

# 泥石流的流变特性

鲁晓兵

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

李德基

(中国科学院成都山地所, 成都 610041)

**摘要** 根据实验结果, 将泥石流的流变关系分为稀性和粘性泥石流两类情况进行了分析, 并由流变模型给出明渠中泥石流的垂向速度分布。

**关键词** 稀性泥石流, 粘性泥石流, 流变, 流核

## 1 引言

因为流变关系与泥石流动力特性密切相关, 因此泥石流流变关系一直是泥石流研究者探索的热点之一。由于泥石流由水和砂、石组成, 且砂、石粒径分布广, 其流变关系很复杂, 本文根据实验数据对泥石流流变特性进行了分析。

## 2 稀性泥石流流变的关系

在蒋家沟作的一系列泥石流流变实验<sup>[1,2]</sup>, 使用的仪器是 SHL-1 型同心圆柱砂浆混凝土流变仪, 该仪

器由西安冶金学院采矿系研制, 为直立同轴旋转式, 可在 5 转/min~200 转/min 无级调速, 内筒直径 50 mm, 外筒直径有 150 mm 和 90 mm 两种, 仪器开启后, 30 s 完成读数。实验材料取自蒋家沟内的泥石流, 是在泥石流发生时现场取样。实验中取稀性泥石流体的容重范围为  $1300 \text{ kg/m}^3 \sim 1760 \text{ kg/m}^3$ , 粒径均小于 2 mm; 粘性泥流体容重范围为  $1999 \text{ kg/m}^3 \sim 2292 \text{ kg/m}^3$ , 最大粒径为 20 mm。表 1 给出了 3 个样品泥石流体的特征参数。

由实验数据可以看出, 当密度从低逐渐增加时, 稀性泥石流流变性质可以从 Bingham 体变化到幂律体(图 1)。当其密度低于  $1688 \text{ kg/m}^3$  时, 泥石流显示为 Bingham 流体特性, 而超过该值时, 则为幂律流变性质。在下面的分析中, 为便于后面求速度分布, 将测

表 1 泥石流体的特征参数

类型	固体物 松散孔 隙率 (%)	固体物 紧密孔 隙率 (%)	泥石流 体容重 ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )	泥石流 体积比 浓度 (%)	大于 2mm 的 石块 (%)	小于 2mm 的 泥沙 (%)	浆体 容重 ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )
1	60.17	62.30	2.042	61.27	56.12	43.88	1.715
2	57.17	61.18	1.951	55.92	54.06	45.94	1.614
3	57.23	61.69	1.871	51.21	41.47	58.51	1.688

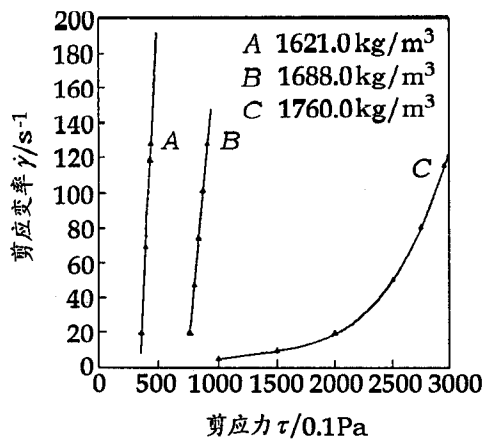


图 1 稀性泥石流的流变关系

出的数据整理成  $\dot{\gamma}$  与  $\tau$  的关系(表 1)。

当泥石流在 Bingham 体范围时, 其流变曲线可

以表示为

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 + \eta_1 \tau \quad (1)$$

其中  $\eta_1$  为参数。

而幂律体的泥石流流变关系可以表示为

$$\dot{\gamma} = A_1 \tau^4 + B_1 \tau^3 + C_1 \tau^2 + D_1 \tau + E_1 \quad (2)$$

其中  $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1$  是 5 个参数, 由实验确定。下面给出 3 个例子:

1) 密度为  $1621 \text{ kg/m}^3$  时

$$\dot{\gamma} = 1.223\tau - 420.17$$

2) 密度为  $1688 \text{ kg/m}^3$  时

$$\dot{\gamma} = 0.67\tau - 489.1$$

本文于 1999-02-25 收到。

3) 密度为  $1760 \text{ kg/m}^3$  时

$$\dot{\gamma} = 3.96 \times 10^{-12} \tau^4 - 6.53 \times 10^{-9} \tau^3 - 1.57 \times 10^{-5} \tau^2 + 0.048 \tau - 24.94$$

### 3 粘性泥石流的流变特性

实验表明, 粘性泥石流 (密度为  $1900.0 \text{ kg/m}^3 \sim 2300.0 \text{ kg/m}^3$ ) 的流变关系为明显的三次幂率流体特性 (图 2).

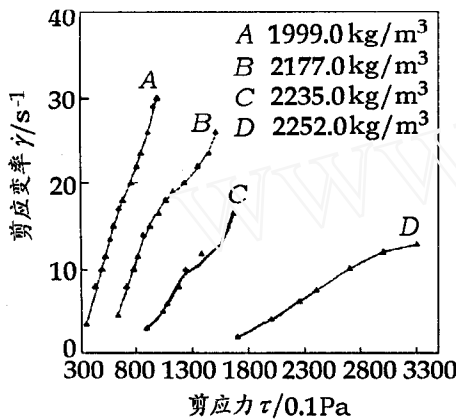


图 2 粘性泥石流的流变关系

粘性泥石流的流变关系可表示为

$$\dot{\gamma} = A_2 \tau^3 + B_2 \tau^2 + C_2 \tau + D_2 \quad (3)$$

其中  $A_2, B_2, C_2, D_2$  是由实验确定的参数. 该模型有一拐点.

下面给出几个实验例子

1) 密度为  $1999.0 \text{ kg/m}^3$  时

$$\dot{\gamma} = 1.62 \times 10^{-7} \tau^3 - 3.57 \times 10^{-4} \tau^2 + 0.295 \tau - 68.69$$

2) 密度为  $2177.0 \text{ kg/m}^3$  时

$$\dot{\gamma} = 7.14 \times 10^{-8} \tau^3 - 2.53 \times 10^{-4} \tau^2 + 0.311 \tau - 112.4$$

3) 密度为  $2235.0 \text{ kg/m}^3$  时

$$\dot{\gamma} = 1.16 \times 10^{-7} \tau^3 - 4.7 \times 10^{-4} \tau^2 + 0.643 \tau + 286.56$$

4) 密度为  $2252.0 \text{ kg/m}^3$  时

$$\dot{\gamma} = -3.02 \times 10^{-9} \tau^3 + 2.11 \times 10^{-5} \tau^2 - 4.01 \times 10^{-2} \tau + 24.08$$

### 4 力学机理分析<sup>[3]</sup>

当稀性泥石流密度低且颗粒粒径相对小时, 颗粒在流动中容易定向, 于是流变关系表现为线性特征.

但是随着密度的增加, 粒径也将增大, 颗粒之间的作用变得复杂, 流变关系显示为非线性特征即幂次关系.

对于粘性泥石流, 在低剪切率条件下, 颗粒受到的扰动小而只被微弱地定向, 有较大的内摩擦力, 故有较大的粘性. 随着剪切率的增加, 一方面颗粒的定向性逐渐增强, 其粘性有逐渐降低的趋势; 另一方面, 随着剪切率和速度的上升, 紊动效应将增强, 使粘性有增大的趋势, 在某一应力应变状态时, 粘性将由定向作用起主导作用转到紊动效应起主导作用, 粘性于是将由逐渐下降转向逐渐上升, 该点称为拐点, 粘性泥石流显示为三次幂率体.

### 5 在均匀沟渠中的速度分布

#### 5.1 稀性泥石流沿垂向的速度分布

设沟渠的坡角为  $\theta$ , 泥石流流体密度为  $\rho$ , 坐标原点在泥石流顶面上, 重力沿与沟渠面平行方向的分量为  $F = \rho g y \sin \theta$ . 对于匀速运动的流体有  $\tau = F$ , 同时应变率和速度的关系可以表示为  $\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y}$ , 将这几个关系式代入式 (1) 和式 (2) 得到

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \dot{\gamma}_0 + \eta_1 F \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = A_1 F^4 + B_1 F^3 + C_1 F^2 + D_1 F + E_1 \quad (5)$$

对  $y$  积分, 就可得到稀性泥石流沿垂向的速度分布为

$$u = \frac{1}{2} \eta_1 W y^2 + \dot{\gamma}_0 y + a_0 \quad (6)$$

或

$$u = \frac{1}{5} A_1 W^4 y^5 + \frac{1}{4} B_1 W^3 y^4 + \frac{1}{3} C_1 W^2 y^3 + \frac{1}{2} D_1 W y^2 + E_1 y + F_1 \quad (7)$$

其中  $W = \rho g \sin \theta$ ,  $a_0, F_1$  是积分常数, 由边界条件决定.

#### 5.2 粘性泥石流沿垂向的速度分布

同理, 由式 (3) 对  $y$  积分可得到粘性泥石流沿垂向的速度分布

$$u = \frac{1}{4} A_2 W^3 y^4 + \frac{1}{3} B_2 W^2 y^3 + \frac{1}{2} C_2 W y^2 + D_2 y + E_2 \quad (8)$$

很显然, 高密度稀性泥石流和粘性泥石流都具有幂率体性质, 沿垂向的速度分布比 Bingham 体上升更快, 流核更厚, 如果用 Bingham 体代替, 则会有一定的误差.

## 6 结论

根据实验数据, 泥石流的流变特性在本文进行了讨论. 很明显, 泥石流的流变特性随其密度而变化. 因此, 在不同的泥石流沟道或即使在同一沟道但在不同的时刻其泥石流流变参数也是不一定相同的. 故我们应根据不同的场合采用合适的模型.

## 参 考 文 献

- 1 吴积善. 蒋家沟泥石流流态. 山地研究, 1987, 5(4): 237
- 2 吴积善等. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京: 科学出版社, 1990. 55~79
- 3 Chan C F, Fong Man. Non-Newton Fluid Mechanics. Beijing: Science Press, 1984

## THE RHEOLOGICAL CHARACTERS

## OF DEBRIS FLOW

LU Xiaobing

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

LI Deji

(Institute of Mountain Hazard and Inveriment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract** The constitutive relationship of debris flow has been discussed according to the data of experiments in this paper. Based on the relationship, the vertical velocity distribution has been obtained and some analysis has been given at the same time. **Key words** deluted debris flow, visco-debris flow, rheology, flow core

## 柱下钢筋混凝土十字交叉基础节点力的分配

秦植海 李根生\* 张维国

(河北工程技术高等专科学校, 沧州 061001)

\* (南运河管理处)

**摘要** 本文给出了合理的重叠基底反力调整方法及计算公式, 并通过算例对节点力调整前后基底反力及内力的变化进行了对比.

**关键词** 十字交叉, 基础, 节点力, 分配, 重叠, 调整

## 1 引 言

钢筋混凝土十字交叉基础是具有较大刚度的高次超静定体系, 对地基的不均匀变形有较大的调节作用, 故在一般的房屋建筑中广泛被采用.

十字交叉基础是一种空间结构, 应用弹性半无限空间体理论的精确计算是十分复杂的, 一般可采用简化计算方法. 首先将十字交叉基础简化为地基上十字交叉梁系, 分离为两个方向的地基上梁, 但应满足两个条件: 一是荷载分配应满足交叉节点处的静力平衡条件, 即分配在正交基础梁上节点的荷载总和等于柱荷载, 其次是节点处应满足竖向位移协调条件.

从文克尔地基模型出发, 用基床系统法求解, 可

将十字交叉基础边柱节点、角柱节点及内柱节点(图1)作用的荷载  $F_i$ , 分解成  $x$ 、 $y$  两个方向的荷载  $F_{ix}$ 、 $F_{iy}$ , 然后分别按  $x$ 、 $y$  两个方向的柱下条形基础各自作用着  $F_{ix}$ 、 $F_{iy}$  计算基底反力、内力及配筋.

对于边柱节点

$$\left. \begin{aligned} F_{ix} &= \frac{4b_x S_x}{4b_x S_x + b_y S_y} \cdot F_i \\ F_{iy} &= \frac{b_y S_y}{4b_x S_x + b_y S_y} \cdot F_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对于内柱和角柱节点

$$\left. \begin{aligned} F_{ix} &= \frac{b_x S_x}{b_x S_x + b_y S_y} \cdot F_i \\ F_{iy} &= \frac{b_y S_y}{b_x S_x + b_y S_y} \cdot F_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$