

DOI: 10.11779/CJGE2020S2003

堰塞湖风险分析与应急抢险关键技术研究与应用

张宗亮^{1, 2}, 吴学明^{1, 2}, 王 昆^{1, 2}, 何 宁³, 周彦章^{*3}

(1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 2. 国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心, 云南 昆明 650051;

3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘 要: 地震或暴雨导致山体塌方形成堰塞湖, 给下游人民生命财产造成巨大威胁, 及时准确采集处理堰塞湖应急抢险所需数据, 识别分析堰塞湖灾害风险, 能够为堰塞湖应急抢险、减灾兴利提供科学依据。以红石岩堰塞湖灾害应急抢险和处置工程为依托, 提出了堰塞湖应急抢险数据采集与处理方法, 系统研发了堰塞湖灾害及其风险因子识别方法体系和堰塞湖灾害应急指挥平台, 构建了堰塞湖应急抢险成套关键技术, 研究结果表明该套技术体系能有效应用于红石岩堰塞湖应急抢险与后续处置工程实践, 解决了堰塞湖应急抢险快速响应与科学决策难题。

关键词: 堰塞湖; 风险分析; 应急抢险; 应急指挥平台

中图分类号: TV22

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0013-07

作者简介: 张宗亮(1963—), 男, 教授级高级工程师, 全国工程勘察设计大师, 主要从事水利水电工程设计、咨询、科研及管理工作。E-mail: zhang_zl@powerchina.cn。

Researches and application of key technologies for risk analysis and emergency rescue of landslide-dammed lakes

ZHANG Zong-liang^{1, 2}, WU Xue-ming^{1, 2}, WANG Kun^{1, 2}, HE Ning³, ZHOU Yan-zhang³

(1. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China; 2. Sub-center of High Earthfill/Rockfill Dam,

National Energy and Hydropower Engineering Technology R&D Center, Kunming 650051, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute,

Nanjing 210024, China)

Abstract: The landslide-dammed lake caused by earthquakes or heavy rains will threaten the lives and property of people in the downstream. It is necessary to timely and accurately collect and process the data with respect to the dammed lake for the risk identification and analysis. And this will also provide a scientific basis for emergency rescue, risk eradication and disaster reduction for the landslide-dammed lake. Based on the emergency rescue and disposal project of Hongshiyuan landslide-dammed lake, a set of key technologies for disasters of landslide-dammed lakes are developed containing the collection and integration of emergency rescue data, the identification of risk factors and emergency command platform, and they are successfully applied to the emergency rescue and subsequent treatment of Hongshiyuan landslide-dammed lake. This technical system solves the problems of quick response and scientific decision-making in the emergency rescue of landslide dams.

Key words: landslide-dammed lake; risk analysis; emergency rescue; emergency command platform

0 引 言

堰塞湖指山体滑坡、崩塌、泥石流堵塞河道形成的湖泊, 具备一定挡水能力的堵塞河道的堆积体被称为堰塞体^[1-2]。近年来受强降雨、强地震等极端条件影响, 堰塞湖多发频发, 给人民生命财产造成严重威胁。2008年5月12日汶川8.0级强烈地震, 共形成34座堰塞湖^[4], 其中堰塞体体积最大的为北川县城上游约4 km处的唐家山堰塞湖, 湖区长23 km、库容3.2亿m³, 下游120万人民生命财产安全受到威胁; 2014年8月3日云南省鲁甸县6.5级地震, 诱发牛栏江干流山体塌方形成红石岩堰塞湖^[5-6]; 2018年10月10日和

11月3日, 金沙江上游白格地区两次大型山体滑坡形成堰塞体, 阻塞金沙江形成堰塞湖, 潜在最大蓄水量达7.9亿m³, 溃决后对下游造成巨大破坏^[7-8]。

堰塞湖具有水文气象、地形地质、物质结构、溃堰形式、环境社会等不确定性, 堰塞体呈宽级配非均匀结构、材料颗粒尺度离散性大、空间结构和物性参数随机性强等特征, 风险分析和应急抢险是根除堰塞湖风险、减灾兴利的重要措施。堰塞湖应急抢险、后

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508500)

收稿日期: 2020-08-07

*通信作者(E-mail: yzzhou@nhri.cn)

续处置、永久整治三大阶段诸多重大科学技术难题,属于亟待解决的国家重大需求,国内外在堰塞湖风险识别评价与应急抢险方面缺少相关研究先例,缺乏系统的应急指挥平台。

2014年8月3日16时30分,云南省鲁甸县发生6.5级地震,在鲁甸县火德红乡李家山村和巧家县包谷垭乡红石岩村交界的牛栏江干流上,地震造成两岸山体塌方形成堰塞湖。堰塞体位于原红石岩水电站取水坝下游600 m处,历史上红石岩左岸滑坡体曾发生堵江事件,地震发生后,滑坡表面物质被震松,大孤石及局部失稳碎石土滑移进入牛栏江,但滑坡体整体没有滑动,处于稳定状态。右岸滑坡体滑向河床形成泥石流向下游运动,加剧了中上部边坡岩体的变形破坏,高速倾倒崩滑,迅速向河床堆积形成堰塞体。右岸崩塌沿河流方向的山体崩塌长度约890 m,后缘岩壁高度约600 m,最大坡顶高程1843.7 m,属特大型崩塌。红石岩堰塞湖属大型堰塞湖,风险等级为I级(最高级别)^[1,3]。

红石岩堰塞湖应急抢险、后续处置及后期整治工作以乏信息条件下水利水电工程综合勘察设计技术为基础,采用3S、全三维等数字化设计技术和手段,从地形、地质数据采集,到边坡、堰塞体、库岸监测,以及枢纽布置、施工总布置等,完成了排险、河流规划、可行性研究、后续处置等工作。本文以红石岩堰塞湖作为研究对象,系统总结了红石岩堰塞湖应急抢险、后续处置及后期整治工作,为落实“切实做好堰塞湖后续处置和整治”“先除害、再兴利、轻重缓急,分期开展后期电站重建工程等工作”等各级指示精神提供了重要技术支撑,提出了堰塞湖应急抢险数据采集处理方法,研发了风险识别评价理论体系和应急指挥平台,形成了堰塞湖应急抢险关键成套技术。

1 应急抢险数据采集与处理

针对水文气象、地形地质和环境社会等不确定性,研发空天地一体化乏信息数据快速采集与处理技术,构建堰塞湖及其影响区域的水文模型,精确测量了堰塞体位置、几何参数及堆积方量,建立三维地形模型以支撑堰塞湖应急抢险工作。

1.1 水文气象资料采集

通过3S技术获取全球范围的气象数据、下垫面参数,采用水文地理数据模型、分布式水文模型,结合互联网获取共享数据,开展乏资料地区水文分析计算。红石岩堰塞湖乏信息地区水文分析计算解决方案为:气象水文数据采集,包括实测、卫星气象数据获取与整理、融合;基于ArcHydro模型流域特征提取,

得到流域边界、河网、河道等数据,为水位流量关系、库容面积曲线计算提供基础数据;构建基于3S技术的分布式SWAT水文模型,提出了SWAT模型输入数据获取、建模、率定与验证、参数化方法,结合实际工程,提出基于分布式水文模型的乏资料地区水文泥沙计算方案。

1.2 地形资料采集与三维模型建立

充分利用现场收集资料和实测数据,采用无人机航测遥感新技术辅以少量像控点,结合地面三维激光扫描仪获取的点云数据进行加工处理,制作满足设计要求的基础地理信息数据。

(1)采用低空无人机航摄系统快速采集并进行灾害信息自动解译。以无人机航线自动规划方法,制定目标区域后,快速组织设备及人员飞行作业,及时获取影像,在救灾工作中,持续更新数据,自动解译相关信息,快速获取由灾害引起的各类数据。

(2)iScan一体化地面移动测量系统灾害数据采集及处理技术。将三维激光扫描设备(LS)、卫星定位模块(GNSS)、惯性导航装置(IMU)、里程计、360°全景相机、集成控制模块和高性能板卡计算机集成、封装,快速获取灾害现场的点云数据,处理并建立灾害区域三维模型及可量测三维全景数据,反映灾害现场状况。

(3)基于北斗卫星导航系统的监测及监控系统。应用北斗卫星导航系统的救灾设备、人员动态部署、灾害监控、现场情况收集等,作为灾害应急指挥平台的重要信息来源及组成部分,实时掌握救灾资源、灾害情况分布及救灾工作开展情况。

(4)基于移动互联网的实时灾害信息采集方法。基于移动互联网的现场灾害数据采集及利用方式,通过救灾过程中的现场救援人员,最大程度的在应急指挥平台中反映现场动态情况,为救灾决策提供依据。

(5)区域灾害监测。应急抢险阶段,利用星载InSAR与地基InSAR相结合,开展堰塞湖滑坡体变形监测。星载InSAR主要用于区域性地质灾害监测;地基InSAR完成局部观测区域的二维微小变形监测。

基于上述方法获取基础地形数据,快速形成红石岩堰塞湖永久性整治工程区1:2000地形图及数字高程模型、堰塞湖区1:5000地形图及数字高程模型、堰塞湖区域地形三维模型、基于星载和地基inSAR的变形监测分析成果等。这些基础资料及时应用于堰塞湖规模、次生灾害范围确定与灾情评估,可为抢险救灾、工程勘察与设计等提供科学依据。

确定红石岩堰塞湖基本地形为:堰塞体位于红石岩水电站取水坝下游600 m处,堰塞体顶部左岸低、右岸高,右岸边缘为滑坡堆积体,顶部顺河向平均宽

度约 262 m、顶部横河向平均长度 301 m, 上游迎水面最低高程点 1222 m、下游最低点高程为 1091.7 m, 堰塞体左岸最高点高程 1270 m、右岸最高点高程 1349 m, 上游迎水面平均坡比约 1:2.5、下游面平均坡比约 1:5.5。1222 m 高程顶宽约 17 m, 顺河向下宽约 910 m; 沿 1222 m 高程坝轴线长度约 307 m, 估算堰塞体总方量约 1000 万 m^3 。至堰塞湖顶部 1222 m, 库容 2.6 亿 m^3 , 回水长度约 23 km。利用 GIS 及 BIM 相关技术手段, 快速测量堰塞体规模, 建立堰塞体的三维模型, 建立红石岩堰塞体的模型如图 1, 2 所示。



图 1 红石岩堰塞体平面图

Fig. 1 Plane graph of Hongshiyuan landslide-dammed object

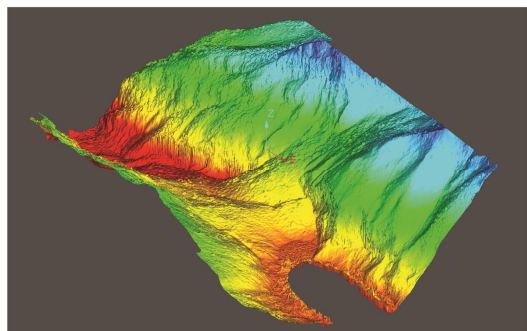


图 2 红石岩堰塞体三维地形模型

Fig. 2 3-D terrain model for Hongshiyuan landslide-dammed object

1.3 地质资料采集与工程地质条件分析

乏信息条件下堰塞湖应急处置过程地震地质资料、区域地质资料采集与处理的快速开展工作内容和方法包括以下几方面:

(1) 地震地质资料采集。根据工程规模及不同需求, 从国内外权威网站等, 选择搜索空间、时间及震级范围内的历史地震记录点, 记录数据涵盖震中地理坐标、震级、震源深度、发震日期及时间等, 下载适合构造解译光谱范围的高精度、多光谱遥感影像和地

形数据, 搭建三维场景和地质信息数据库, 开展主要控震构造活动性遥感地质解译。

(2) 区域地质资料采集处理。与国外大型地形地质资料网站合作, 或登陆国外相关国家地质调查部门网站, 收集、购买所需要的区域地质图及相关报告等。以三维仿真场景为基础搭建地质信息数据库, 地质信息数据库内容涵盖地形地貌、地层岩性、地质构造、物理地质现象、岩溶、水文地质条件、岩土体物理力学性参数、勘探试验成果、遥感地质解译成果、地质空间分析成果、地质附图及地质报告等信息。

基于上述方法和技术手段, 收集、处理工程区各类地质数据和资料, 辅以地形地貌资料, 完成了红石岩堰塞湖工程构造稳定性、库区工程地质条件、堰塞体基础工程地质条件、堰塞体工程地质条件、泄洪冲沙洞及溢洪洞工程地质条件、非常溢洪道工程地质条件、引水发电系统工程地质条件以及天然建筑材料等评价。

确定红石岩堰塞体基本工程地质特性为: 堰塞体快速倾倒崩滑, 物质主要来自右岸高处, 左岸亦有滑崩物质汇入; 以碎块石为主, 成份均主要为弱、微风化、新鲜白云质灰岩、白云岩。初步估测堰塞体堆积物岩性组合, 最大粒径大于 5 m, 块径 50 cm 以上的约占 50%, 块径 2~50 cm 以上的约占 35%, 块径 2 cm 以下的约占 15%。堰塞体渗流量较小, 初步判断堆石级配基本连续, 密实度较高。

2 堰塞湖灾害风险识别与评价

建立堰塞湖灾害风险因子识别方法体系, 明确评价内容。基于红石岩堰塞湖应急抢险数据采集与处理成果, 识别并评价了其边坡稳定性、堰塞体稳定性、泄洪通道安全性、对上下游淹没影响、溃决风险、次生灾害等影响, 为应急抢险指挥调度提供技术支撑。

2.1 风险识别与评价技术

堰塞湖灾害风险因子及其识别主要包括水文气象、地形地质、堰塞体危险性和溃决损失等 4 个方面。

水文气象资料是评价堰塞湖风险、制定抢险救灾方案所需的最重要、最基本信息。堰塞湖应急水文勘察包括堰塞湖回水长度、水面平均宽度、平均水深、堰前水位、堰塞体特征点高程、堰塞湖上下游河段典型断面测量、进出堰塞湖流量和测时水位蓄水量等。

地形地质信息包括地形资料和地质资料。堰塞湖险情发生后, 建立覆盖堰塞体及周边范围的大地坐标系, 实测堰塞体及周边范围的地形以分析堰塞体的体型, 包括堰塞体长度、宽度、高度、体积和形态等。对于堰塞体上下游影响范围内的崩塌滑坡、危岩体及

泥石流以及可能失稳边坡的地形、地貌、地层岩性、地质构造及水文地质条件,确定可能失稳边坡的分布范围、体积和边界条件,以及堰塞体和基础的结构物质组成及物理力学性质。

堰塞体危险性由堰塞湖规模、堰塞体物质组成和堰塞体高度3个风险因子共同确定。当3个分级指标所属级别相差两级或以上,且最高级别指标只有1个时,应将3个分级指标中所属最高危险级别降低一级。其余情况均应将分级指标中所属最高危险级别作为该堰塞体的危险级别。

堰塞体溃决损失根据堰塞体影响区的人口、重要城镇、公共或重要设施等情况进行判断,分为极严重、严重、较严重和一般。

2.2 红石岩堰塞湖风险识别与评价

(1) 风险评估

红石岩堰塞湖影响下游人口0.9万人、淹没耕地8500亩,下游两岸分布鲁甸县4个乡镇、巧家县5个乡镇、昭阳区1个乡镇,涉及3万余人、3.3万亩耕地。下游牛栏江干流建有天花板、黄角树两座水电站。

根据中华人民共和国水利行业标准《堰塞湖风险等级划分标准》SL450—2009^[1],红石岩堰塞湖总库容2.6亿 m^3 ,属大型堰塞湖;堰塞体高度超过70 m,堰塞体危险级别为极高危险;堰塞体溃决损失严重性为严重;堰塞湖风险等级为I级(最高级别),堰塞湖应急处置期洪水标准为5 a一遇($P=20\%$)。

(2) 堰塞体形成过程及稳定性分析

a) 堰塞体形成过程。采用FDEM-GIM方法模拟地震作用下山体失稳、滑动和堆积过程,由此得到红石岩堰塞湖滑坡体不同时刻的滑动状态,见图3。

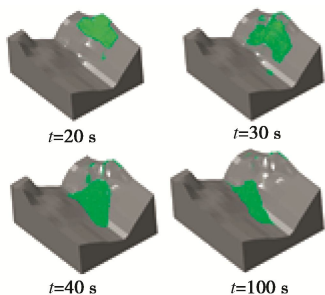


图3 红石岩堰塞湖滑坡体不同时刻滑动形态

Fig. 3 Sliding morphology of Hongshiyuan landslide-dammed object at different time

地震初期,滑动体出现裂缝贯通形成整体滑裂面,随地震荷载逐渐作用,滑动体内部损伤逐渐累积,19 s时,滑动体与下部基岩层明显地出现了分离;随后在地震和重力共同作用下滑坡体高速下滑,下滑过程中滑坡体不断破碎、解体,与对岸岩体和破碎块体之间发生强烈撞击、破碎,60 s后滑坡体逐渐稳定,在河

道中慢慢堆积密实,100 s基本静止形成堰塞体。

b) 堰塞体稳定性分析。根据堰塞体地质资料与工程地质条件,堆石料变形模量较高、坝后渗流量较小,推断堰塞体孔隙率低、密实度较高,沉降变形量不大;堰塞体高度较高,根据经验判断总体应力应变水平不高。初步判断红石岩堰塞体的沉降及应力应变水平与同规模堆石坝基本相当,变形稳定满足要求。通过分析多种工况下堰塞体最大横剖面渗流及坝坡稳定性,堰塞体在最高水位1222 m及以下水位挡水时,渗透、变形、坝坡稳定均满足要求,堰塞体安全稳定。

c) 堰塞湖边坡稳定性分析。红石岩堰塞湖右岸边坡崩塌后形成边坡高760 m、坡度 $70^\circ \sim 85^\circ$,崩塌后地形变化较大,边坡高陡近直立,整体呈一台阶状地形,上部滑床后缘为陡崖,坡表卸荷裂隙发育,遍布碎裂状块体,边坡后缘坡面约60 m(距崩塌边缘)范围内卸荷变形缝多见,发育频率约5 m一条。采用倾斜摄影方法对边坡的地形地质条件进行精细测绘,利用BIM平台建立边坡三维地形、地质及数值模型,回溯边坡失稳过程,反演边坡力学参数,正演边坡所处状态,判定应急抢险期间边坡整体稳定性。目前边坡整体稳定性良好,边坡整体稳定安全系数1.25,不会产生大规模二次塌滑。

(3) 堰塞湖溃决洪水计算

红石岩堰塞湖位于天花板水库上游18.8 km,黄角树水库上游57.6 km,考虑天花板电站大坝为混凝土拱坝,具有一定的抵御溃坝洪水翻坝的能力,而黄角树电站大坝为面板堆石坝,因此,溃坝风险处置的目标是保证黄角树水库大坝不漫顶,即最高水位不超过坝顶高程775 m。根据《堰塞湖风险等级划分标准》SL450—2009,红石岩堰塞湖应为风险I级的极高危险亚类,堰塞湖应急处置期洪水的重现期 ≥ 5 a,考虑其发生于汛期,且对下游两座电站影响较大,按历史最大洪水进行风险分析。

为研究红石岩堰塞湖溃堰对下游河道沿岸居民的影响,采用DB IWHR模型计算堰塞湖发生溃堰时下游河道沿程水面线主要敏感对象位置及水位如表1。

对于堰塞体的应急处置措施可采取开挖引流槽、人为控制使其湖水放空,达到除险的目的。对不开挖引流槽和开挖引流槽(底宽5 m,深8 m)两种方案按洪水重现期分别为5, 20, 100年进行溃决洪水计算分析,不开挖引流槽方案按坝顶高程1222 m起溃计算,开挖引流槽方案按引流渠渠底高程1214 m起溃计算,计算得不开挖引流槽和开挖引流槽两种应急处置方案的溃决洪水过程如图4, 5。

表 1 堰塞湖下游主要敏感对象位置水位

Table 1 Water levels of main sensitive positions in downstream of landslide-dammed lake

敏感点名称	距堰塞湖 距离/m	堰塞湖溃堰水位	
		1208 m	1200 m
		站点水位/m	
唐家平子	2942	1092.32	1090.95
沙坝河吊桥	4233	1087.72	1086.18
回龙湾	10465	1077.01	1074.02
老店子	13839	1076.27	1073.15
罗家梁子	17387	1076.18	1073.06
天花板大坝	19083	1076.13	1073.02
清水河汇口	19772	981.52	980.25
天花板厂址	21281	968.51	967.30
锅厂	34881	891.72	890.70
董家田坝	37719	872.42	871.54
下河坝	53517	763.58	758.08
梭山(大坝)	55709	763.17	757.45
黄角树大坝	57982	763.15	757.43
田坝	59683	701.44	700.33
箐岗平	64863	663.41	662.61
黄角树厂房	69950	601.71	600.46
小河沟	72004	573.71	573.19
麻壕	74856	560.40	560.25

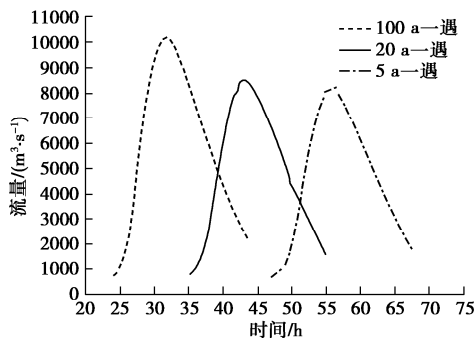


图 4 堰塞湖无引流槽溃坝流量过程线

Fig. 4 Dam-break discharge hydrograph of landslide-dammed lake without drainage tank

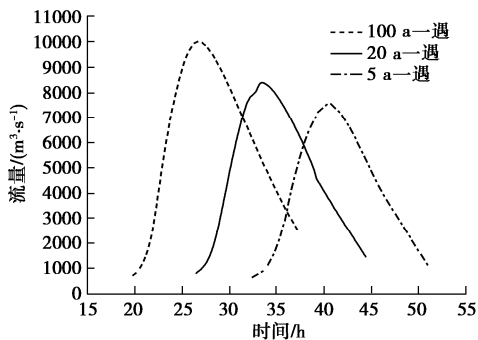


图 5 堰塞湖开挖引流槽溃坝流量过程线

Fig. 5 Dam-break discharge hydrograph of landslide-dammed lake with drainage tank

(4) 对上下游影响评价

红石岩堰塞湖上下游主要工程包括上游已建红石岩电站、小岩头电站和德泽水库，以及下游已建 90 m 高的天花板混凝土拱坝和 65 m 高的黄角树混凝土面板堆石坝。

a) 对上游影响评价。堰塞湖洪水调度按照自由泄流方式进行，调洪时段按 1 h 计。对上游居民点的影响：以泄流槽底板高程 1214 m、底宽 5 m 开挖后，起调水位 1180 m、遭遇 $P=20\%$ 洪水时，调洪高水位为 1212.89 m；起调水位 1190 m、遭遇 $P=20\%$ 洪水时，调洪高水位为 1214.70 m，需做好影响范围内居民的避险疏散工作。对上游小岩头电站的影响：小岩头厂房设计、校核水位分别为 1208.56 m 和 1209.5 m，小岩头厂房室外地坪高程 1211 m；以泄流槽底板高程 1214 m，底宽 5 m 开挖后，起调水位 1180 m、遭遇 $P=20\%$ 洪水时，调洪高水位为 1212.89 m，高于厂房地坪高程 1.89 m；起调水位 1190 m、遭遇 $P=20\%$ 洪水时，调洪高水位为 1214.70 m，高于厂房地坪高程 3.7 m，需充分重视厂房的防洪度汛安全问题；小岩头水电站大坝位于堰塞体坝址上游约 30 km，坝址下游枯水位在 1255 m 左右，远高于堰塞体坝前壅水，堰塞体壅水对小岩头大坝没有影响。

b) 对下游影响评价。根据表 1 和图 4，5 计算结果，红石岩堰塞湖发生溃堰对下游河段两已建电站大坝安全基本没有影响。天花板水电站最高洪水水位低于的大坝校核洪水位，入库洪峰较大， $Q_m=6345\text{ m}^3/\text{s}$ ，超过电站校核洪水洪峰流量，坝前水位较高会对库区淹没产生一定影响；黄角树水电站泄洪建筑最大泄量 $6781\text{ m}^3/\text{s}$ ，堰塞湖溃堰洪水经天花板水库的调蓄以后的入库洪峰仅 $4868\text{ m}^3/\text{s}$ ，相应水库调洪高水位 763.15 m，低于黄角树水电站正常蓄水位 770 m，但洪峰流量较大，可能会对库区产生淹没影响。

(5) 泄洪通道安全性评价

通过泄洪通道结构复核及泄流能力分析：引水隧洞段在应急处置期及后续处置期内运行整体是安全的，不会出现大规模衬砌的破坏、垮塌；红石岩引水隧洞及调压井作为堰塞体的应急处置及后续处置期的泄洪通道是安全的；堰塞体泄流槽具有一定的抗冲刷能力，过流过程中不会发生突溃；水位下降后，粗格栅拦污栅存在被堵塞垮塌的可能。可在进水口前沿或上游合适设置拦污漂，或通过拆除或爆破的方式打通一处缺口防止粗拦污栅垮塌。红石岩调压井施工支洞堵头检修门及调压井、堰塞体泄流槽作为堰塞湖在应急和后续处置期内的应急泄洪通道是安全的。

3 堰塞湖灾害应急指挥平台研发与应用

总结红石岩堰塞湖应急抢险与处置工程研究成果,研发形成了堰塞湖灾害应急指挥平台。堰塞湖灾害应急指挥平台作为红石岩堰塞湖应急抢险与处置工程相关灾害信息集成展示的终端,实时反映现场灾害情况、救灾设备、人员分布、受灾设施、人群分布、救灾资源分布等情况,基于灾害应急数据库,进行各类相关的分析功能,为抢险救灾工作提供了统一的数据共享机制及展示平台,并提供辅助决策功能,实现救灾应急联动,统一调配救灾资源,在快速响应和科学决策中发挥了关键作用。

3.1 平台介绍

堰塞湖灾害应急指挥平台基于“CS+BS+移动端”架构开发而成,支持无网、网络和移动3种应用场景。平台可在同一个框架下集中整合遥感影像、地理位置与地质信息、水文信息、灾区地形信息、救灾人员与受灾群众信息等基础数据,基础数据涵盖分属不同的机构或部门进行更新和维护的灾害数据、天气数据、地名地址数据、交通网络数据、河流数据等,建立相应的数据库;以基础数据为基础,应用水利、水电等专业技术,分析堰塞湖面临各类风险及相应并制定风险处置方案,包括溃坝、泥石流、地震、山洪、滑坡灾害等风险分析与处置模块,为灾害应急管理、应急决策提供准确、统一、全面支撑,见图6。



图6 堰塞湖应急指挥平台界面

Fig. 6 Platform interface of emergency command for landslide-dammed lakes

3.2 平台用户设置

堰塞湖灾害应急抢险系统对不同的用户开放不同权限,多用户协同合作,完成各自的职责和任务。主要用户及其权限操作如下:

(1) 应急抢险部门领导。应急抢险部门领导作为抢险工作的决策层,可以浏览平台上的所有信息,利用这些信息辅助决策、联络抢险人员、各方协调等。

(2) 相关部门情报人员。灾区周围水文站情报人

员、水库情报人员、气象部门情报人员、交通部门情报人员等,可以对平台内周围水库情况、水文情况、气象情况以及交通情况的数据进行增删改查,可以浏览抢险部门的联系方式、方便联络。

(3) 救灾人员。救灾人员可以在平台上传当前的救灾进展、最新救灾动态,以及相应的图片、视频、地理位置等资料。

(4) 社会公众。社会公众能够对所见的地质灾害及受灾情况进行拍照并上传到平台,或通过平台为抢险及救援等提供线索;获取天气信息、灾情信息、医疗救护点、道路中断及交通管制等信息。

3.3 平台功能

堰塞湖灾害应急抢险指挥平台主要功能包括:

(1) 灾区电子沙盘。根据无人机摄影建立的三维模型,得到灾区电子沙盘,包括堰塞体形态、空间分析功能、淹没分析功能、周边水库位置、周围人口分布状况、道路条件等。

(2) 水位-库容计算。根据堰塞体上游三维模型,计算得出“水位-库容”曲线,便于险情判断与洪水演进分析。

(3) 周围水情。收集灾区周围水库的基本情况,包括库容、防洪能力等,方便抢险时洪水调度;气象预警,了解来水情况,辅助救灾。

(4) 监测预警与应急。在灾区使用相应设备采集数据,实时更新水位情况、来水流量、出水流量、边坡稳定、有无后续地震所引发新的滑坡等。

(5) 受灾群众分布。基于GIS技术与无人机技术,直观看到灾区受灾群众的分布,便于第一时间对受灾群众进行救助。

(6) 救灾人员管理。为每支救灾队伍配备卫星定位设备,使得救灾队伍的位置信息能直观地反映在应急平台上,显示救灾人员的相应信息,方便联络。

(7) 救灾动态。可应急指挥平台公告板块发布公告,分享最新的灾情状况与救灾进展。

(8) 辅助决策。集合尽可能多的信息,在灾区电子沙盘上进行展示与决策模拟,适用于指挥部决策讨论。

(9) 指挥调度。指挥部门下达救灾指令,抢险人员提出抢险需求,上下级互动的主要模块,提供各方的联系信息。

(10) 资源管理。记录各类救灾资源的统计情况、使用情况、位置情况,为指挥部决策提供物资信息。

4 结 论

受水文地质条件不明、交通不便、施工环境危险

等不利因素制约, 巨型滑坡堵江形成堰塞湖排险处置工程难度非常大, 若采取措施操作不当, 将造成灾难性后果。依托红石岩堰塞湖灾害应急抢险和处置工程开展系统研究, 提出了堰塞湖应急抢险数据采集与集成方法, 建立了灾害风险识别及影响评价体系, 研发了应急抢险指挥平台, 形成了应急抢险成套技术, 成功应用于红石岩堰塞湖应急抢险与处置工程实践, 顺利完成了应急抢险和后续处置, 为后续整治利用打下了坚实基础, 相应技术成果可为堰塞湖应急抢险与处置工作提供技术支撑。

致 谢: 对中国水利水电科学研究院陈祖煜院士团队在堰塞湖溃决机理和堰塞湖溃决风险分析, 武汉大学周伟教授团队在堰塞体形成过程及稳定性分析理论和应急抢险实践中的大力支持和协助表示感谢!

参考文献:

- [1] 堰塞湖风险等级划分标准: SL450—2009[S]. 2009. (Standard for Classification of Risk Grade of Landslide Lake: SL450—2009[S]. 2009. (in Chinese))
- [2] 堰塞湖应急处置技术导则: SL451—2009[S]. 2009. (Technique Guideline for Emergency Disposal of Landslide Lake: SL451—2009[S]. 2009. (in Chinese))
- [3] 刘 宁, 程尊兰, 崔 鹏, 等. 堰塞湖及其风险控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (LIU Ning, CHENG Zun-lan, CUI Peng, et al. Dammed Lake and Risk Mangement[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [4] 许 萍, 邵生俊, 余芳涛, 等. 唐家山堰塞坝散粒堆积体开槽泄流的冲刷过程分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, **38**(9): 167 - 172. (XU Ping, SHAO Sheng-jun, SHE Fang-tao, et al. Analysis of hydraulic washing granule mass and discharging water flow of trench in Tangjiashan Barrier Lake[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed.), 2010, **38**(9): 167 - 172. (in Chinese))
- [5] 张宗亮, 张天明, 杨再宏, 等. 牛栏江红石岩堰塞湖整治工程[J]. 水力发电, 2016, **42**(9): 83 - 86. (ZHANG Zong-liang, ZHANG Tian-ming, YANG Zai-hong, et al. Remediation project of hongshiyuan dammed lake in Niulan River[J]. Water Power, 2016, **42**(9): 83 - 86. (in Chinese))
- [6] 刘建康, 程尊兰, 余 涛. 云南鲁甸红石岩堰塞湖溃坝风险及其影响[J]. 山地学报, 2016, **34**(2): 208 - 215. (LIU Jian-kan, CHENG Zun-lan, SHE Tao. Assessment of dam failure and secondary hazards for hongshiyuan dammed lake caused by Ludian Earthquake in Niulanjiang River[J]. Mountain Research, 2016, **34**(2): 208 - 215. (in Chinese))
- [7] 陈祖煜, 雷 盼, 张 强, 等. 白格堰塞体风险后评估-再次堵江洪水分析和应对措施[J]. 水利规划与设计, 2020(1): 1 - 5, 48. (CHEN Zu-yu, LEI Pan, ZHANG Qiang, et al. Post risk assessment of Baige landslide object - Flood analysis and Countermeasures of river blocking again[J]. Water Conservancy Planning and Design, 2020(1): 1 - 5, 48. (in Chinese))
- [8] 冯文凯, 张国强, 白慧林, 等. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(2): 415 - 425. (FENG Wen-kai, ZHANG Guo-qiang, BAI Hui-lin, et al. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge Baige landslide in Jinsha Rver on October 11[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(2): 415 - 425. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)