

文章编号: 1008-2786-(2017)6-842-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000285

黏性泥石流冲起爬高计算

唐金波^{1,2}, 胡凯衡^{1*}, 苏凤环¹

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 四川大学 水力学与山区河流保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘 要: 泥石流冲起爬高是泥石流防治工程设计中的一个重要参数。黏性泥石流是一种特殊的固、液两相流体, 固、液两相间的相互作用很弱, 流体整体性表现为粘塑性流体。在运动过程中, 由于黏粒含量高, 液相浆体表现出非常大的宏观黏性, 而浆体的屈服应力和固相颗粒间的摩擦作用使得泥石流表现出很强的塑性特性。本文以黏性泥石流作为研究对象, 考虑泥石流龙头的运动平衡方程, 建立了一个简单的黏性泥石流运动爬高的物理模型。结合运动平衡方程的解和障碍物的几何特性, 推导了黏性泥石流的冲起爬高的计算公式。参数敏感性分析表明, 泥石流的冲起爬高随着障碍物迎面坡度和泥石流流速的增加而增加, 随着障碍物坡面的摩擦系数和泥石流密度的增加为减小, 而泥石流的泥深、液相浆体的屈服应力及动力粘性对泥石流的爬高影响较小。进一步的分析表明, 黏性泥石流冲起爬高的计算公 $H_p = aV^2/2g$ 主中的动能修正系数 a 与泥石流的密度及障碍物的迎面坡度和摩擦系数有关, 可表示为 $a = \sin \theta / [\sin \theta + C_s(\rho_s - \rho_f) / \rho \cos \theta \tan \varphi]$ 。利用水槽实验和云南蒋家沟野外采集的泥石流动力学参数和爬高数据, 验证了本文提出的黏性泥石流冲起爬高的计算公式的可靠性。

关键词: 黏性泥石流; 冲起爬高; 水槽实验; 蒋家沟

中图分类号: P642. 22

文献标志码: A

泥石流行进中若遇到障碍物或沟槽突然束窄, 动能将转化为势能, 形成冲起爬高现象^[1-3] (图 1), 可达十几米高^[4], 常常破坏岸边的建筑物和沟道工程。Takahashi 等^[5]运用动量平衡方程推导了水石流运动的爬高计算公式。Hung^等^[6]基于 Voellmy 模型研究了雪崩的冲起爬高, 发现用 Voellmy 模型计算的爬高低估了雪崩的实际爬高值。Chu 等^[7]比较了 Takahashi 和 Voellmy 的公式, 表明了 Takahashi 公式的计算结果更接近于水槽实验的数据。然而, 当泥石流来流方向与障碍物坡面垂直时, Takahashi 计算公式得到的爬高值为 0, 这与实际不符。

康志成基于云南蒋家沟的长期野外观测数据, 提出了泥石流冲起爬高的经验计算公式^[8]:

$$H_p = \frac{aV^2}{2g} \quad (1)$$

式中, H_p 为泥石流冲起爬高, V 为泥石流流速, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度, a 为动能修正系数, 根据云南蒋家沟实际观测, 取 $a = 1.6$ 。王继康^[9]针对铁路沿线泥石流对公式 (1) 给出的修正系数为 $a = 1.05 - 1.1$ 。黄勇^[10]针对天山公路泥石流冲起爬高的泥痕实测资料发现对于黏性泥石流的冲起爬高, 铁道部的计算公式更为吻合, 而对于稀性泥石流其

收稿日期(Received date): 2016-09-23; 改回日期(Accepted date): 2016-10-11

基金项目(Foundation item): 中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)项目(KFJ-EW-ST-094); 国家自然科学基金青年基金项目(41601011); 四川省科技支撑项目(2014SZ0163)资助[Technology Service Network Initiative of CAS(KFJ-EW-ST-094); National Natural Science Foundation of China(41601011); Sichuan Province Science and Technology Support Project(2014SZ0163).]

作者简介(Biography): 唐金波(1986-), 男, 云南泸西人, 助理研究员, 在职博士研究生, 从事泥石流运动机理及数值模拟研究[Tang Jinbo(1986-), male, born in Luxi, Yunnan, research assistant, Ph. D candidate, mainly engaged in dynamical mechanics and numerical simulation of debris flow.] E-mail: jinbotang@imde.ac.cn

* 通信作者(Corresponding author): 胡凯衡(1975-), 男, 江西瑞金人, 博士, 研究员, 主要从事泥石流减灾理论与技术、泥石流动力学过程与数值模拟研究[Hu Kaiheng, male, born in Ruijin, Jiangxi Province, Ph. D, professor, mainly engaged in mitigation theory and technology of debris flow and dynamical mechanics and numerical simulation of debris flow.] E-mail: khhu@imde.ac.cn.

图1 泥石流爬高现象^[3]Fig.1 Photo of debris flow run-up^[3]

计算结果偏高。近年来随着流体力学数值模拟的发展,泥石流数值模拟得到了大量的运用^[12,13], Mancarella 等^[14]基于 Savage-Hutter 发展的浅水模型^[15],运用光滑速度算法计算了泥石流的冲起爬高,发现泥石流冲起爬高随着障碍物坡面的摩擦系数的增加而降低。然而,这种基于深度平均的浅水模型所计算的爬高值高估了实际的爬高值。在实际的工程应用中,泥石流的冲起爬高的计算通常采用的是公式(1),为方便起见我们将其称为势能公式。这个公式非常简单,需要获取的动力学参数少,便于工程应用。但是,相应的计算误差也较大^[14]。

泥石流与障碍物的相互作用非常复杂, Armanini 通过实验研究发现当泥石流撞击到障碍物时产生了两种运动,即向上游运动的反射波和向上的喷射波,后者产生泥石流的冲起爬高现象^[17]。也就是说泥石流并没有完全将动能转化为势能。因此公式(1)中的 a 应小于1,这就与云南蒋家沟实际观测资料,取 $a=1.6$ 产生矛盾。本文从泥石流两相流特性出发基于黏性泥石流的运动特性,通过理论分析推导了黏性泥石流的爬高计算公式,对公式中的动力学参数进行了敏感性分析,最后利用水槽实验数据及野外观测数据对本文提出的公式进行了验证。

1 黏性泥石流运动爬高公式的推导

泥石流作为一种特殊的固、液两相流体,其运动特性非常复杂。泥石流运动过程中,固、液两相的运动速度并不相等,导致固、液两相间存在相间作用力,比如拖曳力等^[18]。尽管相间作用力存在一定的消能作用,但 Iverson 指出其相间速度差相对于泥石

流的整体运动速度很小^[19]。因此,在建立泥石流的运动模型时,可以忽略其相间速度的影响。对于黏性泥石流,由于液相浆体中的细颗粒含量较高,液相浆体表现为黏塑性流体性质,可以用 Bingham 流体进行描述^[19],即 $S_f = \tau_B + 3\eta \frac{v}{H}$ 。而固相颗粒间主要为颗粒的摩擦 $S_s = C_s(\rho_s - \rho_f)gH \cos \theta \tan \varphi$,其中 v 、 H 、 ρ 分别为泥石流流速、泥深及密度, C_s 为固相颗粒的体积分数, φ 为固相颗粒与障碍物坡面的摩擦角, ρ_s 为固相颗粒的密度, τ_B 、 η 、 ρ_f 分别为泥石流浆体的屈服应力、动力黏性系数及密度。另外,如图2所示,泥石流在爬升过程中,重力也是泥石流爬升的阻力。

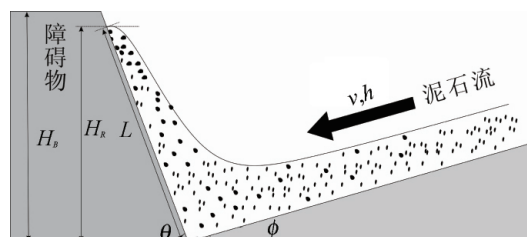


图2 泥石流运动爬高示意图

Fig.2 Schematic diagram of debris flow run-up

假定泥石流爬升过程中,龙头的深度保持不变。因此建立运动平衡方程为

$$\rho \frac{d(Hv)}{dt} = -\rho g H \sin \theta - (1 - C_s) \left(\tau_B + 3\eta \frac{v}{H} \right) - C_s (\rho_s - \rho_f) g H \cos \theta \tan \varphi \quad (2)$$

将此方程简化为

$$\frac{dv}{dt} = \Phi - \Psi v \quad (3)$$

其中

$$\Phi = -g \sin \theta - (1 - C_s) \frac{\tau_B}{\rho H} - C_s \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho} g \cos \theta \tan \varphi \quad (4)$$

$$\Psi = (1 - C_s) \frac{3\eta}{\rho H^2} \quad (5)$$

设泥石流在坡面上运动的起始速度为 v_0 , 因此求解方程(5)得泥石流在坡面上爬升的速度为

$$v = \frac{\Phi}{\Psi} [1 - \exp(-\Psi t)] + v_0 \exp(-\Psi t) \quad (6)$$

当泥石流爬升至最高处时,其龙头的运动速度变为零。令 $v=0$ 得到

$$0 = \frac{\Phi}{\Psi} [1 - \exp(-\Psi T)] + v_0 \exp(-\Psi T) \quad (7)$$

因此求解得到泥石流在坡面上爬升过程中的运动时间为

$$T = \frac{1}{\Psi} \ln \left(\frac{\Phi - v_0 \Psi}{\Phi} \right)$$

进而可以得到泥石流在坡面上运动的距离为

$$L = \int_0^T v(t) dt = \frac{\Phi}{\Psi^2} \ln \left(\frac{\Phi - v_0 \Psi}{\Phi} \right) + \frac{v_0}{\Psi} \quad (8)$$

由此得到黏性泥石流运动的爬高为

$$H_R = L \sin \theta \quad (9)$$

2 参数敏感性分析

取 $\tau_B = 10 \text{ Pa}$, $\eta = 0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\varphi = 15^\circ$, $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_f = 1200 \text{ kg/m}^3$, 研究初始速度和障碍物迎面坡度对泥石流爬高的影响。结合公式(10)和

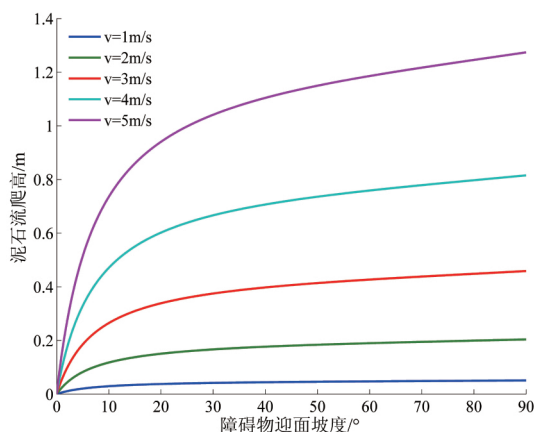
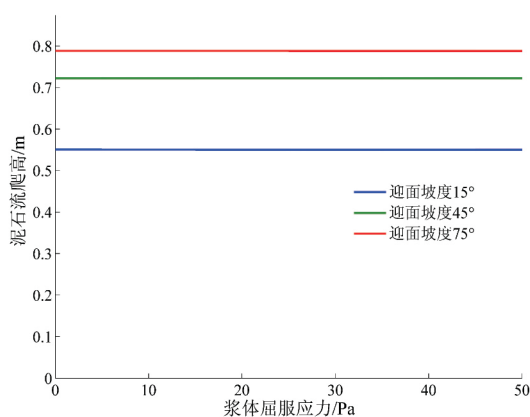


图3 不同流速条件下，泥石流爬高随障碍物坡度的变化

Fig. 3 Variation of debris flow run-up at different slopes of barrier and velocity



(a) 液相浆体屈服应力对泥石流爬高的影响

(a) The influence of yield stress of liquid-slurry on debris flow run-up

(11) 绘制初始速度和障碍物迎面坡度与泥石流爬高的关系图(图3)。可以看出,总体上泥石流的爬高随着障碍物的迎面坡度的增加而增加。但当障碍物迎面坡度小于 20° 时,泥石流的爬高对障碍物的迎面坡度变化较为敏感;当障碍物迎面坡度大于 20° 时,泥石流爬高对障碍物迎面坡度变化的敏感性较弱。另外,从图3还可以看出速度对爬高的影响非常明显。随着泥石流流速的增加,其爬高值迅速变大。

从图4泥石流的泥深对泥石流的爬高的影响很小。从图5可以看出泥石流的浆体的屈服应力及动力黏性系数对泥石流的爬高几乎么有影响,换句话说泥石流流体中的浆体在泥石流运动过程中的作用很小。从图6可以看出障碍物迎面的摩擦系数和泥石流的密度对泥石流爬高的影响相对较大。并且随着障碍物迎面的摩擦系数和泥石流的密度的增加,泥

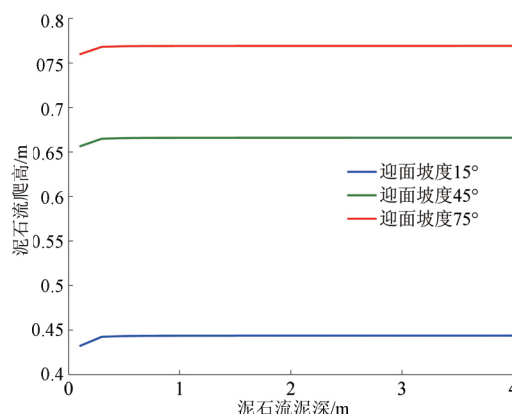
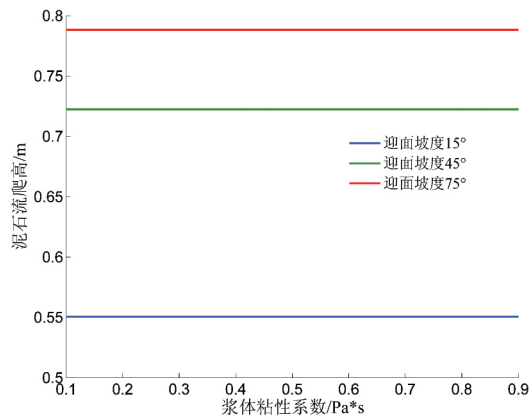


图4 不同障碍物迎面坡度条件下，泥石流泥深对泥石流爬高的影响

Fig. 4 Influence of flow depth on the debris flow run-up at different slopes.

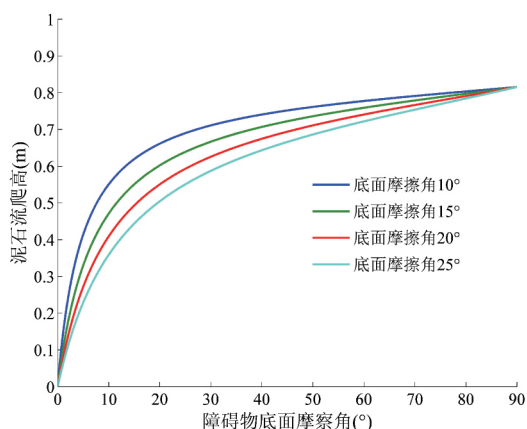


(b) 液相浆体动力黏性对泥石流爬高的影响

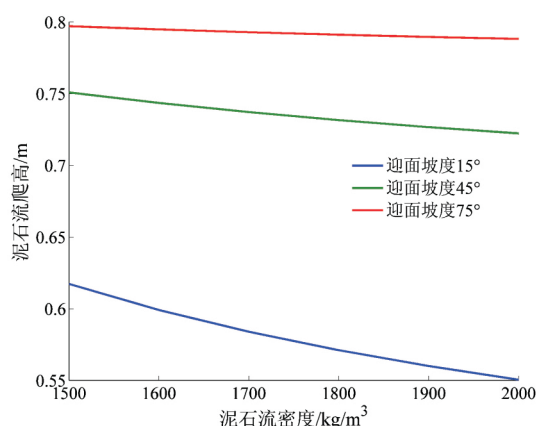
(b) The influence of viscosity of liquid-slurry on debris flow run-up

图5 泥石流液相浆体性质对泥石流爬高的影响

Fig. 5 The influence of properties of liquid-slurry on debris flow run-up



(a) 底面摩擦角对爬高的影响



(b) 泥石流密度对爬高的影响

(a) The influence of friction angle of barrier on run-up of debris flow (b) The influence of density of debris flow on run-up of debris flow

图6 障碍物底面摩擦角及泥石流密度对泥石流爬高的影响

Fig. 6 The influence of friction angle of barrier and density of debris flow on debris flow run-up

石流的爬高呈现出减小的趋势。

因此忽略浆体的阻碍作用,得到

$$\frac{du}{dt} = -g \sin \theta - C_s \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho} g \cos \theta \tan \varphi \quad (10)$$

由此求出泥石流的爬高为

$$H_R = \frac{0.5 \sin \theta u^2}{g \sin \theta + C_s \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho} g \cos \theta \tan \varphi} \quad (11)$$

在公式(13)中,由于泥石流的密度 $\rho = C_s(\rho_s - \rho_f) + \rho_f$,因此在浆体密度 ρ_f 不变的条件下, ρ 与 C_s 具有一一对应的关系。由此可得势能公式(1)中的经验值 a , 可以表示为

$$a = \frac{\sin \theta}{\sin \theta + C_s \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho} \cos \theta \tan \varphi} \quad (12)$$

3 水槽实验及野外观测数据分析

3.1 水槽实验

为验证推导的爬高公式,在中国科学院东川泥石流观测研究站开展了泥石流爬高水槽实验。取云南蒋家沟泥石流堆积物去掉 2 cm 以上粗颗粒作为实验材料,其颗粒级配曲线如图 7。实验水槽长 6 m,宽 0.4 m,高 0.4 m。水槽可变坡度为 7.5°, 10°, 12°。在距离出口 70 cm 处设置了高度分别为 0.4 m 障碍物(图 3)。在水槽底部每 20 cm 作一个标记,摄像机记录泥石流龙头的位置(摄像机每秒拍摄 25 帧照片),用于计算泥石流龙头的流速。在距离障

碍物上游 1.5 m 处,激光泥位计以 30 Hz 的频率记录泥石流的流深过程(图 8)。障碍物上面设置一个刻度尺用于记录泥石流的冲起爬高数据(表 1)。

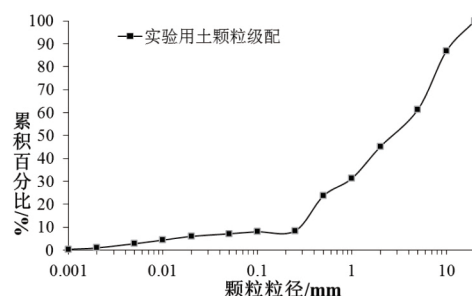


图7 泥石流实验材料的颗粒级配曲线

Fig. 7 Cumulative grain size distribution of material in flume experiments



图8 实验水槽装置、障碍物位置及泥石流爬高

Fig. 8 Experiment setup and measure of debris flow run-up

3.2 野外实测资料

文献 9 中有云南蒋家沟泥石流多年的野外观测

爬高数据(表2)^[8]。但是,只有冲起高度和龙头高

表 1 水槽实验得到的障碍物迎面坡度、
泥石流流动力学参数及爬高数据

Table.1 Slope of barrier, dynamical parameters and
run-up data of debris flow measured during experiments

障碍物迎 面坡度/ $^{\circ}$	龙头流速 /m/s	泥石流密度 /kg/m ³	龙头泥深 /m	龙头爬高 /m
79.7	3.125	2134	0.079	0.770
82.8	3.125	1846	0.065	0.690
77.5	3.750	2002	0.074	0.900
77.5	3.750	1974	0.068	0.890
77.5	3.409	2065	0.08	0.840
77.5	3.409	2184	0.069	0.832
79.7	3.409	2173	0.074	0.870
82.8	2.678	2083	0.072	0.650
77.5	2.884	2061	0.071	0.550
82.8	2.678	1988	0.102	0.630
82.8	3.409	1796	0.129	0.718
79.7	3.409	1878	0.072	0.580

表 2 野外测量的泥石流流动力学参数及爬高高度

Table.2 Dynamical parameters and debris flow run-up measured in field

爬高高度/m	龙头高度/m	速度/ m/s
2.50	0.70	5.53
4.00	0.79	7.00
3.00	0.94	6.06
3.50	1.04	6.55
4.50	1.17	7.42
4.00	1.31	7.00
5.00	1.39	7.83
7.00	1.45	9.26
7.60	1.64	9.65
8.20	1.81	10.02

度数据。康志成运用势能公式拟合得到了 α 为1.6。因此,可以利用势能公式(1)大致反算泥石流的流速如表2。蒋家沟流域野外自然边坡的坡度约为 $30\sim 35^{\circ}$ 之间^[20],公式(11)中取 $\theta=30^{\circ}$ 。由于蒋家沟泥石流为典型的黏性泥石流,其密度通常在 $1800\sim 2300\text{ kg/m}^3$ 之间^[21],为了便于计算,取其平均为 2050 kg/m^3 。

将测量的泥石流流动力学参数带入公式(11)中,计算出泥石流的理论爬高值。进一步于与水槽实验及蒋家沟野外采集的数据进行比较,如图9所示。其结果表明公式(11)预测的泥石流爬高值与实际

测量得到的爬高值几乎保持一致,能够满足工程设计要求。

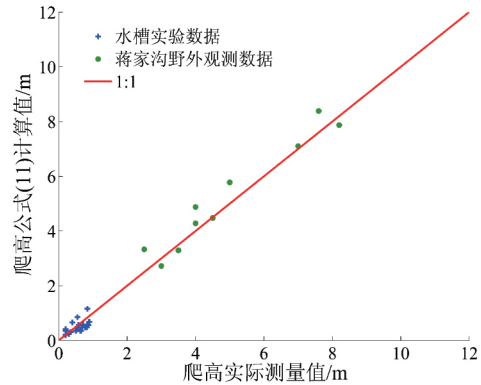


图 9 泥石流冲起爬高的测量值与计算值的比较

Fig.9 Comparison of the calculated
and measured debris flow run-up

4 结论

泥石流在运动过程中,遇到障碍物时,由于惯性作用会产生冲起爬高现象,可能会对沟道两岸的工农业生产及居民生活带来了极为不利的影响。本文基于泥石流运动的两相流特性,针对黏性泥石流,推导了泥石流运动爬高的计算公式。理论分析研究表明,影响泥石流爬高的因素主要有泥石流的流速和密度,以及障碍物的迎面坡度及其摩擦系数。泥石流的爬高值随着泥石流流速及障碍物迎面坡度的增加而增加,随着泥石流密度及障碍物迎面的摩擦系数的增加而减小。泥石流液相浆体的流动力学参数,即屈服应力及动力黏性对泥石流运动爬高的影响非常小,因此在分析泥石流的爬高时,其液相浆体的阻碍作用可以忽略。除此之外,泥石流的流深对泥石流的爬高也没有明显的影响。进一步的研究表明,黏性泥石流冲起爬高的计算公式 $H_p = aV^2/2g$ 主中的动能修正系数 a 可表示为 $a = \sin \theta / [\sin \theta + C_s (\rho_s - \rho_f) / \rho \cos \theta \tan \varphi]$ 。水槽实验和云南蒋家沟野外采集的泥石流流动力学参数和爬高数据,验证了本文提出的黏性泥石流冲起爬高的计算公式的可靠性。

参考文献(References)

- [1] NG C. W. W., ChOI C. E., SONG D, et al. Physical modeling of baffles influence on landslide debris mobility [J]. Landslides, 2014: 1-18.
- [2] 康志成,李焯芬,马蔼乃,罗锦添. 中国泥石流研究 [M]. 北京: 科学出版社. 2004: 184-185. [KANG Z. C., LEE C. F. et al.,

- The research of debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 184 – 185.]
- [6] 康志成. 中国泥石流灾害与防治 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 49. [KANG Z. C., Debris flow hazards and their control in china [M], Beijing: Science Press, 1996: 49.]
- [7] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理及其灾害防治 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1 – 11. [FEI X. J., SHU A. P., Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University press, 2004: 1 – 11.]
- [8] TAKAHASHI T. and YOSHIDA, H., 1979. Study on the deposition of debris flows, Part 1—Deposition due to abrupt change of bed slope [C]. Annuals, Disaster Prevention Research institute, Kyoto University, Japan, 22 B – 2: 20 – 28.
- [9] HUNGR O., and MCCLUNG, D. M. 1987. An equation for calculating snow avalanche run-up against barriers [C]. In Avalanche Formation, Movement and Effects. Proceeding, Davos Symposium, 1986. International Association of Hydrological sciences, Publication 162, pp: 605 – 612.
- [10] VOELLMY A. Über die zerstörungskraft von lawinen [J]. 1964: 50: 57.
- [11] CHU T., HILL G., MCCLUNG D. M., et al. Experiments on granular flows to predict avalanche run-up [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(2): 285 – 295.
- [12] 康志成. 云南东川蒋家沟泥石流运动流态特征 [J]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(4). 北京: 科学出版社, 1985, 97 – 107. [KANG Z. C., A velocity analysis of viscous debris flow at Jiangjia gully of Dongchuan in Yunnan [C]. Proceeding of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, Beijing: Science Press, 1985, 97 – 107.]
- [13] 王继康. 泥石流防治工程技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996: 92 – 100. [WANG J. K., Prevention and control engineering for debris flow [M]. Beijing: China Railway Press, 1996: 92 – 100.]
- [14] 黄勇. 天山公路沟谷泥石流运动机理和防治工程设计参数研究 [J]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007. [HUANG Y. Study on movement mechanism and engineering design parameters of gully-shaped debris flow along the Tianshan highway [D]. Urumchi: Xinjiang agricultural university. 2007.]
- [15] DENLINGER R P, IVERSON R M. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 2. Numerical predictions and experimental tests [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2001, 106(B1): 553 – 566.
- [16] ARMANINI A, FRACCAROLLO L, ROSATTI G. Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(5): 993 – 1006.
- [17] MANCARELLA D, HUNGR O. Analysis of run-up of granular avalanches against steep, adverse slopes and protective barriers [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(8): 827 – 841.
- [18] SAVAGE S B, HUTTER K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. Journal of fluid mechanics, 1989, 199: 177 – 215.
- [19] 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.
- [20] ARMANINI A. On the dynamic impact of debris flows [M]. Recent Developments on Debris Flows. Springer Berlin Heidelberg, 1997: 208 – 226.
- [21] 崔鹏, 唐金波, 林鹏智. 泥石流运动阻力特性及其研究进展. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(3): 1 – 11. [CUI P., TANG J. B., LIN P. Z., Study and research progress of resistance character of debris flow [J]. Journal of Sichuan University: Engineering edition, 2016, 48(3): 1 – 11.]
- [22] IVERSON R. M. and DENLINGER R. P., Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, 1, Coulomb mixture theory [J]. Journal of geophysical research, 2001, 106: 537 – 552.
- [23] CUI P, CHEN X, WANG Y, et al. Jiangjia Ravine debris flows in south-western China [M]. Debris-flow hazards and related phenomena. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 565 – 594.

Determination of Run-up of Viscous Debris Flow

TANG Jinbo^{1,2}, HU Kaiheng¹, SU Fenghuan¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Debris flow run-up is one of the key considerations in engineering mitigation design, particularly in the case of viscous debris flow, which usually was considered as granular-liquid two-phase flow. Due to its high clay content, viscous debris flow travels with higher viscosity, usually treated as visco-plastic flow in the modelling. Such plastics behavior of debris flow was ascribed to the interaction result of yield stress of liquid phase and friction

stress between particles. In this study, run-up of viscous debris flow was addressed and a simplified physical model was developed based on momentum equilibrium equation for the debris flow front. The bottom shear stresses consisted of the stress of liquid slurries and was simulated by Bingham model and the friction stress between coarse particles and the surface of barrier. The calculation formula of viscous debris flow run-up was obtained through combining the solution of momentum equation for debris flowfront with the geometric characteristics of the barrier. The sensitivity analysis of the parameters showed that debris flow run-up increased with the increasing of velocity of debris flow and slope of barrier, and decreased with the decreasing of density of debris flow and friction coefficient between coarse particles and the surface of barrier. However, height of debris flow and dynamical parameters of liquid-slurry had less effect on the run-up of debris flow. Therefore, viscous debris flow run-up depended mainly on velocity of debris flow, slope of barrier and friction coefficient between coarse particles and the surface of barrier. Ignoring the resistance due to liquid slurry, the debris flow run-up could be calculated with the model, i. e. $H_p = aV^2/2g$. Furthermore, the coefficient a in the debris flow run-up model, was depends on the density of debris flow, the slope of barrier and friction coefficient between coarse particles and the surface of barrier and can be modeled as $a = \sin \theta / [\sin \theta + C_s(\rho_s - \rho_f) / \rho \cos \theta \tan \varphi]$. The proposed model was verified using experiment data and field measurement at the Jiangjia Gully.

Key words: viscous debris flow; run-up; flume experiment; Jiangjia Gully