

doi: 10.11988/ckyyb.20181354

2020, 37(4): 56-61

考虑浆体黏度的泥石流流速计算方法

王喜安^{1,2}, 陈剑刚^{1,3}, 陈华勇¹, Nirdesh Nepal^{1,2}, 王飞⁴

(1.中国科学院成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;
2.中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 3.中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心,
北京 100101; 4.成都理工大学 信息科学与技术学院, 成都 610059)

摘要: 泥石流浆体黏度通过影响泥石流内、外部的阻力特征影响泥石流的糙率系数, 泥石流糙率系数与浆体黏度之间的关系还没有基于观测数据的定量表述。通过对云南东川蒋家沟泥石流观测资料的分析, 研究泥石流糙率系数与浆体黏度之间的关系, 并通过回归分析得到考虑浆体黏度的泥石流糙率系数计算公式, 最后基于此构建了考虑浆体黏度的泥石流流速计算公式。结果表明, 随着泥石流浆体黏度的增加, 泥石流糙率系数逐渐增加, 浆体黏度在宏观上表现为增阻作用, 考虑浆体黏度的泥石流流速计算公式改进了现有公式在计算浆体黏度较高的泥石流流速中的不足。研究结果可为进一步研究浆体黏度对泥石流运动阻力的影响提供参考, 也为工程实践中的流速计算和增阻消能设计提供新的思路。

关键词: 泥石流; 流速; 浆体黏度; 曼宁糙率系数; 蒋家沟

中图分类号: P694 文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2020)04-0056-06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Calculation of Debris Flow Velocity in Consideration of Viscosity of Slurry

WANG Xi-an^{1,2}, CHEN Jian-gang^{1,3}, CHEN Hua-yong¹, Nirdesh Nepal^{1,2}, WANG Fei⁴

(1.Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2.College of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 4.College of Information Science and Technology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The viscosity of slurry affects the roughness coefficient of debris flow by changing the internal and external resistance characteristics of debris flow. Such influence is often neglected and has not been quantitatively expressed based on observed data. In this paper we explore the relation between roughness coefficient and viscosity of slurry based on field measurement data at the downstream channel of Jiangjia Ravine. By regression fitting we acquire the formula of calculating the roughness coefficient of debris flow in consideration of the viscosity of slurry, and further establish the mathematical relation between velocity of debris flow and viscosity. Results illustrate that the roughness coefficient of debris flow increases with the augment of viscosity of slurry. In other words, the viscosity of slurry enhances resistance in a macroscopic sense. The present formula overcomes the shortcomings of existing formulae in calculating the velocity of debris flow with high viscosity. The results provide a reference for further study of the influence of viscosity of slurry on the resistance of debris flow, and offer a new idea for calculating flow velocity and designing energy dissipation methods.

Key words: debris flow; velocity; viscosity of slurry; Manning's roughness coefficient; Jiangjia Ravine

收稿日期: 2018-12-24; 修回日期: 2019-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661144028); 中国科学院青年创新促进会(2017426); 中国科学院“西部之光”人才项目

作者简介: 王喜安(1994-), 男, 河南延津人, 硕士研究生, 主要从事山地灾害减灾防灾技术方面的研究。E-mail: wangxian171@mailsucas.ac.cn
通信作者: 陈剑刚(1982-), 男, 河北邢台人, 研究员, 博士, 主要从事泥石流灾害防治研究。E-mail: chenjg@imde.ac.cn

1 研究背景

泥石流流速是泥石流动力学分析中的重要参数之一,也是泥石流防治工程中必须考虑的参数。泥石流流速对泥石流防治工程的安全运行有着至关重要的作用,防治工程在使用过程中面临着严重的泥石流破坏^[1],以调控动能为目的的新型工程结构通过降低泥石流流速,能够保证防治工程的安全运行^[2-4]。现有的泥石流断面平均流速的计算公式可分为4类:弯道超高公式^[5-6]、基于量纲分析的经验公式^[7-9]、基于运动模型的半经验公式^[10-11]和改进的曼宁公式^[9,12-15]。弯道超高公式的参数均为几何参数,容易获得,但公式中的修正系数的取值存在争议^[11,15-16];基于量纲分析的经验公式多以水力半径、沟床比降和特征粒径为主要参数^[7-9,17];基于运动模型的半经验公式以特定的运动模型为基础推导而得,其中的运动模型包括牛顿黏性流模型、层流状态下的牛顿流体和 Bagnold 的膨胀理论,这类公式的关键参数不易获取,并且所使用的运动模型存在争议,实用性不大^[18];改进的曼宁公式多集中于对糙率系数进行修正,常依据观测数据进行曼宁糙率系数 n 的率定,此类公式具有较好的实用性^[19]。

曼宁糙率系数原本是衡量河床及边壁形状和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,而泥石流大多为层流或接近层流,因此曼宁公式并不适用于泥石流流速的计算^[8,13]。但是,在找到更好的计算理论之前,改进的曼宁公式依然是工程实践中计算泥石流流速最实用的方法^[19]。因此,丰富和完善曼宁糙率系数内涵和计算方法对工程实践依然具有意义。现有的研究普遍认为曼宁糙率系数是泥石流运动过程中阻力因素的综合体现,既包括外部阻力因素,也包括内部阻力因素^[9,13,19]。外部阻力因素主要包括泥石流沟道形状、过流断面形态和不规则断面;内部阻力因素包括泥石流的泥深、流量、含沙量和固体颗粒物质组成等^[13]。泥石流物质组成复杂,在研究中可将其分为2部分:粗颗粒和浆体。泥石流浆体黏度是表征泥石流流变性质的一个重要参数,泥石流浆体黏度可以影响泥石流运动过程中浆体黏性剪切力和粗颗粒间的碰撞频率^[19],是泥石流糙率系数的重要影响因素。

为研究泥石流糙率系数与浆体黏度之间的定量关系,本文通过分析云南蒋家沟实测数据,在已有的泥石流糙率系数经验公式的基础上,通过回归分析获得考虑浆体黏度的泥石流糙率系数计算公式,并

讨论浆体黏度对泥石流糙率系数的影响。基于上述考虑浆体黏度的泥石流糙率系数计算公式,改进了现有泥石流流速公式在计算浆体黏度较高的泥石流流速中的不足,得到了考虑浆体黏度的泥石流流速计算公式。该公式属于改进的曼宁公式,在其他沟道的应用中具有一定的局限性^[19]。最后,用云南蒋家沟1974年和1982年的观测数据对改进后的流速经验公式进行验证。

2 蒋家沟泥石流糙率系数确定方法

泥石流糙率系数是反映泥石流内、外阻力的综合参数,其取值主要由泥石流的综合阻力决定。崔鹏等^[19]建立了综合阻力模型,即

$$S_r = S_f + S_{cf} + S_{cc} + S_e \quad (1)$$

式中: S_r 为泥石流综合阻力; S_f 为泥石流浆体阻力; S_{cf} 为粗颗粒间的接触摩擦应力; S_{cc} 为粗颗粒间的碰撞应力; S_e 为由边壁引起的外部综合阻力。

泥石流浆体阻力 S_f 包括屈服应力和黏性剪切力,泥石流运动时所受的切应力 τ 的表达式为

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

式中: τ_B 为泥石流浆体的屈服应力; η 为泥石流浆体黏度; $\frac{\partial u}{\partial z}$ 为泥石流运动的速度剪切率。

浆体黏度的增加使泥石流浆体阻力增加,宏观表现为运动阻力的增加。粗颗粒间的碰撞应力 S_{cc} 也受浆体黏度的影响,浆体黏度的增大具有减小颗粒间碰撞频率的作用。综上所述,浆体黏度是影响综合阻力的重要参数。但是现有的研究中(表1)并没有考虑浆体黏度对蒋家沟泥石流糙率系数的影响。

浆体黏度对泥石流糙率系数的影响是复杂的,现有的理论基础还不足以清晰地表征浆体黏度对泥石流糙率系数的影响机制。但是,浆体黏度在宏观上对泥石流糙率系数的影响是可以研究的。在已有的泥石流糙率系数表达式中引入修正系数 k (k 的取值依赖于浆体黏度),用于研究浆体黏度和泥石流糙率系数在宏观上的统计学关系。由于观测数据的限制,本文可选取的泥石流糙率系数表达式为康志成公式 I 和康志成公式 II (见表1)。康志成公式 I 仅用泥石流深度来计算泥石流糙率系数,忽略了泥石流体中泥沙对糙率系数的影响。康志成公式 II 引入泥沙修正系数,更加全面地考虑了泥石流糙率系数的影响因素。以康志成公式 II 为基础,蒋家沟泥石流综合糙率系数 n 可以表示为

表 1 现有蒋家沟泥石流糙率系数 n 的计算公式Table 1 Existing formulae for calculating roughness coefficient n of debris-flow at Jiangjia Ravine

公式名称(年份)	公式表达式	参数含义
康志成公式 I (1985) [9]	$\frac{1}{n} = 28.5H^{-0.34}$	H 为泥深(m)
康志成公式 II (1985) [9]	$\frac{1}{n} = k \frac{75H^{-0.425}}{\sqrt{1+\gamma_H\Phi_C}}$	$\Phi_C = \frac{\gamma_C-1}{\gamma_H-\gamma_C}$ γ_C 为泥石流重度, γ_H 为泥石流固体物质重度
胡凯衡公式(2013) [12]	$\frac{1}{n} = 8.94H^{-0.52}B^{0.35}$	B 为泥面宽(m)
朱兴华公式(2013) [13]	$\frac{1}{n} = 0.103 \left(\frac{d_{84}}{R} \right) 0.93R^{\frac{1}{6}} + 0.044 2 \left(\frac{Hd_{16}}{d_{50}d_{50}} SI \right)^{0.3}$	d_s 为特征粒径 R 为泥石流过流断面水力半径(m), S 为体积比含沙量 I 为沟床比降

$$\frac{1}{n} = k \frac{75H^{-0.425}}{\sqrt{1+\gamma_H\Phi_C}} \quad (3)$$

式中 k 为康志成公式 II 的泥石流糙率系数的修正系数。

根据曼宁公式 泥石流综合糙率系数可表示为

$$\frac{1}{n} = \frac{v}{R^{2/3}I^{1/2}} \quad (4)$$

式中 v 为泥石流断面平均流速(m/s)。本文采用的观测数据来源于蒋家沟, 沟道横断面宽浅 [20], 水力半径 R 可近似取值为 $H^{[12]}$ 。

为了研究浆体黏度对泥石流综合糙率的影响, 本文假设式(3)中的修正系数 k 为泥石流浆体相对黏度 μ 的函数, 即 $k = f(\mu)$, 其中 $\mu = \frac{\eta}{\mu_0}$, η 为浆体黏度(Pa · s), μ_0 为水的黏度(Pa · s) [21]。联立式(3)、式(4)可得修正系数 k 的表达式为

$$k = f(\mu) = \frac{v\sqrt{1+\gamma_H\Phi_C}}{75H^{0.242}I^{1/2}} \quad (5)$$

选取云南省昆明市东川区蒋家沟于 1975 年观测的包含泥石流浆体粒径信息的泥石流动力学数据共 32 组 [22], 将流速、泥深、密度等泥石流动力学参数代入式(5), 从而得到修正系数 k 的值, 如表 2 所示。泥石流中的固液分界粒径会随泥石流的物质组成发生变化 [23], 本文借用前人的研究方法, 取 2 mm 以下的细颗粒物与水组成的混合浆体视为泥石流浆体 [14]。泥石流浆体黏度的主要影响因素是颗粒组合特征和固体体积浓度。王裕宜等 [14] 针对蒋家沟泥石流浆体黏度做了大量的统计研究, 得到了泥石流浆体黏度经验公式, 即

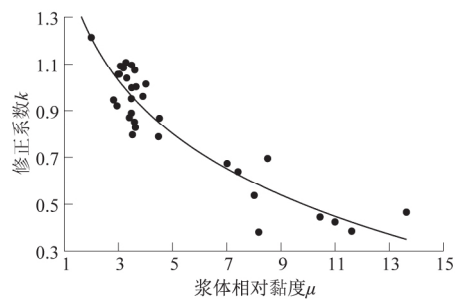
$$\eta = 1.42 \times 10^{-4} e^{17.98C_v} \quad (6)$$

式中 C_v 为泥石流浆体固体体积浓度。

根据式(6)得到相应的泥石流浆体黏度, 从而得到泥石流浆体相对黏度 μ (表 2), 建立 $\mu-k$ 散点图

(图 1), 并拟合出经验关系曲线, 即

$$k = f(\mu) = -0.447 \ln \mu + 1.52, \quad R^2 = 0.86 \quad (7)$$

图 1 蒋家沟泥石流 $\mu-k$ 的关系Fig.1 Relation between μ and k of debris flow at Jiangjia Ravine

联立式(3)、式(7)得到基于蒋家沟观测数据的泥石流综合糙率系数的经验公式, 即

$$\frac{1}{n} = (-33.525 \ln \mu + 114) \frac{H^{-0.425}}{\sqrt{1+\gamma_H\Phi_C}} \quad (8)$$

由图 1 可知, 康志成公式 II 的糙率系数公式的修正系数 k 随浆体相对黏度 μ 的增大而减小, 说明随着泥石流浆体相对黏度 μ 的增大, 泥石流综合糙率系数 n 增大, 即泥石流浆体黏度的增大在宏观上会引起泥石流综合阻力增大。

3 蒋家沟泥石流断面平均流速计算方法的改进

由图 1 可以看出在泥石流浆体相对黏度 μ 较小 ($\mu < 5$) 时, 康志成公式 II 的糙率系数公式的修正值 k 主要集中在 1.0 附近, 说明对于浆体相对黏度 μ 较小的泥石流, 康志成公式 II 有较好的适用性。但是, 当泥石流浆体相对黏度 μ 较大 ($\mu > 7$) 时, 康志成公式 II 的糙率系数公式的修正值 k 集中在 0.5 左右, 最小可以达到 0.4 左右, 这使得泥石流流速的计

表 2 1975 年蒋家沟泥石流观测站具有粒径信息的观测数据

Table 2 Observational data containing particle size information at Jiangjia Ravine in 1975

序号	观测日期	泥深 H/m	沟床比降	泥石流密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	糙率修正 系数 k	浆体固体 体积浓度 C_v	浆体相对黏度 μ	平均流速 $v_{\text{观测}}/(m \cdot s^{-1})$
1	1975-06-11	3.72	0.066	2 206	0.921	0.169	2.950	9.15
2	1975-06-11	2.75	0.066	2 210	1.040	0.175	3.309	9.56
3	1975-06-11	1.70	0.066	2 190	0.890	0.178	3.480	7.45
4	1975-06-11	2.10	0.066	2 202	0.961	0.184	3.907	8.36
5	1975-06-11	1.60	0.066	2 221	1.014	0.186	4.017	8.08
6	1975-06-11	1.30	0.066	2 202	1.056	0.169	2.989	8.17
7	1975-06-11	2.20	0.066	2 292	1.213	0.147	2.002	9.56
8	1975-06-11	2.10	0.066	2 213	1.091	0.171	3.080	9.37
9	1975-07-05	1.40	0.063	1 947	0.788	0.192	4.484	7.81
10	1975-07-22	2.10	0.063	2 211	1.106	0.175	3.282	9.30
11	1975-08-08	2.04	0.055	2 267	0.946	0.166	2.823	6.90
12	1975-08-08	2.50	0.055	2 220	0.851	0.180	3.598	6.90
13	1975-08-08	2.26	0.055	2 213	0.827	0.180	3.628	6.60
14	1975-08-08	0.65	0.055	2 236	0.871	0.177	3.404	5.00
15	1975-08-08	1.22	0.055	2 208	0.998	0.178	3.490	6.90
16	1975-08-08	1.68	0.055	2 276	1.083	0.173	3.188	7.45
17	1975-08-08	1.07	0.055	2 285	0.951	0.178	3.481	5.80
18	1975-08-08	1.61	0.055	2 250	1.095	0.178	3.494	7.70
19	1975-08-08	1.77	0.055	2 239	1.056	0.170	3.036	7.70
20	1975-08-08	1.09	0.055	2 252	1.002	0.181	3.656	6.40
21	1975-08-08	1.20	0.055	2 204	0.868	0.192	4.515	6.00
22	1975-08-08	1.45	0.055	2 246	1.074	0.180	3.609	7.40
23	1975-08-08	1.03	0.055	2 122	0.796	0.179	3.521	5.80
24	1975-08-10	0.70	0.055	1 914	0.695	0.228	8.510	5.60
25	1975-08-10	0.60	0.055	1 988	0.674	0.217	7.013	4.90
26	1975-08-10	0.60	0.055	1 974	0.638	0.220	7.419	4.70
27	1975-08-10	0.60	0.055	1 826	0.467	0.254	13.638	3.90
28	1975-08-11	0.56	0.058	1 797	0.426	0.242	10.998	3.68
29	1975-08-11	0.70	0.058	1 804	0.447	0.239	10.444	4.05
30	1975-08-11	0.93	0.058	1 916	0.537	0.224	8.020	4.75
31	1975-08-11	0.50	0.058	1 701	0.384	0.225	8.186	3.48
32	1975-08-11	0.52	0.058	1 701	0.388	0.245	11.618	3.55

算值与观测值之间存在较大误差。为了解决这一问题,用修正后的泥石流糙率系数公式计算泥石流流速,将式(8)代入曼宁公式,可得到考虑浆体黏度的蒋家沟泥石流断面平均流速公式,即

$$v = (-33.525 \ln \mu + 114) \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma_H \Phi_C}} H^{-0.242} I^{1/2} \quad (9)$$

选取云南省昆明市东川区蒋家沟于 1974 年和 1982 年观测的包含泥石流浆体粒径信息的泥石流流动力学数据共 25 组^[22],将沟床比降、泥深、密度等泥石流流动力学参数分别代入康志成公式 II 和式(9)求出相应的泥石流流速计算值(表 3),并与流速观测值进行对比(图 2)。由图 2 可知,康志成公式 II 和式(9)的计算值和实测值之间的误差大都较好地控制在实测值的±20%以内。基于表 3 中的样本数据,通过 t 分布对事件“流速计算值和实测值之间的误差在实测值的±20%以内”的置信度进行评估

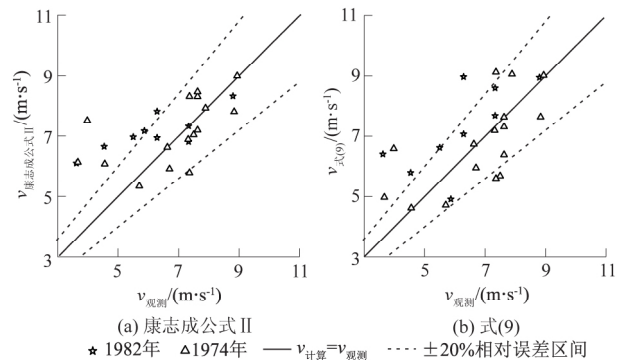


图 2 蒋家沟泥石流流速观测值与计算值对比

Fig.2 Comparison of velocity of debris flow in Jiangjia Ravine between observation and calculation

(表 4),康志成公式 II 的计算值和实测值之间的误差在实测值的±20%以内的置信度为 86.5%,式(9)的计算值和实测值之间的误差在实测值±20%以内的置信度为 98.0%,式(9)对康志成公式 II 具有一定的修正能力,拥有更好的适用性。

表 3 1974 年和 1982 年蒋家沟泥石流观测站具有粒径信息的观测数据及相应的流速计算值
Table 3 Observation data containing particle size information at Jiangjia Ravine in 1974 and 1982
and corresponding calculated results of velocity of debris flow

序号	观测日期	泥深 H/m	沟床比降	泥石流密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	浆体固体 体积浓度 C_v	浆体相对 黏度 μ	平均流速 $v_{\text{观测}}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{\text{康志成公式 II}} /$ $(m \cdot s^{-1})$	$v_{\text{式(9)}} /$ $(m \cdot s^{-1})$
1	1974-06-29	0.17	0.055 0	1 567	0.189	4.221	3.98	7.52	6.59
2	1974-06-29	0.17	0.055 0	1 830	0.197	4.899	3.67	6.14	4.97
3	1974-06-29	0.17	0.055 0	1 841	0.203	5.473	4.56	6.08	4.63
4	1974-06-30	0.40	0.055 0	2 101	0.172	3.156	6.70	5.92	5.96
5	1974-06-30	0.35	0.055 0	2 168	0.188	4.152	5.70	5.34	4.72
6	1974-07-16	0.45	0.060 0	1 995	0.197	4.910	7.50	7.04	5.69
7	1974-07-16	1.70	0.060 0	2 077	0.173	3.178	8.94	8.99	9.02
8	1974-07-16	1.50	0.063 0	2 204	0.176	3.353	8.84	7.81	7.65
9	1974-07-16	2.00	0.063 0	2 210	0.161	2.578	7.36	8.32	9.12
10	1974-07-16	2.00	0.063 0	2 250	0.156	2.331	7.89	7.93	9.06
11	1974-07-16	0.55	0.063 0	2 251	0.177	3.447	7.36	5.80	5.61
12	1974-07-16	1.10	0.063 0	2 074	0.188	4.192	7.63	8.31	7.31
13	1974-07-16	1.00	0.063 0	2 190	0.166	2.784	7.63	7.20	7.64
14	1974-07-16	0.90	0.063 0	2 206	0.168	2.902	7.32	6.89	7.19
15	1974-07-16	0.70	0.063 0	2 186	0.171	3.083	6.63	6.63	6.74
16	1974-07-16	1.27	0.063 0	2 090	0.204	5.546	7.63	8.47	6.39
17	1982-07-08	0.90	0.060 3	2 150	0.212	6.474	5.87	7.17	4.91
18	1982-07-08	1.20	0.060 3	2 240	0.137	1.668	6.29	6.94	8.96
19	1982-07-08	1.80	0.060 3	2 330	0.157	2.399	7.33	6.81	7.69
20	1982-07-08	0.80	0.060 3	2 150	0.179	3.580	5.50	6.97	6.62
21	1982-07-08	2.20	0.060 3	2 210	0.164	2.711	8.80	8.33	8.95
22	1982-07-08	1.50	0.060 3	2 240	0.152	2.170	7.33	7.33	8.60
23	1982-07-08	1.00	0.060 3	2 090	0.185	3.974	6.29	7.82	7.07
24	1982-07-08	0.40	0.062 8	2 135	0.167	2.867	3.62	6.11	6.41
25	1982-07-08	1.20	0.062 8	2 290	0.189	4.269	4.54	6.65	5.80

表 4 事件“流速计算值和实测值之间的误差在实测值的 $\pm 20\%$ 以内”的置信度评估

Table 4 Confidence assessment of the event “error between calculated and observed velocity within $\pm 20\%$ of observed velocity”

公式类型	样本个数	样本均值/ $\%$	样本标准差/ $\%$	抽样平均误差/ $\%$	自由度	误差区间/ $\%$	置信度/ $\%$
康志成公式 II	25	13.66	28.13	5.63	24	[-20 20]	86.5
式(9)	25	8.79	25.92	5.18	24	[-20 20]	98.0

式(9)的建立基于蒋家沟泥石流的观测数据,适用于大重度、高黏度的黏性泥石流。应用式(9)计算泥石流流速时应注意获取泥石流浆体黏度的数据。式(9)是否适用于稀性泥石流、水石流以及高含沙水流的流速计算还有待进一步的研究,还需加强不同区域、不同特征的泥石流的原型观测,获取更多的原型数据对式(9)进行验证和修正。

4 结论与展望

4.1 结论

在糙率系数计算中引入泥石流浆体相对黏度 μ ,建立了基于蒋家沟观测数据的综合糙率系数的定量计算公式,进而提出了基于曼宁公式和考虑浆体黏度的泥石流断面平均流速计算公式。根据对蒋家沟泥石流的观测数据的分析,所得结论如下:

(1) 浆体黏度同时具备增阻和减阻的作用,增阻作用主要体现在泥石流浆体黏性剪切力的增加作用,减阻作用主要体现在粗颗粒间碰撞频率的减小

作用。在宏观上,泥石流浆体黏度的增大造成泥石流综合糙率系数增大。

(2) 考虑浆体黏度的蒋家沟泥石流流速计算公式改进了现有泥石流流速计算公式在计算浆体相对黏度 μ 较大($\mu > 7$)的泥石流流速时的不足。该公式适用于计算黏性泥石流的流速,对于其他类型泥石流的实用性还有待更多观测数据的验证和修正。

4.2 展望

泥石流的流速计算公式不仅可以用于计算泥石流流速,还可为泥石流的增阻消能方法提供指导。现有的泥石流增阻消能方法主要从沟床粗糙程度着手,如在排导槽中加设肋槛、梯-潭结构等。未来的增阻消能方法可以从改变泥石流流体性质着手,采用在泥石流流体中投放增黏剂等方法增加泥石流综合糙率系数。这需要进一步研究泥石流流体性质对泥石流流速的影响机制。

参考文献:

[1] CHEN J G, CHEN X Q, TAO W, et al. Types and Cau-

- ses of Debris Flow Damage to Drainage Channels in the Wenchuan Earthquake Area [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(6): 1406-1419.
- [2] CHEN J, CHEN X, LI Y, *et al.* An Experimental Study of Dilute Debris Flow Characteristics in a Drainage Channel with an Energy Dissipation Structure [J]. *Engineering Geology*, 2015, 193: 224-230.
- [3] CHEN X Q, CHEN J G, ZHAO W Y, *et al.* Characteristics of a Debris-Flow Drainage Channel with a Step-Pool Configuration [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 143(9), doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001352.
- [4] WANG T, CHEN X Q, LI K, *et al.* Experimental Study of Viscous Debris Flow Characteristics in Drainage Channel with Oblique Symmetrical Sills [J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 55-62.
- [5] CHOW T V. *Open-channel Hydraulics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1959: 680.
- [6] AULITZKY H. The Debris Flows of Austria [J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1989, 40(1): 5-13.
- [7] JULIEN P Y, PARIS A. Mean Velocity of Mudflows and Debris Flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136(9): 676-679.
- [8] 吴积善. 泥石流流态及流速计算 [C] // 中国科学院成都地理研究所. 泥石流论文集(1). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981: 79-86.
- [9] 康志成. 云南东川蒋家沟粘性泥石流流速分析 [C] // 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第4号. 北京: 科学出版社, 1985: 104-108.
- [10] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 170-180.
- [11] HUNGR O, MORGAN G C, KELLERHALS R. Quantitative Analysis of Debris Torrent Hazards for Design of Remedial Measures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(4): 663-677.
- [12] HU K H, TIAN M, LI Y. Influence of Flow Width on Mean Velocity of Debris Flows in Wide Open Channel [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(1): 65-69.
- [13] 朱兴华, 崔鹏, 唐金波, 等. 粘性泥石流流速计算方法 [J]. *泥沙研究*, 2013(3): 59-64.
- [14] 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等. 粘性泥石流流体的应力应变特性和流速参数的确定 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(1): 9-13.
- [15] BULMER M H, BARNOUIN-JHA O S, PEITERSON M N, *et al.* An Empirical Approach to Studying Debris Flows: Implications for Planetary Modeling Studies [J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2002, 107(E5): 9-1-9-14.
- [16] CHEN C-L. Comprehensive Review of Debris Flow Modeling Concepts in Japan [M] // COSTA J E, WIECZOREK G F. *Reviews in Engineering Geology, Vol VII. Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*. USA: The Geological Society of America, Boulder, CO, 1987: 13-29.
- [17] YANG H J, WEI F Q, HU K H. Mean Velocity Estimation of Viscous Debris Flows [J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(4): 771-778.
- [18] 蒋树, 文宝萍. 国内外泥石流活动关键指标估算方法之比较 [J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(3): 86-96.
- [19] 崔鹏, 唐金波, 林鹏智. 泥石流运动阻力特性及其研究进展 [J]. *工程科学与技术*, 2016, 48(3): 1-11.
- [20] 魏丽, 胡凯衡, 黎晓宇, 等. 蒋家沟泥石流沟道年际冲淤变化特征分析 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(9): 57-62.
- [21] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 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, 1987.
- [22] 康志成, 崔鹏, 韦方强, 等. 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: 254-255.
- [23] 费祥俊, 朱平一. 泥石流的粘性及其确定方法 [J]. *铁道工程学报*, 1986(4): 9-16.

(编辑: 黄玲)

(上接第55页)

- [2] 邓玉梅. 淮河防洪存在的问题与对策 [J]. *中国减灾*, 1998, 8(2): 1-4.
- [3] 庞欣欣. 淮河流域降水集中度和集中指数年际变化分析 [J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(9): 43-47.
- [4] 荣艳淑, 王文, 王鹏, 等. 淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1): 1-8.
- [5] 尹东屏, 沈树勤, 曾明剑, 等. 淮河下游暴雨和非暴雨天气特征分析 [J]. *气象科技*, 2005, 33(4): 324-329.
- [6] 叶金印, 黄勇, 张春莉, 等. 近50年淮河流域气候变化时空特征分析 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 84-91.
- [7] 张领见, 杨军. 科学调度减轻淮河洪灾 [J]. *人民长江*, 2008, 39(14): 13-15.
- [8] 姜健俊. 治淮工程防洪减灾效益分析 [J]. *治淮*, 2016(2): 14-15.
- [9] 徐伟, 刘茂, 杨杰, 等. 基于HEC-RAS的淮河南段洪水漫顶风险分析 [J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(7): 13-18.
- [10] 何典灿, 周建中, 江炎生, 等. 基于MIKE的杜家台洪道行洪能力研究 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(9): 52-56, 78.
- [11] 江苏省地方志编纂委员会. *江苏省志·水利志* [M]. 南京: 江苏古籍出版社, 2001.
- [12] GB/T 22482-2008, *水文情报预报规范* [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] GB50179-2015, *河流流量测验规范* [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [14] SL247-2012, *水文资料整编规范* [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

(编辑: 黄玲)