

各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟

赵 洲, 宋 晶, 刘锐鸿, 杨守颖, 李志杰

Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil

ZHAO Zhou, SONG Jing, LIU Ruihong, YANG Shouying, and LI Zhijie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算

Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading

陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 贺建清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 138-145

无侧限压缩条件下黏性土磁各向异性研究

A study of anisotropy of magnetic susceptibility of cohesive soil under unconfined compression

孙茜, 阎长虹, 刘羊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 123-130

侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质

Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment

何俊, 栗志翔, 石小康, 王小琦 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 83-89

含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture

邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-111

滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the landslide-debris flow impact guiding structure

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊, 杨海龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 161-168

基于应力修正的土体抗剪强度影响因素分析

An analysis of the factors affecting shear strength parameters of soils based on stress correction

龚琰, 朱建群, 陈浩锋 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 95-95



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006027

各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟

赵 洲¹, 宋 晶^{1,2,3}, 刘锐鸿¹, 杨守颖¹, 李志杰¹

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 广州 510275; 3. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 软土预压工程中, 初始和诱发各向异性对软土力学性质的影响十分显著, 而现有研究缺乏对初始和诱发各向异性的统一研究方法。采用离散单元法, 以颗粒长宽比作为定量评价指标, 构建真实形态的颗粒模型, 生成 5 组不同沉积角的初始各向异性试样, 并进行竖直和水平两方向加载的双轴模拟实验, 研究了初始各向异性对软土力学特性影响; 在细观层面, 以颗粒为对象研究了颗粒接触形式和转动角度的变化规律, 以接触为对象研究了配位数和接触法向各向异性的发展趋势, 在此基础上探究抗剪强度指标与各向异性关系。结果表明: 初始和诱发各向异性共同影响试样力学性质, 当加载方向和软土沉积方向垂直时, 土体有最大的峰值强度。颗粒接触形式中面面接触的比例随加载的进行逐渐增大, 并影响着试样初始模量和抗剪强度, 配位数和接触法向各向异性受颗粒接触形式的影响有不同的演化规律, 并在加载后期趋于稳定; 同时, 初始各向异性试样相较各向同性试样有更大的黏聚力, 诱发各向异性主要影响试样内摩擦角, 进而影响试样抗剪强度。

关键词: 软土; 各向异性; 峰值应力; 抗剪强度指标; 细观宏观性质

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0070-08

Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil

ZHAO Zhou¹, SONG Jing^{1,2,3}, LIU Ruihong¹, YANG Shouying¹, LI Zhijie¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Guangzhou, Guangdong 510275, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: The initial and induced anisotropy has a significant effect on the mechanical properties of soft soil in preloading engineering. However, there is a lack of unified research methods for the initial and induced anisotropy. Discrete element method is adopted in this study, and the length-width ratio of particles is used as the quantitative evaluation index. Five types of initial anisotropy samples with different deposition angles are generated. The effects of initial anisotropy and induced anisotropy on the mechanical properties of soft soil are studied by vertical and horizontal loading. At the micro level, the contact form and rotation angle of particles are examined from the point of view of particles, and the development trend of coordination number and contact normal to anisotropy is studied from the point of view of contact. The relationship between shear strength index

收稿日期: 2020-06-12; 修订日期: 2020-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872228; 41402239; 41877229); 广东省自然科学基金项目(2019A1515010554); 广州市科技计划项目(201904010136)

第一作者: 赵洲(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事软土微观结构及数值模拟。E-mail: zhaozh59@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 宋晶(1982-), 女, 博士, 副教授, 主要从事软土工程及微观结构研究。E-mail: songj5@mail.sysu.edu.cn

and anisotropy is explored. The results show that initial and induced anisotropy influences the mechanical properties of the samples. When the loading direction is perpendicular to the soft soil deposition direction, the soil mass has the maximum peak strength. In the particle contact form, the proportion of surface contact gradually increases with loading. The initial modulus and shear strength are influenced. The coordination number and contact normal anisotropy have different evolutions under the influence of particle contact form, and tend to be stable at the later loading stage. In terms of shear strength parameters, the initial anisotropy will increase the cohesion of the sample, and the induced anisotropy will mainly change the internal friction angle, which is consistent with the law of shear strength.

Keywords: soft soil; anisotropy; peak stress; shear strength index; mesoscopic and macroscopic characteristics

软土预压工程中, 由于颗粒沉积环境与沉积条件的差异, 促使颗粒形成不同方向的初始排列, 从而造成结构上的各向异性, 称为初始各向异性^[1]。采用真空预压和堆载预压的处理方法, 导致颗粒水平和竖向的应力状态不同, 进而影响土体力学行为, 称为诱发各向异性^[1]。因此, 对软土力学性质的研究, 需综合考虑初始和诱发各向异性的影响, 建立细观组构与宏观力学特性之间的相互联系。

目前, 研究各向异性的常用方法主要包括了土工试验和数值模拟。早期工作集中于研究各向异性土体对地基承载力的影响, Oda 等^[2]、Siddiquee 等^[3]通过室内试验发现, 当荷载方向与颗粒沉积方向平行时, 地基承载力会大幅提升。针对初始各向异性的研究, Zhang 等^[4]通过提取不同深度的天然黏土来获取各向异性试样, 进行一系列固结试验, 研究各向异性对压缩指数和屈服应力的影响, 并从微观机理予以解释, 但其理论有待完善。对于诱发各向异性的研究, Rouain 等^[5]在复杂应力路径的真三轴试验基础上, 发现土体强度受应力路径的影响, 并提出结构性土的统一本构模型。曾玲玲等^[6]、刘恩龙等^[7]、刘嘉英等^[8]也针对土体在不同应力路径下强度、变形及破坏特性进行了探究, 极大丰富了土体各向异性的基础理论。王清等^[9-10]从微观角度研究了土体结构强度的形成机制, 并指出结构体单元的动态平衡特征。对于土体颗粒内在结构信息的提取, 目前常用有扫描电镜 (SEM)、X 射线断层成像 (CT)、数字图像技术成像、热电导率和水电导率^[11-13]等研究手段。室内试验和现场试验作为基础研究手段仍存在诸多局限, 如试样的初始各向异性难以控制, 制样方式和试验手段会对最终结果产生很大影响。更为关键的是, 室内试验无法做到组构演化过程实时监测, 从而难以通过细观机制解释宏观力学行为。

离散元法将散体介质独立为离散单元体, 通过单元接触判断发生的相互作用, 能较好反映散体材料细观结构方面特征。Ehsan^[14]建立凸多边形的离散元颗粒, 并模拟层理的不同初始角度, 来探索初始各向异性对试样剪切和变形行为的影响。DAI 等^[15]采用三种不同的制样手段制备各向异性试样并进行三轴剪切, 分析了固有各向异性对剪切强度和体积膨胀率的影响机理, 并使用组构张量对土体宏观响应进行表征。Wang 等^[16]通过二维和三维的 DEM 构建出 4 类沉积角试样, 发现颗粒材料的胀缩性与颗粒各向异性和接触法向的演变过程有关。当前离散元研究方法多是将初始和诱发各向异性分开考虑, 本文将二者结合考虑, 研究初始和诱发各向异性对软土宏微观力学响应的共同影响。通过构建实际形状的软土颗粒模型, 制备初始和诱发各向异性试样, 进行双轴剪切试验, 分析了各向异性对宏观力学性质的影响, 并通过颗粒接触形式、配位数和接触法向各向异性等细观层面影响宏观力学差异的机理进行探讨, 以期丰富细观土力学的理论。

1 颗粒形状统计与构建

室内试验土样取自深圳大鹏新区海域工程现场, 土体呈深黑色, 属于高液限黏土^[17], 其外形多呈片状结构, 颗粒间的接触方式以边-面、面-面接触为主。在离散元程序中基本单位为标准的圆盘, 无法真实反映颗粒的实际形状与接触方式。基于此, 本文在考虑形状因素的基础上, 建立真实颗粒以反应宏观力学性质, 具体步骤如下: ①采用 PCAS 图像处理软件对原状软黏土的 SEM 图像进行统计分析, 如图 1 所示, 并计算软土颗粒的形状参数; ②对单个颗粒形态进行描述, 选取长宽比 As 作为指标 (定义见图 2), 反映颗粒轮廓的整体形态。绘制软土颗粒的长宽比累积分布

曲线,如图 2 所示;③基于颗粒实际形状,采用 clump 模拟单颗粒模型,由多个球单元等间距排列为刚性集合体。在低围压下,不考虑颗粒内部的破碎,仅考虑 clump 之间的相互作用,以及颗粒与墙体的接触,以模拟三轴试验中颗粒与橡胶膜的接触行为。

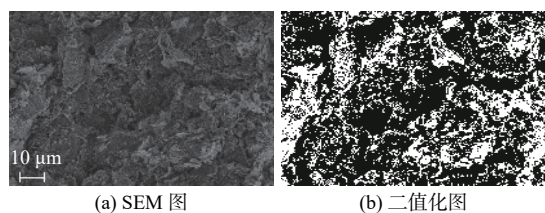


图 1 软土 SEM 图像

Fig. 1 SEM image of soft soil

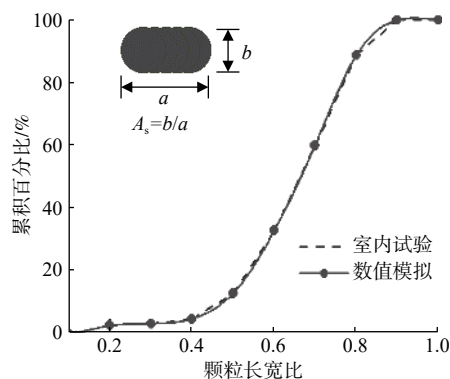


图 2 颗粒形状和长宽比累积分布曲线

Fig. 2 Particle shape and cumulative distribution curve of the aspect ratio

2 试样制备与加载

制备试样具体方案如下:①在高 100 mm、宽 50 mm 的矩形空间中,制备不同长宽比的颗粒,并按长宽比累积曲线分布于矩形空间中,初始孔隙率为 0.2,与 SEM 图片的面积孔隙率一致,颗粒粒径在 4~8 mm 之间均匀分布,且满足边界效应。②制备初始各向异性试样,将颗粒长轴绕水平向旋转 θ 角后,限制颗粒旋转,并在一定时步内施加重力作用,此过程模拟沉积角为 θ 的土样原始沉积。③在矩形空间高 50 mm 处重新生成顶墙,形成边长为 50 mm 的正方形试样,即为所需的加载试样,试样尺寸满足边界效应。卸除重力并解除颗粒旋转限制。④固结过程则向中心缓慢移动四周墙体,等向施加围压进行固结,达到所设定的初始围压并维持平衡。

固结完成后,对试样进行不同方向的加载以模拟诱发各向异性,加载方向设定为水平和竖直两个方

向,当进行水平向加载时,采用伺服机制保持上下端墙体应力恒定,左右端墙体以恒定速率相向运动,加载速率采用 0.01 mm/s,整个过程维持准静态。竖直加载方式则维持左右端墙体应力恒定,利用上下端墙体进行加载。初始围压设为 100, 200, 400 kPa,与室内试验一致。初始试样如图 3 所示。对模型局部放大,可反映出颗粒的 3 种接触方式:红色代表面面接触,蓝色代表边面接触,绿色代表边边接触(图 3)。

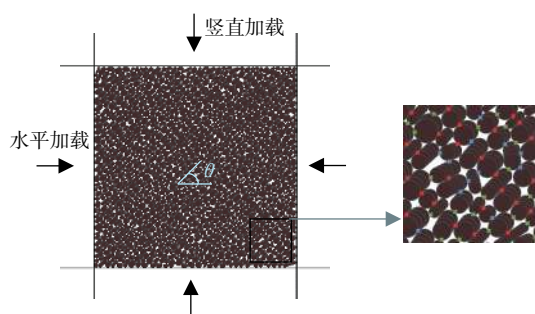


图 3 数值模型加载方式及颗粒接触方式

Fig. 3 Numerical model loading mode and particle contact mode

3 细观参数标定

为模拟软土颗粒之间的接触强度和黏结强度特性,选用线性接触黏结模型作为颗粒接触法则,并通过室内三轴剪切试验(固结不排水剪)进行参数标定,采用初始各向同性试样(iso)的竖向加载进行离散元模拟,不断调整参数至模拟结果与室内试验的拟合程度达到最佳,数值模型的力学参数标定结果如表 1 所示。数值模拟和室内试验的应力应变曲线如图 4 所示。由图 4 可知,本文基于真实颗粒形态建立的数值试样与室内试验结果具有较好的一致性,在此基础上进行针对初始和诱发各向异性的三轴试验研究。

表 1 数值模型参数

Table 1 Parameters used in the numerical model				
有效模量 E/MPa	刚度比 k	摩擦系数 μ	阻尼系数	颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
1	1	0.03	0.7	2 700

4 宏观力学结果

软土真空预压联合堆载工程中,主要存在 2 个方向的荷载,一类是竖向堆载,另一类为水平向吸力。数值模拟过程中,将考虑竖直方向和水平方向作为荷载方向,设置 5 组沉积角($0^\circ \sim 10^\circ$ 、 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、 $60^\circ \sim 70^\circ$ 、 $80^\circ \sim 90^\circ$),用于模拟软土颗粒的 5 类沉积方向。开展三轴试验模拟,应力应变曲线如图 5 所示。

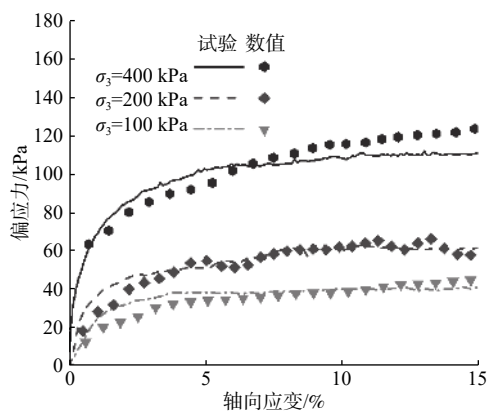
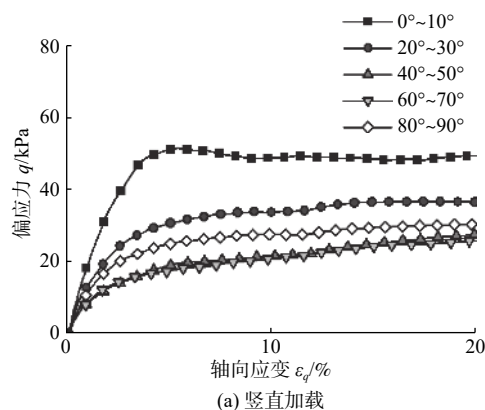
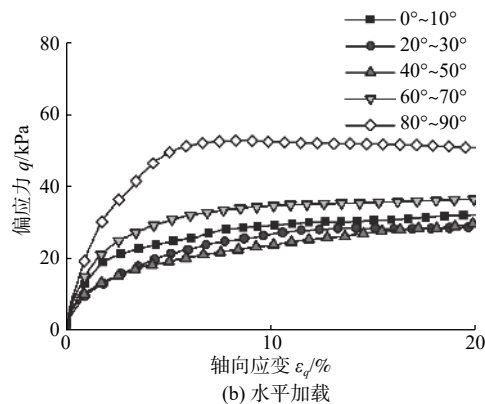


图 4 数值试验与室内试验应力应变曲线

Fig. 4 Stress and strain curves of the numerical and laboratory tests



(a) 竖直加载



(b) 水平加载

图 5 不同沉积角下偏应力与轴向应变关系

Fig. 5 Relationship between the deviator stress and axial strain of the different deposition angles

初始各向异性试样在两类加载方向下, 偏应力随轴向应变的演化过程既具有相似规律, 也存在显著差异之处。相似规律: 加载初期偏应力随轴向应变的增大迅速增大, 约在 5% 轴向应变处相对变缓; 加载后期偏应力增大趋势逐渐平缓, 达到峰值应力并最终维持恒定, 曲线整体呈应变硬化型。显著差异: 竖直加载中 (图 5a), 颗粒沉积角为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 时的峰值应力最大, 而

水平加载中 (图 5b), 沉积角为 $80^\circ \sim 90^\circ$ 时的峰值应力最大。即偏应力大小不仅限于受加载类型的影响, 而且取决于颗粒沉积方向与加载方向的关系。当颗粒沉积方向与加载方向垂直时, 试样峰值应力可达到最大值, 即试样表现更大的抗剪强度。可见, 软土宏观力学性质受初始各向异性和诱发各向异性的影响显著。当加载方向相同时, 颗粒沉积方向与加载方向垂直的试样抗剪强度更高, 而同一沉积角试样在不同方向下加载, 达到的抗剪强度也不同。软土固结过程中, 若全程采用真空预压, 含量较高的黏土颗粒沉积角较大, 土样抗剪强度不能有效增加。因此, 软土工程后期多采用真空联合堆载, 堆载的竖直方向与颗粒沉积角更接近 90° , 可以进一步提高软土抗剪强度。

图 6 为当轴向应变为 15% 时对应的试样偏应力为峰值应力统计值。当试样为横向沉积 $0^\circ \sim 10^\circ$ 和轴向沉积 $80^\circ \sim 90^\circ$ 时, 加载方向对峰值应力影响最显著, 而当沉积角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时影响最小, 与各向同性试样最为接近。当加载方向相同时, 相对于各向同性 (iso) 试样峰值应力变化原因为试样的初始各向异性, 沉积角与加载方向垂直时, 所产生的峰值应力会远远大于各向同性试样。而沉积角与加载方向一致时, 峰值应力则小于各向同性试样。软土固结过程前, 充分搅拌或者沉积的工法更有利于形成各向异性的土体, 也更利于固结后抗剪强度增加。

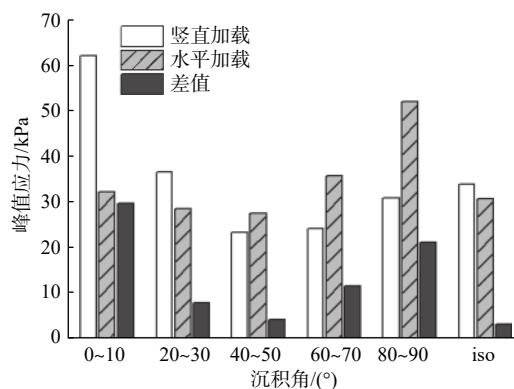


图 6 峰值应力及差值

Fig. 6 Peak stress and difference

各向异性软土的力学特性与微观组构的演化过程密切相关, 朱楠等^[18]通过室内微观试验对比不同地区软土工程特性, 表明颗粒接触方式的不同是软土工程性质差异的主要原因。在此基础上, 本文针对三轴试验中颗粒接触方式的演化过程进一步研究, 发现在单一周围压力加载条件下, 接触方式对力学性质的影响不仅体现在某一临界状态, 而且体现在加载的全过程。

已从实验模拟和工程实践角度分析了沉积角和加载方向对宏观力学特征的影响,为体现剪切过程颗粒接触形式的变化特征,下面从细观角度进行分析。

5 细观机理分析

5.1 颗粒面面接触及颗粒转角

对颗粒长轴 a 、短轴 b 及枝向量 l 进行统计,本次模拟中颗粒接触类型包括边边接触、边面接触和面面接触,其判断方式如图 7 所示。面面接触系数 P 可定义为面面接触数占总接触数的比例,即为:

$$P = \frac{C_1 - C_0}{C} \quad (1)$$

式中, C_1 ——面面接触数;

C_0 ——初始面面接触数;

C ——总接触数。

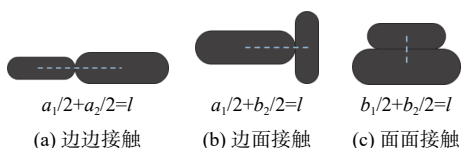


图 7 颗粒接触形式及判别方法

Fig. 7 Particle contact form and the discriminant method

基于离散元模拟结果,图 8 显示了面面接触系数 P 随轴向应变的演化过程。在剪切初期,颗粒通过平移、旋转等方式调整自身位置,大量接触形式由边边、边面接触转化为面面接触,因此颗粒接触形式中的面面接触形式迅速增加,并在偏应变约 5% 时达到峰值,此变化趋势与试样应力应变具有一致性,说明剪切初期面面接触形式能有效增加试样初始模量。剪切后期,颗粒接触基本稳定,面面接触系数受初始各向异性影响较大,随轴向应变呈现增长趋势,并在剪切末期逐渐稳定。

在加载过程中,不同初始各向异性对应的面面接触系数曲线形状相似但具有不同的初始斜率和峰值状态,且与应力应变曲线形态一致,说明面面接触对力学性质的影响不仅作用在初始状态^[18],也作用于整个加载过程。

基于离散元试验结果,对不同形状的颗粒达到峰值应力时的转角进行统计,以 $40^\circ \sim 50^\circ$ 沉积角试样为例,结果如图 9 所示。在二维平面中颗粒长宽比越小,形状更为细长,颗粒转动惯量越大,在加载过程中受阻力越大而难以发生偏转,这与 Marschall 等^[19]、袁斌等^[20] 研究结论一致。因此初始各向异性试样在二

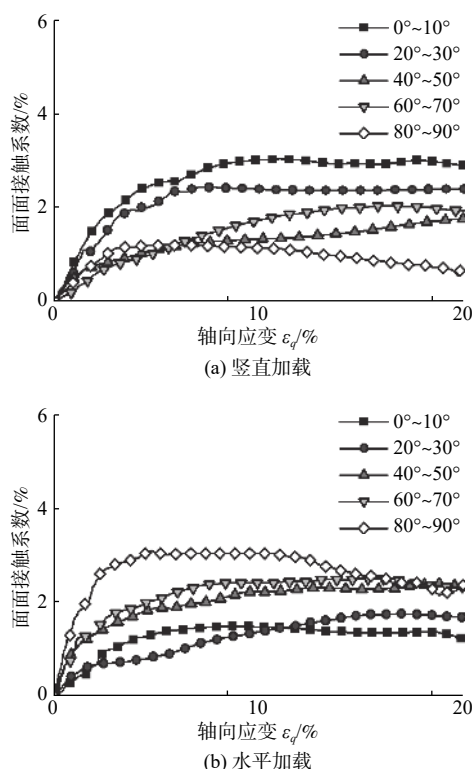


图 8 不同沉积角下面面接触系数与轴向应变关系

Fig. 8 The relationship between surface contact coefficient and axial strain of the different diposition angles

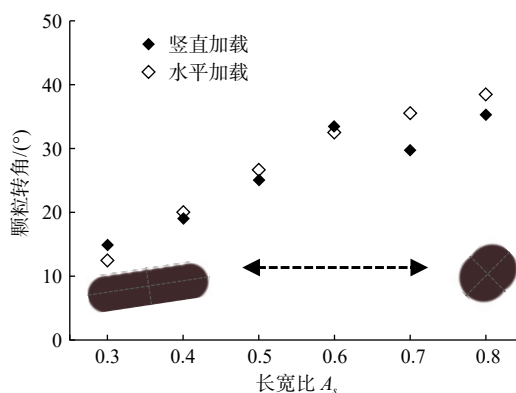


图 9 沉积角 $40^\circ \sim 50^\circ$ 试样颗粒长宽比与转角关系

Fig. 9 Relationship between the aspect ratio and angle of the sample with diposition angle $40^\circ \sim 50^\circ$

维加载中,颗粒发生转动从而改变颗粒的接触形式,最终影响峰值应力。

5.2 配位数演化规律

离散元模拟过程中,可参考配位数反映试样在加载过程中的密实程度。配位数越高,颗粒之间的相互连接越紧密。配位数定义为^[21]:

$$Z = \frac{2C}{N} \quad (2)$$

式中: C ——总接触数;

N ——总颗粒数。

配位数 Z 随加载过程的变化曲线如图 10 所示。竖直加载和水平加载两种加载方式下, 配位数呈现相似趋势。当颗粒沉积方向与加载方向一致, 即竖直加载沉积角为 $80^\circ \sim 90^\circ$ (图 10a) 和水平加载沉积角为 $0^\circ \sim 10^\circ$ (图 10b) 时, 配位数随轴向应变先迅速增加至峰值, 后稍有减小至稳定。说明试样密实程度提高, 颗粒定向排列而未发生大的偏移, 相互作用更加紧密。

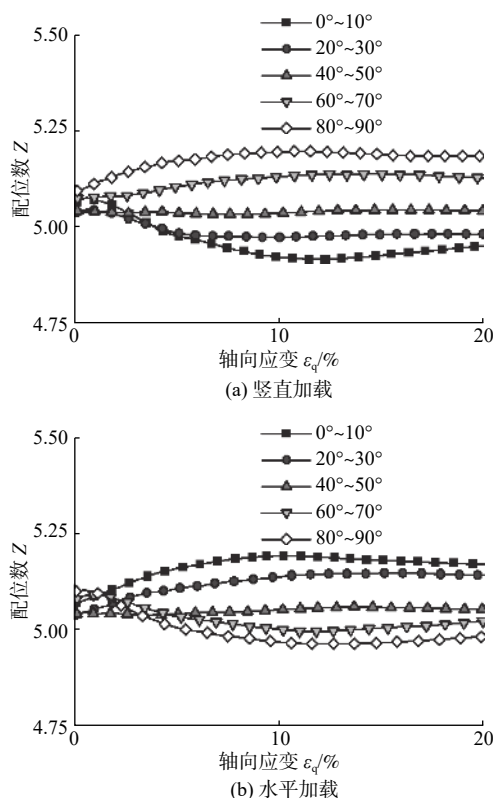


图 10 不同沉积角下配位数与轴向应变关系

Fig. 10 Relationship between the coordination and axial strain of the different disposition angles

由图 10 可知, 当沉积方向与加载方向一致时, 配位数先减小后逐渐增加到稳定状态, 反映出颗粒在加载初期发生大幅偏转, 周边孔隙增大, 密实度减少, 颗粒接触形式在此期间发生调整, 最终达到以面面接触形式为主, 势能减小至稳定。可见初始各向异性会诱发各向异性会通过改变颗粒接触形式, 影响试样的密实程度, 从而影响试样力学性质。

5.3 接触法向各向异性演化规律

颗粒材料的接触法向定义为颗粒之间接触方向的单位向量, 反映颗粒接触基本特征, 其空间分布可用组构张量进行定量表征。接触法向可用二阶张量

F_{ij} 表示为:

$$F_{ij} = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^C n_i^k n_j^k \quad (3)$$

式中: n^k ——接触 k 处的单位接触法向量。

已有研究表明, 接触法向各向异性程度是试样强度的决定性因素, 接触法向各向异性可用最大、最小主分量比值确定^[10], 即:

$$A_m = F_{11}/F_{22} \quad (4)$$

当 $A_m=1$ 时, 代表各向同性结构。如图 11(a) 所示, 竖直加载过程中, 相同轴向应变时, 沉积角越大, A_m 越大, 且在加载初期下降趋势更明显。而水平加载演化规律则相反, 沉积角越小, A_m 越小, 见图 11(b)。两者结合可知, 当颗粒沉积方向与加载方向越接近, 接触法向各向异性越大。随加载进行, 颗粒长轴方向逐渐趋于与加载方向垂直, 并通过增加面面接触比例增大其定向性。剪切后期, 颗粒接触形式以稳定面面接触为主, 接触法向各向异性也达到稳定阶段。

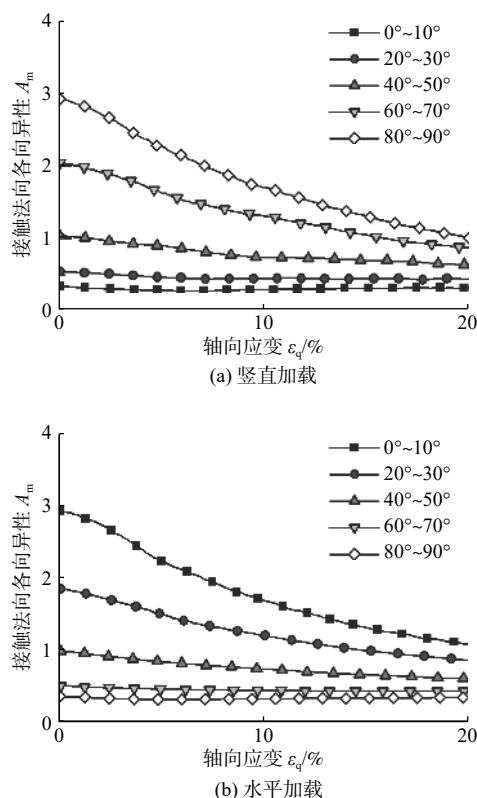


图 11 不同沉积角下接触法向各向异性与轴向应变关系

Fig. 11 Relationship between the contact normal anisotropy and axial strain of the different angles

6 抗剪强度指标影响规律

对各试样分别在 100, 200, 400 kPa 围压下进行三

轴试验, 获得试样在不同围压下的抗剪强度, 通过摩尔库伦定律 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$, 求得各向异性试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 结果如表 2 所示。

表 2 不同沉积角试样的抗剪强度指标
Table 2 Shear strength indices of the samples with different deposition angles

沉积角/ $^{\circ}$	竖直加载		水平加载	
	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
0~10	7.10	8.95	7.12	5.31
20~30	7.40	6.13	7.50	4.21
40~50	7.03	4.11	6.74	3.82
60~70	7.47	4.36	7.28	5.69
80~90	6.78	5.50	7.21	9.22
iso	4.47	6.09	4.33	6.01

黏聚力随沉积角的变化如图 12 所示, 5 种不同沉积角试样的黏聚力分布在 6.7~7.5 kPa 之间, 较初始各向同性试样的黏聚力提高 50%~67%, 可见初始各向试样由于面面接触比例较高, 颗粒间接触面积更大而产生更强的黏结作用, 因而在宏观上表现为更大的黏聚力。另一方面, 加载方式对试样黏聚力的影响不明显, 可见诱发各向异性对试样黏聚力的影响不大。

内摩擦角随沉积角的变化情况如图 12 所示, 2 种加载方式下, 沉积角为 40°~50°时试样的内摩擦角最低, 与各向同性试样相比减小了 51%, 而沉积角方向

与加载方向一致时, 内摩擦角最高, 与各向同性试样相比增加了 46%。同时, 沉积角为 40°~50°的试样, 在不同加载方式下内摩擦角较接近, 而沉积角越偏离此区间, 加载方式对内摩擦角的影响越大。表明初始和诱发各向异性主要通过改变试样内摩擦角对试样宏观力学性质造成影响。

7 结论

(1) 软土的宏观力学性质受初始各向和诱发各向异性特性影响。同一沉积角试样, 当加载方向不同时, 抗剪强度差异显著; 颗粒沉积方向与加载方向垂直时, 试样固结后的抗剪强度更高。这为软土固结工程中的加载方式选择提供了理论支持。

(2) 随着加载进行, 颗粒接触形式由边边、边面接触逐渐转化成面面接触。颗粒长宽比越小, 颗粒越难发生转动。沉积角与加载方向夹角越大, 面面接触比例越大, 试样具有更高的峰值应力。

(3) 初始各向异性和诱发各向异性通过影响颗粒接触形式, 使试样细观结构变化, 可通过配位数和接触法向各向异性等指标有效表征。

(4) 加载方向一定, 颗粒沉积角对内摩擦角的影响明显, 且沉积方向与加载方向垂直时, 内摩擦角最大。而不同沉积方向试样的黏聚力差别不明显, 但均高于各向同性试样。

参考文献 (References):

- [1] 张坤勇, 殷宗泽, 梅国雄. 土体两种各向异性的区别与联系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1599-1604. [ZHANG Kunyong, YIN Zongze, MEI Guoxiong. Difference and connection of two kinds of anisotropy of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1599-1604. (in Chinese with English abstract)]
- [2] ODA M, KOISHIKAWA I, HIGUCHI T. Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test[J]. Soils Foundation, 1978, 18(4): 25-38.
- [3] SIDDIQUEE M S A, TATSUOKA F, TANAKA T, et al. Model tests and FEM simulation of some factors affecting the bearing capacity of a footing on sand[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(2): 53-76.
- [4] ZHANG F, CUI Y J, ZENG L L, et al. Anisotropic features of natural Teguline clay[J]. Engineering Geology, 2019, 261: 105275.
- [5] ROUAINIA M, MUIR WOOD D. A kinematic hardening

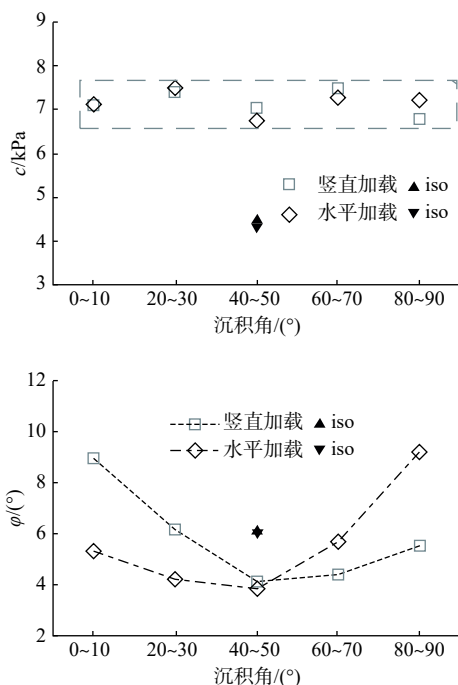


图 12 各向异性对抗剪强度的影响规律

Fig. 12 Effects of anisotropy on shear strength

- constitutive model for natural clays with loss of structure[J]. *Geotechnique*, 2000, 50(2): 153 – 164.
- [6] 曾玲玲, 陈晓平. 软土在不同应力路径下的力学特性分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1264 – 1270. [ZENG Lingling, CHEN Xiaoping. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1264 – 1270. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘恩龙, 沈珠江. 不同应力路径下结构性土的力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2058 – 2064. [LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2058 – 2064. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘嘉英, 周伟, 马刚, 等. 颗粒材料三维应力路径下的接触组构特性[J]. *力学学报*, 2019, 51(1): 26 – 35. [LIU Jiaying, ZHOU Wei, MA Gang, et al. Contact fabric characteristics of granular materials under three dimensional stress paths[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 26 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王清, 孔元元, 张旭东, 等. 结构性土体固结压力的力学效应[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(5): 987 – 994. [WANG Qing, KONG Yuanyuan, ZHANG Xudong, et al. Mechanical effect of pre-consolidation pressure of structural behavior soil[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(5): 987 – 994. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王清, 王凤艳, 肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(2): 148 – 153. [WANG Qing, WANG Fengyan, XIAO Shufang. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its application to the engineering[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(2): 148 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [11] SUN Q, ZHENG J X. Two-dimensional and three-dimensional inherent fabric in cross-anisotropic granular soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 116: 103197.
- [12] 顾迪, 严学新, 张云, 等. 上海黏土压缩回弹变形的微观机理[J]. *水文地质工程地*, 2020, 47(4): 123 – 131. [GU Di, YAN Xuexin, ZHANG Yun, et al. Micro-mechanism of compression and rebound of clay in Shanghai[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 123 – 131. (in Chinese with English abstract)]
- [13] BAYESTEH H, MIRGHASEMI A A. Numerical simulation of porosity and tortuosity effect on the permeability in clay: Microstructural approach[J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(5): 1158 – 1170.
- [14] SEYEDI HOSSEININIA E. Discrete element modeling of inherently anisotropic granular assemblies with polygonal particles[J]. *Particuology*, 2012, 10(5): 542 – 552.
- [15] DAI B B, YANG J, ZHOU C Y, et al. DEM investigation on the effect of sample preparation on the shear behavior of granular soil[J]. *Particuology*, 2016, 25: 111 – 121.
- [16] WANG R, CAO W, ZHANG J M. Dependency of dilatancy ratio on fabric anisotropy in granular materials[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2019, 145(10): 04019076.
- [17] 宋晶, 王清, 夏玉斌, 等. 真空预压处理高黏粒吹填土的物理化学指标[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1476 – 1480. [SONG Jing, WANG Qing, XIA Yubing, et al. Physical and chemical indicators of dredger fill with high clay by vacuum preloading[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1476 – 1480. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 朱楠, 刘春原, 王文静, 等. 衡水湖地区湿地湖泊相黏土工程地质特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 125 – 132. [ZHU Nan, LIU Chunyuan, WANG Wenjing, et al. Investigation of engineering geological characteristics of the marshy and lacustrine clays in the Hengshui Lake area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 125 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [19] MARSCHALL T A, TEITEL S. Athermal shearing of frictionless cross-shaped particles of varying aspect ratio[J]. *Granular Matter*, 2019, 22(1): 1 – 13.
- [20] 袁斌, 霍宇翔, 巨能攀, 等. 颗粒棱角指标的改进及其对剪切特性的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 167 – 173. [YUAN Bing, HUO Yuxiang, JU Nengpan, et al. Improvement of grain edge index and its effect on shear characteristics[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 167 – 173. (in Chinese with English abstract)]
- [21] GONG J, NIE Z H, ZHU Y G, et al. Exploring the effects of particle shape and content of fines on the shear behavior of sand-fines mixtures via the DEM[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 106: 161 – 176.