

# 考虑率效应的低应力下黏土-钢界面 剪切试验研究

王洪羽<sup>1,2</sup>, 国振<sup>1\*</sup>, 王会峰<sup>3</sup>, 雷震名<sup>3</sup>, 王臻魁<sup>2</sup>, 王立忠<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021;

3. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461)

**摘要:** 管-土界面的摩擦特性对海底管道在位稳定性影响极大。软黏土在我国海域分布广泛, 为探究管-黏土在低应力时的界面剪切特性, 自主研发了一套可以考虑低应力、率效应的界面剪切设备, 并开展了一系列黏土-钢界面剪切试验, 着重分析了法向应力和剪切速率对黏土-钢界面剪切行为的影响。试验结果表明, 界面峰值剪应力和残余剪应力均随着法向应力的增大而增大; 界面峰值剪应力和残余剪应力均随着剪切速率的增大而降低; 剪切速率最大时的界面峰值摩擦角和残余摩擦角均小于试验土体内摩擦角, 剪切破坏发生在界面上而非土体内部。本文探明了低应力下法向应力和剪切速率对黏土-钢界面强度的影响规律, 可为海底管道设计提供参考。

**关键词:** 黏土; 低应力; 剪切速率; 界面剪切; 界面剪切强度; 界面摩擦系数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)04-0279-06

## Experimental study on clay-steel interface shear characteristics considering low stress and rate effect

WANG Hong-yu<sup>1,2</sup>, GUO Zhen<sup>1\*</sup>, WANG Hui-feng<sup>3</sup>, LEI Zhen-ming<sup>3</sup>, WANG Zhen-kui<sup>2</sup>,  
WANG Li-zhong<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China;

3. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** The frictional characteristics of the interface between the pipe and soil have a significant impact on the in-situ stability of submarine pipelines. Soft clay is widely distributed in coastal areas of our country. In order to investigate the interface shear characteristics between pipes and clay under low-stress conditions, a self-developed interface shear apparatus was designed to consider low stress and rate effects. A series of clay-steel interface shear tests were conducted, with a particular focus on analyzing the influence of normal stress and shear rate on the shear characteristics of the clay-steel interface. The test results indicate that both the peak shear stress and residual shear stress of the interface increase with an increase in normal stress. However, as the shear rate increases, both the peak and residual shear stress of the interface decrease. When the shear rate is at its maximum, the peak friction angle and residual friction angle of the interface are lower than the internal friction angle of the tested soil. Thus, shear failure occurs at the interface rather than within the soil body. This study reveals the influence of normal stress and shear rate on the strength of the clay-steel interface under low-stress conditions, providing necessary insights for the design of submarine pipelines.

**Key words:** clay; low stress; shear rate; interface shear; interface shear strength; interface friction coefficient

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 海南省重大科技计划项目 (ZDKJ202019); 浙江省自然科学基金项目 (LR22E080005)。

作者简介: 王洪羽 (1998—), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事海底管道方面的研究工作。E-mail: wang\_hy98@163.com。

\*通信作者: 国振 (1982—), 男, 山东淄博人, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: nehzoug@163.com。

## 0 引言

高温高压海底管道整体屈曲 (Global Buckling) 根据屈曲方向不同, 可分为水平的侧向屈曲与竖直的隆起屈曲。管道侧向屈曲受到土体水平抗力和轴向摩擦抗力约束, 而隆起屈曲过程中受到土体竖向抗力和轴向摩擦抗力约束, 轴向摩擦抗力对侧向屈曲和隆起屈曲影响显著<sup>[1]</sup>。另外, 深海管道在位服役过程中, 将经历数次停产检修, 每次开井-关井的循环过程均会引起管道沿轴向的非均匀升温膨胀和冷却收缩, 进而导致管道可能朝某一固定方向整体滑移, 该现象称为管道轴向走管 (Pipeline Walking)<sup>[2-3]</sup>, 走管机制与管道的轴向摩擦抗力息息相关。因此, 管-土界面的摩擦特性影响着管道的在位稳定性<sup>[4]</sup>。

管-土界面是由管道与土体接触面及附近土体薄层构成, 其强度的发挥机制受到结构面粗糙度、法向应力等因素影响。针对这些因素, 学者们通常采用界面直剪试验进行研究。POTYONDY<sup>[5]</sup>是最早开展结构-土界面剪切试验的学者之一, 其利用应力应变控制式的界面直剪仪分析了界面摩擦角和黏聚力的变化规律。UESUGI 和 KISHIDA<sup>[6]</sup>通过试验研究了砂土的中值粒径、砂土类型对界面特性的影响。VANGLA 和 LATHA GALI<sup>[7]</sup>利用界面直剪仪研究了不同粒径砂颗粒与不同加筋材料之间的界面剪切特性, 结果表明颗粒粒径对界面强度影响显著。HAN 等<sup>[8]</sup>同样通过界面直剪试验研究了界面粗糙度、颗粒级配、颗粒形状对界面特性的影响, 结果表明, 界面粗糙度对界面强度具有显著影响, 不规则形状颗粒的界面摩擦角更大。方敏慧等<sup>[9]</sup>利用自主研发的界面直剪仪研究了不同法向刚度对钙质砂-结构界面剪切特性的影响。

对于黏土-结构界面剪切特性, TAHA和 FALL<sup>[10]</sup>研究了粗糙度和干密度对界面强度的影响, 试验结果表明界面强度随着粗糙度和干密度的增大而增大。MARTINEZ和STUTZ<sup>[11]</sup>研究了剪切速率和超固结比对界面强度的影响, 发现界面强度随着剪切速率的增大而减小, 其与孔压消散程度息息相关。YAZDANI等<sup>[12]</sup>通过温控界面直剪仪开展了一系列温度影响下的界面剪切试验, 结果表明温度会影响黏土-结构界面的摩擦系数。MAGHSOODI等<sup>[13]</sup>研究了温度对黏土-结构界面循环剪切效应的影响, 发现温度升高后, 界面破坏

所需的循环次数增多。

综上, 土-结构界面剪切特性已经通过各类界面直剪试验得到了较为广泛的研究。然而, 在这些研究中, 施加的法向应力一般在 50 kPa 以上<sup>[11-13]</sup>。而对于裸置在海床上或者埋置于海床下的海底管道, 其所受到的法向应力往往较低, 甚至可能只有几千帕。鉴于此, 本文针对低应力下黏土-结构界面剪切特性, 自主研发了一套新型界面剪切设备, 并基于该设备, 开展了不同法向应力和不同剪切速率下的界面剪切试验, 分析了其对界面强度和界面摩擦角的影响规律。

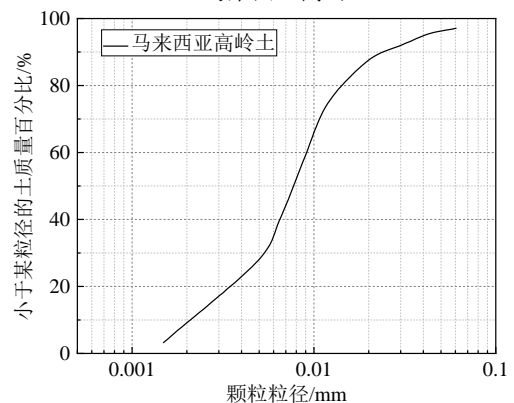
## 1 试验概述

### 1.1 试验材料

本试验采用马来西亚高岭土 (图 1 所示), 其矿物成分主要由高岭石、伊利石和蒙脱石组成。取出部分高岭土粉进行颗粒成分分析, 得到高岭土的黏粒 ( $d \leq 0.005 \text{ mm}$ ) 含量为 64.9%, 粉粒 ( $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.075 \text{ mm}$ ) 含量为 35.1%, 砂粒 ( $d \geq 0.075 \text{ mm}$ ) 含量为 0%。液塑限联合测定仪测定得到高岭土的液限  $\omega_L=54\%$ , 塑限  $\omega_P=15\%$ , 塑性指数  $I_p=39$ 。



(a) 马来西亚高岭土



(b) 级配曲线

图 1 试验用土

Fig. 1 Testing soil

### 1.2 试验装置

自主设计一套可考虑低应力、应变率效应的界面剪切仪 (如图 2 所示), 包括剪切模块、剪切控制模块、低应力侧向力控制模块以及数据采集设备。

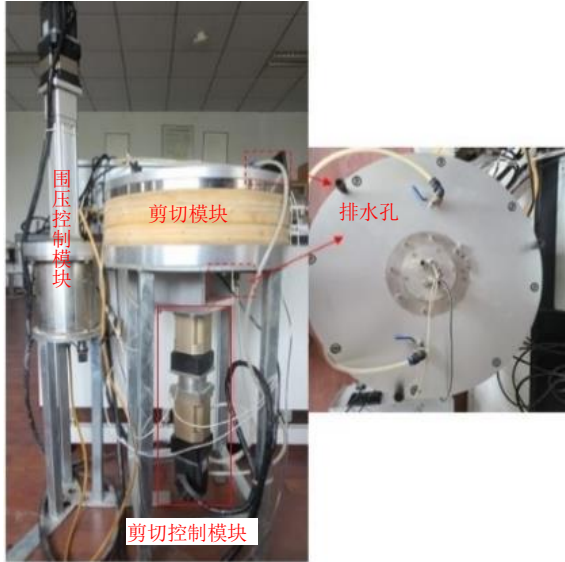


图 2 试验设备  
Fig. 2 Test equipment

剪切模块包括扭剪桶、模型桶盖、模型桶底板、模型桶、压力水囊、水囊进水口、排水孔和伺服电机。压力水囊环绕模型桶侧壁, 用于施加侧向围压, 侧向围压施加范围为 0~50 kPa。模型桶盖及底板各对称布置两排水孔以实现试验土体双面排水, 排水孔内嵌土工布。模型桶内为一外直径 800 mm、内直径 100 mm、高 100 mm 的空心圆柱, 用于装载试验土体。扭剪桶为位于设备中心的圆柱体, 直径为 100 mm, 下方与剪切控制模块连接。

剪切控制模块由扭矩传感器、减速器固定板、伺服减速器以及剪切伺服电机组成。当剪切控制模块接收到输入的剪切速率 (mm/s) 信号后, 将其转化为角速度 (rad/s) 带动扭剪桶旋转, 进而与模型桶中土体发生界面剪切。而在扭剪桶旋转过程中受到的环向抗力 (N·m) 则会被扭矩传感器识别, 在数据采集设备中转换成界面剪切力 (Pa) 输出。扭矩传感器的量程为 0~300 N·m。

低应力侧向力控制模块包括侧压伺服电机、水压室、活塞缸、进水管路。该模块通过进水管路与剪切模块的压力水囊连接, 当侧向伺服电机接收到控制设备输入的围压时, 会精准地将活塞缸中的水压入压力水囊, 进而实现在试验土样侧向施加围压的目的。侧向压力的控制范围为 0~50 kPa。

### 1.3 试验流程

(1) 土样制备: 根据一般做法, 将高岭土粉与水按照质量比 1:2 $\omega_L$  进行混合, 倒入真空搅拌机内抽真空搅拌 6 h, 使制备土样完全饱和。本文中抽真空泵设置的起止气压为 -85 kPa 和 -90 kPa。然后, 将制备好的土样倒入剪切仪的空腔中<sup>[14]</sup>。

(2) 土体固结: 按照试验要求施加相应围压, 如表 1 所示。试验选用的土体在常温 (20°C) 下的固结系数  $C_v=0.00286 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。计算固结度的公式如下所示:

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad (1)$$

$$U(t) = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{H^2}} \quad (2)$$

式中:  $T_v$  为时间因数;  $C_v$  为固结系数;  $t$  为固结时间;  $H$  为排水路径长度, 本试验为双面排水, 取土体高度的一半;  $U(t)$  为固结度。

本试验中土样高度为 10 cm, 因此  $H$  为 5 cm, 固结时间为 4 h, 因此, 计算得到固结度为 98.6%, 满足试验要求。

表 1 试验加载方式  
Table 1 Loading method of tests

组别	剪切速率/(mm/s)	围压/kPa
1		10
2	0.000 3	15
3		20
4		10
5	0.001	15
6		20
7		5
8		10
9	0.01	15
10		20
11		25
12		30
13		10
14	0.1	15
15		20
16		10
17	0.3	15
18		20

(3) 界面剪切: 根据表 1 中试验工况施加对应剪切速率。在本试验中, 最大剪切速率为 0.3 mm/s, 最小剪切速率为 0.000 3 mm/s, 相差

1 000 倍, 可以使得黏土-结构界面在最大和最小剪切速率工况下接近完全不排水或完全排水状态<sup>[11]</sup>。本文选取的最大剪切位移为 5 mm。在剪切过程中, 施加的围压保持不变, 为常应力状态。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同法向应力

为探究法向应力对界面剪应力的影响, 在剪切速率为 0.01 mm/s 下, 进行了不同法向应力 (5 kPa、10 kPa、15 kPa、20 kPa、25 kPa、30 kPa) 下的界面剪切试验, 试验结果如图 3 所示,  $\tau$  为剪切应力,  $\sigma_v$  为法向应力。

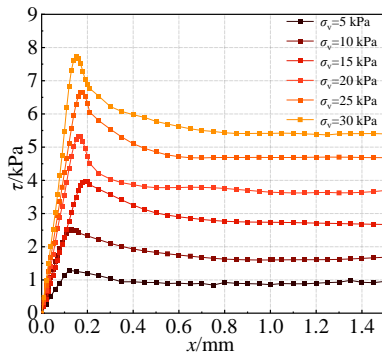


图 3 不同法向应力下的剪切应力

Fig. 3 Shear stress under different normal stresses

可以发现, 在不同法向应力下, 剪应力-剪切位移曲线均具有明显的峰值应力和残余应力, 说明黏土-结构界面在剪切过程中发生了应变软化, 并且应变软化现象随着法向应力的增大而增大。界面剪切的初始加载刚度随着法向应力的增大而增大。在不同法向应力下, 界面峰值剪应力分别为 1.29 kPa、2.51 kPa、3.98 kPa、5.42 kPa、6.65 kPa、7.73 kPa, 界面残余剪应力分别为 0.92 kPa、1.68 kPa、2.68 kPa、3.66 kPa、4.70 kPa、5.41 kPa, 如表 2 所示。

表 2 不同法向应力下的界面剪应力

Table 2 Interface shear stresses under different normal stresses

法向应力/kPa	$\tau_{peak}$ /kPa	$\tau_{res}$ /kPa
5	1.29	0.92
10	2.51	1.68
15	3.98	2.68
20	5.42	3.66
25	6.65	4.70
30	7.73	5.41

当法向应力从 5 kPa 增大至 30 kPa, 峰值剪应力和残余剪应力分别增大 415%、488%。说明峰值

剪应力和残余剪应力都随着法向应力的增大而增大。除此之外, 发挥至峰值剪应力所需的剪切位移在 0.1~0.2 mm, 达到残余剪应力所需的剪切位移为 0.4~0.7 mm。

将不同法向应力下的峰值剪应力和残余剪应力绘制在  $\tau$ - $\sigma_v$  坐标系下, 可以得到峰值摩擦角为 14.57°, 残余摩擦角为 10.51° (见图 4)。

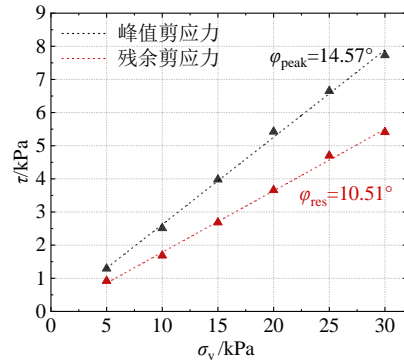


图 4 界面峰值和残余摩擦角

Fig. 4 Interface peak and residual friction angles

### 2.2 不同剪切速率

界面剪切强度除了受到法向应力的影响, 也会受到剪切速率的影响。一些学者也针对剪切速率开展了相关研究。一般认为, 对于正常固结 (NC) 土, 当剪切速率足够低, 土体处在完全排水状态, 此时固结完成, 无超孔压累积; 随着剪切速率提高, 土体进入部分排水状态, 固结仅部分完成; 当剪切速率足够大时, 土体处在完全不排水状态, 土体来不及固结并伴随超孔压的累积<sup>[15-18]</sup>。3 种状态如图 5 所示。

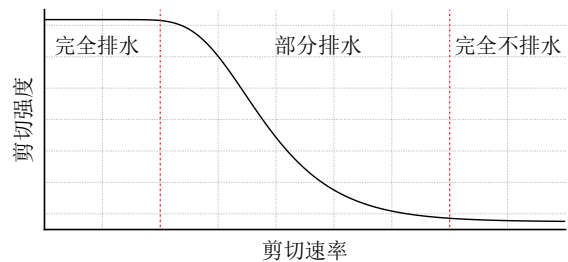


图 5 剪切速率对正常固结黏土的影响

Fig. 5 Influence of shear rate on NC clay

为进一步探究低应力下剪切速率对界面特性的影响, 分别在法向应力 10 kPa、15 kPa、20 kPa 下, 进行了剪切速率为 0.000 3 mm/s、0.001 mm/s、0.01 mm/s、0.1 mm/s、0.3 mm/s 的剪切试验, 如表 1 所示。

图 6 为法向应力 15 kPa 时, 不同剪切速率下界面剪应力的变化规律。可以发现, 当剪切速率从 0.000 3 mm/s 提高至 0.3 mm/s 的过程中, 界面峰值剪

应力分别为 6.17 kPa、6.11 kPa、3.98 kPa、3.14 kPa、2.67 kPa, 界面残余剪应力分别为 3.99 kPa、3.92 kPa、2.68 kPa、2.05 kPa、2.18 kPa, 如表 3 所示。并且初始加载刚度随着剪切速率的增大而降低。

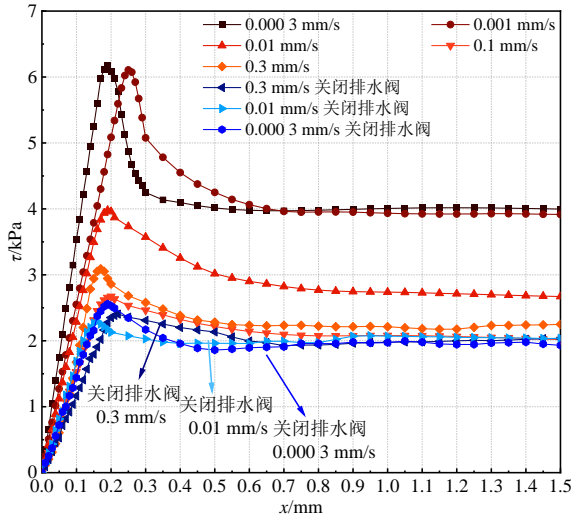


图 6 不同剪切速率下界面剪切应力

Fig. 6 Interface shear stresses under different shear rates

表 3 不同剪切速率下的界面剪应力

Table 3 Interface shear stresses under different shear rates

剪切速率/(mm/s)	$\tau_{peak}/kPa$	$\tau_{res}/kPa$
0.000 3	6.17	3.99
0.001	6.11	3.92
0.01	3.98	2.68
0.1	3.14	2.05
0.3	2.67	2.18

界面峰值和残余剪应力均随着剪切速率的增大而降低, 说明剪切速率越大, 界面土体固结越不充分, 超孔压累积, 有效应力降低, 导致剪切应力也随之降低。同样, 进行 3 组完全关闭排水阀的界面剪切试验, 界面剪切速率分别为 0.3 mm/s、0.01 mm/s、0.000 3 mm/s, 试验结果如图 6 所示。3 组试验在峰值和残余剪应力上均与开启排水阀时最大剪切速率的结果差距不大, 说明剪切速率对界面强度的主要影响因素是界面处超孔压的累积程度。

将不同剪切速率下的峰值剪应力和残余剪应力绘制在  $\tau-\sigma_v$  坐标系下, 可以得到当剪切速率分别为 0.000 3 mm/s、0.001 mm/s、0.01 mm/s、0.1 mm/s、0.3 mm/s 时, 界面峰值摩擦角分别为 22.78°、21.30°、14.57°、11.18°、10.43°, 残余摩擦角分别为 15.47°、14.41°、10.51°、8.55°、7.81°, 如表 4 所示。

表 4 不同剪切速率下的摩擦角

Table 4 Friction angles under different shear rates

剪切速率/(mm/s)	$\varphi_{peak}/(^{\circ})$	$\varphi_{res}/(^{\circ})$
0.000 3	22.78	15.47
0.001	21.30	14.41
0.01	14.57	10.51
0.1	11.18	8.55
0.3	10.43	7.81

在前人的研究中, 一般将界面破坏模式分为 3 类。第 1 类为剪切破坏发生在土与结构接触面处, 是直接滑动破坏, 此时界面抗剪强度最小; 第 2 类为剪切破坏发生在土体内部, 剪切过程中, 土体内部形成滑移剪切带; 第 3 类破坏介于前两者之间, 既与接触面滑移相关, 也与土体剪切变形有关。在本试验中, 经过固结不排水单剪试验, 测得的土体内摩擦角  $\varphi_{cu}$  为 16.69°, 剪切速率最大时 ( $v=0.3$  mm/s), 峰值和残余摩擦角分别为 10.43° 和 7.81°, 均小于  $\varphi_{cu}$ , 说明剪切破坏发生在界面上, 并不在土体内部, 如图 7~8 所示。

本文通过如下公式<sup>[11]</sup>, 计算界面强度随剪切速率的变化规律:

$$\alpha = \alpha_d - (\alpha_d - \alpha_u) e^{-\ln(2) \sqrt{\frac{v_{50}}{v}}} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  定义为界面摩擦系数, 通过  $\tau/\sigma_v$  进行计算;  $\alpha_d$  为完全排水状态下的界面摩擦系数;  $\alpha_u$  为完全不排水状态下的界面摩擦系数;  $v_{50}$  为界面摩擦系数降低至  $(\alpha_d + \alpha_u)/2$  时对应的剪切速率。

根据试验数据拟合后的曲线如图 9 所示,  $\alpha_d$  为 0.282,  $\alpha_u$  为 0.118,  $v_{50}$  为 0.005 2 mm/s。

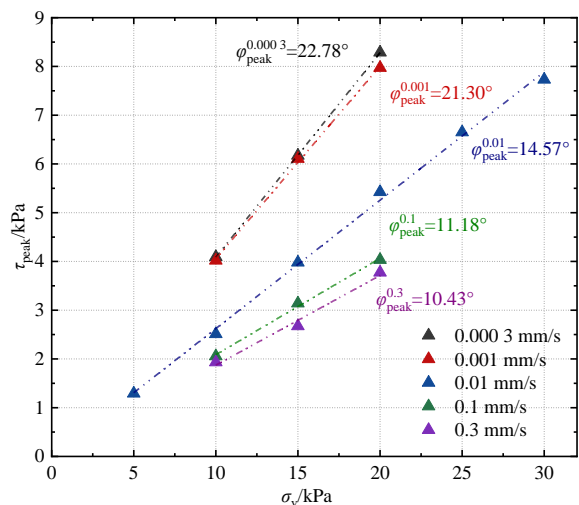


图 7 不同剪切速率下界面峰值摩擦角

Fig. 7 Interface peak friction angles under different shear rates

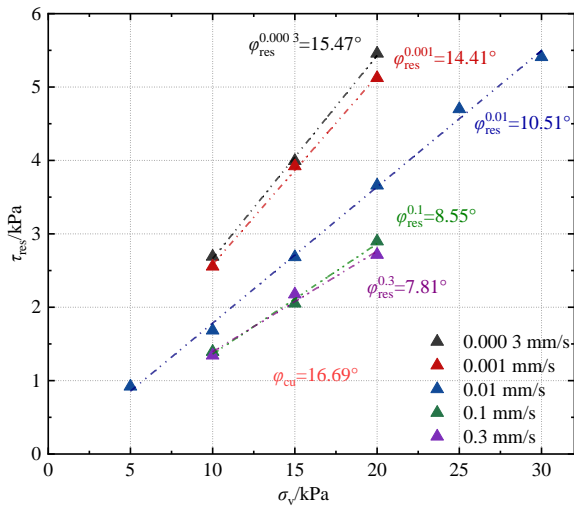


图8 不同剪切速率下界面残余摩擦角

Fig. 8 Interface residual friction angles under different shear rates

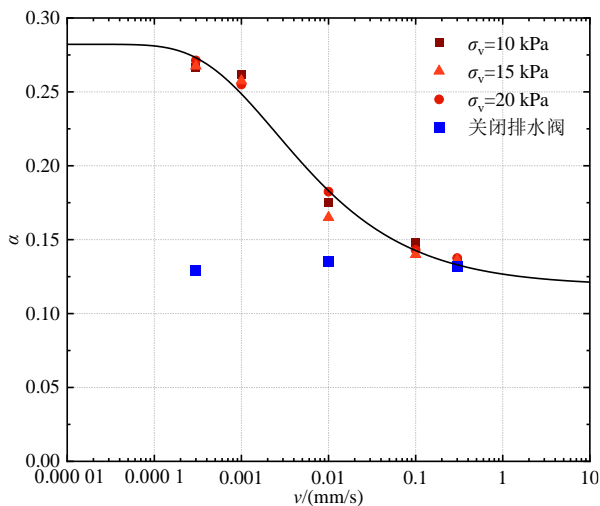


图9 不同剪切速率下界面摩擦系数

Fig. 9 Interface friction coefficients under different shear rates

### 3 结论

为探究低应力下率效应对软黏土-钢界面剪切特性的影响,自主设计了一套界面剪切仪,并开展了不同法向应力、不同剪切速率的界面剪切试验。主要结论如下:

(1) 界面峰值剪应力和残余剪应力均随着法向应力的增大而增大。

(2) 由于剪切速率增大会导致超孔压的累积,界面峰值剪应力和残余剪应力均随着剪切速率的增大而降低。

(3) 剪切速率最大时的界面峰值摩擦角和残余摩擦角均小于试验土体内摩擦角,剪切破坏发生在界面上而非土体内部。

本文探明了低应力下法向应力和剪切速率对界

面强度的影响规律,可为海底管道设计提供参考。

### 参考文献

- [1] WANG Z K, VAN DER HEIJDEN G H M, TANG Y G. Localised upheaval buckling of buried subsea pipelines[J]. Marine Structures, 2018, 60(2018): 165-185.
- [2] CARR M, SINCLAIR F, BRUTON D. Pipeline walking-understanding the field layout challenges and analytical solutions developed for the safebuck JIP[J]. SPE Projects, Facilities & Construction, 2008, 3(3): 1-9.
- [3] BRUTON D, CARR M, LESLIE D. Lateral buckling and pipeline walking, a challenge for hot pipelines[C]//Offshore Pipeline Technology Conference. Amsterdam, 2003.
- [4] 王宽君. 软土性状的温度效应[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. WANG Kuan-jun. Temperature dependent behavior of soft soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [5] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [6] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 139-149.
- [7] VANGLA P, LATHA GALI M. Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 254-268.
- [8] HAN F, GANJU E, SALGADO R, et al. Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand-steel interface friction angle[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(12): 04018096.
- [9] 方敏慧, 李雨杰, 沈侃敏, 等. 考虑法向刚度影响的钙质砂-钢界面剪切试验研究[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 17-24. FANG Min-hui, LI Yu-jie, SHEN Kan-min, et al. Experimental study on calcareous sand-steel interface shearing considering the effects of the normal stiffness[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 17-24.
- [10] TAHA A, FALL M. Shear behavior of sensitive marine clay-concrete interfaces[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(4): 644-650.
- [11] MARTINEZ A, STUTZ H H. Rate effects on the interface shear behaviour of normally and overconsolidated clay[J]. Géotechnique, 2019, 69(9): 801-815.

(下转第 304 页)