



南沙吹填土物相结构特性分析研究*

王 婧^{1,2,3}, 董志良^{3,4}, 莫海鸿², 李晋骅², 彭 浩²

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641;
3. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230; 4. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 通过现场取南沙吹填土样, 室内开展粒度测试、物相分析、微观结构、元素含量、比表面积分析, 并通过土工试验测试基本物理力学指标。从物理至化学、宏观至微观的角度综合分析了南沙吹填土物相结构特性。试验结果表明: 吹填土以白云母和石英为主; 微观结构为絮凝片状; O、Si 元素的质量分数多; 比表面积在黏土矿物中偏小, 微电场及结合水膜形成相对较弱。

关键词: 吹填土; 物相; 结构特性; 微观

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0036-05

Analysis of phase structure characteristics for dredger fill from Nansha

WANG Jing^{1,2,3}, DONG Zhi-liang^{3,4}, MO Hai-hong², LI Jin-hua², PENG Hao²

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Civil and Transportation Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

3. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China;

4. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

Abstract: Using the dredger fill sample from Nansha area, we carry out a series of tests in laboratory for the grading, phase, microstructure, element content, and specific surface area analysis. We also obtain the basic physical and mechanical indices by geotechnical experiment. Through comprehensive analysis from the views of physics to chemistry and by the macro way to micro way, we obtain the phase structure characteristics of dredger fill from Nansha area. Test results show that dredger fill is mainly of muscovite and quartz; microstructure appears as flocculation plate; the mass fraction of elements O & Si constitute the majority. The specific surface area is less for clay minerals, so it causes relatively weak minute electric field and combined water film.

Keywords: dredger fill; phase; structure characteristics; microcosmic

随着经济的发展和城市基本建设的蓬勃开展, 人们对土地资源的需求日益迫切, 将疏浚出来的吹填土进行填海造陆已成为沿海城市缓解土地资源紧张的重要途径。围海造陆吹填软土地基的加固处理已成为不可避免的技术问题。但是由于吹填土孔隙比高、压缩性强、含水率高和承载力低等特征, 其

固化后能否满足工程需求是人们关注的焦点^[1-2]。不同地域疏浚吹填土因细粒含量不同而使渗透性差别很大。因此, 有必要从物质结构特性等各方面对吹填土性质进行分析研究。本文针对南沙地区围海造陆现场吹填土开展一系列的土工测试及微观测试分析, 总结出吹填土的特性^[3-4]。

收稿日期: 2014-12-18

*基金项目: 中交交通基础工程环保与安全重点实验室科研资助项目 (Y2013D27)

作者简介: 王婧 (1986—), 女, 博士, 工程师, 从事岩土工程和地下结构研究。

1 试验过程及方法

1.1 现场取样

供试吹填土样取自广州南沙区围海造陆现场,位于龙穴岛广州港南沙港区,围海造陆吹填现场取样位置为 $22^{\circ}38'N$ 、 $113^{\circ}41'E$ 。

1.2 检测项目及测试方法

室内物理力学参数指标:烘箱法测含水量;环刀法测湿密度;比重瓶法测比重;液塑限联合测定仪测液塑限;标准固结仪测固结参数;变水头渗透仪测渗透系数;筛析法联合密度计法测颗粒成分。

粒度分析:马尔文激光粒度分析仪测试法;化学成分及矿物成分:X射线衍射法;微观结构:环境电子扫描仪分析法及能谱分析;比表面积:比表面积分析仪^[5]。

2 结果与讨论

由南沙吹填土样外观形态看出土样颗粒和团聚体在空间排列上呈现团粒结构。图1吹填土原状土样显示不成形,基本成流塑状态。图2吹填土烘干土样显示成硬结块,强度较高。

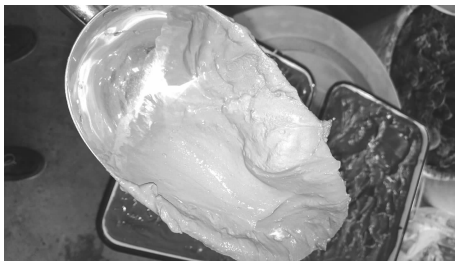


图1 吹填土原状土样



图2 吹填土烘干土样

2.1 粒度分析

南沙吹填土颗粒成分测试分别由常规土工试验(包括粗颗粒的筛析法和细颗粒的密度计法)

以及激光粒度分析仪测试法开展。激光粒度分析被用于检测粒度范围:10 nm至3 mm的颗粒粒径,通过颗粒的衍射或散射光的空间分布(散射谱)来分析颗粒大小。粒度成分颗分曲线结果如图3所示,分别有土工试验颗分曲线以及激光粒度试验颗分曲线,两种测试方法的粒组分类测试结果见表1。

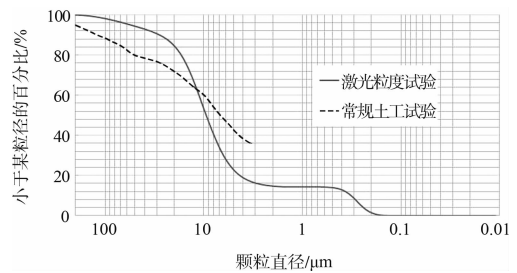


图3 吹填土粒度分布曲线

表1 粒度测试结果

粒组	颗粒名称	粒径 d/mm	百分含量/%	
			土工试验	粒度试验
细粒	黏粒	<0.005	43.0	23
	粉粒	$0.005 \sim 0.075$	42.5	73
粗粒	细砂	$0.075 \sim 0.25$	11.6	4
	中砂	>0.25	2.9	0

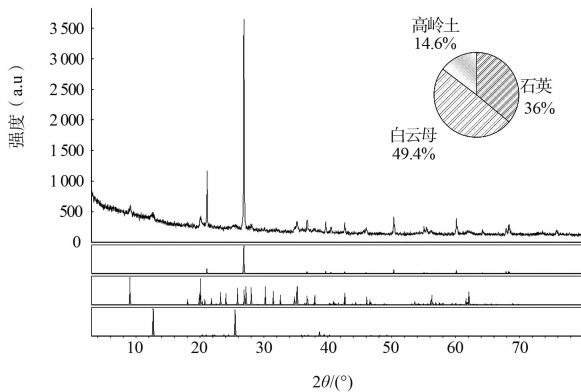
可以看出,激光粒度试验方法测试出的颗粒组分,集中分布在粉粒 $0.005 \sim 0.075$ mm之间,占73%。而土工试验测出的粒组份在细颗粒各区间分布都较为均匀。分析二者测试结果的区别,是由于密度计法加入了4%的六偏磷酸钠10 mL分散剂,使得较细且粘聚力较紧密的细颗粒得到了分散;而激光粒度试验里未加分散剂,细颗粒之间的团聚导致颗粒组分偏大的误区。原因是吹填原状土中含有一定量的由黏粒、粉粒结合形成的具有一定抗水性能的“团粒”,团聚度较高。

从粒径累计分布结果分析得出,南沙吹填土样中颗粒以黏粒和粉粒为主,其中粉粒含量($d = 0.005 \sim 0.075$ mm)约占42.5%,黏粒的含量($d < 0.005$ mm)约占43.0%。黏粒表面一般带电,具有较强的吸附能力,在溶液中,表面一定范围内会形成具有特殊性质的结合水,这类水随外界条件所表现出的规律直接影响着土的性质

变化规律，并决定土的物理、力学性质。

2.2 物相分析

通过 X 射线衍射法对吹填土物相进行测试，即将一定波长的 X 射线照射到物质的结晶体上时，X 射线因在结晶内遇到规则排列的原子或离子而发生散射，散射的 X 射线在某些方向上相位得到加强，从而显示与结晶结构相对应的特有的衍射现象。则不同的矿物因具有不同的晶格排列，根据其独有的衍射现象可综合判断出其所对应的矿物名称^[6]。X 射线衍射结果如图 4 所示，结果显示吹填土的化学成分复杂。原生矿物以白云母和石英为主，占 49.4% 和 36%，次生矿物中高岭土占 14.6%。

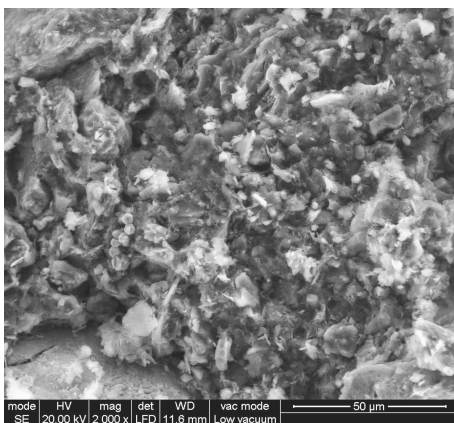


注：全谱拟合，拟合度为1.38。

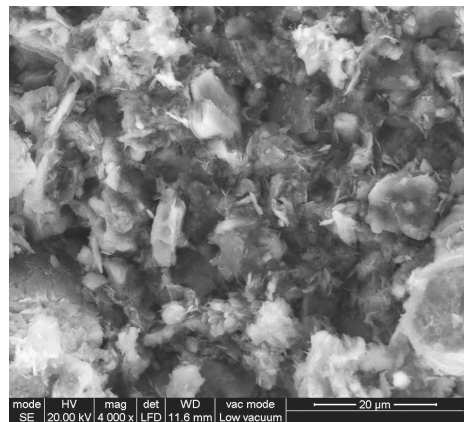
图 4 吹填土 X 射线衍射分析

2.3 微观结构分析

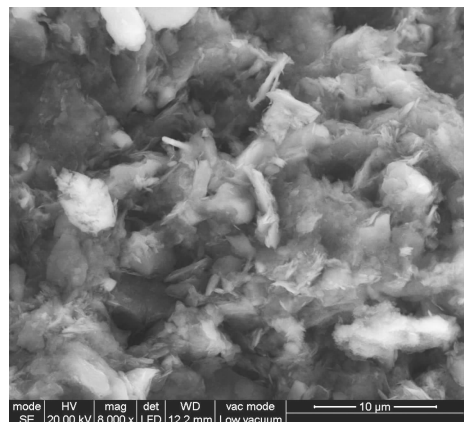
将吹填土样在 105 °C 下烘干 10 h，分别在 2 000 倍、4 000 倍、8 000 倍下对土样进行环境电子扫描，图像结果如图 5 所示。



a) 放大2 000倍



b) 放大4 000倍



c) 放大8 000倍

图 5 吹填土样环境电子扫描图

从图 5 可以发现，土样基体在微形态上主要以土样骨骼颗粒和孔隙为主，细粒物质较少。基本呈絮凝片状结构，放大 8 000 倍可观察到多数颗粒呈片状或针刺状。土样颗粒个体普遍较小，无明显棱角，呈絮状，基本单元体主要为碎屑、集粒及不规则的曲片状叠聚体，无定向排列，随机分布，黏粒含量较多。粒状单晶或集合体彼此相互接触，有的集合体表面附有小片状黏土矿物。孔隙主要为粒间孔隙和粒内孔隙，孔隙壁由面-面、面-边相互作用的微聚集体组成，其中弯曲的聚集体常常彼此覆盖，形成单个蜂窝状孔隙。此外，结构中还含有相当数量的未分解生物碎屑或硅藻土，结构无定向性，孔隙主要为粒间孔隙，粒内孔隙不发育，以粒状胶结和蜂窝状结构为主。

微观结构与矿物分析结果显示主要为石英及白云母吻合，这一结构形式及矿物组成与珠三角

沿海地带的淤泥类似。

2.4 化学元素分析

对于吹填土样在环境电镜扫描的同时进行能谱分析, 土样的能谱图及化学元素相对含量分别如图 6 及表 2 所示。

由能谱分析结果得出, O、Si 元素的质量分数分别占总量的 52.32%、25.18%, 即土的主体成分为 SiO₂, 除 O、Si 以外的非金属元素较少。样品均检测出 10 种元素, 其中, 金属元素较多但并不含重金属元素, 金属元素 Mg、Al 及 Fe 的出现, 可能是同晶置换的结果, 其使晶体带有永久负电

荷, 而土层表面的负电荷则由 Na、K 等元素形成的阳离子所平衡。C 元素的质量分数为 0.14%, 证明土样具有一定量的有机质, 经过有机质试验检测该吹填土样有机质含量为 2.03%。

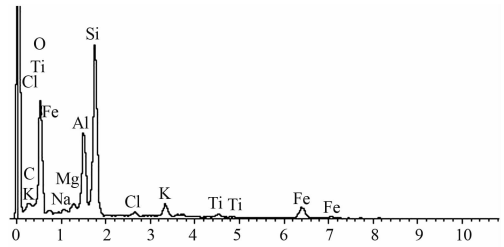


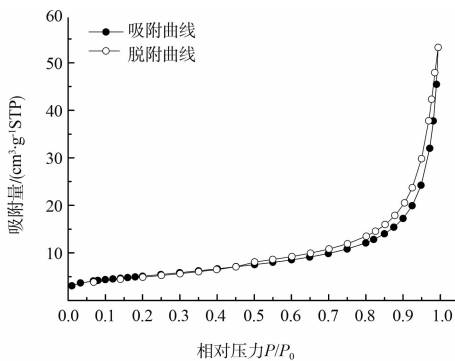
图 6 吹填土样元素测试能谱

表 2 吹填土体化学元素相对含量

元素	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ti	Fe
质量百分比/%	0.14	52.32	0.74	1.07	10.28	25.18	0.79	2.54	0.86	6.09

2.5 比表面积分析

土样的比表面积则由比表面积测定仪进行试验, 其中样品在测试前经过了高真空、200 ℃、4 h 脱气处理, 以确保将材料中的杂质气体脱净。其分析所获得的相对压力-吸附等温线如图 7 所示。



注: BET 比表面积: 18.111 8 m²/g; 总孔隙体积: 0.082 297 cm³/g (单点吸附), 0.082 518 cm³/g (孔径分布脱附); 类型: II, 非孔隙。

图 7 吹填土样压力-吸附等温线

图 7 中黑线代表吸附等温线, 红线代表解吸附迟滞回曲线。吹填土样分析得出的吸附等温线属于分类中的 II 型曲线——非孔类, 说明材料本身基本上没有孔, 所以比表面积很小, 拐点处通常被认为是单层吸附容量结束的标志。迟滞回曲

线属于 H3 型曲线, 一般由片状颗粒材料如黏土给出, 在较高相对压力区域没有表现出任何吸附限制。

据 BET 方法计算得出的比表面积为 18.11 m²/g, 在黏土矿物中属于偏小值。本土样在比表面积及液限、塑限数值上与高岭土接近, 因为土样还混有石英及白云母, 作为非孔材质, 所以导致数值上会比高岭土偏低。而且非黏土矿物颗粒如石英和长石, 即使将颗粒粒径研磨至 0.002 mm 以下, 与水拌合后也不会具有黏土矿物的液塑限高、塑性指数范围大等性质。

黏粒的比表面积越大, 在颗粒表面就能产生较强的微电场, 在电场的影响下极性水分子形成定向排列, 在颗粒表面形成一层结合水膜, 包裹着土颗粒的结合水的结构不同于一般的自由水, 其密度较大, 具有一定的黏滞性, 是土颗粒的塑性和粘聚力的来源之一。

2.6 物理力学指标

南沙吹填土样按照《土工试验方法标准》开展室内土工试验, 测定土样的基本物理力学指标, 数据成果如表 3 所示。

表 3 物理力学指标

含水率	湿密度 ρ _w	干密度 ρ _d	比重	天然	饱和度	液限	塑限	塑性	液性	压缩系数	压缩模量	固结系数	次固结系数	渗透系数
w _o /%	(g·cm ⁻³)	(g·cm ⁻³)	ρ _s	孔隙比 e _o	S _r /%	w _L /%	w _p /%	指数 I _p	指数 I _L	a _{v1-2} /MPa ⁻¹	E _{s1-2} /MPa	C _v /(10 ⁻³ m ² s ⁻¹)	C _α /(10 ⁻² m ² s ⁻¹)	k ₂₀ /(10 ⁻⁶ cm·s ⁻¹)
140	1.302	0.54	2.618	3.826	100	56.8	26.8	30.0	1.5	1.16	2.0	1.048	1.625	4.23

1) 含水率 w 高, 天然孔隙比 e 大。广州南沙地区软土的含水量和孔隙比都比较大。该吹填土样含水量达到 140%, 孔隙比达 3.826。土颗粒基本处于悬浮状态, 土颗粒间充满自由水, 粒间作用力极弱, 基本可忽略土样的结构性。

2) 土体接近完全饱和。南沙区软土的饱和度一般大于 92%, 本次土样饱和度为 100%, 可认为完全饱和。

3) 垂直渗透性低。土层垂直方向的渗透系数在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s, 使得土体在荷载作用下固结速率很慢, 强度提高缓慢。统计结果还表明, 水平方向的渗透系数与垂直方向有明显差别, 一般在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s。出现这种方向性渗透系数较大差异的原因跟颗粒形状有很大关系, 土样的颗粒片状物居多, 若土层表面出现一定压力, 土颗粒则会慢慢形成面朝上下的叠片结构, 此时则会表现出垂直方向的渗透系数要低于水平方向。

4) 抗剪强度低。该区软黏土的抗剪强度特性与其微观结构有关, 总的来说由于软土链接结构的连接强度较弱, 抗剪强度一般不高, 随着饱和土排水固结, 土的体积减小, 土结构单元的接触点增大, 随着有效应力增大和土体结构连接强度的提高, 土体抵抗剪切破坏能力增强。

5) 压缩性高。珠江三角洲软土层大多呈正常固结状态, 也有部分浅层软土属欠固结土层。天然孔隙比大说明了土体中的孔隙体积大, 自然压缩性就会高, 该地区的软土大多处于欠固结状态, 压缩系数为 1.16 MPa^{-1} , 压缩模量为 2.0 MPa , 属高压缩性, 工程性质上体现为沉降量大。

6) 结构性强。由于珠三角软土一般为蜂窝状、絮状结构, 其中以海相沉积的片架结构黏土为代表, 因而受到扰动后其强度会显著降低, 甚至呈流动状态。

7) 触变性强。触变性是软黏土具有显著结构性的表现, 一旦受到扰动, 其絮状结构会遭到破坏, 土体强度明显下降, 甚至变成流动状, 静置后强度又会增长。

8) 具有一定有机质含量。有机质的存在对土

的工程性质影响较大。随着有机质含量的增加, 土的分散性加大, 含水量增高(可达 50% ~ 200%), 干密度减小($< 1 \text{ g/cm}^3$), 胀缩性增加($> 50\%$); 压缩性增大, 强度减小, 承载力降低。在珠江三角洲地区有机质软土突出表现为较大的溶水性和塑性、较大的膨胀性和低渗透性。本次试验土样测得的有机质含量为 2.03%, 不属于高有机质含量土。

3 结论

1) 南沙吹填土具有黏粒含量高, 且细颗粒之间的团聚度较高; 物相组成主要以原生矿物白云母和石英为主, 次生矿物含有黏土矿物高岭土。

2) 微观结构显示絮凝片状结构, 含少量针状, 由面-面、面-边相互作用的微聚集体组成; O、Si 元素的质量分数最多, 含同晶置换的表面负电荷金属元素 Mg、Al 及 Fe, 以及阳离子 Na、K 元素。

3) 比表面积在黏土矿物中属于偏小值, 偏高岭土性质, 蒙脱石含量不高。微电场及结合水膜形成相对较弱。

4) 含水率 w 高, 天然孔隙比 e 大; 接近完全饱和; 垂直渗透性低; 抗剪强度低; 压缩性高; 结构性强; 触变性强; 具有一定有机质含量。

参考文献:

- [1] 董志良, 张功新, 陈平山, 等. 吹填造陆超软土地基加固理论与工艺技术创新[J]. 水运工程, 2011(11): 192-200.
- [2] 宋晶, 王清, 孙铁, 等. 吹填土自重淤积阶段孔隙水压力消散的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2 935-2 940.
- [3] 莫海鸿, 王婧, 林奕禧. 软土真空预压处理有效性的宏观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(S1): 2 692-2 697.
- [4] 张中琼, 王清, 张泽, 等. 吹填土固结过程中结构与物理性质变化[J]. 天津大学学报, 2014, 47(6): 504-511.
- [5] Wang J, Mo H H. Effect of mineral composition on macroscopic and microscopic consolidation properties of soft soil [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2014, 50(6): 232-237.
- [6] 赵林, 朱德成, 毛国柱, 等. 天津人工海岸吹填土内源污染物分布规律探讨[J]. 天津大学学报, 2014, 47(5): 452-458.

(本文编辑 郭雪珍)