

DOI: 10.11779/CJGE

# 不排水条件下饱和黏土界面强度特性影响规律研究

廖晨聪<sup>\*1,2</sup>, 黄骋驰<sup>2</sup>, 苏新斌<sup>2</sup>, 叶冠林<sup>1,2</sup>, 郑东生<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院土木工程系, 上海 200240;

3. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 吸力式基础与黏土海床的界面强度是评估安装贯入阻力的关键参数。由于海床完全被水淹没, 其饱和状态、排水条件、孔隙水压等会对界面强度的发挥产生重要影响。已有的界面测试方法缺乏对土体饱和度、排水状态、孔隙水压等的准确测量与控制, 无法体现海洋工程中土与结构的界面特性。通过改造传统应变式三轴仪实现了饱和黏土的完全不排水界面剪切与界面孔压的精确测量, 开展了三种剪切速率、三种粗糙度以及四种固结压力下的界面剪切试验, 对界面剪应力、偏应力、孔隙水压力、摩擦角、应力路径进行了分析。试验结果表明: 剪切速率越快, 界面滑动破坏的有效应力比和有效应力摩擦角越大, 界面最大孔隙水压力随结构面粗糙度的增大而增大; 界面剪切速率特性主要与土体本身的加载速率效应有关, 随着剪切速率增大, 界面孔隙水压力达到稳定所需的轴向应变越大。因此, 严格控制黏土饱和度及剪切过程的不排水条件对界面剪切强度的精准量测十分重要, 有助于准确计算沉贯摩阻力和吸力值, 确保吸力式基础沉贯到位。

**关键词:** 界面强度; 剪切速率; 饱和黏土; 排水状态; 孔隙水压力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 -

作者简介: 廖晨聪(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋岩土方面的研究工作。E-mail: billaday@sjtu.edu.cn。

## Interface strength behavior of saturated clay under fully undrained condition

LIAO Chen-cong<sup>\*1,2</sup>, HUANG Cheng-chi<sup>2</sup>, SU Xin-bin<sup>2</sup>, YE Guan-lin<sup>1,2</sup>, JENG Dong-sheng<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Ocean and Civil

Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology,

Shandong Qingdao 266000, China)

**Abstract:** The interface strength between the suction bucket and the clay is a critical parameter in evaluating the penetration resistance during installation. Since the seabed is completely submerged, factors such as saturation degree, drainage conditions, and pore water pressure significantly influence the development of interface strength. Current interface testing devices do not provide accurate measurement and control of interface saturation, drainage status, and pore water pressure, which limits their ability to reflect the soil-structure interface characteristics in ocean engineering. By modifying traditional strain-controlled triaxial instruments, this study achieved fully undrained interface shear and accurate measurement of pore pressure in saturated clay. Interface shear was evaluated at three shear rates, three roughness levels, and four consolidation pressures. During the tests, interfacial shear stress, deviatoric stress, pore water pressure, friction angle, and stress path were analyzed. The results indicate that as the shear rate increases, both the effective stress ratio and effective stress friction angle increase. In addition, the maximum pore water pressure increases with increasing structural surface roughness. The interface shear characteristics are primarily influenced by the rate effect. As shear rate increases, the axial strain required to stabilize the interface pore water pressure also increases. Hence, careful control of clay saturation and undrained conditions are essential for accurate measurement of interface shear strength, which is crucial for reliable calculation of frictional resistance and suction pressure during suction foundation installation.

**Key words:** interface strength, shearing rates, saturated clay, drainage condition, pore water pressure

## 0 引言

吸力式基础具有制作简便、安装迅速、可回收等优点, 是当前深远海风电工程中使用的重要基础形式。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279106); 上海市教委科研创新计划(2021-01-07-00-02-E00089)

收稿日期: 2024 - xx - xx

\*通讯作者(E-mail: billaday@sjtu.edu.cn)

确保吸力式基础沉贯至预定海床深度，是正常服役使用的重要前提。吸力式基础沉贯过程中基础-土体界面力学特性决定了侧壁摩阻力的大小，是影响沉贯过程中所需吸力的关键因素<sup>[1]</sup>。受到饱和土体性质、沉贯速度及结构面粗糙度的共同影响，准确评估基础沉贯过程中所需的吸力仍旧十分困难。为获得吸力式基础与土体的界面强度特性，需深入分析不同固结压力、剪切速率及结构面粗糙度条件下，饱和黏土与基础之间的界面作用机理。

许多学者利用直剪试验<sup>[2]</sup>、单剪试验<sup>[3]</sup>、剑桥扭剪试验<sup>[4,5]</sup>、环剪试验<sup>[6]</sup>等手段分析黏性土与结构物的界面力学特性。王永洪等<sup>[7]</sup>研究了剪切速率对桩-黏性土界面超孔隙水压力与强度特性的影响，结果表明固结压力和剪切速率对界面强度特性影响显著。Hammoud<sup>[8]</sup>研究了法向应力和结构面粗糙度对界面强度的影响，研究结果显示在特定的法向应力条件下，界面的抗剪强度主要受结构面粗糙度和土体的中值粒径等因素影响。李大勇等<sup>[9]</sup>利用 GDS 界面剪切仪，开展不同剪切速率下吸力基础-黏土界面剪切试验，表明界面抗剪强度随剪切速率的增加而降低，界面黏聚力与剪切速率呈正相关，而界面摩擦角则相反。A Martinez 等<sup>[10]</sup>进行了不同剪切速率下黏土-结构物界面剪切特性试验，研究表明随着剪切速率的增加，界面由排水到部分排水再到不排水，产生的超孔隙压力导致正常固结黏土抗剪强度下降。郑铮等<sup>[11]</sup>通过开展静/动载作用下不排水深海沉积物-结构界面特性试验，发现界面承载力随粗糙度增大而逐渐增强。以上研究结果表明剪切速率、固结压力、饱和状态、孔隙水等均会对黏土界面强度的发挥产生重要影响。

需要指出的是，由于前述试验设备的局限性，对剪切速率、饱和状态等影响因素的研究仍有欠缺。目前界面的直剪、环剪试验大都通过剪切速率的快慢近似模拟排水条件，无法严格控制试样的排水状态，导致剪切速率效应与排水固结效应无法明确区分。此外，由于缺乏围压室与乳胶膜密封，不能施加反压与围压，试样也未真正实现完全饱和，测出的孔压值不精确，不能反映海洋环境的特点。本文利用三轴仪，基于预制滑动面概念，研究了饱和土与结构物界面的强度特性规律，实现了试样在不排水条件下的完全饱和与孔压测量，分析了固结压力、剪切速率及界面粗糙度对饱和黏土界面强度、界面孔压及速率效应的影响规律，可为吸力式桶形基础与饱和黏土海床的界面强度提供试验依据与数据支撑。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土体与试样组成

试验土样选用性质稳定的饱和重塑 Speswhite 高岭土，具有白度高，杂质含量低，化学惰性强，易于分散等特点，其物理力学特性指标见表 1。

表 1 Speswhite 高岭土物理力学性质

Table 1 Physical-mechanical properties of Speswhite kaolin clay

相对密度 <i>G</i>	液限 <i>W<sub>L</sub></i> %	塑限 <i>W<sub>P</sub></i> %	塑性指数 <i>I<sub>P</sub></i>	内摩擦角 $\varphi'$	粒度级配(%) 100 < 75 $\mu\text{m}$ 97.92 < 2 $\mu\text{m}$	平均粒径 0.7 $\mu\text{m}$
2.61	61.4	32	29.4	22.6°		

试样结构物采用 304 不锈钢，经过抛光、线割和刻槽，形成不同的表面相对粗糙度  $R$ <sup>[12]</sup>：

$$R = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (1)$$

其中， $L$  为取样长度， $z(x)$  是轮廓曲线上各点相对于基准线的垂直偏差。抛光处理后表面粗糙度  $R_1=0.6 \mu\text{m}$ ，线割处理后表面粗糙度  $R_2=6 \mu\text{m}$ ，刻槽处理后表面粗糙度  $R_3=270 \mu\text{m}$ ，代表了从相对光滑到粗糙的结构面平整度变化<sup>[13]</sup>。

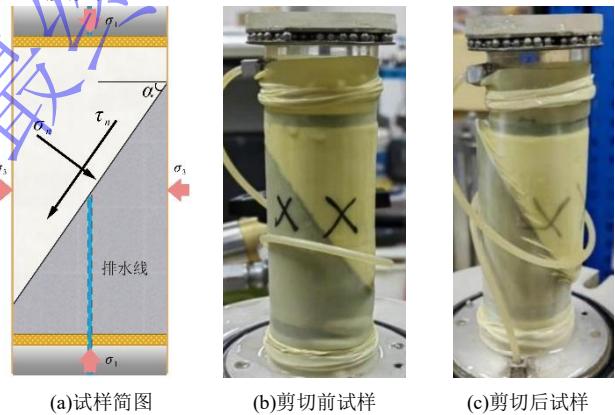


图 1 三轴组合试样

Fig. 1 Triaxial combination test sample

图 1(a)为土与结构物界面三轴试验组合试样，上部为土样，下部为结构物；试样高度 80 mm，直径 39.1 mm，结构物斜面与水平面夹角为  $\alpha = 60^\circ > 45^\circ + \varphi'/2$ 。由图 1(b)和图 1(c)可知，剪切过程中土体能沿着预制斜面滑动<sup>[13]</sup>。试验时土样和结构物由乳胶膜包裹，这使得试验过程中可以清晰观察到土样在界面上的滑动过程，试验在轴向应变达到 15% 时停止。乳胶膜在剪切中会发生一定变形，通过试验修正了乳胶膜变形的影响<sup>[14]</sup>。

### 1.2 试验仪器与试验方案

试验采用 SJ-1B 应变式三轴仪，主要包括围压、反压、孔隙水和体变测量等功能。由于黏土的界面剪切过程受剪切速率和粗糙度共同影响，且不排水条件下黏土内的孔隙水压力累积，界面的孔隙水压力将成为有效应力和界面强度的重要影响因素。因此，在仪

器上下排水通道均装有孔压计, 以同时测量土体上部和界面的孔隙水压力; 同时, 在下部试样钻有一直径为 3 mm 的小孔, 内部填充金属透水石, 形成单独的排水线, 直接将界面孔隙压力传递到下排水通道传感器, 如图 1(a)所示。此外, 为了独立研究剪切速率和结构面粗糙度对界面强度特性的影响, 使用乳胶膜包裹试样, 施加反压和围压, 并关闭连接界面和试样顶部的排水路径, 确保试样在剪切时处于完全不排水状态。其余改装部分详见文献<sup>[14]</sup>。试验主要步骤包括制样、饱和、固结和剪切, 应变控制加载系统通过仪器下部的变速箱实现底座的抬升(不同剪切速率)。压力控制系统为气压控制, 同步实现轴压、围压、反压的施加, 操作细节详见文献<sup>[13]</sup>, 具体试验工况参见表 2。

表 2 界面三轴试验工况

Table 2 Triaxial interface test conditions

界面类型	固结围压 (kPa)	剪切阶段 排水状态	剪切速率 (mm/min)
$R_1$	50、100、150、250	完全不排水	$v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$
$R_2$	50、100、150、250	完全不排水	$v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$
$R_3$	50、100、150、250	完全不排水	$v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$

试验制作了三种结构物面粗糙度, 分别为

$R_1 = 0.6 \mu\text{m}$ 、 $R_2 = 6 \mu\text{m}$ 、 $R_3 = 270 \mu\text{m}$ ; 三种剪切速率(三轴试验中的应变速率), 分别为  $v_1 = 0.0022 \text{ mm/min}$ 、 $v_2 = 0.033 \text{ mm/min}$ 、 $v_3 = 0.166 \text{ mm/min}$ ; 四种固结围压, 分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、250 kPa。

## 2 试验结果分析

### 2.1 偏应力-轴向应变曲线分析

根据试验结果, 绘制了在不同围压、结构面粗糙度和剪切速率下的饱和黏土-结构物界面三轴剪切试验的偏应力-轴向应变曲线。图 2 表明, 不同围压、不同结构面粗糙度以及不同剪切速率下的偏应力-轴向应变曲线大致相同。加载初期, 偏应力随轴向应变的增长速度较快, 当轴向应变达到 2%-4% 时出现转折, 之后偏应力随轴向应变的增长趋于稳定, 呈现非软化型应变。当剪切应变达到一定值后, 偏应力将保持稳定状态; 结构面粗糙度越大, 偏应力越大; 围压越大, 偏应力也越大。偏应力进入稳定阶段时的拐点, 视为土体开始在结构物上整体滑动的起点。

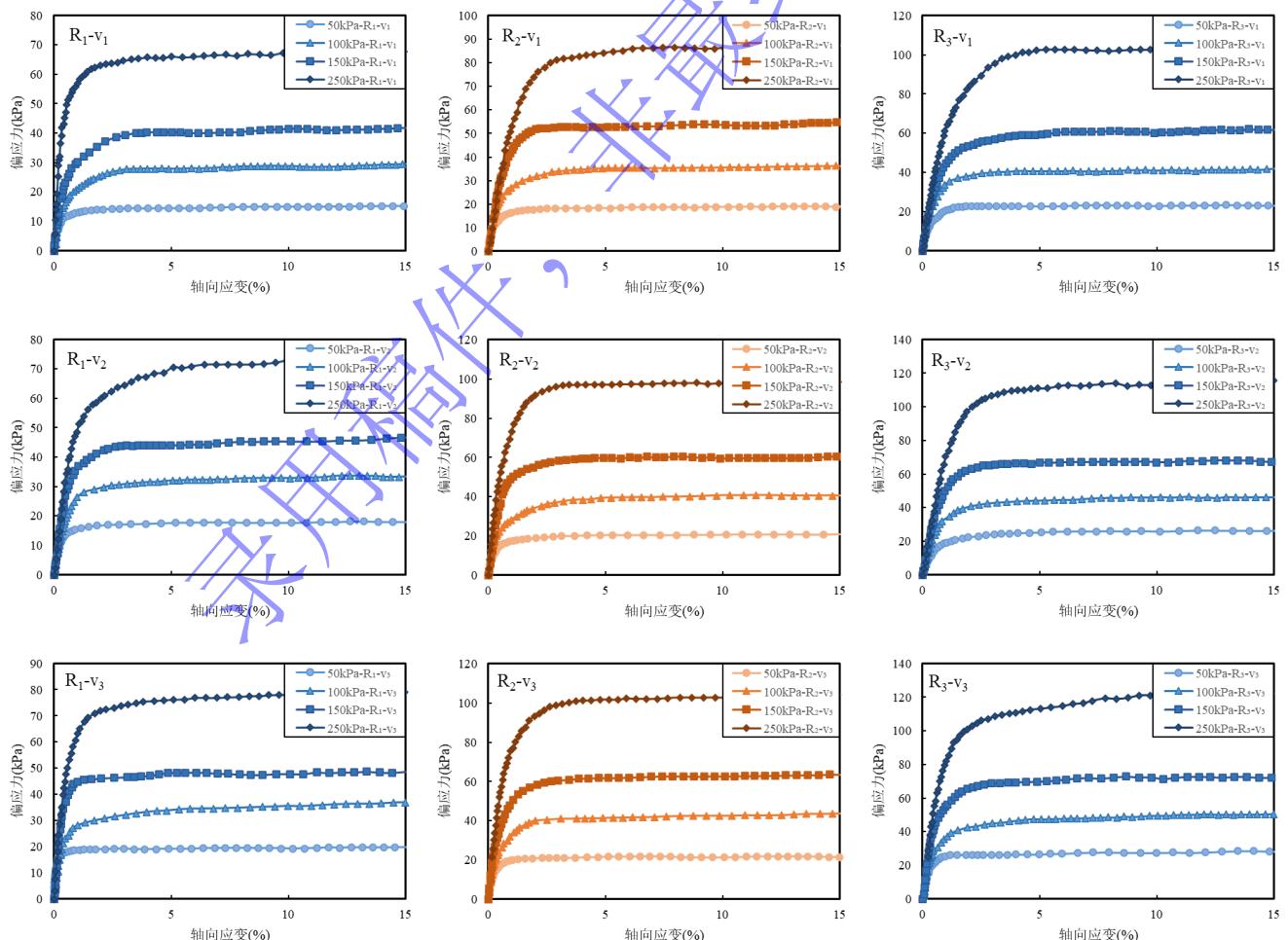


图 2 三轴固结不排水试验界面偏应力-轴向应变曲线

Fig.2 Deviator stress-axial strain curve of interface triaxial consolidated undrained tests

表 3 界面三轴固结不排水试验破坏时的偏应力 (单位: kPa)

Table 3 Deviator stress during interface failure in triaxial consolidated undrained tests (unit: kPa)

试验工况	$R_1v_1$	$R_1v_2$	$R_1v_3$	$R_2v_1$	$R_2v_2$	$R_2v_3$	$R_3v_1$	$R_3v_2$	$R_3v_3$
50kPa	15.2	18.1	19.7	19.1	20.9	21.9	23.2	26.4	28.6
100kPa	29.3	33.3	36.9	36.2	40.8	43.8	42.0	46.5	50.7
150kPa	41.7	46.7	47.7	54.7	60.7	63.6	62.2	68.0	72.3
250kPa	67.9	74.4	79.1	87.6	98.6	104.	105.	115.	122.

在相同固结压力下, 当组合试样剪切轴向应变小于 1% 时, 不同剪切速率和不同结构面粗糙度下的偏应力与轴向应变的增长速率基本相同, 认为此时界面处于弹性阶段, 土体还没有在界面上发生整体滑动, 界面抗剪强度主要由土体与结构面之间的粘结力提供 [15]。当轴向应变达到 1% 以后, 偏应力增长速度逐渐减缓, 土体开始发生塑性变形, 结构面粗糙度对试样偏应力随轴向应变的影响开始显现。结构面粗糙度越大, 偏应力越往上提高, 当结构面粗糙度较小时, 偏应力较早的进入平稳阶段。当轴向应变达到 4% 时, 几乎所有工况下的偏应力都达到稳定阶段, 认为此时土体开始在结构面上发生整体滑动。同时, 由于采用正

常固结状态的重塑土体, 结构性较弱, 其应力-应变表现更加接近于摩擦特性, 因此界面软化现象不明显。

取应变 10% 对应的偏应力为组合试样总应力抗剪强度破坏时的偏应力, 表 3 列出了各工况下界面三轴固结不排水剪切试验破坏时的偏应力。随着围压从 50 kPa 上升至 250 kPa, 偏应力呈现显著增加的趋势, 表明界面在高围压下具有更高的承载能力。此外, 在相同围压条件下, 加载速率和界面粗糙度的增加导致偏应力上升。值得注意的是, 在高围压下, 加载速率与界面粗糙度的叠加效应更加显著, 尤其是在 250 kPa 围压下, 随着粗糙度和加载速率的增加, 偏应力的增幅尤为突出。这表明在高应力水平下, 材料的非线性变形机制更加活跃。因此, 在实际工程应用中, 需综合考虑围压、加载速率及界面粗糙度这三者的联合影响, 以准确评估材料在复杂加载条件下的力学表现。

## 2.2 孔隙水压力-轴向应变曲线分析

根据测得的界面孔隙水压力, 绘制了在不同围压、结构面粗糙度和剪切速率下的饱和黏土-结构物界面三轴剪切不排水试验的孔隙水压力-轴向应变曲线。

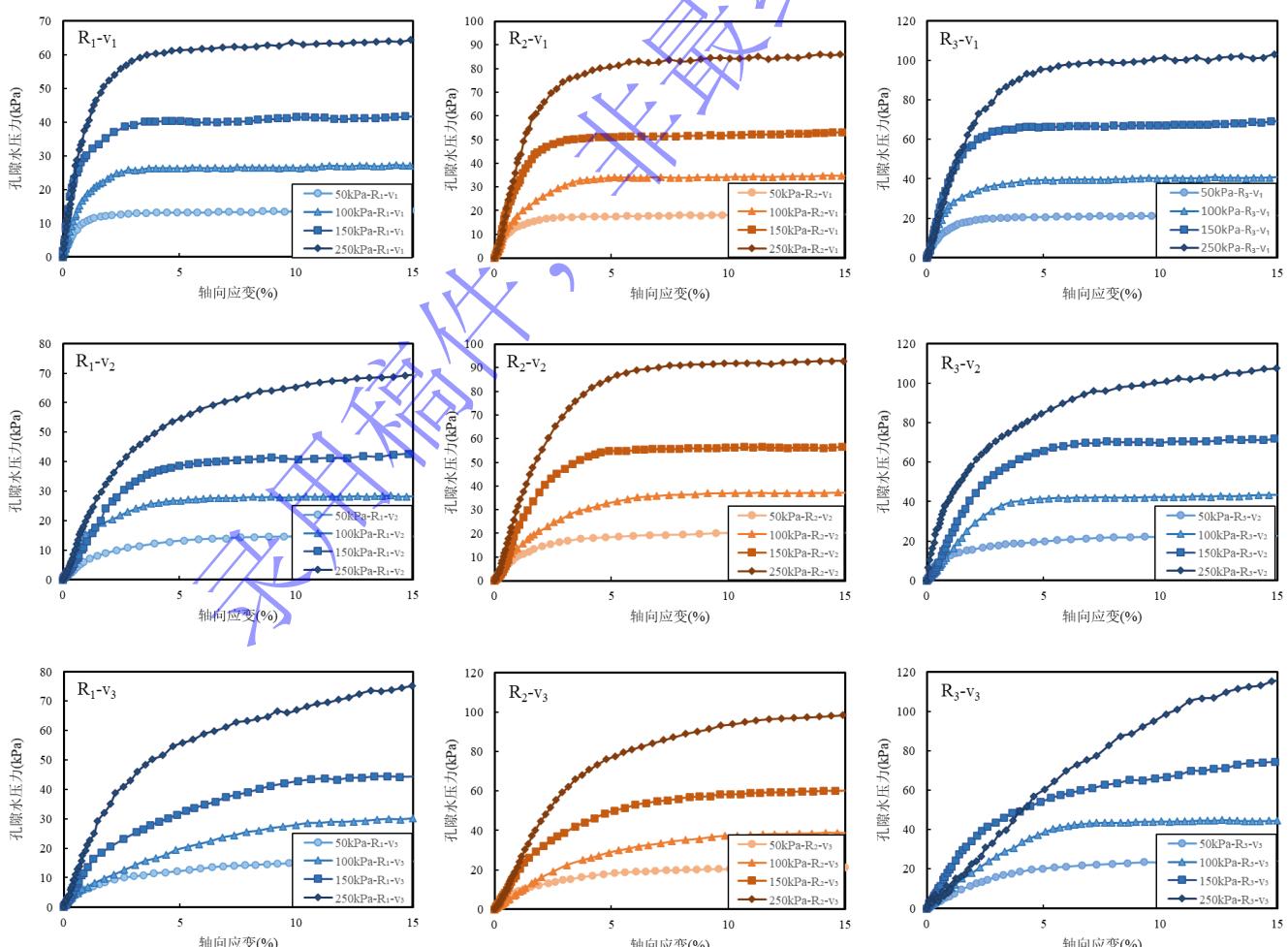


图 3 三轴固结不排水试验界面孔隙水压力-轴向应变曲线

Fig.3 Relationship between pore water pressure-axial strain on interface of triaxial consolidated undrained test

图 3 表明, 在剪切速率一定时, 界面上孔隙水压力随围压的增大而不断增大, 且不同围压和结构面粗糙度下的界面孔隙水压力-轴向应变曲线形状基本相同, 在加载初期, 界面孔隙水压力快速上升后, 逐渐稳定并缓慢增加。剪切速率对界面孔隙水压力随轴向应变的生成速率影响显著, 剪切速率 0.0022 mm/min 时, 孔隙水压力在轴向应变 4% 左右便达到稳定阶段; 剪切速率越大, 界面孔隙水压力越大, 达到稳定阶段所需的轴向应变越大, 孔隙水压力相比于偏应力的生

成具有明显的滞后性, 且剪切速率越大, 孔隙水压力发展的延迟性明显上升。这种结果主要是由于软黏土中孔隙水压力的黏滞特性所导致的<sup>[16]</sup>。界面在剪切过程中会产生孔隙水压力, 但孔隙水压力在界面上和试样土体内部的分布是不均匀的。当剪切速率越快时, 孔隙水压力显著累积, 在局部区域形成较高值, 土体内部孔隙水压力不均匀; 剪切速率足够慢时, 孔隙水压力有充分的时间扩散, 使得试样内部的孔隙水压力分布均匀。

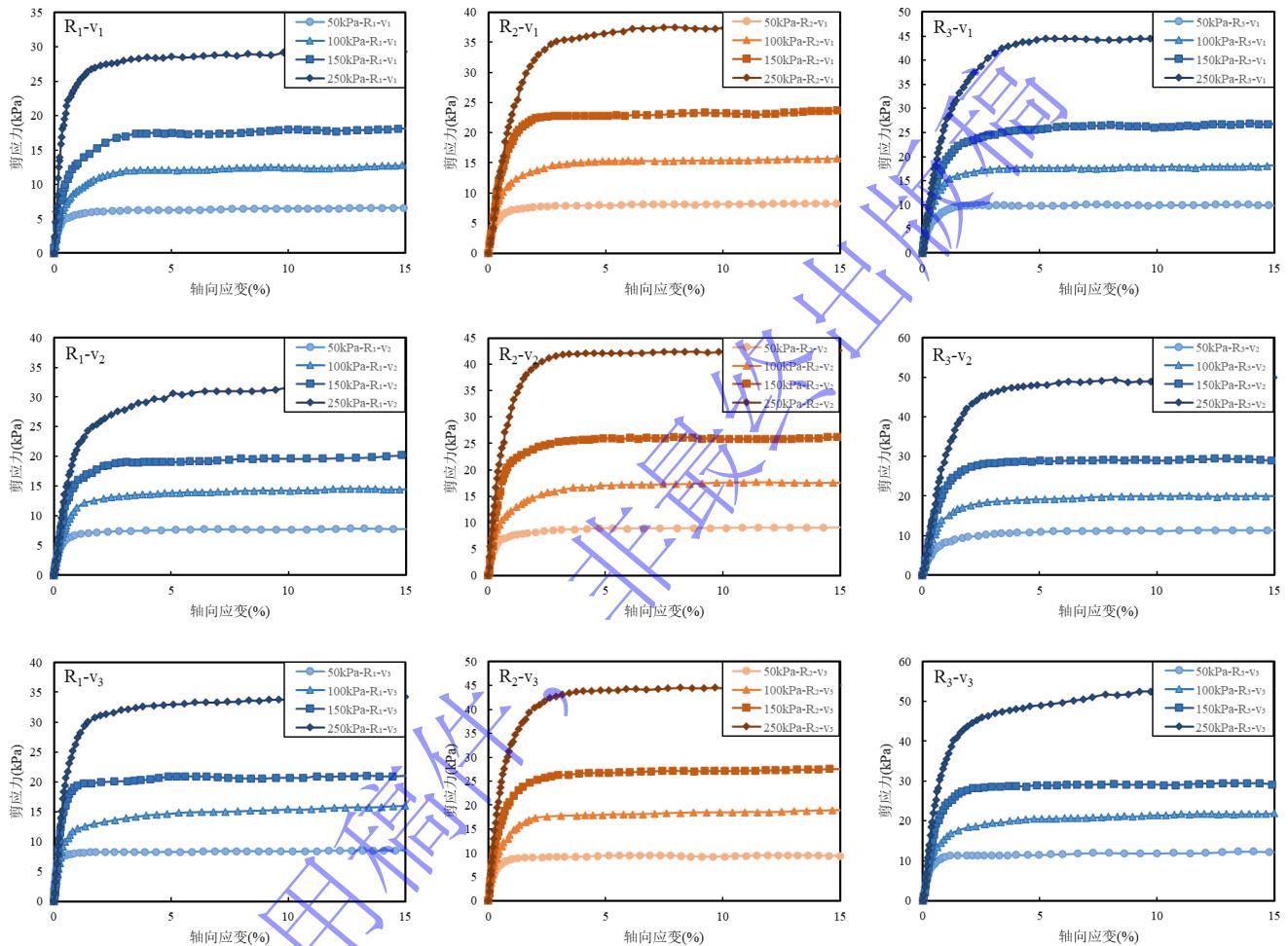


图 4 三轴固结不排水试验界面剪应力-轴向应变曲线

Fig.4 Shear stress-axial strain curve of interface for triaxial consolidated undrained tests

### 2.3 剪应力-轴向应变曲线分析

根据土体与结构物界面的应力状态, 如图 1(a)所示, 可知界面上剪应力  $\tau_n$  为:

$$\tau_n = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin 2\alpha \quad (2)$$

根据试验结果, 绘制了在不同围压、结构面粗糙度和剪切速率下的饱和黏土-结构物界面三轴剪切不排水试验的剪应力-轴向应变曲线, 如图 4 所示。由于界面剪应力与试样整体偏应力满足数学比例关系, 因此界面剪应力-轴向应变曲线与偏应力-轴向应变曲线形状近似。

图 4 表明, 在土体与结构物接触过程中, 界面剪应力与轴向应变之间存在显著的正相关关系。在达到稳定时, 随着固结压力和剪切速率的增加, 界面剪应力也相应增大。研究表明, 不同工况条件下, 界面剪应力与轴向应变之间的生成规律基本一致, 说明这一现象具有普遍性。当剪切轴向应变小于 1% 时, 界面表现出明显的弹性特征, 此时抗剪强度主要由土体的黏结力所提供<sup>[14]</sup>。而一旦轴向应变超过 1%, 土体便开始进入塑性变形阶段。此外, 结构面粗糙度对界面剪应力具有显著影响, 粗糙度越大, 抗剪强度越强。当轴向应变达到 3% 时, 几乎所有工况下的界面剪应力

都达到稳定阶段，土体在结构面上开始表现出整体滑动的趋势，表现为应变非软化型。因此，可以得出结论，土体在与结构面接触时的剪应力特性受到多个因素的影响，包括结构面粗糙度、固结压力和剪切速率。

表4为各个工况下界面三轴固结不排水剪切试验界面剪应力，可得界面剪应力随剪切速率的增大而增大。随着剪切速率的增加，界面剪应力达到稳定所需要的轴向应变也随之增大。这意味着，土体在经历快速剪切时，其内部颗粒的重新排列和适应需要更多的时间才能达到稳定，这主要是由于剪切速率的变化改变界面处土颗粒与结构物表面的咬合作用特性，进而影响了界面整体的力学性能表现。

表4 试验界面破坏时的剪应力（单位：kPa）

Table 4 Shear stress at failure of interface (unit: kPa)

工况组合	$v_1 R_1$	$v_1 R_2$	$v_1 R_3$	$v_2 R_1$	$v_2 R_2$	$v_2 R_3$	$v_3 R_1$	$v_3 R_2$	$v_3 R_3$
50 kPa	6.6	8.3	10.1	7.9	9.1	11.5	8.5	9.5	12.4
100 kPa	12.8	15.6	18.2	14.6	17.6	20.1	16.0	18.7	22.0
150 kPa	18.1	23.6	26.9	20.2	26.2	29.5	21.1	27.6	31.4
250 kPa	29.4	38.0	45.8	30.2	42.7	50.2	34.3	45.1	53.1

## 2.4 有效应力路径曲线分析

图5为饱和黏土-结构物界面三轴固结不排水剪切试验的界面有效应力路径曲线。

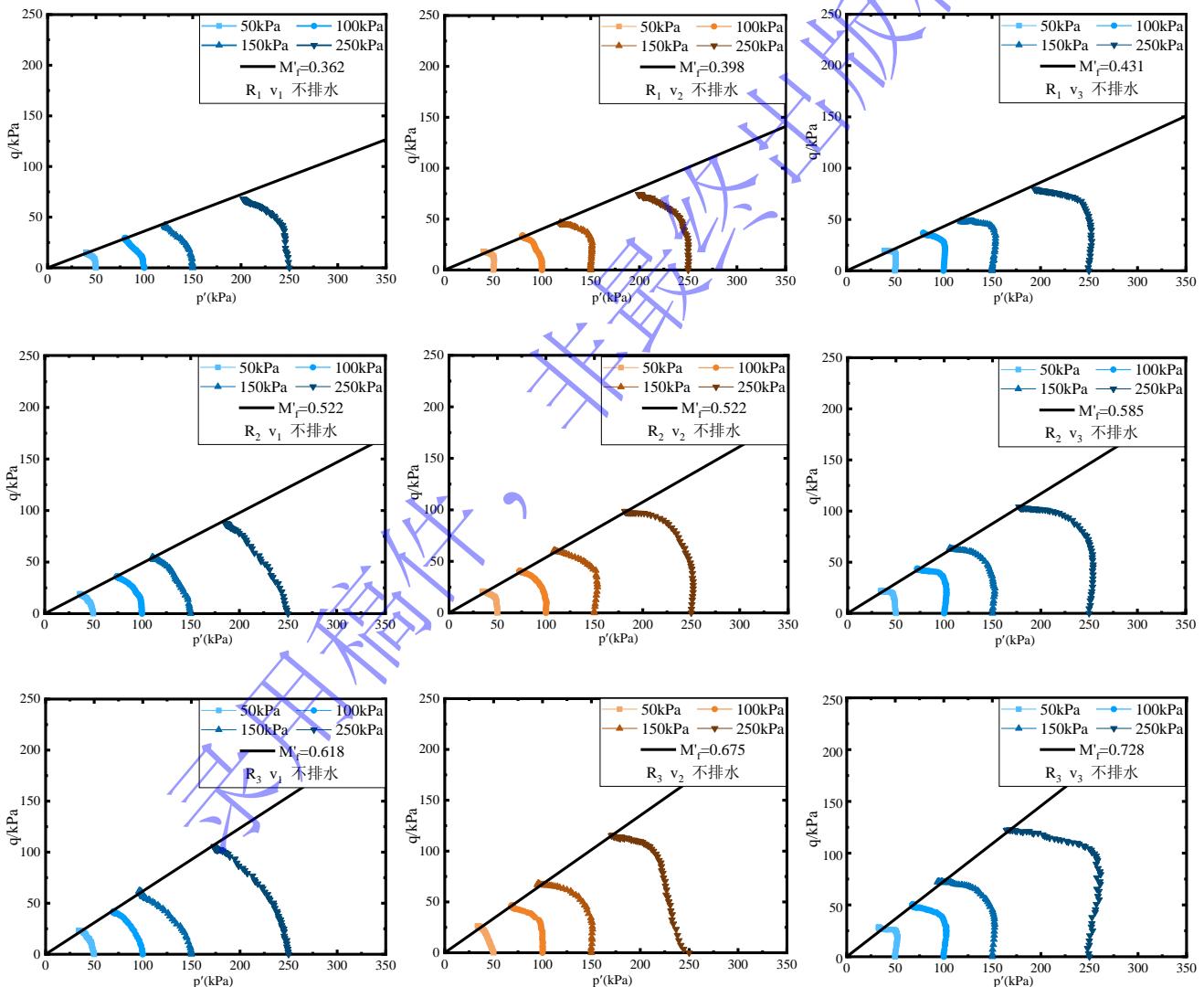


图5 三轴固结不排水剪切试验界面有效应力路径曲线

Fig.5 Effective stress path curve of interface triaxial consolidated undrained shear tests

图5表明，不同工况下有效应力路径达到临界状态线 $M'_f$ 时即停止，不会发生偏转、硬化或者软化现象，有效应力路径与总应力路径的差值(孔隙水压力)随偏应力的增加不断增加。相同剪切速率下的有效应

力路径基本相似呈“反C”型，不同剪切速率下的有效应力路径有所不同，相比于剪切速率 $v_1$ ，剪切速率 $v_3$ 时，有效应力路径在剪切初期有一段竖直往上的增长，后面逐渐往右偏转；剪切速率 $v_2$ 则介于两者中间。

在相同结构面粗糙度和剪切速率下的有效应力路径曲线形状基本相同, 该结果证明了正常固结黏土  $p'$ - $q'$ - $e'$  的唯一性<sup>[17]</sup>, 即对具有同样固结密度 ( $e$  相同) 的土样进行不排水剪切试验时, 由于剪切过程中土体体积  $V$  保持不变, 物态边界对应唯一有效应力路径。

### 3 讨 论

根据土体与结构物界面上应力状态, 具体推导见苏新斌等人<sup>[13]</sup>的研究, 可知界面上应力比  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{\tau_n}{\sigma_n} \quad (3)$$

界面滑动破坏时的有效应力比  $\eta'_f$  为:

$$\eta'_f = \frac{\tau_{n,f}}{\sigma'_{n,f}} \quad (4)$$

$\tau_{n,f}$  与  $\sigma'_{n,f}$  分别为界面滑动破坏时的剪应力与有效正应力;

界面滑动破坏时的总应力比  $\eta_{f,cu}$  为

$$\eta_{f,cu} = \frac{\tau_{n,f}}{\sigma_{n,f}} \quad (5)$$

$\sigma_{n,f}$  为界面滑动破坏时的正应力;

界面滑动破坏时的有效应力摩擦角  $\varphi'_f$  为:

$$\varphi'_f = \arctan \eta'_f \quad (6)$$

界面滑动破坏时的总应力摩擦角  $\varphi_{f,cu}$  为:

$$\varphi_{f,cu} = \arctan \eta_{f,cu} \quad (7)$$

#### 3.1 粗糙度对界面强度特性的影响

考虑到界面摩擦角和土体内摩擦角之间的联系, 使用归一化有效参数( $E$ )来进一步分析界面强度<sup>[14]</sup>, 使用以下等式进行计算:

$$E = \frac{\tan \varphi_{int}}{\tan \varphi_{soil}} \quad (8)$$

式中,  $\varphi_{int}$  为界面内摩擦角,  $\varphi_{soil}$  为土体内摩擦角, 包括有效应力摩擦角和总应力摩擦角。等式要求在相同的剪切速率下获得界面和纯土体两种摩擦角。在纯土试样的固结不排水三轴试验中测得在  $v_1$ 、 $v_2$  和  $v_3$  下纯黏土的有效应力摩擦角分别为  $21.8^\circ$ 、 $23.2^\circ$ 、 $24.7^\circ$ , 总应力摩擦角分别为  $12.2^\circ$ 、 $13.5^\circ$ 、 $14.9^\circ$ 。

表 5 三轴固结不排水剪切试验界面破坏时总应力和有效应力摩擦角(单位:  $^\circ$ )

Table 5 Total stress and effective stress friction angle of interface failure in triaxial consolidated undrained shear test (unit:  $^\circ$ )

根据表 5 中不同结构面种粗糙度、不同围压下的界面有效应力摩擦角  $\varphi'_f$ 、总应力摩擦角  $\varphi_{f,cu}$ , 绘制了剪切速率  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  下, 三轴固结不排水剪切试验界面有效应力摩擦角和总应力摩擦角的归一化有效参数  $E$  随结构面粗糙度变化趋势曲线。并通过拟合得到饱和黏土与结构物界面有效应力摩擦角和总应力摩擦角的归一化有效参数  $E$  与结构物粗糙度  $R$  之间的经验公式, 如图 6(a)、6(b)所示。

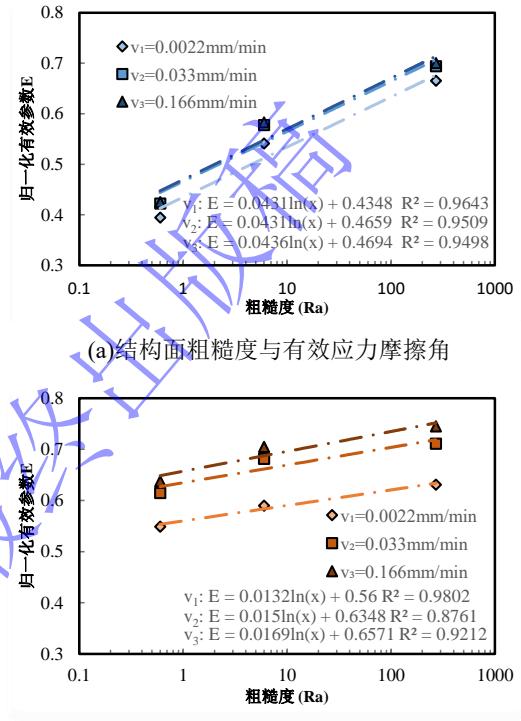


图 6 结构面粗糙度-归一化有效参数关系曲线  
Fig.6 Relationship curve of roughness-friction angle

图 6(a)与图 6(b)表明:  $E$  和  $\ln(R)$  呈线性关系, 即归一化有效参数与结构面粗糙度呈对数增长型关系, 这与 Liao 等人<sup>[14]</sup>研究试验结果基本相同, 其研究表明归一化界面摩擦因数与  $\ln(R)$  ( $R$  为结构面的粗糙度) 呈线性关系。

由上可知, 结构面粗糙度对界面强度特性有着明显的影响。当结构物表面光滑时, 饱和重塑 Speswhite 高岭土主要以团粒的形式存在; 当结构物表面粗糙度较小时, 饱和重塑 Speswhite 高岭土在结构面上发生剪切滑动时, 土体颗粒所受剪切作用主要限于界面附近, 饱和黏土与结构物界面之间的抗剪强度, 主要由土与结构物之间的黏聚力和滑动摩擦力提供。

相反, 当结构面粗糙时, 土体颗粒会被嵌入到缝隙中, 表面宏观凹槽和微观结构对黏土颗粒的约束作用越强, 增加了界面的抗剪强度。图 6 表明, 界面剪应力主要由高岭土与结构面的摩擦力、黏结力和部分土体剪切破坏产生, 随着结构面粗糙度的增加, 界面

的抗剪强度也随之增加。这表明，完全饱和重塑高岭土在缺乏各向异性和结构性特征的情况下，其界面抗剪强度主要受结构面粗糙度的影响，而结构面粗糙度通过约束黏土颗粒运动显著增强了界面的抗剪能力，从而影响了土体的稳定性和强度。

### 3.2 剪切速率对界面强度特性的影响

根据表 5 中  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  三种不同剪切速率，不同围压下，三轴固结不排水剪切试验的界面有效应力摩擦角  $\varphi'_f$ 、界面总应力摩擦角  $\varphi_{f,cu}$ ，绘制结构面粗糙度  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  下，界面有效应力摩擦角  $\varphi'_f$ 、总应力摩擦角  $\varphi_{f,cu}$  随剪切速率  $v$  的变化曲线，如图 7(a)、7(b)所示。并通过拟合得到饱和黏土与结构物界面有效应力摩擦角  $\varphi'_f$  和总应力摩擦角  $\varphi_{f,cu}$  与剪切速率  $v$  之间的经验公式。

图 7(a)表明： $\varphi'_f$  与  $\ln(v)$  呈线性关系，即界面有效应力摩擦角与界面剪切速率呈对数增长型关系，剪切速率越大，界面有效应力摩擦角  $\varphi'_f$  越大。图 7(b)表明： $\varphi_{f,cu}$  与  $\ln(v)$  呈线性关系，即界面滑动摩擦角与剪切速率呈对数增长型关系。

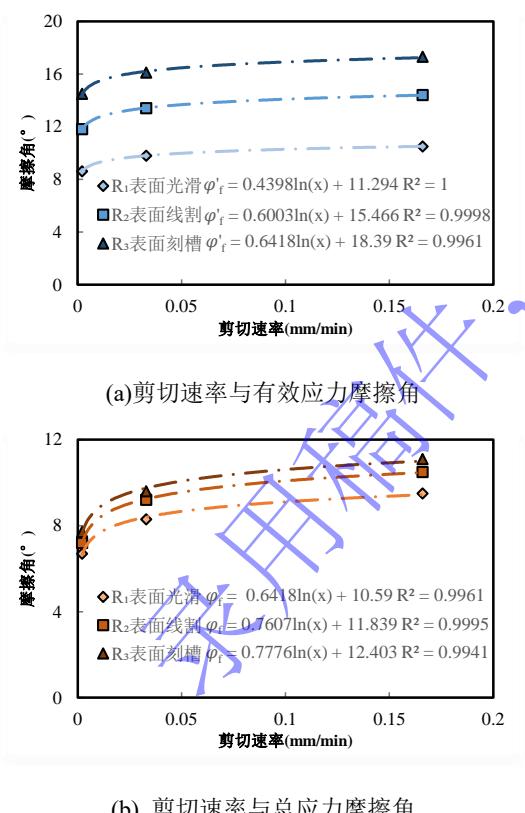


图 7 三轴固结不排水试验界面剪切速率-摩擦角关系曲线  
Fig.7 Relationship curve of shearing rates-friction angle of triaxial consolidated

由上可知，剪切速率对界面强度特性产生显著影响。试验结果表明，界面抗剪强度随剪切速率的增加而增加。而在传统界面直剪试验中，界面剪应力、应力比、摩擦角与剪切速率呈负相关关系，剪切速率越

快，界面剪应力、应力比和摩擦角越小<sup>[9]</sup>，这一现象与界面三轴固结不排水剪切试验完全相反。

这种差异主要是因为在不排水剪切试验中，剪切速率的变化不影响试验的排水条件，整个过程中界面始终处于不排水状态。在这种情况下，剪切速率的变化主要与土体的抗剪强度的应变速率效应相关。因此，界面三轴固结不排水剪切试验通过严格控制黏土的饱和度和剪切过程中的不排水条件，能够排除排水条件的影响，独立地探讨剪切速率对界面强度的作用。这为深入理解剪切速率如何影响土体和界面力学特性提供了一个重要的实验框架。

## 4 结 论

针对海洋吸力式基础界面强度问题，利用三轴仪在不排水条件下对饱和黏土的界面强度特性进行了深入分析，得到以下结论：

- (1) 通过严格控制试样饱和度与不排水状态，测量了饱和黏土与结构物界面的抗剪强度、孔隙水压力、摩擦角等关键参数，区分了速率与排水状态的耦合影响，揭示了完全不排水状态下剪切速率和结构面粗糙度对界面强度特性的影响。
- (2) 界面孔隙水压力随围压、粗糙度和剪切速率的增加而不断增大，达到稳定阶段所需的轴向应变越大，孔隙水压力相比于偏应力的生成具有明显的滞后性，且剪切速率越大，孔隙水压力发展的延迟性明显上升。
- (3) 不排水剪切条件下，结构面粗糙度和剪切速率与界面抗剪强度呈正相关。随着剪切速率和结构面粗糙度的增加，其对界面强度的影响逐渐减弱，并给出了归一化有效参数  $E$  与结构物粗糙度、界面摩擦角与剪切速率的拟合关系。

## 参 考 文 献

- [1] 李大勇, 侯新宇, 张雨坤, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1598-1607. (LI Da-yong, HOU Xin-yu, ZHANG Yun-kun, et al. Effects of relative densities on mechanical characteristics of interface between sand and suction caisson during penetration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(9): 1598-1607. (in Chinese))
- [2] 赵春风, 龚辉, 赵程, 等. 考虑法向应力历史的黏土-混凝土界面弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 848-855. (ZHAO Chun-feng, GONG Hui, ZHAO Cheng, et al. Elastoplastic analysis of interface between clay and concrete

- considering effect of normal stress history[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 848-855. (in Chinese))
- [3] 张冬霁, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及其应用[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(6): 65-69. (ZHANG Dong-ji, LU Ting-hao. Establishment and application of an interface model between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(6): 65-69. (in Chinese))
- [4] ZIOGOS A, BROWN M, IVANOVIC A, et al. Chalk-steel interface testing for marine energy foundations[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2017, **170**(3):285-298
- [5] 丁树云, 毕庆涛, 蔡正银, 等. 环剪仪的试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(S2): 197-201. (DING Shu-yun, BI Qing-tao, CAI Zheng-yin, et al. Test procedures for ring shear apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 197-201. (in Chinese))
- [6] 孔令伟, 熊春发, 郭爱国, 等. 海积软黏土的强度特性与桩土界面剪切速率效应[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(z2): 13-16. (KONG Ling-wei, XIONG Chun-fa, GUO Ai-guo, et al. Effects of shear rate on strength properties and pile-soil interface of marine soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(z2): 13-16. (in Chinese))
- [7] 王永洪, 张明义, 刘俊伟, 等. 黏性土中单桩贯入桩-土界面超孔压和土压测试现场试验[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(05): 950-958. (WANG Yong-hong, ZHANG Ming-yi, LIU Jun-wei, et al. Field tests on excess pore pressure and soil pressure of pile-soil interface for a single pile during pile-sinking in clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(5): 950-958. (in Chinese))
- [8] HAMMOUD F , BOUMEKIK A . Experimental study of the behaviour of interfacial shearing between cohesive soils and solid materials at large displacement[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2006, **7**(1): 63-80.
- [9] 李大勇, 张雨坤, 高玉峰, 等. 不同剪切速率下吸力基础-黏土界面剪切特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, **42**(01): 231-236. (LI Da-yong, ZHANG Yu-kun, GAO Yu-feng, et al. Shear behavior of suction foundation-clay interface under different shear rates[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, **42**(01): 231-236. (in Chinese))
- [10] MARTINEZ A, HENNING H. Shearing of clay-structure interfaces at varying deformation rates[C]. Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges, 2020.
- [11] 郑铮, 杨钢, 张世兴, 等. 深海沉积物-结构界面仪试验装置研发及其验证试验[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(1): 173-180. (ZHENG Zheng, YANG Gang, ZHANG Shi-xing, et al. Development and verification tests of deep-sea sediment-structure interface equipment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(1): 173-180. (in Chinese))
- [12] UESUGI M , KISHIDA H . Tests of interfaces between sand and steel in simple shear apparatus[J]. Geotechnique, 1987, **37**(1):45-52.
- [13] 苏新斌, 廖晨聪, 刘世奥, 等. 基于预制滑动面的饱和黏土-结构物界面强度特性三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(10): 2852-2860. (SU Xin-bin, LIAO Chen-cong, LIU Shi-ao, et al. Triaxial test for strength characteristics of saturated clay-structure interface based on prefabricated sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(10): 2852-2860. (in Chinese))
- [14] LIAO C, LIU S, XIA X. Triaxial Shear test for strength behavior of saturated sand-steel interface based on preformed failure plane[J]. Geotechnical Testing Journal, 2022, **45**(5): 1005-1029.
- [15] 于大伟. 波浪-海床-结构物耦合数值模型研究与应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021. (YU Da-wei. Study and Application of Integrated Numerical Model for Wave-Seabed-Structure Interaction[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021. (in Chinese))
- [16] 任玉宾. 强结构性深海软黏土循环软化和触变硬化机制探究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2021. (REN Yu-bin. Study on the mechanism of cyclic softening and thixotropy hardening of strong structural deep-sea soft clay[D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese))
- [17] 胡恒东. 考虑加载速率与应力路径影响的海积软土力学特性试验研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2014. (HU Heng-dong. Experimental study on mechanical properties of marine soft soil considering the influences of loading rate and stress path[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2014. (in Chinese))