

引用格式:梁瑛,曹文豪,季宪军,潘华利,欧国强.成都粘土泥浆流变模型探讨[J].山地学报,2021,39(2):218-225.

LIANG Ying, CAO Wenhao, JI Xianjun, PAN Huali, OU Guoqiang. Discussion on the Rheological Model of Chengdu Clay slurry [J]. Mountain Research, 2021, 39(2):218-225.

成都粘土泥浆流变模型探讨

梁瑛¹,曹文豪¹,季宪军¹,潘华利²,欧国强^{2*}

(1. 南阳理工学院,河南 南阳 473004; 2. 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: 泥浆是泥石流流体力学的重要研究对象。细小的黏性颗粒是黏性泥石流泥浆的基本组成部分,传统流变模型可以描述粘性泥石流中颗粒物质相互作用,然而各灾害点物质组成的差异性使得泥浆流变模型的应用各有不同,且当前研究缺少对不同模型应用的详细讨论。本研究利用 MCR301 流变仪,开展不同含水量成都粘土泥浆流变实验,分析成都粘土泥浆剪切应力随剪切速率变化过程、含水量对剪切应力的影响;对比分析幂律模型、宾汉模型和 Herschel & Bulkley 模型(H-B 模型),拟合各含水量成都粘土泥浆的流变实验结果。得出如下结论:(1)随着含水量由 50% 增大到 400%,成都粘土泥浆切应力迅速降低,由超过 8000 Pa 降低到 5 Pa 左右;当剪切速率约为 0.2 s^{-1} 时,剪切应力随剪切速率增加而迅速增大,但当剪切速率大于 0.2 s^{-1} 时,剪切应力随剪切速率增加而增长缓慢,成都粘土泥浆表现出典型的剪切稀化非牛顿流体;(2)H-B 模型能很好地反映各含水量成都粘土泥浆剪切应力与剪切速率的变化全过程(剪切稀化),是拟合成都粘土泥浆流变过程的最佳数学模型;(3)泥浆屈服应力(τ_{HB})和流动指数(η_{HB})随含水量的增加迅速减小。本文流变模型实验的开展和研究对深入认知和探索泥石流致灾全过程具有重要意义。

关键词: 成都粘土;泥浆;流变实验;流变模型;H-B 模型

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

根据含水量的不同,泥石流分为黏性泥石流和稀性泥石流^[1]。与稀性泥石流相比,黏性泥石流具有泥浆和固体颗粒组成的结构^[2]。因泥浆黏连作用,裹挟着粗颗粒一同运移,泥石流具有冲击力强、破坏性大的特征^[3-4]。泥浆影响黏性泥石流的运动过程和运移形态^[5],是黏性泥石流运动研究的重要对象,主要内容包括泥浆屈服应力和泥浆流变模型。颗粒界限粒径^[6]、颗粒形态^[7]、颗粒浓度^[8-9]、黏土矿物成分^[10]、黏粒含量^[11]、有机碳含量^[12]、含水量^[12-13]等要素对屈服应力的影响,为黏性泥石流启动、运移和堆积过程研究提供合理的理论解释。泥

石流浆体流变模型是泥石流运动过程研究的理论基础,合理的流变模型有助于理解泥石流致灾全过程。研究表明^[14],由于存在颗粒摩擦、互锁和碰撞导致堆积密度、颗粒分布、晶粒取向以及颗粒团簇的形成和破坏等复杂机制,泥石流运动难以用单一的流变模型来描述。基于黏性泥石流泥浆和粗颗粒组构的浆体和粗颗粒相互作用,是研究泥石流灾害运动全过程的有效途径。泥石流在运动过程中相邻粗颗粒间速度差剪切颗粒间泥浆,恰当的泥浆流变模型是描述这一过程的关键。

泥浆常用的流变模型有幂律模型^[15-16]、

收稿日期(Received date):2020-01-22;改回日期(Accepted date):2021-02-15

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(41672357,51679229,41672318)。^[National Natural Science Foundation of China(41672357, 51679229,41672318)]

作者简介(Biography):梁瑛(1974-),女,河南人,硕士,副教授,主要研究方向:工程应用数学。^[LIANG Ying(1974-),female, born in Henan province, M. Sc., associate professor, research on engineering applied mathematics] E-mail:liangying589@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):欧国强(1958-),男,四川人,博士,研究员,主要研究方向:山地灾害动力学。^[OU Guoqiang(1958-), male, Ph. D., professor, research on mountain disaster dynamics] E-mail:ouqg@imde.ac.cn

Bingham (1922) 模型^[17-19] 和 Herschel & Bulkley (1926) 模型^[20-23]。

幂律模型适用于没有屈服应力的非牛顿流体:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中, τ 为剪切应力; η 为幂律模型流动系数; n 为流动指数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。当 $n = 1$ 时, 为牛顿流体; $n > 1$ 时, 剪切增稠; $n < 1$ 时, 剪切变稀。

Bingham 模型适用于有屈服应力流体:

$$\tau = \tau_B + \eta_B \dot{\gamma} \quad (2)$$

式中, τ_B 、 η_B 分别为屈服应力和流动系数。当剪切应力小于 τ_B 时, 只发生弹性形变, 当切应力大于 τ_B 时, 切应力随剪切速率线性增加, 为 Newton 体。

H-B 模型适用于有一定屈服应力的非牛顿流体:

$$\tau = \tau_{HB} + \eta_{HB} \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

式中, 当 $n > 1$ 时, 为剪切稠化流体, 具有胀塑性; 当 $n < 1$ 时, 为剪切稀化流体, 具有假塑性; 当 $n = 1$ 时, 为 Bingham 模型。

以上模型已经应用于具体的灾害研究中, 然而因各灾害点物质组成具有差异, 使得泥浆流变模型应用各有不同, 同时缺少对模型应用的详细探讨。细小的黏性颗粒是黏性泥石流的基本组成部分, 本文以成都龙泉区黏土为泥浆配制材料, 进行不同含水率泥浆流变实验, 探讨泥浆流变模型, 可以为其他区域泥石流浆体流变模型研究提供参考。

1 试验材料及试样制备

1.1 试验材料

成都黏土广泛分布于岷江二、三级阶地及成都市东郊和龙泉驿一带, 呈棕黄、褐黄色、灰黄等色, 质地硬塑, 含铁锰结核, 黏性强^[24]。在成都龙泉区取成都黏土若干, 呈棕黄色。将部分土样置入盆中, 加水浸没土样, 浸泡 24 h 以上, 人工拌合, 待充分饱和后备用。取备用样品若干, 配制三种含水量泥浆 (50.00%、63.00%、80.00%), 用液塑限联合测定仪, 根据液塑限测定实验方法, 每一种含水量泥浆测定三次锥入深度, 取平均值, 确定其液塑限, 测试结果见表 1。根据实验结果, 成都粘土的液限含水量 w_L 为 66.50%, 塑限含水量 w_p 为 24.50%。塑性指数 I_p 为: $I_p = w_L - w_p = 42 > 17$, 属粘土, 与文献资料^[25]相一致。

表 1 成都粘土液塑限实验

Tab. 1 Liquid plastic limit experiment of Chengdu Clay

试样编号	含水量/%	锥入深度/mm	平均值/mm
1	50	10.45	10.60
		9.92	
		11.42	
2	63	15.91	16.69
		16.46	
		17.69	
3	80	23.18	21.45
		20.31	
		20.85	

利用激光衍射粒度分析仪 (英国马尔文 Mastersizer 2000), 分析成都粘土颗粒物质组成 (图 1)。

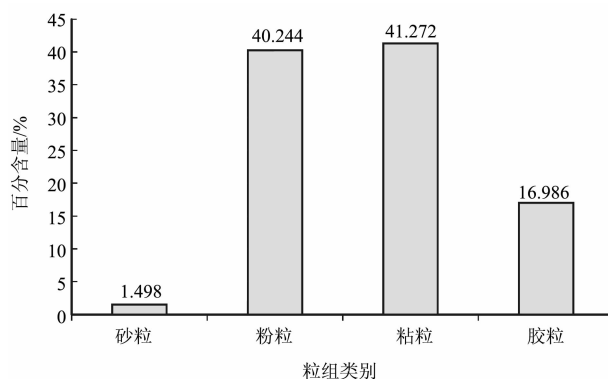


图 1 成都黏土颗粒组成

Fig. 1 Composition of Chengdu Clay particles

1.2 试验试样制备

取饱和备用成都粘土 (浸泡 48 h 以上), 利用烘干法测定其初始含水量 (w_0 为单位体积内含水质量与干土质量百分比)。将其放置于 10 个量杯内, 分别向杯内加入水, 根据初始含水量, 计算每个量杯内成都粘土泥浆含水量, 利用泥浆比重计测定各含水量泥浆密度, 各试样含水量及密度见表 2, 制备的泥浆试验样品见图 2。

2 实验仪器及试验方法

2.1 实验仪器

成都黏土泥浆流变特性实验利用奥地利安东帕

表 2 泥浆试样含水量

Tab.2 Moisture content of mud

试样编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.82	1.75	1.71	1.65	1.60	1.51	1.41	1.32	1.20	1.15
含水量/%	50.00	57.00	63.00	72.00	80.00	101.00	131.00	182.00	302.00	400.00



图 2 部分泥浆试验样品

Fig.2 Mud sample of this research

MCR301 流变仪测定(图 3)。该流变仪采用空气轴承,最小扭矩 $0.002 \mu\text{N} \cdot \text{m}$,最大扭矩 $200 \text{ mN} \cdot \text{m}$;偏角(预设): $0.1 \mu\text{rad}$ 至无穷大;最小速度(CSS): $10 \sim 7 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,最小速度(CSR): $10 \sim 6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,最大速度: $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$;最小频率: $10 \sim 5 \text{ Hz}$;最大频率: 100 Hz ;法向应力范围: $0.01 \sim 50 \text{ N}$;法向应力精度: 0.002 N ;温度: $-150 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



图 3 安东帕 MCR301 流变仪

Fig.3 Picture of Antonpa MCR301 rheometer

本次试验采用 ST 同心圆轴测试系统,该系统由内部十字板转子测试系统和外部固定圆筒组成。

内部十字转子按照设定速率转动,通过传感器记录转子转动过程中扭矩大小,计算泥浆切应力。外部圆筒固定,圆筒内盛泥浆,圆筒外通过水循环系统保持所测样品温度恒定。

2.2 试验方法

取适量泥浆装入固定外筒,十字板转子上端面与筒内泥浆齐平。设定十字转子转动速率,整个实验过程为增速剪切,剪切速率在 $0 \sim 2 \text{ s}^{-1}$ 按 10 为底的对数进行增加。通过水循环系统将试样测试温度恒定在 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 试验结果及讨论

3.1 含水量对成都粘土泥浆切应力的影响

根据以上试验准备和设计,各泥浆试样(表 2)剪应力随剪切速率变化过程见图 4。

从上述实验结果(图 4)可以看出,随含水量增大,泥浆切应力迅速降低,由超过 8000 Pa 降低到 5 Pa 左右。剪切应力随剪切速率变化较大,以含水量为 80.00% 的成都粘土泥浆为例,当剪切速率为 0.01 s^{-1} 时,剪切应力为 444 kPa ;当剪切速率为 0.21 s^{-1} 时,剪切应力为 1250 kPa ;而当剪切速率由 0.21 s^{-1} 增大到 1.90 s^{-1} 时,剪切应力仅从 1250 kPa 增大到 1280 kPa 。因此,剪切速率对泥浆的剪应力影响具有阶段性。当剪切速率较小时(约为 0.20 s^{-1}),切应力迅速增大;当剪切速率超过一定值时(约为 0.20 s^{-1}),切应力变化较小。根据剪切应力与剪切速率的关系,成都粘土泥浆为典型的剪切稀化非牛顿体流体。

3.2 成都粘土泥浆流变模型讨论

为探讨成都粘土泥浆合适的流变模型,对流变实验数据采用幂律模型、宾汉模型、H-B 模型进行数值拟合,并将不同含水量泥浆应力与剪切速率变化过程与幂律模型、宾汉模型、H-B 模型数值进行拟合,如图 5 所示。

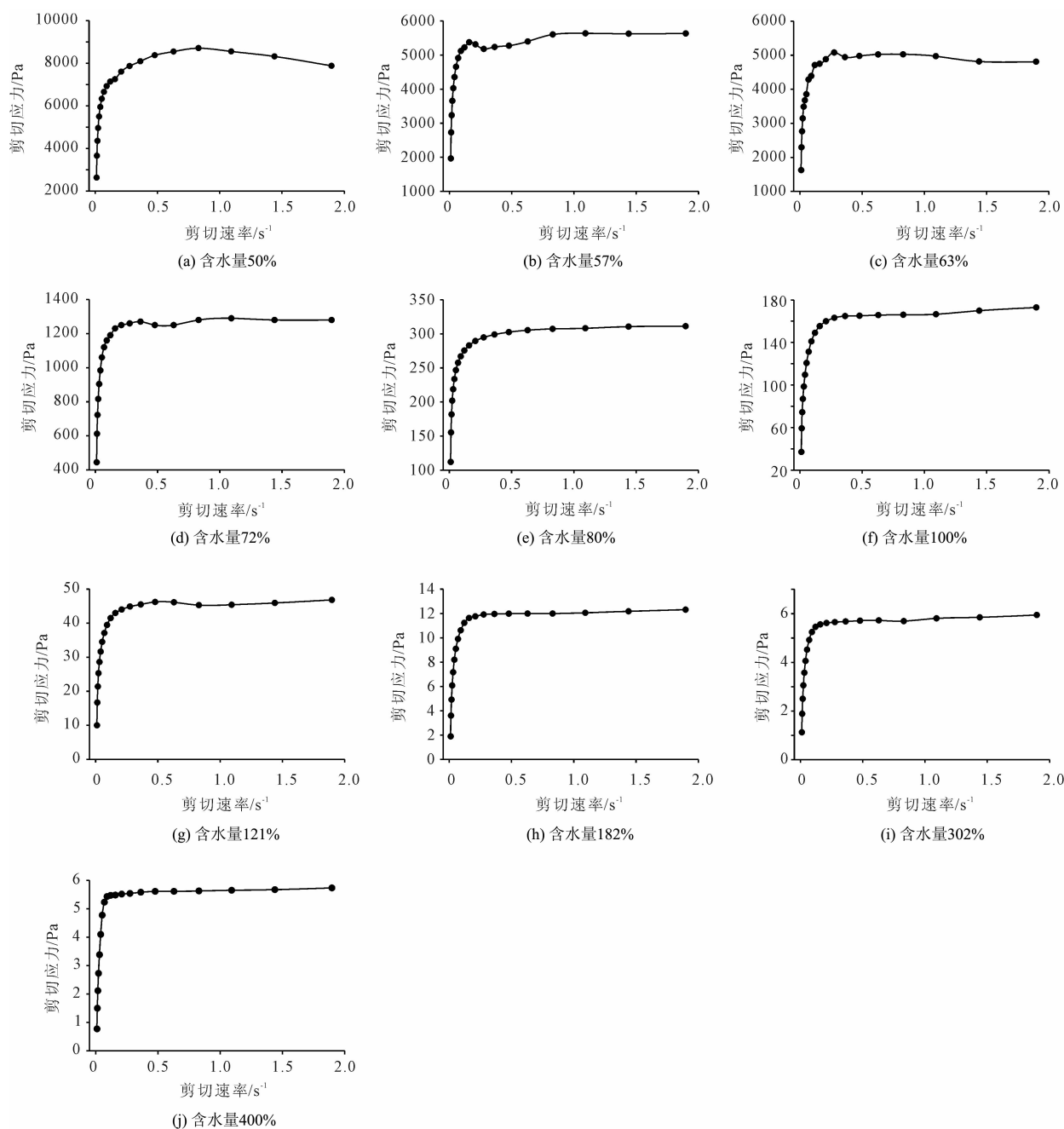


图4 剪切应力随剪切速率变化

Fig. 4 Change of shear stress with shear rate

从图6各含水量泥浆实验数据和各模型拟合结果来看,宾汉模型仅能粗略表达泥浆剪切应力随剪切速率变化的关系(剪切应力随剪切速率增长而增大),不能描述低剪切速率下应力与剪切速率的关系;当剪切速率超过一定值后,模拟应力与实验结果存在较大偏差,对各含水量泥浆拟合的相关系数 R 仅为 $0.50 \sim 0.60$ 。幂律模型能较好地体现泥浆剪切应力随剪切速率增大的非线性增长过程,但对低

剪切速率下应力与剪切速率间关系描述不完整;当剪切速率超过一定值后,与宾汉模型类似,模拟结果与实验结果存在一定差异,应力增长趋势较实验结果偏大,其相关系数 R 为 $0.83 \sim 0.90$ (表3)。H-B模型与其他模型相比具有较大优势,对各含水量成都粘土泥浆实验数据与拟合值基本重合,能很好地反映泥浆剪切应力与剪切速率的变化全过程(剪切稀化),对各含水量成都粘土泥浆拟合的相关系数 R

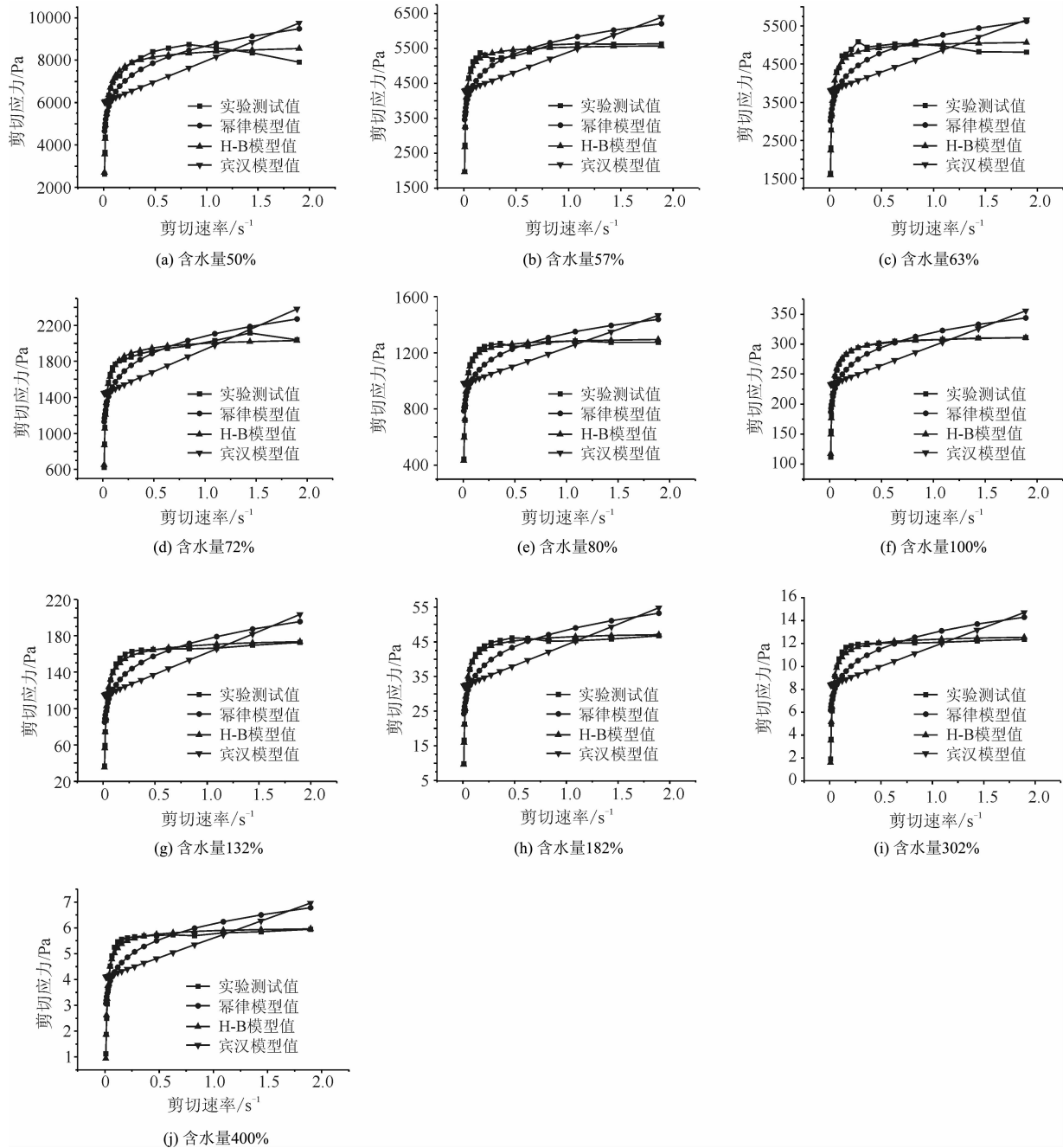


图 5 各含水量泥浆剪切应力与剪切速率关系实验值与拟合值

Fig. 5 Experimental value and fitting value of the relationship between shear stress and shear rate of Chengdu Clay mud with different water content

均接近 1, 甚至等于 1 (含水量为 80.00% 的成都粘土泥浆)。因此, 从应力与剪切速率数学表达上来说 (数值拟合), H-B 模型是成都粘土泥浆流变最佳模型, 但 H-B 模型的流动系数 η_{HB} 和流动指数 n 为负值, 这一点和流变模型流动系数、流动指数 (正值) 所应具有的物理意义相反, τ_{HB} 大于剪切过程中记录的所有切应力。因此, 有关文献认为此模型模

拟泥浆的流变行为是不适用的, 依然采用拟合度一般的幂律模型来反映其流变过程, 从上述模拟结果来看, 与实际应力剪切速率关系相差较大, 不够精确。限于作者本人知识所限, 不能就此给予较为合理阐释, 但对于准确描述这一过程来说, 准确的数学模型更具有现实意义, 这一点对复杂的粗颗粒和泥浆相互作用过程至关重要。

根据不同含水量成都黏土泥浆实验和模拟结果,利用 H-B 模型结果,得到 H-B 模型中 τ_{HB} 、 η_{HB} 随含水量变化关系图(图 6、图 7),结果表明随泥浆含水量增加, τ_{HB} 、 η_{HB} 迅速减小。

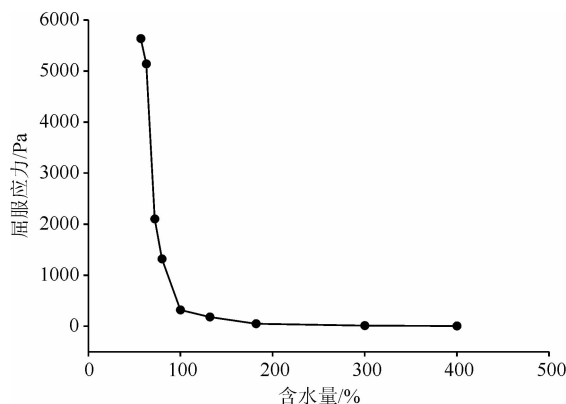


图 6 τ_{HB} 与含水量关系

Fig. 6 Relationship of τ_{HB} with moisture content

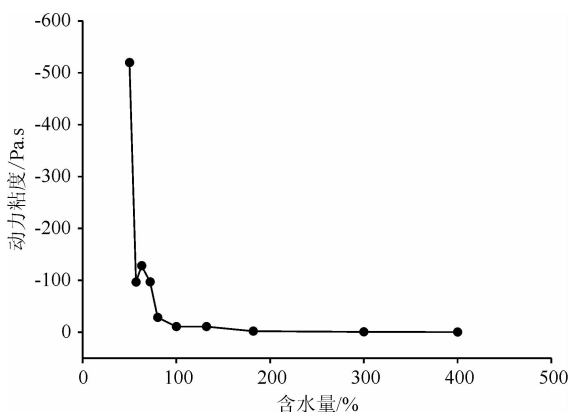


图 7 η_{HB} 与含水量关系

Fig. 7 Relationship of η_{HB} with moisture content

4 结论

通过不同含水量成都粘土泥浆流变实验,观察成都粘土泥浆剪切应力随剪切速率变化过程,分析含水量对剪切应力的影响,利用幂律模型、宾汉模型和 H-B 模型,拟合各含水量成都粘土泥浆的流变过程,对比各模型拟合数据,确定成都粘土泥浆的适合流变模型,得出如下结论:

(1)含水量对成都粘土泥浆切应力影响较大,随含水量增大(由 50% 增大到 400%),切应力迅速降低(由超过 8000 Pa 降低到 5 Pa 左右)。

(2)剪切速率对泥浆的剪应力影响具有阶段性:当剪切速率较小时(约为 0.20 s^{-1}),切应力迅速

增大;当剪切速率超过一定值时(约为 0.20 s^{-1}),剪切应力变化较小。成都粘土泥浆为典型的剪切稀化非牛顿流体。

(3)比较不同模型拟合结果,H-B 模型能很好地反映各含水量成都粘土泥浆剪切应力与剪切速率的变化全过程(剪切稀化),相关系数 R 均接近 1。H-B 模型是拟合成成都粘土泥浆流变最佳数学模型,这对准确描述黏性泥石流运动过程中粗颗粒与泥浆相互作用至关重要。但拟合所得流变参数(流动系数 η_{HB} 和流动指数 n)为负值,与流变模型传统物理意义不一致(流变参数为正)。

(4)根据实验数据和拟合结果,建议采用 H-B 模型作为成都粘土泥浆切应力与剪切速率的数学模型,描述黏性泥石流运动过程中粗颗粒与泥浆相互作用过程,为以粗颗粒为对象的黏性泥石流运动过程细观分析提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 石建军,李保珠,李鹏,等. 元谋县 9·17 特大泥石流特征及形成机理分析[J]. 地质论评, 2018, **64**(3):665-673. [SHI Jianjun, LI Baozhu, LI Peng, et al. Analysis of characteristics and formation mechanism for the 9·17 giant debris flow in Yuanmou country, Yunnan province [J], Geological Review. 2018, **64**(3): 665-673] DOI: 10.16509/j.georeview.2018.03.012
- [2] 沈寿长,谢慎良. 泥石流流体的结构模式和粗颗粒对泥浆体流变特性的影响[J]. 泥沙研究, 1983(3):12-19. [SHEN Shouchang, XIE Shenliang. Mode of structure of debris fluid and the effect of coarse grains on the rheological characteristics of slurry [J]. Journal of Sediment Research, 1983(3):12-19] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1983.03.002
- [3] PANKOW K L, MOORE J R, HALE J M, et al. Massive landslide at Utah copper mine generates wealth of geophysical data [J]. GSA Today, 2014, **24**(1):4-9. DOI: 10.1130/GSATG191A.1.
- [4] 赵春红. 基于物质组成和冲击特性的泥石流冲击力研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2017:82-88. [ZHAO Chunhong. Study on impact force of debris flow based on material composition and impact [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017: 82-88]
- [5] 王裕宜,詹钱登,严壁玉,等. 泥石流流体的流变特性与运移特征[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 2014:184-260. [WANG Yuyi, JAN Chyandeng, YAN Biyu, et al. Debris flow rheology and movement [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2014:184-260]
- [6] 杨红娟,韦方强,胡凯衡,等. 不同上限粒径泥石流浆体的流变参数变化规律[J]. 水利学报, 2016, **47**(7):884-890. [YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, HU Kaiheng, et al. Rheological parameters of debris flow slurries with different maximum grain sizes

- [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(7):884 – 890] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150931
- [7] PELLEGRINO A M, SCHIPPA, L. Rheological modeling of macro viscous flows of granular suspension of regular and irregular particles [J]. *Water*, 2018(10):21. DOI: 10.3390/w10010021
- [8] 杨红娟, 韦方强, 胡凯衡. 泥石流浆体黏度计算中最大体积分数的确定 [J]. *山地学报*, 2018, **36**(3):382 – 390. [YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, HU Kaiheng. Determination of the maximum packing fraction for calculating slurry viscosity of debris flow [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(3):382 – 390] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000334
- [9] SOSIO R, CROSTA, G B. Rheology of concentrated granular suspensions and possible implication for debris flow modeling [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45: W03412. DOI: 10.1029/2008WR006920
- [10] 马煜. 黏土矿物成份与泥石流屈服应力的关系研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011:30 – 33. [MA Yu. Research on clay minerals and yield stress of debris flow by experiments [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011:30 – 33]
- [11] 刘曙光. 天然泥石流剪切应变特性试验研究 [J]. *人民长江*, 2016, **47**(16):83 – 86. [LIU Shuguang. Test study on shear strain characteristics of debris flow [J]. *Yangtze River*, 2016, **47**(16):83 – 86] DOI: 10.16232/j.cnki.1001 – 4179.2016.16.018
- [12] CAROTENUTO C, MEROLA M C, ALVAREZ-ROMERO M, et al. Rheology of natural slurries involved in a rapid mudflow with different soil organic carbon content [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 2015, 466:57 – 65. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2014.10.037
- [13] 季宪军, 梁瑛, 潘华利, 等. 含水率对泥石流浆体力学特性影响实验研究 [J]. *山地学报*, 2019, **37**(1):70 – 77. [JI Xianjun, LIANG Ying, PAN Huali, et al. Experimental study on influence of water content on mechanical properties of debris flow slurry [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(1):70 – 77] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000400
- [14] MAJOR J J, PIERSON T C. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries [J]. *Water Resources Research*, 1992, **28**(3):841 – 857. DOI: 10.1029/91WR02834
- [15] REINER V M. Ueber die Strömung einer elastischen Flüssigkeit durch eine Kapillare [J]. *Kolloid-Zeitschrift*, 1926, **39**(1):80 – 87. DOI: 10.1007/BF01425357
- [16] JEONG S W, LEROUEIL S, LOCAT J. Applicability of power law for describing the rheology of soils of different origins and characteristics [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(9):1011 – 1023. DOI: 10.1139/T09 – 031
- [17] SCOTTO DI SANTOLO A, PELLEGRINO A M, EVANGELISTA A, et al. Rheological behaviour of reconstituted pyroclastic debris flow [J]. *Geotechnique*, 2012, **62**(1):19 – 27. DOI: 10.1680/geot.10.P.005
- [18] PARSONS J D, WHIPPLE K X, SIMONI A. Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flows [J]. *The Journal of Geology*, 2001, **109**(4):427 – 447. DOI: 10.1086/320798
- [19] DE BLASIO F V, ELVERHOI A, ISSLER D, et al. Flow models of natural debris flows originating from overconsolidated clay materials [J]. *Marine Geology*, 2004, **213**:439 – 455. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.10.018
- [20] HERSCHEL W H, BULKLEY R. Konsistenzmessungen von gummi-benzollösungen [J]. *Kolloid-Zeitschrift*, 1926, **39**(4):291 – 300. DOI: 10.1007/BF01432034
- [21] CHEN H, LEE C F. Runout analysis of slurry flows with Bingham model [J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 2002, **128**(12):1032 – 1042. DOI: 10.1061/(ASCE)1090 – 0241(2002)128:12(1032)
- [22] PELLEGRINO A M, SCHIPPA L. A laboratory experience on the effect of grains concentration and coarse sediment on the rheology of natural debris-flows [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(22):749. DOI: 10.1007/s12665 – 018 – 7934 – 0
- [23] SCHIPPA L. Modeling the effect of sediment concentration on the flow-like behavior of natural debris flow [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2020, **35**(4):315 – 327. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2020.03.001
- [24] 应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 成都平原区成都黏土的粒度特征及其成因意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, **32**(1):72 – 77. [YING Lichao, LIANG Bin, WANG Quanwei, et al. Grain size analysis and origin of the Chengdu clay from the Chengdu plain, Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, **32**(1):72 – 77]
- [25] 赵志中, 乔彦松, 王燕, 等. 成都平原红土堆积的磁性地层学及古环境记录 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, **37**(3):370 – 377. [ZHAO Zhizhong, QIAO Yansong, WANG Yan, et al. Magnetostratigraphic and paleoclimatic studies on the red earth formation from the Chengdu plain in Sichuan province, China [J]. *Chinese Science: Earth Science*, 2007, **37**(3):370 – 377]

Discussion on the Rheological Model of Chengdu Clay Slurry

LIANG Ying¹, CAO Wenhao¹, JI Xianjun¹, PAN Huali², OU Guoqiang^{2*}

(1. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, He'nan, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China)

Abstract: To understand the mechanical properties of slurry in debris flow fluid is a prerequisite for recognizing the movement process of debris flow. A proper rheological model of slurry in debris flow body can contribute to a better understanding of the process of debris flow initiation and the process of the particles interaction during moving of the viscous debris flow. In this study, MCR301 rheometer was used in the laboratory testing of slurry properties, it conducted rheological experiments on the slurries of Chengdu Clay. The change process of shear stress with shear rate was analyzed, following by the influence of water content on shear stress. It introduced power law model, Bingham model and Herschel & Bulkley model separately to compare the fitting of the rheological test results of the Chengdu Clay slurry with various water contents. The following conclusions were drawn as hereafter: (1) The shear stress of the Chengdu Clay slurry decreased rapidly from more than 8000 Pa to about 5 Pa with the increase of water content from 50% to 400%. As the shear rate was small (about 0.2 s^{-1}), the shear stress increased rapidly with the increase of shear rate. In the case of the shear rate exceeding a certain value, the shear stress increased slowly with the increase of shear rate, suggesting that the Chengdu Clay slurry be a typical shear – thinning non – Newtonian fluid definitely; (2) H-B model could well reflect the whole process of shear stress with shear rate (shear – thinning) of the clay slurry with varied water contents, and it was recognized as the best mathematical model for the fitting of rheological process of the slurry of Chengdu Clay; (3) On this basis, the influence of water content on the rheological parameters (τ_{HB} 、 η_{HB}) of Chengdu Clay mud was analyzed, and the conclusion that the yield stress (τ_{HB}) and flow index (η_{HB}) of Chengdu Clay mud decrease rapidly with the increase of water content was obtained. Based on the rheological experiment, this paper discusses the rheological model of mud, which is of great significance for further understanding and exploring the whole process of debris flow disaster.

Key words: Chengdu Clay; slurry; rheological experiment; Rheological Model; H-B model