

老旧水利大坝除险加固技术对策研究

文 / 王 虎 陕西水务发展实业集团有限公司

摘要：老旧水利大坝在我国水利体系中承担着重要的防洪、灌溉和供水功能，其安全性直接关系到区域经济和社会稳定。然而，随着坝体运行年限的延长，材料老化、结构损伤和水文环境变化带来的安全隐患日益突出。本文系统分析了老旧水利大坝面临的主要困境，结合坝体裂缝修复、渗漏控制、结构加固、监测管理及洪水应急等方面的技术策略，提出一套综合性除险加固方案。研究显示，通过科学的结构加固和系统的监测管理，可有效延长大坝使用寿命，降低安全风险，实现水利基础设施的稳健运行。

关键词：老旧水利大坝；除险加固；结构加固；渗漏控制；监测管理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.084

引言

老旧水利大坝是水利工程体系的重要组成部分，其建设年代普遍较早，设计标准和施工技术存在局限。随着社会经济发展和气候变化，水利工程面临的水文压力增加，安全风险逐渐显现。大坝安全不仅是工程技术问题，也是社会管理问题，涉及水资源调配、防洪减灾及区域发展等多重因素。针对老旧大坝存在的结构劣化、渗漏问题以及监测管理不足，亟需建立科学的除险加固策略，以保障坝体安全和区域稳定。本研究从技术与管理双重维度出发，对老旧水利大坝的加固方法进行了系统分析，强调策略的可操作性、科学性与长期有效性。

一、老旧水利大坝发展背景

（一）老旧水利大坝的基本类型

老旧水利大坝主要表现为土坝、混凝土坝和重力坝，建造年代不同、建造工艺、所用材质和结构都有很大不同，土坝大多是20世纪五六十年代修建而成，结构选材主要是就地取材，设计洪水标准低，抗洪能力低。混凝土坝和重力坝具有更多的工程力学指标，但由于施工的材料和方法制约，建成后也暴露出裂缝、渗漏以及基底沉降等大量问题。大坝类型与所在水文地质情况不同，其结构形态的不同不仅决定了下步的大坝监测、加固与养护的技术取向，认识其类型是下步制订科学加固方案的重要基础。

（二）老旧水利大坝运行管理与监测情况

大部分老坝在建造设计之初管理较粗放，运行监测方式多依靠人工巡检，监测无连续性和准确性，近年虽已逐步采用自动化监测方式，但监测范围小，监测精度及监测频率不够完善，并不能满足大坝安全评估要求，运行和管理制度环节信息孤岛严重，无法统一管理坝身各部位状态数据、历史维修保养信息及应急处置信息，上述运行和管理方式致使难以及时发现问题，隐患逐步累积，尤其是在严重水文事件的情况下，安全隐患严重。

二、老旧水利大坝存在的主要困境问题

（一）材料老化与结构损伤难题

尤其是老旧的大坝，主要是由坝体材料的自然老化

及其长期运行所产生的结构性老化所引起。其表现为混凝土裂缝、混凝土碳化、钢筋锈蚀，土坝由于长期被水流冲刷而引起的坝体渗漏、坝体坍塌的风险加大。这些情况不仅影响大坝自身的承载力，而且对大坝产生的潜在因素影响也可能会引发一连串后果，例如由于渗水而导致的大坝基础土体冲刷、大坝体自身的非均匀沉降导致应力更集中。由于年久，很多原始的设计图册资料、施工日志缺失，其材料本身性能难以全部摸清，给维修技术方案的合理制定增加了难度，常规的维修方式又难以对深层结构问题进行彻底修复，其长期潜在的缺陷所积聚的风险也是其一大隐患。

（二）水文环境变化对坝体安全影响

洪水流量加大、洪峰集中、洪水历时短及枯水少雨季节河槽缺水形成连续流槽及地下水等，再加上地表杂草的堆积和植物的生长，对水库大坝的正常工作产生重要影响，因而，水文环境变化越大的时候，大坝的隐患也越多。一旦大坝浸水时间较长，大坝的渗透变形状况加重或饱和度提高，大坝上出现多处渗透异常则会给大坝带来很大的危害。因此，解决水文环境变化问题需要进一步研究和分析。

（三）管理维护与技术手段不足

老旧水利大坝管理面临体制与技术双重限制。部分大坝管理机构缺乏专业技术人员，巡查与维护流程多依赖经验判断，缺乏科学化、系统化管理体系。现代化检测手段如动态应力监测、渗流监控等部署不足，数据分析能力有限，无法为决策提供精确支撑。技术手段的落后还体现在加固方案选择上，部分措施存在针对性不强、成本高或实施周期长的问题，导致隐患无法得到及时、有效处理，安全风险长期累积，制约大坝整体功能和防洪能力^[1]。

三、老旧水利大坝除险加固技术对策

（一）坝体裂缝修复与加固施工技术方法

针对大坝裂缝治理的思路是，从裂缝的识别、裂缝处理方案、治理材料、施工过程和治理后的结果反馈几个角度出发，建立一套由检测→治理方法→材料与工艺

→裂缝质量控制→验收治理效果的闭环体系^[2]。裂缝检测应在非破坏性检测的基础上,采用多种检测技术,如肉眼观察裂缝、超声波检测、红外热检测、裂缝声发射等进行表面、内部检测,判断裂缝的深浅,再采用超声波等方法定位裂缝;裂缝分类应依据裂缝宽度、裂缝走向、裂缝深度与结构承力性进行分类,据此对结构裂缝、非结构裂缝、渗透裂缝设计不同的裂缝处理方案。对于裂缝较大的外露裂缝或浅层裂缝,在裂缝表面可采用高性能环氧树脂胶或强度较高并有一定刚度的高标号水泥砂浆进行裂缝填充,施工控制及质量保证应控制注浆压力、浆液黏稠度、注入时间,使浆液在裂缝中流动均匀,浆液凝结固化后对裂缝实现充填;当裂缝长度较大,或结构承受较大应力,在沿裂缝方向将钢丝或钢束插入裂缝内,或在裂缝表面铺设碳纤维布等进行裂缝的增强,通过合理控制施工应力,对裂缝进行加固后,裂缝内部应力状态趋于合理;进行大坝表面和结构裂缝治理时,

在选择合适的治理措施时要考虑施工次序及施工作业区的控制,依据裂缝的特征选择不同注浆和加固的先后次序进行,避免施工过程中产生应力的集中,使裂缝产生二次损害或拉坏下游岩基等。针对不同治理及施工工艺应控制注浆或灌浆的压力、体积以及进行裂缝外观、压浆情况的跟踪并采用回弹、超声波探伤、红外热检测及温度测量方法进行验收。

(二) 渗漏控制与防渗材料选择与应用

解决渗漏应采用材料及施工方式与长时期渗漏观测三位一体的成套方案,渗漏控制材料除综合考虑防渗有效、施工匹配、耐久性和经济性外,核心材料主要包括高流动性环氧树脂、微膨胀水泥浆、膨润土复合材料及高性能土工膜,在坝体上形成各部位的分层或复合防渗体系。其中,在施工应用上以精确掌握渗漏通道条件为前提,采用针对性的高压注浆、补浆、复盖加厚及复合防渗结构施工技术,封堵渗水路径^[3]。如图1所示。

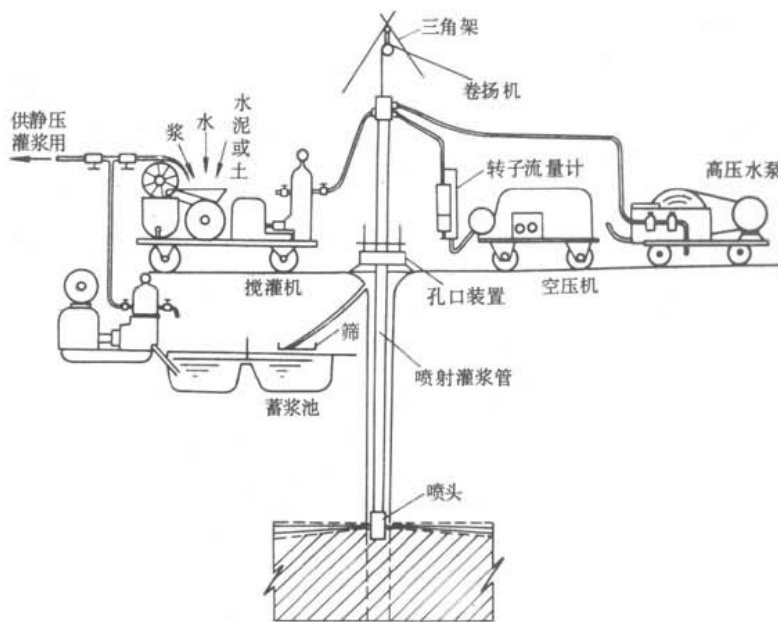


图1 高压注浆施工示意图

在注浆过程中,对每个地段段落要采取间歇、分区、分阶段控制注浆压力和注浆量,依据浆液稠度和凝固时间进行注浆,确保达到浆液渗透孔道充填均匀一致,避免出现浆液在注浆过程中聚集在某部分结构产生应力集中,或浆液从周围结构向外挤出。对于坝基和薄弱部位要采用低渗透混凝土帷幕或深层搅拌桩或高压注浆墙等方式进行强基固基,提高坝基抗压能力并控制坝基内部的渗压,最终完成整体坝基防渗。如图2所示。

从材料应用上考虑,要从材料施工时的性能检测、材料长期使用过程中的检测(渗透率检测、抗压强度检测、材料长期稳定性试验)来保证其抗渗性能长期有效,并在施工中采取渗压监测孔、测水位数据分析这一动态维护管理体系进行实时有效的渗透状态的掌控和今后的维护加固措施优化;而长期运维时要注重定期维护、材料

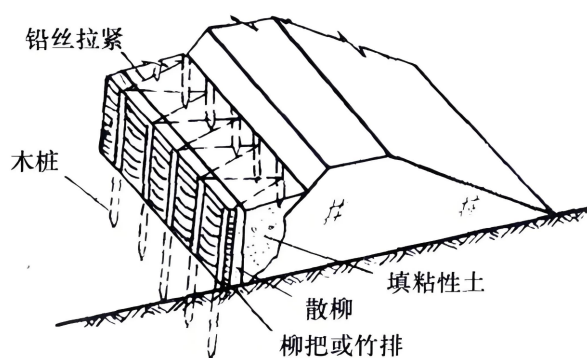


图2 深层搅拌桩加固示意图

更换以及监测数据分析的定期运维体系构建,实现对坝体渗漏路线的有效截断以及坝体整体防渗性能优化升级,同时便于后期对坝体的维护及开展工作^[4]。

（三）堤坝稳定性提升的结构加固措施

对大坝坝体稳定性提升的技术措施，应坚持大坝整体能力提升、局部薄弱环节的加固及大坝长期稳定性的动态管理，将大坝的施工技术措施、大坝工程材料、大坝结构监测管理及大坝结构维修结合起来。坝体加固主控技术措施是针对坝体薄弱部位的局部加厚、大坝混凝土性能提升技术及钢纤维复合加固技术，并通过坝体局部受力优化而实现大坝整体承载能力的提升。对于坝肩、坝顶结构的加固，可采取土石方的支撑及土体加筋和支护墙结构的施工而提高坝体结构的整体侧向约束及抗滑能力。对于坝基承压的提升则可采取低渗混凝土的帷幕、深层搅拌桩及高压注浆墙等施工而通过大坝坝基结构整体受力优化及分层分区的施工、避免大坝坝基结构受力出现应力集中及裂缝而改变坝基结构内部的应力和渗压分布而实现大坝的整体稳定性提升。在大坝结构加固技术措施的施用上必须根据有限元分析及数值模拟优化加固施工技术措施、规避大坝结构施用受力、应力等参数的不合理性及造成坝体结构的局部结构应力超限及受力集中等安全事件发生。

（四）定期巡检监测与异常处理操作规程

为了综合防控枢纽大坝安全风险，在构建完善的检测巡查制度的基础上，应通过运行分析、周期性比对等手段分析事故易发区与普发区。对大坝大周期监测的检查频率进行高、普区分级和分标准（频次），高风险区可采用1d或几次的检查频次，实现人机协同检查；并应用高精度检测设备检查、大周期精细无人机的检测、激光探测及测量等方式来进行监测数据提取，每次检查作业需指明人员、明确工作，并将“检查—监测数据提取—数据分析—处理反馈”四位一体及时优化，避免信息滞后、权责划分不清的问题；监测方案要注重细节，包括基础量测、关键性控制参数监测如结构变位/沉降、渗流压力、裂缝开度、渗流量等应通过高精度仪器实施连续性监测，还应使用无人机遥感、激光遥感等在较短时间内快速检查水坝等目标物体的外饰面，即定期获取普发区图像和激光数据，再应用多种量化指标，如时间序列监控、分级阈值、异常监测等对危险征兆指标提前作出判断。应根据风险程度分为高低三个阈值，阈值以小到一般、由小变大为分级原则，一级阈值：要求立即现场复核、加密检查，二级阈值：要求召开专家会议形成预案并进行决策，三级阈值：要求立即启动应急处置^[5]。突发异常处置方案应涵盖各种异常的技术研判、处置方案及责任人。对于裂缝发展、渗量增大、坝基沉降等突发异常，应及时做出快速评估，由现场复核和数据分析确定风险级别，在此基础上采取切实可行的应急应对方案，如坝体注浆、应急引排或支护结构等临时稳定措施，并结合下游防洪调度措施降低可能的风险，在后续中长期采用技术方案设计、施工工艺及效果评估，并输出文本固化形成规范性成果。

（五）洪水应急处置与风险防控综合方案

要将洪水风险的防控及紧急应急处置形成完整的从

风险识别到风险应对的链条，形成数据采集—数据技术分析—响应落实的业务链，形成“数据—技术—工程”的关系。预警层是根据降雨量、径流量及水利工程量预测和估算出可能发生的洪水流量大小、泄洪量及流域范围等信息，并建立多种数据源融合的洪水模型，形成洪水未来发生水位、洪量、洪水过程及影响范围模拟成果，对应不同洪水规模绘制洪水淹没区域的风险等级和相关响应的预防性下泄流量、临时抢险加固方案、人员撤退、转移等预案的分级预案。预警层数据要与其他层相衔接，实现防汛过程中大坝内部资料的互联互通，以大坝内部资料的异常状态结合防汛预警后自动响应高级别预案的转序。响应层是根据需求组建各相关的职能部门、专业人员，形成跨部门、跨专业的应急指挥联动机制。负责组织指挥防洪、气象、交通运输、抢险救援等相关部门人员，制定各自的职责及任务并落实责任。在技术层面上，应在建设计划期间配备移动式闸门、移动式坝体抢险料具、水泵等，备用抢险作业吸水设备，确保洪水发生时迅速到位，对于不同坝型和坝体类别选择的抢险措施，在效果、作用时效、运用先后时间安排上可多种组合并用，如混凝土裂缝临时注浆封堵或水泥砂浆、土坝坝肩保护封堵、临时泄洪、导流措施及部位调整、应急措施等风险防控的部位及风险缓解对策^[6]。

结语

针对已有大坝的安全保障，单纯的除险加固往往无法满足复杂结构和环境挑战，从安全栓塞裂缝、防水漏封堵、整体结构加固、常态监测管控到洪水安全管理是完善的安全保障闭环，技术创新应以工程实践为基础，并针对材料、坝体、水文环境，科学设计、施工、管理，及时对隐患进行预警，应急管控，风险管控一体化，使风险管控更加科学有效，老旧大坝的安全保障不仅要靠加固技术，更要靠科学管理和大数据支撑，在这个过程中，使水利设施基础设施得以可持续发展，为社会经济发展奠定牢固的水利基础。

参考文献

- [1] 马浩然. 水利工程大坝的安全监测技术分析[J]. 水上安全, 2024(22): 40-42.
- [2] 李雪帆. 水利工程大坝加固施工技术研究[J]. 现代工程技术, 2024, 3(17): 25-28.
- [3] 陈希. 水利工程大坝结构设计的关键分析[J]. 水上安全, 2024(18): 62-64.
- [4] 宋国锋, 李海波, 宁继勇. 水利工程大坝基础处理施工技术分析[J]. 水上安全, 2025(2): 55-57.
- [5] 张生武. 水利工程大坝施工中碾压混凝土施工技术[J]. 水上安全, 2024(4): 169-171.
- [6] 郝来丽. 水利工程大坝施工中碾压混凝土施工技术分析[J]. 建筑与装饰, 2024(13): 154-156.

作者简介：王虎，1986年12月2日，男，汉，甘肃天水，本科，中级工程师，研究方向：水利水电工程方向。