

文章编号: 1000-7598-(2007)增刊-0155-05

黏性泥石流沟道侵蚀启动机制研究

何思明^{1,2}, 吴永^{1,2}, 李新坡^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 黏性泥石流具有非常强的侵蚀能力, 在其运动过程中不断地对沟道进行下蚀和侧蚀, 并将沟道中大量的松散物质带走, 增大了泥石流的危害性。根据黏性泥石流本构模型和土体抗剪强度理论, 以极限分析的上限定理为工具, 在假定沟床以圆弧面侵蚀的条件下, 研究了黏性泥石流运动对沟道土体的侵蚀启动机制, 建议了相应的计算公式和判断准则, 讨论了泥石流重度、沟道坡降、土体强度等因素对沟道土体受泥石流侵蚀启动速度的影响。

关键词: 上极限定理; 泥石流; 沟道; 侵蚀启动

中图分类号: TU 458; TU 753.8

文献标识码: A

Research on eroded start mechanism of channel debris flow

HE Si-ming^{1,2}, WU Yong^{1,2}, LI Xin-po^{1,2}

(1. Key laboratory of Mountain Hazard and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Chengdu Research Institute of Environment and Disaster in Mountainous Regions Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The viscous debris flow has a very strong eroded ability. It can erode a large amount of loose matters by its constantly erosion or lateral erosion and take them away during its flowing process, which makes it become more dangerous. According to the debris flow constitutive model and soil shear strength theory, take the upper bound theorem used in limit analysis as measure, and under the condition of assuming the erosion surface as arc, the startup mechanism of corroding to the ditch is studied. Then the corresponding calculating formula and judging criteria are suggested. At last, the influence of some factors on the erosion start velocity, such as the gravity, the falling gradient, the strength of the soil and so on, is discussed intensively.

Key words: upper limit theorem; debris flow; eroded start

1 前言

泥石流是山区常见的一种自然现象, 是介于滑坡、崩塌等块体运动与挟沙水流运动之间的一系列连续运动^[1], 它爆发突然, 危害巨大, 防不胜防, 是一种常见的山地自然灾害, 也是降雨、地形地貌、地质构造、固体堆积物、植被覆盖度及人类活动等因素共同作用的结果^[2]。

泥石流具有非常强的侵蚀能力, 在其运动过程中, 不断地对沟道进行下蚀和侧蚀, 并将沟道中大量的松散物质带走, 增大了泥石流的危害性^[3, 4]。泥石流的沟道侵蚀主要包括下切侵蚀、侧蚀以及溯源侵蚀等三种形式, 尤以下切侵蚀最为显著。一般来说, 泥石流流量大、流速快时, 发生沟床侵蚀;

反之则发生淤积。

目前有关泥石流沟道侵蚀的研究文献不多, 也不深入, 大多还停留在现象描述方面, 对其机制问题还存在许多模糊认识。为此, 本文以极限分析的上限定理为工具, 在假定沟床以圆弧面侵蚀的条件下, 研究了黏性泥石流运动对沟道土体的侵蚀启动机制, 详细分析了影响泥石流侵蚀速度的各种因素包括: 泥石流重度、流速、沟道坡降、土体强度等的影响。是关于沟道泥石流侵蚀机制研究的一次尝试。

2 黏性泥石流在沟道中的运动特征

2.1 黏性泥石流本构关系

黏性泥石流属于层流型, 层间无质量交换。其

收稿日期: 2007-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.40572158); 交通部西部科技项目: 国道 317 线西藏段公路边坡病害超前诊断及处治技术研究。

作者简介: 何思明, 男, 1968 年生, 博士, 研究员, 主要从事山地灾害形成机理及防治技术研究。E-mail: hsm112003@yahoo.com.cn

黏性剪应力远大于紊流剪应力。因此,黏性泥石流的本构方程可用 Bingham 模型表达^[5, 6]:

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{du}{dy} \quad (1)$$

式中: τ 为泥石流剪应力; τ_B 为泥石流浆体的屈服剪应力; η 泥石流的黏滞系数; u 为泥石流的流速。

2.2 泥石流在沟道中的流速分布及沟底剪应力

考察如图 1 所示的沟道泥石流问题,在层流条件下典型沟道黏性泥石流的速度分布可按下列式表达^[7, 8] (Egashira, et al., 1989 年; Takahashi, 1980 年):

$$u(y) = \frac{5}{3} u_m \left[1 - \left(1 - \frac{y}{h} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (2)$$

式中: u_m 为沟道泥石流的平均流速; h 为泥深。

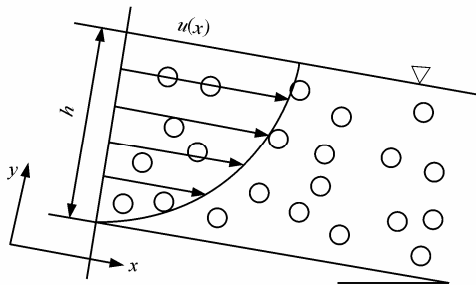


图 1 泥石流在沟道流动过程中的速度分布

Fig.1 Distribution of velocity of debris flow under different stretching depths in ditch

将式 (2) 代入式 (1), 可以求出任意位置处泥石流的剪应力:

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{5u_m}{2h} \sqrt{1 - \frac{y}{h}} \quad (3)$$

式中: τ 为泥石流切应力; τ_B 为泥石流屈服应力; η 为泥石流黏滞系数。

相应地, 沟底泥石流的剪应力为

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{5u_m}{2h} \quad (4)$$

式中 τ_d 为泥石流沟底切应力。

3 极限分析上限定理^[9]

极限分析法在 20 世纪 50 年代初已由 Drucker 等运用于土力学中, 现已广泛应用于地基、边坡等土工稳定性问题。极限分析法采用塑性理论中的上、下限定理来确定稳定性问题的真实解的范围。通过求解最小的上限解和最大的上限解, 可以有效地缩小这个真实解的范围。极限分析上限定理的证

明要求下的假定^[5]: (1) 岩土体为理想塑性材料; (2) 岩土体屈服方程满足在应力空间内外凸; (3) 岩土体服从相关联流动法则。上限法中, 如果假设破坏岩土体以刚体形式运动, 则只需求解一个简单的方程。上限定理要求对于任意机动容许的破坏机制, 内能损耗率不小于外力功率, 可用下式表示 (Drucker 等, 1952 年):

$$\int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV \geq \int_S T_i v_i dS + \int_V X_i v_i dV, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (5)$$

式中: X_i 为体积力; T_i 为表面力; v_i 为机动容许的速度场; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为与 v_i 相容的应变率场; σ_{ij} 为与 X_i 和 T_i 关联的应力场, 另外, S 和 V 分别为表面力作用面积和破坏的岩土体体积。孔隙水压力和地震荷载对边坡稳定的影响可以在上式左边第二项中加以考虑, 本文为简化计算, 不予考虑。对于简单的边坡稳定性问题, 外力做功为发生破坏部分土体的重力做功; 而内能耗散则仅发生在沿破坏面的速度间断面上。

4 泥石流沟道土体侵蚀启动机制

考察如图 2 所示的泥石流沟道侵蚀模型, 假设泥石流对沟道土体以圆弧面的形式侵蚀, 施加在沟床侵蚀土体上的荷载有泥石流重力、泥石流施加在沟床表面上的切应力、侵蚀部分土体的重力等。

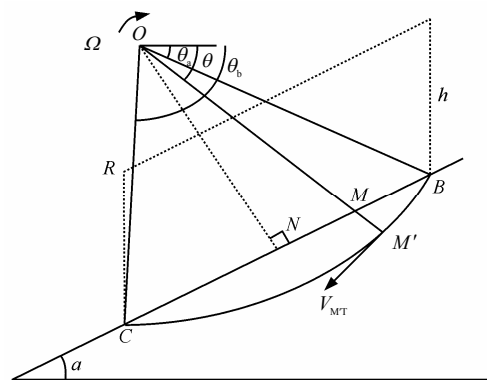


图 2 泥石流沟道侵蚀计算模型

Fig.2 Calculation model of the debris flow corroding to ditch

假设泥石流对沟道的侵蚀是绕圆心 O 点旋转的圆弧面侵蚀, 那么可以采用极限分析的上限定理对本问题进行研究, 下面分别系统的计算外力功和能量耗散。

4.1 外力功的计算

外功率由泥石流重力, 拖拽力和沟床扇缘部分

产生的外力功率组成，分别按照如下方法计算。

(1) 沟床 BC 上部塑性泥石流的功率

在泥石流重力作用下，沟床面受到得均布泥石流荷载作用。根据相关的几何关系，可以推导出泥石流重力所做的外力功。

$$W_G = \gamma_p h \Omega R^2 \cdot \frac{\cos^2\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right)}{\cos \varphi} \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\theta_b + \theta_a}{2}\right) \ln \left[\frac{1 + \sin\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right)} \right] \quad (6)$$

式中： W_G 为泥石流重力所做的外力功； Ω 为旋转机构的角速度； h 为泥石流的泥深； γ_p 为泥石流的重度， φ 为沟床土体的内摩擦角； R 为圆弧半径； θ_b 、 θ_a 分别为 OB 、 OC 与水平面的夹角。

(2) 泥石流沟床切应力所做功

泥石流在运动过程中，在沟床会产生切应力，切应力所做的外力功为

$$W_\tau = \left(\tau_B + \eta \frac{5u_m}{2h} \right) \Omega R^2 \frac{\cos^2\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right)}{\cos \varphi} \cdot \int_{\theta_a}^{\theta_b} \left[\frac{\cos\left(\varphi - \frac{\theta_b + \theta_a}{2} + \theta\right)}{\cos^2\left(\frac{\theta_b + \theta_a}{2} - \theta\right)} \right] d\theta \quad (7)$$

式中： W_τ 为沟床切应力所做的外力功，其他符号意义同前。

(3) 侵蚀土体所做外力功

被侵蚀掉的沟床土体所做的外力功可以表达为

$$W_s = \frac{1}{3} \Omega R^3 \gamma_s \left[\sin \theta_b - \sin \theta_a - \cos\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_b + \theta_a}{2}\right) \sin(\theta_b - \theta_a) \right] \quad (8)$$

式中： W_s 为沟床切应力所做的外力功； γ_s 为侵蚀土体的重度，其他符号意义同前。

4.2 内部能量耗散

在极限状态下，滑体沿间断面 $\widehat{BC}$ 的能量耗散的微分速率应等于间断微分面积 $Rd\theta$ 、切向速度均值 ΩR 及凝聚力 C 三者的乘积，在速度（角度）间断面上进行积分，即得总能量耗散：

$$W = \int_{\theta_a}^{\theta_b} C \Omega R R d\theta = \Omega C R^2 (\theta_b - \theta_a) \quad (9)$$

式中： W 为速度间断面上的能量耗散； C 为侵蚀土体的内聚力；其它符号意义同前。

4.3 土体侵蚀临界方程的建立

根据极限分析得上限定理，则有

$$W = W_G + W_\tau + W_s \quad (10)$$

$$c(\theta_b - \theta_a) = \ln \left[\frac{1 + \sin\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right)} \right] \cos^2\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right) \cdot \left[\gamma_p h \frac{\cos\left(\varphi + \frac{\theta_b + \theta_a}{2}\right)}{\cos \varphi} + \tau_B + \eta \frac{5V}{2h} \right] + \frac{1}{3} \gamma_s R \left[\sin \theta_b - \sin \theta_a - \cos\left(\frac{\theta_b - \theta_a}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_b + \theta_a}{2}\right) \sin(\theta_b - \theta_a) \right] \quad (11)$$

令 $\theta = \theta_b - \theta_a$ ，则有

$$u_m = \frac{2h}{5\eta} \cdot \left[\frac{2\theta C - \frac{2R\gamma_s \sin \alpha \sin^3 \theta}{3}}{\cos^2 \theta \ln\left(\frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta}\right)} - \gamma_p h \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi} - \tau_B \right] \quad (12)$$

本式建立了泥石流侵蚀启动平均速度与各影响因素之间的定量关系。

5 影响泥石流沟道土体侵蚀启动的因素分析

为研究各因素对泥石流侵蚀启动速度的影响，笔者以如下算例为基础进行因素敏感度分析。

某沟道泥石流，泥石流泥深 $h = 0.5$ m，泥石流为黏性泥石流，其本构关系满足 Bingham 模型，浆体屈服强度 $\tau_B = 0.2$ kN/m³、黏滞系数 $\eta = 0.240$ N/m²，泥石流重度 $\gamma_p = 20$ kN/m³，沟床坡度 $\alpha = 10^\circ$ ，沟床土体重度 $\gamma_s = 21$ kN/m³，土体内摩擦角 $\varphi = 13^\circ$ ，凝聚力 $c = 15$ kPa。

(1) 沟床及其侵蚀土体性质对泥石流侵蚀启动速度的影响

在泥石流性质、侵蚀土体形状完全确定的条件下，分别研究了沟床坡降、侵蚀土体重度、内聚力、内摩擦角对泥石流侵蚀启动速度的影响，结果见图 3~6。结果表明，泥石流侵蚀启动速度随沟床倾

角的增加而降低;随沟床侵蚀土体重度的增加而降低;随侵蚀土体内聚力的增加几乎呈线性关系增加;随侵蚀土体内摩擦角的增加而近似线性关系增加。

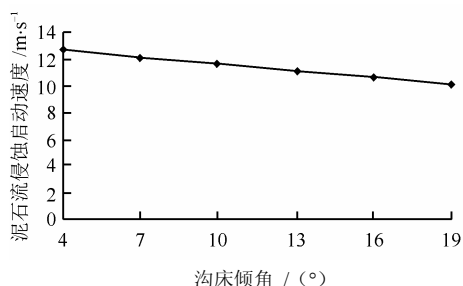


图3 泥石流侵蚀启动速度随沟床倾角的变化
Fig.3 The change of the erosion start velocity with the ditch obliquity

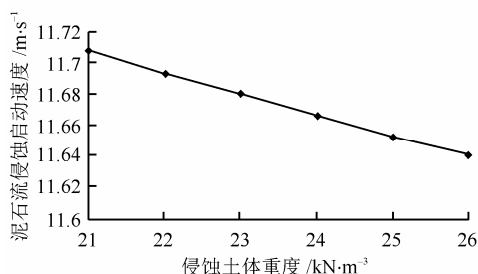


图4 泥石流侵蚀启动速度随侵蚀土体重度的变化
Fig.4 The change of the erosion start velocity with the soil gravity

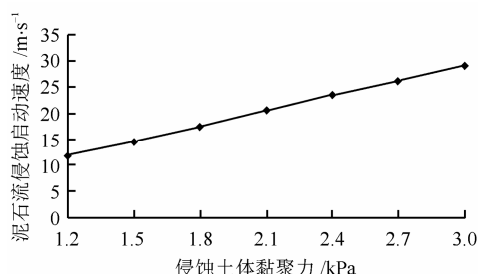


图5 泥石流侵蚀启动速度随侵蚀土体黏聚力的变化
Fig.5 The change of the erosion start velocity with the soil cohesion

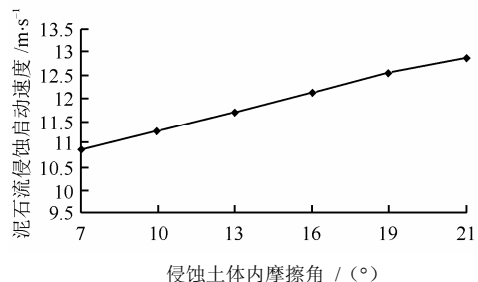


图6 泥石流侵蚀启动速度随侵蚀土体内摩擦角的变化
Fig.6 The change of the erosion start velocity with the internal friction angles of the soil

(2) 泥石流性质对沟床侵蚀启动速度的影响在沟床倾角、侵蚀土体以及侵蚀土体形状确定

的条件下,笔者分析了泥石流性质(泥石流泥深、泥石流黏滞系数、浆体屈服应力以及泥石流重度)对其侵蚀启动速度的影响,结果分别见图7~10。结果表明,泥石流侵蚀启动速度随泥深的增加而迅速增大;随黏滞系数的增加而减小;随泥石流浆体屈服剪应力的增加而减少;随泥石流重度的增加而增加。

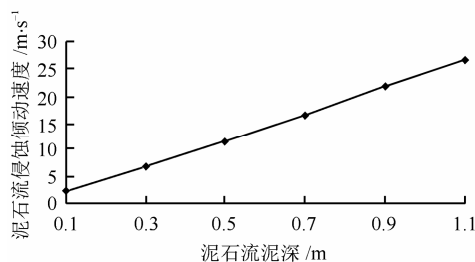


图7 泥石流侵蚀启动速度随泥石流泥深的变化
Fig.7 The change of the erosion start velocity with the debris flow depth

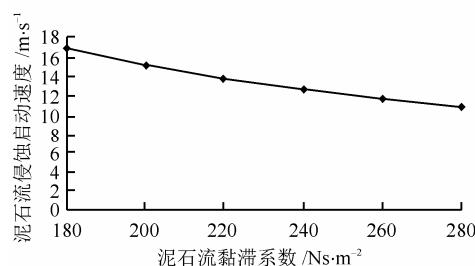


图8 泥石流侵蚀启动速度随泥石流黏滞系数的变化
Fig.8 The change of the erosion start velocity with the viscosity coefficients

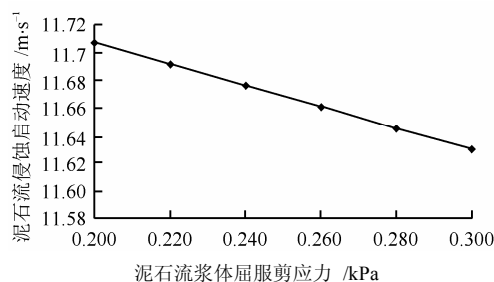


图9 泥石流侵蚀启动速度随泥石流浆体屈服剪应力的变化
Fig.9 The change of the erosion start velocity with the yield shear stress of debris flow slurry

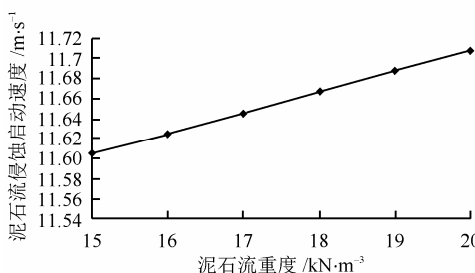


图10 泥石流侵蚀启动速度随泥石流重度的变化
Fig.10 The change of the erosion start velocity with the debris flow gravity

(3) 侵蚀土体形状、大小对泥石流侵蚀启动速度的影响

在泥石流和沟床土体完全确定的条件下,笔者等分别研究了泥石流侵蚀启动速度与侵蚀圆弧半径、圆心角的关系,结果分别见图 11,图 12。结果表明,泥石流侵蚀启动速度与侵蚀土体圆弧圆心角正相关,与侵蚀土体半径负相关,即侵蚀土体体积越大,泥流速侵蚀启动速度越大。

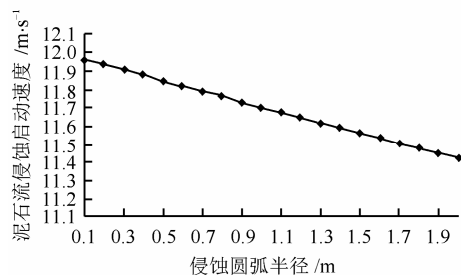


图 11 泥石流侵蚀启动速度随侵蚀圆弧半径的变化

Fig.11 The change of the erosion start velocity with the arc radius

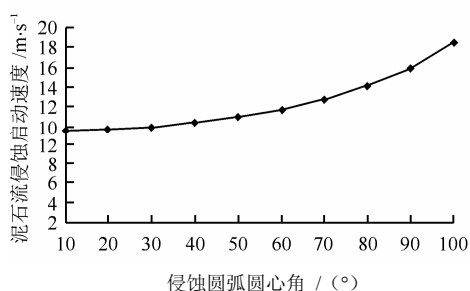


图 12 泥石流侵蚀启动速度随侵蚀土体圆心角的变化

Fig.12 The change of the erosion start velocity with the arc central angles

6 结 论

基于极限分析的上限定理,推导了沟道泥石流侵蚀启动速度的表达式,分析了影响泥石流侵蚀启动速度的各因素的敏感性,并得出了如下结论:

(1) 泥石流侵蚀启动速度随沟床倾角的增加而降低;随沟床侵蚀土体重度的增加而降低;随侵蚀土体内聚力的增加几乎呈线性关系增加;随侵蚀土体内摩擦角的增加而近似线性关系增加。

(2) 泥石流侵蚀启动速度随泥深的增加而迅速增大;随黏滞系数的增加而减小;随泥石流浆体屈服剪应力的增加而减少;随泥石流重度的增加而增加。

(3) 泥石流侵蚀启动速度与侵蚀土体圆弧圆心角正相关,与侵蚀土体圆弧半径负相关,即侵蚀土体体积越大,泥流速侵蚀启动速度越大。

参 考 文 献

- [1] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] 徐永年,匡尚富,黄永健,等. 崩塌土流活化机理的实验研究[J]. 水利学报, 2002, (10): 87—90.
XU Yong-nian, KUANG Shang-fu, HUANG Yong-jian, et al. Experimental study of flow mechanism of avalanche soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (10): 87—90.
- [4] 王裕宜,詹钱登,邹仁元,等. 黏性泥石流体阵性流形成机理研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11 (2): 46—50.
WANG Yu-yi, JAN Chyan-deng, ZOU Ren-yuan, et al. Study on forming mechanism of viscous debris flow surges[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(2): 46—50.
- [5] 熊斌. 黏性泥石流运动机理[博士学位论文 D]. 北京: 清华大学, 1996.
- [6] 沈寿长. 泥石流应力本构关系[J]. 水利学报, 1998 (12): 16—22.
SHEN Shou-chang. Stress constitutive relations for debris flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, (12): 16—22.
- [7] Drago M. A coupled debris flow-turbidity current model[J]. *Ocean Engineering*, 2002, (29): 1 769—1 780.
- [8] Norifumi Hotta, Takehiko Ohta. Pore-water pressure of debris flows[J]. *Phys. Chem. Earth(B)*, 2000, 25(4): 381—385.
- [9] 陈惠发著. 极限分析与土体塑性[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.