

DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2018.02.010

黏性泥石流流速垂向分布试验研究

杨红娟^{1,2}, 韦方强², 胡凯衡², 洪勇²

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都 610041;

2. 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: 黏性泥石流是泥石流中最常见且破坏性最大的一类, 测量其垂向流速分布是检验泥石流运动模型的有效手段。利用泥石流原状堆积物中 10 mm 以下部分模拟黏性泥石流, 开展了 7 组流槽试验, 对冲击力的垂向分布和泥深进行测量, 根据冲击力的垂向分布反算得到流速的垂向分布。结果显示试验中黏性泥石流的流速分布特征与一般流体相似, 且能够通过宾汉模型描述。揭示了通过测量冲击力分析黏性泥石流流速的可行性, 但是研究结论需要通过对天然泥石流的冲击力测量进一步检验。

关键词: 泥石流; 冲击力; 流速; 垂向分布; 流变模型

中图分类号: P642.23 文献标识码: A 文章编号: 0468-155X(2018)02-0061-06

泥石流流速垂向分布是泥石流运动力学的核心研究内容之一, 它关系到泥石流流量、平均流速、冲击力、运动摩擦等重要工程设计参量的计算。黏性泥石流是泥石流中最常见的类型^[1], 因其在坡度较缓的沟道中也能快速运动, 发生时往往具有很大的破坏性, 这使得黏性泥石流流速垂向分布的研究尤为重要。目前的泥石流流速研究大多是对泥石流表面流速和龙头平均流速的研究, 测量手段包括利用雷达测速仪测量表面流速^[2]、通过影像解析法测量表面流速的分布^[3]、利用秒表或根据超声波、地声等信号探测龙头到达两个断面的时刻进而计算平均流速^[4]等。人们根据这些研究建立泥石流平均流速的经验公式^[5-7], 加深了对泥石流动力学特性的认识, 但是相关手段无法用于泥石流内部流速的测量, 因此目前研究中泥石流流速垂向分布的研究较少。目前对泥石流流速垂向分布的研究主要分为两类。一类是利用颗粒在透明介质中的运动模拟泥石流, 通过影像解析颗粒的运动速度得到流速垂向分布, 如陈华勇等^[8]用粒子图像测速技术(PIV)测量玻璃微珠在丙烯酸树脂和乙酸乙酯混合液中的速度场, 研究了稀性泥石流的流速分布。此类研究中所用透明介质均为牛顿体, 泥石流中的泥浆具有较大的屈服应力, 因此这些研究适用于细颗粒含量较低的水石流和稀性泥石流, 不适合黏性泥石流模拟。另一类是根据对泥石流流体性质的假设而建立的运动力学模型推导泥石流流速垂向分布^[9], 如牛顿体模型、碰撞模型、宾汉模型等。泥石流体的性质可根据流变试验确定, 但是流变试验所用材料粒径小(小于 2 mm), 与实际泥石流流体差异较大, 因此泥石流流变模型的适用性需要通过实际观测的流速分布进行验证。由于泥石流冲击力与泥石流流速相关性强且相对容易获取, Yang 等^[10]提出利用泥石流冲击力反算泥石流流速的方法, 并通过泥石流表面流速和表面冲击力的模型试验对该方法进行了验证。该方法克服了影像解析类方法要求介质透明的缺点, 可用于泥石流内部流速的测量。本研究将运用该方法开展黏性泥石流流速垂向分布的研究, 首先进行黏性泥石流运动的流槽试验, 测量泥石流冲击力的垂向分布, 进而根据泥石流流速与冲击力的关系得到黏性泥石流流速垂向分布, 并根据测试结果验证泥石流流变模型。

收稿日期: 2016-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201011); 中科院山地所“青年百人团队”项目(SDSQB-2013-01)

作者简介: 杨红娟(1982-), 女, 河南襄城人, 副研究员, 博士, 主要从事山地灾害基础理论方面研究。E-mail: yanghj@imde.ac.cn

1 试验装置与测量系统

1.1 试验装置

试验采用可变坡钢结构水槽开展黏性泥石流垂向流速分布测试。试验装置如图 1 所示,由四部分构成:泥浆池、水槽、传感器支架、回收池。水槽长 600 cm,宽 30 cm,高 40 cm,水槽坡度可以无级变动。水槽上端连接泥浆池,末端连接回收池,为试验提供物料供应和回收利用。在距离水槽末端 200 cm 位置设立传感器支架,供安装冲击力传感器使用。

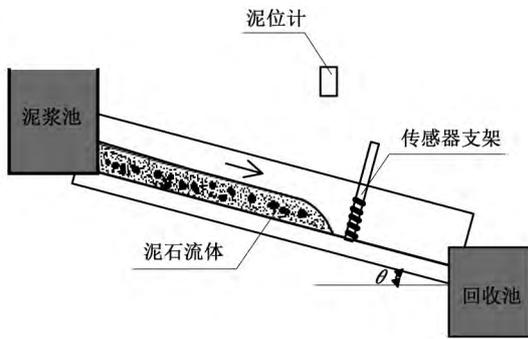


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Diagram of experimental equipment

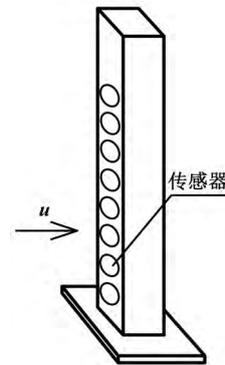


图 2 传感器支架示意

Fig. 2 Diagram of sensor support

1.2 测量系统

测量系统包括两部分:冲击力测量和泥深测量。冲击力测量系统包括冲击力传感器组、数据采集器和计算机。传感器组由 8 个直径 1 cm 的圆形应变式传感器组成。传感器被固定在一个中空支架的迎水面,受力面与支架迎水面位于同一平面,如图 2 所示。8 个传感器的中心分别距离水槽床面 1.4 cm、2.9 cm、4.4 cm、5.9 cm、7.4 cm、8.9 cm、10.4 cm 和 11.9 cm,传感器的数据线从支架上方引出连接到数据采集器。数据采集器由成都中科动态仪器有限公司生产,共有 24 个通道,采样频率为 4 000 Hz。采集器与计算机相连,冲击力数据可在计算机中同步记录和显示。使用激光泥位计测量传感器处泥深变化过程,测量精度为 0.1 cm,采样频率为 30 Hz,安装在传感器前上方。

2 试验材料与试验结果

2.1 试验材料与试验概况

试验材料来自云南东川蒋家沟泥石流原状堆积物,经 10 mm 过筛处理,去除大于 10 mm 的砾石。试验材料颗粒级配曲线见图 3,黏粒、粉砂、砂和砾石所占比例分别为 11%、16%、29% 和 44%。

共开展 7 组冲击力测试,测试时首先将泥石流样品在回收池中充分搅拌,然后放入泥浆池。泥浆池闸门打开后开始采集冲击力和泥深信号,同时用秒表记录泥石流龙头从闸门流动到冲击力测量断面的时间。试验过程中在水槽尾部采集泥石流样品,测量其密度。试验的基本情况列于表 1。根据康志成等^[2]对黏性泥石流的界定和试验的泥石流流体密度,7 组试验的泥石流流体均为黏性泥石流。根据试验中通过秒表测算的龙头到达冲击力测量断面之前的平均流速以及泥位计记录的最大泥深,各组测量结果差异较小,试验重复性较好。

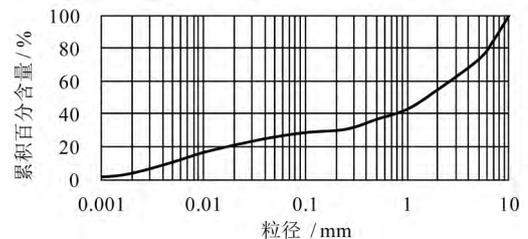


图 3 试验材料颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curve of experimental material

2.2 试验结果

每组试验可以通过测量系统获取泥石流运动过程中的 2 组数据,即冲击力和泥深。其中,冲击力传感器测量值为冲击力,冲击力除以传感器面积得到冲击压强。图 4 显示了其中一组试验获取的泥深和 1.4 cm、4.4 cm、7.4 cm 处的冲击压强过程线。从泥深过程看,流动约持续 6 s,期间泥深先增大后减小,最大值为 10.3 cm。泥石流龙头从侧面观察呈三角形,因此 1.4 cm 处的冲击力传感器首先接触到泥石流流体,冲击压强迅速增加,之后 4.4 cm 和 7.4 cm 处的传感器也依次受到冲击作用。受环境噪音和传感器测量误差的影响,冲击压强数据具有波动性,泥深增加时由于颗粒冲击作用的随机性,这种波动显著增加。图 4 显示泥深较大时,4.4 cm 和 7.4 cm 处的冲击压强水平显著高于 1.4 cm 处,表明底部的泥石流流速最小。泥深较小时,冲击压强主要由静压强构成,1.4 cm 处传感器被泥石流淹没最多,因此测值最大,4.4 cm 处测值接近于 0。这些试验结果为研究泥石流流速垂向分布提供了试验数据支持。

表 1 泥石流冲击力试验概况

Table 1 Results of flume tests

密度/(kg/m ³)	水槽倾角/°	最大泥深/cm	龙头平均流速/(m/s)
2106	8.3	10.1	2.37
2080	8.3	10.4	2.54
2079	8.3	10.3	2.49
2099	8.3	10.4	2.59
2101	8.3	10.5	2.45
2089	8.3	9.9	2.35
2111	8.3	10.2	2.33

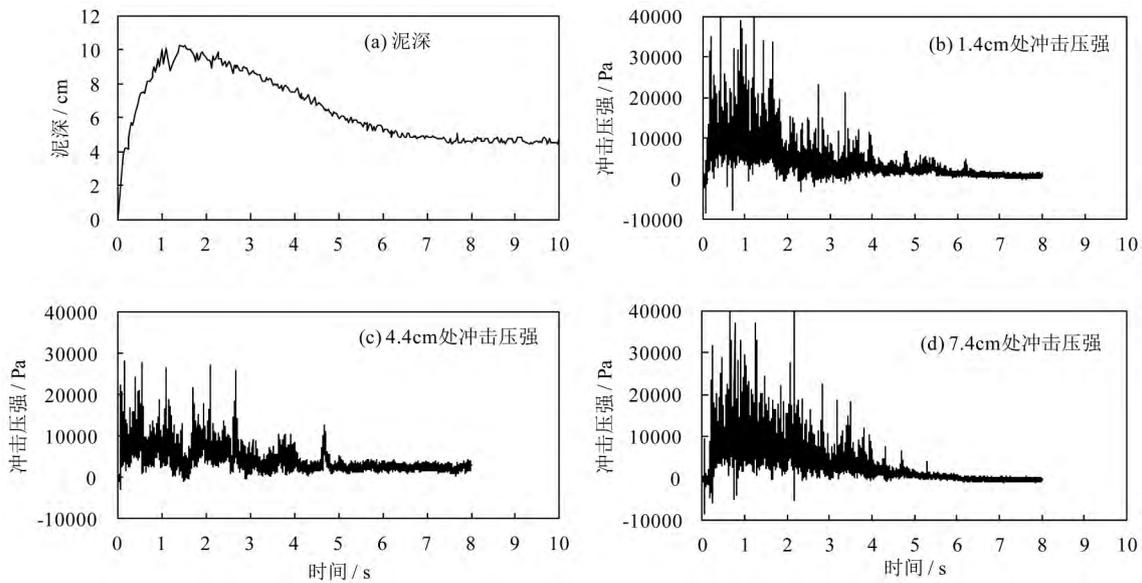


图 4 某组试验的泥深和几个高度处的冲击压强过程

Fig. 4 Processes of debris flow depth and pressure

3 黏性泥石流流速垂向分布分析

3.1 泥石流流速的计算方法

Yang 等^[10]开展的试验研究表明,传感器所测泥石流冲击压强包括静压强 p_s 和动压强 p_k 两部分, p_s 可根据静水压公式计算

$$p_s = \rho_c g (h - z) \cos\theta \tag{1}$$

式中 ρ_c 为泥石流流体密度 kg/m^3 ; g 为重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; h 为泥深 m ; z 为传感器中心距离槽底的高度 m ; θ 为水槽倾角。

p_k 与流速 u 之间的关系为

$$u = \sqrt{2p_k / \rho_c} \tag{2}$$

因此可根据试验数据得到各传感器处的泥石流流速,步骤如下:

- (1) 根据泥深记录, 利用式(1) 计算各传感器中心位置的泥石流静压强 p_s , 并插值为 4 000 Hz;
- (2) 利用傅立叶变换对冲击压强信号进行低通滤波, 进而根据冲击压强和静压强计算各传感器中心位置的动压强过程;
- (3) 根据式(2) 利用各传感器中心位置的动压强计算该处的流速。

3.2 黏性泥石流流速垂向分布

图 5 为某组试验 1.4 cm、2.9 cm 和 4.4 cm 处的动压强过程, 由于不同高度处泥石流冲击传感器时相互影响以及颗粒分布的随机性, 动压强过程线具有一定波动, 因此本文取一段时间内动压强的平均值计算各测量高度的流速。时段的选取原则是流动尽量稳定且较多的传感器被淹没, 由图 4 可知泥深在最大值处比较稳定, 因此取平均泥深最大的 1 s 内各高度动压强的平均值计算泥石流流速。

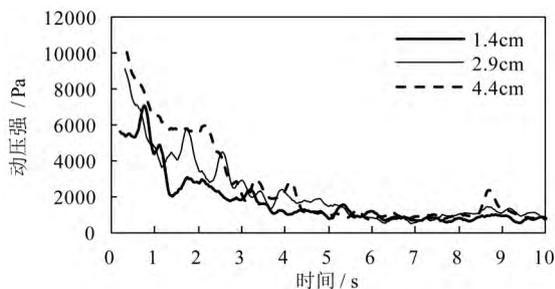


图 5 某组试验的动压强过程
Fig. 5 Processes of kinetic pressure

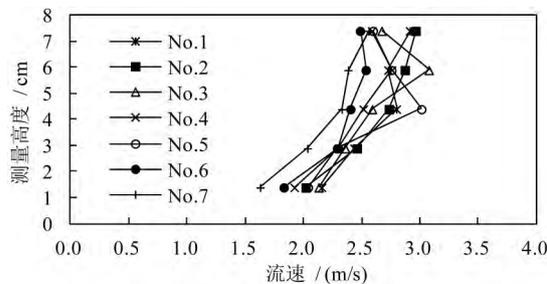


图 6 各组试验的流速垂向分布
Fig. 6 Vertical velocity distribution of debris flow

各组试验的流速剖面如图 6 所示。流速随测量高度增加而增加, 剪切速率随测量高度增加而减小。一些试验的流速最大值出现在 4.4 cm 或 5.9 cm 处, 这可能因泥石流冲击传感器时相互影响引起。试验中水槽底部没有用试验材料做粗化处理, 流体在该处会发生滑动, 这可能是各组流速剖面不重合的主要原因。

3.3 流速垂向分布的模型验证

泥石流内部作用力包括黏滞力、紊动力、颗粒摩擦力、碰撞力等。摩擦力与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 无关, 黏滞力与 $\dot{\gamma}$ 成正比, 碰撞力和紊动力均与 $\dot{\gamma}$ 的 2 次方成正比。由于黏性泥石流中紊动力和碰撞力远小于黏滞力和摩擦力, 不少研究者利用宾汉模型描述, 其应力应变的关系为^[11-12]

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \tag{3}$$

式中 τ 为剪切应力, Pa; τ_y 为屈服应力, Pa; η 为塑性黏度, Pa · s。然而, 一些流变试验表明泥石流或浆体在剪切速率较低时存在剪切稀化或稠化现象^[13-15], 因此本文同时采用更加通用的 Herschel-Bulkley 模型(记为 H-B 模型) 描述黏性泥石流, 其应力应变的关系为

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^n \tag{4}$$

式中参数 K 为稠度指标; n 为流体流动指标, 小于 1 时为剪切稀化, 大于 1 时为剪切稠化。对 H-B 模型进行参数限定可以得到其它泥石流流变模型, 其中 $n=1$ 且 $\tau_y > 0$ 时为宾汉模型, $n=1$ 且 $\tau_y = 0$ 时为牛顿体模型^[16], $n=2$ 且 $\tau_y = 0$ 时为碰撞模型^[17]。

对于二维稳定流动, 剪应力与重力沿流动方向的分量相等, 可得到

$$\begin{cases} \tau_y + K \dot{\gamma}^n = \rho_c g (h - z) \sin\theta & z < h_e \\ \dot{\gamma} = 0 & z \geq h_e \end{cases} \tag{5}$$

式中 $h_e = h - \tau_y / \rho_c g \sin\theta$ 为发生剪切变形的流体的深度。假设与槽底接触的流体滑动速度为 u_0 , 根据式(5) 可以得到流速 u 的解析表达式为

$$\begin{cases} u = u_0 + \left[1 - \left(1 - \frac{z}{h_e} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \cdot u' & z < h_e \\ u = u_0 + u' & z \geq h_e \end{cases} \tag{6}$$

$$\text{其中 } u' = \frac{n}{n+1} \cdot \left(\frac{\rho_c g h_e \sin\theta}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot h_e$$

本文选取的计算时段泥深较稳定,流速变化较小,加之两侧为玻璃,边壁剪切力小,故可近似为二维稳定流动。各组试验泥石流密度接近且颗粒级配相同,因此可用同一组参数(n 、 K 、 τ_y)描述其流变特性。 u_0 受边界条件影响,各组试验差异较大,应分别拟合,取式(6)中 u_0 的表达式为

$$u_0 = \sum_{i=1}^7 a_i u_{0i} \tag{7}$$

式中 u_{0i} 为第 i 组流速剖面对应的滑动速度, μ /s; a_i 为变量,对于第 j 组流速剖面其值为

$$\begin{cases} a_i = 1 & i = j \\ a_i = 0 & i \neq j \end{cases} \tag{8}$$

取 a_i ($i = 1, \dots, 7$)、 ρ_c 、 h 、 z 为自变量, μ 为因变量,以 u 的回归值和测量值的均方根误差最小为目标函数,分别通过式(6)拟合 H-B 模型、宾汉模型、牛顿体模型、碰撞模型中的流变参数以及滑动速度 u_{0i} ,流变参数拟合结果列于表 2。根据判定系数 R^2 ,各模型均通过了显著性水平为 0.001 的相关性检验。 R^2 以及均方根误差 $RMSE$ 均表明,H-B 模型和宾汉模型的拟合结果最好,其中宾汉模型略次于 H-B 模型,牛顿体模型居中,碰撞模型模拟结果相对较差。

表 2 流变模型参数的拟合结果

Table 2 Calibration results of rheological parameters

流变模型	n	K	τ_y /Pa	$RMSE$ /(m/s)	R^2
H-B 模型	5.45	2.53E-06	142.1	0.101	0.913
宾汉模型	—	4.55	103.4	0.103	0.909
牛顿体模型	—	12.14	—	0.127	0.862
碰撞模型	—	0.94	—	0.142	0.829

H-B 模型的拟合参数 n 为 5.48,超出了泥石流流体流变模型物理意义的范围($0 \leq n \leq 2$)。7 组试验中 4 组泥深数据采集时间较长,取泥石流停止运动时的泥深 h' 为残留泥深,由此可计算屈服应力为^[18]

$$\tau_y = \rho_c g h' \sin\theta \tag{9}$$

该计算值可作为屈服应力的参考值。4 组试验测算的屈服应力分别为 92.8 Pa、95.2 Pa、96.4 Pa、69.5 Pa,宾汉模型拟合的屈服应力为 103.4 Pa,与参考值接近;H-B 模型拟合的屈服应力为 142.1 Pa,远大于参考值。从这两方面判断,宾汉模型在黏性泥石流运动机理描述方面优于 H-B 模型。

4 结论与讨论

本研究通过黏性泥石流模型试验测量断面上不同深度处的冲击力,反算了黏性泥石流流速的垂向分布,并利用流速数据对黏性泥石流流变模型进行检验,初步得到如下结论:

(1) 黏性泥石流的垂向流速分布和一般流体类似,即流速随高度增加而增加,剪切速率随高度增加而减小;

(2) 宾汉模型描述黏性泥石流流变特性的能力与 Herschel-Bulkley 模型接近,且流变参数更具物理意义,牛顿体模型和碰撞模型描述能力较弱,表明宾汉模型更适用于黏性泥石流。

本研究开展的模型试验中颗粒最大粒径为 10 mm,显著大于流变试验的一般粒径范围,但是和天然泥石流相比仍然偏小,使得试验中的颗粒作用力远小于天然状况,浆体作用力则大于天然状况,进而使试验中的主导作用力可能不同于实际情况,因此今后有必要在天然沟道中开展冲击力测量,研究天然泥石流流速的垂向分布。

参考文献:

[1] 余斌. 黏性泥石流的平均运动速度研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 524-532.

- [2] 康志成 李焯芬 马蔼乃 等. 中国泥石流研究 [M]. 北京: 科学出版社 2004: 21 - 22 231 - 238.
- [3] Prochaska A B , Santi P M , Higgins J D. Relationships between size and velocity for particles within debris flows [J]. Canadian Geotechnical Journal , 2008 , 45(12) : 1778 - 1783.
- [4] Arattano M , Marchi L. Measurements of debris flow velocity through cross-correlation of instrumentation data [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences , 2005 , 5(1) : 137 - 142.
- [5] 舒安平 费祥俊. 黏性泥石流运动流速与流量计算 [J]. 泥沙研究 2003(3) : 7 - 11.
- [6] Julien P Y , Paris A. Mean velocity of mudflows and debris flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2010 , 136(9) : 676 - 679.
- [7] 朱兴华 崔鹏 唐金波 等. 黏性泥石流流速计算方法 [J]. 泥沙研究 2013(3) : 59 - 64.
- [8] 陈华勇 胡凯衡 崔鹏 等. 泥石流内部流速分布规律试验研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版 2015 47(6) : 77 - 83.
- [9] Han Z , Chen G , Li Y , et al. A new approach for analyzing the velocity distribution of debris flows at typical cross-sections [J]. Natural Hazards , 2014 , 74: 2053 - 2070.
- [10] Yang H , Wei F , Hu K , et al. Measuring the internal velocity of debris flows using impact pressure detecting in the flume experiment [J]. Journal of Mountain Science , 2011 , 8(2) : 109 - 116.
- [11] Fraccarollo L , Papa M. Numerical simulation of real debris-flow events [J]. Physics and Chemistry of the Earth Part B , 2000 , 25(9) : 757 - 763.
- [12] Blasio F V , Elverhøi A , Issler D , et al. Flow models of natural debris flows originating from overconsolidated clay materials [J]. Marine Geology , 2004 , 213(1) : 439 - 455.
- [13] Major J J , Pierson T C. Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries [J]. Water Resources Research , 1992 , 28(3) : 841 - 857.
- [14] 王裕宜 詹钱登 李昌志 等. 黏性泥石流应力应变特征的初步试验研究 [J]. 山地学报 2002 20(1) : 42 - 46.
- [15] Sosio R , Crosta G B. Rheology of concentrated granular suspensions and possible implications for debris flow modeling [J]. Water Resources Research , 2009 , 45(3) : W03412.
- [16] Takahashi T. Debris flow: mechanics , prediction and countermeasures [M]. Leiden: Taylor & Francis , 2007: 92 - 101.
- [17] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A , 1954 , 225(1160) : 49 - 63.
- [18] 吴积善 张军 程尊兰 等. 黏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.

Experimental study on vertical velocity distribution of viscous debris flows

YANG Hong-juan^{1 2} , WEI Fang-qiang² , HU Kai-heng² , HONG Yong²

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

2. Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610041 , China)

Abstract: Viscous debris flow is the most common and serious destructive type among all kinds of debris flows. Measurement of its vertical velocity distribution is essential for testing debris flow models. In this study 7 flume tests were conducted to measure the vertical distribution of the impact force and flow depth of viscous debris flows , in which the experimental material was collected from natural debris flow deposit and was sieved by a 10 mm mesh screen. The vertical velocity distribution was obtained using the relationship between the impact force and velocity. Results show that the velocity of viscous debris flow changes with flow depth as other fluids. It means velocity increases with depth while shear rate shows an opposite trend. Moreover , the velocity distribution can be explained well by the Bingham model. This study reveals the availability of deriving velocity distribution by impact force measurement. However , further work should be conducted in natural debris flow gullies to verify these conclusions.

Key words: debris flow; impact force; velocity; vertical distribution; rheological model

(责任编辑: 陈绪坚)