

泥石流流体的沉积稳定浓度 与颗粒级配之关系*

王玉章 康志成

(中国科学院东川泥石流观测研究站)

提 要 沉积稳定浓度主要反映了泥石流固体物质的级配特点,它涉及到泥石流流体的固体颗粒的大小和排列状况。利用这种浓度可确定泥石流流体的粘滞系数、宾汉剪切力以及与泥石流颗粒级配有关的其他参数。分析了泥石流流体的沉积稳定浓度与颗粒级配的理论关系,并用实验方法建立了它们的关系式。

关键词 泥石流 沉积稳定浓度 颗粒级配 比表面

泥石流的天然浓度和颗粒级配之间没有必然的理论联系。天然浓度同时受固体颗粒和水、气等多因素影响,而颗粒级配只决定于固体颗粒本身的性质。很明显,对相同颗粒级配的泥石流,水分、气体等的多少必然反映出天然浓度的差值。相反,天然浓度相同,但颗粒级配却不一定相同,从而泥石流反映出的一系列性质也各相异。所以天然浓度不能准确反映固体颗粒级配,这是其局限性。为此引入能够表示颗粒级配特性的浓度概念,即沉积稳定浓度(极限浓度)。

一、泥石流流体的沉积稳定浓度

沉积稳定浓度是指泥石流流体中固体颗粒稳定接触排列下的浓度,用体积浓度 C_{vs} 表示,无量纲,有的称为饱和浓度¹⁾。确定 C_{vs} 的方法是将天然状态下暴发过程中的泥石流样品在室内让其自然沉积,且达到终极稳定状态下所求出。

沉积稳定浓度只涉及到固体物质单一因素,亦即颗粒的大小、组成及其排列状况。所以如果泥石流的固体物质组成一定时,不管水分参与量的多少,其相应的 C_{vs} 都是定值。由此沉积稳定浓度可用来表征颗粒级配的特征参数。

值得注意的是,如果固体颗粒为等径球体,则沉积稳定浓度相当于均匀球体按形心呈立方体排列,这样 C_{vs} 值是一常数。R. A. 拜格诺计算为 $C_{vs} = 0.5236^{[1]}$ 。但是泥石流流体一方面是由小至粘粒、大至巨砾的宽级配非均匀固体物质所组成;另一方面,泥石流固体颗粒并非都是球体,所以它们的 C_{vs} 值将是一个变数。

(一)以细颗粒为主所组成的 C_{vs} 值

泥石流固体颗粒组成越细,一方面颗粒总表面积越大,结合水量越多,这意味着颗粒

1) 费祥俊, 1981, 高浓度浑水的粘性, 清华大学水利工程系泥沙研究室, 第 1—27 页。

本文改回日期: 1991-05-22.

之间保留有更多的水分不能析出来;另一方面,如果颗粒组成以粘粒(粒径 <0.005 毫米者)和粉粒(粒径 $0.050-0.005$ 毫米者)为主,则在其沉积过程中,由于布朗运动和分子力、静电引力的作用,颗粒相互联接,逐渐扩大,形成海绵状结构。这种结构决定了其孔隙体积很大,甚至大于固体部分的体积。因此以细颗粒为主所组成的沉积稳定浓度小于其理论计算值 $C_{vs} = 0.5236$ 。

(二)以粗颗粒为主所组成的 C_{vs} 值

这种情况下,在粗颗粒之间的孔隙中可以充填小的固体颗粒,小颗粒之间再充填更小的颗粒,形成不均匀颗粒的充填结构、镶嵌结构。这种结构使孔隙体积远小于均匀颗粒排列下的孔隙体积。它决定了这样的沉积稳定浓度大于其理论计算值 $C_{vs} = 0.5236$ 。

实验与计算结果也从另一个侧面表明,不同颗粒级配的泥石流,其沉积稳定浓度是一个变化值,且颗粒组成越细, C_{vs} 值越低,反则反之。正是这种变化使泥石流的颗粒级配与浓度的概念(C_{vs})结合起来,二者有相应的对应关系,此即引入沉积稳定浓度之意义。

二、泥石流体的颗粒级配

泥石流体的颗粒级配是指泥石流中各粒径区段固体物质的相对百分含量,也叫颗粒组成。它包括两个可变因素,一是颗粒的粒径大小,二是相应的百分含量。

(一)常见表示颗粒级配的方法

在对泥石流的研究中,常使用图示法(图 1, 图示法中之一个)和特定的统计参数来反应级配。其中,图示法可以较准确地反映颗粒粒径的分布特点,它的最大优点是直观地展示了颗粒级配的全过程。但曲线或图形不便于作定量描述和相互比较。因此不少学者提出:用各种特征参数来描述颗粒粒径的分布特点,并在此基础上进行数据统计处理。

一般用于颗粒级配的统计参数有:中值粒径 D_{50} 、分选系数 $(D_{75}/D_{25})^{1/2}$ 或 $1/2(\varphi_{16} + \varphi_{84})$ 、图解平均值 $1/3(\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84})$ 等,在数学表达上简单明了,计算也不复杂。钱宁曾指出^[2]:用这些参数反映颗粒级配特点,“在使用上比较方便快捷,能用来作统计处理,一般情况下也能给令人满意的结果。但从统计的意义上看,这些参数并不十分严谨,因此在某些特殊情况下(具有双峰的频率曲线)不能全部反映实际图形。”

理论上,一定的泥石流体中的固体物质,对应于一条完整的(也是唯一的)颗粒级配曲

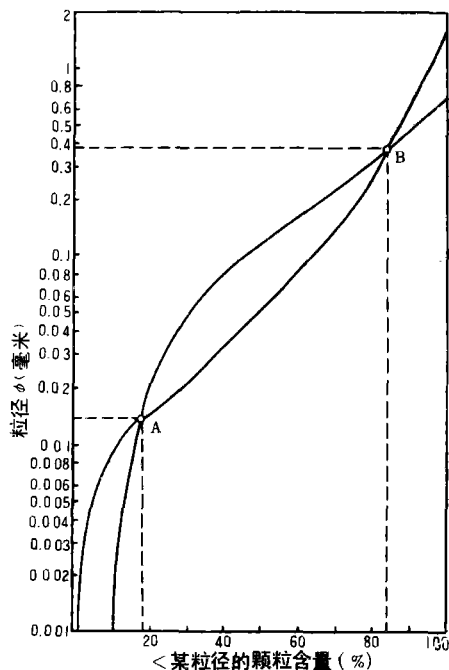


图 1 $\varphi_{16}, \varphi_{84}$ 分别相等的不同颗粒级配

Fig. 1 Different curves with the same φ_{16} , φ_{84} respectively

线, 这条曲线由无数个点所组成。除非是一条直线, 否则用一个点, 如中值粒径 D_{50} ; 两个点, 如分选系数 $1/2 (\varphi_{84} + \varphi_{16})$ 中的 φ_{84} 和 φ_{16} 点; 甚至三个点, 如图解平均值 $1/3 (\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84})$ 中的 φ_{16} , φ_{50} 和 φ_{84} 点, 都难以控制和确定这条曲线。所以这些指标不能从理论上准确地代表颗粒级配。换言之, 固定的颗粒级配物质在曲线上有确定的 φ_{16} , φ_{84} 以及其他各点, 但反之则不成立 (见图 1)。图中两条曲线 (分别代表两种颗粒级配) 都通过 A, B 两点, 即二者的分选系数相等, 但二者却分别反映了两种不相同的颗粒级配情况。实际工作中, 也曾发现类似情况。

以上分析可知, 上述定量指标虽有其重要的应用价值, 它们可以反映颗粒级配的某些性质, 但作为一种数字指标却不能代表固定的颗粒级配。

(二) 颗粒级配的表征指标——比表面

单位体积内固体颗粒的总表面积即比表面, 单位为毫米⁻¹。

假设泥石流体内颗粒的等容粒径为 d , 则颗粒体积 $V_0 = (1/6) \pi d^3$, 单位体积内均匀颗粒数

$$n = C_v / V_0 = 6 C_v / \pi d^3 \quad (1)$$

式中 C_v 为泥石流体积浓度。对于泥石流固体成分而言, 因颗粒大小不均, 式 (1) 改为

$$n = (6 C_v / \pi) \sum_{i=1}^m P_i / d_i^3 \quad (2)$$

式中 d_i , P_i 分别为颗粒组成第 i 组的分组粒径和相应的百分含量; m 为划分的粒组数。

又因为单颗粒表面积 $S_0 = \pi d_i^2$, 所以泥石流体的单位体积内颗粒的总表面积

$$S = n \cdot S_0 = 6 C_v \sum_{i=1}^m P_i / d_i \quad (3)$$

如果只考虑固体颗粒本身的级配特征, 不考虑气液两相的影响, 即认为大小混杂的固体颗粒是紧密接触, 颗粒之间没有气液充填的空间。这样处理后, 则 $C_v = 1$ 。此时泥石流固体成分的单位体积颗粒总表面积 (比表面)

$$A_s = 6 \sum_{i=1}^m P_i / d_i \quad (4)$$

1981 年费祥俊也得到同样的结果。

前面已经讨论了颗粒级配概念包括两个变量: 一是颗粒大小及其区段, 二是相应的百分含量。这里比表面 A_s 正是由变量 P_i, d_i 所决定, 为用比表面 A_s 作为表征颗粒级配的指标提供了可能性。另一方面, 颗粒级配曲线由若干组数据点 (P_i, d_i) 所构成, 通过控制粒组数 m 的多少, 即可获得颗粒级配曲线的一定精度, 从而克服了前述两点或三点控制颗粒级配曲线的不足。所以从理论上提供了用比表面 A_s 作为表征颗粒级配指标的精确性。

对于相同的颗粒级配, 粒组的划分方案不同, 所得的 P_i, d_i 必然不同, 它影响到比表面 A_s 值的变化。因此只有按统一原则划分粒组, 比表面才能代表有对比意义的颗粒级配。

参考和沿用前人在泥石流研究中对固体颗粒粒组的划分, 再考虑到比表面 A_s 受细颗粒的影响尤其敏感, 因此对细颗粒部分 ($d < 2$ 毫米) 作了详尽划分 (表 1)。

三、沉积稳定浓度与比表面的关系

综上所述,对于一定的泥石流体,有与之对应的沉积稳定浓度 C_{vs} 和固定的颗粒级配。若以比表面 A_s 代表颗粒级配,则 C_{vs} 与 A_s 之间必然存在着稳定的关系。

目前用实验量测的方法确定沉积稳定浓度 C_{vs} 和比表面 A_s ,旨在建立二者的经验关系式,使它们之间在理论上的对应关系得以进一步补充与完善。

(一)实验原理及方法

1. 沉积稳定浓度 C_{vs}

实验原理是将取得的天然泥石流样品,让其在室内自然沉积,经足够长的时间,泥石流中析出部分清水,固体物质达沉积终极稳定状态,这种经重力脱水达到的最大浓度即沉积稳定浓度(图2)。首先计算沉积终极稳定后的最大沉积容重 γ_{cmax} ,再用式

$$C_{vs} = (\gamma_{cmax} - 1) / (\gamma_s - 1) \quad (5)$$

换算为沉积稳定浓度 C_{vs} 。式中 γ_s 为固体颗粒的容重。

作实验时,判断和统一沉积稳定标准是关键。原则上24小时内固体物质的沉降深度不再有变化,即可认为沉积达到终极稳定状态。

2. 比表面 A_s

实验的核心是作泥石流固体物质的常规颗粒分析。这是因为比表面 A_s 由分组粒径 d_i 及其百分含量 P_i 所决定。在统一划分粒组(见表1)的前提下作实验样品的颗粒分析。实验原理及方法严守土工试验规范。

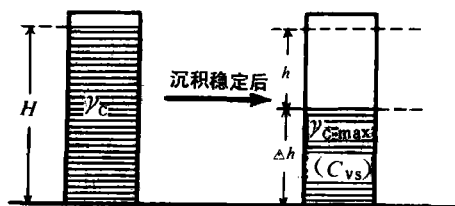


图2 泥石流流体沉积过程示意

Fig. 2 Deposit course of debris flow sample

H. 沉积前厚度; Δh . 沉积稳定后厚度; h. 析出水部分

求得各组样品的分组粒径 d_i 和含量百分数 P_i 后,用式(4)即可求得各自的比表面 A_s 。

(二)沉积稳定浓度 C_{vs} 与比表面 A_s 的关系

在天然条件下,经过取舍,获得了5次泥石流暴发运动过程中的21组实验样品,其浓度变化在1.070—2.271克/立方厘米之间,基本上代表了由挟沙洪水到高粘性的全类型泥石流。对各自的沉积稳定浓度 C_{vs} 和比表面 A_s 进行了系统配套实验,其实验结果列于表2。

利用表2中 C_{vs} 与 A_s 的对应关系作散点分布图(图3),可发现比表面 A_s 随着沉积稳定浓度 C_{vs} 的增加而减小,二者有明显的直线变化关系。所以设适线方程为

表1 颗粒粒组分类

Table 1 The types of particles in debris flow

颗粒名称		粒组(毫米)
粘粒		<0.001
		0.001—0.005
粉沙	细粉沙	0.005—0.010
	粗粉沙	0.01—0.050
沙	细、中沙	0.05—0.100
	粗沙	0.1—0.5
砾石	小砾石	0.5—2.0
	大砾石	2—5
卵石		5—10
		10—20
漂石		20—40
		40—80
		>80

$$A_s = A + B C_{vs}$$

(6)式中 A, B 为待定系数。根据量纲分析, A, B 的单位均与比表面的单位同, 即毫米⁻¹。利用数理统计方法得 $A = 1966$ 毫米⁻¹, $B = -2201$ 毫米⁻¹。

表 2 C_{vs} 与 A_s 的实验成果表Table 2 Test results of C_{vs} and A_s

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γ_c (克/厘米 ³)	1.070	1.159	1.209	1.225	1.287	1.321	1.378	1.440	1.559	1.678	1.684
$\star C_{vs}$	0.153	0.219	0.255	0.262	0.279	0.293	0.325	0.356	0.451	0.476	0.522
A_s (毫米 ⁻¹)	1613	1512	1426	1393	1352	1327	1262	1176	920	920	829
样品编号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
γ_c (克/厘米 ³)	1.761	1.851	1.970	2.010	2.091	2.101	2.144	2.173	2.210	2.271	
C_{vs}	0.575	0.630	0.668	0.696	0.735	0.749	0.761	0.768	0.795	0.825	
A_s (毫米 ⁻¹)	708	548	443	416	309	312	316	277	263	179	

所以沉积稳定浓度 C_{vs} 与比表面 A_s 之间的关系式为

$$A_s = 1966 - 2201 C_{vs} \quad (7)$$

其相关系数 $r = -0.999$, 精度 $S = 47$ 。

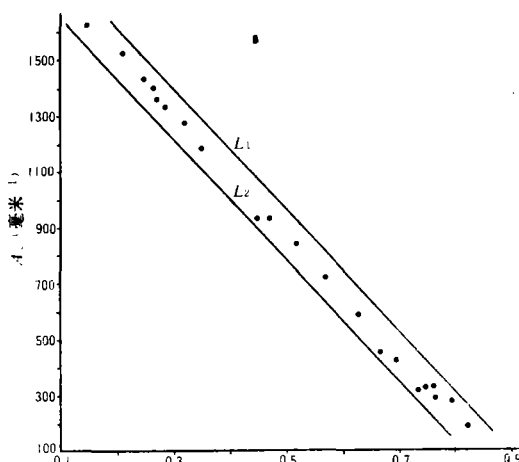
1. 对于信度 $\alpha = 0.05$, 自由度 $n-2 = 19$, 可以查得相关系数检验值为 0.433。因为 $A_s - C_{vs}$ 关系式的相关系数 $|r| = 0.999 > 0.433$, 这证明沉积稳定浓度 C_{vs} 与比表面 A_s 的关系式是可信的。

2. 根据置信水平 $1 - \alpha = 95\%$, 精度 $S = 47$, 这意味着利用 C_{vs} 计算 A_s 时, 概率为 95% 的区间为 $A_s = A + B C_{vs} \pm 2S$, 即

$$A_s = 1966 \pm 94 - 2201 C_{vs} \quad (8)$$

该区间在图 3 上表示为两条平行直线。

关系式 $A_s = 1966 - 2201 C_{vs}$ 证明: 一定的泥石流流体, 沉积稳定浓度和比表面有着密切的关系, 它反映了泥石流体的浓度与固体颗粒级配之间的关系。

图 3 C_{vs} 与 A_s 的关系Fig. 3 Relationship between C_{vs} and A_s

$$L_1: A_s = 1966 - 2201 C_{vs} + 94;$$

$$L_2: A_s = 1966 - 2201 C_{vs} - 94$$

参 考 文 献

- (1) 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 94—132 页。
- (2) 钱宁、万兆惠, 1983, 泥沙运动力学, 科学出版社, 第 14—35 页。

STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN DEPOSIT DENSITY AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF DEBRIS FLOW

Wang Yuzhang Kang Zhicheng

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

Abstract

Deposit density is a new concept for debris flow, which shows the density of debris flow and on the other hand, reflects the particle size distribution in debris flow. In this paper, the characteristics of deposit density and the scientific basis of specific surface area to stand for the particle size distribution were analyzed respectively. Then, the theoretic relationship between deposit density and particle size distribution of debris flow was researched. Samples were obtained from moving flows in Jiangjia Ravine near Dongchuan City for measurement of deposit density and specific surface area of debris flow. Finally, the equation of relationship between them was set up.

Key words debris flow, deposit density, particle size distribution, specific surface area