

引用格式: 吕佳豪, 侯精明, 李东来, 荆海晓, 陈光照. 溃坝洪水演进一维水动力模型[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 123-131.

LYU Jiahao, HOU Jingming, LI Donglai, JING Haixiao, CHEN Guangzhao. One-dimensional hydrodynamic model for dam-break flooding [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 123-131.

## 溃坝洪水演进一维水动力模型

吕佳豪, 侯精明\*, 李东来, 荆海晓, 陈光照  
(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

**摘要:** 中国是受洪水灾害影响最严重的国家之一。洪水数值模型可准确地反映洪水的演进与致灾过程。本研究针对天然河道洪水过程存在的尺度大、水流流态复杂、河道断面形式多变以及计算建模困难等问题, 提出一套基于 Godunov 格式的有限体积法离散圣维南方程组的一维水动力模型, 并采用求解复杂断面水力要素之间关系的方法, 提高了一维水动力模型求解的精度与效率, 精确地反映了复杂断面河道的水流运动特性。将模型模拟得到的数值解与算例中的解析解或实测数据进行对比, 结果表明: (1) 构建的一维水动力模型模拟结果与理想算例解析解及实验实测数据吻合程度均较高, 所有算例的  $E_{NS}$  均大于 0.5, 说明模型具有良好的稳定性和适应性; (2) 将模型应用至金沙江白格堰塞湖溃坝洪水算例中, 模拟得到的流量峰值及整体洪水过程均与实测过程吻合较好, 在叶巴滩和苏洼龙两个测点处  $E_{NS}$  分别为 0.633 和 0.812, 证明了模型在实际应用中的适用性与可靠性。结果表明, 开发的一维水动力模型对溃坝洪水等水流流态复杂、突发性强的洪水过程具有良好的模拟效果。本研究可为河道及溃坝洪水风险的初步、快速评估等工作提供有效的模拟支撑。

**关键词:** 河道水动力模型; Godunov 格式; 明渠水流运动过程; 复杂断面处理; 溃坝洪水

**中图分类号:** TV 133.2

**文献标志码:** A

近年来, 全球气候变化导致极端降雨事件增加, 频繁引发大型洪水灾害, 严重影响流域下游经济安全与社会稳定<sup>[1-4]</sup>。例如, 2015 年 8 月 3 日, 陕西省西安小峪河流域暴发山洪灾害, 河道下游 9 人被洪水冲走, 7 人身亡<sup>[5]</sup>; 2021 年 8 月 19 日, 陕西省蓝田县突发山洪, 冲毁下游交通、电力、通信等部分基础设施, 经济损失惨重<sup>[6]</sup>。根据事后险情分析<sup>[5-6]</sup>, 这两次事件均属于典型的溃坝洪水灾害: 上游短历时极端降雨引发山洪泥石流, 冲积物堵塞河道卡口和桥涵形成堰塞湖, 随着水位抬升, 堰塞体产生溃决, 引发溃坝水体下泄, 导致短历时、大峰值洪水直

接冲击下游村镇, 最终造成严重后果。

溃坝洪水演进过程是水动力学研究中的热点问题<sup>[7-8]</sup>。随着计算方法的不断改进和发展, 采用二维、三维水动力模型可精准模拟天然河道水流过程, 取得了很好的仿真效果。然而, 一些大型河流(谷)存在水系复杂, 河道断面形式沿程变化大、水流流态复杂、洪水突发性等问题, 若采用二、三维水动力模型对其进行模拟, 需要的基础数据多、工程计算量大, 相对计算效率低, 难以满足灾害的快速、初步评估和工程实际需求。因此, 简单、快速地获得下游洪水演进的实用参数, 包括洪峰流量、断面水位和流速

**收稿日期** (Received date): 2023-03-16; **改回日期** (Accepted date): 2023-10-11

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金(52079106); 中德科学基金交流中心项目(M-0427); 陕西省创新能力支撑计划-创新人才推进计划(2020TD-023)。[National Natural Science Foundation of China (52079106); Chinesisch-Deutsches Mobilitätsprogramm (M-0427); Innovation Capability Support Program of Shaanxi (2020TD-023)]

**作者简介** (Biography): 吕佳豪(1999-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要研究方向: 水动力模型开发。[LYU Jiahao (1999-), male, born in Xi'an, Shaanxi province, Ph. D. candidate, research on hydrodynamic model] E-mail: 1210412033@stu.xaut.edu.cn

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 侯精明(1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 地表水动力及其附随过程数值模型。[HOU Jingming (1982-), male, Ph. D., professor, research on numerical simulation of surface hydrodynamic and its accompanying process] E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

等现场性指标,对抢险救灾的现场决策极其重要。

采用一维水动力模型对溃坝洪水进行模拟计算可以取得较好的效果<sup>[9-10]</sup>。一维模型在模拟时不考虑水流在横向的演进及变化过程,避开河道漫滩(尤其在平原区域的宽浅河道)等河道参数引起的计算困难和耗时,所得结果仍能满足洪峰流量、断面水位、洪峰到达时间以及整体洪水过程的快速计算需求,工程计算效率比二维、三维水动力模型有明显提升,在溃坝洪水等突发性洪水事件中有显著的实际意义。

然而,一维水动力模型在计算方法上仍需要改进。通过有限差分法近似求解一维圣维南方程组是反映河道洪水过程的一种途径,由于其原理简单,常用于断面简单、流态单一的河道洪水过程模拟,拥有较好的模拟效果<sup>[11-12]</sup>。但这类方法对拥有复杂断面和水流流态的洪水过程模拟仍存在不足之处,尤其是对激波捕捉和流态交替等溃坝洪水中常见水流问题的处理存在困难。

自从 Godunov 格式被提出以来,因为其对激波优秀的捕捉能力,且经过多位学者的不断改进,已在计算流体力学中得到了广泛的应用<sup>[13]</sup>。在一维水动力模型中采用 Godunov 格式求解时,对复杂的河道断面一般有两种处理方式,一种是将水面坡度项分解为水深压力项和底坡项。这种方法适用于河道断面不规则程度较高且沿程变化较大的情况,在对水深压力项采用数值积分算法求解后可取得良好的模拟效果<sup>[14]</sup>;Schippa 等将这种方法改进后推广应用在了一维河道动床模型中,并与河道动床实验结果进行了对比,说明了这类方法在动床模拟中的优势<sup>[15]</sup>。另一种是将水面坡度项直接作为源项处理。这种方法可以避免处理复杂的河道底坡源项,计算格式的守恒性也可通过通量替换的形式得到保证,适用于具有复杂底坡的浅水水流问题<sup>[16-17]</sup>。经过上述学者的研究,通过这两种处理方式均可取得较好的模拟效果,但上述研究尚未对复杂的河道断面形式进行专门的处理,而这一点在天然河道中又十分重要。因此,文中采用上述第一种处理方法下的圣维南方程作为模型控制方程,并在此基础上提出了一种复杂河道断面的处理方式,更精确地求解河道断面水力要素。

本文基于 Godunov 格式的有限体积法对一维圣维南方程进行求解,每个计算单元界面上的通量值

由 HLL(Harten, Lax, van Leer) 近似 Riemann 解求得,采用二阶 Runge Kutta 方法以及 MUSCL(Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws) 格式来确保时空积分的二阶精度。采用底坡通量法对底坡源项进行数值求解<sup>[18]</sup>,将每一个计算单元的底坡源项转化为计算界面上的通量,保证底坡源项和界面通量的协调。此外,为了确保模型的稳定性,时间步长采用 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy condition) 条件进行限制。本文通过简易溃坝算例、喉口混合流算例、溃坝波实验算例以及金沙江白格堰塞湖溃坝算例等不同类型的明渠水流过程对模型进行了测试,验证了本模型可准确模拟各类复杂的明渠、溃坝水流问题,且在实际应用中取得了良好的效果。

## 1 控制方程

描述明渠一维浅水流动的圣维南方程组<sup>[14]</sup>包括:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{bmatrix};$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$I_1 = \int_0^{h_s} (h_s - h_i) b(x, h_i) dh_i \quad (3)$$

$$I_2 = \int_0^{h_s} (h_s - h_i) \frac{\partial b(x, h_i)}{\partial x} dh_i \quad (4)$$

式中,  $t$  为时间;  $A$  为过水断面面积;  $Q$  为断面流量;  $g$  为重力加速度;  $S_0$  为底坡源项,表达式为  $S_0 = -\frac{dz_b}{dx}$ ;

$S_f$  为摩阻源项,表达式为  $S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}}$ 。

图 1 为明渠横断面及变量示意图。 $z_b$  为床面高程;  $n$  为曼宁系数;  $R$  为水力半径;  $I_1$  为断面湿润面积产生的静力矩,  $I_2$  为由于断面变化而产生的静水压力以及  $I_1$  的沿程变化;  $h_s$  为水深,  $h_i$  为所选取微元与河床的距离;  $b(x, h_i)$  为所选取微元的宽度。

本文所采用的公式中包含了  $I_1$  和  $I_2$  这两项表达式,在非棱柱体明渠水流运动中,对这两项的精确处理至关重要,否则,后续提到的近似 Riemann 解以及 MUSCL 重构等带来的作用将很小<sup>[15]</sup>。同时,因

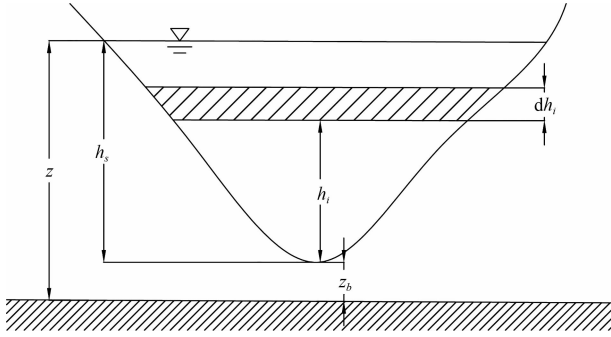


图1 明渠横断面变量示意图  
Fig.1 Variable of open channel cross section

为压力项已经通过  $I_1$  和  $I_2$  进行了精确的表达,底坡源项也在公式中得到了体现,采用合理的限制手段,这种方式更能精准地反映天然河道断面的变化,本文采用底坡通量法对底坡源项进行处理。

关于  $I_1$  和  $I_2$  的求解,  $I_1$  易于求解,但  $I_2$  中  $\frac{\partial b(x, h_i)}{\partial x}$  项的直接求解较为困难。对此, Schippa 等详细介绍了莱布尼茨积分法求解  $I_2$  的过程<sup>[15]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_1}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h_s} (h_s - h_i) b(x, h_i) dh_i \\ &= \int_{h_s}^0 \frac{\partial}{\partial x} [(h_s - h_i) b(x, h_i)] dh_i \\ &= \int_{h_s}^0 \left[ (h_s - h_i) \frac{\partial b(x, h_i)}{\partial x} + b(x, h_i) \frac{\partial (h_s - h_i)}{\partial x} \right] dh_i \\ &= \int_{h_s}^0 (h_s - h_i) \frac{\partial b(x, h_i)}{\partial x} dh_i + \frac{\partial h_s}{\partial x} \int_0^{h_s} b(x, h_i) dh_i \\ &= I_2 + \frac{\partial h_s}{\partial x} A \end{aligned} \quad (5)$$

据此,在  $I_1$  项求出后,  $I_2$  项可以相对容易求得。

## 2 离散方法

采用格心有限体积法,将计算时的变量储存在单元中心,对公式(1)在第  $i$  个计算单元上积分后,采用高斯定理进行离散可得:

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Omega} (F_{i+1/2} - F_{i-1/2}) + \Delta t S_i \quad (6)$$

式中,  $U_i$  为第  $i$  个计算单元变量的平均值;  $n$  为第  $n$  个计算时段;  $\Omega$  为控制单元的长度;  $\Delta t$  为计算时间步长;  $F_{i+1/2}$ 、 $F_{i-1/2}$  分别为第  $i$  个单元左右两侧界面

的通量值;  $S_i$  为第  $i$  个单元源项的平均值。

## 3 复杂河道断面处理方法

河道断面数据是一维模型计算时所需要的最重要的数据之一,与断面形式相关的湿周、湿润面积、水面宽度等水力要素都是模型计算时极为重要的变量,对这些变量的精确求解在模型计算时尤为重要。但由于天然河道断面形式复杂,导致水位-过水面积、水位-湿周、水位-水面宽度等计算也随之变得复杂。本文针对这一问题,提出了一种计算任意河道断面形式下各水力要素之间关系的方法。

图2为复杂断面处理方法示意图,以水位-过水面积关系计算为例。在计算时,将任意一个河道断面沿河宽方向离散为  $n$  个窄条,窄条宽度为  $D_w$ ,其中第  $i$  个窄条左边界对应的起点距为  $d_i$ ,相应的河底高程为  $z_i$ ,右边界对应的起点距为  $d_{i+1}$ ,相应的河底高程为  $z_{i+1}$ 。设任意时刻该断面的水深为  $h$ ,第  $i$  个窄条的面积为  $S_i$ ,则第  $i$  个网格中水深  $h$  与  $S_i$  的计算公式如下。

(1) 当  $h > \max(z_i, z_{i+1})$  时

$$S_i = \frac{(2h - z_i - z_{i+1}) \cdot D_w}{2} \quad (7)$$

(2) 当  $z_i > h > z_{i+1}$  时

$$S_i = \frac{(h - z_{i+1})^2 \cdot D_w}{2(z_i - z_{i+1})} \quad (8)$$

(3) 当  $z_i < h < z_{i+1}$  时

$$S_i = \frac{(h - z_i)^2 \cdot D_w}{2(z_{i+1} - z_i)} \quad (9)$$

在循环完  $n$  个窄条后,则可得到该断面水深-面积对应关系为:

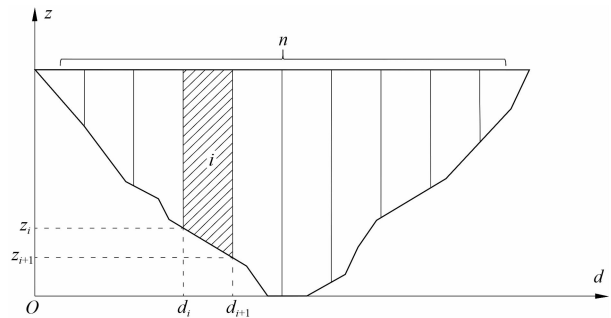


图2 复杂断面处理方法示意图

Fig.2 Processing method of complex cross section

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (10)$$

其他水力要素的离散过程和计算方法与上述方法类似,此处不再进行过多描述。

## 4 算例验证

本文选取纳什效率系数  $E_{NS}$  作为模型模拟效果的评判指标,以  $E_{NS} \geq 0.5$  作为模拟效果良好的最低要求。 $E_{NS}$  的计算公式如下:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (r_{i,m} - r_{i,s})^2}{\sum_{i=1}^N (r_{i,m} - \bar{r}_m)^2} \quad (11)$$

式中,  $r_{i,m}$  为实测序列或解析解序列;  $r_{i,s}$  为模拟序列;  $\bar{r}_m$  为实测序列或解析解序列的平均值;  $N$  为序列个数。

### 4.1 三角形渠道溃坝算例

该算例由 Sanders 等提出<sup>[19]</sup>,该算例为平底三角形明渠中的溃坝过程,三角形明渠两侧边坡与水平面夹角均为  $45^\circ$ ,渠道总长 1000 m,初始在  $x < 500$  m 范围内具有 1 m 高的水深,  $x > 500$  m 为干渠道,计算时将渠道离散为 100 个均匀网格,计算时间步长取为 0.1 s,模拟总时长 90 s。该算例包含了干湿交替、激波捕捉等多个水动力模型计算中的难题,因此常被用以检验数值模型的稳定性。

图 3 为本文模型模拟水深及过水面积与该算例的解析解对比结果,可以看出,在  $t = 45.16$  s 时,本文模型计算值与解析解吻合良好,水深及过水面积的  $E_{NS}$  分别为 0.996 和 0.999,均大于 0.5;并且模拟得到的水面线十分光滑,不存在振荡的现象,证明模

型可以很好地处理干湿交替问题,并且拥有较强的激波捕捉能力。

### 4.2 混合流算例

该算例由 Hubbard 等提出,目的是检验模型处理复杂边界和复杂地形的能力<sup>[20]</sup>。计算区域为长 3 m 的矩形明渠,明渠中部底高程抬升,并且存在河宽束窄。明渠初始存在 1.0 m 的水深,初始流量为 0,计算时,将计算区域离散为 150 个均匀网格,忽略明渠摩阻带来的影响,在上下游分别给定  $1.878 \text{ m}^3/\text{s}$  的流量和 1.0 m 的水位边界,模拟总时长 120 s。

明渠宽度的表达式为:

$$B(x) = \begin{cases} 1.0 - 0.1 \cos^2(\pi(x - 1.5)) & 1 \leq x \leq 2 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

明渠底高程的表达式为:

$$z_b(x) = \begin{cases} 0.1 \cos^2(\pi(x - 1.5)) & 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

该算例计算区域内同时存在着急、缓流以及流态的过渡,并且存在激波,因此常被用来检验所构建模型的稳定性和适用性。图 4 为计算达到稳定状态后本文所构建模型的模拟值与解析解的对比结果,可以看出本文模型与解析解吻合良好,水深及弗劳德数的  $E_{NS}$  分别为 0.975 和 0.999,均大于 0.5;并且通过水深和弗劳德数的变化可以看出,在渠底凸起及渠道束窄之前,水流流态为缓流,在底坎处流态逐渐过渡,向急流转变,经过底坎后产生了激波,流态又转变为缓流。本文模型对这种复杂的流态进行了准确的模拟,表明本文模型具有良好的稳定性和适用性。

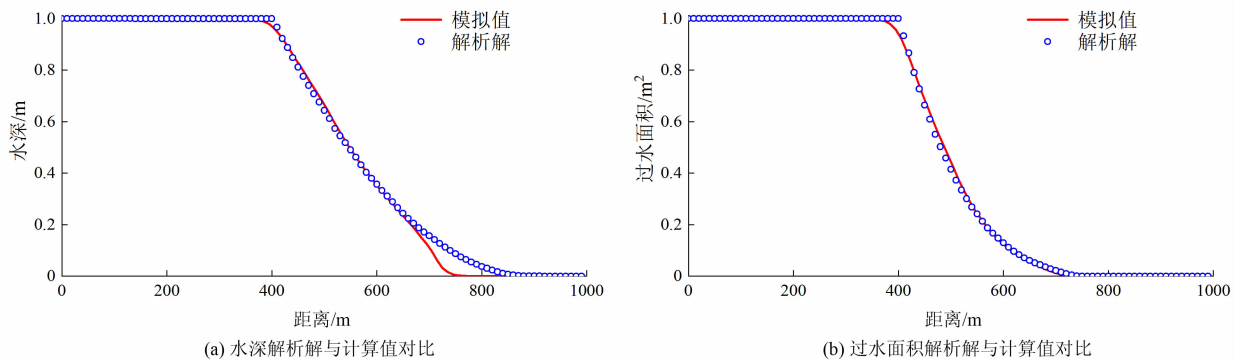


图 3 三角形溃坝算例解析解与模拟值对比

Fig. 3 Comparison of analytical solutions with simulated values of dam break flow in triangular channel

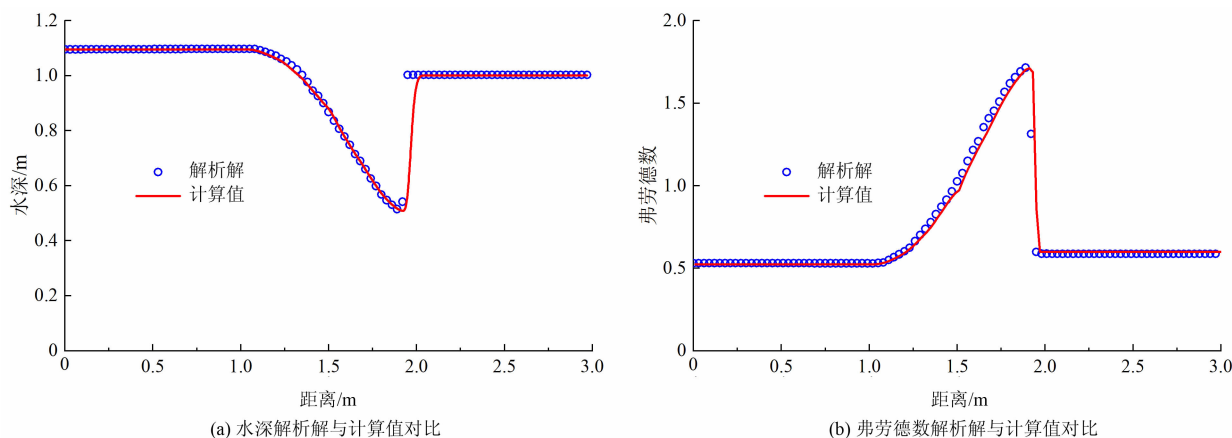


图4 混合流算例解析解与模拟值对比

Fig. 4 Comparison of analytical solutions with simulated values of mixed flow

### 4.3 溃坝波实验算例

该算例为 Hiver 等进行的具有三角形障碍物的明渠溃坝波实验<sup>[21]</sup>。实验装置为矩形明渠,长 38 m,宽 0.75 m,大坝位置处于实验装置 15.5 m 处,坝前水深 0.75 m,等腰三角形障碍物顶点位于大坝下游 13 m 处,障碍物长 6 m,高 0.4 m。在大坝下游 10 m、11 m、13 m 和 20 m 处分别布设 G10、G11、G13 和 G20 四个测点。三角形障碍物右侧有 0.15 m 的初始水深,并且下游设置有 0.15 m 高的挡水堰。实验装置布置如图 5 所示。计算时,渠道糙率取为 0.0125,计算区域离散为 760 个 0.05 m 的均匀网格。

各个实验测点的水深监测结果与模拟水深对比如图 6 所示,在四个测点处的模拟水深与实测水深吻合良好, G10、G11、G13 和 G20 的  $E_{Ns}$  分别为 0.686、0.766、0.737 和 0.778,均大于 0.5;并且模型准确地模拟出了实验测点处水面波动情况,证明了模型的计算精度与稳定性。

### 4.4 金沙江溃坝算例

金沙江白格堰塞湖位于西藏自治区昌都市江达县和四川省甘孜藏族自治州白玉县交界处,在 2018 年 10 月 10 日以及 11 月 3 日发生两次山体滑坡。第二次山体滑坡的土石方堆高了第一次滑坡形成的堰塞体,并且堵塞了已形成的泄流水槽,导致溃坝风险再次增加<sup>[22]</sup>。因此,本文以第二次山体滑坡形成的堰塞湖事故作为研究对象,分析堰塞体发生溃决后,下游洪水的演进情况。

本文以堰塞体处作为模拟起点,以下游 235 km 处的苏洼龙作为模拟终点,此段河道断面形式较为复杂,高程落差约 500 m,平均坡降 0.002,整体河段宽度为 50 ~ 150 m,根据 Ma<sup>[23]</sup>等提出的河道底高程重构方法对该段河道底高程进行重构,重构后的河道纵断面如图 7 所示。模拟段上下游分别给定流量和水位边界条件,上游流量边界条件为实测入库流量 1500 m<sup>3</sup>/s,下游边界条件为自由出流边界,溃坝流量过程则根据水科院溃口演变模型求得<sup>[24]</sup>,具体

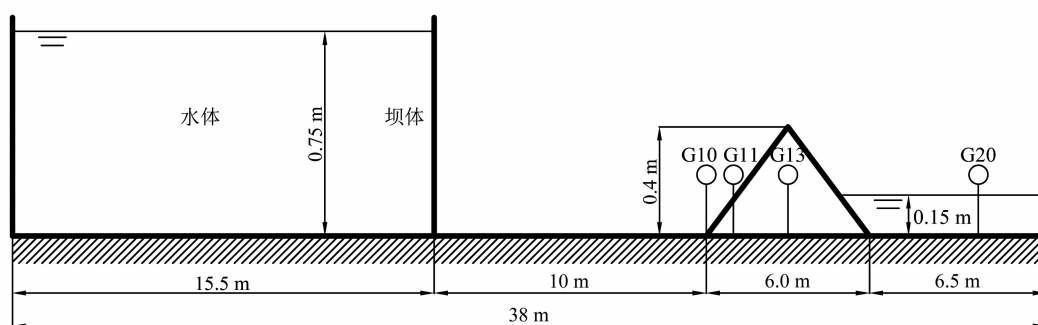


图5 实验装置结构及测点布置位置

Fig. 5 Experimental set-up and distribution of measurement points

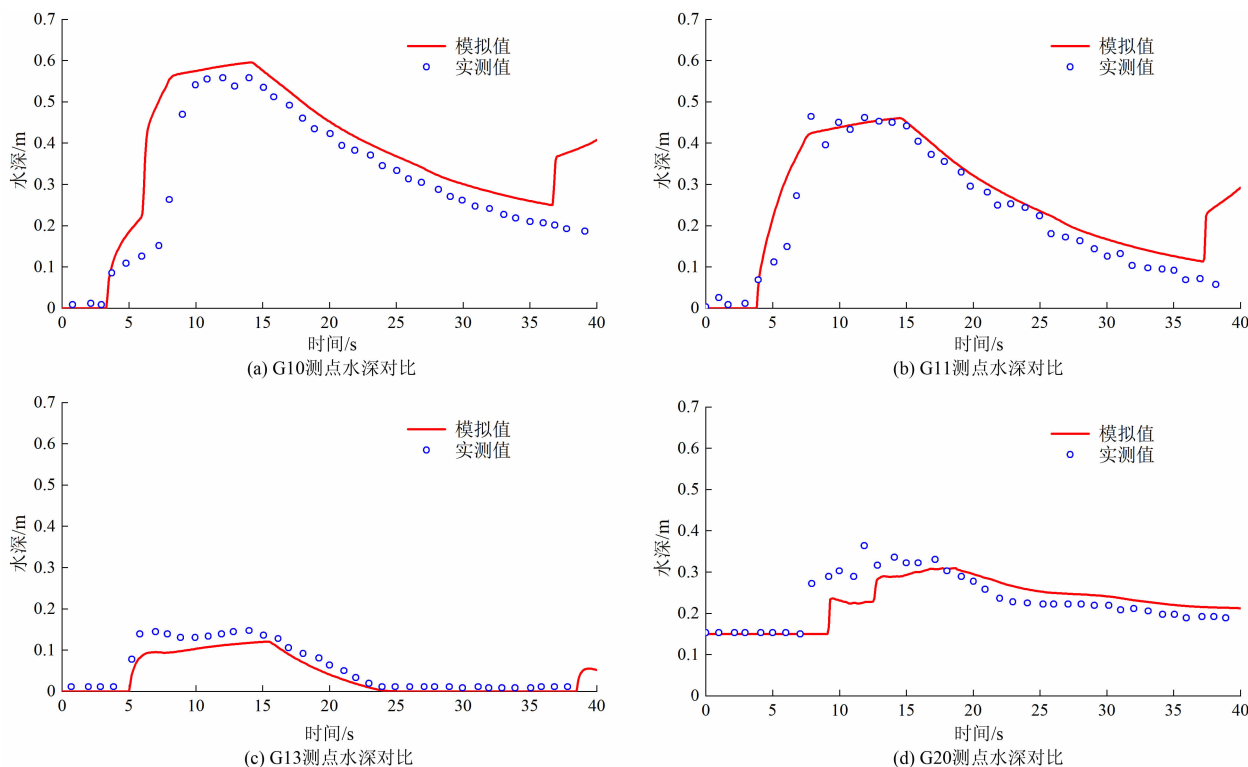


图 6 各测点模拟水深与实测水深对比

Fig. 6 Comparison of water level process at measurement points

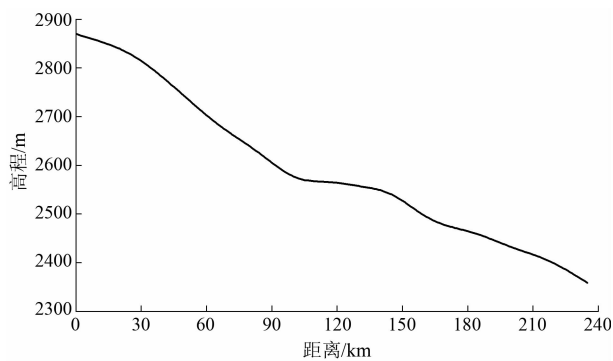


图 7 河道纵断面

Fig. 7 Profile of longitudinal channel

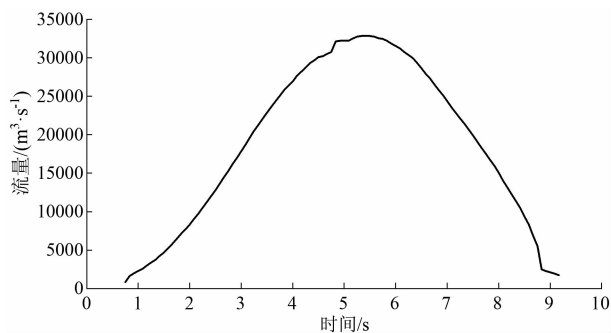


图 8 溃坝流量过程线

Fig. 8 Discharge process of dam break

流量过程如图 8 所示。由于堰塞体形成后,下游河道仍存在约  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  的基础流量,故将河道初始流量设置为  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ,河道曼宁系数根据现场实际情况统一设置为  $0.02^{[25]}$ ,共模拟下游 40 h 的洪水演进过程。图 9 为本文模拟结果与下游两个实测点位叶巴滩、苏洼龙的流量对比图,从图中可以看出,本文模型模拟流量峰值与实测数据吻合良好,叶巴滩和苏洼龙模拟结果的  $E_{NS}$  分别为 0.633 和 0.812,均大于 0.5;模拟峰现时间与实际峰现时间相比,存在

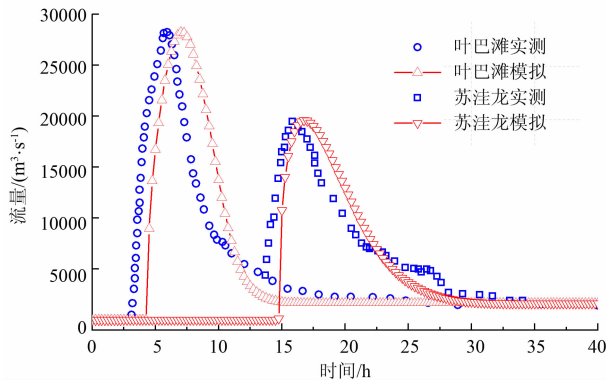


图 9 叶巴滩与苏洼龙模拟与实测流量过程对比

Fig. 9 Comparison of discharge process at Yebatan and Suwalong

约 1 h 的滞后,滞后的原因在于获取的河道断面数据不够精准。但整体过程与实测过程吻合良好,且计算耗时极短,说明本文模型在实际应用中拥有很好的适用性,对实际河道中的洪水过程可以进行较为精准的模拟。

## 5 结论

针对天然河道洪水过程通常存在尺度大、水流流态复杂、河道断面形式多变和计算建模困难等问题,本文基于 Godunov 有限体积格式构建了一维溃坝洪水演进模型,并采用一种复杂河道断面数据处理方法保证了模型的模拟精度,在理想算例与实际算例中进行了测试,得出以下结论:

(1) 模型采用 HLL 格式的近似黎曼解计算界面通量,采用 Runge-Kutta 方法和 MUSCL 格式将模型时空精度提高到二阶,并将因断面变化产生的水深压力项在公式中体现出来,精确地反映了溃坝洪水的水流运动特性,对激波捕捉、流态变化等水流问题具有良好的处理能力。

(2) 针对任意复杂河道断面水力要素间关系较难求解的问题,提出了一种计算任意河道断面各水力要素之间关系的方法并结合进水动力模型中,可精确求解复杂断面的水力要素值,提高了模型求解的效率与精度。

(3) 通过将本文模型的数值解与几个经典理想算例及实验算例中的精确解或实测数据进行对比,发现本文模型的数值解与精确解及实验数据吻合程度均较高,所有算例的  $E_{NS}$  值均大于 0.5,证明了模型具有良好的稳定性和计算精度。

(4) 通过将本文模型应用至金沙江溃坝实际算例中,模型模拟流量峰值与实测流量峰值吻合较好,在两个测点处  $E_{NS}$  分别为 0.633 和 0.812,模拟峰现时间相比实测峰现时间略有滞后,证明了模型在实际应用中的适用性与可靠性。

综上所述,本文开发的一维水力模型对溃坝洪水等流态复杂、突发性强的洪水过程具有良好的模拟效果,研究可为河道及溃坝洪水风险的初步、快速评估等工作提供有效的模拟支撑。但由于一维水力模型的局限性,难以反映河道洪水漫滩后的演进及淹没过程,这给准确评估实际受灾范围带来了困难。在后续的研究中,可考虑将本文所开发的一

维水力模型在关键区域与二维水力模型耦合,在保证计算效率的前提下,更为准确模拟洪水对关键区域的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 郭良,丁留谦,孙东亚,等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. 水利学报, 2018, **49**(9): 1123 - 1136. [GUO Liang, DING Liuqian, SUN Dongya, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, **49**(9): 1123 - 1136] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180728
- [2] 郭良,张晓蕾,刘荣华,等. 全国山洪灾害调查评价成果及规律初探[J]. 地球信息科学学报, 2017, **19**(12): 1548 - 1556. [GUO Liang, ZHANG Xiaolei, LIU Ronghua, et al. Achievements and preliminary analysis on China national flash flood disasters investigation and evaluation [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, **19**(12): 1548 - 1556] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01548
- [3] 熊俊楠,李进,程维明,等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2019, **74**(7): 1374 - 1391. [XIONG Junnan, LI Jin, CHENG Weiming, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(7): 1374 - 1391] DOI: 10.11821/dlxb201907008
- [4] 吴杰,陈冠,孟兴民,等. 白龙江流域滑坡降雨临界值[J]. 山地学报, 2022, **40**(6): 875 - 886. [WU Jie, CHEN Guan, MENG Xingmin, et al. Rainfall threshold of landslides in the Bailong River basin, China [J]. Mountain Research, 2022, **40**(6): 875 - 886] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000720
- [5] LI Bingyao, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Application of LiDAR UAV for high-resolution flood modelling [J]. Water Resources Management, 2021, **35**: 1433 - 1447. DOI: 10.1007/s11269-021-02783-w
- [6] 曹保前. 蓝田县灞河“2021·8·19”暴雨洪水分析[J]. 陕西水利, 2022(11): 77 - 78 + 83. [CAO Baoqian. Analysis of the August 19, 2021 rainstorm and flood in Bahe River, Lantian district [J]. Shaanxi Water Resources, 2022(11): 77 - 78 + 83] DOI: 10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2022.11.024
- [7] 孙万光,杨海滔,杨斌斌,等. 基于 HLLC 近似 Riemann 求解器的天然河道水流运动模拟[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 12 - 19. [SUN Wanguang, YANG Haitao, YANG Binbin, et al. Simulation of natural river flow based on HLLC approximate riemann solver [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2): 12 - 19] DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.02.003
- [8] 杨程,吕岁菊,李春光,等. 基于非结构网格的三维水流数值模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, **45**(11): 147 - 154. [YANG Cheng, LYU Suiju, LI Chunguang, et al. Numerical simulation of three dimensional flow based on unstructured grids [J]. Journal of Northwest Agriculture and



- Forestry University ( Natural Science Edition ), 2017, **45** ( 11 ): 147 – 154 ] DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.11.019
- [ 9 ] 姜晓明, 李丹勋, 王兴奎. 基于黎曼近似解的溃堤洪水一维-二维耦合数学模型 [ J ]. 水科学进展, 2012, **23** ( 2 ): 214 – 221. [ JIANG Xiaoming, LI Danxun, WANG Xingkui. Coupled one-and two-dimensional numerical modeling of levee-breach flows using the Godunov method [ J ]. Advances in Water Science, 2012, **23** ( 2 ): 214 – 221 ] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2012.02.006
- [ 10 ] 蒋先刚, 刘维明, 文宿崧, 等. 基于 HEC-RAS 模型的雅江中游古高能洪水的模拟研究 [ J ]. 山地学报, 2022, **40** ( 2 ): 276 – 288. [ JIANG Xiangang, LIU Weiming, WEN Susong, et al. Simulation of ancient high-energy flood in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River based on HEC-RAS model [ J ]. Mountain Research, 2022, **40** ( 2 ): 276 – 288 ] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000671
- [ 11 ] 郭立兵, 王亚东, 田福昌. 基于一维水动力模型分析涉水建筑对河道行洪能力的影响 [ J ]. 南水北调与水利科技, 2017, **15** ( 6 ): 165 – 171. [ GUO Libing, WANG Yadong, TIAN Fuchang. Effect of water-related structures on flood discharge capacity of river based on one-dimensional hydrodynamic model [ J ]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2017, **15** ( 6 ): 165 – 171 ] DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.024
- [ 12 ] 马海波, 董晓华, 王伟. 基于有限差分法的扩散波沿程洪峰衰减确定方法研究 [ J ]. 水电能源科学, 2014, **32** ( 9 ): 75 – 77. [ MA Haibo, DONG Xiaohua, WANG Wei, et al. Research on peak discharge attenuation value determination of diffusion wave along based on Finite difference method [ J ]. Water Resources and Power, 2014, **32** ( 9 ): 75 – 77 ]
- [ 13 ] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 应用 Godunov 格式模拟复杂河网明渠水流运动 [ J ]. 应用基础与工程科学学报, 2015, **23** ( 6 ): 1088 – 1096. [ ZHANG Dawei, QUAN Jin, MA Jianming, et al. Flows simulation in complex open channel networks using Godunov method [ J ]. Journal of Basic Science and Engineering. 2015, **23** ( 6 ): 1088 – 1096 ] DOI: 10.16058/j.issn.1005 – 0930.2015.06.003
- [ 14 ] XIN Xiaokang, BAI Fengpeng, LI Kefeng. Numerical simulating open-channel flows with regular and irregular cross-section shapes based on Finite volume Godunov-type scheme [ J ]. International Journal of Computational Methods, 2020, **18**: 4. DOI: 10.1142/S0219876220500474
- [ 15 ] SCHIPPAL, PAVAN S. Bed evolution numerical model for rapidly varying flow in natural streams [ J ]. Computers and Geosciences, 2009, **35** ( 2 ): 390 – 402. DOI: 10.1016/j.cageo.2008.08.004
- [ 16 ] 张大伟, 程晓陶, 黄金池, 等. 复杂明渠水流运动的高适用性数学模型 [ J ]. 水利学报, 2010, **41** ( 5 ): 531 – 536. [ ZHANG Dawei, CHENG Xiaotao, HUANG Jinchi, et al. Widely adaptable numerical model for complicated open channel flows [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41** ( 5 ): 531 – 536 ] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.05.012
- [ 17 ] NUJIĆ M. Efficient implementation of non-oscillatory schemes for the computation of free-surface flows [ J ]. Journal of Hydraulic Research, 2010, **33** ( 1 ): 101 – 111. DOI: 10.1080/00221689509498687
- [ 18 ] HOU Jingming, LIANG Qihua, SIMONS F, et al. A 2D well-balanced shallow flow model for unstructured grids with novel slope source term treatment [ J ]. Advances in Water Resources, 2013, **52**: 107 – 131. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.08.003
- [ 19 ] SANDERSB F. High-resolution and non-oscillatory solution of the St. Venant equations in non-rectangular and non-prismatic channels [ J ]. Journal of Hydraulic Research, 2010, **39** ( 3 ): 321 – 330. DOI: 10.1080/00221680109499835
- [ 20 ] HUBBARD M E, GARCIA-NAVARRO P. Flux difference splitting and the balancing of source terms and flux gradients [ J ]. Journal of Computational Physics, 2000, **165** ( 1 ): 89 – 125. DOI: 10.1006/jcph.2000.6603
- [ 21 ] SOARES-FRAZÃO S. Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill [ J ]. Journal of Hydraulic Research, 2010, **45** ( Supl ): 19 – 26. DOI: 10.1080/00221686.2007.9521829
- [ 22 ] 刘青, 王伟, 高星, 等. 大型滑坡坝溃决对下游河谷坡岸的影响分析——以白格滑坡下游 50 km 内的河谷边坡为例 [ J ]. 山地学报, 2021, **39** ( 2 ): 226 – 237. [ LIU Qing, WANG Wei, GAO Xing, et al. Analysis of the effects of dammed lake outburst floods on geomorphology of river basin: A case study of the valley slope erosion within 50 km downstream of Baige landslide, Tibet, China [ J ]. Mountain Research, 2021, **39** ( 2 ): 226 – 237 ] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000590
- [ 23 ] HOU Jingming, MA Yongyong, WANG Tian, et al. A river channel terrain reconstruction method for flood simulations based on coarse DEMs [ J ]. Environmental Modelling and Software, 2021, **140**: 105035. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105035
- [ 24 ] 马利平, 侯精明, 张大伟, 等. 耦合溃口演变的二维洪水演进数值模型研究 [ J ]. 水利学报, 2019, **50** ( 10 ): 1253 – 1267. [ MA Liping, HOU Jingming, ZHANG Dawei, et al. Study on 2-D numerical simulation coupling with breach evolution in flood propagation [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50** ( 10 ): 1253 – 1267 ] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190462
- [ 25 ] 陈祖煜, 张强, 侯精明, 等. 金沙江“10·10”白格堰塞湖溃坝洪水反演分析 [ J ]. 人民长江, 2019, **50** ( 5 ): 1 – 4 + 19. [ CHEN Zuyu, ZHANG Qiang, HOU Jingming, et al. Back analysis on dam-breach flood of “10.10” Baige barrier lake on Jinsha River [ J ]. Yangtze River, 2019, **50** ( 5 ): 1 – 4 + 19 ] DOI: 10.16232/j.cnki.1001 – 4179.2019.05.001



## One-Dimensional Hydrodynamic Model for Dam-Break Flooding

LYU Jiahao, HOU Jingming<sup>\*</sup>, LI Donglai, JING Haixiao, CHEN Guangzhao

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** China is one of the countries severely affected by floods. Numerical modelling of flooding can accurately reflect the flood evolution and disaster-causing process.

In this study, a set of one-dimensional hydrodynamic model based on the finite volume method to discretize Saint-Venant equation set in Godunov format was proposed to address the issues of modeling of flooding in natural rivers characterized by large scale, complex flow regimes, variable channel cross-section forms; it employed a method for solving the relationships between hydraulic elements of arbitrarily complex cross-sections, which accurately provided values of hydraulic elements for any complex channel cross-section during model solving.

(1) All cases had ENS values greater than 0.5, demonstrating the model's good stability and adaptability. By comparison the analytical solutions obtained by the model with solutions from classical ideal cases, experimental cases, and actual engineering cases, as well as measured data, this model improved the accuracy and efficiency of one-dimensional hydrodynamic model solving, effectively reflecting the characteristics in open-channel flow with complex cross-sections.

(2) Applying this model to an actual example of dam-break flooding at the Baige Dam on the Jinshajing River, the simulated peak floods and overall flood processes closely match observations. ENS values at the two measurement sites, Yebatan and Suwalong were 0.633 and 0.812, respectively, convincing the applicability and reliability of the model in practical applications.

The proposed one-dimensional hydrodynamic model exhibited excellent simulation effectiveness in flooding with complex flow conditions and high suddenness. This study provides an efficient simulation for preliminary or rapid assessment of dam-break flooding risks.

**Key words:** river hydrodynamic model; Godunov scheme; open-channel flow; complex cross-sections; dam-break flooding

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)