

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.007

自升式钻井船插桩对邻近平台桩基影响的 评价方法探讨

李书兆^{1,2}, 李亚¹, 鲁晓兵²

(1. 中海油研究总院, 北京 100028; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100910)

摘 要: 自升式钻井船被广泛用于中、浅水域油气钻井、勘探开发或平台维修等海洋工程。通常, 钻井船靠作业臂工作, 由于其极限长度有限, 所以钻井船作业时经常紧邻固定式导管架海洋平台。软弱土层中, 钻井船就位时插桩深度较深, 插桩过程中大量土体被排开, 致使邻近平台桩基可能承受很大的附加荷载, 这些附加荷载与桩基原有的荷载相叠加, 很有可能超出其原有设计承载能力, 引起严重的工程安全隐患和经济损失。如何可靠地评估自升式钻井船插桩对邻近导管架平台桩基的影响, 从而优化钻井船定位并指导导管架平台桩基基础的早期设计, 是我国当前海上油气开发亟需解决的一个难点问题, 迄今为止尚没有形成一种被广泛认可的方法。基于此, 系统阐述了评价自升式钻井船插桩对邻近桩基影响的方法, 包括模型试验、简化理论方法和数值方法, 分析了现有方法中存在的问题, 并对未来的研究方向提出了建议, 供读者参考。

关键词: 自升式钻井船; 桩靴贯入; 导管架平台桩基; 土体大变形; 数值方法; 模型试验

中图分类号: P75

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2017)03-0293-09

Discussion of methods evaluating the effects of the jack-up spudcan penetration on the adjacent platform pile

LI Shu-zhao^{1,2}, LI Ya¹, LU Xiao-bing²

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Jack-up rig is always employed to some marine engineering, for example, oil and gas drilling, exploration and exploitation, and maintenance platform. Generally, since the jack-up rig works depending on the manipulator which has the limited length, it often works in close proximity to a permanent jacket platform. The jack-up spudcan penetrates deeply in the soft clay deposit when the jack-up rig is in place. A large volume of soil is displaced during the spudcan penetration, so that the adjacent pile may be subjected to excess induced loads. These loads added with the original pile loads may exceed the normal design bearing capacity, which may cause serious engineering safety hazard and economic losses. It is a challenge for the development of the oil and gas that how to reliably evaluate the effect of the jack-up spudcan penetration on the adjacent jacket platform pile, and then optimize the jack-up rig position and guide the early design of the jacket platform pile. There is no widely accepted method to date. Based on the fact, the paper elaborates the methods evaluating the effect of spudcan penetration on the adjacent pile, which include the model tests, simplified theory and numerical approaches, and this paper analyzes the existing problems for the present methods and gives some suggestions in regard to the further research, providing a reference for readers.

Keywords: jack-up rig; spudcan penetration; jacket platform pile; large soil deformation; numerical methods; model tests

自升式钻井船是广泛用于中、浅水域油气开发的重要设施, 主要由操作平台、桩腿和升降系统组

成, 见图 1。它常被用于油气钻井、勘探开发、设备运输或固定平台维护等海洋工程, 占有使用平

收稿日期: 2016-02-02; 修订日期: 2016-03-18

基金项目: 中国海洋石油总公司综合科研项目 (ZHKY-2013-ZY-05); 中国博士后科学基金。

作者简介: 李书兆 (1985-), 博士, 工程师, 从事海洋岩土工程方面的研究。电子邮箱: lishzh25@126.com。

台总数的 60% (Le et al, 1979; 孟昭瑛, 1994; 张浦阳, 2008)。自升式钻井船桩腿贯入海床,直到指定深度,支撑钻井船正常作业。为便于桩腿的贯入和拔出,并增强平台在操作和环境荷载作用下的在位稳定性,钻井船桩腿底部的桩靴一般设计成扁平的纺锤状,即所谓的 Spudcan,桩靴的最大直径可达到 20 m 以上 (Young, 1984; 高博, 2007; 郑喜耀等, 2014)。桩靴的不规则形状和大的外形尺寸使插、拔桩导致的土体位移场与经典贯入器(如 CPT、取样器及传统桩基)所产生的位移场有明显区别。

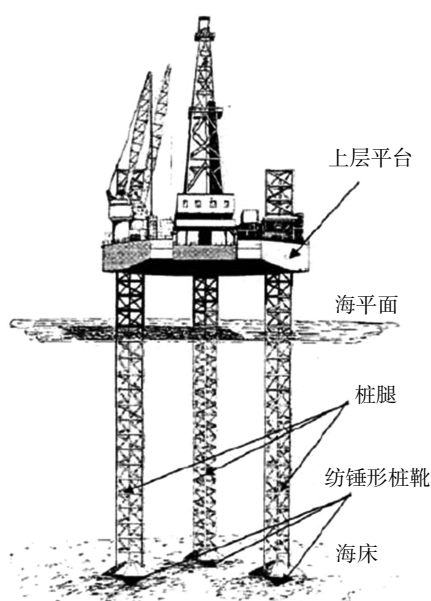


图1 自升式钻井船

固定式导管架海洋平台是海洋油气开采中常用的平台之一,包括上部平台夹板、层间桁架或立柱、中间导管架以及支撑桩基等结构。由工作船将其拖往现场并定位,随后在桁架结构底端空心管中打入支撑桩基,桩数、桩长和桩径由海底地质条件及受荷情况等多种因素决定,桩基最大贯入深度可高达 100 m。随后,在空心管与桩基之间灌浆,通过固结作用将空心管与桩基连接。因此,导管架平台上部结构所承受的工作荷载和波浪、风等循环荷载可通过灌浆固结传递到支撑桩基,由桩基承担上覆作用力,保证整个平台的稳定性,以便其正常工作 (许亮斌等, 2001; 王兴国, 2003)。

通常,自升式钻井船靠作业臂进行工作,由于其极限长度有限,所以钻井船作业时经常紧邻固定式导管架海洋平台。例如在我国南海、东海使用的

海洋 941 钻井船,桩靴直径为 18 m,南海与东海油气开发场地的平均水深一般大于 100 m,因此钻井船作业时,插桩位置边缘距导管架平台桩基础只有 5~7 m 的距离,即最大距离不超过 0.4 倍桩靴直径 (兰斐, 2015)。软弱土层中,钻井船就位时插桩深度较深,插桩过程中要排开大量土体,这些被排开的土体会导致邻近导管架平台桩基承受很大的附加荷载,进而在整个桩身范围内产生较大的附加弯矩和剪力。这些附加荷载与平台桩基原有的荷载相叠加,很有可能超出桩基原有的设计承载能力,带来严重的工程安全隐患和经济损失 (Chow, 1987)。图 2 为钻井船插桩对邻近导管架平台桩基影响的示意图 (Li et al, 2015)。英国 HSE (Health and Safety Executive) 对 2004 年以前发生并公开发表的各类自升式钻井船事故进行了分类汇总,其中钻井船插桩与导管架桩基相互作用所导致的事故占所有统计事故(230 例)的 10% (Dier et al, 2004)。美国造船与海洋工程学会 (SNAME) 有关规范规定,当钻井船桩靴边缘与平台桩基边缘之间距离大于 1 倍桩靴直径时,可以不考虑钻井船插桩对平台桩基的影响 (SNAME, 2008)。然而,目前我国在海洋油气开发工程实践中经常会遇到间距小于 0.5 倍甚至 0.25 倍桩靴直径的情况。如何可靠评估自升式钻井船插桩对邻近导管架平台桩基的影响,从而优化钻井船定位并指导导管架平台桩基础的早期设计,是我国当前海上油气开发亟需解决的一个难点问题,迄今为止尚没有形成一种被广泛认可的方法,并且这一问题涉及的土体极大变形分析方法、钻井船插桩与土体及平台桩基相互作用机理、钻井船插桩导致的海洋平台桩基响应等一系列问题也是目前国际海洋岩土工程领域内尚未解决好的基础科学问题。

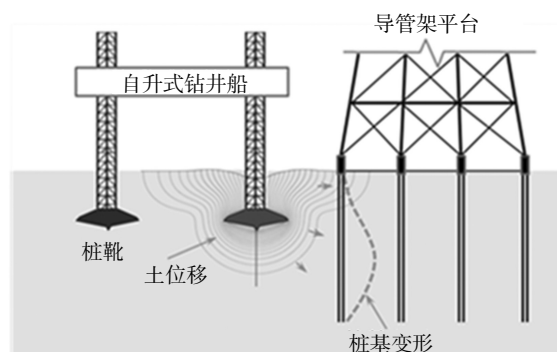


图2 自升式钻井船插桩对邻近导管架平台桩基影响的示意图

评价自升式钻井船插桩对邻近桩基影响的关键问题是合理模拟土体大变形的桩靴连续贯入过程,基础问题是明确桩靴贯入过程中周围土体位移场流动机理和变化规律。为满足钻井船稳定性要求,插桩深度可能高达 2~3 倍桩靴直径 (Endley et al, 1981)。插桩过程可能导致周围土体隆起并向插桩坑内产生显著回淤,从而使插桩过程的边界条件取决于插桩场地土层性质、插桩速率以及插桩深度等多种因素,具有明显的不确定性,使得钻井船的插桩问题具有严重的非线性极大变形特性 (Cole, 1972; Cooke et al, 1979; Bell et al, 1984; Kee et al, 1984; Carlsen et al, 1986)。目前,评价自升式钻井船插桩对邻近桩基影响的方法有以下几种: (1) 通过高 g 离心试验或 $1g$ 模型试验揭示插桩周围土体的流动机理和位移变化规律,直接测量插桩过程中邻近桩基产生的位移或附加应力,定量评价桩靴-桩基之间的相互作用 (Siciliano et al, 1990; Craig et al, 1990; Xie, 2009; 吴永韧等, 2008); (2) 首先采用简化理论方法或数值方法获取自由场地插桩周围土体位移场,进而通过地基梁法和 p - y 数据确定邻近桩基的变形及附加弯矩和剪力 (Chow et al, 1987; Mirza et al, 1988); (3) 通过包含桩靴、土体和桩基等结构的三维数值模型直接计算插桩过程中桩基的响应 (Tho et al, 2013)。基于此,本文致力于系统阐述评价自升式钻井船插桩对邻近导管架平台桩基影响方法的研究现状,提出评价方法中存在的问题以及建议进一步的研究方向。对深入研究评价自升式钻井船插桩对邻近桩基影响的有效、实用方法具有较好的参考意义。

1 研究方法及现状

1.1 模型试验

模型试验分为能够模拟原位土体应力状态的高 g 离心模型试验和 $1g$ 条件下的小模型试验,常被用于研究难以解决的科研和工程问题。

Siciliano 等 (1990) 为研究自升式钻井船桩靴贯入过程中周围土体位移场的变形规律以及其对邻近桩基的影响,进行了一系列 $100g$ 条件下的离心模型试验。试验土层为不排水剪切强度随深度线性增加的饱和软粘土,通过固结重塑饱和泥浆制备而成。模型试验中,距插桩位置 0.25、0.5 和 1 倍桩

靴直径处放置三种受影响桩基,且沿桩身间隔一定距离安放应变片,以此测量并记录插桩过程中桩身产生的附加弯矩。试验结果显示距离插桩位置较近的桩基桩头弯矩比距离插桩位置较远处桩基桩头弯矩大,这一现象作者未进行深入研究和解释。最后,依据离心试验结果,假设桩基位置处土体的位移,根据地基梁法和 p - y 曲线计算桩基产生的弯矩。通过反复迭代试算,当根据假定的土体位移获得的梁弯矩与离心试验结果具有较好的一致性时,可认为假定的土体位移就是由于桩靴贯入桩基位置处土体所产生的位移。但是,该方法的可行性还需不同土性条件和不同桩靴形状的离心试验或数值分析进行验证。

Craig 等 (1990; 1998) 针对上层砂土下层粘土的土性条件,进行了 $100g$ 条件下桩靴贯入对邻近桩基影响的离心模型试验。结果显示:桩靴贯入深度较浅时,桩基弯矩随着插桩深度的增加而增大;当桩靴贯入深度超过 150 mm (对应原型插桩深度 15 m) 时,桩基弯矩随插桩深度的增加而减小。但是由于试验中桩身安放的应变片过少,测量结果不能完整且准确揭示桩靴贯入过程中桩身弯矩的变化规律和分布情况。

Xie 等 (2009; 2012) 通过固结重塑饱和泥浆的方法制备试验土层,进行了一系列 $100g$ 条件下的小尺寸离心模型试验,模拟自升式钻井平台桩靴的贯入和拔出,以此研究自升式钻井平台插、拔桩对邻近导管架平台桩基的影响。采用高分辨率粒子图像测速技术,揭示了正常固结粘土和上层粘土下层砂土中桩靴贯入、拔出时周围土体的流动机制。为研究不同桩头约束条件下桩靴贯入对邻近桩基的影响,模型试验选用自由桩头和固定桩头两种极端桩头约束条件,获得了不同贯入深度下由于挤土作用桩基产生的附加弯矩。此外,还研究了桩靴贯入过程中桩基长度、桩基嵌入砂土层的深度、桩靴-桩基之间的距离以及桩靴工作周期等因素对邻近桩基特性的影响。

Wu 等 (2008) 通过 $1g$ 条件下模型试验研究饱和粉砂土层中插桩对邻近自由桩头桩基的影响。探究了土的干密度、插桩速率、桩靴与邻近桩基之间的距离等因素对桩基桩头位移的影响。研究表明桩基桩头位移随着土体干密度的降低、插桩速率的增加以及桩靴与桩基间距的减小而增大。但是 $1g$

条件下的模型试验,无法准确模拟土体原有的结构性、应力历史和应力状态等性质,很难准确反应插桩过程中土体表现出的隆起或回淤特性,所以该研究具有一定的局限性。

1.2 简化理论方法

自升式钻井船插桩对邻近导管架桩基的影响主要涉及两方面研究:(1)插桩过程中,桩靴周围土体大变形位移场的确定;(2)桩基受到挤土作用所产生的位移和附加应力及弯矩。已有一些研究致力于发展求解土体大变形位移的简化理论计算方法,具体情况如下:

Baligh 等(1985)通过对试验结果的分析,指出基础深贯入时土体变形与土体特性无关,属于应变控制问题。在此基础上,他提出了一种近似评价贯入器(桩基、CPT、取样器等)嵌入土体时周围土体位移场的理论方法,即应变路径法或深基础应变路径法(Strain Path Method, SPM)。该方法在空穴扩张理论的基础上,假设土体为均质、各向同性、不可压缩、无限空间体,借助流体力学中的源理论,将桩基不排水贯入土体的过程,视为一簇无旋、无粘性理想均匀流绕固定源流动过程,通过土颗粒速度沿流线积分确定土体的位移场。在缺乏现场土性物理及力学参数的情况下,对于预估土体变形、预测基础特性、解释现场试验数据,应变路径法是一种较好的选择(Levadoux, 1980; Levadoux et al, 1980; Szechy, 1968)。Huang (1989)采用应变路径法给出了不同形状旁压仪在贯入过程中土体产生的位移及应变场,由于采用许多平面四边形的组合代替实际贯入体的形状,因此只能采用数值解法获取土体位移场。Danziger 等(1997)也采用应变路径法确定贯入器在嵌入过程中土体产生的位移场。但是,由于地表面的存在,土体为半无限空间体,与该方法中假设土体为无限空间体相矛盾,因此利用应变路径法确定的土体位移场在贯入器端部附近较为合理,但却无法给出远离贯入器端部处土体准确的位移场。

针对应变路径法忽略地表面存在这一问题,Sagaseta 假设土体为弹性体,采用源汇理论模拟实际自由地表面的存在,通过求解土颗粒速度,并将速度沿流线积分获取土体位移,该方法被称为浅基础应变路径法(Shallow Strain Path Method, SSPM)。Sagaseta 等(1987; 1997)基于小应变理

论推导了土颗粒速度计算公式,并且给出了地表面位移计算表达式。Chow 等(1990)利用浅基础应变路径法,计算得到了桩基贯入时周围土体的竖向位移场,并利用弹性理论探讨了邻桩的上抬规律,研究了参数变化对邻桩上抬产生的影响。罗战友(2004)结合 Sagaseta 的方法对应变路径法进行了修正,并结合 Boussinesq 解推求了水平挤土位移场的计算表达式。

1.3 数值分析方法

数值分析方法可较好模拟三维空间中结构的不规则形状、桩靴连续贯入过程,合理解决土体大变形、非线性以及结构与土相互作用等问题,可有效分析插桩周围土体大变形位移场的变化规律和流动特性,并根据该位移场评价邻近桩基的挤土响应,也可建立包含桩靴-土体-桩基的三维有限元模型,直接评价钻井船插桩效应对邻近桩基的影响。

Lyons 等(1985)建立了包含预定位置处桩靴的三维有限元分析模型,施加等效荷载评价邻近桩基的响应。该模型不能真实模拟桩靴连续贯入过程以及贯入过程中土体空穴不稳定而产生的回淤现象,进而无法正确评价桩靴贯入过程中周围土体位移场的变化规律和流动特性,也就无法有效分析桩靴贯入时邻近桩基受土体挤压作用而产生的附加剪力和弯矩。同时,Lyons 指出了采用轴对称模型和平面应变模型评价桩靴贯入对邻近桩基影响的不恰当性,并且强调了三维有限元分析方法是评价桩靴-桩问题的一种有效途径。

Tan 等(2006)建立了成层土中桩靴贯入对邻近桩基影响的三维有限元模型,将土体视为遵循 Drucker-Prager 屈服准则的理想弹塑性体,桩靴与桩基之间的距离为 0.53 倍桩靴直径,通过常规有限元计算获得了插桩深度较浅时桩身的应力。但是,由于模拟的最大插桩深度小于桩靴边缘与邻近桩基之间的距离,且未考虑插桩过程中土体回淤的影响,其计算结果很难反应实际插桩过程对邻近桩基的影响程度。

刘占阁等(2003)利用对插桩坑底部施加压力替代插桩力的方法,通过常规有限元计算,分析了插桩导致的邻近桩桩身应力、应变及位移的分布,并求得了桩靴贯入影响下的 $t-z$ 曲线和 $p-y$ 曲线。虽然在常规有限元分析中采用等效替代的方法可以避免桩靴贯入土体导致的非线性大变形引起的计算

网格畸变,但是无法模拟插桩的整个连续过程中不断累积的挤土效应对邻近桩的影响,因此计算结果与实际相比可能存在较大的差异。

已有研究指出采用数值方法合理评价钻井船插桩对邻近导管架桩基影响的关键因素是有效模拟桩靴的连续贯入过程。采用常规拉格朗日有限元法模拟桩靴连续贯入时,常常由于土体过渡变形,导致有限元网格严重畸变,致使计算结果失真或计算中断。为了解决常规有限元法在求解大变形问题上的局限性,一些学者对此进行了详细研究 (Mirza et al, 1988; Benson, 1992; Menzies D et al, 2008)。目前,对于评价桩靴深贯入对邻近桩基影响的非线性大变形有限元方法主要有 3 种:

(1) 网格重划分有限元方法 (Remeshing FEM)

Hu 等 (1998a; 1988b; 1988c) 在传统小应变有限元基础上发展了一种简单的网格重划分小应变差值技术 (Remeshing and Interpolation Technique with Small Strain Model, RITSS), 将其与有限元程序包 ANFEM 相结合, 建立了岩土大变形有限元分析方法 (Carter et al, 1990)。从理论上来说, 该方法属于自适应网格的一种数值分析方法。数值分析过程中, 根据变形后的边界重新划分网格, 以此避免有限元网格进一步扭曲, 通过插值技术得到新网格的应力变量和材料参数。模型网格数量、节点数量、以及节点之间的连接关系均有所改变。Hos-sain 等 (2009; 2010)、Liu 等 (2005; 2009)、于龙等 (2008) 详细介绍了 RITSS 有限元法的计算原理, 并采用该方法分析了单一软粘土或分层土中桩靴贯入土体的流动机理以及插桩阻力的变化规律, 无法获取土体的位移变化, 运用该方法定量评价钻井船插桩对邻近桩基的影响还需进行深入研究。

(2) 任意拉格朗日-欧拉自适应网格有限元方法 (Arbitrary Lagrangian Eulerian adaptive meshing FEM, ALE 方法)

ALE 方法是一种将拉格朗日法与欧拉法相结合的数值算法, 将土体发生大变形区域中的网格设为自适应网格, 按照设定的频率重新划分网格。网格进行重划分时, 原有网格结点与物质点相脱离, 按照设定算法将原有网格上的场变量映射到新的网格。但是, 整个计算过程中, 网格的拓扑结构 (单元、节点数量以及节点之间的连接) 不会改变

(Abaqus 6.13, 2013)。

Kellezi 等 (2009) 采用 ALE 方法建立轴对称模型对上层砂土下层粘土桩靴插桩过程进行研究, 采用动力显示技术求解桩靴连续贯入过程, 通过调整插桩速度、质量缩放系数、沙漏系数等参数, 获得有效合理的数值结果, 并与已有离心试验结果进行比较, 验证了该方法可用于模拟自升式钻井船插桩过程。最后利用该方法, 评价了某一特定场址自升式钻井船插桩土体的变形特征, 为简化有限元模型, 将上层 7 m 深度的粘土层视为均布压力, 且不考虑土体的回淤特性。实际工程中, 桩靴穿过粘土层并连续贯入到砂土层, 这与 Kellezi 的模型简化相差较大, 所以该方法是否可以运用于评价多种土层条件下钻井船连续插桩问题还需进行深入研究。

吴永韧等 (2009) 利用 LS-DYNA 有限元软件, 通过 ALE 算法研究了钻井船插桩过程中土体和邻近受影响桩的变形和桩身应力变化, 进而分析了平台基础承载力的变化。研究结果表明, 桩靴周围土体受到桩靴的挤压破坏后强度明显下降, 形成失效区, 土体表面沉陷区为土体失效区周围两倍半径的区域。由于邻近桩的存在, 桩靴左右两侧土体竖向和横向位移不完全对称, 埋有桩基侧的水平方向土体位移略小于自由侧的水平方向土体位移。

Li 等 (2015) 针对 Sicilino 和 Xie 离心试验, 采用 ALE 方法建立了二维轴对称模型预测试验结果, 研究单一粘土层钻井船插桩周围土体的流动机理和位移变化规律, 发现土体位移场与土体参数如 e_{50} 有很大关系, 同一水平位置, 土体位移随 e_{50} 的增大而增大, 也就表明土体位移取决于其应力应变特性。但是, Sicilino 与应变路径法指出土体位移仅取决于贯入器形状, 与土体性质无关, 两者相矛盾。为研究由于插桩的挤土效应邻近桩基所产生的附加应力, Li 等 (2015) 根据土体位移场, 按照 API RP 2A 确定桩基 P-Y 数据, 采用地基梁法分析了桩基响应, 结果显示桩基弯矩几乎不受土体参数 e_{50} 的影响 (API, 2007)。最后, 详细说明了桩基设置为固定桩头约束条件的合理性, 深度探讨了目前工程中按照桩基所承受的原有荷载与附加荷载简单相加设计桩基承载力的方法。

(3) 欧拉-拉格朗日耦合有限元方法 (Coupled Eulerian-Lagrangian FEM, CEL 方法)

CEL 方法是一种拉格朗日体与欧拉体相耦合

的数值分析方法, 将需要分析的区域根据产生大变形的可能性大小分为欧拉体区域与拉格朗日体区域, 在这两种区域内分别采用欧拉有限元法和拉格朗日有限元法进行计算。计算过程中, 欧拉体的空间网格形状、大小位置保持不变, 物质可在网格之间自由运动; 其它区域设为拉格朗日体, 采用拉格朗日有限元方法计算变形响应, 计算过程中, 物质的运动和网格的变形保持一致。CEL 方法充分发挥了欧拉有限元方法和拉格朗日有限元方法的优势, 并克服了他们各自的不足 (Qiu et al, 2012; Arslan et al, 2014)。

Qiu 等 (2011a; 2011b; 2011c; 2012) 指出传统有限元方法很难用于求解大变形岩土边值问题, 土体发生严重的大变形使得有限元网格发生畸变以及非线性接触问题突出, 致使无法获得有效的收敛解。基于此, 建议采用 CEL 数值方法分析岩土大变形边值问题, 通过条形基础基准试验的理论解标定数值结果。计算结果表明 CEL 方法可以较好地解决常规有限元方法难以求解的大变形岩土工程问题。利用该方法, Qiu 等分析了单一粘土和上层砂土下层粘土中自升式钻井船插桩的稳定性, 真实模拟了钻井船插桩过程, 详细研究了模型参数如桩靴-土之间摩擦系数、土体本构模型、以及网格划分等因素对计算结果的影响, 揭示了桩靴周围土体流动机理和土体隆起、回淤的形成原因。通过有限元计算与离心试验结果的比较, 验证了该方法的有效性。

Tho 等 (2009; 2010; 2011; 2013) 借助 LS-DYNA 有限元软件, 提出采用 CEL 数值分析方法, 真实模拟桩靴的连续贯入过程、明确了桩靴贯入过程中周围土体的流动机理并定量评估了桩靴贯入对邻近桩基的影响。为了节约计算成本, 有限元模型为离心试验尺寸的四分之一, 包含桩靴、土层以及桩基等结构, 模型上部由于桩靴贯入土体发生极大变形, 设为欧拉体, 模型底部小变形区域设为拉格朗日体, 设置桩靴为刚性壳体, 采用抗弯刚度互等原则, 将钢管桩等效为实心圆柱桩, 以便提高有限元分析中稳态时间增量步的大小。模型中土体的应力应变关系选取为满足 Von Mises 屈服准则的理想弹塑性本构关系。考虑桩基与上部导管架的联接作用, 将桩头部分设为刚体, 桩身设为拉格朗日体, 桩基与土接触面之间不允许出现滑移现象。CEL

数值计算结果与已有高 g 离心试验数据比较, 结果显示两者具有较好的一致性, 验证了 CEL 数值分析方法评价桩靴-桩基相互作用的可行性。最后, Tho 等 (2009; 2010; 2011; 2013) 利用 CEL 数值分析方法, 研究了若干参数对桩基响应的影响, 进一步说明了该方法的有效性和多功能性。

2 问题和建议

通过以上分析, 对于目前自升式钻井船插桩对邻近导管架桩基影响的评价方法, 存在的问题和建议主要有以下几方面:

(1) 已有离心试验研究方法中忽视了土体的结构性, 表现为在试验中使用泥浆固结方法得到的重塑土。原位土体在长期的时间效应作用下会产生明显的结构性, 表现在土样不固结不排水条件下, 其应力应变曲线具有明显的峰值-残余值变化。当土体的残余强度显著低于其峰值强度时, 考虑土体在大应变后会出现大幅度的强度折减, 会增进土体在桩靴周围的回流, 从而较大幅度地降低土体位移场的量值, 并约束位移场在较远空间的传递, 进而有效降低邻近桩基上产生的次生荷载。其次, $1g$ 条件下的模型试验, 由于其缩尺效应, 无法真实模拟原位场地土体的应力状况、结构特性以及应力应变特性, 严重影响桩靴贯入过程中土体的位移变化、隆起和回淤, 很难真实反映现场原位土体的变形特征, 具有一定的局限性。但是, 其试验数据可用于对有限元方法可行性的校验, 仍具有一定的参考意义。

针对以上问题, 建议对原位饱和土体进行高 g 离心试验, 研究自升式钻井船插桩周围土体位移场的流动机理及其对邻近导管架桩基产生的附加效应。原位土体可以较好保证土体原有的结构性, 试验结果更加贴切土体的真实位移和桩基的真实响应。另外, 如果具有合适的依托项目和足够的试验经费, 建议进行现场原位测试试验, 直接测试插桩过程中邻近桩基的响应, 如位移、应力和弯矩等, 获取第一手现场实测数据, 为简化理论方法和有限元方法的研究提供真实可靠的标定参考。

(2) 对于求解土体变形的简化理论分析方法, 仅适用于理想土性条件, 即均质、各向同性土性, 且贯入器为理想规则形状。但是, 实际土体性质是

与应力历史有关的各向异性弹塑性材料, 另外贯入器多为非规则形状, 建立如何评价非规则形状贯入器连续贯入非均质弹塑性土体的土体变形特性(隆起和回淤)的应变路径法是非常有必要的。

建议将流体力学、固体力学与土力学相结合, 进一步研究半无限空间中考虑土体各向异性、且为弹塑性材料的应变路径法, 明确贯入器连续嵌入土体时周围土体位移场是否与土体材料性质有关, 揭示不同土性条件下土体流动机理和位移变化规律的差异性; 在此基础上, 深入研究适用于不规则形状贯入器(桩靴基础)排水和不排水贯入土层的应变路径法, 为校验数值方法提供可靠的标定参考;

(3) ALE 有限元方法多被用于评价大变形区域为单一土层的钻井船插桩问题, 如何用此方法分析钻井船在不同土层场地插桩时周围土体的位移, 还需做进一步研究, 特别是利用这一方法得到钻井船在不同土层场地插桩时周围土体的位移能否反映真实的土体位移, 尚缺乏必要的计算结果与试验结果的对比验证研究。

因此, 建议研究适用于不同土层场地钻井船插桩的 ALE 有限元方法, 详细研究土性参数、插桩速度、自适应网格区域及其网格划分频率等因素对计算结果的影响, 确保数值结果可反映现场土体的真实位移变化, 可通过与简化理论方法或已有高 g 离心试验结果对比, 校验数值计算结果, 验证 ALE 方法的可行性。将 ALE 法计算得到的有效位移解与地基梁法相结合, 详细研究邻近桩基的响应。通过与离心试验结果的比较, 研究 ALE 方法与地基梁法相结合评价自升式钻井船插桩对邻近导管架桩基影响的适用性。

(4) 关于评价自升式钻井船插桩对邻近导管桩基影响的 CEL 有限元方法的相关研究很少, 且均针对单一的软粘土场地。能否利用这一计算分析技术形成一种客观评价钻井船插桩在不同土层场地插桩时对邻近平台桩基影响的数值仿真分析方法, 尚缺乏必要的研究, 特别是与试验结果的比较研究。该方法把钻井船桩靴、土体、桩基甚至导管架整合在一个模型里来模拟, 但这种方法对于生产项目而言过于复杂, 耗用资源较多, 各种因素特别是来自土体的不确定性因素相互交织, 难以实现对结果可靠性的把控。此外, 该方法把土体处理为连续介质与桩基发生相互作用, 这与常规导管架设计中把土

体离散为一系列半经验性土弹簧的做法有较大差异, 容易造成桩体综合内力解释上的混乱。

针对该问题, 建议深入研究多种土性条件下 CEL 有限元方法的适用性, 需详细阐明土性参数选取, 桩基桩头、桩端的约束条件、欧拉深度设置、以及插桩贯入速率等模型设置的合理性, 并与已有离心试验结果进行对比验证。另外, 在保证计算结果合理的前提下, 尽量简化该方法, 以便将其应用于实际海洋油气工程。最后, 建议将 CEL 三维有限元方法与 ALE 有限元方法和地基梁法相结合的评价方法进行详细对比分析, 提出具有科学依据、满足工程质量保障体系的定量评估钻井船插桩对邻近桩基影响的实用方法。

(5) 无论是先确定插桩周围土体的位移场, 再确定受影响桩的桩身响应, 还是通过大变形三维有限元计算, 直接确定受影响桩的桩身响应, 都会涉及如何客观评价作用于受影响桩桩身的极限挤土力问题。无论是粘土层还是砂土层中的主动桩, 桩身受到的阻力存在一极限值。对于受插桩挤土影响的被动桩, 怎样确定插桩导致的受影响桩桩身的挤土力分布, 特别是极限挤土力, 目前也缺乏必要的研究。例如, 如果按美国石油协会 API RP 2A 规范推荐的方法确定桩身挤土效应, 对于海洋平台主动桩而言常常趋于保守, 但对于土体位移产生的被动桩加载而言又恰恰是偏于危险。此外, API 方法对不同土体和较大尺寸的桩基分析的适用性也常常受到质疑, 而这点也是海洋导管架平台桩基设计中一个关键。

关于被动桩挤土效应研究, 建议采用三维实体有限元方法研究适合于评价被动桩挤土规律, 确定影响挤土力的主要参数, 提出有效评价桩身挤土力的实用方法, 并采用所提出的方法对已有离心或现场试验进行预测、分析, 亦或针对实际海洋工程案例进行评估, 详细说明所建立方法的可行性, 且保证计算结果对于评价被动桩稳定性是偏于保守的, 有利于保证实际海洋工程的安全性。

3 结论

自升式钻井船插桩对邻近导管架平台桩基影响问题涉及土体的极大变形、钻井船插桩与土体及平台桩基的相互作用、钻井船插桩导致的导管架平台

桩基响应等一系列问题,是目前国际海洋岩土工程领域内尚未解决好的基础科学问题,并没有形成一种被广泛认可的实用评价方法。本文系统且全面阐述了目前关于钻井船插桩土体流动机理和变形的分析方法以及插桩对邻近平台桩基影响的评价方法,包括模型试验、简化理论方法和数值分析方法。通过对评价方法研究现状的分析,提出了一些问题。最后,针对这些问题并结合实际海洋工程的需求,给出了未来研究方向的建议,与读者分享和讨论并供其参考。

参 考 文 献

- Abaqus Analysis User's Guide, 2013. Version 6.13.
- API RP 2A-WSD, 2007. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress—design. American Petroleum Institute, Washington D C, USA.
- Arslan H, Wong P C, 2014. Advanced continuum modeling of pile response to jack-up spudcan penetration. The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Baligh M M, 1985. Strain path method. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 111 (9): 1 108–1 136.
- Bell R A, Taylor L R, Rinne E E, 1984. Pile foundation movements during construction. *Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE, 331–349.
- Benson D J. 1992. Computational methods in lagrangian and eulerian hydrocodes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 99 (2): 235–394.
- Carlsen C A, Kjei H, Eriksson K, 1986. Structural behaviour of harsh environment jack-ups. *The Jack-up drilling platform design and operation*, London: Collins, 90–136.
- Carter J P, Balaam N, 1990. AFENA User's Manual, Geotechnical Research Centre, The University of Sydney.
- Chow Y K, Teh C I, 1990. A theoretical study of pile heave. *Geotechnique*, 40: 1–14.
- Chow Y K, 1987. Interaction between jack-up rig foundations and offshore platform piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 11: 325–344.
- Cole K W, 1972. Uplift of piles due to driving displacement. *Civil Eng & Public Works Review*, 67: 263–269.
- Cooke R W, Price G, Tarr K, 1979. Jacked piles in London clay: a study of load transfer and settlement under working conditions. *Géotechnique*, 29 (2): 113–147.
- Craig W H, 1998. Spud-can foundations: installation with deep penetration and subsequent removal. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Geotechnical Engineering*, 131 (3): 146–151.
- Craig W H, Chua K, 1990. Deep Penetration of spud-can foundations on sand and clay. *Geotechnique*, 40 (4): 541–556.
- Danziger F A B, Almeida M S S, Sill S G C, 1997. The significance of the strain path analysis in the interpretation of piezocone dissipation data. *Geotechnique*, 47 (5): 901–914.
- Dier A, Abolfathi S, Carroll B, 2004. Guidelines for jack-up rigs with particular reference to foundation integrity. HSE Books.
- Endley S N, Thompson P J, Baglioni V P, 1981. Prediction of jack-up rig footing penetration. *Offshore Technology Conference*, OTC 4144.
- Hossain M S, Randolph M F, 2009. New mechanism-based design approach for spudcan foundations on single layer clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (9): 1 264–1 274.
- Hossain M S, Randolph M F, 2010. Deep-penetrating spudcan foundations on layered clays: Numerical Analysis. *Geotechnique*, 60 (3): 171–184.
- Hu Y, Randolph M F, 1998a. A practical numerical approach for large deformation problems in soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22 (5): 327–350.
- Hu Y, Randolph M F, 1998b. Deep penetration of shallow foundations on non-homogeneous soil. *Soils Found*, 38 (1): 241–246.
- Hu Y, Randolph M F, 1998c. H-adaptive FE analysis of elasto-plastic non-homogeneous soil with large deformation. *Computers and Geotechnics*, 23 (1): 61–83.
- Huang A B, 1989. Strain path analyses for arbitrary three-dimensional penetrometers. *International Journal of numerical and analytical methods in Geomechanics*, 13: 551–564.
- Kee R, Ims BW, 1984. Geotechnical hazards associated with leg penetration of jack-up rigs. *Journal of Seabed Mechanics*, 169–174.
- Kellezi L, Kudsk G, 2009. Spudcan penetration FE simulation of punch-through for sand over clay. *Proc 12th IntConf Jack-Up Platform Design, Construction and Operation*.
- Le T P, 1979. Seabed reconnaissance and offshore soil mechanics for the installation of petroleum structures. Editions Technip.
- Levadoux J N, 1980. Pore pressures in clays due to cone penetration. Massachusetts Institute of Technology.
- Levadoux J N, Baligh M M, 1980. Pore pressure during cone penetration, Research Report R80–15, Order No 666, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Li Y, Zhou Y R, et al, 2015. Numerical study of spudcan penetration induced loading on an adjacent jacket pile in soft clays. *Proceedings of the Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference Hawaii, USA, June 21–26*.
- Liu J, Hu Y, et al, 1995. Deep penetration of spudcan foundation into double layered soils. *China Ocean Engineering*, 19 (2): 309–324.
- Liu J, Hu Y, 2009. The effect of strength anisotropy on the bearing capacity of spudcan foundations. *Computers and Geotechnics*, 36 (1): 125–134.
- Lyons R H, Wilson S, 1985. Effects of spudcans on adjacent piled foundation. *Proc Jack-up Drilling Platform*, 8–22.
- Menzies D, Roper R, 2008. Comparison of jackup rig spudcan penetration methods in clay. In *Proceedings of the Offshore Technology*

- Conference, Houston, Texas, OTC19545.
- Mirza U A, Sweeney M, Dean A R, 1988. Potential effects of jack-up spudcan penetration on jacket piles. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC5762.
- Qiu G, Grabe J, 2012. Numerical simulation of the deep penetration process of spudcans into sand overlying clay using the extended hypoplastic models. Proceedings of the twenty-second international offshore and polar engineering conference Rhodes, Greece.
- Qiu G, Henke S, Grabe J, 2011. Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. Computers and Geotechnics, 38 (1): 30-39.
- Qiu G, Henke S, 2011b. Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay. Marine structures, 24 (4): 528-550.
- Qiu G, Grabe J, 2011a. Explicit modeling of cone and strip footing penetration under drained and undrained conditions using a visco-hypoplastic model. Geotechnik, 34 (3): 205-217.
- Sagaseta C, Whittle A J, Santagata M, 1997. Deformation analysis of shallow penetration in clay. International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 21: 687-719.
- Sagaseta C, 1987. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. Geotechnique, 37: 301-320.
- Siciliano R J, Hamilton J M, et al, 1990. Effect of jackup spud cans on piles. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 7-10 May, OTC 6467.
- SNAME, 2008. Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-up Units. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin 5-5A, New Jersey, USA.
- Szechy K, 1968. Deformations around and below driven and vibrated test tubes. Actatechnicaacademiaescientiarumhungaricae, 62 (1-2): 97-113.
- Tan X M, Guo J Y, Lu C, 2006. Effect of spudcan penetration on neighboring existing pile. The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Tho K K, Leung C F, et al, 2009. Application of Eulerian finite element technique for analysis of spudcan and pipeline penetration into the seabed. Proceedings of the 12th International Jack-up Conference, London.
- Tho K K, Leung C F, et al, 2010. Eulerian finite-element technique for analysis of jack-up spudcan penetration. International journal of geomechanics, 12 (1): 64-73.
- Tho K K, Leung C F, et al, 2011. Important considerations in the application of Eulerian technique for spudcan penetration analysis. In Proceedings of the 13th International Conference on Jack-Up Platform Design, Construction and Operation, London.
- Tho K K, Leung C F, et al, 2013. Eulerian finite element simulation of spudcan-pile interaction. Canadian Geotechnical Journal, 50 (6): 595-608.
- Xie Y, 2009. Centrifuge model study on spudcan-pile interaction. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore.
- Xie Y, Leung C F, Chow Y K, 2012. Centrifuge modelling of spudcan-pile interaction in soft clay. Géotechnique, 62 (9): 799-810.
- Young A G, Remmes B D, Meyer B J, 1984. Foundation performance of offshore jack-up drilling rigs. Journal of Geotechnical Engineering, 110 (7): 841-859.
- 高博, 2007. 纺锤型基础在双层土中的承载力数值模拟研究. 大连, 大连理工大学.
- 兰斐, 2015. 钻井船插桩对邻近平台桩基影响的数值分析. 天津, 天津大学.
- 刘占阁, 王栋, 栾茂田, 2003. 钻井船基础压入对邻近平台桩基影响的有限元数值分析. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集.
- 罗战友, 2004. 静压桩挤土效应及施工措施研究. 浙江, 浙江大学.
- 孟昭瑛, 任贵永, 1994. 海上自升式平台工作原理和基本特性. 中国海洋平台, 9 (6): 167-170.
- 王兴国, 2003. 导管架海洋平台结构优化设计研究, 大连, 大连理工大学.
- 吴永韧, 鲁晓兵, 2009. 桩靴贯入对固定平台基础扰动的数值模拟. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册).
- 吴永韧, 鲁晓兵, 等, 2008. Spudcan 基础贯入对固定平台基础影响. 中国海洋平台, 23 (1): 35-38.
- 许亮斌, 陈国明, 2001. 简易平台技术的发展与展望. 中国海上油气(工程), 13 (2): 1-5.
- 于龙, 2008. 三维 RITSS 大变形有限元方法及其在基础刺入破坏和锚板承载力问题中的应用. 大连, 大连理工大学.
- 张浦阳, 2008. 海上自升式钻井平台插/拔机理及新型桩靴静/动承载力研究. 天津, 天津大学.
- 郑喜耀, 周松望, 姚首龙, 2014. 自升式钻井平台插桩分析的几个关键问题. 海洋通报, 33 (1): 84-89.

(本文编辑:袁泽轶)