

不同处理方法下吹填土微观结构特征

王 清¹, 孙明乾¹, 孙 铁², 孙 涛³

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007;

3. 天津滨海建设投资集团, 天津 300450)

摘要: 以天津滨海新区吹填土为研究对象, 用 X 射线衍射分析方法确定吹填土中的矿物成分, 并结合扫描电子显微镜微观结构照片, 利用 WD-5 图像处理系统对土体的微观结构作定量分析, 讨论两种不同加固处理方法下天津滨海新区吹填土结构单元体、孔隙的丰度和定向频率等评价指标的变化情况。试验分析表明, 经过排水处理后, 孔隙率变小, 土中结构单元体从较为松散的状态转变为团聚状态, 孔隙也随之进行调整, 孔隙数量减少, 定向性逐渐不明显, 土体固结程度变高。

关键词: 吹填土; 微观结构; 定量分析

中图分类号: P642.13

文献标志码: A

Microstructure Features for Dredger Fill by Different Solidified Technologies

WANG Qing¹, SUN Mingqian¹, SUN Tie², SUN Tao³

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying Co. Ltd., Beijing 100007, China; 3. Tianjin Binhai Investment Group Co. Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: With the dredger fill in Tianjin Binhai New Area as study object, the mineral composition is identified by X-ray diffraction approach, and the microstructure is studied by scanning electronic microscope (SEM) along with quantificational analysis of the microstructure on the basis of WD-5 picture processing system. And then the changing of evaluation indicators by two different reinforcement approaches, such as the size of structure element and pore, abundance, and directional frequency are discussed. The conclusion indicates that after water drainage treatment, the porosity becomes smaller, the dispersed structural elements of soil become agglomerated elements, displaying a variety of oblate. Simultaneously, the pores in the soil diminish and lose balance, and the directing property becomes indistinct. Consolidation degree of soil becomes higher.

Key words: dredger fill; microstructure; quantitative analysis

随着沿海城市建设及对外开放的需要, 吹填造陆已成为当今沿海城市解决土地资源紧缺的主要方式, 是沿海工程建设和海岸开发工程中的重要组成部分。利用吹填水域中的淤泥土造陆, 既能减少土地资源占有, 又能降低造价^[1-2]。大量的工程实践发现, 水力吹填的淤泥与其下覆海相淤泥的物理力学性质差别很大, 对后期的加固处理方法的适应性也有很大差异。由于对人工吹填场地尚缺乏全面的研究和探讨, 以往的加固设计方案也多借用已有的海相淤泥泥资料, 所以加固效果不理想, 尤其是工后沉降量较大, 是目前实际工程中亟待解决的问题。因此加强吹填土结构形成及结构强度研究对工程安全运营和避免工后不良影响有十分重要的意义^[3]。

本文以天津滨海新区吹填土为研究对象, 从吹填土物质成分和微观结构角度出发, 通过对比不同处理方法下吹填土的基本特性和微结构特征, 研究吹填土固结规律, 分析吹填土造陆影响要素, 为工程设计及施工提供客观科学的依据。

1 吹填土成分特征

1.1 试验方案

为了分析不同处理方法下吹填土物理化学性质及微结构特征变化规律, 在相同地点选取两组土样, 其中经过排水处理的吹填土样为 37 个, 编号为 ZY01—ZY37; 未经过排水处理的土样为 28 个, 编号为 ZY201—ZY228。采用粒度成分、矿物成分以及扫描电镜试验等分析方法, 对这两组土样进行基本物

收稿日期: 2012-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(41172236, 40372122); 国家自然科学基金国际合作项目(40911120044)

第一作者: 王 清(1959—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程地质。E-mail: wangqing@jlu.edu.cn

孙明乾(1987—), 男, 硕士生, 主要研究方向为岩土工程。E-mail: sunkurama@126.com

理性质试验,研究吹填土的结构特性对其固结过程的影响。

1.2 取样概况

吹填土试验土料取自天津滨海新区中心渔港,位于天津滨海新区汉沽,使用吹填造陆方法,自2007年开工建设以来已吹填2080万 m^3 ,形成3.5 km^2 土地。研究区约1.3 km^2 区域为经过真空预压处理的吹填处理地基土,真空预压插板深度为8~10 m;约1.8 km^2 区域为未经过真空预压处理的吹填处理地基土,均属于自重固结的土层。

1.3 土样基本性质

对两种不同处理方法的吹填土试验土料进行基本性质的测试。

经过排水处理的土样初始含水率为28.9%,液限为30.9%,塑限为18.2%,孔隙比为0.82,塑性指数为12.55,压缩系数为0.39,易溶盐质量分数为6.33%;未经过排水处理的土样初始含水率为29.7%,液限为32.6%,塑限为18.3%,孔隙比为0.86,塑性指数为13.70,压缩系数为0.42,易溶盐质量分数为8.16%;根据建筑地基基础设计规范GB50007—2002,将天津滨海新区吹填土命名为粉质粘土。

土体的粒度成分通常与土体的成因类型有直接关系,同时也是影响土体工程地质性质的重要因素之一^[4]。采用静水沉降法和筛分法对土样进行颗分试验,两种不同处理方法的吹填土土样颗粒分析累计曲线见图1。由图1可看出,加入分散剂后,粒径大于0.005 mm的粒组的质量分数 w 相对于未加分散剂时有不同程度的下降,其中粉粒组(0.005~0.05 mm)降低幅度最大,黏粒组(<0.005 mm)的质量分数 w 显著增加,这是由于土中黏粒与粉粒、黏粒结合形成了具有一定抗水性能的“假粉粒”^[5]。加入分散剂后,土样中粉粒间“团粒”的团聚性消失,土样的不均匀系数都大于5,颗粒级配组成良好。大小土粒的分布组合情况反映了土体压密后孔隙减小的可能性较大。

土的矿物成分是影响土的工程地质性质的重要因素,本次研究采用了粉晶X衍射方法为土体矿物成分测试的主要手段^[6]。吹填土矿物成分衍射结果见图2。分析结果表明,上部土体中次生矿物的质量分数很高,占50%左右,下部土体中以原生矿物为主,占70%左右;粘土矿物主要以伊利石和伊蒙混层矿物为主,含有少量的高岭石和绿泥石,未见蒙脱石。由于土体中粘粒的质量分数较高,含有一定量的有机质,因此具有较强的亲水性。

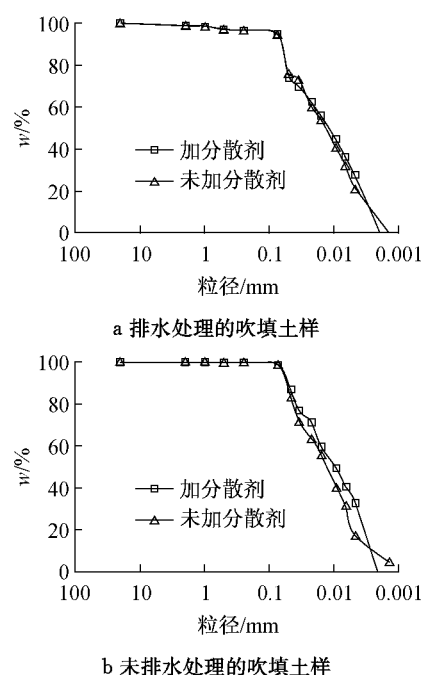
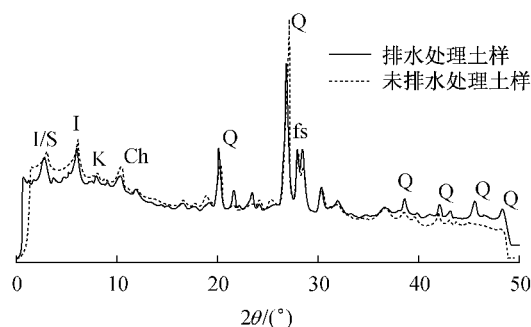


图1 吹填土的颗粒分析曲线

Fig.1 Gradation curves of dredger fill



Q为石英 fs为碱性长石 I/S为伊蒙混层
I为伊利石 K为高岭石 Ch为绿泥石

图2 矿物成分衍射图

Fig.2 Diffraction pattern of mineral components

2 微观结构特征定量分析

2.1 微观结构定量参数的选定及其确定方法

土的微观结构特征是决定其宏观力学性质的本质因素。现代高新科技的迅猛发展为土微观结构的定量研究奠定了基础,也为实现土的微观结构与土应力应变建立相关关系创造了条件。目前,国内外诸多学者在土微观结构的研究领域都取得了一定的成果^[7-9]。本文定量讨论不同处理方法下吹填土的加固效果。每种处理方法选取6组相近深度的土样,利用WD-5图像处理系统从微观结构照片中提取数据,根据照片中结构单元体和孔隙显示的灰度不同,将结构单元体与孔隙区分开。土样基本数据见表1。土

样微观结构照片见图3。

表1 试样基本情况

Tab.1 Basic situation of dredger fill

排水处理		未排水处理	
编号	深度/m	编号	深度/m
ZY03	4.0	ZY201	2.7
ZY09	12.0	ZY205	10.9
ZY13	23.0	ZY212	22.7
ZY17	28.6	ZY214	29.7
ZY24	37.3	ZY216	36.5
ZY27	40.2	ZY218	40.9

2.2 孔隙与结构单元体的等效直径分布

为了定量分析土体中颗粒组成情况,通常取等效球体直径表示颗粒大小,该大小尺度被称为等效

直径。试样结构单元体和孔隙的等效直径分布见表2。由表2可知,经过排水处理的吹填土样结构单元体等效直径主要集中在 $<1\mu\text{m}$ 区间内,其次分布在 $1\sim5\mu\text{m}$ 区间内,而且在排水深度 $8\sim10\text{m}$ 内等效直径在 $<1\mu\text{m}$ 区间的结构单元体的数量明显较高,主要原因是在排水作用下,土体的结构单元体发生变形和错动,为维持土体平衡,较小的结构单元体充填到下部土体的孔隙中,土体的胶结作用增强,土中结构单元体由松散状态转变为团聚状态;未经过排水处理的吹填土样结构单元体等效直径平均分布在 $<5\mu\text{m}$ 区间内,其中结构单元体等效直径在 $2\sim5\mu\text{m}$ 区间内明显增多。这说明由于没有排水作用,土体结构单元体主要呈松散状态。

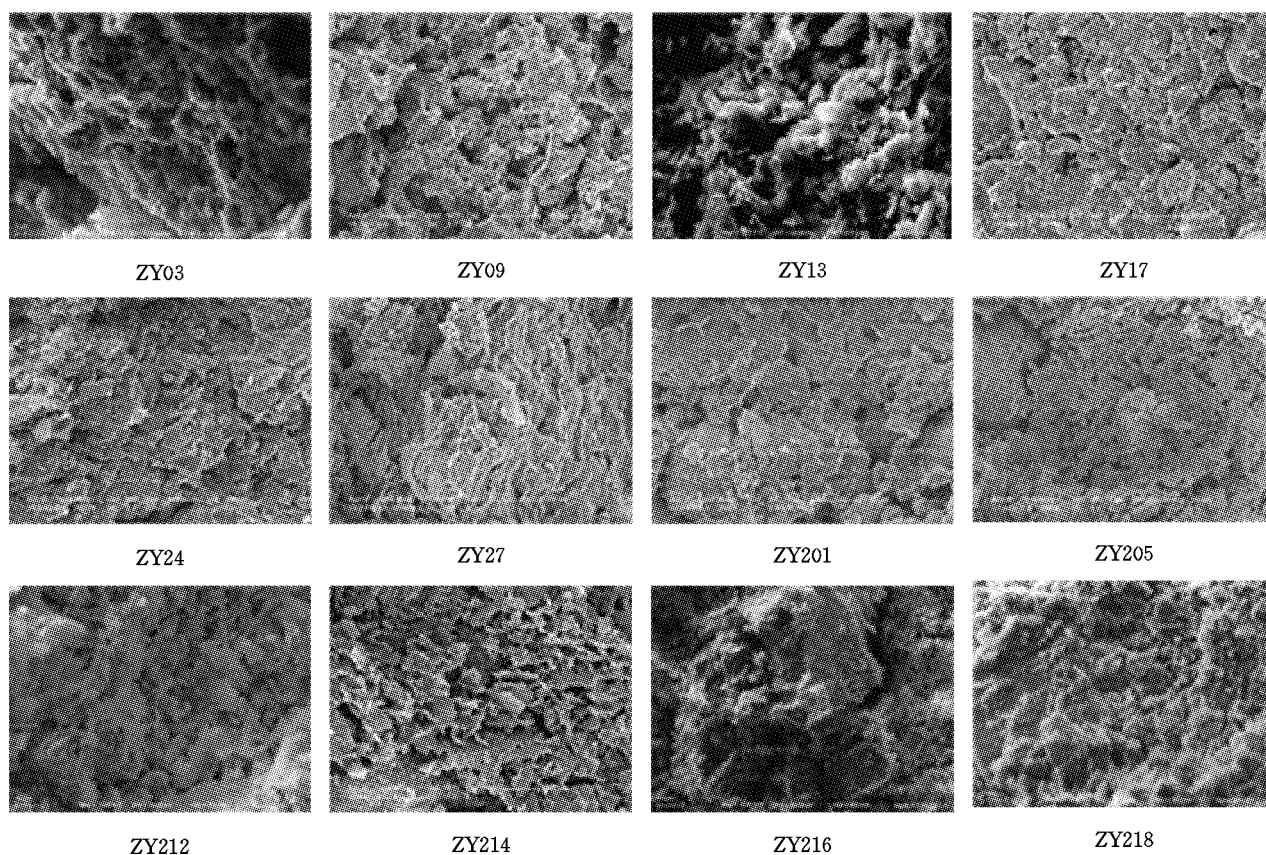


图3 试样微观结构照片

Fig.3 Pictures of microstructure

经过排水处理吹填土样的孔隙等效直径在 $2\sim5\mu\text{m}$ 区间内明显较少,这是由于在排水作用下,土体内的大结构单元体在重力作用下先沉降,然后细小结构单元体开始沉降,使土体内部小孔隙数量增加,形成稳定的粒间孔隙,故经过排水处理的土样 $<1\mu\text{m}$ 孔隙比较多;经过排水处理的吹填土样随着埋深增加,直径为 $1\sim5\mu\text{m}$ 区间的孔隙逐渐减少,而小于 $1\mu\text{m}$ 的孔隙逐渐增多,试样结构趋于紧密,土体

结构更加密实。这是由于排水作用使土体结构单元体的排列产生改变,孔隙也随之进行调整,一些小的结构单元体落入孔隙中,使小孔隙的数量增多。

2.3 孔隙与结构单元体丰度

丰度是指土中颗粒在测量窗口内短轴和长轴之比,用 C 来表示,它的大小反映了研究对象在二维平面内所展示的形状特征,可用公式(1)来计算。从公式(1)可以看出,丰度 C 在 $(0,1)$ 之间, C 值越小,反

表 2 等效直径分布比例
Tab.2 Distribution of equivalent diameters

样品编号		孔隙等效直径分布比例/%						结构单元体等效直径分布比例/%					
		<1	1~2	2~5	5~10	10~20	>20	<1	1~2	2~5	5~10	10~20	>20
		μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
排水处理	ZY03	53.85	29.06	14.53	2.56	0	0	78.33	15.00	5.00	1.67	0	0
	ZY09	55.74	27.87	13.93	2.46	0	0	89.32	6.80	2.91	0	0.97	0
	ZY13	56.45	24.19	15.32	3.23	0.81	0	54.55	30.91	13.64	0.91	0	0
	ZY17	80.88	14.71	4.41	0	0	0	73.77	18.03	6.56	1.64	0	0
	ZY24	43.48	39.13	16.52	0.87	0	0	73.91	19.13	4.35	1.74	0.87	0
	ZY27	76.86	19.01	3.31	0.83	0	0	81.03	15.52	1.72	1.72	0	0
未排水处理	ZY201	69.91	22.12	7.96	0	0	0	85.59	14.41	0	0	0	0
	ZY205	60.66	31.15	7.38	0.82	0	0	71.67	20.00	4.17	3.33	0.83	0
	ZY212	13.87	37.23	43.07	5.84	0	0	26.26	34.34	27.27	10.10	1.01	1.01
	ZY214	36.30	32.59	28.89	2.22	0	0	75.79	17.89	5.26	0	0	1.05
	ZY216	20.90	38.81	32.09	5.22	2.24	0.75	12.50	63.89	22.22	1.39	0	0
	ZY218	2.94	36.76	49.26	8.09	2.94	0	41.43	32.86	21.43	2.86	0	1.43

映研究对象越趋向于长条形; C 越大,则趋向于等轴形^[10].

$$C = \frac{B}{L} \tag{1}$$

式中: B 和 L 分别表示研究对象的短轴和长轴的长度.

试样结构单元体和孔隙的丰度分布特征见表 3. 由表 3 可以看出,在未经排水处理的吹填土样中,结构单元体丰度主要集中在 0.4~0.6 区间内.而在经过排水处理后,结构单元体丰度平均分布在 0.2~

0.4,0.4~0.6,0.6~0.8 这 3 个区间内,丰度集中分布呈下降的趋势,这说明在排水固结过程中,颗粒经历了压扁过程,细长的结构单元体减少,等轴的结构单元体增多,土样以不同程度的扁圆结构单元体为主,这是因为在排水过程中团聚状结构较为稳定,变化较小.未经排水处理的吹填土样与经过排水处理的吹填土样相比,结构单元体丰度在 0.4~0.6 区间的比例较大,这是由于未经排水处理的土样结构单元体较为松散,结构单元体间接触较少,从而使得较细长和扁圆结构单元体数量比较多.

表 3 孔隙和结构单元体的丰度分布
Tab.3 Proportion of structure element and pore abundance

样品编号		孔隙丰度分布频率/%					结构单元体丰度分布频率/%				
		0~	0.20~	0.40~	0.60~	0.80~	0~	0.20~	0.40~	0.60~	0.80~
		0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
排水处理	ZY03	1.71	21.37	45.30	23.93	7.69	0	23.33	33.33	26.67	16.67
	ZY09	1.64	19.67	38.52	29.51	10.66	1.96	25.49	40.20	25.49	6.86
	ZY13	0.81	25.81	34.68	29.03	9.68	1.64	18.03	37.70	37.70	4.92
	ZY17	2.21	27.21	39.71	24.26	11.03	0.91	24.55	36.36	27.27	10.91
	ZY24	6.09	20.87	40.87	24.35	7.83	4.35	32.17	38.26	19.13	6.09
	ZY27	2.48	23.97	44.63	21.49	7.44	8.62	39.66	24.14	15.52	12.07
未排水处理	ZY201	1.77	25.66	38.94	28.32	5.31	0	17.12	36.94	34.23	11.71
	ZY205	3.28	27.05	31.97	28.69	9.02	7.50	31.67	41.67	13.33	5.83
	ZY212	2.92	24.09	41.61	25.55	5.84	1.01	22.22	37.37	27.27	12.12
	ZY214	3.70	22.22	37.78	26.67	9.63	4.21	37.89	25.26	23.16	9.47
	ZY216	0.75	24.63	39.55	30.60	4.48	1.39	22.22	50.00	19.44	6.94
	ZY218	0.73	24.82	43.07	25.55	5.84	1.43	27.14	27.14	34.29	10.00

排水处理前后土样孔隙丰度大多位于 0.4~0.6 区间内,排水处理后丰度在 0.6~0.8 区间内分布频率稍有变大,0.2~0.4,0.4~0.6 和 0.6~0.8 这 3 个区间内分布趋向平均,表明孔隙丰度集中分布值略有上升,孔隙在排水作用下不断变化,以扁圆形居多,长条形和近圆形的较少,结构单元体呈现出一种

无序排列的球形体.经过排水处理的吹填土样随着埋深增加,大孔隙开始逐渐变小,小孔隙的体积变化较小,其形状逐渐趋向圆滑.这是排列松散的大絮凝体向小絮凝体转化的结果.

2.4 孔隙与结构平均形态特征

以上具体分析了丰度分布特征,观测孔隙和结

构单元体的具体形态. 下面对于各试样平均形态分布特征参数进行分析评价, 证实上述推测. 圆形度是研究对象实际面积与外接圆面积的比值, 用 R 来表示. 圆形度越大, 越接近 1, 越接近圆形, 圆形度计算公式如下:

$$R = \frac{A}{A'} \quad (2)$$

式中: A 为微观结构单元体或孔隙的实际面积; A' 为结构单元体或孔隙外接圆面积.

形状系数是研究对象的等面积圆的周长与实际周长的比值, 用 F 来表示. 一般而言, 形状系数大于等于 1, 数值越大, 说明研究对象的形状越不规则, 计算公式如下:

$$F = \frac{P}{S} \quad (3)$$

式中: P 表示结构单元体或孔隙等面积圆的周长; S 表示单元体或孔隙实际周长^[11].

试样单元体和孔隙的平均形态分布特征见表 4. 从表 4 可以看出, 经过排水处理的吹填土样, 结构单

元体平均丰度、平均圆形度和平均形状系数随土样埋深增加逐渐减小, 而未经过排水处理的吹填土样 3 项平均形态特征参数变化比较小, 平均丰度主要分布在 0.4~0.6 区间, 圆形度主要分布在 0.3~0.5 区间, 而平均形状系数集中在 0.6~0.7 区间. 这些都说明结构单元体排水固结过程中相互错动形成团聚体, 随渗流压力的增大, 松散的小团粒将重新聚集成团状, 结构单元体形状发生变化, 逐渐趋于扁圆形, 结构单元体形状逐渐不规则.

试样在排水处理前后对比, 孔隙的平均形态参数变化规律与结构单元体变化特征比较一致, 未经过排水处理的吹填土样, 平均丰度主要分布在 0.53 左右, 圆形度主要分布在 0.3~0.4 区间, 而平均形状系数集中在 0.6~0.7 区间. 说明在排水作用下, 结构单元体之间相互挤压, 咬合形成新的稳定结构集合体, 连接由松散变得紧密. 较大的结构单元体逐渐变形, 夹杂在结构单元体之间的孔隙也逐渐变小, 形状不同程度地趋向于扁圆形.

表 4 平均形态特征参数分布

Tab. 4 Average morphological characteristics parameters

样品编号	孔隙			结构单元体		
	平均丰度	平均圆形度	平均形状系数	平均丰度	平均圆形度	平均形状系数
排水处理	ZY03	0.53	0.46	0.67	0.58	0.70
	ZY09	0.55	0.39	0.62	0.52	0.56
	ZY13	0.54	0.41	0.63	0.56	0.68
	ZY17	0.50	0.40	0.64	0.55	0.31
	ZY24	0.51	0.27	0.50	0.49	0.35
	ZY27	0.51	0.40	0.61	0.46	0.37
未排水处理	ZY201	0.52	0.35	0.60	0.58	0.45
	ZY205	0.53	0.42	0.66	0.46	0.34
	ZY212	0.52	0.36	0.59	0.56	0.38
	ZY214	0.53	0.34	0.60	0.49	0.47
	ZY216	0.53	0.44	0.65	0.52	0.52
	ZY218	0.53	0.38	0.60	0.56	0.76

2.5 孔隙与结构单元体形态排列特征分析

根据本节前一部分描述, 两组吹填土试样经历了不同的处理方法, 由于孔隙水渗流过程的影响, 结构单元体与孔隙的排列有可能发生旋转或者移动, 因此通过颗粒排列特征分析, 得到吹填土固结过程中微观结构的变化规律, 对解释吹填土固结机理有举足轻重的作用. 定向角是研究对象的长轴与 X 方向的夹角, 定向频率是根据研究对象定向角的分布 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$, 用一定的定向角密度 $\Delta\theta$, 将 180° 分成若干份, 计算研究对象定向角落入各区间的几率^[12-15]. 文中定义 $\Delta\theta = 10^\circ$, 分成 18 个定向角区间, 用 $F(\alpha)$ 来代表各定向频率, 计算公式如下:

$$F(\alpha) = \frac{n_\alpha}{n} \quad (4)$$

式中: n_α, n 分别是定向角落入 $[\theta_{i-1}, \theta_i]$ 的研究对象数量和总的研究对象数量. 频率 $F(\alpha)$ 可用直方图表示, 直观地反映在各定向角区内研究对象的出现的频率, 从而可以了解研究对象的平面定向性规律. 据以上排列特征参数, 借助 WD-5 图像处理系统, 计算测试试样的定向角, 见图 4、图 5. 对试样排水处理前后的结构单元体定向频率计算分析表明, 试验的结构单元体定向角分布在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的概率最大, 在其他各个区间的几率各不相同. 经过排水处理后, 结构单元体定向性发生了明显的变化, 定向性逐渐不明显,

分布在 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的概率明显减小,分布在其他各区间的定向角概率趋向平均。这是由于土样在排水固结过程中经历了水土分离、自重沉降和真空预压3个阶段,其结构单元体定向角在不同区间有不同的几率显现,使结构单元体产生了不同方向的定向分布。可见,在排水作用下土体结构单元体没有明显的定向性。

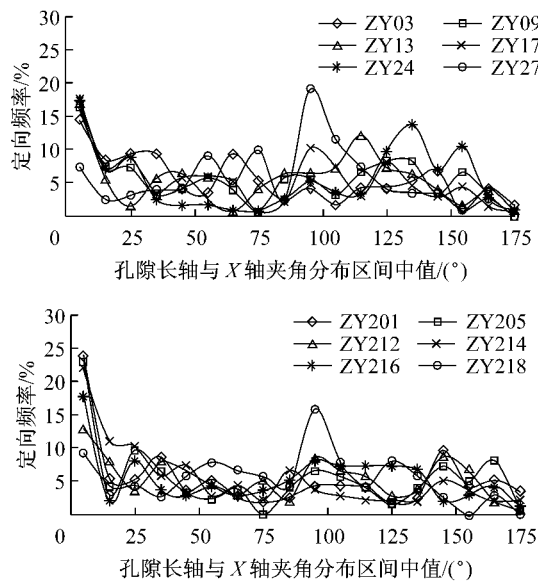


图4 孔隙定向分布

Fig.4 Directional distribution of pore

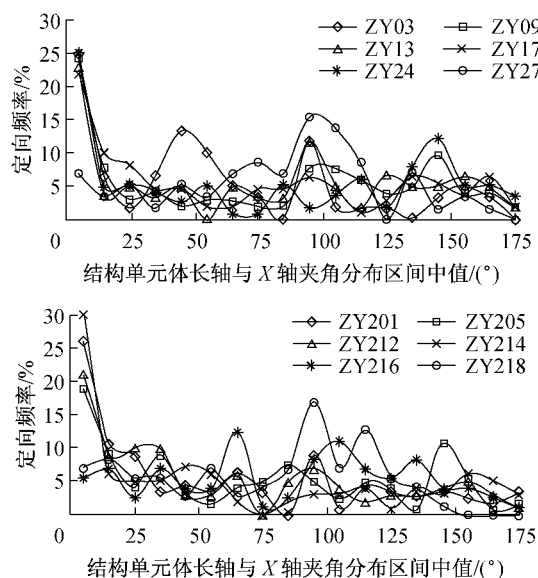


图5 结构单元体定向分布

Fig.5 Directional distribution of structure element

试样排水处理前后的孔隙定向频率的变化规律与结构单元体变化特征比较一致,各区间的定向角概率趋向平均,分布在 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的概率下降明显。表

明在排水作用下,由于结构单元体定向分布产生变化,结构单元体之间的孔隙随之调整,较大的孔隙被压碎成较小的孔隙,孔隙的定向性总体上呈减小趋势。

3 结论

分析不同固结处理方法下天津滨海新区吹填土试样微观结构特征,得出以下主要结论:

(1) 通过粒度分析发现研究区样品团聚性较强,虽然样品的黏粒含量较高,但是,土体表现出较大的“假粉性”,经分析发现形成这种“假粉粒”的主要原因是由于研究区样品中含有较多的盐,由于大量的盐分的作用,促使粘粒发生了团聚作用。土中粉、黏粒含量较高,且含有较高的具有一定抗水性的“假粉粒”,由于这些“假粉粒”的存在,土样可以在吹填的同时进行加固,建议采用孔径大于 0.005 mm 的滤膜进行真空加固处理。

(2) 从矿物成分的测试结果可以看出,两种地基处理类型的土体对应在同一层位上的结晶矿物成分和含量是极其相近的,这说明排水与否对于地基处理后的土体中结晶矿物成分的影响是不明显的,影响较大的矿物只是盐类的含量。

(3) 通过分析吹填土体孔隙与结构单元体的等效直径分布、丰度、平均形态特征等参数可以看出,土体经过排水处理后,土体的结构单元体重新分布,结构单元体之间相互挤压,咬合形成新的稳定结构集合体,连接由松散变得紧密。细长的结构单元体减少,等轴的结构单元体增多,土体的胶结作用增强,土样以不同程度的扁圆结构单元体为主;孔隙也随之进行调整,大孔隙开始逐渐变小,其形状逐渐趋向圆滑,较小的结构单元体填充到下部土体的孔隙中,土体的胶结作用增强,土中结构单元体由松散状态转变为较为稳定团聚状态。

(4) 对试样孔隙和结构单元体定向频率测试结果表明,吹填土样经过排水处理后,孔隙和结构单元体定向性发生了明显的变化,定向性逐渐不明显,分布在各区间的定向角概率趋向平均。这是由于土样在固结排水过程中,经历了水土分离、自重沉降和真空预压3个阶段,其结构单元体定向角在不同区间有不同的几率显现,使结构单元体产生了不同方向的定向分布。孔隙由于结构单元体定向分布产生变化也随之调整,较大的孔隙被压碎成较小的孔隙,孔隙的定向性总体上呈减小趋势。

参考文献:

- [1] 苑晓青,王清,孙铁,等.分级真空预压法加固吹填土过程中孔隙分布特征[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2012,42(1):169.
YUAN Xiaoqing, WANG Qing, SUN Tie, et al. Pore distribution characteristics of dredger fill during hierarchical vacuum preloading [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(1):169.
- [2] Kjellman W. Consolidation of clay by means of atmosphere pressure[C]. Proceedings of a Conference on Soil Stabilization. Boston: MIT,1952:258.
- [3] 杜冬菊,杨爱武,刘举,等.天津滨海吹填土[M].北京:科学出版社,2010.
DU Dongju, YANG Aiwu, LIU Ju, et al. Dredger fill of Tianjin Binhai New Developed Area[M]. Beijing: Science Press,2010.
- [4] 牛岑岑,王清,谭春,等.吹填土渗流固结过程微观结构的分形特征[J].西南交通大学学报,2012,47(1):78.
NIU Cencen, WANG Qing, TAN Chun, et al. Microstructure fractal feature of dredger fill during seepage flow consolidation [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012,47(1):78.
- [5] 牛岑岑,王清,苑晓青,等.渗流作用下吹填土微观结构特征定量研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(4):104.
NIU Cencen, WANG Qing, YUAN Xiaoqing, et al. Quantitative research on microstructure features of dredger fill under seepage flow [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(4):104.
- [6] 宋晶,王清,陈慧娥,等.高粘性高盐量吹填土固结过程孔隙分维特征[J].吉林大学学报:地球科学版,2010,40(2):361.
SONG Jing, WANG Qing, CHEN Huie, et al. Fractal dimension of porous of heavy clay and saliniferous dredger fill during the process of consolidation [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(2):361.
- [7] Asuri S, Altschaeffl A G. Pore size distribution studies [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations, 1971(SM5):771.
- [8] Pierre D, Guy L. Study of the structure of a sensitive champlain clay and its evolution during consolidation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(1):21.
- [9] Vallejo L E. Fractal analysis of the fabric changes in a consolidating clay [J]. Engineering Geology, 1996, 43:281.
- [10] 宋晶.分级真空预压法加固吹填土过程中孔隙分布特征[D].长春:吉林大学建设工程学院,2011.
SONG Jing. Laboratory simulation test and PFC^{3D} numerical analysis of high clay dredger fill in the consolidation process of step vacuum preloading [D]. Changchun: College of Civil Engineering of Jilin University,2011.
- [11] 刘婷慧,王清,董钧祥,等.室内加固的吹填土微结构试验研究[J].水文工程地质,2005,4:21.
LIU Pinhui, WANG Qing, DONG Junxiang, et al. Microstructure experimental investigation of the indoor reinforced dredger fill [J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2005,4:21.
- [12] 宋晶,王清,夏玉斌,等.真空预压处理高黏粒吹填土的物理化学指标[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(5):1476.
SONG Jing, WANG Qing, XIA Yubin, et al. Physical and chemical indicators of dredger fill with high clay by vacuum preloading [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011,41(5):1476.
- [13] 王春波.天津滨海新区吹填土固化技术及固化机理研究[D].天津:天津城市建设学院,2007.
WANG Chunbo. Study on the solidified technology and mechanism for hydraulic fill of Tianjin Binhai New Developed Area [D]. Tianjin: Tianjin Institute of Urban Construction, 2007.
- [14] 王江宏.天津滨海新区吹填土快速结壳的真空预压法研究[D].天津:天津城市建设学院,2007.
WANG Jianghong. Study on the fast incrustated technology with vacuum preloading for hydraulic fill of Tianjin Binhai New Developed Area [D]. Tianjin: Tianjin Institute of Urban Construction,2007.
- [15] 王清,王凤艳,肖树芳,等.土微观结构特征的定量研究及其在工程应用的新观点[J].成都理工学院学报,2001,28(2):148.
WANG Qing, WANG Fengyan, XIAO Shufang, et al. A quantitative study on the micro-structure characteristics of soil and its application in the engineering [J]. Journal of Chengdu University of Technology,2001,28(2):148.