

松砂直剪试验中的经典与非经典场量数值分析

蒋明镜^{1,2}, 王富周^{1,2}, 朱合华^{1,2}, 肖 俞^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 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)

摘要: 采用改进的离散元软件, 模拟分析了松散砂土直剪试验中的经典与非经典场量. 经典场量包括应力、应变、速度场以及应力路径; 非经典场量包括转动场、组构和配位数等. 分析了剪切过程中经典与非经典场量的变化规律, 探讨了两种场量之间的联系. 研究表明, 非经典变量是经典变量的微观本质体现.

关键词: 离散元; 剪应变; 应力路径; 平均纯转动率; 组构

中图分类号: TU 41 **文献标识码:** A

Classical and Non-classical Variables Analysis of Loose Sand in Direct Shear Test by Discrete Element Method Analysis

JIANG Mingjing^{1,2}, WANG Fuzhou^{1,2}, ZHU Huhua^{1,2}, XIAO Yu^{1,2}
(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to analyze the classical and non-classical variables of loose sand in direct shear test, numerical investigation were carried out by DEM. Classical variables include stress, strain, velocity fields, and stress-path. Non-classical variables include averaged pure rotation rate (APR), fabric and coordination number. In the study, the changes of variables and the relationships among them were analyzed. The results show that the non-classical variables are microscopically essence of classical variables.

Key words: discrete element method; shear strain; stress path; averaged pure rotation rate; fabric

的本构模型以及特殊的网格划分方式实现对应力应变等经典场量的分析^[1-3]. 这一方法用于常规土工试验-直剪试验分析时, 存在两点不足: ①无法给出非经典场量的分布规律; ②难以用试验方式分析应力应变不均匀分布特征. Cundall 和 Strack 建立的离散单元法^[4]在处理非连续性以及破坏性问题时具有很大的优越性, 它不仅可以分析砂土经典场量的分布规律, 而且能深入土体的微观领域, 分析组构、配位数等非经典场量的变化规律. 这些研究涉及边界效应、剪切导致的砂土各项异性以及应变局部化分析等^[5-7]. 作者近期对密砂展开了一系列研究^[8-9]. 本文采用分层欠压法^[10]生成均匀的松散砂样, 研究松砂直剪试验中的经典场量和非经典场量之间的内在规律.

1 松砂直剪仿真试验简介

1.1 离散元模型

文中采用离散元直剪试验如图 1 所示, 采用的离散元模型参数见表 1^[9].

表 1 离散元模型参数
Tab.1 Parameters of the DEM sample

颗粒数目	24 000
颗粒直径 d	6.0~9.0 mm
颗粒密度 ρ	2 600 kg · m ⁻³
颗粒法向刚度	1.5 × 10 ⁸ N · m ⁻¹
颗粒切向刚度	1.0 × 10 ⁸ N · m ⁻¹
颗粒间摩擦系数 μ	0.5
孔隙比 e	0.233
墙体法向刚度	1.5 × 10 ⁸ N · m ⁻¹
墙体切向刚度	1.0 × 10 ⁸ N · m ⁻¹
颗粒与墙体间的摩擦系数 μ	0

对砂土力学特性的分析目前已开始从经典与非经典两类变量着手进行. 有限元方法主要借助特殊

采用分层欠压法^[10]制备松散样, 试样尺寸为1 400 mm×900 mm, 由 10 种不同直径共 24 000 个颗粒组成,

收稿日期: 2010-04-19
基金项目: 国家自然科学基金(10972158); 国家杰出青年基金(51025932); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100072110048)
第一作者: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为天然结构性粘土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土的宏、微观试验、本构模型和数值分析. E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

颗粒直径分布在 6.0~9.0 mm 之间,平均半径为 7.6 mm,不均匀系数为 1.3. 用 6 个刚性墙边界模拟上下剪切盒. 为防止剪切中颗粒的溢出,沿剪切面在试样的两侧添加了 4 个水平墙体. 剪切前需要加竖向压力固结稳定,在离散元分析中,竖向压力通过内置的伺服系统添加,使得剪切盒的上下压力达到目标值. 为使试样内部颗粒充分接触,首先给定 12.5 kPa 的竖向压力,然后在

不同围压下固结,最后通过控制上下盒相对运动,从而对试样进行剪切测试.

1.2 松砂抗剪强度及体变规律

图 2 为松砂直剪仿真试验得到的剪应力-体变化曲线. 由图 2a 可知,松砂剪应力的增长过程可近似分为两个增长阶段:初始快速增长阶段和后期缓慢增长阶段,呈现硬化特性.

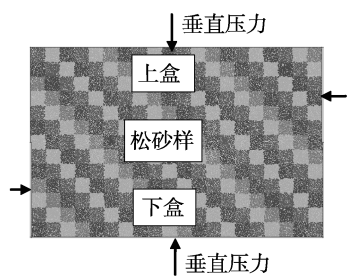


图 1 离散元模型

Fig.1 DEM model of the sample

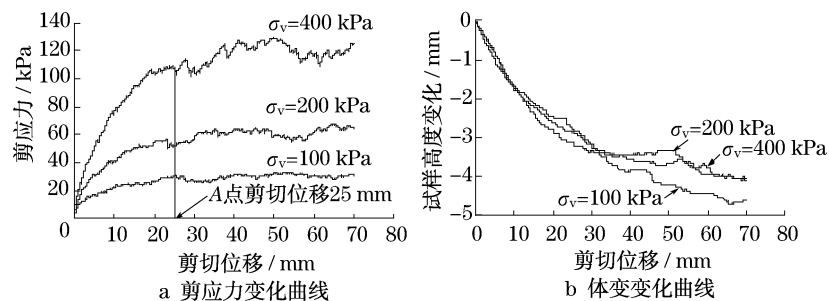


图 2 剪应力、体变变化曲线

Fig.2 Curves of shear stress and volumetric strain patterns

不同法向压力 σ_v 作用下松砂高度变化曲线如图 2b 所示. 从体变的整个变化过程可以看出,试样一直处于被压缩状态,试样的高度一直在减小. 这与密砂先剪缩后剪胀的特性^[10]是不同的. 剪应力和体变的变化规律与松散样的力学特性具有一致性.

1.3 边界摩擦的影响

笔者近期研究^[9]表明,室内直剪试验高估了密砂的抗剪强度. 此次松砂的研究结果如图 3 所示. 经过计算,边界无摩擦时内摩擦角为 17.9°,边界完全粗糙时内摩擦角为 16.2°,两种强度指标相差 1.7°,说明实际的室内直剪试验低估了松砂的抗剪强度. 从图 2b 可以看出,松砂剪切过程中试样的高度在减小,导致剪切面以上的土体相对于剪切盒产生了向下运动的趋势,如果边界存在摩擦,试样将受到向上的摩擦力作用,从而降低了松砂剪切面上所受到

的竖向压力,松砂抗剪强度被减弱. 这一结果与前人结论相同^[5-6].

2 经典场量分析

2.1 应力分布状态

直剪试验中应力分布不均匀性^[11]会影响试验结果. 为对主应力等经典场量进行分析,本文对 PFC2D 进行了改进,实现了试样内各点应力矢量的可视化,如图 4 所示. 同时对此经典场量进行了分解,对各组分进行独立研究,如图 5~8 所示.

图 4 主应力矢量图显示,试样内部主应力受到剪切后分布具有明显的不均匀性,而且发生偏转. 试样内部,左下端和右上端主应力较大,特别是靠近刚性边界的区域大主应力沿水平向分布;试样的左上端和右下端主应力值较小,且大主应力沿竖向分布;在试样的中间区域主应力发生了明显的倾斜.

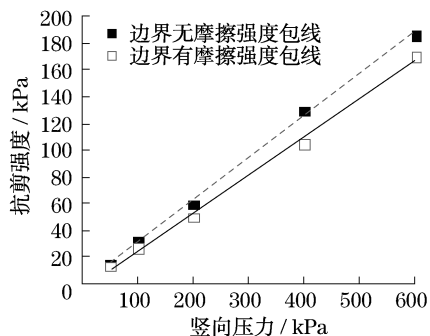


图 3 松砂强度包线

Fig.3 Shear strength envelopes of loose sand

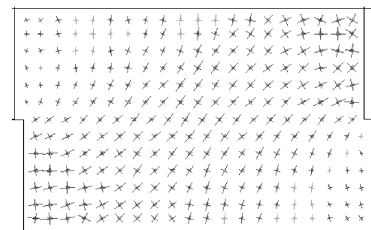


图 4 应力矢量分布图

Fig.4 Distributions of principal stress vectors

图 5,6 为主应力分量分布图. 可以看出,初始主应力分布比较均匀,剪切进行到一定程度后,主应力

发生了重分布,可分为两个区域,见图 5b 和图 6b. I 区,试样的左上端与右下端;II 区,沿着试样左下端与右上端分布.这两个区域的应力变化存在很大的差别. I 区,属于低应力区,主应力有减小的趋势;II 区,属于高应力区,主应力有增大的趋势.

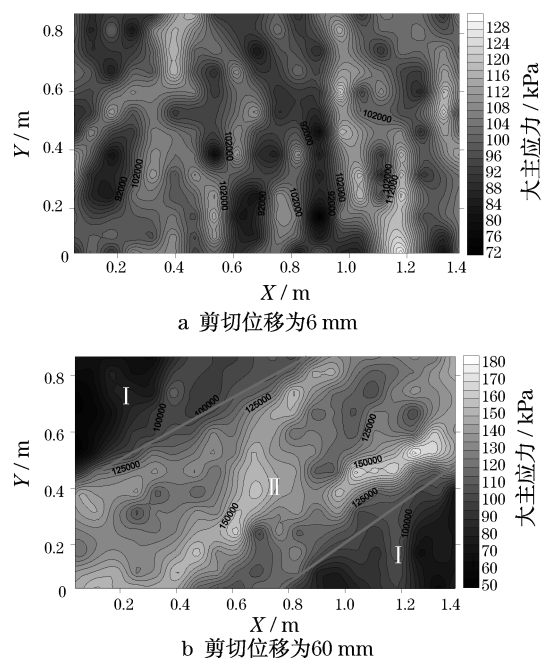


图 5 大主应力分布图

Fig.5 Distribution of major principal stress

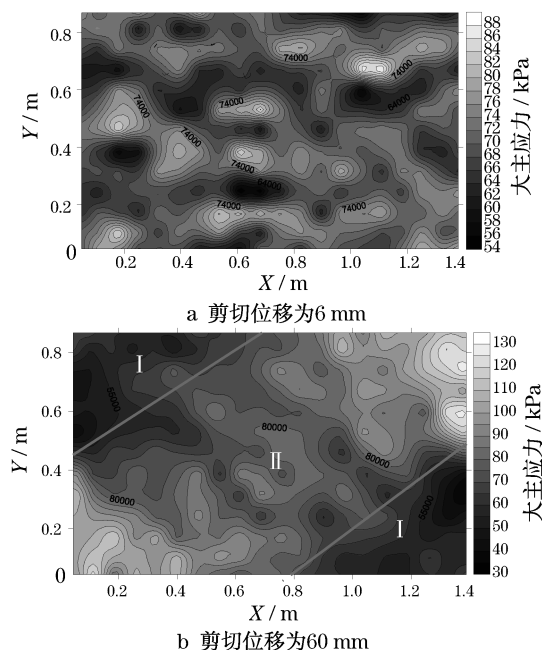


图 6 小主应力分布图

Fig.6 Distribution of minor principal stress

图 7 为试样内部剪应力分布图.初始正负剪应力分布比较均匀,剪切进行到一定阶段后,正负剪应力分开分布.正剪应力集中在试样的 4 个角落,负剪应

力集中在试样中间并形成规则的四边形区域,如图 7b 所示.正负剪应力数值都有一定程度的增大,但以负剪应力增大幅度为大.

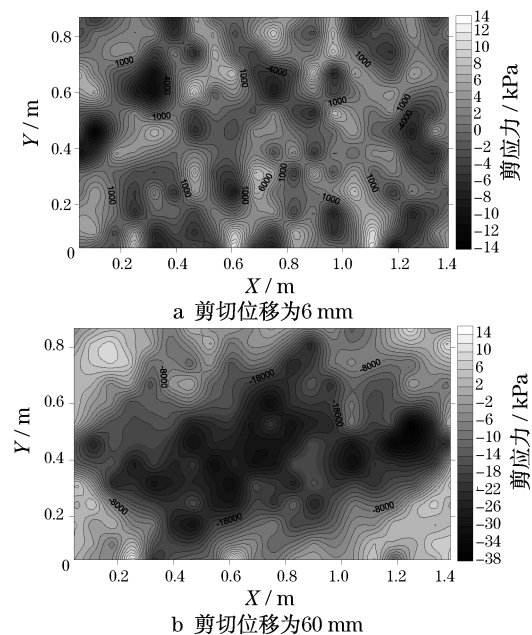


图 7 剪应力分布图

Fig.7 Distribution of shear stress

主应力矢量方向分量是反映应力分布状态的另一经典场量,如图 8 所示.可见应力矢量由于剪切发生的偏转同时存在顺时针和逆时针两个方向,不同区域的偏转程度不同.左下角和右上角区域,应力主方向与水平面夹角接近 0° ,说明主应力在这两个区域偏转了 90° 左右;试样中间区域,主方向角分布在 $[40^\circ, 50^\circ]$ 之间.

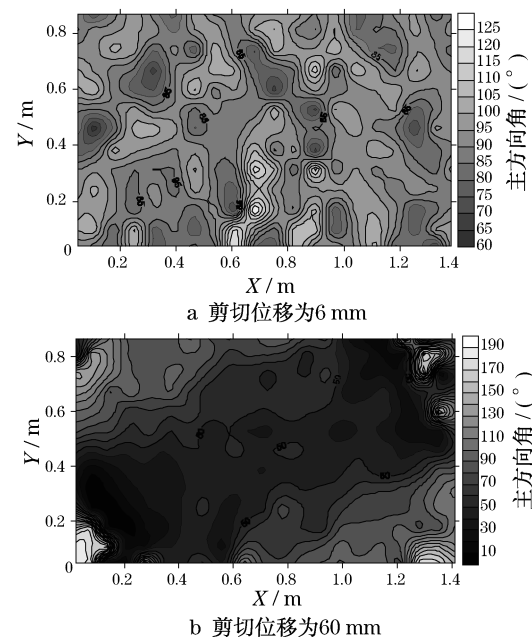


图 8 主方向角分布图

Fig.8 Distribution of principal stress angle

2.2 剪切应变

本文采用离散元网格表示法^[12],将试样分为13行20列,总共260个格子,每个格子所含颗粒数目大致为93,并且将剪切面附近单独分为一行.从图9的剪切形状变化可见,剪切面附近格子的形状变化是最大的,其他区域内格子形状保持完好.

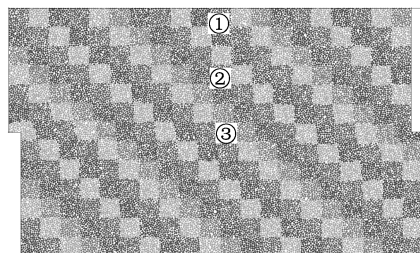


图9 剪切变形图

Fig.9 Deformation pattern of the sample

图10为剪应变分布图.从图10a可知,剪切变形从剪切面两端开始发展,初始剪应变没有形成贯通的区域,随着剪切的进行,剪应变沿着剪切面向试样内部发展并形成贯穿试样左右的剪应变集中区域,如图10b所示.

2.3 应力路径

应力路径是表征土体应力历史的经典变量,其

测点分布如图9所示.松砂100 kPa 竖向压力作用下各测点应力路径如图11所示,图中点A的剪切位移为25 mm左右.

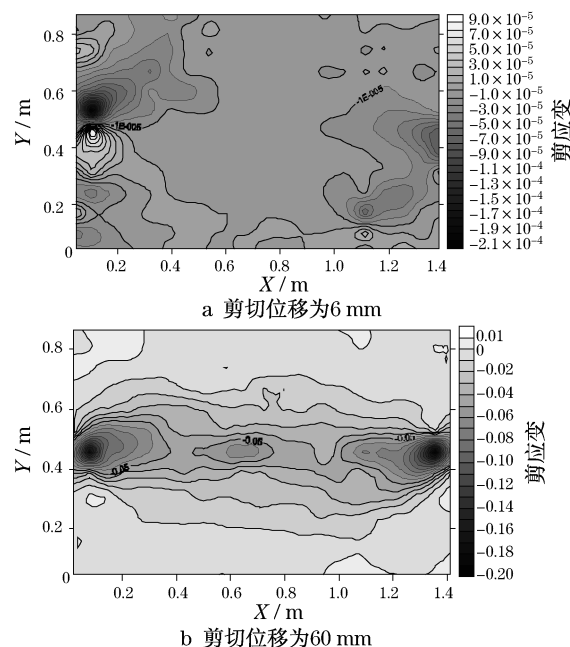


图10 剪应变分布图

Fig.10 Distribution of shear strain

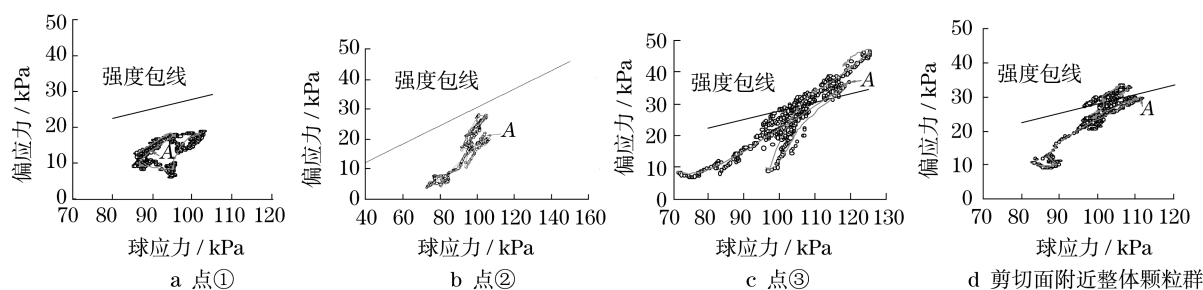


图11 不同测点的应力路径

Fig.11 Stress paths with different areas

3个点的应力路径及剪切面附近颗粒群整体的应力路径,都经过一个初始加载阶段,到达点A后开始出现加载卸载循环波动,波动围绕试样整体强度包线.点A在3条应力路径中均非常接近强度包线:点①、点②应力路径图中,点A位于强度包线之下,点②曲线上的点A距离强度包线较近;点③应力路径曲线上,点A位于强度包线之上;剪切面附近整体应力路径图中,点A位于强度包线以下.

需要说明的是,图2a中在点A附近剪应力出现峰值,并出现大的下降;点A以前剪应力基本处于增长阶段,波动性较小.这说明,当砂土剪应力趋近其抗剪强度时,剪应力往往会发生较大波动,从而导

致了试样内部应力路径的复杂性使之呈现出反复加载卸载的规律.

点①位于试样的边界处,受到边界效应的影响,该点经过一小段加载阶段后,便表现出波动性,并且该点应力值较小,整个应力路径处于强度包线以下.从图11可见,离剪切面越远应力路径峰值点越低.

2.4 速度场/平动速度

图12为松砂试样剪切位移为60 mm时平均平动速度沿纵向的分布图.可以看出剪切面附近颗粒平动速度较小,但变化梯度大;远离剪切面的区域平动速度较大,但变化梯度几乎为零.这与图10结果是一致的.

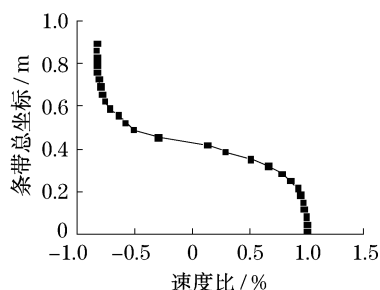


图 12 平动速度分布曲线

Fig.12 Velocity distributions of each band

3 非经典场量分析

3.1 平均纯转动率

转动是表征颗粒运动状态的非经典变量. 本文主要研究接触点处纯转动率^[13], 它是一个反应颗粒尺寸与转动的非经典变量, 具体内容参见文献[13]. 图 13 为松砂剪切位移为 60 mm 时试样内部平均纯转动率变化曲线. 从转动的分布规律可知, 剪切面附近颗粒主要处于转动状态, 远离剪切面颗粒基本未发生转动, 而以平动为主. 转动集中区域为试样剪应变的集中区.

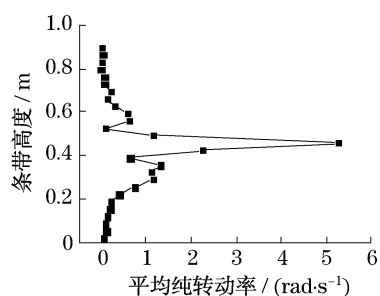


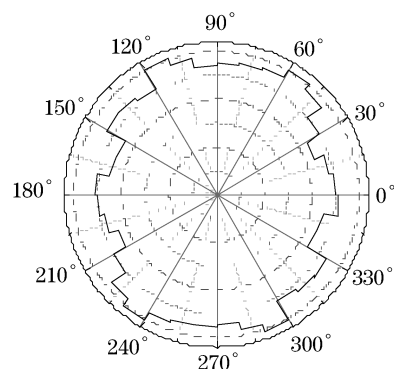
图 13 颗粒转动分布曲线

Fig.13 Motion state of the sample

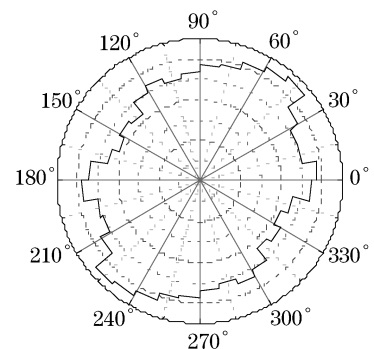
3.2 组构分析

组构是反映试样接触方向分布的一个非经典微观变量. 本文将测试范围分为以测点①为中心的剪切面附近的大区域和以测点②为中心的大区域两个测试区域, 如图 9 所示, 这两个区域在原来测试范围的基础上进行了放大, 目的是为了使测试区域内包含尽量多的颗粒, 从而减小组构测试过程中由于颗粒数目过少而产生的波动, 测试结果如图 14 和图 15 所示.

由图 14 可以看出, 剪切面附近的颗粒群初始接触方向主要分布在 $[50^\circ, 120^\circ]$ 之间, 剪切后接触方向主要分布在 $[40^\circ, 90^\circ]$ 之间, 即接触组构的主轴发生了偏转. 取角度范围的平均值作为主轴方向可得, 剪切面附近主轴由 85° 偏转到 65° , 偏转角度为 20° .



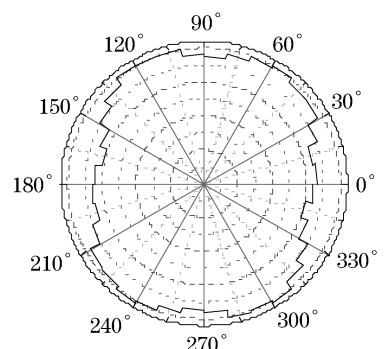
a 剪切位移为6 mm



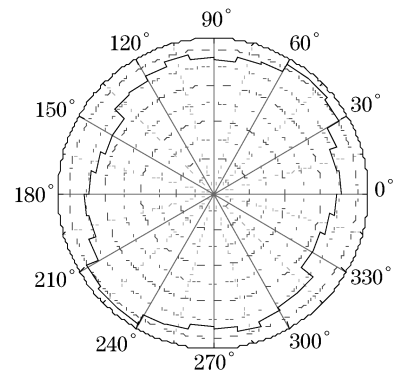
b 剪切位移为60 mm

图 14 剪切面附近组构变化图

Fig.14 Fabric around shear plane



a 剪切位移为6 mm



b 剪切位移为60 mm

图 15 剪切面区域以外组构变化图

Fig.15 Fabric outside shear plane

图15所示,剪切面以外的区域组构主轴同样发生了接近 20° 的偏转,但是在各个角度方向的变化量不及剪切面附近变化明显。

3.3 配位数

图16为松砂在100 kPa 竖向压力作用下,平均配位数随着剪切位移的变化曲线。

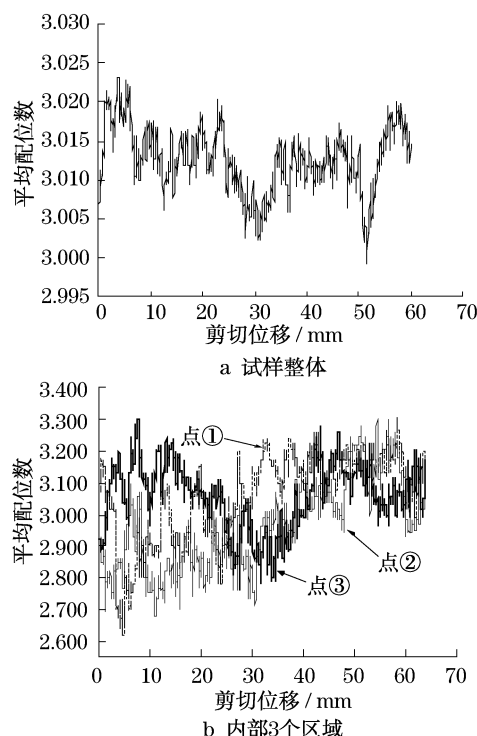


图16 砂土平均配位数变化曲线

Fig.16 Average coordination number of sands

如图16a所示,剪切初始阶段试样整体平均配位数有增大趋势,后期略微下降并出现波动;如图16b所示,3个区域内部颗粒的平均配位数随着剪切位移的增加,相对于初始值均出现了微小的增大,并且3个区域的平均配位数均在3.000附近波动。

4 结论

本文进行了直剪试验离散元数值分析,对松砂试样内部经典变量与非经典变量进行了研究和探讨,得到如下主要结论:

(1) 经典场量的分析表明,试样内部应力应变分布不均匀,并且伴随着主应力偏转. 试样的左下角和右上角主应力值较大,左上角和右下角应力值较低;剪应变沿剪切面向中间发展,并在剪切面附近形成集中区,这一区域内部颗粒运动速度较小;离剪切面越远,应力路径峰值点越低;在试样内部各区域伴

随着应力路径的变化,试样内部不同区域出现程度不同的加卸载波动。

(2) 对平均纯转动率、组构和配位数等非经典微观变量的分析表明,砂土经典宏观变量都存在微观机制. 应变局部化区域内部是颗粒转动的集中区;应变局部化区域内组构在各个角度方向的变化表示了颗粒间力传递方向的改变,宏观上表现为主应力偏转。

参考文献:

- [1] Dounias G T, Potts D M. Numerical analysis of drained direct and simple shear tests [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(12): 1870.
- [2] Tejchman J. Fe-simulation of direct wall shear box test [J]. Soils and Foundations, 2004, 44(4): 67.
- [3] Tejchman J, Bauer E. Fe-simulation of a direct shear and a true simple shear test within a polar hypoplasticity [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32: 1.
- [4] Cundall P A, Strack O D L. The distinct numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29: 47.
- [5] Liu S H, Sun D A, Matsuoka H. On the interface friction in direct shear test [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32: 317.
- [6] Liu S H. Simulating a direct shear box test by DEM [J]. Can Geotechnical, 2006, 43: 155.
- [7] Wang J F, Dove J E, Gutierrez M S. Discrete-continuum analysis of shear banding in direct shear test [J]. Geotechnique, 2007, 57(6): 513.
- [8] 蒋明镜, 王富周, 朱合华. 单粒组密砂剪切带的直剪试验离散元数值分析 [J]. 岩土力学, 2009, 31(1): 253.
JIANG Mingjing, WANG Fuzhou, ZHU Hehua. Shear band formation in ideal dense sand in direct shear test by DEM analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 31(1): 253.
- [9] 蒋明镜, 王富周, 朱合华, 等. 密实散粒体宏观特性的直剪试验离散元数值分析 [J]. 河海大学学报, 2010, 38(5): 538.
JIANG Mingjing, WANG Fuzhou, ZHU Hehua, et al. DEM simulation of macro-micro mechanical properties of dense granular materials in direct shear test [J]. Journal of Hohai University, 2010, 38(5): 538.
- [10] Jiang M J, Konrad J M, Leroueil S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 579.
- [11] Terzaghi K, Peck R B. Soil mechanics in engineering practice [M]. New York: Wiley, 1996.
- [12] Jiang M J, Yu H S, Harris D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30: 335.
- [13] Jiang M J, Yu H S, Harris D. Kinematic variables bridging discrete and continuum granular mechanics [J]. Mechanics Research Communications, 2006, 33: 651.