

天津吹填软土沉积特性及其微观结构研究

杨爱武^{1,2} 杜东菊^{1,2} 卢力强^{1,2}

- (1. 天津城市建设学院土木工程系, 天津 300381;
2. 天津市软土工程特性与工程环境重点实验室, 天津 300381)

摘要: 吹填软土由于其物质成分和沉积环境千差万别, 决定了其工程性质也差别很大, 具有区域性特点。本文以大型沉降柱模拟吹填泥浆自然沉积, 对天津滨海新区吹填泥浆静水沉降过程中泥水分界面、含水量、孔隙比变化及其沉积后的相关特性进行了探讨, 并对其微观结构特征进行了研究。试验结果分析表明: 天津吹填土富含粘土矿物, 微结构不稳定。在沉积过程中, 颗粒分选明显, 各项指标前期变化大, 后期趋于稳定, 总体工程性质差, 难以直接满足工程建设的需要, 需进行相应的处理。

关键词: 吹填软土; 沉积特性; 微观结构; 泥水分界面

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)05-0083-05

吹填软土作为一种特殊性土, 自重沉积时间短, 在自重作用下获得的固结度小于天然软土, 因此具有更大的欠固结特性与可压缩特性。沿海城市目前正在进行大规模的工程建设, 对土地资源的要求日益迫切, 将疏浚出来的淤泥用来填海造陆, 已成为沿海城市缓解土地资源紧张的有效途径之一。大量的工程实践发现, 水力吹填的淤泥与其下伏海相淤泥层的物理力学性质有很大差别, 对后期的加固处理方法的适应性也有很大的差异^[1]。而到目前为止, 对这种人工吹填土的物理力学性质及工程特征尚缺乏系统的研究和探讨, 对它的加固设计方案也多借用已有的海相淤泥资料, 所以加固效果往往难以保证^[2], 因此对吹填软土工程性质的研究具有重要的工程实践价值。目前已有不少学者开展了相关的研究^[3-14], 取得了一定的成果。由于吹填土性质与其物质来源有重要关系, 因此具有很强的区域性特点。目前天津滨海新区正在进行大规模吹填造陆工程, 其吹填的物质成分主要河道疏浚的淤泥, 塑性指数大, 以细粒为主, 有别于我国沿海其他地区吹填土。深入研究该地区吹填土沉积特性及

工程性质, 对于指导新区吹填场地地基处理具有重要的理论意义。

1 试验内容

1.1 试验装置设计

本次试验设计了高 2m、直径 0.8m 的大型沉降柱模拟试验。沉降柱由有机玻璃制成, 分为上下两节, 每节高 1m, 用法兰盘连接, 底部开有小孔, 作为下排水用。下节距离其顶端 10cm 向下每隔 10cm 开有一个小孔, 共 8 孔, 编号从上到下依次为 1, 2, 3, …, 8, 孔中插入玻璃管, 玻璃管一端伸入沉降柱中 30cm, 其周围开有小孔, 并用滤纸包裹, 另一端用乳胶管将其与固定在支架板上的带刻度的玻璃管相连接, 用以量测静水沉降过程中超静孔隙水压力变化, 玻璃管中高出筒内水面的高度即为沉降柱内相应位置超静孔隙水压力, 本文对此不做研究。在沉降柱的另一侧, 距离柱顶 30cm 向下每隔 20cm 依次安装 6 个排水孔, 编号从上到下依次为 1, 2, …, 6, 用以放水或泥浆, 测定泥浆中含水量变化。

1.2 试验样品

试验用吹填泥浆在吹填场地正在吹填的吹填管口附近取得, 初始含水量约 400%, 富含粘土矿物, 主要以伊利石、蒙脱石为主。

1.3 试验方法及内容

试验前, 在沉降柱底部铺上土工布并上覆滤水纸, 然后将吹填泥浆灌入沉降柱中, 总高度为 180cm。本文设计的沉降柱底部开有小孔, 其上铺设土工布并上覆滤水纸, 其渗透性略高于吹填场地工程实际, 主要是

收稿日期: 2010-01-27; 修订日期: 2010-03-42

基金项目: 天津市科技发展计划项目(04311381); 天津市科技发展计划重点科技攻关项目(06YFSZSF04000); 科技创新能力与环境建设平台项目(06SYSYJC14900)。

作者简介: 杨爱武(1971-), 男, 博士研究生, 副教授, 从事软土地基处理及土体微观结构研究。

E-mail: tulilab@163.com

为了研究下排水对静水沉积的影响。试验过程中,对泥水分界面下沉量进行了全过程跟踪观测。同时在不同的时间段,从泥浆孔中放出泥浆测定其含水量变化。在试验进行到 45 天后,观测发现泥水分界面变化很小。此时,将上部自由水抽取,测得沉降土层含水量为 115.0%,底部沉积土柱高度为 71cm,排出的自由水高度为 109cm。而后让其表面自然蒸发,一年后在沉降柱上中下部位分别取样进行各种测试。

2 试验结果分析

2.1 泥浆沉淀过程中有关参数分析

为了研究泥浆沉淀过程中有关特性,在泥浆沉淀过程中对泥水分界面、含水量进行观测和试验,并计算其孔隙比变化。计算成果如表 1。

表 1 泥浆沉积过程中有关参数变化表

Table 1 Parameters changes in the procession of mud deposition

时间 (d)	0	2	10	30	45	366
泥水分界面高度 (cm)	180	102	84	74	71	63
含水量 (%)	400	210	168	139	115	45
平均孔隙比	11.6	5.84	4.62	3.85	3.21	1.20

由表 1 可知,在 0~2 天内,泥浆下沉面、平均含水量以及平均孔隙比变化率最大。2~10 天时变化率减小,10 天后变化率明显减小,随后基本处于平稳。也就是说泥浆下沉经历了 3 个阶段,即:第一阶段是颗粒及絮团自由沉降阶段,该阶段土颗粒之间未有接触,处于水中自由落体状态,泥水很快分离分界面下降量大,含水量减少近半,孔隙比也同样减少近半;第二阶段为悬浮细粒团再集凝下落阶段,此时土颗粒之间开始接触,由于接触的土颗粒之间会相互碰撞、干扰,下沉速度相应减小,因此泥水分界面下沉量较第一阶段减小,含水量和孔隙比也如此;第三阶段为泥浆完全自重固结阶段,此时土颗粒完全接触,进一步紧密接触完全靠土体自重,所以变化率很小,最后趋于稳定。总之,泥浆在初始自重作用下,各指标变化量很大,地基处理时要考虑让其先自然沉积一段时间(本文为 10 天)后再进行相关处理,避免不必要的浪费。

2.2 颗粒分析

土的粒度成分是决定土体强度的主要因素之一,本文为研究沉积过程中粒度分选情况,自重固结一年后,在沉降柱上、中、下三段分别取样,利用自动粒度分析仪(sedigraph 5100)进行了粒度分析,成果如表 2。

表 2 土颗粒粒度分析

Table 2 Soil particle size analysis

部位	粒级百分含量 (%)							
	>0.05mm	0.05~	0.025~	0.01~	0.005~	0.002~	0.0015~	0.0001~
		0.025mm	0.01mm	0.005mm	0.002mm	0.0015mm	0.0001mm	0.0005mm
上部	0	0.2	1.1	3.8	11.5	7.8	10.2	18.1
中部	0	0.4	1.6	5.2	18.9	6.4	9.7	13.2
下部	1.0	0.9	7.7	11.7	20.8	5.6	7.4	11.5

由表 2 可知:上部土层中粘粒(0.005mm)含量为 94.9%,粉粒(0.05mm)以上含量为 5.1%,基本上都为粘粒;中部粘粒(0.005mm)含量为 92.8%,粉粒(0.05mm)以上含量为 7.2%;下部粘粒(0.005mm)含量为 78.7%,粉粒(0.05mm)以上含量为 21.3%。也就是说在沉积过程中土颗粒逐渐分选,由上到下颗粒逐渐变粗。

根据 Stock 定律,即下沉的速度与团粒的直径平方成正比。因此,粗颗粒下沉快,细颗粒相对慢。即颗粒相同的土粒依照 Stocke 定律将以等速度 v 下降。经过 t 秒后所有粒径为 d 的颗粒下降的距离为 $L=vt$,因此,所有粒径大于 d 的颗粒已经下降到 L 平面以下, L 平面以上仅有小于 d 的颗粒,所以沉降过程中颗粒大

小出现一定的粒度序列,即颗粒出现分选现象,表现为沿沉降柱向下颗粒逐渐变粗,但随着时间的推移,部分小颗粒会充填于大颗粒中,于是就表现为上部粘粒含量较多,向下粉粒含量逐渐增多。但现场实际吹填泥浆并非一次性搅拌均匀沉积,分选性不如室内明显。据有关文献^[15],随吹填口距离的增大,场地表现有一定的分选性,即远离吹填口颗粒越来越细。静水中颗粒沉积分布规律以及有关文献所显示的吹填场地颗粒实际分布情况,对于研究吹填场地土体工程性质及其地基处理具有重要的实践价值。

2.3 吹填软土矿物成分分析研究

岩土体由矿物构成,其矿物成分是决定土体工程性质的因素之一。由前述试验成果知:沉降柱中土颗

粒从上到下逐渐变粗 ,上部为淤泥质软粘土 ,是工程中最难的处理层。因此 ,本文着重对其矿物成分进行了分析研究 ,以期对其地基处理提供借鉴。本文以 X 衍

射方法对沉降柱中上部土体矿物种类与含量、粘土矿物含量进行了测试 ,成果如表 3、表 4。

表 3 矿物 X-射线衍射分析成果表
Table 3 X-ray diffraction analysis of mineral

样品编号	成岩矿物种类和含量(%)								粘土矿物总量(%)
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	石盐	角闪石	
1	17.4	4.6	6.3	17.4	1.3	0.7	1.9	0.3	50.1
2	19.5	1.2	8.5	16.1	1.2	0.3	1.6	0.2	51.4

表 4 粘土矿物 X-射线衍射分析成果表
Table 4 X-ray diffraction analysis of clay mineral

样品编号	粘土矿物相对含量(%)						混合比(%S)	
	S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S
1	42	37	10	11			45	
2	45	36	9	10			45	

注:1—伊利石 K—高岭石 C—绿泥石 I/S—伊蒙混层

从测试成果可以看出 ,粘土矿物含量高 ,超过 50% ,其中伊利石、高岭石、绿泥石分别占粘土矿物总量的 35% ~ 37%、9% ~ 10%、10% ~ 12% ,伊蒙混层占粘土矿物总量的 42% ~ 45%。粘土矿物由于其晶格结构的差异 ,反映出力学性质也有很大差别。伊蒙

混层晶格结构连接低于伊利石与高岭石系列 ,含量越多 ,对工程力学性质不利影响越大 ,因此 ,本文实测得到的力学性质较差。

2.4 物理力学性质研究

沉降柱泥水分界面在 45 天后变化很小 ,超静孔隙水压力也基本消散 ,将上部自由水全部排出 ,测其沉淀物含水量为 115%。也就是说吹填泥浆在静水沉淀时 ,当上覆水压为 1m 时 ,沉淀泥浆含水量在 110% 左右 ,此含水量可以作为吹填场地土的初始含水量 ,具有很重要的工程指导意义。当下部继续保持排水状态 ,泥浆表面自然蒸发时 ,一年后在沉降柱上中下部位取样 ,进行物理力学性质试验 ,具体数据见表 5。

表 5 土样物理力学性质指标
Table 5 Basic physical parameters of soil samples

部位	含水量(%)	天然孔隙比	塑性指数	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	固结快剪指标		土的定名
					C(kPa)	$\varphi(^{\circ})$	
上部	47.7	1.334	22.9	2.302	13	7	淤泥质粘土
中部	30.7	0.78	14.7	4.413	22	14	粉质粘土
下部	23.2	0.769	11.0	5.786	40	21	粉质粘土

由表 5 可以看出 ,沉降柱上部土层为淤泥质粘土 ,含水量高 ,孔隙比大 ,力学性质差 ,向下逐渐过渡到粉质粘土并接近粉土 ,力学性质逐渐增大。与颗粒分析结果相一致 ,即越往下 ,颗粒逐渐变粗 ,符合静水沉降规律。总的来说 ,利用本文设计的沉降柱在有下排水的条件下 ,一年后固结效果显著提高 ,中下部的工程性质明显要好于上部 ,说明吹填泥浆沉淀过程中下排水起重要作用 ,工程实际中可考虑下排水进行地基处理。

2.5 比表面积及孔隙特征研究

比表面积是指每克物质中颗粒总表面积之和。比表面积是衡量物质特性的重要参量 ,其大小与颗粒的粒径、形状、表面缺陷及孔结构密切相关。同时 ,比表面积大小对物质其它的许多物理及化学性能会产生很

大影响 ,特别是随着颗粒粒径的变小 ,比表面积成为衡量物质性能的一项非常重要参量 ,一般比表面积大、活性大的多孔物质 ,吸附能力强。本文对沉降柱上中下部位土体取样 ,利用比表面积孔径分析仪 (ASAP2020) 进行了比表面积及孔隙特征等的测试 ,成果如表 6。

表 6 BET 比表面积及孔隙参数统计表
Table 6 BET surface area and void parameters

序号	部位	比表面积(m^2/g)	平均孔径($\text{\AA}$)	单位质量孔隙体积(m^3/g) (孔径在 $17\text{\AA} \sim 3000\text{\AA}$ 之间)
1	上部	17.6502	97.0	0.040745
2	中部	11.9729	105.3563	0.030062
3	下部	10.2065	180.9944	0.043831

注:表中数据为 BET 法计算所得

表 6 统计资料表明,沉降柱土体由上到下,比表面积逐渐变小,孔隙尺寸逐渐变大,符合吹填软土沉降过程特点。即吹填软土在静水沉降过程中,大颗粒沉降快,小颗粒沉降相对慢,这样土颗粒在沉降过程中就进行了分选,由上到下颗粒逐渐变粗。由沉降柱土体物理性质试验知:上部为粘粒含量高的粘土,中部为粉质粘土,下部为接近粉土的粉质粘土。粘土颗粒细,单位质量中颗粒数量多,颗粒之间接触孔隙就越小,微小孔的数量也就越多,因此平均孔径小,比表面积大,单位质量体积孔隙也大。向下,颗粒逐渐变粗时,颗粒间孔隙随颗粒增大而增大,因此,平均孔径增大,比表面积逐渐减小。由于单位质量孔隙总体积是由平均孔径组成的球体积与孔隙个数乘积,其变化不是简单的递增或递减关系,因此本文出现随颗粒变粗,单位质量体积出现由大→小→大的过程。比表面积及孔隙特征能在一定程度上反映土体结构、物质组成,进而判定土的吸附能力、矿物成分及含量、颗粒大小等,是吹填场地地基处理宝贵的基础资料。

2.6 微观结构研究

土的微观结构影响土体的工程性质,深入研究其微观结构,有助于从本质上揭示土体宏观行为。本文对沉降柱上中下土层分别进行了微观结构研究,包括微结构扫描及定量分析。

2.6.1 微观结构扫描图片

扫描图片显示上部土层呈絮凝状、片堆结构,属于松软的柔性结构。向下逐渐过渡到粒状镶嵌结构,粉粒呈嵌入状零星分布,嵌入物与基质呈面一面接触(图 1~图 3)。此类结构强于絮凝状结构,因此表现出力学性质逐渐高于上部土层。

2.6.2 微观结构定量分析

为了定量地对微观结构进行分析,本文对扫描照

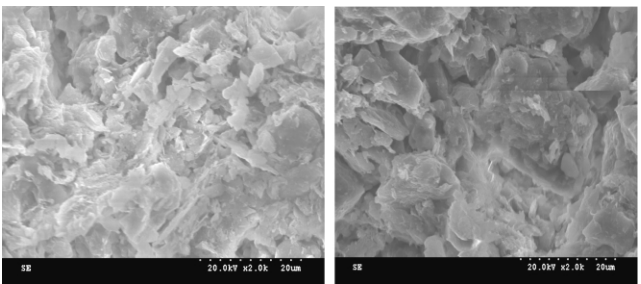


图 1 上部微观结构图

Fig.1 The upper micro-structure diagram

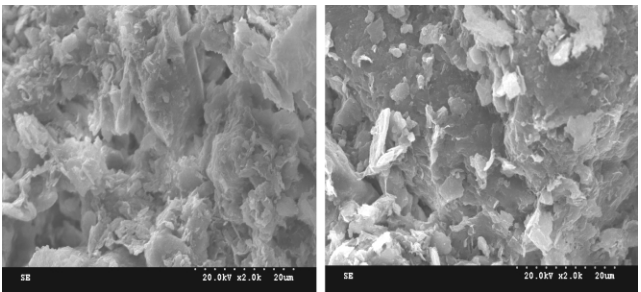


图 2 中部微观结构图

Fig.2 The middle micro-structure diagram

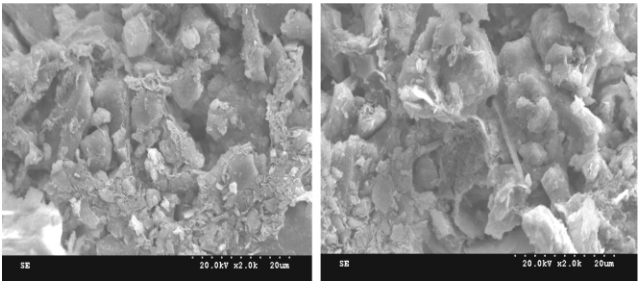


图 3 下部微观结构图

Fig.3 The lower micro-structure diagram

片进行了二值化处理,结果见表 7。

表 7 微观结构定量分析表

Table 7 Quantitative analysis of micro-structure

序号	部位	孔隙个数	平面孔隙含量	平均孔隙面积(μm^2)	平均孔隙周长(μm)	孔隙面积(μm^2)	孔隙周长(μm)
1	上部	6002	0.54	0.219	0.528	1314.4	3151.1
2	中部	5618	0.43	0.232	0.543	1303.3	3050.6
3	下部	5120	0.34	0.29	0.608	1484.8	3112.9

表 7 表明,随着深度的增加,孔隙个数、平均孔隙含量逐渐减少,平均孔隙面积及周长增加,总的孔隙面积及周长是平均面积及周长与孔隙个数的乘积,因此表现出减小再增加的过程,与孔径分析仪测试 BET 比表面积及有关参数相符,符合泥浆静水沉积特性,即越向下,粗颗粒粉粒多,结构连接也随之发生变化,这也

从微观结构上解释了力学性质变化的原因。

3 结论与建议

(1)吹填泥浆沉淀过程中,早期各项指标变化很大,沉积后分选明显,下排水对吹填土性质影响很大,后期处理时应考虑到以上因素。

(2)矿物成分是决定土体工程性质的因素之一,天津滨海新区吹填软土粘土矿物以伊利石及伊蒙混层为主,其晶格构造决定了其力学性质差,需要进行相应处理才能满足工程建设需要。

(3)天津地区吹填软土比表面积及其微观结构与矿物成分颗粒大小有关,粘粒含量越高,颗粒越细,比表面积越大,微观结构也越不稳定。

参考文献:

- [1] 刘莹,王清,肖树芳.不同地区吹填土基本性质对比研究[J].岩土工程技术,2003(4):197-200.
- [2] 彭涛,武威,黄少康,等.吹填淤泥的工程地质特性研究[J].工程勘察,1999(5):1-5.
- [3] 文海家,严春风,汪东云.吹填软土的工程特性研究[J].重庆建筑大学学报,1999,21(2):79-83.
- [4] 刘娉慧,王清,刘莹.吹填泥浆的沉降试验研究及成果分析[J].成都理工学院学报,2001,28(s):140-144.
- [5] 王华敬,顾长存,苏慧.钱塘江吹填土的沉淀特性研究[J].连云港职业技术学院学报,2002,15(2):60-63.
- [6] 刘莹,肖树芳,王清.吹填土的沉积固化后结构强度增长的机理分析[J].同济大学学报,2003,31(11):1295-1298.
- [7] 谢海澜,王清,李萍,等.生石灰和水泥混合处理吹填土的试验研究[J].工程地质学报,2003,11(1):49-53.
- [8] 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.
- [9] 谢海澜,王清.粉煤灰加固处理吹填泥浆的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1811-1816.
- [10] 刘娉慧,肖树芳,王清.外掺剂加固吹填泥浆的机理分析[J].工程地质学报,2005,13(2):285-288.
- [11] 刘娉慧,王清,董钧祥.室内加固的吹填土微结构试验研究[J].水文地质工程地质,2005,32(4):21-23.
- [12] 郭宏宇,严驰,凌光懋.外用改良剂改善吹填土工程性质的试验研究[J].港工技术,2005(1):50-51.
- [13] 刘娉慧,王清,石丙飞,等.快速加固吹填泥浆的试验研究与分析[J].岩土力学,2005,26(12):2023-2026.
- [14] 刘莹,王清.吹填土沉积后微观结构特征定量化研究[J].水文地质工程地质,2006,33(3):124-127.
- [15] 杨顺安,张瑛玲,刘虎中,等.深圳地区吹填淤泥的工程特征[J].地质科技简报,1997,16(1):85-89.

Study on sediment characteristics and micro-structure of soft dredger soil of Tianjin

YANG Ai-wu^{1,2}, DU Dong-ju^{1,2}, LU Li-qiang^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300381, China;

2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300381, China)

Abstract: Due to the different material composition and depositional environments, the engineering properties of soft dredger soil varied widely and also has regional characteristics. In order to probe the mud-water interface, water content and void ratio changes in the procession of subsidence and post-depositional characteristics of Tianjin soft dredger soil, the large-scale settlement column is designed to simulate the natural sediment of the mud, and its micro-structure is also studied. The test results show that Tianjin soft dredger soil is rich in clay minerals, and its micro-structure is unstable. In the procession of deposition, the particle sorted apparently. Its indicators varied greatly in the early, but later stabilized. The engineering properties are poor, which can not directly meet the needs of construction, so need to be handled accordingly.

Key words: soft dredger soil; sediment characteristics; micro-structure; mud-water interface

责任编辑:张明霞