

自升式平台穿刺风险随钻评估机制及其应用

龙 黎¹, 刘 宾¹, 刘 铮¹, 薛志刚¹, 孙永全¹, 郑前进², 陈垚森³

(1. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518067;

2. 深圳市宝安区大空港新城发展事务中心, 广东 深圳 518101;

3. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘要:自升式钻井平台通过插桩实现站稳,当其插桩压载点泥面以下存有上硬下软且硬地层较薄的硬壳地层(鸡蛋壳地层)时,平台将会发生穿刺,从而影响作业安全。通过对地层进行孔压静力触探测试(Piezocone Penetration Test, PCPT)和钻孔取样,计算其承载力,可评估平台插桩作业安全。从理论上验证了在对地层进行 PCPT 测试时所获取的锥尖阻力 q_c 和孔隙压力 u_2 是计算地层承载力的 2 个关键参数,其随钻曲线的变化可作为定性识别硬壳层的指标;并根据井位水深和平台实际的作业能力,可快速评估自升式钻井平台在插桩过程中的穿刺风险。以南海东部海域自升式平台作业为例开展研究,结果表明:相对常规自升式井场工程地质调查,该方法在提升时效和节约成本方面具有明显优势,可大幅提升井场工程地质调查的作业效率。

关键词:自升式平台;PCPT;随钻评估;穿刺风险;硬壳地层

中图分类号:TE242

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)04-0284-07

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.04.005

引用格式:LONG L, LIU B, LIU Z, et al. A while-drilling evaluation system for the punch-through risk of jack-up drilling platform during preloading and its application[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(4): 284-290. 龙黎, 刘宾, 刘铮, 等. 自升式平台穿刺风险随钻评估机制及其应用[J]. 海岸工程, 2021, 40(4): 284-290.

在全球海洋油气资源的勘探开发中,自升式钻井平台以其移动灵活、造价较低且适用不同海底条件和较大水深变化范围等优势,在海洋石油钻井装备中占据了重要的地位。典型的自升式钻井平台由 3 根桩腿支持其钻井平台模块,每个桩腿上都有其专属的“桩靴”。平台拖航就位后,通过抽水至甲板上实行压载,在此过程中桩靴缓慢插入海底泥面以下,直到达到最大预压载荷,实现平台稳定。

当海底泥面下存在着上硬下软且硬地层厚度较薄的层状地层时,自升式平台将会发生不可控的快速沉降,即发生“穿刺”(punch-through)。而一旦钻井平台作业水深和桩腿入泥深度之和超过平台作业极限时,将会导致自升式钻井平台发生如桩腿损坏、船体倾斜,甚至翻沉等重大安全事故。因此在自升式钻井平台压载作业前,要先进行井场工程地质调查,其工作内容主要为根据平台桩腿数量进行若干个 40 m 的 PCPT 作业,其原理是利用一根安装了传感器的圆锥形探头在地层中以准静力匀速贯入,所采集的各项应力数据如锥尖阻力、侧摩阻力和孔隙水压力等参数可连续、实时地反映地层变化特征,再结合 1 个 40 m 的海底地层钻孔取样结果,根据经验公式来进行土质分类和特性分析、推断地层的设计强度参数,为自升式钻井平台插桩深度计算提供基础资料。

前人的研究主要集中在研究穿刺的机理和优化运用 PCPT 测试中获取的参数进行地层承载力的计算等^[1-5],需较长的现场作业时间和室内计算时间方能得到可靠结论。南海东部海域每年 10 月至翌年 3 月进入冬季季风期,海况恶劣,海上现场作业时窗较窄,如何运用 PCPT 测试所获取的参数快速实现自升式平台插桩压载作业安全评估,对于提升季风期井场调查的工作效率具有十分现实的意义。

收稿日期:2020-10-27

作者简介:龙 黎(1986—),男,工程师,硕士,主要从事海上井场调查等物探方面研究. E-mail: longlihn@126.com

(陈 靖 编辑)

1 穿刺机理及其计算原理

自升式钻井平台穿刺,是指平台在升船压载过程中,桩腿之下的桩靴遇到硬地层之下存在软地层的层状地基,当桩靴施加的压载超过层状地基承载力时,地基土发生冲剪破坏,桩靴穿过硬地层进入软地层后,由于承载力的大幅下降,造成平台桩腿发生迅速且不可控的下沉现象。因此当地层的承载力曲线出现随着深度增加而降低的情况,必须对桩靴穿刺可能性进行评价。下列 3 种情况均有可能导致平台桩腿在压载过程中发生穿刺:①均一厚层黏性地层中的穿刺破坏;②上硬下软的地层,且硬地层较薄,当桩靴穿过上部硬层时的穿刺破坏;③上硬下软的黏性地层,桩靴位于硬层中,压载完成后,由于钻井作业过程中的震动和循环荷载等原因,上部硬层土产生渐进破坏导致硬地层土的强度降低,承载力下降,出现穿刺破坏。

其中第 2 种情况即所谓的硬壳地层,俗称“鸡蛋壳”地层。当自升式平台的桩靴接触硬壳地层的顶层时,因下覆软地层的存在,硬壳地层的承载力不足以支撑桩腿的压载量,致使硬壳地层发生冲剪破坏,其土层从桩靴两侧挤出,桩靴会快速穿透硬壳地层而进入下覆软地层,这是自升式钻井平台插桩压载作业中最常见且危害性最大的穿刺情况。

关于硬壳地层穿刺分析计算,国内普遍采用的《海洋井场调查规范》^[6]和 SNAME(The Society of Naval Architects and Marine Engineers)^[7]推荐的方法。2 种方法大致相同,都采用由 Young 和 Focht 提出的 1:3 载荷扩展法进行计算^[8],这个方法的原理是假设施加在上层硬地层的基础载荷被扩展通过硬层,在下层软地层的顶面产生一个假设的等效基础,通过硬地层的扩展比例因子为 1:3(水平方向:垂直方向)(图 1)。在这种情况下,上部硬地层的承载力由下层软地层的强度决定,穿刺的安全性主要取决于上层硬地层的厚度。其计算公式为:

$$q_n = 6 \times S_u \times \left(1 + 0.2 \times \frac{D'}{B'}\right) \times \frac{A'_p}{A_p} \leq q_{n(\text{硬层})}, \quad (1)$$

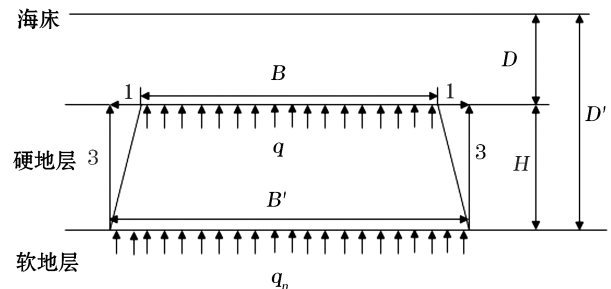
式中: q_n 为实际地层的承载力; S_u 为不排水黏性土抗剪强度; A_p 为实际基础面积; A'_p 为等效基础面积, $A'_p = A_p \times \left(1 + \frac{2H}{3B}\right)^2$; $q_{n(\text{硬层})}$ 为地层无限厚时的承载力。

当自升式钻井平台插桩压载位置确定后,式(1)中 S_u 为唯一变量,其计算公式为:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}}, \quad (2)$$

式中: N_{kt} 为 PCPT 测试所用的锥头系数; q_t 为校正后的 PCPT 锥尖阻力, $q_t = q_c + (1 - a) \times u_2$, 其中, q_c 为 PCPT 测试锥尖阻力(MPa)、 u_2 为 PCPT 测试孔隙压力(MPa)、 a 为 PCPT 测试所用探头圆锥面积比; σ_{vo} 为总上覆压力。

由此可见,当自升式钻井平台类型、桩腿桩靴大小和井口位置确定后,PCPT 测试中实测到的锥尖阻力 q_c 和孔隙压力 u_2 可作为判断硬壳地层的关键参数:当其随钻曲线出现明显高于上下地层的异常波动,且地层厚度较薄时(据南海东部海域经验,一般小于 4 m),则可基本判断该地层为硬壳地层。



注: H 为实际基础面之下硬地层厚度; B 为实际基础直径;

B' 为等效基础直径, $B' = B + \frac{2}{3} \times H$; D 为实际基础深度;

D' 为等效基础深度, $D' = D + H$

图 1 3:1 载荷扩展法示意图

Fig.1 A sketch map of 3:1 load spread method

2 案例分析

目前,南海东部海域常规自升式井场工程地质调查现场作业的主要内容:依次对自升式钻井平台的 3 个桩腿进行 40 m PCPT 测试,再在井口位置完成 1 个 40 m 钻孔取样,现场作业时间约为 2 d。然后将取样结果和 PCPT 测试结果返回陆地进行室内分析和计算,室内分析需 2~3 d,方能得到可靠的结论及建议报告(图 2)。

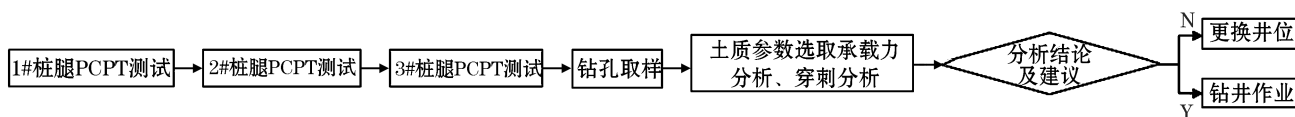


图 2 南海东部海域常规自升式井场工程地质调查现场作业流程

Fig.2 The flow chart of conventional engineering geological survey at the jack-up well site in the eastern South China Sea

2.1 案例 1

某年 10 月,南海东部海域已进入冬季季风期,H 平台计划 3 d 后钻探 HZ 井,该井位水深 110 m。H 平台是一艘三桩腿的自升式平台,最大压载载荷 112.2 MN,作业极限为 122 m,考虑平台作业安全,H 平台在 HZ 井完成压载后其桩腿入泥深度不得超过 12 m。若按常规方法开展 HZ 井的工程地质调查,现场作业时间需 2 d,而受季风影响当时海上作业时窗只有不到 1 d 的时间。因此现场决策在进行 HZ 井工程地质作业时优先开展 H 平台 1# 桩腿的 PCPT 测试作业,重点关注其锥尖阻力和孔隙压力这 2 个可用于判断该地层下是否存在硬壳地层关键数据的随钻曲线,进而分析其地层变化,评估在压载过程中平台桩腿穿刺的可能性。

现场 PCPT 测试随钻结果表明:在 HZ 井 1# 桩腿预定位置泥面以下 8~10 m 处,存在一个厚度约为 2 m 的硬质地层,其锥尖阻力 q_c 值明显大于上下相邻地层,说明该地层具有明显的硬壳地层特征(图 3)。

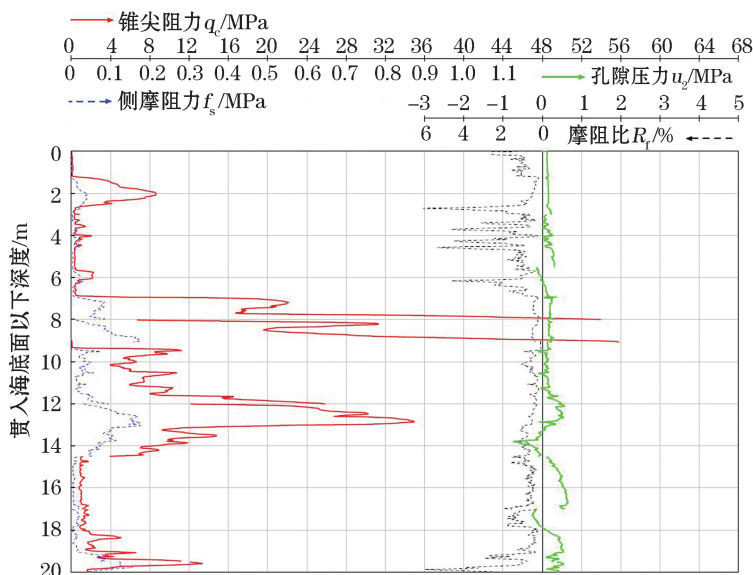


图 3 H 平台 1# 桩腿 PCPT 测试随钻曲线

Fig.3 The while-drilling curve of PCPT at 1# pile leg of Platform H

H 平台在该地层内的插桩作业中一旦发生穿刺,H 平台 1# 桩腿将快速沉降至泥面以下 19.2 m,穿刺行程达到 11.2 m,超过了 H 平台的作业极限(图 4)。因此在完成 HZ 井 1# 桩腿的 PCPT 测试后,立即停止该井后续工程地质作业,调查船转场至其他备用井开展作业,整个现场作业耗时 8 h。

2.2 案例 2

某年 12 月,F 平台计划 2 d 后钻探 LD 井,该井位水深 76.3 m。F 平台是一艘三桩腿的自升式平台,最大压载载荷 64.7 MN,作业极限为 90 m,考虑平台作业安全,F 平台在 LD 井完成压载后其桩腿入泥深度不得超过 14 m。

现场 PCPT 测试随钻结果表明:在 LD 井 1# 桩腿预定位置泥面以下 8~12 m 处,存在一个厚度约为 4 m 的硬质地层,其锥尖阻力 q_c 值明显大于上下相邻地层,但其绝对值并不大,说明该地层具有明显的硬壳地层特征,且其地层承载力不大(图 5)。

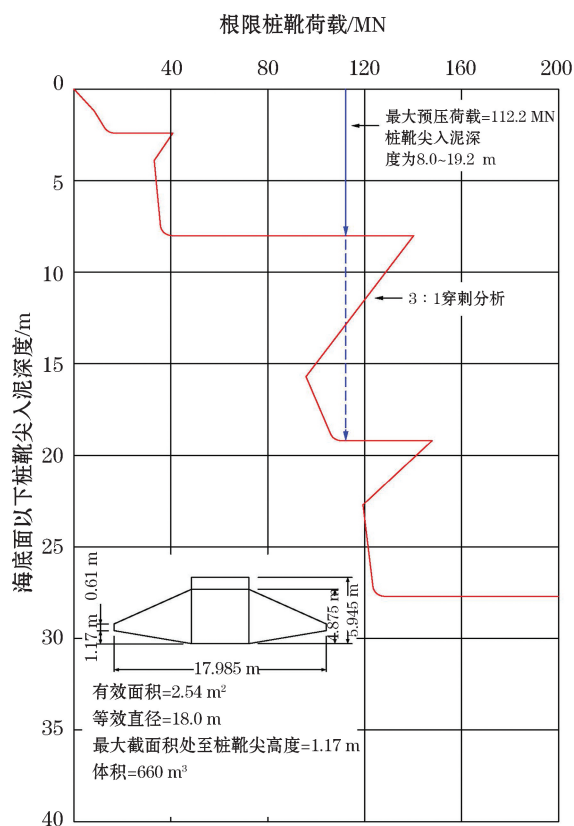


图 4 H 平台 1# 桩靴压载载荷与其入泥深度关系曲线

Fig.4 The relationship between the pressure load and the depth into the mud at 1# pile shoe of Platform H

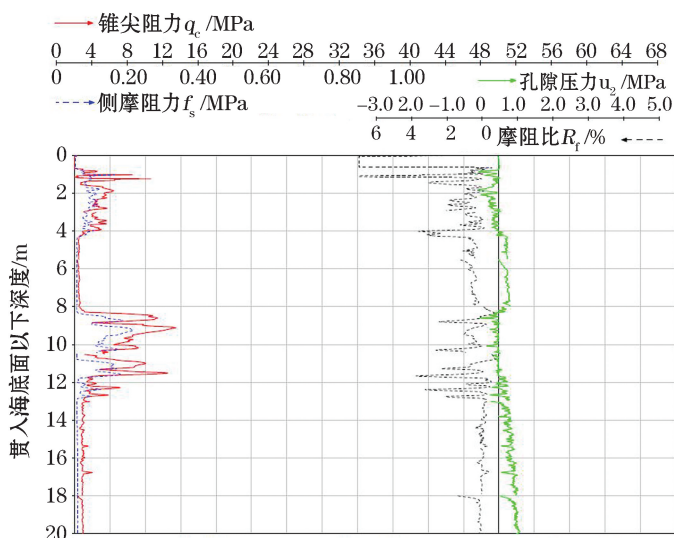


图 5 F 平台 1# 桩腿 PCPT 测试随钻曲线

Fig.5 The while-drilling curve of PCPT at 1# pile leg of Platform F

根据现场计算,F 平台在该地层内的插桩作业中一旦发生穿刺,该硬壳地层以下 12~40 m 的下覆地层均不足以支撑 F 平台桩靴的压载载荷,F 平台将发生不可预期的快速沉降(图 6)。考虑到平台作业安全的因素,现场评估该井场不适合 F 平台承钻,整个现场作业耗时约 7 h。

目前,南海东部海域采用了一套新的自升式钻井平台压载穿刺风险随钻评估机制,该机制在逐个对平台桩腿进行 PCPT 测试时,密切观察其随钻曲线的变化,结合平台的实际作业能力,可实时判断自升式平台压

载穿刺的风险(图7)。

对比2015—2019年南海东部海域井场调查单井作业时效和案例一 HZ 井、案例二 LD 井的作业时效(图8)可知,相对于常规井场工程地质作业,该机制在提升井场工程地质现场作业时效和节约成本方面具有明显的优势,尤其是在季风期其优势更加明显。

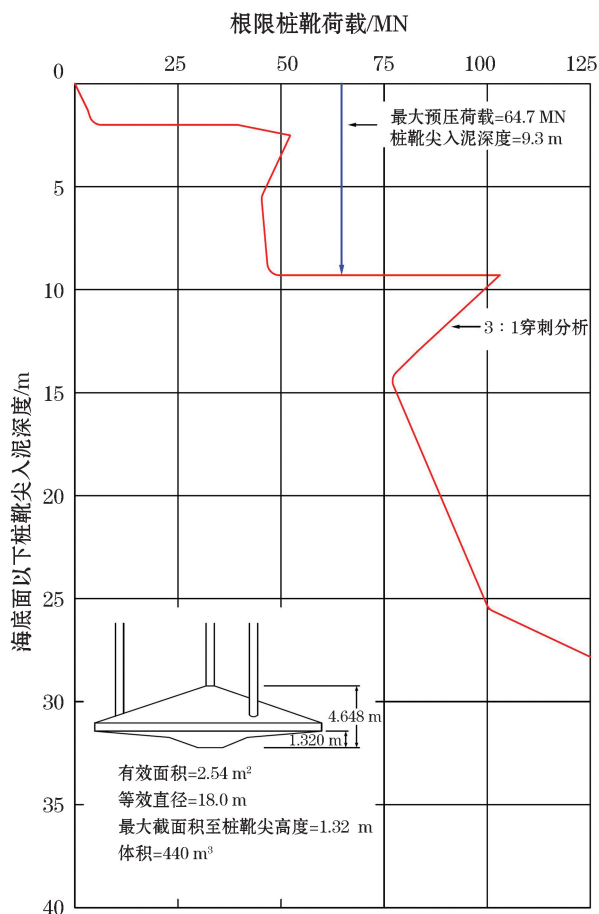


图6 F平台1#桩靴压荷载与其入泥深度关系
Fig.6 The relationship between the pressure load and the depth into the mud at 1# pile shoe of Platform F

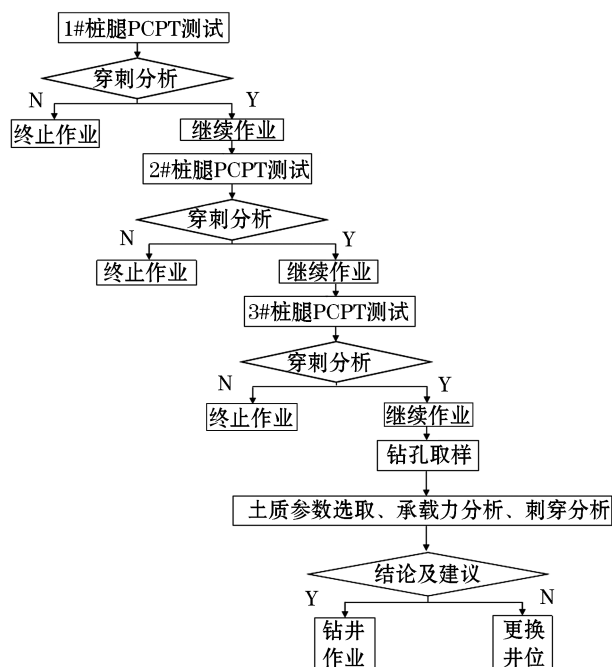


图7 自升式钻井平台压载穿刺风险随钻评估机制流程
Fig.7 The flow chart of the while-drilling evaluation system for the punch-through risk of jack-up drilling platform during preloading



注:2017年南海东部海域全年未进行井场工程地质作业

图8 HZ井、LD井及2015—2019年南海东部海域单井工程地质作业时效对比

Fig.8 The histograms of the time-effectiveness of the engineering geological survey operations at Well HZ, Well LD and the single-wells drilled in the eastern South China Sea during 2015—2019

3 结 论

本文根据南海东部海域多年的工作经验,结合具体工程案例,总结了自升式钻井平台压载穿刺杂险评估机制,得到以下结论:

1)PCPT 测试中其锥尖阻力 q_c 曲线和孔隙压力 u_2 随钻曲线的异常波动,可作为定性识别硬壳地层的重要指标。在冬季季风期现场作业时窗较短的情况下,通过合理安排作业顺序,重点关注 q_c 和 u_2 随钻曲线的变化,可实现快速地评估平台插桩压载过程中穿刺风险的目的,提升现场工作效率。

2)作业能力类似 H 或 F 的自升式钻井平台的插桩压载过程中,在厚度小于 4 m 的硬壳地层中极易发生穿刺。但对于不同海域,需要研究人员在对本地区沉积背景和平台作业能力进行充分总结,探究本地区硬壳地层厚度的一般规律。

参考文献(References):

- [1] ZHENG X Y, YAO S L, ZHOU Y R, et al. Application of PCPT data to the discrimination of liquefaction potential of sub-bottom granular soils[J]. Coastal Engineering, 2014, 33(3): 55-62. 郑喜耀, 姚首龙, 周杨锐, 等. PCPT 资料在海底浅层砂土液化势判别中的应用[J]. 海岸工程, 2014, 33(3): 55-62.
- [2] WANG H G, JIA W. Application of PCPT data to the determination of internal friction angle of sandy soil[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(2): 124-129. 王虎刚, 贾巍. 孔压静力触探在确定砂土内摩擦角中的应用[J]. 海岸工程, 2020, 39(2): 124-129.
- [3] ZHANG P Y, DING H Y. Numerical analysis on punch-through phenomenon of offshore jack-up drilling platform[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(2): 117-122. 张浦阳, 丁红岩. 海上自升式钻井平台桩靴穿刺现象的数值分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 117-122.
- [4] FENG L J, ZHANG F, ZHANG H, et al. Discussion on issues in piling for jack-up rig[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(11): 101-104. 冯利杰, 张福, 张辉, 等. 自升式钻井平台插桩问题探讨[J]. 石油机械, 2014, 42(11): 101-104.
- [5] HU Z H, ZHAO J, SONG L S, et al. Analysis on punch-through during the jack-up unit preloading in complex stratum[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011(5): 64-68. 胡知辉, 赵军, 宋林松, 等. 复杂地层条件下自升式钻井平台插桩穿刺分析[J]. 中国海上油气, 2011(5): 64-68.
- [6] National Energy Administration. Specification for marine well site survey: SY/T 6707—2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016. 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.
- [7] SNAME. Recommended practice for site specific assessment of mobile jack-up unit[M]. Alexandria: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2007.
- [8] YOUNG A G, FOCHT J A. Subsurface hazards affect mobile jack-up rig operations[J]. Soundings, 1981, 3(2): 4-9.

A While-Drilling Evaluation System for the Punch-Through Risk of Jack-up Drilling Platform During Preloading and its Application

LONG Li¹, LIU Bin¹, LIU Zheng¹, XUE Zhi-gang¹, SUN Yong-quan¹,
ZHENG Qian-jin², CHEN Yao-sen³

(1. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518067, China;

2. Center for Development Affairs of Airport New Town, Bao'an District, Shenzhen, Shenzhen 518101, China;

3. China Water Resources Pearl River Planning Surveying and Designing Co. Ltd., Guangzhou 510610, China)

Abstract: Jack-up drilling platforms can keep standing by pitching piles. When the stratum under the sur-

face at the load points of the piles is a thin hard crust and is harder at upper and soft at lower, the platforms will undergo the punch-through, thus affecting the operation safety. Through the piezocone penetration test (PCPT) and drilling samples, the bearing capacity of the stratum is calculated and the safety of the piling operation can be evaluated. It is theoretically verified that the cone resistance q_c and the pore-water pressure u_2 obtained during the PCPT are two key parameters for calculating the bearing capacity of the stratum. The while-drilling curve changes of the two parameters can be taken as the indicators for identifying qualitatively the hard crust stratum. Then, combining with the water depth at the well site and the actual operation capacity of the platform, the punch-through risk of the jack-up drilling platform during preloading can be evaluated rapidly. The operation of the jack-up drilling platform in the eastern South China Sea can be taken as the example. The results from that application have shown that compared with the conventional well site engineering survey, this method shows obvious advantages in the aspects of promoting time-effectiveness and saving cost and can greatly improve the operation efficiency of engineering geological survey at the well sites.

Key words: jack-up drilling platforms; piezocone penetration test; while-drilling evaluation; punch-through risk; hard crust stratum

Received: October 27, 2021