

水库除险加固工程坝体加固设计方案研究

徐阿通

阿勒泰水利水电勘测设计研究院有限公司 新疆 阿勒泰 836500

摘 要：水库坝体受地质、水文、设计施工及运行管理等因素影响，易出现裂缝、渗漏、滑坡等病害，威胁工程安全。本文深入剖析坝体病害类型与成因，阐述加固设计需遵循安全、经济、耐久等原则，介绍传统与新型加固技术。结合工程实例，通过病害诊断、方案比选与参数优化，提出“灌浆加固+排水系统修复+坝坡防护”综合方案。经实施验证，该方案有效提升坝体安全性，兼具显著经济与社会效益。

关键词：水库除险加固工程；坝体加固；设计方案

引言：水库作为重要的水利工程设施，在防洪、灌溉、供水等方面发挥着不可替代的作用。然而，随着运行年限的增长，许多水库坝体受地质条件、水文环境、设计施工缺陷以及运行管理不当等因素影响，出现了裂缝、渗漏、滑坡、不均匀沉降等病害，严重威胁水库的安全运行和下游人民生命财产安全。因此，开展水库除险加固工程坝体加固设计方案研究，采取科学有效的加固措施消除坝体隐患，提高水库的可靠性和稳定性，具有重要的现实意义。

1 水库坝体病害类型与成因分析

1.1 常见坝体病害类型

水库坝体作为水利工程的核心构筑物，长期受各类因素影响易产生多种病害，其中最常见的类型包括裂缝、渗漏、滑坡、不均匀沉降等。裂缝多出现于坝顶、坝坡及坝基部位，易导致坝体结构强度下降；渗漏会造成坝体含水量异常，加速内部侵蚀；滑坡主要发生在坝坡，严重时会引起坝体坍塌；不均匀沉降则会导致坝体开裂、错位，影响整体稳定性。

1.2 病害成因分析

（1）地质条件。地质条件是坝体病害产生的先天因素，也是核心诱因之一。部分水库坝基存在软弱夹层、风化岩层等不良地质体，这类地质结构承载力低、抗剪强度不足，无法稳定支撑坝体重量，易导致坝体不均匀沉降和滑坡；同时，地基分布不均匀，会使坝体受力失衡，局部应力集中，进而引发裂缝等病害，这类先天缺陷难以通过后后期修复完全弥补。（2）水文因素。水文环境的长期作用是坝体病害发展的重要推手。水库水位频繁涨落，会使坝体受到反复的干湿交替和冻融循环，导致坝体材料老化、开裂；此外，地下水渗透和库水渗漏会产生渗透压力，破坏坝体内部结构，加剧渗漏病害，若渗透压力过大，还会冲刷坝基土壤，诱发坝体滑坡。

（3）设计施工缺陷。设计与施工的不合理的是坝体病害产生的人为因素。设计阶段若未充分勘察地质水文条件，导致坝体结构设计不合理、材料强度选型不足，或排水系统设计缺陷，会为后期病害埋下隐患；施工过程中，若施工工艺不规范、材料质量不达标，或排水系统施工失误导致失效，会直接引发坝体裂缝、渗漏等病害^[1]。（4）运行管理问题。后期运行管理不当会加速坝体病害的发生和发展。部分水库存在超蓄运行现象，超出坝体设计承载能力，导致坝体受力过大；同时，日常维护保养不到位，未及时排查坝体微小裂缝、渗漏等隐患，也未对排水系统、坝坡等部位进行定期检修，使得小隐患逐渐发展为重大病害，影响坝体安全。

2 水库除险加固工程坝体加固设计原则与方法

2.1 加固设计基本原则

（1）安全性、经济性、耐久性、可操作性。安全性是首要原则，加固设计需优先解决坝体安全隐患，确保加固后坝体能够抵御各类不利因素，满足安全运行标准；经济性要求在保证加固质量的前提下，优化设计方案，控制工程投资，避免不必要的浪费；耐久性需考虑坝体长期运行环境，选用耐腐蚀、抗老化的材料和工艺，延长坝体使用寿命；可操作性要求设计方案贴合现场施工条件，施工工艺简便易行，便于组织实施。（2）生态环保与施工可行性。生态环保原则要求加固工程尽量减少对周边生态环境的破坏，避免施工过程中产生的废水、废渣污染水体和土壤；施工可行性需结合现场地质、水文、交通等条件，合理规划施工流程，避开不利施工时段，确保施工过程安全、高效，兼顾施工进度与工程质量。

2.2 传统加固技术分析

（1）灌浆加固。分为化学灌浆和水泥灌浆，主要用于处理坝体裂缝、坝基渗漏及软弱夹层等病害，通过将

灌浆材料注入坝体或坝基缝隙,凝固后形成整体结构,提升坝体整体性和抗渗性。(2)混凝土防渗墙。适用于坝基及坝体渗漏严重的情况,通过在坝基或坝体浇筑连续的混凝土墙体,阻断渗水通道,增强坝体抗渗能力,保障坝体稳定。(3)预应力锚固技术。通过在坝体或坝基植入预应力锚杆、锚索,施加预拉力,抵消坝体内部应力,减少坝体变形和裂缝发展,提升坝体承载能力。(4)土工合成材料加固。常用土工格栅、防渗膜等材料,土工格栅用于增强坝体土体整体性,防止坝坡滑动;防渗膜用于阻断渗漏,适用于中小型水库坝体防渗处理,具有施工简便、成本较低的优势。(5)坝体加高或培厚。针对坝体高度不足、断面尺寸不达标的情况,通过加高坝顶、培厚坝坡,提升坝体防洪能力和承载能力,适配水库运行需求^[2]。

2.3 新型加固技术探讨

(1)纳米材料改性技术。通过在加固材料中添加纳米颗粒,改善材料力学性能和抗腐蚀、抗老化能力,提升加固层与坝体的结合度,增强加固效果,延长坝体耐久性。(2)智能监测与自修复材料。结合智能监测设备,实时监测坝体变形、裂缝等病害发展情况;同时采用自修复材料,当坝体出现微小裂缝时,材料可自动愈合,减少病害进一步发展,降低维护成本。(3)生态型加固技术。如植被护坡,在坝坡种植适宜的草本、灌木植物,利用植物根系固定坝坡土体,同时美化环境、减少水土流失,兼顾加固效果与生态环保,适用于生态敏感区域的坝体加固。

3 水库除险加固工程坝体加固设计方案优化研究

3.1 加固方案选择依据

(1)病害类型与严重程度。这是方案选择的核心前提,不同病害类型、严重程度对应的加固技术与方案差异显著。针对轻微裂缝病害,可优先选择灌浆加固等简易方案;若裂缝贯穿坝体、渗漏严重,需结合防渗墙技术制定综合加固方案;对于滑坡、不均匀沉降等结构性病害,需重点考虑增强坝体整体性和稳定性的方案,避免方案针对性不足导致加固失效。同时,需通过详细勘察明确病害发展阶段,对处于发展期的病害,方案需兼顾应急处置与长期加固,确保及时遏制病害恶化。(2)地质条件与水文环境。地质与水文条件直接决定加固技术的适用性和方案的可行性。地质方面,若坝基存在软弱夹层、风化岩层,需优先考虑能改善坝基承载力的加固方案,如灌浆加固、预应力锚固技术;若地基不均匀,需结合沉降控制措施优化方案。水文方面,水位波动频繁、渗透压力较大的水库,需重点强化防渗设计,

优先选择混凝土防渗墙、土工合成材料防渗等方案;降水量大、水土流失严重的区域,需兼顾护坡与加固,提升方案的适应性^[3]。(3)工程经济性。在保证加固效果和坝体安全的前提下,经济性是方案优化的重要考量因素。需对比不同加固方案的前期投资、施工成本、后期维护费用,避免过度设计导致成本浪费。对于中小型水库,可优先选择工艺简便、成本较低的传统加固技术;对于大型水库或重点防护工程,可在保障安全的基础上,合理选用新型技术,平衡短期成本与长期耐久性,实现工程效益最大化。

3.2 多方案比选方法

(1)层次分析法(AHP)。该方法通过将加固方案比选的复杂问题分解为目标层、准则层、方案层,明确各层次指标的权重,通过两两对比判断矩阵,量化各方案的综合得分,进而筛选出最优方案。其核心优势的是能将定性指标与定量指标结合,适用于多因素、多目标的方案比选,可有效解决加固方案中安全、经济、生态等多维度考量的矛盾问题。(2)模糊综合评价法。针对加固方案比选中部分指标(如施工可行性、生态影响)难以量化的问题,该方法通过建立模糊评价矩阵,对各方案的各项指标进行模糊打分,结合权重计算综合评价结果,实现对方案的全面评估。该方法灵活性强,能充分考虑评价过程中的不确定性,更贴合工程实际中的复杂场景,提升方案比选的合理性。(3)数值模拟对比分析。借助专业工程模拟软件,采用有限元法等数值模拟技术,对不同加固方案下坝体的应力分布、变形情况、抗渗性能等进行模拟计算,直观对比各方案的加固效果。通过模拟不同工况(如暴雨、水位骤升骤降)下坝体的运行状态,可提前预判方案的适用性和安全性,为方案优化提供精准的量化依据,避免方案实施后出现加固效果不达标的问题^[4]。

3.3 关键参数优化设计

(1)灌浆压力与孔距。灌浆压力需结合坝体材料强度、裂缝宽度及地质条件综合优化确定,若压力过小,将导致灌浆材料无法充分填充裂缝。缝隙,加固效果不佳;压力过大则可能造成坝体二次开裂。孔距优化需结合灌浆压力、灌浆材料扩散半径,兼顾加固均匀性与施工效率,避免孔距过大导致加固存在盲区,或孔距过小增加施工成本,通常需通过现场灌浆试验确定最优参数组合。(2)防渗墙深度与厚度。防渗墙深度需穿透透水层,延伸至不透水岩层一定深度,确保阻断所有渗水通道,其深度需结合地质勘察结果优化,避免深度不足导致防渗失效,或过度加深增加施工难度和成本。厚度设

计需根据渗透压力、墙体材料强度优化,兼顾抗渗性与结构稳定性,通常结合数值模拟计算,确定既能抵御渗透压力,又经济合理的最优厚度^[5]。(3)锚固力与布置间距。锚固力需根据坝体受力情况、地质条件优化,确保能有效抵消坝体内部应力,控制坝体变形,锚固力不足会影响加固效果,过大则会造成材料浪费。布置间距需结合锚固力、坝体结构特点,均匀布置锚杆、锚索,避免间距过大导致应力集中,或间距过小增加施工工作量,需通过力学计算和现场试验,优化确定最优布置参数。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

(1)水库基本情况。该水库位于准噶尔盆地北缘,总库容1107万m³,属III等中型水库,主要功能为农业灌溉、兼顾城乡供水,于1994年建成投入运行,至今已运行32年,远超设计运行年限,工程老化问题突出。

(2)坝体结构与病害现状。坝体为均质土坝,坝顶高程554m,最大坝高8m,坝顶宽5m,坝顶轴线长1582m。经安全鉴定,坝体存在多处典型病害:坝顶高程不满足要求;坝面混凝土板多处断裂、错台,面板填缝设施老化;坝后排水设施淤堵失效,坝脚沼泽化明显,存在渗透变形风险;属三类病险水库,需及时加固处理。

4.2 加固方案设计

(1)方案选择与参数设计。结合病害现状、当地地质水文条件及经济性,选用“坝体加高培厚+排水系统修复+坝坡防护”综合方案。参数设计:采用拆除上游坝面混凝土板,培厚坝体,增设土工膜防渗体,上游设阻滑墙至坝基泥岩相对隔水层,规整坝坡至1:3;坝体下游清除坝坡表层后培厚坝体,增设预制混凝土网格;重建坝后排水棱体,布设排水盲沟,间距3m。(2)施工工艺与流程。结合西北地区气候特点,避开灌溉期和冬季严寒时段,施工流程为:施工准备→病害勘察复核→坝体拆除清废→上游坝坡培厚与防水设施重建→排水系统重建→下游坝坡修整与防护→施工质量检测。

4.3 实施效果评价

(1)安全性监测数据。加固完成后,连续6个月监测显示:坝体渗流量从加固前的18.2L/min降至2.1L/min,渗透压力降至0.12MPa,符合安全控制标准;坝体最大沉降量3mm,坝体整体稳定性显著提升,有效遏制了渗透破坏风险。(2)经济效益与社会效益分析。经济效益方面,加固工程总投资2300万元,相比重建水库节省投资60%以上,恢复灌溉面积10万亩,保障2.3万乡村人口安全供水,每年减少因病害维修及渗漏造成的损失约120万元。社会效益方面,消除了水库安全隐患,保障下游1.8万群众生命财产安全,改善区域灌溉条件,促进农业稳产增收,同时修复工程周边生态,实现加固与生态保护双赢。

结束语

水库除险加固工程中坝体加固设计是保障水库安全运行的关键环节。通过对坝体病害的深入剖析,明确成因并针对性地选择加固技术与方案,结合科学合理的参数优化,能够有效提升坝体稳定性与安全性。本文所提出的综合加固设计方案,经工程实例验证切实可行,不仅成功消除坝体隐患,还带来了显著的经济与社会效益。未来,随着技术发展,需持续探索创新加固方法,完善设计理论,为水库长久安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]刘伟忠.石陂水库除险加固工程设计方案分析[J].水利技术监督,2024,(02):229-232.
- [2]李杰.土石坝除险加固防渗方案对比分析与决策优选[J].水利科学与寒区工程,2022,5(07):106-110.
- [3]白阳.水库除险加固工程坝体加固设计方案研究[J].东北水利水电,2025,43(11):53-56.
- [4]李昕洁,姬浩翔,李金妹.浅谈小型水库大坝除险加固技术和防渗处理措施[J].中国设备工程,2025,(21):220-223.
- [5]张永堤.跃进水库除险加固技术方案的设计与应用[J].黑龙江水利科技,2025,53(11):128-132.