

文章编号: 0258-2724(2001)03-0318-04

# 泥石流松散物质启动条件的分析与计算

白志勇

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 根据松散物质大都有一定固结程度的特点, 分析了沟床纵坡、洪峰流量、松散物质饱和抗剪强度及剪切面积的影响, 建立了松散物质启动条件的判别公式, 为研究松散物质在不同条件下的活动性提供了一种计算方法, 给出了成昆铁路沿线干沟松散物质的计算算例。

**关键词:** 泥石流; 松散体力学; 启动条件; 计算方法

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A

## The Analysis and Calculation of Starting Conditions for the Loose Matters to Form Debris Flow

BAI Zhi-yong

(School of Civil Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** According to the characteristic that most of the loose matters consolidate to a certain extent, the author studied the effects of the factors on the formation of debris flows, such as ditch grade, crest discharge, saturation resistance to shear and shear area of the loose matters. The discriminants for the loose matters to start are proposed. An application of the proposed method to some ravines along the Chengdu Kunming railway line is presented.

**Key words:** debris flow; loose matters mechanics; starting condition; computational methods

在泥石流研究中,对泥石流活动性及危害性的评价,常常取决于有多少松散物质实际可以参加到泥石流活动中去。甚至是否能够定为泥石流,也要看能参加活动的松散物质多少及组成泥石流流体的体积浓度和密度。因此,在松散物质动储量的统计中,松散物质在地表水流作用下能否被启动,就成了至关重要的内容。

对松散物质启动条件(或活动性)的研究,以前主要集中在两个方面:一个方面是从水力学的角度出发,在室内试验槽中铺上砂和土颗粒(部分为塑料颗粒),进行模拟实验,从而总结出相关经验公式。但因使用的砂和土颗粒均被强烈扰动过,颗粒间近似离散状态,故一般视粘聚力为零。而实际情况中大部分松散物质粘聚力影响都非常大,从而造成一定误差<sup>[1,2]</sup>。另一方面是从数理统计的角度出发,用模糊数学和灰色理论等进行统计分析,建立松散物质启动条件的判别式。但用于确定松散物质稳定度的判别原型,依然是靠直观感觉(如表面坍塌程度等),故常使其可信度受到一定影响<sup>[2,3]</sup>。

在现实生活中,除人工弃碴形成的泥石流外,大量的泥石流都发育在崩塌和滑坡等重力堆积普遍发育的地带或强烈风化地区。其松散物质来源主要有崩积岩堆、山体滑坡、支沟洪积扇、坡积层、宽大的断层破碎带物质、强风化地区的巨厚风化残积层、地壳抬升后的古冲、洪积层或古泥石流扇以及现代一般洪水在沟床中的正常沉积物。由于松散物质形成时,不一定具备形成泥石流的降雨条件,有的沟甚至经过十几年、几十年或更长时间才具备形成泥石流的降雨条件。除现代一般洪水的正常沉积物外,大部分松散物质

收稿日期: 2001-02-22

作者简介: 白志勇(1956-),男,副教授。

都具有一定的固结程度,有的甚至固结到特大洪水都难以将其撼动的程度,因此应从松散物质所受各种力的平衡关系去考虑判断松散物质的活动性或启动条件。

## 1 建立计算模型

如图1所示,松散物质在饱水条件下,主要受重力 $G$ 、静摩擦阻力 $F$ 、粘聚力 $C$ 、浮力 $U$ 和水流推力 $R$ 共同作用。重力 $G$ 在沟床底坡上又分解成正压力 $N$ 和下滑力 $T$ ,其分解的比例受沟床底坡坡度角的控制。各个力的确定如下:

(1) 重力 $G = LBH$ ,式中 $L$ 为松散物质长度, $B$ 为松散物质宽度, $H$ 为松散物质高度,为松散物质重度,各参数由现场实测确定。其中重度可用称重法或粒径分析法确定。

(2) 正压力 $N$ 和下滑力 $T$ 由重力 $G$ 与沟床底坡坡度角确定。即 $N = G \cos \theta$ , $T = G \sin \theta$ 。

(3) 饱和粘聚力 $C$ 与饱和内摩擦角,由现场取样后,在室内作饱和抗剪强度试验确定,也可以用现场大面积剪切试验确定。因松散物质中起粘结作用的主要是小颗粒物质,故取样时应以取小颗粒原样为主,不能取扰动样品。粘聚力的计算应以整个剪切面上粘聚力的总和为准,即 $LBC$ 。

(4) 浮力 $U$ 应根据设计频率暴雨洪峰流量 $Q_P$ ,在松散物质堆积处的洪水深度 $h_1$ ,计算而得。即 $U = \gamma_w h_1 LB$ ,式中 $\gamma_w$ 为水流的重度。

(5) 静摩擦力 $F$ 主要考虑松散物质正压力 $N$ 、水流浮力 $U$ 和内摩擦角的影响。 $F = (N - U) \tan \phi$ 。

(6) 水流推力 $R$ 的求取如下:以图1为例,取水流流体控制面如图2所示,控制断面上所受的力有1-1断面的动水压力 $P_1$ ,2-2断面的动水压力 $P_2$ ,水流的重力 $G_w$ ,沟床的支承力 $F'$ ,松散物质的反作用力 $R$ 。

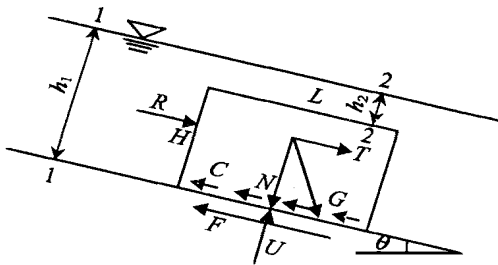


图1 松散物质受力示意

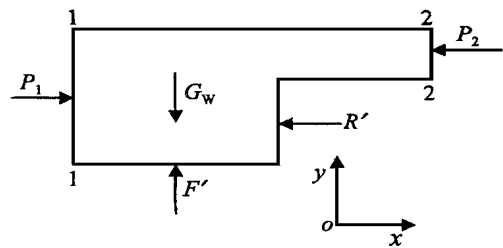


图2 水流推力计算示意

地表水流为不可压缩流体,遇到松散物质后,在1-1断面与2-2断面通过的流量相等,流速不同,为恒定总量流。即 $S_1 V_1 = S_2 V_2 = Q_P$ 。 $S_1$ 与 $S_2$ 和 $V_1$ 与 $V_2$ 分别为1-1断面和2-2断面的面积与流速。对于恒定总量流,可将流体看作由若干紧密相联的运动质点组成的质点系,其动量定理可表述为:在 $dt$ 时间内,质点系的动量变化 $dk$ 等于该质点系所受外力的合力 $F$ 在这一时间内的冲量 $Fdt$ 。即 $dk = d(mu) = Fdt$ 。为便于理解,将恒定总量流简化成图3所示。在恒定总量流中取一束元流,初始时刻元流在1-2位置,经过 $dt$ 时刻后,运动到1'-2'位置。元流过水断面分别为 $ds_1$ 与 $ds_2$ ,流速分别为 $u_1$ 和 $u_2$ 。 $dt$ 时间内元流的动量变化 $dk$ 等于1-2段与1'-2'段流体各质点动量的矢量和之差。因1-2段无变化,所以等于2-2段与1-1段动量的矢量差,根据质量守恒原理,2-2段与1-1段的质量相等(设为 $dM$ )。

则元流的动量变化为

$$dk = dM u_2 - dM u_1 = dM (u_2 - u_1)$$

因元流通过其各过水断面的流量相等,即

$$dQ_1 = dQ_2 = dQ$$

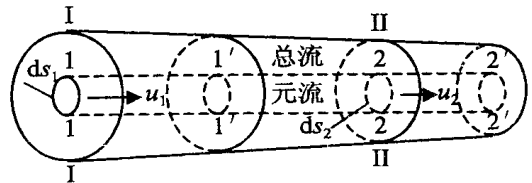


图3 恒定总量流动量分析

故

$$dk = dQdt(u_2 - u_1)$$

式中:  $dQ$  为元流流量;  $\rho$  为流体密度。

总流的动量变化  $dk$  等于所有元流的动量变化之矢量和  $dk$ 。将元流的动量变化沿总流过水断面积分, 则  $dt$  时间内, 总流的动量变化为

$$dk = \int_{s_2} \rho Q dt u_2 - \int_{s_1} \rho Q dt u_1 = dt \left( \int_{s_2} \rho u_2^2 ds - \int_{s_1} \rho u_1^2 ds \right)$$

元流的流速  $u$  一般难以确定, 一般用流体断面平均流速  $V$  代替  $u$  进行计算, 但需用动量修正系数 (实际动量与按  $V$  计算的动量之比) 进行换算。

$$= \frac{\int u^2 ds}{V^2 S}$$

值的大小与总流过水断面上的流速分布有关。一般流动的  $\sigma = 1.02 \sim 1.05$ , 在工程计算中常取  $\sigma = 1.0^{[1]}$ 。

则有

$$dk = dt(\sigma_2 V_2^2 S_2 - \sigma_1 V_1^2 S_1)$$

因  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  断面上流量相等, 即

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 = Q_p$$

$$dk = Q_p dt(\sigma_2 V_2 - \sigma_1 V_1)$$

根据质量系动量定理, 对于总流有  $dk = F dt$ ,  $Q_p(\sigma_2 V_2 - \sigma_1 V_1) = F$ , 合力  $F$  如图 2 所示。在  $x$  轴方向上建立恒定总量流的动量方程

$$Q_p(\sigma_2 V_2 - \sigma_1 V_1) = P_1 - P_2 - R$$

$$R = P_1 - P_2 - Q_p(\sigma_2 V_2 - \sigma_1 V_1)$$

式中:  $P_1 = (1/2) \rho B h_1^2$ ;  $P_2 = (1/2) \rho B h_2^2$ ;  $Q_p$  和  $V_1$  分别为沟谷在松散物质堆积处的设计频率洪峰流量与流速;  $V_2$  由式  $V_2 = Q_p / S_2$  得到; 地表水流对松散物质迎水面的冲击力  $R$  与  $R$  大小相等, 方向相反。若松散物质未将沟谷填满, 则作用在松散物质上瞬间的流量应按断面上松散物质所占宽度按比例分配。

## 2 建立启动判别公式及影响因素分析

按图 1 所示, 在平行沟床底坡方向建立力的平衡关系, 则

$$F + LBC = R + T$$

$$K = \frac{F + LBC}{R + T} = \begin{cases} < 1 & \text{不稳定} \\ = 1 & \text{平衡极限} \\ > 1 & \text{稳定} \end{cases}$$

式中  $K$  为松散物质稳定性系数, 其它见前述。当  $K=1$  时, 松散物质处于极限状态; 当  $K<1$  时, 松散物质处于不稳定状态, 将被水流卷走; 当  $K>1$  时, 松散物质处于稳定状态, 该频率的洪峰无法搬动该松散物质, 故可将此式作为检算松散物质启动与否的判别公式。举例如下:

某松散物质长 100 m, 宽 20 m, 高 3.5 m。该处沟宽 30 m, 沟床底坡  $15^\circ$ , 设计 50 年一遇的洪峰流量为  $190 \text{ m}^3/\text{s}$ , 流速为  $1.9 \text{ m/s}$ , 试验得松散物质饱和粘聚力为  $0.008 \text{ MPa}$ , 饱和内摩擦角为  $15^\circ$ , 重度为  $22 \text{ kN/m}^3$ , 清水水体重度为  $9.8 \text{ kN/m}^3$ , 密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 并设  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1.0$ 。按前述计算可得:

$h_1 = 3.3 \text{ m}$ ,  $h_2 = 0$ ,  $G = 154000 \text{ kN}$ ,  $N = 148753 \text{ kN}$ ,  $T = 39858 \text{ kN}$ ,  $U = 64680 \text{ kN}$ ,  $F = 22527 \text{ kN}$ ,  $LBC = 16000 \text{ kN}$ ,  $P_1 = 1078 \text{ kN}$ ,  $P_2 = 0$ ,  $Q_p V = 215 \text{ kN}$ ,  $R = 1293 \text{ kN}$ ,  $K = 0.94$ 。该松散物质为不稳定的松散物质。

分析上例各计算值, 可以看出,  $N$ ,  $T$ ,  $U$ ,  $F$  和  $LBC$  值较大, 是主要影响值,  $R$  值较小, 为次要影响值。而  $N$  和  $T$  值又取决于  $\theta$ ,  $U$  值取决于洪峰流量,  $F$  和  $LBC$  值取决于其中包含的  $C$  和  $\theta$  值。  $LBC$  值还取

决于剪切面积,所以,松散物质启动的关键因素主要是,沟床底坡坡度、松散物质饱和粘聚力与饱和内摩擦角及松散物质底部剪切面积,以及洪峰流速和流量。流水的影响主要表现在水流的推力、水流对松散物质产生的浮力,以及对松散物质饱和粘聚力和饱和内摩擦角的影响上,其中水流的推力作用是较小的。

3 应用举例

用上述方法,对成昆铁路蒲坝车站小龙滩沟、柏村车站黄果坪沟、石棉县仁宗海水库电站干沟的松散物质活动性进行测量和计算,均取得满意效果,限于篇幅,此处仅以干沟松散物质的测定为例,予以说明。

干沟地处四川省石棉县、康定县和九龙县交界处,属大渡三级支流。干沟汇水面积 29.92 km<sup>2</sup>,分水岭最高海拔 6 079 m,沟口最低海拔 2 808 m,相对高差 3 271 m。主沟呈南北发育,主沟水平长度 10.27 km,沟床底坡平均坡度 17.7°,沟内两侧山坡支沟发育,流域切割密度为 4.165 km/km<sup>2</sup>。干沟地处贡嘎山南麓,沟底最高气温 39.2℃,最低气温 -3.9℃,多年平均降水量为 801.2 mm,多年平均最大日降水量为 64.7 mm,多年平均最大小时雨强为 26.7 mm。沟内海拔 3 500 m 以上无树木生长,海拔 4 500 m 以上为永久冰雪地带。干沟所在地为贡嘎山复向斜核部的东翼,由一系列紧密褶皱构成,岩层产状主要为 320°~360°∠50°~70°,出露地层为三迭系上统居里寺组(T<sub>3j</sub>)的中厚至厚层灰色变质长石砂岩夹薄层黑色板岩。上述地形、地质及气候条件,造成干沟以雪线附近典型的冰劈风化为主,松散物质极为丰富,曾多次爆发过不同规模的泥石流。按松散物质成因类型及固结程度,可将其组分为 8 类,即:冰碛物、现代洪水正常堆积物、新岩堆、较新支沟洪积扇、古岩堆、古支沟洪积扇、第四期泥石流垄岗、第一、二、三期古泥石流扇。为使测试工作具有实际意义,在现场反复比较的基础上,对每一类松散物质遴选出最具代表性的堆积体进行量测、取样、试验和检算。计算结果见表 1。

表 1 干沟泥石流松散物质稳定性系数检算

松散物质类型	采样点距 沟口距离 / km	50 年一遇 洪峰流量 /(m <sup>3</sup> /s)	松散物质尺寸				沟床 纵坡 /(°)	松散物质饱 和抗剪强度		稳定性 系数 <i>k</i>
			长 / m	宽 / m	高 / m	体积 / m <sup>3</sup>		<i>C</i> / MPa	<i>φ</i> / (°)	
现代洪水正常堆积物	4.13	170.36	54	17	2.5	2 295	11	0.0	15	0.65
第四期泥石流垄岗	1.25	186.96	105	21	3	6 615	13	0.008	15	0.98
新岩堆	5.38	78.15	80	20	4	6 400	17	0.008	15	0.92
较新支沟洪积扇	5.13	134.79	110	30	3	9 900	15	0.008	15	0.96
冰碛物	6.0	70.00	120	40	3.5	16 800	19	0.01	15	0.96
古岩堆	2.75	170.36	100	30	4.3	12 900	10	0.018	20	2.30
古支沟洪积扇	3.68	170.36	120	30	3.5	12 600	10	0.018	20	2.37
第三期古泥石流垄岗	0.88	186.96	160	19	2.5	7 600	8	0.01	15	1.99

4 结束语

综上所述,可得出以下几点意见:

- (1) 泥石流沟松散物质在某一暴雨频率的洪峰作用下能否启动,是可以通过实际检算来具体确定的。
- (2) 用上述稳定性计算方法来确定松散物质的活动性是可行的。
- (3) 影响松散物质稳定性的主要因素是沟床底坡坡度、松散物质饱和抗剪强度、剪切面面积和洪峰流量。而后者首先是影响松散物质粘聚力、内摩擦角以及产生浮力,其次才是产生推力。
- (4) 松散物质固结程度有不可忽视的作用。

参考文献:

[1] 黄儒钦. 水力学教程[M]. 成都:西南交通大学出版社,1993:44-45.  
[2] 徐弘. 泥石流松散固体物质临界集聚量估算模型研究[J]. 西南交通大学学报,1995;30(2):212-217.  
[3] 徐弘. 川西红层泥石流流域产沙评价模型研究[J]. 西南交通大学学报,1995;30(6):620-626.