

粘性泥石流阻力规律初探

祁 龙

(中国科学院 寒区、旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 用曼宁公式分析泥石流阻力时, 不同地区 and 不同流域之间的糙率 n 值相差很大, 即是同一条沟的 n 值也很分散。若考虑单宽固体物质重量和粗、细颗粒含量之比沿垂线分布的不均匀性之后, 则使单沟的 n 值点群分布趋于集中, 且能将不同泥石流沟相差数倍的 n 值用统一的表达式加以描述。

关键词: 粘性泥石流; 阻力; 糙率。

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

1 研究现状

对粘性泥石流阻力的研究多采用曼宁公式, 即用糙率 n 代表阻力来分析它的变化规律^[1,2]。这样, n 不仅反映了床面的摩擦力, 同时也包含了流体内部的粘性力和摩擦力, 因而, 它的变化规律较之洪水要复杂得多。主要表现在不同地区和沟谷之间的 n 值要相差 3~4 倍之多^[3], 这一方面给使用者造成了困难, 同时也给研究者提出了一个需要解决的课题。显然, 对此仅用床面和边壁的粗糙程度来解释是不行的, 因为粘性泥石流经过“铺床”作用后, 床面阻力不应相差太大。只有深入到流体内部结构才能找到合理的答案。然而, 由于反映流体结构特征的宾汉极限剪应力 τ_B 及粘滞系数 η 变化复杂, 测试困难, 虽然有一些包含了 τ_B 和 η 的流速计算公式^[4,5], 但因很难对其在不同流域的通用性作出评价, 在生产实践中也未被广泛采用。

2 阻力变化规律及机理

研究表明, 代表阻力的 n 值具有随泥深 H 的增加而增大的规律, 其中云南东川蒋家沟为^[2]

$$n = 0.035H^{0.34} \quad (1)$$

而甘肃武都的柳弯沟、火烧沟及马槽沟中, n 与 $H^{0.23}$ 成正比^[6,7]。国内其他一些进行过观测的泥石流沟也表现出类似规律。由此看来, 泥石流阻力随 H 的增加而增大是一个普遍的规律, 但对其成因的认识却不完善。已故著名泥沙专家钱宁教授认为^[8], 泥石流中固体颗粒的粒径随 H 的增加而变粗, 由此造成阻力的增大。经点绘文献^[9]中的相关数据, 发现粒径 $d-H$ 的关系并不密切(图1)。如果说在泥深 ≥ 1.0 m 时还有点关系的话, 在泥深 < 1.0 m 时, 二者之间则毫无关系。由此可见, 由于粒径随泥深的增大而变粗致阻力增大的解释是不全面的。那么导致 n 随泥深而增大的真正原因是什么呢? 对此作如下分析。

根据力平衡原理, 在稳定流条件下, 床面阻力(不计内阻力)应等于流体作用在床面上的剪力 γHJ 。对同一观测断面, J 为常数, 因而, 床面阻力只与 γH 有关。由于 H 的变化幅度大, 大小相差 20 倍左右, 而 γ 的变化幅度小, 在粘性泥石流范围内, 大小相差仅有 1.2 倍, 即使不考虑 γ 的影响, 泥深 H 也能与阻力 n 保持一定的关系。因此, n 随 H 增大的实质应该是由单宽重力随 H 的增加而增大所致。由于

收稿日期: 2000-01-06; 改回日期: 2000-03-12。

基金项目: 中国科学院“山地灾害—泥石流、滑坡研究”特别支持项目。甘肃省科学技术委员会攻关项目(GK953-3-7)

作者简介: 祁龙(1948-), 男(汉族), 甘肃省临夏市人。1975年毕业于兰州大学数学力学系固体力学专业。现主要从事泥石流形成机理及灾害防治研究。

图 1 所用资料中缺粒度分析成果, 为了和以后的分析相一致, 又采用甘肃武都泥弯沟、柳弯沟和火烧沟的资料^[2], 点绘了 $n-H$ 以及 $n-C_vH$ (体积浓度与泥深的乘积) 关系图(图 2), 从图 2 可以看出, 后者的点群分布较前者有所改善。因此, 本文的解释不仅反映了该现象的物理本质, 且能提高精度。但它仍不能将不同流域的泥石流阻力规律统一起来。

3 不同地区泥石流阻力的统一表达

有关研究表明, 不同地区、不同沟谷之间泥石流阻力相差很大, 文献^[2]中将其按阻力大小分为高、中、低阻三种类型, 而对其机理的解释是由于颗粒粗细程度不同所致。云南东川蒋家沟属低阻型, 武都为中阻型, 在同等水深下, 武都泥石流阻力是蒋家沟的 2 倍左右。按上述解释, 武

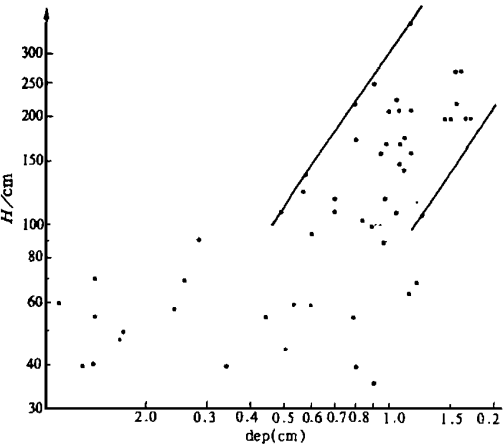


图 1 $d-H$ 关系图
Fig.1 $d-H$ relation

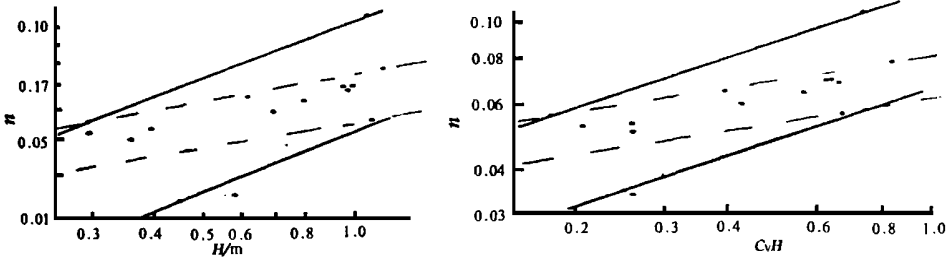


图 2 $n-H$ 和 $n-C_vH$ 关系图
Fig.2 $n-H$ and $n-C_vH$ relation

都泥石流应粗于蒋家沟, 然而, 经分析所能找到的各种资料, 却未发现蒋家沟泥石流^[10] 细于武都的任何证据。恰恰相反, 蒋家沟泥石流还要粗于武都。这样, 如何解释蒋家沟泥石流在颗粒粗于武都的条件下, 其阻力还会小于武都泥石流就成为我们关心的问题。

首先, 根据细颗粒对泥石流具有减阻的作用, 而粗颗粒却增加泥石流阻力的一般认识^[1], 设想蒋家沟泥石流中, 虽然各级细颗粒的重量百分数(P_i)均小于武都, 但总量($P_i C_v H$)是否会大于武都呢, 如果确实如此, 亦能解释蒋家沟阻力小于武都的原因。经点绘 $P_i C_v H-n$ 的关系图, 发现按此处理后, 虽然蒋家沟的细颗粒总量比武都有所增大, 但并未增大到与 n 值相对应的位置上, 且点群散乱, 看不出 n 随 $P_i C_v H$ 的增大而减小的趋势。由此看来, 在分析中仅考虑细粒的减阻影响, 而不考虑颗粒的增阻作用是不行的。为此又采用粗、细颗粒含量百分数之比(P_j/P_i)与 $C_v H$ 的乘积为参数, 点绘 $(P_j/P_i) C_v H-n$ 的关系图。经反复比较, 不论粗颗粒含量(P_j)和细颗粒含量(P_i)取何粒级, 虽然都能使同一地区(或流域)泥石流点群分布趋于集中, 但这种处理不仅不能将两地的泥石流阻力规律统一起来, 而且还有加大分散程度的现象。

受泥石流沉积剖面中存在着“底泥层”和“反向粒级层”的启发, 可以设想, 泥石流泥深越小, 在碰撞离散力的作用下, 大颗粒越易于向表层聚集, 并导致较多的细颗粒留在底部。而泥深越大, 粗颗粒向表层的集中越困难, 只有部分粗颗粒聚集在表面, 仍有一部分粗颗粒和细颗粒一同留在底部。按此设想构造出一个新的参数 $P_{<2}/P_{>2} (0.3/H)^{0.5}$, 这一参数的物理意义是: 泥深越小, 细、粗颗粒比例越大, 越利于流动; 泥深越大, 底层细、粗颗粒比例越小, 越不利于流动。如表层采样的 $P_{<2}/P_{>2}$ 为 0.8 时, 当泥深为

0.3 m 时, $P_{<2}/P_{>2}(0.3/H)^{0.5}$ (记为 A) 仍为 0.8; 泥深为 0.6 m 时, A 变为 0.56; 泥深为 1.0 m 时, A 变为 0.43……, 当泥深为 2.1 m 时, A 则变为 0.29。 A 值的减小并不意味着底部细颗粒总量的减少, 而表明泥深越大, 底层的细颗粒占单宽总量的份额相对要小些。 当它乘以 $C_v H$ 后仍要大于泥深较小时的总量, 只是与它所背的“包袱”相比, “马力”似赚不足, 故造成了阻力增大。

经点绘 $AC_v H-n$ 的关系图, 发现蒋家沟泥石流流点群基本上与武都泥石流混合在一起, 且并未超出武都泥石流点群的分布幅度(图 3)。 图 3 与图 2 相比, 分布宽度并未明显减加。 这说明参数 $AC_v H$ 基本上反映了阻力 n 的变化规律。 经简单分析, 得到如下表达式

$$n = 0.14 [P_{<2}/P_{>2}(0.3/H)^{0.5} C_v H]^{0.8} \tag{2}$$

整理后得

$$n = 0.09 \left(P_{<2}/P_{>2} C_v \right)^{0.8} H^{0.4} \tag{3}$$

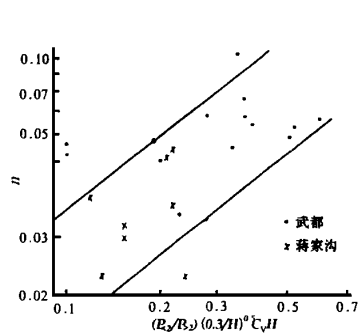


图 3 $n-(P_{<2}/P_{>2})(0.3/H)^{0.5} C_v H$
Fig. 3 $n-(P_{<2}/P_{>2})(0.3/H)^{0.5} C_v H$ relationship

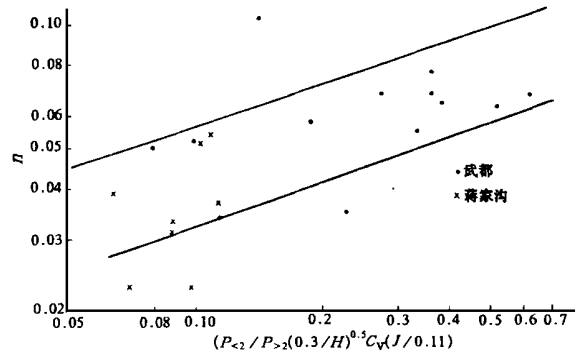


图 4 $n-(P_{<2}/P_{>2})(0.3/H)^{0.5} C_v H(J/0.11)$
Fig. 4 $n-(P_{<2}/P_{>2})(0.3/H)^{0.5} C_v H(J/0.11)$ relationship

4 表达式的改进

以上通过改变粗、细颗粒的浓度分布, 虽然初步回答了造成蒋家沟和武都泥石流阻力之间巨大差别的原因, 但估计还有其他因素的影响, 对此, 需要作进一步研究。

4.1 泥深的影响

泥石流在原沟床上流动的只是打头的前一二阵, 其后的上百阵泥石流都是在前面泥石流形成的残留层上运动着。 残留层厚度在蒋家沟为 1.0 m 左右, 在武都平均为 0.4 m 左右。 泥石流在残留层上流过时, 下部残留层处于什么状态至今仍然是个谜, 文献[2]中认为的“龙头”冲深、尾部淤积是有道理的, 其他研究者也有类似的看法^[11], 即认为除了床面上很薄的一层外, 残留层都在运动。 如果假定残留层全部都在移动, 那么蒋家沟泥石流的实际泥深应该加上 1.0 m, 而武都应加 0.4 m。 这样, 反算的 n 值虽然都要增大, 但蒋家沟增加的幅度要比武都大。 以两地水深均为 1.0 m 的两次泥石流为例, 经校正后蒋家沟的 n 值由 0.033 增加到了 0.052, 武都由 0.068 增加到了 0.085。 蒋家沟增长了 54.5%, 而武都增长了 25%, 蒋家沟的增长率是武都的 2.18 倍。 按此处理, 不仅可缩小图 3 中点群的分布宽度, 亦可理解蒋家沟泥石流为什么会在很小的比降下具有很高的流速。 这就是蒋家沟泥石流的实际流深要比我们观测到的数据增大了许多。

4.2 泥面宽度的影响

经点绘武都泥流观测资料, 发现 n 与泥面宽度 B 成反比, 也就是说流速与 B 成正比。 对这一现象的解释应该是泥面越宽, 残留层越厚, 因而实际流深越大。 除此之外, 泥面越宽, 受边壁的影响越小, 即

表现在平面流速横向分布比较均匀。而泥面较窄时, 受固定边壁的影响, 横向流速分布的弧度半径小, 对平均流速的影响显著。假定有两阵同样泥深的泥石流, 一是在10 m宽的沟槽中流动, 另一是在30 m宽的沟槽中流动, 前者在10 m宽处就受到两岸固定边壁的摩阻, 后者在10 m宽处所面对的还是流动着的泥石流, 二者之间的差异是显而易见的。特别是在泥深较小时, 泥石流仅在残留层中间较低部位流动, 宽度小于残留层边界, 所受边壁影响更小。对此, 虽然按水力学的办法用水力半径代替水深加以修正, 但目前看来, 这种处理是不够的。估计这也是蒋家沟泥石流流速很高的原因之一。

另外, 泥面越宽, 淤积层越厚, 还会导致残留层表面细颗粒的增加, 这同样有利于流动。当泥石流停止后, 由于剪切作用的消逝, 粗大颗粒会在重力作用下下沉, 并将细颗粒挤到表面, 从而形成表面光滑层。泥石流在运动中, 由于中部流速高于两侧, 因而, 不断的将粗大颗粒挤出主流线, 当一阵泥石流过后, 同样由于平面横向流速差的缘故, 中间部位呈低于两侧的凹状淤积形态, 后由两侧的淤积物迅速“填平补齐”。在这一过程中, 也有较多的细颗粒运移到中部, 促进了中间部位表面光滑层的形成和发展。对淤积层的这种垂向和横向的颗粒交换变化还未做过研究, 今后应引起重视。

4.3 顺直沟段长度的影响

在泥石流动力学分析中, 将其视为恒定均匀流。但实际上泥石流既不恒定, 也不均匀。若将其在顺直沟段的流动视为加速运动, 那么顺直段越长, 观测流速就越大。一般来说, 流域越大, 比降越小, 泥石流越频繁, 就有可能形成很长的顺直沟槽。在这种沟段上加速运动的泥石流, 容易达到很高的流速。这也是象蒋家沟、大白泥沟那样的较大流域中泥石流阻力小, 而象老干沟、武都柳弯沟、火烧沟等小流域中, 泥石流阻力大的原因之一。

4.4 表达式的改进

上述三种影响其实都与沟床比降有关, 比降越小, 残留层越厚、越宽, 且沟道越顺直。为此, 在式2右侧的参数项中增加比降因子, 并点绘成图4。图4与图3相比, 落在两条平行线外的同是4个点, 但平行线的间距减小了31%, 精度大为提高。图4中所用资料来自4条泥石流沟, 比降范围0.045~0.113。

n 的表达式为

$$n = 0.97[(P_{<2}/P_{>2})(0.3/H)^{0.5}C_vH(J/0.11)]^{0.4} \tag{4}$$

整理后有

$$n = 0.185[(P_{<2}/P_{>2})C_vJ]^{0.4}H^{0.2} \tag{5}$$

将式(5)代入曼宁公式 $V = \frac{1}{n}H^{\frac{2}{3}}J^{\frac{1}{2}}$ 后, 粘性泥石流流速公式为

$$V = 5.4[(P_{<2}/P_{>2})C_v]^{-0.4}H^{0.47}J^{0.1} \tag{6}$$

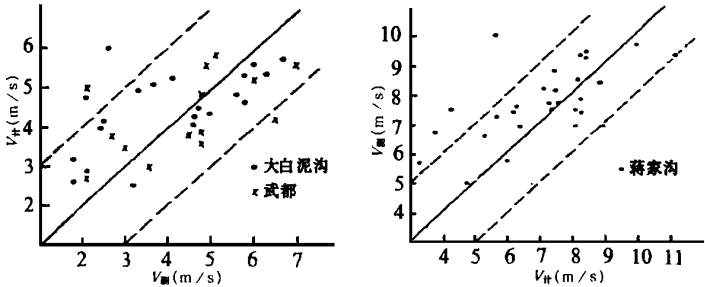


图5 $V_{\text{计}} \sim V_{\text{测}}$ 比较

Fig. 5 $V_{\text{cal}} \sim V_{\text{meas}}$

4.5 验证与分析

对式(6)用东川大白泥沟^[9]和蒋家沟资料^[12]进行验证, 结果见图5。其中 $P_{<2}$ 按文献中列的小白泥沟数据代替。两沟相邻, 形成环境和流体性质相近。蒋家沟资料的采用是为了便于和王光谦公式的计

算结果进行比较, 其中 $P_{<2}$ 用费祥俊公式^[13] 估算。将图 5 和相应文献中的图件相比较, 可以认为式(6)的计算结果不差于上述两家公式。作为一个主要依据武都泥石流建立起来的通用公式, 对东川地区泥石流能够达到这样高的吻合程度是令人满意的。如果仅从图 5 单独来看, 式(6)的计算结果对大白泥沟偏高一些, 而对蒋家沟又偏低一些。这可能是由于大白泥沟无 $P_{<2}$ 值而借用了小白泥沟, 且 γ_c 只有 2.15 t/m^3 和 1.97 t/m^3 两种、变化太少的缘故。蒋家沟是国内阻力最小的泥石流沟, 作为一个通用公式, 计算结果稍低一些是可以理解的。

用式(6)计算泥石流流速时, 不需要选择 n 值和进行流变实验, 只要作一个简单的粒度分析就可完成。不仅计算简便, 且能减少由于经验不足和认识不清而造成的人为误差。这对那些刚接触泥石流的设计者, 和那些从未进行过观测和调查的泥石流沟的流速分析是十分有用的。

4.6 存在的问题

式(4)中反映的阻力规律对统一不同流域的泥石流阻力是有效的, 但就每条流域单独来看, 蒋家沟的点群却不如 $n-C_vH$ 的关系好。对此, 虽然可通过变化粗、细颗粒粒级和含量比之加以改善, 但它也说明可能还有其他因素的影响。这是需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] 祁龙. 泥石流的阻力分析[J]. 水土保持通报, 1989, 9(6): 21~26.
- [2] 吴积善, 康志成. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 118~127.
- [3] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982. 33~44.
- [4] 吴积善. 泥石流流态及流速计算[A]. 见: 泥石流论文集[1][C]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981. 79~86.
- [5] 刘江, 程尊兰. 云南盈江浑水沟泥石流流速计算[A]. 见: 泥石流论文集(1)[C]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981. 87~89.
- [6] 杨针娘. 暴雨粘性泥石流流速公式的初步探讨[A]. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第4号)[C]. 北京: 科学技术出版社, 1985. 199~206.
- [7] 高守义, 祁龙. 甘肃省武都县马槽沟泥石流特征[J]. 山地研究(现《山地学报》), 1997, 15(4): 300~304.
- [8] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1983. 435~447.
- [9] 杜榕桓, 康志成. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 151~152, 105, 144~145.
- [10] 康志成, 章书成. 泥石流流体特征的初步分析[A]. 见: 河流泥沙国际学术讨论会论文集(第1卷)[C]. 北京: 光华出版社, 1980. 121~225.
- [11] 甘肃省交通科学研究所, 等. 泥石流地区公路工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981. 51.
- [12] 王光谦. 稳定粘性泥石流机理的研究[A]. 见: 泥石流与洪水灾害防御国际学术讨论会论文集(A卷)[C]. 1991. 104~109.
- [13] 费祥俊. 细颗粒浆体、泥石流浆体对泥石流运动的作用[J]. 山地研究(现《山地学报》), 1991, 9(3): 143~151.

A COMPARISON AND ANALYSIS OF RESISTANCE LAW OF VISCOUS DEBRIS FLOW

QI Long

(Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000 PRC)

Abstract: Resistance of debris flow (n) calculated from Manning formula has a property that n value increases with the depth of debris flow adding. The phenomena can be reasonable explained by

the total weight of unit width soil particles increasing why the depth of debris flow adding.

The resistance (n value) varies in different watersheds, and some difference values even reach up to four times. The result can not well explained by the difference of the riverbed roughness in the different watershed, because the viscous debris flow have a pavement on the bed and result in the difference of the bed not great in different watershed. Under the inspiring of only “bottom mud layer” and “inverse grading” existing in depositional profile of debris flow, the author thinks that the coarser particles will move upward the top layer by the acting of shear-colliding force in the motion of the debris flow, and result in more fine materials remained on the bottom bed, and the force decrease as the depth of debris flow adding. According to the above results, we assume a vertical distribution function of coarse and fine particle ratio, and the resistance lawd of the viscous debris flow between Jiangjia Gully and Wudu county which n values differ two times are integrated to the function.

Key words: viscous debris flow ; resistance; roughness