

DOI: 10.11779/CJGE202201017

# 深海沉积物 - 结构界面仪试验装置研发及其验证试验

郑 铮<sup>1</sup>, 杨 钢<sup>1</sup>, 张世兴<sup>1</sup>, 孙安元<sup>1</sup>, 孔纲强<sup>2</sup>, 王 谕<sup>1</sup>, 杨 庆<sup>1\*</sup>

(1 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 深海沉积物 - 结构界面特性是海洋平台结构设计与计算的关键之一; 然而, 目前针对深海沉积物 - 结构界面特性的试验装置与测试方法尚比较缺乏。基于大连理工大学“土工静-动力液压三轴剪切仪”, 改造三轴压力室, 研制一套深海沉积物 - 结构界面仪; 首先系统介绍了试验装置的研发思路、技术优势以及使用方法, 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, 验证所研制界面仪的可靠性和准确性; 续而初步探讨粗糙度、动载 ICSR 等因素对界面的力学性能和孔压发展的影响规律。研究结果表明: 静载作用下界面应力曲线随着粗糙度的增加由折线型转变为双曲线型, 剪切过程中近界面土体经历了先剪缩后剪胀的发展趋势, 界面破坏形式随粗糙度增大呈现由深海沉积物 - 结构表面向土体内的迁移现象; 动力循环荷载作用下粗糙度 II 结构物随循环周次增加呈上拔滑移状, 伴随着动孔压的累积界面呈现刚度弱化现象, 界面累积塑性应变在循环周次为 300 时趋于稳定, 最终归一化界面动孔压  $u/\sigma_3$  为 0.22; 该界面仪为深海沉积物 - 结构界面特性和机理研究、以及界面本构模型的建立提供有利支撑。

**关键词:** 界面仪; 深海沉积物; 动荷载; 界面孔压; 三轴试验

中图分类号: TU415 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)01-0173-08

作者简介: 郑 铮(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事深海沉积物 - 结构界面特性方面的研究工作。E-mail: zhengzheng6768@163.com。

## Development and verification tests of deep-sea sediment-structure interface equipment

ZHENG Zheng<sup>1</sup>, YANG Gang<sup>1</sup>, ZHANG Shi-xing<sup>1</sup>, SUN An-yuan<sup>1</sup>, KONG Gang-qiang<sup>2</sup>, WANG Yin<sup>1</sup>, YANG Qing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Key Laboratory

of Ministry of Education for Geotechnical Mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The characteristics of deep-sea sediment-structure interface is one of the key problems in the design and calculation of offshore platform structures. However, there is a lack of experimental devices and methods for the characteristics of sea sediment-structure interface. Based on the geotechnical static-dynamic hydraulic triaxial shear apparatus in Dalian University of Technology, a set of structure-soil interface instrument is developed. The development ideas, technical advantages and application methods of the test devices are introduced. The reliability is verified through the tests on the characteristics of undrained deep-sea sediment structure interface under static and dynamic loads. The influences of roughness and dynamic load ICSR on the mechanical behavior and the development law of pore pressure of the interface are preliminarily discussed. The results show that there is no obvious strain-softening phenomenon in the development of the interface stress during the installation process of low roughness pile, while the stress curve shows a trend of strain-hardening under the influences of high roughness. From the pore pressure accumulation curve, the interface soil has experienced the trend of shear shrinkage first and then dilatancy, and with the increase of roughness, the failure surface gradually migrates from the interface to the soil. Under the dynamic cyclic loads, roughness II structure presents pull-up sliding phenomenon with the increase of cyclic times, and along with the accumulation of dynamic pore pressure, the interface presents stiffness-weakening phenomenon. The cumulative plastic strain of the interface tends to be stable when the cyclic times is 300, and finally the normalized dynamic pore pressure of the interface is 0.22. The instrument provides a precondition for the studies on the characteristics and mechanism of deep-sea sediment-structure interface as well as the establishment of constitutive model for the interface.

**Key words:** interface instrument; deep sea sediment; dynamic load; interface pore pressure; triaxial test

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51890912); 国家自然科学基金项目(51639002); 中央高校基本科研业务费项目(DUT21LAB118)

收稿日期: 2021-02-09

\*通信作者(E-mail: qyang@dlut.edu.cn)

## 0 引言

中国油气资源开采逐渐由近浅海走向深远海, 对开采平台锚固系统也提出了更高的挑战。深海油气开发时, 大量使用鱼雷锚、平板锚等海底锚固结构; 锚固结构作为海洋平台的“根”, 一旦失稳破坏, 将造成重大经济损失乃至海洋环境灾难。深海沉积物-锚固结构界面特性, 是锚固结构承载性能与设计计算的关键; 因此, 非常有必要展开系统研究。

围绕土体-结构界面特性, 国内外相关学者展开了系列研究, 并取得一些有益成果。在相关传统界面仪器的应用中, 大多是采用改进的直剪仪<sup>[1-6]</sup>、扭剪仪<sup>[7]</sup>和单剪仪<sup>[8-10]</sup>等, 部分学者近年来通过改进三轴仪<sup>[11-13]</sup>实现界面力学特性试验。楼晓明等<sup>[11]</sup>为模拟土体加卸荷对桩基摩阻力的影响, 通过施加气压于土体上方进而研制了土体在加卸荷下桩基影响试验装置; 邬俊杰等<sup>[12]</sup>利用围压室顶部的双套活塞实现对顺接触面向土体应力状态和桩土接触面剪切加载的分别控制, 研制了一套可控制复杂应力状态变化的桩土接触面三轴模拟试验仪; Hebel<sup>[13]</sup>通过改变桩体表面 CPT (cone penetration test) 摩擦套筒颗粒大小和形状对桩土界面粗糙度进行量化, 进而得出不同粗糙度下界面静载力学发展特性; 李春红等<sup>[14]</sup>基于静三轴装置展开温度对桩-土接触面力学性质的影响研究, 自主研制了一套温控桩-土接触面三轴试验仪, 实现非等温条件下桩-土接触面热力耦合特性测试。这些基于三轴仪改进的界面装置不仅具有三轴装置自身的优势, 用途相对广泛, 控制方法便捷, 而且相比于其他界面装置, 能严格控制不排水试验条件, 对界面的研究有较高的应用价值。

然而, 既有研究多以砂土或陆地黏土为主, 尚鲜有关于深海软黏土与结构界面的试验研究成果<sup>[15-16]</sup>, 究其原因, 除了受深海土取样困难、保存试样手段繁琐、研究条件有限等因素影响, 最重要的是传统界面仪器尚存不足致使无法对深海土界面破坏机制展开探究, 主要原因在于: ①排水状态难以准确标定; ②剪切引起的超孔压难以测定; ③应力应变控制兼容性较差。综上可知, 考虑到三轴界面仪的技术优势, 可借此开展深海沉积物-结构界面探究, 但既有三轴界面仪都是基于静三轴改进, 仍无法实现循环应力加载。因此, 依托大连理工大学“土工静-动力液压三轴剪切仪”, 研发一套深海沉积物-结构界面仪, 以解决深海锚固结构与土体相互作用问题, 实现对结构物不排水剪切引起的孔隙水压和界面剪切强度  $S_{ui}$  等有效参数的精确测量。通过对界面不排水工况的静、动剪切

试验测试, 验证改进界面仪的可靠性和准确性。

## 1 试验设备的研制

### 1.1 设备构成

大连理工大学“土工静力-动力液压三轴剪切仪”包括三轴加载系统①、数据采集系统②、模拟控制系统③、气水转化系统④和伺服液压动力系统⑤等部分(图1)。本文基于该设备, 对三轴压力室进行改造, 以满足海洋土-结构界面特性研究需求。改装后的三轴压力室实物图和示意图如图2所示。

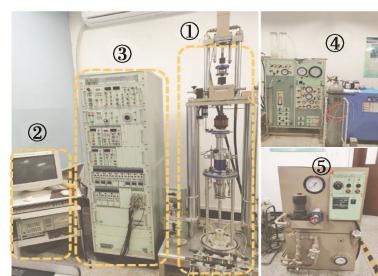
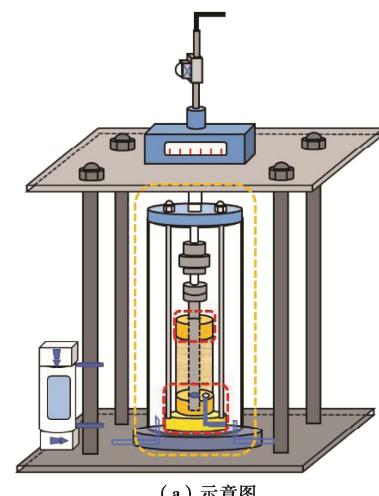
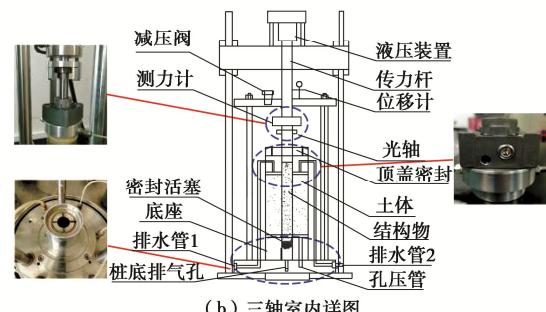


图1 土工静力-动力液压三轴剪切仪

Fig. 1 Photo of geotechnical static-dynamic hydraulic triaxial shear apparatus



(a) 示意图



(b) 三轴室内详图

图2 改造后的界面仪设备示意图

Fig. 2 Diagram of interface equipment

与既有常规三轴压力室装置相比, 设备构造的改造主要有以下4点:

(1) 改制土样顶、底元件。土样顶盖和底座的中

心位置预留直径为 20 mm 的孔洞, 结构物的顶端和底端分别穿进顶盖和底座的孔隙中, 且该直径为 20 mm 的孔洞深度能满足结构物在轴向剪切过程中有足够的活动范围。

(2) 增设顶盖上方密封装置和光轴连接杆。光轴穿过顶盖密封装置做到与外界完全隔离, 并在光轴下端连接结构物, 在结构物受力运动过程中, 有效地防止气体或者液体沿缝隙进入土体内。

(3) 调整底座孔压管位置。在靠近结构物 3 mm 处布设孔压孔, 外接孔压传感器、孔压阀门和进/出水阀门, 在界面剪切过程中, 关闭土体外界排水阀门, 土颗粒与结构物表面相互作用产生的超孔隙水压由孔压传感器直接读取。

(4) 增设底部密封橡皮活塞。底座打孔并在结构物下端连接橡皮活塞, 可有效地维持土体的密闭状态, 以构造理想的不排水试验条件。

## 1.2 设备技术特点

该深海沉积物-结构界面仪设备在研究深海沉积物界面方面具有诸多优势:

(1) 精准控制不排水状态。传统界面剪切装置在试验中往往通过改变不同的剪切速率以限定排水或不排水状态, 在严格意义上讲试验处于部分排水的状态, 剪切过程产生的超孔压必然随时间有一定程度的消散, 显然这一试验过程会高估深海沉积物与结构界面的抗拔承载性。

(2) 控制系统和加载方式多元。可根据实际界面受力状态自主地选择应力控制或应变控制系统, 选择单次剪切或循环加载方式。这一功能不仅更为贴切地表征深海沉积物界面受波浪荷载下的应力(半)正弦的受力状态, 而且为复杂应力状态的力学特性分析提供了试验可操作前提。

(3) 界面孔压的标定。该功能可有效地弥补传统界面装置的不足, 尤其抗拔结构短时间内突然失稳的实际工况, 不排水状态下界面研究对海洋工程设计安全十分重要, 因此对于界面剪切产生超孔压的监测极具实用价值的。

综上所述, 针对深海沉积物-结构界面研究现状的不足, 该设备可有效地实现对 CU (consolidation undrained) 状态下静、动界面剪切试验研究。另外, 考虑到对海底抗拔结构的承载性分析, 仪器改进阶段在土体上方设计应力边界, 可更为贴切地得到深海抗拔结构物在风浪等动力荷载作用下的循环上拔失稳机制。

## 1.3 界面受力分析

含结构物的土体在固结、静力或动力作用下的受

力简图如图 3 所示。

(1) 固结阶段: 试样上方压力由围压  $\sigma_3$  提供、试样下方固定且由底座提供反力, 结构-土体界面整体处于等向固结状态。

(2) 静态剪切阶段: 结构物以某一恒定剪切速率  $v$  向下或向上运动, 不同时刻下结构物受力  $F_n$  通过仪器测力计测定。剪切方向向下时, 可以模拟深海锚固结构的安装阶段的贯入过程; 剪切方向向上时, 可以模拟结构物界面土体卸荷过程, 此时界面摩擦力  $F_s$  为

$$F_s = F_n + G \quad (1)$$

式中,  $F_s$  为界面摩擦力 (kN),  $F_n$  为匀速剪切过程中桩顶压力值 (kN),  $G$  为桩体重量 (kN), 本文约为 0.004 kN。

(3) 动态剪切阶段: 动态剪切过程中, 采用应力控制的加载方式, 即在结构物上方施加某一峰值为  $\sigma_s$  的正弦波以模拟海面暴风、海浪循环荷载对锚固结构的影响, 设定海面循环荷载的频率  $f$  为 0.05~0.20 Hz<sup>[17]</sup>。该设备可实现多元化动剪试验操作, 例如可施加不同形状的波形、改变界面初始承载状态和应变动态加载等功能。这使该界面设备能针对不同海底锚固结构受力工况对界面的力学特性进行分析, 大大丰富了传统有关界面动态剪切的试验研究手段。

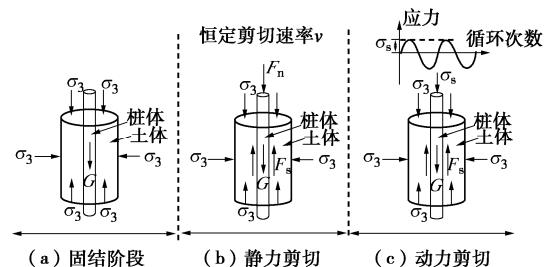


图 3 固结、静剪及动剪阶段的试样受力分析

Fig. 3 Mechanics of test samples at consolidation, static shear and dynamic shear stages

## 1.4 试样制备方法

采用改进泥浆法进行制样并加工定制配套模具和结构物, 以保证试样制备的可重复性和均一性; 模具实物图如图 4 所示。其中, 模具筒为内径 61.8 mm、外径 70 mm、高度 210 mm 的有机玻璃筒, 底座为外径 61.8 mm、内径 20 mm、高度 30 mm 的有机玻璃体, 其作用为排水和限位功能, 模具压头的作用为承压和排水功能, 压头的连接杆为 60 mm 深度的中空铝制杆体, 在底座和模具压头上均打有均匀分布的圆孔 (孔径 2 mm), 以便于排水。结构物尺寸为直径 20 mm, 高度 210 mm, 其表面粗糙度是通过控制桩体表面不同  $R_a$  (Roughness average) 得以实现, 选用  $R_a$  为 0.8, 3.2, 50  $\mu\text{m}$  的 3 种粗糙结构物进行研究, 按  $R_a$  由小到

大分别记录为粗糙度 I、粗糙度 II 和粗糙度 III。

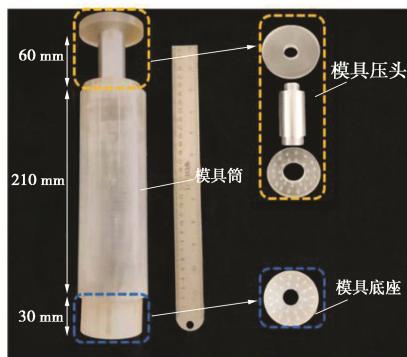


图 4 模具尺寸图

Fig. 4 Size of mold dimension

在制备土体试样过程中通常按照土体液限的 1.2~1.5 倍配置泥浆<sup>[18]</sup>，土体密度为

$$\rho = \frac{G_s(1+w)\rho_w}{1+wG_s} \quad (2)$$

式中  $\rho$  为土体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )； $w$  为土体含水率 (%)； $\rho_w$  为纯水在  $4^\circ\text{C}$  下的密度，通常取  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

为提高土体成样后的饱和程度，将配好的泥浆搁置在桶内 24 h，并每隔 6 h 对桶内泥浆进行震荡排气。在模具压头和底座表面均依次贴有合适尺寸的滤纸和透水棉布，将计算好质量的泥浆倒入模具中，在分级加载预压过程中仅有极少土颗粒的流失，假定排出体积都为泥浆内水的体积，得

$$\rho_{ini}h_{ini}A - (h_{ini} - h_{obj})A\rho_w = \rho_{obj}Ah_{obj} \quad (3)$$

式中  $\rho_{ini}$  为初始泥浆密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )； $h_{ini}$  为倒入模具筒后初始泥浆高度 ( $\text{cm}$ )； $A$  为空心土体底面积 ( $\text{cm}^2$ )， $h_{obj}$  为预压后理想土体高度 ( $\text{cm}$ )， $\rho_{obj}$  为预压后土体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

通过标定初始泥浆密度  $\rho_{ini}$  和理想土体高度  $h_{obj}$ ，得出初始泥浆高度  $h_{ini}$ ：

$$h_{ini} = \frac{h_{obj}(\rho_{obj} - 1)}{\rho_{ini} - 1} \quad (4)$$

设倒入泥浆总质量为  $m_{ini}$  ( $\text{g}$ )，其计算式为

$$m_{ini} = h_{ini}\rho_{ini}A \quad (5)$$

至此，形成一整套由仪器研发到土样制备的试验系统和方法，为深海沉积物-结构界面的相关研究提供了技术支撑。

## 2 深海沉积物-结构界面试验概况

### 2.1 土性参数及制备

试验采用重塑南海沉积物，其颗粒级配曲线如图 5 所示，粒径范围分布在  $0.0004\sim0.6 \text{ mm}$ ，且大多集中在  $0.01 \text{ mm}$  左右<sup>[19]</sup>；主要物理参数指标见表 1。

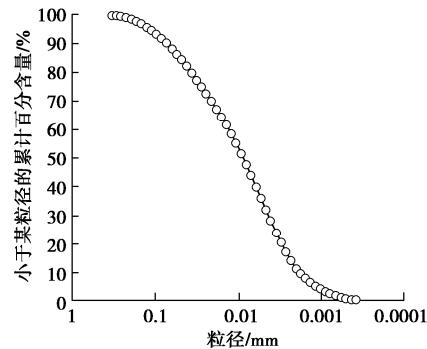


图 5 土体颗粒级配曲线

Fig. 5 Grain-size distribution curves of soil particles

表 1 南海沉积物主要物理参数指标  
Table 1 Basic physical properties of marine soft clay from South China Sea

相对质量密度 $G_s$	天然含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$
2.71	143.9	74.3	34.5	39.8	2.8

依据南海土参数配备含水率为 100% 的泥浆，经预压固结后得到的含结构物土体表面无气泡且均匀性良好，经计算土体实际密度与设计计算值误差在 0.01  $\text{g}/\text{cm}^3$  以内，最终预压应力大小为 75 kPa，配制的泥浆和得到的土体参数见表 2。

表 2 泥浆及土样参数表

Table 2 Detailed parameters of mud and soil sample

尺寸/cm $A/\text{cm}^2$	底面积 $A/\text{cm}^2$	泥浆高度 $h_{ini}$ /cm	泥浆密度 $\rho_{ini}/(\text{g}/\text{cm}^3)$	土样密度 $\rho_{obj}/(\text{g}/\text{cm}^3)$
$6.18 \times 2 \times 12$	26.85	17.31	1.46	1.66

### 2.2 试验方法及方案设计

在装样前先对各个管路进行排气并对传感器调零，装样后始终保持有效围压为 30 kPa，每 20 kPa 一级对土体进行反压饱和直至饱和结束，依据《土工试验规范》<sup>[20]</sup>， $B$  值达到 0.95 以上方可停止饱和，在对该重塑南海沉积物试样的饱和过程中发现，当反压增大到 100 kPa 时最终满足  $B$  值要求，为减少反压对试验结果的影响，设置所有试验的饱和反压同一值<sup>[21]</sup>。固结过程采用等向固结的方式，设定所有参照组的固结有效围压均为 100 kPa，并依据孔压消散程度达到 0.95 以上判断得出固结完成时间<sup>[20]</sup>。

加载过程主要从静载和动载两方面开展，试验设计方案与工况见表 3；其中，静载试验，试样有效围压为 100 kPa、正常固结土、剪切速率为  $0.1 \text{ mm}/\text{min}$  的不排水剪切。考虑粗糙度对侧壁摩阻力的影响，设计 3 种粗糙度以模拟结构物表面凹凸程度对不排水状态下界面的力学行为。

表 3 静动载试验方案设计

Table 3 Design test schemes of static and dynamic loads

反压 /kPa	有效围压 /kPa	剪切速率 /(mm·min <sup>-1</sup> )	粗糙度 等级	剪切 时间/min
100	100	0.1	I	180
100	100	0.1	II	180
100	100	0.1	III	180
有效围压/kPa	ICSR	频率/Hz	粗糙度等级	循环圈数
100	0.2	0.1	II	300

动载试验以粗糙度 II 为研究对象。为探究结构物在循环荷载作用下的界面土体破坏机制, 本文提出界面循环应力比 (interface cycle stress ratio) 的概念以表征结构物的循环应力状态, 简称为 ICSR, 定义如下:

$$\text{ICSR} = \frac{\sigma_s}{\sigma_3} = \frac{F_d}{\sigma_3 2\pi r h} \quad (6)$$

式中  $\sigma_s$  为结构物所受正弦波峰值应力大小 (kPa);  $\sigma_3$  为动载有效围压值 (kPa);  $F_d$  为桩体在正弦波峰值所受力大小 (kN);  $r$  为结构物半径大小 (m);  $h$  为土体固结后高度 (m)。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 试验结果可靠性验证

施加在结构物上某一恒定剪切速率, 得出结构物位移与界面摩擦力曲线, 通过将此摩擦力除以固结后结构 - 土体实际接触面积, 进而换算出界面不排水强度  $S_{ui}$ , 绘制的不排水界面应力 - 应变曲线如图 6 所示; 取 3 种粗糙度下界面不排水剪切强度峰值为  $S_{ui}$ , 结合相关研究数据建立粗糙度  $R_a$  与归一化界面强度  $S_{ui}/\sigma_3$  关系图 (图 7)。因前人研究中大多是以某一较快速率作为不排水速率, 但严格意义上讲, 这通常还会伴随着超孔压的消散过程, 所得的界面剪切强度会高于真实不排水强度, 且受土体密实度、含水率及土体取材不同, 归一化强度会略有差异, 但整体上前人研究中随粗糙度增大, 归一化界面强度  $S_{ui}/\sigma_3$  基本呈现双曲线型, 也即越接近于土体真实强度<sup>[22-23]</sup>, 本文研究也同样得到了类似规律, 很好地验证了该改进仪器的科学性和准确度。

#### 3.2 静载作用下界面特性

由图 6 可见, 界面不排水强度随结构物粗糙度的增大而逐渐增大, 在粗糙度 I 和 II 的界面破坏应力曲线中, 应变在约 2% 处界面应力达到峰值, 随后应力曲线缓慢降低, 整体呈现折线型, 粗糙度 III 的界面应力呈现先在应变的 0~3% 范围内快速升高随后缓慢增高的发展趋势, 整体呈现双曲线型。这种现象主要是因为高粗糙度影响下, 破坏大多发生在土 - 结构物表

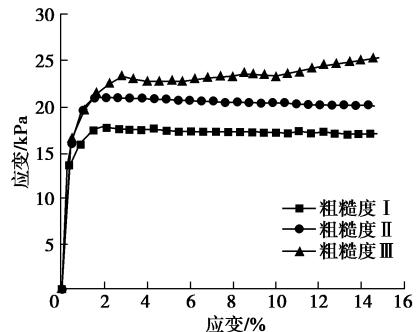


图 6 静载作用下应力 - 应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain curves under static loads

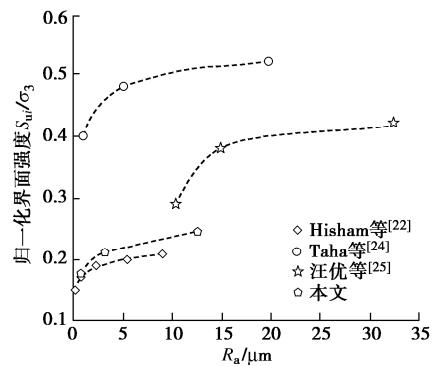


图 7 相关研究对照图

Fig. 7 Comparison of related studies

面, 界面不排水强度  $S_{ui}$  呈现出的应力软化效应并不明显, 这与 Hisham 等<sup>[22-23]</sup>的结果相近。粗糙度 III 结构物与土体相互作用中, 由于表面凹槽深度增高致使破坏过程时会调动更多的土颗粒参与剪切过程, 破坏形式也由界面破坏逐渐向土体内部转移, 界面破坏强度持续升高且逐渐靠近土体真实强度。

孔压与应变发展规律如图 8 所示。由图 8 可见, 不同粗糙度影响下, 界面超孔隙水压力整体呈现先增大后减小的趋势, 这是因为在剪切开始前, 相比土颗粒而言, 结构物认为是不可压缩的, 固结阶段使界面土体紧紧贴合在结构物表面, 剪切初始阶段界面土体先是产生剪缩趋势, 后随结构物剪切位移的增大, 土颗粒翻滚产生轻微剪胀趋势, 故孔压呈现先增高后降低的现象, 同样可以分析得出在粗糙度 III 结构物剪切中, 剪胀趋势基本消失是由于破坏面以由土 - 结构物面向土体内迁移。另外, 孔压峰值随粗糙度增大呈现先增大后减小的趋势, 初步认为由于粗糙度下发生界面滑动破坏, 随着凹槽深度增大, 调动的土体增多, 因此增大粗糙度剪缩趋势明显, 然而继续增大粗糙度, 土体破坏逐渐由界面转移至土体内部, 因土颗粒之间错动产生的剪缩趋势要小于土 - 结构表面剪缩程度, 故呈现了孔压峰值降低的现象。

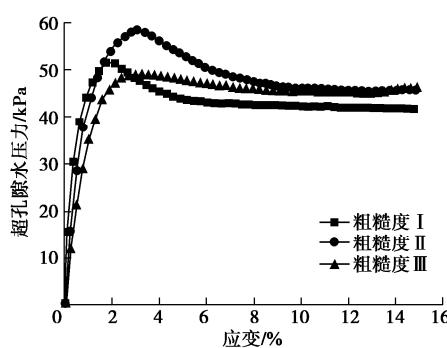


图 8 静载作用下孔压发展规律曲线

Fig. 8 Development of pore pressure under static loads

### 3.3 动载作用下界面特性

循环加载作用下 ( $\sigma_3=100$  kPa,  $N=300$  圈, ICSR=0.2) 应力 - 应变滞回圈如图 9 所示。由图 9 可见, 在此界面循环加载条件下随着加载圈数的增加, 伴随着结构物的不断上拔直至达到稳定, 主要原因是结构物在某一向下应力的加载过程中, 界面土体受摩阻力影响相互挤压, 最终在粗糙度 II 结构物表面产生滑移破坏。当结构物受同样大小且方向向上的应力加载作用下, 界面土体受到方向向下摩阻力的反作用力, 依据能量原理破坏必然发生在最薄弱的部位, 当土体抗拉强度低于真实界面强度时, 土体最终必然发生拉伸破坏, 这一现象类似于陆地抗拔桩研究中桩周土的三轴拉伸破坏形式, 因此结构物在受此正弦荷载的加载中, 更容易呈现累积应变向上的拉拔破坏, 这也更为贴切地模拟了海底锚固结构受海上风浪荷载的失稳破坏形式。另外, 从滞回圈的位置清晰地看出结构物 - 土体界面的累积塑性应变  $\varepsilon_p^*$  随循环圈数  $N$  逐渐增大, 且在  $N=300$  圈时基本稳定, 整体呈现刚度渐进弱化的现象。

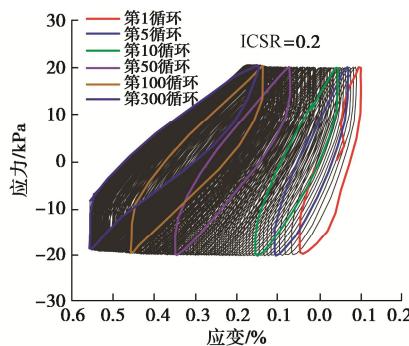


图 9 动载作用下应力 - 应变滞回圈曲线

Fig. 9 Stress-strain hysteresis loop curves under dynamic loads

循环加载作用下 ( $\sigma_3=100$  kPa,  $N=300$  圈, ICSR=0.2) 孔压发展模式如图 10 所示。由图 10 可知, 累积超孔压发展随循环圈数呈现双曲线型, 通过式 (7) 进行拟合, 具体数据见表 4。

$$u=\frac{N}{AN+B} \quad , \quad (7)$$

式中,  $A$  为孔压峰值渐近线的倒数,  $B$  为  $N$  趋近于 0 点时的孔压斜率,  $R^2$  达到了 0.993, 整体拟合效果较好, 在循环圈数为 300 时基本达到峰值, 其归一化界面超孔压  $u/\sigma_3$  为 0.22, 在循环加载过程中, 超孔压的不断累积致使界面土体有效应力不断衰减, 界面体现出循环软化现象。

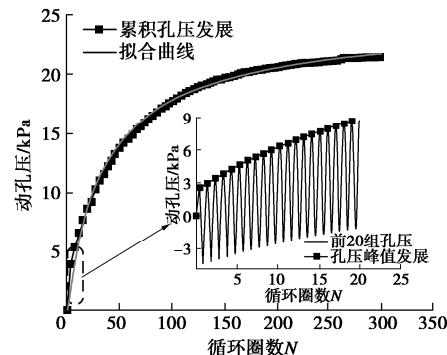


图 10 动载作用下孔压发展规律曲线

Fig. 10 Development of pore pressure under dynamic loads

表 4 拟合公式参数

Table 4 Parameters for fitting formula

拟合公式	ICSR	$A$	$B$	$R^2$
$u=N/(AN+B)$	0.2	0.04112	1.51522	0.993

## 4 结 论

(1) 本文基于“土工静力-动力液压三轴剪切仪”, 研发了一套深海沉积物 - 结构物测试界面仪; 可实现界面剪切引起的孔压测定, 严格控制界面不排水剪切应力路径, 实现深海结构的沉贯和动力失稳拉拔试验等。该界面仪的研发辅以改进泥浆的成样方法, 实现成套的界面试验设备及方法, 依据界面不排水静载测试结果对比前人研究结果初步验证了所研制界面仪及其使用方法的准确性和可靠性, 为深海沉积物 - 结构物界面特性与机理研究提供技术支撑。

(2) 静载作用下, 粗糙度 I、II 结构物界面应力发展整体呈折线型, 粗糙度 III 结构物界面应力呈应变硬化型, 界面承载性随粗糙度增大而逐渐增强; 剪切过程中不同粗糙度下界面土体孔压经历了先剪缩后剪胀发展趋势; 剪胀趋势逐渐消失意味着破坏面由土与结构物表面向土体内部产生迁移。

(3) 动载作用下, 通过在粗糙度 II 结构物上施加 ICSR=0.2,  $f=0.1$  Hz 的正弦荷载, 结构物 - 土体界面刚度随循环周次的增加而降低, 呈现界面弱化现象, 且结构物产生上拔滑移直至稳定, 累积应变呈现结构物拉拔的力学行为。本文试验条件下, 归一化界面动

孔压  $u/\sigma_3$  为 0.22, 且动孔压发展呈双曲线型。

基于该改进界面仪的技术优势, 后续可考虑对界面 CU 工况的试验分析, 弥补界面有关 CU 状态下的力学特性和孔压发展规律研究现状的不足, 例如可实现对不同围压和不同粗糙度下界面不排水状态下破坏形式和机理的探究, 考虑剪切速率影响的不排水界面力学特性等试验研究。

## 参考文献:

- [1] DESAI C S, PRADHAN S K, COHEN D. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand-concrete interfaces using the disturbed state concept[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, **5**(4): 286 – 294.
- [2] DI DONNA A, FERRARI A, LALOUI L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(4): 659 – 672.
- [3] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 14 – 22. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 14 – 22. (in Chinese))
- [4] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(2): 149 – 153. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(2): 149 – 153. (in Chinese))
- [5] 夏红春, 周国庆. 土-结构接触面剪切力学特性及其影响因素试验[J]. 中国矿业大学学报, 2010, **39**(6): 831–836. (XIA Hong-chun, ZHOU Guo-qing. Experimental study of the shear mechanical characteristics at a soil-structure interface and the factors affecting them[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, **39**(6): 831 – 836. (in Chinese))
- [6] CHEN X B, ZHANG J S, XIAO Y J, et al. Effect of roughness on shear behavior of red clay-concrete interface in large-scale direct shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(8): 1122 – 1135.
- [7] UESUGI M, KISHIDA H, TSUBAKIHARA Y. Friction between sand and steel under repeated loading[J]. Soils and Foundations, 1989, **29**(3): 127 – 137.
- [8] 冯大阔, 张建民. 粗粒土与结构接触面静动力学特性的大型单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1201 – 1208. (FENG Da-kuo, ZHANG Jian-min. Monotonic and cyclic behaviors of coarse-grained soil-structure interface using large-scale simple shear device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1201 – 1208. (in Chinese))
- [9] VIEIRA C S, LOPES M D L, CALDEIRA L. Sand-nonwoven geotextile interfaces shear strength by direct shear and simple shear tests[J]. Geomechanics and Engineering, 2015, **9**(5): 601 – 618.
- [10] 刘方成, 陈巨龙, 王海东, 等. 一种大型循环单剪试验装置研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(11): 3336 – 3346. (LIU Fang-cheng, CHEN Ju-long, WANG Hai-dong, et al. Development of a large-scale cyclic simple shear test apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(11): 3336 – 3346. (in Chinese))
- [11] 楼晓明, 李德宁, 杨敏, 等. 土体常规加卸荷对桩基影响模型试验系统研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(8): 1509 – 1515. (LOU Xiao-ming, LI De-ning, YANG Min, et al. Development and application of simulation system for model piles impacted by routine loading and unloading of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(8): 1509 – 1515. (in Chinese))
- [12] 邬俊杰, 刘帅君, 陈锦剑, 等. 桩土接触面三轴模拟试验设备研究与应用[J]. 上海交通大学学报, 2014, **48**(11): 1523 – 1527, 1535. (WU Jun-jie, LIU Shuai-jun, CHEN Jin-jian, et al. Development and application of a triaxial model test system for pile-soil interface[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, **48**(11): 1523 – 1527, 1535. (in Chinese))
- [13] HEBELER G L, MARTINEZ A, FROST J D. Shear zone evolution of granular soils in contact with conventional and textured CPT friction sleeves[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, **20**(4): 1267 – 1282.
- [14] 李春红, 孔钢强, 张鑫蕊, 等. 温控桩-土接触面三轴试验系统研制与验证[J]. 岩土力学, 2019, **40**(12): 4955 – 4962. (LI Chun-hong, KONG Gang-qiang, ZHANG Xin-rui, et al. Development and verification of temperature-controlled pile-soil interface triaxial shear test system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(12): 4955 – 4962. (in Chinese))
- [15] KUO M, BOLTON M. Shear tests on deep-ocean clay crust from the Gulf of Guinea[J]. Géotechnique, 2014, **64**(4): 249 – 257.

- [16] KUO M, BOLTON M. The nature and origin of deep ocean clay crust from the Gulf of Guinea[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(6): 500 – 509.
- [17] 曹 洋, 周 建, 严佳佳. 考虑循环应力比和频率影响的动荷载下软土微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(3): 735 – 743. (CAO Yang, ZHOU Jian, YAN Jia-jia. Study of microstructures of soft clay under dynamic loading considering effect of cyclic stress ratio and frequency[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(3): 735 – 743. (in Chinese))
- [18] CHEN Y M, JI M X, HUANG B. Effect of cyclic loading frequency on undrained behaviors of undisturbed marine clay[J]. *China Ocean Engineering*, 2004, **18**(4): 643 – 651.
- [19] 任玉宾, 朱兴运, 周令新, 等. 南海西部海盆深海沉积物物理性质初探[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, **47**(10): 14 – 20. (REN Yu-bin, ZHU Xing-yun, ZHOU Ling-xin, et al. Preliminary study on physical properties of deep-sea sediments in the western basin of South China sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, **47**(10): 14 – 20. (in Chinese))
- [20] 土工试验规程: SL237—1999[S]. 1999. (Specification of Soil Test: SL237—1999[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [21] 黄 博, 汪清静, 凌道盛, 等. 饱和砂土三轴试验中反压设置与抗剪强度的研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1313 – 1319. (HUANG Bo, WANG Qing-jing, LING Dao-sheng, et al. Effects of back pressure on shear strength of saturated sand in triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(7): 1313 – 1319. (in Chinese))
- [22] EID H T, AMARASINGHE R S, RABIE K H, et al. Residual shear strength of fine-grained soils and soil–solid interfaces at low effective normal stresses[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, **52**(2): 198 – 210.
- [23] EID H T. Undrained interface shear strength of fine-grained soils for near-shore marine pipelines[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2020, **43**(2): 495 – 516.
- [24] TAHA A, FALL M. Shear behavior of sensitive marine clay–steel interfaces[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, **9**(6): 969 – 980.
- [25] 汪 优, 任加琳, 李 赛, 等. 土-结构接触面剪切全过程本构关系研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, **48**(3): 144 – 152. (WANG You, REN Jia-lin, LI Sai, et al. Study on shear constitutive relation of soil-structure interface in whole process[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, **48**(3): 144 – 152. (in Chinese))

## 彩色插图索引

- DOI: 10.11779/CJGE202201001 一文彩色插图 ..... (后插 1)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201006 一文彩色插图 ..... (后插 1)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201009 一文彩色插图 ..... (后插 1)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201010 一文彩色插图 ..... (后插 2)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201011 一文彩色插图 ..... (后插 2)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201012 一文彩色插图 ..... (后插 3)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201013 一文彩色插图 ..... (后插 5)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201016 一文彩色插图 ..... (后插 7)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201017 一文彩色插图 ..... (后插 5)  
 DOI: 10.11779/CJGE202201020 一文彩色插图 ..... (后插 8)