



淤泥质港口航道适航密度确定方法的改进

金 镠¹, 虞志英², 何 青², 赵 捷²

(1. 交通部长江口航道管理局, 上海 200003; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 根据浮泥层中船舶航行时船体边壁带动附近浮泥作剪切流动的物理过程与浮泥在缓坡上的重力流之间的相似性, 提出以船体边壁附近浮泥层流态转换条件来定义适航密度, 以避免现行方法的不确定性, 并提出了相应的计算方法。计算表明, 适航密度与航行速度和浮泥层厚度有关。在通常航速和0.5~1.5 m浮泥层厚度条件下连云港航道的适航密度约为1.25~1.35 g/cm³。

关键词: 适航密度; 浮泥; 淤泥质港口

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)02-0145-05

Improvement of method for determining nautical density in muddy harbor

JIN Liu¹, YU Zhi-ying², HE Qing², ZHAO Jie²

(1. Yangtze River Navigation Administration Bureau, MOT, Shanghai 200003, China;

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research of East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: A new approach for defining the nautical density using the flow pattern critical conditions of fluid mud around the walls of the ships is proposed based on the similarity between the form of shear flow as ships sail in the fluid mud layer and the gravity flow of fluid mud on the gentle slope. The new methodology can avoid the uncertainty of current ones. Relevant calculation method is provided. It is shown that the nautical density is related to the cruise speed and the thickness of the fluid mud layer. Under the general cruise speed and 0.5~1.5 m thick layer condition, the nautical density in the channel of the Lianyung port is about 1.25~1.35 g/cm³.

Keywords: nautical density; fluid mud; muddy harbor

近床面出现高浓度悬沙层和浮泥, 是淤泥质潮汐河口、海岸黏性细颗粒泥沙特有的运动形态和物理过程, 即在潮周期中的潮流加速阶段, 床面泥沙大量悬浮, 而在憩流前后的一段时间内, 由于泥沙的絮凝沉降、制约沉降、浮力以及层化引起的紊动衰减等的综合作用, 近床面会形成有相当厚度的高浓度悬沙层, 其底层有可能密实成为具有一定结构强度的非牛顿流体——浮泥^[1]。这一过程如发生在较深的人工挖槽例(如港池和航道)内, 则浮泥因为较长的生成和积聚时间而具有较大的厚度并能长时间维持和逐步固结成为碍航淤积。在成为碍航淤积之前的浮泥层, 可以

允许船舶航行而成为通航水深的一部分, 称为适航水深。可以允许船舶航行的最大浮泥密度, 称为适航密度。

自20世纪70年代荷兰鹿特丹港和比利时泽布吕赫港首先提出适航水深和适航密度的概念并建立利用适航水深的一套实用化方法以来, 国内外港航工程界均沿袭上述欧洲二港的方法, 即试验测定浮泥的宾汉屈服应力 τ_B 及宾汉黏滞系数 η_B 并与密度 ρ_m 建立关系。依据 τ_B 、 η_B - ρ_m 关系曲线上的最大转折点, 读取相应的密度值作为适航密度。但是, τ_B 或 η_B - ρ_m 曲线为以e为底的指数曲线, 不存在极值和拐点, 凭曲线“看上去”发生转折的位置

收稿日期: 2012-07-06

作者简介: 金镠(1940—), 男, 教授级高级工程师, 从事港口、航道工程的建设管理工作。

确定适航密度就有很大的人为性。

笔者早年在连云港组织并参与了对当地淤泥的流变特性和适航水深的研究^[2-3]。几十年来,国内开展适航水深研究应用的港口很多,积累了大量资料和成功经验,并已完整地概括和体现在我国的港口工程规范中。但确定适航密度的方法至今并无实质性的改进,本文的工作期望对此能有所补益,并进一步对影响适航密度的因素进行定量分析。本文关于改进适航密度确定方法的研究,仍采用当时连云港淤泥流变特性的试验成果。

1 连云港淤泥的流变特性

连云港港口附近西墅淤泥,黏土含量 37%, $d_{50}=9\text{ }\mu\text{m}$ (中、高潮位线处);黏土含量 80%, $d_{50}=2\text{ }\mu\text{m}$ (低潮位线附近)。表层淤泥密度 $\rho=1.51\sim 1.56\text{ t/m}^3$ 。旋转圆筒法流变特性试验中,剪切率的变化范围为 $10^{-3}\sim 10^3\text{ s}^{-1}$,温度 $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验表明,该港淤泥具有宾汉伪塑性体特性,宾汉屈服应力 $\tau_B(\text{Pa})$ 和宾汉动黏系数 $\eta_B(\text{Pa}\cdot\text{s})$ 与淤泥体积密度 C_v 有下列关系:

$$\tau_B=0.499\ 7e^{16.46C_v} \quad (1)$$

$$\eta_B=0.016\ 7e^{20.48C_v} \quad (2)$$

淤泥体积密度 C_v , 定义为单位体积淤泥中土粒体积所占百分比,可表示为

$$C_v = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_m} \quad (3)$$

式中: ρ_m , ρ_w 和 ρ_s 分别为淤泥、水和土颗粒的密度。

宾汉伪塑性体的本构关系为:

$$\begin{cases} \tau = \tau_B & \tau \leq \tau_B \\ \tau = \tau_B + \eta_B \frac{\partial u}{\partial y} & \tau > \tau_B \end{cases} \quad (4)$$

2 浮泥的运动特性

浮泥由近底高浓度悬沙层密实形成。高浓度悬沙层可以由潮流产生,也可以产生于波浪引起的底部沉积物的液化。高浓度悬沙层与浮泥的区别在于前者属牛顿流体,而后者为非牛顿流体。因此,前者可以在潮流和密度梯度驱动下运移(密度流或浑浊流),而后者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

(重力流)。

荷兰 Delft 大学的 Van Kessel 等对缓坡上的浮泥重力流进行了系统的试验研究^[4],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 给出。有效雷诺数 Re 为^[5]:

$$\frac{1}{Re} = \frac{1}{R_\mu} + \frac{1}{R_\tau} \quad (5)$$

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:

$$R_\mu = \frac{4\bar{\rho}UH}{\eta_B} \quad (6)$$

$$R_\tau = \frac{8\bar{\rho}U^2}{\tau_B} \quad (7)$$

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 推荐 Liu 等^[5]提出的层流-紊流转变的有效雷诺数 $Re=2\ 000\sim 3\ 000$ 。Van Kessel 由试验绘出流体阻力系数 C_D 与有效雷诺数 Re 的关系见图 1。

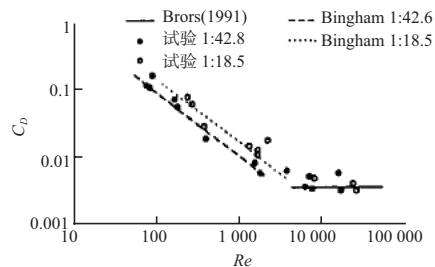


图1 阻力系数 C_D 与有效雷诺数 Re 的关系^[4]

在低雷诺数即层流流态时, C_D 较大。但随 Re 增大而减小; 而转变为紊流状态后, C_D 为常数 (0.003 5)。二者的转变出现在 $Re=2\ 000\sim 3\ 000$ 时, 与 Liu 等^[5]的建议值一致。

3 淤泥沉积物的密实-固结特性

黏性细颗粒泥沙在河口海岸水体中的性状, 最重要的一是其沉降特性, 即在咸水环境下的絮凝沉降和制约沉降, 成为近底高浓度泥沙层和浮泥层形成的直接原因; 二是其密实-固结特性, 由于自重作用下的排水过程通常较为缓慢, 沉积物

密度增长经历较长的过程,成为决定沉积泥沙冲刷及再悬浮特性的重要条件之一。

以连云港淤泥为例,静置条件下的沉降固结试验表明(图2),孔隙比 e 或密度 ρ 的变化可划分为3个阶段:絮凝沉积阶段(图2的Ⅰ阶段),历时1~5 h,孔隙比减小到 $e\approx 9$,密度 ρ 增大到 1.18 t/m^3 左右,此阶段仍为高浓度悬沙层,骨架尚未形成,属牛顿流体;自重固结阶段(图2的Ⅱ阶段),历时5 h~2 d,淤泥骨架形成,产生结构强度,随着超静孔隙水压力逐步消散,有效应力相应增加, e 达到5左右,密度为 1.25 t/m^3 左右;次固结阶段,即图2的Ⅲ阶段, e 的减小和 ρ 的增长十分缓慢,当沉降天数达到100 d以上, e 降至4.3, ρ 增加至 1.30 t/m^3 以上。

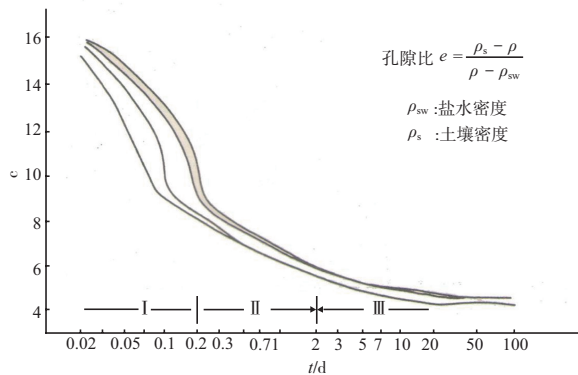


图2 静置泥浆沉降固结试验曲线^[6]

淤泥的密实固结过程反映在空间上,就是密度随深度的变化。连云港上述试验和天然沉积淤泥的取样分析,得到密度的时间变化和垂向变化分别为:

$$\rho_t=400\lg t-150\tag{8}$$
$$\rho_H=400+150\lg H\tag{9}$$

式中: t 为时间(d); H 为厚度(cm); ρ_t 为密度(t/m^3)。

4 适航密度概念的改进和连云港适航密度值的确定

浮泥层自身不会在水流底切力的驱动下运移而只能在斜坡上当重力的切向分量超过浮泥的抗剪强度时才会发生运动,而运动时阻力的大小与浮泥层的流态有关。人工航道和港池,均以某一设计底高程开挖,底坡往往为零,因此浮泥自身没有流动的条件。

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。在不同的浮泥密度、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,在浮泥为高密度时,往往出现层流,且阻力系数较大;相反,浮泥密度较低时,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密度定义为适航密度。

表1为依据式(1)~(3)和式(5)~(7)算得的连云港淤泥的有效雷诺数 Re 。计算中变量为浮泥层平均密度 ρ_m 和航行速度 U ;船舶在浮泥层中的吃水接近于浮泥层厚度,后者只取了一种厚度($H=100\text{ cm}$)。表2为按照式(1)~(3)计算的流变参数 τ_B , η_B 值。

表1 有效雷诺数 Re 计算成果($H=100\text{ cm}$)

$\rho_m/\text{(g}\cdot\text{cm}^{-3}\text{)}$	$U=50\text{ cm/s}$			$U=100\text{ cm/s}$			$U=200\text{ cm/s}$			$U=300\text{ cm/s}$			$U=400\text{ cm/s}$			$U=500\text{ cm/s}$		
	R_μ	R_τ	Re	R_μ	R_τ	Re	R_μ	R_τ	Re	R_μ	R_τ	Re	R_μ	R_τ	Re	R_μ	R_τ	Re
1.05	66 456	2 675	2 572	132 911	10 700	9 903	265 822	42 802	36 866									
1.10	35 144	1 732	1 651	70 287	6 929	6 307	140 575	27 716	23 151									
1.15	17 829	1 084	1 022	35 659	4 336	3 866	71 318	17 342	13 950	106 976	39 020	28 591						
1.20	8 511	653	606	17 021	2 612	2 264	34 042	10 446	7 993	51 083	23 504	16 096						
1.25	3 828	376	342	7 657	1 504	1 257	15 314	6 015	4 319	22 971	13 534	8 516	30 628	24 060	13 745	28 285	37 594	18 968
1.30	1 651	210	186	3 302	840	669	6 603	3 359	2 227	9 905	7 558	4 400	13 206	13 437	6 660	16 508	20 995	9 242
1.35	655	110	95	1 309	442	330	2 619	1 768	1 055	3 928	3 978	1 977	5 238	7 072	3 009	6 547	11 050	4 111
1.40				478	219	150	956	877	457	1433	1 973	830	1 911	3 508	1 237	2 389	5 481	1 664
1.45							321	410	180	481	923	316	642	1 640	461	802	2 563	611
1.50													183	682	144	228	1 066	188

表2 连云港淤泥流变参数值

$\rho_m /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	C_v	$\eta_B /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\tau_B /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)
1.05	0.031 2	0.316	7.85
1.10	0.064 5	0.626	12.70
1.15	0.100 0	1.29	21.22
1.20	0.138 0	2.82	36.76
1.25	0.179 0	6.53	66.50
1.30	0.222 0	15.75	123.8
1.35	0.269 0	41.24	244.3
1.40	0.320 0	117.2	510.8
1.45	0.375 0	361.5	1 131.5
1.50	0.438 0	1314.0	2 813.9

注：计算参数均采用cm,g,s制，1 Pa=1 N/m²=10 g/(cm·s²)。

取层流-紊流转换条件 $Re=3\ 000$ 和 $2\ 000$ ，得浮泥层厚度为100 cm时，不同航行速度所相应的适航密度（图3）。

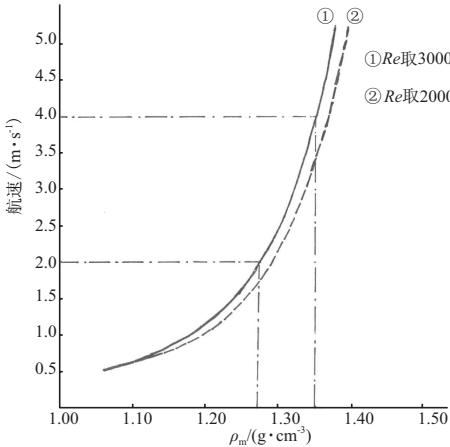


图3 船舶在浮泥层中吃水1 m时的适航密度-航速关系

由表2和图3可知：

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，在低密度条件下为紊流状态，随着密度增大，浮泥流态从紊流向层流转变。

2) 对连云港淤泥而言，在通常进出港船行速度4~8 kn（即2~4 m/s）情况下，适航密度在1.25~1.35 g/cm³。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，确定适航密度1.2~1.25 g/cm³较为稳妥。换言之，航道和港池适航密度的取值可以有所不同，航道内船行速度较

大，对浮泥作为适航水深的利用可以更充分一些。

3) 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，对适航密度的确定差别不大。

进一步分析浮泥层厚度对适航密度的影响。表3为不同浮泥层厚度时有效雷诺数 Re 的部分计算结果。在不同船行速度和浮泥层厚度下， Re 与密度的关系见图4。可知，对同样密度的浮泥，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。取与 $Re=3\ 000$ 相应的密度为适航密度，由图4可见，在4 kn航行速度下，浮泥层厚度为50~150 cm，适航密度从1.27 g/cm³提高到1.30 g/cm³；在8 kn航行速度下，浮泥厚度为50~150 cm，适航密度可以放宽为1.33~1.38 g/cm³。这些适航密度值，可视为连云港淤泥在不同条件下最大可利用的适航密度。实际应用上为确保航行安全，取值要小一些。

表3 不同浮泥层厚度时的有效雷诺数 Re 值(部分计算结果)

$\rho_m /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$U=200\text{ cm/s}$			$U=400\text{ cm/s}$		
	$H=100\text{ cm}$	$H=150\text{ cm}$	$H=50\text{ cm}$	$H=100\text{ cm}$	$H=150\text{ cm}$	$H=50\text{ cm}$
1.15	11 668	13 950	14 923			
1.20	6 473	7 993	8 672			
1.25	3 369	4 319	4 794	9 358	13 475	15 790
1.30	1 665	2 226	2 508	4 427	6 660	6 815
1.35	752	1 055	1 219	1 911	3 009	3 722
1.40	309	457	544	751	1 237	1 522
1.45				268	461	607

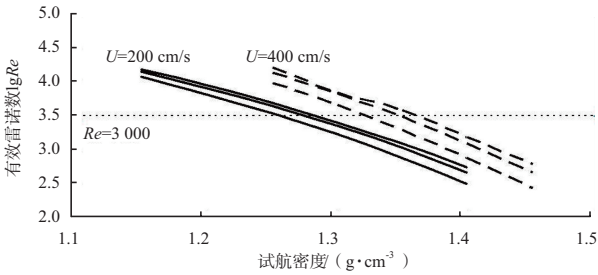


图4 浮泥层厚度-适航密度关系

5 结语

1) 淤泥质河口、海岸潮汐水流中黏性细颗粒泥沙形成的浮泥，属宾汉伪塑性流体，其屈服应力 τ_B 和动黏系数 η_B 与浮泥密度 ρ_m 之间的关系符合以自然对数e为底的指数曲线，不存在极值、拐点等转折点。现行以这类曲线“看上去”的转折来定义适航密度是不确定的，这种不确定性成为适航

水深利用中长期存在的问题。

2) 船舶在浮泥层中航行时, 船体作为固体边界, 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, 因此可以适用后者层流-紊流流态转换的判据即浮泥有效雷诺数 $Re=2\ 000\sim 3\ 000$ 来定义适航密度。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。借助于这一方法, 可避免现行方法的不确定性。

3) 根据连云港淤泥流变特性试验成果, 计算分析不同航行速度, 浮泥密度和浮泥层厚度(船舶在浮泥层中的吃水近似于浮泥层厚度)下的有效雷诺数和适航密度值, 得到适用于航道内通常航行速度(4~8 kn)和浮泥层厚度(50~150 cm)的浮泥层适航密度为 $1.25\sim 1.35\text{ g/cm}^3$; 适用于港池内较低航行速度(2~4 kn)和浮泥层厚度(50~150 cm)的浮泥层适航密度为 $1.20\sim 1.35\text{ g/cm}^3$ 。

参考文献:

- [1] 金鏐, 虞志英, 何青. 滩槽泥沙交换对北槽深水航道回淤影响的分析[J]. 水运工程, 2013(1):101-108.
- [2] 金鏐, 虞志英. 关于淤泥质港口航道适航水深的研究[G]//连云港回淤研究论文集. 南京: 河海大学出版社, 1990.
- [3] 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): 21-25.
- [4] Thijs van Kessel, C Kranenburg. Gravity current of fluid mud on sloping bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 1996, 122(12):710-717.
- [5] Liu K F, Mei C C. Approximate equations for the slow spreading of a thin sheet of Bingham plastic fluid[J]. Phys Fluids, 1990, A2(1): 30-36.
- [6] 张万茜. 黏性淤泥质泥沙起动冲刷实验研究[D]. 南京: 河海大学, 1984.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

我国有众多大中型的淤泥质海港, 其中一些港口泥沙回淤严重, 维护疏浚量大, 甚至某些港口在台风或寒潮作用下还会产生骤淤现象, 给船舶的正常通航带来困难。从港航管理维护和节约资源的角度而言, 利用适航水深具有现实的经济价值。

尽管经数十年的研究应用, 适航水深应用的难点仍然是适航淤泥密度的确定, 多停留在初期的研究总体思路, 即: 依据浮泥试验建立的宾汉屈服应力 τ_B 、宾汉黏滞系数 η_B -密度 ρ_m 关系曲线, 量取最大转折点相应的密度值作为适航密度。

该文以连云港浮泥为例, 根据其流变特性, 把适航密度定义为: 因船舶与浮泥相对运动, 使其层流-紊流转换时(判别指标: 有效雷诺数)相应的浮泥密度。这种方法改变了现行适航密度的确定方法, 且引入了船舶航行速度的这一影响因素, 更具操作性, 对确定连云港地区以及类似淤泥质港口航道的适航密度具有理论意义和工程应用价值。

徐元

2014年12月

评委简历:



徐元, 博士, 教授级高工, 中交上海航道勘察设计研究院有限公司总工程师。

先后主持上海国际航运中心洋山深水港(一、二、三期)、长江口三期工程减淤工程、长江南京以下12.5 m深水航道工程等重大工程。作为主要获奖人, 多个项目获得国家、省部咨询奖、优秀工程设计奖。国内外发表科技论文二十余篇。拥有已授权专利11项(其中1项发明专利)。曾担任交通运输部《疏浚与吹填工程设计规范》、《航道工程设计规范》副主编、上海市《内河航道工程设计规范》主编及参与多项规范规程的编写工作。