



连云港港适航淤泥重度取值研究

叶建林¹, 吕小波¹, 庞启秀²

(1. 连云港港口集团有限公司, 江苏 连云港 222042; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 适航淤泥重度的取值是港口适航资源与适航水深应用技术的^{关键}。以连云港港为例, 通过对连云港港底质淤泥进行现场采样分析, 分别开展了淤泥流变性试验、船舶模型阻力试验与层流-紊流流态转换理论分析, 对于适航资源应用最重要的参数——适航淤泥重度的取值进行分析总结, 得出连云港港适航淤泥重度的取值结果, 并提出了取值建议。

关键词: 适航资源; 淤泥重度; 连云港港

中图分类号: U 612. 3 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)09-0035-07

Research on Lianyungang port nautical specific weight

YE Jian-lin¹, LYU Xiao-bo¹, PANG Qi-xiu²

(1. Lianyungang Port Group Co., Ltd., Lianyungang 222042, China;
2. Scientific Research Institute of Tianjin Port and Waterway Engineering of Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Nautical silt specific weight is the key for both nautical resources and nautical depth. Taking Lianyungang port for example, the Lianyungang port sediment silt-site sampling and analysis are carried out. The mud rheology test, resistance test ship models and laminar-turbulent flow pattern changing theory, and nautical specific weight, which is the most important parameter for nautical resources, are analyzed . The results of Lianyungang port nautical specific weight are obtained and recommended values are proposed.

Keywords: nautical resources; silt specific weight; Lianyungang port

适航资源是将海底水域部分表层浮泥作为水深加以利用, 对于降低淤泥质港口疏浚量、减少维护费用具有重要的意义, 适航资源的合理应用对于港口的发展具有重要的作用。通过对连云港港局部港区和航道泥沙底质取样及回淤层泥沙的水力特性试验分析得出: 连云港港为淤泥质港口, 回淤泥沙颗粒很细, 平均中值粒径 $\bar{D}_{50}$ 约为 0. 0043 mm, 淤积物中的黏土含量为 50% 左右; 泥沙起动试验结果表明泥沙的起动流速(垂线平均)为 20 cm/s 时泥沙在水槽底部处于轻微起动状态; 随着水流速度进一步增大, 泥沙起动量迅速增多, 当垂线平均流速为 35 cm/s 时泥沙处于中等强度运动状态, 即水槽底部各处平均粒径以下的泥沙都在运动; 当垂线平均流速为 55 cm/s 时, 泥沙几乎完全起动、

悬扬, 处于普遍运动状态; 连云港区泥沙颗粒组成及水动力试验结果表明其已具备适航资源(浮泥形成)产生的条件^[1-2]。适航淤泥重度的取值是适航资源应用的前提, 只有明确了适航淤泥重度, 才能有标准去判断多少重度的浮泥可作为适航资源应用。依据《淤泥质海港适航水深应用技术规范》^[3]要求, 适航淤泥重度取值宜采用淤泥流变性试验与船模阻力试验方法来确定, 但上述这两种研究方式受主观因素影响大, 需经验判断, 因此本文将在淤泥流变性试验和船舶模型阻力试验基础上, 采用层流-紊流流态转换法理论分析连云港区适航淤泥重度, 同时结合国内沿海港口的适航淤泥重度取值与其泥沙平均中值粒径 $\bar{D}_{50}$ 关系对比进一步研究确定。

收稿日期: 2014-12-12
作者简介: 叶建林 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程建设及管理。

1 流变试验分析适航淤泥重度取值

港口航道、港池中的淤泥有不同的物理、力学、流变等工程性质，不同的研究领域应选用最具代表性的参数来分析淤泥的基本性质与变化规律。适航水深是研究船舶底部与淤泥层的作用（剪切或扰动），所以各国的学者和工程师多用淤泥的流变参数如淤泥的黏性、应力等来研究适航水深问题^[4-5]。而这些流变参数与淤泥的粒径、重度、黏性土含量、含水量（或含沙量）及其环境中所含的离子种类与数量有关^[6]。要合理确定连云港的适航淤泥重度标准，首先需要通过淤泥流变试验研究分析。

1.1 试验过程

淤泥流变性试验设备为 R/S-cc 型流变仪，该仪器通过一个经校验过的铍-铜合金的弹簧带动一个转子在液体中持续旋转，旋转扭矩传感器测得弹簧的扭变程度即扭矩，它与浸入样品中的转子被黏性拖拉形成的阻力成比例，扭矩与液体的黏度成正比。流变仪采用液晶显示，显示信息包括黏度、温度、剪切应力/剪切率、扭矩、转子号、转速以及程序运行跟踪等。其测量的数字信号输出接口则可以用于连接电脑等外围数据处理系统，同时还配备了一套数据处理软件，可计算并显示某些关系曲线。

采用现场取样分别对连云港港庙岭作业区、老港区的淤泥沙配制了 11 种不同重度的淤泥，分别为 10.2、10.8、11.2、11.7、11.9、12.2、12.3、12.5、12.7、13.0、13.5 kN/m³，测定各重度淤泥在不同剪切率条件下的剪应力和黏度，试验温度约为 16 ℃。

1.2 试验结果

1.2.1 剪应力与剪切率的关系

利用试验所测定的数据绘制淤泥剪应力与剪切率关系（图 1）。试验结果表明：随着淤泥重度的增大，相同剪切率下的剪应力也越来越大，而且这个规律越加明显，也就是说重度对剪应力的影响是非线性的，淤泥重度越大，其影响也越大；各重度淤泥对应的剪应力与剪切率关系基本一致，均表现出剪应力随剪切率的增大而逐渐增大的规律。

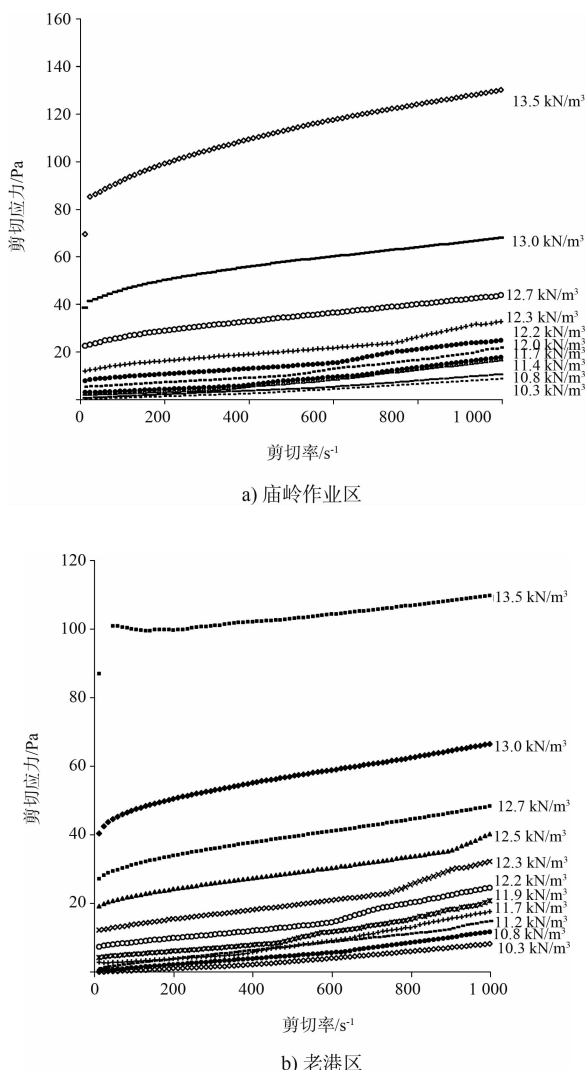


图 1 淤泥的剪应力与剪切率关系

1.2.2 剪应力与重度的关系

为了更清晰反映剪应力与重度的关系，除了采用屈服应力外，将各剪切率对应的剪应力与重度的关系曲线图分开绘制。无论是老港区的淤泥流变试验结果，还是庙岭作业区的结果，均表现出和屈服应力与淤泥重度相同的变化规律，即在淤泥重度较小时，剪应力变化均较缓慢，当淤泥重度到某一临界值，剪应力随重度的增加而迅速增加。根据国内外众多使用适航水深技术港口的有关经验，这个临界重度可作为适航水深下界面淤泥的重度标准，依图 2 可得出，老港区淤泥的临界重度为 12.2 kN/m³左右，庙岭作业区回淤泥沙剪应力随重度的变化曲线形状基本与老港区的相同，临界重度也为 12.2 kN/m³左右。

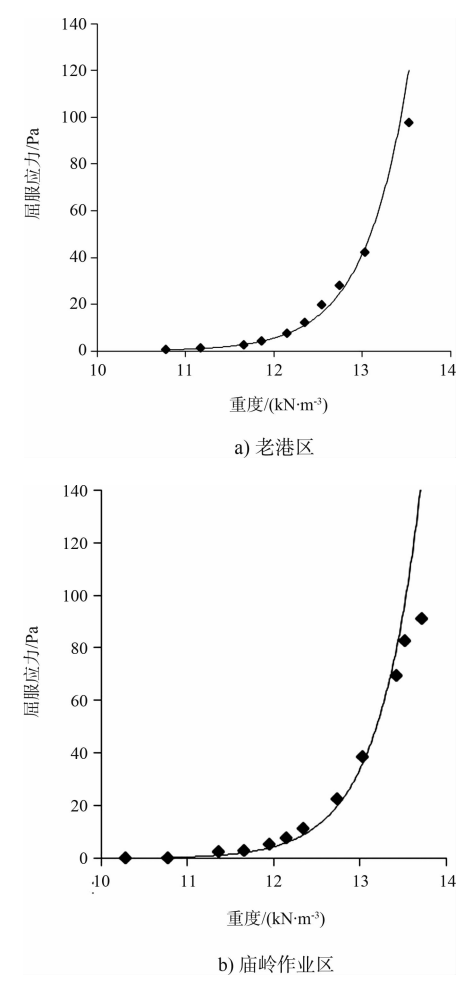


图 2 屈服应力与淤泥重度的关系

1.3 适航淤泥重度取值初步分析

国内外学者通过研究, 针对黏性泥沙建立了各种流变模型, 这些模型的适用性与泥沙的物理性质 (如密度、矿物组成及颗粒级配、盐度和温度等) 相关, 大量研究成果表明, 宾汉模型更适用于浮泥, 而且我国河口海岸的黏性泥沙, 如天津港、长江口和黄河口泥都具有明显的屈服极限^[7-10], 研究连云港区适航淤泥重度的流变特性, 也可采用宾汉模型得出屈服应力。宾汉 (Bingham) 模型本构方程为:

$$\tau = \tau_B + \mu \dot{\gamma}$$
 (1)

式中: $\tau > \tau_B$; τ_B 为宾汉屈服应力 (Pa); μ 为浮泥的黏滞系数 (Pa·s)。利用公式(1), 从图 1 中淤泥重度对应的剪切应力与剪切率的关系, 进而得出各淤泥的宾汉屈服应力。由图 2 可知, 当泥沙重度较小时, 随重度变化, 屈服应力并无明显

变化, 但当泥沙重度增加到一定数值时, 重度再增加, 屈服应力则迅速增加。按照规范要求取对应的淤泥重度与屈服应力关系曲线上曲率变化比较明显的起始点对应的淤泥重度作为适航淤泥重度值, 可得出淤泥的临界重度值约 12.2 kN/m³。

2 船模阻力试验分析适航淤泥重度取值

通过实际船舶操作确定适航淤泥重度所需费用很大, 必须在特定的环境下, 由港口方、船公司、海事、引航等相关单位配合, 因此实际操纵船舶试验所需经费高且存在安全风险。测定船舶模型在淤泥模拟条件下的运动及其所受阻力的变化状况, 是一种直观有效的试验方法, 是合理确定适航淤泥度的重要手段。

2.1 试验过程

船模阻力试验设备由船模、动力系统、泥浆搅拌机、测力系统及数据处理软件等构成 (图 3)。试验时首先配制某一重度的泥样, 并借助泥浆搅拌机进行搅拌, 然后对放置在泥样中的船模进行配载使之达到预定的“吃泥深度”, 再按不同级船速进行试验。当该重度淤泥的试验完成后, 再向淤泥中加定量的清水配制成更小重度的泥样, 即试验从大重度淤泥开始, 直至清水试验。

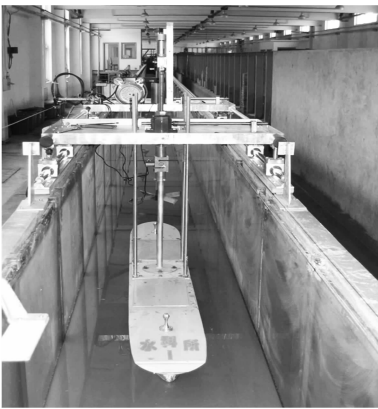


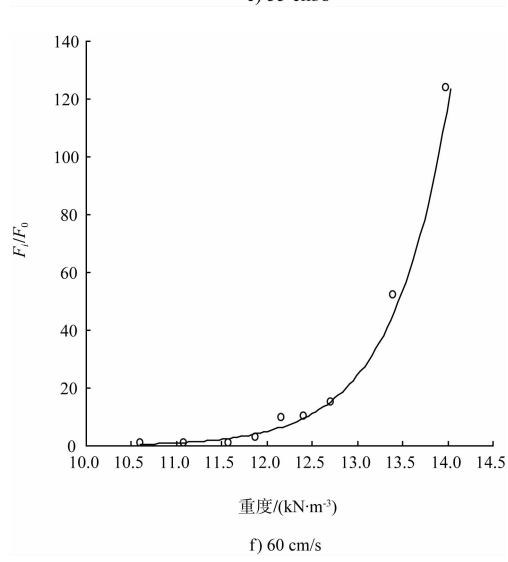
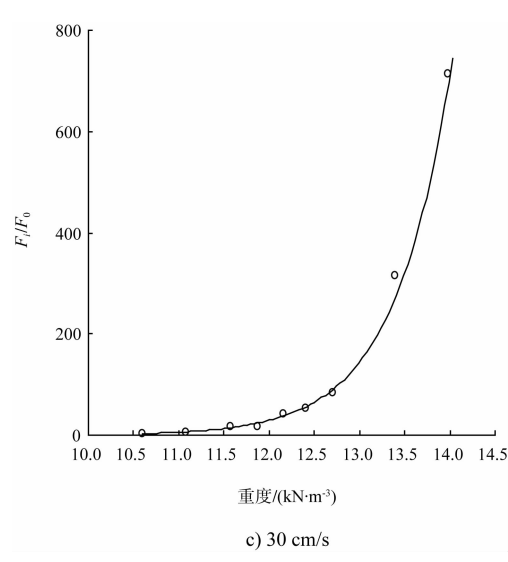
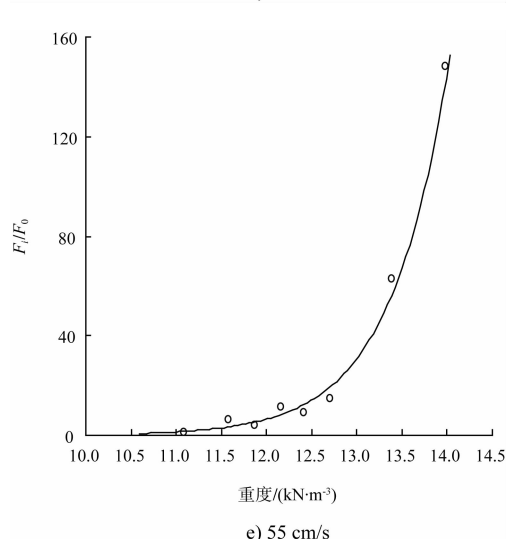
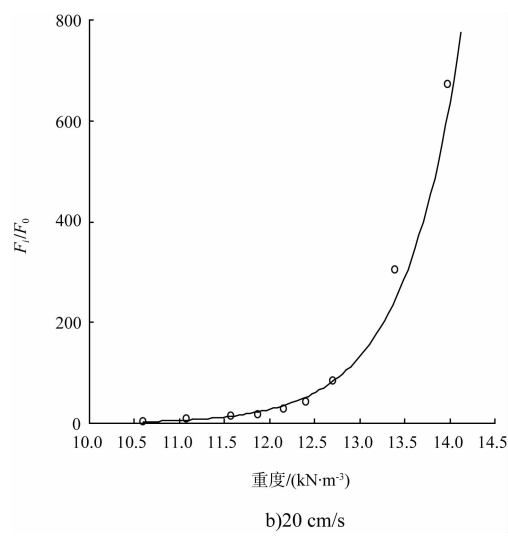
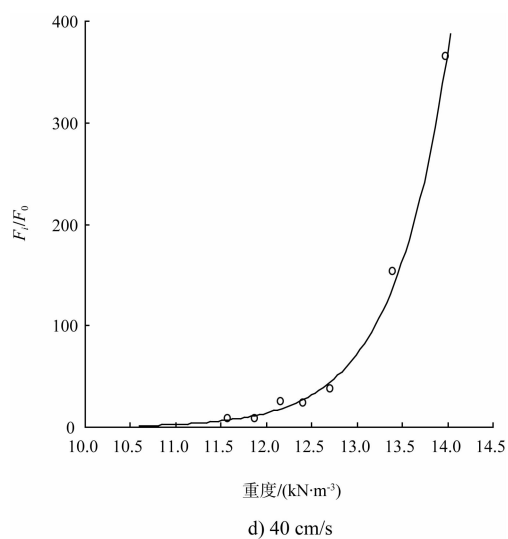
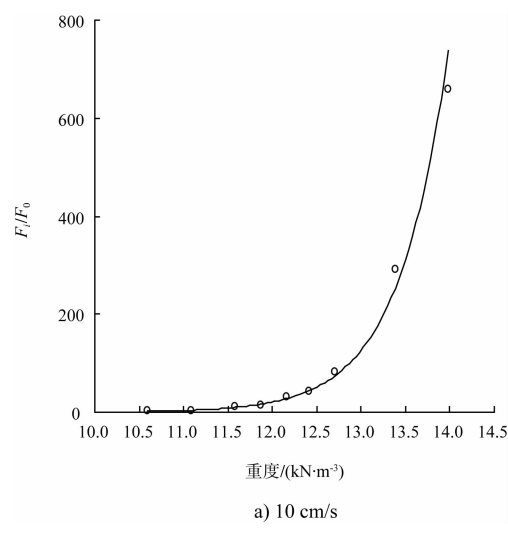
图 3 船模阻力试验设备

通过对连云港港区的现场取样, 试验测量了在 9 种不同淤泥重度下船模以 8 种速度运行时受到的阻力。淤泥重度分别为 10.6、11.1、11.6、11.9、12.2、12.5、12.8、13.4、14.0 kN/m³, 船

模速度分别为 10、20、30、40、55、60、70、80 cm/s，试验温度与流变试验时的温度基本相同，约为 16 ℃，吃泥深度为 5.0 cm。

试验测量了船模在不同重度的淤泥中以不

同船速运行时受到的阻力 F_i ，并测量了船模以相同吃水深度在清水中运行时的阻力 F_0 ，然后计算比值 F_i/F_0 ，并绘制其与重度的关系曲线（图 4）。



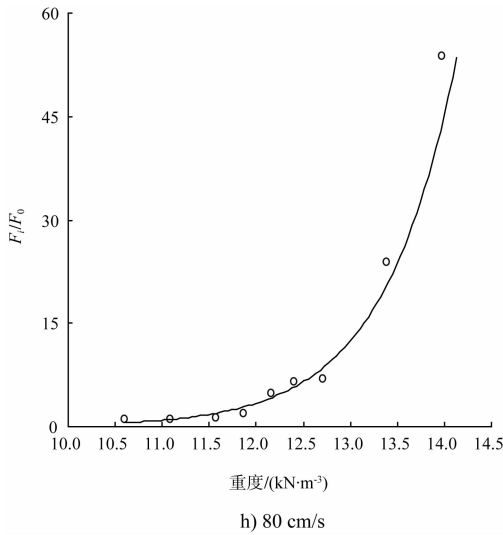
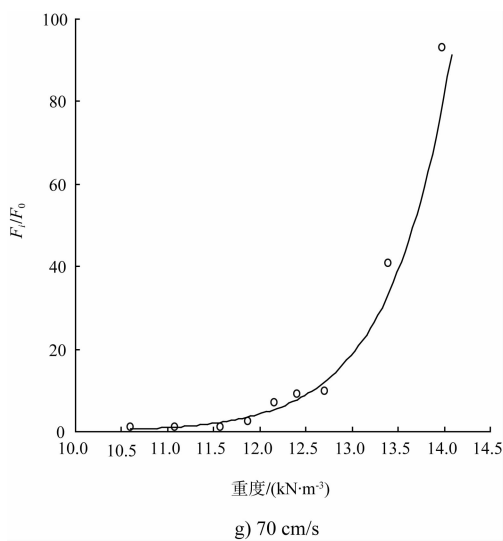


图 4 不同船模速度时 F_i/F_0 与重度的关系曲线

2.2 试验结果分析

将各重度淤泥对应的船阻力和船速度关系绘制于同一幅图中（图 5），从图 5 分析得出船模阻力不仅随淤泥重度的增加而增加，而且还表现出航行在同一重度的淤泥中的船所受阻力随船速度的增大而增加的规律，这与 1.2 节淤泥流变性试验所得出的剪应力随剪切速度的增加而增加的结论一致。从船模阻力试验可以看出，无论船模以何种速度运动，在淤泥重度较小时，相对阻力 F_i/F_0 的变化都很缓慢，当淤泥重度达到某一临界值后， F_i/F_0 随重度的增大而迅速的增大，查图可得到临界重度值变化范围为 12.0 ~ 12.4 kN/m³。

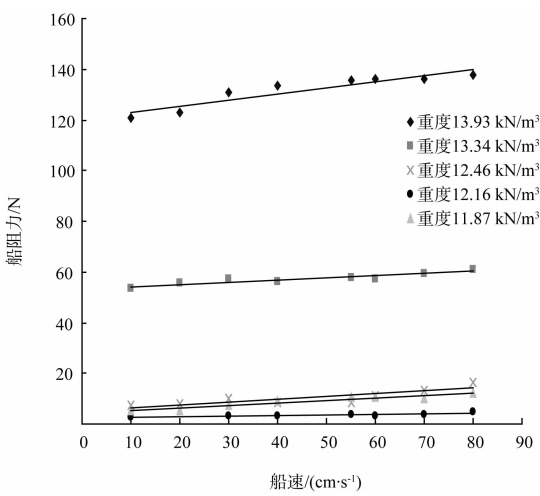


图 5 船阻力与船速度的关系

3 层流-紊流流态转换法分析适航淤泥重度取值

虽然众多淤泥质港口都是依据以上“拐点法”确定适航淤泥重度值并成功应用，但是屈服应力与浮泥重度之间的关系符合指数曲线，即实际上并不存在极值、拐点等转折点。金镠等^[11]提出，船舶在浮泥层中航行时，船体作为固体边壁，其附面（边界层）切应力会带动附近浮泥产生剪切流动，这一物理过程与浮泥在缓坡上的重力流相似，因此可以适用层流-紊流流态转换的判据即浮泥有效雷诺数 $Re = 2\ 000 \sim 3\ 000$ 来确定适航密度，这一判据也体现了船舶在浮泥层中航行时阻力变化的特征。

浮泥为非牛顿流体，只能在重力分量引起的切应力超过浮泥层抗剪强度时沿缓坡运移。Van Kessel等^[12]对缓坡上的浮泥重力流进行了系统的试验研究，指出缓坡上的浮泥流动可以有层流和紊流两种流态。前者为高浓度时的流态，可模态化为宾汉流体；后者为相对低浓度时的流态，此时有与上部水流的交换。层流到紊流的转变条件用有效雷诺数 Re 为：

$$\frac{1}{Re} = \frac{1}{R_\mu} + \frac{1}{R_\tau} \tag{2}$$

式中： R_μ 和 R_τ 分别取决于宾汉黏滞性和宾汉屈服应力的雷诺数，分别表示为：

$$R_\mu = \frac{4\bar{\rho}UH}{\mu_B} \tag{3}$$

$$R_{\tau} = \frac{8\bar{\rho}U^2}{\tau_B} \tag{4}$$

式中： $\bar{\rho}$ 为浮泥层平均密度； U 为浮泥层运移速度； H 为浮泥层厚度。Van Kessel 提出层流-紊流转变的有效雷诺数 2 000 ~ 3 000。

船体的一部分在浮泥层中运动，船体边壁处的流体切应力必然超过浮泥的抗剪强度，从而带动船体周边的部分浮泥一起运移，这一物理过程与缓坡上的浮泥重力流相似。在不同的浮泥重度、浮泥层厚度以及航行速度等条件下，船体引起的浮泥运动可以是层流，也可以是紊流，在浮泥为高重度时，往往出现层流，且阻力系数较大；相反，浮泥重度较低时，可能为紊流，且阻力系数较低。因此，可以把与层流-紊流转换时的有效雷诺数相对应的浮泥重度定义为适航重度。1) 在船行速度很低的情况下，船体周边浮泥的流态基本为层流，此时可以利用作为通航水深的浮泥层厚度很小。在船行速度超过 1 kn 时，在低重度条件下为紊流状态，随着重度增大，浮泥流态从紊流向层流转变。2) 作为船体周边浮泥流态转换的指标，有效雷诺数 Re 取 3 000 或 2 000，对适航重度的确定差别不大。3) 对同样重度的浮泥，代表层流-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，也随着浮泥层厚度的增大而增大。

根据式(2) ~ (4) 以及前面流变试验的结果计算得出在层流-紊流转换条件 $Re = 3\ 000$ 和 $2\ 000$ 、浮泥层厚度为 50 cm 时不同航行速度相对应的适航重度 (图 6)。通常在进出港船航行速度在 4 ~ 8 kn (即 2 ~ 4 m/s) 的情况下，适航淤泥重度分别为 12.4 ~ 13.2 kN/m³ ($Re = 3\ 000$) 和 12.6 ~ 13.4 kN/m³ ($Re = 2\ 000$)。从港口管理角度考虑，吃水较深的重载大船利用适航水深航行时，有时也会采用较小航速 (2 ~ 4 kn)，因此适航淤泥重度值可取 11.8 ~ 12.4 kN/m³。

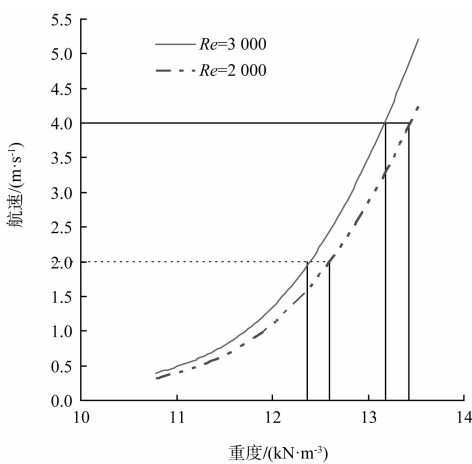


图 6 船舶吃泥深度为 0.5 m 时适航重度与航速的关系

4 连云港港适航淤泥重度取值分析

国内沿海港口的适航淤泥重度取值范围与其淤泥泥沙特性有关，它们的共同特点是泥沙的平均中值粒径 $\bar{D}_{50}$ 很小，黏土 (粒径 < 0.004 mm) 含量很高，适航淤泥重度取值相似。例如天津港航道泥沙的平均中值粒径 $\bar{D}_{50}$ 为 0.003 8 mm，黏土含量为 52%，适航淤泥重度取值 12.7 kN/m³；国华台山电厂煤港泥沙的平均中值粒径 $\bar{D}_{50}$ 为 0.004 8 mm，黏土含量为 46%，适航淤泥重度取值 12.3 kN/m³；广州港南沙港区泥沙的平均中值粒径 $\bar{D}_{50}$ 为 0.005 2 mm，黏土含量为 43%，适航淤泥重度取值 12.3 kN/m³；连云港港平均泥沙中值粒径 $\bar{D}_{50}$ 为 0.004 3 mm，黏土含量在 50% 左右，可推算得出连云港港适航淤泥重度取值范围与上述值相差不大。另外，国外淤泥重度取值范围为：比利时 11.3 ~ 12.3 kN/m³，德国 12.0 ~ 12.2 kN/m³。对于连云港港适航淤泥重度取值，除上述 3 种方法外，参照国内外类似港口的适航淤泥重度标准值，表 1 对比分析得出：连云港港的适航淤泥重度取值范围为 12.0 ~ 12.4 kN/m³ 较适宜，从经济效益因素和提高船舶航行安全性等方面在应用中适当调整，建议在船舶生产实践操作中进一步优化修正。

表 1 适航淤泥重度值分析对比		
分析方法	适航淤泥重度值/ (kN·m ⁻¹)	特点
流变试验宾汉模型分析	12.2 左右	人为性较大, 需经验判断
船模阻力实验分析	12.0 ~ 12.4	船舶模型模拟淤泥中的运动, 直观
层流-紊流流态转换法	11.8 ~ 12.4	浮泥有效雷诺数 <i>Re</i> 理论判断

注: 从经济效益和提高生产船舶航行安全性考虑, 连云港区适航淤泥重度取值范围在 12.0 ~ 12.4 kN/m³ 较合适, 同时建议在船舶实践操作中进一步优化修正。

5 结语

1) 通过淤泥流变性试验, 测定了连云港港庙岭作业区与老港区多种淤泥重度值在相应剪切率条件下的剪应力与黏度, 并用宾汉模型研究连云港港适航淤泥重度的流变特性, 根据淤泥重度与屈服应力关系曲线, 分析得出适航淤泥重度值在 12.2 kN/m³ 左右。

2) 通过船模阻力试验, 测定了船舶模型以不同船速在各种重度的淤泥中运行时受到的阻力, 并将其与在清水中所测阻力作比值, 得到连云港港适航淤泥重度取值变化范围为 12.0 ~ 12.4 kN/m³。

3) 对层流-紊流流态转换法进行理论分析, 通过浮泥有效雷诺数取 2 000 ~ 3 000 来确定适航重度, 得出港口适航淤泥重度取值范围为 11.8 ~ 12.4 kN/m³。

4) 流变性试验是研究适航重度最常用的方式, 事实上由于存在人为因素其拐点值并不明确, 需辅以经验判断; 船舶模型在淤泥中航行的阻力试验结果直观、易懂, 但其缺乏船舶实践操作数据来辅以验证; 层流-紊流流态转换法属理论分析, 浮泥有效雷诺数 *Re* 需取一定范围来界定。基于上述 3 种方法, 参照国内外类似港口的适航重度标准值, 从经济效益和提高船舶航行安全性考虑, 分析得出连云港港适航淤泥重度取值范围为 12.0 ~ 12.4 kN/m³

参考文献:

[1] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.

[2] 陈学良. 连云港浮泥测试及“适航深度”的确定[J]. 水运工程, 1998(8): 28-31.

[3] JTJ 325—2006 淤泥质海港适航水深应用技术规范[S].

[4] 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.

[5] Bai Y C, Ng C O, Shen H T, et al. Rheological properties and incipient motion of cohesive sediment in the Haihe estuary of China[J]. China Ocean Engineering, 2002, 16: 483-498.

[6] Maa P Y, Mehta A J. Soft mud properties: Voigt model[J]. Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1988, 114: 765-770.

[7] 庞启秀. 浮泥形成和运动特性及其应对措施研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.

[8] 钱平生. 天津港适航水深下界面淤泥容重值确定与适航水深测量[J]. 海洋测绘, 2002(3): 35-39.

[9] Jiang F, Mehta A J. Mudbanks of the southwest coast of IndiaIV: Mud viscoelastic properties[J]. Journal of Coastal Research, 1995, 11(3): 918-926.

[10] Huang Zhenhua, Aode Huhe. Laboratory study of rheological properties of mudflows in Hangzhou bay, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24: 410-424.

[11] 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.

[12] Kessel T van, Kranenburg C. Gravity current of fluid mud on sloping bed [J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 1996, 122(12): 710-717.