

DOI: 10.11779/CJGE2019S1050

饱和细粒土固结过程中三维微观空架结构研究

李 学¹, 宋 晶^{1, 2, 3}, 赵 洲¹, 李志杰¹, 黄伟标¹

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 广州 510275;
3. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 饱和细粒土具有典型的多尺度孔隙三维空架结构, 显著影响着土体固结沉降等宏观力学特征。基于 SEM 及多能量同步辐射 X 射线 μ CT 技术结合数据约束算法 (DCM), 建立饱和细粒土多尺度结构三维微观模型。研究结果表明: 土样受荷时土体表面的表观孔隙率与体积孔隙率的变化趋势基本一致, 但表观孔隙率略小于体积孔隙率。800 kPa 压力是土样表面表观孔隙率随压力变化的转折点, 土体在 800 kPa 压力时其微观结构发生了显著变化, 可能对应着土体骨架的蠕变变形。100 kPa 土样和 800 kPa 土样表面的平均孔隙形状系数出现异常, 100 kPa 时低于均值 0.32, 而 800 kPa 时显著高于 0.32, 表明土体中孔隙在受压初始阶段对压力变化较敏感, 而在固结后期土体结构发生变化。土样的实验孔隙率略大于由 DCM 计算出的体积孔隙率和 DCM 导出二维切片的表观孔隙率, 经 DCM 二维切片得到的土样平均表观孔隙率在 0.35~0.45 范围内波动。数据约束模型突破分辨率限制, 实现微纳米级颗粒的三维结构表征, 同时 PCAS 检验数据约束模型切片数据可为计算土体孔隙率提供新途径。

关键词: 饱和细粒土; 孔隙; SEM; 数据约束模型; 三维微观结构

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0197-04

作者简介: 李 学(1993—), 男, 博士, 主要从事软土微观结构方面研究。E-mail: lixue36@mail2.sysu.edu.cn。

Three-dimensional pore evolution analysis in consolidation of saturated fine-grained soil

LI Xue¹, SONG Jing^{1, 2, 3}, ZHAO Zhou¹, LI Zhi-jie¹, HUANG Wei-biao¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Guangzhou 510275, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The saturated fine-grained soil has a typical multi-scale three-dimensional overhead structure and its complex micro-morphology significantly affects the consolidation settlement and other macro-mechanical characteristics. Based on the scanning electron microscopy (SEM), a three-dimensional micro-model for saturated fine-grained soil with multi-scale structure is established by using the multi-energy synchrotron radiation X-ray micro-CT technology combined with the data constrained algorithm (DCM). The results show that the change trend of apparent porosity of soil surface is basically the same as that of volumetric porosity, while the apparent porosity is slightly smaller than the volumetric one. The pressure of 800 kPa is the turning point of apparent porosity of soil samples with pressure. It is presumed that the microstructure of soil changes remarkably at the pressure of 800 kPa, which may correspond to creep deformation of soil skeleton. The average pore shape coefficients of 100 kPa and 800 kPa are abnormal, lower than 0.32 at 100 kPa and significantly higher than 0.32 at 800 kPa, which indicates that the pore in soil is sensitive to pressure change at the initial stage of compression, while the soil structure changes at the later stage of consolidation. Both the volumetric porosity calculated by DCM and the apparent porosity of DCM two-dimensional slices are slightly lower than the experimental porosity of soil samples. The average apparent porosity of soil samples obtained by DCM two-dimensional slices fluctuates in the range of 0.35 to 0.45. The DCM may break through the resolution limitation and realize the characterization of micro-nanoparticles. Meanwhile, the DCM tested by the PCAS can provide a new way to calculate soil porosity.

Key words: saturated fine-grained soil; pore; SEM; data constrained algorithm; three-dimensional microstructure

0 引 言

饱和细粒土属软土一种, 其物质成分复杂且结构

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41402239, 41572277, 61505266);

广东省自然科学基金项目 (S201204000733)

收稿日期: 2019-04-29

尺度跨度大, 具有非常复杂的非线性特征^[1]。软土的孔隙性是区别于其他工程材料的显著标志之一, 它是导致土体复杂物理特性的主要原因^[2]。饱和细粒土孔隙结构的各向异性表现在宏观变形破坏中, 这在一定条件下可显著改变和影响软土的破坏模式和工程特性^[3]。

饱和细粒土作为常见的工程填料, 从开始固结到长期蠕变, 不同组分呈现的宏观、细观、微观等多尺度演化规律尚不清楚^[4]。孔隙结构类型等因素对软土固结过程及工后沉降的影响尤其突出, 在外力作用下, 孔隙的分布特征与宏观变形机制密切相关^[5]。本研究以饱和细粒土为研究对象, 采用电镜扫描及 X 射线 μ CT 技术, 结合数据约束算法 (DCM) 建立土体三维空架网状结构模型, 统计土体孔隙及二、三维孔隙率信息。并基于 PCAS 检验三维空架模型的合理性, 探讨提取软土微观结构信息的新途径, 建立在固结压力作用下土体微宏观之间的定量联系。为进一步发展表征土体孔隙结构的新方法以及土体蠕变机制分析提供可行性理论。

1 试验方案

1.1 土体物理力学性质及样品制备

本研究土样取自某工程区, 将土样经 0.075 mm 湿筛筛选后与蒸馏水以 1:6 质量比混合静置, 配置饱和细粒土 (含水率 83.10%), 其基本性质如表 1 所示。饱和细粒土主要由黏粒 (36.09%) 和粉粒 (63.91%) 组成, 不均匀系数 25 (大于 5), 级配曲线的曲率系数 1.44, 这些都说明细粒土物质组成极不均匀。

表 1 饱和细粒土基本物理力学性质

| Table 1 Basic properties of saturated fine-grained soil | | | | | | | |
|---|------------|-------------------------------|------|------------|------------|-----------|---------|
| 含水率 /% | 土粒相 对密度 | 干密度 /(g·cm ⁻³) | 塑限 | 黏粒 含量/% | 粉粒 含量/% | 不均匀 系数 | 孔隙 比 |
| 83.10 | 2.29 | 0.82 | 30.1 | 36.09 | 63.91 | 25 | 2.28 |

将配置好的饱和细粒土在 100, 200, 400, 800, 1600 kPa 竖向压力下依次进行一维固结压缩试验。经历自重沉降的土样视为 0 kPa 样品, 最终得到不同压力下固结的 6 组试样 (0, 100, 200, 400, 800, 1600

kPa)。土样经竖向荷载作用, 在侧向环刀限制下仅发生竖向沉降变形。试验过程中采用湿润棉花密封高压固结仪, 使土样始终保持饱和状态。将固结沉降稳定后的 6 组土样用环刀以人工方式缓慢切削成直径为 5 mm, 高 10 mm 的圆柱形, 切削过程中尽量避免土体扰动, 切削完成后置于恒温恒湿箱 (25℃) 内保存, 以备电镜扫描和 CT 试验。土样的直径 (5 mm) 约是土颗粒最大粒径 (0.075 mm) 的 66 倍, 减小样品建模的尺寸效应, 同时兼顾 CT 试验的图像质量以及试验条件。

1.2 电镜扫描 (SEM)

将 6 组试样从恒温箱内取出, 用手轻轻掰断土样露出新鲜断面, 经喷金处理后置于电镜下扫描。随电镜放大倍数增加 (50X 到 10000X), 土样表面孔隙和颗粒的可统计直径不断减小, 视窗内多尺度孔隙和颗粒的数量也在减少, 故观察时应选择适宜的放大倍数。

1.3 X 射线 μ CT 试验

采用 X 射线 μ CT 技术不仅可实现土样无损三维结构定量表征, 而且其图像像元尺寸为微米级。多能量同步辐射 X 射线 μ CT 技术结合数据约束算法 (DCM), 不仅可以表征像元尺寸为微纳米级的物质, 而且还保留了孔隙和矿物质的最小形态单元。综合考虑土样厚度、矿物质吸收 X 射线能量差异以及试验的环境温度等因素后选择 30KeV 和 40KeV 作为 CT 扫描的双能量。

2 试验结果及分析

2.1 SEM

本研究选取 6 个样品均放大 2000 倍的 SEM 图像作为 PCAS 处理的原图, 如图 1 所示 (不同彩色区域代表大小不同孔隙)。将 SEM 获取到的土样原始图像经 PCAS 处理, 根据实际情况选取不同阈值识别土体颗粒和孔隙, 重点提取孔隙结构定量信息。采用阈值分割法对 SEM 原图进行二值化处理, 根据不同灰度值区分图像中孔隙和颗粒以及去除杂点。为得到合适的孔隙几何参数和统计参数, 对土样表观孔隙率较小的样品选取较小阈值, 反之亦然^[3]。

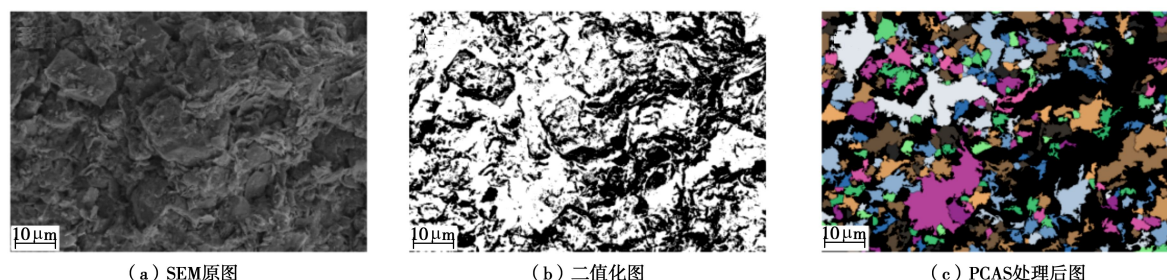


图 1 PCAS 处理 SEM 原图 (以 200 kPa 样品为例)

Fig. 1 SEM images processed by PCAS

由于 PCAS 软件中的参数以像素为单位, 可通过如下公式转换成实际尺寸:

$$S_t = S / R^2 \quad , \quad (1)$$

$$C_t = C / R^2 \quad . \quad (2)$$

式中 R 为 SEM 图像分辨率; S 和 C 分别是像素面积与像素周长; S_t 和 C_t 分别为真实面积与真实周长。表观孔隙率指土体表面孔隙的总面积与表面积之比。土样表观孔隙率及平均形状系数随压力变化如图 2 所示。随着土样受荷增大, 土体表观孔隙率逐渐减小(从 0.75 减小到 0.58)。当土样受荷小于 800 kPa 压力时, 表观孔隙率迅速减小, 压力超过 800 kPa 以后, 表观孔隙率变化缓慢。800 kPa 可作为土体固结排水时的压力转折点, 推测土体在 800 kPa 压力时其微观结构发生了显著变化, 可能对应着土体的固结蠕变。

孔隙形状系数表示孔隙复杂度, 100 kPa 对应的孔隙形状系数低于各压力下的平均形状系数 0.32, 推测土样在 100 kPa 压力下孔隙分布重新调整。超过 100 kPa 以后, 孔隙形状系数迅速增大, 在 800 kPa 左右时达到峰值, 此时孔隙形状最复杂。100, 800 kPa 分别对应着孔隙平均形状系数的最小、最大值。结合上文土体的表观孔隙率变化在 800 kPa 压力时出现转折点, 可知在 800 kPa 压力下土体结构发生了蠕变变形。

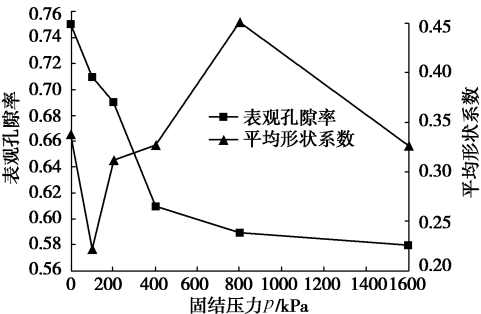


图 2 土样表观孔隙率和平均形状系数

Fig. 2 Apparent porosities and average shape coefficients of soil

2.2 X 射线 μCT 试验建立土体三维模型

数据约束算法结合 X 射线 μCT 技术可实现微纳米级孔隙及颗粒的三维微观表征, 同时可获取各尺度孔隙的特征参数。基于多能量同步辐射 X 射线 μCT 技术获得土体投影图像并实现投影图重构, 建立土体三维微观模型, 如图 3 所示。该模型的像元尺寸为 6.53 μm, 模型实际体积为 1.306 mm×1.306 mm×1.306 mm。

该模型中绿色部分代表孔隙。可看出 0 kPa 样品体积孔隙率较大, 具有典型的空架结构。随固结压力增大, 孔隙逐渐被压碎或被固体物质所填充, 三维空架结构逐渐变得密实, 土体体积孔隙率减小, 与表观孔隙率变化规律基本一致, 土体结构更稳固。由于存在粒内孔隙, 以及土体表面的一些“大颗粒”可能会

覆盖住孔隙, 导致表观孔隙率略小于体积孔隙率。

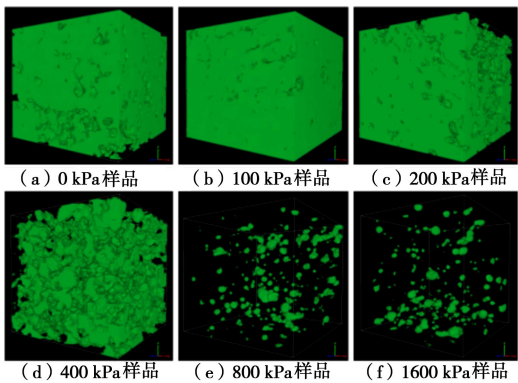


图 3 土体三维微观结构建模(绿色部分代表孔隙)

Fig. 3 Three-dimensional model for soil samples (green part represents pores)

2.3 基于 PCAS 检验 DCM

沿土样高度, 提取 6 组土样内部不同位置的二维切片各 200 张做定量分析。通过计算 μCT 单张二维层析图像中孔隙像素个数与总像素的比值, 可得任意水平切面的表观孔隙率, 统计结果如表 2 所示。经 DCM 二维切片得到的表观孔隙率在 0.35~0.45 范围内波动, 这主要是由软土颗粒空间的各向异性造成。与前文经 SEM 计算得知的二维孔隙率相比, 经 DCM 二维切片得到的土样平均表观孔隙率略小于由 SEM 计算的, 这主要是 SEM 仅仅是对土体表面的一个新鲜断面上孔隙的统计, 具有一定的局限性, 而 DCM 二维切片对应着 200 张二维切片的平均表观孔隙率。

表 2 样品孔隙率比较

| Table 2 Porosities of soil samples | | | |
|------------------------------------|----------------|-------------------|-------|
| 样品 | 体积孔隙率 (DCM) | 平均表观孔隙率 (二维切片) | 实验孔隙率 |
| 0 kPa | 0.693 | 0.451920 | 0.731 |
| 100 kPa | 0.454 | 0.428521 | 0.566 |
| 200 kPa | 0.441 | 0.416532 | 0.539 |
| 400 kPa | 0.432 | 0.375497 | 0.513 |
| 800 kPa | 0.410 | 0.356191 | 0.496 |
| 1600 kPa | 0.409 | 0.355996 | 0.492 |

基于 DCM 和 PCAS 处理二维切片, 可实现土体二、三维孔隙率之间的转换, 如式 (3) 所示。同时用以检验 DCM 表征饱和细粒土三维微观结构的合理性。

$$n3D = \sum_{i=1}^N (255 - D_i) / (255N) \quad , \quad (3)$$

式中, D_i 为第 i 个像素对应的灰度, N 为图像像素的总个数, 由此计算出的三维孔隙率如图 4 所示, 并与土样实验孔隙率做对比。由图 4 可知, 每个土样的实验孔隙率略大于由 DCM 计算出的体积孔隙率和表观孔隙率, DCM 二维切片表观孔隙率沿土样高度在一定范围内波动, 这主要是因为 DCM 参数设置并不能完全反映土体实际的物质属性。

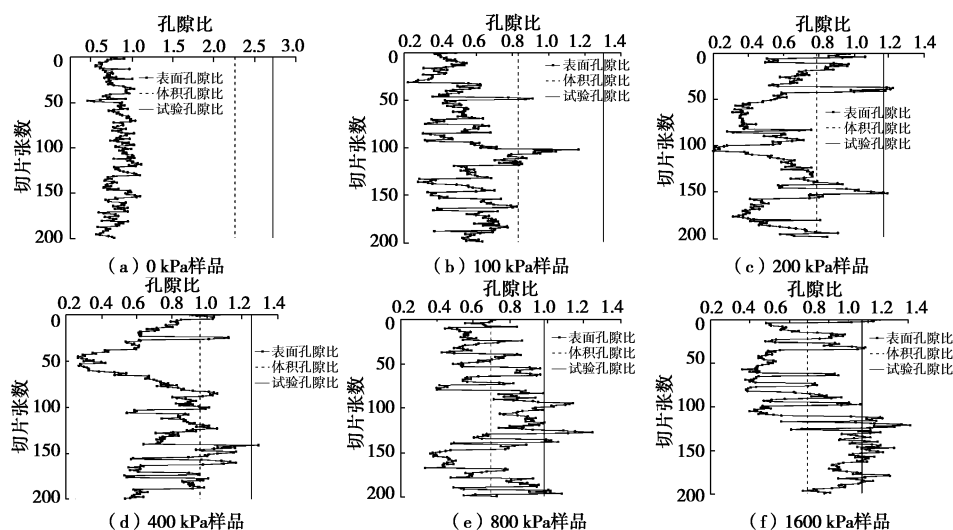


图4 土样孔隙比比较

Fig. 4 Porosity ratios of soil samples

3 讨 论

基于 SEM 的表观孔隙率略小于体积孔隙率,这主要是 SEM 只能扫描土体表面的局部区域,计算表观孔隙率的代表性较差。用 PCAS 处理 SEM 图像时,土体表面部分“大颗粒”会遮盖住孔隙,造成统计误差。此外,土体中孔隙包括粒间孔隙和粒内孔隙两种,所测出的表观孔隙率实际上是粒间孔隙的孔隙率。

由 SEM 得到的表观孔隙率略大于经 DCM 导出二维切片计算的平均表观孔隙率,SEM 仅仅是对土体表面的某一新鲜断面上统计孔隙,而 DCM 二维切片孔隙率是对 200 张二维切片的表观孔隙率的平均统计,其考虑了沿土样表面以及土样高度的影响,因此两种表观孔隙率存在差异。

4 结 语

土体表观孔隙率随荷载增大而逐渐减小,800 kPa 压力是土体表观孔隙率随压力变化速率的转折点,推测土体在 800 kPa 压力时其微观结构发生了显著变化,可能对应着土体的固结蠕变。

随压力增大,土体表面孔隙形状的复杂度出现一定的调整。100 kPa 土样的孔隙复杂度最低,800 kPa 样品的孔隙形状最复杂。推测土体孔隙在 100 kPa 压力时出现一定调整,使得土体逐渐适应外界压力变化,当压力达到 800 kPa 时,土体孔隙形状在外压作用下变得比较复杂,此时对应着土体发生蠕变变形。超过此压力阶段后,孔隙形状在荷载作用下又变得比较简单,此时土骨架承担更多的应力。

经 DCM 导出二维切片计算得到的土样平均表观孔隙率沿土样高度在 0.35~0.45 范围内波动,土样的实验孔隙率略大于由 DCM 计算出的体积孔隙率和

DCM 导出二维切片的表观孔隙率,这主要是由软土颗粒空间的各向异性造成。

参考文献:

- [1] 赵明华, 胡 倩, 杨超伟, 等. 考虑地基土非线性固结的桩侧负摩阻力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1417 - 1424. (ZHAO Ming-hua, HU Qian, YANG Chao-wei, et al. Negative skin friction of piles considering nonlinear consolidation of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1417 - 1424. (in Chinese))
- [2] DENG Y F, ZHANG T W, CUI Y J, et al. Pore water salinity effect on the intrinsic compression behavior of artificial soft soils[J]. Applied Clay Science, 2018, **166**: 299 - 306.
- [3] 程 壮, 王剑锋. 用于颗粒土微观力学行为试验的微型三轴试验仪[J]. 岩土力学, 2018, **39**(3): 1123 - 1129. (CHENG Zhuang, WANG Jian-feng. A mini-triaxial apparatus for testing of micro-scale mechanical behavior of granular soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(3): 1123 - 1129. (in Chinese))
- [4] 史江伟, 陈 丽. 不均匀土体位移引起地下管线弯曲变形研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(4): 1164 - 1170. (SHI Jiang-wei, CHEN Li. Investigation of bending information of underground pipelines induced by differential ground movements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(4): 1164 - 1170. (in Chinese))
- [5] 李 学, 刘治清, 宋 晶, 等. 有机质在吹填淤泥固结中的微宏观特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, **47**(10): 28 - 35. (LI Xue, LIU Zhi-qing, SONG Jing, et al. Micro and macro characteristics of organic matters in dredger fill consolidation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, **47**(10): 28 - 35. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)