

# 粘性泥石流运动流速与流量计算

舒安平<sup>1</sup>, 费祥俊<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 清华大学, 北京 100084)

**摘要:**粘性泥石流作为最常见的一种泥石流, 普遍存在于固体物质组成松散、降雨持续集中的陡峻山区。作者首先对现有的粘性泥石流运动速度的有关成果进行扼要评述。根据曼宁公式的结构形式, 通过对大量泥石流沟的实测资料进行统计分析, 得出涉及参数较为全面、具有一定普遍意义的粘性泥石流运动速度公式, 经验表明该公式的可靠度令人满意, 据此提出粘性泥石流的流量公式及其计算方法, 从而为泥石流灾害治理工程规划设计提供了科学依据。

**关键词:**粘性泥石流; 曼宁公式; 阻力参数; 流速; 流量

**中图分类号:** P642.23    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0468-155X(2003)03-0007-05

## 1 引言

我国是一个泥石流频发的国家, 特别是在西南和西北山区, 每年雨季由于滑坡泥石流等山地灾害造成的人员伤害及经济损失均十分严重。就在2002年5月至8月中旬不足4个月的时间里, 仅仅云南省14个地市州因连降暴雨, 引发受灾超过2 000万人、死亡230多人、经济损失高达36亿元的重大洪水泥石流灾害即为一个典型的例证。可见, 泥石流作为一种破坏性自然灾害, 由于来势迅猛、影响深远, 一旦成灾, 其后果相当严重, 因此对泥石流运动流速与流量进行分析研究, 不仅为工程规划设计所急需, 而且也是工程界和学术界普遍关注的重点课题。

根据固体物质颗粒组成, 泥石流一般可分为泥流、粘性泥石流和水石流三种类型, 其中粘性泥石流由于其固体颗粒组成范围广, 并具有粗颗粒多、细颗粒含量大、颗粒分布呈“双峰”形态的特点, 是自然界中最为常见的一种泥石流, 一直是许多专家学者研究的重点课题。目前盛行的粘性泥石流运动理论模型, 主要基于两相流体内部阻力特点来求解泥石流运动流速。尽管这种方法理论性较强, 但由于各种模型应用时存在着一定的局限与不足, 特别是由于粘性泥流体内部阻力的复杂性而不得不假定固体颗粒呈均匀分布, 加之模型中存在着一些难以确定的参数等问题, 使得目前人们提出的一些泥石流运动速度模型及流量计算方法尚难达到实用水平<sup>[1]</sup>。在这种情况下, 只能借助经验方法建立适合某种特定条件下的泥石流运动流速公式, 进而求解流量, 显然这些公式带有很强的经验性, 其适用范围有限而难以推广应用。

有鉴于此, 作者试图基于曼宁公式的结构形式, 通过对我国西部大量泥石流沟的实测资料进行统计分析, 提出涉及参数较为全面、具有一定普遍意义的粘性泥石流运动速度公式及流量的计算方法。本项研究成果不仅有利于丰富河流动力学学科内容, 而且具有重要的实用价值。

收稿日期: 2003-01-23

作者简介: 舒安平(1965—), 男, 湖北鄂州人, 中国水科院高工、博士。

基金项目: 国家自然科学基金项目(49831010)。

## 2 现有成果的概述

目前,有关粘性泥石流运动速度的研究成果较多,这里受篇幅限制,只将具有代表性的成果进行分析。

云南省东川蒋家沟是一个典型的泥石流沟,每年洪水季节粘性泥石流频发,素有天然泥石流博物馆之称,闻名于世。康志成等<sup>[2]</sup>根据60年代以来收集有关蒋家沟泥石流实测资料,通过分析泥石流内部与外部阻力变化规律,建立阻力综合参数 $1/n_c$ 与泥深 $h$ 之间的关系,获得了具有典型代表意义的粘性泥石流流速公式,即

$$n_c = 0.035h^{0.34} \quad (1)$$

或

$$U_c = 28.5h^{-0.34} \left( h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \right) = 28.5h^{0.327} J^{0.5} \quad (2)$$

我们根据云南大盈江浑水沟泥石流的观测资料<sup>[3]</sup>,通过分析拟合也得到类似于式(1)的阻力关系式

$$n_c = 0.051h^{0.25} \quad (3)$$

此外,基于河流水力学流速公式而得到的粘性泥石流流速经验公式也不少,但与以上公式相比均有异曲同工之处,在此不再一一赘述。

式(1)和式(3)均表明,泥石流阻力因子 $n_c$ 值随着泥深的增加而增大。一方面可理解为,泥深的增加使得挟带的固体含量也越多,因而阻力也越大。但从另一角度来看,一定坡降下泥深越大,反映泥石流的流量也大,而流量增加为什么会综合阻力因子 $n_c$ 也增加,令人难以理解。而且进一步比较式(1)与(3)还可发现,在相同泥深 $h$ 下,浑水沟 $n_c$ 值比蒋家沟要大,因为同为粘性泥石流,蒋家沟的细颗粒含量比浑水沟大,而上述经验式的系数又不能正确反映颗粒组成及比降对 $n_c$ 值的影响,表明经验关系式所反映的因子并不全面。

此外,通过分析甘肃省武都地区柳湾沟、火烧沟及泥湾沟的大量粘性泥石流实测资料<sup>[4]</sup>进一步发现, $1/n_c$ 与 $h$ 之间不仅并不存在简单的相关关系,而且按式(2)计算的泥石流流速普遍高出实测值约一倍左右<sup>[1]</sup>,充分表明具有式(1)或式(2)结构形式的粘性泥石流流速公式存在着结构形式简单、包涵因子不全等弊端,而且经验性很强,因此有必要进一步深入分析研究。

## 3 粘性泥石流的流速

### 3.1 流速公式的建立

一般来说,应用曼宁公式来表达泥石流流速,其中的阻力因子 $n_c$ 实际上是包含泥石流内部及外部的阻力综合因子。泥石流内部阻力由颗粒间相互作用及液体粘性引起,与由边壁糙度引起的外部阻力完全不同。对于粘性泥石流的外部糙度,据我国泥石流界估算结果,其平均值 $1/n \approx 30$ ,即曼宁糙率 $n = 0.033$ 左右。对于泥石流内部阻力综合参数,可以通过引入修正系数 $a$ 对曼宁公式进行修正,于是得到泥石流流速公式

$$U_c = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{a} \cdot h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{n_c} \cdot h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

根据对大量的实测资料分析结果,泥石流内部阻力综合参数 $1/n_c$ 与泥石流固体浓度、颗粒组成以及泥深与坡降等因素有关。通过分析包含蒋家沟在内的几条粘性泥石流沟的实测资料,首先发现浓度对 $n_c$ 的影响是复杂的,一方面粘性泥石流浓度 $S_0$ 的增加使得内部阻力提高;另一方面当 $S_0$ 很高时,由于颗粒沉速与内部阻力因浓度提高迅速减少,因而浓度对泥石流内部阻力有着双重作用,宜用 $S_0(1-S_0)$ 作为影响因子。其次,对于粘性泥石流流速,如采用修正的曼宁公式来表达,则式(4)中水深 $h$ 及坡降 $J$ 的方次明显偏高,这说明采用 $a$ 对曼宁公式进行修正,应使 $h$ 及 $J$ 的方次下降。尽管如此,但不同泥石流沟的阻力关系还是无法统一在一起,进一步对比分析蒋家沟及浑水沟的实测资料,发现蒋家沟粘性泥石流的细颗粒含量要比浑水沟多,而在相同条件下 $1/n_c$ 值要大,表明 $1/n_c$ 与细颗粒含量呈反变关

系,可选择反映颗粒级配特征的下限粒径  $d_{10}$  作为细颗粒含量的指标。由于各组次泥石流的  $d_{10}$  值不完全相同,这里只好取各组次的平均值,蒋家沟粘性泥石流平均  $d_{10}=0.011\text{mm}$ ,浑水沟粘性泥石流平均  $d_{10}=0.032\text{mm}$ 。

综上分析,泥石流内部阻力  $1/n_c$  与水力泥沙综合因子  $\Theta = \frac{S_v(1-S_v)}{\sqrt{hJd_{10}}}$  关系密切。应用蒋家沟及浑水沟的实测资料,在对数坐标上点绘  $1/n_c$  与  $\Theta$  的关系图,发现两沟的点据能够很好地集中在一条直线的两侧,其线性关系令人满意,如图 1 所示。

对图 1 的关系进一步拟合分析,得到如下综合阻力参数公式

$$\frac{1}{n_c} = 1.62\Theta^{\frac{2}{3}} = 1.62\left[\frac{S_v(1-S_v)}{\sqrt{hJd_{10}}}\right]^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

式中  $d_{10}$  单位为  $\text{mm}$ 。将式(5)关系代入式(4),得到粘性泥石流流速公式

$$U_c = \frac{1}{n_c} \cdot h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} = 1.62\left[\frac{S_v(1-S_v)}{d_{10}}\right]^{\frac{2}{3}} h^{\frac{1}{3}} J^{\frac{1}{6}} \quad (6)$$

式(6)作为粘性泥石流流速公式,其形式并不复杂,而且式中所包涵的影响参数比较全面,与同类公式相比具有更加普遍意义和实用价值。

### 3.2 流速公式的验证

应用甘肃武都地区三条粘性泥石流沟的资料对式(6)进行检验,结果表明按式(6)计算的泥石流流速与实测值相吻合的程度令人满意,如图 2 所示。

此外,图 2 同时还点绘有别于前文建立式(6)时的 1966 年蒋家沟实测资料,我们发现蒋家沟点群也均集中在  $45^\circ$  线的两侧,基本说明式(6)可以用于不同地区的泥石流流速计算。鉴于目前所收集到的实测资料十分有限,以上的验证只是初步的,今后有待于进一步丰富完善。

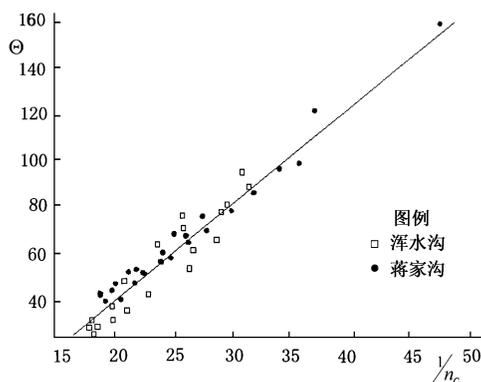


图 1  $\Theta \sim 1/n_c$  关系

Fig.1 Relationship between  $\Theta$  and  $1/n_c$

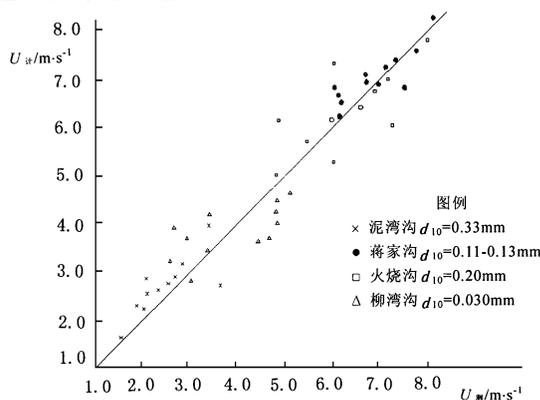


图 2 粘性泥石流流速公式的验证结果

Fig.2 Verification of velocity of viscous debris flow

## 4 粘性泥石流的流量

泥石流流量作为泥石流治理工程规划设计的重要参数,可以基于式(6)所示的泥石流流速公式进行计算。

根据泥石流流量连续律,可得粘性泥石流沟单宽流量计算公式

$$q_c = h \cdot U_c = \frac{1}{n_c} \cdot h^{\frac{5}{3}} J^{\frac{1}{2}} = 1.62\left[\frac{S_v(1-S_v)}{d_{10}}\right]^{\frac{2}{3}} h^{\frac{4}{3}} J^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

对于一般泥石流沟,泥石流流量不仅取决于流速的大小,而且还与沟道断面形态密切相关。

如定义泥石流沟断面形态参数或称沟相关系数  $M$  为断面湿周  $P$  与水力半径  $R$  之比,即

$$M = \frac{P}{R} = \frac{A}{R^2} \quad (8)$$

根据流量连续方程,可得泥石流流量为

$$Q = A \cdot U_c = MR^2 \cdot U_c$$

或

$$\frac{Q}{M} = R^2 \cdot U_c \quad (9)$$

## 5 应用计算

### 5.1 流速与流量计算

为便于应用,现列举体积浓度  $S_v=0.36$ 、下限粒径  $d_{10}=0.032\text{mm}$  的粘性泥石流沟进行计算说明。作为一种简化处理,假定具有宽浅特征的泥石流沟床宽度  $B=20\text{m}$  和纵坡  $J=0.06$  保持不变,则将式(6)中的泥深  $h$  可以近似用水力半径  $R$  代替来计算泥石流流速  $U_c$ 。

首先将泥深取值为  $h=0.5、1.0、1.5、2.0\text{m}$ ,依次列表计算  $R、M、U_c$  及  $R^2 U_c (=Q/M)$ ,然后绘制出  $R \sim U_c$  及  $R \sim Q$  关系线,分别如表1和图3所示。因此,只要已知该泥石流沟的流量  $Q$ 、流速  $U_c$  及水力半径  $R$  中的任意一个参数,即可利用图3所示的关系线求得其他两个变量。例如,  $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ ,由图3查得泥石流沟的水力半径  $R=1.13\text{m}$ ,再由  $R \sim U_c$  关系求得流速  $U_c=3.94\text{m/s}$ ;如此类推,可求得  $Q=50\text{m}^3/\text{s}$  时水力半径  $R=0.69\text{m}$ ,流速  $U_c=3.30\text{m/s}$ ,这表明,在相同浓度和纵坡的前提下,尽管泥石流流量变幅很大,但由于断面水力半径的调整,造成泥石流的运动流速变幅却比较小。

表1 粘性泥石流的流速与流量计算结果( $S_v=0.36, d_{10}=0.032\text{mm}$ )

Table 1 The calculated results for velocity and discharge of viscous debris flow

$h/\text{m}$	0.5	1.0	1.5	2.0	备注
$R=Bh/(B+2h)$	0.48	0.91	1.30	1.67	
$M=Bh/R^2$	44.10	24.20	17.63	14.40	
$U_c/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.95	3.66	4.13	4.48	式(6)
$Q/M$	0.67	3.03	7.03	12.45	式(9)
$Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	29.51	73.22	123.88	179.24	

### 5.2 流速计算方法的改进

我们仍以蒋家沟泥石流为例进行计算分析,提出对粘性泥石流流速公式(6)进一步完善的方法。通过分析更多的蒋家沟实测资料,结果发现当泥石流容重减小时,颗粒组成相应变化,用固定的  $d_{10}$  平均值,作为细颗粒泥沙特征粒径计算流速结果误差有所加大。因此建议当  $\gamma_m \geq 2.12$  时,仍采用  $d_{10}=0.011\text{mm}$ ,当  $\gamma_m < 2.12$  时,经资料分析  $d_{10}$  有所增加,建议采用如下关系

$$d_{10} = 0.165 \cdot \gamma_m^{-3.60} \quad (10)$$

按上式取  $d_{10}$  值,我们又用蒋家沟较早时期的观测资料对式(6)进行校核计算,验算结果表明,计算泥石流流速的平均误差为  $\pm 5.82\%$ ,其中误差在  $10\%$  以内的比例达到  $80\%$  以上,表明修正后的流速公式计算结果令人满意。值得说明的是,式(10)只适用于蒋家沟泥石流流速计算,对于其他泥石流沟尚需具体问题具体分析。

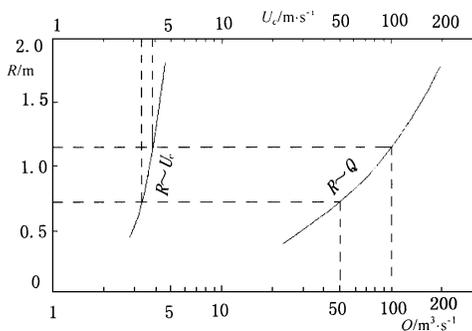


图3  $R \sim U_c$  及  $R \sim Q$  关系线

Fig. 3 Relationship between  $R \sim U_c$  and  $R \sim Q$

## 6 结语

(1)根据修正的曼宁公式,通过分析大量的实测资料,提出粘性泥石流综合阻力参数公式(5)及流速公式(6),而且流速公式(6)具有考虑影响因子全面、结构形式不复杂、使用方便等特点,经检验表明该流速公式可靠度令人满意,可用于粘性泥石流运动流速计算。

(2)基于流速计算公式(6),提出泥石流沟流量的计算方法,即流量公式(9)。

(3)通过算例,分析泥石流沟水力半径、流速和流量三者的关系,由此提出流速与流量计算应用方法及流速计算的改进方法,本项研究成果对泥石流治理工程规划设计提供了可靠的依据。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 费祥俊,舒安平.泥石流运动机理与灾害防治[M].清华大学出版社,2003年.
- [ 2 ] 杜榕桓,康志成,等.云南小江流域泥石流观测与防治规划研究[M].科学技术文献出版社重庆分社,1987.145—150.
- [ 3 ] 张信宝,刘江.云南大盈江流域泥石流[M].成都地图出版社,1989年.第99页.
- [ 4 ] 中国科学院兰州冰川冻土研究所,甘肃省交通科学研究所.甘肃泥石流[M].人民交通出版社,1982年.第37页.

## Calculation for Velocity and Discharge of the Viscous Debris Flow

SHU An-ping<sup>1</sup>, FEI Xiang-jun<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044;

2. Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** Viscous debris flow usually occurs in the mantainuous area with steep slope and in the case of heavy rain-falls. After a brief review to the existing results, a new velocity fomula with entiral factors and commonly practical meanings has been derived on the basis of the structural formation of Manning velocity fomula, and its coefficients were established by large numbers of field data. Then, the velocity calculated by the fomula is verified by many measured data including Jiangjia Ditch etc, and the discharge for viscous debris flow can be calculated by cross-section phase method. The presented results may be applied to planning and design of harnessing projects of debris flow.

**Key words:** viscous debris flow; Manning fomula; resistance factor; velocity; discharge