

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.019

# 吸力基础沉贯过程中桶-土界面力学机理研究进展\*

李逸凡<sup>1,2</sup>, 李大勇<sup>1,3</sup>, 张雨坤<sup>1</sup>, 高玉峰<sup>4</sup>

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 潍坊学院建筑工程学院, 山东 潍坊 261041;  
3. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 4. 河海大学土木交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 吸力式桶形基础在海洋工程特别是作为海上风力发电机的基础中得到越来越广泛的应用, 其沉贯能力是保证桶形基础下沉到预定位置, 达到承载力要求的关键。分析了沉贯过程中桶-土界面力学机理的研究现状, 讨论了不同土质、模型尺寸、渗透系数等对桶-土界面力学机理的影响, 对理论计算、试验和数值模拟等研究方法进行分类总结。发现对于吸力基础在负压沉贯过程中的研究多是针对沉贯阻力和临界吸力的计算, 很少对沉贯过程中桶-土界面力学机理进行细观研究, 尤其是对桶-土界面力学特性的影响因素进行定量分析少有论述。指出了在研究吸力基础沉贯特性和桶-土相互作用机理的理论分析、模型试验及数值模拟中的本构模型等方面存在的问题。最后, 对吸力基础沉贯过程中桶-土相互作用机理的进一步研究进行了展望。

**关键词:** 海上风电; 吸力基础; 负压沉贯; 桶-土界面力学机理; 影响因素

**中图分类号:** TU443    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0828-13

## Review of Mechanical Mechanism of Bucket-soil Interface During Installation of Suction Caissons

LI Yifan<sup>1,2</sup>, LI Dayong<sup>1,3</sup>, ZHANG Yukun<sup>1</sup>, GAO Yufeng<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Architecture and Engineering, Weifang University, Weifang 261041, China; 3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China, 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Suction caissons are widely used in ocean engineering, especially as the foundations of off-shore wind turbines. Its penetration is a key factor to ensure that the foundation is driven into a desired position in the seabed and meets the bearing capacity requirement. This paper presents an overview of the research works on the mechanical mechanism of the bucket-soil interface during installation of suction caissons, discusses the effects of different soil qualities, model sizes, and permeability coefficients on its mechanical mechanism, and also summarizes the research methods, such as theoretical calculations, experiments, and numerical simulations. It is found that the studies on suction caissons in the process of negative pressure penetration have mostly focused on the calculation of penetration resistance and critical suction. However, few microscope studies are carried out in this area, especially for the quantitative analysis of mechanical characteristics of interface between soil and structure. The

\* 收稿日期: 2020-03-11; 修回日期: 2020-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51890912)资助

作者简介: 李逸凡(1986-), 女, 讲师, 博士研究生。主要从事海洋岩土工程方面的研究。Email: 570183501@qq.com

problems in studying the penetration characteristics of suction caissons are pointed out. The shortcomings in studying the bucket-soil interface mechanical mechanism are discussed, including theoretical analysis, model tests and constitutive models in numerical simulation. Finally, further research on the bucket-soil interface mechanical mechanism during installation of suction caissons is prospected.

**Keywords:** offshore wind turbines; suction caissons; sunk by negative pressure; bucket-soil interface mechanical mechanism; affecting factors

## 引言

吸力式桶形基础作为一种新型的海洋工程基础形式,具有成本低、安装周期短、可重复使用等优点,广泛应用于海上风电工程<sup>[1]</sup>。吸力基础的沉贯过程对整个基础的安装至关重要。在沉贯过程中,要防止吸力过大形成的土塞,及砂土中的渗透破坏;而吸力不足,则基础无法下沉到预定位置,其稳定性和承载能力都不能得到保障<sup>[2]</sup>。为解决以上问题,更好的提高其承载能力和使用寿命,国内外开展了大量的理论、试验研究及数值模拟。如 T.I. Tjelta<sup>[3]</sup>、E.C.Clukey<sup>[4]</sup>、W.Chen等<sup>[5]</sup>、练继建等<sup>[6]</sup>、李大勇等<sup>[7]</sup>通过模型试验研究桶形基础负压下沉中沉贯阻力与所需吸力的关系,保证基础顺利下沉;T. Feld<sup>[8]</sup>、丁红岩等<sup>[9]</sup>、L.B.Ibsen等<sup>[10]</sup>利用数值模拟软件分析吸力在砂土中引起的渗流场变化,建立临界吸力计算公式,防止流砂等渗透破坏;李大勇等<sup>[11]</sup>对传统吸力基础构造形式进行改进,设置裙边结构,使其具有更好的沉贯特性。综上所述,已有研究多为针对沉贯阻力、所需吸力和临界吸力的计算,对桶-土间接触应力、摩阻力以及桶-土接触面的本构模型的研究还不深入,尤其是对桶-土界面力学机理的影响因素进行定量分析少有论述。

由于沉贯过程受复杂多变的土质条件、土压力和负压引发的渗流场等因素影响,土和桶体的变形及强度特性相差悬殊,在相互作用时接触面可能出现局部脱开、滑动、大剪切变形等非连续性变形现象<sup>[12]</sup>。已有的沉贯过程研究成果未对上述变形现象进行深入分析,只是采用土力学基本理论和经验公式估算沉贯阻力,故试验或施工中吸力值的设计并不精确,土塞形成机理在本质上也未进行定性的解释。因此深入系统的分析桶-土界面力学机理,特别是在沉贯过程中接触应力、孔隙水压力和摩阻力的分布情况,对土体受扰动导致的物理力学参数的变化进行定量研究(如吸力引起桶内砂土松动,影

响渗透系数在桶周围的分布),可以进一步了解沉贯特性,给工程设计和施工提供理论支持。因此开展桶-土相互界面的力学机理研究非常有必要。

本文从吸力基础沉贯过程以及该过程中桶-土界面力学作用方面展开论述,将现有的理论方法、试验类型和数值模拟进行讨论和总结,重点阐述桶-土界面力学机理的理论、建模方法及影响因素,给出接触应力、摩阻力的计算公式,指出现有研究方法的不足,为今后的研究方向提供参考。

## 1 吸力基础沉贯相关理论

吸力桶形基础是否能贯入到预定位置,是保证整个结构安全运行的关键因素。由于吸力沉贯原理的特殊性,在不同土质环境中,基础沉贯特性会产生不同的效果,对桶-土界面力学机理也会有显著的影响。施加吸力后,会引起桶内外壁与土的接触应力、孔隙水压力及摩阻力发生变化,这些变化导致吸力作用下的沉贯阻力与静压作用时有明显区别。沉贯分析包括沉贯阻力的计算、达到预定深度所需吸力、容许吸力和施加吸力引起的土塞等。

### 1.1 沉贯阻力

正确计算沉贯阻力是确定所需吸力的重要前提。吸力基础的沉贯阻力( $R$ )是桶内、外壁摩阻力( $F_i$ 、 $F_o$ )和桶端阻力( $F_{tip}$ )之和。在自重作用下,沉贯阻力不受渗流影响,计算简单,对后期施加吸力无直接影响,因此以下主要讨论施加吸力后基础受到的沉贯阻力计算。由于砂土和黏性土物理性质差别较大,其沉贯阻力公式计算也截然不同,表1和表2分别列出了黏性土和砂土中目前常用的吸力作用下沉贯阻力计算方法。

综合表1和表2的公式,可以归纳为基于承载力(API、Anderson)方法、CPT-Based(DNV、Feld、Senders)方法和Houlsby解析法三种计算沉贯阻力的方法。这三种方法都忽略了桶内土塞上升的阻

表1 黏性土中桶形基础沉贯阻力计算公式

Table 1 Formulas for penetration resistance of suction caisson in clay

方法分类	计算公式
DNV方法	$R = \pi D(2k_f \int_0^h q_c(z) dz + k_p q_c(h)t)$
API方法	$R = \alpha' c_u A_{wall} + N_c c_u A_{tip}$
Anderson方法 <sup>[13]</sup>	$R = \alpha s_{u,D}^{av} A_{wall} + (N_c s_{u,tip}^{av} + \gamma' z) A_{tip}$
Houlsby方法 <sup>[14]</sup>	$R = h\alpha_o s_{u1}(\pi D_o) + h\alpha_i s_{u1}(\pi D_i) + (\gamma' h - s + s_{u2} N_c)(\pi D t)$

注:  $D_o$ 、 $D_i$ 、 $D$ 、 $t$ 分别为桶外径、内径、平均直径和桶壁厚;  $k_f$ 为侧壁阻力系数;  $k_p$ 为端阻力系数;  $h$ 为贯入深度;  $q_c$ 为锥尖阻力; API方法中,  $\alpha'$ 为无量纲系数,  $\alpha' = 0.5\phi^{-0.5}$  ( $\phi \leq 1.0$ ),  $\alpha' = 0.5\phi^{-0.25}$  ( $\phi > 1.0$ ),  $\phi = \frac{c_u}{\gamma' h}$ ;  $c_u$ 为相应点土壤的不排水抗剪强度;  $N_c$ 为桩的承载力系数。Anderson方法中,  $\alpha$ 为剪切强度系数(通常取  $\alpha = 1/S_t$ , 试验土灵敏度  $S_t$ 在3~4之间,  $\alpha$ 在0.25~0.33之间);  $s_{u,D}^{av}$ 为桶基下沉深度范围内的平均不排水抗剪强度;  $s_{u,tip}^{av}$ 为桶端处的平均不排水抗剪强度;  $N_c$ 为承载力系数, 一般取5.1~9.0。Houlsby方法中,  $\alpha_o$ 、 $\alpha_i$ 为筒外、内壁黏附系数(或桶壁侧阻系数);  $s_{u1}$ 为贯入深度内的平均土体不排水抗剪强度;  $s_{u2}$ 为桶端部土体不排水抗剪强度

力、土体变形以及桶裙底部“尖端”形状的作用。其中CPT-Based方法受限于试验条件的精准性, 静力触测定的是探头在静压下沉过程中土体阻力的特性, 与吸力作用下的沉贯特性有较大差异, 且引

起渗流减阻特性的关键参数  $k_p$ 、 $k_f$ 等没有定量评估理论模型。大量研究针对各自模型试验给出了参数的推荐值<sup>[22-26]</sup>, 也考虑了土质、桶径、贯入深度、桶内受土塞挤压程度和水深等因素<sup>[27-28]</sup>, 与实际工程数据却存在一定偏差<sup>[29]</sup>, 但公式简单、参数少, 使用较广泛。基于承载力方法和Houlsby解析法中的参数较多, 要准确预测沉贯阻力必须精确测定每一个参数, 在实际使用中与试验数据和数值模拟偏差较大<sup>[30]</sup>, 许多室内外及现场试验与规范给出了不同推荐值<sup>[31-36]</sup>。

从桶-土相互作用角度来看, 正确计算沉贯阻力的核心问题是确定吸力作用下引起的桶内、外土体中接触应力的改变, 从而计算内外壁摩阻力和端阻力。

## 1.2 所需吸力与临界吸力

在桶形基础负压沉贯过程中, 施加的吸力会在桶形基础顶部产生压力提供向下的贯入力, 帮助基础下沉到预期的贯入深度。在此期间, 既要求所需的吸力能克服沉贯阻力保证基础顺利下沉, 同时要避免桶内出现过大的土塞而导致基础无法下沉到预期深度, 以及在砂土中要防止吸力过大, 引起管涌、流砂等渗透破坏。

表2 砂土中桶形基础沉贯阻力计算公式

Table 2 Formulas for penetration resistance of bucket foundation in sand

方法分类	计算公式
DNV方法 <sup>[15-16]</sup>	$R = \pi D(2k_f \int_0^h q_c(z) dz + k_p q_c(h)t)$
Feld方法 <sup>[8]</sup>	$R = \pi D_i r \tan \varphi \int_0^h \sigma'_v (1 - r_i \frac{s}{s_{crit}}) dz + \pi D_o r \tan \varphi \int_0^h \sigma'_v (1 + r_o \frac{s}{s_{crit}}) dz + A_{tip} k_p q_c (1 - r_p \frac{s}{s_{crit}})$
API方法 <sup>[17]</sup>	$R = 0.5\gamma' h K \tan \delta A_{wall} + 0.5\gamma' h N_q A_{tip}$
Anderson方法 <sup>[18]</sup>	$R = 0.5\gamma' h K \tan \delta A_{wall} + (0.5\gamma' t N_y + q N_q) A_{tip}$
Houlsby方法 <sup>[19]</sup>	$R = (\gamma' + \frac{as}{h}) Z_o^2 \left[ \exp\left(\frac{h}{Z_o}\right) - 1 - \frac{h}{Z_o} \right] (K \tan \delta)_o (\pi D_o) + \left( \gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) Z_i^2 \left[ \exp\left(\frac{h}{Z_i}\right) - 1 - \frac{h}{Z_i} \right] (K \tan \delta)_i (\pi D_i) + \left\{ \left( \gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) Z_i^2 \left[ \exp\left(\frac{h}{Z_i}\right) - 1 \right] N_q + \gamma' t N_y \right\} (\pi D t)$
Senders方法 <sup>[20]</sup>	$R = \pi D_o k_f \int_0^h q_c(z) dz + \left[ \pi D_i k_f \int_0^h q_c(z) dz + k_p q_c(h) \pi D t \right] \left( 1 - \frac{s}{s_{crit}} \right)$

注:  $s$ 为吸力;  $s_{crit}$ 为临界吸力;  $K$ 为侧压力系数;  $\delta$ 为桶-土摩擦角;  $N_y$ 、 $N_q$ 为承载力系数;  $\varphi$ 为土体内摩擦角;  $\sigma'_v$ 为竖向有效应力;  $r$ 为桶壁粗糙度系数;  $r_i$ 、 $r_p$ 为最大程度减少桶内壁摩擦和端阻力的系数;  $r_o = 0.1(L/D)^{0.25}$ ;  $q = \gamma' z$ 为端部有效上覆土压力, C.J.F.Clausen<sup>[21]</sup>提出用下式修正  $q: q = \gamma' z (1 + \alpha_f K \tan \delta)$ ,  $\alpha_f$ 为竖向边载增加系数, 一般为1.0。Houlsby方法中,  $a$ 为桶外侧土体水头损失比, 一般小于0.5,  $a$ 、 $Z_o$ 、 $Z_i$ 具体算法参考原文公式

### 1.2.1 所需吸力( $s_{req}$ )

根据吸力基础沉贯过程的受力分析,当沉贯力大于等于沉贯阻力( $R$ )时,吸力基础才会下沉,此时施加的吸力即为所需吸力( $s_{req}$ ):

$$W' + s_{req} A_{in} = R \quad (1)$$

式中, $W'$ 为基础自重,水中以浮重度计算; $A_{in}$ 为吸力作用面, $A_{in} = \pi D_i^2/4$ ;  $R$ 为沉贯阻力,具体计算方法见表1和表2。需要注意的是,通过上述公式计算的所需吸力需要和临界吸力公式比较,不能超过临界吸力值。

### 1.2.2 临界吸力( $S_{crit}$ )

在砂土中,由于渗透系数较大,桶形基础在沉贯过程中桶顶的负压会在桶内外形成渗流,如图1所示。当土体达到临界破坏状态,施加的吸力即为临界吸力<sup>[37]</sup>。常用的砂土中桶形基础临界吸力公式见表3。

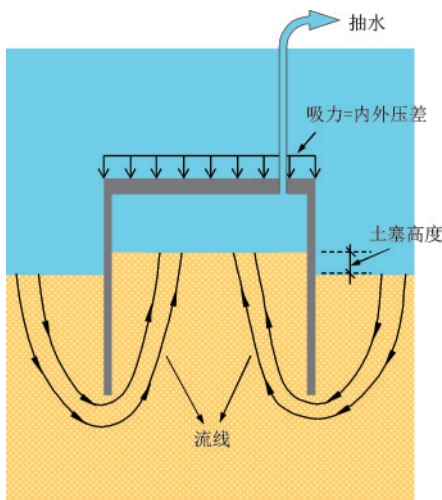


图1 吸力基础沉贯

Fig.1 Suction caisson installing diagram

通过大量工程实例和模型试验证明,在砂土中,当施加的吸力超过临界吸力值时,虽然桶内土体表面出现了小范围隆起,但没有发生渗透破坏<sup>[38-39]</sup>。这是由于当达到临界水力梯度时,向上的渗流使得桶内土体发生松动,比原状土体具有更高的渗透性,桶内的水力梯度会下降到小于临界值,土体内还具有一定的安全空间,因此可以适当提高临界吸力值<sup>[27]</sup>,但对于提高倍数没有明确解释。另外,表中公式假设桶内土体的渗透系数是均匀的,但通过试验现象和吸力引起的渗流场模拟可知<sup>[40-41]</sup>,渗透系数随深度改变,且桶内外渗透系数之比也会发生变化,这将导致临界吸力计算值存在较

表3 砂土中桶形基础临界吸力公式

Table 3 Formulas for the critical suction of bucket foundations in sand

方法分类	计算公式
Feld <sup>[8]</sup>	$\frac{S_{crit}}{\gamma' D} = 1.32 \left( \frac{h}{D} \right)^{0.75}$
Houlsby <sup>[19]</sup>	$\frac{S_{crit}}{\gamma' D} = \left( \frac{h}{D} \right) \left( 1 + \frac{\alpha_1 k_{fac}}{1 - \alpha_1} \right)$
Andersen <sup>[18]</sup>	$S_{crit} \approx 0.16 \left[ 5 \left( \frac{h}{D} \right)^{0.5} + 3 \right] \frac{k_{fac, thin}^{0.675 - 0.3 \left( \frac{h}{D} \right)}}{\left( \frac{h}{D} \right)^{0.5}} h \gamma'$
Senders <sup>[20]</sup>	$\frac{S_{crit}}{\gamma' D} = \left\{ \pi - \arctan \left[ 5 \left( \frac{h}{D} \right)^{0.85} \right] \left( 2 - \frac{2}{\pi} \right) \right\} \left( \frac{h}{D} \right)$

注: $\alpha_1 = 0.45 - 0.36 \left( 1 - e^{-\frac{0.28h}{D}} \right)$ ;  $k_{fac}$ 为负压下桶内和桶外渗透系数之比( $k_{fac} = k_{inside}/k_{outside}$ );  $k_{fac, thin}$ 为桶壁周围小范围内桶内和桶外渗透系数之比

大误差。

在黏性土中要保证桶内不会出现过大土塞导致基础无法达到预期贯入深度,防止桶内的土体发生反向承载力破坏导致筒内土体发生“拔断”<sup>[31,42]</sup>。黏性土中常用临界吸力公式见表4。

表4 黏性土中桶形基础临界吸力公式

Table 4 Formulas for the critical suction of bucket foundations in clay

方法分类	计算公式
API <sup>[17]</sup>	$S_{crit} = N_c^* s_{u, tip}^{av} + \alpha A_{in} s_{u, D}^{av} / A_{top}$
DNV <sup>[16]</sup>	$S_{crit} = \frac{F_{in}}{A_{in}} + \frac{N_c^* s_{u, tip}^{av}}{F_s}$

注: $N_c^*$ 为反向承载力系数,取6.2~9;  $A_{in}$ 为桶壁内侧入土面积;  $A_{top}$ 为吸力作用面;  $F_s$ 为安全系数, DNV规范建议取1.5,并且将 $s_{u, tip}^{av}$ 折减到2/3

国振等<sup>[43]</sup>发现采用API计算的临界吸力值偏大,吸力沉贯过程中土塞隆起明显大于规范结果,应进行折减,提供一定的安全空间,与DNV规范方法一致。但是折减系数的取值依据并没有具体说明,不具有广泛性。施加吸力与土塞的关系以及桶内土体发生反向承载力破坏的临界状态需要进一步深入研究。

### 1.3 土塞形成机理

通过大量的室内室外试验和现场实际工程,发现在不同性质的土体中进行桶形基础的吸力沉贯

时,桶内都会出现土塞的现象<sup>[44-45]</sup>。关于土塞形成的机理,一直以来都是研究人员研究的重点。

在无黏性土中,施加的吸力会引起桶内外的渗流,如果施加的吸力增长幅度过大,桶内砂土就会出现液化和砂沸现象,加重土塞形成。M.N. Tran等<sup>[46]</sup>使用半沉箱模型和粒子图像测速(PIV)技术研究了土塞形成机理,认为吸力在桶内产生较大的水力梯度,此时桶内土体孔隙率增大,土体变松散,体积发生膨胀,渗流也会将外部土体带入桶内。这些试验现象与朱儒弟等<sup>[47]</sup>、杨少丽等<sup>[48]</sup>、M. Senders<sup>[49]</sup>、李大勇等<sup>[7]</sup>、朱兴运<sup>[50]</sup>、王胤等<sup>[51]</sup>及其他很多学者一致。

而在黏性土中,由于渗透系数非常小,施加吸力在桶内外的渗流可以忽略不计<sup>[52]</sup>,因此,桶形基础在黏性土负压下沉过程中桶内出现的土塞形成机理与无黏性土有很大的差异。如A.J. Whittle等<sup>[52]</sup>和H.P. Jostad等<sup>[53]</sup>为代表的一些研究人员认为吸力基础下沉过程中桶壁排开的土体全部进入桶内,造成土塞的隆起;而W. Chen等<sup>[32]</sup>通过离心机试验研究模型在黏性土中的沉贯特性,无论采用静压沉贯还是吸力沉贯,发现只有13%被沉箱墙置换的土体移动到沉箱内部。通过大量相关文献对比,研究人员关于在黏性土中土塞形成机理的研究结论并不一致<sup>[54-57]</sup>,这也是后期通过试验和数值模拟继续研究的重点。

通过上述文献对土塞发展规律及影响因素的分析可知,桶内土塞会对桶-土界面力学机理产生显著影响,主要表现在对桶内壁的压力上,在下节详细介绍。土塞对于吸力基础沉贯是极为不利的,目前减小土塞发展的措施主要是控制吸力施加的大小和方式<sup>[58-59]</sup>。

## 2 沉贯过程中桶-土界面力学机理

土体是非连续介质,碎散性和流动性非常强,当土中结构发生位移时,由于土体不具备抗拉性能,不会产生拉应力,土体会随其发生移动。而土体和桶体弹性模量差异较大、变形不一致,因此桶-土界面上存在较大的剪应力<sup>[60]</sup>。在吸力基础下沉过程中,受到桶壁的摩阻力,土体挤压变形,便将荷载通过径向应力和剪应力的方式传递给桶壁,在此期间饱和土体由于受到吸力的作用成为一个复杂

的动态过程。正确分析桶-土间相互作用(径向应力及摩擦力)的改变、剪切破坏的发展及荷载传递过程,才能进一步深入明确沉贯阻力、所需吸力、土塞等因素之间的关系。

### 2.1 现场试验

试验能更好地揭示吸力基础沉贯过程中桶-土界面力学机理,确定影响因素,给实际工程提供依据。现场大比尺试验测得的指标具有代表性,能反映实际情况。如T.I. Tjelta<sup>[3]</sup>和A. Bye等<sup>[61]</sup>、E.C. Clukey<sup>[4]</sup>和V. Ravichandran等<sup>[62]</sup>通过现场试验,得出一些沉贯特性的基本理论,但太耗成本和时间,不适合大量开展针对某些变量(如长径比、构造形式)的试验。而小比尺模型试验无论从模型的几何尺寸还是水位、土质等相关因素较方便改变,包括室内模型试验和离心机试验。

通过吸力基础在无黏性土和黏性土中负压沉贯特性的试验,可以看出桶-土界面力学机理包括桶内外壁土压力变化、渗流减阻效应等都表现出明显的差异。在无黏性土和粉土中的实验规律基本一致;施加吸力可以引起土体中产生桶外流向桶内顶部的渗流,减小桶内壁和端部的有效应力,从而减小沉贯阻力,渗流减阻效应明显<sup>[63-64]</sup>。而在黏性土中试验现象和结论却存在分歧。

在黏性土的吸力沉贯试验中,一部分认为施加吸力后沉贯阻力增大,超过静压沉贯时的沉贯阻力;如J. Cao等<sup>[65]</sup>、A. F. Rauch等<sup>[66]</sup>、K. H. Andersen等<sup>[67]</sup>、国振等<sup>[43]</sup>、Zh. Guo等<sup>[58]</sup>和R. Liu等<sup>[68]</sup>发现基础在黏性土中施加吸力下沉时,贯入到较大的深度受到的阻力远远大于静压下相同位置的阻力,桶内壁土压力增大,影响沉贯的顺利进行,施加的吸力不能显著降低沉贯阻力。而另一部分试验发现黏土中吸力有明显的减阻效应,沉贯阻力要小于静压下相同位置的沉贯阻力;如G. T. Houlsby等<sup>[14]</sup>、R. M. EI-Sherbiny<sup>[55]</sup>、M. Senders等<sup>[20]</sup>、霍知亮<sup>[33]</sup>、李大勇等<sup>[35]</sup>通过模型试验和理论分析都得到吸力减阻结论。

造成上述不同试验结果的原因为:第一种试验数据表明施加吸力后沉贯阻力增大,对比模型几何尺寸发现,这些试验中模型的长径比大,挤土效应明显,桶壁排开的土体全部进入桶内。施加吸力后,桶外土体大量涌入桶内,导致土体隆起,有效应

力增加,桶内侧摩阻力增大,土塞增长率快。第二种观察到明显减阻效应的试验模型长径比较小,自重沉贯结束后,桶内土体并没有受到较大的挤压。施加吸力后,饱和黏性土的结构受到扰动,导致强度降低,减小了桶-土之间的摩阻力;再者施加吸力使土体受到向上的拉力,土体竖直方向的变形增加,横向上呈现压缩变形,作用在桶内壁的土压力减小。

通过试验现象分析,桶内外壁接触应力、摩阻力影响因素主要有以下几点:

### 2.1.1 几何尺寸

一般来说室内试验模型长径比在 1~9 之间<sup>[48,69]</sup>。长径比较小(一般小于 4),沉贯特性相似,对桶-土界面力学特性影响较小。但随着长径比的增加,桶内土压力与孔隙水压力都发生明显变化<sup>[70-71]</sup>。壁厚对桶内侧土压力系数影响较小,桶外土压力系数与桶厚正相关<sup>[30]</sup>。

### 2.1.2 渗透系数

沉贯过程中渗透系数与基础贯入深度和桶径比之间存在线性关系<sup>[72]</sup>。渗透系数在桶内外的大小、分布及变化代表了渗流场及砂土松密程度,影响径向应力和侧壁摩阻力的大小及分布<sup>[37,73]</sup>。

### 2.1.3 水深

室内模型模型试验中,为了方便观察吸力基础沉贯的整个过程,以及保证基础下沉过程中的竖直和稳定,通常将水位设置为高于土体表面 50 cm 以内<sup>[68,74]</sup>。而研究人员发现水位越低,负压越小,导致沉贯中桶壁压力不同<sup>[7]</sup>,还要防止空化现象<sup>[53,67]</sup>。朱儒弟等<sup>[47]</sup>、R.M.EI-Sherbiny<sup>[55]</sup>和国振等<sup>[43]</sup>在试验中,当模型自重沉贯结束后,通过注水阀向桶内加水,在施加吸力前使桶内充满水确保抽吸稳定。

## 2.2 理论分析

关于桶-土界面力学机理的理论分析,集中在讨论桶壁和土体相对运动以及土体变形作用在桶壁上的径向应力和摩阻力的变化,土对桶的作用力分布情况如图 2 所示。通过 2.1 节中对吸力基础沉贯试验的总结可知,在无黏性土中,渗流减阻效应明显,对桶-土界面力学机理认识一致。而在黏性土中,桶内外壁上的土压力、摩阻力变化以及是否存在渗流减阻效应、挤土效应有很大差异,因此关于桶-土界面力学机理的理论分别从无黏性土和黏性

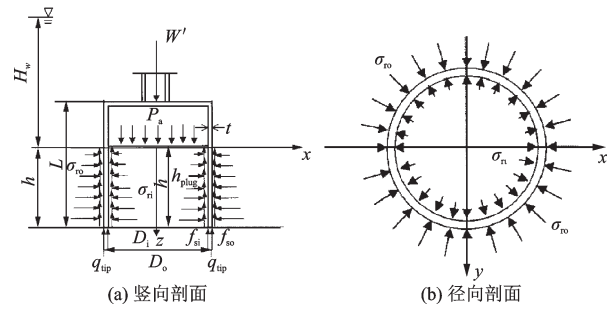


图 2 桶形基础沉贯中土对桶的作用力分布

Fig.2 Distribution of the forces on the bucket applied by soil during installation

注:  $W'$  为作用在桶形基础上的垂直荷载;  $H_w$  为水深;  $L$  为桶高;  $t$  为桶壁厚;  $p_a$  为桶内土柱顶部所受压力;  $h_{plug}$  为桶内土柱高度;  $h$  为入土深度;  $\sigma_{ro}$ 、 $\sigma_{ri}$  分别为桶外侧和内侧的径向压力;  $q_{tip}$  为桶端阻力;  $f_{so}$ 、 $f_{si}$  分别为桶外壁、内壁摩阻力

土展开讨论。

在无黏性土中王庚荪等<sup>[75]</sup>基于土体简化弹簧模型,认为桶壁置换土体全部移动到桶外,考虑渗流的影响,建立了桶在下沉过程中桶-土作用力的微分方程,给出了桶内和桶外径向有效应力和摩阻力的计算公式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{ri} &= \left( \gamma' - \gamma_w \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{h + h_{plug} + t} \right) (z + h_{plug} - h) \\ f_{si} &= \tan \delta K \left( \gamma' - \gamma_w \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{h + h_{plug} + t} \right) (z + h_{plug} - h) \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{ro} &= \left( \gamma' + \gamma_w \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{h + h_{plug} + t} \right) z \\ f_{so} &= \tan \delta K \left( \gamma' + \gamma_w \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{h + h_{plug} + t} \right) z \end{aligned} \right\} (3)$$

式中,  $z$  为计算点相对于泥面的深度;其他系数同前。

在黏性土中,根据前人研究的成果,分歧点在于当基础负压下沉时,桶端部土体流向模式以及桶壁置换的土体向内或向外位移所占的比例,这对于量化径向压力和桶壁摩阻力具有重要的影响。黏性土中桶-土相互作用理论见表 5。

表5 黏性土中桶-土相互作用理论

Table 5 Bucket-soil interaction theory in clay

方法分类	计算公式
NGI方法 <sup>[76]</sup> (桶壁置换土体全部进入桶内)	$\sigma_{ri} = \gamma_w(h_{plug} - h + z) + K\gamma'(h_{plug} - h + z) + \Delta\sigma_{ri} = (\gamma_w + K\gamma')(h_{plug} - h + z) + (1 - K)\sigma'_v + 2s_u$ $f_{si} = \eta c'_0 + \tan\delta \left[ K\gamma'(h_{plug} - h + z) + (1 - K)\sigma'_v + 2s_u \right]$ $\sigma_{ro} = \sigma'_v(1 + 2K)/3 + u_o$ $f_{so} = \eta c'_0 + \tan\delta \sigma'_v(1 + 2K)/3$
圆孔扩张理论 <sup>[77]</sup> (CEM)(桶壁置换土体全部移向桶外)	$\sigma_{ro} = \frac{1}{S_t} \frac{\tau_f}{\tan\delta} + \left( 1 - \frac{1}{S_t} \right) \left( \frac{1 + 2K}{3} \right) \sigma'_v + \tau_f \ln \left( \rho \frac{G}{\tau_f} \right) + u_o$ $f_{so} = \alpha \sigma_{ro} = \frac{K_1 \sigma'_{rc} \tan\delta}{\tau_f} \sigma_{ro}$

注:  $\Delta\sigma_{ri}$  为土体向桶内移动对桶壁产生的挤压力; 竖向有效应力  $\sigma'_v = \gamma'z + 2\frac{z}{R} \frac{s_u}{S_t} - P_a$ ;  $h_{plug}$  为桶内土柱高度;  $s_u$  为土体不排水抗剪强度;  $u_o$  为桶外侧孔隙水压力;  $S_t$  为土的灵敏度;  $\tau_f$  为土体抗剪强度;  $\rho$  为桶形基础径向剖面面积比,  $\rho = 4t/D_o$ ;  $\alpha$  为桶外侧摩擦系数;  $K_1$  为施加吸力过程中径向有效应力的降低系数, 一般取 0.8;  $\sigma'_{rc}$  为固结后桶外向有效应力

以上分析方法基于桶壁置换的土体全部进入桶内或者被排挤到桶外侧, 属于两种极端情况。然而通过大量试验测量结果, 在自重和吸力沉贯的综合过程中, 被桶壁置换的土体有 30%~50% 进入桶内<sup>[78]</sup>。这是由于大部分桶壁端部都有一个较尖的外部倒角, 这种形式除了更好的帮助基础穿透土体, 也使多数土体向外扩展, 避免桶内出现过大的土塞。在实际应用以上理论公式分析桶-土界面力学机理时, 根据实际情况, 可以加入系数做适当的调整。

此外, 在吸力基础沉贯过程中, 挤土效应和吸力会引起超孔隙水压力的变化, 继而使土体有效应力改变, 对计算沉贯阻力和临界吸力有重要影响。J.Cao等<sup>[79]</sup>通过离心机试验测量了吸力基础沉贯过程中不同位置的超孔隙水压力, 并与圆孔扩张理论分析的超孔隙水压力结果一致; 毋晓妮<sup>[80]</sup>、陈飞<sup>[81]</sup>、贾楠<sup>[82]</sup>通过数值模拟沉贯过程渗流场的变化, 得到超孔隙水压力的分布; 丁红岩等<sup>[83]</sup>通过在土体中预埋孔隙水压力传感器, 监测沉贯过程中孔隙水压力的大小并和数值模拟结果进行比较。以上研究只是通过试验和数值模拟对超孔隙水压力的分布及变化规律展开讨论, 并没有进一步明确对有效应力的影响。后期在理论分析桶-土界面力学机理上应考虑超孔隙水压力的定量因素。

### 2.3 数值模拟

数值模拟是辅助理论和试验研究的有效手段,

一些理论模型计算较为复杂, 较难通过试验进行研究, 比如桶形基础沉贯过程中的渗流场分析、桶壁上的压力分布、孔隙水压力分布等。通过数值模拟可以更加直观、清晰地分析整个过程。目前利用软件模拟沉贯过程中的核心问题是如何模拟土体大变形以及大变形土体中的渗流分布。这需要解决好本构问题, 由于土体具有非线性, 目前提出的所有本构模型没有一个可以完全体现土的各种特性。每一个本构模型往往针对某个具体分析才具备合理性, 因此要根据实际工况灵活选用本构关系。

目前研究土-结构相互作用的本构方法主要分为三种: 等效弹簧模型、分布弹簧模型和连续介质模型。当结构与均质土相互作用, 土的变形较小时, 土-结构的相互作用可用等效土的刚度来考虑, 从而使土可视线性材料, 采用等效弹簧模型。该模型简化运动方程, 减少计算时间, 有一定的局限性。分布弹簧模型通过在土-结构界面上分布非线性弹簧来考虑土-结构的相互作用, 用载荷-挠度曲线来描述。然而由于该模型的非线性特性随土体类型的不同而不同, 需要进行详细的研究。土体连续体介质模型的建立, 为研究土-结构相互作用的复杂行为提供了一种新的方法, 其能准确地预测土与土-结构相互作用的非线性行为, 也可以预测多物理场行为, 比如桶形吸力基础沉贯过程渗流场、应力场和位移场的流固耦合研究。

数值计算方法一般分为有限元、离散元及边界

元。在模拟吸力基础沉贯过程中,以有限元为代表的软件有 ABAQUS、FLAC3D、ADINA、PLAXIS、CEL 等。如 M.N. Tran<sup>[84]</sup> 利用 PLAXIS 模拟了吸力基础在密实砂土以及有淤泥胶结物夹层时的沉贯特性和渗流场分布,指出了 PLAXIS 模拟的局限:假定渗流稳定,安装过程是缓慢的,并且不能很好的模拟砂土的松动区域。毋晓妮<sup>[80]</sup> 针对沉贯过程中桶和土体大变形相互作用,通过 ABAQUS 上加载脚本程序对沉贯过程进行大变形模拟,并分析了不同吸力下桶壁摩阻力、土体超孔隙水压力及渗流场分布。吕洋等<sup>[85]</sup> 基于 ALE 技术,解决了以往有限元基于小变形理论导致分析中出现网格畸变的问题,在 ABAQUS 平台上建立轴对称模型,很好的模拟了黏土中吸力基础的大变形沉贯,得到内外壁摩阻力和端阻力在沉贯中的变化规律。闫澍旺等<sup>[86]</sup> 通过试验数据与数值模拟结果对比发现,采用的 CEL 有限元模拟方法可对桶形基础沉贯进行很好的预测。有限元操作便捷,但有些力学机制难以反映,如非均质、不连续和大变形等特点,而离散元可以模拟土颗粒的移动、转动和大变形等行为,形象地反应土体中应力场、位移等力学参量的全程变化,弥补有限元的不足。以离散元为代表的软件有 PFC 等, J. Du 等<sup>[87]</sup> 采用离散单元法模型对土塞的形成过程进行了模拟计算,发现内壁的摩擦力和吸力是形成土塞的主要外力。丁红岩等<sup>[9]</sup> 将  $J_2$  流动理论与离散元方法结合,建立桶形基础土体的本构方程,并利用有效应力原理建立流固耦合渗流模型,修正了沉贯阻力公式。李文帅<sup>[88]</sup> 采用 PFC2D 建立了桶形基础沉贯模型,模拟了沉贯全过程,发现利用土体颗粒变位和力链变化更能反映沉贯过程周围土体的细观变化。

### 3 结论与展望

介绍了吸力基础沉贯特性方面取得的研究成果,总结了沉贯阻力、所需吸力、临界吸力的常用公式并指出其适用条件和不足。从试验研究、理论分析等方面阐述了沉贯过程中桶-土界面力学机理的相关问题研究概况,分析了影响桶壁摩阻力、接触应力的因素。建议在以下几个方面进一步讨论和深入研究:

(1) 吸力作用下沉贯阻力的计算取决于桶-土接

触应力、桶壁摩阻力,不同土体性质、几何尺寸、水深、渗透系数等因素对桶-土界面力学机理的影响需要进一步明确,对土体受扰动导致的物理力学参数的变化应进行定量研究。同土与结构接触面的研究结合起来,如利用 GDS 剪切仪研究土和结构面错动时的界面特征。

(2) 沉贯过程桶-土界面力学机理的理论模型研究较少,尤其是在黏性土中,对于土体置换、流动情况还未有统一定论,黏性土中桶内接触应力和摩阻力的变化情况有待研究,土塞形成机理尚需试验和数值模拟进一步论证。

(3) 利用数值方法研究沉贯过程中桶-土界面力学机理时,多采用稳态渗流,且忽略了土体变形造成的应力场变化。实际上吸力作用下基础沉贯过程是非稳态渗流过程,应该考虑渗流场、应力场耦合条件,对桶-土界面力学机理进行深入分析。

(4) 由于缺乏现场工程监测数据的校对模型试验,许多模型试验现象和结论并不一致。通过模型试验进一步研究桶-土界面力学机理,需要现场工程实例提供相关数据进行对比,使得室内模型试验具有更大的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Housby G T, Puzrin A M. A thermomechanical framework for constitutive models for rate-independent dissipative materials[J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16(9):1 017-1 047.
- [2] Villalobos F A, Byrne B W, Housby G T. Model testing of suction caissons in clay subjected to vertical loading [J]. Applied Ocean Research, 2010, 32 (4) : 414-424.
- [3] Tjelta T I. Geotechnical experience from the installation of the Europipe jacket with bucket foundations [C] // Proceedings of Offshore Technology Conference, Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1995.
- [4] Clukey E C. Suction caisson soil displacement during installation[J]. International Symposium Frontiers in Offshore Geotechnics, 2005:229-234.
- [5] Chen W, Randolph M F. External radial stress changes and axial capacity for suction caissons in soft clay [J]. Thomas Telford Ltd, 2007, 57(6):499-511.
- [6] 练继建,陈飞,杨旭,等.海上风机复合筒型基础负压沉放调平[J].天津大学学报(自然科学与工程技术)

- 术版), 2014, 47(11):987-993.
- Lian J J, Chen F, Yang X, et al. Suction installation and leveling of composite bucket foundation for offshore wind turbines [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, 47 (11) : 987-993. (in Chinese)
- [7] 李大勇, 张雨坤, 高玉峰, 等. 中粗砂中吸力锚的负压沉贯模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(12): 2 277-2 283.
- Li D Y, Zhang Y K, Gao Y F, et al. Model tests on penetration of suction anchors in medium-coarse sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2 277-2 283. (in Chinese)
- [8] Feld T. Suction buckets, a new innovative foundation concept, applied to offshore wind turbines [D]. Denmark: Aalborg University, 2001.
- [9] 丁红岩, 张超. 流固耦合渗流模型在筒型基础沉贯中应用[J]. *天津大学学报*, 2007, 40(4):387-391.
- Ding H Y, Zhang Ch. Application of fluid-solid coupling seepage analytical model in suction penetration of bucket foundation [J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(4):387-391. (in Chinese)
- [10] Ibsen L B, Thilsted C L. Numerical study of piping limits for suction installation of offshore skirted foundations and anchors in layered sand [C] // *Proceedings of International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, Western Australia: MBD Offshore Power A/S and Aalborg University, 2011:421-426..
- [11] 李大勇, 刘小丽, 孙宗军. 海上风电塔架基础的新型吸力锚研发[J]. *海洋技术*, 2011, 30(3):83-87.
- Li D Y, Liu X L, Sun Z J. A new type of suction anchor foundation research and development used on offshore wind tower [J]. *Marine Technology*, 2011, 30 (3): 83-87. (in Chinese)
- [12] 张嘎. 粗粒土与结构接触面静动力学特性及弹塑性损伤理论研究[D]. 北京:清华大学, 2002.
- Zhang G. A new monotonic and cyclic elasto-plasticity damage theory for soil-structure interfaces [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
- [13] Andersen K H, Jostad H P. Foundation design of skirted foundations and anchors in clay [C] // *Proceedings of Offshore Technology Conference*, Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1999.
- [14] Houlby G T, Byrne B W. Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 2005, 158(2):75-82.
- [15] Hogervorst J R. Field trials with large diameter suction piles [C] // *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1980:217-224.
- [16] Det Norske Veritas. Foundations, classification notes [R]. Hovik: Det Norske Veritas, 1992.
- [17] API RP 2A recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms: RP 2A [S]. Washington D.C.: API Publishing Services, 2000.
- [18] Andersen K H, Jostad H P, Dyvik R. Penetration resistance of offshore skirted foundations and anchors in dense sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008(1):106-116.
- [19] Houlby G T, Byrne B W. Design procedures for installation of suction caissons in sand [J]. *Geotechnical Engineering*, 2005, 158(3):135-144.
- [20] Senders M, Randolph M F. CPT-based method for the installation of suction caissons in sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(1):14-25.
- [21] Clausen C J F. Fundamentering av plattformer: Observasjoner og refleksjoner [C] // *16<sup>th</sup> Laurits Bjerrum Memorial Lecture*, Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1998.
- [22] 孙东昌, 张士华, 于鸿洁, 等. 桶形基础负压沉贯特性分析[J]. *海岸工程*, 1999, 18(1):33-36.
- Sun D Ch, Zhang Sh H, Yu H J, et al. Characteristic analysis of bucket foundation during penetration by suction [J]. *Coastal Engineering*, 1999, 18(1): 33-36. (in Chinese)
- [23] 杨树耕, 孟昭瑛, 许涛, 等. 海上筒基平台负压沉贯阻力的数值计算研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 1999, 21(6):94-101.
- Yang Sh G, Meng Zh Y, Xu T, et al. Numerical study for penetrating resistance of offshore bucket foundation platform [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21 (6) : 94-101. (in Chinese)
- [24] 张超. 筒型基础负压沉贯渗流分析模型[D]. 天津大学, 2007.
- Zhang Ch. Seepage analytical model of bucket foundation during suction penetration [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [25] Xu X, Schneider J A, Lehane B M. Evaluation of end-bearing capacity of open-ended piles driven in sand from CPT data [C] // *Proceedings of Frontiers in Offshore*

- Geotechnics: ISFOG, London: Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, 2005:725-731.
- [26] Lehane B A, Schneider J A, Xu X. The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand [C] //Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG, Perth: Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, 2005:19-21.
- [27] 陈 飞, 练继建, 马煜祥, 等. 粉砂中筒型基础沉贯过程筒-土作用机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4):113-121.  
Chen F, Lian J J, Ma Y X, et al. Model tests on bucket-soil interaction during installation of bucket foundation in silt sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4):113-121.(in Chinese)
- [28] Chen F, Lian J J, Wang H, et al. Large-scale experimental investigation of the installation of suction caissons in silt sand[J]. Applied Ocean Research, 2016, 60:109-120.
- [29] Villalobos F A. Discussion of 'CPT-based method for the installation of suction caissons in sand' by Marc Senders and Mark F. Randolph[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12):1732-1734.
- [30] 祁 越, 刘 润, 练继建. 无黏性土中筒型基础负压下沉模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1):139-150.  
Qi Y, Liu R, Lian J J. Model test of bucket foundation suction installation in cohesionless soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 139-150.(in Chinese)
- [31] Huang J, Cao J, Audibert J M E. Geotechnical design of suction caisson in clay [C] //Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu: Hawaii International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003:770-779.
- [32] Chen W, Randolph M. Radial stress changes around caissons installed in clay by jacking and by suction[C] // Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004:493-499.
- [33] 霍知亮. 黏土地基中桶形基础模型试验及工作机理研究[D]. 天津:天津大学, 2015.  
Huo Zh L. Model test and working mechanism study of suction caisson in clay [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.(in Chinese)
- [34] 练继建, 马煜祥, 王海军, 等. 筒型基础在粉质黏土中的静压沉放试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1856-1862, 1910.  
Lian J J, Ma Y X, Wang H J, et al. Experimental study on static pressure sedimentation for bucket foundation in silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1856-1862, 1910.(in Chinese)
- [35] 李大勇, 王栋林, 张雨坤, 等. 黏性土中裙式吸力基础沉贯与注水拔出试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019: 1-9.  
Li D Y, Wang D L, Zhang Y K, et al. Model tests on penetration and extration of modified suction caissons in clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019:1-9.(in Chinese)
- [36] Wu Y Q, Wang Zh T, Yang Q, et al. Theoretical studies on penetration resistance of suction caissons in clay [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(5):558-567.
- [37] Erbrich C T, Tjelta T I. Installation of bucket foundations and suction caissons in sand[C] //Offshore Technology Conference, Houston, USA: Offshore Technology Conference, 1999:1-11.
- [38] Cho Y, Bang S, Preber T. Transition of soil friction during suction pile installation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39:1118-1125.
- [39] Bang S, Cho Y, Preber T, et al. Model testing and calibration of suction pile in sand[C] //Proceedings of 11<sup>th</sup> Asian Regional Conference of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ISSMGE, Seoul, Korea: Korean Geotechnical Society, 1999:253-256.
- [40] Yang D L, Kou H L, Zhang W C, et al. Model tests on performance of offshore wind turbine with suction caisson foundation in sand[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 38(8): 980-988.
- [41] 杨少丽, Grande Lars, 齐剑峰, 等. 桶基负压沉贯下粉土中水力梯度的变化过程[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6):662-665.  
Yang Sh L, Grande L, Qi J F, et al. Process of hydraulic gradient in silt during penetration of bucket by suction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 662-665.(in Chinese)
- [42] 马煜祥. 粉质粘土中筒型基础沉放阻力特性试验研究 [D]. 天津:天津大学, 2016.  
Ma Y X. Model test research on the penetration resistance of bucket foundation during installation in silty clay [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.(in Chinese)
- [43] 国 振, 王立忠, 袁 峰. 粘土中吸力锚沉贯阻力与

- 土塞形成试验研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(1):9-19.
- Guo Zh, Wang L Zh, Yuan F. An experimental investigation of insertion resistance and soil heave during caisson installation in soft clay [J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(1):9-19.(in Chinese)
- [44] Senpere D, Aubergne G A. Suction anchor piles-a proven alternative to driving or drilling [C]//Proceedings of 14<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1982: 483-493.
- [45] Tjelta T I. Suction piles: their position and applications today [C] //Proceedings of 11<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway: Offshore Technology Conference, 2001:1-6.
- [46] Tran M N, Randolph M F, Airey D W. Study of seepage flow and plug loosening in installation of suction caissons in sand [C]//Proceedings of 15<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea: Offshore Technology Conference, 2005:516-521.
- [47] 朱儒弟, 高恒庆, 马小兵, 等. 海上平台桶形基础模型压力压贯与负压沉贯试验研究[J]. 海岸工程, 1999, 18(1):60-66.
- Zhu R D, Gao H Q, Ma X B, et al. Offshore bucket foundation model penetration by pressure and suction test research [J]. Coastal Engineering, 1999, 18(1) : 60-66.(in Chinese)
- [48] 杨少丽, 李安龙, 齐剑峰. 桶基负压沉贯过程模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2):236-238.
- Yang Sh L, Li A L, Qi J F. Experimental study on bucket foundation during penetration by suction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 236-238.(in Chinese)
- [49] Senders M. Suction caissons in sand as tripod foundations for offshore wind turbines [D]. Perth: The University of Western Australia, 2008.
- [50] 朱兴运. 吸力锚基础负压沉贯阻力及土塞形成机理研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2018.
- Zhu X Y. Research on penetration resistance and formation mechanism of soil plug during suction anchor installation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.(in Chinese)
- [51] 王胤, 朱兴运, 杨庆. 考虑砂土渗透性变化的吸力锚沉贯及土塞特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1):190-196.
- Wang Y, Zhu X Y, Yang Q. Installation of suction caissons and formation of soil plug considering variation of permeability of sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1):190-196.(in Chinese)
- [52] Whittle A J, Germaine J T, Cauble D F. Behavior of miniature suction caissons in clay [C]//Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour: New Frontiers - Proceedings of an International Conference, London, UK: Society of Underwater Technology, 1998: 279-300.
- [53] Jostad H P, Andersen K H. Foundation design of skirted foundations and anchors in clay [C]//Offshore Technology Conference, Houston Texas: Offshore Technology Conference, 1999.
- [54] House A R, Randolph M F, Borbas M E. Limiting aspect ratio for suction caisson installation in clay [C]// Proceedings of 9<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France: International Society of Offshore and Polar Engineers, 1999:676-683.
- [55] El-Sherbiny R M. performance of suction caisson anchors in normally consolidated clay [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2005.
- [56] 丁红岩, 张浦阳. 筒型基础安装过程中筒内土塞生成的可视化模拟计算 [J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(6):1 034-1 038.
- Ding H Y, Zhang P Y. Visual simulation of soil plug formation inside bucket foundations during suction penetration [J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2007, 37(6):1 034-1 038.(in Chinese)
- [57] 黄阿岗, 丁广伟, 郭旺军. 海上平台桶形基础沉贯过程的数值分析 [J]. 价值工程, 2011, 30(2):43-45.
- Huang A G, Ding G W, Guo W J. Numerical analysis of penetration process of bucket foundation of offshore platform [J]. Value Engineering, 2011, 30(2) : 43-45. (in Chinese)
- [58] Guo Zh, Wang L Zh, Yuan F, et al. Model tests on installation techniques of suction caissons in a soft clay seabed [J]. Applied Ocean Research, 2012, 34: 116-125.
- [59] Wang L, Yu L, Guo Zh, et al. Seepage induced soil failure and its mitigation during suction caisson installation in silt [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(1):1-11.
- [60] 李森. 软基基础与土相互作用分析方法研究 [D]. 南京:河海大学, 2003.
- Li M. Analysis of interaction between the foundation in soft slab and the surrounding weak soil [D]. Nanjing: Hohai University, 2003.(in Chinese)

- [61] Bye A, Erbrich C, Rognlien B. Geotechnical design of bucket foundations[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference, Houston Texas: Offshore Technology Conference, 1995:869-883.
- [62] Ravichandran V, Maji V B, Gandhi S R. Field testing of suction anchors for mooring applications[J]. Indian Geotechnical Journal, 2015, 45(3):267-277.
- [63] Erbrich C T, Tjelta T I. Installation of bucket foundations and suction caissons in sand[C]//Offshore Technology Conference, Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1999:1-11.
- [64] Zhang P Y, Hu R Q, Ding H Y, et al. Comparative analysis of seepage field characteristics in bucket foundation with and without compartments[J]. Ocean Engineering, 2017, 143:34-49.
- [65] Cao J, Phillios R, Popescu R. Penetration resistance of suction caissons in clay[C]//Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan; International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002:800-806.
- [66] Rauch A F, Olson R E, Luke A M. Measured response during laboratory installation of suction caissons [C]//Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003:780-787.
- [67] Andersen K H, Philippe J, Luger D, et al. Centrifuge tests on installation of suction anchors in soft clay[J]. Ocean Engineering, 2005, 32:845-863.
- [68] Liu R, Ma W G, Qi Y, et al. Experimental studies on the drag reduction effect of bucket foundation installation under suction pressure in sand[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(5): 421-431.
- [69] Wu X N, Hu Y, Li Y, et al. Foundations of offshore wind turbines: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 104:379-393.
- [70] Pouyan B, Jin M K. Evaluation of cyclic and monotonic loading behavior of bucket foundations used for offshore wind turbines[J]. Applied Ocean Research, 2019.
- [71] Andersen K H, Philippe J, Luger D, et al. Centrifuge tests on installation of suction anchors in soft clay[J]. Ocean Engineering, 2003, 32(7):845-863.
- [72] Villalobos F A. Installation of suction caissons in sand [C]//Proceedings of The Chilean Conference of Geotechnics, Santiago: Congreso Chileno de Geotecnia, 2007:1-14.
- [73] Tran M N, Randolph M F. Variation of suction pressure during caisson installation in sand [J]. Géotechnique, 2008, 58(1):1-11.
- [74] Chen W, Zhou H, Randolph M F. Effect of installation method on external shaft friction of caissons in soft clay [J]. American Society of Civil Engineers, 2009 (5) : 605-615.
- [75] 王庚荪, 孔令伟, 杨家岭, 等. 单桶负压下沉过程中土体与桶形基础的相互作用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6):877-881.  
Wang G S, Kong L W, Yang J L, et al. Interaction between soil mass and bucket foundation in suction sinking process of single bucket[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6):877-881.(in Chinese)
- [76] Anderson K H, Jostad H P. Shear strength along inside of suction anchor skirt wall in clay[C]//Offshore Technology Conference, Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2004:1-13.
- [77] Randolph M F. Science and empiricism in pile foundation design: 43rd Rankine Lecture [J]. Geotechnique, 2003, 53(10):847-875.
- [78] 刘润, 李贝贝, 马文冠, 等. 粉质黏土中筒型基础沉放的影响范围研究[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 960-968.  
Liu R, Li B B, Ma W G, et al. Research on the influence scope of bucket foundation installation in silty clay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 960-968.(in Chinese)
- [79] Cao J, Phillips R, Popescu R, et al. Excess pore pressures induced by installation of suction caisson in ne clays[C]//Offshore Site Investigation and Geotechnics 'Diversity and Sustainability', London, UK: Society of Underwater Technology, 2002.
- [80] 毋晓妮. 吸力沉箱贯入过程大变形数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.  
Wu X N. Large deformation numerical simulation of suction caisson penetration [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2012.(in Chinese)
- [81] 陈飞. 筒型基础沉放过程渗流与阻力特性数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.  
Chen F. Numerical study on the characteristics of the seepage and penetration resistance of bucket foundation during suction installation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.(in Chinese)
- [82] 贾楠. 海上风电单筒多舱型筒型基础沉放调平机理及沉贯阻力研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.

- Jia N. Analysis on penetrating-levelling mechanism and penetration resistance of bucket foundation with inner compartments for offshore wind turbines [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.(in Chinese)
- [83] 丁红岩, 贾楠, 张浦阳. 砂土中筒型基础沉放过程渗流特性和沉贯阻力研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3 130-3 138.
- Ding H Y, Jia N, Zhang P Y. Research of seepage characteristics and penetration resistance during installation of bucket foundations in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3 130-3 138.(in Chinese)
- [84] Tran M N. Installation of suction caissons in dense sand and the influence of silt and cemented layers[D]. Sydney: The University of Sydney, 2005.
- [85] 吕阳, 王胤, 杨庆. 吸力式筒形基础沉贯过程的大变形有限元模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3 615-3 624.
- Lyu Y, Wang Y, Yang Q. Large deformation finite element simulation of suction bucket foundation during penetration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3 615-3 624.(in Chinese)
- [86] 闫澍旺, 林澍, 霍知亮, 等. 桶形基础液压下沉过程的耦合欧拉—拉格朗日有限元法分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(1):247-252.
- Yan Sh W, Lin Sh, Huo Zh L, et al. Coupled Eulerian-Lagrangian finite element analysis of suction caisson penetration process under hydraulic pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 247-252. (in Chinese)
- [87] Du J, Ding H Y, Zhang P Y, et al. Numerical analysis of soil plug inside suction foundations during suction penetration by discrete element method [J]. Transactions of Tianjin University, 2006(1):61-65.
- [88] 李文帅. 砂土中筒型基础静压沉贯过程受力特性研究[D]. 扬州:扬州大学, 2018.
- Li W Sh. Mechanical characteristics of bucket foundation in sand during static pressure penetration[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.(in Chinese)

(本文责编:赵霞)