

粗细颗粒同时存在时的流动阻力*

万兆惠 华景生

(水利部水利水电科学研究院泥沙研究所)

提 要 为了研究同时存在粗细颗粒的流动阻力,进行了一组专门设计的试验。分析试验资料结果表明:由细的粘土颗粒引起的粘性力与由粗颗粒引起的离散力是可以线性叠加的。离散力是由于粗颗粒相互之间的碰撞,以及粗颗粒与边壁之间的碰撞所造成的。而粘土颗粒的絮凝作用形成絮团和絮网结构,它们对粗颗粒之间的碰撞起到缓冲作用。因而当有细的粘土颗粒存在时,离散力大幅度降低。

关键词 泥石流 阻力 离散力 粘性力 絮网结构

高含沙水流,特别是泥石流,通常挟带粒径范围很广的泥沙,这包括一定数量的粘土,以及粉沙、粗中细沙、砾石、巨石等等。因而研究同时存在粗细颗粒时的流动阻力以及这两类颗粒之间的相互作用是很有意义的。为这一研究,进行了一组专门设计的试验。现将简要描述这一试验的情况,以及对试验资料进行初步分析所得出的认识和结论。

(一)试 验

试验在毛细管粘度计内进行。毛细管为长100.3厘米、内径5毫米的紫铜管。首先将粘土颗粒和水配制成比重为1.41的泥浆,量测其流变特性。然后一步一步地加入比重也是1.41、粒径为0.9毫米的均匀煤粒,再量测不同煤粒浓度的混合浆液的流变特性。本试验中煤粒的体积浓度达到0.352。由于煤粒的比重与周围粘土浆液的比重相同,因而煤粒的下沉可以避免。这就绕开了一般试验中难以避免的粗颗粒分选沉降的困难。

纯粹细颗粒浆液的流变特性可以很好地用宾汉模型来描述,如图1中 $C_v = 0$ 的试验点据所示

$$\tau = \tau_B + \eta (du/dy) \quad (1)$$

式中 C_v 是煤粒的含量,以体积百分比计; τ 是 y 点的切应力; u 是该点的流速; du/dy 是该点的切变速率; τ_B 和 η 则为两个流变参数,前者为宾汉切应力,后者为刚度系数。

加入粗颗粒(煤粒)使得在同样切变速率下的切应力有所增大,但宾汉切应力没有明显增大。图1中画出了部分流变测量的结果。

(二)机 理 及 假 定

根据上述流变测量的结果,对同时存在粗细两类颗粒的浆体的运动阻力作出如下几个假定。

1. 同时存在粗细两类颗粒的浆体运动时粘性力及离散力同时起作用。
2. 粘性力主要是由细的粘土颗粒所引起的。有了粗颗粒以后,粘性力仍可由宾汉模

* 中国科学院东川泥石流观测研究站基金资助项目。
本文改回日期:1991-06-03.

型来描述。

3. 离散力主要是由于粗颗粒相互之间的碰撞,以及粗颗粒与边壁之间的碰撞所引起的。离散力可以由 R. A. 拜格诺的模型来描述。

4. 粘性力与离散力在原则上是可以线性叠加的。

5. 由于表面的物理化学作用,细颗粒会相互吸附并形成絮团和絮网等结构。这些絮团絮网结构能使粗颗粒之间的碰撞得到缓冲,从而使离散力减少到一定程度,可以用系数 K 来反映这一缓冲作用, K 值小于 1。

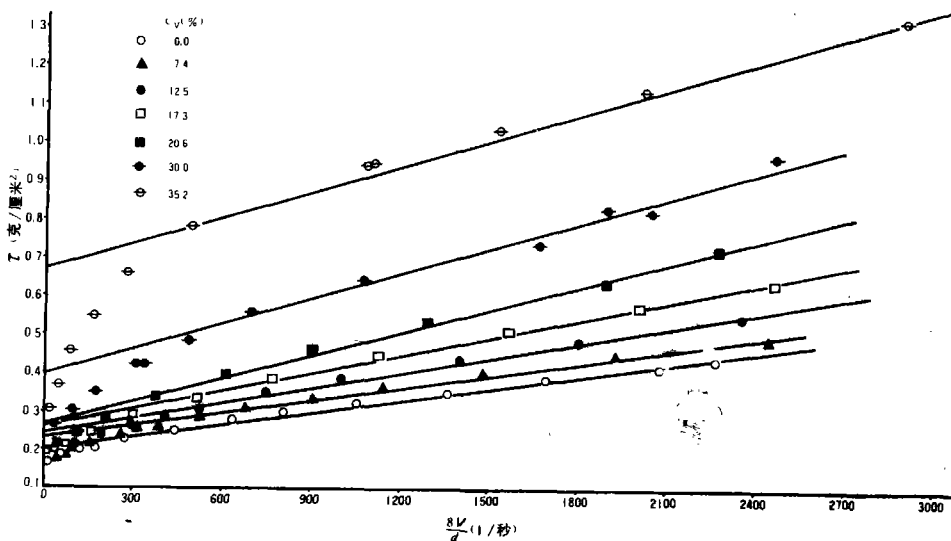


图1 流变量测结果

Fig. 1 Results of rheological measurement

应用以上这些假定,可以写下同时存在粗细两种颗粒时流体的流动阻力

$$\tau = \tau_B + \eta (du/dy) + K T \quad (2)$$

式中 T 为只存在粗颗粒时的离散切应力, $K T$ 则为同时存在粗细两种颗粒时粗颗粒相互碰撞引起的切应力。

式(2)的物理意义可以作如下的理解:同时存在粗细两种颗粒时的流动阻力由两部分组成,即粘性力 $\tau_B + \eta (du/dy)$ 及离散切应力 $K T$ 。由于细颗粒所形成的絮团、絮网的缓冲作用,离散力已打了一个折扣 K (与不存在细颗粒条件下的离散力相比)。

(三)离散力的表达式

拜格诺曾通过一组专门试验,得出不同条件下的离散力表达式^[1]如下:

在参数 $N = [\lambda^{1/2} \rho_s D^2 (du/dy)] / \eta < 70$ 的范围内,流动属于粘性区,在该区内

$$T = 2.2 \lambda^{3/2} \eta (du/dy) \quad (3)$$

在 $N > 400$ 的范围内,流动属于惯性区,在该区内

$$T = 0.013 (\lambda D)^2 (du/dy)^2 \quad (4)$$

以上二式中 ρ_s 和 D 分别为粗颗粒的密度和粒径, λ 为线性浓度, 按照拜格诺的定义

$$\lambda = [(C/C_v)^{1/3} - 1]^{-1} \quad (5)$$

式中 C_v 是粗颗粒的浓度, 以体积百分比计; C 是该种颗粒的极限浓度, 也即该种颗粒松散堆积时的体积浓度。对于均匀颗粒, C 可以取作 0.65。

拜格诺专门设计的试验是用塑料圆球加在甘油中进行的, 即用的是牛顿流体, 动力粘滞系数(相当于宾汉流体的刚度系数) η 是唯一的流变参数。而我们试验中用的是粘土泥浆, 即宾汉流体, 因而要用有效粘滞系数 $\eta_e = \eta [1 + (\frac{\tau_B}{\eta} \frac{8V}{d})]$ 来代替式(3)中的 η 。这里 V 和 d 分别是毛细管内的平均流速和毛细管内径。

(四) 基本方程

流体的流变方程可以一般性地写成

$$du/dy = f(\tau) \quad (6)$$

层流流动条件下, 通过一个圆管的流量 Q 可用如下积分求得^[2]

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{4} \left(\frac{8V}{d} \right) = \frac{1}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (7)$$

式中 τ_w 是边壁处的切应力; R 是管子的半径。只要给出 $f(\tau)$ 的表达式, 上式便可以积分。

上面已经讨论了: 在层流流动条件下, 同时存在粗细两种颗粒的流动阻力可以综合写成

$$\tau = \begin{cases} \tau_B - \eta (du/dr) + K_1 0.013 \rho_s (\lambda D)^2 (du/dr)^2 & (\text{对于 } N > 400) \\ \tau_B - \eta (du/dr) - K_2 2.2 \lambda^{3/2} \eta (du/dr) & (\text{对于 } N < 70) \end{cases} \quad (8)$$

式中 对于惯性区和粘性区的系数分别用不同的符号 K_1 和 K_2 表示; r 则为离管子中心的距离。由于采用了离管子中心的距离 r 代替离边壁的距离 y 来表示某一点的位置, 因而 du/dy 与 du/dr 恒具有相反符号。将式(2—4)综合写成式(8)时, 其中有些项的符号要作出相应的调整。

在 $N < 70$ 的粘性区, 可以由式(8)得出如下关系式

$$f(\tau) = -du/dr = (\tau - \tau_B)/\eta (1 + K_2 2.2 \lambda^{3/2}) \quad (9)$$

将式(9)代入式(7), 并作为初步近似, 假定 K_2 为常数, 则不难积分得出

$$\frac{8V}{d} = \frac{\tau_w}{\eta (1 + K_2 2.2 \lambda^{3/2})} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_B}{\tau_w} + \frac{1}{3} \frac{\tau_B}{\tau_w} \right) \quad (10)$$

在 $N > 400$ 的惯性区内情况则较为复杂。在该区内

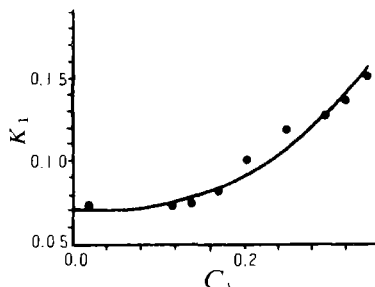
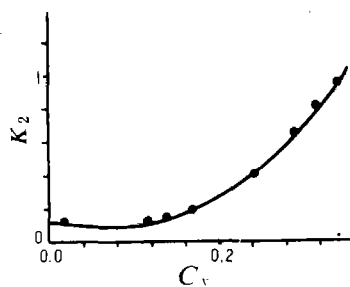
$$\tau = \tau_B - \eta (du/dr) + K_1 0.013 \rho_s (\lambda D)^2 (du/dr)^2 \quad (11)$$

这是一个 $(-du/dr)$ 的二次方程。令 $b = \eta$ 以及 $a = K_1 0.013 \rho_s (\lambda D)^2$, $C = \tau_B - \tau$, 考虑到圆管内总是近边壁流速小, 中心区流速大, $(-du/dr)$ 恒为正值, 因此可以写下

$$f(\tau) = -du/dr = [-b + \sqrt{b^2 - 4a(\tau_B - \tau)}]/2a \quad (12)$$

将上式代入式(7), 并积分之, 便可以得到

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{4} \frac{8V}{d} = \frac{b}{2a} \frac{\tau_B^3 - \tau_W^3}{3 \tau_W^3} + \frac{1}{6720 a^4 \tau_W^3} \{ 240 a^2 [\tau_W^3 \sqrt{(4a\tau_W + C)^3} - \tau_B^3 \sqrt{(4a\tau_B + C)^3}] - 48 a C [\tau_W \sqrt{(4a\tau_W + C)^3} - \tau_B \sqrt{(4a\tau_B + C)^3}] + 8 C^2 [\sqrt{(4a\tau_W + C)^3} - \sqrt{(4a\tau_B + C)^3}] \} \quad (13)$$

图2 K_1 与 C_v 的关系Fig. 2 Relationship between K_1 and C_v 图3 K_2 与 C_v 的关系Fig. 3 Relationship between K_2 and C_v

式(10)和式(13)分别是粘性区和惯性区内同时存在粗细两种颗粒的流体的基本方程式。公式表明, $8V/d$ 是如下参数的函数: $\rho_s, d, \lambda, \tau_B, \eta, \tau_W$, 以及系数 K_1 或 K_2 。

(五) 验 证

试验中, 毛细管内径 d 、粗颗粒(煤粒)粒径 D 和粗颗粒密度 ρ_s 都是已知的。纯粹粘土泥浆的流变参数 τ_B 和 η 也都已事先通过流变测量得出。

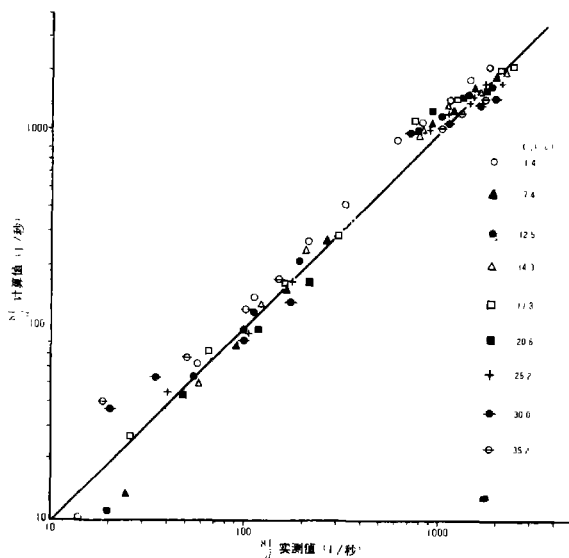
在每一组同时包含粗细两种颗粒浆体的试验中, C_v 或 λ 可以测得, 通过流变测量, 每一点的流量 Q (以及相应的平均流速 V) 及 τ_W 都可以测得。

根据试验中实测的流量 Q (或相应的平均流速 V) 可以算得一个实测的 $8V/d$, 即 $(8V/d)_{\text{mea}}$ 。如果系数 K_1 或 K_2 已知, 则根据式(10)或式(13), 以及实测的公式中的那些参数, 也可以算得一个 $8V/d$, 即 $(8V/d)_{\text{cal}}$ 。

采用试算的方法得出 K_1 和 K_2 。结果表明: K_1 和 K_2 都随粗颗粒浓度而变, 如图2和图3所示。

K_1 或 K_2 确定以后, 便可以计算 $(8V/d)_{\text{cal}}$ 。将它与根据直接测量得出的 $(8V/d)_{\text{mea}}$ 相比较, 其结果如图4所示。两者符合的程度是令人满意的。

(六) 讨 论

图4 实测与计算的 $8V/d$ 之比较Fig. 4 Comparison between $(8V/d)_{\text{cal}}$ and $(8V/d)_{\text{mea}}$

1. 在同时存在粗细两种颗粒的浆体中,阻力由粘性力和离散力两部分组成。总阻力是由细颗粒引起的粘性力与由粗颗粒引起的离散力(打折扣的,详见后)叠加而成。

2. 粘性力可以用宾汉模型来描述。离散力可以用拜格诺的公式来描述。由细颗粒形式的絮团、絮网对粗颗粒的碰撞有缓冲作用,因而有细颗粒存在时离散力有一定程度的减少。

3. 由于絮凝结构缓冲作用所造成的离散力的减少是相当明显的,这可以用系数 K_1 (或 K_2) 来反映。 K_1 变化于 0.07—0.15 之间, K_2 则变化于 0.15—0.95 之间。

4. 应用如上这些概念于泥石流,可以得出下面这些推论:

1) 泥石流体内泥沙浓度 λ 和颗粒粒径 D 都是很大的。由式(4)可见,相应地离散力也将是很大的。换句话说,泥石流体内粗颗粒对流动阻力起着重要作用,而泥石流的阻力则要比没有粗颗粒的泥流的阻力大得很多。

2) 与不存在细颗粒的水石流相比,在泥石流中由于细颗粒构成的絮凝结构的缓冲作用,其阻力有明显的减少。

这就说明了为什么在自然界中,水石流总是在纵比降大于 0.05 的沟道中才能发生,而泥石流则在比降缓得多(如 10^{-3} — 10^{-4}) 的沟道中也有可能发生。

参 考 文 献

- [1] Bagnold, R. A., 1956, The flow of cohesionless grains in fluids. *Proceedings of Royal Society of London, Series A*, 225, 235—237.
- [2] 钱宁、万兆惠, 1983, 泥沙运动力学, 科学出版社, 第 580—582 页。

RESISTANCE CONSISTING OF BOTH VISCOUS FORCE AND DISPERSIVE FORCE

Wan Zhaohui Hua Jingsheng

(Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research)

Abstract

A set of specially designed experiments have been carried for studying the resistance of a flow consisting of water and both fine and coarse particles. The viscous force caused by fine particles and the reduced dispersive force are linearly addible. The dispersive force caused by collision of coarse particles reduces to a great degree due to the cushioning effect of the flocculent structures formed by fine particles. The preliminary result is presented in this paper and further study is needed.

Key words debris flow, resistance, dispersive force, viscous force, flocculent structure