

DOI: 10.11779/CJGE201704013

显微 CT 扫描南京粉砂空间孔隙结构的精细化表征

张 巍, 梁小龙, 唐心煜, 施 斌, 徐炎达, 肖 瑞

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘 要: 孔隙结构是反映土体物理、力学性质变化的本征指标, 传统医用 CT 分辨率尺度不足以辨识表征岩土体细观结构的单个颗粒或孔隙。使用了 14 μm 高空间分辨率的工业显微 CT, 对砂雨法生成的南京粉砂试样进行了扫描。对 CT 图像预处理后所得二值数字图像序列进行了三维重构, 实现了任意表征单元体 (REV) 提取, 并可对 REV 采用三维二值矩阵加以表征与定量分析。通过分析断层图像序列, 计算出土样整体的体积孔隙率, 与实验孔隙率误差仅 3.93%。沿试样高度计算表观孔隙率在 20.97%~46.77% 范围内波动。从试样底部一 REV 中提取出水平方向、与水平面成 60° 角以及两正交垂直方向共 4 个典型切面, 对其孔隙定向性进行统计分析, 结果表明, 水平切面具有最小主定向角, 两正交垂直切面中, 一个具有最大主定向角, 另一具有最小各向异性率, 斜切面孔隙呈近似等向分布, 无明显定向性。采用孔隙网络模型进行空间孔径定量分析, 结果发现, 所提取出 3 个 REV 的最大孔径分布在 629~696 μm , 最小孔径分布在 54~77 μm , 平均孔径分布在 166~185 μm , 孔径分布在 100~200 μm 范围内最为集中。方法可用于热、水、力等各类因素作用下土体空间孔隙结构的无损定量分析。

关键词: 显微 CT; 南京粉砂; 阈值分割; 三维重构; 表征单元体; 孔隙率; 定向性; 孔径分布

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)04 - 0683 - 07

作者简介: 张 巍(1974 -), 男, 副教授, 从事工程地质数值方法研究。E-mail: wzhang@nju.edu.cn。

Fine characterization of spatial pore structure of Nanjing silty sand using micro-CT

ZHANG Wei, LIANG Xiao-long, TANG Xin-yu, SHI Bin, XU Yan-da, XIAO Rui

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Pore structure is the index reflecting the nature of the physical and mechanical properties of the soil. The resolution scale of the traditional medical CT is not high enough to identify the single grain or pore characterizing the meso-structure of geo-materials. An industrial micro-CT, with a high spatial resolution of 14 μm , is used to scan a Nanjing silty sand specimen fabricated by pluviation. The binary digital image sequence is acquired after preprocessing the CT initial images, and three-dimensional reconstruction is implemented. Arbitrary representative elementary volume (REV) is extracted, and three-dimensional binary matrix is used for the characterization of the REV and for the quantitative calculation. By analyzing the tomographic images, the volume porosity of the whole specimen is calculated, with an error of only 3.93% compared with the experimental porosity. The apparent porosity along the specimen fluctuates between 20.97 and 46.77%. Four typical sections, one horizontal, one tilting with an angle of 60 degrees to the horizon and two orthogonal vertical sections, are extracted from the REV at the bottom of the specimen. Statistical analysis of the preferred orientation is performed, and the results show that the minimum orientation angle occurs at the horizontal section, and one of the two orthogonal vertical sections exhibits the maximum orientation angle and the other exhibits the maximum anisotropic ratio, and the oblique section exhibits approximate isotropy, namely no obvious preferred orientation. The pore network model is used for spatial pore diameter analysis of three extracted REV, and the results indicate that the maximum pore diameter distributes from 629 to 696 μm , and the minimum pore diameter does from 54 to 77 μm , and the average pore diameter does from 166 to 185 μm , and the pore diameter concentrates from 100 to 200 μm . The proposed method is capable of nondestructive quantitative analysis of pore structure variation of the spatial soil under any effect induced by heat, water or mechanics.

Key words: micro-CT; Nanjing silty sand; threshold segmentation; 3D reconstruction; representative element volume; porosity; preferred orientation; pore diameter distribution

0 引 言

作为土体细观结构的基本组成部分, 孔隙结构是

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230636); 国家自然科学基金项目(40902076); 江苏省自然科学基金项目(BK20141224)
收稿日期: 2016 - 01 - 25

反映土体物理、力学性质变化的本征指标^[1]。将土样制成光片，采用扫描电镜或光学显微镜拍照并进行数字图像分析，是表征土体表观孔隙结构的常用方法，但该方法难以无损地提供土样内部孔隙结构的分布特征^[2]。压汞法与低温氮吸附法可测定土样中孔径分布，间接地定量表征土样空间孔隙结构，但这两种方法也无法精细化地表征出土样内部空间孔隙结构的形态特征^[3-4]，并且，仍难以识别土样中的闭合或非连通孔隙。此外，压汞法在高压操作过程中还存在破坏土样原生孔隙结构的可能性。由于土体实际的物理、力学行为均有空间特性，因此，有必要在现有土体孔隙结构研究方法基础上，进一步发展表征土体空间孔隙结构的新原理与新方法。

X 光计算机断层扫描成像 (CT) 技术具有无损、非侵入式透视成像等特点。中国自 20 世纪 90 年代开始，CT 技术被逐步应用于热、水、力等因素作用下土样体变特征的试验实时观测，取得了大量有价值的研究成果^[5-8]。然而，国内 CT 原位观测试验装置基本上都由医用 CT 改进得来，目前已知 CT 观测成像的最高空间分辨率为 0.15 mm，该分辨率尺度下，不足以辨识表征岩土体细观结构的单个颗粒或孔隙等细节^[9]。

近年来，微焦点 X 射线光源技术迅速发展^[10]，与此同时，在油、气、煤炭能源开发及 CO₂ 地质封存等工业背景驱动下，μm 量级分辨率的工业显微 CT (μCT) 已在岩石孔隙尺度成像领域得以广泛应用^[11]。中国太原理工大学与中国工程物理研究院自行研制了 μCT225kVFCB 型高精度显微 CT，空间分辨率达到 1 μm，利用该装置，李伟等实现了不同煤体结构煤中孔隙分布三维可视化精细表征^[12]；李建胜等构建了泥岩的孔隙结构（孔隙孔径和孔隙率）分析算法^[13]。此外，李小春等采用 TESCO 公司的 HMX225 显微 CT（空间分辨率 5 μm），自行研制了配套使用的岩石 CT 三轴仪，获得了 Berea 砂岩在不同应力状态下的有效孔隙半径分布、有效喉道半径分布以及弯曲度分布等孔隙几何特征^[14]。对于粒径大于显微 CT 分辨率的砂土、粉土等细粒无黏性土，使用显微 CT 观测其孔隙结构具有足够高的表征精度，近年来，国外已逐步使用显微 CT 原位观测并定量分析不同应力状态下砂土的孔隙结构变化^[15]；但在中国，相关研究仍有待开展。

本文以南京粉砂为例，使用 GE Nanotom M 显微 CT，对自由状态下的土样实现了孔隙尺度成像与三维重构，可提取出土样内部不同位置及尺寸的表征单元体 (REV)。采用三维二值矩阵表征 REV，计算出土样的体积孔隙率及沿土样高度的表观孔隙率。对 REV 不同典型方向上切面的定向性进行了定量分析。基于孔隙网络模型，计算了 REV 空间孔径分布。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料及制样

试验所用土样为取自南京河西地区第①-3 地层的粉砂土，其物理力学性质见表 1。南京粉砂富含云母，多呈片状，与球状颗粒标准砂在矿物成分、级配以及颗粒形状等方面存在差异^[16]。土样取回经室内风干后过 2 mm 筛，得到显微 CT 扫描用土样，其颗粒粒径分布的测试结果见表 2。

表 1 土样的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of specimen					
比重	孔隙	饱和	压缩模量	含水率	内摩擦角
G_s	比 e_0	度 S_r	E_s/MPa	$w/\%$	$\varphi/(^\circ)$
2.69	0.706	90	7.9	23.7	31.5

表 2 土样的粒径分布特征

Table 2 Distribution characteristics of diameters of soil specimen						
粒径含量/%		D_{60}	D_{30}	D_{10}	C_u	C_c
2~0.075	<0.075	/mm	/mm	/mm		
mm	mm					
99.23	0.77	0.73	0.29	0.19	3.842	0.606

显微 CT 扫描对样品有尺寸限值，具体由样品的物质种类及其密度所决定。据测算后确定，本试验土样内径 8 mm、高度 40 mm，采用透明密封离心管装样，土样处于自由重力状态下，所制样品为 1 个含水率为 0 的重塑干样，干密度为 1.57 g/cm³，如图 1，制样方法为砂雨法^[17]，即将干砂从固定高度，通过一定直径漏斗，洒入离心管内。该方法旨在模拟砂土天然的沉积过程，以获得接近于天然砂土的孔隙结构。为避免样品在运输过程中的扰动，制样过程在 CT 扫描现场完成。

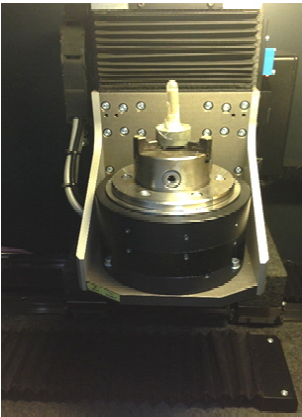


图 1 样品及样品台

Fig. 1 Specimen and sample plate

1.2 显微 CT

显微 CT 采用美国 GE 公司 Phoenix Nanotom M 纳米焦点工业 CT（以下简称 Nanotom），其规格指标包

括: 180 keV 最大管电压, $0.2\ \mu\text{m}$ 最大分辨率, $150\sim 600\ \text{mm}$ 焦测距, $1.5\sim 300$ 倍几何放大倍率, 最大目标尺寸(高 \times 直径)为 $250\ \text{mm}\times 240\ \text{mm}$, 最大试样重量 $3\ \text{kg}$ 。与采用卧式扫描的医用 CT 不同, 工业显微 CT 采用立式旋转(OR)扫描方式, 如图 2 所示, 盛放土样的离心管被固定于 CT 工作仓内可旋转操作台上, 微焦点 X 光源固定, 样品沿水平面方向匀速旋转 360° 以获得整体样品的透视图像, 扫描完成后, 对图像进行分解获得所有断层的二维层析图像。

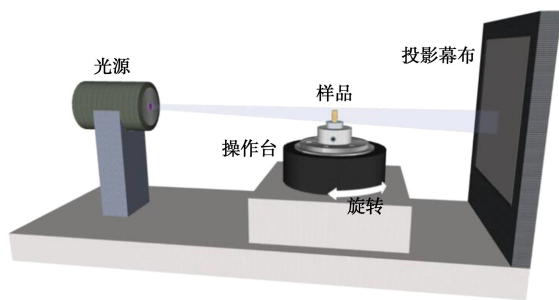


图2 成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging

本试验 CT 扫描的空间分辨率被设定为 $14\ \mu\text{m}/\text{像素}$, 断层间隔 $20\ \mu\text{m}$, 样品扫描全部时间约 $60\ \text{min}$, 扫描完成后, 共获得 2000 张断层序列扫描的栅格数据(TIFF)格式图像(8 位灰度)。

2 数字图像预处理

显微 CT 所获得的原始断层序列图像, 需要经过图像增强等预处理后, 才能用于数字图像定量分析。图像增强的目的在于提高图像的清晰度, 抑制无用部分信息, 使图像更易于解析。使用共享图像处理软件 ImageJ 对原始断层序列图像进行预处理。ImageJ 是一款基于 Java 的开源软件^[18], 由美国健康研究所(NIH)开发, 除了基本的图像操作外, ImageJ 还能对图像进行区域和像素统计、间距及角度计算、创建柱状图与剖面图以及进行傅里叶变换等高级图像处理功能。

图 3 (a) 为所获得的断层序列图像中的一幅, 以此为例说明使用 ImageJ 进行图像处理的基本步骤: 首先进行灰度直方图均衡化处理, 其目的在于对图像重新分配像素值, 使得一定灰度范围内的像素数量大致相同; 其次进行图像平滑滤波处理, 其目的在于消除图像中交织的噪声, 同时最大限度地保持图像的细节, 采用均值滤波器进行平滑处理后, 获得如图 3 (b) 所示灰度图像; 随后, 根据所选定的阈值, 利用灰度直方图分析图像的灰度分布, 对图像逐个像素扫描, 并将像素依次标记为对象或背景, 实现图像的阈值分割, 并最终获得如图 3 (c) 所示的二值图像。

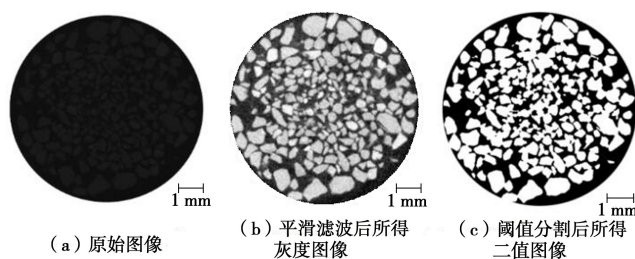


图3 显微CT数字图像预处理

Fig. 3 Preprocessing of digital images from micro-CT

3 三维重构

对试样数字图像的三维重构同样可借助于 ImageJ 中 3D 模型构建模块实现, 基本方法是导入所有经过预处理的 CT 断层二值图像, 将其层叠并使用 ImageJ 自带的三维重构算法实现。图 4 (a) 中显示了样品的整体三维重构模型; 在单张断层二维层析图像上框选所感兴趣的区域(ROI), 随后输入断层序列范围, 可从整体模型中提取出三维表征单元体(REV), 图 4 (b) 中为从样品不同位置所提取出的 3 个不同尺寸的三维表征单元体 REV1、REV2 与 REV3。

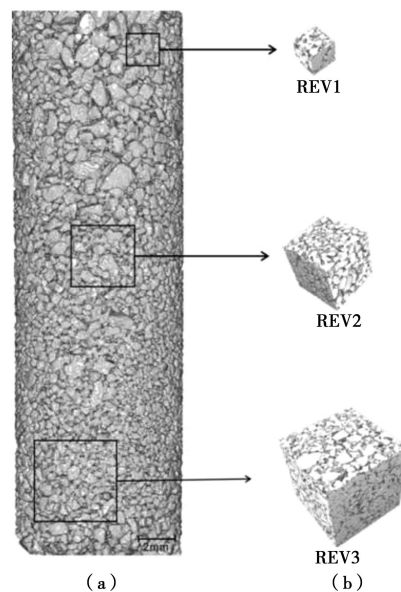


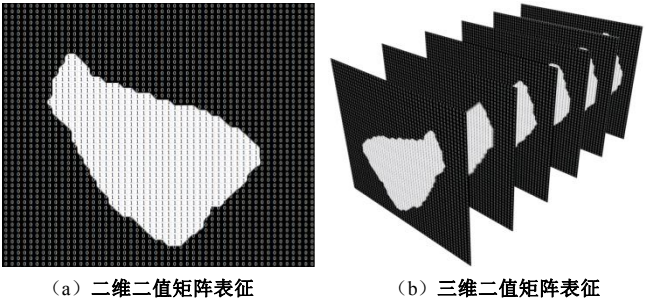
图4 三维重构模型及表征单元体

Fig. 4 3D reconstruction model and representative element volumes

4 二值矩阵表征

假设一幅显微CT二值数字图像由 $m\times n$ 个像素点所组成, 每个像素点的取值为 0 或 1, 如图 5 (a) 所示, 则该二值数字图像本质上对应于一个二维的二值(0-1)矩阵, 矩阵中每一个元素与图像中每一个像素点相对应, 矩阵元素取值为 0 代表该元素所对应像素

为孔隙；取值为 1 代表该元素所对应像素为颗粒；同理，如图 5 (b) 所示，对于三维重构所获得的任意一个 REV，都对应于一个三维二值矩阵。因此，对于土样细观组构的定量分析，都可以转化为对二值图像像素点在不同规则下的统计计算，可采用 MATLAB 等软件通过矩阵运算编程加以实现。



(a) 二维二值矩阵表征 (b) 三维二值矩阵表征

图 5 二值图像所对应的二值矩阵

Fig. 5 Binary matrices corresponding to binary images

5 孔隙率空间分布

孔隙率是表征土体物理性质的主要参数之一，与 SEM 图像分析类似，通过计算显微 CT 单张二维层析图像中孔隙像素个数与总像素之比，即可获得该切面的表观孔隙率^[19]。但显微 CT 比 SEM 先进之处在于^[20]，通过分析断层图像序列，还可进一步计算出试样的体积孔隙率及表观孔隙率分布。如图 6 所示的 REV，假定显微 CT 切面扫描间距为 dz ，REV 切片上下边界范围分别为 l 与 u ， $n_i(\bar{z})$ 是 \bar{z} 高度位置断层的表观孔隙率，当扫描间距足够小时，可视作该断层切片的上下 $dz/2$ 间距内的表观孔隙率均为 $n_i(\bar{z})$ ，则 REV 的空间孔隙率可用其所有离散切片的表现观孔隙率近似表示为

$$n_s \doteq \sum_i^u n_i(\bar{z}) \cdot dz \quad (1)$$

图 7 绘出了根据式 (1) 计算出的试样整体的体积孔隙率，此时断层切面为整个试样平面，而 \bar{l} 到 u 为整个样品高度范围。图中实验含水率是根据比重 G_s ，重度 γ 和含水率 w 计算得到的。此外，图中还绘出了沿土样断层表现观孔隙率的分布曲线，所选取的断层间隔为 $200\text{ }\mu\text{m}$ ，共 200 个数据点。图中可见，计算所得体积孔隙率约为 31.30%，略小于实验孔隙率 32.58%，其原因主要在于图像分割过程中，部分孔隙的灰度由于接近分割阈值，因此被划分为颗粒像素，从而造成断层二值图像的表现观孔隙率与实际表现观孔隙率存在细微误差，当对 2000 张断层二值图像进行叠加时，误差被放大，但其误差仅为 $(32.58\sim 31.30)/32.58=3.93\%$ ，该误差在可接受范围以内。此外，试样表现观孔隙率在 20.97%~46.77% 范围内波动，这是由粉砂颗粒的空间各向异性所造成的，可观察到，试样顶部粉砂颗粒普

遍较大且松散，表现孔隙率在大于体积孔隙率的范围内波动；试样底部粉砂颗粒较小且密，表现孔隙率在小于体积孔隙率的范围内波动。

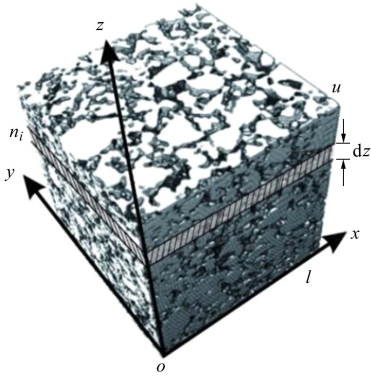


图 6 REV 体积孔隙率示意图

Fig. 6 Schematic of volume porosity of REV

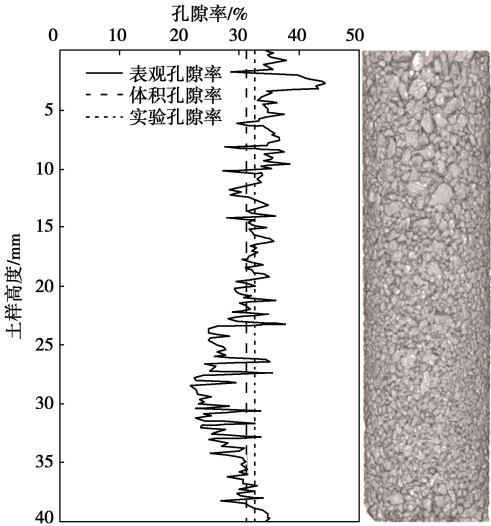


图 7 孔隙率分布示意图

Fig. 7 Schematic of porosity distribution

6 空间孔隙结构定量分析

6.1 任意切面提取

孔隙定向性是表征土体工程性质的重要细观力学指标之一，从试样显微 CT 图像所对应的三维二值矩阵中，可以提取出任意位置沿任意方向的切面，其主要原理在于：首先根据切面始末两端的位置以及范围，确定出 REV 三维二值矩阵的始末行、列，并将其作为切面二值矩阵的首、尾行向量；再根据切面的方向，依次确定切面二值矩阵中的其他行向量。以图 8 (a) 中的 REV3 为例，图 8 (b) ~ (e) 分别为从该 REV 中所提取出的 4 个典型切面，即水平方向的 $ABCD$ 切面、与水平面成 60° 角的 $EFGH$ 切面以及两正交垂直方向的 $ABB'A'$ 切面与 $BCC'B'$ 切面。在三轴试验加载中， $ABCD$ 、 $ABB'A'$ 与 $BCC'B'$ 3 个切面可分别用于对

应大主应力、中主应力与小主应力方向, 而 $EFGH$ 则对应沿剪切带方向切面。

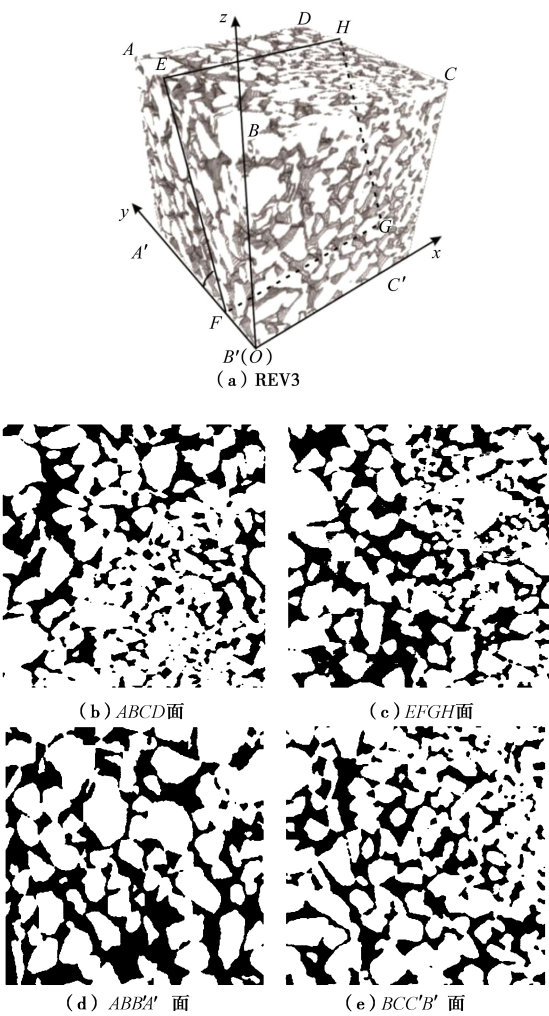


图 8 REV3 典型切面二值图像

Fig. 8 Binary images of typical sections of REV3

6.2 定向性统计分析

描述孔隙定向性通常采用定向玫瑰图, 主要定量指标包括主定向角、各向异性率以及概率熵等。采用南京大学自主开发的颗粒(孔隙)及裂隙图像识别与分析系统(PCAS)^[21], 自动识别出图 8 (b)~(e) 二值图像中所有孔隙的主轴方向角, 据此统计并绘出这 4 个典型切面的孔隙定向玫瑰图, 如图 9 (a)~(d) 所示, 图中孔隙定向角间隔为 5°。各图中同时绘出了对各数据点拟合后所得的最佳拟合椭圆, 该椭圆的旋转角度即为二值图像的主定向角, 确定标准差椭圆采用 ArcGIS 实现, 进一步还可计算出各向异性率与概率熵等数据^[22], 详见表 3。表中可见, 水平切面 $ABCD$ 具有最小的主定向角 8°, 其各向异性率为 45.6%; 垂直切面 $BCC'B'$ 具有最大的主定向角 116°, 其各向异性率为 51.4%; 另一垂直切面 $ABB'A'$ 的定向角则处于前两者之间, 为 65°, 而其各向异性率最小, 为 35.2。

对于斜切面 $EFGH$, 由于孔隙呈近似等向分布, 无明显定向性, 即各向异性率近似为 0。概率熵是用来反映土体结构单元体有序性的指标, 表中可见 $ABCD$ 具有最大的概率熵, 为 0.94006, 而 $ABB'A'$ 则具有最小的概率熵, 为 0.87411。表 3 中同时还统计出了 4 个典型切面的表观孔隙率作为参考, 孔隙率通过累计各切面二值图像内孔隙像素获得。

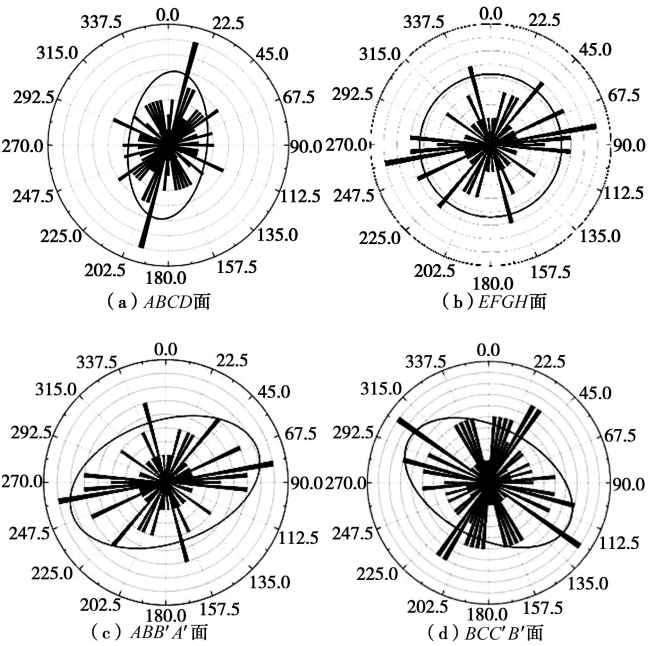


图 9 REV3 典型切面孔隙定向性玫瑰图及拟合椭圆

Fig. 9 Rosette histogram and best fitting ellipse of typical sections of REV3

表 3 REV3 典型切面的定向性指标

Table 3 Orientation specifications of typical sections of REV3				
典型切面	主定向角	各向异性率/%	概率熵	表观孔隙率/%
$ABCD$	8°	45.6	0.94006	29.38
$EFGH$	—	0	0.89794	34.00
$BCC'B'$	116°	51.4	0.91733	37.49
$ABB'A'$	65°	35.2	0.87411	30.18

6.3 空间孔径分析

土体内部孔径大小及其分布是控制土体强度的重要因素之一^[23]。图 3 中 REV 内部空间孔径大小及其分布采用帝国理工大学 Blunt 课题组 PORENET 软件进行定量分析, 该软件基于孔隙提取的最大球体算法, 即将 REV 孔隙空间等效为一系列通过喉道相连的孔隙体, 孔隙体被简化为圆球, 喉道被简化为细杆, 孔隙空间被简化为一系列球-杆相连的网络状结构, 即孔隙网络模型^[24]。具体原理与使用方法另文介绍。

表 4 中列出图 3 中 REV1~REV3 空间孔隙的最大孔径、最小孔径、平均孔径以及孔径分布, 数据均由

PORENET 分析得出。空间孔径采用等效球方法定义,即每个空间孔隙都具有一定体积,将该体积等效于一个球的体积,该体积球体的直径即等效孔径;所有孔隙的等效孔径之和与孔隙总数之比即平均孔径。表中可见,3 个 REV 最大孔径分布在 629~696 μm,最小孔径分布在 54~77 μm,平均孔径分布在 166~185 μm,孔径分布在 100~200 μm 范围内最为集中,其次是 200~400 μm 范围内,大于 400 μm 孔径分布最少。

表 4 空间孔径分布

Table 4 Distribution of spatial pore diameters							
编号	最大孔径 μm	最小孔径 μm	平均孔径 μm	孔径分布/%			
				<100 μm	100~200 μm	200~400 μm	>400 μm
REV1	696	77	185	9.2	40.8	42.1	7.9
REV2	629	83	166	16.4	50.9	31.7	1.0
REV3	678	54	189	13.5	42.4	39.6	4.5

7 结 论

(1) 显微 CT 扫描试样所得原始断层序列图像,需依次经过灰度直方图均衡化、平滑滤波以及阈值分割后,以得到用于精细化表征南京粉砂空间孔隙结构的二值图像序列。

(2) 对显微 CT 二值图像序列三维重构模型中所提取出的任意一个表征单元体 (REV),都对应于一个三维二值矩阵,对土样细观组构的定量分析,可转化为对二值图像像素点在不同规则下的统计计算。

(3) 计算获得了样品的体积孔隙率,与实验孔隙率误差仅为 3.93%,误差主要源于阈值分割中孔隙像素识别的累计误差。沿试样高度表观孔隙率在 20.97%~46.77% 范围内波动。

(4) 从显微 CT 图像所对应的三维二值矩阵中,可以提取出任意位置沿任意方向的切面,可用以揭示沿主应力方向或剪切带方向孔隙微观结构的变化特征。

(5) 对砂雨法生成南京粉砂试样底部表征单元体 REV3 的水平方向切面 ABCD、与水平面成 60° 角切面 EFGH 以及两个垂直方向切面 ABB'A' 与 BCC'B' 的孔隙定向性统计分析发现,ABCD 具有最小主定向角 8°,BCC'B' 具有最大主定向角 116°,ABB'A' 具有最小各向异性率,而 EFGH 孔隙呈近似等向分布,无明显定向性。

(6) 基于孔隙网络模型,计算得到所提取出的 3 个 REV 最大孔径分布在 629~696 μm,最小孔径分布在 54~77 μm,平均孔径分布在 166~185 μm,孔径分布在 100~200 μm 范围内最集中,大于 400 μm 的孔径分布最少。

致 谢:感谢东南大学岩土工程研究所杜延军教授对本文内容所提出的宝贵意见。

参考文献:

[1] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 2005: 122 - 123.

[2] 王慧妮,倪万魁. 基于计算机 X 射线断层术语扫描电镜图像的黄土微结构定量分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 243 - 248. (WANG Hui-ni, NI Wan-Kui. Quantitative analysis of loess microstructure based on CT and SEM images [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 243 - 248. (in Chinese))

[3] 张先伟,孔令伟. 利用扫描电镜、压汞法、氮气吸附法评价近海黏土孔隙特征[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 134 - 142. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei. Study of pore characteristics of offshore clay by SEM and MIP and NA methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 134 - 142. (in Chinese))

[4] 陈悦,李东旭. 压汞法测定材料孔结构的误差分析[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(4): 198 - 201. (CHEN Yue, LI Dong-xu. Analysis of error for pore structure of porous materials measured by MIP[J]. Bulltin of The Chinese Ceramic Society, 2006, 25(4): 198 - 201. (in Chinese))

[5] 陈世杰,赵淑萍,马巍,等. 利用 CT 扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 193 - 200. (CHEN Shi-jie, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Studying frozen soil with CT technology: present studies and prospects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013 35(1): 193 - 200. (in Chinese))

[6] 方祥位,申春妮,陈正汉,等. 原状 Q₂ 黄土 CT-三轴浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 98 - 106. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, CHEN Zheng-han, et al. Triaxial wetting tests of intact Q₂ loess by computed tomography[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 98 - 106. (in Chinese))

[7] 左永振,程展林,赵娜. 千枚岩碎屑土三轴试验剪切带扩展性状的 CT 研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1524 - 1531. (ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, ZHAO Na. Expansion mechanism of shear bands in phyllite detritus soil by CT technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1524 - 1531. (in Chinese))

[8] 姚志华,陈正汉,朱元青,等. 膨胀土在湿干循环和三轴浸过程中细观结构变化的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 68 - 76. (YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, ZHU Yuan-qing, et al. Meso-structural change of remolded

- expansive soil during wetting-drying cycles and triaxial soaking tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 68 - 76. (in Chinese))
- [9] 方建银, 党发宁, 肖耀庭, 等. 粉砂岩三轴压缩 CT 试验过程的分区定量研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2015, **34**(10): 1976 - 1984. (FANG Jian-yin, DANG Fa-ning, XIAO Yao-ting, et al. Quantitative study on the CT test process of siltstone under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(10): 1976 - 1984. (in Chinese))
- [10] 韩放达, 肖永顺, 常 铭, 等. X 射线源焦点尺寸测量方法和标准综述[J]. 中国体视学和图像分析, 2014, **19**(4): 321 - 329. (HAN Fang-da, XIAO Yong-shun, CHANG Ming, et al. Review of measurement methods and standards of focal spot size of X-ray sources[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2014, **19**(4): 321 - 329. (in Chinese))
- [11] BLUNT M, BIJELJIC B, DONG H, et al. Pore-scale imaging and modeling[J]. Advances in Water Resources, 2013, **51**(1): 197 - 216.
- [12] 李 伟, 要惠芳, 刘鸿福, 等. 基于显微 CT 的不同煤体结构煤三维孔隙精细表征[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(6): 1127 - 1132. (LI Wei, YAO Hui-fang, LIU Hong-fu, et al. Advanced characterization of three-dimensional pores in coals with different coal-body structure by micro-CT[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(6): 1127 - 1132. (in Chinese))
- [13] 李建胜, 王 东, 康天合. 基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构算法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1703 - 1708. (LI Jian-sheng, WANG Dong, KANG Tian-he. Algorithmic study on rock pore structure based on micro-CT experiment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1703 - 1708. (in Chinese))
- [14] 李小春, 曾志姣, 石 露, 等. 岩石微焦 CT 扫描的三轴仪及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(6): 1128 - 1134. (LI Xiao-chun, ZENG Zhi-jiao, SHI Lu, et al. Triaxial apparatus for micro-focus CT scan of rock and its preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(6): 1128 - 1134. (in Chinese))
- [15] FONSECA J, O'SULLIVAN C, COOP M, et al. Quantifying the evolution of soil fabric during shearing using Scalar parameters[J]. Géotechnique, 2013, **63**(10): 818 - 829.
- [16] 朱建群, 孔令伟, 高文华, 等. 南京砂的稳态特征研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 931 - 935. (ZHU Jian-qun, KONG Ling-wei, GAO Wen-hua, et al. Steady-state properties of Nanjing sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 931 - 935. (in Chinese))
- [17] 朱逢斌, 陈 甦, 孙雷江, 等. 自制砂雨装置填砂装样质量分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(增刊 2): 2076 - 2092. (ZHU Feng-bin, CHEN Su, SUN Lei-jiang, et al. Quality analysis of sand filling by the self-made pluviation device[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(S2): 2076 - 2092. (in Chinese))
- [18] RASBAND W. Online manual for the WCIF-ImageJ collection[EB/OL]. <http://www.uhnresearch.ca/facilities/wcif/imagej/>, 2006.
- [19] 唐朝生, 施 斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 560 - 565. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, WANG Bao-jun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 560 - 565. (in Chinese))
- [20] 徐日庆, 邓伟文, 徐 波, 等. 基于 SEM 图像的软土三维孔隙率计算及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(7): 1497 - 1502. (XU Ri-qing, DENG Wei-wen, XU Bo, et al. Calculation of three-dimensional porosity of soft soil based on SEM image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(7): 1497 - 1502. (in Chinese))
- [21] LIU Chun, SHI Bin, ZHOU Jian, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011, **54**(1): 97 - 106.
- [22] 王宝军. 基于标准差椭圆法 SEM 图像颗粒定向研究原理与方法[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(7): 1082 - 1087. (WANG Bao-jun. Theories and methods for soil grain orientation distribution in SEM by standard deviational ellipse[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(7): 1082 - 1087. (in Chinese))
- [23] DU Yan-jun, JIANG Ning-jun, LIU Song-yu, et al. Engineering properties and microstructural characteristics of cement solidified zinc-contaminated kaolin clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(3): 289 - 302.
- [24] DONG H, BLUNT M J. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images[J]. Physical Review E, 2009, **80**(3): 1 - 11.