

DOI : 10.11779/CJGE201605001

天津滨海吹填泥浆的自重沉降固结特性研究

张先伟^{1,3}, 杨爱武^{1,2}, 孔令伟³, 周奇³, 王韬^{1,2}

(1. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300381; 2. 天津城建大学土木工程系, 天津 300381;
3. 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:以天津滨海新区吹填泥浆为研究对象,对初始含水率 $w_0=200\% \sim 2000\%$ 的泥浆开展长达 100 d 的自然沉降模型试验,研究吹填泥浆的自重沉降固结规律与形成土的微观结构特性,据此提出吹填工程设计的控制指标,为吹填工程的设计与施工提供可靠的技术支撑。结果表明,天津吹填泥浆的沉降类型主要是沉积沉降和固结沉降,沉积沉降过程分为絮凝阶段、阻碍沉降阶段、自重固结阶段。含水率临界值(或土的形成含水率) $w_0^*=400\%$,且 w_0^* 与液限 w_L 具有较好的线性关系。初始含水率 $w_0 < w_0^*$,发生固结沉降,沉降量可以用一维固结理论计算; $w_0 > w_0^*$,发生沉积沉降,沉降量可以用沉积规律计算。土的形成孔隙比 $e_0^*=10.92$;沉降稳定时间 T_c 可用 $T_c=159(w_0/w_L)^{-1}$ 计算;稳定孔隙比 e_c 可由分段公式计算, $e_c=0.08+5.4(e_0-13.65)$, $e_c=0.4+1.03(e_0<13.65)$;絮凝屈服应力 $P_s=0.3$ kPa,界限孔隙比 $e_s=6.4$ 。研究还表明,泥浆沉降过程其实是絮凝屈服应力与有效应力相互影响的过程,进而产生不同的沉降特征;吹填形成土在平行于沉降方向为絮凝结构,而垂直沉降方向呈堆叠结构。

关键词:吹填泥浆;自重沉降固结;孔隙比;含水率;时间

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)05-0769-08

作者简介:张先伟(1982-),男,黑龙江龙江人,博士,助理研究员,从事特殊土的力学特性研究。E-mail: xwzhang@whrsm.ac.cn。

Self-weight sedimentation and consolidation characteristics of hydraulic-dredged slurry in Tianjin Binhai District

ZHANG Xian-wei^{1,3}, YANG Ai-wu^{1,2}, KONG Ling-wei³, ZHOU Qi³, WANG Tao^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300381, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300381, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The model tests on hydraulic-dredged slurry with initial moisture content w_0 of 200%~2000% in Tianjin Binhai District after sedimentation of 100 days are performed to investigate the self-weight sedimentation and consolidation characteristics. The relevant indices for the hydraulic fill are suggested so as to provide reliable theoretical support for dredger filling projects at the design and construction stages. The results show that the settling of the hydraulic-dredged slurry in Tianjin includes two types, deposition settling and consolidation settling, respectively. The former undergoes flocculation, hindering settling and consolidation. The critical moisture content w_0^* is 400%, and there is a linear relationship between w_0^* and the liquid limit. When $w_0 < w_0^*$, the consolidation settling occurs, and the settlement can be calculated by using the one-dimensional consolidation theory. When $w_0 > w_0^*$, the deposition settling occurs, and the settlement can be calculated by using the sedimentation rule. The void ratio of soil formation e_0^* is 10.92. The time of sedimentation stability can be calculated using $T_c=159(w_0/w_L)^{-1}$. The void ratio of sedimentation stability can be calculated by the piecewise formulae $e_c=0.08+5.4(e_0-13.65)$ and $e_c=0.4+1.03(e_0<13.65)$. The flocculation yield stress P_s is 0.3 kPa and the boundary void ratio e_s is 6.4. The self-weight sedimentation and consolidation is the process that the flocculation yield stress and the effective stress influence each other, so that different settlement characteristics are aroused. The micro-structure of dredged mud in parallel direction to sedimentation is flocculation structure, and that in vertical direction to sedimentation is a stacked one.

Key words: hydraulic-dredged slurry; self-weight sedimentation and consolidation; void ratio; moisture content; time

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102200; 41372291); 天津市软土特性与工程环境重点实验室开放课题(2012SCEEKL006); 天津市科技计划项目(15JCZDJC40600; 15ZCZDSF00220)
收稿日期: 2015-06-09

0 引言

疏浚泥浆用于填海造陆已成为沿海城市土地开发的重要手段,它不但能有效降低近海抛泥弃淤对海洋环境的污染,同时也对缓解沿海城市土地资源紧张的局面有相当积极意义,其经济和社会效益均十分显著^[1]。目前,天津滨海新区正在进行着世界瞩目的吹填造陆工程,一般工程多是基于水力疏挖原理的浚清、输送方法,底泥被混合为高含水率的泥浆通过吹淤进入吹填池。泥土颗粒在自重作用下发生沉降—固结,上层的积水作为尾水进行排放。由于天津滨海新区吹填材料来源于浅海淤泥,其黏粒含量高达50.0%以上,且富含盐分与有机质,属于一种高含水率的超软土^[2],这使得天津滨海新区吹填土有别于其他地区吹填土,自重沉降固结特性十分复杂。

细粒土的自重沉降固结其实是一个古老的问题,很多国内外学者对此已经开展大量的试验和理论研究^[3-8]。当土水溶液中的固体含量非常低时,土颗粒之间相互无影响,颗粒的沉降速率可以用经典的Stokes沉速公式描述,然而,由于吹填泥浆中富含黏土矿物颗粒,颗粒下沉过程中附带的静电力的相互干涉会导致土颗粒下沉速度明显小于Stokes公式及其修正公式的计算值^[8];此外,当泥浆尚未完全形成土前呈流动状态,此时颗粒通过相互作用力形成絮团,絮团间的孔隙随着有效应力的增大被压缩,而絮团内部的孔隙体积基本不变,因此,这一阶段泥浆的力学行为不能用经典的太沙基固结理论解释^[4]。由此看来,这些传统的计算方法、公式并不适用于吹填泥浆的沉降计算,这也导致吹填工程设计几乎无章可循,究其原因还是没有真正了解吹填泥浆的自重沉降固结规律。此外,现有研究多为基础理论研究^[5-8],缺乏对吹填设计中具体技术问题的指导,如吹填泥浆状态与含水率和物理特性相关,泥浆的初始含水率往往与含泥量及吹填机械差异而变化,那么泥浆的初始含水率变化对自重沉降固结特性有何影响;泥浆在什么时候可以形成土,其界限含水率是多少;吹填土体如何确定沉降结束,何时可以进行上层积水排出,如何确定吹填场地标高,即吹填后场地沉降值如何计算。针对上述问题,对天津滨海新区吹填泥浆开展长达100 d的自然沉降模拟试验,研究吹填泥浆的自重沉降固结规律,提出吹填工程设计的相关控制参数,为吹填工程的设计与施工提供可靠的技术支持。

1 土样与试验方法

1.1 试样的基本性质

土样取自天津滨海新区临港工业区吹填口的吹填泥浆,现场测量含水率为398.0%~438.0%(不同吹填时间的泥浆共测量10组,得到含水率的平均值为412.0%)。土样的基本物理化学性质与颗粒组成见表1与图1,利用X衍射矿物分析得到该土的矿物组成见表2。天津滨海吹填土具有较大的阳离子交换量和比表面积以及较高的活性,含有一定量的有机质与易溶盐。该土的黏土矿物含量占总矿物的60%,其中伊利石占22%,伊蒙混层占20.3%。根据筛分试验结果发现,加入分散剂后(六偏磷酸钠溶液),直径 d 小于0.005 mm的颗粒明显增大,说明该土可能存在稳定性较差的“假粉粒”,这可能是土中有机质和盐导致的团聚作用引起。

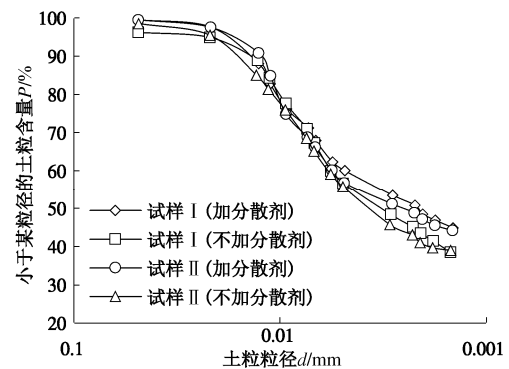


图1 吹填泥浆的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curves of hydraulic-dredged slurry

1.2 试验方法

试验所用沉降容器为横截面积32 cm²、容积1000 mL的玻璃量筒,量筒外壁上附有精度为1 mm的刻度线。首先,将现场取回的泥浆风干后,挑出贝壳等杂质,碾碎后过0.1 mm的筛。然后,如图2(a)~(c),添加蒸馏水,配置初始含水率 $w_0=200\% \sim 2000\%$ 的泥浆(其中, $w_0=400\%$ 接近实际吹填泥浆含水率),缓慢注入量筒中,当泥面达到31.25 cm停止,用搅拌棒搅拌均匀后,立即用保鲜膜密封量筒口以便防止水分蒸发,同时记录泥浆的初始高度。试验过程中,读取不同时刻泥面高度,当泥浆沉降基本稳定后(为了便于分析,统一设定为100 d),终止试验。

根据试验结果计算沉积物的物理指标。当某一时刻 t 泥浆沉积物高度为 H_t ,假设沉积物中水分均匀分布,则此时沉积物中的平均含水率

$$w_t = \frac{H_t}{H_0} = \frac{1 + (G_s / G_w) w_t}{1 + (G_s / G_w) w_0} \quad (1)$$

式中, G_s 、 G_w 分别为土和水的比重, $H_t=H_0-S_t$, H_0 为泥浆的初始高度, S_t 为 t 时刻泥浆的沉降量。

根据土工试验规程(SL237—1999)由 w_t 求得沉积物的平均孔隙比 e_t 、平均密度 ρ_t 等指标。

表 1 吹填泥浆的物理性质和化学性质指标平均值

Table 1 Physical and chemical average indexes of hydraulic-dredged slurry

天然含水率 $w/\%$	比重 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数 I_p	活动度 A	pH	总表面积 $/(m^2 \cdot g^{-1})$	有机质 含量 $\%$	易溶 盐 $\%$	阳离子交换量 (CEC) $/(meq \cdot (100 g)^{-1})$
412.0	2.73	60.6	31.4	29.2	0.60	8.5	125	2.03	2.401	13.2

表 2 矿物物相定量分析结果 (全土)

Table 2 Results of quantitative analysis of material phase (total soil)

石英	钾长石	斜长石	方解石	石盐	白云石	伊蒙混层	高岭石	伊利石	绿泥石
16.2	4.2	4.3	12.4	1.9	1.0	20.3	10.2	22	7.5

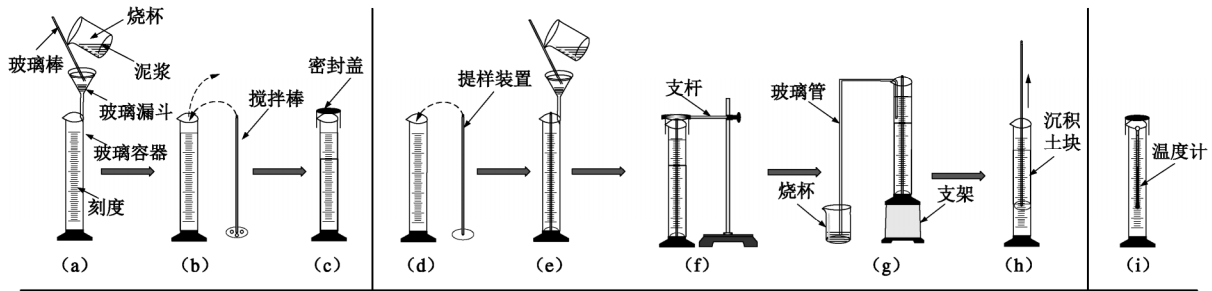


图 2 试验装置与试验过程示意图

Fig. 2 Sketch of test equipments and experimental process

为了调查自重沉降固结形成土的结构特征,按照上述步骤进行相同试验,但预先在量筒中放入一个提样装置,如图2(d)~(h)。提样装置为一根顶端带有圆形有机玻璃片的细长玻璃杆,并用支杆固定使其垂直,试验结束后,虹吸法析出上部清水,提出土块。对土块用真空冷冻升华干燥法制样^[9],利用Quanta 250型扫描电子显微镜进行微观结构调查。为避免温度对泥浆沉降的影响,沉降模拟试验中,将温度计放入装有蒸馏水的量筒中(图2(i)),利用室内空调控制试验温度为 20 ± 2 。

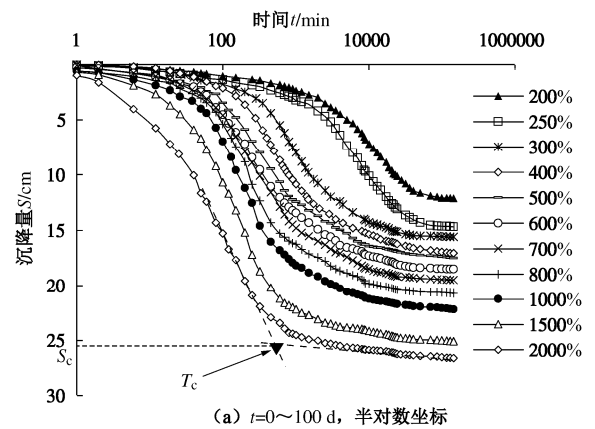
需要说明的是,自重沉降固结的试验容器尺寸可能对试验结果有一定影响,已有研究表明^[5],对于细粒土泥浆,当泥面高度为25~50 cm时,由颗粒尺寸分选导致的试验结果差异性较小,因此,本试验的初始泥面设定为31.25 cm。

慢,沉降曲线为直线型;随着 w_0 的增大,沉降曲线斜率逐渐增大,沉降速率增大,并且由直线型逐渐向曲线形过渡。

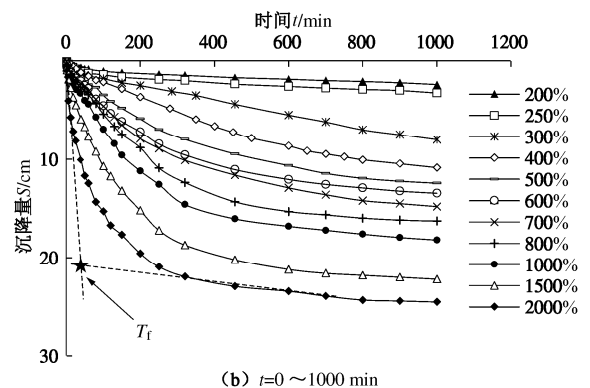
2 吹填泥浆的自重沉降固结特性

2.1 沉降曲线

经历不同沉降时间 t 的泥面沉降量 S 的变化曲线称为沉降曲线,天津吹填泥浆的沉降全过程曲线见图3(a)。由于试验初期泥面沉降速度较快,为更好地分析吹填泥浆沉降特性,绘制试验开始后1000 min内沉降曲线,见图3(b)。根据图3(a)可知,天津吹填泥浆的沉降特征受 w_0 (或 e_0)影响较大,泥浆的 w_0 越大,泥面下沉速率越快,最终沉降量越大(见表3),这与以往的细粒土沉降试验结果基本一致^[4-6]。从图3(b)也可以看出,当 w_0 较低时,沉降初期泥面沉降速率较



(a) $t=0 \sim 100$ d, 半对数坐标



(b) $t=0 \sim 1000$ min

图 3 天津吹填泥浆的沉降曲线

Fig. 3 Settling curves for hydraulic-dredged slurry

表3 吹填泥浆沉降过程相关参数变化

Table 3 Change of relevant parameters for hydraulic-dredged slurry in settling

初始含水率 $w_0/\%$	初始孔隙比 e_0	e_0/e_L	沉降量 S/mm	试验结束后 孔隙比 e_f
200	5.46	3.30	12.12	3.34
250	6.83	4.14	14.69	3.61
300	8.19	4.96	15.61	4.10
400	10.92	6.61	17.05	4.96
500	13.65	8.27	17.53	5.99
600	16.38	9.93	18.51	6.68
700	19.11	11.58	19.49	7.19
800	21.84	13.24	20.74	7.35
1000	29.30	16.54	22.19	7.91
1500	40.95	24.82	25.10	8.06
2000	54.60	33.09	26.62	8.09

2.2 沉降类型

根据图3可以发现,随着 w_0 的增大,沉降曲线形状发生了显著变化, w_0 较低时(如 $w_0=200\% \sim 400\%$),曲线形状与常规压缩试验中 $S-\lg t$ 曲线相似,呈反“S”型;随着 w_0 增大,沉降初期的直线段变短,沉降中期的曲线斜率增大,泥浆相对较早地进入自然沉降稳定阶段。IMAI^[5]根据泥浆的初始含水率对其沉降规律影响,利用沉降曲线特征将沉降类型分为分散自由沉降、絮凝自由沉降、沉积沉降和固结沉降4种类型。比较可知,天津吹填泥浆的沉降类型主要是沉积沉降和固结沉降。泥浆的 w_0 是不同沉降类型的发生条件,固结沉降发生条件为泥浆初始状态为固结状态,如 $w_0=200\% \sim 400\%$ 时,其特征主要是泥浆沉降主要由固结引发;沉积沉降发生条件为泥浆初始状态为沉积状态,如 $400\% < w_0$ 时,其特征主要是颗粒沉降过程伴随着絮凝体的相互作用,但絮凝时间较短,沉降过程可以看到清楚的土水分界面。从图3(b)还可以发现,当泥浆具有相对较高的 w_0 (沉积状态),泥浆中的水被排除,含水率逐渐降低,即沉降曲线右移,沉积状态转为固结状态,也就是说较高 w_0 的泥浆的沉降发展是伴随着沉积沉降转为固结沉降的过程。

2.3 自重沉降固结演化规律

为进一步分析天津吹填泥浆的自重沉降固结演化规律,同时鉴于沉积沉降过程包含固结沉降,下面根据沉降曲线(图4)对泥浆的沉积沉降过程简述。

(1) 絮凝阶段

水中的土颗粒受到自重和水的阻力影响,当土颗粒受到重力小于水的阻力,土颗粒做悬浮运动,否则,土颗粒下沉^[12]。由于黏土颗粒具有絮凝作用,土颗粒做悬浮运动的同时,相互絮凝形成絮凝体,絮凝体又相互絮凝形成更大的絮团。当具有较大重量的絮团大于水的阻力时,泥面开始沉降。由此看来,沉降初期泥面保持短暂的稳定,与土颗粒的絮凝有关。

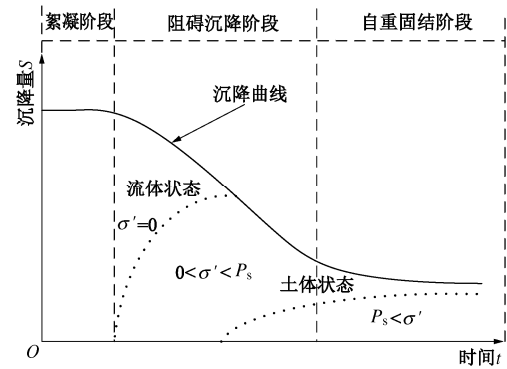


图4 自重沉降固结过程示意图

Fig. 4 Process of self-weight sedimentation and consolidation

(2) 阻碍沉降阶段

形成的絮团开始沉降标志着进入沉降阶段,该阶段显著的特点是絮凝团聚体与水有明显的分界面(即泥面),并且泥面呈等速率沉降,对应于图3(a)中沉降曲线的直线段。结合图3(a)可以看到,随着 w_0 的增大,直线段的斜率逐渐增大,即沉降速率逐渐增大。泥面等速率沉降现象已经被许多学者通过试验证实^[4-6],主要是由于土颗粒絮团相互影响,在自重的作用下相互羁绊下群体下沉,泥面表现为等速率沉降,这种沉降模式被称为阻碍沉降。由此看来,天津吹填泥浆沉降中发生等速率下沉原因是发生了阻碍沉降。试验中还发现,伴随阻碍沉降发生,沉积物中形成树状的排水通道,排水通道方向一般垂直于泥面下沉方向,并且随着沉降时间增长逐渐上移,在沉降阶段结束时消失(见图5(a))。

(3) 固结阶段

泥浆发生阻碍沉降的同时,下沉至底部的土颗粒相互堆积形成松散的土,此时土颗粒相互接触并传递有效应力;由于自重的影响,形成的土中产生超孔隙水压力,随着超孔隙水压力的消散,有效应力增加,土固结并下沉,孔隙比逐渐减小。此时,泥浆被分为上下两个区域,上部泥浆仍发生阻碍沉降,下部泥浆进入固结状态。阻碍沉降与固结沉降的分界面被称为土形成面^[12](见图5(b))。随着泥浆中絮团的不断下沉形成土,泥面逐渐下降,土形成面逐渐上升,当所有土颗粒在底部堆积时,泥浆完全进入固结阶段。表现在图3(b)中沉降曲线出现明显拐点,沉降速率迅速降低。由此看来,泥浆沉降过程中,发生的等速沉降和慢速沉降现象是由泥浆的阻碍沉降和自重固结引起的。根据上述分析,将天津吹填泥浆的沉降过程分为3个阶段,即絮凝阶段、阻碍沉降阶段、自重固结阶段,如图4所示。

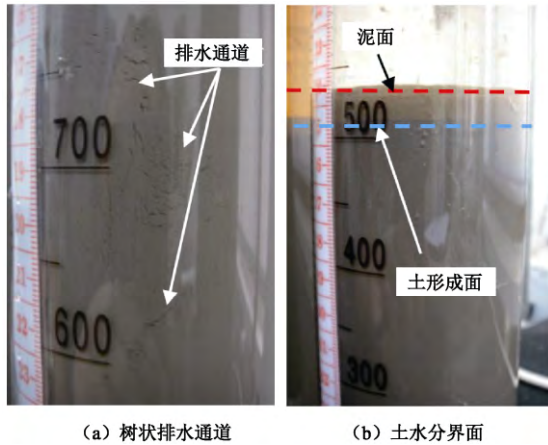


图 5 吹填泥浆沉降阶段照片

Fig. 5 Photos of hydraulic-dredged slurry in settling stage

2.4 沉积沉降和固结沉降的定量判定

基于上述分析, 接下来对天津吹填泥浆的吹填控制与评价相关参数分析。

天津吹填泥浆沉降类型分为沉积沉降与固结沉降, 为了定量评价不同沉降类型的发生条件, 首先找出絮凝阶段泥面保持稳定的时间, 称为絮凝时间 T_f , 建立 T_f 及泥面沉降速率 V_t 与 w_0 的关系, 如图6所示, 其中, V_t 等于图3中沉降曲线在絮凝阶段的切线斜率; T_f 为快速沉降段与匀速沉降段两条曲线切线的交点对应的时间(如参考图3(b)中, $w_0=2000\%$ 泥浆的沉降曲线)。

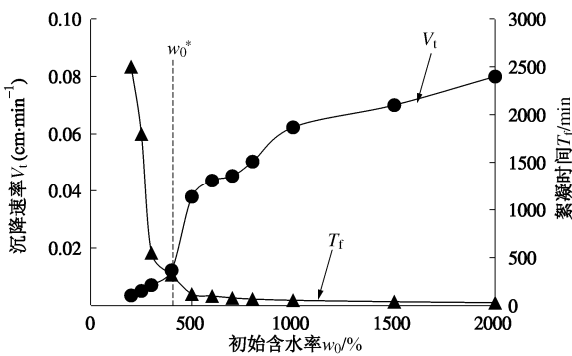


图 6 吹填泥浆的絮凝时间、沉降速率与初始含水率关系

Fig. 6 Effects of initial water content of hydraulic-dredged slurry on flocculation time and settling rate

由图6可知, 天津吹填泥浆的 V_t 随 w_0 的增加呈非线性增大, $w_0 > 400\%$ 时, V_t 出现明显增大现象; 对应地, T_f 降低到接近于0, 这反映出在相对较高的 w_0 状态下, 泥浆没有出现明显的絮凝现象。这种 T_f 或 V_t 突然改变的现象可以解释为: 当泥浆的 w_0 超过一个含水率临界值 w_0^* , 土颗粒可以快速移动并形成悬浮的絮团; 相反的, 一旦 $w_0 < w_0^*$, 土颗粒数量多会增大相互作用力, 限制颗粒移动, 延长絮团形成时间, 最终导致固结沉降类型的 V_t 明显小于沉积沉降类型的 V_t , 需要的絮凝也越长。由此看来, w_0^* 可作为区分沉积沉降与固结沉

降的临界含水率, 从图6可以确定天津吹填泥浆 $w_0^* = 400\%$ 。 $w_0 < 400\%$, 发生固结沉降, 沉降规律可以用一维固结理论描述^[13]; $w_0 > 400\%$, 发生沉积沉降, 沉降规律可以沉积规律描述^[14]。

对比以往研究发现, 除了 w_0^* 可能与吹填重量有关^[5], 不同地区泥浆的 w_0^* 主要与其土性有关。为了消除这种影响, 采用表征土性的液限 w_L 计算 w_0^* , 图7列出9种黏性土以及黏土矿物^[4-5, 12]的 w_0^* 与 w_L 的关系。除了蒙脱土, 高岭土与其他地区黏性土泥浆的 w_0^* 随 w_L 增大呈线性增大, 相互关系可以表述为

$$w_0^* (\%) = 12.1w_L (\%) - 238.5 \quad (2)$$

式(2)反映出土的黏粒含量越多, 泥浆从流动状态转向可塑状态所需的含水率越高, 泥浆沉降的临界含水率 w_0^* 越大。Carrier等^[15]利用数值模拟方法得到 w_0^*/w_L 等于7.0。Monnte等^[16]则根据试验数据指出 w_0^* 在5.0~7.0倍液限 w_L 之间。从图7中可以看到, 虽然天津滨海吹填泥浆的 $w_0^* = 6.6w_L$, 位于5.0~7.0倍液限之间, 但其他地区黏性土泥浆的 $w_0^* - w_L$ 曲线普遍位于 $5.0w_L \sim 7.0w_L$ 范围之上, 这可能是由于确定泥浆进入固结状态的临界含水率的方法不同引起。CARRIER等^[15]是在沉降稳定后, 测定泥浆表面的含水率进而确定 w_0^* , 取样的泥浆在沉降过程中已经不可避免发生了自重固结, 导致测定的 w_0^* 低于实际 w_0^* ^[12]。

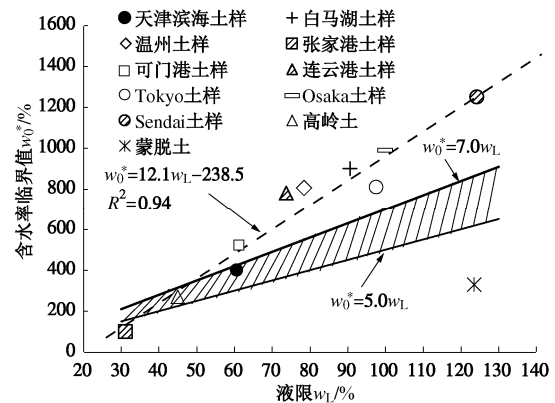


图 7 液限与含水率临界值关系

Fig. 7 Relationship between liquid limit and critical moisture content

2.5 土的形成含水率

根据前述分析可知, 初始含水率较高的泥浆处于流动的沉积状态, 随着沉降的发展, 沉积物含水率逐渐降低, 孔隙比逐渐减小, 泥浆逐渐形成土, 即变为固结状态。因此, 临界含水率 w_0^* 也可以认为泥浆沉降过程中土的形成含水率, 也就是说天津吹填泥浆的含水率超过形成含水率400%, 流动的泥浆将形成可塑态的土。

土的形成状态评价也可以用土的形成孔隙比 e_0^*

描述。如图8所示，当 $e < 10.92$ ，泥浆的沉降速率 V_t 迅速降低，推断泥浆状态由沉积状态变为固结状态，由此得到天津吹填泥浆的 $e_0^* = 10.92$ 。从图9中也可以看出，泥浆随着沉降发展，含水率逐渐降低，孔隙比逐渐减小，当 $e = 10.92$ （或 $w_0 = 400\%$ ），土开始形成。图10给出了不同 w_0 的泥浆的土的形成时间 T_s ，随着 w_0 的增大， T_s 逐渐增大，当 $w_0 > 1000\%$ ， T_s 趋于稳定，即 $w_0 > 1000\%$ 的泥浆的土的形成时间约为1500 min。

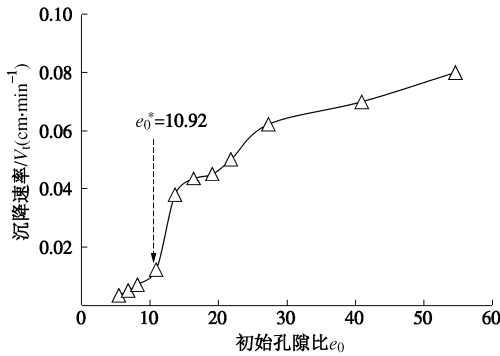


图8 沉降速率与初始孔隙比关系

Fig. 8 Relationship between settling velocity and initial void ratio

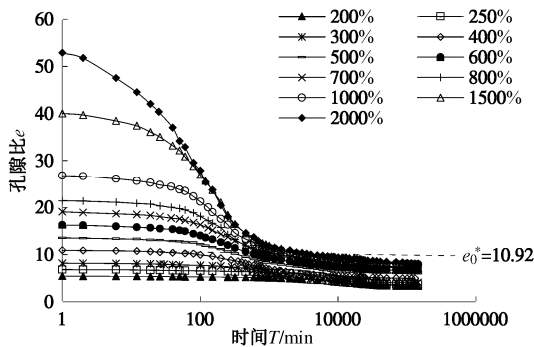


图9 沉降时间与孔隙比关系

Fig. 9 Relationship between void ratio and settling time

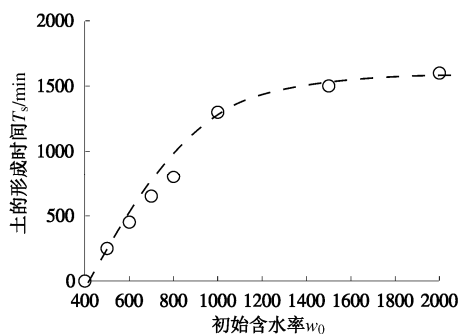


图10 不同初始含水率下土的形成时间

Fig. 10 Formation time of soils with different initial moisture contents

2.6 沉降稳定时间

$S - lgt$ 沉降曲线趋于水平时，泥浆内的超孔隙水压力消散完毕，泥浆自重固结完成，标志着自然沉降结束^[8]。自然沉降结束的时间成为沉降稳定时间 T_c ，该参数是吹填工程中堆场容积设计及工期预估的重要

评价指标。 T_c 可以通过 $S - lgt$ 沉降曲线匀速沉降段与稳定阶段两条曲线切线的交点对应的时间确定（如参考图3（a）中， $w_0 = 2000\%$ 泥浆的沉降曲线）。

图11为 $T_c - (w_0/w_L)$ 关系曲线，可以发现，天津滨海吹填泥浆及其他地区3种土样随着 w_0/w_L 的增加， T_c 呈非线性幂函数下降趋势，可用下式描述：

$$T_c = 159.0 \left(\frac{w_0}{w_L} \right)^{-1} \quad (3)$$

式（3）反映出泥浆的初始含水率 w_0 越高，泥浆的孔隙比越大，土的渗透性越好，自然沉降完成的时间越短。

根据沉降稳定时间 T_c 还可以进一步确定泥浆自重固结完成后土持有的孔隙比（定义为稳定孔隙比 e_c ），进而为估算吹填工程地基承载力提供借鉴参考。根据图3（a）中找出 T_c 对应的沉降量 S_c ，利用 $H_c = H_0 - S_c$ 得到泥面距离底部的高度，利用式（4）得到稳定孔隙比 e_c ：

$$\frac{H_c}{H_0} = \frac{1 + e_c}{1 + e_0} \quad (4)$$

建立 e_c 与初始孔隙比 e_0 的关系，如图12所示。结果表明，利用泥浆的 e_0 可以很好地计算沉降的稳定孔隙比 e_c ， $e_c - e_0$ 具有明显的分段性特征，可表示为

$$\begin{cases} e_c = 0.08e_0 + 5.4 & (e_0 \geq 13.65) \\ e_c = 0.4e_0 + 1.03 & (e_0 < 13.65) \end{cases} \quad (5)$$

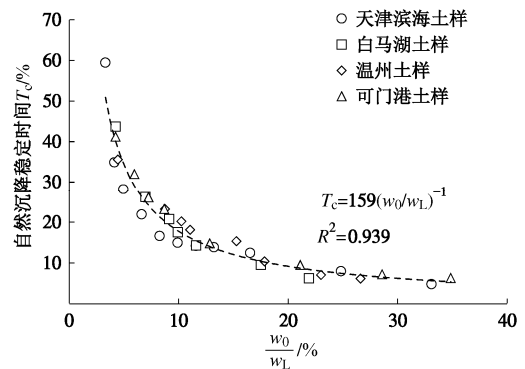


图11 T_c 与 (w_0/w_L) 关系曲线

Fig. 11 Relationship between T_c and w_0/w_L

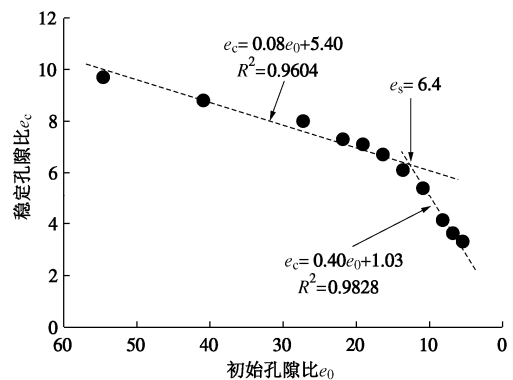


图12 e_c 与 e_0 关系曲线

Fig. 12 Relationship between e_c and e_0

2.7 絮凝屈服应力

图12中 $e_c - e_0$ 关系曲线出现明显转折点的现象可以用泥浆的絮凝屈服应力与有效应力 σ' 变化解释^[12]。沉降形成的絮团由于其内部土颗粒间的静电力与范德华力相互吸引, 具有抵抗一定外力的能力, 絮团最大屈服抗力称为絮凝屈服应力 P_s 。由图4可知, 絮凝阶段, 泥浆处于流动状态, $\sigma' = 0$; 沉降阶段, 絮团相互吸引并下沉形成土, 絮团间开始传递有效应力, 随着沉降的发展及土的自重的增加, σ' 从0逐渐升高, 导致絮团间孔隙被压缩。此时, $0 < \sigma' < P_s$, 所以絮团未被破坏, 内部孔隙体积不变; 自重固结阶段, 随着絮团自重增大, σ' 进一步增大, 一旦 σ' 超过 P_s , 絮团内部孔隙开始被压缩, 直至固结完成。上述过程中, σ' 是随土的自重固结发展而变化的, 土的自重必然与初始孔隙比 e_0 相关; 而 e_c 可以表征自重固结作用下土被压缩的程度。因此, 自重沉降固结导致的 σ' 变化必然会影响到 $e_c - e_0$ 曲线关系。只有当 e_0 较高, 自重固结产生的 σ' 才会很小, 仅絮团间孔隙被压缩, 稳定孔隙比 e_c 必然较高; 当 e_0 降低, 会产生较高的 σ' 并超过 P_s , 导致絮团内和絮团间孔隙都被压缩, e_c 迅速降低, 引起图12中的转折点。将图12中转折点对应的 e_c 定义为界限孔隙比 e_s , 该值的准确确定对于计算不同初始含水率泥浆的最终沉降标高具有重要意义。

P_s 表达式为

$$P_s = \gamma'_s H_c \quad (6)$$

式中, γ'_s 是高度 H_c 的沉积土具有的平均重度。由此, 得到天津滨海吹填泥浆的 $P_s = 0.3 \text{ kPa}$, $e_s = 6.4$, $e_s = 3.88e_L$ (e_L 为土在液限时具有的孔隙比)。

2.8 形成土的微观结构

沉积土的力学性状很大程度上受其微观结构系统控制^[17], 为了更好地了解泥浆的吹填成土机理, 对天津吹填泥浆 ($w = 400\%$, 接近实际含水率) 沉降100 d后的土进行微观结构调查, 见图13。天津吹填泥浆沉降形成的土在垂直沉降方向呈堆叠结构 (见图13(a)), 表现为扁平状絮团相互之间以面一面的接触方式, 一层层的由上至下堆叠 (箭头方向为沉降方向), 絮团和孔隙与沉降方向呈90度展布, 有明显的定向性, 孔隙连通性好; 放大电镜照片可以看到这些扁平状絮团实际上是由矿物颗粒以边一面和面一面接触形成的絮凝结构 (见图13(b))。图13(c) (d) 可以看到, 与地质沉积形成土不同, 吹填沉积形成的土由于沉降作用, 垂直和平行沉降方向的土的微观结构明显不同, 平行沉降方向SEM表现为明显的絮凝结构, 而垂直沉降方向呈堆叠结构。此外, 从图13(d) 还可以看到直径超过50 μm 的大孔隙, 这可能是自重固结阶段排水通道。

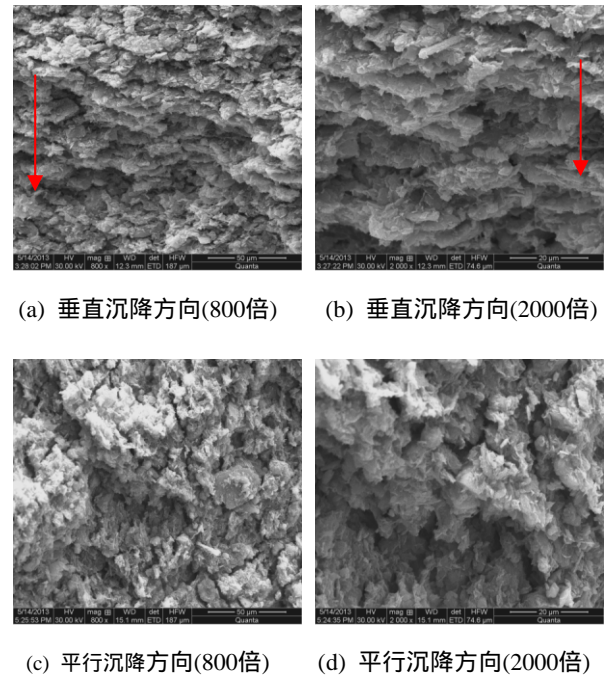


图13 吹填土的微观结构照片

Fig. 13 SEM photos of hydraulic-dredged mud

可以看出, 由于沉降过程中颗粒的循序下沉以及固结排水引起垂直与平行沉降方向的土的微观结构形态并不相同, 整体而言, 不同方向上, 孔隙连通性较好, 这些孔隙组成贯通的孔隙网, 利于自重固结水的排出。图13所示的土的结构具有微观组构特征, 这种结构的土已经具有一定的结构强度。

3 结 论

(1) 不同初始含水率的天津吹填泥浆的沉降类型主要是沉积沉降和固结沉降。其中, 沉积沉降过程分为絮凝阶段、阻碍沉降阶段、自重固结阶段。且沉积沉降过程中随着含水率的降低逐渐转向固结沉降。

(2) 确定了表征天津吹填泥浆自重沉降固结的相关参数。含水率临界值或土的形成含水率 $w_0^* = 400\%$, w_0^* 与液限 w_L 具有较好的线性关系 $w_0^* = 12.1w_L - 238.5$; 土的形成孔隙比 $e_0^* = 10.92$; 沉降稳定时间 T_c 可用 $T_c = 159(w_0/w_L)^{-1}$ 计算; 稳定孔隙比 e_c 可由分段公式计算, $e_c = 0.08 + 5.4(e_0 - 13.65)$, $e_c = 0.4 + 1.03(e_0 < 13.65)$; 絮凝屈服应力 $P_s = 0.3 \text{ kPa}$, 界限孔隙比 $e_s = 6.4$, $e_s = 3.88e_L$ 。

(3) 天津吹填泥浆自重沉降固结的相关参数可用以指导吹填工程。泥浆的初始孔隙比 e_0 或初始含水率 w_0 对其沉降特性具有重要影响, $w_0 < 400\%$, 发生固结沉降, 沉降量 S 可以用一维固结理论计算; $w_0 > 400\%$, 发生沉积沉降, 沉降量 S 可以用沉积规律计算。当沉降时间达到 T_c , 泥浆的含水率 w 降低至 w_0^* , 开始形成可塑态的土, 如果需要固化泥浆, 应在吹填前或

吹填后1500 min内添加固化剂。当沉降时间超过 T_c ，认为自重沉降固结稳定，可进行上层积水排出，进行吹填土的地基处理与后续施工，此时地基承载力可根据 e_c 估算。

(4) 天津吹填泥浆沉降形成土在平行沉降方向表现为絮凝结构，而垂直沉降方向呈堆叠结构。土的微观孔隙网连通性好，利于自重固结中水的排出。

(5) 天津吹填泥浆来源于浅海淤泥，具有较高的盐分与有机质，后续研究应重点研究海水中的盐分对泥浆沉降规律的影响。

参考文献：

- [1] 杜东菊, 杨爱武, 刘 举, 等. 天津滨海吹填土[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (DU Dong-ju, YANG Ai-wu, LIU Ju, et al. The dredger fill of Tianjin Binhai area[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [2] 杨爱武, 孔令伟, 张先伟. 吹填软土蠕变过程中颗粒与孔隙演化特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1634 – 1640. (YANG Ai-wu, KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei. Analysis of evolution of particles and pores in creep process of dredger fill soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1634 – 1640. (in Chinese))
- [3] 杨秀娟, 贾永刚. 黄河口入海泥沙沉积固结过程长期现场观测研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 671 – 678. (YANG Xiu-juan, JIA Yong-gang. Long-term field observation of sediment consolidation process in Yellow River Delta, China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 671 – 678. (in Chinese))
- [4] XU G Z, GAO Y F, HONG Z S, et al. Sedimentation behavior of four dredged slurries in China[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2012, 30(2): 143 – 156.
- [5] IMAI G. Settling behavior of clay suspension[J]. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 61 – 77.
- [6] IMAI G. Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 7 – 20.
- [7] SRIDHARAN A, PRAKASH K. Self weight consolidation: compressibility behavior of segregated and homogeneous finegrained sediments[J]. Marine Georesources and Géotechnique, 2003, 21(2): 73 – 80.
- [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 – 1685. (ZHANG Nan, ZHU Wei, WANG Liang, et al. Study of sedimentation and consolidation of soil particles in dredged slurry[J]. Rock and Soil Mechanics, 34(6): 1681 – 1685. (in Chinese))
- [9] 张先伟, 孔令伟, 王 静. 针对黏性土胶质联结特征的SEM-EDS试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 195 – 203. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, WANG Jing. Experimental study of SEM-EDS for cementation bond characteristics of Zhanjiang clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 195 – 203. (in Chinese))
- [10] SL 237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL 237—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [11] IMAI G, TSURUYA K, YANO K. A treatment of salinity in water content measurements of very soft dredged clays[J]. Soils and Foundations, 1979, 19(3): 84 – 89.
- [12] 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 Gui-zhong, JI Feng, WENG Jia-xing. Sedimentation behavior of dredged slurry at high water contents[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(3): 22 – 27. (in Chinese))
- [13] TOORMAN E A. Sedimentation and self-weight consolidation: general unifying theory[J]. Géotechnique, 1996, 46(1): 103 – 113.
- [14] TAN T S, YONG K Y, LEONG E C, et al. Sedimentation of clayey slurry[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, 116(6): 885 – 898.
- [15] CARRUER III W D, BROMWELL L G, SOMOGYI F. Design capacity of slurried mineral waste ponds[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(5): 699 – 716.
- [16] MONTE J L, KRIZEK R J. One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation[J]. Géotechnique, 1976, 26(3): 495 – 510.
- [17] ZHANG X W, KONG L W, LI J. An investigation of alternations in Zhanjiang clay properties due to atmospheric oxidation[J]. Géotechnique, 2014, 64(12): 1003 – 1009.