



滨海港港区浮泥特性及适航密度研究

赵桑岚, 汪承志, 刘臻, 谭欣扬

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 为减少维护疏浚成本、提高船舶通航效率, 以盐城滨海港港区浮泥为研究对象, 基于浮泥特性对滨海港浮泥适航密度开展研究。通过对港池、航道区疏浚后码头前沿浅点进行浮泥厚度分布、沉积物粒度分析、流变特性试验研究浮泥特性, 而后结合浮泥黏粒含量与适航密度关系、流变特性试验、层流-紊流流态转变理论三者共同确定滨海港港区的适航浮泥密度。结果表明: 滨海港港区浮泥平均厚度为 1.71 m, 沉积物多以黏性细颗粒为主, 中值粒径多为 0.006~0.008 mm, 黏粒含量超过 90%, 符合利用适航水深的条件; 确定滨海港港区适航浮泥密度标准值为 1 200~1 240 kg/m³。

关键词: 滨海港; 浮泥; 流变特性; 适航密度

中图分类号: U612; U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0075-11

Properties and density of seaworthiness of fluid mud in harbor area of Binhai Port

ZHAO Sanglan, WANG Chengzhi, LIU Zhen, TAN Xinyang

(College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to reduce the cost of maintenance dredging and improve the navigational efficiency of ships, we take the fluid mud in the harbor area of Binhai Port in Yancheng as the research object, and conduct a study on the seaworthy density of fluid mud in Binhai Port on the basis of characteristics of fluid mud. We carry out the thickness distribution of fluid mud, sediment particle size analysis, and rheological characteristic test at shallow points along the wharf front after dredging in the harbor pool and channel area to study the characteristics of fluid mud, and then combine the relationship between the mucous content of fluid mud and the seaworthy density, the rheological characteristic test, and the theory of laminar-turbulent flow transition together to determine the seaworthy density of fluid mud in the harbor area of Binhai Port. The results show that the average thickness of fluid mud in the harbor area of Binhai Harbor is 1.71 m, and the sediments are mostly dominated by viscous fine particles, with median particle sizes ranging from 0.006 to 0.008 mm, and the content of viscous particles is more than 90%, which is in line with the condition of utilizing the seaworthy water depth. It is determined that the standard value of density of the seaworthy fluid mud in the harbor area of Binhai Port is from 1,200 to 1,240 kg/m³.

Keywords: Binhai Port; fluid mud; rheological property; seaworthy density

浮泥在多变的海岸动力环境中, 如波浪和潮流的作用下, 对航道形态和适航水深的确定具有关键影响。浮泥因其流动性特点, 在疏浚过程中难以完全清除, 且随着水深增加, 浮泥密度逐渐增大, 容易沉积并降低航道深度, 阻碍船舶航

行^[1-2]。因此, 许多淤泥质港口广泛采用适航水深技术, 以确保船舶安全通行和港口高效运营^[3-4]。

浮泥适航密度的确定是应用适航资源的基础, 与浮泥的物理特性和流变特性密切相关。例如, Kerkaert 等^[5]研究泽布吕赫港淤泥的适航密度, 发

收稿日期: 2024-10-16

作者简介: 赵桑岚 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为港口、海岸及近海工程。

现其与黏粒含量呈负相关;陈晓峰等^[6]则研究汕头港的可航密度,结果与泽布吕赫港相似;Li 等^[7]通过长江口深水航道的研究,揭示水动力因素对流泥形成和分布的影响,并确定低屈服应力层(密度 $\rho < 1\,250\text{ kg/m}^3$)可作为潜在的适航深度。此外,其他研究也证实了类似结论,例如黄骅港适航淤泥密度标准值为 $1\,220\text{ kg/m}^3$ ^[8],科钦港为 $1\,170\text{ kg/m}^3$ ^[9];伶仃洋港口航道浮泥平均厚度在 $0.1\sim 2.7\text{ m}$,可作为适航水深开发使用^[10]。针对浮泥的流变特性,麻考等^[11]研究江苏沿海条子泥地区的泥沙,发现粉沙含量对流变特性起关键作用;陈沁泽等^[12]研究不同均匀粒度高岭土泥沙,发现粒径和含水率对流变特性有显著影响;刘晓磊等^[13]构建一个反映固结时间和含水率效应的海底高浓度黏性泥沙流变模型,为数值仿真研究提供了参考;Shakeel 等^[14-15]研究德国汉堡港沉积物流变特性,发现该地区流动泥层的屈服应力较小,触变较弱,适航水深应采用屈服应力和浮泥密度共同确定;Samsami 等^[16]研究布什尔港,发现大多数样品的泥沙浓度和屈服应力分别低于 $1\,030\text{ kg/m}^3$ 和 123 Pa ,该港口及其进出航道可实际实施高达 1 m 的通航泥沙层。现阶段,层流-紊流流态转变理论也可用于浮泥适航密度的确定。如金镠等^[17]指出,船舶在浮泥层中的运动类似于浮泥在缓坡上的重力流,可以通过有效雷诺数 Re 为 $2\,000\sim 3\,000$ 范围内的浮泥确定适航密度;叶建林等^[18]通过层流-紊流流态转变理论分析连云港港区适航淤泥密度,确定其值为 $1\,180\sim 1\,240\text{ kg/m}^3$ 。

综合来看,研究港区浮泥分布、粒径、黏粒含量、流变特性及层流-紊流流态转变理论是确定适航浮泥密度的关键手段。本文通过水沱和泥浆密度仪测量确定浮泥分布厚度,然后在选定位置采集浮泥样品,进行粒度分析和流变试验,最后结合浮泥黏粒含量、流变特性试验及层流-紊流流态转变理论,确定滨海港区适航浮泥密度。研究成果可为指导滨海港港区适航水深资源利用提供参考。

1 研究区域概况

滨海港位于江苏沿海中北部海岸,紧邻废黄河口以北和中山河以南。为打造受保护的挖入式港口,该地建有南北双防波堤,形成安全屏障。防波堤呈折线形,北堤长 $4\,880\text{ m}$,南堤长 $1\,985\text{ m}$ 。北堤末端水深 14 m ,南堤末端水深 10 m ,港口入口宽 800 m ,可确保船只顺畅进出。滨海港平面布置见图 1。

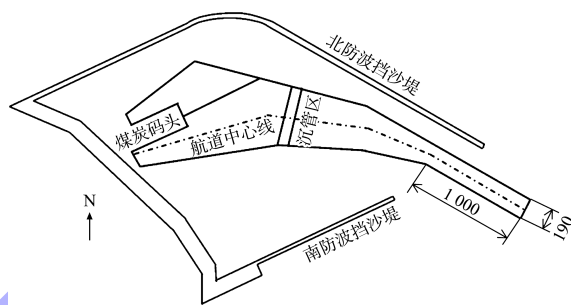


图 1 滨海港平面布置 (单位: mm)

Fig. 1 Layout of Binhai Port (unit: mm)

据统计,滨海港年淤积总量为 113 万 m^3 ,其中外航道 46.52 万 m^3 ,内航道 66.48 万 m^3 。口门附近的年淤积强度最高,达 1.32 m/a ,港池内部航道为 0.96 m/a ,航道中部回淤中心处最高,达 1.65 m/a 。为确保航道通航深度,每年需要进行大量维护性疏浚,但由于淤积物密度小,疏浚效率低,造成资源浪费。为解决这个问题,国内多个港口已开始推广使用适航水深技术。根据 JTJ/T 325—2006《淤泥质海港适航水深应用技术规范》^[19]的要求,滨海港具备利用适航水深技术的基本条件。

2 研究方法

2.1 水文测量

水沱的存在和变化能反映港池或航道区的淤积情况,浮泥密度的变化也能直接反映沉积物的性质和淤积程度。因此,本文在港池和航道区疏浚后码头前沿浅点,采用水沱和泥浆密度仪测量方法,对港内淤积情况进行分析。本文在港池和航道区共选取 10 个断面、50 个测点(图 2),以分析研究区域内各水样的浮泥密度垂线分布及浮泥厚度。

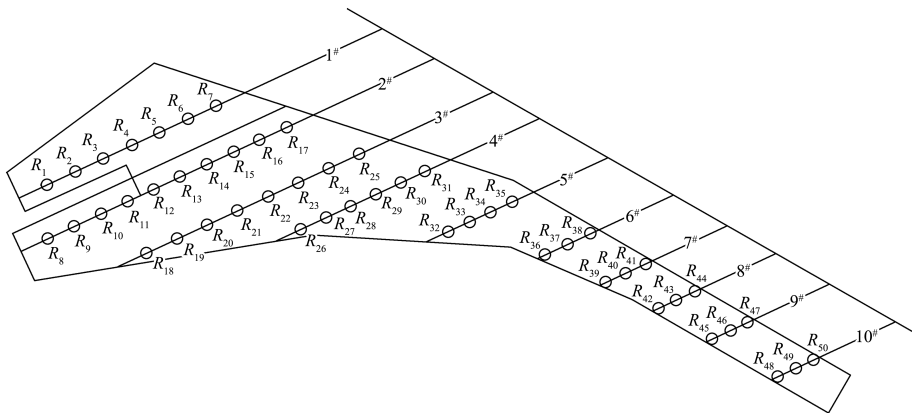


图 2 港池、航道区泥浆密度测量断面及取样点布置

Fig. 2 Layout of sections and sampling points for mud density measurement in harbour basin and channel area

2.2 浮泥取样

为研究滨海港区浮泥的物理特性和流变特性, 本文选取 20 个点进行取样研究, 取样点布置见图 3。取样点选在进港航道向港池内部的转角段和码头前沿等轴线位置, 该区域泥沙沉积较为稳定, 可避免泥沙运动对样本的影响。

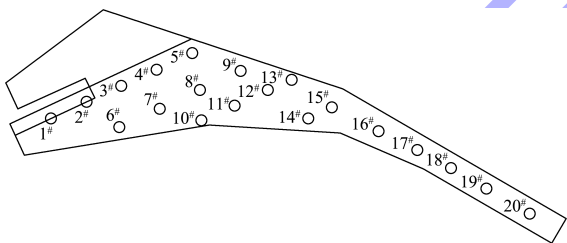


图 3 浮泥取样点布置

Fig. 3 Layout of sampling points for fluid mud

2.3 粒度分布

通过对浮泥黏性颗粒的粒径进行分析可以了解浮泥特性。如颗粒大小、形状、密度和黏附性等。强黏性浮泥易附着船底, 导致额外的航行阻力和磨损; 颗粒过小可能形成淤积层, 影响航道通航能力。为确保港口的适航性是否符合标准, 本文采用 Bettersize2600 激光粒度分布仪测量粒径级配, 仪器量程为 $0.02 \sim 2\,600\ \mu\text{m}$ 。

2.4 流变试验

港口航道和港池中的浮泥物理及流变特性因地而异, 需要选用代表性参数进行研究。目前, 国内外研究多关注浮泥的流变特性(如黏性和应力), 这些特性与浮泥的粒径、密度、黏土含量、

含水量及环境中的离子类型和数量等因素密切相关。本文通过流变试验, 研究不同粒径和密度的浮泥样品在施加剪切应力下的变形及流动行为变化。

根据现场浮泥分布及粒径检测结果, 选取中值粒径 d_{50} 分别为 $0.006\,1\ \text{mm}$ (F_1)、 $0.006\,8\ \text{mm}$ (F_2) 和 $0.007\,1\ \text{mm}$ (F_3) 的 3 种典型泥样, 开展流变特性试验。试验使用 TA HR-10 流变仪, 采用控制剪切速率的方法, 从 $0.001\ \text{s}^{-1}$ 线性递增至 $10\ \text{s}^{-1}$ (120 s 内), 再从 $11\ \text{s}^{-1}$ 递增至 $150\ \text{s}^{-1}$ (每 2 s 增加 $1\ \text{s}^{-1}$)。试验用水为天然海水, 温度控制在 $15 \sim 18\ ^\circ\text{C}$ 。泥样的密度范围为 $1\,050 \sim 1\,350\ \text{kg/m}^3$, 每种泥样选取 9 个密度值 ($1\,050$ 、 $1\,100$ 、 $1\,130$ 、 $1\,170$ 、 $1\,190$ 、 $1\,230$ 、 $1\,270$ 、 $1\,290$ 、 $1\,350\ \text{kg/m}^3$)。通过静态流变试验, 获得不同密度下剪切应力与剪切速率的关系及黏滞系数与剪切速率的变化关系。

2.5 层流-紊流流态转变理论

本文通过流变试验测定浮泥黏度与适航密度、屈服应力与适航密度的关系。然而, 流变试验得到的适航密度不全面, 因为浮泥的流态(层流或紊流)也会影响其运动模式和流动效率。当浮泥处于层流时, 更容易被水流带走; 而在紊流状态下, 浮泥的稳定性更高, 不易被扰动。

由于浮泥是非牛顿流体, 其流动特性仅在重力产生的切应力超过浮泥层的抗剪强度时才会发生。Kessel 等^[20]对斜坡上的浮泥重力流动进行试验分析, 发现高浓度下, 浮泥表现为层流, 可简化为宾

汉流体模型；低浓度下，则形成紊流状态；并提出层流-紊流转变的有效雷诺数 Re 为 2 000~3 000。这两种流动状态的转换可通过有效雷诺数 Re 描述：

$$\frac{1}{Re} = \frac{1}{Re_\mu} + \frac{1}{Re_\tau} \quad (1)$$

式中： Re_μ 和 Re_τ 分别取决于宾汉黏滞性和宾汉屈服应力的雷诺数。它们的公式为：

$$Re_\mu = \frac{4\rho v H}{\eta_B} \quad (2)$$

$$Re_\tau = \frac{8\rho v^2}{\tau_B} \quad (3)$$

式中： $\bar{\rho}$ 为浮泥层平均密度， kg/m^3 ； v 为浮泥层转移速度， m/s ； H 为浮泥层厚度， m ； η_B 为宾汉动黏系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； τ_B 为宾汉屈服应力， Pa 。

3 结果分析

3.1 浮泥厚度分布

港池、航道区代表点位浮泥密度垂线分布见图 4。可以看出，浮泥密度在 1 050~1 300 kg/m^3 区间存在一定厚度。浮泥密度在 1 050~1 300 kg/m^3 区间的厚度分布见图 5。

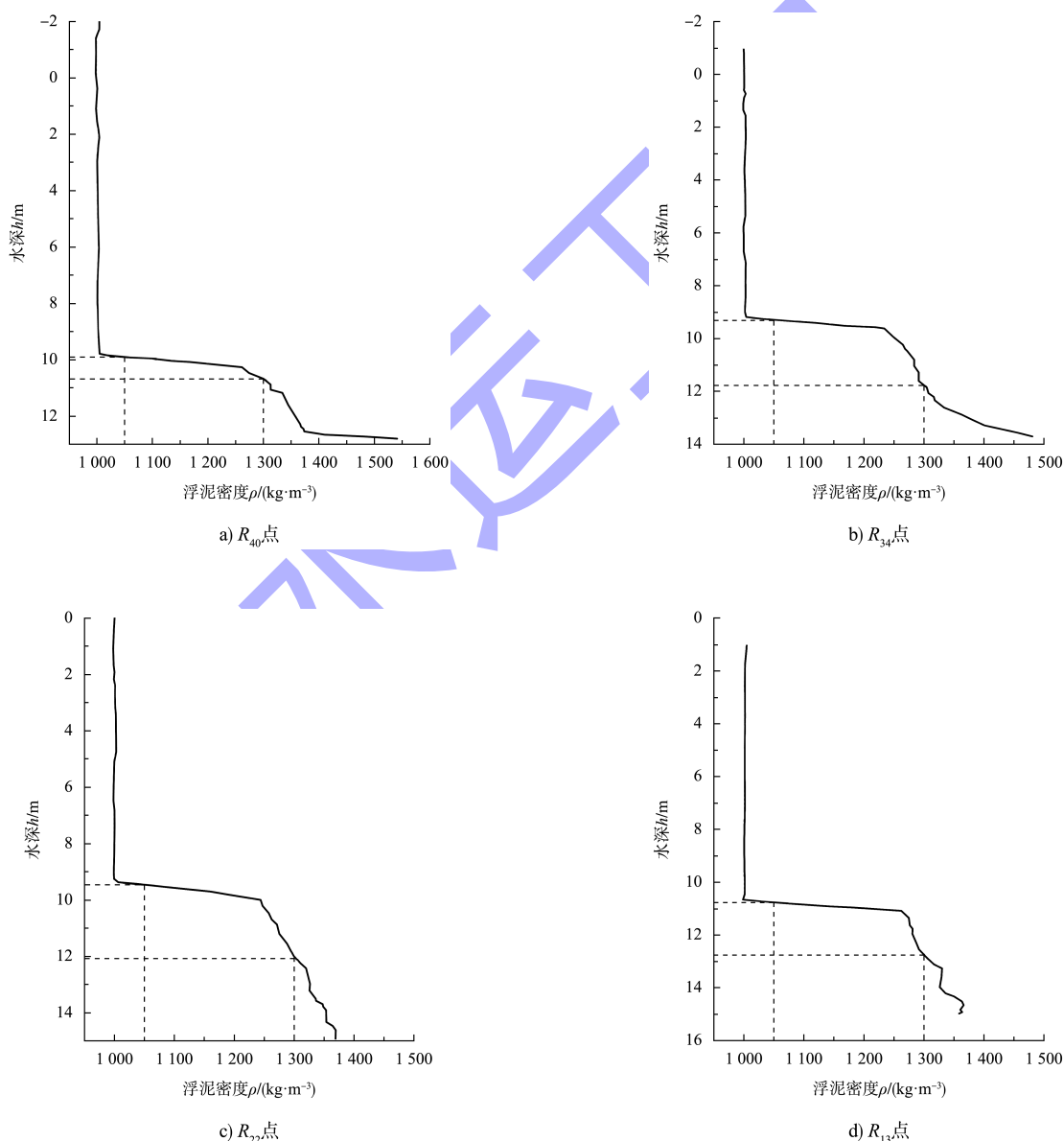


图 4 港池、航道区代表点位浮泥密度垂线分布

Fig. 4 Vertical distribution of fluid mud density at representative points in harbor basin and channel area

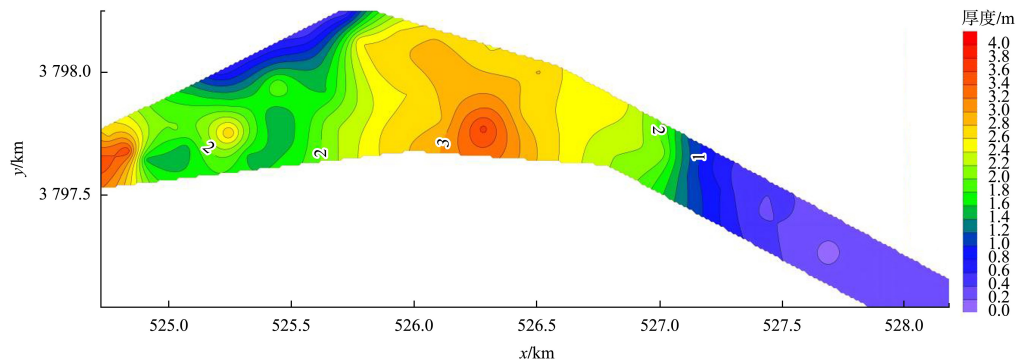


图 5 浮泥密度在 1 050~1 300 kg/m³ 区间的厚度分布

Fig. 5 Thickness distribution when fluid mud density ranges from 1,050 to 1,300 kg/m³

由图 5 可知, 滨海港浮泥层厚度范围为 0.12~3.67 m, 平均厚度为 1.71 m。航道中心线处浮泥平均厚度为 1.62 m。厚度较大的区域为进港航道向港池内部的转角段和码头前沿, 前者平均厚度为 2.17 m, 后者为 2.38 m。进港航道口门段及口门外航道底部几乎没有浮泥分布。

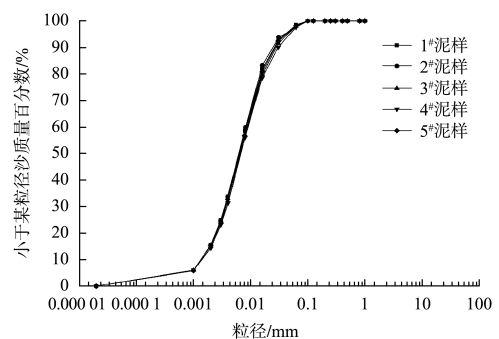
3.2 浮泥粒度分布

对各取样点的泥样进行粒径分析, 结果见表 1 (泥样编号与取样点编号相同)。可以看出, 港池和航道区开挖后的沉积物以黏性细颗粒为主, 中值粒径 d_{50} 多为 0.006~0.008 mm, 除 19[#]、20[#]泥样外, 其余各取样点中值粒径均小于 0.01 mm, 平均中值粒径为 0.006 8 mm。各浮泥样品级配曲线见图 6, 可以看出, 除 18[#]~20[#]泥样外, 其余泥样中小于 0.06 mm 的黏粒含量均超过 90%, 平均值为 95%。

黏粒通常指浮泥粒径小于 0.06 mm 的颗粒。黏粒含量越高, 浮泥密度越大, 过多的细颗粒沉积可能会导致航道变浅, 减少航道的有效深度, 进而影响航道的承载能力。因此, 保持适当的浮泥黏粒含量是保证航道通航能力、确保船舶安全的前提。本文结合滨海港区港池、航道区浮泥取样结果与适航密度上限与黏粒含量的关系, 初步确定适航密度上限值应控制在 1 200~1 250 kg/m³。

表 1 港池、航道区浮泥取样特征粒径
Tab. 1 Characteristic particle size of fluid mud sampling from harbor basin and channel area

泥样	平均粒径/mm	中值粒径/mm	最大粒径/mm
1 [#]	0.011	0.006 5	0.110
2 [#]	0.010	0.006 2	0.110
3 [#]	0.011	0.006 7	0.109
4 [#]	0.012	0.006 8	0.111
5 [#]	0.011	0.006 5	0.109
6 [#]	0.011	0.006 6	0.110
7 [#]	0.012	0.006 8	0.111
8 [#]	0.013	0.007 1	0.128
9 [#]	0.021	0.008 6	0.320
10 [#]	0.014	0.007 3	0.110
11 [#]	0.013	0.006 8	0.127
12 [#]	0.011	0.006 1	0.128
13 [#]	0.012	0.006 3	0.147
14 [#]	0.013	0.006 7	0.127
15 [#]	0.014	0.006 7	0.129
16 [#]	0.012	0.006 2	0.128
17 [#]	0.014	0.007 1	0.129
18 [#]	0.023	0.008 5	0.173
19 [#]	0.031	0.012 1	0.170
20 [#]	0.035	0.031 1	0.150



a) 1[#]~5[#]泥样

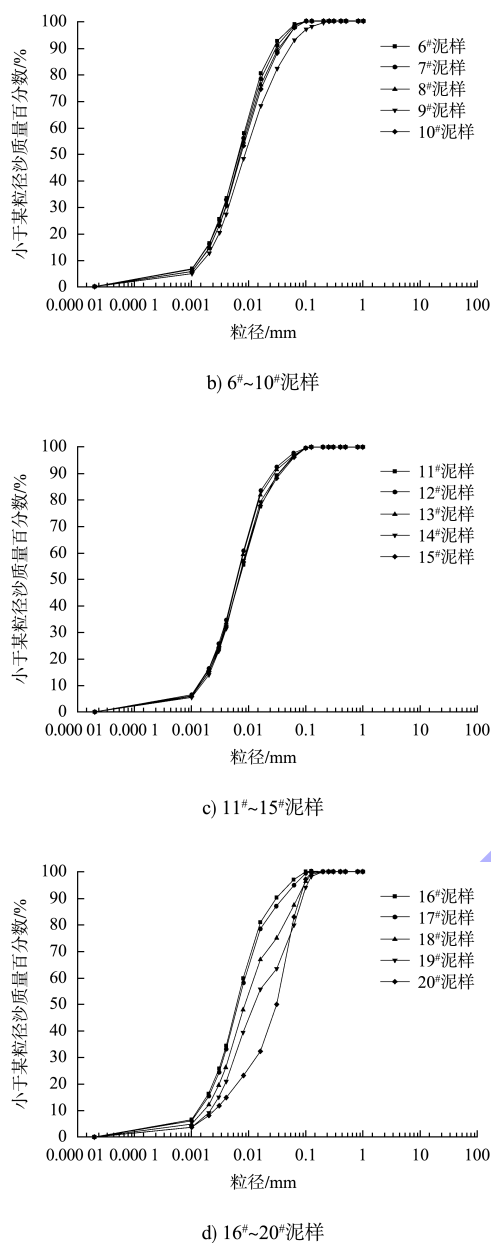


图6 港池、航道区浮泥级配曲线

Fig. 6 Grading curve of fluid mud in harbor basin and channel area

3.3 浮泥流变特性

由浮泥流变试验得到的各粒径泥样浮泥剪切应力与剪切速率关系见图7, 黏滞系数与剪切速率关系见图8。

由图7可以看出, 浮泥样本的剪切应力随剪切速率的增加而先增后减再增, 最终趋于稳定。进一步分析显示, 在低剪切速率(小于 10^{-2} s^{-1})下, 剪切应力随剪切速率的增加而增大, 且浮泥密度越大, 剪切应力上升速率越快; 在中等剪切

速率($10^{-2} \sim 10 \text{ s}^{-1}$)下, 剪切应力随剪切速率的增加呈下降趋势; 在高剪切速率(超过 10 s^{-1})下, 剪切应力逐渐上升并趋于稳定, 表明浮泥在此状态下发生屈服变形, 呈整体流动特征。此外, 相同剪切速率下, 浮泥粒径越大, 相应的剪切应力也越大。

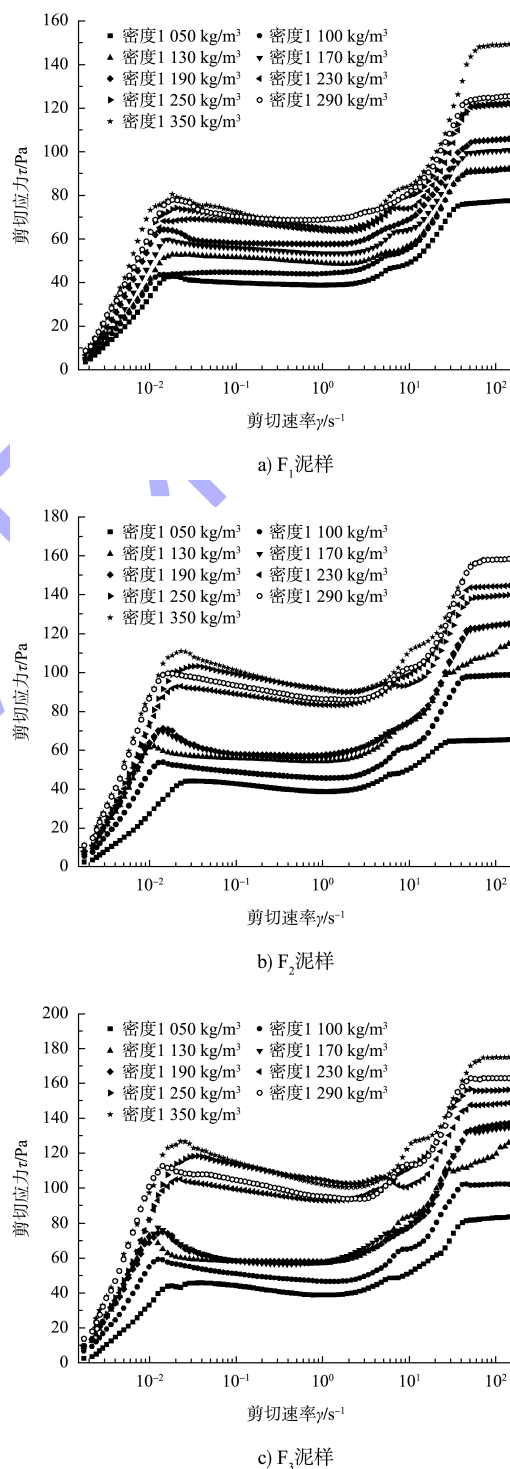


图7 各粒径泥样的剪切应力与剪切速率关系
Fig. 7 Relationship between shear stress and shear rate of mud samples with different particle sizes

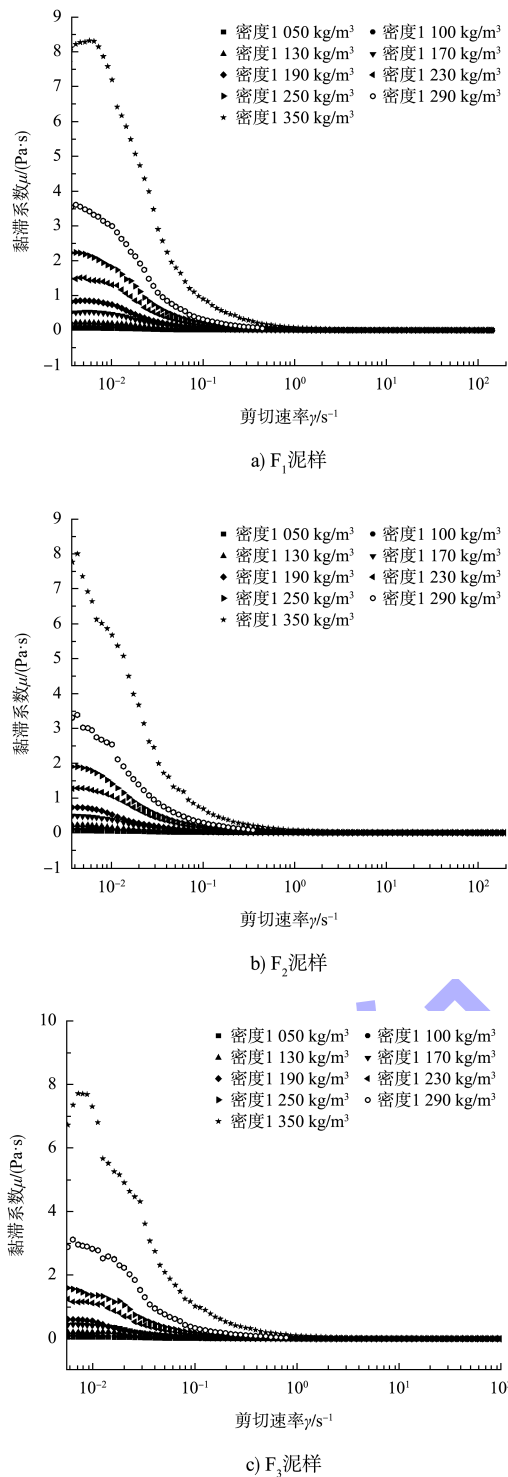


图8 各粒径泥样的黏滞系数与剪切速率关系

Fig. 8 Relationship between viscosity coefficient and shear rate of mud samples with different particle sizes

由图8可以看出,黏滞系数随剪切速率呈现先增后减的趋势。在低剪切速率(小于 10^{-2} s^{-1})下,浮泥样本的黏滞系数缓慢上升,形成黏滞系数平台;随着剪切速率增大,黏度明显下降,表现

出显著的剪切变稀现象。对于密度超过 $1\,100 \text{ kg/m}^3$ 的浮泥,流变曲线中存在与屈服应力相匹配的黏滞系数峰值,而密度较低的浮泥则无此特征。在相同剪切速率下,黏滞系数随浮泥粒径增加而减小。

黏性泥沙的屈服应力是指泥沙从固态转变为液态的开始,即开始流动时对应的剪切应力。本文采用宾汉模型进行流变特性试验,计算并确定屈服应力。宾汉模型一般表达式为:

$$\tau = \tau_B + \mu\gamma \quad (4)$$

式中: τ_B 为宾汉屈服应力,Pa。

采用宾汉模型描述的浮泥流变关系见图9、10。由图9可知,浮泥密度低于 $1\,200 \text{ kg/m}^3$ 时,屈服应力相对稳定,随着密度增加,屈服应力明显增加,整体呈指数上升趋势。根据JTJ/T 325—2006《淤质海港适航水深应用技术规范》要求,本文选取曲线变化最显著的起始点所对应的浮泥密度作为适航密度值。由图10可知,浮泥的黏滞系数随密度增大而增加。在密度较小时,黏滞系数增长较慢,密度增大到一定程度后,黏滞系数对密度的敏感度明显增加。本文选取图中黏滞系数与密度斜率为1的点作为拐点,此时浮泥具有最大流动性,该点对应的浮泥密度即为适航密度,见表2。

由表2可知,浮泥粒径增大导致屈服应力与黏度的拐点值增加,相应的适航密度值也增大。因此,在确定适航密度时,应综合考虑浮泥粒径、屈服应力及黏滞系数。由流变试验确定其适航密度为 $1\,200 \sim 1\,240 \text{ kg/m}^3$,较上述通过浮泥粒度分布确定的适航密度范围小,原因在于流变试验选取的点位于航道和港池中心,该区域水流交换频繁,浮泥容易被冲刷或混合,导致密度较低。

表2 各粒径泥样的适航密度

Tab. 2 Seaworthy density of mud samples with different particle sizes

粒径/ mm	屈服应力/ Pa	黏滞系数/ (Pa·s)	适航密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
0.006 1	44.485	0.878 8	1 200
0.006 8	52.699	1.280 7	1 230
0.007 1	57.287	1.410 4	1 240

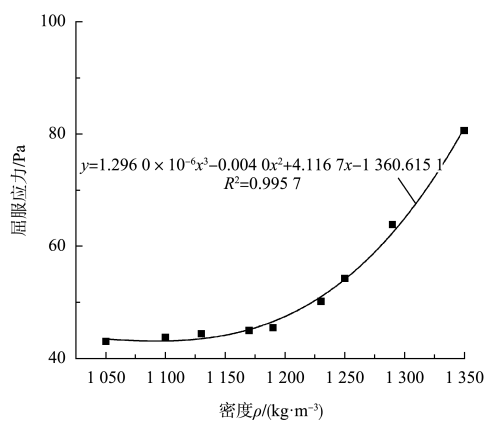
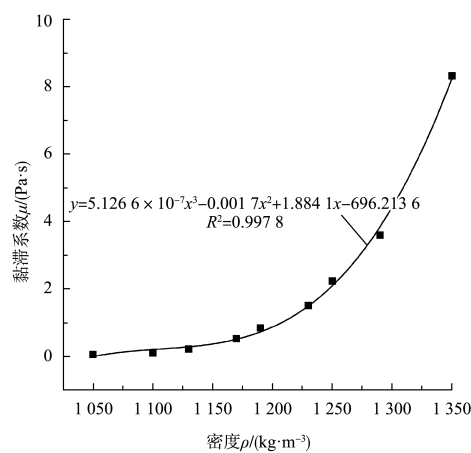
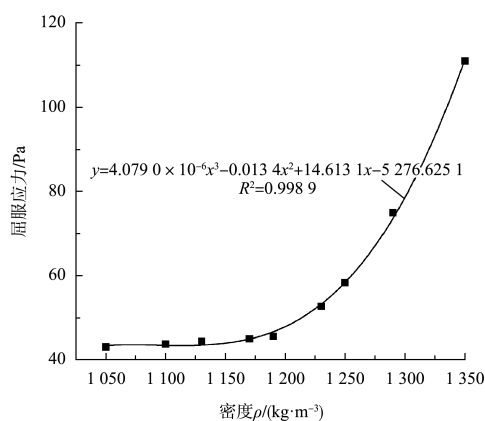
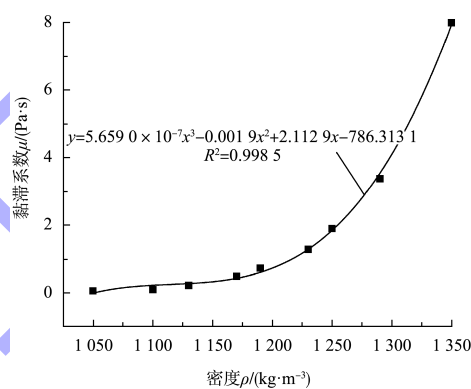
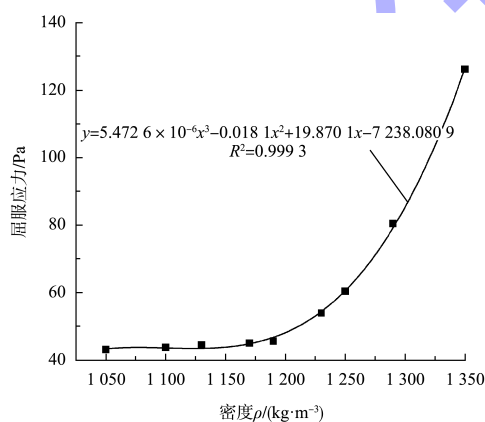
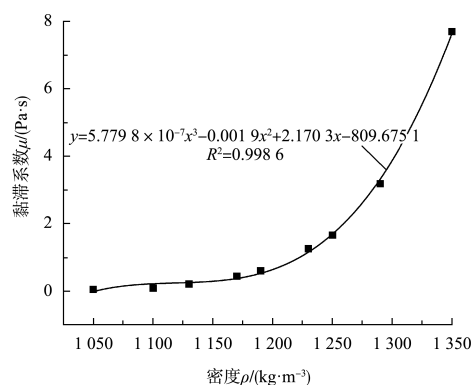
a) F_1 泥样a) F_1 泥样b) F_2 泥样b) F_2 泥样c) F_3 泥样c) F_3 泥样

图 9 各粒径泥样的屈服应力与密度关系
Fig. 9 Relationship between yield stress and density of mud samples with different particle sizes

图 10 各粒径泥样的黏滞系数与密度关系
Fig. 10 Relationship between viscosity coefficient and density of mud samples with different particle sizes

3.4 层流-紊流流态转变理论分析结果

不同浮泥密度 ρ 对应的宾汉屈服应力 τ_B 与宾汉动黏系数 η_B 见表 3。

表 3 滨海港浮泥流变参数
Tab. 3 Rheological parameters of fluid mud in Binhai Port

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	τ_B/Pa	$\eta_B/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
1 050	43.051	0.055
1 100	43.713	0.096
1 130	44.392	0.216
1 170	44.969	0.485
1 190	45.579	0.728
1 230	52.690	1.287
1 250	62.337	1.900
1 290	88.918	3.379
1 350	110.939	8.000

结合式(1)~(3)与表 3 计算得到的有效雷诺数 Re , 绘制的船舶在浮泥层中吃水 1 m 时适航密度与雷诺数关系见图 11, 其中变量为浮泥层平均密度 $\bar{\rho}$ 和航行速度 v 。可以看出, 当浮泥密度相同时, 层流-紊流转换条件的有效雷诺数 Re 随着航行速度的增加而增大。

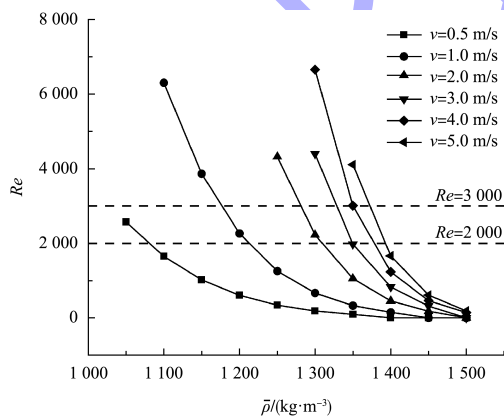


图 11 船舶在浮泥层中吃水 1 m 时适航密度与雷诺数关系
Fig. 11 Relationship between seaworthy density and Reynolds number for ship with 1 m draft in fluid mud layer

结合式(1)~(3)与表 3 计算得到的有效雷诺数 Re , 绘制的船舶航速一定时适航密度与雷诺数关系见图 12, 其中变量为浮泥层平均密度 $\bar{\rho}$ 和浮泥层厚度 H 。

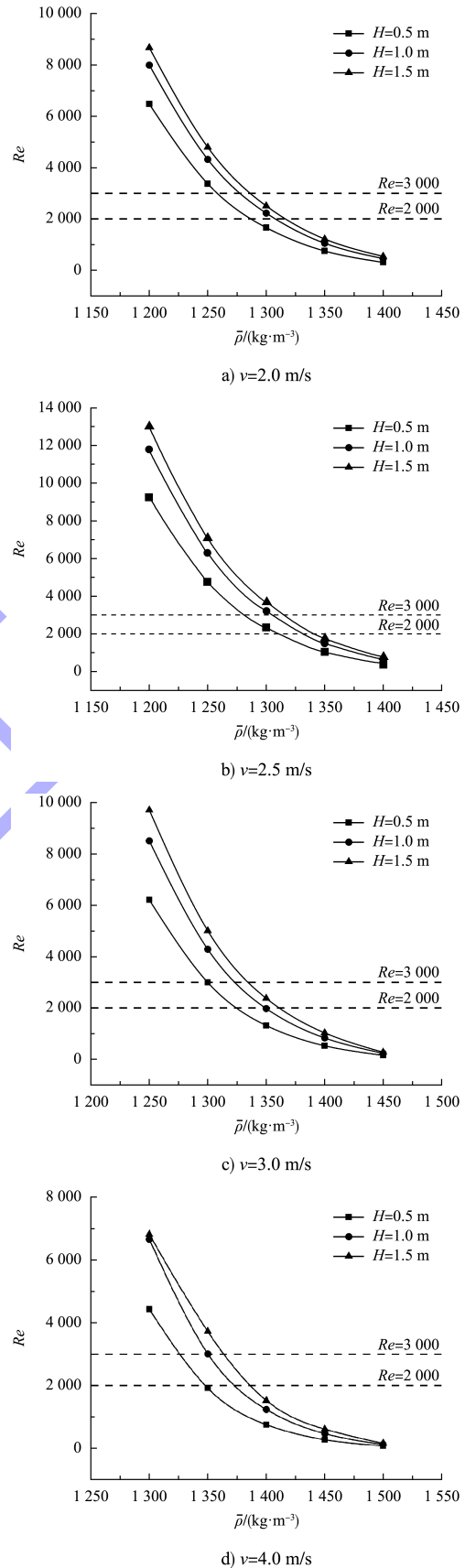


图 12 航速一定时适航密度与雷诺数关系
Fig. 12 Relationship between seaworthy density and Reynolds number for given navigation speed

由图 12 可知, 当船舶航行速度一定、浮泥密度相同时, 有效雷诺数 Re 随浮泥层厚度增加而增大。具体而言, 航行速度为 2 m/s 时, 浮泥层厚度在 0.5~1.5 m, 适航密度为 1 250~1 325 kg/m³; 航行速度为 4 m/s 时, 适航密度可放宽为 1 325~1 375 kg/m³。

对于滨海港而言, 在 2~4 m/s 的航行速度下, 适航密度为 1 250~1 375 kg/m³。考虑到港口管理需求, 当重载大船采用较低的航行速度(1~2 m/s)时, 适航密度为 1 200~1 250 kg/m³ 较为稳妥。这表明航道和港池的适航密度可以有所不同, 航行速度较大的航道可充分利用浮泥作为适航水深。这些适航密度值是滨海港浮泥在不同条件下最大可利用的密度, 实际应用中为确保航行安全, 应适当降低。

4 结论

1) 通过对浮泥厚度以及浮泥粒度分布分析得出, 港区浮泥主要分布在进港航道向港池内部的转角段和码头前沿, 浮泥中值粒径多为 0.006~0.008 mm, 平均中值粒径为 0.006 8 mm, 符合规范中利用适航水深的条件。

2) 浮泥流变特性试验反映, 屈服应力与密度曲线、黏度与密度曲线关系与三次多项式较为吻合。各泥样屈服应力与黏滞系数随密度的增大而增大, 当浮泥密度小于 1 200 kg/m³ 时, 滨海港浮泥的屈服应力与黏滞系数变化不大, 当密度继续增加时, 屈服应力与黏滞系数有明显上升趋势。

3) 结合浮泥黏粒含量与适航密度关系、流变特性试验、层流-紊流流态转变理论以及参照国内外类似港口的适航密度标准值, 从经济效益和提高船舶航行安全性考虑, 得出滨海港的适航浮泥密度为 1 200~1 240 kg/m³。

参考文献:

- [1] 刘洁, 周鹏, 孟彩侠. 浮泥特性及输移规律综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(10): 1-11.
LIU J, ZHOU P, MENG C X. Summary on characteristics and transport laws of fluid mud[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(natural science), 2023, 42(10): 1-11.
- [2] 尹则高, 曹先伟. 航道工程中的浮泥研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(3): 92-94.
YIN Z G, CAO X W. Review of fluid mud research in navigation project[J]. Journal of water resources & water engineering, 2010, 21(3): 92-94.
- [3] MCANALLY W H, KIRBY R, HODGE S H, et al. Nautical depth for US navigable waterways: a review[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2016, 142(2): 04015014.
- [4] 庞启秀, 杨树森, 杨华, 等. 淤泥质港口适航水深技术研究与应用[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 33-39.
PANG Q X, YANG S S, YANG H, et al. Research and application of the technique of nautical depth in muddy harbors [J]. Hydro-science and engineering, 2010 (3): 33-39.
- [5] KERKAERT P, MALHERBE B, BASTIN A. Navigation in muddy areas: the Zeebrugge experience [J]. PIANC quarterly bulletin, 1985, 59: 127-135.
- [6] 陈晓峰, 黄建维, 刘建军. 汕头港外航道适航水深的研究和运用[J]. 海洋工程, 2002(4): 26-31.
CHEN X F, HUANG J W, LIU J J. Investigation and utilization of the nautical depth of the outer navigation channel of Shantou Harbour [J]. Ocean engineering, 2002(4): 26-31.
- [7] LI W, LI M, ZHANG X, et al. Characteristics of fluid mud in the Yangtze Estuary: storm, tide, and slope-triggered sediment dynamics and effects[J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2023, 281: 108194.

- [8] 钟维林,温春鹏. 神华黄骅港内航道及港池适航水深应用可行性研究[J]. 水运工程, 2020(8): 42-47.
ZHONG W L, WEN C P. Feasibility study on navigable depth in harbor basin and inner channel of Shenhua Huanghua Port [J]. Port & waterway engineering, 2020(8): 42-47.
- [9] FERKET B, HEREDIA G M, ROCABADO I, et al. Assessment of siltation processes and implementation of nautical depth in the Port of Cochin, India [C]//Central Dredging Association. Proceedings of CEDA Dredging Days. Delft: CEDA, 2017: 1-13.
- [10] 李孟国,韩志远,许婷,等. 伶仃洋港口航道泥沙问题研究[J]. 水运工程, 2021(9): 1-8.
LI M G, HAN Z Y, XU T, et al. Study on sediment problems of harbors and channels in Lingdingyang Bay [J]. Port & waterway engineering, 2021 (9): 1-8.
- [11] 麻考,许春阳,陈永平,等. 不同级配组成对泥沙流变特性影响实验研究[J]. 泥沙研究, 2024, 49(2): 25-32.
MA K, XU C Y, CHEN Y P, et al. Experimental study on the influence of silt content on sediment rheological properties [J]. Journal of sediment research, 2024, 49(2): 25-32.
- [12] 陈沁泽,王宪业,赵中豪,等. 粒度与含水率对泥沙流变特性影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(6): 58-64.
CHEN Q Z, WANG X Y, ZHAO Z H, et al. Experimental study on the influence of particle size and water content on sediment rheological properties [J]. Journal of sediment research, 2021, 46(6): 58-64.
- [13] 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.
LIU X L, CHEN A D, ZHANG H, et al. Rheological characteristics and its influencing factors of dense cohesive sediments in the Huanghe River subaqueous delta [J]. Acta oceanologica sinica, 2021, 43(5): 127-134.
- [14] SHAKEEL A, KIRICHEK A, CHASSAGNE C. Rheological analysis of mud from Port of Hamburg, Germany [J]. Journal of soils and sediments, 2020, 20: 2553-2562.
- [15] SHAKEEL A, CHASSAGNE C, BORNHOLDT J, et al. From fundamentals to implementation of yield stress for nautical bottom: case study of the Port of Hamburg [J]. Ocean engineering, 2022, 266: 112772.
- [16] SAMSAMI F, HAGHSHEENAS S A, SOLTANPOUR M. Physical and rheological characteristics of sediment for nautical depth assessment in bushehr port and its access channel [J]. Water, 2022, 14(24): 14244116.
- [17] 金镠,虞志英,何青,等. 淤泥质港口航道适航密度确定方法的改进[J]. 水运工程, 2013(2): 91-94, 106.
JIN L, YU Z Y, HE Q, et al. Improvement of method for determining nautical density in muddy harbor [J]. Port & waterway engineering, 2013(2): 91-94, 106.
- [18] 叶建林,吕小波,庞启秀. 连云港港适航淤泥重度取值研究[J]. 水运工程, 2015(9): 35-41.
YE J L, LYU X B, PANG Q X. Research on Lianyungang port nautical specific weight [J]. Port & waterway engineering, 2015(9): 35-41.
- [19] 淤泥质海港适航水深应用技术规范: JTJ/T 325—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Technical specifications of nautical depth applied to muddy harbour: JTJ/T 325-2006 [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [20] KESSEL T, KRANENBURG C. Gravity current of fluid mud on sloping bed [J]. Journal of hydraulic engineering, 1996, 122(12): 710-717.

(本文编辑 王璁)