

• 滑坡堰塞湖灾害机理与防控 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202300320



本刊网刊

考虑人体与水流相互作用的溃坝洪水生命损失评估模型

彭 铭^{1,2}, 马福军^{1,2}, 沈丹祎^{3*}, 蔡一坚⁴, 石振明^{1,2}, 周家文⁵, 刘西军⁴

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 4. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000;
5. 四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 溃坝洪水会给下游人民群众造成巨大的生命损失, 开展溃坝洪水造成的生命损失风险定量评估对应急抢险救灾具有重要的现实意义。本文在已有生命损失贝叶斯网络HURAM1.0模型基础上, 引入了人体稳定性物理模型, 考虑人体与水流相互作用关系, 对处于洪水中的人先进行稳定性判定, 并进行溺水判定, 运用蒙特卡洛模拟方法, 综合了水深和流速对生命损失的影响, 建立HURAM2.0模型; 并将该模型应用于唐家山堰塞坝溃坝洪水生命损失分析。结果表明: HURAM2.0模型建立了水流流速对生命损失影响的定量关系, 更精确地刻画了人体在水流中的稳定性和求生能力, 相比HURAM1.0模型对较强洪水强度条件下的生命损失预测结果更准确。同时, 在本文建立的模型中, 除水深、洪水严重程度变化不大, 其余变量的敏感性均有所上升, 其中居民区住宅层数、在建筑物中庇护情况和溃坝时长等变量对模型计算结果的最大影响程度分别增加142%、95%和93%, 加强了模型在低、中、高3类洪水强度下的解释性, 与HURAM1.0相比在贝叶斯反演分析中更占优势。在唐家山堰塞坝溃坝风险分析中, HURAM2.0能区分出不同水流速度条件下的生命损失, 更符合实际情况, 即开挖泄流槽前风险大、死亡率高, 在现场勘测和开挖泄流槽后风险及死亡人数大大降低, 建议结合预警疏散以降低生命损失风险。

关键词: 溃坝; 人体稳定性; 生命损失风险; 贝叶斯网络; 堰塞坝溃决洪水

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)01-0127-11

堰塞坝是由地震、降雨、火山喷发等诱发斜坡失稳堵塞河道而形成的天然坝体。据统计, 51%的堰塞坝会在形成后的7 d内发生溃坝^[1]。堰塞坝溃决通常具有突发、隐秘和难以预控的特点, 极易对下游群众生命安全构成威胁。如: 1933年, 四川叠溪堰塞坝在形成45 d后突然溃决, 造成下游2 500多人死亡; 2018年, 金沙江白格堰塞坝在形成10.6 d后发生溃决, 溃决洪水威胁下游500多千米的丽江市, 迫使25 000人紧急撤离^[2]。因此, 定量评估溃坝洪水造成的生命损失, 进而指导洪水影响范围内的人员疏散具有重要减灾价值。

溃坝洪水造成人类生命损失的影响因素包括直接因素和间接因素。其中, 水流流速和水深是最显著

的直接影响因素, 对暴露在洪水中人的稳定性至关重要。现有的溃坝生命损失模型包括经验模型、物理模型和混合模型。经验模型主要通过历史数据拟合生命损失率和关键变量间的关系^[3-5], 易于应用, 但不能揭示实际物理作用机制和变量间的相关关系。物理模型侧重于研究人在水中的行为和稳定性^[6-9], 但不能给出生命损失和稳定性间的关系。以上两种模型大多是基于假设几个互相独立的变量建立的定性或半定量研究, 没有考虑到变量本身存在的不确定性及变量之间的相关关系。混合模型将经验模型中历史数据、专家经验和物理模型揭示的内在规律统一起来, 扬长避短^[10-12]。

近年来, 很多基于贝叶斯网络建立的混合模型

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071010; 42061160480); 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放基金(SKHL2011)

作者简介: 彭 铭(1981—), 男, 副教授, 博士。研究方向: 地质灾害风险防控。E-mail: pengming@tongji.edu.cn

* 通信作者: 沈丹祎, E-mail: shendanyi@zju.edu.cn

网络出版时间: 2023-08-07 18:20:03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20230807.0947.002>

被广泛应用于各行各业的决策、推理和风险评估。贝叶斯网络由节点和弧链接及其(条件)概率组成,可以通过逻辑推理解决不确定性问题。Zhang^[13]和Xu^[14]等采用贝叶斯网络诊断了堤坝灾害。Peng和Zhang等^[11-12]基于贝叶斯网络提出HURAM1.0模型分析了溃坝生命损失,该模型考虑了水力学参数、地形参数和人员疏散情况等15个变量,采用条件概率考虑变量间的不确定性及相关性。但HURAM1.0模型没有考虑到人体和洪水间的物理相互作用过程,忽略了水动力因素对人体稳定性的影响,在水流速较大时的预测结果与实际情况偏差较大。

本文基于HURAM1.0模型,嵌入考虑人体稳定性的物理模型,用基于物理和统计的新模块替代原本

假设生命损失是水深函数的经验模型,考虑了水流流速对生命损失的影响,从而得到HURAM2.0模型;将所提出的模型和HURAM1.0模型对比并开展参数敏感性分析;同时,将所提出的HURAM2.0模型应用于唐家山堰塞坝中评估溃坝洪水对北川县造成的生命损失风险。

1 生命损失风险评估模型

1.1 HURAM2.0模型

HURAM1.0模型是Peng和Zhang^[11]基于贝叶斯网络提出的生命损失风险评估模型,实现了基于物理机理和概率统计的综合定量分析。图1红框部分为建立HURAM1.0模型的逻辑结构示意图。

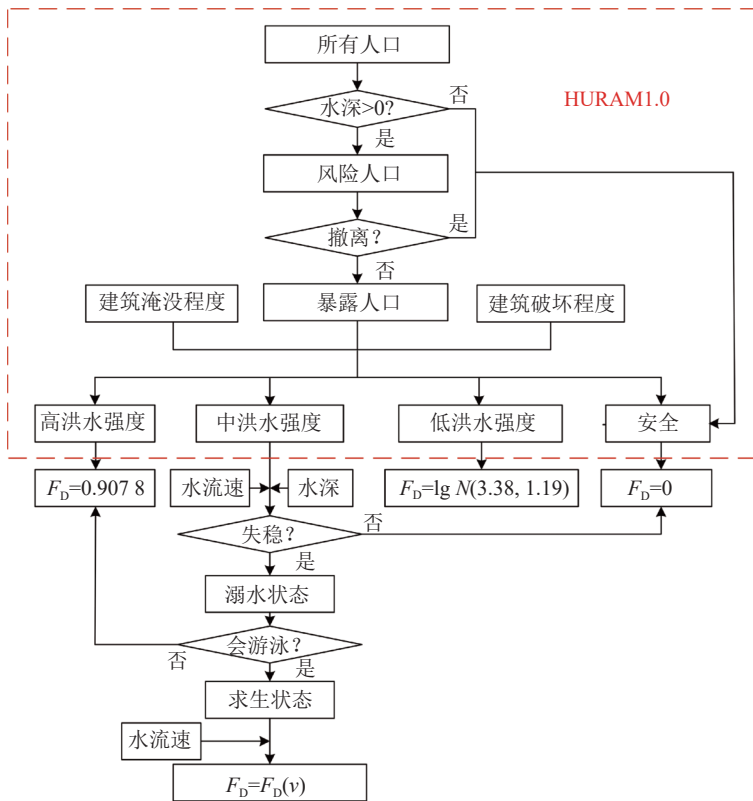


图 1 HURAM2.0模型逻辑结构示意图

Fig. 1 Logic structure of the HURAM2.0 model

HURAM1.0模型的研究对象是所有受洪水影响区域内的人口,包括风险人口和暴露人口。其中,风险人口所处的区域水深大于0,暴露人口是指没有成功从洪水淹没地区撤离的人员^[1]。同时,考虑建筑物的损坏和淹没程度,模型将洪水的破坏性分为安全、低破坏性、中破坏性和高破坏性4个等级,并考虑人员在不同洪水强度下的初始分布及预警作用下的人员重新分布,假设房屋建筑均匀分布在所在区域上。安全等级下,建筑物保持结构完整且楼层没有淹没,死亡率假设为0;高破坏性等级下,建筑物结构破坏,

且楼层完全被淹没,通过大量数据统计得到死亡率为0.91;低、中破坏性等级下,假设生命损失率 F_D 是自变量为水深 d 的对数正态分布函数:

$$F_D(d) = \phi\left(\frac{\ln d - \mu_N}{\sigma_N}\right) \quad (1)$$

通常采用大量案例数据得出中、低破坏性下的生命损失率。其中:低破坏性时, $\mu_N=3.376$, $\sigma_N=1.188$;中破坏性时, $\mu_N=1.649$, $\sigma_N=0.562$ 。

HURAM1.0模型低破坏性等级下流速较小,主要

为淹没风险,故只考虑生命损失率是水深的函数是合理的。但在中破坏性等级下,水流流速相对较大,快速冲击的水流会使人体自身稳定性大幅下降。如在暴雨产生的急性山洪事件中,快速流动的河水经常会造成伤亡事件,这其中的水动力因素作用不可忽视。另外,人在水中有一定的求生能力,应予以考量。

基于此,HURAM2.0模型在原模型基础上,增加了一条从水流速到生命损失的新连接,引入人体稳定性物理模型,对处于中破坏性等级下的人体基于水深和水流流速进行稳定性判定,考虑了中洪水强度下流速对人体稳定性的作用,进而得到其对生命损失的影响规律(图1)。假定当事人失稳跌倒,即进入溺水状态;溺水状态下,人无法保持稳定站立,需要通过游泳求生,不会游泳的人处于高风险,会游泳的人进入求生状态;求生状态下,人体在水中的游泳能力和水流流速有关,当超过游泳速度的极限后,人体将失去控制,体力不支而处于高风险状态。

1.1.1 人体在水中稳定性物理模型

假设人体站在水中仅受到水流的拖曳力 D 、流

水的升力 L 、人体自身的重力 G 和水对人体的浮力 B (图2(a)),则有:

$$D = \frac{1}{2}\rho C_D w d v^2 \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{2}\rho C_L w d v^2 \quad (3)$$

$$G = \rho_P g H_p w b \quad (4)$$

$$B = \rho g d w b \quad (5)$$

式(2)~(5)中, ρ 和 ρ_P 分别为水和人体的密度, C_D 和 C_L 分别为阻力系数和升力系数, v 为水流速度, H_p 为人体身高(从肩膀到脚底), w 为人体正面的宽度, b 为水流速度方向上人体的投影长度。

1) 失稳模式

由于个体差异和洪水环境的复杂性,人体的失稳模式多种多样,现有研究大都做了简化处理^[6-8],只考虑滑动和倾倒两种最常见的失稳模式(图2(b)),具体分析如下:

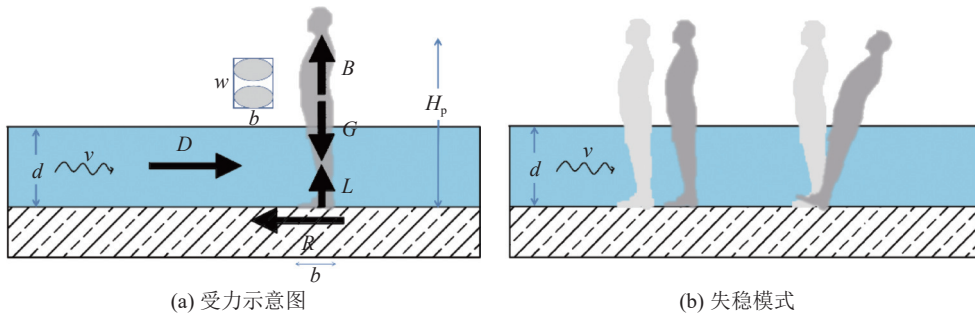


图2 站立在水中的人受力示意图和失稳模式

Fig. 2 Forces acting on a submerged human body and instability mode

a. 滑动失稳

当脚底与地面之间的摩擦力不足以抵抗正面的动水压力时,人体滑动失稳,其极限平衡状态为:

$$D = (G - B - L)\mu \quad (6)$$

式中, μ 为脚与地面之间的摩擦力系数,将式(2)~(5)代入式(6)中,可得:

$$\frac{1}{2}\rho C_D w d v^2 = \left(\rho_P g H_p w b - \rho g d w b - \frac{1}{2}\rho C_L w d v^2 \right) \mu \quad (7)$$

人体的密度与水的密度接近,令 $\rho = \rho_P$,可得:

$$v^2 = \frac{2b\mu g}{C_D + \mu C_L} \left(\frac{H_p}{d} - 1 \right) \quad (8)$$

将等式(8)两边同除以 gd ,移项可得:

$$\frac{v^2}{gd} \left(C_L + \frac{C_D}{\mu} \right) = \frac{2b}{d} \left(\frac{H_p}{d} - 1 \right) \quad (9)$$

分析式(9)可知:等式左边, $\frac{v^2}{gd}$ 为弗劳德数 Fr 的

平方, $C_L + \frac{C_D}{\mu}$ 包含了阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 和摩擦力系数 μ 。等式右边, $\frac{2b}{d}$ 为反映淹没状况的形状因子; $\frac{H_p - d}{d}$ 反映了身体的未淹没比例,和水深及人体身高密切相关。

b. 倾倒失稳(力矩失稳)

当倾倒力矩大于抵抗力矩时,人体倾倒失稳,其极限平衡状态为:

$$D \frac{d}{2} = (G - B - L)b \quad (10)$$

式(10)中,竖直方向上的稳定力矩的力臂为 $b/2$,但考虑到人体在水中会进行姿态调整,取 b 更为合适。将式(2)~(5)代入式(10)可得:

$$\frac{d}{4}\rho C_D w d v^2 = \left(\rho_P g H_p w b - \rho g d w b - \frac{1}{2}\rho C_L w d v^2 \right) b \quad (11)$$

进一步处理可得:

$$v^2 = \frac{2b^2g}{\frac{1}{2}C_{Dd} + C_{Lb}} \left(\frac{H_p}{d} - 1 \right) \quad (12)$$

式(12)两边同除以 gd 并移项可得:

$$\frac{v^2}{gd} \left(C_L + \frac{d}{2b} C_D \right) = \frac{2b}{d} \left(\frac{H_p}{d} - 1 \right) \quad (13)$$

分析式(13)可以发现: $C_L + \frac{d}{2b} C_D$ 为一个无量纲参数,包含了阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 和淹没形状因子 $\frac{2b}{d}$ 。

从式(9)和(13)中可以发现,滑动和倾倒是失稳状态都与弗劳德数及人在水中的淹没状况有关。两者的相同点是等式左边包含弗劳德数,等式右边与人的身高和水深有关。

2)综合性冲击参数

为了方便地考虑人体在流动水中的物理行为模式,Lazzarin等^[8]提出一个结合水深 d 和水流速 v 的无量纲冲击参数 W :

$$W = \left(\frac{d}{Y_W} \right)^\alpha (1 + \beta Fr^2), Y_W > 0, \alpha \geq 1, \beta \geq 0 \quad (14)$$

式中: $Fr = v/\sqrt{gd}$; Y_W 为衡量实际水深 d 的参考深度,是一个无量纲化的参量,实际过程中,考虑到人在水中的姿态调整,取1.25 m为宜; α 和 β 为衡量 W 静态与动态分量相对重要性的校准因子。

根据 v - d 平面(图2)上数据的分布,可以发现人存在最大防洪极限条件,这些极限条件对应于流速较小时相对较大的水深,以及流速较大时相对较小的水深。此时,选取合适的 α 和 β ,利用冲击参数 W 可以获得水与人体之间物理作用机制和人体稳定性破坏过程。 v - d 平面上等 W 值线上的点对特定类别的人体破坏过程的破坏潜力是等价的,通过经验数据拟合得到 $W = 1.00$ 、 $W = 0.35$ 等值线(分别对应成人和儿童),较好地包裹了数据点的上限。以上表明,超过此界限,人体极易失稳,此时 $Y_W = 1.25$ m, $\alpha = 2.0$, $\beta = 4.0$ 。

3)人体在水中站立稳定性量化评估

当淹没水深处于0~1.5 m区间内,基于人所处环境下的水流流速和水深进行失稳判定。通常,水流流速越大,稳定性越差,成人和儿童由于身体素质不同,具有不同的脆弱性(成人稳定性:儿童稳定性=4:1)。以成人为例,当 $W \leq 1$ 时,人体可保持站立稳定,认为安全;当 $W > 1$ 时,人体失稳进入溺水状态。每种情况下采用蒙特卡洛模拟100万次,得出人体在流动水中的稳定性量化结果(表1)。

表 1 人在水中的站立稳定性

Tab. 1 Stability for a flooded human body

水流流速/(m·s ⁻¹)	稳定性量值	
	成人	儿童
(0, 1]	0.214 523	0.531 892
(1, 2]	0.411 218	0.735 239
(2, 4]	0.724 894	0.889 414
(4, 6]	0.911 042	0.959 075
>6	0.969 860	0.987 083

注:稳定性量值越接近1代表稳定性越差,表明在该水流流速区间内跌倒的可能性越大。

1.1.2 溺水状态下人的生命损失分析

溺水状态的人需要通过游泳逃生,人在水中的自控能力与水流流速有关,当水流速超过游泳速度的极限(以世界冠军游泳速度为基准,一般是普通人的2~3倍),人体将失去控制处于高风险状态。

溺水状态下人本身有一定的求生欲望和能力,但受客观环境影响,其求生能力有限。随水流速的增大,死亡率会急剧上升,在水流超过2 m/s时,随着水流速继续增大,死亡率会不断地逼近上限100%,出现收敛趋势,即流速和死亡率近似呈指数关系(图3)。

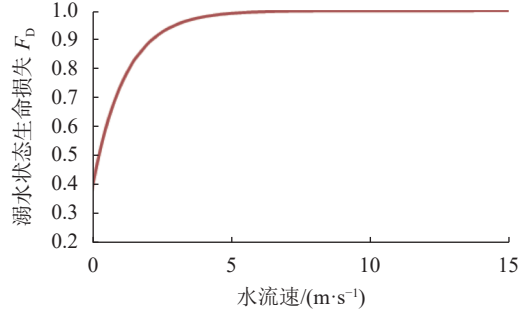


图 3 溺水状态下的人体易损性曲线

Fig. 3 Human vulnerability curve in the drowning state

1.1.3 考虑人体稳定性和求生能力的生命损失量化

图4为人体稳定性和求生能力量化逻辑结构。

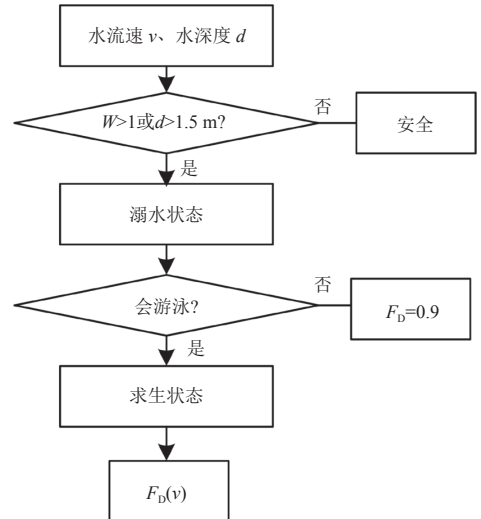


图 4 人体稳定性和求生能力量化逻辑结构

Fig. 4 Quantification logical structure of human stability and survival ability

由图4可知,组合各种不同水流流速和水深条件,各采用蒙特卡洛实验重复100万次,可得到在不同的洪水状况组合情况下人体的生命损失量化值,见表2。

表 2 基于人体站立稳定性物理模型死亡率量化结果

Tab. 2 Mortality quantification results based on a physical model of human stability

淹没水深/m	水流速/(m·s ⁻¹)	死亡率	生还率
0~1.5	(0, 1]	0.1519	0.8481
	(1, 2]	0.3781	0.6219
	(2, 4]	0.7749	0.2251
	(4, 6]	0.9056	0.0944
	>6	0.9746	0.0254
>1.5	(0, 1]	0.5821	0.4179
	(1, 2]	0.8192	0.1808
	(2, 4]	0.9439	0.0561
	(4, 6]	0.9895	0.0105
	>6	0.9992	0.0008

注:淹没水深0~1.5 m是考虑到人体本身姿态的调整,可能在水中保持站立的前提条件,超过这个水深直接进入溺水状态的判定。

将表2的条件概率嵌入到修改的贝叶斯网络中,使用Hugin Lite计算可得到新模型各节点的先验概率分布。

1.2 模型对比分析

使用Hugin Lite计算得到的先验概率是基于统计数据 and 已发表文献中的成果,因此,结果仅代表溃坝洪水造成的全球总的平均生命损失风险。

HURAM2.0模型计算出的先验生命损失概率为7.58%,比HURAM1.0模型计算出的生命损失(4.54%)风险大。其原因主要是HURAM1.0模型忽略了水动力因素对人体稳定性的不利影响,低估了特定情况下的生命损失风险。改进模型在保持其他节点概率分布都不变的条件下,进一步考虑了水深和水流流速对生命损失的影响。

在具体的溃坝案例中应用时,需要输入具体的水力参数、人员分布信息、建筑物特征等信息,基于贝叶斯定理更新先验概率得到后验分布。

图5为HURAM2.0模型和HURAM1.0模型预测的死亡率。

图5中所使用的历史数据信息经过校核和正则化,剔除了一些不符合常理的异常值;斜率为1的对角线代表预测值等于观测值。由图5可知:死亡率较高(大于5%)时,HURAM2.0模型预测性能明显好于HURAM1.0模型;死亡率较低时,两模型预测性能相当。整体规律为死亡率低于1.44%时,HURAM-2.0模型预测值比HURAM1.0略小;当死亡率值较大时,HURAM2.0模型预测值比HURAM1.0模型

略大。

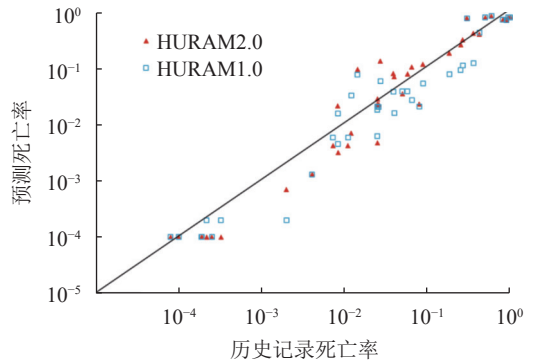


图 5 HURAM2.0、HURAM1.0模型的预测结果
Fig. 5 Predicted fatality rates using HURAM1.0 and HURAM2.0

1.3 HURAM2.0模型参数敏感性分析

图6为14个指标对先验概率的影响程度,对比HURAM2.0和HURAM1.0模型,主要差异有:1)变化不大的,如洪水严重程度、水深度等影响因素。因为HURAM2.0模型的贝叶斯网络仅修正了中风险程度下的生命损失函数,不影响安全和低死亡率($F_D = 0$),以及高风险高死亡率($F_D = 0.9077$)下的生命损失,故洪水严重程度影响范围区间变化不大,且水深始终是导致生命损失的主要因素。2)变化范围扩大的,如疏散率、洪水到达时间段、在建筑物中庇护情况、预警时间、洪水上升速率、水流流速等,由于考虑了流水动力因素对人体稳定性的不利作用,修改后的贝叶斯网络对水流流速的变化更敏感,并导致生命损失风险整体上升,上限提高,变化范围扩大。3)变量的区间向上发生位移的,如居民区住宅类型、淹没区距坝址处距离,这两个相对不重要的影响因素因生命损失整体风险上升而产生取值的偏移。

表3为生命损失的参数敏感性分析及对比。

表3中, I_{min} 和 I_{max} ^[11]分别反映各变量对生命损失值的正面(从最小值开始增大)和负面(从最大值开始减小)影响的能力大小,是一个梯度变量,值越大代表影响越大。由表3可知:1)HURAM2.0模型中水流流速的影响权重(图6水流速对应的条件概率取值范围扩大)和敏感性均有所提高,水深敏感性相对下降,原因可能是考虑了深度相对较浅、流速相对较大的人体失稳情况(HURAM1.0模型未考虑),此时控制生命损失的主导因素是较大的水流流速;2)居民区住宅层数、在建筑物中庇护情况和溃坝时长的影响程度更大,这是因为这3个变量均能直接影响到人员的疏散和庇护情况,既没有撤离又无成功庇护的暴露人口将直接在洪水中受到水流的冲击,从而变得更危险。

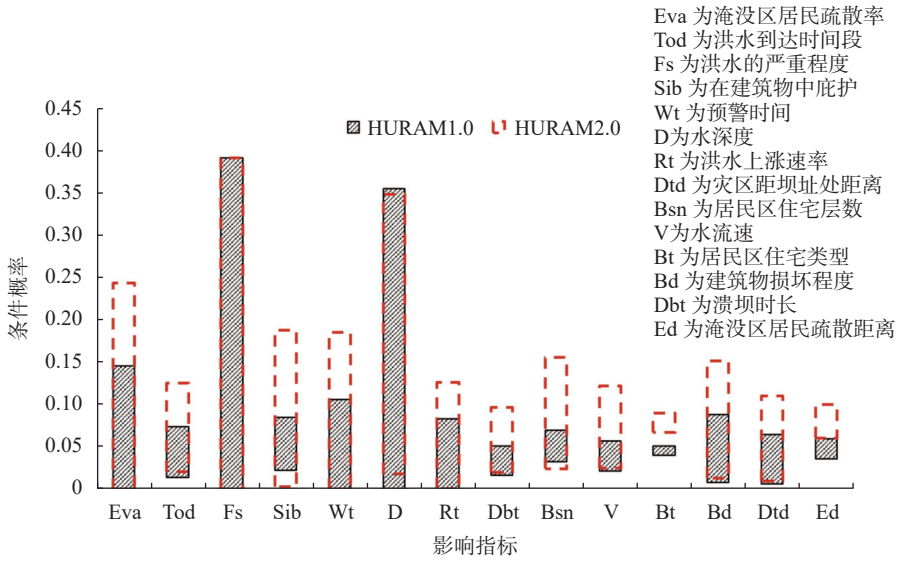


图 6 先验的HURAM1.0和HURAM2.0中的14个影响指标的分析

Fig. 6 Influences of 14 factors on the loss of life in both prior HURAM1.0 and HURAM2.0

表 3 生命损失的参数敏感性分析及对比

Tab. 3 Parameter sensitivity analysis and comparison of life loss

指标	HURAM1.0模型		HURAM2.0模型		相对变化	
	I_{min}	I_{max}	I_{min}	I_{max}	$\Delta I_{min}/\%$	$\Delta I_{max}/\%$
Ed	0.202 643	0.321 586	0.204 485	0.324 538	0.91	0.92
Tod	0.693 833	0.625 551	0.720 317	0.654 354	3.82	4.60
Dtd	0.843 612	0.431 718	0.864 116	0.456 464	2.43	5.73
Bsn	0.277 533	0.539 648	0.672 823	1.054 09	142.43	95.33
Dbt	0.634 361	0.140 969	0.734 828	0.275 726	15.84	95.59
D	0.993 392	6.817 181	0.759 894	3.596 306	-23.51	-47.25
V	0.511 013	0.270 925	0.662 269	0.610 818	29.60	125.46
Bt	0.110 132	0.127 753	0.105 541	0.188 654	-4.17	47.67
Wt	1.000 000	1.330 396	1.000 000	1.447 230	0	8.78
Rt	0.997 797	0.845 815	0.988 127	0.672 823	-0.97	-20.45
Bd	0.806 167	0.951 542	0.824 538	0.998 681	2.28	4.95
Eva	1.000 000	2.220 264	1.000 000	2.217 678	0	-0.12
Sib	0.495 595	0.874 449	0.960 422	1.484 169	93.79	69.73
Fs	1.000 000	7.607 930	1.000 000	4.155 673	0	-45.38

综上所述, HURAM2.0相比HURAM1.0模型, 很多变量的敏感性都有所上升, 这意味着贝叶斯反演时更具优势。此外, 由于改进后的模型引入了基于实验数据的物理模型, 构建更加精细, 更加详尽地考察了水动力作用因素, 增强了模型的解释性, 故改进模型的贝叶斯网络反演更具有说服力。

坝库容量巨大, 汇水面积大, 水位上涨快, 坝体结构松散, 溃坝风险高, 对下游120万人的生命财产安全构成巨大威胁。

2 案例分析

2.1 唐家山堰塞坝介绍

2008年5月12日, 中国四川发生了里氏8.0级地震, 导致唐家山山体滑坡堵塞湔江上游, 形成了一个巨型堰塞坝, 如图7所示。堰塞坝坝高82 m, 坝宽(顺河向)802 m, 坝长(横河向)611 m, 坝体体积 $2.04 \times 10^7 \text{ m}^3$, 库容 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, 回水长度达20 km, 集水面积近 $3\,550 \text{ km}^2$; 坝体距离北川镇上游3.5 km。唐家山堰塞



图 7 唐家山堰塞坝卫星图像

Fig. 7 Tangjiaoshan landslide dam satellite image

唐家山堰塞坝坝体为3层结构,最上层是厚度为5~15 m的碎石土;中间是10~15 m强风化碎裂岩;最下层为50~80 m厚的弱风化碎裂岩石^[15-17];坝体抗侵蚀性从顶层到底层由弱变强^[18]。2008年6月1日,开掘长475 m、宽25 m、深12 m的泄流槽,开挖土方量 $1.36 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。泄流槽将原始的坝顶高程从752.2 m降至740.4 m,净容量降至 $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[17]。

2008年6月11日上午6:00,唐家山堰塞坝开始溃决;12:30达到峰值流量 $6500 \text{ m}^3/\text{s}$,坝顶高程下降至735.8 m;14:00湖水位高程下降至714.1 m,相应库容降至 $8.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。最终溃口深度42 m,顶宽145~235 m,底宽80~100 m。

2.2 溃坝洪水分析

2.2.1 工况设置

根据对堰塞坝信息的掌握程度由浅到深和工程减灾措施的从无到有,即堰塞坝灾害的发展阶段设置两种工况研究溃坝洪水生命损失。

工况1:滑坡形成的堰塞坝结构松散,本身极不稳定,很快会发生溃决,在最初几个小时很难获取坝体结构和材料参数,需要对堰塞坝的安全状况做快速评估^[19-21]。分析中,按照最坏情况考虑,即设定工况1为高侵蚀坝体材料下发生漫顶溃决的工况^[21]。

工况2:通过现场勘测获得坝体基本信息,包括坝体材料、结构参数等,得知坝体由3层不同风化程度的碎裂岩构成,堰塞坝的竖向非均质性将影响到坝体的溃决过程^[22]。为降低风险,现场通过开挖泄流槽降低了坝顶高程,导致坝体提前发生漫顶溃决。设定工况2为现场勘测和开挖泄流槽工况。

工况1坝顶的高程为752 m,积蓄的最大库容 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$;工况2开挖泄流槽后,坝体高程降至742 m,湖水最大库容下降至 $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2.2 洪水演进模拟

首先,获取河道3维地形信息,主要包括:通过Google Earth获取研究区域的DEM高程信息图片和卫星影像图;采用地图分析软件Global Mapper获取典型断面的3维数据。该方法可以在短时间内获取全球范围内任何堰塞湖所在流域河道的3维地形信息。在此基础上,开展溃坝模拟和洪水演进分析:

1) 工况1中,对堰塞坝的信息掌握不充分,只有通过航空照片估算坝体几何参数,采用Peng等^[1]根据52例堰塞坝破坏信息数据库提出的多参数经验模型估算坝体溃决的参数。使用基于稳定流能量守恒和非稳态流的质量和动量守恒开发的1维水力演进计算模型HEC-RAS进行洪水演进计算,模拟得到上、下游(北川)水位高程和溃坝流量如图8所示。溃坝持续时间为8.9 h,坝址处的峰值流量达到 $31749 \text{ m}^3/\text{s}$;

流经北川时峰值流量为 $31670 \text{ m}^3/\text{s}$;最大淹没水深20 m,流速达到1.9 m/s。

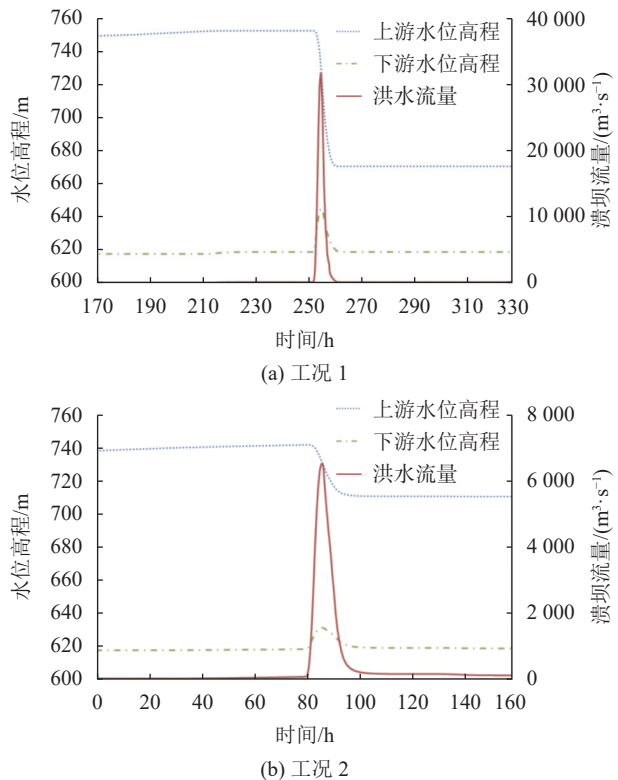


图8 工况1和工况2上下游水位高程变化和北川流量过程曲线

Fig. 8 Upstream and downstream water level elevation and Beichuan flow process curve in Case 1 and 2

2) 工况2中,通过现场勘测得到坝体的基本参数(坝体材料、结构参数),在开挖泄流槽后,使用物理模型DABA^[23]模拟坝体溃决,该模型基于侵蚀理论和浅水流模型模拟水土之间的相互作用。通过侵蚀系数和临界侵蚀剪应力描述土壤侵蚀性。通过求解河流的连续性方程及宽顶堰的溃口水流模拟流体动力学过程。输入大坝几何信息、土体参数及上游的日平均入流量,即可输出每个时步的溃决参数。将坝址处溃决流量输入HEC-RAS模型,得到下游各位置流量过程线。北川的峰值流量为 $6567 \text{ m}^3/\text{s}$,相比工况1大大减小;溃坝持续时间为14 h;北川最大淹没水深为6.1 m,平均水流速为1.1 m/s。

2.3 唐家山堰塞坝溃决生命损失风险评估

根据疏散距离和水深将断面信息离散成输入贝叶斯网络的 i 个区段。假设人员均匀分布在居民区内,那么在不同工况 S_j (本文工况1、2)下,人类生命损失风险可计算为:

$$R(H|S_j) = \sum P_{\text{PAR}i} \times P_i(L|S_j) \quad (15)$$

式中, $P_{\text{PAR}i}$ 为第 i 个区段上的风险人口, $P_i(L|S_j)$ 为工况 S_j 下区段 i 上的死亡率。

以工况2为例,将典型断面分割成6个区段(图9),各区段输入改进的贝叶斯网络的变量取值见表4,计

算结果见表5。同样地,计算出工况1、2的生命损失,结果见表6。

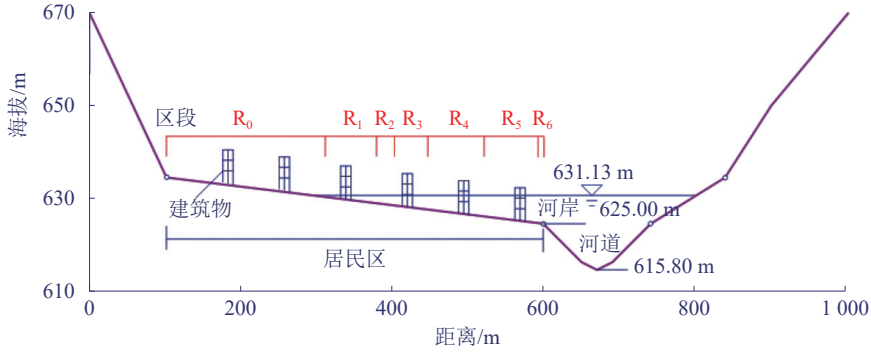


图9 工况2风险人群划分

Fig. 9 Population at risk in Beichuan in Case 2

表4 工况2输入改进的贝叶斯网络的参数

Tab. 4 Inputs for improved Bayesian network in Case 2

区间	撤离距离/m	水深/m	水流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	溃坝时长/h	时间段	坝址距离/m	楼层数目	建筑物形式
R1	(0, 75]	(0, 1.50]	1.1	14	8: 00—17: 00	3.5	3	砖砌
R2	(75, 100]	(1.50, 2.00]	1.1	14	8: 00—17: 00	3.5	3	砖砌
R3	(100, 150]	(2.80, 3.00]	1.1	14	8: 00—17: 00	3.5	3	砖砌
R4	(150, 225]	(3.00, 4.50]	1.1	14	8: 00—17: 00	3.5	3	砖砌
R5	(225, 300]	(4.50, 6.00]	1.1	14	8: 00—17: 00	3.5	3	砖砌
R6	(300, 307]	(6.00, 6.13]	1.1	14	8: 00—17: 00	3.5	3	砖砌

表5 HURAM1.0和HURAM2.0计算得到的北川地区各区间生命损失计算结果对比(工况2)

Tab. 5 Comparison of life loss in Beichuan area by HURAM1.0 and HURAM2.0 models (Case 2)

区间	风险人口	生命损失率	
		HURAM1.0	HURAM2.0
R1	4500	1.16×10^{-7}	1.16×10^{-7}
R2	1500	1.79×10^{-6}	1.79×10^{-6}
R3	3000	1.86×10^{-6}	1.86×10^{-6}
R4	4500	0.000 4	0.001 1
R5	4500	0.002 1	0.003 2
R6	390	0.010 4	0.006 7

表6 溃坝洪水流量及其造成的北川人员生命损失

Tab. 6 Dam-break floods and caused loss of life in Beichuan Town

编号	坝址		北川				生命损失人数	
	峰值流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	溃坝时间/h	峰值流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	风险人数	最大水深/m	水流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	HURAM1.0	HURAM2.0
工况1	31 749	8.9	31 670	30 000	20.0	1.94	4 255	3 994
工况2	6 534	14.0	6 567	18 300	6.1	1.10	15.31	21.96

2.3.1 工况1分析

工况1情况下,溃坝时,改进模型计算出的北川人类生命风险分布如图10所示,IR为个体生命损失风险,下同。

北川几乎全部区域被洪水所淹,淹没最深处达20 m,淹没区域风险人口达30 000人。即使在发出疏散警报(贝叶斯网络预测)的情况下,生命损失风险也达到4 000左右,属于极大的灾害事故。这主要是由于在工况1中,假设坝体具高侵蚀性,溃决时间很短,最终溃口深度大,漫顶溃坝时积蓄的库容极大,短时间内北川遭遇严重洪水,所有未撤离的人群都将遭遇致命的洪水侵害,风险极大。

图11为HURAM1.0和HURAM2.0模型计算的生命损失率。工况1水深20 m,水流速为1.94 m/s时,属于中破坏性洪水的范畴。在HURAM1.0模型中(图11虚线),暴露人口在中等洪水下,仅采用有限的几个历史数据拟合,当流速超过9 m/s时,死亡率即高达0.892 1;对不同的水流速状况未做出进一步区分,即不管水流速有多大,只要水深确定,其预测的结果都将保持不变,与事实不符。HURAM2.0模型采用人体稳定性物理模型,暴露人口在中等洪水下(图11实线和短划线),当流速超过9.00 m/s(大于1.5 m的参考深度),考虑到溺水人群在1.00~2.00 m/s的流速中具有一定的求生能力,死亡率仅0.819 2,小于HURAM1.0

模型的预测结果。同时,当水流速降低时,死亡率会降低;当水流速超过人体游泳能力的极限2 m/s时,死亡率急剧上升,改进后的模型能够区分不同水流条件下的生命损失计算结果。

为21.96,比HURAM1.0模型预测结果(15.31)略大,主要是考虑了水流流速对人体稳定性的不利影响。

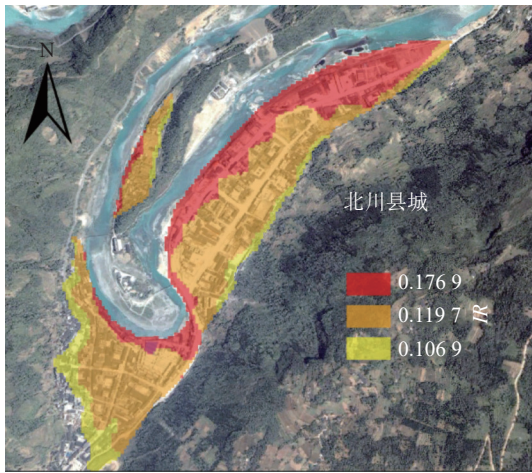


图 10 工况1北川人类生命风险分布

Fig. 10 Human life risk distribution for Beichuan in Case 1

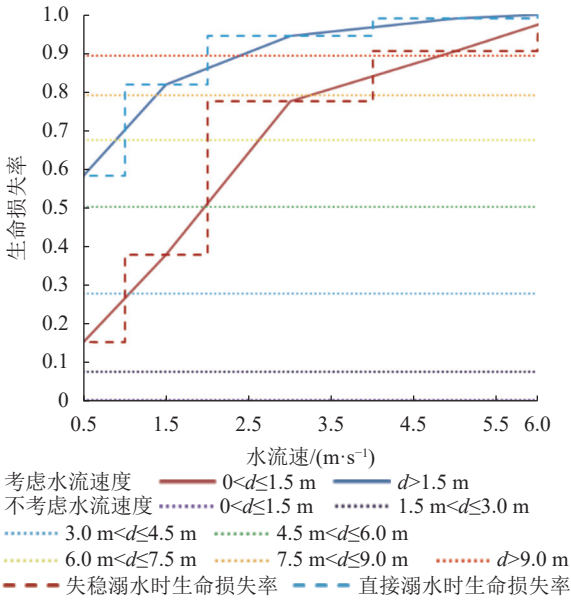


图 11 HURAM1.0和HURAM2.0模型计算的生命损失率

Fig. 11 Life of loss calculated by HURAM1.0 and HURAM2.0 models

2.3.2 工况2分析

工况2中,北川人类生命损失风险的强度和分布范围都大幅度降低,如图12所示。

开挖泄流槽后,坝顶高程降低,峰值流量大大减小,洪水强度大幅度下降,减轻了堰塞坝溃决对下游的影响,最大淹没深度为6.1 m,北川只有一部分被水淹没,风险人口为18 300,生命损失风险下降至20人左右。此时,多数未撤离人员都可以在3楼寻求庇护,只有少部分来不及采取庇护措施的人遭受一定的洪水风险。HURAM2.0模型预测的人类生命损失风险

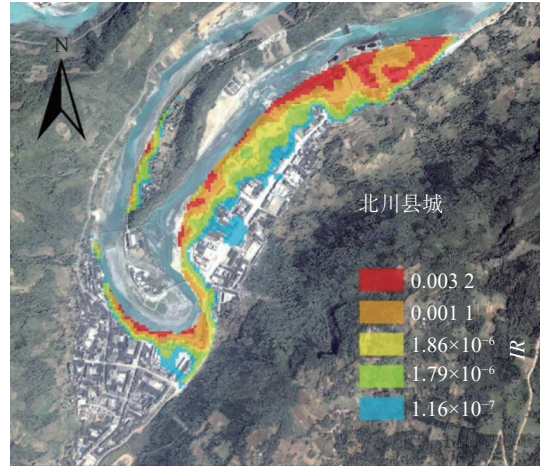


图 12 工况2北川人类生命风险分布

Fig. 12 Human life risk distribution for Beichuan in Case 2

由以上可知,及时到现场勘察查明堰塞坝的资料,尽早采取工程减灾措施,可以在很大程度上降低堰塞坝灾害造成生命损失的风险;且在工况1中,HURAM2.0能区分不同水流速度下的生命损失。

3 模型局限性

HURAM2.0模型是一个宏观模型,在统计学平均意义上预测洪水水流对生命损失的影响,受限于当前的基础和水平,做了一些必要的假设和简化,可能会降低模型的精度和适用性。

1)溃坝洪水中含有大量泥沙,一般距离坝址处越近,洪水泥沙含量的不利影响就越大;距离坝址越远,泥沙的影响越小。本文暂未考虑水沙混合流对人体稳定和求生能力的影响。在后续研究中将进一步考虑水沙混合流与人体之间的相互作用。

2)只考虑了水流直接作用导致的滑动和倾倒失稳模式,区分了儿童和成人两类群体的差异,在区域统计学的平均意义上预测效果要好于对局部的单独个体的预测效果。后续研究将进一步关注和考虑复杂环境(如被树枝和大石块绊倒、被水沙流体大石块撞击失稳)对特定类别个体的影响。

3)HURAM2.0模型在计算溃坝生命损失方面具有较大优势,但由于所建立的贝叶斯网络只能接受离散数据信息条件的输入,离散化的过程会不可避免地降低数据的分辨率和敏感性。未来将进一步考虑建立连续变量的贝叶斯网络。

4 结 论

1)在溃坝风险评估模型HURAM1.0的基础上,进一步考虑水流作用下人体稳定性,提出HURAM2.0

模型。该模型考虑了多因素相互作用及不确定性的影响,实现了在较强洪水强度条件下的生命损失更准确的预测,增强了模型的解释性。

2)在生命损失易损性函数中引入水流速度参数,更精确地刻画了人体在水流中的稳定性和求生能力。相比HURAM1.0模型仅适合低、高洪水强度生命损失预测,HURAM2.0模型可以实现低、中、高3类洪水强度下生命损失的准确预测,并且能在中等破坏性洪水下区分出水流流速的影响,更符合实际情况。

3)将本文模型应用到唐家山堰塞坝溃坝洪水风险评估中,结果表明:在未查明堰塞坝基本资料也未开挖泄流槽的情况下,坝体溃决导致的生命损失风险较大;在获得坝体3层结构并开挖泄流槽降低坝顶高程后,生命损失风险大幅度降低。这说明及早查明堰塞坝的情况并采取相应的工程措施(如开挖泄流槽)能在很大程度上降低堰塞坝灾害的风险。

参考文献:

- [1] Peng M,Zhang L M.Breaching parameters of landslide dams [J].*Landslides*,2012,9:13–31.
- [2] Fan Xuanmei,Xu Qiang,Alonso-Rodriguez A,et al.Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet,China:Prime investigation,early warning,and emergency response[J].*Landslides*,2019,16:1003–1020.
- [3] Graham W.Procedure for estimating loss of life caused by dam failure[R].Denver:U.S.Bureau of Reclamation,Dam Safety Office,1999.
- [4] Brazdova M,Riha J.A simple model for the estimation of the number of fatalities due to floods in central Europe[J].*Natural Hazards and Earth System Sciences*,2014,14(7):1663–1676.
- [5] Brussee A R,Bricker J D,De Bruijn K M,et al.Impact of hydraulic model resolution and loss of life model modification on flood fatality risk estimation:Case study of the Bommelerwaard[J].*Journal of Flood Risk Management*,2021,14(3):e12713.
- [6] Jonkman S N,Penning-Rowsell E.Human instability in flood flows[J].*Journal of the American Water Resources Association*,2008,44(5):1208–1218.
- [7] Xia J,Falconer R A,Xiao X.New criterion of human stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies[C].35th World Congress of the International Association for Hydro Environment Engineering and Research.Chengdu:Int Assoc Hydro Environm Engr & Res,2013.
- [8] Lazzarin T,Viero D P,Molinari D,et al.Flood damage functions based on a single physics- and data-based impact parameter that jointly accounts for water depth and velocity[J].*Journal of Hydrology*,2022,607:126489.
- [9] Shu C W,Han S S,Kong W N,et al.Mechanism of toppling instability of the human body in floodwaters[C].*2nd International Conference on Water Resource and Environment*.Shanghai,2016.
- [10] Jonkman S N,Vrijling J K,Vrouwenvelder.Methods for the estimation of loss of life due to floods:A literature review and a proposal for a new method[J].*Natural Hazards*,2008,46(3):353–389.
- [11] 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*,2012,64:903–933.
- [12] Peng M,Zhang L M.Analysis of human risks due to dam-break floods-part 2:Application to Tangjiashan landslide dam failure[J].*Natural Hazards*,2012,64:1899–1923.
- [13] Zhang L M,Xu Y,Jia J S,et al.Diagnosis of embankment dam distresses using Bayesian networks.Part I .Global-level characteristics based on a dam distress database[J].*Canadian Geotechnical Journal*,2011,48(11):1630–1644.
- [14] Xu Y,Zhang L M,Jia J S.Diagnosis of embankment dam distresses using Bayesian networks.Part II .Diagnosis of a specific distressed dam[J].*Canadian Geotechnical Journal*,2011,48(11):1645–1657.
- [15] Cui Peng,Zhu Yingyan,Han Yongshun,et al.The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes:Distribution and preliminary risk evaluation[J].*Landslides*,2009,6:209–223.
- [16] Hu Xiewen,Huang Runqiu,Shi Yubing,et al.Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam[J].*Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2009,28(1):181–189.[胡卸文,黄润秋,施裕兵,等.唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J].*岩石力学与工程学报*,2009,28(1):181–189.]
- [17] Liu Ning,Chen Zuyu,Zhang Jianxin,et al.Draining the Tangjiashan barrier lake[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2010,136(11):914–923.
- [18] Chang D S,Zhang L M,Xu Y,et al.Field testing of erodibility of two landslide dams triggered by the 12 May Wenchuan earthquake[J].*Landslides*,2011,8:321–332.
- [19] Zheng Hongchao,Shi Zhenming,Peng Ming,et al.Review and prospect of the formation mechanism of landslide dams caused by landslide and avalanche debris[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(2):19–28.[郑鸿超,石振明,彭铭,等.崩滑碎屑体堵江成坝研究综述与展望[J].*工程科学与技术*,2020,52(2):19–28.]
- [20] Shi Zhengming,Shen Danyi,Peng Ming,et al.Research progress on rapid hazard assessment of landslide dams caused by landslides and avalanches[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(6):1–20.[石振明,沈丹祎,彭铭,等.崩滑型堰塞坝危险性快速评估研究进展[J].*工程科学与技术*,2021,

53(6):1–20.]

- [21] Shen Danyi, Shi Zhenming, Peng Ming, et al. Stability estimation of landslide dams[C]//Proceedings of 2019 National Engineering Geology Academic Annual Meeting. Beijing: Journal of Engineering Geology Editorial Division, 2019: 348–355. [沈丹祎, 石振明, 彭铭, 等. 堰塞坝稳定性快速评估[C]//2019年全国工程地质学术年会论文集. 北京:《工程地质量报》编辑部, 2019:348–355.]
- [22] Shi Zhenming, Zhang Gongding, Peng Ming, et al. Experi-

mental investigation on the breaching process of landslide dams with heterogeneous structures[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(1):129–140. [石振明, 张公鼎, 彭铭, 等. 非均质结构堰塞坝溃决机理模型试验[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(1):129–140.]

- [23] 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.

A Method for Estimating Human Loss of Life in Dam-Breach Flood Considering Human-Fluid Interaction

PENG Ming^{1,2}, MA Fujun^{1,2}, SHEN Danyi^{3*}, CAI Yijian⁴, SHI Zhenming^{1,2}, ZHOU Jiawen⁵, LIU Xijun⁴

(1. College of Civil Eng., Tongji Univ., Shanghai 200092, China; 2. Key Lab. of Geotechnical and Underground Eng. of Ministry of Education, Tongji Univ., Shanghai 200092, China; 3. Inst. of Geotechnical Eng., College of Civil Eng. and Architecture, Zhejiang Univ., Hangzhou 310058, China; 4. Huadong Eng. Corp. Ltd., Hangzhou 310000, China; 5. Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Dam-breach floods pose a significant threat to human life downstream. Conducting a quantitative risk assessment of life loss caused by dam-breach has important practical implications for emergency response and disaster relief efforts. This study presents the HURAM2.0 model, an extension of the existing HURAM1.0 model of life loss Bayesian network, which considers the interaction between the human body and water flow. It first assesses the stability of individuals in floodwaters and then determines the risk of drowning. By employing Monte Carlo simulation, the model integrates the effects of water depth and flow velocity on life loss. The HURAM2.0 model is applied to analyze the life loss caused by the breach of the Tangjiashan landslide dam. The main conclusions are as follows: The HURAM2.0 model established a quantitative relationship between flow velocity and loss of life, thereby providing a more accurate description of the stability and survival capabilities of the human body in water flow. In comparison to the HURAM1.0 model, the HURAM2.0 model demonstrated greater accuracy in predicting the loss of life under conditions of strong flood intensity. Additionally, within the HURAM2.0 model, apart from water depth and flood severity which remain relatively consistent, the sensitivity of the other variables increases. Specifically, the number of floors in residential buildings, shelter provided by buildings, and duration of the breach variables were found to exhibit a respective increase in their impact on model calculations by 142%, 95%, and 93%. This enhancement strengthens the model's interpretability under low, medium, and high flood intensity, providing a favorable position for Bayesian inversion. In the risk analysis of the Tangjiashan landslide dam, the HURAM2.0 model differentiates the loss of life under different flow velocity conditions, which aligns more closely with reality. The risk and mortality rate were high before the spillway was excavated. The risk was significantly reduced and the number of deaths greatly decreased after on-site surveys and spillway excavation. It is recommended to use early warning systems and evacuation measures to mitigate the risk of life loss.

Key words: dam breach; physical modeling of human stability; risk of loss of life; Bayesian network; landslide dam breach floods

(编辑 李轶楠)

引用格式: Peng Ming, Ma Fujun, Shen Danyi, et al. A method for estimating human loss of life in dam-breach flood considering human-fluid interaction[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(1):127–137. [彭铭, 马福军, 沈丹祎, 等. 考虑人体与水流相互作用的溃坝洪水生命损失评估模型[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(1):127–137.]