

水库大坝安全评估与风险控制技术研究

潘永阳

浙江富江建设集团有限公司 浙江 温州 325000

摘要: 水库大坝作为重要的水利基础设施,在防洪、灌溉、发电、供水等方面发挥着关键作用。然而,随着水库大坝运行年限的增加以及各种自然和人为因素的影响,其安全问题日益凸显。本文阐述了安全评估的方法,并提出了针对性的风险控制技术和策略,旨在为保障水库大坝的安全运行提供理论支持和实践指导。

关键词: 水库大坝;安全评估;风险控制技术

1 引言

水库大坝是水利工程建设的重要组成部分,对于保障国家水资源安全、促进经济社会发展具有重要意义。我国拥有大量的水库大坝,其中许多大坝建于上世纪五六十年代,经过多年的运行,部分大坝出现了不同程度的老化、损坏等问题,安全隐患逐渐增加。一旦水库大坝发生安全事故,不仅会造成巨大的经济损失,还会威胁到下游人民群众的生命安全。因此,加强水库大坝安全评估与风险控制技术研究,提高水库大坝的安全管理水平,是当前水利工作面临的重要任务。

2 水库大坝安全评估方法

2.1 现场检查与检测

2.1.1 外观检查

外观检查是水库大坝安全评估的基础,能及时发现问题,检查范围包括坝体、坝基等关键部位。混凝土坝外观检查重点看裂缝,分为表面(宽 $< 0.2\text{mm}$)、深层(宽 $0.2\text{--}1\text{mm}$)和贯穿裂缝(宽 $> 1\text{mm}$,贯穿断面),严重威胁结构完整性。土石坝需留意滑坡(规模从几十平方米到数千平方米)、塌陷(坑径几十厘米到数米,深 $0.5\text{--}3\text{m}$)。检查人员用目测快速发现表面缺陷,丈量精确测量尺寸,拍照记录位置、形状和环境,为后续分析和修复提供资料。

2.1.2 内部检测

外观检查难发现内部缺陷,需专业检测技术。地质雷达检测高效无损,发射高频电磁波,遇介质界面产生反射信号,依其推断坝体内部有无空洞、裂缝等,探测深度 $10\text{--}30\text{m}$,分辨率厘米级,可精准检测直径超 5cm 空洞、宽度超 0.1mm 裂缝^[1]。超声波检测利用超声波特性,遇缺陷时传播特性改变,分析可确定缺陷情况,精度高,对直径超 3cm 空洞、宽度超 0.05mm 裂缝检测佳。钻孔取芯获岩芯样本,观察其了解物理学性质,深度依大坝而定,常见 $20\text{--}50\text{m}$ 。压水试验测注水量算渗透系

数,评估渗透性能,系数一般要求小于 $1\times 10^{-5}\text{cm/s}$ 。

2.1.3 金属结构与机电设备检测

金属结构检测聚焦闸门与启闭机。闸门易锈蚀、磨损、变形,锈蚀深度超闸门厚度 10% 需修复或更换;磨损量超密封面宽度 20% 要处理;变形量超设计尺寸 5% 需矫正或更换。启闭机可能出现电机故障、传动部件磨损,影响运行。机电设备检查电气与自动化控制系统,电气设备或绝缘老化、短路,用绝缘电阻测试(不低于 $1\text{M}\Omega$)检测;自动化控制系统或传感器故障、程序错误,影响运行与监测。检测方法有无损检测(磁粉、渗透检测查表面缺陷)和性能测试(模拟工况监测机电参数)。

2.2 安全监测数据分析

2.2.1 监测项目与布置

变形监测含表面与内部监测。表面监测用视准线法等,在大坝表面布监测点,间距依坝型和高度定,混凝土坝 $20\text{--}50\text{m}$,土石坝 $30\text{--}80\text{m}$,定期测位移。内部监测用沉降仪等,在坝体埋仪器,实时监测内部变形。渗流监测包括渗压与渗流量监测。渗压监测埋渗压计,测坝体和坝基渗流压力,间距 $10\text{--}30\text{m}$ 。渗流量监测用量水堰等,测渗漏水,量水堰设于排水廊道或集水井处。应力应变监测用应变计等,埋于坝踵、坝趾等关键部位,实时获取数据。

2.2.2 数据分析方法

安全监测数据有多种分析方式。统计分析能确定数据分布规律与特征值,计算平均值、标准差、极值等,了解数据集中与离散程度。如大坝某监测点位移数据,平均值稳定、标准差小,表明位移变化稳定;极值超范围则需探究。趋势分析用于判断数据变化趋势、预测大坝未来安全,可用回归分析、时间序列分析等建立数据与时间模型,如渗流量逐年上升且速率超阈值,可能有渗漏隐患,要及时处理。相关性分析研究监测项目关系,找影响安全主因,通过计算相关系数分析关联程

度,如位移与渗压相关系数高,渗压变化或是位移重要影响因素。

2.3 数值模拟分析

2.3.1 有限元分析

有限元分析是水库大坝安全评估的重要数值模拟手段。通过构建大坝有限元模型,输入材料参数和荷载条件,能计算应力分布、变形情况等,并与设计值对比,评估结构安全性。建模时,要精准确定几何形状、材料属性和边界条件。几何形状依据设计图纸和实测数据建模;材料属性涵盖弹性模量等,通过室内或现场取样检测获取;边界条件按大坝实际受力设置,如坝基约束、水压力分布等^[2]。计算结果中,应力分布需满足材料强度要求,混凝土坝抗压强度设计值10-30MPa,抗拉1-3MPa,土石坝应力要符合土体抗剪强度。变形需在允许范围,混凝土坝水平位移不超坝高1‰,垂直不超2‰,土石坝位移应不影响正常运行。

2.3.2 渗流分析

渗流分析聚焦水库大坝渗流场分布与稳定性。采用有限差分法、有限元法等数值方法,构建大坝渗流模型,分析不同工况渗流,确定渗流出口渗透坡降,判断是否发生渗透破坏。建模时,要考虑材料渗透系数、水位变化等因素。不同材料渗透系数差异大,混凝土坝一般在 1×10^{-8} - 1×10^{-6} cm/s,土石坝在 1×10^{-7} - 1×10^{-3} cm/s。水位变化影响渗流场分布与渗透坡降,需依水库实际运行模拟。若渗流出口渗透坡降超土体临界值,大坝可能渗透破坏。临界值与土体颗粒组成、密实度相关,砂土一般在0.2-0.5,黏土在0.5-1.0之间。

2.3.3 动力分析

可能受地震作用的水库大坝需进行动力分析。常用时程分析法、反应谱分析法,计算地震下动力响应(位移、加速度、应力等),评估抗震安全性。时程分析法输入实际或人工合成地震波,算大坝地震过程动力响应,能考虑地震波频谱特性、持时等,结果精确但计算量大。反应谱分析法依据地震反应谱曲线,算最大动力响应,计算简便,但无法考虑时程特性。动力分析中,大坝动力响应要满足抗震设计要求,一般位移不超坝高3‰,加速度不超0.2g,应力不超材料抗震强度设计值。重要工程还要进行抗震性能评估和加固设计,保障地震时安全。

3 水库大坝风险控制技术

3.1 工程措施

3.1.1 坝体加固

坝体稳定性关乎水库安全,针对不同类型坝体问题

需加固。混凝土坝裂缝,细微裂缝(< 0.2 mm)用表面封闭法,涂环氧树脂等;0.2-0.5mm裂缝化学灌浆,注入低粘度(10 - 50 MPa·s)、高强度(50 - 80 MPa)环氧树脂灌浆液; > 0.5 mm裂缝水泥灌浆,用 ≥ 42.5 水泥,水灰比0.5-1.0,压力0.2-1.0MPa。土石坝渗漏常用防渗墙,混凝土防渗墙厚0.6-1.2m,抗压 ≥ 15 MPa;塑性混凝土柔韧性好。高压喷射灌浆形成帷幕,压力20-40MPa。坝体高、厚不足可用加高培厚法,用原材料分层夯实,每层0.3-0.5m,压实度 ≥ 0.96 。

3.1.2 溢洪道改造

依据水库洪水频率分析与设计标准,确定溢洪道拓宽加深尺寸。拓宽宽度按泄洪流量需求,每增 100 m³/s流量,宽度或增5-10m;加深深度依过流与消能要求,一般加深1-2m可提升泄洪能力。拓宽加深时,边坡合理开挖支护,坡度控制在1:1.5-1:2.5,采用锚杆、喷射混凝土等措施保稳定。增加闸门数量可提高开启灵活性与泄洪效率,其尺寸数量依设计流量和水头确定,启闭设备选性能可靠、操作灵活的,启闭时间控制在1-3min。

3.1.3 输水洞维修与加固

洞身裂缝修补依宽度、深度选法,小缝用环氧砂浆涂抹,其抗压强度60-80MPa,粘结强度不低于3MPa;宽深缝用压力灌浆法,注入水泥浆或化学材料填充。处理洞身表面混凝土剥落、碳化问题,用高强度修补材料修复。金属结构防腐,先喷砂除锈至Sa2.5级,再涂环氧富锌底漆等配套涂料,总涂层厚度不小于 250 μ m^[3]。定期检查更换闸门止水装置,确保密封。启闭机更新选性能先进、安全可靠设备,具过载、限位保护等功能,操作方式多样,额定起重量依闸门重量和运行要求确定且留安全余量。

3.1.4 抗震加固

在坝体设抗震钢筋是有效之法,其直径通常不小于12mm,间距依坝体受力与抗震设计要求确定,多在150-300mm之间。同时提高坝体配筋率,混凝土坝配筋率可增至0.5%-1.5%,以增强抗拉、抗剪强度与延性。采用高性能混凝土是重要手段,它强度高、耐久性好且工作性能佳,抗压强度60-100MPa,抗拉强度5-8MPa。添加减水剂、引气剂等外加剂可改善混凝土微观结构,提升抗震性能。此外,还可使用纤维增强混凝土等新型材料,进一步提高坝体抗震能力。

3.2 管理措施

3.2.1 加强日常巡查与维护

日常巡查每日一次,重点检查大坝坝体、溢洪道、输水洞等关键部位。汛期、高水位运行或遇特殊天气

时,巡查频次增至每小时或每两小时一次。巡查内容涵盖坝体表面有无裂缝、渗漏、滑坡,溢洪道闸门、启闭机运行及边坡稳定性,输水洞洞身、闸门有无漏水损坏,以及监测设施是否完好。同时,强化大坝维护保养,定期清洁、润滑、调试设施设备。发现安全隐患及时处理,如修补小裂缝、紧固松动螺栓,确保大坝设施设备处于良好运行状态。

3.2.2 完善安全监测系统

依水库大坝特点与运行要求,增设监测项目,如坝体内部应力应变、渗流压力、水位水温监测等。合理布置监测点,大型水库大坝监测点可达数百甚至上千个,确保数据全面反映运行状态。采用先进设备与技术,如高精度传感器、自动化数据采集传输系统,提升监测数据精度与可靠性,位移监测精度不低于 $\pm 1\text{mm}$,渗流压力不低于 $\pm 0.5\text{kPa}$ 。加强监测数据分析处理,组建专业团队,运用先进方法与软件实时分析预警。数据异常时及时深入分析,查明原因并采取措。

3.2.3 制定应急预案

成立以水库大坝管理单位主要负责人为组长的应急指挥部,设抢险救援、技术保障、后勤保障、医疗救护等小组,明确职责分工。按事故严重程度和影响范围,将应急响应分为 I 至 IV 级,明确各级启动条件与程序,确保迅速有效响应。针对不同事故制定详细处置措施,如坝体渗漏采取降水位、设反滤层、灌浆处理;溢洪道闸门故障用备用电源启动、人工操作保泄洪。定期组织应急演练,每年至少一次,涵盖事故报警、响应、抢险救援、人员疏散等环节,检验预案可行性,提升应急队伍实战能力。

3.3 监测预警技术

3.3.1 自动化监测技术

传感器是核心,依监测项目选型,位移监测用全站仪、GPS定位仪,精度达 $\pm 1\text{mm}$;渗流压力监测用渗压计,精度 $\pm 0.5\text{kPa}$;应力、应变监测用应变计等,精度 $\pm 1\mu\epsilon$ 。数据采集设备自动采集、存储传感器数据,采样频率1次/小时-1次/天,数据通过光纤通信、GPRS/3G/4G无线通信等有线或无线方式传输至监控中心^[1]。远程监控中心借助计算机软件实时显示、分析、处理数据,具备数据查询、报表生成、预警发布等功能,还能通过互联网远程访问控制,提升管理效率,为安全评估和风险控制提供有力支持。

3.3.2 预警模型与指标体系

为保障水库大坝安全,需建立安全预警模型和指标体系并确定预警阈值,监测数据超阈值时及时预警。预警模型可采用多种方法,统计分析模型基于历史数据确定监测指标正常范围与趋势,超范围即预警;神经网络模型能自动学习数据复杂关系,提升预警准确性;灰色系统模型适用于数据少、信息不全情况,经处理分析建立模型。预警指标体系涵盖位移、渗流压力、应力、应变等,依规范和经验确定各指标阈值。以坝体位移为例,累计位移量超坝高1‰-3‰或位移速率连续3天超0.1mm/d发黄色预警,超3‰-5‰或连续3天超0.3mm/d发橙色预警,超5‰或连续3天超0.5mm/d发红色预警,以便管理人员及时应对。

3.3.3 信息共享与协同预警

建立水库大坝安全监测信息共享平台,实现水利、气象、地震等部门间的信息共享与协同预警。平台具备数据存储、查询、分析与发布功能,便于各部门掌握大坝运行状态及自然灾害预警信息。通过合作协议明确职责分工,确保在暴雨、台风或地震预警发布后,相关信息能快速传递至管理单位,及时采取降水位、加强巡查等防范措施,提升风险防控能力。

结语

水库大坝安全评估与风险控制技术对保障其安全运行至关重要。通过现场检查、数据分析及数值模拟等手段进行全面安全评估,并采用工程措施、管理策略、监测预警等方法有效降低风险。随着科技进步,人工智能、大数据等新技术的应用将进一步增强评估和控制能力。同时,加强人员培训,提高业务水平和安全意识也必不可少。实际工作中需重视投入,建立完善的安全管理体系,加强协作监督,确保措施落实。未来应持续研究创新,如探索破坏机理、开发智能预警系统等,以提高评估准确性与风险控制科学性,支持水利事业可持续发展。

参考文献

- [1]宋有东.水利工程中水库大坝的安全管理策略研究[J].水上安全,2025,(04):55-57.
- [2]周凤杰,徐正飞,张旭漫.超长服役期混凝土坝安全性能评估——以夔门水库大坝为例[J].江苏水利,2023,(09):50-54+65.
- [3]罗舸旋子.涪天河水库大坝风险分析及应急预案[D].长沙理工大学,2021.