

DOI: 10.11779/CJGE202209004

# 相对密实度对沉贯中吸力基础桶壁-砂土界面力学特性的影响

李大勇<sup>1, 2</sup>, 侯新宇<sup>1</sup>, 张雨坤<sup>\*1</sup>, 高玉峰<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 3. 河海大学土木交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 吸力基础是一种系泊海洋浮动平台及固定海上风电塔架的基础形式。吸力基础在砂土中吸力贯入时, 沉贯阻力主要由内外壁摩阻力组成。吸力基础沉贯过程中基础-土体界面力学特性决定侧壁摩阻力的大小。开展界面剪切试验, 研究了相对密实度及沉贯深度对吸力基础-砂土界面沉贯过程中相互作用的影响。结果表明: 吸力基础-砂土界面剪应力随剪切位移增加, 呈现出软化特征; 随砂土密实程度的增加, 界面摩擦系数、界面峰值强度和相对应的剪切位移逐渐增大; 但上述参数随沉贯深度的增加先减小后逐渐增大。研究工况条件下, 界面摩擦系数量值处于 0.2~0.34。根据试验结果, 得到了不同沉贯深度处基础桶壁摩阻力, 基础侧壁摩阻力-贯入深度之间关系可用指数函数表示; 内外壁摩阻力随砂土密实程度增加逐渐增大, 外壁摩阻力增长幅度较内壁摩阻力更加明显, 外壁摩阻力最大值是相同沉贯深度处内壁摩阻力的 2.1 倍。界面剪切试验中, 砂土发生明显挤出现象, 砂土挤出主要发生在剪切初期, 对应剪切位移较小, 可用于揭示吸力基础沉贯过程中, 由于桶壁贯入造成的砂土置换侧向挤出现象。界面剪切过程中砂土颗粒发生破碎, 填充至砂土颗粒间孔隙中, 导致土体试样高度下降, 砂土呈现出“剪缩”现象。发现界面摩擦角与土体内摩擦角之比随土体密实程度的增加逐渐降低。研究内容有助于准确得到沉贯摩阻力和沉贯所需吸力, 确保吸力基础沉贯至预定位置。

**关键词:** 界面剪切试验; 吸力基础沉贯; 相对密实度; 界面摩擦系数; 侧壁摩阻力

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)09-1598-10

**作者简介:** 李大勇(1971—), 男, 教授, 从事海洋岩土工程和土力学理论等方面的研究。E-mail: ldy@upc.edu.cn。

## Effects of relative densities on mechanical characteristics of interface between sand and suction caisson during penetration

LI Da-yong<sup>1, 2</sup>, HOU Xin-yu<sup>1</sup>, ZHANG Yu-kun<sup>1</sup>, GAO Yu-feng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Suction caissons are popular for mooring oil and gas platforms and fixing wind turbines. The penetration resistance is mainly the friction between the inner and outer walls during suction penetration in sand. During installation of the suction caisson, the frictional forces between the caisson wall and the soil are dominated by the shear behaviors of the interface between the caisson wall and the soil. A series of interface shear tests with the GDS interface shearing instrument are conducted to investigate the influences of the initial relative densities and penetration depth on the interfacial shear characteristics of soil-suction caisson. The test results show that the shear stress - shear displacement relationship curve of interface under different relative densities exhibits strain softening, and interfacial shear strength and the corresponding shear displacement increase with the increasing relative densities. It is found that the friction coefficient of interface increases with the increase of the relative density, and firstly increases and then decreases with the increase of the penetration depth. Under the experimental programs of tests, the friction coefficient of interface ranges from 0.2 to 0.34, and the friction resistance at different depths can be calculated in terms of the test results, indicating the friction

resistance between the inner and outer walls increases exponentially with the increase of the penetration depth. The friction resistance between the inner and outer walls increases

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目 (51879044, 51808325, 51639002); 山东科技大学科研创新团队项目 (2015TDJH104)

**收稿日期:** 2021-04-14

**\*通信作者** (E-mail: philc007@163.com)

with the increase of the relative density, and the increase rate of friction of the outer wall is greater than that of the inner wall. When the penetration completes, the friction of the outer wall is 2.12 times that of the inner wall. During shearing, sand particles are found to be squeezed out, and they are mainly squeezed out at the initial stage of the testing, i.e., the corresponding shear displacement is relatively small. This phenomenon indicates that during installation of the suction caisson, the sand particles are squeezed out because of the replacement between the sand volume and the volume of suction caisson wall. The sand particles broken in the process of testing causes the sand volume to decrease. Besides, it is found that the ratio of the interfacial friction angle to the internal friction angle decreases with the increase of the relative density. To obtain the accurate installation resistance and the required suction to install the suction caisson, it is important to investigate the shear behaviors of the interface between the suction wall and the sand.

**Key words:** interface shear test; suction caisson installation; relative density; friction coefficient of interface; frictional force acting on caisson wall

## 0 引言

吸力基础具有制作简便、安装速度快、造价低等优点, 常用做海洋工程结构物的基础。吸力基础沉贯至预定位置, 是正常使用的前提。当吸力基础在砂土沉贯时, 土体中发生渗流作用, 导致基础端部有效应力和尖阻力大幅降低, 甚至降为零<sup>[1-2]</sup>, 此时沉贯阻力主要由基础内外壁摩阻力组成<sup>[3]</sup>。准确预测基础侧壁摩阻力, 对确定工程中沉贯所需吸力值有重要意义。对于吸力基础而言, 其沉贯过程中基础-土体界面相互作用力学特性决定其沉贯侧壁摩阻力的大小。

国内外学者对吸力基础吸力沉贯特性和基础-土体界面相互作用开展了一系列研究。Houlsby 等<sup>[4-5]</sup>提出吸力基础在砂土和黏性土中沉贯阻力以及所需吸力的计算公式。Mehrarvar 等<sup>[6]</sup>发现不同尺寸的吸力基础沉贯过程中, 所需吸力的变化曲线是相似的, 所需吸力随基础尺寸增加逐渐增大。李大勇等<sup>[7-8]</sup>基于滑移线理论, 提出了计算吸力沉贯最大、最小吸力值的计算方法。Chen 等<sup>[9]</sup>研究发现, 吸力沉贯时内壁摩阻力和端阻力显著降低, 而外壁摩阻力基本保持不变, 并建立了所需吸力的新的预测方法。Harireche 等<sup>[10]</sup>研究了不同深度处土体渗透系数值对沉贯阻力和所需吸力的影响, 认为土体渗透性恒定的传统理论会使吸力的预测过于保守。闫澍旺等<sup>[11]</sup>开展模型试验, 阐明黏性土中吸力基础内部土塞随吸力发展规律。Liu 等<sup>[12]</sup>开展模型试验, 发现任一沉贯深度处, 吸力基础界面摩擦系数为对应压力贯入条件下的 0.5 倍。

相比传统结构-土体界面力学研究, 吸力基础沉贯过程中基础-土体界面力学特性研究较少, 反映了这方面研究还不成熟, 传统结构如桩基础等结构与土体界面相互作用的研究可为吸力基础界面力学特性研究提供借鉴。

Nardelli 等<sup>[13]</sup>使用大型直剪仪, 研究混凝土材料-砂土界面剪切特性, 发现界面摩擦角与土体摩擦角之比随砂土密实程度的降低逐渐增大。Tiwari 等<sup>[14]</sup>采用

直剪仪, 开展了界面剪切试验, 发现砂土-结构界面摩擦角与土体内摩擦角之比随着砂土密实程度的增大逐渐降低; 界面抗剪强度包络线并非为一条直线, 同时指出大多数规范中计算土体-结构界面摩阻力的方法是相当保守的。Tejchman 等<sup>[15]</sup>通过开展直剪试验, 发现钢材-砂土界面摩擦角随着砂土密实程度增加逐渐增大, 砂土与粗糙界面摩擦角近似等于土体内摩擦角。Jitsangiam 等<sup>[16]</sup>利用直剪仪进行单调直剪试验和循环直剪试验, 发现抗剪强度随土体密实程度的提高而增大, 且在循环剪切后施加剪切荷载得到的界面摩擦系数大于单调直剪试验得到的摩擦系数。郭聚坤等<sup>[17]</sup>利用改进直剪仪研究了混凝土桩与黏性土界面剪切特性, 发现固结时间对界面摩擦角影响较小。

对于吸力基础, 其在砂土中沉贯安装过程与传统桩基础存在显著差别: 吸力沉贯时, 基础内外侧土体发生渗流作用, 基础内侧土体有效应力降低, 外侧有效应力增加, 最终导致基础内外壁-土体界面法向应力、摩擦系数、摩阻力量值均有较大差异。目前计算吸力基础沉贯摩阻力的方法普遍采用假定系数, 将基础内、外壁与土体界面侧摩阻系数假设为一定值  $k_r$ <sup>[18]</sup>, 但该方法未能体现界面摩擦系数随沉贯深度和砂土相对密实度等因素的变化规律。

开展界面剪切试验研究饱和砂土-吸力基础沉贯界面力学特性, 讨论了相对密实度和沉贯深度的影响规律, 得到界面摩擦系数的变化趋势, 分析了吸力基础沉贯时桶壁摩阻力的变化趋势, 为揭示吸力沉贯基础-砂土界面相互作用机理、确定摩阻力提供借鉴。结合试验现象, 阐述了吸力基础沉贯导致的土体置换和侧向挤出现象。

## 1 试验仪器及流程

### 1.1 试验仪器

图 1 为吸力基础-砂土沉贯界面剪切试验的 GDS 界面仪, 图 2 为不锈钢制压杆, 压杆界面粗糙度  $R_a=0.3$

μm。吸力基础-土体接触面为圆形, 试验过程中不锈钢制压杆固定不动,通过底部步进电机控制底座旋转, 带动环刀及内部砂土试样转动, 从而模拟吸力基础沉贯过程。采用此种设计可以保证剪切过程中界面面积恒定。界面仪法向压力由电机控制, 通过设置不同法向压力, 模拟实际工程中不同沉贯深度处侧壁受到的法向压力作用。采用干装法向环刀内填装土样, 砂土试样直径为 70 mm, 高度为 20 mm。图 3 为电控直剪残剪仪, 用于土体直剪试验。

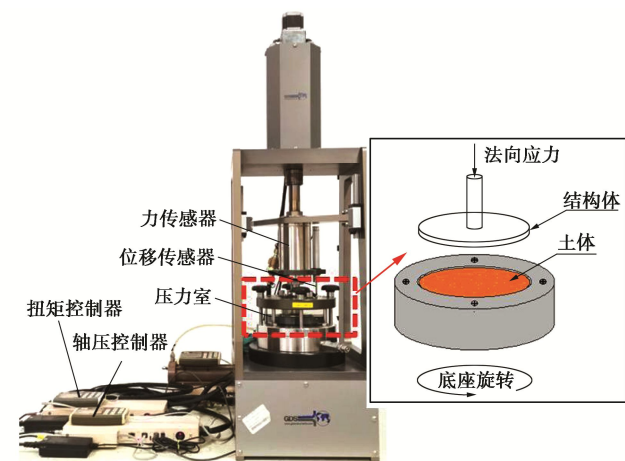


图 1 GDS 界面剪切仪  
Fig. 1 GDS interface shearing instrument



图 2 轴向压杆  
Fig. 2 Axial pressure bar

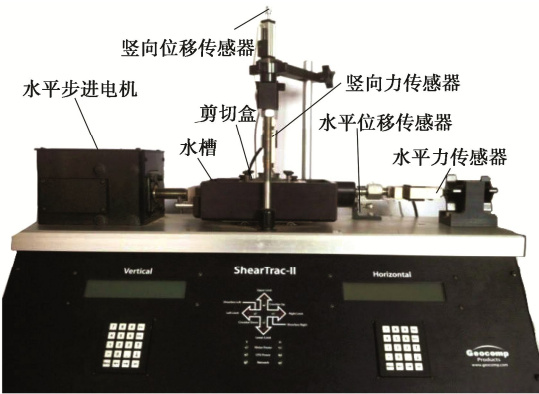


图 3 直剪仪  
Fig. 3 Direct shear apparatus

1.2 试验材料

试验海砂取自青岛金沙灘。其物理参数和级配曲线见表 1 和图 4。

表 1 试验用砂相关物理参数

Table 1 Relevant physical parameters of sand for tests					
试验用砂	$C_u$	$C_c$	$D_{50}/\text{mm}$	$e_{\max}$	$e_{\min}$
细砂	2.33	0.98	0.18	0.980	0.560

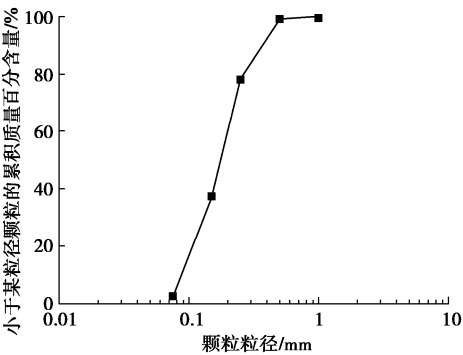


图 4 颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curve of particles

1.3 试验方案

界面仪底座在剪切扭矩作用下匀速旋转, 从而在结构-土体界面产生剪应力。利用式 (1) 和式 (2), 可将作用于界面的扭矩以及界面旋转角位移换算为吸力沉贯界面剪应力和剪切位移:

$$\tau = \frac{M}{\int_0^R 2\pi r^2 dr} = \frac{3M}{2\pi R^3}, \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为剪应力,  $M$  为扭矩,  $R$  为轴向应力杆底面半径。

$$s = \frac{\pi}{180} \nu r' t, \quad (2)$$

式中,  $s$  为剪切位移,  $r'$  为平均半径, 计算公式见式 (3),  $\nu$  为剪切角速度,  $t$  为剪切时间。采用平均半径的作用是消除剪切过程中界面剪应力和剪切位移分布不均的情况。

$$r' = \frac{\int_0^R 2\pi r^2 dr}{\pi R^2} = \frac{2}{3} R. \quad (3)$$

为了使试验结果更好地反映工程实际, 试验剪切速率参考天津港北大防波堤、大港油田等吸力基础实际工程, 沉贯速率分别为 0.17 和 1.2 cm/min<sup>[19]</sup>, 因此, 本文的沉贯速率介于二者之间, 设置为 1 cm/min。

此外, 吸力基础在砂土中沉贯时, 基础内部及周围土体形成由外向内的渗流作用, 使得基础内部土体有效应力降低、外部土体有效应力增加, 导致作用于基础外壁的侧向压力大于作用于内壁的侧向压力。目前, 针对吸力基础在砂土中沉贯时内外渗流场的分布

以及对界面特性影响的研究尚不完善, 但可以通过研究不同深度处土压力分布以正确反映沉贯渗流作用。Liu 等<sup>[12]</sup>以长径比为 1.0 的吸力基础为研究对象, 得到了吸力沉贯过程中, 作用于基础内壁和外壁的法向应力(即土压力)分布规律。试验结果综合考虑了渗流作用以及挤土作用。对上述法向应力分布进行拟合, 可以得出作用于基础的土压力与沉贯深度的关系:

$$p_i = 19.70l - 0.806 \quad , \quad (4)$$

$$p_o = 40.28l - 4.147 \quad , \quad (5)$$

式中,  $p_i$  为内壁土压力,  $p_o$  为外壁土压力,  $l$  为沉贯深度。

通过式 (4), (5) 可得高度为 5 m, 长径比为 1.0 的吸力基础在不同外壁土压力(即试验法向应力)条件下对应的贯入深度, 见表 2。吸力基础沉贯时, 作用于基础内外壁的土压力受桶壁粗糙度等因素影响显著。界面剪切试验研究需进一步与吸力基础模型试验相结合, 探讨基础沉贯内外壁土压力值的影响因素。

表 2 法向应力与沉贯深度对应关系

Table 2 Normal stresses under various penetration depths							
土压力/kPa	10	20	30	50	100	150	200
对应外壁沉贯深度/m	0.35	0.60	0.83	1.30	2.50	3.70	5.00
对应内壁沉贯深度/m	0.55	1.06	1.56	2.58	5.00	—	—

本文试验设计了不同初始密实程度状态的砂土: 松散 ( $D_r=0.3$ )、中密 ( $D_r=0.5$ ) 和密实 ( $D_r=0.7, 0.9, 1$ )。表 3 给出了各试验工况对应的法向应力和初始相对密实度。

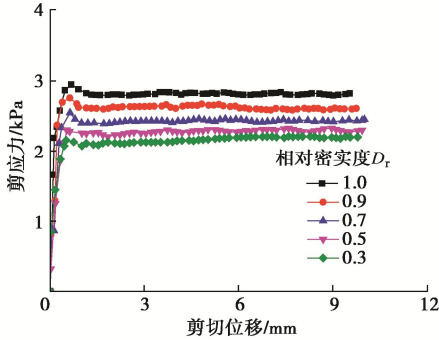
表 3 试验工况

Table 3 Experimental programs		
剪切类型	相对密实度	法向应力/kPa
界面剪切	0.3,0.5,0.7,0.9,1.0	10,20,30,50,100,150,200
直剪	0.3,0.5,0.7,0.9,1.0	

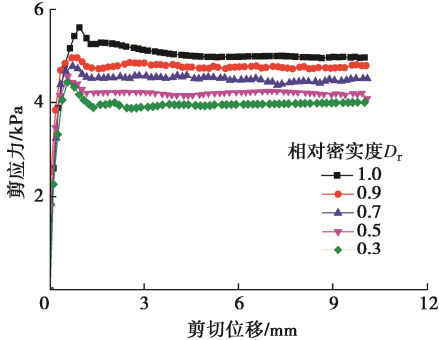
2 结果分析

2.1 剪应力 - 剪切位移曲线

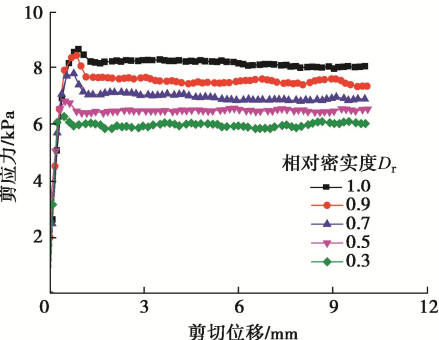
图 5 给出了砂土-基础界面剪应力随剪切位移变化规律, 界面剪应力及剪切位移分别由式 (1), (2) 计算得到。由图 5 可知, 法向应力为 10, 20, 30, 50 kPa 时, 界面剪应力首先迅速增长至峰值, 随后骤然减小至稳定值。法向应力为 100, 150, 200 kPa 时, 界面剪应力首先随剪切位移线性增长至最大值, 随后减小至稳定值。最大剪应力值对应的剪切位移为 0.37~1 mm。



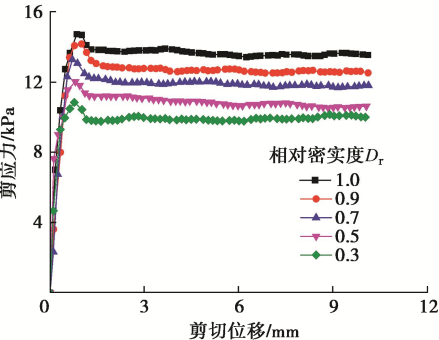
(a) 10 kPa



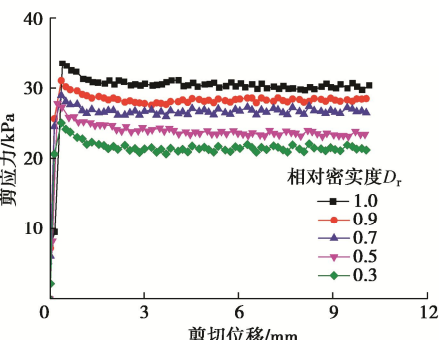
(b) 20 kPa



(c) 30 kPa



(d) 50 kPa



(e) 100 kPa

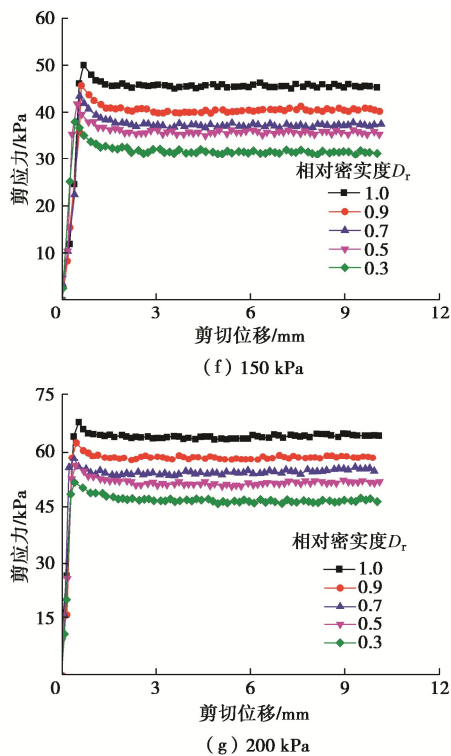


图5 界面剪应力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 5 Shear stress - shear displacement relationships of interface under different relative densities

此外,从图5中可以看出,界面抗剪强度随土体密实程度的增大显著增加,这与 Jitsangiam 等<sup>[16]</sup>的界面抗剪强度随相对密度变化的结论一致。法向应力较小时(10~20 kPa),密实状态砂土-基础界面抗剪强度较中密状态提高幅度最大,分别提高了 10.8%, 4.7%, 14.1%;当法向应力为 30~200 kPa 时,砂土相对密度由松散变为中密时的界面抗剪强度增幅最为明显,分别增加了 10.7%, 10.9%, 13.9%和 8.8%。

图6给出了直剪试验中,不同密实程度砂土中剪应力 - 剪切位移关系,砂土剪应力和剪切位移分别由直剪仪水平力传感器和水平位移传感器测得(如图3所示)。试验砂土抗剪强度随密实程度的提高逐渐增加。当土体密实程度由松散变为中密时,其抗剪强度提高幅度最大,法向应力 10, 50, 100, 200 kPa 对应

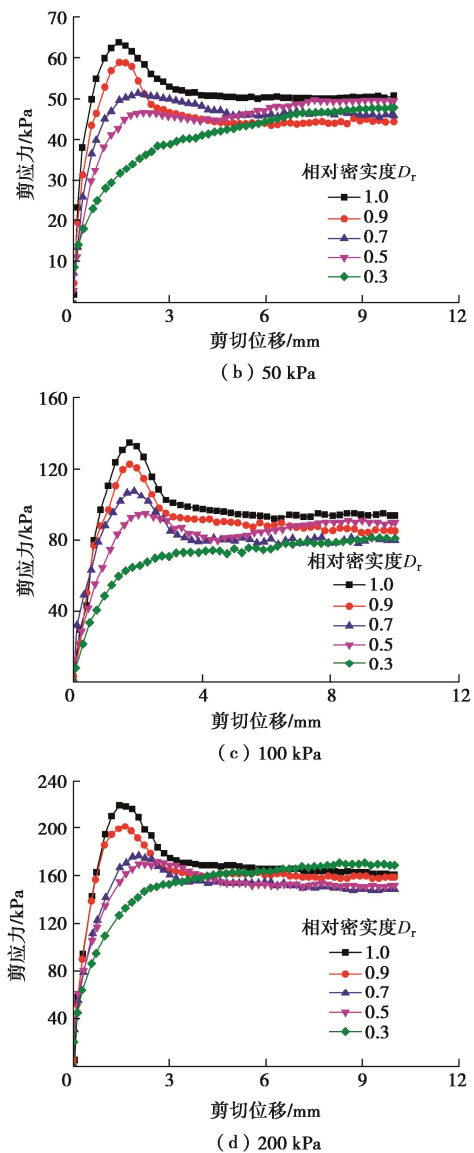


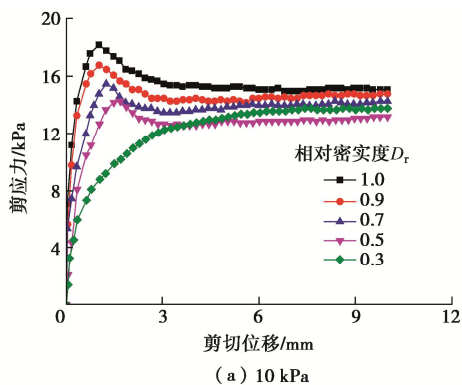
图6 砂土剪应力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 6 Shear stress - shear displacement curves of saturated sand under different relative densities

的抗剪强度分别提高了 16.3%, 27.6%, 33.7%, 12.4%。不同法向应力下,随土体密实程度增大,峰值剪应力对应的位移逐渐减小。其原因为高密实程度砂土中,土体颗粒排列紧密,咬合力增强,粒间摩擦力变大,导致需要克服更大的颗粒翻滚、移动阻力。

## 2.2 竖向位移 - 剪切位移变化规律

图7为不同相对密度下,界面法向位移与剪切位移关系,界面竖向位移由 GDS 界面剪切仪的竖向位移传感器测得(图1所示),剪切位移由式(2)计算得到。各法向应力下,砂土的体积表现出剪缩特征(即竖向位移不断减小)。由图7(a)可以看出,曲线变化可分3阶段:①第I阶段,法向位移随剪切位移增加呈线性减小趋势,同一法向应力下曲线斜率基本相同,如 50 kPa 下,  $D_r=0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0$  的砂土



中曲线斜率分别为 1.63, 1.69, 1.79, 1.65, 1.63; ②第Ⅱ阶段, 曲线斜率减小; ③第Ⅲ阶段, 曲线基本平缓, 竖向位移降低至恒定值。第Ⅰ, Ⅱ阶段分界点对应的剪切位移值随相对密度和法向应力的增加而增大, 变化范围为 0~1 mm。不同法向应力下, 试验结束时, 界面法向位移量与土体密实程度成正相关的关系。竖向位移增大的原因包括: ①法向应力作用下, 导致土体孔隙压缩; ②剪切过程中, 界面-土体相互作用造成的土体颗粒挤出(图 9 所示); ③界面剪切过程中, 土体颗粒破碎。

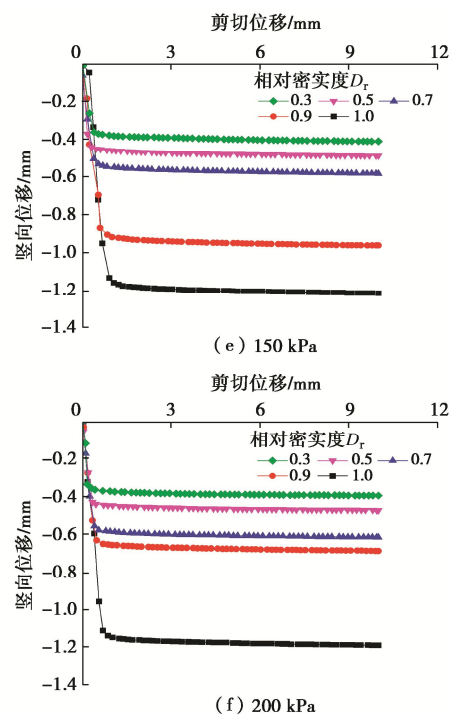
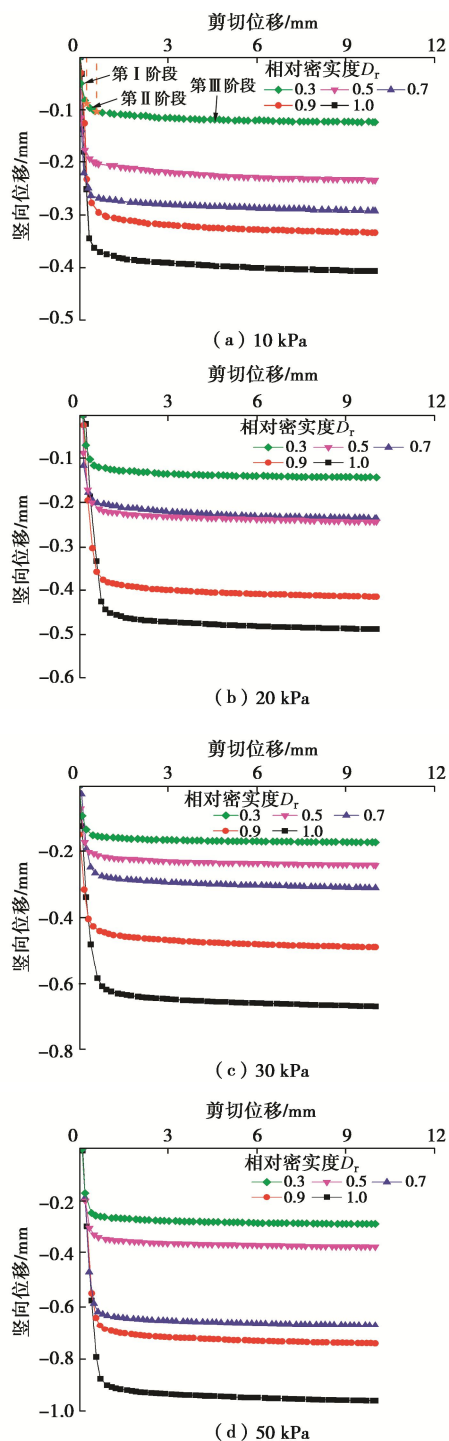


图 7 不同相对密度下界面竖向位移 - 剪切位移关系

Fig. 7 Vertical displacement - shear displacement relationship curves of interface under various relative densities

对试验结束后的砂土试样烘干, 进行颗粒筛分试验, 得到剪切试验之后砂土的颗粒级配曲线, 如图 8 所示, 界面剪切后的颗粒级配曲线较剪切前的颗粒级配曲线向左偏移, 因此, 剪切试验完成后, 砂土颗粒发生破碎。

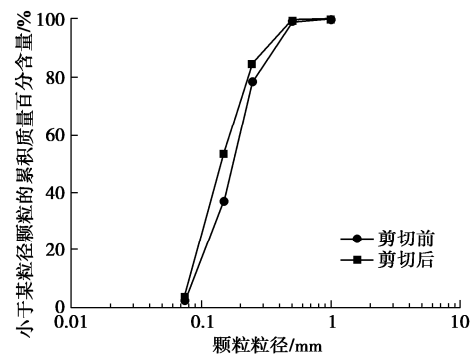


图 8 剪切试验前后颗粒级配曲线对比

Fig. 8 Comparison between grain-size distribution curves of particles before and after shear test

从图 9 可以看出, 一定法向应力下, 试验过程中界面处砂土颗粒由于基础-土体相互作用被逐渐挤出环刀, 此过程主要发生在第Ⅰ, Ⅱ阶段剪切初期, 此时剪切位移较小, 但土体挤出量相对较大。此外, 相同剪切位移下砂土挤出量随着法向应力和相对密实度的增大而增加。此现象可用于解释吸力基础沉贯过程中, 桶壁贯入造成的砂土置换侧向挤出现象。从图 7

可以看出, 由于不同法向应力代表不同沉贯深度, 一定深度处的砂土挤出仅发生在基础贯入该深度后的小位移范围内。相对密实度为 1.0, 法向应力为 10 kPa 的试验完成后没有砂土挤出, 法向应力为 100, 200 kPa 的试验完成后砂土的挤出量分别占砂土总量的 0.38% 和 0.54%。由此可得, 相对密实度为 1.0, 法向应力较小时, 竖向位移主要由土体颗粒剪切破碎产生的, 法向应力较大时, 竖向位移的变化是砂土挤出和颗粒剪切破碎的共同作用, 且法向应力越大, 砂土挤出量越多。相对密实度为 0.5, 法向应力为 100 kPa 和 200 kPa 的试验完成后, 砂土挤出量非常小, 此时, 土体竖向位移的变化主要是由于土体孔隙压缩和剪切过程中颗粒破碎共同引起。



图 9 砂土挤出

Fig. 9 Sand to be squeezed out

2.3 界面和土体强度参数变化规律

图 10 为界面剪切试验和直剪试验得到的强度包络线。法向应力越大, 抗剪强度越大。界面抗剪强度与法向应力的关系可以用式 (6) 表示, 用于评估界面抗剪强度。

$$\tau = a \times \sigma'^2 + b \times \sigma' + c \quad (6)$$

式中,  $\tau$  为抗剪强度,  $\sigma'$  为法向应力,  $a, b, c$  为系数, 其值见表 4。由表 4 可知, 抗剪强度与法向应力关系与拟合曲线较为吻合。利用式 (6) 以及表 4 中的数据可以计算出任意法向应力下的界面抗剪强度。

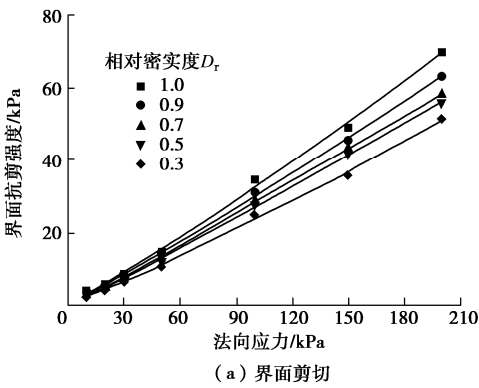
表 4 抗剪强度 - 法向应力线性回归方程

Table 4 Shear strength - linear regression equations for vertical pressure

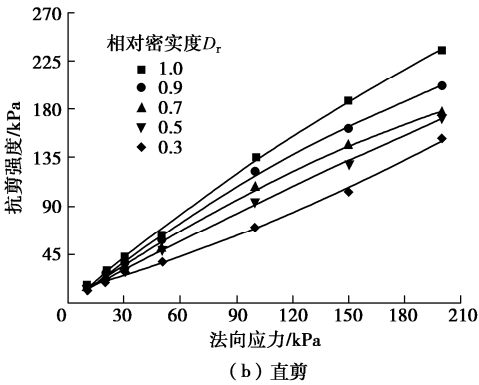
相对密实度	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
1.0	0.00021	0.3050	-0.1190	0.997
0.9	0.00015	0.2871	-0.1090	0.999
0.7	0.00027	0.2885	-0.6047	0.999
0.5	0.00060	0.2741	-0.8873	0.999
0.3	0.00018	0.2206	-0.1780	0.997

图 10 所示, 相同法向应力下, 界面抗剪强度、饱和土体抗剪强度随土体密实程度的提高, 均显著增加。法向应力确定的情况下, 土体密实程度对土体抗剪强度的影响大于对界面抗剪强度的影响。吸力基础实际

工程设计时, 假定抗剪强度与法向应力呈线性关系, 但所得的抗剪强度与法向应力呈二次曲线关系, 因此, 如果实际工程采用线性关系设计, 会使得出的结果偏于危险。



(a) 界面剪切



(b) 直剪

图 10 不同初始相对密度下砂土界面抗剪强度包络线

Fig. 10 Shear strength envelopes of sand interface under different initial relative densities

表 5 给出了法向应力为 100 kPa 时界面摩擦角和土体内摩擦角之间的关系。定义参数  $m$  为界面摩擦角与土体内摩擦角的比值。从表 5 可知, 砂土内摩擦角、界面摩擦角与土体密实程度成正相关的关系。试验工况下, 界面摩擦角的变化范围为  $14.05^{\circ} \sim 18.12^{\circ}$ , 土体内摩擦角的变化范围为  $39.15^{\circ} \sim 54.07^{\circ}$ , 可见相对密实度对土体内摩擦角的影响比对界面摩擦角的影响更加显著, 这与 Tejchman 等<sup>[15]</sup>界面摩擦角的变化规律一致。 $m$  随相对密实度的提高而减小。图 11 给出了界面摩擦角随砂土内摩擦角变化的规律, 土体-基础界面摩擦角随土体内摩擦角增加显著增大。

表 5 不同相对密度下砂土抗剪强度指标

Table 5 Parameters of sand under different relative densities

<i>D</i> <sub>r</sub>	界面摩擦角 $\delta /(^{\circ})$	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	<i>m</i>
1.0	18.12	54.07	0.335
0.9	17.23	50.89	0.338
0.7	16.13	47.20	0.342
0.5	15.51	43.50	0.357
0.3	14.05	39.15	0.359

2.4 砂土-基础界面摩擦系数

界面摩擦系数为剪应力和法向应力的比值。由图

12 可知, 界面摩擦系数随法向应力及相对密度的增加逐渐增大。当法向应力由 50 kPa 增大至 100 kPa 时, 砂土-基础界面摩擦系数变化幅度最大, 相对密度为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 的土体界面摩擦系数分别提高了 13.7%, 9.3%, 8.7%, 15.2%, 15.0%。当竖向压力为 150 kPa 时, 砂土密实程度对土体-界面摩擦系数影响最为显著。

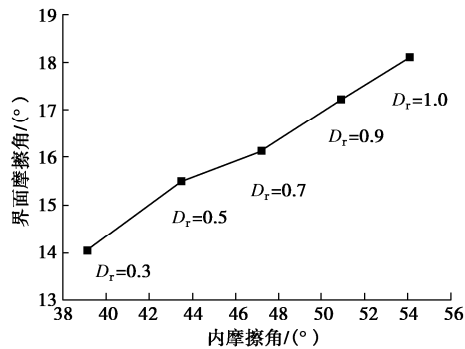


图 11 界面摩擦角 - 内摩擦角曲线

Fig. 11 Relationship between interfacial friction angle and internal friction angle

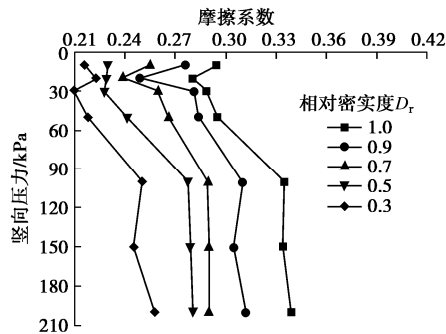


图 12 界面摩擦系数变化规律

Fig. 12 Variation laws of friction coefficient of interface

2.5 沉贯过程中吸力基础阻力变化

式 (7) 和 (8) 给出了沉贯过程中, 吸力基础内壁和外壁摩阻力计算公式:

$$F_o = \mu \pi D_o \int_0^h p_o(l) dl \quad , \quad (7)$$

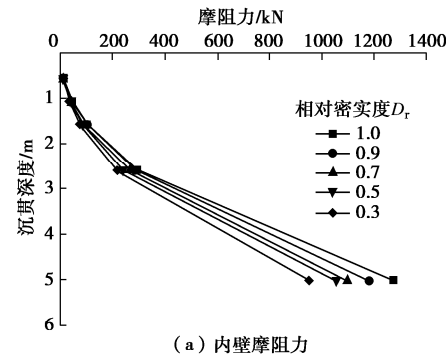
$$F_i = \mu \pi D_i \int_0^h p_i(l) dl \quad , \quad (8)$$

式中,  $F_i$ ,  $F_o$  分别为吸力基础内、外壁总摩阻力,  $\mu$  为界面摩擦系数, 可从表 4, 5 进行取值,  $D_i$ ,  $D_o$  分别为吸力基础内、外直径,  $h$  为吸力基础长度。

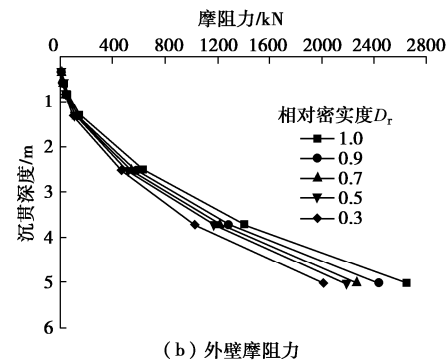
结合式 (1), (2) 以及式 (4), (5), 得到基础沉贯时内壁及外壁土压力 (法向压力) 随沉贯深度的变化, 将界面剪切试验得到的相应深度处摩擦系数代入公式 (7), (8), 从而得到基础不同沉贯深度出内外壁摩阻力 (如图 13 所示)。

由图 13 可知, 内外壁摩阻力与沉贯深度呈指数形

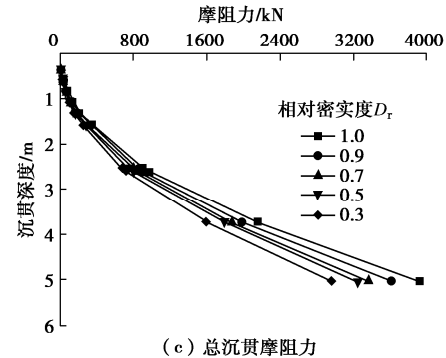
式增长趋势, 基础内壁摩阻力明显小于外壁摩阻力。当吸力沉贯深度为 5.0 m 时, 相对密度为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 的砂土中, 外壁摩阻力为内壁摩阻力的 2.08, 2.07, 2.06, 2.08 和 2.12 倍。此外, 从图中可以看出, 基础内外壁摩阻力随土体密实程度的增大逐渐增加。



(a) 内壁摩阻力



(b) 外壁摩阻力



(c) 总沉贯摩阻力

图 13 沉贯摩阻力变化规律

Fig. 13 Variation of friction resistance with penetration depth in sand with different densities

3 结 论

以吸力基础为研究对象, 开展界面剪切试验, 研究了基础吸力沉贯过程中基础-砂土界面相互作用。讨论了相对密度对界面摩擦角和界面摩擦系数的影响, 得到了基础沉贯过程中内外壁阻力的演化规律, 得出以下结论:

(1) 不同相对密度下, 砂土-基础界面剪应力随剪切位移增加表现出软化趋势, 界面抗剪强度随相

对密实度的增加而提高;本文试验工况下,砂土-吸力基础界面抗剪强度对应的剪切位移随相对密实度的提高而增加,剪切位移为0.37~1 mm。

(2) 界面剪切试验中,砂土发生明显挤出现象,砂土挤出主要发生在剪切初期,对应剪切位移较小。此现象可揭示吸力基础沉贯过程中,桶壁贯入造成的砂土置换侧向挤出。一定沉贯深度处的砂土挤出仅发生在基础贯入该深度后的小位移范围内。

(3) 界面剪切过程中,砂土颗粒破碎,细小颗粒填入土体孔隙,是界面剪切试验竖向位移变化的重要影响因素。

(4) 随相对密实度增加,砂土-基础界面摩擦角与摩擦系数均增大。相同密实程度条件下,界面摩擦角为内摩擦角的0.37~0.41倍,相对密实度对土体内摩擦角的影响比对界面摩擦角的影响更加显著。不同相对密实度下,试验工况条件下,摩擦系数变化范围为0.20~0.34。

(5) 沉贯过程中,吸力基础外壁摩阻力大于内壁摩阻力。沉贯完成时(法向应力200 kPa时),试验工况下,最大外壁摩阻力值为内壁摩阻力值的2.12倍。随着土体密实程度增加,基础内外壁摩阻力均提高。

## 4 讨 论

吸力基础沉贯设计中,首先需要计算沉贯阻力,进而确定所需沉贯吸力以及合理的沉贯抽水速率,确保基础顺利贯入至预定位置。由本文试验分析可知,侧壁摩阻力显著影响吸力基础的沉贯过程及最终贯入深度。当侧摩阻力预测值小于实际值时,施加预设吸力无法将基础贯入至设计深度;当侧摩阻力预测值大于实际值,导致施加吸力过大,引起基础内部形成较高“土塞”,基础无法沉贯至设计深度。因此需要准确预测吸力基础沉贯侧摩阻力。

开展界面剪切试验,讨论了相对密实度和法向应力对砂土-吸力基础界面强度以及界面摩擦系数、摩擦角的影响,分析了侧壁摩阻力变化规律。结合本文试验阐述了实际工程中吸力基础沉贯过程中挤土现象。本文是在单一界面粗糙度条件下开展的研究,界面粗糙程度对剪切特性的影响是今后研究的主要内容之一。

### 参考文献:

[1] 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): 2277 - 2283. (LI Da-yong, ZHANG Yu-kun, GAO Yu-feng, et al. Model tests on penetration of suction anchors in

medium-coarse sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2277 - 2283. (in Chinese))

[2] 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): 184 - 190. (WANG Yin, ZHU Xing-yun, YANG Qing. Installation of suction caissons and formation of soil plug considering variation of permeability of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 184 - 190. (in Chinese))

[3] 丁红岩, 张浦阳. 海上吸力锚负压下沉渗流场的特性分析[J]. 海洋技术, 2003, **22**(4): 44 - 48. (DING Hong-yan, ZHANG Pu-yang. Suction penetration seepage field's characteristics of suction anchor[J]. Ocean Technology, 2003, **22**(4): 44 - 48. (in Chinese))

[4] HOULSBY G T, BYRNE B W. Design procedures for installation of suction caissons in sand[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2005, **158**(3): 135 - 144.

[5] HOULSBY 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.

[6] MEHRAVAR M, HARIRECHE O, FARAMARZI A, et al. Modelling the variation of suction pressure during caisson installation in sand using FLAC3D[J]. Ships and Offshore Structures, 2017, **12**(7): 893 - 899.

[7] 李大勇, 吴宇旗, 张雨坤, 等. 砂土中桶形基础吸力值的设定范围[J]. 岩土力学, 2017, **38**(4): 985 - 992, 1002. (LI Da-yong, WU Yu-qi, ZHANG Yu-kun, et al. Determination of suction range for penetration of suction caissons in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(4): 985 - 992, 1002. (in Chinese))

[8] 李大勇, 吴宇旗, 张雨坤. 砂土中吸力式桶形基础竖向承载性状研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, **35**(3): 33 - 39. (LI Da-yong, WU Yu-qi, ZHANG Yu-kun. Vertical bearing capacity of suction caisson foundation in sand[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, **35**(3): 33 - 39. (in Chinese))

[9] CHEN F, LIAN J J, WANG H J, et al. Large-scale experimental investigation of the installation of suction caissons in silt sand[J]. Applied Ocean Research, 2016, **60**: 109 - 120.

[10] HARIRECHE O, MEHRAVAR M, ALANI A M. Suction

- caisson installation in sand with isotropic permeability varying with depth[J]. *Applied Ocean Research*, 2013, **43**: 256 - 263.
- [11] 闫澍旺, 霍知亮, 楚 剑, 等. 黏土中桶形基础负压下沉阻力及土塞发展试验[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, **49**(10): 1027 - 1033. (YAN Shu-wang, HUO Zhi-liang, CHU Jian, et al. Experiment on penetration resistance and soil plug development during suction caisson penetration in soft clay[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016, **49**(10): 1027 - 1033. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] NARDELLI A, CACCIARI P P, FUTAI M M. Sand-concrete interface response: the role of surface texture and confinement conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2019, **59**(6): 1675 - 1694.
- [14] TIWARI B, AL-ADHADH A R. Influence of relative density on static soil - structure frictional resistance of dry and saturated sand[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, **32**(2): 411 - 427.
- [15] TEJCHMAN J, WU W. Experimental and numerical study of sand-steel interfaces[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1995, **19**(8): 513 - 536.
- [16] JITSANGIAM P, PRA-AI S, BOULON M, et al. Characterization of a soil - rough structure interface using direct shear tests with varying cyclic amplitude and loading sequences under a large cyclic testing cycle condition[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, **17**(5): 1829 - 1845.
- [17] 郭聚坤, 寇海磊, 许泓霖, 等. 桩 - 海洋黏土界面剪切性状试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, **36**(4): 104 - 108, 117. (GUO Ju-kun, KOU Hai-lei, XU Hong-lin, et al. Experimental study on shear behaviors of interface between pile and marine clay[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, **36**(4): 104 - 108, 117. (in Chinese))
- [18] 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 Yue, LIU Run, LIAN Ji-jian. Model test of bucket foundation suction installation in cohesionless soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(1): 139 - 150. (in Chinese))
- [19] 袁中立, 秦延龙, 唐海燕. 浅海桶形基础平台[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010. (YUAN Zhong-li, QIN Yan-long, TANG Hai-yan. *Bucket Foundation Platform in Shallow Sea*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese))

## 岩土工程西湖论坛(2022): 海洋岩土工程(第二号通知)

海洋资源的开发利用是解决当前资源短缺、全球气候变化、环境恶化等难题, 实现可持续发展的重要途径。海洋环境极端多变, 工程地质条件复杂, 海洋资源的开发和利用涉及大量的岩土工程问题。结合国家海洋强国、双碳目标等重大战略需求, 更好地为我国工程建设服务, 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、《地基处理》杂志社、浙江省科学技术协会和浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心等四家单位, 将于2022年10月22—23日联合组织召开岩土工程西湖论坛(2022): 海洋岩土工程。

本次会议也是中国工程院土木、水利与建筑工程学部年度计划学术活动之一。

**主办单位:** 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 《地基处理》杂志社; 浙江省科学技术协会; 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心

**承办单位:** 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心

**会议地址:** 杭州花家山庄浙江省杭州市西湖区三台山路25号。

**网上注册地址:** <http://www.geo-forum.cn>, 9月15日启动线上注册, 在此之前请联系大会秘书处注册。

**注册费用:** 网上正式代表1800元/人, 现场正式代表2200元/人, 学生代表1000元/人。

**付款事项:** 银行账号: 1202050609006809541; 公司名称: 浙江浙峰科技有限公司; 开户银行: 中国工商银行浙江省分行杭州文三路支行; 转账时请务必备注: 西湖论坛+参会人员姓名。发票将在会议现场发放, 如有特殊需求, 请联系会务组秘书处。

**大会秘书处:** 宋秀英: 18969127702, xysong2020@163.com; 王笑笑: 13646828087, wangxiuxiu713@163.com。

(大会组委会 供稿)