

DOI: 10.11779/CJGE201503011

# 夹层土上自升式钻井平台穿刺机理的离心模型试验研究

李 飒<sup>1</sup>, 王耀存<sup>1</sup>, 吴兴州<sup>2</sup>, 梁建辉<sup>3</sup>, 周杨锐<sup>4</sup>

(1. 天津大学建工学院岩土所, 天津 300072; 2. 中冶建工集团有限公司勘察设计研究院, 重庆 400084;

3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 4. 中海油服股份有限公司物探事业部, 天津 300451)

**摘 要:** 自升式钻井平台是一种海洋石油开采中常用的平台结构形式。桩脚穿刺是引发自升式钻井平台事故的最主要的原因, 目前对于穿刺机理的研究都集中在桩靴达到或者进入到硬层以后, 即认为只有桩靴在达到或进入硬层后, 穿刺行为才开始启动。在中国南海海域普遍存在硬夹层分布土层, 即软—硬—软, 俗称“鸡蛋壳”土层分布, 现场情况显示, 在这种土质条件下, 现有的方法很难对穿刺行为做出准确的预测。采用离心模型试验以及有限元的方法对上述土层分布下的穿刺机理进行了研究。离心模型试验显示: 在桩靴贯入过程中所受到的土阻力的大小沿深度的分布存在两种不同的模式。当上层软土强度与硬层强度之比在 0.5 左右时, 土阻力沿深度的分布存在两个峰值点; 当上层软土强度与硬层强度之比在 0.2 左右时, 土阻力沿深度的分布与现有计算模式的情况相同。有限元计算分析显示造成上述现象的主要原因是塑性区在土体中的展开模式的区别。在钻井平台预压插桩过程中应该充分考虑土体中土阻力的分布特点, 合理设计每级预压荷载的大小, 预防穿刺的发生。

**关键词:** 桩靴; 穿刺; 离心模型试验; 有限元

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)03-0479-08

**作者简介:** 李 飒(1970-), 女, 博士, 教授, 主要从事海洋土的工程性质、土与结构物相互作用以及海洋工程等方面的研究与教学工作。E-mail: lisa@tju.edu.cn。

## Centrifugal model tests on mechanism of spudcan penetration of jack-up drilling platform in egg-shell layered soil

LI Sa<sup>1</sup>, WANG Yao-cun<sup>1</sup>, WU Xing-zhou<sup>2</sup>, LIANG Jian-hui<sup>3</sup>, ZHOU Yang-rui<sup>4</sup>

(1. Geotechnical Institute, Civil Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Metallurgical Construction

Engineering Group Co., Ltd. Survey And Design Institute, Chongqing 400084, China; 3. China Institute of Water Resources and

Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Geophysical Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China)

**Abstract:** A jack-up drilling rig is a type of mobile platform which is commonly used in offshore engineering. Spudcan installation in stiff clay overlying soft clay is subjected to potential penetration through hazard. Penetration failure occurs when the applied load exceeds the maximum bearing resistance of the layered soil causing the spudcan to plunge into the underlying clay. In the South China Sea, the layered soil called “egg shell” or “sandwich layered soil” which is composed of thick soft-thin stiff-thick soft clay can be found. The methods for calculating penetration often used today are difficult to make right prediction for this layered soil in practice. To provide a better understanding of the spudcan bearing resistance in “egg shell” soil, centrifugal model tests are undertaken to investigate the development of the bearing failure mechanism and bearing resistance-depth profile. At the same time, the finite element method is also used to study the mechanism of penetration in the layered soil. The centrifuge tests show that the failure mechanism is governed mainly by the undrained shear strength ratio between the two layers. When the ratio of the undrained shear strength of soft clay to that of stiff clay is around 0.5, the spudcan resistance-depth profile has two peak points; when the ratio is about 0.2, the spudcan resistance-depth profile is the same as that provided by the other researchers. The FEM analysis shows that under different undrained shear strength ratios, the plastic zones around spudcan expand in different ways. When jack-up drilling rigs are preloaded in “egg shell” layered soil, different bearing failure mechanisms should be considered

properly to prevent platform from penetration through failure.

**Key words:** spudcan; penetration; centrifugal model test; finite element method

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046800);  
国家重大专项子任务(2011ZX05056-002-01); 上海交通大学国家重点  
实验室开放课题(1201)

收稿日期: 2014-05-20

## 0 引言

自升式钻井平台便于建造且移动自由灵活,适用于不同的海底地质条件和较大范围的水深范围,是一种海洋石油开采中常用的平台结构形式。

为了保证平台的安全生产,在钻井前需要对每根桩腿进行分级预压,即逐级施加预压荷载,将桩腿贯入至泥面以下一定的深度。自升式钻井平台基础穿刺,是指钻井平台在升船压桩过程中,桩脚基础遇到硬土层之下存在软土层的层状地基,由于钻井平台桩脚基础具有面积小,压载大的特点,当桩脚施加的压载超过层状地基承载力时,地基土发生冲剪破坏,桩脚穿过硬土层进入软土层后,由于承载力的大幅下降,造成钻井平台桩脚的迅速下沉现象。一旦穿刺发生,就可能造成桩腿损坏、船体倾斜,甚至翻沉。因此在硬—软土层状地基发育海区,钻井平台桩靴潜在穿刺危险是对钻井平台安全的严重威胁<sup>[1]</sup>,自升式钻井平台的穿刺示意图见图1。

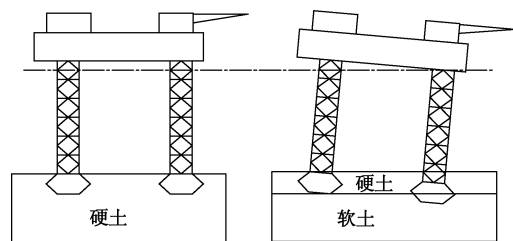


图1 自升式钻井平台的穿刺示意图

Fig. 1 Penetration of spudcan of jack-up drilling platform

穿刺主要发生在两种土质条件下:一种是砂土—软黏土,另一种是硬黏土—软黏土<sup>[2-5]</sup>。目前用于穿刺分析的方法主要有Hanna和Meyerhof提出的上硬下软地基中的承载力计算方法以及投影面积法<sup>[6-8]</sup>。

由于目前的方法预测精度较低,实际工程中钻井平台事故的发生比较频繁。据统计,在1955年—2006年间,每年发生事故的平台数量平均占到平台总数的4%~6%,其中穿刺引发的事故有很大的比例<sup>[9]</sup>,为此很多研究者对此问题展开了探讨。吴秋云等探讨了上述分析方法在渤海海域的适用性,认为3:1投影面积法可以对砂土—黏土穿刺进行较好的预测<sup>[1]</sup>;刘剑涛等指出现有预测方法均存在一定局限性,需对计算参数的选择进行更加细致的研究<sup>[10]</sup>。戴兵等通过对穿刺事故的分析指出,需要将投影面积法和硬砂层剪切破坏后桩靴下部土体的变化结合起来,分析土体的极限承载能力,才能得到准确结果<sup>[11]</sup>。

Kellezi 等<sup>[12]</sup>利用有限元对钻井平台插桩过程进行了模拟,指出有限元法结合传统的预测方法可以提

高预测的精度。Tho 等<sup>[13]</sup>提出采用耦合欧拉-拉格朗日的方法(CEL)建立有限元模型,模拟桩靴贯入过程,取得了良好的效果。除了有限元模拟,室内模型试验和离心模型试验也被用于研究穿刺行为,其中最具有代表性的是 Hossain 进行的一系列离心模型试验,根据离心模型试验的结果结合有限元模拟,研究了硬黏土—软黏土模式下桩靴的穿刺机理,指出  $S_{ubs}/S_{ut}$ , 即上部土层不排水强度/下部土层不排水强度,  $t/D$ , 即桩靴的入泥深度/桩靴最大宽度,  $KD/S_{ubs}$ , 即土体强度沿深度的变化 ( $K$  为黏土的不排水强度随深度变化的系数), 均会对穿刺的发生产生影响<sup>[14-16]</sup>。

总体来说,目前对于穿刺机理的研究都集中在桩靴达到或者进入到硬层以后,即认为只有桩靴在达到或进入硬层后,穿刺行为才开始启动,其基本的机理如图2所示。从图中可以看到,当施加的荷载达到或超过硬层所提供的极限承载力后,由于下部土层的承载力明显降低,此时穿刺发生。

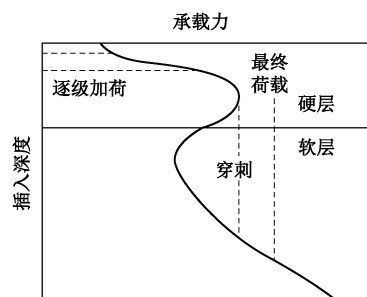


图2 穿刺机理示意图

Fig. 2 Mechanism of penetration

海底的土层在形成过程中由于受到多方面的影响,其土层分布往往非常复杂。以南海海域为例,就普遍存在硬夹层分布土层,俗称“鸡蛋壳”土层分布,见图3。其特点是软黏土中存在一厚度较小,一般为2~4 m的硬黏土或砂土层。现场情况显示,在这种土质条件下,利用现有的方法很难做出准确的预测。为了对此种土层分布的穿刺机理有深入的了解,本文利用离心模型试验以及有限元的方法对软黏土—硬黏土—软黏土土层的穿刺机理进行了有针对性的研究。

## 1 离心模型试验

### 1.1 试验方法

本次试验使用中国水利水电科学研究院的LXJ-4-450大型土工离心机,离心机的主要技术指标,详见表1。离心机主机的转臂连接试验吊篮和配重吊篮,试验吊篮和配重吊篮均为半自由悬挂式。试验时吊篮可以自动摆动并且摆平后其底板恰好套入转臂端部的承力横板。

试验过程中,土样和桩靴模型被固定在一个模型

箱里, 模型箱尺寸为长×宽×高=0.8 m×0.6 m×0.5 m, 模型箱的正面由有机玻璃制成, 可以打开。模型箱放置在试验吊篮里。外置的液压泵被固定在离心机的转臂横梁上, 为桩靴下压提供动力。液压泵通过油管与液压缸筒连接, 缸筒内的油压驱动钢芯, 使桩靴向下运动, 试验数据通过汇电滑环实时传输至数据采集计算机。图 4 为制作好的模型和相应的试验设备。



图 3 鸡蛋壳土层示意图

Fig. 3 “Egg shell”soil layers

表 1 土工离心机的主要技术指标

Table 1 Technical indexes of centrifuge

指标	半径 /m	加速度 /g	载荷 /t	容量 /(g·t)	试验吊篮尺寸 长×宽×高 /(m×m×m)
数值	5.03	300	1.5	450	1.5×1.0×1.5

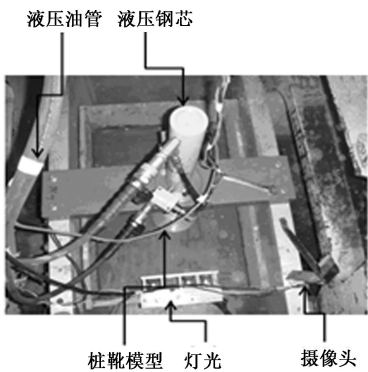
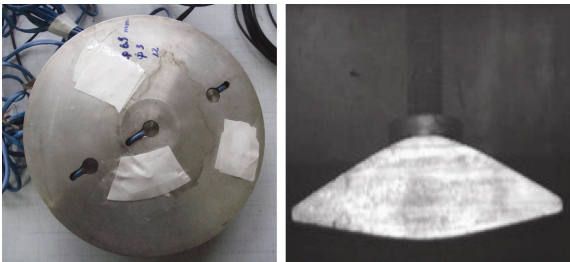


图 4 离心模型试验的模型箱

Fig. 4 Model box of centrifuge tests

桩靴模型形状和尺寸按照原型 1 : 100 进行制作, 最大截面直径为  $D=18\text{ cm}$ , 用钢材制成。本次试验采用两种桩靴模型, 即全模型桩靴和半模型桩靴。全模型试验的桩靴见图 5 (a), 在全模型桩靴在底面安装有土压力传感器和孔压传感器, 具体位置见图 5 (c)。



(a) 全模型 (b) 半模型

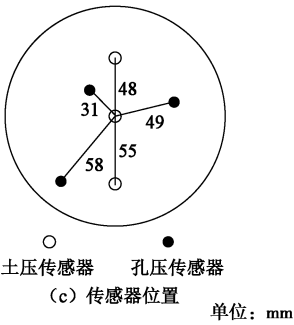


图 5 桩靴模型

Fig. 5 Spudcan model

本次试验使用的孔隙水压力传感器为 PDCR 81 型孔压传感器, 直径 3 mm 左右, 量程 700 kPa, 精度 0.1%。土压力传感器为 BW-1 型土压力传感器, 直径 6 mm 左右, 量程 1000 kPa, 精度 0.25%, 主要测量桩靴底部土压力的变化。各种传感器均在桩靴底部钻孔安装。全模型桩靴主要是用来测试试验过程中土阻力和孔压的变化情况。

所谓半模型试验即将全模型桩靴从中间一分为二, 见图 5 (b)。半模型试验主要是用来研究桩靴贯入过程中周围土体的运动情况。试验过程中, 半模型桩靴紧贴在模型箱有机玻璃面上, 同时在土层上分行设置彩色的荧光片。离心机实验吊篮中安装的高速摄像机, 可以在试验过程中进行大批量的图像采集。采集到的图像用粒子图像测速技术 (PIV) 进行分析, 可以得到桩靴贯入过程中周围土体的速度场。图 6 为制作好的半模型试验箱。

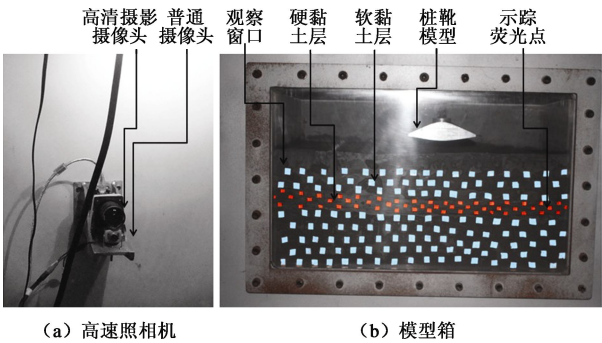


图 6 半模型试验装置图

Fig. 6 Finished model box of half model tests

离心模型试验用土为南海水深 200 m 处现场获取的低液限粉质黏土, 其基本物理性质见表 2, 颗粒曲线见图 7。

实验用土制备首先需要对黏土进行充分搅拌, 然后加水制成泥浆, 静置 2~4 h, 待土体稳定后, 在表面覆盖土工布利用真空泵抽真空 2~4 h, 这一过程主要是排气。然后将饱和均匀的泥浆放入模型箱, 利用离心机对土样进行固结。不同强度的土体需要分别进

行固结。首先制作软土层,在 50g 的加速度下固结 1~2 h,然后测量软层的强度,强度达到要求后,将土体分为两部分,分别转移至其他模型箱,并加水养护。再在离心机中制备硬层,在硬层制备的过程中需要在土体顶部增加配重。最后将制作好的土体进行装配,并再次测量土体的强度,作为实际土层的强度进行后续分析。图 8 为装箱后的含有硬夹层的试验用土,以及土体不排水强度随深度的变化的示例。

表 2 试验用土物理性质

Table 2 Physical mechanics of soils

指标	重度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	干重度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比重	塑限 /%	塑性 指数
数值	19.2	15.2	2.77	36.2	13.6

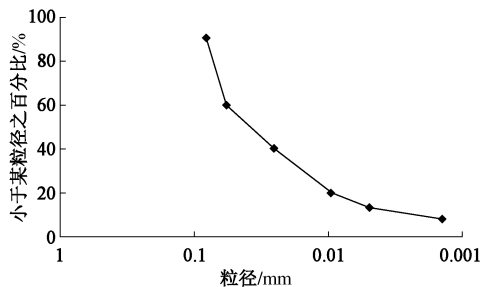


图 7 颗粒级配曲线  
Fig. 7 Distribution of soil particle size

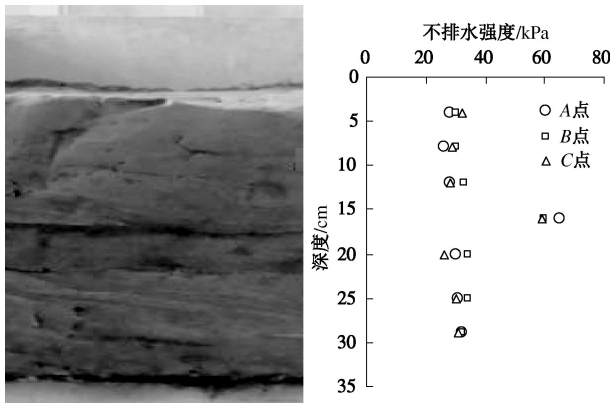


图 8 试验土体及其强度  
Fig. 8 Soil and undrained shear strength of soil

1.2 试验内容

离心模型试验加速度取  $a=100g$ , 分别进行了 6 组试验。其中一组为半模型, 5 组为全模型试验, 全模型试验中一组为均质土试验, 是为了进行对比分析而设立的。由于饱和黏土是在离心机中固结, 因此均质土的强度随深度线性增加, 其强度变化可表示为  $S_u=20+0.1h$ , 其他试验条件具体见表 3。

表 3 离心模型试验实验方案

Table 3 Schemes of model tests

编号	土样描述	试验类型	不排水强度之比/ $\text{kPa}$	土层厚度/ $\text{cm}$
1	无硬夹层	全模型	$S_u=20+0.1h$	$H_1=30$
2	软—硬—软	全模型	$S_{ut}/S_{um}=0.5$ $S_{ub}/S_{um}=0.51$	$H_1=10, H_2=2,$ $H_3=18$
3	软—硬—软	全模型	$S_{ut}/S_{um}=0.5$ $S_{ub}/S_{um}=0.60$	$H_1=12, H_2=4,$ $H_3=14$
4	软—硬—软	全模型	$S_{ut}/S_{um}=0.23$ $S_{ub}/S_{um}=0.35$	$H_1=10, H_2=2,$ $H_3=18$
5	软—硬—软	全模型	$S_{ut}/S_{um}=0.21$ $S_{ub}/S_{um}=0.38$	$H_1=10, H_2=4,$ $H_3=16$
6	软—硬—软	半模型	$S_{ut}/S_{um}=0.55$ $S_{ub}/S_{um}=0.59$	$H_1=10, H_2=2,$ $H_3=18$

注:  $S_{ut}$  上层土不排水强度;  $S_{um}$  硬夹层不排水强度;  $S_{ub}$  下层土不排水强度,  $H_1$  上层土厚度;  $H_2$  硬夹层厚度;  $H_3$  下层土厚度。

2 试验结果及分析

在桩靴模型底部分别安装了 3 个土压力传感器和 3 个孔压传感器, 在试验过程中, 三者的测试结果比较接近, 见图 9。图 9 为试验 1 三个传感器的测试结果。为清楚起见, 此后每个试验仅给出其中一个结果作为示例。从图 9 (b) 中的孔压随深度变化可以看到, 孔压的大小在 7 cm 有一突变, 造成这一现象主要有两方面的因素: ①黏土中孔压产生有一定的滞后效应<sup>[17-18]</sup>; ②在 0~4 cm 左右桩靴的下沉主要是自重引起的沉降, 下沉的速度较快, 也可能导致上述结果的出现。

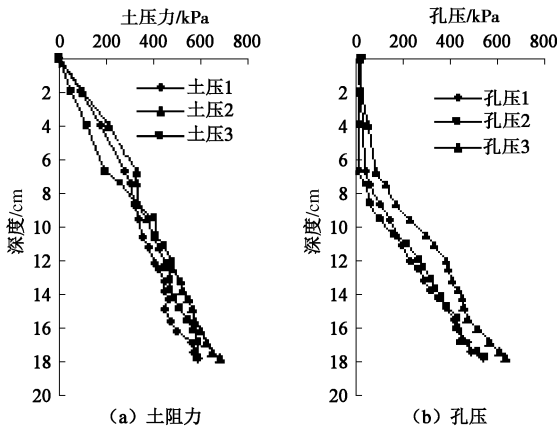


图 9 模型试验 1 的模型试验结果  
Fig. 9 Results of model test 1

图 10 为 4 组软—硬—软土层全模型试验得到的桩靴底部土阻力随深度变化曲线。可以看到, 由于硬层的存在, 桩靴在穿越硬层的过程中都有不同程度的穿刺发生, 但贯入过程中的土阻力随深度的变化却表现出不同的特点。根据曲线的特点, 4 个试验可以分



为两组。图 10 (a)、(b) 为  $S_{ut}/S_{um}=0.5\sim0.55$  的情况, 其土阻力随深度的分布出现了两个明显的拐点, 即在硬层之上 1~2 cm 左右有一个土阻力增高区域的存在。而对于图 10 (c)、(d),  $S_{ut}/S_{um}=0.21\sim0.23$  的情况, 则没有发现上述情况, 其穿刺过程与其他研究者的情况类似。

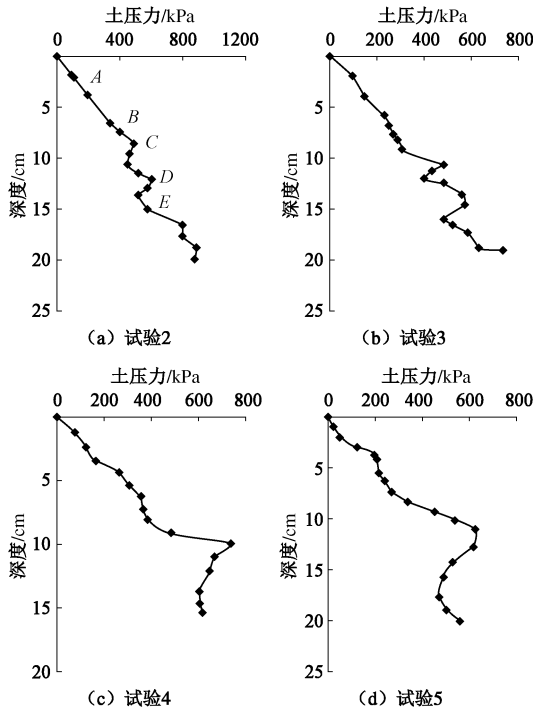


图 10 试验 2~5 的土阻力沿深度的分布模型试验结果

Fig. 10 Distribution of soil resistance along penetration depth of tests 2~5

为了对  $S_{ut}/S_{um}=0.5\sim0.55$  出现的特殊情况有进一步的了解, 进行了半模型试验。图 11 为半模型试验过程中捕捉到的图像以及利用粒子成像测速 (PIV) 技术对图片进行处理后得到的桩靴插入过程中土体运动的速度场。

其中图 11 (a) 为桩靴刚刚接触到土体时的情况, 图中虚线部分表示硬层所在的位置。为了明确桩靴的贯入过程, 在图 10 (a) 中标明了所选图片的贯入位置。

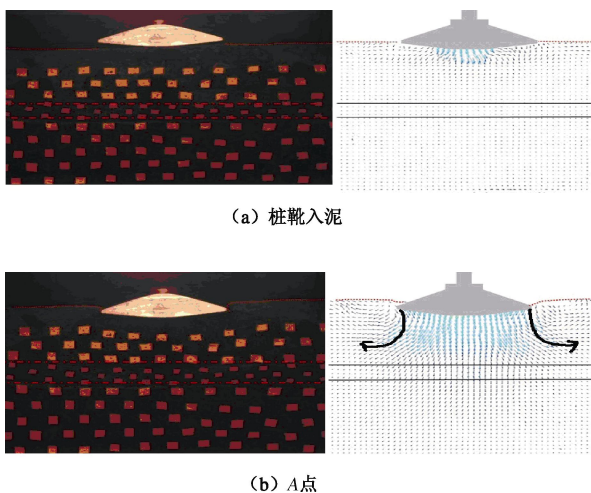


图 11 半模型试验结果

Fig. 11 Results of half model tests

图 11 (b) 为桩靴开始贯入到达图 10 (a) 中所示 A 点时的土体的速度场。从图中可以看到, 由于此时处于软土部分, 硬层尚未起效, 贯入时周围土体的速度场较大; 随着贯入深度的增加, 当到达 B 点时 (图 11 (c)), 硬层开始起效, 从照片中可以看到, 此时的硬层已经有了一定的变形, 而土体的速度场较之前有了明显的降低; 此时继续施加荷载, 到达 C 点时 (图 11 (d)), 土体中的速度场的分布与之前相比发生了一定的变化, 桩靴下方与硬层之间的土体的速度场减小, 这是桩靴受到较大阻力的反应 (参见图 11 (e) 桩靴到达硬层时土体的反应); 桩靴继续贯入到达 D 点 (图 11 (e)), 此时桩靴已经到达硬层所在位置, 硬层所在位置的土体的速度场很小, 说明这是一个土阻力较大的区域, 硬层下软层速度增大; 到达 E 点时 (图 11 (f)), 桩靴已经接近硬层底部, 其下软层速度场整体明显增大, 桩靴正下方速度激增。

通过上述的试验结果可以看到, 当  $S_{ut}/S_{um}=0.5\sim0.55$  时, 桩靴贯入过程中所遇到的土阻力存在两个峰

值点, 第一个峰值点出现在距离硬层之上的 1~2 cm 处, 第二个峰值点出现在到达硬层时, 且本次试验中第一峰值的大小可以达到第二峰值的 80%~90%。

上述土阻力沿深度的分布特点说明, 当桩靴穿过软—硬—软土层时, 不同的硬层强度可能导致不同的贯入过程。如果桩靴的尺寸较大, 即重量较大, 同时所施加的本级压载也较大, 桩靴穿过第一峰值点后可能直接贯入硬层产生穿刺, 在这种情况下发生时, 穿刺现象有可能提前发生, 也就是说在还没有到达硬层所在位置穿刺已经发生, 这种穿刺由于有两次加速的过程其穿刺深度也会大于一般的穿刺。如果本级压载的荷载较小, 且桩靴自身的尺寸也较小, 这种土阻力分布也可能导致双穿刺现象的发生, 即在还没有到达硬层时, 即发生一规模较小的穿刺, 硬层支撑住桩靴, 下级荷载施加后又会再次穿刺。

为了对上述现象出现的原因进行探讨, 采用 ABUQUS 模拟了桩靴的贯入过程, 对软—硬—软土层桩靴的穿刺机理进行了进一步的分析。

3 有限元分析

对于桩靴贯入这种问题, 土体的变形相对较大, 经常会因为网格变形奇异造成模型计算的不收敛。为了能更好的模拟桩靴贯入过程, 采用 CEL 法对桩靴贯入进行了有限元计算。

CEL 方法是 ABAQUS 中流固耦合分析的关键技术, 它分别汲取了欧拉网格和拉格朗日网格的优点, 并应用强大简易的 Abaqus/Explicit 通用接触算法较好的解决流体和固体结构的接触问题, 得到结构准确的应力应变响应<sup>[19-20]</sup>。本次有限元计算采用了这种方法对桩靴的贯入进行了模拟。

在有限元计算中, 土体采用三维欧拉体进行模拟, 单元形式为 EC3D8R, 土体的尺寸为 80 cm×60 cm×30 cm 与模型试验中土体的尺寸相同, 上部软层厚度 10 cm, 硬层的厚度 2 cm, 下部软层 18 cm。在数值模拟过程中, 桩腿桩靴的变形远远小于土体的变形, 且刚度很大, 因此将桩靴设置为刚体, 桩靴形状和尺寸也与模型试验中桩靴形状尺寸相同, 见图 12。

由于桩靴贯入过程中, 桩靴、地基以及荷载具有对称性, 所以对于土体只选取计算区域的四分之一进行模拟。进行网格划分时通常从计算的精度和计算的速度两方面进行考量。将土体分成两个区域: 近桩靴区和远桩靴区。近桩靴区土体受力变形较大, 网格划分稠密; 远桩靴区土体受力、变形小, 网格划分稀疏。模型的网格划分情况如图 12。

由于地基土采用欧拉模型, 对地基边界采用加速

度约束。在竖向边界施加水平的加速度约束, 在水平边界施加垂直的加速度约束, 并设置欧拉吸收边界。土体本构关系采用 M-C, 主要计算参数见表 4。

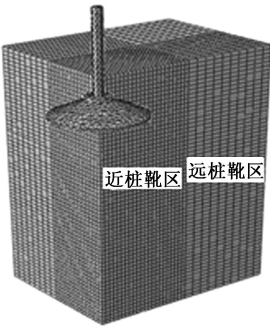


图 12 有限元网格划分  
Fig. 12 Element mesh of FEM

表 4 有限元计算参数

Table 4 Soil parameters in FEM

指标	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	不排水强度 /kPa	泊松比	弹性模量 /kPa
工况 a	19.2	上部软层: 22	0.49	11000
		硬 层: 40		20000
		下部软层: 22		11000
工况 b	19.2	上部软层: 22	0.49	11000
		硬 层: 96		48000
		下部软层: 22		11000

采用上述模型对桩靴的贯入过程进行模拟, 得到不同桩靴贯入过程中周围土体的速度矢量图。将此速度矢量图与试验获得的经过 PIV 技术处理得到的速度矢量图进行比较, 如图 13 所示, 从中可以看到较好的一致性。

同时, 通过有限元计算还可以得到不同插深位置处土体的塑性区展开图, 见图 14。图 14 中给出了硬层强度  $S_{ut}/S_{um}=0.55$  以及  $S_{ut}/S_{um}=0.23$  两种情况下土层中塑性区变化的情况。其中 (a) 系列代表  $S_{ut}/S_{um}=0.55$  的情况而 (b) 系列代表  $S_{ut}/S_{um}=0.23$  的情况。

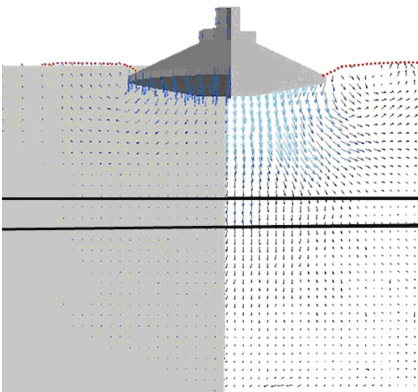


图 13 有限元模拟和半模型试验速度矢量图比较  
Fig. 13 Comparison of velocity vectors between CEL method and half model tests



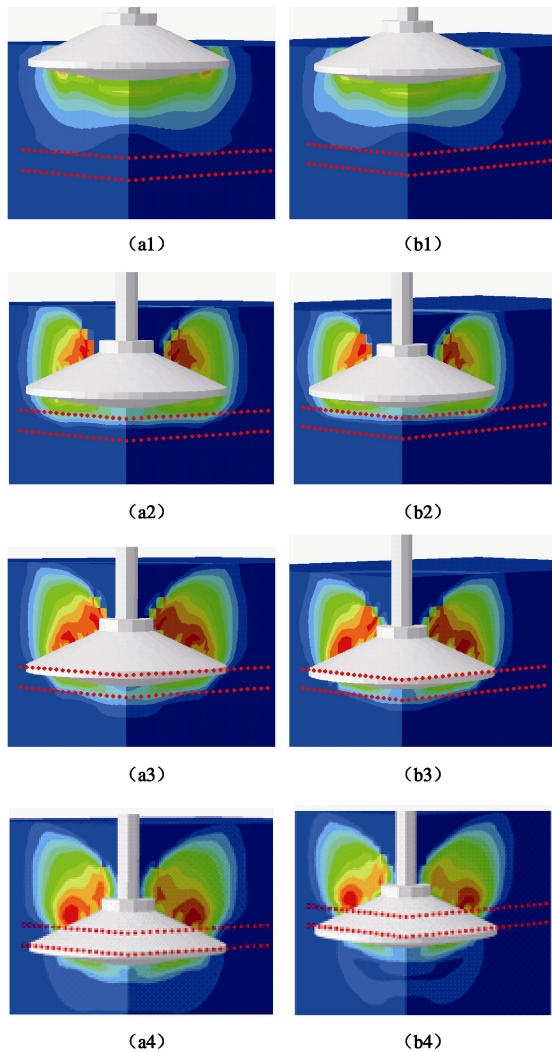


图 14 塑性区展开图

Fig. 14 Distribution of plastic areas

从图中可以看到,当桩靴刚刚进入第一层软黏土层时,桩靴周围土体迅速进入塑性状态,桩靴下部土体的塑性区也不断扩展,如图 14 (a1)、(b1) 所示,此时两者的情况类似。当桩靴接近硬黏土层时,对于系列 (a),桩靴下方土体的塑性区已经发展到硬层,见图 14 (a2),而对于系列 (b),土体的塑性区还集中在软土之中,见图 14 (b2)。图中红色部分代表塑性变形较大的区域,说明此部分土体产生了回流。图 14 (a3)、(b3) 是桩靴达到硬层顶部时的情况,可以看到,对于系列 (a),此时土体硬层中的塑性区的范围也要明显大于 (b) 系列。当桩靴穿过硬黏土层后,桩靴下部土体的塑性区快速扩展,系列 (a) 的塑性区范围大于系列 (b),如图 14 (a4)、(b4) 所示。这可能是因为,桩靴穿过硬层后,由于硬层厚度较薄,冲剪破坏后,硬层犹如一层“垫子”附着在桩靴底部,从而造成了上述分布的产生。在试验后对土层分布的调查中也发现了这一现象。

塑性区不同的扩展方式解释了在硬层强度不同时,土阻力沿深度的不同变化趋势。当硬层强度相对较小时 ( $S_{ut}/S_{um}=0.5\sim0.55$ ),当桩靴接近硬层时,硬层开始起效,由于其强度较小,所以在桩靴接近硬层时,硬层会产生一定的塑性应变,造成土阻力的升高,此时在硬层上方一定范围内出现了第一个峰值点;而当硬层强度相对较大时 ( $S_{ut}/S_{um}=0.21\sim0.23$ ),当桩靴接近硬层时,并不足以使得硬层发生明显塑性变形,塑性区仍然存在于软土层中,其效果相当于 Meyerhof 承载力公式中的排挤效应 (squeeze)。此时,由于破坏均出现在软土中,硬层以上的土阻力没有明显的提高,因此没有峰值点的出现。这就解释了不同硬层强度条件下,桩靴贯入过程中土阻力沿深度的不同变化模式。

#### 4 结论与建议

本文根据中国海域土层分布的特点,利用离心模型试验以及有限元方法对软黏土—硬黏土—软黏土土层(“鸡蛋壳”土层)分布下的钻井平台桩靴穿刺机理进行了研究。离心模型试验显示,在软—硬—软土层中进行钻井平台插桩,插桩过程中土阻力沿深度的变化存在两种不同的模式。当硬层强度较小时 ( $S_{ut}/S_{um}=0.5\sim0.55$ ),土阻力沿深度存在两个峰值点,第一峰值点出现在硬层上部 1~2 m 位置处,第二峰值点出现在硬层中。当硬层强度较大时 ( $S_{ut}/S_{um}=0.21\sim0.23$ ),土阻力的峰值点仅出现在硬层中。有限元的分析说明,产生上述现象的主要原因是由于在桩靴贯入过程中,塑性区展开的模式有所不同。当硬层强度较小时 ( $S_{ut}/S_{um}=0.5\sim0.55$ ),随着桩靴接近硬层,硬层当中会出现一定的塑性区域,从而对上部软层中的土阻力产生影响,导致第一峰值点的出现;当硬层强度较大时 ( $S_{ut}/S_{um}=0.21\sim0.23$ ),桩靴的接近不足以引起硬层的塑性变形,塑性区仍然主要集中在软土当中,硬层联合桩靴对软土起到排挤效应 (squeeze),因此只有达到硬层位置时,土阻力才会产生明显的升高。

在实际的钻井平台预压过程中需要考虑上述土阻力随深度变化的特点,合理设计每级预压荷载的大小,预防穿刺的发生,保证作业安全。

#### 参考文献:

- [1] 吴秋云,周扬锐,冯秀丽,等. 自升式钻井船基础刺穿分析方法在渤海石油开发区的应用[J]. 海岸工程, 1999, 18(4): 16 - 19. (WU Qiu-yun, ZHOU Yang-rui, FENG Xiu-li, et al. Applying of the punch-through analysis method of rig-drilling ship in bohai open up oilfields[J]. Coastal

- Engineering, 1999, **18**(4): 16 - 19. (in Chinese))
- [2] Guidelines for jack-up rigs with particular reference to foundation integrity[R]. Egham: MSL Engineering Limited, Health and Safety Executive, 2004.
- [3] BAGLIONI V P, CHOW G S, ENDLEY S N. Jack-up foundation stability in stratified soil profiles[C]// Proceeding of 14th Offshore Technology Conference. Houston, 1982: 363 - 369.
- [4] MCCLELLAND B, YOUNG A G, REMMES B D. Avoiding jack-up rig foundation failures[C]// Symp Geotech. Aspects of Coastal & Offshore Structures. Bangkok, 1981: 137 - 157.
- [5] RAPOPORT V, YOUNG A G. Foundation performance of jack-up drilling units: analysis of case histories[C]// International Conference on Mobile Offshore Structures. London, 1987: 461 - 476.
- [6] HANNA, MEYERHOF. Design chart for ultimate bearing capacity of foundation on sand over lying soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, **17**(2): 300 - 303.
- [7] SY/T 6707—2008 海洋井场调查规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008. (SY/T 6707—2008 Specification for marine well site survey[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [8] Guidelines for site specific assessment of mobile jack-up units[S]. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin 5-5A, 2007.
- [9] 吴波鸿. 静力触探在渤海某海上平台场址工程勘察中的应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008. (WU Bo-hong. The application of cone penetration test in Bohai offshore platform site investigation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese))
- [10] 刘剑涛, 吴文峰, 蒋宝凡. 自升式钻井船插桩深度预测[J]. 中国造船, 2007, **48**(增刊): 317 - 322. (LIU Jian-tao, WU Wen-feng, JIANG Bao-fan. Estimation of footing penetration of jack-up drilling rig[J]. Ship Building of China, 2007, **48**(S0): 317 - 322. (in Chinese))
- [11] 戴兵, 段梦兰, 宋林松, 等. 自升式钻井平台穿刺分析[J]. 科技导报, 2010, **28**(17): 63 - 66. (DAI Bing, DUAN Meng-lan, SONG Lin-song, et al. Investigation of the punch-through in jack-up rigs[J]. Science & Technology View, 2010, **28**(17): 63 - 66. (in Chinese))
- [12] KELLEZI L, KUDSK G. Spudcan penetration fe simulation of punch-through for sand over clay[C]// The 12th International Jack-up Conference. London, 2009.
- [13] THO K K, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Eulerian finite-element technique for analysis of jack-up spudcan penetration [J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2012, **12**(1): 64 - 73.
- [14] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. Deep-penetrating spudcan foundations on layered clays: numerical analysis[J]. Géotechnique, 2010, **60**(3): 171 - 184.
- [15] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. Deep-penetrating spudcan foundations on layered clays: centrifuge tests[J]. Géotechnique, 2010, **60**(3): 157 - 170.
- [16] 问延煦, 施建勇. 孔压滞后现象及其对固结系数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(2): 357 - 363. (WEN Yan-xu, SHI Jian-yong. Delay of pore pressure in oedometer and its effect on determination of coefficient of consolidation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(2): 357 - 363. (in Chinese))
- [17] 秦昊, 单红仙, 刘涛. 波浪作用下海床孔压滞后现象研究[J]. 中国水运, 2007, **5**(4): 76 - 78. (QIN Hao, SHAN Hong-xian, LIU Tao. The study of pore pressure delay of seabed under wave loading[J]. China Water Transport, 2007, **5**(4): 76 - 78. (in Chinese))
- [18] HOSSAIN M S. New mechanism-based design approaches for spudcan foundations on clay[D]. Australia: University of Western Australia, 2008.
- [19] 王鹏. 自升式钻井平台插桩数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (WANG Peng. The study of numerical simulation of spudcan penetration for jack-up drilling platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [20] ABAQUS/Explicit user's manual[M]. Hibbitt: Karlsson & Sorensen, Inc, 2002.