

水利工程大坝防渗加固技术应用研究

赵惠

中国水利水电第六工程局有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i6.7047

[摘要] 渗漏属于危及大坝运行安全的常见病害。本文对坝体、坝基、绕坝三种渗漏进行梳理,并分析其特点和原因,确定防渗加固的实施原则以及不同坝体的技术要求,对灌浆、防渗墙、高压旋喷、混凝土补强四种主要工艺原理进行阐述。根据现场工况展开技术适配分析,依靠县域中型均质土石坝的实例展开方案落地、施工执行和效果检测,然后将各种工艺的应用效果以及经济指标进行比较。文章对目前防渗工程施工、运维环节存在的主要问题进行了分析,并提出了一套全流程的质量控制方案,预测了行业的发展趋势,可以给国内类似的病险水库防渗加固工程提供技术上的参考和实践上的借鉴。

[关键词] 水利工程; 大坝; 防渗加固; 施工技术; 渗漏治理

中图分类号: TV5 文献标识码: A

Research on the Application of Seepage Prevention and Reinforcement Technology for Dams in Water Conservancy Projects

Hui Zhao

China Water Resources and Hydropower Sixth Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] Seepage is a common defect threatening the operational safety of dams. This paper reviews three types of seepage: dam body, dam foundation, and seepage around the dam, analyzes their characteristics and causes, determines the implementation principles of seepage prevention and reinforcement, and outlines the technical requirements for different dam types. The principles of four main technological processes—grouting, cutoff walls, high-pressure jet grouting, and concrete reinforcement—are explained. Based on field conditions, a technical adaptation analysis is conducted. Using a case study of a medium-sized homogeneous earth-rock dam in a county, the paper demonstrates the implementation of the solution, construction execution, and effect testing. The application effects and economic indicators of various processes are then compared. The paper analyzes the main problems existing in the construction and operation and maintenance of current seepage prevention projects, proposes a comprehensive quality control scheme, and predicts industry development trends. This can provide technical reference and practical guidance for similar seepage prevention and reinforcement projects of dilapidated reservoirs in China.

[Key words] water conservancy project; dam; seepage prevention and reinforcement; construction technology; leakage control

引言

我国中小型水库数量众多,大部分大坝服役年限较长,由于地质条件、施工缺陷和长期荷载的作用,渗漏病害时有发生,已经成为水利运行管理的主要问题。渗漏不但会降低地基的承载能力,还会腐蚀坝体结构,容易引起坝体失稳等安全事故。目前防渗加固技术种类繁多,但是由于工况不同、选型不合理、施工管理不到位等原因,部分治理工程不能达到预期的效果。为了提高病害治理的专业性,本文根据行业规范和工程实践对渗漏成因及相应的处理方法进行分类,并用工程实际检验组合工艺应

用的价值,总结经验并提出优化途径,以保证水利工程安全长效运行。

1 大坝渗漏成因及加固基本准则

1.1 大坝渗漏类型与工程特征

水利工程长期运行期间,大坝渗漏属于常见的结构性病害,按照渗漏位置可划分为坝体、坝基和绕坝渗漏这三种情况。坝体渗漏多发生在坝身砌体、混凝土浇筑缝和土石坝内部,以坝面湿润、点状和线状渗水为主,在中小型水库中较多见。坝基渗漏是由岩体裂隙、土层孔隙贯通造成的,会逐渐降低地基的承载能

力; 绕坝渗漏发生在坝体和岸坡结合处, 容易产生集中渗流^[1]。三类病害都会对坝体造成侵蚀, 缩短工程使用寿命, 严重时危及水库运行安全。

1.2 渗漏病害成因系统分析

大坝渗漏是由地质、建设、运行管理等各方面因素造成的。部分坝址岩土裂隙发育、土质疏松, 天然就具备了渗流条件。防渗设计不合理、浇筑不密实、灌浆有盲区、防渗材料破损等施工问题都会给渗漏留下隐患。水库水位涨落、水流冲蚀、冻融、土体沉降等都会使结构缺陷不断增大, 而且由于运维巡检、病害处理不及时, 小隐患最终发展成严重的渗漏。

1.3 防渗加固工程实施原则

开展大坝防渗加固要严格依照行业规范, 坚持四项基本原则。坚持安全第一, 施工方案和工艺不得损坏原有的坝体, 不得造成次生病害; 按照工程实际选择技术和材料, 控制造价; 根据坝型、地质条件选择适合的工艺; 采取标本兼治的办法, 封堵渗流通道时同时加强结构稳定性, 防止病害复发。

1.4 不同坝体加固技术要求

不同坝体的防渗加固侧重点不同。土石坝重点做好土体防渗和压密, 优先采用灌浆、防渗墙、土工膜复合体系; 混凝土坝重点处理裂缝、施工冷缝和坝基渗漏, 配合补强、灌浆和防渗涂层; 砌石坝以充填砌体缝隙、整体加固为主。各种防渗体系都要和原结构一起工作来达到设计的抗渗和稳定要求。

2 主要防渗加固技术与作用原理

2.1 灌浆防渗技术作用机理

灌浆防渗是大坝防渗加固应用最广的工艺, 分为帷幕灌浆和固结灌浆两种。帷幕灌浆是用高压把水泥基浆液注入坝基、坝体裂隙, 浆液凝固后形成连续的隔水帷幕, 阻止深部渗流通道, 主要用在坝基和深部渗漏治理上。

固结灌浆主要目的是填充、压密坝体松散土体和破碎岩体, 浆液渗透到土体孔隙中胶结松散介质, 提高坝体密实度和整体强度^[2]。两类灌浆技术依靠浆液的充填、胶结、挤压这三大作用来达到防渗和结构加固的目的, 适合于大多数中低水头水利大坝。

2.2 防渗墙体构造工作原理

混凝土防渗墙、高喷桩防渗墙属于坝体防渗的主要构造形式。混凝土防渗墙通过开槽、浇筑混凝土形成连续地下墙体, 依靠墙体自身低渗透性隔断水平和竖向渗流, 墙体具有隔水和承重双重作用, 适用于地基透水性强、渗漏范围大的大坝工程。

高喷桩防渗墙依靠高压射流切割土体, 混合水泥浆液形成桩体搭接墙体, 利用桩体连续性建立防渗屏障。两类防渗墙嵌入相对不透水层, 可以从空间上截断渗流途径, 抗渗性能较好, 多用于病险水库大坝整体防渗整治。

2.3 高压旋喷加固技术机理

高压旋喷技术依靠钻机将高压水泥浆液喷射到坝体缺陷处和软弱土层上, 高速射流冲击扰动周围土体, 使土体与浆液充分混合搅拌。混合体凝结硬化之后, 形成整体性好、渗透系数很低

的水泥土固结体。该技术既可以堵住局部的集中渗漏通道, 又可以提高软弱部位的结构强度和抗变形能力。施工扰动小、点位灵活, 适用于坝体局部孔洞、局部土体松散、浅层集中渗漏等病害的局部防渗补强, 是局部防渗补强的首选技术^[3]。

2.4 混凝土补强防渗原理

对于混凝土坝的裂缝、表层剥落、接缝渗漏等病害, 主要用表层修补、裂缝注浆、防渗涂层三种补强工艺。浅表裂缝和表面缺陷用聚合物砂浆、环氧材料封堵抹平, 阻止表面渗水; 深层贯穿裂缝用低压注浆填充裂隙, 恢复结构的整体性; 防渗涂层在混凝土表面形成致密的防护层, 隔绝外界水体的侵入, 减缓结构的衰老。该类技术以修复混凝土结构完整性、降低表面渗透性为主要目的, 专门解决混凝土坝表层和浅表渗漏问题。

3 防渗加固技术工况对比与实例应用

3.1 不同工况技术适配分析

根据水库水位、地质情况、渗漏位置等现场工况的不同, 各种防渗加固技术的适用性也大相径庭。高水位运行、坝基大范围渗漏工况下, 帷幕灌浆、混凝土防渗墙综合效果最好, 可以实现深层全域防渗; 枯水期检修、坝体局部渗漏工况, 优先采用高压旋喷和混凝土补强技术, 施工方便、工期短。岩石地基整体性好, 灌浆技术成孔及注浆效果稳定; 软土地基孔隙大、易变形, 更适合用高喷防渗墙和旋喷桩组合工艺^[4]。

绕坝渗漏受山体地形的限制, 一般采取帷幕灌浆加局部土体加固的组合方式。在临水施工、场地狭小等特殊作业环境里还要考虑设备通行能力和施工安全。根据不同的施工条件、防渗标准等进行技术的综合比选, 防止出现技术错配造成治理效果不佳的情况。

3.2 工程场景技术选型研判

大坝防渗加固技术选型要以现场勘查、渗漏评估为基础, 形成标准化的选型思路。地质勘探、渗流监测确定渗漏范围、渗流量、渗漏通道分布, 确定治理目标; 根据坝型、工程运行要求划定施工边界, 分为全域治理和局部补强。对运行时间较长的病险土石坝, 首先采用帷幕灌浆和防渗墙相结合的方式进行处理, 既达到防渗的目的又起到整体加固的作用; 对于新建或者工况较好的混凝土坝, 在出现浅表渗漏的时候直接用混凝土补强工艺。

根据工期、施工场地、工程造价综合考虑, 山区小型水库优先选择小型化施工技术, 大型拦河大坝可以采用大型成套设备进行防渗墙施工, 实现技术可行性和经济性的平衡。

3.3 典型工程病害现状勘查

以县域中型水库大坝为工程实例, 大坝为均质土石坝, 建成运行20年以上, 承担周边农业灌溉和生活供水任务。现场勘察得知坝体下游坡面有湿润区和线状渗水点, 坝基局部渗流量超过规范要求, 两岸结合部存在轻微绕坝渗漏。根据地质探测结果可知, 坝体中部土体局部密实度不够, 坝基浅层存在连通孔隙, 长时间的水位变化使原有的防渗体系慢慢失效。经监测统计可知, 在水库高水位下, 渗漏问题更加严重, 已经对大坝的运行稳定性

造成影响,被当地水利部门列为一般病险坝,需要进行系统的防渗加固治理。经现场监测得知水库低水位总渗流量为 $18.6\text{ m}^3/\text{d}$,高水位总渗流量为 $42.3\text{ m}^3/\text{d}$,大于《水库大坝安全评价导则》中均质土石坝 $20\text{ m}^3/\text{d}$ 的允许范围,坝基土体渗透系数为 $5.2\times 10^{-4}\text{ cm/s}$,属于强透水地层。本次治理要保证正常的供水、不停运水库,在渗漏封堵和结构补强的基础上进行。

3.4 现场施工方案组织实施

根据该工程病害特点和现场情况,选择帷幕灌浆加高压旋喷组合施工方案。第一阶段进行坝基帷幕灌浆,沿坝轴线布置灌浆孔,分序分段进行注浆,浆液为普通硅酸盐水泥浆液,灌浆压力和注浆量严格控制,逐层封堵坝基渗流通道。第二阶段在坝体局部渗漏处布置高压旋喷桩,桩体互相搭接成局部防渗带,压实松散土体。两岸绕坝渗漏区做浅层固结灌浆,封堵山体 and 坝体的结合缝隙^[5]。

施工过程中严格按照水利施工规范控制工序,实行分段施工、实时监测,安排专人全程巡查值守,防止施工荷载对坝体造成扰动。现场同步做好施工废水、弃土处理,落实扬尘、污水控制措施,保证现场作业安全和周围环境整洁。

3.5 完工防渗效果检测评价

工程全部施工完毕并养护后,用外观检查、渗流监测、钻孔取样三种方法进行综合检测。外观检查发现原坝面渗水、坡面湿润的地方完全消失,坝体外观形态没有变化。连续30天的水位监测结果可知,大坝高水位总渗流量为 $7.2\text{ m}^3/\text{d}$,满足规范要求,水位变化时渗流状态正常。现场钻孔取样检测灌浆固结体渗透系数为 $2.1\times 10^{-7}\text{ cm/s}$,旋喷桩体渗透系数为 $3.5\times 10^{-7}\text{ cm/s}$,密实度和防渗指标均满足设计要求。综合判定,本次防渗加固工程达到预期治理目标,各种技术组合应用效果好,可以长期保证大坝的安全稳定运行,也为区域类似病险土石坝治理提供了一个可以借鉴的范例。

4 应用成效总结与技术发展建议

4.1 各类技术应用成效归纳

根据工程实践,对四种主流技术的应用效果和经济指标进行综合归纳。根据近几年中小型水库造价标准,帷幕灌浆综合单价为 $260\sim 320\text{ 元/m}$,适用范围广、性价比高,治理深部渗漏效果好;混凝土防渗墙综合单价为 $750\sim 900\text{ 元/m}^2$,防渗性能好,适合大范围高标准工程,造价高;高压旋喷桩综合单价为 $380\sim 450\text{ 元/m}$,施工扰动小,适合局部浅层渗漏治理;混凝土补强工艺造价最低,可以快速修复坝体浅表病害。不同的技术各有其优缺点,复杂的渗漏工程应该采用组合工艺,以达到治理效果和成本控制的双重目的。

4.2 现有施工现存问题剖析

从施工和运行角度来说,目前大坝防渗加固还存在着很多问题。一些中小型工程照搬以往的经验来选型,没有根据地质、坝体情况来制定方案,造成治理效果不好。灌浆、旋喷等工序控制不到位容易造成注浆不实、桩体搭接缝隙等问题。传统的防

渗材料抗老化、抗冲刷性能差,使用年限长了就会出现性能下降的情况。另外很多工程重施工、轻监测,缺少常态化的渗流监测,不能及时发现复发性渗漏。

4.3 现场施工质量管控对策

根据已有的问题,结合工程实践提出全流程管控的措施。技术选型之前加强现场勘查和试验,根据实测数据选择方案,抛弃经验化的选型方式。施工阶段执行工序“三检制”,控制孔位、压力、浆液配比等主要参数,主要检查隐蔽工程质量。优先采用高耐久、高抗渗新型建材来提高防渗体系的使用寿命。工程验收之后创建常态化的监测体系,跟踪剖析数据,达成病害早发现、早处理,塑造起“施工—验收—运维”全流程管理机制。

4.4 行业技术发展趋势展望

伴随着水利工程提质升级,大坝防渗加固技术也向新材料、智能化、绿色化方向发展。新型高分子材料、改性水泥浆液由于具有良好的性能而被广泛使用,智能监测与数值模拟相结合可准确找到渗漏通道,预测渗流的变化。低扰动、环保型施工工艺也被广泛使用,既考虑了治理效果又考虑了生态保护。智能监测、新材料、组合工艺将是智能监测系统的发展方向。

5 结语

坝体渗漏治理要根据病害类型、坝体结构、场地工况来选择合适的治理技术。灌浆、防渗墙、高压旋喷和混凝土补强技术各有适用的场合和经济性,采用组合工艺可以较好地解决复杂的渗漏问题。经过本次工程实践可知,帷幕灌浆与高压旋喷联合使用的方法可以有效地减小渗流量、提高土体防渗性,取得较好的治理效果。由于行业内技术选型随意、工序控制薄弱、运维体系缺乏等,只有实行精细化管理、采用新型材料和智能监测技术,才能不断改善防渗工程质量。未来要不断推进工艺革新和技术融合,建立起全生命周期管理机制,全方位加强水利大坝安全保障水平。

【参考文献】

- [1]张二宝.水库大坝防渗墙混凝土加固安全施工技术研究[J].科技资讯,2026,24(6):146-148.
- [2]赵海红.灌浆技术在水利水电工程大坝施工中的应用研究[J].水上安全,2026,(3):193-195.
- [3]朱让,唐金鑫.帷幕灌浆施工技术在水利工程大坝基础防渗加固中的应用[J].工程技术研究,2025,10(18):65-67.
- [4]董浩.大坝防渗加固中高压旋喷桩应用效果研究[J].水利科技与经济,2023,29(6):49-53+63.
- [5]何金文,张诗瑶,胡世燃,等.土石坝高喷桩防渗墙抗压强度与渗透系数相关性及其分布模型研究[J].中国农村水利水电,2025,(1):193-200.

作者简介:

赵惠(1987—),女,汉族,吉林双辽人,工程师,大学本科,研究方向:水利水电。