

深海能源土的三轴剪切试验及离散元数值模拟研究

徐富涛^a, 吕思章^a, 郝景龙^a, 谢元照^a, 王 航^a, 孔 亮^{a,b}

(青岛理工大学 a. 理学院; b. 土木工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 天然气水合物的开采极易导致能源土力学特性劣化, 充分明确深海能源土的力学特性是实现天然气水合物安全、高效开采的前提。文章通过室内试验和离散元数值模拟试验相结合的方法, 分析不同有效围压和剪切速率下能源土应力应变的演化规律, 基于 PFC 离散元数值模拟软件建立了能源土三轴剪切离散元模型, 探讨深海能源土剪切过程中接触力链和颗粒位移的分布形式, 揭示能源土的力学特性的微观机理。研究结果表明: 随着有效围压和剪切速率的增大, 能源土的抗剪强度逐渐提高; 剪切速率越大, 能源土的软化现象越明显; 随着剪切过程的进行, 颗粒间的接触力链由试样两端逐渐向试样中部传递; 有效围压越大, 试样颗粒的径向位移越小, 宏观表现出试样的径向变形越小。

关键词: 深海能源土; 有效围压; 剪切速率; 三轴剪切试验; 离散元数值模拟

中图分类号: TE311

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)06-0020-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.06.070

Triaxial shear test and discrete element numerical simulation of deep-sea energy soil

XU Futao^a, LÜ Sizhang^a, HAO Jinglong^a, XIE Yuanzhao^a, WANG Hang^a, KONG Liang^{a,b}

(Qingdao University of Technology; a. School of Science;

b. School of Civil Engineering, Qingdao 266520, Shandong, China)

Abstract: The extraction of natural gas hydrates is highly likely to cause the deterioration of the mechanical properties of energy soils. Fully understanding the mechanical properties of deep-sea energy soils is a prerequisite for the safe and efficient extraction of natural gas hydrates. In this study, the evolution of the stress-strain behavior of energy soils under different effective confining pressures and shear rates was analyzed through a combination of laboratory tests and discrete element numerical simulations. A triaxial shear discrete element model for energy soils was established using the PFC discrete element simulation software. The distribution patterns of contact force chains and particle displacement during the shear process of deep-sea energy soils were investigated, revealing the mesoscopic mechanism of the mechanical properties of energy soils. The results show that the shear strength of energy soils gradually increases with increasing effective confining pressure and shear rate. The higher the shear rate, the more pronounced the softening behavior of energy soils. During the shear process, the contact force chains between particles are gradually transferred from the ends of the specimen to the middle. As the effective confining pressure increases, the radial displacement of the particles decreases, leading to smaller macroscopic radial deformation of the specimen.

Key words: deep-sea energy soil; effective confining pressure; shear rate; triaxial shear test; discrete element numerical simulation

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12172187); 山东省高等学校大学生创新创业训练计划项目(S202310429336)

作者简介: 徐富涛(2004—), 男, 主要从事力学及海洋岩土工程方面的研究。

通信作者: 孔 亮(1969—), 男, 教授、博士生导师, 从事岩土本构模型与海洋岩土工程方面的教学与研究工作。

天然气水合物是由天然气与水在高温低压环境下形成的笼状结晶物质^[1]。天然气水合物作为一种新型清洁战略性替代能源,具有分布广、储量大、污染小、能量密度高等优点,受到了世界各国的密切关注,也为我国能源转型和“双碳”目标实现提供了新的方向和契机^[2]。天然气水合物的土体一般称为含水合物沉积物,简称为能源土^[3]。能源土在全世界范围内广泛分布于海洋深水大陆架及陆地永久冻土地带。我国南海海域天然气水合物储量巨大,其储量相当于800亿吨油当量。因此,合理开发利用我国的天然气水合物资源,为我国能源转型提供了新方向。水合物开采使能源土孔隙中固态水合物分解成为液态水和天然气,其内部发生了物态和相态变化,导致颗粒间的胶结作用逐渐破坏,能源土骨架的抗剪强度随之弱化,压缩性增大,使其变形过大或骨架坍塌,进而可能诱发一系列的工程地质灾害,如海底滑坡、井壁失稳、泥石流以及平台倾覆等^[4-6]。因此,厘清能源土的工程力学特性以及开采过程中沉积物力学特性的演化规律,是实现水合物安全、高效、持续开采的前提保证^[7-8]。

目前国内外学者对能源土的力学特性开展了诸多室内试验研究^[9-11],研究表明能源土的力学特性受到水合物饱和度、颗粒粒径、有效围压以及孔隙度等因素的显著影响。随着水合物饱和度、有效围压以及细粒含量的增加,显著提高了能源土的强度^[12-13]。MIYAZAKI等^[14]通过排水三轴压缩试验,研究发现能源土的刚度与宿主砂颗粒的类型有关,强度和刚度随着甲烷水合物饱和度和有效围压的增大而增大。SHEN等^[15]进行了不同温度和水合物饱和条件下能源土的力学试验,研究发现能源土强度与水合物饱和度呈显著正相关,与温度呈显著负相关。吴杨等^[16]通过能源土三轴试验研究表明,能源土抗剪强度及剪胀性均随细粒含量(粒径 $<0.075\text{ mm}$)的增加而显著增强。与大颗粒沉积物相比,细颗粒含量增多势必会影响沉积物的状态,使沉积物更加致密,剪胀性的增加可以用砂土的临界状态理论解释。然而,能源土是一种复杂的颗粒介质,其力学特性受内部颗粒和细观结构变化的显著影响,室内试验难以有

效捕捉其内部颗粒位移和细观结构的变化,不能深入分析能源土的力学特性。离散元数值模拟因其在解释颗粒尺度上细观力学响应的优势备受诸多学者的青睐,离散元数值模拟不仅可以再现能源土的宏观力学行为,而且还可以从细观层面解释其宏观力学响应^[17]。所以,离散元数值模拟方法被广泛用于能源土力学特性的研究。JIANG等^[18]通过离散元数值模拟方法,分析了水合物饱和度和有效围压对能源土力学特性的影响,探讨了剪切过程中能源土细观结构的演化规律。王璇等^[19]在PLFC中提出了一种胶结型能源土离散元模拟方法,并探讨了能源土中水合物胶结断裂数量与偏应力的内在联系,试验分析表明偏应力达到峰值时水合物的胶结断裂数量增长速率最快。WANG等^[20]基于PLFC^{2D}建立了循环荷载作用下双轴压缩试验模型,研究发现能源土剪切过程中,循环加载次数随着水合物饱和度和动应力幅值的增加而减小,能源土的破坏模式与动应力幅值和水合物饱和度有关。DING等^[21]采用PFC^{2D}建立了孔隙填充型、胶结型、支撑(持力体)型、包裹型赋存模式的能源土离散元模型,开展了双轴压缩数值模拟实验,探究了不同水合物赋存模式和水合物饱和度对能源土力学特性的影响。研究表明,水合物的赋存模式对剪切强度的影响较小。

为此,本文通过室内外试验和离散元数值模拟相结合的方法,分析不同有效围压和剪切速率影响下深海能源土力学特性的演化规律,探讨不同影响因素下颗粒位移、接触力链以及颗粒速度的分布形式,揭示深海能源土的力学特性的细观机理。

1 深海能源土三轴剪切试验

1.1 试验设备

室内试验设备采用图1所示英国GDS仪器设备有限公司生产的高压低温水合物三轴试验系统进行三轴剪切试验,对能源土的力学特性展开一系列三轴剪切试验研究。该试验系统主要包括温度控制器、有效围压控制器、轴压控制器、孔压控制器、数据采集器4个部分,图1为试验系统。

1.2 试验材料

主要采用石英砂作为沉积物,依据我国南海



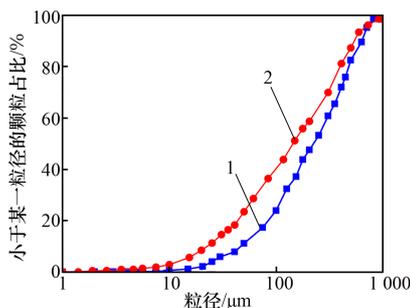
图 1 试验系统

区域能源土的砂颗粒级配曲线进行人工配置试验所需砂样。石英砂配制完成后,根据水合物饱和度将石英砂与水按一定的质量混合均匀。随后,采用分层击实法制备出直径为 50 mm,高度为 100 mm 的圆柱试样。试验材料及制备完成的试样,如图 2 所示。实验室内人工配置的砂样与南海原状土样的颗粒级配曲线如图 3 所示。



(a) 试验材料; (b) 制备完成的试样

图 2 试验材料及试样



1—本文沉积物颗粒; 2—SH-7。

图 3 颗粒级配曲线图

1.3 水合物合成及加载

试样制备完成之后,将其安装到围压室中。安装完成之后,向围压室内注入硅油,通过硅油控制围压室内的压力和温度条件。当围压稳定在 5 MPa,温度稳定在 1 ℃之后,向试样内部冲入甲烷气体,甲烷气体的压力控制在 4 MPa。在上述稳定条件下,让试样内的水与甲烷气体充分反应,反应时间不小于 48 h。当试样内甲烷气体的体积变化小

于 5 mm³/min 时,可认为水合物已完全合成。水合物完全合成之后,调节试验系统,设置试验内部的孔压值为 4 MPa。同时,也调节围压室围压的围压值,使其达到设定值。围压达到设定值之后,调节载平台使其以一定的速率向上运动,实现对试样的剪切。其中,有效围压为围压值与孔压值之差;剪应力为传感器测量的轴压值与围压值之差。

1.4 试验方案

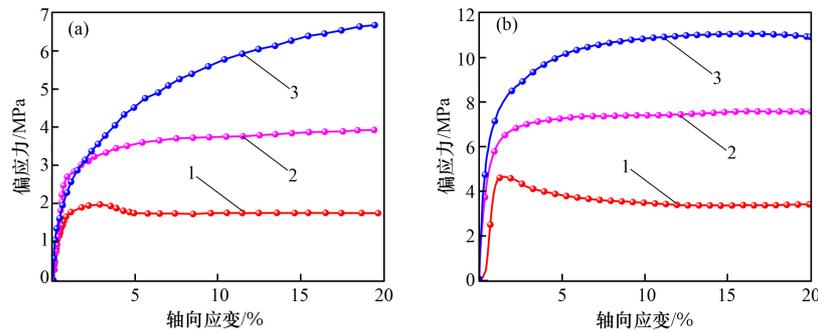
试验考虑了有效围压剪切速率两个影响因素,主要考察有效围压和剪切速率对能源土力学特性的影响,依据影响因素设计了试验方案,方案如表 1 所示。剪切过程中,试样温度控制在 1 ℃,孔压控制在 4 MPa,当试样轴向应变达到 21% 时剪切结束。

表 1 室内试验方案

试验编号	剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	有效围 压/MPa	饱和度/%
1	0.1	1	20
2	0.1	3	20
3	0.1	5	20
4	0.5	1	20
5	0.5	3	20
6	0.5	5	20

1.5 室内试验结果分析

图 3 给出了水合物饱和度为 20% 时,剪切速率为 0.1 mm/min 和 0.5 mm/min 下试样的应力应变结果。对比图 4(a) 和图 4 (b),剪切速率从 0.1 mm/min 增大到 0.5 mm/min 时,相同有效围压下的试样强度均随剪切速率 v 的增加而增大,说明剪切速率 v 的增大能够显著提高能源土强度。有效围压为 1 MPa 时,剪切速率为 0.1、0.5 mm/min 的试样均发生明显的应变软化,其中,相比较而言,剪切速率为 0.5 mm/min 时,试样的应变软化更加明显。有效围压为 3、5 MPa 时,应力应变均表现为应变硬化,可以看到,当剪切速率提高时,能源土硬化程度相对减弱。说明剪切速率能够促进能源土的软化现象。此外,当剪切速率为 0.1 mm/min 时,应力应变曲线相对更加平稳,说明能源土试样在较低剪切速率下试样内部颗粒更加稳定。



剪切速率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$): (a) 0.1; (b) 0.5

σ_3/MPa : 1—1; 2—3; 3—5。

图 4 不同剪切速率下深海能源土应力应变室内试验结果

2 离散元数值模拟

2.1 离散元数值模型的建立

本文采用 PFC^{3D} 5.0 数值模拟软件建立的三轴剪切试验离散元模型, 如图 5 所示。考虑到模型的计算效率, 对模型试样尺寸进行缩放, 试样为 $\varnothing 2.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆柱体, 确保试样的高径比为 2:1。设置砂颗粒的粒径为 0.1 ~ 0.4 mm, 砂颗粒的密度设置为 2650 kg/m^3 。水合物颗粒的粒径为 0.08 mm, 水合物颗粒的密度设置为 900 kg/m^3 。

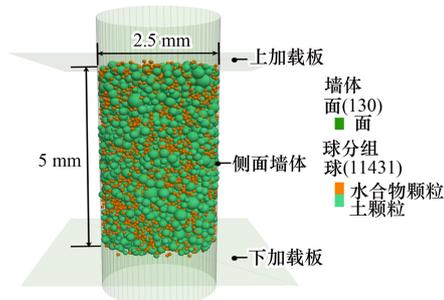


图 5 深海能源土三轴数值模型

2.2 接触模型的选取

接触模型指颗粒间的相互作用关系, 颗粒间接触模型的选取取决于材料的性质。模型初步建立完成后, 需要在不同的颗粒之间添加不同的接触力, 在离散元模拟软件 PFC 中, 模拟砂土通常

选取线性模型, 模拟具有胶结作用的水合物通常采用平行黏结接触模型。因此, 本文中建立的能源土模型采用这两种接触模型, 分别是线性模型和平行黏结接触模型。土颗粒与土颗粒之间采用线性接触模型, 模拟砂颗粒之间的摩擦力; 而水合物颗粒与砂颗粒之间采用平行黏结接触模型, 进而模拟水合物颗粒和砂颗粒之间的胶结特性。

2.3 细观参数标定

在离散元数值模拟中, 模型的细观参数与材料的宏观参数无直接的联系, 一般需要通过室内试验对细观参数进行标定。本文依据剪切速率为 0.1 mm/min 的室内试验结果进行参数标定, 标定方法采用“试错法”。该标定方法的主要步骤: 首先, 依据试验得到的应力应变曲线和弹性模量估算出细观参数初步值并开展数值模拟; 其次, 将数值试验结果与室内试验结果进行对比, 通过对比结果调节相应参数的大小并再次进行数值模拟, 然后进一步对比数值模拟结果与室内试验结果。当数值模拟结果与室内试验结果相近时, 认为选取的细观参数能反应深海能源土的真实力学特性。此时参数标定结束, 标定结束之后依据试验方案进行一系列的三轴剪切数值试验。细观参数标定结果如表 2 所示。

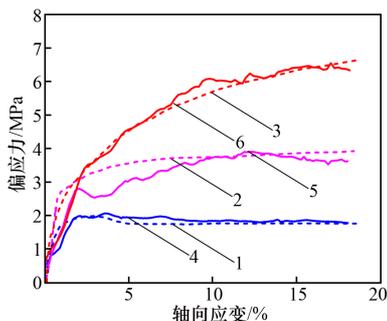
表 2 细观参数标定

材料	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ 10^7 Pa	法向切向 刚度比	平行黏结模量/ 10^7 Pa	法向切向 黏结刚度比	摩擦系数
砂颗粒	2.65	10	1.5	—	—	0.75
水合物颗粒	0.30	1	1.5	1	1.5	0.50
砂颗粒 - 水合物颗粒	—	3	1.5	3	1.5	0.50

3 数值模拟结果分析

3.1 室内试验与数值模拟结果对比分析

由图6可知：离散元数值模拟结果与试验结果的整体吻合度较高，不同有效围压下数值模拟之与试验值的变化规律和数值基本一致，仅在有效围压3 MPa时数值模拟值与试验值存在一定的误差。分析认为：1) 数值模拟中采用球形颗粒代替土颗粒和水合物颗粒，与砂颗粒和水合物颗粒的形状存在差异，数值模拟颗粒之间的机械咬合力远小于室内试验的，所以在剪切过程中更容易发生颗粒间的相对位移，致使偏应力变化幅度较大；2) 建模过程中生成的颗粒粒径与室内试验基质土的粒径存在差异，进而导致加载过程中颗粒间的力学特性与室内试验存在差距；3) 数值模拟中水合物颗粒与之间的胶结特性与室内试验的胶结特性存在差异，数值模拟中的黏结强度均为定值，未考虑实际试验中黏结厚度的影响，这也导致室内试验与数值实验间存在差异。但数值模拟曲线和室内试验曲线的变化规律和数值的大小趋于一致，说明数值模拟中的细观力学参数和数值模型基本能反应室内试验的宏观力学特性。在此基础上，通过改变有效围压和剪切速率两个变量两个影响因素，进而分析有效围压和剪切速率对深海能源土力学特性的影响。



室内试验有效围压/MPa: 1—1; 2—3; 3—5。
数值模拟有效围压/MPa: 4—1; 5—2; 6—3。

图6 离散元模型细观参数标定结果

3.2 有效围压的影响

图7为不同有效围压下深海能源土的应力应变模拟结果。结果表明，当有效围压为1 MPa时，能源土试样呈现出明显应变软化现象，随着有效围压的增加，能源土试样表现为从应变软化到应

变硬化的过渡，说明有效围压对能源土的软化现象起到抑制作用，这与室内试验得到的结果一致。分析认为在剪切过程中，有效围压较低时，有效围压对颗粒之间的限制作用减小，导致土颗粒易发生滑移，并且随着剪切过程的进行水合物颗粒易发生破碎现象，使试样内的颗粒数目增大，在低有效围压和颗粒破碎双重因素下导能源土呈现明显的应变软化现象。

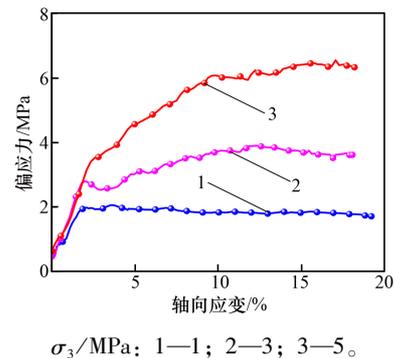


图7 不同有效围压下深海能源土应力应变数值模拟结果
3.3 剪切速率的影响

试样的破坏强度与剪切速率之间的关系如图8所示。随着剪切速率的提高，能源土的破坏强度均不断增强，且呈现线性增大的趋势。不论有效围压为1、3、5 MPa，破坏强度均与剪切速率具有近似线性关系。分析出现上述结果的主要原因：剪切速率较小时，能源土试样内部颗粒的移动主要以滑动为主，在较大剪切速率下，试样内部颗粒同时发生滑动、旋转现象，与其他颗粒间的咬合、摩擦作用增强，能源土强度随之增加。此外，这种现象还可以从剪切带的发展角度解释。一方面是因为在较低的剪切速率下，剪切带有足够时间发展并逐渐贯通，导致试样峰值强度下降。在较高的剪切速率下，剪切带发育时间有限，较难形成剪切带，试样强度增大。另一方面是在高剪切速率下，由于高剪切速率引起的惯性作用，阻碍了试样内部颗粒的旋转、滑移等运动，试样更加稳定，宏观表现为强度增大。

3.4 细观信息分析

离散元数值模拟可以获得剪切过程中接触力链、颗粒位移场等细观信息，结合室内试验可以从细观层面进一步解释深海能源土的宏观力学特性。本小节主要以剪切速率为0.1 mm/min的剪切

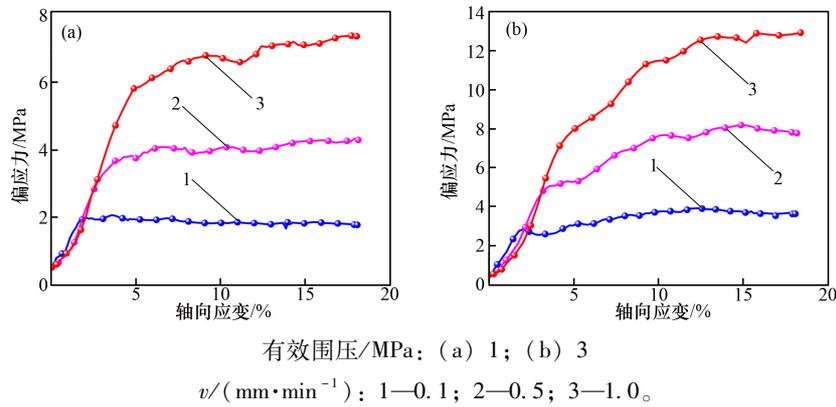


图 8 不同剪切速率下深海能源土应力应变数值模拟结果

试验作为研究对象, 分析剪切过程中接触力链和位移场等细观信息的演化规律, 进一步揭示深海能源土的力学和变形机理。

3.4.1 接触力链分析

由图 9 可以看出, 有效围压分别为 1、3、5 MPa 时, 试样加载到轴向应变为 2% 时, 颗粒间的接触力链分布比较均匀, 说明此时试样整体处于弹性变形阶段。但是试样内部的接触力链明显比试样边缘的力链密集, 并且随着有效围压的增大该现象越来越明显。这说明在有效围压的作用下, 试样内部颗粒承受外部荷载的比例明显高于试样边缘处的颗粒。随着轴向应力的增大, 试样的上下两端首先出现强力链, 接触力链的数量和大小均大于试样中间位置的力链, 这说明在加载过程中轴向应力是由试样两端逐渐向试样内部扩展。当轴向应变继续增大, 试样两端的强力链逐渐向内部扩展, 此时试样内部的力链主要以竖向强力连为主, 弱力链区域逐渐减小, 说明试样在纵向方向上的应力分布呈不均匀分布。当轴向应变达到 20% 时, 试样内部的强力链逐渐贯通整个试样, 说明此时试样所承受的剪应力已接近其剪切强度。此外, 还发现随着有效应力的增大, 试样在剪切过程中的直径逐渐减小, 随着说明随着有效围压的增大, 试样受到的束缚力越大, 限制了内部颗粒的横向变形, 而在纵向方向上表现出更大的承载力。这也进一步验证了随着有效围压的增大, 试样的抗剪强度逐渐增大。

3.4.2 颗粒位移场分析

由图 10 所示, 当轴向应变为 2% 时, 有效围压为 1 MPa 的试样中有少量颗粒出现径向位移, 而有效围压为 3 MPa 和 5 MPa 试样的颗粒均未发生明显

的颗粒位移, 说明此时试样基本处于颗粒弹性变形阶段, 这与 3.4.1 中接触力链的变化规律相对应。轴向应变继续增大达到 10% 时, 有效围压为 1 MPa 的试样内部颗粒出现明显位移, 此时位移方向由径向逐渐转变为纵向, 说明此时产生了纵向塑性变形。当轴向应变达到 15% 时, 有效围压为 1 MPa 和 3 MPa 的试样均出现了明显的竖向变形, 而有效围压 5 MPa 试样的颗粒位移较小, 这也说明了随着有效围压的增大, 试样内部颗粒受到的束缚力越大, 颗粒越难以发生位移, 宏观表现出抗剪强度越大。当轴向应变达到 20% 时, 有效围压为 1、3、5 MPa 试样的上下端均出现明显颗粒位移, 有效围压越小颗粒的位移量越大。此外, 还可以发现有效围压越高, 试样颗粒的侧向位移量越小, 宏观表现为试样的侧向变形程度越小, 说明高有效围压对试样径向变形具有抑制作用。

4 结 论

(1) 有效围压对深海能源土的力学特影响较大, 当水合物饱和度相同时, 有效围压越高能源土的强度就越大。并且有效围压越高, 能源土的应力应变曲线表现出明显的应变硬化现象。这说明有效围压的增大对能源土的软化现象起抑制作用。有效围压越高能源土内部的水合物颗粒易发生破碎现象。

(2) 深海能源土的抗剪强度受剪切速率的影响较大, 剪切速率的增大能显著提高能源土试样的抗剪强度。当剪切速率较小时, 能源土试样内部颗粒的移动主要以滑动为主, 当剪切速率较大时, 试样内部颗粒同时发生滑动、旋转现象。

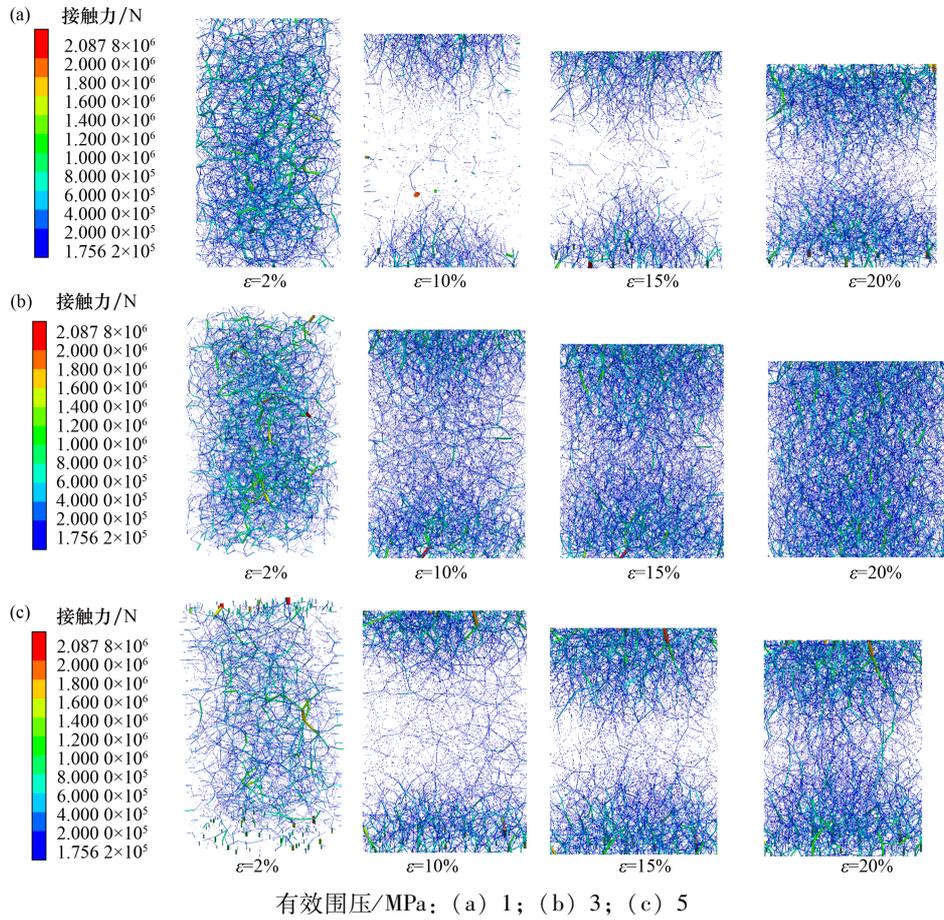


图 9 不同有效围压下接触力链随轴向应变 (ϵ) 的演化图

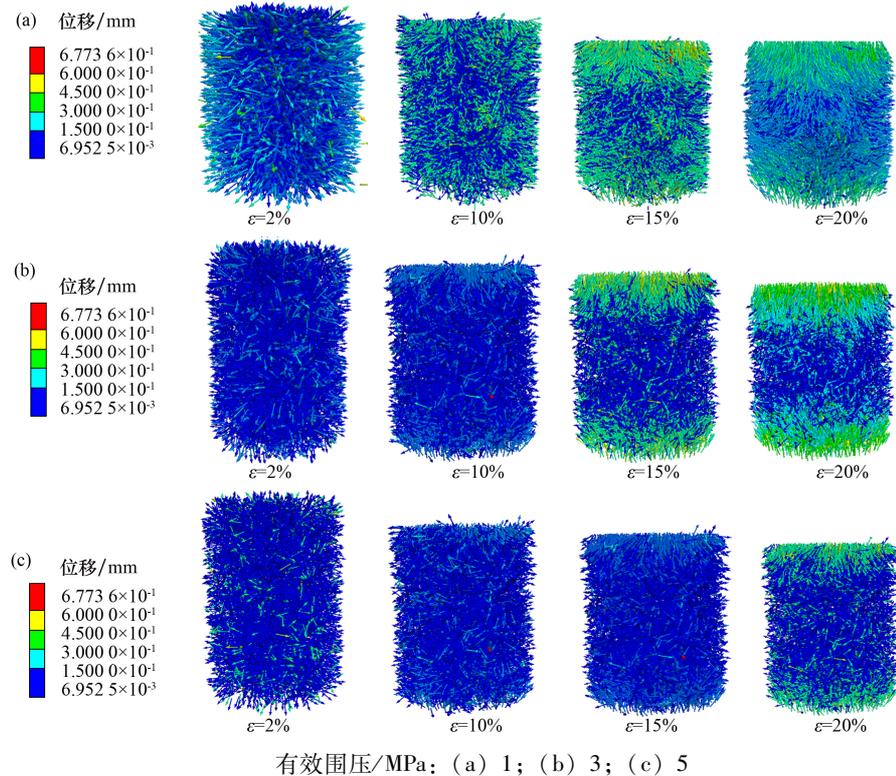


图 10 不同有效围压下颗粒位移随轴向应变的演化图

(3) 剪切过程中, 接触力链由两端逐渐向试样中心传递, 加载初期, 试样轴心位置处的接触力链明显多于试样两侧, 强力链首先出现在试样的两端并逐渐向试样中部移动, 强力链贯通试样上下两端, 且强力链方向主要以竖向为主。

(4) 加载过程中, 试样上下两端颗粒逐渐向中间区域运动, 中间区域颗粒受挤压, 产生侧向运动。有效围压越高, 试样上下两端颗粒及中心区域颗粒的径向位移量越小, 宏观表现为试样的径向变形程度越小。

参考文献:

- [1] ENGLEZOS P. Clathrate hydrates [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1993, 32(7): 1251 - 1274.
- [2] ZHENG R, LI S, LI Q, et al. Study on the relations between controlling mechanisms and dissociation front of gas hydrate reservoirs [J]. *Applied Energy*, 2018 (215): 405 - 415.
- [3] 蒋明镜, 肖俞, 刘芳. 深海能源土开采对海床稳定性的影响研究思路 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(9): 1412 - 1417.
- [4] REIJ - AYOUB R, TAN C, CLENNELL B, et al. A wellbore stability model for hydrate bearing sediments [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2015, 57(1): 209 - 220.
- [5] RUTQVIST J, MORIDIS G J, 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.
- [6] LIU L, LU X, ZHANG X, et al. Numerical simulations for analyzing deformation characteristics of hydrate-bearing sediments during depressurization [J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2017, 1(3): 135 - 147.
- [7] 董林, 廖华林, 李彦龙. 天然气水合物沉积物力学性质测试与评价 [J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(9): 34 - 43.
- [8] 鲁晓兵, 张旭辉, 王淑云. 天然气水合物开采相关的安全性研究进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(3): 7 - 37.
- [9] YUN T S, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B4): B04106.
- [10] GHIASSIAN H, GROZIC J L H. Strength behavior of methane hydrate bearing sand in undrained triaxial testing [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013 (43): 310 - 319.
- [11] LUO T, LI Y, MADHUSUDHAN B N, et al. Comparative analysis of the consolidation and shear behaviors of CH₄ and CO₂ hydrate-bearing silty sediments [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020 (75): 103157.
- [12] WU P, LI Y, WANG L, et al. Hydrate-bearing sediment of the South China Sea: Microstructure and mechanical characteristics [J]. *Engineering Geology*, 2022 (307): 106782.
- [13] WANG L, LI Y, SHEN S, et al. Mechanical behaviours of gas-hydrate-bearing clayey sediments of the South China Sea [J]. *Environmental Geotechnics*, 2020, 9(4): 210 - 222.
- [14] MIYAZAKI K, MASUI A, SAKAMOTO Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(6): 1 - 11.
- [15] SHEN Z, JIANG M. DEM simulation of bonded granular material. Part II: Extension to grain-coating type methane hydrate bearing sand [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016(75): 225 - 243.
- [16] 吴杨, 崔杰, 廖静容, 等. 不同细颗粒含量甲烷水合物沉积物三轴剪切试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(1): 156 - 164.
- [17] 周世琛, 郇筱林, 陈宇琪 等. 天然气水合物沉积物不排水剪切特性的离散元模拟 [J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 73 - 83.
- [18] JIANG Y, GONG B. Discrete-element numerical modelling method for studying mechanical response of methane-hydrate-bearing specimens [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(9): 1082 - 1096.
- [19] 王璇, 徐明. 胶结型含可燃冰砂土剪切特性的离散元模拟 [J]. *工程力学*, 2021, 35(1): 157 - 163.
- [20] WANG D, GONG B, JIANG Y. The distinct elemental analysis of the microstructural evolution of a methane hydrate specimen under cyclic loading conditions [J]. *Energies*, 2019, 12(19): 3694.
- [21] DING Y, QIAN A, LU H, et al. DEM investigation of the effect of hydrate morphology on the mechanical properties of hydrate-bearing sands [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022(143): 104603.