

DOI: 10.11779/CJGE201410001

# 不同温压环境下深海能源土力学特性离散元分析

蒋明镜<sup>1, 2</sup>, 朱方园<sup>1, 2</sup>

(1. 同济大学土木学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 深海能源土宏观力学特性与所处温度与水压环境密切相关, 明晰温压对能源土力学特性的影响对水合物的安全开采具有重要意义。首先, 介绍深海能源土的温度-水压-力学微观胶结模型, 用以描述能源土粒间的水合物胶结接触力学特性; 其次, 将该模型导入至离散元商业软件 PFC2D 中, 开展不同温度与水压环境下的离散元双轴试验; 最后, 结合离散元双轴试验结果及同已有室内试验结果的对比分析, 探讨温度与水压对深海能源土宏观力学特性的影响规律和微观作用机理。结果表明: 引入胶结模型的离散元双轴试验可较好地描述深海能源土强度、变形等力学特性随温度与水压的变化关系; 温度与水压影响深海能源土宏观力学特性的微观机理是颗粒间水合物胶结强度与刚度同温度与水压间的相关性; 建议采用温压距离参数  $L$  (在无量纲化的温度-水压坐标平面内, 水合物赋存温度与水压点至其相平衡线的最小距离) 评价实际复杂温压场下的深海能源土宏观力学特性。

**关键词:** 深海能源土; 温压环境; 离散单元法; 微观胶结模型

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)10-1761-09

**作者简介:** 蒋明镜(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 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 investigation on mechanical properties of methane hydrate bearing soils under different temperatures and pore-water pressures

JIANG Ming-jing<sup>1, 2</sup>, ZHU Fang-yuan<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering, Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Mechanical properties of methane hydrate bearing soils (MHBS) are influenced by the surrounding temperature ( $T$ ) and pore-water pressure ( $\sigma_w$ ). Study on such influence is of great significance for the safe exploration of methane hydrate. Firstly, a thermal-hydro-mechanical bond contact model is introduced to capture the microscopic contact behavior of methane hydrate bonded granules. Secondly, the model is implemented into the distinct element method (DEM) to simulate DEM biaxial tests of MHBS for different  $T$  and  $\sigma_w$ . Finally, the influence of  $T$  and  $\sigma_w$  on the macro-mechanical properties of MHBS is discussed by analyzing the results from the DEM biaxial tests and the laboratory tests. The results show that the DEM biaxial tests incorporating the bond contact model can efficiently capture the influence of  $T$  and  $\sigma_w$  on macro-mechanical properties of MHBS.  $T$  and  $\sigma_w$  affect the mechanical properties of inter-particle methane hydrate and in turn influence the macroscopic mechanical behavior of MHBS. A dimensionless parameter  $L$ , which is calculated in the coordinates of ordinate and abscissa being dimensionless  $\sigma_w$  and  $T$  respectively as the minimum distance from a point of dimensionless  $\sigma_w$  and  $T$  to the phase equilibrium line, is advised to use for evaluating the macro-mechanical properties of MHBS with respect to different  $T$  and  $\sigma_w$ .

**Key words:** methane hydrate bearing soil; temperature and pore-water pressure; distinct element method; bond contact model

## 0 引言

天然气水合物(简称水合物), 俗称“可燃冰”, 是由天然气与水所形成的笼状晶体<sup>[1]</sup>, 其储量约为现有地球化石燃料含碳量总和的两倍<sup>[2]</sup>, 是一种储量巨大的新型战略能源。在自然界中, 水合物常稳定赋存于陆地永冻带、内陆湖或深海等具有低温与高压条件的特定环境中<sup>[3-4]</sup>。在深海环境中, 水合物广泛蕴藏于

砂土、黏土等沉积物中, 这种含天然气水合物的深海沉积物, 简称为“深海能源土”。

已有研究表明<sup>[5-9]</sup>, 颗粒间水合物的存在对深海能

基金项目: 国家自然科学基金国家杰出青年基金项目(51025932); 教育部博士点基金项目(20100072110048); 国家自然科学重点基金项目(51239010)

收稿日期: 2013-07-24

源土的强度贡献显著(特别是当水合物以胶结形式存在于土体颗粒间时),较高水合物含量下的土体强度可高达无水合物含量时的2~3倍。然而,深海水合物开采或自然环境变化(全球气候变暖、海底抬升等),会改变水合物所赋存的温度与水压环境,导致水合物大量分解或溶解,从而劣化深海能源土的力学特性,引发深海滑坡、海床沉陷等一系列岩土工程灾害<sup>[10-11]</sup>。

目前,人们主要采用升温或降压手段使得水合物所处温压(温度与水压)条件逼近其相平衡线而发生分解,从而实现水合物开采。值得注意的是,在水合物开采过程中,即使某些土体区域中水合物尚未分解,其强度也可能随开采所引起温压场的改变而发生劣化,此对开采平台及辅助设施的安全性带来极大威胁。因此,为实现深海水合物的安全商业开采,需明晰温压环境对能源土力学特性的影响。然而,已有室内试验<sup>[5-9]</sup>多研究围压、水合物含量与形成方式等对能源土力学性质的影响,鲜见针对温压影响的研究。此外,若采用室内试验手段开展深海能源土力学特性受温度与水压影响的敏感性分析时,需严格控制能源土试样中的水合物形成与含量等,操作难度大、周期长;且难以结合加载过程中的土体宏、微观信息,揭示温度、水压的影响机理。笔者认为,运用离散单元法开展不同温度与水压条件下的深海能源土数值试验不失为研究其力学特性同温压环境间相关性的一种有效手段。

离散单元法将土体视为散粒体的集合,立足于颗粒间微观接触力学响应和牛顿运动定律,可从粒间接触尺度揭示土体宏观力学现象的机理<sup>[12]</sup>。离散单元法的一个关键问题是建立合理的粒间接触模型。蒋明镜等<sup>[13-15]</sup>采用离散单元法初步研究了水合物饱和度、试验反压对深海能源土力学特性的影响。但是所采用的模型并不能反映温度-水压的耦合影响,以及温压环境达到水合物相平衡线右侧时所引起的粒间水合物分解,因此不能有效模拟温压对深海能源土力学特性的影响。近期,蒋明镜等<sup>[16]</sup>综合考虑了温度-水压对粒间水合物胶结强度和刚度的影响,并结合粒间水合物胶结尺寸(厚度和宽度)的分析,建立了较为完善的深海能源土温度-水压-力学微观胶结模型。本文将该模型通过FISH语言和C++语言引入离散元商业软件PFC<sup>2D</sup>,开展不同温度与水压环境下的深海能源土宏观力学特性分析。首先,简要介绍近期提出的深海能源土温度-水压-力学微观胶结模型<sup>[16]</sup>和引入商业软件PFC<sup>2D</sup>的过程;其次,根据离散元数值试样的粒间接触尺寸建立水合物胶结尺寸和水合物饱和度的关系,并据此求解胶结模型的强度与刚度参数;最后,开展不同温度与水压条件下的深海能源土双轴数值试验,结合离散元数值分析结果及已有室内试验资料<sup>[17]</sup>,

探讨温压对深海能源土力学特性影响的微观机理并总结其影响规律。

## 1 深海能源土胶结模型简介

深海能源土温度-水压-力学微观胶结模型的具体建立过程详见文献[16],此处将简要介绍其的基本力-位移准则、胶结强度、胶结刚度,及其在离散元商业软件PFC2D中的实现过程。

### 1.1 力-位移准则

图1中给出了胶结模型的基本接触示意。图1(b)与1(c)分别对应于水合物在两直接接触与相离的颗粒间形成,简称为胶结模式I与II。

其中,模式I的颗粒间含水合物胶结与颗粒接触两部分,粒间总接触力由颗粒与水合物胶结两部分共同传递;模式II的颗粒间仅含水合物胶结,粒间总接触力仅由水合物胶结传递。胶结模式I和模式II根据水合物生成时刻各个接触的间隔或重叠判断。当此时两颗粒接触存在间隔,则生成模式II的胶结模式,赋值相应胶结参数;当此时两颗粒接触存在重叠,则生成模式I的胶结模式,赋值相应胶结参数和颗粒参数。

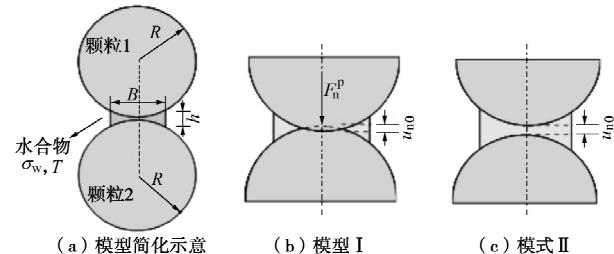


图1 深海能源土微观胶结模型

Fig. 1 Bond contact model for methane hydrate bearing soils

对于水合物胶结接触,其破坏前法向、切向和扭转向的力-位移关系分别满足下列表达式:

$$F_n^b = k_n^b \cdot (u_n - u_{n0}) \quad (-R_{tb} < F_n^b < R_{cb}), \quad (1)$$

$$F_s^b \leftarrow k_s^b \cdot \Delta u_s^b + F_s^b \quad (F_s^b < R_{sb}), \quad (2)$$

$$M^b \leftarrow k_m^b \cdot \Delta \theta^b + M^b \quad (M^b < R_{rb}). \quad (3)$$

式中,  $F_n^b$ 、 $F_s^b$  和  $M^b$  分别为胶结法向力、切向力和扭矩;  $k_n^b$ 、 $k_s^b$  和  $k_m^b$  分别为3个方向的胶结接触刚度;  $u_n$  和  $u_{n0}$  分别为当前和水合物形成时刻的粒间重叠量(或间距);  $\Delta u_s^b$  和  $\Delta \theta^b$  分别为累积剪切位移和累积转角;  $R_{tb}$ 、 $R_{cb}$ 、 $R_{sb}$  和  $R_{rb}$  分别为拉、压、剪切和扭转胶结强度。当胶结发生破坏时,3个方向的力-位移关系如下:

$$F_n^b = \begin{cases} 0 & (u_n < u_{n0}) \\ k_n^b \cdot (u_n - u_{n0}) & (u_{n0} \leq u_n < (R_{cb}/k_n^b + u_{n0})) \\ \lambda R_{cb} & (u_n \geq (R_{cb}/k_n^b + u_{n0})) \end{cases}, \quad (4)$$

$$F_s^b \leftarrow \min[k_s^b \cdot \Delta u_s^b + F_s^b, F_{s,resid}^b] \quad (F_s^b \geq R_{sb}), \quad (5)$$

$$M^b \leftarrow \min[k_m^b \cdot \Delta \theta^b + M^b, M_{resid}^b] \quad (M^b \geq R_{rb}), \quad (6)$$

式中,  $F_{s,resid}^b$  和  $M_{resid}^b$  分别表示胶结破坏界面的残余抗剪强度和残余抗扭强度, 均满足库仑定律, 表示如下:

$$F_{s,resid}^b = F_n^b \cdot \mu^b, \quad (7)$$

$$M_{resid}^b = \frac{F_n^b \cdot B}{6}, \quad (8)$$

式中,  $\mu^b$  表示胶结摩擦系数,  $B$  为胶结宽度。

对于颗粒接触, 其在法向、切向和转动向的力-位移关系如下:

$$F_n^p = \begin{cases} k_n^p \cdot u_n & (u_n \geq 0) \\ 0 & (u_n < 0) \end{cases}, \quad (9)$$

$$F_s^p \leftarrow \min[k_s^p \cdot \Delta u_s^p + F_s^p, F_n^p \cdot u^p], \quad (10)$$

$$M^p \leftarrow \min\left[k_m^p \cdot \Delta \theta^p + M^p, \frac{F_n^p \cdot \beta^p \cdot \bar{R}}{6}\right]. \quad (11)$$

式中  $\bar{R}$  为两相邻或接触颗粒的平均半径, 表示为  $\bar{R} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ ;  $\beta^p$  为颗粒形状系数, 表示颗粒间的抗转动能力, 其它变量的含义与式 (1) ~ (8) 中的胶结接触类似 (胶结接触的上标为 b, 颗粒接触的上标为 p)。

对于图 1 所示的两种水合物胶结模式, 接触间总法向力  $F_n$ 、切向力  $F_s$  与扭矩  $M$  可统一表达为水合物胶结与颗粒接触两部分之和:

$$\left. \begin{aligned} F_n &= F_n^b + F_n^p, \\ F_s &= F_s^b + F_s^p, \\ M &= M^b + M^p. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

值得注意的是, 模式 II 中颗粒接触的法、切向力与扭矩均为零, 而模式 I 中不为零。

## 1.2 胶结强度

在实际拉-压-剪-扭复杂加载条件下, 水合物胶结在法向力 ( $F_n^b$ ) - 剪切力 ( $F_s^b$ ) - 扭矩 ( $M^b$ ) 空间的强度包面如图 2 所示。

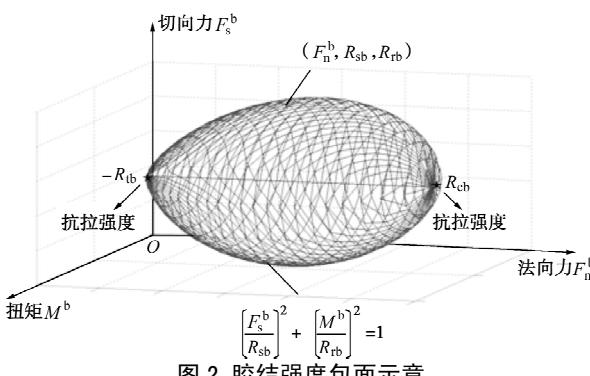


Fig. 2 Sketch of bond strength envelope in  $F_n^b - F_s^b - M^b$  space

其中法向力 (以压为正) 的左右两端分别对应于负抗拉强度  $-R_{rb}$  和抗压强度  $R_{cb}$ , 包面上各点代表复杂

加载下的胶结抗剪与抗扭强度  $R_{sb}$ ,  $R_{rb}$ 。该强度包面由以下公式控制:

$$\left( \frac{F_s^b}{R_{sb}'} \right)^2 + \left( \frac{M^b}{R_{rb}'} \right)^2 \begin{cases} < 1 & (\text{胶结未破坏}) \\ = 1 & (\text{临界状态}) \\ > 1 & (\text{胶结破坏}) \end{cases}, \quad (13)$$

$$R_{sb}' = f_s K_s (F_n^b + R_{tb}) \left[ \ln \left( \frac{R_{cb} + R_{tb}}{F_n^b + R_{tb}} \right) \right]^{0.59}, \quad (14)$$

$$R_{rb}' = f_r K_r (F_n^b + R_{tb}) \left[ \ln \left( \frac{R_{cb} + R_{tb}}{F_{nb} + R_{tb}} \right) \right]^{0.59}. \quad (15)$$

式中  $R_{sb}'$  为仅拉-压-剪作用 (无扭矩) 下的胶结抗剪强度;  $R_{rb}'$  为仅拉-压-扭作用 (无剪切力) 下的胶结抗扭强度;  $f_s$ ,  $K_s$ ,  $f_r$  和  $K_r$  为强度包面的形状参数, 具体求解过程见文献[18]。

在式 (14) 与 (15) 中, 胶结抗压与抗拉强度  $R_{cb}$ ,  $R_{tb}$  可表示为

$$R_{cb} = 1 \cdot B \cdot q_{max,c}, \quad (16)$$

$$R_{tb} = 1 \cdot B \cdot q_{max,t}, \quad (17)$$

式中,  $q_{max,c}$  和  $q_{max,t}$  分别为纯水合物在水压  $\sigma_w$  条件下进行竖向压缩和拉伸试验下的所获取的拉伸与压缩峰值偏应力。基于已有纯水合物试验数据的分析, 在温度  $T$  和水压  $\sigma_w$  作用下, 两者可表示如下<sup>[16]</sup>:

$$q_{max} / p_a = \begin{cases} \alpha_1 L + \alpha_2 & (L > 0) \\ 0 & (L \leq 0) \end{cases}, \quad (18)$$

式中,  $p_a$  表示一个大气压数值 ( $1.01 \times 10^5$  Pa),  $L$  为无量纲的温度与水压坐标系内, 水合物赋存温度与水压点 ( $T$ ,  $\sigma_w$ ) 至其相平衡线的最小距离 (简称温压距离参数), 具体示意如图 3 所示。当  $L > 0$  时, 水合物可稳定赋存, 其数值随温度的升高或水压的降低而减小; 当  $L \leq 0$  时, 水合物达到相平衡线而发生分解, 无任何强度;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为拟合参数, 其值因水合物成样方式和加载条件而异。下文模拟以 Hyodo 等<sup>[17]</sup>制备的室内深海能源土试样为背景, 根据文献[16]对他们制备的纯水合物力学试验结果<sup>[19]</sup>的拟合得  $\alpha_1 = 715$ ,  $\alpha_2 = 14$ 。

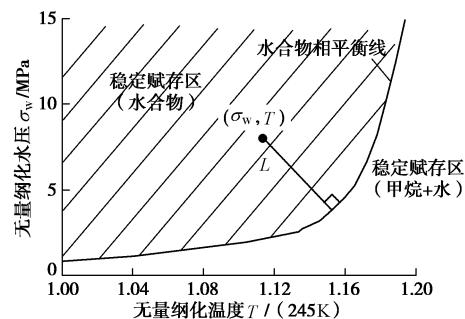


图 3 参数  $L$  在无量纲温度与水压坐标平面内的示意

Fig. 3 Schematic diagram of parameter  $L$  in normalized coordinates of temperature and water pressure

在式(18)中, 当求解  $L$  所对应温度与水压分别取  $T$  与  $\sigma_w$  时, 所获取为式(16)中的压缩峰值偏应力  $q_{\max,c}$ ; 当温度与水压取为  $T$  与  $\sigma_t$  时, 所获取为式(16)中的压缩峰值偏应力  $q_{\max,t}$ , 其中  $\sigma_t$  为水压  $\sigma_w$  条件下进行竖向拉伸试验时所获取的最大法向拉应力,  $\sigma_t = \sigma_w - q_{\max,t}$ 。

### 1.3 胶结刚度

水合物胶结法向接触刚度可表示为

$$k_n^b = (1 \cdot B \cdot E) / h, \quad (19)$$

式中,  $E$  为水合物弹性模量,  $h$  为水合物胶结平均厚度, 表示为粒径水合物最小与最大胶结厚度的平均值。切向刚度和转动向刚度可由法向刚度表示为

$$k_s^b = k_n^b / 1.5, \quad (20)$$

$$k_m^b = k_n^b B^2 / 12. \quad (21)$$

在式(19)中, 水合物弹性模量  $E$  同样与温压距离参数  $L$  相关<sup>[16]</sup>:

$$E / P_a = \begin{cases} \beta_1 L + \beta_2 & (L > 0) \\ 0 & (L \leq 0) \end{cases}. \quad (22)$$

同样的,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  因试验条件而异。对 Hyodo 等<sup>[17]</sup>的纯水合物试验数据拟合得  $\beta_1=7880$ ,  $\beta_2=2110$ 。将上述力-位移关系以及胶结强度和刚度的表示方法用 C++语言编译成 DLL 文件, 通过 PFC<sup>2D</sup> 提供的用户自定义接口引入。胶结模型参数可通过 FISH 语言赋值和 DLL 文件提供的接口, 实现和 DLL 模型文件的交互。以下将该模型引入至离散元双轴试验, 开展不同温度与水压环境下的能源土力学特性分析。

## 2 不同温压下离散元数值试验方案

### 2.1 试验方案

图 4 为离散元双轴试验所考察的 2 种温压路径, 路径  $a-c-d-g$  保持温度不变, 通过降低水压而逐渐达到水合物相平衡线; 路径  $b-c-e-f$  保持水压不变, 通过升高温度而逐渐达到相平衡线。

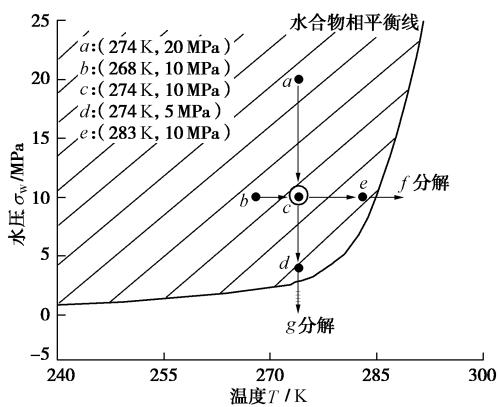


图 4 双轴试验温压条件

Fig. 4 Temperature and pore-water pressure conditions involved in DEM biaxial tests

### 2.2 模拟步骤

离散元双轴试验流程如下: 首先采用分层欠压法<sup>[20]</sup>生成颗粒间无水合物胶结作用的均匀样; 然后对所生成试样的颗粒间赋予水合物胶结, 平衡试样至稳定; 最后在目标有效围压下, 以 5%/min 的准静态应变速率加载试样至破坏。本文离散元模拟为水合物饱和度为 40% 和 52% 两种试样, 与 Hyodo 等<sup>[17]</sup>室内制备的试样饱和度相同, 以便于对比分析。

### 2.3 参数选取

图 5 为所生成的离散元双轴试样, 试样尺寸为 800 mm × 400 mm, 共由 10 种粒径颗粒 (6.0, 6.8, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 8.0, 8.2, 8.4, 9.0 mm) 组成, 每种粒径颗粒的质量百分数均为 10%, 平均粒径为 7.6 mm, 不均匀系数为 1.3, 具体试样颗粒参数: 颗粒总数为 6000, 初始孔隙比为 0.25, 颗粒干密度为 2.6 g/cm<sup>3</sup>, 颗粒直径为  $6.0 \times 10^{-3} \sim 9.0 \times 10^{-3}$  m, 颗粒法向接触刚度为  $6 \times 10^8$  N/m, 颗粒切向接触刚度为  $4 \times 10^8$  N/m, 颗粒间摩擦系数为 0.5, 颗粒形状系数为 0.5, 颗粒与边界摩擦系数为 0.0, 试验墙体法向刚度为  $6 \times 10^8$  N/m, 试验墙体切向刚度为  $4 \times 10^8$  N/m。

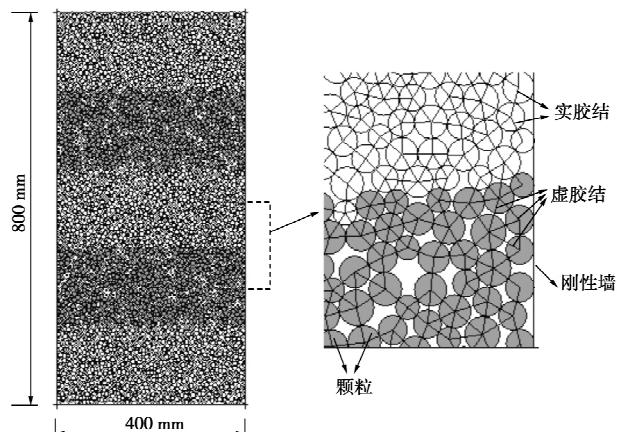


图 5 离散元双轴试样

Fig. 5 DEM samples

图 5 中同时给出了试样中的水合物胶结分布, 以连接于两颗粒中心的黑线表示。可以发现, 水合物胶结以两种形式分布于试样中: ①水合物胶结形成于两相互接触的颗粒间 (实胶结), 对应于图 1 中所示的水合物生成模式 I; ②水合物胶结形成于两相离的颗粒间 (虚胶结), 对应于图 1 中的模式 II。

这些水合物胶结的具体尺寸与水合物饱和度  $S_{MH}$  和水合物生成时颗粒间接触间距相关。 $S_{MH}$  定义为<sup>[14]</sup>水合物体积 (面积) 与孔隙体积 (面积) 的百分比, 即  $S_{MH} = A_{MH}/A_V \times 100\%$ 。已有研究表明<sup>[18]</sup>: 在给定水合物饱和度  $S_{MH}$  下, 试样颗粒接触间的水合物胶结厚度不超过某一定值 (该值定义为临界胶结厚度

$h_{\max}^{\text{cr}}$ )。若试样中两颗粒接触间的距离小于  $h_{\max}^{\text{cr}}$  时, 粒间水合物胶结面积可由图 6 的示意求出, 继而可求出整个试样的饱和度  $S_{\text{MH}}$ 。本文试样所对应水合物饱和度  $S_{\text{MH}}$  与  $h_{\max}^{\text{cr}}$  的关系如图 7 所示。知道  $h_{\max}^{\text{cr}}$  后, 试样中第  $i$  个胶结接触点的水合物胶结宽度  $B_i$  可通过下式求出

$$B_i = \sqrt{4\bar{R}_i^2 - (2\bar{R}_i + h_{\min,i} - h_{\max}^{\text{cr}})^2}, \quad (23)$$

式中,  $\bar{R}_i$  表示两个接触颗粒的平均半径,  $h_{\min,i}$  表示水合物胶结的最小厚度, 胶结模式 I 中  $h_{\min,i}$  为 0, 胶结模式 II 中,  $h_{\min,i}$  为水合物生成时两相邻颗粒间的最小间距, 具体如图 6 所示。

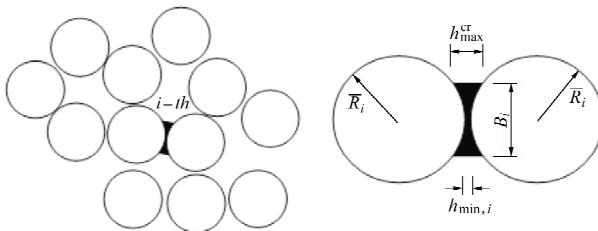


图 6 试样中水合物胶结示意

Fig. 6 Sketch of particles bonded by methane hydrate

将试验温压条件(如 a:  $T=274 \text{ K}$ ,  $\sigma_w=20 \text{ MPa}$ )和上述胶结宽度和厚度代入式(13)~(22), 便可得到水合物胶结强度和刚度参数, 这些参数控制着水合物胶结在复杂荷载作用下的接触力学响应。

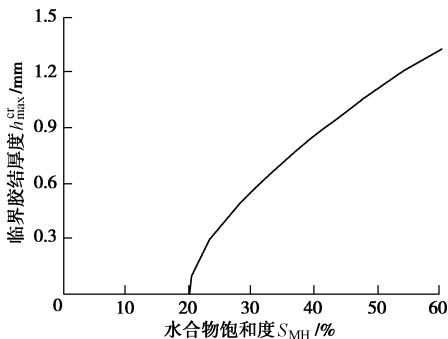


图 7 水合物饱和度  $S_{\text{MH}}$  同临界胶结厚度  $h_{\max}^{\text{cr}}$  间关系

Fig. 7 Relationship between methane hydrate saturation  $S_{\text{MH}}$  and critical bond thickness  $h_{\max}^{\text{cr}}$

### 3 不同温压下离散元数值试验结果

#### 3.1 数值试验与室内试验结果对比

试样在升温路径( $b-c-e-f$ )和降压路径( $a-c-d-g$ )中各代表点的应力-应变与体变关系如图 8、9 所示, 其中偏应力指轴向压力同有效围压之差。图 8、9 中(a)、(b)分别为各代表点的离散元双轴试验及 Hyodo 等<sup>[17]</sup>的室内三轴试验结果。由于点  $f$  和  $g$  已超过水合

物相平衡线, 试样中无水合物存在, 图 8(b)和图 9(b)同时给出了无水合物试样的室内试验应力-应变与体变关系, 以作为对比分析。

由图 8、9 中模拟结果与实测结果的比较可以看出, 离散元数值试验能够有效模拟能源土力学特性同温度与水压的变化关系, 主要体现在以下 2 个方面:

(1) 随着温度升高或者水压的减小, 试样强度与弹性模量逐渐减小。在应力-应变关系中, 温压点由  $b$  到  $f$  以及由  $a$  到  $g$ , 试样所对应的峰值偏应力及以初始阶段斜率所表征的弹性模量逐渐减小。

(2) 随着温度升高或者水压的减小, 试样的剪胀现象逐渐减弱。以如图 8 所示的升温情况为例, 在温度较低时( $b$  点), 应力-应变关系呈现为应变软化, 体变关系呈现为先剪缩后剪胀, 而随着温度的升高(如达到无水合物存在的温压点  $f$ ), 应力-应变关系逐渐过渡为应变硬化、体变关系的剪胀现象逐渐减弱。

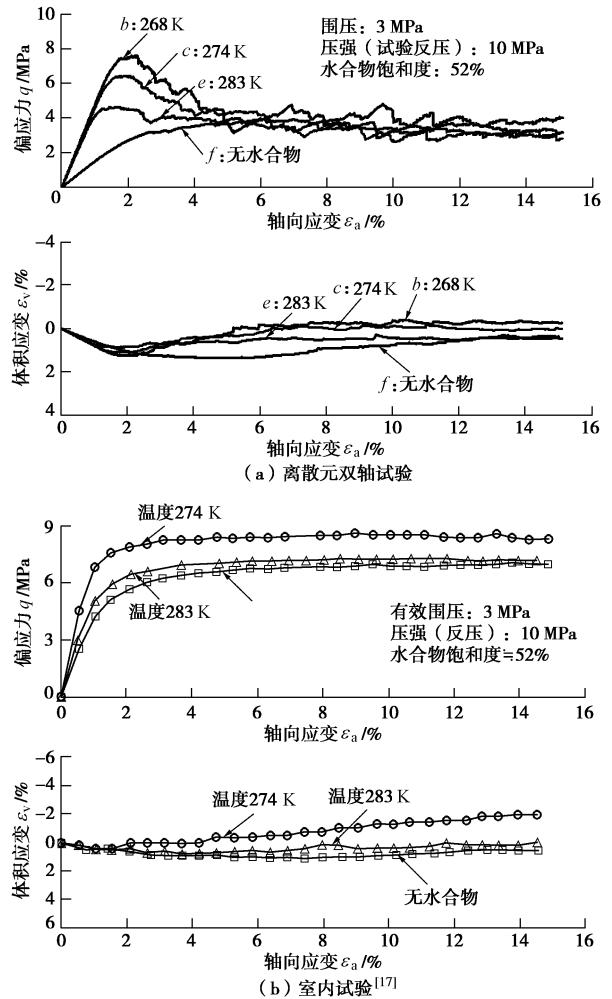


图 8 不同温度下能源土力学特性

Fig. 8 Mechanical behaviors under different temperatures

图 8、9 中, 15%的应变条件下, 数值试验应变软化现象明显(且此时应力稳定, 试样进入临界状态), 而室内试验并无明显的应变软化现象(同时应力未稳

定，疑似未进入临界状态）。为分析两者差别，图 10 进一步给出了室内能源土试样<sup>[5,17]</sup>在轴向应变为 15% 与 50% 时的应力-应变与体变对比关系。可以发现，和 15% 应变条件下的现象不同，当轴向应变为 50% 时，室内试样呈现为明显的应变软化现象（此时，试样进入临界状态）。可见，在临界状态下，室内试验和数值试验均体现为明显的应变软化现象，两者定性一致，但是进入临界状态的应变不同。Masui 等<sup>[6]</sup>和 Miyazaki 等<sup>[7]</sup>关于能源土的室内试验结果所呈现的明显应变软化现象也证实了前述推论。

需要注意的是，Hyodo 等<sup>[17]</sup>采用室内三轴试验，而本文离散单元法数值模拟采用二维双轴试验。因此，本文模拟结果和室内实验结果定性上一致，定量上存在一些差别。

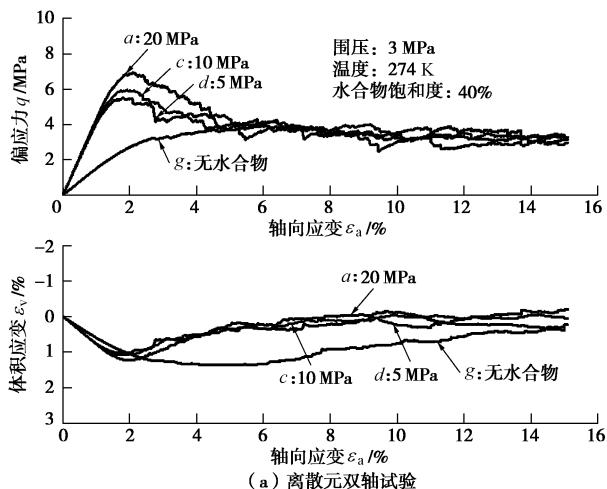


图 9 不同压强下能源土力学特性

Fig. 9 Mechanical behaviors under different pressures

### 3.2 能源土宏观强度的温压相关性及其微观机理

蒋明镜等<sup>[15]</sup>通过离散元数值模拟初步揭示了水压（试验反压）对深海能源土力学特性的影响。此处，结合进一步讨论温度和水压共同影响深海能源土力学特性的微观机理。

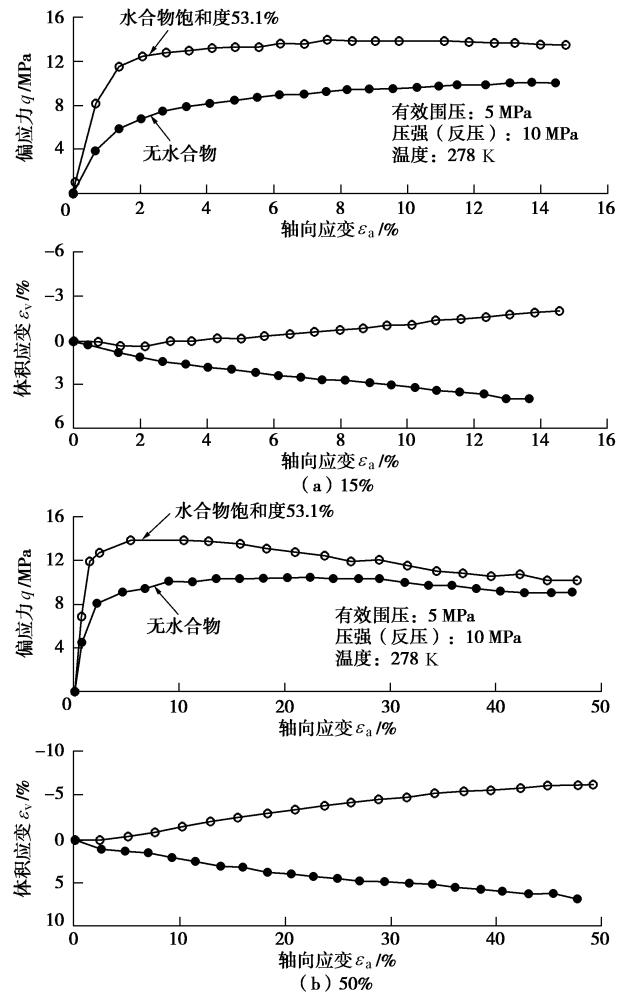


图 10 不同加载轴向应变下能源土室内试验结果<sup>[5, 17]</sup>

Fig. 10 Triaxial test results under different axial strains<sup>[5, 17]</sup>

图 11 所示为各温度与水压条件下的水合物胶结率同轴向应变间的关系，其中水合物胶结率定义为水合物残余胶结数目同其总数目的百分比。由图可知：①水合物胶结率随着轴向应变的增加而逐渐减小，这是胶结型深海能源土产生应变软化的微观机理；②在相同轴向应变下，水合物胶结率随温度的升高或水压的降低而逐渐减小，这是能源土宏观强度随温度升高或水压降低而下降的根本原因。结合图 11 与图 8、9 的联合分析可知，温度和水压对深海能源土宏观力学特性影响的微观机理主要源于粒间水合物胶结特性同温压间的相关性。水合物是一种对温压敏感性极高的材料，当通过升温或降压使得温压点由 b 过渡至 e 或由 a 过渡至 d 时，其胶结强度和刚度逐渐减小，从而使得深海能源土在剪切过程中胶结破坏数目逐渐增多，土体的宏观强度和弹性模量也逐渐减小。

在图 8(a) 与图 9(a) 中，当温压条件由点 e 继续过渡至 f 或由点 d 继续过渡至 g 时，水合物发生分解（水合物饱和度 0%）。此时水合物对土体强度无任何贡献，因而点 f 和点 g 所对应的土体强度最小。注意到，尽管点 f 和点 g 处的温压条件不同，但是其力

学响应一致, 表明了无水合物试样的宏观力学响应并不随温压条件的改变而改变, 从而再次间接证实水合物力学特性同温压间的相关性是温压对深海能源土宏观力学特性影响的微观机理。

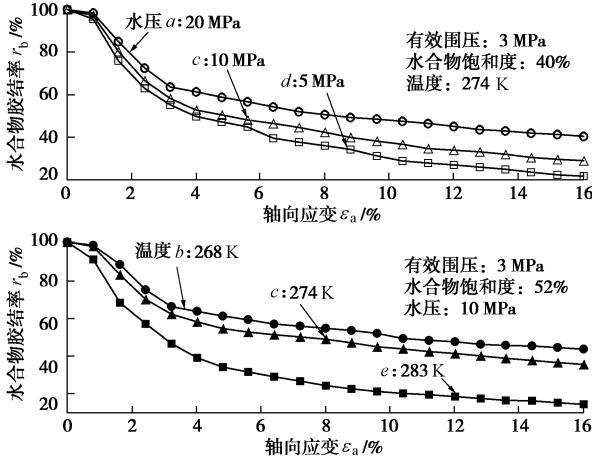


图 11 各温度与水压下水合物胶结率同轴向应变间的关系

Fig. 11 Relationship between ratio of intact bonds and axial strain under different temperatures and pore-water pressures

进一步的, 图 12 (a) 归纳了离散元双轴试验所获取的无量纲峰值偏应力 ( $q_{\max}/p_a$ ) 和初始弹性模量 ( $E/p_a$ ) 与温压距离参数  $L$  间的关系。为便于对比分析, 图 12 (b) 中同时给出了 Hyodo 等<sup>[17]</sup>的室内试验结果。结合图 12 的分析可知, 无论是本文数值试验结果还是室内试验结果, 深海能源土的无量纲峰值偏应力和弹性模量均与温压距离参数  $L$  近似呈线性关系, 且其斜率随着水合物饱和度的升高而升高 (这是由于随着水合物饱和度的升高, 粒间胶结尺寸增大, 从而据式 (16) 和 (17) 知其胶结强度增大):

$$\left. \begin{aligned} \frac{q_{\max} - q_{\max(0)}}{p_a} &= k_q \cdot L, \\ \frac{E - E_{(0)}}{p_a} &= k_E \cdot L. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中,  $k_q$  与  $k_E$  分别为能源土峰值偏应力与弹性模量随  $L$  增长的斜率;  $q_{\max(0)}$  与  $E_{(0)}$  分别为温压条件临近水合物相平衡线时 (即  $L$  趋近与 0 时) 能源土试样的最大偏应力与弹性模量。因此, 若已知两代表温压环境下的土体峰值偏应力  $q_{\max}$  与弹性模量  $E$ , 其它温压环境下的土体  $q_{\max}$  和  $E$  可由式 (24) 简化预测。

由于室内试验<sup>[17]</sup>中土体在轴向应变 15% 时尚未达到临界状态, 图 13 仅以离散元双轴试验为例, 给出了试样的无量纲残余偏应力 ( $q_{\text{resid}}/p_a$ ) 与温压距离参数  $L$  间的关系。

可以发现, 温度与水压对深海能源土残余偏应力影响不大, 并接近与净砂样的峰值偏应力。这是由于在大应变条件下, 水合物胶结发生大量破坏, 并在破

坏区域形成剪切带 (图 13 中黑点表示水合物胶结), 此时试样的强度主要取决于颗粒间摩擦。而各个能源土试样沉积物的摩擦系数相同, 因此其残余偏应力非常接近, 体现出温压的独立性。

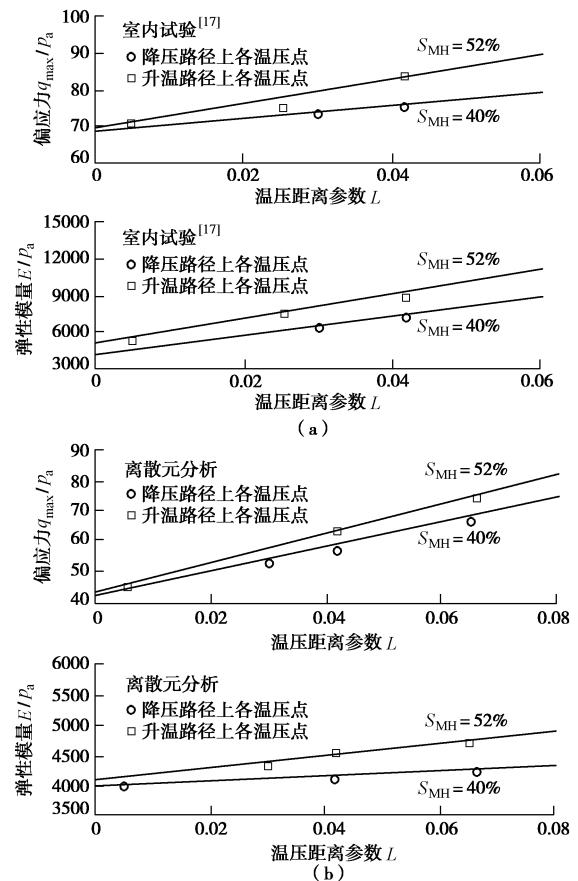


图 12 能源土峰值偏应力  $q_{\max}$  与弹性模量  $E$  随参数  $L$  间关系

Fig. 12 Variation of peak deviator stress and elastic modulus of methane hydrate bearing soils with parameter  $L$

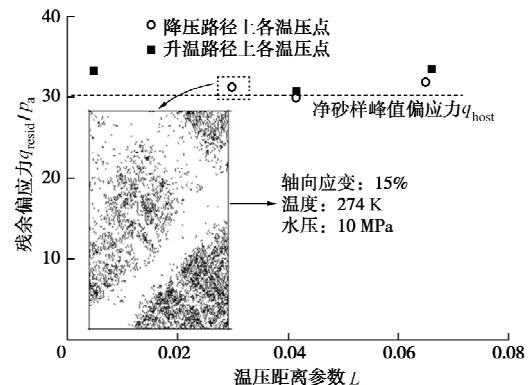


图 13 能源土残余偏应力  $q_{\text{resid}}$  与参数  $L$  间关系

Fig. 13 Variation of residual deviator stress of methane hydrate bearing soils with parameter  $L$

## 4 结 论

本文将深海能源土温度-水压-力学胶结模型通

过 C++ 文件编译并引入离散元商业软件 PFC<sup>2D</sup> 中, 进行了深海能源土力学特性的双轴试验模拟。结合双轴试验结果及同 Hyodo 等<sup>[17]</sup>室内试验结果的对比, 分析了温度与水压对能源土宏观力学特性影响的微观作用机理与影响规律。主要结论如下:

(1) 引入微观胶结模型的离散元双轴试验能够较为有效地描述深海能源土应力 - 应变、体变关系等宏观力学特性随温度与水压间的变化关系。

(2) 当深海能源土所赋存的温度升高或水压降低时, 土体峰值强度与弹性模量逐渐减小, 应变软化和剪切膨胀现象逐渐减弱。

(3) 深海能源土粒间水合物胶结的力学特性对温度与水压环境较为敏感, 其胶结强度与刚度随温度的升高或水压的降低而减小, 此影响着深海能源土在不同温度与水压环境下的宏观力学响应。

(4) 深海能源土试样的峰值强度与弹性模量随温压距离参数  $L$  的增长呈线性增长, 且增长的斜率随着饱和度的增加而增大。但是, 深海能源土残余强度受温度和水压的变化影响较小。温压距离参数  $L$  可用于评价实际复杂温压场下的能源土宏观力学特性。

由于计算条件的限制, 文中离散元分析中将实际情况简化为二维平面问题、土颗粒形状简化为圆盘形, 颗粒间水合物力学性质采用简化公式预测, 这些难以同实际室内试验一一对应。因而相比于同实际试验结果的定量比较, 文中侧重于在定性上的温压影响机理与影响规律分析。以上分析的合理性以及温压对深海能源土宏观力学特性的具体影响尚需后期大量室内试验工作的检验与探索。

## 参考文献:

- [1] SOGA K, LEE S L, NG M Y A, et al. Characterisation and engineering properties of methane hydrate soils[M]. London: Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, 2006: 2591 – 1642.
- [2] MACDOBALD G T. The future of methane as an energy resource [J]. Annual Review of Energy, 1990, **15**(1): 53 – 83.
- [3] BRUGADA J, CHENG Y P, SOGA K, et al. Discrete element modeling of geomechanical behavior of methane hydrate soils with pore-filling hydrate distribution[J]. Granular Matter, 2010, **12**(5): 517 – 525.
- [4] KVENVOLDEN K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate[J]. Organic Geochemistry, 1995, **23**(11/12): 997 – 1008.
- [5] 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.
- [6] 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 5th International Offshore and Polar Engineering Conference. Seoul, 2005.
- [7] MIYAZAKI K, MASUI A, SAKAMOTO Y, et al. Triaxial compression properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, **116**(B6): B06102, doi: 10.1029/2010JB008049.
- [8] 魏厚振, 颜荣涛, 陈盼, 等. 不同水合物含量含二氧化碳水合物砂三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 198 – 203. (WEI Hou-zhen, YAN Rong-tao, CHEN Pan, et al. Deformation and failure behavior of carbon dioxide hydrate-bearing sands with different contents under triaxial shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 198 – 203. (in Chinese))
- [9] 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 Xiao-yong, JIANG Ming-jing, et al. The triaxial shear strength of synthetic hydrate-bearing sediments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1565 – 1572. (in Chinese))
- [10] NIXON M F, GROZIC J L H. Submarine slope failure due to gas hydrate dissociation: a preliminary quantification[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(3): 314 – 325.
- [11] 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.
- [12] CUNDALL P A, STRACK O L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, **29**(1): 47 – 65.
- [13] 蒋明镜, 肖俞, 朱方园. 深海能源土微观力学胶结模型及参数研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1574 – 1583. (JIANG Ming-jing, XIAO Yu, ZHU Fang-yuan. The obtain of micro-contact model and bond parameters for the deep-sea energy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1574 – 1583. (in Chinese))
- [14] 蒋明镜, 肖俞, 朱方园. 深海能源土宏观力学性质的离元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 157 – 163. (JIANG Ming-jing, XIAO Yu, ZHU Fang-yuan. Numerical simulation of macro-mechanical properties of deep-sea methane hydrate soils by DEM[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 157 – 163. (in Chinese))
- [15] 蒋明镜, 朱方园, 申志福. 试验反压对深海能源土宏观力学特性影响的离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 219 – 226. (JIANG Ming-jing, ZHU Fang-yuan, SHEN Zhi-fu. The influence of backpressure on macro-mechanical properties of methane hydrate soils by DEM analyses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 219 – 226. (in Chinese))
- [16] 蒋明镜, 朱方园. 一种深海能源土的二维温度-水压-力学微观胶结模型[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(7): 1377 – 1386. (JIANG Ming-jing, ZHU Fang-yuan. Thermal-hydro-mechanical bond contact model for the methane hydrate bearing soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1377 – 1386. (in Chinese))
- [17] 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.
- [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模拟[J]. 岩土力学, 2014, **36**(4): 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, 2014, **36**(4): 2672 – 2681. (in Chinese))
- [19] 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.
- [20] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(5): 579 – 597.

### 第九届全国土动力学学术会议 2014年11月14日~16日, 天津大学 二号通知(2014年9月)

**主办单位:** 中国振动工程学会土动力学专业委员会。

**支持单位:** 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 中国水利学会岩土力学专业委员会; 中国力学学会岩土力学专业委员会; 中国地震学会地震工程专业委员会; 中国建筑学会工程勘察分会; 中国建筑学会地基基础分会。

**承办单位:** 天津大学; 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室; 中交天津港湾工程研究院有限公司; 交通运输部天津水运工程科学研究院。

**协办单位:** 河北工业大学; 天津城建大学; 中国民航大学; 中海油田服务股份有限公司; 中交第一航务工程勘察设计院有限公司。

第九届全国土动力学学术会议将于2014年11月14日~16日在美丽的渤海之滨天津召开。会议旨在交流近年来我国土动力学及岩土工程抗震领域的最新研究成果, 为从事土动力学及岩土工程抗震研究和应用的科技工作者提供良好的学术交流空间, 共同促进土动力学的理论创新、技术进步和工程应用, 为我国工程建设防灾减灾事业的发展提供坚实的技术支持。本次会议共收到论文270余篇, 论文内容涉及有关土动力学的理

论、试验技术、试验、工程实录等14个方面的研究。经大会学术委员会评审, 会议录用180余篇论文, 这些论文将在《岩土工程学报》正刊和《地震工程学报》正刊陆续发表。

**会议主要日程:** 11月13日注册报到、专委会会议; 14, 15日开幕式、大会报告、分组报告、闭幕式, 16日考察。

**会议费用:** 正式代表1200元/人, 学生代表600元/人, 陪同代表500元/人。

**会议地点:** 天宇大酒店; 地址: 天津市和平区电台道, 电话: 022-23603388; 大会统一安排住宿, 费用自理。

**展览联系:** 会议期间将于会场(天宇大酒店)设立展位, 展览内容主要包括岩土工程相关工程设备、试验设备、仪器以及相关软件, 欢迎相关单位参展, 设立展位事宜请联系: 孙立强: 13752697072, 冯士伦: 13902164874。

**大会秘书处:** 刘润: 022-27404286, 13820185360, 孙立强: 13752697072, 邱长林: 15922103966, 冯士伦: 13902164874, 通信地址: 天津市南开区卫津路92号天津大学建筑工程学院岩土工程研究所, 邮政编码: 300072。

(天津大学 供稿)