

DOI: 10.11779/CJGE20230510

# 真空作用下高含水率疏浚泥颗粒迁移规律试验研究

曾玲玲<sup>1</sup>, 王其忠<sup>1</sup>, 林晓鑫<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 福建省水利水电勘测设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

**摘要:** 研制了高含水率疏浚泥真空固结模型装置, 针对两种具有不同液限的疏浚泥, 开展不同初始状态下的真空固结试验, 探究真空作用下疏浚泥初始状态对细颗粒迁移性状的影响规律。研究结果表明, 引入初始含水率与液限比值作为无量纲化的初始状态指标, 能够作为确定细颗粒迁移与否的一个临界阈值。当初始含水率与液限比值不大于临界阈值, 真空作用下高含水率疏浚泥没有发生颗粒迁移; 当初始含水率与液限比值大于临界阈值, 真空作用下高含水率疏浚泥发生颗粒迁移, 黏粒向排水面附近聚集。一旦发生颗粒迁移, 黏粒向排水面附近富集的程度随着初始含水率与液限比值的增大而愈发显著。

**关键词:** 疏浚泥; 真空预压; 颗粒迁移; 液限; 初始含水率

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)08-1776-07

**作者简介:** 曾玲玲(1983—), 女, 博士, 教授, 从事疏浚泥物理-力学性状与内陆堆场处理技术、天然沉积土结构损伤理论与地基处理技术、污染底泥物理-化学-力学性状与资源化处理技术方面的研究工作。E-mail: lingl413@126.com。

## Experimental investigation on particle migration behaviour of dredged clays with high initial water contents under vacuum pressure

ZENG Lingling<sup>1</sup>, WANG Qizhong<sup>1</sup>, LIN Xiaoxin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** A vacuum consolidation model equipment is designed for performing a series of vacuum consolidation tests on two dredged clays with different liquid limits reconstituted at different initial water contents. The experimental results indicate that the ratio of the initial water content to the liquid limit is a useful dimensionless index for describing the behaviour of fine particle migration of dredged clays under vacuum pressure. It is found that there is a unique critical value of the ratio of the initial water content to the liquid limit for the occurrence of particle migration. When the ratio of the initial water content to the liquid limit is less than the critical value, the particle migration of dredged clays does not occur under vacuum pressure. But in the case that the ratio of the initial water content to the liquid limit is larger than the critical value, the particles of dredged clays migrate to the drainage surface, resulting in the enrichment of clay particles in the vicinity of the drainages. The level of clay particles enrichment increases with the increase in the ratio of the initial water content to the liquid limit.

**Key words:** dredged clay; vacuum preloading; particle migration; liquid limit; initial water content

## 0 引言

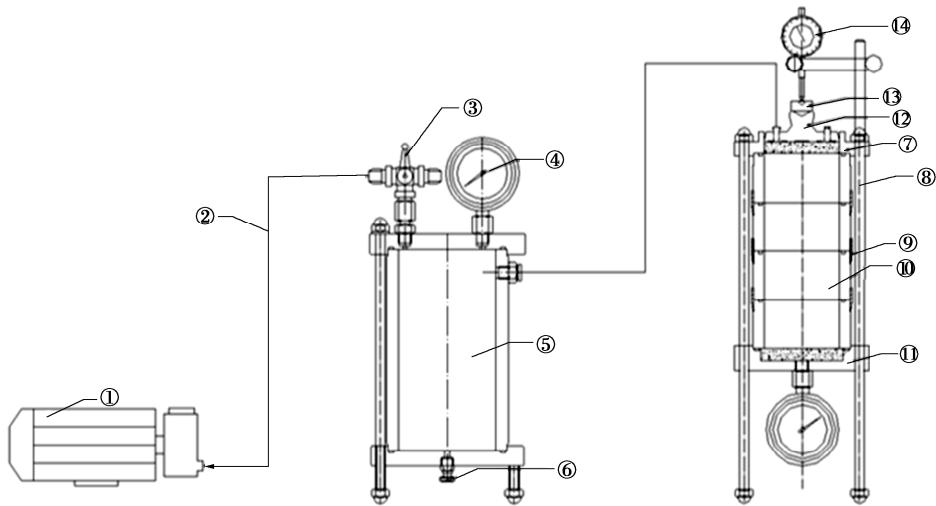
对于河湖库的清淤以及各种海洋工程的修建、维护不可避免地产生大量的疏浚泥<sup>[1]</sup>, 在沿海地区经常将疏浚泥作为填料, 用于围海吹填造陆工程<sup>[2-3]</sup>。中国通常采用水力方式进行疏浚, 其优点是连续作业、效率高、成本低, 符合中国基本国情<sup>[4]</sup>。水力式疏浚产生的疏浚泥具有含水率高、压缩性高、强度低等特点, 工程性质差<sup>[5-6]</sup>。工程实践中发现, 真空预压法加固高含水率疏浚泥经常在排水板附近形成土桩, 远离排水板的区域加固作用不明显<sup>[7-9]</sup>。一些研究者将真空排水固结技术处理大面积疏浚泥效果不佳归结于土颗粒径

向移动, 富集于排水板附近形成透水性差的致密区, 从而导致排水淤堵<sup>[9-10]</sup>。

关于真空作用下高含水率疏浚泥的颗粒迁移试验研究见之报道不多, 开展真空压力作用下不同含水率疏浚泥颗粒迁移性状的试验研究具有科学意义和应用价值。本研究采用室内模型试验, 针对具有不同液限的疏浚泥开展不同初始含水率条件下的真空固结试验, 分析真空作用下高含水率疏浚泥颗粒迁移性状与关键控制因素。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178361); 江苏省南水北调科技研发项目(JSNSBD202205)

收稿日期: 2023-06-05



①-真空泵; ②-真空导管; ③-调节阀门; ④-真空表; ⑤-压力平衡缸; ⑥-泄水阀; ⑦-试验导向套; ⑧-螺纹杆; ⑨-定位圈; ⑩-有机玻璃套环; ⑪-试样底座; ⑫-有机试样盖; ⑬-水准气泡; ⑭-位移百分表

图1 高含水率疏浚泥真空固结模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematic plot of vacuum consolidation model

## 1 试验装置与试验方案

### 1.1 试验装置

本研究自主研发了高含水率疏浚泥真空固结模型试验装置, 如图 1 所示。试验装置由三部分组成: 真空泵、水气压力平衡装置和试样室。真空泵用于施加真空负压; 水气压力平衡装置用于收集水气并且上方安装压力表能随时监控施加的真空负压值, 保证压力恒定; 试样室的高度为 16 cm, 内直径为 6.3 cm 的有机玻璃环, 顶部为可以上下活动的有机试样盖, 有机试样盖顶部与水气压力平衡装置通过管道相连, 底部与透水石相连, 试样顶部与透水石相连为排水边界, 试样室下方底座装有真空压力表, 监测试样底部受到的真空负压值。真空加载试验前先将水气压力平衡装置抽真空, 使其内部真空压力达到试验所需真空负压值, 然后打开水气平衡装置与试样间的阀门, 对试样进行加载, 并保持水气平衡装置内压力恒定, 试样固结过程中的水经过真空导管进入水气平衡装置中。

### 1.2 试样

本文使用两种不同的疏浚泥: 一种取自于福州市大学城的旗山湖, 称为旗山湖疏浚泥; 另一种取自于温州市瓯飞一期工程, 称为温州疏浚泥, 试样液限根据《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》, 使用碟式液限仪测定, 塑限采用滚搓法测定, 相对质量密度通过比重瓶法测定, 颗粒级配根据 ASTM D422-63 标准使用细筛与 H151 比重计进行测定。温州疏浚泥的液限为 63.3%, 塑限为 26.1%; 旗山湖疏浚泥的液限为 35.6%, 塑限为 18.6%。两种土样主要由细颗粒组

成, 其中温州疏浚泥的黏粒含量 ( $d < 0.005 \text{ mm}$ ) 和粉粒含量 ( $d: 0.075 \sim 0.005 \text{ mm}$ ) 分别为 46.1% 和 49.5%, 旗山湖疏浚泥的黏粒含量和粉粒含量分别为 33.9% 和 58.4%。图 2 为两种土样的塑性图, 可以看出两种土均位于 A 线上方, 旗山疏浚泥为低液限黏土, 温州疏浚泥为高液限黏土。

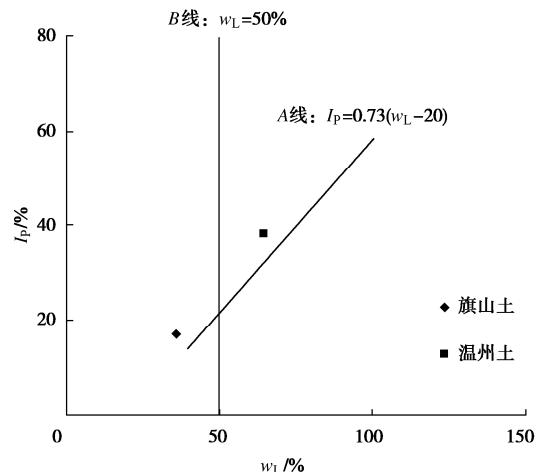


图2 土样塑性图

Fig. 2 Plasticity chart of clay samples

### 1.3 试验方案

针对旗山湖疏浚泥和温州疏浚泥, 制备不同的初始含水率试样, 分别为液限的 1.5 倍、2.0 倍、2.5 倍、3.0 倍和 4.0 倍左右, 如表 1 所示。将搅拌均匀的试样慢慢倒入高 16 cm 的有机玻璃套环中, 试样安装完成后施加 100 kPa 的真空荷载, 真空固结变形稳定后, 拆开试样室获得距离上部排水边界 1~2 cm 处的上部试样, 以及距离底部不排水边界 1~2 cm 处的下部试

样，并将上、下部试样分别自然风干后进行颗粒分析试验。

表 1 疏浚泥真空固结试验方案

Table 1 Test programs for investigated clays

旗山湖疏浚泥			温州疏浚泥		
$w_L/\%$	$w_0/\%$	$w_0/w_L$	$w_L/\%$	$w_0/\%$	$w_0/w_L$
35.6	53.40	1.50	64.3	129.10	2.01
35.6	72.30	2.03	64.3	161.36	2.51
35.6	89.42	2.51	64.3	191.40	2.98
35.6	107.00	3.00	64.3	258.51	4.02
35.6	141.97	3.99			

## 2 试验结果

图 3 (a), (b) 给出了温州疏浚泥在真空固结后

不同试样高度的颗粒分布曲线对比分析结果，发现初始含水率 ( $w_0$ ) 为液限 ( $w_L$ ) 的 2.0 倍和 2.5 倍时，真空固结后上部和下部试样的颗粒分布曲线基本一致，并且与真空固结前试样的颗粒分布曲线基本重叠，说明初始含水率为液限的 2.0 倍和 2.5 倍时，温州疏浚泥在真空作用下没有发生颗粒迁移。当初始含水率为液限的 3.0 倍时，真空固结后温州疏浚泥上部试样的颗粒分布曲线向上移动，下部试样向下移动，说明较小粒径的颗粒发生了迁移，向排水面方向富集，如图 3 (c) 所示。由图 3 (d) 可见，当初始含水率为液限的 4.0 倍时，上部与下部试样的颗粒分布曲线差异变大，说明随着  $w_0/w_L$  的增大，颗粒迁移现象逐步显著。

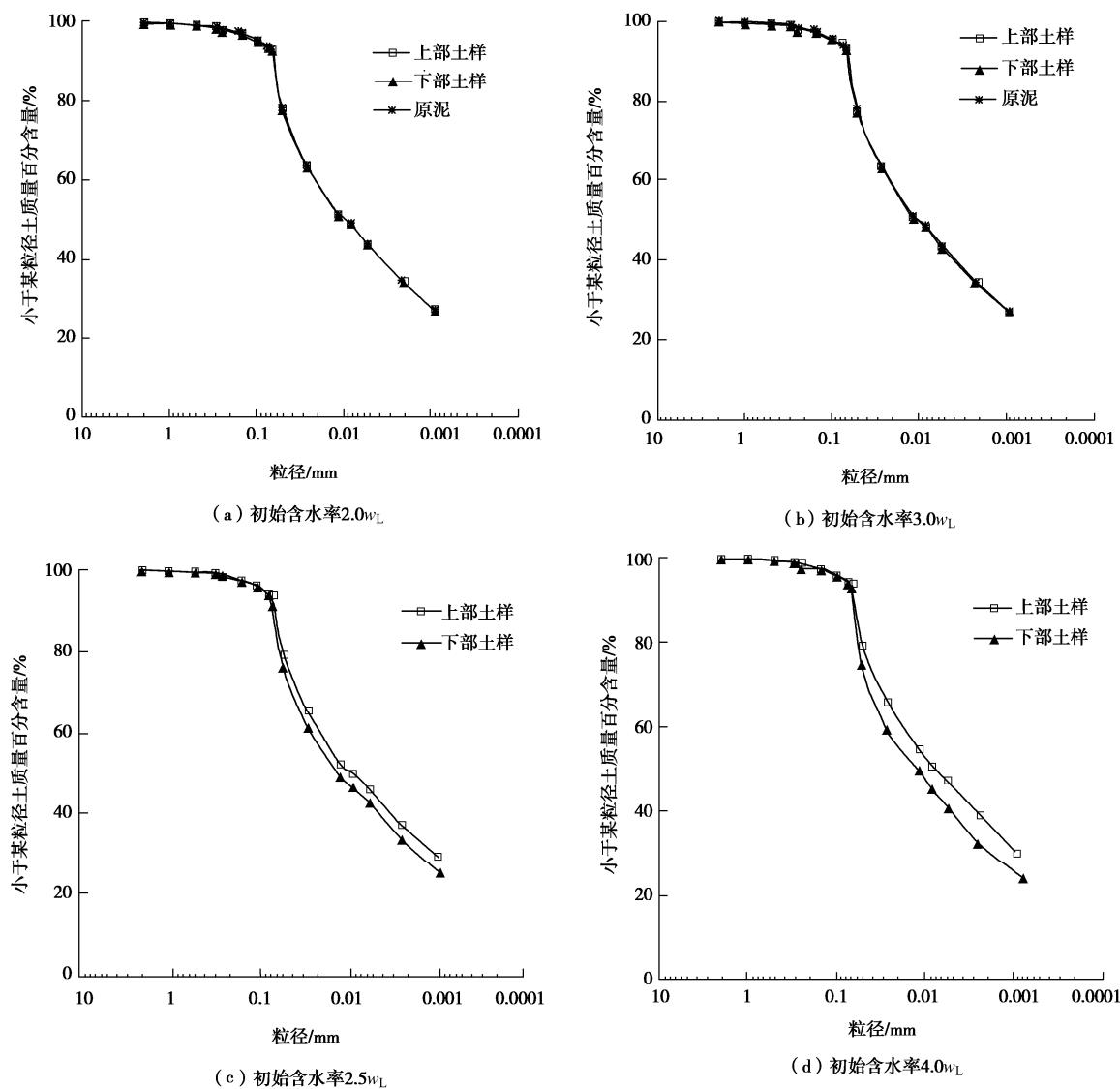


图 3 温州疏浚泥真空加载后试样上、下部分颗粒分曲线

Fig. 3 Particle segregation behaviour of Wenzhou clay under vacuum pressure

同样的规律可见于旗山湖疏浚泥, 当  $w_0/w_L = 1.5, 2.0, 2.5$  时, 旗山湖疏浚泥在真空作用下没有发生颗粒迁移, 如图 4 (a) ~ (c) 所示。当初始含水率为 3.0 倍和 4.0 倍液限含水率时, 较小粒径的颗粒向排水面迁移, 颗粒迁移的程度随着初始含水率与液限比值的增大而愈发明显, 如图 4 (d), (e) 所示。

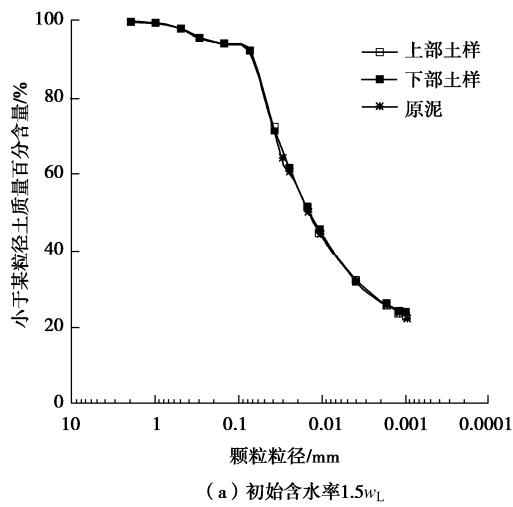
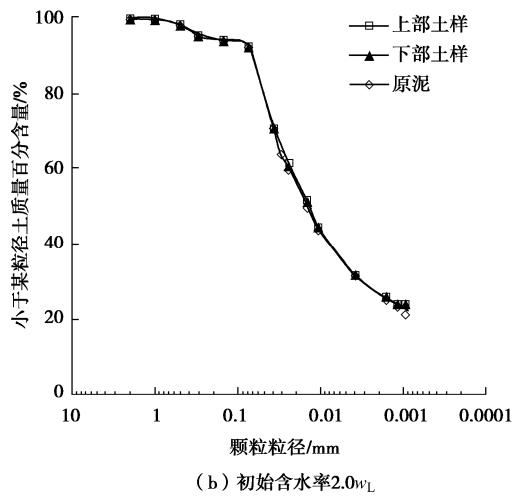
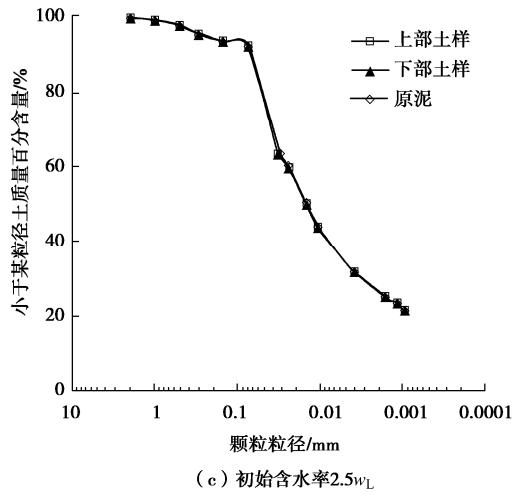
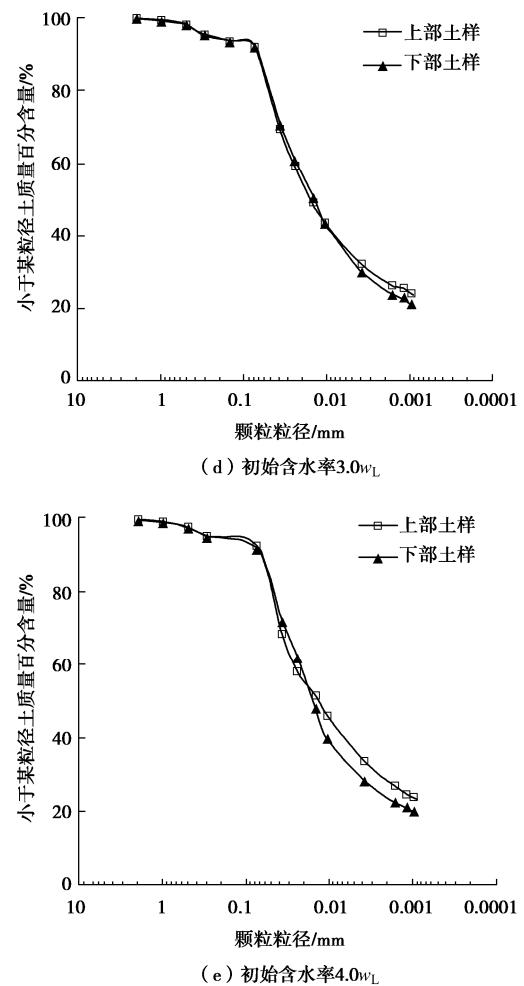
(a) 初始含水率  $1.5w_L$ (b) 初始含水率  $2.0w_L$ (c) 初始含水率  $2.5w_L$ 

图 4 旗山湖疏浚泥真空加载试样上、下部分颗粒分曲线

Fig. 4 Particle migration behaviour of Qishanhu clay under vacuum pressure

### 3 颗粒组分变化规律

疏浚泥颗粒分布通常具有宽广的级配, 如本文采用的两种疏浚泥颗粒大小变化范围为  $1.0 \sim < 0.001$  mm。因此, 为了简单清晰地探讨真空固结过程疏浚泥颗粒迁移性状, 按照土力学的颗粒组成划分方法, 将土颗粒划分 3 个粒组: 黏粒 ( $d < 0.005$  mm)、粉粒 ( $0.075 \text{ mm} > d > 0.005 \text{ mm}$ ) 和砂粒 ( $d > 0.075 \text{ mm}$ ), 两种疏浚泥在真空作用后不同部位各粒组含量变化如图 5, 6 所示。当含水率很低时土体为密实固态, 真空作用下土颗粒不会发生迁移, 因此将真空固结前试样的不同颗粒含量数据显示于  $w_0/w_L = 0$  处, 用于比较分析。

图 5 显示了温州疏浚泥试样初始含水率为 2 倍和 2.5 倍液限含水率时, 经过真空固结后上部和下部的颗粒组成变化很小, 黏粒含量变化范围在 42.1% ~ 42.3% 范围内, 粉粒含量变化范围为 51.5% ~ 51.7%, 与真空固结前颗粒分组基本一致; 当初始含水率为 3.0 倍液限时, 离排水面较近的上部试样黏粒含量为 45.5%,

粉粒含量为 48.5%，而离排水边界较远的下部试样黏粒含量为 41.7%，粉粒含量为 52.7%；当初始含水率为 4.0 倍液限时，上部和下部试样的黏粒含量和粉粒含量的差距进一步加大，离排水面较近的上部试样黏粒含量为 47.1%，粉粒含量为 47.5%，而离排水边界较远的下部试样黏粒含量为 34.5%，粉粒含量为 59.9%。

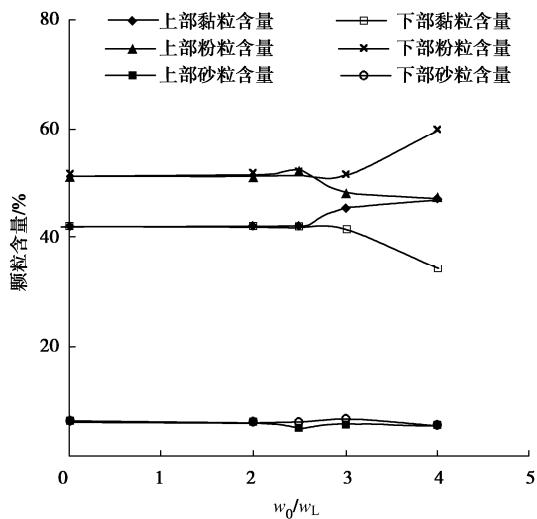


图 5 温州疏浚泥不同部位各粒组含量分布

Fig. 5 Change of grain size with initial state for Wenzhou clay

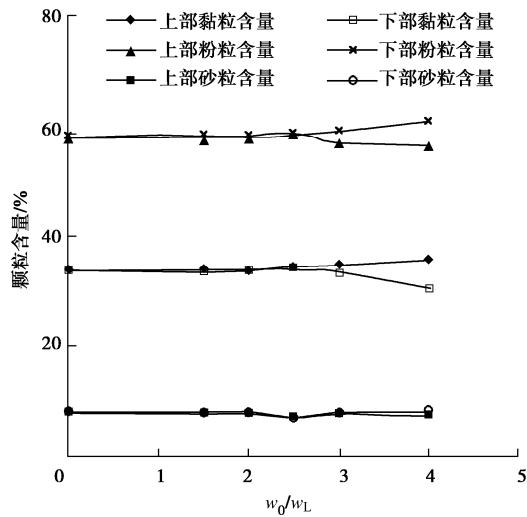


图 6 旗山湖疏浚泥不同部位各粒组含量分布

Fig. 6 Change of grain size with initial state for Qishanhu clay

图 6 显示了福州旗山湖疏浚泥试样初始含水率为 1.5 倍、2 倍和 2.5 倍液限含水率时，真空固结前后的颗粒组成含量基本没有变化，黏粒含量分布于 33.9% 附近，粉粒含量分布于 58.4% 附近；当初始含水率为 3.0 倍液限时，离排水面较近的上部试样黏粒含量为 34.9%，粉粒含量为 57.5%，而离排水边界较远的下部试样黏粒含量为 33.7%，粉粒含量为 59.4%；

当初始含水率为 4.0 倍液限时，上部和下部试样的黏粒含量和粉粒含量的差距加大，离排水面较近的上部试样黏粒含量为 35.9%，粉粒含量为 56.8%，而离排水边界较远的下部试样黏粒含量为 30.7%，粉粒含量为 61.3%。

以上结果说明，当初始含水率小于 2.5 倍液限含水率时，没有发生颗粒迁移现象；当初始含水率大于 3.0 倍液限含水率后，黏粒向排水面富集，导致距离排水边界较近区域的上部试样黏粒质量含量增多，粉粒含量减小，而距离排水边界较远区域的下部试样黏粒质量含量减小，粉粒含量增大。同时也可以看出，粗颗粒总含量很小，颗粒迁移对其相对含量的影响很小。

初始含水率为 3 倍和 4 倍液限试样在真空加载后由于黏粒和粉粒相对含量的变化，从图 4, 5 可以看出，颗粒迁移导致颗粒分布曲线的斜率发生相应的变化，本文引入等效不均匀系数  $C_{ur} = d_{60}/d_{30}$  用于分析颗粒分布曲线斜率的变化规律， $d_{30}$  作为有效粒径，表示小于该粒径的土含量占总质量的 30%， $d_{60}$  表示小于该粒径的土含量占总质量的 60%，为控制粒径。等效不均匀系数  $C_{ur}$  变大，表明试样的粒径大小相差越悬殊。图 7 (a) 显示温州疏浚泥初始含水率为 2.0 倍和 2.5 倍液限含水率试样真空固结后的不均匀系数浮动范围 15.47~15.88，与真空固结前试样等效不均匀系数 15.87 基本一致。当初始含水率为 3.0 倍和 4.0 倍液限含水率试样真空固结后等效不均匀系数为 8.24~19.78，真空固结前后等效不均匀系数发生显著变化。图 7 (b) 显示旗山湖疏浚泥试样初始含水率为 1.5 倍、2.0 倍和 2.5 倍液限含水率试样真空固结前后等效不均匀系数变化很小，分布于 7.14~7.42 范围内；3.0 倍和 4.0 倍液限含水率固结后试样等效不均匀系数变化很大，分布于 4.92~10.57。

#### 4 发生颗粒迁移的临界初始状态与变化规律

土体的液性指数或者更为简单的初始含水率与液限比值经常用于定量描述初始状态对饱和重塑土力学性状的影响，文献[6, 11, 12]给出重塑土不固结不排水剪切强度随着初始含水率与液限比值的增大而减小的结论。本研究采用初始含水率与液限比值描述真空作用下颗粒迁移性状，图 8 给出了离排水面不同距离的上部试样黏粒含量与下部试样黏粒含量的比值随  $w_0/w_L$  的变化，可以发现，两种具有不同物理性质（包括液塑限和颗粒分布）的高含水率疏浚泥，发生颗粒迁移的临界初始状态值均为  $w_0/w_L = 2.7$ 。初始状态小于临界值，没有发生颗粒迁移；当  $w_0/w_L$  大于临界值，

黏粒向排水面附近富集。以上结果表明, 真空作用下疏浚泥是否发生颗粒迁移与疏浚泥的强度密切相关。

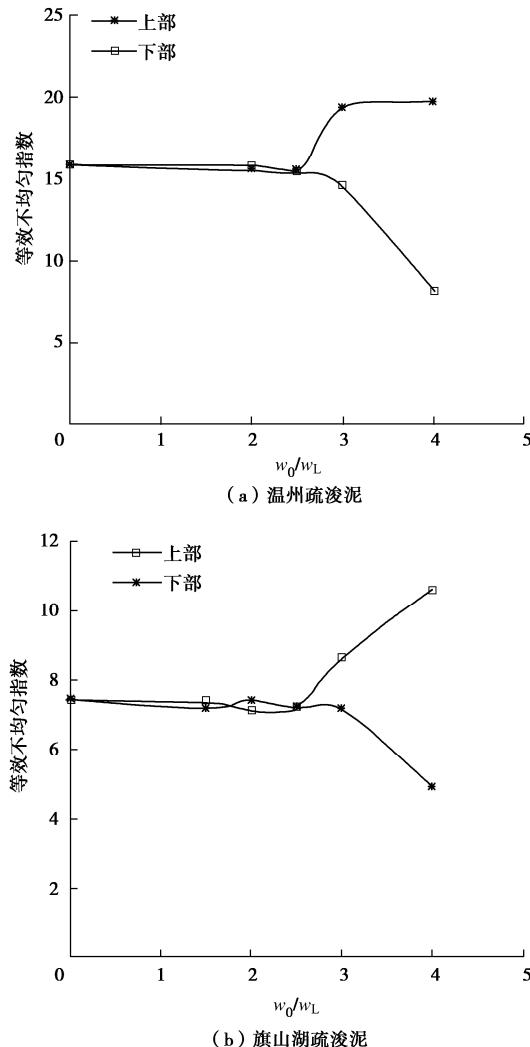


图 7 等效不均匀系数随着  $w_0/w_L$  的变化

Fig. 7 Change of nonuniformity coefficient with initial state

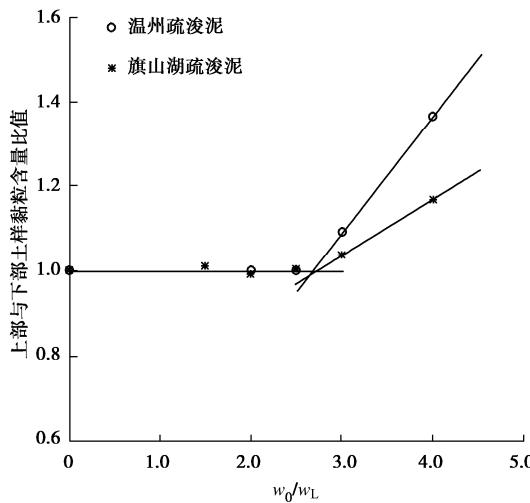


图 8 试样上部和下部黏粒含量的比值

Fig. 8 Ratios of upper to lower particles of clay samples

图 9 给出了上部试样和下部试样的等效不均匀系

数比值随  $w_0/w_L$  的变化, 可以发现, 等效不均匀系数比值发生变化的临界初始状态与上部试样黏粒含量与下部试样黏粒含量的比值的临界初始状态基本一致, 大约为  $w_0/w_L = 2.7$ 。另外, 从图 8 还可以发现, 当  $w_0/w_L$  大于发生颗粒迁移临界值, 上部试样黏粒含量与下部试样黏粒含量的比值随  $w_0/w_L$  变化的斜率越大, 该斜率可以代表颗粒迁移的显著程度, 说明液限高的温州疏浚泥随着  $w_0/w_L$  的增大, 颗粒迁移显著程度要大于液限低的旗山湖疏浚泥, 也就是液限越高, 一旦发生颗粒迁移, 在排水通道附近发生黏粒富集的现象越明显。

应该明确指出, 本研究仅限于两种不同液限的疏浚泥开展初始状态对真空作用下颗粒迁移性状的试验研究, 关于发生颗粒迁移的初始状态临界值  $w_0/w_L$ , 以及颗粒迁移程度随  $w_0/w_L$  的变化规律需要更多的试验数据予以验证完善。同时, 今后需要进一步开展不同试样高度和不同起始真空压力下的颗粒迁移性状试验研究与现场实例研究, 分析不同尺度下不同排水距离的颗粒迁移性状和真空加固效果。

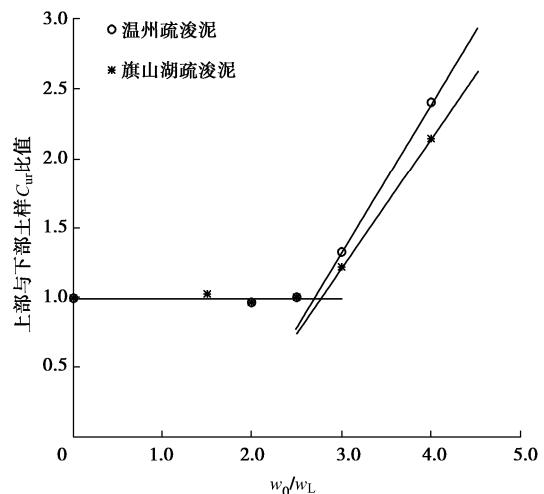


图 9 试样上部和下部等效不均匀系数的比值

Fig. 9 Ratios of upper to lower nonuniformity coefficients of clay samples

## 5 结 论

本研究基于自行研制的高含水率疏浚泥真空固结模型装置, 针对两种不同液限的疏浚泥开展不同初始状态对真空作用下颗粒迁移性状的试验研究, 得出如下 3 点结论。

(1) 真空作用下高含水率疏浚泥是否发生颗粒迁移的临界阈值取决于疏浚泥的初始含水率与液限的比值, 说明真空作用下发生颗粒迁移的阈值与疏浚泥不固结不排水强度密切相关。

(2) 当初始含水率与液限比值小于临界阈值, 真

空作用下高含水率疏浚泥基本不会发生颗粒迁移。

(3) 当初始含水率与液限比值大于临界阈值, 真空作用下黏粒向排水面附近聚集, 富集程度随着初始含水率与液限比值的增大而增大。

## 参考文献:

- [1] 黄华梅, 高杨, 王银霞, 等. 疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在中国应用潜力[J]. 生态学报, 2012, **32**(8): 2571-2580. (HUANG Huamei, GAO Yang, WANG Yinxia, et al. Review of the current situation of coastal ecological engineering using dredged marine sediments and prospects for potential application in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(8): 2571-2580. (in Chinese))
- [2] 董志良, 刘嘉, 朱幸科, 等. 大面积围海造陆围堰工程关键技术研究及应用[J]. 水运工程, 2015(2): 9-17. (DONG Zhiliang, LIU Jia, ZHU Xingke, et al, et al. Key technology research and application of cofferdam construction in large-area reclamation project[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(2): 9-17. (in Chinese))
- [3] 尚金瑞. 围海造陆填土与地基处理技术及其应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015. (SHANG Jinrui. Filling and Ground Treatment Technologies of Land Reclamation and Their Applications[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese))
- [4] 韩明, 刘厚恕. 浅述中国疏浚工业的发展道路[J]. 船舶, 2002, **13**(2): 6-13. (HAN Ming, LIU Houshu. On the development of China's dredging industry[J]. Ship & Boat, 2002, **13** (2): 6-13. (in Chinese))
- [5] 牟聪. 低应力下高含水率疏浚黏土固结性状试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. (MOU Cong. Experimental Investigation of Consolidation Behaviour for Dredged Clays with High Water Contents under Low Stress Levels[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese))
- [6] CARRIER W D, BROMWELL L G, SOMOGYI F. Design capacity of slurried mineral waste ponds[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **20**(5): 154-155.
- [7] KJELLMAN W. Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure[C]// Pro Conference on Soil Stabilization. Boston, 1952.
- [8] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, **35**(2):7-10. (GONG Xiaonan, CEN Yangrun. Mechanism of vacuum preloading[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, **35**(2):7-10. (in Chinese))
- [9] 陈平山, 董志良, 张功新. 新吹填淤泥浅表层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J]. 水运工程, 2015(2): 88-94. (CHEN Pingshan, DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin. Mechanism and numerical simulation of the “soil piles” in the fresh hydraulic mud fill treated by surface-layer improvement technique[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(2): 88-94. (in Chinese))
- [10] 邓东升, 洪振舜, 刘传俊, 等. 低浓度疏浚淤泥透气真空泥水分离模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 250-253. (DENG Dongsheng, HONG Zhenshun, LIU Chuanjun, et al. Large-scale model tests on dewater of dredged clay by use of ventilating vacuum method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 250-253. (in Chinese))
- [11] NAGARAJ T S, SRIASA MURTHY B R. A critical reappraisal of compression index equation[J]. Géotechnique, 1986, **36**(1): 27-32.
- [12] LOCAT J, DEMERS D. Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, **25**(4): 799-806.