侧限压缩下砂土的细观力学特性及其形态分析

曹亮^{1,2)},刘文白²⁾,李晓昭¹⁾,赵晓豹¹⁾,张辉²⁾

1) 南京大学 地球科学与工程学院;南京大学一华东有色地勘局地下空间

与地质环境研究所,南京,210093;

2) 上海海事大学海洋环境与工程学院,上海,201036

内容提要:本文基于室内固结试验,自行设计加工了土体受到轴向压力和侧限条件时,对土的细观结构进行观测的细观结构观测固结仪。通过对中砂半模固结仪试验的宏观变形场分析选择了细观特征观测点,发现中砂的位移场类似于抛物线形,位移量最大区总是发生在上透水石的底面中心处;利用 MiFas 图像软件对中砂压缩过程中的显微图像进行处理,分析了中砂试样在压缩过程中的细观力学特性,包括特征区域的颗粒面积分布、颗粒长短轴的变化、颗粒偏心度的变化、颗粒方向性和土体孔隙特征的变化。压缩试验的细观力学研究意义在于把土力学的宏观力学试验用细观结构分析和变形场分布来描述,为常规土力学试验开辟了一种可行的细观分析方法,仪器的构思和设计加工也为细观土力学工作开展提供了一种新的途径。

关键词:半模固结仪;砂土散粒体;图像处理;细观力学特性

土体力学特性与土的三大工程问题,即强度问 题、变形问题和渗流问题密切相关,而土体微细观结 构反应与宏观上所表现出来的强度特性、变形过程、 应力分布、破坏形式密不可分。近年来,土体结构性 研究已成为现代土力学的前沿课题之一(沈珠江, 1998)。随着数字图像处理技术的快速发展,许多 学者从微观尺度上对受荷条件下粘性土的微结构变 化和结构特征参数进行了定量分析研究(施斌, 1997;王清等,2001;周宇泉等,2005;肖琳等,2009)。 与粘性土相比,许多学者通过对砂土应力应变关系 及其机理进行细观数值模拟,揭示砂土变形的细观 机制并建立相应的砂土细观力学模型,可以有效地 反映砂土的细观结构与宏观力学反应之间的联系 (刘文白等,2004;周健等,2007;刘洋等,2008;史旦 达等,2008;刘斯宏等,2009)。但该方法主要是针对 净砂而提出的,天然结构性砂土的力学特性与净砂 的室内测试结果存在较大差别,天然砂土离散元方 法中关于接触本构模型及其参数的确定,是其关键 点之一,也必须通过细观试验来获取和验证。 (Delenne et al., 2004; Jiang et al., 2006)。所以试 验的方法仍占有重要位置,试验方法在某些方面具 有不可替代的作用(白义如等,2004)。如何利用试 验和观测手段对天然砂土组构参数进行量化,确定 理论模型和数值计算中的参数显得尤为重要。 Sukumaran(2001)等将"团颗粒"方法与数字图像技 术结合起来,将实际砂颗粒数字图像导入颗粒流程 序,为定量模拟砂颗粒的细观力学特性提供了启示; Oda(2004)等利用 Microfocus X - Ray CT 对砂土剪 切带中的细观结构变化进行了实时监测和研究;张 嘎(2005)等利用大型土与结构接触面试验设备和 数字图像位移测量技术,研究了土与结构接触面土 颗粒的细观运动,从细观尺度上分析了砂土类介质 两种典型理想单元体内部结构变化对其力学响应的 影响:Kuo(1998)等给出了基于体视学方法的组构 张量定义以及测量方法,但利用切片法得到砂土横 截面图像不仅操作复杂,且不易获得有关砂粒间接 触关系的参数。

如果对常规仪器进行合理的技术改造,开展土体微细结构变化的定量试验研究,不仅试验操作简单,而且易于推广应用。室内固结试验作为土力学中的基本试验之一,土样被密封于环刀内部土体结构变化难以观测,试验的结果反映的是土单元体的

收稿日期:2010-04-15;改回日期:2010-07-23;责任编辑:章雨旭。

注:本文为国家自然科学基金项目(编号51078228;50909057);江苏省研究生培养创新工程项目(编号CX10B_019Z);公益性行业科研专项经费资助项目(编号200805036);上海海事大学校级重点学科建设项目(编号A290209002)的成果。

作者简介:曹亮,男,1985年生。博士研究生。地质工程专业。Email:bingshimoya@126.com。

力学行为(陈云敏等,2008)。即针对土工问题中的 一个"点",按一定的状态和路径对土体的宏观力学 性质进行研究,可归结为应力一应变的试验。

本文通过自行研制的细观结构观测固结仪(实用新型专利号:ZL200920072242.6),实现了常规试验与土体细观结构的联合测试;从天然砂土的位移场发展变化和细观结构定量分析入手,提出了一种土体宏细观力学性状相关联的试验研究方法,期望为建立具有细观结构变化特征背景的砂土颗粒受力模型及本构关系提供相应的试验依据。

1 试验介绍

1.1 砂样

试样取自上海市重大建设项目——辰山植物园 某试验段工程现场,根据《建筑地基基础设计规范》 (GB5007-2002)进行室内试验测定,该试样定名为 中砂,其基本物理力学性质指标列于表1。

1.2 试验设备及过程

1.2.1 细观结构观测固结仪

刘文白等(2009)通过自行加工的半模直剪设 备,对砂土在剪切过程中的土颗粒的位移变化进行 定量分析研究,为直剪试验的发展提供了一种新的 思路。本文基于室内固结试验,自行设计加工了土 体受到轴向压力和侧限条件时,对土的细观结构和 土体内部的变形随压力变化而变化进行观测的土工 试验仪器即细观结构观测固结仪,包括底座、设置在 底座内的大套环、设置在大套环内的小套环、透水石 及传压盖板,所述透水石包括上透水石和下透水石, 所述大套环、传压盖板、小套环和透水石均为半圆 状,所述大套环的直边侧面为平板状透明物体构成 的细观结构观测面;所述细观结构观测面、大套环、 小套环和透水石相互连接构成一盛放土样的固结容 器。该仪器不仅可以进行砂土细观结构和土体内部 变形的观测,也可以进行粘性土土体内部变形的观 测,具有易于加工、试验简便、试验结果直观等优点。

1.2.2 变形量测的数字照相设备

5%

相机(图 1a)为 NikonD200 数码相机(带三角架),1020 万象素,8 倍光学变焦。其它的辅助摄像

53%

20%

设备包括新闻照明灯(图 1b)、遥控拍摄装置等。相机、灯光的位置在整个试验过程中保持固定。相机 用遥控线控制,以减少拍照对相机的晃动。

1.2.3 砂土细观图像的采集设备

相机为 Nikon coolpix4500 单反数码相机,数字 照片采用 450 万像素、4 倍光学变焦。其它辅助设 备包括支架及体视显微镜分析仪(图 1c 和 d)(1 套,三目体视显微镜 XTZ-350,0.8 ~ 5.6 倍变焦,调 焦比 7:1,放大倍率 8 ~ 50 倍),照明设备(SZX-DI-S 体视光源 6V 20W 卤素灯,亮度可调)。

1.3 试验过程

刘文白等(2009)利用细观结构观测固结仪对 某粉质粘土进行了不同含水率下的固结试验,并对 试验结果进行了数学分析和曲线拟合,通过得到与 常规试验相近的结果,验证了半模固结仪试验的可 行性。本次试验在南京土壤仪器厂生产的高压固结 仪(杠杆比 i = 24:1)上进行,将砂样分层装入半模 固结仪试样室并抹平样面。荷载采用砝码逐级单调 加荷的方式,荷载依次为50、100、200、300、400和 600kPa,每级荷载作用下土样压缩达到相对稳定后 采集分析所需图像(图1e)。由于砂土颗粒变形较 大而且变化平缓,试验照片序列间图像相关性较好, 数字照相量测技术(DPDM)技术在砂土的变形量测 试验研究中取得了较好的应用效果(李元海等, 2004, 2007)。将所拍照片转为 BMP 格式后,基于 数字照相量测技术,在PhotoInfor程序中根据图像上 指定的像素网点的位置追踪和坐标计算,实现像素 点的位移量测。细观试验时,将带有螺纹口的数码 相机安装在显微镜目镜上,打开体视光源,调节体视 显微镜上的准焦螺旋和镜头、观测面之间的距离,使 相机显示屏显示的砂土颗粒形态尽量清晰(图1f)。 根据文3.1 中变形量测试验分析的结果,在细观结 构观测面洗取四个特征观测点,对目标区域进行放 大。试验中,每个特征观测点的细观图片均在独立 的半模固结仪试验中拍摄。

以1号点为例,在细观结构观测面的对应位置 贴上带有刻度(以mm为单位)的标签,如图2a所

0.513

0

32.5

不同粒径颗粒含量 不均匀 曲率 最大孔 最小孔 内摩 粘聚力 2.0~1.0 $1.0 \sim 0.5$ 0.5~0.25 0.25~0.075 系数 系数 隙比 隙比 擦角 $C_q/(kPa)$ $\varphi_{\rm q}/(°)$ c_{u} mm $c_{\rm c}$ $e_{\rm max}$ e_{\min} mm mm mm

3.2

1.5

0.856

22%

表 1 砂土的物理力学性质指标 Table 1 Physic—mechanical indices of sand



图1试验图像采集设备及安装示意图

Fig. 1 Devices for taking experimental images and illustration for installment
 (a)带三脚架的相机;(b)新闻灯;(c)支架;(d)体式显微镜;(e)变形量测试验装置示意图;(f)细观试验装置示意图
 (a)Tripod-mounted camara;(b)News lamp;(c)Bracket;(d)Bodied microscope;(e)Illustration of the macro deformation analysis devices;(f)Illustration for the devices of micro analysis



图 2 1 号点的显微镜细观图像 Fig. 2 Microscopic images in Zone 1

表 2 各特征观测点的图像比例

 Table 2
 Magnification ratio in each microscopic

feature zone

特征点	1 号点	2 号点	3 号点	4 号点
图像比例(mm/pixel)	0.0071	0.0053	0.0065	0.0058
放大倍数	30	40	33	37

示。这样,在调节显微镜物镜的过程中不但能迅速 地找到目标区域,也可根据刻度值和图片的像素大 小计算出图像比例(单位:mm/pixel)。每次试验

时,显微镜与细观观测面间的距离不同会导致放大 倍数有所差异(表2),但不会对细观结构参数造成 显著的影响,因为在细观这一层次上,土体具有理想 的自相似性(周健等,2006)。进行细观图像采集 前,用小刀轻轻探入显微镜和玻璃表面之间将标签 挑去,露出后面被遮挡的砂土颗粒,若图像中颗粒较 暗,可用体式显微镜上的遮光器调节光线的强弱,如 图 2b 所示。加荷过程中用 Nikon coolpix4500 数码 相机拍摄各荷载等级下土体压缩达到相对稳定后的



图 3 中砂半模固结试验的位移场分布图 Fig. 3 Distribution of the sands deformation field in the half mold consolidation tests

细观图像,由于篇幅所限,仅将摄取1号点处100、200、400和600 kPa的细观图片列于图2c-f。

2 试验结果及讨论

2.1 半模固结试验变形场分析

通过对比确定中砂半模压缩试验的图像分析区 域为宽 64mm,高 25mm 的长方形,分析范围包括上、 下透水石和侧壁的一部分。PhotoInfor 程序中的图 像比例为 0. 024mm · pixel⁻¹,搜索步长为 0. 1 pixels,测点间距为 20pixels,共计 6600 个由 4 测点 组成的网格单元。分析得到的土体位移场分布显示 了各级荷载下的变形区域和变形模式。

图 3 中列出了加荷中期 p = 300kPa(图 3a)和最 后一级荷载 p = 600kPa(图 3b)时的压缩土体位移 场分布图,四周边界为上、下透水石和左、右侧壁。 结果表明:由于中砂的颗粒间没有粘聚力,上透水石 底部压力中间大而边缘等于零。随着荷载增大,位 移场云图从上透水石的下底面中心向外依次出现几 个明显的弧形分布区,若保证装样均匀且不出现偏 心荷载,半模固结仪试验位移场及等值线应呈轴对 称的抛物线形分布。

利用 PostViewer 对 *p* = 600kPa 时的位移变形量 测结果进一步统计分析,可得到上透水石底面处压 缩土体的位移值大小。见图 4。可见上透水石底面 中心处的位移量最大,约为 0.3mm,故将 1 号细观 观测点选在此处,推测此处砂土细观结构会相应发 生明显变化;此外,2 号点,3 号点,4 号点在细观结 构观测面上的位置分布见图 5。

2.2 加荷过程中观测区域颗粒基本形态分析

以1号点为例,细观图像圆形区域的边界亮度 不够,颗粒形态并不清晰。故选取一内接正方形分 析区域进行分析,裁剪后要求分析区的中砂颗粒清



图 4 p = 600kPa 时上透水石底面处的位移分布 Fig. 4 Deformation field under the upper porous stone(p = 600kPa)



图 5 各细观特征观测点的位置分布 Fig. 5 Each microscopic feature zones and position

晰并易于识别,并且分析测点均指单元中心点(图 6a)。若直接将裁切好的图片(图 6b)用 MiFas 图像 分析系统(体视显微镜分析系统)进行细观图像处 理,效果不太理想。根据判别砂土颗粒与孔隙的标 准(周健等,2008),利用 Adobe Photoshop 将试验图 片上的中砂颗粒圈出后涂白,并在 Mifas 软件中设

表 3 各观测点的细观量化指标——颗粒数目、总面积、颗粒偏心度 Table 3 Quantitative Indicators in each microscopic feature zone

	1 号点				2 号点			3 号点			4 号点		
荷载	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	颗粒	
大小	数目	总面积	偏心度	数目	总面积	偏心度	数目	总面积	偏心度	数目	总面积	偏心度	
(kpa)	(个)	(μm^2)	/	(个)	(μm^2)	/	(个)	(μm^2)	/	(个)	(μm^2)	/	
0	279	17357	0.505	155	21926	0.470	112	23453	0.560	98	16544	0.607	
50	300	18834	0.476	177	21989	0.457	196	23560	0.445	121	16550	0.539	
100	398	20091	0.445	171	21827	0.447	208	23587	0.430	134	16521	0.538	
200	332	20198	0.465	172	21738	0.434	153	23701	0.433	102	16576	0.579	
300	313	21384	0.450	189	21801	0.451	163	24036	0.423	130	16618	0.426	
400	342	21634	0.453	145	21831	0.482	213	24504	0.451	110	16857	0.598	
600	376	23214	0.471	157	21705	0.470	225	25044	0.468	105	17622	0.572	



图 6 细观图像的处理: (a)裁切前的细观图片; (b)裁切后的图像;(c)二值化后的图像 Fig. 6 Processing steps for the microscopic images: (a) Untrimmed microscopic image; (b) Trimmed microscopic image;(c)Image binarizing process



图 7 颗粒总面积折线图(a)、颗粒长轴均值折线图(b) 和颗粒偏心度均值折线图(c)



置图像二值化的阈值为 120,将颗粒与孔隙明显地 区分开来(图6c)。沈珠江(1996)指出,能初步决定 细观结构的指标包括平均孔隙率、孔隙分布的标准 差、组构张量的主轴方向及其椭圆度、定向张量的主 轴方向及其椭圆度和平均胶结力及其分布的标准 差。本文根据 Mifas 软件的实际分析功能,主要针 对细观结构参数中与视觉相关的参数:砂土颗粒的数目、总面积、偏心度(见表3)、长短轴、以及定向特征进行了分析。若以某级荷载下的细观结构参数做基数 a,荷载等级增加后相应的参数变为 b,则将细观结构参数变化率 R 定义为 R = [(b - a)/a] × 100%。

2.2.1 颗粒数目及总面积

各特征观测点的颗粒总面积折线图见图 7a。1 号点在加荷初期,分析区域内的颗粒数目持续增加, 四个点中该处位移量最大,细观结构特征上表现为 颗粒间的孔隙不断被填充,颗粒总面积持续增加,加 荷过程结束后总面积为23214µm²,与初始状态相比 变化率 R = 33.74%;由于2号点靠近下透水石边 界,颗粒个数在试验过程中虽有所变化,但位移增量 不明显导致颗粒总面积受荷载影响很小;3号点在 加荷初期,分析区域内的土颗粒总面积基本上没有 变化,200kPa时位移增量逐渐传递至该处,颗粒的 接触点增加,颗粒间的摩擦由咬合摩擦为主导作用 改变为滑动摩擦,颗粒被逐步挤密,颗粒总面积随之 不断增大:4号点虽与3号点处于同一水平位置,但 该处紧靠环刀侧壁,离竖向中轴线最远,荷载加至 400kPa 时,颗粒的总面积才伴随位移增量有所增 加。

2.2.2 颗粒长、短轴及偏心度

求解砂土颗粒的形状参数,比如说长轴方向,关 键在于能给出一个适合的数学描述。已知的确定颗 粒长轴方向的方法有三种:最佳拟合直线法、最小外 界矩形法(minimum external rectangular, MER)和二 阶矩法。MiFas 图像分析系统采用 MER 法对长轴 方向进行了统计,各特征观测点的颗粒的长轴均值 折线图见图 7b,可看出在中轴线位置处的1号点和 2号点,颗粒长轴在加荷过程中具有显著的定向性, 长轴均值加荷前后变化不大;3、4号点在加荷初期 颗粒的长轴均值都出现了不同程度的降低,3号点 的长轴均值变化幅度更大。荷载由 100kPa 增至 200kPa 时,3、4号点的颗粒长轴均值的变化趋势相 反,此时4号点的颗粒开始克服环刀侧壁摩擦力产 生相反方向的转动;继续加荷,两分析区域内的颗粒 通过自身形态的变化和结构调整完成了定向排列, 长轴均值的变化趋势归于一致,说明当大部分颗粒 适应了新的应力环境后,颗粒的位移和旋转方向具 有较好的一致性。由于砂土颗粒的刚度较大,试验 压力范围内颗粒破碎的机率较小,加荷前后各特征 观测点的短轴均值的变化趋势与长轴基本一致。

颗粒的偏心度均值 E 为颗粒短轴 B 与长轴 A 比值的平均值, E = B/A, 该值代表了颗粒在分析区 域内的圆度, 见图 7c。偏心度的取值范围为(0,1), 其值越小, 颗粒越狭长。1、3、4 号点尽管初始偏心 度均值不同, 但加荷结束后颗粒的偏心度与初始状 态相比是减小的, 即颗粒形态最终向扁长状发展, 向 稳定的承载形式过渡; 1 号点处的位移增量虽然最 大, 但颗粒的偏心度变化比较平稳, 初、末级荷载的 偏心度降低, R = 6.7%, 说明靠近上透水石的颗粒 虽然产生了较大的定向移动, 但颗粒的运动主要集 中于竖直方向, 颗粒的空间排列形态并没有发生大 的变化。当施加荷载超过 200kPa, 4 号点的颗粒偏 心度有了最大的下降幅度, 变化率 R = 26.42%, 表 明颗粒产生了明显地旋转, 颗粒的空间位置发生了 变化, 荷载增加导致颗粒长短轴的方位重新调整。

2.2.3 颗粒排列的定向特征

颗粒的方向性定义为颗粒长轴与水平 *x* 轴的夹 角 θ。由于颗粒方向在 0~180°和 180°~360°具有 对称性,以 0~180°的玫瑰花图来表示颗粒长轴方 向的角度频数分布,以 1 号点为例,从图 8 中可得到 颗粒长轴与 *x* 轴的夹角和夹角落在划分的小区间内 的颗粒个数。

定义分布概率 $F(\alpha) = \frac{n_i}{n} \times 100\%$

式中: n_i、n 分别为夹角 θ 落入[θ_{i-1}, θ_i]的土 颗粒数量和颗粒总数。 不同长轴方向范围内的 颗粒个数及概率统计列于表 4,由于半模试验是将 中砂试样分层压入固结容器,颗粒间已经被逐渐

表 4 1 号点不同长轴方向范围内的颗粒个数及概率统计 Table 4 Granules' amount and probabilistic analysis with different direction in Zone 1

荷载	各夹角区间的颗粒数目(个)/F(α)值								
(kPa)	[0,90°)	[90,105°]	[105,120°]	[120,135°)	[135,150°)	[150,165°)	[165,180°]	(个)	
0	79/28.32%	39/13.98%	9/3.23%	18/6.45%	10/3.58%	20/7.17%	104/37.28%	279	
600	113/30.05%	40/10.64%	8/2.13%	7/1.86%	19/5.05%	14/3.72%	175/46.54%	376	

2.2.4 颗粒的孔隙率变化

向排列的过程。

由于拍摄的图片是二维的且拍摄区域内的砂土 颗粒位置不固定,定义孔隙率 n 为孔隙面积与分析 区域面积的比值。利用 MiFas 图像分析系统对图像 的孔隙面积和分析区域总面积分别做出统计,然后 计算出对应荷载下孔隙率值。加荷前和 p = 600kPa 时孔隙率分别用 n_0 和 n_{600} 表示;孔隙率的变化值和 变化率分别用 Δn 和 R 来表示,计算结果列于表 5。

1 号观测点的孔隙变化率 R = -72.56%,该点 受压缩荷载影响孔隙率的变化率最大,其次为颗粒 数目(R = 34.77%)和颗粒总面积(R = 33.74%), 颗粒的偏心度变化率 R 仅为 -6.7%,说明加荷前 后细观结构参数变化最显著的是孔隙率;2 号点的 加荷前后孔隙率增加了约3.19%,四个细观观测中 变化最小;3 号观测点和4 号观测点的孔隙率减小 幅度较为接近。

3 结论

本文主要从砂土散粒体的细观力学出发,提出



表5 各点加荷前后的孔隙率变化值 Δn 及变化率 R

le 5	The	variation	of	void	area	S	value	and	ratio	ın	each	Zone

观测点 i	分析区面积(μm^2)	n_0	n ₆₀₀	Δn	R(%)
1	25412.88	0.317	0.087	-0.230	-72.56
2	29274.28	0.251	0.259	0.008	3.19
3	32940.22	0.288	0.240	-0.044	-15.28
4	23838.85	0.306	0.261	-0.045	-14.71

了一种基于室内固结试验的土体宏细观力学性状相 关联的试验研究方法,此研究方法为进一步认识和 揭示土的力学规律与机理,确定理论模型和数值计 算中的参数提供了新途径,并为下一步建立细观结 构观测固结试验的宏观试验现象与细观结构变化的 定量模型提供了相应的试验依据。研究结果如下:

(1)利用自行改制的细观结构观测固结仪实现 了单调加荷条件下中砂内部土体的变形量测,得到 了压缩土体的局部化变形范围和变形模式;并根据 宏观变形量测的结果,选取了四个细观特征观测点 进行显微图像拍摄。

(2)利用 MiFas 图像软件对中砂压缩过程中的显微图像进行处理,分析了中砂试样在压缩过程中的细观力学特性,发现1号点土体结构受荷载扰动最剧烈,细观结构特征上表现为颗粒间的孔隙不断被填充,颗粒总面积持续增加,该处加荷前后细观结构参数变化最显著的是孔隙率。对该点处颗粒的定向特征进行分析,发现颗粒不断被倾斜压密,构成点接触的颗粒数目逐渐减少,颗粒长轴方向多渐朝水平方向发展,最终颗粒的长轴方向与荷载方向大致正交,中砂颗粒最终完成了随机排列→装样挤密→颗粒旋转→定向排列的过程;2号点各颗粒的细观结构受压缩荷载影响较小,各细观参数变化不大;3、4号点处于同一水平位置,加荷中后期细观结构具有明显的突变性,4号点处颗粒与侧壁的摩擦力对该处细观结构影响较大。

参考文献 / References

- 白义如,白世伟,冯传玉.2004.模型位移场的散斑互相关法测量技 术研究及应用 岩土力学,25(6):995~998.
- 陈云敏,陈仁朋,詹良通.2008. 岩土工程的多尺度试验(大会特邀 报告),第25届全国土工测试学术研讨会论文集:43~56,杭 州.
- 李元海,朱合华,上野胜利,望月秋利. 2004. 基于图像相关分析砂 土试验模型变形场量测. 岩土工程学报,26(1):36~41.
- 李元海,朱合华,靖洪文,上野胜利,2007.基于数字照相的砂土剪 切变形模式的试验研究.同济大学学报,25(6):685~689.
- 刘斯宏,姚仰平,孙其诚,李铁军,刘敏芝. 2009. 基于细观结构的颗 粒介质应力应变关系研究. 科学通报,54(11):1496~1503.

- 刘文白,周健. 2004. 上拔荷载作用下扩展基础的颗粒流数值模拟. 水利学报,(12):69~76.
- 刘文白,张辉,曹亮,周健,史旦达. 2009. 细观结构直接剪切仪.实 用新型专利号:ZL 200920156414.3
- 刘文白,曹亮,邓一兵. 2009. 基于 DPDM 技术的某粘性土侧限压缩 试验变形场分析.水运工程,(10):36~40.
- 刘洋,吴顺川,周健. 2008. 单调荷载下砂土变形过程数值模拟及细 观机制研究.岩土力学,29 (12):3199~3204,3216.
- 沈珠江. 1996. 土体结构性的数学模型—21 世纪土力学的核心问题. 岩土工程学报, 1(1):14~17.
- 沈珠江. 1998. 现代土力学的基本问题. 力学与实践, (2):21~27.
- 施斌. 1997. 粘性土微观结构简易定量分析法.水文地质工程地质, 24(1):7~10.
- 史旦达,周健,刘文白,贾敏才. 2008. 循环荷载作用下砂土液化特性的非圆颗粒数值模拟.水利学报,39(9):1074~1082.
- 王清,肖树芳,王凤艳. 2001. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用.成都理工学院学报,28(2):148~153.
- 肖琳,李晓昭,胡增辉,赵晓豹,赵高峰,陈立根.土体内在结构对热 导率计算模型的影响研究.地质论评,2009,55(4):598~605.
- 张嘎,张建民,梁东方.2005. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量. 岩土工程学报, 27(8):903~907.
- 周健,余荣传,贾敏才. 2006. 基于数字图像技术的砂土模型试验细 观结构参数测量. 岩土工程学报, 28(12):2047~2052

- 周健,史旦达,贾敏才,闫东霄. 2007. 循环加荷条件下饱和砂土液 化细观数值模拟. 水利学报, 38(6):697~703.
- 周健,贾敏才. 2008. 土工细观模型试验与数值模拟. 北京:科学出版社, 19~20.
- 周宇泉,洪宝宁. 2005. 粘性土压缩过程中的微细结构变化试验研 究. 岩土力学, 26(增):82~86.
- Delenne J Y, Youssaufi M S E, Cherblanc F, Benet J C. 2004. Mechanical Behaviour and Failure of Cohesive Granular Materials. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28: 1577 ~ 1594.
- Jiang Mingjing, Yu H-S, Harris D. 2006. Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 30(7):723 ~761.
- Kuo C Y, Frost J D, Chameau J L A. 1998. Image analysis determination of stereology based fabric tensors. Geotechnique, 48 (4):515~525.
- Oda M, Takemura T, Takahashi M. 2004. Microstructure in shear band observed by microfocus X-Ray computed tomography. Geotechnique, 54(8):539 ~ 542.
- Sukumaran B, Ashmaway A K. 2001. Quantitative characterization of the geometry of discrete particles. Geotechnique, 51(7):619~627.

Micro Mechanical Properties and Shape Analysis of Sands Employing Confined Compression Tests

CAO Liang $^{1,2)}$, LIU Wenbai $^{2)}$, LI Xiaozhao $^{1)}$, ZHAO Xiaobao $^{1)}$, ZHANG Hui $^{2)}$

1) School of Earth Sciences and Engineering, NJU-ECE Institute for Underground Space and Geoenvironment,

Nanjing University, Nanjing, 210093;

2) College of Ocean Environment & Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai, 200136

Abstract: Based on the principle of confined compression tests, the half mold consolidation apparatus was designed for soil's micro-observation under axial and confined compression stress. Firstly, the macro deformation field of medium sands in half mode test was analyzed and microscopic feature zones were eventually selected: the axisymmetric displacement field was similar to a parabola, the largest change of displacement always occured at the bottom's center of the upper porous stone. By using the micro image processing software—MiFas, micro mechanics characteristics of the tests was further studied, including the whole acreage of granules, the changes of long and short axes, eccentricity, the angle between the long axes and horizontal direction and the void area's ratio. The importance of micro mechanics study lies in its emphasis on the distribution of the deformation field and related micro structural changes. The design of half mold micro observation apparatus was also a creative work for macro deformation and micro structure analysis which could provide a new concept for the development of traditional soil mechanical tests.

Key words: half mold consolidation apparatus; granular sands; image processing; micro mechanical properties