

DOI: 10.11779/CJGE2019S2039

饱和细粒土孔隙结构定量表征

李 学¹, 宋 晶^{2, 3, 4}, 赵 洲², 李志杰², 黄伟标²

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519000; 2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275; 3. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 广州 510275; 4. 广东省地质过程与矿产资源勘查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 土的物质组成多样且结构尺度跨度大, 多物质成分和多尺度结构影响土体结构特征。借助室内试验及数值模拟(数据约束模型), 表征饱和细粒土固结过程中多物质成分的多尺度结构, 并进行三维结构定量表征, 侧重探讨饱和细粒土固结过程中孔隙结构的变化特征。研究表明, 饱和细粒土受压固结的蠕变界限在400 kPa左右, 对应的界限孔隙值为0.4 μm(微米孔隙)。随土样受压强度增加, 土体中不同尺度的孔隙及其连通体数量均发生变化: 孔隙和孔隙连通体数量都先增加后减少最后趋于稳定, 但变化规律并不完全一致。孔隙数量在200 kPa压力时达到峰值, 而孔隙连通体数量却在400 kPa压力下达到峰值, 孔隙总体积受孔隙数量和孔隙体积两个因素影响。土体固结前期主要发生大孔隙变形, 大孔隙数量是影响其固结效应的重要因素。而在固结后期, 微小孔隙体积是影响土体固结效应和蠕变的关键因素之一。本研究多方法结构分析在突破吹填淤泥这类饱和细粒土的结构定量分析后, 有利于物质微观力学理论的进一步深化。

关键词: 饱和细粒土; 多物质成分; 多尺度结构; 数据约束模型; 三维表征

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2019)S2 - 0153 - 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。

Quantitative study on pore structure of saturated fine-grained soil

LI Xue¹, SONG Jing^{2, 3, 4}, ZHAO Zhou², LI Zhi-jie², HUANG Wei-biao²

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519000, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Guangzhou 510275, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The compositions of soils are various. Particularly, the scale of the soil structure is large. Both multi-material and multi-scale have an effect on the structural characteristics of soils. Based on the indoor experiments (MIP, SEM and X-μCT) and numerical simulation tests (data constrained modeling, abbreviated as DCM), the multi-scale structure of multi-component in the consolidation process of saturated fine-grained soil is studied. In addition, 3D structure of saturated fine-grained soil is analyzed quantitatively. This study focuses on studying the changing mechanism of soil structure in the process of consolidation. The results show that the pressure reaches 400 kPa approximately when the saturated fine-grained soil begins to creep. The corresponding critical value of pore diameter is 0.4 μm (micrometer-pore). The pore and pore cluster quantities increase with the increasing pressure and then decrease. Beyond this value, there is no noticeable change. However, the change rules of pore and pore cluster are not entirely consistent. The quantities of pore and pore cluster reach the peak at pressure up to 200 kPa and 400 kPa, respectively. The methods in this study are not only applied in saturated fine-grained soil, but also contributes to further study on the micro-macroscopic mechanics of other materials. The DCM may become a breakthrough when analyzing the structure of other soil materials. Thus, the quantitative characterization of various soil structures may be achieved.

Key words: saturated fine-grained soil; multi-component; multi-scale structure; data constrained model; 3D characteristion

0 引言

软土的多尺度结构和高孔隙性是区别于其他工程材料的显著标志之一^[1]。饱和细粒土作为软土的一种, 物质组成复杂且结构尺度跨度大, 这导致土体结构易受扰动, 尤其是土体中孔隙的形状和排列型式及土颗

粒间的相互作用会影响饱和细粒土的结构性^[2-3]。

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: 2019-04-28

*通讯作者(E-mail: songj5@mail.sysu.edu.cn)

随着数字图像技术的发展,土体结构研究从二维、定性研究进入到三维、定量研究阶段^[4]。由于饱和细粒土结构的复杂性和研究技术的限制以及土体取样技术的制约,将土体微观之间建立定量联系一直是土力学微观领域研究的重点和难点^[5]。目前对土体物质成分和结构性的研究大多限于重塑土,如何将土体内部的三维量化表征与既有的表面二维三维表征建立联系,既是探讨重塑土固结排水过程的关键,又是建立土体微观结构特征与宏观力学性质的根本^[6]。本研究通过室内试验及数值模拟,从吹填淤泥中提取细粒土,获取孔隙分布特征,并对土体进行三维定量表征。侧重探讨饱和细粒土受竖向一维压力固结过程中孔隙的变化特征,进一步探讨表征土体孔隙结构的新方法,为土体蠕变机制分析及破坏模式提供可行性理论。

1 试样制备

通过湿筛法制取粒径小于 0.075 mm 的细粒土,其基本性质如表 1 所示。将细粒土与蒸馏水以 1:6 质量比混合搅拌后静置,一次性配置饱和细粒土。先让饱和细粒土在沉降柱内自由沉降,将沉降柱试验结束后的样品作为高压固结试验的初始样品,在 5 个不同终极压力下(100, 200, 400, 800, 1600 kPa)进行分级加载的一维排水固结试验。土体在达到预定压力后立即进行卸荷,制取在不同压力固结下的 6 组(每组 5 个)平行柱状样品。样品截面直径为 5 mm、高 20 mm。经真空冷冻升华干燥后,置于恒温箱(20°C & 20%)内进行干燥保存,以备显微 CT 试验。将未加压的样品视为 0 kPa 样品,5 个不同压力下的样品作为结构分析样品(100, 200, 400, 800, 1600 kPa)。选取具有代表性的每组样品 3 个(共计 6×3=18 个)进行结构分析。先后采用压汞试验(MIP)、扫描电子显微镜(SEM)以及 X 射线 μ-CT 试验 3 种试验方法。

表 1 土体基本物理力学性质

Table 1 basic properties of soil

土粒相 对密度	含水率 /%	孔隙 比	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
2.29	83.10	2.28	51.4	30.1	21.3

2 试验方法及结果

2.1 基于 MIP 孔隙结构分析

结合孔隙分布特征和前人对土体孔隙区间划分的研究经验^[4],选择基数 4 作为划分孔隙大小的界限值。根据孔隙的等效直径,划分孔隙大小为纳米孔隙(<0.04 μm)、微米孔隙(0.04~0.4 μm)、小孔隙(0.4~4 μm)、中孔隙(4~40 μm)、大孔隙(40~400 μm)以及超大孔隙(>400 μm)。

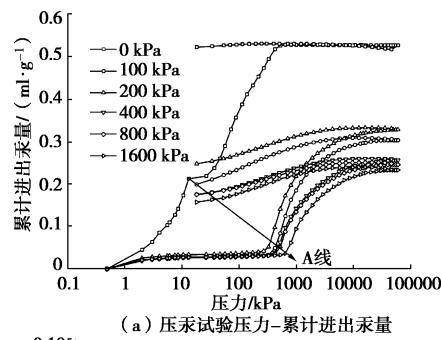
图 1(a)是 6 个样品的压汞试验结果。进汞量曲线呈典型的“S”型,且每个样品进汞量曲线“S”型的转折点不一致:从 100 kPa 样品到 1600 kPa 样品,曲线转折点所对应的压汞试验压力逐渐增大,如图 1(a)中 A 线所示,推测样品固结过程中结构发生了蠕变,饱和细粒土蠕变界限在 400 kPa 左右,对应的界限孔隙值为 0.4 μm(微米孔隙)。建立线性拟合方程:

$$p_{cr} = 0.1949 p + 279.17 \quad , \quad (1)$$

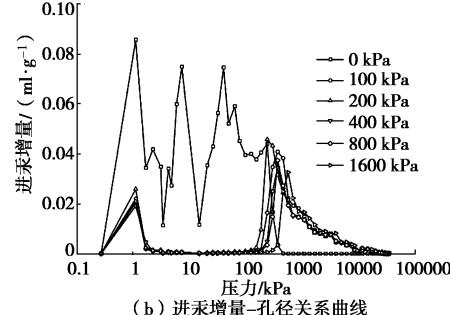
式中, p_{cr} 为临界压力, p 为先期固结压力。从图 1(b)看出,自重沉淤 0 kPa 样品的进汞增量曲线为三峰分布,而其他样品为双峰分布,且分布状态相似。孔隙直径在 0.2 μm 左右时,对应的进汞量突增,在 0.4 μm 时达到峰值,当孔径大于 0.7 μm 后,进汞增量基本接近于 0,且趋于平稳。0.4 μm 孔径对应的进汞压力为 400 kPa,在压力达到 400 kPa 时进汞量突增,突破了孔喉限制,使土体结构遭受破坏,400 kPa 可能对应着土体结构破坏的临界压力。自重沉淤样品的孔隙数量少而体积大,其他样品的孔隙数量相对多但体积小,说明在不同压力下,孔隙总体积受两个变量影响:孔喉直径和其对应的微小孔和闭孔隙数量。饱和细粒土的孔隙结构方程可表达为如下函数:设 $V_{(d)}$ 是半径小于 r 的孔隙体积,将孔隙形态近似化为球体,有

$$V_{(d)} = \int_0^r \frac{4}{3} \pi r^3 dN \quad , \quad (2)$$

式中, N 为半径小于 r 的孔隙数目。对比图 1(b), (c),自重沉淤样品的孔隙体积在 4~40 μm 区间内占有绝对优势,约占孔隙总体积的 84.99%,而其他样品的孔隙体积主要分布在 0.4~4 μm 和 0.04~0.4 μm 两个区间内。



(a) 压汞试验压力-累计进出汞量



(b) 进汞增量-孔径关系曲线

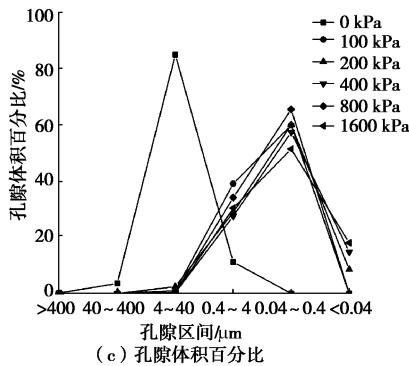


图 1 压汞曲线图

Fig. 1 Curves of pore-size distribution

2.2 基于 SEM 孔隙结构分析

对不同压力下的 6 个样品做进一步分析。从图 2 (a) 可看出, 100~1600 kPa 样品的孔隙数量先增加后减少, 其中 200 kPa 与 400 kPa 样品的孔隙数量占绝对优势, 且孔隙数量主要集中在 4~40 μm 区间内。当压力达到 200 kPa 时, 孔隙数量急剧增加, 达到峰值, 随后孔隙数量逐渐下降。

统计孔隙面积, 如图 2 (b) 所示。土体孔隙面积主要集中在 40~400, 4~40, 0.4~4 μm 3 个区间内。结合图 2 (a), 说明孔隙总体积受孔隙数量和孔隙直径两个变量影响, 这与压汞法得出结论基本吻合。

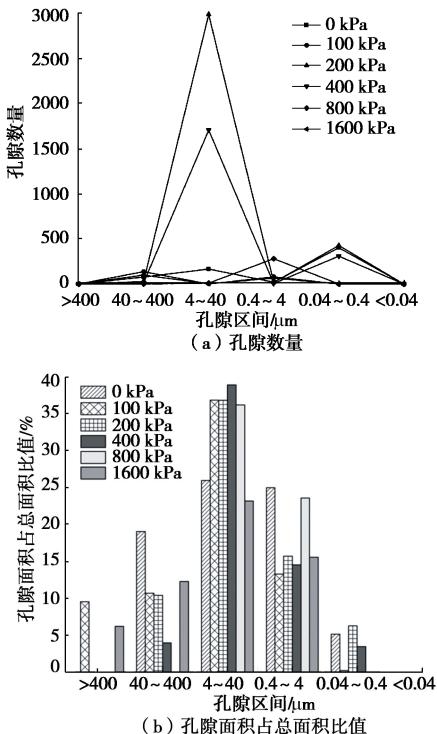


图 2 孔隙数量和面积百分比统计图

Fig. 2 Curves of pore-size distribution

2.3 基于 X 射线显微 CT 的数据约束模型

本研究中采用的 X 射线 μ CT 技术结合数据约束模型 (DCM) 不仅可以表征大于等于像元尺寸的土体

结构信息, 而且保留了小于像元尺寸的物质和孔隙分布信息。采用 30 keV 和 40 keV 两个能量, 分别对同一个样品进行同步辐射 X 射线 μ CT 试验。

DCM 能直观反映土体孔隙三维分布特征, 如图 3 所示。蓝色部分代表孔隙, 随竖向压力由 0 增加到 1600 kPa, 孔隙体积显著减小, 孔隙连通性也变弱, 从开始时的大量贯通到 1600 kPa 样品中存在少量独立孔隙。进一步分析饱和细粒土中孔隙连通体的分布特征, 如图 4 (a) 所示。孔隙连通体数量主要集中在孔径为 0.04~40 μm 区间内, 但分布却并不规律。随压力增大, 孔隙连通体体分比逐渐减小, 孔径位于 40~400 μm 区间内的连通体体分比几乎为零, 如图 4 (b) 所示, 这与图 4 (a) 中孔径位于 40~400 μm 区间内连通体数量为零保持一致。说明饱和细粒土在高压固结时孔隙形状发生了明显变化, 微观结构变化不规律。

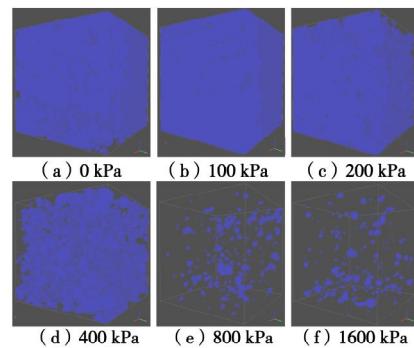


图 3 孔隙赋存图

Fig. 3 Three-dimensional distribution of soil pore

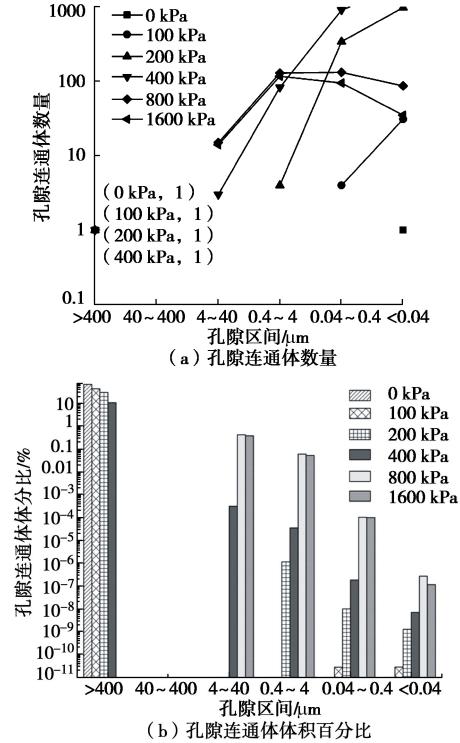


图 4 孔隙连通体统计图

Fig. 4 Curves of pore cluster

3 讨 论

虽然采用一维 (MIP)、二维 (SEM) 和三维 (X- μ CT-DCM) 不同的分析手段和技术, 都能实现饱和细粒土孔隙的多尺度表征。但压汞法 (MIP) 适用于孔直径在 0.003~400 μm 的中孔和大孔, 对纳米级孔的测定不够准确。SEM 试验样品表面需镀金或镀碳 (镀碳较佳), 且观测表面受气候环境影响较大。SEM 结合 MIP, 前者可以从微纳米尺度定性观察土颗粒大小、排列以及分布状况, 而后者可以从定量层面表征土体孔隙尺寸与相对含量, 二者结合使用可以定性定量耦合地分析土体微观结构。高精度 X 射线测试需要足够小的样品尺度, SEM 联合 X 射线 μ CT 试验, 在对样品无损的情况下, 可以实现土体微观结构从二维到三维的表征。

对比图 1 (a), (c)、图 2 (b) 及图 4 (b) 可知, 随竖向压力由 0 增加到 1600 kPa, 大孔隙数量逐渐减小, 抵抗外压能力较强的中小孔隙数量进一步增多, 且趋于稳定, 孔隙也由贯通状逐渐变为独立存在。进一步对比图 2 (a)、图 4 (a), 孔隙数量最多不一定代表孔隙连通体数量最多。SEM 二维图像较难直观反映孔隙连通体数量, SEM 二维图像得到的在 4~40 μm 区间内的孔隙在三维空间可能连通。因此由 SEM 图像得到的孔隙数量与 DCM 模拟出的孔隙连通体数量存在一定差异。

4 结 语

土体固结过程中结构发生了蠕变且蠕变界限在 400 kPa 左右, 对应的界限孔隙值为 0.4 μm (微米孔隙)。土样蠕变的临界压力与先期固结压力有关, 先期固结压力越大, 临界压力也越大。

随样品受压增加, 孔隙及其连通体的数量和体分比发生了变化, 孔隙总体积受孔隙数量和孔径两个因素影响。固结前期主要发生大孔隙变形, 大孔隙体积是影响其固结效应的重要因素之一。而在固结后期, 随着大孔隙被逐渐压缩成微小孔隙, 微小孔隙体分比增大, 这时微小孔隙是影响土体固结效应和蠕变的关键因素之一。

参考文献:

- [1] 施有志, 柴建峰, 林树枝, 等. 高真空击密法在平潭综合实验区吹填软基处理效果评价[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 11~18. (SHI You-zhi, CHAI Jian-feng, LIN Shu-zhi, et al. Application of high vacuum densification method to soft soil foundation treatment engineering at pingtan compressive experimental area[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 11~18. (in Chinese))
- [2] 施斌, 顾凯, 魏广庆, 等. 地面沉降钻孔全断面分布式光纤监测技术[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 356~364. (SHI Bin, GU Kai, WEI Guang-qing, et al. Full section monitoring of land subsidence borehole using distributed fiber optic sensing technologies[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 356~364. (in Chinese))
- [3] 鲍硕超, 王清, 陈剑平, 等. 吉林省延边地区路基边坡膨胀土孔隙分布特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 132~137. (BAO Shuo-chao, WANG Qing, CHEN Jian-ping, et al. Pore size distribution of expansive soil of the subgrade slope in Yanbian region, Jilin province[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(1): 132~137. (in Chinese))
- [4] 刘莹, 肖树芳, 王清. 吹填土沉积固化后结构强度增长的机理分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(11): 1295~1298. (LIU Ying, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Mechanism analysis of increase of structure strength of solidified dredger fill[J]. Journal of tongji University, 2003, 31(11): 1295~1298. (in Chinese))
- [5] 杨爱武, 闫澍旺, 杜东菊. 结构性吹填软土蠕变模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3213~3218, 3224. (YANG Ai-wu, YAN Shu-wang, DU Dong-ju. Study of creep model of structural soft dredger fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3213~3218, 3224. (in Chinese))
- [6] 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-macro characteristics of organic matter in dredger fill consolidation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 28~35. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)