

倪嘉楠,洪勇,姜奕辰,等. 基于离散元方法的黏性土剪切特性细观机理. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(1): 223 - 232. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230116.

Ni Jianan, Hong Yong, Jiang Yichen, et al. Mesoscopic Mechanism of Clay Shear Properties Based on Discrete Element Method. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 223 - 232. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230116.

基于离散元方法的黏性土剪切特性细观机理

倪嘉楠,洪 勇,姜奕辰,于 超,贺可强,李 亮

青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266525

摘要:为了研究黏性土在剪切过程中的细观剪切力学特性,结合室内试验结果和离散元模拟方法对粉质黏土剪切力学性质进行了细观机理分析。首先基于室内试验的结果,通过建立符合黏性土剪切试验特征的 PFC^{2D} 模型,对剪切过程中黏性土和砂土的一些细观参数进行比较分析;然后对黏性土在不同剪切阶段细观应力、细观变形以及细观位移进行分析,并从细观角度分析了试样的宏观剪切力学特性。结果表明:黏性土中的剪切应力主要是由颗粒之间的力链提供的,黏性土的颗粒较小,力链较细,所提供的承载力也较小,黏性土力链最大承载力仅约为 0.77 kN,而标准砂可以达到 1.75 kN;超固结状态下的黏性土在进行剪切时具有明显的应变软化现象,这一现象与颗粒的定向排列以及颗粒之间的强力链数量减少有关;在剪切过程中黏性土中部配位数减少了 1.70,这是由于黏性土颗粒发生偏移,颗粒之间的接触形成拱状结构,也导致了孔隙率增大,使得黏性土的体积应变增大;黏性土在剪切过程中,颗粒位移等值线在模型的中部 PFC^{2D} 模型形成近似菱形的区域,并且黏性土在剪切破坏时形成的剪切带是一条相对位移基本一致的狭长条带。

关键词:黏性土;砂土;离散元;体积应变;孔隙率;剪切带;PFC^{2D} 模型

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230116

中图分类号:P59

文献标志码:A

Mesoscopic Mechanism of Clay Shear Properties Based on Discrete Element Method

Ni Jianan, Hong Yong, Jiang Yichen, Yu Chao, He Keqiang, Li Liang

School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, Shandong, China

Abstract: In order to study the micro shear mechanical properties of clay during the shear process, a micro mechanism analysis of the shear mechanical properties of this silty clay was conducted using laboratory test results and discrete element simulation methods. Based on the results of experiments, a PFC^{2D} model that conforms to the shear test characteristics of clay was established to compare and

收稿日期:2023-05-08

作者简介:倪嘉楠(1998-),男,硕士研究生,主要从事土体剪切力学性质方面的研究,E-mail:1006074308@qq.com

通信作者:洪勇(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土力学和地质灾害方面的研究,E-mail:hongyong@qut.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41572259,41272341)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41572259,41272341)

analyze some micro parameters of clay and sand during the shear process. Then micro stress, micro deformation, and micro displacement of clay at different shear stages were analyzed, and the macroscopic shear mechanical properties of the sample were analyzed from a micro perspective. The results show that the shear stress in clay is mainly provided by the force chain between particles. The particles in clay are smaller and the force chain is finer, resulting in a lower bearing capacity. The maximum bearing capacity of the force chain in clay is only about 0.77 kN, while standard sand can reach 1.75 kN. Under the condition of overconsolidation, clay exhibits significant strain softening during shearing, which is related to the directional arrangement of particles and the reduction in the number of strong chains between particles. During the shearing process, the middle coordination number of the clay decreased by 1.70, which is due to the displacement of the clay particles, and an arch like structure between the particles were formed to increase the porosity, which results in an increase in the volumetric strain of the clay. During the shearing process of clay, the contour lines of particle displacement form an approximately diamond shaped area in the middle region of the PFC^{2D} model, and the shear band of clay is a narrow strip with relatively consistent displacement when sheared.

Key words: clay; sand; discrete elements; volumetric strain; porosity; shear band; PFC^{2D} model

0 引言

黏性土作为一种在各项工程建设当中常见的土工材料,其剪切力学特性一直是岩土和工程地质领域的重要研究课题。目前相关研究主要是利用直剪试验、三轴试验、平面应变试验等方法对黏性土的宏观剪切力学特性进行分析,尚缺少对其剪切时土体细观力学特性的研究。

相较于有限单元法、有限差分法、边界元法等传统的数值分析方法^[1],离散单元法将岩土体视为由球体(ball)组成,通过运用力-位移法则和牛顿第二定律来研究每一个球体的受力和运动,进而从细观的层面来分析研究岩土体的力学性质变化。

目前,颗粒流(PFC)已经成为研究土体细观特性最常用的方法之一,并广泛应用于砂土、黏性土和岩石等的细观性质研究当中。国内外学者通过颗粒流软件对土的力学性质进行了一系列的研究,其中:周健等^[2]使用颗粒流软件模拟了砂土的双轴试验,基本再现了砂土室内双轴试验的应力-应变关系曲线的特征;罗勇^[3]首次尝试用 PFC 模拟基坑开挖的动态过程,模拟研究了颗粒排列成不同空间结构的力学性状和三轴砂土的应力-应变关系曲线;刘红帅等^[4]采用抗转动线性接触模型模拟砂土三轴压缩试验,并使用正交-响应面法对其进行了细观参数标定;周博等^[5]借助颗粒流软件对黏性土类样本开展了大量平面双轴压缩试验;高彦斌等^[6]通过对黏性

土模拟提出了土体内各向异性的存在;程升等^[7]对南海软黏土进行了剪切变形离散元模拟,探究了土体发生破坏时剪切带内的应变;Chen 等^[8]通过对不同颗粒形状的砂土直接剪切性能的离散元模拟,研究了砂粒球形度对砂土剪切性质的影响;Thornton^[9]利用 PFC 对砂土进行了模拟,阐明了颗粒间摩擦对宏观和微观力学行为的影响;陈建锋等^[10]采用接触黏结模型并依据颗粒流中的 bond 原理对黏性土双轴试验进行了模拟,通过宏细观关系,得到了上海第②层褐黄色粉质黏土细观参数。

上述研究虽对揭示土体细观力学特性具有积极的推动作用,但是对于黏性土在剪切过程中剪切力学特性细观机理的研究尚少。目前在基坑开挖及地下工程建设中发生的边坡失稳、滑坡等不良地质现象常伴随着黏性土体的剪切变形破坏,因此研究黏性土剪切力学性质的细观机理具有十分重要的研究意义。

本文在国内外对于砂土、土石混合体以及岩石等剪切力学性质研究的基础上,主要针对颗粒间具有黏结作用的黏性土剪切力学特性进行颗粒流数值模拟研究。首先通过 PFC^{2D}建立黏性土的直剪试验数值模型,然后结合室内试验的数据,通过对黏性土和砂土模拟结果进行比较分析,对黏性土在不同剪切过程中的剪切力学特性及其力链、配位数、孔隙率和颗粒位移等细观参数进行研究,以期从细观角度揭示其宏观力学特性的本质。

1 数值模拟

1.1 试样选取及室内试验

本项研究所用土样取自长春市内伊通河西部洪积波状平原,取样深度距地表约 7 m。土体矿物成分以石英、伊利石、蒙脱石为主,宏观结构呈紧密块状结构。天然土体内孔隙发育,具有较好的透水性。土体粒组成分中,粒径为 0.007 5~0.05 mm 的粉质颗粒质量分数约 80.79%,粒径<0.007 5 mm 的黏粒质量分数约 17.50%,平均粒径为 0.02 mm。其物理性质指标见表 1。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)^[11],该类土属于粉质黏土。为了更好地分析黏性土的剪切力学特性,本文也对标准砂试样进行了模拟,并与黏性土数值模拟的结果进行了比较分析。标准砂数值模拟试验的对象为中国 ISO 标准砂,由筛分法测得其级配曲线如图 1 所示,通过级配曲线及室内试验可知其物理性质如表 2 所示。

表 1 黏性土样基本物理性质指标						
Table 1 Basic physical properties of clay						
含水率/ %	相对 密度	孔隙比	液限/ %	塑限/ %	液性 指数	塑性 指数
17.75	2.69	0.69	29.9	17.11	12.79	0.05

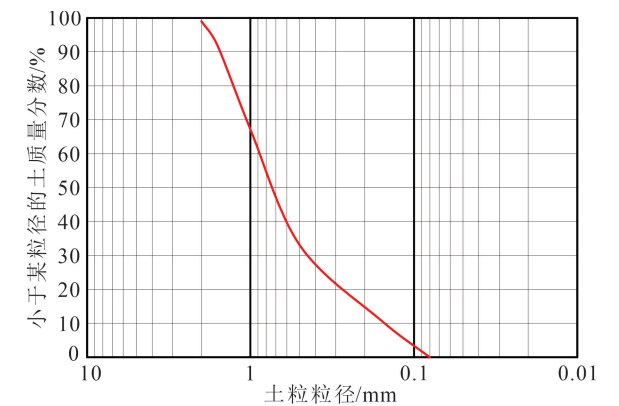


图 1 标准砂级配曲线
Fig.1 Gradation of sand

本项研究按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[12]对所取试样进行了剪切试验。本次试验采用重塑土,为了探究黏性土在剪切过程中出现的应变软化现象,需要使土样处于超固结状态,具体试验步骤如下:首先对取回的试样用烘箱以

105 ℃ 的温度进行 24 h 以上的烘干碾碎,完全干燥后碾碎并过 2 mm 筛;然后加水拌和均匀,密封放置使其充分饱和,将试样调配成饱和土样。

表 2 标准砂基本物理性质指标									
Table 2 Basic physical properties of sand									
相对 密度	最大孔 隙比	最小孔 隙比	D_{60} / mm	D_{50} / mm	D_{30} / mm	D_{10} / mm	不均匀 系数	曲率 系数	
2.71	0.66	0.39	0.66	0.50	0.24	0.11	5.991	1.006	

注: D_{10} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 分别为样品中累积质量分数达到 10%、30%、50%、60% 时对应的粒径。

为了使土样达到超固结状态,首先需要让土样在给定的前期固结压力(PCP)下固结稳定,本次试验的前期固结压力设为 350 kPa,该固结压力由试验仪器的加载能力来设定。待土体固结完成之后,卸载其法向应力使其小于前期固结压力而达到超固结状态。根据其前期固结压力将其正应力设为 200、100、50 kPa。当土体在卸载后法向应力的作用下稳定之后,对在不同固结压力下的试样分别进行剪切速率为 1 mm/s 的不排水剪切试验,待剪切位移到达 5 mm 时停止试验,试验结果见图 2。

1.2 数值模型建立

本文在室内试验的基础上,利用颗粒流数值模拟软件(PFC^{2D})建立黏性土直剪试验数值模拟模型。模型建立步骤为:1)创建与室内剪切试验相似的剪切盒,在剪切盒内生成颗粒,然后对颗粒和边界赋予相应的参数,如摩擦系数、黏结力、刚度比、弹性模量等参数。2)借助 PFC 程序中的 FISH 函数对试样施加竖向荷载,并对试样进行伺服控制。在此过程中通过不断调用伺服函数来模拟室内试样中施加的竖向荷载。3)保持竖向荷载不变,在剪切盒下盒沿 x 方向按一定速率施加恒定剪切力进行剪切试验模拟。

模拟过程中黏性土试样尺寸参照实际直剪试验中试样的尺寸来确定。室内试验采用的粉质黏土主要由黏粒和粉粒组成。由于其粒径非常小,如果在数值模拟时使用实际尺寸的话将会导致整个模型中颗粒的数量非常多,这会极大降低计算效率。已有研究^[13]表明,在颗粒流模拟中,相比于颗粒间的接触黏结强度及摩擦系数而言,颗粒的尺寸对土体宏观特性的影响要小很多。Jensen 等^[14]曾在砂土结构面相互作用模拟时提出,当 $L/d \geq 30$ 时(其中, L 为

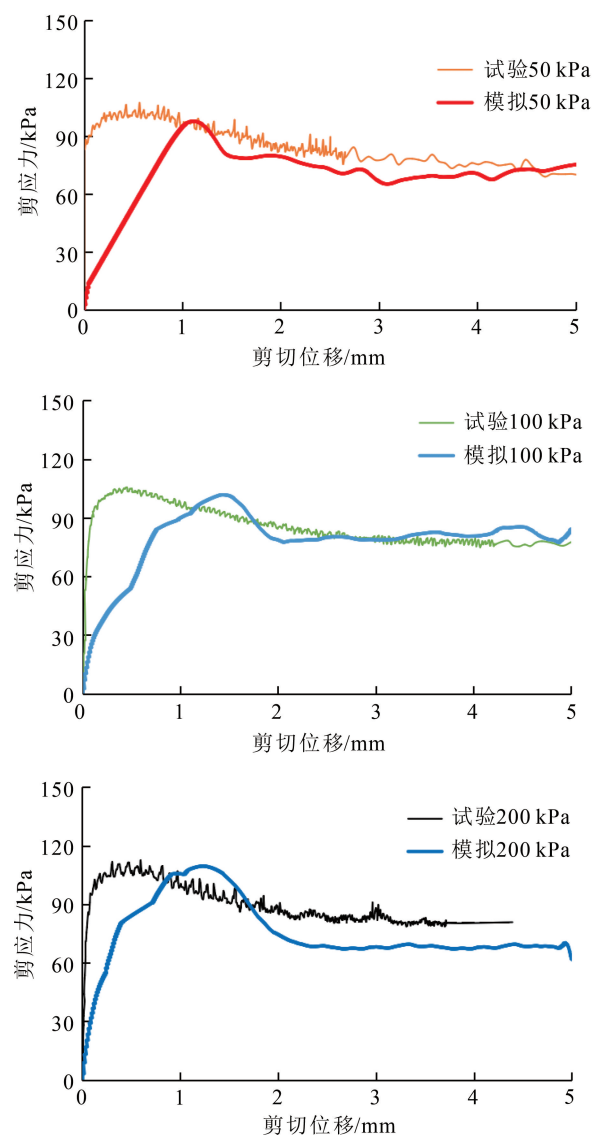


图 2 黏性土在数值模拟与室内试验剪切应力-剪切位移曲线对比

Fig.2 Comparison of shear stress-shear displacement curves of clay between numerical simulation test and laboratory test

数值试样外观尺寸, d 为颗粒的平均粒径), 可以忽略尺寸效应的影响。在建立模型的过程中, 孔隙率也是一个关键的因素, 它可以直接影响土体的力学性能。在 PFC^{3D} 中, 可以直接使用在室内试验中测得的孔隙率, 但是二维的面积孔隙率完全不同于三维的体积孔隙率, 本文采用 Wang 等^[15] 提出的抛物线方程来进行三维到二维的孔隙率转换, 方程如下:

$$n_{2D} = 0.42 n_{Lab}^2 + 0.25 n_{Lab}。$$

式中: n_{2D} 为二维孔隙率; n_{Lab} 为室内孔隙率。

综上, 在综合计算效率和计算误差的基础上, 本次直剪试验数值模拟最终选择粒径在 0.15 ~ 0.30 mm 之间以 0.16 的孔隙率随机分布的颗粒, 共包含 9 380 个颗粒。数值模拟试验的剪切速率取与室内试验相同的 1 mm/s。

本研究中的接触模型选择线性接触黏结模型 (linear contact bond model)。线性接触黏结模型通过接触键使颗粒和颗粒、颗粒和边界相结合。接触键是一对弹性弹簧, 其具有恒定的法向刚度和剪切刚度, 并且给定法向黏结力和切向黏结力。如果法向力超过法向黏结力, 则黏结断裂, 法向力和剪切力均为 0; 如果剪切力超过切向黏结力, 则黏结断裂, 但接触力不变^[16]。

1.3 黏性土细观参数选取

黏性土细观参数标定是模拟研究中的重要步骤, 但是目前对于黏性土宏观参数与细观参数之间的关系不太明确, 因此多数学者还是通过试错法来确定模型土的细观参数^[17-19]。本文通过不断地改变黏性土模型的有效模量、刚度比、法向切向黏结强度和摩擦系数, 比较数值模拟试验与室内试验的剪应力和剪切位移曲线之间区别, 直到黏性土的应力应变曲线与室内试验相吻合为止。本研究按试错法最终选择的细观参数如表 3 所示。

表 3 黏性土颗粒流数值模拟参数		
Table 3 Numerical simulation parameters of clay		
参数	单位	取值
初始试样高	mm	25
初始试样直径	mm	60
颗粒最小粒径	mm	0.15
颗粒最大粒径	mm	0.30
二维面积孔隙率		0.16
法向墙体刚度	N · m ⁻¹	2 × 10 ⁹
有效模量	Pa	2 × 10 ⁷
颗粒刚度比		1.5
颗粒法向黏结力	N	80
颗粒切向黏结力	N	80
颗粒间摩擦系数		0.7

图 2 为数值模拟与室内试验得到的黏性土剪应力-剪切位移关系曲线。如图 2 所示: 在 50、100、200 kPa 法向应力的作用下, 数值模拟和室内试验的剪切应力-剪切位移曲线的趋势基本相同, 在达到

峰值之后都出现了软化现象;在相同法向应力作用下,黏性土的峰值强度及残余强度大小基本一致。从整体上看,本文采用的离散元数值试验模型可以模拟室内试验,能够反映实际黏性土的力学性质,可以用来模拟黏性土的细观力学性质。

2 数值模拟结果与分析

2.1 细观应力分析

为了更好地分析黏性土剪切特性的细观机理,本文归纳了前人所做的标准砂直剪试验数值模拟^[20],并与黏性土数值模拟的结果进行比较分析。图 3 为法向应力为 300 kPa 时的剪切应力-剪切位移曲线。从图 3 中我们可以看出:标准砂的抗剪强度要明显大于黏性土;黏性土在剪切过程中到达峰值之后出现明显的应变软化现象,最后剪切应力保持在残余强度。下面我们将从细观的角度来分析黏性土和标准砂剪切应力曲线的差异。

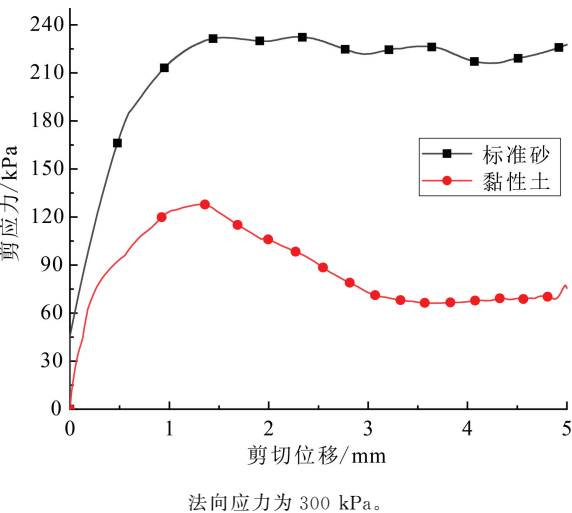


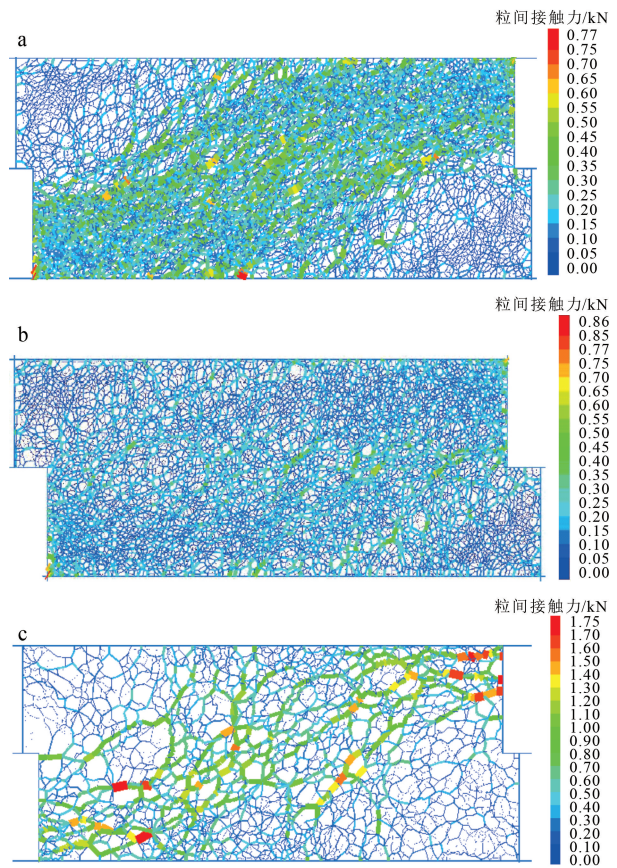
图 3 黏性土与标准砂应力-位移曲线对比
Fig.3 Comparison of stress-strain curves of clay and standard sand

力链是反映颗粒间接触的连线,利用力链可以用来定性描述颗粒间的接触力大小。力链数量可以反映颗粒间接触的密集程度,力链的宽度可以反映颗粒间承载力的大小。力链越粗表示颗粒间的接触力越大,越细则越小。图 4 为黏性土与标准砂在不同剪切阶段的颗粒间力链分布。

通过对比标准砂和黏性土剪切应力在达到峰值强度时产生的力链发现:黏性土的力链间距小(图 4a),力链主要聚集在右上到左下的范围内,密集程

度较高,黏性土形成了更多的力链,但是产生的力链比较细,力链提供的最大承载力约为 0.77 kN,在剪切带内的力链最大承载力仅为 0.65 kN;而标准砂力链的间距大(图 4c),数量少,力链的密集程度较低,但是力链承载力大,最大承载力为 1.75 kN,远大于黏性土力链的承载力。上述模拟结果表明:标准砂颗粒间力链数量少,主力链宽度和承受的剪切力高于黏性土;黏性土颗粒间力链数量多,力链所能承受的剪切力比较小,所能承受黏性土的剪切应力要比标准砂小。此外,观察发现黏性土剪切过程中剪切带范围内的接触力大部分处在 0.40~0.65 kN 的范围内,而剪切带外的接触力明显小于这个范围,这表明土的抗剪强度主要是由剪切带内颗粒之间的接触力提供。

图 4b 为黏性土在达到残余强度时的力链分布。

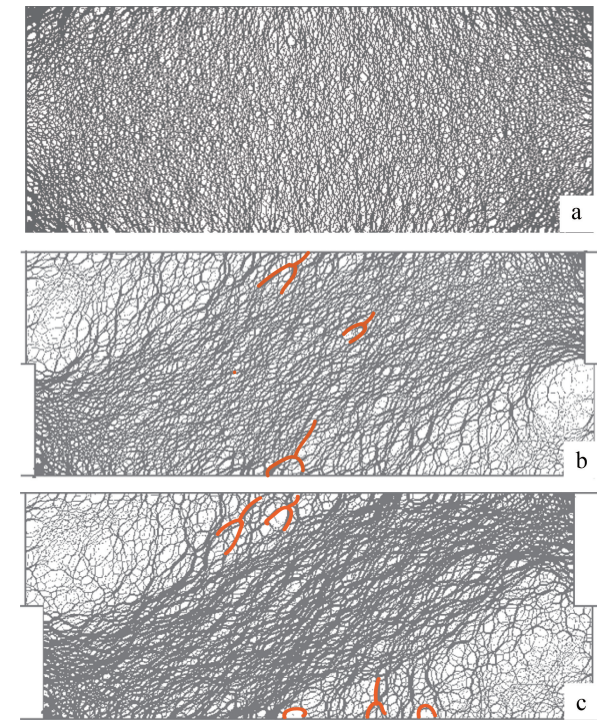


a. 黏性土峰值强度时力链;b. 黏性土残余强度时力链;c. 标准砂峰值强度时力链。

图 4 黏性土和标准砂不同剪切阶段力链分布
Fig.4 Contact force distribution at different shear stages of clay and standard sand

与图 4a 相比,图 4b 黏性土粗力链的数量明显减少,力链所能承受的最大承载力也只为 0.55 kN 左右,模型中的力链多数为细力链。这些力链只承受较小的接触力,使得黏性土在残余阶段的剪切应力小于峰值阶段。产生这一现象的原因在于,在残余剪切阶段土体中产生一个贯通的连续剪切面^[21],此时残余强度主要由接触面之间的滑动摩擦力以及颗粒间的咬合力提供^[22]。

图 5 为黏性土在剪切过程中不同剪切位移下土体力链分布图。剪切开始时(图 5a),力链在法向均匀分布;随着剪切的进行(图 5b),强弱力链在法向的分布越来越不均匀,其中,从右上到左下力链数量增多,表明颗粒间的接触非常密集;随着剪切位移的继续增大(图 5c),从右上到左下部分的力链数量继续增加,表明接触力主要集中在这一区域。随着剪切的进行,可以看到接触网络中出现了拱状结构(图 5b,c);这是由于剪切过程中,颗粒之间的黏结发生断裂,模型中的颗粒重新排列,颗粒之间的位置发生偏移,导致不同颗粒之间形成新的接触,进而力链在模型的内部形成了拱状结构,又被称为应力拱^[23]。此类拱状结构的形成,也会导致土颗粒之间的接触减少。



a. 剪切位移为 0 mm;b. 剪切位移为 1 mm;c. 剪切位移为 2 mm。红线为拱状结构。

图 5 黏性土峰值阶段力链分布

Fig.5 Peak phase force chain distribution of clay

2.2 细观变形分析

2.2.1 体积应变

在剪切过程中,颗粒在边界加载的剪切力作用下处于运动状态,从而使原本排列整齐的颗粒发生相对位移,在宏观上表现为体积应变。在室内试验时无法测得试样的体积应变,但是数值模拟可以很好地解决这一问题。

图 6 为剪切过程中的黏性土和标准砂体积应变变化曲线。其中:黏性土的体积应变随着剪切位移的增大而逐渐增大,体积应变最高到达约 0.7%;在到达峰值之后黏性土的体积应变曲线出现明显的回落,最后保持在 0.4%左右。而标准砂的体积应变随着剪切的进行一直增大,体积应变最终高达 3.86%。经过对比可知,黏性土的体积应变明显小于标准砂,并且黏性土的体积应变曲线在到达峰值后有一段明显的回落。

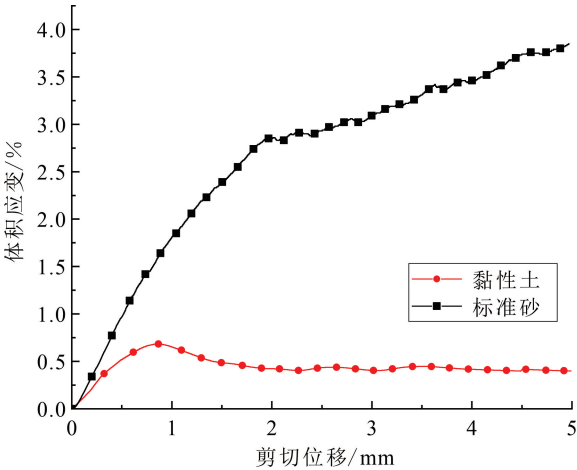


图 6 黏性土和标准砂体积应变-剪切位移曲线

Fig.6 Volumetric strain of clay and standard sand

2.2.2 孔隙率

为了分析黏性土模型内部不同部位土体在剪切过程中体积的细观变化,本文通过 PFC 自带的监测圆监测模拟时模型内部孔隙率的变化情况。

将模型按照宽度分成上中下三部分,每部分细分成三个区域分别布置测量圆(图 7a)。图 7b,c,d 为黏性土在不同剪切阶段各部分孔隙率的分布情况。

图 7b 为剪切开始时模型的孔隙率。在初始孔隙率为 0.16 的条件下,经过预压,模型中间大部分区域的孔隙率处于 0.147~0.150 的范围内,孔隙率分布较为均匀,模型上下边缘的孔隙率最大可以达

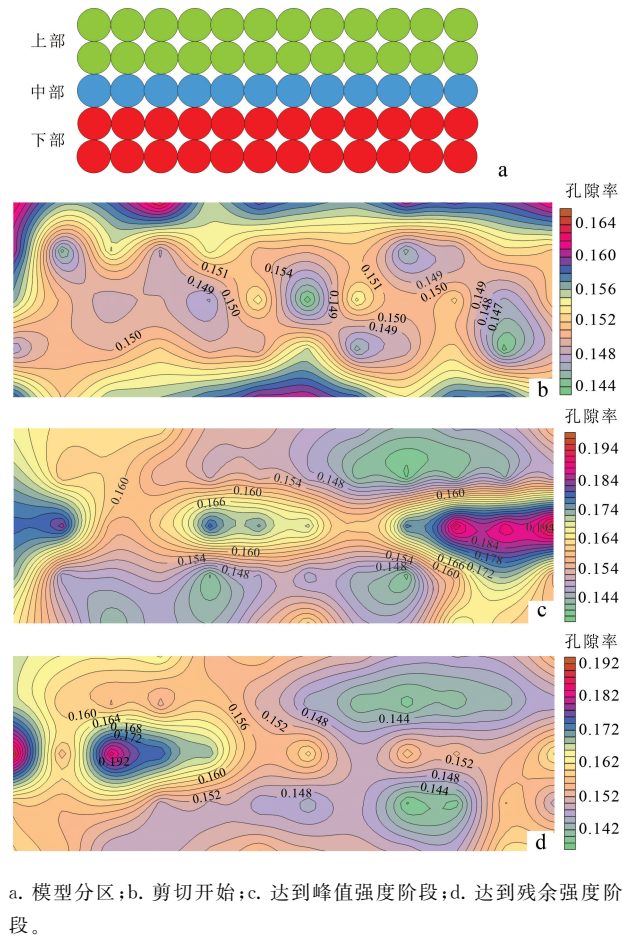


图 7 黏性土不同剪切阶段模型内部孔隙率分布图
Fig.7 Porosity distribution of clay at different shear stages

到 0.164。

图 7c 为达到峰值强度时模型内部孔隙率的分布。从图 7c 可见:在剪切过程中模型内部孔隙率与剪切开始时相比明显增大,并且在剪切带附近形成多个峰值点,孔隙率最大可以达到 0.196;在模拟过程中剪切带主要位于模型中部,随着剪切的进行模型内部孔隙不断增大。这表明剪切过程中发生体积应变的区域主要集中在剪切带附近,并且体积应变与模型内部孔隙率变化有关,孔隙率的增大导致了模型的体积变化。

图 7d 为达到残余强度时黏性土模型内部孔隙率的分布。从图 7d 可以看出:孔隙率比峰值强度时减小,但仍比剪切开始时要大;在剪切面附近形成多个峰值点,孔隙率最大可以达到 0.192,最大值仍出现于模型的中部区域;在剪切过程中孔隙率先增大后减小,但是剪切完成时的孔隙率仍大于初始孔隙率,孔隙率在剪切过程中的变化大致呈现出先变大然后基本趋于稳定的变化趋势。

2.2.3 配位数

配位数是反映土颗粒排列是否紧密、粒间接触数量多少的指标。配位数的变化可以反映土颗粒在剪切过程中重新排列的过程和紧密程度,配位数和粒间接触数量有关。配位数变小,表明土的内部结构在剪切过程中受到破坏,颗粒之间的接触减少,模型变得更加松散。

图 8 是标准砂和黏性土的配位数变化对比图。从图 8 可以看出:在剪切未开始时黏性土的中部配位数明显多于标准砂,这说明黏性土模型的颗粒更小,颗粒之间形成的接触更加充分;随着剪切的进行,两种土的配位数都出现了减少,这与体积应变率的变化结果一致。在剪切过程中,配位数降低说明颗粒之间的粒间接触被破坏,颗粒之间的接触减少。这也可以与之前力链的分析结果联系起来,说明在剪切过程中出现了拱状结构式的接触,这导致了粒间接触减少,以及体积应变率的增加。

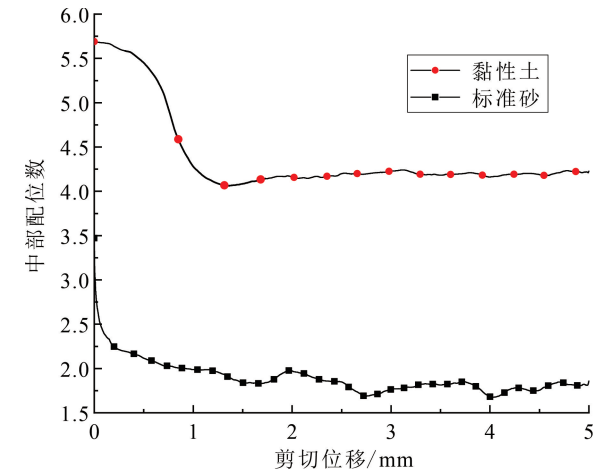


图 8 黏性土和标准砂配位数变化图
Fig.8 Changes in coordination numbers of sand and clay

为了研究模型不同部位的配位数变化情况,本文分别对模型不同部位的配位数进行了分析。图 9 为黏性土模型在剪切过程中不同部位配位数的变化。由图 9 可知:剪切开始时,上部和下部的配位数基本一致,而中部的配位数大于上部和下部,这说明模型土体中部的粒间接触更多,颗粒更加紧密;随着剪切的进行,各部分的配位数都在不断减小,尤其是中部配位数值的减少量远大于上部和下部。表 4 是黏性土和标准砂中各部位配位数的减少量。

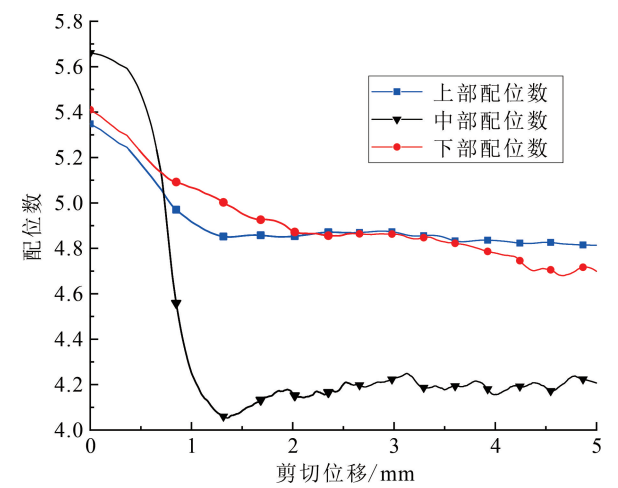


图 9 黏性土模型中不同部位配位数变化

Fig.9 Changes in coordination number of different parts of the clay model

表 4 配位数减少量			
Table 4 Coordination number reduction			
	上部	中部	下部
标准砂	1.50	1.80	1.40
黏性土	0.55	1.70	0.70

从表 4 可知:在剪切的过程中,黏性土上部和下部的配位数减少量比标准砂要少,这是由于黏性土模型的颗粒较小,不同颗粒的粒径大小相差不大;而且黏性土颗粒之间有黏结力的作用,从而导致颗粒之间产生的错动很小,所以黏性土配位数的减少量比标准砂要小;而黏性土和标准砂中部配位数减少量都很大,且明显高于上部和下部的配位数减少量,这是由于模型中部的颗粒运动最剧烈,二者的中部区域在运动过程中原结构破坏最严重,粒间接触破坏最多,并且模型的剪切带产生在土体中部区域。

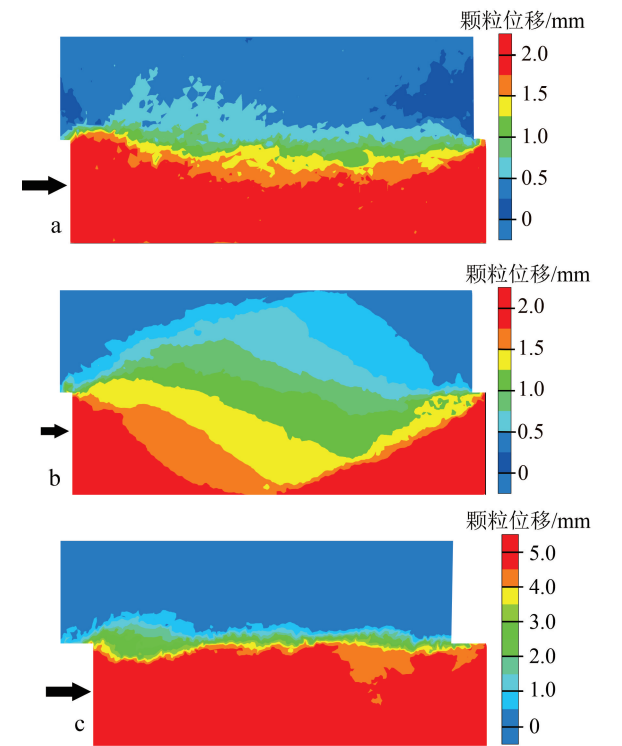
综上所述,黏性土模型在剪切的过程中,颗粒进行了重新排列,在重新排列的过程中导致了粒间接触被破坏。由于颗粒位置发生偏移,不同颗粒间接触形成拱状结构,导致了内部配位数减小,使得孔隙率增大,从宏观上表现出来就是体积应变的增大。

2.3 细观位移分析

图 10 为标准砂和黏性土剪切过程中颗粒的位移云图,不同颜色表示不同的颗粒位移,不同颜色之间的交界线即为其颗粒位移等值线。

图 10 中标准砂模型剪切完成之后剪切带内出现了多条颜色不同的条带(图 10a),而图 10c 中黏

性土剪切完成之后,剪切带主要以绿色的区域为主;这表明标准砂剪切带内不同区域颗粒的相对位移不一致,而黏性土剪切带内的颗粒位移较为一致。由图 10a 和图 10c 对比可知:在剪切完成时,标准砂剪切作用对于颗粒位移的影响范围比黏性土要大;黏性土模型剪切带内形成了相对位移基本一致的狭长条带,而标准砂模型的中上部分颗粒的相对位移等值线在向上部发展,使得剪切带向外延伸并形成了一个副剪切带,副剪切带内的颗粒同样提供了一定的抗剪强度^[24]。



a. 标准砂剪切 2 mm;b. 黏性土剪切 2 mm;b. 黏性土剪切 5 mm。箭头表示剪切时下剪切盒的运动方向。

图 10 标准砂和黏性土颗粒位移分布云图

Fig.10 Cloud distribution of standard sand and clay particles

由图 10b 可知:黏性土在剪切过程中各个部分的颗粒会产生不同程度的位移。在剪切刚开始时,随着下部剪切盒向右运动,下部的颗粒有向右的位移,上部颗粒保持静止;随着剪切的进行,颗粒位移等值线逐渐向模型中部区域集中,形成一个类似菱形的区域,在这个区域中颗粒的相对位移大于区域外,并且越靠近中部颗粒的相对位移越大。由图 10c 可知:在剪切完成时,模型在中间区域形成了颗粒位移较为一致的条带,并且剪切作用对于颗粒位

移的影响范围比标准砂要小,这也是黏性土体积应变较小的原因。相较于图 10b,图 10c 中的菱形区域逐渐变小,并且向模型中部发展,直到贯穿整个试样;在剪切结束时黏性土模型中部区域形成了一条相对位移基本一致的狭长条带区域,这一区域就是黏性土在剪切结束后最终形成的剪切带。

综上所述,与标准砂相比,在剪切完成时剪切作用对黏性土颗粒运动的影响范围较小。黏性土在剪切过程中颗粒位移等值线在模型中部形成了一个类似菱形的区域;在剪切完成时模型中部区域形成了相对位移基本一致的狭长剪切带。而标准砂在剪切结束后形成的剪切带内的颗粒相对位移不一致,在剪切带上部区域形成了一个副剪切带,并且提供了一定抗剪强度,这也是标准砂抗剪强度大于黏性土的原因之一。

3 结论

1)黏性土的抗剪强度低于砂土,其细观机理为砂土颗粒之间力链间距大,力链多为强力链,提供的承载力较强;黏性土的力链分布密集,力链比较细,这些力链提供的承载力比较小。故黏性土的剪切应力比较小,并且强力链主要集中在剪切带附近。

2)与砂土相比,超固结状态下的粉质黏土在剪切过程中出现应变软化现象,这一现象与颗粒的定向排列有关。随着剪切的进行,黏性土中的强力链数量越来越少,这也导致了剪切应力下降。

3)黏性土颗粒之间的接触在剪切过程中被破坏,颗粒发生重新排列,颗粒之间的接触形成拱状结构,导致颗粒之间的配位数降低,这种情况在剪切带内最明显。拱状结构的形成也导致了颗粒之间的孔隙率变大,实际上土体的体积应变与土体的孔隙率有关,土体的孔隙率越大,那么土体的体积应变就越大,黏性土孔隙率最大的地方是在剪切带处,这也是剪切过程中颗粒运动最剧烈的地方。

4)黏性土在剪切过程中颗粒位移影响的区域较小,所以其体积应变较小;黏性土在剪切过程中颗粒位移等值线会呈现一个近似菱形的区域,并且在破坏时剪切带是一条相对位移基本一致的狭长条带。而砂土在剪切结束后形成的剪切带内的颗粒相对位移不一致,在剪切带上部区域形成了一个副剪切带,并且提供一定抗剪强度。

参考文献(References):

[1] 石崇.颗粒流数值模拟技巧与实践[M].北京:中国建筑

工业出版社,2015.

Shi Chong. Skills and Practice of Numerical Simulation on Particle Flow Code [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.

[2] 周健,池永.砂土力学性质的细观模拟[J].岩土力学, 2003,24(6):901-906.

Zhou Jian, Chi Yong. Mesomechanical Simulation of Sand Mechanical Properties [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(6):901-906.

[3] 罗勇.土工问题的颗粒流数值模拟及应用研究[D].杭州:浙江大学,2007.

Luo Yong. Simulation of Soil Mechanical Behaviors Using Discrete Element Method Based on Particle Flow Code and Its Application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[4] 刘红帅,张东涛.基于正交-响应面法的砂土细观参数标定[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4): 1280-1290.

Liu Hongshuai, Zhang Dongtao. Calibration of Sand Mesoscopic Parameters Based on Orthogonal-Response Surface Method[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024,54(4):1280-1290.

[5] 周博,汪华斌,赵文锋,等.黏性材料细观与宏观力学参数相关性研究[J].岩土力学,2012,33(10):3172-3178.

Zhou Bo, Wang Huabin, Zhao Wenfeng, et al. Analysis of Relationship Between Particle Mesoscopic and Macroscopic Mechanical Parameters of Cohesive Materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(10): 3172-3178.

[6] 高彦斌,王江锋,叶观宝,等.黏性土各向异性特性的PFC数值模拟[J].工程地质学报,2009,17(5):638-642.

Gao Yanbin, Wang Jiangfeng, Ye Guanbao, et al. PFC Numerical Simulation on Anisotropic Properties of Cohesive Soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2009,17(5):638-642.

[7] 程升,朱超祁,单红仙,等.基于离散元的南海软黏土剪切变形模拟[J].科学技术与工程,2020,20(9):3707-3714.

Cheng Sheng, Zhu Chaoqi, Shan Hongxian, et al. Shear Deformation Simulation of Soft Clay in South China Sea Based on Discrete Element Method [J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(9):3707-3714.

[8] Chen C H, Gu J Y, Peng Z S, et al. Discrete Element Modeling of Particles Sphericity Effect on Sand Direct Shear Performance [J]. Scientific Reports, 2022, 12

- (1):5490.
- [9] Thornton C. Numerical Simulation of Deviatoric Shear Deformation of Granular Media [J]. *Geotechnique*, 2000, 50(1):43–53.
- [10] 陈建峰,李辉利,周健.黏性土宏细观参数相关性研究[J]. *力学季刊*,2010,31(2):304–309.
Chen Jianfeng, Li Huili, Zhou Jian. Study on the Relevance of Macro-Micro Parameters for Clays[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2010, 31(2): 304–309.
- [11] 土的工程分类标准:GB/T 50145—2007 [S].北京:中国计划出版社,2008.
Standard for Engineering Classification of Soil:GB/T 50145—2007[S]. Beijing:China Planning Press,2008.
- [12] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2008.
Standard for Soil Method:GB/T 50123—2019 [S]. Beijing:China Planning Press,2008.
- [13] 曾远.土体破坏细观机理及颗粒流数值模拟[D].上海:同济大学,2006.
Zeng Yuan. Microscopic Mechanics of Soil Failure and PFC Numerical Simulation [D]. Shanghai: Tongji University,2006.
- [14] Jensen R P, Bosscher P J, Plesha M E, et al. DEM Simulation of Granular Media-Structure Interface: Effects of Surface Roughness and Particle Shape[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1999, 23(6):531–547.
- [15] Wang Z, Ruiken A, Jacobs F, et al. A New Suggestion for Determining 2D Porosities in DEM Studies[J]. *Geomechanics & Engineering*, 2014, 7(6):665–678.
- [16] Potyondy D O, Cundall P A. A Bonded-Particle Model for Rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8):1329–1364.
- [17] 李力,吕敬科.基于颗粒流理论的深海沉积物剪切特性模拟研究[J]. *矿冶工程*, 2017, 37(6):1–6.
Li Li, Lü Jingke. Simulation of Shear Properties of Deep-Sea Sediment Based on Particle Flow Theory [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2017, 37(6):1–6.
- [18] 宁孝梁.黏性土的细观三轴模拟与微观结构研究[D].杭州:浙江大学,2017.
Ning Xiaoliang. The Meso-Simulation of Triaxial Tests and Microstructure Study of the Cohesive Soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [19] Gu X, Huang M, Qian J. Discrete Element Modeling of Shear Band in Granular Materials[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014, 72:37–49.
- [20] 姜奕辰,洪勇,倪嘉楠.基于离散元方法的砂土抗剪强度细观分析[J]. *低温建筑技术*, 2022, 44(11):96–101.
Ji Yichen, Hong Yong, Ni Jianan. Micro-Investigation of Shear Strength of Sand Based on Discrete Element Method [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2022, 44(11):96–101.
- [21] Skempton A W. First-Time Slides in Over-Consolidated Clays[J]. *Geotechnique*, 1970, 20(3):320–324.
- [22] 刘茂,赵其华.滑带土抗剪强度影响因素及其变化规律综述[J]. *水利与建筑工程学报*, 2010, 8(6):123–142.
Liu Mao, Zhao Qihua. Influencing Factors on Shear Strength of Slide Soils and Their Variation Rules[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2010, 8(6):123–142.
- [23] 莫品强,赵子露,胡裕琛,等.颗粒堆积体各向异性及宏细观力学特性的三维离散元模拟研究[J]. *太原理工大学学报*, 2022, 53(1):129–139.
Mo Pinqiang, Zhao Zilu, Hu Yuchen, et al. Anisotropy and Mechanical Behaviour of Sand Pile Using 3D DEM Simulation[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2022, 53(1):129–139.
- [24] 王晓帅.不同粒径组土体直剪试验中剪切带形成过程及数值模拟研究[D].天津:河北工业大学,2020.
Wang Xiaoshuai. A Study on Forming Procedure and Numerical Modeling of Shear Bands and in Direct Shear Tests of with Different Particle Sizes [D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2020.