

基于二维溃坝波数值模拟的生命损失估算

沈照伟¹, 潘存鸿¹, 叶碎高¹, 王立辉², 鲁海燕¹

(1. 浙江省水利河口研究院 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 浙江 杭州 310020; 2. 福州大学, 福建 福州 350108)

摘要: 通过界面数值通量以及底坡源项的计算求解无碰撞二维 Boltzmann 方程, 建立了二维溃坝波数值模型. 以杭州市余杭镇上游某水库为例, 模拟了该水库溃坝后溃坝波的演进过程, 模拟结果表明溃坝洪水淹没范围很大, 距坝约 11 km 的下游, 水深仍可达 4.0 m 以上. 同时, 应用通用的溃坝生命损失模型, 在获取网格单元上的水力学参数值(包括水深和最大流速)基础上, 输入当地的地形、人口等基本数据, 估算了水库溃坝对下游造成的生命损失. 该方法可用于其他水库的风险管理分析, 为相关部门决策提供依据和参考.

关 键 词: 溃坝波; 数值模拟; 生命损失

中图分类号: TV122+.4; TV698.2+37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2013)04-0024-05

水库大坝溃决的风险是客观存在的, 一旦溃决将对水库下游群众的生命和财产造成重大损失. 因此, 溃坝生命损失评估对水库大坝安全运行及区域防洪减灾均具有重要意义.

国内外常用的溃坝生命损失估算方法有 B&G 法、D&M 法、Graham 法、Assaf 法及简化 Graham 法等, 这些方法是在对众多已溃坝水库生命损失的统计和研究的基础上提出来的. B&G 法和 D&M 法主要应用数理统计回归方法, 利用多个主要生命损失影响参数的经验公式来估算. 由于溃坝资料有限, 拟合效果可能也不是很好. Assaf 法是基于风险人口生还率的生命损失评价新模型的方法, 由于目前对风险人口主观能动性、溃坝洪水的互动性研究还不够深入, 往往应用的条件还不够成熟. 周克发等^[1]提出的生命损失模型更加符合我国实际, 该模型计算中必须考虑溃坝洪水演进过程的水深与流速. 现有的一些洪灾损失模型主要按照一般洪水的演进计算, 而溃坝洪水与一般洪水计算相比主要有以下特点: (1) 动边界处理时, 在水量严格守恒基础上, 要求具有处理强间断情况下的动边界能力; (2) 溃坝波水力条件变化梯度往往很大, 计算时要求在不规则地形下具有稳定性, 同时具有捕捉激波的能力; (3) 溃坝波计算区域很大, 计算时要有局部加密功能, 同时要有较强的边界适应能力. 构建边界适应性强, 并具有模拟间断流动能力的二维溃坝波数值模型, 是溃坝波模拟计算的关键. 早期的溃坝波数值模型大多为平底情况^[2-4], 近几年来, 一些学者应用能模拟大梯度流动的高性能格式建立了二维溃坝波数值模型, 并在实际水库溃坝和河道溃堤中逐渐开始应用^[5-7]. 本文应用有限体积-KFVS (Kinetic Flux Vector Splitting) 格式建立了二维溃坝波整体数值模型, 采用改进的干底 Riemann 解方法计算动边界问题, 以杭州市余杭区余杭镇为例, 计算上游某水库溃坝洪水演进过程. 结合现有通用的溃坝生命损失模型, 开展生命损失评估. 在获取网格单元上的水力学参数值(包括水深和最大流速)基础上, 以区域地形、人口等数据为模型输入, 分析了水库溃坝对下游余杭镇造成的生命损失. 对水库大坝安全运行及区域防洪减灾均具有重要的意义.

收稿日期: 2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079130); 浙江省重大科技计划资助项目(2007C13012)

作者简介: 沈照伟(1975-), 男, 浙江桐庐人, 高级工程师, 博士, 主要从事防洪减灾及水库大坝安全评估.

E-mail: shenzw@zjwater.gov.cn

1 研究方法

1.1 溃坝波数值模型

无碰撞二维 Boltzmann 方程为^[8]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c_x \frac{\partial f}{\partial x} + c_y \frac{\partial f}{\partial y} + \varphi_x \frac{\partial f}{\partial x} + \varphi_y \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中: f 为分子速度分布函数; c_x 为 x 方向的分子速度; c_y 为在 y 方向的分子速度; φ 为外力作用、由非平底引起的阻力项及重力项, $\varphi_x = g(S_{0x} - S_{fx})$, $\varphi_y = g(S_{0y} - S_{fy})$, g 为重力加速度, S_{fx} 和 S_{fy} 为 x 和 y 方向的阻力项, S_{0x} 和 S_{0y} 为 x 和 y 方向的底坡项。

将 Boltzmann 方程乘以 $(1, c_x, c_y)^T$, 并对分子速度空间积分, 可以间接求解浅水方程, 则有

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = [h, hu, hv]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{F} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c_x f dc_x dc_y, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c_x^2 f dc_x dc_y, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c_x c_y u v f dc_x dc_y \right]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{G} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c_y f dc_x dc_y, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c_x c_y f dc_x dc_y, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c_y^2 f dc_x dc_y \right]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{S} = [0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy})]^T \quad (6)$$

式中: h 为水深; u, v 分别为 x 和 y 方向的流速。

通过界面数值通量以及底坡源项的计算可以求解式(2)。界面通量可采用有限体积-KFVS 法求解^[9], 其他项可用通常的有限体积法求解。在计算过程中控制方程必须遵守水量守恒, 因此界面通量求解过程中最关键的是方程右端的底坡源项与左端的压力项保持“和谐”。本文采用潘存鸿等^[9]提出的“静水压力法”源项来处理, 多个算例验证已表明有限体积(KFVS)格式具有捕捉强间断的能力, 特别适用于不规则地形下的溃坝波计算^[9]。

1.2 水库溃坝生命损失模型

周克发等^[1]提出的水库溃坝生命损失模型参数主要是 P_{AR} 风险人口数; f 风险人口死亡率(计算时风险人口死亡率是根据当地实际情况确定的); a 风险人口死亡率的修正系数(计算时根据溃坝洪水灾难严重性程度确定)。生命损失评价模型的具体公式如下:

$$L_{OL} = P_{AR} \times f \times a \quad (7)$$

在实际应用中, 要结合当地实际情况, 建立合适的风险人口死亡率和溃坝洪水对下游造成的灾难严重程度评估参数, 即确定上述公式中的 f 和 a 两个参数。

1.2.1 风险人口 P_{AR} 风险人口取决于溃坝发生时间、洪水淹没范围以及影响范围内人口的分布与活动状态。其计算有以下几种方法:

(1) 人口密度法。假设淹没范围内人口均匀分布, 那么风险人口就是单位面积的人口密度与淹没面积相乘; 通常在缺乏详细人口分布数据的大中型水库溃坝时采用。

(2) 居民点(居住单元)数目累计估算法。统计各个居民点的人口数, 求和; 适用于中小型水库及统计资料丰富地区, 也是推荐方法, 在实际工作中可灵活采用。

1.2.2 风险人口死亡率 f 周克发等^[1]调研已溃决大坝有 8 座, 风险人口死亡率遵循以下基本原则: (1) 按警报时间的增加而逐渐减小; (2) 按溃坝洪水严重性程度的减弱而减小; (3) 按风险人口对溃坝洪水严重性的理解程度增强而减小。应用 Graham 法对无案例类型进行推演, 结合 Graham 法的风险人口死亡率, 提出了基于溃坝洪水严重性及警报时间等级的、符合我国实际情况的风险人口死亡率, 详见表 1。其中: ①溃坝洪水

严重性 $S=DV$ (D 为水深, V 为流速), 根据洪水演算结果, 分高 ($>7.0 \text{ m}^2/\text{s}$)、中 ($3.0 \sim 7.0 \text{ m}^2/\text{s}$)、低 ($<3.0 \text{ m}^2/\text{s}$) 3 类。②警报时间分无警报 ($<0.25 \text{ h}$)、部分警报 ($0.25 \sim 1.00 \text{ h}$)、充分警报 (1.00 h) 3 种。

表 1 不同严重性条件下溃坝风险人口损失率估算表^[1]

Tab. 1 Population loss estimation of dam break risk

溃坝洪水严重性	警报时间/h	死亡率 f	
		建 议 值	可取范围
高	无警报 (<0.25)	0.75	0.25 ~ 1.00
	部分警报 ($0.25 \sim 1.00$)	0.20	0.05 ~ 0.40
	充分警报 (>1.0)	0.18	0.01 ~ 0.3
中	无警报 (<0.25)	0.50	0.10 ~ 0.80
	部分警报 ($0.25 \sim 1.00$)	0.13	0.015 ~ 0.30
	充分警报 (>1.0)	0.05	0.01 ~ 0.10
低	无警报 (<0.25)	0.03	0.001 ~ 0.05
	部分警报 ($0.25 \sim 1.0$)	0.007	0 ~ 0.015
	充分警报 (>1.0)	0.0003	0 ~ 0.0006

1.2.3 风险人口死亡率的修正系数 a 该系数按下式计算:

$$a = m_1 + b \times m_2 \quad (8)$$

式中: m_1 为生命损失直接影响因素的灾难严重性程度影响因子, $m_1 \leq 1$; m_2 为生命损失间接影响因素的灾难严重性程度影响因子, $m_2 \leq 1$; b 为生命损失间接影响因素的灾难严重性程度影响因子系数, $0 < b < 1$ 。

m_1 和 m_2 的估算如下: 轻微取 $0 \sim 0.20$, 一般取 $0.20 \sim 0.40$, 中等取 $0.40 \sim 0.60$, 严重取 $0.60 \sim 0.80$, 极严重取 $0.80 \sim 1.00$ 。间接影响因素对溃坝生命损失的影响往往比直接影响因素小, 经综合考虑, b 取 0.25 。

1.3 模型计算

溃坝生命损失计算需输入主要数据有地形、人口等基础数据和溃坝洪水计算结果。准确地进行溃坝生命损失评估需要将二维溃坝波数值计算模型与溃坝生命损失模型相结合, 最关键的是获取详细的洪水参数、适当的损失分类、以及建立不同损失类别下洪水参数与损失之间的关系 (一般通过历史洪灾信息、问卷调查、实验室试验等) 等。

2 计算实例

现以余杭区余杭镇为例, 其上游某水库总库容 2.13 亿 m^3 。该水库主坝为扩大黏土心墙坝, 坝顶长 575 m , 宽 10 m , 坝顶高程 36.26 m 。水库校核标准 $P=0.01\%$, 校核洪水位 35.03 m ; 设计标准为 $P=1\%$, 设计洪水位为 32.56 m 。假设上游发生百年一遇洪水, 水库发生溃坝, 计算范围包括整个水库和坝下河道和田地 (如图 1)。现研究溃坝洪水造成的水库下游余杭镇的生命损失。

2.1 溃坝波数值模拟

大坝瞬时溃坝对下游的影响最大, 故本文采用了水库在设计洪水位 32.56 m 条件下瞬时溃坝, 溃口位置位于坝中间, 溃口宽度为 176 m , 开展溃坝洪水演进计算。计算时作为陆边界处理包括库周和坝下山体; 作为自由出流处理包括平原边界和水域边界。溃坝波计算的上边界取水库百年一遇设计洪水位, 下游河道范围水位为 2 m ; 河道以外的陆域边界为干底, 计算初始流速为零。

数值计算最关键的是动边界处理。本文应用干底 Riemann 解处理^[10], 计算时定义河道以外干底单元的水深为零。为了使动边界处理方法达到水量守恒, 模型计算中若单元界面没有水量流入, 则水深仍然为零; 若

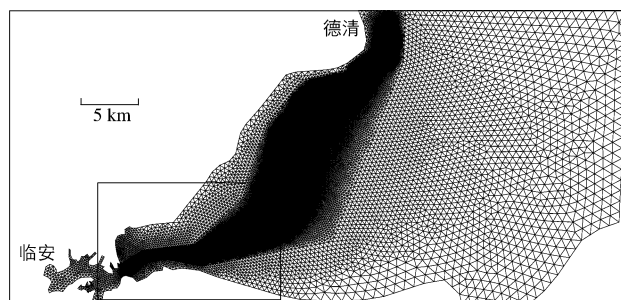


图 1 计算区域网格

Fig. 1 Grid computing area

单元界面有水量流入,即使单元水深小于干湿底临界水深值。

水库下游的计算下垫面比较复杂,除部分区域山体外,还包括河道、水田、村庄、树丛等。因此,合理选取曼宁系数 n 非常困难。本文结合国内外相关研究成果,为简化起见,曼宁系数 n 值在坝下河道取 0.03,非河道区取 0.05。其他典型下垫面可根据水利部《洪水风险图试点项目实施工作大纲(讨论稿)》推荐的糙率取值:如村庄取 0.07,树丛取 0.65,旱田取 0.06,水田取 0.05,道路取 0.035,空地取 0.035,河道取 0.025~0.035。

计算结果(图2、图3及表2)表明,溃坝洪水淹没范围很大,距坝约 11 km 的下游,水深仍可达 4.0 m 以上。

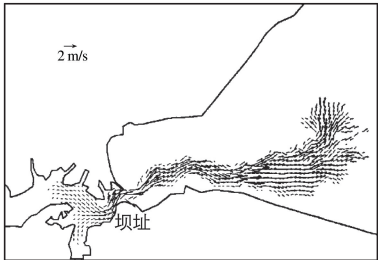


图2 溃坝后 2 h 流速矢量
Fig.2 Distribution of velocity vectors at two hours after dam break

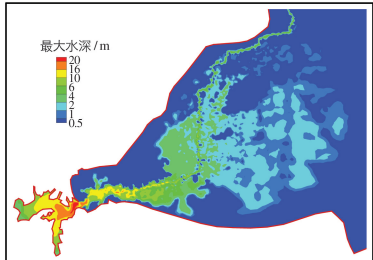


图3 溃坝最大水深平面等值线
Fig.3 The maximum depth of water surface contour

表2 距坝址不同距离代表点最大水深和最大流速

Tab.2 The maximum water depth and maximum velocity at different locations near the dam site

代表点	距坝址距离/ m	最大水深/ m	最大流速/ (m·s ⁻¹)	代表点	距坝址距离/ m	最大水深/ m	最大流速/ (m·s ⁻¹)
A	-1 802	18.36	2.24	E	4 279	12.74	4.91
B	0	15.66	7.40	F	6 933	4.40	3.17
C	629	18.54	10.09	G	11 653	8.56	2.83
D	1 108	10.75	8.33				

注:“-”表示位于坝址上游。

2.2 溃坝生命损失计算

由于各个单元网格的风险人口死亡率是不同的,溃坝严重性也可能不同,所以生命损失是先求得各单元网格内的生命损失,再求和。人口密度已知,各个网格的面积也已知,两者相乘得到各网格内的风险人口。

风险人口损失率 f 按表1确定。此次实例中假设警报时间为半小时,即部分警报情况。根据洪水严重性结果,参考表1,可得到各网格的风险人口死亡率。间接影响因素对溃坝生命损失的影响往往比直接影响因素小,经综合考虑, b 取 0.25 较为合适; m_1 和 m_2 取为 0.5。计算得 $a=0.625$ 。所有网格单元都取同一值。

将上述3个参数的结果相乘,即得到各单元网格的生命损失估算值;其总和即为余杭镇在此次溃坝洪水中的生命损失。最终计算结果为 712 人。

3 结 语

(1)本文通过界面数值通量以及底坡源项的计算求解无碰撞二维 Boltzmann 方程,建立了二维溃坝波数值模型,并模拟了余杭上游某水库溃坝后溃坝波的演进过程,计算了库下游溃坝洪水的淹没水深及流速。

(2)应用通用的溃坝生命损失评估模型,以杭州市余杭区余杭镇为例,以当地人口、地形数据为基本,结合溃坝洪水演进模型,获取网格单元上的水深和最大流速,计算分析了水库溃坝对下游地区造成的生命损失。结果表明,总生命损失为 712 人。

参 考 文 献:

[1] 周克发,李雷,盛金保.我国溃坝生命损失评价模型初步研究[J].安全与环境学报,2007,7(3):145-149.(ZHOU Ke-

- fa, LI Lei, SHENG Jin-bao. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(3): 145-149. (in Chinese))
- [2] 谭维炎. 计算浅水动力学——有限体积法的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. (TAN Wei-yan. Computational shallow hydrodynamics——The application of finite volume method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese))
- [3] TORO E F. Shock-capturing methods for free-surface shallow flows[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.
- [4] 王立辉, 胡四一. 溃坝问题研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(1): 80-85. (WANG Li-hui, HU Si-yi. Study on dam failure-related problems[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(1): 80-85. (in Chinese))
- [5] 梁林, 倪晋仁. 黄河溃堤过程数学模型及其模拟方法[J]. 中国科学: E 辑, 2002, 32(5): 618-627. (LIANG Lin, NI Jin-ren. Mathematical model and its computational method for levee-break process in Yellow River[J]. Science in China(SerE), 2002, 32(5): 618-627. (in Chinese))
- [6] VALIANI A, CALEFFI V, ZANNI A. Case study: Malpasset dam-break simulation using a two-dimensional finite volume method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(5): 460-472.
- [7] 谢作涛, 张小峰, 袁晶, 等. 溃坝洪水数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2005(2): 9-17. (XIE Zuo-tao, ZHANG Xiao-feng, YUAN Jing, et al. Numerical simulation of dam-break floods[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(2): 9-17. (in Chinese))
- [8] XU Kun. Gas-kinetic scheme for unsteady compressible flow simulations[C]//The 29th Computational Fluid Dynamics. Von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series, 1998: 1998-2003.
- [9] 潘存鸿, 徐昆. 三角形网格下求解二维浅水方程的 KFVS 格式[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 858-864. (PAN Cun-hong, XU Kun. Kinetic flux vector splitting scheme for 2D shallow water equations with triangle mesh[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 858-864. (in Chinese))
- [10] 潘存鸿, 于普兵, 鲁海燕. 浅水动边界的干底 Riemann 解模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(3): 305-312. (PAN Cun-hong, YU Pu-bing, LU Hai-yan. Numerical simulation of wetting and drying for shallow flows by Riemann solution on dry bed[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(3): 305-312. (in Chinese))

Life loss estimation caused by reservoir dam break based on 2D dam-break wave numerical simulation

SHEN Zhao-wei¹, PAN Cun-hong¹, YE Sui-gao¹, WANG Li-hui², LU Hai-yan¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction, Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China; 2. Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A 2D numerical model based on Boltzmann equation and an unstructured FVM grid with a kinetic flux vector splitting (KFVS) scheme is developed to simulate dam-break wave. Taking one reservoir dam at Yuhang District of Hangzhou as an example, the propagation of the dam-break wave of the reservoir dam is simulated by this model. The simulated results show that the influence region given by dam flood is very large at the downstream of the dam; about 11 km away from the dam, the depth of the water can still reach more than 8.5 m. The life loss caused by dam failure is evaluated. Using regional population, and geography data as main input, it is then integrated with the dam-break flood routing model to acquire the hydraulic parameters, including depth and velocity, and then to estimate the life loss. The analyse results show that total life loss number is up to 712. This number is close to the conclusion of some existing researches. This method can be applied to other reservoirs after making some modifications, so as to provide technical support for decision makers.

Key words: dam-break wave; numerical simulation; life loss