

水利工程中小型水库除险加固设计研究

童卫国 孙少秋

广东中灏勘察设计咨询有限公司云南分公司 云南 蒙自 661100

摘要:我国多数中小型水库修建年限久远,建设标准偏低、施工工艺简陋,长期服役后受自然侵蚀、管护缺失影响,坝体渗漏、结构开裂、配套设施老化等病险问题突出,存在极大安全隐患。本文剖析水库病害类型与成因,依托现行水利规范,制定坝体、防渗体系及附属建筑专项加固方案,开展安全校核与综合效益分析,优化施工工艺与长效运维机制,可为国内同类中小型水库除险加固工程提供参考借鉴。

关键词:水利工程;中小型水库;除险加固设计

引言:中小型水库是区域防洪、农业灌溉、村镇供水的核心水利基础设施,上世纪五六十年代修建水库占比极高,多数超设计年限运行,普遍存在渗流、结构开裂、泄洪能力不足等病险问题,制约水利功能发挥,威胁下游群众生命财产安全。当下基层水库加固存在设计粗放、工艺老旧、重施工轻运维等问题。基于此,本文剖析水库病害诱因,优化加固设计方案,完善施工管控与后期运维策略,助力中小型水库安全长效运行,契合水利工程提质改造建设需求。

1 水利工程中小型水库病险成因及病害类型分析

1.1 中小型水库工程基础概况

(1)中小型水库界定标准与工程结构组成:根据中国现行水利规范,库容在100万~1000万 m^3 为中型水库,10万~100万 m^3 为小(1)型,1万~10万 m^3 为小(2)型。工程结构主要由挡水坝体、泄洪设施(溢洪道)、输水涵管及放水启闭设备组成,部分配设简易监测系统。(2)老旧水库建设标准与施工工艺短板:我国大量中小型水库建于20世纪50—70年代,受限于当时技术条件,设计洪水标准偏低(部分仅按20~50年一遇),施工以群众会战为主,坝体碾压不密实,料源混杂,缺乏规范的质量检测,遗留先天性缺陷。(3)水库长期服役运行工况特征:多数水库已运行40年以上,远超原设计使用年限。长期承受水位波动、冻融循环及渗流作用,坝体材料性能衰减,加之早期设计荷载与实际工况偏差,结构性老化与疲劳问题突出。

1.2 水库主要病险病害分类

(1)坝体结构病害:坝体渗漏最为常见,表现为坝后渗水、管涌或流土;滑坡多发生于上下游坝坡,受浸润线抬升或水位骤降诱发;沉降开裂则因坝体不均匀变形产生纵向或横向裂缝,严重时贯穿坝身。(2)坝基与坝肩防渗体系破损病害:主要体现为坝基接触面渗

漏、绕坝渗流及岩溶通道渗水,导致扬压力异常升高,影响坝体整体抗滑稳定性。(3)溢洪道、输水涵管附属建筑物破损病害:溢洪道常见边墙倾斜、底板冲刷磨损、消能设施毁坏;输水涵管则出现管身断裂、接头止水失效、闸阀锈蚀等,严重时制约泄洪与供水功能。(4)监测、启闭配套设施老化失效问题:水位、位移、渗流等监测设施多已损坏或精度不足;启闭机、闸门等金属结构锈蚀、动力系统老化,操作可靠性大幅下降^[1]。

1.3 水库病险核心诱发成因

(1)自然因素:长期水文侵蚀造成坝面淘刷、护坡损坏;风化作用使岩体及混凝土强度衰减;极端降雨引发超标洪水,导致漫顶、冲刷溃坝风险显著增加。(2)人为因素:早期设计存在水文计算偏小、坝体断面不足、无防渗设施等缺陷;施工中碾压不实、清基不彻底、材料控制不严等问题普遍存在,成为病险根本源头。(3)运维因素:日常管护缺失表现为巡查流于形式、小修小补不及时;运维体系不完善则体现在资金投入不足、专业技术人员匮乏、应急预案可操作性差,致使病害持续发展而未能有效遏制。

2 水利工程中小型水库除险加固总体设计与专项方案设计

2.1 除险加固设计基本原则与设计依据

(1)安全性、经济性、生态协同设计原则:以消除病险、恢复工程安全为首要目标,确保大坝抗滑、抗渗及结构稳定满足现行规范;在保障安全的前提下,优先采用成熟工艺与当地材料,降低建设与维护成本;施工中减少库区扰动,保护植被与水质,实现工程安全、投资节约与生态保护的协同。(2)水利水库加固行业规范、水文勘测设计依据:严格执行《小型病险水库除险加固项目管理办法》、《碾压式土石坝设计规范》(SL274)等现行规程;依据最新水文复核成果(设计洪

水、校核洪水及调洪演算),结合地质勘察报告(坝体密实度、渗透系数、软弱层分布)及原工程设计资料,科学确定加固技术参数与洪水标准。(3)水库原有功能保留与优化设计要求:加固后不得降低防洪、灌溉、供水等原有效益,有条件时通过溢洪道改造或增设非常溢洪道提升调蓄能力;同步优化输放水设施布置,预留自动化监测接口,实现功能保障与安全管理水平双提升。

2.2 大坝主体结构除险加固设计

(1)坝体防渗注浆加固工艺设计:针对土石坝散浸或集中渗漏区,采用劈裂或充填灌浆工艺,孔距1.5~2.5m,梅花形布置,孔深进入相对不透水层不少于1m;浆液选用水泥黏土浆(水泥:黏土=1:2~1:3)或纯水泥浆,灌浆压力0.1~0.3MPa,封孔后注水试验渗透系数小于 $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ^[2]。(2)坝坡修整、抗滑锚固加固方案设计:对塌陷、鼓胀或坡比不足的坝坡进行削坡培厚,坡比放缓至1:2.5~1:3.0;在潜在滑动面布设土工格栅或钢筋锚杆(直径25~32mm,锚固深度进入稳定层 $\geq 3\text{m}$,间排距2.0m $\times$ 2.0m);坡面增设干砌石或混凝土框格护坡并植草,配套排水沟,提高抗滑稳定性。

(3)坝体沉降、裂缝修补专项设计:横向贯穿裂缝采用开挖回填法,槽深宽比不小于1:2,分层回填黏性土夯实,压实度 ≥ 0.96 ;纵向裂缝及不均匀沉降区采用充填式黏土水泥浆灌注,压力0.05~0.15MPa;变形缝处设置沥青麻丝或橡胶止水带,表面铺设复合土工膜加强防渗。

2.3 防渗系统专项加固设计

(1)坝基帷幕防渗加固设计:沿坝轴线布设单排或双排帷幕灌浆孔,孔距2.0~3.0m,排距1.5~2.0m,灌浆孔深入相对不透水层以下3~5m,孔底段透水率 $\leq 5\text{Lu}$;采用循环式灌浆,水泥浆为主(必要时掺水玻璃),灌浆压力0.5~1.0MPa,完工后打检查孔进行压水试验验证。(2)坝肩绕渗封堵、截水结构优化设计:在坝肩与岸坡接触带开挖截水槽,槽底嵌入弱风化岩层0.5m以上,回填黏土或现浇C20混凝土截水墙,墙厚0.5~1.0m;对岩溶或裂隙发育区,将帷幕线向坝肩延长20~30m;坝肩下游增设贴坡排水体或排水孔,及时导排渗水、降低扬压力。(3)复合防渗材料选型与施工参数设计:选用两布一膜复合土工膜(膜厚0.5~1.0mm,单位面积质量 $\geq 500\text{g/m}^2$,断裂强度 $\geq 10\text{kN/m}$),铺设前清基找平,压实度 ≥ 0.93 ;膜间搭接 $\geq 10\text{cm}$,热熔焊接或专用胶粘接,强度不低于母材;膜上覆保护层厚度30~50cm,分层压实,防止穿刺与老化破坏^[3]。

2.4 附属建筑物加固与设施更新设计

(1)溢洪道:拆除破损底板及边墙,重浇C25/C30钢

筋混凝土衬砌(厚30~40cm,配 $\Phi 12@200$ 双层双向筋)。水力复核后通过扩宽或降低底板提高过流能力,设计洪水下安全超高 $\geq 0.3\text{m}$ 。出口设消力池(池长 ≥ 4 倍跃后水深)或挑流鼻坎。(2)输水涵管:严重破损处采用顶管或开挖置换为钢管(壁厚8~10mm,防腐)或预应力钢筋混凝土管;局部渗漏处内衬不锈钢板(3~5mm)或玻璃钢管,接缝设遇水膨胀止水条。废弃涵管全管封堵:先注M10砂浆,两端浇筑混凝土堵头(厚 $\geq 1.0\text{m}$)。

(3)监测与运维设施:增设坝体表面位移观测桩(间距30~50m)、渗压计(最大断面及坝肩)及库水位自计仪,数据接入远程平台。更换锈蚀启闭机与闸门,采用手电两用螺杆/卷扬式启闭机,配备用电源(柴油发电机或太阳能)。完善视频监控及水位预警广播,实现运维信息化与应急智能化。

3 水利工程中小型水库除险加固设计效益分析与工程优化对策

3.1 工程安全性校核分析

(1)加固后大坝抗渗、抗滑稳定性验算:依据复核后的水文地质参数,采用有限元或极限平衡法计算坝体浸润线位置与渗流坡降,加固后坝体渗透坡降应小于允许值(土石坝一般为0.2~0.4);抗滑稳定性采用瑞典圆弧法或毕肖普法验算,正常工况下安全系数不小于1.25,校核工况不小于1.15,确保加固后满足现行规范要求。

(2)极端水文工况下水库运行安全校核:按PMF或校核洪水标准(重现期500~2000年)进行调洪演算,复核溢洪道最大泄流量与坝顶超高,加固后坝顶安全超高应大于0.5m(土石坝)或0.3m(混凝土坝);同时验算极端暴雨下坝坡冲刷稳定性及库水位骤降时的上游坝坡稳定性^[4]。(3)结构加固质量达标性验证:通过施工期现场检测与竣工后验收试验,验证注浆后钻孔取芯率及抗压强度、帷幕灌浆压水试验透水率($\leq 5\text{Lu}$)、土工膜焊接强度及完整性;对锚杆进行拉拔试验,抗拔力不小于设计值的1.1倍;位移监测数据须连续稳定,验证加固效果达到设计预期。

3.2 综合效益评价分析

(1)防洪减灾、供水灌溉社会效益:加固后水库可恢复或提升防洪标准,保护下游村镇及农田免受洪水威胁,年均减少洪灾损失显著;同时保障下游灌溉用水与乡镇供水安全,提高灌溉保证率(一般由不足50%提升至75%以上),促进农业生产与农村稳定。(2)工程造价、运维成本经济效益分析:相比新建水库,除险加固工程投资仅为新建的20%~40%,单位库容投资低;加固后延长水库使用寿命15~30年,年均折旧费用大幅

降低;后期运维成本因设施更新而减少,启闭机能耗下降,漏水损失减少,投资回收期通常为5~8年。(3)库区水土保持、水生态环境生态效益:坝坡护砌与植被恢复减少库周水土流失量,拦沙效果显著;复合防渗材料减少渗漏,维持库水位稳定,改善湿地生境;施工期采取围堰导流与沉淀池等措施,避免浑浊水下泄,加固后库区水质保持或优于Ⅲ类标准,促进水生态系统良性循环。

3.3 加固设计优化方案与施工管控要点

(1)传统加固设计方案短板优化改进:传统方案中灌浆孔布设均匀但未区分渗流强弱区,优化为基于地质雷达探测结果分区布孔,强渗区加密至1.0~1.5m;坝坡护砌由全断面混凝土优化为“混凝土框格+生态植草”,减少硬化面积20%~30%,兼顾排水与景观。(2)中小型水库低成本轻量化加固设计优化:推广高聚物注浆技术(聚氨酯材料),注浆速度快、微扰动,单孔造价较水泥灌浆降低15%~20%;坝体裂缝修补采用自粘型复合土工膜带,无需大型机械;涵管加固内衬HDPE管(壁厚6~8mm),现场热熔焊接,施工周期缩短30%以上^[5]。(3)现场施工质量、工期风险管控要点:严格按试验段确定灌浆压力与浆液配比,实行“一孔一记录”;土工膜铺设避开雨天,焊接后逐条进行充气或真空检测;建立工期动态控制网络图,将溢洪道衬砌、涵管置换等关键路径工期压缩10%~15%,同时储备抽排水与应急支护设备,防范汛期施工风险。

3.4 病险水库后期长效运维管控策略

(1)水库常态化安全监测体系搭建:布置一体化智能监测终端(含渗压、位移、水位、雨量),数据每4小时自动采集并无线传输至县级监管平台;设置变形预警阈值(累计位移 $\geq 30\text{mm}$ 或日变幅 $\geq 3\text{mm}$ 自动报警),实现“感知—传输—预警”闭环管理。(2)分区管护、定期检修运维制度完善:将水库划分为大坝主体、泄洪

设施、放水设施、监测设施四个管护区,明确责任人及巡查频次(汛期每日1次、非汛期每周1次);制定年度检修计划,汛前完成启闭机试运行、溢洪道清理、涵管探伤检查,建立“一库一档”电子台账。(3)中小型水库风险预警机制构建:整合气象预报与库水位实时数据,建立水位—降雨量联合预警模型,划分蓝、黄、橙、红四级响应;当预报降雨达到50mm/24h或库水位超汛限0.5m时,自动向乡镇、水利站及巡查员发送预警短信;每两年组织一次应急演练,提升基层预警响应能力,将病险水库安全风险降至最低。

结束语

本文完成中小型水库病险诱因梳理、加固方案设计、效益核验及工艺优化全套研究,验证了帷幕灌浆、生态护坡、智能监测配套方案的实用性。加固改造后水库结构稳定性、防洪标准全部达标,兼顾经济、社会与生态效益,破解传统加固短板。后续工程需结合库区地质水文条件因地制宜施工,严控施工质量,落实智能监测与常态化管护,全面提升病险水库治理质量与运维管控水平。

参考文献

- [1]王泽宇.老旧小型水库溢洪道改造与枢纽整体除险加固设计[J].水电能源科学,2024,42(5):127-130.
- [2]周健.中小型水库除险加固工程结构设计要点与安全复核分析[J].水利规划与设计,2024,14(2):112-115.
- [3]陈亮.丘陵地区小型水库大坝滑坡治理及除险加固设计研究[J].农村水利水电,2023,7(11):87-90.
- [4]张磊.中小型水库除险加固初步设计难点及优化措施[J].水利科技与经济,2023,29(7):78-81.
- [5]廖照邦,吴德新.中小型水库泄洪建筑物除险加固改造设计[J].云南水力发电,2022,38(2):104-107.