

粘性泥石流体的应力应变特性和流速参数的确定

王裕宜¹, 詹钱登², 韩文亮³, 洪勇¹, 邹仁元⁴

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院东川泥石流观测研究站, 四川 成都 610041;

2. 台湾成功大学水利与海洋工程学系, 台湾 台南 70101; 3. 清华大学水利系, 北京 100083;

4. 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)

摘要: 文章从粘性泥石流体的组成, 应力应变特性和减阻作用的观测试验入手, 揭示了粘性泥石流体运动的阻力特性, 探讨了粘性泥石流流速公式中的曼宁糙率系数的表征。粘性泥石流体运动的阻力特性主要与沟槽特征以及泥深和粘附层流变特性有关。根据高、低不同阻力的粘性泥石流浆体的泥砂比, 浆体介质的流变参数 (η_p 、 τ_{by}) 和体积浓度 (C_{vf}), 可获得不同阻力介质状态下统一的阻力糙率系数与它们的相关式, 以此来确定曼宁糙率系数。

关键词: 粘性泥石流; 应力应变特性; 流速公式; 糙率系数

文章编号: 1003-8035 (2003) 01-0009-05

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

高浓度粘性泥石流体 ($S_r = 2100 \text{ kg/m}^3$) 能在坡度 ($j = 0.52 \sim 0.06$) 不大的沟道中高速运动 ($V = 10 \sim 15 \text{ m/s}$), 其独特的应力应变特性所产生的减阻作用, 给泥石流防治工程动力参数的确定带来了困难。本文从粘性泥石流体的组成, 应力应变特性和减阻作用入手, 探讨粘性泥石流流速公式中的不同阻力类型、不同流变特性表达的统一通用曼宁糙率系数的表征, 为泥石流防治提供简化了的可操作性粘性泥石流流速计算方法。

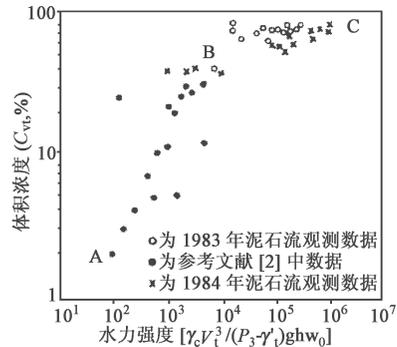


图1 粘性泥石流的水力强度特征

Fig. 1 Hydraulic strength of viscous debris flow

1 粘性泥石流体的组成和应力应变特征

高浓度粘性泥石流体挟带着大量固体物质 ($C_{vt} > 0.5$), 并含有一定数量的细颗粒物, 使它具有较高正压力 (附加孔隙压力) 和屈服应力, 对粘性泥石流体能在坡度 ($j = 0.52 \sim 0.06$) 不大的沟道中高速运动起着明显的减阻作用。

1.1 粘性泥石流体的浓度特征

粘性泥石流的体积浓度 (C_{vt}) 通常大于 0.5, 并且大于该流体的临界浓度 ($C_{vt} > C_{v0}$)。根据蒋家沟的观测资料分析, 粘性泥石流体的水力强度和阻力损失特征 (图 1 中的 BC), 完全不同于一般挟沙水流的水力强度和阻力损失特征 (图 1 中的 AB)^[1], 该流体只要有足够的泥深和一定坡度 (坡度不大), 它就可以高速度地在沟道中运动。

1.2 粘性泥石流体中的细颗粒含量特征

粘性泥石流体固体物质含量中有一定数量的细

颗粒 ($d < 0.05 \text{ mm}$), 它约占固体物质总重量的 10 ~ 18%。泥石流体中一定数量的细颗粒, 对泥石流体的运动能起到双重作用。一方面细颗粒可增加泥石流体的粘滞性显著地降低紊动, 一定程度上增加泥石流运动阻力; 另一方面因细颗粒在泥石流运动中呈中性悬浮运动, 其结构效应大大地降低了层移层的沉速及有效重量, 从而减少了粗大颗粒离散剪切阻力。后一种减阻作用则比前一种增阻作用更为强烈。所以, 在同等条件下, 高粘性泥石流比低粘性泥石流及非粘性泥石流运动速度快 (表 1)^[2]。

收稿日期: 2002-10-14; 修回日期: 2002-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40071010)

作者简介: 王裕宜 (1944—), 女, 研究员, 从事于泥石流应力应变特性和泥石流预测预报的观测研究。

表1 泥石流流体及浆体的颗粒组成、流变参数、阻力特征

Tab. 1 Particle composition of debris flows and slurries, their rheological parameters and characteristics of resistance

No.	泥石流容重 (t/m^3)	固体物质组成 (%)				浆体容重 (t/m^3)	泥砂比	τ_{Bf} (Pa)	η_p (Pa·s)	坡降	流速 (极值) (m/s)	阻力特征 (n_c)	
		(平均值)			流体中								
		>2mm	2~0.05	0.05~0.005	浆体中								
	mm	mm	mm	<0.005									
1	2.19	58	24	14	4	1.67	0.75:1	20.93	0.069	0.06~0.12	5~6	中阻 (0.041)	
			57	35	8								
2	2.12	66	17.5	10.2	6.3	1.67	0.95:1	50.32	0.18	0.05~0.08	8~10	低阻 (0.027)	
			52.0	20.5	18.5						(15)		
3	2.12	57.5	33	5.5	4.0	1.66	0.29:1	7.15	0.09	0.08~0.16	3~5	高阻 (0.063)	
			77.5	14	8.5						(6)		

注: No. 1 为甘肃武都火烧沟粘性泥石流 ($n=5$); No. 2 为云南东川蒋家沟粘性泥石流 ($n=18$); No. 3 为云南盈江浑水沟粘性泥石流的观测数据平均值 ($n=8$).

1.3 粘性泥石流体的正压力特性

高浓度粘性泥石流有很高的正压力(或称附加孔隙压力 P_e),并随着泥石流流体体积浓度的增加而呈幂律指数增加^[3],从而减少了粗颗粒的有效重量(如式(2))^[4],其结构效应大大地降低了层移层的沉速,最终导致粗大颗粒离散剪切阻力的减弱。

$$N(P_e) = 2494.76 C_{st}^{0.94} \quad (1)$$

$$\gamma_c h_j \left[1 - \frac{y}{h} \right] = \tau_{Bf} + \eta \frac{du}{dy} + \zeta \left(\frac{du}{dy} \right)^2 + K_1 \rho_s D^2 \lambda^E \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (2)$$

$$= \tau_{Bf} + (\sigma_n - P_e) \tan \varphi_s + \eta \frac{du}{dy} + K_1 \rho_s D^2 \lambda^E \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

1.4 粘性泥石流体的屈服应力

高浓度粘性泥石流流体不仅有相当高的启动屈服应力(图2中的 τ_{y2} 和 τ_{y3}),并在阵性流的尾部有一定泥深的残余屈服应力(图2中的 τ_{y1})。粘性泥石流体的这种残余屈服应力所形成的粘附层不仅为下一阵粘性泥石流的阵性流加速运动提供减阻下垫面,同时也为其龙头侵蚀提供触变启动物质。而粘附层提供减阻下垫面的差异,又影响着泥石流体的流速差异^[5,6]。

如表1所示具有以下4个特点:①以上3组不同类型高浓度泥石流的浓度(容重)基本相似,相对误差只有3.3%。②3组不同类型高浓度泥石流所携带的粗颗粒物质,相对而言低阻力型(蒋家沟)的泥石流比中(武都火烧沟)、高阻力型(浑水沟)的泥石流携带的物质还粗,相对误差达15%。因此仅仅用大于2mm砾石含量和泥石流浓度来探讨粘性泥石流流速差异是不恰当的^[7]。③3组不同类型高浓度泥石流浆体的浓度(容重)基本相似。④

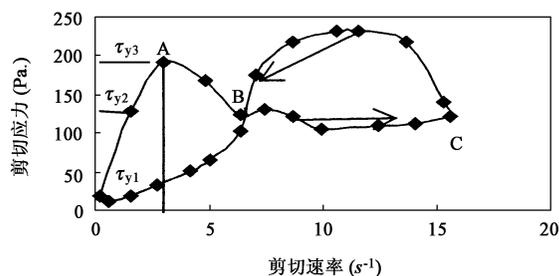


图2 粘性泥石流样品流变曲线

Fig. 2 Rheological curve of viscous debris flow sample ($r_c = 2.1 t/m^3$) in the field

这3组粘性泥石流流体不仅提供减阻下垫面的泥石流浆体的物质组成差异很大,而且泥石流浆体的流变特征差异也十分明显。这就向我们提出了问题:高浓度泥石流流体高速运动特点和减阻的机理是什么?如何确定粘性泥石流体的流速参数?

2 粘性泥石流经验性的流速计算公式

为了解决泥石流防治工程设计中的流速参数问题,我国不少科研和生产部门,根据某些高频率粘性泥石流的防治工作,结合本地的实际情况,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。经过分析后提出了若干符合我国不同地区、不同类型粘性泥石流的经验性和半经验性流速计算公式。

(1) 西藏波密古乡沟粘性泥石流^[8]

$$V_c = \frac{1}{n_c} H^{3/4} j^{1/2} \quad (n_c \text{ 取 } 0.45) \quad (3)$$

(2) 云南东川蒋家沟粘性泥石流^[9]

①
$$V_c = \frac{1}{n_c} H^{2/3} j^{1/2} \quad (n_c = 0.035 H^{0.34}) \quad (4)$$

$$\textcircled{2} V_c = \frac{m_c}{a} H^{2/3} j^{1/2} \quad (m_c = 75 H^{-0.43}, a = \sqrt{\rho_s \phi + 1}) \quad (5)$$

(3) 云南大盈江浑水沟粘性泥石流^[10]

$$V_c = \left[\frac{\gamma_f}{\gamma_c} \right]^{0.4} \left[\frac{\eta_{cf}}{\eta_c} \right] \gamma_f \quad (\eta_c \text{ 为泥浆有效粘度}) \quad (6)$$

(4) 甘肃武都火烧沟粘性泥石流^[11]

$$V_c = \left[\frac{1}{n_c} \right] H^{2/3} j^{1/2} \quad (n_c = 0.031 h^{0.23}) \quad (7)$$

以上各类粘性泥石流的流速公式, 都是以曼宁公式为基础进行有关糙率参数修正后获得的。曼宁公式为:

$$V_c = c \sqrt{Rj} = \frac{1}{n_c} R^{2/3} j^{1/2} \quad (8)$$

但在同等泥深的条件下, 因为缺乏泥石流减阻下垫面的机理探讨, 所以在公式推导时只能根据某一地区测试值进行泥石流浓度和粘度值修正, 因此存在着区域的局限性。

3 粘性泥石流流体运动的阻力特性

粘性泥石流流体运动的阻力特性主要与沟槽特征以及泥深和粘附层流变特性有关。

3.1 泥石流沟槽特征

蒋家沟泥石流观测资料表明, 粘性泥石流暴发后的最初几阵性流, 在粗糙的沟槽中只能前进数 10m 至 100~200m 就停积下来。当最初的阵性流铺床过程完成后, 跟着来的阵性流才能实现高速运动。铺床前后的流速可以相差 1 倍以上^[9]。1994 年 9 月在美国俄勒岗州的 Andrew's H. J. 森林试验站的大型水槽实验 (全长 100m, 宽 2m) 也证实了这一点。此实验的下游平滑水泥板的流路坡度为 3°, 原设想泥石流流体从坡度为 31°的水槽中启动冲下可以在下游流路上流动 25m 远, 但泥石流流体只流动了 3m 就停积下来了。为了探求沟槽下垫面的影响, 在蒋家沟现场进行小型水槽试验, 采集活泥石流样, 容重分别为 0.724、0.613、0.513 和 0.465。每个样品都进行二次重复测试, 第二次泥石流流速测定是在第一次泥石流通过的木质水槽残留层上进行的。根据该实验资料, 第二次流速是第一次流速的 1 倍左右 (图 4, 式 (9)), 与野外观测资料基本一致。

$$V_{2c} = 0.61V_{1c} + 0.583 \quad (9)$$

3.2 泥石流体的泥深

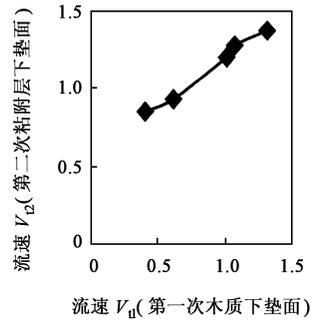


图 3 不同下垫面水槽流速对比图
Fig. 3 Comparison of flow velocity under different flume bed

野外观测资料表明, 泥石流体的泥深越大, 所挟带的固体物质含量越高。这时泥石流体的势能损失也越大, 反映泥石流体的糙率系数随着泥深的增加而加大。在以上粘性泥石流的流速计算公式中已体现出来。

3.3 泥石流体的粘附层特性

表 1 中各地区不同类型粘性泥石流流速的阻力特性存在着很大差异, 这种差异除了与沟床条件有关外, 还与细颗粒组成的泥浆体性质有关。泥石流浆体中的粘粒 ($d < 0.005 \text{ mm}$)、粉砂 (泥 $0.05 \sim 0.005 \text{ mm}$) 和粗砂 ($0.005 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$) 含量的多少, 决定了泥石流浆体的性质。就泥石流浆体而言, 粘性越高, 其流体变形的阻力损失越大。但是这种充填在粗颗粒之间的高粘性浆体的内部减阻作用与其粘附层 (残留层) 提供的沟床下垫面的外部减阻作用, 远远的大于浆体所提供的内部粘性阻力。所以高粘性泥石流比亚粘性泥石流与粘性泥石流在同等条件下其运动速度要快得多。因此细颗粒组成的泥浆体性质, 对泥石流体的运动起着重要作用。

根据云南浑水沟和蒋家沟的多年观测资料, 可获得高阻力型和低阻力型粘性泥石流浆体的应力流变参数 (η_p 、 τ_{Bf}) 与固体体积浓度 (C_{cf}) 的相关性分别为:

浑水沟:

$$\tau_{Bf} = 0.03 e^{14.42 C_{cf}} \quad (10)$$

$$\eta_p = 2.47 \times 10^{-4} e^{15.48 C_{cf}} \quad (11)$$

蒋家沟:

$$\tau_{Bf} = 0.02 e^{19.64 C_{cf}} \quad (12)$$

$$\eta_p = 1.42 \times 10^{-4} e^{17.98 C_{cf}} \quad (13)$$

式 (10)、(11)、(12)、(13) 的相关系数分别为

0.9250、0.9447、0.9788 和 0.9897。从表 1 分析可知, 如果单以某一颗粒组 (0.05~0.005 mm 或 $d < 0.005\text{mm}$) 的含量 (重量百分比) 作参数来反映泥石流浆体流变参数是不恰当的。比如, 武都地区粘性泥石流浆体的粉砂 (d 为 0.05~0.005 mm) 的含量比蒋家沟粘性泥石流浆体的多 2% 左右, 但前者的流变参数 τ_{Bf} 却只有后者的 τ_{Bf} 的 1/2 左右, 是因为前者的粘粒含量 (4%) 比后者的 (6.3%) 少 2.3%。又如, 尽管浑水沟亚粘性泥石流的粘粒含量 ($d < 0.005\text{mm}$) 与武都地区粘性泥石流的含量相似, 都是 8% 左右 (表 1), 但前者的流变参数 τ_{Bf} 却只有后者的 τ_{Bf} 的 1/3 左右, 是因为前者的颗粒含量以粗砂为主 (78%) 而后者以粗砂与粉砂为主 (各占 57% 和 35%)。由于泥石流浆体的屈服应力是由 τ_{bc} (粘结力) 和 τ_{Bf} (粘附力) 组成, 而粘结力 (τ_{bc}) 是由泥粘颗粒组成的浆体提供, 粘附力 (τ_{Bf}) 由浆体中的泥膜化的砂颗粒提供。因此用泥砂比 (泥砂比是在泥浆的组成中以 0.05 mm 粒径为分界的泥粘颗粒的含量 ($d < 0.05\text{mm}$) 与砂颗粒的含量 ($d > 0.05\text{mm}$) 之比) 这个泥浆介质的结构参数, 可以在一定程度上反映泥石流流体流动时, 携带固体物质的能量 (浓度) 和颗粒相互充填叠置的结构状况, 以及减阻下垫面的流变特性。根据高、低不同阻力的粘性泥石流浆体的泥砂比, 基本上可获得一个较统一的泥砂比 (R_{ns}) 与流变参数 (η_p 、 τ_{Bf}) 和体积浓度 (C_{vf}) 的相关式。

$$\tau_{Bf} = 0.021(R_{ns})^{-0.3} \exp[19.64(R_{ns})^{0.25} \times C_{vf}] \quad (14)$$

$$\eta_p = 1.39 \times 10^{-4} (R_{ns})^{-0.47} \exp[18.07(R_{ns})^{0.13} \times C_{vf}] \quad (15)$$

或者:

$$R_{ns} = 2.25 \times 10^{-6} \tau_{Bf}^{-3.36} \exp[9.37 \times 10^{-6} \tau_{Bf}^{3.87} \times C_{vf}] \quad (16)$$

$$R_{ns} = 4.59 \times 10^{-9} \eta_p^{-2.2} \exp[8.9 \times 10^{-11} \eta_p^{7.99} \times C_{vf}] \quad (17)$$

4 粘性泥石流流速公式中曼宁糙率系数的确定

4.1 粘性泥石流曼宁糙率系数的表征

根据不同地区、不同类型泥石流体的泥深与糙率系数有关的观测资料^[8,10], 可将高、中、低阻力不同的沟槽糙率系数分别归化成以下各式 (图 4):

$$\text{高阻} (R_{ns} = 0.29) \quad n_c = 6.1 \times 10^{-2} h^{0.28} \quad (18)$$

$$\text{中阻} (R_{ns} = 0.75) \quad n_c = 4.3 \times 10^{-2} h^{0.30} \quad (19)$$

$$\text{低阻} (R_{ns} = 0.96) \quad n_c = 3.1 \times 10^{-2} h^{0.36} \quad (20)$$

以上 3 式的相关系数分别为 0.9994、0.9853、0.9976, 90% 的置信区间都达到 $0.9995 < \rho < 0.8853$ 。将以上 3 式的幂相关参数 (A、B) 与相对应的浆体介质的泥砂比进行回归, 可获得不同阻力介质状态下统一的阻力糙率系数表征公式 (相关系数分别为 $y = -0.9507, 0.8315$):

$$n_c = 0.033 R_{ns}^{-0.51} \exp(0.34 R_{ns}^{0.17}) \ln h \quad (21)$$

如果将式 (16)、(17) 分别代入式 (21), 也同样可获得粘性泥石流糙率系数与泥石流减阻下垫面的浆体介质的流变参数 (η_p 、 τ_{Bf}) 和体积浓度 (C_{vf}) 的综合表达式。

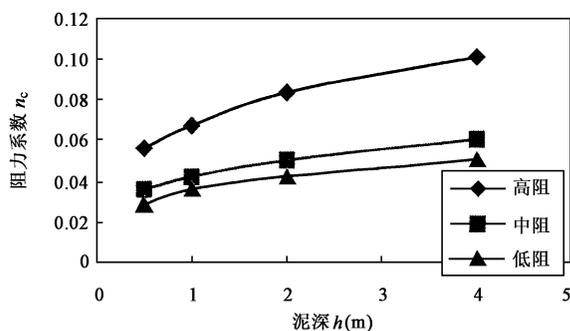


图 4 泥石流阻力系数与泥深关系图

Fig. 4 Relationship between coefficient of resistance and depth of debris flows

4.2 粘性泥石流流速通用计算公式

将式 (21) 代入式 (8), 即可获不同阻力类型, 不同流变特性表达的统一通用流速计算公式。在进行泥石流防治工程流速参数设计时, 可根据该泥石流沟堆积物的细颗粒泥砂比和最大泥深, 就可以计算出该沟泥石流最大流速。式 (22) 可为泥石流防治提供简化了的、可操作性的粘性泥石流流速计算方法。这个计算方法可不必进行烦琐的流变试验, 即可获得反映出粘性泥石流运动和减阻规律的流速公式。

$$V_c = [0.033 R_{ns}^{-0.51} \exp(0.34 R_{ns}^{0.17}) \ln h]^{-1} R^{2/3} J^{1/2} \quad (22)$$

4.3 验证

根据浑水沟 1977 年、1978 年和蒋家沟 1997 年、2001 年粘性泥石流的流速及样品级配的观测资料, 与按式 (22) 计算的泥石流流速进行对比。高阻力

型的浑水沟粘性泥石流的流速观测数据和计算数据的平均相对误差为 -0.102 ($n=8$), 低阻力型的蒋家沟粘性泥石流的流速观测数据和计算数据的平均相对误差为 -0.1193 ($n=18$)。因为在泥石流的流动过程中测量泥深的超声波传感器, 受到粘性泥石流阵性流龙头强烈紊动小砾石碰撞溅高的干扰, 泥深的实际观测资料存在着较大的误差。尽管在泥石流结束以后还需要进行后期的测量来修正, 但因沟床在泥石流的流动过程中变化很大仍存在一定误差, 因此以上相对误差被认为在允许范围内。

参考文献:

- [1] Yuyi Wang, xianjun Fei. The effect of hydraulic characteristic on motion of debris flow [A]. The Sixth International Symposium on River Sedimentation [C], 1995, New Dehi, India, 555—565.
- [2] 王裕宜, 詹钱登. 泥沙浆体与甘油浆体流变特性之实验研究 [A]. 中华防灾学会 (台湾), 第二届土石流研讨会论文集 [C]. 1999, 226—233.
- [3] Wang Yuyi and Fei xianjun. Particle support mechanism in viscous debris flows at Jiangjia Ravine, Yunnan, China [A]. Science in China [C]. 1999, 42 (5): 550—555.
- [4] Wang Yuyi, Fei Xianjun and Chen Rui. A modified rheological model of natural debris flow [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (8): 743—748.
- [5] 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮. 粘性泥石流应力应变特性的初步试验研究 [J]. 山地学报, 2002, 20 (2): 67—72.
- [6] 王兆印, 崔鹏, 余斌. 泥石流的运动机理和减阻 [J]. 自然灾害学报, 2001, 10 (3): 37—42.
- [7] 祁龙. 粘性泥石流阻力规律初探 [J]. 山地学报. 2000, 18 (6): 508—5137.
- [8] 王文澜, 章书成. 西藏古乡沟冰川泥石流特性 [A]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊 (4) [C]. 北京: 科学出版社, 1985, 19—35.
- [9] 康志成. 云南东川蒋家沟粘性泥石流流速的初步分析 [A]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊 (4) [C]. 北京: 科学出版社, 1985, 119—123.
- [10] 刘江, 程尊兰. 云南盈江浑水沟泥石流流速计算 [A]. 泥石流论文集 (1) [C]. 科学技术文献出版社重庆分社. 87—89.
- [11] 杨针娘. 暴雨型粘性泥石流流速的初步分析 [A]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊 (4) [C]. 北京: 科学出版社, 1985, 199—206.
- [12] 徐道明, 冯清华. 泥石流河槽糙率表 [A]. 第一届全国泥石流学术会议论文集摘要汇编 [C]. 1979, 51—52.

Stress-strain properties of viscous debris flow and determination of velocity parameter

WANG Yu-yi¹, ZHAN Qian-deng², HAN Wen-liang³, HONG Yong¹, ZOU Ren-yuan⁴

(1.Chengdu Institute of Mountain Hazards & Environment, CAS. Donchuan Debris Flow Observation & Research, CAS. Chengdu 610041, China;

2.Department of Hydraulics & Ocean Engineering, Cheng Kung University, Tainan 70101, China;

3.Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4.Chengdu Institute of Mountain Hazards & Environment, CAS. Chengdu 610041, China)

Abstract: The paper firstly discussed the composition, stress-strain properties and the reduction resistance of the viscous debris flow based on the experiments, demonstrated the resistance property of viscous debris flow movement, and discussed the coefficients of Manin's rough in flow velocity formula of viscous debris flow. The resistance property is mainly related to the bed channel, depth and rheology of the adhesive layer. According to the ratio of silt to sand (R_{nc} , and the rheological properties (η_b , τ_{bf}) as well as volume densities (C_{vf}) of viscous debris flow in different resistance conditions, the resistance coefficients and their relative equations can be obtained so as to determine the Manin's rough coefficients.

Key words: viscous debris flow; stress-strain properties; flow velocity formula; rough coefficient