

泥石流流速研究现状与发展方向

韦方强^{1,2}, 胡凯衡^{1,2}

(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: 泥石流流速是泥石流运动学研究的核心内容之一,也是泥石流防治工程设计的核心参数之一。在全面介绍了目前国内外泥石流流速野外观测和室内水槽测试的技术方法和成果,分析总结了国内外在泥石流流速分布和泥石流流速估算方法的研究成果的基础上,结合现有技术手段,分析了泥石流流速野外观测和室内水槽测试的主要内容和技術发展方向,提出了泥石流流速分布和流速计算研究的核心内容和主要发展方向。

关键词: 泥石流; 流速; 流速分布; 现状; 发展方向

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

泥石流流速的分布和计算是泥石流运动学研究的核心问题之一,其本身也是泥石流防治工程设计的核心参数。然而,由于泥石流是一种复杂的多相非牛顿体,野外原型观测和室内实验测量困难,测量手段和运动机理研究的滞后一直制约着泥石流流速研究的发展。一般所谓的泥石流流速是指泥石流在流通区运动通过时的速度,具体可分为泥石流的平均流速、表面流速、内部流速和龙头运动速度等。自然界和模拟实验中泥石流的流态既可能为层流,也可能为紊流。即使是层流,其流速在垂向、纵断面和横断面的分布也是不均匀的,而平均流速的测量和计算往往比不均匀的表面流速、内部流速和龙头流速简单。因此,目前在实际泥石流流速观测、测试和计算时,其结果一般都为平均流速。本文将通过对国内外泥石流流速的野外观测、实验测试、计算方法的研究成果的分析,结合现代技术的发展,阐述泥石流流速研究现状,并提出其发展方向。

1 泥石流流速的观测

1.1 国内的泥石流流速观测

我国泥石流流速观测起始于1960年,曾在西藏

古乡沟和加玛其美沟、甘肃柳弯沟和火烧沟以及云南浑水沟和蒋家沟等开展过流速观测工作,其中蒋家沟的流速观测一直持续到现在。在1980年以前,大部分泥石流流速观测均采用简单方法进行,即选择上下断面,测量两个断面间的距离,在泥石流发生时用秒表测量泥石流从上断面运行到下断面的运动时间,从而计算泥石流流速^[1]。后来改用超声波液位计来记录泥石流到达上下两个断面的时间。实际上这种方法观测到的泥石流流速只是泥石流龙头在两个观测断面间运动的平均速度。在利用上述方法观测泥石流流速的同时,间或采用向泥石流中抛洒漂浮物的方法间接观测泥石流流速^[2],这种方法观测到的是在两个观测断面间某一位置的泥石流表面平均流速。由于泥石流沟道较宽和其他条件的限制,很难观测到泥石流表面流速的横向分布。

1980年以后,随着相关技术和计算机技术的发展,开始研究利用电子仪器设备进行泥石流流速观测。1985年中国科学院东川泥石流观测研究站开始利用雷达测速仪对泥石流流速进行观测,但由于观测条件恶劣,仅观测到06-25发生的4阵泥石流流速资料,雷达测速仪就被损毁了^[2,3]。尽管如此,这次观测却观测到了泥石流中泓表面流速和距中泓

收稿日期 (Received date): 2009-05-15.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (编号: 40771026). [Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Number 40771026)]

作者简介 (Biography): 韦方强 (1968-), 山东临沐人, 博士, 研究员, 主要从事山地灾害减灾理论和技术研究. [Wei Fangqiang (1968-), Professor majoring in theory and technology of mountain hazards mitigation.]

5 m 一侧的表面流速数据,为泥石流表面流速分布研究提供了极为宝贵的数据。Fu X. 等 (2007) 利用此数据做了进一步的分析,对康志成等确定的表面流速系数进行了检验^[4]。1999 年章书成采用双相机获取了蒋家沟泥石流运动过程的连续像对,研究泥石流表面特征,可以用于阵流高度和类型、纵横断面形态、表面坡度、点流速和流速场等的分析^[5]。

1.2 国际上的泥石流流速观测

国际上泥石流流速观测方法主要分为 4 大类:

第一类方法是利用安装在不同断面的一组超声波传感器探头探测泥石流龙头到达不同断面的时间,从而根据不同断面间的距离和到达不同断面的时间差计算泥石流龙头运动速度。例如, M. Arattano 等 (2000) 利用安装在意大利 Moscardo Torrent 的 3 个断面的超声波探头测量到 1996-06-22 和 08-07 两场泥石流的龙头流速^[5]。

第二类方法是利用安装在不同断面的一组震动和声音传感器探测泥石流龙头到达不同断面的时间,从而根据不同断面间的距离和到达不同断面的时间差计算泥石流龙头运动速度。例如,意大利于 1997 年在 Dolomites 的 Acquabona Creek (意大利东部阿尔卑斯山) 建立了泥石流观测系统,该系统利用安装在两个断面的地声传感器监测泥石流龙头到达的时间,根据泥石流到达两个断面的时间间隔和断面间的距离计算泥石流流速^[6]; Itakura (1997) 等利用麦克风和信号处理器构成的传感器探测泥石流的到达^[7]; Arattano (1999) 在意大利北部阿尔卑斯山区的 Moscardo Torrent 利用由 4 只震动传感器组成的监测系统 (间隔 100 m) 测量到 1995~1996 年间的 3 场泥石流数据,并用此数据估算泥石流的运动速度^[8]。

第三类方法是空间滤波测速和电磁多普勒测速。Itakura Y. 等 (1985, 1989) 研发了利用空间滤波测量泥石流表面流速的方法^[9, 10], Uddin (1999) 改进了该种测量方法,可以调整滤波参数使测量精度更高,并对日本 Yakedake 山泥石流的表面流速进行了测量^[11-12]。Inaba 等 (2000) 研制了时空微分空间方法测量泥石流流速矢量场的方法,并将其应用到真实泥石流的流速测量中^[13]。

第四类方法是利用固定的摄像机影像测量泥石流的表面流速。安装固定的摄像机获得泥石流视频信息较为普遍,在日本、意大利和瑞士等均开展了此

项工作^[14-16]。Arattano 和 Gratton 根据安装在意大利 Moscardo Torrent 的固定摄像机获取的视频信息,研究了利用固定摄像机视频信息测量泥石流表面流速的方法,并将计算结果与使用超声波传感器测量的数据进行了对比,测量结果的差异均在 10% 以内^[15, 17]。

前两类方法获得的流速是泥石流龙头在两个断面间运动的平均速度,无法获得连续流体的运动速度,后两类方法主要是测量泥石流表面流速,不只限于测量龙头流速,甚至可以获得表面流速的分布。

2 泥石流流速的实验测试

实验室内的泥石流流速测试亦比较困难,目前亦仅限于对龙头流速和表面流速的测量。常用的测试方法主要包括两类,一类是断面+秒表法,另一类是图像解析法。

2.1 断面+秒表法

断面+秒表法是实验室最简易的流速测量方法,不仅可以测量泥石流龙头的运动速度,也可以测量泥石流表面流速,泥石流实验中最为常用。

测量龙头运动速度的方法较为简单,只需要测量泥石流龙头通过预定断面的时间和断面间距离便可测得泥石流在两个断面间的平均流速。若测量泥石流表面流速则需要抛洒漂浮物作为辅助手段,测量漂浮物通过两个预定断面的时间,从而计算泥石流表面平均流速。

2.2 图像解析法

图像解析法在泥石流实验中也经常使用,并逐渐成为流速测试的主要方法。图像解析的图像获取方法有两种,一是通过计算机控制照相机按照一定时间间隔拍摄图像,二是通过摄像机 (最好为高速摄像机) 获得泥石流运动的视频。图像解析的最简单方法是通过图像对比确定标识物在不同时间的位置,计算泥石流表面流速,并通过专业软件对不同时刻的图像进行匹配解析,这种解析方法不仅可以获得泥石流表面流速,还可以分析泥石流表面流场,并估算泥石流流量等参数。例如,2001 年陈建华等 (2003) 将在蒋家沟使用的图像获取和解析方法改进后用于实验室泥石流模拟实验测试中,取得了良好的效果^[18]。

3 泥石流流速分布研究

3.1 泥石流横向流速分布

由于受到野外观测和实验测试技术手段的限制, 目前尚缺乏对泥石流横向流速分布的深入研究。康志成等 (1984 2004) 根据对东川蒋家沟泥石流龙头的观测——龙头在平面上的位置是一个向前突出的舌形体, 判断泥石流表面流速中间大两侧小, 并根据拍摄到的泥石流龙头照片中舌形体的凸宽比, 粗略估算蒋家沟粘性泥石流阵流的表面流速系数为 $0.7^{[23]}$ 。Tecca PR & Deganutti AM (2003) 利用 1998 年监测到的意大利 Acquabona 流域的泥石流运动录像资料, 并根据估算的抗剪强度和粘性系数等流变参数, 分析估算了泥石流表面流速分布, 得到的结论是, 泥石流表面流速分布显示了泥石流流体从类似宾汉体向类似牛顿体渐变的规律^[19]。

3.2 泥石流垂向流速分布

国内外对泥石流垂向流速分布的研究也很不深入。Takahashi (1978 1980) 根据泥石流水槽实验结果, 确定了泥石流垂向流速分布遵从幂律关系, 即泥石流垂向流速与泥石流总流深与距沟床的距离只差的 1.5 次方成正比^[20 21]。康志成等 (1984 2004) 根据蒋家沟泥石流龙头在运动过程中由上向下翻落, 判断泥石流表面流速大于底层流速, 并根据获得的泥石流运动照片粗略估算蒋家沟粘性阵流的垂向流速系数为 $0.85^{[23]}$ 。Hamilton 和章书成 (1997) 根据野外观测到的泥石流表层的物体不旋转的现象推断, 泥石流的垂向流速分布或者剪切率很小, 但未给出准确的泥石流分布^[22]。

4 泥石流流速的估算研究

由于泥石流流速是泥石流防治工程设计中的重要参数之一, 虽然目前尚没有成熟的计算公式, 但国内外均发展了一系列的泥石流流速估算方法。

4.1 国内的泥石流流速估算方法

国内泥石流流速的估算方法主要分为两类, 一类是根据观测资料整理分析的经验公式, 另一类是根据泥石流运动痕迹推算泥石流流速。

1. 基于观测资料的经验公式

我国基于实际观测资料的经验公式较多, 例如云南东川蒋家沟粘性泥石流估算公式^[23], 云南东川

大白泥沟和蒋家沟粘性泥石流经验公式^[24], 甘肃武都火烧沟、柳弯沟和泥弯沟粘性泥石流估算公式^[25], 西藏波密古乡沟粘性泥石流估算公式^[26], 云南大盈江浑水沟粘性泥石流估算公式^[27], 青海扎麻隆峡稀性泥石流估算公式^[24], 北京地区稀性泥石流估算公式^[28]。这些经验公式皆以水力学中的谢才—曼宁公式为原型, 利用不同的观测资料进行统计回归分析, 确定公式中不同参数的取值, 其基本公式为

$$U = KR^a I^b \quad (1)$$

式中 U 为泥石流流速, R 为泥石流水力半径, I 为泥石流水力坡度, K 、 a 、 b 均为待定参数。

2. 基于弯道超高的推算公式

由于泥石流阻力特性复杂, 长期以来无法建立泥石流流速的理论计算公式。因此, 主要依靠上述的经验公式来估算泥石流流速。近年来, 一些学者开始依据泥石流沟弯道两岸留下的泥痕, 由泥面的弯道超高与流速的关系来推算泥石流流速。例如, 何杰和陈宁生 (2001) 以蒋家沟支沟——大凹子沟 1994 年泥石流弯道超高测量数据, 研究了粘性泥石流弯道超高在流速计算中的应用^[29], 蒋忠信 (2007) 在归纳和探讨泥石流弯道超高计算模式的基础上, 改进和总结了基于弯道超高计算泥石流流速的方法^[30]。

4.2 国际上的泥石流估算方法

国外的学者也提出了一些经验公式, 比如 Koch (1998) 建立的经验公式

$$V = C_1 H^{0.3} S^{0.5} \quad (2)$$

式中 C_1 为经验系数。该公式在非定常的泥石流阵流的数值模拟中得到了很好的验证^[31]。除此之外, 根据泥石流的不同理论模型, 也有一些学者推导了泥石流平均流速的计算公式^[32]:

1. 颗粒流的膨胀体模型, 其流速估算公式为

$$V = (2/3) \xi^{1.5} S \quad (3)$$

式中 V 是泥石流平均流速, ξ 是颗粒大小和浓度的集中系数, H 为流深, S 为沟床坡度。该公式反映了颗粒流在惯性区的膨胀剪切关系, 这也正是高桥堡泥石流模型^[33]的基础。

2. 牛顿体紊流的 Manning-Strickler 公式, 其公式为

$$V = (1/n) H^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

式中 n 是曼宁系数。这个计算公式已经被推荐进为日本的泥石流防治技术标准中^[34]。

3. 明渠流的谢才公式, 其公式^[38]为

$$V = CH^{1/2} S^{1/2} \quad (5)$$

式中 C 为谢才系数。谢才公式是从一维明渠水流的运动方程中推导出来的, 后来推广到泥石流流速估算中。实际上, 以上这几种计算公式都可以统一到公式 (1) 的形式中。

5 泥石流流速研究发展方向

综上所述, 由于泥石流流体的特殊性, 野外观测和实验条件都受到很大的限制, 泥石流流速的研究尚局限在对龙头流速和表面流速的研究, 并且也多停留在对龙头平均流速和表面平均流速的研究, 鲜有对其流速垂向分布的研究, 更缺乏对泥石流内部流速和流速分布的研究。因此, 今后泥石流流速的研究应当重点发展如下方向的研究。

1. 泥石流流速观测方法研究

泥石流流速的现场观测数据是研究泥石流流速的最佳数据, 但由于泥石流发生的不确定性, 导致现场观测到泥石流十分困难, 目前全世界只有少数几个流域可以重复观测到泥石流发生实况^[1, 36-39], 且目前观测的泥石流流速多为龙头平均流速。因此, 今后泥石流流速现场观测方法的研究, 应当充分利用最新的光电技术和各种传感器技术, 研发不仅可以测量泥石流平均流速, 还可以测量泥石流实时流速的测量设备, 不仅可以测量泥石流表面流速, 还可以测量泥石流内部流速的测量设备。

泥石流实时流速测量设备应重点发展以雷达多普勒雷达或激光多普勒技术为基础的测量设备, 由于是激光测量, 对于流场没有干扰, 测速范围宽, 而且由于多普勒频率与速度是线性关系, 和该点的温度、压力没有关系, 是目前技术条件下最理想的泥石流表面流速测量方法。泥石流内部流速测量更为困难, 目前所有用于流体内部流速测量的仪器设备置于泥石流流体中均会被泥石流破坏, 最佳方法是向泥石流流体中投掷坚固的无线电示踪球, 根据示踪球的运动轨迹测算泥石流的内部流速。无线电示踪方法的最大困难有两点: 一是选择合适的波段, 突破泥石流流体的屏蔽作用, 使无线电波能从深厚的泥石流流体内部发射出来; 二是如何制作既坚固又对无线电无屏蔽作用的无线电示踪球。

2. 泥石流流速实验测试方法研究

泥石流水槽实验中的表面流速测量相对容易,

图像解析法应是发展的主要方向。图像获取可以采用高分辨的高速摄像机, 重点研究流速场的分析, 研发多功能的分析软件, 提高流速测量精度, 提取表面流速分布信息。

泥石流水槽实验中的内部流速测量则相对困难。由于泥石流流体的不均匀性和巨大的破坏力, 常规的流速仪均不适用于泥石流内部流速的测定, 并且由于泥石流流体的高密度和不透明, 一般流体流速实验中常用的示踪方法 (染色示踪法、盐溶液示踪法等) 也均无法使用。因此, 泥石流内部流速测量方法应重点考虑无线电粒子示踪方法。因为泥石流水槽实验中的泥石流流深较浅, 固体颗粒粒径较小, 在室内水槽内测定泥石流内部流速对无线电示踪粒子的要求较高, 不仅要满足野外泥石流测量中的示踪球的所有条件, 还要能作为泥石流的固体颗粒融入泥石流运动中, 并且不能对泥石流流场产生扰动。

3. 泥石流流速计算研究

流速计算研究是泥石流流速研究中最终用于泥石流减灾实践的部分, 是泥石流流速研究的重点。由于目前泥石流流速分布等理论问题尚有待突破, 泥石流流速估算的经验公式仍是目前研究的重要内容。目前国内外已积累了较多的不同类型泥石流的观测资料, 同时, 泥石流流速弯道超高估算方法又增加了大量虽无实际观测资料, 但可以通过对泥石流痕迹勘测而获得的泥石流流速信息, 应充分利用这些观测和勘测资料开展泥石流流速经验公式的对比研究, 推出具有较好通用性的经验公式。当然, 泥石流流速计算的理论公式是该研究的主要方向, 利用泥石流流体和流体运动研究的理论成果, 探索和建立泥石流流速理论公式是泥石流流速计算研究的最终目标。

由于流速分布测试技术手段的限制, 泥石流流速分布研究尚不深入。因为泥石流流速分布, 特别是粘性泥石流流速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, 所以泥石流流速分布研究是今后泥石流流速研究的最重要方向, 必须研发新的测试手段, 争取在泥石流横向流速分布和垂向流速分布方面获得突破性进展。

参考文献 (References)

- [1] Kang Zhicheng, Cui Peng, Wei Fangqiang et al. Observation and test data of Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station. Chinese Academy of Sciences, (1961~1984). [M]. 2006.

- Beijing Science Press [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]
- [2] Kang Zhicheng, Li Zhuofen, Ma Aina *et al* Debris Flow Research in China [M]. Beijing Science Press, 2004: 159~162 [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: 159~162]
- [3] Kang Zhicheng. An analysis of maximum discharge of viscous debris flow at Jiangjia Gully of Dongchuan in Yunnan [A]. In *Memoirs of Lanzhou Institute of Geology and Cryopedology Chinese Academy of Sciences* (4) [C]. Beijing Science Press, 1984: 108~118 [康志成. 云南东川蒋家沟粘性泥石流流速分析 [A]. 见: 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, 1984: 108~118]
- [4] Fu Xudong, Wang Guangqian, Kang Zhicheng *et al* Planar velocity distribution of viscous debris flow at Jiangjia Ravine, Yunnan China: a field measurement using two radar velocimeters [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2007, 12 (4): 583~587
- [5] Zhang S., Chen J. Measurement of debris flow surface characteristics through close-range photogrammetry [A]. In C.-L. Chen & D. Rickermann (eds.), *Debris flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* [C]. Rotterdam: Milpress, 2003: 775~784
- [5] A rattano M., Grattoni P. Using a fixed video camera to measure debris flow surface velocity [A]. In W ieczorek & Naeser (eds.), *Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* [C]. Rotterdam, 2000: 273~281
- [6] M. Berti R., Genevois R., LaHusen R., *et al* Debris flow monitoring in the Acquabona Watershed on the Dolomites (Italian Alps) [J]. *Phys. Chem. Earth (B)*, 2000, 25 (9): 707~715
- [7] Itakura Y., Koga Y., Takahama J., *et al* Acoustic detection sensor for debris flow [A]. In Cheng-lung Chen (eds.), *Debris flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* [C]. New York: ASCE, 1997: 747~756
- [8] A rattano M. On the use of seismic detectors as monitoring and warning systems for debris flows [J]. *Natural Hazards*, 1999, 20 (2~3): 197~213
- [9] Itakura Y., Ogawa K., Suwa H., *et al* Trends and fluctuation of the surface velocity of debris flow measured by a non-contact speed sensor with a spatial filter [A]. In M. Harada (eds.), *Fluid Control and Measurement* [C]. Tokyo: Pergamon Press, 1985: 781~786
- [10] Itakura Y. & Suwa H. Measurement of surface velocity of debris flows by spatial filtering velocimetry [A]. *Proceedings of the Japan China Symposium on Landslides and Debris flows* [C]. Niitata, Tokyo, Japan, 1989: 199~203
- [11] Uddin M.S., Inaba H., Itakura Y., *et al* Adaptive computer based spatial filtering method for more accurate estimation of the surface velocity of debris flow [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (32): 6714~6721
- [12] Uddin M.S., Inaba H., Itakura Y., *et al* Estimation of the surface velocity of debris flow with computer based spatial filtering [J]. *Applied Optics*, 1998, 37 (26): 6234~6239
- [13] Inaba H., Itakura Y., Kasahara M. Surface velocity computation of debris flows by vector field measurements [J]. *Physics and Chemistry of the Earth Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2000, 25 (9): 741~744
- [14] Takahashi T. Debris Flows [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991
- [15] Berti M., Genevois R., LaHusen R., *et al* Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps) [J]. *Physics and Chemistry of the Earth Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2000, 25 (9): 707~715
- [16] Hurlimann M., Rickermann D., Graf C. Field and monitoring data of debris flow events in the Swiss Alps [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40 (1): 161~175
- [17] A rattano M., Marchi L. Video-derived velocity distribution along a debris flow surge [J]. *Phys. Chem. Earth (B)*, 2000, 25 (9): 781~784
- [18] Chen Jianhua, Zhang Lei, Ruan Shanfa. Synchronic exposure controller for non-metric cameras [J]. *Journal of Nanjing University of Technology*, 2003, 25 (5): 92~100 [陈建华, 张雷, 阮善法. 非两侧相机同步摄影控制器 [J]. 南京工业大学学报, 2003, 25 (5): 92~100]
- [19] Tecca PR., Deganutti AM., Genevois R., *et al* Velocity distributions in a coarse debris flow [A]. In Rickermann D.; Chen C. (eds.), *Debris flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* [C]. Rotterdam, Milpress, 2003: 905~916
- [20] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1978, 104 (8), 1153~1169
- [21] Takahashi T. Debris flow on prismatic open channel [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1980, 106 (3), 381~396
- [22] Hamilton D., Zhang SC. Velocity profile assessment for debris flow hazards [A]. In Chen CL. (eds.), *Debris flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction & Assessment* [C]. New York: ASCE, 1997: 474~483
- [23] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan *et al* Debris Flow Observation and Research on Jiangjia Gully in Yunnan [M]. Beijing Science Press, 1990: 118~127 [吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 118~127]
- [24] Chen Guangxi, Wang Jikang, Wang Linhai. Debris Flow Prevention [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983: 2~49 [陈光曦, 王继康, 王林海. 泥石流防治 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983: 2~49]
- [25] Lanzhou Institute of Geology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences. Gansu Communications Science Research Institute. Gansu Debris Flow [M]. Beijing: China Communications Press, 1982: 27~43 [中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 27~43]
- [26] Cheng Zunlan, Liu Leiji, You Yong. Debris flow velocity of Guixiang Ravine, Xizang [J]. *Mountain Research*, 1997, 15 (4), 293~295 [程尊兰, 刘雷激. 西藏古乡沟泥石流流速 [J]. 山地研

- 究(现山地学报), 1997, 15(4): 293~295]
- [27] Liu Jiang, Cheng Zunlin. Calculation of debris flow velocity in Hunshuigou of Dayingjiang River, Yunnan Province [A]. In: Memoirs of Debris Flow (1) [C]. Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Press, 1981: 87~89 [刘江, 程尊兰. 云南大盈江浑水沟泥石流流速计算 [A]. 见: 泥石流论文集(1) [C]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981: 87~89]
- [28] Gansu Communications Science Institute, Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology. Chinese Academy of Sciences Highway Engineering in Debris Flow Regions [M]. Beijing: China Communications Press, 1981: 64~143 [甘肃省交通科学研究所, 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 泥石流地区公路工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1981: 64~143]
- [29] He Jie, Chen Ningsheng. Application of debris flow overstep in curve ways to velocity calculation [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(4), 425~428 [何杰, 陈宁生. 粘性泥石流弯道超高在流速计算中的应用 [J]. 成都理工大学学报, 2001, 28(4): 425~428]
- [30] Jiang Zhongxin. Current velocity calculation of debris flow based on excess height in Bend [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2007, 21(6): 288~291 [蒋忠信. 基于弯道超高计算泥石流流速的探讨 [J]. 岩土工程技术, 2007, 21(6): 288~291]
- [31] PWRI. Technical standard for measures against debris flow [Z]. Technical Memorandum of PWRI NO. 2632, Ministry of Construction, Japan
- [32] Ricker mann D. Empirical relationships for debris flows [J]. *Natural Hazards*, 1999, 19(1): 47~77
- [33] Takahashi T., Sawada T., Suwa H., et al. IAHR Monography Series [A]. Balkema Publishers, The Netherlands
- [34] Ricker mann D. Debris flows 1987 in Switzerland: Modelling and sediment transport [A]. In: R. O. Sinniger and M. Monbaron (eds.), *Hydrology in Mountainous Regions III* [C]. IAHS Publ. 1990, No. 194: 371~378
- [35] Koch T. Testing of various constitutive equations for debris flow modeling [A]. In: K. Kovar et al. (eds.), *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters* [C]. IAHS Publ. 1998, No. 248: Merano, Italy, 249~257
- [36] Zhang Xinbao, Liu Jiang. Debris flows in Dayingjiang River, Yunnan Province [M]. Chengdu: Chengdu Maps Press, 1989: 32~107 [张信宝, 刘江. 云南省大盈江流域泥石流 [M]. 成都: 成都地图出版社, 1989: 32~107]
- [37] Zeng Siwei, Zhang Youan. The diversion work for debris flow at Huoshao Gully of Gansu [A]. In: Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences (4) [C]. Beijing: Science Press, 1985: 218~226 [曾思伟, 张又安. 甘肃火烧沟泥石流排导沟的工程实践 [A]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊 [C]. 北京: 科学出版社, 1985: 218~226]
- [38] Marchi L., Arattano M., Deganutti A.M. Ten years of debris flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps) [J]. *Geomorphology*, 2002, 46(1~2): 1~17
- [39] Berti M., Genevois R., Simoni A., et al. Field observations of a debris flow event in the Dolomites [J]. *Geomorphology*, 1999, 29(3~4): 265~274

Review and Trends on Debris Flow Velocity Research

WEI Fangqiang^{1,2}, HU Kaheng^{1,2}

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

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

Abstract The velocity of debris flow is not only a key part of debris flow kinematics but also one of the key parameters in the design of debris flow control works. This paper introduced the approaches and achievements of field observation and laboratory test of debris flow velocity in the world, presented the researches of debris flow velocity distribution and methods of estimating debris flow velocity. Based on the research status and available technologies at present, the main contents and developing directions of the field observation and laboratory test of debris flow velocity and the researches of debris flow velocity distribution and velocity calculation were proposed.

Key words debris flow; velocity; velocity distribution; research status; developing direction