

· 机理试验 ·

# 长江口细颗粒泥沙密实室内试验研究\*



万远扬<sup>1,2</sup>, 陈曦<sup>3</sup>, 黄伟<sup>4</sup>, 沈淇<sup>1</sup>

(1. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201; 2. 联合国教科文组织—水教育学院, 代尔夫特 2601DA 荷兰;  
3. 宁波市港航管理局, 浙江 宁波 315041; 4. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 细颗粒泥沙密实速度问题是认识细颗粒动力过程重要的参数之一, 也是决定地貌学数学模型表现能力的核心参数。利用“大型可温控自动搅拌沉降试验筒”及音叉密度仪等, 对3种取自长江口的原状沙样进行了密实过程试验, 并分别利用密度计法和迈克劳林公式计算了密实速度。通过对比发现: 密度计法计算过程简化太多, 不宜采用; 迈克劳林公式物理意义较强, 适合作为密实速度计算公式。试验成果发现泥沙粒径是影响密实速度的重要影响因子, 长江口细颗粒泥沙密实速度大致为 $0.31 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-3}$  mm/s。

**关键词:** 长江口; 细颗粒泥沙; 密实速度; 沉降筒

中图分类号: TV 145

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)11-0111-04

## Experimental study on the consolidation velocity of fine sediment in the Yangtze estuary

WAN Yuan-yang<sup>1,2</sup>, CHEN Xi<sup>3</sup>, HUANG Wei<sup>4</sup>, SHEN Qi<sup>1</sup>

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Scientific Research Center, Shanghai 201201, China; 2. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft 2601 DA, The Netherlands; 3. Ningbo Port & Waterway Administration Bureau, Ningbo 315041, China;  
4. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** For coastal and estuarine morphodynamics, consolidation of fine sediment is of crucial importance for us to understand its influence on sediment dynamics process. Based on a new settling column and the DensiTune, three series of consolidation experiments are carried out, the difference between those series is the median grain size, all the sediment samples are collected originally from the Yangtze estuary. Two methods, the density method and the McLaughlin method, are employed to calculate the consolidation velocity. Experiments have shown that the flocculation becomes weaker when sediment size increases, and we find that the grain size is a significant impact for fine sediment consolidation. According to careful analysis and comparison, the consolidation velocity of fine sediment in the Yangtze estuary is in the range of  $0.31 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-3}$  mm/s.

**Key words:** Yangtze estuary; fine sediment; consolidation velocity; settling column

泥沙在自重和水压力的作用下的排水密实过程属于泥沙沉降过程中的最后一个阶段。这一阶段密实规律与泥沙自由沉降有很大差异, 对于细颗粒(一般中值粒径小于 $62 \mu\text{m}$ )泥沙<sup>[1]</sup>, 前者一般与泥沙粒径和组成相关<sup>[2]</sup>; 而后者还与含沙量、盐度、水体矿物成分, 水流紊动等相关<sup>[3]</sup>。这两个

阶段的分界点长期以来一直较为模糊, 根据相关文献介绍及实际的试验分析, 认为在水沙混合物由牛顿流体向非牛顿流体转变时, 即是沉降与密实的分界点。根据细颗粒泥沙的沉降与含沙量的关系, 一般可分为自由沉降、絮凝沉降和阻滞沉降, 而当阻滞沉降发育到一定阶段时, 流体特性

收稿日期: 2013-08-25

\*基金项目: 上海市自然科学基金项目(11ZR1415800); 中荷合作伙伴基金项目(RESEDUE.60038881)

作者简介: 万远扬(1981—), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要从事河口泥沙动力学研究。

会发生一定本质性改变（宾汉体），此时即是密实阶段的开始。

泥沙的密实程度与床面抗冲刷（剪切）能力、泥沙再悬浮等地貌学因子密切相关<sup>[4-5]</sup>。研究泥沙密实过程及密实速度对认识泥沙的物理特性和动力过程具有非常核心的意义，一个准确的密实速度能为泥沙模型相关参数的选取提供重要的参考，对密实过程相关机理和影响因子的认识能为圈围造地工程、航道回淤问题、港口吹填加固技术等提供一定技术支撑。

### 1 试验介绍

近30年来，国内外许多学者<sup>[1,3,6-7]</sup>一直关注泥沙的密实过程及其相关流变特性、冲刷能力的研究，尤其对于黏性细颗粒泥沙，泥沙密实影响着泥沙的运动特性和地形演变。总的来看，研究泥沙密实问题的试验方法有：1）密度计法或称浑液交界面法；2）X或γ射线密度仪法；3）双频测深仪法；4）音叉密度测量法。方法1）较为简单，在实验室内较易操作，但其把清浑水交界面下沉的速度当成泥沙密实的速度缺乏一定的科学依据，且本质上也忽略了泥沙的垂线分布；方法2）起点较高，操作的安全性及试验仪器的标定等工作值得注意；方法3）操作较为简单，但是高浓度泥沙层的密度分布与回波信号的关系难以一一对应，测量精度较低；方法4）是随着音叉密度仪的出现而形成的一种新方法，该法在在国内外已广泛应用于浮泥密度的现场观测。本研究拟分别采用方法1）和4）来计算长江口3种不同粒径泥沙（8 μm, 16 μm, 58 μm）在水温24℃，盐度为10 psu的现场盐水中的密实速度。

#### 1.1 试验设备

本研究采用“上海河口海岸科学研究中心”自主设计开发的大型可温控自动搅拌沉降试验筒<sup>[8]</sup>（图1，2）。沉降筒内搭载有DensiTune（音叉）、DR水深仪（由于音叉自带压力探头精度有限、故外加水深仪用于记录精确的水深值）、自动升温保温设备及高压空气搅拌装置等。

#### 1.2 密实速度计算方法

##### 1) 浑液交界面法<sup>[9]</sup>。

又称密度计法，将预先配置好的高浓度沙样

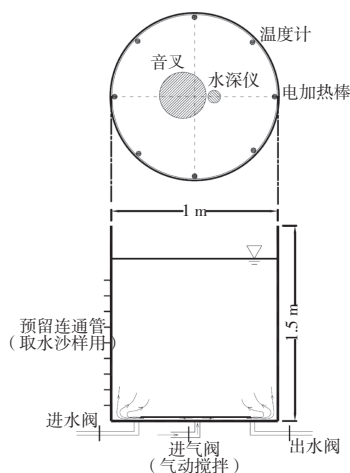


图1 试验装置示意图

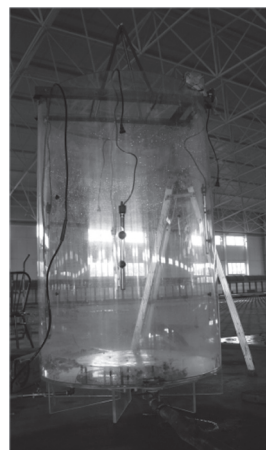


图2 实物照片

倒入标有刻度、较为细长的容器中，在密实过程中，每隔一定时间记录下浑液交界面（泥浆面）的位置，据此把该交界面向下移动的平均速度当成泥沙密实速度。

##### 2) 迈克劳林公式<sup>[10]</sup>。

迈克劳林公式本身是用来计算细颗粒泥沙沉降速度的，如果把沉速当成密实速度即可利用同样公式来计算泥沙的密实速度。

根据沙量连续方程式可得：

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\omega}S)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中：S为含沙量；t为时间； $\bar{\omega}$ 为某一瞬时某一高度的平均密实速率；z为距底的高度。

对水深z积分得：

$$(\bar{\omega}S)_{z=h} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h S dz \quad (2)$$

通过测定不同密实历时沿水深h的含沙量或密

度分布, 运用图积分或有限差分法, 即可求出不同水深 $h$ 处的瞬时密实速度随历时 $t$ 的变化, 但该值随水深和时间而变, 不便于实际应用。因此提出了一个中值密实速度的概念或者叫群体密实速度, 一般以密度达到初始密度的50%时的密实时间 $t_{0.5}$ 内的速度平均值, 得水深 $h$ 处的断面平均密实速度, 即为群体密实速度:

$$(\omega_{50\%})_{mc} = \frac{1}{t_{0.5}} \int_0^{t_{0.5}} \omega_i dt \quad (3)$$

式中:  $\omega_{50\%}$ 为群体密实速率;  $t_{0.5}$ 为瞬时密度达到初始密度一半时的时间;  $\omega_i$ 为瞬时密实速率。

迈克劳林公式类似于欧拉法<sup>[3]</sup>, 它求出的是整个密实期间通过各固定断面的各级颗粒的断面平均密实速度, 中值密实速度算法较为简单, 计算值属群体密实速度(中值密实速度), 表示非均匀沙50%颗粒已经完成密实时所对应的速率(密实半衰期), 其概念类似 $d_{50}$ , 其物理意义较强, 非常适用于细颗粒泥沙密实速度的推算。

### 1.3 试验流程

密实试验开始的标志是浮泥产生的中后期, 在长江口区域, 浮泥的密度一般为 $1\ 033\sim 1\ 245\ \text{kg/m}^3$ (平均密度为 $1\ 100\ \text{kg/m}^3$ 左右; 换算成含沙量的话, 约为 $200\ \text{kg/m}^3$ 左右), 因此本次密实试验初始泥浆密度为 $1\ 100\ \text{kg/m}^3$ 左右, 配置初始泥浆的方法是, 先将原状的泥样放入一定水中, 利用超声波震荡器对其固结泥块进行充分解散, 然后放入试验筒内(液面高度为 $1.2\ \text{m}$ )进行充分的充气搅拌使其充分混合均匀, 然后让其开始进行自由沉降, 一般待沉降 $30\ \text{min}$ 以后, 即开始出现肉眼可见的清浑水交界面, 此时, 清水的高度大约为 $70\sim 80\ \text{cm}$ , 根据前人分析<sup>[11]</sup>, 泥面上水深基本不会影响密实过程, 因此可认为不同泥样从密实阶段开始时, 试验条件基本一样(包括水温控制为 $24\ ^\circ\text{C}$ , 盐度控制为 $10\ \text{psu}$ )。

从这个时候开始才是密实试验的开始, 然后每隔 $3\sim 12\ \text{h}$ 测量一次泥浆沿水深方向的浓度分布, 同时记录下不同时刻的浑液面位置。

## 2 试验结果分析

### 1) 密度计法。

根据长江口泥沙密实试验3个泥样记录的混

液面位置, 绘制不同泥沙浑液面随时间的变化(图3)。

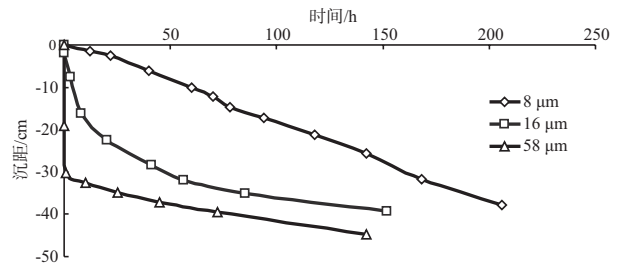


图3 泥沙浑液面随时间变化曲线

由图3明显可见, 颗粒越细, 密实速度越慢; 当中值粒径为 $58\ \mu\text{m}$ 时, 混液面下降速度很快, 在 $10\ \text{h}$ 内液面迅速下降 $30\ \text{cm}$ 。此外, 粒径越细, 密实速度越均匀; 粒径越粗, 选取的计算时段不同, 密实速度差异较大。如按混液交界面下降速度来算粒径为 $58\ \mu\text{m}$ 的密实速度, 前 $0.5\ \text{h}$ 和后面时间密实速度相差巨大。因此当粒径较粗或者级配较不均匀时, 不宜选用密度计法来计算密实速度。

### 2) 迈克劳林法。

根据密实试验过程中记录的垂线密度分布, 3组沙沉降密度剖面随时间的变化见图4, 由图4可见:

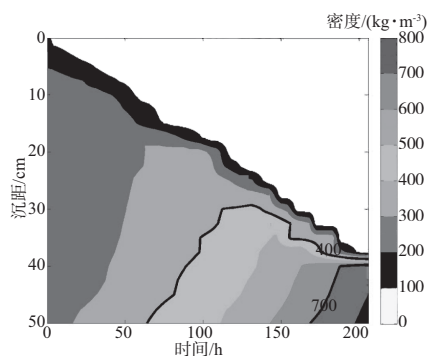
①对于 $8\ \mu\text{m}$ 的泥沙, 含沙量随着水深和时间增加而增大, 沉降后的泥浆表面含沙量约为 $400\ \text{kg/m}^3$ , 中低含沙量达到弱固结状态(含沙量约为 $700\ \text{kg/m}^3$ )所需时间较长, 约为 $9\ \text{d}$ , 整体泥沙沉降过程最为均匀。

②对于 $16\ \mu\text{m}$ 的泥沙, 底部泥沙密度增长较快, 在 $24\ \text{h}$ 后底层的含沙量就可以达到 $700\ \text{kg/m}^3$ 以上, 之后底部密实过程趋于缓慢。随着密实排水, 泥沙表面降低, 整体密度继续增加。

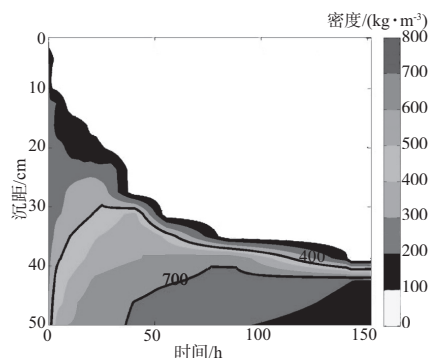
③对于 $58\ \mu\text{m}$ 的泥沙, 试验开始时, 粗颗粒泥沙迅速下沉, 表面变清, 大部分颗粒较粗的泥沙在 $10\ \text{h}$ 以内就沉降完毕, 液面下降了 $30\ \text{cm}$ 左右, 并且底部的密实程度较高。

### 3) 密实速度的对比。

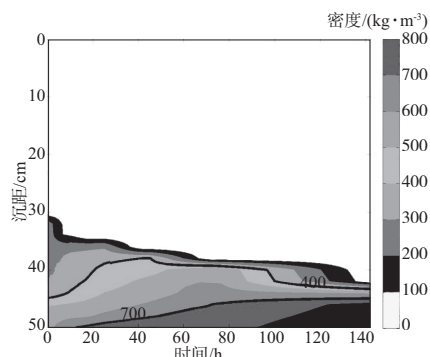
根据上述两种方法所计算的密实速度见表1, 由表1可见, 密度计法所得的密实速度差异较小, 其主要原因是忽略了泥水混合体内含沙量或密度的变化, 所见的同一混液交界面, 其自身密度及密度梯度差异十分巨大, 因此拿它来当做密实速



a) 泥样中值粒径为8 μm



b) 泥样中值粒径为16 μm



c) 泥样中值粒径为58 μm

图4 密实过程中不同泥样垂向密度剖面随时间变化曲线

度是十分不精确的，尤其对于粗颗粒泥沙。

相对来看，迈克劳林公式所计算的密实速度差异能基本反映实际粒径对密实速度的影响程度，且该公式自身物理意义较为明确<sup>[12]</sup>，适合作为细颗粒泥沙密实速度计算公式。

表1 不同方法计算的密实速度对比

泥样编号	中值粒径/μm	密度计法密实速度/ (10 <sup>-3</sup> mm·s <sup>-1</sup> )	迈克劳林法密实速 度/(10 <sup>-3</sup> mm·s <sup>-1</sup> )
1	8	0.54	0.31
2	16	0.74	0.68
3	58	1.10	4.80

### 3 结论

1) 根据试验分析结果来看，密度计法计算密实速度较为粗糙，其忽略了混液交界面密度的差异及溶液中的密度梯度差异；而迈克劳林公式物理意义较强，计算结果与实际密实特征较为相似。

2) 细颗粒泥沙的粒径是影响密实速度的重要影响因子，粒径越细，絮凝体间密实排水过程越缓慢。

3) 根据本次试验结果，长江口细颗粒泥沙密实速度大致为 $0.31 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-3}$  mm/s。

### 参考文献:

- [1] Mehta A J. On estuarine cohesive sediment suspension behavior [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94: 14 303-14 314.
- [2] van Rijn L C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas [M]. Netherlands: Aqua Publications, 1993.
- [3] 黄建维. 海岸与河口黏性泥沙运动规律的研究和应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [4] 张志忠. 长江口细颗粒泥沙基本特性[J]. 泥沙研究, 1996(1): 67-73.
- [5] 关许为, 陈英祖, 杜心慧. 长江口絮凝机理的试验研究[J]. 水利学报, 1996(6): 70-74, 80.
- [6] 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 51-57.
- [7] 章厚玉, 王荣新, 马继建, 等. 泥沙沉降过程与密度变化关系试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009(12): 10-12.
- [8] 万远扬, 戚定满, 顾峰峰, 等. 大型可控自动搅拌沉降密实试验装置基试验方法: 中国, 201210315564[P]. 2012-11-28.
- [9] 白玉川. 河口泥沙运动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2011.
- [10] McLaughlin R T. Settling properties of suspensions [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1961, 126(1): 1 780-1 786.
- [11] 韩其为. 淤积物干容重的分布及其应用[J]. 泥沙研究, 1997(2): 10-16.
- [12] Sills G C. Consolidation of cohesive sediments in settling columns [C]// 4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference. Wallingford UK, 1994: 107-120.

( 本文编辑 武亚庆 )