

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.028

泥砂互混吹填土自重沉积及颗粒分布规律

乐绍林¹, 柏 巍², 吴名江¹, 林融冰², 陈 进¹, 赵亚峰¹

(1. 武汉二航路桥特种工程有限责任公司, 湖北 武汉 430071 ;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要:开展大尺寸沉降柱试验, 获得不同初始含砂比、不同初始含水率的泥砂互混吹填土在自重作用下的泥面沉降量和沉降速率的基本特征, 结合分层抽取法获得试样沿高度方向的密度剖面与颗粒分布变化规律。试验结果表明, 泥砂互混吹填土沉积和颗粒分布规律与初始含砂比、初始含水率有较大关系, 增加初始含砂比能显著增加沉降量, 且存在一个合理含砂比, 超过合理含砂比后沉降量反而降低, 初始含水率越低该种现象越明显; 沉降-时间曲线基本可以分为 3 个阶段, 其中第 II 阶段呈现出比较明显的非线性特征, 随着初始含水率降低, 3 个阶段和非线性特征逐渐不明显; 密度剖面呈阶梯变化特征, 并随初始含水率和初始含砂比的降低而逐渐过渡到线性特征; 初始含砂比和初始含水率均影响着泥砂互混吹填土的颗粒分布模式, 初始含砂比和初始含水率越大越有利于粒径大于 0.075 mm 的颗粒沉积; 初始含砂比越大, 底部沉积的粒径小于 0.005 mm 颗粒相对越多, 体现出群体沉降特征。

关 键 词:泥砂互混吹填土; 泥面沉降量; 沉降速率; 含砂比; 密度剖面

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增1 - 0233 - 07

Effect of sand-mud ratio on heterogeneous dredger fill soil and particle distribution under deposited deadweight

YUE Shao-lin¹, BAI Wei², WU Ming-jiang¹, LIN Rong-bing², CHEN Jin¹, ZHAO Ya-feng¹

(1. CCCC Road & Bridge Special Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430071, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The basic features of the mud surface settlement and the sedimentation rate under the deadweight in heterogeneous dredger fill soil with initial varying sand-mud ratio and initial water content are acquired by means of large size settlement column tests, and the variation of the density profile of the sample is obtained by combining with stratified sampling method. The results show that: heterogeneous dredger fill soil and particles settlement under deposited deadweight have a closer relationship with the initial moisture and sand contents; the higher initial water content, the greater the settlement, the faster the settlement rate; the more sand, the greater settlement. The settlement increase significantly as the sand-mud ratio grows, but the settlement declines as the sand-mud ratio increases when sand-mud ratio is more than 20%; and the lower the initial moisture content, the more obvious the phenomenon. At higher initial moisture content, the settlement-time curve of each sample can be basically divided into three stages; and nonlinear characteristics are obvious in the stage II. As the initial moisture content declines, the three stages and nonlinear characteristic in the settlement - time curve gradually disappear; the lower sand-mud ratio, the more significant linear characteristic in settlement-time curves. Density profile along the height changes a lot at the high moisture content and high sand-mud ratio; and it presents a step-change feature; while it gradually varies linearly as the initial moisture content and the sand-mud ratio declines. Initial moisture content and the sand-mud ratio effect the grain distribution, higher the initial moisture content and the sand-mud ratio is beneficial to (>0.075 mm) sedimentation of particle size greater than 0.075 mm; the higher the sand-mud ratio, the more particle size less than 0.005 mm at the bottom, which shows the feature of group settlement.

Keywords: heterogeneous dredged fill; mud surface settlement; sedimentation rate; sand-mud ratio; density profile

1 引 言

汕头市东部城市经济带市政基础设施建设项目

区域内的吹填堆场位于韩江三角洲网河出海口区域, 工程建设范围为东经 116°45'50" ~ 116°50'57" 和北纬 23°19'29" ~ 23°25'42" 之间, 吹填土深度约为

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 湖北省科技支撑计划项目 (No. 2013BGH006); 湖北省自然科学基金 (No. 2014CFB370)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Hubei (2014CFB370) and the Hubei Science and Technology Support Program(2013BGH006).

第一作者简介: 乐绍林, 男, 1965 年生, 本科, 工程师, 主要从事软基处理、泥资源综合利用方向的研究与管理工作。E-mail: yueshaolin@rbse.cn

通讯作者: 柏巍, 男, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事红黏土、软弱土等特殊土力学方面的研究工作。E-mail: wbai@whrsm.ac.cn

2.4 ~ 10.1 m。吹填堆场泥砂来源复杂,且是多次反复吹填而成,使得先前沉积物重新混合形成泥砂互混系统,其特征是初始浓度要小于挖泥船抽吸时对应的浓度,堆场含水率通常在 100% ~ 400% 左右。堆场内的吹填土在横-纵-深方向的砂粒、粉粒和黏粒呈现出不同于高含水率吹填土颗粒的沉积特征,即吹填土颗粒并非完全按照粒径的大小先后沉积,而是泥砂混合沉积的模式。勘查发现,场地内₁~₄分别为中粗砂混淤泥、细砂混淤泥、淤泥混砂、淤泥质黏土的吹填土层,呈灰或灰黄色,饱和,流塑状态。根据 32 个不同取样点的颗分统计,粒径范围为 2 ~ 0.075 mm 的颗粒占比为 0.9% ~ 36.2%。

由于城市周边吹填土堆场受空间制约越来越明显,环保要求也越发严格,吹填土堆场形成不久后就需要进行地基处理,传统粗放式堆场设计已不能满足目前工程建设的需要,因此,研究泥砂互混吹填土的自重沉积规律,有助于堆场设计、提高施工的经济性。国内外学者 Imai^[1]、别学清等^[2]、何洪涛等^[3]、高庄平等^[4]采用不同尺寸的沉积(降)柱、量筒对吹填土的自然沉积规律开展了研究,还有学者借助离心机模型进行了相应的试验研究^[5]。以上学者采用的土样一般为单纯淤泥土,模拟疏浚初期的情况,含水率极高,土颗粒(或单个絮团)以单体的方式在水中沉降,沉降规律基本满足 Stokes 公式,但这种情况与反复吹填后的泥砂互混系统的自重沉积固结有所不同,目前泥砂互混系统的自重沉积固结规律的研究并不多见,泥砂互混系统颗粒的沉降是否符合 Stokes 定律?不同含砂量对泥砂互混吹填土的自重沉积规律的影响几何?是否存在合适的含砂比可以加速吹填土的自重固结速率?这些都亟待解答。

为了解泥砂互混吹填土自重沉积的基本规律,本次通过不同初始含砂比(sand-mud ratio,简称 SMR),定义为吹填土中粒径大于 0.075 mm 砂的质量与粒径小于 0.075 mm 细粒土的质量比值和不同初始含水率(Initial water content,简称 IWC)的沉降柱试验,获得了泥砂互混吹填土的泥面沉降量与沉降速率基本特征,参考分层抽取法^[3,6]获得上述试样自重沉积的密度剖面变化和颗粒分布规律。

2 试验方法

2.1 试验土样

本次试验对象是不同含砂比的泥砂互混系统,如果直接取淤泥混砂土样进行试验不仅会导致含砂

比无法准确控制,而且对于低含砂比的土样还可能需要进行砂、淤泥分离工作。为了方便地获得多种含砂比的吹填土自重沉积试样,采用粗粒组(砂粒的粒径 $d > 0.075$ mm)和细粒组($d < 0.075$ mm)分开取样并重新配置的方式。

试验中的粗粒组采用海砂,取自于吹填料源附近的海砂堆场,见图 1(a)。根据筛析试验,粒径 $d > 2$ mm 占比 3.2%, 2 ~ 0.5 mm 占比 10.6%, 0.5 ~ 0.25 mm 占比 45.4%, 0.25 ~ 0.075 mm 占比 40.4%, $d < 0.075$ mm 占比 0.3%。按照岩土工程勘察规范^[7]的第 3.3.3 条的分类方法属于中砂(粒径大于 0.25 mm 的颗粒质量超过总质量 50%),由于粒径 $d > 2$ mm 为贝壳类,试验前将海砂过 2 mm 的筛网。

淤泥质土取自新溪片区 WE 三路以北, SN 二路,五 ~ 七路附近,这些区域均靠近吹填堆场出水口,粉、黏粒含量占比大,见图 1(b)。试验时将 4 个场地所取淤泥质土混合备用,其常规物理性质指文见表 1。



(a) 海砂取样地

(b) 吹填淤泥土取样

图 1 取样点照片

Fig.1 Photos of sand and mud

表 1 吹填淤泥基本物理性质指文

Table 1 Basic physical property indexes of hydraulic fill mud

| 物性指文 | 量值 |
|--------------------------|----------------------|
| 颗粒组成/% | |
| 0.5 ~ 0.25/mm | 2.93 |
| 0.25 ~ 0.075/mm | 4.73 |
| 0.075 ~ 0.005/mm | 44.20 |
| < 0.005/mm | 48.14 |
| 土粒相对密度 | 2.69 |
| 含水率/% | 82 ~ 192 |
| 密度/(g/cm ³) | 1.32 ~ 1.56 |
| 干密度/(g/cm ³) | 0.45 ~ 0.86 |
| 液限/% | 46.5 |
| 塑限/% | 25.0 |
| 塑性指数/% | 21.5 |
| 渗透系数/(cm/s) | 7.9×10^{-7} |

注:含水率、密度、干密度为堆场内取土时所测值范围,其他物性指文是上述 4 个场地淤泥质土混合后的指文。

试验用水取自韩江三角洲网河出海口附近区域的海水, pH = 8.1, 密度为 1.022×10^3 g/cm³。

2.2 试验装置的设计与制作

2.2.1 沉降柱的设计与制作

由于沉降柱试验还受到沉降柱边界效应的影响，试验设计时考虑从两方面减少其影响，一是采用具有较高表面光滑度的有机玻璃制作，其表面性能优于塑料；二是增大沉降柱尺寸。尺寸并非越大越好，边界效应对沉降柱试验结果的影响存在一个临界值，即当沉降柱内径大于某尺寸后边界摩擦对沉降柱沉降影响很小。本次试验的沉降柱内径根据泥砂混合吹填土颗粒的最大粒径(2 mm)的 100 倍确定即为 200 mm，高度为 1 300 mm。

2.2.2 分层抽取装置的制作与抽取步骤

为了获得沉积过程中各层含水率和密度等指标，还需要结合分层抽取法来取样，参考相关研究^[3,6,8]，设计制作了由水循环式真空泵和抽滤瓶组成的分层抽取装置，示意图如图 2 所示。

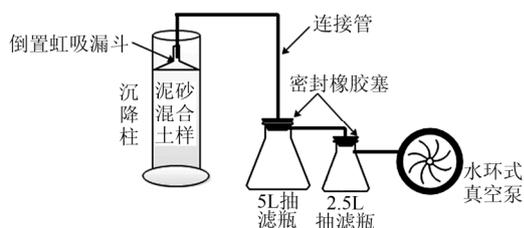


图 2 分层取样试验装置示意图

Fig.2 Sketch of multilayer extraction sampling equipment

具体抽取步骤为：通过真空泵连接的取样器，按照沉降柱上的刻度控制取样的深度，每 10 cm 抽取一层，将抽取出的泥砂浆搅拌均匀后，一部分放入量杯中通过烘干法测定其含水率，另一部分烘干冷却后采用筛析法结合密度计法^[9]进行颗粒分析，分层密度值采用式(1)计算。

$$\rho = \frac{S_r d_s \rho_w (1+w)}{w d_s + S_r} = \frac{d_s \rho_w (1+w)}{w d_s + 1} \quad (1)$$

式中： ρ 为泥砂土样的密度(g/cm^3)； S_r 为饱和度，由于泥砂混合物在絮凝、自重沉积和固结的过程中均为饱和状态，可以认为 $S_r = 100\%$ ； d_s 为土粒相对密度； w 为各层土样的含水率； ρ_w 为海水密度(g/cm^3)。

2.3 试验组合

考虑 3 种不同初始含砂比(SMR)、3 种不同初始含水率(IWC)的试验组合研究泥砂混合吹填土的自重沉积固结过程，试验组合见表 2，共 9 组试验。

根据目文含砂比(SMR)配置好土样，实测的含砂比分别为 10.13%、19.76%、29.37%，为方便比

较，上述实测含砂比以 SMR 10%、SMR 20%、SMR 30%的目文含砂比进行文注。

表 2 试验组合
Table 2 Combination experiments

| 序文 | SMR/% | IWC/% |
|---------|-------|-------------|
| S1 ~ S3 | 30 | 200、150、100 |
| S4 ~ S6 | 20 | 200、150、100 |
| S7 ~ S9 | 10 | 200、150、100 |

分别在时间点 5、17、48、72 h 对平行沉降柱试验进行分层取样，共进行了 36 组平行沉降柱试验，每组获取 8~12 个土样，将所取土样进行含水率、密度和颗粒分析试验，密度剖面抽取试验组合见表 3。

表 3 密度剖面抽取试验组合

Table 3 Synthesis of density profile experiments

| 试验序文 | SMR/% | IWC/% | 抽取时间点/h |
|-----------|-------|-------------|------------|
| D1 ~ D12 | 30 | 200、150、100 | 5、17、48、72 |
| D13 ~ D24 | 20 | 200、150、100 | 5、17、48、72 |
| D25 ~ D36 | 10 | 200、150、100 | 5、17、48、72 |

3 试验结果分析与讨论

试验结果从泥面沉降量和沉降速率、密度剖面变化、颗粒分布规律三方面进行分析，其中泥面沉降量指泥水分界面与沉降柱顶面之间的距离，泥面沉降速率是指单位时间内的泥面沉降量、密度剖面是指沿着整个沉降柱沿高度方向的密度分布剖面。

3.1 泥水分界面沉降量时程变化

3.1.1 含砂比对泥面沉降量时程变化的影响

图 3 为不同 SMR 时在不同 IWC 条件下的泥面沉降量随时间变化曲线。综合比较图 3 各图可以得出如下规律：(1) 初始含砂比对泥面沉降量有明显的影响，如 IWC 为 200% 时，在 50、100、200、800 h 四个时间点，SMR 20% 的沉降量比 SMR 10% 的沉降量增大 328%、302%、242%、114%；IWC 为 150% 时，在 50、100、200、400 h 的 4 个时间点，SMR 20% 的沉降量比 SMR 10% 的沉降量增大 161%、147%、166%、156%。(2) SMR 由 10% 提高到 20% 时，沉降量增幅明显，但 SMR 从 20% 提高至 30% 时沉降量变化却相对较小，SMR 30% 相对于 SMR 20% 的只是在自重沉降初期些许提高了沉降量，随后反而小于 SMR 20% 的沉降量，这种现象在初始含水率越低时表现越明显，以 400 h 监测时间点为例，初始含水率为 200% 时，SMR 30% 的沉降量比 SMR 20% 的沉降量小 0.2%；初始含水率为 150% 时，SMR 30%

的沉降量比 *SMR* 20%的沉降量小 9.0%，初始含水率为 100%时 *SMR* 30%的沉降量比 *SMR* 20%的沉降量小 24.8%。

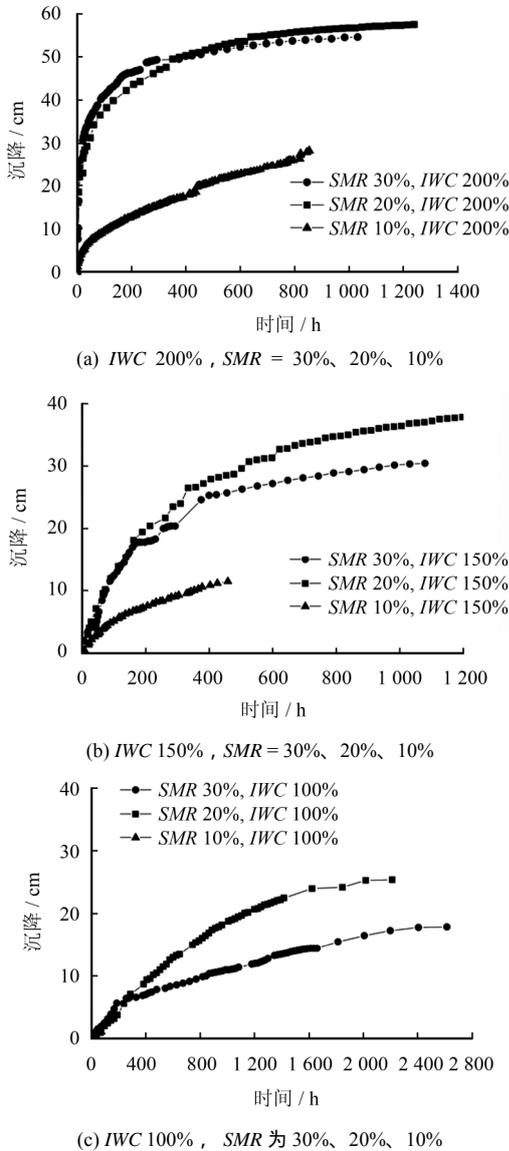


图3 不同 *IWC* 下不同 *SMR* 时泥面沉降时程变化曲线
 Fig.3 Settlement curves of mud surface and time curves when different values of *IWC* and *SMR*

3.1.2 初始含水率对泥面沉降量时程变化的影响

初始含水率对沉降量也有明显影响，在 50、100、200、400 h 四个时间点，*SMR* 30%的 *IWC* 200% 试样的沉降量相对于 *IWC* 100%试样的沉降量分别增加 21.7、14.8、7.0、6.1 倍，同样在 50、100、200、400 h 四个时间点，*IWC* 150%的沉降量相对于 *IWC* 100%的试样沉降量分别增加 2.7、3.7、2.1、3.1 倍。从图 3 中还可以发现，*IWC* 200%的各含砂比试样的泥面沉降速率要明显高于 *IWC* 150%与 *IWC* 100% 试样，表明在初始含水率 100%~200%范围内，含水率越高，沉降越快，沉降量越大。

3.1.3 泥面沉降量时程变化曲线形态特征

从泥面沉降量时程变化曲线形态特征可进行具体的分析，以 *IWC* 200%时的 3 个试样为例，沉降-时间曲线基本可以分为 3 个阶段，如图 4(a)~4(c) 所示。第 I 阶段泥面沉降量迅速增加，沉降速率迅速变小，为急剧沉降阶段；第 II 阶段泥面沉降量持续增加，沉降速率持续降低，为减速沉降阶段；第 III 阶段沉降量持续增加，但沉降速率已非常小，为缓慢沉降阶段。

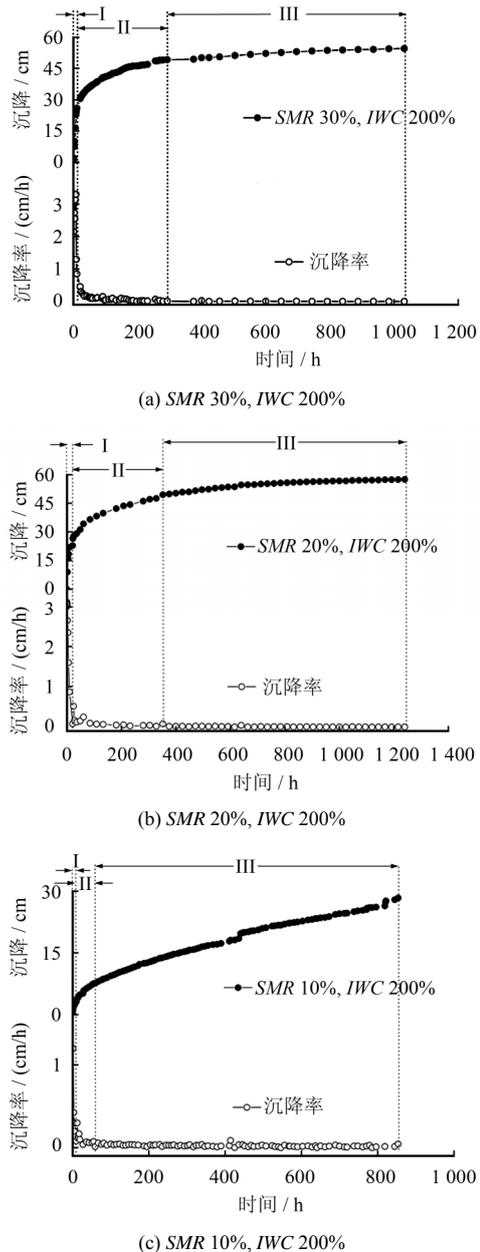


图4 *IWC* 200%不同 *SMR* 时的沉降量、沉降速率与时间关系曲线

Fig.4 Relationships among settlement, sedimentation rate and time when *IWC* is 200% and different values of *SMR*

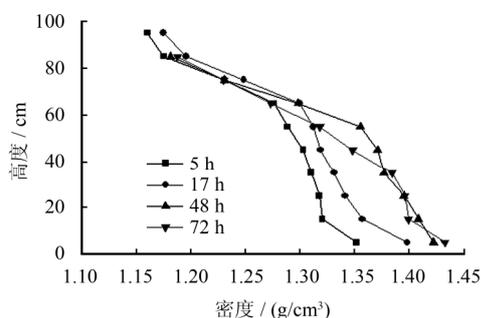
增加初始含砂比能减少第 I 阶段的持续时间，使第 II 阶段非线性特征更加突出。初始含水率对泥

面沉降量时程变化曲线形态也有较大的影响: *IWC* 150%时, 只有 *SMR* 30%与 *SMR* 20%的两个试样的泥面沉降量时程变化曲线还基本呈 3 个阶段特征, *SMR* 10%的 3 个阶段特征已不明显; *IWC* 100%、*SMR* 30%与 *SMR* 20%的整个沉降-时间曲线已无明显的第 I、II 阶段。

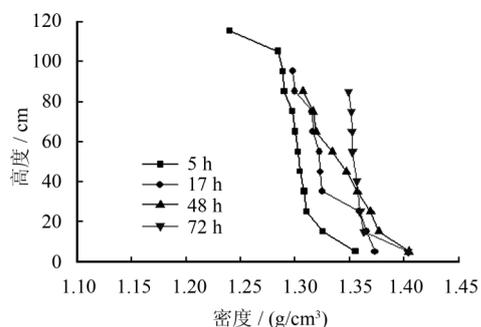
3.2 密度剖面变化规律

3.2.1 初始含砂比对密度剖面的影响

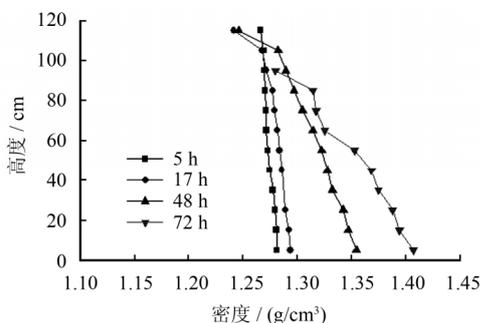
根据泥面沉降曲线选取 5、17、48、72 h 四个不同时间点分析沉积阶段的密度剖面变化规律, 对于泥砂混合吹填土中的 *IWC* 200% ,*SMR* 30%、*SMR* 20%、*SMR* 10%的密度剖面如图 5 所示。



(a) 初始含水率 200%, 含砂比 30%



(b) 初始含水率 200%, 含砂比 20%



(c) 初始含水率 200%, 含砂比 10%

图 5 初始含水率 200%时各含砂比土样在不同时间的密度剖面

Fig.5 Density profiles soils of *SMR* are 30%, 20%,10% at different times when *IWC* is 200%

从图 5(a)中可以看出, *SMR* 30%的泥砂互混浆体在自重沉降后 5、17、48、72 h 四个时间点沿高

度剖面的密度变化较大, 随着悬浮态吹填泥砂浆逐渐沉积, 其密度剖面随时间呈 3 段式阶梯变化特征。以 5 h 的密度剖面为例, 第一段为 5 ~ 15 cm, 此段从 15 cm 处的土体密度为 1.321 g/cm³ 变化为 5 cm 高度处的 1.352 g/cm³, 密度变化率(密度变化值与高度差的比值)为 3.1×10⁻³ g/cm⁴; 第二段为高度为 15 ~ 55 cm, 土体密度变化范围为 1.321 ~ 1.289 g/cm³, 密度变化率为 8.0×10⁻⁴ g/cm⁴; 第三段为高度在 55 ~ 95 cm, 土体密度变化范围为 1.289 ~ 1.160 g/cm³, 密度变化率为 3.2×10⁻³ g/cm⁴。从图中还可以看出, 随着自重沉降时间的增长(5、17、48、72 h), 距沉降柱底部 5 cm 处的高度处的密度逐渐增大, 其中 5 h 此处的密度与 17 h 的密度变化明显, 17 h 时此处的密度与 48 h 的密度变化趋势减弱, 48 h 和 72 h 的密度变化较小。

SMR 20%的泥砂互混浆体, 在自重沉降后的 5、17、48、72 h 四个时间点沿高度剖面的密度变化规律与 *SMR* 30%并不一致, 在自重沉降后 5 h 的时间点的密度剖面还包含有 3 段式阶梯变化特征, 而 17、48、72 h 各时间点的 3 段式特征已不明显, 可见从随着自重沉降时间逐渐增长(5、17、48、72 h), 距沉降柱底部 5 cm 处的高度处的密度逐渐增大, 在 48 h 和 72 h 时的密度值大小已接近一致, 如图 5(b) 所示。

SMR 10%的泥砂互混浆体, 在自重沉降后的 5、17、48、72 h 四个时间点沿高度剖面的密度变化规律均已不包含有 3 段式阶梯变化特征, 逐渐呈现出线性变化特征, 如图 5(c)所示。随着自重沉降时间逐渐增长(5、17、48、72 h), 距沉降柱底部 5 cm 高度处的密度逐渐增大, 与含砂比 30%和 20%的明显区别在于: 5 h 此处的密度与 17 h 的密度变化并不明显, 17 h 时此处的密度与 48 h 的密度变化趋势并不是减弱而是增大, 而 48 h 和 72 h 的密度值大小却有较大差别, 其原因可能是 *SMR* 减少, 淤泥细粒土占比增多, 细粒土絮团与砂粒相互干扰, 导致砂粒沉降至此处的速度变慢。

3.2.2 初始含水率对密度剖面的影响

对于泥砂混合吹填土中的 *IWC* 150% 和 *IWC* 100%, *SMR* 为 30%、20%、10%的 5、17、48、72 h 四个不同时间点的密度剖面分别如图 6 所示。从图中可以看出, *IWC* 150%、*IWC* 100%各含砂比的泥砂互混浆体, 在自重沉降后密度剖面变化规律已基本非 3 段式变化规律, 偏于线性。*IWC* 200%时, 含砂比越高, 密度差异越大, 而 *IWC* 150%、100%的各含砂比试样的密度沿高度方向变化很小。随着

自重沉降时间逐渐增长,各初始含水率试样的沉降柱底面以上 10 cm 范围内密度会逐渐增大,但 IWC 150%、100%的试样变化幅度相比 IWC 200%减弱。

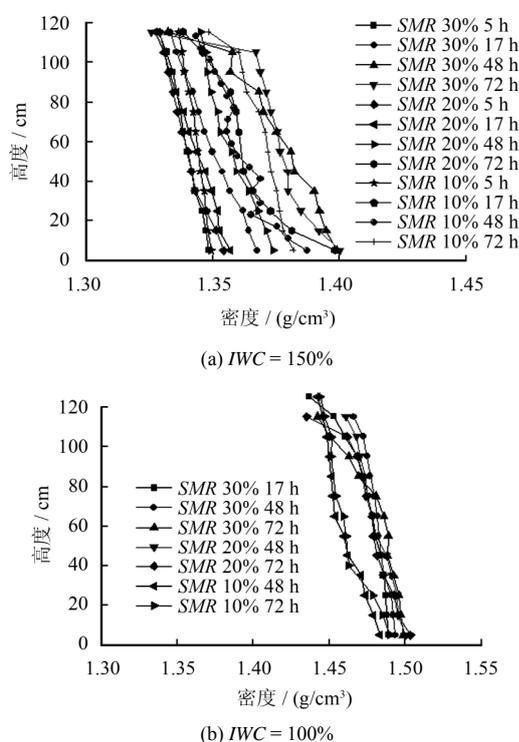


图6 不同初始含水率各含砂比的密度剖面图

Fig.6 Density profiles at different values of IWC and SMR

3.3 颗粒分布规律

3.3.1 初始含砂比对颗粒分布的影响

表4为 IWC 200%各初始含砂比试样 5 h 时泥面以下 10 cm 范围内和沉降柱底面以上 10 cm 范围内的颗粒组成。从表中可以看出,初始含砂比影响着泥砂互混吹填土的颗粒分布模式:初始含砂比越大更有利于粒径 $d > 0.075$ mm 的颗粒沉积;含砂比越大,底部沉积的粒径 $d < 0.005$ mm 颗粒相对越多。

表4 IWC 200%时含砂比试样 5 h 时的分层颗粒组成
Table 4 Grain composition of IWC 200% at 5 h

| 取样部位 | SMR /% | 颗粒(mm)组成/% | | |
|-------------------|--------|------------|--------------------|-----------|
| | | >0.075 | $0.075 \sim 0.005$ | < 0.005 |
| 泥面以下 10 cm 范围内 | 30 | 0 | 50.5 | 49.5 |
| | 20 | 5.9 | 44.5 | 49.6 |
| | 10 | 8.1 | 43.7 | 48.2 |
| 沉降柱底面以上 10 cm 范围内 | 30 | 31.1 | 40.7 | 28.2 |
| | 20 | 27.8 | 45.5 | 26.7 |
| | 10 | 24.3 | 55.6 | 20.1 |

3.3.2 初始含水率对颗粒分布的影响

表5为 SMR30% 72 h 的各初始含水率土样泥面以下 10 cm 范围内和沉降柱底面以上 10 cm 范围内的颗粒组成。从表中可以看出,泥面以下 10 cm 范围内 $d > 0.075$ mm 颗粒随着初始含水率的降低而占

比增大,而沉降柱底面以上 10 cm 范围内 $d > 0.075$ mm 颗粒,随着初始含水率的降低而占比减小,表明初始含水率越小越不利于粒径 $d > 0.075$ mm 的颗粒沉积,同时也可发现初始含水率越小,泥面下 10 cm 范围内的土样的颗粒 $d < 0.005$ mm 颗粒占比越少,而底部沉积的粒径 $d < 0.005$ mm 颗粒占比相差不大。

表5 初始含砂比 SMR 30%时各含水率试样 72 h 时的分层颗粒组成

Table 5 Bottom grain compositions of SMR30% at 72 h

| 取样部位 | IWC /% | 颗粒(mm)组成/% | | |
|-------------------|--------|------------|--------------------|-----------|
| | | >0.075 | $0.075 \sim 0.005$ | < 0.005 |
| 泥面以下 10 cm 范围内 | 200 | 0 | 43.0 | 57.0 |
| | 150 | 17.1 | 38.0 | 44.9 |
| | 100 | 19.3 | 40.9 | 39.8 |
| 沉降柱底面以上 10 cm 范围内 | 200 | 32.4 | 37.1 | 30.5 |
| | 150 | 29.1 | 40.5 | 30.4 |
| | 100 | 24.2 | 46.5 | 29.3 |

3.4 讨论

经典 Stokes 定律的表达的是球形质点在无限广阔液体中下沉时的速度和球形质点直径之间的关系。通常研究泥浆中颗粒在水中沉降的研究时泥浆初始含水率极高^[1, 3, 10],土颗粒(或单个絮团)以单体的方式在水中沉降,这种单颗粒沉降规律基本满足 Stokes 公式。反复吹填的泥砂互混淤泥土由于浓度相对高,堆场内也非无限广阔液体,因此表现的不是单颗粒或团粒的沉降过程,实际上应属于混砂情况下淤泥絮体压缩和自重固结,故经典 Stokes 定律并不适合描述反复吹填堆场中的泥砂沉积规律。

反复吹填泥砂互混系统中可能存在絮团沉降^[11]和群体沉降^[12-13],沉降现象与低浓度颗粒沉降有质的区别,因为泥砂互混吹填土系统的泥浆浓度较高,颗粒所占的体积大,沉降过程中颗粒之间的相互干扰要强烈得多。表5中含水率降低时 $d > 0.075$ mm 的颗粒沉积明显减慢,是细颗粒阻碍粗颗粒沉的结果。表4中初始含砂比较大的沉降柱底面以上 10 cm 范围内 $d < 0.005$ mm 的颗粒就越多,是粗颗粒下沉时携带的细颗粒相对多和群体沉降的直观体现,从汕头市东部城市经济带市政基础设施建设项目区域内的吹填堆场内的勘察取样中也可得到证实,即泥砂互混吹填土颗粒并非完全按照粒径的大小先后沉积,而是泥砂混合沉积的模式。

4 结论

(1)增加初始含砂比能显著增加沉降量,且存在一个合理含砂比,超过合理含砂比后沉降量反而

降低，初始含水率越低这种现象越明显。

(2) 整个沉降-时间曲线基本可以分为急剧沉降、减速沉降、缓慢沉降固结 3 个阶段，其中第 II 沉积阶段呈现出比较明显的非线性特征。随着初始含水率降低，沉降-时间曲线的 3 个阶段和非线性特征逐渐不明显。

(3) 密度剖面沿高度变化较大，呈阶梯变化特征，随初始含水率和含砂比的降低而逐渐过渡到线性特征，表明初始含水率越低，细颗粒土对砂颗粒下沉的阻碍现象越强烈，形成泥砂互混独特的沉积模式。

(4) 初始含砂比和初始含水率均影响着泥砂互混吹填土的颗粒分布模式，初始含砂比和初始含水率越大越有利于粒径 $d > 0.075$ mm 的颗粒沉积，初始含砂比越大，底部沉积的粒径 $d < 0.005$ mm 颗粒相对越多，表现出群体沉降特征。

参 考 文 献

- [1] IMAI G. Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials[J]. **Soils and Foundations**, 1981, 21(1): 7 - 20.
- [2] 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 Xue-qing, DAI Min-zhong, GUAN Tu-lin, et al. The sedimentation behavior of dredged slurries in sea water environment[J]. **Science Technology and Engineering**, 2015, 15(4): 273 - 277.
- [3] 何洪涛, 朱伟, 张春雷, 等. 分层抽取法在泥沙沉积过程中的应用研究[J]. **岩土力学**, 2011, 32(8): 2371 - 2378.
HE Hong-tao, ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, et al. Application of multilayer extraction sampling to sediment deposition process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(8): 2371 - 2378.
- [4] 高庄平, 范云中, 郭帅杰. 深圳湾淤积泥沙自重沉积固结试验[J]. **人民黄河**, 2014, 36(2): 33 - 36.
GAO Zhuang-ping, FAN Yun-zhong, GUO Shuai-jie. Experiment of deposited sediment weight consolidation in Shenzhen Bay[J]. **Yellow River**, 2014, 36(2): 33 - 36.
- [5] 杨坪, 唐益群, 王建秀, 等. 基于大变形的冲填土自重固结分析及离心模型试验[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 27(6): 1212 - 1219.
YANG Ping, TANG Yi-qun, WANG Jian-xiu, et al. Study on consolidation settlement of dredger fill under deadweight using large strain theory and centrifuge model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 27(6): 1212 - 1219.
- [6] 王亮, 朱伟, 茅加峰, 等. 使用改进的分层抽取法研究淤泥沉积过程中的强度变化[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(5): 916 - 921.
WANG Liang, ZHU Wei, MAO Jia-feng, et al. Application of improved multilayer extraction sampling to change of shear strength of dredged material during deposition process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(5): 916 - 921.
- [7] 建设部综合勘察研究设计院. GB 50021-2001. 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Comprehensive Survey and Design Institute of Ministry of Construction. GB 50021-2001. Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [8] 张楠, 朱伟, 王亮, 等. 吹填泥浆中土颗粒沉降-固结规律研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(6): 1681 - 1686 .
ZHANG Nan, ZHU Wei, WANG Liang, et al. Study of sedimentation and consolidation of soil particles in dredged slurry[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1681 - 1686.
- [9] 南京水利科学研究院. GBT 50123-1999. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社. 1999.
Nanjing Hydranlic Research Institute. GBT 50123-1999 Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [10] 张楠, 朱伟, 王亮, 等. 吹填泥浆中土颗粒沉降-固结规律研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(6): 1681 - 1686.
ZHANG Nan, ZHU Wei, WANG Liang, et al. Study of sedimentation and consolidation of soil particles in dredged slurry[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1681 - 1686.
- [11] WINTERWERP J C. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud[J]. **Continental Shelf Research**, 2002, 22(9): 1339-1360.
- [12] 蔡树棠. 泥沙的群体沉降速度[J]. **应用数学和力学**, 1983, 4(3): 341 - 346.
CAI Shu-tang. The velocity of the collective motion of sedimentation of sand and clay[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 1983, 4(3): 341 - 346.
- [13] 张耀哲. 非黏性均匀沙群体沉降运动沉速公式的研究[J]. **西北农林科技大学学报(自然科学版)**, 2006, 34(4): 117 - 120.
ZHANG Yao-zhe. Study on theoretic formula of sedimentation velocity in the sediment group settlement zone[J]. **Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)**, 2006, 34(4): 117 - 120.