

## 粘性泥石流流速计算方法

朱兴华<sup>1 2 3</sup>, 崔鹏<sup>1 3</sup>, 唐金波<sup>1 3</sup>, 邹强<sup>1 2 3</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 泥石流流速是泥石流动力学分析中最为重要的参数, 以曼宁公式为原型的泥石流流速计算公式正被广泛的用于泥石流动力学分析及工程防治设计。然而由于曼宁公式中, 对糙率系数的选取带有很强的主观因素, 从而导致曼宁公式的泥石流流速计算值与实际相差甚远。本文首先较为全面地分析了影响曼宁糙率系数的6方面因素, 并将这6方面的因素归结为外部沟道边界条件和粘性泥石流流体内部特征两大方面; 然后基于上述分析分别构建了关于泥石流外部糙率和内部糙率的具有明确物理意义的无量纲综合影响因子, 从而提出了粘性泥石流综合糙率系数的数学表达式; 接着以东川泥石流观测站的21组观测数据对待定参数进行了率定, 从而提出了粘性泥石流综合糙率系数的计算表达式, 并将公式计算结果与实测数据进行了比较, 结果令人满意; 最后以综合糙率系数表达式完善了粘性泥石流流速计算公式。

关键词: 粘性泥石流; 糙率系数; 流速; 东川泥石流观测站

中图分类号: TV143.4

文献标识码: A

文章编号: 0468-155X(2013)03-0059-06

## 1 引言

泥石流流速是泥石流动力学分析中最重要的参数之一, 也是泥石流工程防治设计中必须考虑的参数。泥石流流速可分为泥石流的平均流速、表面流速、内部流速和龙头速度等<sup>[1]</sup>。但由于泥石流流态复杂多变, 横向和纵向流速分布不均匀。因此, 目前在实际泥石流流速观测、测试和计算时, 泥石流流速往往采用断面的平均流速来表示。

目前确定泥石流断面平均流速的计算方法, 经验或半经验的计算公式不下数十种。例如云南东川蒋家沟粘性泥石流估算公式<sup>[2]</sup>, 云南东川大白泥沟和蒋家沟粘性泥石流经验公式<sup>[3]</sup>, 西藏波密古乡沟粘性估算公式<sup>[4]</sup>等等, 但所有这些公式皆以水力学中的曼宁公式(式(1))为原型

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

式中  $U$  为泥石流断面平均流速;  $R$  为泥石流过流断面水力半径;  $I$  为泥流水力坡降,  $n$  为曼宁糙率系数。各家经验公式利用不同的观测资料进行统计回归分析, 调整公式中  $R$  及  $I$  的指数, 并调整曼宁糙率系数, 从而拟合出适合该观测区域的泥石流流速计算公式, 但这些公式往往有地域局限性。

另外, 在以往对泥石流流速计算中,  $n$  值的选取往往带有很大的为主观性, 而  $n$  值选取的是否合理对计算结果的准确性影响颇大, 是泥石流流速计算公式的关键。因此, 研究首先详尽地分析了泥石流曼宁糙率系数6方面的影响因素, 并根据这些因素构建出泥石流曼宁糙率系数的无量纲计算表达式, 接着选取了中国科学院东川泥石流观测站的观测数据拟合出合理的综合曼宁糙率系数的计算方法, 从而完善了计算泥石流流速的曼宁公式。

收稿日期: 2011-10-13

基金项目: 中科院重点部署项目(KZZD-EW-05-01); 国家科技支撑计划(2012BAC06B02)

作者简介: 朱兴华(1984-)男, 湖北宜昌人, 博士研究生, 研究方向为泥石流输沙及山区河流演化。E-mail: zhuxinghua09@163.com

通讯作者: 崔鹏。E-mail: pengcui@imde.ac.cn

## 2 粘性泥石流糙率系数的涵义及影响因子

### 2.1 泥石流糙率系数的涵义

天然河道的糙率是衡量河床及边壁形状不规则及粗糙程度对水流阻力影响的一个综合性系数<sup>[5]</sup>, 它表征均匀流条件下阻力平方区内水流周界粗糙程度对水流的阻力作用和影响。然而, 粘性泥石流流体性质与水流相差甚远, 因此粘性泥石流的曼宁糙率系数应该是一个必须充分反映出包括过流断面周界的形态、粗糙程度、水力条件及泥石流流体内部能量耗散在内的综合流速系数。

国内外部分专家学者们认识到了准确选取泥石流曼宁糙率系数的重要意义, 并通过修正泥石流曼宁糙率系数修正断面平均流速计算公式。目前这部分的研究成果主要体现为两大类: 一类是以钱宁等<sup>[6]</sup>为代表提出的查表法(如表 1 所示), 主要用于实测资料短缺的泥石流沟道。可根据具体的泥石流沟道特征, 快速地确定泥石流曼宁糙率系数, 但这种方法缺乏理论依据, 且对整条沟道用统一的曼宁系数来表征, 显得不太合理。

表 1 泥石流糙率系数的确定  
Table 1 Roughness coefficients of debris flows

泥石流类型	河槽特点	比降	不同水深 (m) 下的 $n$ 值			
			0.5	1.0	2.0	4.0
稀性泥石流	河槽窄而陡, 多跌坎与卡口, 堵塞严重, 河床由直径 0.5 ~ 2m 的巨石组成。	0.15 ~ 0.22	0.20	0.25	0.33	0.50
	河槽多弯道和跌坎, 河床由粒径 0.3 ~ 0.5m 的漂石组成。	0.08 ~ 0.15	0.10	0.125	0.167	0.25
	河槽宽平顺直, 河槽由小于 0.3m 的碎石和沙砾组成。	0.02 ~ 0.08	0.058	0.071	0.10	0.125
粘性泥石流	河槽陡窄弯曲, 河床由巨石沙砾组成, 多形成巨石堵塞及跌坎。	0.12 ~ 0.16	0.056	0.067	0.083	0.10
	河槽较为顺直, 河床由漂石及沙砾组成。	0.08 ~ 0.12	0.036	0.042	0.05	0.06
	河槽宽平顺直, 河床由一般小于 0.3m 的碎石沙砾组成。	0.04 ~ 0.08	0.029	0.036	0.042	0.05

另一类是以杜榕桓等<sup>[7]</sup>和费祥俊<sup>[8]</sup>等为代表的公式算法, 主要通过分析资料相对丰富的沟道实测数据, 从而提出经验性或半经验性的曼宁糙率系数的计算方法:

杜榕桓等<sup>[7]</sup>收集并分析东川蒋家沟泥石流实测资料, 发现综合曼宁糙率系数与泥石流泥深有较好的相关性, 并拟合了曼宁糙率系数  $n$  与泥深  $h$  之间的关系表达式, 即

$$n = 0.035h^{0.34} \quad (2)$$

舒安平等<sup>[9]</sup>根据云南大盈江浑水沟的泥石流观测资料, 通过拟合也得到了类似公式(2)的表达式, 并指出只考虑泥深不全面。进一步考虑泥石流固体浓度、颗粒组成及坡降, 提出了综合糙率系数的计算方法

$$\frac{1}{n} = 1.62 \left[ \frac{S(1-S)}{\sqrt{hI}d_{10}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

式中  $S$  为体积比含沙量;  $I$  为泥石流水力坡降;  $d_{10}$  为泥石流固体物质级配曲线中小于该粒径含量占总试样质量 10% 的粒径。但公式(3)没有体现泥石流沟道边界条件对曼宁糙率系数的影响, 且  $S(1-S)$  项并没准确地反映泥石流含沙量与曼宁糙率系数之间的关系。

### 2.2 糙率系数的影响因子分析

准确而全面地分析曼宁糙率系数的影响因素及它们与糙率系数的变化关系是准确修正泥石流综合曼宁糙率系数的基础。总结泥石流曼宁糙率系数的影响因素, 主要包括以下 6 个方面:

(1) 泥石流沟道的粗糙程度。沟道的粗糙程度由床沙粒径组成来反映。国内外若干学者<sup>[10]</sup>试图通过建立糙率系数与床沙代表粒径之间的关系, 从而通过床沙代表粒径推算河床的糙率系数, 这从某种层面上说明床沙粒径组成对糙率系数的影响是必然的。然而, 邓安军等<sup>[11]</sup>点绘了黄河干支流的一些实测资料的糙率系数与床沙中值粒径的关系, 并未发现两者具有较好的相关性, 这又说明了对于高含沙水流甚至泥石流, 床沙粒径组成已不是糙率系数的主要影响因素。

(2) 过流断面形态。湿周的大小显然对糙率系数有影响。相同的过流断面面积, 不同的断面形态

具有不同的湿周,因此断面形态对糙率系数有影响,通常采用水力半径来反映断面的形态特征。

(3) 不规则断面。沟道断面局部发生变化时,会产生局部水头损失,从而反映出糙率的增加。由于不规则断面出现的随机性,使得泥石流经过不规则断面所产生的局部水头损失情况更加复杂。

(4) 泥石流的泥深及流量。杜榕桓等<sup>[7]</sup>分析了断面平均泥深对糙率 $n$ 值的影响,费祥俊<sup>[8]</sup>指出断面泥深是影响泥石流糙率计算的主要因素之一。程进豪等<sup>[12]</sup>点绘黄河下游山东段各断面的糙率 $n$ 值与高含沙水流水深的关系,发现当断面平均水深 $h$ 值较小时,糙率 $n$ 值变幅较大且随着 $h$ 的减小而逐渐增大,这主要是床面形态阻力较大且不稳定所致;在 $h$ 增大到一定值时, $n$ 值最小;当 $h$ 超过一定值时, $n$ 值略有增大,变幅减小,河床阻力趋于稳定。

(5) 泥石流流体中的含沙量。含沙量对糙率的影响,目前各家观点不一。程进豪等<sup>[12]</sup>点绘了黄河下游同流量级情况下糙率与含沙量的关系图,并指出含沙量对糙率无影响。惠遇甲等<sup>[13]</sup>认为糙率系数随着含沙量的增大而减小。邓安军等<sup>[11]</sup>分析了大量黄河干支流的实测资料后指出,在含沙量较小时,由于泥沙的制紊作用,含沙量增加使得水流垂线流速分布更加均匀,即出现减阻的现象,但随着含沙量的增加,颗粒间相互碰撞的机会也逐渐增多;在含沙量较大( $10 \sim 100\text{kg}/\text{m}^3$ )时,两方面影响相互抵消,糙率系数随含沙量变化不大,糙率系数出现最小值;在含沙量( $>100\text{kg}/\text{m}^3$ )较高时,含沙量的存在增加碰撞和摩擦的机会,糙率系数随着含沙量的增加而增大。粘性泥石流的含沙量远大于 $100\text{kg}/\text{m}^3$ ,因此糙率系数 $n$ 随着泥石流流体中总含沙量的增加,是逐渐增大的。

(6) 泥石流固体物质的颗粒组成。泥石流中固体颗粒组成复杂,其中较细颗粒以悬移质形式运动,而较大颗粒则以推移形式运动,各自的能耗及阻力规律不同,如果不加区分就难以求得泥石流运动的总阻力<sup>[14]</sup>。因此分析粘性泥石流的阻力系数必须综合考虑选取粗细颗粒的代表粒径及含量。

### 3 粘性泥石流流速计算式的修正

#### 3.1 糙率系数综合影响因子的构建

以上分析了6方面的因素对综合曼宁糙率系数的影响。概括起来,主要包括泥石流运动过程中沟道边界的摩阻损失及泥石流流体内部的能量耗散两个方面<sup>[9,15]</sup>。进一步分析这些因素对曼宁糙率系数的影响,提出具有明确物理意义的无量纲参数,从而提出计算综合曼宁糙率的表达式。

沟道边界对糙率系数的影响:粘性泥石流流经沟道时会经过铺床过程形成残留层<sup>[16]</sup>,从而使后来的泥石流以很高的流速流通,因此本文拟采用泥石流固体物质组成中粗颗粒的代表粒径 $d_{84}$ 来反应沟床的粗糙程度, $d_{84}$ 越大,床面越粗糙,糙率系数也越大;以湿周 $\chi$ 表示泥石流过流断面特征对糙率系数的影响,湿周 $\chi$ 越大,糙率系数越大。

泥石流流体对糙率系数的影响:糙率系数随着泥石流流体中固体物质含量 $S$ 的增大而增大。泥石流的流速与流体运动过程中的水头损失关系密切,在过流断面边界条件一定的情况下,沟床比降 $J$ 与流速的关系十分密切,在此引入沟床比降 $J$ 为影响因子,流速随着 $J$ 的增大而增大,其内部的流速梯度也越大,粘滞阻力损失也就越大。另外,细颗粒的含量对泥石流的运动以及运动过程中的能量耗散的影响也较大,细颗粒含量越多,细颗粒与水充分混合之后形成的液相粘滞系数就越大,其“制紊”效果越明显,泥石流运动就越接近层流。费祥俊等<sup>[17]</sup>通过大量的数据分析,指出粘性泥石流颗粒组成是典型的“双峰型”分布,即泥石流的级配构成中细颗粒和粗颗粒所占的比重较多,而中等粒径颗粒反而较少。因此,以 $d_{16}$ 为细颗粒的代表粒径, $d_{16}$ 的值越小意味着颗粒组成中细颗粒的含量越多。

综合上述分析,粘性泥石流综合糙率系数 $n$ 由外部边界条件引起的糙率 $n_1$ 和流体内部特征引起的糙率 $n_2$ 两部分构成,可表达如下

$$n = n_1 + n_2 = f(\chi, d_{84}) + g(h, S, d_{16}, J) \quad (4)$$

下面分别构建出 $n_1$ 和 $n_2$ 的无量纲影响因子。 $n_1$ 随着湿周 $\chi$ 以及床沙粒径 $d_{84}$ 的增大而增大,且在过流断面的湿周 $\chi$ 及床沙粒径 $d_{84}$ 一定的情况下,过流断面面积越大,该断面的过流能力越强,也即泥石流的摩阻损失相对越小。根据上述分析,式(4)中的 $n_1$ 可以写成是一个关于无量纲参数 $d_{84}/R$ 的函数

$$n_1 = f\left(\frac{\chi d_{84}}{A}\right) = f\left(\frac{d_{84}}{R}\right) \quad (5)$$

式中  $A$  为过流断面的面积;  $R$  为过流断面的水力半径;  $d_{84}/R$  是一个表征床面相对粗糙的无量纲参数,其倒数正是 Bathurst<sup>[18,19]</sup> 所提出的山区河流流态特征参数,即“相对淹没系数”;另外 Limerinos<sup>[20]</sup>, Hey<sup>[21]</sup> 等均以无量纲因子 ( $R/d_{84}$ ) 为关键参数,提出了山区河流的糙率系数的计算方法,由此可见,泥石流外部糙率系数即  $n_1$  应该是一个与无量纲参数  $d_{84}/R$  密切相关的函数关系式。

前面已经分析了粘性泥石流的糙率系数随着含沙量  $S$  及沟床比降  $J$  的增大而增大。泥石流固体物质组成对流体内部的能量损失影响很大,在含沙量一定的情况下,细颗粒含量越多,将使得一部分粗颗粒从层移或推移转为悬移运动,使得流体内部紊动减少,从而使得内部能量耗散减小。 $d_{16}$  值越小,则泥石流细颗粒相对越多,而粘性泥石流中值粒径  $d_{50}$  的变化相对不大,因此以无量纲参数  $d_{16}/d_{50}$  可以表示细颗粒所占的比重,  $n$  随着  $d_{16}/d_{50}$  的增大而增大。另外以  $h/d_{50}$  表示泥石流流体中颗粒的线性浓度,线性浓度越大则颗粒之间发生碰撞的概率越高,流体内部的能量耗散也越大。综上所述,  $n_2$  的可用下式表示

$$n_2 = g\left(\frac{h}{d_{50}} \cdot \frac{d_{16}}{d_{50}} \cdot S \cdot J\right) \quad (6)$$

将上述式(5)和式(6)代入式(4)可得综合曼宁糙率系数表达式,由于  $n_2$  与四个无量纲因子有关,这增加了分别确定各因子与  $n_2$  的相关关系的难度。因此,本项研究中,以四个无量纲因子为整体进行简化处理。综合糙率系数的表达式为

$$n = n_1 + n_2 = k_1 \left(\frac{d_{84}}{h}\right)^\alpha + k_2 \left(\frac{h}{d_{50}} \cdot \frac{d_{16}}{d_{50}} \cdot S \cdot J\right)^\beta \quad (7)$$

式中  $k, \alpha, \beta$  均为待定系数。

### 3.2 待定系数的率定

由于公式(7)中包含有  $k_1, k_2, \alpha, \beta$  这样四个待定系数,下面选用中国科学院东川泥石流观测站的观测资料<sup>[22]</sup> 对其进行率定。本文选取了1974年6月29日、7月16日及1982年7月8日共21组完整的观测数据。

舒安平等<sup>[9]</sup> 等指出粘性泥石流的外部糙度,根据我国泥石流界估算结果,其平均值  $1/n \approx 30$ ,即曼宁糙率  $n \approx 0.033$ ; Bathurst<sup>[19]</sup> 通过分析了大量的欧美山区河流观测数据以及前人的水槽实验数据,提出了适用于清水河流的达西-维斯巴赫糙率系数的精准表达式,改写成曼宁糙率系数表达式

$$n_1 = 0.103 \left(\frac{d_{84}}{R}\right)^{0.93} \cdot R^{\frac{1}{6}} \quad (8)$$

笔者认为山区河流的糙率系数计算方法可以为泥石流外部糙率的计算所借鉴,并结合东川蒋家沟观测资料,运用式(8)计算,发现蒋家沟的外部糙率取值范围大致在0.016~0.021之间;然而,结合蒋家沟的21组观测数据对公式(7)进行拟合,发现第一项也即  $n_1$  并未表现出收敛,而是围绕某一定值上下波动,该拟合值约为0.023。仔细的分析这21组观测数据,其各项观测值(包括泥位深度,沟床比降等)的变化并不显著,外部糙率值也应近似为一定值。

第二部分  $n_2$  与  $h/d_{50}, d_{16}/d_{50}, S, J$  表现出较好的收敛性。进一步拟合可得公式(7)的具体表达式

$$n = n_1 + n_2 = 0.023 + 0.0442 \left(\frac{h}{d_{50}} \cdot \frac{d_{16}}{d_{50}} \cdot S \cdot J\right)^{0.3} \quad (9)$$

图1给出了蒋家沟粘性泥石流糙率计算值与实测值之间的比较图,由图1可见按照公式(9)计算的糙率值与实测数据的吻合程度令人满意。

鉴于目前所收集到的实测资料有限且仅限于蒋家沟,以上的验证只是初步的。对于一般的粘性泥石流沟道,引入式(8),从而得到普适性的糙率系数计算公式

$$n = n_1 + n_2 = 0.103 \left(\frac{d_{84}}{R}\right)^{0.93} \cdot R^{\frac{1}{6}} + 0.0442 \left(\frac{h}{d_{50}} \cdot \frac{d_{16}}{d_{50}} \cdot S \cdot J\right)^{0.3} \quad (10)$$

今后有待于运用更多不同区域的,丰富,精确而系统的观测资料对公式(10)进行进一步的校正和完善,从而使其更具普适性。

### 3.3 粘性泥石流流速公式的修正

在野外考察及观测过程中,应尽可能的选取较为顺直的沟段,这样做有两方面的考虑:一方面泥石流水力坡降  $I$  很难实测,但顺直段的水力坡降  $I$  可近似等于泥石流沟床比降  $J$ ; 另一方面,顺直沟段无需考虑沟道不规则断面变化所引起的局部水头损失,并可近似以泥深  $h$  代替水力半径  $R$ 。将公式(10)代入公式(1)便可得粘性泥石流的流速计算公式

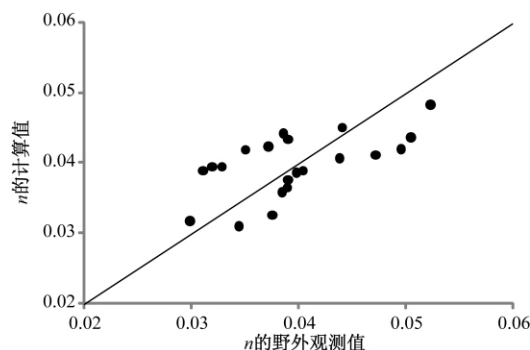


图1 粘性泥石流糙率计算值与实测值比较

Fig.1 Comparison of calculated and measured values of roughness coefficient of viscous debris flow

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} = \frac{1}{0.103 \left(\frac{d_{84}}{R}\right)^{0.93} R^{1/6} + 0.0442 \left(\frac{h}{d_{50}} \cdot \frac{d_{16}}{d_{50}} \cdot S \cdot J\right)^{0.3} h^{2/3} J^{1/2}} \quad (11)$$

对泥石流沟道进行野外考察时,该公式适用于“泥痕法”计算各断面的粘性泥石流峰值流速和流量,公式中各个参数均可以通过野外调查获取。

## 4 结论与思考

本文首先较为全面地分析了影响曼宁糙率系数  $n$  的6方面的因素,并将这6方面的因素归结为外部沟道边界条件  $n_1$  和泥石流流体内部特征  $n_2$  两大方面;然后分别分析了泥石流内部阻力系数及外部阻力系数,并提出了粘性泥石流的糙率系数表达式。

通过上述分析可以发现:

(1) 泥石流的综合曼宁糙率系数由外部沟道边界条件和泥石流流体内部特征两方面组成,这与山区河流的糙率系数明显不同。

(2) 分别提出了影响  $n_1$  及  $n_2$  的具有明确物理意义的无量纲因子,并通过实测数据进行拟合和分析。结果表明,经过粘性泥石流铺床作用之后的泥石流沟道,其沟道边界条件所引起的阻力系数与无量纲因子  $(d_{84}/R)$  密切相关;泥石流流体内部阻力系数与无量纲影响因子  $\left(\frac{h}{d_{50}} \cdot \frac{d_{16}}{d_{50}} \cdot S \cdot J\right)$  的相关性较好,这也充分说明泥深、泥石流颗粒组成、泥石流固体物质的浓度及流速对曼宁糙率的影响较大。

由于糙率系数原本只是用于衡量河床及边壁形状不规则及粗糙程度对水流阻力影响的系数,曼宁公式也只适用于紊流粗糙区,而粘性泥石流运动大部分为层流或接近层流,因此以曼宁公式计算粘性泥石流流速已并不合适。但在没有寻求到更简洁合理的计算理论之前,一方面必须丰富和完善曼宁综合糙率系数的内涵及计算方法,另一方面应该积极探索新的粘性泥石流流速的计算理论,从而为防灾减灾设计提供科学指导。

### 参考文献:

- [1] 韦方强,胡凯衡.泥石流流速研究现状与发展方向[J].山地学报,2009,27(5):545-550.
- [2] 吴积善,康志成,田连权.云南蒋家沟泥石流观测研究[M].北京:科学出版社,1990:118-127.
- [3] 陈光曦,王继抗,王林海.泥石流防治[M].北京:中国铁道出版社,1983:2-49.
- [4] 程尊兰,刘雷激.西藏古乡沟泥石流流速[J].山地研究(现山地学报),1997,15(4):293-295.
- [5] 张小琴,包为民,梁文清,黄琳煜.河道糙率问题研究进展[J].水力发电,2008,34(6):98-100.
- [6] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.
- [7] 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].重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1987:145-150.

- [ 8 ] 费祥俊. 粘性泥石流的输沙浓度与运动速度[J]. 水利学报 2003 ,34( 2) : 15 - 18.
- [ 9 ] 舒安平, 费祥俊. 粘性泥石流运动流速与流量计算[J]. 泥沙研究 2003( 3) : 7 - 11.
- [10] 倪晋仁, 王光谦, 张红武. 固液两相流基本理论及其最新应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 136 - 139.
- [11] 邓安军, 郭庆超, 陈建国. 挟沙水流综合糙率系数研究[J]. 泥沙研究 2007( 5) : 24 - 29.
- [12] 程进豪, 安连华, 王华, 王维美. 黄河山东段河床糙率分析[J]. 水利学报, 1997, 28( 1) : 39 - 43.
- [13] 惠遇甲, 李义天, 胡春宏. 高含沙水流紊动结构和非均匀沙运动规律的研究[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.
- [14] 费祥俊, 熊刚. 泥石流输砂能耗及运动速度与阻力的计算方法[J]. 泥沙研究, 1995( 4) : 1 - 9.
- [15] Soto A. U. , M. A. Manuel . Roughness coefficient in mountain rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE , 1994 ,1: 1 - 8.
- [16] 吴积善, 张军, 程尊兰, 游勇, 刁惠芳. 粘性泥石流的泥深与残留层关系及其确定[J]. 泥沙研究 2003 ( 6) : 7 - 12.
- [17] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [18] Bathurst J. C. . Flow resistance estimation in mountain rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1985 ,111: 625 - 641.
- [19] Bathurst J. C. . At a site variation and minimum flow resistance for mountain rivers [J]. Journal of Hydrology 2002 269: 11 - 26.
- [20] Limerinos J. T. . Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels [R]. Geological Survey Water Supply paper ,United States government printing office ,Washington , D. C. ,1970: 46 - 47.
- [21] Richard D. H. . Flow resistance in gravel-bed rivers [J]. Journal of the Hydraulics Division ,ASCE ,1979 ,105 ( HY4) : 365 - 379.
- [22] 康志成, 崔鹏, 韦方强, 何淑芬. 中国科学院东川泥石流观测研究站观测实验资料集( 1961 - 1984) [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 254 - 257.

### Calculation of viscous debris flow velocity

ZHU Xing-hua<sup>1, 2, 3</sup>, CUI Peng<sup>1, 3</sup>, TANG Jin-bo<sup>1, 3</sup>, ZOU Qiang<sup>1, 2, 3</sup>

(1. *Ins. of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Key Lab of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)*

**Abstract:** The velocity is the most important parameter in kinetic analysis of debris flows. At present, the Manning formula is widely used in the calculation of debris flow velocity. However, the selection of Manning roughness coefficient is of subjectivism; thus the calculation of debris flow velocity always has a big error comparing with the observations. In this paper, 6 factors of Manning roughness coefficient are analyzed comprehensively, and then all of them are attributed to channel boundary conditions  $n_1$  and debris flow internal features  $n_2$ . Based on the above analysis, two non-dimensional factors with clear physical meaning are constructed, which are proposed in the mathematical expression of Manning roughness coefficient. In addition, 21 groups of observations from the Dongchuan Debris Flow Observation Station (DDFOS) are used to calibrate the undetermined parameters in the mathematical expression. What's more, a formula for velocity of viscous debris flow is amended by the calibrated Manning roughness coefficient expression. At last, the calculation of debris flow velocity is compared with the observations of the DDFOS and the results are generally satisfactory.

**Key words:** viscous debris flow; roughness coefficient; velocity; DDFOS