

刘晓磊, 陈安铎, 张红, 等. 黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙流变特性及其影响因素[J]. 海洋学报, 2021, 43(5): 127–134, doi:10.12284/hyxb2021083

Liu Xiaolei, Chen Anduo, Zhang Hong, et al. Rheological characteristics and its influencing factors of dense cohesive sediments in the Huanghe River subaqueous delta[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(5): 127–134, doi:10.12284/hyxb2021083

黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙流变特性及其影响因素

刘晓磊^{1,2}, 陈安铎¹, 张红¹, 陆杨¹, 马路宽¹, 贾永刚^{1,2}

(1. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 黏性泥沙在黄河水下三角洲广泛分布, 其在外部载荷作用下易引发泥沙淤积、冲刷、海床流化等问题, 对港口、航道、海底管线等工程设施构成巨大威胁。利用黄河水下三角洲埋岛海域所取海底表层沉积物, 制备不同固结时间和不同含水率的高浓度黏性泥沙样品。采用 R/S 流变仪, 对所制备高浓度黏性泥沙样品进行全剪切速率下的流变试验, 分析黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙流变特性及含水率和固结时间对流变特性的影响。结果表明, 高浓度黏性泥沙在剪切荷载作用下流化失稳, 发生相态转化; 屈服应力在固结 120 min 后增加了 35%; 含水率 50% 以上高浓度黏性泥沙在高剪切速率下表现出剪切增稠行为, 且随含水率增加剪切增稠行为越明显; Power 模型适用于含水率大于 50% 的高浓度黏性泥沙在高剪切速率下的流变行为。本研究可为海底黏性泥沙运动过程数值模拟与海底重力流等灾害预测提供参考。

关键词: 黄河水下三角洲; 高浓度黏性泥沙; 流变特性; 影响因素; 流变试验

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)05-0127-08

1 引言

黏性泥沙在水流、波浪载荷作用下运动情况复杂, 易引发泥沙淤积^[1]、冲刷^[2]等问题, 同时在一定的波浪条件下会流化形成流动性较大的浮泥层^[3], 进一步失稳引发重力流形式的沉积物运动^[4], 从而改变海底地形地貌, 并对港口、航道、海底管线等工程设施安全造成一定影响^[5]。黄河水下三角洲位于渤海湾和莱州湾交汇处, 水动力条件复杂, 黏性泥沙广泛分布^[6], 同时也是胜利油田的所在地, 分布有多条海底管线和多座海洋平台。因此, 研究黄河水下三角洲黏性

泥沙在海洋动力作用下的流动变形特性, 对深入理解该区海底地形地貌演化和海底地质灾害防治具有重要意义。

黏性泥沙的流变特性是指在外荷载作用下, 黏性泥沙对流动和变形的抵抗能力, 反映了黏性泥沙的结构性和强度, 控制着黏性泥沙的力学性质和运动规律^[7]。由于海底环境复杂, 样品获取困难, 目前国内外学者多关注河口^[8]、港口^[9]、湖泊^[10]及海湾^[11]黏性泥沙的流变特性, 影响因素涉及 pH、含水率^[12]、盐度^[13]、固结时间^[11]和温度^[14]等。连云港淤泥随剪切速率增加呈现 3 种流变性质^[15]。在水流(单向剪切)作用下,

收稿日期: 2020-04-08; 修订日期: 2020-06-02。

基金项目: 国家自然科学基金(41877221); 山东省自然科学基金(ZR2019QD001); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金(QNLM20160RP0110)。

作者简介: 刘晓磊(1985—), 男, 山东省烟台市人, 副教授, 博士, 主要从事海洋工程地质与环境相关教学与科研工作。E-mail: xiaolei@ouc.edu.cn

适宜采用 Bingham 模型来描述淤泥流变特性;在波浪(双向剪切)作用下,适宜采用非线性黏弹性体模型来描述淤泥流变特性^[16]。低剪切速率时高浓度黏性泥石流体具有应力过冲现象与剪切稀化特征^[17]。受限于仪器设备和实际需求,现有流变试验多在剪切速率 $0 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 下开展,而在真实的海洋环境中,尤其是极端天气下,海流流速极大,黏性泥沙可能处于高剪切速率荷载作用之下,因此开展高剪切速率下黏性泥沙的流变特性研究十分必要。在黄河水下三角洲海域,冯秀丽等^[18]率先通过对砂质粉土和粉质黏土触变性的对比试验研究,阐述了黄河水下三角洲粉土的触变性,刘涛等^[19-20]研究了循环荷载下和波浪作用下黄河水下三角洲粉土液化流动特性。但以上研究局限于土体液化后的抗剪强度和表观黏度,并未引入具体的流变模型来分析黏性泥沙的流变特性。因此,全剪切速率下黄河水下三角洲黏性泥沙流变特性的研究亟待开展。

基于上述现状,本文在黄河水下三角洲埕岛海域现场采集原状黏性泥沙,制备不同固结时间和不同含水率的高浓度黏性泥沙样品,采用 R/S 流变仪开展多组全剪切速率下的流变试验,研究黏性泥沙流变特性,并对含水率和固结时间影响下的流变模型进行了讨论,为下一步开展海底泥沙运动过程的数值模拟奠定了试验基础。

2 试验设计

2.1 原状黏性泥沙样品采集

采用 Teledyne Odom 公司生产的 Echotrac MK III 双频测深仪(高频 210 Hz,低频 24 Hz)对黄河水下三角洲埕岛海域进行调查。调查区域大小为 $2 \text{ km} \times 6 \text{ km}$,结果显示整个调查区广泛分布有 $8 \sim 24 \text{ cm}$ 厚的浮泥,为浮泥发育区。在研究区选取 6 个取样点,利用密封性较强的蚌式取样器采集原状表层泥沙样(图 1)。根据《土工试验方法标准》对原状泥沙样进行一系列基本物理性质测试(表 1)。结果表明,原状泥沙样含水率约 $40\% \sim 50\%$,平均含水率 42% ,含水率均高于液限,Q1 站位原状泥沙样含水率甚至达到了 1.59 倍液限,表明其具有很强的流动性^[21]。

2.2 流变试验仪器与原理

流变试验采用美国博勒飞(Brookfield)公司生产的 R/S 流变仪,搭配 V40-20 型转子(表 2)。试验时,流变仪的测量转子在装有试验土样的测量杯中转动,对土样进行剪切,搭配智能控制软件 Rheo3000,实现程序智能控制与数据采集,得到不同剪切速率下的不

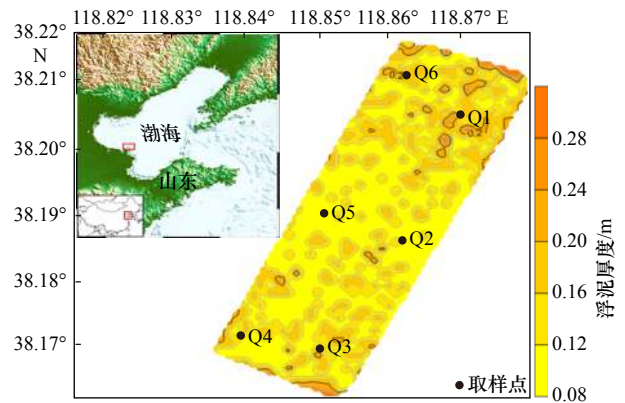


图 1 研究区浮泥分布

Fig. 1 The distribution of fluid mud thickness in the study area

表 1 原状泥沙基本物理性质

Table 1 Physical properties of natural sediments

取样点	含水率/ %	塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	含水率/ 液限	粉粒 含量/%	黏粒 含量/%
Q1	47.42	19.59	29.89	10.30	1.59	71.0	27.9
Q2	42.30	20.17	30.44	10.27	1.39	71.7	26.9
Q3	34.81	19.57	30.83	11.26	1.13	72.6	23.4
Q4	48.08	18.64	33.11	4.47	1.45	74.3	22.1
Q5	44.59	22.1	30.74	8.64	1.45	72.1	27.1
Q6	42.80	17.21	31.23	14.02	1.37	74.3	21.6

排水抗剪强度。测量中采用控制应变模式,逐级增加剪切速率到目标值,得到流变曲线。

2.3 样品制备与测试

将 6 个站位原状黏性泥沙样均匀混合烘干后,去除贝壳等杂质,充分搅拌保证均匀;加 3.5% 盐水配置成含水率 $35\% \sim 60\%$ 的样品,其中 42% 为研究区域原状泥沙平均含水率。泥浆试样的微观结构与固结过程密切相关^[22-23]。为了研究固结时间对流变特性的影响,对含水率 45% 的样品设置不同固结时间对照组。在样品加到测量杯后将测量杯封口防止水蒸发影响试验结果,分别静置 0 min、15 min、60 min、120 min 后进行试验。细粒土与水混合后,其微观结构已经发生了变化,试样需要一定的固结时间才能恢复其微观结构^[11]。为了更接近泥沙天然状态,测试都是在样品放入流变仪测量筒 5 min 后开始进行的。样品的详细情况如表 3 所示。

3 试验结果与分析

3.1 海底黏性泥沙典型流变曲线

在不同固结时间、含水率下得到高浓度黏性泥沙流变曲线,以 100 s^{-1} 为界限将曲线分为“低剪切速率”

表2 R/S流变仪基本参数

Table 2 Basic parameters of R/S rheometer

精度/%	可测量扭矩/N·m	角分辨率/mrad	可调转速/(r·min ⁻¹)	可测剪切强度/Pa	转子型号
1	0.05~50	0.8	0.7~1 000	0~1 706	V40-20

表3 样品信息表

Table 3 Information of samples

试样编号	密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	固结时间/min
1	1.52	35	5
2	1.51	40	5
3	1.50	42	5
4	1.47	45	0, 15, 60, 120
5	1.44	50	5
6	1.40	55	5
7	1.37	60	5

和“高剪切速率”,如图2、图3所示。由图2可知,高浓度黏性泥沙整体剪切应力随含水率的增加而增大,剪切应力随剪切速率的增加先增加后降低,最后随剪切速率增加线性增加。特别的,含水率50%及以上高浓度黏性泥沙流变曲线在高剪切速率下出现“上翘”趋势。固结时间对流变曲线的影响明显(图3),剪切应力随着固结时间的增加而整体增加,其中固结0 min和15 min的剪切应力在高剪切速率下差距缩小。

3.2 流变曲线分析

黏性泥沙往往表现出固态和液态双重属性,黏性泥沙在剪切荷载作用下结构破坏可以看作是黏性泥沙由固态到流态的相态转化过程。对比以上多条流变曲线,可将黏性泥沙在剪切荷载作用下破坏过程分为3个阶段: $\dot{\gamma}_1$ 、 $\dot{\gamma}_2$ 分别为两个临界剪切速率。因整个相态转换在低剪切速率下已全部完成,单独将低剪切速率下流变曲线拿出分析,如图4。

I. 当 $0 < \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_1$ 时,剪切速率极低,高浓度黏性泥沙结构未发生破坏。流变曲线过原点,剪应力随着剪切速率增大而增大。高浓度黏性泥沙表现出固相特性。

II. 当 $\dot{\gamma}_1 < \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_2$ 时,高浓度黏性泥沙的结构开始发生破坏,剪应力随着剪切速率的增加而降低。本阶段为高浓度黏性泥沙固态向流态转变阶段。 $\dot{\gamma}_1$ 为起始剪切速率,表征高浓度黏性泥沙结构开始发生剪切破坏。

III. 当 $\dot{\gamma}_2 < \dot{\gamma}$ 时,高浓度黏性泥沙结构已经完全破

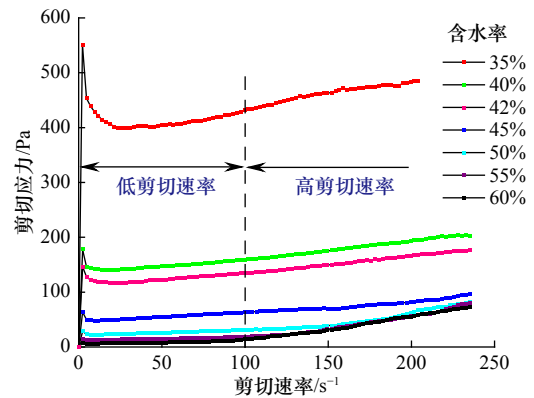


图2 不同含水率高浓度黏性泥沙流变曲线
Fig. 2 Rheological curves of dense cohesive sediment with different moisture contents

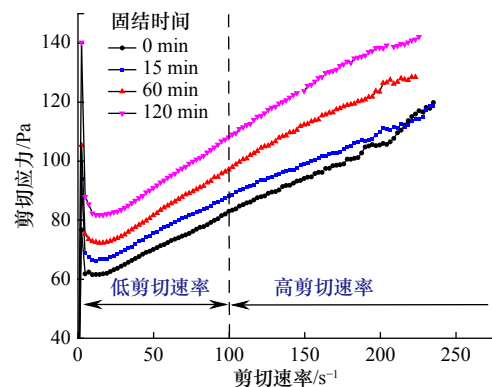


图3 含水率45%高浓度黏性泥沙不同固结时间流变曲线
Fig. 3 Rheological curves of dense cohesive sediment with moisture content of 45% at different consolidation times

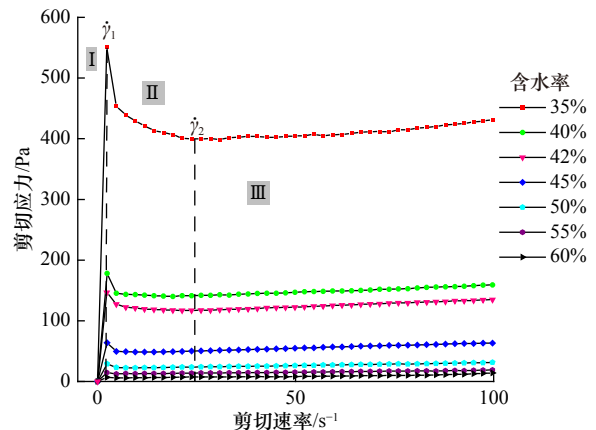


图4 低剪切速率下高浓度黏性泥沙流变曲线
Fig. 4 Rheological curve of dense cohesive sediment in low shear rate

坏,剪应力随剪切速率增加而增加,本阶段高浓度黏性泥沙已经由固态完全转化为流态。 $\dot{\gamma}_2$ 为高浓度黏性泥沙完全进入流态时的剪切速率。

4 流变模型及其影响因素

4.1 海底黏性泥沙流变模型

已有很多研究人员以试验分析或理论推导的方法,提出了多种非牛顿流体流变模型^[24]。常用以下3种流变模型来描述黏性泥沙流特性。

(1) 幂律模型

幂律模型是最简单的流体剪切模型,可用来描述剪切增稠流体行为,表达式为:

$$\begin{aligned} \tau &= K(\dot{\gamma})^n \\ \eta_0 &= \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, τ 为剪切应力; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; η_0 为稠度系数; K 为常数; n 称为流体的流动指数,当 $n < 1$ 时,流体表现出剪切变稀的行为,当 $n = 1$ 时,流体表现出牛顿流体行为,当 $n > 1$ 时,流体表现出剪切增稠的行为。

(2) Bingham 模型

Bingham 模型常用来描述黏塑性黏性泥沙的流变曲线,这种流变曲线是一条有正截距的直线。具体模型表达式如下:

$$\tau = \tau_y + \eta_0 \dot{\gamma}, \quad (2)$$

式中, τ 为剪切应力; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; τ_y 为屈服应力; η_0 为稠度系数。 τ_y 是流体发生流动的临界剪切应力, η_0 则表征流体的流动性, η_0 越大则流体流动性越大。

(3) Herschel-Bulkley 模型

Herschel 和 Bulkley 于 1926 年在研究橡胶材料时提出了 Herschel-Bulkley 模型,具体模型表达式如下:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma}^n, \quad (3)$$

式中, τ_y 为屈服应力; μ_p 和 n 为常数。当 $n < 1$ 时,流体为假塑性流体; $n > 1$ 时,流体为膨胀性流体; $n = 1$ 时,该模型退化为 Bingham 模型。

鉴于黄河水下三角洲海底黏性泥沙平均含水率为 42%,故选取该组实验结果建立黄河水下三角洲海底黏性泥沙典型流变模型。由本文 2.2 可知,黏性泥沙样品在流变仪剪切荷载作用下会出现相态转换。为了更好地描述黏性泥沙样品的流变特性,本文所做的流变模型拟合指的是仅针对流态阶段做的模型拟合。如图 5 所示,高浓度黏性泥沙流变曲线近似为一条具有横截距的直线,Bingham 模型能较好地描述高浓度黏性泥沙的流变特性。高浓度黏性泥沙表现出非牛顿流体中黏塑性流体的特性。

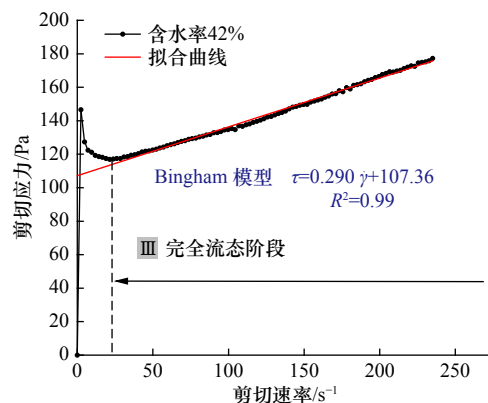


图 5 含水率 42% 高浓度黏性泥沙流变曲线及模型拟合

Fig. 5 Rheological curve and model fitting of dense cohesive sediment with moisture content of 42%

4.2 固结时间的影响

如图 3 所示,固结时间对高浓度黏性泥沙流变曲线具有显著影响。引入 Bingham 模型对曲线进行拟合,各参数统计如表 4 所示。如图 6 所示,屈服应力和稠度系数与固结时间呈线性关系,屈服应力和稠度系数随着固结时间的增加而增加。屈服应力在固结 120 min 后增加了 35%,说明黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙具有快速固结的特点。

固结 15 min 样品和直接测试的样品的流变曲线在高剪切速率下发生了汇合,而固结 60 min 和 120 min 样品的流变曲线则始终处于未固结样品流变曲线的上方。说明虽然固结一段时间后黏性泥沙样品颗粒之间形成了一定的结构,但较短固结时间下形成的结构是可逆的。在高速剪切速率作用下结构完全被破坏,恢复到了未固结的状态。而长固结时间下形成的结构则较为稳定,在高剪切速率下强度依然有明显的升高。

4.3 含水率的影响

当高浓度黏性泥沙的含水率大于 50% 时,流变曲线表现出了与传统剪切变稀流体模型不同的“上翘”

表 4 各固结时间 Bingham 模型参数

Table 4 Bingham model parameters at different consolidation times

固结时间/min	τ_y /Pa	η_0	R^2
0	57.333	0.249 7	0.994 6
15	64.326	0.258 8	0.996 1
60	68.119	0.284 8	0.995 9
120	77.245	0.302 6	0.986 1

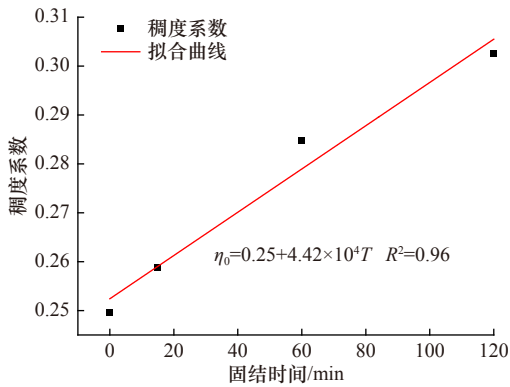
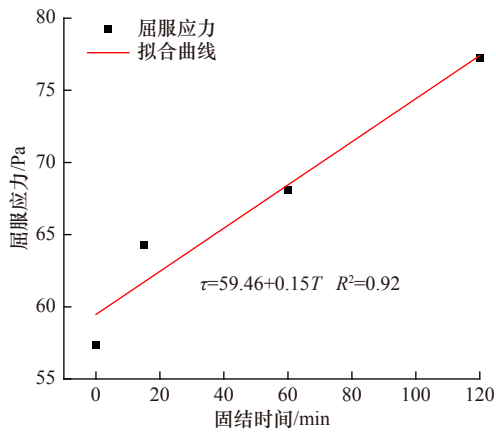


图6 固结时间与流变参数拟合曲线

Fig. 6 The fitting curve between consolidation time and rheological parameters

的趋势, 这种不同的趋势在双对数坐标下更为明显(图7), 6种含水率黏性泥沙的流变曲线出现了两种趋势。为了更好地分析不同含水率黏性泥沙流变特性, 以50%为界限把低含水率黏性泥沙和高含水率黏性泥沙分开分析。

低含水率高浓度黏性泥沙全剪切速率下, 流变曲线与Bingham模型拟合程度较高, 屈服应力、稠度系数随含水率的增加呈指数降低。

对于含水率大于50%的高浓度黏性泥沙样品, 以含水率55%的样品为例分析其流变模型。如图8所示, 黏度先是随着剪切速率的增加而急剧减小, 当剪切速率超过了“临界点”后黏度随着剪切速率增加出现了轻微的变大, 高浓度黏性泥沙在高剪切速率下表现出了剪切增稠行为。此时Bingham模型已不能描述高浓度黏性泥沙全剪切速率下的流变特性, 引入Power模型, 以“临界点”为界限将流变曲线分为两个阶段, 分别进行流变模型的拟合, 如图9。各含水率高浓度黏性泥沙流变模型参数汇总见表5。

如表5所示, 除高含水率高浓度黏性泥沙剪切增稠阶段外, Bingham模型依然适用。含水率与Bingham

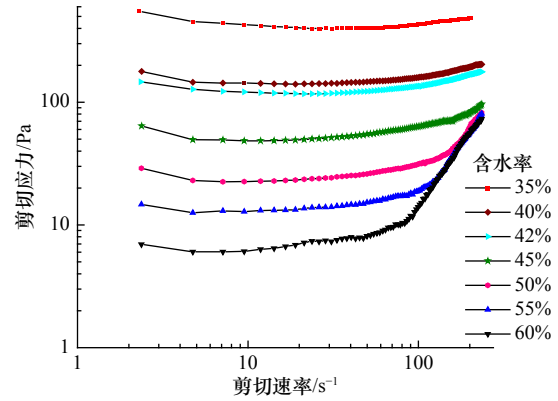


图7 不同含水率高浓度黏性泥沙双对数坐标下流变曲线

Fig. 7 Rheological curves of dense cohesive sediments with different moisture content in logarithmic coordinates

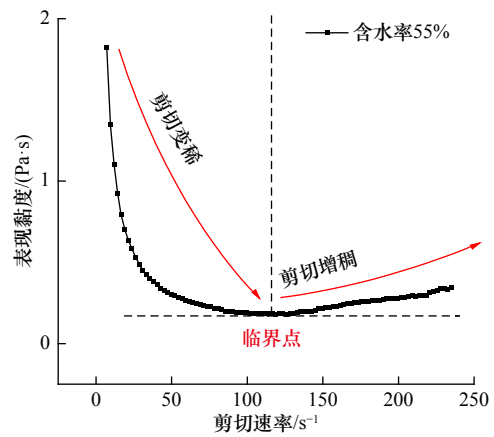


图8 黏度曲线

Fig. 8 Viscosity curve

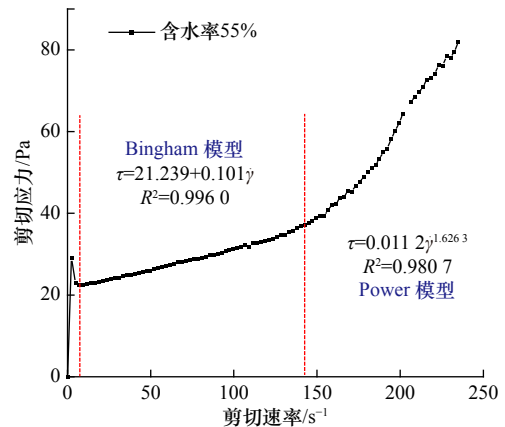


图9 黏性泥沙流变曲线分段拟合

Fig. 9 Section fitting of rheological curve of cohesive sediment

模型相关参数拟合曲线如图10所示。用公式(4)、(5)表示稠度系数、屈服应力随含水率的变化规律。

$$\eta_0 = 2.016 \times 10^6 \omega^{-4.26}, \quad (4)$$

$$\tau_y = 1.51 \times 10^{15} \omega^{-8.16}, \quad (5)$$

表 5 各含水率高浓度黏性泥沙流变模型参数

Table 5 Parameters of dense cohesive sediment rheological model

含水率/%	Bingham模型			Power模型		
	τ_y	η_0	R^2	K	n	R^2
35	380	0.531	0.96	-	-	-
40	130	0.313	0.99	-	-	-
42	107	0.29	0.99	-	-	-
45	44	0.190	0.98	-	-	-
	低剪切速率			高剪切速率		
50	21	0.101	0.99	0.011 2	1.62	0.98
55	11	0.075	0.96	0.001 7	1.970	0.99
60	5	0.056	0.97	0.001 6	1.973	0.99

注: -表示无数据。

式中, ω 为含水量。在高剪切速率阶段 Power 模型中的流动系数 n 均大于 1。高浓度黏性泥沙均表现出了剪切增稠的性质, 随着含水率的增加, n 值逐渐增加, 剪切增稠行为逐渐明显。在风暴等极端海况下, 现场黏性泥沙常处于高剪切速率荷载作用之下, 极有可能会发生剪切增稠现象。

5 结论

本文基于黄河水下三角洲原状黏性泥沙制备高浓度黏性泥沙样品开展了室内流变试验, 得到了不同含水率、固结时间下的流变曲线, 讨论了黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙的流变特性及其影响因素, 得到以下主要结论。

(1) 黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙在剪切荷载作用下表现出非牛顿流体中黏塑性流体的特性, 且发生了从固态到完全流态的相态转化过程。

(2) 黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙具有快速固结的特性, 固结 120 min 后屈服应力可增加 35%; 较短固结时间下形成的结构是可逆的, 在高速剪切速率作

参考文献:

- [1] 孙连成. 淤泥质海岸天津港工程泥沙治理与功效[J]. 水运工程, 2009(4): 10-18.
Sun Liancheng. Tianjin Port engineering sediment treatment and efficacy on silt coast[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(4): 10-18.
- [2] 任美镠, 张忍顺, 杨巨海, 等. 风暴潮对淤泥质海岸的影响——以江苏省淤泥质海岸为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 1-24.
Ren Mei'e, Zhang Renshun, Yang Juhai, et al. The influence of storm tide on mud plain coast—with special reference to Jiangsu Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1983, 3(4): 1-24.
- [3] 曹祖德. 浮泥特性研究进展[J]. 水道港口, 1992(1): 34-40.
Cao Zude. Advances in cohesive sediment research[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1992(1): 34-40.

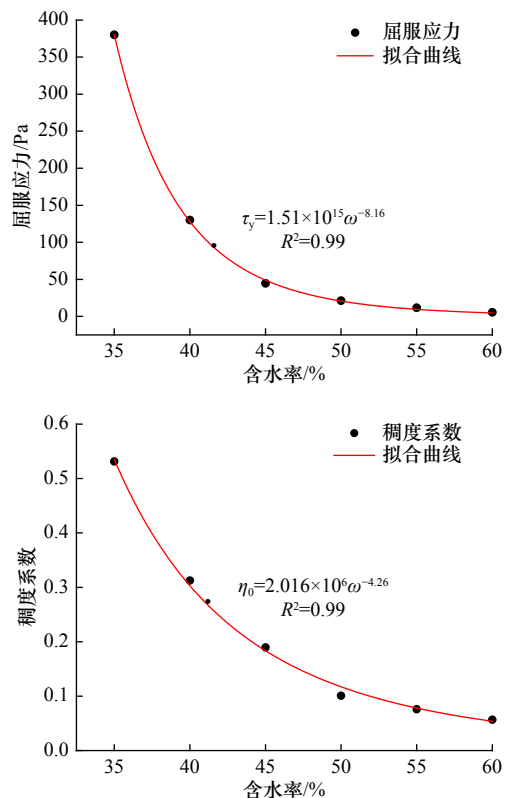


图 10 含水率与屈服应力、稠度系数拟合曲线
Fig. 10 The fitting curve between moisture content and rheological parameters

用下结构完全被破坏恢复到了未固结的状态, 而长固结时间下形成的结构则较为稳定, 在高剪切速率下强度依然有明显的升高。

(3) 不同含水率对高浓度黏性泥沙的流变模型有影响, Bingham 模型适用于低含水率高浓度黏性泥沙全剪切速率及高含水率高浓度黏性泥沙低剪切速率下流变特性的描述; 高含水率高浓度黏性泥沙在高剪切速率下表现出剪切增稠现象, Power 模型更能准确地描述此时高浓度黏性泥沙的流变特性。

(4) 基于流变试验结果, 建立了考虑固结时间和含水率影响的海底高浓度黏性泥沙流变模型及参数范围, 为下一步开展海底黏性泥沙运动过程的数值模拟提供支持。

- [4] 贾永刚,单红仙.黄河口海底斜坡不稳定性调查研究[J].*中国地质灾害与防治学报*,2000,11(1):1-5.
Jia Yonggang, Shan Hongxian. Investigation and study of slope instability of subaqueous delta of modern Yellow River[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(1): 1-5.
- [5] 李广雪,庄克琳,姜玉池.黄河三角洲沉积体的工程不稳定性[J].*海洋地质与第四纪地质*,2000,20(2):21-26.
Li Guangxue, Zhuang Kelin, Jiang Yuchi. Engineering instability of the deposition bodies in the Yellow River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(2): 21-26.
- [6] 文明征,王振豪,张博文,等.黄河水下三角洲浮泥层分布与扰动地层调查研究[J].*工程地质学报*,2018,26(S1):677-683.
Wen Mingzheng, Wang Zhenhao, Zhang Bowen, et al. Survey on the distribution of fluid mud and disturbed strata on subaqueous Yellow River Delta[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(S1): 677-683.
- [7] 胡正红,张婧,刘兴年,等.泥石流浆体流变特性影响因素试验研究[J].*水力发电学报*,2014,33(2):131-136.
Hu Zhenghong, Zhang Jing, Liu Xingnian, et al. Experimental study on rheological properties factors of debris flow slurry[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(2): 131-136.
- [8] 戴志军,朱文武,李为华,等.近期长江口北槽河道浮泥变化及影响因素研究[J].*泥沙研究*,2005(1):49-54,74.
Dai Zhijun, Zhu Wenwu, Li Weihua, et al. Research on recent changes of fluid mud and its impacted factors in the north passage of the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005(1): 49-54, 74.
- [9] 许宝华,王真祥.象山港进港航道外干门浅段试挖槽浮泥观测研究[J].*人民长江*,2009,40(22):67-68.
Xu Baohua, Wang Zhenxiang. Observation and research on floating mud in trial excavation section of main entrance channel of Xiangshan Port[J]. *Yangtze River*, 2009, 40(22): 67-68.
- [10] Yang W Y, Tan S K, Wang H K, et al. Rheological properties of bed sediments subjected to shear and vibration loads[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2013, 140(1): 109-113.
- [11] Huang Zhenhua, Aode H. A laboratory study of rheological properties of mudflows in Hangzhou Bay, China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(4): 410-424.
- [12] Coussot P, Piau J M. On the behavior of fine mud suspensions[J]. *Rheologica Acta*, 1994, 33(3): 175-184.
- [13] 王梦寒,王宪业,陈思明,等.黏性泥沙的物理特性与起动应力的流变学分析[J].*泥沙研究*,2018,43(6):8-14.
Wang Menghan, Wang Xianye, Chen Siming, et al. Influences of physical properties of cohesive sediment on threshold shear stress based on rheological method[J]. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(6): 8-14.
- [14] 郭兴森,年廷凯,范宁,等.低温环境下南海海底泥流的流变试验及模型[J].*岩土工程学报*,2019,41(1):161-167.
Guo Xingsen, Nian Tingkai, Fan Ning, et al. Rheological tests and model for submarine mud flows in South China Sea under low temperatures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(1): 161-167.
- [15] 呼和敖德,黄振华,张袁备,等.连云港淤泥流变特性研究[J].*力学与实践*,1994,16(1):21-24.
Hu Heaode, Huang Zhenhua, Zhang Yuanbei, et al. Study on rheological characteristics of silt in Lianyungang[J]. *Mechanics in Engineering*, 1994, 16(1): 21-24.
- [16] 练继建,戴丽荣,俞波.淤泥的几种流变模式[J].*海河水利*,1997(4):6-11.
Lian Jijian, Dai Lirong, Yu Bo. Flow patterns of silting mud[J]. *Haihe Water Resources*, 1997(4): 6-11.
- [17] 王裕宜,詹钱登,严璧玉.泥石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.
Wang Yuyi, Zhan Qian deng, Yan Biyu. Debris-flow Rheology and Movement[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2014.
- [18] 冯秀丽,周松望,林霖,等.现代黄河三角洲粉土触变性研究及其应用[J].*中国海洋大学学报*,2004,34(6):1053-1056.
Feng Xiuli, Zhou Songwang, Lin Lin, et al. The Thixotropy of silt in Huanghe Delta[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(6): 1053-1056.
- [19] 刘涛,张美鑫,崔逢.循环荷载下粉土液化流动特性拖球试验研究[J].*海洋学报*,2017,39(3):115-121.
Liu Tao, Zhang Meixin, Cui Feng. Dragging ball test on flow characteristics of liquefied silt under cyclic loading[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(3): 115-121.
- [20] 刘涛,崔逢,张美鑫.波浪作用下液化粉土流动特性拖球试验研究[J].*海洋学报*,2016,38(3):123-130.
Liu Tao, Cui Feng, Zhang Meixin. Dragging ball test on flow characteristics of liquefied silt under wave loading[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(3): 123-130.
- [21] Einsele G. Deep-reaching liquefaction potential of marine slope sediments as a prerequisite for gravity mass flows? (Results from the DSDP)[J]. *Marine Geology*, 1990, 91(4): 267-279.
- [22] Whitehouse R, Soulsby R, Roberts W, et al. Dynamics of estuarine muds: A manual for practical applications[M]. London: Institution of Civil Engineers, 2000.
- [23] 杨秀娟,贾永刚.黄河口入海泥沙沉积固结过程长期现场观测研究[J].*岩土工程学报*,2013,35(4):671-678.
Yang Xiujuan, Jia Yonggang. Long-term field observation of sediment consolidation process in Yellow River Delta, China[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(4): 671-678.
- [24] 杨闻宇.剪切荷载作用下高浓度粘性泥沙流变特性的实验研究[D].上海:上海交通大学,2014.
Yang Wenyu. Experimental study on the rheological properties of dense cohesive sediments under shear loadings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

Rheological characteristics and its influencing factors of dense cohesive sediments in the Huanghe River subaqueous delta

Liu Xiaolei^{1,2}, Chen Anduo¹, Zhang Hong¹, Lu Yang¹, Ma Lukuan¹, Jia Yonggang^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: Cohesive sediments are widely distributed in the subaqueous delta of the Huanghe River and can easily cause problems such as sedimentation, erosion and sea-bed fluidization under the action of external load, which poses a great threat to the engineering facilities such as ports, waterways and submarine pipelines. Samples of cohesive sediment with different consolidation times and different water contents were prepared by using the undisturbed cohesive sediment taken from the fluid mud development area of the Huanghe River subaqueous delta. The rheological tests were carried out under the mode of full shear rate with R/S rheometer to analyze the rheological characteristics of cohesive sediment in the Huanghe River subaqueous delta and the effects of water content and consolidation time on the rheological characteristics. The results show that the cohesive sediment flows and becomes unstable under the shear load, and the phase changes. The yield stress increased by 35% after being consolidated for 120 min. The shear thickening behavior of the cohesive sediment with 50% water content at a high shear rate was more obvious with the increase of water content. Power model is applicable to the rheological behavior of the cohesive sediment with a water content greater than 50% at high shear rate. This study can provide a reference for the numerical simulation of subaqueous cohesive sediment and the prediction of subaqueous gravity flow.

Key words: Huanghe River subaqueous delta; dense cohesive sediments; rheological characteristics; influencing factors; rheological test