

文章编号:1671-8879(2015)02-0046-06

# 不同地基处理条件下吹填土孔隙分布特征

宋盛渊<sup>1</sup>,王清<sup>1</sup>,孙铁<sup>2</sup>,闫欢<sup>1</sup>,孙明乾<sup>1</sup>,苑晓青<sup>1</sup>

(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)

**摘要:**为了评价和分析天津滨海新区中心渔港吹填土的固化效果和工后沉降,将经真空预压处理与未经真空预压处理的 2 组土样进行了室内物理化学试验分析。同时,还对不同处理条件下的 2 组土样进行了压汞试验,利用分形理论对吹填土中的孔隙直径进行了区间的划分,并对比了 2 组处理条件下孔隙率的变化特征。研究表明:与未经真空预压处理的土样相比,真空预压处理后的土样含水量减小、易溶盐含量减少,土体的物理化学性质得到改善;2 组吹填土样孔隙直径分布区间大致相同,主要集中在 0.4~3.5  $\mu\text{m}$  区间内,0.04~0.4  $\mu\text{m}$  和 3.5~35  $\mu\text{m}$  区间有少量分布,小于 0.04  $\mu\text{m}$  以及大于 35  $\mu\text{m}$  区间的孔隙分布基本很少;在距地表 0~8 m 和 25~50 m 深度范围内,经真空预压处理土样中的孔隙率小,固化效果较好;在距地表 8~25 m 深度范围内,经真空预压处理土体中的排水通道阻塞,导致土样的固结过程受到了影响,孔隙率较大,固化效果较差。

**关键词:**道路工程;吹填土;压汞试验;孔隙分布;分形

**中图分类号:**U416.1;TU447 **文献标志码:**A

## Pore distribution characteristics of dredger fill consolidated by different methods

SONG Sheng-yuan<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, SUN Tie<sup>2</sup>, YAN Huan<sup>1</sup>, SUN Ming-qian<sup>1</sup>, YUAN Xiao-qing<sup>1</sup>

(1. School of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China;

2. China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying Co. Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** In order to evaluate and analyze the consolidation effect and the post settlement of dredger fill in Tianjin Binhai New Area, two sets of soil samples handled with the vacuum preloading and without vacuum preloading were selected, and the physical and chemical tests on them were made in the laboratory. At the same time, two sets of soil samples were tested by mercury injection test, and the pore diameter range of dredger fill was divided by using fractal theory, and the characteristics of the porosity under 2 conditions were compared. The test results show that compared with the one without vacuum preloading, water content and soluble salt content of the vacuum preloading one decreases, and the physical and chemical nature of dredger fill have been improved after the vacuum preloading. The pore diameter distributions of two sample sets are almost identical. The pore diameter is mainly distributed in 0.4-3.5  $\mu\text{m}$ , and the pores of 0.04-0.4  $\mu\text{m}$  and 3.5-35  $\mu\text{m}$  are less, and the pores of diameter less than 0.04  $\mu\text{m}$  and greater than 35  $\mu\text{m}$  are the least. In a burial depth of 0-8 m and 25-50 m, porosity of soil becomes

收稿日期:2014-03-10

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

吉林大学基本科研业务费项目(450060491448)

作者简介:宋盛渊(1987-),男,山西汾阳人,工学博士研究生,E-mail:songshengyuan@126.com。

smaller and consolidation is better after the vacuum preloading, but in a burial depth of 8-25m, porosity of soil is larger and consolidation is poor because the drainage channel of soil is blocked. 2 tabs, 4 figs, 16 refs.

**Key words:** road engineering; dredger fill; mercury injection test; pore distribution; fractal

## 0 引言

改革开放以来,随着中国沿海城市经济的迅速发展及建设用地的日益紧张,围海造陆已成为解决沿海城市建设用地的重要组成部分。天津滨海新区在围海造陆的过程中由于砂源比较紧缺,因此必须采用近海新近沉积的淤泥作为吹填料。然而,由于吹填所采用的淤泥具有含水量高、孔隙比高、压缩性高和承载力低的特点,对这种吹填土地基的加固处理已成为岩土工程界不可避免的技术难题<sup>[1]</sup>。在加固过程中,孔隙分布特征是反映吹填土固结效果的重要指标。

近年来,国内外学者对吹填土的孔隙分布特征进行了相关研究。邱长林等研究了孔隙变化对吹填土地基真空预压固结的影响,结果表明吹填土地基在考虑孔隙变化时前期固结速度快,后期逐渐变慢<sup>[2]</sup>;成玉祥等获取了未经处理和经过真空预压处理土样的 SEM 照片,通过对比分析了真空预压过程中吹填土的孔隙变化规律<sup>[3-4]</sup>;Ren 等对吹填土地基的固结特性进行了全过程数值研究<sup>[5]</sup>。

以上学者只研究了真空预压处理后吹填土的孔隙分布特征,而没有将未经真空预压处理和经真空预压处理的吹填土孔隙分布特征随深度的变化进行对比研究。鉴于此,本文以天津滨海新区中心渔港的吹填土为研究对象,着重从吹填土的物质组成和微结构的角度出发,通过对比不同处理条件下吹填土中孔隙分布与变化特征,来研究吹填土的固化规律,分析固化过程中的影响因素,最终为吹填土的加固处理提供客观科学的依据。

## 1 吹填土的基本性质

### 1.1 试验方案

天津滨海新区中心渔港是由吹填造陆形成的,吹填后一部分区域未经真空预压处理,而另一部分区域经真空预压处理。真空预压处理时,塑料排水板间距为 0.8 m,插板深度 8 m。其中编号为 ZY01~ZY30 的土样依次取自于经过真空预压处理区域的同一钻孔不同深度;编号为 ZY201~ZY221 的土样依次取自于未经过真空预压处理区域的同一钻孔

中。对这 2 组吹填土样进行粒度成分、矿物成分、易溶盐含量和压汞试验的测试,通过测试结果的对比,来分析不同处理条件下吹填土的结构特性。

### 1.2 粒度成分

土的粒度成分是指土中各种大小土粒的百分含量,土的粒度成分往往都与土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<sup>[5]</sup>。由于中心渔港的吹填土样中易溶盐含量(质量分数)均大于 5%,因此对它们进行了洗盐前后的颗粒分析试验,测试结果见图 1。

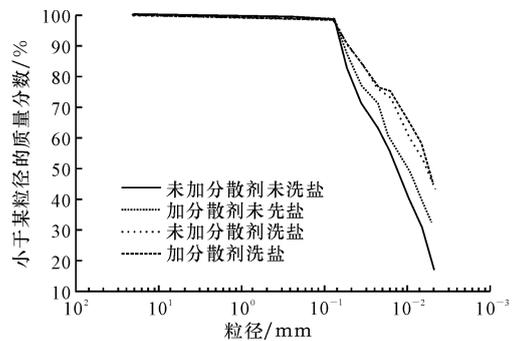


图 1 吹填土的颗粒分析曲线

Fig. 1 Gradation curves of dredger fill

在土样未洗盐前,由加分散剂与不加分散剂的对比试验可以看出:加入分散剂后,吹填土中各粒组百分含量(质量分数)都有所改变,而且粉粒含量明显减少,粘粒含量明显增多,说明中心渔港吹填土中含有一些由粘粒、粉粒相互之间结合形成的具有一定抗水能力的“假粉粒”,按地矿部 DT-92 规程土粒度分类定名为粉质轻粘土<sup>[5]</sup>。

在土样洗盐后,由加分散剂与不加分散剂的对比试验可以看出:加入分散剂后,吹填土中各粒组百分含量变化很微小,说明“假粉粒”在洗盐过程中已经分解。

### 1.3 矿物成分

土中矿物种类及含量既可以影响土的工程地质性质,还可以反映其物质来源<sup>[5]</sup>。本文主要采用粉晶 X 衍射方法对其矿物成分进行测试,测试结果见下页表 1。由表 1 可以看出:①在相同深度下,真空预压处理和未经真空预压处理土样的矿物成分有微小的区别,是由于取样位置不同造成的,同时也说明

表1 吹填土的矿物成分  
Tab.1 Mineral composition of dredger fill

处理方式	深度/m	矿物相对含量 wB(质量分数)/%									
		Q	f <sub>s</sub>	Pl	C <sub>c</sub>	D <sub>o</sub>	I/S	I	K	C <sub>h</sub>	A <sub>m</sub>
真空预压处理	4.0	31	7	8	4		9	31	4	6	
	12.7	27	10	20	4	1	6	22	4	4	2
	29.2	20	22	16	5	1	6	22	3	5	
	47.2	20	23	26	1	2	6	14	3	4	1
未经真空预压处理	4.6	29	11	7	4	2	7	28	4	6	2
	12.7	30	9	13	2	1	9	27	4	4	1
	29.7	27	9	22	6	3	6	21	2	4	
	47.2	23	20	30	1	2	5	14	2	3	

注:Q为石英;f<sub>s</sub>为碱性长石;Pl为斜长石;C<sub>c</sub>为方解石;D<sub>o</sub>为白云石;I/S为伊蒙混层;I为伊利石;K为高岭石;C<sub>h</sub>为绿泥石;A<sub>m</sub>为角闪石。

真空预压不会影响土样的矿物成分;②中心渔港吹填土中矿物成分随深度变化比较大,表层土体中次生矿物含量很高,最高达50%,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;埋深大于30m的土体中原生矿物含量占70%左右,主要以石英、长石为主,含有少量方解石和白云石,偶见角闪石;由于土体中伊利石含量为14%~31%,可见土具有较强的亲水性。

## 2 压汞试验

### 2.1 试验原理

土的孔隙特征是土的重要结构特征之一,孔隙受土中结构单元体的排列和胶结等因素的影响,呈现出不同的形状和大小<sup>[5]</sup>。孔隙的形状和大小是土结构的重要组成要素,直接影响土体的工程地质性质。随着土体的固结,土中孔隙的形状和大小将发生显著的变化,因此,吹填土固结过程中孔隙分布特征及变化规律是反映其固化效果的最主要指标<sup>[6-8]</sup>。

本文采用美国麦克仪器公司生产的Auto pore 9500型压汞仪进行土体孔隙特征分析,它是研究土体内孔隙定量分布的有效方法之一。其原理是将汞在一定压力下压入孔隙中,假设孔隙横截面为圆形,当作用在汞接触截面法线方向的压力 $p\pi r^2$ 与同一截面上张力在该面法线上的分量 $2\pi r\sigma\cos(\alpha)$ 大小相等时,系统达到了平衡状态。即有

$$p\pi r^2 = 2\pi r\sigma\cos(\alpha) \quad (1)$$

式中: $p$ 为施加的压力; $r$ 为孔隙半径; $\sigma$ 为汞的表面张力系数,一般取 $\sigma = 0.485 \text{ N/m}$ ; $\alpha$ 为汞对材料的浸润角,一般取 $\alpha = 130^\circ$ 。

### 2.2 试验方法

首先把原状土样切成细小土块,然后将土块放

入 $-196^\circ\text{C}$ 的液氮中迅速冻结,冻结后将试样放入冷冻干燥机的冷阱中抽真空升华24h以上,这一过程可将试样中非晶态的冰直接升华成气态的水蒸气挥发掉,以使试样的微结构不致因失水而发生太大改变,最后把经过升华处理的试样进行压汞试验<sup>[9]</sup>。

根据美国麦克公司提供的压汞操作手册,压汞试验主要分低压试验和高压试验,首先将试样装入膨胀计内进行低压分析,低压系统主要用来测量粗孔隙,低压试验完成后再将试样装入高压仓进行高压分析。试验过程中,随着高压油泵不断加压,系统将逐点测量孔隙中的累积进汞量直至最大压力。最后根据不同压力下的累积进汞量,得到孔隙累积含量与孔隙直径的关系,从而分析土体的孔隙分布特征<sup>[10]</sup>。为了对比同一深度2组土样的孔隙分布特征,从2组土样中分别挑选出6个埋深相近的土样进行压汞试验,压汞试验土样基本情况见表2。

表2 试样基本情况

Tab.2 Basic situation of dredger fill

真空预压处理		未真空预压处理	
编号	深度/m	编号	深度/m
ZY02	3.0	ZY201	2.7
ZY09	12.0	ZY206	12.7
ZY13	23.0	ZY211	22.7
ZY17	28.6	ZY213	29.7
ZY24	37.3	ZY215	36.5
ZY30	45.4	ZY218	45.1

## 3 不同处理条件下孔隙分布特征

### 3.1 吹填土孔隙的分形模型

分形最早是由美籍法国数学家Benoit Mandelbrot为高度不规则的集合命名提出的,为揭示其中的规律性和物理本质形成了分形理论。吹填土的微

结构特征具有不规则性和复杂性的特点,但其孔隙分布特征具有自相似性,因而可以通过分形理论的方法对吹填土孔隙进行分析<sup>[11-13]</sup>。由于压汞试验可以根据不同压力下的累积进汞量求得孔隙体积的累积含量,因此可以绘制吹填土孔径-孔隙体积累积含量分形曲线,如图 2 所示。其中  $d$  为孔隙直径。

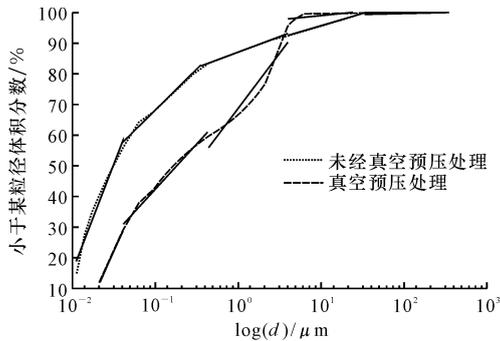


图 2 孔隙分布的分维特征

Fig. 2 Fractal characteristics of pore distribution

假定孔隙是半径为  $r$  的球体,设  $V_p$  为半径小于  $r$  的孔隙体积,则孔隙的体积  $V_p$  为

$$V_p = \int_0^r \frac{4}{3} \pi r^3 dN = Ar^{3-D} \quad (2)$$

式中:  $N$  为半径小于  $r$  的孔隙数目;  $D$  为孔隙分布的分维数;  $A$  为常数。

于是孔隙分布的分维数  $D$  可以从吹填土孔径-孔隙体积累积含量的双对数坐标中得到,如果吹填土孔径-孔隙体积累积含量在双对数坐标中直线的斜率为  $k$ ,则分维数  $D = 3 - k$ 。

从图 2 中可以看到半径小于  $r$  的孔隙体积占总孔隙体积的百分含量随孔径变化曲线在孔径分别为 0.04、0.4、3.5、35  $\mu\text{m}$  处明显分为 5 个折线段,说明土孔隙分布具有多重分形性质,其中每一折线段都说明孔隙直径在该区间范围内具有自相似的性质<sup>[14-15]</sup>。因此根据孔隙的自相似性,可将孔隙大小分为 5 个等级:①微孔隙( $d \leq 0.04 \mu\text{m}$ );②小孔隙( $0.04 \mu\text{m} < d \leq 0.4 \mu\text{m}$ );③中孔隙( $0.4 \mu\text{m} < d \leq 3.5 \mu\text{m}$ );④大孔隙( $3.5 \mu\text{m} < d \leq 35 \mu\text{m}$ );⑤超大孔隙( $d > 35 \mu\text{m}$ )。

### 3.2 吹填土孔隙率变化特征

为了对比不同处理方法下、相近深度的吹填土的固化效果,绘制了 2 种处理方法下吹填土的孔隙率随深度的变化曲线,如图 3 所示。由图 3 可以看出,不同处理条件下土体的孔隙率大致为 30%~50%。从地表到 8 m 左右深度范围内,经真空预压处理土样的孔隙率比未经真空预压处理土样的孔隙率小,说明在该深度范围内真空预压处理土体的固

结效果更好,真空预压处理的影响范围大致在 8 m,这一结果与塑料排水板插板深度相吻合;在 8~25 m 左右深度范围内,未经真空预压处理土样的固结效果比经真空预压处理土样的固结效果好。分析出现这一现象的原因是由于真空预压时上层排水导致土体中的颗粒孔隙位置发生变化,土体中的排水通道阻塞,导致土样的固结过程受到了影响。而在 25~50 m 深度范围内,经真空预压处理土样的孔隙率小于未经真空预压处理土样,说明 25 m 以下土体真空预压效果达到预期,固结过程中孔隙率逐渐下降,土颗粒之间的距离不断地缩小,土体固结程度提高<sup>[16]</sup>。

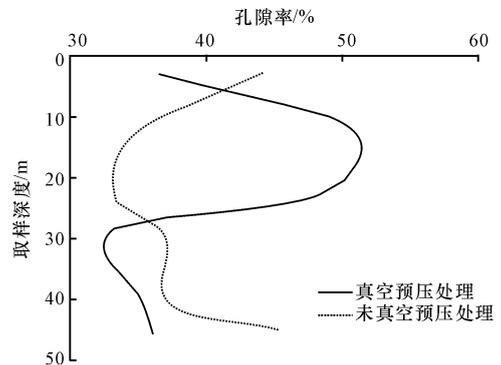


图 3 孔隙率随深度变化曲线

Fig. 3 Curves of porosity with depth

### 3.3 吹填土孔隙直径分布特征

为了进一步了解吹填土中孔隙分布情况,绘制了不同深度孔隙直径分布曲线,见下页图 4。从图 4 中可以看出,土样的孔隙直径分布曲线上基本都会出现 1 个比较明显的峰值,峰值的大小代表了该孔隙直径所占孔隙的体积分数。在距地表 3 m 深度处,真空预压处理曲线的峰值出现在 0.4~3.5  $\mu\text{m}$  内,说明表层土中孔隙直径集中分布在中孔隙区间内;而未经真空预压处理曲线的峰值出现在 3.5~35  $\mu\text{m}$  内,土体中大孔隙所占的体积分数较大。这一结果说明真空预压处理对表层土体的加固效果好。

在距地表 13 m 深度处,未经真空预压处理曲线的峰值出现在 0.4~3.5  $\mu\text{m}$  内,土体内中孔隙所占的体积分数较大,而真空预压处理曲线的峰值出现在 3.5~35  $\mu\text{m}$  内,说明该深度土体中的大孔隙比较多,这是由于上层排水导致土体中的颗粒孔隙位置发生变化,土体中的排水通道阻塞,导致土样的固结过程受到了影响。

在距地表分别为 23、29、41、45 m 深度处,真空预压处理曲线和未经真空预压处理曲线的峰值都出

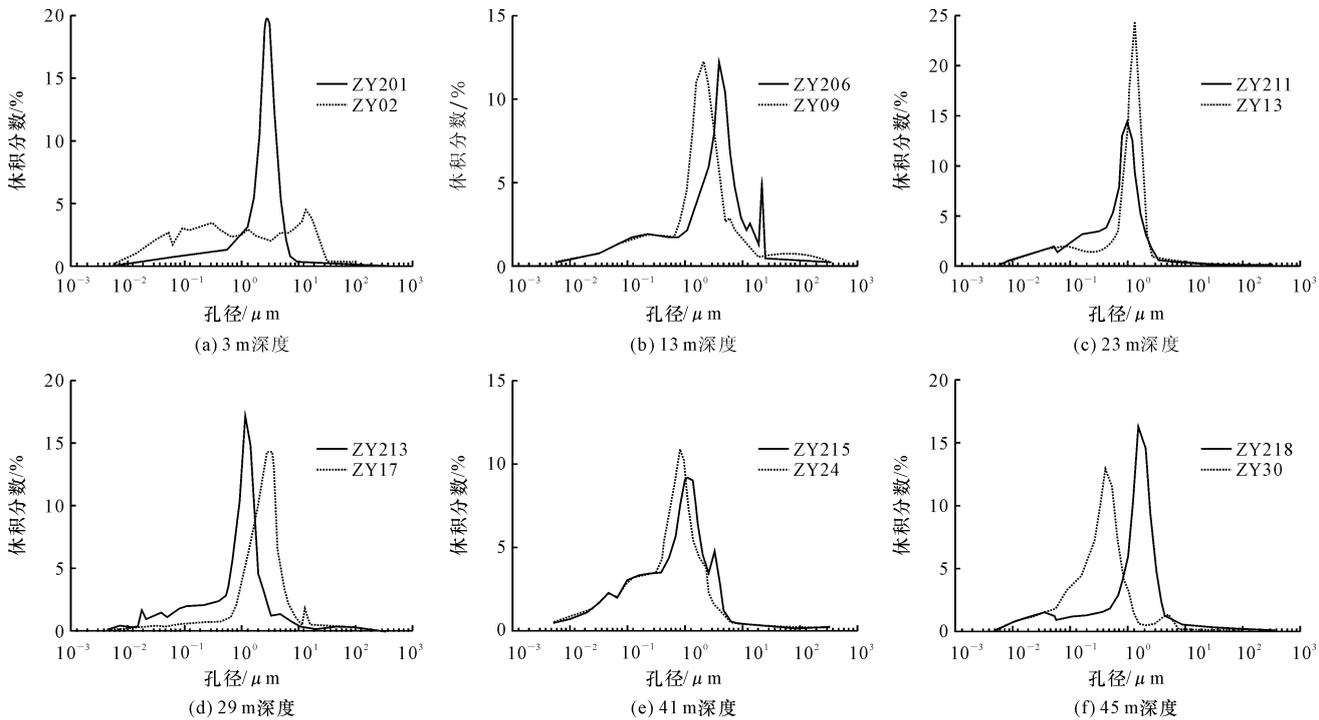


图4 孔隙直径分布曲线

Fig. 4 Pore diameter distribution curve

现在  $0.4 \sim 3.5 \mu\text{m}$  内, 土体中以中孔隙为主, 说明该深度范围内, 2 种处理方法下的吹填土的孔隙分布基本相同。

## 4 结 语

(1) 2 组吹填土样孔隙直径分布趋势大致相同, 土样的孔隙直径主要集中在  $0.4 \sim 3.5 \mu\text{m}$  区间内,  $0.04 \sim 0.4 \mu\text{m}$  和  $3.5 \sim 35 \mu\text{m}$  区间有少量分布, 小于  $0.04 \mu\text{m}$  以及大于  $35 \mu\text{m}$  区间的孔隙分布基本很少。

(2) 2 组吹填土样孔隙率随深度的变化分为 3 个区段: 在距地表 8 m 深度范围内, 由于真空预压处理土样中的水分经排水板排出、土颗粒排列密实, 孔隙率小于未经真空预压处理土样的; 在距地表 8~25m 深度范围内, 未经真空预压处理土样的孔隙率小于真空预压处理土样的孔隙率, 分析出现这一现象的原因是由于真空预压时上层排水导致土体中的颗粒孔隙位置发生变化, 土体中的排水通道阻塞, 导致下层土体的固结过程受到了影响; 在距地表 25~50 m 深度范围内, 真空预压处理土样的孔隙率小于未经真空预压处理土样, 说明 25 m 以下土体真空预压效果达到预期, 固结过程中孔隙率逐渐下降。

(3) 建议进一步采用分级真空预压法处理土样

与本文 2 组土样进行压汞试验对比, 这样可以得出不同埋深条件下土样中的孔隙直径变化过程, 为更加深入地研究土体的固化机理提供依据。

## 参考文献:

### References:

- [1] 宋盛渊, 王清, 孙涛, 等. 天津滨海新区地基工程地质分区的可拓学评价[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2014, 35(10): 1502-1506.  
SONG Sheng-yuan, WANG Qing, SUN Tao, et al. Extensics evaluation of engineering geological zoning of foundation soil in Tianjin Binhai New Area[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2014, 35(10): 1502-1506. (in Chinese)
- [2] 邱长林, 闫涛旺, 孙立强, 等. 孔隙变化对吹填土地基真空预压固结的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 631-638.  
QIU Chang-lin, YAN Shu-wang, SUN Li-qiang, et al. Effect of varying void on consolidation of dredger fill under vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 631-638. (in Chinese)
- [3] 成玉祥. 滨海吹填土结构强度形成机理与真空预压法关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.  
CHENG Yu-xiang. The structural strength formation mechanism of seashore dredger fill and key technique of vacuum preload method[D]. Xi'an: Chang'an Uni-

- versity,2008. (in Chinese)
- [4] 成玉祥,杜东菊. 真空预压处理吹填土的微结构特征试验[J]. 煤田地质与勘探,2010,38(4):52-55.  
CHENG Yu-xiang, DU Dong-ju. Experimental study on micro-structural characteristics of hydraulic fill treated with vacuum preloading[J]. Coal Geology & Exploration,2010,38(4):52-55. (in Chinese)
- [5] Ren F F, Xu Q, et al. Numerical Study on the Full-Range Consolidation Characteristics of a New Dredger Fill Foundation[C]//ISCEG. New Frontiers in Engineering Geology and the Environment; Proceedings of the International Symposium on Coastal Engineering Geology. Shanghai: Springer Geology,2013:83-87.
- [6] Chummuneerat S, Jitsangiam P, Nikraz H. Performances of hydrated cement treated crushed rock base for western australian roads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2014, 1(6):432-438.
- [7] 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):169-176.  
YUAN Xiao-qing, 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):169-176. (in Chinese)
- [8] 王清,桑伟峰,徐黎明,等. 基于室内模拟实验的软土固结沉降的分形几何[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(2):465-470.  
WANG Qing, SANG Wei-feng, XU Li-ming, et al. Fractal geometry of consolidation settlement of soft soil based on simulation experiment[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2):465-470. (in Chinese)
- [9] 王清,王凤艳,肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. 成都理工学院学报,2001,28(2):148-153.  
WANG Qing, WANG Feng-yan, XIAO Shu-fang. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its application to the engineering[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2):148-153. (in Chinese)
- [10] 张平,房营光,闫小庆,等. 不同干燥方法对重塑膨润土压汞试验用土样的影响试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(1):388-391.  
ZHANG Ping, FANG Ying-guang, YAN Xiao-qing, et al. Study of different dry methods for drying remolded bentonite sample with mercury intrusion test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1):388-391. (in Chinese)
- [11] 丁建文,洪振舜,刘松玉. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(12):3591-3596.  
DING Jian-wen, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu. Microstructure study of flow-solidified soil of dredged clays by mercury intrusion porosimetry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12):3591-3596. (in Chinese)
- [12] 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):78-83.  
NIU Cen-cen, 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):78-83. (in Chinese)
- [13] 毛灵涛,薛茹,袁则循. 软土路基微结构扫描电镜图像的分形[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(2):30-33.  
MAO Ling-tao, XUE Ru, YUAN Ze-xun. Fractal approach on soft soil subgrade microstructure SEM image[J]. Journal of Changpan University: Natural Science Edition, 2007, 27(2):30-33. (in Chinese)
- [14] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distribution: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56:362-369.
- [15] 孔令荣,黄宏伟,张冬梅,等. 不同固结压力下饱和软粘土孔隙分布试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(6):1036-1040.  
KONG Ling-rong, HUANG Hong-wei, ZHANG Dong-mei, et al. Experiment study on relationship between pore distribution and different stress levels due to consolidation of soft clays[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6):1036-1040. (in Chinese)
- [16] 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化研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(4):104-109.  
NIU Cen-cen, WANG Qing, YUAN Xiao-qing, et al. Quantitative research on microstructure features of dredger fill under seepage flow[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(4):104-109. (in Chinese)