

DOI: 10.11779/CJGE201712003

各向异性砂土宏微观特性三维离散元分析

蒋明镜^{1, 2, 3}, 张安^{1, 2, 3}, 付昌^{1, 2, 3, 4}, 李涛^{1, 2, 3}

(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. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007)

摘要: 各向异性对砂土强度和变形特性有显著的影响, 为了研究各向异性砂土的宏微观特性, 基于三维离散元法, 对 7 个不同沉积角的试样进行了一系列的三轴模拟试验。利用“Clump”命令生成近似椭球形状颗粒, 并且采用三维抗转动模型来模拟颗粒间的抗转动能力。离散元模拟结果与已知室内试验结果吻合很好。结果表明: 随着沉积角的增大, 偏应力和轴向应变的关系逐渐由应变软化向应变硬化发展。沉积角较小的试样剪胀性更强并且容易到达临界状态, 颗粒组构-应力联合不变量(表征颗粒长轴组构张量和应力张量的相对角度)的值接近于-1, 且颗粒长轴组构各向异性先增大后减小; 然而对于沉积角较大的试样, 在轴向应变 50%处, 仍不能达到临界状态, 并且联合不变量的值大于-1, 颗粒长轴组构各向异性先减小后不断增大。对于法向接触组构, 组构主轴方向迅速向应力主轴方向偏转, 组构各向异性的演化规律与偏应力随轴向应变的演化规律相似。

关键词: 各向异性; 三维离散单元法; 砂土; 临界状态; 三轴试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)12-2165-08

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、非饱和土的宏微观试验、本构模型和数值分析方面的研究以及土体渐进破坏分析, 并从事相关的教学工作。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn。

Macro and micro-behaviors of anisotropy granular soils using 3D DEM simulation

JIANG Ming-jing^{1, 2, 3}, ZHANG An^{1, 2, 3}, FU Chang^{1, 2, 3, 4}, LI Tao^{1, 2, 3}

(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. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Henan Electric Power Survey & Design Institute, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Anisotropy has a significant effect on the strength and deformation characteristics of granular sand. In order to study the macro- and micro-behaviors of anisotropic sand, a series of numerical triaxial tests are performed on seven specimens with different bedding angles using the three-dimensional discrete element method (DEM). The approximate ellipse-shaped particles are generated using the command of clump, and a 3D rolling resistance model is implemented to simulate the local rolling resistance between particles. Good agreement is achieved between the present DEM simulation results and previously published experimental results. The relationship between deviator stress and axial strain changes from strain softening to strain hardening with the increase in bedding angel. The specimens with smaller inclination angels are more dilative and easier to reach the critical state. The combined invariants representing the relative orientation of particle orientation fabric tensor and stress tensor can approach nearly to -1. Their fabric anisotropies of particle orientation increase first and then decrease. However, for the specimens with higher bedding angels, the critical state cannot be reached even when the axial strain reaches 50% and the combined invariants are much larger than -1. Their fabric anisotropies first drop and then continuously increase. For the contact normal based fabric tensor, the principal axe rotates instantly toward the principal axe of the stress tensor, and the evolution of fabric anisotropy is similar to that of deviatoric stress against the axial strain.

Key words: anisotropy; three-dimensional discrete element method; granular soil; critical state; triaxial test

0 引言

土体各向异性根据其产生原因分为原生各向异性及次生各向异性两种^[1]。原生各向异性是指天然土体

受沉积条件及重力场的定向作用, 颗粒长轴在沉积过

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51639008)

收稿日期: 2016-09-19

程中出现优势方向而产生的；而次生各向异性是指由于应力状态等发生变化而导致的各向异性，又被称为诱发各向异性。各向异性对于土体力学和变形特性影响明显，如相同地基不同方向地基承载力差别可达30%左右^[2]，基坑隆起系数在竖直及水平方向相差两倍以及隧道开挖过程中横向及纵向土体位移相差较大等，这些工程实例表明土体的各向异性对施工方案设计有着重要影响。为此，国内外学者在室内试验、宏观本构理论和离散元数值模拟等方面进行了大量的研究。

在室内试验研究方面，Oda^[3]、Authur等^[4]和Tatsuoka等^[5]分别采用常规三轴试验、真三轴试验以及平面应变试验研究砂土初始组构各向异性对土体的强度和变形特性的影响，试验研究表明：各向异性砂土抗剪强度随加载方向与颗粒沉积方向夹角的增大而降低，试样达到破坏时的轴向应变显著增加，试样的剪胀性呈现出显著的各向异性。其他学者通过采用直剪试验^[6-7]和空心圆柱试验^[8]等也得了相似的结论。

在土体各向异性本构理论研究方面，国内外学者主要是将组构参数或各向异性状态参数引入各向同性模型中建立各向异性本构模型，并且可分为两种不同方式^[9]：①利用原生组构各向异性，并假定其在试验剪切时保持不变^[10-13]；②考虑组构各向异性在剪切过程中的演化^[14-15]。相关室内试验^[16]和数值模拟表明^[17]，第②种方法更加合理和实际。因此，为了获得更加合理的宏观本构模型，还需对各向异性砂土的力学特性的微观机理，尤其是组构的演化规律进行研究。

由于室内试验很难对试样组构各向异性进行定量描述，而离散单元法，可以实时观测试样内部微观结构信息，已被国内外学者广泛应用于各向异性砂土的宏、微观力学特性的研究。受到接触算法和计算效率的影响，目前对各向异性砂土的分析主要以二维椭圆颗粒为主，如Jiang等^[18-19]、蒋明镜等^[20-21]和Ting等^[22]所采用的理想光滑椭圆颗粒，Mahmood等^[23]和Yan等^[24]所采用的形状近似椭圆的团颗粒（将多个圆盘绑定形成一个近似椭圆的刚体，每个刚体被视为一个颗粒）。然而，在二维情况下，椭圆颗粒的转动行为与实际砂土并不相符，并且二维孔隙结构也与三维情况下存在一定差别，因此并不能很好的对实际砂土体变进行描述。相关学者也采用了三维理想椭球颗粒进行模拟，如Ng^[25]采用的ELLIPSE3H程序，但是该方法接触点求解较复杂，计算效率相对较低。对于团颗粒，颗粒之间的接触实质为圆盘与圆盘或者球与球之间的接触，接触判断算法相对简单。因此，笔者认为采用三维团颗粒进行各向异性砂土宏微观离散元分析更加合理与高效。

本文以PFC^{3D}软件为平台^[26]，通过“Clump”命令将球体组合成形状近似椭球的团颗粒。并引入三维抗转动模型来模拟颗粒局部抗转动能力，然后通过分层欠压法生成沉积角不同的各向异性砂土试样，并对这些试样进行三轴试验模拟。试验结束后，首先，从宏观角度上，将模拟结果与室内试验的应力应变曲线和体变曲线进行对比，验证该方法的有效性，并分析加载方向与沉积方向的夹角对各向异性试样的力学和变形特性的影响。然后，从微观角度上，分析颗粒长轴、接触法向等微观组构的演化规律，对宏观力学和变形特性进行解释。

1 团颗粒生成及微观接触模型

1.1 团颗粒生成

通过PFC^{3D}软件的“Clump”命令生成团颗粒主要包括两种方式：①通过直接设定团颗粒中pebble（小圆球）的具体位置及半径定义其形状；②导入边界网格面（见图1），通过空间几何尺寸关系在边界面内根据相应算法自行生成pebble，其优点在于能够通过两个pebble接触点处切线的夹角生成团颗粒，夹角越大，则会在网格面内生成更多的pebble，使得生成的团颗粒表面相对光滑，通过此方法可以比较容易控制颗粒形状。但是生成的团颗粒的体积和转动惯量均是以导入的网格面为边界进行计算的，与本研究想要得到的团颗粒在物理力学特性上存在一定差别。因此本研究将两种方法相结合，即：首先采用第②种方法在边界范围内生成目标团颗粒形状，随后将团颗粒中所有pebble的半径及坐标记录下来，生成各项指标均满足要求的团颗粒模板（长短轴比为1.7）。接下来三轴试验成样过程中均是以此团颗粒模板为基础生成粒径不同的团颗粒。

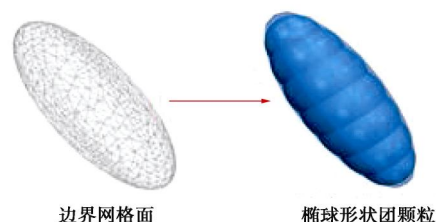


图1 椭球形状颗粒生成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of generation of ellipse-shaped particles

1.2 微观接触模型

实际土颗粒表面往往比较粗糙，因此颗粒间存在一定的接触面积，导致颗粒间的接触可以传递力矩，因此本模拟在考虑颗粒整体形状影响的基础上采用三维抗转动模型，以考虑颗粒间的局部抗转动作用，以更加真实的模拟土颗粒。根据文献[27]，模型力学响

应包括法向、切向、转动向和扭转向 4 个方向。法向力学响应采用全量法进行计算；切向力学响应采用增量法进行计算，最大值不超过 $mk_n u_n$ ；转动向力学响应采用增量法计算，最大值 M_r^{\max} 不超过 $2.1F_n \bar{R}_c / 4$ ；扭转向也采用增量法计算，最大值 M_t^{\max} 不超过 $0.65mF_n \bar{R}_c$ 。图 2 中 k_n 为法向刚度， k_s 为切向刚度， k_r 为转动向刚度， k_t 为扭转向刚度， F_s^{\max} 为峰值切向力， M_r^{\max} 为峰值弯矩， M_t^{\max} 为峰值扭矩， u_n 为法向重叠量， u_s 为相对剪切位移， q_r 为相对转动角， q_t 为相对扭转角， m 为摩擦系数。另外， \bar{R}_c 为接触半径， $\bar{R}_c = b\bar{R}$ ，其中， b 为粒间抗转动系数， $\bar{R} = 2R_1R_2/(R_1 + R_2)$ ， R_1 和 R_2 分别为两接触颗粒 (pebble) 的半径。

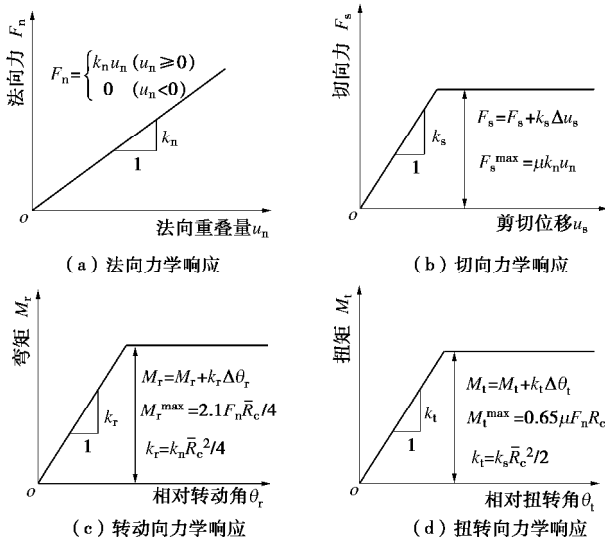


图 2 接触模型力学响应
Fig. 2 Mechanical responses of contact model

2 各向异性砂土制备

为了方便与室内试验数据进行对比，本研究采用的是丰浦砂级配 (图 3)。基于 1.1 节生成的团颗粒模板，通过体积等效法，放缩团颗粒模板，即可自动生成与级配曲线各粒径对应的球体积相等的团颗粒。

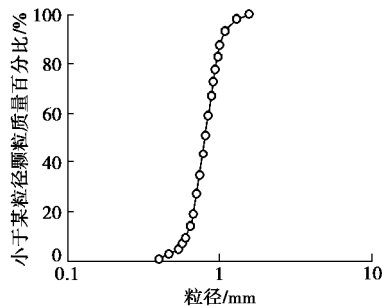


图 3 颗粒级配曲线
Fig. 3 Grain-size distribution curves

各向异性砂土成样方法参考笔者等^[21]提出的二维各向异性砂土制备方法，生成 7 种不同沉积角 δ (0° ,

15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°) 的立方体离散元试样。试样目标孔隙比均为 0.65。对于 0° 和 90° 的试样，可采用分层欠压法^[28]分五层直接制备。而对于其他沉积角度试样，首先需要按照沉积角生成倾斜的底墙和左右侧墙、竖直的前后侧墙以及水平的顶墙，前后侧墙和左右侧墙的间距为试样的宽度。六面刚性墙生成后，在该区域生成一定数目、长轴倾角随机分布的团颗粒，然后顶墙缓慢向下移动，使得该层试样达到目标孔隙比，然后调整顶墙位置，重复上述步骤，直至五层试样生成，如图 4 (a) 所示。根据试样尺寸及加载方向的需要，删除左上部分突出的团颗粒并重新设定顶墙的位置参数，即可制备相应沉积角度的各向异性砂土离散元试样，如图 4 (b) 所示。

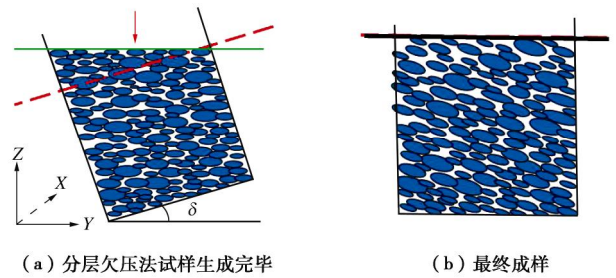


图 4 各向异性试样离散元制备示意图

Fig. 4 Schematic diagram of preparation of anisotropic sample using discrete element method

图 5 为试样椭圆颗粒在 YZ 平面投影的颗粒长轴分布玫瑰图。由图可见，各试样颗粒长轴优势方向与水平面所成夹角，与成样过程中底墙的倾角基本相同。

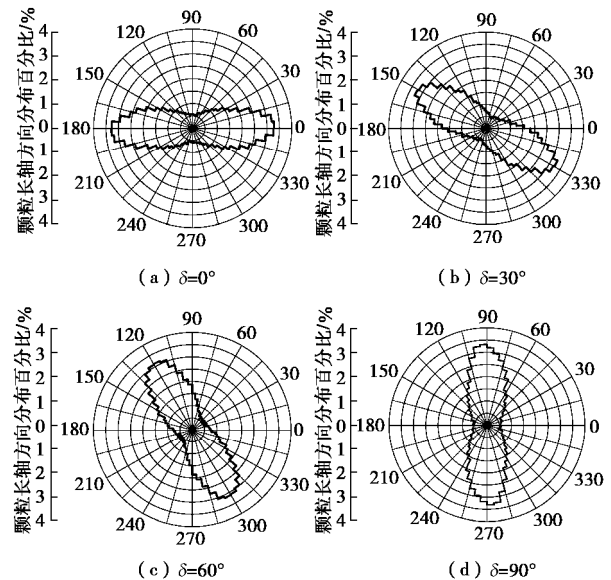


图 5 颗粒初始排列玫瑰花图 (YZ 投影面)

Fig. 5 Rose diagrams of initial particle arrangement (YZ projection plane)

3 离散元模拟参数及实施步骤

各向异性试样制备完成后，各试样在 100 kPa 围

压下进行固结，然后进行三轴剪切试验。

在成样阶段,为了生成目标孔隙比为 0.67 的试样,在分层欠压过程中颗粒间的摩擦力尽可能小,使颗粒间能够更加紧凑,因此这一阶段对应的摩擦系数选为 0.2。在固结和三轴剪切过程中,颗粒间摩擦系数为 0.5。在离散元的计算过程中,为了获得合理的计算时步,在准静态的条件下对颗粒质量进行放大来增大时步,在提高计算效率的同时,保持试样整体力学特性基本不变^[29-30],离散元模拟参数如表 1 所示。

表 1 各向异性砂土离散元模拟参数

Table 1 Parameters of anisotropic sand in DEM simulation		
各向异性净砂离散元模拟参数		数值
颗粒参数	颗粒数目	20000 左右
	颗粒长短轴比例 A_m	1.7
	颗粒法向接触刚度 $k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	6.0×10^8
	颗粒切向接触刚度 $k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	4.0×10^8
	成样过程中颗粒间摩擦系数 μ	0.2
	剪切过程中颗粒间摩擦系数 μ	0.5
墙体参数	颗粒抗转动系数 β	0.2
	墙体法向接触刚度 $k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	6.0×10^8
	墙体切向接触刚度 $k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	4.0×10^8
	颗粒与墙体间摩擦系数	0.0
试验参数	围压	100 kPa
	应变率	3%/min

4 宏观力学与变形特性

4.1 力学特性

各向异性净砂离散元模拟的结果首先需要与室内试验结果对比以研究其合理性。本研究将选取 Lam 等^[31]所做的室内三轴压缩试验结果对离散元模拟结果进行对比。图 6 (a) 为室内试验的应力应变曲线,图 6 (b) 为离散元模拟所得应力应变结果。室内试验结果及离散元模拟结果均表明:随着沉积角 d 的增大,试样峰值偏应力逐渐减小,且整体力学响应逐渐由应变软化向硬化发展;试样初始剪切模量逐渐减小。离散元模拟结果与室内试验结果相一致表明采用离散元方法能够合理的对各向异性净砂力学特性进行反映。

图 7 (a) 和图 7 (b) 分别为室内试验及离散元模拟中各向异性净砂峰值内摩擦角比和残余内摩擦角比随沉积角的变化规律,其中, j_0 和 j_{r0} 分别为 $d=0^\circ$ 时试样的峰值和残余内摩擦角。如图 7 (a) 所示,室内试验和离散元结果均表明,随着 d 的增大,峰值内摩擦角比有减小的趋势,当 $d>60^\circ$ 时,峰值内摩擦角比基本保持不变。由于离散元应力应变曲线在残余阶段具有一定波动,因此本文选取轴向应变 35%~45%的内摩擦角平均值作为残余内摩擦角。而室内试验加载到的应变较小,应力-应变曲线虽未完全但已趋于稳定,因此本文选取其应力-应变曲线最后一个点计算残余内摩擦角。如图 7 (b) 所示,离散元模拟

结果表明:当 $d\leq 30^\circ$ 时,残余内摩擦角比变化较小,与 Oda 等^[2]的室内试验结果基本一致;当 $d>30^\circ$ 时,在 Oda 等^[2]的室内试验结果中,残余内摩擦角比变化较小,Lam 等^[29]的室内试验与本文模拟结果均表明随着沉积角的增加,残余内摩擦角略微增加。

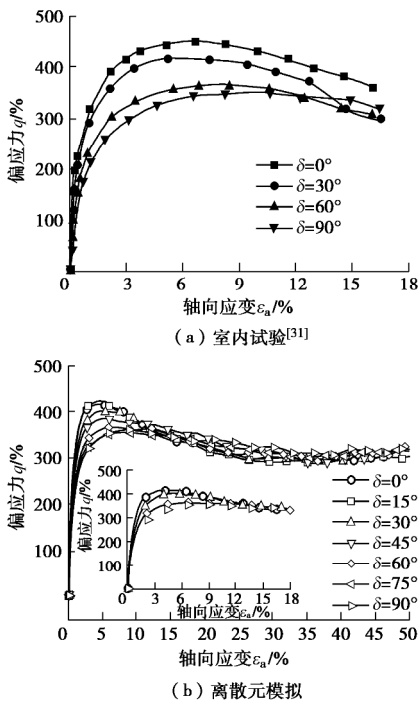


图 6 室内试验及离散元模拟应力-应变关系对比
Fig. 6 Comparison of stress-strain relationships between experimental and DEM simulation results

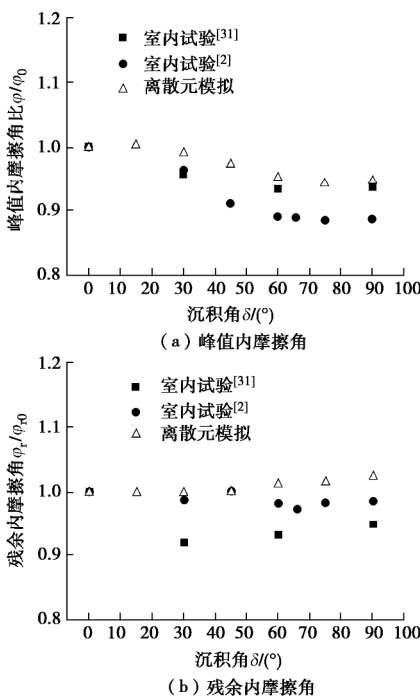


图 7 内摩擦角随沉积角变化规律
Fig. 7 Variation of internal frictional angle against sedimentary angle

4.2 剪切变形特性

图 8 (a) 和图 8 (b) 分别为室内试验^[31]和离散元模拟所得到的体应变 - 轴向应变曲线, 室内试验结果及离散元模拟结果均表明: 在初始剪切阶段, 试样首先发生剪缩, 随着剪切的进行, 逐渐由剪缩发展为剪胀。随着 δ 的增大, 体应变绝对值减小, 即剪胀性减小。室内试验及离散元模拟结果基本相同, 表明离散元能很好的模拟各向异性砂土的体变规律。另外对于沉积角较小的试样 ($d \leq 45^\circ$), 孔隙比能够达到稳定进而达到临界状态。而对于 d 为 60° , 75° 和 90° 试样, 体应变绝对值仍持续增加, 当轴向应变为 50% 时, 试样仍不能够达到临界状态。

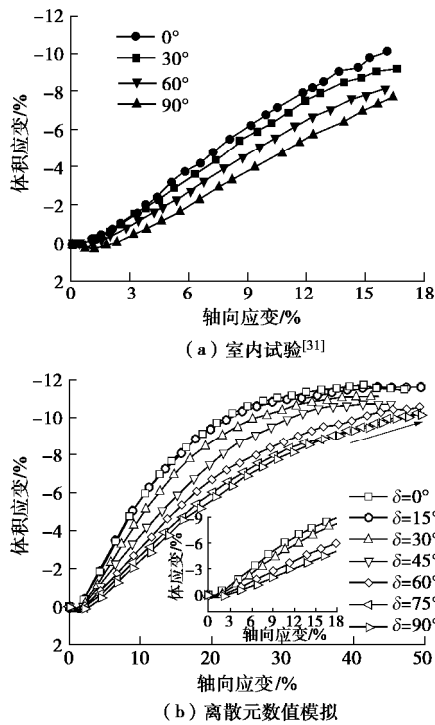


图 8 室内试验及离散元模拟体应变 - 轴向应变结果对比
Fig. 8 Comparison of volumetric strain-axial strain relationships between experimental and DEM simulation results

5 微观特性描述

各向异性砂土的宏观变形和力学特性与微观组构演化密切相关, 本文主要采用组构张量法对颗粒长轴方向、接触法向进行定量的描述。颗粒长轴指的是团颗粒中各 pebble 球心的连线。

对于组构张量法, 比较简便可行的办法是采用二阶对称张量。本文采取 Oda 等^[32]提出的组构张量的计算方法, 其表达式如下所示:

$$j_{ij} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^{2N} u_i^k u_j^k, \quad (1)$$

式中, N 代表单元内砂颗粒的总数或者接触总数, u_i^k 是第 k 个颗粒或者接触的主轴单位向量。

离散元模拟过程中, 主要对颗粒长轴和接触法向组构的各向异性程度及方向进行了记录。组构的各向异性系数 F (表征各向异性程度) 可由偏组构张量 F_{ij} 的模式表示:

$$F = \|F_{ij}\| = \sqrt{F_{ij} F_{ij}}, \quad (2)$$

式中, 偏组构张量 $F_{ij} = j_{ij} - 1/3 j_{kk} d_{ij}$ 。

为了反映组构主方向与应力主方向的夹角, 本文定义一个应力张量和组构张量的联合不变量 A , 表达式如式 (3) 所示, 对于颗粒长轴组构, 联合不变量用 A_p 表示, 对于法向接触组构, 用 A_c 表示。该联合不变量 A 与组构各向异性系数 F 的乘积, 即为 Li 等^[12]提出的各向异性本构模型中的各向异性状态参量。

$$A = \frac{\text{tr}(S_{ij} F_{ij})}{\|S_{ij}\| \cdot \|F_{ij}\|}, \quad (3)$$

式中, 偏应力张量 $S_{ij} = s_{ij} - (1/3) s_{kk} d_{ij}$ 。

5.1 颗粒长轴组构演化规律

图 9 为颗粒长轴组构-应力联合张量不变量 A_p 的变化情况。由图可知: 对于 $\delta=0^\circ$ 的试样, 在加载过程中, A_p 的值约等于 -1, 说明颗粒长轴主方向基本垂直于最大主应力方向; 对于 $d > 0^\circ$ 的试样, 随着轴向应变的增加, A_p 逐渐减小并向 -1 靠近, 说明颗粒长轴组构主方向逐渐向最大主应力垂直方向偏转, 并且随着 δ 的增大, A_p 减小的速度越快, 说明对于 d 的较大的试样, 颗粒转动的程度更高, 而这种颗粒的重新排列会使得试样部分孔隙减小, 从而减弱试样整体的剪胀性。对于能够达到临界状态的试样 ($d \leq 45^\circ$), A_p 的值趋于稳定并接近于 -1。而对于 d 为 60° , 75° 和 90° 的试样, 在 50% 应变处, A_p 仍然保持不断减小的趋势, 说明颗粒长轴组构主方向仍在不断的调整, 因此在宏观变形特性上表现出不断剪胀的趋势而未能达到临界状态。

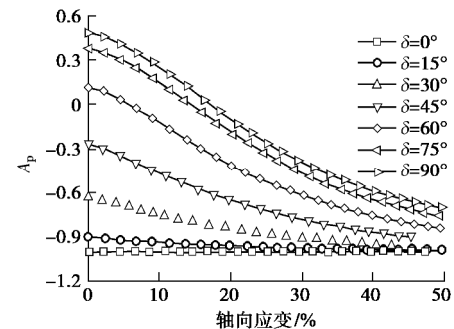


图 9 不同沉积角下 A_p 变化曲线

Fig. 9 Curves of A_p with different sedimentary angles

图 10 为不同 d 颗粒长轴组构各向异性系数随轴

向应变的变化关系。由图可知，在初始时刻，尽管相对于整体坐标系而言颗粒排列不同，但是相对于沉积面而言，试样的颗粒各向异性程度基本相同。由图可以看出随着加载的进行，颗粒各向异性系数逐渐发生变化，对于 $d=0^\circ$ ， 15° ， 30° 的试样，各向异性系数先增大后减小，并且趋于稳定；对于 $d=45^\circ$ 的试样，各向异性系数逐渐减小，并趋于稳定；而对于 $d=60^\circ$ ， 75° ， 90° 的试样，在初始三轴压缩时刻，颗粒组构主方向偏向于加载方向，因此在前期加载阶段（轴向应变 $<20\%$ ），颗粒各向异性系数不断减小，并且随着 d 的增大，各向异性减小的幅度越大，然后随着剪切的继续进行，颗粒组构各向异性逐渐增强，并且随着 d 的增大，各向异性系数增加的幅度越大，并且均未到达一个稳定的值。综上所述，初始颗粒组构不同使得各向异性砂土宏观变形特性各异，并且颗粒长轴-接触力联合张量不变量 A_p 以及颗粒组构的各向异性系数是否能达到稳定值，可以作为判断土体是否能够达到临界状态的重要依据。

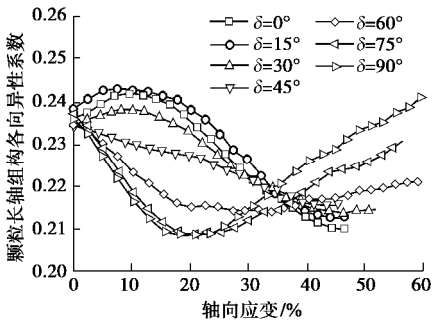


图 10 不同沉积角颗粒组构各向异性变化曲线

Fig. 10 Fabric anisotropies of particle direction with different sedimentary angles

5.2 接触法向组构演化规律

图 11 为 d 为 0° ， 30° ， 60° 和 90° 4个试样在三轴剪切初始时刻，接触法向在 YZ 面上投影的分布玫瑰画图。由图可知，粒间接触的主方向与成样过程中顶墙基本垂直。这是由于在压缩过程中沿压缩方向颗粒间被压紧，使得该方向接触较其他方向更多。

图 12 为接触组构-应力联合张量不变量 A_c 的变化情况。三轴剪切前，对于 $d=0^\circ$ 的试样， A_c 约等于 1，说明接触组构主方向和最大主应力方向基本重合，并且在加载过程中 A_c 的值保持不变。对于 $\delta>0^\circ$ 的试样，随着加载的进行， A_c 逐渐增大，主要是因为在小主应力方向，颗粒接触点逐渐减小，而在大主应力方向，颗粒接触点逐渐增多，从而使得接触组构主方向逐渐向加载方向偏转。不同 δ 试样 A_c 最终稳定在 1 附近。

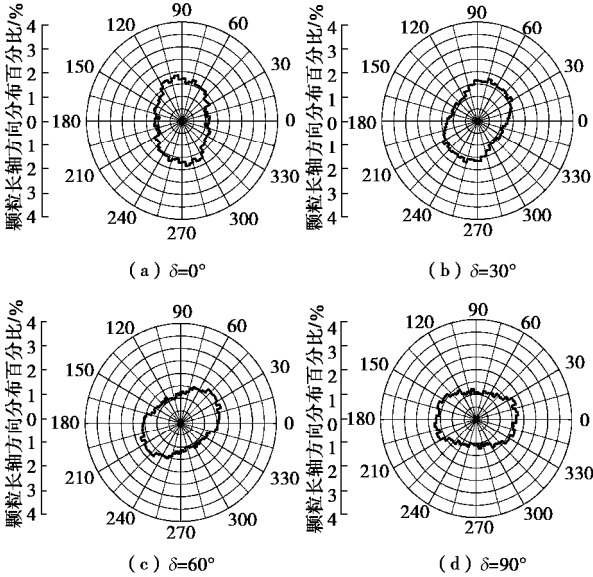


图 11 接触法向排列玫瑰图（YZ 投影面）

Fig. 11 Rose diagrams of contact normal distribution (YZ projection plane)

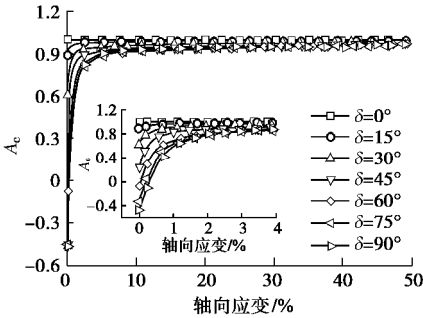


图 12 不同沉积角下 A_c 变化曲线

Fig. 12 Curves of A_c with different sedimentary angles

图 13 为不同 d 接触法向组构各向异性系数随轴向应变的变化关系。由图可知，当 $d=0^\circ$ ， 15° ， 30° ， 45° 时，随着轴向应变增大，接触各向异性系数先增大后减小，最终达到某一稳定值；当 $d=60^\circ$ 时，接触各向异性系数随着轴向应变增大而增大，最终基本稳定在某一值；而对于 75° 和 90° 试样，随着轴向应

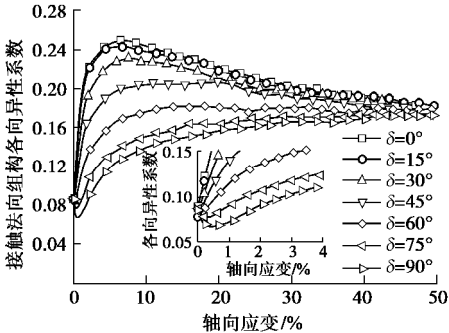


图 13 不同沉积角接触法向组构各向异性变化曲线

Fig. 13 Fabric anisotropies of contact normal with different sedimentary angles

变的增加, 各向异性系数先略微减小, 主要是因为成样过程中, 由于墙体作用使得初始时刻接触组构主方向与加载方向相差较大, 在竖直方向荷载作用下, 接触组构主方向旋转, 使得原有的接触各向异性减弱, 然后随着剪切的继续进行, 接触各向异性逐渐增强, 最终达到稳定。另外, 随着 d 的增大, 各向异性系数是逐渐增大的, 且增大速率越快, 这与宏观上应力应变曲线是相一致的。

6 结 论

本文基于三维离散元方法, 采用“Clump”命令生成近似椭球颗粒, 并引入三维抗转动接触模型, 模拟各向异性砂土的三轴剪切试验, 得到主要结论如下:

(1) 本文所采用的离散元方法能很好地反映各向异性砂土应力应变和剪切变形特性, 随着沉积角的增加, 试样峰值强度、初始剪切刚度和剪胀性均减小。

(2) 对于沉积角较小的试样 (0° , 15° , 30°), 颗粒组构各向异性程度先增加后减小, 并趋于稳定, 试样均能达到临界状态; 对于沉积角为 45° 的试样, 各向异性程度逐渐减小, 并趋于稳定, 试样也能达到临界状态; 而对于沉积角为 60° , 75° 和 90° 的试样, 各向异性程度先减小后增大, 颗粒长轴发生较大程度偏转, 使得试样部分孔隙减小, 从而减弱试样整体的剪胀性, 并且当轴向应变为 50%, 试样仍未达到临界状态。

(3) 颗粒组构-应力联合不变量 (表征颗粒长轴组构张量和应力张量的相对角度) 的值是否能接近于 -1 以及各向异性系数是否趋于稳定, 可以为判断各向异性砂土能否进入临界状态提供参考。

(4) 接触法向主方向迅速向主应力方向偏转, 随着沉积角的增加, 接触法向组构各向异性演化规律逐渐由“应变软化”向“应变硬化”发展, 这与宏观上应力应变曲线的变化规律是相似的。

参考文献:

- [1] CASAGRANDE A, CARILLO N. Shear failure of anisotropic materials[J]. Journal of Boston Society of Civil Engineers, 1944, **31**(4): 74 - 81.
- [2] ODA M, KOISHIKAWA I, HIGUCHI T. Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test[J]. Soils and Foundations, 1978, **18**(1): 25 - 38.
- [3] ODA M. Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material[J]. Soils and Foundations, 1972, **12**(1): 17 - 36.
- [4] ARTHUR J R F, MENZIES B K. Inherent anisotropy in a sand[J]. Géotechnique, 1972, **22**(1): 115 - 128.
- [5] TATSUOKA F, SAKAMOTO M, KAWAMURA T, et al. Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures[J]. Soils and Foundations, 1986, **26**(1): 65 - 84.
- [6] GUO P J. Modified direct shear test for anisotropic strength of sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(9): 1311 - 1318.
- [7] 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-peng, YAO Yang-ping, et al. An improved direct shear apparatus for shear strength of anisotropic sands and its primary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(12): 2579 - 2584. (in Chinese))
- [8] PRADHAN T B S, TATSUOKA F, HORII N. Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus[J]. Soils and Foundations, 1988, **28**(2): 95 - 112.
- [9] GAO Z, ZHAO J. Constitutive modeling of anisotropic sand behavior in monotonic and cyclic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 04015017(8).
- [10] LI X S, DAFALIAS Y F. Constitutive modeling of inherently anisotropic sand behavior[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(10): 868 - 880.
- [11] YIN Z Y, CHANG C S, HICHER P Y. Micromechanical modelling for effect of inherent anisotropy on cyclic behaviour of sand[J]. International Journal of Solids & Structures, 2010, **47**(14/15): 1933 - 1951.
- [12] YAO Y P, KONG Y X. Extended UH model: Three-dimensional unified hardening model for anisotropic clays[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, **138**(7): 853 - 866.
- [13] YAO Y P, TIAN Y, GAO Z W. Anisotropic UH model for soils based on a simple transformed stress method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017, **41**(1): 54 - 78.
- [14] LI X S, DAFALIAS Y F. Anisotropic critical state theory: role of fabric[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, **138**(3): 263 - 275.
- [15] GAO Z W, ZHAO J D, LI X S, et al. A critical state sand plasticity model accounting for fabric evolution[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2014, **38**(4): 370 - 390.
- [16] ODA M, KAWAMOTO K, SUZUKI K, et al. Microstructural

- interpretation on reliquefaction of saturated granular soils under cyclic loading[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2001, **127**(5): 416 – 423.
- [17] LI X, LI X S. Micro-macro quantification of the internal structure of granular materials[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, **135**(7): 641 – 656.
- [18] JIANG M J, LI T, SHEN Z F. Fabric rates of elliptical particle assembly in monotonic and cyclic simple shear tests: a numerical study[J]. *Granular Matter*, 2016, **18**(3): 1 – 14.
- [19] JIANG M J, LI T, CHAREYRE B. Fabric rates applied to kinematic models: evaluating elliptical granular materials under simple shear tests via discrete element method[J]. *Granular Matter*, 2016, **18**(3): 1 – 15.
- [20] 蒋明镜, 付 昌, 刘静德, 等. 不同沉积方向各向异性结构性砂土离散元力学特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(1): 138 – 146. (JIANG Ming-jing, FU Chang, LIU Jing-de, et al. DEM simulations of anisotropic structured sand with different deposit directions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(1): 138 – 146. (in Chinese))
- [21] 蒋明镜, 陈 添, 刘静德, 等. 沉积角对净砂宏微观力学特性影响的离散元分析[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(2): 554 – 562. (JIANG Ming-jing, CHEN Tian, LIU Jing-de, et al. Discrete element analysis of effects of sedimentary angle on macro-micromechanical properties of pure sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(2): 554 – 562. (in Chinese))
- [22] TING J M, MEACHUM L, ROWELL J D. Effect of particle shape on the strength and deformation mechanisms of ellipse - shaped granular assemblages[J]. *Engineering Computations*, 2013, **12**(2): 99 – 108.
- [23] MAHMOOD Z, IWASHITA K. Influence of inherent anisotropy on mechanical behavior of granular materials based on DEM simulations[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, **34**(8): 795 – 819.
- [24] YAN W M, ZHANG L. Fabric and the critical state of idealized granular assemblages subject to biaxial shear[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, **49**: 43 – 52.
- [25] NG T T. Macro- and micro-behavior of granular materials under different sample preparation methods and stress paths[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2004, **41**(21): 5871 – 5884.
- [26] Itasca Consulting Group Inc. PFC3D (particle flow code in three dimensions) version 5.0 manual[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2015.
- [27] JIANG M J, SHEN Z F, WANG J F. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, **65**: 147 – 163.
- [28] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. *Computers & Geotechnics*, 2003, **30**(7): 579 – 597.
- [29] THORNTON C. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media[J]. *Géotechnique*, 2000, **50**(1): 43 – 54.
- [30] ZHAO X L, EVANS T M. Numerical analysis of critical state behaviors of granular soils under different loading conditions[J]. *Granular Matter*, 2011, **13**(6): 751 – 764.
- [31] LAM W K, TATSUOKA F. Effects of initial anisotropic fabric and σ_2 on strength and deformation characteristics[J]. *Soils and Foundations*, 1988, **28**(1): 89 – 106.
- [32] ODA M, NEMAT-NASSER S, KONISHI J. Stress-induced anisotropy in granular masses[J]. *Soils and Foundations*, 1985, **25**(3): 85 – 97.