

基于流域形态完整系数的泥石流容重计算方法

韩征¹,徐林荣¹,苏志满¹,王磊²,陈舒阳¹

(1. 中南大学土木建筑学院,长沙 410004; 2. 中铁第四勘察设计院,武汉 430063)

摘要:通过对四川山区20条典型泥石流沟道的现场调查,建立了流域形态完整系数与泥石流浆体容重的统计关系,通过拟合分析形成了基于流域形态完整系数泥石流容重的指数式计算公式,获取了回归曲线,并采用误差分析、影响因素分析及趋势分析验证了该计算公式的合理性。研究表明,泥石流流域形态对泥石流浆体容重有很大影响,在区域地质背景条件相似时,浆体容重随流域形态完整系数的增大而减小。当流域形态完整系数大于0.3时,形成的泥石流多为稀性泥石流,且逐步向水石流、夹砂水流的状态发展,浆体容重可达到 $1.28\text{t}/\text{m}^3$ 的极值,这与目前观测到的泥石流容重最小值相符。基于统计关系建立的拟合公式尤其适用于流域形态完整系数较大的桦叶形泥石流沟,可为无法观测(已暴发或难以到达)的泥石流沟容重的计算提供简便方法,亦可为容重参数的合理确定提供区域性参考。

关键词:泥石流;流域形态完整系数;浆体容重

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)02-0100-06

随着我国社会经济发展,特别是西部大开发及汶川地震灾区的恢复和建设,山区泥石流的危害越来越大,正确地计算泥石流的各参数并评估泥石流的危害,从而有效地防治泥石流灾害已刻不容缓。

泥石流的容重是泥石流的最重要的参数之一^[1],对泥石流流速、整体冲击力等特征值的计算有很大影响。现有的泥石流容重计算方法有数十种之多,概括为理论推导法和特征参数法两类^[2],理论推导法采用野外调查和访问目击者的方法,如现场调查试验法及数量化综合评判法^[3],所得容重受人为因素影响大,加之精度不确定,且配制时块石的多寡对泥石流容重的影响很大,常常难以准确反映容重的真实值;特征参数法主要根据角砾含量^[4]、颗粒平均粒径^[5]、粘粒含量^[6]、中值粒径^[7]、算术平均粒径^[7]和主沟坡降^[8]等泥石流相关特征参数与容重的关系,提出相应的计算公式。在这些方法中,基于主沟坡降、流域面积等地形参数的容重计算最为简便实用,目前形成了铁道部第二设计院公式^[8]和中科院兰州冰川冻土研究所公式^[8]等,但以上公式均为单因素经验公式,缺乏相应的理论依据,具有单一性和一定的区域特性。因此,在

实际工作中人们希望找到既有理论依据,又实用的方法来计算泥石流容重^[2]。

对四川省冕宁县后山乡的石灰窑沟、桃水沟这两条泥石流沟进行调查时发现,这两条泥石流沟位置相邻,地形地貌、区域地质条件、植被覆盖及人为活动条件基本相似,理论上认为这两条泥石流沟应产生性质相似的泥石流。但从调查结果来看,这两条泥石流沟产生了性质截然相反的泥石流。石灰窑沟历史上暴发泥石流的容重为 $1.94\text{t}/\text{m}^3$,而桃水沟容重却为 $1.45\text{t}/\text{m}^3$ 。经考察,两沟主要在流域形态方面区别较大。据此推测泥石流流域形态与泥石流浆体容重间存在相关关系。本文统计分析了我四川省西南山区20条泥石流沟浆体容重与流域形态完整系数的关系,探讨了基于泥石流流域形态完整系数的泥石流浆体容重计算方法。

1 流域形态完整系数的确定

流域形态与泥石流有着密切的关系,最有利于泥石流发生的流域形态是漏斗形、桦叶形、桃叶形、柳叶形及长条形几种形态,其形态可以用流域形态完整系数 δ 来表示^[9]:

$$\delta = \frac{A_b}{L_w^2} \quad (1)$$

式中: L_w ——流域长度(km);

A_b ——流域面积(km^2)。

通过式(1)可以判断,流域越为狭长,流域形态完整系数 δ 越小;反之流域形态完整系数 δ 越大。

一般地,根据流域形态系数的大小,可以为泥石流

收稿日期:2011-06-08;修订日期:2011-09-02

基金项目:交通部西部交通建设科技项目(200831800087);四川省交通厅科技项目(2006A024-582)

作者简介:韩征(1986-),男,硕士研究生,主要从事地质灾害的评估与治理的研究。

E-mail:hankzzz@163.com

流域形态进行定型:

- 长条形泥石流流域: $\delta < 0.3$;
- 桦叶形泥石流流域: $0.3 \leq \delta < 0.7$;
- 漏斗形泥石流流域: $\delta \geq 0.7$ 。

2 统计关系分析

2.1 流域形态完整系数与浆体容重的获取

通过对四川省西南山区 20 条典型泥石流沟资料

的整理,获取了这些泥石流沟基本的沟道特征,并通过式(1)计算得出这些泥石流沟的流域形态完整系数 δ ,如表 1 所示。

2.2 流域形态完整系数与容重的统计关系分析

通过分析四川省西南山区 20 条泥石流沟的容重及泥石流流域形态完整系数,可以绘制出泥石流流域面积、沟道长度以及流域形态完整系数与容重关系云图(图 1)及测试容重曲线图(图 2)。

表 1 泥石流流域形态完整系数与容重关系

Table 1 Relationship between integrity coefficient of debris flow watershed morphology and bulk density

沟名	沟道位置	流域面积 A_b (km^2)	沟道长度 L_w (km)	流域形状完整系数 δ	流域形态定型	容重 γ_c (t/m^3)
关家沟	雅安市汉源县青富乡	6.110	4.642	0.284	长条形	1.710
小河大沟头	石棉县大堡永和乡	48.590	14.690	0.225	长条形	1.680
田坝干沟	汉源县青富乡	8.010	6.565	0.186	长条形	1.730
沈家沟	雅安市汉源县青富乡	1.240	2.642	0.178	长条形	1.820
小沙沟	汉源县唐家乡伍家山村	0.480	1.740	0.159	长条形	1.790
大沙沟	汉源县唐家乡伍家山村	12.570	7.700	0.212	长条形	1.630
野鸡洞	雅安至泸沽高速公路 K186 + 940 处	0.970	1.700	0.336	桦叶形	1.600
小沟尔	雅安至泸沽高速公路 K179 + 700 处	12.850	8.100	0.196	长条形	1.670
雀儿沟	雅安至泸沽高速公路 K184 + 400 处	14.080	7.300	0.264	长条形	1.570
舍可泥罗	雅安至泸沽高速公路 K198 + 115 处	0.770	1.900	0.213	长条形	1.730
春河沟	冕宁县石龙乡	11.790	4.458	0.593	桦叶形	1.350
喇嘛房	雅安至泸沽高速公路 K188 + 250 处	4.229	3.110	0.437	桦叶形	1.410
阁里沟	冕宁县林里乡	16.980	6.400	0.415	桦叶形	1.390
石灰窑	冕宁县后山乡	5.811	4.760	0.256	长条形	1.940
挑水沟	冕宁县后山乡	0.831	1.550	0.346	桦叶形	1.450
小堡子沟	冕宁县后山乡	1.930	2.670	0.271	长条形	1.590
石龙沟	冕宁县石龙乡	0.410	1.077	0.354	桦叶形	1.490
一颗印	理县朴头乡	47.000	14.870	0.213	长条形	1.786
塔子沟	理县朴头乡	28.640	10.080	0.282	长条形	1.731
甲司口	理县朴头乡	12.350	7.610	0.213	长条形	1.752

由图 1 可以看出在流域面积一定的条件下,泥石流浆体容重随沟道长度的增加基本呈现逐步增大的趋势,即随着流域形态完整系数的减小,容重逐步增大。该规律与图 2 呈现的规律相吻合。

通过对图 2 散点、曲线的分析可知,泥石流容重大体上随着泥石流流域形态完整系数的增大而非线性的减小,尤其对于流域形态完整系数大于 0.3 的泥石流,规律较为明显,且随着流域形态完整系数的进一步增大,形成的泥石流向着水石流、夹砂水流的方向发展。此外,由图 2 中散点的分布规律来看,随着泥石流流域形态完整系数的进一步增大,泥石流容重的减小趋势有所放缓,当流域形态完整系数较大(0.45 以上)时,泥石流容重基本保持在 $1.30\text{t}/\text{m}^3$ 左右浮动。

3 公式拟合与误差分析

3.1 公式拟合

通过对图 2 中的实测曲线进行回归分析,用多种模型对曲线进行拟合,发现该曲线用指数函数拟合较好,因此,采用指数方程对趋势线进行回归分析,通过不断的修正方程中的各项系数 a 、 b 、 c ,使得拟合曲线总体产生的误差尽量小,最后,得出的方程如下:

$$\rho_c = 1.282 + 2.146 \times 0.001^\delta \quad (2)$$

式中: ρ_c ——泥石流容重(t/m^3);

δ ——泥石流流域形态完整系数。

式(2)反映了泥石流容重与泥石流流域形态完整系数之间存在着指数函数的关系。该指数函数为一个上凹下凸的曲线,表明在一定范围内,随着泥石流流域形态完整系数的增加,泥石流容重递减,且递减的趋势

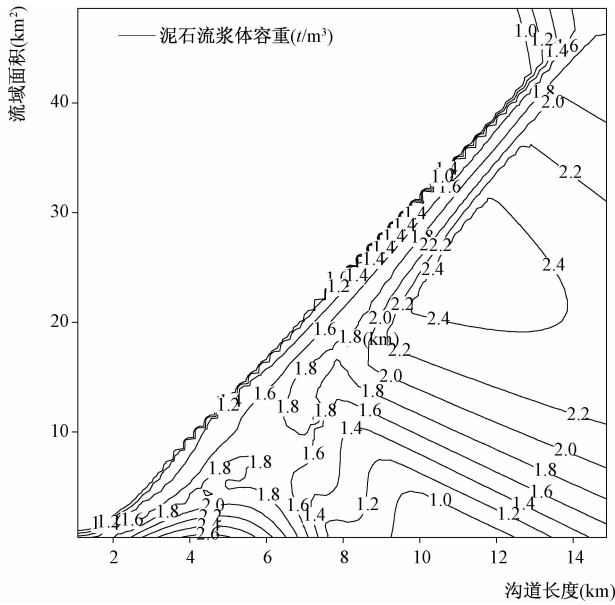


图 1 泥石流流域形态与泥石流容重的关系

Fig. 1 Relationship between debris flow watershed morphology and the bulk density

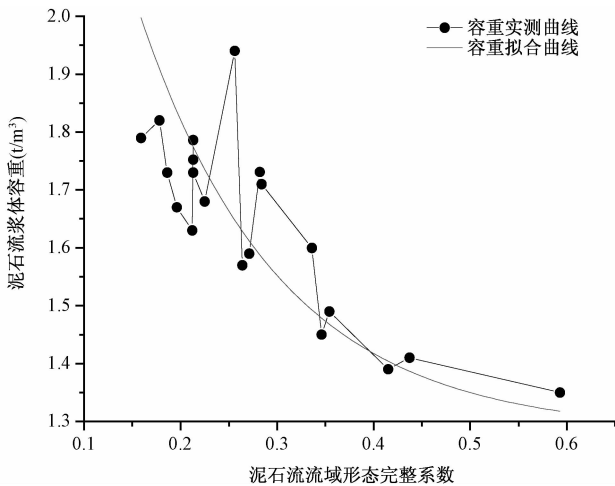


图 2 泥石流流域形态完整系数与泥石流容重的关系拟合曲线图

Fig. 2 The fitting curve between integrity coefficient of debris flow watershed morphology and the bulk density

逐渐放缓。从曲线趋势及函数式的极限计算可知,该曲线存在一个函数的下限,且该下限为:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} y = \lim_{x \rightarrow \infty} (1.282 + 2.146 \times 0.001^x) = 1.282$$

计算得出该曲线的下限为 1.282,即说明一般情况下,泥石流的容重要大于 1.282t/m³,再低则是以水流的形式出现,难以形成泥石流。该下限值与成昆铁路泥石流观测试验和调查资料^[15]记载中所观测到的泥石流最小容重 1.20 t/m³ 基本相符。

3.2 误差分析

用式(2)计算的容重与实际测得的容重相比较,并将其相对误差分别列入表 2 中。

用拟合出的函数(式(2))计算出泥石流容重计算值,与试验值进行比较,统计相对误差小于 5%、10%、15%、20% 的个数分别为 11、19、20、20,百分比分别为 55%、95%、100%、100%。分析图 3 可以看出,指数函数式(式(2))计算得出的泥石流容重计算值与测试值之间的误差绝大部分在 10% 以内,最大误差仅 11.72%,这说明用该模型计算的泥石流容重与试验值接近,因此具有很强的实用性,能够用以计算并反映泥石流真实的容重值。

另外,图 3 反映出容重计算值与试验值的误差程度随着流域形态完整系数的增加而降低。对于泥石流流域形态系数较大(大于 0.30)的桦叶形泥石流沟,用式(2)计算得出的泥石流容重计算与试验值的误差基本保持在 2.00% 以内,而流域形态完整系数小于 0.30 的狭长型泥石流沟容重的计算值与试验值之间的误差则相对较大。桦叶形泥石流流域下的容重计算值与试验值的误差 5% 以内的样本数占总数的 83.33%,误差水平普遍较低(表 3),因此,拟合公式在应用于流域形态完整系数大于 0.30 的桦叶形泥石流沟的容重计算具有很高的可信度,计算结果与实际测量值吻合较好。

表 2 基于流域形态完整系数计算泥石流容重误差分析
Table 2 Error analysis of bulk density based on the integrity coefficient of debris flow watershed morphology

序号	沟名	流域形状完整系数	实测容重 (t/m ³)	拟合容重 (t/m ³)	误差 (%)
1	关家沟	0.284	1.710	1.585	7.33
2	小河大沟头	0.225	1.680	1.735	3.28
3	田坝干沟	0.186	1.730	1.876	8.46
4	沈家沟	0.178	1.820	1.911	5.00
5	小沙沟	0.159	1.790	2.000	11.72
6	大沙沟	0.212	1.630	1.778	9.09
7	野鸡洞	0.336	1.600	1.493	6.67
8	小沟尔	0.196	1.670	1.837	9.98
9	雀儿沟	0.264	1.570	1.628	3.69
10	舍可泥罗	0.213	1.730	1.774	2.53
11	春河沟	0.593	1.350	1.318	0.57
12	喇嘛房	0.437	1.410	1.387	2.15
13	阁里沟	0.415	1.390	1.404	0.35
14	石灰窑	0.256	1.940	1.647	6.47
15	挑水沟	0.346	1.450	1.479	2.21
16	小堡子沟	0.271	1.590	1.613	8.91
17	石龙沟	0.354	1.490	1.469	1.51
18	一颗印	0.213	1.786	1.776	0.55
19	塔子沟	0.282	1.731	1.588	8.25
20	甲司口	0.213	1.752	1.774	1.25

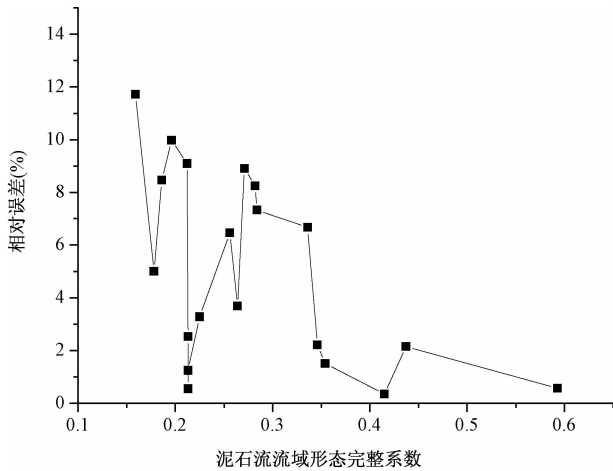


图 3 泥石流流域形态完整系数与误差关系
Fig. 3 Relationship between the integrity coefficient of watershed morphology and the deviation

表 3 不同流域形态下泥石流容重计算误差比较
Table 3 Comparison of the calculation error of mud-rock flow in various basin shapes

泥石流流域形态	样本总个数	误差在 5% 以内的样本数	所占百分比 (%)
长条形	14	6	42.85
桦叶形	6	5	83.33

4 影响因素探讨

4.1 降水条件

泥石流流域形态对雨水和暴雨径流过程有明显的影响,径流和洪峰流量大小,直接关系着各种松散固体物质的启动和参与,与泥石流发生关系密切^[9],图 2 的规律分析及式(2)说明了浆体容重与流域形态完整系数存在一定的关系。

已有成果表明,泥石流沟道集水能力与流域形态有关:

$$Q_w = 0.278\psi \frac{S_p^n}{\tau^n} F \quad (3)$$

式中, Q_w ——暴雨洪峰流量 (m^3/s);

ψ ——洪峰径流系数;

S_p ——暴雨雨力 (mm/h);

n ——暴雨递减指数,根据各地水文资料可查出;

F ——集水面积 (km^2);

τ ——流域汇流时间 (h)。

式(3)表明,对于流域形态系数较大(集水面积较大)的泥石流,其沟道集水能力较强,能够产生较大的暴雨洪峰流量(图 4)。

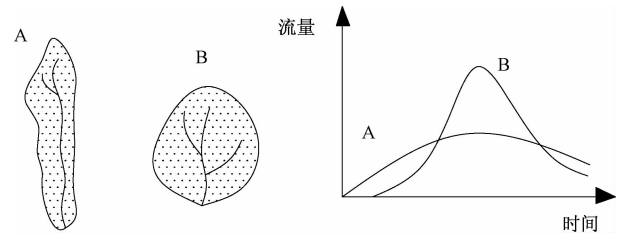


图 4 泥石流流域形态与洪峰流量关系^[13]
Fig. 4 Relationship between debris flow watershed morphology and peak flow rate

而泥石流的容重取决于其中的土水比,土水比的值越大,泥石流的容重越大^[6],见式(4):

$$\rho_c = \rho_s - C_v \times (\rho_s - \rho_w) \quad (4)$$

式中: ρ_s ——泥石流流体中固体颗粒的平均比重 (t/m^3);

ρ_w ——水的容重 (t/m^3);

ρ_c ——泥石流流体的容重 (t/m^3);

C_v ——水的体积比重。

可见流域形态系数较大的沟道形成的泥石流浆体水土比较大,其浆体容重较小,多为稀性泥石流。这一趋势与式(2)所呈现的规律是一致的。

4.2 沟道发育程度

泥石流流域形态完整程度包含流域面积与沟道长度两个方面。流域面积是反映泥石流沟谷发育程度的重要参数,有研究表明^[10],流域面积随着泥石流沟谷由发育期向衰退期的发展而逐渐增大,发育期泥石流流域面积多小于 $1km^2$,衰退期泥石流多大于 $10km^2$;沟道长度是影响泥石流沟谷发育程度快慢的一个指标,主沟长越大,其发育速率就越小;泥石流沟道的发育程度与发育速率对泥石流浆体性质起到了控制作用,如发育期的泥石流沟谷总体以侵蚀下切为主^[11],形成的泥石流一般为粘性^[12],而衰退期(或老年期)的泥石流沟,形成的泥石流一般为稀性,容重较小,其影响如图 5 所示。这一趋势与式(2)所呈现的规律是一致的。

5 结论

(1)在同一区域地质条件下,泥石流浆体容重随流域形态完整系数的增大而非线性减小。当泥石流流域形态完整系数大于 0.3 时,形成的泥石流通常为稀性泥石流,且随着流域形态完整系数的进一步增大,逐步向水石流、夹砂水流的状态发展;

(2)泥石流浆体容重与流域形态完整系数间存在

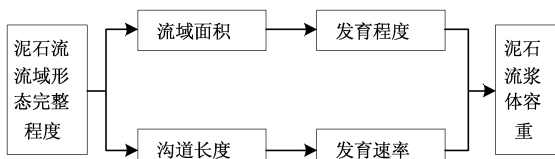


图5 泥石流流域形态对容重的影响

Fig. 5 The influence circuit between integrity coefficient of watershed morphology and the bulk density

指数函数拟合关系。拟合公式的容重计算值与试验值的吻合度高,55%的相对误差值小于5.0%。特别适用于泥石流流域形态系数大于0.30的桦叶型泥石流沟,计算值与试验值之间有相对误差小于2.0%的占到83.3%;

(3)泥石流流域形态对浆体容重的影响与降水条件、沟道发育程度等因素有关。影响规律与拟合曲线所呈现的规律基本一致,验证了基于流域形态完整系数的容重拟合计算公式的合理性;

(4)研究成果可应用在无法直接观测的泥石流的容重计算上,也可与同一区域内的泥石流的容重现场调查试验结果进行对比验证,以减小试验中的随机误差及人为因素的干扰,为泥石流容重参数的合理确定起到区域性的参考作用。

参考文献:

[1] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 789 - 796. [YU B. Research on the Calculating Density by the Deposit of Debris Flows [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 789 - 796. (in Chinese)]

[2] 陈宁生, 杨成林, 李欢. 基于浆体的泥石流容重计算[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(2): 168 - 173. [CHEN N S, YANG H L, LI H. Calculation of the debris flow concentration based on debris flow slurry [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(2): 168 - 173. (in Chinese)]

[3] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0220 - 2006 泥石流灾害防治工程勘察规范[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2006. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0220 - 2006 Code for Investigation of Mitigation and Prevention Engineering of Debris Flow [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2006. (in Chinese)]

[4] 杜榕恒, 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: 99 - 100. [DU L H, KANG Z C, CHEN X Q, et al. A Comprehensive Investigation and Control Planning for Debris Flow in the Xiaojiang River Basin of Yunnan Province [M]. Chongqing: Scientific and Technological Literature Publishing House, 1987: 99 - 100. (in Chinese)]

[5] 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: 131 - 132. [WU J S, KANG Z C, TIAN L Q, et al. Observation Research on Debris Flow in Jiangjia Ravine of Yunnan Province [M]. Beijing: Scientific Press, 1990: 131 - 132. (in Chinese)]

[6] 崔鹏, 陈宁生, 刘中港, 等. 基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算[J]. 中国科学 E 辑技术科学, 2003, 33(S): 164 - 174. [CUI P, CHEN N S, LIU Z G, et al. Calculation of the Debris Flow Density Based on the Clay Content [J]. Science in China Series E, 2003, 33(S): 164 - 174. (in Chinese)]

[7] 李培基, 梁大兰. 泥石流容重及其计算[J]. 泥沙研究, 1982(3): 75 - 83. [LI P J, LIANG D L. Density of Debris Flows and the Calculating [J]. Journal of Sediment Research, 1982(3): 75 - 83. (in Chinese)]

[8] 中国科学院 - 水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000: 38. [Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. Chinese Debris Flow [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000: 38. (in Chinese)]

[9] 周必凡. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 16 - 17. [ZHOU B F. Mitigation and Prevention Guidebook of Debris Flow [M]. Beijing: Scientific Press, 1991: 16 - 17. (in Chinese)]

[10] 庄建琦, 崔鹏. 基于BP神经网络泥石流沟发育阶段的判定: 以成昆铁路四川段和昆东铁路为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(9): 849 - 855. [ZHUANG J Q, CUI P. Determination on Evolution Stage of Debris Flow Gully Based on BP Neural Network [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(9): 849 - 855. (in Chinese)]

[11] 陈强, 聂德新, 李树武, 等. 澜沧江里底水电站库区泥石流物质来源及堆积特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 11 - 14. [CHEN Q, NIE D X, LI S W, et al. Study on the source material and deposition characteristics of debris flow around

- Lidi hydroelectric power station in the upstream of Lancang River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(2): 11 – 14. (in Chinese)]
- [12] 中国科学院 – 水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000: 41. [Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. *Chinese Debris Flow* [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000: 41. (in Chinese)]
- [13] 沈玉吕, 龚国元. 河流地貌学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 15. [SHENG Y L, GONG G Y. *Introduction of River Geomorphology* [M]. Beijing: Scientific Press, 1986: 15. (in Chinese)]
- [14] 庄建琦, 崔鹏, 胡凯衡, 等. 沟道松散物质起动形成泥石流实验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(5): 230 – 236. [ZHUANG J Q, CUI P, HU K H, *et al.* Research on Debris Flow Initiation Due to Bed Failure After Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(5): 230 – 236. (in Chinese)]
- [15] 成昆铁路技术总结委员会办公室. 成昆铁路泥石流[J]. *铁道学报*, 1979(3): 89 – 107. [Office of Technical Summary Committee along ChengKun Railway. Mud-stone Flow on Regions of Chengdu-Kunming Railway [J]. *Journal of The China Railway Society*, 1979(3): 89 – 107. (in Chinese)]

Research on the method for calculating the bulk density of debris flow based on the integrity coefficient of watershed morphology

HAN Zheng¹, XU Lin-rong¹, SU Zhi-man¹, WANG Lei², CHEN Shu-yang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha, Hunan 410004, China;

2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co, Ltd, Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: In this paper, we build up the statistic relationship between the bulk density of debris flow slurry and integrity coefficient of watershed morphology by carrying out field investigation of 20 debris flow basins at the mountain areas of Sichuan province. With fitting analysis results, we fit the trend line and obtain the exponential formula to calculate the bulk density of the debris flow slurry, verifying the rationality of fitting formula by error analysis, effect factors analysis and tendency analysis. Primary research results show that integrity coefficient of basin shape exert a remarkable influence on the bulk density, which decreases when the integrity coefficient increases. The diluted debris flow or even water-stone flow is formed when the integrity coefficient is over 0.3, and the minimal value of bulk density is 1.28 t/m³ from calculation, which is very close to the current observed value. This method is especially suitable for those debris flows whose integrity coefficient of watershed morphology is relatively large. It can provide an easy way to calculate the bulk density of the debris flow which cannot be observed directly, and it is also helpful to determine the bulk density legitimately in some regions.

Key words: debris flow; integrity coefficient of watershed morphology; bulk density

责任编辑: 张若琳