

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-2371-08

# 分层抽取法在泥沙沉积过程中的应用研究

何洪涛<sup>1,2</sup>, 朱 伟<sup>1,3</sup>, 张春雷<sup>4</sup>, 王 亮<sup>1,5</sup>

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广州, 510230;  
3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098; 4. 河海大学 环境学院, 南京 210098;  
5. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广州 510300)

**摘 要:** 悬浮泥沙到沉积土的形成过程非常复杂, 涉及到泥沙的沉降和土的自重固结。物理模型试验需要实测含水率、密度、颗粒分布、超孔隙水应力和总应力, 但目前尚无简单可行的方法。提出了一种改进的室内试验方法, 通过与国内外现有试验方法相对比, 改进后的方法不仅可以得到泥沙在沉积过程中的泥面下沉变化、含水率(密度)分布、超孔隙消散剖面, 而且还能得到沉积物在不同高度和时间的颗粒分布变化等性质。通过多个试验实测及一致性测试表明, 实测数据合理、可信, 一致性检验误差较小, 验证了此方法的可行性。

**关 键 词:** 分层抽取法; 泥沙沉积; 含水率; 超孔隙水压力; 颗粒分布

中图分类号: TU 411.2

文献标识码: A

## Application of multilayer extraction sampling to sediment deposition process

HE Hong-tao<sup>1,2</sup>, ZHU Wei<sup>1,3</sup>, ZHANG Chun-lei<sup>4</sup>, WANG Liang<sup>1,5</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, SOA, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** The soil bed formation is a complex process which involves sedimentation and dead-weight consolidation. However, there isn't a simple and feasible method for measuring the water content, density, grain size, pore water pressure and total stress during its physical model test now. An improved laboratory testing method has been carried out. Compared with the available testing methods, the surface settlement, water content (density) distribution, dissipation profiles of excess pore water pressure, and grain size distribution variation of deposition at different depths and times in the process can be obtained by using the improved method. The experimental results show that the measured data are reasonable; and error of consistency test is small; and the improved laboratory testing method is feasible.

**Key words:** multilayer extraction sampling; sediment deposition; water content; excess pore water pressure; grain size distribution

## 1 引 言

土是经过泥沙的沉积而形成的。河口、海岸、河流、湖泊及水库都在发生泥沙的沉积过程, 产生底泥并转化为土。在吹填造陆、航道整治以及水环境治理的疏浚工程等人工工程中会形成一种完全扰动的悬浮泥沙(黏土颗粒较多时称为泥浆), 悬浮态的泥沙经过沉降及自重固结作用最终形成具有一定结构性的沉积土<sup>[1]</sup>。泥沙从水土混合的悬浮物(颗粒之间没有接触应力)转化为土水分离的土(颗粒

互相接触并产生有效应力)的过程非常复杂, 除土力学以外还涉及到胶体化学、流体力学等领域。而这一过程的研究对于吹淤工程以及新近沉积物的处理与利用有着重要的意义。

研究泥沙沉积为土的过程, 除了传统土力学需要了解土的含水率、密度、有效应力和孔隙水应力的变化以外, 还需要了解颗粒的动态变化和悬浮态泥沙的物理性质变化。对于含水率高达 100%~600%的泥-土系统(悬浮态泥沙和沉积态泥土同时存在的系统)而言, 传统的测试方法会出现一些困

收稿日期: 2010-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No. 50979028); 水利部公益性行业科研专项经费项目资助 (No. 200801065); 海洋公益性行业科研专项经费项目资助 (No. 201105024)。

第一作者简介: 何洪涛, 男, 1986 年生, 硕士, 主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: heht@fhdigz.com

难。悬浮态泥沙沉降及自重固结研究中，有效应力的获得需要测得总应力及孔隙水压力；颗粒分布分析需取样或原位调查。测试一般包括泥-水分界面变化、含水率（密度）分布、孔隙水压力消散变化、颗粒分布及强度变化，而现有的土工试验方法在测试上难以适用于这种变化中的泥-土体系。也有一些针对这一系统的研究，但测试手段较为复杂<sup>[2]</sup>，而且偏重于研究沉降和自重固结各个阶段内的静止状态，难以对应一个随时间不断变化的动态过程。本

文探讨了国内外多种试验方法后，提出了利用分层抽取法研究泥沙从悬浮态到沉积态变化过程的试验方法。

2 现有试验方法

悬浮态泥沙沉降与自重固结的试验研究最早是由 Been 和 Sills 等<sup>[3]</sup>开展，随后许多学者开始进入这一研究领域，部分国内外有关学者的试验方法详见表 1。

表 1 沉积柱试验一览表  
Table 1 Synthesis of sediment column experiments

| 参考资料来源                     | 试验条件                         |             |             | 沉积柱(内径×高度)尺寸<br>(mm×mm) | 密度剖面      | 孔隙水压力剖面      | 颗粒分布 |
|----------------------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|-----------|--------------|------|
|                            | 初始密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 试样高度<br>/ m | 最长历时<br>/ d |                         |           |              |      |
| Been 等 <sup>[3]</sup>      | 1.020~1.224                  | 0.643~1.929 | 100         | 102×2 000               | X 射线核子密度计 | 1 支孔压传感器+转换器 | 最后测试 |
| Imai <sup>[4]</sup>        | 1.031~1.085                  | 0.215~2.000 | 3           | 50×250, 200×250         | 剪切取样      |              | 最后测试 |
| Merckelbach <sup>[5]</sup> | 1.070~1.133                  | 0.354~1.546 | 95          | 100×400, 分层沉积柱          | γ 射线核子密度计 | 1 支孔压传感器+转换器 |      |
| Alexis 等 <sup>[2]</sup>    | 1.071                        | 1.500       | 32          | 90×1 750                | γ 射线核子密度计 | 1 支孔压传感器+转换器 | 最后测试 |
| 刘莹等 <sup>[6]</sup>         | 1.037~1.256                  |             | 90          |                         |           |              |      |

Alexis<sup>[2]</sup>、Been<sup>[3]</sup>与 Merckelbach<sup>[5]</sup>等试验方法类似，采用是 X 射线或 γ 射线核子密度计对整个沉积柱在不同时间段进行垂直扫描，如图 1 所示。此方法可得到不同时间段的密度剖面，优点是无损式测量、连续性好、可测试初始状态；但同时存在如下缺点：成本较高、设备操作复杂、测试结果均需率定、核子密度计对操作人员会造成一定的辐射影响等。在测试孔隙水压力剖面时，采用一个孔压传感器加转换器测试整个沉积柱孔隙水压力剖面，如图 2 所示。在一定程度上会因压力传递距离造成水头损失，不同高度处的孔压在不同时间测试还会造成孔压数据的相对滞后性。Merckelbach<sup>[5]</sup>则更加关心沉积物的强度变化规律，通过设计分层式沉积柱在一定时间段进行分层测试，如图 3 所示，但试验装置过于复杂，不便操作及推广。

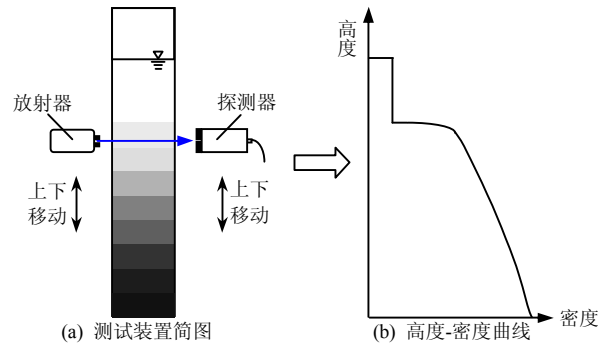


图 1 核子密度计无损测量密度  
Fig.1 Nondestructive density measurement  
by nuclear densimeter

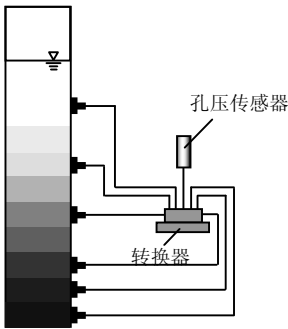


图 2 孔隙水压力测试  
Fig.2 Pore water pressure measurement

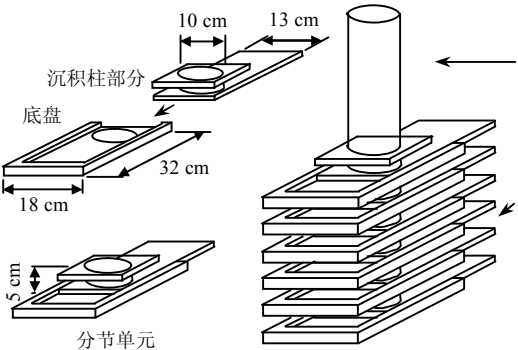


图 3 分层式沉积柱示意图  
Fig.3 Sketch of layered sediment column

Imai<sup>[5]</sup>采用试样切割器在不同时间对试样进行剪切取样，如图 4 所示，从而可得到沉积柱的分层密度。此方法的优点是可准确得出试样在不同时间

的分层密度, 且能得到试样其他参数, 如颗粒分布变化; 缺点是操作过于复杂、对试验装置要求过高。

刘莹等<sup>[6]</sup>主要是把沉积柱中的泥柱当成一个整体来研究, 这样对沉积物的整体变化可作宏观性的把握, 但由于缺少密度剖面、孔压剖面和颗粒分布的测试, 还需要对细节性进行深入研究。

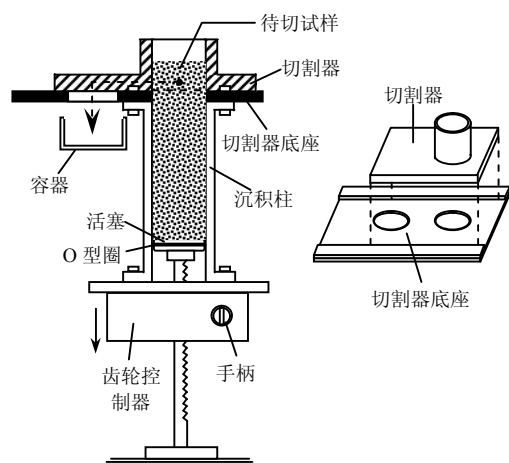


图4 试样切割器测量密度  
Fig.4 Density testing by sample cutter

### 3 分层抽取法的试验方法设计

参考其他学者的试验方法, 考虑到试验方法的成本、操作性和准确性, 提出了一种分层抽取试验法。其方法是由沉积柱、孔隙水应力实测及采集、含水率(密度)、粒度的分层抽取试验组成。在沉积柱中注入试验泥沙使其开始沉降, 通过不同位置的孔隙水应力计采集孔隙水应力的变化, 并通过抽取装置从顶部自上而下抽取各层泥沙, 测试其含水率、密度和颗粒分布。

#### 3.1 沉积柱设计

根据 Elder<sup>[7]</sup>的研究经验, 内径小于 100 mm 的沉积柱可能会因尺寸效应对泥沙的沉降及自重固结造成一定的影响, 因此, 本试验设计的沉积柱内径均为 100 mm, 采用分节式设计, 每节 400 mm, 由有机玻璃制成, 用法兰盘连接, 可组装成高度不同、内径均为 100 mm 的沉积柱。

#### 3.2 孔隙水压力测试

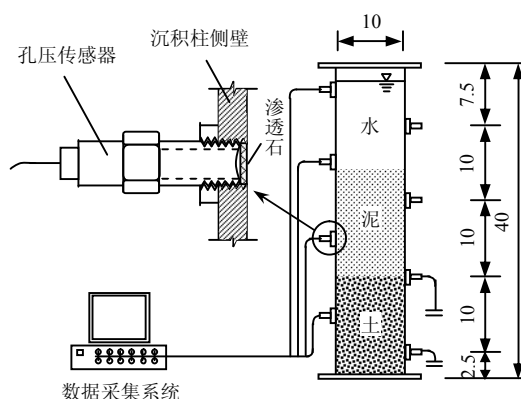
通过孔压测试系统可得到孔隙水压力随时间消散的变化。采用左右间隔式将高精度差压式孔压传感器直接安装在沉积柱上, 见图 5, 不仅可减小因侧壁不均匀带来的测试误差, 也可去除水头损失的影响。每个孔压传感器前端均配置一块陶土板渗透石, 以过滤泥沙中的土颗粒, 只让水透过渗透石, 从而测得此处的孔隙水压力。孔压传感器的另一端

接在数据采集系统上, 输出信号为差压式信号(0~5 V), 对应的压力为 0~35 kPa, 测试前采用静水进行率定, 记录沉积柱中不同高度变化的静水反映的差压信号, 得到测试点偏离率定曲线均小于 0.5%, 即得到孔压传感器的精度小于 0.1 kPa。

有效应力公式为

$$\sigma = \sigma' + u = \sigma' + u_w + u_e \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为总应力 (kPa);  $\sigma'$  为有效应力 (kPa);  $u$  为孔隙水压力 (kPa);  $u_w$  为静水压力 (kPa);  $u_e$  为超孔隙水压力 (kPa)。



(a) 孔压测试系统示意图(单位: cm)



(b) 孔压测试系统实物图

图5 孔压测试系统

Fig.5 Measuring system of pore pressure

#### 3.3 含水率(密度)测试

通过分层抽取试样可得到分层含水率(密度)剖面及颗粒分布变化。分层抽取试样的步骤如下: ①根据密度剖面测试的时间段数量制备相应数量的沉积柱; ②根据试验条件将准备好的泥沙体均匀注入各个沉积柱, 使每个沉积柱的初始条件(高度、密度)相同, 并依次在各个沉积柱上标记密度剖面的待测时间; ③将各个不同测试时间土柱分层后(见图 6), 进行真空抽取试样, 通过移动取样器的

取样管（贴有标尺）控制取样深度，同时取样管底部为设有均匀小孔且直径较大的喷头状取样嘴，使得取样断面能够保持均匀（见图 7），一般为每分钟每层 3 cm，即取样速率为 3 cm/min，则一个密度剖面的取样时间约 20 min 左右，取样完成后可见到沉积柱的侧壁上明显有均匀分层的痕迹（见图 8）；④抽取试样至真空缸内的试样杯后，放入烘箱测其含水率，换算成相应的密度，并把各个时间的沉积柱密度剖面作为一个连续试验的密度剖面变化，分层抽取法示意图见图 9。

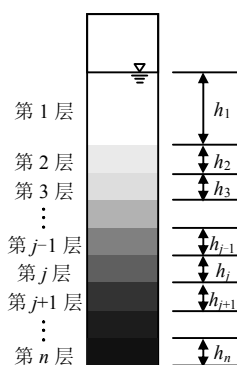


图 6 沉积柱分层

Fig.6 Subdivision of layered sediment column



图 7 取样器

Fig.7 Sampling device



图 8 分层取样后的土柱变化

Fig.8 Sediment column after multilayer extraction sampling

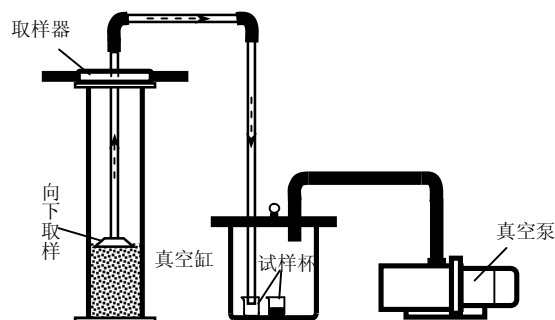


图 9 分层取样法示意图

Fig.9 Sketch of multilayer extraction sampling

由于泥沙在沉降和自重固结过程中均在水中运动，可假设泥沙体的饱和度  $S_r = 100\%$ ，则泥沙可看作固、液两相体。含水率与孔隙比的关系为<sup>[8]</sup>

$$e = \omega G_s \quad (2)$$

式中： $e$  为孔隙比； $\omega$  为含水率； $G_s$  为土粒相对密度。

密度与含水率的关系为

$$\rho = \frac{G_s(1 + \omega)}{1 + \omega G_s} \rho_w \quad (3)$$

式中： $\rho_w$  为水的密度 ( $\text{g/cm}^3$ )； $\rho$  为泥沙体的密度 ( $\text{g/cm}^3$ )。

因此，获得了含水率指标，同时也获得了其他指标如孔隙比、密度等。

由于在对高含水率的泥沙进行分层抽取时，泥-水分界面下降较快，一般的泥面下降速率  $v = 0.05 \sim 0.1 \text{ cm/min}$ ，与取样速率  $v' = 3 \text{ cm/min}$  的比值  $v'/v = 30 \sim 60$ ，则不同的泥面下降速率会对取样数据造成一定的影响，参考其他学者的研究<sup>[4]</sup>，针对这个问题进行了适当修正。

每层取样的修正如图 10 所示，设取样时实测含水率为  $\omega'$ ，真实含水率为  $\omega$ ， $\Delta t$  为单次取样时间， $\Delta z$  为单次取样高度， $v$  为泥面下沉速率， $n$  为孔隙率， $G_w$  为水的相对密度，则真实含水率  $\omega$  可写为

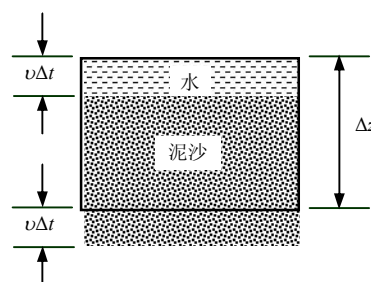


图 10 取样修正

Fig.10 Correcting errors in sampling

$$\omega = \frac{n\rho_w}{(1-n)\rho_s} = \frac{n}{1-n} \frac{G_w}{G_s} = \left( \frac{1}{1-n} - 1 \right) \frac{G_w}{G_s} \quad (4)$$

式 (4) 也可写为

$$\frac{1}{1-n} = 1 + \omega(G_s/G_w) \quad (5)$$

实测含水率  $\omega'$  可表示为

$$\omega' = \frac{v\Delta t\rho_w + (\Delta z - v\Delta t)n\rho_w}{(\Delta z - v\Delta t)(1-n)\rho_s} = \frac{v\Delta tG_w}{(\Delta z - v\Delta t)(1-n)G_s} + \frac{nG_w}{(1-n)G_s} \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (6), 可得

$$\omega' = \frac{v\Delta tG_w}{(\Delta z - v\Delta t)(1-n)G_s} + \omega \quad (7)$$

式 (7) 也可写为

$$(\omega' - \omega)(1-n)(G_s/G_w) = \frac{v\Delta tG_w}{\Delta z - v\Delta t} \quad (8)$$

将式 (5) 代入式 (8), 可得

$$\frac{(\omega' - \omega)(G_s/G_w)}{1 + \omega(G_s/G_w)} = \frac{v\Delta t}{\Delta z - v\Delta t} \quad (9)$$

同时, 设取样速率  $v' = \Delta z / \Delta t$ , 则式 (9) 可写为

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{(v'/v) + (1/\omega)(G_w/G_s)}{(v'/v) - 1} \quad (10)$$

由图 11 可知, 当  $v'/v$  较小时,  $\omega'/\omega$  比值较大; 反之, 当  $v'/v$  较大时,  $\omega'/\omega$  比值较小。且在  $v'/v$  相当大的情况下, 如  $v'/v > 100$  时,  $\omega'/\omega \approx 1$ ; 在同一个  $v'/v$  比值下,  $\omega'/\omega$  随真实含水率  $\omega$  的增大而减小, 并逐渐趋缓。

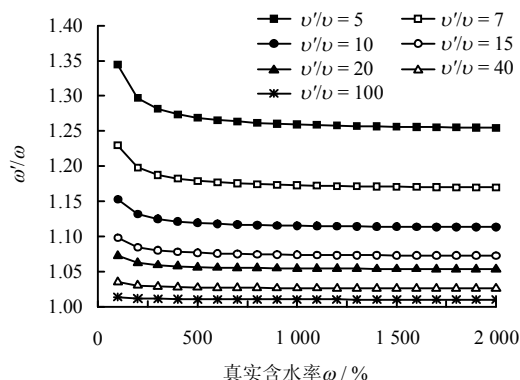


图 11 不同  $v'/v$  比值下取样对含水率的影响  
Fig.11 Effects of sampling on water content under different ratios of  $v'/v$

### 3.4 颗粒分布的测试

密度剖面的测试同时为颗粒分布的测试提供条件, 采用英国马尔文公司的激光粒度仪 (Malvern Mastersizer 2000) 对不同时间段的试样进行颗粒测试, 可以在不同时间段不同高度处测试颗粒分布, 研究沉积造成的颗粒分布规律及颗粒分布与其他指标的关系。

## 4 实测结果

### 4.1 试验结果

试验采用取自江苏宜兴周铁镇太湖清淤产生的西太湖疏浚淤泥。《土工试验方法标准》<sup>[9]</sup>测定了试验用疏浚泥的基本物理性质指标, 详见表 2。

表 2 试验用疏浚泥的基本物理性质指标  
Table 2 Basic physico-mechanical parameters of test dredged sediment

| 取泥地 | 土粒相对密度 $G_s$ | 液限 $\omega_L$ / % | 塑限 $\omega_P$ / % | 黏粒含量 <sup>①</sup> / % | 有机质含量 <sup>②</sup> / % |
|-----|--------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| 西太湖 | 2.62         | 54                | 25                | 24.47                 | 1.04                   |

注: ①粒径  $< 5 \mu\text{m}$ ; ②采用日本岛津公司 (SHIMADZU) 的 TOC-V (CPN) SSM-5000A 测得。

分别在 2、4、6、8、24、48 h 时间段测得两种不同初始含水率 ( $\omega_i = 317\%$  和  $\omega_i = 636\%$ ) 的密度剖面, 密度剖面随时间呈现不一样的变化, 初始含水率较高 ( $\omega_i = 636\%$ ,  $\rho_i = 1.092 \text{ g/cm}^3$ ) 的疏浚泥在 24 h 内变化较大, 见图 12, 可明显看到密度剖面呈阶梯变化, 即悬浮态泥浆在向沉积土的不断转化, 随着自重固结地进行, 密度剖面逐渐趋缓, 最后在 48 h 时最底端的密度约为  $1.37 \text{ g/cm}^3$ 。

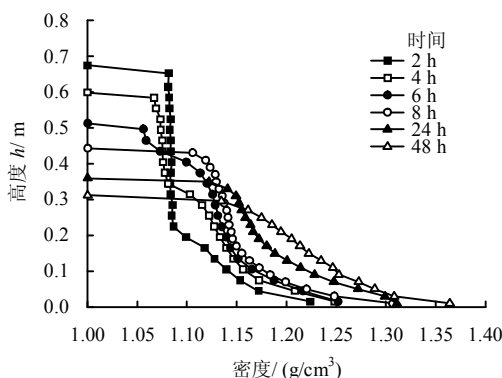


图 12 不同时间的密度剖面  
Fig.12 Density profiles at different times

由式 (1) 可知, 超静孔隙水压力即为孔隙水压力与静水压力的差值, 通过沉积柱上不同位置的孔压传感器和数据采集系统得到疏浚泥 ( $\omega_i = 636\%$ ,

$\rho_i = 1.092 \text{ g/cm}^3$ ) 在 48 h 内的孔隙水压力, 减掉静水压力, 即为不同时间的超静孔隙水压力剖面消散剖面<sup>[10]</sup>, 见图 13。由图可知, 刚开始 ( $t=2 \text{ h}$ ) 的超孔隙水压力曲线比较接近初始状态的理论值, 超孔隙水压力随着自重固结地进行不断消散, 最后在 48 h 时底部的超孔压消散度可达 70% 以上。

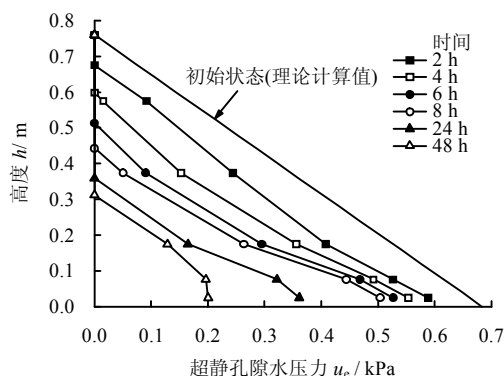


图 13 超孔压消散曲线

Fig.13 Dissipation curves of excess pore water pressure

在测试疏浚泥 ( $\omega_i = 636\%$ ,  $\rho_i = 1.092 \text{ g/cm}^3$ ) 在 4 h 和 48 h 的分层含水率 (密度) 时, 同时对泥柱均分为 5 层 (设整个泥柱高度为 1, 最底端  $z=0$ , 最顶端  $z=1$ ) 进行取样测其粒度组成, 见图 14。颗粒分布随着沉积过程呈现不同的变化, 在 4 h 时可明显观察到泥柱最底端和其他部分的粒度组成不同, 在 48 h 时整个泥柱的粒度分布较为分散。

#### 4.2 一致性检验

分层抽取法在取样过程中会对试样造成一定的扰动, 且分层抽取法在测试含水率 (密度) 时是利用平行样方法来进行测试的, 平行样之间也会存在一定的误差, 可通过一致性试验检验分层抽取法的精确性。通过在每个时间段制备相同条件的 3 个平行样, 测试试样的含水率及颗粒分布, 设计了两个试验组, 分析其一致性, 具体试验方案设计见表 3。

通过测试含水率剖面、密度剖面及不同高度处的颗粒分布, 选取代表性图, 如图 15~17。

由密度剖面通过换算可得到每层竖向的总应力

$$\sigma_{v(j)} = \sigma_{v(j-1)} + \gamma_j h_j = \sigma_{v(j-1)} + \rho_j g h_j \quad (11)$$

式中:  $\sigma_{v(j)}$  为第  $j$  层的竖向总应力 (kPa);  $\gamma_j$  为第  $j$  层的重度 ( $\text{kN/m}^3$ );  $h_j$  为第  $j$  层的厚度 (m);  $\rho_j$  为第  $j$  层土的密度 ( $\text{kg/m}^3$ )。

每层的总应力均含一个静水应力, 如果把静水应力从竖向总应力中减去, 即为差值  $\sigma_v - u_w$ , 作  $\sigma_v - u_w$  应力与高度的关系图如图 18, 可更易了解

沉积物的应力变化特征及一致性。通过实测换算得到的  $\sigma_v - u_w$  应力值, 比较各个试验组平行样之间的差值及与理论计算值的误差, 可验证分层取样的正确性及精度大小, 见表 4。

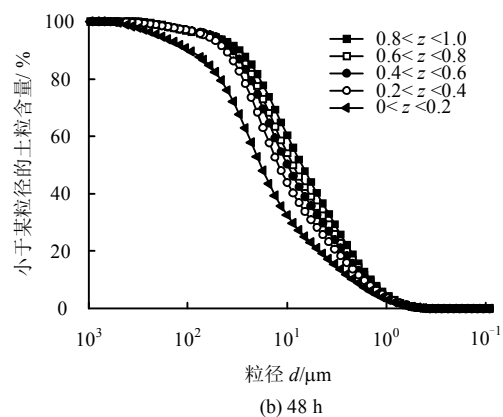
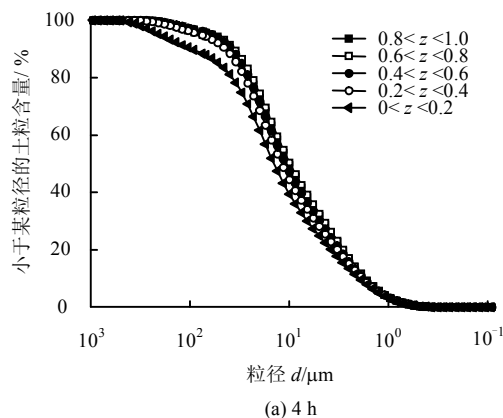


图 14 不同深度和时间的颗粒分布曲线

Fig.14 Grain size distributions at different depths and times

表 3 一致性试验方案

Table 3 Scheme of consistency test

| 序号 | 名称  | 初始含水率 $\omega_i / \%$ | 初始高度 $h_i / \text{m}$ | 粒径范围 $d / \mu\text{m}$ | 历时 $t / \text{h}$ | 试验用泥 | 平行样 / 个 | 测试内容   |
|----|-----|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|------|---------|--------|
| 1  | TY1 | 643                   | 0.760                 | 0~500                  | 4                 | 疏浚泥  | 3       | 泥水分界面  |
| 2  | TY2 | 643                   | 0.760                 | 0~500                  | 24                | 疏浚泥  | 3       | 含水率、粒度 |

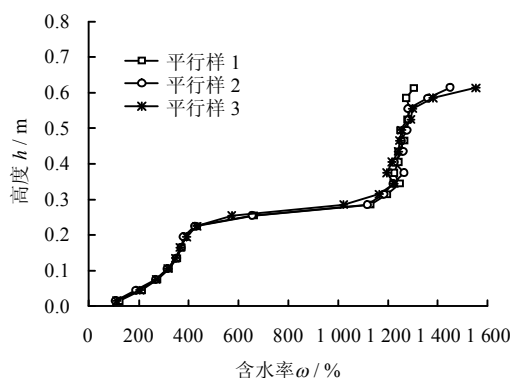


图 15 试验组 TY1 的含水率剖面

Fig.15 Water content profiles of test TY1

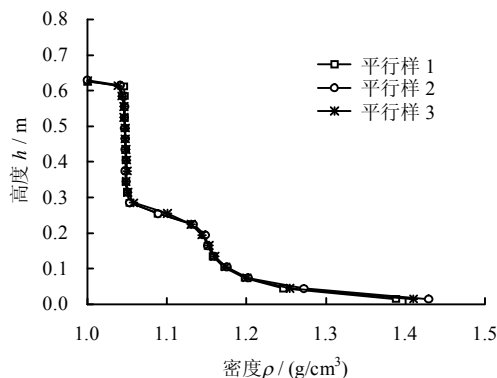


图 16 试验组 TY1 的密度剖面  
Fig.16 Density profiles of test TY1

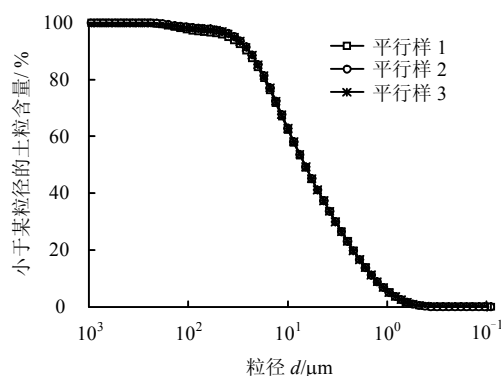


图 17 试验组 TY1 在  $h=0.465$  m 处的颗粒分布  
Fig.17 Grain size distribution at  $h=0.465$  m of test TY1

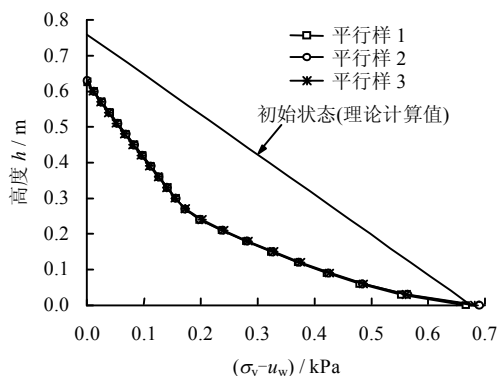


图 18 试验组 TY1 的  $(\sigma_v - u_w)$  应力变化  
Fig.18  $(\sigma_v - u_w)$  stress variation of test TY1

表 4 各试验组的最大  $(\sigma_v - u_w)$  应力变化及误差值(单位: kPa)  
Table 4 Maximal  $(\sigma_v - u_w)$  stresses and errors of all tests (unit: kPa)

| 试验<br>组号 | 不同平行样的最大 $\sigma_v-u_w$ 应力 |       |       | 平行样之间<br>的最大差值 | 理论<br>计算值 | 平行样与理论<br>值的最大差值 |
|----------|----------------------------|-------|-------|----------------|-----------|------------------|
|          | 1#                         | 2#    | 3#    |                |           |                  |
| TY1      | 0.666                      | 0.690 | 0.681 | 0.024          | 0.676     | 0.014            |
| TY2      | 0.683                      | 0.673 | 0.691 | 0.018          | 0.676     | 0.015            |

通过泥水分界面变化、含水率剖面、密度剖面、颗粒分布及  $\sigma_v - u_w$  应力变化分析, 验证了分层抽取法在取样过程中具有较好的一致性, 其中泥-水分

界面最大差值为 0.007 m; 含水率分布最大差值出现在最顶部, 且差值为 249% (密度相差  $0.007 \text{ g/cm}^3$ ); 密度分布最大差值出现在最底部, 且差值为  $0.041 \text{ g/cm}^3$ ; 颗粒分布均基本一致; 试验组  $\sigma_v - u_w$  应力平行样之间的最大差值为 0.024 kPa, 平行样与理论值的最大差值为 0.015 kPa。

## 5 讨 论

利用分层抽取法研究泥沙沉积变化过程的试验方法可得到不同时间段的含水率(密度)分布、颗粒分布、超孔隙水压力消散变化等试验结果, 与现有试验方法相比, 分层抽取法有如下不同点:

(1) 在密度测试上, 很多研究采用核子密度计进行无损检测, 可在任意时段获知沉积柱的密度剖面, 而分层抽取法通过平行试样法只能获得有限的密度剖面, 同时平行样之间的差异也会对试验结果造成一定的影响; 但密度计法成本过高, 且操作过于复杂, 对试验人员造成一定辐射影响, 而本试验方法在得到同样的试验结果情况下, 有操作简单、成本低廉等优点, 便于推广。

(2) 在孔压测试上, 与其他方法相比, 本方法去除了因水头损失、测试滞后性造成的影响, 同样可得到超孔压消散曲线, 且进一步提高了准确性和连续性。

(3) 在颗粒分布测试上, 分层取样法可在密度测试的同时进行取样筛分测试, 可获得沉积柱不同时间段的颗粒分布, 而以往测试一般只能获得最后时间段的颗粒分布。

(4) 可为强度试验提供测试基础, 即在不同时间段可对沉积柱先进行分层强度测试(可用十字板剪切仪测其不排水剪切强度), 然后再进行密度和颗粒取样测试, 但测试过程中同时会对下部待测试样在一定程度上造成扰动。

## 6 结 论

(1) 从土的自重固结之前的阶段开始研究泥沙悬浮物-沉积土之间的过渡过程是土力学较为新颖的领域, 对于吹淤黏土尽快完成自重固结有理论意义。这一研究需要较为完善、可操作的试验方法, 本文提出的分层抽取法基本可以满足各种实测需求。

(2) 试验方法原理简单、易操作, 且成本较低, 测试手段多样化, 即可测试泥-水分界面变化、含水率(密度)分布、颗粒分布及超孔隙水压力分布, 且能为强度提供测试基础, 比相似的装置原理简单,

测试参数全面。

(3) 通过实测数据分析及一致性检验, 认为实测结果客观, 符合一般规律, 一致性检验误差较小, 其精度完全满足实测的需要。

(4) 与其他试验方法相比, 分层抽取法是一种局部破坏试验方法, 需要的平行试验量比较大。今后可考虑开发成多联的试验柱, 一次可进行多组的试验。

### 参考文献

- [1] SILLS G C. Development of structure in sedimenting soils[J]. **Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 1998, 356: 2515—2534.
- [2] ALEXIS A, LE BRAS G, THOMAS P. Experimental bench for study of settling-consolidation soil formation[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2004, 27(6): 557—567.
- [3] BEEN K, SILLS G C. Self-weight consolidation of soft soils: An experimental and theoretical study[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(4): 519—535.
- [4] IMAI G. Experimental studies of sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials[J]. **Soils and Foundations**, 1981, 21(1): 7—20.
- [5] MERCKELBACH L M. Consolidation and strength evolution of soft mud layers[D]. Delft: Delft University of Technology, 2000.
- [6] 刘莹, 肖树芳, 王清. 吹填土室内模拟试验研究[J]. **岩土力学**, 2004, 25(4): 518—521, 528.  
LIU Ying, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Research on indoor scale-down test of dredger fill[J]. **Rock and soil Mechanics**, 2004, 25(4): 518—521, 528.
- [7] ELDER D M. Stress-strain and strength behaviour of very soft soil sediment[D]. Oxford: Oxford University, 1985.
- [8] 卢廷浩. 土力学(第2版)[M]. 南京: 河海大学, 2005
- [9] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [10] BARTHOLOMEEUSEN G, SILLS G C, ZNIDARCIC D, et al. Sidere: Numerical prediction of large-strain consolidation[J]. **Geotechnique**, 2002, 52(9): 639—648.
- [13] ZHANG M X, ZHOU H, JAVADI A A, et al. Experimental and theoretical investigation of strength of soil reinforced with multi-layer horizontal-vertical orthogonal elements[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2008, 26(1): 1—13.
- [14] 张孟喜, 闵兴. 单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(8): 931—936.  
ZHANG Meng-xi, MIN Xing. Triaxial tests on sand reinforced with one-layer 3D reinforcement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 931—936.
- [15] 张孟喜, 王振武. 双层立体加筋砂土的强度特性[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(5): 3289—3298.  
ZHANG Meng-xi, WANG Zhen-wu. Strength properties of two-layer three-dimensional reinforced sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 3289—3298.
- [16] 张孟喜, 赵飞, 侯娟. 条形荷载下 H-V 加筋砂土地基模型试验研究[J]. **土木工程学报**, 2008, 41(2): 94—99.  
ZHANG Meng-xi, ZHAO Fei, HOU Juan. Model tests of H-V reinforced sand-bed subjected to strip loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, 41(2): 94—99.
- [17] GUIDO V A, CHANG D K, SWEENEY M A. Comparison of geogrid and geotextile reinforced earth slabs[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1986, 23(1): 435—440.
- [18] WAYNE M H, HAN J, AKINS K. The design of geosynthetic reinforced foundations[C]//Geosynthetics in Foundation Reinforcement and Erosion Control Systems: Proceedings of Sessions of Geo-congress. Virginia: ASCE Geo-Institute Geotechnical Special Publication, 1998: 1—18.
- [19] WILSON C, GIOVANNI C. Experimental and numerical study of soil-reinforcement effects on the low-strain stiffness and bearing capacity of shallow foundations[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2007, 25: 265—281.
- [20] ADAMS M T, COLLIN J G. Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(1): 66—72.

上接第 2370 页