库岸滑坡涌浪二维光滑粒子动力学数值模拟

缪吉伦[1,2]，陈景秋[1]，张永祥[1]，黄成林[2]

(1. 重庆大学 资源与环境学院，重庆 400015；2. 重庆交通大学 西南水运工程研究所，重庆 400016)

摘　要：库岸高速滑坡产生的巨大涌浪常常导致严重灾难。建立了高速滑坡块体运动全程预测模型，对滑坡冲击产生的水体运动，则根据可压缩流连续方程和 Navier—Stokes 方程由 SPH 法(光滑粒子动力学法)求解。对 SPH 法的基本原理、核函数及控制方程离散格式、边界处理方法等进行了介绍。在此基础上结合滑坡体及水体的运动变形，建立了涌浪 SPH 立面二维数值模型，将所得初始涌浪高度、波浪爬坡高度与其他理论方法得到的结果进行了比较。结果表明该方法能够模拟滑坡涌浪运动过程，SPH 法适于模拟具有瞬时大变形等物理力学问题。

关键词：高速滑坡；涌浪；光滑离子流体动力学；无网格法；数值模拟

文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2013)03-0175-05　　**中图分类号**：TV 145

Numerical Simulation of Impulsive Wave Generated by Landslide on Reservoir Bank Using Two-dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics Method

MIAO Ji-lun[1,2], CHEN Jing-qiu[1], ZHANG Yong-xiang[1], HUANG Cheng-lin[2]

(1. *College of Resources & Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing* 400015, *China*;
2. *Southwest Institute of Waterway Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400016, *China*)

Abstract: Impulsive wave generated by high-speed landslide on reservoir bank often result in serious disasters. At first, a sliding block model is developed for predicting the movement of high-speed landslide, while the fluid movement is solved by SPH(smoothed particle hydrodynamics) method in accordance with the incompressible continuity equation and Navier—Stokes equation. Then the basic principle, kernel function, discretization scheme and boundary treatments are introduced. Coupled with landslide and fluid movement, the SPH model is developed to simulate impulse wave. The initial impulsive wave height and climbing height are compared with those by other methods. Results show that the model can simulate the movement of waves generated by high-speed landslide, and the SPH method can well simulate the mechanics problems with instantly large deformation.

Keywords: high-speed landslide; impulsive wave; smoothed particle hydrodynamics; meshfree method; numerical simulation

降雨、地震及水库蓄水等常诱发河岸高速滑坡，这种滑坡具有突发性、瞬时性等特点。大型滑坡体不但堵塞河流，阻断航道，对水体的猛烈冲击还会引起水体的剧烈变化，破坏沿岸建筑物，产生巨大的涌浪使得船翻人亡，更严重的是随着涌浪的传播和叠加，会造成溃坝等重大事故。如我国湖南省柘溪水库库岸滑坡、长江新滩滑坡及著名的意大利瓦依昂水库滑坡产生的涌浪造成了灾难性的损失。因此研究滑坡在运动过程中的变化规律和涌浪的传播过程，对于滑坡涌浪的预报、边坡加固设计与防范工程的实施、水库运行决策等，具有十分重要的现实意义。

许多水利工作者致力于滑坡涌浪预测研究。目前滑坡涌浪的研究手段主要采用物理模型和数值模拟方法。Monaghan 等[1]研究了矩形块体沿弧形坡面下滑撞击入水的过程，进行了刚体与水相互冲击的室内试验和数值模拟。2006 年 Oger 等[2]进行了不同楔形体滑入水体的试验。Iwasaki[3]在固定水深的渠道中对滑坡的水平运动进行了试验研究；余仁福等[4]对龙羊峡水库近坝段进行了滑坡涌浪模型试验。在水流数值模拟方面，Navier—Stokes 方程可以用

收稿日期：2012-06-26　　修回日期：2012-07-10

资助项目：国家自然科学基金资助项目“基于灾变链式理论的多种灾害演化规律探索”(50879097)；教育部博士点专项基金资助项目“滑坡涌浪二维问题的时空守恒元和解元数值解法”(2011019111036)；中央高校基本科研业务费“多因素、高精度滑坡涌浪的数学模型研究及其应用”(CDJZR12240070)

作者简介：缪吉伦(1971—)，男(汉族)，四川省阆中市人，博士生，副研究员，主要从事水利水运工程研究。E-mail：jimcqcu@163.com。

Eulerian 固定网格法求解。如宋新远等[5] 基于 FLUENT软件,结合 RNG 湍流模型并采用 VOF 方法,模拟了二维滑坡涌浪。袁晶等[6] 采用动网格技术,建立了可变网格下的平面二维水库滑坡涌浪 FVM 数学模型。模型试验需要的时间长费用高,而基于网格的方法一般将水体假设为连续介质,即认为水是由"流体质点"连续地无空隙地组成。它们在模拟浪花飞溅、高速冲击(HVI)等大变形问题时,面临网格反复再分等复杂处理过程,计算过程中往往因网格过度畸变导致计算失败而使模拟无法完成。

SPH 法(光滑粒子动力学法)作为无网格法,将流体看成由许多有一定间距的散点粒子组成,每个粒子均具有密度和压力等参量。在求解水流运动 N—S 方程时,不需生成网格,避免了大量的单元划分,克服了有限元方法等局部近似引起的误差,尤其适合于模拟流体飞溅、涌浪等瞬时大变形问题。本文将应用这种新的无网格 SPH 法,结合滑坡体块体运动模型模拟在滑坡体冲击下水流的运动及生成的涌浪问题。

1 滑坡体运动模型

1.1 块体模型的建立

滑坡涌浪模拟包括滑坡体(固相)与水体(液相)的运动及其相互作用。首先必须确定滑坡体的运动规律(即固相部分)。目前应用于滑动大变形的分析方法主要有离散单元法和流形元法。如程谦恭等[7] 利用离散元对大板桥滑坡的整个过程进行了模拟,Hatzor 等[8] 和 Sitar 等[9] 分别利用 DDA 进行了二维动态滑坡稳定分析。裴觉民等[10] 利用流形元法对岩石边坡进行了动态稳定分析等。

这些方法参数要求多,计算复杂,耗用机时长。本文采用条分法的基本思想,建立滑坡块体运动简化模型,为了简化起见,认为滑坡运动是一种连续的块体运动,这使得模拟的时间大大缩短。已有研究证明该模型可行[11-13]。

将滑坡体沿滑动面划分成垂直的 N 个条柱体。对任一滑坡条柱体,假定滑动速度及加速度与滑动面平行。条柱体沿滑动面作刚体运动,即条柱体在运动过程中不发生变形。根据牛顿第二定律,条柱体的运动可以写成如下形式:

垂直于滑动面方向 $\sum F_y=0$,即

$$W_i\cos\alpha-(U_{i+1}-U_i)\sin\alpha_i-U_{bi}-N_i=0 \tag{1}$$

平行于滑动面方向 $\sum F_x=0$,即

$$W_i\sin\alpha_i+\Delta T_i-(U_{i+1}-U_i)\cos\alpha_i-(c_iL_i+N_i\mathrm{tg}\varphi_i)=M_ia_i \tag{2}$$

式中:$\triangle T_i$——土体间作用力的差值(kN);c_i——有效黏聚力(kPa);L_i——条柱体 i 底部沿滑动面的长度(m);N_i——竖向反力(kN);U_i——浮托力(kN);U_{bi}——孔隙水压力(kN);φ_i——块体与滑动面之间的动摩擦角(°),与土体内摩擦角有关;α_i——条柱体 i 底面与水平面的夹角(°);M_i,W_i——块体的质量(kg)及重量(kN);a_i——条柱体的加速度(m/s^2)。

将每个条柱体视为具有一定质量的刚体,即块体间的垂直力可以忽略,在某时刻各块体加速度大小相等。由动力平衡条件知块体间的合力为 0,由方程(1),(2)可得到条块在某时刻的加速度 $a_i=a$,进而求得速度及位移。当速度为 0 时滑坡体即停止运动。

1.2 水下受力

当滑坡体在水下运动时,受到 2 种流体力的作用,其一是水体阻力作用,其值为(1/2)M,无论流体有无黏性均存在;另一力为表面摩擦阻力 f,其大小为:

$$f=(1/2)c_d\rho_sv^2S \tag{3}$$

式中:M——滑坡体质量(kg);v——滑坡体运动速度(m/s);t——时间(s);c_d——黏性阻力系数($c_d=0.15\sim0.18$);ρ_s——岩土体的浮密度(kg/m^3);S——迎水面的表面积(m^2)。

2 二维涌浪 SPH 数值方法

2.1 SPH 法的基本思想

SPH 法将描述场的函数用"核函数逼近"近似,整个流场被离散成一系列"粒子",所有力学量由这些"粒子"负载。每个粒子的物理量由周围粒子的属性表达。场中的任一宏观变量 $f(x)$ 都能借助于一组无序点上的值表示成积分插值计算得到[14]:

$$<f(x)>=\int_D f(x')W(x-x',h)\mathrm{d}x' \tag{4}$$

式中:D——整个求解区域;$f(x')$——预先设置点的宏观变量值;$W(x-x',h)$ 称为核函数,它有 2 个自变量:粒子间距离 $|x-x'|$ 和光滑长度 h。任一点 i 的函数值可表示为 SPH 的离散形式:

$$<f(x_i)>=\sum_{j=1}^{N}m_j\frac{f(x_j)}{\rho_j}W(x-x_j,h) \tag{5}$$

式中:N——支持域内相邻粒子个数;m_j,ρ_j——分别为粒子 j 的质量和密度。

2.2 Navier—Stokes 控制方程及 SPH 离散

水流运动可用 N—S 方程求解。拉格朗日型的控制方程[15-16] 为连续方程:

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}=-\rho\nabla\cdot\vec{v} \tag{6}$$

动量方程:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{\rho}\nabla p+\vec{g}+v_0\nabla^2\vec{v} \tag{7}$$

式中:ρ——流体粒子密度,初始密度为 1.0×10^3 kg/m^3;t——时间(s);$\vec{v}$——粒子运动速度(m/s);P——压力(Pa);$\vec{g}$——重力加速度(9.81 m/s^2);v_0——水的运动黏性系数(10^{-6} m^2/s)。

根据式(5)可得出控制方程的 SPH 离散格式为:

$$\frac{\mathrm{d}\rho_i}{\mathrm{d}t}=\rho_i\sum_{j=1}^{N}v_{ij}\frac{m_j}{\rho_j}\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \tag{8}$$

$$\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t}=-\sum_{j=1}^{N}m_j\left(\frac{p_i}{\rho_i^2}+\frac{p_j}{\rho_j^2}+\Pi_{ij}\right)\frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i}+\vec{g} \tag{9}$$

Π为黏性项,本文采用 Morris 等[17]提出的公式:

$$\Pi_{ij}=\frac{4v_0\vec{r}_{ij}v_{ij}}{(\rho_i+\rho_j)\vec{v}_{ij}^2} \tag{10}$$

式中:v_{ij}——粒子 i,j 的速度差值,$v_{ij}=v_i-v_j$;r_{ij}——两点距离矢量。

2.3　光滑核函数的选取

光滑核函数除满足狄拉克 δ 函数条件外,还应具有归一性、紧支性及单调非负性等性质。常用的核函数有 Gaussian 型,3 次样条核函数及更高次的 4 次、5 次样条核函数等。本文选取较简单的 quadratic 核函数模拟涌浪问题:

$$W(r,h)=\alpha_D\left(\frac{3}{16}q^2-\frac{3}{4}q+\frac{3}{4}\right)\quad(0\leqslant q\leqslant2) \tag{11}$$

式中:q——相对作用范围,$q=(x-x')/h$;α_D——归一化常数,对二维问题,$\alpha_D=2/(\pi h^2)$;本例中 $h=0.92\sqrt{\Delta x^2+\Delta z^2}=1.30$ m。

2.4　状态方程

通过引入人工压缩性,把一般的不可压缩流体看作可压缩流体,在水状态方程中引入压缩率可模拟具有自由表面的流动。这样不用求解压力泊松方程,编程简单。

$$\rho_0=B\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma}-1\right] \tag{12}$$

式中:ρ_0——粒子的初始密度(kg/m^3);γ——系数,对于水取 $\gamma=7$;B——用于限制密度的最大改变量,一般作为初始压力,本文取 $B=\frac{\rho_0C^2}{\gamma}$;$C$——人工音速(m/s),选取总体流动最大流速值的 10 倍作为人工音速值,即 $C=\sqrt{200gH}$;H——水面高度(m)。

粒子的位移变化为:$\frac{\mathrm{d}\vec{\gamma}}{\mathrm{d}t}=\vec{v}$ (13)

方程(8),(9),(12),(13)组成了基于 SPH 的离散化 N—S 方程组,加入定解条件就组成了完整的迭代方程组。

2.5　边界处理方法

入口边界、出口边界看成特殊自由边界处理。界面处粒子压力赋值为 0 或一定的外压力值。在 SPH 数值模拟中,将固壁边界离散成为“边界粒子”,固壁粒子参与控制方程计算,壁面采用滑移边界,但它们在模拟中位置固定,即设置位移为 0。当流体粒子距离固壁很近时,为阻止流体粒子穿越固壁边界而引起计算崩溃,边界粒子对靠近它的流体粒子施加一个大小适当的中心排斥力作用,且排斥力只在近距离上起作用。

2.6　数值解法

先通过连续方程计算粒子的密度变化,捕捉自由表面粒子并进行自由表面粒子的密度校正,然后通过状态方程计算粒子的压力,同时计算外力引起的加速度,再通过动量方程计算粒子总的加速度。采用迭代方法实现粒子密度、速度、位置的更新。粒子搜索采用关联链表搜索技术。

对离散的 SPH 方程组进行时间积分一般采用显式格式,如四阶 Runge—Kutta 法、标准蛙跳(Leap-frog)法等,还可用中心差分、Verlet 差分格式等。本文采用预测—校正方法。为保证解的收敛性,时间步长 Δt 应满足 CFL 条件。

3　算例模拟

某滑坡断面如图 1 所示。滑坡体断面积约 1.82×10^2 m^2,最大厚度约 10 m,土体容重 $\rho=20.0$ kN/m^3。滑坡体运动数值模拟用前面提到的块体模型。根据其地形地貌及地质条件将滑坡体沿滑动面从顶部到底部划分为 15 个条柱体。滑带土体参数通过室内物理力学实验和参数反演分析综合确定为:内摩擦角 $\varphi=30°$,黏聚力 $c=9$ kPa。

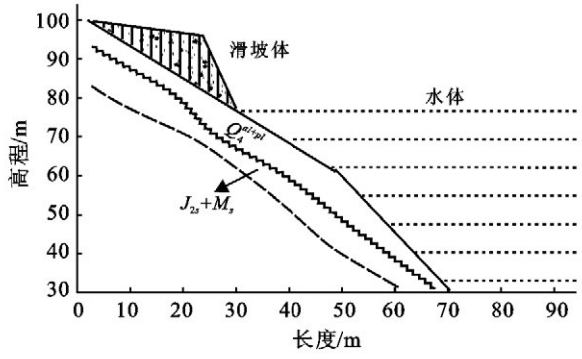


图 1　滑坡体地质剖面形态示意图

在 SPH 模型中,水体被分成许多具有质量属性的粒子,岸坡视为固定不动的粒子。当滑坡体在水下运动时,滑坡体表面视为可动的边界粒子。为避免水体粒子发生“穿透”现象,岸坡固壁粒子交错布置成两行,粒子间距与水体粒子一致。粒子间距 $\triangle x=\triangle z=1$ m。粒子总数为 6 806。模拟时间步长 $\triangle t=0.001$ s,在运行中可以调整。

3.1 滑坡运动过程

滑坡体加速度变化曲线见图 2，速度变化见图 3。模拟结果表明滑坡体入水前以恒定加速度下滑，速度逐渐增大。当 $t=4$ s 滑坡体开始水下运动时，由于水体阻力增加、滑动力减小，加速度略有减小。随着岸坡变陡，下滑力增大，加速度也增大，$t=11$ s 时加速度达到最大值。之后滑坡体在河床底部运动时，由于坡度小，下滑力减小，加速度迅速减小，当 t 接近 12 s 时加速度为 0，此时速度达到最大值，最大滑速为 17.6 m/s。随着流体阻力增加，加速度小于 0 后，速度迅速减小。

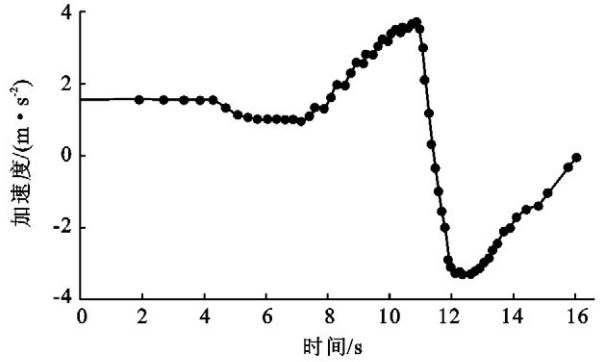


图 2 滑坡体加速度历时变化曲线

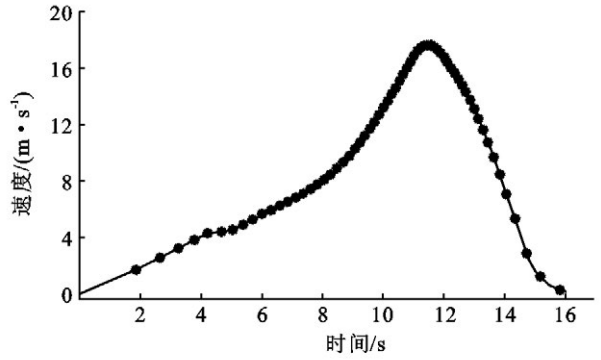


图 3 滑坡体速度历时变化曲线

3.2 波浪的变化

滑坡涌浪的变化过程见图 4。当滑坡体潜入水下时，即推挤相邻水体粒子向右快速运动并抬升水位，形成涌浪，水面正波开始形成。在 $t=10$ s 时水波达到右岸后，水流沿岸坡继续爬升，继而水流在重力作用下回落并形成负波向左岸传播。波浪到达左岸后又被反射向右岸运动。涌浪在经过两岸几个往复运动后，水面振荡逐渐平静下来。在 $t=12$ s 时，由于滑坡运动速度大于水流速度，在滑坡体顶部形成一个大气泡，随着滑坡体沿河底运动速度逐渐减小，气泡随后溃灭，并引起明显的水—气混掺。图 4c 通过数值模拟详细显示了水—气演化过程及水体粒子的分布情况。从水面变化看，初始时刻水面涌高为 0，而后逐渐增大，至 $t=14.2$ s 时形成最大波高为 9.63 m（图 4d），之后最大涌浪高度逐渐平顺减小。计算得到最大滑距为 79.5 m。

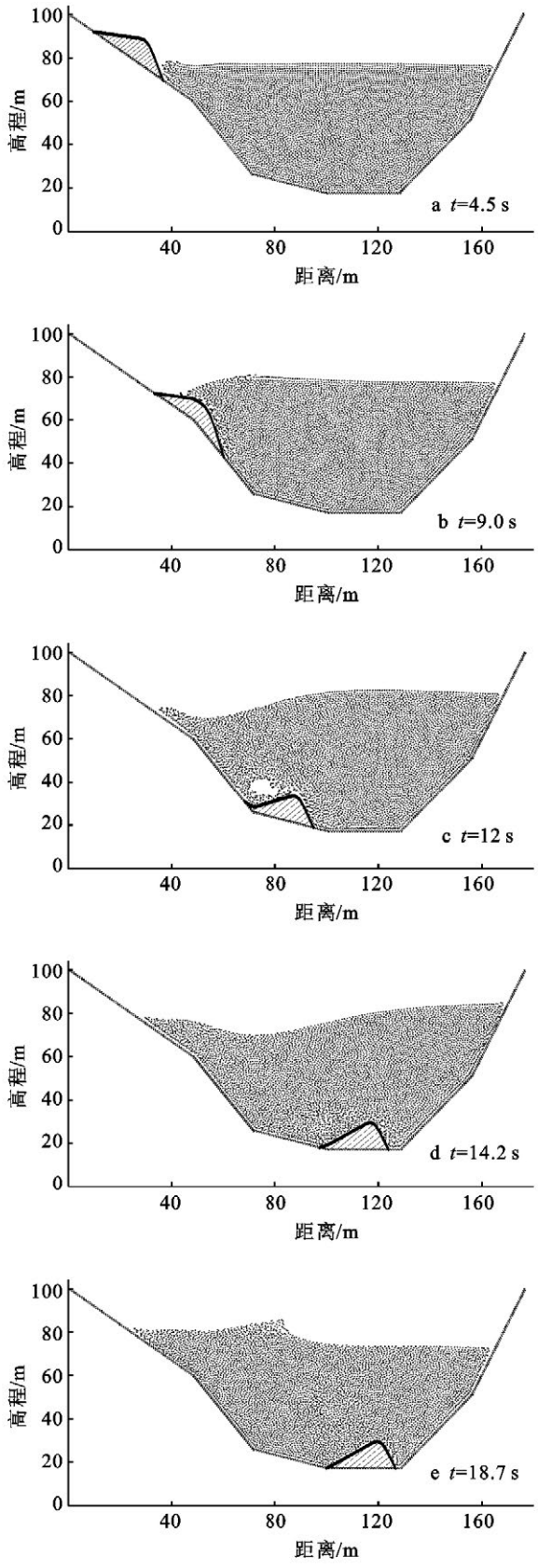


图 4 滑坡涌浪的变化过程

3.3　涌浪高度预测

许多学者通过试验或调查提出了涌浪高度预测公式,这些方法大多是经验性的,如美国土木工程协会建议法、水科院经验公式法和潘家铮法等,认为涌浪高度仅取决于滑坡速度、库水深度等简单因素。任兴伟等[18]根据线性插值原理对潘家铮公式进行了修正,当岸坡发生水平运动时,激起的初始浪高可表示为[15]:

$$\frac{\xi_0}{h}=1.17\times\frac{v}{\sqrt{gh}} \tag{14}$$

式中:ξ_0——激起的初始涌浪高度(m);h——水库平均深度(m);v——岸坡水平运动速度(m/s)。

当岸坡以垂直速度运动 v' 进入水库时,激起的初始浪高可表示为:

$$\frac{\xi_0}{h}=f\left(\frac{v'}{\sqrt{gh}}\right) \tag{15}$$

通常滑坡以斜向模式运动(即水平及垂直方向均发生大位移),可推导得到:

$$\frac{\xi_0}{h}=m(\alpha)\times\frac{v}{\sqrt{gh}} \tag{16}$$

式中:$m(\alpha)$——不同滑动面倾角时的修正系数。$m(\alpha)=1.17-\frac{\alpha[1.17-m(90)]}{90}$,$\alpha$——斜坡坡角。$m(90)$可根据曲线查得。

本文取滑坡体滑动处水面平均宽度天然工况下平均水深 $h=41$ m,岸坡角度平均值 45°。据此采用块体法求得滑坡体入水时的平均速度 $v=3.9$ m/s。根据(16)式计算得到初始涌浪爬坡高 $\xi_0=9.4$ m。因此可以看出潘家铮经验公式计算的涌浪爬高与本文的计算结果 9.63 m 基本吻合。

4　结 论

本文首先利用动力平衡方程,建立了简化的滑坡运动块体模型,与 DDA 等方法不同,滑坡仿真分析不需大量的岩土力学参数,仅需岩土体 c,φ 值。运用 SPH 数学模型求解 N—S 方程时,需提供水位特征及河道典型断面或三维地形。本文基于预测—校正法(分数步长法)求解弱可压缩流体的 SPH 方程组,考虑了水阻力影响,有效模拟了滑坡运动、水体自由面变形、气泡形成等复杂流体问题。滑坡运动计算过程避免了冗繁复杂的数值分析模拟。模拟结果与其他方法基本一致。与常规方法相比,FVM 等基于网格的数值模拟方法,在模拟流体瞬时剧变时网格扭曲需反复重构,不能复演气泡形成及溃灭过程;潘家铮法等经验预测方法则基于简单的"单向流"研究,不能计算涌浪速度场分布及涌浪演变运动,不能确定水体粒子对构筑物的压力。本文采用的 SPH 法可用于确定滑坡体对岸涌浪爬坡范围,预估涌浪爬坡可能引起的受灾区域,为滑坡涌浪实时预报和防范提供更全面、准确的科学依据。

由于影响滑坡涌浪的因素非常多,且往往具有不确定性,计算时边界条件和初始条件也非常复杂,并且考虑到滑坡体内情况千变万化,各项指标的测定都有一定的任意性,涌浪计算难以精确。今后还要运用三维岩土及流体耦合模拟的方法,进一步分析高速滑坡涌浪的产生、沿程传播、爬坡及反射的一些规律。

SPH 方法无需生成网格,避免了大量的单元划分,解决了通常拉氏方法中的网格缠结和扭曲以及网格重划的问题,能够适应扭曲变形,特别是在大变形问题中自适应性强。是今后流体及固体运动研究的新方法。

[参 考 文 献]

[1] Monaghan J J, Kos A, Issa N. Fluid motion generated by impact[J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ccean Engineering, ASCE, 2003,129(6):250-259.

[2] Oger G. Two-dimensional SPH simulation of wedge water entries[J]. Journal of Computational Physics, 2006,213(2):803-822.

[3] Iwasaki S I. A semi-analytical and semi-empirical method for the evalution of tsunami generating efficiency due to landslides plunging into the water bodies[C]// Fourth pacific congress on marine science and technology, Janpan. 1990:162-166.

[4] 宋新远,邢爱国,陈龙珠. 基于 FLUENT 的二维滑坡涌浪数值模拟[J]. 水文地质工程地质,2009(3):90-94.

[5] 余仁福. 黄河龙羊峡工程近坝库岸滑坡涌浪及滑坡预警研究[J]. 水利发电,1995,3(5):14-16.

[6] 袁晶,张小峰,张为. 可变网格下的水库滑坡涌浪数值模拟研究[J]. 水科学进展,2008(4):546-550.

[7] 程谦恭,胡厚田. 剧动式高速岩质滑坡全程运动学数值模拟[J]. 西南交通大学学报,2000,35(1):18-22.

[8] Hatzor Y H, Arzia A, Zaslavsk Y, et al. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the DDA method: King Herod's Palace, Masada, Israel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(5):813-832.

[9] Sitar N, Maclaughlin M M, Doolin D M. Influence of kinematics on landslide mobility and failure model[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005,131(6):716-728.

[10] 裴觉民,石根华. 岩石滑坡体的块体动态稳定和非连续变形分析[J]. 水利学报,1993(3):28-34.

(下转第 205 页)

31.10%，减少了 2.3%，面积为 88.50 km²；低植被覆盖区损毁较轻，面积比率由 16.09%减少到 15.25%，减少了 0.84%，面积约 32.38 km²。

表 3　地震前后植被覆盖度统计结果

植被覆盖等级	无植被覆盖区	低植被覆盖区	中植被覆盖区	高植被覆盖区
震前像元个数	192 721	687 852	1 427 659	1 966 369
震后像元个数	498 846	651 876	1 329 401	1 794 477
震前面积/km²	173.45	619.07	1 284.89	1 769.73
震后面积/km²	448.96	586.69	1 196.46	1 615.02
震前百分比/%	4.51	16.09	33.40	46.00
震后百分比/%	11.67	15.25	31.10	41.98
面积变化/km²	275.51	−32.38	−88.43	−154.71

由植被覆盖度分级图与茂县坡度图（附图 5）进行叠加对比分析可知，地震对茂县植被损毁较严重的地区主要集中在大于 40°坡度，这些地区也是滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害严重发育地段。

3　结 论

（1）“5·12”汶川地震对灾区植被覆盖产生很大的影响，为了调查地震对茂县植被覆盖度的影响程度，本文选取地震前后茂县的 TM 5 影像为数据源，通过对影像进行处理提取植被覆盖度并进行统计和分析。实践证明，遥感可以有效地提取大范围的植被覆盖状况，为植被恢复工作提供有力的科学依据。

（2）首先对地震前后研究区影像进行辐射校正，对图像的 DN 值转换为地表实际反射率；然后根据地表反射率计算归一化植被指数，采用像元二分法估算植被覆盖度；将研究区植被覆盖度分为 4 级：低覆盖度、中覆盖度、高覆盖度以及无植被地区，通过像元二分法模型得到地震前后植被覆盖度分级图和统计表。在获得地表实际反射率的基础上，采用像元二分法模型反演植被覆盖度是确实可行的方法。

（3）研究结果表明，地震对茂县的植被覆盖状况产生了明显变化，无植被覆盖区面积比率增加了 7.16%，面积为 275.5 km²；其中高植被覆盖区破坏最为严重，中植被覆盖区破坏程度次之，低植被覆盖区变化最小；植被覆盖变化程度较大的区域主要分布在坡度大于 40°的地段，也是次生灾害发育的地方。相关部门应针对这些地区采取有效的生态修复和植被恢复重建手段，以控制水土流失和地质灾害隐患。

[参 考 文 献]

[1] 孙丹峰. 土地利用/覆被遥感分析[M]. 北京：中国大地出版社，2006：114-138.

[2] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京：科学出版社，2003：172-175，372-375.

[3] 陈晓玲，赵红梅，田礼乔. 环境遥感模型与应用[M]. 武汉：武汉大学出版社，2008：16-20.

[4] 王桥，杨一鹏，黄家柱，等. 环境遥感[M]. 北京：科学出版社，2005：346-366.

[5] 池宏康，周广胜，许振柱，等. 表现反射率及其在植被遥感中的应用[J]. 植物生态学报，2005，29(1)：74-80.

[6] 马志勇，沈涛，张军海，等. 基于植被覆盖度的植被变化分析[J]. 测绘通报，2007(3)：45-48.

[7] 陈涛，李平湘，张良培. 武汉地区 1988—2002 年植被覆盖度变化动态分析[J]. 遥感技术与应用，2008，23(5)：511-515.

[8] 王兮之，梁钊胸. 基于 MODIS 数据的湟水流域植被覆盖变化研究[J]. 干旱区资源与环境，2010，24(6)：137-142.

[9] 李营，张峰，王桥. 呼伦贝尔盟草原植被覆盖状况时空演变特征分析[J]. 干旱区资源与环境，2010，24(6)：126-131.

[10] 任志明，李永树，蔡国林. 一种利用 NDVI 辅助提取植被信息的改进方法[J]. 测绘通报，2010(7)：41-43.

[11] 杨胜天，刘昌明，杨志锋，等. 南水北调西线调水工程区的自然生态环境评价[J]. 地理学报，2003，57(1)：11-18.

（上接第 179 页）

[11] Miao Tiande, Liu Zhongyu, Niu Yonghong, et al. A sliding block model for the runout prediction of high-speed landslides[J]. Can. Geotech. J., 2001, 38(2): 217-226.

[12] 刘忠玉，马崇武，苗天德，等. 高速滑坡远程预测的块体运动模型[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19(6)：742-746.

[13] 汪洋，刘波，汪为. 滑坡速度计算的改进条分法[J]. 安全与环境工程，2004，11(3)：68-70.

[14] 缪吉伦，陈景秋，张永祥. SPH 方法在自由表面流体研究中的应用[J]. 水利水电科技进展，2011，31(3)：20-23.

[15] Liu Guirong, Liu Moubing. Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003: 26-32.

[16] Roubustsova V, Kahavita R. The SPH technique applied to free surface flows[J]. Computers & Fluids, 2006, 35(10): 1359-1371.

[17] Joseph P Morris, Patrick J Fox, Zhu Y. Modeling low reynolds number incompressible flows using SPH[J]. Journal of Computational Physics, 1997, 136(1): 214-226.

[18] 任兴伟，唐益群，代云霞，等. 滑坡初始涌浪高度计算方法的改进及其应用[J]. 水利学报，2009，9(40)，1116-1119.