

DOI: 10.11779/CJGE20230572

# 黄河三角洲潮滩表层沉积物在潮波和波浪作用下的孔压响应及固结机理现场试验研究

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:** 为了研究黄河三角洲潮滩表层粉质土在波浪和潮波作用下的孔压响应及对沉积物固结状态影响, 在黄河三角洲潮滩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, 利用静力触探试验、孔隙水压力测试手段, 对比研究了试坑扰动恢复土体和潮滩原状土体在波浪和潮波作用下的孔压响应, 并探讨了黄河三角洲潮滩表层粉质土非均匀固结机理。研究发现: 在潮波作用下, 潮滩和试坑土体产生了不同的孔压响应, 在涨退潮过程中试坑土体超静孔隙水压力经历了负-零-正的变化, 相当于经历了一次加卸荷过程, 而潮滩土体仅产生了负值超静孔隙水压力。在潮波与波浪相互耦合作用下, 潮滩浅部土体产生了明显的孔隙水压力积累, 在深度 0.3 m 附近出现超静孔隙水压力最大值。潮滩表层土体强度沿深度从上到下呈现高-低-次高不均匀固结现象, 产生这一现象的机理与潮滩土体在潮波、波浪和潮波相互耦合作用下孔压响应特点有关, 特别是潮滩 0.3 m 深度附近土体受波浪影响显著, 长期作用下形成硬壳层。

**关键词:** 黄河三角洲; 粉质土; 波浪; 潮波; 孔压响应; 固结

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2111-08

**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。

## In-situ tests on pore-water pressure response and consolidation mechanism of surface sediments in tidal flat of Yellow River Delta under tide and wave loading

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, Ji'nan 250014, China; 2. Shandong Institute of Earthquake Engineering, Ji'nan 250021, China;

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

**Abstracts:** In order to study the pore pressure response and consolidation mechanism of the surface sediments in the tidal flat of the Yellow River Delta under the action of wave and tide loading, the fluid sediments imitating the rapidly deposited seabed silty soils are made in situ, and they are promptly filled into a one-meter deep pit excavated at the tidal flat. By using the static cone penetration tests and the pore water piezometer tests, a comparative study is conducted about the pore-water pressure responses of pit soils and the tidal flat soils under the action of tide and wave loading, meanwhile the non-uniform consolidation mechanism of the tidal flat soils is discussed. It is shown that the pore-water pressure responses between the the tidal flat soils and the pit soils are different under the tide loading, in the process of rising and falling tide, the excess pore-water pressure of the pit soils undergoes negative-zero-positive changes, and it is equivalent to a process of loading and unloading, however, the tidal flat soils only produce negative excess pore-water pressure. Under the coupling action of tide and wave loading, the accumulation of pore water pressure is obvious in the surface soils of tidal flat, and the maximum excess pore water pressure is generated near a depth of 0.3 m. The strength of the tidal flat soils in the Yellow River Delta presents the phenomenon of high-low-subhigh non-uniform consolidation along the depth, and the mechanism of this phenomenon is related to the characteristics of pore pressure responses of tidal flat soils under the tide loading and coupling action of tide and wave loading, especially near the surface of 0.3 m of soils, which is significantly affected by long-term wave loading and a hard shell layer is formed.

**Key words:** Yellow River Delta; silty soil; wave; tide; pore-water pressure response; consolidation

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40172088, 40472137)

收稿日期: 2023-06-21

## 0 引言

随着黄河三角洲经济建设的高速发展, 沿岸和近岸工程日益增多, 越来越多的遇到地基稳定性问题。三角洲潮滩沉积物在波浪和潮波的共同作用下不仅会造成潮滩土体发生砂土液化, 引起防波堤滑移、海底管线上浮、海底滑坡等地质灾害现象的发生<sup>[1]</sup>, 而且还会造成潮滩土体固结状态的变化<sup>[2]</sup>。

在以往研究中, 关于波浪与海床之间相互作用问题, 研究者大多基于 Biot 多孔弹性介质固结理论开展了大量研究<sup>[3-5]</sup>。同时近三十年来, 在数值模拟方面发展迅速, Thomas<sup>[6]</sup>、Gatmir<sup>[7]</sup>及 Jeng 等<sup>[8]</sup>利用简化有限元法、解析-数值混合方法研究了海床动力反应。为了验证理论的正确性和数学建模的需要, 诸多研究者在造波池、离心机中进行了一些比例模型试验<sup>[9-11]</sup>, Sumer 等<sup>[9]</sup>通过水槽试验研究了在波浪荷载长期作用下, 海床土体超静孔隙水压力的累积、消散和海床土体液化和固结过程; 苏思杨等<sup>[10]</sup>通过离心模型试验验证了波浪作用下海床地基硬壳层的形成机制。关于黄河口粉质土在波浪作用下的动力响应和固结研究方面, 刘红军等<sup>[12]</sup>采用数值模拟方法对黄河口粉质海床在波浪荷载作用下的动力响应进行了分析; 张民生等<sup>[13]</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; 单红仙等<sup>[14]</sup>、杨秀娟等<sup>[2]</sup>在黄河三角洲潮滩开展的现场模拟试验探讨了黄河口快速沉积粉质土固结过程及固结非均匀化现象。

综观以上研究方法, 在适用上都具有一定的假设和限定。黄河三角洲潮滩沉积物不断遭受波浪和潮波强烈侵蚀和改造, 波浪和潮波相互耦合在一起, 用以上解析解答及数值方法来解决潮滩动力响应, 都面临着极大困难。同时, 以上所有研究都没有考虑潮波对海床沉积物的影响。本文通过野外观测试验, 分别研究了潮波作用下、波浪和潮波共同作用下对潮滩表层沉积物的动力响应, 以及对沉积物固结状态的影响。

## 1 研究区概况及表层土特征

### 1.1 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潮滩上(图1), 自1976年黄河改道以来, 该叶瓣潮滩失去泥沙来源, 表层沉积物一直遭受波浪和潮流的强烈侵蚀。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120~150 cm/s。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>[15]</sup>。

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。

### 1.2 研究区表层土特征

研究区 1.0 m 深度内的土体为粉土, 砂含量为0.4%~5.2%, 粉粒含量为84.5%~92.3%, 黏粒含量为6.2%~15.1%。基本物理力学指标: 含水率为24.8%~26.8%, 密度为1.94~1.96 g/cm<sup>3</sup>, 孔隙比为0.73~0.76, 塑性指数为7.7~8.7, 液性指数为0.34~0.71, 黏聚力 $c_{cq}$ 为10~25 kPa, 内摩擦角 $\varphi_{cq}$ 为49.3~52.2, 压缩模量为7.62~11.88 MPa, 为中低压缩性土。

## 2 现场开展的试验内容

### 2.1 试验现场布置

为了研究黄河三角洲潮滩表层粉质土在波浪和潮波作用下的孔压响应及固结状态, 在现场做了一组扰动土与原状土孔隙水压力、静力触探对比试验, 研究区位置及试验现场布置见图1。首先在潮滩上开挖了一个长宽深为2 m×1 m×1 m 试验坑, 将挖出的土制作成流态泥浆, 随后回填到开挖的试验坑中, 并且在图1 K2 点不同深度放置孔隙水压力计, 在试验期内(4月11日—15日)实时测定孔隙水压力的变化, 并在试验坑内每天测定静力触探试验值, 试验结束后在试验坑 S2 点取1 m 扰动恢复土样。同时在平行潮水方向距离试验坑5 m 的 K3 点原状土中不同深度布置孔隙水压力计, 与试验坑 K2 孔隙水压力计同步测定孔压在波浪和潮波作用下的变化情况, 在 K3 点附近还做了原状土的静力触探, 并在 S1 点取1 m 原状土样。

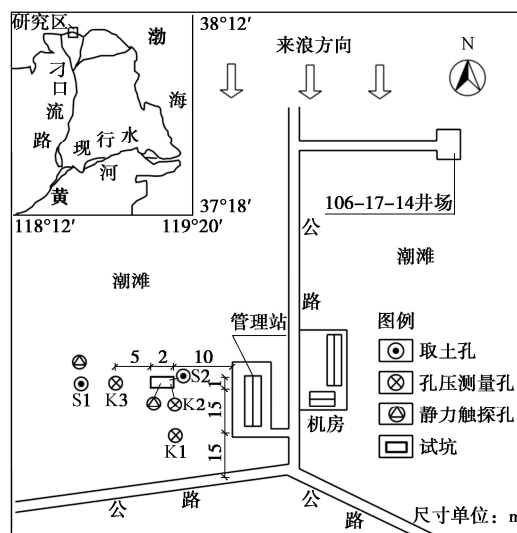


图1 研究区位置及试验现场布置图

Fig. 1 Location and arrangement of research area

静力触探测试采用南光地质仪器厂生产的CLD-3

型静力触探仪, 数据采集系统是 DN-1 型数字显示仪, 探头为单桥探头, 贯入速率控制在 1~2 cm/s, 每隔 5 cm 读取一个数值。

在最初野外实测试验时(4 月 5 日—9 日), 在 K1 点潮滩原状土中不同的深度布置孔隙水压力计。

该对比试验的目的是了解不同固结状态的土体在波浪和潮波作用下不同的孔压响应, 尤其是在试验坑用自制扰动土样模拟黄河口快速沉积物在波浪及潮波作用下土体强度增长及固结状态随时间变化情况, 以期揭露黄河三角洲潮滩及浅水水下岸坡表层超固结沉积硬层的形成机理。

2.2 孔隙水压力计的布置

试验中使用的孔压测量设备是由南京水利科学研究院设计制造, 采用进口压阻式压力传感器, 尺寸  $\phi 20\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ , 外壳为不锈钢材料, 量程 35~120 kPa, 精度 0.1%~0.5%。

孔隙水压力计在埋入土中之前, 提前 24 h 在水中浸泡, 并不时摇动排除气体使之达到饱和。采用洛阳铲成孔, 孔径 70 mm。孔隙水压力计周围填充干净中粗砂, 中间采用膨胀干黏土球封孔。K1、K2、K3 各点的孔隙水压力计埋深除个别位置略有差异外, 大致按埋深 0.0, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0 m 来布设, K2 点 1.0 m 处恐因受底部边界效应影响, 未布设孔隙水压力计, 各点的孔隙水压力计沿深度的埋置见图 2。

3 室内土工试验

对取自 S1 点的潮滩原状土样和试验结束后取自 S2 点的试坑扰动恢复土样进行了室内土工试验测试, 其物理力学指标见表 1。从表 1 可知潮滩土样与试坑土样两者的物理力学性质差别很大, 从试坑土体的 K2 点的孔压观测来看, 由于充分扰动由土体自重产生的超静孔隙水压力从 4 月 11 日 18 时至 13 日 15 时已消散完毕, 该土处于正常固结状态; 而原状土体则处于超固结状态, 先期固结压力远远超过其自重, 不排水抗剪强度是试坑扰动后恢复土样的 2.1~2.7 倍, 孔隙比也小于试坑土样。

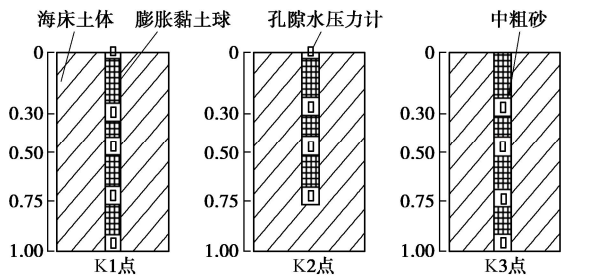


图 2 孔隙水压力计沿深度的埋置图  
Fig. 2 Arrangement of pore-water piezometers in soils

4 原位测试结果及分析

4.1 试坑土体超静孔压消散规律

根据试坑 K2 点孔隙水压力计测定的数值, 绘制出不同深度处孔隙水压力随时间的变化曲线图(图 3)。图中的超静孔隙水压力值是试坑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。在涨退潮阶段, 上述差值再减去海床表面孔压探头记录的潮波水压力。

从图 3 中看出: 试坑刚填埋完时各深度处超静孔压达到最大值, 30 cm 达到 3.54 kPa, 50 cm 达到 4.52 kPa, 75 cm 达到 6.52 kPa, 与该深度处的上覆有效自重应力基本一致。根据前 4 h 内孔压变化数值来看, 75 cm 深处孔压消散最快, 30 cm 处次之, 50 cm 处消散最慢, 说明该试坑土体为双面排水固结。之后孔压消散速度变慢, 大约经过 51 h 后(11 日 12 时—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。自重固结完毕之后, 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。

4.2 静力触探试验数据

从 4 月 11 日至 15 日为了考察试坑扰动土体的强度随超静孔压消散和时间推移的增长规律, 每天在试坑内做一次静力触探试验, 同时在 K3 点附近在未扰动的潮滩做了静力触探试验。根据 4 月 13 日、4 月 15 日测试的试坑土体、4 月 15 日测试的潮滩原状土体的结果, 绘制了比贯入阻力  $P_s$  沿深度变化曲线图(图 4)。

表 1 潮滩原状土样与试坑扰动后恢复土样物理力学性质指标表

Table 1 Mechanical properties of testing pit and in-situ soils											
试样	深度/ m	w/ %	$\rho$	$e$	$S_r$	$I_p$	$K_v/$ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$E_{s1-2}/$ MPa	$C_u/$ kPa	$P_c/$ kPa	OCR
S1 原 状样	0.0~0.3	24.8	1.94	0.74	91	7.7	$2.32\times 10^{-6}$	11.88	20.5	180.9	30.4
	0.3~0.6	25.3	1.96	0.73	94	8.0	$2.12\times 10^{-6}$	7.62	31.8	143.8	12.1
	0.6~1.0	26.8	1.95	0.76	95	8.7	$9.78\times 10^{-7}$	10.29	50.5	171.5	8.79
S2 试 坑样	0.0~0.3	26.4	1.92	0.78	92	8.0	$4.86\times 10^{-6}$	8.68	9.5		
	0.3~0.6	28.0	1.92	0.81	94	8.5	$4.37\times 10^{-6}$	7.19	13.6		
	0.6~1.0	29.1	1.93	0.81	97	7.8	$4.25\times 10^{-6}$	8.24	18.7		



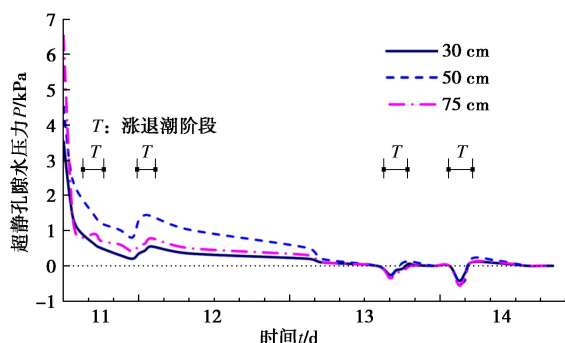
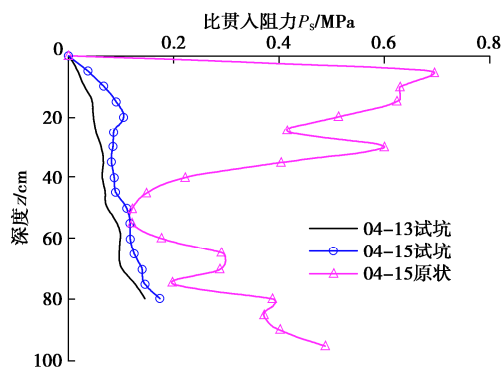


图3 不同深度处孔隙水压力时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of pore pressure at different depths

从图4可看出:试坑土体在4月13日,土体正常固结后,比贯入阻力沿深度大致呈线性增加;4月15日受潮波和波浪等影响,比贯入阻力呈非均匀增加,沿深度方向开始呈现非线性变化,在20 cm左右出现峰值。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先出高-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。从对比试验来看,4月15日试坑土体为正常固结或轻微超固结土,而潮滩原状土体沿深度呈现不均匀超固结状态。

图4 试坑及原状土体比贯入阻力  $P_s$  沿深度  $z$  变化曲线图Fig. 4 Curves of  $P_s$  between in-situ soils and testing pit soils

#### 4.3 潮滩原状土体与试坑扰动恢复土体在潮波作用下的孔压对比与分析

图5表示了4月14日在一个风浪不明显的涨-退潮的过程中,潮波作用下对于潮滩超固结原状土体(K3点)及试坑扰动恢复后正常固结土体(K2点)的孔隙水压力响应的对比结果。在图5(a), (b)中, A, B, C, D 曲线代表 K2 点处不同深度孔压计测量曲线, E, F 为 K3 点处不同深度孔压计测量曲线(注:该点位处 0.5, 1.0 m 深处的孔压计因故障而弃用)。

图5(a)为不同深处的孔隙水压力历时曲线,是由各孔压计的实测水头减去其埋置位置至海床表面这一段水头得到的,即将海床表面作为位置水头的起算位置,由于海床表面有潮波压力,故不能称之为超静孔隙水压力。从图中可看出在整个涨退潮过程中,试

坑土体各深度处孔压均大于潮滩原状土体的孔压。在涨潮阶段(0~2.25 h)不同深度处的孔压随潮波压力的增加而不断增加,但不如海床表面潮波压力增加的快,并且沿深度加大孔压衰减增加;与潮波压力相比,试坑土体在不同深度的衰减并不太大,但潮滩原状土体衰减却很大;相同深度处两者孔压差别也很大,在0.30 m深度处两者孔压相差达0.35倍潮波压力,在0.75 m深度两者孔压相差达0.67倍潮波压力。在退潮阶段(2.25~4.5 h),潮波压力(曲线A)达到峰值并开始下降后,不同深度处的孔压并不立即减小,而是各自经历一定的时间迟滞达到峰值后才开始下降;不同深度处原状与试坑土体的时间迟滞见图5(h),从该图可见原状土体时间迟滞大于试坑土体,原状土体随深度的增加迟滞时间不断增加,试坑土体随深度的增加时间迟滞也不断增加,但到0.50 m深处其值达到最大,而后随深度增加略有减小。在退潮过程中潮波压力下降速率最快,试坑土体次之,潮滩原状土体孔压下降最慢。在试坑土体0.30 m深度以上孔压消散最快,0.50 m深处孔压消散最慢,再往下孔压消散略有增加;原状土体在0.30 m深度附近孔压消散速率几乎和试坑扰动恢复土体0.50 m处持平,但其下部0.75 m处孔压消散最慢,下降幅度很小。

图5(a)中潮滩原状土体和试坑扰动恢复土体对于潮波不同的孔压响应,与两者土体物理力学性质差别有关。

(1) 渗透系数的影响,从表1可知扰动恢复土体  $K_v$  是原状土体的2~4倍,因为在潮波作用下荷载影响小,主要以垂向渗流作用为主,潮波在将其水体势能向土中传播过程中,渗流速率起了关键作用,这同时也可以说明时间迟滞差别的原因。

(2) 土的固结状态和刚度的影响,从表1可知潮滩原状土体处于超固结状态,孔隙比小,侧限压缩模量大即刚度大,因此在上部水体载荷的作用下土骨架的体积变形小,形成附加孔压也小,而试坑扰动恢复土体处于正常固结状态、刚度小,土骨架在动水力的作用下体积变形大,能够形成较大的附加孔压。至于两者的孔压衰减,是由于在向下渗流过程中,克服土体的黏滞阻力造成的水头损失引起的。

图5(b)是由图5(a)中各孔压曲线减去潮波压力(曲线A)得到的,它表示在涨退潮过程中超静孔隙水压力的变化情况。从图中可知潮滩原状土体超静孔隙水压力数值很大,且大部分时间为负值,随深度增加负值超静孔隙水压力的数值也不断增大,在高潮附近达到最大,随退潮发展负值孔压的数值逐渐减小;试坑扰动恢复土体也有类似的变化趋势,幅值要小的多,但在退潮后期出现正值超静孔隙水压力。

图 5(c) 表征了试坑扰动恢复土体不同时刻孔压沿深度分布。在涨潮阶段到退潮开始后一段时间, 孔压沿深度衰减, 为垂直向下的渗流, 土体骨架承受向下的动水力作用, 在退潮末期, 在中部 0.50 m 处出现最大孔压值, 土体内部的渗流场发生了变化, 在 0.50 m 以上为向上的渗流, 其下向下渗流。

图 5(d) 说明了潮滩原状土体不同时刻孔压沿深度分布。在涨退潮过程中, 潮波压力大于下部土体的孔压值, 土体中的孔压沿深度方向减小, 为垂直向下的渗流, 土体骨架承受向下的动水力作用, 随着时间的发展, 沿深度方向出现先增大后减小的趋势。

图 5(e) 表征了试坑扰动恢复土体不同时刻超静孔压沿深度分布。在涨潮阶段到退潮开始后一段时间, 表现为负值超静孔压, 其数值沿深度逐渐加大, 在高潮到达之前 (1.5 h) 达到最大, 此后逐渐减小, 到 (3.0 h) 几乎降到 0; 在此后的退潮阶段表现为正值超静孔压, 随着退潮的发展, 正值超静孔压不断增大, 在垂向上在 0.50 m 深处出现最大值。在整个涨退潮过程中, 垂向有效应力增量表现为正-零-负变化, 类似于一次长周期的动载荷加卸荷过程, 在不同深度上压缩曲线形成不闭合的滞回圈, 大致可用图 5(g) 近似说明。在退潮末期, 在试坑 0.50 m 深处, 出现正值超静孔压最大值, 渗流方向在该深度发生变化, 该处孔压不易消散, 强度的增长较慢, 因此可形成如图 4 所示的从上到下强-弱-强的变化规律。这一过程可以解释黄河三角洲表层快速沉积物在长期的潮波作用下固结非均匀性现象的原因。

图 5(f) 说明了潮滩原状土体不同时刻超静孔压沿深度分布。在涨退潮过程中, 超静孔压一直为负值超静孔压, 其数值沿深度增加而增大, 随着时间的发展, 沿深度方向出现先增大后减小的趋势。因此垂向有效应力表现为由正增量不断加大, 在高潮时接近最大值, 而后不断减小, 在退潮末期趋近于 0。所以该土体在涨退潮过程中, 土体处于加卸荷过程, 如图 5(g) 中的  $a-k-a$  曲线, 与试坑扰动恢复土体不同是, 有效应力一直大于初始有效应力。

在试验期间, 潮差很小, 所引起的有效应力增量也小, 潮滩原状土体对于这种潮差很小的潮波以弹性响应为主, 这一点可以从退潮末期土体中积累的超静孔压很小看出。而试坑扰动恢复土体在退潮末期土体中还积累着相当数量的超静孔压, 造成这一差别的原因主要是土体的固结状态、孔隙比、渗透系数等差别造成的, 因而在潮差很大的潮波作用下原状土体也会产生与扰动恢复土体相类似的响应, 使潮滩土体固结非均匀性进一步增强。

#### 4.4 潮滩原状土体在波浪与潮波共同作用下的孔压响应与分析

图 6 表示了 4 月 6 日在一个涨退潮的过程中叠加

不规则风浪作用下对于黄河口潮滩原状土 (K1 点) 孔隙水压力响应。孔压计的埋置见图 2 中 K1 点。该测点处位于高潮线附近, 为不规则浅水波。

图 6(a) 为不同深处的孔隙水压力历时曲线, 是由各孔压计的实测水头减去其埋置位置至海床表面这一段水头得到的, 即将海床表面作为水头起算位置。在涨潮阶段土体不同深度处的孔压随潮波压力增加而增加, 0.33, 0.50 m 深度在波浪作用下孔压不断积累, 出现所谓的累积孔压<sup>[12]</sup>或残余孔压<sup>[16]</sup>, 孔压曲线分别高于曲线 A。在退潮阶段潮波压力下降很快, 由于在波浪的作用下, 土中孔压一直不断积累, 下降较慢。从图 6(a) 还可看出, 在波浪作用下每个周期中产生的瞬态孔压, 与波浪相位相比, 没有发生相位迟滞现象, 但波动幅值沿深度方向发生了衰减, 这一孔压现象与刘红军等<sup>[12]</sup>采用数值模拟法、Yamamoto<sup>[3]</sup>采用解析法得到的孔压结果基本一致, 与 Bennett 等<sup>[17]</sup>在密西西比河三角洲粉质黏土中的野外试验观测结果也吻合, 但后者没有得到孔压积累现象。

图 6(b) 是由图 6(a) 中各孔压曲线减去潮波压力 (曲线 A) 得到的, 它表示潮波和波浪共同作用引起的土体超静孔隙水压力的变化情况。在涨退潮过程中, 在 0.33, 0.50 m 处, 波浪作用影响显著, 土体中的超静孔压为正值, 在 0~0.2 h 这一段时间孔压积累上升迅速, 之后随着潮波水位的上漲超静孔压有所下降, 到高潮期下降到最低值, 此后由于潮水逐渐消退, 水深变浅, 在波浪作用下孔压又不断积累, 超静孔压又不断上升。而在 0.75, 1.00 m 处, 波浪作用弱, 主要受潮波作用控制, 超静孔压历时曲线同图 6(b) 中曲线 E, F 类似, 在涨潮阶段为负值超静孔压, 其数值不断增加; 在退潮阶段负值超静孔压的数值不断减小, 并在退潮末期开始出现正值超静孔压。如果扣除潮波对于超静孔压的影响, 波浪作用引起的超静孔压应当是波动上升趋势, 沿深度发生衰减。

图 6(c) 表征了潮滩表层土体不同时刻孔隙水压力沿深度分布。在深度 0.33 m 孔压出现最大值, 其上为向上的渗流, 其下向下渗流。这一孔压模式与 Yamamoto<sup>[3]</sup>、Jeng 等<sup>[5, 8]</sup>按照弹性多孔介质理论、杨少丽等<sup>[18]</sup>采用非耦合的分析方法得到的孔压沿深度方向发生衰减情况不一致, 与栾茂田等<sup>[16]</sup>运用动静结合办法得到的孔压分布类似。

图 6(d) 表示了潮滩表层土体不同时刻超静孔隙水压力沿深度分布。从图中可知, 在 0.33 m 附近出现超静孔压最大值, 并向下衰减, 这一孔压特征与刘红军等<sup>[12]</sup>采用广义塑性模型和数值模拟法得到的累积孔压、栾茂田等<sup>[16]</sup>运用动静结合法得到的残余孔压、杨少丽等<sup>[18]</sup>采用非耦合分析方法得到的超静孔压分

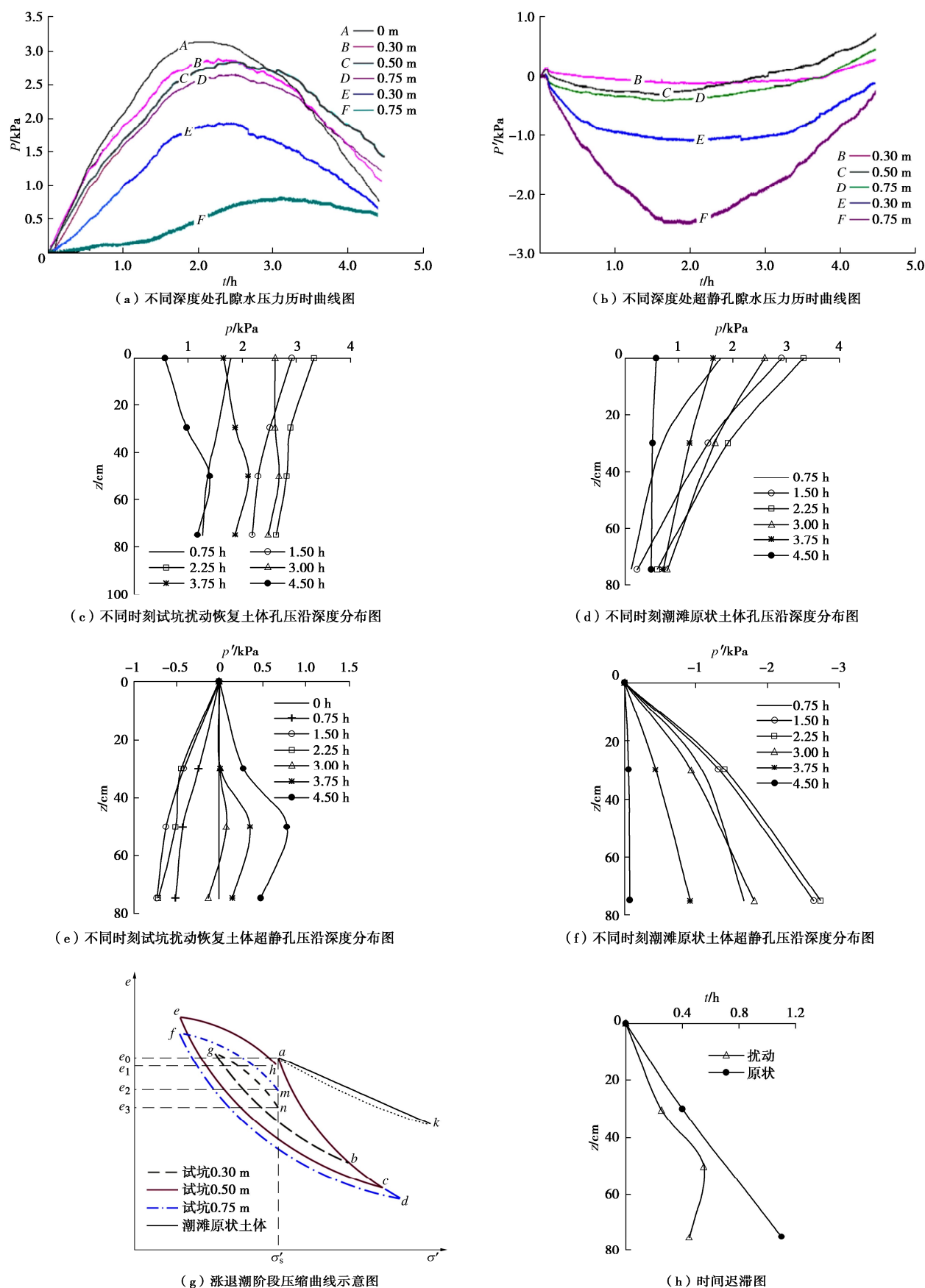


图 5 涨退潮阶段潮滩原状土体与试坑扰动恢复土体孔压对比

Fig. 5 Comparison of pore-water pressures between in-situ soils and testing pit soils at stages rising and falling tide

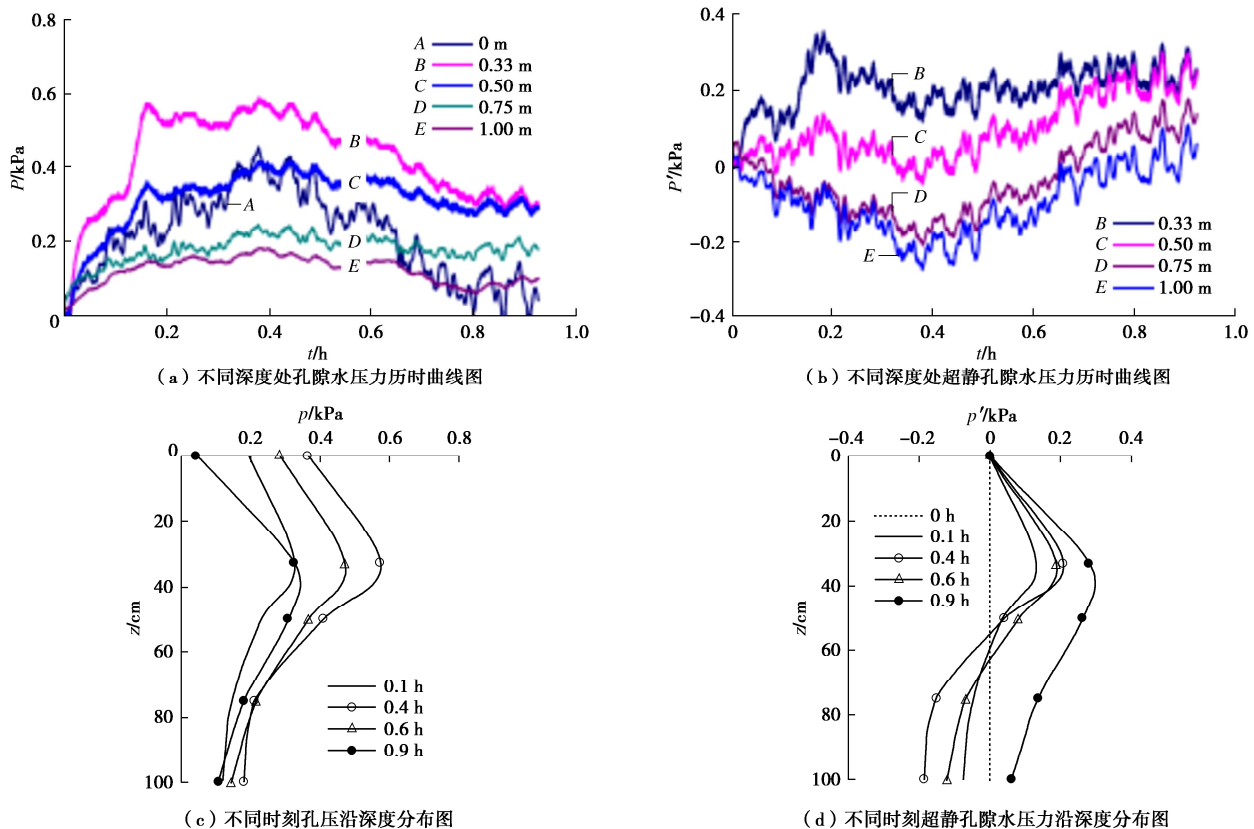


图 6 潮滩原状土体对于波浪与潮波共同作用下的孔压响应

Fig. 6 Responses of pore-water pressures of in-situ soils in tidal flat under wave and tide loading

布类似,所不同的是潮滩土体孔压分布还受潮波影响,在下部出现负值超静孔压。0.5 m 以上土体中为正的超静孔压,在 0.3 m 附近孔压出现最大值,孔隙水发生向上渗流,在渗流过程中,上部土体孔压消散,发生排水,强度提高,这可以解释潮滩表层土体在长期的波浪作用下,形成硬壳层的原因。0.5 m 以下土体中超静孔压先负后正,经历了类似于试坑扰动恢复土体在潮波作用下的加卸荷过程,在 0.5 m 处上下一定范围内加荷的幅值小,而卸荷的幅值大,该处的土体强度增长缓慢,形成一个相对弱区;在 0.75 m 向下加荷的幅值大,而卸荷的幅值小,该处的土体强度增长较快,形成一个次强区。因此在潮波及波浪作用下潮滩表层土体强度从上到下会形成图 4 中强-弱-次强的不均匀固结特征。在长期的波浪和潮波作用下,潮滩土体的固结不均匀性不断增强,表层 0.3 m 附近土体受波浪作用影响显著,在长期作用下形成硬壳层。

## 5 结 论

本文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,利用野外静力触探试验、孔隙水压力测试手段,对比研究了潮滩原状土体和试坑扰动土体 1.0 m 深度范围内,在潮波和波浪作用下孔隙水压力响应,并探

讨了对沉积物固结状态的影响,主要得出以下 5 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,自重引起的超静孔压在大约 51 h 已消散完毕,试坑土体处于正常固结状态。潮滩原状土体呈超固结状态,沿深度方向从上到下呈现高-低-次高不均固结特性。

(2) 在潮波作用下,试坑土体和潮滩原状土体孔隙水压力出现时间迟滞和沿深度衰减现象,这与土的刚度与渗透系数有关,没有发现孔隙水压力积累现象。

(3) 在潮波作用下,潮滩原状超固结土体和试坑扰动恢复正常固结土体产生了不同的孔压响应。试坑土体在涨退潮过程中超静孔隙水压力经历了负-零-正的变化,各深度处相当于经历了一次加卸荷过程;而潮差较小的潮波使潮滩土体产生弹性响应,仅出现负值超静孔隙水压力。

(4) 与遭受潮波作用不同,在潮波与波浪相互耦合作用下潮滩浅部原状土体产生了明显的孔隙水压力积累,在深度 0.3 m 附近出现超静孔隙水压力最大值,以正值超静孔隙水压力为主。潮滩下部土体受波浪作用减弱,受潮波作用影响,在涨潮阶段和退潮大部分阶段为负值超静孔隙水压力。

(5) 黄河三角洲潮滩表层土体呈现高-低-次高不均固结现象与潮滩土体在潮波、波浪和潮波相互耦合作用下孔压响应特点有关。在长期的波浪和潮波有

用下, 潮滩原状土体的固结不均匀性不断增强, 特别是表层 0.3 m 附近土体受波浪作用影响显著, 在长期作用下形成硬壳层。

### 参考文献:

- [1] 周良勇, 刘健, 刘锡清, 等. 现代黄河三角洲滨浅海区的灾害地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, **24**(3): 19-27. (ZHOU Liangyong, LIU Jian, LIU Xiqing, et al. Coastal and marine geo-hazards in the modern Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, **24**(3): 19-27. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] YAMAMOTO T. Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations[J]. Ocean Engineering, 1981, **8**(1): 1-16.
- [4] MEI C C, FODA M A. Wave-induced response in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface boundary layer theory[J]. Geophysic Journal of the Royal Astronomical Society, 1981, **66**: 597-631.
- [5] JENG D S. Porous Models for Wave-Seabed Interactions[M]. Heidelberg: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013.
- [6] THOMAS S D. A finite element model for the analysis of wave induced stresses, displacements and pore pressures in an unsaturated seabed[J]. Theory Computer and Geotechnics, 1989, **8**(1): 1-38.
- [7] GATMIRI B. A Simplified finite element analysis of wave-induced effective stress and pore pressure in permeable sea bed[J]. Géotechnique, 1990, **40**(1): 15-30.
- [8] JENG D S, LIN Y S. Finite element modelling for water waves-soil interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, **15**(5): 283-300.
- [9] SUMER B M, HATİPOĞLU F, FREDSOE J, et al. The sequence of sediment behavior during wave-induced liquefaction[J]. Sedimentology, 2006, **53**(3): 611-629.
- [10] 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))
- [11] LIU B, JENG D S, YE G L, et al. Laboratory study for pore pressures in sandy deposit under wave loading[J]. Ocean Engineering, 2015, **106**: 207-219.
- [12] 刘红军, 王虎, 张民生, 等. 波浪作用下黄河三角洲粉质土海床动力响应分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 2065-2071. (LIU Hongjun, WANG Hu, ZHANG Minsheng, et al. Analysis of wave-induced dynamic response of silty seabed in Yellow River delta[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 2065-2071. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 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))
- [15] 臧启运. 黄河三角洲近岸泥砂[M]. 北京: 海洋出版社, 1996: 26-85. (ZANG Qiyun. Alongshore Mud and Sand of Yellow River Delta[M]. Beijing: Ocean Press, 1996: 26-85. (in Chinese))
- [16] 栾茂田, 张晨明, 王栋, 等. 波浪作用下海床孔隙水压力发展过程与液化的数值分析[J]. 水利学报, 2004, **35**(2): 94-100. (LUAN Maotian, ZHANG Chenming, WANG Dong, et al. Numerical analysis of residual pore water pressure development and evaluation of liquefaction potential of seabed under wave loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, **35**(2): 94-100. (in Chinese))
- [17] BENNETT R H, FARIS J R. Ambient and dynamic pore pressures in fine-grained submarine sediments: Mississippi Delta[J]. Applied Ocean Research, 1979, **1**(3): 115-123.
- [18] 杨少丽, 沈谓詮, 杨作升. 波浪作用下海底粉砂液化的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(4): 28-37. (YANG Shaoli, SHEN Weiquan, YANG Zuoshen. The mechanism analysis of seafloor silt liquefaction under wave loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(4): 28-37. (in Chinese))