

文章编号: 1000-7598-(2003) 05-0744-04

土体微细结构变化过程的试验研究方法

刘敬辉, 洪宝宁, 张海波

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 提出了一种新的岩土材料微细结构光学图像测量方法。实现了常规土工三轴实验与岩土材料微细结构的联合测试, 获得了土体在荷载作用过程中微细结构变化清晰的图像序列, 不仅可以定量研究土体在荷载作用下微结构的变化情况, 还可利用数字图像相关技术对微细结构图像序列进行相关分析, 得出土颗粒在荷载作用下的微观位移场, 为建立土体合理的本构关系模型提供试验依据。

关 键 词: 岩土微细结构; 光学测量; 数字图像处理

中图分类号: TU 411.2

文献标识码: A

A new experimental method of soil microstructure changing process

LIU Jing-hui, HONG Bao-ning, ZHANG Hai-bo

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai university, Nanjing 210098, China)

Abstract: A new optical image measurement method of soil and rock microstructure is presented. the soil sample can be measured by general triaxial experiment and optical image measurement at the same time. This method can obtain clear image array of soil microstructure of the same soil sample under different loads; it can be used both in quantitative analysis of soil microstructure change and in measurement of soil micro-displacement field under different loads.

Key words: microstructure of soil; optical measurement; digital image processing

1 前 言

土体是地球表层分布广泛且性质复杂的工程材料, 在宏观上表现为复杂的不确定性和模糊性, 其物理力学性质具有很强的非均匀性和各向异性特征。传统均匀化处理方法, 基于宏观试验的唯象分析建立的本构关系, 很难逾越土体微细结构的多样性和不规则性, 分析评价结果往往与实际情况有较大偏差, 甚至给工程建筑造成麻烦和损失。大量的研究表明, 土在工程环境下所表现出众多且复杂的工程特性和现象, 都与其内部微细结构的形态和变化有关。因此, 研究土体新的微细结构变化的试验方法, 从土体微细结构变化的定量试验研究着手, 揭示土体工程特性与其微细结构变化之间的内在规律性, 建立具有微细结构变化特征背景的本构关系, 不仅对深入研究各类岩土工程问题具有十分重要意义, 而且对分析和评价土的工程性质及其对工程建

筑的适应性也有着明显的现实性。本文作为土体微细结构变化系统研究的一部分, 将着重土体微细结构变化过程的试验研究方法。

2 试验研究方法的特点

目前, 岩土微细结构研究仍以利用直接手段(压汞、气体吸附等) 和间接手段(电液散法、渗透性法、声波法等) 的定性研究为主, 很难适应岩土微细结构的研究重点从定性分析转入定量分析的研究, 即实现结构要素(颗粒大小、形状、颗粒表面起伏、颗粒定向性、孔隙大小、形状、粒间联结方式等) 的量化分析。微细结构定量分析的重要前提是真实地提取微结构量化信息。现阶段微细结构的定量试验大多利用显微仪器(如电子显微镜, X 射线衍射仪, CT 机等) 观测不同荷载状态下制作的土壤薄片, 得到其微细结构图片, 再利用计算机图像处理的方法获得微结构图片的量化信息。这些

收稿日期: 2002-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50279008)

作者简介: 刘敬辉, 男, 1976 年生, 河海大学岩土工程专业硕士, 主要从事粘性土微细结构和数字图像处理技术的研究。

方法虽然在粘性土微细结构信息定量分析方面做出很大的贡献,但它存在其自身无法克服的缺点:

(1) 土壤薄片制作需要经过速冻、抽真空、切片等一系列工序,制作过程繁琐,价格昂贵;

(2) 由于这类微结构试验系统采用的土壤薄片不能在承受荷载作用的情况下连续地观察。要得到土在不同荷载下的微细结构信息,需要分别从不同荷载下的土体中取土制作土壤薄片,再放到仪器中观测。由于岩土材料的高度不均匀性,即使相距很近的土体其微细结构本身也存在很大差异,使得从各微细结构图片上得到的微结构量化信息的可比较性明显降低,因此,存在较大的误差。

(3) 现有的试验方法大多不能连续观测岩土材料在荷载作用下微结构的变化,无法得到土体在荷载作用下微观颗粒和孔隙的实际变形和位移信息,只能从统计信息上得到土体微结构在不同荷载下的变化趋势,因此,难以在土体微细结构的真实演变的基础上建立土颗粒的受力模型及本构关系,从而,制约了相关理论的进一步发展。

本文提出的土体微细结构光学测试系统,是为克服上述微细结构测试方法缺点而研制的。该测试系统改变了传统的试样制作方法,制备试样简便,能够连续拍摄同一试样在不同荷载、不同时刻下的微结构图片,从而,获得土体在荷载作用下微细颗粒的真实变形、位移信息,利用数字处理技术可实现连续定量分析。另外,该测试系统可进行土体微结构与荷载、土体微观位移与宏观位移的联合测试。为建立岩土材料力学模型及本构关系,提供可靠的微观试验依据。该测试系统,既保留以往微细结构测试装置的功能和优点,同时,又克服传统试验方法的不足,是一种具有非接触性、对土壤原始性质扰动影响小、精度高的新型试验方法。

3 试验系统组成

岩土微细结构光学测试系统主要由加载系统、图像采集系统和图像处理系统三部分组成,示意图如图1示。

3.1 加载系统

三轴加载装置是根据试验要求研制的并委托上海 711 所加工制造。加载舱采用半圆柱体形状(如图2所示),观测面采用特制高强度玻璃板(能承受 10 MPa 的压强不变形)。轴向压力通过蜗轮蜗杆施加,在蜗杆与轴压加载压头间安装有轴向压力、轴向位移传感器;围压通过半圆筒状橡胶气囊从土样周围施加,围压充气口处安装有侧向压力传感器,

土样观测断面上的围压由玻璃板的反力提供,根据半圆柱体的对称性可知观测断面上应力 $\sigma = \sigma_3$ 。轴向压力、轴向位移和侧向压力传感器分别通过光缆与微型计算机相连,将所得到的荷载和位移信息直接传入计算机。

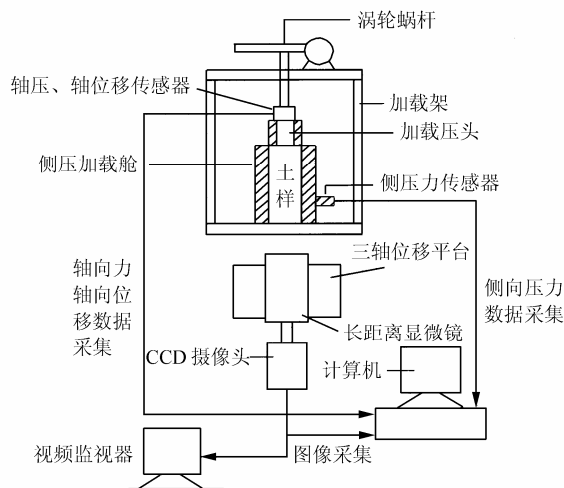


图1 微细结构光学测试系统示意图
Fig.1 The sketch of the optical test system

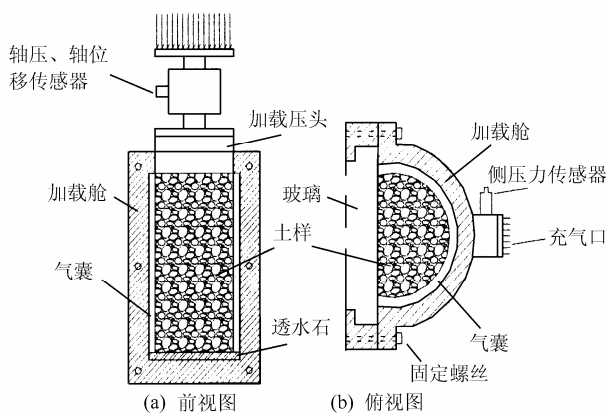


图2 加载舱详图
Fig.2 The details of the loading cabin

3.2 数据采集系统

图像采集系统由长距离显微镜、三轴位移平台、CCD 摄像仪和视频监视器组成。将长距离显微镜固定在三轴位移平台上,正对加载舱的观测断面(玻璃板一面)进行观测,长距离显微镜后接 CCD 摄像头,经 CCD 摄像头拍摄到的微细结构图像分别由光缆传入到视频监视器和微机中,通过观察视频监视器中的放大微细结构图像来观察、跟踪目标。

长距离显微镜采用美国科视达公司生产的 Questar QM100 型,其工作范围为 15~35 cm,在

15cm 处的分辨率为 $1.1\ \mu\text{m}$, 三轴位移平台可在 x , y , z 三个方向上精确调节位移大小, 通过调节三轴位移平台, 可达到调节焦距和跟踪观察同一微土体的目的; CCD 信噪比: 30 dB, 分辨率为 500 L。视频监视器采用松下 19 寸监视器, 分辨率为 850 L。

3.3 数据处理系统

由 CCD 摄像机拍摄微细结构图像传入计算机后, 经图像采集卡处理后转化为数字图像, 利用所编制的微细结构处理软件, 可以实现加载过程中按要求定时对微细结构图像进行自动捕捉、自动存盘, 再按要求对所得到的微细结构图像进行分析处理, 提取微结构量化信息。

选用功能强大、灵活性高、可移植性强的 Visual C++ 作为开发工具, 编制的微细结构图像处理软件具有以下功能:

(1) 能按要求的时间间隔实现微细结构图像的自动捕捉和自动存盘;

(2) 能根据土样中的控制点在不同微细结构图像中的坐标, 确定位移转换模式, 建立微细结构图像序列的前后对应关系, 保证所分析的微小区域的土体为同一区域;

(3) 能够应用几种供选择的图像阈值计算方法对微结构图像进行阈值处理, 并经过对阈值图像的统计计算, 迅速得出孔隙总面积、孔隙率、孔隙数目、平均面积、平均周长、颗粒定向度等微结构量化信息;

(4) 能够利用数字图像相关技术, 对微结构图像序列进行分析处理, 得到微细颗粒位移矢量图, 进而建立微细结构位移场。

4 试验原理及试验步骤

4.1 试验原理

岩土微细结构光学测试系统的基本工作原理可以概括为: 利用特别研制的三轴加载设备(见图 2)对土样施加三轴荷载, 在加载的同时, 由 CCD 摄像机连续地拍摄经长距离显微镜放大的土体微细结构图片, 将得到的视频图像, 分别传输到视频监视器和计算机中, 利用图像采集卡将传入计算机的视频图像转化为数字图像, 土样承受的荷载信息及轴向位移采用压力传感器和位移传感器测读, 并同时传入计算机中。运用编制的岩土微细结构分析软件对微结构图片序列进行分析处理, 获得微细结构的孔隙总面积、孔隙率、孔隙数目、平均面积、平均周长、颗粒定向度等量化信息和土样的微观变形场。

4.2 试验步骤

(1) 土样制备

土样制备的目的是为了得到既与加载舱形状尺寸相符的土样, 又能保持其真实的天然结构。试验系统采用半圆柱形土样, 由与普通三轴试验尺寸相同的圆柱形土样沿对称面环割到一定深度后掰开得到(尽量不要用机械模具, 用刀具进行切片处理, 事实上已经改变了土的原始结构), 这样能得到半圆柱体的试样, 能够保证试样断面中有一部分为新鲜断面, 保持其真实的天然结构。将制成半圆柱体的试样, 置于放大镜下选取断面较为平整的部分。为了去除试样表面的扰动颗粒, 可在试样的表面轻涂一薄层胶水, 待胶水干后把胶皮撕下, 并用橡皮球吹去松动的颗粒, 即可获得试样的新鲜表面, 然而, 对于以细小的粘土矿物为主的试样, 当胶皮撕下时反而会把粘土矿物薄片拉起, 所以, 操作时应十分仔细。为减少实验过程中, 土样与玻璃间相对滑动而引起的涂抹, 在土样剖面上附上一层高透明度的极薄塑料薄膜, 并在薄膜与玻璃间涂上一层透明硅油以减少摩擦。

(2) 系统标定

利用微细结构图像量化信息分析计算土体在荷载作用下的物理力学性质, 必须精确地建立微结构图像与实际土体在几何尺寸上的对应关系, 因此, 试验时, 当调节好长距离显微与试样间距离以及显微镜焦距后, 进行标定试验以确定数字图像中每个像素所表示的实际物体的长度。

标定方法是用光学测试系统, 观测一标有精确微小刻度的物体, 根据两者之间的比值 k , 确定数字图像中像素与物体实际尺寸的对应关系, 在实际测量中, 再用 k 换算出微结构图像所对应的土体的几何尺寸。

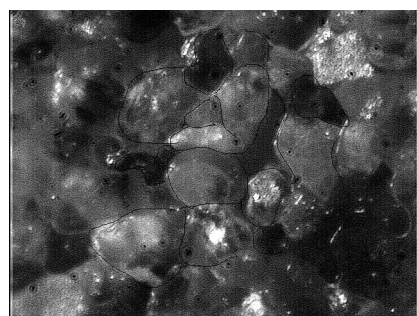
(3) 试样加载观测

将围压充气口与高压气瓶相连, 调节蜗轮使加载压头与试样顶面刚好接触(暂不施加轴压和围压), 运行图像分析软件存取试样初始状态的微细结构图片, 调节气阀施加侧向压力, 转动蜗杆施加轴向压力, 调节三轴位移平台, 使显微镜跟踪观测同一微小区域的土体, 设定图像分析软件, 按指定的时间间隔捕捉并存取试样的微细结构图片, 得到试样在荷载作用下微结构变化的图像序列。

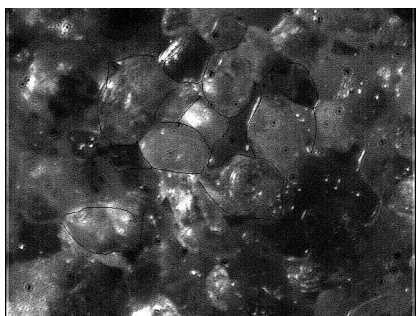
(4) 计算机图像处理

利用编制的图像处理软件提取微细结构图像序列中的量化结构信息, 建立试样的微观位移场及微结构变化信息, 为进一步理论分析提供试验基础。

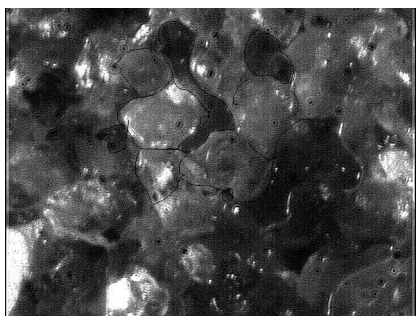
作为对测试系统的论证, 笔者对砂质粘土进行微细结构试验观测。下面是压缩过程中所得的图片, 见图 3。从图 3(a)~3(d)的逐步压缩图片中, 可以清楚的观测到土体在荷载作用下, 孔隙的变化及微细颗粒的位移情况。



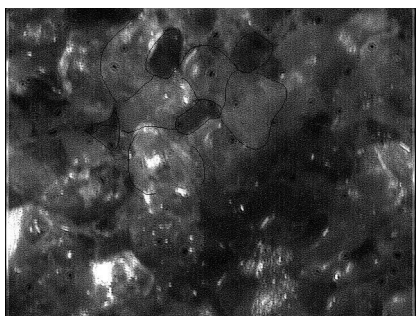
(a) $\sigma_3=150$ kPa, $\sigma_1=100$ kPa



(b) $\sigma_3=150$ kPa, $\sigma_1=200$ kPa



(c) $\sigma_3=150$ kPa, $\sigma_1=300$ kPa



(d) $\sigma_3=150$ kPa, $\sigma_1=400$ kPa

图 3 砂质粘土压缩后孔隙颗粒位移变化过程图

Fig. 3 The displacement and movement figures of the grain hole of arenaceous soil after compressed

由于篇幅关系, 仅给出图 3(a)~3(d)图像在不同压力环境下孔隙率变化曲线, 如图 4, 其他特征参数从略。由图 4 可以看出, 随着压力增加, 孔隙率相应减少。将其结果与常规三轴实验时, 在相同压力环境的孔隙率比较, 相差仅 6.5 %, 验证了微细结构处理的合理性。

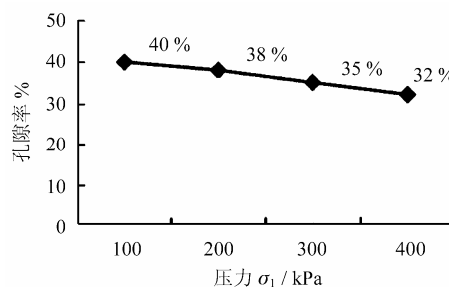


图 4 孔隙率与压力的关系曲线

Fig.4 The relationship between porosity and pressure

5 结 语

本文介绍了新研制的岩土微细结构光学测试系统及其实验原理和方法, 并利用该测试系统对砂质粘性土进行了微细结构测量, 结果证明了实验方法的可行性。通过使用微细结构光学测试系统, 得到的岩土材料微细结构信息可为岩土材料力学模型及本构关系的建立提供可靠的微观试验依据。对土体固结机理等的研究将发挥很大的作用。

参 考 文 献

- [1] Tovey N K. Quantitative analysis of electron micrograph of soil structure[A]. In: **Proceedings of the International Symposium on Soil Structure Gothenburg[C], Sweden: [s.n.]. 1973.**
- [2] 胡瑞林主编, 李向全, 官国琳, 等. 粘性土微结构定量模型及其工程地质特性研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [3] 洪宝宁, 赵维炳. 利用图像序列测量土工模型位移长的数学模型[J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 61—65.
- [4] 施斌, 姜洪涛. 粘性土的微观结构分析技术研究[J], 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 864—870.
- [5] 吴义祥. 工程粘性土微观结构的定量分析[J], 中国地质科学院院报, 1991, 23: 143—153.
- [6] 赵永红, 梁海华, 熊春阳, 等. 用数字图像相关技术进行岩石损伤的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 73—76.
- [7] 吴继敏. 图像阈值计算方法及岩石薄片矿物信息提取[J]. 水利水电科技进展, 1998, 8(3): 24—27.