

# 可移动自升式平台的桩靴沉放安装研究

潘泽华, 刘博<sup>✉</sup>, 刘东华

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的] 桩靴基础是可移动自升式平台的关键基础结构, 在其贯入过程中会排开大量土体。为保证可移动自升式平台在海上风电安装领域的安全应用, 研究桩靴沉放过程中周围土体流动模式的演变规律, 可靠评估桩靴的贯入阻力尤为重要。[方法] 利用耦合的欧拉-拉格朗日 (CEL) 方法, 模拟了桩靴在常见海床地质条件 (包括均质黏土、非均质黏土、砂土、“黏土-砂土-黏土”以及“黏土 (硬)-砂土 (软)-黏土 (硬)”) 下的安装沉放过程, 分析了沉放贯入机理的差异性。[结果] 仿真结果表明: 桩靴沉放过程中, 土体流动机制和桩靴贯入阻力与海床土强度特性密切相关, 而桩靴与海床土界面的摩擦系数对桩靴贯入机理和贯入阻力影响不大。[结论] 通过与现行设计规范计算结果对比, 大变形有限元模拟和规范设计相结合的方法更应该被推荐应用于工程设计实践, 以便为桩靴贯入过程中的穿刺风险评价和插桩深度预测提供更好的依据。

**关键词:** 施工安装; 桩靴沉放; 大变形有限元; 贯入阻力; 沉放机理

中图分类号: TK89; TU476

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)01-0048-09

开放科学 (资源服务) 二维码:



## Research on the Penetration of Spudcan Foundation for Mobile Jack-Up Platform

PAN Zehua, LIU Bo<sup>✉</sup>, LIU Donghua

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] The spudcan foundation is the key structure of the mobile jack-up platform, which displaces surrounding soil during its penetrating installation. In order to ensure the safety in the application of mobile jack-up platform to the offshore wind power installation works, it is particularly important to research the evolution of surrounding soil flow mechanism during spudcan penetration, and to evaluate the penetration resistance of spudcan reliably. [Method] The coupling Euler-Lagrange (CEL) method was used in this research to simulate the process of spudcan penetration under several typical seabed geological conditions (homogeneous and heterogeneous clay, sand, "clay-sand-clay" and "clay (hard)-sand (soft) and clay (hard)"), and to analyze the differences of penetration mechanisms. [Result] The simulation results show that in the process of spudcan penetration, the soil flow mechanism and penetration resistance of spudcan are closely related to the strength characteristics of seabed soil, while the friction coefficient of the interface between spudcan and seabed soil has little effect on the penetration mechanism and resistance. [Conclusion] From comparison with the results calculated in accordance current design specifications, the method combining large deformation finite element analysis and industry code design should be recommended to be applied in engineering design practice, as to provide a better basis for the assessment of punch-through risk and the prediction of penetrating depth in the process of spudcan penetration.

**Key words:** installation; spudcan penetration; large deformation finite element analysis; penetration resistance; penetrating mechanism

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

我国是海上风能资源大国, 拥有着漫长的海岸线, 达 1.8 万 km 之长。然而随着我国海上风电市场

快速发展, 近海风能资源逐渐不再能够满足人们的需求, 我国海上风电逐渐走向深海化、远海化。因此, 我国亟需各种海工设备和先进技术, 助力我国海上

收稿日期: 2022-06-24 修回日期: 2022-08-01

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电吸力桶基础受力机理与变形控制关键技术研究”(EV04631W)

风电迈入深海、远海时代和平价化时代<sup>[1]</sup>。

与此同时,自升式可移动平台凭借其转场方便、可回收等优点,逐渐受到了海上风电行业的青睐。可移动自升式平台由平台、桩腿和桩靴组成,通常采用预压安装的方式,通过预压荷载将桩靴压入海床土体中,为平台提供支撑。在单层土体中预压贯入时,桩靴贯入阻力通常随贯入深度增加而增加,然而在复杂土层尤其是“上硬下软”以及“夹层土”土层中预压贯入时,桩靴贯入阻力极有可能会呈现下降的趋势,造成“穿刺”现象<sup>[2]</sup>,进而导致巨大的经济损失。因此,针对桩靴贯入这一过程,国内外学者进行了大量的研究。

Hossain 等人<sup>[3-5]</sup>针对桩靴在黏土和“上硬下软”土层中的贯入过程进行了大量数值分析和模型试验。针对单层黏土,作者研究了桩靴在黏土中贯入时贯入阻力的影响因素,如基础粗糙系数、土体强度等,并对桩靴贯入阻力进行了归一化处理,得到了承载力系数的大致范围,同时,对极限空穴深度进行了分析,得到了极限空穴深度的表达式;针对“上硬下软”的成层土,作者分析了土体强度、土层厚度等因素对“穿刺”现象的影响。Qiu 等人<sup>[6-7]</sup>利用 CEL 技术对上砂下黏土层中的桩靴贯入阻力进行了数值分析,研究了砂土层相对密实度和桩靴尺寸对贯入阻力的影响,并分析了桩靴在上砂下黏土层中的穿刺机制,指出了其与典型的承载力破坏模式的区别。Zhang 等人<sup>[8]</sup>分析了桩靴在成层土中的穿刺现象,并分析了网格尺寸和贯入速率对数值试验的影响。作者指出,当最小网格尺寸为  $0.05D$ (桩靴直径)、贯入速率为  $0.1 \text{ m/s}$  时,利用 CEL 技术得到的桩靴贯入阻力曲线与模型试验基本一致。戴笑如等人<sup>[9]</sup>通过 CEL 技术,分析了欧拉区域、网格加密区域、最小网格尺寸,以及桩靴贯入速率对桩靴在各种土层贯入时的贯入阻力曲线振荡的影响。研究表明:欧拉域的范围并不影响桩靴贯入阻力,当贯入速率取  $0.2 \text{ m/s}$ 、最小网格尺寸取  $0.05D$ 、加密区域取  $2D$  时,贯入阻力与实际情况更为相符。Lee 等人<sup>[10]</sup>引入了一个新的应力失效模型,进而分析了圆形桩靴在上砂下黏土层中的贯入机制,提出了全新的计算公式,该方法对经验确定的分布因子具有一定的依赖性。许浩等人<sup>[11]</sup>针对工程中常见的多层土层,提出了计算贯入阻力的新方案,即通过采用修正系数由下向上修正

各土层的承载力,最终获得多层土的承载力。并给出了避免穿刺现象的方法。Hu 等人<sup>[12]</sup>通过一系列试验,提出了计算上砂下黏土层中峰值贯入阻力的修正公式,该修正公式与土体破坏应力和砂土层土层厚度相关。试验结果表明,该修正公式可广泛适应于密砂和松砂下覆黏土土层。李飒等人<sup>[13]</sup>通过离心模型试验,研究了桩靴在“软-硬-软”土层中的贯入阻力和穿刺机理。结果表明,桩靴贯入阻力曲线与土体强度比值密切相关。上层软土与硬土的强度比值较大时,存在两个峰值强度,比值较小时,峰值强度仅出现在硬土层中。郑敬宾等人<sup>[2]</sup>对目前出现的常规贯入阻力计算方法进行了对比,指出了现行 ISO 方法<sup>[14]</sup>的保守性。

综上所述,前人的研究主要集中于圆形桩靴在单层土或多层土中的贯入过程,很少将砂土、黏土,以及多层土进行集中分析。因此,本文拟在前人基础上,利用 CEL 有限元技术,系统分析矩形桩靴在砂土、黏土和黏土-砂土-黏土中的贯入过程,研究矩形桩靴的沉放贯入机理和贯入阻力的演变规律。

## 1 桩靴贯入计算方法

在桩靴贯入阻力计算这一问题中,常采用的计算方法主要有模型试验、数值模拟和 ISO 规范法。

### 1.1 模型试验

在模型实验中,为反映实际工程中各物理量含义,通常需要按一定的比尺关系将其缩小,进而进行模型试验。常见的比尺关系有  $1:50$ 、 $1:100$  等。一般认为,模型试验是准确度最高的方案,然而由于实验室等问题的限制,该解决方案较为昂贵。

### 1.2 ISO 方法

在 ISO 规范中,对桩靴在单层黏土、单层砂土以及成层土的计算方法均做了具体规定。

在黏土中,桩靴贯入阻力采用式(1)计算:

$$p = \alpha s_u + p_0' \quad (1)$$

式中:

$p$  ——桩靴贯入阻力(kPa);

$\alpha$  ——修正后的承载力系数;

$s_u$  ——土体强度(kPa);

$p_0'$  ——对应深度处的上覆荷载(kPa)。

在砂土中,桩靴贯入阻力采用式(2)计算:

$$Q_v = \gamma' d_v N_\gamma \pi D^3 / 8 + p_0' d_q N_q \pi D^2 / 4 \quad (2)$$

式中:

$Q_v$  —— 桩靴在砂土层中的贯入阻力(kPa);

$\gamma$  —— 当前土层的有效容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ );

$d_v$  —— 压载的深度修正系数,取 1;

$N_v$  —— 压载的承载力系数;

$d_q$  —— 深度修正系数;

$N_q$  —— 承载力系数。

针对双层土而言,规范根据贯入机制将其分为整体剪切破坏、挤土效应和冲剪破坏,进而选择不同的公式计算其桩靴贯入阻力。

针对多层土,采用由下至上模式,先判定底部两层土体破坏模式,计算其桩靴贯入阻力;之后,将两层土体视为新的一层土体,重复上述过程,进行计算。

### 1.3 数值模拟

随着计算机技术的发展,数值模拟计算逐渐成熟。目前常规数值模拟方法有 CEL、ALE 和 RITSS 等。其中,CEL 方法内置有丰富的土体本构关系,相较于其他方法更易访问,是商业化最成熟的方法。因此,CEL 方法在解决桩靴贯入这一大变形问题中具有明显优势。本文主要采用 CEL 方法进行计算。

## 2 CEL 有限元模型

### 2.1 桩靴模型

本研究中桩靴为矩形桩靴,桩靴最大截面处长边  $A=14.65\text{ m}$ ,短边  $B=9.45\text{ m}$ ,最大截面底部高度为  $0.605\text{ m}$ 。其余细节见图 1。在本文中,将桩靴基础约束为刚体。桩靴基础采用 C3D10M 网格类型划分,网格尺寸取  $0.05B$ ,网格总数为 25 000 个。

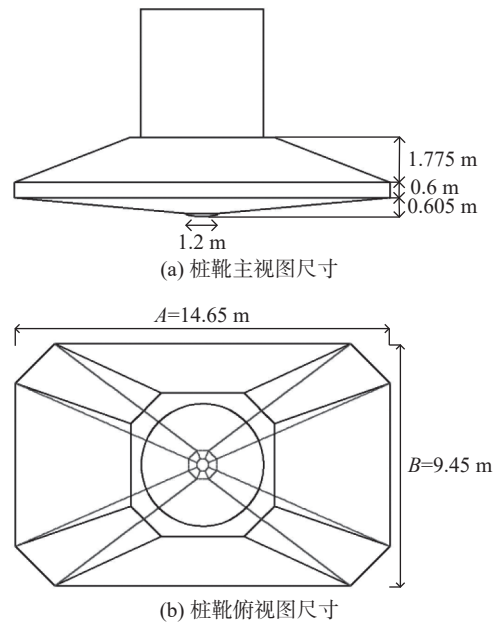


图 1 桩靴模型

Fig. 1 The model of spudcan

### 2.2 土体模型

在本文中,分别选取均质黏土、非均质黏土、砂土和成层土来分析桩靴贯入过程,具体土体参数如表 1 所示。

考虑到计算的时效性,考虑到模型的对称性,本文仅建立 1/4 有限元模型。图 2 为 3 层土的土体模型的示意图,在模型建立过程中,为避免由于土体范围过小导致的边界效应,土体沿长轴方向和短轴方向分别取  $5A$  和  $5B$ ,空气层厚度为  $10\text{ m}$ ,土体总厚度为  $50\text{ m}$ 。同时,土体采用结构化网格进行划分,网格

表 1 土体参数

Tab. 1 Soil parameter

工况	属性	土层厚度/m	黏土材料 $s_u/\text{kPa}$	砂土材料		弹性模量 $E/\text{kPa}$
				摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	膨胀角 $\psi/(\text{°})$	
1	单层均质黏土	50	10	—	—	$250s_u$
2	单层非均质黏土	50	$2+1.5z$	—	—	$250s_u$
3	单层砂土	50	—	28	0	$35\ 000$
4	3层土:黏-砂-黏	$H_1=6.4$	$S_{u1}=0.2+0.5z$	$\varphi_2=31$	$\psi_2=3$	$E_1=250s_u$
		$H_2=6.3$				$E_2=3.5\times 10^4$
		$H_3=37.3$				$E_3=250s_u$
5	3层土:黏(硬)-黏(软)-黏(硬)	$H_1=5$	$S_{u1}=60$	—	—	$250s_u$
		$H_2=15$	$S_{u2}=5$			
		$H_3=30$	$S_{u3}=60$			

注:  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 分别为土层1、土层2和土层3的厚度;  $S_{u1}$ 、 $S_{u2}$ 、 $S_{u3}$ 分别为土层1、土层2和土层3的土体强度;  $\varphi_2$ 为土层2的摩擦角;  $\psi_2$ 为土层2的膨胀角;  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 分别为土层1、土层2和土层3的弹性模量。

类型为 EC3D8R。根据 Zhang 等人<sup>[8]</sup>和戴笑如等人<sup>[9]</sup>的建议, 最小网格尺寸取  $0.05B$ , 最小网格区域取  $2A \times 2A$ , 网格总数为 68 800 个。

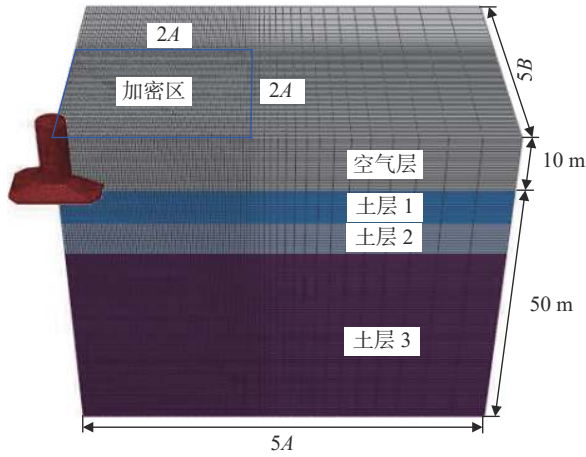


图 2 土体模型

Fig. 2 Finite element model of soil

考虑到在插桩的过程中, 海洋土体常处于饱和不排水状态。因此, 在本文中采用总应力分析法进行分析。针对砂土土层, 采用摩尔-库伦屈服准则, 作为岩土领域最常用的准则之一, 其表达式为:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cos \varphi + \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \sin \varphi \quad (3)$$

式中:

$\sigma_1$  —— 最大主应力 (kPa);

$\sigma_3$  —— 最小主应力 (kPa);

$c$  —— 粘聚力 (kPa);

$\varphi$  —— 摩擦角 ( $^\circ$ )。

在该屈服准则中, 土体材料的破坏仅与最大主应力  $\sigma_1$  和最小主应力  $\sigma_3$  有关, 而与中主应力  $\sigma_2$  无关。

针对黏土土层, 采用 Tresca 屈服准则, 该屈服准则是摩尔-库伦屈服准则特殊工况, 其表达式为:

$$c = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (4)$$

### 2.3 接触属性

在本文中, 桩靴与土体之间采用通用基础, 其法向行为采用硬接触。同时, 为分析粗糙程度对桩靴贯入阻力的影响, 法相行为则分别采用光滑接触、粗糙接触和摩擦系数  $\mu=0.6$  罚接触。

### 2.4 边界条件

在本文中, 在对称边界, 即 1/4 截面处建立对应的对称速度约束, 在土体外边界建立固定速度约束。

为避免桩靴贯入阻力曲线的振荡, 根据 Zhang 等人<sup>[8]</sup>的建议, 桩靴贯入速率取 0.1 m/s。

### 2.5 模型验证

Hossain 等人<sup>[15]</sup>针对成层土进行了一系列离心试验, 本文仅选取一组工况进行对比, 验证 CEL 方法的可行性。在该工况中, 桩靴直径  $D=3$  m; 上层土体为均质土厚度为 4.5 m, 土体强度  $s_{ubs}=13.4$  kPa, 土体刚度  $E=250s_u$ ; 下层土体为线性增加土体, 土体强度  $s_u=8+2(z-4.5)$  kPa, 土体刚度  $E=250s_u$ 。具体模拟结果如图 3 所示。图中显示, CEL 计算方法得到的桩靴贯入阻力曲线与离心试验得到的结果具有良好的吻合性, 说明了 CEL 方法的可行性。

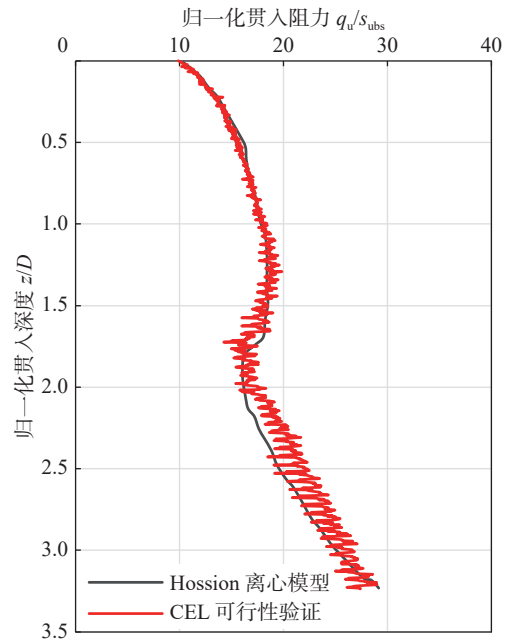


图 3 CEL 验证

Fig. 3 Validation of CEL

## 3 土体流动机理

本节根据表 1 列出的 5 种典型土体强度分布开展了大变形分析, 包括单层均质黏土、单层非均质黏土、单层砂土及两种易发生“穿刺”破坏风险的黏-砂-黏、硬黏-软黏-硬黏的软土夹心分层土此 5 种强度断面分布, 研究了桩靴在不同土层分布工况下贯入过程的土体流动机理。

### 3.1 均质黏土中土体流动机理

本文以工况 1 为例分析桩靴在黏土中贯入时的土体流动机制。

图 4 为桩靴在均质黏土中贯入时的速度场。其中实线为空气层与土体的分割线。图 4(a) 为桩靴刚与土体接触时的土体速度矢量图, 此时桩靴周围的土体在挤土作用下发生斜向外流动, 土体表面逐渐发生隆起, 桩靴上部逐渐形成空穴; 当桩靴贯入深度  $z/B=0.5$  时, 桩靴周围土体斜向外流动趋势消失, 空穴侧壁土体呈现竖直向上的流动趋势, 如图 4(b) 所示; 之后, 随着贯入深度的增加, 在图 4(c) 中, 桩靴周围土体的流动模式发生改变, 在挤土作用下, 空穴侧壁土体出现回流的趋势; 在图 4(d) 中, 土体表面的速度场消失, 土体表面隆起逐渐稳定, 不再发生改变; 当桩靴贯入深度  $z/B=1.2$  时, 随着空穴侧壁土体回流, 桩靴上部空穴逐渐被回流土体填充, 如图 4(e) 所示;

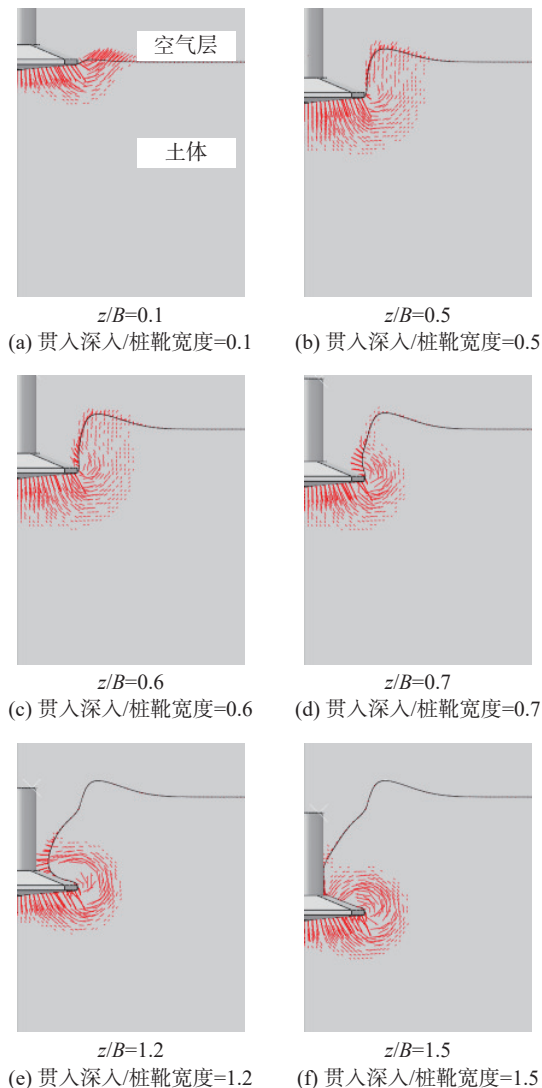


图 4 工况 1 中不同深度下的土体速度场

Fig. 4 Velocity field of soil at different depths in case 1

之后随着桩靴贯入深度的进一步增加, 桩靴上部空穴深度逐渐保持稳定, 此时土体仅发生局部回流, 其流动模式在之后的贯入过程中保持稳定, 不再发生改变, 如图 4(f) 所示。

### 3.2 非均质黏土中土体流动机理

图 5 为桩靴在非均质黏土中贯入时的速度场。图 5(a) 显示, 当桩靴贯入深度较浅时, 桩靴周围土体斜向上流出, 土体产生隆起, 与均质土中土体流动基本一致; 当桩靴贯入一定深度时, 桩靴周围土体产生回流, 如图 5(b) 所示; 随着贯入深度的进一步增加, 在重力的作用下, 隆起土体斜向下流动, 同时桩靴周围土体产生回流, 此时位于桩靴顶部的空穴由回流土体和斜向下流动的土体共同填充, 如图 5(c) 所示; 在图 5(d) 中, 空穴深度不再发生改变, 土体运动模式与均质土保持一致, 仅发生局部回流。

### 3.3 砂土中土体流动机理

图 6 为桩靴在砂土中贯入时的土体速度场。在桩靴贯入前期阶段, 在桩靴挤土作用下, 土体发生斜向上流动, 土体表面发生隆起, 与黏土中基本一致, 如图 6(a) 所示; 之后随着桩靴贯入, 桩靴土体流动模

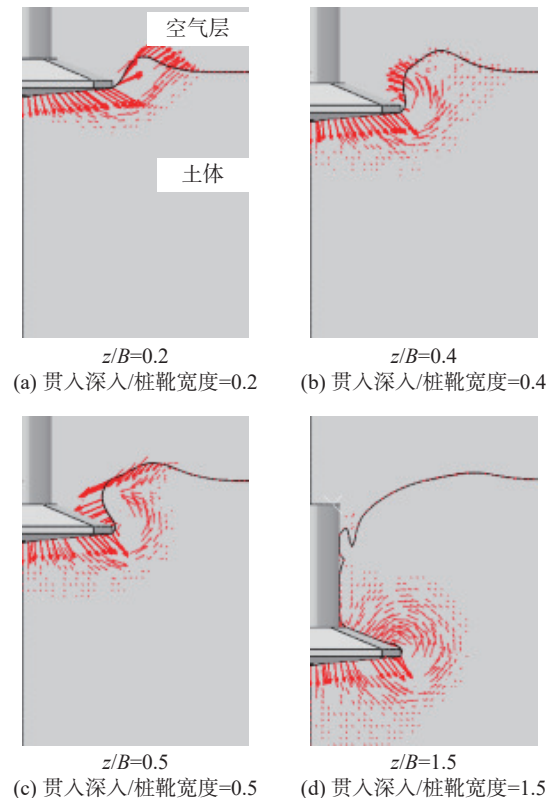


图 5 工况 2 中不同深度下的土体速度场

Fig. 5 Velocity field of soil at different depths in case 2

式发生改变, 前期隆起的土体在重力作用下, 其流动方向发生改变, 转变为斜向下流动, 如图 6(b) 所示; 之后, 桩靴上部空穴逐渐被斜向下流动的土体填充, 而位于桩靴边缘的土体仅在局部范围内出现回流趋势, 并不会直接填充其周围空穴, 如图 6(c) 所示; 之后, 随着贯入深度增加, 土体持续斜向下流动填充桩靴上部空穴, 之前土体隆起的位置形成弧线, 受此影响, 其空穴深度并不保持恒定, 如图 6(d) 所示。

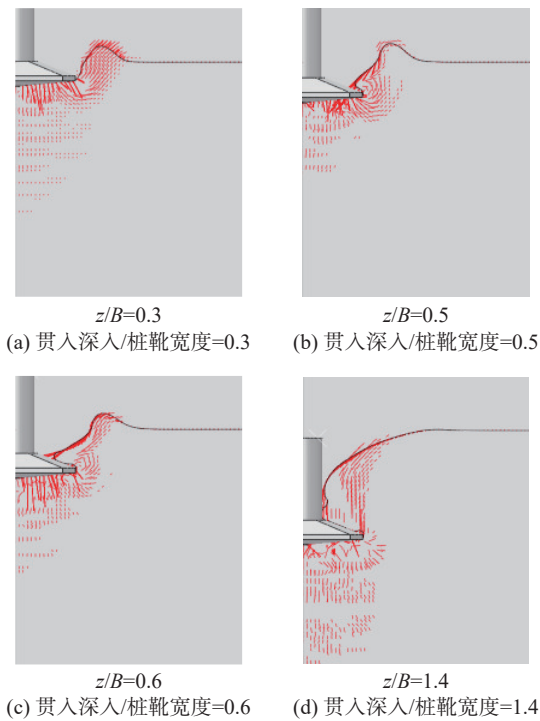


图 6 工况 3 中不同深度下的土体速度场

Fig. 6 Velocity field of soil at different depths in case 3

### 3.4 黏-砂-黏土体中土体流动机理

图 7 为桩靴在黏-砂-黏土体中的贯入阻力曲线, 图中显示, 在桩靴贯入深度达到 B 点之前, 桩靴贯入阻力缓慢增加; 之后, 在 B-C 段, 桩靴贯入阻力迅速增加; 之后, 其增长趋势放缓, 但仍呈增加趋势。

为更好地说明土体流动机理, 将图 8 所示的土体速度场与桩靴贯入阻力曲线直接联系起来。

当桩靴贯入至 A 点时, 此时桩靴周围土体斜向上流出, 产生隆起, 桩靴顶部产生空穴。当桩靴贯入至 B 点处, 桩靴周围土体产生回流, 并在重力的作用下逐渐填充空穴, 此时桩靴贯入深度逐渐接近黏土底部, 但从图中可以看出, 此时桩靴挤土作用尚未对底部砂土层产生影响。因此在 A-B 段, 桩靴贯入阻

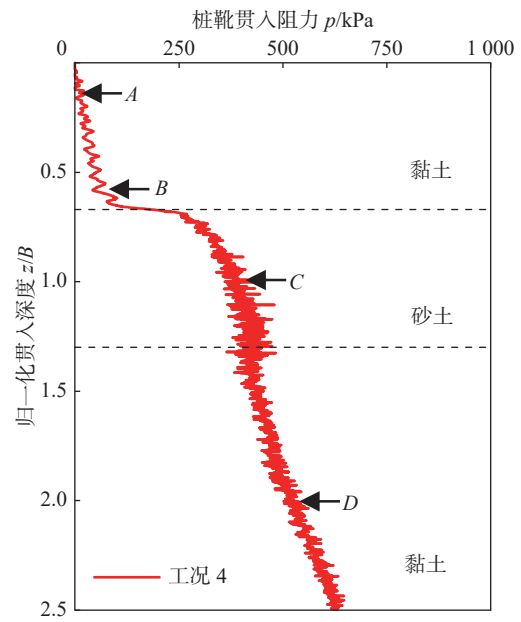


图 7 工况 4 中桩靴贯入阻力

Fig. 7 Penetration resistance of spudcan in case 4

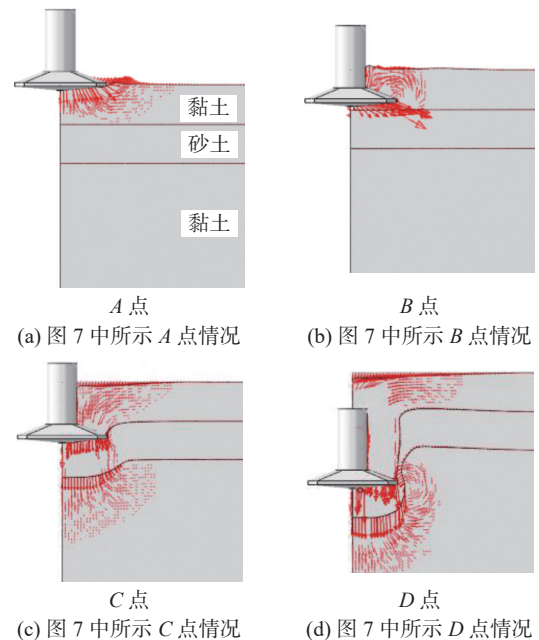


图 8 工况 4 中不同深度下的土体速度场

Fig. 8 Velocity field of soil at different depths in case 4

力主要由黏土层提供。当桩靴贯入至 C 点时, 顶部黏土层在重力作用下持续坍塌流出, 砂土向下流动, 并产生楔形砂塞, 对底部黏土层产生影响。因此在 B-C 段, 随着桩靴逐渐贯入至砂土层中, 由于砂土层抗剪能力更强, 因此桩靴贯入阻力迅速增加。在 C-

D段,随着桩靴贯入深度的进一步增加,顶部黏土层运动趋势保持不变,砂土层产生斜向下流动的趋势,而底部黏土层则产生回流,砂层被携带进入下层黏土,此时桩靴贯入阻力由底部黏土层提供。

### 3.5 硬-软-硬黏土中土体流动机理

图 9 为桩靴在黏(硬)-黏(软)-黏(硬)土体中的贯入阻力曲线。图中显示,当桩靴贯入深度较浅时,桩靴承载力快速增加,之后随着桩靴的贯入而逐渐减小,当贯入深度  $z/B=1.8$  时,桩靴贯入阻力再次增加。可以看出,由于土层强度的影响,桩靴贯入阻力存在明显的穿刺现象。

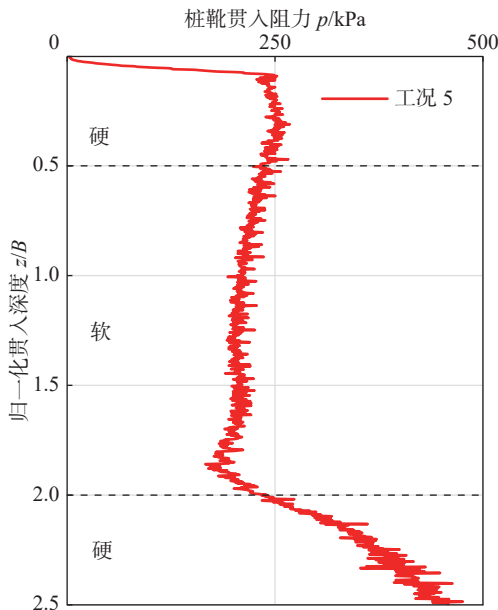


图 9 工况 5 中桩靴贯入阻力

Fig. 9 Penetration resistance of spudcan in case 5

图 10(a) 显示,在桩靴贯入较浅时,由于顶部土层强度较高,仅产生局部向上的流动趋势,而软黏土土层由于强度较低,产生明显的斜向下位移,此时桩靴贯入阻力由顶部硬黏土层和软黏土层共同提供。之后随着桩靴贯入深度的增加,桩靴逐渐贯入到软黏土层,此时软黏土层产生局部回流,并产生填充空穴的趋势,而顶部黏土层部分土体被桩靴带走,逐渐形成土塞,如图 10(b) 所示。随着桩靴贯入深度的进一步增加,桩靴逐渐接近底部硬黏土层,在这一过程中,顶部黏土层形成的土塞逐渐与顶部黏土层失去联结,被侧向挤出,而软黏土层则在回流趋势的影响下逐渐填充空穴,如图 10(c) 所示,在这一阶段中,桩

靴贯入阻力由软黏土土层提供,同时由于土塞的侧向挤出,有效桩靴尺寸逐渐减小,因此桩靴贯入阻力有所减小。当桩靴贯入深度  $z/B>1.8$  时,底部硬黏土层产生典型的一般剪切破坏,即土体斜向上流动,软黏土层仍保持回流填充空穴的运动趋势。在这一过程中,桩靴基础对底部硬黏土层产生影响,因此其桩靴贯入阻力迅速增加。

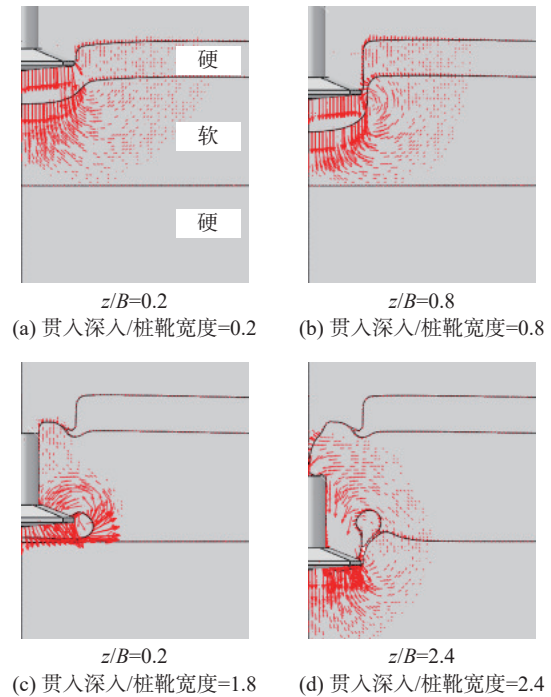


图 10 工况 5 中不同深度下的土体速度场

Fig. 10 Velocity field of soil at different depths in case 5

## 4 摩擦系数影响分析

为分析摩擦系数对桩靴贯入阻力和土体流动的影响,本文以工况 2 为例,分别采用光滑接触、粗糙接触和摩擦系数  $\mu=0.6$  的罚接触和模拟桩靴基础的法向行为。图 11 为不同摩擦设置下的桩靴贯入阻力曲线图,图中显示,虽然摩擦系数有所不同,其贯入阻力基本完全一致。据此,可认为其土体流动机理亦保持一致。

## 5 案例分析

以东南沿海某实际工程为例,对桩靴施加 9 200 t 预压荷载,观察矩形桩靴在该场地的适应性。该场地的土体材料参数如表 2 所示。

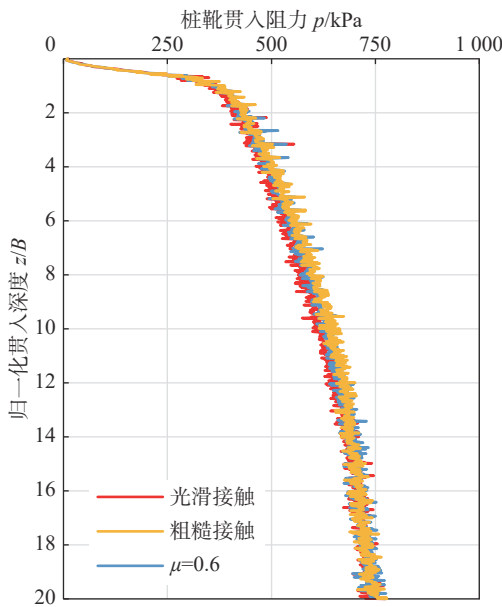


图 11 不同摩擦系数下的桩靴贯入阻力

Fig. 11 Penetration resistance of pile boots under different friction coefficients

表 2 工程土体参数

Tab. 2 Engineering soil parameter

序号土层	土层厚度/m	上限HE土体强度 $s_u$ /kPa	下限LE土体强度 $s_u$ /kPa	摩擦角 $\varphi$ (°)	膨胀角 $\psi$ (°)	弹性模量E/kPa
1	黏土 0~2	$9.375+2.81z$	$3.75+1.88z$	—	—	$250s_u$
2	黏土 2~7.5	$187.5-13.64(z-2)$	$30+4.09(z-2)$	—	—	$250s_u$
3	黏土 7.5~14.7	$75+2.08(z-7.5)$	$52.5+1.04(z-7.5)$	—	—	$250s_u$
4	砂土 14.7~17	—	—	34	4	35 000
5	黏土 17~26.8	90	60	—	—	$250s_u$

图 12 为 ISO 方法和 CEL 方法计算得到的桩靴贯入阻力曲线图。图中显示,在预压荷载作用下,利用 CEL 方法在 HE 土体中得到的预压深度为 2 m,在 LE 工况下得到的预压深度为 12 m;用 CEL 方法在 HE 土体中得到的预压深度为 2 m,在 LE 工况下得到的预压深度为 13 m。两种方法得到的预压深度基本一致。图中显示,场地 1HE(ISO)在 2 m 及 15 m 深度处有明显的贯入阻力降低,这是与 ISO 计算“穿刺”风险时的假定相关,在分层土交界处计算时强度的降低将按照保守的已出现“穿刺”风险破坏模式计算。但是,从 HE 工况的强度分布看,第 2 层为深

厚硬土层,尽管强度在降低,但不易发生“穿刺”风险,这可以通过平行的大变形模拟结果看出,由于大变形模拟可以准确地反映土体材料在桩靴贯入过程中的流动,在桩靴贯入过程中上部的软硬混合土层可被桩靴带入下层,使得贯入曲线并没有显著的“脆性”响应(即冲剪破坏区),同样地在 15 m 处的 ISO 计算曲线也不应认为存在“穿刺”风险,因此可认定场地 1HE 工况无穿刺风险。另外,规范方法和有限元方法给出随深度的贯入曲线趋势基本一致。在黏-黏交界处,有限元给出结果更为保守,在黏-砂-黏交界处,规范法给出结果更为保守。

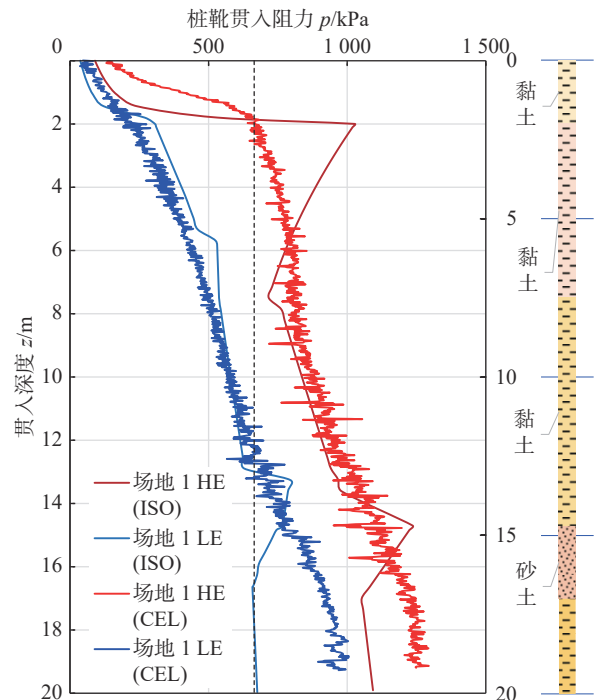


图 12 不同方法计算得到的桩靴贯入阻力

Fig. 12 The penetration resistance of spudcan calculated by different methods

## 6 结论

本文利用 CEL 有限元技术,针对矩形桩靴,分析了桩靴在多种土层贯入时的土体流动机理和贯入阻力,并分析了摩擦系数的影响,研究结果如下:

- 1) 在桩靴贯入前期,土体均产生挤压破坏,发生斜向上流动。
- 2) 贯入至一定深度时,桩靴上部空穴发生填充。空穴填充方式包括有表面坍塌流动填充、侧壁回流填充以及二者组合 3 种。



3) 摩擦系数并不影响桩靴贯入阻力和土体流动机理。

4) 桩靴穿刺现象的出现与土层强度密切相关。当桩靴穿越“硬-软”土层时, 极有可能产生穿刺现象。

5) 插桩深度的预测建议按照规范和有限元模拟相结合的方法开展设计, 以保证预测的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 蔡绍宽. 平价上网助力海上风电行业发展——未来五年海上风电从业同仁的使命 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(2): 7-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.002.
- CAI S K. Grid parity speeds up the development of offshore wind power industry—the practitioner mission of offshore wind power in the next five years [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(2): 7-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.002.
- [2] 郑敬宾, 胡畔, 王栋. 复杂土层中自升式平台桩靴安装穿刺预测 [J]. *海洋工程*, 2018, 36(3): 123-130. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.03.017.
- ZHENG J B, HU P, WANG D. Prediction of punch-through during spudcan installation in complex soil profiles [J]. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(3): 123-130. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.03.017.
- [3] HOSSAIN M S, HU Y X, RANDOLPH M, et al. Limiting cavity depth for spudcan foundations penetrating clay [J]. *Geotechnique*, 2005, 55(9): 679-690. DOI: 10.1680/geot.2005.55.9.679.
- [4] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. New mechanism-based design approach for spudcan foundations on single layer clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(9): 1264-1274. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000054.
- [5] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. Deep-penetrating spudcan foundations on layered clays: numerical analysis [J]. *Geotechnique*, 2010, 60(3): 171-184. DOI: 10.1680/geot.8.P.040.
- [6] QIU G, HENKE S. Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay [J]. *Marine Structures*, 2011, 24(4): 528-550. DOI: 10.1016/j.marstruc.2011.06.005.
- [7] QIU G, GRABE J. Numerical investigation of bearing capacity due to spudcan penetration in sand overlying clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(12): 1393-1407. DOI: 10.1139/T2012-085.
- [8] ZHANG Y, BIENEN B, CASSIDY M J, et al. The undrained bearing capacity of a spudcan foundation under combined loading in soft clay [J]. *Marine Structures*, 2011, 24(4): 459-477. DOI: 10.1016/j.marstruc.2011.06.002.
- [9] 戴笑如, 王建华, 范怡飞. 钻井船插桩CEL数值模拟中的若干问题分析 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(6): 2278-2286. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2142.
- DAI X R, WANG J H, FAN Y F. Issues of numerical simulation of the spudcan penetration based on CEL method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(6): 2278-2286. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2142.
- [10] LEE K K, RANDOLPH M F, Cassidy M J. Bearing capacity on sand overlying claysoils: a simplified conceptual model [J]. *Geotechnique*, 2013, 63(15): 1285-1297. DOI: 10.1680/geot.12.P.176.
- [11] 许浩, 刘振纹, 祁磊, 等. 自升式平台桩腿穿刺分析及风险控制方法探讨 [J]. *石油工程建设*, 2017, 43(6): 17-21. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2017.06.004.
- XU H, LIU Z W, QI L, et al. Study on punch-through analysis and risk control method of jack-up spudcan [J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2017, 43(6): 17-21. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2017.06.004.
- [12] HU P, STANIER S A, Cassidy M J, et al. Predicting peak resistance of spudcan penetrating sand overlying clay [J]. *Geotech Geoenviron Eng*, 2014, 140(2): 4-13. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001016.
- [13] 李飒, 王耀存, 吴兴州, 等. 夹层土上自升式钻井平台穿刺机理的离心模型试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(3): 479-486. DOI: 10.11779/CJGE201503011.
- LI S, WANG Y C, WU X Z, et al. Centrifugal model tests on mechanism of spudcan penetration of jack-up drilling platform in egg-shell layered soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(3): 479-486. DOI: 10.11779/CJGE201503011.
- [14] ISO. Petroleum and natural gas industries-site-specific assessment of mobile offshore unit—part 1: jack-ups: ISO/FDIS 19905-1 [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2012.
- [15] HOSSAIN M S, RANDOLPH M F. Deep-penetrating spudcan foundations on layered clays: centrifuge tests [J]. *Geotechnique*, 2010, 60(3): 157-170. DOI: 10.1680/geot.2011.61.1.85.

#### 作者简介:



潘泽华

潘泽华(第一作者)

1989-, 男, 湖北孝感人, 工程师, 船舶与海洋工程结构物设计制造专业, 硕士, 主要从事海上风电基础结构设计工作(e-mail)panzehua@gedi.com.cn。



刘博

刘博(通信作者)

1989-, 男, 河南三门峡人, 高级工程师, 上海交通大学岩土工程专业, 博士, 主要从事海上风电支撑结构研究工作、水动力荷载下海床及海床结构物失稳机理研究工作(e-mail)liubo2@gedi.com.cn。

(编辑 李辉)