

基于 DPM 模型的水上散粒体滑坡涌浪仿真分析

魏云鹏, 闫毅志, 张万举, 李梓萌, 王文雄, 刘波

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 针对工程地质中散粒体结构的滑坡, 本文以 EDEM-FLUENT 耦合方法和 DPM (Discrete Phase Model) 模型为基础, 采用 VOF 方法追踪自由液面, 模拟散粒体滑坡体沿斜坡运动所引起的涌浪产生及其传播过程。将数值计算结果与试验观测数据进行对比, 验证该数值模型的有效性, 并分析了 DPM 模型作用下滑坡体运动状态对涌浪生成和传播过程的影响。通过对数值仿真试验结果进行分析, 发现数值模拟结果与物理试验观测数据吻合较好, 这表明 DPM 模型能够准确模拟滑坡涌浪的产生与传播特性。

关键词: 散粒体滑坡; 滑坡涌浪; EDEM-FLUENT 耦合方法; DPM 模型

中图分类号: TV39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 03—0076—04

边坡失稳是一种广泛存在的地质灾害, 产生的滑坡灾害危害性和破坏性巨大。中国是一个滑坡灾害极为频繁的国家, 尤其是在我国的西南部地区, 存在着大量的成因复杂、规模大和危害性强等显著特点的大型滑坡。滑坡涌浪作为滑坡体入水后形成的次生灾害, 大型滑坡体高速入水激起巨大涌浪, 而且在河道上下游长距离内传播, 容易造成洪水、漫坝等更大的灾难, 会造成人员伤亡和财产损失。

最典型的滑坡涌浪灾害属 1958 年 07 月 09 日由 8.3 级地震诱发的美国阿拉斯加 Lituya 海湾滑坡, 体积约为 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的滑坡体以高速冲入水中, 产生 524 m 高的涌浪, 引发了有记录以来的最高涌浪, 巨浪冲高对沿途植被造成了严重的破坏和侵蚀。1963 年发生在意大利的瓦依昂水库滑坡, 高速入水的滑坡体产生的涌浪高达 175 m, 造成巨大的生命财产损失。我国地质灾害频发, 其中滑坡灾害是所有地质灾害中分布最广、危害最严重的一种。1985 年发生在长江西陵峡新滩北岸的滑坡, 大规模的滑坡体进入江中, 掀起高达数十米巨大涌浪, 造成大量船只被击毁, 死亡 9 人。2013 年云南永善县黄华镇黄坪村发生滑坡, 滑坡体积达到数十万立方米, 造成严重的生命和财产损失。

从以上国内外诸多的滑坡灾害例子中可以看出, 大规模滑坡体滑入河道, 激起的涌浪对航行的船只产生严重威胁, 同时堆积河床底部的滑坡体, 会阻塞河道, 形成堰塞湖; 发生在库区的大规模滑坡会引发巨大涌浪, 摧毁水工建筑物, 甚至会产生漫坝危及下游人民生命财产安全。为减少人员伤亡和财产损失, 对潜在滑坡进行

实时监控和预警, 有必要开展滑坡涌浪以及高速远程滑坡涌浪研究, 预测和评估灾害范围, 为滑坡涌浪灾害产生的实时预报和灾后紧要防范提供科学依据。

随着计算机技术的迅猛发展, 数值模拟方法成为研究滑坡涌浪问题的重要手段, 该方法具有全面、准确分析问题的优点, 以及处理滑坡涌浪研究中遇到的复杂耦合问题的优势。目前针对滑坡涌浪各个过程的数值模拟研究已经取得了较大的进展。现有的滑坡涌浪模型多将滑体简化为刚性块体从滑面滑入水中, 宋新远基于 Navier-Stokes 方程, 结合 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型并采用 VOF 法跟踪非线性自由表面流场模拟了涌浪的产生过程, 模拟结果与试验结果和实例观测结果吻合较好; 但是其假设滑坡体为固定形状的单一块体, 忽略了滑坡体在滑动过程中的变形对涌浪产生的影响。徐文杰以室内模型试验为基础采用 CEL 算法建立数值分析模型, 并与模型试验结果和 SPH 方法模拟结果进行了对比分析, 之后进一步研究了滑坡体形状、体积、滑面摩擦角等与涌浪的关系, 其研究也主要是针对单个块体滑坡, 并没有考虑散体滑坡。而自然界中的滑坡通常变形显著, 如果仅仅将滑坡体假定为刚性块体过于简单, 对涌浪的产生也有很大影响, 因此有必要在数值模型中考虑滑坡体的变形效应。

为了减小将滑体简化为刚性块体带来的误差, 更好地描述滑坡体运动规律及其产生涌浪运动特征。本文针对水上散粒体滑坡, 采用 EDEM-FLUENT 耦合方法, 结合 DPM 模型对散粒体滑坡产生的滑坡涌浪特征进行研究。主要考虑离散体和水体之间相互作用的情况下,

通过物理实验验证耦合算法的有效性,并对涌浪的产生和传播特性进行了数值研究。

1 控制方程

本文数值模拟计算中,采用基于欧拉-拉格朗日框架下的 DPM 方法对水上散粒体滑坡涌浪进行研究。在 DPM 模型中,水和空气为连续相,采用 Navier-Stokes 方程描述,并采用 VOF 方法对自由液面进行追踪。曳力是固体颗粒在流场中运动时受到的主要作用力,本文选用 Morsi 等提出的 Spherical 曳力模型。

1.1 连续相控制方程

根据质量守恒定律推导出流动控制方程,即连续方程

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{U}^f) = 0 \quad (1)$$

式中: ∇ 为拉普拉斯算子。

根据牛顿第二定律推导出流体动量方程,控制方程中的流体速度、压力和密度,为每个体积单元内的平均状态变量。动量方程表达式:

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho \mathbf{U}^f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{U}^f \mathbf{U}^f) - \varepsilon \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}^f) = -\nabla p - \mathbf{f}^p + \varepsilon \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}^s \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U}^f$ 为流体单元的平均速度; $\mathbf{f}^p$ 为单元控制体内流体与颗粒之间的相互作用力。

由于滑坡体下滑引起河道、水库等水的运动是湍流运动,本文选取雷诺平均 NS 模型 (RANS) 方法中的 RNG k- ε 模型。

1.2 颗粒离散元控制方程

本文在颗粒接触力和体积力的基础上,还引入了流体和颗粒相互作用力。颗粒 i 的运动控制方程如下:

$$m_i \frac{d\mathbf{U}_i^p}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i^c} \mathbf{F}_{ij}^c + \mathbf{F}_i^f + \mathbf{F}_i^g \quad (3)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i^c} \mathbf{M}_{ij} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{U}_i^p$ 为颗粒 i 的平移线速度; $\mathbf{F}_{ij}^c$ 为作用在颗粒 i 上的接触力; $\mathbf{F}_i^f$ 为颗粒 i 所受的流体作用力; $\mathbf{F}_i^g$ 为颗粒 i 所受的重力; I_i 为颗粒 i 的转动惯量,其值可以通过其他变量确定; ω_i 为颗粒 i 的转动角速度; m_i 为颗粒 i 受到颗粒 (或墙体) j 的转动力矩; n_i^c 为颗粒 i 总的接触数。对于颗粒间接触作用,本文采用 Hertz-Mindlin 非线性接触模型。

1.3 EDEM-FLUENT 耦合方法

流体相和颗粒相间的相互作用力包括拖曳力、压

差力、浮力和虚质量力等。根据研究需要,本文仅考虑了浮力 $\mathbf{F}_b$ 和拖曳力 $\mathbf{F}_d$:

$$\mathbf{F}_d(u - u_p) = \frac{\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{18 C_D R_e}{24} (u - u_p) \quad (5)$$

$$\mathbf{F}^f = \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_d \quad (6)$$

式中: d_p 为颗粒直径; C_D 为曳力系数。

将计算离散相的 EDEM 软件和计算流体相的 FLUENT 软件耦合起来。在求解耦合系统时,在一些初始条件和增量荷载下, EDEM 软件首先求解粒子系统,然后计算合力。然后将相互作用力传递到流体系统中,通过 FLUENT 求解流体系统。当流体的所有状态变量都得到求解后,这些相互作用力就会更新并传回到 EDEM 中,以求解下一时间步的粒子系统。

2 算例验证

2.1 模型设置

本文主要对水上滑坡涌浪进行验证,采用 Viroulet 等的水上散粒体滑坡涌浪物理试验来进行数值仿真研究。初始模型如图 1 所示,图中水深为 0.15 m,滑坡斜面与水平面夹角为 45°,实验中通过布置的 4 个波高仪来记录产生的涌浪。滑坡体的截面为图中 0.14 m × 0.14 m 的三角形,初始 $t = 0$ 时刻滑坡体刚好位于自由水面之上,滑坡体的前缘速度为零,启动后滑坡体从静止开始沿斜面往下滑。物理试验中初始时刻通过挡板维持滑坡体稳定,抽去挡板后滑坡体沿着倾角 45° 的斜面下滑产生涌浪 (本文所采用的滑坡体颗粒参数源于谭海)。

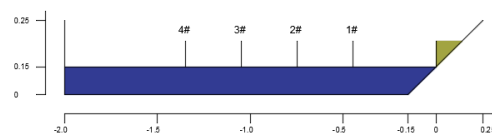


图 1 初始模型

2.2 边界条件

模型上方上部为压力出口 (pressout) 边界条件,模型底部和两侧壁以及滑体四周设置为固壁边界条件,固壁边界为无滑移条件,近壁区处理采用标准壁面函数法。

2.3 试验结果分析

规定 $t = 0$ s 时滑坡体开始运动且前缘到达自由水面,图 2 中 (a)、(b)、(c) 情况中上图为 Viroulet 等的试验结果,中间图为 Si 等的试验结果,下图为本文

DPM 模型数值仿真结果,散粒体滑坡在下滑的过程中伴随着显著变形,在水体的拖曳力作用下,滑坡体前缘逐渐变厚,呈球形鼓泡状。并且滑坡体入水后以较大的速度沿斜坡运动到水槽底部,并继续向前运动,最终静止堆积在水槽底部。进一步对比滑体的水平运动距离可知,本文的仿真试验结果中滑坡体向前滑移的距离与前两者试验结果基本吻合。

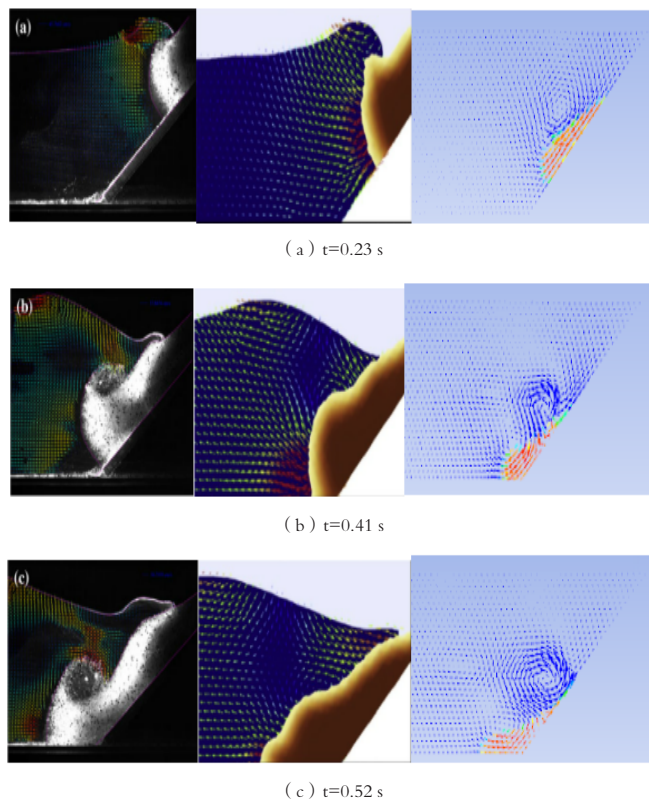
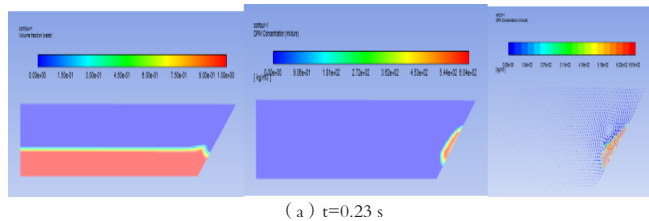
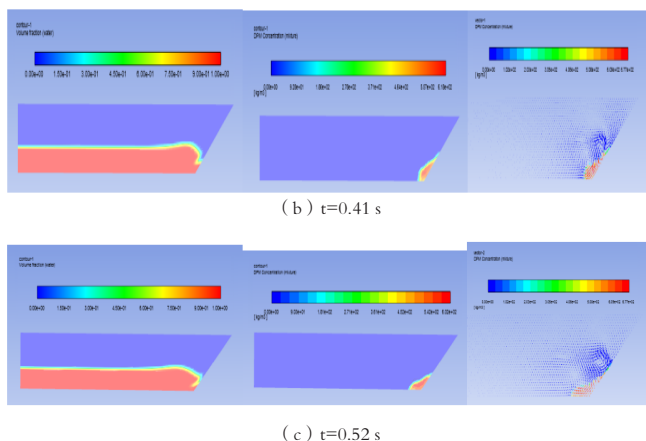


图2 涌浪产生区域的滑坡体堆积形态对比

图3所示为涌浪产生区域流体相体积分数云图、滑坡体的速度云图以及周围水体的速度矢量图。从流体相体积分数云图可知,滑坡体下滑时周围的水体被排开,导致水面抬升形成涌浪,并且随着时间推移近场形成的涌浪将逐渐向外传播。从滑坡体速度云图可知,滑坡体沿斜面下滑时周围水体获得较大的速度,使得在滑坡体周围产生顺时针涡流,这是因为在相互作用的过程中能量从滑坡体传递至了库水中,引起周围水体的速度变化;随着滑坡体停止运动后,周围水体的速度开始逐渐变小,表明滑坡体运动对其周围水体的速度有很大影响。



(a) $t=0.23\text{ s}$



(b) $t=0.41\text{ s}$

(c) $t=0.52\text{ s}$

图3 涌浪产生区域滑坡体的速度云图以及周围水体的速度矢量图

3 结论

(1) 通过 DPM 模型可直观地看到滑坡体的变形和颗粒的运动轨迹,对比刚性滑坡体在下滑的过程中不发生变形,本文数值试验中滑坡体在下滑过程中运动形态与原物理试验保持一致。

(2) 与刚体滑块滑坡体运动到水槽底部转角处停止运动不同,可变形散粒体滑坡在运动至转角处后还会沿着水槽底部继续向前运动,但由于受到水体拖曳力等阻力作用滑坡体开始减速变慢,最终静止堆积在斜面和水槽底部的转角处。

(3) 可变散粒体形滑坡体下滑过程中由于内部颗粒的摩擦和碰撞,一部分能量耗散在滑坡体内部的变形中,导致只有较少的能量从可变形滑坡体传递至库水中。因此,可变形滑坡涌浪自由水面的变形没有相应的刚体滑坡涌浪的剧烈。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007(03):433-454.
- [2] Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Lituya Bay case: Rockslide impact and wave run-up[J]. Journal of Tsunami Hazards, 2001, 19(1):3-19.
- [3] 钟立勋. 意大利扎依昂水库滑坡事件的启示 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993, 5(2): 77. 84.
- [4] 刘世凯. 长江西陵峡新滩滑坡涌浪高度衰减因素初探 [J]. 水利水电技术, 1987(09):11-14.
- [5] 蒋权, 陈希良, 肖江剑, 邱向东, 李攀峰. 云南黄坪库区滑坡运动及其失稳模式的离散元模拟 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(03):53-59.
- [6] 宋新远. 大型滑坡灾害数值模拟研究 [D]. 上海交通大学

探索西江“龙圩水道” 水下延时爆破降低震动传播速度参数选取

张利洪

(长江重庆航道工程局 重庆 400100)

摘要:为解决西江“龙圩水道”水下爆破整治工程临近高楼居民对震感的特殊要求,探索将爆破震动传播速度降低到了 0.5m/s 以下延时爆破参数选取。通过监测验证达到要求。

关键词:降低震动传播速度;延时爆破;爆破参数;监测验证

中图分类号: U615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 03—0079—05

“黄金水道”西江“龙圩水道”水下延时爆破整治工程临近梧州主城区。岸边高楼及建筑物比较复杂,对爆破震动及空气冲击波要求高。震动传播速度超过 0.5m/s 时,居民楼 15 层以上人为感觉震动比较强烈。探索水下延时爆破降低震动传播速度参数选取。

“延时爆破”技术具有爆破震动小,空气冲击波及飞石危害小,爆堆“大块率”和能耗均低,能够提高炸药利用率等特点。“水下爆破”技术采用“簇联”起爆网路。

1 工程概况

1.1 工程周边建筑物情况

西江航运干线贵港至梧州 3000 吨级航道工程“龙圩水道”位于梧州主城区,南岸楼房比较多。南北两岸

已建防洪堤,岸坡较为稳定。经卫星地图实测,南岸防洪堤最近距离约 110m。爆区最近点距“江南明珠”小区 256m,距“龙翔百汇”小区 244m,距“水岸名都”小区 190m。爆区周边建筑物如下图:



图 1 工程爆破周边建筑物图

学,2009.

[7] 徐文杰. 基于 CEL 算法的滑坡涌浪研究 [J]. 工程地质学报,2012,20(03):350-354.

[8] 徐文杰. 滑坡涌浪影响因素研究 [J]. 工程地质学报,2012,20(04):491-507.

[9] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55.

[10] H.P. Zhu,Z.Y. Zhou,R.Y. Yang,A.B. Yu. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments[J]. Chemical Engineering Science,2006,62(13).

[11] S. Viroulet,A. Sauret,O. Kimmoun,C. Kharif. Granular

collapse into water: toward tsunami landslides[J]. Journal of Visualization,2013,16(3):

[12] 谭海. 基于无网格方法的滑坡及滑坡涌浪研究 [D]. 武汉大学,2019.

[13] Pengfei Si,Huabin Shi,Xiping Yu. A general numerical model for surface waves generated by granular material intruding into a water body[J]. Coastal Engineering,2018,142: