

# 我国泥石流流速研究与计算方法

康志成

(中国科学院成都地理研究所)

泥石流流速是泥石流动力学研究最重要的课题之一,也是泥石流防治工程设计不可缺少的计算依据。所以国内外的许多研究单位和生产部门都很重视这一工作。我国对这项课题的研究可分为二个阶段。

## 一、引用国外研究成果阶段(50—60年代)

建国初期,在公路、铁路的修建中,涉及到不少泥石流问题。交通勘测设计部门首先开展了泥石流的调查和防治工作。为了满足勘测设计的要求开始引用苏联在这方面的研究成果,其中尤以引用泥石流流速的计算方法最为突出(表1)。表1的11种公式中,最为常用的是1,4和9。

表1 国外泥石流流速公式一览表

Table 1 Schedule of introduced and improved flow velocity formula of debris flow

编号	公式形式	适用情况	推荐单位	作者及参考文献
1	$V_C = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \phi + 1}} V_B$ $\phi = \frac{\gamma_C - 1}{\gamma_H - \gamma_C}$	按清水动能与挟沙水流相等的概念出发,从稳定均匀流推导而来。适用于水石流和稀性泥石流。	铁道部第一 铁道设计院	M. Φ. 斯里勃 内依(苏联) <sup>[1]</sup>
2	$V_C = \frac{6.5}{\sqrt{\gamma_H \phi + 1}} R^{2/3} I^{1/4}$	这里令 $V_B = 6.5 R^{2/3} I^{1/2}$ 而推导出动力平衡流速公式。计算值偏小,一般不采用。		M. Φ. 斯里勃 内依(苏联) <sup>[1]</sup>
3	$V_C = \frac{15.3}{\sqrt{\gamma_H \phi + 1}} R^{2/3} I^{3/8}$	经过改进的斯氏公式。适用于西北地区的泥石流。		铁道部第一设计院改进的斯氏公式 <sup>[1]</sup>
4	$V_C = \frac{m_C}{\sqrt{\gamma_H \phi + 1}} R^{2/3} I^{1/2}$	$m_C$ 为泥石流糙率系数,可查Π. B. 巴克诺夫斯基糙率系数表(表2),适用于水石流和稀性流。	铁道科学研究所西南研究所	斯氏改进公式 <sup>[2]</sup>
5	$V_C = \frac{M}{\sqrt{\gamma_H \phi + 1}} R^{2/3} I^{1/6}$	此式采用东川地区的老干沟,法窝沟,西昌地区的彝农河的资料改进。适用于稀性流。	铁二院研究所丁玉寿推荐,并建议M值由表3确定。	斯氏改进公式 <sup>[2]</sup>

续表 1

编号	公式形式	适用情况	推荐单位	作者及参考文献
6	$V_C = \frac{m}{\sqrt{\gamma_H \phi + 1}} R^{2/3} I^{1/10}$	适用于山区大比降水石流和挟沙水流。m值列于表4。	北京市市政设计院刘德昭。	斯氏改进公式 <sup>[3]</sup>
7	$V_C = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \sqrt{\frac{1 - C_V}{1 + C_V(\gamma_H - 1)}}$	适用于水石流和稀性流。	铁道部科学研究院西南研究所 <sup>2)</sup>	C. M. 弗列什曼(苏联)
8	$V_C = K_B \sqrt{AgHI}$ $A = 1 - 0.825 \frac{\bar{P}_H}{I} + 1.65 \bar{P}_H$	适用于非粘性泥石流。K <sub>B</sub> 取值决定于河床相对糙度 H/Δ 的阻力系数, 即H/Δ为5, 10, 15; K <sub>B</sub> 为5.0, 7.1, 8.2。	铁道部科学研究院西南研究所 <sup>2)</sup> 。	M. A. 莫斯特柯夫(苏联)
9	$V_C = K_C \sqrt{gH(I - I_0)}$ $K_C = \frac{2}{\sqrt{3e}} \sqrt{\frac{(1-e)^3}{1-\frac{e}{z}}}$ $e = D/H$	适用于粘性泥石流	中国科学院兰州冰川冻土所 <sup>[4]</sup>	
10	$V_C = aV_B$ $a = 1 - 0.1\gamma_C^{3/2} \sqrt{\eta - \eta_0}$	适用于粘性泥石流。a为流速减少系数。	铁道部科学研究院西南研究所孟同清 <sup>2)</sup>	C. M. 弗列什曼(苏联)
11	$V_C = \frac{\rho g I H^2}{2\eta}$	适用于粘性泥石流	中国科学院兰州冰川冻土所 <sup>[5]</sup>	R. P. 夏普(美国)

1) 丁玉寿, 1980, 泥石流计算方法的初步研究, 铁二院科研所。

2) 孟河清, 1980, 苏联对泥石流运动机理和动力学特征值的研究, 西南铁科所。

由于我国地区广大, 山地地质地貌条件复杂, 环境差异很大, 所以泥石流类型多样, 性质各异。采用苏联各家的泥石流流速计算方法, 对我国情况极其复杂的泥石流地区来说, 必然出现很大误差。所以在我国不同地区进行泥石流观测, 建立适合于我国情况的泥石流计算方法, 这不仅是泥石流防治工作的需要, 而且也是我国泥石流研究工作所要经历的道路。

表1内各公式符号含意如下:  $V_C$ 为泥石流流速(米/秒, 厘米/秒);  $\gamma_H$ 为泥石流固体物质比重(吨/立方米, 克/立方厘米), 一般取值2.65—2.7吨/立方米;  $\phi$ 为泥石流修正系数,  $\phi = (\gamma_C - 1)/(\gamma_H - \gamma_C)$ ;  $\gamma_C$ 为泥石流流体容重(吨/立方米, 克/立方厘米);  $R$ 为泥石流水力半径, 有时用平均水深代替( $H$ );  $I$ 为水面比降, 一般用河床纵比降替代;  $m_C$ 为泥石流糙率, 可查H. B. 巴克诺夫斯基糙率表(表2);  $m$ 为外阻力系数, M. Ф. 斯里

表 2 Ⅱ. B. 巴克诺夫斯基糙率系数 ( $m_c$ )Table 2 Roughness coefficient ( $m_c$ ) of B. V. Baknovski

组别	沟槽特征	$m_c$ 值		坡度
		极限值	平均值	
1	糙率最大的泥石流沟槽, 沟槽中堆积有难以滚动的棱石或稍能滚动的大石块, 沟槽被树木(树干、树枝及树根)严重阻塞, 无水生植物, 沟底以阶梯式急剧降落。	3.9-4.9	4.5	0.375-0.174
2	糙率较大的不平整的泥石流沟槽, 沟底无急剧突起, 沟床内均堆积大小不等的石块, 沟槽被树木所阻塞, 沟槽内有草木植物, 沟床不平正, 有洼坑, 沟底呈阶梯式降落。	4.5-7.9	5.5	0.199-0.067
3	较弱的泥石流沟槽, 但有大的阻力, 沟槽由滚动的砾石和卵石组成, 沟槽常因稠密的灌丛而严重阻塞, 沟槽凹凸不平, 表面因大石而突起。	5.4-7.0	6.6	0.187-0.116
4	处于中下游的泥石流沟槽, 沟槽经过光滑岩面, 有时经过大小不等的跌水沟床, 在开阔河床有树枝砂石堆积阻塞; 无水生植物。	7.7-10.0	8.8	0.220-0.112
5	流域在山区或近山区河槽, 河槽经过砾石、卵石河床, 由中小粒径与能完全滚动的物质组成, 河槽阻塞轻微, 河岸有草木及木本植物, 河底降落较均匀。	9.8-17.5	12.9	0.090-0.022

勃内依采用6.5; 据丁玉寿研究中国山区河流处于过阻力平方区的特点,  $m$ 取值在5.5—7.5间(表3)<sup>[3]</sup>; 据刘德昭研究,  $m$ 取值见表4;  $C_V$ 为泥石流体积比含沙量,  $C_V = (\gamma_C - 1) / (\gamma_H$

表 3 据丁玉寿的外阻力系数表( $m$ )Table 3 Outer resistance coefficient ( $m$ ) of Ding Yushou

分类	河床特征	$m$
1	河床稳定、顺直、水流集中	7.5
2	河床基本稳定, 微弯	6.5
3	具有冲沟, 断面不规则, 弯曲, 水流分叉, 有堵塞情况	5.5

表 4 据刘德昭的外阻力系数表( $m$ )Table 4 Outer resistance coefficient ( $m$ ) of Liu Dezhao

分类	沟床特征	$I > 0.015$ $m$	$I \leq 0.015$ $m$
I	河段顺直, 河床平整, 断面为矩形或抛物线形的漂石砂卵石, 或黄土质河床, 平均粒径为0.01—0.08米。	7.5	40
II	河段较为顺直, 由漂石、碎石组成的单式河床, 河床质较均匀, 大石块直径为0.4—0.8米, 平均粒径为0.04—0.2米; 或河段较为弯曲, 不太平整的I类河床。	6.0	32
III	河段较为顺直, 由巨石、漂石、卵石组成的单式河床, 大石块平均直径为0.1—1.4米, 平均粒径为0.1—0.4米, 或较为弯曲, 不太平整的II类河床。	4.8	25
IV	河段较为顺直, 河槽不平整, 由巨石、漂石组成的单式河床, 河床大石块直径为1.2—2.0米, 平均直径0.2—0.6米; 或III类较为弯曲不平整的河床。	3.8	20
V	河段严重弯曲, 断面很不规则, 有树木、植被, 巨石严重阻塞河床。	2.4	12.5

- 1);  $K_B$ 为取决于河床相对糙度 $H/\Delta$ 的阻力系数,  $\Delta$ 采用与床沙平均粒径相等的值;  $e$ 为相对糙度,  $e = D/H$ ,  $D$ 为泥石流中固体物质的平均粒径;  $I_0$ 为粘性泥石流的临界坡度, 一般取0.05—0.06;  $\eta$ 为泥石流流体粘度 (一般取其大于2毫米的泥浆液的粘度, 泊);  $\eta_0$ 为非粘性流体过渡到粘性流体的临界粘度, 一般取3泊;  $\rho$ 为泥石流流体密度,  $\rho = \gamma_c/g$ 。

## 二、建立地区性经验和半经验泥石流 流速计算方法阶段(60—70年代)

### (一) 粘性泥石流流速的研究和计算方法

引用外国的, 特别是引用苏联的泥石流运动速度的研究成果和计算方法, 无疑对推

**表 5 我国泥石流流速经验公式一览表**

Table 5 The schedule of flow velocity formula of debris flow in China

编号	进行泥石流观测的名沟	观测年份及资料系列	公式形式	适用情况	作者及文献
(1)	西藏波密古乡沟	1964—1965年; 分别为85次和10次泥石流观测资料	$V_C = \frac{1}{n_c} H^{3/4} I^{1/2}$ $n_c$ 为泥石流糙率系数, 一般粘性泥石流取0.45, 稀性泥石流取0.25.	适用于稀性泥石流和粘性泥石流, 特别适合于含有大漂石的冰川泥石流。	王文睿 章书成 [6]
(2)	云南东川	1965—1967年 1973—1975年 共101次泥石流, 3千多阵次	$V_C = \frac{1}{n_c} H^{2/3} I^{1/2}$ $\frac{1}{n_c} = 28.5H^{-0.34}$	适合于粘性阵性泥石流, 特别是云南东川地区。	康志成 [5]
(3)	蒋家沟	1965—1967年 1973—1975年 共101次泥石流, 3千多阵次	$V_C = \frac{m_c}{a} H^{2/3} I^{1/2}$ $m_c = 75H^{-0.425}$ $a = \sqrt{\gamma_{fl}\phi + 1}$	适合于粘性阵性泥石流, 特别是云南东川地区。	
(4)	甘肃武都火烧沟柳弯沟泥弯沟	1963—1965年 1972—1973年 共分析泥石流 113阵次	$V_C = 65kH^{1/4} I^{4/5}$ $k$ 为断面平均流速换算系数, 一般取 $k=0.70$	适用于武都地区的粘性泥石流。	杨针娘 [7]
(5)	甘肃武都火烧沟柳弯沟	共分析泥石流 113阵次	$V_C = m_c H^{2/3} I^{1.2}$ $m_c$ 为糙率系数, 可查表7	适用于武都地区的粘性泥石流	曾思伟等 [8]
(6)	云南大盈江浑水沟	1976—1978年共 观测 101 次泥石流 资料	$V_C = \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_c}\right)^{0.4} \cdot \left(\frac{\eta_{eb}}{\eta_c}\right)^{0.1} \cdot V_b$ $\gamma_b$ : 清水容重, $\gamma_b=1.0$ ; $\eta_{eb}$ : 清水有效粘度(泊); $\eta_c$ : 泥石流浆体有效粘度(泊)	适用于紊动强烈的连续性泥石流。	刘江 程尊兰 [9]

续表 5

编号	进行泥石流观测的沟名	观测年份及资料系列	公式形式	适用情况	作者及文献
(7)	四川西昌黑沙河马颈沟	1974—1976年马颈沟20余次小型泥石流	$V_c = 2.77 \left( \frac{R}{d_{85}} \right)^{0.727} \left( \frac{\eta_{cs}}{\eta_c} \right)^{0.42} \sqrt{RI}$ $d_{85}: \text{占固体总重量85的固体颗粒粒径};$ $R \text{ 泥石流的水力半径}$	适用于流域小于1公里 <sup>2</sup> 以下的小型粘性泥石流	吴积善 <sup>[10]</sup>
(8)	四川西昌黑沙河马颈沟	1974—1976年马颈沟15次小型泥石流	$V_c = 740 \left( \frac{\gamma_c}{\eta_c} \right)^{1.4} R^{2.610.5}$	适用于结构蠕动流	
(9)	云南东川蒋家沟大白泥沟等	共163阵次资料	$V_c = kH^{2/3} I^{1/3}$ $k \text{ 为粘性泥石流流速系数, 见表8}$	适用于粘性泥石流	陈光曦 王继康 <sup>[11]</sup>
(10)	西藏古乡沟东川蒋家沟武都火烧沟	共采用199次泥石流, 3千多阵次资料	$V_c = \frac{1}{n_c} H^{2/3} I^{1/2}$ $n_c \text{ 为粘性泥石流糙率系数表(表6)}$	适用于粘性泥石流	康志成 章书成
(11)	云南东川蒋家沟	1974—1975年共53阵对应资料	$V_c = 25.38 \left( \frac{d_{cp}}{H} \right)^{0.127} \left( \frac{\eta}{\gamma_c \sqrt{gH^3}} \right)^{0.0576} \sqrt{gHI}$	适用于粘性泥石流	康志成 <sup>[5]</sup>
(12)	云南东川蒋家沟	1974—1975年共53阵对应资料	$V_c = 27.57 \left( \frac{d_{cp}}{H} \right)^{0.245} \sqrt{gHI}$	适用于粘性泥石流	

动我国泥石流动力学研究和防治工程设计是起了积极作用的。但多数也是一些半经验公式, 仅管某些使用者对个别参数作了改进, 由于误差大, 仍不能满足我国各种泥石流类型的流速计算问题。所以许多研究单位, 结合某些高频率泥石流的防治工作, 开展了以泥石流运动要素为主的观测研究, 积累了大量的资料, 经过分析, 提出了一批符合我国不同地区、不同泥石流类型和性质的经验和半经验流速计算方法(表5), 同时还根据这些

资料、泥石流性质和河床条件编制了符合我国情况的第一张粘性泥石流糙率表(表6)。由于我国泥石流暴发频繁、规模大、类型齐全,再加之资料系列长,完整。所以,在此基础上建立起来的泥石流流速计算方法,比引进的公式更切合我国泥石流的情况,并受到

表 6 粘性泥石流糙率表\*

Table 6 Roughness of viscous debris flow

序号	泥石流流体的特征	沟床状况	糙率值	
			$\frac{1}{n}$	$n$
1	泥石流流体中石块与浆体成整体运动,所含石块粒径较大,而且大小极悬殊,一般粒径在30-50厘米,粒径在2-5米的也有相当比例(约占20%)。龙头几乎全由大石块组成,犹如一堵石墙似的前行。龙头在弯道或河床展宽处容易停积,后面龙身部分可以超越而去,龙头流速小于龙身流速。停积后形成明显的垄岗状堆积	沟床极为粗糙,有数百米 <sup>3</sup> 至上千米 <sup>3</sup> 巨石,还有泥石流挟带的树木亦停在沟内。沟道多弯道和大跌水、瀑布,沟内无法通行,人迹罕见。 沟床流通段沟底纵坡在10-15%	平均值: 3.57 其中: $H_{平均}$ >2米时, 为2.25	平均值: 0.270 其中: $H_{平均}$ >2米时, 为0.445
2	泥石流流体中石块与浆体成整体运动,石块较大,一般石块粒径20-30厘米,含少量粒径为2-3米的大石块,流体搅拌比较均匀,龙头紊动强烈,有黑色烟雾及火花,龙头流速和龙身流速基本一致。停积后,亦有垄岗状堆积	沟床比较粗糙,凹凸不平,石块较多,有弯道、跌水。 沟床流通段沟底纵坡在7.0-10.0%	$H_{平均} < 1.5$ 米时, 20-30 平均: 25 $H_{平均} > 1.5$ 米时, 10-20 平均: 15	$H_{平均} < 1.5$ 米时, 0.05-0.033 平均: 0.04 $H_{平均} > 1.5$ 米时, 0.05-0.10 平均: 0.067
3	泥石流流体搅拌得十分均匀,如同制备好的混凝土一样,石块粒径一般在10厘米左右,偶声亦有粒径2-3米的大石块出现。龙头与龙身物质组成差别不大。龙头在运动过程中紊动十分强烈,浪花飞溅,停积后浆体与石块不分离。整个流体向四周扩散,呈叶片状	沟床较固定,床内石块亦较均一(一般10厘米左右),由于洪水冲刷造成沟底不平整,而且粗糙,流水沟两侧基本平顺,但又属于干而粗糙。流通段沟底纵坡为5.5-7.0%	0.1米 < $H_{平均}$ < 0.5米时, 23 0.5米 < $H_{平均}$ < 2.0米时, 13 2.0米 < $H_{平均}$ < 4.0米时, 10	0.1米 < $H_{平均}$ < 0.5米时, 0.043 0.5米 < $H_{平均}$ < 2.0米时, 0.077 2.0米 < $H_{平均}$ < 4.0米时, 0.10
4	同 3	泥石流铺床后,使原河床粘附了一层泥浆体,使原干而粗糙河床变得光滑平顺,利于泥石流流体运动,可以视为人工河槽	0.1米 < $H_{平均}$ < 0.5米时, 46 0.5米 < $H_{平均}$ < 2.0米时, 26 2.0米 < $H_{平均}$ < 4.0米时, 20	0.1米 < $H_{平均}$ < 0.5米时, 0.022 0.5米 < $H_{平均}$ < 2.0米时, 0.038 2.0米 < $H_{平均}$ < 4.0米时, 0.05

\* 本表由康志成、章书成制作。

表7 泥石流沟的  $m_c$   
Table 7  $m_c$  Value of debris flow Ravine

类别	沟床特征	$m_c$			
		平均泥深(米)			
		0.5	1.0	2	4
I	黄土地区泥流沟或大型的粘性泥石流沟, 沟床平坦开阔, 流体中大石块很少, 纵比降为2-8%		29.0	22.0	16.0
II	中小型粘性泥石流沟, 沟谷一般平顺, 流体中含大石块较少, 沟床纵比降为3-8%	26.0	21.0	16.0	14.0
III	中小型粘性泥石流沟, 沟床狭窄弯曲, 有跌坎, 或沟道虽顺直, 但含大石块较多, 沟床平顺的大型稀性泥石流沟, 沟床纵比降4-12%	20.0	15.0	11.0	8.0
IV	中小型稀性泥石流沟, 碎石性河床, 多石块, 不平整, 沟床纵比降为10-18%	12.0	9.0	6.5	
V	沟道弯曲, 沟内多顽石, 跌坎, 床面极不平整的稀性泥石流沟, 沟床纵比降为12-25%		5.5	3.5	

表8 粘性泥石流流速系数(K)  
Table 8 Flow velocity coefficient (k) of viscous debris flow

流速系数	泥深 H (米)			
	<2.5	3	4	5
K	10	9	7	5

生产、科研和教学部门的欢迎(表7, 8)。

另一方面这些公式来源于各个地区不同类型和性质的泥石流观测资料, 所以它们之间的差别也必然很大(图1)。

从图1可以看出, 在同样条件下, 水深一样时, 采用上述方法计算泥石流流速差别很大。这正好反映了各地区泥石流在性质上的明显差异, 从而决定了它们的阻力特征也是不一样的。根据阻力特征, 按照图1把我国现有泥石流流速计算方法分为三类:

1. 低阻型泥石流流速计算方法 这些方法是公式(2), (3)和(9)。这类公式来源于云南东川蒋家沟和小江大白泥沟的泥石流观测资料。这个地区的泥石流是我国典型暴雨泥石流地区, 以阵性流为其特征。这类泥石流搅拌均匀, 如同制备好的混凝土沙浆一样, 流体内的物料较均一, 并为粘稠的泥浆体所充填, 在运动过程中粗颗粒之间为光滑摩擦, 同时沟床内有泥浆粘附液, 使干而粗糙的河床变得光滑平顺, 利于运动。所以在天然河道中这类泥石流的运动速度很快, 有时高达15米/秒。

2. 中阻型泥石流流速计算方法 这类泥石流的经验公式来源于甘肃武都地区的粘性泥石流观测资料, 如公式(4)和(5)。这类泥石流也为粘性泥石流, 流体中颗粒粗

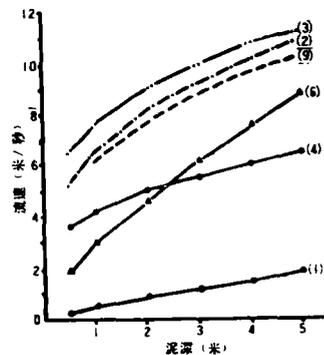


图1 我国泥石流流速计算公式对比图  
Fig.1 Comparison of velocity formula of debris flows in China

大,其均匀程度较前者差;沟床比较粗糙,凹凸不平。在运动过程中,粗颗粒之间为滑润摩擦,而沟床阻力较大。

3.高阻型泥石流流速计算方法 这类泥石流流速计算的公式为(1)和(6),来源于西藏古乡沟和大盈江浑水沟的泥石流观测资料。它们都属于连续性泥石流。这类泥石流体的泥浆液较稀,被搬运物料粗大,所以它们在运动过程中颗粒与颗粒为粗糙摩擦;同时河床坎坷,床料粗大,而沟道多弯道和跌水。所以是最大阻力的情况。

表5中公式(8)是黑沙河支沟马颈沟坡面蠕流公式,适用于速度非常缓慢情况。这种流体运动速度非常缓慢的原因,是流体非常粘稠,具有塑性特征。

上述流速公式的差异,正好反映了不同地区泥石流体的性质和河床条件。当我们要使用这些方法时,应根据泥石流性质和沟床条件选择上述合适的计算公式。

图1中各类泥石流流速计算公式的阻力特征为什么会有这样大的差别?除了河床条件而外,由细颗粒组成的泥浆体的性质,对泥石流运动起重要作用,而泥浆液中的粘土(小于0.005毫米)、粉沙(0.005—0.05毫米)和沙(0.05—2毫米)的含量多少,又决定着泥浆液的性质(表9)。

表9 泥石流泥浆液中固体物质组成(%)及流体阻力特征

Table 9 Solid material component (%) in debris flow slurry and flow resistance characteristics

典型 沟名	泥石流 容重 (吨/米 <sup>3</sup> )	泥浆液中固体物质组成(%)			流动 特征	粘性 特征	阻力 特征	参考文献	
		>2毫米	沙 (2-0.05)	粉沙 (0.05-0.005)					粘土 (<0.005)
东川 蒋家沟	2.30-1.90	(60) <sup>1)</sup>	31 (13)	30 (12)	39 (15)	阵性流	高粘性	小阻型	(12)
武都 火烧沟等	2.04-2.20	(58)	38 (16)	48 (20)	14 (6)	阵性流	粘性	中阻型	(8)
大盈江 浑水沟	2.25-1.90	(52)	78 (37.5)	12 (5.9)	9 (4.5)	连续流	低粘性	大阻型	2)

1)括号内的数字为泥石流体内各粒级的百分含量。

2)中国科学院成都地理研究所一室,1979,云南大盈江浑水沟泥石流的特征和防治,云南省水利科学研究所。

表9中泥浆液中固体物质组成的差异,反映了流体性质上的不同。从表中可以看出:蒋家沟以粘土含量占优势,武都火烧沟和泥湾沟以粉土含量占优势,而大盈江浑水沟以沙的含量占优势,所以它们形成高粘性、粘性和弱粘性三种不同的泥浆液。照理来说,粘性越高,其流体变形所产生的阻力损失也越大。但是这种充填在粗颗粒之间的高粘性泥浆液的减阻作用远大于弱粘性泥浆液的减阻作用。同时泥浆液的这种减阻作用远大于泥浆液的粘性阻力。所以粘性泥石流比非粘性泥石流和弱粘性泥石流在同等条件下其运动速度要快得多。

为了便于使用者选用上述公式,笔者根据图1中各类计算方法的泥石流性质、河床条件及阻力特征,把我国粘性泥石流流速计算方法,按糙率系数概化为三类(表10)。

表 10 粘性泥石流 Manning 糙率系数表  
Table 10 Roughness coefficient of viscous debris flow

泥石流阻力分类	泥石流特征及沟床条件	纵坡 I	不同深度之 $n_s$ 值		
			<1.0米	2.5米	4.0米
高阻型	泥石流流体中小于2毫米的固体物质, 主要是由沙 (2.00-0.05毫米) 组成的弱粘性泥浆液。浆液中石块粗大, 大小悬殊, 龙头几乎全由大石块组成, 其容重达1.9-2.2吨/米 <sup>3</sup> 。沟床是糙率最大的情况, 陡急弯曲, 沟床质由石块泥沙组成, 多巨石突起和跌坎。	0.08-0.16	0.140	0.17	0.20
中阻型	泥石流流体中小于2毫米的固体物质, 主要由粉沙 (0.05-0.005毫米) 组成的粘性泥浆液。浆液中的中等石块较多 (一般直径0.5-1.0米), 泥浆体呈整体运动。沟床是糙率中等的情况, 河床质由碎石泥沙组成, 床面突起不大。	0.06-0.12	0.080	0.08	0.10
低阻型	泥石流流体中小于2毫米的固体物质主要由粘土 (小于0.005毫米) 组成的高粘性泥浆液。泥浆液中的粗粒同浆液搅拌得十分均匀, 如同混凝土砂浆, 流体内巨石较少, 容重可在1.9-2.3吨/米 <sup>3</sup> 。沟床是糙率最小的情况, 河床质由碎石泥沙组成, 床面顺直平整。	0.05-0.08	0.038	0.05	0.08

## (二) 稀性泥石流流速的研究和计算方法

我国稀性泥石流流速研究和计算方法, 由于受到观测资料的限制, 一直采用国外引进的或改进的公式。

现有稀性泥石流流速公式有三种形式, 大多是以水力学中的流速公式形式表示的, 系根据水流与泥石流的能量转化关系的不同而推导出来的。

### 1. M. Φ. 斯里勃内依 (1940年) [1]

$$V_C = \frac{6.5}{a} H^{2/3} I^{1/4}, \quad (1)$$

其中

$$a = \sqrt{\phi r_H + 1}.$$

### 2. 铁道部第一设计院根据我国西北情况建立的经验公式 [1]

$$V_C = \frac{15.3}{a} H^{2/3} I^{3/8}. \quad (2)$$

### 3. 铁道部第三设计院, 根据铁一院的资料而建立的经验公式 [2]

$$V_C = \frac{15.5}{a} H^{2/3} I^{1/2}. \quad (3)$$

上述三种公式中的符号含义同前。它们的共同问题是没有反映出泥石流容重的变化对其流速影响的渐变过程, 以至什么样的泥浆容重才算泥石流, 才能使用这些公式计算的难题不好解决。例如泥石流容量为1.2, 1.1, 甚至接近1.0时, 它应趋近于水流规律, 然而上述三种公式并没有体现。为了解决这些问题, 采用动能平衡原理的方法。其假定和推理如下:

(1) 泥石流在河槽中运动时的动能, 与泥石流中的清水部分在同一河槽中运动时的动能相等; (2) 把泥石流抽象为两部分, 即清水部分和固体物质部分 (干燥了的沙

石), 主要能量在于清水, 固体物质补给清水形成泥石流, 可忽略固体物质补给时的能量; (3) 忽略了泥石流流体粘度对泥石流流速的影响。

依据动能的表达式  $\frac{1}{2}mV^2$ , 所以令: 清水的体积为  $W_B$ ; 泥石流的体积为  $W_C$ ; 清水的容重为  $\gamma_B$ ; 泥石流的容重为  $\gamma_C$ ; 清水的质量  $m_B = \gamma_B W_B / g$ ; 泥石流的质量为  $m_C = \gamma_C W_C / g$ ; 清水的速度为  $V_B$ ; 泥石流的速度为  $V_C$ 。根据动能平衡的假定, 建立如下关系:

$$\frac{\gamma_B W_B}{2g} V_B^2 = \frac{\gamma_C W_C}{2g} V_C^2, \tag{4}$$

得  $\gamma_B W_B V_B^2 = \gamma_C W_C V_C^2$ 。

因为  $\gamma_C W_C = \gamma_H W_H + \gamma_B W_B$ ,

所以  $\gamma_B W_B V_B^2 = (\gamma_H W_H + \gamma_B W_B) V_C^2$ ,

即  $V_B^2 = \left( \frac{\gamma_H W_H + \gamma_B W_B}{\gamma_B W_B} \right) V_C^2$ 。

令  $\phi = W_H / W_B$ ,  $V_B^2 = (\gamma_H \phi + 1) V_C^2$ ,

$$V_C = \frac{1}{[\gamma_H \phi + 1]^{1/2}} V_B = \frac{1}{a n_B} H_B^{2/3} I^{1/2} \tag{5}$$

式中  $n_B$  为清水河床糙率系数;  $H_B$  为清水水深。

利用公式 (5) 计算流速比较麻烦。因为用形态调查法得到的是泥石流泥位下的深度, 必须把它换算成相当于清水流量时水深。清水断面 ( $W_B$ ) 与泥石流断面 ( $W_C$ ) 有如下关系<sup>[4]</sup>:

$$W_B = \frac{1}{\gamma_C^{1/2} (1 + \phi)^{3/2}} W_C = \beta W_C. \tag{6}$$

如果知道泥石流容重  $\gamma_C$ , 可由表 11 查得  $\beta$ 。

上述三种公式和式 (5) 相比, 后者的数字偏大, 偏安全 (表 12 和图 2), 同时它反映了泥石流容重的变化对流速影响这一渐变过程。所以该公式 (5) 比较适用于洪水——稀性泥石流的流速计算。

表 11 在不同的沙石比重 ( $\gamma_H$ ) 下的  $\gamma_C$  与  $\beta$  的关系

Table 11 Comparison of  $\gamma_C$  and  $\beta$  values

$\gamma_H$	$\gamma_C$					
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
2.5	1.0	0.861	0.735	0.628	0.531	0.444
2.6	1.0	0.866	0.748	0.644	0.549	0.466
2.7	1.0	0.871	0.756	0.656	0.565	0.484

表 12 各稀性泥石流流速计算公式计算结果比较

Table 12 Counting results of flow velocity formula of watery debris flows

泥石流容重 (吨/米 <sup>3</sup> )	计算公式			
	(1)	(2)	(3)	(5)
1.0	2.39	3.82	2.52	4.95
1.1	2.22	3.54	2.34	4.37
1.2	2.05	3.28	2.16	3.88
1.3	1.92	3.05	2.02	3.38
1.4	1.77	2.82	1.86	2.94
1.5	1.64	2.62	1.73	2.57
1.6	1.52	2.42	1.60	2.20

### (三) 水石流流速计算方法

水石流几乎没有人直接观测到它的流动过程和状态。所以对它的运动速度的研究, 仅能从它通过的沟床及停积形态加以推测。例如1981年8月13日云南东川大桥河支沟清水沟发生了一次规模巨大的水石流, 在汇口处有明显的堆积形态。

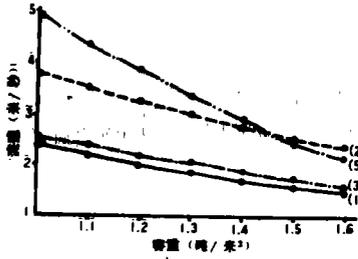


图2 稀性泥石流各公式计算结果比较  
Fig.2 Counting results of various formula of watery debris flow

到目前为止, 在我国还没有人专门从事此类泥石流的观测试验研究。所以这方面的理论和经验公式都还没有。日本高桥堡在这方面作过专门的实验研究<sup>1)</sup>。他根据水石流运动的特点, 认为水石流运动时颗粒之间接触所产生的剪切力远大于流体部分所承受到的剪应力。所以他建议采用R.A.拜格诺(英国)的颗粒流在强烈惯性范围内的膨胀体的运动方程所得到的流速计算公式<sup>[18]</sup>为

$$V_{cp} = \frac{2}{5d} \left\{ \frac{g}{K} \left[ C_d + \frac{\rho}{\rho_s} (1 - C_d) \right] \right\}^{1/2} \left[ \left( \frac{C_{dm}}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1} \left( \frac{\sin\theta}{\sin\alpha} \right)^{1/2} H^{3/2} \quad (7)$$

式中  $K$  为常数, 一般取0.013—0.042;  $\rho_s$  为沙石体密度,  $d$  为沙石平均粒径,  $\rho$  为水的密度,  $H$  为流体深,  $\theta$  为沟床纵坡角,  $C_d$  为水石流体积比浓度,  $C_{dm}$  为水石流体的极限体积比浓度,  $\alpha$  为动摩擦角。

此公式在使用时, 有几个参数目前尚无法确定。如  $K$  (常数)。根据R.A.拜格诺的研究, 当  $\left[ \left( \frac{C_{dm}}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right] > 0.71$  时,  $K$  为0.042定值, 对于比此大的  $C_d$  的值来说,  $K$  值随  $C_d$  的增大而急剧增大, 在无法确定时,  $K$  值可在0.013—0.042之间取值。

$C_{dm}$  (极限体积比浓度) 的确定。在均匀颗粒的情况下, 可按照一定的排列取值, 一般可取0.52—0.70, 但对于非均匀颗粒的泥石流来说, 不同的级配组成就有不同的  $C_{dm}$  值。所以在已知  $C_d$  的情况下, 并不能得到  $C_{dm}$  值, 而  $C_{dm}$  值却与颗粒组成的组合有关, 要得到这样的关系需要做野外各种浓度条件下的实体实验。

$\alpha$  (动摩擦角), 此值是颗粒碰撞时的一个综合作用下的剪切角, 此值随颗粒组成状况和浓度在变化。总的来说, 它随浓度的增大而增大, 当浓度很稀时,  $\alpha \rightarrow 0$ , 当  $C_d \rightarrow C_{dm}$  时,  $\alpha \rightarrow \phi$  (堆积体的内摩擦角), 成为土石堆积体的滑动过程。

由于上述原因, 公式(7)难于在实际工作中应用。要使它在泥石流研究和防治工作中发挥作用, 必须合理而科学地解决上述参数的确定方法。

1) 高桥堡, 1979, 对泥石流发生和流动的研究, 西南铁科所泥石流译文集(二)。

## 参 考 文 献

- (1) 铁道部第一设计院, 1965, 铁路设计手册(路基), 人民铁道出版社, 第113—126页。
- (2) 铁道部第三设计院, 1965, 铁路设计手册(桥涵水文), 人民铁道出版社, 第90—91页。
- (3) 刘德昭, 1985, 稀性泥石流流速公式的选择及其陡坡流速公式糙率系数的分析, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第4号), 科学出版社, 第190—197页。
- (4) 中国科学院冰川冻土沙漠研究所, 1973, 泥石流, 科学出版社, 第44—54页。
- (5) 康志成, 1985, 云南东川蒋家沟粘性泥石流流速分析, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第4号, 科学出版社, 第108—117页。
- (6) 王文睿 章书成等, 1985, 西藏古乡沟冰川泥石流特征, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第4号, 科学出版社, 第19—35页。
- (7) 杨针娘, 1985, 暴雨型粘性泥石流流速公式的初步探讨, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第4号, 第199—206页。
- (8) 中国科学院兰州冰川冻土研究所和甘肃省交通科学研究所, 1982, 甘肃泥石流, 人民交通出版社, 第27—43页。
- (9) 刘 江, 程尊兰, 1981, 云南盈江浑水沟泥石流流速计算, 中国科学院成都地理研究所泥石流论文集(1), 科学技术文献出版社重庆分社, 第87—89页。
- (10) 吴积善, 1981, 泥石流流态及流速计算, 中国科学院成都地理研究所泥石流论文集(1), 科学技术文献出版社重庆分社, 第79—86页。
- (11) 陈光曦, 王继康等, 1983, 泥石流防治, 中国铁道出版社, 第71—80页。
- (12) 康志成, 1985, 云南东川蒋家沟泥石流运动流态特征, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第4号, 科学出版社, 第97—107页。
- (13) Bagnold R. A., 1954, Experiments on a Gravityfree Dispersion on Large solid sPheres in a Ne-wtonian fluid under shere, Proc. Roy. soc. A., 225, 49—63.

## A VELOCITY RESEARCH OF DEBRIS FLOW AND ITS CALCULATING METHOD IN CHINA

Kang Zhicheng

(Chengdu Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

To research the velocity of debris flow is one of the most important problems in studying dynamics of debris flow. It is also necessary basis for designing preventive projects of debris flow. So many production and research departments at home and abroad have paid a close attention to resolving this problem. In China, the research on the problem can be divided into two stages.

First stage (1950s-1960s): During this stage, chinese researchers introduced the foreign study results, especially the calculating methods of velocity and discharge of debris flow, to use for solving problems that they met at the beginning of the founding of the P.R.C. This greatly advanced the researchs and the preventions of debris flow. But, because that there are vast in territory and complicated conditions of geology and geomorgraphy, it yet didn't satisfy the needs of the debris flow prevention.

Second stage (1970s-now): integrated with the production departments, the research departments had ever set up some observation points in the debris flow ravines which severaly affected communication and transportation. On the base of analysing observed data from different regions, some empiric formulas for calculating velocity of debris flow have been attained in different area. In comparion with the introduced methods, the domestic ways are more suited to chinese conditions, has been improved in theory, and also have made certain contributions to dynamical research of debris flow. At presen, chinese researchers are studying the basic patterns of debris Flow and its applications through field observations and laboratory tests.