

DOI: 10.11779/CJGE201601015

# 不同沉积方向各向异性结构性砂土离散元力学特性分析

蒋明镜<sup>1, 2, 3</sup>, 付 昌<sup>2, 3</sup>, 刘静德<sup>2, 3</sup>, 张伏光<sup>2, 3</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 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. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘 要:** 为探究沉积方向对各向异性结构性砂土力学特性的影响, 首先采用椭圆颗粒生成两种不同沉积方向(水平与竖直)的各向异性净砂样, 其次, 引入一个考虑胶结厚度影响的微观胶接触模型从而生成各向异性结构性砂土。最后, 对两种各向异性结构性砂土试样进行双轴压缩试验, 并将水平沉积试样试验结果与室内试验结果对比验证该模型的可行性。同时, 将两种不同方向试样的试验结果进行对比以探究沉积方向的影响。结果表明: 两种试样应力-应变关系均呈软化及剪胀现象, 水平沉积试样峰值偏应力较竖直沉积试样大, 而二者残余阶段偏应力无明显差别; 水平沉积试样临界孔隙比较竖直沉积试样大; 胶结破坏速率及胶结破坏率变化与宏观力学特性变化相对应, 且变化规律基本相同; 水平方向沉积试样的胶结接触主方向始终保持竖直而竖直沉积试样的胶结接触主方向始终保持水平; 在水平沉积试样中始终为水平分布颗粒长轴分布主方向, 而竖直沉积试样中颗粒长轴逐渐向各向同性分布靠近。

**关键词:** 各向异性结构性砂土; 椭圆颗粒; 不同沉积方向; 宏微观力学特性; 离散单元法

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)01-0138-09

**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、太空土、深海能源土、非饱和土的宏、微观之试验、本构模型和数值分析方面的研究以及土体逐渐破坏分析。E-mail: mingjingjiang@tongji.edu.cn。

## DEM simulations of anisotropic structured sand with different deposit directions

JIANG Ming-jing<sup>1, 2, 3</sup>, FU Chang<sup>2, 3</sup>, LIU Jing-de<sup>2, 3</sup>, ZHANG Fu-guang<sup>2, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of 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. Dept. of

Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the effects of deposit directions on the mechanical response of anisotropic structured sand, two anisotropic pure sand samples deposited in horizontal and vertical directions are prepared by using elliptical particles in NS2D first, and then a bond contact model considering the bond thickness is implemented into the pure anisotropic sand samples to prepare anisotropic structured sand samples. Biaxial compression tests are conducted on both samples, and the results of samples with horizontal deposit direction are compared with the laboratory test results to validate this model, then the results of two samples with different deposit directions are compared to study the effect of depositing direction. Test results show that strain softening and shear dilation occur in both samples. The peak deviator stress of the horizontal deposited sample is larger than that of the vertical deposited sample, while the residual shear forces are nearly the same. Besides, the critical void ratio of the horizontal deposited sample is larger than that of the vertical deposited sample. The changes of bond breakage percentage and bond breakage ratio of these two samples are of the same and are consistent with the stress-strain and volumetric mechanical responses. The number of bond contacts decreases in the two samples, and the bond contacts distribute in a vertical principal direction in the horizontal deposited sample and a horizontal principal direction in the vertical deposited sample during the tests. The principal direction of particle orientation is horizontal for the horizontal deposited sample throughout the tests, while the principal direction of particle orientation in the vertical deposited sample is firstly vertical and then develops towards an isotropy state.

**Key words:** anisotropic structured soil; elliptical particle; different deposit direction; macro and micro mechanical response; discrete element method

## 0 引 言

胶结特性与各向异性广泛存在于自然环境下沉积

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51025932); 教育部博士点基金项目(20100072110048); 国家防灾减灾重点实验室项目(SLDRCE14-A-04)  
收稿日期: 2015-04-07

的砂土中, 对砂土力学特性影响显著。其中, 本文将胶结特性定义为狭义的结构性。这种各向异性及胶结物同时存在的砂土被称为各向异性结构性砂土。

当前对砂土的研究多是将各向异性与结构性分开考虑。对于各向异性的研究, Casagrande 等<sup>[1]</sup>首先将土体的各向异性分为初始各向异性与次生各向异性。其中, 初始各向异性是由土颗粒的定向排列所引起的。为探究初始各向异性的影响, Authur 等<sup>[2]</sup>采用砂雨法制备立方体砂样, 通过改变沉积方向与加载方向的夹角对试样进行一系列三轴压缩试验, 结果表明: 当颗粒沉积方向与最大主应力方向夹角在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内增大时, 测得的试样内摩擦角降低, 而试样达到破坏时的轴向应变显著增加。童朝霞等<sup>[3]</sup>采用改进的直剪仪(剪切面与沉积面夹角能够在  $0^\circ \sim 180^\circ$  区间内变化)对不同沉积方向各向异性净砂进行研究。结果表明: 砂土内摩擦角随剪切面与沉积面夹角的改变而改变, 当夹角在  $0^\circ \sim 90^\circ$  区间变化时砂土取得最小峰值内摩擦角, 而在夹角为  $105^\circ$  时取得最大峰值内摩擦角; 随着材料各向异性程度的改变, 砂土取得最大及最小内摩擦角所对应的剪切面与沉积面夹角相应改变。以上室内试验对沉积方向的影响进行了研究, 丰富了砂土的理论研究, 具有重大意义。

而对于砂土结构性的研究, Wang 等<sup>[4]</sup>通过室内三轴试验研究了水泥胶结与石膏胶结砂土的力学特性。结果表明: 与无胶结砂土相比, 水泥胶结砂土的抗剪强度显著提高, 试样出现应变软化及剪胀现象, 且剪切破坏时试样内发生明显的应变局部化; 随着水泥含量增加, 水泥胶结砂抗剪强度增加, 应变软化特性、剪胀性及应变局部化现象趋于显著。王绪民等<sup>[5]</sup>采用二次掺水法制备氧化钙胶结砂样, 并对该胶结砂土试样进行固结排水三轴压缩试验。结果表明, 钙质胶结对结构性砂试样的力学特性影响显著: 人工胶结砂土均表现出应变软化特性, 随着氧化钙掺入量的增加, 试样应变软化特性趋于增强, 黏聚力及内摩擦角增量增大。以上室内试验结果表明砂土的结构性影响明显, 在模拟含胶结物的天然沉积砂土时不可忽略。

室内试验加深与丰富了砂土各向异性与结构性的理论研究, 并为更进一步研究天然沉积砂土奠定了基础。尽管如此, 室内试验仍然有缺陷, 如试样可重复性差, 微观信息难以统计等。试样微观信息作为宏观力学响应的内在因素而被一些学者关注。虽然已有室内试验可对某一时刻颗粒排列进行统计<sup>[6]</sup>, 而对于颗粒接触及胶结物分布等微观信息不能够实时监控, 使得宏微观力学特性的联系难以建立。这些不足决定了各向异性结构性砂土进行研究需借助数值模拟手段。

离散单元法 (DEM) 最初由 Cundall 等<sup>[7]</sup>提出,

该方法不仅可以实现对颗粒材料宏观力学特性的模拟, 同时可以实现对微观变量的记录, 为岩土力学的研究提供了一个思路。当前通过离散元方法对砂土的研究多是将各向异性与结构性分开考虑<sup>[8-9]</sup>, 而将二者同时考虑的研究较少。本文为同时考虑胶结物与各向异性的影响, 首先采用离散元软件 NS2D 中椭圆颗粒生成水平与竖直两种不同沉积方向的净砂样, 随后, 将一个基于实际天然沉积砂土胶结分布规律与室内微观力学试验结果<sup>[10-14]</sup>提出的不考虑颗粒间抗转动能力的微观胶结接触模型引入净砂样中从而生成不同沉积方向的各向异性结构性砂土试样。通过对两种不同沉积方向的各向异性砂土进行双轴试验, 并将二者宏观力学特性及微观变量进行对比研究, 以揭示试验过程中不同沉积方向宏微观变量变化的差别。

## 1 两种不同沉积方向各向异性结构性砂土试样制备

### 1.1 各向异性净砂样制备

当前已有学者采用多边形及椭圆形等对天然砂土中非圆形颗粒进行近似模拟, 而本文在考虑计算效率及当前技术的基础上, 采用椭圆颗粒进行模拟。已有研究表明, 天然砂土沉积过程中受重力场影响呈显著的定向排列特性, 当加载方向与颗粒沉积方向夹角发生变化时, 其力学特性也随之改变。为探究这一影响, 本文通过离散元法对水平与竖直两种沉积方向试样进行对比分析, 如图 1 所示。

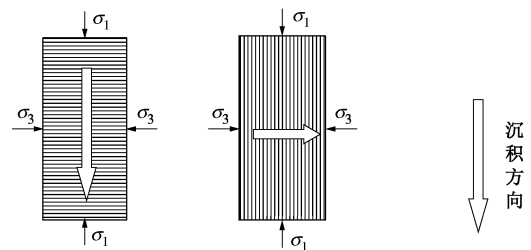


图 1 两种不同沉积方向试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of samples with two deposit directions

两种沉积方向试样均采用蒋明镜等<sup>[15]</sup>提出的分层欠压法进行制备。试样高宽比为 2:1, 由 5000 个长短轴比为 2:1 的椭圆颗粒<sup>[16]</sup>组成, 初始孔隙比(孔隙面积与颗粒面积之比)为 0.22。颗粒分布采用等效粒径进行描述, 并将等效粒径定义为  $d_{eq} = \sqrt{d_a d_b}$ , 其中  $d_a$ ,  $d_b$  分别为椭圆颗粒的长短轴尺寸。 $d_{eq}$  变化范围为 6~9 mm, 等效中值粒径  $d_{50} = 7.6$  mm, 不均匀系数  $C_u = 1.3$ 。等效粒径分布如图 2 所示。

两种不同沉积方向试样的具体制样过程如下:

#### (1) 竖直方向沉积试样

竖直方向沉积的净砂样分 4 层进行制备。首先生

成倾角(墙与颗粒接触面法向量与  $y$  轴正向间的夹角, 逆时针为正, 顺时针为负) 为  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$  与  $90^\circ$  的底墙、顶墙及左右侧墙, 并根据需要在指定区域内生成第一层椭圆颗粒, 颗粒位置及长轴倾角均随机分布。固定底墙、顶墙与右侧墙, 向右移动左侧墙直至试样达到第一层目标孔隙比后, 重新设定左侧墙的位置, 在第一层颗粒左侧指定区域重新生成第二层颗粒, 重复第一层制样过程, 直至试样制备完成。

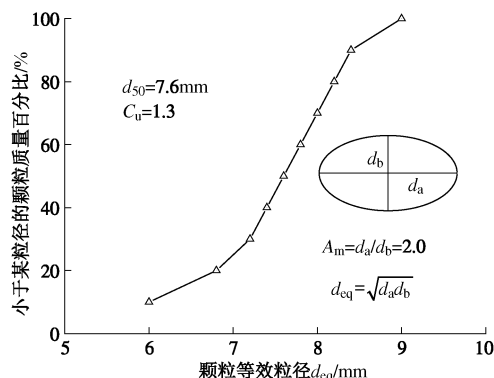


图 2 各向异性离散元试样的颗粒级配曲线

Fig. 2 Distribution of equivalent particle size

## (2) 水平方向沉积试样

水平沉积方向的净砂样分为 8 层进行成样(水平沉积方向沉积厚度为竖直沉积方向沉积厚度的两倍)。首先生成倾角为  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$  与  $90^\circ$  的底墙、顶墙及左右侧墙, 并根据需要在指定区域内生成第一层椭圆颗粒, 颗粒位置及长轴倾角均随机分布。固定底墙与左右侧墙, 以恒定速率向下移动顶墙直至试样达到第一层目标孔隙比后, 重新设定顶墙的位置, 在指定区域重新生成第二层颗粒, 重复第一层制样过程, 直至目标离散元试样制备完成。待该区域内孔隙比达到第一层目标孔隙比后, 再在第一层上部某指定区域随机生成第二层颗粒, 重复第一层的制样过程, 直至第八层试样成样结束。

待两种净砂样制备完成后, 固定试样左右侧墙, 对试样施加 12.5 kPa 的竖向压力进行单向固结, 直至试样平衡至稳定。每  $10^\circ$  一份将圆周空间分成 36 个小区间, 统计颗粒长轴朝向落在每个区间内的颗粒数目占总颗粒数的比值即得到颗粒排列分布玫瑰图, 如图 3 所示。由图 3 可知, 竖直沉积净砂样组构主方向为竖直方向, 而水平沉积净砂样组构主方向为水平方向, 表明分层欠压法能有效生成不同沉积方向的试样。

## 1.2 各向异性结构性砂土胶结模型

通过对人工制备结构性砂土电镜扫描发现有两种胶结接触模式共存<sup>[17]</sup>, 示意图如图 4 所示。其中, 模式 I 为两颗粒不直接接触, 二者间最短距离大于零 ( $h>0$ ), 此时在胶结物生成后外力均由胶结物传递,

可表示为

$$\left. \begin{aligned} F_n &= F_n^b, \\ F_s &= F_s^b, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $F_n$  与  $F_s$  分别为模式 I 接触传递的法向力与切向力,  $F_n^b$  与  $F_s^b$  分别为胶结物传递的法向与切向作用力。

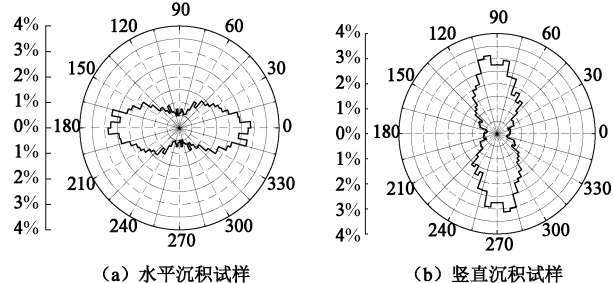


图 3 各向异性离散元试样颗粒初始排列方向的玫瑰图

Fig. 3 Rose diagrams of particle distribution of anisotropic samples

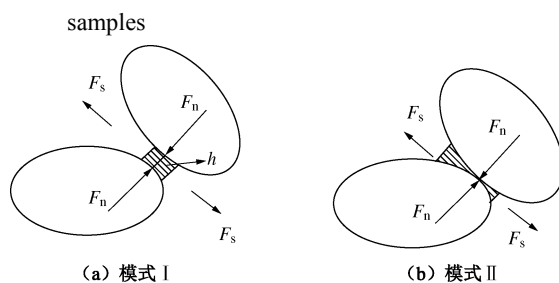


图 4 结构性砂土颗粒间接触示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bond contact in structured soil

模式 II 中颗粒直接接触, 即最短距离为零 ( $h=0$ )。接触间的力由颗粒与胶结物共同传递, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} F_n &= F_n^p + F_n^b, \\ F_s &= F_s^p + F_s^b, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,  $F_n^p$  与  $F_s^p$  分别为颗粒传递的法向力与切向力。

对于相互重叠的颗粒其最小距离为零, 在胶结生成后, 胶结物将受到拉力。

对于颗粒间力 - 位移关系及胶结物力 - 位移关系见文献[18] (能源土为一种特殊的结构性砂土, 尽管其力学参数选取与本文不同, 但颗粒及胶结的力 - 位移关系仍适用)。值得注意的是: 离散元中若考虑颗粒间抗转动能力将导致应力非对称, 与经典本构理论不一致。因此, 本文忽略颗粒间抗转动能力。为研究胶结的破坏准则, 蒋明镜等<sup>[10-14]</sup>已对不同胶结厚度的水泥及环氧树脂胶结铝棒进行拉、压、剪、扭等多种加载条件的室内试验, 并归纳得到如下胶结破坏准则:

$$\left( \frac{F_s^b}{R_{sb}'} \right) + \left( \frac{M^b}{R_{tb}'} \right)^2 \begin{cases} < 1 & (\text{胶结未破坏}) \\ = 1 & (\text{临界状态}) \\ > 1 & (\text{胶结破坏}) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $M^b$  为胶结物所受扭矩,  $R_{sb}'$  为拉-压-剪切 (无扭矩) 加载下的胶结抗剪强度,  $R_{tb}'$  为拉-压-扭转 (无

剪切力) 加载下的胶结抗扭强度。

由于本文不再考虑抗转动, 将式 (3) 简化为

$$\left(\frac{F_s^b}{R_{sb}'}\right) \begin{cases} < 1 & \text{(胶结未破坏)} \\ = 1 & \text{(临界状态)} \\ > 1 & \text{(胶结破坏)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $R_{sb}'$  为拉-压-剪切 (无扭矩) 加载下的胶结抗剪强度, 可由下式确定<sup>[18]</sup>:

$$R_{sb}' = \mu^b \cdot R_{cb} \cdot \frac{F_n^b + R_{tb}}{R_{cb} + R_{tb}} \cdot \left[ 1 + g_s \cdot \left( \ln \frac{R_{cb} + R_{tb}}{F_n^b + R_{tb}} \right)^{f_s} \right], \quad (5)$$

式中,  $g_s$  与  $f_s$  为胶结抗剪强度的形状参数, 其值取决于胶结材料性质。 $\mu^b$  为粒间胶结接触面摩擦系数,  $R_{tb}$  与  $R_{cb}$  分别为胶结抗拉强度与抗压强度。当颗粒间胶结所受法向作用力  $F_n^b$  趋于  $-R_{tb}$  时, 胶结抗剪强度趋于 0; 当胶结法向力  $F_n^b$  趋于抗压强度  $R_{cb}$  时, 抗剪强度趋于胶结破坏时的最大残余抗剪强度, 即  $R_{sb}' \rightarrow \mu^b \cdot R_{cb}$ 。

在考虑胶结厚度 (即颗粒间最小距离) 影响时, 粒间胶结抗拉强度与抗压强度取决于胶结物的厚度, 本文选取水泥的试验结果作为参考, 由下式确定<sup>[14]</sup>:

$$R_{tb} = 766 + 267h, \quad (6)$$

$$R_{cb} = 24415 - 4180h, \quad (7)$$

式中,  $h$  为粒间胶结物厚度 (mm), 如图 4 (a) 所示。 $R_{tb}$  与  $R_{cb}$  单位为 N。

通过对电镜扫描图进行分析, 发现胶结临界厚度  $h_{cr}$  与颗粒中值粒径之比  $\alpha = h_{cr} / d_{50}$  和胶结物含量基本呈线性关系<sup>[17]</sup>。在粒径分布确定后, 通过直接设定  $\alpha$  值来设定  $h_{cr}$ 。当粒间最小距离小于  $h_{cr}$  时, 胶结生成。当粒间最小距离大于  $h_{cr}$  时, 胶结将不会生成。

2 不同沉积方向各向异性结构性砂土离散元模拟及结果分析

2.1 试样参数选取及试验步骤

将上文提出的不考虑粒间抗转动能力的微观胶结接触模型引入各向异性净砂样中, 对满足胶结生成要求的颗粒之间施加胶结, 平衡试样至稳定。各向异性结构性砂土离散元模拟参数见表 1。其中, 颗粒与墙体间的摩擦系数取为 0, 以模拟实际真三轴试验中加载板与土体之间摩擦系数较小的情况。

本文通过双轴压缩试验对不同沉积角度力学特性进行探究, 具体步骤如下: ①每种沉积方向制备 3 个各向异性结构性砂土试样, 并分别施加 3 种等向荷载 (50, 100, 200 kPa) 进行等向压缩, 平衡至稳定。②待等向压缩完成后, 保持侧向围压恒定, 以恒定剪切速率 (0.1%/min) 相向移动上下端墙体直至试样达到临界状态。试样在整个试验过程中始终保持准静态。

2.2 应力 - 应变关系

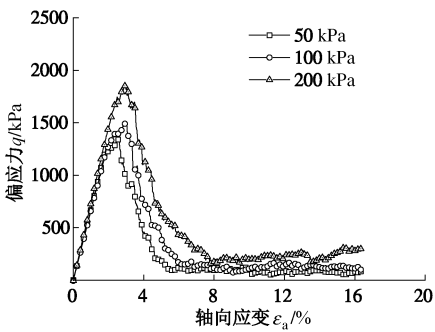
本文定义偏应力  $q = \sigma_1 - \sigma_2$ 。图 5, 6 分别为水平

沉积试样离散元模拟及室内试验<sup>[19]</sup>应力 - 应变关系与孔隙比 - 应变关系。图 7 所示竖直沉积试样双轴试验应力 - 应变及孔隙比 - 应变关系曲线。对比图 5, 6 可知, 室内试验<sup>[19]</sup>及离散元模拟宏观力学响应在定性层面上是相似的: 在双轴压缩试验初始阶段试样基本呈线弹性及剪缩现象; 随着剪切的进行, 在偏应力达峰值后, 试样呈明显应变软化特性, 且体变逐渐由剪缩发展为剪胀。待试样达残余抗剪阶段后, 偏应力稳定于某较低数值, 并且试样体积基本恒定。随围压增大, 峰值偏应力及残余抗剪阶段偏应力均增大, 临界孔隙比减小, 表明围压的增加会约束各向异性结构性砂土剪胀特性的发展。离散元模拟及室内试验结果对比表明, 本文提出的不考虑粒间抗转动能力的胶结模型能够合理的模拟各向异性结构性砂土。此外, 对比水平沉积试样 (图 5 (a) 与图 6 (a)) 与竖直沉积试样 (图 7) 的离散元模拟结果发现: 水平方向沉积试样在发生屈服及偏应力达到峰值时所对应的轴向应变略大于竖直沉积样, 且水平向沉积试样其峰值偏应力及残余抗剪阶段孔隙比均大于相同试验条件下竖直沉积样的值, 二者残余强度无明显差异。笔者认为试样微观变量变化是宏观现象变化的微观反映, 具体分析见下文。

表 1 离散元模拟结构性砂土参数

Table 1 Parameters of DEM samples

离散元模拟参数	参量值
初始孔隙比 $e$	0.22
颗粒密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$2.6 \times 10^3$
颗粒长短轴比例	2:1
颗粒切向接触刚度 $k_n^p$ /( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$2.0 \times 10^8$
颗粒法向接触刚度 $k_s^p$ /( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.5 \times 10^8$
颗粒间的摩擦系数 $\mu^p$	0.5
临界胶结厚度参数 $\alpha$	0.04
胶结法向接触刚度 $k_n^b$ /( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.0 \times 10^8$
胶结切向接触刚度 $k_s^b$ /( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$0.75 \times 10^8$
胶结摩擦系数 $\mu^b$	0.17
颗粒与墙的摩擦系数	0.0
围压/kPa	50, 100, 200
双轴试验剪切速率/( $\% \cdot \text{min}^{-1}$ )	0.1



(a) 离散元模拟

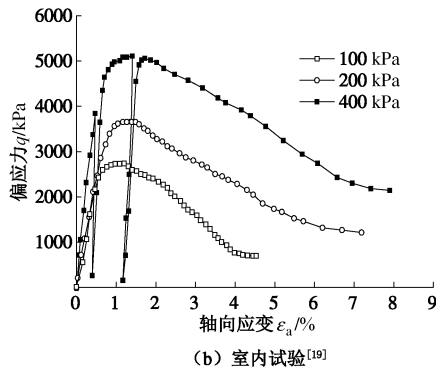


图5 水平沉积各向异性结构性砂土双轴压缩偏应力 - 应变关系

Fig. 5 Relationship between deviator stress and axial strain of horizontal deposit anisotropic structured soil during biaxial compression tests

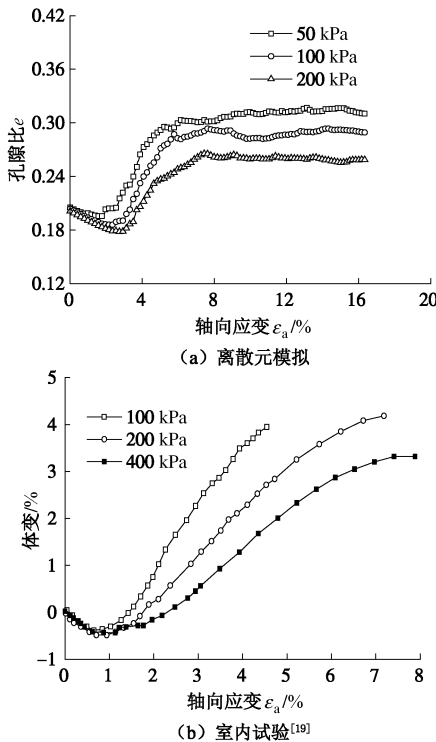


图6 水平沉积各向异性结构性砂土双轴压缩孔隙比 - 应变关系

Fig. 6 Relationship between void ratio and axial strain of horizontal deposit anisotropic structured soil during biaxial compression tests

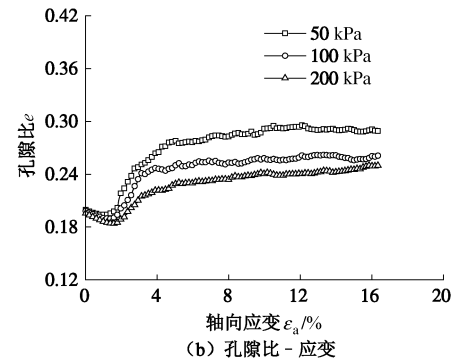
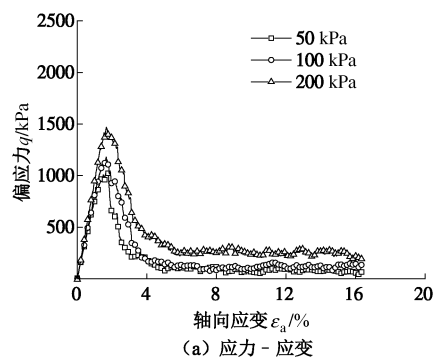


图7 竖向沉积各向异性结构性砂土应力 - 应变及孔隙比 - 应变图

Fig. 7 Relationship between deviator stress, void ratio and axial strain of vertical deposit anisotropic structured soil

### 3 不同沉积方向各向异性结构性砂土微观力学特性

为方便起见, 本文以围压  $\sigma_2 = 100$  kPa 的不同沉积方向试样为例进行介绍。

#### 3.1 胶结变化规律

胶结破坏率定义为胶结破坏点数占试样初始胶结点数的百分比; 胶结破坏速率  $n_b$  定义为

$$n_b = \frac{(N_1 - N_2) / N}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}}, \quad (8)$$

式中,  $N$  为初始胶结总数,  $N_1$  为轴向应变为  $\varepsilon_{a1}$  时剩余的胶结数,  $N_2$  为轴向应变为  $\varepsilon_{a2}$  时剩余的胶结数。

图8为不同沉积方向试样宏观力学响与内部胶结破坏率及胶结破坏速率在试验进行时的关系。由图8(a)与图8(b)对比可知, 尽管加载方向与颗粒沉积方向不同, 但各向异性结构性砂土双轴压缩过程中胶结破坏规律是相同的, 且与宏观力学曲线变化相对应。根据双轴压缩过程中胶结破坏发展情况可将双轴试验分为4个阶段: 阶段I为双轴试验开始至粒间胶结开始急剧破坏(点A); 阶段II为点A至胶结破坏速率达到峰值点(点B); 阶段III为点B至胶结破坏速率基本稳定(点C); 阶段IV为点C至双轴压缩结束。其中, 阶段I由于胶结物被破坏较少, 胶结物及颗粒的力 - 位移关系均为线性关系(见模型), 使得试样整体亦呈线弹性, 即试样偏应力随轴向应变增加而线性增大, 且试样发生剪缩变形; 对于阶段II, 随着试验进行, 胶结破坏速率逐渐增大, 胶结破坏数目逐渐增多, 使得试样整体抗剪强度降低并开始发生屈服, 且其剪缩变形速率逐渐降低。在胶结破坏速率达到峰值时(点B), 试样偏应力同样达到峰值, 同时其体积变形开始由剪缩向剪胀转变; 对比两试样可发现, 竖直沉积试样发生塑性变形及应力 - 应变关系曲线峰值点所对应的轴向应变小于水平沉积试样, 这主要是由于

竖直沉积试样内部颗粒向偏应力方向发生旋转多于水平沉积试样(见下文颗粒组构分析),且相同轴向应变下竖直沉积试样颗粒转动较大,进而引起较多的胶结破坏。同时,由于颗粒旋转而导致的胶结破坏多为拉剪破坏,使得竖直沉积试样拉剪胶结破坏率大于水平沉积试样。对于阶段Ⅲ,随着试验进行,胶结破坏速率逐渐降低,而胶结破坏数目始终在不断增加,使得试样抗剪强度进一步减小,所能承受的偏应力相应减小,在宏观上则表现为显著的应变软化特性;对于阶段Ⅳ,尽管胶结破坏速率稳定于某一较小数值,然

而由于试验过程中胶结物始终在破坏,使得此时试样内胶结物剩余含量较少,此时,试样在外力作用下达到临界状态,试样偏应力及体变均基本保持稳定。同时,由图 8 还可看到,各向异性结构性砂土试样内拉剪胶结破坏率均远大于压剪胶结破坏率,即试样内颗粒间胶结点主要发生拉剪破坏,而少数发生压剪破坏。由此可知,双轴压缩试验中各向异性结构性砂土试样内胶结点发生破坏时,胶结多处于拉伸状态,这与试样双轴压缩试验中发生体积剪胀变形一致。

### 3.2 颗粒排列特性

图 9, 10 所示分别为水平与竖直方向沉积试样内颗粒长轴排列方向玫瑰图。由图 9 可知,水平沉积试样在双轴压缩过程中试样内部颗粒长轴排列主方向始终为水平方向,且随轴向应变增加,水平方向排列颗粒所占比列略微增大。在偏应力较小时( $\varepsilon_a=1\%$ ),试样处于弹性阶段且在竖向被压缩,颗粒间接触逐渐紧密(如图 5 所示)。在这一过程中,少量长轴非水平分布的颗粒逐渐向水平方向旋转,使得水平方向分布的颗粒逐渐增多,胶结发生破坏。这是由于长轴方向水平分布的颗粒势能最小,而长轴方向非水平分布的椭圆颗粒由于势能较大,难以处于稳定。在外力作用下长轴非水平分布的颗粒为达到稳定而逐渐向水平方向旋转。随着试验进行,偏应力逐渐增大且试样结构趋于稳定。待偏应力达到峰值时,由于施加的围压小于保持试样稳定所需要的围压时,试样开始发生侧向膨胀,且随着试验进行,试样整体逐渐表现为剪胀。

由图 10 可知,竖直沉积试样在双轴压缩过程中试样颗粒长轴排列主方向始终为竖直方向,且随轴向应变增加,竖直方向排列颗粒所占比列逐渐减小,水平方向排列颗粒所占比列逐渐增大,整体分布逐渐呈各向同性。在偏应力较小时( $\varepsilon_a=1\%$ ),竖直沉积试样相比于水平沉积试样内部非水平方向分布的颗粒所占比列较大,少量非水平颗粒逐渐向水平方向转动,使得相同轴向应变时胶结破坏速率较水平沉积试样大。同时由于此时胶结破坏数目较少,颗粒受胶结物的胶结作用较大而处于弹性状态。随着试验进行,待偏应力达到峰值时,由于所施加的围压小于保持试样稳定所需要的围压时,试样发生侧向膨胀,且随着试验进行,试样逐渐呈现剪胀。此时,由于胶结破坏较多,胶结对颗粒的捆绑作用减弱,非水平分布颗粒旋转增多,胶结破坏增多,试样逐渐向各向同性转变,如图 10(c) 所示。与水平沉积样相比,竖直沉积样临界孔隙比小于水平沉积样,这是由于水平向沉积样颗粒多为水平分布,使得试样水平方向弹性模量较小,而竖直沉积试样颗粒呈微弱的各向异性,侧向弹模大

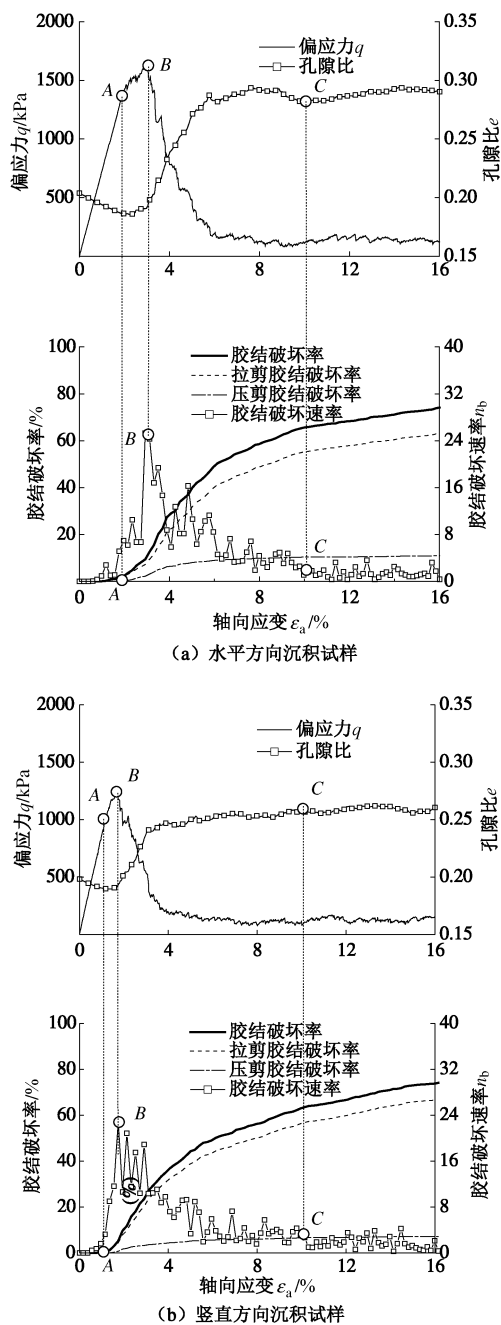


图 8 胶结破坏率及胶结破坏速率与宏观力学响应的关系

Fig. 8 Relationship among bond breakage percentage, bond breakage ratio and macro mechanical responses



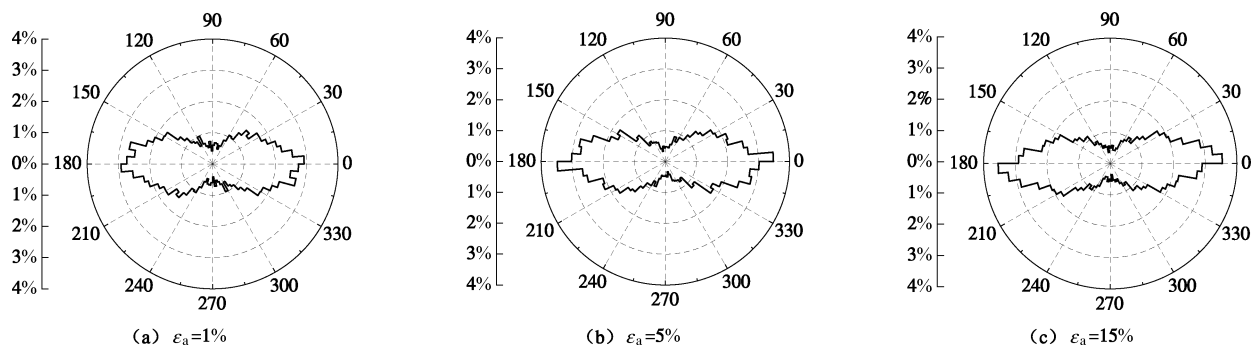


图9 水平方向沉积各向异性结构性砂土双轴压缩不同轴向应变时颗粒排列玫瑰图

Fig. 9 Rose diagrams of particle arrangement in horizontal deposit sample during biaxial compression tests

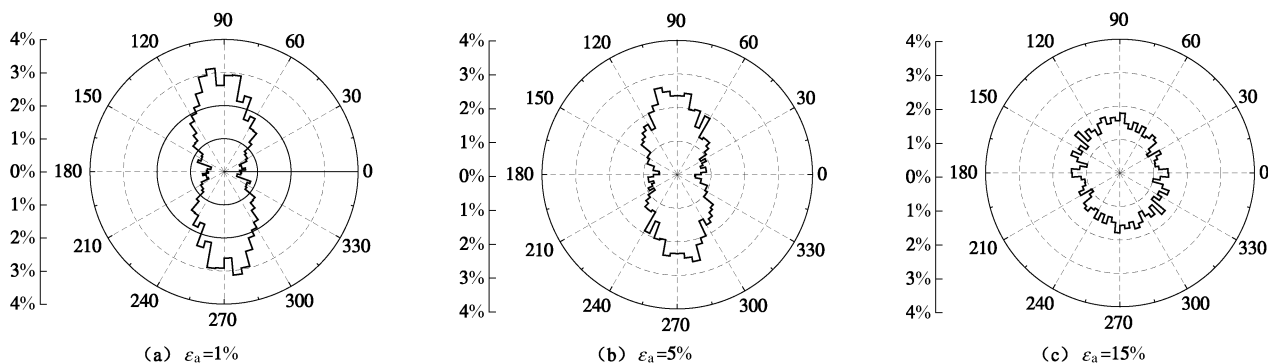


图10 竖直方向沉积各向异性结构性砂土双轴压缩不同轴向应变时颗粒排列玫瑰图

Fig. 10 Rose diagrams of particle arrangement in vertical deposit sample during biaxial compression tests

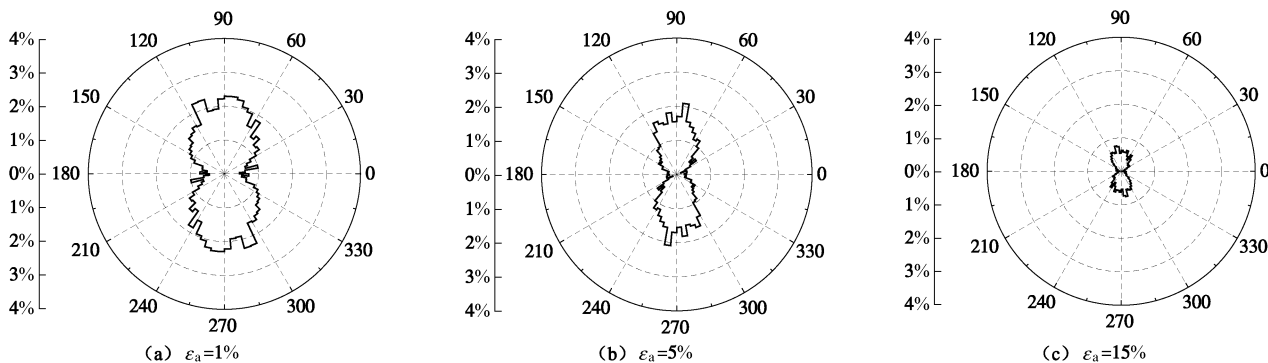


图11 水平方向沉积各向异性结构性砂土双轴压缩不同轴向应变时胶结接触玫瑰图

Fig. 11 Rose diagrams of bond contact in horizontal deposit sample during biaxial compression tests

于水平沉积试样,在相同围压下较水平沉积试样变化较小。

### 3.3 试样胶结接触排列组构特性

按1.1节中玫瑰图画法,统计每个区间胶结数目占初始总胶结接触数目的比例即得胶结接触分布玫瑰图。值得注意的是,由于试验过程中胶结物逐渐破坏,因此,胶结接触组构玫瑰图所占面积逐渐减小。图11、12所示分别为水平与竖直沉积方向结构性砂土胶结点排列方向玫瑰图。由图11可知,水平向沉积试样胶结点分布主方向始终为竖直方向,且随试验进行,竖向胶结接触所占比例先增大后减小,水平胶结接触

所占比例随轴向应变增加呈先减小后略微增大的趋势。由图12可知,竖向沉积试样胶结点分布初始时刻(轴向应变1%)主方向为水平方向;随着试验进行呈逆时针转动,即胶结接触点主方向逐渐趋于加载方向。竖直方向接触受压力较大,破坏方式多为压剪扭;而水平向胶结接触由于颗粒转动受到拉力,产生拉剪扭破坏,在破坏数目上以拉剪扭较多,如图7所示。因此,在竖直沉积试样内由于颗粒转动较多,水平胶结破坏较多,使得胶结接触主方向逐渐变为竖直方向。



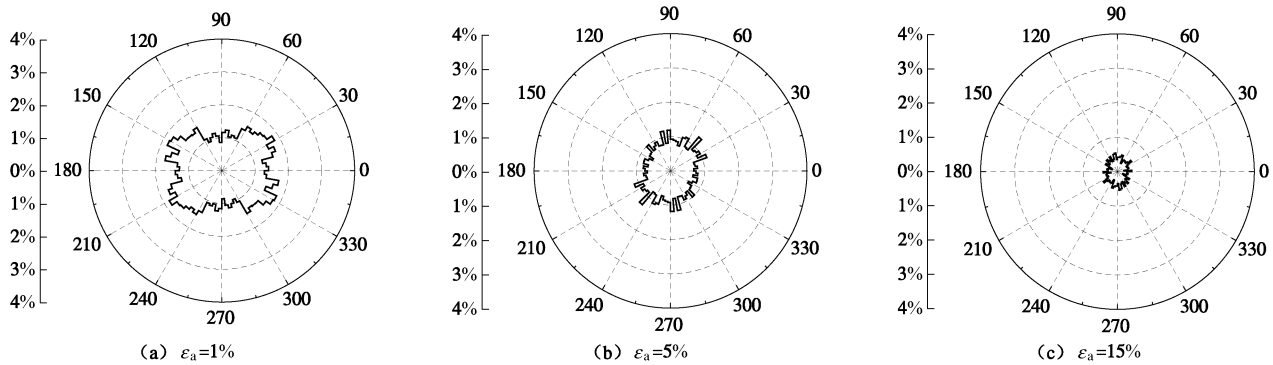


图 12 竖直方向沉积各向异性结构性砂土双轴压缩不同轴向应变时胶结接触排列玫瑰图

Fig. 12 Rose diagrams of bond contact in vertical deposit sample during biaxial compression tests

## 4 结 论

本文在离散元方法的基础上采用 NS2D 中椭圆颗粒近似模拟实际砂土颗粒。通过改变砂土的沉积方向生成颗粒长轴主方向不同的两个净砂样, 将一个不考虑颗粒抗转动的微观胶结接触模型引入净砂样中实现不同沉积方向各向异性结构性砂土的模拟。水平沉积试样离散元模拟及室内试验结果所反映的规律一致表明了该模型的适用性, 同时, 对比水平与竖直沉积试样结果表明:

(1) 两种沉积方向试样均呈现出应变软化及剪胀现象, 水平方向沉积的试样在偏应力达到峰值时对应的轴向应变大于竖直方向沉积, 且水平方向沉积试样其峰值偏应力及残余抗剪阶段孔隙比均大于竖直方向沉积试样, 两试样残余强度无明显差异。

(2) 水平及竖直沉积的各向异性结构性砂土胶结破坏速率及胶结破坏速率变化规律均能与宏观现象很好地联系起来。

(3) 水平沉积试样颗粒长轴排列主方向始终为水平向, 且随轴向应变增加, 水平方向排列颗粒所占比例略微增大。竖直沉积试样颗粒长轴初始排列主方向为竖直方向; 在较大应变情况下主方向为竖直方向的现象逐渐减弱。

(4) 双轴试验过程中胶结物逐渐减少, 且对于水平沉积试样, 胶结点分布主方向始终为竖直方向, 且竖向分布的胶结点所占比例随轴向应变增加先增大后减小, 相应的水平方向分布胶结点所占比例随轴向应变的增加先减小后略微增大。对于竖直沉积试样, 胶结接触点初始主方向为水平方向; 在剪切过程中胶结接触点主方向逐渐向加载方向转动。

## 参考文献:

[1] CASAGRANDE A, CARILLO N. Shear failure of anisotropic materials[J]. Proceedings of Boston Society of Civil

Engineers, 1944, **31**(4): 74 - 81.

[2] ARTHUR J, MENZIES B K. Inherent anisotropy in a sand[J]. Géotechnique, 1972, **22**(1): 115 - 128.

[3] 童朝霞, 周少鹏, 姚仰平, 等. 测定各向异性砂土抗剪强度特性的新型直剪装置及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(12): 2579 - 2584. (TONG Zhao-xia, ZHOU Shao-ping, YAO Yang-ping, et al. An improved direct shear apparatus for shear strength of anisotropic sand and its primary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(12): 2579 - 2584. (in Chinese))

[4] WANG Y H, LEUNG S C. A particulate-scale investigation of cemented sand behavior[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(1): 29 - 44.

[5] 王绪民, 赵 灿, 陈善雄, 等. 人工胶结砂物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(11): 3134 - 3140. (WANG Xu-min, ZHAO Can, CHEN Shan-xiong, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of artificially cemented sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(11): 3134 - 3140. (in Chinese))

[6] 陈立平, 张顶立, 房 倩, 等. 基于细管统计的各向异性砂土摩擦特性与破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 3291 - 3298. (CHEN Li-ping, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Research on fabric characteristics and failure mechanism of anisotropic sand based on micro-statistic[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 3291 - 3298. (in Chinese))

[7] CUNDALL P A, STRACK O L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Géotechnique, 1979, **29**: 47 - 65.

[8] 史旦达, 周 健, 刘文白, 等. 砂土单调剪切特性的非圆颗粒模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1361 - 1366. (SHI Dan-da, ZHOU Jian, LIU Wen-bai, et al. Numerical simulation for behaviors of sand with non-circular particles under monotonic shear loading[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1361 - 1366. (in Chinese))
- [9] JIANG M J, SUN Y G, LI L Q, et al. Contact behavior of idealized granules bonded in two different interparticle distances: An experimental investigation[J]. Mechanics of Materials, 2012, **55**: 1 - 15.
- [10] 蒋明镜, 孙渝刚. 人工胶结砂土力学特性的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1849 - 1856. (JIANG Ming-jing, SUN Yu-gang. A DEM modelling of mechanical behavior of artificially cemented sand[J]. Mechanics of Materials, 2011, **32**(6): 1849 - 1856. (in Chinese))
- [11] JIANG M J, SUN Y G, XIAO Y. An experimental investigation on the mechanical behavior between cemented granules[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, **35**(5): 678 - 690.
- [12] 蒋明镜, 孙渝刚, 李立青. 复杂应力下两种胶结颗粒微观力学模型的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 354 - 360. (JIANG Ming-jing, SUN Yu-gang, LI Li-qing. Experimental study on micro-mechanical model for two different bonded granules under complex stress conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 354 - 360. (in Chinese))
- [13] 蒋明镜, 孙渝刚, 李立青. 胶结颗粒接触力学特性测试装置研制[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 309 - 315. (JIANG Ming-jing, SUN Yu-gang, LI Li-qing. Development of experimental apparatus for contact behavior of bonded granules[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 309 - 315. (in Chinese))
- [14] 蒋明镜, 周雅萍, 陈 贺. 不同胶结厚度下粒间胶结力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1264 - 1273. (JIANG Ming-jing, ZHOU Ya-ping, CHEN He. Experimental study of mechanical behaviors of bonded granules under different bond thicknesses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1264 - 1273. (in Chinese))
- [15] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(7): 579 - 597.
- [16] 李立青, 蒋明镜, 吴晓峰. 椭圆形颗粒堆积体模拟颗粒材料力学性能的离散元数值方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 713 - 718. (LI Li-qing, JIANG Ming-jing, WU Xiao-feng. A developed discrete element model NS2D for simulating mechanical properties of elliptical particles assemblages[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 713 - 718. (in Chinese))
- [17] 蒋明镜, 刘静德. 结构性砂土胶结厚度分布特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报(已录用). (JIANG Ming-jing, LIU Jing-de. Experimental and numerical research on bonding properties of structured sand[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering (Accepted). (in Chinese))
- [18] JIANG M J, FU C, SHEN Z F, et al. DEM simulations of methane hydrate dissociation by thermal recovery[C]// Proceedings of International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro. UK, 2014: 379 - 384.
- [19] AJORLOO A M, MROUEH H, LANCELOT L. Experimental investigation of cement treated sand behavior under triaxial test[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, **30**: 129 - 143.