



泥石流冲磨作用

1.1 泥石流流速

1.1.1 稀性泥石流流速

泥石流流速是确定泥石流冲击、磨蚀荷载的重要依据,国内外在该方面做了大量研究,建立了多个经验、半定量的泥石流流速计算公式,本书从稀性泥石流、黏性泥石流和水石流三方面介绍经典且具有较强工程实用价值的泥石流流速计算公式。

1. 斯里勃内依公式

基于水力学谢才公式,苏联学者 M. Φ. 斯里勃内依提出的稀性泥石流流速公式为

$$v_c = \frac{v_b}{a} = \frac{m_0}{a} R_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{4}} \quad (1.1)$$

式中: v_c 为泥石流流速(m/s); v_b 为清水流速(m/s); a 为修正系数; m_0 为清水阻力系数的倒数; R_c 为水力半径(m); I_c 为泥石流沟床比降。

式(1.1)也可表示为下列形式:

$$v_c = H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{4}} \quad (1.2)$$

式中: H_c 为泥石流体平均泥深度(m)。

费祥俊等推导了修正系数 a 的表达式:

$$a = \sqrt{\frac{\gamma_c}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{1 - S_v}} \quad (1.3)$$

式中: S_v 为泥石流固相体积比浓度; γ_w 为清水容重(kN/m³); γ_c 为泥石流体平均容重(kN/m³)。

2. 动力平衡公式

假定清水动能与挟沙水流(泥石流)动能相等,按恒定均匀流理论建立的泥石流动力平衡流速公式为

$$v_c = \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{n} R_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

式中： $\frac{1}{n}$ 为清水河床糙率。

3. 铁道部第一勘测设计院西北公式

铁道部第一勘测设计院根据对青海扎麻隆峡内纵坡为 70‰~130‰的稀性泥石流沟调查资料,基于谢才公式建立的稀性泥石流流速计算公式为

$$v_c = \frac{M_0}{a} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{3}{8}} \tag{1.5}$$

式中： M_0 为未考虑泥石流特征的沟床糙率,铁道部第一勘测设计院建议取 15.5；修正系数 a 可按式(1.6)和式(1.7)计算确定：

$$a = \sqrt{1 + \varphi_c \gamma_s} \tag{1.6}$$

$$\varphi_c = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_c} \tag{1.7}$$

式中： γ_s 为泥石流流体中固相颗粒容重(kN/m³)。

4. 铁道部第三勘测设计院泥石流公式

$$v_c = \frac{15.5}{a} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \tag{1.8}$$

该公式仍然是基于谢才公式建立的。

5. 云南东川泥石流流速改进公式

中国科学院成都山地灾害与环境研究所基于云南东川大量的泥石流现场观测资料,按照谢才公式提出了泥石流流速计算公式(又称西南地区现行公式)：

$$v_c = \frac{m_c}{a} R_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \tag{1.9}$$

式中： m_c 为 JI. B. 巴克诺夫斯基糙率系数,按表 1.1 参考取值。

表 1.1 JI. B. 巴克诺夫斯基糙率系数

类型	沟槽特征	m_c 值		坡度/‰
		极限值	平均值	
1	糙率最大的泥石流沟槽。沟槽中堆积有难以滚动的棱石或稍能滚动的大石块。沟槽被树木(树干、树枝及树根)严重阻塞,无水生植物。沟底以阶梯式急剧降落	3.9~4.9	4.5	375~174
2	糙率较大的不平整的泥石流沟槽。沟槽无急剧突起,沟槽内堆积大小不等的石块,沟槽被树木所阻塞,沟槽内两侧有草本植物,沟床不平整,有坑洼,沟底呈阶梯式降落	4.5~7.9	5.5	199~67
3	较弱的泥石流沟槽,但有大的阻力。沟槽由滚动的砾石和卵石组成。沟槽常因稠密的灌丛而被严重阻塞,沟槽凹凸不平,表面因大石而突起	5.4~7.0	6.6	187~116
4	流域在山区中、下游的泥石流沟槽。沟槽经过光滑的岩面,有时经过具有大小不等的阶梯跌水的沟床。在开阔河床有树枝,砂石停积阻塞,无水生植物	7.7~10.0	8.8	220~112
5	流域在山区或近山区河槽。河槽经过砾石、卵石河床,由中、小粒径与能完全滚动的物质所组成,河槽阻塞轻微,河岸有草本及木本植物,河底降落较均匀	9.8~17.5	12.9	90~22

6. 北京市政设计院泥石流公式

$$v_c = \frac{M_w R_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{10}}}{a} \quad (1.10)$$

式中: M_w 为河床的外阻力系数,按表 1.2 参考取值。

表 1.2 河床外阻力系数

分类	河床特征	M_w 值	
		$I_c > 0.015$	$I_c \leq 0.015$
1	河段顺直,河床平整,断面为矩形或抛物线形的漂石、砂卵石或黄土质河床,平均粒径 0.01~0.08m	7.5	40
2	河段较顺直,由漂石、碎石组成的单式河床,河床质较均匀,大石块直径为 0.4~0.8m,平均粒径 0.2~0.4m,或河段较弯曲、不太平整的 1 类河床	6.0	32
3	河段较顺直,由巨石、漂石、卵石组成的单式河床,大石块平均直径 0.1~1.4m,平均粒径为 0.1~0.4m,或较为弯曲、不太平整的 2 类河床	4.8	25
4	河段较顺直,河槽不平整,由巨石、漂石组成的单式河床,河床大石块直径为 1.2~2.0m,平均粒径 0.2~0.6m,或较为弯曲不平整的 3 类河床	4.8	20
5	河段严重弯曲,断面很不规则,有树木、植被、巨石严重阻塞河床	2.4	12.5

7. 清水动能推理公式

基于泥石流与清水动能相等,建立的清水动能泥石流流速推理公式为

$$v_c = \frac{1}{a} \frac{1}{n_w} H_w^{\frac{2}{3}} I_w^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

式中: n_w 为清水河床糙率(%); H_w 为清水水深(m); I_w 为清水沟床比降(%).

8. 洪正修稀性泥石流流速修正公式

洪正修基于谢才公式并通过在西南地区铁路沿线的泥石流资料修正,提出的稀性泥石流流速计算公式为

$$v_c = 0.7284 H_c^{0.446} I_c^{0.309} \quad (1.12)$$

1.1.2 黏性泥石流流速

1. 莫斯特科夫公式

$$v_c = \varphi \left(\frac{d_{cp}}{H} \right) \sqrt{gH(I - I_0)} \quad (1.13)$$

式中: d_{cp} 为泥石流固体颗粒的平均粒径(m); H 为泥深(m); I 为河床纵比降(用小数表示); I_0 为泥石流沟床的临界坡降(小数点表示); φ 为函数。

2. 歇普公式

$$v_c = \frac{\sqrt{I_c}}{2} Re \sqrt{g H_c I_c} \quad (1.14)$$

式中: Re 为泥石流流体的雷诺数。

3. 泥石流指数流速公式

$$v_c = \alpha_0 \left(\frac{d_{cp}}{H_c} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{1}{Re} \right)^{\alpha_2} \sqrt{g H_c I_c} \quad (1.15)$$

$$Re = \frac{\eta}{\gamma_c \sqrt{g H_c^3}} \quad (1.16)$$

根据云南东川蒋家沟泥石流 1974—1975 年的观测资料,拟合系数 $\alpha_0 = 25.38$, $\alpha_1 = 0.127$, $\alpha_2 = 0.057$ 。式中物理量同前。当忽略黏度项后,泥石流流速公式为

$$v_c = 27.57 \left(\frac{d_{cp}}{H_c} \right)^{0.245} \sqrt{g H_c I_c} \quad (1.17)$$

4. 东川蒋家沟泥石流流速公式

根据 1965—1967 年、1973—1975 年共 101 次泥石流 3000 多阵流的观测资料,中国科学院成都山地灾害与环境研究所提出了云南东川蒋家沟泥石流公式

$$v_c = \frac{1}{n_c} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.18)$$

$$\frac{1}{n_c} = 28.5 H_c^{-0.34} \quad (1.19)$$

5. 东川大白泥沟、蒋家沟泥石流流速公式

$$v_c = K H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{5}} \quad (1.20)$$

式中: K 为黏性泥石流流速系数(表 1.3)。

表 1.3 黏性泥石流流速系数 K 值表

H_c/m	<2.5	3	4	5
K	10	9	7	5

6. 四川西昌黑马沙河、马颈沟公式

$$v_c = 2.77 \left(\frac{R_c}{d_{85}} \right)^{0.737} \left(\frac{\eta_{eb}}{\eta_e} \right)^{0.42} \sqrt{R_c I_c} \quad (1.21)$$

式中: d_{85} 为占固体总重量 85% 的固体颗粒粒径(m); η_{eb} 为清水有效黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$); η_e 为泥石流浆体的有效黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

7. 西藏古乡沟、东川蒋家沟、武都火烧沟公式

$$v_c = \frac{1}{n_c} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.22)$$

式中: n_c 为黏性泥石流沟床糙率,按照表 1.4 参考取值。

表 1.4 黏性泥石流糙率表

序号	泥石流流体特征	沟床特征	糙率值	
			n_c	$1/n_c$
1	流体呈整体运动；石块粒径大小悬殊，一般在 30~50cm，2~5m 粒径的石块约占 20%；龙头由大石块组成，在弯道或河床展宽处易停积，后续流可超越而过，龙头流速小于龙身流速，堆积呈龙岗状	沟床极粗糙，沟内有巨石和挟带的树木堆积，多弯道和大跌水，沟内不能通行，人迹罕见，沟床流通段纵坡在 10%~15%，阻力特征属高阻型	平均 0.270 $H_c>2\text{m}$ 时，为 0.445	4.57 2.25
2	流体呈整体运动；石块较大，一般石块粒径 20~30cm，含少量粒径 2~3m 的大石块；流体搅拌较为均匀；龙头紊动强烈，有黑色烟雾及火花，龙头和龙身流速基本一致；停积后有龙岗状堆积	沟床比较粗糙，凹凸不平，石块较多，有弯道、跌水；沟床流通段纵坡 7.0%~10.0%，阻力特征高阻型	$H_c<1.5\text{m}$ 时为 0.05~0.033 平均 0.04 $H_c>1.5\text{m}$ 时为 0.05~0.100 平均 0.067	20~30 25 10~20 15
3	流体搅拌十分均匀；石块粒径一般在 10cm 左右，挟有个别 2~3m 的大石块；龙头和龙身物质组成差别不大；在运动过程中龙头紊动十分强烈，浪花飞溅；停积后浆体与石块不分离，向四周扩散呈叶片状	沟床较稳定，河床质较均匀，粒径 10cm 左右；受洪水冲刷沟底不平而且粗糙，流水沟两侧较平顺，但干而粗糙；流通段沟底纵坡 5.5%~7.0%，阻力特征属中阻型或高阻型	$0.1\text{m}<H_c<0.5\text{m}$ 0.043 $0.5\text{m}<H_c<2.0\text{m}$ 0.077 $2.0\text{m}<H_c<4.0\text{m}$ 0.100	23 13 10
4		泥石流铺床后原河床粘附一层泥浆体，使干而粗糙河床变得光滑平顺，利于泥石流流体运动，阻力特征属低阻型	$0.1\text{m}<H_c<0.5\text{m}$ 0.022 $0.5\text{m}<H_c<2.0\text{m}$ 0.038 $2.0\text{m}<H_c<4.0\text{m}$ 0.050	46 26 20

8. 甘肃武都地区黏性泥石流流速公式

甘肃省交通科学研究所通过对陇南武都地区的泥石流调查，运用谢才公式，提出了适用于武都地区的黏性泥石流流速计算公式

$$v_c = M_c H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \tag{1.23}$$

式中： M_c 为泥石流沟床糙率系数，按表 1.5 参考取值。

表 1.5 泥石流沟糙率系数 M_c

类别	沟床特征	M_c			
		H_c/m			
		0.5	1.0	2.0	4.0
1	黄土地区泥石流或大型黏性泥石流沟，沟床平坦开阔，流体中有大石块很少，河床纵坡为 2%~6%，阻力特征属低阻型	—	29	22	16
2	中小型黏性泥石流沟，沟谷一般平顺，流体中含大石块较少，沟床纵坡为 3%~8%，阻力特征属于中阻型或高阻型	26	21	16	14

续表

类别	沟床特征	M_c			
		H_c/m			
		0.5	1.0	2.0	4.0
3	中小型黏性泥石流沟,沟床狭窄弯曲,有跌坎;或沟道虽顺直,但含大石块较多的大型稀性泥石流沟,沟床纵坡为4%~12%,阻力特征属高阻型	20	15	11	8
4	中小型稀性泥石流沟,碎石质河床,多石块,不平整,沟床纵坡为10%~18%	12	9	6.5	—
5	沟道弯曲,沟内多顽石、跌坎,床面极不平顺的稀性泥石流沟,河床纵坡为12%~25%	—	5.5	4.5	—

9. 西藏波密古乡沟公式

$$v_c = \frac{K_c}{n_c} H_c^{\frac{3}{4}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.24)$$

式中: n_c 为泥石流沟床糙率,一般黏性泥石流取 0.45,稀性泥石流取 0.25; K_c 为流速分布系数,一般取 0.45。

10. 云南大盈江浑水沟泥石流流速公式

$$v_c = \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_c} \right)^{0.4} \left(\frac{\eta_{eb}}{\eta_c} \right)^{0.1} v_w \quad (1.25)$$

式中: v_w 为清水流速(m/s),按谢才公式计算。

11. 西北公式

$$v = 4.55 H_c^{\frac{1}{4}} I_c^{\frac{1}{5}} \quad (1.26)$$

12. 修正曼宁公式

$$v_c = 1.62 \left[\frac{S_v(1-S_v)}{\sqrt{H_c I_c d_{10}}} \right]^{\frac{2}{3}} H_c^{\frac{1}{3}} I_c^{\frac{1}{6}} \quad (1.27)$$

$$d_{10} = 0.165 \gamma_f^{-3.60} \quad (1.28)$$

式中: d_{10} 为泥石流固体颗粒级配曲线上累计频率小于 10% 的颗粒的平均粒径(m); γ_f 为泥浆容重(kN/m³)。该公式适用于曼宁糙率 $n=0.033$ 左右的情况。

13. 蒋家沟泥石流表面流速公式

$$v_c = \frac{1}{2.405} \gamma_y \gamma_c \sqrt{g H_c I_c} \quad (1.29)$$

$$\gamma_y = p_c \gamma_s + p_d \gamma_s + \gamma_f (1 - p_c - p_d) \quad (1.30)$$

式中: γ_y 为泥石流中土体的损失容重(kN/cm³); p_c 为黏粒和粉粒所占的重量百分比,可由泥石流流体中的土体颗粒频率曲线查取; p_d 为粉粒(0.05mm)与最大悬浮颗粒所占的重量百分比,也可由土体颗粒频率曲线查得。

14. 洪正修黏性泥石流公式

$$v_c = 1.532 I_c^{0.301} H_c^{0.528} \quad (1.31)$$

式中相关物理量同前。

15. 王继康 82-1 公式

王继康基于对云南地区泥石流调查资料,提出了适用于黏性泥石流流速的计算公式

$$v_c = K_c H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{5}} \quad (1.32)$$

式中: K_c 为黏性泥石流流速系数,如表 1.6 所示。

表 1.6 黏性泥石流流速系数

H_c/m	<2.50	2.75	4.00	4.50	4.00	4.50	5.00	>5.50
K_c	10.0	9.5	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0

1.1.3 水石流流速

1. 日本高桥堡水石流流速公式

$$v_c = \frac{2}{5D_a} \left\{ \frac{g \sin \theta_i}{a_i \sin \varphi_m} \left[C_v + (1 - C_v) \frac{\rho_w}{\rho_s} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{C_s}{C_v} \right) \right] H_c^{\frac{3}{2}} \quad (1.33)$$

式中: θ_i 为泥石流表面纵坡角($^\circ$),一般可用河床纵坡角代替; D_a 为泥石流土体的平均粒径(m), $D_a = \sum_{i=1}^n P_i D_i$, i 为土体颗粒分组数; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; P_i 为第 i 组颗粒在级配曲线上所占的重量的最大粒径(m), D_m 为该组颗粒的最小粒径(m); a_i 为数字值,一般取 $0.013 \sim 0.042$ 。当 $\left(\frac{C_s}{C_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 > 0.071$ 时, $a_i = 0.042$; C_v 为水石流体积浓度; C_s 为水石流体的极限体积浓度; φ_m 为泥石流流体内摩擦角($^\circ$)。

在完全惯性范围内,二维泥石流模型中流速分布为

$$v_s = \frac{2}{3d} \left\{ \frac{g \sin \theta}{a_i \sin \varphi_s} [C_d + (1 - C_d)] \frac{\rho_m}{\sigma} \right\}^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \left[h^{\frac{3}{2}} - (h - y)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (1.34)$$

式中: θ 为泥石流沟床坡角($^\circ$); φ_s 为动摩擦角($^\circ$); C_* 为最大的可能静止体积浓度; d 为固相颗粒直径(m); σ 为固相颗粒密度(g/m^3); ρ_m 为浆体的密度(g/m^3); C_d 为浆体中砂砾固相体积浓度。其中, C_d 由下式计算:

$$C_d = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \varphi - \tan \theta)} \quad (1.35)$$

式中: φ 为沟床内物质的内摩擦角($^\circ$)。

根据 Bagnold 实验,当 $C_d < 0.81 C_*$ 时, $a_i = 0.042$ 。较大的 a_i 值可解释沟床面沉积物的不同速度,尤其是床面粒径较大的砾石在上层泥石流体的作用下发生移动的现象,各种条件下精确的 a_i 值需依赖于大量的实验数据予以统计。式(1.34)可解释泥石流流体垂直断面上的流速分布,当 $h = y$ 时,退化为泥石流表面流速公式。

2. 钱宁水石流公式

钱宁教授认为,水石流粗大颗粒的运动阻力主要取决于颗粒离散力,介质的黏滞阻力相对很小,可以忽略不计。依据 Bagnold(1954)饱和条件下的颗粒离散剪切力 τ_p 表达式

$$\tau_p = K_1 \rho_s D^2 \left[\left(\frac{S_{vm}}{S_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-2} \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (1.36)$$

式中: K_1 为系数; $(S_{vm}/S_v)^{\frac{1}{3}} - 1 = 1/\lambda$, 即线性浓度 λ 的倒数。当颗粒间流体变形产生的阻力可以忽略不计时, τ_p 在恒定条件下与水流剪切力

$$\tau = [S_v(\gamma_s - \gamma) + \gamma](H_c - y) \sin \theta \quad (1.37)$$

保持平衡, 即

$$K_1 \rho_s (\lambda D)^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 = [S_v(\gamma_s - \gamma) + \gamma](H_c - y) \sin \theta \quad (1.38)$$

积分式(1.38)取边界条件 $y=0$ 处, $v=0$, 并令 $\sin \theta = I_c$, 则得

$$v = \frac{2H_c}{3D\lambda} \sqrt{\frac{gH_c I_c}{K_1}} \left[S_v + \frac{\gamma}{\gamma_s}(1 - S_v) \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{y}{H_c} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (1.39)$$

在 $y=H_c$ 处, $v=v_{\max}$, 故

$$v_{\max} = \frac{2H_c}{3D\lambda} \sqrt{\frac{gH_c I_c}{K_1}} \left[S_v + \frac{\gamma}{\gamma_s}(1 - S_v) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.40)$$

由式(1.39)和式(1.40), 可将流速分布以速度差的形式表达:

$$\frac{v_{\max} - v}{v_{\max}} = \left(1 - \frac{y}{H_c} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.41)$$

已知横断面平均流速

$$v_c = \frac{1}{H_c} \int_0^{H_c} v dy$$

则平均流速表达式为

$$v_c = \frac{2H_c}{5D\lambda} \sqrt{\frac{gH_c I_c}{K_1}} \left[S_v + \frac{\gamma}{\gamma_s}(1 - S_v) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.42)$$

式中: S_v 为泥沙体积浓度。

3. 颗粒流公式

$$v_c = \frac{1}{n} \frac{1}{a_p} H_c^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (1.43)$$

$$a_p = \left(1 - \frac{XS_v}{S'_{vm}} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (1.44)$$

式中: a_p 为水石流内部阻力因子; X 为粗颗粒占总重的比例; S'_{vm} 为粗颗粒层平均浓度; 其余物理变量同前。

1.2 泥石流冲击力

实施泥石流治理工程以及预测泥石流沟岸在泥石流作用下的演化过程, 其关键环节是确定泥石流的冲击力。由于泥石流物质成分的多相性、泥石流暴发时间的不确定性以及其强大的毁损性, 目前国内外在泥石流冲击力计算方面的研究进展缓慢, 现有泥石流冲击力计算方法中比较成熟的有 3 种, 即流体动压法、船筏撞击法和地貌形迹法。

1.2.1 流体动压法

根据流体力学,流体动压力公式一般表示为

$$P = \gamma_c v_c^2 \quad (1.45)$$

式中: γ_c 为泥石流体的平均容重(kN/m^3); v_c 为泥石流体平均流速(m/s); P 为单位面积上的流体压力(kPa)。

式(1.45)对于一般均匀流体比较适用,而对于泥石流,计算值偏小。康志成等根据云南蒋家沟 1974—1975 年冲击力测试资料对式(1.45)进行了修正,表达式为

$$P = k \gamma_c v_c^2 \quad (1.46)$$

式中: k 为泥石流不均匀系数, $k=2.5\sim 4.0$; 其余物理量同前。

1.2.2 船筏撞击法

由于泥石流的冲击力比水流大得多,在成昆铁路、东川地区公路沿线,有多处桥梁墩台被冲击毁损乃至冲断。在泥石流沟中的桥梁墩台设计时,冲击力为主要横向设计荷载,在泥石流冲击力公式尚不完备之前,目前国内暂行采用船筏撞击力公式计算泥石流块石冲击力。冲击力公式为

$$P = \gamma_0 v_c \sin \alpha \sqrt{\frac{W_0}{c_1 + c_2}} \quad (1.47)$$

式中: P 为泥石流流体中巨石的集中冲击力(N); γ_0 为动能折减系数,对圆端属正面撞击取 0.3; W 为单个块石的质量(kg); α 为桥墩受力面与泥石流冲击力方向所夹的角($^\circ$); c_1 和 c_2 为巨石及桥梁墩台圬工材料的弹性变形系数(m/kN),采用船筏与墩台撞击的经验取值, $c_1 + c_2 = 0.005 \text{m}/\text{kN}$ 。

1.2.3 地貌形迹法

大量调查显示,每次泥石流活动后均会在防治结构或泥石流沟岸坡出现大量的冲击形迹,如冲击坑、冲蚀槽等,也会在泥石流沟内残留大量的沉积物。因此,把泥石流体概化为固、液两相流体,根据泥石流分相流速计算理论建立泥石流两相冲击力计算方法,并由泥石流冲击形迹计算泥石流冲击时间,可以有效地弱化现有冲击力的不确定性,并且可以在泥石流暴发后根据现场调查、取样分析来估算泥石流活动期间的冲击力及冲击时间。

泥石流在冲击防治结构时,表层泥石流体具有壅高现象,一般壅高 0.8~1.0m。壅高流体内富含固相颗粒,颗粒近似呈抛物线向上游抛出而形成与拦挡结构垂直的近似纵向颗粒及浆体环流,泥石流体通常形成顺时针环流和逆时针环流,分界点一般在泥石流体深度的 2/3 处,其上为顺时针环流,其下为逆时针环流(图 1.1)。顺时针纵向环流从泥石流体表层向下逐渐减弱,逆时针环流内固相颗粒近似呈 S 形,沿着流体地层偏转进入速流槽。逆时针纵向环流对泥石流沟床具有较强的掏蚀作用,可视为局部侵蚀。每次泥石流后,在防治结构面墙或泥石流沟岸均会留下大量的冲击形迹,在防治结构面墙形成

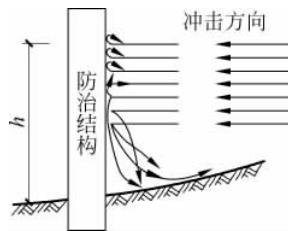


图 1.1 泥石流冲击模式

的冲击形迹可称为冲击坑(图 1.2),在岸坡脚形成的冲击形迹可称为冲蚀槽(图 1.3)。

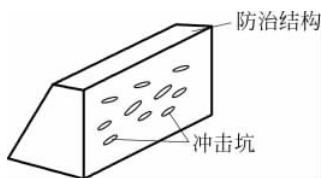


图 1.2 泥石流冲击坑



图 1.3 泥石流冲蚀槽

以下为 4 种基本假定。

第一,把泥石流中粒径大于 2mm 的固相颗粒视为固相物质,其余视为等效浆体,即把泥石流体概化为由等效均质浆体和粒径相同的固相颗粒组成的两相流体。

第二,把泥石流流体视为与沟床平行的一维两相流运动体系,固、液两相的运动速度分别为 v_s 和 v_f ,并且固、液两相以相同的角度冲击防治结构和岸坡。

第三,泥石流在运动过程中,不考虑外部质量源,即不考虑岸坡对泥石流流体的物源补给,泥石流在沟槽内冲淤平衡。

第四,把冲击坑和冲蚀槽等冲击形迹概化为半椭圆球体,其长轴、短轴和深度分别用变量 a_c 、 b_c 、 c_c 表示。冲击形迹坑口面积 A_k 和坑内表面积 S_k 分别由式(1.48)和式(1.49)计算。

$$A_k = \frac{1}{4}\pi a_c b_c \quad (1.48)$$

$$S_k = \pi(a_c + b_c)c_c \quad (1.49)$$

1. 泥石流浆体冲击强度

以单位体积的泥石流液相浆体为控制体,其在防治结构表面的最大冲击面积约为 $3.9m^2$ 。令泥石流液相浆体的密度和运动加速度分别为 ρ_f 和 a_f ,则控制体的质量 m_f 为

$$m_f = \rho_f \quad (1.50)$$

运用牛顿第二定律,则单位承冲面上泥石流浆体冲击强度 q_f 为

$$q_f = 0.2564\rho_f a_f \quad (1.51)$$

式中: ρ_f 的单位为 kg/m^3 ; q_f 的单位为 Pa ; g 为重力加速度,取 $9.8m/s^2$ 。

2. 泥石流固相颗粒冲击力

泥石流固相加速度计算式为

$$a_s = G_0 a_f \quad (1.52)$$

式中: G_0 为固液两相流动差异系数,建议取值范围 $0.6\sim 0.8$ 。

以单个固相颗粒为分析对象,其质量 m_s 为

$$m_s = \frac{\pi}{6}d_c^3\rho_s \quad (1.53)$$

运用牛顿第二定律,可得颗粒冲击力 p_{s0} 为

$$p_{s0} = m_s a_s \quad (1.54)$$

式中: p_{s0} 的单位为 N ; d_c 为等效颗粒粒径(m)。