

粘性泥石流流体力学模型与运动方程及验证*

周必凡

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要 粘性泥石流流体具有粘聚力和内摩擦角, 其剪切强度基本符合 Coulomb 公式. 按颗粒散体流动模型推导出了粘性泥石流阻力方程与匀速运动方程. 运动方程经实验和野外原型观测获得了验证, 表明建立的运动方程与实际相符, 是可信的. 也可以阐明迄今尚未得到解释的、实际发生的某些粘性泥石流具有很高流速的机理.

关键词 粘性泥石流 力学模型 运动方程 运动碰撞系数

本文根据粘性泥石流流体的基本物理力学特征, 采用颗粒散体流动的理论假设, 建立起了粘性泥石流流体力学模型与运动方程, 并用实验和原型观测数据验证所建立的方程是可信的.

1 粘性泥石流流体的基本物理力学特征

1.1 物质组成

粘性泥石流流体由土和水混合组成, 其密度 ρ_c 一般 $\geq 2t/m^3$,

$$\rho_c = C_v(\rho_s - \rho_w) + \rho_w, \quad (1)$$

其中 ρ_s 和 ρ_w 分别为粘性泥石流流体中土和水的密度, 由样品实验分析测定; C_v 为泥石流流体中土的体积含量, 按实际发生的粘性泥石流分析, 其上下界限为

$$60\% \leq C_v < C_s, \quad (2)$$

其中, C_s 为发生泥石流的松散土中土的实体含量,

$$C_s = 1 - n. \quad (3)$$

其中, n 为土的孔隙度, 级配良好的土其 C_s 可达 80%. 按 (2) 式, C_v 一般介于 60%~80% 之间.

粘性泥石流流体中水的体积含量 $C_w = 1 - C_v$, 代入上述 C_v 值, C_w 一般介于 20%~40% 之间.

粘性泥石流流体中土的颗粒大小分布范围一般都很宽, 包括粘粒、粉粒、砂粒、砾石、卵石、直至顽石漂砾. 土的颗粒特征据样品颗粒分析结果用土粒大小分配曲线表示 (图 1).

1.2 结构和剪切强度

粘性泥石流流体是土挟水的塑性颗粒散体, 土粒间的孔隙全部为泥浆充满, 含有少量或极少

1994-03-12 收稿, 1994-09-09 收修改稿

* 国家自然科学基金和中国科学院山地灾害——泥石流、滑坡研究特别支持经费资助项目

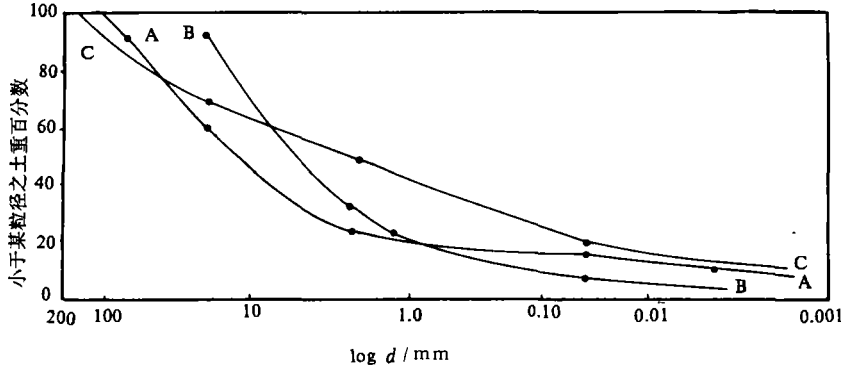


图 1 几处粘性泥石流流体中的土粒大小分配曲线图

A——云南蒋家沟, $\rho_c=2.27 \text{ t/m}^3$; B——云南漾水沟, $\rho_c=2.24 \text{ t/m}^3$; C——四川利子依达沟, $\rho_c=2.30 \text{ t/m}^3$

量的空气,其结构如图 2 所示. 其中粒径 $\leq 0.05 \text{ mm}$ 的土粒与水混合成泥浆体,并具有塑性和剪切强度 τ_0 ;粗颗粒属于散体,粒径 \leq 最大悬浮粒径 D_0 的颗粒受泥浆浮托处于悬浮状态,粒径 $> D_0$ 的颗粒受泥浆浮托及颗粒间的有效接触力支撑处于自由接触状态. 粘性泥石流流体中的土粒相互接触,并具有摩擦角 φ_s .

粘性泥石流流体的剪切强度比土的剪切强度小得多,据定性实验分析其剪切强度 τ_d 基本符合 Coulomb 公式:

$$\tau_d = \tau_0 + \sigma \text{tg} \varphi_m, \quad (4)$$

其中等号右边第一项为泥石流体的粘聚力,目前受仪器限制还难于定量测定,本文中近似地以泥浆的剪切强度 τ_0 代替. 右边第二项为泥石流体的内摩擦强度, σ 为单位面积上的正应力,当泥石流流体表面为自由面时

$$\sigma = H_c \rho_c g, \quad (5)$$

其中, H_c 为剪切面以上的泥石流体的深度, g 为重力加速度; $\text{tg} \varphi_m$ 为粘性泥石流体的内摩擦系数,目前还没有仪器进行定量地测定,但它可以按以下推算得出其近似值.

据文献[1],粘性泥石流体的内摩擦强度主要由其中土的内摩擦强度构成,可近似地认为两者相等:

$$\sigma \text{tg} \varphi_m = H_c \rho_c g \text{tg} \varphi_m = H_c C_v (\rho_s - \rho_y) g \text{tg} \varphi_s, \quad (6)$$

其中等式右边为粘性泥石流流体中土的内摩擦强度, $\text{tg} \varphi_s$ 为饱和松散土的内摩擦系数,本文中采用 φ_s 的取值范围为 $18^\circ \sim 20^\circ$.

由(6)式得

$$\text{tg} \varphi_m = C_v (\rho_s - \rho_y) \text{tg} \varphi_s / \rho_c, \quad (7)$$

其中 ρ_y 为粘性泥石流流体中土的密度参数,据文献[1]:

$$\rho_y = P_d (\rho_s - \rho_m) + \rho_m, \quad (8)$$

其中 P_d 为粒径 $\leq D_0$ 的土粒占总土重的百分比; ρ_m 为剔除流体中 $> 0.05 \text{ mm}$ 的颗粒后泥浆的

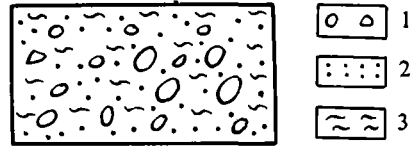


图 2 粘性泥石流流体结构示意图
1——粒径 $> D_0$ 的粗颗粒, 2—— $0.05 \text{ mm} <$ 粒径 $\leq D_0$ 的粗颗粒, 3——粒径 $\leq 0.05 \text{ mm}$ 的土粒与水混合成的泥浆

密度.

2 粘性泥石流流力学模型

2.1 理论假设条件

(1) 土挟水的颗粒散体与单个颗粒相比较是无限大的, 各种颗粒在整个体系的空间和时间范围内是均匀分布的.

(2) 颗粒散体的力学特征值 τ_0 和 $\text{tg}\varphi_m$ 在运动中不发生变化.

(3) 颗粒散体沿坡面流动其底面没有附着层, 并存在底面滑动摩擦流速 U_{x0} , 底面以上的流动是在均匀剪切率 dU_{xz}/dz 状态下发生的, 不随时间变化.

(4) 土粒间的泥浆随颗粒一起运动, 其相对速度为零.

(5) 整个体系的单位体积动能除去摩擦损失保持为常数.

按上述假设条件, 粘性泥石流可以近似地按均质体剪切模型进行力学分析.

2.2 力学模型

粘性泥石流流体在重力作用下沿坡面运动, 坡面对水平面的倾角为 θ , 流体深度为 H_c . 建立坐标系, X 轴平行于坡面指向流动方向, Z 轴垂直于坡面指向朝上, 原点设在坡面上, 如图 3 所示. 观察流动中的任一单元体, 其底面距坡面的垂直距离为 z , 其在 X , Z 和垂直于纸面方向的边长均为单位长度记为 $[1]$. 单元体的质量为 $dm = [1]^3 \rho_c$, 单元体重心相对于剪切面沿 X 方向的相对流速为 $\delta U_{xz} = \frac{[1]}{2} \frac{dU_{xz}}{dz}$, $[1]/2$ 为单元体重心至剪切面的距离, dU_{xz}/dz 为 Z 方向的剪切速率. 在分析单元体对于剪切面作相对运动时, 可将剪切面视为不动, 剪切面以上的流体都在以相同的相对运动速度 δU_{xz} 对于剪切面作相对运动, 因此, 可以认为单元体顶面沿 X 方向的合力为零, 这样仅考虑作用在单元体底面的力系, 使问题大为简化.

单元体对于剪切面发生剪切相对运动时沿 X 方向的力系应满足

$$dm d\delta U_{xz}/dt = \tau, \quad (9)$$

其中 $d\delta U_{xz}/dt$ 为单元体沿 X 方向作相对运动的相对加速度; t 为时间; τ 为作用在单元体底面沿 X 方向的合力

$$\tau = \tau_m - \tau_c, \quad (10)$$

其中 τ_m 为促使单元体沿 X 方向产生剪切相对运动的重力分量

$$\tau_m = (H_c - z) \rho_c g \sin \theta, \quad (11)$$

τ_c 为作用在单元体底面沿 X 方向的运动剪切阻力

$$\tau_c = \tau_0 + \tau_f + \tau_u, \quad (12)$$

其中 τ_0 为粘性泥石流体的粘聚力, τ_f 为粘性泥石流体的内摩擦阻力

$$\tau_f = (H_c - z) \rho_c g \cos \theta \text{tg} \varphi_m, \quad (13)$$

τ_u 为运动阻力

$$\tau_u = \alpha \rho_c (dU_{xz}/dz)^2, \quad (14)$$

其中 α 为运动阻力系数

$$\alpha = [1]^2 (\sin \gamma \cos \gamma \text{tg} \varphi_m + \cos^2 \gamma) / 2, \quad (15)$$

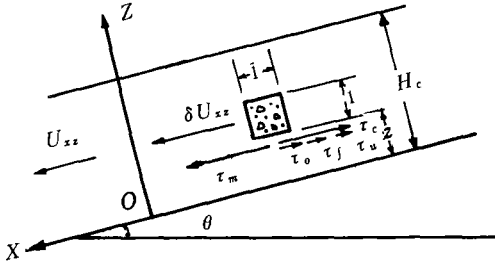


图3 粘性泥石流流体力学模型示意图

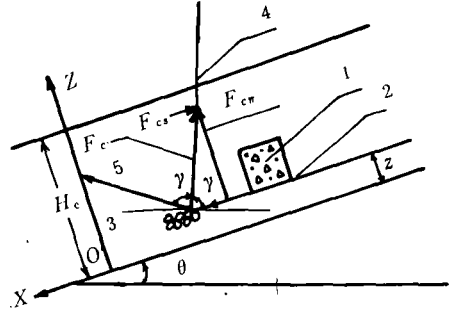


图4 粘性泥石流运动碰撞模型示意图
图中注解见正文

其中 γ 为流体运动方向与碰撞面法线方向的夹角。

(14)和(15)式可用以下的物理模型阐明。

如图4所示,单元体1以相对速度2在粗糙面上运动,其相对运动的动量为 $dm\delta U_{xz} = \frac{[1]^2}{2} \rho_c dU_{xz}/dz$ 。单元体在运动中 与粗糙面发生弹性碰撞,运动方向与碰撞面3的法线方向4的夹角为 γ ,碰撞后的相对速度为5。碰撞前后单元体的相对运动动量沿碰撞面法线方向的变化量为

$$\Delta dm\delta U_{xz} = 2\cos\gamma \frac{[1]^2}{2} \rho_c dU_{xz}/dz = [1]^2 \rho_c \cos\gamma dU_{xz}/dz. \tag{16}$$

单元体与粗糙面碰撞1次的时间为

$$\Delta t = [1]/\delta U_{xz} = [1]/\frac{[1]}{2} (dU_{xz}/dz) = 2/(dU_{xz}/dz). \tag{17}$$

碰撞面沿其法线方向对单元体产生的碰撞反力为

$$F_c = \Delta dm\delta U_{xz}/\Delta t = \frac{1}{2} [1]^2 \rho_c \cos\gamma (dU_{xz}/dz)^2, \tag{18}$$

F_c 沿运动方向的分量 F_{cs} 构成运动碰撞阻力

$$F_{cs} = F_c \cos\gamma = \frac{1}{2} [1]^2 \rho_c \cos^2\gamma (dU_{xz}/dz)^2. \tag{19}$$

F_c 沿垂直于运动方向的分量 F_{cn} 与泥石流流体内部摩擦系数 $\text{tg}\varphi_m$ 之乘积为运动碰撞摩擦阻力

$$F_{cf} = F_c \sin\gamma \text{tg}\varphi_m = \frac{1}{2} [1]^2 \rho_c \sin\gamma \cos\gamma \text{tg}\varphi_m \left(\frac{dU_{xz}}{dz} \right)^2, \tag{20}$$

(19)与(20)式相加得粘性泥石流运动阻力方程(14)。

将 τ_o , (11), (13)和(14)式代入(9)式得粘性泥石流的动力微分方程为

$$\begin{aligned} dmd\delta U_{xz}/dt &= \tau = \tau_m - \tau_c \\ &= (H_c - z) \rho_c g (\sin\theta - \cos\theta \text{tg}\varphi_m) - \tau_o - \alpha \rho_c \left(\frac{dU_{xz}}{dz} \right)^2. \end{aligned} \tag{21}$$

3 粘性泥石流运动方程

3.1 垂线流速分布方程

在匀速运动情况下, (21) 式中 $dmd\delta U_{xz}/dt=0$, 得粘性泥石流沿 Z 向的垂线流速分布微分方程为

$$dU_{xz} = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha} \right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1 \rho_c} - z \right)^{1/2} dz, \quad (22)$$

其中, α_1 为动力系数,

$$\alpha_1 = g(\sin\theta - \cos\theta \text{tg}\varphi_m), \quad (23)$$

积分 (22) 式得

$$U_{xz} = -\frac{2}{3} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha} \right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1 \rho_c} - z \right)^{3/2} + C. \quad (24)$$

当 $z=0$ 时, $U_{xz}=U_{x0}$, 代入 (24) 式得

$$C = U_{x0} + \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha} \right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1 \rho_c} \right)^{3/2}, \quad (25)$$

将 C 代入 (24) 式得粘性泥石流沿 Z 向的流速分布方程为

$$U_{xz} = U_{x0} + \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha} \right)^{1/2} \left[\left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1 \rho_c} \right)^{3/2} - \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1 \rho_c} - z \right)^{3/2} \right]. \quad (26)$$

3.2 底面滑动流速方程

粘性泥石流的底面存在滑动流速, 这是它与一般液体流动不同的特征. 假设粘性泥石流在匀速流动的情况下其底层相对于固定底面的滑动流速为 U_{x0} , 如图 5 所示底面的力系需满足

条件

$$\tau_{mb} - \tau_{cb} = 0, \quad (27)$$

其中 τ_{mb} 为单元体底面所承受的上层泥石流重力沿 X 方向的分量, 促使剪切运动

$$\tau_{mb} = H_c \rho_c g \sin\theta, \quad (28)$$

τ_{cb} 为单元体底面的运动剪切阻力

$$\tau_{cb} = \tau_0 + \tau_{fb} + \tau_{ub}, \quad (29)$$

τ_{fb} 为底面的摩擦阻力

$$\tau_{fb} = H_c \rho_c g \cos\theta \text{tg}\varphi_b, \quad (30)$$

其中 $\text{tg}\varphi_b$ 为粘性泥石流流体与固定坡面间的摩擦系数, φ_b 为其摩擦角.

τ_{ub} 为单元体底面的运动碰撞阻力, 仿照 (14) 和 (15) 式的物理模型和推导得

$$\tau_{ub} = \alpha_2 \rho_c U_{x0}^2, \quad (31)$$

其中 α_2 为底面滑动碰撞系数

$$\alpha_2 = 2(\sin\gamma \cos\gamma \text{tg}\varphi_b + \cos^2\gamma). \quad (32)$$

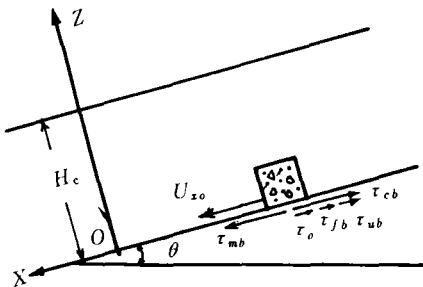


图 5 粘性泥石流底面滑动流速模型示意图

将 τ_0 , (28), (30) 和 (31) 式代入 (27) 式求得底面滑动流速方程为

$$U_{x0} = (\alpha_3/\alpha_2)^{1/2} (H_c - \tau_0/\alpha_3\rho_c)^{1/2}, \tag{33}$$

其中, α_3 为底面滑动动力系数

$$\alpha_3 = g(\sin\theta - \cos\theta \tan\phi_b). \tag{34}$$

将 (33) 式代入 (26) 式得粘性泥石流垂线流速分布方程的确定式为

$$U_{xz} = \left(\frac{\alpha_3}{\alpha_2}\right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_3\rho_c}\right)^{1/2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha}\right)^{1/2} \left[\left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1\rho_c}\right)^{3/2} - \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1\rho_c} - z\right)^{3/2} \right]. \tag{35}$$

3.3 表面流速方程

在 (35) 式中, 当 $z = H_c - \tau_0/\alpha_1\rho_c$ 时, 得粘性泥石流表面流速 U_c , 其方程为

$$U_c = \left(\frac{\alpha_3}{\alpha_2}\right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_3\rho_c}\right)^{1/2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha}\right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1\rho_c}\right)^{3/2}. \tag{36}$$

3.4 垂线流速分布曲线和平均流速方程

匀速运动的粘性泥石流垂线流速分布曲线如图 6 所示. 该曲线系将 H_c 和各参数值代入 (35) 式选定不同的流深计算流速 U_{xz} , 并以流深 z 为纵坐标 U_{xz} 为横坐标点绘而成. 当 $z=0$ 时, 流速为 U_{x0} ; 当 $0 < z < H_c - \tau_0/\alpha_1\rho_c$ 时, 流速为 U_{xz} , 并随 z 增大而增大; 在 $H_c - \tau_0/\alpha_1\rho_c \leq z = H_c$ 的表层内, 流速保持 U_c 不变, 该层流体内部不发生相对运动, 称之为粘性泥石流流核. 流核层深度 $H_0 = \tau_0/\alpha_1\rho_c$, 其物理意义是粘性泥石流在坡面倾角为 θ 时发生流动的最小深度.

垂线流速分布曲线与坐标轴围成的面积除以 H_c , 便得粘性泥石流垂线平均流速 U_m . 根据图 6 和 (35) 式计算得 U_m 的方程为

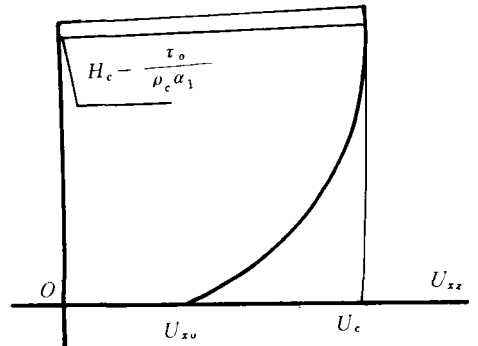


图 6 粘性泥石流垂线流速分布曲线图

$$U_m = (U_c\tau_0/\alpha_1\rho_c)/H_c + \int_0^{H_c - \tau_0/\alpha_1\rho_c} U_{xz} dz/H_c$$

$$= \frac{U_c\tau_0}{\alpha_1\rho_c H_c} + \frac{\left(\frac{\alpha_3}{\alpha_2}\right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_3\rho_c}\right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1\rho_c}\right)}{H_c} + \frac{2\left(\frac{\alpha_1}{\alpha}\right)^{1/2} \left(H_c - \frac{\tau_0}{\alpha_1\rho_c}\right)^{5/2}}{5H_c}. \tag{37}$$

4 验证

粘性泥石流运动方程的运动阻力系数 α 和碰撞角 γ 可以用实验和原型观测数据计算确定及验证.

4.1 理论计算与实验数据验证

实验是在中国科学院、水利部成都山地灾害和环境研究所的泥石流流动力学实验装置 (图 7)

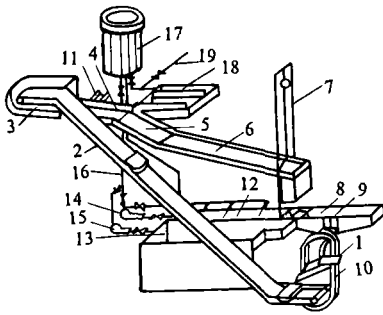


图 7 泥石流实验装置示意图

图中说明见正文

上进行的。实验过程为:将配制的粘性泥石流物料由喂料口 1 加入斗式输送机 2,提升至受料器 3,靠重力流动经分流槽 4 调节后进入前槽 5,再通过实验槽 6 流入泥石流池 8,再经控制闸 9 喂入输送机,如此造成泥石流循环流动,待流动正常后在实验槽观测段进行数据测量。实验槽宽 0.5 m 长 30 m,两侧壁为钢化玻璃,槽底可铺不同的糙率板,实验坡度可用支撑架 7 上的起吊设备调整,调整范围 0~17%。溅出的泥浆通过回收泵 10 送回泥石流池以保持流量稳定。实验结束后,泥石流物料从分流口 11 排至室外处理。此外,该装置亦设有泥浆池 12,清水池 13,泥浆泵 14,清水泵 15,管路 16,稳压池 17,减压槽 18,排废管道 19 等,可以开展泥浆和水力学实验。

理论计算与实验数据列于表 1。本实验的实验槽底采用较粗糙的预制混凝土板铺成,流量 Q_{c1} 用体积法控制,表面流速 U_c 用浮标法量测,泥石流深度 H_c 用超声波测位仪量测,实验物料的最大颗粒粒径为 2 cm, ρ_c 和 τ_0 由样品实验分析测定, $\text{tg}\varphi_m$ 按(7)式计算, $U_{m1} = Q_{c1}/BH_c$, B 为实验槽宽度, $B=0.5\text{ m}$ 。理论计算时取 $\text{tg}\varphi_m = \text{tg}\varphi_b$, $\alpha_1 = \alpha_3$, γ 按(15)式计算, $Q_{c2} = BH_c U_{m2}$, U_{m2} 按(37)式计算。

表 1 理论计算与实验数据验证对比表

序 号	实验数据								计算数据				验证误差	
	$\rho_c/$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\tau_0/$ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{tg}\varphi_m$	$\sin\theta/$ %	$H_c/$ m	$U_c/$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$Q_{c1}/$ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	$U_{m1}/$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	α	$\gamma/(^\circ)$	$Q_{c2}/$ m^3/s^{-1}	$U_{m2}/$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\frac{Q_{c2}-Q_{c1}}{Q_{c1}}$	$\frac{U_{m2}-U_{m1}}{U_{m1}}$
1	1830	1.47	0.051	9.35	0.066	4.78	0.114	3.45	0.027	78	0.118	3.58	4	4
2	2050	8.93	0.055	11.42	0.063	4.59	0.100	3.16	0.027	78	0.114	3.62	14	14
3	2000	8.93	0.030	9.35	0.056	4.60	0.095	3.39	0.021	79	0.105	3.74	11	11
4	2000	8.93	0.030	11.42	0.054	4.82	0.095	3.52	0.025	78	0.015	3.88	11	11
5	2000	8.93	0.030	12.46	0.052	4.98	0.095	3.61	0.023	78.4	0.015	4.04	11	11
6	2000	8.93	0.030	12.35	0.050	5.14	0.095	3.80	0.019	79.4	0.105	4.21	11	11

计算和验证结果,运动阻力系数 α 的值介于 0.019~0.027 之间,碰撞角 γ 介于 $78^\circ\sim 79.4^\circ$ 之间,断面流量 Q_{c1} 与 Q_{c2} 和断面平均流速 U_{m1} 与 U_{m2} 的误差在 4%~14% 之间,这表明理论推导所建立的粘性泥石流运动方程是可信的。

4.2 理论计算与原型观测数据验证

两者的数据列于表 2 中。原型观测数据取自文献[2]。理论计算时取 $\text{tg}\varphi_m = \text{tg}\varphi_b$, $\alpha_1 = \alpha_3$, $\text{tg}\varphi_m$ 系据蒋家沟的多次粘性泥石流样品分析结果按(7)式计算得出的平均值, τ_0 很小予以忽略。计算结果, α 的值介于 0.013~0.023 之间, γ 的值介于 $79^\circ\sim 82^\circ$ 之间,与表 1 中的 α 和 γ 值比较, α 值偏小, γ 值偏大,这可能是由于实验是在定床条件下进行的,与原型动床条件有差别,但总的看来还是较为接近的,这表明理论推导建立的粘性泥石流运动方程是符合实际的。断面流量与平均流速在泥石流原型观测中目前还无法测得,因此,这方面的验证对比也无法进行。

表2 理论计算与原型观测数据验证表

序号	观测日期	原型观测数据				计算数据		
		$\rho_c/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	H_c/m	$\sin\theta$	$U_c/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{tg}\varphi_m$	α	$\gamma/(\circ)$
1	1985-07-25	2 250	3.12	0.061	10.00	0.05	0.023	79
2	1985-07-25	2 250	2.90	0.061	9.50	0.05	0.021	79.6
3	1985-07-31	2 200	3.38	0.060	11.50	0.05	0.019	80.2
4	1984-06-14	2 210	2.50	0.063	8.95	0.05	0.019	80.2
5	1982-07-08	2 330	1.80	0.063	7.30	0.05	0.013	82
6	1982-07-08	2 210	2.20	0.063	8.00	0.05	0.017	80.6

4.3 高速流动的粘性泥石流计算

据 Browning^[3], 1970年5月31日秘鲁瓦斯卡兰山发生的粘性泥石流3 min流动距离达14.5 km, 流速高达81 m/s. 他当时论述其高速流动原因是由于饱水物质在“气垫”上几乎无摩擦地飞驰. 这个问题现在可以用(36)式计算得到解释. 据地形剖面那段长14.5 km的河床纵坡 $\sin\theta=0.72$, H_c 和 $\text{tg}\varphi_m$ 没有记载. 若假定 $H_c=11$ m, $\text{tg}\varphi_m=0.05$, $\alpha=0.023$ 是可能的, 忽略 τ_0 . 并设 $\text{tg}\varphi_b=\text{tg}\varphi_m$, 计算结果 $U_c=80.51$ m/s.

5 结论与讨论

粘性泥石流体的剪切强度基本符合Coulomb公式. 粘性泥石流流体力学模型符合颗粒散体流动模型. 按颗粒运动弹性碰撞建立的粘性泥石流阻力方程和运动方程是可信的并符合实际的.

泥石流物质组成和运动条件的区域差异很大, 不同地区粘性泥石流运动阻力系数 α 和 α_2 及摩擦系数 $\text{tg}\varphi_m$ 与 $\text{tg}\varphi_b$ 的取值范围需要更多的实验和原型观测数据才能划定.

参 考 文 献

- 1 周必凡. 泥石流运动特征剖析. 见: 第二届全国泥石流学术会议(1989, 成都)论文集. 北京: 科学出版社, 1991. 27~35
- 2 吴积善, 康志成, 田连权等. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京: 科学出版社, 1990. 53~127
- 3 Browning J M. Catastrophic Rock Slide, Mount Huascarán, North-central Peru, May 31 1970. The American Association of Petroleum Geologists Bull, 1979. 57(7): 1335~1341.