

徐圩航道淤泥流变特性研究*

许晶禹, 呼和敖德, 唐驰, 张健

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190, Email: xujingyu@imech.ac.cn)

摘要: 本研究在沉积密度为 $\rho_c=1098\text{--}1305 \text{ kg/m}^3$ 范围内, 研究了徐圩航道淤泥的稳态和动态流变特性。通过稳态流变试验结果建立了双 Herschel-Bulkley 模型, 得到高低两个屈服应力和动黏性系数与含沙量的关系式。同时, 通过动态特性的实验研究了淤泥弹性剪切模量和耗损模量, 并给出弹性剪切模量和动态黏性系数与含沙量的指数关系式。

关键词: 淤泥流变; Herschel-Bulkley 模型; 屈服应力; 黏弹特性

1 引言

流变特性是浮泥的基本特性之一, 是表征浮泥细颗粒泥沙之间多重物理—化学内聚力和斥力的综合特性参数。浮泥流变特性受到很多复杂因素的影响, 如泥沙颗粒密度、粒径级配、矿物化学成分、颗粒的比表面积、颗粒表面的物理化学特性、环境水中的离子种类、数量、浮泥的含砂量和水质特性等, 研究结果是正确估计与合理预测航道、港口泥沙冲淤和航道适航深度的必要参数^[1-3]。黏性细颗粒泥沙的稳态流变特性国内外已有不少研究结果发表, 研究认为 Herschel-Bulkley ($n=1$ 时为宾汉模型) 能描述大剪切速率范围的流变关系^[4-7]。然而, 大部分研究结果缺乏低剪切速率条件下的试验结果, 并且天然淤泥的动态流变特性的研究成果更为少见^[8]。Jiang 和 Metha^[9]研究了印度和美国海岸淤泥的动态流变特性, 考察了弹性模量和复合黏性系数与淤泥含沙量关系, Van Kessel 和 Blom^[10]研究了震动幅值对动态流变特性的影响。Huang 和 Huhe^[11]研究了连云港西墅海域和杭州湾深水航道试挖航道淤泥的稳态和动态流变特性, 探讨了双宾汉流变模型和屈服应力、弹性剪切模量等流变参数随含沙量的变化规律。

本研究中, 我们采用 HAAKE RS6000 流变仪对连云港徐圩航道不同容重浮泥开展了稳态和动态流变参数测量, 给出了研究结果。浮泥的稳态实验包括: ① 流变曲线随淤泥容重的变化; ② 屈服应力 (包括初始屈服应力和第二屈服应力) 随浮泥容重变化规律; ③ 表观黏性系数和 Herschel-Bulkley 黏性系数随浮泥容重变化。浮泥的动态测量包括: ① 淤泥弹性模量随容重变化; ② 动态黏性系数随容重变化。

*连云港港 30 万吨级航道工程科研项目“徐圩航道回淤土流变试验及其应用研究”资助 (编号 20100714-30HDKY008-2)。

2 样品及测试方法

2.1 淤泥样品

淤泥比重三次测量结果的平均值为 2.713。颗粒级配采用日本 HORIBA 公司 LA-920 型激光散射粒度分布分析仪。实验结果表明淤泥主要由黏土和粉细沙组成，其中值粒径 d_{50} 为 6.2 μm 。

实验中配制成 5 种不同容重样品，容重范围为 $\rho=1.098\sim1.305 \text{ g/cm}^3$ 。泥样配制过程尽量考虑水环境固有因素的影响，含盐度要尽量与当地海况相近，因此本试验中采用海盐配制，水的含盐度取为 15。实验工况见表 1。

表 1 淤泥流变特性试验工况

试验编号 (No)	淤泥密度 $/(\text{g}/\text{cm}^3)$	淤泥体积含沙量 C_v	淤泥含沙量 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$
pc1	1.098	0.058	157
pc2	1.146	0.086	233
pc3	1.200	0.118	320
pc4	1.256	0.152	412
pc5	1.305	0.179	486

2.2 测试仪器及方法

流变参数测量采用 HAAKE-RS6000 流变仪，试验中使用 4 种不同的转子，分别为普通滚筒转子、放打滑转筒转子和平板转子。流变参数测试过程，首先将配制好的淤泥样品装入仪器筒内，并注意排除空气。所有样品均保持在 20°C 恒温下进行测试。稳态测量采用 CR 模式，即剪切应变扫描过程，给出淤泥的切应力与剪切速率的流变曲线及表观黏性系数。动态测量作应变形式为 $r=r_0 \cos \omega t$ 的小振幅振动扫描，扫描频率范围：0.01~100 rad/s。动态测量自动分离信号中的黏性和弹性分量，然后计算给出动态复合黏度和弹性模量等流变参数。

3 实验结果及讨论

3.1 流变曲线

稳态流变实验给出淤泥切应力 τ 和剪切速率 $\dot{\gamma}$ 之间的关系曲线，一般称为流变曲线。淤泥的流变曲线随体积含沙量的变化示于图 1a。由于淤泥是非牛顿流体，它的流变曲线表现为具有屈服值的伪塑性体。本实验的剪切速率范围较宽，因此，淤泥流变特性随剪切速率从低到高的变化过程经历两个阶段：在低切变速率区，淤泥的切变速率扫描过程，切应力随剪切速率开始迅速增高，然后经历一个下降和回升的变化过程。在低剪切速率区 $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c$ ，总体上淤泥表现为 Herschel-Bulkley 流体特征，随后，流变曲线出现明显的折角，在高剪切速率区 $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$ ，淤泥呈现出伪塑性体特征。这里的临界剪切速率值 $\dot{\gamma}_c$ 与含沙量有关，其值随含沙量的降低而减少。综上所述，连云港淤泥流变特性可以用 Herschel-Bulkley 模型描述：

$$\tau = \tau_y + \eta_b (\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

其中 τ_y 为屈服应力, η_b 为塑性稠度系数, n 为流动指数。当 n 接近 1 时, 式 (1) 变为宾汉模型, 此时 η_b 即为宾汉黏性系数。

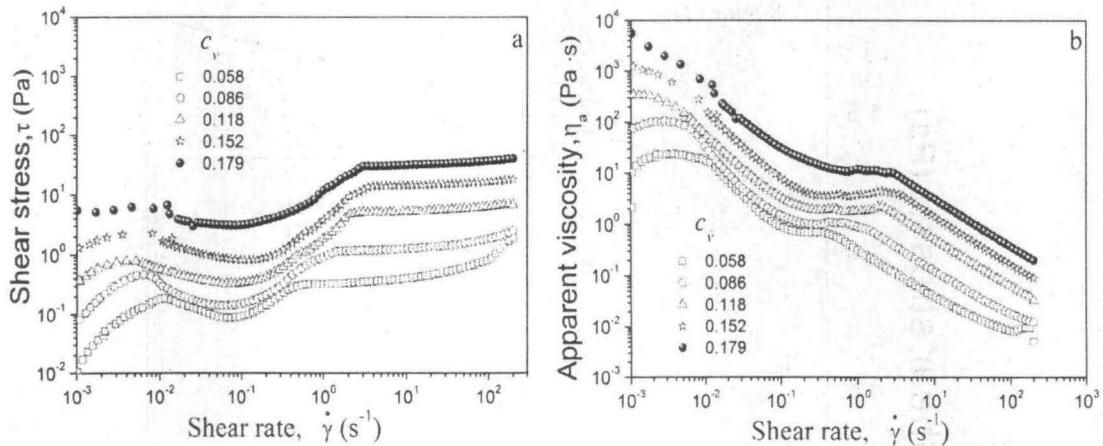


图 1 流变曲线

3.2 表观黏性系数

这里研究的淤泥属于非牛顿流体。非牛顿流体的方程复杂, 至少需要两个以上的参数表示粘度, 实用中普遍采用表观粘性系数 η_a , 其定义为:

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

对 Herschel-Bulkley 流体:

$$\eta_a = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \eta_b (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (3)$$

对于牛顿流体 η_a 为常值, 对非牛顿流体 η_a 为剪切速率的函数。图 1b 给出了表观黏性系数随剪切速率的变化, 可以看出表观黏度随着剪切速率的增高而降低, 随淤泥容重增大而增高, 不同容重淤泥的表观粘性系数随剪切速率的变化规律基本相同。

3.3 屈服应力和黏性系数

屈服应力定义为“低于屈服应力, 物料为弹性体, 高于屈服应力, 物料成为具有塑性粘度的流体”。根据定义, 实际上不可能测量 $\dot{\gamma}=0$ 时的切应力。因此, 我们采用流变曲线外插法来测定淤泥的屈服应力。将流变曲线向低剪切速率方向进行外插, 外插线与应力轴的交点值确定为屈服应力。上面已经分析过连云港淤泥在主要剪切速率范围的流变曲线一般符合 Herschel-Bulkley 流体特征, 根据连云港淤泥的流变特性分为两个剪切速率区对流变曲线进行线性外插来确定屈服应力值(图 2)。对高剪切速率区流变曲线用线性外插得到屈服应力值称

之为 Herschel-Bulkley 屈服应力，用 τ_{y2} 表示，相应的动黏性系数为 η_{b2} 。在低剪切速率区，流变曲线的线性外插值确定的切应力称为屈服应力 τ_{y1} ，相应的黏性系数为 η_{b1} 。其结果列于附录表 2。

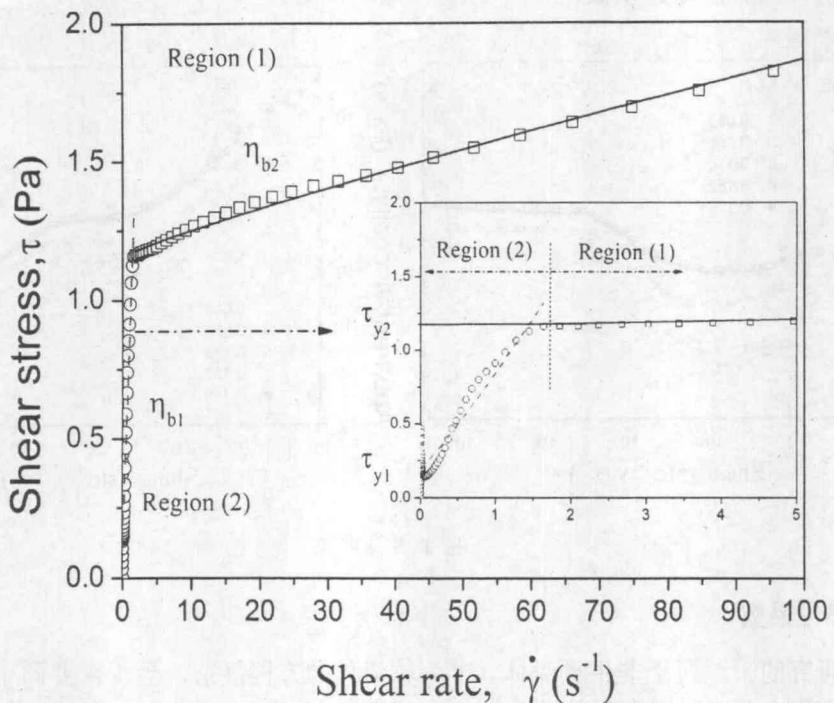


图 2 Herschel-Bulkley 屈服应力及其黏性系数的定义

表 2 Herschel-Bulkley 屈服应力及动力黏性系数

编号	屈服应力/Pa	动力黏性系数/(Pa·s ⁿ)	n, 流动指数	R^2 , 拟合参数
pc1	0.3583	0.0977	0.0008	τ_{y2} τ_{y1} η_{b2} η_{b1} n ₂ n ₁ R^2_2 R^2_1
pc2	1.1575	0.1963	0.0125	0.8155 1.4392 1.7572 0.986 0.521
pc3	4.8348	0.4293	0.1015	0.6568 0.8772 1.1174 0.997 0.843
pc4	13.7360	0.9314	0.1782	1.3785 0.5980 1.5734 0.998 0.971
pc5	28.0287	3.6036	1.4830	3.0091 0.6155 1.2341 0.999 0.968
				0.4049 1.2643 0.998 0.967

图 3 分别给出淤泥的屈服应力和有效黏度随含沙量 C_v 变化曲线。可以看出曲线的变化近似于指数关系，回归的计算公式如下：

$$\tau_{y1} = 0.0011 \cdot e^{45.1043C_v} \quad (4)$$

$$\tau_{y2} = 0.1693 \cdot e^{28.5876C_v} \quad (5)$$

$$\eta_{b1} = 0.0429 \cdot e^{28.698C_v} \quad (6)$$

$$\eta_{b2} = 2.0415 \cdot 10^{-6} \cdot e^{75.3981C_v} \quad (7)$$

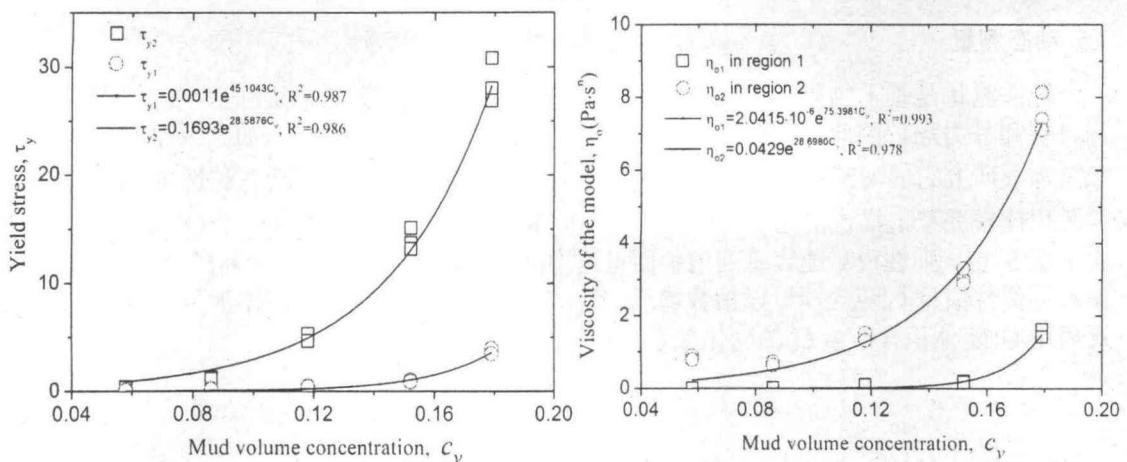


图 3 Herschel-Bulkley 系数随体积含沙量的变化曲线

从图 3 中可以看出, Herschel-Bulkley 屈服应力 τ_{y2} 要比 τ_{y1} 高, 而黏性系数 η_{n2} 要比 η_{n1} 小。在本实验范围的最高含沙量情况下, τ_{y2} 可比 τ_{y1} 高几倍。随含沙量不断减小, τ_{y2} 与 τ_{y1} 将趋于一致。近几年, 随着对细颗粒泥沙流变参数研究的深入, 人们已经开始重视屈服应力与剪切速率的关系。以往多数情况下, 工程上使用的淤泥屈服应力一般用 Herschel-Bulkley 屈服应力, 也就是本研究中的 τ_{y2} 。但是, 根据自然界海况分析, 在研究深水航道适航、冲淤问题中选用低剪切速率屈服值 τ_{y1} 可能更为合适。

3.4 不同转子的影响

为了观察转子对于测量结果的影响, 我们采用样品 1 进行了研究。图 4a 给出了应用 Z38 (转子与转筒之间的缝隙为 2.5 mm) 和 Z41 (转子与转筒之间的缝隙为 1 mm) 的测量结果, 可以看出, 转筒的缝隙变化并没有显著地影响测试结果。按照 Gebhard Schramm 在流变仪测量中的建议, 内外筒的半径比小于 1.1 最为合适。我们试验中采用的 Z41 转子, 满足于这个要求。图 4b 中, 我们采用防打滑转子进行了对比实验。可以看出, 这种防打滑转子在高剪切速率区的测量结果与普通转子相同, 但是无法测量低剪切速率区间的凹区。这可能是由于转子的结构特点, 对于样品有一定的搅拌作用。

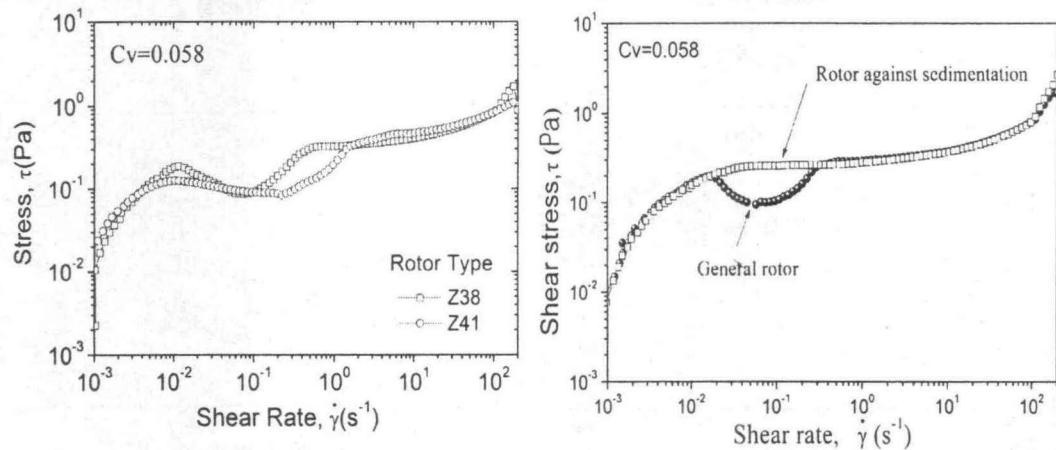


图 4 转子对于样品测试的影响(左 a, 转筒缝隙的影响, 右 b, 防打滑转子与普通转子)

3.5 动态测量

稳态测量是基于物质结构的破坏和生成以瞬间完成的前提下，实际上不同程度依赖于时间过程和外力场。因此，物质的流变性质也随时间和剪切速率变化。如高浓度淤泥的触变现象就需要研究它的动态特性。例如弹性模量 G' （或称储能模量）和动态黏性系数 η^* 等动态参数可以比较完整地描述淤泥结构特征。淤泥样本的弹性模量 G' 和损耗模量 G'' 与频率的变化关系于图 5 中。弹性模量随容重的增长而迅速增高，弹性模量和损耗模量随频率的增高而增高。淤泥的弹性模量 G' 随含沙量以指数增长。图 6 给出了 1.47 rad/s 情况下淤泥的弹性模量 G' 和损耗模量 G'' 随体积含沙量 C_v 的变化关系，近似计算公式如下：

$$G' = 1.1058 \cdot 10^5 e^{68.9193 C_v} \quad (8)$$

$$G'' = 0.0235 e^{31.8560 C_v} \quad (9)$$

淤泥的动态黏性系数是根据耗损模量与频率的关系，通过计算得到：

$$\eta^* = G'' / \omega \quad (10)$$

图 7 给出不同容重淤泥的复合黏性系数随角频率变化曲线，总的变化趋势是随频率增高而下降，在高频端有所回升。角速度为 1.47 rad/s 时，近似计算公式如下：

$$\eta^* = 0.0130 e^{33.3550 C_v} \quad (11)$$

对于强往复流作用下的淤泥运动问题，采用复合黏性系数可能更符合实际工况。

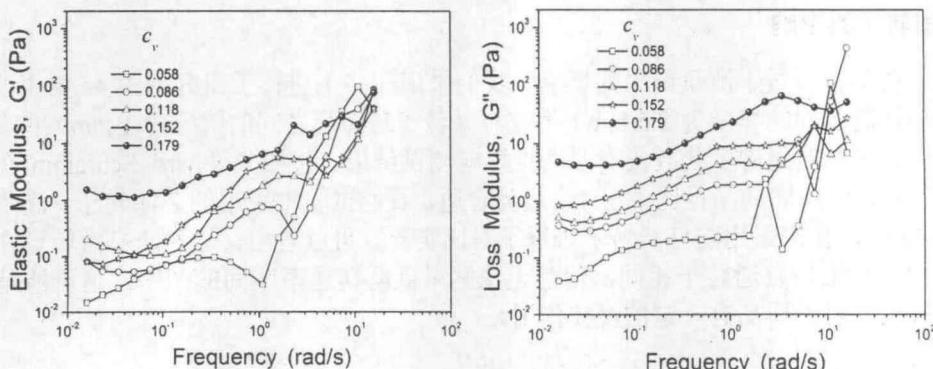


图 5 弹性模量、损耗模量与频率的关系

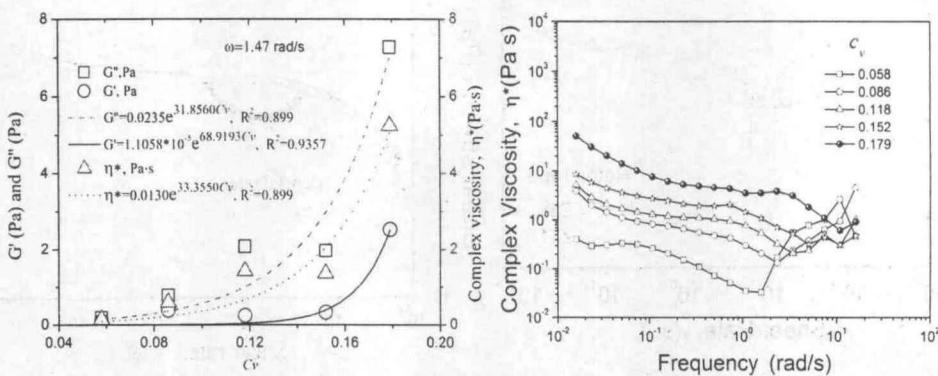


图 6 淤泥弹性模量 G' 与含沙量 C_v 关系

图 7 复合黏性与频率的关系

4 结论

(1) 对徐圩航道淤泥流变特性进行测量。淤泥的体积含沙量为 $C_v = 0.058\sim0.179$, 相应的重量含沙量 $S = 157\sim468 \text{ kg/cm}^3$, 该范围淤泥具有 Herschel-Bulkley 流变特性。

(2) 由流变曲线确定的淤泥的屈服应力和 Herschel-Bulkley 动力黏性系数, 不仅与含沙量有关, 还和剪切速率有关。淤泥屈服应力根据剪切速率分为两种情况, 低剪切速率区屈服应力 τ_{y1} 和高剪切速率区 Herschel-Bulkley 屈服应力 τ_{y2} , 后者比前者高几倍。 τ_{y1} 、 τ_{y2} 以及相应的黏性系数 η_{b1} 、 η_{b2} 与体积含沙量 C_v 均满足指数关系。

(3) 淤泥密度在体积含沙量为 $C_v = 0.12$ 附近, 即浮泥容重 1.2~1.25 之间。屈服应力随体积含沙量 C_v 的变化发生转折 (图 8), 随 C_v 增加成指数增加, 因此适航浮泥容重此应力值以下。

(4) 淤泥的动态流变特征主要对认识高浓度淤泥结构特征具有重要意义。本研究给出不同容重淤泥的弹性模量, 耗损模量和动态黏性系数。结果表明淤泥的弹性模量随淤泥含沙量以指数增长。

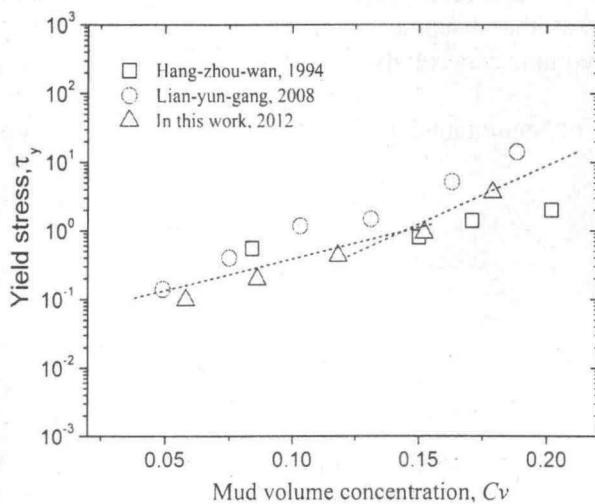


图 8 屈服应力随容重的变化 (对比文献试验结果)

参 考 文 献

- 1 呼和敖德, 黄振华. 淤泥流变特性试验研究—杭州湾深水航道淤泥基本特性研究. IMCAS STR-94021, 1994.
- 2 呼和敖德, 黄振华. 宁波港淤泥流变特性试验研究, IMCAS STR-94023, 1994.
- 3 呼和敖德, 唐驰, 马文驹, 等. 浮淤泥流变特性实验研究—长江口航道治理工程, 2000.
- 4 James A. E., Williams D. J. A., Williams P. R. Direct measurement of static yield properties of cohesive suspensions, *Rheol. Acta*, 26 (1987) 437-446.
- 5 Huhe A., Huang Z. H., Zhang Y. B., et al. Rheology of mudflow in Lian-yun-gang Port, *Mech. Prac.*, 16 (1994) 21-24 (in Chinese).
- 6 Babatope B., Williams P. R., Williams D. J. A. Cohesive sediment characterization by combined sedimentation and rheological measurements, *J. Hydraul. Eng.*, 134 (2008) 1333-1336.
- 7 Toorman E. A. An analytical solution for the velocity and shear rate distribution of non-ideal Bingham fluids in concentric cylinder viscometers, *Rheol. Acta*, 33 (1994) 193-202.

- 8 O'Brien J. S., Julien P. Y. Laboratory analysis of mudflow properties, *J. Hydraul. Eng.*, 114 (1988) 877-887.
- 9 Jiang F., Mehta A. J. Mudbanks of the southwest coast of India IV: Mud viscoelastic properties, *J. Coastal Res.*, 11 (1995) 918-926.
- 10 Kessel T. V., Blom C. Rheology of cohesive sediments: comparison between a natural and an artificial mud, *J. Hydraul. Res.*, 36 (1998) 591-612.
- 11 Huang Z., Huhe A. A laboratory study of rheological properties of mudflows in Hangzhou Bay, China, *Int. J. Sediment Res.*, 24 (2009) 410-424.

Rheological investigation of natural mudflow at Xu-wei channel

XU Jing-yu, HUHE Haode, TANG Chi, ZHANG Jian

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China, Email: xujingyu@imech.ac.cn)

Abstract: In this paper, an experimental study of the rheological properties of natural mudflow at Xu-Wei channel has been carried out in the range of deposition density from 1098 to 1305kg/m³, including steady and dynamic measurements. Base on two different regions of the shear rate, a Dual-Herschel-Bulkley model have been developed to establish the relationships among two yield stresses, dynamic viscosity and sediment concentration. Meanwhile, studies of elastic modulus and loss modulus show that the dynamic properties can be expressed as appropriate exponential functions of sediment volume concentration.

Key words: Rheology of Natural mud; Herschel-Bulkley model; Yield stress; Viscoelastic properties