

粘性泥石流流阻力和运动方程验证分析^{*}

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)

提 要 现有的粘性泥石流阻力运动方程可以大致归纳为三类:一类是将泥石流视为固液两相流,通过理论分析建立的泥石流阻力运动方程;二类是认为粘性泥石流符合宾汉姆流体阻力方程;三类是依据泥石流流体具有基本符合库伦公式的剪切强度,将泥石流视为固体颗粒散体重力流,在理论分析基础上建立的阻力和运动方程。用粘性泥石流流体力学实验数据对三类阻力运动方程进行了验证,结果表明第三类阻力和运动方程与实际接近。

关键词 泥石流 阻力方程 运动方程 实验分析

分类号 《中图法》P642.23

现有的粘性泥石流(其密度一般 $> 1.8 \text{ t/m}^3$)阻力运动方程大致归纳为如下三类:

一类是将泥石流视为固液两相流,在理论分析基础上建立的阻力运动参数方程,通过实验确定其参数,这类方程可以拜格洛(R. A. Bagnold)^[1]方程为代表。其阻力 τ_{xz} 的方程为

$$\tau_{xz} = 2/25 \lambda^{3/2} \eta_m du_{xz}/dz \quad (1)$$

粘性泥石流的表面流速 U_{cb} 方程为

$$U_{cb} = g \sin \theta [\rho + (\rho_s - \rho) C_v] H_c^2 / 4.5 \eta_m \lambda^{3/2} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 λ 为颗粒线性浓度, $\lambda = 1/[C_w/C_v - 1]$, C_w 为泥石流流体中粗颗粒群体的极限浓度, C_v 为粗颗粒群体的浓度; η_m 为流体的粘度, du_{xz}/dz 为垂向的剪切速率; g 为重力加速度; θ 为坡面坡度; ρ 为流体密度; ρ_s 为泥石流流体中土的密度, H_c 为流深。

二类是认为粘性泥石流近似宾汉姆(Bingham)流体,按宾汉姆流体阻力方程导出匀速运动参数方程,通过实验确定流变参数。这类方程可以康志成和熊刚提出的方程^[2]为代表,其阻力方程为

$$\tau_{xz} = \tau_B + \eta du_{xz}/dz, \quad (3)$$

其表面流速方程为

$$U_{cb} = (\rho_c H_c g \sin \theta - \tau_B)^2 / 2 \eta \rho_c \sin \theta \quad (4)$$

式(3)、(4)中 τ_B 为粘性泥石流流体的屈服应力; η 为粘性泥石流流体的粘度; ρ_c 为泥石流流体密度;其他符号同前。

三类是依据泥石流流体具有基本符合库伦(Coulomb)公式的剪切强度,按固体颗粒散体重力流的观点建立的阻力运动的参数方程,通过实验确定其运动碰撞摩擦阻力参数。这类方程可以周必凡^[3]的方程为代表。其阻力方程为

$$\tau_{xz} = \tau_0 + \sigma \tan \varphi + a \rho_c (du_{xz}/dz)^2, \quad (5)$$

其表面流速 U_{ca} 的方程为

$$U_{ca} = U_{w0} + (2/3 \eta) (a \rho_c)^{1/2} (H_c - \tau_0/a \rho_c)^{3/2}$$

^{*}国家自然科学基金(批准号:49471050)和中国科学院山地灾害——泥石流、滑坡基础研究特别支持经费第二期资助项目。

收稿日期:1998-02-28;改回日期:1998-07-20

$$= \frac{1}{2} (a_1/a)^{1/2} (H_c - \tau_0/a_1\rho_c)^{1/2} + \frac{2}{3[1]} (a_1/a)^{1/2} (H_c - \tau_0/a_1\rho_c)^{3/2} \tag{6}$$

式(5)、(6)中 τ_0 为泥石流体的粘聚力, 目前还难以测定, 在计算中以泥石流体中粒径 $< 0.05\text{mm}$ 的泥浆体的屈服应力 τ_0 代替; σ 为剪切面上的正应力, 当泥石流表面为自由表面时, 由底面算起的深度 Z 处的剪切面的正压力 $\sigma = (H_c - Z)\rho_c g \cos\theta$; φ_m 为泥石流体的内摩擦角, 受仪器限制目前还不能直接测定, 据周必凡^[4], $\tan \varphi_m = C_v(\rho_s - \rho_y) \tan \varphi_s / \rho_s$, ρ_y 为泥石流中颗粒的密度参数, 根据泥石流体的密度和颗粒组成计算确定; φ_s 为泥石流中土的内摩擦角; a 为泥石流内部相对运动碰撞摩擦阻力参数, 其取值需由泥石流动力学实验确定。据作者已有的动力学实验数据估计, 粘性泥石流的 a 值大致介于 $0.1 \sim 0.2$ 平均可取 0.015 ; $a_1 = g(\sin\theta - \cos\theta \tan \varphi_m)$; $[1]$ 为单位长度; U_w 为泥石流底面相对静止坡面的滑动流速; 其他符号同前。

现以粘性泥石流动力学实验数据对上述三类粘性泥石流阻力和运动方程进行验证分析。实验是在中国科学院—水利部成都山地灾害与环境研究所泥石流动力学实验室进行的。

粘性泥石流动力学实验装置如图 1 所示, 将配制好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, 再经过实验控制闸 9 喂入输送机 2 如此造成泥石流循环流动, 待流动均匀后在实验槽观测段进行数据量测。此外, 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。

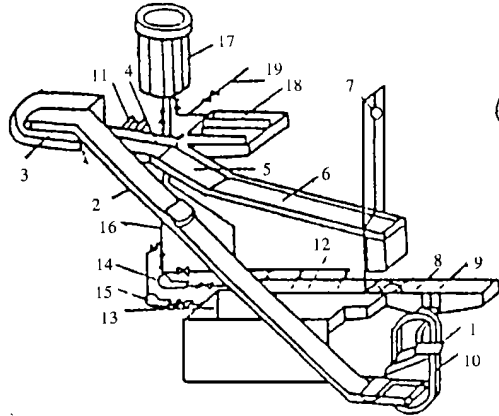


图 1 泥石流实验装置示意图

Fig. 1 Experiment equipment of debris folw

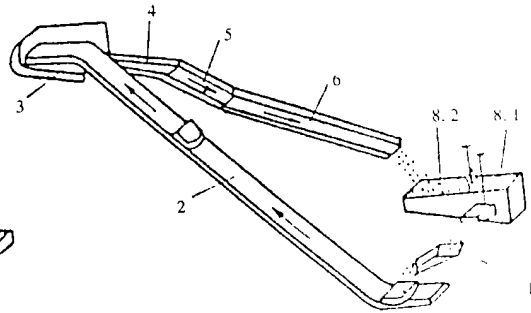


图 2 泥石流实验方法示意图

Fig. 1 Experiment method of debris folw

实验方法如图 2 所示, 将泥石流池隔为 8.1 和 8.2 两部分, 8.1 贮放需要的水, 并在墙上设喂料闸, 8.2 贮放需要的砂和砾石, 并在隔墙上设帘式闸门。实验时, 首先打开 8.1 墙上的喂料闸, 让水经 1 通过 2, 3, 4, 5, 6, 和 8 造成循环流动, 并将准备好的粒径 $d < 0.05\text{mm}$ 的土粒逐渐均匀地加入水中, 在这个阶段清水流逐渐变为混水流或泥浆流; 然后从上到下逐渐开启帘式闸门, 混水或泥浆会不断地冲刷和搬运 8.2 中的砂和砾石, 直到全部物料加入循环流动, 在这个阶段, 混水或泥浆逐渐变成预期的泥石流, 将流动调整均匀后在实验槽的观测段进行实验数据量测, 整个实验大约需要 25min , 第 1 阶段 15min 左右, 第 2 阶段 10min 左右。

在粘性泥石流实验中, 量测了表面流速 U_c (用浮标法量测的中泓表面平均流速), 流深 H_c , 底面拖动力 τ_{bc} (用力传感器量测底面沿流向的剪切力)。坡面坡度 $\sin\theta$ 泥石流体剪切强度参数 τ_0 和 φ_m , 以及泥石流体颗粒大小分布和密度 ρ_c 和颗粒密度 ρ_s 等静力学实验数据预先由泥石流体静力学实验测定。

实验中使用的土粒组成为: $d > 2\text{mm}$ 占 49.71% ; $d = 2\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$ 占 28.78% ; $d = 0.05\text{mm} \sim$

0.005mm占 15%; $d < 0.005\text{mm}$ 占 6 51%, 最大颗粒粒径为 20mm, 粒径 $< 0.05\text{mm}$ 颗粒组成的浆体密度 ρ_m 为 1.38g/cm^3 , 其粘度 η_m 为 0.104Ns/m^2 。实验槽底为较粗糙的混凝土板。部分数据列于表 1 中。 C_v 不是全部土粒的体积浓度, 而是粒径 $> 0.05\text{mm}$ 是粗土粒群体的体积浓度, 其 C_{vo} 大约为 0.8。

表 1 粘性泥石流实验数据
Table 1 Experiment data of viscous debris flow

No.	ρ_c (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	C_v	τ_0 (N/m ²)	λ	C_{vo}	ρ_m (g/cm ³)	η_m (Ns/m ²)	$\text{tg } \psi_m$	$\sin \theta$ (%)	H_e (cm)	U_e (Ns/cm ³)	τ_{he} (N/m ²)
1	2.0	2.74	0.44	2.75	4.5	0.80	1.38	0.104	0.07	13.50	5.1	542	411
2	2.0	2.74	0.44	2.75	4.5	0.80	1.38	0.104	0.07	12.46	5.2	542	388
3	2.0	2.74	0.44	2.75	4.5	0.80	1.38	0.104	0.07	11.42	5.4	457	368
4	2.0	2.74	0.44	2.75	4.5	0.80	1.38	0.104	0.07	10.38	5.5	446	333
5	2.0	2.74	0.44	2.75	4.5	0.80	1.38	0.104	0.07	9.35	5.6	458	304

根据表 1 数据, 按前述的有关公式计算得出的数据以及计算数据与实验数据的偏差分别列于表 2。用拜氏和康志成的方程计算时, 直接将有关实验数据代入有关公式, 分别得出计算表面流速 U_{cb} , U_{ck} 和计算底面阻力(拖动力) τ_{zcb} , τ_{zck} 。再与实验取得的表面流速 U_c 和底面阻力(拖动力) τ_{bc} 进行比较得出偏差。计算时近似地取 $du_{xz}/dz \approx U_d'(H - \tau_0/a_1\rho_c)$ 。在康志成的计算中, 近似地取 $\tau_B = \tau_0$, η 按文献 [5] 的方法计算得出, $\eta = \eta_m(1 - C_v/C_{vo})^{-2.5}$ 。用周必凡的方程进行计算时, 近似取 $a = 0.015$ 。由于底面存在滑动流速 U_{xo} , 据文献 [3] 推导, 其底面阻力 $\tau_{zxc} = \tau_0 + H\rho_c g \cos \theta \text{tg } \varphi_m + 4a\rho_c (H/[1]) U_{xo}^2$, $U_{xo} = 2^{-1}(a_1/a)^{1/2}(H - \tau_0/a_1\rho_c)^{1/2}$ 。

从表 2 中所列的数据分析, 可以得出以下几点:

1. 按宾汉姆流体的阻力与运动方程计算的阻力和表面流速与实验数据的偏差分别为 $-76\% \sim -81\%$ 和 $-11\% \sim -25\%$ 。这样的结果表明, 宾汉姆流体的阻力与运动方程难以适合粘性泥石流的阻力和运动规律。泥石流中含有大量的粗颗粒, 流体内部中层间具有不同的剪切强度, 在运动中要保持像牛顿液体或宾汉姆流体那样的层流状态是困难的, 泥石流流体或泥石流中的粗粒浆体的流变实验表明, 其阻力与相对运动的速率之比值不呈直线关系, 而是一条曲线, 若以二者之比值表示粘度, 则其粘度不是一个常数, 而是随速率改变的, 这已不是牛顿液体或宾汉姆流体概念中的粘度了。

表 2 粘性泥石流计算数据及偏差
Table 2 Calculation data and errors of viscous debris flow

No.	按(5),(6)式			按(1),(2)式		按(3),(4)式		周必凡的偏差		拜氏的偏差		康志成的偏差	
	U_{cc}	τ_{zxc}	$\frac{du_{xz}}{dz}$	U_{cb}	τ_{zcb}	U_{ck}	τ_{zck}	$\frac{U_{cc}-U_c}{U_c}$	$\frac{\tau_{zxc}-\tau_{bc}}{\tau_{bc}}$	$\frac{U_{cb}-U_e}{U_e}$	$\frac{\tau_{zcb}-\tau_{be}}{\tau_{be}}$	$\frac{U_{ck}-U_e}{U_e}$	$\frac{\tau_{zck}-\tau_{be}}{\tau_{be}}$
	cm/s	N/m ²	s ⁻¹	cm/s	N/m ²	cm/s	N/m ²	U _e %	τ_{be} %	U _e %	τ_{be} %	U _e %	τ_{be} %
1	545	393	111	153	248	432	87.7	+1	-4	-72	-40	-20	-79
2	508	352	109	147	243	404	86.2	-6	-9	-73	-37	-25	-78
3	475	317	90	143	201	408	71.6	+4	-14	-69	-45	-11	-81
4	415	265	91	136	203	383	72.4	-11	-20	-71	-39	-18	-78
5	339	211	91	125	203	356	72.4	-26	-31	-73	-33	-22	-76

2. 按拜氏的阻力与运动方程计算的阻力和表面流速与实验数据的偏差分别为 $-33\% \sim -45\%$ 和 $-69\% \sim -73\%$; 这样的结果也很难符合泥石流的阻力和运动规律。拜氏的试验是在两个同心圆筒的环形缝中进行的, 受剪切的固液混合体处于封闭状态, 其中的固体颗粒群体在剪切中的膨胀受到限制, 因而其阻力与具有自由面的泥石流(其中的固体颗粒群体的剪切膨胀较易发生)的阻力相差甚大。

3. 按方程(5)计算的阻力和表面流速与实验数据的偏差分别为 $-4\% \sim -31\%$ 和 $1\% \sim -26\%$ 。与拜氏和康志成的方程相比较, 方程(5)与泥石流的阻力和运动实验数据较为接近。

在方程(5)中, 将固液混合体视为均匀分布的群体, 其剪切强度基本符合库伦公式, 其密度以 ρ_c 表

示, $\rho_c = C_v(\rho_s - \rho) + \rho$ 。将混合体的运动视为固体颗粒群体的运动, 式中不再有流体粘度 η_m 出现。

在周必凡的运动方程中具有底面滑动流速 U_{xp} , 这是根据固体沿坡面滑动的物理意义得出的, 即在坡面上的任何固体, 只要下滑力大于摩擦阻力便会沿坡面向下运动。这是泥石流的重要特征, 也是其与液流的基本差别。

根据以上验证分析结果, 按颗粒散体重力流导出的阻力和运动方程较为符合粘性泥石流的阻力和运动规律。泥石流的物质组成和运动条件的差异很大, 其运动碰撞摩擦阻力参数 α 的取值需要根据实验或原型观测数据才能确定。

参 考 文 献

[1] R. A. Bagnold. Experiments on a gravit free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. Roy. soc, London series A, 1954, 255, 49 ~ 63.

[2] 田连权, 吴积善, 康志成等著. 泥石流侵蚀搬运与堆积. 成都: 成都地图出版社 1993. 91 ~ 92.

[3] 周必凡. 粘性泥石流流力学模型与运动方程及验证. 中国科学(B辑), 1995. 25(2): 196 ~ 203.

[4] 周必凡. 泥石流运动特征剖析. 见: 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所编辑. 第二届全国泥石流学术会议论文集(1989, 成都). 北京: 科学出版社, 1991, 27 ~ 25.

[5] 费祥俊, 朱平一. 泥石流的粘性及其确定方法. 铁道工程学报, 1986. (4): 9 ~ 16.

作者简介 周必凡, 研究员, 从事泥石流研究及灾害防治工作 30 余年, 发表有《泥石流防治指南》等专著及《泥石流流力学模型与运动方程及验证》等论文。

EXPERIMENT AND VERIFICATION ON EQUATIONS OF RESISTANCE AND MOVEMENT OF VISCOUS DEBRIS FLOWS

ZHOU Bi-fan

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences
& Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041)

Abstract

Existing equations on resistance and movement of viscous debris flows may be roughly divided into three types. The first one is based on the theory of two-phase flow of solid and fluid, and is deduced through experiment and analysing on debris flow, the second one is that viscous debris flows coincide the drag equation of Bingham fluid and the third one is that debris flows coincide the equation of solid granular flow. Verified through data from experiments on viscous debris flow, it is shown that the third one is closer to the practice of debris flows than the other two types.

Key words debris flow, equations of resistance and movement, experiment and verification