



## 环境力学专题·论文

## 滑坡涌浪的三维 SPH 方法模拟及其工程应用

石传奇<sup>①</sup>, 安翼<sup>①\*</sup>, 杨家修<sup>②</sup><sup>①</sup> 中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;<sup>②</sup> 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081

\*联系人, E-mail: anyi@imech.ac.cn

收稿日期: 2015-06-01; 接受日期: 2015-07-23; 网络出版日期: 2015-08-31

长江科学院开放研究基金(编号: CKWV2012305/KY)、国家自然科学基金(批准号: 11372326)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB04680202)资助项目

**摘要** 滑坡涌浪是一种严重的次生地质灾害. 滑坡体与水体的强耦合作用以及非线性水波演化是其核心特点. 本文基于 Navier-Stokes 方程和光滑粒子动力学(SPH)离散方法, 建立了能反映上述特点的滑坡涌浪产生过程的数值模型, 并将其应用于复现小湾荒田滑坡涌浪事件, 模拟了其三维涌浪产生的全过程, 得到了符合实际观测结果的首浪参数. 通过对涌浪近场特征的分析表明, 常见的 V 形河谷中, 涌浪首浪的形成受地形影响显著, 可传播的涌浪波幅远小于冲击产生的首浪, 传统的二维或半无限空间三维模型可能明显高估远场的涌浪高度.

**关键词** 滑坡涌浪, 光滑粒子动力学, 流-固耦合, 非线性水波, 荒田滑坡

**PACS:** 47.11.+j, 47.35.+i, 47.60.+i, 47.85.Dh

**doi:** 10.1360/SSPMA2015-00280

滑坡涌浪是一种严重的次生地质灾害, 是边坡堆积失稳破坏后, 快速入水激起的巨浪灾害. 历史上发生过大量的滑坡涌浪灾害. 美国 Lituya 湾涌浪爬升达 524 m<sup>[1]</sup>, 而意大利 Vajont 水库滑坡涌浪翻过坝体, 造成近 2000 人死亡. 在我国, 秭归的新滩滑坡(1985 年)、水布垭的大堰塘滑坡(2007 年)、小湾的荒田滑坡(2009 年)等均造成了较大涌浪灾害, 建立涌浪的准确评估方法有重要的工程意义. 同时, 滑坡涌浪问题涉及滑坡体入水过程中的流-固耦合作用以及涌浪在复杂空间内的传播问题, 研究涌浪产生机理及波浪特征也有重要的科学价值.

现有理想化实验和部分模型试验提供了滑坡涌浪问题的基本认识. 当前理想化实验从形式上可以分为槽道型二维实验<sup>[2]</sup>和水池型半无限空间实验<sup>[3]</sup>, 发展了一系列评估公式. 但 Heller 和 Hager<sup>[4]</sup>及 Risio 等人<sup>[5]</sup>通过实验均发现三维条件下的涌浪过程与二维或半无限空间条件有较大区别. 模型试验<sup>[6]</sup>能够基本表达实际河道的复杂性, 但在滑坡体描述及相似参数协调方面存在困难, 而近场区的波高、流速等信息更难以全面获取.

当前数值模拟手段主要有基于浅水方程和基于 Navier-Stokes(N-S)方程两类, 基于浅水方程的模拟

**引用格式:** 石传奇, 安翼, 杨家修. 滑坡涌浪的三维 SPH 方法模拟及其工程应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 104706

Shi C Q, An Y, Yang J X. A SPH based numerical method of landslide induced impulse and its application on Huangtian landslide event (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 104706, doi: 10.1360/SSPMA2015-00280

方法<sup>[7]</sup>可以统一描述涌浪产生和传播过程, 然而其中经验参数较多, 部分参数在实际问题中较难确定. 基于 N-S 方程的模拟方法<sup>[8]</sup>需要经验参数少, 且在描述强非线性水波方面具有本质优势. 其中光滑粒子动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)方法克服了基于 Euler 描述方法的困难, 可以较方便地实现流固耦合模拟, 也擅长描述自由面. Monaghan 等人<sup>[9]</sup>已经开展了用于发展 SPH 方法的理想化涌浪二维模拟研究, Capone<sup>[10]</sup>则开展了简单的三维滑坡涌浪 SPH 模拟, 滑坡体简化为直角三角楔形, 水库简化为水槽, 距离实际工程应用较远. Ataie-Ashtiani 和 Shobeyri<sup>[11]</sup>考虑了滑坡体变形, 将滑坡体简化为非牛顿流体, 虽能在一定程度上反映滑坡体入水变形, 但却难以真实刻画复杂的滑坡体力学特性, 目前仅用于研究二维简单情况. 用 SPH 方法研究实际涌浪问题需要巨大的计算量和鲁棒的复杂边界处理技术, 目前仅有 Vacondio 等人<sup>[12]</sup>开展了实际涌浪模拟, 但主要着眼于较特殊的 Vajont 水库涌浪翻坝过程, 对山区涌浪产生和传播过程特点讨论较少. 因此本文首先实现了可用于实际工程的基于 N-S 方程的涌浪三维 SPH 模拟方法, 进而研究了小湾荒田滑坡涌浪的产生过程, 在此基础上讨论了实际深 V 型河谷涌浪与现有模型的区别.

### 1 数学模型

描述流体运动的 N-S 方程可写成如下形式:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \boldsymbol{\Theta}, \tag{2}$$

其中  $\mathbf{v}$  为速度矢量,  $\rho$  为密度,  $P$  为压强,  $\mathbf{g}$  为重力加速度,  $\boldsymbol{\Theta}$  为黏性耗散项. Monaghan 给出了方程(1)和(2)的 SPH 离散形式<sup>[13]</sup>:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \nabla_a W_{ab}, \tag{3}$$

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = -\sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g}, \tag{4}$$

其中  $m_b$  和  $m_a$  分别为粒子 b 和粒子 a 的质量, 其他物理量的下标 a 和 b 亦分别对应于粒子 b 和粒子 a.  $\nabla_a W_{ab}$  是核函数的梯度函数. 本文中核函数选用较为常用的三次样条函数:

$$W(r, h) = \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3, & 0 \leq q \leq 1, \\ \frac{1}{4}(2-q)^3, & 1 \leq q \leq 2, \\ 0, & q \geq 2, \end{cases} \tag{5}$$

其中  $r$  为粒子 b 和粒子 a 的距离,  $h$  是光滑长度,  $q=r/h$ , 在三维情况下  $\alpha_D = 1/(\pi h^3)$ .

黏性项  $\Pi_{ab}$  用于表征黏性耗散项  $\boldsymbol{\Theta}$ , 其表达式采用了以下经验形式:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} -\frac{\alpha c_{ab} \mu_{ab}}{\rho_{ab}} & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0, \\ 0 & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} \geq 0, \end{cases} \tag{6}$$

以及

$$\mu_{ab} = \frac{h \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{r_{ab}^2 + \eta^2},$$

其中  $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$ ,  $\mathbf{v}_{ab} = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$ ,  $c_{ab} = (c_a + c_b)/2$ ,  $\eta^2 = 0.01h^2$ .  $\alpha$  为经验黏性系数, 根据文献和试算, 本文中取为 0.5.

本文使用弱可压假定确定压力

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right], \tag{7}$$

其中  $\gamma = 7$ ,  $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ ,  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_0$  为参照声速, 设置为 20 倍最大流速.

时间演进上本文采用经典的 Verlet<sup>[14]</sup>算法. 空间上将水体、边壁与滑坡体均离散成一系列粒子, 如图 1 所示. 边界处布置四层交错分布的虚粒子, 通过改变虚粒子属性施加动力学边界条件.

自由表面附近的粒子支持域截断问题难以用虚粒子解决, 故而本文采用密度修正方法加以处理:

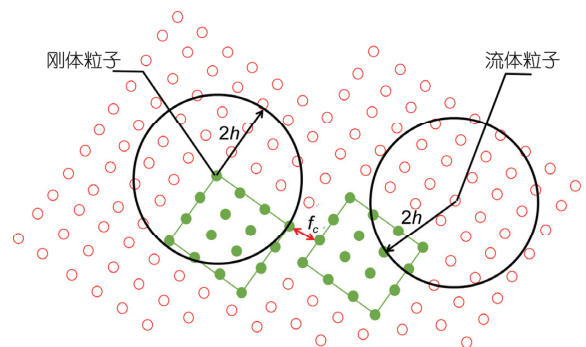


图 1 (网络版彩图) 粒子排布与流固耦合示意图  
Figure 1 (Color online) Schematic diagram of particles arrangement and interaction.

$$\rho_a^{\text{new}} = \sum_{b=1}^N m_b \frac{W_{ab}}{\sum_{b=1}^N W_{ab} \frac{m_b}{\rho_b}} \quad (8)$$

刚体、边壁粒子与流体粒子之间通过粒子信息映射技术构造完整支持域, 进而直接得到任意粒子间的作用力对, 实现了流体、刚体与边界三者之间的相互作用. 为简单起见, 本文滑坡体的粒子的速度和位置由给定的滑坡体运动方程得到.

## 2 模型验证

本文采用 Monaghan<sup>[15]</sup>的孤立波造波实验对模型进行验证. 实验中刚体在二维水槽一端垂直下滑, 将会产生孤立波并向水槽另一端传播.

图 2(a)中给出了静水深 0.21 m 时不同时刻拍摄到的流动图像. 图 2(b)是本文对应时刻的 SPH 模拟结果, 可以看到对流场中孤立波的形成、翻卷的形成与演化等特征的模拟结果与实验结果符合良好. 表 1 给出了实验观察的波幅(波峰距静水面距离)与模拟结

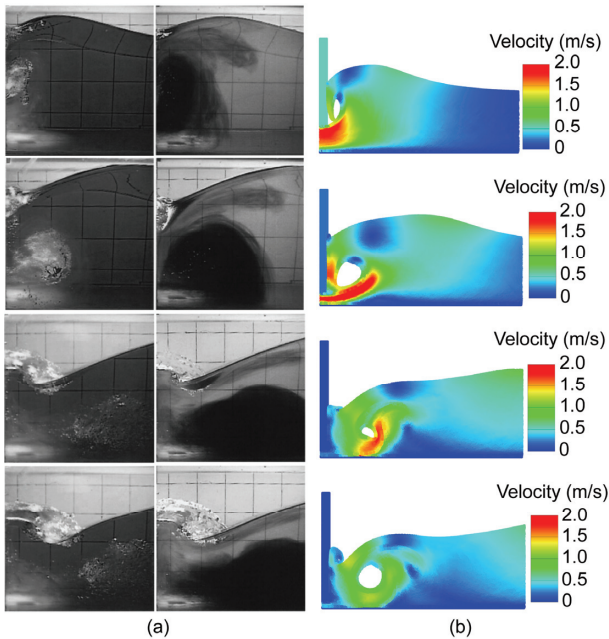


图 2 (网络版彩图)在 0.27, 0.42, 0.61, 0.70 s 时刻的流动图像对比. (a) Monaghan 实验照片, 左侧用荧光粒子突出界面, 右侧用染色剂突出轨迹; (b) 本文模拟结果

Figure 2 (Color online) Comparison of flow image at 0.27, 0.42, 0.61, and 0.70 s. (a) Monaghan's experiments, left pictures use small reflecting particles, right ones use dye; (b) simulated results.

表 1 模拟结果与 Monaghan 实验结果对照(单位: m)

Table 1 Comparison of the experimental and simulated wave amplitude (Unit:: m)

水深	波幅(实验)	波幅(模拟)
0.210	0.092±0.01	0.092
0.288	0.093±0.01	0.090

果的定量比较, 同时图 3 给出了刚体运动的实验与模拟结果定量对比, 表明本文方法是准确有效的.

## 3 在荒田滑坡中的应用

### 3.1 荒田滑坡简介

2009 年 7 月 20 日凌晨 3 时左右, 受到连日降雨影响, 位于小湾水电站上游约 7.5 km 的澜沧江右岸的荒田滑坡体突发滑坡, 入江山体约 100 多万方, 巨大冲击掀起 30 多米高的巨浪. 滑动后的荒田滑坡体宽约 500 余米, 高约 350 m, 总方量约 300 万立方<sup>[16]</sup>, 其形态变化如图 4 所示.

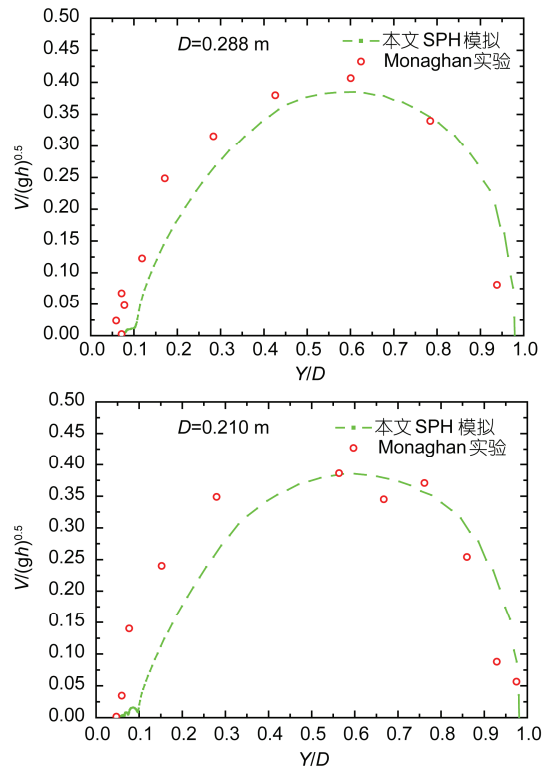


图 3 (网络版彩图)滑块运动的定量对比.  $D$ : 水深;  $V$ : 滑块速度;  $Y$ : 滑块底部距水槽底部距离

Figure 3 (Color online) Quantitative comparison of simulated and experimental box movement processes.  $D$ : water depth;  $V$ : box velocity;  $Y$ : gap size between box and wave tank bottom.

### 3.2 滑坡体和水库模型

本文使用滑坡发生前的局部详细地形图和ASTER v2提供的大范围地形图进行拼接,建立了荒田滑坡所在区域的数字高程模型,以荒田滑坡为中心选取了3 km×3 km的模拟计算区域,对水库边界、水体等直接据实建模,滑坡体作为刚体考虑,其上表面使用工程实测数据,下表面形状参考实际滑动形态简化为圆弧,滑坡体与水体直接传递作用力.对于滑坡体的运动,我们做了以下假定:

- (1) 滑坡体为刚体,上表面为真实地形,下表面为半径R的圆柱面的一部分;
- (2) 圆柱面轴线平行于滑坡体所在河道中轴线;
- (3) 滑坡体绕圆柱面轴线做旋转运动.

这样滑坡体的形状只受半径R的影响,其值可通过稳定性分析结果得到,本文中通过实测的滑动后滑体剖面形状反算得到.

通过网格无关性试算,确定整个三维区域共使用两亿多粒子离散,具体的粒子数分配如表2所示.计算中使用了基于CUDA的GPU加速技术,在一块NVIDIA Quadro® K6000显卡上完成一个算例大约花费1-2天.

### 3.3 滑坡体的运动

Vacondio 等人<sup>[12]</sup>发现滑坡体的运动可以近似



图4 (网络版彩图)荒田滑坡滑动前后. 图片来自谷歌地球. (a) 2009年3月20日; (b) 2012年6月7日  
Figure 4 (Color online) Images of Huangtian landslide before and after the event (from Google Earth). (a) 2009/3/20; (b) 2012/6/7.

表2 荒田算例模拟粒子数

类型	粒子数
水库岩壁	6196526
滑坡体	1339958
水体	13630916
总数	21167400

成沿圆弧面运动,而且速度变化可以近似成正弦形式:

$$v_s = v_{s-\text{Max}} \sin\left(\frac{\pi}{T_s} t\right), \quad (9)$$

其中 $v_{s-\text{Max}}$ 为最大滑动速度, $T_s$ 为整个滑动的时间,其形式为

$$T_s = \frac{R \cdot \Delta\alpha \cdot \pi}{2v_{s-\text{Max}}}. \quad (10)$$

滑块绕轴转动的角度 $\Delta\alpha$ 通过几何关系可以确定,最高滑速 $v_{s-\text{Max}}$ 选用美国土木工程师协会(ASCE)推荐的公式确定:

$$v_{s-\text{Max}} = \sqrt{1 - \frac{f}{\tan\alpha} - \frac{cl}{W \sin\alpha}} \sqrt{2gH}, \quad (11)$$

其中H是滑体质心落差, $\alpha$ 是滑面倾角,f和c是滑动时滑面抗剪强度参数,l是滑坡体的与滑面的接触长度,W是滑块体单宽重量.参考吴佳壕<sup>[17]</sup>给出的地质参数,方程(11)中各参数取值以及滑坡体最大滑速如表3所示.

### 3.4 模拟结果

基于荒田滑坡的实际条件,对涌浪产生的三维全过程进行了模拟,模拟得到涌浪最大浪高为33.6 m,与实际资料(30余米<sup>[17]</sup>)吻合.图5给出了不同滑动阶段水库中水波高程的演化过程,分别对应时刻0, 6.7, 7.8, 14, 19.5, 40 s;图6给出了典型时刻的水面速度幅值;图7则给出了典型时刻的中间剖面水体速度分布.

从图中可以看出,在滑坡启动后滑坡体前上方的水体首先被推动和抬升,形成涌浪的首浪向对岸以及河道上下游运动,而后在对岸爬升和消退,最终

表3 滑速计算参数取值

参数	取值
H (m)	39.8
$\alpha$	30°
R (m)	1330
l (m)	1089.8
$\Delta\alpha$	3.35°
W (10 <sup>9</sup> N/m)	1.545
f	tan21°
c (kPa)	15
T <sub>s</sub> (s)	7.8
v <sub>s-Max</sub> (m/s)	16

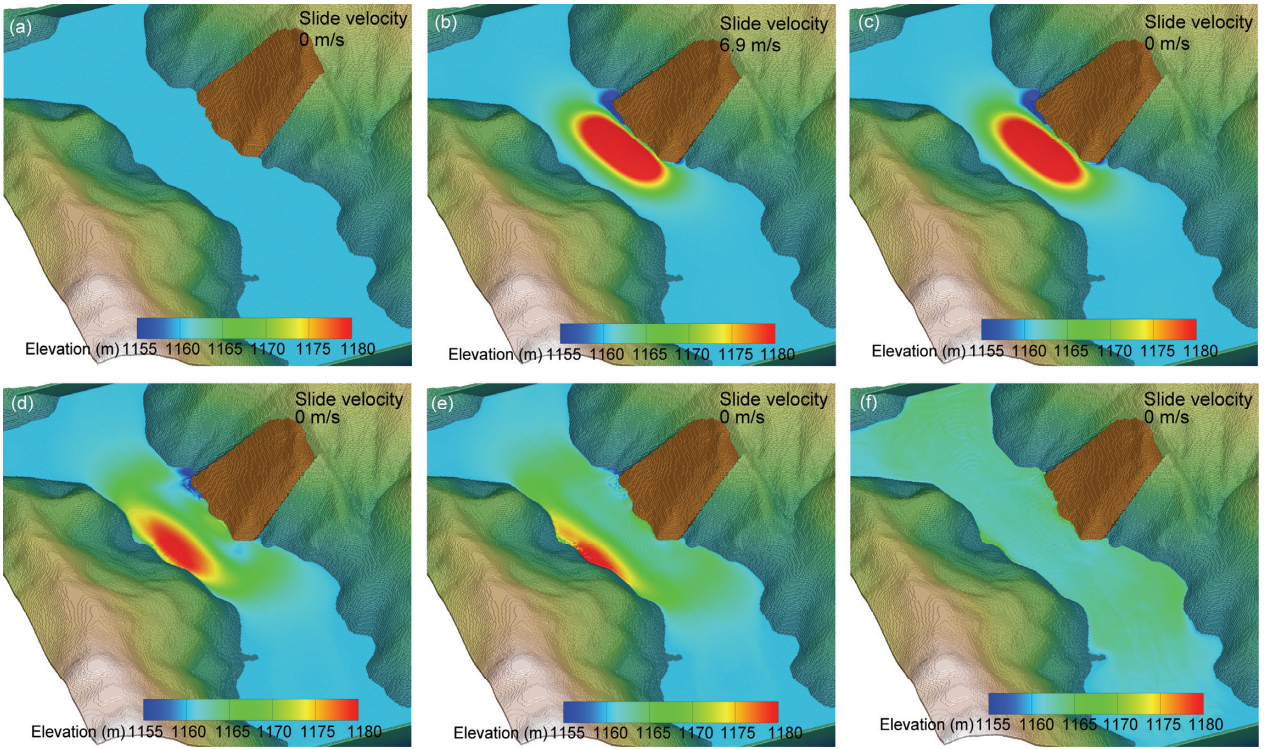


图5 (网络版彩图)水面高程演化过程. (a) 0 s; (b) 6.7 s; (c) 7.8 s; (d) 14 s; (e) 19.5 s; (f) 40 s

Figure 5 (Color online) Evolution of water elevation: from up left to down right corner. (a) 0 s; (b) 6.7 s; (c) 7.8 s; (d) 14 s; (e) 19.5 s; (f) 40 s.

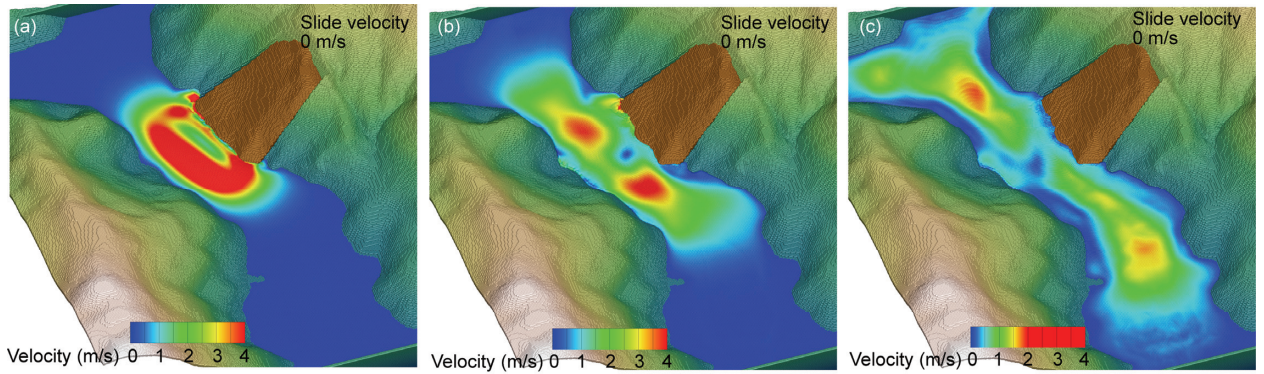


图6 (网络版彩图)涌浪过程中水面速度演化. (a) 6.7 s; (b) 19.5 s; (c) 40 s

Figure 6 (Color online) Velocity field evolution of the water surface. (a) 6.7 s; (b) 19.5 s; (c) 40 s.

形成沿河道传播的可传播涌浪. 具体的, 滑坡体加速下滑阶段涌浪不断变高, 在 6.7 s 时涌浪达到最高值 1193.6 m. 所产生的涌浪主体向对岸运动, 也有向上下游运动的部分; 到 7.8 s 时滑坡体停止运动, 涌浪继续向对岸运动, 涌浪前端的表面水体速度可达 7 m/s; 在 19.5 s 时攀升到最大值 1181.4 m. 攀升后的水体达到最高值后开始回落, 同时向上下游运动的涌

浪逐渐显著; 在 40 s 时可以看到, 已产生波幅有限的涌浪向上下游远处传播.

## 4 讨论

### 4.1 首浪的形成和演化

在 3 个典型区域(上游、滑坡体前方的产生区、下

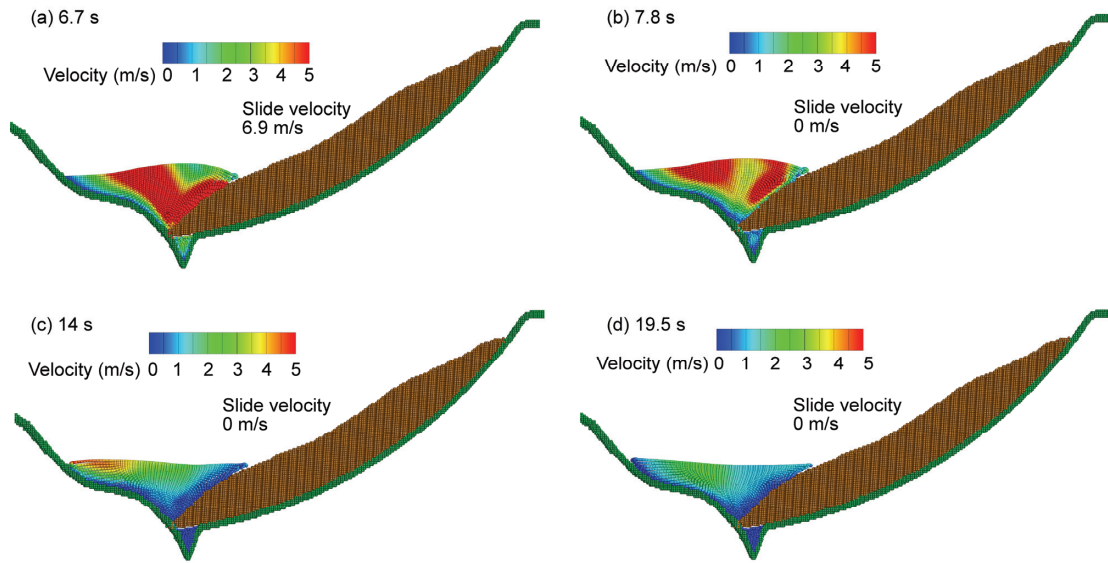


图 7 (网络版彩图)典型纵剖面的速度垂向分布  
 Figure 7 (Color online) Velocity magnitude on typical cross section.

游)的河道中间位置选取多个观测点, 统计其水面高程随时间的变化, 其中上游取 6 个观测点(S1-S6), 产生区取 5 个观测点(C1-C5), 下游取 6 个观测点(X1-X6). 各部分观测点按位置编号, 如图 8 所示, 17 个观测点相邻点之间距离约为 230 m.

在这些测点处的水面高程数据可以描述涌浪的产生、演化和传播过程. 从图 9 中可以看出, 产生区各观测点曲线形态基本相同, C3 和 C4 点高程最大,

浪高最大可达 33.6 m, 对比图 5(b)可以看出这正是滑坡体冲击入水后产生的第一个涌浪, 即传统意义上的首浪. 同时上游 S1 点和下游 X1 点均有时刻较近的涌浪峰值, 但最大浪高仅有 13 和 17 m, 这反映了近场区冲击方向与侧方向涌浪的显著差别. 随着首浪在对岸的爬升和回落, 产生区各点、S1 点和 X1 点均显示出一个规模远小于首浪的次浪, 对上下游其他测点的影响较弱, 随后产生区逐渐平静.

容易看出, S1 点和 X1 点作为上下游区与产生区的过渡分界, 其涌浪高度受滑坡体入水影响较大, 也是涌浪表现出二维特性、开始向上下游传播的起始. 而 S3 点和 X3 点可以作为可向外传播的涌浪参考初始点, 即在 S3 点到 X3 点河道区域可以作为涌浪的产生近场区, 近场区以外的河道可以作为涌浪的传播衰减区, 在传播区涌浪波速逐渐稳定.

整个近场区首浪的最高峰在产生区出现, 但可以看到此处首浪能量大量消耗于向对岸的爬升, 而不能全部向上下游传播. 事实上荒田滑坡涌浪的危害也主要是在对岸, 而距滑坡 9.5 km 的大坝附近实际测量到的涌浪只有约 2 m; 而瓦伊昂水库的涌浪事件中, 滑坡体距离坝体很近, 产生的涌浪直接漫过大坝, 冲毁下游村庄; 这反映了滑坡位置对涌浪破坏性的明显影响.

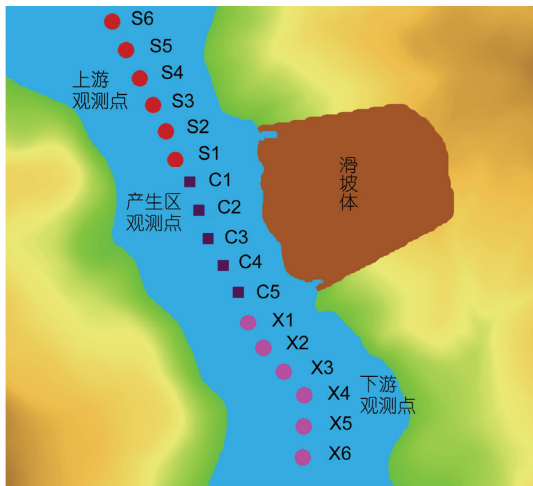


图 8 (网络版彩图)滑坡附近监测点的分布  
 Figure 8 (Color online) Distribution of monitoring points around the landslide.

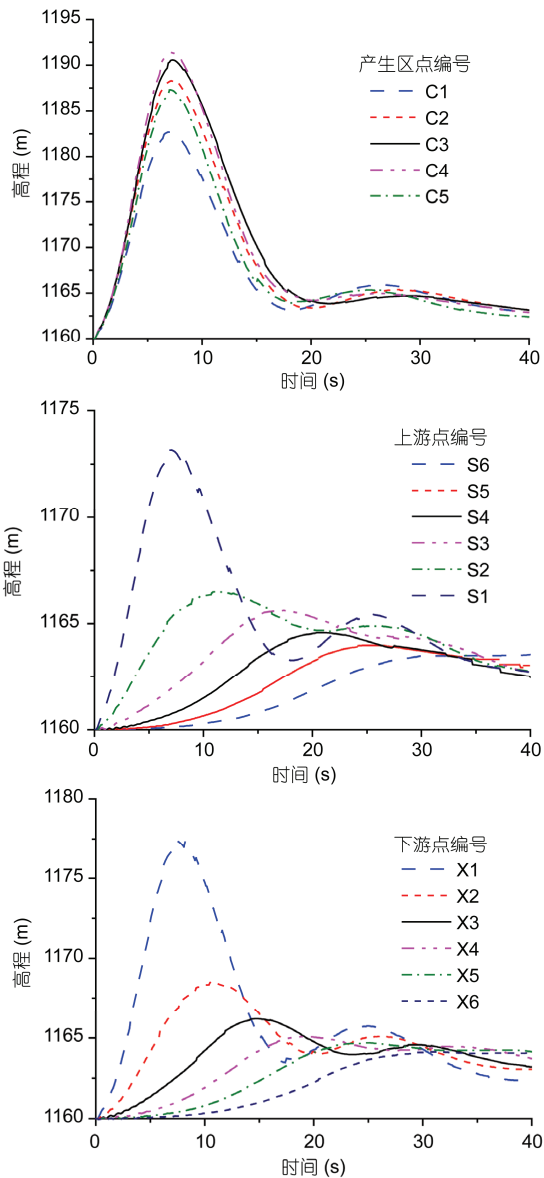


图 9 (网络版彩图)河道典型位置的水面高程变化  
Figure 9 (Color online) Wave evolution at selected monitoring points.

#### 4.2 深 V 河谷的涌浪特点

前人研究中常以二维(图 10(a))或半无限空间内的三维波浪(图 10(b))传播问题来简化涌浪产生和传播问题, 然而实际山区水库中深 V 河谷(图 10(c, d))更为常见. 本文中的荒田滑坡即是一个典型的深 V 河谷, 河道两岸距离较近, 滑坡涌浪的产生和传播相互影响, 受两岸约束明显. 滑坡体直接冲击产生的首浪达到最高值后就开始爬升, 涌浪并未充分发展成

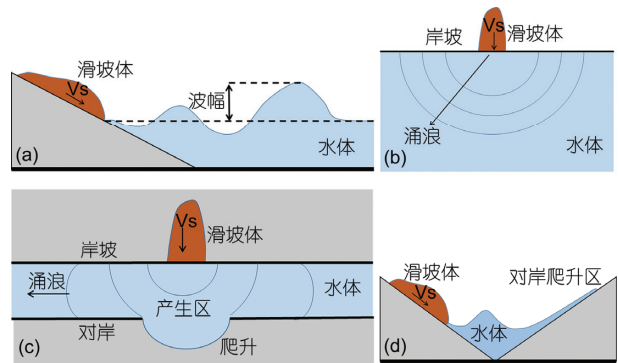


图 10 (网络版彩图)深 V 河谷与传统涌浪简化模型的差别. (a) 二维水槽; (b) 半无限空间水池; (c) 深 V(俯视图); (d) 深 V(侧视图)

Figure 10 (Color online) Difference between deep V channel and typical generalized models. (a) Two dimensional wave channel in (b) wave basin in infinite half-space; (c) deep V channel (top view); (d) deep V channel (side view).

稳定的波形, 涌浪形成过程和爬升过程间隔模糊, 表现出明显的三维特性. 而涌浪在深 V 型河道中的传播过程受两岸的限制而沿河道行进, 更多地表现出二维特征. 可以看出涌浪首浪的产生、爬升方向与涌浪在河道中的传播方向是相互垂直的, 表现出一定的准三维特征. 因此滑坡入水冲击所产生的直接涌浪远大于能够向上下游传播的实际可传播涌浪, 这意味着按照现有的常见方法中以入水最大涌浪为特征参数, 评估涌浪传播将会明显高估其影响.

而对于对岸爬升评估, 工程估算中常用的高田公式或《海港水文规范》方法, 均基于波浪理论. 但是在深 V 型河道中, 涌浪并未充分发展成较稳定的波形形态, 实际上并不适用. 而即使通过引入爬坡方位角修正(汪洋和殷坤龙<sup>[18]</sup>), 利用该公式所得荒田滑坡的爬高值为 38.4–44.3 m<sup>[17]</sup>, 亦高于实际调查结果. 而本文基于 N-S 方程的模拟避免了上述问题, 得到的爬升值为 21.4 m, 与实际观测到的数据(15–20 m)较为吻合. 可以看出, 对于深 V 河谷的涌浪传播和爬升问题, 基于 N-S 方程的模拟方法更为准确和有效.

#### 5 结论

本文利用基于 N-S 方程的 SPH 方法建立了能够模拟滑坡涌浪流-固耦合问题的模型, 并模拟了一个三维实际涌浪事件——荒田滑坡涌浪. 通过模拟和分析荒田滑坡涌浪产生和爬升过程, 发现:

(1) 本文所建立的基于 N-S 方程的流固耦合模拟方法能详细地模拟涌浪的产生和传播, 所得到的涌浪估计相比传统方法更接近实际, 且几乎无经验参数;

(2) 山区常见的深 V 型河谷涌浪问题特性与传

统方法所基于的概念模型有较大差别, 实际中涌浪的产生和传播不在一个方向, 能够向上下游传播的涌浪高度一般明显小于滑坡体冲击产生的首浪高度. 而对岸爬升过程也不宜借用波浪概念, 实际工程计算中应当考虑这一影响.

## 参考文献

- 1 Fritz H M, Mohammed F, Yoo J. Lituya Bay landslide impact generated mega-tsunami 50th anniversary. *Pure Appl Geophys*, 2009, 166: 153–175
- 2 Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Landslide generated impulse waves. *Exp Fluid*, 2003, 35: 505–519
- 3 Walder J S, Watts P, Sorensen O E. Tsunamis generated by subaerial mass flows. *J Geophys Res*, 2003, 108, doi: 10.1029/2001JB000707
- 4 Heller V, Hager W H. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves. *J Waterw Port Coast Ocean Eng*, 2010, 136: 145–155
- 5 Risio M D, Bellotti G, Panizzo A, et al. Three-dimensional experiments on landslide generated waves at a sloping coast. *Coast Eng*, 2009, 56: 659–671
- 6 代云霞. 库岸滑坡涌浪计算方法及物理模拟试验研究. 硕士学位论文. 武汉: 中国地质大学, 2010. 97
- 7 Jiang Z B, Jin F, Sheng J. Numerical simulations of water waves due to landslides (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2005, 22: 1–3 [姜治兵, 金峰. 滑坡涌浪的数值模拟. 长江科学院院报, 2005, 22: 1–3]
- 8 Ren K J, Jin F, Xu Q Q. Vertical two-dimensional numerical simulation for landslide-generated waves (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2006, 23: 1–4 [任坤杰, 金峰, 徐勤勤. 滑坡涌浪垂面二维数值模拟. 长江科学院院报, 2006, 23: 1–4]
- 9 Monaghan J J, Kos A, Issa N. Fluid motion generated by impact. *J Waterw Port Coast Ocean Eng*, 2003, 129: 250–259
- 10 Capone T. SPH Numerical Modelling of Impulse Water Waves Generated by Landslides. Dissertation for Doctoral degree. Rome: Sapienza University of Rome, 2009
- 11 Ataie-Ashtiani B, Shobeyri G. Numerical simulation of landslide impulsive waves by incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics. *Int J Numer Meth Fluids*, 2008, 56: 209–232
- 12 Vacondio R, Mignosa P, Pagani S. 3D SPH numerical simulation of the wave generated by the Vajont rockslide. *Adv Water Resour*, 2013, 59: 146–156
- 13 Monaghan J J. Simulating free surface flows with SPH. *J Comput Phys*, 1994, 110: 399–406
- 14 Verlet L. Computer experiments on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules. *Phys Rev*, 1967, 159: 98–103
- 15 Monaghan J J. Scott Russell's wave generator. *Phys Fluids*, 2000, 12: 622–630
- 16 陈聪. 高山峡谷水库大型堆积体岸坡失稳机理分析及稳定性评价. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2011. 107
- 17 吴佳壕. 山区河道型水库库岸坡涌浪灾害研究与预测. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2011. 89
- 18 Wang Y, Yin K L. Research on propagate and climb height of surge triggered by landslide in reservoir (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2008, 29: 1031–1034 [汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡涌浪的传播与爬高研究. 岩土力学, 2008, 29: 1031–1034]



# A SPH based numerical method of landslide induced impulse wave and its application on Huangtian landslide event

SHI ChuanQi<sup>1</sup>, AN Yi<sup>1\*</sup> & YANG JiaXiu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

<sup>2</sup> *Guiyang Engineering Corporation, Power Construction Corporation of China, Guiyang 550081, China*

Landslide induced impulse wave, which is the result of high speed impact of sliding mass into water, is a serious subsequent geological hazards. Its key features are the coupling effects between water and landslide mass during the impact process and the subsequent nonlinear wave evolution in complex boundaries. Classical numerical models, e.g. shallow water equation based models, would encounter many difficulties when dealing with these features. This paper employed the Smoothed Particle Hydrodynamics method to simulate the initial stage of the landslide induced wave by solving the Navier-Stokes equation, which avoids the most of those difficulties. The slide mass is considered as rigid body while the interaction between it and the water is calculated directly. Monaghan's experimental data are used to validate this model and a good agreement is observed. Then the model is used to study the initial wave and evolution in Huangtian landslide event. The complete three-dimensional evolution of the wave initial stage is obtained and the simulated initial wave height is close to the observed record. Analysis of detailed near field wave characteristics shows that: the generalized near field zone could be divided into three subzones: the impact zone, the evolution zone and the propagating zone; the formation and magnitude of the initial wave are strongly constrained by topography in the deep V channel of mountain reservoirs. The namely initial wave will propagate along the impact direction and consume its energy on the opposite shore, while the energy of the waves which propagate along the river is much smaller. Thus, the amplitude of the near field waves which propagate along the river should be used to estimate the far field wave height instead of the namely initial wave. The commonly used classical two-dimensional or infinite half-space model, which use namely initial wave height as the key factor, could result notable overestimation of the wave amplitude.

**landslide induced impulse wave, smoothed particle hydrodynamics, fluid-solid coupling, nonlinear wave, Huangtian landslide**

**PACS:** 47.11.+j, 47.35.+i, 47.60.+i, 47.85.Dh

**doi:** 10.1360/SSPMA2015-00280