

文章编号: 1006-2467(2023)S1-0025-05

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.S1.09

埕岛油田反复插拔桩区域就位风险及预防措施

安涛¹, 林增勇¹, 张达²

(1. 中石化胜利石油工程有限公司, 山东 东营 257000;

2. 青岛环海海洋工程勘察研究院有限责任公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 胜利埕岛油田位于现代黄河水下三角洲, 海底地层复杂, 沉积物粉土、粉质黏土互层变化大。近年来, 动平台作业在同一井口或相近井口反复插拔桩作业次数越来越多。海上动平台反复插拔桩区域存在滑桩、穿刺、液化下沉风险, 在该类型区域插桩存在较大隐患。针对该风险进行预防措施分析, 降低动平台插桩风险。

关键词: 埕岛油田; 反复插拔桩; 滑桩; 穿刺; 液化下沉

中图分类号: P 751

文献标志码: A

Risk and Preventive Measures of Pile Placement in Chengdao Oilfield

AN Tao¹, LIN Zengyong¹, ZHANG Da²

(1. Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Sinopec, Dongying 257000, Shandong, China;

2. Qingdao Huanhai Marine Engineer Prospecting Institute Co., Ltd.,

Qingdao 266000, Shandong, China)

Abstract: Chengdao Oilfield is located in the modern Yellow River underwater delta, where the seabed strata are complex, and the sediment silt and silty clay have great interbedding changes. In recent years, an increasing number of jack-ups are installed and removed in the same wellhead or similar wellhead. There are risks of sliding pile, punch-through, and liquefaction and subsidence in the area where piles are repeatedly inserted and pulled out on offshore moving platform. Aimed at the risks, preventive measures are analyzed to reduce the risk of pile driving on jack-up platforms.

Key words: Chengdao Oilfield; piles repeatedly inserted and pulled; sliding pile; punch-through; liquefaction and subsidence

在海上勘探开发过程中, 海上平台需在不同井位间多次移位和就位, 平台反复插拔桩会破坏海底土体结构, 影响井口附近地貌, 形成多个或串状桩坑。桩坑内土体与自然形成未扰动的土体物理力学性质差异甚大, 存在滑桩、穿刺、液化下沉等风险。反复插拔桩形成的桩坑成为世界性难题, 《海洋井场调查规范》^[1]未明确指出其风险及防范措施, 仅提出需

要分析和评价海底冲刷、滑坡、海底障碍物等灾害性地质条件。ISO 规范^[2]指出: 当自升式平台从场址离开后, 在海底或海床内较硬层中遗留桩坑。桩坑的形式取决于几个因素, 如桩靴的形状、土壤的条件、桩靴实际插入地层情况以及拔桩的方法。凹陷的形状和凹陷存在的时间也受到当地沉积环境的影响。桩靴位置非常接近或部分和脚印重叠的情况应该充

收稿日期: 2022-07-07 修回日期: 2022-07-25 录用日期: 2022-08-22

作者简介: 安涛(1985-), 高级工程师, 现主要从事海上运行和 Risk 管理工作。

电话(Tel.): 0546-8552157; E-mail: ant5.oss@sinocpec.com.

分被考虑,这是由于原始地层和脚印中或者脚印周边坡上存在差异阻力.由此产生的桩腿位移或者桩靴偏心压载会对自升式平台造成损坏. SNAME 规范^[3]提出:旧桩坑的危害无法避免,需要最大化降低潜在风险.可以考虑在旧桩坑内充填一些填充物,但对如何选择填充物及填充物的去除方法并未提出明确方案.

1 反复插拔桩区域的风险

1.1 滑桩风险

同一区域反复插桩时,桩靴底部强度不均匀的土体会造成桩靴底部阻力与桩轴不重合,产生水平偏向力,插桩过程中桩靴可能滑向或滑出老桩坑,造成平台倾斜和碰撞采油平台的风险.且当平台在反复插桩后桩坑回填物为高强度粒状土时,桩靴入泥过浅在极端天气下亦会引起滑桩风险.而由于反复插桩导致旧桩坑内土体软硬不均,极易发生桩腿快速下落^[1,4-5].

1.2 穿刺风险

反复插拔桩后,在井口水动力作用下,桩坑回填物质不同,若桩坑表层回填物为密实程度较好的粒状土,而下覆较厚的软弱黏性土层,形成上硬下软地层,易出现平台压载后入泥较浅但升高气隙后在实际生产中出现桩腿快速下沉风险,轻则生产任务停止,重则平台损毁^[6-7].

1.3 液化下沉风险

当反复插桩桩坑内回填密实程度较好的粒状土然后再次就位时,极易使压载后桩靴入泥过浅,且粉土为持力层时,虽然竖向承载力满足要求,但存在由于动荷载如风荷载、波浪荷载、机器运转的惯性力等增大超出平台承受能力,引起液化下沉,带来平台倾斜风险^[8].

2 预防措施分析

2.1 重点预防上硬下软“铁板砂”地层

软指流塑-可塑黏土层,硬指中密-密实粉土粉砂层.表层存在中密-密实铁板砂^[9-10]的地层需重点防控,这是发生平台穿刺事故的典型地层.预测插桩深度时,若铁板砂厚度较薄,建议穿透此层,到达铁板砂下持力层,并提示平台存在穿过铁板砂阻力和未穿透铁板砂风险.

2.2 预防反复插桩井口滑桩情况

土体强度的差异会造成桩靴底部阻力与桩轴不重合,产生水平向的偏心力^[11],这两种力作用下,桩靴可能滑向旧桩坑,影响平台稳定性.旧桩坑区域地

层扰动明显,不易准确分析插桩深度,应对就位区域老桩坑历史海洋调查数据和实际插桩数据进行统计、分析,采用理论计算、历史数据分析与工程实践经验相结合的方式,预测插桩入泥深度,并提示平台压载过程中的风险.

2.3 预防插桩过浅引起的滑移问题

插桩过浅导致水平荷载对表层土产生较大推覆力矩,且增加表层液化扰动作业引起滑移问题.建议在土强度较高地层采取措施使入泥深度大于桩靴高度^[12],减少海底流对桩靴附近土体的侵蚀.在实际运行中,首先应尽可能通过插桩计算,选择能够达到插桩深度的平台;其次可采用特殊措施(如挖泥船)处理预就位地层,破坏铁板砂地层;如采取上述措施仍无法覆盖桩靴,建议采取投沙防护措施.投沙应经专业设计和施工,确保投沙质量.

2.4 预防插桩至粒状土引起的振动液化问题

插桩至粒状土,以粒状土为持力层时,虽然竖向承载力满足要求,但由于动荷载如风荷载、波浪荷载、机器运转的惯性力等增大超出平台承受能力,会引起液化下沉,且孔隙水在振动的短促期间内排不出去,就将出现从松到密的过渡阶段,这时颗粒离开原来位置,而又未落到新的稳定位置上,与四周颗粒脱离接触,处于悬浮状态.这种情况下颗粒的自重,连同作用在颗粒上的荷载会由土颗粒和水共同承担.动荷载增大使粒状土发生振动液化量增大,导致沉降量增大.随着桩靴插入深度增大,桩靴上部土层上覆土层厚度增大,土层抗液化能力增强,安全性增加.虽然下沉量可控,但是局部下沉会引起生产任务暂停及平台倾斜事故发生^[13].

3 工程实例

以下列举埕岛油田一个井场中存在的风险,并提出合理的预防措施的案例.

3.1 井场调查报告

A 井场工程地质调查成果参数如表 1~3 所示.表中: N_q 、 N_r 分别为超载和土的容重引起的极限承载力;空白表示不适用.

调查本井位历史插桩发现, A 井从建成至今,平台多次在本井位就位,平台拔桩后在海床上遗留老桩坑,坑内回填高扰动土,周边为原始土或轻微扰动土,导致海床地基承载力不均匀.事实证明,本井位历史桩入泥深度 5.46~7.92 m,左艏桩入泥深度 6.08~8.05 m,右艏桩入泥深度 4.15~8.52 m,同一桩靴位置入泥深度差别较大为反复插桩引起地基承载力不均所致.

表 1 A 井场动平台艏桩工程地质调查成果参数表

Tab. 1 Soil parameters of borehole at wellsite of jack-up bow pile at Well Site A

土层 编号	土层名称	深度/m	水下重度/ (kN·m ⁻³)	黏性土设计 抗剪强度/kPa	粒状土设计 抗剪强度,Φ/(°)	承载力系数	
						N _q	N _r
1	粉土	0.0~2.1	7.5~9.5	42.2~65.6	13~18	3.9	2.6
2	粉土	2.1~7.1	8.5~10.5		25~28	10.7	10.9
3	粉砂	7.1~8.0	8.5~10.5		27~30	14.7	16.7
4	粉质黏土	8.0~11.2	8.0~10.0	57.6~85.8	27~30	14.7	16.7
5	粉土	11.2~14.6	8.5~10.5		27~30	14.7	16.7
6	粉砂	14.6~17.8	8.5~10.5		27~30	14.7	16.7
7	粉质黏土	17.8~19.1	8.0~10.0	28~32		18.4	22.4
8	粉土	19.1~20.0	8.5~10.5				

表 2 A 井场动平台左艏桩工程地质调查成果参数表

Tab. 2 Soil parameters of borehole at wellsite of jack-up port stern pile at Well Site A

土层 编号	土层名称	深度/m	水下重度/ (kN·m ⁻³)	黏性土设计 抗剪强度/kPa	粒状土设计 抗剪强度,Φ/(°)	承载力系数	
						N _q	N _r
1	淤泥	0.0~0.8	6.0~7.0	5.6~10.2			
2	粉土	0.8~3.0	8.0~9.0		13~18	3.9	2.6
3	杂填土	3.0~5.4	8.0~9.0		13~18	3.9	2.6
4	粉土	5.4~7.6	8.5~9.5		23~27	10.7	10.9
5	粉砂	7.6~8.7	9.5~10.5		25~30	14.7	16.7
6	粉土	8.7~16.8	9.5~10.5		25~30	14.7	16.7
7	粉质黏土	16.8~18.1	10.0~11.0	53.4~86.5			
8	粉土	18.1~20.0	10.0~11.0		28~32	18.4	22.4

表 3 A 井场动平台右艏桩工程地质调查成果参数表

Tab. 3 Soil parameters of borehole at wellsite of jack-up right stern pile at Well Site A

土层 编号	土层名称	深度/m	水下重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏性土设计 抗剪强度/kPa	粒状土设计 抗剪强度, $\Phi/(^{\circ})$	承载力系数	
						N_q	N_r
1	粉土	0.0~2.5	7.2~7.9	35.2~52.6	13~18	3.9	2.6
2	粉土	2.5~3.2	8.0~9.0		18~22	6.4	5.4
3	粉质黏土	3.2~5.2	8.0~9.0		25~30	14.7	16.7
4	粉土	5.2~10.6	9.3~10.3	58.6~83.5			
5	粉砂	10.6~17.2	9.8~10.5				
6	粉质黏土	17.2~18.6	10.3~10.8		28~32	18.4	22.4
7	粉土	18.6~20.0	10.3~10.8				

根据《海上平台场址工程地质勘察规范》(GB/T 17503—2009)和《海洋井场调查规范》(SY/T 6707—2016),艏桩桩靴最大截面入泥深度至第 2 层粉土 5.7 m 左右处,预计艏桩入泥深度 2.0~4.8 m;左艏桩桩靴最大截面入泥深度至第 5 层粉砂层 7.6 m 左右处,预计左艏桩入泥深度 4.0~6.8 m;右艏桩桩靴最大截面入泥深度至第 4 层粉土层 5.3 m

左右处,预计右艏桩入泥深度 3.5~6.3 m.

3.2 就位插桩及压载作业

第 1~3 天:平台抗风.

第 4 天:发现首桩明显下沉 0.1°,右桩明显下沉 0.1°.上报工程部后,降平台重新压载.夜间西北风 6~7 级转阵风 8 级,平台调平,值班观察.

第 5 天:9:00 降平台开始压载,15:00 第 4 轮

(1 780.1 t) 压载完毕. 20:00 横倾 0.2° , 纵倾 0.3° , 排载调平.

第 6 天:4:00—7:00 平台压载, 纵横倾无变化. 排载做升平台准备.

第 1 次压载结束: 首桩入泥 2.17 m, 左桩入泥 5.76 m, 右桩入泥 3.01 m.

第 2 次压载结束: 首桩入泥 2.49 m, 左桩入泥 5.76 m, 右桩入泥 3.11 m.

第 1 次和第 2 次入泥深度均在预计深度范围内, 但艏桩和左桩台风期间下沉.

3.3 原因分析

3.3.1 穿刺风险分析 结合钻探资料与实际艏桩插桩情况, 艏桩入泥 2.49 m, 在作业四号平台艏桩压载过程中, 第 1 层粉土表层松散, 完全排出; 第 2 层粉土厚 5.1 m, 第 2 层粉土局部排出, 大部分在桩靴下作为土垫层; 第 3 层粉砂、第 4 层粉质黏土及下卧土层可作为桩靴下良好的持力层和下卧层.

根据《海洋井场调查规范》^[1] 穿刺相对安全系数分析法:

$$F_{s1} = P_2 / P_1 \geq 1.5$$

其中: F_{s1} 为根据最大极限承载力定义的无量纲穿刺相对安全系数; P_1 为单桩最大预压荷载; P_2 为计算得出的桩靴或桩端所处硬土层的最大极限承载力.

由于所应用的分析方法的局限性, 通常认为当 F_{s1} 大于或等于 1.5 时, 本井位可以适应钻井装置插桩; 当 F_{s1} 小于 1.5, 并且只要 F_{s2} 大于或等于 1.2, 通常可认为本井位适合钻井装置插桩. 有公式^[1]

$$F_{s2} = P_3 / P_1 \geq 1.2$$

其中: F_{s2} 为根据最小极限承载力定义的无量纲穿刺相对安全系数; P_3 为桩靴或桩端所处深度以下软弱土层的最小极限承载力.

计算可得, 当桩靴的入泥深度为 2.49 m 时, 插桩安全系数 F_{s1} 为 1.28, F_{s2} 为 1.30, F_{s1} 小于 1.5; 并且只要 F_{s2} 大于或等于 1.2, 通常可认为本井位适合钻井装置插桩, 满足安全系数要求.

同理, 右桩入泥 3.11 m, 当桩靴入泥深度在 5.2 m 时, 安全系数满足; 当桩靴的入泥深度为 3.11 m 时, 第 1 层粉土和第 3 层粉质黏土排出, 第 2 层粉土作为下垫层, 第 4 层粉土、第 5 层粉砂、第 6 层粉质黏土、第 7 层粉土形成强度增大的厚层, 共同承担平台荷载. 满足安全系数, 不会发生穿刺风险.

3.3.2 台风期间下沉原因分析 艏桩地层第 1 层为松散粉土 ($0.0 \sim 2.1$ m), 第 2 层为稍密粉土 ($2.1 \sim 7.1$ m); 第 1 次压载完成后第 1 层松散粉土排开, 第 2 层稍密粉土作为粒状土, 在桩靴垂直荷载

作用下, 孔隙比减小, 相对密实度增大. 右艏桩第 1 层为松散粉土 ($0.0 \sim 2.5$ m), 第 2 层为稍密粉土 ($2.1 \sim 3.2$ m), 第 3 层为可塑粉质黏土 ($3.2 \sim 5.2$ m), 而在平台压载完成后, 受到动荷载如风荷载、波浪荷载、机器运转的惯性力等影响时, 在海底的第 2 层粉土孔隙内充满水, 且孔隙水在振动的短促期间内排不出去, 就将出现从松到密的过渡阶段, 这时颗粒离开原来位置, 而又未落到新的稳定位置上, 与四周颗粒脱离接触, 处于悬浮状态, 这种情况下颗粒的自重, 连同作用在颗粒上的荷载会由土颗粒和水共同承担. 而台风导致动荷载增大, 使第 2 层粉土发生振动, 液化量增大, 导致艏桩和右艏桩沉降量增大. 随着桩靴插入深度增大, 桩靴上部土层上覆土层厚度增大, 土层抗液化能力增强. 且两次压载均在预测深度范围内, 安全性可靠.

3.3.3 风险防控安全措施

(1) 平台施工过程中中控室 24 h 保持人员值班(白班报务员, 夜班带班队长), 对平台纵横倾进行持续观察、记录, 做到有异常早发现早处理.

(2) 平台经理组织技术员、机电工程师、水手长严格控制平台油、水、管材、洗井液等活动载荷上平台的时间节点, 避免平台活动载荷过多, 作业期间的实际载荷不超过作业状态最大可变载荷的 80%, 并计算稳性、合理分布摆放.

(3) 施工期间, 起重作业、钻台起下钻作业平稳操作, 减小动载荷对地基产生的影响.

(4) 加强平台正职领导带班, 组织制定现场处置方案, 有异常及时研判处置.

(5) 机电工程师负责每天检查升降系统, 确保运转正常, 日常施工中升降系统锁定牢固.

(6) 带班队长、水手长加强组织应急演练, 并确保平台消防救生设备处于随时可用状态.

(7) 队长负责检查确认悬臂梁、井架移动系统处于锁死状态, 液压移动装置系统保持正常.

(8) 密切关注气象变化, 台风、风暴潮等灾害来临前, 采取回收悬臂梁、减载的方式, 并进入应急值班状态, 一旦有异常可立即实施降平台作业, 并采取相应的应对措施.

4 结语

基于胜利埕岛油田反复插拔桩复杂地层动平台插桩作业及工程实例, 总结风险点及防控措施, 进行大数据分析, 将研究结果运用于实际插桩作业, 为反复插拔桩区域地层插桩作业提供经验. 针对反复插拔桩区域动平台就位这一世界性难题, 后续研究将

就反复插拔桩就位声学特征及工程力学特点对地层进行分析,并提出在反复插拔桩地区就位的合理地基处理措施。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 海洋井场调查规范: SY/T 6707—2016 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
National Energy Administration. Specification for marine well site survey: SY/T 6707—2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [2] ISO 19905-1. Petroleum and natural gas industries—site-specific assessment of mobile offshore units—part 1: jack-ups[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.
- [3] ISO 19905-1: 2016. Guidelines for site specific assessment of mobile jack-up units[S]. New Jersey, USA: SNAME, 2002.
- [4] 刘阳, 江鹏, 赵少伟, 等. “老脚印”对自升式钻井平台插桩滑移的影响研究[J]. 探矿工程-岩土钻掘工程, 2018, 45(6): 40-46.
LIU Yang, GANG Peng, ZHAO Shaowei, *et al.* Influence of “old footprints” on pile slip of self-elevating drilling platform[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling & Tunneling)**, 2018, 45(6): 40-46.
- [5] 戴霖, 邓春林, 杨杰, 等. 平台就位过程滑桩研究及对策[J]. 中国水运, 2019, 19(6): 91-92.
DAI Lin, DENG Chunlin, YANG Jie, *et al.* Research and countermeasures of sliding pile in the process of platform positioning [J]. **China Water Transport**, 2019, 19(6): 91-92.
- [6] MAHANTA R. Punch-through analysis of jack-up rig at a site off the east coast of India—A case study [C] // IV, A, MAJI V. **Geotechnical Applications**. Singapore: Springer, 2019: 283-290.
- [7] BIENEN B, QIU G, PUCKER T. CPT correlation developed from numerical analysis to predict jack-up foundation penetration into sand overlying clay[J]. **Ocean Engineering**, 2015, 108: 216-226.
- [8] 严维锋, 张峰, 叶俊放, 等. 南黄海铁板砂地层插桩分析及应对[J]. 海洋石油, 2021, 41(2): 115-120.
YAN Weifeng, ZHANG Feng, YE Junfang, *et al.* Analysis and countermeasures of pile insertion in the iron plate sand stratum of the South Yellow Sea[J]. **Offshore Oil**, 2021, 41(2): 115-120.
- [9] 陈庆, 谭伯兴. 胜利六号近海自升式移动钻井平台的插拔桩问题的研究[J]. 海洋工程, 1993, 11(4): 84-92.
CHEN Qing, TAN Boxing. Study on problems in pulling up legs of offshore jack-up drilling platform—Shengli no. 6[J]. **The Ocean Engineering**, 1993, 11(4): 84-92.
- [10] 赵文哲. 埕岛海区浅表层地质特点分析[J]. 海岸工程, 2005, 24(4): 27-34.
ZHAO Wenzhe. Analysis of geologic characteristics of shallow strata in Chengdao sea area[J]. **Coastal Engineering**, 2005, 24(4): 27-34.
- [11] 安有杰. 旧桩坑对自升式平台插桩稳定性的影响及对策[J]. 中国化工贸易, 2020, 12(15): 242-243.
An Youjie. Influence of old pile pit on pile stability of jack-up platform and countermeasures [J]. **China Chemical Trade**, 2020, 12(15): 242-243.
- [12] 余稳. 海洋工程勘察中评价砂土液化势的方法研究[J]. 工程勘察, 2020, 48(2): 24-29.
SHE Wen. Study on evaluating methods of liquefaction potential for sandy soil in marine engineering investigation[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2020, 48(2): 24-29.
- [13] 王虎刚. 浅谈海洋饱和砂土液化及判别方法[J]. 价值工程, 2014, 33(22): 317-319.
WANG Hugang. On the liquefaction and identification methods of marine saturated sand[J]. **Value Engineering**, 2014, 33(22): 317-319.