

# 粘性泥石流应力应变特征的初步试验研究

王裕宜<sup>1</sup>, 詹钱登<sup>2</sup>, 李昌志<sup>3</sup>, 韩文亮<sup>4</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院东川泥石流观测研究站, 成都 610041;

2. 台湾成功大学水利及海洋工程系, 台南, 70101; 3. 四川大学高速水力学国家重点实验室, 成都, 610065; 4. 清华大学水利系, 北京, 10084; )

摘 要: 采用自己最新研制的泥石流流变仪, 测试自然界活泥石流体的样品, 发现粘性泥石流流体在低速率受剪时具有应力过冲和剪切稀化等特征。这些特征的讨论和认识, 为进一步深化泥石流模型理论研究奠定了基础。

关键词: 粘性泥石流, 应力过冲, 剪切稀化

中图分类号: P642.23 文献标识码: A

## 1 概况

泥石流是山区介于挟沙水流和滑坡之间的土、水、气混合流体。它往往突然暴发, 来势凶猛, 破坏力强, 对山区的经济建设和人民的生命财产构成严重威胁, 成为山区主要自然灾害之一。为了有效地治理泥石流, 减轻泥石流的灾害损失, 就必须研究泥石流发生、运动和堆积的机理, 掌握泥石流活动的基本规律。而泥石流流体应力应变(或称流变)特征的测试和认识, 则是研究泥石流内在机理的重要基础。泥石流流体应力应变(或称流变)特征的测试和认识, 是研究泥石流内在机理的重要基础。自 1978 年 Takahashi<sup>[1]</sup> 首次应用 Bagnold<sup>[2]</sup> 的颗粒流理论解释水石流的剪切机理以来, 随着国际减灾活动的加强, 有关泥石流应力应变行为的研究已经成为泥石流研究领域的热点之一。国内外许多泥石流专家利用旋转式(O'Brien and Julien 1988<sup>[3]</sup>, Major and Pierson 1990<sup>[4]</sup>)、锥盘式(Phillips and Davies 1989<sup>[5]</sup>, 沈和魏 1988<sup>[6]</sup>)和直立式<sup>[7]</sup>(詹和陈, 1997)等多种结构的流变仪来研究泥石流体的流变行为, 但都因受仪器自身结构的限制, 无法对含有粗颗粒的自然界泥石流流体原样进行测试。迄今为止, 国内外尚未见到有关现场泥石流流体流变参数测定的报道。作者采用自己最新研制的泥石流流变仪, 对中国云南蒋家沟高浓度粘性泥石流体的应力应变行为进行了现场测试, 发现粘性泥石流流体在低速率受剪时具有应

力过冲和剪切稀化等特征。

## 2 实验仪器与测试方法

我们研制的这台大型平板旋转式泥石流流变仪(图 1), 其主要特点是泥石流流体试样在仪器测试室中的受剪状况, 与野外泥石流体的流动状况相似。该流变仪的上盘(测量盘)直径为 50cm, 它与正压力传感器和扭矩传感器相连接; 下盘(转盘)的直径(内径)为 59cm, 它被设计成可放置泥石流流体试样, 并且连接无级可调速率传感器。上、下盘的间距为可调间距, 最大间距为 4.5cm。正压力传感器的精度为 0.024%, 扭矩传感器的精度为 1.08%。转速传感器的转速为 10 转/分~300 转/分, 其精度为 0.02%。

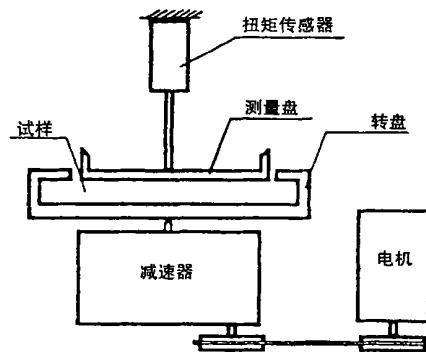


图 1 平板旋转式泥石流流变仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plate-type rheometer

收稿日期: 2001-02-14; 改回日期: 2001-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金资助(40071010), 中国科学院特别支持领域山地灾害基础研究基金资助(99303)。

作者简介: 王裕宜(1944-), 女(汉), 上海人, 研究员, 从事于泥石流应力应变特性和泥石流预测预报的观测研究 30 余年。

这台流变仪与标准规格的通用流变仪进行标样同步平行实验的校正, 是通过两种平行测试进行的。一种平行测试是将该流变仪与美国的数字旋转式粘度计(LVTD230)同步分别进行牛顿体流变参数测定, 该流变仪的牛顿体标样理论值与标样测试修正值的平均误差为 0.009 ( $n$  为 32 个测点,  $\sigma_{n-1}=4.4976 \times 10^{-5}$ )。另一种平行测试是将该流变仪(the DFR)与前东德的圆筒旋转式粘度计(the RV2), 同步分别进行泥浆流变参数的测定(一种非牛顿体), 该流变仪非牛顿体修正值与标样测试值(RV2)的平均误差为 -0.0033 ( $n$  为 16 个测点,  $\sigma_{n-1}=1.2894 \times 10^{-4}$ )。

样品的测定是在中科院东川泥石流观测研究站进行的。将现场采集到的活泥石流流体样品(取自著名泥石流沟—蒋家沟), 筛除颗粒大于 20mm 的砾石, 试样固体物质的总重量占原样固体物质总重量的 95% 左右。将制备后的样品放入仪器测试室进行测定, 由上盘的扭矩传感器和正压力传感器通过 AD 卡与计算机连接输出测试结果, 根据测定的流变曲线分析泥石流体的流变行为。

### 3 实验结果与分析

迄今为止, 所谓泥石流体的流变测试都是以泥浆或以模拟砂、粘粒的材料( $d_{\max} \leq 2\text{mm}$ )为试样进行的(这种浆体的固体颗粒总重量仅占自然界粘性泥石流体固体物质总重量的 40%), 将测得的结果再扩展到含粗颗粒砾石的两相流体—泥石流体, 并根据测得的流变曲线, 确定为宾汉模型<sup>[6, 7]</sup>。而针对活泥石流体(含粗颗粒砾石)的应力应变特征的实际测试还未见报道, 这除了因仪器结构上的缺陷和样品制备上的困难外, 还因为多数人对流变测试结果的分析, 忽视了泥石流体低速率时的应力应变特征。尽管有些人<sup>[3, 9]</sup>已注意和观测到自然界泥石流体的剪切速率很少超过 20 1/s(一般都 $< 10$  1/s), 但也因缺乏测试手段<sup>[4, 6, 8]</sup>而难以开展这方面的研究工作。

作者使用自己研制的泥石流流变仪, 对自然界粘性泥石流体(颗粒粒径范围从粘粒到 20mm 的砾石)的应力应变行为进行测定, 该应力应变曲线与泥浆宾汉流变曲线不一样(图 2)具有明显的应力过冲和触变滞后环等几个特征, 初步分析如下。

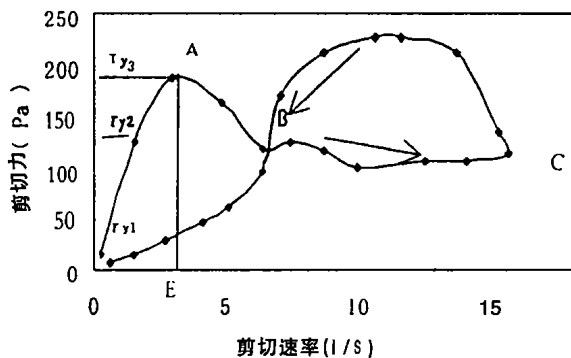


图 2 粘性泥石流体的流变曲线  
Fig. 2 Rheological curve of debris flow sample  
( $\tau_c = 2.1 \text{ N/m}^2$ ) in the field

#### 3.1 粘性泥石流体的应力过冲现象

粘性泥石流体应力应变曲线在极低速率部位出现滞后环分异段和较高的始屈服应力及极限屈服应力(或称应力过冲)的现象说明, 停积在沟床中的粘性泥石流体具有一定屈服力(或称终屈服应力, 图 2 中  $\tau_{y1}$ ), 泥石流体须具备较高屈服应力(图 2 中  $\tau_{y2}$  和  $\tau_{y3}$ ), 才能克服静止状态下的结构力( $\tau_{y1}$ )而启动<sup>[9]</sup>。这除了与浆体介质的触变性有关外, 还与高浓度粗颗粒(砾石)的挤压摩擦力共同组成的泥石流体结构应力滞后特性(或称抗剪强度)有关。浆体介质的触变性起因于悬浮体内部粘粒间各种相互作用力(如粒际作用力、流体动力、布朗运动等)组成的网络结构的解凝和聚凝。含砾石的粘性泥石流体结构应力滞后的特性, 主要起因于粗细颗粒相互作用的结构破坏, 受剪初期泥石流体经历了较明显的结构逐渐形变破坏和最终剪破的二个阶段, 即初始屈服应力和极限屈服应力阶段(图 2 中  $\tau_{y2}$  和  $\tau_{y3}$ )。初剪时, 由于初始孔隙率大, 易于压缩变形。当孔隙压缩到一定程度, 粗颗粒骨架开始承重时, 粗细颗粒间接触越来越多, 浆体介质承受压力不再增加, 而是从砾石骨架间隙中挤出并触变稀化<sup>[13]</sup>。当颗粒间接触面最大而趋向稀化滑动时, 应力达到最大, 颗粒间骨架结构最终被剪破。其结构破坏的最大应力, 也可称为极限屈服应力(图 2 中的  $\tau_{y3}$ )。图 3 中的 2、3、4 点的泥深( $H$ )分别为 3.2m、3.7m、3.4m, 流速速度( $H/V$ )分别为 2.51/s、2.61/s、2.71/s。粘性泥石流应力过冲与阵性流形成机理还需作进一步深入推导。

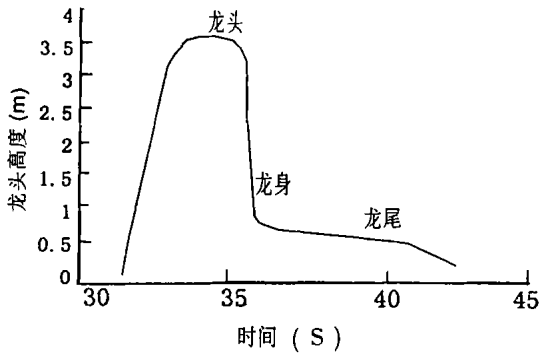


图3 泥石流阵性流流速时空分布图

Fig. 3 Distribution of speeds with time and space

因为粘性泥石流阵性流的形成与泥石流体的浓度和粘性介质直接相关,而泥石流体内的粘性介质作为中性悬浮质是相对稳定不变的,泥石流流体浓度的增加是依靠砾石含量的增加来实现的。因此,为了进一步研究砾石含量对粘性泥石流应力过冲特征的影响,我们设计了粘性介质(浆体)相同( $C_{vf}=0.4518$ )的三组不同粒径的砾石( $d$ 为2mm~5mm, 5mm~10mm, 10mm~15mm)随浓度变化的平行实验。三组试验的分析结果一致。图4是砾石为10mm~15mm粒径组的不同浓度变化的平行实验的结果。在这组试验中,泥石流体的体积浓度( $C_{vf}$ )从0.4888到0.7388,砾石的体积浓度从0.037到0.287。从图4的分析可知,泥石流流体浓度(砾石的浓度)越高,极限屈服应力越大,应力过冲现象越明显。

### 3.2 粘性泥石流体的剪切稀化特性

粘性泥石流流体应力应变曲线在低速率部位体现的剪切稀化特征,它除了与浆体介质受剪初期粘度稀化<sup>[11]</sup>和应力松弛<sup>[12]</sup>特性有关外,还与粗细颗粒间过渡区结构稀化和暂时粒间高附加孔隙压力<sup>[13]</sup>迅速降低的特性有关。剪切场使泥浆网络结构的聚团在流动方向上更为伸展,因而使链段中平均浓度降低,致使粘度减弱而剪切稀化。在剪切场中粘性泥石流流体剪切稀化的流变行为还应对粘性泥石流流体结构的第三相,即粗颗粒(砾石)与浆体界面过渡相进行探讨,才能作出解释<sup>[14]</sup>。过渡相系围绕粗颗粒周围一薄壳(粘附层),它的强度通常比粘性泥石流体的两个主要组成相(砾石和浆体)为弱<sup>[14]</sup>。根据浆体中粘粒扩散层吸附水(紧束缚水31~10 000个大气压和松束缚1.5~6.25个大气压)的特性,剪切初期水膜外层的松束缚水受剪应力影响被释放成自

由重力水,增加流场中自由重力水传递,而导致过渡相区结构稀化。剪切初期粒间结构的形变和破坏的过程,导致孔隙压缩封闭和贯穿,以及暂时的粒间附加孔隙压力的产生和衰减(图5中 $A' \rightarrow B'$ )<sup>[13]</sup>,加剧了粘性泥石流体内有效应力的减少和剪切稀化。剪切初期正压力中附加孔隙压力( $P_e$ )的出现,显然引起土体内抗剪强度( $\tau_s$ )迅速降低(图5中 $A'(N)$ ),则有 $\tau_a = C + \sigma_s \tan \varphi = C + (\sigma_n - N(P_e)) \tan \varphi$

由于附加孔隙压力的作用,土体强度减弱,当 $\sigma_n \rightarrow P_e$ 时,土体抗剪强度几乎降为零,此时坡面碎屑就可因此发生液化,形成泥石流。

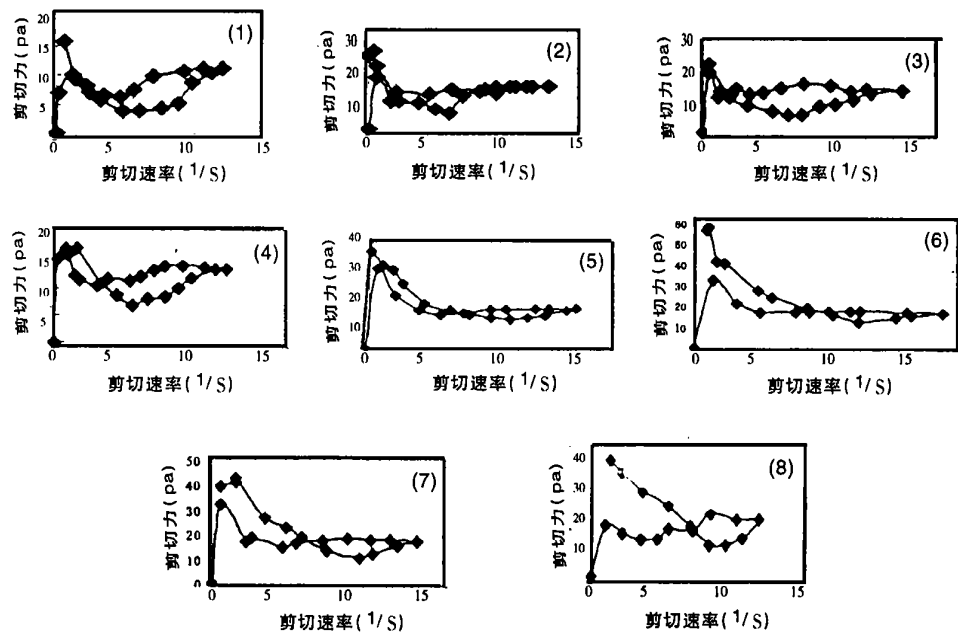
### 3.3 粘性泥石流体的表观滑动摩擦角和滞后环分异段的分析

粘性泥石流应力应变曲线上行段在A点处陡直下降到B点后,流体只需很小应力就可以高速运动的表观滑动摩擦角(或称表观粘度,图5中OC段 $\tan q_c = 0.0564$ ,  $q_c = 3.6^\circ$ ),该角比通常角砾土的内摩擦角(样品土样接近饱和含水量时, $\varphi = 18^\circ \sim 24^\circ$ ,最小极值为 $14^\circ$ )小得多,它与蒋家沟高浓度粘性泥石流通区坡度角( $\theta = 3^\circ \sim 5^\circ$ )相似。该项试验结论与有关的试验结论相似<sup>[17, 18]</sup>。其表观滑动摩擦角(表观粘度)与流体能量消耗最小的有效应力(图5中A'点所对应的B点),以及最终流体的动摩擦系数有关(图5中的OC'段( $\tan q_m$ ))。当 $q_m > q_c$ 时,粘性泥石流体的阵性流加速发展;当 $q_m < q_c$ 时,阵性流减速消退。因此,该表观滑动摩擦角可以用来解释高浓度粘性泥石流体,在低坡度下的高速运动以及阵性流叠加等动力学运动机理。

由图5可知,粘性泥石流的上行与下行不同形态的剪切曲线,特别在低速率部位滞后环的分异段,能较好解释野外自然界泥石流体的龙头冲刷和龙尾淤积这一自然现象。从粘性泥石流体的流变曲线(图2)可知,尽管 $\tau_{y1} \rightarrow 0$ ,但泥石流流体仍具有一定结构强度( $\tau_{y1}$ ),致使龙尾具有一定厚度的粘附层( $\tau_{y1}$ 点泥深为0.3m)。第二阵泥石流物质来时(加大泥深),剪应力必定能扩大到 $\tau_{y3}$ ,这次前阵静止的龙尾泥石流体的触变启动,其流速突然跳到相当大的数值(E),形成龙头冲刷。如果 $\tau_{y3}$ 越大,该阵泥石流揭走前一阵泥石流体的残留层的厚度越大,且流速越快,沟床逐渐下切。如图3根据用雷达测速仪和超声波泥位仪测得蒋家沟一场泥石流几一阵阵性流的龙头、龙身和龙尾(残留层)及泥深数据。因此,粘性泥石流阵性流一般保持有“头”冲和“尾”淤的特性,并与沟床中静止的泥

石流体残留层进行物质交换, 保持相对平衡。可见, 这也是泥石流流体流变滞后环双屈服应力触变特性所决定的。由于泥石流体的触变特性与泥石流流体性质和流速梯度有关, 所在一场泥石流过程中, 粘性泥石流阵性流、粘性泥石流连续流和稀性泥石流对沟床都会形成时冲时淤的状况。例如, 1986—7—25 的一场泥石流。开始为粘性泥石流阵性流, 产生的粘附淤积

形成泥深达 1.05m 的残留层; 接着有较长时间的稀性泥石流连续流过程, 当稀性泥石流结束时, 沟床刷深 2.9m。新西兰学者 Davis T. R. 也于 1990 年在蒋家沟观测到静止泥石流流体经触变后形成小阵流扩大到整沟床的过程<sup>[9]</sup>。泥石流流体触变特性的试验还有待于进一步深入探讨。



(1)  $C_{vf}=0.4888$ ; (2)  $C_{vf}0.5312$ ; (3)  $C_{vf}0.5612$ ; (4)  $C_{vf}=0.6212$ ;  
(5)  $C_{vf}=0.6512$ ; (6)  $C_{vf}=0.6812$ ; (7)  $C_{vf}=0.7112$ ; (8)  $C_{vf}=0.7388$ ( $C_{vf}$ 为泥石流体积浓度)

图 4 粘性泥石流随浓度变化的流变曲线

Fig. 4 Rheological curves of different densities in viscous debris flow

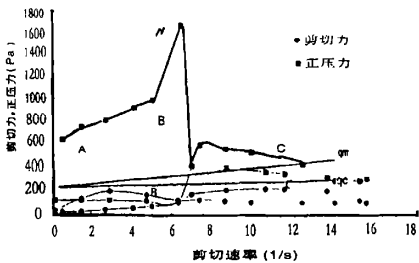


图 5 粘性泥石流剪切和正压力方向流变曲线

Fig. 5 Rheological Curve of stress and normal stress  
in viscous debris flow

参考文献:

[ 1 ] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow, *J. Hyd. Div. Proc. ASCE*, 1978, 104(Hy8) :1153 ~ 1169.  
[ 2 ] Bagnold R A. Experiments on gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, *Proc. of the Royal Soc. of London*, 1954, 225 :49~ 53.  
[ 3 ] Obrien J S, Julien P X. Laboratory analysis of mudflow properties, *J. of Hyd. Eng.*, 1988, 114(8) :877 ~ 887.  
[ 4 ] Major J J, Pierson T C. Rheological analysis of fine-grained natural debris-flow material. Reprinter from Hyd/ Hydrology of arid. *Proc. of Intel. Sym., Hy & IR ASCE*, 1990, 225 ~ 230.  
[ 5 ] Phillips C J, Davies R S. Debris flow material rheology direct measurement. *Proc. of Inter. Sym. on Erosion and Volcanic Debris Flow Technology, Indonesia*, 1989, 21 ~ 28.  
[ 6 ] 沈寿长, 魏鸿. 泥石流应力本构关系的试验研究, 海峡两岸山地

- 灾害与环境保育研究[ C ]. 1998. 114~121.
- [ 7 ] 詹钱登, 陈晋琪. 土石流体在直立旋转式水槽内流动现象之初步实验研究[ C ]. 第一届土石流研讨会论文集. 1996 15—164.
- [ 8 ] 费祥俊. 泥石流的粘度及其确定方法[ J ]. 铁道工程学报. 1986 (4) :9~ 16.
- [ 9 ] 王裕宜, 方图南, 张辉, 等. 泥石流阵性流和触变唯象模型的探讨[ J ]. 自然灾害学报. 1997. 6(4). 38~ 46.
- [ 10 ] 王为标, 孙振天, 等. 沥青混凝土应力—应变特性的研究[ J ]. 水利学报. 1996 (5) 1~8.
- [ 11 ] 王裕宜. 泥石流突发性流动和剪切稀化有相关研究[ J ]. 自然灾害学报. 1997. 6(1). 36~ 43.
- [ 12 ] 韩文亮. 细颗粒浆体应力松弛模型[ J ]. 泥沙研究. 1991. (3) :89~ 91.
- [ 13 ] Wang Yuyi, Fei Xiangyun, Particle support mechanism in viscous debris flows at Jiangjia Ravine, Yunnan China, *Science in China (Series E)*, Oct. 1999. 42(5) 550~555.
- [ 14 ] 钱宁, 万兆惠. 泥沙动力学[ M ]. 北京: 科学出版社, 1991. 30.
- [ 15 ] 姜权, 张和平, 方泰. 从物理机理角度探讨混凝土本构的途径. 岩面力学与工程学报, 1999. 18(4): 484~486.
- [ 16 ] 姚贤良, 程方生, 等. 土壤物理学[ M ]. 北京: 农业出版社, 1983. 147~ 152.
- [ 17 ] Chyan-Deng Jan. Dynamic internal friction angle of idealized debris flows, *J of chinese soil and water conservation (Tainan)*. 24. (1), 29~36.
- [ 18 ] Sassa K. Landslide volume apparent friction relationship in the case of rapid loading on alluvial deposits. *Landslide News*, 1992 (8) :16~ 18.
- [ 19 ] T. R. davis and others. New aspects of debris flow Behaviour. Japan-U.S. Sym. on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control. 1991, 78~ 89.

## Preliminary Experiment to Rheological Characters of Viscous Debris flowe, Jiangjia Ravine Yunnan, China

WANG Yu-yi<sup>1</sup>, JAN Chian-deng<sup>2</sup>, LI Chang-zhi<sup>3</sup> and HAN Wen-liang<sup>4</sup>

- (1. *Chengdu institute of Mountain Hazards & Enviroment, Chinese Academy of Sciences, Dongchuan Observation and Research Station of Debris Flow, C. A. S, Chengdu 610041 China;*
2. *Dep. of Hydraulics and Ocean Engineering, Cheng Kung University, Tainan 70101, Taiwan China;*
3. *State Key Hydraulics Laboratory of High Speed Flow, Sichuan University, Chengdu, 610065 China;*
4. *Dep. of Hydraulics, tsinghuw University, Beijing 100083 China*)

**Abstract:** Under support of the latest rheometer designed and made by the author, the rheological characters of natural debris flow were measured. According to the measured data, this paper preliminarily discussed the characters of viscous debris flow at low shear rate. And this study find that overstress effect and shear dilution phenomenon characterize the viscous debris flow in the Jiangjia Ravine, China. All of these have laid the foundation in a certain degree for further study on theory of debris flow model.

**Key words:** viscous debris flow; overstress; shear dilution