

自升式平台遗留桩坑及周边土体的时空变化特征

——以废弃黄河水下三角洲埕岛地区某井场为例

田明阳^{1,2,3*}, 田振环^{1,2,3#}, 王威^{2,3}, 史经昊¹, 王振国^{2,3}, 李洁^{1,2,3}

¹中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛

²山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南

³山东省富铁矿勘查技术开发工程实验室, 山东 济南

收稿日期: 2024年2月26日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年6月28日

摘要

本研究选择废弃黄河水下三角洲埕岛地区的一个典型井场, 基于多年水深测量、浅地层剖面探测、工程地质调查资料, 详细分析正常固结饱和软黏土为主地层上遗留桩坑及周边土体的时空变化特征。刚形成的桩坑由一个初始泥线以下深度 $0.33D$ (桩靴直径 D)、直径 $2D$ 的具有双坡结构剖面的凹坑和一个土体强度分布高度异质性的剖面组成。土层破坏以冲剪破坏为主, 原始海床以下至稍微延伸到桩靴贯入深度以下的范围被剧烈扰动, 在水平方向上强烈扰动出现在距插桩中心线 $0.5D$ 范围内, $1D$ 之外的土体影响较小。受扰动的土层可划分为六个性质的区域。随后桩坑逐渐趋于夷平, 内外土体工程性质也不断发生变化, 地层剖面从“软-硬”结构变成了“硬-软-硬”结构, 重塑土体强度随时间逐渐恢复, 直至超过原状土和重塑区以外土体强度。最后还讨论了桩坑的形成机理及桩坑对二次插桩的影响。

关键词

自升式平台, 桩坑, 粉质黏土, 工程地质特性, 废弃黄河水下三角洲

Spatio-Temporal Variation Characteristics of Spudcan-Footprint and Surrounding Soil of Jack-up Platform

—Taking a Well Site in Chengdao Area in Abandoned Yellow River Subaqueous Delta as an Example

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 田明阳, 田振环, 王威, 史经昊, 王振国, 李洁. 自升式平台遗留桩坑及周边土体的时空变化特征[J]. 海洋科学前沿, 2024, 11(2): 77-90. DOI: 10.12677/ams.2024.112008

Mingyang Tian^{1,2,3*}, Zhenhuan Tian^{1,2,3#}, Wei Wang^{2,3}, Jinghao Shi¹, Zhenguo Wang^{2,3}, Jie Li^{1,2,3}

¹College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²No.1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan Shandong

³Shandong Engineering Laboratory for High-Grade Iron Ore Exploration and Exploitation, Jinan Shandong

Received: Feb. 26th, 2024; accepted: Jun. 19th, 2024; published: Jun. 28th, 2024

Abstract

In this study, a typical well site in the Chengdao area of the abandoned Yellow River subaqueous delta was selected. Based on years of water depth measurement, shallow profile detection and engineering geological survey data, the spatial and temporal variation characteristics of the spudcan-footprint and surrounding soil on the normally consolidated saturated soft clay were analyzed in detail. The newly formed footprint consists of a concave surface profile with a double-slope structure at a depth of $0.33 D$ (spudcan diameter D) below the initial mudline, $2 D$ in diameter and a highly non-uniform shear strength profile. The soil failure was dominated by punching shear failure. The range from the original seabed to a slight extension below the penetration depth of the spudcan was severely disturbed. In the horizontal direction, the strong disturbance appeared in the range of $0.5 D$ from the center line of the pile, and the soil outside $1 D$ had less influence. The disturbed soil layer could be divided into six regions with different properties. Subsequently, the pile pit gradually tended to be flattened, and the engineering properties of the soil inside and outside the footprint were constantly changing. The stratum profile changed from “soft-hard” structure to “hard-soft-hard” structure, and the strength of the remolded soil gradually recovered with time until it exceeded the strength of the undisturbed soil and the soil outside the remolded area. Finally, the formation mechanism of pile pits and the influence of old footprints on reinstallation of spudcan were discussed.

Keywords

Jack-up Platform, Spudcan-Footings, Silty Clay, Engineering Geology Properties, Abandoned Yellow River Subaqueous Delta, Reinstallation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自升式钻井平台海上作业后，通常在海床上遗留直径可达几十米、深度几米的桩坑[1] [2]，以及在插桩深度附近受到强烈扰动的地基土层，两者统称为“脚印”。当平台在旧脚印附近进行二次插桩作业时，桩-土-结构之间会发生极其复杂的耦合作用，被称作“踩脚印”问题。如图 1 所示，在“踩脚印”工况下，由于周边海床地形和土体的明显不对称性，桩靴在贯入地基土过程中，可能会受到偏心或倾斜荷载作用而滑移进旧桩坑，导致桩腿弯曲变形、发生与导管架平台相撞、甚至整个钻井平台倾覆等严重安全事故[3]。

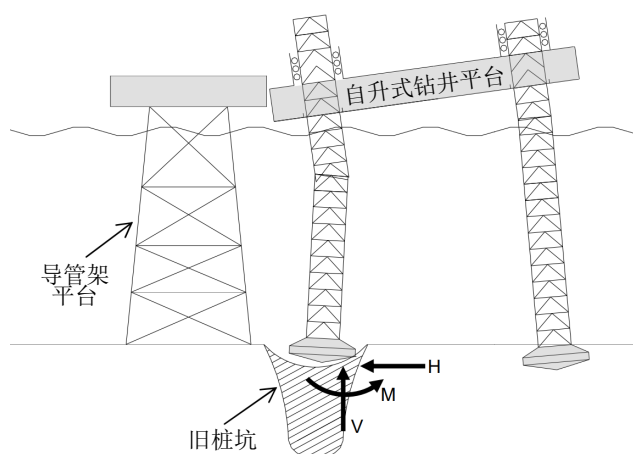


Figure 1. Example of a reinstallation scenario, the pile shoe is subjected to the interaction of vertical reaction V , horizontal sliding force H , eccentricity e and bending moment value $M(e \cdot V)$

图 1. 桩坑失稳机理示意图, 其中桩靴受到竖向反力 V 、水平滑动力 H 、偏心距 e 和弯矩值为 $M(e \cdot V)$ 的相互作用

随着海上开发活动愈加频繁, 旧井位二次钻采的需求不断增多, “桩坑”导致的自升式平台失稳事故也在逐年上升, 已成为平台事故诱因中除了“穿刺”外的第二大原因[4] [5]。根据 2004 年统计数据得知[6], 欧洲壳牌公司近海作业曾留下大约 1200 个桩坑, 导致每年大概有 80 口新井位与“旧桩坑”相邻。在我国胜利油田渤海某井场, 从 2009 年 11 月初次就位至 2019 年 12 月, 十年间就有 5 个自升式平台进行多次插拔桩作业。鉴于桩坑问题的复杂性和紧迫性, 国内外研究人员对其机理进行了探讨, 发现除了插桩位置、桩靴和平台结构固有的物理特性, 桩坑的几何形状和周边土层性质及受到扰动后的强度变化是自升式平台在“桩坑”附近的二次就位问题的关键因素[7]。不少学者[2] [3] [8]认为桩坑的直径、坡度和深度等几何参数都对诱导桩靴荷载有较大影响, 会引起弯矩和水平力的显著变化; 桩坑周边扰动土体强度的不均匀分布也会导致桩靴底座两侧受力的不平衡, 其时空变化会增加受力的复杂性[9]。所以对拔插桩遗留桩坑的几何参数和扰动土层性质的时空变化的研究就尤为重要。

目前相关研究多集中于室内试验。Gan 等[10]利用离心机模型试验发现, 在硬黏土中拔插桩形成的桩坑, 形状可简化为直径 D 、深度 $0.5 D$ (D 为桩靴直径)的圆柱形。Kong 等[3]认为在饱和软黏土中, 桩坑形态可视为直径 $2 D$ 、深度 $0.33 D$ 的倒圆锥形。Cassidy 等[11]通过离心机试验研究了土体强度和插桩深度对桩坑尺寸的影响, 直径一般为 $1 D \sim 2.1 D$, 深度为 $0.11 D \sim 0.28 D$ 。Gaudin 等[12]总结模型试验结果, 认为在插拔桩过程中, 桩靴周围的土体受到高度扰动, 经历重塑和再固结的阶段, 其变化特征受控于桩靴的形状、平台作业周期以及初次和二次插桩之间的时间间隔。Purwana [13]采用离心机试验发现插桩和拔桩过程中, 距桩坑中心线半径 $1.3 D$ 的范围内的土体受到扰动。Cassidy 等[11]发现新形成的模型桩坑内的土体强度降低了 40%, 离桩坑中心 $1.5 D$ 之外的土体不受影响。而国内外关于桩坑尺寸现场测量的公开报道很少, 仅 Handidjaja 等[14]通过地形测量, 发现直径为 11.8 m 的桩靴在不排水抗剪强度 S_u 为 20 kPa 的海床上, 留下的桩坑直径为 $1.3 D$ 、深度为 $0.19 D$ 、坑壁坡度约为 $1:3.5$ 。Teh 等[15]在拔除直径为 14.6 m 的桩靴后, 报告了直径为 $1.03 D$ 和深度为 $0.24 D$ 的桩坑。涉及插拔桩引起的真实地基土改变的报道则更少, 国内研究多集中在黄河水下三角洲地区[16]-[19], 发现经历插拔桩过程后, 地基土浅部地层发生了扰动破坏, 总体上回淤沉积物粒度变粗, 桩坑内土体的强度提高。

上述研究成果为“桩坑”问题相关试验研究中模型桩坑几何参数和模型土体的选择提供了一定的理论依据。但人工桩坑、模型土体和实际工况中桩靴拔桩后产生的桩坑与扰动后的地层特性有较大差异,

导致不同室内试验研究所得出的结论差别较大，其准确性和有效性有待实践的检验，说明老桩坑对平台二次插桩作业稳定性的影响机理尚不明确。而且，缺乏桩坑随时间和空间变化规律的研究。此外，在实际工程中存在海洋施工环境与海床地基土体的不确定性、复杂性问题。有必要对真实桩坑几何形态和周边土层性质及受到扰动后的强度等参数的时空变化规律进行深入研究，不仅可为后续试验研究提供与实际情况相符的模拟条件，还可用以指导工程实践，具有重要的科研意义和应用价值。本研究选择废弃黄河水下三角洲上的一个典型井场，基于多年水深测量、浅地层剖面探测、工程地质调查资料，详细分析以饱和黏土为主地层上遗留桩坑及周边土体的时空变化特征，并讨论这些变化对平台桩坑的影响。

2. 研究概况

该井场位于埕北海域黄河口水下三角洲前缘地带，地处渤海湾东南部，属于胜利油田的主力采油区块，平均水深 15 m 左右，地势平坦(图 2)。黄河三角洲 1953~1964 年和 1964~1976 年叶瓣在此均有沉积，1976 年黄河改道清水沟流路后，井场区不断受到蚀退，目前以冲刷侵蚀和岸滩的均衡调整为主。研究区海底表层沉积物主要类型有粉土和淤泥、淤泥质粉质粘土；浅部地基土主要为近期三角洲相的粉土和淤泥、淤泥质粉质粘土和早期的河湖沼泽相的粉质粘土、粉细砂及粉土[20]。正常固结的黏土和粉土构成了大部分海底沉积，土体的饱和度 S_r 普遍较高，接近 1.0，近饱和状态，压缩性中等。

依据平台初次就位前的浅地层剖面 and 钻孔数据，按土的工程性质，研究区 40 米深度范围内原始地层大致可分为三层，分别定义为 A 层、B 层和 C 层。其中 A 层为三角洲相沉积，埋深 0~8.4 m，又可进一步划分为两个亚层，层 A-1 厚度约 1 m，以粉土为主，呈稍密 - 中密状态，这一层由三角洲相沉积的粗粒物质受动力筛选形成的，俗称“铁板砂”。层 A-2 层厚 7.4 m，以淤泥、淤泥质粉质粘土为主，流塑 - 软塑状态，为黄河三角洲沉积烂泥以及远离河口的细粒沉积物。B 层厚度 8.2 m，以粉质粘土、粉土为主，可塑 - 硬塑状态，为三角洲形成前的滨海相 - 潮坪相的沉积地层。C 层埋深 17 m 以下，以粉土、粉砂为主，局部含粉质粘土层，粉土、粉砂呈中密 - 密实状态，粉质粘土呈可塑偏硬或硬塑状态，属于河湖相的沉积地层。

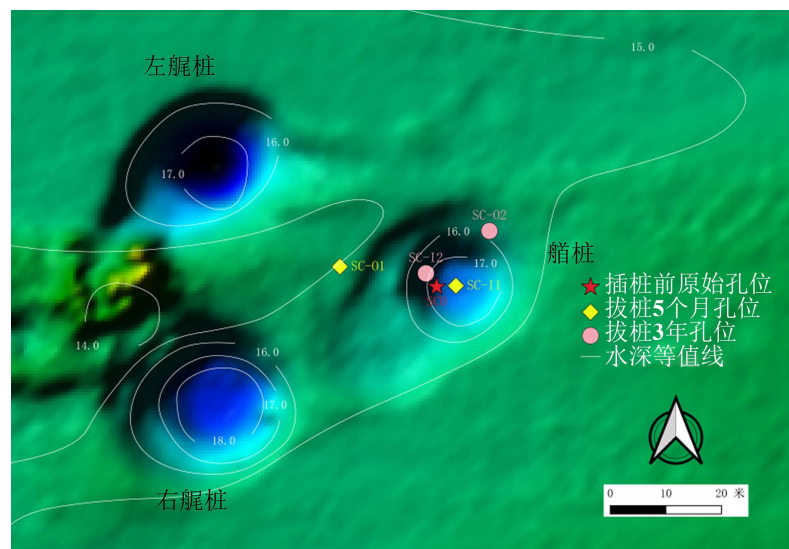


Figure 2. Relative location of spudcan footings and bore-hole
图 2. 埕岛海域某井场地貌及遗留桩坑和钻孔相对位置

自升式钻井平台的桩靴尺寸通常较大，如图 2 所示，平台的插拔桩活动，在海床上形成明显的桩坑，并对涉及深度范围内的地层造成强烈扰动，严重影响后期作业平台的插桩就位活动。在该井场，首次作

业采用的自升式钻井平台为3桩腿平台, 桩柱直径3.5 m, 桩靴形状为正八边形、底面积109.6 m²、直径11.5 m、高度1.97 m。各桩腿最终入泥深度为: 艏桩8.9 m, 左艮桩7.8 m, 右艮桩7.6 m。平台移走后, 留下三个巨大桩坑, 选取艏桩形成的桩坑作为研究对象。为了探讨该桩坑及周边土体的时空变化规律, 利用多波束测深系统, 分别于桩坑形成后的3个月(89天)、5个月(157天)和3年(1032天), 对桩坑及周边地形进行了三次测量。同时, 使用高分辨率浅地层剖面仪和钻探设备, 对桩坑内外不同部位进行了两次测量和取样: 5个月(157天)和3年(1032天), 并通过原位测试和室内土工试验, 获得土层的物理性质指标。再结合该井场插桩前的资料, 共获取5个钻孔, 分别代表平台就位前的原始地层(钻孔编号SC0)、被扰动的地层5个月后的情况(桩坑内: SC-I1; 桩坑外: SC-O1)和被扰动的地层3年后的情况(桩坑内: SC-I2; 桩坑外: SC-O2), 钻孔相对桩坑的位置和具体参数见图2和表1。

Table 1. List of bore-holes information

表 1. 钻孔相关情况一览表

| 编号 | SC0 | SC-I1 | SC-O1 | SC-I2 | SC-O2 |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|
| 钻孔日期距拔桩天数 | 插桩前 | 157 | 157 | 1032 | 1032 |
| 距桩坑中心距离(m) | 3.5 | 0 | 21.2 | 5.8 | 11.6 |
| 距离/靴径 | 0.30 | 0.00 | 1.84 | 0.50 | 1.01 |
| 相对桩坑位置 | 坑内 | 坑中心 | 坑外 | 坑内 | 坑边缘 |
| 钻孔深度(m) | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |

3. 结果分析

3.1. 遗留桩坑时空变化

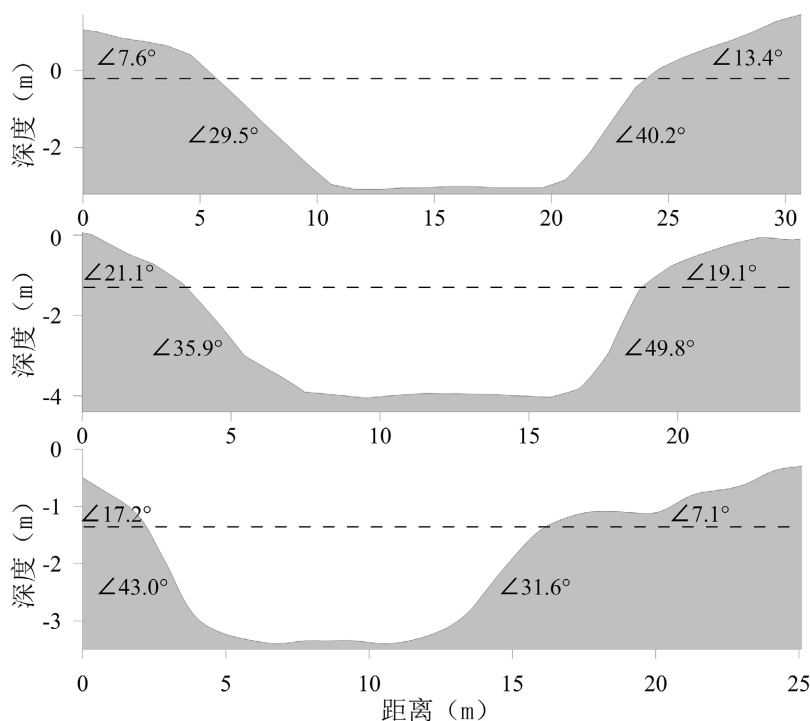


Figure 3. Typical sections of the three remaining pile pits at the early stage of formation

图 3. 遗留的 3 个桩坑形成初期典型剖面图

在桩坑形成初期,由桩坑失稳机理示意图可知(图 1),受所在区域侵蚀大背景和桩柱局部绕流作用下,桩坑周边冲刷显著,桩坑深部呈圆形,近海床面呈椭圆形,长轴沿主流方向。这种现象在深度剖面上也有所表现,如图 3 所示,桩坑底部平坦,中心稍有凸起,宽度 10 m 左右,接近桩靴直径 D ,这是桩靴底座与下卧土体分离时的基础界面。桩坑内壁呈现出双坡结构,上坡较缓(图 3 虚线以上,三个桩坑平均坡度约为 14°),下坡较陡(图 3 虚线以下,三个桩坑平均坡度约为 38°),整个桩坑剖面形态类似“平底锅”。这说明桩坑形成后,很快就受到周边水动力和沉积环境的改造,桩坑上部遭受侵蚀,坑内接受沉积。而 3 年后,桩坑深度变小,在地形地貌图上表现的并不明显。

表 2 给出了桩坑几何参数三次测量具体结果,从中可以得知,3 个月后的桩坑与 5 个月后的变化不大,桩径约为 22.0 m~22 m,即 $1.91 D \sim 1.97 D$;坑深约 3.5 m~4.1 m,即 $0.30 \sim 0.36 D$;坑壁平均坡度 $17.2^\circ \sim 20.6^\circ$ 。这与室内模拟试验结论基本一致,在饱和软黏土中,形成的人工桩坑参数为直径 $2 D$ 、深度 $0.33 D$,呈倒圆锥形[3]。形成 3 年后,桩坑直径稍有增加,由 22 m 变为 24 m,增加了 2 m;深度减小了近 3 m,坑壁平均坡度变缓,仅为 7.3° ,说明随着时间的推移,桩坑被充填,深度变浅,坡度变缓,逐渐趋于夷平。

Table 2. Geometry of spudcan footprints

表 2. 桩坑参数随时间变化统计表

| 时间(天) | 桩坑直径(m) | 桩坑深度(m) | 坑壁平均坡度($^\circ$) | 坑径/靴径 | 坑深/靴径 |
|-------|----------------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 89 | 22.7 ± 2.1 | 3.5 ± 0.7 | 17.2 ± 3.1 | 1.97 ± 0.18 | 0.30 ± 0.06 |
| 157 | 22.0 ± 2.4 | 4.1 ± 0.6 | 20.6 ± 2.9 | 1.91 ± 0.21 | 0.36 ± 0.05 |
| 1032 | 24.1 ± 4.1 | 1.2 ± 0.4 | 7.3 ± 1.2 | 2.17 ± 0.27 | 0.10 ± 0.03 |

3.2. 地层扰动分区变化

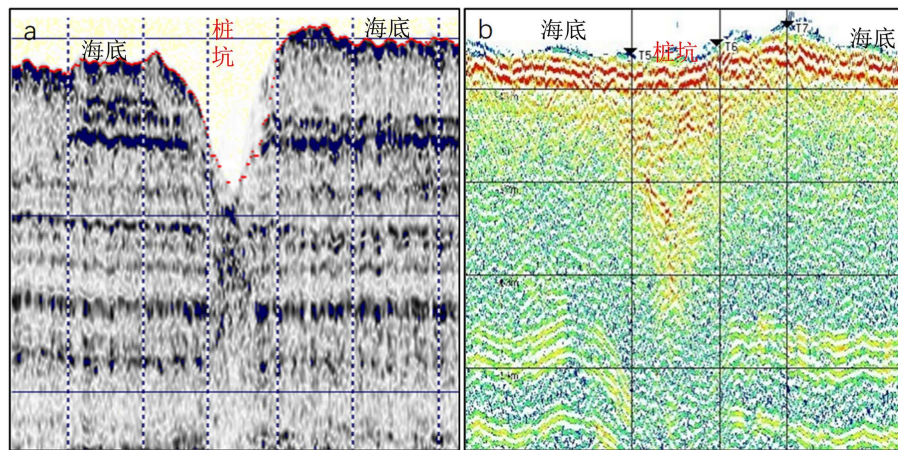


Figure 4. Record maps of shallow seismic profile around spudcan footing. (a) after about 5 months; (b) after about 3 years

图 4. 桩坑周边浅地层剖面记录图谱(桩坑局部); (a) 形成 5 个月后; (b) 形成 3 年后

桩坑形成不久的浅地层剖面记录(图 4(a))显示,新遗留的桩坑呈倒圆锥形,边缘海床稍有隆起,坑深约 4 m,直径约 20 m (近两倍桩靴直径),表层无明显的沉积层反射。靠近桩坑底部的地层声学反射特征紊乱,可能是拔桩过程中,周边部分底土坍塌到桩坑中与坑内原有土层发生无序混合所致的。再深层的下伏地层的反射面出现了中断,反射面中断约 11 m,接近桩靴的直径。声学剖面上桩坑内的声学反射特

征与桩坑两侧存在明显差异,说明海床地基土经历插拔桩过程后,桩靴直径范围内地层结构遭受严重破坏,浅地层反射特征表现为不连续,在桩坑处,形成反射透明层。

对比桩坑形成 3 年后的浅地层剖面记录(图 4(b)),在桩坑处,水深略大于周边海底水深,坑内海底表层沉积反射特征与周边海底已经没有差别,形成了连续的反射界面。在原来桩坑内部的空间内,沿坑内壁呈现出不断变缓的近似 V 字形态反射层理,说明桩坑不断接受周遭沉积。其下仍然保留桩坑刚形成时的界面和下伏土体杂乱的反射特征。与桩靴拔除不久时相比,下部土层反射特征变化不大,地层在桩坑处出现了间断,反射面中断约 11 m,接近桩靴的直径。

通过高分辨率浅地层剖面记录,可以观察到桩靴对地层的扰动细节。如图 5 所示,反射间断出现的最深处要比桩靴的最终贯入深度稍深;距间断区边界约 $0.5 D$ 的范围内,原本近水平的反射层序朝着桩靴压入的方向弯曲,并逐渐变得密集; $0.5 D$ 开外的两侧地层反射特征呈现出波浪形态;桩坑边缘近海床反射层稍有隆起。这说明插桩过程中,桩靴底部和桩周一定范围内的土体受到不排水剪切以及很大的水平挤压,周边土体产生较大的剪切破坏,形成扰动重塑区。桩靴底部的土体在贯入过程中向桩周发生较大的侧向位移和隆起。在海床附近的土体是向上隆起,而在床面以下较深层土体,由于覆盖土层压力作用不能向上隆起,就向水平方向挤压。但土体中并没有出现明显的连续滑动面,桩靴周围附近土体仅发生竖向破坏,两边的土体并没有明显移动,说明在研究区插拔桩,导致的地基土破坏接近于冲剪破坏。根据上述分析的土体扰动特性和破坏程度,可将桩坑周边地层定性分为六个区域(图 5(b))。

① 桩端扰动区。桩靴贯入过程中,少量上层土体可能会被挤压到桩端下伏地层中,同时桩端土体会产生附加应力泡。该区域土体主要发生侧向位移,为半球状扩张区,其影响水平范围约 $2 D$ 。

② 破坏重塑区。主要由于桩靴拔插过程中,该区域内土体结构遭受严重破坏变为重塑状态,宽度与桩靴直径 D 接近。

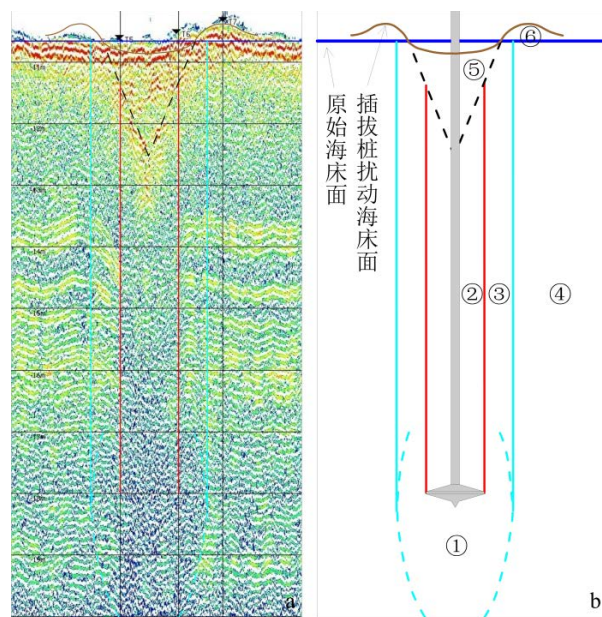


Figure 5. Damage and disturbance of spudcan penetration and extraction to surrounding soil. (a) The image of a high resolution shallow seismic profile after 3 years; (b) Schematic of soil disturbance partition

图 5. 拔插桩对周围土体的破坏和扰动图, (a) 典型高分辨率浅地层剖面记录图谱(3 年后); (b) 土体扰动程度分区示意图

③ 塑性扰动区。位于区域②以外 $0.5D$ 范围内，该区域内土体受桩靴下拖扰动，易发生蠕变。

④ 侧向弹性变形区。这部分区域土体未受到桩靴直接扰动，位移方向基本水平向外。

⑤ 再充填改造区。该区范围主要为桩靴底座与下卧土体分离时形成的空间，底部由坑壁土体坍塌充填，然后受到背景沉积环境和水动力的改造，逐渐被周边推移和跃移组分沉积。

⑥ 海底表层隆起区。在桩靴插入地层的过程中，浅层土体流向海床表面，导致外围海床出现土体凸起，隆起高程在大约距桩坑中心 $1D$ 处达到最大值。

总之，在研究区以饱和粘土和粉土为主的地层中，桩靴在插拔过程中，地基土破坏以冲剪破坏为主，桩周土体最先达到塑性流动和结构性破坏，距离较远的土体仍处于弹性变形阶段。经扰动的土体极易蠕变，表现为地表、浅层和深层土体发生竖向和水平的位移，其数值和影响范围较大。强烈扰动在距插桩中心线 $0.5D$ 范围内， $1D$ 之外的土体影响较小，两者之间为轻度扰动。

3.3. 土体物理力学性质时空变化

由前一章节分析可知，桩靴压入和提取过程中，会对周围土体产生剧烈的挤压剪切作用，桩周内的土体将遭到破坏重塑，而距桩靴稍远的土体也会遭到一定程度的扰动，不同位置土体的原始结构将遭到不同程度的破坏，土的工程性质也将发生改变。选取天然含水率、压缩模量、标准贯入修正击数和不排水抗剪强度等物理力学性能指标，进行定量化分析。从图 6 和图 7 中可以看出，13 m 以浅土体各参数的变化较大，其中受桩靴直接作用的深度为 8.9 m，以下 4.1 m 厚的土层明显受到间接作用，接近 $0.4D$ 。受桩靴插拔显著影响的土体可分为三层，原始地层分别为粉土及淤泥、软黏土和硬黏土为主，前两层被桩靴贯穿，第三层主要位于桩靴最终就位深度以下，表 3 给出了 5 个钻孔各层浅部地层特征及层位物理力学性质指标的统计值，其中 SC-I1 和 SC-I2 处于破坏重塑区，SC-O1 位于侧向弹性变形区，SC-O2 处于塑性扰动区的边缘(表 1 和图 5)。分析结果如下。

首先基于原始地层，对比桩坑内、外地层的变化，恢复 5 个月后的情况(图 6(a)~(d)和表 3)为：第一层土体：发生较大变化。桩坑内由淤泥转变为粉土，桩坑外粉土层增加，仍保留淤泥层；桩坑内、外天然含水率相近，比原始土层小了近一半；压缩模量也接近，比原始增加了一倍；桩坑内不排水抗剪强度稍小于桩坑外，但比原始土层提高了 1.5 倍之多。第二层土体：变化程度较小。桩坑内粉质黏土比桩坑外变得更硬，分别为软可塑和软塑；桩坑内、外天然含水率相近，与初始相比有所波动，但平均值变化不大；两者压缩模量也较为接近，稍小于原始地层；桩坑内、外不排水抗剪强度相近，比原始土层有所提高，约 24%。第三层土体：桩坑内、外土体分布特征与原始相比，都是以可塑 - 硬塑粉质黏土为主，变化不大；桩坑内外天然含水率相近，与初始相比变化不大；桩坑内、外压缩模量都有所增加，其中桩坑内要大于桩坑外，比原始土体增加了约 63%；桩坑内、外不排水抗剪强度相近，平均值比原始土层稍有增加。

对比恢复 3 年后的情况(图 6(e)~(h)和表 3)：第一层土体：发生了较大变化。桩坑内从淤泥转变为稍密 - 中密粉土，桩坑外以粉土层为主，夹杂淤泥质粉质黏土层；桩坑内、外天然含水率较为接近，比原始小了近一半；压缩模量也接近，比原始增加了一倍多；桩坑内不排水抗剪强度稍大于桩坑外，比原始土层提高了 2.2 倍。第二层土体：桩坑内粉质黏土比桩坑外变得更硬；桩坑内、外天然含水率波动较大，桩坑内要大于桩坑外；两者压缩模量平均值较为接近，与原始地层相差不大；桩坑内、外不排水抗剪强度平均值相近，比原始土层提高了 80%。第三层土体：与原始地层较为一致，桩坑内、外仍以可塑 - 硬塑粉质黏土为主；桩坑内外天然含水率相近，与初始相比变化不大；桩坑内、外压缩模量相近，比原始土体增加了约 50%；桩坑内不排水抗剪强度稍大于桩坑外，比原始土层提高了 30%。

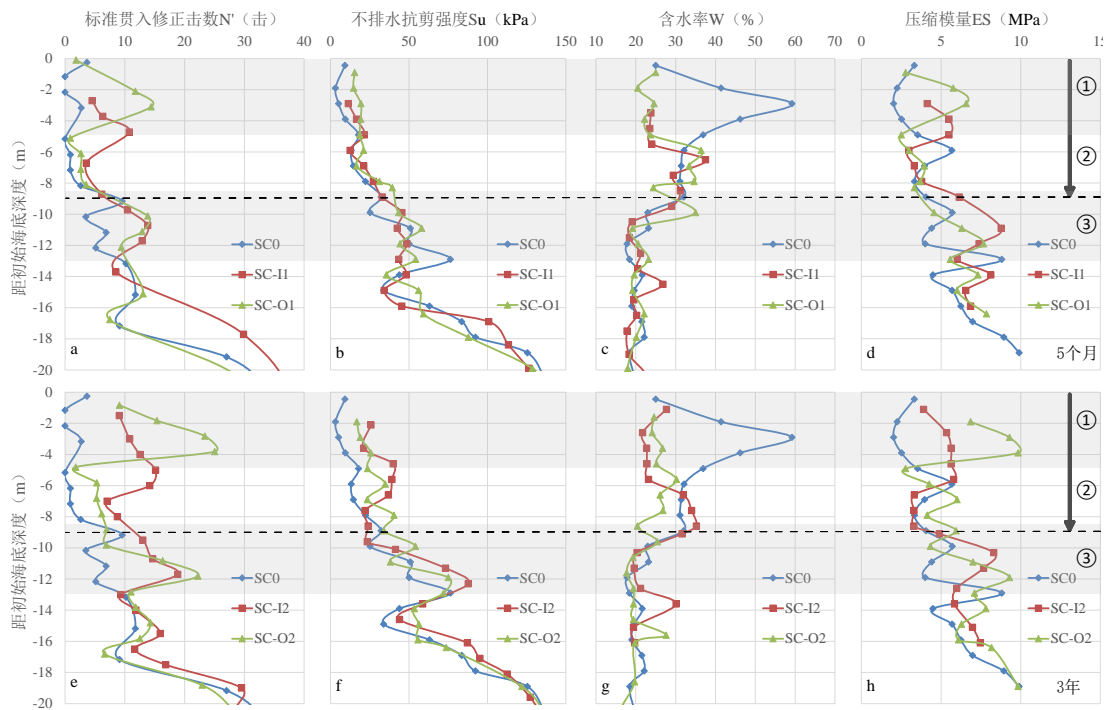


Figure 6. Physical and mechanical properties indexes of soil layer inside vs. outside the spudcan footing at different elapsed time (5 months and 3 years)

图 6. 桩坑内、外土层物理力学性能指标对比曲线，上半图为桩坑形成 5 个月，下半图为桩坑形成 3 年。图中向下箭头和虚线标示最终插桩深度；数字标号为受桩靴插拔明显影响的土层编号

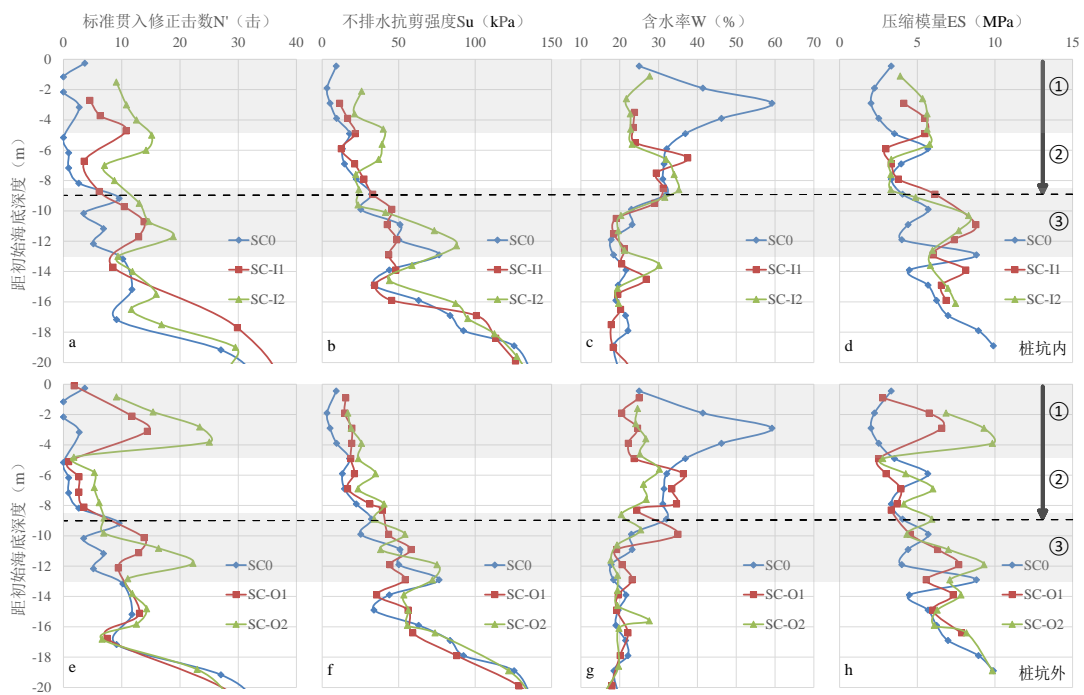


Figure 7. Physical and mechanical properties indexes of soil layer inside and outside the spudcan footing after 5 months vs. 3 years

图 7. 桩坑周边土层物理力学性能指标随时间变化对比曲线，上半图为桩坑内地层土体，下半图为桩坑外地层土体。图中向下箭头和虚线标示最终插桩深度；数字标号为受桩靴插拔明显影响的土层编号

再分析桩坑不同位置土体随时间恢复的情况，桩坑内地层土体的变化(图 7(a)~(d)和表 3)如下：第一层土体：变化较大，由淤泥为主转变为粉土，密实度随着时间从稍密变为中密；5 个月时天然含水率比原始土层小了近一半，随后就基本保持不变；压缩模量 5 个月时比原始增加了一倍，随后也保持稳定；不排水抗剪强度逐渐增加，5 个月时比原始土层提高了 1.5 倍，3 年后增强了 2.3 倍。第二层土体：粉质黏土的状态变为可塑偏软；天然含水率基本不随时间发生大的变化；压缩模量也保持稳定；不排水抗剪强度逐渐增加，5 个月时比原始土层提高了近 20%，3 年后增强了约 80%。第三层土体：以可塑 - 硬塑粉质黏土为主，变化不大；天然含水率基本不随时间变化；压缩模量 5 个月时比原始土体增加了近 60%，随后就基本保持稳定；5 个月时不排水抗剪强度稍大于原始地层，3 年后增加了 33%。

Table 3. Comparison of shallow stratum characteristics and mechanics index of geological stratum within the scope of spudcan penetration and extraction

表 3. 各钻孔插拔桩范围内浅部地层特征及层位物理力学性质指标对比表

| 钻孔层位 | 第一层 | 第二层 | 第三层 | |
|--------------|-------|----------------|--------------|--------------------|
| 地层分布及特征 | SC0 | 淤泥及粉土薄层 | 淤泥质粉质黏土 | 粉质黏土，可塑 - 硬塑，含粉土夹层 |
| | SC-I1 | 粉土，稍密 | 粉质黏土，可塑偏软 | 粉质黏土，可塑 - 硬塑，含粉土夹层 |
| | SC-O1 | 粉土稍密，表层淤泥薄层 | 粉质黏土，软塑 | 粉质黏土，可塑 - 硬塑，含粉土夹层 |
| | SC-I2 | 粉土，稍密 - 中密 | 粉质黏土，可塑偏软 | 粉质黏土，可塑 - 硬塑，含粉土夹层 |
| | SC-O2 | 粉土稍密，淤泥质粉质黏土夹层 | 粉质黏土，软塑 - 可塑 | 粉质黏土，可塑 - 硬塑，含粉土夹层 |
| 含水率(%) | SC0 | 41.7 ± 11.2 | 31.5 ± 0.4 | 22.9 ± 5.1 |
| | SC-I1 | 23.8 ± 0.2 | 32.7 ± 3.5 | 21.9 ± 4.2 |
| | SC-O1 | 23.2 ± 1.7 | 32.2 ± 4.6 | 24.5 ± 6.2 |
| | SC-I2 | 23.7 ± 2.3 | 31.1 ± 4.7 | 23.2 ± 4.9 |
| | SC-O2 | 25.2 ± 1.0 | 27.7 ± 1.8 | 20.4 ± 2.6 |
| 压缩模量(MPa) | SC0 | 2.52 ± 0.49 | 4.13 ± 0.93 | 4.54 ± 0.69 |
| | SC-I1 | 5.04 ± 0.64 | 3.36 ± 0.33 | 7.43 ± 1.07 |
| | SC-O1 | 5.04 ± 1.63 | 3.29 ± 0.57 | 5.46 ± 1.66 |
| | SC-I2 | 4.96 ± 0.76 | 4.27 ± 1.18 | 6.95 ± 1.48 |
| | SC-O2 | 8.66 ± 1.30 | 4.29 ± 1.15 | 6.64 ± 1.80 |
| 标准贯入修正击数 | SC0 | 1.6 ± 1.6 | 1.1 ± 1.0 | 6.3 ± 2.3 |
| | SC-I1 | 7.2 ± 2.6 | 4.8 ± 1.3 | 12.4 ± 1.4 |
| | SC-O1 | 9.3 ± 5.4 | 2.4 ± 0.9 | 12.0 ± 1.9 |
| | SC-I2 | 12.3 ± 2.2 | 7.9 ± 0.9 | 15.5 ± 2.5 |
| | SC-O2 | 18.2 ± 6.4 | 4.6 ± 1.7 | 13.1 ± 6.5 |
| 不排水抗剪强度(kPa) | SC0 | 6.73 ± 2.67 | 16.98 ± 3.53 | 39.60 ± 11.17 |
| | SC-I1 | 16.51 ± 4.20 | 20.29 ± 6.10 | 42.44 ± 5.88 |
| | SC-O1 | 17.20 ± 2.14 | 21.87 ± 5.59 | 46.27 ± 7.04 |
| | SC-I2 | 22.43 ± 2.75 | 30.54 ± 6.98 | 52.61 ± 23.00 |
| | SC-O2 | 20.44 ± 3.79 | 30.56 ± 7.33 | 50.36 ± 16.13 |

注：表中层位顺序分别对应图 6 和图 7 中的层位标号①、②和③。

桩坑外地层土体的随时间变化情况(图 7(e)~(h)和表 3): 第一层土体: 以粉土层为主, 其中夹层随时间由淤泥转变为淤泥质粉质黏土; 天然含水率 5 个月时比原始土层小了近一半, 随后就基本保持不变; 压缩模量逐渐增加, 5 个月后比原始增加了近 1 倍, 3 年后增加了 2.4 倍; 不排水抗剪强度 5 个月时比原始土层提高了约 2 倍, 随后就基本保持稳定。第二层土体: 粉质黏土的状态由软塑变为可塑; 天然含水率波动较大, 随时间呈减小趋势; 压缩模量基本保持稳定; 不排水抗剪强度逐渐增加, 5 个月时比原始土层提高了约 29%, 3 年后增强了约 80%。第三层土体: 以可塑 - 硬塑粉质黏土为主, 变化不大; 天然含水率基本不随时间发生大的变化; 压缩模量随时间稍有增加; 5 个月时不排水抗剪强度稍大于原始地层, 3 年后增加了 27%。

综上所述, 在拔除桩靴后, 研究区桩坑周边地层土体发生了显著变化, 与拔插桩前地层具有很大的差异, 其中桩坑上部再充填改造区、破坏重塑区和下部桩靴底部扰动区土体的工程性质变化最为剧烈, 距离插桩中心较远的其它区域差异越小。桩坑内上层土的类型发生了置换, 被桩坑周边土体坍塌充填、海床面跃移推移等较粗颗粒物回淤充填, 充填的粉土强度明显提高; 预压载插桩作业或者开采作业过程中, 桩靴使贯入深度以下的土层压密, 强度增加。导致地层剖面从“软 - 硬”结构变成了“硬 - 软 - 硬”结构。位于桩靴投影区的坑内重塑土体强度随时间逐渐恢复, 起初在较短恢复期内(至少 5 个月), 土体强度与刚拔桩时差异较小, 低于坑外的土体强度; 随恢复期增加, 土体强度基本都超过原状土和重塑区以外土体强度[21], 其中粉土强度增加更快, 黏土层的强度提升相对较少, 可能与粉土排水条件更好有关。

4. 讨论

4.1. 桩坑形成机理

桩坑的形成主要受拔桩过程中释放的吸力的强烈影响, 即桩靴底座与下伏土体分离时的深度, 这也可能是导致桩坑底部中心的轻微凸起的原因(图 3)。在软黏土中, 桩靴底座与下伏土体分离的界面呈现一定的锥形, 随后少量周边土体的坍塌回填, 造就了桩坑的雏形。界面处由于桩靴挤压产生的超孔压力的消散, 强度恢复更快, 在表层出现强度峰值, 形成一个较硬的层, 在浅剖记录呈现出较明显的 V 字型反射界面(图 4)。随着时间的推移, 此锥形空间逐渐被回淤直至夷平; 另外拔插过程中, 桩靴周边一定范围和深度内的土体受到不排水剪切以及很大的水平挤压, 致使土体中超空隙水压力升高造成土体破坏, 未破坏的土体也因超空隙水压力的不断传播和消散而蠕变, 产生较大的剪切变形, 形成具有很高空隙水压力的扰动重塑区。随着积累的超孔压逐渐释放、排水, 土体强度增加, 变得更密实, 导致下陷; 此外, 插桩过程中, 挤压效应导致表层的隆起, 也会增加桩坑的深度。总之, 桩坑的深度和形状是由多个因素综合造成的, 包括原状土体类型、强度、分层、插桩深度、土体回填程度、桩靴形状, 也可能会受到当地沉积环境的后期改造。比如本例中, 桩坑长期处于冲刷背景环境, 上部受到侵蚀, 坑内填充多为粗颗粒物。

4.2. 遗留桩坑对二次插桩的影响

桩靴 - 足迹相互作用是一个复杂的非线性过程, 受控于多个因素: 插桩偏心距、桩坑的几何形状、土体性质及受到扰动后的强度变化、桩靴的形状、自升式平台结构固有的物理特性、预压载水平等[7]。在桩坑底部以上较浅的深度发生的二次插桩破坏, 其破坏机制由桩坑坡度相关的明显的受力不对称性所致[22], 但目前研究采用的人工桩坑都是坡度不变的单坡结构, 但实际桩坑坡度是非线性的(图 3), 会导致更复杂的响应, 桩靴从较缓的上坡转向较陡的下坡, 不对称性会突然增加, 受力不平衡加大。当插入较深时, 破坏机制受周边土体强度的不均一性主导[21]。由于重塑土体强度的分布导致的桩靴底座左侧和

右侧之间的不平衡力,但随着恢复期的增加,桩坑内外土体强度差距也逐渐增加,会导致桩靴受力更为不平衡,二次就位时还需要考虑桩坑的新旧程度。

一个典型的桩坑的土体强度分布呈现出高度的异质性,强度的较大横向变化与偏移距离直接相关,在 $0.5 D \sim 1 D$ 范围内的偏移距离下,桩靴除了受桩坑几何形态的影响外,在二次就位过程中还会经历土体引起的不均匀承载力。同样值得注意的是,强度随着深度和时间变化显著,虽然较短的平台作业时间和较早的二次插桩会导致桩坑中心出现较软的土体,但较长的作业时间(当作业产生的所有超孔隙水压力都已消散时)和较长的间隔期(当拔桩产生的所有超孔隙水压力都已消散时)会在桩靴最大插桩深度以下产生局部坚硬层。同时由于桩坑回淤较粗沉积,或使用中砂或砾石等较粗充填物人工回填桩坑,都会在表层形成一个坚硬的地层。这些现象都是二次就位面临的潜在危害,但目前常规的缓解措施(回填桩坑、试踩)忽略了这些危险。比如,即使采用一个与以前使用的几何形状相同的桩靴二次插桩时,如果桩坑内的土体比未扰动土体要软的多,可能会发生出乎意料的就位深度(相对与安装在未扰动土体中的另外两个桩腿),进而导致自升式平台不稳定。相反,如果在桩坑下已经形成了一个或多个坚硬的地层,如果桩靴未穿透该层就已达到预压荷载,就会存在刺穿的潜在风险。

目前大部分研究只是针对单一桩腿桩靴桩坑,但是自升式平台一般有 3 或 4 条桩腿,之间的间距一般不超过 5 倍的桩靴直径,各桩腿遗留桩坑的影响范围会相互叠加,出现类似群桩的效应,土体的响应将更加复杂。此外,二次插桩时已插入的桩腿还会影响其他桩腿的受力状态。所以仅考虑桩靴和桩坑之间的作用,获得的结论只是理解桩坑行为的第一步。下一步需要进行更复杂的分析,比如多桩坑效应、考虑土-桩靴-桩腿和船体之间的充分相互作用,将岩土分析与结构分析结合起来。

5. 结论

本文详细研究了废黄河水下三角洲上自升式钻井平台遗留桩坑中一个具有代表性的案例。通过对多年高分辨率水深测量、浅地层剖面探测、工程地质调查资料分析对比,得出以下结论:

1) 在正常固结饱和软黏土层中,刚形成的桩坑尺寸为直径 $2 D$ 、深度 $0.33 D$;桩坑底部平坦,宽度接近桩靴直径 D ;桩坑内壁呈现出上坡缓、下坡陡的双坡结构。随着时间的推移,桩坑深度变浅,坡度变缓,逐渐趋于夷平。

2) 桩坑的土体扰动破坏特征,在垂向上,原始海床以下至部分延伸到桩靴贯入深度以下的范围被剧烈扰动。在横向上,桩靴投影区下方的扰动程度最大,并且随着径向距离的增加而减小。强烈扰动在距插桩中心线 $0.5 D$ 范围内, $1 D$ 之外的土体影响较小,两者之间为轻度扰动。

3) 桩周土体最先遭受结构性破坏和塑性流动,距离较远的土体仍处于弹性变形阶段。经扰动的土体极易变动,表现为地表、浅层和深层土体发生竖向和水平的位移,其数值和影响范围较大。根据桩坑周边土体扰动特性和破坏程度,可将地层分为六个区域:① 桩端扰动区;② 破坏重塑区;③ 塑性扰动区;④ 侧向弹性变形区;⑤ 再充填改造区;⑥ 海底表层隆起区。

4) 桩坑上部再充填改造区、破坏重塑区和下部桩靴底部扰动区土体的工程性质变化最大。桩坑内上层土的类型发生了置换,充填的粉土强度明显提高;桩靴使贯入深度以下的土层压密,强度增加。导致地层剖面从“软-硬”结构变成了“硬-软-硬”结构。

5) 桩坑内重塑土体强度随时间逐渐恢复,在较短恢复期内,土体强度与刚拔桩时差异较小,低于坑外的土体强度;随恢复期增加,土体强度基本都超过原状土和重塑区以外土体强度,其中粉土强度增加更快,黏土层的强度提升相对较少。

6) 建议再次插桩风险分析时需要充分考虑桩坑的新旧程度、“硬-软-硬”结构存在刺穿的潜在风险、桩靴和桩坑之间的作用、多桩坑效应、土-桩靴-桩腿和船体之间的充分相互作用,将岩土分析与

结构分析结合起来。

基金项目

鲁地一勘-KC202207-“张力腿式浅海岩土勘察移动平台设计研究”。

参考文献

- [1] Kong, V.W., Cassidy, M.J. and Gaudin, C. (2010) Spudcan Reinstallation near Existing Footprints. *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Zurich, 28 June-1 July 2010, 1033-1038.
- [2] Hossain, M.S. and Stainforth, R. (2016) Perforation Drilling for Easing Spudcan-Footprint Interaction Issues. *Ocean Engineering*, **113**, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.01.002>
- [3] Kong, V., Cassidy, M.J. and Gaudin, C. (2013) Experimental Study of Effect of Geometry on Reinstallation of Jack-Up Next to Footprint. *Canadian Geotechnical Journal*, **50**, 557-573. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0381>
- [4] Jack, R.L., Hoyle, M.J.R., Smith, N.P., et al. (2013) Jack-Up Accident Statistics—A Further Update. *Proceedings of the 14th International Conference on the Jack-Up Platform Design, Construction and Operation*, London, 17-18 September 2013, 215-223.
- [5] Dier, A., Carroll, B. and Abolfathi, S. (2004) Guidelines for Jack-Up Rigs with Particular Reference to Foundation Integrity. HSE Books.
- [6] Berg, A.H.H.J. (2004) Harmonisation of Distributed Geographic Datasets: A Model Driven Approach for Geotechnical & Footprint Data. Master's Thesis, Delft University of Technology.
- [7] 刘智慧. 钻孔法减弱自升式平台滑移和穿刺风险的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海事大学, 2021.
- [8] Gan, C.T., Leung, C.F., Cassidy, M.J., et al. (2012) Effect of Time on Spudcan-Footprint Interaction in Clay. *Géotechnique*, **62**, 401-413. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.063>
- [9] 赵军, 段梦兰, 宋林松, 等. 自升式钻井平台就位时老桩坑对桩靴性能的影响分析[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 104-108+115.
- [10] Gan, C.T. (2009) Centrifuge Model Study on Spudcan-Footprint Interaction. Ph.D. Thesis, National University of Singapore.
- [11] Cassidy, M.J., Quah, C.K. and Foo, K.S. (2009) Experimental Investigation of the Reinstallation of Spudcan Footings Close to Existing Footprints. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**, 474-486. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:4\(474\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:4(474))
- [12] Gaudin, C., Kong, V. and Cassidy, M.J. (2012) An Overview of Spudcan Reinstallation Near a Footprint. *Proceedings of the 44th Offshore Technology Conference*, Houston, 30 April-3 May 2012, OTC23050. <https://doi.org/10.4043/23050-MS>
- [13] Purwana, O.A., Leung, C.F., Chow, Y.K., et al. (2005) Influence of Base Suction on Extraction of Jack-Up Spudcans. *Geotechnique*, **55**, 741-753. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.10.741>
- [14] Handidjaja, P., Gan, C.T., Leung, C.F., et al. (2009) Jack-Up Foundation Performance over Spudcan Footprints Analysis of a Case History. *Proceedings of the 12th International Conference on the Jack-Up Platform Design, Construction and Operation*, London, 15-16 September 2009, 136-137.
- [15] Teh, K.L., Handidjaja, P., Leung, C.F., et al. (2010) Leg Penetration Analysis of Jack-Up Rig Installation over Existing Footprints. *Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, 20-25 June 2010, 427-433.
- [16] 宋清峰, 吴建政, 亓发庆, 等. 插拔桩对黄河水下三角洲浅层土的扰动及恢复研究[J]. 海岸工程, 2007, 26(2): 11-18.
- [17] 周勇华, 赵川, 肖菲. 插桩引起的黄河水下三角洲工程地质条件变化——以埕岛油田区为例[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(12): 35-39.
- [18] 宋玉鹏, 宋丙辉, 孙永福, 等. 重复插拔桩引发粉质海床扰动效应研究[J]. 油气田地面工程, 2021, 9(3): 50-58.
- [19] 荆少东, 梁晓勇, 徐帅陵, 等. 埕岛油田海上自升式平台反复插拔桩对地层的影响[J]. 油气田地面工程, 2021, 6(4): 21-26.
- [20] 王楠, 吴建政, 亓发庆, 等. 黄河水下三角洲表层粉土的冲切破坏与残留楔体研究[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(6): 1283-1288.
- [21] 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.

- [22] Kong, V.W. (2009) Jack-Up Reinstallation near Footprints. Ph.D. Thesis, University of Western Australia.