

溃坝问题的粒子方法模拟

刘汉涛^{1,2} 干湧³ 常建忠¹ 邵家儒⁴ 李海桥¹

(1 中北大学 能源环境工程与计算流体力学实验室 030051 太原; 2 超重力化工过程山西省重点实验室 030051 太原;

3 浙江大学 航空航天学院 310058 杭州; 4 中国科学院力学研究所 100190 北京)

摘要: 溃坝问题包括水体自由表面变形、翻卷、破碎、复杂的紊流和漩涡, 涉及非线性复杂水动力学问题, 含有丰富而复杂的流动机理。本文改进了传统的物质点方法, 将物质点法从模拟固体问题拓展到了流体问题。采用改进的光滑粒子流体动力学和物质点方法, 对两种长宽比的水坝坍塌过程进行了数值模拟, 得到了波浪前沿及自由表面顶面随时间的演化过程。计算结果表明, 两种粒子方法模拟的水体发展过程与实验结果吻合较好, 较 VOF 更接近实验值。对涌波与竖直壁面的作用进行了计算, 结果表明, SPH 方法与其它方法相比能更好地捕捉水腔形态。最后分析了两种粒子方法在处理流体大变形问题时的特点以及计算的准确性和精度。

关键词: 光滑粒子动力学; 物质点法; 溃坝; 固壁边界

中图分类号: O352 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11776/cjam.33.04.A033

1 引言

溃坝涉及自由表面、流体大变形、非线性复杂水动力学问题, 一直是水动力学研究的重要内容^[1]。对溃坝问题的理论研究通常局限于比较简单的情形; 溃坝问题的实验研究通常通过实验数据总结出经验及半经验的公式。但是, 由于模型实验以及测试等其它条件的局限, 有效证明预测模型的实验数据很少。

目前, 对溃坝等具有自由表面的大变形问题进行模拟的数值方法主要包括: 流体体积法 (Volume-of-Fluid, VOF)^[2]、质点网格法 (Particle-in-Cell, PIC)^[3]、标记网格法 (Marker-and-Cell, MAC)^[4]、光滑粒子动力学方法 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)^[5], 等等。

VOF 采用欧拉方法, 通过追踪和定位自由表面和流体界面, 避免了占用大量内存的问题, 但存在解决 VOF 函数时在自由表面上不连续的问题, 这种方法需要高精度的偏微分方程离散格式, 如二阶 LUD 空间离散、二阶 Crank-Nicholson 时间离散格式^[6]、WENO(Weighted Essentially Non-Oscillatory scheme)格式等^[7]。

PIC 算法由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Harlow 提出, 是一种欧拉-拉格朗日混合方法, 适合于计算具有多种介质和流体大变形的问題, 缺点是方法具有较高的数值耗散, 内存占用较大, 虽能给出自由表面单元, 但不能确定其精确位置。流体网格法 (Fluid-in-Cell, FLIC) 以及流体稳式粒子法 (Fluid Implicit Particle, FLIP) 之后被提出。为求解固体力学问题, 文献[8]采用等效积分弱形式, 建立

基金项目: 国家自然科学基金(51476150); 中国博士后科学基金(2016M590215); 山西省国际科技合作项目(2014081028); 山西省高等学校科技创新项目

收稿日期: 2015-09-15

修回日期: 2016-06-20

第一作者简介: 刘汉涛, 男, 1975 年生, 博士, 中北大学, 副教授; 研究方向——微/纳尺度流体、无网格粒子方法以及多相流。

E-mail: lht@nuc.edu.cn

动量方程的离散格式。离散的物质点携带所有物质信息,如速度、位移、应力等等,并在质点上计算本构方程。采用显式时间积分,对 FLIP 进行了改进。改进后的方法称为物质点法(Material Point Method, MPM)。MPM 方法采用物质点离散固体,而空间导数和动量方程则在规则的欧拉背景网格上计算,可以看作是一种准无网格粒子方法(Quasi-meshless Particle Method),由于其既无需处理对流项又避免了网格畸变问题,非常适合处理材料的特大变形、断裂问题。目前已广泛应用到了材料失效、裂纹扩展、爆炸、侵彻、燃烧、相变等极端载荷环境的数值模拟^[9-11]。但是,将 MPM 应用到流体大变形问题中的研究较少^[12]。

MAC 法也是 PIC 的改进算法,由于采用了标记点,适合于计算多种流体和具有自由表面的流动问题,可以模拟复杂的波浪破碎等问题,但 MAC 方法仍存在累积数值误差和计算代价高的问题。

与基于网格的方法,如边界元法、拉格朗日网格法、欧拉网格法相比,粒子方法由于不存在网格畸变、网格重构、界面追踪、对流项处理等困难,在极大变形、自由表面、变形边界、运动交界面领域受到了广泛应用。SPH 方法采用粒子离散计算区域,粒子代表所模拟的流体或固体介质,并基于粒子体系近似和计算介质运动的控制方程。与一般无网格方法相比,SPH 粒子一方面用于计算场变量与近似控制方程,另一方面也代表了介质系统、携带质量、速度、应力、内能等物理量,它与 MPM 物质点相类似,伴随介质的运动以当地速度移动。可以看出,SPH 方法既有拉氏方法描述物质界面准确的长处,又兼备欧拉方法适合模拟大变形问题的优势。采用 SPH 对溃坝问题的研究较多,SPH 的计算结果与层面设置法 Level-Set、边界元法 BEM 高度一致^[13-14]。SPH 除能准确追踪波前位置,还能模拟波前撞击水体或壁面、水体翻卷、气垫(两相,水中包裹空气泡)以及空穴(单相)等各种现象。

目前 SPH 方法虽已应用到具有自由表面的流体大变形问题,但在计算精度、数值稳定性、边界处支持域被截断等方面仍需进一步改进。而 MPM 方法目前主要应用于计算固体力学领域,少数学者对流体问题进行了研究。本文采用改进的 SPH 和 MPM 方法,对溃坝问题进行了对比研究,并将计算结果与 VOF 以及实验数据进行了对比。在此基础上分析了两种粒子方法在处理流体大变形问题的特点。

2 控制方程及数值方法

2.1 控制方程

对于连续体,模拟中不考虑传热传质。控制方程包括质量守恒的控制微分方程和更新拉格朗日格式的动量方程。

质量守恒的控制微分方程为

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho(\mathbf{x}, t)$ 为流体密度; $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ 为流体速度; t 为时间; \mathbf{x} 为 t 时刻的空间坐标。

更新拉格朗日格式的动量方程为

$$\rho \mathbf{a} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{a}(\mathbf{x}, t)$ 为加速度; $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t)$ 为柯西应力张量, $\mathbf{b}(\mathbf{x}, t)$ 为比体积力。

为在 MPM 方法中模拟流体问题,需在传统的 MPM 方法中增加流体应力应变关系,即

$$\boldsymbol{\sigma} = 2\mu \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \lambda \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) \mathbf{I} - P \mathbf{I} \quad (3)$$

式中: λ 为体积粘度; μ 为剪切粘度; P 为流体质点压力; \mathbf{I} 为二阶单位张量。

为使控制方程封闭,需要增加人工状态方程,在模拟中采用 Mie-Gruneisen 物态方程进行压力求解,即

$$P = \begin{cases} \frac{\rho_0 c^2 \bar{\mu} [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2}) \bar{\mu} - \frac{a}{2} \bar{\mu}^2]}{[1 - (S_1 - 1) \bar{\mu} - S_2 \frac{\bar{\mu}^2}{\bar{\mu} + 1} - S_3 \frac{\bar{\mu}^3}{(\bar{\mu} + 1)^2}] + (\gamma_0 + a \bar{\mu}) e}, & \bar{\mu} > 0 \\ \rho_0 c^2 \bar{\mu} + (\gamma_0 + a \bar{\mu}) e, & \bar{\mu} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{\mu}$ 为压缩率; e 为比内能; ρ_0 为水的初始密度,取值为 1000 kg/m^3 ; $\bar{\mu} = \rho / \rho_0 - 1$; $\gamma_0 = 0.5$; $a = 0$; $S_1 = 2.56$; $S_2 = 1.986$; $S_3 = 1.2268$; 声速 $c = \sqrt{K / \rho_0}$, K 为体模量。

2.2 无网格近似

2.2.1 SPH 近似过程

SPH 方法对控制方程的近似分为核近似和粒子近似两步。核近似对控制方程中的函数或其导数函数进行连续形式的近似,表示为函数本身与某个核函数积的积分,则有

$$\langle \mathbf{u}(\mathbf{x}) \rangle = \int_{\Omega} \mathbf{u}(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (5)$$

之后, 对任意函数 $f(x)$, 粒子 i 处函数的粒子近似形式为

$$\langle u(\mathbf{x}_i) \rangle = \sum_{j=1}^N N_j(\mathbf{x}) u(\mathbf{x}_j) \quad (6)$$

式中: N 为粒子 i 支持域内所有粒子数; $N_j(\mathbf{x})$ 为形函数。对于 SPH, $N_j(\mathbf{x})$ 可表示为核函数及 j 粒子代表的体积之间的关系, 则有

$$N_j(\mathbf{x}) = \Delta V_j W_h(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h) \quad (7)$$

式中: ΔV_j 为粒子 j 代表的体积; $W_h(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j)$ 为核函数。

采用同样的方法对 i 处函数导数进行粒子近似, 从而将控制方程离散。

2.2.2 MPM 近似过程

与 SPH 方法用粒子离散控制方程不同, MPM 方法中, 空间导数和控制方程在背景网格上计算, 质点和背景网格完全固连, 并随背景网格一起运动。质点与背景网格的信息映射通过有限元方法中的形函数 $N_j(\mathbf{x})$ 实现。若 I 表示背景网格结点的变量, p 表示质点携带的变量。质点 p 的位移 $u_p(\mathbf{x})$ 为

$$u_p(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{N_t} N_j(\mathbf{x}) u_j^I \quad (8)$$

也就是说可由背景网格结点的位移 u_j^I 插值获得质点位移。式中 N_t 为质点映射时周围网格的结点总数。对于二维问题 $N_t=4$, 三维问题 $N_t=8$ 。 $N_j(\mathbf{x})$ 为结点 j 的形函数在质点 p 处的值。在本文的二维问题计算中采用最常用的双线性有限元形函数。

2.3 边界处理

固壁边界的实施一直是 SPH 方法中的关键问题之一, 它直接影响计算的精度。尽管提出了很多处理方法, 但目前国内外仍没有一种通用的方法。为提高边界粒子插值精度, 采用如图 1 所示的耦合动力学边界条件^[1]。固壁由两类虚粒子组成, 边界排斥力粒子阻止边界上流体粒子的非物理穿透, 第二类虚粒子的层数由所应用核函数的支持域半径来确定, 保证真实粒子的支持域内不会出现粒子缺失。流体粒子与边界粒子的排斥力为

$$F_{ij} = 0.01c^2 \chi f(\eta) \frac{\mathbf{x}_{ij}}{r_{ij}^2} \quad (9)$$

$$\chi = \begin{cases} 1 - \frac{r_{ij}}{\Delta d}, & 0 < r_{ij} < \Delta d \\ 0, & r_{ij} < 0, r_{ij} > \Delta d \end{cases} \quad (10)$$

$$\eta = r_{ij} / (0.5h_{ij}) \quad (11)$$

$$f(\eta) = \begin{cases} 2/3, & 0 < \eta \leq 2/3 \\ (2\eta - 1.5\eta^2), & 2/3 < \eta \leq 1 \\ 0.5(2 - \eta)^2, & 1 < \eta \leq 2 \\ 0, & \eta > 2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$; $r_{ij} = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|$ 为粒子 i 与粒子 j 间的距离; Δd 为初始粒子间距。

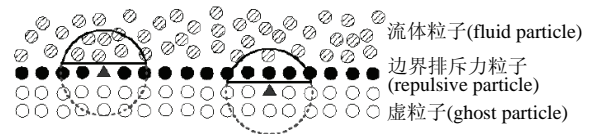


图 1 耦合动力学边界粒子分布^[1]
Fig.1 The coupled dynamic solid boundary treatment in Ref.[1]

MPM 中, 动量方程在背景网格上求解, 并在背景网格上施加边界条件。与 SPH 方法相比, 本质边界条件的施加比较容易。对于固壁边界条件, 只需令背景网格结点在三个坐标方向上的速度、加速度为 0。

3 计算结果及讨论

为比较 SPH 和 MPM 两种方法处理具有自由表面的流动问题, 采用 Fortran 编写了 SPH 和 MPM 的二维计算源程序, 对图 2 所示区域内的经典溃坝问题进行模拟。区域左侧和底部为固壁, 左侧固壁高度 1.0m, 底部长度 3.0m。左侧有一个充满水的水坝。水坝宽为 L , 高度为 H 。初始时刻水体处于平衡状态, 速度为 0, 不同高度上粒子赋压力初值, 即

$$P_i = \rho_0 g (z_i - H) \quad (13)$$

式中: $\rho_0 = 1000 \text{kg/m}^3$; $g = 9.8 \text{m/s}^2$; z_i 为粒子 i 在 z 方向的坐标值。

本文模拟了 $L/H = 0.5$ ($L = 0.3 \text{m}$, $H = 0.6 \text{m}$) 和 $L/H = 1.0$ ($L = 0.6 \text{m}$, $H = 0.6 \text{m}$) 两种水坝宽高比的溃坝。在模拟的初始瞬时, 水坝右侧 $x = L$ 处的挡板迅速移开, 水在重力作用下沿底部固壁向右流动。通过粒子和网格无关性验证, 在 SPH 模拟中, 粒子间距为 0.005m, 声速 $c = 40 \text{m/s}$, 时间步长为 0.00001s, 人工粘性系数为 0.1。 $L/H = 0.5$ 模拟中水粒子 7200 个, 边界粒子 3000 个; $L/H = 1.0$ 的算例中, 水粒子 14400 个, 边界粒子 3000 个。在

MPM 模拟中, 网格尺寸是 0.025, 网格节点数与物质点数相同, 在 $L/H = 0.5$ 模拟中物质点 10000 个, $L/H = 1.0$ 中物质点 20000 个。

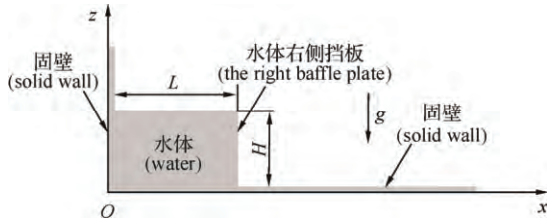


图2 溃坝问题布置示意图

Fig.2 The diagrammatic sketch of dam break

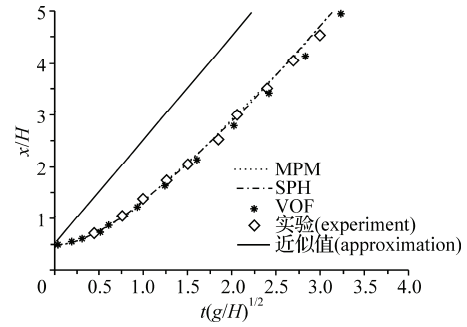
为使计算结果具有通用性并方便与其它实验或计算结果进行对比, 在结果的处理中, 对时间和距离都进行了量纲归一化。其中, 量纲为一的时间为 $t(g/H)^{1/2}$; 距离通过水坝高度 H 进行量纲归一化, 则 x 方向水体前沿的量纲为一距离为 x/H 。

图3展示了不同时刻 SPH 和 MPM 两种方法计算的水体前沿随时间的变化关系。由图3可以看出: 两种 L/H 情况下, SPH 和 MPM 两种方法的计算结果基本一致, 两者最大误差在 0.5% 左右; 二者与文献[15]的实验结果吻合较好, MPM 与实验值最大误差在 4.1% 以内, 但在溃坝的开始和后期, SPH 的结果与实验结果更接近一些; $t(g/H)^{1/2} > 2.5$ 以后, 两种粒子方法得到的结果虽很接近, 但都比实验结果大, 并且随着时间的推移, 与实验结果的差异有增大的趋势。这一增大的趋势可能是由于实验中水体与水平壁面间存在摩擦阻力, 而在模拟计算中水平壁面都为光滑表面。

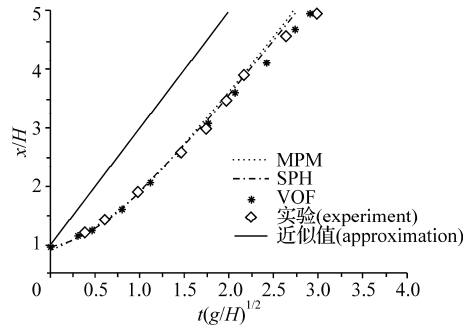
与基于网格的 VOF 方法相比, 在溃坝的前期, MPM 粒子方法和 VOF 方法与实验结果都比较接近, 在有些区域 MPM 粒子法甚至较 VOF 法更接近实验结果; 但在溃坝的后期, VOF 结果与实验结果更接近。

通过对溃坝问题进行理论分析^[16], 可以得到溃坝水体前沿的传播速度为 $2\sqrt{gH}$, 可以看出传播速度与时间无关, 这一结果虽可近似水体前沿传播速度, 但是与实验和模拟结果都相差较大。

图4展示了 $x=0$ 处水表面高度随时间的变化, 可以看出两种粒子方法与实验和 VOF 结果整体上比较吻合; SPH 的数值结果较 MPM 的值稍大, 这与图3水体前沿的模拟中 SPH 较 MPM 值稍小是一致的; 与实验结果相比, $L/H = 0.5$ 时, 在前期 SPH 方法的数值结果更接近实验值, 后期 MPM 的结果更接近实验值; 在 $L/H = 1.0$ 时, 在整个模拟时间内, SPH 更接近实验值; 只在 $t(g/H)^{1/2} = 3$ 左右, MPM 值接近实验结果。



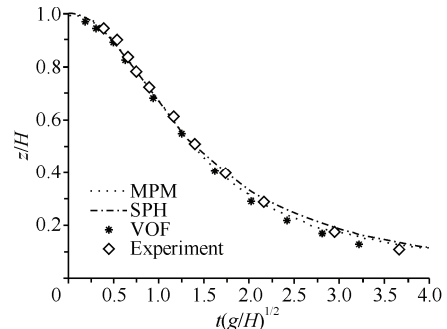
(a) $L/H=0.5$



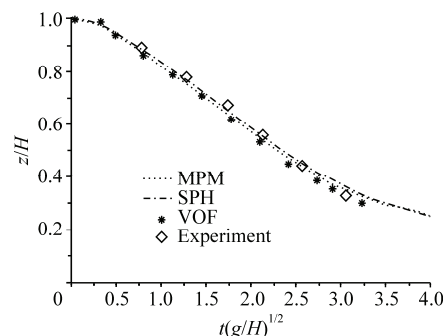
(b) $L/H=1.0$

图3 不同时刻水体前沿位置

Fig.3 The evolution of the water front position



(a) $L/H=0.5$



(b) $L/H=1.0$

图4 $x=0$ 位置水面高度随时间的变化关系

Fig.4 The free surface elevation with non-dimensional time at $x=0$

与基于网格的 VOF 方法相比, 两种 L/H 情况下的粒子模拟结果都较 VOF 结果偏高。从整个模拟过程来看, 粒子方法都较 VOF 更接近实验值。

为模拟流体与固壁的相互作用, 对图5所示水体在矩形容器内的溃坝问题进行了计算。水体宽高比为 1:1 (0.6m:0.6m), 容器宽高比 1:1.8 (1m:1.8m)。

SPH 方法中水粒子 14400 个, 边界粒子 2300 个; MPM 方法中, 网格尺寸 0.025。网格节点数与物质点数相同, 都为 20000 个。

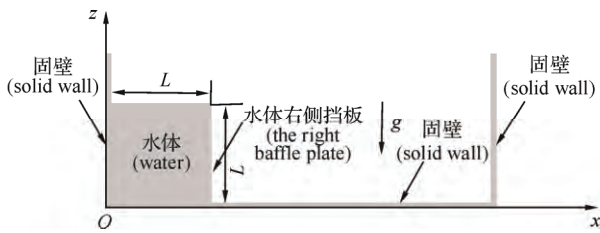
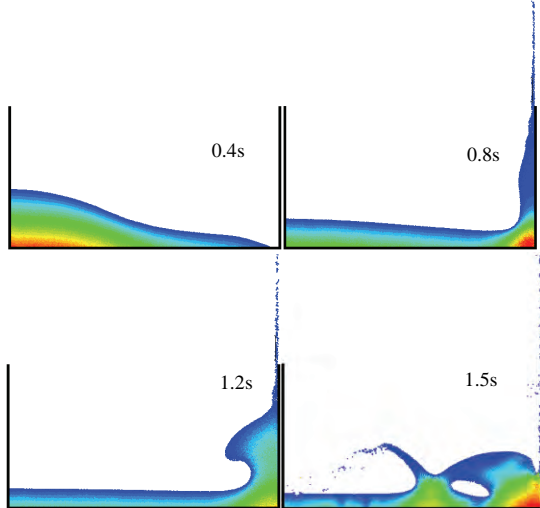
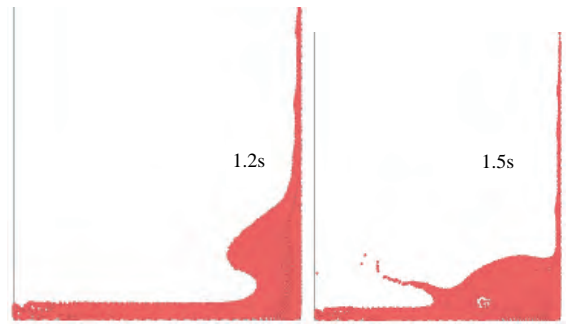
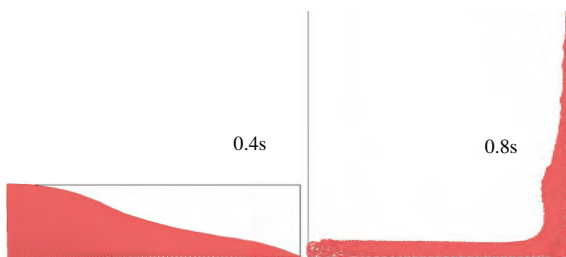


图 5 矩形区域内溃坝问题布置示意图
Fig.5 Dam break flow in a rectangular tank

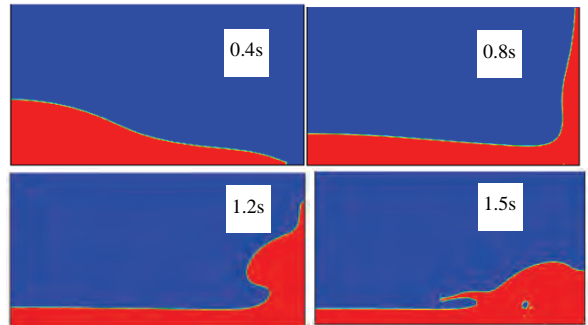
图 6 展示了 SPH、MPM、VOF 三种方法模拟不同时刻水体的发展过程。0.4s 时水体到达竖直壁面; 0.8s 时水体到达最高处并在重力作用下开始下落; 1.3s 时下落的水体前沿翻卷逐渐形成空腔。1.5s 时前沿与底部水体融合, 形成空腔。由于三种方法水体前沿运动速度不同(如前述图 3 所示), 因此上述时刻水体形态并不完全一致。两种粒子方法中, 水体在重力下回落时, 可以看到有些粒子粘附在墙壁上, 而在水体融合的过程中, 有些粒子从水体中飞溅出来。这些结果与 VOF 方法得到的结果相比, 能较好地捕捉水体的融合以及破碎形态。此外, 在 MPM 与 VOF 的模拟中, 空腔的演化过程相比 SPH 较粗糙, 因此 SPH 方法能更好地捕捉溃坝形态。



(a) SPH 数值模拟结果
(SPH simulation results)



(b) MPM 数值模拟结果
(MPM simulation results)



(c) VOF 数值模拟结果
(VOF simulation results)

图 6 矩形容器内溃坝后水体发展过程
Fig.6 Evolution of the water domain during dam break in a rectangular tank

4 结 论

在分析 SPH 和 MPM 两种粒子方法采用的离散和近似过程、固壁处理等问题的基础上, 在传统 MPM 方法中加入应力应变关系及状态方程, 从而能够处理流体力学问题。在 SPH 方法中采用插值精度更高的耦合动力学边界, 解决了复杂边界对 SPH 的限制。在此基础上, 采用两种方法对水坝坍塌过程进行了数值模拟, 并与经典实验和 VOF 方法以及分析解进行了系统的对比分析, 得到以下结论。

- 1) 在两种 L/H 情况下, 两种粒子方法模拟的水体前沿速度均与实验结果吻合较好, 但在模拟后期, 粒子方法得到的结果都较实验结果大, 并且随着时间的推移, 粒子方法得到的结果与实验和 VOF 方法的差异有增大的趋势。
- 2) 粒子方法得到的 $x=0$ 处水表面高度与实验和 VOF 结果整体上也比较吻合。从整个模拟过程来看, 粒子方法都较 VOF 更接近实验值。
- 3) 模拟水体在矩形容器内的溃坝过程中, 粒子方法能较好地捕捉水体的融合及破碎形态。而 SPH 方法与其它方法相比能更好地捕捉水腔形态。

此外, SPH 的模拟过程中, 一个粒子上的物理

量通常是对支持域内的所有粒子进行插值得到, 粒子搜索贯穿每个时间步, 而 MPM 粒子上的值仅由周围网格节点插值得到, 没有复杂的搜索算法。但两者计算效率依赖于具体算法和近似过程。

参 考 文 献 (References)

- [1] Liu M B, Shao J R, Chang J Z. On the treatment of solid boundary in smoothed particle hydrodynamics[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(1): 244-254.
- [2] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [3] Harlow F H. The particle in cell computing method for fluid dynamics[J]. *Methods in Computational Physics*, 1964, 3: 319-326.
- [4] Harlow F H, Welch J E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface[J]. *Physics of Fluids*, 1965, 8(12): 2182-2189.
- [5] Liu G R, Liu M B. Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method[M]. Singapore: World Scientific, 2003.
- [6] 王晓玲, 张爱丽, 陈华鸿, 等. 三维溃坝洪水在复杂淹没区域演进的数值模拟[J]. *水利学报*, 2012, 43(9): 1025-1033. (Wang Xiaoling, Zhang Aili, Chen Huahong, et al. Three-dimensional numerical simulation of dam-break flood routing in the complex inundation areas[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(9): 1025-1033(in Chinese)).
- [7] 朱发昇, 刘玉玲, 郭永涛, 等. 二维溃坝绕流的 WENO 格式数值模拟[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(3): 494-498. (Zhu Fasheng, Liu Yuling, Guo Yongtao, et al. Two-dimensional dam-break numerical simulation based on WENO scheme[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(3): 494-498(in Chinese)).
- [8] Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A particle method for history-dependent materials[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994, 118(1/2): 179-196.
- [9] Chen Z, Jiang S, Gan Y, et al. A particle-based multiscale simulation procedure within the material point method framework[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2014, 1(2), 1: 147-158.
- [10] 郑勇刚, 顾元宪, 陈震. 薄膜破坏过程数值模拟的 MPM 方法[J]. *力学学报*, 2006, 38(3): 347-354. (Zheng Yonggang, Gu Yuanxian, Chen Zhen. Numerical simulation of thin film failure with MPM[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(3): 347-354(in Chinese)).
- [11] Ambati R, Pan X F, Yuan H. Application of material point method for cutting process simulation[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 57: 102-110.
- [12] 张雄, 刘岩, 马. 无网格法的理论及应用[J]. *力学进展*, 2009, 39(1): 1-36. (Zhang Xiong, Liu Yan, Ma Shang. Meshfree methods and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(1): 1-36(in Chinese)).
- [13] Colagrossi A, Landrini M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 191(2): 448-475.
- [14] 刘汉涛, 常建忠, 安康. 基于 SPH 的自由表面流动数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2009(1): 81-84. (Liu Hantao, Chang Jianzhong, An Kang. Numerical modeling of free surface flows with SPH method[J]. *Hydro-science and Engineering*, 2009(1): 81-84(in Chinese)).
- [15] Martin J C, Moyce W J. An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1952, 244: 312-324.
- [16] Whitham G B. *Linear and nonlinear waves*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.

The dilatancy saturated dense sand elastic-plastic model

Dong Xiaoli^{1,2} Zhao Chenggang^{2,3}

(1 Department of City Construction, Beijing City University, 100083, Beijing, China;

2 School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China;

3 School of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, 541004, Guilin, China)

Abstract: Based on the modified Cambridge model, the dilatancy saturated dense sand elastic-plastic model in this paper uses the dilatancy parameters and may overcome the shortcomings of the modified Cambridge model which can not directly simulates the dilatancy of the saturated sand. The improvements embody in the following two aspects, firstly, the dilatancy stress ratio M_d is introduced into dilatancy equation, and secondly, based on the plastic work, the model presents a hardening parameter independent of stress path and replaces plastic strain increment of the modified Cambridge model. Verified by some test results with the results of the modified Cambridge model, the model is suitable for simulating the characteristics of saturated dilatancy sand, and it also can reflect the hardening and softening characteristics during the shearing process. The model contains 8 parameters that can be obtained directly by the conventional triaxial test.

Keywords: *phase transition state, dilatancy, saturated sand, elastic-plastic model.*

Dam break simulation employing particle methods

Liu Hantao^{1,2} Gan Yong³ Shao Jiaru¹ Shao Jiaru⁴ Li Haiqiao¹

(1 The Laboratory. of Energy and Environment Engineering and Computational Fluid Dynamics, North University of China, 030051, Taiyuan, China;

2 Super Gravity in Shanxi Province Key Laboratory of Chemical Process, 030051, Taiyuan, China;

3 School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, 310027, Hangzhou, China;

4 Chinese Academy of Sciences, 100190, Beijing, China)

Abstract: The dam break problem involves free surfaces deformation, rolling, break-up and complicate turbulence and vortices. There are many strong nonlinear hydrodynamics problems and fundamental mechanism. The improved smooth particle hydrodynamics (SPH) and material point method (MPM) are used to investigate the dam break problem, and their simulation results are compared. The evolution of the wave front and the top surface at the position where x equals 0 are simulated, which agree with the Volume-of-Fluid (VOF) simulation results and experiment results well. Finally, the impact of the wave to a vertical wall is computed, and also the morphology evolutions fit well with each other.

Keywords: *smooth particle hydrodynamics(SPH), material point method(MPM), dam break, solid boundary treatment.*