

水动力作用对黄河口沉积物强度影响的现场试验研究

杨秀娟^{1, 3}, 贾永刚^{1, 2*}, 单红仙^{1, 2}, 吴琼², 刘辉²

(1. 教育部海洋环境与生态重点实验室(中国海洋大学), 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

3. 烟台大学文经学院建筑工程系, 山东 烟台 264005)

摘要: 通过现场原位观测试验, 研究波浪、潮流水动力作用对快速堆积的黄河口沉积物固结强度的影响。在黄河三角洲刁口叶瓣潮坪上, 开挖 2 m×1 m×1 m 的试坑, 现场取土配置流状堆积物, 以铁板部分覆盖试坑隔绝波浪和潮流作用, 利用微型贯入、静力触探、十字板剪切试验、孔隙水压力监测等原位测试手段, 实时测定快速沉积的海床土强度发展以及孔隙水压力消散情况, 研究快速沉积的粉质海床土分别在自重条件下以及在波浪和潮波等水动力作用下的固结过程。研究发现: 海床土固结速度很快, 自重作用下固结度 72 h 内达到 37%, 142 h 左右孔隙水压力消散完毕, 水动力作用下固结度 72 h 内达到 52%, 195 h 左右孔隙水压力消散完毕; 在沉积物固结过程中, 水动力作用在固结初始阶段具有决定性作用, 对沉积物强度的改变最大可为自重固结作用的 5 倍, 随深度延伸水动力作用逐渐降低; 随着固结过程的延续, 表层沉积物在水动力作用下强度增加的趋势逐渐减缓, 50 cm 以下深度沉积物在水动力作用下强度逐渐降低, 使得快速沉积粉质土强度逐渐沿深度出现非均匀变化, 并且逐渐形成硬壳层。研究结果对了解水动力在沉积物固结中的作用具有借鉴意义。对于不同水动力在沉积物固结中的作用尚需进一步的研究。

关键词: 黄河口; 海床土; 水动力作用; 固结过程

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)04-0630-08

作者简介: 杨秀娟(1981-), 女, 山东莱芜人, 博士, 主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: ylynyu@163.com。

Experimental study on impact of marine hydrodynamics on strength of seabed sediments in the Yellow River estuary

YANG Xiu-juan^{1, 3}, JIA Yong-gang^{1, 2}, SHAN Hong-xian^{1, 2}, WU Qiong², LIU Hui²

(1. Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Geo Environmental

Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Wenjing College Yantai University, Architecture Engineering

Department, Yantai 264005, China)

Abstract: Based on in-situ tests, the impact of marine hydrodynamics, such as waves and tides, on the consolidation process of rapidly deposited sediments is studied. On the tidal flat of Diaokou delta-lobe, a 2 m×1 m×1 m test pit filled with fluid sediments prepared by the in-situ silt is excavated. The test pit is divided into two parts, one of which is covered with a plate to eliminate the influence of the hydrodynamics. By some field test methods, static cone penetration tests, field vane shear tests and pore water piezometer tests, the variation of sediments strength and pore water pressure of the both parts are real-time measured to study the consolidation process of the prepared sediment under the gravity and marine hydrodynamics. It is shown that the self-consolidated sediments have a high consolidation rate which can reach 37% in 72 h and so does the pore water pressure which nearly disperses over in about 142 h, while under the hydrodynamics, the consolidation rate reaches 52% in 72 h and the pore water pressure disperses over in about 195 h. In the consolidation process, the waves and tides whose ability to raise the strength of the sea-bed soils is five times as much as that of self-consolidated play a decisive role at the initial stage, and with the extension of the depth, the role of the hydrodynamics is reduced. With the continuation of the consolidation process, the trend of the strength increase of the surface sediments gradually slows down under the water dynamics, while the sediments whose depth is below 50 cm is in an opposite way. As a result, the rapidly deposited silts show a non-uniform consolidation state, and the crust is gradually formed. The results provide a reference for studying the role of the hydrodynamics in the soil consolidation process. The impact of different hydrodynamics on the soil consolidation requires further studies.

Key words: Yellow River estuary; seabed soil; marine hydrodynamics; consolidation process

0 引言

黄河三角洲是世界上沉积最快的三角洲之一,

基金项目: 国家自然科学基金项目(40876042)

收稿日期: 2009-01-04

*通讯作者

80%的泥沙在河口附近快速堆积^[1]。过去的研究发现海床土体的强度变化主要由两个方面引起, 一是土体自重条件下的固结作用^[2], 二是波浪改造作用引起的强度变化^[3-4]。对于同一种性质的土体, 土体自重引起的强度随深度逐渐增加^[5], 波浪改造作用引起的强度随深度变化呈现非均匀变化^[6-8]。初步的研究认为, 波浪引起的土体强度随着土体的剪切模量、水深、波浪周期及其渗透系数的影响在深度上呈现明显的非均匀变化^[9-10], 水动力作用对已有海床沉积物微细结构的显著改造, 包括细粒物质的分布与存在形式、颗粒的均匀性、颗粒的形状及排列的定向性等^[13-15], 不论水动力作用强弱, 都对表层沉积物有明显的影响, 并且对沉积物成分的非均匀化影响可到达一定深度范围内, 随着深度增加, 深部土体所受影响逐渐减弱^[16]。

由于黄河口沉积物的特殊性和河口环境的复杂性, 目前仅对沉积物快速堆积固结过程进行了初步探讨, 波浪和潮波等水动力作用在黄河口沉积物固结过程中所起的作用的定量分析尚未开展工作。本文在黄河三角洲刁口叶瓣潮坪上, 开挖试坑, 现场取土配置黄河口快速沉积形成的流体状堆积物, 以铁板部分覆盖试坑隔绝波浪和潮流作用, 实时测定快速沉积的海床土强度, 研究快速沉积的粉质海床土分别在自重条件下以及在水动力作用下的固结过程。研究结果对了解水动力在沉积物固结中的作用具有借鉴意义。

1 研究区概况与表层土特征

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潮坪上, 位于胜利油田海港采油区桩 19 (N38°04'05.2", E118°56'48.9")附近(图 1)。该亚三角洲是由黄河 1953 年~1976 年行水刁口河、神仙河等流路入海形成的。自 1976 年黄河行水清水沟以来, 改道后废弃的河口三角洲由于失去泥沙来源而发生强烈的蚀退破坏, 表层沉积物一直遭受波浪和潮流的强烈侵蚀^[17]。黄河三角洲表面坡度极缓, 常小于 0.6°, 退潮时数公里的潮坪露出水面, 为潮坪上开展研究工作提供了条件^[18]。

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, 最大潮流流速大于 120 cm/s。波浪以风浪为主, 波浪的大小随风速的改变而变化, 强浪向为北东向, 次浪向为北北西, 常浪向为南向, 常见波浪波高小于 0.5 m, 最大波高 3.3 m, 极端海况下波高可达到 5.8 m^[19]。

1.2 研究区表层土特征

对研究区 1 m 深度范围原状土样分析, 土体为粉土, 砂粒含量在 0~9.6%之间, 粉粒含量在 85.6%~99.2%之间, 黏粒含量在 0.8%~4.8%之间; 基本物理力学指标为: 含水率为 22.6%~29.3%, 密度为 1.88~2.00 g/cm³, 孔隙比为 0.67~0.81, 塑性指数为 7.7~8.7, 液性指数为 0.34~0.71, 渗透系数为 3.50~4.84×10⁻³ cm²/s, 黏聚力为 10~25 kPa, 内摩擦角 ϕ 为 49.3°~52.2°, 压缩系数为 0.119~0.205 MPa⁻¹, 属于中压缩性土。

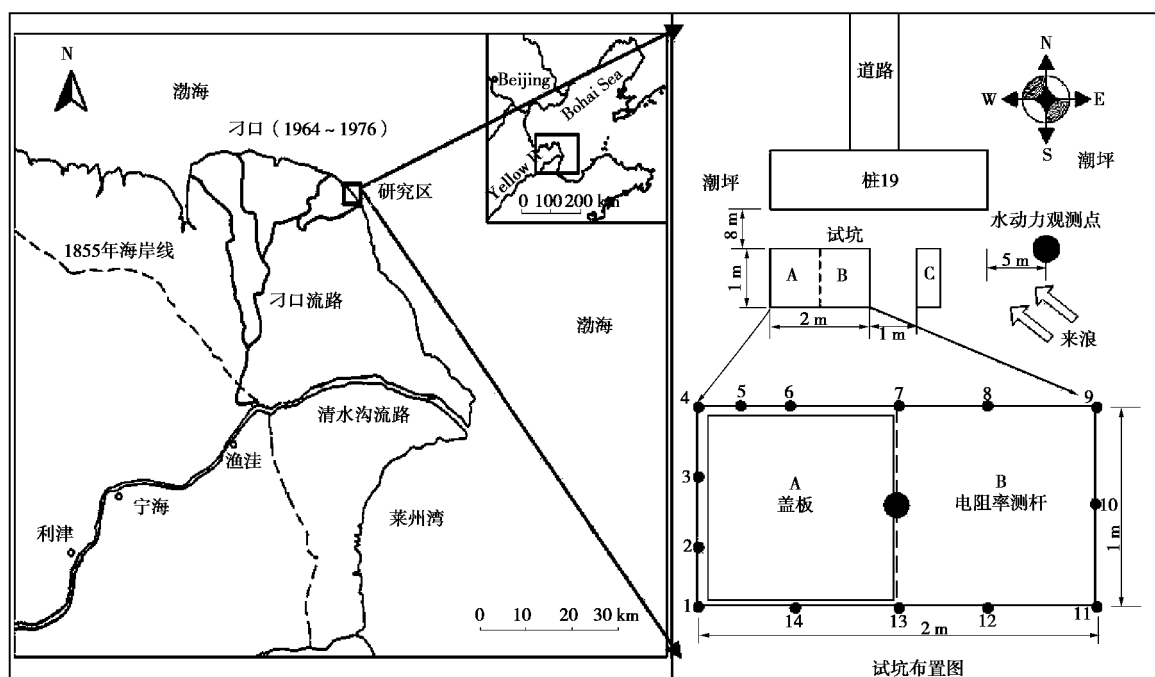


图 1 研究区位置及试验现场布置图

Fig. 1 Location and arrangement of research area

2 现场开展的研究工作

2.1 试验点的选取与布置

为对比黄河口流体状快速沉积物在波浪和潮波作用下以及自重固结条件下的不同固结过程，在潮滩上开挖一个 2 m×1 m×1 m 试验坑。为防止在试坑开挖过程中坑壁坍塌，在试坑四周打入 14 根直径约 3 cm 高为 190 cm 的木杆，上端出露 20 cm，并标记刻度，将其编号为 1~14 号桩（图 1）。将坑内挖出的土粉碎捻细，放置于容器中，在容器中加入水，充分浸泡并搅拌，使之呈现为均匀的流态泥浆，最后将泥浆快速回填到开挖的试验坑中，模拟黄河口沉积物的快速堆积固结过程（图 2）。在回填试坑的同时，分别在试坑的东西两侧中心位置 0 cm，30 cm 和 70 cm 深度放置孔压探头，并在试坑中部放置 1.5 m 长自制的电阻率探杆，以监测固结过程中沉积物的孔压和电阻率变化。回填完毕后，在试坑西侧放置 1 m×1 m×0.1 m 的铁皮盖，将西侧试坑覆盖。

海床粉质土的主要矿物为石英、长石、方解石和白云石。碎屑矿物的含量占 75.8%，可能存在钙质胶结。黏土矿物含量占 24.2%，部分黏土矿物为伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石。虽然蒙脱石的成分含量小，但伊利石的含量却达 13.67%，说明土体有一定的膨胀性和结构性。

2.2 水动力观测

在试坑东侧，距桩 19 东岸约 5 m 处架设门形架，将加拿大 RBR 公司生产的 TWR—2050 型浪潮仪和日本雅力克公司生产的流速计固定在门形架上（图 1），

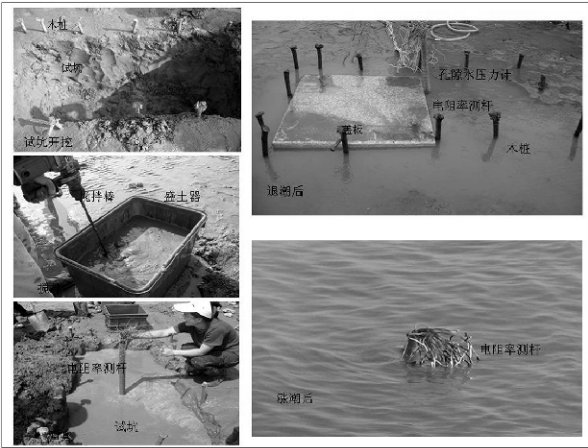


图 2 试坑制备过程图

Fig. 2 Preparation of test pit

试验阶段（7 月 13 日~7 月 30 日）连续采集波浪和流速数据。图 3 给出了试验阶段观测点的水文状况。可以看出，在试验阶段流速较低，最大流速为 34.8 cm/s，平均流速约为 18.7 cm/s。观测点水深在 0.6~1.0 m 左右，水温高于 24℃，1/3 波高最低为 2 cm，最高为 24 cm，平均在 4 cm 左右，波浪周期在 4~6 s 内。

2.3 现场观测工作及取样

由于盖板的存在将整个试坑分割为两个即西侧有盖板的呈自重固结状态的 A 区，以及东侧在水动力作用下固结的 B 区。每日退潮后，掀开盖板在 A、B 两区不同位置分别进行普贯，1 m 深度以内的静探测试，以及 10，30，50，70 cm 深度的十字板测试。同时在试坑东侧 1 m 处即 C 区海床土上进行微型贯入、静力触探和十字板剪切试验。

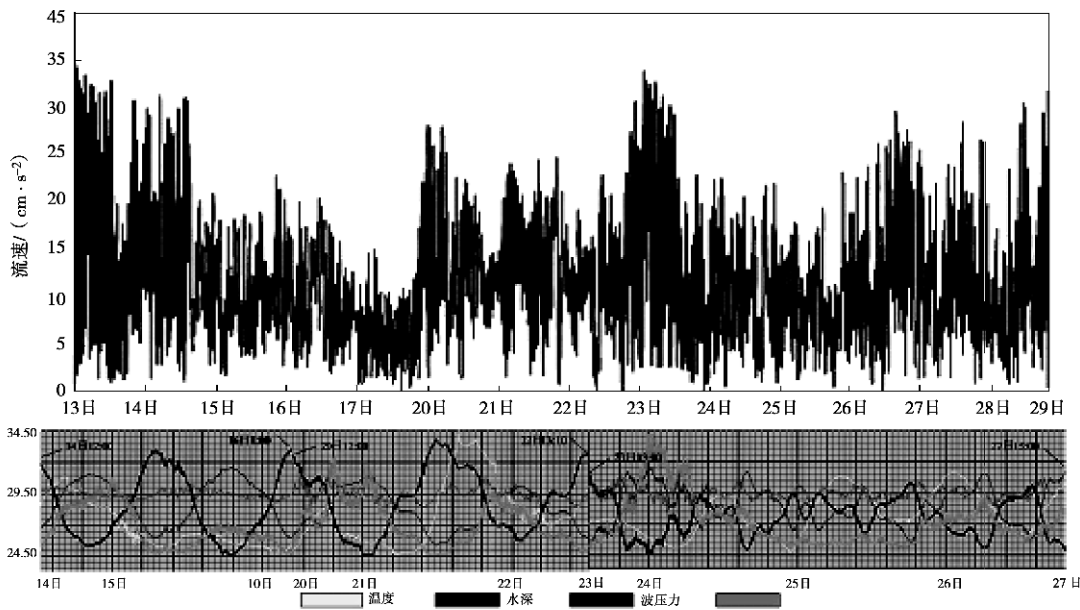


图 3 水文观测数据图

Fig. 3 Curves of marine hydrodynamics

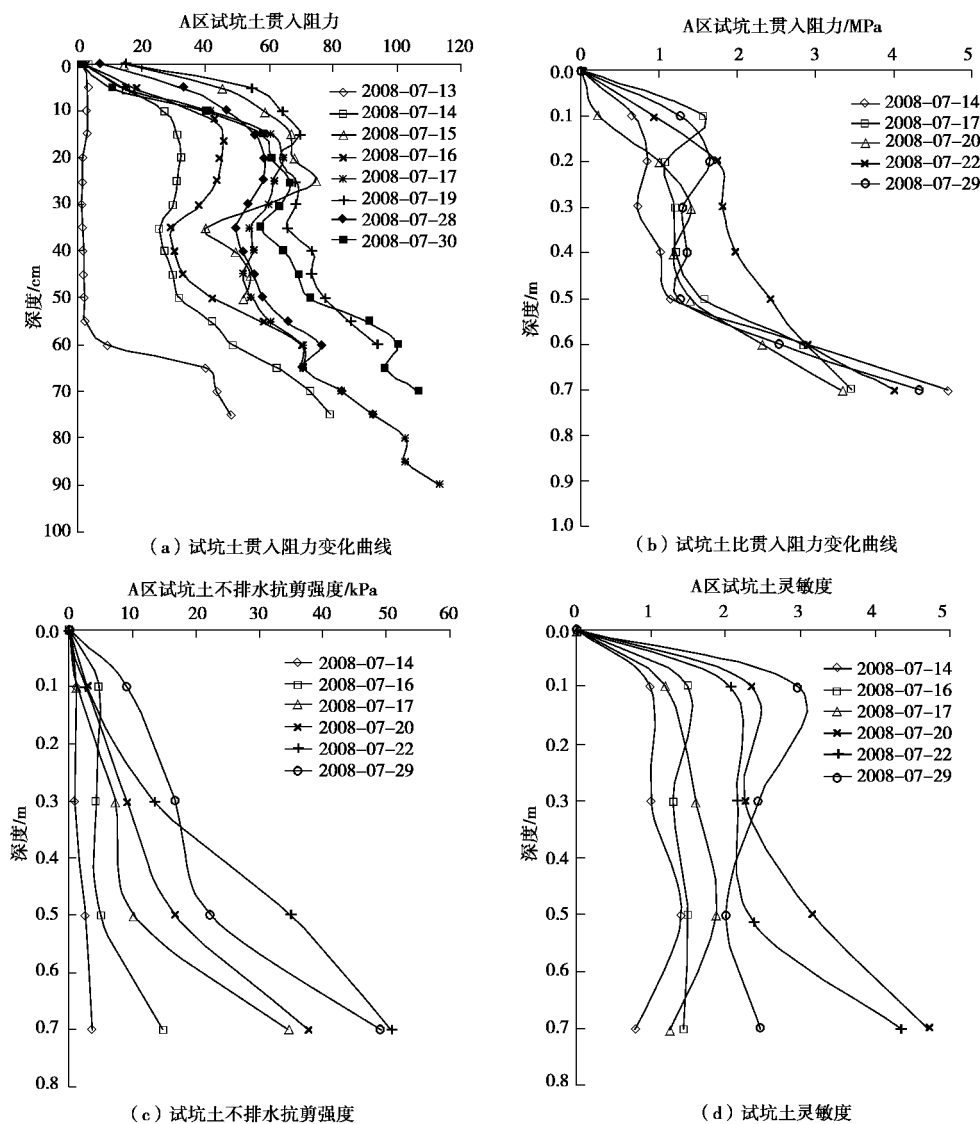


图4 A区试坑土强度指标变化图

Fig. 4 Strength curves of soils in pit A

试验所用的静探仪为南光地质仪器厂生产的CLD-3型静力触探-电测十字板两用仪, 十字板探头采用南光地质仪器厂生产的WKS50×100型, 数据记录采集系统是DN-1型多用数字显示器。利用沈阳建科仪器研究所生产的WG-V型电子普氏贯入仪进行现场测试。仪器的最大量程为1000 N, 灵敏度0.01 N, 最大贯入深度为150 cm。现场采用连续贯入方式, 以2 cm/s匀速贯入, 每贯入5 cm记读一个贯入阻力值。本试验直接利用贯入阻力值作为土体的强度对比指标, 不进行相关的土体强度指标数值换算。

3 试验结果

3.1 A区试坑土自重固结过程

根据试验阶段对A区试坑土的现场试验数据, 绘制试坑土强度变化图(图4)。

A区为自重作用下沉积物的固结过程。由图上来看, 在回填完毕时, 试坑底部60 cm以下深度已经开始固结且具有较高的强度。在前两天内, 由于土体尚未完全固结, 受固结压力的影响, 贯入阻力沿深度基本呈线性增长, 至15日土体贯入阻力已经最大到达74.4 kPa; 此后随时间的发展, 贯入阻力稍有变化并最终稳定, 同时深度方向出现非均匀增长, 在15~25 cm之间增长最快, 出现峰值。比贯入阻力沿深度稍有起伏, 但是基本呈线性变化, 随时间的发展逐步增大, 但是变化幅度较小, 在回填17 d之后, 没有出现明显硬壳。土体的不排水抗剪强度随时间增加逐渐增大, 沿深度基本呈线性分布, 充分体现了自重固结的特性。并且土体灵敏度与时间呈正相关关系, 但是增加幅度较小, 沿深度方向变化不大, 平均值为2.0, 为中低敏土。由此可知, 在自重作用下, 沉积物固结性随深

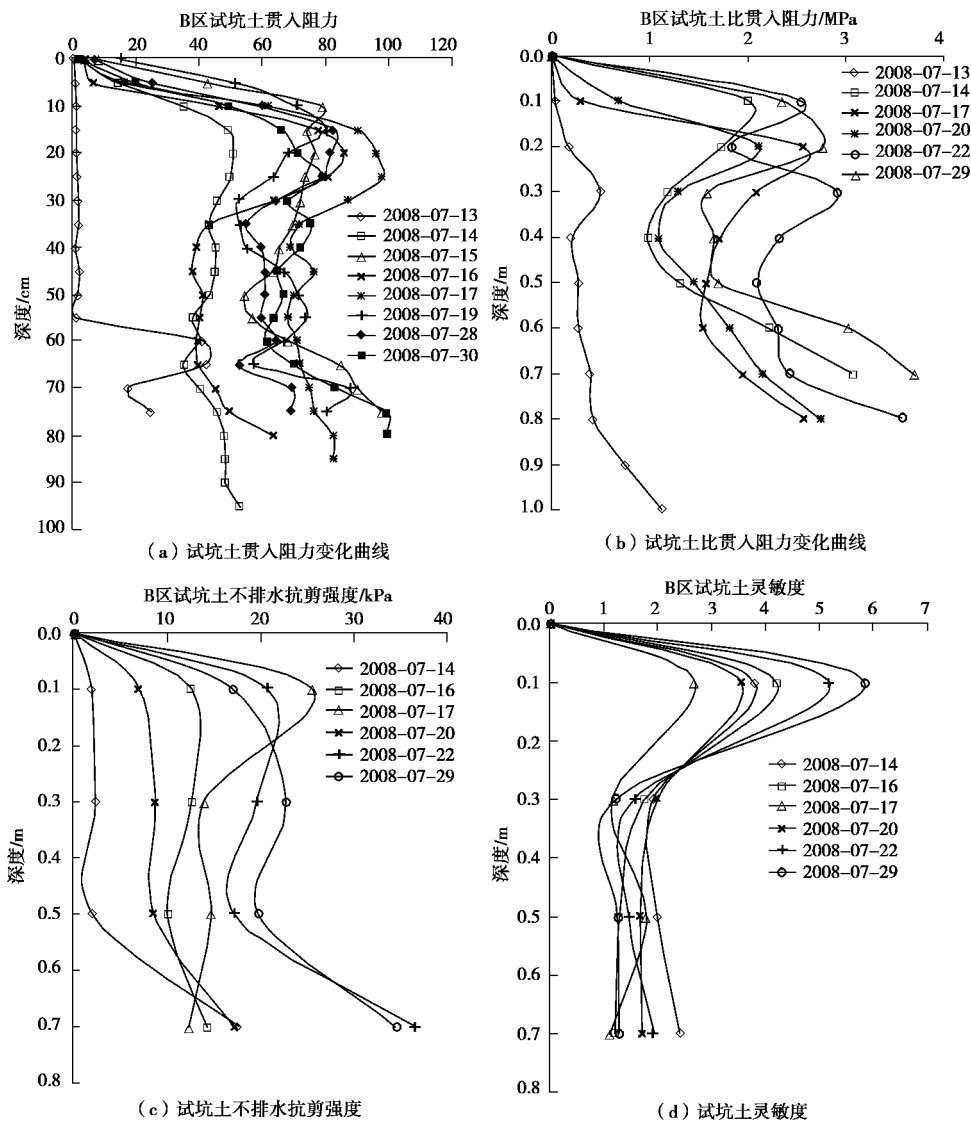


图 5 B 区试坑土强度变化图

Fig. 5 Strength curves of soils in pit B

度增加而增强，并其强度随时间延续而缓慢增长，充分展现了自重固结的特性。

3.2 B 区水动力作用下试坑土的固结过程

根据试验阶段对 B 区试坑土的现场试验数据，绘制试坑土强度变化图（图 5）。

水动力作用下的 B 区试坑土体同自重作用下的 A 区试坑相似，在回填完毕时，试坑底部 60 cm 以下深度已经开始固结具有较高的强度。在前两天内，贯入阻力快速增长，15 日时表层 10 cm 深度已经达到 78.9 kPa 的贯入阻力，此后随时间发展，贯入阻力整体增长幅度不大，但是沿深度方向出现非均匀增长，10~30 cm 深度增长最快，出现峰值 97.7 kPa，沿深度呈现非线性增加。在水动力作用下比贯入阻力有较快增长，至 29 日已经与原状土非常接近，同时在回填第一天 20~40 cm 深度已经出现一个较小的强度硬层，此后

随时间的发展该硬层逐渐上移并最终稳定在 10~30 cm 范围内。虽然 B 区试坑土体的不排水抗剪强度同样随时间增加逐渐增大，但是在试验前几天 30 cm 以上深度已经具有较高的不排水抗剪强度，整体沿深度方向呈现非均匀现象。土体灵敏度呈现明显的非均匀化现象，30 cm 以上深度灵敏度随时间增长有较为显著的增长其平均值为 4.2，为高灵敏土，30 cm 深度以下灵敏度基本保持不变平均值为 1.6 为低灵敏土，由此可以认为水动力作用对表层 30 cm 以内土体的强度有较为显著的影响。

3.3 C 区原始海床的固结过程

根据在 C 区对原始海床土进行的普贯、静力触探和十字板试验结果，统计了海床土强度指标随时间变化表（表 1）。可以看出，原状土基本处于稳定状态，贯入阻力沿深度方向基本不变，0~30 cm 基本呈线性

表 1 原始海床沉积物强度指标
Table 1 Strength of original seabed sediments

深度 /cm	贯入阻力								比贯入阻 力/MPa	不排水抗 剪强度/kPa	灵敏度
	2008.07.14	2008.07.15	2008.07.16	2008.07.17	2008.07.19	2008.07.28	2008.07.29	2008.07.30			
0	2.10	0.00	3.97	2.10	3.15	3.07	1.35	3.20	1.43	1.8	2.57
10	35.50	4.70	39.20	26.37	43.70	41.36	43.73	37.28	2.54		
20	64.10	11.70	52.73	65.93	58.53	68.16	44.90	77.10	2.91	10.4	1.70
30	87.50	25.40	84.77	95.10	65.80	91.21	72.20	86.27	2.90		
40	81.50	38.70	62.70	86.30	85.80	84.80	94.10	109.70	2.84	6.0	3.33
50	64.90	61.00	80.40	72.90	93.75	76.65	116.20	105.20	3.52	14.1	0.80
60	77.40		65.50	118.90	105.40	85.55	128.10	99.50	4.11		

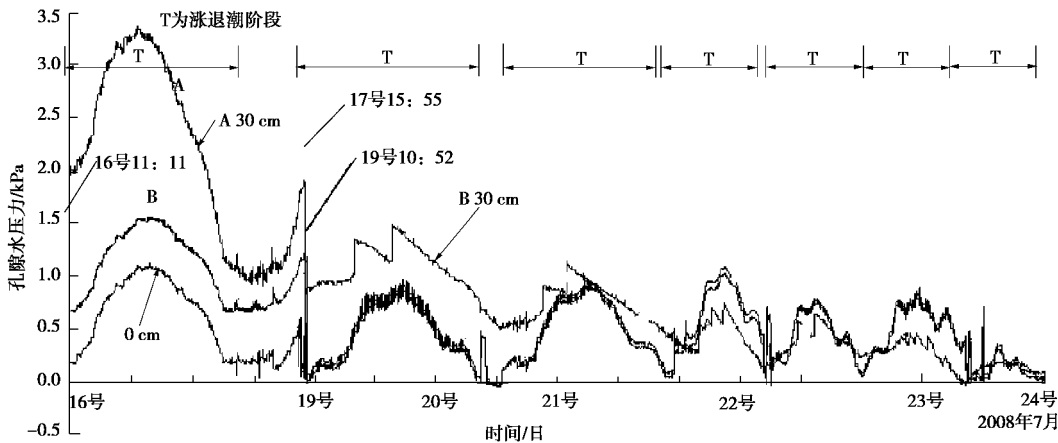


图 6 试坑土孔隙水压力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of pore water pressures

变化, 30 cm 以下基本不变。根据以往的研究, 黄河口粉质土固结速度很快, 1 m 深度以内土体在 2 h 内固结度就可以达到 0.74^[12], 同时较弱的水动力条件仅能改变表层 30 cm 以内土体的强度^[3], 所以表层土体在水动力作用下发生液化之后快速自重固结, 导致 30 cm 以上深度强度线性变化的趋势。

3.4 孔隙水压力随时间变化

根据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(见图6)。图中的孔隙水压力值是孔隙水压力探头的实测孔隙水压力值。图中仅给出了A, B两区30 cm深度试坑土的孔隙水压力变化以及表层0 cm的波压力。

由图6可以看出:①土体孔隙水压力与涨退潮具有良好的对应关系, 在涨、退潮过程中土体的孔隙水压力上升与下降幅值与表面潮波压力变化幅度基本一致。由于在试验期内研究区波浪波高很小, 没有观测到土体在波浪作用下的超静孔隙水压力积累现象。②以往在黄河口地区试坑试验发现, 试坑土体刚填埋完毕时, 各深度处的孔隙水压力达到最大值, 数值大致与上覆有效自重应力一致^[12], 在试坑土体填埋3 d后, 即16号12点, 孔隙水压力数值已经快速消散, 其中A区自重固结土体的孔隙水压力消散最慢, 固结度达到37%, 而B区水动力作用下试坑土孔隙水压力消散较快, 固结度达到52%。③此后土体中的孔隙水压力消散速度变慢, 至19号10点, 即填埋142 h以后, 自重固

结的A区试坑土已经消散完毕, 土体处于正常固结状态, 而水动力作用下的B区试坑土孔隙水压力消散较慢, 至21号15点左右消散完毕, 即经过了195 h后水动力作用下试坑土孔隙水压力消散完毕。④说明水动力作用在沉积物固结的前期阶段具有决定性作用, 加速了固结过程, 而后期则减缓了孔隙水压力的消散降低了固结速率。

4 试验结果分析

本试验中, B 区试坑土为水动力作用以及自重固结综合作用下黄河口沉积物的固结过程, 而 A 区试坑土是排除了水动力作用仅有自重影响的沉积物固结过程, 因此 B 区与 A 区试坑土强度数据之差即为水动力作用在沉积物固结过程中对沉积物强度变化的影响。图 7 和图 8 给出了水动力作用与自重作用在土体贯入阻力和比贯入阻力变化中的表现。

对比图 7 中水动力作用与自重作用之比可知, 水动力作用在沉积物固结过程中具有决定性的作用, 50 cm 以上两者之比大于零, 说明水动力作用提高了沉积物的强度, 基本保持在 0.5~0.84 之间, 随时间发展, 两者之比最大达到 4.80, 说明水动力作用对沉积物强度的改变是自重固结作用的 4.8 倍, 随深度延伸水动力作用逐渐降低, 两者之比降低至 0.24, 与沉积物强度产生非均匀化的范围基本相符。同样对比图 8 中水动力作用与自重作用之比可知, 两者之比介于 -0.97~

2.84 之间,其最大值出现在沉积物回填一天之后,此后不同深度处水动力作用的影响随时间延续逐渐降低,说明水动力作用在沉积物固结的初级阶段具有决定性作用;深度方向两者之比逐渐降低,说明水动力作用沿深度逐渐降低,同时在 10~30 cm 深度范围内水动力作用最强,与硬层的分布位置相符,说明硬层的出现与水动力作用直接相关。结合图 6 中孔压数据,可以得出水动力作用在沉积物固结前期,加快了沉积物的固结速率使沉积物在短时间内具有了一定的强度,并且使沉积物出现非均匀分布现象,导致了硬层的出现,而在沉积物固结后期,水动力作用则降低了沉积物的固结速率,在沉积物强度缓慢增长的过程中导致了非均匀化现象的加剧。

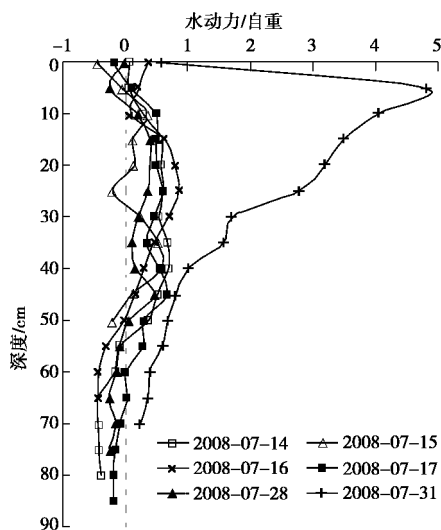


图 7 土体贯入阻力中水动力与自重比值随深度变化图

Fig. 7 Variation of ratio of hydrodynamics to self-consolidation with depth

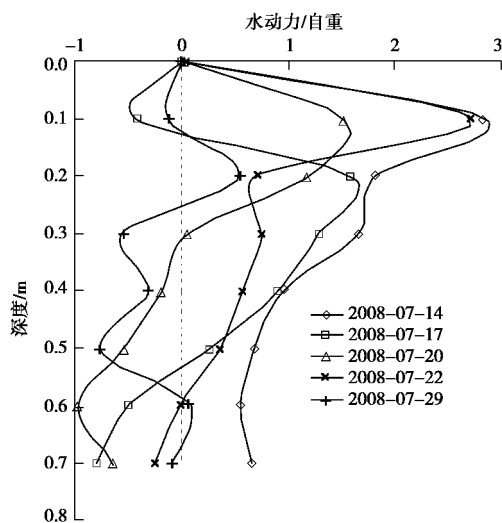


图 8 比贯入阻力中水动力与自重比值随深度变化图

Fig. 8 Variation of ratio of hydrodynamics to self-consolidation with depth

5 结 论

通过在黄河三角洲刁口流路三角洲叶瓣潮坪上选择一典型研究区,利用现场原位测试手段,研究黄河口流状沉积物在自重条件下和水动力作用条件下的快速固结过程,得出以下结论:

(1) 快速沉积的海床土固结速度很快,自重作用下固结度 72 h 内达到 37%, 142 h 左右孔隙水压力消散完毕,水动力作用下固结度 72 h 内达到 52%, 195 h 左右孔隙水压力消散完毕;其强度随深度基本呈线性增加。

(2) 水动力作用与沉积物固结非均匀现象直接相关,并导致了硬壳层的出现。

(3) 在沉积物固结过程中,水动力作用在固结初始阶段具有决定性作用,对沉积物强度的改变最大可为自重固结作用的 5 倍,随深度延伸水动力作用逐渐降低。

致 谢: 试验期间得到了中国海洋大学环境科学与工程学院岩土组的各位老师和同学的热情帮助,在此致以诚挚的谢意。

参考文献:

- [1] 单红仙, 贾永刚, 许国辉. 波浪作用诱发的黄河口水下斜坡失稳破坏[J]. 地质前缘, 2001, 18(3): 33 - 36. (SHAN Hong-xian, JIA Yong-gang, XU Guo-hui. Waves-induced instability of the subaqueous delta slope under water[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 18(3): 33 - 36. (in Chinese))
- [2] 师长兴, 尤联元, 李炳元. 黄河三角洲沉积物的自然固结压实过程及其影响[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 175 - 181. (SHI Chang-xing, YOU Lian-yuan, LI Bing-yuan, et al. Natural consolidation of deposits and its consequences at the Yellow River delta[J]. Science Geographica Sinica, 2003, 23(2): 175 - 181. (in Chinese))
- [3] 贾永刚, 霍素霞, 许国辉, 等. 黄河水下三角洲沉积物强度变化原位测试研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 876 - 881. (JIA Yong-gang, HUO Su-xia, XU Guo-hui, et al. Intensity variation of sediments due to wave loading on subaqueous delta of Yellow River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 876 - 882. (in Chinese))
- [4] 贾永刚, 史文君, 单红仙, 等. 黄河口粉土强度丧失与恢复过程现场振动试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 351 - 358. (JIA Yong-gang, SHI Wen-jun, SHAN Hong-xian, et al. In-situ test study on silt strength's loss and recovery due to vibration load in the Yellow River Mouth[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 351 - 358. (in Chinese))
- [5] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社,

1998. (CHEN Xi-zhe. Soil mechanics and building foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998, (in Chinese))
- [6] 单红仙, 刘媛媛, 贾永刚, 等. 水动力作用对黄河水下三角洲粉质土微结构改造研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(5): 654 - 658. (SHAN Hong-xian, LIU Yuan-yuan, JIA Yong-gang, et al. Case study of micro-structure transform of silt due to wave action on subaqueous of Yellow River, China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(5): 654 - 658. (in Chinese))
- [7] 周其健, 贾永刚, 马德翠. 黄河口潮滩粉土体固结非均匀性研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(7): 1147 - 1152. (ZHOU Qi-jian, JIA Yong-gang, MA De-cui. Research of the heterogeneity of silt seabed in Yellow River estuary shore[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(7): 1147 - 1152. (in Chinese))
- [8] 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 - 1377. (ZHANG Jian-min, SHAN Hong-xian, JIA Yong-gang, et al. An experimental study of nonuniform consolidation of rapid sediment seabed soils at Yellow River mouth subjects to wave and tide wave loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(7): 1369 - 1377. (in Chinese))
- [9] 刘红军, 张民生. 波浪引起海床稳定性分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(6): 986 - 990. (LIU Hong-jun, ZHANG Min-sheng. Analysis of seabed stability under wave loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(6): 986 - 990. (in Chinese))
- [10] 刘红军, 张民生, 许国辉, 陈友媛, 王秀海. 波浪作用下海床土体强度非均匀化数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 924 - 929. (LIU Hong-jun, ZHANG Min-sheng, XU Guo-hui, CHEN You-yuan, WANG Xiu-hai. Numerical analysis of wave-induced non-uniformity of soil strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 924 - 929. (in Chinese))
- [11] 杨少丽, 沈渭铨. 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 - 36. (YANG Shao-li, SHEN Wei-quan. The mechanism analysis of seafloor silt liquefaction under wave loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(4): 28 - 36. (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 Hong-xian, ZHANG Jian-min, JIA Yong-gang, 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] 刘媛媛. 黄河三角洲表层沉积物固结非均匀性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. (LIU Yuan-yuan, Research of heterogeneity consolidation mechanics of subsurface sediment on the subaqueous delta of Yellow River, China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. (in Chinese))
- [14] 王俊超, 贾永刚, 史文君, 等. 差异水动力导致黄河口粉质土微结构分形特征变化实例研究[J]. 海洋科学进展, 2004, **22**(2): 177 - 183. (WANG Jun-chao, JIA Yong-gang, SHI Wen-jun, et al. Case study on the fractal characteristic variations of silty soil microstructure due to differential hydrodynamics in the Yellow River estuarine area[J]. Advances in Marine Science, 2004, **22**(2): 177 - 183. (in Chinese))
- [15] 贾永刚, 董好刚, 单红仙, 等. 黄河三角洲粉质土硬壳层特征及成因研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2029 - 2036. (JIA Yong-gang, DONG Hao-gang, SHAN Hong-xian, et al. Study of characters and formation mechanism of hard crust on tidal flat of Yellow River estuary[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2029 - 2036. (in Chinese))
- [16] 王小花, 刘红军, 贾永刚. 黄河口粉质土矿物成分特征及对水动力条件响应的研究[J]. 海洋地质动态, 2004, **20**(5): 30 - 35. (WANG Xiao-hua, LIU Hong-jun, JIA Yong-gang. Research on the silty soil's mineral composition and characteristics response to the hydrodynamic conditions in the Yellow River delta[J]. Marine Geology Development, 2004, **20**(5): 30 - 35. (in Chinese))
- [17] 臧运启. 黄河三角洲近岸泥砂[M]. 北京: 海洋出版社, 1996: 26 - 85. (ZANG Yun-qi. Offshore mud and sand of Yellow River delta[M]. Beijing: China Ocean Press, 1996: 26 - 85. (in Chinese))
- [18] 贾永刚, 单红仙. 黄河口海底斜坡不稳定性调查研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, **11**(1): 1 - 5. (JIA Yong-gang, SHAN Hong-xian. Investigation and study on slope instability of subaqueous delta of modern Yellow River[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, **11**(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [19] 成国栋, 薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 36 - 40. (CHENG Guo-dong, XUE Chun-ting. Sedimentary geology of the Yellow River Delta[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 36 - 40. (in Chinese))