

土石坝渗漏问题识别与加固技术路径研究

陈霞

信阳市水利勘测设计院 河南 信阳 464000

摘要: 土石坝渗漏问题直接影响坝体安全运行,本文先对土石坝渗漏问题分类与特征展开分析,涵盖渗漏类型、特征及与坝体稳定性的关联。接着阐述渗漏问题识别技术,包括物理探测、工程监测和数值分析方法。随后介绍渗漏加固技术体系,有防渗、排水减压、结构加固和材料改良技术。最后探讨技术路径选择原则与方法,依据渗漏严重程度、工程条件及经济性与可行性选择,并通过多目标决策、层次分析法等优化,为土石坝渗漏治理提供全面指导。

关键词: 土石坝; 渗漏问题; 识别技术; 加固技术; 技术路径

引言: 土石坝作为重要的水利工程建筑,在防洪、灌溉、发电等方面发挥着关键作用。然而,受多种因素影响,土石坝渗漏问题时有发生,这不仅影响正常运行,还可能对下游地区人民生命财产安全构成威胁。渗漏问题形式多样,成因复杂,不同渗漏类型具有不同特征,对坝体稳定性影响各异。准确识别渗漏问题并选择合适的加固技术路径至关重要。因此,深入研究土石坝渗漏问题识别与加固技术路径,对于保障土石坝安全稳定运行具有现实意义。

1 土石坝渗漏问题分类与特征分析

1.1 渗漏类型划分

1.1.1 按渗漏部位

按渗漏发生的具体部位划分,渗漏可分为坝体渗漏、坝基渗漏、接触渗漏和绕坝渗漏。坝体渗漏源于筑坝材料密实度不足,水流通过坝体内部孔隙渗透,长期作用会弱化坝体结构强度。坝基渗漏与地基岩土特性相关,地基渗透性过强或存在裂隙,会让水流从坝体下方形成渗透^[1]。接触渗漏发生在坝体与地基、岸坡等衔接部位,衔接处密封不当易形成渗漏通道。绕坝渗漏则是水流绕过坝体主体,从周边岩土形成渗透路径,与坝体周边地质条件密切相关。

1.1.2 按渗漏路径

按渗漏路径可分为集中渗漏、分散渗漏和管涌型渗漏。集中渗漏表现为水流通过单一明确通道渗透,流量集中且对坝体破坏作用明显。分散渗漏无固定通道,水流通过多个细小孔隙渗透,初期影响隐蔽但长期会侵蚀坝体结构。管涌型渗漏多因岩土颗粒级配不合理,水流携带细小颗粒形成通道,对坝体稳定性影响显著,需结合渗流力学原理进行防控。

1.1.3 按渗漏成因

渗漏成因与材料、结构、地质、施工等因素相关。

材料缺陷导致筑坝材料抗渗性能不足,无法有效阻挡水流渗透。结构失稳会使坝体出现缝隙,为水流提供渗透通道。地质条件差异影响地基渗透性,渗透性较强的地基易引发渗漏。施工过程中操作不规范、压实不充分,会在坝体内部留下隐患,诱发渗漏,各类成因相互作用,共同影响渗漏发生与发展。

1.2 渗漏问题特征

1.2.1 渗透水流形态

渗透水流形态受水流速度、岩土渗透性等因素影响,主要分为层流、紊流和管涌三种类型。层流状态下水流平缓,对坝体侵蚀较弱,多出现于渗漏初期。紊流状态水流扰动剧烈,易携带岩土颗粒,加剧渗漏通道扩张。管涌型水流集中且流速较快,会直接冲刷岩土,破坏坝体结构,需结合流体力学规律进行防控。

1.2.2 渗漏破坏模式

渗漏引发的破坏呈现不同形态,渗透变形是基础破坏形式,水流冲刷导致岩土颗粒流失,弱化坝体结构。局部塌陷多发生在渗漏集中区域,岩土长期浸泡后强度下降,引发局部结构损坏。整体失稳是长期渗漏的结果,坝体承载能力持续下降,最终影响正常运行,各类破坏模式循序渐进,与渗漏程度直接相关。

1.2.3 渗漏与坝体稳定性的关联性

渗漏会直接影响坝体稳定性,水流渗透会降低坝体材料强度,破坏结构完整性。渗漏导致坝体内部含水量增加,加重自重,改变受力分布,进一步降低承载能力。渗漏引发的结构损伤会逐步累积,从局部缺陷发展为整体隐患,二者相互影响,遵循岩土工程中渗流与结构稳定性的内在关联规律,也是渗漏防控的核心考量方向。

2 土石坝渗漏问题识别技术

2.1 物理探测方法

物理探测方法依托地球物理、水文地质等相关理论,

通过捕捉渗漏引发的物理场变化,实现渗漏问题的精准识别,具有非破坏性、高效性的特点。地球物理勘探是常用探测手段,电阻率法利用岩土体渗漏前后电阻率的差异,捕捉渗漏区域分布范围与发育程度;自然电场法借助渗漏水流形成的自然电场异常,定位渗漏通道位置;地质雷达法通过电磁波反射信号的变化,识别坝体内部渗漏隐患与结构缺陷^[2]。示踪技术通过投放示踪剂追踪水流运动轨迹,化学示踪选用稳定性强、易检测的化学物质,通过监测示踪剂扩散路径判断渗漏范围;放射性示踪利用放射性物质的特性,精准追踪渗漏水流的流动方向与速度。温度场监测依托温度差异识别渗漏,分布式光纤测温可实现坝体全域温度实时监测,捕捉渗漏水流引发的温度异常;红外热成像通过检测坝体表面温度分布,快速识别渗漏区域,适配不同工况下的渗漏探测需求。

2.2 工程监测方法

工程监测方法聚焦土石坝运行过程中的各类物理参数变化,通过长期监测捕捉渗漏相关异常信号,为渗漏识别提供直接数据支撑。变形监测针对坝体及地基变形开展,表面位移监测跟踪坝体表面沉降、水平位移变化,内部位移监测捕捉坝体内部土体变形情况,裂缝监测关注坝体裂缝的产生与发展,间接反映渗漏对坝体结构的影响。渗流监测直接针对渗漏水流开展,测压管用于监测坝体及坝基渗压分布,捕捉渗压异常变化;渗压计精准测量岩土体孔隙水压力,反映渗漏发展程度;量水堰用于计量渗漏流量,量化渗漏规模。应力应变监测通过监测坝体内部应力应变状态,土压力盒测量坝体内部土压力分布,应变计捕捉坝体材料应变变化,通过参数异常判断渗漏引发的结构受力变化。

2.3 数值分析方法

数值分析方法依托流体力学、岩土力学相关理论,通过构建数学模型模拟坝体渗流特性,实现渗漏问题的精准识别与分析。渗流场数值模拟通过建立坝体渗流数学模型,开展稳态与非稳态渗流分析,稳态渗流分析适用于坝体正常运行状态下的渗漏评估,非稳态渗流分析针对降雨、蓄水等工况变化下的渗漏动态变化开展。应力-渗流耦合分析考虑渗透力与土体变形的相互作用,模拟渗漏水流对坝体结构应力状态的影响,捕捉渗漏引发的结构力学响应。反演分析基于工程监测获取的实际数据,通过参数反演优化模型参数,提升模拟精度,同时结合反演结果实现渗漏通道的精准定位,为渗漏识别提供理论与数据双重支撑,适配复杂地质条件下的土石坝渗漏识别需求。

3 土石坝渗漏加固技术体系

3.1 防渗加固技术

防渗加固技术是土石坝渗漏治理的核心手段,依托岩土工程防渗理论,通过构建完善的防渗体系阻断渗漏通道,降低渗漏风险。垂直防渗聚焦坝体及坝基深层渗漏治理,混凝土防渗墙凭借高强度、高抗渗性,形成连续防渗屏障,适配深层渗漏治理需求;塑性混凝土防渗墙兼顾强度与柔韧性,适配坝体变形需求,减少防渗结构开裂风险;高压喷射灌浆通过高压喷射形成连续防渗帷幕,可适配不同地质条件,实现深层防渗^[3]。水平防渗针对浅层渗漏治理,土工膜铺设具备轻便、抗渗性强的优势,可快速构建浅层防渗层;黏土铺盖利用黏土的低渗透性,形成大面积水平防渗层,适配均质坝体防渗;沥青混凝土面板凭借良好的抗渗性和耐久性,用于坝体表面防渗,提升整体抗渗能力。复合防渗结合垂直与水平防渗技术的优势,根据坝体渗漏分布特点组合应用,部分场景构建多道防渗体系,进一步提升防渗可靠性,适配不同渗漏类型的治理需求。

3.2 排水减压技术

排水减压技术通过构建科学的排水系统,降低坝体及坝基孔隙水压力,减少渗漏对坝体结构的影响,依托水利工程排水理论优化设计。坝体排水聚焦坝体内部渗流排出,棱体排水设置于坝体下游,快速排出坝体内部渗水,降低坝体浸润线;褥垫排水铺设于坝体底部,均匀排出坝体内部渗水,避免局部积水;贴坡排水直接设置于坝体下游坡面,及时排出表面渗水,防止坡面冲刷。坝基排水针对坝基渗漏设计,减压井可有效降低坝基孔隙水压力,减少渗透破坏风险;排水沟构建坝基排水网络,快速排出坝基渗水;水平排水垫层铺设于坝基底部,加速渗水排出,改善坝基受力状态。排水系统优化需结合渗漏分布特点,通过排水能力计算调整排水设施布局,确保排水系统与渗漏量匹配,提升排水效率,缓解渗漏对坝体的不利影响。

3.3 结构加固技术

结构加固技术围绕坝体结构稳定性提升展开,针对渗漏引发的结构薄弱环节进行优化完善。加厚坝体通过上游培厚增强坝体抗渗能力,下游加戗提升坝体抗滑稳定性,适配不同坝体结构需求。坝坡稳定优化通过放缓坝坡减小边坡应力,增设马道分散坝坡受力,护坡加固提升坝坡抗冲刷能力,减少渗漏引发的坝坡失稳风险。裂缝处理聚焦渗漏引发的坝体裂缝,开挖回填用于浅层裂缝治理,通过分层回填压实恢复结构完整性;灌浆封堵适配深层裂缝,通过注入灌浆材料填充裂缝,阻断渗漏通道;化学加固利用化学材料的胶结作用,增强裂缝

周边土体强度,防止裂缝扩大,保障坝体结构完整。

3.4 材料改良技术

材料改良技术通过优化坝体及坝基材料性能,提升抗渗能力和结构稳定性,依托材料科学与岩土工程相关理论开展。土体改良通过掺加水泥、石灰、膨润土等改良剂,改善土体颗粒级配,提升土体抗渗性和强度,减少土体渗漏通道。新型材料应用为加固提供更多选择,高模量土工格栅可增强土体整体性,减少土体变形,提升坝体抗裂能力;自修复材料可在渗漏引发微小裂缝后自行修复,降低后续维护成本;纳米材料凭借优异的抗渗性和耐久性,融入防渗结构中,进一步提升防渗效果,推动加固技术升级,适配土石坝长期稳定运行需求。

4 技术路径选择原则与方法

4.1 技术路径选择依据

4.1.1 渗漏问题严重程度

渗漏问题严重程度是技术路径选择的核心前提,需区分局部渗漏与整体渗漏的差异化处理逻辑。局部渗漏影响范围有限、隐患程度较轻,技术路径侧重针对性治理,聚焦局部隐患封堵与加固;整体渗漏影响范围广、隐患风险高,技术路径需兼顾全面性与系统性,注重坝体整体防渗体系的完善与加固,避免渗漏隐患进一步扩散。

4.1.2 工程条件限制

工程条件限制直接决定技术路径的适配性,主要涵盖地质条件、施工环境与运行要求三大方面^[4]。地质条件决定坝体及坝基岩土特性,影响加固材料与工艺的选择;施工环境制约施工设备进场、施工流程推进,需选择适配现场条件的技术路径;运行要求明确坝体加固期间及后期的运行标准,技术路径需兼顾加固效果与运行安全,避免施工对坝体正常运行造成影响。

4.1.3 经济性与可行性

经济性与可行性是技术路径落地的关键保障,需综合考量成本效益、施工周期与技术成熟度。成本效益分析需平衡加固投入与治理效果,选择性性价比合理的技术路径;施工周期需贴合工程整体进度规划,避免工期延误;技术成熟度需优先选择经过工程实践检验、应用效果稳定的技术,降低施工风险与不确定性。

4.2 技术路径优化方法

4.2.1 多目标决策

多目标决策聚焦技术路径的综合优化,统筹考量防渗效果、施工难度、长期稳定性三大核心要素。防渗效

果作为核心诉求,需确保技术路径能有效封堵渗流通道、控制渗漏发展,保障坝体防渗性能。施工难度需结合工程条件合理把控,优化工艺设计,提升施工便捷性,降低现场实施难度。长期稳定性需兼顾加固后的耐久性,避免短期治理、长期反复的问题,确保技术路径能长期发挥防渗加固作用,实现治理效果的长效性。

4.2.2 层次分析法

层次分析法通过构建完善的技术路径评价指标体系,实现对不同技术路径的系统评估与优选。结合土石坝渗漏治理需求,梳理防渗效果、施工成本、工期控制、耐久性等核心评价指标,明确各指标权重,通过分层分析、综合研判,筛选出适配工程实际的最优技术路径,提升技术选择的科学性与合理性,规避盲目选择导致的治理失效问题,符合系统工程评价相关理论。

4.2.3 动态调整机制

动态调整机制立足渗漏治理的动态性特征,依托坝体渗漏监测数据实时优化加固方案。通过持续监测渗流量、渗压、坝体变形等核心数据,及时掌握渗漏演化趋势与加固效果,针对监测中发现的问题,调整技术参数、优化施工工艺,确保技术路径始终适配渗漏隐患变化,提升加固治理的精准度与有效性,贴合渗流动态演化规律与工程监测相关技术规范。

结束语

土石坝渗漏问题识别与加固技术路径研究是一个复杂且系统的工程。通过明确渗漏问题分类与特征,为精准识别渗漏提供了基础;多种识别技术的综合运用,可全面掌握渗漏情况;完善的加固技术体系为解决渗漏问题提供了多种手段;科学的技术路径选择原则与方法,确保了加固方案的有效性与合理性。在实际工程中,需根据具体情况灵活运用这些理论和方法,切实解决土石坝渗漏问题,保障长期安全稳定运行。

参考文献

- [1]孙佳易,邓昌,汤雷,等.三维重构反演的土石坝渗漏通道精确识别技术[J].水利水电工程学报,2024(4):71-79.
- [2]曾成.土石坝渗流监测数据异常波动的成因识别方法[J].建筑与施工,2025,4(23):11-12.
- [3]李伟,蔡黎明,孙琰,等.混凝土面板堆石坝蓄水期渗漏成因与堵漏技术研究[J].科技创新与应用,2026,16(6):167-172.
- [4]许云鹏,吴震宇,尹川.心墙堆石坝非饱和渗流模型识别方法及应用[J].水利规划与设计,2022(9):127-132.