

DOI: 10.11779/CJGE20230387

# 利用原位测试试验确定黄河口潮滩粉质土固结状态研究

张建民<sup>1,2</sup>, 单红仙<sup>3</sup>, 王振强<sup>1,2</sup>, 王志才<sup>1,2</sup>, 王津津<sup>1,2</sup>

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 山东省地震工程研究院, 山东 济南 250021; 3. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 黄河口泥沙快速堆积在河口一带, 在波浪和潮汐作用下, 表层沉积物处于超固结状态, 但试验中发现采用 Casagrande 作图法求取的黄河口粉质土先期固结压力往往偏大。为了了解黄河口粉质土固结状态、合理估算先期固结压力, 在黄河口刁口流路三角洲叶瓣潮坪上, 现场取土在试坑内配置了模拟黄河口快速沉积形成的流体状堆积物, 利用原位测试手段(静力触探、十字板剪切试验和孔隙水压力测试), 并在长期观测基础上, 对比研究了 1.0 m 深度范围内试坑和潮滩原状土体固结过程及固结状态。研究发现: 黄河口快速沉积粉质土在自重作用下固结很快, 固结完成后, 土体强度随时间发展呈现不均匀增长, 沿深度方向从上到下出现高-低-次高不均匀固结特征; 历经 16 个月后, 试坑和潮滩原状土体先期固结压力进一步提高, 固结不均匀性和结构性不断增强。从试坑土体自重固结完成后的实际固结状态及原状土体物理性质指标来看, Casagrande 作图法结果偏大, 采用静力触探比贯入阻力法、十字板剪切试验不排水抗剪强度经验公式法估算的试坑和潮滩原状土体先期固结压力数值更为可靠; 同时该方法为土体固结状态研究提供了新途径。

**关键词:** 黄河口; 粉质土; 固结状态; 原位测试; 先期固结压力

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)09-1994-08

**作者简介:** 张建民(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程地震、岩土工程等方面的研究工作。E-mail: jianmin\_1991@s163.com。

## Consolidation states of silty soils in tidal flats of Yellow River estuary by in-situ testing

ZHANG Jianmin<sup>1,2</sup>, SHAN Hongxian<sup>3</sup>, WANG Zhenqiang<sup>1,2</sup>, WANG Zhicai<sup>1,2</sup>, WANG Jinjin<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China; 2. Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan 250021, China;

3. Geo-Environmental Engineering Department, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The sediments in the Yellow River estuary rapidly deposit in the estuarine area. Under the action of waves and tidal waves, the surface sediments are in an over-consolidated state. However, it is found that the pre-consolidation pressure of silty soils in the Yellow River estuary calculated by the Casagrande graphic method is usually too high. In order to find out the consolidation states and estimate the pre-consolidation pressure of silty soils reasonably, a series of tests are conducted on the tide flat of Diaokou delta lobe. The fluid sediments imitating the rapidly deposited seabed silts are made in situ, and then promptly filled into a one-meter deep pit excavated at the tide flat. Through the in-situ testing methods such as the static cone penetration tests, field vane shear tests and pore water pressure tests, on the basis of long-term observation, the consolidation processes and states of the undisturbed soils of the tidal flat and testing pit soils are studied in the range of 1.0 m in depth. It is shown that the consolidation speed of the rapidly deposited pit silty soils are very fast under the effective gravity stress, after consolidation compression is completed, the strength of such soils still increase unevenly with the development of time, exhibiting high-low-subhigh non-uniform consolidation characteristics along the depth. After 16 months, the pre-consolidation pressures of the undisturbed soils and testing pit soils further increase, the characteristics of non-uniform consolidation and structure are enhanced continuously. According to the actual consolidation states of the testing pit soils after the self-weight compression consolidation is completed and the indexes of physical and mechanical properties of the undisturbed soils, the results of the Casagrande graphic method are too great, so it is more reliable to estimate the pre-consolidation pressures of the undisturbed soils and testing pit soils by using the static cone penetration tests and field vane shear tests. Meantime such in-situ testing methods provide a new way to determine the

基金项目: 国家自然科学基金项目(40172088, 40472137)

收稿日期: 2023-05-05

consolidation states of soils.

**Key words:** Yellow River estuary; silty soil; consolidation state; in-situ testing; pre-consolidation pressure

## 0 引言

土的固结状态能够反映土体形成环境和地质历史等因素影响, 先期固结压力是用来判断土体固结状态的重要参数。先期固结压力确定主要有 Casagrande 法<sup>[1]</sup>、Burmister 法<sup>[1]</sup>、Butterfield 双对数法<sup>[2]</sup>、Janbu 法等图解法。针对 Casagrande 法最小曲率点人工难以确定的前提下, 姜安龙等<sup>[3]</sup>采用了拟合压缩曲线法, 邹越强等<sup>[4]</sup>提出了推求先期固结压力的逐步逼近法。当土样扰动增加, 压缩曲线变圆滑或偏离原始曲线时, 用上述图解法得到的土样先期固结压力不够准确<sup>[4-5]</sup>。

黄河以高泥沙含量闻名于世, 巨量的泥沙进入弱潮陆相河口地带, 不断承受海水周期性淹没, 波浪和潮波将力作用于海床土体上, 使海床表层沉积物的应力场、位移场、孔隙水压力发生改变, 从而影响沉积物的固结状态。关于海床土体的固结机理, 研究者大多基于 Biot 多孔弹性介质固结理论对波浪引起海床动力响应进行了解析或数值解答<sup>[6-7]</sup>。冯秀丽等<sup>[8]</sup>发现黄河口表层土体在波浪和潮流的作用下不断粗化, 形成表面硬壳层, 俗称“铁板砂”。张民生等<sup>[9]</sup>通过水槽试验, 研究了波浪荷载作用下黄河口粉土粒径粗化和“铁板砂”的形成过程。冷浩等<sup>[10]</sup>运用数值模拟分析了黄河三角洲硬壳层在不同流速下的形成深度。苏思杨等<sup>[11]</sup>通过离心模型试验验证了波浪作用下海床地基重固结后硬壳层的形成机制。单红仙等<sup>[12]</sup>、杨秀娟等<sup>[13]</sup>、张建民等<sup>[14]</sup>在黄河三角洲潮滩开展的现场模拟试验说明, 黄河口快速沉积的粉质土在波浪和潮波的作用下, 出现了超静孔压的积累, 逐渐呈现超固结状态, 并沿深度方向出现固结非均匀现象。

以上研究揭示了黄河口粉质土在波浪作用下的超固结特性, 但对其固结状态及先期固结压力的研究并不多。由于黄河三角洲粉土具有一定的结构性及触变特性<sup>[15-16]</sup>, 取样时土样易受扰动和液化, 用图解法得到的先期固结压力不可靠。如何正确了解土体固结状态和合理求取先期固结压力是了解黄河三角洲沉积物应力历史的关键, 对于河口海岸建设意义重大。本文设计了场地试验, 利用原位测试试验方法(孔隙水压力测试、静力触探及十字板剪切试验)来探讨黄河三角洲沉积物固结状态。

## 1 确定方法的原理

### 1.1 不排水抗剪强度法

天然土层中有效应力是随深度变化的, 所以不排水强度也随深度而变化。早在 Fellenius<sup>[17]</sup>提出了均质的正常固结黏性土不排水强度是随深度或有效自重应力  $\sigma'_v$  线性增加的。Skempton<sup>[18]</sup>分析了大量的野外试验资料后, 发现正常固结土的  $C_u / \sigma'_v$  与土的黏粒含量或塑性指数有关, 并得出如下公式:

$$C_u / \sigma'_v = 0.11 + 0.0037 I_p \quad (1)$$

Ladd 等<sup>[19]</sup>通过土的应力历史及土的归一化分析得到

$$\text{OCR} = [(C_u / \sigma'_v)_{\text{OC}} / (C_u / \sigma'_v)_{\text{NC}}]^{1/n} \quad (2)$$

式中:  $C_u$  为不排水抗剪强度;  $\sigma'_v$  为土体在现有状态下的有效自重应力; OC 代表超固结土体, NC 代表正常固结土体,  $n$  为塑性体应变比, 介于 0.77~1.51, Ladd 等<sup>[19]</sup>建议取 0.8。

因此通过三轴试验、十字板剪切试验、无侧限抗压强度等试验确定超固结土体的不排水抗剪强度, 利用式(1), (2)可求得土体的超固结比, 从而得到土体的先期固结压力。

### 1.2 静力触探比贯入阻力法

在饱和均质正常固结土体中, 固结压力等于自重有效应力, 且随深度增加而线性增加; 对于静力触探比贯入阻力也往往随深度加大而线性增加<sup>[20]</sup>。这一点可以从 2014 年 4 月 13 日试坑土体自重固结完成后, 比贯入阻力沿深度方向大致呈线性变化得到验证(图 6)。下面分 3 种情况讨论该方法的原理。

(1) 一层饱和均质正常固结土(图1)

对于土体:

$$p_c = \gamma' z \quad (3)$$

对于土体静力触探比贯入阻力( $\lambda$ 为图1(b)中比贯入阻力曲线斜率):

$$P_s = \lambda z \quad (4)$$

由式(3), (4)消去  $z$ , 可得到固结压力  $p_c$  和  $P_s$  比贯入阻力关系式:

$$p_c = \frac{\gamma'}{\lambda} P_s \quad (5)$$

(2) 一层饱和均质超固结土(表面剥蚀)(图2)

对于土体:

$$p_c = \gamma' z + \gamma' h_1 \quad (6)$$

对于土体静力触探比贯入阻力( $\lambda$ 为图2(b)中比贯入阻力曲线斜率):

$$P_s = \lambda z + P_0 \quad (7)$$

由式(6), (7)消去  $z$ , 并将  $P_0 = \lambda h_1$  代入, 同样可得到固结压力  $p_c$  和  $P_s$  比贯入阻力关系式(5)。

(3) 二层饱和均质正常固结土(假设  $\gamma'_1 \neq \gamma'_2$ ) (图3)

对于第二层土体(第一层土体见(1)中分析):

$$p_c = \gamma'_2(z - h_2) + \gamma'_1 h_2 \quad (8)$$

对于土体静力触探比贯入阻力( $\lambda$ 为图3(b)中第二层土的比贯入阻力曲线斜率):

$$P_s = P_0 + \lambda(z - h_2) \quad (9)$$

又有

$$P_0 = \lambda p_{c(z=h_2)} / \gamma'_2 = \lambda \gamma'_1 h_2 / \gamma'_2 \quad (10)$$

由式(8), (9), (10)消去 $z$ 和 $P_0$ 又可得到与关系式(5)一致的情况:

$$p_c = \frac{\gamma'_2}{\lambda} P_s \quad (11)$$

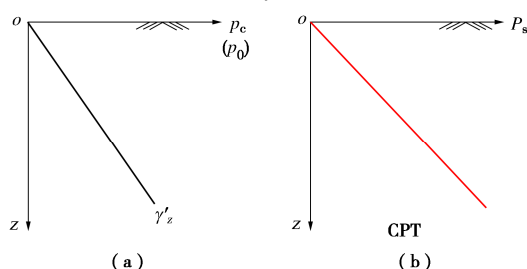


图1 一层饱和均质正常固结土体固结压力与比贯入阻力图

Fig. 1 Consolidation pressures and  $P_s$  of one-layer saturated

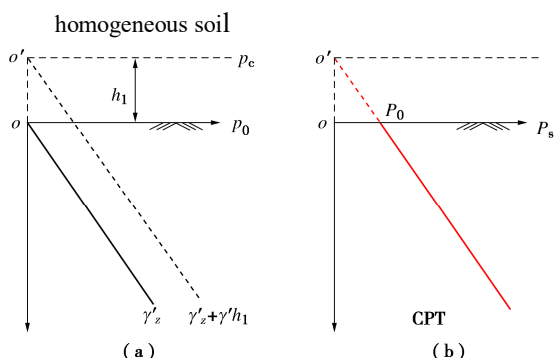


图2 一层饱和均质超固结土体固结压力与比贯入阻力图

Fig. 2 Over-consolidation pressures and  $P_s$  of one-layer saturated

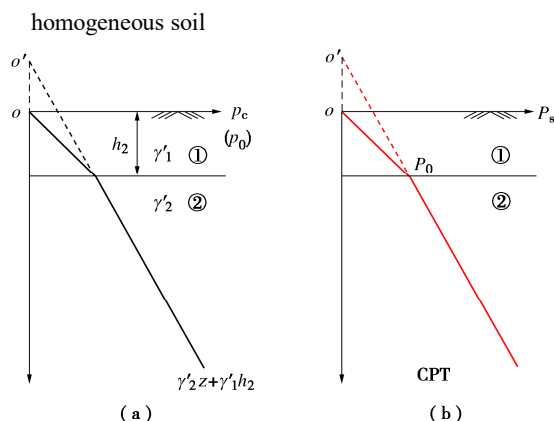


图3 二层饱和均质正常固结土体固结压力与比贯入阻力图

Fig. 3 Consolidation pressures and  $P_s$  of two-layers saturated homogeneous soils

对于第二层土,如图3所示:在  $\gamma'_1 \neq \gamma'_2$  的情况下,有效自重应力(比贯入阻力)曲线与纵坐标不会交于原点 $o$ 点,若  $\gamma'_1 > \gamma'_2$ ,会交于图示的 $o'$ 点,这是简文彬等<sup>[20]</sup>应用静力触探试验进行软土固结状态判别应注意的地方。

对于二层顶部受剥蚀的超固结土同样也可得到式(5)(讨论从略)。因此不论对于正常固结和超固结土,式(5)具有普遍性。

从以上分析及图2来看,对于某均匀正常固结和超固结土体,其比贯入阻力曲线斜率( $\lambda$ )不会随固结状态的变化而变化。因此通过设计试验求得均质正常固结土体的比贯入阻力曲线斜率,应用式(5),采用静力触探试验可求取该类超固结土体的先期固结压力。

## 2 研究区概况

研究区选在黄河三角洲北部刁口流路三角洲叶瓣滩上(图4),自1976年黄河改道以来,该亚三角洲叶瓣失去泥沙来源,表层沉积物一直遭受波浪和潮流的强烈侵蚀作用。研究区为不规则半日潮,平均潮差0.7~1.7 m,最大潮差2.17 m,潮流流速可达120~150 cm/s。波浪以风浪为主,常见波浪波高小于0.5 m,平均波高在11~2月份最高,为0.9~1.1 m,最大波高为5.7~7.2 m,强浪方向为N-NE向<sup>[21]</sup>。

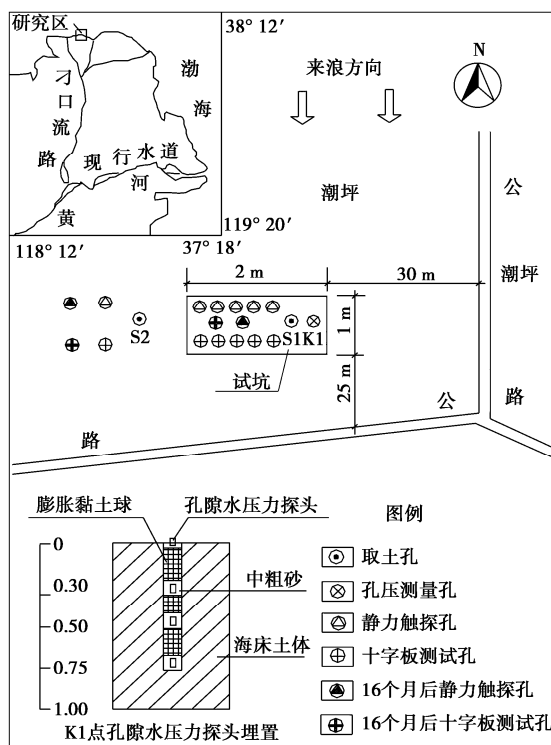


图4 研究区位置及试验现场布置示意图

Fig. 4 Location and arrangements of research area

在野外试验阶段,研究区无明显风浪,最大潮水

深度为0.5~0.6 m, 波浪波高小, 平均波高0.05~0.09 m。高潮时被海水淹没, 低潮时研究区露出水面, 为现场工作的开展提供了便利条件。

3 现场开展的试验内容

3.1 试验现场布置

为研究黄河口海床土体固结过程, 在潮滩上开挖一个长宽深 2 m×1 m×1 m 试验坑(图 4)。将坑中挖出的土晒干、撵细, 按含水率 40%标准(该土体液限最大值为 34%)制成流态泥浆, 回填到试验坑中, 模拟黄河口沉积物快速堆积过程。同时在图 4 中的 K1 点不同深度处分别埋置孔隙水压力探头, 试坑填满后, 开始测定孔隙水压力。在整个试验期内(2014 年 4 月 11 日 12 时—15 日 12 时)连续测定试坑土体的孔隙水压力、静力触探值、十字板剪切试验值的变化。为探讨试坑与潮滩原状土体固结状态的不同, 在 S2 点附近进行了潮滩原状土静力触探和十字板剪切试验。15 日在 S1、S2 点分别取 1 m 试坑和潮滩原状土样。

为了了解潮滩土体在长期遭受波浪和潮波作用下, 土体固结状态变化, 16 个月后, 对试坑和潮滩原状土体进行了长期强度原位测试试验。在图 4 的试验坑内和原状潮滩又做了静力触探、十字板剪切试验。

3.2 孔隙水压力测量设备布置

孔隙水压力仪由南京水利科学研究院设计制造。探头尺寸  $\phi 20\times 60$  mm, 埋入土中之前, 提前 24 h 在水中浸泡, 并不时摇动排除气体。测点位置处以下 50 mm 注入干净中粗砂 40 mm, 然后垂直放入孔压探头, 再注入 60 mm 干净中粗砂, 最后用干黏土球封孔至上一测点位置以下 50 mm 处, 开始第二测点埋设, 方法同上。K1 点探头布设见图 4, 共布置 4 个孔压探头, 深度分别位于 0, 30, 50, 75 cm。

4 试坑与原状土样室内土工试验

研究区 1.0 m 深度范围的土体为粉土, 砂粒含量在 0.4%~5.2%, 粉粒含量在 84.5%~92.3%, 黏粒含量在 6.2%~15.1%。对 4 月 15 日试坑取土孔 S1 土样和潮滩原状取土孔 S2 土样, 室内测定其物理力学指

标见表 1。从表 1 可知, 潮滩原状土样与试坑扰动后恢复土样两者的物理力学性质差别很大, 原状土样密度、压缩模量、先期固结压力均比试坑土样大, 而孔隙比偏小, 反映出原状土更加密实。

表 1 中的先期固结压力是采用传统的 Casagrande 作图法得到的。1.0 m 内潮滩原状土体的先期固结压力介于 135.4~175.8 kPa, 4 月 15 日试坑土体的先期固结压力介于 51.9~75.8 kPa, 两者均处于超固结状态。但从试坑土体 K1 点的孔压数据来看, 由土体自重产生的超静孔隙水压力在 4 月 13 日 15 时已消散完毕, 该土处于正常固结状态, 因而对试坑土体来说, 该数值明显偏大。

5 原位测试结果分析

5.1 试坑土体超静孔压消散规律

根据 K1 点孔隙水压力仪测定的数值, 绘制出不同深度处孔隙水压力随时间的变化曲线图(图 5)。图 5 中的超静孔隙水压力值是各深度处孔压探头的实测孔压与其埋置位置至海床表面静水压力差值, 即将海床表面作为位置水头的起算位置。由于试坑土体顶部一直存在一薄水层, 上述差值再减去海床表面孔压探头记录的水压力(包括涨退潮阶段的潮波水压力)。

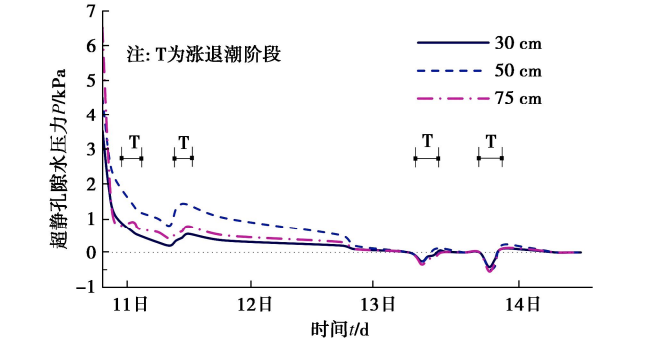


图 5 不同深度处孔隙水压力时程曲线  
Fig. 5 Time-history curves of pore water pressure

从图 5 看出: ①试坑刚填埋完时各深度处超静孔压达到最大值, 沿深度大致呈线形增加, 数值与该深度处的上覆有效自重应力基本一致。②孔压在前 2 h 内消散速度很快, 75 cm 深处孔压消散最快, 固结度

表 1 原状土样与试坑土样物理力学性质指标表

Table 1 Mechanical properties of testing pit soils and undisturbed soils

试 样	深度/m	w/ %	$\rho/$ (g·cm <sup>-3</sup> )	<i>e</i>	<i>S<sub>r</sub></i>	<i>I<sub>p</sub></i>	<i>I<sub>L</sub></i>	$\alpha_{1-2}/$ MPa <sup>-1</sup>	<i>E<sub>s1-2</sub>/</i> MPa	<i>p<sub>cq</sub>/</i> kPa	OCR
原 状 样	0.0~0.3	24.8	1.94	0.737	90	7.7	0.59	0.147	11.88	163.2	115.7
	0.3~0.6	25.3	1.96	0.732	93	8.0	0.33	0.236	7.62	135.4	31.8
	0.6~1.0	26.8	1.95	0.762	96	7.7	0.26	0.171	10.29	175.8	23.1
试 坑 样	0.0~0.3	26.4	1.92	0.784	92	8.0	0.91	0.206	8.68	75.8	54.9
	0.3~0.6	28.0	1.91	0.806	94	7.5	0.88	0.251	7.19	51.9	12.6
	0.6~1.0	29.1	1.92	0.793	98	7.8	0.59	0.218	8.24	65.5	8.9

达到 0.74; 30 cm 处次之, 固结度达到 0.52; 50 cm 处消散最慢, 固结度达到 0.39; 说明该试坑土体固结为双面排水。③之后土体孔压消散速度变慢, 大约经过 51 h 后 (13 日 15 时) 试坑土体中超静孔压已基本消散完毕, 土体处于正常固结状态。④自重固结引起的超静孔压消散完毕之后, 试坑土体遭受了潮波作用, 涨退潮大部分阶段试坑土体中出现了负值超静孔压, 在退潮末期出现了正值超静孔压。

## 5.2 静力触探与十字板剪切试验数据

根据 4 月 13 日、4 月 15 日及 16 个月后测试的试坑土体、4 月 15 日、16 个月后潮滩原状土体的静力触探和十字板试验数据, 绘制了比贯入阻力  $P_s$ 、不排水抗剪强度  $C_u$ 、灵敏度  $S_t$  的变化曲线图 (图 6~8), 其中不排水抗剪强度、灵敏度由十字板试验得到。

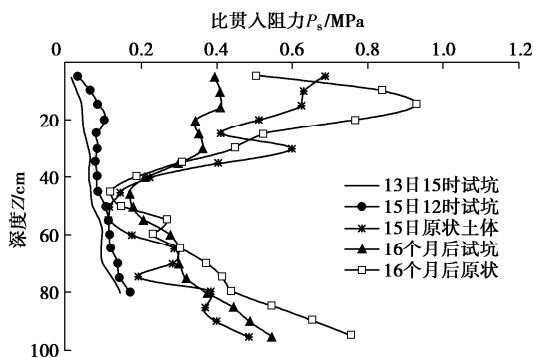


图 6 试坑及原状土体比贯入阻力  $P_s$  沿深度变化曲线

Fig. 6 Curves of  $P_s$  between testing pit soils and undisturbed soils along depth

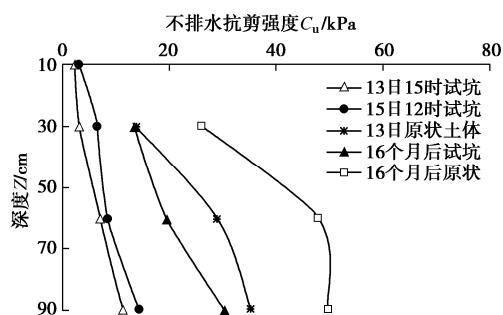


图 7 试坑及原状土体不排水抗剪强度沿深度变化曲线

Fig. 7 Curves of  $C_u$  between testing pit soils and undisturbed soils along depth

从图 6 可看出: 在 4 月 13 日试坑土体正常固结后, 受固结压力随深度增加的影响, 比贯入阻力沿深度大致呈线性增加; 4 月 15 日受潮波和波浪动力作用影响, 比贯入阻力呈非均匀增加, 沿深度开始呈现非线性变化, 在 20 cm 出现峰值。4 月 15 日潮滩原状土体比贯入阻力是试坑土体 15 日试验值的 1.1~9.4 倍, 原状土体沿深度方向呈现出高-低-次高非均匀变化, 在 0~30 cm 比贯入阻力为高值区, 在 30~70 cm 为低值区, 在 70~100 cm 为次高值区。16 个月后, 潮滩

原状土体在表层 0~30 cm 深度处强度有了较大的提高, 在 30~60 cm 深度处变化不大, 在 60 cm 以下强度又有所增强, 非均匀性程度进一步提高。16 个月后, 试坑土体的强度也有了极大的提高, 呈现出与潮滩原状土体趋势相同的不均匀固结现象, 但表层 40 cm 以上仍小于 4 月 15 日原状土体强度。

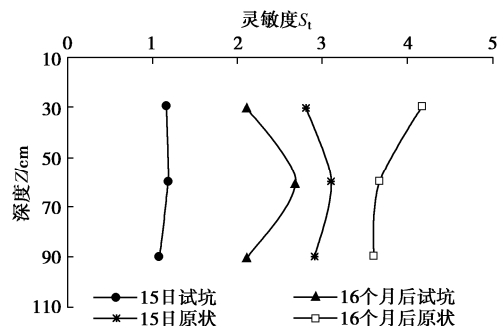


图 8 试坑及原状土体灵敏度变化曲线

Fig. 8 Curve of  $S_t$  between testing pit soils and undisturbed soils along depth

从图 7 可看出, 试坑土体不同深度处的不排水抗剪强度随时间变化曲线同样可以看出以上类似规律。4 月 15 日潮滩原状土体不排水抗剪强度远远大于 15 日试坑土体不排水抗剪强度。历经 16 个月后, 试坑与原状土体不排水抗剪强度有了极大提高, 16 个月后试坑土体不排水抗剪强度在 30 cm 附近已接近 4 月 15 日潮滩原状土体, 30 cm 以下仍小于 4 月 15 日潮滩原状土体强度。从图 8 可看出, 原状和试坑土体的灵敏度沿深度方向也呈现非均匀变化, 随时间推移, 灵敏度在不断提高, 非均匀程度存在不断变大的趋势, 16 个月后试坑土体灵敏度仍小于 4 月 15 日原状土体。

## 6 黄河口表层沉积物固结状态

### 6.1 十字板不排水抗剪强度法

#### (1) 超固结比和先期超固结压力估算

对于正常固结土的  $(C_u/\sigma'_v)_{NC}$  不用公式 (1) 所表示的经验公式, 因为经验公式一般具有针对性和区域性特点, 本文直接利用 4 月 13 日试坑土体正常固结后的  $C_u/\sigma'_v$  来代替, 结果更能反映实际情况。运用公式 (2) 和十字板剪切试验测定的不排水抗剪强度值, 可直接估算出黄河口试坑土体和原状土体的超固结比 (OCR) 和先期固结压力 ( $p_c$ ), 结果见表 2。

从表 2 可知, 试坑土体在 4 月 13 日在自重固结完成后, 15 日处于轻微超固结状态; 4 月 15 日原状土体的先期固结压力介于 16.89~34.58 kPa, 先期固结压力是试坑土体的 2.5~4.6 倍。历经 16 个月后, 试坑土体先期固结压力提高 2.5~2.9 倍左右, 原状土体先期固结压力提高了约 1.5~2.2 倍, 说明原状土体和试坑土体都遭受了波浪和潮波作用下的动力固结过程。16 个月后

表 2 用十字板不排水抗剪强度法估算试坑和原状土体先期固结压力和超固结比

深度/ cm	试坑土体				原状土体			
	4 月 15 日		16 个月后		4 月 15 日		16 个月后	
	$p_c/\text{kPa}$	OCR	$p_c/\text{kPa}$	OCR	$p_c/\text{kPa}$	OCR	$p_c/\text{kPa}$	OCR
30	6.76	2.39	16.52	5.92	16.89	6.05	37.14	13.31
60	6.90	1.24	19.78	3.54	32.24	5.78	60.59	10.86
90	11.29	1.35	28.65	3.42	34.58	4.13	53.15	6.35

表 3 用十字板不排水抗剪强度法估算重塑试坑和原状土体固结压力和超固结比

深度/ cm	试坑土体				原状土体			
	4 月 15 日		16 个月后		4 月 15 日		16 个月后	
	$p_{cr}/\text{kPa}$	OCR	$p_{cr}/\text{kPa}$	OCR	$p_{cr}/\text{kPa}$	OCR	$p_{cr}/\text{kPa}$	OCR
30	5.54	1.98	6.53	2.34	4.66	1.67	6.21	2.22
60	5.61	1.00	5.77	1.03	7.85	1.46	11.93	2.14
90	10.26	1.22	11.33	1.35	9.14	1.09	10.72	1.28

表 4 用十字板不排水抗剪强度法估算试坑和原状土体结构强度

深度/ cm	试坑土体				原状土体			
	4 月 15 日		16 个月后		4 月 15 日		16 个月后	
	$p_s/\text{kPa}$	$p_c/p_{cr}$	$p_s/\text{kPa}$	$p_c/p_{cr}$	$p_s/\text{kPa}$	$p_c/p_{cr}$	$p_s/\text{kPa}$	$p_c/p_{cr}$
30	1.22	1.22	9.99	2.53	12.23	3.62	30.93	5.98
60	1.29	1.23	14.01	3.42	24.42	4.11	48.66	5.08
90	1.03	1.10	17.32	2.53	25.44	3.78	42.43	4.96

的试坑土体先期固结压力均小于原状土体先期固结压力,说明原状土体比试坑土体遭受了更强烈和更长时间的动力固结过程。

(2) 重塑土体超固结比和先期超固结压力

根据试坑和原状土体重塑后的十字板不排水抗剪强度数据,估算出试坑和原状土体重塑后的超固结比(OCR)和固结压力( $p_{cr}$ ),结果见表3。

从表3可知,重塑后试坑土体和原状土体均处于轻微超固结状态,两者在超固结比(OCR)和固结压力( $p_{cr}$ )数值上已差别不大。从表2,3对比来看,重塑后可以消除大部分结构强度,但依然没有完全消除波浪和潮波等动力作用对土体产生的压密效果。

(3) 结构强度估算

表2中的先期固结压力减去表3中重塑土体的固结压力对应的数值,即可得到试坑和原状土体不同时期结构强度。同时据龚晓南等<sup>[22]</sup>定义的土体结构性强弱因子,即 $p_c/p_{cr}$ 值,计算结果见表4。由表4可看出,试坑和原状土体的结构强度随时间增长不断增加,在历经16个月后,试坑土体的结构强度提高了8~17倍之多,原状土体结构强度提高了1.7~2.5倍,原状土体结构强度比试坑土体大2.5~3.5倍,说明结构强度的增长与时间长短有关,土体经历的固结时间越长,结构强度越大,结构性越强。

6.2 静力触探比贯入阻力法

根据前述讨论,运用式(5)采用静力触探比贯入阻力可以估算土体先期固结压力。式(5)中 $\lambda$ 采用4月13日试坑土体比贯入阻力随深度变化曲线的斜

率。因为试坑土体在4月13日超静孔压已消散完毕,处于正常固结状态,比贯入阻力随深度呈线性变化(图6)。通过线性拟合,得到 $\lambda=0.1649$ , $R^2=0.9242$ 。运用上述方法估算了试坑和原状土体的超固结比(OCR)和先期固结压力( $p_c$ ),结果见表5。

从表5中可知,4月15日以来的试坑与原状土体都处于超固结状态。试坑土体在4月15日处于轻微超固结状态;4月15日原状土体的先期固结压力介于6.87~35.55 kPa,是该期试坑土体的1.1~9.4倍。历经16个月后,试坑土体先期固结压力提高1.6~6.0倍左右,原状土体先期固结压力除个别点外大致提高了1.1~1.5倍。原状土体及16个月后试坑土体先期固结压力沿深度方向呈现先减小后增大的变化,40~60 cm附近先期固结压力最小,下部次之,在表层30 cm范围内先期固结压力最大。

7 讨 论

(1)从十字板剪切试验来看,黄河口潮滩粉土具有一定的结构性,在外力作用下(尤其振动荷载)容易发生触变和液化现象,在取样和运输过程中不可避免地受到扰动。随土样受扰动增加,压缩曲线将变得圆滑,偏离了原始压缩曲线,采用传统的Casagrande作图法求取先期固结压力时,在寻找曲线拐点上下工夫<sup>[3-5]</sup>意义并不大,甚至有可能出现误导。

(2)4月15日原状土体的比贯入阻力介于0.12~0.69 MPa,与软土相当,按照冶金部勘测院针对黄河三角洲冲积层拟合的孔隙比与比贯入阻力经验关系<sup>[23]</sup>,经

表 5 用静力触探比贯入阻力法估算试坑和原状土体固结状态  
Table 5 Estimated consolidation states of testing pit soils and undisturbed soils with  $P_s$  by SPT

深度/ cm	试坑土体				原状土体			
	4月15日		16 个月后		4月15日		16 个月后	
	$p_c/\text{kPa}$	OCR	$p_c/\text{kPa}$	OCR	$p_c/\text{kPa}$	OCR	$p_c/\text{kPa}$	OCR
10	3.78	4.06	22.95	24.68	35.55	38.23	47.26	50.82
20	5.92	3.18	19.51	10.49	28.89	15.53	43.20	23.23
30	4.79	1.72	20.53	7.36	33.73	12.09	25.44	9.12
40	4.85	1.30	11.84	3.18	12.52	3.37	10.66	2.87
50	6.20	1.33	10.15	2.18	6.87	1.48	8.40	1.81
60	6.65	1.19	15.79	2.83	9.90	1.77	13.20	2.37
70	7.84	1.20	17.09	2.62	16.16	2.48	21.09	3.24
80	9.81	1.32	21.26	2.86	21.82	2.93	24.93	3.35
90			27.63	3.30	22.62	2.70	36.88	4.41

计算4月15日原状土体的孔隙比 ( $e$ ) 介于1.01~1.47, 而表1室内试验数据明显偏小, 特别是结合4月15日试坑土体的实际固结状态来看, 利用Casagrande作图法得到先期固结压力数值偏大, 采用原位测试方法估算的试坑和潮滩原状土体的先期固结压力数值更为可靠。

(3) 采用静力触探比贯入阻力法和十字板不排水抗剪强度法估算的先期固结压力在量值上大致吻合。由于试验方法特点, 静力触探试验可获得沿深度方向更加密集的测点, 能够详细反映潮滩土体固结不均匀现象。而十字板不排水抗剪强度法公式(2)中塑性体应变比 $n$ 的经验取值对估算结果也存在一定影响。

(4) 试坑和原状土体在历经 16 月后, 先期固结压力和结构强度不断提高, 特别是表层 30 cm 提高更大, 形成表面硬壳层及固结不均匀现象。这种现象形成与土体中胶结作用、长期的潮波和波浪动力作用<sup>[12-14]</sup>以及水动力作用引起的颗粒定向优化作用有关<sup>[24]</sup>。

8 结 论

在黄河刁口流路三角洲叶瓣潮坪上, 现场取土在试坑内配置黄河口快速沉积形成的流体状堆积物, 利用室内试验和原位测试试验手段(静力触探、十字板剪切试验和孔隙水压力测试), 在长期观测的基础上, 对比研究了试坑和潮滩原状土体1.0 m深度范围内固结过程及固结状态, 主要得到以下4点结论。

(1) 黄河口快速沉积粉质土在自重作用下固结速度很快; 固结完成以后, 土体强度随时间的发展呈现不均匀增长, 沿深度方向呈现高-低-次高不均匀固结特性; 历经16个月后, 固结非均匀现象进一步提高, 特别是上部30 cm左右增长幅度最大, 形成硬壳层。

(2) 从试坑土体实际固结状态及原状土体物理性质指标来看, 采用Casagrande作图法结果偏大, 通过静力触探比贯入阻力法、十字板剪切试验不排水抗剪强度法估算的黄河口潮滩试坑和原状土体的先期固结压力数值更为可靠。

(3) 黄河口刁口流路潮滩1.0 m内原状土体处于超固结状态, 历经16个月后, 试坑和潮滩原状土体先

期固结压力进一步提高, 结构性不断增强, 潮滩原状土体的先期固结压力大致介于8.4~60.6 kPa。

(4) 本次研究通过现场试验和原位测试手段估算土体的先期固结压力, 为土体固结状态确定提供了一条新途径。

参考文献:

[1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Geotechnical Principle and Calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996. (in Chinese))

[2] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils[J]. Géotechnique, 1979, 29(4): 469-480.

[3] 姜安龙, 赵春风, 高大钊. 确定先期固结压力的数学模型法[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 292-295. (JIANG Anlong, ZHAO Chunfeng, GAO Dazhao. Mathematical model method of determining preconsolidation pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 292-295. (in Chinese))

[4] 邹越强, 王建斌, 邵孟新. 推求先期固结压力的逐步逼近法[J]. 岩土力学, 1994, 16(3): 548-561. (ZOU Yueqiang, WANG Jianbing, SHAO Mengxin. Ascertaining preconsolidation pressure by iteration[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 16(3): 548-561. (in Chinese))

[5] 顾小芸. 海洋土先期固结压力的综合方法[C]//中国土木工程学会第五届全国土力学及基础工程学术会议论文集, 厦门, 1987. (GU Xiaoyun. Synthetically determinate methods of pre-consolidation pressure of marine soils[C]// Proceedings of The Fifth National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, China Civil Engineering Society, Xiamen, 1987. (in Chinese))

[6] YAMAMOTO T. Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations[J]. Ocean Engineering, 1981, 8(1): 1-16.

[7] JENG D S, LEE T L. Dynamic response of porous seabed to ocean waves[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(2):

- 99-128.
- [8] 冯秀丽, 沈渭铨, 杨荣民, 等. 现代黄河口区沉积环境与沉积物工程性质的关系[J]. 青岛海洋大学学报, 1994a: 20-28. (FENG Xiuli, SHEN Weiquan, YANG Rongmin, et al. Relation between the geotechnical character of seabed sediment and the sedimentary environment of the modern Huanghe estuary area[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1994a: 20-28. (in Chinese))
- [9] 张民生, 刘红军, 李晓东, 等. 波浪作用下黄河口粉土液化与“铁板砂”形成机制的模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3347-3351, 3356. (ZHANG Minsheng, LIU Hongjun, LI Xiaodong, et al. Study of liquefaction of silty soil and mechanism of development of hard layer under wave actions at Yellow River Estuary[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3347-3351, 3356. (in Chinese))
- [10] 冷浩, 胡瑞庚, 刘红军, 等. 波浪作用下黄河三角洲硬壳层液化渗流形成机制研究[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(6): 1779-1787. (LENG Hao, HU Ruigeng, LIU Hongjun, et al. Mechanism of liquefaction seepage of upper seabed layer in the Yellow River Delta under wave-current via numerical simulation[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **29**(6): 1779-1787. (in Chinese))
- [11] 苏思杨, 孔德琼, 吴雷晔, 等. 波浪作用下海床液化-重固结移动边界分析模型及离心模型试验验证[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(6): 1156-1165. (SU Siyang, KONG Deqiong, WU Leiye, et al. Development and validation of a modified moving boundary model to simulate liquefaction-solidification behaviors of seabed under wave loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(6): 1156-1165. (in Chinese))
- [12] 单红仙, 张建民, 贾永刚, 等. 黄河口快速沉积海床土固结过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(8): 1676-1682. (SHAN Hongxian, ZHANG Jianmin, JIA Yonggang, et al. Study on consolidation process of rapidly deposited seabed soils in Yellow River Estuary[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(8): 1676-1682. (in Chinese))
- [13] 杨秀娟, 贾永刚. 黄河口入海泥沙沉积固结过程长期现场观测研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 671-678. (YANG Xiujuan, JIA Yonggang. Long-term field observation of sediment consolidation process in Yellow River Delta, China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 671-678. (in Chinese))
- [14] 张建民, 单红仙, 贾永刚, 等. 波浪和潮波作用下黄河口快速沉积海床土非均匀固结试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(7): 1369-1375, 1380. (ZHANG Jianmin, SHAN Hongxian, JIA Yonggang, et al. An experimental study of nonuniform consolidation of rapid sediment seabed soils at Yellow River mouth subjected to wave and tide wave loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(7): 1369-1375, 1380. (in Chinese))
- [15] 冯秀丽, 周松望, 林霖, 等. 现代黄河三角洲粉土触变性研究及其应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, **34**(6): 1053-1056. (FENG Xiuli, ZHOU Songwang, LIN Lin, et al. The thixotropy of silt in Huanghe delta[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, **34**(6): 1053-1056. (in Chinese))
- [16] PRIOR D B, SUHAYDA J N, et al. Storm wave reactivation of submarine landslide[J]. Nature, 1989(341): 159-164.
- [17] FELLENIUS B H. Discussion on soil properties[C]// Proceedings of the 1st ICSMFE, Cambridge: Harvard University, MA, 1936.
- [18] SKEMPTON A W. The planning and design of the new Hong Kong airport[C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, 1957: 305-307.
- [19] LADD C C, FOOTT R, ISHIHARA K, et al. Stress deformation and strength characteristics[C]// Proceedings of the 9th ICSMFE, Tokyo, 1977: 421-494.
- [20] 简文彬, 吴振祥, 童文德, 等. 静力触探判别软土固结历史[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2166-2169. (JIAN Wenbin, WU Zhenxiang, TONG Wende, et al. Consolidation state of soft soil differentiated by static cone sounding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2166-2169. (in Chinese))
- [21] 臧启运. 黄河三角洲近岸泥砂[M]. 北京: 海洋出版社, 1996. (ZANG Qiyun. Alongshore Mud and Sand of Yellow River Delta[M]. Beijing: Ocean Press, 1996. (in Chinese))
- [22] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, **31**(10): 43-47. (GONG Xiaonan, XIONG Chuanxiang, XIANG Kexiang, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, **31**(10): 43-47. (in Chinese))
- [23] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997. (MENG Gaotou. Mechanism, Method and Engineering Application of Soil in-situ Testing[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese))
- [24] 王俊超. 黄河口潮坪沉积物对水动力作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. (WANG Junchao. Research of Sediment Response to the Hydrodynamic Action on the Tide Flat of Yellow River[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. (in Chinese))