

# MPS 方法数值模拟逐渐溃坝问题

田鑫, 陈翔, 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)

\*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

**摘要:** 土石坝溃决一般为逐渐溃坝, 因此研究逐渐溃坝有重大现实意义。本研究使用课题组自主开发的无网格粒子法求解器 MLParticle-SJTU, 对逐渐溃坝进行了数值模拟。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, 结合模拟数据验证了计算的合理性。考察了溃坝时间对溃坝水流流动形态的影响, 并将二维与三维计算结果进行了对比。

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

## 1 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于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, 只有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、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。本研究采用的 MPS 方法就是其中有代表性的一种。在 MPS 方法的发展过程中, 人们不断将其运用到溃坝问题研究中。2001 年, Sueyoshi<sup>[1]</sup>使用 MPS 法模拟了溃坝模型具有斜坡长底的溃坝模型等实例; 2002 年, Sueyoshi<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。2006 年, Ataie-Ashtiani<sup>[3]</sup>讨论了多种已经出现的核函数在溃坝模型中使用情况, 2007 年, Lee<sup>[4]</sup>

使用 MPS 法模拟了具有刚性和弹性边界的溃坝问题。在国内，MPS 法也被众多学者用来研究溃坝问题。2010 年，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<sup>[6-7]</sup>在 2011 年对比了运用二维溃坝模型对 SPH 法与 MPS 法进行了对比，并在当年将 MPS 法运用在三维溃坝问题中。

本课题组自主开发的 MLParticle-SJTU 求解器考察了逐渐溃坝问题。首先计算了坝体溃决历时 0.2s 的工况，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出库流量及对壁面抨击压力的影响；最后选取几个典型工况进行了三维计算，对比了二维与三维计算结果的差异。

## 2 数值方法

### 2.1 控制方程

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：

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

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

其中： $\rho$  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， $\nu$  是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。

### 2.2 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>[3-7,12-13]</sup>

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_\epsilon}{0.85r + 0.15r_\epsilon} - 1, & 0 \leq r < r_\epsilon \\ 0, & r_\epsilon \leq r \end{cases} \quad (3)$$

其中， $r$  表示两个粒子之间的距离， $r_\epsilon$  是粒子作用域的半径。

### 2.3 梯度模型

MLParticle-SJTU 求解器采用的动量守恒的梯度模型为<sup>[14]</sup>

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

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。

## 2.4 Laplacian 模型

在 MPS 方法中，Laplacian 模型是由 Koshizu-ka<sup>[15]</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，其推导源于非定常扩散问题， $\lambda$ 的引入是为了使数值结果与扩散方程的解析解相一致。

## 2.5 不可压缩条件

MLParticle-SJTU 求解器采用的压力 Poisson 方程是 Tanaka<sup>[15]</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<sup>[16]</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： $k$ 是时间步， $\gamma$ 是一系数，其值为 0—1 之间的数。

## 2.6 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。在本研究采用的自由面判断方法[2]中，首先定义矢量

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

矢量  $\mathbf{F}$  表示粒子数密度的不确定度。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，其中为  $\alpha$  一参数。本研究取  $\alpha=0.5$ 。

## 2.7 溃口形成速率假定

溃口冲刷速率根据以下基本模式设定：

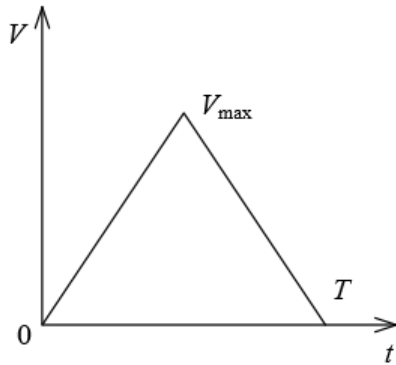


图1 溃口发展速度基本模式

由图1 的溃口发展速度基本模式可以得到，冲刷速率 $V_d$ 的表达式：

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

其中 $V_{\max} = 2ZDD/T$ ，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。

### 3 数值试验及结果分析

#### 3.1 数值试验及与网格法的对比

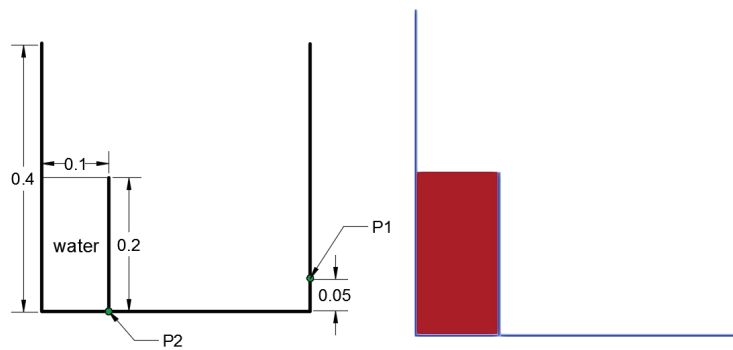


图2 二维溃坝几何模型

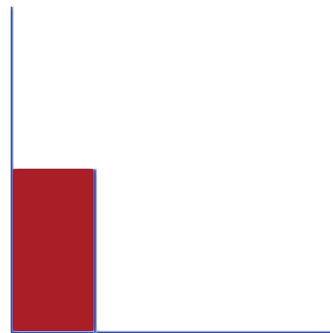


图3 二维溃坝数值模型

本文构造的数值模型参考徐娜娜<sup>[8]</sup>的数值模型建立，其物理模型如图 2 所示，水槽的长度、高度设置为 0.4m，水体长度、高度分别为 0.1m、0.2m，中间设置刚性坝体，为检测对避免的抨击压力以及流量，在 P1 处设置压力监测点，在 P2 处设置水面高度监测点。

构造的数值模型如图 3 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 0s 开始崩溃。流体粒子数为 5000，总粒子数 7215，粒子间距为 0.002。水的密度  $\rho=1000\text{kg/m}^3$ ，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  $dt=0.0001\text{s}$ 。

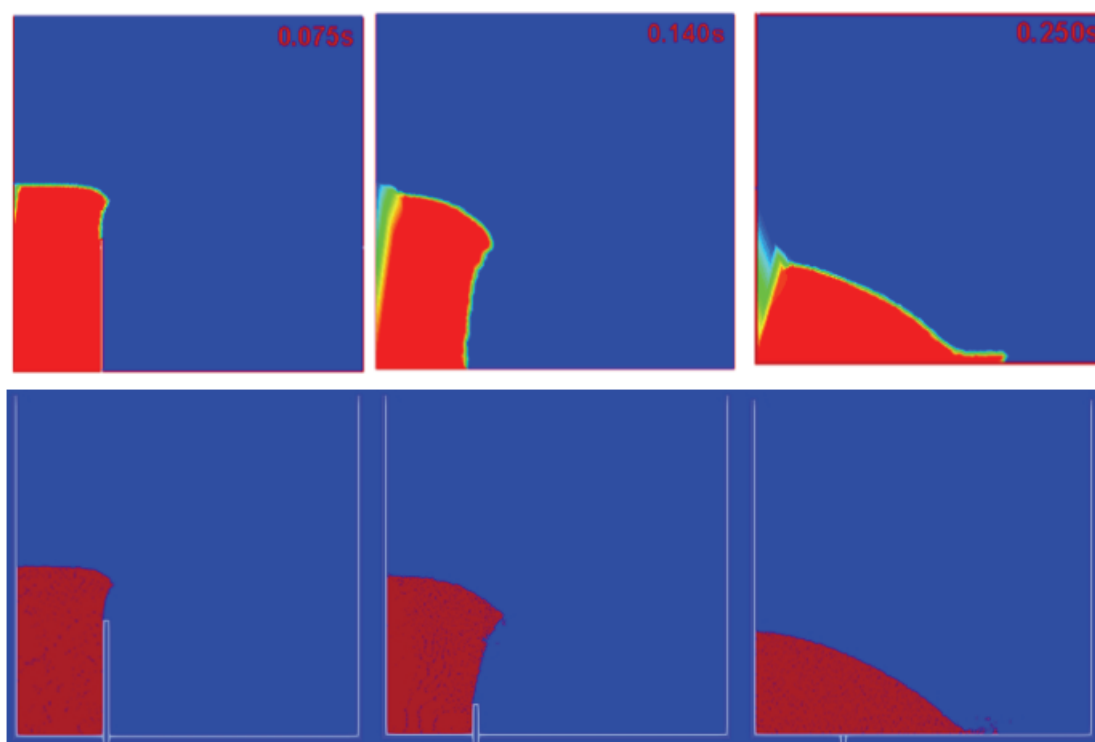


图 4 MPS 与网格法在不同瞬间流体形态的对比  
(上排为网格法模拟结果，下排为 MPS 模拟结果)

首先设置溃坝时间  $t=0.2\text{s}$  进行模拟，并与网格法计算结果对比。图 4 给出了 3 个不同瞬间的流场形态对比，两者的流场形态基本一致。在 0.075s 时由于坝体下落，部分水已开始漫出。0.14s 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。到 0.25s，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。

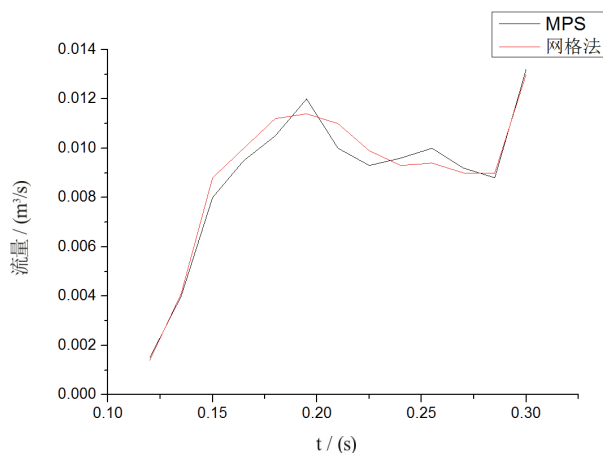


图5 坝址处流量随时间变化对比图

图5对两种方法计算得出的流量数据进行了对比,两者结果比较相似,这也说明MPS法计算逐渐溃坝问题是可靠的。

### 3.2 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,溃决时间分别为0.2s, 0.3s, 0.4s, 0.5s, 0.6s, 0.7s, 0.8s, 0.9s。主要考察了P1点处的压力情况。

从模拟结果来看,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(0.2s,0.3s,0.4s)时,水溢流的速度跟不上坝体溃决速度,在分子吸引力与表面张力作用下,短时间内会形成一块水体。整个溃坝过程可分为4个阶段:溢流阶段,从开始到坝体完全消失,此时上方的水逐渐一出,形成一块向右倾斜的“水体”;水体拍击阶段,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。

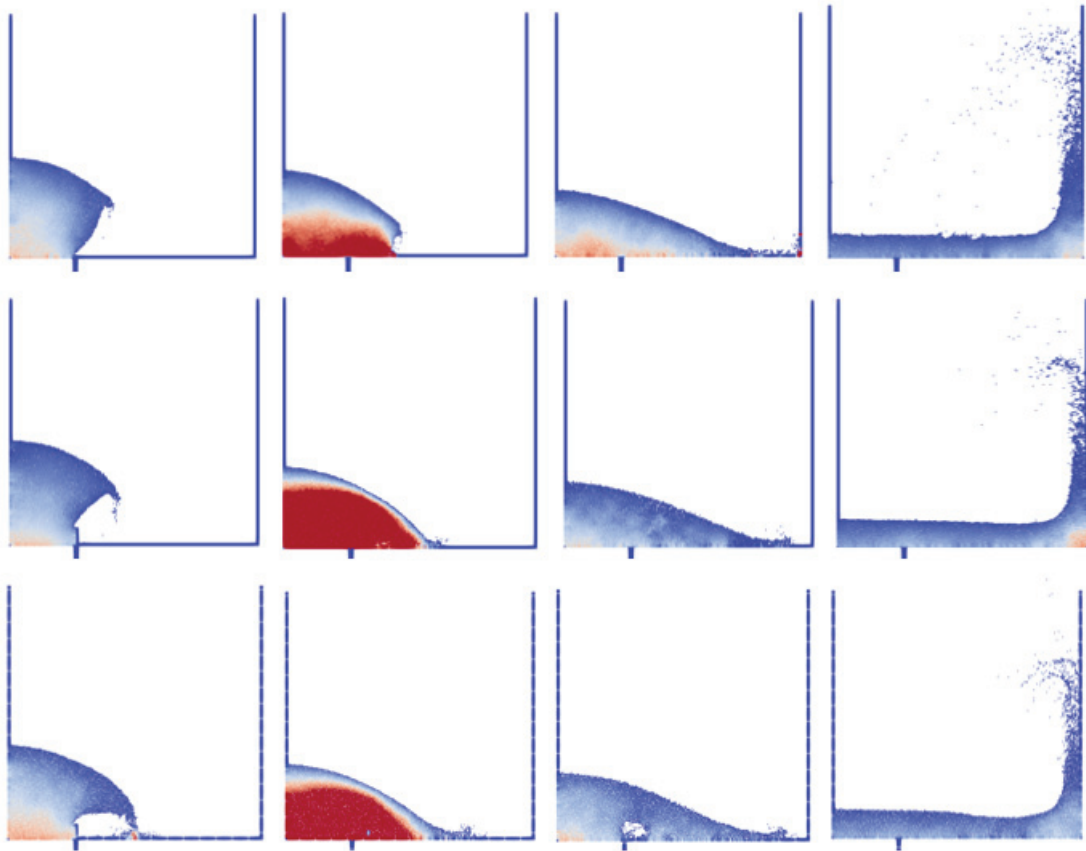


图 6 短时间溃坝的流动形态（从上到下依次为 0.1s, 0.2s, 0.3s）

溃决时间长时( $t > 0.4s$ ), 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 6 是溃坝时间 0.6s 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。0.5~0.9s 的流动状态都与此类似。



图 7 0.6s 典型流动形态

对于瞬时溃坝, 由于水是沿水槽底逐渐流向下流, 溃决过程流动较为平稳。

另外，一个明显的影响是，随着溃决时间的增加，水到达测压点 P1 的时间变长，正如图 7 所示，基本随溃坝时间呈线性增长。

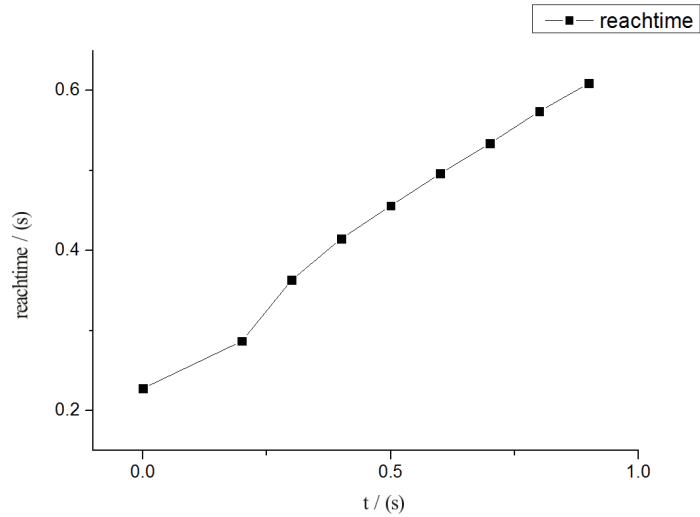


图 8 水流到达 P1 历时曲线

### 3.3 溃决时间对壁面抨击的影响

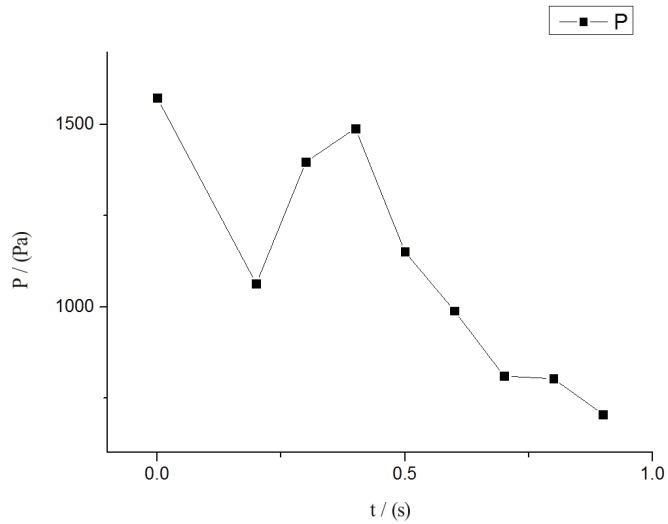


图 9 P1 点处压力最大值随溃坝时间变化曲线

图 9 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。溃坝时间 0.2~0.4s，压力最大值逐渐增加，在 0.4s 处



达到极大值，这三种情况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，0.4s 这一现象最为明显，因而压力也较大。当溃坝时间大于 0.4s 后，溢流比较平稳，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，抨击压力也随之减小，在 0.9s 时达到最低值。

### 3.4 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，在宽度方向为 0.1m。溃坝时间分别为 0.2s, 0.4s, 0.6s。

模型如图 10 所示，计算总粒子数为 120450，其中流体粒子数 28800，其余为边界粒子。对应的粒子间距为 0.004，时间步长  $dt = 0.0001s$ 。在右壁面 0.05m 高处设置两个压力测点，P1 位于宽度中点，P2 位于距前壁面 0.025m 处。

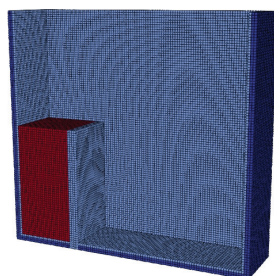


图 10 三维逐渐溃坝模型

图 11 是三维计算所得的流场形态，可以看出三维同样能很好的模拟出，逐渐溃坝的流动现象，且飞溅现象比二维更加明显。

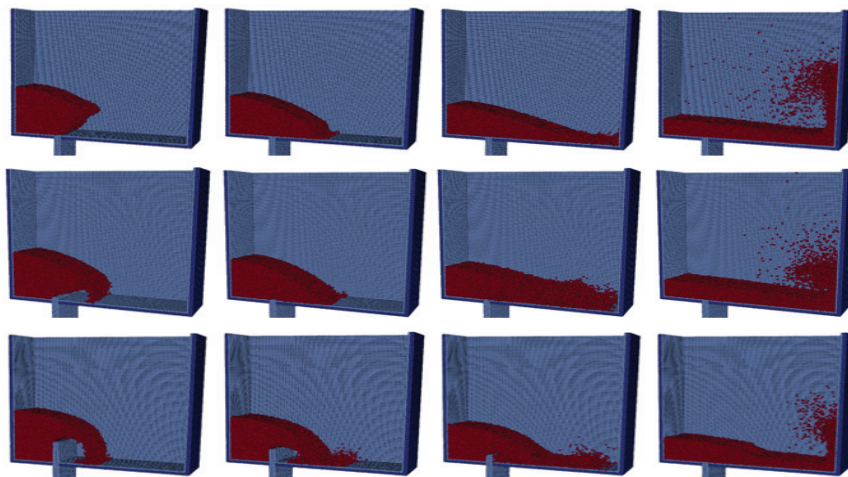


图 11 三维计算的流场形态  
(自上往下分别为 0.2s, 0.4s, 0.6s)

图 12 中对比了溃坝时间 0.2s, 0.4s, 0.6s 三维计算以及二维计算的压力检测结果。可以看到在第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, 由于并非溃坝水流冲击形成, 此峰值不予考虑。

考虑第一峰值可以看到 3D 宽度方向的两个测点结果差异很小, 二维与三维计算结果则差异较大。三维与二维曲线的变化趋势基本相同, 但二维计算结果压力震荡较为明显。

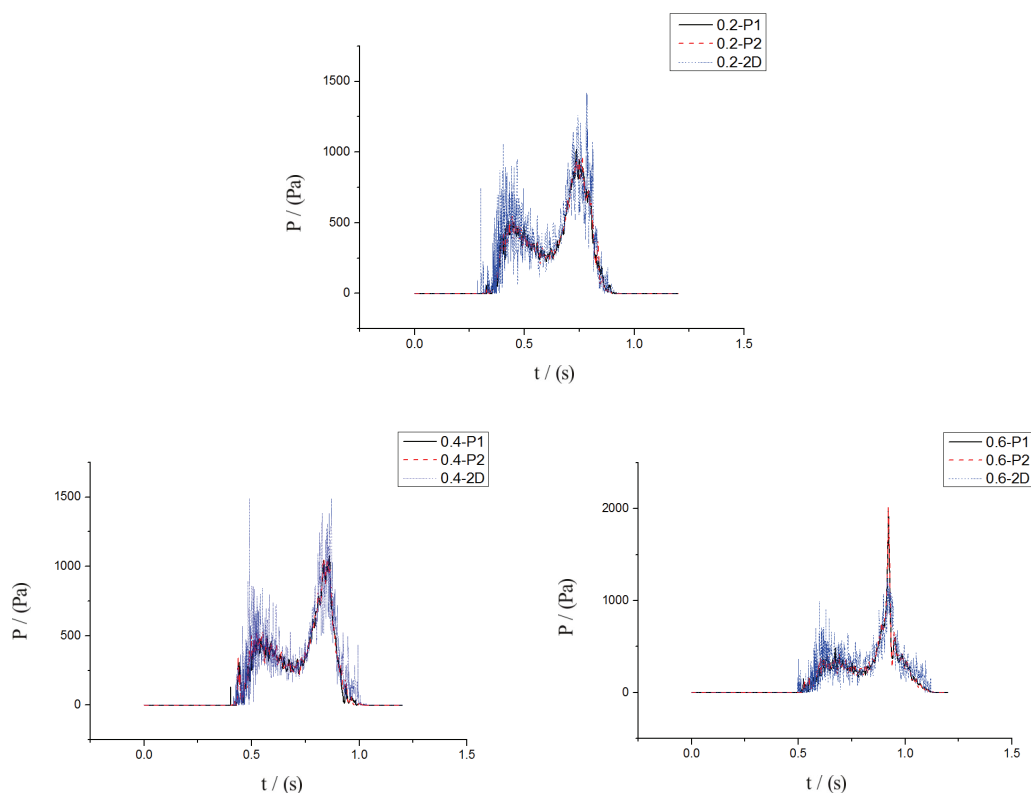


图 12 三维与二维抨击压力对比

## 4 结论

本研究用 MPS 方法模拟了逐渐溃坝现象, 在验证了方法的可靠性后, 研究了溃坝时间对于流场以及壁面抨击压力的影响, 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, 得出了如下结论。

- (1) 采用 MPS 方法可较好的模拟逐渐溃坝问题当中的流场。
- (2) 溃坝时间 0.2s, 0.3s, 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 0.2s, 0.3s, 0.4s 逐渐增加, 在 0.4s 时有一峰值, 超过 0.4s 后, 冲击压力逐渐变小。

(4) MPS 方法三维计算时产生的压力振荡小于二维。两者均能较好的计算压力变化趋势。

## 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11), 以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)的资助。在此一并表示衷心感谢。

## 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 Chen J K L, Noguchi H, Koshizuka S. Fluid-shell structure interaction analysis by coupled particle and finite element method[J]. Computers & Structures, 2007, 85(11-14):688-697.
- 5 潘徐杰, 张怀新, 孙学尧. 一种适用于移动粒子半隐式法的自由表面识别方法[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(1):134-138.
- 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, 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(2):34-48.
- 8 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, 2011.
- 9 郭洪巍, 吴葱葱. 逐渐溃坝和瞬时溃坝的模拟研究与比较[J]. 东北水利水电, 2000(2):1-3.
- 10 刘学炎. 溃坝水流数值模拟[D]. 武汉理工大学, 2009.
- 11 杨亚强, 唐振远, 万德成. 基于 MPS 方法模拟带水平隔板的液舱晃荡[J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30(2):146-153.
- 12 张雨新, 万德成, 日野孝则. MPS 方法数值模拟液舱晃荡问题[J]. 海洋工程, 2014, 32(4):24-32.

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

TIAN Xin, CHEN Xiang, WAN De-cheng<sup>\*</sup>

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

<sup>\*</sup>Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

**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 of dam break flow is then investigated.

**Key words:** MlParticle-SJTU; MPS; Dam failure; Gradual dam failure; Instantaneous dam failure.