

文章编号: 1000-7598 (2014) 01-0255-08

# 水合物沉积物力学性质的三维离散元分析

杨期君<sup>1,2</sup>, 赵春风<sup>1,2</sup>

(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)

**摘 要:** 水合物沉积物力学特性研究是天然气水合物开采领域中的热点问题。为深入了解水合物对沉积物力学特性的影响, 在提出一个新的水合物沉积物离散元数值试样制备方法的基础上, 模拟了不同水合物饱和度沉积物试样的三轴排水试验, 并从其应力-应变关系、体变特性、弹性模量及峰值强度等方面对模拟结果及已有室内三轴试验结果进行了对比, 然后利用该方法对具有不同微观胶结参数的水合物沉积物样进行了三轴离散元数值试验。研究表明: 所提出的离散元模拟方法能较好地反映水合物沉积物的主要力学特性; 天然气水合物与土颗粒间胶结性能的改变会对水合物沉积物的力学响应产生一定的影响; 水合物沉积物强度和模量的增加是孔隙填充水合物和粒间胶结水合物共同作用的结果。

**关 键 词:** 水合物沉积物; 力学性质; 离散元法; 三轴排水试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

## Three-dimensional discrete element analysis of mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments

YANG Qi-jun<sup>1,2</sup>, ZHAO Chun-feng<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments has been a research focus in the area of exploiting methane hydrate from deep seabed currently. This paper presents a numerical analysis of mechanical behavior of hydrate-bearing sediments by using the discrete element method (DEM). Firstly, a new method for preparing hydrate-bearing samples in the DEM simulation is proposed. Then, a series of numerical simulations of drained triaxial tests are performed on hydrate-bearing sediments with different hydrate saturations. And the simulation results are compared with the test results obtained in the laboratories. Finally, some numerical experiments on hydrate-bearing sediments with different micro-bond parameters are performed using the same method. The study shows that the DEM simulation is able to capture the main mechanical characteristics of hydrate-bearing sediments; and their mechanical properties will change with the variation of the properties of the bond between methane hydrate and soil particles. Furthermore, it is found that both of their peak strength and elastic modulus are enhanced by the presence of methane hydrate in hydrate-bearing sediments with the forms of cementation and pore-filling in combination.

**Key words:** methane hydrate-bearing sediments; mechanical behavior; discrete element method; drained triaxial test

## 1 引 言

水合物沉积物是指含天然气水合物的天然土体。其中赋存的天然气水合物储藏总量巨大, 被认为是一种极具开发前景的能源, 许多国家已制定了相应的开采计划, 我国也在加大这方面的研究。已有研究表明, 水合物的存在会对沉积物的力学性质产生明显的影响<sup>[1-2]</sup>, 那么由于开采而引起的水合物分解就会导致沉积物力学性质的劣化, 进而带来

一系列岩土工程问题, 如海底滑坡<sup>[3-5]</sup>、钻井井壁失稳<sup>[6-8]</sup>等。因此, 为保证水合物的安全开采以及避免海底地质灾害的发生, 正确认识水合物沉积物的力学性质无疑具有非常重要的意义。

目前, 已有众多国内外学者对天然或人工合成水合物沉积物进行了试验研究<sup>[9-15]</sup>, 取得了一些有意义的成果, 加深了人们对水合物沉积物力学性质的认识。水合物沉积物是一种由土体颗粒、天然气水合物、水和气体共同组成的多相材料, 其力学性

质复杂,影响因素众多,其中,天然水合物的含量、存在形式和物理力学性质等对水合物沉积物力学性质的影响尤为明显。但由于天然气水合物特殊的赋存环境(高压低温),水合物沉积物的取样与制备都比较困难,因此,力学试验难以大量开展;另外,室内试验也无法对水合物沉积物力学性质的各项影响因素进行单独探讨,这些原因均会限制水合物沉积物复杂力学性质的系统研究。

离散单元法因其特有的优势,已被广泛应用于岩土工程的众多领域,为岩土工程研究提供了新途径。目前,部分学者已经采用离散元法对水合物沉积物的力学性质展开了研究,如 Brugada 等<sup>[16]</sup>利用离散元商业软件 PFC<sup>3D</sup>对含有孔隙填充水合物的沉积物进行了三轴排水试验,从颗粒行为上分析了孔隙填充水合物对沉积物力学特性产生影响的内在原因;蒋明镜等<sup>[17-18]</sup>则考虑水合物对土颗粒的胶结作用,引入其团队建立的微观胶结模型,并用 PFC<sup>2D</sup>模拟了水合物沉积物的双轴试验;Jung 等<sup>[19]</sup>同样考虑水合物的胶结作用,分别对含有两种水合物存在形式的沉积物进行了三维离散元模拟分析。上述研究为水合物沉积物力学性质的研究提供了新思路,有助于人们了解其复杂力学性质的内在原因。然而,这些研究中的数值试样均只考虑了某一种水合物存在形式(胶结或孔隙填充),并不能很好地反映水合物沉积物的实际情况,如 Waite 等<sup>[2]</sup>认为,沉积物中的天然气水合物主要有3种存在形式:①沉积物孔隙中的填充物;②沉积物的受力骨架;③土体颗粒间的胶结物质。另外,Brugada 等<sup>[16]</sup>和 Jung 等<sup>[18]</sup>均采用离散的、不能破坏的小颗粒模拟水合物,这种做法忽略了水合物破坏对沉积物力学性质产生的影响,与实际情况存在一定的差异。

基于上述分析,本文首先提出一个制备水合物沉积物离散元试样的新方法;然后模拟了不同水合物饱和度沉积物试样的三轴排水试验,并将模拟结果与已有试验结果进行了对比;最后,通过对具有不同微观胶结参数的沉积物样进行三轴数值试验,初步探讨了水合物与土颗粒间胶结性质变化对沉积物宏观力学性质的影响。

## 2 离散元数值模拟

本文采用离散元商业软件 PFC<sup>3D</sup> (particle flow code in three dimensions) v3.10 对水合物沉积物的三轴排水试验进行模拟分析,下面将详细介绍沉积物离散元试样的制备和三轴排水试验的模拟方法。

### 2.1 试样制备

本文的离散元试样为圆柱体,直径为 2 mm,高度为 4 mm。采用类似于文献[20]中的方法,认为水合物沉积物的固体骨架由土颗粒和水合物颗粒共同组成,这两种颗粒均用圆球模拟。为能更好地与室内试验结果进行对比,用于模拟土颗粒的圆球直径为 0.1~0.4 mm,颗粒级配与 Toyoura 砂接近,级配曲线如图 1 所示。因为水合物是在沉积物孔隙中形成,则试样中的水合物颗粒的直径应较小,否则将很难生成较高水合物饱和度的沉积物样,而较小的水合物颗粒势必导致试样中颗粒数目的剧增,从而极大地降低计算效率,因此,综合上述两个因素,在本研究中,水合物颗粒直径取 0.06 mm。

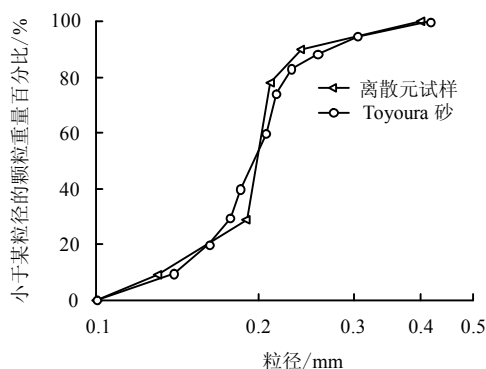


图 1 离散元颗粒材料和 Toyoura 砂的颗粒级配曲线  
Fig.1 Particle size distributions of granular material used in DEM and Toyoura sand

为了能模拟沉积物中水合物的破坏,本文对 Wang 等<sup>[20]</sup>提出的成样方法进行了改进,具体步骤如下:

(1) 采用 PFC<sup>3D</sup> 中的粒径膨胀法制备不含水合物的沉积物试样。首先,在上述圆柱体范围内随机生成所需数目、颗粒直径为其目标直径一半的土颗粒,所需土颗粒数目取决于试样的初始孔隙率,如本文试样的初始孔隙率为 0.42,则土体颗粒数目为 2 542;然后将所有土颗粒的直径逐渐膨胀至目标直径,在此过程中,通过循环计算使所有土颗粒逐渐达到平衡。

(2) 施加固结压力使所生成的不含水合物的沉积物样固结。为了模拟水合物沉积物初始的应力状态,给该沉积物试样施加 0.5 MPa 的固结压力,并使试样的颗粒在该压力的作用下相互接触且最终达到平衡。

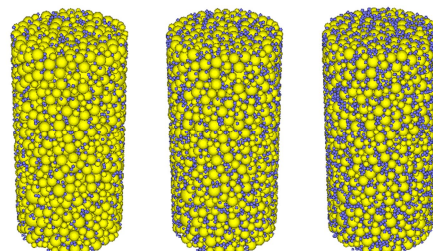
(3) 在不含水合物的沉积物试样中生成所需饱和度的水合物。首先,固定试样中的土颗粒位置并

缩小土其直径；接下来在试样孔隙中随机生成直径为 0.06 mm 的水合物颗粒，其数目可通过水合物饱和度计算，本文研究了具有 3 种水合物饱和度  $S_{MH}$ （10%、20%、30%）的沉积物试样，其中的水合物颗粒数目分别为 4 473、8 947 和 13 421；然后将土颗粒直径逐渐膨胀至原有直径并取消对土颗粒的固定。在此过程中，水合物颗粒受土颗粒作用而往不同方向运动，直至所有颗粒达到平衡；最后，通过命令分别在土颗粒与水合物颗粒接触点及水合物颗粒之间的接触点形成平行胶结，平行胶结模型详见 PFC<sup>3D</sup> 用户手册<sup>[21]</sup>。

最终生成的不同水合物饱和度的沉积物离散元试样如图 2 所示，图中浅色的颗粒为土颗粒，深色的颗粒为水合物颗粒。

由于现有试验条件的限制以及数值模拟中所用圆球与真实颗粒的差异，离散元法中的颗粒间微观

参数往往很难确定。参考已有研究<sup>[16, 19]</sup>中的参数取值，并经过大量试算，本文模拟采用完全刚性的上、下墙，但为了能模拟试样的侧向变形，侧墙则选取了一个相对较小的法向刚度，为  $1 \times 10^4$  N/m，另外，所有墙体均为光滑，其他材料参数见表 1。



(a) 饱和度为 10% (b) 饱和度为 20% (c) 饱和度为 30%

图 2 不同水合物饱和度的离散元三轴试样  
Fig.2 DEM triaxial samples with different hydrate saturations

表 1 离散元模拟中的材料参数

Table 1 Material properties used in DEM simulations

| 材料               | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 颗粒直径<br>D/mm | 接触刚度<br>$E_c$ /MPa | 法向刚度<br>$k_n$ /(N/m) | 切向刚度     | 摩擦系数 | 胶结刚度/(N/m) |           | 胶结强度/MPa |          | 胶结半径             |
|------------------|----------------------------|--------------|--------------------|----------------------|----------|------|------------|-----------|----------|----------|------------------|
|                  |                            |              |                    |                      |          |      | 法向         | 切向        | 法向       | 切向       |                  |
| 土颗粒              | 2.65                       | 0.10~0.40    | 286.0              | $2DE_c$              | $0.7k_n$ | 0.75 |            |           |          |          |                  |
| 水合物颗粒            | 0.30                       | 0.06         | 28.6               | $2DE_c$              | $0.7k_n$ | 0.50 | $10^{13}$  | $10^{13}$ | 10       | 10       | 1.0              |
| 水合物颗粒与<br>土颗粒接触处 |                            |              |                    |                      |          |      | $10^{13}$  | $10^{13}$ | 1, 5, 10 | 1, 5, 10 | 0.25, 0.50, 0.75 |

注：胶结半径是指两胶结颗粒胶结区域半径与较小颗粒半径的比值<sup>[21]</sup>。

## 2.2 三轴试验模拟

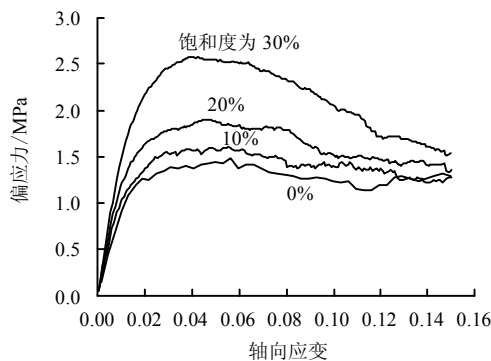
离散元法模拟水合物沉积物三轴排水试验的具体实施方法如下：首先，采用 PFC<sup>3D</sup> 中的伺服技术<sup>[21]</sup>使水合物沉积物数值试样在 1 MPa 的围压下充分固结，然后保持该围压不变，通过控制上、下边界墙的运动速度 ( $1 \times 10^{-6}$  m/s) 进行三轴压缩试验。本文共完成了 8 组具有不同水合物饱和度以及不同微观胶结力学参数的水合物沉积物样的三轴排水试验。

## 3 数值模拟结果

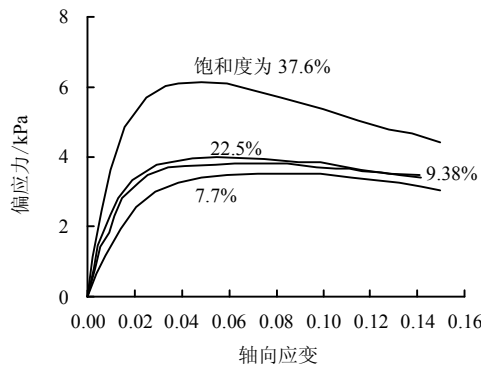
### 3.1 应力-应变关系

不同水合物饱和度沉积物试样的应力-应变关系如图 3 所示，图 3(a)为不同饱和度（0、10%、20% 和 30%）沉积物试样在 1 MPa 围压下的离散元数值模拟结果，图 3(b)为 Masui 等<sup>[11]</sup>对不同饱和度（7.70%、9.38%、22.5%和 37.6%）天然水合物沉积物所进行的三轴排水试验结果，试验的有效围压为 1 MPa。

将图 3(a)、3(b)进行比较可以发现，本文离散元模拟结果能较好地反映水合物沉积物的主要应力-应变特性，主要体现在：



(a) 模拟结果



(b) 试验结果<sup>[11]</sup>

图 3 不同水合物饱和度沉积物应力-应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curves of hydrate-bearing sediments with different hydrate saturations

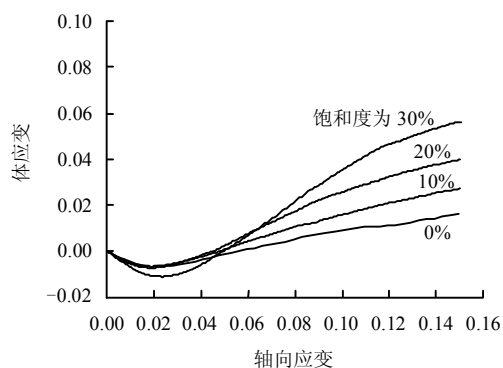
(1) 水合物饱和度对水合物沉积物的应力-应变曲线影响明显。随着水合物饱和度的增加, 水合物沉积物表现出越来越明显的应变软化现象。

(2) 水合物沉积物的峰值强度与水合物饱和度有着密切的联系。水合物饱和度越大, 沉积物的峰值强度也越大, 且其峰值强度的增长幅度越明显。

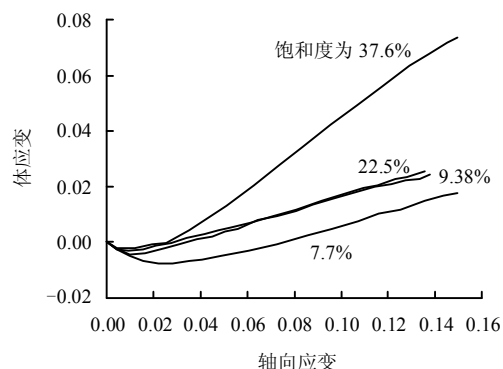
(3) 水合物饱和度对水合物沉积物的残余强度有一定的影响。在水合物饱和度较小的情况下, 沉积物的残余强度基本不受水合物的影响, 而当水合物饱和度较大时, 沉积物的残余强度明显增加, 且其增加幅度随水合物饱和度的增加而趋显著。

### 3.2 体变关系

图 4(a)给出了不同水合物饱和度 (0%、10%、20%和 30%) 沉积物样在 1 MPa 围压下体变曲线的离散元模拟结果, 图 4(b)为相同有效围压下不同饱和度 (7.70%、9.38%、22.5%和 37.6%) 天然水合物沉积物三轴排水试验所得的体变曲线<sup>[11]</sup>。由图 4(a)、4(b)可以发现, 二者反映了基本一致的体变规律: 试样先剪缩后剪胀, 且水合物饱和度越大, 剪胀越明显。



(a) 模拟结果



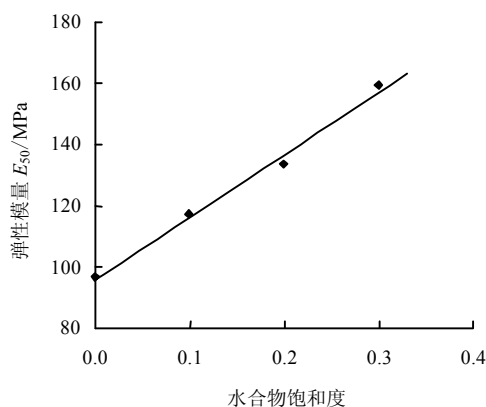
(b) 试验结果<sup>[11]</sup>

图 4 不同水合物饱和度沉积物体变曲线

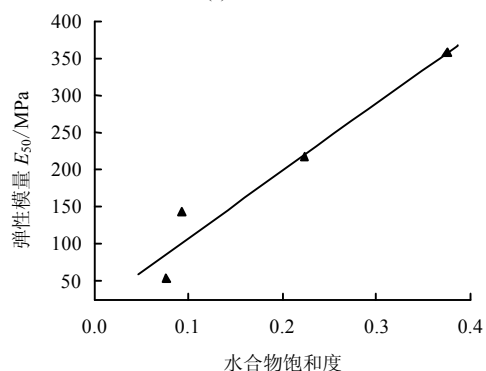
Fig.4 Volumetric strain response of hydrate-bearing sediments with different hydrate saturations

### 3.3 弹性模量 $E_{50}$

图 5(a)、5(b)分别为 1 MPa 有效围压下离散元数值模拟和室内三轴排水试验得到的水合物沉积物弹性模量  $E_{50}$  与水合物饱和度的变化关系<sup>[11]</sup>。由图 5 可以看出, 尽管由两种方法得到的沉积物弹性模量  $E_{50}$  在数值上存在一定的差别, 但其随水合物饱和度的变化规律却大体上是一致的, 即弹性模量  $E_{50}$  与水合物饱和度基本呈线性关系。



(a) 模拟结果



(b) 试验结果<sup>[11]</sup>

图 5 沉积物弹性模量  $E_{50}$  与水合物饱和度的关系

Fig.5 Relationships between Young's modulus at 50% stress level ( $E_{50}$ ) of hydrate-bearing sediments and methane hydrate saturation

### 3.4 峰值强度

1 MPa 有效围压下水合物沉积物峰值强度与水合物饱和度的关系如图 6(a)、6(b)所示, 图 6(a)为本文离散元模拟结果, 图 6(b)为室内三轴排水试验结果<sup>[22]</sup>。通过对比可知, 数值模拟结果与试验结果表现出相似的变化规律: 沉积物的峰值强度随水合物饱和度的增加而呈非线性增加。

综上所述, 通过将离散元模拟结果与相同有效围压下已有室内三轴排水试验结果在应力-应变关系、体变关系、弹性模量  $E_{50}$  及峰值强度等方面进行比较, 可以发现, 尽管这些结果在数值上有些差异, 但数值模拟结果仍然能较好地反映出水合物沉

积物主要力学特性的变化规律,这说明采用本文方法对水合物沉积物的力学性质进行定性研究应该是可行的。

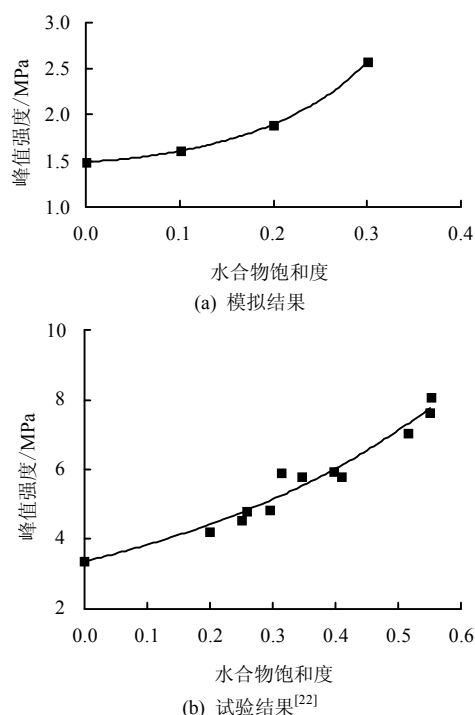


图6 沉积物峰值强度与水合物饱和度的关系

Fig.6 Peak strength of hydrate-bearing sediments vs. methane hydrate saturation

## 4 微观胶结性能的影响

水合物沉积物的固体骨架由土颗粒与水合物共同组成,而且水合物的胶结作用能将土颗粒与水合物连成一体以共同承担外力,所以,这种胶结作用的大小会对水合物沉积物的力学响应产生明显影响。而胶结作用的大小与土颗粒和水合物的物理力学性质有关,任何一种物质性质的改变都可能引起该胶结性能的变化,进而影响水合物沉积物的力学性质。已有研究表明,水合物的力学性质与其赋存的温、压条件密切相关,一般而言,温度越低、压力越大,水合物的强度就越大<sup>[23]</sup>;另外,已有的钻孔资料也显示,从不同地点获取的天然水合物沉积物中土颗粒的矿物成分也不尽相同<sup>[1]</sup>。因此,研究水合物与土颗粒之间的胶结性能对沉积物力学性质的影响具有实际意义,其研究成果将有助于深入了解水合物影响沉积物力学性质的内在原因。在离散单元法中,一般采用胶结强度与胶结半径两个参数表示颗粒间的胶结性能,因此,本文分别对具有不用胶结强度与胶结半径的水合物沉积物样进行离散元三轴排水试验,以探讨沉积物力学性质与胶结性能之间的关系。

### 4.1 胶结强度的影响

图7为通过离散元数值试验得到的水合物饱和度为30%,胶结半径为0.5,但胶结强度不同(1、5、10 MPa)的沉积物样的应力-应变曲线。由图7可以看出,颗粒间的胶结强度对水合物沉积物的应力-应变特性具有一定的影响:随着胶结强度增加,沉积物的峰值强度和弹性模量逐渐增大,但其所表现出来的应变软化现象却没有明显差别。

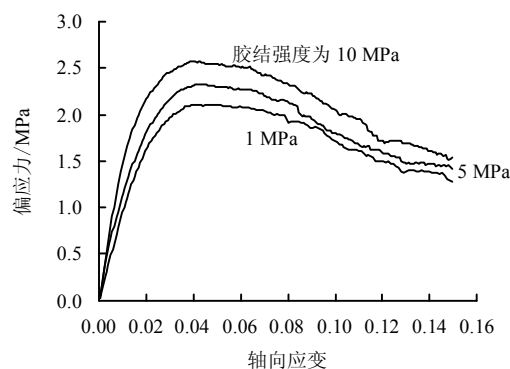


图7 不同胶结强度沉积物应力-应变关系

Fig.7 Stress-strain curves of hydrate-bearing sediments with different bond strengths

### 4.2 胶结半径的影响

水合物饱和度为30%,胶结强度为10 MPa,但胶结半径不同(0.25、0.50和0.75)的沉积物样的应力-应变曲线如图8所示。由图可知,胶结半径对沉积物的弹性模量影响较大,胶结半径越大,弹性模量越大,但胶结半径对沉积物峰值强度的影响则相对较小。

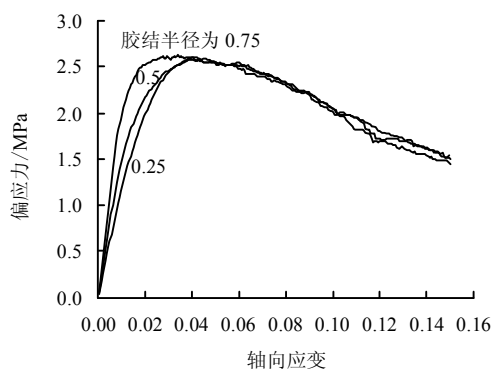


图8 不同胶结半径沉积物的应力-应变关系

Fig.8 Stress-strain curves of hydrate-bearing sediments with different bond radii

由上述数值试验结果可知,水合物与土颗粒间的胶结性能对水合物沉积物的力学性质具有一定的影响。所以,当外部条件的改变引起该胶结性能变弱时,即使水合物没有发生分解,也可能会带来一

些岩土工程问题,如边坡失稳、地基变形增大等,因此,在进行水合物沉积物力学性质研究时,应该考虑水合物与土颗粒性质变化所带来的影响。

## 5 讨论与分析

从已有研究成果可知,水合物沉积物的力学性质与水合物和土颗粒之间的相互作用密切相关,本文将根据离散元结果尝试解释水合物沉积物复杂力学特性的内在原因。

水合物的形成占据了沉积物中的原有孔隙,使水合物沉积物的孔隙减小,水合物饱和度越大,沉积物的孔隙就越小。在本研究中,当水合物饱和度从0%增加到10%、20%、30%时,沉积物样的孔隙率从0.41分别减小到0.38、0.36、0.33。当水合物饱和度较小时,尽管沉积物的孔隙有所减小,但由于沉积物中的孔隙仍然较大,水合物在受到土颗粒作用时尚能进行相对自由的移动,往往较难形成受力骨架,因此,水合物对沉积物力学性质的影响不明显;但随着水合物饱和度的增加,沉积物的孔隙越来越小,在外荷载的作用下,水合物的移动就会受到越来越多的限制,很容易与周围土颗粒接触而成为持力体,从而提高了水合物沉积物的强度和弹性模量,加剧了沉积物的剪胀与应变软化现象。

Brugada 等<sup>[16]</sup>研究表明:以填充孔隙形式存在于沉积物中的水合物,只有当其饱和度大于20%时,才会对沉积物的力学性质产生较明显的影响,这证明了上述分析的合理性。而本文模拟结果以及天然水合物沉积物的试验结果均表明,即使水合物饱和度小于10%,沉积物的强度与弹性模量也会受水合物的影响,这说明水合物影响沉积物力学性质的内在机制尚需要另外的解释。

水合物对土颗粒具有胶结作用,它与土颗粒在接触点处胶结,因此,与无胶结的松散土颗粒相比,水合物沉积物中土颗粒受到的约束作用更大。水合物饱和度越大,土颗粒与水合物之间的胶结就越多,整个试样中所有颗粒受到的总约束作用也越强,这就意味着水合物沉积物发生破坏需要更多的能量,因此,沉积物具有更大的强度与弹性模量。图9为离散元数值试验过程中不同水合物饱和度沉积物样胶结数目随轴向应变的变化情况。对比图9和图3(a)可知,水合物饱和度越大,试样中的胶结数目就越多,相应的,沉积物的强度和弹性模量也越大。如果保持试样中的胶结数目不变,即水合物饱和度不变,仅增加胶结强度,由于每个胶结破损所需能量增加,则试样破坏时所需的总能量仍然是增加的,

从而导致水合物沉积物的强度和弹性模量增加。图10为相同水合物饱和度(30%),但不同胶结强度的沉积物样中胶结数目的变化情况。将图10与图7进行比较可以发现,当试样中有相同数量的胶结破损时,胶结强度大的试样发生的应变越大,即所需能量越大,所以其强度和弹性模量明显增加。根据PFC<sup>3D</sup>中胶结半径的定义<sup>[20]</sup>可知,胶结半径的增大虽然也增加了每个胶结破坏所需的能量,但增加量相对较小,所以沉积物的强度变化较小;而胶结半径的增大会大大提高颗粒的抗转动能力,所以沉积物的弹性模量随胶结半径的增大而明显增加。图11为水合物饱和度是30%,但胶结半径不同的沉积物样胶结数目在数值试验过程中的变化情况,试验结果表明,上述分析是合理的。

综上所述,水合物沉积物的力学性质,如弹性模量、强度、剪胀及软化现象等,是孔隙填充和颗粒间胶结两种形式的水合物共同作用的结果,但二者的影响机制不同:在水合物饱和度较小时,填充于孔隙中的水合物对沉积物的力学性质影响基本没有影响,而胶结作用的影响却不可忽略。因此,在研究水合物沉积物力学性质时,应该同时考虑这两种存在形式的水合物的影响。

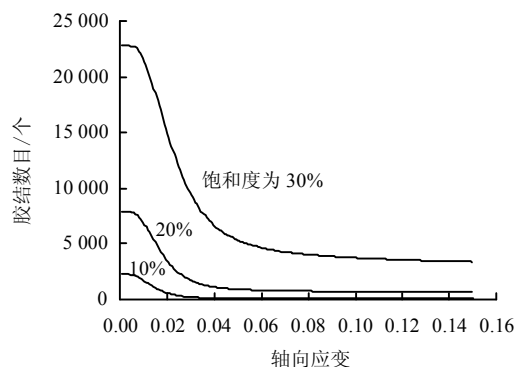


图9 不同水合物饱和度沉积物样中胶结数目变化  
Fig.9 Variations of bond number of hydrate-bearing sediments with different hydrate saturations

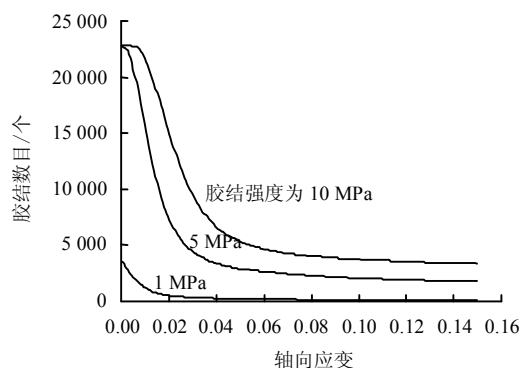


图10 不同胶结强度沉积物样中胶结数目变化  
Fig.10 Variations of bond number of hydrate-bearing sediments with different bond strengths

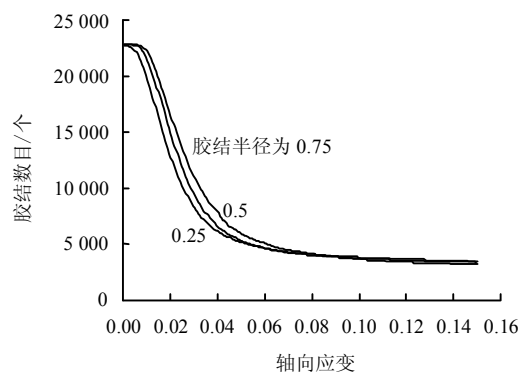


图 11 不同胶结半径沉积物样中胶结数目变化

Fig.11 Variations of bond number of hydrate-bearing sediments with different bond radii

## 6 结 论

(1) 提出了一个制备水合物沉积物离散元试样的新方法。该方法能简单、方便地生成具有任意水合物饱和度沉积物样,且试样中同时存在有孔隙填充及胶结等两种形式的水合物。

(2) 采用本文离散元模拟方法得到的结果能较好地反映水合物沉积物的主要力学特性:随着水合物饱和度的增加,沉积物的强度和弹性模量增大,剪胀和应变软化现象更明显。

(3) 水合物与土颗粒间胶结性能的变化会影响水合物沉积物的力学响应。水合物与土颗粒间的胶结强度越大,水合物沉积物的强度和弹性模量越大,而胶结半径的增大则主要引起沉积物弹性模量的增大,对强度的影响相对较小。

(4) 以填充孔隙和胶结土体颗粒等两种形式存在的水合物均会影响水合物沉积物的力学性质,水合物对沉积物力学性质的影响来源于二者的共同作用。

致谢:衷心感谢蒋明镜教授在离散元计算上给予的指导与支持!

## 参 考 文 献

- [1] SOGA K, LEE S L, NG M Y A, et al. Characterisation and engineering properties of methane hydrate soils [J]. **Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils**, 2007, 3: 2591—2642.
- [2] WAITE W F, SANTAMARINA J C, CORTES, D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments[J]. **Reviews of Geophysics**, 2009, 47 (4): RG4003, doi: 10.1029/2008RG000279.
- [3] SULTAN N, COCHONAT P, FOUCHER J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability[J]. **Marine Geology**, 2004, 213 (1): 379—401.
- [4] BROWN H E, HOLBROOK W S, HORNBACH M J, et al. Slide structure and role of gas hydrate at the northern boundary of the Storegga slide, offshore Norway[J]. **Marine Geology**, 2006, 229(3): 179—186.
- [5] NIXON M F, GROZIC, J L H. Submarine slope failure due to hydrate dissociation: A preliminary quantification[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(3): 314—325.
- [6] FREIJ-AYOUB R, TAN C, CLENNELL B, et al. A wellbore stability model for hydrate bearing sediments[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2007, 57(1): 209—220.
- [7] RUTQVIST J, GROVER T, MORIDIS G. Coupled hydrologic, thermal and geomechanical analysis of well bore stability in hydrate-bearing sediments[C]//Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference Publisher, 2008.
- [8] KLAR A, SOGA K, NG M Y A. Coupled deformation-flow analysis for methane hydrate extraction[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(10): 765—776.
- [9] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO N, et al. Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture[J]. **Soils and Foundations**, 2005, 45(1): 75—85.
- [10] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. The effect of saturation degree of methane hydrate on the shear strength of synthetic methane hydrate sediments[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Gas Hydrates. Trondheim: Tapir Academic Press, 2005: 657—663.
- [11] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Triaxial compression test on submarine sediment containing methane hydrate in deep sea of the coast of Japan[C]//Proceedings of the 41st Annual Conference. Kagoshima: Japanese Geotechnical Society Publisher, 2006.
- [12] YUN T S, SANTAMARINA J C, RUPPEL C. Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2007, 112, B04106, doi:10.1029/2006JB 004484.
- [13] MIYAZAKI K, MASUI A, SAKAMOTO Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2011, 116, B06102 doi:10.1029/ 2010JB008049.
- [14] 张旭辉, 王淑云, 李清平, 等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(10): 3069—3074.

- ZHANG Xu-hui, WANG Shu-yun, LI Qing-ping, et al. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3069—3074.
- [15] 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[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1234—1240.
- YAN Rong-tao, WEI Chang-fu, WEI Hou-zhen, et al. Effect of hydrate formation on mechanical strength of hydrate-bearing sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(7): 1234—1240.
- [16] BRUGADA J, CHENG Y P, SOGA K, et al. Discrete element modelling of geomechanical behaviour of methane hydrate soils with pore-filling hydrate distribution[J]. **Granular Matter**, 2010, 12(5): 517—525.
- [17] 肖俞, 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, 32(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, 32(Supp.1): 755—760.
- [18] 蒋明镜, 贺洁, 周雅萍. 基于微观胶结厚度模型的深海能源土宏观力学特性离散元分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2672—2681.
- JIANG Ming-jing, HE Jie, ZHOU Ya-ping. Distinct element analysis of macro-mechanical properties of deep-sea methane hydrate-bearing soil using micro-bond thickness model [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2672—2681.
- [19] JUNG J W, SANTAMARINA J C, SOGA K. Stress-strain response of hydrate-bearing sands: Numerical study using discrete element method simulations[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2012, 117, B04202. doi: 10.1029/2011JB009040.
- [20] WANG Y H, LEUNG S C. A particulate scale investigation of cemented sand behaviour[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(1): 29—44.
- [21] CUNDALL P A. PFD<sup>3D</sup> user's manual. (Version 3.1) [R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2004.
- [22] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Mechanical properties of Toyoura sand containing synthetically produced gas hydrate in a triaxial pressure vessel[C]// The 2nd International Workshop on Gas Hydrate Studies and Other Related Topics for the Future Energy and Environment Considerations. Kitami: Japanese Geotechnical Society Publisher, 2005.
- [23] SONG Y, YU F, LI Y, et al. Mechanical property of artificial methane hydrate under triaxial compression[J]. **Journal of Natural Gas Chemistry**, 2010, 19(3): 246—250.

## 上接第 254 页

- [23] 经济部水利署中区水资源局. 鲤鱼潭水库定期监测分析总报告[R]. 台中: 经济部水利署中区水资源局, 2000.
- [24] 章为民, 陈生水. 紫坪铺面板堆石坝汶川地震永久变形实测结果分析[J]. 水力发电, 2010, 36(8): 51—53.
- ZHANG Wei-min, CHEN Sheng-shui. Analysis on permanent deformation monitoring data of Zipingpu concrete faced rockfill dam after Wenchuan earthquake[J]. **Water Power**, 2010, 36(8): 51—53.
- [25] 章为民, 王年香, 顾行文, 等. 土石坝坝顶加固的永久变形机理及离心模型试验验证[J]. 水利水运工程学报, 2011, (1): 22—27.
- ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, GU Xing-wen, et al. Deformation mechanism study of top reinforcement of the earth-rockfill dam and its verification by the centrifuge model test[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2011, (1): 22—27.
- [26] ROMO M P. Model development from measured seismic behaviour of earth-rockfill dams[R]. Mexico City: Instituto De Ingenieria UNAM, 2002.
- [27] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 长河坝动力离心模型试验研究[J]. 水力发电, 2009, 35(5): 67—70.
- WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen, et al. Dynamic centrifuge model test for Changheba dam[J]. **Water Power**, 2009, 35(5): 67—70.
- [28] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 高心墙堆石坝地震反应复合模型研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 798—804.
- WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen, et al. Combined model for seismic responses of high core rockfill dams[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(5): 798—804.
- [29] Comision Federal De Electricidad. Effects of the septemter 1985 earthquake on dams built on the Balsas river[R]. Mexico City: Comision Federal De Electricidad Mexico, 1987.
- [30] AHMED W M ELGAMAL, RONALD F SCOTT, MOHAMED F SUCCARIEH, et al. La Villita dam response during five earthquakes including permanent deformation[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 116(10): 1443—1462.