

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.02.007

非饱和重塑黄土应变控制等应力比 试验三维离散元分析

李涛^{1,2}, 蒋明镜², 李立青²

(1. 中国民航大学 机场学院, 天津 300300; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 黄土地区工程建设中有大量填方工程, 填方工程中土体可能承受等应力比压缩荷载, 为了研究非饱和和重塑黄土在较高应力比下的宏微观力学性质, 运用应变控制加载方式开展了不同应力比的非饱和和黄土等应力比试验离散元数值分析。数值模拟中, 考虑颗粒间转动和扭转抗力及范德华力并采用分层欠压法制备均匀松散黄土数值试样, 引入粒间引力反映毛细力作用。通过应变加载方式对数值试样开展等吸力的等应力比数值试验表明: 离散元数值结果能定性再现室内等应力比试验的压缩和剪切特性; 试样力学配位数随平均应力的变化不受应力比的影响; 试样偏组构的变化与其初始状态和加载应力比关系密切。

关键词: 离散单元法; 非饱和黄土; 等应力比试验; 应变控制

中图分类号: U41

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)02—0036—06

Strain-controlled Constant-stress-ratio Compression Tests on Unsaturated Remolded Loess Using the 3D Discrete Element Method

LI Tao^{1,2}, JIANG Mingjing², LI Liqing²

(1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The loess bear constant stress ratio stress under soil filling projects which are very common in engineering practice in loess areas. Strain-controlled constant-stress-ratio compression tests were carried out on unsaturated loess using the discrete element method (DEM) to investigate macro and microscopic behavior of unsaturated loess subjected to various stress ratios. Loose and homogenous numerical sample was generated by considering rolling and twisting resistances and van der Waals force in the contact model and using the multi-layer under-compaction method. The adhesive force was incorporated into the contact model to reproduce the capillary force in unsaturated loess. Then, constant-stress-ratio compression tests with constant suction were executed by strain-controlled loading method. Results show that the DEM simulation reproduces the compression and shearing behavior of unsaturated loess in laboratory tests. In microscopic behavior, the mechanical coordination number versus mean stress curves are independent on the stress ratio. The deviator fabric variation is controlled by its initial state and loading stress ratio.

Keywords: discrete element method; unsaturated loess; constant-stress-ratio compression tests; strain-controlled

黄土主要分布在干旱和半干旱地区, 黄土工程中遇到的土体多处于非饱和状态, 非饱和和黄土试验和理论研究一直是岩土工程界的热门课题之一^[1-3]。非饱和黄土的试验研究主要针对等向压

缩、侧限压缩、常规三轴和真三轴应力路径等^[4-7], 但实际工程中如黄土路基和填方工程^[8]可能出现小主应力和大主应力共同增加的等应力比路径^[9]。在等应力比路径下, 随着应力比的变化, 土体可能发

收稿日期: 2020-11-18

修稿日期: 2020-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809193; 51890911); 中国博士后科学基金项目(2018M631741)

作者简介: 李涛(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土和结构性土宏微观力学性质研究工作。E-mail: letllejn@163.com

生压缩控制和剪切控制的转换,难以通过常见应力路径试验反映,因此,有学者通过等应力比路径研究黄土的力学性质并应用到本构模型研究^[9-11]。

黄土宏观力学性质与其微观特性密不可分。为了研究黄土宏观力学特性的微观机制,不少学者开展扫描电镜观测、X 射线计算机断层扫描^[12]等微观试验。为了分析微观试验难以全面获取的接触方向、接触力等统计信息,Jiang 等^[13]采用二维离散单元法(DEM),使用简单胶结接触模型模拟黄土粒间胶结,研究了等应力比路径下黄土的力学特性。由于应力加载进行高应力比压缩试验难以反映理想塑性和软化,模拟采用完备的非饱和和重塑黄土三维接触模型^[14],对非饱和和重塑黄土离散元试样开展了不同应力比的应变加载等吸力等应力比试验,研究了黄土数值试样的应力、变形及其对应的微观力学性质(平均配位情况、接触法向和接触力组构等)。

1 黄土接触模型及其微观参数

黄土颗粒/团粒形状不规则,表面附着细小黏土颗粒,在粒间接触上表现出抗弯和抗扭能力,研究采用的黄土接触模型^[14],基于 Jiang 等^[15]的完整接触模型,同时采用粒间引力考虑颗粒间的范德华力和毛细力作用。接触模型已应用于非饱和黄土三轴试验^[16]和一维压缩试验^[17]离散元数值分析。

假设颗粒间通过圆形截面接触,接触半径为^[15]:

$$R_c = \beta R \quad (1)$$

式中: β 为接触半径系数, $R = 2R_1R_2/(R_1 + R_2)$, R_1 和 R_2 为两颗粒半径。考虑粒间引力时,颗粒间力和弯矩的计算示意图如图 1 所示。接触刚度可由颗粒等效模量和颗粒法切向刚度比计算。

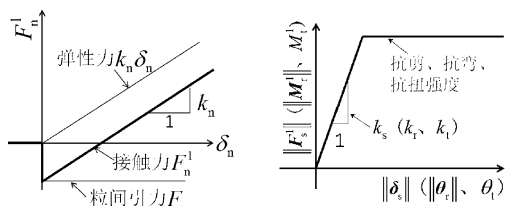


图 1 接触模型力学响应示意图

当接触剪力、弯矩和扭矩达到强度时,颗粒间发生滑动、转动和扭动,接触力和力矩不再增加。接触的抗剪强度 $\|F_s^l\|$ 、抗弯强度 $\|M_r^l\|$ 和抗扭强度 $\|M_t^l\|$ 分别按下列公式计算^[14-15]:

$$\|F_s^l\| \leq \mu(F_n + F_a) \quad (2)$$

$$\|M_r^l\| \leq 0.25\zeta_c(F_n + F_a)R_c \quad (3)$$

$$M_t^l \leq 0.65\mu(F_n + F_a)R_c \quad (4)$$

式中: F_n 为法向接触力; F_a 为粒间引力; μ 为粒间摩擦系数; ζ_c 为颗粒局部压碎系数,可取 $\zeta_c = 2.1$ 。

接触模型参数如表 1 所示。粒间引力是影响非饱和和重塑黄土宏观力学性质的主要微观变量之一,对于非饱和黄土,范德华力与毛细力相比很小,粒间引力主要是由毛细水引起。粒间引力为^[14]:

$$F_a = \left(\frac{s}{\xi_a(1 + (s/a_{st})^{b_{st}})^{1-1/b_{st}}} + \sigma_v \right) d_{50}^2 \quad (5)$$

式中: d_{50} 为中值粒径; s 为基质吸力; σ_v 为范德华力系数; ξ_a , a_{st} 和 b_{st} 为拟合参数, $a_{st} = c_{a1} \exp(c_{a2}e_0)$, e_0 为试样的初始孔隙比。

表 1 离散元模拟微观参数^[14]

参数名称	数值	参数名称	数值
颗粒等效模量/MPa	800	颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2710
颗粒法切向刚度比	1.5	局部阻尼系数	0.7
颗粒摩擦系数	0.5	粒间引力/N	式(5)
接触半径系数	0.21		

2 数值试样制备与离散元实施

采用分层欠压法分五层制备黄土离散元试样,颗粒数目为 42 180 个,粒径级配曲线如图 2 所示,中值粒径 d_{50} 为 20 μm 。为了制备大孔隙比黄土数值试样,在制样过程中施加范德华力,大小按下式计算:

$$F_v = \sigma_v d_{50}^2 \quad (6)$$

式中: σ_v 取 4 kPa。试样生成后在 12.5 kPa 竖向压力下侧限压缩稳定(预压),预压完成后孔隙比为 0.934。

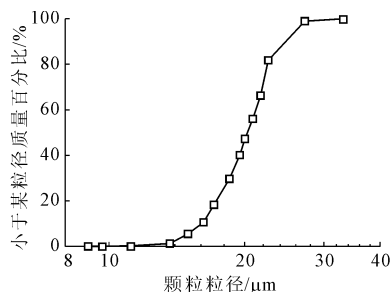


图 2 离散元试样粒径级配曲线

预压完成后,对黄土离散元试样上下墙体分别按 10/s 应变率施加荷载,对四个侧墙采用伺服控制,使试样的应力比($\eta = q/p$, p 为平均应力, q 为偏应力)保持不变,以实现试样的应变控制等应力比

加载。应变控制对比分级荷载施加方式容易实现较高应力比下的等应力比加载,因此为本文所采用。试验过程中保持试样的基质吸力不变(100 kPa)。在数值分析过程中,随着试样调整,接触可能消失和生成,新生成接触自动施加接触模型并赋予模型参数。

3 离散元试样的宏观性质

图 3 给出了非饱和重塑黄土离散元试样压缩曲线,通过与室内试验结果的对比可知,在半对数坐标中,非饱和黄土孔隙比先缓慢减小,在屈服应力之后快速减小,离散元试样的压缩线趋势与室内试验^[5]相同。离散元孔隙比变化数值上与室内试验差别较大,主要是因为离散元在颗粒形状、颗粒团簇破碎等方面与实际黄土颗粒不同造成的。关于应力比的影响,离散元结果表明在一定的应力比范围内($\eta < M$, M 为临界状态线斜率),不同应力比压缩试验的压缩曲线基本重合。 $\eta > M$ 的试样在压缩流塑阶段出现了剪胀现象,且应力比越高,试样剪胀性越强。

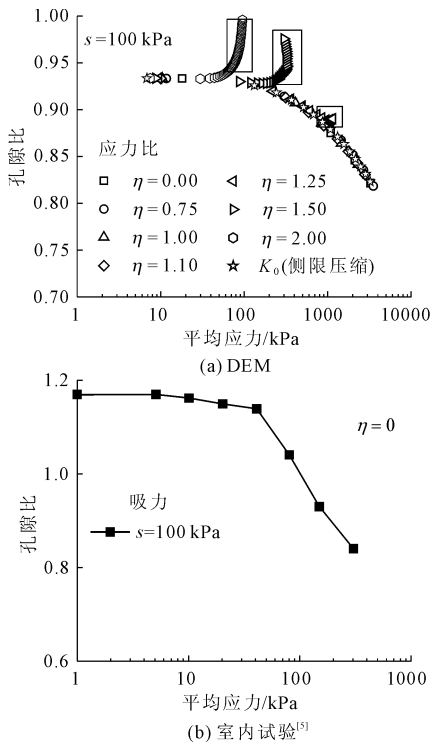


图 3 等应力比压缩曲线

图 4 给出了非饱和重塑黄土离散元试样等应力比试验的偏应力 - 偏应变关系曲线,通过与室内试验结果对比可知,离散元试样的偏应力 - 偏应变关系与室内试验^[10]结果趋势相同。在低应力比下($\eta < M$),试样主要表现出压缩特性,由于应力路径

始终远在临界状态线以下,随着应力的增加,偏应变增加较小,试样发生压缩屈服但不发生剪切破坏。在高应力比下($\eta > M$),试样主要表现出剪切特性,偏应力 - 偏应变关系类似常规三轴试验,随着偏应变的增加,试样发生剪切破坏,并伴随剪缩或剪胀。

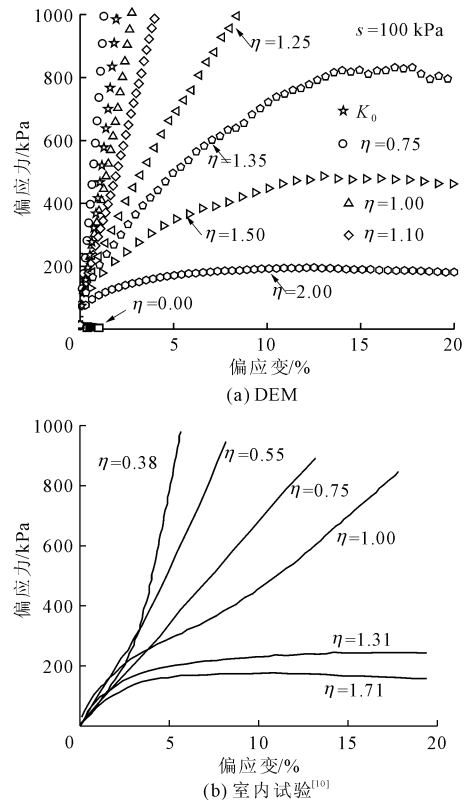


图 4 应力 - 应变曲线

4 离散元试样的微观性质

为了探求非饱和重塑黄土宏观力学性质的微观机制,对离散元试样的配位情况和组构情况进行了分析。

平均配位数(简称“配位数”)和平均力学配位数(简称“力学配位数”)可以用来分析土体颗粒的平均接触情况,采用下式计算^[18]:

$$Z = 2N_c/N_p \quad (7)$$

$$Z_m = (2N_c - N_{p1})/(N_p - N_{p1} - N_{p0}) \quad (8)$$

式中: Z 为配位数; Z_m 为力学配位数; N_c 为接触数量; N_p 为颗粒数量; N_{p0} 和 N_{p1} 分别是接触数量为 0 和 1 的颗粒数量; $N_p - N_{p1} - N_{p0}$ 为有效颗粒数量。

图 5 给出了非饱和重塑黄土离散元试样的平均配位情况,试样的力学配位数在半对数坐标系中随平均应力的增加先缓慢增加后快速增加。通过与压缩曲线的对比可知,在 200 kPa 平均应力以下,随着应力的增加,配位数、力学配位数、有效颗粒数量发

生了较明显增加,但试样孔隙比变化较小。即试样的颗粒重排列和变形仅发生微调整,滞后于配位情况的变化。

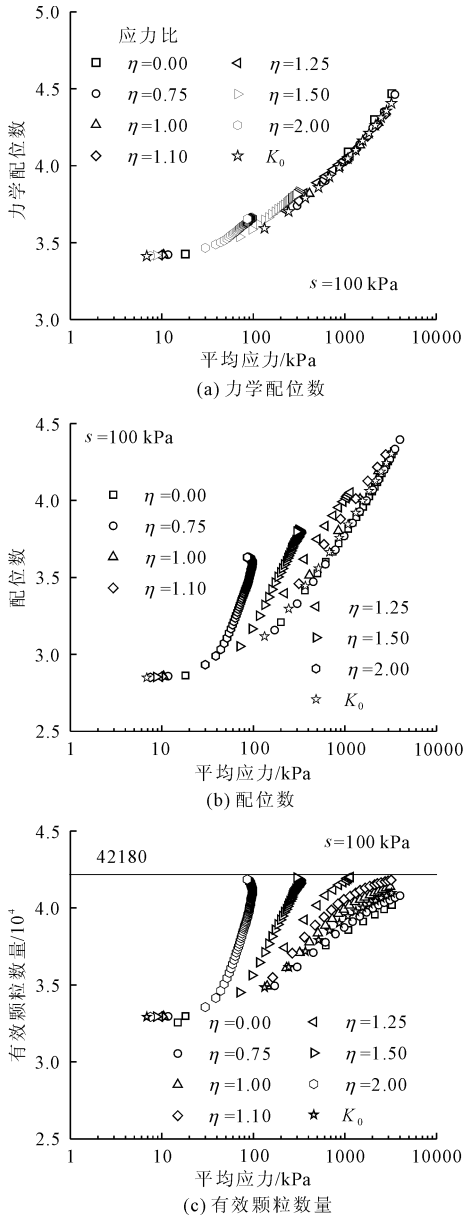


图 5 配位性质

不同应力比离散元试样的力学配位数随平均应力变化曲线保持很好的归一性,与压缩曲线表现相对应。但是配位数曲线有所不同,除等向压缩试样($\eta = 0$)外,随应力比的增加,配位数随平均应力增加的速率变大,相同平均应力下的有效颗粒数量更大。可见,虽然某平均应力下不同应力比试样的力学配位数相同,但配位情况却有一定不同,高应力比试样中有更多的颗粒参与了传力(颗粒排列调整更充分)。高应力比($\eta > M$)试样在进入流塑阶段尾段后,有效颗粒数量接近最大,试样力学配位数基本

保持不变,与之对应的,试样的孔隙比、平均应力和偏应力都基本维持不变,试样达到临界状态。可见,临界状态对应的宏微观变量都基本保持不变,且有效颗粒数量接近总颗粒数量(颗粒均参与传力),与此对应,颗粒排列经历了充分调整。

组构张量可以用来反映矢量集合方向(接触法向、接触力方向)的统计规律,组构张量计算如下^[19]:

$$F_{ij} = \frac{1}{2N_c} \sum_{k=1}^{2N_c} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (9)$$

式中: n_i 为矢量的方向余弦。偏组构 Δ 可用来表示矢量集合方向各向异性程度:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(F_1 - F_2)^2 + (F_2 - F_3)^2 + (F_3 - F_1)^2} \quad (10)$$

式中: F_1 、 F_2 和 F_3 是组构张量的三个不变量。

图 6 给出了非饱和重塑黄土离散元试样的接触方向偏组构随平均应力的变化,试样初始接触方向偏组构是原位应力状态下的偏组构(预压后),接触方向偏组构的变化明显受试验应力比的影响。随着平均应力的增加,侧限压缩试验的应力比不断下降(如图 6(b)),但侧限压缩的接触方向偏组构基本保持不变(高平均应力下轻微下降)。在等应力比压缩中, $\eta = 0.00$ 和 $\eta = 0.75$ 试样的应力比始终小于侧限压缩试验的应力比,接触方向偏组构随平均应力的增加而不断减小,应力比越小,接触方向偏组构随平均应力减小越快;试样的应力比先是小于而后大于侧限压缩试验的应力比,接触方向偏组构随平均应力的增加先减小后增加,应力比越大,接触方向偏组构随平均应力增加越快。可见,试样接触方向偏组构的变化与其初始状态和加载应力路径关系密切。

图 7 给出了 $\eta = 0.00$ 和 $\eta = 1.25$ 试样接触方向组构玫瑰图(轴向为各个 1° 径向范围内接触的数量)的变化。随着加载的进行, $\eta = 0.00$ 试样各个方向接触数量均增加,但水平倾向接触数量增加的更快,试样接触方向各向异性程度减小。 $\eta = 1.25$ 试样总接触数量有明显增加,但水平倾向接触数量基本不变,试样接触方向各向异性程度增加。

图 8 给出了非饱和重塑黄土离散元试样接触力偏组构随平均应力的变化。施加毛细力后,试样初始接触力偏组构(0.239)远大于初始接触方向偏组构(0.074),说明接触力的初始各向异性程度大于接触方向。 $\eta \leq 1.25$ 试样的总接触力、强接触力(大

于平均接触力)和弱接触力(小于平均接触力)偏组构均表现为随平均应力的增加先下降再增加; $\eta \geq 1.50$ 试样接触力偏组构(总、强、弱)随平均应力增加较快,最终达到较大的各向异性程度;侧限压缩试验接触力偏组构(总、强、弱)经历了“缓慢下降-快速下降-缓慢变化”的过程。在整个等应力比加载试验(不含等向压缩试样)过程中,接触力偏组构始终大于接触方向偏组构;强接触力偏组构大于弱接触力偏组构,即强接触力各向异性程度很高,对承担竖向荷载贡献大。

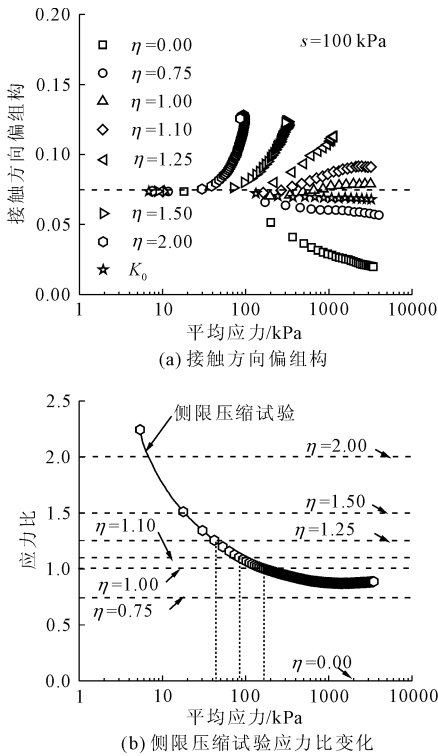


图 6 接触方向组构特性

1.25 试样水平倾向接触力数量基本不变, 竖直倾向接触力数量有一定的增加, 各向异性程度增加。

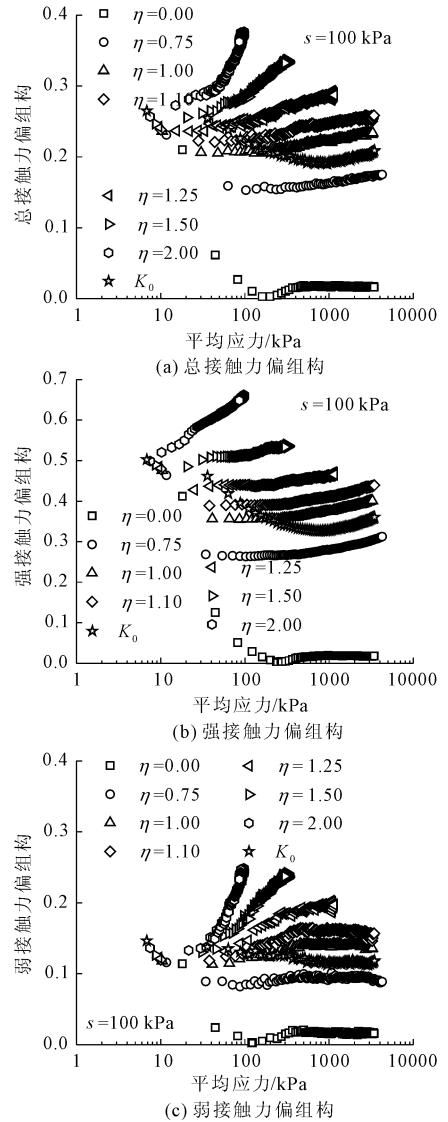


图 8 接触力组构特性

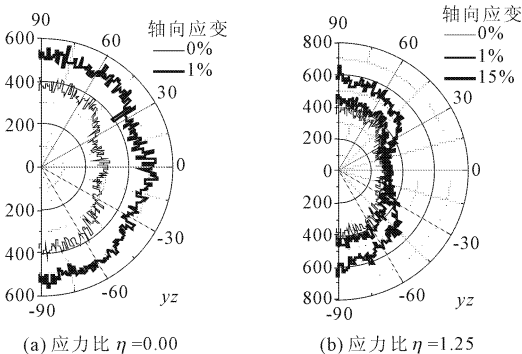


图 7 接触方向组构玫瑰图

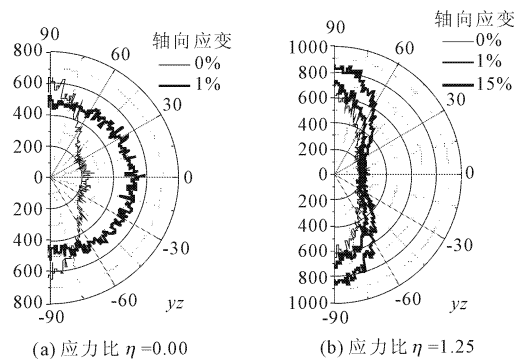


图 9 接触力组构玫瑰图

图 9 给出了接触力组构玫瑰图,在加载开始时接触力具有明显的各向异性;随着加载的进行, $\eta = 0.00$ 试样水平倾向接触力数量明显增加, 竖直倾向接触力数量略微减小, 各向异性程度明显降低; $\eta =$

离散元试样反映了实际黄土的范德华力、毛细力、颗粒间摩擦和转动抗力等特征,但对颗粒级配、颗粒形状进行了简化,忽略了颗粒破碎。因此,离散

元模拟仅能定性分析非饱和和重塑黄土配位数和组构的变化规律,配位数和偏组构数值会与实际黄土有一定的不同,模拟的定性结果与微观观测结果^[20]是协调一致的。

5 结 论

(1) 离散元模拟结果能定性再现室内等应力比试验的压缩曲线和剪切特性。在低应力比下($\eta < M$)试样主要表现出压缩特性,在高应力比下($\eta > M$)试样主要表现出剪切特性,可能表现出剪胀性。

(2) 不同应力比试样的力学配位数在半对数坐标系中随平均应力的增加先缓慢增加后快速增加,不同应力比曲线具有很好的归一性;高应力比试样比低应力比试样有更多的颗粒参与了传力;临界状态对应的宏微观变量都基本保持不变。

(3) 试样接触方向偏组构的变化与其初始状态和加载应力比关系密切;侧限压缩的接触方向偏组构基本保持不变。在加载过程中(等向压缩试样除外),接触力偏组构始终大于接触方向偏组构;强接触力偏组构大于弱接触力偏组构。

参考文献:

[1] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.

[2] 郑 方, 刘奉银, 王 磊. 粒度对非饱和土土水特征曲线滞回特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 19-24.

[3] 孙俊煜, 廖红建, 董 琪, 等. 非饱和黄土宏细观含水状态与结构性的研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 6(1): 129-133, 163.

[4] 扈胜霞, 张 栋, 杨 瑞, 等. 非饱和和重塑黄土固结特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 55-58.

[5] NG C W W, Cheng Q, Zhou C. Thermal effects on yielding and wetting-induced collapse of recompacted and intact loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 55(8): 1095-1103.

[6] 闫芙蓉, 胡雪源, 崔 芳. 非饱和黄土抗剪强度特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(5): 100-104, 227.

[7] 方瑾瑾, 邵生俊, 冯以鑫. 真三轴条件下 Q_3 原状黄土的吸力变化特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 934-942, 950.

[8] 李 宁, 杨 卿. 西部水利与土木建设中的岩土工程

问题[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 1-8.

[9] 刘祖德, 陆士强, 杨天林, 等. 应力路径对填土应力应变关系的影响及其应用[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 45-55.

[10] Shi J, Liu Z D. On characteristic of the stress strain and foundation deformation of intact and compacted collapsing loess[C]//Proceedings of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soil, Beijing: International Academic Publishers, 1988: 374-378.

[11] 蒋明镜, 卢国文, 李 涛. 基于胶结破损机理的非饱和和结构性黄土本构模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(3): 243-251.

[12] 延 恺, 谷天峰, 王家鼎, 等. 基于显微 CT 图像的黄土微结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 71-77.

[13] Jiang M J, Zhang F G, Hu H J. DEM modeling mechanical behavior of unsaturated structural loess under constant stress increment ratio compression tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 17(4): 04016108.

[14] 蒋明镜, 孙若晗, 李 涛, 等. 一个非饱和和结构性黄土三维胶结接触模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 213-216.

[15] 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.

[16] Li T, Jiang M J, Thornton C. Three-dimensional discrete element analysis of triaxial tests and wetting tests on unsaturated compacted silt [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 97: 90-102.

[17] 李 涛, 蒋明镜, 张 鹏. 非饱和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(S1): 39-44.

[18] Thornton C. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media [J]. Géotechnique, 2000, 50(1): 43-53.

[19] Satake M. Fabric tensor in granular materials[C]//Proceedings of IUTAM Symposium on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft, Rotterdam, 1982: 63-68.

[20] Imseeh W H, Druckrey A M, Alshibli K A. 3D experimental quantification of fabric and fabric evolution of sheared granular materials using synchrotron micro-computed tomography [J]. Granular Matter, 2018, 20(2): 24.