

DOI: 10.11779/CJGE2023S20023

# 含气砂不排水单调及循环剪切特性研究

孙淼军<sup>1</sup>, 施周桓<sup>2</sup>, 周波翰<sup>1</sup>, 潘 坤<sup>2\*</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:** 通过“水气置换法”制备了重塑含气砂土, 开展了一系列固结不排水剪切试验, 对比了饱和砂与含气砂在不同固结条件下的单调及循环剪切特性。试验结果表明: 正常固结条件下, 含气砂抗剪强度随含气量的增加而增大, 表现出更为显著的剪胀特性和应变硬化趋势, 其临界状态应力比相较于饱和砂有所增大。对于超固结砂土, 其抗剪强度随含气量的增加而减小, 此时气体的存在减弱了土体强度随超固结比的增长趋势; 同时, 含气砂动强度随超固结比的提高而下降。

**关键词:** 含气砂土; 不排水; 单调剪切; 循环加载; 超固结

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0165-06

**作者简介:** 孙淼军(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋地质灾害评估等方向的研究工作。E-mail: sun\_mj2@hdec.com。

## Undrained monotonic and cyclic shear behaviors of gas-bearing sand

SUN Miaojun<sup>1</sup>, SHI Zhouhuan<sup>2</sup>, ZHOU Bohan<sup>1</sup>, PAN Kun<sup>2</sup>

(1. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang

University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** A series of undrained monotonic and cyclic triaxial tests are carried out to compare the shear behaviors of the gas-bearing and saturated sand under varying consolidation conditions. The results show that under the normal consolidation conditions, the shear strength of the gas-bearing sand increases with the gas content, exhibiting a more significant dilatancy characteristic and strain-hardening tendency, and its critical state stress ratio is higher than that of the saturated sand. For the over-consolidated sand, its shear strength decreases with the gas content. It indicates that the presence of gas weakens the increasing trend of soil strength with the over-consolidation ratio. In the meanwhile, the cyclic shear resistance of the gas-bearing sand decreases with the increasing over-consolidation ratio.

**Key words:** gas-bearing sand; undrained condition; monotonic shear; cyclic loading; over consolidation

## 0 引 言

作为一种清洁能源, 海底天然气在中国国民经济建设中发挥着越来越重要的作用, 其根据所处地层深度可分为浅层天然气和深水天然气。浅层气多存在于浅层区域(即海底以下 1 km 范围内), 开发成本相对较低, 因此现阶段能源开发多以浅层气为主<sup>[1]</sup>。海底浅层气通常是由海底沉积物中的有机物经生化作用产生, 主要气体成分包括二氧化碳和甲烷<sup>[2]</sup>, 一般以游离气泡、气囊等形式赋存于土体中。地质资料表明, 浙江沿海地区广泛分布着浅层气气藏, 在气藏的形成过程中, 黏土通常作为浅层气的生气层与覆盖层, 而具有封闭条件的砂土则作为气体的储集层, 形成含气砂<sup>[3]</sup>。含气砂具有气相不连续、水相连续和高饱和度( $S_r > 85\%$ )的特点, 土中气压远高于大气压, 最高可达 0.5 MPa。杭州湾跨海大桥的施工过程中曾因出现井喷现象导致地质勘查作业中断<sup>[4]</sup>; 上海浦东隧道由

于浅层气释放导致隧道出现横向位移和不均匀沉降<sup>[3]</sup>。上述工程实例表明, 深入开展含气砂力学特性研究对指导工程实践具有重要意义。

受限于原状土取样困难以及高昂的运输成本, 室内单元体试验多围绕人工模拟制备的重塑含气土开展研究。目前已有关于室内含气土制备的方法大致分为两类。第一类是关于含气细粒土的制备: Nageswaran<sup>[5]</sup>利用沸石对极性水分子的吸附性, 以气体置换的方式制备含气土样; 韩珠峰<sup>[6]</sup>通过 CT 试验和十字剪切试验验证了沸石法制备含气软土的可行性; 闫锴等<sup>[7]</sup>进一步对沸石粒径与生成气泡直径之间的关系进行了探讨, 优化了沸石法制气效果。第二类则是用于制备含

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200); 国家自然科学基金项目(U2239251, 52178362)

**收稿日期:** 2023-11-30

**\*通信作者** (E-mail: pk2018@zjut.edu.cn)

气粗颗粒土,这类土体中气泡直径小于土体骨架,气泡的存在对土体结构影响较小。Sobkowicz 等<sup>[8]</sup>采用“CO<sub>2</sub>脱溶法”实现含气砂样的制备,即采用 CO<sub>2</sub> 饱和和水饱和试样,通过逐渐降低围压使 CO<sub>2</sub> 脱溶释放,进而得到不同含气量的砂样。陈楷文<sup>[9]</sup>针对 CO<sub>2</sub> 在水中的溶解和脱溶以及无气水驱替不易定量控制的问题,设计了溶解平衡监测釜装置,通过溶液实测 PH 值来判断气体的吸收和解吸是否达到相平衡状态,从而保证土中实际气体含量的精确性。此外,还有不少学者通过生化反应进行了尝试:胡光海<sup>[10]</sup>基于微生物的厌氧发酵产气原理,成功模拟制备出气相分布均匀的含气土样;He 等<sup>[11]</sup>基于微生物诱导部分饱和(MIPS)的方法,利用不同浓度的菌液饱和砂样,进而获得不同含气量的砂样。上述方法均属“自产气法”,试验操作较为复杂、试验可重复性不易保证,并且部分“生物制气法”存在气体量不易控制,土体扰动较大的弊端。“外生气体法”的出现则在一定程度上降低了操作难度,同时可较好地控制气体含量。刘文卓等<sup>[12]</sup>将非饱和和三轴仪中传统内置气管替换为外接的体积可控式气液储存器,提出了一种可以精确控制土中气体含量的“水气置换法”。孔亮等<sup>[13]</sup>基于上述方法,进行了常剪应力路径下含气密砂的剪切特性分析,发现试样在排水与不排水条件下的破坏模式分别为瞬变破坏与渐变破坏。韩珠峰<sup>[6]</sup>发现气体的存在减缓了砂土孔压消散的速度,土体孔压幅值及渗透性均随含气量的增加而降低。孔凡玲等<sup>[14]</sup>通过一系列固结排水三轴试验,指出含气土抵抗变形的能力随含气量的增加呈现逐渐降低的趋势。

以上关于含气砂土剪切特性的研究多关注饱和度(含气量)、密实度等条件的影响,未考虑实际工程土体多处于复杂固结应力条件(如超固结等),而对不同状态含气砂循环剪切特性的相关研究也极为少见。本文采用“水气置换法”进行含气砂样的模拟制备,进行了一系列不排水单调及循环加载三轴试验,重点探讨不同固结条件对含气砂单调及循环剪切特性的影响。

## 1 试验材料

本试验用土取自杭州湾某储气砂地域,测得砂样相对质量密度  $G_s$  为 2.64,最小孔隙比  $e_{\min}$  为 0.61,最大孔隙比  $e_{\max}$  为 0.872。图 1 为基于筛分法测得的杭州湾储气砂粒径分布曲线图,由图可知,土样粉粒含量较少,粒径主要分布于 0.1~0.5 mm。

## 2 试验步骤及试验方案

试样直径 38 mm,高度 76 mm,采用欠压击实法

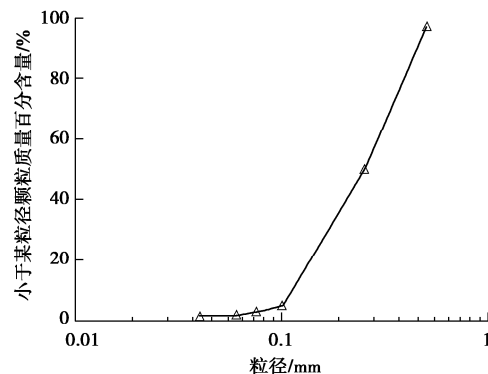


图 1 杭州湾储气砂粒径分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of Hangzhou Bay sand 制样,相比于干装法和水中沉积法,该方法可以更好地混合砂粒和粉粒,保证试样的均一性<sup>[15]</sup>。向试样中依次通入 CO<sub>2</sub> 和无气水,施加反压进行饱和(反压 200 kPa,围压 220 kPa)并检测孔压系数  $B$  值,当  $B > 0.96$  时认为试样达到饱和。

试样饱和后进行含气砂样的制备,具体操作如下:对反压和围压同时进行卸载,卸载过程中保证有效围压恒定,直至反压为 0。拆除反压阀门与控制器之间的连接,并打开排水阀门,进行“水气置换”环节。

首先,根据式(1)计算 200 kPa 反压下指定饱和度  $S'_r$  的含气砂样所含的气体含量  $V_a$ :

$$V_a = \frac{eV_0S'_r(1-S'_r)}{1+e} \quad (1)$$

式中:  $V_0$  为试样总体积;  $S'_r$  为含气砂样的饱和度。

由式(2)气体体积与压强之间的关系式,计算 200 kPa 反压条件下一定含气量  $V_a$  在标准大气压条件下所对应的体积为  $3V_a$ 。

$$pV=nRT \quad (2)$$

式中:  $p$  为气体压强;  $V$  为气体的体积;  $n$  为气体物质的量;  $R$  为气体常数;  $T$  为气体的热力学温度。

将计算得到  $3V_a$  体积量的气体通过注射器从反压口缓慢注入试样,同时记录排水阀门处排出的无气水体积,以保证充分的水气等量置换。随后,关闭排水阀门,将反压与围压再次同时线性回升至预定的压力设定值,待试样压力值稳定后静置 0.5 h,将其等向固结至设定的初始平均有效应力值并进行剪切。在对比不同应力历史条件土体的剪切行为时,将先期固结应力与现有固结应力之比定义为超固结比 OCR:

$$\text{OCR} = p_c/p_1 \quad (3)$$

式中:  $p_c$  为先期固结应力;  $p_1$  为现有固结应力。

试验过程中单调剪切采用应变控制,加载速率为 0.1%/min,循环加载频率  $f$  为 0.01 Hz,表 1 为单调剪切及循环加载的具体试验方案,表 1 中循环应力比 CSR 定义如下:

$$CSR = \frac{q_{cyc}}{2p'_0} \quad , \quad (4)$$

式中,  $q_{cyc}$  为循环应力幅值,  $p'_0$  为初始有效围压。

表 1 试验方案

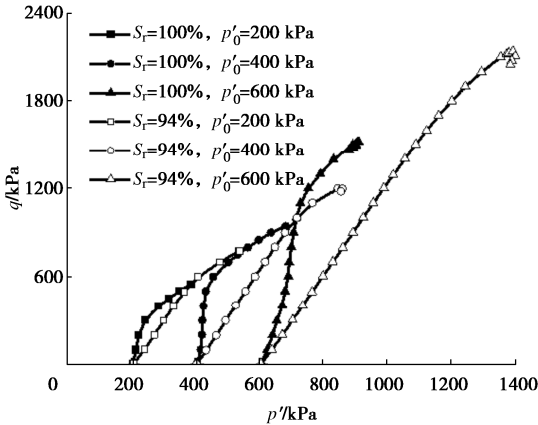
Table 1 Test schemes

| 试验类型 | $p'_0/\text{kPa}$ | $D_r/\%$ | OCR | $S_r/\%$  | CSR    |
|------|-------------------|----------|-----|-----------|--------|
| 单调剪切 | 200               | 30       | 1   | 100/96/94 | —      |
|      | 70                |          |     | 100/96/94 |        |
|      | 400               | 70       |     | 100/96/94 |        |
|      | 600               | 70       |     | 100/96/94 |        |
|      | 200               | 70       |     | 100/96/94 |        |
| 循环剪切 | 200               | 70       | 2   | 100/96/94 | 0.075  |
|      |                   |          | 1   | 100       | 0.0875 |
|      |                   |          |     | 0.1       | 0.1    |
|      |                   |          |     | 94        | 0.1125 |
|      |                   |          |     | 0.125     | 0.0075 |
|      |                   |          | 2   | 100       | 0.0875 |
|      |                   |          |     | 0.1       | 0.0875 |
|      |                   |          |     | 94        | 0.1    |
|      |                   |          |     | 0.1125    | 0.1125 |
|      |                   |          |     |           |        |

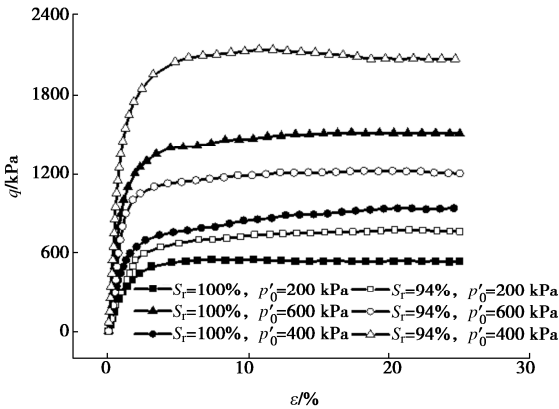
3 试验结果分析

3.1 单调剪切典型响应

图 2 为不同有效围压条件下, 饱和密砂与含气密砂不排水单调剪切试验结果。由图 2 (a) 可知, 在任一有效围压下, 试样的应力路径随着加载的进行不断向右上方发展; 值得注意的是, 在较高围压条件下 ( $p'_0=600\text{ kPa}$ ), 试样应力路径在加载末期达到峰值, 随后即出现峰值回弹现象。图 2 (b) 中, 绝大部分试样展现出应变硬化型发展模式, 试样偏应力随轴向应变的增大而增加的同时, 其增长速率逐渐降低, 最终达到稳定状态。无论是饱和砂还是含气砂, 可以观察到曲线整体随有效围压的增加出现不同程度的提升, 说明有效围压对土体提供了一定的约束作用, 并促进抗剪强度的提高。



(a) 有效应力路径图

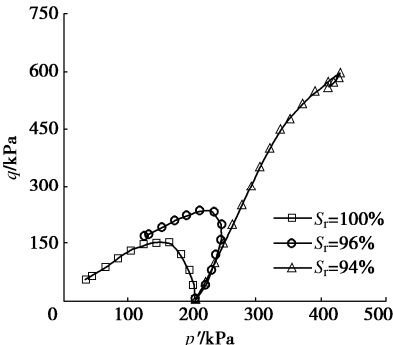


(b) 应力应变关系图

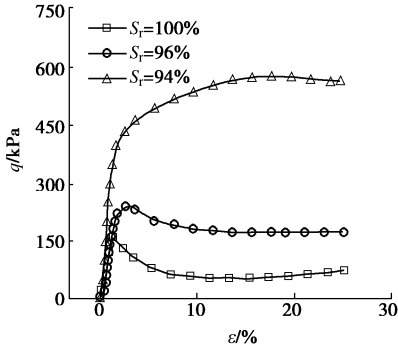
图 2 不同有效围压下密砂剪切行为

Fig. 2 Shear behaviors of dense sand under different effective confining pressures

与图 2 密砂在单调剪切过程中所表现的应变硬化行为不同, 图 3 所示 ( $p'_0=200\text{ kPa}$ ) 松砂的应力路径整体发展随饱和度的降低呈现由左下方向右上方变化的趋势。具体的, 在单调荷载作用下, 饱和松砂呈现明显的剪缩现象, 而含气松砂 ( $S_r=94\%$ ) 则主要表现为剪胀状态。图 3 (b) 应变发展曲线显示, 在非稳态态后<sup>[15]</sup>, 饱和松砂的偏应力不断减小并伴随轴向应变的急剧发展, 即试样发生应变软化行为, 含气松砂 ( $S_r=94\%$ ) 在初期表现硬化状态而后呈现微弱软化现象。上述结果表明, 随着含气量的增加, 松砂试样的应变软化程度逐渐减弱, 当含气量达到某一特定值后, 应变软化现象消失, 试样表现应变硬化趋势。



(a) 有效应力路径图



(b) 应力应变关系图

图 3 不同饱和度松砂剪切行为 ( $p'_0=200\text{ kPa}$ )

Fig. 3 Shear behaviors of loose sand with different degrees of saturation ( $p'_0=200\text{ kPa}$ )

在本系列单调剪切试验中, 试样的偏应力变化在轴向应变发展至 25% 时逐渐趋于稳定, 可以认为此时的土体接近于临界状态, 在  $p'$ - $q$  平面内分别绘制饱和砂与含气砂的临界状态特征点, 如图 4 所示。可以发现饱和砂与含气砂的临界状态应力比分别为 1.32 和 1.40, 这表明含气砂具有更大的临界状态摩擦角 ( $\varphi_{cs} = 34.6^\circ$ ); 另一方面, 含气量的大小对含气砂在  $p'$ - $q$  平面内的临界状态线影响较小。

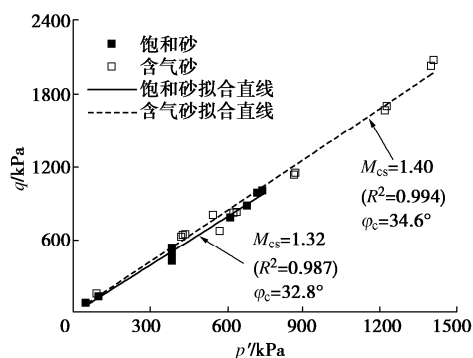


图 4  $p'$ - $q$  平面临界状态线

Fig. 4 Critical state line in  $p'$ - $q$  plane

### 3.2 循环剪切典型响应

图 5, 6 分别为循环荷载作用下饱和密砂和含气密砂 ( $S_r=94\%$ ) 的典型响应。如图 5 (a) 所示, 饱和试样的应力路径随着加载的进行不断左移直至趋近于 0。图 5 (b) 中, 在循环剪切初期, 试样的应变发展相对缓慢, 当加载至第 8 个循环时, 轴向应变出现急剧增长, 试样的破坏伴随有效应力的突然丧失和应变的急剧发展, 表现为典型的“流动液化”破坏模式。

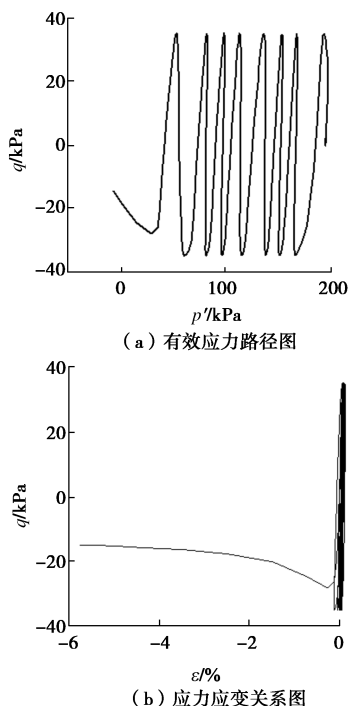


图 5 饱和密砂循环剪切响应 ( $p_0=200$  kPa)

Fig. 5 Cyclic shear responses of saturated dense sand ( $p_0=200$  kPa)

不同于饱和试样, 图 6 (a) 所示含气密砂的有效应力随着加载的进行逐渐降低, 未出现明显的急剧下降。在循环加载初期, 含气密砂的应力路径斜率较饱和试样有所增大, 说明土体中气体的存在有效缓解了孔压的上升, 加载末期由于剪缩和剪胀趋势的不断转换, 试样的应力路径呈现“蝶状”形态。相应的, 图 6 (b) 中, 试样在前 83 次循环中应变积累较为缓慢, 但在后续 2 个循环中应变向压缩和拉伸两侧迅速发展。不同于图 5 所表现的流动液化破坏, 此时试样的破坏由“循环活动性”<sup>[15]</sup>所导致。

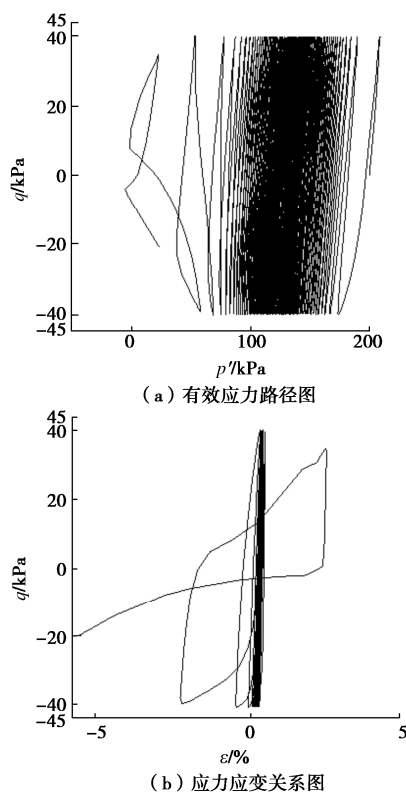


图 6 含气密砂循环剪切响应 ( $p_0=200$  kPa)

Fig. 6 Cyclic shear responses of gas-bearing dense sand ( $p_0=200$  kPa)

### 3.3 强度特性

上述单调剪切试验中, 对于松砂在应变软化过程中出现峰值偏应力和密砂在硬化后期偏应力保持稳定的现象, 图 7 引入峰值偏应力  $q_{peak}$  和残余偏应力  $q_{res}$  分别作为松砂与密砂的强度表征参数, 其中残余偏应力指试样应变发展至 15% 时所对应的偏应力值。由图 7 可知, 试样的峰值偏应力和残余偏应力均随饱和度的降低而增大, 说明不论是松砂还是密砂, 气体的存在有助于土体抗剪强度的提高, 并且这一增强效应随含气量的增大愈加显著。

图 8 为砂土的超固结比 OCR 与残余偏应力  $q_{res}$  关系曲线。由图 8 可知, 3 种试样的峰值偏应力随 OCR 的增大而增大, 但是这一强度提高趋势随着饱和度的降低逐渐减缓, 当  $S_r$  下降至 94% 时, 3 种超固结比状

态下的土体残余偏应力近似相同。此外, 超固结条件下, 试样残余偏应力随饱和度的降低而减小, 这与正常固结砂土的表现恰恰相反, 此时气体的存在反而阻碍了试样残余强度的提高。

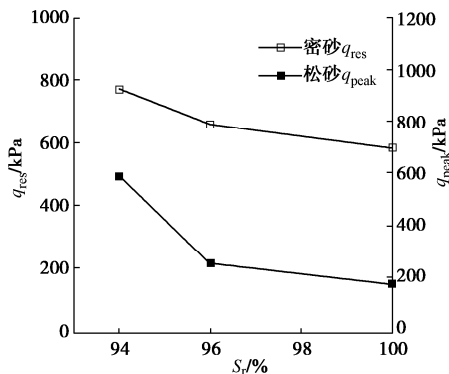


图 7 不同密实度砂土强度与饱和度关系曲线 ( $p_0=200$  kPa)

Fig. 7 Relationship between strength and saturation degree of sand with different densities ( $p_0=200$  kPa)

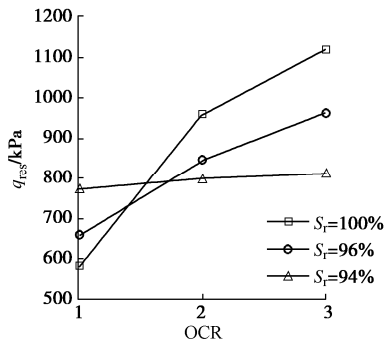


图 8 超固结比与残余偏应力关系曲线 ( $p_0=200$  kPa)

Fig. 8 Relationship between over-consolidation ratio and residual deviator stress ( $p_0=200$  kPa)

图 9 所示为不同超固结比条件下, 饱和密砂与含气密砂 ( $S_r=94\%$ ) 在达到 5% 应变破坏标准所需振次  $N_f$  与循环应力比 CSR 之间的关系曲线。总的来说, 试样的破坏振次随 CSR 的增加而减少, 说明 CSR 的提高不利于土体稳定性。当 CSR 相同时, 含气试样相较于饱和砂样破坏振次更大, 这表明气体有助于正常固结土体动力稳定性的提高。此外, 随着超固结比的增大, 饱和密砂 (OCR=2) 动强度也呈现一定程度的提升; 而对于含气砂土, 其动强度则随着超固结比的增大而减小, 这与单调剪切试验规律保持一致。

对于饱和砂而言, 试样属于固液两相体系, 超固结比 OCR 越大, 土体在初始状态下的骨架排列便愈加紧密, 有助于试样整体强度的提高; 然而, 作为固液气三相体系的含气砂, 特别是在超固结状态下, 土体的结构性发生改变, 颗粒间已有的咬合、排列在受到剪切荷载作用下将会被削弱<sup>[16]</sup>, 且土中气泡 (气相) 随荷载的施加不断出现破裂<sup>[8]</sup>, 进而引起土骨架发生错动、滑移, 导致土体原有骨架受力体系发生破坏,

因此不利于试样整体强度。

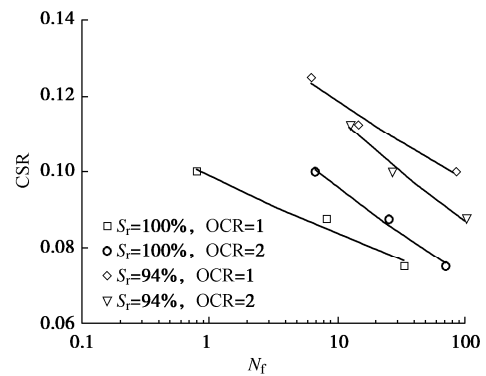


图 9 饱和密砂和含气密砂  $N_f$ -CSR 曲线 ( $p_0=200$  kPa)

Fig. 9  $N_f$ -CSR curves of saturated and gas-bearing dense sand ( $p_0=200$  kPa)

## 4 结 论

本文基于“水气置换法”制备了重塑含气砂样, 通过一系列固结不排水剪切试验, 对比了饱和砂与含气砂在不同固结条件下的单调及循环剪切特性。

(1) 不同密实度和围压条件下, 含气量对砂土单调剪切特性的影响规律较为一致, 土体强度随含气量的增加而增大, 表现出更为显著的剪胀行为和应变硬化趋势; 相较于饱和砂, 含气砂的临界状态应力比有所增大。

(2) 对于超固结砂土, 其抗剪强度随含气量的增加而减小, 与正常固结砂土的表现相反, 此时气体的存在减弱了土体强度随超固结比的增长趋势。其原因是超固结状态下, 土中气泡随荷载的施加发生破裂, 进而导致土骨架发生错动、滑移, 不利于试样整体强度。

(3) 循环荷载作用下, 试样主要表现为流动液化和循环活动性两种破坏模式, 含气砂抗液化强度较饱和砂有所增大; 同时, 含气砂动强度随超固结比的增大而降低。

## 参考文献:

- [1] 卢 浩, 王明洋, 戎晓力, 等. 含气地层中气体释放对盾构隧道稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 301-306, 323. (LU Hao, WANG Mingyang, RONG Xiaoli, et al. Study of influence of gas entering tunnel on stability of shield tunnel in gassy soil layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 301-306, 323. (in Chinese))
- [2] 丁 智, 郑海洋, 冯丛烈, 等. 含气土工程特性研究现状综述及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(4): 537-553. (DING Zhi, ZHENG Haiyang, FENG Conglie, et al. Overview on research of engineering characteristics of gassy

- soil and prospects[J]. Tunnel Construction, 2021, **41**(4): 537-553. (in Chinese))
- [3] 孔令伟, 郭爱国, 陈守义, 等. 浅层天然气井喷对地层的损伤影响与桩基工程危害分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, **24**(4): 375-381. (KONG Lingwei, GUO Aiguo, CHEN Shouyi, et al. Influence of shallow natural gas blowout on stratum damage and hazard analysis of pile foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, **24**(4): 375-381. (in Chinese))
- [4] 朱瑶宏, 黄燕庆, 曾洪贤, 等. 杭州湾大桥南岸工程地质特征与浅层气分布[J]. 岩土力学, 2002, **23**(增刊 1): 215-219. (ZHU Yaohong, HUANG Yanqing, ZENG Hongxian, et al. Engineering geological features and shallow gas distribution in south bank of Hangzhou Bay bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(S1): 215-219. (in Chinese))
- [5] NAGESWARAN S. Effect of Gas Bubbles on the Sea Bed Behaviour[D]. Oxford: University of Oxford, 1983
- [6] 韩珠峰. 波浪作用下砂质含气海床的动力响应特性研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020. (HAN Zhufeng. Study on Dynamic Response Characteristics of Sandy Gas-bearing Seabed under Wave Action[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [7] 闫 锴, 王 勇, 张军杰, 等. 海底泥质含气沉积物样品的沸石法制备探讨[J]. 实验室研究与探索, 2022, **41**(1): 11-16, 27. (YAN Kai, WANG Yong, ZHANG Junjie, et al. Discussion on the preparation of seabed muddy gas-bearing sediment samples by zeolite method[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, **41**(1): 11-16, 27. (in Chinese))
- [8] SOBKOWICZ J C, MORGENSTERN N R. An experimental investigation of transient pore pressure behavior in soils due to gas exsolution[C]// Proceedings of the International Symposium on Prediction and Performance in Geotechnical Engineering. Quebec, 1987.
- [9] 陈楷文. 不同剪切路径下含气砂土的力学响应特性试验研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021. (CHEN Kaiwen. Experimental Study on Mechanical Response Characteristics of Aerated Sand under Different Shear Paths[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021. (in Chinese))
- [10] 胡光海. 东海陆坡海底滑坡识别及致滑因素影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. (HU Guanghai. Identification of Submarine Landslides along the Continental Slope of the East China Sea and Analysis of Factors Causing Submarine Landslides[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese))
- [11] HE J, CHU J, IVANOV V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas[J]. Géotechnique, 2013, **63**(4): 267-275.
- [12] 刘文科, 孔 亮, 袁庆盟, 等. 含气土三轴试样制备的新方法[J]. 实验室研究与探索, 2018, **37**(4): 63-67. (LIU Wenzhuo, KONG Liang, YUAN Qingmeng, et al. New method of preparation of gassy soil specimens in triaxial tests[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, **37**(4): 63-67. (in Chinese))
- [13] 孔 亮, 刘文科, 袁庆盟, 等. 常剪应力路径下含气砂土的三轴试验[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3319-3326. (KONG Liang, LIU Wenzhuo, YUAN Qingmeng, et al. Triaxial tests on gassy sandy soil under constant shear stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3319-3326. (in Chinese))
- [14] 孔凡玲, 王 滢, 张 粮, 等. 深海能源土含气储层力学特性三轴试验研究[J]. 海洋工程, 2023, **41**(6): 148-157. (KONG Fanling, WANG Ying, ZHANG Liang, et al. Triaxial test study on mechanical properties of deep-sea energy-bearing soil gas reservoir[J]. The Ocean Engineering, 2023, **41**(6): 148-157. (in Chinese))
- [15] PAN K, XU T T, LIAO D, et al. Failure mechanisms of sand under asymmetrical cyclic loading conditions: experimental observation and constitutive modelling[J]. Géotechnique, 2022, **72**(2): 162-175.
- [16] 汪华斌, 周 宇, 余 刚, 等. 结构性花岗岩残积土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(4): 991-1002. (WANG Huabin, ZHOU Yu, YU Gang, et al. Triaxial test of structural granite residual soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(4): 991-1002. (in Chinese))

(编校: 孙振远)