

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

土石坝溃坝洪水模拟与损失评估

蒋正淳, 陈小康, 杜镇瀚, 杨蒙, 单熠博, 钟启明

Study on flood simulation and loss assessment for embankment dam events

JIANG Zhengchun, CHEN Xiaokang, DU Zhenhan, YANG Meng, SHAN Yibo, ZHONG Qiming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240917002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国水库溃坝及其生命损失统计分析

Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China

水利水电工程学报. 2023(1): 1 <https://doi.org/10.12170/20220919001>

混凝土坝洪水漫顶生命风险评价

Assessment of life risk due to flood overtopping of concrete dam

水利水电工程学报. 2022(2): 85 <https://doi.org/10.12170/20210402001>

河道堰塞生命损失评估方法研究

Study on the evaluation method of life loss due to river clogging

水利水电工程学报. 2021(5): 58 <https://doi.org/10.12170/20200827002>

开封市7.20特大暴雨城市内涝风险评估

Urban waterlogging risk assessment of 7.20 heavy rainfall in Kaifeng City

水利水电工程学报. 2022(4): 11 <https://doi.org/10.12170/20210824002>

基于AHP-集对分析的矿井水资源利用风险评估

Risk assessment of mine water resource utilization based on analytic hierarchy process and set pair analysis

水利水电工程学报. 2021(3): 126 <https://doi.org/10.12170/0201120002>

近期我国土石坝溃决或出险事故及其启示

Recent earth-filled dam failures or accidents of reservoirs in China and their enlightenment

水利水电工程学报. 2023(1): 27 <https://doi.org/10.12170/20211024002>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240917002

蒋正淳, 陈小康, 杜镇瀚, 等. 土石坝溃坝洪水模拟与损失评估 [J]. 水利水运工程学报, 2025(6): 137-151. (JIANG Zhengchun, CHEN Xiaokang, DU Zhenhan, et al. Study on flood simulation and loss assessment for embankment dam events[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(6): 137-151. (in Chinese))

土石坝溃坝洪水模拟与损失评估

蒋正淳¹, 陈小康¹, 杜镇瀚¹, 杨 蒙¹, 单熠博¹, 钟启明^{1,2,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 土石坝溃坝洪水风险评估对溃坝应急预案编制和抢险救灾具有至关重要的意义。目前土石坝溃坝洪水流量过程计算时对复杂结构坝体溃决机理考虑较少, 溃坝洪水损失评估方法考虑的影响因素不够全面。提出了一个机理-数据双驱动土石坝溃坝洪水模拟与损失评估方法, 可考虑土石坝的溃坝过程、溃坝洪水演进过程, 并采用贝叶斯模型定量评估溃坝洪水导致的生命与经济损失。评估方法主要包括 3 个模块: 溃坝过程模拟方法、溃坝演进洪水致灾因子计算方法、生命与经济损失评估方法。并采用该方法对 2018 年中国射月沟溃坝案例进行反演分析, 计算结果与实测值相比, 溃口洪水峰值流量、溃口最终尺寸和溃口峰值流量出现时间的相对误差小于 15%, 淹没区典型断面最高水位的最大误差为 -0.21 m, 淹没区生命损失结果相近, 验证了该风险评估方法计算结果的合理性。研究结果可为溃坝洪水应急防控和防灾减灾提供科技支撑。

关键词: 土石坝; 溃口流量; 洪水演进; 生命损失; 经济损失; 风险评估

中图分类号: TV698.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2025)06-0137-15

水库大坝的修建为人类带来巨大的经济和社会效益, 但受自然灾害或人为因素的影响, 在其生命周期内也存在潜在的溃坝风险。由于全球气候变化, 近年来世界各地发生了多起超标准洪水导致的大坝溃坝事件, 中国也发生了多起极端暴雨引发的溃坝灾难^[1-2]。因此, 科学合理的土石坝溃坝洪水风险定量评估对制定应急响应决策至关重要。土石坝溃坝洪水风险评估旨在量化潜在的洪水损失, 其关键是评估溃坝洪水流量过程、溃决洪水演进特征和洪水损失评估。

为了获得土石坝溃坝洪水流量, 常用两类数学方法, 即基于溃坝案例统计资料的经验模型和基于溃坝机理的数学模型。经验模型一般通过分析土石坝溃坝案例, 通过统计坝体形态参数、水库特征和坝料特性来预测溃口峰值流量、溃口最终尺寸和溃坝历时, 但经验模型无法提供溃口洪水流量过程线和溃口形态演化过程^[3], 如 USBR 模型^[4]以及 Froehlich^[5]、Xu 等^[6]和 Zhong 等^[7]提出的经验模型; 基于溃坝机理的数学模型一般考虑溃坝过程中的水动力特征、坝料冲刷过程和坝体结构破坏过程, 预测溃口洪水流量过程和溃口形态发展过程^[8], 如 NWS-BREACH 模型^[9]、DLBreach 模型^[10]、DB-IWHR 模型^[11]、DABA 模型^[12]和 NHRI-DBRK 模型^[13]。

溃坝洪水演进过程模拟主要有两种方法, 即经验公式法和数值分析法。对于经验公式法, 洪水演进过程中下游各控制断面的洪峰流量和到达时间可由经验公式求得^[14], 经验公式法一般基于大量的历史数据和统计信息, 无法准确反映复杂情况下的洪水演进过程, 局限性较大。数值模拟方法一般选择 N-S 方程作为

收稿日期: 2024-09-17; 修回日期: 2024-11-22; 接受日期: 2024-12-02

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目(U22A20602); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y324006)

作者简介: 蒋正淳(1998—), 男, 浙江杭州人, 博士研究生, 主要从事土石坝溃坝洪水风险评估。

E-mail: 17857698334@163.com 通信作者: 钟启明(E-mail: qmzhong@nhri.cn)

控制方程,采用特征法、有限差分法、有限元法或有限体积法等数值分析方法计算,相对于经验公式法可以更精确地模拟复杂的洪水演进过程,提供详细数据和可视化结果^[15-17]。此外,还有一系列广泛使用的溃坝洪水演进模拟常用软件,如 FLDWAV^[18]、DHI MIKE FLOOD^[19] 和 HEC-RAS^[20]。

溃坝洪水损失一般侧重于生命损失和经济损失的统计分析。生命损失的计算方法主要有 3 种,即经验模型、物理模型和折中模型^[21]。经验模型通过整合历史数据和数学方法来描述生命损失与影响因素之间的关系,计算方法简单直观,适用于快速的生命损失估算,但无法准确预测特殊情况,并且缺乏生命损失背后的具体影响因素,如 Brown 等^[22-25] 提出的生命损失经验模型;物理模型以个人为研究对象,关注人类在极端条件下的稳定性和行为模式,能够揭示生命损失的个体差异,因此也需要大量的统计数据,如 Abt 等^[26-28] 和 Jonkman 等^[29] 提出的生命损失物理模型;折中模型同时具有经验模型和物理模型的特点,可以根据具体情况调整参数和方法,适用于不同情况的生命损失评估,如 Aboelata 等^[30-31] 提出的生命损失折中模型。

经济损失一般是指由于溃坝洪水造成的可由货币直接计量的各类损失,主要可分为直接经济损失与间接经济损失;由于间接经济损失定义不统一、界限区分不明确,本文主要关注直接经济损失。直接经济损失的评估方法主要包括数理统计模型和模糊数学模型^[32]。数理统计模型建立在大量调查数据基础上,依赖于社会经济资料和各行业财产损失率资料,研究淹没水深、洪水流速以及淹没时间等要素与经济损失之间的关系,能提供较为客观和可靠的损失评估结果,但对数据质量和完整性较高,如 Das 等^[33-35] 提出的数理统计模型。模糊数学模型根据溃坝洪水淹没情况,结合区域内的洪水特征、气象条件、社会经济情况等不确定性信息,构建基于数学模型的综合评估方法,适用于缺乏准确数据或参数的情况,如武靖源等^[36-38] 提出的模糊数学模型。

目前,溃口洪水流量过程、溃坝洪水演进和溃坝洪水损失评估通常是分模块独立开展模拟,缺乏统一考虑溃坝致灾全过程洪水风险的定量评估方法。另外,拥有可靠溃口洪水流量和致灾后果记录的溃坝案例较为稀少,也限制了溃坝洪水风险评估方法的验证。本文以 2018 年 7 月 31 日中国射月沟水库土石坝溃坝案例为研究对象,针对该水库大坝的坝型,提出机理-数据双驱动的沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝过程数学模型,结合溃坝洪水演进数值模拟分析,建立基于贝叶斯网络的溃坝洪水风险定量评估方法,并通过调查资料验证方法的合理性。另外,对于其他坝型,如混凝土重力坝或拱坝、均质土坝、土质心墙坝、面板堆石坝等,溃坝洪水流量过程计算应选取相应坝型的溃坝模型。

1 沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝过程模拟方法

基于沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝机理,建立可反映其溃坝过程的数学模型。由于溃坝过程持续时间相对较短,忽略溃坝过程中渗流效应。模型主要由以下 4 个部分组成(图 1)。

(1)水动力模块(见图 1(a))。在计算上游库水位高程变化时,采用水量平衡方程计算库水位的变化:

$$A_s \frac{dz_s}{dt} = Q_{in} - Q_b - Q_{spill} - Q_{Tunnel} \quad (1)$$

式中: A_s 为水库库面面积; z_s 为水库库水位; t 为溃坝发展时间; Q_{in} 为入库流量; Q_b 为溃口流量; Q_{spill} 为溢洪道出流量; Q_{Tunnel} 为闸门出流量。

溃口洪水流量采用宽顶堰公式:

$$Q_b = k_{sm} (c_1 b H^{1.5} + c_2 m H^{2.5}) \quad (2)$$

式中: k_{sm} 为尾水淹没修正系数; c_1 和 c_2 为修正系数; b 为溃口底宽; H 为溃口处水深; m 为溃口边坡坡比的倒数。

(2)坝料冲蚀模块(见图 1(b))。坝顶坝料的冲蚀量采用基于切应力的冲蚀速率公式计算:

$$E = k_d (\tau_b - \tau_c) \quad (3)$$

式中: E 为冲蚀率; k_d 为冲蚀系数, 通常由试验量测或经验公式求取; τ_b 为水流剪应力; τ_c 为坝料临界剪应力。

对于下游坡的变陡过程, 可由式(4)表示:

$$d\beta/dt = \left(E_1 - \frac{E_0}{\cos\beta_0} \right) / l_1 \quad (4)$$

式中: $d\beta$ 为下游坡坡角增加值; E_1 为下游坡初始冲坑处冲蚀率; E_0 为坝顶处冲蚀率; l_1 为初始冲坑距溃口长度。

下游坝壳料的溯源冲蚀过程, 可由式(5)表示:

$$dx/dt = C_T q^{1/3} H_e^{1/2} \quad (5)$$

式中: dx/dt 为溯源冲刷速率; C_T 为溯源冲刷系数; q 为溃口单宽流量; H_e 为水流高度。

(3)下游坡堆石体溃口发展模块(见图 1(c))。坝轴线处的溃口发展过程可表示如下:

$$\Delta B_t = \frac{n_{loc} \Delta z_b}{\sin\varphi_1} \quad (6)$$

$$\Delta B_b = m_{loc} \Delta z_b \left(\frac{1}{\sin\varphi_1} - \frac{1}{\tan\varphi_1} \right) \quad (7)$$

式中: φ_1 为溃口堆石体的内摩擦角; ΔB_t 为溃口顶宽增加值; ΔB_b 为溃口底宽增加值; m_{loc} 为溃口所在位置; Δz_b 为溃口底部冲蚀深度增加值。

随着溃口的逐渐发展, 溃口边坡的稳定性采用极限平衡法进行分析。假设破坏面为平面, 边坡滑动力 F_d 可表示为:

$$F_d = 1/2 \gamma_s H_s^2 \left(\frac{1}{\tan\theta} - \frac{1}{\tan\beta} \right) \sin\theta \quad (8)$$

边坡的抗滑力 F_r 可表示为:

$$F_r = 1/2 \gamma_s H_s^2 \left(\frac{1}{\tan\theta} - \frac{1}{\tan\beta} \right) \cos\theta \tan\beta + \frac{C_1 H_s}{\sin\theta} \quad (9)$$

式中: β 和 θ 分别为溃口边坡失稳前后坡角; γ_s 为土体重度; C_1 为坝壳料黏聚力; H_s 为溃口边坡高度。

边坡失稳的判定标准为:

$$F_d > F_r \quad (10)$$

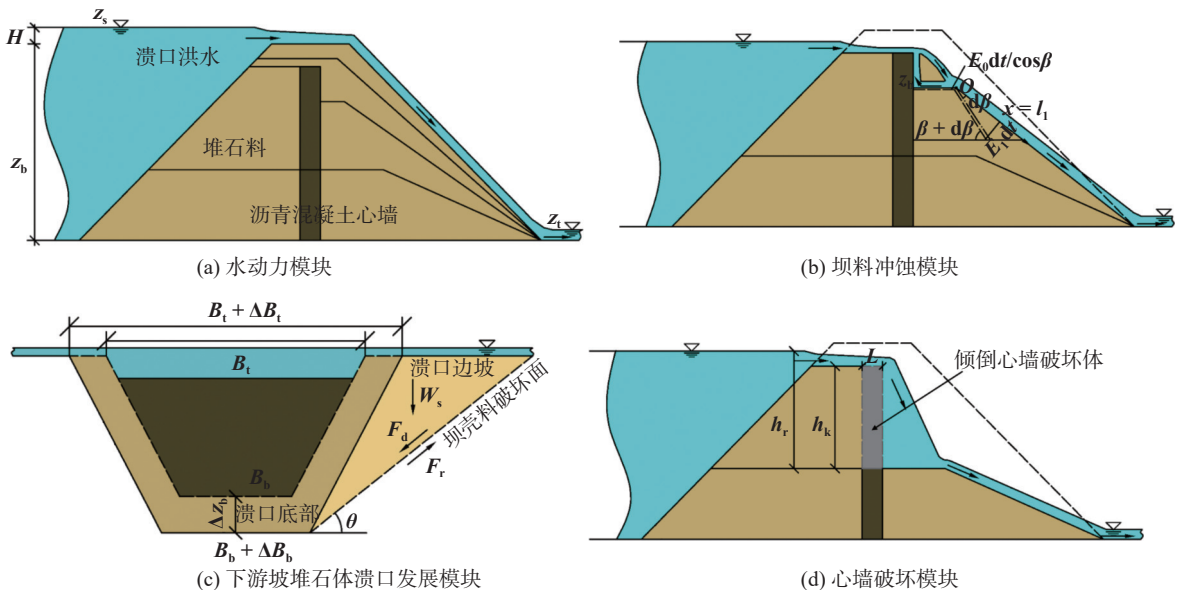


图 1 沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝过程数学模型示意

Fig. 1 Numerical model for the breach process of asphalt concrete core dam

(4)心墙破坏模块(见图 1(d))。计算采用力矩平衡法计算临空心墙的折断过程。作用在心墙破坏面的折断力矩 M_0 可表示为:

$$M_0 = F_s h_k + (F_w + F_e) \frac{h_k(2h_r - h_k) + h_r}{3(h_r - h_k + h_r)} \quad (11)$$

作用在心墙破坏面的抵抗力矩 M_r 可表示为:

$$M_r = 2A_t C_2 \frac{h_k(2h_r - h_k) + h_r}{3(h_r - h_k + h_r)} + \frac{1}{2} W_c L_c \quad (12)$$

式中: F_s 为溃口漫顶水流作用在心墙顶部的剪切力; F_w 为库水作用在心墙上的水压力; F_e 为上游坝壳料作用在心墙上的土压力; h_k 为破坏心墙的高度; h_r 为库水位距离心墙破坏面的高度; A_t 为破坏心墙的截面积; C_2 为心墙的黏聚力; W_c 为破坏面以上心墙的重量; L_c 为心墙破坏面宽度。

心墙发生倾覆破坏的临界条件为:

$$M_r = M_0 \quad (13)$$

基于所建立的溃坝数学模型, 沥青混凝土心墙坝的漫顶溃坝过程计算流程可用图 2 表示。

2 溃坝演进洪水致灾因子计算方法

溃坝洪水演进是生命和经济损失产生的直接原因, 建立了溃坝洪水与潜在损失的联系。通过基于质量守恒和动量守恒的一维或二维 N-S 方程^[39], 可以有效模拟非恒流溃坝洪水的演进过程。而洪水严重程度和淹没历时等洪水致灾因子是衡量溃坝洪水损失的关键。

2.1 洪水严重程度

洪水严重程度是衡量淹没区损失的重要评价指标, 可表示为:

$$S_D = H_L v_L \quad (14)$$

式中: S_D 为洪水严重程度; H_L 为断面处的水深; v_L 为断面处的流速。

利用溃坝洪水演进数值分析成果, 可确定坝址下游指定区域水深和流速, 进而得出洪水严重程度。此外, 对于经验法, 特定断面的洪峰流量计算公式^[14]为:

$$Q_{pL} = V_w / \left(\frac{V_w}{Q_p} + \frac{L}{v_L k} \right) \quad (15)$$

式中: Q_{pL} 为某断面的洪水流量; V_w 为溃坝时库容; Q_p 为溃口峰值流量; L 为某断面到坝址的距离; k 为经验常量, 山区可取 1.1~1.5, 丘陵区可取 1.0, 平原区可取 0.8~0.9^[40]。

某一断面的水深计算公式为:

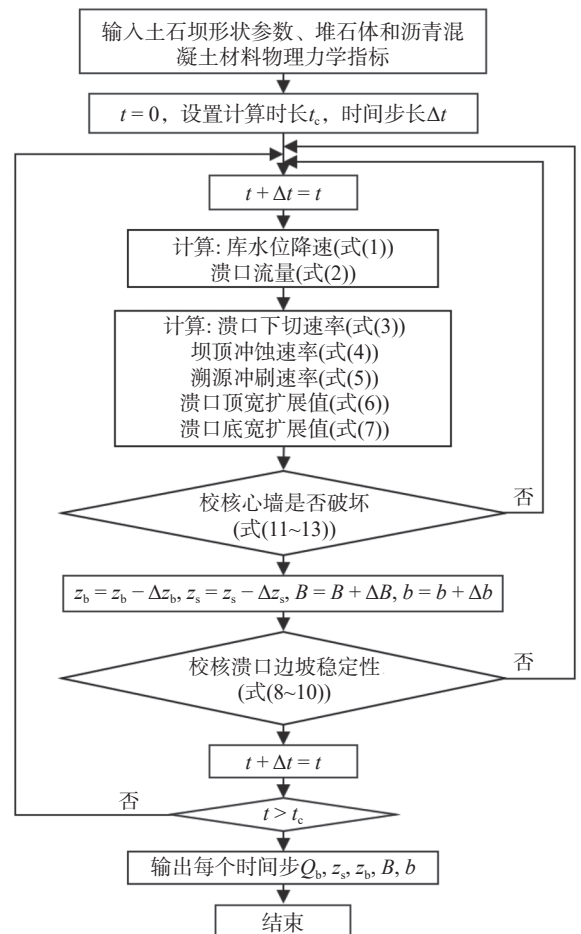


图 2 沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝过程计算流程

Fig. 2 Calculation flowchart for the breach process of asphalt concrete core dam

$$H_L = \frac{Q_{pL}}{v_L B_L} \quad (16)$$

式中: B_L 为特定截面的宽度。

2.2 洪水持续时间

洪水到达时间指的是溃坝水流抵达特定区域的时间, 可利用溃坝洪水演进数值分析结果获得。对于经验法, 洪水到达时间受坝高、水库库容、距坝址距离和基流水深的影响, 其经验计算公式^[41]为:

$$T_A = K_0 \frac{L^{1.75} (10 - H_0)^{1.3}}{V_w^{0.2} H_d^{0.35}} \quad (17)$$

式中: T_A 为洪水到达时间; K_0 为时间系数, $K_0 = 0.7 \times 10^{-3}$; H_0 为平均基流深度, 可取 2 m; H_d 为土石坝坝高。

洪水上涨时间是指从溃坝流量到达一定区域到洪水上涨到危险水深之间的持续时间, 可利用溃坝洪水演进数值分析结果获得。对于经验法, 洪水上涨时间计算公式^[21]为:

$$T_R = T_e \alpha_t \beta_t \gamma_t \quad (18)$$

式中: T_R 为洪水上涨时间; T_e 为溃坝持续时间; α_t 为洪峰出现时间与溃坝持续时间之比, 可取 0.222 5; 当遭遇洪峰, 水深 $h_p \leq 1.5$ m 时, $\beta_t = 1$, $h_p > 1.5$ m 时, $\beta_t = 1.5/h_p$; γ_t 为能耗系数, 当距坝址距离为 0~4.8 km、4.8~12.0 km、12.0~36.0 km 或 36.0 km 以上时, 能耗系数可分别取 1.00、1.05、1.10、1.20。

3 生命与经济评估方法

溃坝洪水造成的损失主要包括生命损失和经济损失, 除了洪水严重程度和洪水持续时间等致灾因子外, 其他客观和主观影响因素也对损失产生重要影响, 本节基于溃坝洪水的致灾因子, 分析生命损失和经济损失的影响因素, 并建立考虑各影响因素的生命与经济评估贝叶斯网络模型。

3.1 生命损失影响因素分析

生命损失指洪水中的死亡人数, 主要受疏散水平和溃坝水流特性的影响。疏散的成效取决于疏散所需时间与可用时间之间的关系:

$$T_w + T_R > T_n \quad (19)$$

式中: T_w 为预警时间; T_n 为疏散所需时间。

预警时间是指从警报发出到溃坝洪水到达特定区域之间的时间间隔。疏散所需时间是指危险人群从收到警报到成功疏散到安全区域所需的总时间, 包括警报启动时间、警报传播时间、响应时间和撤离时间, 其中警报传播时间可使用双参数 Weibull 分布公式^[42]来描述。

$$p_T = 1 - \exp(-\varepsilon T^\varphi) \quad (20)$$

式中: p_T 为对应在 T 时刻收到警告的人口比例; ε 和 φ 为 Weibull 分布中的系数。

对数正态分布函数可以计算以水流深度为自变量的生命损失率^[43]。

$$F_D(h) = \Phi \left[\frac{\ln(h) - \mu_D}{\sigma_D} \right] \quad (21)$$

式中: $F_D(h)$ 为流量深度为 h 时的损失率; Φ 为标准正态分布函数; μ_D 和 σ_D 分别为平均值和标准偏差。

3.2 经济损失影响因素

经济损失按照经济类型可分为: 农牧渔业损失(第一类)、林牧业损失(第二类)、工商业及住宅财产损失(第三类), 以及第三产业与基础设施损失(第四类)四大类。

可以建立水深与各经济类型损失率之间的关系^[44]:

$$R_{Loc}(i, h) = \begin{cases} Mh^N & h \leq 3.5 \\ R(3.5) & h > 3.5 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $R_{Loc}(i, h)$ 为经济类型 i 对应水深 h 的直接经济损失率; M 和 N 分别为损失拟合系数和损失拟合指数。

3.3 基于贝叶斯网络的溃坝洪水损失评估方法

采用贝叶斯网络对土石坝溃坝导致的生命与经济损失进行定量评估。图 3 展示了用于土石坝溃坝洪水风险评估的贝叶斯网络结构及其节点。

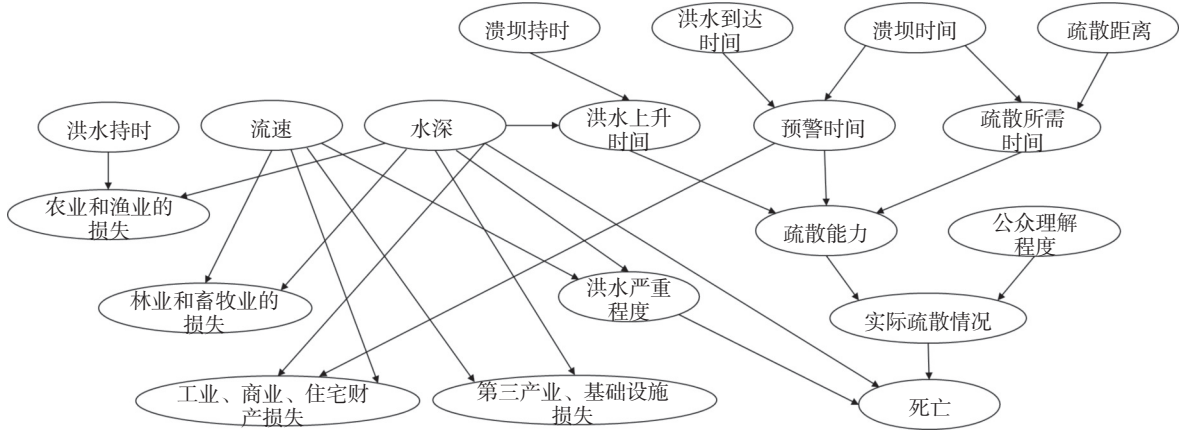


图 3 溃坝风险评估拓扑图

Fig. 3 Topological diagram for dam breach risk assessment

在土石坝溃坝风险评估中, 贝叶斯网络节点的量化主要依赖于溃坝的历史统计数据。贝叶斯网络中的节点状态及其取值范围见表 1。有关溃决洪水演进的模块划分为溃坝持续时间、洪水到达时间、溃坝时间等 9 个节点; 有关生命损失的模块划分为预警时间、疏散所需时间、疏散能力等 6 个节点; 有关经济损失的模块划分为农业和渔业的损失、林业和畜牧业的损失等 4 个节点, 节点的状态和取值范围参考文献 [17]。

表 1 溃坝风险评估的节点状态和取值范围

Tab. 1 Node states and value ranges for dam breach risk assessment

节点	状态	取值范围
溃坝持续时间 (h)	短; 中; 长; 很长	(0, 0.25]; (0.25, 1.00]; (1.00, 3.00]; (3.00, ∞)
洪水到达时间 (h)	短; 中; 长; 很长	(0, 0.25]; (0.25, 1.00]; (1.00, 3.00]; (3.00, ∞)
溃坝时间	白天; 傍晚; 夜晚	(8:00—17:00]; (17:00—22:00]; (22:00—8:00]
疏散距离 (km)	近; 中; 远; 很远	(0, 0.1]; (0.1, 0.5]; (0.5, 1.5]; (1.5, ∞)
洪水历时	短; 中; 长; 很长	(0, 2]; (2, 4]; (4, 6]; (6, ∞)
流速 (m/s)	慢; 中; 快; 很快	(0, 1]; (1, 2]; (2, 4]; (4, ∞)
水深 (m)	浅; 中; 深; 很深	(0, 1.5]; (1.5, 3.0]; (3.0, 6.0]; (6.0, ∞)
洪水上涨时间 (h)	短; 中; 长; 很长	(0, 0.25]; (0.25, 1.00]; (1.00, 3.00]; (3.00, ∞)
洪水严重程度 (m ³ /s)	高; 中; 低	(0, 3]; (3, 7]; (7, ∞)
预警时间 (h)	短; 中; 长; 很长	(0, 0.25]; (0.25, 1.00]; (1.00, 3.00]; (3.00, ∞)
疏散所需时间 (h)	短; 中; 长; 很长	(0, 0.25]; (0.25, 1.00]; (1.00, 3.00]; (3.00, ∞)
疏散能力	能离开; 不能离开	能离开; 不能离开
公众理解程度	不理解; 模糊; 中; 清楚; 理解	(0, 0.2]; (0.2, 0.4]; (0.4, 0.6]; (0.6, 0.8]; (0.8, 1.0]
实际疏散情况	已疏散; 未疏散	已疏散; 未疏散
死亡	死亡; 存活	死亡; 存活
农业和渔业的损失	损失率; 剩余价值	损失率; 剩余价值
林业和畜牧业的损失	损失率; 剩余价值	损失率; 剩余价值
工业、商业、住宅财产损失	损失率; 剩余价值	损失率; 剩余价值
第三产业、基础设施损失	损失率; 剩余价值	损失率; 剩余价值

疏散距离、洪水到达时间和公众理解程度的先验概率直接从统计概率中得出, 而水深、溃坝持续时间、流速和溃坝时间则通过 Peng 等^[21] 总结的 57 个案例获取(表 2)。基于专家经验确定各节点之间的影响参数^[41, 45-46], 利用蒙特卡罗方法, 生成大量随机样本进行模拟分析, 计算确定每个节点在贝叶斯网络模型中的条件概率。在获得先验概率和条件概率分布后, 建立了溃坝洪水风险评估贝叶斯网络模型(图 4)。

表 2 父节点的先验概率
Tab. 2 Prior probabilities of parent nodes

节点	状态	概率
水深	浅/中/深/很深	0.337 7/0.406 4/0.187 1/0.028 8
溃坝持续时间	短/中/长/很长	0.298 2/0.526 3/0.140 4/0.035 1
流速	慢/中/快/很快	0.250 0/0.250 0/0.187 5/0.312 5
溃坝时间	白天/傍晚/夜晚	37.5/20.8/41.7
疏散距离	近/中/远/很远	0.25/0.25/0.25/0.25
洪水到达时间	短/中/长/很长	0.400/0.208/0.146/0.246
洪水历时	短/中/长/很长	0.25/0.25/0.25/0.25
公众理解程度	不理解/模糊/中/清晰/理解	0.05/0.10/0.15/0.20/0.50

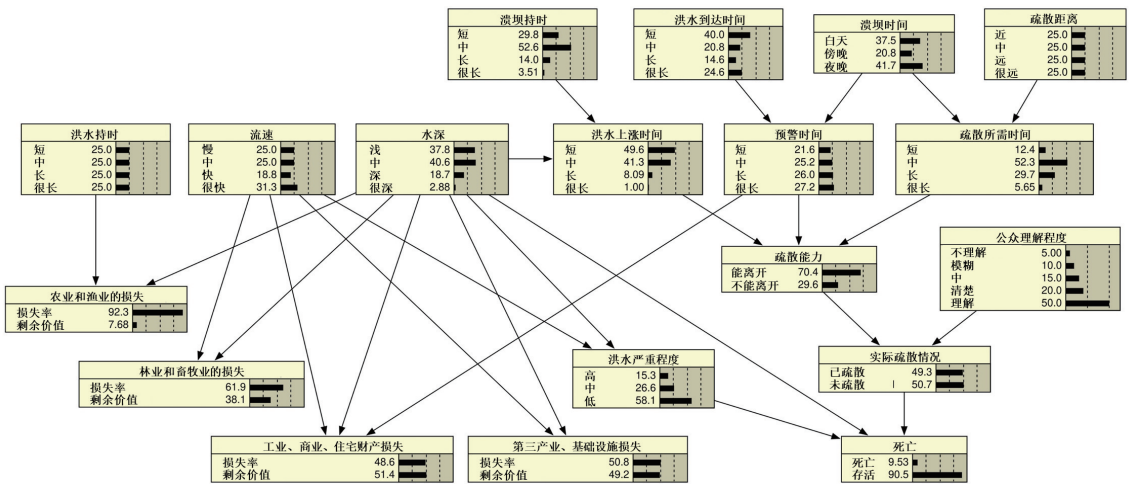


图 4 溃坝风险评估贝叶斯网络模型

Fig. 4 Bayesian network model for dam breach risk assessment

4 模型验证

选取拥有实测资料的射月沟水库溃坝案例, 对其溃坝洪水风险进行反演分析, 深入剖析溃坝过程、溃坝洪水演进与灾害损失, 对本文提出的土石坝溃坝洪水风险定量评估方法的合理性进行验证。

4.1 射月沟水库溃坝案例简介

射月沟流域发源于卡里克山南坡, 有 6 条支流汇聚成射月沟水库^[47]。图 5 展示了射月沟流域的河流水系和气象站(即小堡站、射月沟站和沁城乡站)的分布情况。射月沟水库大坝为沥青混凝土心墙堆石坝, 图 6 为大坝典型断面示意图^[47]。

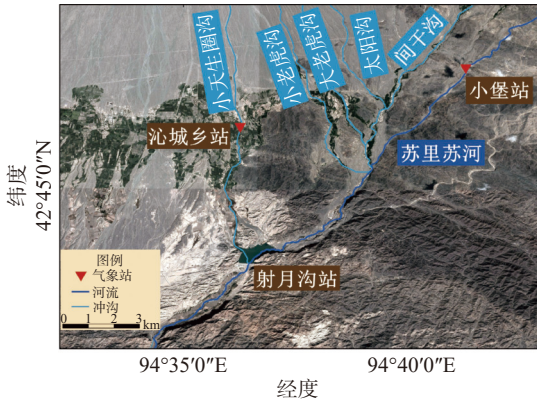


图 5 射月沟流域水文条件

Fig. 5 Hydrological conditions of Sheyuegou catchment

据记录,2018年7月31日1时至13时,射月沟流域发生强降雨,新疆维吾尔自治区水文局于溃坝后进行了洪水痕迹分析,确定降雨期间射月沟水库入库峰值流量为 $1\ 848\ \text{m}^3/\text{s}$ ^[48],远高于水库洪水设计标准,从而导致漫顶溃坝。另外,本文采用赵悬涛等^[49]结合中国国家气象信息中心降雨信息,模拟获取的射月沟流域2018年7月31日降雨-入库流量过程曲线(图7)。

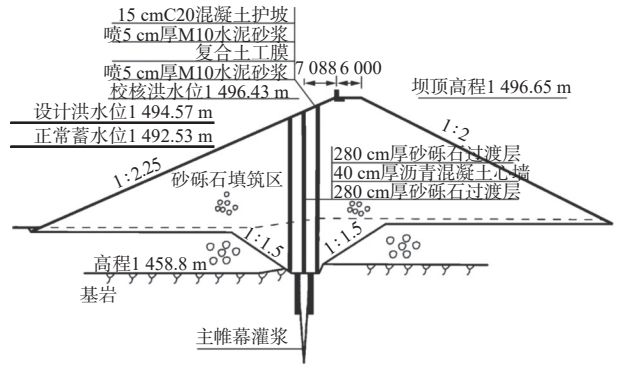


图 6 射月沟大坝典型断面示意(单位: mm)

Fig. 6 Schematic cross-section of Sheyuegou dam (unit: mm)

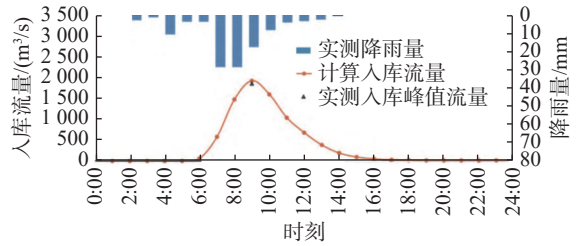


图 7 射月沟水库降雨-入库流量过程

Fig. 7 Rainfall-inflow hydrograph of Sheyuegou Reservoir

2018年7月31日8时至11时40分,现场目击者用手机拍摄了射月沟水库溃坝过程的视频片段,对了解坝体冲蚀和溃口水动力特征具有重要意义。图8展示了溃坝过程中代表性时刻的照片。



图 8 射月沟溃坝过程照片

Fig. 8 Photographs of the Sheyuegou dam breach process

4.2 射月沟水库溃坝洪水风险分析

基于前文提出的溃坝洪水风险定量评估方法对射月沟水库溃坝过程、洪水演进及溃坝损失进行全面评估。溃坝始于 2018 年 7 月 31 日 9 时 10 分, 并于当日 11 时左右结束, 因此本文的溃坝模拟时间设置为 3 h, 时间步长为 1 s。从射月沟水库坝址到头宫队、二宫队和三宫队的距离分别为 2.00、6.65 和 9.65 km (图 9)。图 10 展示了溃坝洪水的计算区域和网格, 模拟面积为 117.33 km²。表 3 给出了射月沟水库、坝体及下游河道的计算参数。

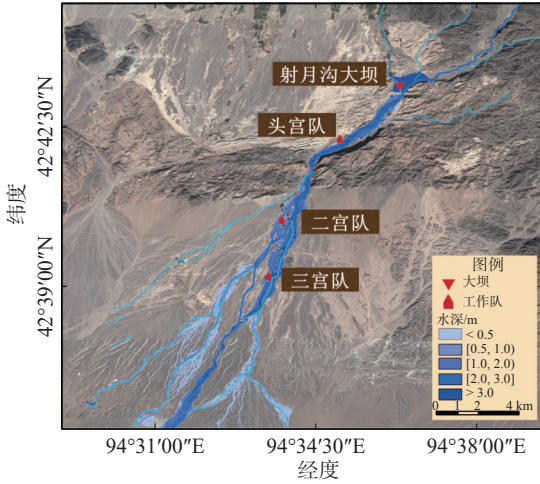


图 9 下游潜在淹没区域

Fig. 9 Potential inundation area downstream

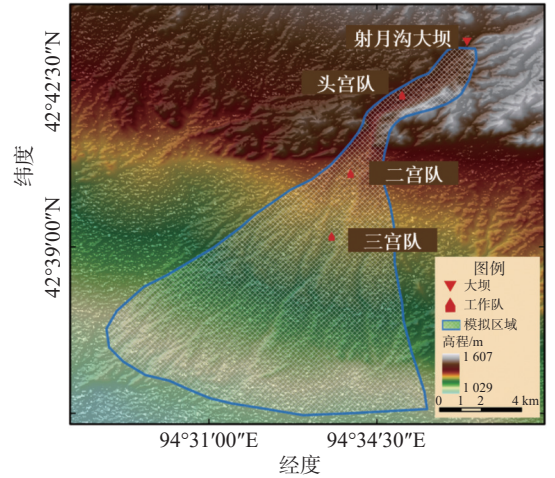


图 10 计算区域和网格

Fig. 10 Computational domain and mesh grid

表 3 射月沟溃坝案例的输入参数

Tab. 3 Input parameters for the Sheyuegou dam breach case

坝高 /m	顶宽 /m	坝长 /m	上游坡比	下游坡比	初始库水位 /m	水库面积 /km ²	来流量 /(m ³ /s)
41.15	6	403	1:2.25	1:2	1 497.65	A_s-h	Q_m-h
d_{50} /mm	C /kPa	φ /(°)	k_d /(cm ³ /N/s)	τ_c /Pa	C_T /(m ⁻¹ s ^{-2/3})	n_r	n_a
10	0	38.8	3.0	5	0.001	0.035	0.04

注: d_{50} 为填料平均粒径; C 为填料黏聚力; φ 为填料内摩擦角; k_d 为填料冲蚀率; τ_c 为填料临界起动切应力; C_T 为溯源冲蚀系数; n_r 为河道糙率; n_a 为洪泛区糙率。

溃坝过程计算结果显示, 溯源冲蚀在全断面漫顶后 0.90 h(31 日 10:04)停止, 此时初始溃口形成, 而实测时间为 10:00; 溃坝后 1.38 h(31 日 10:33)溃口流量达到峰值, 实际为 10:25, 计算结果与实测数据一致性较好。表 4 汇总了射月沟溃坝的计算与实测结果, 包括溃口峰值流量(Q_p)、最终溃口顶宽(B_f)、最终溃口底宽(b_f)、最终溃口深度(D_f)和峰值流量出现时间(T_p)。图 11 和图 12 对比了计算与实测的溃口流量及溃口形态。计算值与实测值的对比发现, 各关键溃坝参数的最大相对误差在±15% 以内, 验证了本文提出的溃坝过程数值方法的合理性。

表 4 射月沟溃坝计算结果与实测结果比较

Tab. 4 Comparison of calculated and observed results for Sheyuegou dam breach case

项目	Q_p /(m ³ /s)	B_f /m	b_f /m	D_f /m	T_p /h
实测数据	6 700.0	91.5	65.2	31.4	1.25
计算结果	6 367.6	100.5	60.8	29.9	1.38
相对误差	-5.0%	9.8%	-6.7%	-4.8%	10.4%

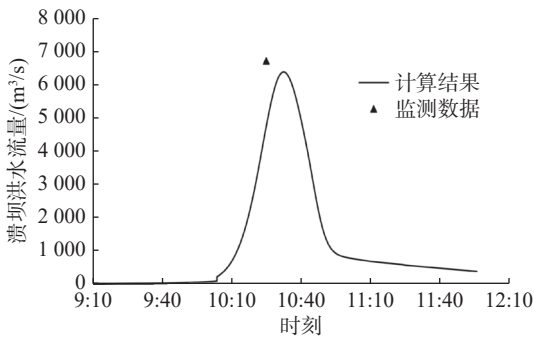


图 11 计算与实测溃口流量对比

Fig. 11 Comparison of calculated and observed breach flows

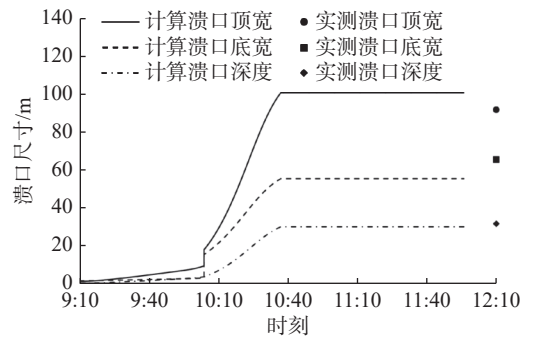


图 12 计算与实测溃口尺寸对比

Fig. 12 Comparison of calculated and observed breach sizes

结合洪水后的目击描述和洪水痕迹分析,确定了 5 个拥有实测资料的特征断面,即 *A-A*、*B-B*、*C-C*、*D-D* 和 *E-E*(图 13)。图 13 和 14 展示了射月沟水库溃坝后淹没区的最大水深和最大流速。将最高水位计算值与实测值进行比较(图 15),5 个特征断面最大水深的误差为 0.21 m(表 5),验证了溃坝洪水演进计算结果的合理性。

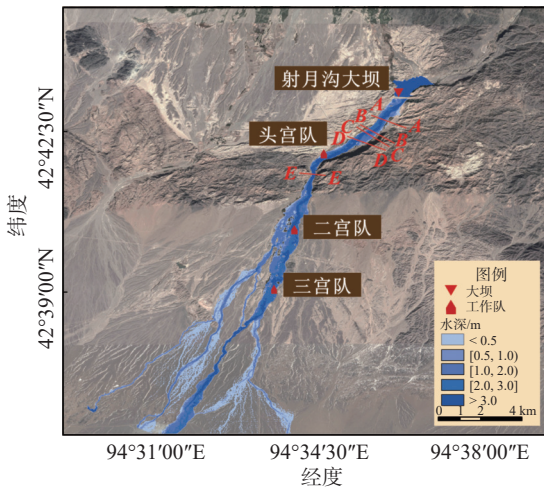


图 13 淹没区计算最大水深

Fig. 13 Calculated maximum water depth in inundated area

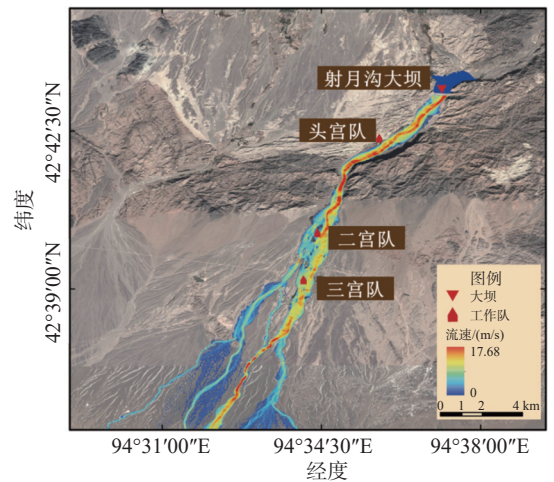


图 14 淹没区计算最大流速

Fig. 14 Calculated maximum flow velocity in inundated area

生命损失主要来自坝址下游二宫村的头宫队、二宫队和三宫队村民,3 个队的风险人口总数为 635 人。图 16 显示了根据表 1 中洪水严重程度划分的二宫村风险区域分布,将风险人口分布、溃坝时间、溃坝持续时间和疏散距离等参数导入贝叶斯网络,可得二宫村的生命损失(表 6)。计算结果表明,溃坝洪水导致坝址下游二宫队 29 人死亡,与实际统计的人数相近。

除生命损失外,溃坝洪水还导致了重大经济损失。本节财产损失的研究范围同样仅限于二宫村的经济损失。通过收集灾区的产业结构分布和经济状况数据,将这些参数输入贝叶斯网络模型,计算结果显示,总财产损失为 1 763.5 万元人民币(表 7)。

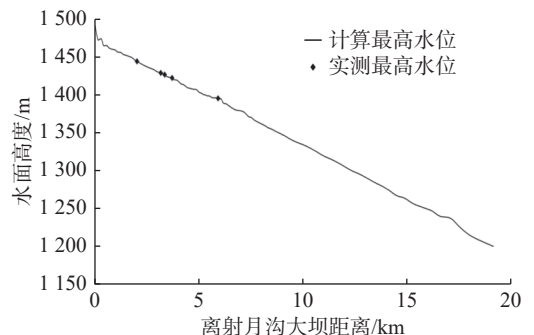


图 15 5 个特征断面最高水位计算与实测对比

Fig. 15 Comparison of calculated and observed highest water levels at five characteristic cross-sections

表 5 淹没区特征断面最高水位计算与实测比较

Tab. 5 Comparison of calculated and observed highest water levels at characteristic sections in inundated area

断面	离坝址的距离 /km	计算最高水位 /m	测量最高水位 /m	差值 /m
A-A	2.013	1 444.07	1 444.00	0.07
B-B	3.170	1 428.52	1 428.40	0.12
C-C	3.357	1 426.38	1 426.20	0.18
D-D	3.712	1 421.99	1 422.00	-0.01
E-E	5.913	1 394.69	1 394.90	-0.21

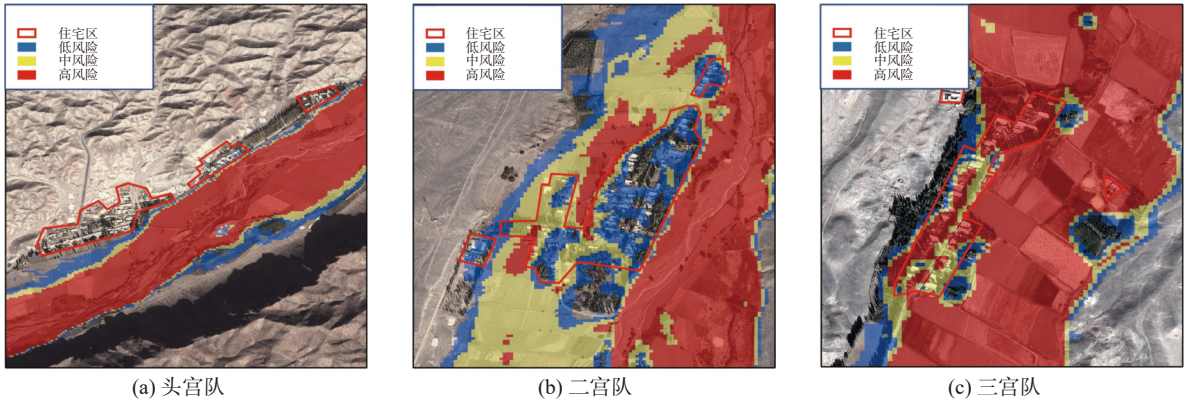


图 16 二宫村各队风险等级划分

Fig. 16 Risk levels of teams in Ergong Village

表 6 生命损失评估输入和输出参数

Tab. 6 Input and output parameters for loss of life assessment

位置	输入参数							输出参数		
	风险人口 /人	溃坝时刻	溃坝持续时间 /h	洪水到达时间 /h	水深 /m	流速 /(m/s)	公众理解程度	疏散距离 /km	生命损失率 /%	死亡人数 /人
头宫队	234			0.67	0.75	1.95	0.3	0.5	0.023	0
二宫队	206	09:10	1.83	0.78	0.97	2.70	0.3	1.0	1.550	3
三宫队	195			0.87	2.09	4.18	0.3	1.5	13.400	26

表 7 经济损失评估输入和输出参数

Tab. 7 Input and output parameters for loss of property assessment

位置	输入参数				产值 /百万元				财产损失总额
	水深 /m	洪水历时 /h	流速 /(m/s)	预警时间 /h	农业和渔业	林业和畜牧业	工业/商业/住宅	第三产业/基础设施	
头宫队	0.75	0.91	1.95	2.25	2.035	2.200	4.480	2.145	
二宫队	0.97	2.72	2.70	2.36	1.787	1.932	3.933	1.883	
三宫队	2.09	5.54	4.18	2.45	1.693	1.831	3.727	1.784	

位置	损失率 /%				损失额 /百万元				财产损失总额
	农业和渔业	林业和畜牧业	工业/商业/住宅财产	第三产业/基础设施	农业和渔业	林业和畜牧业	工业/商业/住宅财产	第三产业/基础设施	
头宫队	65	31.0	24.8	29.4	1.323	0.682	1.111	0.631	3.747
二宫队	85	71.6	56.3	71.0	1.519	1.383	2.214	1.337	6.453
三宫队	100	81.4	78.3	74.8	1.693	1.490	2.918	1.334	7.435

5 结 语

本文基于土石坝溃决过程数值模拟方法和溃坝洪水生命和经济损失评估方法,提出了一种土石坝溃坝洪水风险定量评估方法,并通过比较射月沟水库溃坝案例的实测数据与计算结果验证了该方法的合理性。主要结论如下:

(1)建立了考虑沥青混凝土心墙坝溃决机理的漫顶溃坝过程数值模拟方法,模型可考虑下游坝坡在漫顶水流作用下纵断面的溯源冲蚀、横断面的连续冲蚀和溃口边坡间歇性失稳,以及沥青混凝土心墙的倾倒塌坏。

(2)以洪水严重程度和洪水持续时间为基础,同时考虑溃坝持续时间、洪水到达时间、溃坝时间、疏散距离、洪水历时、洪水流速、洪水水深、洪水上涨时间、预警时间、疏散所需时间、洪水严重程度、疏散能力、公众理解程度、实际疏散情况等 14 个影响因素,建立了基于贝叶斯网络的生命和经济损失评估方法。

(3)以射月沟水库溃坝案例为研究对象,反演分析该水库的溃坝过程和溃坝洪水致灾后果。实测值与计算值对比表明,溃口峰值流量、溃口最终尺寸和峰值流量出现时间等关键溃坝参数相对误差在 $\pm 15\%$ 之内,淹没区典型断面最高水位的最大误差为 -0.21 m,淹没区生命损失结果相近,验证了评估方法的合理性。

(4)由于土石坝溃坝风险评估是一个复杂的体系,涉及溃坝过程模拟、溃坝洪水演进和灾害损失评估,其中的溃坝洪水数值模拟方法仍存在大量假设,实测数据有限且其准确性存在不确定性,土石坝溃坝风险定量评估方法仍需进一步验证与提升。

参 考 文 献:

- [1] 张士辰,李宏恩.近期我国土石坝溃决或出险事故及其启示[J].*水利水电工程学报*,2023(1):27-33.(ZHANG Shichen, LI Hongen. Recent earth-filled dam failures or accidents of reservoirs in China and their enlightenment[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(1): 27-33. (in Chinese))
- [2] 马黎,钟启明,杨蒙,等.新疆射月沟水库溃坝过程数值模拟[J].*水利水电工程学报*,2023(6):195-204.(MA Li, ZHONG Qiming, YANG Meng, et al. Numerical simulation of dam breach process of Sheyuegou Reservoir in Xinjiang[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(6): 195-204. (in Chinese))
- [3] ZHONG Q M, WANG L, CHEN S S, et al. Breaches of embankment and landslide dams - State of the art review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216: 103597.
- [4] USBR (United States Bureau of Reclamation). Downstream hazard classification guidelines[R]. Denver: United States Department of the Interior, 1988.
- [5] FROEHLICH D C. Peak outflow from breached embankment dam[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1995, 121(1): 90-97.
- [6] XU Y, ZHANG L M. Breaching parameters for earth and rockfill dams[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(12): 1957-1970.
- [7] ZHONG Q M, CHEN S S, FU Z Z, et al. New empirical model for breaching of earth-rock dams[J]. *Natural Hazards Review*, 2020, 21(2): 06020002.
- [8] ZHONG Q M, WANG L, SHAN Y B, et al. Review on risk assessments of dammed lakes[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 981068.
- [9] FREAD D L. BREACH: An erosion model for earthen dam failures (Model description and user manual)[R]. Silver Spring: National Weather Service of the USA, 1988.
- [10] WU W M. Simplified physically based model of earthen embankment breaching[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(8): 837-851.
- [11] CHEN Z Y, MA L Q, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake[J]. *Journal of*

- [Hydraulic Engineering](#), 2015, 141(4): 05014011.
- [12] CHANG D S, ZHANG L M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth[J]. [Natural Hazards and Earth System Sciences](#), 2010, 10(4): 933-946.
- [13] 陈生水, 钟启明. 土石坝溃坝数学模型及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019. (CHEN Shengshui, ZHONG Qiming. Numerical models for earth-rock dam breaching and their applications[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019. (in Chinese))
- [14] LIAO H M, YANG X G, XU F G, et al. A fuzzy comprehensive method for the risk assessment of a landslide-dammed lake[J]. [Environmental Earth Sciences](#), 2018, 77(22): 750.
- [15] ZHONG Q M, CHEN L C, MEI S Y, et al. Numerical investigation of hydro-morphodynamic characteristics of a cascading failure of landslide dams[J]. [Journal of Mountain Science](#), 2024, 21(6): 1868-1885.
- [16] WU H, ZHONG Q M, DENG Z, et al. Numerical investigation of the effect of landslide relative density on the impulse wave amplitude[J]. [Ocean Engineering](#), 2024, 309: 118563.
- [17] MEI S Y, CHEN S S, ZHONG Q M, et al. Detailed numerical modeling for breach hydrograph and morphology evolution during landslide dam breaching[J]. [Landslides](#), 2022, 19(12): 2925-2949.
- [18] FREAD D L, LEWIS J M. FLDWAV: A generalized flood routing model[J]. [Hydraulic Engineering](#), 1988: 668-673.
- [19] Danish Hydraulic Institute. Mike Flood: Modelling of urban flooding[R]. Copenhagen: Danish Hydraulic Institute, 2021.
- [20] US Army Corps of Engineers. HEC-RAS, River analysis system user's manual[R]. Davis: Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, 2021.
- [21] PENG M, ZHANG L M. Analysis of human risks due to dam-break floods: Part 1: a new model based on Bayesian networks[J]. [Natural Hazards](#), 2012, 64(1): 903-933.
- [22] BROWN C A, GRAHAM W J. Assessing the threat to life from dam FAILURE[J]. [Journal of the American Water Resources Association](#), 1988, 24(6): 1303-1309.
- [23] GRAHAM L. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[R]. Denver: Dam Safety Office, U. S. Bureau of Reclamation, 1999
- [24] HUANG D J, YU Z B, LI Y P, et al. Calculation method and application of loss of life caused by dam break in China[J]. [Natural Hazards](#), 2017, 85(1): 39-57.
- [25] MAHMOUD A A, WANG J T, JIN F. An improved method for estimating life losses from dam failure in China[J]. [Stochastic Environmental Research and Risk Assessment](#), 2020, 34(8): 1263-1279.
- [26] ABT S R, WITTIER R J, TAYLOR A, et al. Human stability in a high flood hazard zone[J]. [Journal of the American Water Resources Association](#), 1989, 25(4): 881-890.
- [27] REITER P. Loss of life caused by dam failure: the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki[R]. Helsinki: PR Water Consulting Ltd, 2001.
- [28] LIND N, HARTFORD D, ASSAF H. Hydrodynamic models of human stability in a flood[J]. [JAWRA Journal of the American Water Resources](#), 2004, 40(1): 89-96.
- [29] JONKMAN S N, PENNING-ROUSELL E. Human instability in flood flows[J]. [Journal of the American Water Resources Association](#), 2008, 44(5): 1208-1218.
- [30] ABOELATA M A, BOWLES D S. LIFESim: a model for estimating dam failure life loss[R]. Logan: Utah State University, 2005.
- [31] GE W, JIAO Y T, SUN H Q, et al. A method for fast evaluation of potential consequences of dam breach[J]. [Water](#), 2019, 11(11): 2224.
- [32] 杜镇瀚, 钟启明, 董海洲, 等. 堰塞湖风险评估研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 13-25. (DU Zhenhan, ZHONG Qiming, DONG Haizhou, et al. A review of risk assessment studies on dammed lake[J]. [Journal of Hohai University \(Natural Sciences\)](#), 2022, 50(4): 13-25. (in Chinese))
- [33] DAS S, LEE R. A nontraditional methodology for flood stage-damage calculations[J]. [Journal of the American Water Resources Association](#), 1988, 24(6): 1263-1272.
- [34] 康相武, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 大尺度洪水灾害损失与影响预评估[J]. [科学通报](#), 2006, 51(增刊 2): 155-164. (KANG

- Xiangwu, WU Shaohong, DAI Erfu, et al. Loss and impact pre-assessment of large scale flood disaster[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Suppl2): 155-164. (in Chinese))
- [35] 刘欣欣, 顾圣平, 赵一梦, 等. 修正损失率的溃坝洪水经济损失评估方法研究[J]. *水利经济*, 2016, 34(3): 36-40, 80-81. (LIU Xinxin, GU Shengping, ZHAO Yimeng, et al. Evaluation methods for economic loss due to dam-break flood using modified loss rate[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2016, 34(3): 36-40, 80-81. (in Chinese))
- [36] 武靖源, 韩文秀, 徐杨, 等. 洪灾经济损失评估模型研究: (I) 直接经济损失评估[J]. *系统工程理论与实践*, 1998(11): 54-57. (WU Jingyuan, HAN Wenxiu, XU Yang, et al. A study on evaluation theory and mathematical model for economic loss of flood damage: (I) direct economic loss[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 1998(11): 54-57. (in Chinese))
- [37] LI Q, ZHOU J Z, LIU D H, et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion[J]. *Safety Science*, 2012, 50(5): 1275-1283.
- [38] 周蕾, 吴先华, 吉中会. 考虑恢复力的洪涝灾害损失评估研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(2): 11-21. (ZHOU Lei, WU Xianhua, JI Zhonghui. Research advance in flood damage assessment considering resilience[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(2): 11-21. (in Chinese))
- [39] TORO E F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction[M]. Heidelberg: Springer, 2009.
- [40] 李炜. 水力计算手册[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LI Wei. Hydraulic calculation manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [41] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1993. (XIE Renzhi. Dam failure hydraulics[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [42] LINDELL M K. EMBLEM2: An empirically based large scale evacuation time estimate model[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008, 42(1): 140-154.
- [43] JONKMAN S N. Loss of life estimation in flood risk assessment; theory and applications[D]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [44] DU Z H, ZHONG Q M, MEI S Y, et al. Risk assessment of dammed lakes in China based on Bayesian network[J]. *Natural Hazards*, 2023, 115(1): 129-161.
- [45] CLAUSEN L, CLARK P B. The development of criteria for predicting dam-break food damages using modeling of historical dam failures. In: White WR (ed) international conference on river flood hydraulics[M]. London: Wiley, 1990: 369-380.
- [46] BOWLES D S. Estimating life loss for dam safety risk assessment: A review and new approach[D]. Washington DC: Institute for Water Resources US Army Corps of Engineers, 2002.
- [47] 哈密地区水利水电勘测设计院. 射月沟水库二期工程初设报告[R]. 哈密: 哈密地区水利水电勘测设计院, 2007. (Hami District Institute of Water Resources and Hydropower of Survey and Design Research. Preliminary design report of phase II project of Sheyuegou reservoir[R]. Hami: Hami District Institute of Water Resources and Hydropower of Survey and Design Research, 2007. (in Chinese))
- [48] 王梅霞, 张太西, 余行杰, 等. 新疆哈密 2018·7·31 特大暴雨山洪汇水量估算与应用研究[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(4): 939-945. (WANG Meixia, ZHANG Taixi, YU Xingjie, et al. Estimation and application of water-collecting amount during an extreme heavy rainfall induced flash flooding in Hami City on 31st July 2018[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(4): 939-945. (in Chinese))
- [49] 赵悬涛, 刘昌军, 王文川, 等. 射月沟水库溃坝洪水模拟及溃坝原因分析[J]. *中国农村水利水电*, 2022(5): 171-177, 183. (ZHAO Xuanta, LIU Changjun, WANG Wenchuan, et al. Dam break flood simulation of sheyuegou reservoir and reasons for the dam break[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(5): 171-177, 183. (in Chinese))

Study on flood simulation and loss assessment for embankment dam events

JIANG Zhengchun¹, CHEN Xiaokang¹, DU Zhenhan¹, YANG Meng¹, SHAN Yibo¹, ZHONG Qiming^{1,2,3}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China*; 3. *Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The assessment of flood risk resulting from embankment dam breaching is essential for developing effective emergency response strategies and improving disaster relief efforts. Embankment dams, widely adopted for their cost-efficiency, construction simplicity, and adaptability to diverse terrains, are particularly susceptible to breaching under extreme hydrological conditions, structural deficiencies, or inadequate maintenance. When a breach occurs, the sudden release of stored water can trigger a catastrophic flood wave, causing severe consequences such as substantial loss of life, infrastructure damage, environmental degradation, and prolonged socio-economic disruption in downstream areas. Despite the urgency of accurate risk evaluation, existing methodologies for flood discharge simulation and loss assessment often exhibit critical limitations. Traditional models tend to oversimplify the complex breaching processes and inadequately capture the nonlinear dynamics of flood propagation. Additionally, many approaches lack robust techniques for estimating both direct and indirect losses and offer limited tools for quantifying predictive uncertainty. To address these challenges, this study introduces a novel mechanism-data dual-driven framework for flood simulation and loss assessment tailored to embankment dam breach scenarios. This method integrates detailed physical modeling of the dam breach process with data-driven statistical analysis of flood propagation and its consequences. By combining these complementary perspectives, the approach enables more realistic and accurate flood simulations, offering a stronger foundation for risk assessment. A central innovation of the methodology is the incorporation of a Bayesian statistical model, which facilitates probabilistic analysis and enables rigorous quantification of uncertainties in estimating both life loss and economic damage. The assessment framework consists of three interrelated modules. The first module simulates the breach process using a combination of physical models, empirical equations, and field data to reconstruct the timing, size, and evolution of the breach. The second module calculates key disaster-inducing factors during flood propagation—such as flow velocity, flood depth, inundation extent, and arrival time in affected areas—which are critical for evaluating the intensity and spatial reach of the event. The third module estimates human and economic losses by integrating the hydrodynamic outputs from the second module with demographic, land use, and infrastructure data to assess exposure and vulnerability. The Bayesian model is then employed to quantify uncertainty and generate probabilistic loss estimates. To validate the effectiveness and reliability of the proposed method, it was applied to the 2018 Sheyuegou dam breach case in China. This real-world event provided a comprehensive dataset for model calibration and verification. Inversion analysis results showed that the relative errors for key parameters—such as peak flood discharge, final breach dimensions, and timing of peak flow—were all within $\pm 15\%$ of observed values. Moreover, the maximum deviation in the highest water level at representative cross-sections within the inundation zone was only -0.21 meters. Regarding casualty estimation, the predicted number of fatalities closely matched the reported figures, underscoring the method's accuracy and credibility. In conclusion, these findings confirm that the proposed mechanism-data dual-driven approach is an effective and practical tool for simulating dam breach scenarios and assessing associated flood risks. Its capacity to accurately replicate real-world outcomes while incorporating uncertainty in loss estimates provides valuable support for emergency preparedness, response planning, and disaster risk reduction. This research advances flood risk assessment methodologies by offering a more comprehensive, precise, and scientifically robust framework for managing the impacts of embankment dam failures.

Key words: embankment dam breach; breach discharge; flood propagation; loss of life; economic loss; risk assessment