

粘性泥石流加速运动的力学分析*

康志成

(中国科学院东川泥石流观测研究站)

提 要 首先论述了四种沙石体运动模式, 还通过理论推导, 求解沙石体运动的加速度、末速度和平均速度的计算公式, 最后分析了沙石体在多级变坡斜面上加速运动的速度计算方法。

关键词 沙石体 运动摩擦角 起动纵坡 变律

松散的土石体和沙石体在暴雨、冰雪融水、地下水等的影响下处在饱和和过饱和状态, 它们从斜坡和沟谷的不同地貌部位上, 通过重力作用所出现的崩滑现象, 都有可能转化成泥石流。下面对土石体产生滑动后所出现的加速运动过程进行分析。

一、沙石体性质变化

当沙石体起动后, 它本身的主要物理力学指标就发生改变, 这些改变有利于运动。由于土石体或沙石体处在饱和状态, 它们运动后, 必然使剪切面的一层沙石体性质发生改变, 在剪切层面之间出现由细颗粒组成的稠泥浆, 它们使静摩擦角减少, 随着运动距离增加, 这种减少也越来越大, 所以沙石体起动后, 它的静摩擦角 φ 大于运动时的摩擦角 φ_m (以下简称运动摩擦角); 运动开始后沙石体的结构力 $C \approx 0$, 它的运动有图 1 中的四种情况。

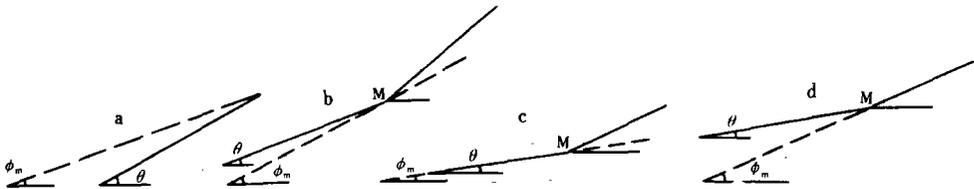


图 1 沙石体运动时几种模式

Fig. 1 Some moving patterns of debris body

1. 若保持在原始起动纵坡 θ 的斜面上运动时或出现在式(1)条件下, 沙石体将沿着斜面作加速运动(见图 1 a).

$$\text{当 } \varphi_m < \theta \text{ 时,} \quad d\theta/dl > d\varphi_m/dl \quad (1)$$

* 本文得到四川大学物理系荀兴华的指正, 在此表示感谢。
本文改回日期: 1991-05-25。

式中 $d\varphi_m/dl$ 为运动摩擦角变律, $d\theta/dl$ 为斜面坡度沿长度方向的变律。

2. $\theta > \varphi_m$, $d\theta/dl > d\varphi_m/dl$, 沙石体作加速运动, 到了 M 点时, $\theta = \varphi_m$, 加速运动停止, 由于 M 点以下出现 $\theta < \varphi_m$, 所以沙石体开始减速(见图 1 b)。

3. 开始时 $\theta > \varphi_m$, 沙石体作加速运动, 到了 M 点以后, 由于 $\theta = \varphi_m$, 沙石体作匀速运动(见图 1 c)。

4. M 点以上, 由于 $\theta = \varphi_m$, 沙石体作匀速运动, M 点以下, $\theta < \varphi_m$, 沙石体作减速运动(见图 1 d)。

除了上述几种情况之外, 还有一些运动状态, 这里就不再列举了。

二、加速段的流速计算方法

设沿 X, Y 方向取单位宽度的立方体 ABCD, 其体积为 $y dx$. 并认为沿深度方向 Y 的颗粒体的速度是均匀的, 其值为 V , 加速度为 a (图 2). 同时略去在 X 和 $X + dx$ 的两个截面上的作用力, 于是沿 X 方向的运动方程 $F = ma$ 可写为

$$\gamma_c y dx \sin \theta - \gamma_c y dx \cos \theta \tan \varphi_m = \gamma_c y dx a/g$$

消去 $\gamma_c y dx$ 得

$$a = g \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m) \quad (2)$$

当沙石体的初速度 $V_0 = 0$ 时, 经过时间 t 的运动速度为

$$V_t = a t = g t \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m) \quad (3)$$

沙石体在时间 t 内的平均速度 \bar{V}_t 有

$$\bar{V}_t = (1/2) a t = (1/2) g t \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m) \quad (4)$$

沙石体在时间 t 内的运动距离 S_t 由下式确定

$$\begin{aligned} S_t &= (1/2) V_t t \\ &= (1/2) g t^2 \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m) \end{aligned} \quad (5)$$

在沙石体经过距离为 S_t 的斜面后所需时间 t 和最后的速度 V_t , 分别为

$$\begin{aligned} t &= \sqrt{\frac{2 S_t}{g \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m)}} \\ &= 1.414 \sqrt{\frac{S_t}{g \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m)}} \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)得

$$V_t = 1.414 \sqrt{S_t g \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m)} \quad (7)$$

当沙石体的运动初速度 $V_0 > 0$ 时, 在加速运动的条件下经历了时间 t 以后的 V_t, \bar{V}_t, S_t 分别为

$$V_t = V_0 + g t \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m) \quad (8)$$

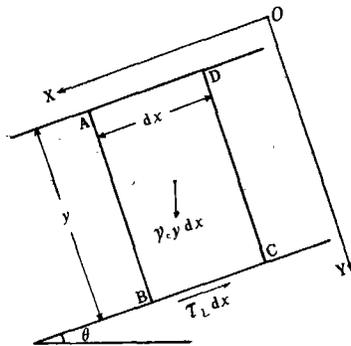


图 2 沿 X 方向运动体的平衡方程示意图

Fig. 2 Equation of moving bodies along X direction

$$\begin{aligned}\bar{V}_t &= (1/2)(V_0 + V_t) \\ &= (1/2)[V_0 + V_0 + g t \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m)] \\ &= V_0 + (1/2) g t \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m)\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}S_t &= t \bar{V}_t \\ &= V_0 t + (1/2) g t^2 \cos \theta (\tan \theta - \tan \varphi_m)\end{aligned}\quad (10)$$

三、在多级变坡斜面上沙石体加速运动的速度计算分析(图 3)

从图 3 中可以看出, 沟床纵坡角 θ 在各个梯级段都大于同段的沙石体的运动摩擦角 φ_m , 同时沟床纵坡逐渐变缓, $\theta_0 > \theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4 > \theta_5$, 而运动摩擦角也逐渐变小, 即 $\varphi_{m0} > \varphi_{m1} > \varphi_{m2} > \varphi_{m3} > \varphi_{m4} > \varphi_{m5}$, 所以沙石体起动后, 在变坡的情况下, 都出现加速运动。

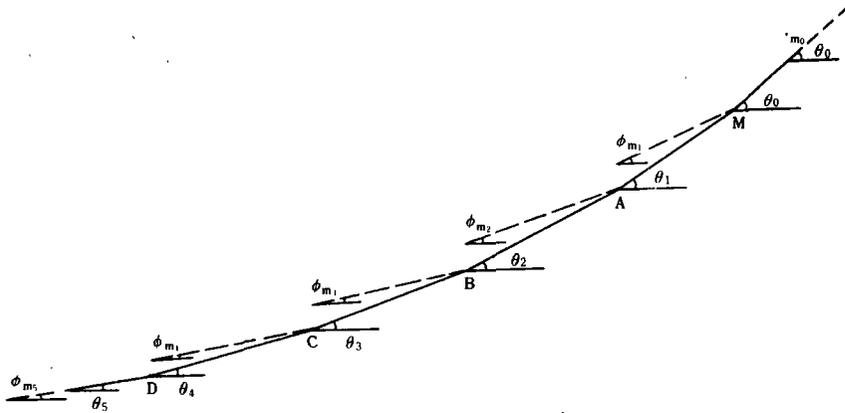


图 3 变坡段斜面沙石体运动坡度变化与运动摩擦角变化图

Fig. 3 Slope changes of moving debris bodies and the changes of motion friction

$$\varphi_{m0} = \theta_0, \varphi_{m1} < \theta_1, \varphi_{m2} < \theta_2, \varphi_{m3} < \theta_3, \varphi_{m4} < \theta_4, \varphi_{m5} = \theta_5;$$

$$\varphi_{m0} > \varphi_{m1} > \varphi_{m2} > \varphi_{m3} > \varphi_{m4} > \varphi_{m5}; \theta_0 > \theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4 > \theta_5$$

为了计算沙石体在每一段的加速度和运动速度, 这里需要对每一段求出平均斜面纵坡和每一段沙石体的运动摩擦角。

M—A 段的加速度 a_A , 末速度 $V_{A\lambda}$ 和平均速度 $\bar{V}_{A\lambda}$ (图 3) 为

$$a_A = g \cos \theta_1 (\tan \theta_1 - \tan \varphi_{m1}) \quad (11)$$

$$V_{A\lambda} = V_0 + g t_A \cos \theta_1 (\tan \theta_1 - \tan \varphi_{m1}) \quad (12)$$

$$\bar{V}_{A\lambda} = V_0 + (1/2) g t_A \cos \theta_1 (\tan \theta_1 - \tan \varphi_{m1}) \quad (13)$$

式中 V_0 为 M 点处的末速度。

沙石体经过 M—A 段的斜面距离 S_A 后, 所需的时间 t_A 由下面的方程式求解:

$$(1/2) g t_A^2 \cos \theta_1 (\tan \theta_1 - \tan \varphi_{m1}) + V_0 t_A - S_A = 0 \quad (14)$$

A—B 段的加速度 a_B , 末速度 V_B 和平均速度 $\bar{V}_{A\lambda}$ (见图 3) 为

$$a_B = g \cos \theta_2 (\tan \theta_2 - \tan \varphi_{m2}) \quad (15)$$

$$V_{AB} = V_{Aa} + g t_B \cos \theta_2 (\tan \theta_2 - \tan \varphi_{m2}) \quad (16)$$

$$\bar{V}_{AB} = V_{Aa} + (1/2) g t_B \cos \theta_2 (\tan \theta_2 - \tan \varphi_{m2}) \quad (17)$$

式中 V_{Aa} 为 A 点处的末速度。

沙石体经过 A—B 段的斜面距离 S_B 后,所需的时间 t_B 由下面的方程式求解:

$$(1/2) g t_B \cos \theta_2 (\tan \theta_2 - \tan \varphi_{m2}) + V_{Aa} t_B - S_B = 0 \quad (18)$$

对于 B—C, C—D...段,均可采用上述方法依次进行计算。

MECHANICS ANALYSIS OF ACCELERATED MOTION FOR VISCOUS DEBRIS FLOW

Kang Zhicheng

(Dongchuan Debris flow Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The loose debris flow in saturation or supersaturation due to rainstorm, meltwater of ice and snow and groundwater etc. occur landslide under gravity action, and then, all of them may form debris flow. Four motion patterns after debris body initinting are systematically discussed in this paper. The calculating formulae of motion acceleration, final and mean velocities of debris bodies in various conditions are derived. At last, the calculating method for accelerated motion of debris bodies on the slope surfaces in analysed.

Key words debris body, moving friction angle, variation law, initintion longiludinal slope