

循环荷载下深海能源含气土动力特性试验研究

王 滢^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 孔祥霄^{1,2}

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:以往对深海能源含气土的研究多以静荷载作用为主,且含气土的气泡尺寸多为不可控的离散小气泡。本研究提出一种能够控制含气量及气泡大小的制样方法,并对含有离散大气泡的深海能源含气土开展固结不排水循环加载动三轴试验,分析深海能源含气土在不同循环应力比(cyclic stress ratio, CSR)、有效围压、饱和度和黏土含量条件下的累积塑性应变、滞回曲线、动孔压和动强度发展规律。结果表明:累积塑性应变分为“稳定增长型”和“失稳破坏型”两类,累积塑性应变增长速率随着 CSR 增大、饱和度下降、围压增大和黏土含量增加而加快。含气土的滞回圈随振次增加、饱和度下降、围压增大及黏土含量增加,呈现出回弹模量降低、阻尼比增大的现象。含气土动孔压发展模式分为“缓慢增长型”和“孔压骤增型”,孔压增长速率随饱和度下降、CSR 增大及黏土含量增加而加快,且在循环荷载作用下,动孔压均未达到有效应力水平,即在轴向应变达到 5% 前,试样未现液化破坏现象。动强度随饱和度降低而下降,且下降幅度随饱和度的降低,呈现出增大的趋势。

关键词:深海能源土;含气土;动力特性;动三轴试验;位移判别标准

中图分类号:TU411

文献标志码:A

Experimental study on dynamic characteristics of deep-sea energy gas-bearing soil under cyclic loading

WANG Ying^{1,2}, LI Pengfei^{1,2}, KONG Xiangxiao^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Previous studies on deep-sea energy gas-bearing soil mainly focus on static load effects and uncontrollable discrete small bubbles of gas-bearing soil in size. In this study, a sample preparation method for controllable gas content and bubble size was proposed and consolidated undrained cyclic loading dynamic triaxial tests were conducted on deep-sea energy gas-bearing soil containing discrete large bubbles to analyze the cumulative plastic strain, hysteresis curve, dynamic pore pressure, and dynamic strength development of deep-sea energy gas-bearing soil under different cyclic stress ratios (CSR), effective confining pressures, saturation levels, and clay contents. The results show that the cumulative plastic strain can be divided into “stable growth type” and “unstable failure type”. The rate of cumulative plastic strain growth increases with the the decrease of saturation and the increase of CSR, confining pressure, and clay content. The hysteresis loop of gas-bearing soil increases with the decrease of saturation and the increase of vibration frequencies, confining pressure and clay content, showing a decrease in elastic modulus and an increase in damping ratio. The development mode of dynamic pore pressure in gas-bearing soil can be divided into “slow growth type” and “sudden increase type”. The rate of pore pressure growth accelerates

收稿日期:2023-06-12

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME144)

作者简介:王滢(1979—),女,山东临沂人,副教授,博士,主要从事岩土动力学及岩土地震工程教学和研究。

E-mail:hopeywwgy@hotmail.com

with the decrease of saturation and the increase of CSR and clay content. Moreover, under cyclic loading, the dynamic pore pressure does not reach the same level as the effective stress, that is, no liquefaction failure phenomena occur to the sample before the axial strain reaches 5%. The dynamic intensity decreases with the decrease of saturation and the decrease magnitude shows an increasing trend with the decrease of saturation.

Key words: deep-sea energy soil; gas-bearing soil; dynamic characteristics; dynamic triaxial test; displacement discrimination criteria

天然气水合物是一种在低温高压条件下形成的化合物,由气体分子和水分子结合而成,其中气体分子主要为甲烷等烃类气体,因此天然气水合物也被称为可燃冰^[1]。天然气水合物主要分布在深海和寒冷地区,该区域环境对其存储和稳定性有着至关重要的影响。天然气水合物在开采和提取过程中分解为气体,导致深海能源土形成深海能源含气土,降低海底沉积地层的稳定性,从而增加深海能源土的开采难度。因此,深入研究深海能源含气土的动力特性对安全有效开采具有重要意义。

当前针对深海能源土的研究,主要基于人工合成模拟试样开展。根据含天然气水合物的深海沉积土性质,刘芳等^[2]采用甲烷及四氢呋喃制备水合物并混合砂土制备深海沉积物,利用三轴试验仪对深海能源土饱和度与内摩擦角进行了研究。Yoneda等^[3]将含甲烷水合物同 Toyoura 砂混合制备了深海能源土,利用自主研制的高压低温平面应变测试仪对能源土的剪切带应变行为进行研究。Hyodo等^[4]将日本南开海槽深海沉积土与甲烷水合物混合以制备深海能源土,通过高围压三轴压缩法,对试样进行了不同应变速率的试验研究。李洋辉等^[5]将高岭土同天然气水合物混合以制备深海能源土,并通过三轴试验对不同围压下深海能源土的力学行为进行了研究。Kajiyama等^[6]研究了细粒含量对深海能源土抗剪强度的影响。蒋明镜等^[7]结合深海能源土微观胶结模型,通过平面应变双轴试验的离散元模拟,研究了深海能源土剪切带形成机理以及剪切带内外的宏微观变量特征。以上研究大多是对深海能源土的静力学方面进行讨论,而对于深海土的动力特性研究鲜有报道。

鉴于获取深海能源土的困难性,目前对天然气水合物分解后的深海能源含气土的力学特性研究,多是将其转化为对含气土的相关研究。黄家晟等^[8]基于分数阶黏弹性模型对含气土的地基热水气力耦合时变行为进行了探讨。闫锴等^[9]采用沸石制备含气土试样,探究了不同沸石掺量下的含气土力学特性。刘文卓等^[10]采用水气置换法制备含气土,开展了含气土与饱和土的对比试验。孔亮等^[11]通过改进非饱和土三轴仪,提出一种充气管法对含气土试样进行制备,探究常剪应力路径下的含气砂土力学性能。韩珠峰等^[12]基于沸石的微孔吸附特性,以沸石为中间介质研究模拟制备含气软土沉积物的方法,探讨了沸石掺量与置换气量之间的关系。虽然已经进行了许多含气土的试验研究,但在实验室制备含气土试样方面仍存在许多不足,其中主要的问题之一是目前还缺乏有效控制气泡大小及含气量的方法。

综上所述,当前深海能源含气土的动力特性研究较少,且含气土的气泡尺寸多为不可控的离散小气泡。依据深海能源含气土的力学特点,利用标准应力路径三轴仪,制备气相为可控尺寸的离散大气泡含气土试样进行循环荷载作用下的动力特性试验研究,以期对深海能源含气土的稳定、液化及抗震性能研究提供一定的理论支撑。

1 试验方案设计

1.1 试验材料

1.1.1 海砂

试验所用砂样取自青岛黄海海域,由于原状海砂粒度差异较大,且长期沉积在海底,其中多含海草、海生物及海底淤泥等杂质,若使用原状海砂进行试验,将造成较大误差。为确保试验准确性,采用粒径 2 mm 以下的海砂进行相关试验,粒径级配曲线见图 1。

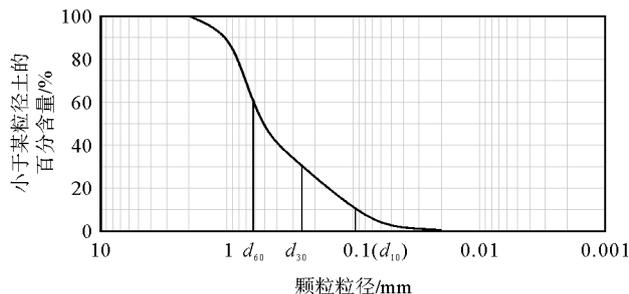


图 1 海砂粒径级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of sea sand

为进一步判断试验所用海砂的级配特征,通过图 1 海砂粒径级配曲线,得到海砂特征粒径:有效粒径 d_{10} 、连续粒径 d_{30} 及控制粒径 d_{60} , d_{10} 、 d_{30} 及 d_{60} 分别相当于小于某粒径土重累计百分含量为 10%、30% 及 60% 对应的粒径,并由特殊粒径计算不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ,当试样 $C_u > 5$ 、 $1 < C_c < 3$ 时粒径级配良好。本试样 $C_u = 6.3 > 5$ 、 $1 < C_c = 1.07 < 3$,故试验所用海砂属于级配良好的砂样。

1.1.2 高岭土

试验所用黏土需具备与海洋黏土相当的力学性能,方能降低误差,得到合理的试验结果。朱一铭^[13]通过高岭土与海洋黏土的对比试验发现,在粒径级配、力学特性及水合物破坏强度方面,两者具有基本一致的特性,验证了高岭土代替海洋黏土的可行性,试验所用高岭土成分见表 1。

表 1 高岭土成分
Table 1 Composition of kaolin

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	MnO	K ₂ O	其他
含量	52.14	24.68	5.22	2.57	1.03	0.10	0.13	1.37	12.76

1.1.3 海洋土配比

为探究不同工况下深海能源土含气土的力学特性,需对不同黏土比例掺量的试样进行相关试验研究。试验选用高岭土作为海洋土的黏土部分,分别按 10%、15% 及 20% 比例将黏土掺入海砂中,以制备不同工况下的海洋土试样。将制备完毕的海洋土试样置于真空饱和器中,对其进行抽气储存,以防空气中的气体及水分进入试样。依据土工试验方法标准对海洋土试样进行基本物理参数测定,结果见表 2。

表 2 海洋土试样基本试验指标
Table 2 Basic test indicators of marine soil samples

海洋土类型	黏土含量/%	比重 G_s	孔隙比 e_0	塑性指数 I_p	泊松比 ν
1	10	2.66	0.65	4.62	0.35
2	15	2.67	0.64	5.34	0.36
3	20	2.67	0.62	6.53	0.36

1.2 试验方法

1.2.1 含气土试样制备

利用标准应力路径三轴仪进行等压固结不排水试验,不同饱和度的试样采用 CO₂ 饱和与反压饱和相结合的方式制备^[14],当孔隙水压力系数 $B \geq 0.97$ 时,认为试样饱和,试验采用正弦波施加循环荷载。

含气土是一种饱和度 $S_r \geq 85\%$ 的非饱和土体,其气体赋存形式呈封闭状,并有离散小气泡及离散大气泡两种形态,如图 2 所示。而深海能源含气土中以离散大气泡赋存形态更为常见,故对制备离散大气泡含气土开展相关研究。

鉴于目前各类试验方法虽能制备含气土,但气泡尺寸难以控制的现状,试验采用半径 2.5 mm、高 2 mm 的圆柱形水晶气泡(高压聚乙烯)代替真实气泡。深海能源含气土中的气体通常由甲烷、硫化氢等气体组成,由于仅探讨深海能源含气土在动荷载作用下的力学特性,

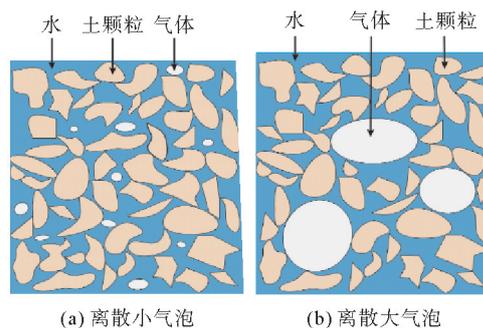


图 2 含气土气泡赋存形态

Fig. 2 Occurrence form of gas bubbles in aerated soil

考虑安全因素以及突出试验研究重点,本研究采用空气代替^[15]。通过加入不同比例的水晶气泡,再对试样进行饱和,消除其他游离气体,以制备含气土试样,从而达到控制气泡尺寸及含气量的目的。试样含气量通过公式(1)与公式(2)原理进行控制。

$$V_g = \frac{e_0 V_t (1 - S_r)}{e_0 + S_r}, \tag{1}$$

$$n = \frac{V_g}{V_c} \tag{2}$$

式中: V_g 为含气土气体总体积; V_t 为含气土试样总体积; e_0 为初始孔隙比; S_r 为饱和度,且 S_r 大于 0(深海能源土通常为湿土); n 为水晶气泡数量; V_c 为水晶气泡体积。

依据不同含气土的围压、黏土含量及含气量的不同,制备不同的试样,并设定不同的循环应力比(CSR),以探究其动力特性。试验方案如表 3 所示。

表 3 试验方案
Table 3 Test programs

黏土含量/%	饱和度/%	有效围压/kPa	CSR
		50	0.60
	97	100	0.45, 0.60, 0.75
		150	0.60
		50	0.60
10	94	100	0.45, 0.60, 0.75
		150	0.60
		50	0.60
	91	100	0.45, 0.60, 0.75
		150	0.60
15	94	50	0.60
20	94	50	0.60

1.2.2 试验过程

不同工况下试验过程基本类似。试验步骤为:①现场取样在室内进行筛分;②根据不同工况,通过分层捣实法^[16]制备含气土试样;③饱和试样;④各向等压固结,固结比取 $K_c=1.0$;⑤施加循环荷载,对深海能源含气土试样展开动力试验。

含气土破坏判别标准主要有孔隙水压力初次与有效围压相等的初始液化判别标准和超过容许值的位移判别标准。本试验采用超过容许值的位移判别标准,以试样轴向应变

达 5% 作为破坏标准。不同类型三轴试验应力路径如图 3 所示,图中 σ_1 和 σ_3 分别为三轴试验大主应力和小主应力,横竖坐标分别为平均主应力 p 和广义剪应力 q , K_0 为静止土压力系数。

2 试验结果分析

2.1 累积塑性应变

含气土的累积塑性应变曲线依据不同发展过程可分为“稳定增长型”和“失稳破坏型”两类:① 稳定增长型。在动荷载作用下试样尺寸变化较小,试样内部结构较为稳定,塑性应变增长速率较低,在试验振次(N)内未达破坏;② 失稳破坏型。试样初期塑性变形发展缓慢、内部结构稳定,随振次增加,试样内部结构剧烈变化,在某一振次下试样失稳,失稳后试样塑性应变呈直线型迅速增加,进而造成试样破坏。

2.1.1 不同 CSR 下累积塑性应变演变规律

图 4 为有效围压 100 kPa,黏土含量 10%,饱和度分别为 97%、94%、91%,不同 CSR 的含气土累积塑性应变曲线。由图 4 可知,当试样 CSR 为 0.45 时,随振次增加,试样塑性应变增长速率较慢,试样的最大累积塑性应变分别为 0.44%、0.49% 和 0.69%,累积塑性应变 ϵ_{dc} 始终小于 1%,呈稳定增长型。当 CSR 为 0.60 和 0.75 时,在塑性应变 ϵ_{dc} 发展前期试样呈稳定增长型,但随振次增加,试样内部结构剧烈变化,呈失稳破坏型特征。说明相同围压下随 CSR 增大,含气土的孔压增长速率呈现增大态势,使得土体在较短时间内发生变形,继而破坏。

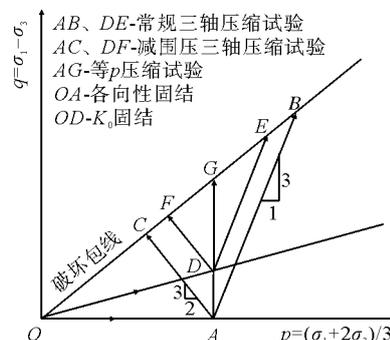


图 3 p-q 应力路径图

Fig. 3 p-q stress path diagram

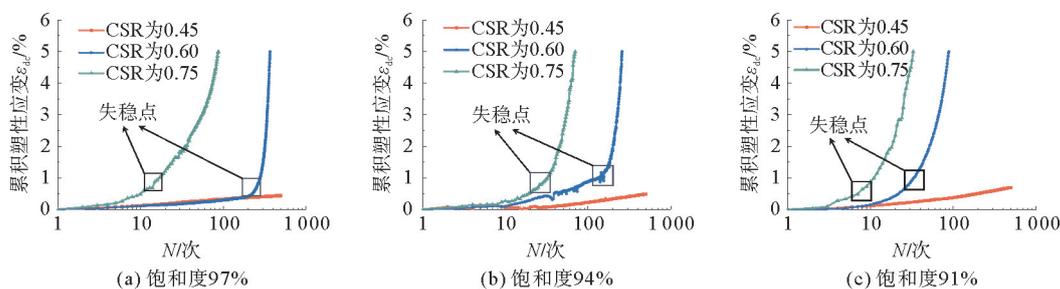


图 4 不同 CSR 下累积塑性应变曲线

Fig. 4 Accumulated plastic strain curve under different CSRs

2.1.2 不同饱和度下累积塑性应变演变规律

图 5 分别为有效围压 50、100 和 150 kPa, CSR 为 0.60, 黏土含量 10%, 不同饱和度的含气土累积塑性应变曲线。

1) 由图 5(a)可知, 当试样饱和度为 97% 时, 累积塑性应变 ϵ_{dc} 发展平缓, 呈稳定增长型。当饱和度为 94%、91% 时, 试样在较低振次下应变发展平缓, 随振次增加, 在较短振次下发生破坏, 呈失稳破坏型。

2) 由图 5(b)和图 5(c)可知, 随着围压增大, 各工况累积塑性应变 ϵ_{dc} 增长速率明显加快, 失稳所需振次降低。其中 97% 饱和度含气土试样随着围压增大, 从稳定增长型转化为失稳破坏型, 且随饱和度降低, 失稳点也更加不明显。在循环荷载作用下, 深海能源土含气储层随着饱和度的降低和围压的增大, 土体更容易发生破坏, 且随围压增大, 稳定增长型向失稳破坏型转变。

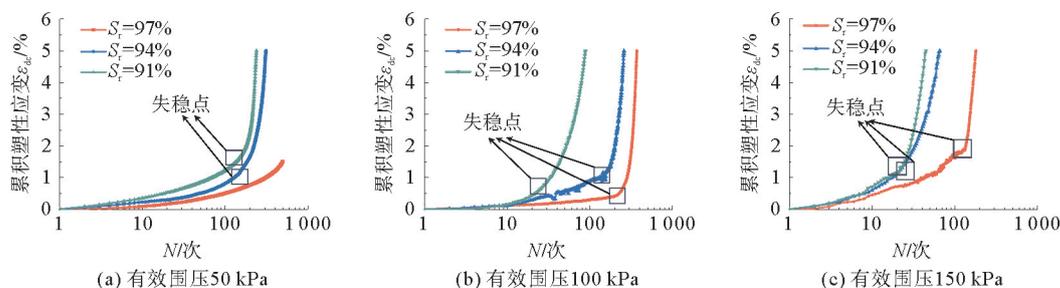


图 5 不同饱和度的累积塑性应变曲线

Fig. 5 Accumulated plastic strain curve at different saturation levels

2.1.3 不同黏土含量下累积塑性应变演变规律

图 6 为有效围压 50 kPa, CSR 为 0.60, 饱和度为 97%、94%、91% 时, 不同黏土含量的含气土累积塑性应变曲线。

1) 由图 6(a)可知, 试样在 97% 饱和度下, 当黏土含量为 10% 时, 试样塑性应变 ϵ_{dc} 稳步发展, 呈稳定增长型。试验终止时, 其最终应变达 1.51%, 超过 1%, 塑性应变较大。黏土含量为 15% 及 20% 时, 试样出现失稳点, 呈失稳破坏形态。

2) 由图 6(b)和图 6(c)可知, 不同黏土含量时含气土皆为失稳破坏型, 且随黏土含量的增大, 失稳及破坏所需振次进一步下降。这是由于黏土颗粒的存在填补了沙粒间的孔隙, 颗粒间接触面积增大, 使得有效应力降低, 土体抗剪强度下降, 含气土更容易发生变形, 从而达到破坏。随着黏土含量的增加, 含气土的抗剪强度也会随之下降, 黏土含量增多是含气土发生破坏的重要因素。

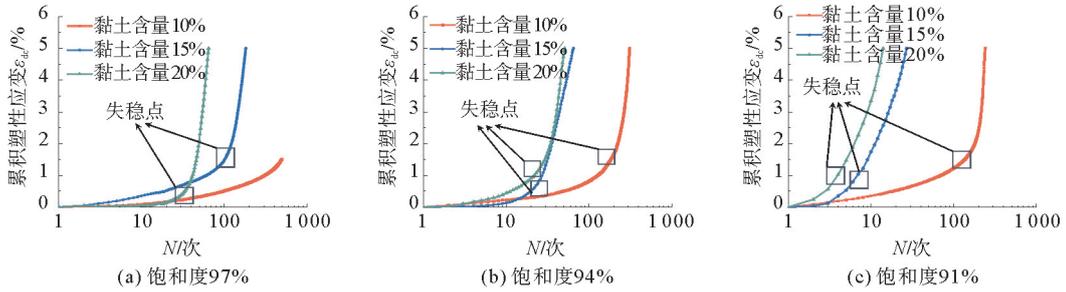


图 6 不同黏土含量下累积塑性应变曲线

Fig. 6 Accumulated plastic strain curve under different clay contents

2.2 滞回曲线

滞回曲线是关于土体应力-应变关系的曲线,其演变过程能够直观表征土体的材料和动力特性。一方面,滞回圈的倾斜程度可表征土体的回弹模量,即刚度的大小;另一方面,滞回圈的面积可表征阻尼比,即土体的耗能能力。

2.2.1 相同振次下滞回曲线变化趋势

图 7 为振次 $N=10$,有效围压 50、100 和 150 kPa,CSR 为 0.60,黏土含量 10% 及不同饱和度下的含气土滞回曲线。由图 7 可知:

- 1) 随着饱和度的下降,滞回圈倾斜程度变小,说明在相同动荷载作用下,深海能源含气土随着饱和度下降,回弹模量减少,土体刚度降低;面积增大表征阻尼比增大,耗能能力增强。
- 2) 随着围压增大,试样滞回圈面积增加,表明含气土试样的耗能能力随着围压的增大而增加。随着围压增大,含气土试样滞回圈的倾斜程度也随之降低,即土体的回弹模量也有所下降。

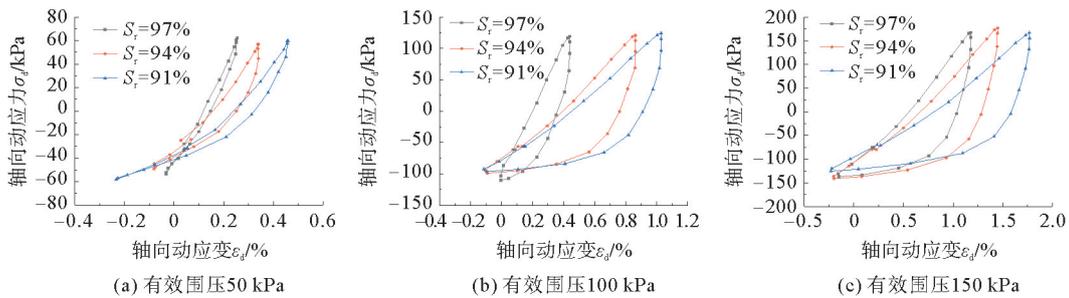


图 7 同一振次不同饱和度下滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curve under the same vibration frequency and different saturation levels

2.2.2 不同振次下滞回曲线变化趋势

图 8 为有效围压 100 kPa,CSR 为 0.45、0.60、0.75,黏土含量 10%,饱和度 94%,不同振次下的含气土滞回曲线变化趋势。

- 1) 由图 8(a)可知,含气土试样的滞回曲线随着振次增加,斜率变化较小,面积减小。在动荷载作用下显示出塑性变形较小的现象,此时与上述累积塑性应变曲线中的稳定增长型相对应,面积减小表明土体的阻尼比降低,抗震能力下降。
- 2) 由图 8(b)和图 8(c)可知,试样滞回曲线具有前期稳定发展、中期逐渐变化、后期突然破坏的特征。在振动前中期,对应累计塑性应变曲线中的稳定发展特征,且逐渐呈现出塑性变形的特点。在发展后期,试样在较少振次下滞回圈倾斜程度达到最小,面积达到最大,表明试样丧失抵抗动荷载变形的能力,对应累计塑性应变曲线中的失稳破坏特征。

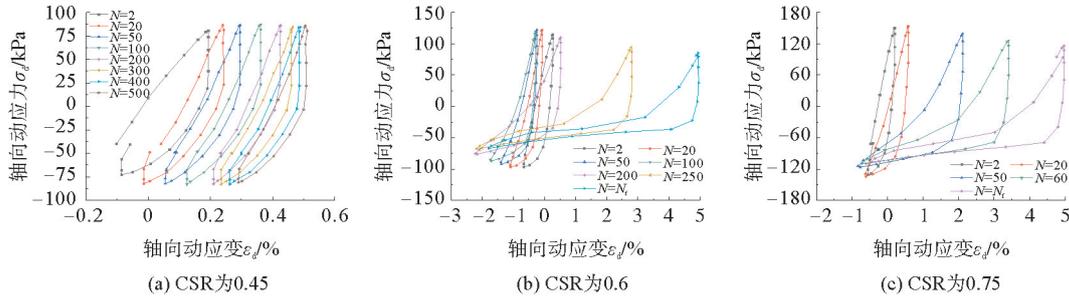


图 8 不同振次下滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curve under different vibration frequencies

2.3 动孔压

土体在动荷载作用下,孔隙水压力的增长,是抗剪强度下降的根本性原因,也是有效应力法分析土体动强度大小的关键。采用动孔压为纵轴,振次为横轴来描述动荷载作用下含气土孔压的演变规律,且当动孔压与有效围压初次相等时有效应力趋近 0,认为含气土发生液化破坏。动孔压曲线的发展模式可以分为两种:

1) 缓慢增长型。随振次增加,动孔压缓慢增长,根据有效应力原理,此时有效应力缓慢下降,从而抗剪强度下降速率较低,使土体能够抵抗更高振次的循环荷载。

2) 孔压骤增型。在振动初期,土体孔压大幅上涨,使得有效应力迅速降低,抗剪强度大幅下降,使得土体在较短振次内就达到破坏。

图 9 为有效围压 100 kPa,黏土含量 10%,饱和度为 97%、94%、91%,不同 CSR 下的动孔压发展过程。

1) 由图中 9(a)可知,当 CSR 为 0.45 时,随振次增加,孔压增长较低,呈现出缓慢发展特征,此时土体有效应力下降较少,含气土试样具有充足承载能力。当 CSR 为 0.60 时,前期孔压发展较慢,动孔压达到 40 kPa 时曲线的曲率发生变化,孔压增长速度提高。当 CSR 为 0.75 时,孔压在较低振次下迅速发展,呈孔压骤增特性,土体有效应力迅速下降,试样承载能力大幅下降,含气土试样在较少振次下达到了破坏。

2) 由图 9(b)可知,当 CSR 为 0.45 时,试样动孔压同样呈现出稳定增长特征。当 CSR 为 0.6 时,动孔压前期稳定增长,到中期曲率改变,孔压增长速率增加。CSR 为 0.75 时,动孔压呈现出明显的孔压骤增型特征。

3) 由图 9(c)可知,当 CSR 为 0.6 时,孔压在较小振次下迅速发展,使土体在较少振次下达到了破坏,呈现出与图 9(a)中 CSR 为 0.6 时不同的特性。表明当饱和度下降时,孔压发展过程可能从缓慢增长型向孔压骤增型转变。

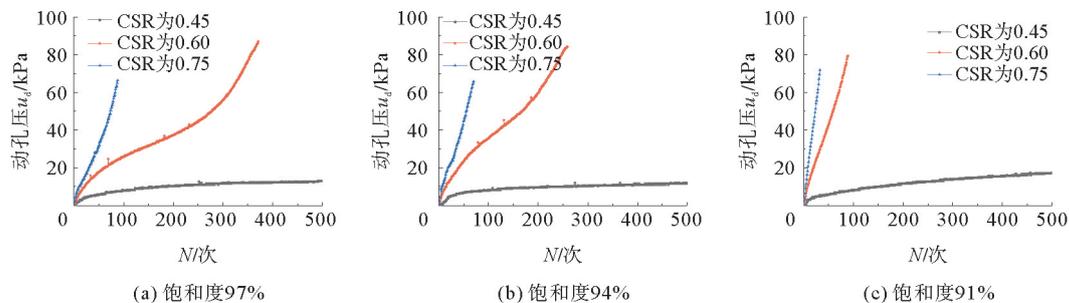


图 9 不同 CSR 下动孔压发展过程

Fig. 9 Development process of dynamic pore pressure under different CSRs

图 10 为有效围压为 50、100 和 150 kPa,CSR 为 0.60,黏土含量 10%,不同饱和度下的动孔压发展曲线。由图 10 可知:

1) 在动荷载作用下,随饱和度下降,孔压上涨速率上升。表明当饱和度下降时,土体更容易发生变形,

当变形增大时,孔压也会随之增大。

2) 当围压较低时,试样在不同饱和度下的动孔压均呈现出缓慢增长型特性,随着有效围压增大,试样在饱和度为 94% 和 91% 时由缓慢增长型转变为孔压骤增型,而试样在饱和度为 97% 时未发生类型转变,表明此时土体抗剪强度下降较为缓慢。

3) 在不同有效围压下,饱和度由 97% 下降到 91% 的过程中,含气土试样的孔压增长、振次减少,抵抗变形的能力随之降低,在达液化破坏前已达应变破坏。

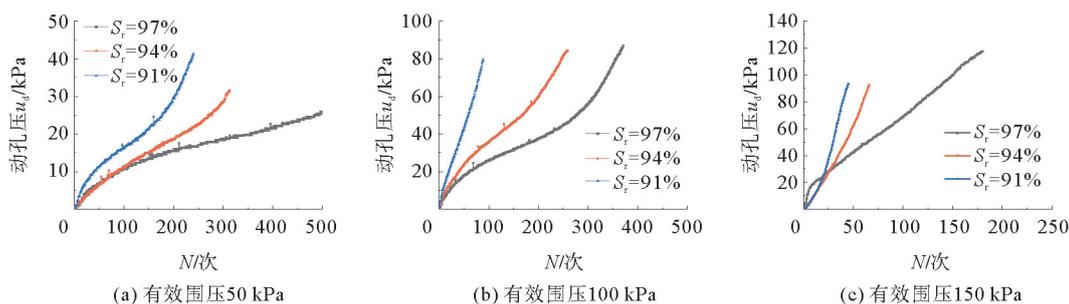


图 10 不同饱和度下动孔压发展过程

Fig. 10 Development process of dynamic pore pressure under different saturation levels

图 11 为有效围压 50 kPa, CSR 为 0.6, 饱和度为 97%、94%、91%, 不同黏土含量下的动孔压发展曲线。

1) 由图 11(a) 和图 11(b) 可知, 随着黏土含量增加, 土体动孔压曲线增长速率提高, 土体受到动荷载作用时, 孔压增长速率上涨, 使得土体抗剪强度下降, 从而达到破坏。

2) 由图 11(c) 可知, 当含气土饱和度为 91% 时, 试样在黏土含量 10% 时的动孔压可增长到 41.3 kPa, 而黏土含量 15%、20% 的含气土试样破坏时, 动孔压仅分别达到 13.9 和 12.7 kPa, 表明随着黏土含量的增加土体变得更难出现液化破坏, 呈现出明显的应变破坏特征。

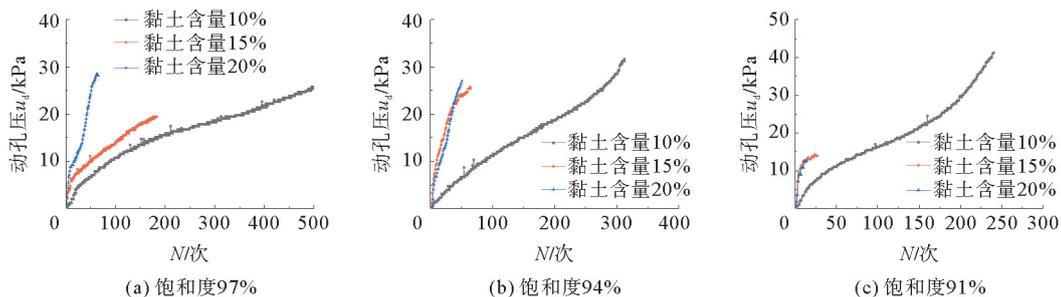


图 11 不同黏土含量下动孔压发展过程

Fig. 11 Development process of dynamic pore pressure under different clay contents

综上所述, 从图 9~11 中可以看出, 各工况下的动孔压 u_d 均未与有效应力相等, 即在轴向应变达到 5% 前, 试样未出现液化破坏现象。这表明, 在循环荷载作用下, 对于含有离散大气泡的含气土, 其破坏判别标准采用超过容许值的位移判别标准比初始液化判别标准更加适宜。

2.4 动强度

土体的动剪应力幅值与破坏振次 (N_f) 在其他条件一定的情况下, 存在一一对应关系。即土体在周期荷载作用下发生破坏时, 试样 45° 面上的动剪应力幅值即为土体的动强度。

图 12 为有效围压 100 kPa, 黏土含量 10%, 不同饱和度下的含气土动强度曲线。由图 12 可知:

1) 在相同破坏振次(N_f)下,高饱和度的曲线始终在低饱和度曲线上方。以破坏振次 $N_f=150$ 为例,含气土饱和度为 97% 时,动剪应力 $\tau_d=45.3$ kPa,饱和度为 94% 时 $\tau_d=43.9$ kPa,饱和度为 91% 时 $\tau_d=38.9$ kPa,即在破坏振次 $N_f=150$ 时,97% 饱和度的动强度比 94% 饱和度高 3.2%,比 91% 饱和度时高 16.5%。94% 饱和度的动强度比 91% 饱和度时高 12.9%。

2) 当破坏振次(N_f)相同时,随着饱和度下降,动强度随之降低,且下降幅度不同,饱和度越低,动强度下降的幅度越大。因为当饱和度较高时,含气土内的离散大气泡含量较低,含气土在循环荷载作用下,土颗粒可以排列的更为贴合,压缩较为紧密。随着饱和度下降,含气土内封闭大气泡含量增加,土颗粒之间难以进一步胶结,土体结构稳定性下降,从而导致土体动强度降低幅度变大。

3 结论

提出一种能够控制含气量及气泡大小的制样方法,得出了循环荷载作用下含有离散大气泡深海能源含气土的破坏判别标准,主要结论如下。

1) 各工况下的含气土累计塑性应变主要为“稳定增长型”和“失稳破坏型”两类。当 CSR 较小时,试样应变始终小于 1%,处于稳定状态;当 CSR 较大时,试样发生失稳破坏。饱和度对试样塑性应变影响显著,饱和度越低,试样所需破坏振次越少,各工况饱和度下塑性应变均超过 1%,且主要以失稳破坏形式为主。随有效围压增大,试样有从稳定增长型向失稳破坏型转变的趋势,表现为围压越大,试样稳定性越差,土体更容易发生破坏。黏土含量的不同,一方面体现在随黏土含量增加,试样塑性应变增长速率变大;另一方面随黏土含量增加,试样鼓胀破坏趋势愈加明显。

2) 深海能源含气土滞回曲线的滞回圈随着振次增加、饱和度下降、围压增大及黏土含量增加,呈现出倾斜程度变小,面积增大,反映了含气土回弹模量降低,阻尼比增大,土体抵抗变形能力下降,耗能能力增强。

3) 深海能源含气土孔压发展模式可分为“缓慢增长型”和“孔压骤增型”。孔压增长速率随饱和度下降、CSR 增大和黏土含量增加而加快。在循环荷载作用下,各工况的动孔压与有效应力的比值均未达到 1.0,即在轴向应变达到 5% 前,试样未出现液化破坏现象,表明含有离散大气泡的含气土呈现出应变破坏特征。

4) 饱和度对土体动强度影响明显,高饱和度土体动强度始终高于低饱和度土体动强度,在相同破坏振次下,随着饱和度降低,动强度也随之下降,并且当饱和度降低时,动强度的下降幅度呈现增大趋势。

参考文献:

[1] 魏纳,裴俊,蔡萌,等.天然气水合物自生热解堵剂热量平衡模拟计算[J].石油学报,2023,44(4):657-671.
WEI Na, PEI Jun, CAI Meng, et al. Simulated calculation of heat balance of natural gas hydrate autogenous thermal unplug-ging agent[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(4): 657-671.

[2] 刘芳,寇晓勇,蒋明镜,等.含水合物沉积物强度特性的三轴试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(8):1565-1572.
LIU Fang, KOU Xiaoyong, JIANG Mingjing, et al. Triaxial shear strength of synthetic hydrate-bearing sediments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1565-1572.

[3] YONEDA J, HYODO M, YOSHIMOTO N, et al. Development of high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(5): 774-783.

[4] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO N, et al. Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sedi-ments mixture[J]. Soils and Foundations, 2005, 45(1): 75-85.

[5] 李洋辉,宋永臣,于锋,等.围压对含水合物沉积物力学特性的影响[J].石油勘探与开发,2011,38(5):637-640.
LI Yanghui, SONG Yongchen, YU Feng, et al. Effect of confining pressure on mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 637-640.

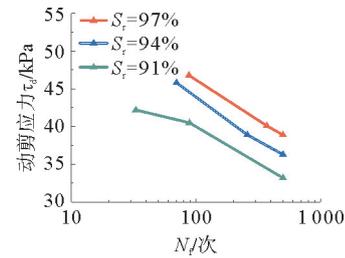


图 12 动强度曲线

Fig. 12 Dynamic strength curve

- [6] KAJIYAMA S, HYODO M, NAKATA Y, et al. Shear behavior of methane hydrate bearing sand with various particle characteristics and fines[J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57(2): 176-193.
- [7] 蒋明镜, 彭镛, 申志福, 等. 深海能源土剪切带形成机理离散元分析[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(9): 1624-1630.
JIANG Mingjing, PENG Di, SHEN Zhifu, et al. DEM analysis on formation of shear band of methane hydrate bearing soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(9): 1624-1630.
- [8] 黄家晟, 王路君, 刘燕晶, 等. 含气土地基热水气力耦合时变行为分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(9): 2507-2517.
HUANG Jiasheng, WANG Lujun, LIU Yanjing, et al. Time-dependent behavior of thermal-hydro-mechanical coupling of gassy soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(9): 2507-2517.
- [9] 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.
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.
- [10] 刘文卓, 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.
- [11] 孔亮, 刘文卓, 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.
- [12] 韩珠峰, 王勇, 孙富学, 等. 一种海底含气软土的室内模拟制样方法[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(1): 16-21.
HAN Zhufeng, WANG Yong, SUN Fuxue, et al. A method of preparing submarine gassy soft soil in laboratory[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2021, 40(1): 16-21.
- [13] 朱一铭. 天然气水合物沉积物静动力学特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
ZHU Yiming. Study on the statics and dynamic mechanical properties of natural gas hydrate-bearing sediments[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [14] 高运昌, 彭晓东, 高盟, 等. 南海钙质砂的液化特性动三轴试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(2): 69-76.
GAO Yunchang, PENG Xiaodong, GAO Meng, et al. Dynamic triaxial test on liquefaction characteristics of calcareous sand in South China Sea[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2020, 39(2): 69-76.
- [15] 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.
- [16] 王海萍, 高盟, 高运昌, 等. 高聚物固化钙质砂的动力特性试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(4): 56-64.
WANG Haiping, GAO Meng, GAO Yunchang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of calcareous sand solidified by polymer[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2021, 40(4): 56-64.

(责任编辑: 吕海亮)