

## 溃坝水流模拟方法的对比分析

肖 潇<sup>1</sup>, 吴时强<sup>1</sup>, 程永舟<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 采用 FLUENT 软件与光滑粒子流体动力学法 (SPH) 分别对溃坝水流进行数值模拟, 对比分析溃坝水流的流动形态、流速及水位变化。结果表明, 两者较为一致地反映了溃坝水流的流动过程及流体的速度场, 其中 SPH 方法能精确地捕捉自由液面, 所得自由水面附近结果更为准确; FLUENT 所计算的流速、水位等数据更加精确, 能很好地体现水流的表面张力。分析两种方法各自的优缺点和适用性, 使其在面对复杂的工程实际问题时发挥更大的作用, 促进溃坝洪水数学模型的应用与发展。

**关键词:** 溃坝; SPH; 自由面; VOF 模型

**中图分类号:** TV131

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2012)03-0037-07

溃坝洪水是指由于大坝等挡水物体突然溃决, 发生水体突泄而形成的洪水。溃坝洪水波洪峰流量大、传播速度快, 破坏力极强, 一旦发生将对下游人民生命财产安全带来巨大威胁。基于溃坝后果的严重性, 溃坝洪水波演进模拟一直是众多学者所关注的研究重点。

J. C. Martin 等<sup>[1]</sup>对在重力作用下直立方形水柱塌落水波进行了试验研究; P. K. Stansby 等<sup>[2]</sup>试验研究了前后具有不同高程比的两块水体溃决过程; M. A. Cruchaga 等<sup>[3]</sup>对具有不同高程及不同密度的水体塌落过程进行了试验分析研究。这些试验数据为数学模型的验证提供了依据。随着数值计算方法不断进步, 数值模拟手段越来越多地被应用于溃坝洪水波传播问题的研究中。常见的数值方法有有限元法、有限差分法、有限体积法及近几十年发展起来的无网格方法, 如粒子法、SPH 法等。但这些数值方法由于离散方式、计算方法不同, 从而对模拟结果的影响也不同, 因此, 研究不同数值方法对溃坝洪水波演进模拟适用条件显得尤为重要。

计算流体力学软件 FLUENT 采用基于有限体积法对 Navier-Stokes 控制方程进行离散求解, 并采用标准紊流模型对方程进行封闭, 自由面采用 VOF 方法处理。宋新远等<sup>[4]</sup>利用 FLUENT 模拟了二维滑坡涌浪; 刑爱国等<sup>[5]</sup>利用 FLUENT 分析了堰塞湖溃坝洪水演进。光滑粒子流体动力学法 (SPH) 是一种基于拉格朗日形式的无网格法, 通过粒子逼近得出 SPH 形式的 Navier-Stokes 方程, 从而建立相应的数学模型。J. J. Monaghan 等<sup>[6]</sup>通过与 SPH 相类似的方法生成孤立波, 且通过相关试验来研究缓坡上波的破碎现象。E. Y. M. Lo 等<sup>[7]</sup>将 SPH 法与大涡模相结合拟研究溃坝洪水波传播问题, 并深入研究了孤立波的爬坡与破碎现象。A. Colagrossi 等<sup>[8]</sup>详细研究溃坝水流与直立墙作用形成的复杂界面问题。

考虑到 FLUENT 软件是应用有限体积法的基于网格的模拟软件, 而 SPH 方法是提出最早且发展比较完善的无网格法, 本文采用这两种方法分别模拟溃坝水流问题, 比较两种方法模拟的溃坝水流流态及水力特性, 分析两种方法的优缺点, 探讨两种方法模拟溃坝水流问题的适用性, 为今后在复杂条件下选择合适的数值模拟方法提供依据。

**收稿日期:** 2011-10-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50909009, 50979008); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2008490911)

**作者简介:** 肖 潇(1986-), 女, 湖南常德人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学方面的研究。

E-mail: xxxtina@163.com

## 1 计算方法

### 1.1 FLUENT 建立的数学模型

控制方程采用描述流体运动的连续方程和动量方程(N-S方程),表达式如下:

$$\text{连续方程:} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程:} \quad \rho \frac{d\vec{V}}{dt} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla \cdot P + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

采用VOF方法<sup>[9]</sup>处理自由表面,用 $F$ 来表示体积分数, $F$ 满足方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(vF)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

每个控制单元内各相体积分数之和等于1.若 $F=1$ ,则说明该单元全部为指定相流体所占据;若 $F=0$ ,则该单元为无指定相流体单元;若 $0 < F < 1$ ,则该单元称为交界面单元.

采用有限体积法对控制方程进行离散;采用PISO算法进行速度压力耦合求解;壁面采用无滑移边界条件.

### 1.2 SPH 数学模型

SPH方法<sup>[10-12]</sup>是对基于密度、能量、速度等的偏微分方程,用一系列点的变量函数及其导数的近似来表示,获得常微分方程的离散形式来求解流体动力学中的问题.任一宏观变量都能借助于一组无序点上的值表示成积分插值计算得到.对于任意函数 $A(\mathbf{r})$ 有:

$$A(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} A(\mathbf{r}') W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \quad (4)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为位置矢径; $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)$ 为核函数; $h$ 为光滑长度, $\Omega$ 为它的支持域; $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ 为粒子间距离.

将式(4)转化为支持域内所用粒子叠加求和的离散化形式,则在粒子 $a$ 处的函数可表示为:

$$A(\mathbf{r}) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (5)$$

式中: $m_b$ 为粒子质量; $\rho_b$ 为粒子密度, $W_{ab} = W(r_a - r_b, h)$ 为核函数.核函数采用三次样条函数.

将SPH方法引入控制方程进行离散,表达式如下:

$$\text{动量守恒方程:} \quad \frac{d\vec{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left[ \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right] \nabla_a W_{ab} + \vec{g} \quad (6)$$

$$\text{质量守恒方程:} \quad \frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \vec{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (7)$$

$$\text{能量守恒方程:} \quad \frac{de_a}{dt} = \frac{1}{2} \sum_b m_b \left[ \frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Psi_{ab} \right] \vec{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (8)$$

边界条件采用R. A. Dalrymple等<sup>[13]</sup>提出的动力边界条件,该方法使边界粒子满足流体粒子一样的方程,但是它们需满足固壁不可滑移的条件.

## 2 计算模型与结果分析

### 2.1 计算模型及参数

为了比较FLUENT模拟与SPH方法模拟各自的特点,本文以J. C. Martin等<sup>[1]</sup>的物理模型试验作为参考标准(如图1),建立了二维溃坝水流模型,对比分析两种方法模拟结果.初始时刻坝的上游水位

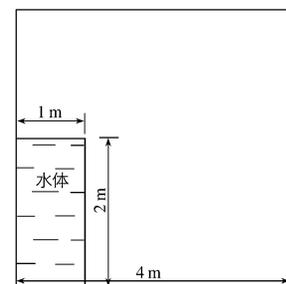


图1 溃坝模型布置

Fig.1 Schematic layout of a dam-break model

为 2 m, 坝上游河道长度为 1 m, 坝下游为干河, 河长 3 m. 上边界的边界条件为压力入口, 其他边界均为壁面.

FLUENT 建立的模型中, 计算网格采用结构化的四边形网格, 网格单元的大小为 0.1 m×0.1 m, 计算时间步长取 0.001 s, 空气密度取 1.225 kg/m<sup>3</sup>, 水密度取 998.2 kg/m<sup>3</sup>, 重力加速度取 9.80 m/s<sup>2</sup>.

SPH 方法建立的模型中, 取粒子的初始速度为 0, 粒间距为 0.02 m, 水体粒子的总数为 11 103 个, 水密度取 998.2 kg/m<sup>3</sup>, 重力加速度取 9.80 m/s<sup>2</sup>.

### 2.2 水流流态计算结果分析

图 2 和 3 分别为 FLUENT 软件和 SPH 方法模拟溃坝过程水流流态计算结果. 在  $t>0$  时刻, 挡板移开瞬间, 水体的势能释放为动能, 快速向右下方流动. 水体运动过程中, 波前峰快速覆盖底部干边界, 抵达右侧边壁. 比较两种方法模拟的溃坝水流流态非常接近, 而 SPH 方法的模拟结果稍有滞后, 但是其模拟的水流边界更容易捕捉.

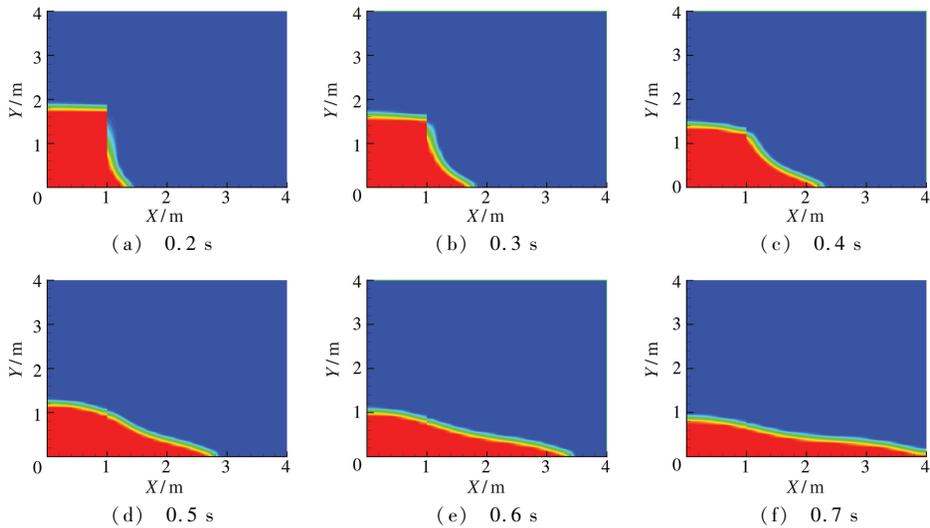


图2 FLUENT 模拟的溃坝水流流态计算结果

Fig.2 The calculated results of dam-break flow pattern by FLUENT

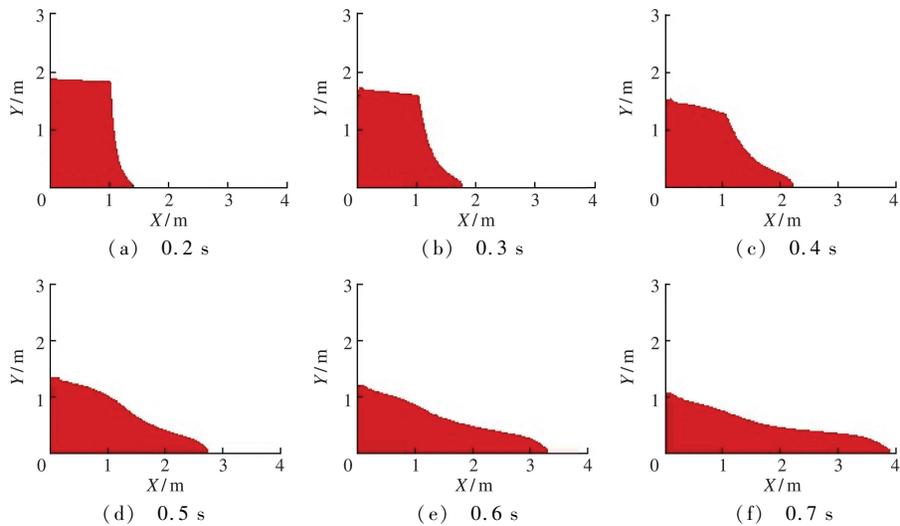


图3 SPH 方法模拟的溃坝水流流态计算结果

Fig.3 The calculated results of dam-break flow pattern by SPH method

图 4 为水流前进过程中波峰到达位置与时间的关系, 与 J. C. Martin 等的实测数据比较, FLUENT 模拟结

果更接近于实测值,而 SPH 方法的模拟结果偏差稍大,尚待改进.但它们的最大相对误差不超过 10%,都能很好地反映真实流动,结果合理.

图 5 和 6 分别为 FLUENT 软件和 SPH 方法模拟溃坝过程达到右壁后水流流态计算结果.从图 5 和 6 可见,当水流达到右壁后,水体在惯性作用下沿右侧边壁继续向上运动,动能转化为势能.当水流运动接触到上壁边界时,由于壁面摩擦力和重力的作用,水流达到极限运动高度后开始回落并向后翻转,接着向左流动.在水流到达右壁后,两种方法模拟的溃坝水流流态整体较为相似,但局部位置情况有所差别,SPH 方法模拟的水体沿壁上爬时无法表现出水体的表面张力;在水体回落向后翻转时 FLUENT 模拟结果无法表现出水滴的飞溅情况.

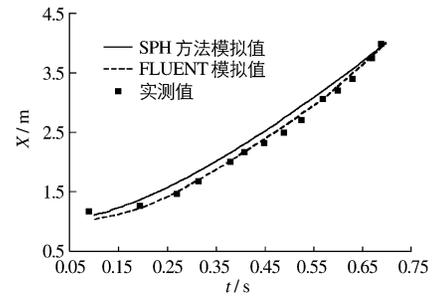


图 4 水流波峰到达位置与时间的关系  
Fig. 4 The relationship between flow arriving location and time

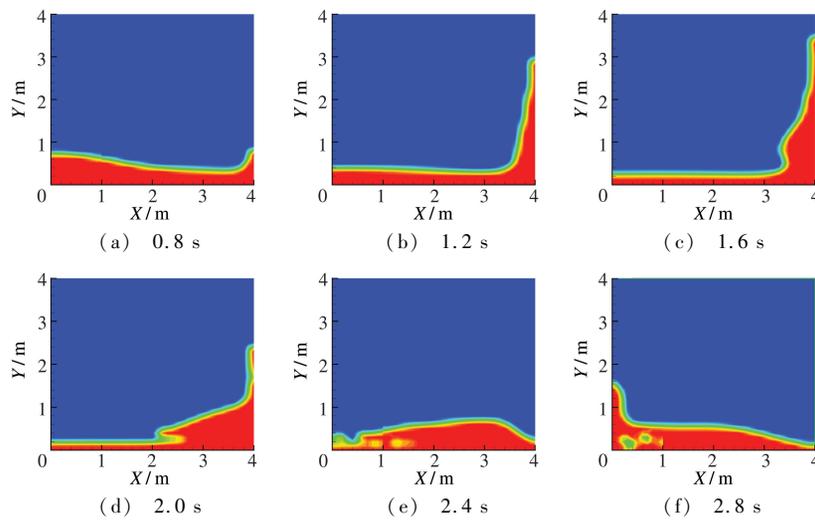


图 5 FLUENT 模拟的溃坝水流流态计算结果  
Fig. 5 The calculated results of dam-break flow pattern by FLUENT

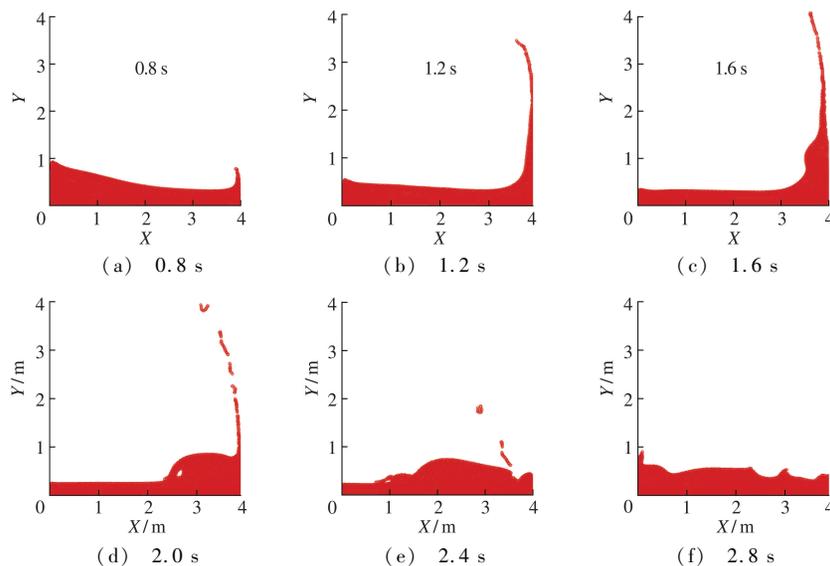


图 6 SPH 方法模拟的溃坝水流流态计算结果  
Fig. 6 The calculated results of dam-break flow pattern by SPH method

### 2.3 水流流场计算结果分析

图7为FLUENT与SPH模拟的溃坝水流典型时刻的流场分布,可见两者速度场比较一致.其中FLUENT能更好地计算气液两相流的速度场,但不能准确地地区分气液分界面;而SPH方法,到目前还无法模拟两相流问题.

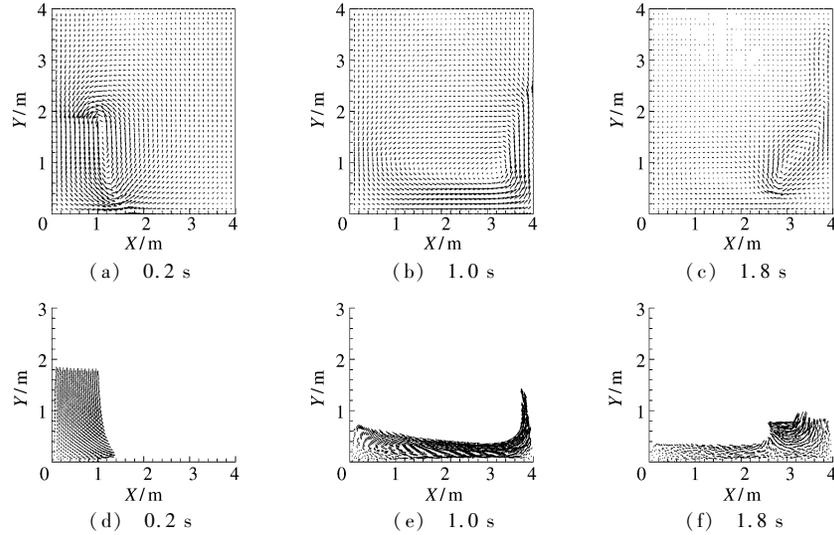


图7 溃坝过程的流场((a),(b),(c)为FLUENT方法,(d),(e),(f)为SPH方法)

Fig.7 The flow field of dam-break process

图8为FLUENT与SPH模拟的典型时刻坝址处的断面速度对比,可见两者速度矢量方向比较一致,但是速度大小有一定差异.在初始情况下,两者速度大小较接近,随着时间的推移,两者速度相差逐渐变大.结合图4发现SPH计算的速度偏小,分析其原因,很可能是由于SPH方法求解时自由表面处粒子分布不完整所导致.

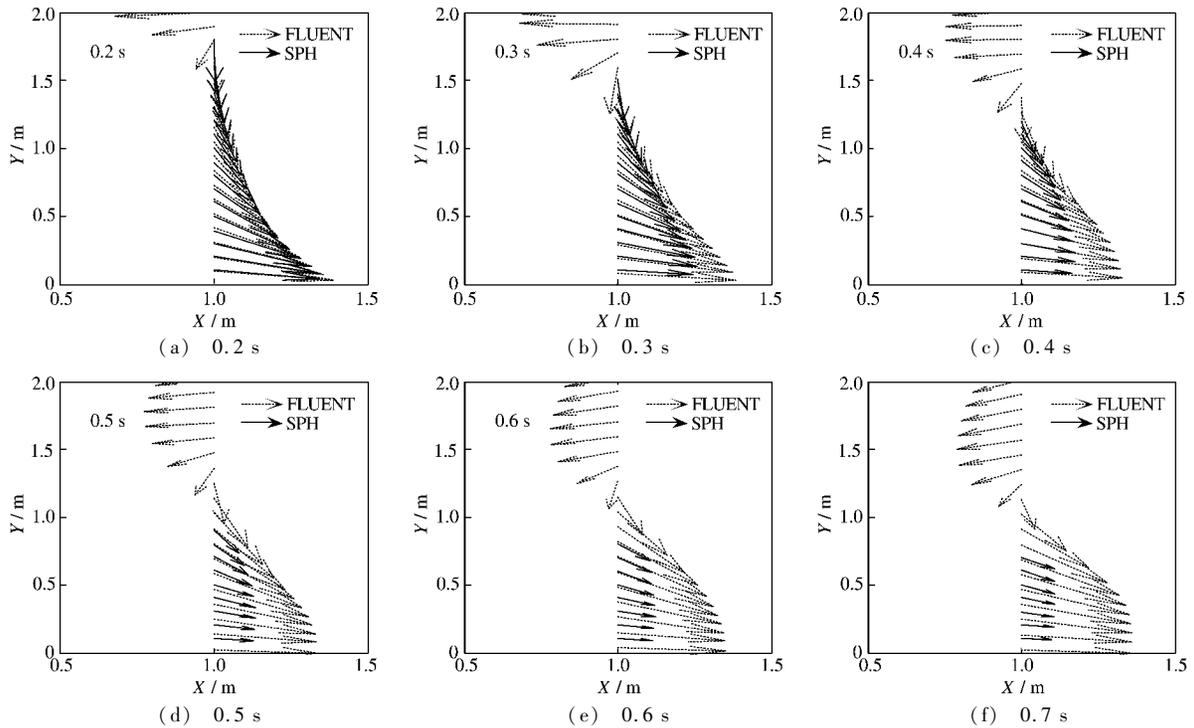


图8 典型时刻坝址处的断面速度

Fig.8 The section speed of typical time at dam-site

## 2.4 水位计算结果分析

图9为不同位置(左壁、坝址和右壁)水位随时间变化的关系,可以看出两种方法的水位变化趋势比较一致,存在的差异主要体现在边壁水位相差较远,在最高峰的数值相差更甚.所以从理论上讲,SPH方法处理边壁需要改进.

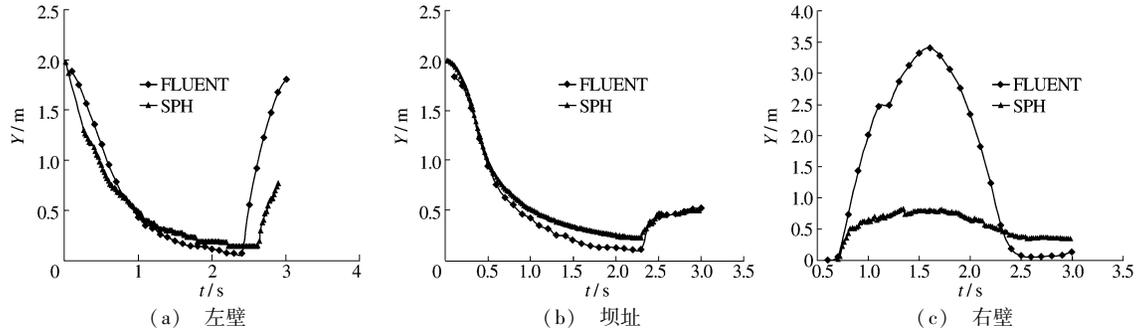


图9 不同位置水位随时间变化

Fig.9 Changes in water levels of left wall, dam-site and right wall with time

## 3 结 语

本文分别采用 FLUENT 软件和 SPH 方法对溃坝问题进行了模拟,对比分析了两者计算结果,得出以下结论:

(1) 两种模型均能较好地反映溃坝水流流态,相对而言,FLUENT 更适用于模拟流体变形不大时的流动情况,而 SPH 方法则更适用于模拟波浪的翻转与破碎等流体变形较大的情况.

(2) SPH 方法能更精确地捕捉自由液面,能有效追踪粒子的运动过程,故可用于污染物扩散等的模拟.

(3) FLUENT 模拟结果表明,采用该方法更能体现水体表面张力,速度计算结果更准确,水位变化更符合实际情况.这归功于 FLUENT 所采用的有限体积法的发展已经比较完善,而 SPH 方法模拟过程中,粒子分布不均匀,边界处理技术不成熟对结果的影响比较大.因此,对于计算精度要求高的问题,采用 FLUENT 软件计算更为适合可靠.

(4) 为了能在复杂情况下进行更好地模拟,SPH 方法在前处理、边界处理方面仍需改进和完善.

## 参 考 文 献:

- [1] MARTIN J C, MOYCE W J. An experimental study of the collapse of a liquid columns on a rigid horizontal plane [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1952, 244 (882): 312-324.
- [2] STANSBY P K, CHEGINI A, BARNES T C. The initial stages of dam-break flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 374: 407-424.
- [3] CRUCHAGA M A, CELENTANO D J, TEZDUYAR T E. Collapse of a liquid column: numerical simulation and experimental validation[J]. Computational Mechanics, 2007, 39(4): 453-476.
- [4] 宋新远, 邢爱国, 陈龙珠. 基于 FLUENT 的二维滑坡涌浪数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(3): 90-94. (SONG Xin-yuan, XING Ai-guo, CHEN Long-zhu. Numerical simulation of two-dimensional water waves due to landslide based on FLUENT[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(3): 90-94. (in Chinese))
- [5] 邢爱国, 徐娜娜, 宋新远. 易贡滑坡堰塞湖溃坝洪水分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 78-83. (XING Ai-guo, XU Na-na, SONG Xin-yuan. Numerical simulation of lakewater down-stream flooding due to sudden breakage of Yigong landslide dam in Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 78-83. (in Chinese))
- [6] MONAGHAN J J, KOS A. Solitary waves on a cretan beach[J]. Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 1999, 125(3): 145-154.

- [7] LO E Y M, SHAO S D. Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method[J]. *Applied Ocean Research*, 2002, 24(5): 275-286.
- [8] COLAGROSSI A, LANDRINI M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 191(2): 448-475.
- [9] 张健, 方杰, 范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. *水利水电科技进展*, 2005, 25(2): 67-70. (ZHANG Jian, FANG Jie, FAN Bo-qin. Advances in research of VOF method[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2005, 25(2): 67-70. (in Chinese))
- [10] MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics[J]. *Annual Rev Astron Appl*, 1992, 30: 543-574.
- [11] LIU G R, LIU M B. 光滑粒子流体动力学: 一种无网格粒子法[M]. 韩旭, 杨刚, 强洪夫, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005: 17-18. (LIU G R, LIU M B. Smoothed particle hydrodynamics: a mesh free particle method[M]. HAN Xu, YANG Gang, QIANG Hong-fu. Changsha: Hunan University Press, 2005: 17-18. (in Chinese))
- [12] 肖潇, 蒋昌波, 程永舟. 水流对浮体作用的 SPH 方法模拟[J]. *船舶力学*, 2011, 15(8): 861-866. (XIAO Xiao, JIANG Chang-bo, CHENG Yong-zhou. Simulation of flow-induced floating-body motion with SPH method [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 15(8): 861-866. (in Chinese))
- [13] DALRYMPLE R A, KNIO O. SPH modelling of water waves[C]//*Proceedings of the Fourth Conference on Coastal Dynamics*, Lund Sweden. ASCE, 2001: 779-787.

## Comparative analysis of simulation method for dam-break flow

XIAO Xiao<sup>1</sup>, WU Shi-qiang<sup>1</sup>, CHENG Yong-zhou<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China*)

**Abstract:** By use of FLUENT software and the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method to simulate dam-break flow, we studied different results of dam water flow patterns and velocity field. The research results show that both methods can reflect dam-break flow patterns and the fluid velocity field consistently. SPH method can capture free surface more accurately. Regarding the calculation results of flow rate, water level and so on, FLUENT is more accurate, and it can reflect the surface tension of water very well. The advantages and disadvantages of both methods are analyzed to promote the development and application of the dam-break flood numerical model in dealing with complicated issues in hydraulic engineering.

**Key words:** dam-break; SPH; free surface; VOF model