

# 深圳湾新吹填超软土固结系数的试验研究

张 明<sup>1</sup>, 赵有明<sup>2</sup>, 龚 镭<sup>3</sup>, 胡荣华<sup>1</sup>

(1. 中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 广东 深圳 518034; 2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081;  
3. 招商局蛇口工业区有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 采用全自动气压固结仪对深圳湾吹填超软土进行大量的固结试验, 通过对试验结果的统计分析及与原状淤泥固结系数的对比研究, 得出如下结论: (1) 实际工程中, 可近似采用压力范围 < 100 kPa 内统计样本均值线上、压力范围 > 100 kPa 内对数函数带形宽度内的固结系数, 对此区域吹填淤泥的变形及固结速率进行近似估算; (2) 同区域内吹填淤泥固结系数小于原状淤泥的固结系数, 随着固结压力的增加, 两者间差异性越来越小, 说明吹填淤泥经过超载预压处理后, 可以达到与原状淤泥相同的排水固结速率。

**关键词:** 土力学; 吹填超软土; 固结系数; 全自动气压固结仪; 原状淤泥; 固结压力

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 1 - 3157 - 05

## TEST STUDY OF COEFFICIENT OF CONSOLIDATION OF FRESH HYDRAULIC FILL ULTRA-SOFT SOIL IN SHENZHEN BAY

ZHANG Ming<sup>1</sup>, ZHAO Youming<sup>2</sup>, GONG Lei<sup>3</sup>, HU Ronghua<sup>1</sup>

(1. Shenzhen Research and Design Institute, China Academy of Railway Sciences, Shenzhen, Guangdong 518034, China; 2. China Academy of Railway Science, Beijing 100081, China; 3. China Merchants Shekou Industrial Zone Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

**Abstract:** Automatic pressure consolidometer is introduced to conduct numerous consolidation tests of hydraulic ultra-soft soil filling in Shenzhen Bay, and results are analyzed statistically and compared with coefficient of consolidation of original mud. The obtained results verify that: (1) In actual engineering, coefficient of consolidation is introduced to estimate the deformation and rate of consolidation of hydraulic mud filling approximately in special zone, which is confined within a statistical sample average curve in stress range (less than 100 kPa) and a logarithm function-width in stress range (more than 100 kPa). (2) Consolidation coefficient of hydraulic mud filling is less than original mud in a same zone, with an increase in consolidation pressure, the difference becomes small. It shows that hydraulic mud filling can be achieved a same drainage consolidation rate with original mud after it experiences surcharge preloading.

**Key words:** soil mechanics; hydraulic fill ultra-soft soil; coefficient of consolidation; automatic pressure consolidation oedometer; original mud; consolidation pressure

## 1 引 言

传统的固结理论计算中采用固定的固结系数,

其表达式为  $C_v = k(1+e_0)/(a_v \gamma_w)$ 。而大量研究结果<sup>[1]</sup>表明, 固结过程中渗透系数与压缩系数均会随有效应力变化而变化, 即固结系数随有效应力水平而变化。特别对于高压缩性的淤泥土, 其变化值是较大的。

**收稿日期:** 2009 - 04 - 03; **修回日期:** 2009 - 06 - 30

**作者简介:** 张 明(1979 -), 男, 2003 年毕业于河南工业大学土木建筑学院土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事软土固结理论、地基处理及复合地基的数值计算与方法、岩土工程检测、科研及咨询方面的研究工作。E-mail: honest-2003@163.com

很显然，传统理论虽然可以简化计算，但并未反映淤泥土固结过程中的真实性状。正如 J. M. Duncan<sup>[2]</sup> 在太沙基讲座中指出，固结系数的不确定性给利用传统固结理论计算土体变形带来很大限制。

室内试验测定固结系数，主要因土样压缩性质、状态及受荷历史、扰动程度等不同，试验结果表现出不确定性。沈珠江<sup>[3]</sup>认为，不同取样方式(薄壁、厚壁)得到的土样以及重塑土样的固结系数随固结压力的变化规律如图 1 所示。目前国内进行压缩试验时一般只进行固结压力为 50, 100, 200 和 400 kPa 的固结试验，得到的曲线一般呈现缓降型，甚至是水平线型的曲线。吕永高和杨建林<sup>[4]</sup>对不同竖向荷载作用下低、中、高压缩性土的固结系数统计分析结果表明：对高压缩性土，压力越大，固结系数越大；中压缩性土，2 种竖向荷载作用下固结系数相差很小，基本上相同；低压缩性土，固结压力越大，固结系数越小。林鹏等<sup>[5]</sup>的研究表明，正常固结软土在小应力范围内，固结系数随应力水平的增加而增加，大应力范围内，固结系数随应力水平的增加而减小；超固结软土的固结系数随应力水平的增加而增加。马驹<sup>[6]</sup>认为，固结压力大于先期固结压力时，黏土的固结系数随压力的增加呈递增趋势，固结压力小于先期固结压力时，固结系数随压力增加而递减。

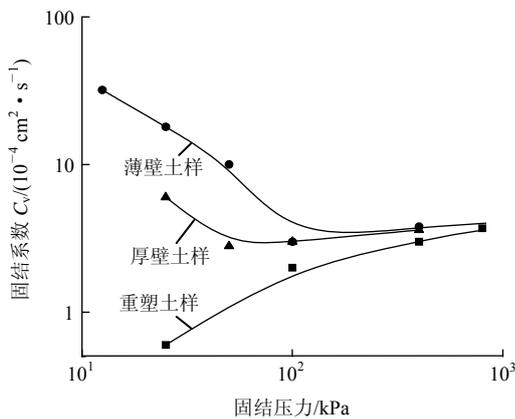


图 1 固结系数随压力的变化

Fig.1 Variation of coefficient of consolidation with pressure

如何使室内试验测定的固结系数能较好地反映现场土体实际的固结特性，需要从取样条件及固结试验条件等方面加以改进与完善。对于吹填超软土，采用常规固结试验难以对其固结系数进行测定，加载及数据采集存在诸多困难，且试验周期长。本文

采用一种新型全自动气压固结仪对深圳湾吹填超软土进行了高压固结试验，通过试验结果的统计分析以及与原状淤泥固结系数的对比研究，以期能为此区域后续的围海造陆地基处理工程中吹填土的变形及固结速率的估算提供固结参数。

## 2 试验简介

### 2.1 全自动气压固结仪

全自动气压固结仪根据气压传动的原理加荷，是一种新式的气压自动加荷固结仪，用于测定在不同荷载和侧限条件下土的压缩性能。整套系统由固结仪、气压控制器、多路通讯转换器和数据采集系统组成(见图 2)。可进行正常慢固结试验和快速固结试验，测定前期固结压力和固结系数。它利用压缩空气通过气缸对土样进行逐级加荷<sup>[7]</sup>，低压为 0~100 kPa，高压为 100~3 200 kPa。计算机软件系统具有可分别对气压控制器设定固结压力，自动纠正容器(包括土样)及其他附件的质量，启动固结、停止固结和数据交换等功能，可对 16 台固结仪的位移传感器进行标定，实时显示固结试验的数据和图表曲线。计算机软件系统可以联接电子天平，对土样盒称重，计算含水量。气压控制器可同时对 16 台固结仪设定同一固结压力，自动采集 16 通道数据，实时将 16 通道数据传给计算机，实现自动控制。



图 2 全自动气压固结仪装置简图

Fig.2 Installation diagram of automatic pressure consolidation oedometer

全自动气压固结仪克服了单杠杆固结仪存在的缺点，具有以下优点：(1) 固结压力分别设定，按所规定的时间和荷重序列逐级加荷，并按固结试验的要求记录数据，显示时间平方根曲线、时间对数

曲线, 大大提高仪器的灵活性, 缩短试验周期; (2) 可以减小劳动强度, 提高工作效率; (3) 具有声音提示, 自动采集数据功能; (4) 大、小环刀可分别设定, 分别加荷, 减小人为误差, 提高试验精度。

### 2.2 试验条件及方法

为了保证试样与现场状态具有更大的相似性, 现场取样时将土样装入 2 层塑料袋, 并作密封处理后放入桶内, 试验前开袋检查无明显泌水现象。由于试样含水量很高, 取样及制样过程中已部分扰动, 试验前试样基本物理性质指标见表 1。由于土样的初始强度极低, 试验荷重第一级、二级分别为 5.0 和 12.5 kPa, 并选用荷重序列为 5.0, 12.5, 50.0, 80.0, 100.0, 120.0, 300.0, 400.0, 600.0, 800.0 和 1 200.0 kPa 等进行分级加载, 试样高度为 2 cm, 面积为 30 cm<sup>2</sup>, 试验方法参照标准固结进行, 每级荷重的稳定标准为 0.005 mm/h, 最后一级荷重稳定固结 3 d。

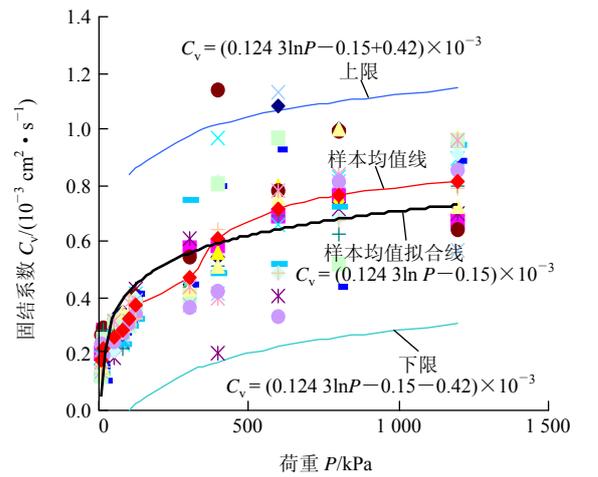
表 1 吹填淤泥试样基本物理性质指标  
Table 1 Physical properties of hydraulic silt sample

参数 指标	密度 $\rho$ (g · cm <sup>-3</sup> )	孔隙比 $e_0$	含水量 $w_0$ /%	相对 密度 $G$	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_P$ /%	塑性指数 $I_P$
最大值	1.50	-	98.6	2.774	48.0	27.6	28.9
最小值	1.45	-	93.4	2.739	56.8	34.0	19.0
平均值	1.48	2.666	95.7	2.759	51.2	22.5	23.6

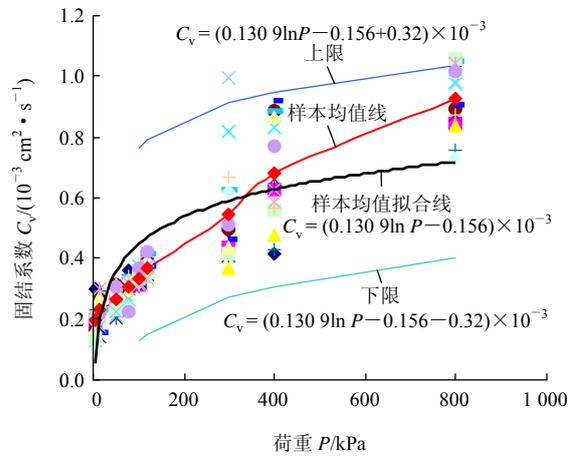
## 3 试验结果与分析

### 3.1 固结系数变化规律研究

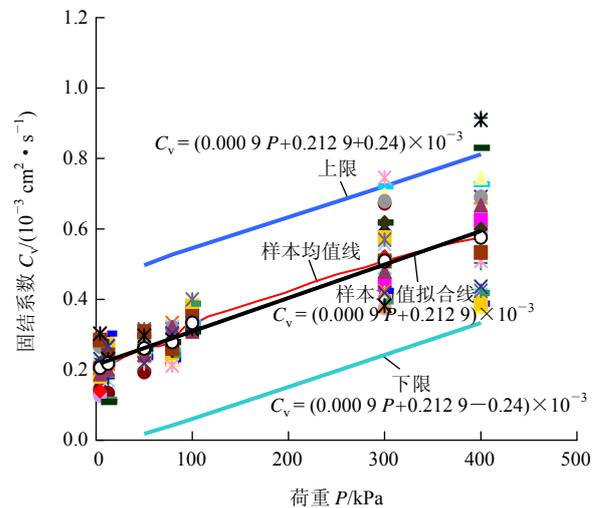
图 3 为不同试验荷重下吹填淤泥的固结系数变化情况, 可得到以下启示: (1) 在小压力范围 0~100 kPa 下, 各土样的固结系数分布相对集中, 紧密分布在统计样本均值线两侧, 实际工程中可近似采用此压力范围内的固结系数均值进行变形计算; (2) 在压力 > 100 kPa 时, 各土样的固结系数分布比较分散。图 3(a), (b) 显示, 各压力下的固结系数近似呈现对数函数带形分布, 随着固结压力范围的变大, 带形的分布宽度越来越大。图 3(c) 显示各压力下的固结系数近似符合线性函数带形分布, 与张长生<sup>[8]</sup>的研究结果“固结系数分布在一定宽度的带形区域内”是一致的; (3) 由图 3(a), (b) 可见, 对吹填淤泥试样施加最大荷重 ≥ 400 kPa 时, 固结系数的带形分



(a) 固结压力 5~1 200 kPa



(b) 固结压力 5~800 kPa



(c) 固结压力 5~400 kPa

图 3 不同固结压力下吹填淤泥的固结系数

Fig.3 Consolidation coefficients of hydraulic silt under different consolidation pressures

布随着最大荷重的增加而变宽。固结压力与固结系数间的关系采用指数函数拟合, 相关系数都超过 0.86。图 3(c) 中固结系数的统计样本均值线线性相

关系系数超过 0.9, 随着荷重的增加固结系数近似呈线性增加。各级压力下吹填淤泥固结系数的增量  $\Delta C_v$  及固结系数增量与压力增量之比  $\Delta C_v/\Delta P$  如表 2 所示。第一、二级加载, 吹填淤泥初始为松散状态, 对所施加的荷载极其敏感, 施加很小的固结压力, 固结系数增加很快, 增量比  $\Delta C_v/\Delta P$  最大; 随着固结压力的不断增加, 固结系数不断增大, 但增量比减小, 当固结压力增加至 100 kPa 左右时, 增量比变大, 荷载由 80 kPa 增至 120 kPa, 固结系数增量  $\Delta C_v = 0.85 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 随着固结压力进一步增加至 300 kPa, 固结系数增量达到最大。此后, 固结系数增量比逐渐变缓。一般超载预压法软土地基处理中, 预压荷载在 80~300 kPa 范围内, 此阶段固结系数变化范围较大, 采用固定的固结系数进行变形及固结度计算时, 与实际情况会有很大的出入。

表 2 各压力增量下吹填淤泥固结系数的变化

Table 2 Variation of consolidation coefficient of hydraulic silt under pressure increment

压力范围/kPa	$\Delta C_v/(10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$(\Delta C_v)/\Delta P/(10^{-4} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$
5.0~12.5	0.025	0.034
12.5~50.0	0.040	0.011
50.0~80.0	0.023	0.008
80.0~100.0	0.045	0.022
100.0~120.0	0.040	0.020
120.0~300.0	0.126	0.007
300.0~400.0	0.108	0.011
400.0~600.0	0.114	0.006
600.0~800.0	0.043	0.002
800.0~1200.0	0.050	0.001

### 3.2 吹填淤泥与原状淤泥固结系数的对比分析

深圳前海湾吹填淤泥(以下简称吹填淤泥)为人工吹填形成, 属流塑饱和状态的欠固结土, 试样取自表层 3~6 m 深度, 室内从塑料袋中取出制样后在全自动气压固结仪中进行试验, 属部分扰动土, 试验样本共 64 组; 深圳前海湾原状淤泥(以下简称原状淤泥)为海相沉积淤泥, 属滨海滩涂淤泥, 位于吹填淤泥层以下, 属流塑饱和状态的正常固结土, 其性质优于上层吹填淤泥, 取自 6~12 m 深度, 试验样本共计 48 组; 深圳机场二跑道淤泥(以下简称机场淤泥)属海相沉积淤泥, 呈饱和流塑状态, 欠固结土, 厚度分布不均匀, 土样取自深度 1.8~7.5 m, 试验样本数共 21 组。试验前对 3 类土样进行了颗粒分析试验, 并利用 X 射线衍射方法测试了吹填淤泥的黏土矿物组成, 其结果如表 3 所示。

表 3 淤泥的物质组成

Table 3 Physical components of silt

土性	含量/%			黏土矿物绝对含量/%		
	粉粒(0.005~0.075 mm)	黏粒(0.002~0.005 mm)	胶粒(<0.002 mm)	高岭石	伊利石/蒙脱石	绿泥石
吹填淤泥	53.0	20.7	26.3	14.2	18.4	2.8
原状淤泥	43.2	16.8	38.0	-	-	-
机场淤泥	22.0	15.0	-	-	-	-

为了使试验数据更加准确, 需要对异常数据进行处理, 工程上常用的一种方法是  $3\sigma$  ( $\sigma$  为标准差) 删除标准。对进行删除后的固结系数试验样本进行参数统计, 求出其均值和标准差。图 4 是对上述 3 种淤泥固结系数试验结果取样本均值得到的曲线, 由图 4 可见:

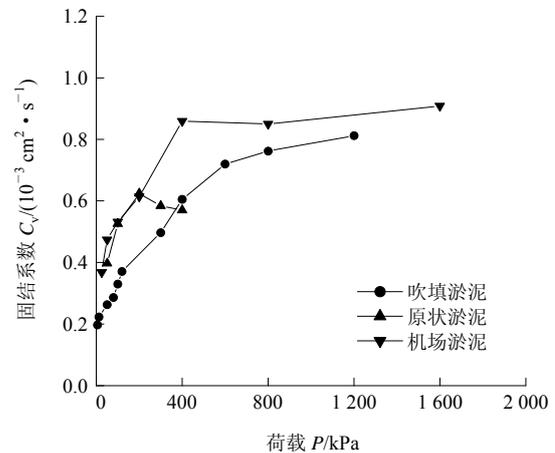


图 4 不同固结压力下淤泥的固结系数

Fig.4 Consolidation coefficient of silt between under different consolidation pressures

(1) 吹填淤泥的固结系数变化趋势与机场淤泥一致, 与图 1 重塑土样曲线变化趋势相近, 吹填淤泥的固结系数小于机场淤泥, 随着固结压力的增加固结系数增大。其原因在于: 2 种淤泥都属新近沉积的欠固结土, 自重作用下的固结还未完成, 在固结压力作用下, 随着固结压力的增加两者固结系数变化规律基本一致。表 3 显示吹填淤泥颗粒比机场淤泥细, 表现为同一固结压力下前者固结系数小于后者。

(2) 压力  $\leq 200$  kPa 情况下原状淤泥与机场淤泥曲线基本重合, 与其所处的地质环境及形成条件有关, 但随着压力的增加, 原状淤泥的固结系数先增大后减小, 机场淤泥固结系数随着压力的增加而增大, 曲线逐渐趋于平缓。

(3) 同一区域吹填淤泥与原状淤泥的固结系数

表现出不同的变化规律: 在较小固结压力作用下, 吹填淤泥固结系数小于原状淤泥, 随着压力的增加, 两者间差距逐渐变小, 两曲线存在一交点, 最后一级荷重(400 kPa)下, 吹填淤泥的固结系数反而大于原状淤泥。说明虽然吹填淤泥初始状态性质比原状淤泥差, 经过预压处理后, 但仍可以达到与原状淤泥相同的排水固结速率。

吹填淤泥与原状淤泥固结系数表现的差异性可从其特殊的物理力学性质、物质组成、形成条件、应力历史等方面加以解释: 由表 3 可见, 吹填淤泥的黏土矿物以亲水性差、水化膜厚度较小的伊利石、高岭石为主, 亲水性较强, 压缩性高, 物理力学性质方面表现为含水量与孔隙比都比原状淤泥高。在较小的荷载作用下, 孔隙比的变化较大, 压缩系数  $a_v$  一般比同样状态下的原状淤泥要大得多。另外, 实际固结与压缩过程中, 由于孔隙比的改变使渗透系数  $k$  也发生变化。吹填淤泥<sup>[9]</sup>由海相淤泥经吹填机械松动、扰动、与水混合搅拌及取样扰动与制样等过程, 伴随着原状淤泥结构的破坏、颗粒分选以及新结构的形成, 属重塑土范畴, 土颗粒间重新排列且黏结强度降低, 破坏了原状土的絮凝集聚体, 并发育成带状结构, 与以粒状胶结和蜂窝状微结构为主的原状淤泥相比, 表现出明显的大孔隙架空结构, 孤立孔隙虽直径较大, 但其数量较少, 连通性差, 孔隙的存在形式和孔隙的大小对渗透产生了较大的影响, 使其压缩过程中渗透系数  $k$  很小。从固结系数的定义式:  $C_v = k(1+e_0)/(a_v \gamma_w)$  来看, 吹填淤泥的固结系数比原状淤泥低的主要原因是由于其压缩系数高所致。

另外, 吹填淤泥填料一般来自工程场地近海近河深部海相淤泥, 原状淤泥源于浅层海相淤泥, 经过不断的沉积搬运等物理过程, 深部淤泥颗粒比浅层淤泥要粗, 但吹填淤泥经过搅拌后, 颗粒变细, 土颗粒分布也变得比较均匀, 与原状淤泥颗粒组成比较接近。表 3 中的颗粒分析结果显示, 吹填淤泥与原状淤泥中黏粒与胶粒 2 种细颗粒的含量之和分别为 47%, 54.8%, 两者十分接近, 前者略小于后者, 在较高的固结压力长时间作用下, 土体不断压密, 土体的固结排水速率主要受其自身粒度成分的影响, 表现为两者在试验后期具有相近的固结系数。

## 4 结 论

(1) 深圳湾吹填超软土全自动气压固结试验结果表明: 当固结压力 < 100 kPa 时, 吹填淤泥的固结系数紧密分布在线性均值线两侧; 固结压力 > 100 kPa 时, 固结系数变化范围较大, 近似呈现指数函数

带形分布。实际工程中, 可根据固结系数的分布特点, 选取合适的固结系数, 对此区域内围海造陆地基处理工程吹填土的变形及固结速率进行近似估算。

(2) 同区域内吹填淤泥的固结系数小于原状淤泥, 是由于其自身特殊的物质组成、应力历史、形成条件等决定的。但随着固结压力的增加, 两者间差异越来越小, 说明吹填淤泥初始状态性质虽然比原状淤泥差, 但经过超载预压处理后, 仍可以达到与原状淤泥相同的排水固结速率。

## 参考文献(References):

- [1] MESRI G, ROKHSAR A. Consolidation of normally consolidated clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1974, 100(8): 889 - 903.
- [2] DUNCAN J M. Limitation of convention analysis of consolidation settlement[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1993, 119(9): 1 333 - 1 359.
- [3] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 28(1): 100 - 111.(SHEN Zhujiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 28(1): 100 - 111.(in Chinese))
- [4] 吕永高, 杨建林. 不同竖向荷载作用下低、中、高压压缩性土固结系数大小的统计分析[J]. 岩土工程界, 2002, 5(9): 63 - 64.(LU Yonggao, YANG Jianlin. Statistic analysis of coefficient of consolidation of low, medial, high compressibility soil under different vertical loads[J]. Geotechnical Engineering World, 2002, 5(9): 63 - 64.(in Chinese))
- [5] 林 鹏, 许镇鸿, 徐 鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 106 - 108.(LIN Peng, XU Zhenhong, XU Peng, et al. Research on coefficient of consolidation of soft clay under compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 106 - 108.(in Chinese))
- [6] 马 驯. 固结系数与固结压力关系的统计分析研究[J]. 港口工程, 1993, (1): 46 - 53.(MA Xun. Statistical analysis and study of the relations between the coefficient of consolidation and consolidation pressure[J]. Ports Engineering, 1993, (1): 46 - 53.(in Chinese))
- [7] 颜立军. 全自动气压固结仪[J]. 油气田地面工程, 2008, 27(5): 94.(YAN Lijun. Automatic pressure consolidation oedometer[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2008, 27(5): 94.(in Chinese))
- [8] 张长生. 深圳前海湾海相沉积淤泥固结变形特性研究[博士学位论文][D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2005.(ZHANG Changsheng. Study of the properties of deformation and consolidation of marine clay at Shenzhen Houhai bay[Ph. D. Thesis][D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, 2005.(in Chinese))
- [9] 文家海, 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.(WEN Jiahai, YAN Chunfeng, WANG Dongyun. Some engineering properties of the dredger fill[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1999, 21(2): 79 - 83.(in Chinese))