

DOI: 10.11779/CJGE201409008

深海能源土剪切带形成机理离散元分析

蒋明镜^{1, 2, 3}, 彭 镛^{1, 2, 3}, 申志福^{1, 2, 3}, 张望城^{1, 2, 3}, 朱方园^{1, 2, 3}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 天然气水合物的分解开采过程将会劣化深海能源土的力学性能, 从而引发一系列岩土工程问题。因此, 要实现天然气水合物的安全开采, 需要对能源土的强度和变形特性开展研究。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。结果表明: 水合物胶结提升了深海能源土的强度, 且使其呈现出明显的应变软化特性; 剪切带在峰值应力后开始产生, 伴随着胶结的大量破坏以及各宏微观变量的局部化; 剪切带内外各宏微观变量差异明显, 随着轴向应变的增加, 土体微观结构也随之发生变化。

关键词: 深海能源土; 天然气水合物; 剪切带; 应变局部化; 离散单元法

中图分类号: TU43; P744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)09-1624-07

作者简介: 蒋明镜(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏观微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn。

DEM analysis on formation of shear band of methane hydrate bearing soils

JIANG Ming-jing^{1, 2, 3}, PENG Di^{1, 2, 3}, SHEN Zhi-fu^{1, 2, 3}, ZHANG Wang-cheng^{1, 2, 3}, ZHU Fang-yuan^{1, 2, 3}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Methane hydrate (MH) decomposition and mining will worsen the mechanical behavior of methane hydrate bearing soil (MHBS) and cause a series of geotechnical problems. Therefore, in order to facilitate safe exploitation of MH, it is crucial to understand the strength and deformation characteristics of MHBS. Based on the bond model of MHBS, the distinct element method (DEM) is used in planar biaxial compression tests to analyze the formation of shear band as well as some micro and macro variables of MHBS within and outside the shear band. The results show that methane hydrate increases the strength of MHBS and leads to strain-softening behavior; the shear band is fully developed after the peak stress, accompanied by massive bond breakage and localization of other micro variables; the micro and macro variables within and outside the shear band differ. Besides, with the increase of axial strain, the micro structure of MHBS changes.

Key words: methane hydrate bearing soil; methane hydrate; shear band; strain localization; distinct element method

0 引言

深海能源土(methane hydrate bearing soils)是指含天然气水合物的深海沉积土体, 而天然气水合物(methane hydrate)是位于大陆永久冻土或深海海床下等区域的、在特定温压条件下由水和天然气形成的笼形结晶化合物。全球天然气水合物的储量是现有天然气、石油储量的两倍, 被公认为是代替石油、煤和天然气等常规能源的新型清洁能源, 在能源稀缺的21世纪, 具有广阔的开发前景^[1]。然而, 水合物的不合理开采可能威胁海上平台和海底工程的安全, 甚至引发海底滑坡、海底管线破裂等一系列严重自然灾害和

工程事故^[2-3]。为了安全开采天然气水合物, 必然涉及与深海能源土力学性质相关的一系列岩土工程问题。深海能源土中水合物所形成的胶结, 使得能源土相比普通砂土具有更加复杂的力学特性。已有成果分别通过原位取样^[4]和人工合成试样^[5-7]的方法试验研究深海能源土的力学性能。此外, 也不乏深海能源土相关的数值模拟^[8]和本构模型^[9]研究。但是, 以往研究大多集中在能源土的强度特性, 对于能源土的变形特性

基金项目: 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目(51025932)

收稿日期: 2014-02-12

研究有所欠缺。对于土体的剪切带的研究, 也有室内试验^[10]和数值模拟^[11-12]的研究成果。虽然近年来出现对深海能源土剪切带的试验研究^[13], 但深海能源土的破坏必定与胶结破坏等微观信息相关, 实验方法无法进行微观信息的定量量测。因此, 有必要寻找更为有效的方法。

笔者认为, 离散单元法作为一种有效的研究土体应变局部化特性的手段, 可以联系土体的宏微观力学响应, 适用于深海能源土剪切带的形成规律研究。该方法将土体视为离散颗粒的堆积体, 仅需给定颗粒间的接触模型, 即可模拟颗粒材料在不同加载条件下的宏微观响应。由于离散单元法可以在颗粒接触层面便捷的观察到力链、接触破坏等微观信息, 从而可以在微观层面解释离散颗粒材料的宏微观力学响应。因此, 本文将已有深海能源土微观胶结模型引入到商业软件PFC2D中, 模拟深海能源土平面应变双轴实验, 研究深海能源土模拟试样渐进破坏的过程, 分析剪切带形成规律, 这对于深海能源土变形特性的研究, 具有一定的意义。

1 深海能源土微观胶结模型

本文离散元模拟采用文献[14]提出的深海能源土微观胶结模型, 其示意图如图1所示。天然气水合物生成前, 由于上覆沉积层、人工构筑物荷载等因素, 土体及土颗粒受到一定的初始作用力。根据土颗粒的受力状态, 土颗粒间分为接触和分离两种情况。因此, 水合物生成时, 可能生成于相互接触的两个颗粒间(图1(a)), 也可以生成于相互分离的两个颗粒间(图1(b))。定义任意时刻颗粒间法向重叠量 $u_n = r_1 + r_2 - d$, 式中 r_1 和 r_2 分别为两颗粒半径, d 为颗粒中心距。 $u_n \geq 0$ 时, 颗粒接触, 对应图1(a)的情况; $u_n < 0$ 时, 颗粒分离, 对应图1(b)的情况。

模型力-位移准则适用于上述两种情况。胶结颗粒的粒间接触力由粒间胶结和颗粒共同分担, 即

$$F_n = F_n^b + F_n^p \quad , \quad (1a)$$

$$F_s = F_s^b + F_s^p \quad , \quad (1b)$$

$$M = M^b + M^p \quad , \quad (1c)$$

式中, F_n^b , F_s^b , M^b 分别为粒间胶结所传递的法向、切向力与扭矩, F_n^p , F_s^p , M^p 分别为颗粒所传递的法向、切向力与扭矩。

对于颗粒接触部分, 在 $u_n < 0$ 时, 颗粒相离, 其在接触处所传递的各向力均为0:

$$\left. \begin{array}{l} F_n^p = 0 \\ F_s^p = 0 \\ M^p = 0 \end{array} \right\} \quad (u_n < 0) \quad , \quad (2)$$

当 $u_n \geq 0$ 时, 颗粒所传递的法向力、切向力和扭矩, 可根据Jiang等^[15]提出的颗粒抗转动接触模型表示为

$$F_n^p = k_n^p \cdot u_n \quad (u_n \geq 0) \quad , \quad (3a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_s^p \leftarrow F_s^p + k_s^p \cdot \Delta u_s^p \\ F_s^p \leq F_n^p \cdot \mu^p \end{array} \right. \quad (u_n \geq 0) \quad , \quad (3b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M^p \leftarrow M^p + k_m^p \cdot \Delta \theta^p \\ M^p \leq F_n^p \cdot \beta^p \cdot r/6 \end{array} \right. \quad (u_n \geq 0) \quad . \quad (3c)$$

式中 Δu_s^p , $\Delta \theta^p$ 分别为任意时刻下颗粒接触间切向位移与相对转角增量; k_n^p , k_s^p , k_m^p 分别为颗粒在法向、切向及扭转向接触刚度; r 为两接触颗粒平均半径; μ^p 为颗粒接触间摩擦系数; β^p 为颗粒的抗转动系数, 描述颗粒间的抗转动能力^[15]。

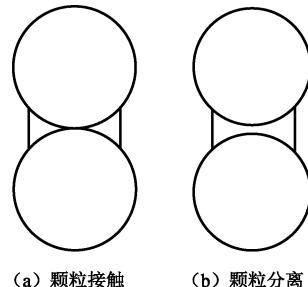


图1 能源土简化微观胶结模型

Fig. 1 Bond contact model for methane hydrate bearing soils

胶结接触法向受力可按下式表示:

$$F_n^b = \begin{cases} k_n^b \cdot u_n^b & -R_{tb} \leq F_n^b \leq R_{cb} \\ 0 & F_n^b < -R_{tb}, F_n^b > R_{cb} \end{cases} \quad , \quad (4)$$

式中, u_n^b 为胶结法向重叠量, 其表达式如下:

$$u_n^b = u_n - u_{n0} \quad , \quad (5)$$

式中, u_{n0} 为水合物生成时颗粒间法向重叠量; k_n^b 为胶结法向刚度:

$$k_n^b = (1 \times B_{MH} \times E) / t \quad , \quad (6)$$

式中, t 为胶结水合物的平均厚度, E 为水合物弹性模量; B_{MH} 为胶结宽度; R_{tb} , R_{cb} 分别为胶结法向抗拉、法向抗压强度:

$$R_{tb} = 1 \times B_{MH} \times \sigma_{tbMH} \quad , \quad (7a)$$

$$R_{cb} = 1 \times B_{MH} \times \sigma_{cbMH} \quad , \quad (7b)$$

式中, σ_{cbMH} , σ_{tbMH} 分别为水合物抗压与抗拉强度, 可由水合物强度试验得出。

胶结破坏前, 胶结接触抗剪或抗扭作用力, 为相应方向上接触刚度与位移量的乘积:

$$F_s^b = k_s^b \cdot u_s^b \quad , \quad (8a)$$

$$M^b = k_m^b \cdot \theta^b \quad , \quad (8b)$$

式中, k_s^b , k_m^b 分别为胶结法向、切向、扭转向刚度:

$$k_s^b = k_n^b / 1.5 \quad , \quad (9a)$$

$$k_m^b = k_n^b \times B_{MH}^2 / 12 \quad , \quad (9b)$$

式中, u_s^b , θ^b 分别为胶结接触生成后切向位移与相对

转角。

胶结破坏后, 胶结接触抗剪或抗扭作用力下降到残余值 $F_{s(\text{resid})}^b$, $M_{(\text{resid})}^b$:

$$F_{s(\text{resid})}^b = F_n^b \cdot \mu^b , \quad (10\text{a})$$

$$M_{(\text{resid})}^b = F_n^b \cdot \beta^b \cdot r / 6 , \quad (10\text{b})$$

式中, r 为两接触颗粒平均半径; μ^b 为胶结接触界面摩擦系数; $\beta^b = B_{\text{MH}} / r$ 为胶结抗转动系数^[14]。

对于承受拉、压、剪、扭共同作用的胶结, 可用 $f_{s,m}^b$ 作为描述胶结接触在共同作用下的破坏指标, 其取值如下:

$$f_{s,m}^b = \left(\frac{F_s^b}{R_{sb}} \right)^2 + \left(\frac{M^b}{R_{tb}} \right)^2 \begin{cases} < 1 & \text{胶结未破坏} \\ = 1 & \text{临界状态} \\ > 1 & \text{胶结破坏} \end{cases} , \quad (11)$$

式中, R_{sb} , R_{tb} 分别为胶结抗剪与抗扭强度, 其取值分别如下:

$$R_{sb} = \mu^b \cdot R_{cb} \cdot \frac{F_n^b + R_{tb}}{R_{cb} + R_{tb}} \cdot \left[1 + g_s \left(\ln \frac{R_{cb} + R_{tb}}{F_n^b + R_{tb}} \right)^{f_s} \right] , \quad (12\text{a})$$

$$R_{tb} = \frac{r \beta^b R_{cb}}{6} \cdot \frac{F_n^b + R_{tb}}{R_{cb} + R_{tb}} \cdot \left[1 + g_r \left(\ln \frac{R_{cb} + R_{tb}}{F_n^b + R_{tb}} \right)^{f_r} \right] , \quad (12\text{b})$$

式中, f_s , g_s 与 f_r , g_r 分别为胶结抗剪与抗扭强度包线的形状参数, 其具体取值与最小胶结厚度 h_{\min} 有关:

$$f_s = 0.824 + 0.364 \exp \left[-0.5 \left(\frac{h_{\min} - 1.069}{0.353} \right)^2 \right] , \quad (13\text{a})$$

$$g_s = 2.876 - 1.623 \exp \left[-0.5 \left(\frac{h_{\min} - 1.236}{0.506} \right)^2 \right] , \quad (13\text{b})$$

$$f_r = 1 / (2.719 - 3.207 h_{\min} + 1.442 h_{\min}^2) , \quad (13\text{c})$$

$$g_r = 3.068 h_{\min}^2 - 7.347 h_{\min} + 6.358 . \quad (13\text{d})$$

2 离散元模拟过程

2.1 无水合物胶结试样制备

运用分层欠压法^[16]生成颗粒数 24000、平面孔隙比 0.27 的均匀砂样。试样级配曲线如图 2, 粒径范围 6.0~9.0 mm, 平均粒径 $d_{50} = 7.6$ mm, 不均匀系数 $d_{60}/d_{10} = 1.3$ 。试样参数如表 1。

2.2 天然气水合物胶结试样制备与试验过程

生成上述无胶结砂样后, 保持侧向变形为零, 对其施加 12.5 kPa 坚向压力并稳定, 以模拟水合物于海底下 1.2 m 左右深度处开始形成时的土体应力条件。然后添加上节所述天然气水合物胶结模型, 以模拟水合物形成过程。本文取具有代表性的天然气水合物赋存条件 (赋存温度 274 K, 反压 10 MPa), 水合物密度 $\rho = 0.9 \text{ g/cm}^3$, 弹性模量 $E = 319.29 \text{ MPa}$, 抗拉与

抗压强度 $\sigma_{c\text{MH}} = 6.40 \text{ MPa}$, $\sigma_{t\text{MH}} = 5.48 \text{ MPa}$; 胶结表面摩擦系数 $\mu^b = 0.5$, 抗转动系数 $\beta^b = 1.0$, 最小胶结厚度 $h_{\min} = 0.6 \text{ mm}$ 。水合物饱和度与胶结宽度存在关系, 可由以下式描述^[14]:

$$S_{\text{MH}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[2\beta^b r^2 - 2r^2 \arcsin \left(\frac{\beta^b}{2} \right) - \beta^b r^2 \sqrt{1 - \frac{\beta^{b2}}{4}} \right]}{V_v} + 26.4\% , \quad (14)$$

式中, S_{MH} 为水合物饱和度, V_v 为土体孔隙体积, n 为胶结总数。本文模拟的水合物饱和度为 53.24%, 相应的胶结宽度 $B_{\text{MH}} = 1.0r$ 。

表 1 无胶结离散元试样颗粒参数

Table 1 Particle properties of non-bonded DEM samples

参数	取值
试样尺寸	820 mm×1640 mm
颗粒总数	24000
初始平面孔隙比 e_p	0.27
颗粒密度	2600 kg/m ³
颗粒法向接触刚度 k_n^p	$6.0 \times 10^8 \text{ N/m}$
颗粒切向接触刚度 k_s^p	$4.0 \times 10^8 \text{ N/m}$
颗粒间摩擦系数 μ^p	0.5
颗粒与边界的摩擦系数	0.0
颗粒与边界的接触刚度	$3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}$
颗粒抗转动系数 β^p	0.5

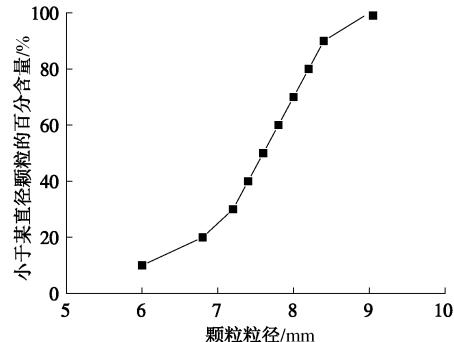


图 2 试样颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution for DEM samples

研究表明^[17], 柔性膜边界相比刚性边界, 能更好地反映试样的变形特性, 特别是剪切带的形成及变化规律。因此, 将水合物形成后的双轴试样两侧更换为膜边界, 且利用文献[17]的方法对试样分块着色以观察试样内部变化(图 3)。用应力伺服方法施加 0.5 MPa 围压后, 上刚性墙以恒定应变速率 (5%/min) 加载, 以模拟室内试验的加载过程。该应变速率符合准静态加载条件。

3 模拟结果及分析

3.1 深海能源土力学特性

双轴试验得到深海能源土的应力 - 应变关系和体应变曲线分别如图 4, 5 所示。这里添加同样条件的无水合物胶结砂样, 作为对照。可以看出, 无胶结试样的应力随着轴向应变的增加逐渐上升, 且增速逐渐变缓, 呈现出明显的应变硬化特性; 相比之下, 深海能源土胶结试样存在峰值应力, 对应的轴向应变介于 1%~2% 之间, 且残余应力趋近并略高于无胶结试样, 呈现出明显的应变软化特性。这与文献[1, 12]的结果一致。由体变曲线可知, 无胶结试样在整个过程中均剪缩, 而胶结试样在峰值应力过后呈现出明显的剪胀特性。

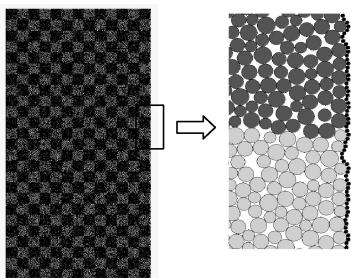


图 3 柔性膜边界与分块着色法

Fig. 3 Flexible boundary and alternately colored blocks

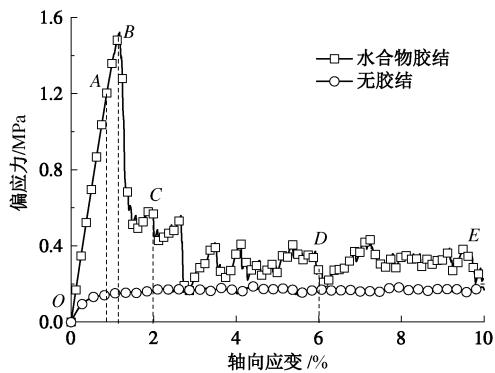


图 4 试样应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain relationship for DEM samples

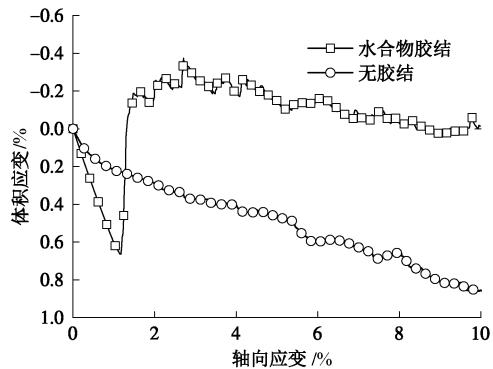


图 5 试样本体变曲线

Fig. 5 Volumetric strain-axial strain relationship for DEM samples

分别选择不同的围压 (0.5, 1, 2 MPa) 进行试验, 得到深海能源土峰值和残余的强度包线如图 6 所示。

分析得出峰值黏聚力 $c_p = 1.05 \text{ MPa}$, 内摩擦角 $\varphi_p = 15.21^\circ$; 残余内摩擦角 $\varphi_r = 20.61^\circ$ 。可见胶结的存在, 使得土的黏聚力增大, 而使内摩擦角减小。这一结果与 Zhang 等^[7]的试验结果一致。

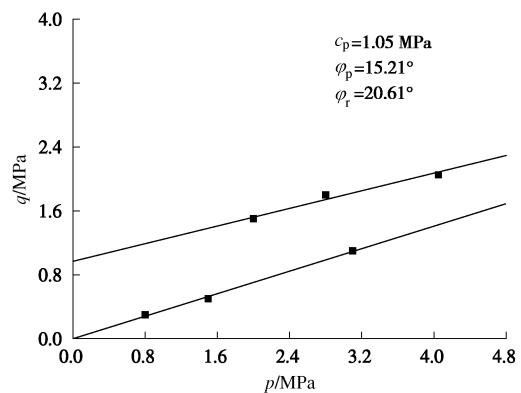


图 6 水合物胶结试样强度包线

Fig. 6 Strength envelope for methane hydrate bonded samples

3.2 深海能源土剪切带形成与发展规律

在图 4 中标记 O, A, B, C, D, E 6 点, 分别代表加载开始点 ($\varepsilon_1 = 0.0\%$)、试样初始屈服点 ($\varepsilon_1 = 0.8\%$)、峰值应力点 ($\varepsilon_1 = 1.2\%$)、软化阶段点 ($\varepsilon_1 = 2.0\%$)、残余强度稳定点 ($\varepsilon_1 = 6.0\%$) 和加载结束点 ($\varepsilon_1 = 10.0\%$), 分析此 6 点对应轴向应变状态下能源土试样剪切带的形成规律。图 7~9 分别为上述 6 点状态下试样的形态、胶结分布以及接触力链分布图。

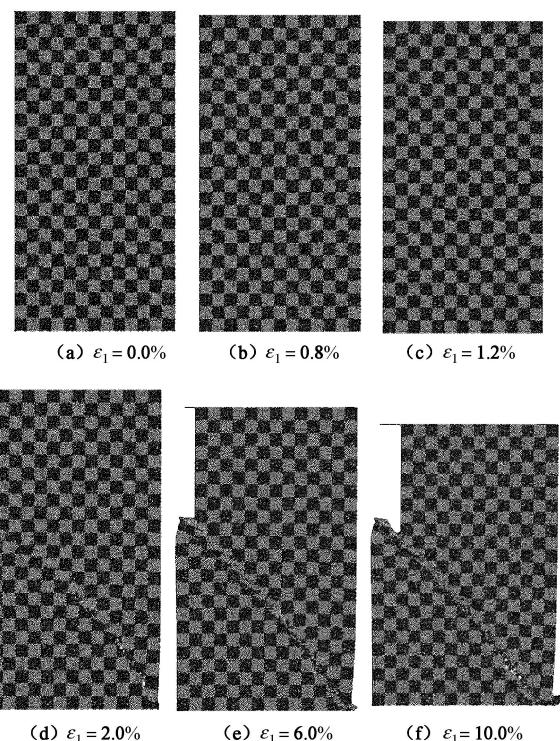


图 7 6 种应变下试样形态

Fig. 7 Sample under six successive strains

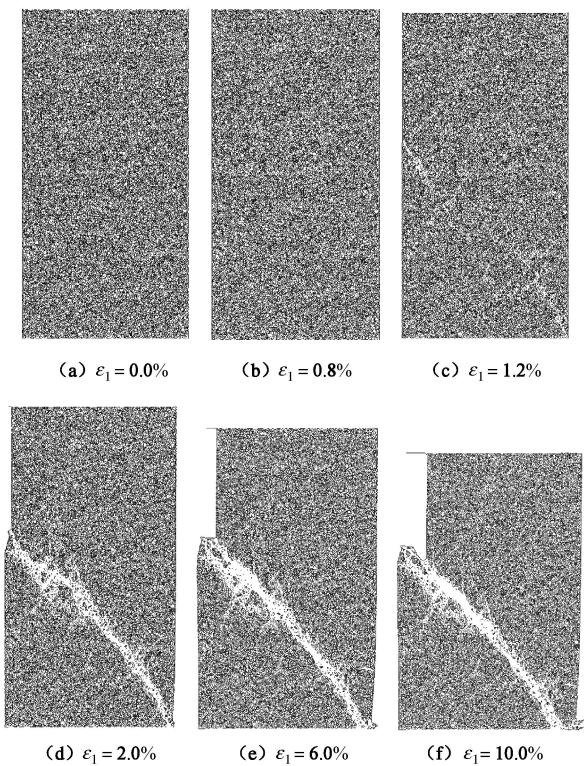


图 8 6 种应变下试样胶结分布

Fig. 8 Bond distribution of sample under six successive strains

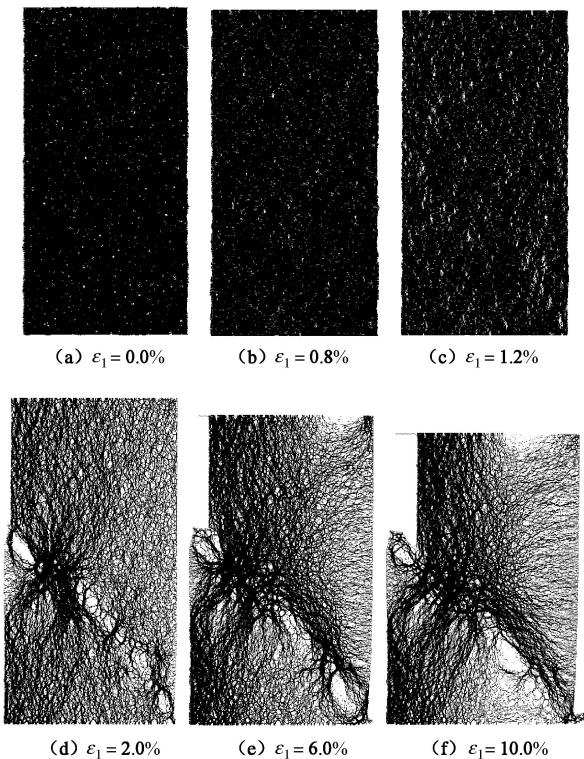


图 9 6 种应变下试样接触力链

Fig. 9 Force chains of sample under six successive strains

可以发现,深海能源土在峰值应力之前,没有剪切带出现,无明显胶结破坏,接触力链均匀;而在应变软化阶段,剪切带开始形成并不断扩大,且在剪切

带形成的区域,胶结大量破坏,接触力链随之发生集中,与剪切带外形成明显差异。这说明,深海能源土剪切带的形成,与水合物微观胶结的局部大量破坏密切相关。

3.3 深海能源土剪切带内外宏观特性

进一步在剪切带内外区域分别布置测量单元 (REV),以研究剪切带内外深海能源土宏观特性差异。剪切带内外平均单个测量元的剪应变以及孔隙比随轴向应变的变化关系如图 10, 11 所示。

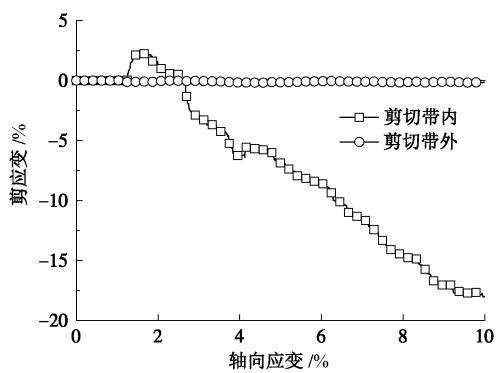


图 10 剪切带内外剪应变 - 轴向应变关系

Fig. 10 Shear strain-axial strain relationship within and outside shear band

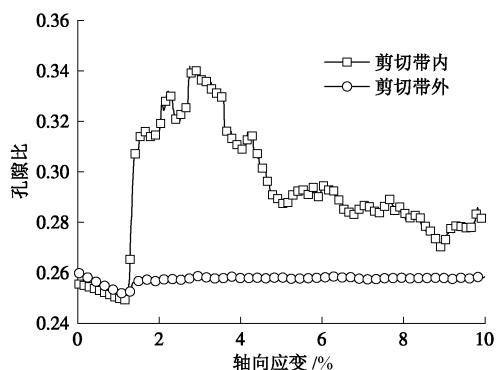


图 11 剪切带内外孔隙比 - 轴向应变关系

Fig. 11 Void ratio-axial strain relationship within and outside shear band

分析可知,在剪切带形成前(1.2%轴向应变以前),剪切带内外的剪切应变、胶结破坏数与孔隙比均无明显差异;而剪切带形成后,剪切带内外的剪切应变、胶结破坏数与孔隙比开始分化,差异随着加载的进行越来越大。剪切带内局部剪应变接近 20%,其增加规律与文献[12]一致。剪切带内外孔隙比的差异,印证了剪切带形成与应变局部化的特征。

图 12 为围压 2 MPa 的试样在 $O \sim E$ 6 种状态下剪切带内外的组构分布。随着加载的进行,剪切带外组构分布无明显变化。剪切带区域内的颗粒接触组构,在剪切带形成前(A 点及以前)接近总体组构分布,

但在剪切带形成后(B点)开始变化。颗粒接触向两个方向集中,且随着加载的继续进行,其中一个方向朝向剪切带方向偏转。这与剪切带区胶结的大量破坏有关。

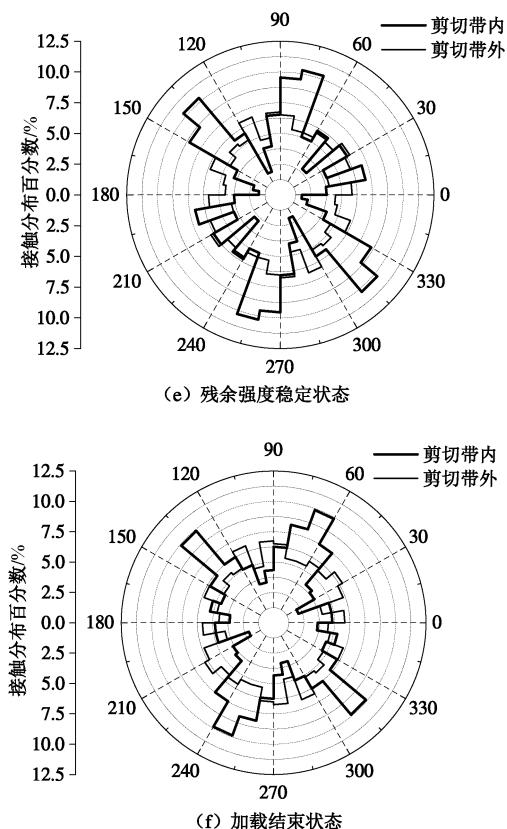
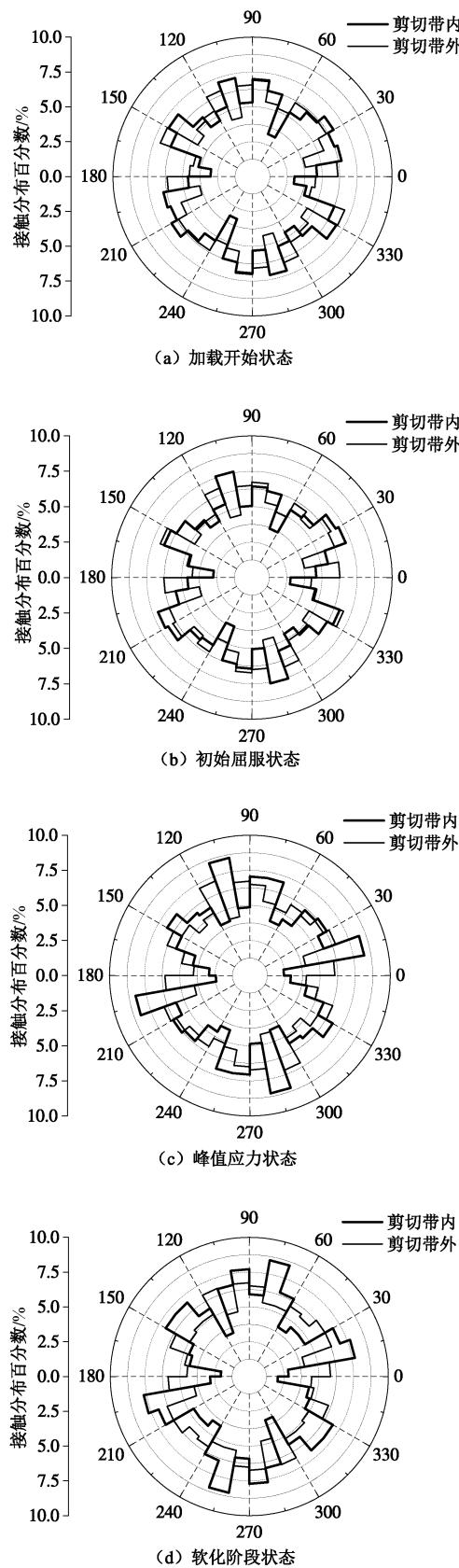


图 12 试样 6 种状态下剪切带内外组织

Fig. 12 Fabric within and outside shear band under six states

4 结 论

本文将深海能源土微观胶结模型引入离散元软件PFC2D中,模拟典型深海能源土平面应变双轴试验,并与相同条件下无胶结试样进行对比,研究了深海能源土剪切带的形成过程及对应的宏微观机理。结果表明:

(1) 由于天然气水合物胶结的存在,增大了深海能源土的黏聚力,从而使其强度相比无胶结土大幅提升。深海能源土加载过程呈现出应变软化的特点,峰值应力过后应力跌落至残余值,接近于无胶结土。

(2) 深海能源土峰值应力过后将会形成剪切带,此过程伴随着剪切带形成区域的大量胶结破坏,微观接触力链的局部集中以及局部应变的增大,表明深海能源土剪切带的形成与剪切带区域内天然气水合物形成的胶结的大量破坏有关。

(3) 深海能源土剪切带形成以后,剪切带内外各宏微观变量呈现出显著差异。剪切带的形成不仅伴随应变局部化,更伴随着土体内部各微观变量的局部化。此外,随着剪切带的产生和发展,试样内部的微观结构也发生变化,尤以剪切带内变化明显。

由于本文的研究着重于深海能源土剪切特性和剪切带形成机理,没有考虑其在受力过程中水合物的相

变特性。对于这一问题的探讨, 将在笔者今后的工作中有所体现。

参考文献:

- [1] 肖 偃, 蒋明镜, 孙渝刚. 考虑简化胶结模型的深海能源土宏观力学性质离散元数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2011, 21(增刊 1): 755 - 760. (XIAO Yu, JIANG Ming-jing, SUN Yu-gang. Numerical simulation of macromechanical properties of deep-sea energy soil by discrete element method under simplified bond model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 21(S1): 755 - 760. (in Chinese))
- [2] DILLON W P, DANFORTH W W, HUTCHINSON D R, et al. Evidence for long-term instability in Storegga region off western Norway[J]. Marine Geology, 1996, 13: 281 - 292.
- [3] PETERS D, HATTON G. Gas hydrate geohazards in shallow sediments and their impact on the design of subsea systems[C]// Proceedings of 6th International Conference on Gas Hydrate. Vancouver. British Columbia, 2008.
- [4] KATAOKA S, YAMASHITA S, SUZUKI T. Soils properties of the shallow type methane hydrate-bearing sediments in the Lake Baikal[C]// The 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Egypt, 2009: 299 - 302.
- [5] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments[C]// Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference. Seoul, 2005: 364 - 369.
- [6] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO N, et al. Mechanical behavior of methane hydrate-supported sand [C]// International Symposium on Geotechnical Engineering Ground Improvement and Geosynthetics for Human Security and Environmental Preservation. Thailand, 2007: 195 - 208.
- [7] ZHANG X H, LU X B, ZHANG L M, et al. Experimental study on mechanical properties of methane-hydrate-bearing sediments[J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(5): 1356 - 1366.
- [8] YU Y, CHENG Y P, SOGA K. Mechanical behaviour of methane hydrate soil sediments using discrete element method: pore-filling hydrate distribution[M]// WU C Y. Discrete Element Modelling of Particulate Media. London: RSC Publishing, 2012: 264 - 270.
- [9] YAN R, WEI C, WEI H, et al. A generalized critical state model for gas hydrate-bearing sediments[M]// YANG Q, ZHANG J M, ZHENG H, et al. Constitutive Modeling of Geomaterials. Springer: Berlin Heidelberg, 2013: 649 - 656.
- [10] BORJA R I, SONG X, RECHENMACHER A L, et al. Shear band in sand with spatially varying density[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2012, 61(1): 219 - 234.
- [11] JIANG M, ZHU H, LI X. Strain localization analyses of idealized sands in biaxial tests by distinct element method[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2010, 4(2): 208 - 222.
- [12] JIANG M, ZHANG W, SUN Y, et al. An investigation on loose cemented granular materials via DEM analyses[J]. Granular Matter, 2013, 15(1): 65 - 84.
- [13] HYODO M, YONEDA J, YOSHIMOTO N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(2): 299 - 314.
- [14] JIANG M, CHEN H, TAPIAS M, et al. Study of mechanical behavior and strain localization of methane hydrate bearing sediments with different saturations by a new DEM model[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 57: 122 - 138.
- [15] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(5): 340 - 357.
- [16] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUAIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. Computers and geotechnics, 2003, 30(7): 579 - 597.
- [17] JIANG M J, YAN H B, ZHU H H, et al. Modeling shear behavior and strain localization in cemented sands by two-dimensional distinct element method analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(1): 14 - 29.