

## 细颗粒浆体、泥石流浆体 对泥石流运动的作用\*

费祥俊

(清华大学水利水电工程系)

康志成 王裕宜

(中国科学院东川泥石流观测研究站)

**提 要** 通过泥石流野外观测资料分析,得出稀性泥石流及粘性泥石流存在颗粒不分选的浆体,并讨论了一般形式的泥石流流速公式,它适用于类似蒋家沟各种类型的泥石流。

**关键词** 泥石流 浆体浓度 阻力

泥石流中各种大小颗粒都由什么力支持其运动,无疑是理解泥石流运动机理的重要途径。一般挟沙水流中,颗粒较细,固体含量不多,水流的紊动对泥沙的扩散,支持颗粒的悬移运动是主要的。泥石流中固体颗粒粒径范围宽,固体浓度高,紊动很弱,因此水流紊动扩散支持颗粒运动的作用不大,何况高容重泥石流中,紊动已完全消失;固体颗粒的支持力除浮力外将是颗粒作剪切运动时产生的粒间离散力,或是高浓度浆体所具有的屈服剪切力维持颗粒不沉,呈所谓中性悬移运动。由于对上述两种颗粒支持力的重视或强度程度不同,出现对泥石流运动机理的分歧看法。即强调粒间离散力支持颗粒运动者,认为泥石流属两相流;强调浆体屈服应力支持颗粒运动者,认为泥石流属非牛顿体一相流,无疑这两种都是极端的看法。要比较正确地回答上述问题,首先要研究在粒度分布很广、固体浓度又很高的泥石流体中,是否存在不分选的浆体,以及这种浆体的粒径界限及浓度大小。

### 一、细颗粒浆体及其作用

泥石流机械组成中都会有一定数量的细颗粒,这些细颗粒与水结合,在一定浓度下可以形成一种固液不分选、并且有屈服应力的浆体,这对于泥石流运动有重要意义。

众所周知,细颗粒与含有离子的水结合,在很低的固体体积浓度下就能形成絮团;浓度稍高后,絮团连结成絮网结构,就能有一定的承载能力。试验结果表明,粒径  $d < 0.03$  毫米的颗粒最易出现絮凝,  $d > 0.05$  毫米絮凝现象已很微弱。因此为方便计,暂且以  $d < 0.05—0.06$  毫米为细颗粒浆体的上限粒径。分析泥石流的颗粒组成资料,也发现当泥石流的容重  $\gamma_m > 1.4$  后,不论泥石流的总含沙量多大,  $d < 0.05—0.06$  毫米颗粒的含沙量有基本保持不变的特点。表1列出我国云南东川蒋家沟部分泥石流及美国华盛顿州圣海伦火山泥石流机械组成的部分资料。从表中可以看出上述两种泥石流成因条件截然

\* 中国科学院东川泥石流观测研究站基金资助项目。

本文收稿日期:1991-06-10.

不同,但颗粒组成中细颗粒的含沙量却十分相近。即在总含沙量为 500—2000 公斤/立方米这样大的范围内变动时,其中  $d < 0.05$ —0.06 毫米的含沙量都稳定在 300—380 公斤/立方米不大的范围内,这种现象在高含沙洪水中同样存在。如据黄游中游 80 多个站次的资料统计,总含沙量在 400—1300 公斤/立方米范围内变化时,其中细颗粒(以  $d < 0.03$  毫米计)含沙量只在 150—200 公斤/立方米小范围内变化。

表 1 泥石流总含沙量与细颗粒含沙量的关系

Table 1 The relationship between total and one fine grain sediment concentrations of debris flow

云南东川蒋家沟泥石流	总含沙量(公斤/米 <sup>3</sup> )	500	794	910	1349	1598	1734	1934	2000
	$d < 0.05$ 毫米(%)	66	45	30	29	24	27	17	18
	$d < 0.05$ 毫米(公斤/米 <sup>3</sup> )	330	357	273	388	377	356	329	369
美国圣海伦火山泥石流	总含沙量(公斤/米 <sup>3</sup> )	568	847	977		1060	1160	1320	
	$d < 0.06$ 毫米(%)	54	39	32		31	29	26	
	$d < 0.06$ 毫米(公斤/米 <sup>3</sup> )	307	330	313		329	336	343	

重新分析了云南东川蒋家沟 1983—1985 年泥石流组成实测资料,分组统计  $d < 0.05$  毫米的含沙量大小,所得结果同样表明在各级总含沙量下,  $d < 0.05$  毫米细颗粒含沙量还是稳定在一定的范围之内,即总含沙量在 2000, 1500 及 1000 公斤/立方米以下三组资料中  $d < 0.05$  毫米的细颗粒含沙量的平均值分别为 315.9, 313.2 及 318.6 公斤/立方米,各组变动范围只在  $\pm 20$  公斤/立方米。如按  $d < 0.05$  毫米的平均含沙量为 316 公斤/立方米计,令  $d > 0.05$  毫米粗颗粒重量占固体总重的比例为  $x$ ,则蒋家沟泥石流固体体积总浓度

$$S_v = \frac{316}{2700} \frac{1}{1-x} = \frac{0.117}{1-x} \quad (1)$$

或泥石流容重  $\gamma_m$  与粗颗粒比例含量  $x$  的关系为

$$\gamma_m = 1 + [0.2/(1-x)] \quad (2)$$

图 1 点绘了蒋家沟 1983—1985 年泥石流容重  $\gamma_m$  与粗颗粒比例  $x$  的实际关系,可以看出点据与上式符合良好,只是在低容重区点据较散乱。由此表明将  $d = 0.05$  毫米作为细颗粒浆体上限粒径是比较合适的。

有意义的不仅是细颗粒的绝对含沙量,还必须研究其相应的体积比浓度,这是因为浓度大小对颗粒是否会分选有重要作用。根据上述蒋家沟的实际资料,不难求得泥石流细颗粒浆体的体积浓度,却随着泥石流容重的增加而提高。如令  $S_{vi}$  及  $S_{vc}$  分别表示泥石流中作为液相的细颗粒浆体体积浓度及粗颗粒体积浓度,则因

$$S_{vc} = x \cdot S_v \quad (3)$$

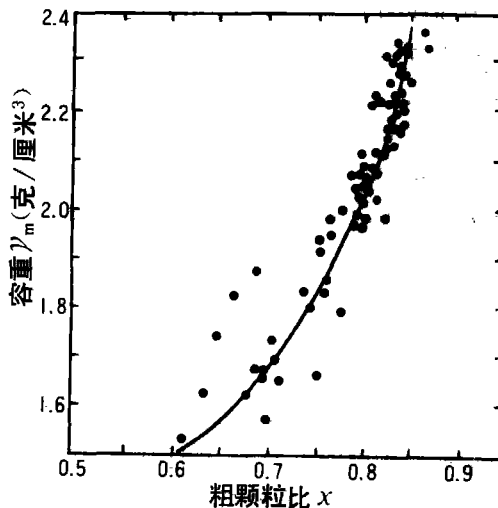


图 1  $\gamma_m-x$  关系

Fig. 1  $\gamma_m-x$  relationship

及 
$$S_{vt} = S_{ve} + (1 - S_{ve}) S_{vf} \quad (4)$$

可以求得细颗粒浆体体积浓度为

$$S_{vt} = \frac{S_{vt}(1 - x)}{1 - x S_{vt}} \quad (5)$$

对于蒋家沟泥石流,将式(1,2)代入式(5)经整理后得

$$S_{vt} = 0.2 / (2.91 - \gamma_m) \quad (6)$$

或相应的细颗粒浆体容重  $\gamma_t$  为

$$\gamma_t = (3.25 - \gamma_m) / (2.91 - \gamma_m) \quad (7)$$

由式(6)可见,细颗粒浆体体积浓度随泥石流容重增加而提高。试验结果表明,细颗粒浆体体积浓度  $S_{vt}$  达到 0.15 左右(相当于  $\gamma_m \geq 1.5$ ),已可保持固体颗粒基本上不沉降分选。泥石流容重增加,细颗粒浆体的稳定性相应提高。

细颗粒浆体在泥石流中的作用是:

1. 细颗粒浆体以泥膜形式包围泥石流中的粗大颗粒,足以减小高容重泥石流中粗大颗粒间的摩擦阻力。

2. 细颗粒浆体作为泥石流中的液相具有一定的体积浓度,可以降低粗颗粒的有效重力,从而也减小这些颗粒间的离散剪切力。

3. 细颗粒浆体体积浓度随泥石流容重增加而提高,可见式(6),浆体的屈服应力也随着提高,因此在容重大的粘性泥石流中可使部分粗大颗粒由推移运动转化为中性悬移运动。

以上所列的细颗粒浆体作用都促使泥石流有较好的流动性和较小的运动阻力。例如对没有细颗粒的水石流,根据高桥保<sup>[1]</sup>分析,当重力分量大于阻力时,产生运动的条件为

$$\tan \theta \geq \frac{S_{v*}(\gamma_s - \gamma)}{S_{v*}(\gamma_s - \gamma) + \gamma} \cdot \tan \phi \quad (8)$$

式中  $\theta$  为沟道的倾角;  $S_{v*}$  为松散物质的体积浓度;  $\tan \phi$  为静摩擦系数。假定  $S_{v*} = 0.70$  及  $\tan \phi = 0.80$ ,则产生水石流的地面坡度由式(8)为  $\theta \geq 23.5^\circ$ 。在有细颗粒的情况下,即稀性泥石流产生条件,在忽略粒间流体变形阻力时应是

$$\tan \theta \geq \frac{S_{v*}(\gamma_s - \gamma_t)}{S_{v*}(\gamma_s - \gamma) + \gamma} \cdot \tan \phi' \quad (9)$$

式中  $\gamma_t$  即为式(7)所表达的细颗粒浆体容重。如当  $\gamma_m = 1.7$  ( $S_{v*} = S_v = 0.41$ )时,相应  $\gamma_t = 1.283$ ,  $\tan \phi'$  为因细颗粒存在而减少的摩擦系数,在没有具体数值以前,假定  $\tan \phi > \tan \phi' = 0.60$ ,这样稀性泥石流产生的地面坡度由式(9)将为  $\theta \geq 11.7^\circ$ 。这比水石流产生需要的坡度约小一半。

## 二、泥石流浆体及其作用

从式(6)可得,对容重  $\gamma_m \geq 2.0$  的粘性泥石流,其细颗粒浆体体积浓度可以达到  $S_{vt} \geq 0.22$ 。在这种容重下,细颗粒浆体有可观的屈服应力,可以支持较粗颗粒不沉。换句话说,对粘性泥石流,作为稳定悬液的上限粒径将进一步提高。把这种含有较大上限粒

径的悬液,不妨称为泥石流浆体。

和细颗粒浆体上限粒径估计的方法相似,对于泥石流浆体的上限粒径也可从分析泥石流颗粒组成的实际资料中求得。在小江流域的粘性及亚粘性泥石流颗粒组成资料中发现,粒径  $d < 1.0$  毫米的含沙量在各级容重的泥石流中几乎保持不变,约为  $520 \pm 35$  公斤/立方米。进而分析了  $d < 2.0$  毫米的含沙量也几乎保持不变,如表 2 列出的部分数据<sup>[2,3]</sup>。

从表 2 资料表明,泥石流总含沙量在 800—2100 公斤/立方米范围内变动,而  $d < 2.0$  毫米的含沙量除个别数据外均在 600—700 公斤/立方米之间,据统计资料,其平均值为 680 公斤/立方米左右。 $d < 2.0$  毫米的含沙量却随着总含沙量增大而提高。这表明  $d < 2.0$  毫米的固体颗粒,可以被各级容重的粘性或亚粘性泥石流整体搬运,它们属于所谓中性悬移质。而  $d > 2.0$  毫米颗粒含量随着泥石流容重增大而提高,表明在一定浓度下存在颗粒的分选沉降现象。

为进一步证明  $d = 2.0$  毫米可作为泥石流浆体的上限粒径,用上述相似方法,计算不同容重泥石流中泥石流浆体的体积浓度,检验其是否稳定。这里以  $x$  表示  $d > 2.0$  毫米的粗颗粒重量占全部固体重量的比例, $d < 2.0$  毫米的含沙量按平均值 680 公斤/立方米计,则因

$$S_{v'} = \frac{680}{2700} \cdot \frac{1}{1-x} = \frac{0.252}{1-x}$$

代入式(5)经整理得

$$S_{v'} = 0.43 / (3.13 - \gamma_m) \quad (10)$$

式中  $S_{v'}$  即为据小江泥石流资料统计得出的泥石流浆体体积浓度与泥石流容重的关系。图 2 所示系按表 2 数据点绘的  $S_{v'}$ — $\gamma_m$  关系,基本上与式(10)关系线(图中曲线)相符。

由式(10)或图 2 可见,随着泥石流容重  $\gamma_m$  增加, $d < 2.0$  毫米的泥石流浆体体积浓度

$S_{v'}$  也迅速加大,这点非常重要。据此还可得出泥石流浆体容重  $\gamma'$  与泥石流容重  $\gamma_m$  的关系如下式

$$\gamma' = (3.85 - \gamma_m) / (3.13 - \gamma_m) \quad (11)$$

泥石流浆体在一定浓度以上经试验证明均可用宾汉体表达。宾汉剪切力随浆体浓度

表 2 小江流域泥石流总含沙量与  $d < 2.0$  毫米含沙量的关系

Table 2 The relationship between total and one of  $d < 2.0$  mm sediment concentrations of debris flow in Xiaojiang Basin

总含沙量 (公斤/米 <sup>3</sup> )	$d < 2.0$ 毫米 (%)	$d < 2.0$ 毫米 (公斤/米 <sup>3</sup> )
794	87.50	647
953	79.05	756
1164	66.95	779
1212	55.00	666
1318	51.46	678
1436	49.14	705
1660	47.69	791
1779	33.20	591
1892	37.00	700
1912	30.80	589
2179	21.64	472
1211	55.00	666
1429 <sup>1)</sup>	455.00	643
1905 <sup>2)</sup>	29.50	562
1905 <sup>3)</sup>	27.00	514
1667 <sup>4)</sup>	41.00	684
1827 <sup>2)</sup>	31.00	566
1779	38.00	680
1652	41.80	690
1905	35.70	680
1953	35.30	690

1) 腊利沟 1983 年 6 月 20 日, 2) 达德沟 1983 年 6 月 22 日, 3) 黑水河 1983 年 6 月 26 日, 4) 小白泥沟 1983 年 6 月 7 日。其余均为将家沟资料。

或容重的提高而迅速上升,根据中国科学院成都山地灾害与环境研究所<sup>[3]</sup>流变试验结果,可用下式表示,即

$$\tau_B = 10^{6.41(\gamma'_t - 1.281) + 1} \quad (\text{牛/平方米}) \quad (12)$$

这样泥石流浆体的稳定性,可用宾汉剪切力能否支持 2.0 毫米的泥沙颗粒来检验。不同容重泥石流浆体的最大不沉粒径为

$$d_0 = 6 \tau_B / (\gamma_m - \gamma'_t) \quad (13)$$

表 3 列出各级容重下,泥石流浆体宾汉剪切力可以支持的粒径  $d_0$ ,通过式(11—13)计算。

从表 3 验算结果表明,以  $d = 2.0$  毫米作为泥石流浆体的上限粒径,对于  $\gamma_m \geq 1.8$  的泥石流是适宜的。但对于  $\gamma_m < 1.8$  的情况,泥石流浆体的上限粒径应小于 2.0 毫米。计算结果也表明,随着泥石流容重的提高,泥石流浆体的屈服应力急剧上升,以致能支持粒径几厘米至几十厘米的大石块,这与蒋家沟野外观测资料是相符的。

根据以上分析,可得以下认识:

1. 颗粒分布范围很广的粘性泥石流流体及亚粘性泥石流流体可区分为粒径不分选部分及分选部分。而且泥石流容重越大,不分选部分所占比重越大,显然还与物质来源等条件有关,因此各种泥石流的运动模型往往不重视泥石流颗粒组成的特点,而简化为单纯的宾汉体或膨胀体(即一相或两相)都是十分近似的。

表 3 泥石流浆体  $\tau_B$  值及  $d_0$  值

Table 3  $\tau_B$  and  $d_0$  values of debris flow slurry body

$\gamma_m$	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.25	2.30
$\gamma'_t$	1.448	1.477	1.510	1.549	1.593	1.646	1.709	1.785	1.829	1.880
$\tau_B$	11.76	18.05	29.37	52.23	99.98	218.60	533.90	1700.00	3256.00	6912.00
$d_0$ (毫米)	0.57	0.90	1.51	2.78	5.52	12.70	32.90	113.60	228.60	515.40

2. 由式(10)或图 2 可见,泥石流浆体体积浓度  $S_v'$  高达 0.30—0.50,有很高的屈服应力,这是高容重泥石流中粗大颗粒的重要支持力,对减少泥石流运动阻力及其流态的确定有重要作用。

3. 应用泥石流浆体的概念,有助于探讨泥石流运动机理,并为泥石流阻力、流速等重要参数的确定提供比较清楚的物理图形。

### 三、泥石流的阻力与流速

根据上面讨论,在一般情况下泥石流中粗细颗粒以不同的形式运动,其中较细颗粒作

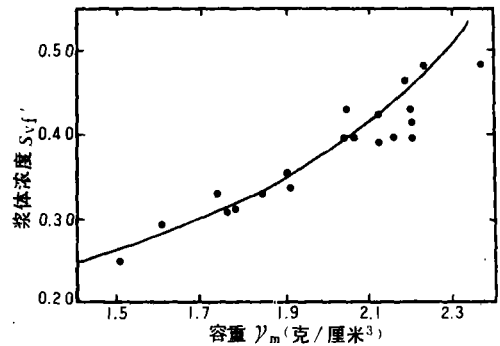


图 2  $S_v'$ — $\gamma_m$  关系

Fig. 2  $S_v'$ — $\gamma_m$  relationship

中性悬移运动,其流动阻力较小;粗大颗粒则以推移形式运动,直接消耗泥石流流的能量。这样在没有冲淤情况下,泥石流底床剪切力  $\tau_w = \gamma_m h J$  与以上两部分消耗的剪切力相平衡,即

$$\tau_w = \tau_m + \tau_s \quad (14)$$

式中  $\tau_m$  为较细颗粒形成浆体剪切阻力,可用下式表达

$$\tau_m = \frac{f_m}{4} \cdot \frac{\rho_m v^2}{2} = \frac{f_m v^2}{8g} \cdot \gamma_m' \quad (15)$$

式中  $f_m$  为阻力系数,与浆体的流动雷诺数及底床的糙率有关; $\gamma_m'$  为不分选部分的容重,一般  $\gamma_m' < \gamma_m$ 。如果推移部分颗粒重量占全部颗粒重量的比例为  $p$ , 则

$$\begin{aligned} \gamma_m' &= \gamma + (1-p) S_v (\gamma_s - \gamma) \\ \text{或} \quad \gamma_m' &= \gamma_m - p S_v (\gamma_s - \gamma) \end{aligned} \quad (16)$$

式中  $S_v$  为泥石流固体体积总浓度。

式(14)中  $\tau_s$  为消耗在推移颗粒上的剪切力,它与这部分颗粒的浓度、有效重及底床的摩擦系数大小有关。即颗粒间的相互作用力(碰撞及摩擦)通过固体颗粒传递到底床,最后为其有效重的摩擦力所平衡,这样

$$\tau_s = p S_v h (\gamma_s - \gamma_t) \cos \theta \tan \alpha \quad (17)$$

式中  $\tan \alpha$  为摩擦系数; $\theta$  为河床倾角。将式(15—17)代入式(14),并加整理可得

$$J = \frac{f_m U^2}{8g h} [1 - p S_v (\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_m})] + p S_v (\frac{\gamma_s - \gamma_t}{\gamma_m}) \cos \theta \tan \alpha \quad (18)$$

这便是泥石流阻力公式的结构形式,由此可得稳定流动条件下的泥石流流速

$$v = \sqrt{\frac{8g}{f_m}} \cdot \sqrt{\frac{h [J - p \tan \alpha (\frac{\gamma_s - \gamma_t}{\gamma_s - \gamma}) (1 - \frac{\gamma}{\gamma_m}) \cos \theta]}{1 - p (1 - \frac{\gamma}{\gamma_m})}} \quad (19)$$

这便是泥石流流速公式,它不带任何经验系数,适用于各种类型的恒定流动的泥石流,但式(19)中有  $f_m$ ,  $p$ ,  $\gamma_t$  及  $\tan \alpha$  四个参数,在不同条件下有不同的数值。以下结合具体条件进行讨论。

1. 对于没有粗粒的泥流及容重极高的粘性泥石流,可以认为是颗粒完全不分选的伪一相流动。这时  $p = 0$ , 式(19)变为

$$v = \sqrt{8g/f_m} \cdot \sqrt{h J} \quad (20)$$

这与明流流速的谢才公式在形式上一致,但式中阻力系数  $f_m$  应由泥流的流变参数及床面糙率来确定。对于紊流(只有泥流存在紊流),可用

$$f_m = 0.11 \times (\frac{\Delta}{h} + \frac{68}{Re})^{0.25}$$

式中  $\Delta$  为床面凸起高度; $h$  为水深; $Re$  为雷诺数。 $Re = (4 h \cdot U \cdot \gamma_m)/g \eta$ ,  $\eta$  为刚度系数。对于层流,阻力系数的理论公式为

$$f_m = \frac{96}{Re [1 - \frac{3}{2} (\frac{\tau_B}{\tau_w}) + \frac{1}{2} (\frac{\tau_B}{\tau_w})^3]}$$

当分母为零, 即  $\tau_w = \tau_b$  或  $J \leq \frac{\tau_b}{\gamma_m h}$ ,  $f_m \rightarrow \infty$  或流速趋于零, 这便是高浓度泥流及高容重粘性泥石流断流或起动条件。

2. 对于没有细颗粒的水石流, 可以认为完全由颗粒碰撞的离散力支持运动, 即  $p = 1.0$  及  $\gamma_t = \gamma$ , 这样流速公式将是

$$v = \sqrt{\frac{8g}{f_m}} \sqrt{h \left[ J - \tan \alpha \cos \theta \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma_m} \right) \right] \frac{\gamma_m}{\gamma}} \quad (21)$$

由式(21)可得: 当  $J = \tan \alpha \cos \theta \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma_m} \right)$  时,  $v \rightarrow 0$ , 这即为水石流的起动条件, 或可写作

$$\tan \theta \geq \frac{\tan \alpha S_v (\gamma_s - \gamma)}{S_v (\gamma_s - \gamma) + \gamma} \quad (22)$$

上式与式(8)一致, 只是起动时应采用动摩擦系数, 所以式(22)中  $\tan \alpha$  应代以  $\tan \phi$  ( $\tan \phi > \tan \alpha$ ), 另外浓度应代以松散物质的堆积浓度。这里还值得注意的是: 式(21)中的动摩擦系数  $\tan \alpha$  并非常值。固体颗粒间的作用一般在互相碰撞及摩擦二种形式: 在浓度较低时, 碰撞为主要形式, 碰撞损失能量较小, 因此表现在  $\tan \alpha$  值也较小; 在浓度很高时, 固体颗粒间相互挤压、摩擦是主要形式, 这时颗粒间相互作用的损失能量大,  $\tan \alpha$  值也较大。

3. 对于含有细颗粒、浓度又不是很高的稀性泥石流, 虽然有部分细颗粒处于悬移运动, 但大部分颗粒维持运动仍以粒间离散力为主。作为初步近似, 可假定  $p \approx 1$ , 但细颗粒浆体容重大于清水容重, 即  $\gamma_t > \gamma$ , 由式(19)得流速公式为

$$U = \sqrt{\frac{8g}{f_m}} \sqrt{h \left[ J - \tan \alpha \cos \theta S_v \left( \frac{\gamma_s - \gamma_t}{\gamma_m} \right) \right] \frac{\gamma_m}{\gamma}} \quad (23)$$

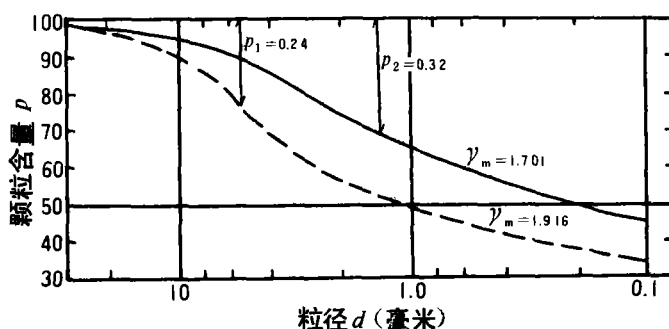


图3  $p$  值确定方法

Fig. 3 Method for determining  $p$  value

相应的起动条件, 即  $U \rightarrow 0$  时,

$$J \geq \tan \alpha \cos \theta S_v \left( \frac{\gamma_s - \gamma_t}{\gamma_m} \right)$$

或

$$\tan \theta \geq \frac{S_v (\gamma_s - \gamma_t) \tan \alpha}{S_v (\gamma_s - \gamma) + \gamma} \quad (24)$$

式(24)与式(9)一致, 这里应将  $\tan \alpha$  代以  $\tan \phi$ ,  $S_v$  代以  $S_v$ .

4. 对于颗粒组成范围很广、固体浓度很高的粘性泥石流及亚粘性泥石流,式(19)的流速公式中  $p < 1$ ,而且由于粘性泥石流中具有稳定不分选的泥石流浆体,因而式(19)中的  $\gamma$  应代以泥石流浆体的容重  $\gamma'$  [见式(11)]。由式(19)不难得出粘性泥石流起动条件为

$$\tan \theta \geq p \cdot \frac{S_v (\gamma_s - \gamma')}{S_v (\gamma_s - \gamma) + \gamma} \cdot \tan \alpha \quad (25)$$

同样式(25)中  $\tan \alpha$  应代以  $\tan \phi$ ,由于  $p < 1$ ,因而粘性泥石流与水石流或稀性泥石流相比,可在沟道坡度更缓的条件下发生。

按式(19)解算泥石流流速的主要困难是确定式中的  $p$  值,即作推移运动颗粒重量占全部固体重量的比例。它随泥石流容重和颗粒组成的不同而异。一般可视泥石流容重  $\gamma_m$  的高低,先假定一个  $p$  值,  $\gamma_m$  越大  $p$  应越小。由假定的  $p$  值,通过颗粒级配曲线定出颗粒分选的界限粒径,即  $d_0$  (图3),然后按式(16)确定泥石流体中颗粒不分选部分的容重  $\gamma_m'$  及相应的屈服应力  $\tau_B$ ,再用公式  $d_0 = 6 \tau_B / (\gamma_s - \gamma_m')$  校核  $d_0$  值,看其是否与图3中求得的相同。如不相同,再重新假定  $p$  值,重复以上计算,这样计算比较复杂,看来也无必要。一种简便的近似方法,便是根据泥石流浆体容重  $\gamma'$ ,计算屈服应力  $\tau_B$  及所谓不沉粒径  $d_0$  [见式(12,13)]。再望求得的  $d_0$ ,通过级配线求  $p$  (见图3)。

## 四、泥石流流速公式的初步验证

迄今为止泥石流流速公式多属经验性质,常用的经验公式为

$$U = K H^\alpha J^\beta$$

式中  $H$  为泥深,  $J$  为比降,系数  $K$ 、指数  $\alpha$ 、 $\beta$  各家差别很大。这类经验公式难以反映泥石流运动机理,应用上局限性很大,这是不难理解的。上节提出的泥石流流速公式,虽然在理论上并不严格,但比较符合泥石流运动机理,使用起来也不复杂。下面用蒋家沟的野外测验资料验证流速公式。验证计算如表4。

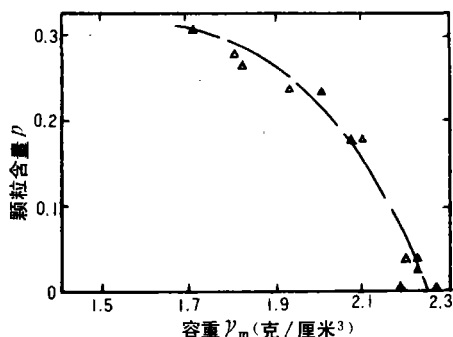
表4 泥石流流速公式验算

Table 4 Checking velocity formula of debris flow

序号	$\gamma_m$	$R_m$	$J$	$U_m$ (米/秒)	$\gamma'$	$\tau_B$ (克/厘米 <sup>2</sup> )	$d_0$ (厘米)	$p$	$f_m$	$U_H$ (米/秒)
1	2.00	0.45	0.060	0.75	1.637	0.193	1.09	0.24	0.060	3.16
2	2.08	1.70	0.060	8.94	1.686	0.398	2.35	0.18	0.050	8.83
3	2.20	1.50	0.063	8.84	1.774	1.457	9.44	0.04	0.058	10.70
4	2.16	0.95	0.063	10.00	1.742	0.909	5.69	0.01	0.050	9.58
5	2.25	0.55	0.063	7.30	1.818	2.786	18.90	0	0.046	7.68
6	2.07	1.10	0.063	7.63	1.679	0.359	2.11	0.18	0.053	7.30
7	2.19	1.00	0.063	7.63	1.766	1.295	8.32	0.04	0.057	8.85
8	2.21	0.90	0.063	7.32	1.782	1.640	10.70	0.03	0.062	8.15
9	1.80	0.56	0.058	3.68	1.540	0.046	0.24	0.28	0.048	3.46
10	1.80	0.70	0.058	4.05	1.543	0.048	0.25	0.27	0.047	4.15
11	1.92	0.93	0.058	4.75	1.593	0.101	0.55	0.24	0.048	4.75
12	1.70	0.50	0.058	3.48	1.504	0.027	0.14	0.32	0.046	3.38



验算中动摩擦系数  $\tan \alpha$ , 除  $\gamma_m$  较小的第 9, 10 及第 12 次分别用  $\tan \alpha = 0.55$  及  $\tan \alpha = 0.50$  外, 其他均取  $\tan \alpha = 0.60$ , 床面凸起一般采用  $d_{95}$ . 虽然由于野外资料的精度受各种条件的限制, 验算所采用的参数, 如  $\tan \alpha$  值等一时也难以正确测定, 但验算的结果表明, 除个别情况 (如第 1 次) 外, 计算流速值与实际观测值相差不大, 平均误差在  $\pm 10\%$  以内, 这比一般经验公式的结果可靠。验算结果还表明, 随着泥石流容重  $\gamma_m$  增加, 推移部分颗粒所占比例  $p$  相应减少。图 4 系表 4 中 12 次泥石流资料计算而点绘的  $p-\gamma_m$  关系。由此可见, 粘性泥石流及亚粘性泥石流中, 推移部分颗粒所占比例最大不超过  $1/3$ ; 当  $\gamma_m \geq 2.25$  吨/立方米时, 几乎全部颗粒呈中性悬移。

图 4  $p-\gamma_m$  关系Fig. 4  $p-\gamma_m$  relationship

以上验算限于资料条件, 仅仅是初步的。

公式中使用的  $\gamma'_i, \tau_B$  等都是以前家沟泥石流的观测和试验数据为基础的, 应用到别的地区是否仍然有效也有待证明。总之随着资料的积累和研究工作的深入, 上述泥石流流速计算方法, 必然会有进一步的修正和完善。

## 参 考 文 献

- [1] Takahashi, T., 1978, Mechanical characteristics of debris flow. *J. Hydr. Div., Proc. ASCE*, 104(HY8), 1153—1169.
- [2] 杜榕桓等, 1987, 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究, 科学技术文献出版社重庆分社, 第 98 页。
- [3] 吴积善等, 1990, 云南蒋家沟泥石流观测研究, 科学出版社, 第 58, 83 页。

## EFFECT OF FINE GRAIN AND DEBRIS FLOW SLURRY BODIES ON DEBRIS FLOW MOTION

Fei Xiangjun

*(Hydraulic Engineering Department, Qinghua University)*

Kang Zhicheng Wang Yuyi

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

### Abstract

The results of analysis on debris flow data in the field show that there is slurry body of unsorted grains in micro-viscous and viscous debris flows, i. e. unsorted slurry body with upper-limit size of 0.05mm (fine grain slurry body) is in  $\gamma_m > 1.4$  micro-viscous debris flow, and it with upper-limit size of 2.00mm (debris flow slurry body) is in  $\gamma_m > 1.9$  viscous debris flow. These slurry is of the properties of Non-Newton flow body, as well as an important effect in the formation and motion of debris flow is discussed in this paper. It is distinct from other empirical formulae of flow velocity and can be used in debris flow calculation.

**Key words** debris flow, slurry concentration, resistance