

中小型橡胶坝运行期安全监测体系构建探析

崔 岩

(水发燃气(庆阳)有限公司,甘肃 庆阳 745000)

【摘 要】水利工程是当今社会重要的民生工程,水利工程的安全事关国家和百姓的安危。目前我国大量中小型橡胶坝受限于当时的投资限制,没有充分应用安全监测装置,至今仍然依靠人工巡视。本文以山东省青州市某中型橡胶坝为实例,基于安全复核发现的监测设施不全、混凝土老化等问题,提出了一套低成本方案,通过对位移、渗流压力、水位的动态感知,实现从“被动发现”向“主动感知”转变,为同类型的中小型水利工程安全监测提供可行路径。

【关键词】水利工程;安全管理体系;橡胶坝;安全评价

【中图分类号】TV644

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-08-0030-03

Construction and Analysis of Safety Monitoring System for Small and Medium Sized Rubber Dams during Operation Period

CUI Yan

(Shuifa Gas (Qingyang) Co., Ltd., Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: Water projects are vital livelihood projects in modern society, and their safety is crucial to the security of the country and the public. Restricted by investment constraints at the time of construction, a large number of small and medium sized rubber dams in China are not equipped with sufficient safety monitoring devices and still rely on manual inspection to this day. Taking a medium sized rubber dam in Qingzhou City in Shandong Province as an example, this paper addresses the problems identified in safety re checks, such as incomplete monitoring facilities and concrete aging, and proposes a low-cost solution. Through dynamic perception of displacement, seepage pressure and water level, the system realizes the transition from "passive detection" to "active perception", and provides a feasible approach for safety monitoring of similar small and medium sized water projects.

Key words: Water project; Safety management system; Rubber dam; Safety assessment

我国已建成橡胶坝广泛分布于中小河流,但大多受限于建设年代早、标准低及管护资金匮乏,安全监测设施严重不足。大量橡胶坝安全管理方式仍停留在人工巡查阶段。水利部推进标准化管理,明确要求强化在线监测与实时预警。如何在不显著增加财政负担的前提下,利用低功耗传感与物联网技术填补监测盲区,是一个急需解决的问题。本文以山东省青州市某典型橡胶坝为例进行探讨,该坝运行 14 年并经历超标准洪水,存在结构老化与监测缺失等问题。

1 工程概况

某橡胶坝控制流域面积 105 km²,工程等别

Ⅲ等,主要建筑物 3 级,为充水枕式橡胶坝,设计坝高 3.0 m,坝顶高程 94.50 m,洪水设计 20 年一遇,设计流量 438 m³/s。该坝曾经漫顶,下游消能设施局部水毁,经紧急修复后未再出现问题。

2 工程隐患

1)结构安全方面。工程总体布置合理,稳定性满足要求,锚固系统正常,混凝土强度仍满足 C25 原设计值。但表层轻微碳化,水位变动区存在冻融剥蚀,局部深度 2.8 mm,碳化深度平均

收稿日期:2026-04-11

作者简介:崔岩(1981—),男,工程师

11~13 mm。钢筋局部存在锈蚀,经抽检,约 50% 的测点存在钢筋锈蚀问题。消能设施存在风险,消力池深度与长度满足要求,但缺少海漫和防冲槽,极端工况下抗冲刷能力高度依赖下游河道钢筋混凝土。

2)监测能力方面。监测能力严重不足。变形、位移、渗流、水位等重要指标均无有效监测设备,完全依赖人工检查和专项检测,缺乏实时数据获取与预警能力。

3)应急与保障能力方面。未配备备用发电机组,一旦供电中断,充排水系统将失去动力。充排水和控制系统自动化程度低,完全依赖人工井下作业,存在安全风险,工作效率低下。

3 监测现状与缺陷剖析

3.1 观测模式

1)变形与位移观测。两岸无任何水平位移观测墩或沉降基准点。工程竣工 14 年来,坝体底板不均匀沉降量和翼墙侧向位移完全未知。橡胶坝对底板平整度和锚固线形变极为敏感,没有沉降数据,就无法判断混凝土碳化是否引发底板不均匀变形。一旦发生沉降,坝袋局部撕裂的风险增大,未配备检测设备导致无法第一时间侦测到形变。

2)渗流场观测。底板扬压力和绕渗监测仅靠目视下游是否“翻花”或“浑浊”。这种方法只有在管涌发展到较严重阶段,下游出水变浑时才能发现异常。对于管涌通道形成前,细颗粒在坝基内部被逐步掏蚀的内源侵蚀现象,仅靠肉眼观察下游水体完全无法发现异常,直至管涌通道贯通至中后期才可能察觉。冻融剥蚀暗示混凝土微裂隙存在,在无渗压计实时监测扬压力情况下,无法获知高水位时压力水通过微裂隙侵蚀钢筋周围环境情况,而此种隐蔽锈蚀正是导致混凝土结构在无明显征兆下发生脆性破坏的主要原因。

3.2 数据采集模式

1)动态风险采集。每日 2 次固定时段巡视,无法覆盖坝袋剧烈振动、河床急剧冲刷等险情高发洪水过程。一旦发生超标准洪水,将导致消能设施局部水毁。峰值流速、溢流水舌形态、水跃振荡频率等关键参数,在人工巡视中完全无法捕获。若在消力池末端布设压力水位计或振动加速

度传感器,便能在冲刷深度超限时第一时间报警,而非事后发现损伤。

2)数据记录。巡视记录多为定性描述,缺少连续的数据支撑。如坝袋振动只能描述“轻微振动”等,不似位移传感器能精确标示振幅。数据过于粗糙,导致管理者无法建立退化趋势模型,无法制定连续性的养护方案。

3.3 运行控制

监测缺失对运行控制的直接影响,在断电工况下体现最为突出。充排水系统缺少备用电源,开启或者关闭都需要工人下井操作。由于现有遥测终端和水位雷达均未配备太阳能供电系统或蓄电池,一旦供电中断,水位监测信息全部消失,管理者在控制室无法获知水位是否上涨、是否已溢流,遂陷入无法抉择的困境。即使供电正常,控制环节也存在严重的响应延迟。暴雨洪峰起涨快的中小流域,从发现水位上涨到漫顶窗口期仅 1~2 h,而仅下井操作就需耗时 15~30 min 以上,监测缺失将导致错过抢险的最佳窗口期。

4 监测体系构建方案

4.1 监测点位与指标

1)水情监测。改变依赖水尺目测的现状,在上游铺盖段安装一体化雷达水位计。雷达水位计不受水温、泥沙和漂浮物干扰,尤其适合汛期高含沙量的中小河流。可通过 RTU 每 5 min 推送水位数据至云端,解决人工无法实时监测的问题。当实时水位超过 94.50 m 坝顶高程时,自动计算溢流堰上水头,为消除漫顶风险提供量化依据。

2)渗流监测。针对渗透破坏薄弱部位的威胁,在坝底板中部钻孔穿透混凝土,于底部砂砾石垫层埋入振弦式渗压计。该传感器输出频率信号,抗干扰强,可据此实时计算底板扬压力折减系数 α 。当 α 由正常值 0.2 突变至 0.5,意味着防渗铺盖或齿墙可能已破坏,该预警机制可在管涌发展到地表出逸之前捕捉到扬压力的异常变化,为应急处置争取宝贵时间。

3)结构监测。在坝袋两端锚固线安装拉线式位移传感器,坝袋充胀时钢索伸出,实时计算高度行程。若充胀高度达 3.1 m(设计标高 3.0 m),或左右岸行程差超过 5%,则判定存在锚固松动或坝袋受力不均等严重隐患。

4.2 数据传输架构

橡胶坝地形开阔,传统有线敷设的数据传输架构成本高且容易遭受雷击破坏。采用自组网无线方案,能够有效避免相关问题。

1)感知层。低功耗与窄带传输相结合。传感器统一采用低功耗型号,由锂亚硫酰氯电池供电,配合间歇工作模式(汛期每 10 min、非汛期每 6 h 唤醒一次),理论续航可达 3~5 a,减少频繁更换电池的人工成本。数据传输采用 LoRa 扩频通信,视距覆盖 2~3 km,满足全坝范围组网需求。

2)汇聚层。太阳能驱动边缘采集网关。在坝肩控制室或电线杆架设 LoRa/4G 网关,集成 LoRa 接收模块与 4G Cat.1 上行模块。配备 40W 太阳能板和 20Ah 磷酸铁锂电池,可满足连续阴雨 7~10 d 的供电需求,保证监测数据不因断电而中断。

3)应用层。轻量化软件传达信息。网关通过 4G 网络以 MQTT 协议将数据推送至私有云或公有云物联网平台。管护人员无需安装组态软件,仅通过小程序或企业 APP 接收数据。水位超限时以模板消息直推片区责任人,实现数据直观表达,为相关人员做出及时判断提供依据。

4.3 分级预警

预警分为黄、橙、红三级,各级触发条件不以单一参数为准,需同时满足持续时长或多参数复合验证,以降低误报概率。

1)黄色预警触发条件包括上游水位达 94.00 m、扬压力折减系数 $\alpha > 0.4$,或单日降雨超 50 mm 且水位上涨速率超过 20 cm/h。预警触发后,推送短信告警,值班员巡视频率加密至每小时 1 次,并检查水泵预充水状态。

2)橙色预警触发条件为上游水位升至

94.30 m、坝袋充胀高度超 3.0 m,或渗透比降 $J > 0.1$ 。触发后,现场高音喇叭播报语音提示,云平台自动生成抢险准备通知,推送至下游村镇负责人,所有传感器强制切换为每分钟 1 次的连续监测模式。

3)红色预警触发条件为雷达水位计连续 5 min 监测水位 > 94.50 m,确认漫顶溢流;拉线位移传感器检测到坝袋单侧位移 30 s 内突降超 20 cm,指向坝袋破裂或锚固失效;渗压计数据剧烈跳变后归零,表示为结构破坏。预警触发后系统自动报警通知三级责任人,启动应急广播组织下游疏散,并锁定前后 30 min 数据备查。

5 结 论

本文以山东省青州市某典型橡胶坝为实例,针对其安全复核中暴露的结构主体基本稳定但监测手段严重缺失的核心问题,提出了一套适用于中小型水利工程的低成本、轻量化监测体系构建方案。

中小型橡胶坝的安全提升无需追求昂贵的大而全系统。在关键部位布设有限传感器就可实现基本的预警功能。依托无线物联网实现数据上云,建立分级预警触发机制,可使中小型橡胶坝的安全保障率提升。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部.水库大坝安全评价导则:SL 258-2017[S].北京:中国水利水电出版社,2017.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.橡胶坝工程技术规范 GB/T 50979-2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [3] 王光纶.《水工程水资源认识研究》[M].北京:科学出版社,2019.

(责任编辑 李浩)

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告