34 卷第 3 期 346 ~ 355 页
2016 年 5 月

山 地 学 报
MOUNTAIN RESEARCH

Vol. 34, No. 3 pp346 ~ 355
May, 2015

文章编号: 1008 - 2786 - (2016) 3 - 346 - 10
DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000138

坡面颗粒流开源软件 TITAN2D 的改进及应用

袁 礼, 刘 伟, 翟 健
(中国科学院数学与系统科学研究院计算数学所 科学与工程计算国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 滑坡或崩塌碎屑流的泛滥范围和冲击力可以用颗粒薄层流模型进行数值模拟研究。薄层流模型是将流体力学的质量守恒和动量守恒方程在深度方向平均后所得的近似方程组,因其在分析上的简化而广受重视。近年来基于颗粒薄层流模型(以 Savage - Hutter 模型为代表)的模拟研究取得大量进展,但相应的能够模拟自然地形上碎屑流的开源软件尚不多见。2007 年美国纽约州立布法罗大学公开了一款结合颗粒薄层流模型和地理信息系统(GIS)的开源软件 TITAN2D。在此,将 TITAN2D 中原来的 HLL 通量修改为耗散更小的 HLLC 通量,并增加了颗粒材料的停止准则。通过简单的颗粒堆积物和溃坝问题,验证了软件改进的有效性。进一步,利用中科院科学数据服务平台的 DEM 数据对重庆武隆鸡尾山滑坡、舟曲泥石流用干颗粒流进行数值模拟。通过调节底面摩擦角可以使计算结果大概反映实际灾害的泛滥范围,表明该软件值得进一步改进与发展。

关键词: 颗粒崩塌流; Savage - Hutter 模型; 停止准则; 开源软件; TITAN2D
中图分类号: P642 **文献标志码:** A

滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害因其巨大的破坏性早已引起人们广泛的关注。地质灾害的形成机理和演化过程十分复杂,即使是对灾害启动后运动过程的准确预测仍是尚未解决的科学难题。地质灾害中,泥石流是含有大量泥沙、石块等松散土体与水体混合的特殊洪流,是介于大块体运动和高含沙河水流动之间的一系列流动过程[1]。崩塌体或滑坡体破裂后形成的坡面碎屑流也是含有大量尺寸不同固体散粒的高速运动,散粒小到厘米级,大到米级,材料组成很不均匀。泥石流和滑坡碎屑流的多相、多尺度、多粒度等复杂性给研究带来很大挑战。尽管如此,经过越来越多研究者的长期努力,在地质流体力学的理论、计算和实践应用等方面都取得了大量进展[2-14]。

1 颗粒薄层流研究概述

本文主要关注将滑坡碎屑流作为连续介质处理的数值模拟技术。对于远程滑坡碎屑流问题,完全三维的流体力学数值模拟仍需巨大计算资源,因此人们利用这类特殊流动问题的"浅层"特点发展了深度平均的薄层流模型[3,9]。由于颗粒薄层流模型是相对简单的二维偏微分方程组,其数值求解所需计算量较小,因而可用于模拟远距离大范围的坡面碎屑流问题[3,8-9]。虽然平均了沿地面法向方向的变化细节,但颗粒薄层流模拟可用于研究滑坡碎屑流在地形上的发展过程,不失为预测地质灾害泛滥区域和评估灾害风险的一种有用工具。

颗粒薄层流模型及其计算研究早已受到广泛重视并得到深入发展。Savage 和 Hutter 最早推导了库仑颗粒材料的 Saveg - Hutter(SH)方程[3],Gray 等[8]将 SH 方程推广到全局曲线坐标系; Iverson 和 Denlinger[10-11]在 SH 方程基础上提出了液固混合物薄层流模型,后来给出全局直角坐标系下的有限体

收稿日期(Received date): 2014 - 08 - 29; 修回日期(Accepted): 2014 - 10 - 23。
基金项目(Foundation item): 国家 973 计划资助项目(2010CB731505), 国家自然科学基金资助项目(11261160486, 11321061)。[National Basic Research Program (973 - program) (2010CB731505), National Natural Science Foundation of China (11261160486, 11321061).]
作者简介(Biography): 袁礼(1963 -),男,重庆人,博士,研究员。主要从事计算流体力学研究工作。[Yuan Li(1963 -), male, born in Chongqing, PhD, Professor, mainly engaged in research of computational fluid dynamics.] Tel: 010 - 82541933, E - mail: lyuan@lsec.cc.ac.cn

积 - 有限元混合解法[12]; Takahashi[13] 考虑了泥石流底部侵蚀和沉积的影响; Pitman 等[15] 给出了双速度流固两相薄层流模型; Mangeney 等[16] 用 Kinetics 格式计算了薄层流模型并给出了一个颗粒停止准则; Patra 等[17] 发展了基于 Iverson 模型[10-11] 的并行求解软件 TITAN2D; 国内也开展了许多基于薄层流模型的建模和计算工作[6,18-22]。

虽然基于颗粒薄层流模型的数值模拟和实验室验证研究常见诸于文献中,但将颗粒薄层流模型和地理信息系统(GIS)整合集成的研究才开始不久[19-20,23-24]。文献[25]指出,将地质流体力学模型和 GIS 空间模型整合可以使目前模型的应用局限问题在一定程度上得到解决,有助于快速进行泥石流灾害的分析。具有这种功能的只有商业或内部软件如 FLO-2D[26]、DAN[7] 等,但免费开源的软件尚不多见,这在某种程度上阻碍了广大研究者利用和改进现有模型的步伐。

余斌[27] 介绍了美国纽约州立布法罗大学开发的基于 Iverson 模型和地理信息系统(GIS)的软件 TITAN2D[17],并施加了一个全局停止准则[28]。2007 年布法罗大学发布了开源软件 TITAN2D 的 3.0 版[29]。该版本有几个特点: 1) 具有结构网格并行自适应加密能力,可在并行计算机上进行大规模计算; 2) 前处理结合开源 GIS 软件 GRASS 处理数字高程模型(DEM)数据; 3) 流体力学模型作为单独模块给出,可使广大研究者进一步发展和改进各自的模型和解法。4) 有不同区域不同摩擦系数、底面侵蚀和沉积计算模块的发展空间; 5) 有基于不确定性量化理论绘制灾害分布图的计算模块。TITAN2D 的缺点是格式耗散较大和前锋处理欠佳,使得计算的前锋速度和泛滥区误差较大,且颗粒流动不能在缓坡上停止。此外,如同许多类似模型一样,在模拟实际崩塌碎屑流问题时,材料内摩擦角和底面摩擦角的选择依赖于用户的经验,一般作为调节参数。

我们曾邀请 TITAN2D 的研发者 Patra 和 Pitman 讲解该软件的算法和使用,然后尝试对该软件进行改进。本文中,我们首先简介 TITAN2D 所用的薄层流模型和数值格式,然后将原来的 HLL 通量修改为分辨率较高的 HLLC 通量,并增加库仑材料颗粒流的停止准则。接着在简单测试问题中检验了改进的效果,最后根据中科院科学数据库服务平台的 DEM 数据,对武隆鸡尾山滑坡和舟曲泥石流用干颗粒流假设进行数值试验。我们还改正了原 TITAN2D 用固定密网格计算经常发散的代码缺陷。照本文修改后的 TITAN2D 程序可由作者个人网页下载[http://lsec.cc.ac.cn/~lyuan/code.html]。

2　数值方法

2.1　颗粒薄层流模型

为了适应 DEM 数据给出的栅格格式的数字地形,TITAN2D 采用 Iverson 等[10-11] 给出的直角坐标系下的颗粒薄层流方程组:

$$\partial_t \mathbf{U} + \partial_x \mathbf{F} + \partial_y \mathbf{G} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \tag{1}$$

其中守恒变量 $\mathbf{U}$、流通量 $\mathbf{F}$,$\mathbf{G}$ 和源项 $\mathbf{S}$ 分别为

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + 0.5k_{\mathrm{ap}} g_z h^2 \\ huv \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + 0.5k_{\mathrm{ap}} g_z h^2 \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ S_x \\ S_y \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} S_x = {} & g_x h - hk_{\mathrm{ap}} \mathrm{sign}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \frac{\partial (g_z h)}{\partial y} \sin\phi_{\mathrm{int}} \\ & - \frac{u}{\sqrt{u^2+v^2}} \max\left(g_z + \frac{u^2}{r_x}, 0\right) h \tan\phi_{\mathrm{bed}} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} S_y = {} & g_y h - hk_{\mathrm{ap}} \mathrm{sign}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \frac{\partial (g_z h)}{\partial x} \sin\phi_{\mathrm{int}} \\ & - \frac{v}{\sqrt{u^2+v^2}} \max\left(g_z + \frac{v^2}{r_y}, 0\right) h \tan\phi_{\mathrm{bed}} \end{aligned}$$

式中　h 为沿竖直的 z 方向的流体深度,t 为时间,x、y 为水平的全局直角坐标,u、v 分别为 x、y 方向的速度分量,r_x 和 r_y 分别为地形在 Oxz 和 Oyz 坐标面内的曲率半径,$g_x = -g_z \partial_x b$ 和 $g_y = -g_z \partial_y b$ 分别为地形效应项沿两个坐标方向的分量,$b(x,y)$ 为地形,$g_z = g\cos\theta$ 为法方向的重力加速度分量[11],θ 为底面法向和 z 方向的夹角,k_{ap} 为土压力系数,ϕ_{int} 和 ϕ_{bed} 分别是库仑材料的内摩擦角和底面摩擦角。

2.2　数值格式

方程组(1)在 $h \neq 0$ 时为严格的双曲型方程,允许间断解存在,故可用激波捕捉方法求解。TITAN2D 采用 Godunov 型有限体积法求解方程(1)。为达到二阶时间精度,采用了 Davis 的预估 - 校正 Godunov 方法。预估步采用对时间层 n 的泰勒展开求出中间时间层的 $\mathbf{U}_{i,j}^{n+1/2}$:

$$\mathbf{U}_{i,j}^{n+1/2} = \mathbf{U}_{i,j}^{n} - \frac{1}{2}\Delta t\left(\mathbf{A}_{i,j}^{n}\Delta_x \mathbf{U}_{i,j}^{n} + \mathbf{B}_{i,j}^{n}\Delta_y \mathbf{U}_{i,j}^{n}\right) + \frac{1}{2}\Delta t \mathbf{S}_{i,j}^{n} \tag{3}$$

这里 A 和 B 分别是通量 F 和 G 的雅可比矩阵，$\Delta_x \mathbf{U}$ 和 $\Delta_y \mathbf{U}$ 分别是两个坐标方向的斜率限制器。校正步用有限体积法更新 $\mathbf{U}_{i,j}^{n+1}$：

$$\mathbf{U}_{i,j}^{n+1} = \mathbf{U}_{i,j}^{n} - \frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\mathbf{F}_{i+1/2,j}^{n+1/2} - \mathbf{F}_{i-1/2,j}^{n+1/2}\right) - \frac{\Delta t}{\Delta y}\left(\mathbf{G}_{i,j+1/2}^{n+1/2} - \mathbf{G}_{i,j-1/2}^{n+1/2}\right) + \Delta t \mathbf{S}_{i,j}^{n+1/2} \quad (4)$$

这里数值通量从原来耗散较大的 HLL 通量改为耗散较小、分辨率较高的 HLLC 通量，其所需网格界面左右侧变量仍用二阶 MUSCL 插值公式获得。计算区域边界上采用特征边界条件，泥石流的前缘采用单个稀疏波近似处理[11,17]。HLLC 通量如下

$$\mathbf{F}_{i+1/2} = \begin{cases} \mathbf{F}_L, & 0 \leqslant S_L \\ \mathbf{F}_L + S_L(\mathbf{U}_{L^*} - \mathbf{U}_L), & S_L \leqslant 0 \leqslant S_* \\ \mathbf{F}_R + S_R(\mathbf{U}_{R^*} - \mathbf{U}_R), & S_* \leqslant 0 \leqslant S_R \\ \mathbf{F}_R, & S_R \leqslant 0 \end{cases}$$

其中

$$\mathbf{U}_{K^*} = h_K \frac{S_K - u_K}{S_K - S_*}\begin{bmatrix} 1 \\ S_* \\ v_K \end{bmatrix}, K = L, R$$

本文所用的波速 S_L, S_R, S_* 的估计为

$$S_L = \min(u_L - c_L, u_R - c_R)$$

$$S_R = \max(u_L + c_L, u_R + c_R)$$

$$S_* = \frac{p_R - p_L + h_L u_L(S_L - u_L) - h_R u_R(S_R - u_R)}{h_L(S_L - u_L) - h_R(S_R - u_R)}$$

这里 $c_K = (\sqrt{k_{ap} g_z h})_K$，$p_K = 0.5(k_{ap} g_z h^2)_K$，$K = L, R$。我们的波速估计不同于文献[11]，数值试验显示我们的选择使计算更加稳定。

Patra[17] 等对于实际地形上火山熔岩流的模拟显示 HLLC 和 HLL 结果的差别不大。但计算流体力学的许多文献表明，二者对于有接触间断问题的模拟结果有一定的差别，HLLC 分辨率较好。本文在图 11 中比较了二者对于实际问题的差别。

2.3 流动停止准则

颗粒流和浅水流的一个重要区别是当颗粒流自由面的倾角小于颗粒的内摩擦角时，流动就可以保持静止，而浅水流的自由面必须完全水平才能保持静止。为了描述颗粒流的这一物理特性，本文主要根据 Mangeney 等人的方法[16,30] 设置(局部)停止准则。该方法的思想是比较库仑摩擦力临界值和一个所谓的“可容许的底面剪应力值”[30](文献[16]中称为“净驱动力”)的大小：如果可容许的底面剪应力小于库仑摩擦力临界值，则流体就停止运动，反之，流体继续运动且实际所受摩擦力等于库仑摩擦力。具体地，在使用公式(4)时，首先在不计摩擦力项的情况下计算出一个“可容许的底面剪应力值”

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}_{i,j}^{n+1} = \begin{bmatrix} hu \\ hv \end{bmatrix}_{i,j}^{n} + \Delta t \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix}_{i,j}^{n+1/2} + \Delta t \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix}_{i,j}^{n+1/2} \quad (5)$$

右边第二项表示(4)中的数值通量差项，第三项表示(4)的源项中的重力项。我们的停止准则是：当 $|\mathbf{T}_{i,j}^{n+1}| < \Delta t g_z h_{i,j}^{n+1/2} \tan\phi_{bed}$，即容许的底面剪应力值小于库仑摩擦力临界值，并且当 $|\nabla(h+b)_{i,j}^{n+1/2}| < \tan\phi_{int}$，即自由面倾角小于内摩擦角时，流动就停止，直接设置速度 $v = 0$；否则，仍然用原摩擦律公式代入(4)式源项中求解动量。对于速度已为零的单元，其摩擦力值将根据文献[31]的静力条件计算。

3 软件使用流程

原始 TITAN2D 3.0.0 可由网址[29] 申请获得。本文修改的软件可由作者个人网下载(见 1 节末)。TITAN2D 软件主要用 C++ 编写，仅其中部分流体计算模块用 Fortran 编写。TITAN2D 在 linux 系统下安装和运行。由于 TITAN2D 与免费开源 GIS 软件 GRASS 相结合，因此还需要安装 GRASS 软件。TITAN2D 的运行步骤是：先由 GRASS 处理栅格形式的原始数字高程(DEM)数据，或者用户自制的 XYZ 数据，生成浮点型的栅格地图层，然后运行 titan 的脚本程序 titan_gui.py，此时输入初始堆积物的体积、摩擦角等计算参数，生成工作目录，最后进入工作目录下执行坡面颗粒流模拟程序 titan。更具体的操作步骤详见 TITAN2D 用户手册[29]。

4 验证算例

本文选择两个有理论解的算例[32] 来验证修改后 TITAN2D 程序的计算效果。除特别说明外，均采用 HLLC 数值通量。

4.1 静力平衡和启动/停止条件

文献[32]给出的验证算例是漏斗状地形上的静止堆积物，地形 b 和堆的初始水位 H 分别为

$$b = \sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + \left(\frac{y}{2}\right)^2}, H = b + h = -b + 0.2 \quad (6)$$

由于要求深度 $h \geqslant 0$，因此初始堆积物将占据 $b(x,y) < 0.1$ 这一小部分圆形区域。原点设在堆中心，计算区域取 $[-0.3, 0.3] \times [-0.3, 0.3]\ m^2$，计算网格

数为 128 × 128。首先取摩擦角 $\phi_{bed} = \phi_{int} = 40°$。由于堆积物表面斜率(0.5)小于由摩擦角决定的可保持静止的最大允许斜率($\tan\phi_{int}$),因此初始堆积物理论上将保持静止状态。图 1 显示了计算的 $t = 0$ 和 $t = 1.0$ s 时堆积物深度的等值线分布,可见 $t = 1.0$ s 时的堆积物基本上保持了最初分布,仅在外边缘处有些扩散,中心处圆有些变形。图 2 显示了 $t = 0.4$ s 和 $t = 1.0$ s 时速度模的等值线分布。可见速度仅在外边缘处有很小的值,其余地方为零,数值解基本保持了静力学平衡状态。堆积物中心处等值线由圆变方的反常结果可能和格式的限制器有关,边缘处速度有小残余值的反常结果,可能和数值扩散造成前缘有小深度值进而影响速度计算准确度有关。

接下来取 $\phi_{bed} = \phi_{int} = 25°$。由于摩擦角不够大,摩擦应力不能支持初始自由面,堆积物开始流动。图 3 显示了 $t = 0.2$ s 和 $t = 2.0$ s 时的颗粒流深度等值线分布。图 4 显示了最大速度模的时间演化过程,可见 $t \geqslant 0.5$ s 以后速度趋于残余小值,流动基本上达到静力学平衡。

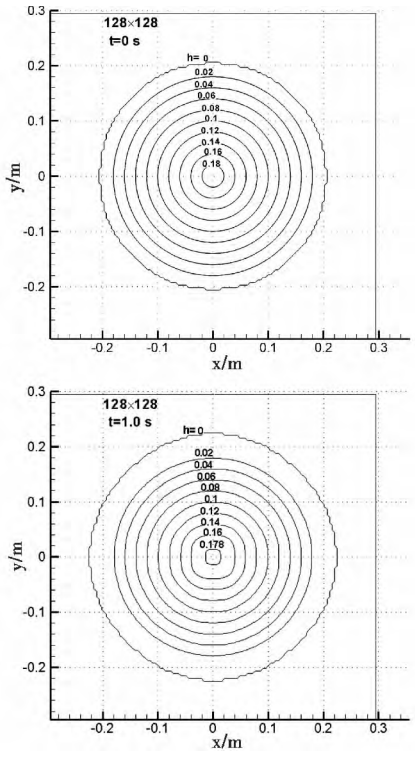
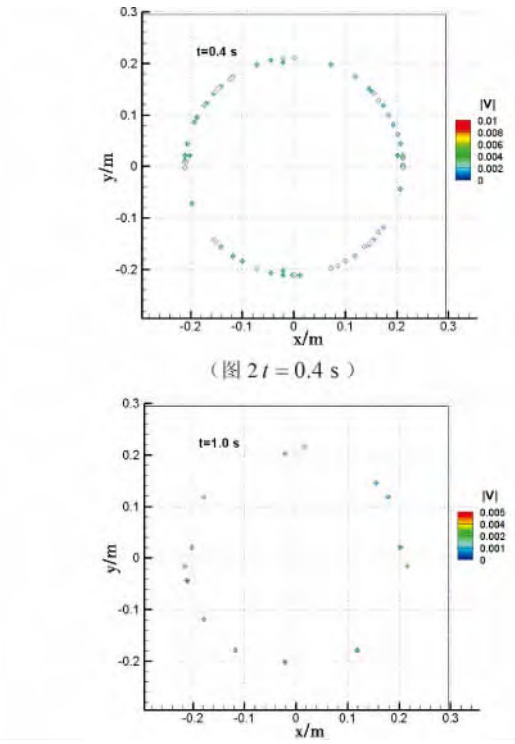


图 1　摩擦角 $\phi_{bed} = \phi_{int} = 40°$,圆形堆积物在初始时刻和 $t = 1.0$ s 时刻的深度等值线分布

Fig. 1　Contours of fluid depth for a circular pile at $t = 0$ and $t = 1.0$ s, $\phi_{bed} = \phi_{int} = 40°$



（图 2 $t = 0.4$ s）

图 2　摩擦角 $\phi_{bed} = \phi_{int} = 40°$,圆形堆积物 $t = 0.4$ s 和 $t = 1.0$ s 时的速度模等值线分布

Fig. 2　Contours of velocity modulus for a circular pile at $t = 0.4$ s and $t = 1.0$ s, $\phi_{bed} = \phi_{int} = 40°$

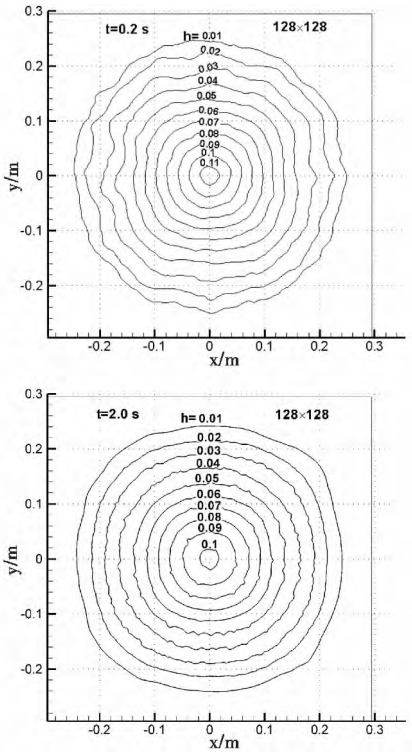


图 3　摩擦角 $\phi_{bed} = \phi_{int} = 25°$. 运动堆积物在 $t = 0.2$ s 和 $t = 2.0$ s 时的深度分布

Fig. 3　Contours of fluid depth for a movable circular pile at $t = 0.2$ s and $t = 2.0$ s, $\phi_{bed} = \phi_{int} = 25°$

4.2 有精确解的溃坝问题

文献[32]还给出了颗粒流溃坝问题的精确解。它是由经典的浅水溃坝的精确解经过变量变换获得,其中深度解的具体公式为

$$h=\begin{cases} h_0 & , \quad X\leqslant -\sqrt{gh\cos\theta}t \\ \dfrac{h_0}{9}\left(2-\dfrac{X}{t\sqrt{gh_0\cos\theta}}\right)^2 & , \quad -\sqrt{gh\cos\theta}t\leqslant X\leqslant 2\sqrt{gh\cos\theta}t \\ 0 & , \quad X\geqslant 2\sqrt{gh\cos\theta}t \end{cases}$$

这里,h 是法向深度,h_0 是上游的初始深度,x 轴沿斜坡向下,$X=x+g\cos\theta(\tan\phi_{\mathrm{bed}}-\tan\theta)t^2/2$ 是变换后的坐标,θ 是斜坡的倾角。图 5 所示为颗粒流溃坝的纵向剖面在 $t=0.5$ s 时的数值解和精确解比较。计算用 272×32 网格数,计算区域为 25.6×3.2 m^2,初始上游深度 $h_0=10$ m,坡面倾角 $\theta=40°$,底面摩擦角 $\phi_{\mathrm{bed}}=24.5°$。从图 5 可见计算结果和精确解符合的比较好。

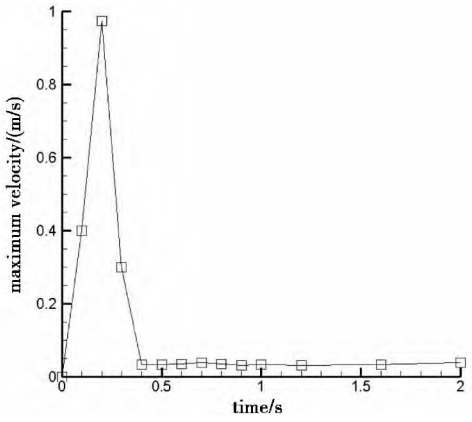


图4 摩擦角 $\phi_{\mathrm{bed}}=\phi_{\mathrm{int}}=25°$,流体的最大速度随时间的变化过程

Fig. 4 Time history of maximum velocity modulus for a movable circular pile, $\phi_{\mathrm{bed}}=\phi_{\mathrm{int}}=25°$

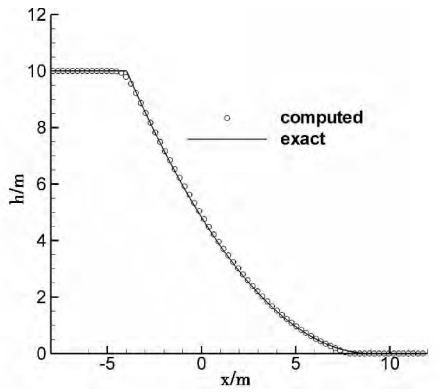


图5 溃坝问题的数值解和精确解的比较

Fig. 5 Comparison of numerical and exact depth profiles for the dam break problem after 0.5 s

5 现场灾害模拟

5.1 武隆鸡尾山滑坡碎屑流

2009-06-05,重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山山体发生了大规模的崩滑,约 500×10^4 m^2 高速落下的滑体物质沿铁匠沟山谷形成平均厚约 30 m,长度约 2 200 m 的堆积区,掩埋了 12 户民房和正在开采铁矿的矿井入口,造成 10 人死亡,64 人失踪的灾难性崩滑事件[33]。

本文应用修改后的 TITAN2D 对鸡尾山滑坡进行了数值模拟。模拟所用的地形是中科院科学数据服务平台(www.csdb.cn)的 GDEM 30 m 分辨率 DEM 数据(卫星图像拍摄于 2000 年左右),经过开源地理信息系统软件 GRASS 处理后,形成 TITAN2D 所需的地形数据 $b(x,y)$。计算区域取 3 km×4 km,计算网格数取为 192×256。按照文献[32],初始堆积物体积为 5.0×10^6 m^3。计算中将水平面上同体积的半抛物体的厚度竖直叠加在地形上。抛物体长轴方向北偏东 5°。计算结果对于底面摩擦角比内摩擦角更敏感,根据 Hunger 实验[34],颗粒材料的底面摩擦角比内摩擦角一般大 4°左右。本文取底面摩擦角为可调参数,内摩擦角 $\phi_{\mathrm{int}}=\phi_{\mathrm{bed}}+4°$。

图 6 所示为分别用不同底面摩擦角计算到 $t=2$ h 的碎屑流深度分布比较。图 6(a)-(c)施加了本文的停止准则,图 6(d)没有用停止准则。施加停止准则的颗粒运动一段后可以基本上停留在斜坡位置上如图 6(a)(b),而不用停止准则的图 6(d),即使底面摩擦角比图 6(a)的更大,流动也会比图 6(a)流得远很多,且 $t=2$ h 后还继续流动,颗粒能在斜坡上停止,说明改进 TITAN2D 的计算结果比较合理。图 7 给出取 $\phi_{\mathrm{bed}}=15°$,$\phi_{\mathrm{int}}=19°$,流域中 $h>1$ mm 地方的最大运动速度以及全计算区域中最大深度在[0,700 s]时间段的发展历程,可见该时段的最大速度发生在 $t=20$ s,达 80 m/s;此时堆积物由最初设定的最大深度 60 m 展开到较薄的 34 m,冲到沟底后很快堆积到一个峰值 41 m,然后逐渐流向下游,厚度逐渐变薄到 29 m 左右。图 8 给出了从 $t=3$ s 到 $t=300$ s 过程中数个时刻(时间 10 20 s 间隔)中的最大深度和速度分布的云图,这可以大致反映这段时间内碎屑流的泛滥范围和冲击力。

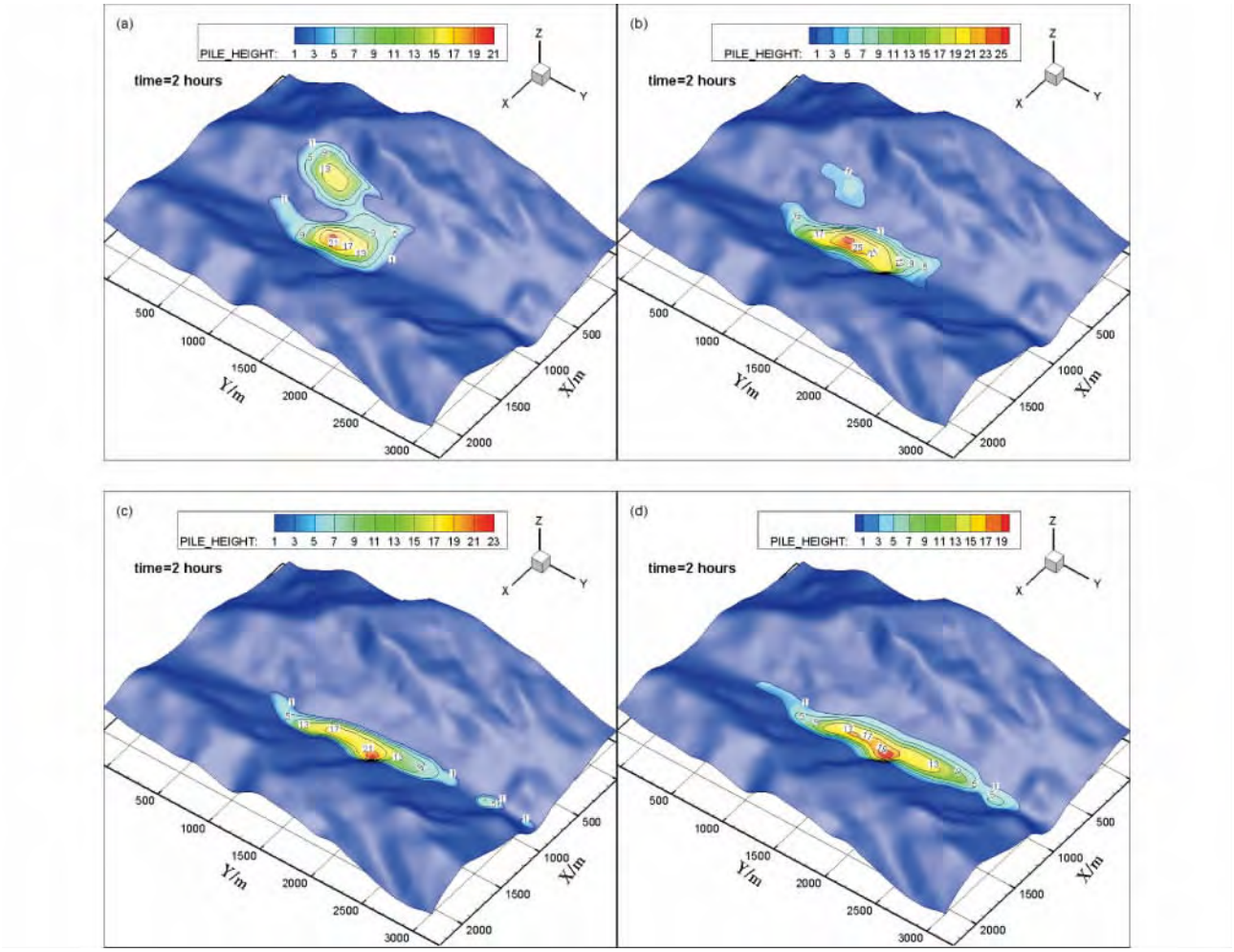


图 6　用不同摩擦角计算武隆鸡尾山滑坡的流体深度分布比较

(a) $\phi_{bed}=20°$,$\phi_{int}=24°$,(b) $\phi_{bed}=15°$,$\phi_{int}=19°$,(c) $\phi_{bed}=10°$,$\phi_{int}=14°$, (d) 无停止准则,$\phi_{bed}=\phi_{int}=24°$

Fig. 6　Comparison of flow depths among different friction angles for Wulong Jiweishan landslide

(a) $\phi_{bed}=20°$,$\phi_{int}=24°$,(b) $\phi_{bed}=15°$,$\phi_{int}=19°$, (c) $\phi_{bed}=10°$,$\phi_{int}=14°$, (d) without stopping criteria and $\phi_{bed}=\phi_{int}=24°$

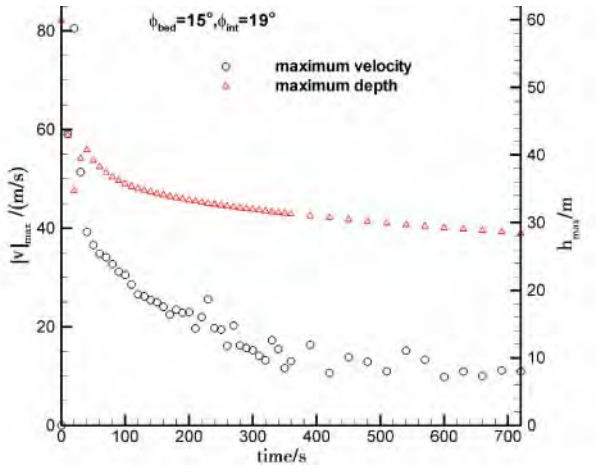


图 7　武隆鸡尾山滑坡的最大速度和深度随时间的发展历程

Fig. 7　Time history of maximal velocity and depth for the Wulong Jiweishan landslide

5. 2　舟曲泥石流

2010 – 08 – 07 深夜至 8 日凌晨,甘肃省舟曲县县城北的罗家峪、三眼峪区域发生了特大泥石流,冲毁沿途房屋,冲进县城,并在白龙江内形成堰塞坝。泥石流灾害造成 1 248 人遇难,494 人失踪。

根据现场调查,舟曲泥石流主要属于黏性泥石流[35]。但受 TITAN2D 只能模拟干性颗粒流的制约,本文只用干颗粒流进行数值试验。地形仍用中科院科学数据平台的 GDEM 30 m 分辨率 DEM 数据(2000 年左右) 。根据文献[35]给出的泥沙总量,我们设初始颗粒堆积物总体积为 97.7×10^4 m^3,其中大峪 48.6×10^4 m^3,小峪 24.7×10^4 m^3,罗家峪 24.4×10^4 m^3,分别设置成三个水平面上 10 m 高、不同长短轴、长轴大致沿各个沟向的半抛物体,然后

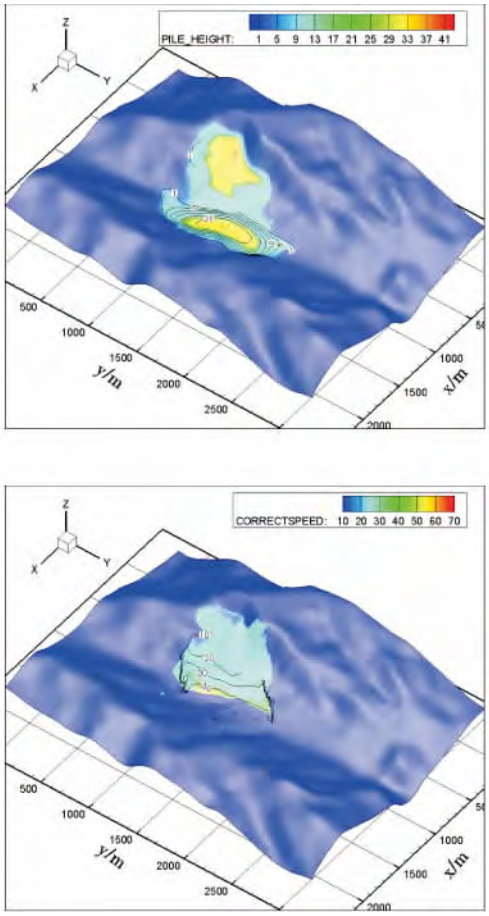


图 8 鸡尾山滑坡的模拟结果

摩擦角 $\phi_{bed}=15°$，$\phi_{int}=19°$，时间从 $t=3$ s 到 $t=300$ s 内的最大流动深度云图(上)和最大速度云图(下)

Fig. 8 Simulation results of Jiweishan landslide

Cloud maps of the maximum depth (top) and maximum velocity (bottom) from $t=3$ s to $t=300$ s, $\phi_{bed}=15°$, $\phi_{int}=19°$

将高度竖直地叠加在地形上。计算区域取为 6 km ×6 km，计算网格数取为 256 ×256。

图 9(a) ~(c) 所示，是分别用三个摩擦角计算的颗粒流在 $t=5.5$ h 的深度分布比较。其中图 9(a) 为用 $\phi_{bed}=20°$，$\phi_{int}=24°$ 的结果，从北边大、小峪合流出来的颗粒流体还没流到县城北边的三眼峪村就停止了，东边罗家峪来的流体也很早就停止流动。图 9(b) 为用 $\phi_{bed}=10°$，$\phi_{int}=14°$ 的计算结果，$t=5.5$ h 后颗粒流勉强流动到白龙江，但还不能在河中堆积。这说明用常规砂砾材料(摩擦角多在 20°以上)不能表示舟曲泥石流的流动性。图 9(c) 为用小摩擦角 $\phi_{bed}=9°$，$\phi_{int}=11°$ 的结果，这类似于流动性很强的“颗粒材料”，计算全历程中瞬时最大流动速度达 90 m/s，瞬时最大深度达 20 m，但颗粒运动速度太快，冲击范围很大，计算的从 $t=0$ s 到 $t=7200$ s 这个时间段中的最大深度云图(图 10 左)也不很符合卫星遥感观测的泥石流泛滥区域(图 10 右)。但这也从另一方面说明了舟曲泥石流中降雨和地面侵蚀过程的影响相当大。本文的干颗粒流模拟和实际降雨造成的泥石流有较大差别，因此只是一个数值试验。相比较而言，用摩擦角 $\phi_{bed}=9°$，$\phi_{int}=11°$ 计算的最终堆积区和实际观测图有一定相似性(图 10)。

最后，为了比较 HLLC 和 HLL 数值通量的差别，图 11 给出了模拟的鸡尾山滑坡碎屑流和舟曲泥石流的瞬时深度等值线。可见对于大区域问题，两种格式所得结果看起来差别不大，HLL 的前沿偏大些。这符合 Patra[17] 等的计算结果和结论。

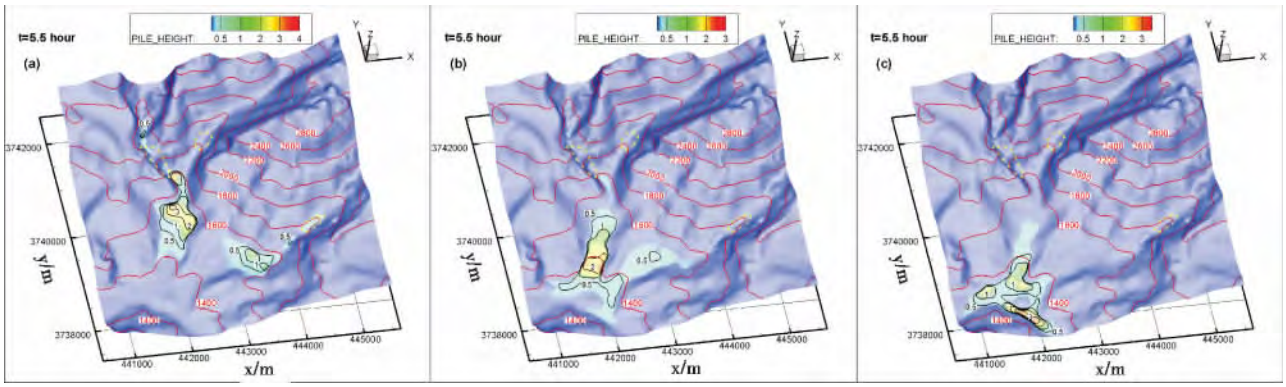


图 9 计算的舟曲泥石流在 $t=5.5$ h 的流体深度分布

(a)：$\phi_{bed}=20°$，$\phi_{int}=24°$，(b)：$\phi_{bed}=10°$，$\phi_{int}=14°$，(c)：$\phi_{bed}=7°$，$\phi_{int}=11°$。红线为地形等高线，黄虚线为堆积物初始位置，x 和 y 轴为 UTM 坐标，x 轴指向东方，y 轴指向北方

Fig. 9 Distributions of flow depth at $t=5.5$ hours for Zhouqu debris flow as computed with various friction angles (a) $\phi_{bed}=20°$, $\phi_{int}=24°$, (b) $\phi_{bed}=10°$, $\phi_{int}=14°$, (c) $\phi_{bed}=7°$, $\phi_{int}=11°$. Red lines are elevation levels, yellow dashed lines are initial positions of the piles, and coordinates are UTM system, with x pointing to the east and y to the north

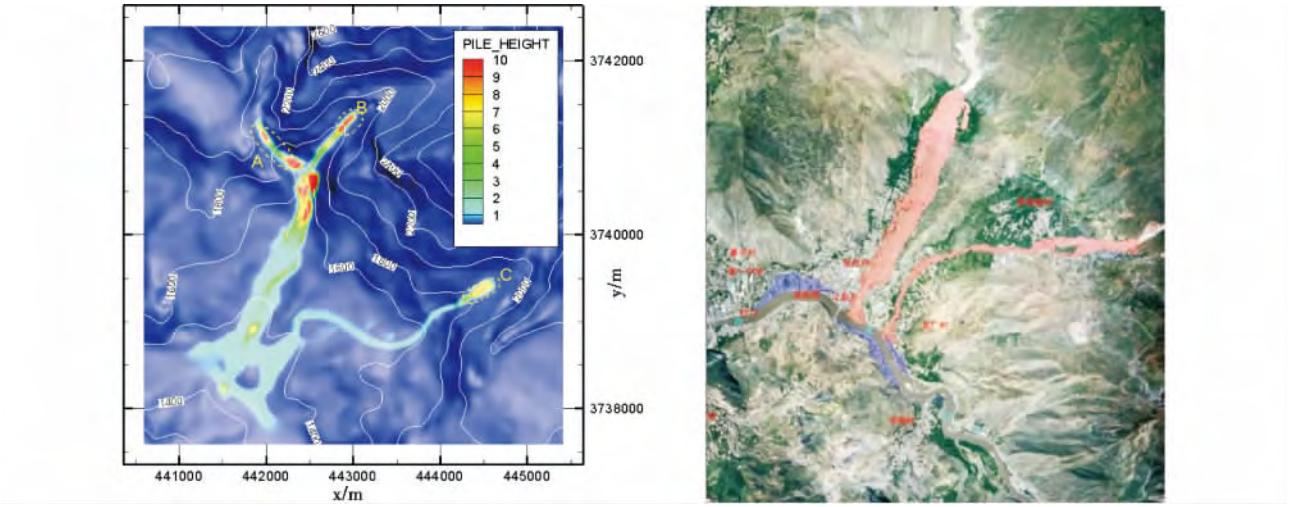


图 10　舟曲泥石流的干颗粒流模拟结果和观测的对比

摩擦角 $\phi_{bed}=7°$,$\phi_{int}=11°$, 时间从 $t=0$ s 到 $t=7200$ s 的最大流体深度云图(左) 和中科院对地观测中心的卫星遥感图(右)

Fig. 10　Comparison between the computed dry granular flow depth and satellite remote sensing picture of Zhouqu debris flow

Left: calculated accumulative color maps of the maximum flow depth from $t=3$ s to $t=7200$ s, $\phi_{bed}=7°$, $\phi_{int}=11°$, right: satellite remote sensing picture by CEODE, CAS

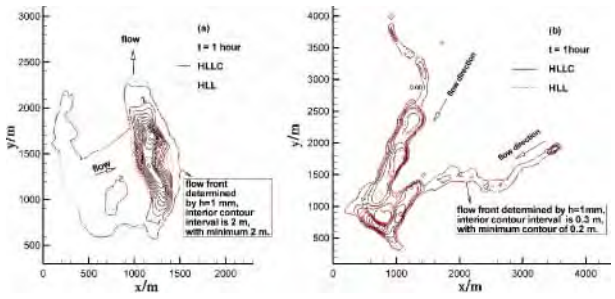


图 11　HLLC 和 HLL 格式计算的 $t=1$ h 的深度比较

(a) 鸡尾山滑坡, 摩擦角 $\phi_{bed}=15°$,$\phi_{int}=19°$,192 × 256 网格;

(b) 舟曲泥石流, 摩擦角 $\phi_{bed}=7°$,$\phi_{int}=11°$,256 × 256 网格

Fig. 11　Comparison of computed fluid depths at hour between HLLC and HLL schemes

(a) Jiweishan landslide, $\phi_{bed}=15°$, $\phi_{int}=19°$, 192 × 256 meshes,

(b) Zhouqu debris flow, $\phi_{bed}=7°$, $\phi_{int}=11°$, 256 × 256 meshes

6　结论

本文对结合颗粒薄层流模型和地理信息系统的开源软件 TITAN2D 作了修改,增加了 HLLC 数值通量选项和流动停止准则,并用简单颗粒流测试问题,检验了修改软件的有效性; 进一步,用干颗粒流数值模拟两个实际灾害问题,通过调节底面摩擦角,可以使软件的模拟结果和实际观测有一定的可比性。今后如进一步发展多相流模型、本构关系和底部侵蚀/沉积过程等关键模块,则有望进一步提升该软件的模拟能力,而软件的开源性提供给了给广大研究者改进和发展各种模型和算法的机会。

致谢: 本文工作得到清华大学孙其诚教授和中国科学院力学研究所马照松高级工程师的帮助,在此表示感谢。

参考文献(References)

[1] 胡明鉴,汪稔,陈中学,王志兵. 泥石流启动过程 PFC 数值模拟[J]. 岩土力学, 2010,31(增 1) : 394 – 405 [Hu Mingjian, Wang Ren, Chen Zhongxue, et al. Initiation process simulation of debris deposit based on particle flow code PFC [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Suppl. 1) : 394 – 405]

[2] Johnson A M. Debris flow. In: Slope instability [M], ed: Brunsden D and Prior DB. New York: John Wiley,1984: 257 – 351

[3] Savage S B, Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. J. Fluid Mech,1989,199: 177 – 215

[4] 崔鹏. 泥石流起动条件及机制的试验研究 [J]. 科学通报, 1991,21: 1650 – 1652 [Cui Peng. Study on conditions and mechanisms of debris flow initiation by means of experiment [J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 21: 1650 – 1652]

[5] 王光谦, 倪晋仁. 泥石流动力学基本方程 [J] . 科学通报, 1994, 39(18) : 17001704 [Wang Guangqian, Ni Jinren. Basic equations of debris flow dynamics [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(18) : 1700 – 1704]

[6] 刘学, 王兴奎, 王光谦. 基于 GIS 的泥石流过程模拟三维可视化 [J]. 水科学进展, 1999, 10(4) : 388 – 392 [Liu Xue, Wang Xinkui, Wang Guangqian. GIS – based 3 – D visualization of debris process simulation [J]. Advances in Water Science, 1999, 10 (4) : 388 – 392]

[7] Hungr O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 610 – 632

[8] Gray J, Wieland M, Hutter K. Gravity driven free surface flow of granular avalanches over complex basal topography [J]. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 1999, 455: 1841 – 1874

[9] Iverson R M. The physics of debris flows [J]. Rev. Geophys., 1997, 35: 245 – 296

[10] Iverson R M, Denlinger R P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(No. B1): 537 – 552

[11] Denlinger R P, Iverson R M. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 2. Numerical predictions and experimental tests [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(No. B1): 553 – 566

[12] Denlinger R P, Iverson R M. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1. theory and computation [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(F1): 337 – 357

[13] Takahashi T. Debris flow [M]. International Association for Hydraulic Research monograph. Rotterdam: Balkema, 1991.

[14] Chen H, Lee C F. Numerical simulation of debris flows [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 30: 146 – 160

[15] Pitman E B and Le L. A two-fluid model for avalanche and debris flows [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2005, 363: 1573 – 1601

[16] Mangeney – Castelnau A, Vilotte JP, Bristeau MO, et al. Numerical modeling of avalanches based on Saint – Venant equations using a kinetic scheme [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108: 2527

[17] Patra A K, Bauer A C, Nichita C C, et al. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2005, 139: 1 – 21

[18] 唐川. 泥石流堆积泛滥过程的数值模拟及其危险范围预测模型的研究 [J]. 水土保持学报, 1994, 8(1): 45 – 50 [Tang Chuan. Numerical simulation of debris flow inundation on the alluvial fans and its prediction model of the risk areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(1): 45 – 50]

[19] 韦方强, 胡凯衡, Lopez JL, 等. 泥石流危险性动量分区方法与应用 [J]. 科学通报, 2003, 48(3): 298 – 301 [Wei Fanqiang, Hu Kaiheng, Lopez JL, et al. Method and application of the momentum model for debris-flow risk zoning [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(3): 298 – 301]

[20] 王纯祥, 白世伟, 江崎哲郎, 等. 基于 GIS 泥石流二维数值模拟 [J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1359 – 1368 [Wang Chunxiang, Bai Shiwei, Esaki Tetsuro, et al. GIS – based two-dimensional numerical simulation of debris flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1359 – 1368]

[21] 李同春, 李杨杨, 章书成, 等. 泥石流泛滥区域数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(6): 1 – 4 [Li Tongchun, Li Yangyang, Zhang Shucheng, et al. Numerical simulation on inundation area of debris flow [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(6): 1 – 4]

[22] 樊赟赟. 泥石流动力过程模拟及特征研究 [D]. 北京: 清华大学, 2010. [Fan Yunyun. Numerical simulation of debris flows and study of their characteristics [D]. Beijing: Tsinghua University doctoral thesis, 2010.]

[23] Chau K T, Lo K H. Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4: 103 – 116

[24] Wu Jian, Chen Guangqi, Zheng Lu, ZhangYingbin. GIS – based numerical modeling of debris flow motion across three-dimensional terrain [J]. J. Mt. Sci., 2013, 10(4): 522 – 531

[25] 兰恒星, 周成虎, 王小波. 泥石流本构模型及动力学模拟研究现状综述 [J]. 工程地质学报, 2007, 15(3): 314 – 321 [Lan Hengxing, Zhou Chenghu, Wang Xiaobo. A literature review on debris flow constitute model and its dynamic simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(3): 314 – 321]

[26] O'Brien J S, Julien P Y, Fullerton WT. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. J. Hydraul. Eng., 1993, 119(2): 244 – 261

[27] 余斌. 美国纽约州立大学布法罗分校火山碎屑流和泥石流数学模型研究近况 [J]. 山地学报, 2005, 23(1): 126 – 128 [Yu Bin. Research on the numerical model of pyroclastic flow and debris flow in the State University of New York at Buffalo [J]. Mountain Research, 2005, 23(1): 126 – 128]

[28] Yu B, Dalbey K, Webb A, et al. Numerical issues in computing inundation areas over natural terrains using Savage – Hutter theory [J]. Nat Hazards, 2009, 50: 249 – 267

[29] GMFG. Titan2d user guide [R/OL]. 2007. [2014 – 08 – 10] http://www.gmfg.buffalo.edu.

[30] Maeno F, Hogg A J, Sparks R, Matson G. Unconfined slumping of a granular mass on a slope [J]. Physics of Fluids, 2011, 25: 023302.

[31] 樊赟赟, 王思敬, 王恩志. 一维泥石流的静动力阻力特征研究及数值模 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 857 – 861 [Fan Yunyun, Wang Sijing, Wang Enzhe. Characteristics of static and ynamic resistance of one-dimensional debris flow and its numerical simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 857 – 861]

[32] Juez C, Murillo J, Garcia – Navarro P. 2D Simulation of granular flow over irregular steep slopes using global and local coordinates [J]. Journal of Computational Physics, 2013, 255: 166 – 204

[33] 高杨, 殷跃平, 邢爱国, 等. 鸡尾山高速远程滑坡 – 碎屑流动力学特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 46 – 51 [Gao Yang, Yin Yueping, Xing Aiguo, et al. Jiweishan rapid and long run-out landslide-debris flow dynamic characteristics analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 46 – 51]

[34] Hungr O, Morgenstern N R. Experiments on the flow behavior of granular materials at high velocity in an open channel flow [J].

Geotechnique, 1984, 34: 305 – 413

[35] 余斌,杨永红,苏永超,等. 甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究 [J]. 工程地质学报,2010, 18(4): 437 – 444 [Yu Bin, Yang Yonghong, Su Yongchao, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu county, Gansu province, August 7, 2010 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 437 – 444]

Improvement and Application of Open-source Code TITAN2D for Numerical Simulation of Dry Granular Avalanche Flows over Natural Terrain

YUAN Li, LIU Wei, ZHAI Jian

(*LSEC and Institute of Computational Mathematics, Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract: The inundating zones and impacting forces of incurred by landslide – and avalanche-debris flows can be studied numerically by using shallow granular flow models. A shallow flow model is a set of approximate equations derived from depth average of the mass and momentum balance equations of fluid mechanics, and has attracted widespread attention due to its simplicity in analysis. Although a lot of simulation studies based on shallow granular flow models (typically the Savage – Hutter model) have been conducted in the past, few open source codes are available for modeling granular avalanche flows over natural terrains. In 2007 an open source code named TITAN2D was issued by the University at Buffalo. It features a combination of the shallow granular flow model with the geographic information system (GIS). In this paper, the numerical flux scheme used in the original TITAN2D is modified from HLL to HLLC scheme, and the stopping criteria for granular materials are added to TITAN2D. The effectiveness of the improved code is verified in simple granular pile and dam break problems. Furthermore, by utilizing the open digital elevation model (DEM) database at CAS – CSDB web site, Wulong Jiweishan landslide and Zhouqu debris flow were simulated as dry granular avalanches. Numerical results obtained by tuning the bed friction angle can partially reflect the inundating zones of the real disasters but reveal differences, indicating that TITAN2D is worthy of development and needs further improvement.

Key words: granular avalanche flow; Savage – Hutter model; stopping criterion; open source code; TITAN2D