

极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案

张贵金^{1,2}, 罗舸旋子^{1,2}, 朱博渊^{1,2}, 陈会芳^{1,2}, 王振华³, 周芳军³

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;

3. 湖南涇天河工程建设投资有限责任公司, 湖南 永州 425500)

摘要:考虑洪水漫顶条件下的溃决模式, 拟定汛限水位、校核洪水位与校核洪水流量、多年平均入库流量的极端组合方式, 采用 DB-IWHR 模型计算堆石坝溃坝洪水过程; 利用 MIKE 21 模拟洪水演进过程, 取支流历史最大洪水过程并使其与干支流洪峰遭遇, 评估洪水对下游的淹没风险。以涇天河大坝为例, 根据库容、堆石材料参数等确定不同入库洪水组合方式及坝体侵蚀特性, 结果表明: 构建的溃坝及洪水演进模型能较好模拟溃坝过程及溃坝洪水对下游的淹没风险特征。最后提出库坝安全运行建议, 并制定避洪转移预案。

关键词:堆石坝; 极端条件; 溃坝风险; 应急预案; 涇天河大坝

中图分类号: TV122⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2021)02-0028-08

Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions//ZHANG Guijin^{1,2}, LUO Gexuanzi^{1,2}, ZHU Boyuan^{1,2}, CHEN Hui Fang^{1,2}, WANG Zhenhua³, ZHOU Fangjun³(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Hunan Centianhe Engineering Construction and Investment Co., Ltd., Yongzhou 425500, China)

Abstract: Taking a rockfill dam as a research object, the collapse modes of flood overtopping were considered. The flood process of rockfill dam break was calculated by DB-IWHR model under extreme conditions of the combination for flood limit water level, checked flood water level, checked flood discharge and multi-year average inflow. Flood evolution process was simulated using MIKE 21 to assess the downstream risk of flood inundation by taking the maximum discharge processes of historical floods of tributaries encountered with the flood peak of the main stream. The Centianhe Dam was selected as an example, in which different combinations of inflow floods and dam erosion features were determined according to the reservoir capacity and rockfill material parameters. The results show that the proposed dam break and flood routing models can effectively simulate the process of dam break and the characteristic of flood inundation risk in the downstream region. Finally, suggestions for safe operation of the dam are put forward and plans for flood avoidance and personnel transfer are correspondingly formulated.

Key words: rockfill dam; extreme condition; dam-break risk; emergency plan; Centianhe Dam

兴修水库、拦河筑坝有利于发挥防洪、发电和灌溉等多重效益,但同时也会带来低概率、高风险的大坝溃决事故,给下游地区造成重大安全隐患。对溃坝洪水进行研究可为下游风险预警和避洪转移提供关键信息,对防洪减灾意义重大^[1]。

漫顶溃决是堆石坝溃坝的主要方式之一^[2],其溃决机理为:漫顶洪水在坝体形成溃口,继而冲蚀坝料,并使得溃口边坡失稳,直至形成稳定的溃口断

面^[3-7]。针对堆石坝的溃决过程,当前主要利用数学模型开展研究,主要有参数模型、精细化模型和简化模型三类。参数模型多采用经验公式计算溃坝相关参数,而不考虑筑坝材料的冲淤特性^[6];精细化模型对物理机制的考虑最为充分,但计算时间较长,且受溃坝过程中复杂因素的影响,其结果的准确性与简化模型相比尚不明确,应用也较少^[6-8];简化模型既考虑了大坝的溃决机理,基于流深、剪应力、堤坝

基金项目:水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金(2019SS06);湖南省重大水利科技项目(湘水科计(2017)230-37, XSKJ2018179-32)

作者简介:张贵金(1964—),男,教授,博士,主要从事水利水电工程研究。E-mail: 493340832@qq.com

通信作者:朱博渊(1989—),男,工程师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: boyuan@csust.edu.cn

材料等特性模拟溃口和流量的变化特征,结果可靠,又能保证计算效率^[8-13],因此在堆石坝溃坝数值模拟中应用最为广泛^[14-17]。

洪水演进研究基于对洪水波算法的改进而不断成熟,其基本算法包括有限体积法、有限差分法和有限元法,据此开发了多种数学模型^[18-22]。由于溃坝洪水淹没范围广,多利用平面二维数学模型开展研究,其中 MIKE 21 应用较为普遍,采用有限体积法,计算效率和结果精度均较高^[23-25]。

本文阐述堆石坝溃坝和洪水演进模型构建的一般方法,并以涪天河大坝为例,计算溃坝洪水过程线和模拟洪水对下游的淹没风险,研究成果可为水库安全运行管理及编制应急预案提供参考,并对湘江上游潇水流域防洪安全、水资源科学利用具有重要价值。

1 研究方法

1.1 溃坝模型

1.1.1 计算原理

采用 DB-IWHR 简化模型对水流运动、坝料冲刷、边坡稳定性等因素进行综合考虑,假定溃口形态,采用宽顶堰过流形式和冲刷模型模拟坝料的冲刷,并分析溃口的纵向下切和横向扩展,从而建立坝体溃决过程^[12-17]:

a. 溃口断面流量。溃口出口水流按自由出流考虑,出流流量 Q 采用宽顶堰过流公式计算:

$$Q = CB(H - z)^{3/2} \quad (1)$$

式中: C 为综合流量系数,取值范围为 1.3 ~ 1.7^[24]; B 为溃口宽度; H 和 z 分别为库水位和溃口底部高程。

b. 溃口竖向侵蚀。在高速溃坝水流中,溃坝流量计算结果受参数影响极为敏感,指数形式的侵蚀率模型计算不易收敛,此处以双曲线模型表征侵蚀率和剪应力之间的关系:

$$e = \frac{\nu}{a + b\nu} \quad (2)$$

式中: e 为侵蚀率, mm/s; a 、 b 为筑坝材料侵蚀性系数^[24-25]; ν 为实际剪应力与临界剪应力的差值。

c. 溃口横向扩展。分析土体边坡的稳定性,采用双曲线经验模型确定概化梯形^[26]侧面的倾角增量 β (图 1), 计算溃口宽度 B :

$$B = B_0 + 2\Delta z + 2h \tan\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

式中: B_0 为溃口初始宽度; Δz 为溃口底高增量; h 为水流经过溃口跌落后的水深; β 为梯形初始倾角。

1.1.2 模型构建

a. 溃坝参数。模型参数由库坝特征参数、水力

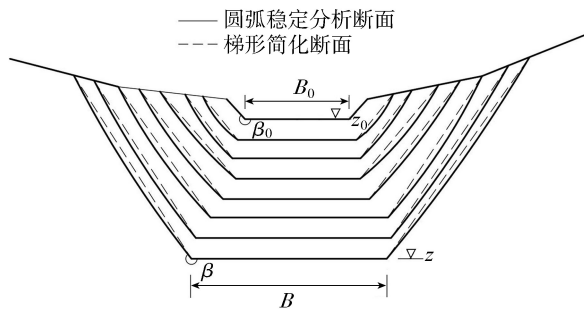


图 1 DB-IWHR 模型溃口扩展过程概化

学参数和土力学参数组成。库坝特征参数包括库容、初始库水位、入库流量及坝体溃口初始宽度、初始底高和启动流速,可分别查工程报告和根据模型内部公式计算得到。水力学参数包括宽顶堰综合流量系数和跌落系数,结合工程特征、根据计算和查阅规范得到^[27-28]。土力学参数^[29]包括土料容重、黏聚力、内摩擦角和侵蚀系数,取决于坝体的材料特性,可对坝体堆石材料取样分析获得,其中侵蚀性系数的取值范围随颗粒级配变化较大^[26-28],工程中需从偏安全角度取值。

b. 溃坝工况。为分析极端条件下的溃坝事故,充分考虑恶劣的入库洪水条件、不同溃坝可能性(包括泄洪设施异常等意外情况)和水库下游遭受不同强度洪水的损失程度,拟定的入库洪水量级一般为校核洪水^[30],对不同初始库水位(如汛限水位、校核洪水位)下的入库洪水(如校核洪水+多年平均入库流量、校核洪水+设计洪水或多场校核洪水叠加)进行组合,最终得到极端溃坝工况,从而对溃坝洪水过程线、库水位变化、溃口发展过程等进行计算。

1.2 洪水演进模型

1.2.1 计算原理

本文利用 MIKE 21 开展二维非恒定流水动力模拟计算的基本方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = hS \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} -$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (5)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} -$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (6)$$

式中： h 为水深； t 为时间； $x、y$ 为笛卡尔坐标系坐标； $u、v$ 为 $x、y$ 方向的速度分量； S 为源汇项； f 为科氏力系数， $f=2\omega\sin\varphi$ ； ω 为地球自转角速度； φ 为当地纬度； g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 ； η 为水位； ρ_0 为标准大气压下水的密度； ρ 为水的相对密度； p_a 为当地大气压； $\tau_{sx}、\tau_{sy}$ 为表面风应力在 $x、y$ 方向的分量； $\tau_{bx}、\tau_{by}$ 为底部切应力在 $x、y$ 方向的分量； $s_{xx}、s_{xy}、s_{yx}、s_{yy}$ 为辐射应力分量； $T_{xx}、T_{xy}、T_{yy}$ 为水平黏滞应力项； $u_s、v_s$ 为源汇项在 $x、y$ 方向的水流流速。

MIKE 21 对干湿边界自动进行处理，利用 3 个水深指标（干水深、淹没深度、湿水深）来判断网格单元的淹没状态：当单元上水深小于湿水深（0.1 m）、但尚未露滩时，将该网格上的动量通量设置为 0，只考虑质量通量；当单元上水深减小至露滩状态时，则忽略该单元，直至其被重新淹没。该算法能有效避免水深过小时的计算失稳现象。

1.2.2 模型构建

a. 模型边界及初始条件。大坝坝址处为模型上边界，下边界通常为溃坝下泄流量衰减至下游河道安全泄量时的断面位置。若大坝下游一定距离有水库、湖泊等大型水体，且溃坝洪水对其水位不会造成明显影响，可将下边界取在该水体处或其回水末端^[30]。以坝址处的最高洪水位和下游边界水位为端点，按线性递减的原则确定河道沿程水位，并平推至河道两岸得到模型的陆地边界（图 2）。上边界处给定溃坝洪水过程线，下边界处可给定出流断面的水位、流速、水位-流量关系等。在下游支流入汇处给定相应的洪水过程线。模型计算时河道初始条件为其沿程初始水位或水深，两岸地表未过水。

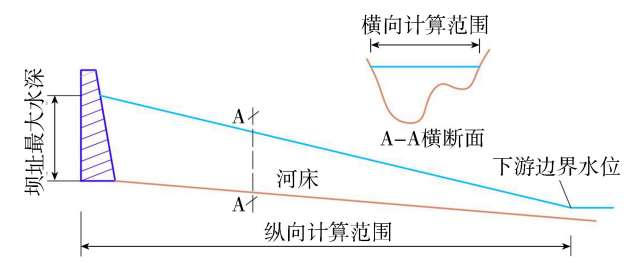


图 2 溃坝洪水演进模型计算边界确定方法

b. 地形处理。从地理空间数据云平台（URL: <http://www.gscloud.cn/>）获取研究区域的 DEM 数据（30 m×30 m），考虑到溃坝对下游的淹没范围大，该精度能满足计算要求和保证结果的可靠性。利用 ArcGIS10.2 将地形数据转换到 WGS-84 坐标系统，并换算至 1985 国家高程基准。为较好刻画研究区域边界和地形条件，采用非结构化三角形网格，并使网格尺寸小于地形测点的空间距离，以保证地形插值的精度。由于河流走向蜿蜒曲折，河道内浅滩、

深槽并存，且溃坝洪水沿河道行进，需对河道网格进行加密和细化处理。地形插值方法采用克里金方法，该方法对复杂地形的处理效果较好，近年来得到普遍应用^[31-34]。最后，将插值得到的连续地形与地图影像进行比对，修正失真区域。

c. 河道及地表糙率。对于实际发生溃坝的工程，可利用历史洪水和溃坝洪水对河道及地表糙率进行率定^[31]。若工程未发生溃坝事件，下游河道糙率可采用历史洪水资料进行率定，而两岸地表的糙率则需根据植被分布、房屋阻水等情况查阅相关手册^[35]、并参考同类工程选取。

2 算例

涑天河水库是湘江支流潇水流域上游以防洪为主的 I 等大（1）型水利枢纽，对下游城镇具有重要防洪保护任务，其扩建工程的堆石坝主体工程于 2017 年竣工，亟须进行溃坝风险评估，故将其作为本研究的算例。

基于溃坝冲蚀机制及宽顶堰过流特性计算溃口初始宽度、底高及启动流速；宽顶堰综合流量系数根据经验公式^[35]计算得到，并与已有研究成果^[26]中的取值范围比对，跌落系数在已有研究成果^[26]的基础上，结合本工程特性选取；土料容重、黏聚力和内摩擦角经现场调研分析和查阅《涑天河水库扩建工程正常蓄水位蓄水安全工作报告》^[36]得到。最终确定 DB-IWHR 模型的计算参数如表 1 所示。

表 1 DB-IWHR 模型计算参数

名称	符号	单位	取值
溃口初始宽度	B_0	m	21
溃口初始底高	z_0	m	323
启动流速	V_c	m/s	2.53
宽顶堰综合流量系数	C	$\text{m}^{1/2}/\text{s}$	1.42
跌落系数	m		0.8
土料容重	γ	N/m^3	26166
黏聚力	c	Pa	93900
摩擦角	φ	($^\circ$)	35

涑天河水库防洪库容加安全超高库容共计 6 亿 m^3 ，校核洪水 24 h 洪量为 5.7 亿 m^3 ^[34]，在汛期，按汛限水位运行且考虑泄洪洞正常工作时，水库可容纳 4 场以上校核洪水叠加，不考虑泄洪设施和水电站引水洞出流，也能完全蓄滞一场校核洪水。因此，为研究极端条件下的涑天河溃坝事件，假设泄洪设施遭遇地质灾害停止工作（如受库区雾江滑坡体垮塌堵塞），在初始水位为汛限水位和校核洪水位的条件下，入库洪水过程分别设定为校核洪水叠加多年平均流量和两场校核洪水叠加的情况。同时，根据涑天河筑坝材料的侵蚀性^[37]，侵蚀性系数

a 、 b 在常用范围 1.2 ~ 1.5 和 0.001 ~ 0.01^[26-27] 内分别选取中值(代表侵蚀性小)和最小值(代表侵蚀性大)。最终拟定计算工况如下(两种工况中校核洪水均采用 24 h 洪量计算):

工况 1。水库初始水位为汛限水位(310.50 m), 遭遇一场校核洪水(洪峰流量为 9 300 m³/s)后再以多年平均流量(84 m³/s)入库, 库水位逐渐上升直至漫顶溃坝, 取 $a = 1.35$, $b = 0.005$ 。

工况 2。水库初始水位为校核洪水位(320.27 m), 遭遇两场校核洪水(洪峰流量为 9 300 m³/s)入库, 库水位逐渐上升直至漫顶溃坝, 取 $a = 1.20$, $b = 0.001$ 。

图 3 显示, 两种工况均在库水位达到最大值 325 m 时开始发生溃坝, 下泄流量逐渐增大, 直至分别达到峰值 8 275 m³/s 和 41 528 m³/s, 随后流量逐渐减小至 84 m³/s 和 4 610 m³/s, 溃坝总历时分别为 100 h 和 24.5 h, 库水位最终降低至 251 m 和 248 m, 溃口深度达到 72 m 和 75 m。

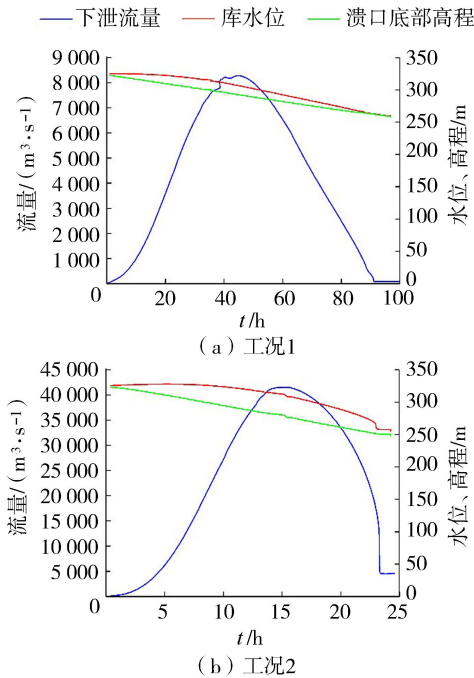
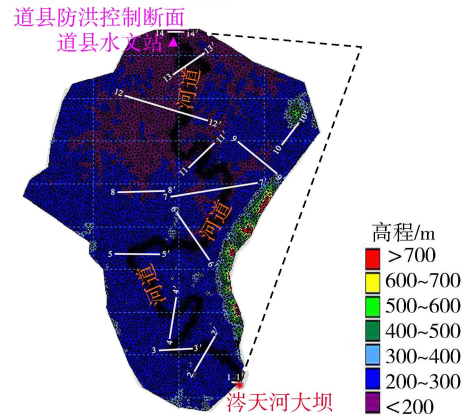


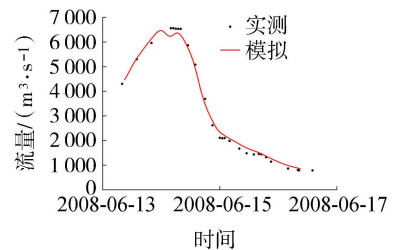
图 3 洮天河水库溃坝流量、库水位及溃口底部高程变化

模型上边界取洮天河水库坝址, 下边界取下游双牌水库回水末端道县县城防洪控制断面, 并根据河道沿程水位推算陆地边界, 最终得到计算范围(图 4(a))。计算范围内共有网格单元 46 409 个, 河道区域进行网格加密, 网格面积控制在 100 ~ 2 000 m², 满足河道洪水计算的网格要求^[29]。坝下游为山地、平原交错的复杂地形, 采用克里金方法插值并校正后的连续地形真实度较高(图 4(a))。上边界给定两种工况下的溃坝洪水过程线(图 3), 下边界给定道县防洪控制断面的水位流量关系。河道

沿程左岸有两条较大支流入汇, 为充分考虑洪水风险, 采用支流历史最大洪水过程线, 并通过试算使得支流入汇洪峰流量与坝址下泄洪峰流量在支流河口处遭遇。计算初始时刻坝下游河道水深为初始水面以下水深, 两岸地表未过水。将干流大水年汛期实测日均流量系列和支流实测同期流量系列叠加, 通过调整河道糙率, 使得洪水演进至下边界附近道县水文站时流量系列的模拟结果与实测成果吻合(图 4(b)), 最终确定河道糙率为 0.035。河道两岸植被主要为杂草和灌木, 房屋在县城区域较为密集, 经查阅《水力计算手册(第二版)》^[35] 和对比同类工程^[38] 最终取地表综合糙率为 0.05。



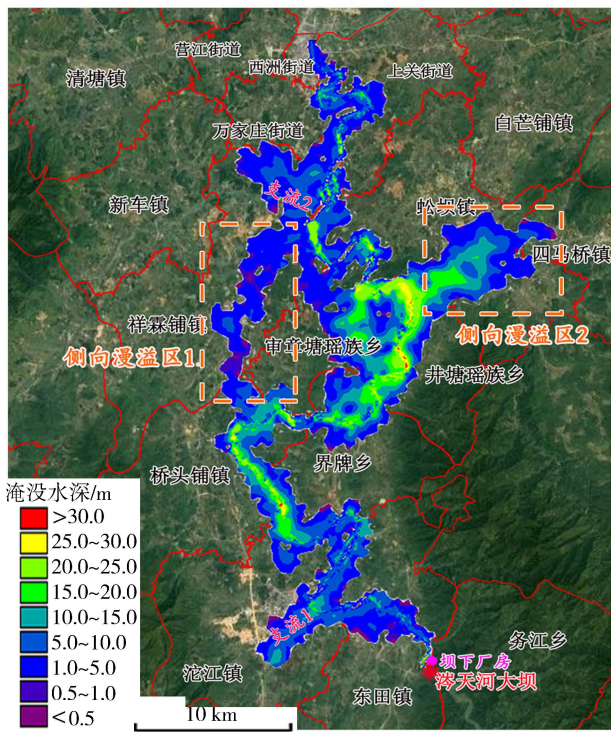
(a) 计算边界、网格及断面布设



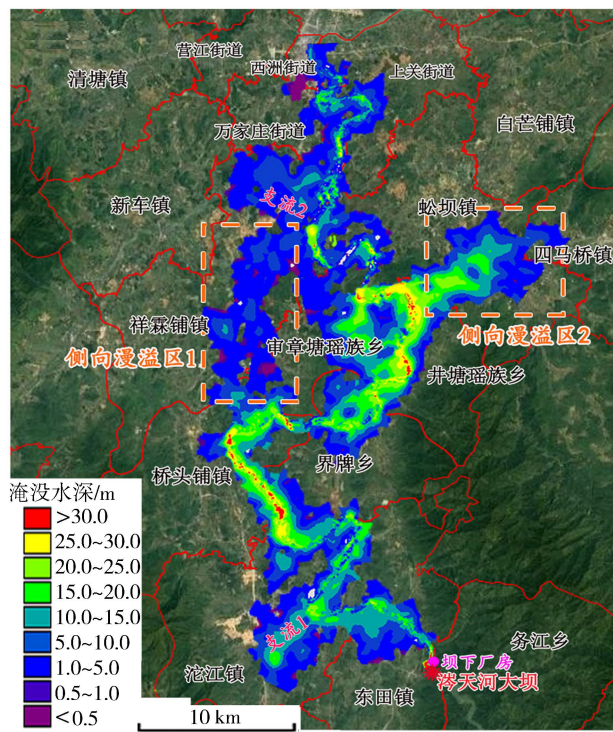
(b) 河道糙率率定结果

图 4 洪水演进模型构建及糙率率定

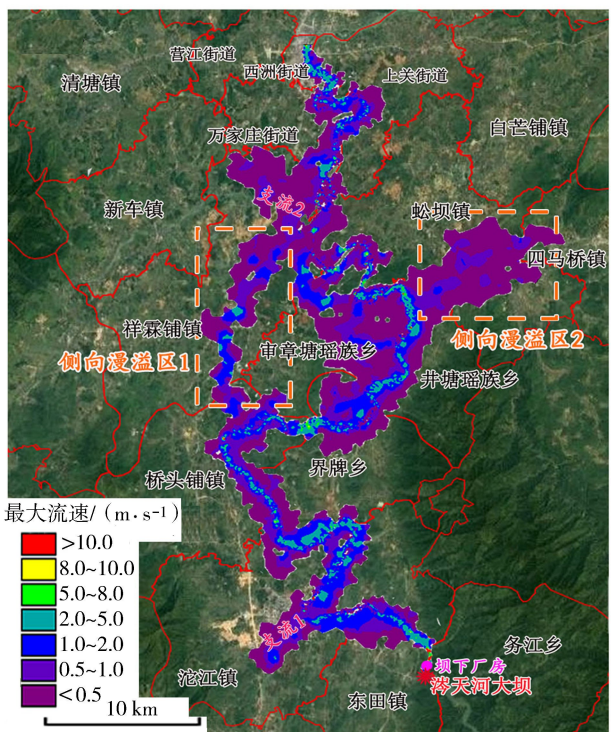
洪水向下游演进, 两种工况下的最大淹没面积分别为 232 km² 和 253 km²(图 5)。洪水演进受地形影响较大, 在河道两岸低洼地带发生侧向漫溢, 支流河口处, 洪水向支流上游发生倒灌(图 5)。最大流速与最大水深分布规律基本一致, 主河道附近以及受高地环绕的低洼地区、特别是计算范围内河道地形较低的中间区段, 淹没水深和流速均较大, 其余地区水流分散、淹没水深和流速较小(图 5)。近坝段水深和流速较大, 可能冲毁坝下厂房(图 5)。相较于工况 1, 工况 2 对下游区域的淹没风险显著增大, 表现为淹没水深及流速整体增大, 尤其是计算范围内上游区段的淹没水深大幅增加, 河道流速及两个侧向漫溢区域的流速增大明显, 其余区域亦有增大



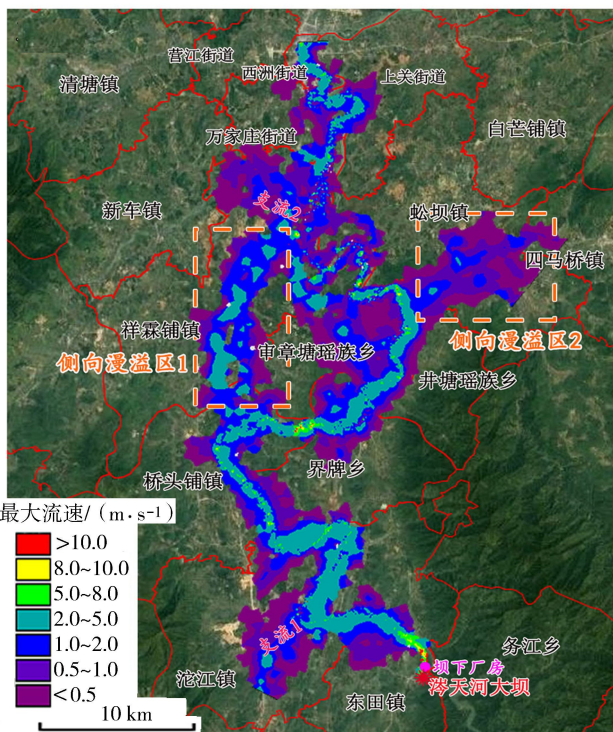
(a) 工况1最大水深分布



(b) 工况2最大水深分布



(c) 工况1最大流速分布



(d) 工况2最大流速分布

图5 溃坝洪水淹没情况

(图5)。溃坝洪水向下游迅速传播,到达各城镇断面(断面位置见图4(a))的时间沿程变晚,发生侧向漫溢后,干流河道的洪峰流量明显减小,而支流入汇后,干流河道的洪峰流量显著增大(图6)。相较于工况1,工况2洪水前锋到达各断面的时间大幅提前,各断面的洪峰流量显著增大(图6)。以上计算结果符合溃坝洪水演进的一般规律。

3 应急预案对策

水库预留库容结合配套泄洪设施一般足以容纳一定防洪标准的入库洪水(包括校核洪水叠加的情况),因此,漫顶溃坝工况的发生概率很小,即使发生,其溃坝过程和洪水演进所带来的风险要比本文所考虑的极端情况(沿程糙率取大值、溃坝洪峰与

表2 涿天河溃坝避洪转移预案

断面编号	洪水前锋到达时间/h		转移批次	
	工况1	工况2	工况1	工况2
1—1	2.33	0.33	1	1
2—2	8.16	3.66	1	1
3—3	12.66	5.50	2	1
4—4	20.83	8.66	2	2
5—5	24.50	10.16	3	2
6—6	32.66	12.66	3	2
7—7	36.66	14.50	3	2
8—8	39.66	14.13	3	2
9—9	42.50	16.66	3	2
10—10	65.13	22.33	3	2
11—11	57.50	21.00	3	2
12—12	10.33	3.13	3	2
13—13	68.83	21.50	3	2
14—14	72.16	23.00	3	2

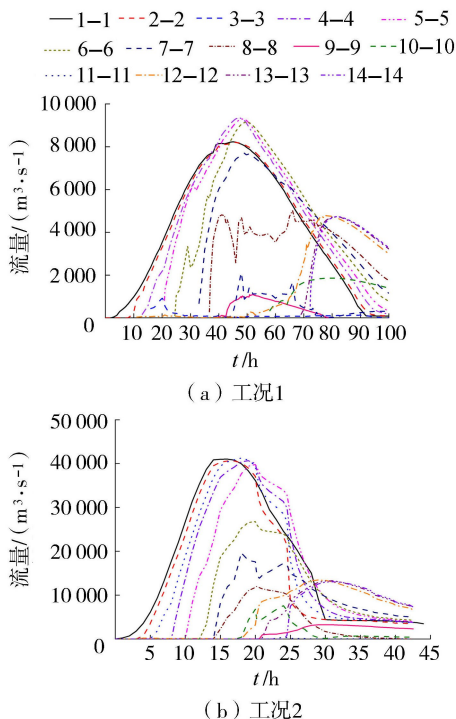


图6 重点断面流量过程线

支流历史最大洪水过程线的洪峰遭遇)小得多,对下游的影响将大幅减弱。基于以上成果,提出应急预案如下:

a. 做好建筑物安全管理,确保库坝安全运行。要确保汛期泄洪洞启闭设备的可靠性和电站正常引水发电,并根据降雨预报不断优化防洪调度方案;加强库区水位观测和大坝安全监测,特别要加强对库区边坡的安全监测,做好稳定和防护措施,防止出现严重地质灾害,影响泄洪洞正常运行。

b. 提高下游保护区防护标准,制定避洪转移预案。适当提高防护区重要建筑物和区段的防洪标准,确保下游地区信息传递渠道畅通,一旦遭遇不利工况,及时采用网络平台或广播对下游地区下达提醒、预警或撤退时间、线路等信息通知。在编制水库应急预案时,重点关注最不利工况下影响严重的区域,并根据洪水演进分析成果,按照溃坝洪水的到达时间进行生命财产转移。根据 SL 483—2017《洪水风险图编制导则》^[30],转移批次按洪水前锋到达时间划分,<12 h、12~24 h 和>24 h 的区域分别为第1批、第2批和第3批转移区,对照算例中两种极端工况(图6)的避洪转移预案如表2所示。

4 结语

漫顶溃坝是堆石坝溃决的主要方式之一,基于宽顶堰过流机制,将溃口形态概化为梯形断面,考虑不同极端洪水组合下水流对堆石料的侵蚀能力和溃口发展过程,通过合理选取侵蚀性系数等参数,采

用 DB-IWHR 模型对溃坝洪水过程线进行计算。进一步采用 MIKE 21 模拟溃坝洪水向下游演进的时空规律,为最大限度考虑洪水淹没风险,支流选取历史最大洪水过程线,并使其洪峰与干流洪峰在入汇口遭遇。采用克里金方法对地形进行插值、并修正失真区域,以保证下游地形导入精度。涿天河水库算例的结果表明洪水对下游地区的淹没面积、淹没水深和流速分布及沿程各断面的洪水传播特征均符合溃坝洪水演进的一般规律,且溃坝流量越大、洪水淹没风险越大。为规避洪水风险,需做好库坝建筑物安全管理,优化防洪调度,提高下游保护区防护标准,并按照溃坝洪水到达时间制定避洪转移预案。

参考文献:

- [1] 顾冲时,苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):1-12. (GU Chongshi, SU Huaizhi, Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):1-12. (in Chinese))
- [2] 方崇惠,段亚辉. 溃坝事件统计分析及其警示[J]. 人民长江,2010,41(11):96-101. (FANG Chonghui, DUAN Yahui. Statistical analysis of dam-break incidents and its cautions [J]. Yangtze River, 2010, 41(11):96-101. (in Chinese))
- [3] 钟启明,沈光泽,曹伟. 土石坝溃决机理模型试验研究进展[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(4):615-623. (ZHONG Qiming, SHEN Guangze, CAO Wei. Review on the model test for earth-rock dam breach [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4):615-623. (in Chinese))
- [4] 陈生水,曹伟,霍家平,等. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 岩土工程学报,2012,34(7):1169-1175. (CHEN Shengshui, CAO Wei, HUO Jiaping, et al. Numerical simulation for overtopping-include break

- process of concrete-faced sandy gravel dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1169-1175. (in Chinese)
- [5] 胡去劣, 俞波. 面板坝溃决过程模拟计算 [J]. 水动力学研究与进展, 2000, 15(2): 37-44. (HU Qulie, YU Bo. Numerical simulation for concrete rockfill dam failure [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2000, 15(2): 37-44. (in Chinese))
- [6] 陈生水, 陈祖煜, 钟启明. 土石坝和堰塞坝溃决机理与溃坝数学模型研究进展 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(8): 27-36. (CHEN Shengshui, CHEN Zhuyu, ZHONG Qiming. Progresses of studies on failure mechanism and numerical dam failure model of earth-rockfill dam and landslide dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8): 27-36. (in Chinese))
- [7] 王廷, 沈振中. 一种模拟面板砂砾石坝漫顶溃决的动床耦合分析模型 [J]. 水利学报, 2015, 46(6): 73-80. (WANG Ting, SHEN Zhenzhong. Mathematical model of overtopping-include break of concrete-faced sand-gravel dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 73-80. (in Chinese))
- [8] 周建银, 姚仕明, 王敏, 等. 土石坝漫顶溃决及洪水演进研究进展 [J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 1-15. (ZHOU Jianyin, YAO Shiming, WANG Min, et al. Review on overtopping failure and flood evolution of earth-rock dam [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 1-15. (in Chinese))
- [9] 蔡萁, 王昭升, 朱思宇, 等. 土石坝风险实时评估与综合预警模型 [J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 57-63. (CAI Qian, WANG Zhaosheng, ZHU Siyu, et al. A real-time risk assessment and synthetical early warning model of earth and rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4): 57-63. (in Chinese))
- [10] 李景远, 周孝德, 吴巍, 等. 土石坝漫顶溃决过程数值模拟研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4): 196-199. (LI Jingyuan, ZHOU Xiaode, Wu Wei, et al. Research on numerical simulation of break process of overtopping failure for earth-rock dam [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(4): 196-199. (in Chinese))
- [11] 方崇惠, 李海涛. 水库抢险应急预案中溃坝洪水及演进分析 [J]. 人民长江, 2014, 45(16): 29-32. (FANG Chonghui, LI Haitao. Analysis on dam-break flood routing for compiling of reservoir emergency plan [J]. Yangtze River, 2014, 45(16): 29-32. (in Chinese))
- [12] 赵洋. 基于 DB-IWHR 和 HEC-RAS 模型的堰塞体溃决洪水及演进研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [13] 李相南, 陈祖煜. 两种溃坝模型在唐家山堰塞湖溃决模拟中的对比 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 20-26. (LI Xiangnan, CHEN Zhuyu. Comparison of two models for back analysis of dam breach of Tangjiashan Barrier Lack [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 20-26. (in Chinese))
- [14] 胡良明, 张志飞, 李仟, 等. 梯级水库土石坝连溃模拟及风险分析 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(7): 65-73. (HU Liangming, ZHANG Zhifei, LI Qian, et al. Sequential dam break simulation and risk analysis of earth-rock dam of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(7): 65-73. (in Chinese))
- [15] CHEN Z, MA L, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan Barrier Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(4): 682-688.
- [16] WANG L, CHEN Z, WANG N, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode [J]. Engineering Geology, 2016, 209: 70-81.
- [17] ZHOU X, CHEN Z. Risk analysis and emergency actions for Hongshiyuan Barrier Lake [J]. Natural Hazards, 2015, 79(3): 1933-1959.
- [18] 谭箐, 王晓刚, 刘火箭, 等. 溃坝洪水在下游水库的演进及坝前爬高 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 26-30. (TAN Qing, WANG Xiaogang, LIU Huojian, et al. Dam-break flood evolution in downstream reservoir and runoff in front of dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 26-30. (in Chinese))
- [19] 王晓玲, 张爱丽, 陈华鸿, 等. 三维溃坝洪水在复杂淹没区域演进的数值模拟 [J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1025-1033. (WANG Xiaoling, ZHANG Aili, CHEN Huahong, et al. Three-dimensional numerical simulation of dam-break flood routing in the complex inundation areas [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1025-1033. (in Chinese))
- [20] 方园皓, 张行南, 夏达忠. HEC-RAS 系列模型在洪水演进模拟中的应用研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 12-15. (FANG Yuanhai, ZHANG Xingnan, XIA Dazhong. Research on application of series of HEC-RAS Model to flood routing simulation. [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2011, 33(2): 12-15. (in Chinese))
- [21] 黄潘阳, 来向华, 季有俊, 等. 舟山东港新城溃堤洪水演进数值模拟 [J]. 海洋学研究, 2017, 35(4): 61-68. (HUANG Panyang, LAI Xianghua, JI Youjun, et al. Numerical simulation of sea dikes breaching flood in Donggangxincheng of Zhoushan [J]. Journal of Marine Sciences, 2017, 35(4): 61-68. (in Chinese))
- [22] 龚政, 郭蕴哲, 杭俊成, 等. 沿海城市溃堤洪水模拟技术研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 78-85. (GONG Zheng, GUO Yunzhe, HANG Juncheng, et al. Advances in dike-breaking flood simulation technology in coastal cities [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 78-85. (in Chinese))
- [23] 沈洋, 王佳妮. 基于 MIKE 软件的溃坝洪水数值模拟 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 56-58. (SHEN Yang, WANG Jiani. Numerical simulation of dam break flood based on MIKE software [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(6): 56-58. (in Chinese))

- [24] 杨峰,倪玉芳,黄卫,等. 出山店水库溃坝洪水数值模拟研究[J]. 人民黄河,2020,42(1):27-31. (YANG Feng, NI Yufang, HUANG Wei, et al. Numerical modelling of dam-break flood in Chushandian Reservoir [J]. Yellow River, 2020,42(1):27-31. (in Chinese))
- [25] 陈建峰. 黑河金盆水库下游洪水模拟研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.
- [26] 陈祖煜,陈淑婧,王琳,等. 土石坝溃坝洪水分析:原理和计算程序[J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(2):16-23. (CHEN Zhuyu, CHEN Shujing, WANG Lin, et al. Analysis of earth-rock dam break flood: theory and calculation program [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2019, 2(2):16-23. (in Chinese))
- [27] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [28] SINGH V P. Dam breach modeling technology [M]. Amsterdam:Springer Netherlands, 1996.
- [29] 陈淑婧,王秋生,于沐,等. 土石坝漫顶溃决模型的分析比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):406-411. (CHEN Shujing, WANG Qiusheng, YU Shu, et al. Comparative analysis of models for overtopping-induced earth-rock dam breach [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(5):406-411. (in Chinese))
- [30] 中华人民共和国水利部. 洪水风险图编制导则:SL 483—2017[S]. 北京:中华人民共和国水利部,2017.
- [31] SIMON J B, KENNETH P, van der WAL D, et al. Long-term morphological change and its causes in the Mersey Estuary, NW England[J]. Geomorphology, 2006,81:185-206.
- [32] CUI Lifang, GE Zhenming, YUAN Lin, et al. Vulnerability assessment of the coastal wetlands in the Yangtze Estuary, China to sea-level rise [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015,156:42-51.
- [33] ZHU Boyuan, LI Yitian, YUE Yao, et al. Alternate erosion and deposition in the Yangtze Estuary and the future change [J]. Journal of Geographical Sciences, 2020,30(1):145-163.
- [34] 王明,张新华,张森,等. 山丘区小流域沟道洪水演进数值模拟研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2019,51(3):67-76. (WANG Ming, ZHANG Xinhua, ZHANG Miao, et al. Numerical simulation of flood routing in the gully regions of small mountainous watersheds [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2019,51(3):67-76. (in Chinese))
- [35] 武汉大学水利水电学院水力学流体力学教研室. 水力计算手册[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [36] 水利部水利水电规划设计总院. 涿天河水库扩建工程正常蓄水位蓄水安全鉴定工作报告[R]. 北京:水利部水利水电规划设计总院,2018.
- [37] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 湖南省潇水涿天河水库扩建工程初步设计报告[R]. 长沙:湖南省水利水电勘测设计研究总院,2012.
- [38] 长江水利委员会水文局. 湖南溇水皂市水利枢纽工程溃坝洪水计算及其影响分析报告[R]. 武汉:长江水利委员会水文局,2019.

(收稿日期:2020-05-07 编辑:郑孝宇)

(上接第27页)

- [10] 陈大宏,陈妮. 溢流堰水流的三维模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(5):54-56. (CHEN Dahong, CHEN Wei. Three-dimensional simulation of the over-flow weir flow[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science),2005,38(5):54-56. (in Chinese))
- [11] 李珊珊,李国栋,苗洲,等. 琴键堰不同堰高泄流特性的数值模拟[J]. 水利水电技术,2016,47(5):60-64. (LI Shanshan, LI Guodong, MIAO Zhou, et al. Numerical simulation study on discharge characteristics of piano-key weir with various heights [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(5):60-64. (in Chinese))
- [12] 王莹莹. 矩形渠道侧堰水力性能研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [13] 王佳伟. 矩形渠道薄壁侧堰试验研究与数值模拟[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [14] 扈霖. 斜交实用堰过流能力及水力特性的试验研究及数值模拟[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [15] 魏文礼,张泽伟,白朝伟,等. 双曲线型薄壁堰泄流规律的数值模拟[J]. 西北农林科技大学学报,2016,44(8):213-218. (WEI Wenli, ZHANG Zewei, BAI Chaowei, et al. Numerical simulation of discharge of a hyperbolic weir[J]. Journal of Northwest A&F University (Nature Science Edition), 2016,44(8):213-218. (in Chinese))
- [16] GHORBAN M, HADI A. Experimental and numerical analysis of flow over a rectangular full-width sharp-crested weir[J]. Water Science and Engineering, 2018,11(1), 75-80.
- [17] 司鹏飞,田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(6):28-32. (SI Pengfei, TIAN Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6):28-32. (in Chinese))
- [18] VATANKHAH A R, MIRNIA S H. Predicting discharge coefficient of triangular side orifice under free flow conditions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2018, 144(10):04018030.
- [19] QIAN Shangtu, XU Hui, FENG Jiangang, et al. Discussion of “predicting discharge coefficient of triangular side orifice under free flow conditions” by Ali R. Vatankhah and S H Mirnia[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2019, 145(8):07019008.
- [20] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

(收稿日期:2020-01-22 编辑:郑孝宇)