二维粒状材料双轴压缩试验系统的研制与应用

张连卫[1]，张建民[1,2]，张 嘎[1,2]，孙振岳[1]

（1.清华大学岩土工程研究所，北京 100084；2.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点试验室，北京 100084）

摘 要：为研究粒状材料的力学特性及其与材料细观组构演化之间的关系，新研制了一套适用于粒状材料的二维双轴压缩试验系统，并以金属棒等模拟材料组成的二维堆积体为试验对象，在水平和竖直两个方向独立加载，能实现常侧向压力、等 p 和等应力比等多种应力路径。采用数字照相结合图像相关分析技术高精度地实现了对材料细观组构的跟踪测量，并可分析二维粒状材料内部的应变局部化及细观组构的演化过程。使用该双轴压缩试验系统，针对椭圆形截面金属棒组成的二维粒状材料试样进行了常侧向压力的压缩试验，验证了该试验系统的有效性。

关键词：粒状材料；双轴压缩；细观组构；剪切带

中图分类号：TU402 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)01－0148－05

作者简介：张连卫(1978－)，男，山东无棣人，博士研究生，主要从事粒状材料各向异性方面的研究。E-mail: zhanglianwei01@mails.thu.edu.cn。

Development and application of a 2D biaxial compression test system for granular materials

ZHANG Lian-Wei[1], ZHANG Jian-Min[1,2], ZHANG GA[1,2], SUN Zhen-Yue[1]

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Lab of Hydroscience and Engineering , Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A set of two-dimensional biaxial compression test system was developed to investigate the stress-strain behavior and its variation with the micro-fabric for granular materials. During testing a specimen was assembled using very small metal bars with elliptical sectional shapes and then was loaded in both horizontal and vertical directions. Three different stress paths, including constant lateral pressure, constant mean principal stress and constant principal stress ratio, could be easily realized. A new method of non-invasive measurement using both digital photo technology and image correlation analysis was developed so that the displacement of each metal bar in the specimen could be truly traced and as a result the displacement field of each specimen and its micro-fabric evolution during application of loading could be measured with a high degree of accuracy. The new test system was applied in monotonic shear tests for two-dimensional assemblies of mental bars with different elliptical sections, showing its essential effectiveness for the investigation of the micro-fabric variation and mechanical behavior.

Key words: granular material; biaxial compression; micro fabric; shear band

0 引 言

粒状材料的力学特性，特别是各向异性和结构性对其应力应变特性的影响，与颗粒长轴及接触法线定向性等细观组构特征以及变化紧密相关。合理地揭示不同加载条件下粒状材料细观组构及其演化规律，描述组构演化与应力应变响应之间的内在关系，对建立粒状材料的本构模型和准确预测其力学行为具有极其重要的意义。

自1964年Brewer引入土的组构概念以来，有关组构特征描述及其对粒状材料宏观力学行为影响的研究有了明显的进展[1-5]。当前研究粒状材料的细观组构及其演化规律的途径及方法主要有理论分析、数值模拟和物理模拟三类[1]。其中理论分析方法简单，物理概念明确，但仅能够对有限数量的理想形状颗粒的规则排列情况进行分析[2]。数值模拟，如PFC等离散元程序，可模拟较大量理想形状的颗粒不规则排列所形成的堆积体的力学行为，但仍需假定颗粒间的接触本构特性[5]，需要由物理模拟提供计算参数，并且计算规模受到计算机计算能力限制。因此理论分析和数值模拟仍不能替代物理模拟。采用物理模拟方法研究粒

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50478016）；北京市自然科学基金重点资助项目（8061003）

收稿日期：2007－02－12

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

状材料在受力变形过程中的组构演化规律，不仅有助于揭示粒状材料的细观组构特征及演化的物理本质，也能够为数值模拟提供参数并验证数值模拟结果的合理性。

采用物理模拟方法来研究粒状材料组构演化规律时需要解决好两个关键技术问题：①消除加载系统边壁效应以得到真实的宏观力学响应；②跟踪测量变形过程中的组构特征及演化并将其与宏观力学响应联系起来。就粒状材料细观组构特征及演化的测量技术而言，迄今为止基本上经历了 3 个发展阶段。早期缺乏基本的测量工具，只能依据试样表面绘制的网格变化来作定性分析。第二阶段采用切片法结合照相技术、SEM 技术等实现了材料内部组构的定量分析，且针对不同方向切面上组构分布的分析研究了材料组构各向异性。Oda[3]、Mahmood 和 Mitchell 等均采用该方法研究了砂土的细观组构特性。这类方法的缺点在于仅能够得到材料在给定应力应变条件下的组构特征，不能连续跟踪材料在整个变形过程中的演化发展规律。更为合理的研究组构演化规律的方法要求组构测量既不中断材料的变形，又不破坏材料结构，也就是说需要在不影响物理模拟的前提下获得材料细观组构的照片或其他信息，因此应采用无损测量技术。其中，X 射线技术和 CT 技术已在细观组构测量中得到应用，但由于其设备复杂，实现困难，并未得到普及，有必要开发或引入其他简单易行的无损测量技术。所以，目前非常有必要开发新的粒状材料力学试验设备及相应的测试技术，以便在大量细致深入的试验观察和研究的基础上，为能够合理地考虑细观组构变化影响的粒状材料本构理论框架的建立提供充分的物理基础和科学依据。

针对上述的问题，本文研制了一台新的适用于研究二维粒状材料力学特性的双轴压缩试验系统，并借助数字照相和图像相关分析技术实现了对材料细观组构演化过程的跟踪测量。初步的试验应用表明，该试验系统具有较好的可重复性，试验结果合理，可用于揭示粒状材料的细观组构演化与力学响应规律的试验研究。

1　粒状材料双轴压缩试验系统

新试验系统是针对二维粒状材料设计的，主要由加载模块和测量模块组成。

1.1　试验对象

砂土等天然材料是三维的粒状材料，其细观组构的复杂性使得直接分析非常困难，因此较为可行的研究思路是分离细观组构的影响因素，将复杂的研究对象理想化，针对理想材料进行简单应力状态下的试验。Oda[6]、Matsuoka 和 Geka[7]以及刘斯宏和卢廷浩[8]等均曾对棒状颗粒的二维堆积体在双轴压缩或单剪条件下的力学行为进行了试验研究，取得了较好的效果。

新试验系统采用圆形和椭圆形等理想截面的金属棒堆积成矩形的二维粒状材料作为研究对象，在水平和竖直两个方向上独立施加压力进行压剪。采用这种材料作为研究对象的优点在于：试样的边界条件明确，易于控制；二维粒状材料的组构较为简单，便于观察和量测，便于分离不同的组构因素，如颗粒的形状和长轴方向等；能够将宏观变形和细观组构演化的测量相关联，便于揭示这两者之间的内在关系。

1.2　加载模块

加载模块的作用在于提供水平和竖直两个方向的压力，并为试样提供容器。为简化计，加载模块在已有的常规三轴剪切仪的基础上进行开发。因此竖直方向压力由三轴剪切仪的轴向加载机构提供，采用应变控制方式；水平方向的压力由气缸提供，为应力控制方式。

如图 1 所示，加载模块的主体部分是一个方形框架。框架中部是试样容器，左右两侧为提供水平方向压力的气缸，由框架提供水平反力。框架整体放置于三轴剪切仪的竖向加载平台上，由三轴剪切仪控制该框架的升降并提供竖向压力。试样为矩形，在竖直方向（Z 向）和水平方向（X 向）承受正应力。

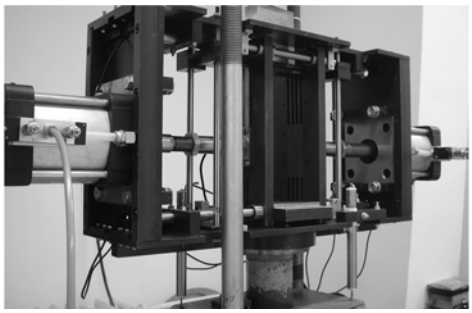


图 1　加载模块实物照片

Fig. 1 Photo of the loading module of the biaxial compression apparatus for 2D granular materials

图 2 示出了加载模块的结构和工作原理。图中：①为由金属棒堆积成的二维粒状材料矩形试样；②为试样顶部的加载盖板，用于传递竖向压力；③为容器侧压板，安装于试样外侧，用于传递水平向压力；④为容器底板，和②、③一起构成试样容器；⑤为方形框架的底板，安置于三轴剪切仪的竖向加载平台⑥上；⑦为三轴剪切仪的反力架。

加载过程中，试样顶部的加载盖板②受三轴剪切仪的反力架约束作用，不发生竖向位移；方形框架底

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

板⑤连同试样（包括侧压板③和底板④）一起随三轴剪切仪的竖向加载平台⑥升降，试样高度（即加载盖板和容器底板之间的距离）随之发生变化，因此控制⑥的升降即可控制试样的竖向应变。

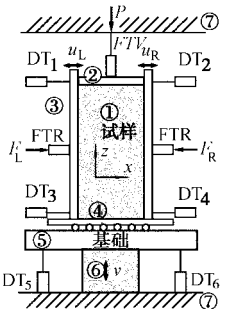


图 2 加载模块结构和工作原理

Fig. 2 Structure and working mechanism of the biaxial compression apparatus for 2D granular materials

为避免侧压板旋转对试验精度的影响，侧压板安装于水平导轨上。试样容器边角处的颗粒挤出将会影响体应变。为防止颗粒挤出，侧压板③与试样顶部的加载盖板②、侧压板与容器底板④之间采用了相互交错的锯齿形结构。

材料试验中摩擦阻力会给试验结果引入误差。该试验系统可能存在的摩擦阻力出现在两处 :试样端部、侧压板和水平导轨之间。为减少端部摩擦阻力的影响，底板④和水平加载框架的底板⑤之间装有滚针与平直式运动保持架组件。水平导轨和侧压板之间设有滚针轴套，可减少侧压板所受摩擦力。

表 1 给出了该双轴压缩试验系统加载模块的主要性能指标。

表 1 粒状材料双轴剪切仪主要性能指标

Table 1 Main properties of the biaxial compression test system

加载能力/t		试样尺寸/mm		允许变形/mm	
竖直	水平	高度	宽度	竖直	水平
5	1	240	120	50	30

1.3 测量模块

测量模块同时测量试样的宏观力学响应与细观组构演化，以便将两者联系起来。其中宏观力学响应的测量主要通过由传感器、数据采集卡和数据处理软件组成的数据采集系统来完成。如图 2 所示，试样所受竖向压力 P 通过置于试样顶部的力传感器 FTV 测量，水平方向所受压力 F_L 和 F_R 通过安装在侧压板外侧的力传感器 FTL 和 FTR 测量。位移通过 DT1～DT6 共 6 个位移传感器测量。其中 DT1～DT4 为水平位移传感器，DT5、DT6 为竖向位移传感器。根据测量结果，通过计算可得到试样的应力应变曲线。

针对材料内部细观组构的测量，目前有多种可连续跟踪组构演化的非接触式测量技术，其中数字照相结合图像相关分析的技术较为简单实用，易于实现，并且当数字照片分辨率较高时该技术具有较高的测量精度。张嘎等[9]采用该项技术跟踪粗粒土与结构接触面在剪切过程中的颗粒移动和破碎情况，获得了较好的效果。

本文采用该技术实现对材料内部细观组构演化的跟踪测量。注意到粒状材料内部颗粒之间的相对位移是组构演化的直接表现，细观组构的跟踪测量由三个步骤完成：①固定相机位置，剪切过程中每隔一定时间拍摄一张照片，获得试样的数字照片序列；②采用张嘎等[9]开发的图像相关分析软件，对得到的数字照片序列进分析，得到随试样整体变形发展其内部位移场的变化过程；③根据获得的试样位移场变化选取其中特定区域的数字照片，分析颗粒的长轴倾角等组构特征在剪切过程中的变化。

2 试验应用

为验证上述试验系统的有效性，本文针对椭圆形截面金属棒制成的矩形试样，进行了 200 kPa 侧压的单调剪切试验。为验证试验的可重复性，另有两个平行试验作为对比。试验采用三种不同直径的椭圆形截面金属棒，长轴分别为 4，2 和 1 mm，其截面长短轴之比均为 2∶1，长度为 40 mm。三种金属棒以质量比为 8∶2∶1 混合。为保证试样均匀性，试样分 12 层堆积而成，每层按比例称取不同直径的金属棒后充分混合。

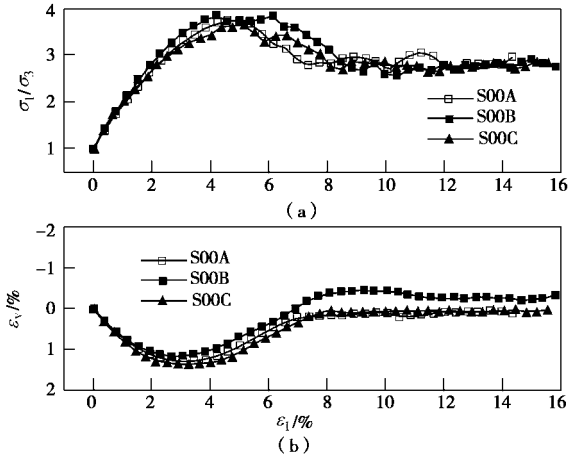


图 3 主应力比曲线和体应变曲线

Fig. 3 Principal stress ratio curves and volume strain curves of parallel tests

2.1 应力应变曲线

图 3 给出了试验结果，其中图 3（a）和（b）分别为主应力比曲线和体应变曲线。试样边界均为刚性，故采用试样边界位移计算试样整体体变。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图中 S00A、S00B 和 S00C 分别代表 3 次平行试验。考虑到采用的试样粒径级配曲线非连续，导致试验结果有一定的波动，因此从整体上看，可认为三次试验的主应力比曲线和体应变曲线非常接近，表明试验重复性较好。

图 3（a）表明，应力比曲线在达到峰值之后表现出一定程度的软化：当大主应变达到 5%左右时，主应力比达到峰值 3.84，对应内摩擦角为 36 °。图 3（b）则表明，试样具有一定剪胀性。

2.2　试样内部位移场

以 S00A 为例，对试样内部的位移场进行了分析。图 4 给出了剪切过程中竖向位移等值线与位移矢量随竖向应变发展的变化情况，其中图 4（a）和图 4（b）分别表示试样整体竖向应变为 5.2%和 13.5%时的位移场。

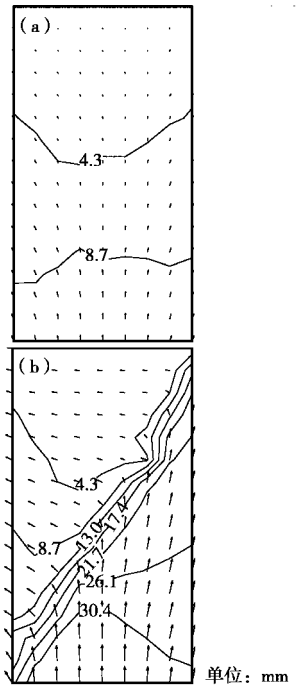


图 4 剪切过程竖向位移等值线与位移矢量图

Fig. 4 Vertical displacement contour and total displacement vector during shearing process

图 4 表明，试样底部位移以竖向为主，顶部位移以水平方向为主，这与试样的边界条件有关。随试样整体竖向应变的增大，试样最大竖向位移逐渐增加；当竖向应变较小时，试样内的竖向位移分布较为均匀；竖向应变达到一定程度时，竖向位移场分布不均匀性增强，局部位移梯度变大，表明出现了剪切带，如图 4（b）竖向位移等值线在 13.0～21.7 的区域。

2.3　组构演化

根据图 4（b），选择剪切过程中试样内局部位移梯度较大的区域分析。图 5 所示为竖向应变 ε_1 分别为 0，5.2%，9.5%和 13.5%时试样的局部照片，其中灰色部分为颗粒（金属棒）端面，黑色为颗粒之间的孔隙。为使剪切过程中堆积体内部的变形特征的观察更为直观，剪切开始前使用石笔在试样端面绘制矩形网格，图 5 中白色即石笔绘制的痕迹。

比较图 5（a）～（d）可发现，剪切前接近矩形的网格，在剪切初期基本保持形状不发生变化，仅有大小变化，表明在这个阶段变形以压缩为主（图 5（a）、（b））。随剪切过程发展，网格发生扭曲，且扭曲的程度随竖向应变的发展逐渐增强（图 5（c）、（d））。至剪切过程结束即竖向应变 ε_1 ＝13.5%时，网格扭曲最为明显。这说明在剪切过程中，粒状材料内部的变形呈不均匀，且不均匀程度随剪切过程逐渐增强。

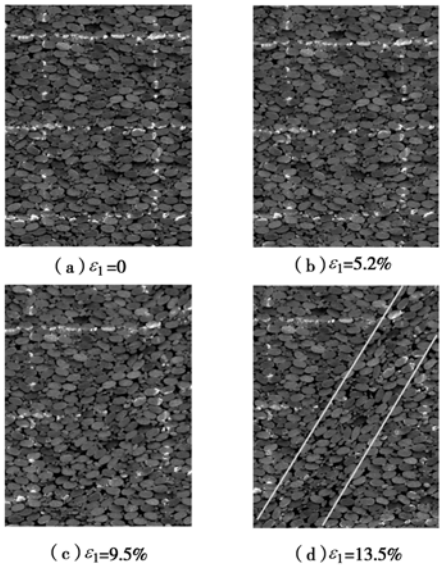


图 5 剪切过程试样局部照片（0 ° 装样，200 kPa 侧压）

Fig. 5 Local photo of the sample during shearing process (Sampling angle: 0 °, lateral pressure: 200 kPa)

由图 5（d）可知，两条直线之间的颗粒长轴方向剪切后发生了较为明显的变化 在两条直线外的区域，颗粒长轴方向基本没有发生变化。这和 Oda 等[10]得出的结论相同，证实了该试验系统用于粒状材料组构演化和力学特性研究的有效性。

3　结　　语

研制了一套新的适用于二维粒状材料的双轴压缩试验系统。该试验系统边界条件简单，易于控制；试验对象为理想截面形状的棒状颗粒堆积成的二维粒状材料，组构较为简单，便于观察和量测，并且便于分离不同的影响因素。与现有的试验系统相比，该双轴加载试验系统的结构简单，精度满足要求；能够连续地跟踪试样的组构演化，可将宏观量测和细观量测结合起来。试验表明，该试验系统具有较好的可重复性，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试验结果合理，可用于粒状材料细观组构演化规律与力学特性的试验研究。

参考文献：

[1] 张建民，谢定义. 饱和砂土动本构理论研究进展[J]. 力学进展，1994，**24**(2)：187－201. (ZHANG Jian-min, XIE Ding-yi. Advances on the research of dynamic constitutive theory of saturated sand[J]. Advances in Mechanics, 1994, **24**(2): 187－201. (in Chinese))

[2] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. Mathematical and Physical Sciences (Series A), 1962, **269**(1339): 500－527.

[3] ODA M. Initail fabrics and their relations to mechanical properties of granular materials[J]. Soils and Foundations, 1972, **12** (1): 17－36.

[4] ODA M, Nemat-Nasser, et al. Stress-induced anisotropy in granular masses[J]. Soils and Foundations, 1985, **25**(3): 85－97.

[5] CUNDALL P A, STRACK O D. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, **29**(1): 47－65.

[6] ODA M, IWASHITA K. Mechanics of granular materials, an introduction[M]. A A Balkema, 1999: 1－2.

[7] MATSUOKA H, GEKA H. A stress-strain model for granular materials considering mechanism of fabric change[J]. Soils and Foundations, 1983, **23**(2): 83－97.

[8] 刘斯宏，卢廷浩. 用离散单元法分析单剪试验中粒状体的剪切机理[J]. 岩土工程学报，2000，**22**(5)：608－611. (LIU Si-hong, LU Ting-hao. Microscopic shear mechanism of granular materials in simple shear by DEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(5): 608－611. (in Chinese))

[9] 张 嘎，张建民，梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量[J]. 岩土工程学报，2005，**27**(8)：903－907. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, LIANG Dong-fang. Measurement of soil particle movement in soil-structure interface test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 903－907. (in Chinese))

[10] ODA M, KONISHI J. Experimental micromechanical evaluation of the strength of granular materials: effects of particle rolling[C]// Mechanics of Granular Materials: New Models and Constitutive Relations. Amsterdam： Elsevier Science Pubilishers B V, 1983: 21－30.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net