

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1415

黏土中自升式钻井船插桩对邻近桩基影响的分析方法

李 亚, 李书兆, 张 超

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘 要: 自升式钻井船是广泛用于浅、中水域油气资源开发的重要设施, 经常紧邻固定式导管架平台进行作业。钻井船插桩就位过程中大量土体被排开, 挤土效应会导致邻近导管架平台桩基承受很大的附加荷载, 影响平台的正常设计性能, 该效应在黏土中尤为显著。针对黏土中钻井船插桩对邻近桩基的影响这一实际问题, 现有规范和分析方法存在明显不足。为此, 建立了一套数值分析方法, 把这一复杂问题分解成相对独立、简单的两个方面进行分析: 一是采用任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 数值方法, 计算自由场地插桩周围土体产生的位移场; 二是利用桩基水平力与位移关系曲线, 即 P - Y 曲线, 采用杆系-土弹簧的传统方法计算土体位移产生的桩体加载。通过与已有离心试验数据的比较, 验证了该方法的可靠性和适用性。研究揭示了自由场地土体的变形模式和流动机制, 阐明了由于插桩邻近桩基产生的附加荷载变化规律, 特别是发现了黏土变形参数 e_{50} 对插桩引起的自由场地土体位移场有显著影响, 但对插桩引起的桩基加载影响较小。最后, 针对导管架对桩基的桩头约束条件和插桩及导管架自身对桩基的线性叠加加载适用性问题给出了详细说明。

关 键 词: 自升式钻井船; 插桩; 土体位移; P - Y 曲线; 桩头约束; 黏土

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)05-1891-10

An approach to analyze effects of spudcan penetration of a jack-up rig on adjacent piles in cohesive soils

LI Ya, LI Shu-zhao, ZHANG Chao

(CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: A mobile jack-up rig is an important facility in offshore oil and gas development and often works in close proximity to a permanent jacket platform. Penetration of the spudcan could displace a large volume of soil and induce considerable loadings to the pile foundation of a nearby jacket, which may jeopardize the designated performance of the jacket platform. The aforementioned effect is more significant in cohesive soils where deeper penetration is expected. However, the currently available industry guideline and approaches have obvious limitations on this important issue. Therefore, a numerical approach is developed in this paper which has two steps to study the effects of the spudcan penetration on an adjacent jacket pile in cohesive soils: (1) computation of the lateral soil displacement induced by the spudcan penetration in a free field assuming the jacket is absent through the arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) numerical method, and (2) computation of the pile lateral loading induced by the aforementioned soil displacement based on the P - Y curves by the conventional beam-column method. Feasibility and reasonability of the approach are verified by calculated results against centrifugal experiment results published in the past. The paper reveals the deformation mode and flow mechanism of the soil in the free field, indicates the variation of additional loadings of the adjacent pile induced by spudcan penetration, and especially finds that the induced soil displacement is heavily dependent on soil deformation characteristics such as e_{50} , and the induced pile loading is found to be not sensitive to the variation of e_{50} within a reasonable range. Finally, the study discusses how to define the boundary condition at the pile head where the pile is connected to the upper structure, and whether the linear superposition law is appropriate for loadings induced by the spudcan penetration and the jacket.

Keywords: mobile jack-up rig; spudcan penetration; soil displacement; P - Y curves; pile head constraint; cohesive soil

收稿日期: 2016-06-12

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司科研项目 (No.ZHKY-2013-ZY-05)。

This work was supported by CNOOC Scientific Research Project(ZHKY-2013-ZY-05).

第一作者简介: 李亚, 男, 1974 年生, 博士, 教授级高工, 中海油岩土工程特聘专家, 主要从事海洋岩土工程及地质灾害等方面的研究与实践。

E-mail: liya4@cnooc.com.cn

1 引言

自升式钻井船是广泛用于浅、中水域油气资源开发的重要设施,主要由操作平台、桩腿和升降系统等组成。为便于桩腿的贯入和拔出,并增加平台在操作和环境荷载作用下的在位稳定性,钻井船桩靴一般设计成扁平的纺锤状,即所谓的 Spudcan,见图 1。桩靴的最大外径 D 可达到 20 m 以上,其在平面上的投影接近圆型^[1-4]。自升式钻井船独特的操作方式和桩靴形状引发了一系列特殊的岩土工程问题。由于作业臂的极限长度有限,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 钻井船插桩位置边缘距导管架平台桩基础的最大净距离不超过 0.4 倍桩靴直径^[5-6]。在较软的黏土层中,钻井船插桩较深,插桩过程中大量土体被排开,挤土效应会导致邻近导管架平台桩基承受很大的附加荷载,见图 2。这些附加荷载与平台桩基原有的荷载相叠加,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^[7]。美国造船与轮机工程师协会 (SNAME)^[8] 通常建议在黏土场址中,把钻井船桩靴和导管架桩基之间的净距离 S 控制在不小于 1 倍的桩靴外径 D ,即 $S/D \geq 1$ 。当上述要求不能满足时,则建议进行更深入的分析,但并未提供具有充分依据的分析方

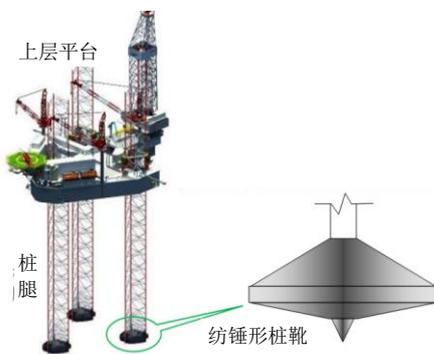


图 1 自升式钻井船及桩靴
Fig.1 Mobile jack-up rig and spudcan

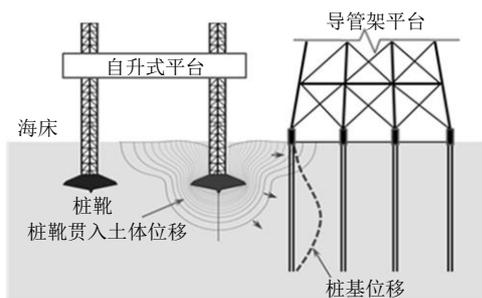


图 2 钻井船插桩对邻近导管架桩基的影响示意图
Fig.2 Schematic of spudcan penetration-induced loading effect on adjacent piles

法。当前我国海洋油气开发的水域越来越深,导管架平台和钻井船越来越大,钻井船就位和作业的矛盾越来越突出,因此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础的早期设计,是我国当前海上油气开发亟需解决的一个重点和难点问题。

目前,分析钻井船插桩对邻近导管架桩基安全影响的方法主要有两种:高重力加速度 g 离心模型试验和数值模拟分析。Siciliano 等^[9]在离心机试验量测数据的基础上,给出了由插桩深度 Z 、插桩与桩基净距离 S 及插桩最大外径 D 所确定的土体归一化横向位移图表,但该结果没有考虑土体性质和桩靴形状的影响,因此其普适性存在较大的疑问。其后,Craig^[10-11]、Xie^[12-13]等进行了更深入的离心机试验,给出了特定土层条件下插桩过程中邻近桩基的响应,特别是指出了横向加载是插桩对邻近桩基最重要的影响机制。尽管离心模型试验有助于了解现象的本质,然而出于成本和进度的考虑,对每个海洋项目都采用离心试验是不现实的,建立在小样本空间的回归公式与海洋工程低重复和高风险的本质特点也是相抵触的。由于在处理土体分层、材料本构、结构形状、接触条件、加载路径等各方面的灵活性,数值模拟方法成为了建立钻井船插桩对邻近桩基影响实用方法的理想选择。对于插桩这一具有回淤等特征的土体大变形问题,有限元网格容易发生畸变且非线性接触问题突出,传统有限元方法无法获得有效的收敛解^[14-17]。因此,进行插桩对邻近桩基的安全影响分析必须借助先进的大变形计算技术。Tho 等^[18-19]采用欧拉-拉格朗日耦合 (coupled Eulerian Lagrangian 简称 CEL) 数值方法,模拟了桩靴的连续贯入过程,定量分析了桩靴贯入对邻近桩基的影响。但这种方法把所有因素整合在一个模型里来模拟,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。另外,该模型把土体处理视为连续介质,并与桩基相互作用,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。

基于以上分析,本文把自升式钻井船插桩对邻近桩基的安全影响这一复杂问题分解成相对独立且简单的两个方面:①充分利用轴对称简化模型,采用任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrangian Eulerian 简称 ALE) 自适应网格技术,计算自由场地插桩周围土体 (假定桩基不存在) 产生的位移场;②采用

杆系-土弹簧的传统方法计算土体位移导致的桩体加载。相对简单的模型可以突出关键参数对最终结果的影响,从而有的放矢地细化数值模型,保证结果的可靠性,这是研究走向应用的基本要求。本文以 Siciliano 等^[9]和 Xie 等^[12-13]的离心机试验结果为例,对上述方法做出详细解释,并通过与试验测试结果的比较,展示该方法的适用性和可靠性,揭示主要的不确定性因素对计算结果的影响。

2 离心试验简介

图3为 Xie^[12]进行的离心机试验装置和原型桩靴的几何尺寸。其中,桩靴的最大外径 $D=12\text{ m}$,导管架桩基外径为 1.26 m ,抗弯刚度 EI 和抗压刚度 EA 分别为 $5.7\text{ GN}\cdot\text{m}^2$ 和 30 GN 。导管架桩基与上部结构为刚性连接,桩底自由。试验模拟的海床上部为 37 m 的正常固结到轻微超固结的黏土层,底部为 3 m 的密实砂土。黏土的有效重度为 6 kN/m^3 ,其不固结不排水抗剪强度 S_u 在海床面处为 2 kPa ,随埋深增加的速率为 1.5 kPa/m 。在试验模拟的工况中,钻井船桩靴与导管架桩基的净距离 S 分别为 3 m ($0.25D$)、 6 m ($0.50D$)、 12 m ($1.00D$)。插桩的入泥深度 Z 分别为 9 m ($Z/D=0.75$)和 15 m ($Z/D=1.25$)。此处插桩的入泥深度 Z 定义为海床面到桩靴最大外径下边缘的竖向距离。试验量测了自由场地土体位移及邻近桩基不同深度处弯矩随插桩深度的变化。

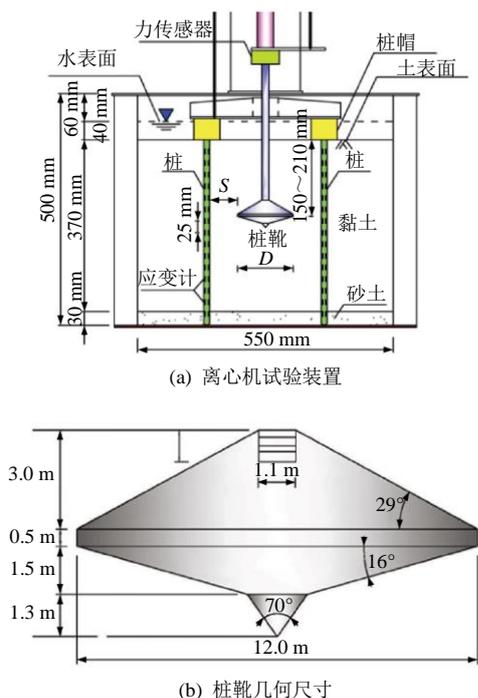


图3 离心机试验装置及桩靴几何尺寸^[11]

Fig.3 Centrifuge test settings and spudcan dimensions^[11]

Siciliano 等^[9]给出了黏土中完全由插桩几何参数确定的归一化土体横向位移随深度的变化曲线。因此,这里不再给出其详细的离心模型试验装置和试验参数。

3 自由场地土体位移的计算

3.1 ALE 数值方法

根据土体扰动和变形的预期程度,本文选择了有限元软件 ABAQUS 中 ALE 大变形数值技术,计算钻井船插桩过程黏土产生的位移场。ALE 方法集合了拉格朗日有限元法与欧拉有限元法的优点,通过自适应网格技术维持模型的高质量网格。当物质发生大变形时,原有网格结点与物质点相脱离而自由运动,模型网格进行重新划分,进而避免单元的过渡畸变,并维持原有网格的拓扑结构。网格重划分后,按照设定算法将原有网格上的场变量映射到新的网格。与 CEL 技术相比,ALE 的单元网格始终被一种物质材料完全填充,更容易实现土体位移场的获取。

3.2 数值模型

建立数值模型时,考虑到桩靴周围较近范围内的土体位移主要由塑性变形引起,且钻井船各个桩靴间的距离相对较远,故忽略了各个桩靴贯入所产生的土体位移场之间的叠加效应。由于桩靴在水平面为轴对称或接近轴对称投影,因此采用轴对称模型模拟桩靴的贯入过程。数值模拟中考虑了以下特点:①相对于海洋黏土的低渗性,插桩速率较大,因此假定插桩过程中黏土的加载变形是不排水、等体积的;②根据生产项目中插桩分析的实际流程,以桩靴位移为控制条件,从桩靴底面接触海床开始直到最终的贯入深度,以此来模拟土体位移场的发展过程。

图4为模拟离心机试验(图3)建立的数值模型, OA 为对称轴。钻井船桩靴模拟为刚性体,只能沿轴心嵌入海床,其几何尺寸见图3(b)。 OC 为海床面,横向边界 CB 距离 OA 的距离为 27.5 m , CB 边界上的节点只能沿竖向移动。为专注于黏性土,数值模型对离心机试验的实际设置做了轻微调整,底部边界 AB 的埋深设置为 38.5 m ,土层全部由黏土组成, AB 边界上的节点只能沿横向移动。上述改动对计算结果的影响预期较小。初始有限元网格由约为 0.2 m 的正方形组成。

土体材料采用符合 Mises 屈服准则的弹塑性模型模拟,其应力-应变关系由不固结不排水(UU)三轴试验确定。海洋工程中通常采用 UU 试验来测

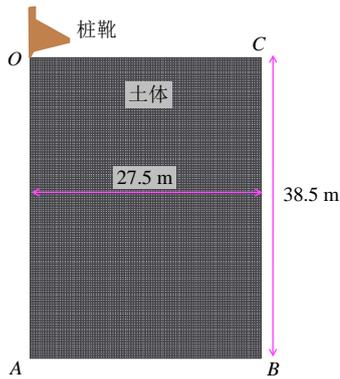


图 4 数值模型的主要几何参数
Fig.4 Dimensions of the numerical model

试黏土的不排水强度 S_u 和变形特征值 e_{50} ，后者是 UU 试验中当偏差应力 ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) 为峰值一半时所对应的轴向应变，是 API RP 2A^[20]中建立桩基横向土弹簧 $P-Y$ 曲线的重要参数。依据 Matlock^[21]的研究成果，原状海洋黏土的 e_{50} 一般在 0.5%~2.0% 之间，对于正常固结和轻微超固结的黏土，单调加载至初始屈服后，可假定土体强度将沿抛物线发生硬化直至峰值 S_u ，其后维持不变。根据以上海洋黏土的典型特征和给定的土体强度，本文构建了 5 条归一化应力-应变曲线 (见图 5)，用于研究不同土体性质对土体位移场的影响，归一化应力-应变曲线表达式为

$$q/S_u = 0.5(\varepsilon/e_{50})^{1/2} \quad (1)$$

式中： ε 为应变； e_{50} 分别取为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 和 6.0%。5 条曲线的初始弹性模量均设为 $300 S_u$ 。当 e_{50} 为 6.0% 时，该值大于常规海洋原状黏土的 e_{50} 值，选取这一数值的目的将在后文讨论。为模拟土体的不排水加载，土体模型中泊松比设为 0.49。

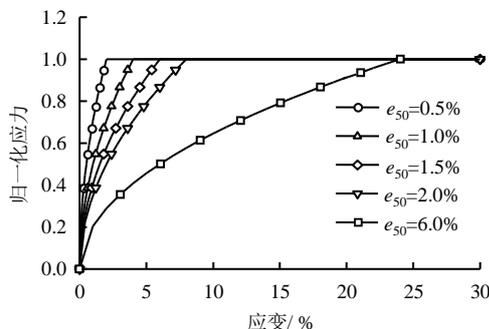


图 5 归一化应力-应变曲线
Fig.5 Normalized stress-strain curves

3.3 自由场地土体位移的数值结果

土体位移场的计算分为两步：①施加自身重力，建立土体的原位静力平衡；②把钻井船桩靴从海床面贯入到预定深度。以 $e_{50}=1.0\%$ 的土体模型为例，

图 6 显示了插桩深度 $Z = 15 \text{ m}$ 时由网格节点所表现的土体位移场，可见海床表面围绕桩腿的地方形成了漏斗状的桩腿坑，在其外侧，挤土效应导致了土体的隆起。无论是土体的下陷还是隆起，都会影响邻近导管架桩基的轴向承载力。但 Xie 等^[12-13]发现，钻井船插桩对邻近桩基的竖向响应影响较小，因此后文主要讨论插桩土体位移场的横向分量及其对邻近桩基的影响。

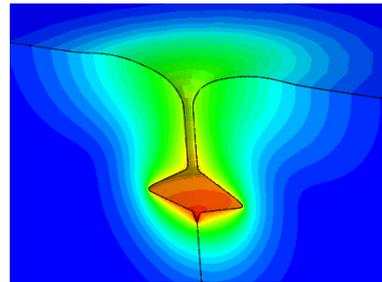


图 6 插桩引起的土体位移场 ($e_{50}=1.0\%$, $Z=15 \text{ m}$)
Fig.6 Soil displacement induced by spudcan penetration ($e_{50}=1.0\%$, $Z=15 \text{ m}$)

使用 ALE 技术时，数值模型设置了“示踪粒子”显示相关剖面处物质点 (与网格节点相对应) 的真实位移。图 7 为不同插桩深度下物质点与网格点的变形图。仍以 $e_{50}=1.0\%$ 的土体模型为例，图 8 显示了由此得到的不同竖向剖面 (S 分别为 $0.25D$ 、 $0.50D$ 和 $1.00D$) 处土体横向位移随插桩深度的变化。可见，土体横向位移随桩靴-桩基间距的增大而减小，对于一给定竖向剖面，土体横向位移沿深度的分布模式随着插桩深度的增加发生明显改变，表现在以下两个方面：①当插桩深度较浅时 ($Z \leq 2.24 \text{ m}$)，横向位移随深度迅速减小；②当插桩深度进一步增大时 ($Z \geq 7.44 \text{ m}$)，依据土体横向位移的分布特征，自上而下把土体分成 3 个深度区间，即浅表层的漏斗区、中间的平台区和深度区。

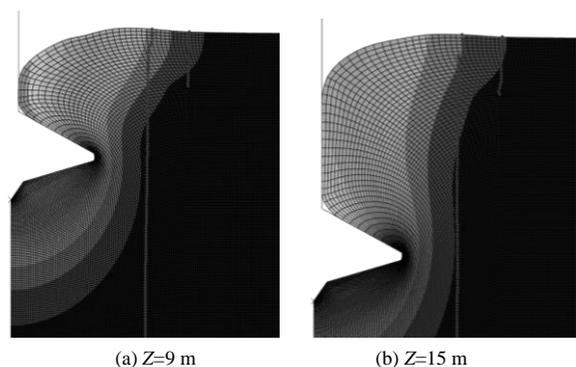


图 7 插桩不同深度下物质点与网格点的变形
Fig.7 Deformation of material and mesh points induced by spudcan penetration at different depths

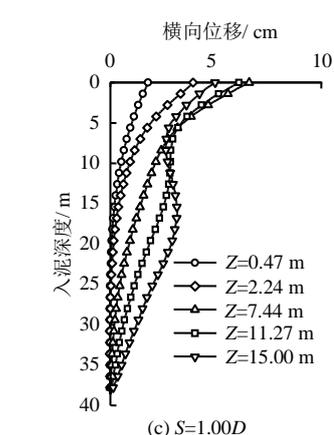
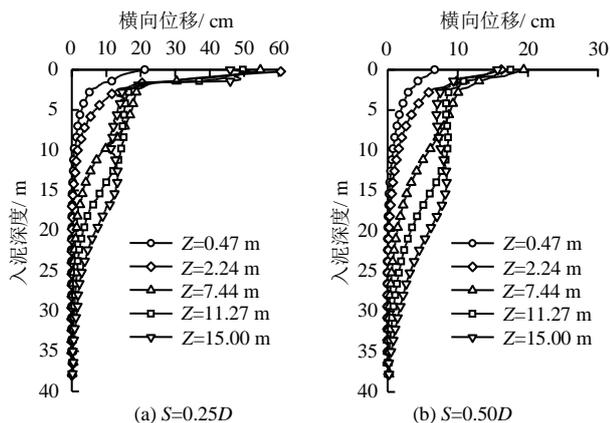


图 8 不同竖向剖面处土体横向位移随插桩深度的变化 ($e_{50}=1.0\%$)

Fig.8 Changes of soil lateral displacement with spudcan penetration depth at different vertical profiles ($e_{50}=1.0\%$)

(1) 在浅表层的漏斗区 (埋深 ≤ 3 m), 土体的横向位移沿埋深迅速减小, 但其数值几乎不再随插桩深度的增加而变化。与此对应的现象是: 桩靴周围的漏斗坑主要由于表层土受挤压而形成, 在插桩初期形成了较完整的漏斗坑; 其后, 表层土体不再发生明显的外扩或内移, 漏斗坑的直径保持相对恒定;

(2) 漏斗区以下一定深度范围内, 对一给定插桩深度, 土体横向位移沿深度的变化相对缓和, 因此该深度范围被称为平台区。平台区的底部与钻井船桩靴最大外径位置大约持平。对于平台区内的某一给定深度, 土体的横向位移随着桩靴的到来而增大, 在桩靴隆起部位经过该深度后, 横向位移会随着土体的回淤而减小;

(3) 平台区以下为深度区, 土体横向位移沿深度迅速减小。

图 9 显示了深度为 9 m 的水平剖面上土体横向位移随插桩深度的变化。对于一给定插桩深度, 土体横向位移场沿径向方向大约以指数函数的方式衰减。同样, 桩靴经过后土体横向位移显著减小。

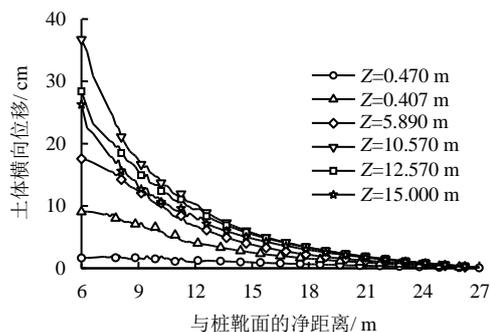


图 9 水平剖面处土体横向位移随插桩深度的变化 ($e_{50}=1.0\%$)

Fig.9 Changes of soil lateral displacement with spudcan penetration depth at a given elevation ($e_{50}=1.0\%$)

图 8 和图 9 中, 靠近桩靴的土体产生了较大变形, 土体的横向位移曲线出现了锯齿状的现象, 这是设置“示踪粒子”计算物质点位移时带来的数值波动, 但这种波动不影响本文对土体位移场的总体评价及后续的导管架桩基受力评估。

为研究土体变形参数 e_{50} 对位移场的影响, 图 10 比较了插桩深度 $Z=15$ m 时, 不同土体模型 (见图 5) 在不同竖向剖面处的横向位移场。可见, 不同 e_{50} 土体横向位移场的分布特征类似, 在明显的漏斗处,

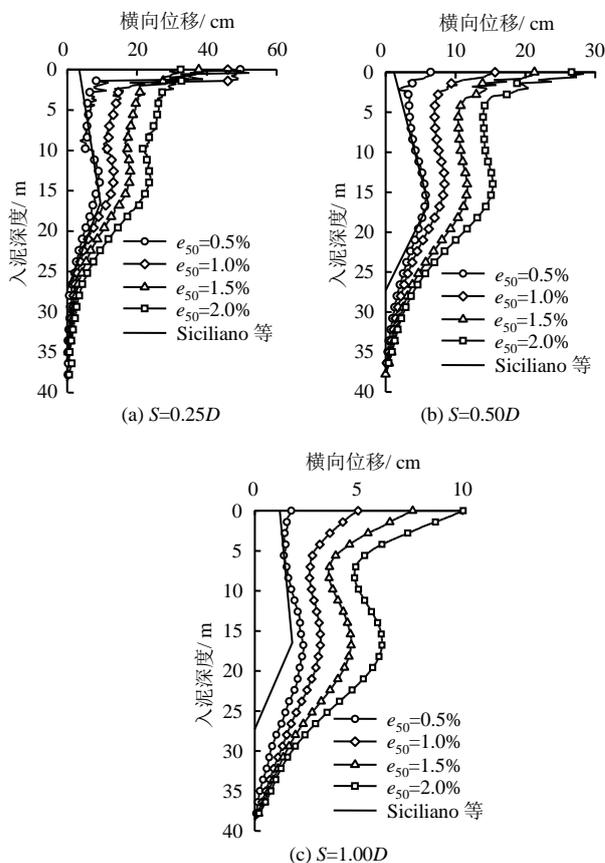


图 10 不同土体模型横向位移场的比较 ($Z=15.00$ m)
Fig.10 Soil lateral displacements of different soil models ($Z=15.00$ m)

$e_{50}=2.0\%$ 土体产生的横向位移约是 $e_{50}=0.5\%$ 土体位移的 2.5 倍。除了浅表层土体，其余位置土体位移剖面随 e_{50} 变化而呈现出等比例的变化。

图 10 也显示了上述数值模拟位移场与 Siciliano 等^[8]结果的比较。可见 Siciliano 位移场与 $e_{50}=0.5\%$ 土体位移场较为一致，这可能是由于 Siciliano 等在其离心机试验时使用了较硬黏土的缘故。

但 Xie 等^[12-13]试验测试得到的土体横向位移要显著大于 Siciliano 等^[9]的结果以及当前数值方法采用 e_{50} 常规取值 ($\leq 2\%$) 时得到的结果。为寻找其原因并匹配离心试验的测试结果，首先把土体模型在全部深度内调整为 $e_{50}=6.00\%$ ，相应结果的比较如图 11 所示。可见，数值结果在浅处 ($<18\text{ m}$) 与试验结果相近，但是在深部要大于后者。为此，进一步的优化分析采用了混合式的 e_{50} 土体材料，使土体的 e_{50} 从海床表面的 6.0% 线性减小到底部的 1.0% 。图 11 显示采用混合式 e_{50} 的数值结果与试验结果更为相符。由于 $e_{50}=6.0\%$ 大于海洋原状黏土的通常数值，上述现象可能是因为离心试验土层采用了泥浆固结方法制备，得到的重塑黏土具有更加缓和的应力-应变特征。

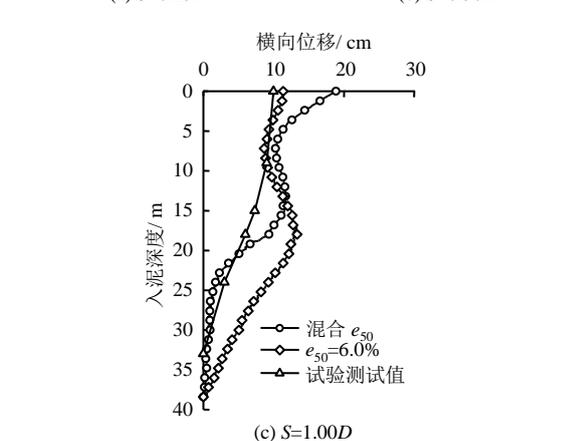
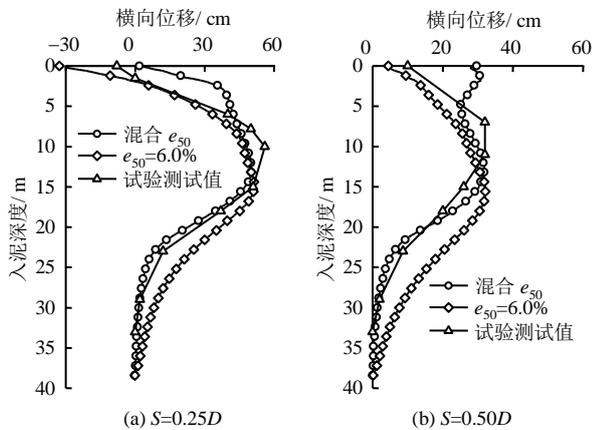


图 11 数值计算与离心试验测量^[11]的横向土位移比较
Fig.11 Measured vs. computed soil lateral displacements

从以上的数值模拟和引用的离心机试验结果可知，自由场地内钻井船插桩所产生的土体位移场受黏土变形参数显著影响，这个结论突出了 Siciliano 等^[9]和规范 SNAME^[8]归一化方案的不合理性，也说明了应变路径方法^[22-23]在求解插桩土体位移场这一特殊问题时的不适用性。

4 邻近桩基的附加荷载

在获取土体位移场后，可采用杆系-土弹簧的传统方法来计算该土体位移所导致的导管架桩基位移及内力。其中，桩侧土弹簧所使用的 $P-Y$ 曲线可根据 API RP 2A 方法建立，对于黏性土，它由土体的有效重度、不排水抗剪强度、 e_{50} 及桩基外径确定。在分析中，为保证参数一致性，确定土弹簧 $P-Y$ 曲线时，使用与按数值方法计算土体位移场时相同的 e_{50} 值。此外，依据离心机试验^[12-13]的设定，海床面处桩头为完全固定，在桩底处为完全自由。导管架桩基的几何和力学参数见第 2 节。

以 $e_{50}=1.0\%$ 的土体为例，当钻井船插桩深度 $Z=15\text{ m}$ 、桩基与桩靴的净距离为 0.25 倍桩靴直径 ($S/D=0.25$) 时，计算所得的桩身横向位移、剪力及弯矩沿深度的变化如图 12 所示。图中比较了插桩在自由土体中产生的横向位移 (对桩基来说是输入位移) 和桩基在该土体位移作用下满足静力平衡和变形协调条件后的最终横向位移，两者之差即桩-土之间的相对横向位移，据此相对位移和土体的 $P-Y$ 曲线，即可获得不同深度土体对桩基的横向压力。

采用同样的方法，图 13 和图 14 分别显示了当插桩深度分别为 9 m 和 15 m 时，在不同 e_{50} 和净间距的条件下，桩基弯距随深度的变化，以及与离心机试验测试值的比较，从中可观察到如下主要现象：

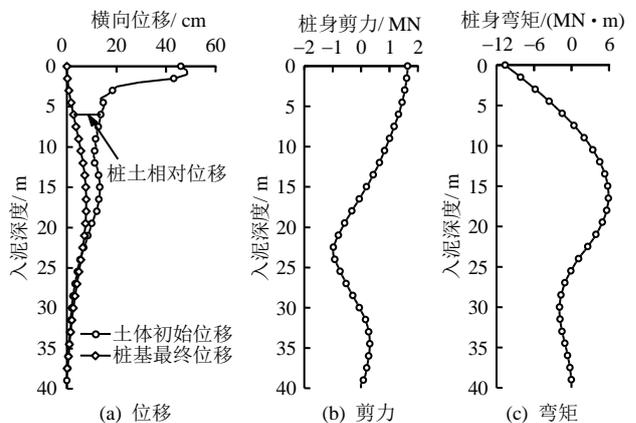


图 12 土体位移引起的桩体位移及内力
Fig.12 Soil movement-induced pile displacement and loading

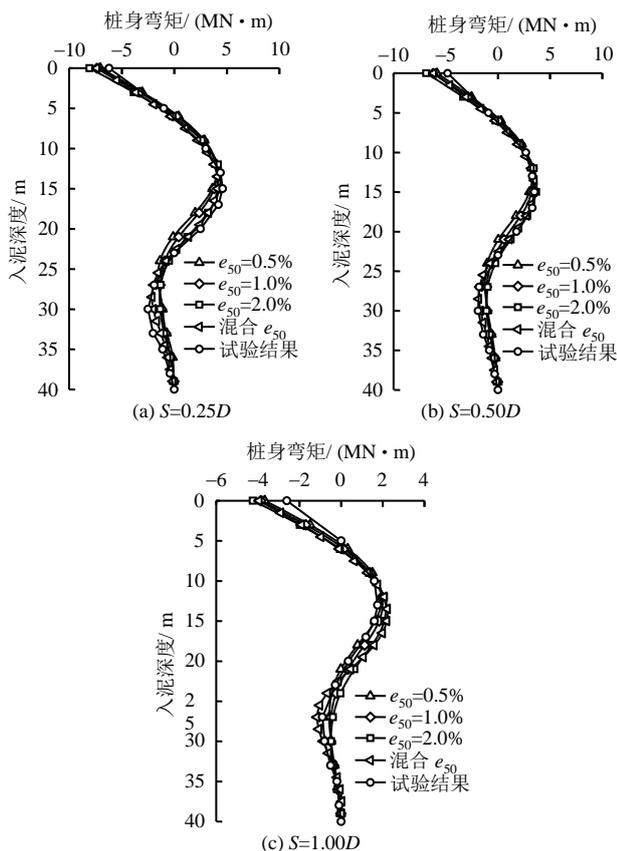


图 13 不同 S/D 和 e_{50} 下桩体弯矩随深度的变化 ($Z=9\text{ m}$)
 Fig.13 Pile bending moments with different S/D and e_{50} ($Z=9\text{ m}$)

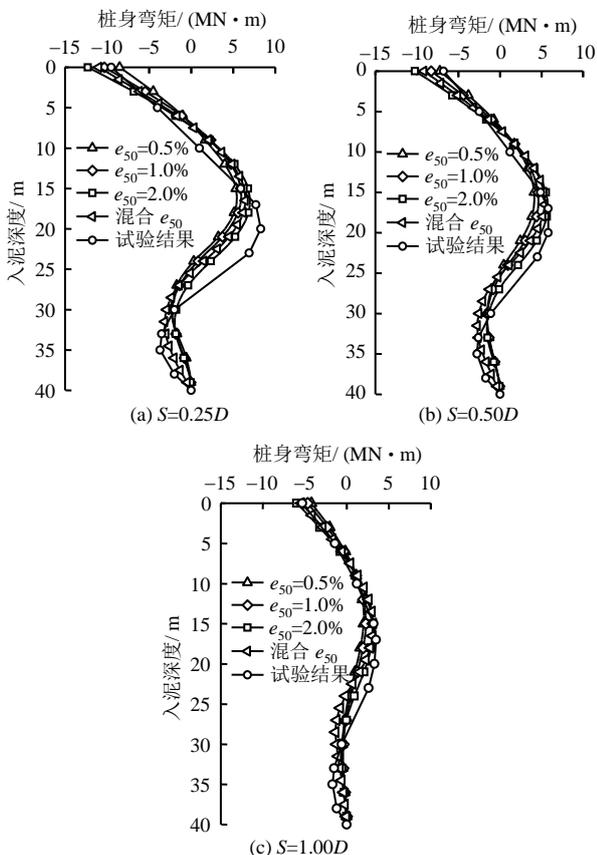


图 14 不同 S/D 和 e_{50} 下桩体弯矩随深度的变化 ($Z=15\text{ m}$)
 Fig.14 Pile bending moments with different S/D and e_{50} ($Z=15\text{ m}$)

(1) 在桩头固定的条件下，桩体弯矩出现两个较大的极值：一个在桩头处，另一个在桩靴深度 Z 下移约 $3\sim 5\text{ m}$ 处。在评估钻井船插桩对邻近导管架桩基的安全影响时，需要考虑插桩及导管架自身的综合加载。导管架自身对桩基横向加载的有效影响深度一般小于 20 倍的桩基直径，而以上两个桩体弯矩极值均出现在此深度之内，因此在评估时需要特别重视。当然，评估也要考虑桩基截面变化的影响。

(2) 对于给定的黏土，桩体的弯矩极值随着与桩靴距离的减小和插桩深度的增加而增大。在桩头固定的条件下，桩基对于插桩土体位移的响应有如一根向下的悬臂梁，桩身弯矩随插桩深度的增加不仅仅因为调动了深部强度更大的土体，也因为等效力臂的增加。

(3) 特别重要的是，对于给定不同 e_{50} 的土体，各桩体弯矩曲线非常接近。这是因为，较软的土体（具有较大的 e_{50} ）在插桩时会产生较大的土体位移（如图 10 所示），但同时产生较软的 $P-Y$ 弹簧，其极限抗力需要较大的相对位移来调动，反之亦然。在这两种相反效应的共同作用下，插桩引起的邻近桩基加载受土体变形参数的影响较小。

(4) 各计算所得的桩体弯矩与试验结果较为一致，其中采用混合式 e_{50} 的拟合效果最好。但计算结果中，桩基下部的极值弯矩与测试结果相比，出现的深度有一定下移。这种差异可能是由于离心试验中，黏土下铺设了 3 m 厚的砂土，其初衷是用于加快上部黏土的固结，但该砂层的出现可能改变了局部的土体位移场及对桩体的加载，该边界效应随插桩深度增加逐渐显现。但值得指出的是，与 Tho 等^[17-18]使用 CEL 技术得到的数值结果相比，本文数值模拟与实测结果吻合更好。

5 实用性问题

Xie 等^[12-13]离心试验中的桩基设置是实际情况的高度简化。首先，离心试验没有直接模拟桩基上部导管架的存在，也没有阐明导管架对桩基的约束是否可用桩头固定的边界条件来代替。图 15 显示出桩头固定和自由桩头两种不同边界对桩体位移和弯矩分布有显著影响。其次，离心试验考虑了插桩造成的桩基加载，而在评估插桩对邻近桩基的安全影响时，需要考虑插桩及导管架对桩基的综合加载。然而，如何分析两种荷载对桩基影响的叠加效应，线性叠加是较为简单的选择，但是否正确？由于居于专业间的灰色区域，这两个问题在以往的研究中没有受到足够的重视。另外，导管架结构分析的常

用软件，虽然便于计算导管架自身结构对桩头的约束作用及对桩体的加载，却不能计算土体位移对桩基的加载，因此也妨碍了结构工程师对土体位移场结果的直接应用。以下内容将从导管架对桩头约束的等价刚度入手，对上述问题做出解答。

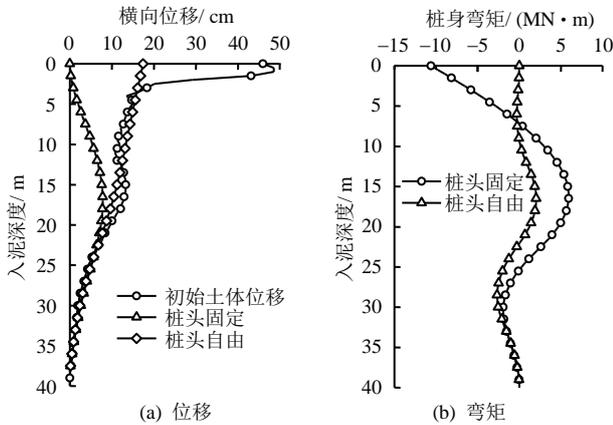


图 15 桩头边界条件对桩体位移及弯矩的影响
Fig.15 Effects of pile head boundary on pile displacement and bending moment

如图 16 所示，本文把所研究单桩的桩头部位从导管架整体结构中隔离出来，依据断开处力与位移的关系，把导管架其他部分对桩头的约束作用以等价的刚度矩阵来代替。通过典型的导管架分析发现，导管架结构对桩头的约束相当于把桩基以原有截面刚度向上延伸约 3~5 倍的桩径，再施加固定边界。把以上刚度矩阵施加在桩头上，通过桩-土共同作用分析发现，导管架结构对桩头的约束远大于一般黏土自身的刚度。因此，在评估钻井船插桩对邻近导管架桩基的安全影响时，假定桩头为固定约束条件，与实际情况偏差很小，且该偏差偏于保守。

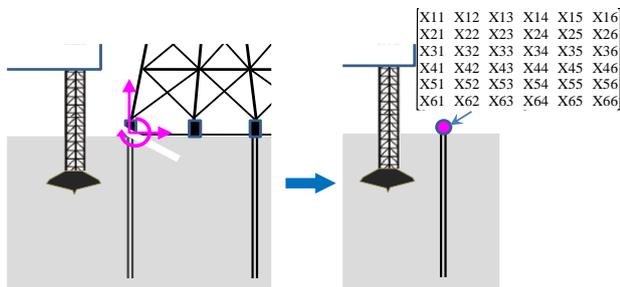


图 16 导管架对桩头约束的等价模型
Fig.16 Equivalent pile head constraint by jacket structure

确定桩头的等价刚度后，采用分步加载的方法评定线性叠加是否适用于插桩及导管架自身对桩基的综合加载：①设定桩头自由，计算导管架上部荷载对桩基的加载；②在变形后的桩头施加等价刚度约束；③施加土体位移，计算土体位移和原有导管

架荷载对桩基的综合加载。通过多个工况的分析发现，上述过程所产生的综合加载与单独加载的线形叠加结果具有一定的差异，如图 17 所示。这种差异主要来源于 P-Y 弹簧的非线性，因此横向土压力的差异最为明显。但是由于线性叠加方法的边界条件是准确的，且桩基总体变形较小，横向位移和弯矩的差异较小。因此，可以在前期设计中采用线性叠加的方法来简化计算，在后期设计中，采用复合加载的方法进一步优化计算。

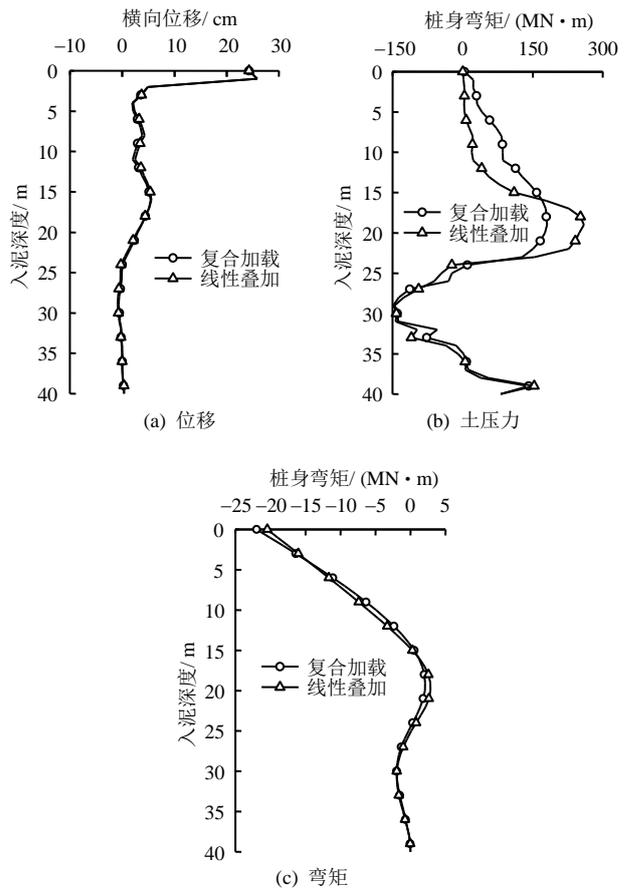


图 17 线性叠加结果与复合加载结果的比较
Fig.17 Linear summation method vs. combined loading method

在上述分析中也发现，当土体强度一致时，在导管架上部荷载单独作用下，较软的土体（具有较大的 e_{50} ）一般会产生较大的桩体内力；而在钻井船插桩单独作用下，较软的土体会产生稍小的桩体内力。综合上述两种相反的效应，特别是考虑到导管架上部荷载通常占桩基总体荷载比例较大，假定较软的土体一般会带来较保守的结果。这个结论可以在分析相关问题时帮助选择合理的土工参数。

6 结论

为分析、评估黏土中钻井船插桩时对邻近导管

架桩基的安全影响,本文首先把这一复杂过程分解为相对独立且简单的两个步骤:计算自由场地由于插桩土体产生的位移场和计算土体位移场导致的桩基加载。通过与已有离心机试验测试结果的比较,阐明了该方法是可靠的。在此基础上,本研究获得了以下主要结论:

(1) 在给定土体强度的条件下,自由场地由于插桩土体产生的位移场受土体变形参数 e_{50} 的影响显著,随 e_{50} 变化呈现几乎等比例的变化。

(2) 土体变形参数 e_{50} 的取值大小在计算土体位移场和确定桩基横向土弹簧时产生相反的效果,受此综合影响,钻井船插桩引起的邻近桩基加载受土体变形参数的影响较小。

(3) 在评估钻井船插桩对邻近导管架桩基的安全影响时,可把导管架对桩头的约束以固定约束来近似代替。

(4) 钻井船插桩及导管架对桩基的综合加载与单独加载的线性叠加结果在弯矩和横向位移分布上产生的差异较小,因此可以在前期设计中采用线性叠加的方法来简化计算。

(5) 在计算钻井船插桩及导管架自身对桩基的综合加载时,土体强度一定的条件下,特别是考虑到导管架上部荷载通常占桩基总体荷载比例较大,选用较软的土体(较大的 e_{50})得到的结果较为保守。

(6) 由于黏土中插桩对邻近桩基的影响较大,且受限于以往离心机试验的结果,本文重点研究了正常固结和轻微超固结黏土中插桩对邻近导管架桩基的安全影响,但所用的方法及原理同样适用于砂性土和分层土。此外,对于硬黏土和结构性较强的黏土,当其残余和重塑强度显著低于其峰值强度时,考虑土体在大应变后强度的弱化现象,会加强土体在桩靴周围的回流,减小土体位移场的量值,并约束位移场向远处空间的传递,进而有效降低邻近桩基上的次生荷载。明确钻井船插桩过程中的土体结构性效应,将是后续研究的重要内容。

参考文献

- [1] LE TIRANT P. Seabed reconnaissance and offshore soil mechanics for the installation of petroleum structures[M]. [S. l.]: [s. n.], 1979.
- [2] 张浦阳. 海上自升式钻井平台插/拔机制及新型桩靴静/动承载力研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
ZHANG Pu-yang. Study on mechanism for spudcan during preloading and extracting of offshore jack-up drilling platform and bearing capacity of improved spudcan in static and cyclic loadings[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [3] YOUNG A G, REMMES B D, MEYER B J. Foundation performance of offshore jack-up drilling rigs[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1984, 110(7): 841—859.
- [4] 李书兆, 李亚, 鲁晓兵. 自升式钻井船插桩对邻近平台桩基影响的评价方法探讨[J]. 海洋通报, 2017, 36(3): 293—301.
LI Shu-zhao, LI Ya, LU Xiao-bing. Discussion of methods evaluating the effect of the jack-up spudcan penetration on the adjacent platform pile[J]. **Marine Science Bulletin**, 2017, 36(3):293—301.
- [5] 兰斐. 钻井船插桩对邻近平台桩基影响的数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2015.
LAN Fei. Numerical analyses on effects of the spudcan penetration on piles of adjacent platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [6] 王建华, 兰斐. 钻井船插桩对邻近桩影响的耦合欧拉-拉格朗日有限元方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1127—1136.
WANG Jian-hua, LAN Fei. A coupled Eulerian-Lagrange FEM for analyzing the effects of spudcan penetration on an adjacent pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 37(4): 1127—1136.
- [7] DIER A, ABOLFATHI S, CARROLL B. Guidelines for jack-up rigs with particular reference to foundation integrity[M]. [S. l.]: MSL Engineering Limited, 2004.
- [8] Society of Naval Architects and Marine Engineers. Recommended practice for site specific assessment of mobile jack-up units[S]. New Jersey: Technical and Research Bulletin 5—5A, 2007.
- [9] SICILIANO R J, HAMILTON J M et al. Effect of jackup spud cans on piles[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1990.
- [10] CRAIG W. H. Spud-can foundations: installation with deep penetration and subsequent removal[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering**, 1998, 131(3): 146—151.
- [11] CRAIG W H, CHUA K. Deep penetration of spud-can foundations on sand and clay[J]. **Géotechnique**, 1990,

- 40(4): 541—556.
- [12] XIE Y. Centrifuge model study on spudcan-pile interaction[D]. Singapore: Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, 2009.
- [13] XIE Y, LEUNG C F, CHOW Y K. Centrifuge modelling of spudcan-pile interaction in soft clay[J]. **Geotechnique**, 2012, 62(9): 799—810.
- [14] QIU G, GRABE J. Explicit modeling of cone and strip footing penetration under drained and undrained conditions using a visco-hypoplastic model[J]. **Geotechnik**, 2011a, 34(3): 205—217.
- [15] QIU G, HENKE S. Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay[J]. **Marine structures**, 2011b, 24(4): 528—550.
- [16] QIU G, HENKE S, GRABE J. Application of a coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(1): 30—39.
- [17] QIU G, GRABE J. Numerical simulation of the deep penetration process of spudcans into sand overlying clay using the extended hypo-plastic models[C]//Proceedings of the Twenty-Second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes: [s. n.], 2012.
- [18] THO K K, LEUNG C F et al. Eulerian finite-element technique for analysis of jack-up spudcan penetration[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2010, 12(1): 64—73.
- [19] THO K K, LEUNG C F et al. Eulerian finite element simulation of spudcan-pile interaction[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2013, 50(6): 595—608.
- [20] American Petroleum Institute. API RP 2A—WSD. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress-design[S]. Washington D. S.: American Petroleum Institute, 2007.
- [21] MATLOCK H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay[C]//Offshore Technology in Civil Engineering, ASCE. [S. l.]: [s. n.], 1970: 77—94.
- [22] BALIGH M M. Strain path method[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1985, 111(9): 1108—1136.
- [23] SAGASETA C, WHITTLE A J, SANTAGATA M. Deformation analysis of shallow penetration in clay[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1997, 21(10): 687—719.

上接第 1890 页

- [5] 艾智勇, 李博. 横观各向同性层状地基平面应变问题的解析层元解[J]. **岩土工程学报**, 2012, 34(10): 1787—1791.
- AI Zhi-yong, LI Bo. Analytical layer element solutions to plane strain problem of transversely isotropic multilayered soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(10): 1787—1791.
- [6] ZHONG W X. Duality system in applied mechanics and optimal control[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [7] ZHONG W X, LIN J H, GAO Q. The precise computation for wave propagation in stratified materials[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2004, 60(1): 11—25.
- [8] AI Z Y, CHENG Y C. Extended precise integration solution for consolidation of transversely isotropic poroelastic layered media[J]. **Computers and Mathematics with Applications**, 2014, 68(12): 1806—1818.
- [9] AI Z Y, WU Q L, WANG L J. Extended precise integration method for axisymmetric thermo-elastic problem in transversely isotropic material[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2016, 40(2): 297—312.
- [10] 钟阳, 耿立涛. 多层弹性平面问题解的精确刚度矩阵法[J]. **岩土力学**, 2008, 29(10): 2829—2832.
- ZHONG Yang, GENG Li-tao. Explicit solution of multiplayer elastic plane by exact stiffness matrix method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2829—2832.