

不同频率下的泥石流流体特征数值计算方法研究

——以大寨沟流域为例

敖浩翔, 刘 晶, 况明生, 张 洪, 鲍华兵

(西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘 要: 在泥石流定量研究中, 泥石流流量、流速、泥石流规模是泥石流流体最重要的特征值。能比较准确的确定泥石流这些特征数值既是泥石流计算中的关键问题, 也是泥石流防治工程设计研究中的重要因素。利用雨洪法, 首先比较一种或两种水文学的计算方法, 择优来计算暴雨与洪水特征数值, 然后利用暴雨与洪水特征数值来推算泥石流流体各种特征数值。比如用暴雨洪峰流量以及配方法来计算泥石流流量, 利用洪水总量来推算泥石流规模。

关键词: 泥石流; 特征数值; 流量; 流速; 规模

中图分类号: P624.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)04-0093-03

Calculation of Characteristics Factors of
Debris Flow Under Different Frequency

——Take Dazhaigou Valley as an Example

A O Hao-xiang, LIU Jing, KUANG Ming-sheng, ZHANG Hong, BAO Hua-bing

(College of Geography, Southwest China University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In metered research of debris flow, the debris flow discharge, current velocity, the debris flow scale are the most important characteristic factors in the debris flow. Calculating characteristics factors accurately is not only the key problem within the debris flow calculation, but also the important factor of research on debris flow's prevention and cure. Rain-storm and flood method is used, making use of one or two kinds of calculation method to calculate rain-storm and the flood characteristic factors, then making use of the rain-storm and the flood characteristic factors to reckon various characteristic factors of the debris flow. For example, to calculate the debris flow discharge with the rain-storm biggest discharge and the formulation methods, or make use of the flood total amount to reckon the debris flow scale.

Key words: debris flow; characteristics Factors; discharge; current velocity; scale

泥石流流量、流速、泥石流规模是泥石流流体最重要的特征值。它不仅反映了泥石流的强度、规模和泥石流的性质, 而且还决定着泥石流防治工程构筑物的类型、结构和大小, 是泥石流防治工程设计研究中不可缺少的基本参数。因此, 比较准确的确定泥石流这些特征数值既是泥石流计算中的关键问题, 也是泥石流工作者极为关注的焦点。雨洪法是计算泥石流流体各种特征数值的一种很好的方法, 主要依据暴雨与洪水特征数值进行推算。

1 暴雨与洪水特征数值

1.1 设计暴雨洪峰流量

(1) 水文地理法。一个地区的暴雨洪峰流量同当地暴雨、地形、土壤、植被及其流域特征和人类经济活动等因素密切相关。大寨沟流域的设计暴雨洪峰流量采用当地的水文地理法进行推算。水文地理法计算暴雨洪峰流量的公式为:

$$Q_{mp\%} = \phi F^n S_p^a J^{\beta} f^{\gamma}$$

式中: $Q_{mp\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的暴雨(清水)洪峰流量 (m^3/s); $p\%$ ——设计频率也就是设计发生频率(概率)。如 1% 为百年一遇, 5% 为 20 年一遇; ϕ ——洪峰径流系数, 即汇流时间内最大降雨量与其所产生的径流深之比值, 这里取 0.68 ; F ——设计断面的集水面积即流域汇水面积 (km^2), 根据大寨沟地形地势情况, 这里取沟口以上也就是全流域面积 $28.73 km^2$; n ——暴雨衰减指数, 表示一次暴雨过程中各种时段的平均暴雨强度随着时段的加长而减小的指标。从云南省洪峰流量 Q_m 同雨强 S 的比值与流域面积 F 的 $Q_m/S-F$ 关系图上查得 n 值, 大寨沟流域的 n 值在 $0.58 \sim 0.62$, 这里取 0.6 ; $S_{p\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的暴雨参数又称雨力也就是最大时雨量 (mm/h), 相当于 $t=1 h$ 的雨强。与暴雨的频率有关, 一般可由最大 $24 h$ 设计暴雨量 $Q_{ip\%}$ 计算而得, 公式为 $S_{p\%} = K \cdot Q_{ip\%} \cdot 24^{n-1}$, 其中: $K = Q_{max}/Q_i$, 是根据定时与自记雨量的资料分析, 定时的日雨量 Q_i 与所摘录的最大

* 收稿日期: 2005-12-15

基金项目: 国家电力公司华东勘测设计研究院(白鹤滩水电站大寨沟、海子沟的泥石流影响及防治对策)

作者简介: 敖浩翔(1982-), 男, 硕士, 研究方向为地貌与环境信息系统, 主要从事自然灾害与 GIS 研究; 通讯作者: 况明生, 教授, 硕士生导师。

自记雨量 Q_{\max} 存在一定的比率即 K , 其 K 值的变化稳定, 一般在 1.1~1.2 之间, 这里取 1.2; $Q_{\varphi\%} = Q_H (1 + C_V) \varphi_{p\%}$, Q_H 为多年 24 h 雨量均值, 应用适线法与 20 年中的每年最大日雨量数值点进行拟合修正后, 得 Q_H 为 43.99 mm, 变差系数 C_V 为 0.467, 偏态系数 C_S 为 1.5, 而 $\varphi_{p\%}$ 则为设计频率 $p\%$ 下的离均系数的值, 可根据 $P - III$ 型频率曲线离均系数值表查得。 J ——设计断面河道平均坡降 ($\%$), 这里取 339 $\%$; f ——流域形状系数, $f = F/L_2$, 其中 L 为设计断面上主河长度 (km), 为 11.2 km; α 、 β 、 γ ——相关指数, 经分析 $\alpha = 1$, J 、 f 对洪峰流量的影响微弱, 在区域洪峰流量的计算中一般将此并入 ϕ 值内进行综合处理, 从而得到简洁方便的设计洪峰流量计算公式:

$$Q_{mp\%} = \phi F^n S_{p\%}$$

(2) 推理公式法:

可利用‘手册’^[2] 的推理公式法计算最大洪峰流量:

$$\text{当 } t_c \geq \tau \text{ 时, } Q_m = 0.278 \frac{h_\tau}{\tau} \cdot F$$

$$\text{当 } t_c < \tau \text{ 时, } Q_m = 0.278 \frac{h_R}{\tau} \cdot F$$

其中: $\tau = \frac{0.278L}{mJ^{1/3}Q_m^{1/4}}$

$$h_t = H_t - \mu \cdot t \quad H_t = S \cdot t^{1-n}$$

式中: Q_m ——洪峰流量 (m^3/s); τ ——流域汇流时间 (h); t_c ——地面产流历时 (h); h_τ ——汇流时间 τ 内的地表净雨深 (mm); h_R ——产流时间 t_c 内的地表净雨量 (mm); H_t ——设计暴雨量由大到小重新排列后的积累过程; S ——最大 1 h 降雨量 (mm/h); u ——产流历时内地面平均入渗率 (mm/h); m ——流域汇流参数。采用相关地区汇流参数计算经验公式:

$$\text{当 } 1 < \theta \leq 30, m = 0.318\theta^{0.204}$$

$$\text{当 } 30 < \theta \leq 300, m = 0.055\theta^{0.72}$$

其中: $\theta = L/(J^{1/3}F^{1/4})$, J 取小数位; 其他符号意义同前。

也可利用推理公式法的另一个公式:

$$Q_{mp\%} = 0.278\phi(S_{p\%}/T^0)F$$

其中符号意义同前。

从总体上看, 两种方法推算的低频率洪峰流量值比较一致; 对高频率洪水, 水文地理法的数据值比推理公式法的数据值稍大, 但差值都在 10 余 m^3/s 之内。从工程安全考虑, 采用水文地理法推算的洪峰流量数值更为有宜。

1.2 洪峰流速

设计频率 $P\%$ 下的暴雨洪峰流速等于:

$$V_{mp\%} = Q_{mp\%} / B_{p\%}$$

式中: $V_{mp\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的暴雨洪峰流速 (m/s); $Q_{mp\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的暴雨洪峰流量 (m^3/s); $B_{p\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的暴雨洪峰时的水道断面面积 (m^2)。由实地勘测获得。

1.3 洪水总量

为简化计算起见, 根据山区小流域暴雨洪峰过程历时短的实际情况, 可在扣出暴雨损失的基础上, 求出洪水产流期的平均净雨强和洪水历时, 这样就可以将设计频率 $P\%$ 下的暴雨洪水总量确定为是设计频率 $P\%$ 下的洪水产流期平均净雨强和洪水历时在该流域面积 F 内的乘积, 即:

$$W_{bp\%} = K S_{ap\%} t_{cp\%} F$$

式中: $W_{bp\%}$ ——设计频率 $P\%$ 下的暴雨洪水总量 (万 m^3);

K ——洪水总量系数, 数值为 1 000 (流域面积同降雨量之间的单位统一后的数值); $S_{ap\%}$ ——设计频率 $P\%$ 下的洪水产流期平均净雨强 (mm/h), 计算公式为:

$$S_{ap\%} = \frac{S_{p\%}}{(t_{cp\%} + d)^n} \cdot \frac{nt_{cp\%}}{(t_{cp\%} + d)} \cdot \frac{S_{p\%} nt_{cp\%}}{(t_{cp\%} + d)^{n+1}}$$

$t_{cp\%}$ ——设计频率 $P\%$ 下的洪水历时 (h); F 意义同前。

把 $S_{ap\%}$ 的计算公式代入 $W_{bp\%}$ 的计算公式中则有:

$$W_{bp\%} = K \cdot \frac{S_{p\%} nt_{cp\%}}{(t_{cp\%} + d)^{n+1}} \cdot t_{cp\%} \cdot F$$

式中: d ——暴雨时间参数, 这里取 0.04; 其他符号意义同前。

可见洪水总量 $W_{bp\%}$ 的确定关键在于洪水历时 $t_{cp\%}$ 的计算, 而洪水历时 $t_{cp\%}$, 暴雨雨强 $S_{p\%}$, 暴雨衰减指数 n , 暴雨时间参数 d , 暴雨损失指数 r 以及暴雨损失系数 R 存在着以下的公式关系:

$$RS_{p\%}^{r-1} = \frac{t_{cp\%} + d - nt_{cp\%}}{(t_{cp\%} + d)^{1+n(1-r)}}$$

式中: R ——暴雨损失系数, 取 1.10; r ——暴雨损失指数, 取 0.76。

把 n 、 d 、 r 和 R 的值代入上式后整理为:

$$\frac{0.4t_{cp\%} + 0.4}{(t_{cp\%} + 0.4)^{1.144}} = 1.1S_{p\%}^{0.24}$$

于是便可从上式中求解 $t_{cp\%}$ 值。但是, 公式所表示的 $t_{cp\%}$ 计算公式同样是隐函数形式, 且 $t_{cp\%}$ 的计算繁杂, 对此可采取试算作图的方式求解, 具体作法是: 当 $t_{cp\%}$ 分别假定为 0.5、1.0、1.5、2.0、……时, 则 $S_{p\%}$ 分别相应地为 7.6、18.8、31.8、45.3、……, (不同雨强的暴雨具有不同的洪水历时), 并据此作成 $t_{cp\%} - S_{p\%}$ 关系曲线图。于是, 洪水历时 $t_{cp\%}$ 值就可以根据 $S_{p\%}$ 值利用此图查出。

1.4 搬运砾石直径

暴雨洪水对地表松散堆积物的影响主要表现为对松散固体物质具有冲刷、搬运和堆积能力。根据地表流水对固体物质推移搬运过程的分析, 地表松散固体物质在流水的作用下主要受到两种力的影响: 一种是流水对固体物质的推动力; 另一种是固体物质 (石块或泥沙) 因重力而产生的沟床摩擦阻力。当直径为 d 的固体物质, 受水流的推动力为 P_w 时, 则:

$$p = krF \frac{v^2}{2g} = kr \frac{\pi d^2 v^2}{2g}$$

式中: k ——系数; r ——水的密度; F ——固体物质受水压的投影面积; π ——水头。

而这时产生的摩擦阻力 f 为:

$$f = A(r_1 - r)b = \frac{4}{3}\pi d^3(r_1 - r)b$$

式中: A ——固体物质 (石块或泥沙) 的体积; r_1 ——石块比重或密度; b ——石块重力产生的摩擦阻力系数。

当流水的推力与固体物质在重力作用下的摩擦阻力相等而处于临界状态时, 则有

$$k\pi d^2 r \frac{v^2}{2g} = \frac{4}{3}\pi d^3(r_1 - r)b$$

这时固体物质失稳, 石块或泥沙被推移搬运 (上式中因河床比降数值小, 故可以不予考虑)。对上式进行整理得

$$d = \frac{3krv^2}{8bg(r_1 - r)}$$

并令:

$$a = \frac{3kr}{8bg(r_1 - r)}$$

则有:
$$d = \alpha w^2$$
考虑设计 $P\%$ 的情况下则有:
$$d_{mp\%} = \alpha w_{mp\%}^2$$
式中: $d_{mp\%}$ ——设计频率 $P\%$ 下洪水推移搬运固体物质的直径(cm); α ——系数, 值为 6.4; $V_{mp\%}$ ——意义同前。

经计算大寨沟流域不同频率下的暴雨与洪水上述各种特征数值见表 1。

表 1 大寨沟流域不同频率下的暴雨与洪水特征数值									
设计频率/ $P\%$	0.2	1	2	5	10	20	50	100	
设计暴雨量 $Q_p\%$ /mm	177.5	152.0	134.4	113.4	96.2	78.4	52.8	23.1	
暴雨参数 $S_p\%$ /mm	59.7	51.2	45.2	38.2	32.4	26.4	17.8	7.8	
暴雨洪峰流量 $Q_{mp\%}$ / (m ³ ·s ⁻¹)	304.4	261.1	230.5	194.8	165.2	134.6	90.8	39.8	
洪水流速 $V_{mp\%}$ / (m·s)	8.2	7.5	6.9	6.1	5.4	4.8	4.0	2.6	
水道断面 $B_p\%$ /m ²	36.9	34.6	33.4	32.1	30.7	28.3	22.7	15.2	
暴雨产流历时 $t_p\%$ /h	2.61	2.39	2.02	1.78	1.56	1.35	1.01	0.6	
平均净雨强 $S_{qp\%}$ / (mm·h ⁻¹)	34.4	29.5	26.1	22.1	18.7	15.2	10.2	4.5	
洪水总量 $W_{bp\%}$ /万 m ³	257.95	202.56	151.47	113.02	83.81	58.95	29.60	7.76	
搬运砾石直径 $d_{mp\%}$ /cm	430.3	360.0	304.7	238.1	186.6	147.5	102.4	43.3	

2 泥石流流体特征数值

2.1 泥石流流量

(1) 配方法。泥石流流量一般都以配方法进行计算。所谓配方法, 就是用某一区域的洪峰流量加上该区域内泥石流流体中的固体物质体积来计算泥石流的流量。计算公式为:

$$Q_{cp\%} = Q_{mp\%} (1 + \varphi) Q_k$$
式中: $Q_{cp\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的设计泥石流流量(m³/S); φ ——泥石流重度修正系数, $\varphi = (\gamma_c - \gamma_B) / (\gamma_H - \gamma_C)$, 其中: r_c ——泥石流容量(t/m³), $\gamma_C = G/V$, 式中: G ——泥石流样品总重量(T), V ——泥石流样品总体积(m³), r_c 经计算为 1.516 t/m³, r_B ——水的比重(t/m³)其值为 1, r_H ——泥石流固体物质重度(t/m³), 根据岩土质量, 取 2.6 t/m³, φ 经计算为 0.475; Q_k ——区域泥石流特征流量修正系数即泥石流流体阻塞系数, 取值范围为 1.1~ 2.5, 根据云南东川泥石流研究成果, 结合大寨沟低频率泥石流主要为水石流或稀性泥石流的性质, 取 1.25。

(2) 最大砾径法。所谓“最大砾径法”, 是日本泥石流学者高桥堡提出的, 其理论根据是: 因沟床内的最大洪积砾石为泥石流流体内最大砾石的停积物, 那么, 就可以根据沟床内最大砾石直径反求泥石流流量。公式为:

$$Q_{q,\%} = 8.35B (d_{\text{tfc}})^{1.5}$$
式中: B ——沟床宽度(m); $d_{p\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的泥石流流体内最大砾石的平均直径(m)。

比如计算百年一遇(设计频率为 1%) 的泥石流流量:
根据对大寨沟下游河床中的砾石调查(见表 2), 最大砾

参考文献:

[1] 水利部长江水利委员会水文局. 水利水电工程设计洪水计算规范[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1993.
[2] 水利部长江水利委员会水文局. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995. 294– 387.
[3] 刘汉超, 等. 泥石流防治工程设计规范[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
[4] 谢洪. 岷江干旱河谷区龙洞沟泥石流及其防治[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(5): 23– 24.
[5] 张远曦, 等. 泥石流流量计算方法研究[J]. 乐山师范学院学报, 2004. 19(5): 107– 109.
[6] 陈宁生, 高延超, 等. 丹巴县邛山沟特大灾害性泥石流汇流过程分析[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 106– 107.

石直径达 3.66 m, 由表 1 可见, 这与大寨沟流域百年一遇上特大洪流的携带最大砾石直径 3.6 m 相当。据此, 可以将这次洪流确定为百年一遇。

表 2 大寨沟流域下游河床最大砾石直径测量数据									
砾石数	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	平均直径/m
砾石直径/m	2.74	3.56	3.21	2.97	2.93	3.66	2.89	3.46	3.18

* :此数据为下红岩附近沟宽约为 10 m 的顺直河道内的测量值。
据此, 由实测河床最大砾石平均直径可得大寨沟百年一遇的泥石流流量:

$$Q_{c,1\%} = 8.35B (d_{1\%})^{1.5} = 8.35 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3.18^{1.5} \text{ m} = 473.51 \text{ m}^3/\text{s}$$
对比“配方法”和“最大砾径法”的计算结果, “配方法”的计算数值比“最大砾径法”略微大一些。从工程安全角度考虑, 以采用“配方法”进行泥石流流量的推算为宜。

2.2 泥石流流速

利用“泥石流防治工程设计规范”中泥石流流速计算公式计算泥石流流速:

$$V_{q,\%} = (\gamma_h \varphi + 1)^{-1/2} K^{-1} I^{1/2} H_p^{2/3}$$
式中: $V_{q,\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的设计泥石流流速(m/s); γ_h ——固体物质重度(t/m³), 根据岩土质量, 取 2.6; K ——泥石流清水沟床槽率系数, 取 0.08; I ——清水水力坡度, 取 0.205; $H_{p\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下计算断面的平均水深(m), 由沟道断面特征, 结合不同频率下的泥石流流量取相应数值; φ 意义同前。

2.3 泥石流规模

2.3.1 泥石流总量

可根据泥石流流量配方法计算公式中的修正系数求得, 即:

$$W_{q,\%} = W_{bp\%} (1 + \varphi)$$
式中: $W_{q,\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的泥石流总量(万 m³); $W_{bp\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的洪水总量(万 m³); φ 意义同前。

2.3.2 泥石流固体物质冲出量
在已知泥石流总量, 且又知泥石流固体物质含量的基础上, 则同频率下的泥石流固体物质冲出量计算公式为:

$$W_{dp\%} = W_{q,\%} \cdot \varphi$$
式中: $W_{dp\%}$ ——设计频率 $p\%$ 下的泥石流固体物质冲出量(万 m³); $W_{q,\%}$ 和 φ 意义同前。

经计算大寨沟流域不同频率下的泥石流流量、流速、总量和固体物质冲出量四种特征数值见表 3。

表 3 大寨沟流域不同频率下的泥石流流体特征数值									
设计频率/ $P\%$	0.2	1	2	5	10	20	50	100	
流量 $Q_{cp\%}$ / (m ³ ·s)	561.24	481.40	424.98	359.16	304.59	248.17	167.41	73.38	
流速 $V_{cp\%}$ / (m·s)	6.60	6.57	6.38	6.14	5.99	5.62	5.14	4.71	
泥石流总量 $W_{cp\%}$ /万 m ³	380.48	298.78	223.42	166.70	123.62	86.95	43.66	11.45	
固体物质冲出量 $W_{dp\%}$ /万 m ³	180.73	141.92	106.12	79.18	58.72	41.30	20.74	5.44	