

水库大坝安全监测与除险加固技术应用

赵志浩

突泉县水利事业发展中心

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6707

[摘要] 水库大坝属于关系到国计民生的重大水利工程,它的安全运行至关重要。本文对大坝安全管理的两个主要技术:安全监测和除险加固做了系统的研究。首先对监测技术体系由传统手段向智能感知的发展进行了详细的分析,其中涉及到的变形、渗流、应力等多种数据的采集方法。其次对渗漏、结构损伤、抗震薄弱环节的除险加固关键技术原理及工程适用性做了详细的论述。继续探究监测预警同工程处治的协同机制,采用物联网、人工智能等现代科技创建起智能化管理平台。通过提高监测技术精准性、智能化、增强加固技术绿色化、高性能化并且使两者相互融合,系统集成可以大幅提升大坝风险控制水平,从而给工程长期安全运行提供有力保障。

[关键词] 水库大坝; 安全监测; 除险加固; 智能感知; 风险管控

中图分类号: TV697 **文献标识码:** A

Application of Safety Monitoring and Reinforcement Technology for Reservoir Dams

Zhihao Zhao

Tuquan County Water Conservancy Development Center

[Abstract] Reservoir dams are major water conservancy projects that are related to national economy and people's livelihood, and their safe operation is crucial. This article systematically studies the two main technologies of dam safety management: safety monitoring and risk mitigation reinforcement. Firstly, a detailed analysis was conducted on the development of monitoring technology system from traditional methods to intelligent perception, which involves various data collection methods such as deformation, seepage, stress, etc. Secondly, a detailed discussion was made on the key technical principles and engineering applicability of risk elimination and reinforcement for leakage, structural damage, and seismic weak links. Continue to explore the collaborative mechanism between monitoring and early warning and engineering treatment, and create an intelligent management platform using modern technologies such as the Internet of Things and artificial intelligence. By improving the accuracy and intelligence of monitoring technology, enhancing the green and high-performance reinforcement technology, and integrating the two, system integration can greatly enhance the level of dam risk control, thereby providing strong guarantees for the long-term safe operation of the project.

[Key words] reservoir dam; Safety monitoring; Risk elimination and reinforcement; Intelligent perception; risk control

在全球气候变化和工程老化双重背景之下,水库大坝长久安全运行会遇到严峻考验。大坝结构在复杂的荷载和环境耦合作用下,安全状态不断变化,急需科学高效的技术手段来进行管控。安全监测和除险加固是工程全生命周期管理的两个重要技术,前者主要做实时感知和状态评价,后者主要做缺陷修复和性能提高,二者互相配合。本文从监测技术智能化发展、加固技术创新现状两方面进行研究,主要分析两者之间怎样实现协同集成,为企业大坝安全管理数字化、智能化进程提供理论基础和实践指导。

1 安全监测技术体系的演进与集成应用

1.1 传统监测方法的基础作用与多维数据采集

传统的监测方法仍然是掌握大坝运行状态的基础途径,构成了一个多维度、全要素的感知网络。变形监测是用精密水准测量、全站仪观测、垂线系统等方法获取坝体在水平、垂直方向上的位移变化,直接反映结构整体稳定性。渗流监测依靠测压管、渗压计、量水堰,持续记载渗透压力、渗流量、水质变动情况,是评判防渗体系效能的主要依据。应力应变监测是在施工期

埋设传感器,对结构内部力学响应参数进行长期监测^[1]。同步进行水位、气温、降水量、地震动等环境量的观测,给分析结构效应量的成因提供荷载条件。这些传统的方法经过长时间的工程实践检验,数据可靠,理论成熟,是安全评估不可缺少的根基。

1.2 现代智能监测技术的创新融合与效能提升

现代信息技术融合应用大大拓宽了监测能力。光纤传感技术可以实现对力、温度场的分布式、长距离、高精度连续测量,并且抗电磁干扰能力很强,适合在恶劣的环境中使用。卫星遥感技术,尤其是合成孔径雷达干涉测量,可以大范围、非接触地监测大坝和库区地表形变,克服了传统点式测量的不足。无人机搭载各种传感器可以快速高效地获取大坝表面高清影像、三维模型、热红外信息,大大提高了表观病害巡查的覆盖面和效率。物联网技术构建的无线传感网络可以自动采集数据、实时传输、云端汇聚,给一体化智能监控平台的建立打下了数据基础。新技术集成使得监测模式从离散的、人工的、滞后的走向连续的、自动的、实时的。

1.3 监测数据的智能处理与预警决策支持

海量监测数据的高效处理和深度分析就是核心价值所在。时间序列分析、回归分析等统计方法用来挖掘数据变化规律、建立预测模型。有限元等数值模拟技术可以对大坝在各种工况下进行细致的模拟,和实测数据相互校验。人工智能、机器学习算法对非线性、高维数据处理有优势,可以做异常检测、模式识别、智能预测模型的建立。多源信息融合技术对各种监测数据、设计资料、巡检记录等加以综合,创建起更为完备的安全评价指标体系。根据上述分析可以建立科学的分级预警模型,设定动态阈值,实现风险的早期识别、自动报警和辅助决策,提高安全管理的主动性和前瞻性。

2 渗漏病害机理分析与防渗控制关键技术

2.1 渗漏成因分类与危害性评估

渗漏是大坝安全中危害较大的病害之一,按发生部位可分为坝基渗漏、坝体渗漏、绕坝渗漏。坝基渗漏多与不良地质条件有关;坝体渗漏一般由于防渗体缺陷或者裂缝引起;绕坝渗漏涉及两岸山体水文地质问题。渗漏不仅造成水量的损失,而且还会引起渗透变形,比如管涌、流土等,甚至会掏空大坝或者地基,从而危害到大坝的安全。准确诊断渗漏成因、路径、规模要依靠工程地质勘察、渗流监测数据、数值模拟三者相结合。

2.2 主被动结合的防渗控制技术体系

防渗控制要按照上堵下排、综合治理的原则。上堵即在渗流上游侧增设或者修复防渗屏障,是根本性的措施。帷幕灌浆技术通过向岩体裂隙灌注浆液形成防渗幕体,是处理基岩渗漏的经典方法,高压旋喷等技术扩大了它的应用范围。混凝土防渗墙技术适合于覆盖层或者土石坝体渗漏处理,塑性混凝土等新材料提高了墙体的适应变形能力。对坝体自身来说,劈裂灌浆、冲抓套井回填、土工膜防渗等技术应用较多。化学灌浆对封堵细小裂缝的效果很好。下排措施是在下游设置可靠的反滤排水设

施,有效降低渗透压力,防止渗透破坏,和上堵措施配合使用,保证工程的安全。

3 结构损伤诊断与加固补强关键技术的应用

3.1 混凝土坝常见病害与修复加固技术

混凝土坝在长期运行中容易产生裂缝、碳化、剥蚀、渗漏等病害。裂缝处理要依照其性质(静止或者活动)和宽度,采取表面封闭,压力灌浆(化学浆材),凿槽嵌缝等办法^[2]。对影响结构整体性的严重损伤要进行结构性加固,预应力锚固技术是通过植入并张拉高强锚索,主动改善结构应力状态,提高抗滑稳定性及整体性的一种技术。外包或者内衬加固法,如下游增设扶壁、拱坝坝肩加设重力墩等,通过新增结构分担荷载。纤维增强复合材料加固技术是用碳纤维布等材料粘贴在混凝土表面,施工简便,能大幅提高构件的抗拉、抗剪性能,而且基本不增加构件的截面尺寸。

3.2 土石坝稳定性问题与增强技术

土石坝稳定性控制要兼顾坝坡抗滑、变形协调和防渗体系的完整性。对于坝坡稳定,可以采用下游增加压重体、上游削坡减载或者布设土工加筋材料等综合措施来提高抗滑能力。防渗体系的修复一般会采用混凝土防渗墙、高压喷射灌浆、复合土工膜铺设等主要技术。根据裂缝的规模、走向、成因不同特点来决定采用开挖置换或者注浆填充等处理方法。所有的加固方案确定都建立在系统渗流和坝坡稳定耦合分析的基础上,经过多方案的技术经济性综合比选,选择最安全、最经济合理的加固方法。

4 抗震性能评估与抗震加固技术体系的应用

4.1 地震动力响应分析与抗震薄弱环节识别

对处在地震活动区的水库大坝,必须做系统性的抗震安全评价。评估工作根据场地地震危险性分析结果来确定地震动设计参数。在此基础上,建立坝体、地基、库水耦合系统有限元动力计算模型,对地震作用下的时程分析或者反应谱分析,得到坝体及坝基的加速度、动应力、动位移等关键响应量,评价结构在设定地震水平下的安全性。通过对响应分布的分析可以找出坝顶、坝肩、结构几何突变处、地基软弱夹层等抗震薄弱部位,为之后采取针对性加固措施提供科学依据^[3]。

4.2 针对性抗震加固措施与方法

根据薄弱环节分析结果采取相应的加固措施。提高结构整体性为根本,可用灌浆、增设混凝土联系梁等方式增强砌石坝或分缝较多的混凝土坝的整体性。增加耗能构件如阻尼器、耗能支座,可以消耗地震能量,减小结构反应。用预应力锚索、抗滑桩等来直接提高潜在滑动体的抗滑稳定性。对有可液化或软弱地基的情况,可以采用振冲碎石桩、深层搅拌桩等地基处理技术进行加固。抗震加固设计要进行加固后的动力复核,以保证满足抗震设防的要求。

5 监测与加固协同的智能化运维管理

5.1 基于数字孪生的全生命周期安全管理框架

数字孪生技术创建起把监测数据和力学模型相结合的高保

真虚拟映射,给水库大坝全生命周期的安全管理提供了一个创新的框架。将建筑信息模型、地理信息系统、物联网监测信息进行集成,可以形成与实体大坝动态同步的数字镜像。该镜像系统具有三维可视化展示、实时状态映射、历史数据回溯、工况模拟推演等功能。依靠该平台,可以在虚拟环境里就拟采取的加固修复方案展开仿真预演并评定成效,进而改善决策过程,促使管理模式由依靠经验判断的传统方式,向依靠数据模型推动的预测性维护方式转变。

5.2 智能化运维管理平台的核心功能架构

智能化管理平台就是集成化的载体。核心功能就是对自动化监测、人工巡检、遥感等各种来源、各种格式的数据进行集中管理,并进行可视化展示。将专业分析模型(结构、渗流、稳定)内嵌或者集成到智能算法(机器学习)中,从而提供在线计算和诊断服务^[4]。根据实时数据以及模型,完成安全状态的自动评判并发出预警。平台在发现隐患的时候,可以调用知识库、案例库,辅助生成并比较加固方案,支持维修决策。实行巡检、报告、审批等业务流程线上化和移动化,提高管理效率。平台创建一个从数据感知、智能决策的全流程闭环。

6 技术发展趋势与未来展望

6.1 监测感知技术的微型化、智能化与网络化发展

未来监测技术的发展趋势就是传感单元集成、智能处理、网络协同。微机电系统和纳米技术的应用会使得传感器体积变小、功耗变低,从而可以实现对大坝内部应力、微渗流等参数的分布式密集感知。智能传感器把边缘计算模块集成起来,可以在节点端实现数据的清洗、特征提取和异常的初步识别,从而大幅度地提高数据的有效性。低功耗广域网、5G/6G通信技术和卫星互联网相结合,会形成空天地一体、高可靠、自组织的异构监测网络。新型物理传感机制(量子传感、太赫兹波探测等)的研究,可以对材料的微观损伤、化学腐蚀等前沿参数进行精确的测量。

6.2 加固材料与工艺的绿色化、高性能化与智能化革新

新材料、新工艺出现以后会改变加固技术的范式。材料研发趋向于多功能集成:超高性能混凝土、纤维增强聚合物复合材料将大幅度提高结构承载力;形状记忆合金、自修复微胶囊技术使结构具备了损伤预警和自修复的能力;地聚合物、生物基灌浆材料响应低碳环保的需求。施工工艺正朝着智能化的方向转变,3D打印技术可以实现复杂加固构件的精确定制,无人化喷涂、巡检和灌浆机器人集群可以在危险环境下自主作业,结合机器视觉和超声相控阵的无损检测技术,可以实现加固效果的全天候在线智能评估。

6.3 智能决策与风险管控的深度融合

决策支持系统会向自主化、前瞻性发展。以深度学习、物理信息神经网络混合模型为基础,把多源监测数据和力学机理融合起来,从而达到大坝性状实时仿真和寿命预测的目的。数字孪生平台会把BIM、IoT和混合现实技术融合起来,创建起沉浸式的运维培训和应急推演环境。区块链技术可以对监测数据、维修记录等进行全流程可信存证和追溯。最终形成一个感知、认知、决策、执行为闭环的智慧运维体系,把被动的响应变为主动的预警,从事后维修变为预测性维护,使重大基础设施的韧性以及可持续运行能力得到全面提高。

7 结束语

本文对水库大坝安全监测、除险加固技术发展过程及其实施进行了梳理,体现了技术集成的作用是提高大坝工程的防洪能力和抗灾能力。在监测方面冲破传统的人工观测的局限,采用光纤传感、卫星遥感、物联网等技术创建起智能感知网络,对诸多参数展开连续自动采集,借助人工智能算法开展异常识别和风险预估,促使监测数据由“离散记录”变成“动态画像”,明显改进预警响应的主动性与前瞻性。除险加固时,把渗漏、结构损伤、抗震薄弱这些主要问题当作对象,用帷幕灌浆、预应力锚固、纤维复合材料这些技术手段,形成“精准诊断、靶向修复、性能提高”的全链条方案,提升了老旧坝体结构的稳定性和耐久性。依靠数字孪生平台同智能运维系统展开深度协作,促使监测预警同工程处置紧密配合,从而达到从被动抢险到主动防控的管理模式转变。随着微型传感器、绿色加固材料、自主决策算法的发展,水库大坝安全将进入感知、认知、决策、执行的全闭环智慧化阶段,给水利高质量发展、工程韧性提升注入新的动力,也为行业全生命周期管理提供范例。

[参考文献]

- [1]汤红兵.自动化监测系统在水库大坝安全监测中的应用研究[J].中国高新科技,2025,(20):99-101.
- [2]丁超.水库大坝除险加固关键技术探究[J].中华建设,2025,(10):141-143.
- [3]韩炜.水库大坝数字孪生安全管理平台设计研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(9):119-121.
- [4]徐俊杰,陈剑,罗诗怡,等.水库大坝除险加固安全监测方案研究[J].水利技术监督,2025(10):14-18+50.

作者简介:

赵志浩(1987--),男,蒙古族,内蒙古人,本科,中级职称,研究方向:水利水电专业。