裹覆型能源土力学特性真三轴试验离散元数值分析

蒋明镜^{1,2,3,4*}, 刘俊^{1,2,3}, 申志福⁵

1. 同济大学, 土木工程防灾减灾国家重点实验室, 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. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;

4. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

5. 南京工业大学交通运输工程学院, 南京 210009

* E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2018-04-20; 接受日期: 2018-08-09; 网络出版日期: 2018-11-01

国家自然科学基金重点项目(批准号: 51639008)资助

摘要 甲烷水合物被公认是有望解决当前及未来能源危机的潜在新型能源而备受关注. 含甲烷水合物的土体称为能源土. 目前室内试验中多采用气饱和和法人工合成能源土, 并在简单应力路径下进行力学测试. 以气饱和和法人工合成能源土时, 甲烷水合物倾向于在颗粒表面及弯液面处生成固态物质, 形成裹覆型能源土. 为研究裹覆型能源土在复杂应力路径下的力学性质, 本文采用考虑裹覆型能源土三大微观机制(胶结、颗粒扩大和增大土颗粒表面粗糙度作用)的离散元模拟方案, 结合纯水合物力学性质与温压相关的试验资料, 对裹覆型能源土在真三轴条件下进行离散元数值模拟. 模拟结果表明: (1) 考虑裹覆型能源土微观机制的离散元模拟方案可有效对能源土力学特性进行模拟; (2) 裹覆型能源土胶结作用较弱, 真三轴剪切中表现出的力学特性非常接近无胶结散粒体材料; (3) 真三轴试验中相同剪应变条件下, 随中主应力系数 b 增大能源土峰值及残余偏应力减小, 与Lade-Duncan强度准则基本吻合.

关键词 水合物沉积物, 离散单元法, 真三轴试验, 强度准则

PACS: 02.90.+p, 45.10.-b, 83.80.Fg, 92.20.Gr

1 引言

甲烷水合物是由甲烷分子和水分子在一定的温压条件下形成的类冰笼形结晶化合物, 广泛存在于永久冻土区和海底大陆架边缘. 标准状况下, 1单位体积的

甲烷水合物分解最多可产生164单位体积的甲烷气体^[1]. 甲烷水合物以其丰富的储量及燃烧清洁被认为是缓解全球能源危机的未来重要绿色能源, 引发了美国、俄罗斯、日本、德国、加拿大、韩国、印度等国家的新一轮科技角力^[2].

引用格式: 蒋明镜, 刘俊, 申志福. 裹覆型能源土力学特性真三轴试验离散元数值分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 034613
Jiang M J, Liu J, Shen Z F. Investigating the mechanical behavior of grain-coating type methane hydrate bearing sediment in true triaxial compression tests by distinct element method (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 034613, doi: [10.1360/SSPMA2018-00132](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00132)

含有甲烷水合物的土体通常被称为水合物沉积物, 简称能源土. 能源土的力学性质与水合物密切相关. 例如, 当温压条件改变时, 水合物的分解可能会造成能源土强度的弱化, 进而引起地层变形、开采井破坏甚至海底滑坡等问题^[3-5]. 因此能源土力学特性的相关研究是水合物安全开采的基础研究课题之一.

由于砂土层中的水合物具有很大的商业开采潜力, 目前室内试验和数值模拟多针对砂性能源土进行研究^[6-9]. 现有研究表明: 能源土的力学特性主要受水合物在土体中分布模式、含量、温度和压力等因素的影响, 其中水合物分布模式从微观结构上控制了水合物对能源土力学性质的影响. 例如, 在气饱和状态成样时, 水合物倾向于在土颗粒表面及接触点附近生成, 少量的水合物即可显著提高能源土的强度及模量, 表现出的胶结性质与胶结砂土^[10]相似, 但是应注意即使是胶结型能源土, 其力学性质因水合物特殊的性质也与常规胶结砂土有着显著的不同. 而在水饱和状态成样时, 水合物由溶解于水中的气体或游离气体生成, 只有在水合物含量较高(如超过25%)时能源土强度才会有所提高^[6-9].

尽管室内试验在一定程度上分析了水合物饱和度、温度、压力和密实度对能源土宏观力学特性的影响^[11-13], 并初步得到了水合物在能源土中的微观结构特点^[14-16]. 由于技术条件的限制, 室内试验仍难以全面揭示能源土复杂宏观力学行为的微观机理. 许多学者通过离散单元法(DEM)^[17]分析能源土的力学性质, 这是由于DEM基于立足于颗粒间基本接触力学关系, 可方便地构建、观察岩土材料微观结构及其演变过程^[17-25]. 在DEM中可直接生成不同微观结构的能源土数值试样, 例如, 对于填充型能源土, 可通过向土骨架中填充单颗粒^[19,20]或者团簇^[21]模拟水合物. 对于胶结型能源土可通过胶结模型将颗粒胶结^[20,22]或直接以胶结模型代表水合物^[23-25]. 从而研究特定形式能源土在不同加载条件下的宏、微观力学响应, 促进对能源土这一特殊岩土材料力学行为的深层次认识, 为建立能源土本构模型提供有效途径. 需要注意的是, 能源土的力学性质受到其微观结构控制, 不同微观结构的能源土性质也截然不同, 目前已有少量关于填充型能源土的DEM分析^[26], 本文则针对室内试验中常见的裹覆型能源土进行研究.

目前国内外学者所开展的能源土力学特性分析主

要是通过常规三轴压缩试验进行. 尽管有少量关于能源土直接剪切^[27]和平面应变试验^[28,29]的报道, 能源土在真三轴条件下的室内试验及离散元模拟几乎处于空白. 与此同时, 在实际水合物开采过程中, 海底中能源土应力路径十分复杂. 因此有必要扩展室内试验中的应力路径, 对能源土在真三轴条件下的力学性质进行探索.

基于Shen和Jiang^[30]已分析的部分裹覆型能源土常规三轴试验DEM分析, 本文将对裹覆型能源土在真三轴条件下的力学特性进行离散元模拟分析. 首先, 对室内试验^[7]中能源土典型的微观结构进行分析, 提出了裹覆型能源土的离散元模拟方案. 然后, 改进已有关于胶结砂土的微观胶结接触模型^[31]并结合室内纯水合物试验资料^[32-37]以模拟裹覆型能源土, 通过与室内常规能源土的常规三轴试验对比说明了该离散元模拟的有效性^[30]. 最后, 对裹覆型能源土进行真三轴试验离散元模拟, 探讨了裹覆型能源土在真三轴条件下的宏、微观力学特性.

2 裹覆型能源土离散元模拟方案

2.1 砂性土中水合物分布特点

目前室内试验多在砂土中通过气饱和法合成能源土试样, 即在保持土体有效应力不变的情况下向非饱和砂土中通入一定压力的甲烷, 再对土体降温达到水合物生成条件. 该方法相对较简便, 因此广泛被采用^[6-9]. 图1为Hyodo等人^[7]利用气饱和法合成能源土在分解过程中试样内部的情况, 其中浅灰色为土颗粒, 深灰色为水合物. 当水合物饱和度(水合物体积占土体孔隙体积的百分比)为50%时, 水合物基本均匀覆盖在颗粒表面. 随着分解的进行, 颗粒表面水合物裹覆厚度逐渐减小, 最终消失.

2.2 裹覆型能源土离散元简化

图2为水合物存在形态示意图. 实际土颗粒形状非常复杂, 本文离散元模拟将土颗粒简化为球颗粒, 颗粒表面均匀覆盖一层水合物.

现考虑图2中在接触处的水合物分布和几何形态. 假设生成水合物前两颗粒半径分别为 R_1 和 R_2 , 在水合物生成前两颗粒可能不接触, 如图3(a)和(b)所示, 也可能接触, 如图3(c)所示. 生成水合物后, 颗粒半径扩大

图 1 试验观察到的水合物存在形式^[7]. (a) 水合物饱和度 50%; (b), (c) 水合物分解过程中; (d) 水合物全部分解
Figure 1 Microscopic distribution of MH observed in experiments [7]. (a) MH saturation of 50%; (b), (c) during MH dissociation; (d) after MH dissociation.

图 2 (网络版彩图)水合物存在形态示意图. (a) 实际颗粒形状; (b) 离散元中简化的颗粒形状
Figure 2 (Color online) Illustration of MH distribution. (a) Real particle shape; (b) idealization of particle shape in DEM.

为 $R'_1 = (1+s)R_1$ 和 $R'_2 = (1+s)R_2$, 其中 s 为裹覆厚度比, 与水合物含量有关. 若当两颗粒在半径扩大后能够发生接触, 认为两颗粒间水合物能起到有效的胶结作用, 根据几何关系就可以求得接触处胶结水合物半径 R_b :

$$R_b^2 = \sqrt{R_1'^2 \left[\frac{d^2 + R_1'^2 - R_2'^2}{2d} \right]^2}, \quad (1)$$

式中, d 为两颗粒中心距离.

颗粒表面裹覆的水合物可以分为两部分, 起胶结作用的水合物(图3中接触处浅灰色部分, 这种接触称为水合物胶结接触)和不起胶结作用的水合物(图3中深灰色裹附部分). 从图1中Hyodo等人^[7]试验观察可知, 水合物倾向于在接触处存在, 且接触处水合物宽度($2R_b$)一般大于水合物最小厚度(H_b). 因此, 对于起胶

结作用的水合物, 若通过式(1)计算得到的 $2R_b$ 小于胶结水合物的最小厚度, 则令 $2R_b = H_b$, 即有额外水合物在接触处生成使得 $2R_b = H_b$, 如图3(a)所示情形, 这可认为是水合物倾向于在接触处形成的具体体现. 注意到图3中以下几何关系:

$$h'_1 = R'_1 - \sqrt{R_1'^2 - R_b^2}, \quad (2)$$

$$h'_2 = R'_2 - \sqrt{R_2'^2 - R_b^2}, \quad (3)$$

$$h_1 = R_1 - \sqrt{R_1^2 - R_b^2}, \quad (4)$$

$$h_2 = R_2 - \sqrt{R_2^2 - R_b^2}. \quad (5)$$

据此可计算水合物总体积 V_{MH} :

$$V_{MH} = \left\{ \begin{aligned} & \sum_{N_b} 4\pi(R_1'^3 - R_1^3 + R_2'^3 - R_2^3) / 3 \\ & + \sum_{N_c} \left[\pi R_b^2 (d - R'_1 - R'_2 + h'_1 + h'_2) \right. \\ & \quad \left. - \pi h_1'^2 (R'_1 - h'_1 / 3) - \pi h_2'^2 (R'_2 - h'_2 / 3) \right] \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

其中, N_b 为球颗粒数量, N_c 为水合物胶结接触数量.

水合物饱和度 S_{MH} 为

$$S_{MH} = \frac{V_{MH}}{V_v}, \quad (7)$$

其中, V_v 为试样中孔隙总体积.

2.3 裹覆型能源土微观机理及离散元实现

申志福等人^[31]通过理论推导并结合室内试验提出了针对砂土的胶结模型, 该胶结模型由非胶结部分与胶结部分组成. 其中非胶结部分即为蒋明镜等人^[38]提出的三维含抗转动的完备模型, 该模型假定两颗粒通过半径为 $R = \beta r$ 的圆形接触面相互作用, β 为形状参数, 表征了颗粒形状对试样宏观力学特性的影响, r 为两颗粒平均半径(取调和平均), 该模型可有效地对砂土的宏观力学特性进行模拟^[38]. 而胶结部分则完整地考虑胶结物在复杂荷载作用下的力学响应以及胶结尺寸的影响. 关于该胶结接触模型详见文献^[38]. 以下将结合裹覆型能源土的特性对该胶结模型进行改进.

本文认为水合物可能通过如下3方面影响裹覆型能源土力学特性: (1) 颗粒接触处的水合物作为胶结物质连接相邻颗粒, 即水合物的胶结作用; (2) 水合物包裹在土颗粒表面, 使得尚存在一定间距的两土颗粒可

图 3 水合物微观分布几何图示. (a) 水合物生成前颗粒不接触且计算所得 $2R_b < H_b$; (b) 水合物生成前颗粒不接触且计算所得 $2R_b \geq H_b$; (c) 水合物生成前颗粒接触

Figure 3 Geometry of grain-coating type MH distribution. (a) Separate sand particles with large gap; (b) separate sand particles with small gap; (c) sand particles in contact.

通过包裹物相互作用, 即水合物的传递作用; (3) 土颗粒表面水合物能增加土颗粒间接触尺寸, 增强颗粒抗转动能力.

对于水合物的胶结作用, 采用本文作者提出的胶结接触模型^[31]来表达, 参考纯水合物试验资料^[32-37]得到模型中胶结强度和模量; 对于水合物的传递作用, 按照2.2节中假定, 某一含量的水合物可分为两部分, 一部分起胶结作用(分布在接触处的水合物), 其余位置水合物不起胶结作用. 对于起胶结作用的水合物, 当满足破坏条件后, 胶结作用丧失, 转变为不起胶结作用的水合物. 不起胶结作用的水合物裹附在颗粒表面, 能够使得不直接接触的砂土颗粒通过裹附层相互作用. 引入残余裹附层厚度比 s' , 当两颗粒间距为 $2s'R$ (R 为颗粒平均半径) 时, 两颗粒即可相互作用; 对于水合物增加颗粒接触面尺寸的影响, 则可直接通过增大形状系数 β 来表达.

特别地, 温度和压力对纯水合物力学性质有着明显的影响. 申志福和蒋明镜^[30]对现有纯水合物的试验

资料^[32-37]进行了充分的总结, 认为水合物的峰值强度与模量可表达为

$$q_{\max}^* = 74.75[\text{MPa}] \cdot L, \quad (8)$$

$$E_{\text{MH}} = 947.69[\text{MPa}] \cdot L + 157.95[\text{MPa}], \quad (9)$$

式中, L 为试验时温压状态点在距离水合物相平衡线的最短距离^[30]. 根据式(8)和(9)即可确定胶结模型中粒间抗拉强度、抗压强度和模量参数^[30]. 而对于净砂(水合物生成之前的土体), 其粒径与相应DEM试样如图4所示. 净砂参数为采用文献^[38]中确定的颗粒模量 $E_p = 0.7 \text{ GPa}$, 法向切向刚度比 $\xi = 5$, 摩擦系数 $\mu = 5$, 形状参数 $\beta_c = 0.25$, 破碎系数 $\zeta_c = 4$. 本文重在介绍裹覆型能源土离散元的模拟及其不同应力路径下的力学响应, 关于模型参数具体物理意义等详见文献^[30,38].

通过以上分析, DEM裹覆型能源土试样的生成方式如下: (1) 按照分层欠压法^[39]生成目标孔隙比的无水合物试样; (2) 将无水合物试样等向固结至 1 MPa , 然后根据目标饱和度施加胶结模型生成不同饱和度的

图 4 (网络版彩图) 级配及离散元试样

Figure 4 (Color online) Grain size distribution and DEM sample.

DEM试样, 饱和度根据式(7)确定; (3) 将能源土试样继续固结到3和5 MPa; (4) 由于尺寸效应^[40], 将由式(8)确定的胶结强度增大4倍以考虑不同温压条件下水合物的胶结作用^[30], 水合物模量直接通过式(9)确定; (5) 参考文献[30], 根据式(10)和(11)确定残余裹覆比和胶结破坏后能源土颗粒形状系数以考虑水合物的颗粒扩大作用和增加颗粒接触面尺寸的影响。

$$s' = 0.278S_{MH}L(\sigma_w, T)^{0.3}, \quad (10)$$

$$\beta = 0.25 + 17.2S_{MH}^2L(\sigma_w, T). \quad (11)$$

通过以上步骤生成水合物试样后, 即可根据要求对DEM能源土试样进行给定应力路径下的模拟。

3 裹覆型能源土真三轴试验模拟

3.1 常规三轴压缩试验

由于能源土室内试验多采用常规三轴压缩来研究, 故首先对裹覆型能源土进行常规三轴压缩试验模拟, 以便与室内试验对比验证离散元模拟的有效性。另外, 下文分析中涉及的参数偏应力 q 、平均应力 p 和剪应变 ε_s 的定义如下:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (12)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}, \quad (14)$$

其中, σ_1 , σ_2 和 σ_3 分别为最大、中间和最小主应力, ε_1 , ε_2 和 ε_3 分别是最大、中间和最小主应变。

图5为初始孔隙比 $e_0=0.94$ 的能源土试样在 $L=0.0256$ (对应温度5°C, 反压10 MPa)时, 在不同围压和饱和度条件下的应力应变曲线。该孔隙比下离散元数值试样在饱和度为0%时为松样, 与Hyodo等人^[7]试验相对应。可以看出, 能源土试样峰值强度和残余强度随着饱和度的增加逐渐增大, 并且当饱和度达到一定程度时, 试样由应变硬化变为应变软化。与偏应力对应, 各围压下随着饱和度的增加, 能源土的剪胀随之增大。另外, 能源土的剪胀随着围压的增大而有所减弱。随着围压的增加, 能源土的强度也逐渐增大, 且高围压下能源土的应变软化不明显。宏观上, DEM模拟与室内试验结果^[7]一致。

为了在数值范围内将DEM模拟结果与室内试验对比, 将模拟数据及室内试验^[7]数据进行归一化处理, 即将DEM及室内试验中能源土峰值强度 $q_{\max}$ 和割线弹性模量 E_{50} 除以净砂的相应值 $q_{\max}(S_{MH}=0\%)$ 和 $E_{50}(S_{MH}=0\%)$ 。同时考虑到室内试样^[7]的不同孔隙比, 对另外两种密实度($e_0=0.67$, $e_0=0.82$)的DEM试样也进行了三轴压缩试验模拟, 结果如图6所示。从图中可以看出, 随着饱和度的增加, DEM与室内试验中能源土的归一化强度与模量均随着饱和度的增加而非线性增加, DEM与室内试验结果在数值范围内接近, 注意到室内试验中存在一些离散点与总体规律不符, 推测是与室内试验中试验误差或者能源土微观型式变化引起, 总体上本文DEM模拟结果室内试验结果在定性变化和数值

图 5 (网络版彩图)不同围压下 $e_0=0.94$ 试样应力应变曲线. (a) 围压 $\sigma_c=1$ MPa; (b) 围压 $\sigma_c=3$ MPa; (c) 围压 $\sigma_c=5$ MPa

Figure 5 (Color online) Stress-strain curves of samples with $e_0=0.94$ under different confining pressures. (a) Confining pressure $\sigma_c=1$ MPa; (b) confining pressure $\sigma_c=3$ MPa; (c) confining pressure $\sigma_c=5$ MPa.

范围上都吻合良好, 说明本文采用的模拟方案合理有效, 能够很好反映水合物饱和度对能源土宏观力学特性的影响, 可对其他应力路径进行模拟.

3.2 真三轴试验

考虑到能源土的实际初始应力条件, 模拟中首先将试样等向压缩到一定的球应力 σ_m , 然后进行等球应力不同中主应力系数 b 情况下的真三轴剪切, 中主应力系数 b 定义为式(15), b 与 π 平面上应力洛德角相互对

应, 如图7所示.

$$b = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_2 - \sigma_3}. \quad (15)$$

因同一饱和度下不同初始孔隙比及平均应力下能源土真三轴模拟结果类似, 如图8归一化偏应力情况所示. 这里归一化偏应力为偏应力 q 与残余状态偏应力 q_{cr} 的比值. 这里仅分析在饱和度 $S_{MH}=38.94\%$, $L=0.0256$ (对应试验条件 5°C 及反压 10 MPa)和球应力为 1 MPa情况下的模拟结果, 这也是Hyodo等人室内试验常见的

图 6 能源土DEM模拟与室内试验力学参数归一化对比. (a), (b) 峰值强度; (c), (d) 割线弹性模量

Figure 6 Effect of MH saturation on the mechanical behavior of MHBS from numerical simulations and experiments. (a), (b) Peak strength; (c), (d) secant modulus.

图 7 (网络版彩图)中主应力系数 b 取值示意图

Figure 7 (Color online) Illustration of intermediate principal stress ratio b .

工况. 如图9所示, 其中图9(c), (e), (f)中各曲线与 b 值对应关系与图9(a), (b), (d)中图例均一致.

由图9可知, 相同剪切应变下, 随 b 值增大试样的偏应力 q 越小, 峰值和残余偏应力均随 b 值增大而减小. 不同 b 值下偏应力随剪应变的变化规律相近: 偏应力均随着剪应变的增加先增大后逐渐减小, 在剪应变为2%左

右达到峰值, 随后逐渐降低至稳定值. b 值越大, 峰值及残余偏应力也越大. 当剪应变 ϵ_d 小于4%时, 中主应力系数对归一化偏应力的变化影响不大, 当剪应变超过4%后, 由于部分试样材料本身等原因, 出现应变局局部化, 故曲线不唯一. 排除应变局局部化的影响, 试样体变和水合物胶结破损过程与中主应力系数关系不大.

图 8 饱和度为38.94%不同初始孔隙比及球应力试样真三轴试验模拟结果. (a) 初始孔隙比0.94, $\sigma_m=1$ MPa; (b) 初始孔隙比0.94, $\sigma_m=3$ MPa; (c) 初始孔隙比0.82, $\sigma_m=3$ MPa; (d) 初始孔隙比0.67, $\sigma_m=3$ MPa

Figure 8 True triaxial test simulation results of samples with $S_{MH}=38.94\%$ and different initial void ratios and mean stresses. (a) Initial void ratio of 0.94, $\sigma_m=1$ MPa; (b) initial void ratio of 0.94, $\sigma_m=3$ MPa; (c) initial void ratio of 0.82, $\sigma_m=3$ MPa; (d) initial void ratio of 0.67, $\sigma_m=3$ MPa.

注意到胶结砂土的力学响应明显依赖于中主应力系数^[31], 这是由于中主应力系数影响了胶结破损的发展. 因此可以推测, 胶结效应很强时, 中主应力系数对胶结破损的影响直接导致宏观力学特性的变化. 而对胶结型能源土这样的弱胶结材料, 中主应力系数对胶结破损影响很小. 因此, 裹覆型能源土在单调加载的真三轴剪切过程中, 硬(软)化规律可很精确地用剪切应变唯一描述, 同时需考虑中主应力系数对临界状态强度的影响.

在大主应变 ε_1 压缩加载下, 小主应变 ε_3 向外膨胀, 且 b 值越大, 扩张越明显. 中主应变 ε_2 在 $b=0.0$ 和 0.2 时向外膨胀, 在 $b=0.4$ 时接近平面应变($\varepsilon_2=0$)条件, 当 b 超过 0.4 后, 中主应力方向应变变为压缩.

模拟真三轴试验得到的峰值及残余偏应力如图10所示. 可以看到峰值偏应力和残余偏应力随 b 值增大而减小, 模拟结果与Lade-Duncan强度准则($I_1^3/I_3-27=k^*$)基本吻合. 相比于胶结砂土^[31], 此处模拟的胶结型深海能源土三维峰值、残余强度准则与无胶结散粒体材

料更为接近, 说明裹覆型深海能源土的胶结作用较弱. 结合图9的分析, 可知真三轴剪切中表现出的力学特性非常接近无胶结散粒体材料.

4 总结

本文对裹覆型能源土的微观结构进行分析, 并对已有离散元胶结接触模型进行改进, 以模拟裹覆型能源土. 通过将常规三轴模拟与室内试验结果对比验证了离散元模拟的有效性, 从而对裹覆型能源土进行真三轴试验模拟, 探讨了在真三轴条件下裹覆型能源土的力学特性, 模拟结果表明:

(1) 考虑水合物的胶结作用、传递作用和增加土颗粒间面接触尺寸三大微观机理的离散元模拟方案可对裹覆型能源土有效模拟.

(2) 裹覆型能源土胶结作用较弱, 真三轴过程中能源土体变和水合物胶结破损过程与中主应力系数关系不大, 剪切中表现出的力学特性非常接近无胶结散粒

图 9 初始孔隙比为 0.94 试样真三轴试验模拟结果. (a) 偏应力变化过程; (b) q/q_{cr} 变化过程; (c) 试样孔隙比变化过程; (d) 胶结破坏百分比变化过程; (e) 中主应变变化过程; (f) 小主应变变化过程

Figure 9 True triaxial test simulation results of samples with initial void ratio of 0.94. (a) Evolution of deviator stress; (b) evolution of q/q_{cr} ; (c) evolution of void ratio; (d) evolution of bond breakage; (e) evolution of intermediate principal strain; (f) evolution of minor principal strain.

图 10 初始孔隙比为 0.94 试样真三轴试验模拟结果. (a) 峰值强度; (b) 残余强度

Figure 10 True triaxial test simulation results of samples with initial void ratio of 0.94. (a) Peak strength; (b) residual strength.

体材料.

(3) 相同剪应变条件下, 裹覆型能源土峰值及残余

偏应力随中主应力系数 b 增大而减小, 变化规律可用 Lade-Duncan 强度准则描述.

参考文献

- 1 Waite W F, Santamarina J C, Cortes D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments. *Rev Geophys*, 2009, 47: RG4003
- 2 Zhang Y Y, Li Y G. Research advances of flammable ice as a new clean energy (in Chinese). *Res Ind*, 2011, 3: 50–55 [张颖异, 李运刚. 新型洁净能源可燃冰的研究发展. *资源与产业*, 2011, 3: 50–55]
- 3 Soga K, Lee S L, Ng M Y A, et al. Characterisation and engineering properties of methane hydrate soils. *Characterisat Eng Propert Nat Soils*, 2007, 3: 2591–642
- 4 Jia Y G, Zhu C Q, Li Q P, et al. Marine geohazards: Review and future perspective. *Acta Geol Sin*, 2006, 90: 1455–1470
- 5 Zhu C Q, Zhang M S, Liu X L, et al. Gas hydrates: Production, geohazards and monitoring (in Chinese). *J Catastrophol*, 2017, 32: 51–56 [朱超祁, 张民生, 刘晓磊, 等. 海底天然气水合物开采导致的地质灾害及其监测技术. *灾害学*, 2017, 32: 51–56]
- 6 Masui A, Haneda H, Ogata Y, et al. Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments. In: *Proceedings of the 5th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Seoul: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2005
- 7 Hyodo M, Yoneda J, Yoshimoto N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed. *Soils Found*, 2013, 53: 299–314
- 8 Lee J Y, Yun T S, Santamarina J C, et al. Observations related to tetrahydrofuran and methane hydrates for laboratory studies of hydrate-bearing sediments. *Geochem Geophys Geosyst*, 2007, 8: Q06003
- 9 Jung J W, Santamarina J C, Soga K. Stress-strain response of hydrate-bearing sands: Numerical study using discrete element method simulations. *J Geophys Res*, 2012, 117: B04202
- 10 Zhang F G, Jiang M J. Analysis of the strength behaviour of cemented sands in true triaxial test with distinct element method (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37: 1530–1539 [张伏光, 蒋明镜. 胶结砂土强度特性的真三轴试验离散元分析. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37: 1530–1539]
- 11 Zhang X H, Wang S Y, Li Q P, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2010, 31: 3069–3074 [张旭辉, 王淑云, 李清平, 等. 天然气水合物沉积物力学性质试验研究. *岩土力学*, 2010, 31: 3069–3074]
- 12 Yan R T, Wei C F, Wei H Z, et al. Effect of hydrate formation on mechanical strength of hydrate-bearing sand (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2012, 34: 1234–1240 [颜荣涛, 韦昌富, 魏厚振, 等. 水合物形成对含水合物砂土强度影响. *岩土工程学报*, 2012, 34: 1234–1240]
- 13 Hyodo M, Wu Y, Nakashima K, et al. Influence of fines content on the mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments. *J Geophys Res Solid Earth*, 2017, 122: 7511–7524
- 14 Yoneda J, Jin Y, Katagiri J, et al. Strengthening mechanism of cemented hydrate-bearing sand at microscales. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 7442–7450
- 15 Sell K, Saenger E H, Falenty A, et al. On the path to the digital rock physics of gas hydrate-bearing sediments—Processing of *in situ* synchrotron-tomography data. *Solid Earth*, 2016, 7: 1243–1258
- 16 Wang J Q, Zhao J F, Yang M J, et al. Permeability of laboratory-formed porous media containing methane hydrate: Observations using X-ray computed tomography and simulations with pore network models. *Fuel*, 2015, 145: 170–179
- 17 Cundall P A, Strack O D L. The discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 1979, 29: 47–65
- 18 Jiang M, Liu J, Shen Z, et al. Exploring the critical state properties and major principal stress rotation of sand in direct shear test using the distinct element method. *Granular Matter*, 2018, 20: 25
- 19 Brugada J, Cheng Y P, Soga K, et al. Discrete element modelling of geomechanical behaviour of methane hydrate soils with pore-filling hydrate distribution. *Granular Matter*, 2010, 12: 517–525
- 20 Yu Y, Cheng Y P, Xu X, et al. Discrete element modelling of methane hydrate soil sediments using elongated soil particles. *Comput Geotech*, 2016, 80: 397–409
- 21 He J, Jiang M J. Three-dimensional distinct element novel sample-preparing method and mechanical behavior for pore-filling type of methane hydrate-bearing soil (in Chinese). *J Tongji Univ (Nat Sci)*, 2016, 44: 709–717 [贺洁, 蒋明镜. 孔隙填充型深海能源土的离散元成样新方法及其宏观力学特性. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44: 709–717]
- 22 Dai S, Santamarina J C, Waite W F, et al. Hydrate morphology: Physical properties of sands with patchy hydrate saturation. *J Geophys Res*, 2012,

117: B11205

- 23 Jiang M, Zhu F, Liu F, et al. A bond contact model for methane hydrate-bearing sediments with interparticle cementation. [Int J Numer Anal Meth Geomech](#), 2014, 38: 1823–1854
- 24 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. [Comput Geotech](#), 2014, 57: 122–138
- 25 Jiang M, Zhu F, Utili S. Investigation into the effect of backpressure on the mechanical behavior of methane-hydrate-bearing sediments via DEM analyses. [Comput Geotech](#), 2015, 69: 551–563
- 26 He J, Jiang M J. Macro-micro mechanical property of pore-filling type methane hydrate-bearing sediment in true triaxial tests based on distinct element analysis (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2016, 37: 3026–3034 [贺洁, 蒋明镜. 孔隙填充型能源土的宏微观力学特性真三轴试验离散元分析. *岩土力学*, 2016, 37: 3026–3034]
- 27 Liu Z, Wei H, Peng L, et al. An easy and efficient way to evaluate mechanical properties of gas hydrate-bearing sediments: The direct shear test. [J Pet Sci Eng](#), 2017, 149: 56–64
- 28 Kato A, Nakata Y, Hyodo M, et al. Macro and micro behaviour of methane hydrate-bearing sand subjected to plane strain compression. [Soils Found](#), 2016, 56: 835–847
- 29 Kajiyama S, Hyodo M, Nakata Y, et al. Shear behaviour of methane hydrate bearing sand with various particle characteristics and fines. [Soils Found](#), 2017, 57: 176–193
- 30 Shen Z, Jiang M. DEM simulation of bonded granular material. Part II: Extension to grain-coating type methane hydrate bearing sand. [Comput Geotech](#), 2016, 75: 225–243
- 31 Shen Z, Jiang M, Thornton C. DEM simulation of bonded granular material. Part I: contact model and application to cemented sand. [Comput Geotech](#), 2016, 75: 192–209
- 32 Hyodo M, Hyde A F L, Nakata Y, et al. Triaxial compressive strength of methane hydrate. In: *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Kitakyushu: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002
- 33 Hyodo M, Nakata Y, Yoshimoto N, et al. Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture. *Soils Found*, 2005, 45: 75–85
- 34 Nabeshima Y, Matsui T. Static shear behaviors of methane hydrate and ice. In: *Proceedings of the 5th Oceanic Mining Symposium*. Tsukuba: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003
- 35 Nabeshima Y, Takai Y, Komai T. Compressive strength and density of methane hydrate. In: *Proceedings of the 6th ISOPE Ocean Mining Symposium*. Changsha: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2005
- 36 Song Y, Yu F, Li Y, et al. Mechanical property of artificial methane hydrate under triaxial compression. [J Nat Gas Chem](#), 2010, 19: 246–250
- 37 Yu F, Song Y C, Liu W G, et al. Study on shear strength of artificial methane hydrate. In: *Proceedings of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2010
- 38 Jiang M, Shen Z, Wang J. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances. [Comput Geotech](#), 2015, 65: 147–163
- 39 Jiang M J, Konrad J M, Leroueil S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies. [Comput Geotech](#), 2003, 30: 579–597
- 40 Weibull W. The phenomenon of rupture in solids. *Proc R Swed Inst Eng Res*, 1939, 153: 1–55

Investigating the mechanical behavior of grain-coating type methane hydrate bearing sediment in true triaxial compression tests by distinct element method

JIANG MingJing^{1,2,3,4*}, LIU Jun^{1,2,3} & SHEN ZhiFu⁵

¹ State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

³ Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

⁴ Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

⁵ College of Transportation Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China

Methane hydrate is viewed as one of the potential energy resources to alleviate the current and future energy needs. Sediments containing methane hydrate are referred to as methane hydrate bearing sediments. In laboratory tests, the methane hydrate bearing sediments are commonly synthesized by the gas saturated method, and their mechanical properties are tested under simple stress path. When the gas saturated method is used to form the methane hydrate bearing sediments, methane hydrate tends to generate at the surface and meniscus of particles, namely the grain-coating type methane hydrate bearing sediments. In this study, to obtain the mechanical behavior of grain-coating type methane hydrate bearing sediment subjected to complex stress paths, a discrete element method simulation scheme accounting for three particle-scale mechanisms of grain-coating type methane hydrate bearing sediments, i.e. cementation, particle enlargement and particle angulation, along with the experimental data of pure methane hydrate that indicate the strong correlation between the mechanical property of pure methane hydrate and the pore pressure/ambient temperature, is adopted to explore the mechanical behavior of grain-coating type methane hydrate bearing sediments under true triaxial compression tests. The results show that: (1) the discrete element method simulation scheme accounting for microscopic mechanism is effective to simulate the mechanical property of grain-coating type methane hydrate bearing sediments; (2) the cementation effect of methane hydrate in the grain-coating type methane hydrate bearing sediments is weak and the mechanical behavior of grain-coating type methane hydrate bearing sediments in true triaxial compression tests is similar to that of cohesionless granular materials; (3) in true triaxial compression tests, the peak and residual deviator stresses of methane hydrate bearing sediments are larger under a lower value of intermediate principal stress ratio. The Lade-Duncan criterion can be used to describe the strength of grain-coating methane hydrate bearing sediments.

methane hydrate bearing sediments, distinct element method, true triaxial compression test, strength criteria

PACS: 02.90.+p, 45.10.-b, 83.80.Fg, 92.20.Gr

doi: [10.1360/SSPMA2018-00132](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00132)