安全隐患, 特别是坝体渗漏问题成为影响水库安全运行的核心难题。近年来, 在国家加大水库除险加固力度的背景下, 坝体防渗技术的研究与应用不断深化。本文基于我国中小型水库现状, 系统分析了坝体防渗的主要技术措施, 探讨其在除险加固工程中的实际应用成效, 梳理工程实践中遇到的技术与管理难点, 并提出针对性的优化建议。研究发现, 科学的防渗技术应用能显著提升坝体安全性与运行寿命, 是实现中小型水库安全高效运行的重要保障。文章最后结合未来水利工程高质量发展需求, 展望了防渗技术的创新方向, 为中小型水库的安全运行和可持续发展提供理论依据和实践参考。

关键词: 中小型水库; 除险加固; 坝体防渗; 技术应用; 效果分析

Analysis of the Application Effect of Dam Body Seepage Control Technology in the Reinforcement and Renovation Projects of Medium and Small Reservoirs

Mao Dun, Liu Chengkai

Lu-Shui Experimental Hub Administration of the Yangtze River Water Resources Commission, China Hubei Chibi 437300

Abstract: With the continuous improvement of the rural water conservancy project system in China, medium and small reservoirs have become increasingly important in flood control, irrigation, water supply, and ecological protection. However, due to factors such as long construction periods, low design standards, and poor maintenance management, many medium and small reservoirs have varying degrees of safety hazards, with dam body seepage being a core issue affecting their safe operation. In recent years, under the background of the country's increased efforts in reservoir reinforcement and renovation, research and application of dam body seepage control technologies have been deepened. Based on the current situation of medium and small reservoirs in China, this paper systematically analyzes the main technical measures for dam body seepage control, discusses their practical application effects in reinforcement and renovation projects, sorts out the technical and management difficulties encountered in engineering practice, and puts forward targeted optimization suggestions. The study finds that the scientific application of seepage control technologies can significantly enhance the safety and operational life of dam bodies, serving as an important guarantee for the safe and efficient operation of medium and small reservoirs. Finally, the article looks forward to the innovative directions of seepage control technologies in line with the future high-quality development needs of water conservancy projects, providing theoretical basis and practical references for the safe operation and sustainable development of medium and small reservoirs.

Keywords: Medium and small reservoirs; Reinforcement and renovation; Dam body seepage control, Technology application; Effect analysis

0 引言

中小型水库作为我国农田水利、生态调节和防灾减灾体系的重要基础设施, 数量庞大且分布广泛。据相关资料统计, 全国现有的中小型水库数量超过 8.5 万座, 占全部水库总数的 90% 以上。由于多数中小型水库修建于上世纪六七十年代, 存在设计标准低、建设条件差、维护投资不

足等共性问题, 加之长期运行后自然老化, 坝体渗漏、坝基变形和防洪能力不足等安全隐患日益突出。渗漏不仅影响水库蓄水和灌溉功能, 还可能引发坝体变形、管涌、滑坡甚至垮坝等重大灾害, 危及下游区域的生命财产安全。因此, 在当前国家推进水库除险加固工程的大背景下, 防渗技术的科学应用成为中小型水库安全治理的重中之重。

本文将系统梳理中小型水库坝体渗漏的成因、主流防渗技术的发展现状及其工程应用效果,通过分析典型案例和实证数据,总结防渗工程的管理要点和优化路径,提出具有操作性的建议,以期推动我国中小型水库安全治理和水利工程现代化进程。

1 中小型水库坝体渗漏隐患成因及防渗需求分析

我国大部分中小型水库分布于丘陵、平原和山区地带,地形、地质和水文条件复杂多变。早期水库坝体建设多采用就地取材,土料级配不合理,夯实度和密实性不足,且缺乏系统的防渗设计与材料应用。随着运行年限的增加,坝体在水流长期作用下,细粒土颗粒易被渗流带走,逐步形成贯穿性渗漏通道。此外,坝基地质条件复杂,如存在砂层、砂砾石层或断裂破碎带等弱透土层,极易发生管涌、流沙、塌陷等渗透破坏现象。局部施工质量不达标、沉降不均匀、坝坡维护不及时也是造成渗漏隐患的重要原因。中小型水库坝体渗漏一旦发生,极易演变为坝体变形、坝基失稳甚至垮坝事故。除险加固工程亟须系统评估坝体渗漏分布及风险,结合坝体结构、地基特性和运行环境,科学选择和集成防渗技术,补齐安全短板。

2 坝体防渗技术的分类与发展趋势

2.1 传统防渗技术的演变

最初中小型水库常用的防渗措施主要有坝体粘土心墙加厚、坡面粘土覆盖、砌石护坡等。这些方法施工工艺简单,成本较低,但对坝体结构和坝基渗漏的治理效果有限。为提升防渗能力,20 世纪 90 年代以来,我国大力推广帷幕灌浆、反滤排水、心墙复合等技术,逐步形成了较为完善的坝体防渗技术体系。帷幕灌浆通过高压注浆在坝基或坝体内部形成低渗透性屏障,适用于地基透水性强的坝体。反滤排水通过级配良好的砂石或土工材料阻止细粒流失,协助快速排出渗流,防止渗透破坏。心墙加固则是针对均质坝和土石坝,通过新建或加厚粘土心墙,提升坝体防渗能力。近年来,随着材料科技和智能建造的发展,复合防渗体系(如土工膜+土工布+粘土)和新型化学防渗剂、纳米防渗材料的工程应用日益增多。各类技术相互补充,推动坝体防渗手段向高效、绿色、智能方向演进。

2.2 新型防渗材料与智能防渗监测技术

传统防渗措施多依赖天然土工材料,受材料性能和施工工艺影响较大,防渗能力有限。随着高分子材料、复合材料和智能监测技术的兴起,水库防渗工程应用了大量创新成果。例如,膨润土防渗垫(GCL)、复合土工膜、防渗毯、聚氨酯灌浆剂等高分子材料具有高强度、高耐久性

和自愈合能力,能有效阻断渗流通道。智能防渗监测技术依托物联网、无线传感、数据采集与远程分析平台,实现对坝体渗流、变形和压力的实时监测与预警,为防渗工程的安全运维提供了科学依据和技术保障。新型材料与智能防渗的集成应用,提升了防渗层结构的整体性能,增强了防渗体系的适应性和长效性,为中小型水库的除险加固提供了有力支撑。

3 坝体防渗技术的工程应用与效果分析

3.1 防渗帷幕技术在不同坝型的应用成效

防渗帷幕技术适用于坝基透水性强、渗漏风险高的土坝和均质坝。帷幕灌浆通常采用水泥、化学浆液或高分子灌浆材料,通过钻孔注浆形成低渗透性帷幕,阻断坝体和坝基之间的渗流通道。部分重点水库工程还采用地下连续墙(塑性混凝土、钢筋混凝土墙等)实现更深层次、更高强度的防渗。工程实践表明,防渗帷幕可将坝基渗透系数降低 1-2 个数量级,渗漏流量减少 60% 以上,坝体稳定性显著提升。在施工组织方面,应根据地基土层分布和渗流路径,科学布置灌浆孔网,控制灌浆压力和浆液质量,避免灌浆死角和渗漏带遗漏。灌浆帷幕技术虽施工工艺要求较高、造价较大,但对保障水库安全运行具有不可替代的作用。

3.2 心墙复合与土工膜防渗技术的协同作用

针对坝体结构复杂、填料条件受限的中小型水库,近年来工程中普遍采用心墙加固与土工膜复合防渗技术。通过新建或加厚心墙(如混凝土心墙、粘土心墙、土工合成材料心墙),提升坝体整体防渗性能,再叠加土工膜、膨润土垫等高分子防渗层,形成多层协同阻隔体系。心墙复合技术结构灵活、施工简便,能有效适应不同地形和坝体类型,特别适合原坝体材料不理想、渗漏路径隐蔽的工程。实际应用中,复合防渗坝体的渗漏量明显低于传统坝型,工程寿命周期延长,运维管理压力减轻。该类技术正逐步成为我国中小型水库防渗加固的主流措施。

3.3 反滤排水与信息化监测保障防渗工程安全

反滤与排水措施是防止坝体内渗水对坝基及下游坡脚造成危害的基础技术。合理设置反滤层(级配砂石、土工织物等),可有效阻挡坝体细粒被渗流带走,防止管涌、流沙和坝坡变形。排水沟、渗沟、盲管等设施能够及时导出渗漏水,减轻坝体水压力,提升结构稳定性。随着智能化水利工程的发展,防渗监测手段不断升级。利用物联网传感器、自动化采集系统和云平台分析,实时掌握坝体渗流、位移和压力变化,实现渗漏风险的动态管控和精准维护。反滤排水与信息化监测的协同应用,极大提升了防渗工程的安全性和管理效率。

4 坝体防渗工程实施与管理中的主要难点及对策

4.1 地质条件复杂与检测技术局限

许多老旧水库所在地区地质结构复杂多变, 渗漏路径往往隐蔽且分布零散, 常规的地质勘察和传统渗流检测手段难以全面、准确地识别所有潜在渗漏隐患, 导致部分关键渗漏通道未被及时发现, 从而增加水库安全风险。为提升检测精度和覆盖范围, 需加大多源数据集成力度, 充分利用地球物理勘测技术、三维地质建模以及无人机航测等现代探测设备, 结合实时在线监测系统, 构建全方位、动态响应的坝体渗漏预警体系。这不仅能够实现对渗漏风险的早期识别和精准定位, 还为科学制定除险加固方案提供有力支撑, 保障水库工程的安全运行和防灾减灾能力。

4.2 防渗材料与工艺适应性问题

由于不同水库的坝体结构和坝地质条件存在显著差异, 单一防渗材料和施工工艺难以满足所有水库的多样化需求。一些地区由于经济条件限制和施工技术水平不高, 往往存在“重施工、轻设计”的现象, 导致防渗层材料选用不合理、施工质量不达标, 影响整体防渗效果和工程寿命。针对这一问题, 应加快新型环保、高效的防渗材料国产化和标准化推广, 促进土工膜、复合材料等先进材料的应用。同时, 应加强不同防渗技术和措施的组合使用, 开展材料与工艺的适应性研究, 推动设计与施工的一体化协同发展, 确保防渗工程既符合技术规范, 又具备良好的经济效益和环境友好性。

4.3 运维管理不足与智能化手段推广滞后

除险加固工程竣工后, 部分水库防渗设施缺乏科学的长期维护和定期检测, 导致防渗效果难以持续保障。当前许多地区在防渗工程运维管理上仍停留在传统人工巡检阶段, 信息化和智能化管理水平较低, 难以实现对坝体状态的实时监控和风险预警。为提升运维效率和安全管理水平, 应建立完善的防渗工程运维档案和动态管理体系, 推动智能运维平台的建设, 广泛应用自动化监测设备、远程预警系统和在线诊断工具, 实现对水库坝体的全生命周期动态监控。借助物联网和大数据技术, 可以及时发现和预警安全隐患, 快速响应和处置突发情况, 显著提升水库安全管理的科学化和智能化水平。

4.4 资金投入与政策支持持续保障

中小型水库数量众多、分布广泛, 防渗工程建设和日常运维的资金需求巨大, 而部分地区财政压力较大, 资金投入不足, 严重影响了工程质量和运行效益, 制约了防渗除险工作顺利开展。为保障防渗工程的可持续发展, 应加强各级政府政策和资金上的统筹协调, 建立多渠道投融资

机制, 鼓励引入社会资本和多元主体参与水库防渗项目建设和运维管理。同时, 应完善财政补助政策和绩效激励机制, 确保资金使用高效透明, 推动重点地区和薄弱环节的资金重点支持。通过政策引导和资金保障, 有效解决资金短缺难题, 促进防渗工程技术水平提升和运行管理现代化, 为保障区域水资源安全和促进乡村振兴提供坚实基础。

5 防渗技术创新发展趋势与工程实践展望

5.1 技术集成与智能化发展

未来防渗工程的发展趋势将更加注重多种技术的融合与集成应用, 实现防渗效果的最大化与工程安全性的提升。灌浆技术、帷幕防渗、心墙建设、土工合成材料的应用将不再孤立, 而是通过智能监测系统和信息技术的支持, 有机结合形成完整的防渗解决方案。利用大数据分析和人工智能算法, 可以实时监测坝体结构的应力、变形、水渗流量等关键参数, 实现对防渗体系的动态调控和精准维护。通过传感器网络与云计算平台, 工程运行数据得以实时上传、分析和反馈, 帮助工程管理人员做出科学决策, 预防潜在风险。此外, 智能化运维平台将推动防渗工程向自动化管理方向发展, 减少人为干预, 提高响应速度和管理效率。多技术集成不仅增强了工程的适应性和可靠性, 也为水库安全运行提供了坚实的技术保障。

5.2 绿色低碳与生态友好型防渗工程

当前, 绿色低碳发展成为国家战略核心, 防渗工程作为水利基础设施的重要组成部分, 必须实现与生态环境的和谐共生。未来的防渗材料将更加注重环保性能, 推广生物基材料和可降解材料, 减少对土壤和水质的污染风险。生态型护坡技术通过植物根系固土和土壤微生态恢复, 实现防渗结构与自然环境的有机结合, 保护和改善生态系统功能。同时, 透水构造的设计理念被广泛应用于防渗体系, 既保证防渗效果, 又促进地下水循环和生态多样性维护。通过合理布局生态绿化带和水体缓冲区, 减少工程建设对周边环境的扰动, 实现水资源的可持续利用。绿色低碳防渗工程不仅降低了施工能耗和资源消耗, 还提升了水利工程的社会效益和环境价值, 符合现代水利工程的可持续发展要求。

5.3 全生命周期管理与长效安全保障

防渗工程的安全性和功能稳定性要求从项目立项之初就纳入全生命周期管理视角。该理念强调对防渗工程从勘察设计、施工建设、运营维护到应急管理的全过程、全方位管理, 形成闭环控制体系。前期勘察需全面掌握地质水文条件, 为设计方案提供科学依据; 设计阶段应合理选择防渗技术和材料, 确保方案的实用性与经济性。施工过程中, 加强质量控制和技术监管, 防止隐患埋下。运维阶段,

依托智能监测平台和数字档案管理系统,持续监控工程状态,及时发现和处理潜在风险。建立健全应急预案和快速响应机制,保障在突发情况下能迅速恢复工程功能。全寿命周期管理提高了中小型水库防渗工程的安全稳定性和经济效益,有效延长工程使用寿命,推动水库实现长期、高效、安全运行。

6 结语

中小型水库除险加固工程中,坝体防渗技术的科学应用和创新发展,是提升水库安全保障能力、服务乡村振兴和生态文明建设的关键支撑。本文系统分析了各类防渗技术的原理、应用与效果,总结了实施中的技术难点与管理对策,提出了未来防渗技术创新与智能化发展趋势。研究表明,只有坚持“因地制宜、科学组合、多元集成、智能管理”,才能实现中小型水库防渗工程的高效实施与可持

续发展。建议未来进一步加强多学科技术协作、加大政策与资金投入、完善长效管理机制,推动防渗技术从“单一治理”向“系统防控”转变,为我国中小型水库的安全运行和高质量发展提供坚实的技术保障。

参考文献:

[1] 王文斌,宋涛.中小型水库坝体防渗技术研究与应用[J].水利科技与经济,2023,(3):54-57.

[2] 陈晓东,孙伟.除险加固工程中坝体渗漏治理新技术分析[J].中国水利,2022,(20):112-116.

[3] 赵云鹏,王永亮.中小型水库坝体防渗与加固工程实践[J].水利建设与管理,2023,(8):77-81.

作者简介:毛盾(1998-),男,汉族,湖北赤壁人,学士学位,科员,助理工程师,研究方向:水利水电工程。