

DOI: 10.11779/CJGE2019S2031

非饱和重塑与结构性黄土等向压缩试验离散元分析

蒋明镜^{1, 2, 3, 4}, 张浩泽^{1, 2}, 李 涛^{1, 2}, 张 鹏^{3, 4}

(1. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300072; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

3. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 4. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 为了研究非饱和重塑与结构性黄土在等向压缩条件下宏微观力学性质, 进行了等向压缩室内试验的离散元数值分析。运用本团队提出的非饱和结构性黄土三维胶结接触模型, 根据室内真三轴试验标定三维接触模型参数, 进行了非饱和重塑与结构性黄土的等向压缩离散元模拟, 并与室内试验结果进行了对比, 在此基础上分析了其宏微观力学机理。结果表明: 离散元模拟结果能较好的定性反映黄土的力学特征, 非饱和黄土的孔隙比随平均应力先缓慢下降, 后在屈服压力附近开始过渡到快速下降; 胶结接触在达到某阈值平均应力时开始发生破坏; 胶结开始发生大量破坏的阈值与压缩曲线上的结构屈服应力有很好的对应关系。

关键词: 非饱和黄土; 等向压缩试验; 离散元分析

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0121-04

作者简介: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 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@tju.edu.cn。

DEM analysis of isotropic compression tests on remolded and structured unsaturated loess

JIANG Ming-jing^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Hao-ze^{1, 2}, LI Tao^{1, 2}, ZHANG Peng^{3, 4}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The macroscopic and microscopic mechanical responses of remolded and structured unsaturated loess are investigated under isotropic compression using the distinct element method (DEM). A three-dimensional (3D) cementation contact model developed for unsaturated structural loess is employed in the DEM with its parameters calibrated from the true triaxial tests on Chinese loess. After preparing the numerical unsaturated remolded and structured loess specimens, the isotropic compression tests are carried out. The DEM results show that the simulation can reproduce qualitatively the main mechanical behavior of the loess. The void ratio of unsaturated loess decreases slowly at first with the mean stress, and then begins to transit to a rapid reduction near the yield stress. When the mean stress of a certain threshold is reached, the cementing contact begins to break. There is a well correspondence between the threshold that a lot of contacts break down and the yield stress of the structure on the compression curve.

Key words: unsaturated loess; isotropic compression test; discrete element analysis

0 引言

天然黄土一般被认为是风成土, 粉粒颗粒间的范德华力等相比颗粒重力不能忽略, 因此黄土在天然沉积过程中容易出现大孔隙; 而所处的半干旱气候使黄土形成了大孔隙胶结结构, 在其大孔隙胶结结构未遭到破坏时表现出较高强度, 但黄土的粒间胶结在遭到破坏时, 黄土力学性质会发生变化, 从而诱发各种地质灾害, 比如降雨或人工灌溉诱发的黄土滑坡等^[1]。

对于非饱和黄土的力学研究在宏观室内试验方

面, 湿陷试验和常规三轴试验等应用较多, 但是由于天然结构性黄土试样试验可重复性较差, 难以进行大量系统的试验, 从而制约了结构性黄土宏微观力学性质的研究和发展。在微观试验观测方面, 已经通过电镜扫描试验和 CT 扫描等观测手段获得了对黄土微观结构特征较为深入的认识。然而, 目前的微观观测手

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579178); 国家自然科学基金重点项目(51639008)

收稿日期: 2019-04-30

段仍较难把握土体的重要微观力学特性，比如颗粒间接触力、三维孔隙特征、胶结破坏和接触组构等。

离散单元法^[2]具有能够模拟大变形、非连续介质的优点，不仅能够实现试验的可重复性，而且能够以无损的方式对试样的宏微观数据进行连续性观测。结合室内宏微观试验，通过离散单元法对非饱和黄土试样进行相应力学试验对于黄土力学特性研究及本构理论发展具有重要意义。其中，等向压缩试验研究纯平均应力作用下黄土力学响应，是研究复杂应力比作用下力学性质的基础，对于非饱和黄土固结特性和本构理论的研究具有重要意义。Jiang 等^[3]通过在颗粒间添加胶结作用模拟黄土的结构性，运用二维离散元方法模拟了结构性黄土侧限压缩和湿陷试验，分析了宏微观力学行为，但该模拟没有考虑颗粒抗转动能力、成样中未考虑范德华力作用且没有考虑毛细力的可恢复性。在该研究的基础上，运用本团队提出的结构性黄土三维胶结接触模型^[4]，在制备离散元试样时考虑颗粒间范德华力并将颗粒吸引力与化学胶结作用分开，并考虑了颗粒的抗转动能力，对非饱和重塑与结构性黄土等向压缩应力状态下进行了三维离散元模拟，并对其压缩曲线与微观胶结破坏特征进行了分析。

1 接触模型及模拟参数标定

1.1 接触模型简介

本文采用本团队提出的非饱和结构性黄土三维胶结接触模型^[4]。该三维胶结接触模型考虑了颗粒间以及胶结接触的法向、切向、弯曲向和扭转向的力和弯矩的传递。模型中引入了颗粒间的吸引力，同时考虑了范德华力作用，已被应用于非饱和黄土侧限压缩和湿陷试验^[5]。试验证明应用此模型的非饱和黄土离散元试样能够较好的再现非饱和黄土的力学特性。颗粒间接触力、接触力矩和胶结力、胶结力矩具体计算过程以及微观参数物理意义详见参考文献[4]。

1.2 模拟参数标定

本文进行了非饱和黄土真三轴试验（成果另文介绍）用以进行微观参数标定。颗粒接触参数结果如下：颗粒等效模量 $E^*=800 \text{ MPa}$ ，颗粒法切向刚度比 $\kappa^*=1.5$ ，颗粒间摩擦系数 $\mu=0.4$ ，颗粒-墙体摩擦系数 $\mu=0$ ，颗粒吸引力系数为 $\sigma_a=59.75 \text{ kPa}$ ，颗粒接触半径系数 $\beta=0.3$ 。胶结参数结果如下：胶结等效模量 $E^*=200 \text{ MPa}$ ，模量折减系数 $\eta_E=0.2$ ，胶结法切向刚度比 $k_b=2$ ，胶结抗压强度 $\sigma_c^b=15 \text{ MPa}$ ，胶结拉压强度比 $\eta_\sigma=0.1$ ，胶结半径系数 $\lambda_b=0.35$ ，胶结临界厚度系数 $g_c=0.1$ 。

2 离散元试样制备及试验模拟方案

结构性黄土和重塑黄土离散元试样的等向压缩

试验的模拟方法和步骤是相同的，二者的不同仅在于结构性黄土离散元试样在试验之前施加了颗粒间的化学胶结作用。

2.1 离散元试样制备

图 1 (b) 给出了本文采用的粒径级配曲线，中值粒径 d_{50} 为 $2 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。取颗粒密度为 2710 kg/m^3 ，颗粒的局部阻尼系数为 0.7。试样由六面无摩擦墙体约束，通过控制墙体运动和受力对试样施加应力、应变，另外墙体和颗粒的接触仅承担法向力。

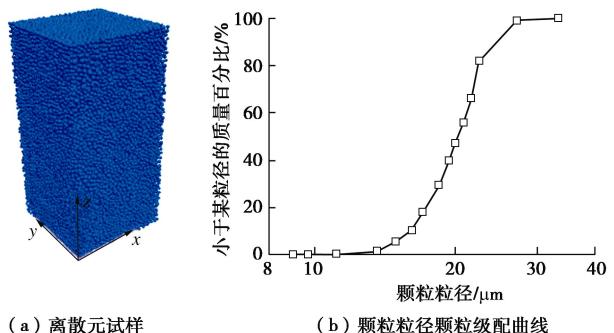


图 1 离散元试样和颗粒级配曲线

Fig. 1 Discrete element sample and grain-size distribution curve

本文采用分层欠压法^[6]，考虑颗粒间范德华力制成松散均匀的黄土三维离散元试样，分六层生成含有 40842 个颗粒的长方体试样，试样高宽比为 2 : 1 : 1，与室内试验高宽比相同。离散元试样如图 1 (a) 所示，图中竖向 (z 向) 为制样时的压缩方向。为模拟黄土的原位应力状态，保持侧向四面墙静止不动即侧限条件下施加竖向荷载 12.5 kPa 对试样进行预压，预压后的孔隙比为 0.951，为最终制备的黄土离散元试样。

2.2 试验模拟方案

本文进行了等向压缩室内试验，得到了非饱和黄土等向压缩曲线，如图 2 (a) 所示，并进行 DEM 模拟。由于在预压后黄土试样处在 K_0 应力状态，为了获得较低竖向压力 (12.5 kPa) 下的数据点，在压缩试验中考虑先对试样进行卸载到竖向压力 5 kPa，然后对上下墙体施加荷载，分 16 级施加，初级荷载为 12.5 kPa，每次施加的荷载约为上级荷载的 $\sqrt{2}$ 倍。本试验中通过设定的主应力比计算侧墙压力并进行伺服控制。

3 离散元结果分析

3.1 压缩曲线

图 2 给出了非饱和重塑与结构性黄土离散元试样与室内试验的等向压缩试验孔隙比 - 竖向压力曲线。通过结构性黄土等向压缩曲线和重塑黄土等向压缩曲线的对比可知，结构性黄土压缩线具有结构屈服应力，

相同压力下结构性黄土压缩线在重塑黄土之上, 随着压力的增加, 结构性黄土的压缩线逐渐向重塑黄土的过渡, 与室内试验结论一致。本节离散元模拟的目的是研究非饱和重塑与结构性黄土的等向压缩特性, 并不追求与室内试验结果完全相吻合。因此, 初始孔隙比的差异会对等向压缩特性产生定量上的影响, 而不会改变其定性规律。

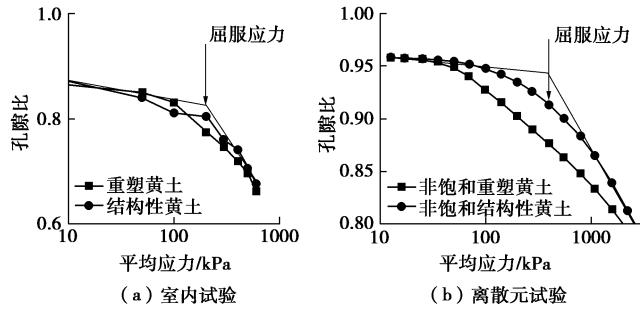


图 2 非饱和黄土等向压缩曲线

Fig. 2 Isotropic compression curves of unsaturated loess

3.2 胶结破坏分析

图 3 给出了非饱和结构性黄土离散元试样等向压缩试验在半对数坐标系与直角坐标系的胶结破坏与竖向压力的关系。图中可见, 胶结接触在某阈值平均应力以下基本不发生破坏, 达到该阈值后胶结开始逐渐破坏。胶结开始发生大量破坏的阈值与压缩曲线上的结构屈服应力有很好的对应关系。胶结开始破坏后是缓慢逐渐破坏, 结构也是逐步屈服。这一现象在直角坐标系中表现更为明显。

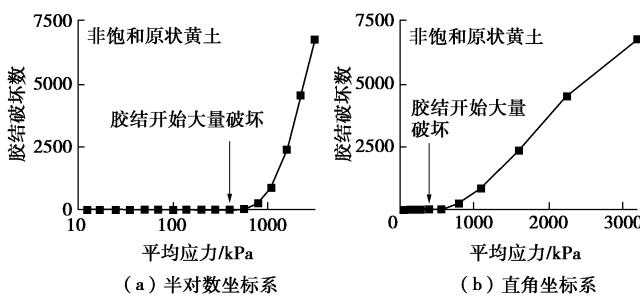


图 3 胶结破坏与平均应力关系曲线

Fig. 3 Bond breakage versus mean stress

3.3 力学配位数

土体的配位数和力学配位数是表征土体微观结构排列的重要微观变量, 表示土体颗粒之间的接触数目情况。其计算公式可见参考文献[7]。

图 4 给出了非饱和重塑与结构性黄土离散元试样等向压缩试验力学配位数随竖向压力的变化。由图可知, 力学配位数随竖向压力增大而增大。由结构性黄土与重塑黄土的对比可知, 结构性黄土的力学配位数初始状态下比重塑土力学配位数大, 这是由于结构性

黄土试样内部接触数目远多于重塑土。而重塑黄土力学配位数上升趋势远大于结构性黄土, 结构性黄土在胶结大量破坏后其力学配位数会快速靠近重塑黄土。

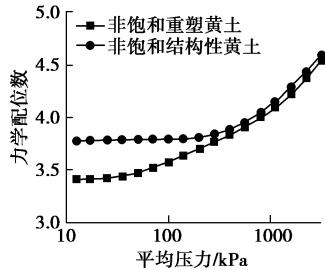


图 4 力学配位数与竖向压力关系曲线

Fig. 4 Mechanical coordination number versus mean stress

3.4 接触偏组构

土体的接触组构是表征土体微观结构排列的重要微观变量, 反映了土体颗粒间接触的定向情况。颗粒接触组构张量表示可见参考文献[8]。类似于偏应力的作用, 偏组构可以用来表示接触方向的各向异性程度, 其表示可见参考文献[9]。

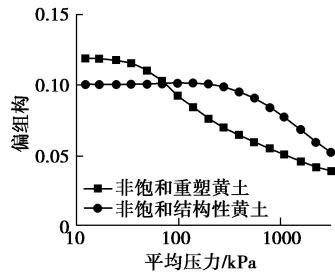


图 5 接触偏组构随平均应力的变化

Fig. 5 Deviator fabric versus mean stress

图 5 给出了重塑黄土离散元试样等向压缩试验接触偏组构与平均应力的关系。由于试样在一维压缩应力状态下进行了预压, 因此试样具有初始各向异性。由于等向应力状态是各向同性应力状态, 因此在等向压缩试验中, 试样的接触偏组构随平均应力的增加不断下降。从图中分析可知, 如果试样的接触各向异性与受力的各向异性程度不同, 则应力会使试样的接触各向异性发生变化, 试样本身会抵抗这个过程, 可以把这种抵抗能力称为组构抗力, 一般说来, 试样的强度越高, 其组构抗力也越大。

图 6 给出了非饱和结构性黄土离散元试样等向压缩试验 3 种偏组构随平均应力的变化曲线。其中总接触由胶结接触和摩擦接触组成。在压缩过程中, 胶结接触偏组构变化不大。而压缩初期, 摩擦接触偏组构几乎可以忽略, 因而此处不做统计, 当胶结开始破坏后, 摩擦接触偏组构会迅速下降, 后逐渐平稳。在强各向同性外力作用下会产生许多偏横向的摩擦接触, 因此对于非饱和黄土试样摩擦接触偏组构是横向占优

的。

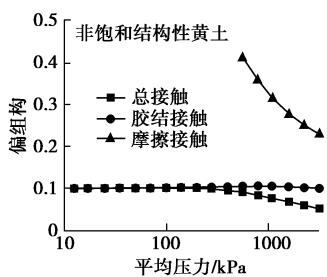


图 6 3 种偏组构随平均应力的变化

Fig. 6 Deviator fabrics of three contact types versus mean stress

4 结 论

本文用团队提出的非饱和结构性黄土三维胶结接触模型, 根据真三轴室内试验结果进行了三维接触模型参数标定, 得到一套可以再现非饱和黄土宏观力学特性的微观参数。而后将模型和标定参数应用于黄土离散元, 采用分层次压法并考虑颗粒间范德华力制成松散均匀的黄土三维离散元试样, 进行非饱和与重塑黄土和结构性黄土离散元试样的等向压缩试验, 并进行了等向压缩室内试验。分析了非饱和与重塑与结构性黄土离散元试样的孔隙比、力学配位数、胶结破坏(结构性黄土)和偏组构等随竖向压力的变化规律。本文研究结果表明:

(1) 非饱和黄土的孔隙比随平均应力增大先缓慢下降, 后在屈服压力附近开始过渡到快速下降。非饱和与重塑与结构性黄土在较小和较高压力区间内, 两者孔隙比相差不大, 在中间压力区间内结构性黄土的孔隙比差异较大, 意味着在这个压力区间内, 结构性土表现出抗压密性质, 结构性表现充分。

(2) 结构性黄土固结屈服应力较重塑土大, 这是由于结构性黄土存在胶结物的胶结作用, 且随着荷载的增加, 结构性土内胶结物不断破坏, 无法重新生成, 结构性土的压缩线逐渐过渡到重塑土的压缩线。

(3) 结构性黄土胶结接触在某阈值平均应力以下基本不发生破坏, 达到该阈值后胶结开始缓慢逐渐破坏。胶结开始发生大量破坏的阈值与压缩曲线上的结构屈服应力有很好的对应关系。胶结开始破坏后是缓慢逐渐破坏, 结构也是逐步屈服。

(4) 结构性黄土的力学配位数初始状态下比重塑土力学配位数大, 结构性黄土在胶结大量破坏后其力学配位数会快速靠近重塑黄土。

(5) 试样的接触偏组构随平均应力的增加不断下降, 重塑土试样压缩初期下降较快, 后随着平均应力

的增加下降趋势变缓。而结构性土则在压缩初期偏组构变化较小, 当胶结开始大量破坏后, 偏组构会迅速下降, 最终与重塑土偏组构接近。

参 考 文 献:

- [1] LI T L, WANG P, XI Y. The mechanisms for initiation and motion of Chinese loess landslides[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 105 - 122.
- [2] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, **29**(1): 47 - 65.
- [3] JIANG M J, LI T, HU H J, et al. DEM analyses of one-dimensional compression and collapse behaviour of unsaturated structural loess[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **60**: 47 - 60.
- [4] 李 涛. 非饱和结构性黄土三维离散元模拟与本构模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2017. (LI Tao. Three-dimensional DEM simulation and constitutive model of unsaturated structural loess[D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese))
- [5] 李 涛, 蒋明镜, 张 鹏等. 非饱和结构性黄土侧限压缩和湿陷试验三维离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 1): 39 - 44. (LI Tao, JIANG Ming-jing, ZHANG Peng. DEM analyses of oedo-meter and wetting tests on the unsaturated structured loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1): 39 - 44. (in Chinese))
- [6] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUOEL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(7): 579 - 597.
- [7] THORNTON C. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media[J]. Géotechnique, 2000, **50**(1): 43 - 53.
- [8] SATAKE M. Fabric tensor in granular materials[C]// Proceedings of IUTAM Symposium on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft: Rotterdam, 1982: 63 - 68.
- [9] BARRETO D, O'SULLIVAN C, ZDRAVKOVIC L. Quantifying the evolution of soil fabric under different stress paths[C]// Powders and Grains 2009: Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media. Golden, 2009: 181 - 184.

(责编: 黄贤沙)