

文章编号: 1000-7598 (2009) 增刊 2-0524-04

# 碎屑流沿坡面运动的数值模拟

鲁晓兵<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1</sup>, 崔 鹏<sup>2</sup>

(1.中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2.中国科学院山地灾害与环境研究所地表过程与山地灾害重点实验室, 成都 610041)

**摘 要:** 根据 Savage 提出的碎屑流运动方程, 分析了碎屑流沿坡面下滑过程中的运动特性, 包括速度分布和高度分布的变化。重点考察了床面摩擦系数、土体内摩擦角、初始运动速度和坡角等因素对碎屑流运动形态的影响。研究表明, 在不同的因素组合情况下, 碎屑体的运动形态有明显的区别。土体内摩擦角和坡角对碎屑流的运动形态和最大运动距离影响明显。相对来说, 床面摩擦角对碎屑流的最大运动距离影响不明显, 这可能是因为床面摩擦只影响靠近床面的部分物质的运动。

**关 键 词:** 碎屑流; 运动; 滑坡

**中图分类号:** TU 441

**文献标识码:** A

## Numerical simulation of clastic grain flow along a slope

LU Xiao-bing<sup>1</sup>, ZHANG Xu-hui<sup>1</sup>, CUI Peng<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The characteristics of clastic grain flow along a non-uniform slope have been discussed based on the controlling equation presented by Savage. The effects of bed friction coefficients, internal friction angles of clastic flow, initial velocity and the slope angle are mainly analyzed. It is shown that the movement of clastic flow is obviously different under different combinations of factors. The internal friction angle and the slope angle affect the movement configuration and the maximum movement distance obviously. However, the bed friction affects the maximum distance little because it only affects the grains near the bed.

**Key words:** clastic grain flow; movement; landslide

## 1 引 言

目前, 很多矿山、采石场等将废弃物堆放于附近的山坡上, 当遇到地震或附近的爆破作业等情况时, 或者当滑坡体与山体碰撞粉碎后, 散体堆积物就会沿坡滑下, 形成碎屑流<sup>[1-3]</sup>, 给沿途的居民带来灾害。如 2008 年 5 月 12 日汶川地震后, 发生了大量的山体碎屑流(图 1), 给周围生态和人民生命财产带了巨大的破坏<sup>[4-5]</sup>。碎屑流与滑坡不同, 不是沿滑动面的整体, 而是呈颗粒介质的流动; 与泥石流也不同, 它主要是以颗粒为主体的运动, 液体对运动不起重要影响(图 2)。因此, 不论从工程应用, 还是从理论研究角度, 对碎屑流的运动特性有必要进行研究。从图 2 可以看出, 碎屑流在运动过程中, 堆积体高度将随坡体或沟道发生向前缘会聚或堆积

区域扩展而堆积高度减小的情况。为了探讨这些现象的成因, 确定其范围和运动特征, 从而为潜在的破坏规模和范围分析提供参考, 采用颗粒流模型结合数值模拟方法, 考察各影响因素变化时碎屑流运动中堆积形态和运动特性。

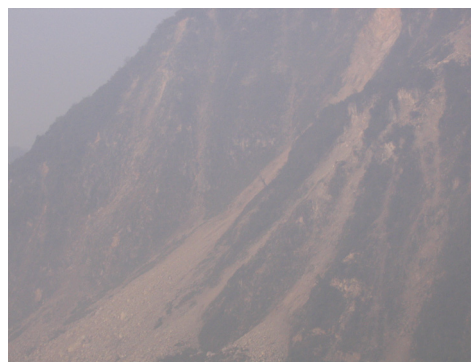


图 1 映秀镇牛圈沟口山体碎屑流  
Fig.1 Cluster in Niu Juan Gully of Yingxiu

收稿日期: 2009-06-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”(No. 2008CB425802); 中科院三期创新方向性项目(No. KZCX2-YW-302-02)。

第一作者简介: 鲁晓兵, 男, 1968 年生, 副研究员, 主要从事岩土力学方面的研究。E-mail: xblu@imech.ac.cn

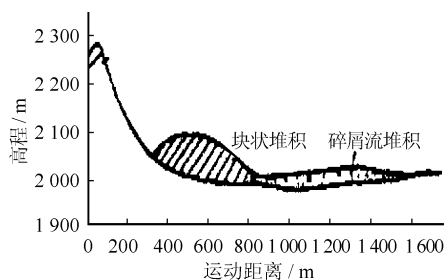


图2 碎屑流的堆积形态  
Fig.2 Accumulation form of clastic flow

## 2 问题和数学表述

针对要解决的问题，将模型简化为如下的情况：当散体堆积物受到外部扰动后，沿坡面下滑，流体前端位置为  $s_f$ ，后端位置为  $s_a$ ，长度  $l = s_f - s_a$ ，坡角为  $\theta$ ，坡面的曲率半径为  $R$ ， $u$  为下滑速度， $H$  为堆积体垂直于  $s$  面的高度， $l$  为堆积体切于  $s$  面长度，如图 3 所示。设  $\delta$  为床面摩擦角， $\lambda = l/R$ ， $k = 1/R$ ， $\varepsilon = H/L$ ， $\bar{u} = u/\sqrt{gl}$ ， $\bar{h} = h/l$ ， $\bar{t} = t/\sqrt{l/g}$ ， $\bar{s} = s/l$ ， $g$  为重力加速度。这样，就得到如下的无量纲控制方程，为简便起见，下式中各量上标“-”略去<sup>[6]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial s} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} &= g \sin \theta - \tan \delta \operatorname{sgn}(u) \\ (\cos \theta + \lambda ku^2) - \varepsilon g K_{\text{actpass}} \cos \theta &\frac{\partial h}{\partial s} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

且

$$K_{\text{actpass}} = \frac{2 \left[ 1 \mp \sqrt{1 - (1 + \tan^2 \delta) \cos^2 \varphi} \right]}{\cos^2 \varphi} - 1 \quad (2)$$

式中： $\varphi$  为土内摩擦角。

初始条件为

$$h_0 = f_1(s), u_0 = 0, s_f = 1.0, s_a = 0 \quad (3)$$

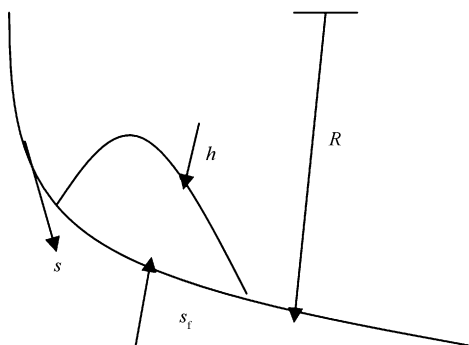


图3 模型示意  
Fig.3 Sketch of the model

边界条件为

$$s = s_f, \text{ 或 } s = s_a, h(s, t) = 0 \quad (4)$$

为了规整计算区域，引入以下坐标变换，使计算网格容易划分。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= t \\ x &= (s - s_a)/l \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $x$  的变化范围为从 0 到 1，则其他量的范围随之而变化。

## 3 计算结果与讨论

本节中将用 NND<sup>[7]</sup>差分格式对上述方程进行离散，然后变化模型中的参数，考察各参数的影响。在计算中，基本参数取如下值： $l = 250 \text{ m}$ ， $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，无量纲的（即规整化的）初始最高点为 0.1，长度为 1.0，初始高度分布为  $h_0 = f_1(x) = 0.1 \sin(x\pi)$ 。计算中时间步长为 0.001，长度步长为 0.01。在后面各图中横坐标  $x$  表示离起始点的距离，纵坐标  $U$  表示速度， $h$  表示堆积体高度。因为各量是无量纲的，且计算域经过式 (5) 规整化，故以下各图中的纵横坐标均是无单位的。

### 3.1 初始速度的影响

图 3(a)给出了初始速度给定时，不同时刻碎屑体的位置和高度。图 3(b)给出了不同初始速度条件下在运动某给定时间后碎屑体的高度和位置。从图中可以看出，随着初始速度的增加，碎屑体的运动速度和运动距离逐渐增大。初始速度越大，前部堆积的厚度越大，后部的高度越低。在坡脚较大时，碎屑流体前部高度降低，后部高度增加。这是因为碎屑体下滑力大，前部阻力小而滑动快的缘故。

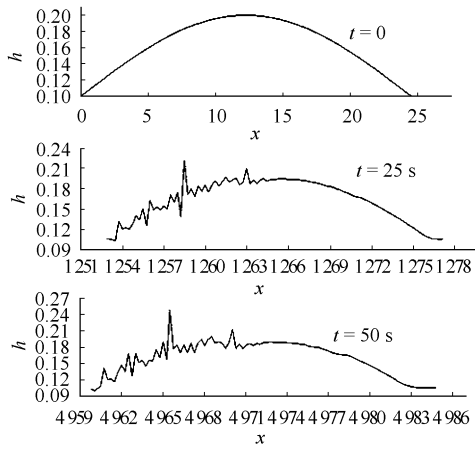
### 3.2 内摩擦角的影响

从图 4 可以看出，随着碎屑体内摩擦角的减小，碎屑体的速度分别沿坡面方向越来越均匀，碎屑体高度与初始高度的差别越来越小。这是因为当内摩擦角小时，颗粒之间的相互作用也小，速度就较均匀，堆积形态变化也小。而当内摩擦角大时，由于内部运动阻力增大，碎屑流逐渐向后方聚集，速度的变化主要在发生堆积的位置。

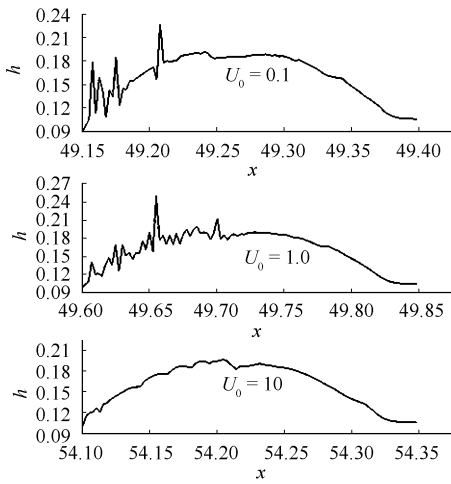
### 3.3 床面摩擦角的影响

从图 5 可以看出，床面摩擦角的影响较其他因素的影响小。当床面摩擦角大于某值后，速度分布和高度不再变化。这是因为床面摩擦角主要控制接近床面的碎屑体的运动，并进而影响内部的运动。当只要床面摩擦角大于碎屑体内摩擦角和坡角时，其对碎屑体近床面部分的影响就基本一样，结果碎

屑流的运动特征就主要由其他因素如坡角、内摩擦角等控制。



(a)  $u_0 = 1.0$



(b) 高度 ( $t=50$  s)

图3 初始速度的影响

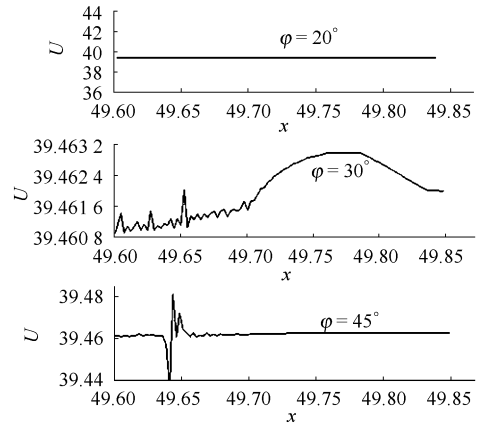
Fig.3 Effects of initial velocity

### 3.4 坡角的影响

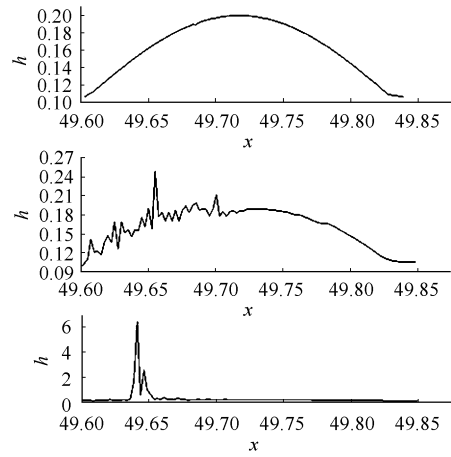
从图6可以看出,坡角大时,碎屑体的运动加速度大,前段受到的阻力小,速度快,坡体厚度逐渐变小;后段由于受到前段的阻碍,运动慢,几乎呈整体滑动形式。坡角小时,阻力大,运动速度越来越小,于是出现堆积,并在堆积体中段逐渐出现隆起,即“龙头”(图4)。

## 4 结语

本文分析了碎屑流沿坡面运动过程中的运动特性和堆积形态,重点考察了床面摩擦角、土体内摩擦角、初始速度和坡角对碎屑流堆积形态的影响。定性解释了一些情况。研究表明,随着初始速度的增加,碎屑体的运动速度和运动距离逐渐增大。随着碎屑体内摩擦角的减小,碎屑体的速度分别沿坡面方向越来越均匀,碎屑体高度与初始高度的差



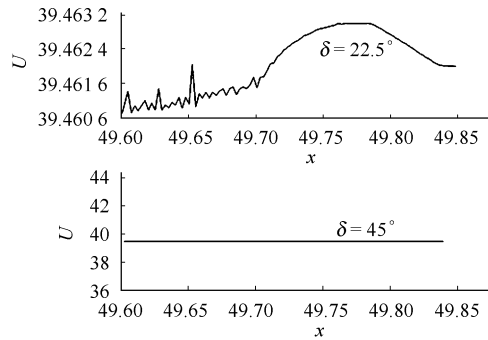
(a) 速度 ( $t=50$  s)



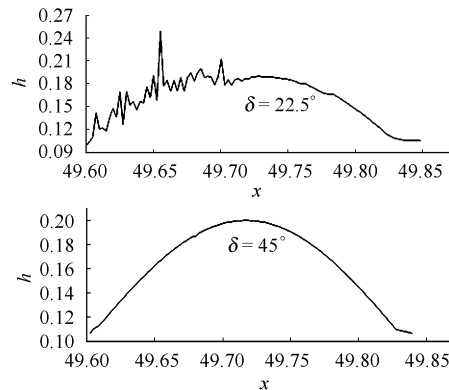
(b) 高度 ( $t=50$  s)

图4 堆积体内摩擦角

Fig.4 Effects of internal friction angle



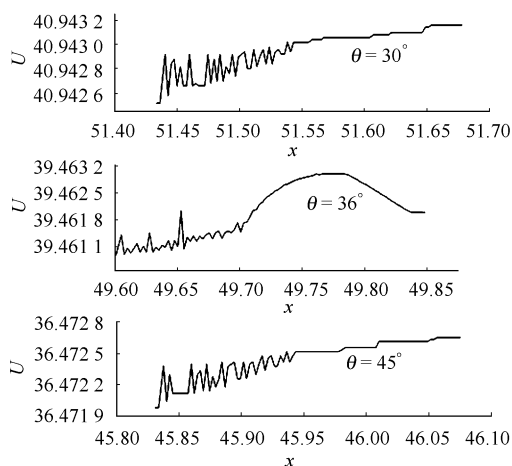
(a) 速度 ( $t=50$  s)



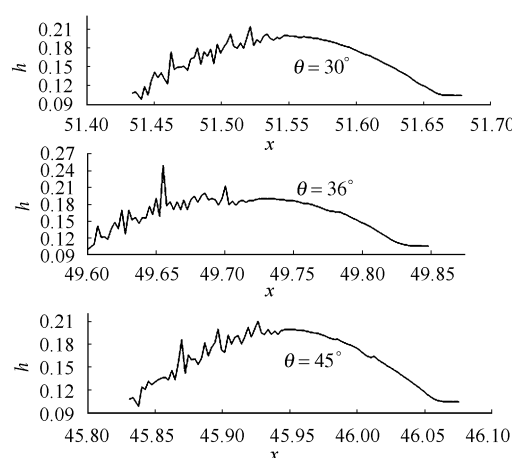
(b) 高度 ( $t=50$  s)

图5 床面摩擦角的影响

Fig.5 Effects of friction angle of slope bed



(a) 速度 ( $t=50\text{ s}$ )



(b) 高度 ( $t=50\text{ s}$ )

图 6 坡角的影响

Fig.6 Effects of slope angle

别越来越小。当床面摩擦角大于某值后，速度分布和高度不再变化。坡角小时，阻力大，运动速度越来越小，于是出现堆积，并在堆积体中段逐渐出现隆起，即“龙头”。本文没有考虑初始堆积形态，沿程有堆积（残留）时，以及考虑平面堆积时，其运动特性如何变化，还有待于进一步的研究。

### 参考文献

- [1] 贺可强, 安振远. 崩滑碎屑流的形成条件与形成类型[J]. 河北地质学院学报, 1996, 19 (3-4): 344-351.
- [2] 陈自生, 张晓刚. 1994-04-30 四川省武隆鸡冠岭滑坡→崩塌→碎屑流→堵江灾害链[J]. 山地灾害, 1994, 12 (4): 225-229.
- [3] 朱平一, 王成华, 唐邦兴. 西藏特大规模碎屑流堆积特征[J]. 山地学报, 2000, 18 (5): 453-456.
- [4] 崔鹏, 韦方强, 何思明等. 5.12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 280-282.
- [5] 崔鹏, 长江上游及西南诸河泥石流及其减灾对策[J]. 中国水土保持, 2008, 12: 31-34.
- [6] SAVAGE S B, HUTTER K. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout(Part I): analysis[J]. ACTA Mechanica, 1991, 86: 201-223.
- [7] 张涵信. 无振荡、无耗散的差分格式[J]. 航空学报, 1988, (1): 1-12.