

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.03.007

# MPS 方法数值模拟土石坝溃决流动\*

田鑫, 万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, E-mail: tianx16@163.com)

**摘要:** 土石坝溃决流动一般为逐渐溃坝流动, 对逐渐溃坝流动进行数值模拟分析有重要现实意义。该文使用自主开发的无网格粒子法求解器 MLParticle-SJTU, 对土石坝溃决的逐渐溃坝流动进行了数值模拟。首先建立了溃坝过程中坝体高度随时间变化的模型, 在此基础上引入 MPS 方法, 计算了溃坝过程中的流动形态以及流量, 计算结果与其他研究者的模拟结果相吻合。此外, 还采用二维模型计算考察了溃坝时间对溃坝水流流动形态及壁面砰击压力的影响, 并对其几个工况进行了三维模拟。

**关键词:** MLParticle-SJTU 求解器; MPS; 粒子法; 溃坝; 逐渐溃坝

**中图分类号:** O357

**文献标志码:** A

## Numerical study on gradual dam-break by MPS method

TIAN Xin, WAN De-cheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Earth-dam failure is usually gradual, so the study of gradual dam break is of great practical significance. In this paper, the numerical simulation of dam break is carried out by using the meshless particle solver MLParticle-SJTU, which is developed by our research group. First, the develop model of dam height is established. On this basis, the MPS method is introduced to calculate the flow pattern and flow rate in dam break process. The influence of dam-break time on the flow pattern

\* **收稿日期:** 2017-08-30(2018-03-20 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)和上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

**作者简介:** 田鑫(1992-), 男, 山西忻州人, 硕士研究生.

**通讯作者:** 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** August 30, 2017 (Revised March 20, 2018)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51490675, 11432009, 51579145), Chang Jiang Scholars Program(T2014099) and Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022).

**Biography:** TIAN Xin (1992-), Male, Master Candidate.

**Corresponding author:** WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

and critical pressure of dam-break flow is investigated by using two-dimensional model calculation. Finally, three-dimensional simulation of several working conditions is carried out.

**Key words:** MLParticle-SJTU; MPS; particle method; dam failure; gradual dam failure.

## 引言

水坝是使用最广泛的水利设施之一, 坝体溃决往往会造成巨大的生命财产损失, 因此对于溃坝问题的研究十分重要。以往模拟此类问题往往采用偏向危险的瞬时溃坝模型, 得出的结果相对保守。但对于我国境内采用比较多的土石坝来说, 其溃决形式通常是由于水流漫顶造成溃口, 在冲刷作用下, 溃口逐渐发展扩大以至完全溃决。这时, 采用瞬时溃坝模型的模拟就显得过于保守, 使用逐渐溃坝模型才能更好地模拟实际情况。

溃坝过程中的流动现象十分复杂, 常带有自由面的翻卷、破碎和飞溅现象, 这对于传统网格方法模拟是一个很大的挑战。无网格粒子法由于使用一些无固定拓扑关系、自由移动的粒子来表达流场, 在处理大变形的流动问题中具有很大优势, 本文采用的MPS方法就是其中有代表性的一种。在MPS方法的发展过程中, 研究者们不断将其运用到溃坝问题研究中。Sueyoshi等<sup>[1]</sup>使用MPS法模拟了具有斜坡长底的溃坝模型等实例。Sueyoshi等<sup>[2]</sup>在对压力震荡进行了修正后, 模拟了带有竖直墙的溃坝模型。Ataie-Ashtiani等<sup>[3]</sup>讨论了多种已经出现的核函数在溃坝模型中使用的情况。Lee等<sup>[4]</sup>使用MPS法模拟了具有刚性和弹性边界的溃坝问题。国内方面, MPS法也被众多学者用来研究溃坝问题。潘徐杰<sup>[5]</sup>改进了自由表面判别方法, 将MPS法运用于溃坝问题研究。张雨新等<sup>[6-7]</sup>运用二维溃坝模型对SPH法与MPS法进行了对比, 并将MPS法运用在三维溃坝问题中。

本文采用课题组自主开发的MLParticle-SJTU求解器模拟了逐渐溃坝问题。首先计算了坝体溃决历时0.2 s的工况, 并与Fluent计算结果进行了对比, 验证了MPS方法计算此问题的可靠性。然后, 对比了坝体溃决历时长短对流动形态及对壁面砰击压力的影响。最后, 本文选取几个典型工况进行了三维计算, 并对计算结果进行了对比分析。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

在MPS方法中, 控制方程包括连续性方程和N-S方程, 对不可压缩流体, 其形式如下:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{f} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $P$  为压力,  $\mathbf{V}$  为速度向量,  $\mathbf{f}$  为质量力, 一般为重力,  $\nu$  为流体的运动黏性系数,  $t$  为时间。式(1)和式(2)的时间导数项是以物质导数的形式给出的, 在粒子法中, 粒子的位置和其他物理量都是基于拉格朗日描述法表达的, 因此不需要计算对流项。

### 1.2 核函数

在粒子法中, 控制方程将被写成粒子形式, 粒子间的相互影响是通过核函数来实现的, 与传统的核函数不同, MLParticle-SJTU求解器采用的核函数为<sup>[8]</sup>

$$W(r) = \frac{r_\varepsilon}{0.85r + 0.15r_\varepsilon} - 1, 0 \leq r < r_\varepsilon \quad (3a)$$

$$W(r) = 0, r_\varepsilon \leq r \quad (3b)$$

式中:  $r$  为两个粒子之间的距离,  $r_\varepsilon$  为粒子作用域的半径。

### 1.3 梯度模型

MLParticle-SJTU求解器采用的动量守恒的梯度模型为

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{P_j + P_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (4)$$

式中:  $D$  为空间维数,  $n^0$  为初始粒子数密度。式(4)既满足了动量守恒定律, 同时保证了任意两个粒子间的压力始终是排斥力。

### 1.4 Laplacian模型

在MPS方法中, Laplacian模型是由Iribe<sup>[9]</sup>给出的, 如下式所示

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (5)$$

式中： $D$ 为空间维数， $n^0$ 为粒子的初始粒子数密度。

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \cdot |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (6)$$

式(5)是一种守恒格式，其推导源于非正常扩散问题， $\lambda$ 的引入是为了使数值结果与扩散方程的解析解相一致。

### 1.5 不可压缩条件

本文采用的压力Poisson方程是Tanaka等<sup>[10]</sup>提出的混合源项法 (mixed source term method)，该方法结合了速度散度和粒子数密度。混合源项法后来被Lee等<sup>[11]</sup>写成了更为合理的表达形式

$$\langle \nabla^2 P^{k+1} \rangle_i = (1-\gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{V}_i^* - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^k \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (7)$$

式中： $k$ 为时间步； $\gamma$ 为一系数，其值为0到1之间的数。

### 1.6 自由面条件

在MPS方法中，自由液面的准确判断对计算的精度和稳定性十分重要。在本文采用的自由面判断方法<sup>[12]</sup>中，首先定义矢量，即

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i = \frac{D}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) W(r_{ij}) \quad (8)$$

矢量 $\mathbf{F}$ 用来衡量邻居粒子不对称性。计算 $\mathbf{F}$ 的模 $|\mathbf{F}|$ ，当粒子满足 $\langle |\mathbf{F}| \rangle_i > \alpha$ 时，即被判定为自由面粒子，其中 $\alpha$ 为一参数，本文取 $\alpha=0.5$ 。

### 1.7 溃口形成速率

溃口冲刷速率根据图1中的溃口发展基本模式<sup>[13]</sup>设定。

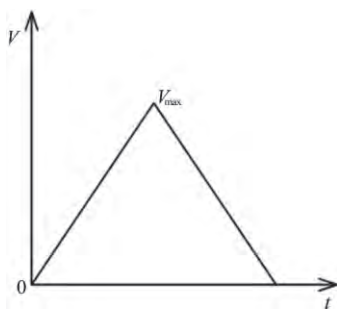


图1 溃口发展速度基本模式  
Fig.1 Basic mode of burst development speed

冲刷速率 $V_d$ 的表达式为

$$V_d = \begin{cases} 2V_{\max}/T \times t, & t \leq T/2 \\ -2V_{\max}/T \times t + 2V_{\max}, & T/2 < t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases} \quad (9)$$

式中： $V_{\max} = 2ZDD/T$ 为最大冲刷速率， $t$ 为时间， $ZDD$ 为可能给冲刷溃口高度， $T$ 为总的溃坝时间。

## 2 数值试验及结果分析

### 2.1 数值试验与验证

本文构造的数值模型参考徐娜娜<sup>[13]</sup>的数值模型建立，其物理模型如图2(a)所示。水槽的长度及高度设置为0.4 m，水体长度和高度分别为 0.1 m和 0.2 m，中间设置刚性坝体，为检测对壁面的碰击压力以及流量，在P1处设置压力监测点。

构造的数值模型如图2(b)所示。坝体采用向下抽离的方式逐渐降低以模拟逐渐溃坝过程，坝体从 0 s开始崩溃。流体粒子数为5 000，总粒子数7 215，粒子间距为0.002。水的密度 $\rho=1\ 000\text{ kg/m}^3$ ，运动黏性系数 $\nu=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ，重力加速度 $g=9.81\text{ m/s}^2$ ，时间步长取 $dt=0.0001\text{ s}$ 。

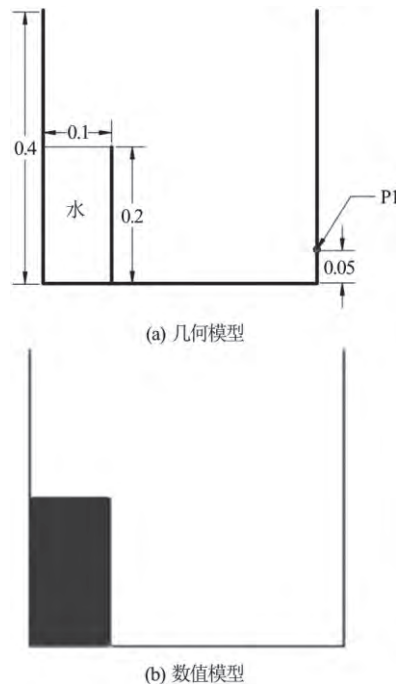


图2 几何模型与数值模型  
Fig.2 Geometric model and numerical model

首先对溃坝时间 $T=0.2\text{ s}$ 的工况进行模拟，并与

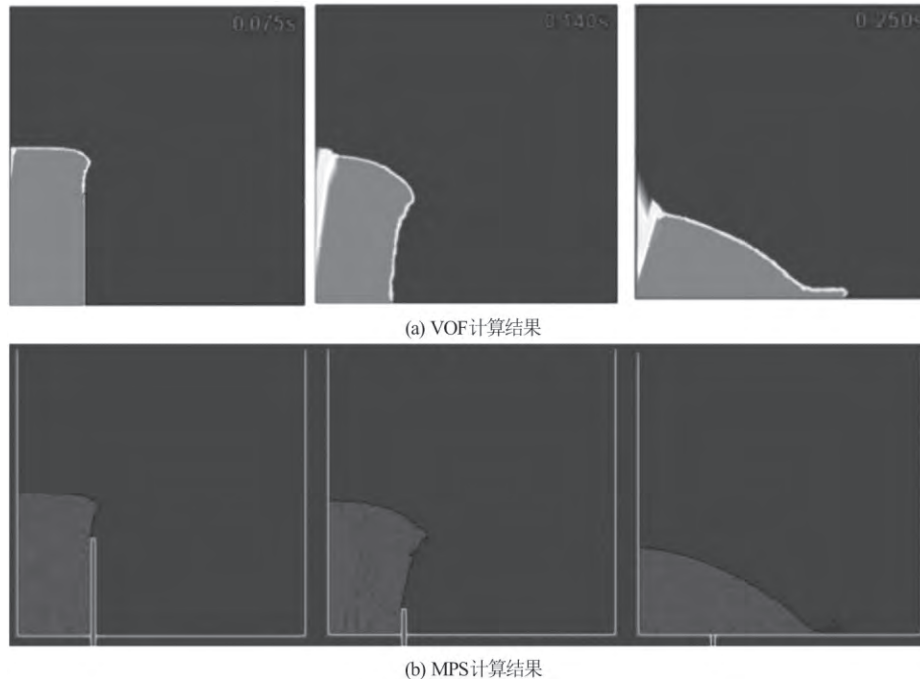
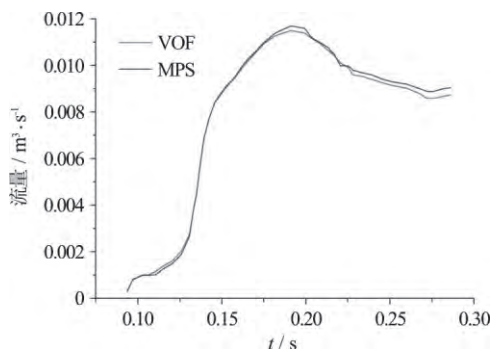


图3 计算结果对比

Fig.3 Comparison of calculated results

网格法计算结果对比。图3给出了三个不同瞬间的流场形态对比, 由图中可见, 两者的流场形态基本一致。在0.075 s时, 由于坝体下落, 部分水已开始漫出; 0.14 s时, 坝体已溃到接近底部位置, 大部分水体由于不受约束而漫出, 形成弧形界面; 至0.25 s时, 坝体完全溃决, 水柱崩塌, 沿水槽底面向右流动, 并在前缘形成一个薄层。在MPS计算结果中可以明显观察到前缘处水体拍击地面引起的飞溅现象, 这在网格法结果中并未体现出来。

图4对两种方法计算得出的流量数据进行了对比。由图中可见, 两者结果比较相似, 这也说明采用MPS法计算逐渐溃坝问题是可靠的。

图4 坝址处瞬时流量对比  
Fig.4 Comparison of discharges at dam

## 2.2 溃决时间对流动状态的影响

本节探究了不同溃坝时间对于溃坝流动的影响, 并与瞬时溃坝的结果进行了对比。计算模型与前一节相同, 溃决时间 $T$ 分别为0.2 s、0.3 s、0.4 s、0.5 s、0.6 s、0.7 s、0.8 s和0.9 s。主要考察了P1点

处的压力情况。

对于瞬时溃坝而言, 由于水是沿水槽底逐渐流向下流, 溃决过程流动较为平稳, 图5是瞬时溃坝时的流动形态。

而对于逐渐溃坝而言, 溃决时间对于整个流动情况有着明显影响。当溃决时间较短时( $T$ 为0.2 s、0.3 s和0.4 s), 水溢流的速度跟不上坝体溃决速度, 短时间内会形成一块水体。整个溃坝过程可分为四个阶段: 溢流阶段, 从开始到坝体完全消失, 此时上方的水逐渐溢出, 形成一块向右倾斜的“水体”; 拍底阶段, 坝体消失后, 水体在重力作用下崩塌, 大量水直接拍击底面, 形成极大压力; 平稳流动阶段, 水体崩塌之后至接触壁面之前, 此阶段流动较为平稳; 爬升阶段, 遇到壁面后水流开始沿壁面向上爬升, 流动伴随着大量水粒子的飞溅。图6展示了溃坝时间为0.2 s、0.3 s和0.4 s时流场的发展情况。

当溃决时间长时( $t > 0.4$  s), 水流从上方逐渐倾斜向前流出, 下方形成空腔, 没有拍击阶段, 流动过程较为平稳, 在溢流过程中水流接触地面后可观察到向上游流动的回流, 伴随着一定程度的翻卷现象。图7是溃坝时间0.6 s几个典型的流动形态。可以明显观察到, 回流及卷入空气的情况, 0.5 s至0.9 s的流动状态都与此类似。

## 2.3 溃决时间对壁面碰击的影响

图8(a)为水流到达测压点P1处所用时间随溃坝时间的变化曲线。可以看到, 随着溃决时间的增加, 水抵达测压点P1的时间变长, 基本随溃坝时间呈线

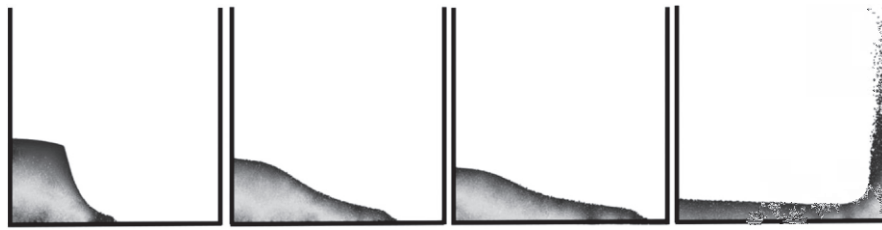


图5 瞬时溃坝的流动形态

Fig.5 Screenshots of instantaneous dam-break

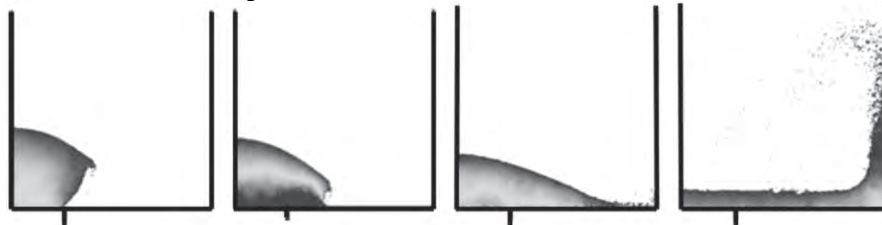
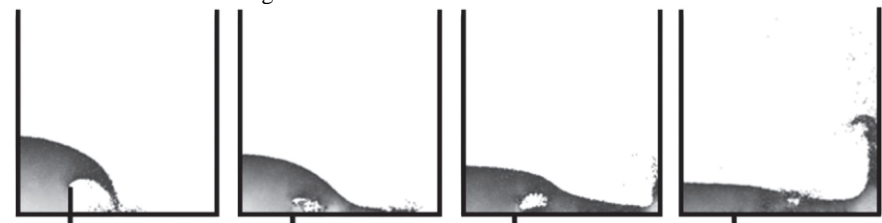
(a)  $T=0.2$  s(b)  $T=0.3$  s(c)  $T=0.4$  s

图6 短时间溃决的流动形态

Fig.6 Screenshots of short-time dam-break

图7  $T=0.6$  s时的典型流动形态Fig.7 Typical flow patterns when  $T=0.6$  s

性增长。图8(b)是P1点压力最大值随溃坝时间变化的曲线。其中瞬时溃坝压力最大,这是由于没有坝体阻挡,冲击壁面的水量最多。压力最大值在溃坝时间为0.3 s处达到极大值,因为存在水体的拍击,在拍击阶段由于大量水从空中直接落向底面,造成压力的陡升,0.3 s这一现象最为明显,因而压力也较大。当溃坝时间大于0.3 s后,溢流逐渐平稳,对壁面的冲击也趋于平稳,且随着溃坝时间的增加,单位时间流向下游的水量减少,砰击压力也随之减小,且在0.9 s时达到最小。

## 2.4 几个工况的三维数值模拟

本节将MPS方法运用到三维逐渐溃坝过程中,水槽长度与高度跟二维模型相同,宽度方向为0.1 m。溃坝时间分别为0.2 s、0.4 s和0.6 s。

模型如图9所示,计算总粒子数为120 450,其中流体粒子数28 800,其余为边界粒子。对应的粒子间距为0.004,时间步长 $dt = 0.0001$  s。在右壁面0.05 m高处设置压力测点,P1位于宽度中点。

图10是三维计算所得的流场形态。由图中可以

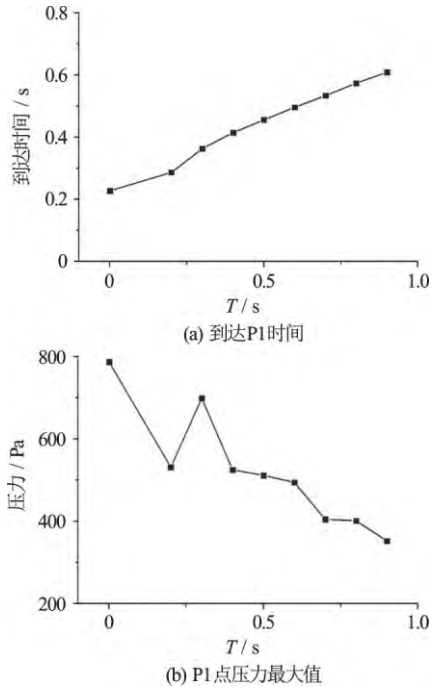


图8 到达 P1 时间及 P1 压力最大值随溃坝时间的变化  
Fig.8 The arrival time of P1 and the maximum value of P1 pressure change with the dam-break time

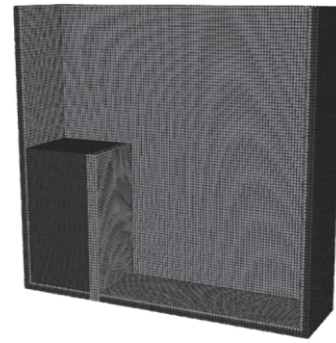


图9 三维数值模型  
Fig.9 Three-dimensional numerical model

一次冲击壁面形成反射波前共有两个压力峰值：第一个峰值出现在水流爬升过程中，向右的水流遇到壁面后产生冲击压力；第二个峰值出现在水流下落阶段，爬升至最高点的水流与飞溅的水滴下落，在壁面下方形成较大压力，由于其并非由溃坝水流冲击形成，故此峰值不予考虑。可以看出随着溃坝时间的增加，水流到达P1点的时间逐渐后延，这与二维模拟中观察到的结果一致。碎击压力首个峰值的模拟结果也与二维计算结果基本一致。

看出，三维同样能很好地模拟出逐渐溃坝的流动现象，并且飞溅现象比二维时更加明显。

图11对比了溃坝时间 $T=0.2\text{ s}$ 、 $0.4\text{ s}$ 和 $0.6\text{ s}$ 时的三维计算以压力监测结果。由图中可以看到，在第

### 3 总结

本文采用MPS方法模拟了逐渐溃坝现象，在验

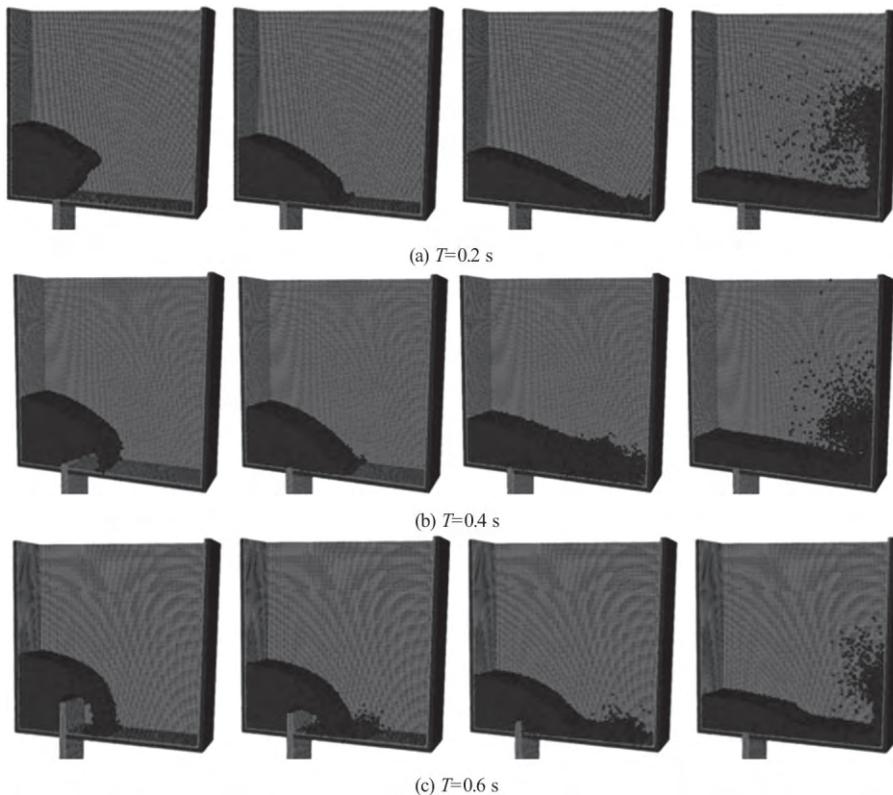


图10 三维数值模拟中的典型流动形态  
Fig.10 Screenshots of three-dimensional numerical simulation

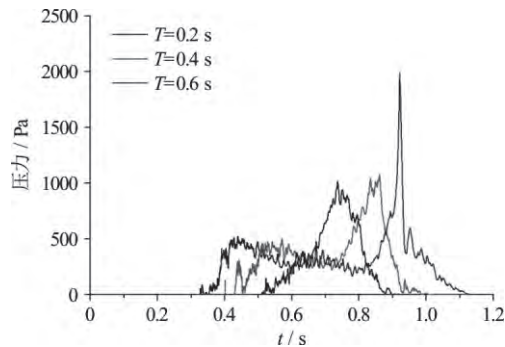


图 11 压力变化时历曲线

Fig.11 Time - history curves of pressure change

证了方法的可靠性后,研究了溃坝时间对于流场以及壁面砰击压力的影响,之后进行了三维计算并将二维与三维计算结果进行了对比,得出如下主要结论:

(1) MPS方法三维计算与二维均能较好的计算壁面砰击压力的趋势,三维模拟能够更加真实地模拟出流场形态,对于飞溅等现象有更好的模拟。

(2) 溃坝时间0.2s、0.3s和0.4s时,会产生大量直接从空中落至底面的拍击现象。时间大于0.4s时,无这一现象出现,流动较为平稳。

(3) 瞬时溃坝产生的壁面冲击压力最大;溃坝时间大于0.3 s后,冲击压力逐渐变小。

## 致谢

本文工作得到上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)以及工信部数值水池创新专项VIV/VIM项目(2016-23/09)的资助,在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献:

- [1] SUEYOSHI M, NAITO S. A Study of nonlinear fluid phenomena with particle method(part1): Two dimensional problems[J]. Journal of the Kansai Society of Naval Architects Japan, 2001: 191-198.
- [2] SUEYOSHI M, NAITO S. A study of nonlinear fluid phenomena with particle method (part2) : Two dimensional hydrodynamic forces[J]. Journal of the Kansai Society of Naval Architects Japan, 2002(237): 181-186.
- [3] ATAIE-ASHTIANI B, FARHADI L. A stable moving-particle semi-implicit method for free surface flows[J]. Fluid Dynamics Research, 2006, 38(4): 241-256.
- [4] LEE B H, JEONG S J, RYU M C, et al. Numerical simulation of non-linear free-surface motions using moving particle semi-implicit(MPS) method[J]. Cephalgia, 2007, 21(6): 809-815.
- [5] 潘徐杰. 基于大涡模拟的移动粒子半隐式法研究及其应用[D]. 上海交通大学, 上海, 中国: 2009.  
PAN Xu-jie. Moving particle semi implicit method research and application based on large eddy simulation[D]. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China: 2009.
- [6] 张驰, 张雨新, 万德成. SPH方法和MPS方法模拟溃坝问题的比较分析[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2011, 26(6): 736-746.  
ZHANG Chi, ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Comparative study of SPH and MPS methods for numerical simulations of dam breaking problems[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(6): 736-746.
- [7] 张雨新, 万德成. MPS方法在三维溃坝问题中的应用[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 140-154.  
ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Application of MPS in 3D dam breaking flows[J]. Science Sinica: Physica, Mechanica and Astronomica, 2011, 41: 140-154.
- [8] ZHANG Y X, WAN D C. Comparative study of MPS method and Level-Set method for sloshing flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(4): 577-585.
- [9] IRIBE T, FUJISAWA T, KOSHIZUKA S. Reduction of communication in parallel computing of particle method for flow simulation of seaside areas[J]. Coastal Engineering Journal, 2010, 52, 287-304.
- [10] TANAKA M, MASUNAGA T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by Quasi-Compressibility[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229: 4279-4290.
- [11] LEE B H, PARK J C, KIM M H, et al. Step-by-step improvement of MPS method in simulating violent free-surface motions and impact-loads[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(9): 1113-1125.
- [12] 张雨新, 万德成. 用 MPS方法数值模拟低充水液舱的晃荡[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2012, 27(1): 100-107.  
ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Numerical simulation of liquid sloshing in low-filling tank by MPS[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(1): 100-107.
- [13] 徐娜娜. 大型滑坡涌浪及堰塞坝溃坝波数值模拟研究[D]. 上海交通大学, 上海, 中国: 2011.  
XU Na-na. Numerical simulations for large-scale landslide-generated waves and waves due to sudden breakage of barrier dam[D]. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China: 2011.