

DOI: 10.11779/CJGE20221361

# 疏浚吹填泥沙静态间歇沉降行为及其稳态宏观评价标准

鲍树峰<sup>1,2</sup>, 董志良<sup>3,4</sup>, 莫海鸿<sup>5</sup>, 周睿博<sup>6</sup>, 张劲文<sup>\*1,2</sup>

(1. 广州交通大学(筹)/广州航海学院土木与工程管理学院, 广东 广州 510725; 2. 广东省近海基础设施绿色建造与智能运维重点实验室, 广东 广州 510725; 3. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 4. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230; 5. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 6. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510220)

**摘要:** 关于疏浚吹填泥沙的静态间歇沉降行为与机理及其稳态宏观评价标准, 目前暂未深入研究。这是当今疏浚吹填泥沙地基采用真空过滤排水固结技术进行处理时无法科学判断最佳启动时间的主要原因之一。鉴于此, 先对疏浚吹填泥沙的静态间歇沉降行为进行理论研究, 建立了颗粒悬浮液的沉降速度与平均孔隙比的理论关系式。然后, 获取典型工程现场的疏浚吹填泥沙, 配制典型浓度试样, 开展静态间歇沉降模型试验研究。研究结果表明: ①黏粒( $d < 0.005$  mm)含量是影响疏浚吹填泥沙静态间歇沉降行为与机理的关键因素之一; ②颗粒通量最大值 $G_{\max}$ 往往出现在试验难以测出的非常低的浓度条件下, 且黏粒含量越高, 越难通过试验方式测得; ③对于黏粒含量为40%~60%的疏浚吹填泥沙, 建议将“平均孔隙比累计变化率为60%~75%”作为静态间歇沉降稳定状态的宏观评价标准。

**关键词:** 疏浚吹填泥沙; 静态间歇沉降行为; 稳态评价标准

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)03-0549-09

**作者简介:** 鲍树峰(1982—), 男, 江西婺源人, 博士研究生, 正高级工程师、教授, 主要从事海洋岩土工程、水利岩土工程、智慧岩土工程等方面的研究工作。E-mail: baoshufeng@gzmtu.edu.cn。

## Static batch settling behaviors of dredged and filled sediment and its steady-state macroscopic evaluation criteria

BAO Shufeng<sup>1,2</sup>, DONG Zhiliang<sup>3,4</sup>, MO Haihong<sup>5</sup>, ZHOU Ruibo<sup>6</sup>, ZHANG Jinwen<sup>\*1,2</sup>

(1. School of Civil & Engineering Management, Guangzhou Jiaotong University /Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Operation & Maintenance for Offshore Infrastructure, Guangzhou 510725, China; 3. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 4. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China; 5. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 6. CCCC FHEC Harbor Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

**Abstract:** The static batch settling behaviors and mechanism of dredged and filled sediment and its steady-state macroscopic evaluation criteria have not been studied in depth yet. This is one of the main reasons why the optimal start-up time cannot be scientifically judged when the dredged and filled sediment foundations are treated by the vacuum filtration drainage consolidation technology today. In view of this, a theoretical study on the static batch settling behaviors of the dredged and filled sediment is conducted, and the theoretical relationship between the settling velocity of particle suspension and the average pore ratio is established. Based on the dredged and filled sediment from typical engineering sites and the configured typical concentration specimens, the experimental researches on the static batch settling model are carried out. The results indicate that: (1) The content of clay particles ( $d < 0.005$  mm) is one of key factors affecting the static batch settling behaviors and mechanism of the dredged and filled sediment. (2) The maximum particle flux  $G_{\max}$  often occurs at very low concentrations that are difficult to measure experimentally. The higher the viscous content, the more difficult it is to measure experimentally the maximum particle flux during static batch settlement. (3) For the dredged sediment whose clay content is within 40% to 60%, the cumulative change rate of the average porosity ratio of 60% to 75% can be taken as the criterion for evaluating the steady state of its batch settling process.

**Key words:** dredged and filled sediment; static intermittent

基金项目: 广东省普通高校创新团队项目(2022KCXTD024); 广东省重点建设学科科研能力提升项目(2022ZDJS091)

收稿日期: 2022-11-04

\*通信作者(E-mail: zjw@gzmtu.edu.cn)

settlement behavior; steady-state evaluation criterion

## 0 引言

疏浚吹填泥沙是江河湖海中原位沉积泥沙经水力重塑后,泥沙颗粒间歇沉降尚未完成、结构极松散、含水率极高、以黏土颗粒( $d < 0.005 \text{ mm}$ )为主的中高浓度颗粒悬浮液<sup>[1-4]</sup>。

对于大规模疏浚吹填泥沙而言,先完成静态间歇沉降再进行真空过滤排水固结是低碳环保型且性价比比较优的处理方法<sup>[5]</sup>。疏浚吹填泥沙沉积固结过程受泥沙混合物初始含水率、密度、吹填厚度、物质组成、水体盐度影响,大致可分为絮状物形成、絮凝沉降以及自重固结 3 个阶段;且孔隙水和颗粒的运动与正常固结过程非常相似,泥沙密度与时间之间存在 4 种独立的对数关系。疏浚吹填泥沙沉积固结结束时的含水率值不是唯一确定的,而是随混合物初始含水率的变化而变化,且黏土颗粒含量较高时,在非常低的有效应力下也存在无数的压缩曲线。部分研究者建立了自重沉积完成后稳定含水率与初始含水率、液限的量化关系,提出了由固-液混合物组成的复杂颗粒体系的沉降势计算公式,并考虑了多因素耦合作用揭示了均匀粒子系统“时间开关”功能的沉降势特征,还考虑了絮凝剂对沉积固结过程的影响,认为经絮凝剂预处理后的沉积模式与未经絮凝剂预处理的相同,但沉积稳定所需的时间减少,而沉积稳定的沉降量则随絮凝剂性质不同而变化<sup>[6-14]</sup>。不难发现,关于疏浚吹填泥沙的静态间歇沉降行为与机理及其稳态宏观评价标准,目前暂未深入研究,这是当今疏浚吹填泥沙地基采用真空过滤排水固结技术进行处理时无法科学判断最佳启动时间的主要原因之一。

鉴于此,本文先对疏浚吹填泥沙的静态间歇沉降行为进行理论研究,然后获取典型工程现场的疏浚吹填泥沙,配置典型浓度试样,开展静水条件下间歇沉降模型试验研究,拟为海洋、水利、矿业等领域的中高浓度固液两相物系进行真空过滤排水固结时的最佳启动时间判断提供科学支撑。

## 1 疏浚吹填泥沙静态间歇沉降行为研究

### 1.1 理论研究

颗粒悬浮液中上层清液与下层沉积物之间出现明显的界面是干涉沉降的重要特征之一<sup>[15]</sup>。其静态间歇沉降过程如图 1 所示,随着颗粒往下沉积,恒定浓度层上移,经  $\Delta t$  时间后,沉积筒底部浓度变为  $C + \Delta C$ ,因此,最高浓度层总是出现在沉积筒底部。

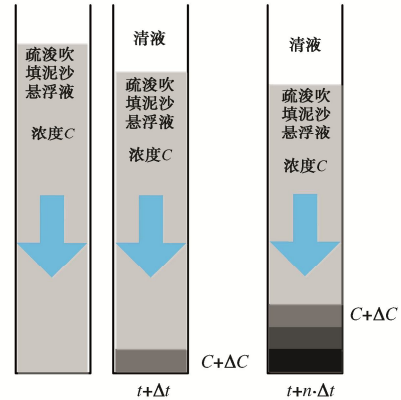


图 1 静态间歇沉降过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of static batch settling process

Richardson 等<sup>[16]</sup>针对 18 种粒径(直径在  $0.002 \sim 7.874 \text{ mm}$ )的均匀球形颗粒悬浮液分别开展了静态沉降试验研究,同时还对两种粒径(直径为  $1.030, 0.510 \text{ mm}$ )组成的颗粒悬浮液开展了同样的研究,然后将颗粒悬浮液的沉降速度与颗粒的沉降速度通过孔隙率  $\varepsilon$  建立了如下的理论关系:

$$U = u_t \varepsilon^n \quad (1)$$

式中:  $U$  为颗粒悬浮液的沉降速度;  $u_t$  为无限流体中颗粒的沉降速度;  $\varepsilon$  为颗粒悬浮液的孔隙率;指数  $n$  为颗粒雷诺数、颗粒直径以及室内模型沉积筒直径的函数。

土力学中常用孔隙比  $e$  或孔隙率  $\varepsilon$  来表征固相中孔隙的含量,两者之间的理论关系如下:

$$\varepsilon = \frac{e}{1+e} \quad (2)$$

则,由式(1),(2)可得

$$U = u_t \left( \frac{e}{1+e} \right)^n \quad (3)$$

因此,对于疏浚吹填泥沙悬浮液而言,根据表 1 中疏浚吹填泥沙的颗粒组成分析结果可知,式(3)同样适用于疏浚吹填泥沙颗粒悬浮液。

Kynch<sup>[15]</sup>假设  $U$  仅是固相浓度  $C$  的函数,建立了间歇沉降的理论,并引入颗粒通量

$$G = UC\rho_s A \quad (4)$$

式中:  $G$  为颗粒通量 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),即单位时间、单位面积内通过横截面的颗粒数量;  $C$  为颗粒悬浮液的浓度(即固相浓度,以体积分率表示);  $A$  为沉积筒横截面积;  $\rho_s$  为颗粒悬浮液的密度。

鉴于此,下面对图 1 所示静态间歇沉降行为进行理论分析。如图 2 所示,考虑介于高度  $h$  和之  $h + dh$  间的单元层,在时间间隔  $\delta t$  内,颗粒在层内的积聚量

可由通量差来描述:

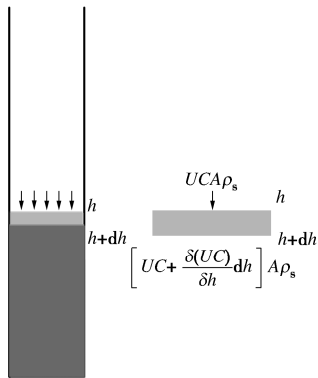


图2 间歇沉降过程中颗粒通量的变化

Fig. 2 Change in particle flux during batch settlement

$$UC\rho_s A - \left[ UC + \frac{\delta(UC)}{\delta h} dh \right] A\rho_s = \frac{\delta C}{\delta t} A\rho_s dh, \quad (5)$$

因此

$$-\frac{\delta(UC)}{\delta h} dh = \frac{\delta C}{\delta t} dh, \quad (6)$$

整理得到

$$-\frac{\delta(UC)}{\delta h} = \frac{\delta C}{\delta t}, \quad (7)$$

式(7)即为沉积筒中某一固定高度的浓度变化率与颗粒通量随高度变化之间的关系。将其进一步整理可得到

$$-\frac{\delta(UC)}{\delta C} = \frac{\delta h}{\delta t}, \quad (8)$$

式(8)则为沉积筒中某一固定浓度传播经由沉降柱的速度, 该速度是颗粒通量随固相浓度变化的函数。联合式(1), 并将式(7)和式(8)分别转化为微分形式再进行积分, 即可建立颗粒悬浮液的沉降速度与固相浓度、颗粒沉降速度、孔隙比等物理指标的表达式

$$U = -\frac{1}{C} \int_0^h \frac{\partial C}{\partial t} dh = u_t \left( \frac{e}{1+e} \right)^n, \quad (9)$$

$$U = -\frac{1}{C} \int_{C_{\max}}^C \frac{\partial h}{\partial t} dC = u_t \left( \frac{e}{1+e} \right)^n. \quad (10)$$

根据图1,2可知,随着泥沙颗粒悬浮液往下沉积,高浓度区从沉积筒底部逐渐上升,直至固液分界面。此时固液分界面的沉降速度即等于高浓度区颗粒悬浮液的沉降速度 $U$ ,则此时式(9), (10)中的孔隙比、固相浓度、颗粒的沉降速度、雷诺数即分别为固液分界面以下整个沉积试样的平均孔隙比、固相平均浓度、颗粒沉降速度平均值、平均雷诺数,为

$$U = -\frac{1}{C} \int_0^h \frac{\partial C}{\partial t} dh = \bar{u}_t \left( \frac{\bar{e}}{1+\bar{e}} \right)^{\bar{n}}, \quad (11)$$

$$U = -\frac{1}{C} \int_{C_{\max}}^C \frac{\partial h}{\partial t} dC = \bar{u}_t \left( \frac{\bar{e}}{1+\bar{e}} \right)^{\bar{n}}. \quad (12)$$

因此,对于某一具体疏浚吹填泥沙悬浮液而言,平均孔隙比 $\bar{e}$ 可作为其是否进入间歇沉降稳定状态的判断指标。

## 1.2 室内模型试验研究

### 1.2.1 试验目的

研究疏浚吹填泥沙的静态间歇沉降行为及机理。

### 1.2.2 试验装置

(1) 自制的沉积筒: 2个整体式沉积筒和8个分段组装式沉积筒, 尺寸为 $\phi 33.4 \text{ cm} \times 130 \text{ cm} \times 8 \text{ mm}$  (满足 $D > 100d$ ,  $D$ 为筒直径,  $d$ 为颗粒粒径), 材料为亚克力板。其中, 分段组装式沉积筒沿高度方向分为4段, 下面3段的高度 $d_1, d_2, d_3$ 根据静态间歇沉降曲线特征进行设计, 相邻两段之间可通过活套法兰连接、密封圈密封。试样高度均为120 cm, 如图3所示。

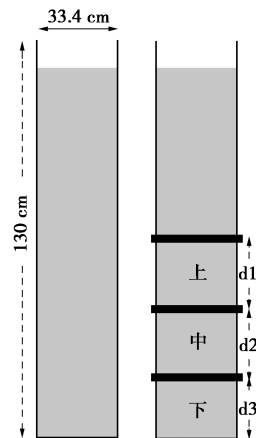


图3 自制沉积筒

Fig. 3 Self-developed deposition tube



图4 高精度微型十字板剪切仪

Fig. 4 High-precision micro cross plate shearing instrument

(2) 室内大型电动电测式十字板剪切仪: 型号为PS-VST-LEE-PS1000, 1台, 如图4所示。

(3) 其它常规土工试验设备及工具。

1.2.3 试验方案

(1) 配制典型试样

a) 广州港南沙港区三期工程和惠州港荃湾港区国际集装箱码头工程疏浚泥沙吹填施工刚完成时，立即在场地中间有代表性的位置获取疏浚吹填泥沙原状试样，并在工程现场自然晾晒至可塑状态后运回室内。

b) 在室内用含3%食盐的盐水代替海水作为稀释用水，按照预估湿密度 $1.10\text{ g/cm}^3$ 和预估含水率450%配制 I 组-南沙试样和 II 组-惠州试样共两组典型浓度试样。

c) 将试样封存24 h使固相颗粒充分浸润。

d) 利用机动搅拌器搅拌均匀后，获取均匀试样进行基本物理性质试验。

(2) 试样基本物理性质试验

试样的基本物理性质指标详见表1。由表1可知：两组试样质量分数分别为21%和15%，体积分数分别为19%和14%，黏粒( $d<0.005\text{ mm}$ )含量分别为40.7%和60.9%，含水率分别为380%和548%，均远大于液限且均为5倍以上，因此，具有典型疏浚吹填泥沙的物理性质。

(3) 室内静态间歇沉降平行试验

a) I 组-南沙试样和 II 组-惠州试样分别装入编号：I-1整体式沉积筒和编号：II-1整体式沉积筒中，进行长期静态间歇沉降试验，时间均为240 d，拟获取各试样达到间歇沉降稳定状态时的相关参数，并为确定分段组装式沉积筒中各活套法兰所处截面的高度提供支撑。

b) 当确定各试样达到间歇沉降稳定状态后，再将 I 组-南沙试样和 II 组-惠州试样剩余的试样分别装入剩下编号 I-2、I-3、I-4、I-5和编号 II-2、II-3、II-4、II-5分段组装式沉积筒中，搅拌均匀后进行短期静态间歇沉降试验。

1.2.4 试验结果分析

(1) 静态间歇沉降行为

I 组-南沙试样和 II 组-惠州试样静置 240 d 期间的固液分界面沉降值随沉积时间的变化曲线如图 5 所示。

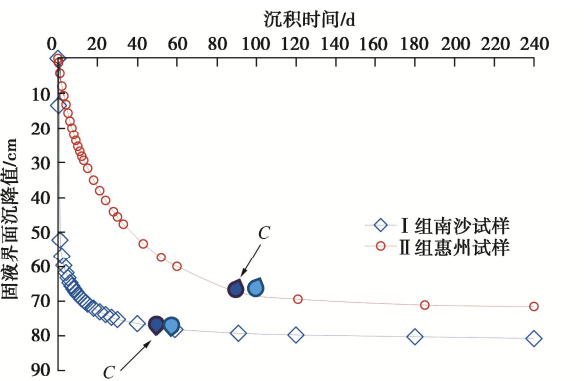


图 5 固液分界面沉降值-沉降时间变化曲线

Fig. 5 Variation curves of settlement-time of solid-liquid interface

由图 1，2，5 可知，

a) 疏浚吹填泥沙的沉积模式可为两大阶段：第一阶段为干涉沉降阶段，第二阶段为自重固结阶段。由式 (10) 可知，随着泥沙颗粒悬浮液往下沉积，高浓度区从沉积筒底部逐渐上升，直至固液分界面；由于泥沙颗粒悬浮液的沉降速度  $U$  与其浓度  $C$  成反比，因此，随后的固液分界面沉降速度（等于最顶层颗粒悬浮液的沉降速度  $U$ ）开始下降，直到泥沙颗粒之间开始相互接触，干涉沉降不再进行；干涉沉降结束后，当即进入自重固结阶段。

然而，由于疏浚吹填泥沙颗粒中含有多种不同粒径的颗粒，因此，从理论上很难判断干涉沉降结束的时机。鉴于此，考虑工程实际情况，本文尝试将“固液分界面沉降速度  $U\leq 1.0\text{ mm/d}$ ”作为干涉沉降结束的判断标准。鉴于此，根据两试样的静态间歇沉降数据可知，图 5 中  $C_{\text{I-南沙试样}} (50\text{ d}, 77.3\text{ cm})$ ， $C_{\text{II-惠州试样}} (91\text{ d}, 67.3\text{ cm})$  以前的曲线为干涉沉降阶段，此阶段颗粒悬浮液沉降较快； $C_{\text{I-南沙试样}}$ ， $C_{\text{II-惠州试样}}$  以后的曲线为自重固结阶段（压紧区）。 $C_{\text{I-南沙试样}}$ ， $C_{\text{II-惠州试样}}$  即可称为压缩点。

b) 疏浚吹填泥沙中黏粒( $d<0.005\text{ mm}$ )含量越高，静态间歇沉降稳定所需的时间越长、总沉降值也越小。如 I-组南沙试样和 II 组-惠州试样的静态间歇沉降稳定所需的时间和总沉降值分别为 (50 d、77.3

表 1 配制试样的基本物理指标

Table 1 Basic physical indices for preparation of specimens

试样	物理性质		界限含水率			颗粒组成/%					
	颗粒比重 $G_s$	含水率/%	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_P$ /%	塑性指数 $I_P$	砾粒 (角砾) $>2.00\text{ mm}$	粗砂 $2.00\sim 0.50\text{ mm}$	中砂 $0.50\sim 0.25\text{ mm}$	细砂 $0.25\sim 0.075\text{ mm}$	粉粒 $0.075\sim 0.005\text{ mm}$	黏粒 $< 0.005\text{ mm}$
I组-南沙	2.712	380	50.8	24.4	26.4	0.00	0.00	1.45	20.75	37.10	40.70
II组-惠州	2.703	548	56.9	40.6	30.3	0.00	0.00	1.25	0.90	36.95	60.90

cm) 和 (91 d, 67.3 cm)。

由式(4)可知, 当颗粒悬浮液的浓度  $C$  为 0 或当颗粒悬浮液的沉降速度  $U$  为 0 (即浓度最大) 时, 颗粒通量  $G$  均为 0, 因此, 颗粒通量必然存在一个最大值。为此, 根据式(7)~(12)可得到颗粒通量随固液分界面高度、固相浓度的变化曲线以及固液界面沉降速度随平均孔隙比的变化曲线, 如图 6~8 所示。

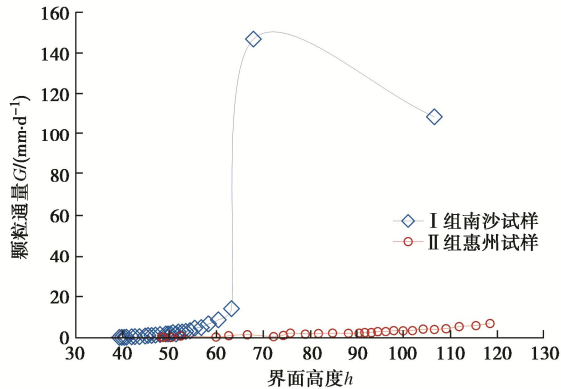


图6 颗粒通量-固液分界面高度的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of particle flux-height of solid-liquid interface

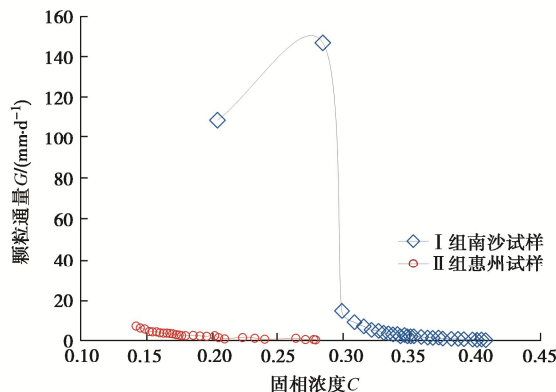


图7 颗粒通量-固相浓度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of particle flux-solid phase concentration

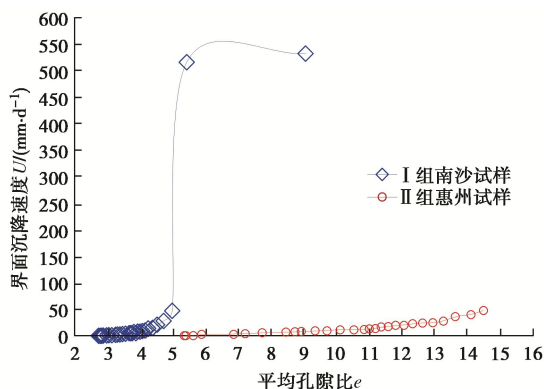


图8 界面沉降速度-平均孔隙比的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of settling velocity-mean pore ratio of interface

由图 6~8 可知:

a) 颗粒通量最大值  $G_{\max}$  往往出现在试验难以测出的非常低的浓度条件下。如 I 组-南沙试样当固液界面高度 68 cm、颗粒悬浮液固相浓度为 28% 时, 颗粒通量为 146.66 mm/d, 接近  $G_{\max}$ , 此时沉积筒中固液分界面以下整个沉积试样的平均孔隙比为 5.41。

上述平均孔隙比的计算方法如下:

$$\bar{e} = \frac{\bar{V}_v}{\bar{V}_s} = \frac{\bar{V}_v - \Delta \bar{V}_v}{\bar{V}_s} = \frac{H_0 A n_0 - \Delta H A}{H_0 A (1 - n_0)} = \frac{H_0 e_0 - S_i (1 + e_0)}{H_0} \quad (13)$$

式中:  $V_v$ ,  $V_s$ ,  $H$ ,  $A$ ,  $n$  和  $\Delta H = S_i$  分别为孔隙体积、固相颗粒体积、固液分界面以下整个沉积土样的高度、沉积土样底面积、沉积土样孔隙率、固液分界面沉降值, 而下表 0 代表试样的初始情况。

工程实际中, 上述平均孔隙比也可通过下式计算得到

$$\bar{e} = \frac{\bar{\rho}_s (1 + \bar{w})}{\bar{\rho}} - 1 \quad (14)$$

式中,  $\bar{w}$ ,  $\bar{\rho}$  分别为固液分界面以下整个沉积土样的平均含水率、平均湿密度。

b) 黏粒 ( $d < 0.005$  mm) 含量越高, 静态间歇沉降过程中的最大颗粒通量越难通过试验方式测得。如 II 组-惠州试样则须在固液界面高度大于 120 cm、颗粒悬浮液平均浓度低于 14% 时才会出现颗粒通量最大值  $G_{\max}$ 。

## (2) 静态间歇沉降机理

根据图 5 可知: I 组-南沙试样和 II 组-惠州试样长期静置后的最终高度分别稳定在 39.4 cm 和 48.4 cm。鉴于此, 每个分段组装式沉积筒中下面 3 个分段的高度均设为 20 cm, 即  $d_1 = d_2 = d_3 = 20$  cm。

将两组试样分别装入 4 个分段组装式沉积筒中, 搅拌均匀后进行短期静态间歇沉降试验。试验过程总, 测试不同沉积时间不同深度位置试样的相关物理力学指标。

根据图 5 可知, I 组-南沙试样静置 40 d 后间歇沉降基本结束, 而 II 组-惠州试样静置 50 d 后仍未完成间歇沉降, 因此, 编号 I-2、I-3、I-4、I-5 分段组装式沉积筒的取样时间分别选定为 7, 15, 25, 40 d, 编号 II-2、II-3、II-4、II-5 分段组装式沉积筒的取样时间分别选定为 10, 20, 30, 50 d, 取样深度位置分别为最下面三段每分段的中间位置, 即深度 0.8 (0.9 m), 1.0, 1.2 m; 相应深度位置的土样获取方法为: 从上到下依次在相应法兰盘位置, 先将上面的分段沉积筒移走, 然后在相应的分段沉积筒中获取相应位置的土样。不同沉积时间不同深度位置土样的物理力学指标

及随沉降时间的变化曲线详见图 9~13。

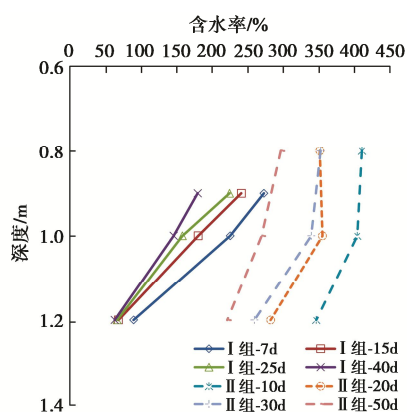


图 9 不同沉积时间含水率-深度的曲线

Fig. 9 Moisture content-depth curves at different deposition time

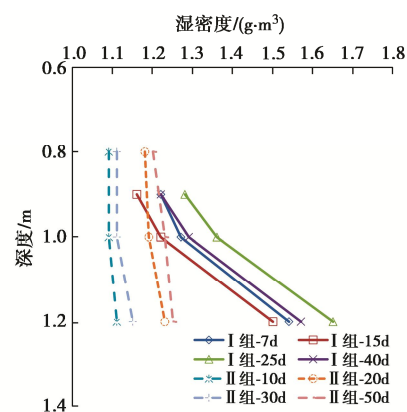


图 10 不同沉积时间湿密度-深度的曲线

Fig. 10 Wet density-depth curves at different deposition time

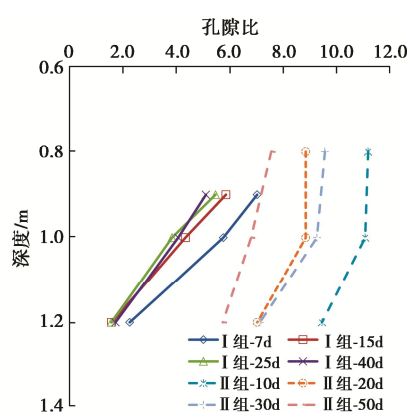


图 11 不同沉积时间孔隙比-深度的曲线

Fig. 11 Void ratio-depth curves at different deposition time

根据图 9~13 可知,

a) 同一沉积深度, 含水率、湿密度、孔隙比、原位抗剪强度等物理力学指标随沉积时间的变化幅度很明显, 而黏粒 ( $d<0.005\text{ mm}$ ) 含量变化幅度相对小很多, 这主要是黏粒细小、沉积速度慢的缘故;

b) 不同沉积时间, 各项物理力学指标沿深度方向的变化规律基本相似。但试样初始黏粒 ( $d<0.005$

mm) 含量越高, 沉积过程中颗粒沿深度方向的分选规律越不明显。II 组-惠州土样不同沉积深度的黏粒含量基本 ( $d<0.005\text{ mm}$ ) 接近, 而 I 组-南沙试样在 1.2 m 深处的黏粒含量则明显小很多;

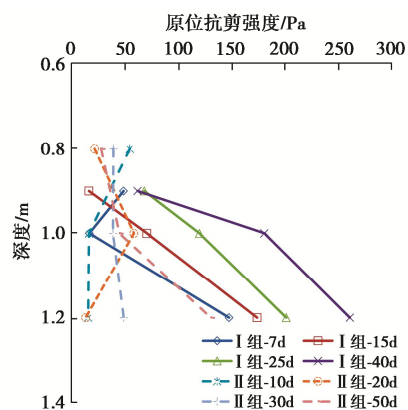


图 12 不同沉积时间原位抗剪强度-深度的曲线

Fig. 12 In-situ shear strength-depth curves at different deposition time

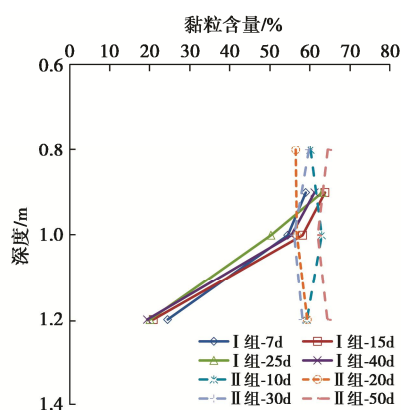


图 13 不同沉积时间黏粒含量-深度的曲线

Fig. 13 Clay content-depth curves at different deposition time

c) 沉积过程中, 颗粒悬浮液中的泥沙颗粒在自重作用下逐渐往沉积筒底部沉积, 沉积物孔隙逐渐变小, 结构骨架逐渐形成, 因而呈现一定的抗剪强度, 如 I 组-南沙试样的平均抗剪强度在 40 d 时达到 167.22 Pa, II 组-惠州试样的平均抗剪强度在 50 d 时达到 67.14 Pa, 其主要原因是两试样的黏粒含量差异性大。

## 2 疏浚吹填泥沙静态间歇沉降稳定宏观评价标准

基于式 (11), (12), 将 I 组-南沙试样和 II 组-惠州试样静置 240 d 期间的固液分界面沉降值、平均含水率、平均湿密度与沉积筒中固液分界面以下整个沉积土样的平均孔隙比建立关系, 如图 14~16 所示。

由图 14~16 可知:

$$U = Ae^B \quad R^2 = 1 \quad , \quad (15)$$

$$\bar{w} = C\bar{e} + D \quad R^2 = 1, \quad (16)$$

$$\bar{\rho} = E\bar{e} + F \quad R^2 = 0.8706 \sim 0.9388. \quad (17)$$

式中:  $\bar{w}$ ,  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{e}$  分别为沉积筒中固液分界面以下整个沉积试样的平均含水率、平均湿密度、平均孔隙比;  $A, B, C, D, E, F$  取决于疏浚吹填泥沙的物理性质, 对于本文的 I 组南沙试样和 II 组惠州试样而言, 均为常数,  $R^2$  为可决系数。

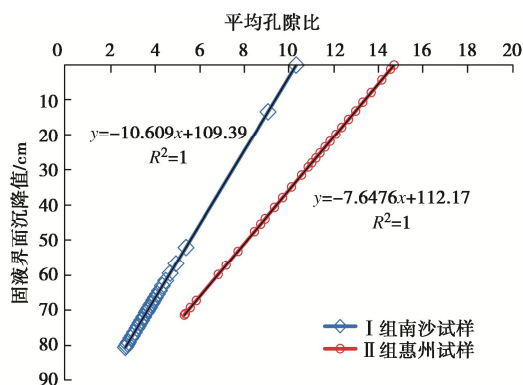


图 14 固液界面沉降值-平均孔隙比曲线

Fig. 14 Sedimentation-average pore ratio curves of solid-liquid interface

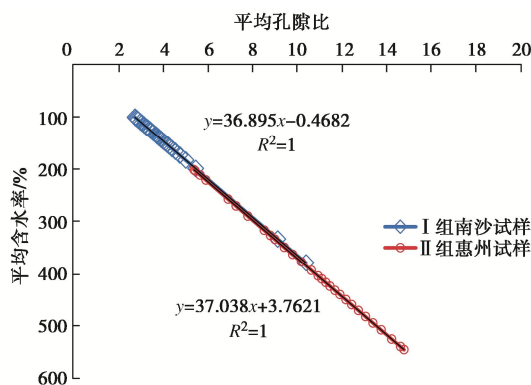


图 15 平均含水率-平均孔隙比曲线

Fig. 15 Average water content-average void ratio curves

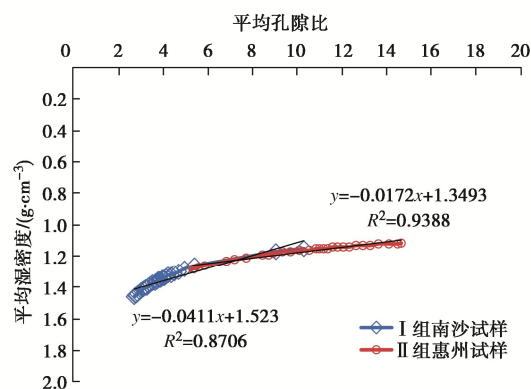


图 16 平均湿密度-平均孔隙比曲线

Fig. 16 Average wet density-average void ratio curves

根据式 (15) ~ (17) 可知,  $R^2$  接近或等于 1,

这表明拟合程度均较好, 也即固液界面沉降值、平均含水率  $\bar{w}$ 、平均湿密度基本上都与平均孔隙比基本呈线性关系。这也进一步表明“平均孔隙比”更适宜作为某一具体颗粒悬浮液静态间歇沉降稳定的核心评价指标。

然而, 疏浚吹填泥沙的物理力学性质往往由于不同地理位置、不同成因而可能存在较大的差异, 这往往也导致孔隙比值和黏粒 ( $d < 0.005 \text{ mm}$ ) 含量的差异性较大。因此, 结合前述间歇沉降行为与机理的研究结果, 引入“无量纲指标—平均孔隙比累计变化率

$\frac{\sum \Delta e_i}{e_0}$  为主要评价指标、黏粒 ( $d < 0.005 \text{ mm}$ ) 含量

为辅助评价指标”作为静态间歇沉降稳定状态的双控指标。

为此, 基于文献调研方法对不同地理位置不同条件下疏浚吹填泥沙在室内静置期间的平均孔隙比累计变化率进行计算和统计<sup>[6-11, 17]</sup>, 统计结果详见表 2。

表 2 的统计结果表明: 不同地理位置不同条件下疏浚吹填泥沙静态间歇沉降稳定后的平均孔隙比累计变化率为 39.6%~75.5%。

然而, 已有研究结果表明<sup>[8, 17]</sup>: 沉积筒横截面尺寸越大, 颗粒悬浮液沉降速度受泥浆和容器内壁之间的黏滞阻力的影响越小。因此, 沉积筒空间尺寸, 尤其是横截面尺寸 (如直径), 是影响沉降稳定状态的重要因素之一。一般情况下, 沉积筒横截面直径  $D > 100d$  时, 器壁的黏滞效应可忽略。鉴于此, 以天津滨海新区、I 组-南沙试样、II 组-惠州试样等 3 组试验研究结果作为典型进行分析, 静置期间相应的平均孔隙比累计变化率随时间的变化曲线如图 17 所示。

由图 17 可知:

(1) I 组-南沙试样和天津滨海新区试样的黏粒含量分别为 40.7% 和 47%, 为常见的疏浚吹填泥沙, 其静态间歇沉降稳定时的平均孔隙比累计变化率分别稳定在 73.7% 和 72.4%。

(2) II 组-惠州试样的黏粒含量高达 60.9%, 类似于 GOROIMAI 中试验样本的黏粒含量 63%~74%<sup>[1]</sup>, 属于极高黏粒含量的疏浚吹填泥沙, 较为少见, 其静态间歇沉降稳定时的平均孔隙比累计变化率稳定在 63.7%。

综上分析, 对于黏粒含量为 40%~60% 的疏浚吹填泥沙, 建议将“平均孔隙比累计变化率为 60%~75%”作为静态间歇沉降稳定状态的宏观评价标准。具体而言, 对于黏粒含量为 40% 的疏浚吹填泥沙, 可将平均孔隙比累计变化率-75% 作为静态间歇沉降稳定状态的宏观评价标准; 对于黏粒含量为 60% 的疏浚

表 2 不同条件下平均孔隙比累计变化率统计值

Table 2 Statistical values of cumulative change rate of average void ratio under different conditions									
试样名称	黏粒含量/% $d<0.005\text{ mm}$	沉积环境	沉积筒直径	初始含水率/%	初始密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	沉积时间 $t/\text{d}$	初始孔隙比	沉积稳定时孔隙比	平均孔隙比 累计变化率/%
南水北调东线—淮安四站	53.4	淡水+海水	3.1 cm	424.0	1.140	30	11.53	3.51	69.6
	53.4	淡水+海水	3.1 cm	530.0	1.110	30	14.42	3.53	75.5
	47.0	海水	3.2 cm	380.0	1.149	80	10.07	5.992	40.5
	47.0	淡水+海水	3.2 cm	570.0	1.102	80	15.105	6.548	56.7
南水北调东线—白马湖	47.0	淡水+海水	3.2 cm	760.0	1.078	80	20.14	6.599	67.2
	47.0	淡水+海水	3.2 cm	950.0	1.063	80	25.175	6.678	73.5
	47.0	海水	4.3 cm	369.5	1.150	21	10.1	6.1	39.6
	47.0	海水	5.3 cm	369.5	1.150	21	10.1	5.7	43.6
	47.0	海水	6.0 cm	369.5	1.150	21	10.1	5.7	43.6
天津滨海新区	47.0	海水	高 2 m 直径 80 cm	400.0	1.120	366	11.6	3.2	72.4
I 组南沙试样	40.7	海水	高 1.3 m 直径 33.4 cm	380.0	1.150	240	10.311	2.714	73.7
II 组惠州试样	60.9	海水	高 1.3 m 直径 33.4 cm	547.0	1.115	240	14.667	5.331	63.7

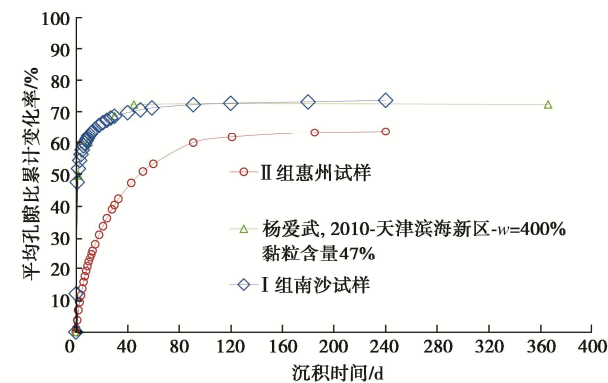


图 17 不同条件下平均孔隙比累计变化率-沉积时间曲线  
Fig. 17 Cumulative change rate of average void ratio-deposition time curve under different conditions

吹填泥沙,将平均孔隙比累计变化率-60%作为静态间歇沉降稳定状态的宏观评价标准;而对于黏粒含量值处于 40%~60%的情况,则可通过线性内插值确定平均孔隙比累计变化率作为静态间歇沉降稳定状态的宏观评价标准。另外,后续将密切关注相关疏浚吹填泥沙工程,获取黏粒含量小于 40%、大于 60%的典型试样,进一步开展相关研究,从而为海洋、水利、矿业等领域中类似于疏浚吹填泥沙这类规模大、体量大的中高浓度固液两相物系进行真空过滤排水固结时的最佳启动时间判断提供科学支撑。

3 结论及建议

- (1) 对疏浚吹填泥沙悬浮液的静态间歇沉降行为进行了理论研究,建立了颗粒悬浮液的沉降速度与平均孔隙比的理论关系式。
- (2) 黏粒 ( $d<0.005\text{ mm}$ ) 含量是影响疏浚吹填泥沙静态间歇沉降行为与机理的关键因素之一。
- (3) 颗粒通量最大值  $G_{\text{max}}$  往往出现在试验难以测出的非常低的浓度条件下;且黏粒含量越高,静态间歇沉降过程中的颗粒通量最大值越难通过试验方式测得。
- (4) 对于黏粒含量为 40%~60%的疏浚吹填泥沙,建议将“平均孔隙比累计变化率为 60%~75%”作为静态间歇沉降稳定状态的宏观评价标准。

参考文献:

[1] GORO IMAI. Experiment studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 7-20.  
[2] 朱 伟, 闵凡路, 吕一彦, 等. “泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3041-3054. (ZHU Wei, MIN Fanlu, LÜ Yìyan, et al. Subject of “mud science and application technology”and its research

- progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(11): 3041-3054. (in Chinese))
- [3] 鲍树峰. 新近吹填淤泥地基真空固结理论与强度增长计算方法及加固新技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. (BAO Shufeng. Vacuum Consolidation Theory and Calculation Method of Soil Strength Growth and New Improvement Technology for Newly Hydraulic Reclamation Mud Foundation[D]. Guangzhou: Chinese Doctoral Dissertations Full-text Database, 2015. (in Chinese))
- [4] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(2): 201-225, I0003. (CAI Yuanqiang. Consolidation mechanism of vacuum preloading for dredged slurry and anti-clogging method for drains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(2): 201-225, I0003. (in Chinese))
- [5] 鲍树峰, 董志良, 娄炎, 等. 高黏粒含量新近吹填淤泥加固新技术室内研发II[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015(9): 1707-1715. (BAO Shufeng, DONG Zhiliang, LOU Yan, et al. Laboratory research on new improvement technology of newly hydraulic reclamation mud with high clay content II [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015(9): 1707-1715. (in Chinese))
- [6] 曹玉鹏, 吉锋. 吹填淤泥沉积规律室内试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, **31**(3): 36-39. (CAO Yupeng, JI Feng. Model tests on sedimentation behavior of dredged sludge[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, **31**(3): 36-39. (in Chinese))
- [7] 翁佳兴. 吹填淤泥自重沉积规律试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2012, **29**(3): 81-85. (WENG Jiaying. Experimental study on sedimentation behavior of dredged sludge[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, **29**(3): 81-85. (in Chinese))
- [8] 徐桂中, 吉锋, 翁佳兴. 高含水率吹填淤泥自然沉降规律[J]. 土木工程与管理学报, 2012, **29**(3): 22-27. (XU Guizhong, JI Feng, WENG Jiaying. Sedimentation behavior of dredged slurry at high water contents[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, **29**(3): 22-27. (in Chinese))
- [9] 别学清, 戴民忠, 管图林, 等. 海水环境下高含水率疏浚淤泥自然沉积规律研究[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(4): 273-277. (BIE Xueqing, DAI Minzhong, GUAN Tulin, et al. The sedimentation behavior of dredged slurries in seawater environment[J]. Science Technology and Engineering, 2015, **15**(4): 273-277. (in Chinese))
- [10] 张莹, 徐桂中, 卢亮, 等. 吹填层厚度对疏浚淤泥沉积特性影响的试验研究[J]. 水运工程, 2020(11): 57-62. (ZHANG Ying, XU Guizhong, LU Liang, et al. Experimental study on effect of hydraulic fill thickness on sedimentation characteristic of dredged slurry[J]. Port & Waterway Engineering, 2020(11): 57-62. (in Chinese))
- [11] 宋苗苗, 王正宏, 徐桂中, 等. 钙质絮凝剂对高含水率吹填淤泥自重沉积特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2021, **41**(5): 22-27. (SONG Miaomiao, WANG Zhenghong, XU Guizhong, et al. Effects of calcareous flocculants on self-weight sedimentation characteristics of dredged slurry with high water content[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, **41**(5): 22-27. (in Chinese))
- [12] WATABE Y, SAITOH K. Importance of sedimentation process for formation of microfabric in clay deposit[J]. Soils and Foundations, 2015, **55**(2): 276-283.
- [13] QIN J, ZHENG J, LI L. An analytical solution to estimate the settlement of tailings or backfill slurry by considering the sedimentation and consolidation[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, **31**: 463-471.
- [14] FANG Y G, LIU H, GUO L F, et al. Calculation theory and experiment verification of sedimentation potential of the complex particle system[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022(649): 129447.
- [15] KYNC G J. A theory of sedimentation[J]. Transactions of the Faraday Society, 1952(48): 166-177.
- [16] RICHARDSON J F, ZAKI W N. Sedimentation and fluidisation: PART I[J]. Institution of Chemical Engineers, 1954(32): 35-53.
- [17] 杨爱武, 杜东菊, 卢力强. 天津吹填软土沉积特性及其微观结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(5): 83-87. (YANG Aiwu, DU Dongju, LU Liqiang. Study on sediment characteristics and micro-structure of soft dredger soil of Tianjin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, **37**(5): 83-87. (in Chinese))