

河南省淤地坝安全自动化监测系统设计与应用

马松增, 徐建昭¹, 何明月², 丁立¹

(1. 河南省水土保持监测总站, 河南 郑州 450008; 2. 河南省水利勘测有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: [目的] 设计淤地坝安全自动化监测系统, 实现淤地坝监测数据的实时传输与预警, 提升河南省淤地坝安全管理能力。[方法] 选取 5 座典型淤地坝作为试点, 进行淤地坝安全自动化监测系统的设计、施工、安装和试运行, 初步建立了淤地坝安全预报模型。[结果] 监测系统实现了淤地坝雨量、水位、渗压、变形和位移、应力、视频等监测数据的自动化采集和安全隐患预测预警, 提升了淤地坝安全监控能力。[结论] 系统运行后有助于增强河南省全省的淤地坝系统安全管理, 为黄土高原地区淤地坝汛期安全运行提供一种全新的信息化管理模式。

关键词: 淤地坝; 安全; 自动化; 预警; 监测

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)05-0112-06

中图分类号: TV93, S157

文献参数: 马松增, 徐建昭, 何明月, 等. 河南省淤地坝安全自动化监测系统设计与应用[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 112-117. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 05. 017; Ma Songzeng, Xu Jianzhao, He Mingyue, et al. Design and application of automatic safety monitoring system for soil-saving dams in He'nan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 112-117.

Design and Application of Automatic Safety Monitoring System for Soil-saving Dams in He'nan Province

Ma Songzeng¹, Xu Jianzhao¹, He Mingyue², Ding Li¹

(1. He'nan Province Soil and Water Conservation Monitoring Centre, Zhengzhou, He'nan 450008, China;
2. He'nan Water Conservancy Survey Co. Ltd, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: [Objective] The automatic monitoring system of soil-saving dam was designed to realize the real-time transmission and early warning of monitoring data, and improve the safety management ability for soil-saving dams. [Methods] Five typical dams were selected as the pilot for the design, construction, installation and trial operation of the automatic safety monitoring system of soil-saving dams. A safety prediction model for soil-saving dam was established. [Results] The system realized the automatic collection of monitoring data for rainfall, water level, seepage pressure, deformation, displacement, stress, and video of soil-saving dam, realized the prediction and early warning of potential safety hazards, and improved the safety monitoring ability of soil-saving dam. [Conclusion] The operation of the system is helpful to enhance the safety management of the warping dam system in the whole He'nan Province, and to provide a new information management mode for the soil-saving dam safety operation in the Loess Plateau in flood season.

Keywords: soil-saving dam; safety; automated; early warning; monitoring

淤地坝是黄土高原水土流失地区控制沟道侵蚀的一项重要工程措施。研究表明,淤地坝对于减少入黄泥沙、区域经济发展和生态环境改善等方面具有非常明显的作用^[1-4]。根据全国第一次水利普查成果,截止 2011 年底,河南省有淤地坝 1 600 多座,其中部分淤地坝工程下游影响区内有国道、高速、铁路等重要交通线路及村庄,淤地坝的安全运行直接关系到

民群众的生命财产安全^[5]。及时高效开展淤地坝运行期监测和应急处理,确保淤地坝防汛安全,是全面提升淤地坝监管水平的有力手段^[6],也是黄河流域生态保护和高质量发展的源头保障措施。

有研究者曾提出小流域淤地坝监测的内容、指标、方法,并选取典型小流域坝系,布设监测点,采用遥感、水沙观测、调查等方法,连续开展淤地坝工程建

设动态、拦沙蓄水、坝地利用及增产效益、坝系工程安全等监测^[7]。近年来有研究者将三维激光扫描技术应用于淤地坝变形监测,获取淤地坝坝体和库岸表面数据^[8]。段茂志^[9]设计构建了小流域淤地坝防洪溃坝风险评价及实时预警模型,由实时降雨预测溃坝风险,在淤地坝溃坝之前发出预警预报。王彦武等^[10]将低空无人机遥感技术应用于淤地坝水土资源监测中,为淤地坝的安全管理和预警提供支持。李想^[11]基于物联网实现了淤地坝管理部门对淤地坝汛情的及时了解和远距离的大坝安全监控。以上这些淤地坝监测方法需要借助大量的人力物力,且缺乏连续性和时效性,在淤地坝易发生险情的强降雨条件下,往往不能实时、准确地预警淤地坝安全隐患。

本研究选取河南省 5 座典型淤地坝作为试点,2019 年开始进行淤地坝安全自动化监测系统的设计、安装、运行,以期实现淤地坝运行安全自动化监测数据的采集和安全隐患预测预警。

1 理论和方法

1.1 淤地坝安全自动化监测系统总体设计

淤地坝安全自动化监测系统由坝区监测点传感器系统和监控调度中心两部分组成一个有机的整体,实现坝体雨量、水位、渗压、变形和位移、应力、视频等监测数据自动采集、存储,并满足实时自动传输的要求。预警模块依据淤地坝安全等级模型进行数据分析,并发布淤地坝安全预警信息。

淤地坝安全自动化信息传输拓扑图如图 1 所示:

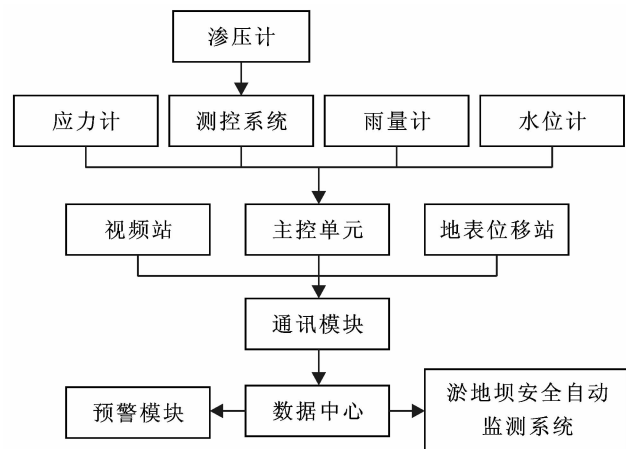


图 1 淤地坝安全自动化信息传输拓扑图

1.2 淤地坝监测内容和方法

淤地坝安全自动监测项目包括:降雨、水位、渗压、变形、位移、应力、视频监控这 7 个参数。

在每座淤地坝上独立布设雨量计、水位计、渗压计、应力计、地表位移站、视频站、太阳能等供电系统

等监测设备;每座淤地坝的监测设备由该坝体安装的太阳能供电系统进行供电。各淤地坝监测设备通过传感器系统与全省监控调度中心进行系统集成,从而实现全省淤地坝监测数据的自动化实时监测。

降雨、水位监测由布设在坝体的雨量计、水位计获取并经由主控单元实时传输至数据中心。

渗压监测根据工程的具体情况,在大坝上选择合适的断面安装埋设相应传感器,传感器向测控单元传输监测数据,测控单元将采集的数据发送至主控单元,最后由主控单元传输至数据中心。

变形和位移监测采用高精度地表位移监测站实时自动化监测进行,监测点采用地表位移监测站多星多频接收机作为数据采集设备,地表位移监测站接收机接收地表位移监测站原始测量数据,通过无线网络由主控单元传输至数据中心进行处理,得到基准点与各监测点之间的相对位置数据,从而达到对各监测点的位移进行监测的目的。

应力监测由固定测斜仪对坝体内部应力进行实时监测,数据经由主控单元采集实时数据传输至数据中心。

视频监控以网络传输抓拍图片的形式,记录并传输现场实际情况。

1.2.1 水位和雨量监测 采用翻斗式雨量计实时自动化监测淤地坝的雨量,雷达液位计实时自动化监测淤地坝的水位。

每座淤地坝遥测水位站配置雷达水位计 1 套,数据采集终端 1 套。数据采集终端接收测站水位\雨量数据后,通过 GPRS 网络传输至数据中心。

水位雨量遥测站采用测、报、控一体化的结构设计,包括遥测传感器(雨量计、水位计等)、数据采集终端、人工置数终端、通信设备、太阳能电源、蓄电池等。所选用雨量计主要参数:雨强范围 0.01~4 mm/min,允许通过最大雨强 8 mm/min;雨量采集分辨率 0.1, 0.2, 0.5 mm 任意可选;具备智能、定时、召测等工作制式;交流、直流、太阳能灯多种供电方式。所用水位计主要参数:测量范围 1.5~30 m;测量盲区<1 m;测量精度 3 mm;最小显示分辨率 1 mm。

1.2.2 渗压监测 根据坝体的长度选择 5 个相等间距的观测面,在观测面坝体内布设渗压计。采用振弦式渗压计对坝体内部实时自动化监测淤地坝的渗压,通过在坝体里钻凿钻孔,把渗压计放置在钻孔里(与测压管结合使用)。通过测量渗压计的压力,再转化为水头高度(高程),结合安装深度以及孔口高程得到坝体或者绕坝的浸润线高度(高程)。测量精度误差小于 10 mm。

浸润线高度 = 渗压管长度 - 安装仪器高 -
渗压计测量高度

每座淤地坝配置振弦式渗压计 1 套(5 支),与水位雨量监测系统共用数据采集终端。振弦式渗压计主要参数:坚固耐腐蚀,体积小,可方便放置于需要测量的狭小空间;多量程可选,通常设定为 25 m 水深;可同步测量埋设点温度;配套数据采集仪可自动控制测量,测量数据实时传输至监控平台软件;设备发生异常时能有效保存原始数据;测量范围 0~250 kPa;测量精度 $\pm 0.1\%$;耐水压为量程的 1.2 倍。

1.2.3 应力监测 根据坝体的长度选择 5 个相等间距的观测面,在观测面坝体内布设应力计。

采用固定测斜仪对坝体内部实时自动化监测淤地坝的应力,其工作原理为:在坝体打孔,埋设专门的内部位移监测设备,实时的采集内部位移数据发送到服务器上,从而完成内部位移监测。通过钻孔的方式,将测斜探头通过连杆方式埋入地下,当坝体内部有位移变化时,测斜探头随之倾斜,信号电缆引入地面仪表连接测试,从而可精确测出水平位移量 $\Delta x, \Delta y$ 或者倾角。根据 $\Delta x, \Delta y$ 的值的大小,做出预报。

每座淤地坝配置固定测斜仪 1 套(5 支),与水位雨量监测系统共用数据采集终端。固定测斜仪主要参数:由斜测仪、导向轮、连接杆、屏蔽电缆、数据采集网关等组成;测量范围 $\pm 15^\circ$;灵敏度 $\leq 9''$;测量精度 $\pm 0.1\%$;耐水压不低于 1 MPa;读数精度 $\pm 0.02 \text{ mm}/500 \text{ mm}$ 。

1.2.4 变形和位移监测 通过地表位移监测站完成淤地坝变形和位移的监测,地表位移监测站安装 2 个监测点和 1 个基站点。

地表位移监测站由高精度北斗兼容 GPS E40 接

收机和 A40C 天线、地表位移监测站无线数据传输模块及太阳能供电系统、避雷系统、安装杆支架等附属设备组成。

地表位移监测站是野外地表自动化监测专用产品,可对淤地坝位移、变形等地质灾害全天候自动化监测,支持监测数据远程推送和本地存储。地表位移监测站选用工业级器件和配件,提供标准化的安装、使用和养护程序,易于安装部署,适用于不同环境下长时间连续工作。

1.2.5 视频监控 视频监视系统主要由前端设备、传输设备、控制设备、记录及监视设备 4 大部分组成。前端设备由安装在监视点的高分辨率彩色摄像机、全方位云台、变焦镜头和室外专业防护设备等组成。它主要负责图象数据的采集和信号处理。

集中控制设备负责完成前端设备和图象的切换控制、全方位云台和三维可变镜头的控制。集中控制设备还可以对监视图象进行分区控制和分组同步控制,借助软件还可以提供图象检索和处理功能。

坝区视频动态监控系统可以给水行政主管部门提供直观、全场景的现场安全状况,方便观察坝体整体情况,以实现实时调度指挥、提高安全保障的力度及效率。

2 实例分析

2.1 淤地坝概况

本研究选取的 5 座淤地坝为:万沟淤地坝、沈家沟淤地坝、鱼池淤地坝、王家岭淤地坝、雷疙瘩淤地坝。5 座淤地坝位于不同的小流域,坝体皆为均质土坝,各淤地坝基本情况如表 1 所示。

表 1 研究样本淤地坝基本情况

| 工程名称 | 所属地区 | 等别与规模 | 建筑物特征 | 主要工程指标 | 蓄水情况 | 主要安全隐患 |
|--------|--------|--------------|-------|--|-------|---------------------------------|
| 王家岭淤地坝 | 三门峡湖滨区 | II 等,中型淤地坝 | 三大件 | 总库容 $2.02 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。坝高 18.5 m,坝顶长 86.0 m,坝顶宽 3.0 m | 无蓄水 | — |
| 鱼池淤地坝 | 三门峡渑池县 | I 等,大 2 型淤地坝 | 三大件 | 总库容 $7.11 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。由主坝和副坝两部分组成。主坝高 16.5 m,坝顶长 97.0 m,坝顶宽 4.0 m;副坝高 8.0 m,副坝顶长 53.0 m,副坝顶宽 3.0 m | 有蓄水 | 下游有 310 国道、连霍高速、陇海铁路等重要交通线路及村庄。 |
| 沈家沟淤地坝 | 洛阳市伊川县 | I 等,大 2 型淤地坝 | 三大件 | 总库容 $9.23 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。坝高 27.0 m,坝顶长 223.0 m,坝顶宽 4.0 m | 无蓄水 | 下游有村庄及乡村公路。 |
| 万沟淤地坝 | 洛阳市嵩县 | I 等,大 2 型淤地坝 | 两大件 | 总库容 $5.34 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。坝高 20.0 m,坝顶长 73.2 m,坝顶宽 3.0 m | 有少量蓄水 | 坝体有局部沉降和裂缝。 |
| 雷疙瘩淤地坝 | 洛阳市嵩县 | II 等,中型淤地坝 | 两大件 | 总库容 $1.67 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。坝高 17.0 m,坝顶长 94.0 m,坝顶宽 4.0 m | 有蓄水 | — |

2.2 监测设施布设与施工

2.2.1 水位和雨量监测设施布设与施工

(1) 设施布设。在 5 座坝体上分别布设 1 套雨量

计和水位计。雨量计、水位计、视频设备共用一个立杆。

各监测点位置布设情况如表 2 所示。

表 2 水位和雨量监测设施布设情况

| 工程名称 | 监测点位置 |
|--------|--------------------|
| 王家岭淤地坝 | 坝体附近临近水面位置 |
| 鱼池淤地坝 | 坝体迎水面测中部距离水面 2 m 处 |
| 沈家沟淤地坝 | 坝体迎水面测中部距离水面 2 m 处 |
| 万沟淤地坝 | 坝体附近临近水面位置 |
| 雷疙瘩淤地坝 | 坝区上游值班房附近临近水面位置 |

以雷疙瘩淤地坝为例,监测淤地坝水位和雨量监测点位典型布设格局见图 2。

(2) 设施施工。水位雨量遥测站基础设计为 150 cm×150 cm×80 cm 的钢筋混凝土结构,预埋螺栓(出基础顶面 100 mm)与支架连接。支架采用高 3 m 的 DN200 镀锌钢管,工作平台为围栏式结构。悬臂

采用长为 2.5 m 的 DN65 镀锌钢管,固定在工作平台底部平面,水位计安装在悬臂端部固定;雨量计支架采用 DN100 的镀锌钢管与工作平台连接,安装在支架上方固定。

2.2.2 渗压监测设施施工

(1) 设施布设。5 座坝体上分别布设振弦式渗压计 1 套(5 支),与水位雨量监测系统共用数据采集终端。每座淤地坝坝顶道路背水面一侧距离道路边沿 0.5~1 m 位置均匀布设 3 个渗压计(渗压和内部位移共用),坝顶迎水面正中布置 1 个渗压计,坝顶背水面正中布置 1 个渗压计。各渗压计布设钻孔规格如表 3 所示。淤地坝渗压监测点位典型布设格局见图 2—4。

表 3 淤地坝渗压计布设钻孔规格

| 工程名称 | 坝顶(3 个) | 迎水面(1 个) | 背水面(1 个) |
|--------|---------------------------|-----------|-----------|
| 王家岭淤地坝 | 间距 20 m,深度 16 m,20 m,16 m | 深度 10.5 m | 深度 18.5 m |
| 鱼池淤地坝 | 间距 20 m,深度 16 m,13 m,17 m | 深度 8 m | 深度 17 m |
| 沈家沟淤地坝 | 间距 50 m,深度 21 m,19 m,14 m | 深度 13 m | 深度 15.5 m |
| 万沟淤地坝 | 间距 25 m,深度 16 m,20 m,16 m | 深度 10 m | 深度 20 m |
| 雷疙瘩淤地坝 | 间距 35 m,深度 7 m,13 m,15 m | 深度 10 m | 深度 15 m |

(2) 设施施工。采用岩芯管冲击法干钻钻孔;钻孔完成后,将加工好的测压管尽快安装,使其管顶露出坝体 0.3 m 左右;测压管在管内水位稳定后,需做注水试验来检验灵敏度;注水量约每 1 m 测压管容积的 3~5 倍;注水后不断观测水位,直至恢复到或接近注水前水位。

用洗净的细砂包裹渗压计,并用土工布扎紧;将电缆和渗压计通过钢丝绳缓缓放入测压管内,放置于

测压管水下 1~2 m 内,固定好顶端钢丝绳;接好通讯线缆,均匀缠裹防水胶带和电气胶带做好防水处理。最后浇筑管口保护装置。

2.2.3 应力监测设施施工

(1) 设施布设。在 5 座坝体内部分别布设固定测斜仪 1 套(5 支),与水位雨量监测系统共用数据采集终端。监测设施布设点位与渗压监测装置相同。淤地坝应力监测点位典型布设见图 2—4。

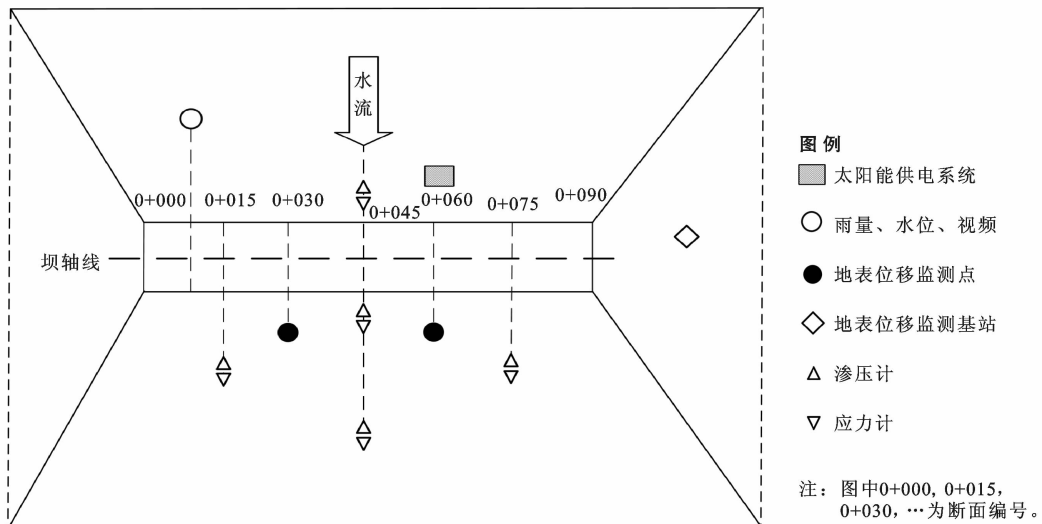


图 2 监测设施典型平面布设示意图(雷疙瘩淤地坝)

(2) 设施施工。固定式测斜仪安装流程: ① 钻孔。采用工程钻探机 $\Phi 110$ mm 的钻头钻孔。为了使测斜仪测量到位, 防止安装时测斜管中有沉淀, 测斜孔都需比安装深度深一些。一般每 10 m 多钻深 0.5 m。在松散或破碎体上钻孔时要用泥浆或水泥浆护壁, 在测斜管安装前不可有塌孔产生。② 清孔。钻头钻到预定位置后, 不要立即提钻, 需把水泵接到清水里向下灌清水, 直至泥浆水变成清水为止, 提钻后

立即安装。③ 安装测斜管。测斜管连接到设计长度后放入孔洞, 放置到位后回填测斜管与孔壁之间的空隙。④ 固定测斜仪。把不同深度的连接杆和斜测仪按顺序放入斜测管, 逐一固定后封堵孔口。

2.2.4 变形和位移监测设施施工

(1) 设施布置。在 5 座坝体分别布设地表位移监测站, 每个监测站包括 2 个监测点和 1 个监测基站。监测点和监测基站布设位置如表 4 所示。

表 4 淤地坝地表位移监测站布设情况

| 工程名称 | 监测点(2 个) | 监测基站(1 个) |
|--------|----------------------------------|-------------------------|
| 王家岭淤地坝 | 坝体背水坡面, 左侧 1/3 位置和右侧 1/3 位置各 1 个 | 坝体外稳定山坡的坡脚处 |
| 鱼池淤地坝 | 坝体背水坡面, 左侧 1/3 位置和右侧 1/3 位置各 1 个 | 坝体外左侧 10m 左右(面向下游)的稳定位置 |
| 沈家沟淤地坝 | 坝体背水坡面, 左侧 1/3 位置和右侧 1/3 位置各 1 个 | 坝体外左侧坝碑处的稳定基岩处 |
| 万沟淤地坝 | 坝体迎水坡面, 左侧 1/3 位置和右侧 1/3 位置各 1 个 | 坝体外左侧稳定基岩处 |
| 雷疙瘩淤地坝 | 坝体背水坡面, 左侧 1/3 位置和右侧 1/3 位置各 1 个 | 坝体外西北侧荒山坡面的稳定位置 |

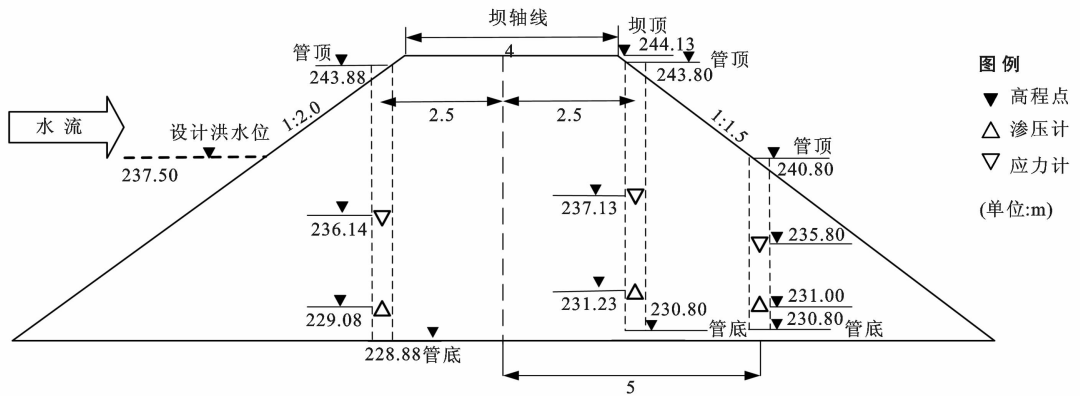


图 3 0+045 横断面渗压、应力监测设施典型布设示意图(雷疙瘩淤地坝)

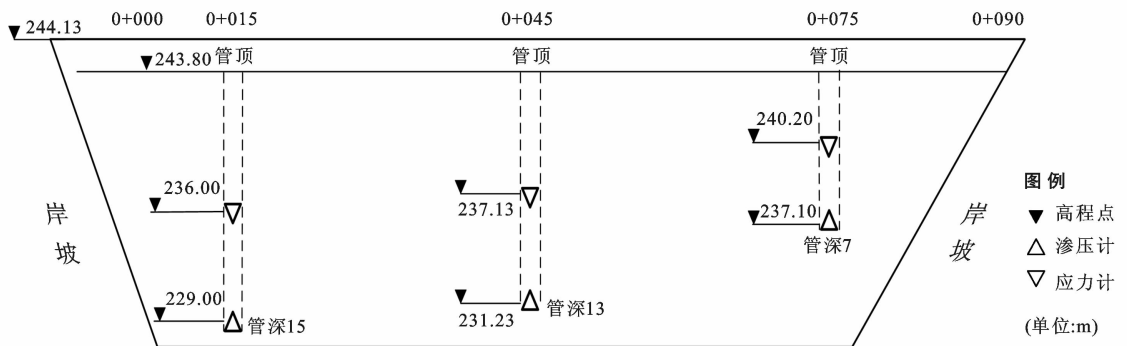


图 4 纵断面渗压、应力监测设施典型布设示意图(雷疙瘩淤地坝)

淤地坝变形和位移监测站典型布设格局见图 2。

(2) 设施施工。地表位移监测站镀锌管立杆的安装需要预先浇筑好基础设施, 将立杆固定到基础上, 基础的尺寸为 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ 。

2.2.5 视频监控 视频监控设备因与水位及雨量监测子系统共用同一根立杆, 故点位布设及施工情况与

水位及雨量监测子项点位分布情况相同(如图 2 所示)。

2.3 监测设施总体布设

依据监测系统的总体设计原则和各淤地坝的实际情况进行设施布设与安装, 以雷疙瘩淤地坝为例, 各坝的降雨、水位、渗压、变形、位移、应力、视频监控

等监测设施典型平面布设格局如图 2 所示。横断面渗压、应力监测设施典型布设如图 3 所示。纵断面渗压、应力监测设施典型布设格局如图 4 所示。

2.4 淤地坝监测预报

2.4.1 预警与报告 淤地坝安全等级设为蓝、黄、橙、红 4 个等级,实时监测数据一旦触及相应安全等级范围,即时通过监测系统界面显示、手机短信等方式,向淤地坝所属区域的各级水行政主管部门负责人发送预警信息,也可通过网络电话联系淤地坝安全责

任管理部门启动相应等级的安全预案。

监测设备野外运行期间一旦出现损毁、停工等情况,系统自动报告异常,在线提醒设备维护人员;待地面工作人员维护设备正常后,系统自动解除异常报告。

2.4.2 安全预报等级 淤地坝的蓝、黄、橙、红 4 个安全预报等级划分的下限阈值如表 5 所示。多项指标同时达到不同安全等级时,按照最高安全等级进行预警提示。各项指标均处于蓝色安全等级时,不进行预警提示。

表 5 淤地坝安全预报等级划分阈值

| 安全等级 | 红色预警 | 橙色预警 | 黄色预警 | 蓝色预警 |
|--------|--------------------------------------|-----------|------------|---------|
| 雨量 | 50 mm/3 h | 50 mm/6 h | 50 mm/12 h | <50 mm |
| 水位 | 坝顶高程 | 溢洪道底板高程 | 汛限水位高程 | <汛限水位高程 |
| 应力 | 15° | 10° | 5° | <5° |
| 变形和位移 | 80 mm | 50 mm | 30 mm | <30 mm |
| 渗压 | 每座坝体依据设计资料独立划分安全等级 | | | |
| 视频 | 作为辅助工具,帮助工作人员远程判断现场安全情势,视频画面不做等级划分 | | | |
| 设备运行状况 | 设备出现损毁、丢失、离线等状态时,系统实时报告设备异常状态,不做等级划分 | | | |

2.4.3 淤地坝监测系统应用情况 淤地坝安全自动化监测系统经过一年试运行,全面实现了预期目标。试运行期间,系统共发布雨量黄色预警 1 次;设备运行异常报告 2 次;未出现橙色、红色安全等级状况。

为验证该系统监测数据的有效性,工作人员在每次降雨过程和试运行结束后,对淤地坝各项监测指标进行了实地查勘。结果表明,各项监测数据及安全等级预警均能有效反映淤地坝运行现场的真实情况。

3 结论

选取 5 座典型淤地坝,布设安全自动化监测系统,经过设计、安装、运行,均实现了淤地坝运行安全自动化监测数据的采集和预报信息发布。目前,淤地坝安全自动化监测系统顺利通过 1 a 时间的稳定运行。运行结果表明,该系统采用先进的观测设备,人工及自动观测相结合,实现了信息的自动采集输入、自动计算和实时自动传输,突破了传统以人工为主的信息采集方式;布设的视频监控设备提升了淤地坝安全监控能力;监测系统集成先进技术,实现了淤地坝运行安全隐患预测预警;系统的建设和运行很大程度上增强了淤地坝的运行安全管理,为各级水行政主管部门提供有效决策依据。

[参 考 文 献]

[1] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020(1):1-11.

[2] 刘晓燕,高云飞,马三保,等.黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J].水利学报,2018,49(2):145-155.

[3] 马安利.淤地坝增产效益监测分析[J].人民黄河,2012,34(10):92-93,96.

[4] 段菊卿.小流域淤地坝建设的水土保持效益浅析[J].水土保持研究,2012,19(1):144-147.

[5] 罗西超.黄土高原淤地坝建设现状及其发展思路[J].中国水土保持,2016(9):24-25.

[6] 史红艳.黄土高原淤地坝防汛监控预警系统建设展望[J].中国防汛抗旱,2019,29(3):16-19.

[7] 喻权刚,马安利.黄土高原小流域淤地坝监测[J].水土保持通报,2015,35(1):118-123.

[8] 张峰,周波,李锋,等.三维激光扫描技术在淤地坝安全监测中的应用[J].水土保持通报,2017,37(5):241-244,275.

[9] 段茂志.淤地坝防洪溃坝风险评价与实时预警模型设计[D].西安:西安理工大学,2019.

[10] 王彦武,周波,马涛,等.低空无人机遥感技术在淤地坝水土资源监测中的应用[J].中国水土保持,2019(10):64-66.

[11] 李想.基于物联网的土质淤地坝监测预警系统[D].太原:太原理工大学,2018.