引文格式：张玉，马硕，丁敬琪，等. 海底能源土-结构界面剪切试验研究[J]. 太原理工大学学报，2026，57(5)：947-955.
ZHANG Yu，MA Shuo，DING Jingqi，et al. Shear behavior of seabed energy soil-structure interface[J]. Journal of Taiyuan University of Technology，2026，57(5)：947-955.

海底能源土-结构界面剪切试验研究

张 玉[1]，马 硕[1]，丁敬琪[1]，罗一博[2]，崔光磊[3]
（1. 中国石油大学（华东）储运与建筑工程学院，山东 青岛；2. 山东黄河勘测设计研究院有限公司，山东 济南；
3. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室，辽宁 沈阳）

摘 要：**【目的】**海底能源土开采过程中容易造成井筒周围胶结强度降低，诱发海底能源土-开采井界面发生剪切变形，直接影响开采井的稳定性。**【方法】**为研究储层土-结构力学特性，在室内重塑南海神狐海域能源土储层重塑土样的基础上，采用GDS界面剪切仪开展了不同含水率和不同剪切速率下的界面剪切力学特性研究，探讨了不同工况下储层土-结构界面的剪切力学特性。**【结果】**研究结果表明，界面剪切应力-应变呈现显著的弹塑性特征，可用对数曲线模型予以表示；剪切会引起土体体积变化，在含水率越高、剪切速率越低时，土体结构的界面剪缩变形越明显；储层土-结构界面的抗剪强度随着法向应力和剪切速率的增加而增大，但随着含水率的增加而减小。相关成果可为海域能源土储层稳定性分析提供依据。

关键词：海底能源土；土结构界面；界面剪切试验；含水率；剪切速率
中图分类号：P744.4；P736 **文献标识码**：A
DOI：10.16355/j.tyut.1007-9432.20240370 **文章编号**：1007-9432(2026)05-0947-09

Shear Behavior of Seabed Energy Soil-Structure Interface

ZHANG Yu[1], MA Shuo[1], DING Jingqi[1], LUO Yibo[2], CUI Guanglei[3]
(1. *College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, China*; 2. *Shandong Yellow River Reconnaissance Design & Research Institute Co., Ltd, Jinan, Shandong, China*; 3. *Key Laboratory of Ministry of Education for Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China*)

Abstract: **【Purposes】** During the extraction of seabed energy soil, a common issue is the reduction in cementation strength around the wellbore, which triggers shear deformations at the interface between the seabed energy soil and the extraction well, consequently impacting the well's stability. **【Methods】** In order to study the geomechanical properties of reservoir soil-structure, research was conducted by using a GDS interface shear device on remolded soil samples from the Shenhu area's seabed energy soil reservoir in the South China Sea. The interface shear mechanical properties with various moisture contents and shear rates were examined, and the shear mechanical behavior of the reservoir soil-structure interface with different conditions was investigated. **【Results】** The findings reveal that the interface shear stress-strain demonstrates distinct elastoplastic characteristics, which can be represented by a logarithmic curve model. Shear induces volumetric changes in the soil, higher moisture contents and lower shear rates lead to more pronounced interface shear compaction deformation. The shear strength of the reservoir soil-structure interface increases with both normal stress and

收稿日期：2024-05-16；**修回日期**：2024-08-19
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51890914，52179119)
第一作者：张玉，教授，从事深部油气资源开采与储存研究方面的工作，(E-mail)zhangyu3@mail.neu.edu.cn

shear rate but decreases with an increase in moisture content. These findings provide a basis for the stability analysis of seabed energy soil reservoirs.

Keywords: seabed energy soil; soil-structure interface; interface shear test; moisture content; shear rate

海底能源土指赋存于海域的天然气水合物沉积物,有着巨大的开采应用潜力[1,2]。开采活动中储层土受到大幅扰动使得储层土抗剪强度和承载能力降低[3],引发储层沉降,进而导致储层土-开采井结构界面受到剪切作用[4-6]。在受力变形过程中,由于开采井与储层材料的差异,土体与水泥、开采井的应力应变特性存在明显不同,需要通过界面传递剪切应力,这可能导致界面局部区域出现错位、滑动等非连续性变形,甚至造成接触界面破坏、井筒失稳等重大工程问题。然而,目前对能源土储层的研究主要集中于对储层的力学性能的演化上,缺乏对储层土-开采井结构的界面剪切力学特性研究。因此开展储层土-结构界面剪切力学试验,获得界面剪切力学特性,对实现水合物安全高效开采至关重要。

土-结构界面直剪试验是研究界面力学特性的主要途径,国内外学者针对土-结构界面力学特性进行了许多研究。李大勇等[7]分析了不同相对密实度对砂土和吸力基础界面剪切力学特性的影响,结果表明界面抗剪强度和摩擦系数随着砂土相对密实度的增大而增加。方敏慧等[8]开展了不同法向刚度条件下的石英砂、钙质砂与钢界面剪切试验,发现随着法向刚度的增加,界面摩擦角和黏聚力分别呈现减小、增加的演化规律,且法向应力对界面剪胀性有抑制作用。胡建林等[9]采用大型直剪仪开展了不同法向应力下的粉质黏土与不同种类型混凝土的界面剪切试验,研究结果表明相同法向应力情况下,再生混凝土与普通混凝土的接触面抗剪强度均小于土体自身的抗剪强度。郭聚坤等[10]利用改进后的直剪仪,研究了不同含水率、不同固结时间下的海洋黏土与桩的界面剪切作用,指出含水率的变化对界面抗剪强度指标有明显影响,而界面摩擦角受固结时间的影响较小,但随固结时间的增加,界面黏聚力逐渐增大。王永洪等[11]基于自行研制的恒刚度直剪仪探究了黏土与混凝土在不同含水率条件下的界面剪切试验,指出含水率的变化对摩擦角的影响较小,而黏聚力的变化是影响界面抗剪强度变化的主要原因。于鹏等[12]开展了不同法向应力、含水率和表面粗糙度条件下的粉土和钢板界面剪切试验,发现表面粗糙度对界面黏聚力有显著影响,而含水率的变化对内摩擦角的影响较大。闫澍旺等[13]分别研究了细砂、中砂、粗砂、软黏土与钢界面的剪切特性,并用“抗剪糙度”来反映桩土间破坏面的位置。Nardelli等[14]、Kou等[15]分别对混凝土界面、钢板界面在不同表面粗糙度下的砂-结构物界面力学特性进行了探讨。Wang等[16]采用直剪试验探究了不同粒径分布对砂土和钢结构界面剪切特性的影响,发现不均匀系数越低,界面抗剪强度越高,且界面摩擦角随着不均匀系数的增加而减小。

另外,孔令伟等[17]针对具有中等结构性的海积软黏土开展了界面环剪试验,发现在不排水条件下,界面内摩擦角随剪切速率的增加是引起界面抗剪强度的增加的主要因素。洪勇等[18]利用环剪仪,探究了超固结粉质黏土在快剪条件下的力学特性,指出快速剪切过程中土体内部结构的调整和剪切面的变化是引起土体抗剪强度变化的主要原因。Vafaei等[19]开展了砂土-钢板界面的环剪和单剪试验,探究了不同颗粒形状对结构界面剪切力学特性的影响规律,指出颗粒形状是影响砂粒最大粒径破坏的重要参数。Zhou等[20]基于环剪仪研究了大位移、不同砂粒形状和循环剪切作用下的砂-钢界面剪切特性,试验发现不同砂粒形状表现出不同的破碎程度和模式,大位移剪切作用能够有效抑制界面强度的退化。

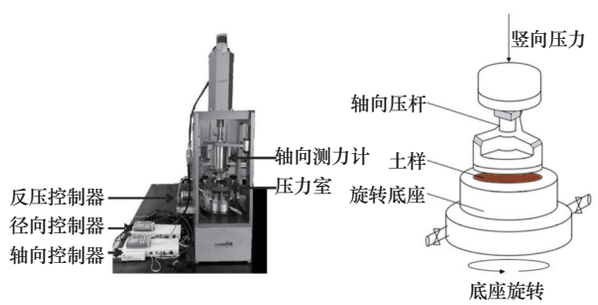
综上所述,现存成果主要集中于不同工况条件下的砂土、粉土、黏土结构界面力学特性演化规律的探究,而水合物储层土作为一种特殊土,储层土-开采井界面力学特性更为复杂,相关研究也多集中于直剪和三轴剪切试验。Liu等[21]人将不同水合物储层土类型考虑在内,探究了不同应力条件下的砂土、粉土土样在直剪过程中的力学响应机制,发现两种土样的峰值抗剪强度随着剪切应力的增加逐渐增大。Liu等[22]人开展了不同轴压和剪切速率的储层土直剪试验,发现在剪切过程中水合物储层土呈现出延性破坏特征。Li等[23],Yuan等[24]进行了不同法向应力和有效围压条件下的储层土三轴剪切试验,发现有效围压越高,试样应变硬化现象越

明显。Lu 等[25]人将 CT 扫描与三轴剪切试验相结合，发现随着轴向应变的增加，储层土表现出明显塑性变形特征。与直剪仪、三轴仪以及环剪仪相比，GDS 界面剪切仪能够有效避免尺寸效应对试验结果造成的偏差，对开展土-结构界面剪切试验具有较大的优势。因此，本文基于南海神狐海域水合物储层土，通过 GDS 界面剪切仪开展了不同含水率、不同剪切速率条件下储层土-结构界面等的剪切面试验，探讨了在这两种工况下储层土-结构界面剪切特性演化规律，以期为实现水合物长期、稳定开采提供参考依据。

1　试验设备及土样介绍

1.1　试验设备

试验采用的界面剪切试验仪（图 1(a)）可以对界面施加轴向应力和持续的扭转力进行力和位移的控制试验，其中扭转力量程为 200 N·m，轴向压力量程为 5 kN（精度±0.2%）。试验过程能够沿着一个方向进行连续剪切，并且可保持剪切面积不变，来模拟土体-结构界面的大变形剪切过程；同时，竖向应力与剪应力在剪切面上均匀分布，土样不会发生凹凸变形，能够有效避免尺寸效应对试验结果造成的偏差[26]。其中，轴向压力杆与下部环刀内土体形成界面系统，通过底座的旋转来实现剪切，剪切示意图如图 1(b)所示。



(a)GDS 界面剪切试验仪　　(b)土-结构界面剪切示意图

图 1　界面剪切示意图

Fig. 1　Interface shearing illustration

1.2　水合物储层土试样制备

试验用土是基于我国深海能源土粒度成分（表 1）和黏土矿物成分（表 2）配备的水合物储层土；配备好的水合物储层土试样（图 2）直径 68 mm，高 22 mm。首先根据深海能源土粒度成分配置砂土，再根据其黏土矿物所占比例加入黏土，最终获得的试验土体颗粒级配曲线如图 3 所示。

表 1　南海神狐海域水合物储层土粒度成分[27]

Table 1　Grain size composition of hydrate-bearing soil in Shenhu sea area of the South China Sea[27]

粒径/mm	<0.004	[0.004, 0.063)	[0.063, 0.25)	[0.25, 0.5)	[0.5, 2.0)
比例/%	0.4	23.5	32.2	29.1	14.8

表 2　南海神狐海域水合物储层土黏土矿物成分[28]

Table 2　Clay mineral composition of hydrate-bearing soil in Shenhu sea area of the South China Sea[28]

矿物成分	蒙脱石	伊利石	绿泥石	高岭石
比例/%	8.68	9.18	3.79	2.26

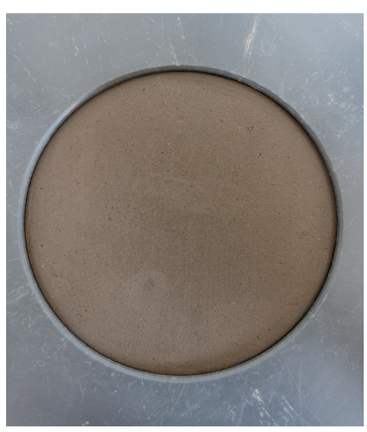


图 2　剪切试样

Fig. 2　Shear sample

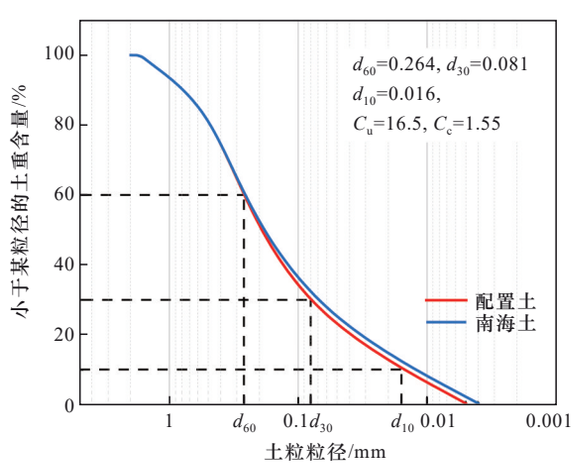


图 3　试验土体颗粒级配曲线

Fig. 3　Grain size distribution curves of the test soil samples

1.3　剪应力计算

GDS 界面剪切仪通过轴向压杆，将法向压力施加于土样顶部，轴向压杆除法向加载外保持固定，旋转底座保持匀速转动使得下剪切面恒定不变。底座旋转产生的扭剪力在试样-结构界面上产生剪应力，剪应力分布如图 4 所示。距离圆心为 r 点的剪应力 τ 由下式确定：

$$\tau_r=\frac{2Tr}{\pi R_1^4}. \tag{1}$$

式中，T 为剪切面上的总扭矩，R_1=34 mm，为轴向

压杆底面半径。

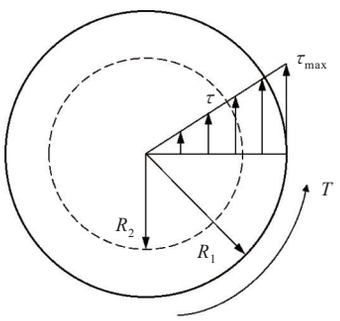


图4 剪切面上剪应力分布示意图

Fig. 4 Shear stress distribution

现有应用GDS界面剪切仪的试验研究中，主要通过在整个剪切面上求平均值来计算剪应力[29, 30]。但实际上，剪切过程中，越靠近圆心的试样颗粒，剪应力、线速度越小，可以认为圆心附近界面不发生剪切。故采用半径R_2至R_1圆环的界面剪切数据，更为真实可靠。圆环上的扭矩T_1为：

$$T_1=\int_A r\tau_r \mathrm{d}A=\int_{R_2}^{R_1} r\cdot\frac{2Tr}{\pi R_1^4}\cdot 2\pi r\mathrm{d}r=\frac{T}{R_1^4}(R_1^4-R_2^4). \tag{2}$$

式中，A为圆环的面积，R_2取值参考环剪试验中的试样外径与内径比值，即$R_1/R_2=1.4\text{-}1.7$[31, 32]，故本试验中R_2取为22 mm。

圆环上的平均剪应力可以通过下式计算：

$$\bar{\tau}=\frac{T_1}{\int_{R_1}^{R_2}2\pi r^2\mathrm{d}r}=\frac{3T_1}{2\pi(R_1^3-R_2^3)}=\frac{3T}{2\pi R_1^4}\cdot\frac{R_1^4-R_2^4}{R_1^3-R_2^3}. \tag{3}$$

圆环上的剪切位移l为：

$$l=v\cdot t=\omega\bar{r}\cdot t. \tag{4}$$

式中，l为剪切位移，v为线速度(cm/min)，ω为剪切角速度(rad/min)，$\bar{r}$为圆环平均半径：$\bar{r}=\frac{\int_{R_2}^{R_1}2\pi r^2\mathrm{d}r}{\pi(R_1^2-R_2^2)}=\frac{2(R_1^3-R_2^3)}{3(R_1^2-R_2^2)}=28.4$ mm，t为剪切时间。

1.4 试验方案

南海水合物储层类型复杂，部分储层不同于常规海洋土的水饱和状态，上下盖层表现出明显的不透水特性[33](图5)，其含水率对开采井界面的影响显著。此外，现有海洋油气开采为提高能源开采效率，常采高压流体注入储层形成复杂缝网[34]，导致井筒周围胶结强度降低，从而诱发井周土体位移导致套管剪切变形。同时，钻井过程中井壁产生的剪切位移及储层应力的重新分布会改变土颗粒间的接触状态，从而影响井壁的稳定性，且开采过程中能源土模量的降低增加了其压缩性，井壁易产生沉降和滑移，开采速率直接影响井壁与水泥环的剪切速率[35, 36]。为此，参照现有针对海洋沉积物力学性质的研究[37-39]，结合实际开采过程中井壁缓慢沉降对不同埋深中等饱和度储层土的力学性质的影响，本研究设置3种含水率、3种剪切速率、4组法向应力，探究储层土-结构面剪切力学特性(表3)。

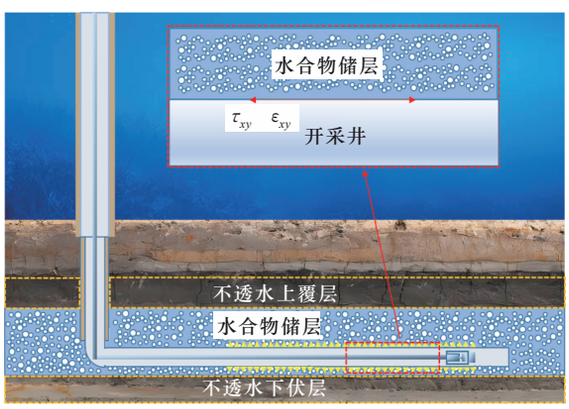


图5 海底能源土储层结构示意图

Fig. 5 Seabed energy soil structure illustration

表3 试样组别设置

Table 3 Settings of sample groups

含水率w/%	剪切速率v/(mm·s^{-1})	法向应力P/kPa
15	0.006	50,100,150,200
	0.01	50,100,150,200
	0.02	50,100,150,200
15		50,100,150,200
18	0.006	50,100,150,200
21		50,100,150,200

2 剪应力-剪切位移关系

不同含水率和不同剪切速率下，土体结构界面剪应力-剪切位移曲线均呈现出明显的应变硬化特征：初始阶段剪应力迅速增加，随后增幅趋缓，并最终达到稳定状态，且剪应力-剪切位移关系均可采用对数模型$P=a\ln s+b$予以表征(图6、图7)。

2.1 不同含水率下的剪切应力-剪切位移关系

同一含水率土样的剪应力峰值和剪切破坏位移均与法向应力呈正相关；不同含水率情况下的剪应力-剪切位移曲线均出现了峰值，而含水率的增加会导致峰值强度降低[11]。这是由于含水率的增加使土-结构物界面之间的润滑作用增大、摩阻力减弱，细小黏土的结合水膜变厚、黏聚力降低，最终

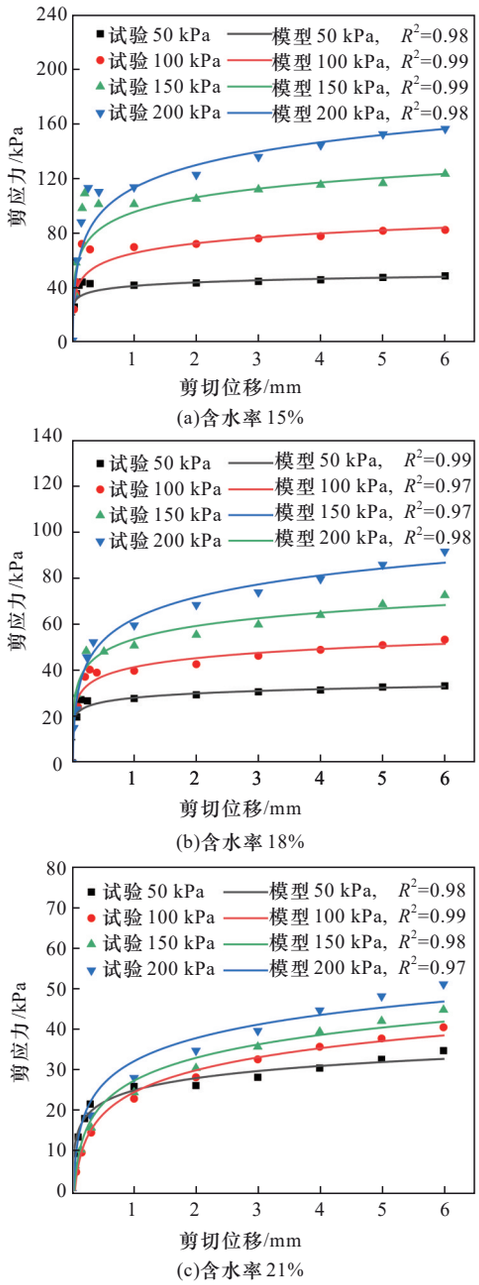


图 6　剪应力-剪切位移曲线(Δw)

Fig. 6　Shear stress-shear displacement curves with different moisture contents

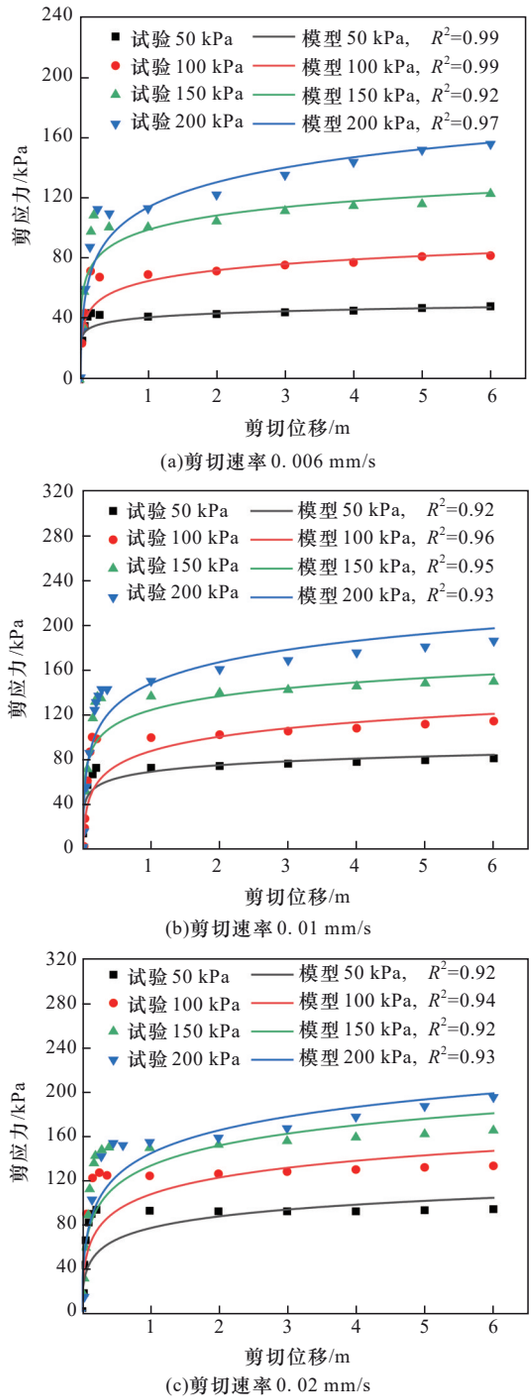


图 7　剪应力-剪切位移曲线(Δv)

Fig. 7　Shear stress-shear strain curves with different shear rates

导致剪应力减小。含水率为 15% 时，剪应力在较大的剪切位移范围内持续增加，与其他含水率相比，曲线上升幅度更大，剪应力峰值更高；此外，含水率降低导致的颗粒间摩擦和黏结力增加，也使得土体硬化现象更加明显。

2.2　不同剪切速率下的剪切应力-剪切位移关系

由于土体内部孔隙被压缩，随剪切位移的增加，剪应力在短时间内迅速增大，至孔隙水共同承压而形成拐点，此后平稳发展。同一剪切速率下的剪切应力峰值强度及其对应的剪切位移均与法向应力呈正相关，这是由于土颗粒间摩擦阻力随法向应力的增大而增加，使得峰值强度提高。此外，不同的剪切速率使得土体内部应力重分布和应力传递机制也有所不同，从图 7 可以看出，剪切速率为 0.02 mm/s 时的剪应力峰值最高，这是由于较高的剪切速率下，颗粒间的相对运动速度较快，摩擦力增加，导致应力集中现象更加显著；同时，各级法向应力下的峰值强度随剪切速率的增加而逐渐增大。

3 法向位移-剪切位移关系

剪切过程中，结构物与土体接触面积保持不变，采用法向位移来反映试样体积变化，即接触面剪切体变特性，其中剪缩为正，剪胀为负[40]。

3.1 不同含水率下的法向位移-剪切位移关系

剪切速率0.006 mm/s时，随着剪切位移的增大，土样出现明显的剪缩，不同含水率的法向位移-剪切位移曲线变化趋势基本一致：法向位移与含水率呈正相关，即界面剪切引起的土样压缩量随含水率的增大而增加；当施加的法向应力从50 kPa变化至200 kPa时，土样剪缩量在含水率15%、18%、21%条件下增加幅度分别为132.7%、134.4%、175.2%（图8），其原因在于随着含水率上升，土体初始孔隙率升高，土样压缩性更强、压缩空间更大，与冯大阔等[40-42]的研究结果对比得到了相似的规律。

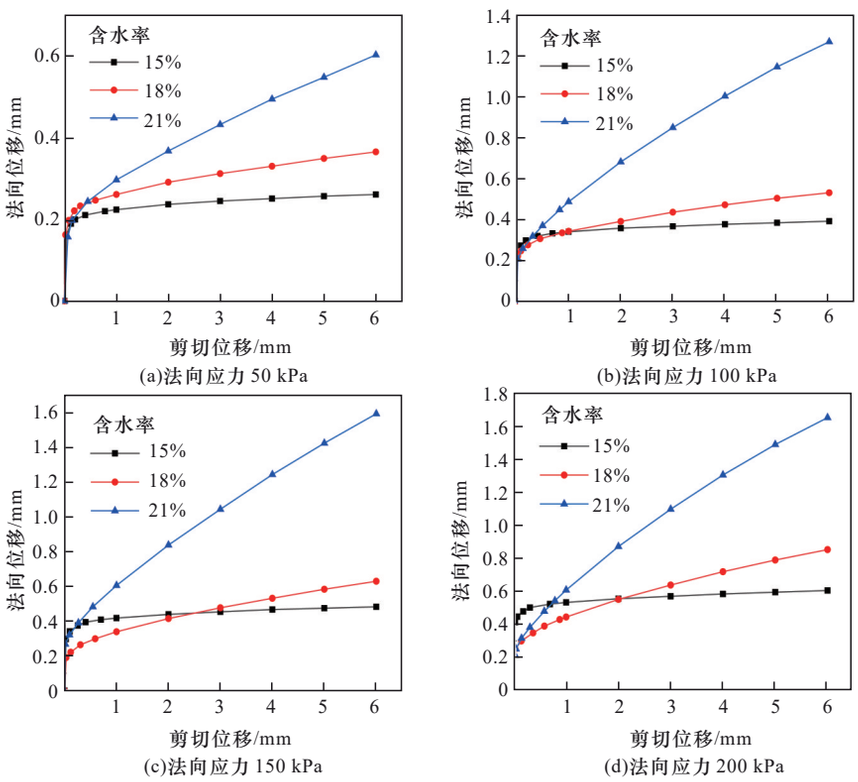


图8 法向位移-剪切位移曲线(Δw)

Fig. 8 Normal displacement-shear displacement curves with different moisture contents

3.2 不同剪切速率下的法向位移-剪切位移关系

含水率为15%时，不同法向应力条件下剪切速率0.006 mm/s的法向位移高于0.02 mm/s对应的法向位移；而在剪切位移为6 mm处，剪切速率为0.006 mm/s在法向应力50、100、150、200 kPa下对应的法向位移分别为0.26、0.391、0.483、0.605 mm，此时法向位移随着法向应力的增加逐渐增大（图9），其原因在于孔隙水排水程度不同，在较低的剪切速率下，整体剪切时间较长，剪切界面和土样内的孔隙水压力更容易消散，使得土体体积变化较大[41,42]。

4 界面剪切抗剪强度指标变化规律

4.1 不同含水率下抗剪强度指标变化

将剪切速率为0.006 mm/s下的试验数据进行线性拟合，得到不同含水率下界面抗剪强度与法向应力的关系（图10）和界面抗剪强度指标（表4），界面破坏形式符合摩尔-库伦破坏准则。界面抗剪强度随着法向应力的增加而增大；同一法向应力下，界面抗剪强度随着含水率的降低而增加。法向应力为200 kPa时，含水率从21%降至15%对应的抗剪强度增加了203.72%，说明含水率的变化是影响抗剪强度的主要因素，这与Fredlund、Escario等[43-45]人的试验结论相同。

含水率较低时，土体结构界面黏聚力与含水率呈正相关[46-48]，摩擦角随着含水率的增加而下降（表4）。当含水率从15%增加至21%时，相邻含水率间的界面摩擦角分别减小了41.02%和71.28%，土体含水率越高，界面摩擦角降低的幅度越大，这是

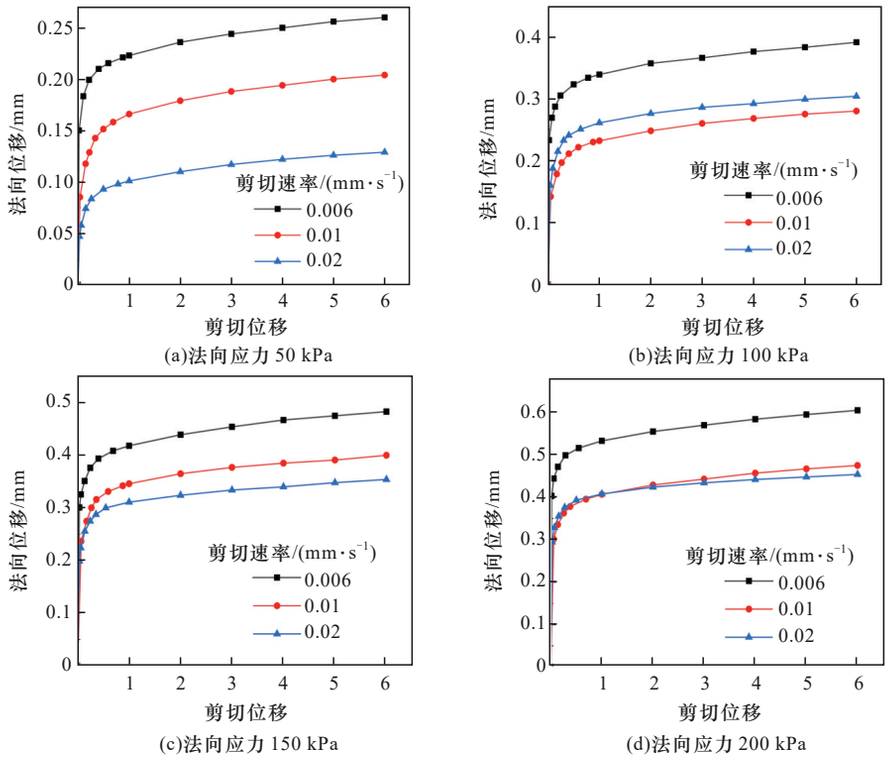


图 9　法向位移-剪切位移曲线(Δv)

Fig. 9　Normal displacement-shear displacement curves with different shear rates

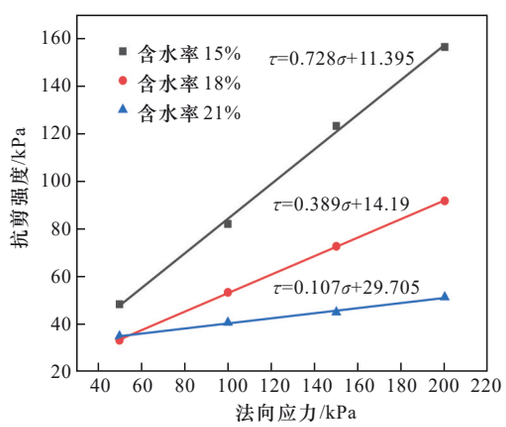


图 10　界面抗剪强度与法向应力关系(Δw)

Fig. 10　Relationships between shear strength of the interface and normal stress with different moisture contents

表 4　海底能源土-结构界面抗剪强度指标

Table 4　Shear strength indices of seabed energy soil-structure interface with different moisture contents

含水率 w/%	界面黏聚力 c/kPa	界面摩擦角 φ/(°)
15	11.395	36.055
18	14.190	21.266
21	29.705	6.107

由于含水率的增加使得土体结构界面之间的润滑作用增大，摩阻力减弱。

4.2　不同剪切速率下抗剪强度指标变化

含水率 15% 时，将不同剪切速率下的界面抗剪强度与法向应力的关系线性拟合（图 11），得到界面黏聚力与界面摩擦角的数值（表 5），土-结构界面破坏形式符合摩尔-库伦破坏准则。界面抗剪强度和法向应力可近似认为是线性关系，随着法向应力、剪切速率的增大而增加。在法向应力为 150 kPa 时，随着剪切速率从 0.006 mm/s 增加到 0.2 mm/s，界面抗剪强度从 86.19 kPa 增大至 165.23 kPa，增大幅度为 91.7%。

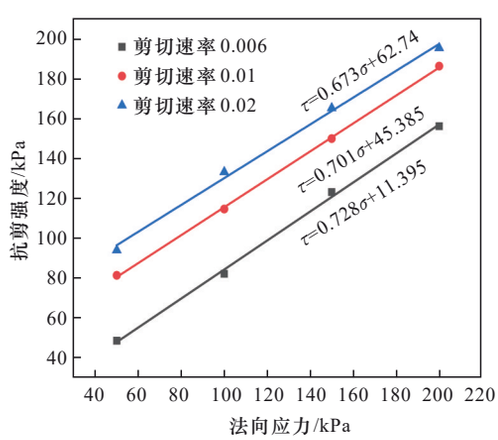


图 11　界面抗剪强度与法向应力关系(Δv)

Fig. 11　Relationships between shear strength of the interface and normal stress with different shear rates

随着剪切速率的增加，界面黏聚力逐渐增大，界面摩擦角随着剪切速率的增加先增大后减小（表 5）；剪切速率由 0.006 mm/s 增加到 0.2 mm/s 时，界面黏聚力增长幅度最大，为 450.6%，此时，界面

摩擦角在33°～37°之间变化，变化幅度较小，说明剪切速率的变化对界面摩擦角影响不大，但对界面黏聚力影响较大，且在剪切速率较大时对界面黏聚力影响更为显著。

表5 海底能源土-结构界面抗剪强度指标(Δv)

Table 5 Shear strength indices of seabed energy soil-structure interface with different shear rates

剪切速率v/(mm·s^{-1})	界面黏聚力c/kPa	界面摩擦角φ/(°)
0.006	11.395	36.055
0.01	45.385	35.031
0.02	62.740	33.941

5 结论

本文开展了海底能源土-结构的界面剪切试验，系统地分析了土样在不同含水率和不同剪切速率下的剪切力学特性，主要结论如下：

1）土-结构界面的剪切应力-剪切位移关系可用对数曲线模型表示。同一含水率和剪切速率土样的剪切应力峰值和剪切破坏位移均与法向应力呈正相关；不同含水率和剪切速率的增加会分别导致剪切应力峰值强度的降低和升高。

2）剪切过程中，土体结构界面的应变硬化现象随着剪切速率、含水率的增加逐渐变得明显；相同法向应力条件下，界面剪缩变形则随着含水率的升高、剪切速率的降低逐渐增大。

3）在相同含水率和剪切速率条件下，土体结构界面抗剪强度和法向应力可近似认为是线性关系，随着法向应力的增加逐渐增大。含水率对界面摩擦角的影响较大，二者之间呈负相关，且在含水率较大时摩擦角减小的更快；不同剪切速率条件下，界面摩擦角集中在33°～37°范围内，变化幅度较小。

参考文献：

[1] 何家雄，宁子杰，赵斌，等.南海天然气水合物资源勘查战略接替区初步分析与预测[J].地球科学，2022，47(5)：1549-1568.

[2] 宁伏龙，梁金强，吴能友，等.中国天然气水合物赋存特征[J].天然气工业，2020，40(8)：1-24，203.

[3] 王淑云，鲁晓兵.水合物沉积物力学性质的研究现状[J].力学进展，2009，39(2)：176-188.

[4] Rutqvist J，Moridis G，Grover T，et al.Geomechanical response of permafrost-associated hydrate deposits to depressurization-induced gas production[J].Journal of Petroleum Science and Engineering，2009，67(1/2)：1-12.

[5] Xin S J，Ling Z，Long N F，et al.Production potential and stability of hydrate-bearing sediments at the site GMGS3-W19 in the South China Sea：A preliminary feasibility study[J].Marine and Petroleum Geology，2017，86：447-473.

[6] Reem F A，Chee T，Ben C，et al.A wellbore stability model for hydrate bearing sediments[J].Journal of Petroleum Science and Engineering，2007，57(1/2)：209-220.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 胡建林，崔宏环，杨鑫，等.粉质黏土与再生混凝土接触面剪切特性试验研究[J].科学技术与工程，2019，19(6)：231-235.

[10] 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)：104-108，17.

[11] 王永洪，张明义，白晓宇，等.不同含水率状态下黏性土-混凝土界面剪切特性室内试验研究[J].防灾减灾工程学报，2018，38(01)：118-123，92.

[12] 于鹏，刘灿，刘红军，等.黄河三角洲粉土-钢界面大型剪切试验研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版)，2021，51(9)：71-79.

[13] 闫澍旺，林澍，贾沼霖，等.海洋土与钢桩界面剪切强度的大型直剪试验研究[J].岩土工程学报，2018，40(3)：495-501.

[14] 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.

[15] Kou H L，Diao W Z，Zhang W C，et al.Experimental study of interface shearing between calcareous sand and steel plate considering surface roughness and particle size[J].Applied Ocean Research，2021，107：102490.

[16] Wang H L，Zhou W H，Yin Z Y，et al.Effect of grain size distribution of sandy soil on shearing behaviors at soil-structure interface[J].Journal of Materials in Civil Engineering，2019，31(10)：04019238.

[17] 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(S2)：13-16.

[18] 洪勇，岳玉秋，郑孝玉，等.大连滨海粉质黏土剪切力学特性环剪试验[J].吉林大学学报(地球科学版)，2016，46(5)：1475-1481.

[19] Vafaei N，Fakharian K，Sadrekarimi A.Sand-sand and sand-steel interface grain-scale behavior under shearing[J].Transportation Geotechnics，2021，30：100636.

[20] Zhou W J，Guo Z，Wang L Z，et al.Sand-steel interface behaviour under large-displacement and cyclic shear[J].Soil Dynamics

and Earthquake Engineering，2020，138：106352.
[21] Liu Z C，Dai S，Ning F L，et al.Strength estimation for hydrate-bearing sediments from direct shear tests of hydrate-bearing sand and silt[J].Geophysical Research Letters，2018，45(2)：715-723.
[22] Liu Z C，Wei H Z，Peng L，et al.An easy and efficient way to evaluate mechanical properties of gas hydrate-bearing sediments：The direct shear test[J].Journal of Petroleum Science and Engineering，2017，149：56-64.
[23] Li Y L，Liu C L，Liu L L，et al.Experimental study on evolution behaviors of triaxial-shearing parameters for hydrate-bearing intermediate fine sediment[J].Advances in Geo-Energy Research，2018，2(1)：43-52.
[24] Yuan Q M，Kong L，Liang Q Y，et al.Mechanical characteristics of gas hydrate-bearing sediments：An experimental study from the South China Sea[J].Journal of Marine Science and Engineering，2024，12(2)：301.
[25] Lu X B，Zhang X H，Sun F F，et al.Experimental study on the shear band of methane hydrate-bearing sediment[J].Journal of Marine Science and Engineering，2021，9(11)：1158.
[26] 丁鲁强，李大勇.加筋体与土体界面力学特性试验研究进展综述[J].山东科技大学学报(自然科学版)，2018，37(3)：59-65.
[27] 侯佳奇.降压分解过程中黏土质砂水合物储层力学性质研究[D].青岛：山东科技大学，2022.
[28] 陆红锋，陈弘，陈芳，等.南海神狐海域天然气水合物钻孔沉积物矿物学特征[J].南海地质研究，2009(0)：28-39.
[29] 房兆晓.沉贯过程中饱和砂土-吸力基础界面剪切特性研究[D].青岛：山东科技大学，2020.
[30] 杨海兵.桩-土界面特性影响因素的试验研究和数值模拟[D].杭州：浙江科技大学，2017.
[31] 刘俊伟，朱娜，王立忠，等.循环荷载下砂与钢板界面的弱化机制[J].浙江大学学报(工学版)，2018，52(6)：1123-1130.
[32] Lade P V，Wang Q.Analysis of shear banding in true triaxial tests on sand[J].Journal of engineering mechanics，2001，127(8)：762-768.
[33] 孙贤，柳军，王晓辉，等.含下伏气的第一类天然气水合物藏开发实验与模拟研究进展[J].化工进展，2024，43(4)：2091-2103.
[34] 王雪刚，钟守明，吴彦先，等.水力压裂诱发断层滑移对套管的剪切作用研究[J].钻采工艺，2023，46(5)：7-14.
[35] Li Y H，Hao Y，Wu P，et al.Mechanical behavior of hydrate-bearing clayey-silty sediments in the south china sea：Strain-rate dependency[J].Energy & Fuels，2024，38(7)：5959-5973.
[36] Wu Q，Yoshimoto N，Nakano N，et al.Shear Rate-dependent behaviors on natural gas hydrate-bearing sediments under plane strain shear test[C]//Proceedings of the ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference，ISOPE，2020.
[37] 孔令伟，吕海波，汪稔，等.湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J].水利学报，2002(9)：82-88.
[38] Chen B，Sun D A，Hu Y S.Experimental study on strength characteristics and microscopic mechanism of marine soft clays[J].Marine Georesources & Geotechnology，2020，38(5)：570-582.
[39] Nian T K，Jiao H B，Fan N，et al.Microstructure analysis on the dynamic behavior of marine clay in the South China Sea[J].Marine Georesources & Geotechnology，2020，38(3)：349-362.
[40] 冯大阔.粗粒土与结构接触面三维本构规律、机理与模型研究[D].北京：清华大学，2012.
[41] 李俊超.饱和粉土-泥皮-混凝土界面环剪试验及边界面模型参数分析[D].青岛：山东科技大学，2022.
[42] 周卫东，陈舒祺，刘飞禹，等.不同含水率花岗岩残积土-格栅界面的循环剪切特性[J].土木与环境工程学报(中英文)，2025，47(3)：58-65.
[43] FREDLUND D G，RAHARDJO H.非饱和土土力学[M].北京：中国建筑工业出版社，1997.
[44] KRAHN J，FREDLUND D.On total，matric and osmotic suction[J].Soil Science，1972，114(5)：339-348.
[45] ESCARIO V，SAEZ J.The shear strength of partly saturated soils[J].Geotechnique，1986，36(3)：453-456.
[46] 苗天德，慕青松，刘忠玉，等.低含水率非饱和土的有效应力及抗剪强度[J].岩土工程学报，2001(4)：393-396.
[47] 林鸿州，李广信，于玉贞，等.基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J].岩土力学，2007(9)：1931-1936.
[48] 史卜涛，张云，胡磊，等.剪切速率对重塑饱和黏土强度影响试验[J].煤田地质与勘探，2017，45(2)：90-95.

（编辑：万　佳）