

# 泥石流的阻力分析

祁 龙

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

## 提 要

观测资料表明,泥石流阻力要大于同等水力条件下的清水阻力。根据泥石流中粗、细颗粒对阻力的不同影响,认为泥石流阻力的增大主要是由于泥石流中的推移质造成的。为了证实这一观点,作者分析了推移质附加阻力与泥石流阻力中大于清水阻力的那部分阻力之间的关系。分析结果表明,泥石流阻力和清水阻力之差有明显地随推移质附加阻力的增加而增大的趋势。

泥石流的阻力分析和流速计算,不仅对该学科的发展和完善有重要的理论意义,而且在防护工程设计中是必不可少的重要参数,具有重要的实用价值。近年来,不少从事泥沙和泥石流的研究者用二相流理论探讨这一问题,取得了新的进展和成果。本文试图将粘性泥石流阻力大于同等水力条件下的清水阻力的原因做一分析解释。

## 一、研究现状

自五十年代以来,对泥石流流速的研究主要是沿用曼宁公式和斯里勃内依公式的形式,根据实测资料,分析糙率系数的变化,制定了一些适合不同地区的糙率系数表。这里糙率 $n$ 不仅反映沟床和边壁阻力,同时也包括了流体的粘性阻力和颗粒间的剪切阻力。由于泥石流在运动过程中,上述几种阻力随着容重、颗粒组成、沟床比降和泥深等因素而剧烈的变化,造成 $n$ 值的高度分散,其数值大小相差5—6倍之多,在实际应用中难以作合理的选择。严格的讲,曼宁公式仅适合于阻力平方区,而泥石流,特别是粘性泥石流,多属于层流区或过渡区,仍然用曼宁公式分析泥石流流速已不尽合理。这也是造成 $n$ 值分散的一个重要原因。在实际应用中,曼宁公式对稀性泥石流的适用性要好于粘性泥石流,同样也是这个道理。

## 二、粘性泥石流运动机理的分析

对粘性泥石流的运动机理类似于高含沙水流的观点也有两种不同的看法:一种看法是大部分泥石流研究者,根据对粘性泥石流运动和堆积特征的感性认识,认为粘性泥石流中含有大量的粘土和胶体物质,随着含沙浓度的增大,泥沙颗粒之间很快形成结构,浆体粘性和极限剪切力急剧增加。当含沙量增加到一定程度后,泥石流就能浮起自身携带的最粗的泥沙颗粒,这时泥石流体不再发生相的分离,固体颗粒的重量由浆体极限剪切力支持,因此把粘性泥石流称为结构性泥石流、伪一相流和粘塑性体等。他们认为,这时只要有足够的坡降克服阻力,粘性泥石流就能维持流动,不存在一般意义上所说的液相搬运固相的问题。

另外一种看法是一些泥沙研究者提出的,他们认为,泥石流是固液两相混合体系的剪切流,其中液相是由水和粉沙、粘土、胶体物质掺混而成的浆液,固相则为较粗的泥沙颗粒。稀性泥石流

容重较低，紊动强烈，流体中的泥沙颗粒可分为三部分：由浆液的结构力支持的细颗粒称为悬浮质；粗颗粒则以滚动、跳跃的形式运动，称为推移质；介于二者之间的泥沙颗粒是靠紊动支持的悬移质。随着含沙浓度的进一步增大，浆体的粘性急剧增加，水流的紊动不断减弱，颗粒之间接触碰撞的机会越来越多，剪切运动产生的离散力变得越来越重要。当含沙量增加到某一浓度（相当于容重1.8克/立方厘米）后，水流紊动消失，泥石流在宏观上呈层流状态，含沙量垂线分布变得十分均匀，泥沙颗粒的重量全部由离散力支持，泥沙中除了和浆液掺混在一起的悬浮质外，其余部分都以层移的形式运动。

以上两种观点，究竟哪一种正确，目前尚无法作出最后的结论。这主要是因为，对粘性泥石流中固体颗粒的运动形式，不论在野外还是在实验室里都没有测到过。不过对于含大量石块且高速运动的粘性泥石流来说，以固液两相的剪切流动解释更合理一些，因为粘性泥石流的容重可高达2.3克/立方厘米以上，单位体积中，固体颗粒达78%，而水只占22%。在泥石流运动中，颗粒之间完全可以保持直接接触，不同粒径的石块相互叠置，填充在石块之间的浆液为量很少。在这种情况下，很难设想石块的重量是孔隙中的浆液支持的，而不是通过石块在剪切运动中不断碰撞，相互支撑，最后把它们的重量直接压在河床上。

事实上，由于粘性泥石流的浆液中包含了一定数量的细颗粒泥沙，因而：1、它的容重大于一般浑水，故它对泥沙的拖曳力和浮力要大于浑水；2、浆液的粘度远大于浑水，故泥沙的沉速要小于浑水中的泥沙沉速；3、泥石流的“铺床”作用降低了床面阻力，因此可以推断，泥石流夹带推移质的能力要比浑水更大。这一点在C. M. 福列什曼的试验中已得到证实，他发现在同样的床面上，细颗粒泥沙和水组成的浆液能推动的石块重量要比清水大几十倍。根据以上分析，我们认为，用二相流来解释粘性泥石流的运动机理是合理的。

### 三、粘性泥石流的阻力分析

前面已经提及，目前对粘性泥石流阻力的研究主要是根据实测资料，用谢才—曼宁公式反求糙率 $n$ 值， $n$ 即代表了泥石流的内外阻力。从各家的分析结果来看， $n$ 值有很强的地区性，不同地区之间 $n$ 值差别很大。但就每一条泥石流沟来说，泥石流阻力要大于同等条件下的清水阻力，如西藏古乡沟实测糙率仅为0.05，而粘性泥石流的 $n$ 值高达0.28，后者是前者的5.6倍。以下就泥石流阻力增大的原因作一粗浅的分析。

**（一）粗细颗粒对阻力的影响。**如果把粘性泥石流按固液两相混合体系的剪切流对待，则其中的泥沙颗粒主要有组成浆液的粉沙、粘土物质，靠浆体结构力支持的悬浮质和靠离散力支持的推移质，悬浮质和浆液溶为一体，不再发生相的分离，因而属于液相的组成部分；推移质为大于浆体极限悬浮粒径的颗粒，它们以滚动、跳跃、滑动的形式运动，并和浆体发生相的分离，属于固相部分。由于粘性泥石流在运动中紊动基本消失，不存在由紊动支持的悬移质，因此，对泥石流阻力产生影响的除了粉粘土物质外，主要有悬浮质和推移质两类泥沙颗粒。

1、粉粘土物质由于有巨大的亲水表面积和双电层电荷作用，容易在水中形成絮凝结构。这类细颗粒物质的增加，会迅速提高浆液的粘度和极限剪应力，从而一方面增大流体的粘性剪切阻力，另一方面又能遏制紊动的发展，减少由紊动引起的能量损失。在相同的水力条件下由于粘滞系数的增大，雷诺数相应减小，使本来为紊流流态的运动提前进入过渡区域层流区。另外还将更多地悬浮起较粗的泥沙颗粒组成浆体，提高浆体容重，减小泥沙沉速，使含沙量和流速垂线分布趋于均匀，从而减小阻力损失。

2、悬浮质受 $\tau_B$ 的支持，为液相的组成部分，其粒径在泥石流中一般达数毫米。虽然粗颗

粒对浆体流变性质的影响已作过不少研究，但结论很不一致。目前实验中所谓的粗颗粒其粒径一般小于1毫米，远小于泥石流中悬浮质的粒径，因此，悬浮质的增加对浆体粘滞系数的影响还不清楚。但对特定的泥石流来说，它的增加，必定会引起推移质数量的减少，增大浆体的容重和浮力，减小颗粒的水下重量。另外悬浮质和浆液成一相，它们在运动过程中不需要提供额外的能量，且释放出来的势能还能补偿到液相中。这对泥石流运动是非常有利的。

3、推移质颗粒粗大，在泥石流中属于靠浆体输送的物质，要维持它们的运动，浆体必须不断地提供能量。在运动中，它们和浆体呈两相，且释放出来的势能又不能补偿到泥石流中，因此，推移质的增加，要消耗泥石流大量的能量，增加泥石流运动的阻力。

综上所述，泥石流中组成浆液的粉粘土物质有增加阻力的一面，同时也有减小阻力的一面，两种影响对比消长，有时相互抵消，有时其中的某一方面占居优势。若把上述两种泥沙和水组成的浆体视为高含沙均质浑水，则实验表明，对于光滑边壁，高含沙均质浑水的阻力损失要大于同等条件下的清水；而对于粗糙边壁，情况正好相反，在同等水力条件下，均质浑水的阻力损失小于清水。泥石流沟床属于粗糙边壁，浆体流动的阻力损失应小于同等水力条件下的清水。据此，我们可以认为，泥石流阻力增大的原因是由于推移质运动造成的。

(二) 泥石流阻力分析。为证实以上想法，需分别求出同等水力条件下的清水和泥石流阻力，还要知道由于推移质运动造成的附加阻力，为此首先要将泥石流的固液两相进行划分。

1、固液两相的划分。要划分泥石流的固液两相，首先要确定靠浆液的浮力和屈服切应力能支持的最大悬浮颗粒粒径 $D_0$ ，小于 $D_0$ 的颗粒为液相的组成部分，大于 $D_0$ 的颗粒则为固相。对粘性泥石流， $D_0$ 可用下式确定：

$$D_0 = \frac{6\tau_B}{K(\gamma_s - \gamma_f)} \quad (1)$$

式中： $D_0$ ——最大悬浮颗粒粒径；

$\gamma_s$ ——固体颗粒容重；

$\gamma_f$ ——浆体容重；

$\tau_B$ ——宾汉极限剪切力；

$K$ ——系数。

用上式确定泥石流中最大悬浮颗粒粒径，尚存在着几个需要解决的问题：首先在实验中浆体处于静止状态，而泥石流处于流动状态，由于剪切运动，泥石流浆体的结构会遭到不同程度的破坏，造成两种状态之间的差别；其次，沉降实验一般是在细颗粒泥浆中放入单个颗粒（球体）后进行测定的，浆体的容重及屈服切应力不因加入试验颗粒而变化。对泥石流来说，悬浮颗粒不再是单个球体，而是包括了粉沙至 $D_0$ 之间的各级泥沙。随着不同粒级的泥沙加入液相，浆体的容重和屈服切应力都要发生变化，它们的变化又导致 $D_0$ 的增大，使得又有一些更粗的颗粒成为液相，如此反复，不断循环。对上述第一个问题，沈寿长作过实验研究，并给出了流动状态下用式(1)确定 $D_0$ 的修正系数表达式。按该式估算，在流速梯度相差10倍时，修正系数仅相差0.15左右，说明在流动状态下，流速梯度的大小对于 $D_0$ 的影响并不显著；但和静止状态相比，则有较大的影响。在一般规模的泥石流运动条件下， $D_0$ 可能减小一半左右。但在目前阶段，各家通过实验确定的 $\tau_B$ 值相差很大，与此相比，由于浆体的流动对 $D_0$ 的影响还是比较小的。另外，由于对泥石流的垂线流速分布还不清楚，所以，在以后的分析中，对泥石流运动所产生的影响未作考虑。

对于上述的第二个问题，王兆印从理论上进行过分析和实验研究，证明对 $D_0$ 的浮力产生影响

的泥沙仅仅是那些细小颗粒，粒径与 $D_0$ 相差不多的颗粒不产生影响。在具体分析中，他们假定产生影响的泥沙仅为粒径小于 $1/50D_0$ 的颗粒。由于目前还无法证明该假定的合理性和给出更恰当的比例关系，在我们以后的分析中仍然认为，凡是小于 $D_0$ 的颗粒都对浮力产生影响，即把上述比例关系按1:1处理。

式(1)中的 $\gamma_f$ 随着 $D_0$ 的变化而变化，用下式计算：

$$\gamma_f = 1 + \frac{(\gamma_s - \gamma)\gamma_n C_v}{[1 - (1 - \gamma_n)C_v]} \quad (2)$$

式中： $\gamma$ ——清水容重；

$\gamma_n$ ——粒径小于 $D_0$ 的颗粒占全部固体颗粒的比例；

$C_v$ ——固体颗粒的体积浓度。

这样，要确定 $D_0$ 需要进行试算，首先假定一个 $D'_0$ ，从颗粒级配曲线上找出 $\gamma_n$ ，按式(2)求出 $\gamma_f$ ，再代入式(1)求出 $D_0$ ，如果 $D_0 \approx D'_0$ ，重新假定 $D'_0$ ，重复以上计算过程，直到 $D_0 = D'_0$ 为止。

需要说明，由于泥石流野外观测条件困难，设备简陋，测验项目不全，因此，即有流动条件又有静力学分析结果的配套资料很少。本次收集到甘肃武都抑弯沟泥石流观测资料72个，云南东川蒋家沟13个，其中武都泥石流资料中缺实测 $\tau_B$ 值，对此我们参照费祥俊公式，根据蒋家沟实测资料分析得到(图1)：

$$\tau_B = 0.476 \exp 7.78 \left( \frac{C'_v - C_{v0}}{C_{vm}} \right) \quad (3)$$

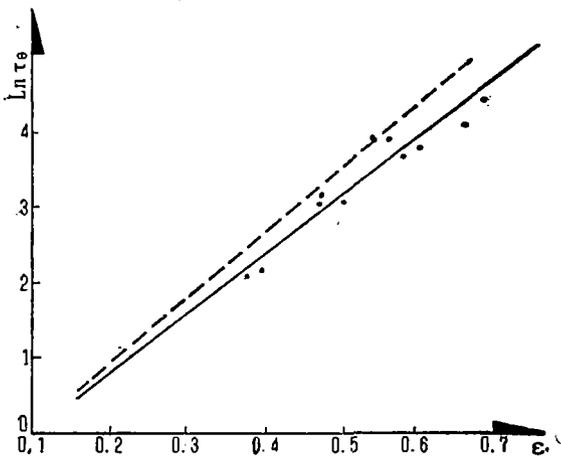


图1 蒋家沟泥石流 $\tau_B \sim C_v$ 关系

式中： $C'_v$ ——为粒径小于0.25毫米以下的泥沙和水组成的浆液的体积浓度， $C_{vm}$ ——为泥沙颗粒在水中的极限体积浓度， $C_{v0}$ ——为宾汉起始体积浓度，可由下式求得：

$$C_{v0} = 1.26 C_{vm}^{3.2} \quad (4)$$

然后用以上两式，并按武都泥石流颗粒级配资料计算了它们的 $\tau_B$ 值。

2、阻力计算。现分别计算同等水力条件下清水和泥石流的阻力，二者之差即为泥石流阻力的增加部分，再求出推移质附加阻力，然后分析它们之间的关系。

(1) 泥石流阻力。对泥石流阻力用

两种方法进行分析：首先用曼宁公式求其糙率 $n$ 值， $n$ 代表了泥石流的阻力。

$$n = R^{2/3} J^{1/2} / v \quad (5)$$

式中： $v$ ——泥石流断面平均流速；

$R$ ——水力半径；

$J$ ——沟床比降。

考虑到粘性泥石流在运动中紊动已充分减弱，处于层流或紊流向层流转变的过渡状态，其阻力规律已超过阻力平方区，用式（5）分析其阻力已不尽合理，因此，又用下式分析了泥石流阻力：

$$\lambda = 8gRJ/v^2 \quad (6)$$

式中：g—为重力加速度，其余符号同前。

（2）清水阻力。和泥石流同等水流条件下的清水阻力用下式计算：

$$n' = H'^{1/3} / [9.66 + 19.5]g \left( \frac{H}{D_{95}} \right) \quad (7)$$

其中： $D_{95}$ —为河床质代表粒径，从泥石流颗粒级配曲线上查得；H—为水深。为了和泥石流阻力的另一种表达形式 $\lambda$ 相对应，又将式（7）求得的 $n'$ 用下式转变成 $\lambda'$

$$\lambda' = \frac{8gn'^2}{R^{1/3}} \quad (8)$$

根据以上计算结算，再求出二者之差 $\Delta n (= n - n')$ 和 $\Delta \lambda (= \lambda - \lambda')$ ， $\Delta n$ 和 $\Delta \lambda$ 代表同等水流条件下泥石流阻力中大于清水阻力的部分。

（3）推移质运动造成的附加阻力用下式计算：

$$J_p = \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f} \cdot \frac{SD'_{50}}{R} \cdot \tan \alpha \quad (9)$$

式中：S—为推移质在床面上的覆盖率，取 $S = 0.9$ ； $\tan \alpha$ —为固体颗粒水下休止角，取

$\tan \alpha = 0.63$ ； $D'_{50}$ —为推移质中值粒径，从颗粒级配曲线上大于 $D_{50}$ 的部分中查找； $\gamma_s$ 和 $\gamma_f$ 同前。

其实上式就是爱因斯坦(H. A. Einstein)推移质输沙率公式中强度参数 $\varphi$ 的另一种表达形式。这里认为，与推移质运动有关的 $\varphi$ ，是推移质床面覆盖率S和水下休止角 $\tan \alpha$ 乘积的倒数，即 $\varphi = 1/S \cdot \tan \alpha$ 。

最后将 $\Delta n$ 和 $\Delta \lambda$ 分别与 $J_p$ 点绘成图2和图3，可以看出，点群虽然比较散乱，但 $\Delta n$ 和 $\Delta \lambda$ 都有随 $J_p$ 的增大而增大的趋势，其中 $\Delta \lambda$ 与 $J_p$ 的关系要好于 $\Delta n$ 与 $J_p$ 的关系。在图上加了两条平行的直线，落在线外的有14点，占总数的22.5%；在线外的点中，右侧的5点仍具有和线内的点相同的生长趋势。

## 小 结

1、通过以上分析，可以认为泥石流阻力的增加主要是由于推移质运动造成的。

2、用曼宁公式分析泥石流阻力已不尽合理，今后对泥石流阻力规律的研究，应更多的采用达西—韦斯巴赫公式。

3、图2和图3中点群不够集中的原因，除了观测资料的精度外，可能是由于推移质床面覆盖率S取为常数的缘故。按理它应该是推移质数量的函数，对此有待进一步研究。

## 参 考 文 献

〔1〕章书成等：《中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊》第4号，第19—36页，科学出版社，1985年。

〔2〕康志成：同上，第108—119页。

〔3〕陈光曦：《泥石流防治》，第65—77页，中国铁路出版社，1983。

〔4〕中国科学院兰州冰川冻土研究所等：《甘肃泥石流》，人民交通出版社，第36—38页，1982。

〔5〕钱意颖等：“高含沙水流的基本特性”，《河流泥沙国际学术讨论会文集》第1卷，第175—184页，

光华出版社, 1980年。

- [6] Bagnold, R. A., "Experiments on a Gravity-free Dispersion of large Solid Sphere in a Newtonian Fluid Under Shear", Proc. Royal Society of London, Vol. 225A, Aug. 1954.
- [7] Tamotsu Takahashi, "Mechanical Characteristics of Debris Flow", J. Hyd. Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., Vol.104, No.HY8, pp1153-1169, 1978.
- [8] 王兆印、钱宁: "层移质运动规律的实验研究", 《中国科学》A辑, 1984年第9期。
- [9] 李培基、梁大兰: "泥石流容重及其计算", 《泥沙研究》, 1982年第3期第75-83页。
- [10] 钱宁、王兆印: "泥石流运动机理的初步探讨", 《地理学报》, 第39卷第33-42页, 1984年。
- [11] C. M. 福利什曼: 《泥石流及其散布地区的道路设计》, 人民铁道出版社, 1958年, 中译本。
- [12] 钱宁、万兆惠: 《泥沙运动力学》第422页, 科学出版社, 1983年。
- [13] 费祥俊: "高含沙水流的颗粒组成及流动特性", 《第二届河流泥沙国际学术讨论会文集》, 1983年10月, 南京。
- [14] D. I. Bray: "Estimating Average Velocity in Graved-Bed Rivers", J. Hyd. Div. Proc. Assc. 105Hy 9/Sept, 1979.

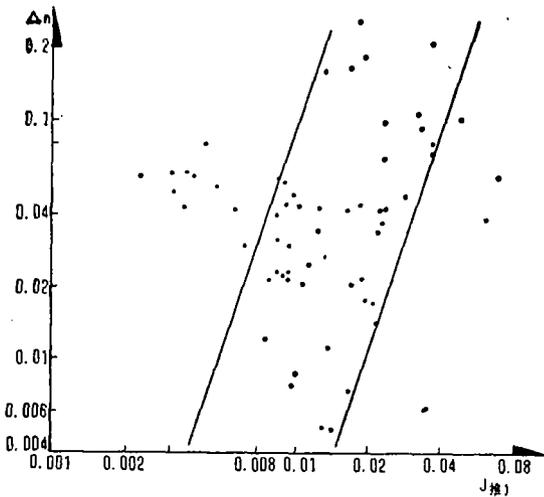


图2 推移质附加阻力 $J_P$ 与 $\Delta n$ 的关系

(以下英文提要转第35页)

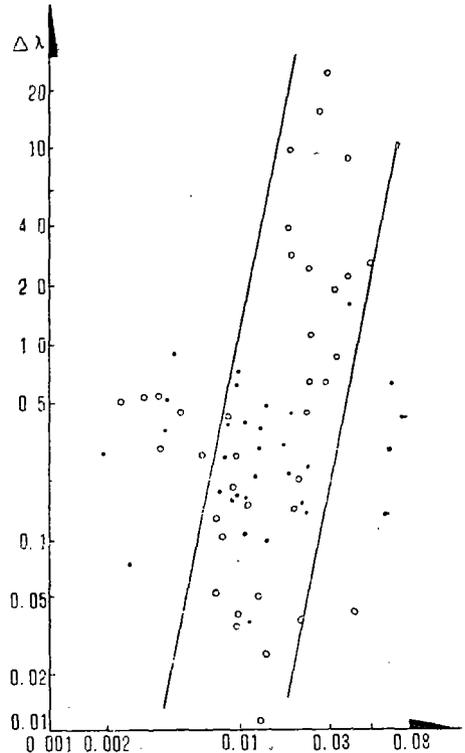


图3 推移质附加阻力与 $\Delta\lambda$ 的关系

# Preliminary research on the development history and environment of debris flows in Xihe county of Gansu Province

*Zhao Shangxue*

*(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica)*

*Zhang Zhengqiang*

*(the Soil and Water Conservation Scientific Testing Station of Xihe, Gansu)*

## Abstract

According to the debris flow development history, geological, geomorphical and precipitation conditions, this experiment initially analyses the distribution, cause and developing tendency of debris flows in Xihe county. It is considered that the debris flows of this county distributes along with structural belt with the changes of rock character and artificial destruction of vegetation. Relying on these, the authors deduce the causes of debris flows and discuss the forming of debris flows with relation to topography, the storage of solid materials, water supplies and new tectonic movement. It at last draw the conclusion that the debris flows tend of this county will come into an expanding stage and become serious soon.

---

(上接第20页)

## An analysis to the resistance of debris flow

*Qi Long*

*(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica)*

## Abstract

The observed data shows that the resistance of debris flow is higher than that of water under the same hydraulic condition. According to the analysis on different effects of coarse grains and fine grains for resistance. This paper thinks that the reason causing increase of resistance of debris flow is the bed load in debris flow. In order to prove this idea, we have analysed the relation between extra resistance causing bed load and increment of resistance of debris flow. The result shows that the increment of resistance increase with the extra resistance increasing.