

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0009-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.003

固结条件下上海软土微观特征研究

李越, 孙红, 葛修润

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 为探讨上海软土固结过程中微结构变化机理, 运用高分辨率场发射扫描电镜对上海第四层软土单轴固结过程中不同固结压力水平下的土样进行试验。结果表明: 固结加载初期, 随着固结压力的增大, 软土孔隙比显著下降, 土体密度增大; 平均形状系数初期显著增大, 孔隙圆滑程度明显上升; 孔隙概率熵显著下降, 孔隙排列的定向性及有序性增强。固结加载后期, 土的微观结构参数随固结压力的变化逐渐趋于平缓。在固结压力的作用下, 孔隙的尺度、形态、排列等微观特征显著改变, 且微观结构参数能较好地反应宏观力学性能。

关键词: 软土; 固结; 孔隙特征; SEM; 微观结构

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Study on microcosmic characteristics of Shanghai soft soil under consolidation

LI Yue, SUN Hong, GE Xiurun

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to study the microstructural mechanism of Shanghai soft soil under consolidation, the fourth layer of Shanghai soft soil under different consolidation pressures were tested by high resolution field emission scanning electron microscope. The results show that with the increase of consolidation pressure, void ratio decreases significantly during the initial period, and the soil density increases. Average form factor increases significantly, the smooth degree increases significantly. The probability entropy decreases gradually, the orientation and order of pore arrangement are enhanced. Consolidation pressure changes pore characteristics including scale, pattern and arrangement significantly, and the microstructure parameters can preferably reflect the macroscopic mechanical properties.

Key words: soft soil; consolidation; pore characteristics; SEM; microstructure

软土具有天然含水量高、压缩率高、剪切强度低、固结系数小等特点, 在施工过程中具有较大的安全风险^[1]。大量的研究和实践证明, 软土的工程性质很大程度上取决于诸如颗粒形状、分布、连接方式、孔隙尺度及孔隙率等微观结构及其变化规律^[2-3]。梁仕华等^[4]验证了土样在沉降、沉降速率和孔压消散方面与线性固结理论的符合性。Hicher等^[5]对土团粒的大小、形状变化、组成土团粒的单元定向分布及土体压缩过程中的各向异性等进行了分析。张先伟等^[6]通过SEM试验观察到土在平行沉降方向表

现为絮凝结构, 而垂直沉降方向呈堆叠结构。Zhang Jiru等^[7]提出一种预测土体微结构固结变形的新模式。孔令荣等^[8]认为上海淤泥质粘土孔隙多以团粒内在的孔隙和颗粒间的孔隙为主。但目前缺少考虑软土在高压固结条件下的孔隙微观特征, 且SEM试验中扫描放大倍数较低, 因此, 本文以上海淤泥质软土为研究对象, 通过采用多个放大倍数的SEM试验对固结过程中0至3200 kPa高压水平下的孔隙微观结构特征及变化规律进行定量分析, 阐述土体孔隙受力变化的规律, 进而揭示土体发生变形的机理。

收稿日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572255)

作者简介: 李越(1992-), 女, 重庆人, 硕士, 从事岩土工程性质方面的研究。

1 宏观试验方案

试验土样取自上海市浦东新区某工地第4层土,取土深度 10 m。其基本物理力学性能如表 1 所示。

表 1 土体基本物理力学性能

Tab.1 Physical and mechanical properties of soil

重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	含水率 $\omega/\%$
17.25	1.28	46.63
比重 G_s	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$
2.70	49.65	23.47

1.1 宏观固结试验

采用单向压缩高压固结仪,以标准固结试验方案为基准,压力级由小到大设为 12.5、25、50、100、200、400、800、1 600、3 200 kPa。其中前两级为预压力。为了减小原始土样之间固有的差异性,试验中每一级压力下设定三组平行试验。

1.2 微观 SEM 试验

微观试验采用 FEI.Sirion200 高分辨率场发射扫描电镜进行分析。每一压力级下,扫描试样取与固结加压方向平行的断面约 4 mm 左右薄片(图 1)。分别采用 $\times 2\ 000$ 、 $\times 5\ 000$ 、 $\times 10\ 000$ 、 $\times 20\ 000$ 和 $\times 50\ 000$ 的放大倍数进行观测和拍摄。

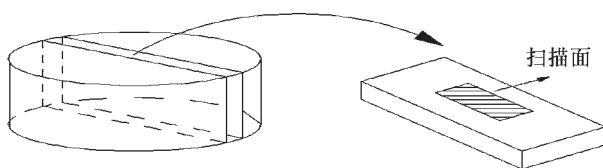


图 1 扫描方向示意图

Fig.1 Diagram of scan direction

试样制备需在每一级压力加载结束后,待 24 h 变形稳定,将土样取出,采用真空冷冻干燥法进行制样^[9]。首先用钢丝锯在固结土样的中间部位切取毛坯样,然后用切土钢刀切成 $2\ \text{cm} \times 0.5\ \text{cm} \times 0.5\ \text{cm}$ 的长条,将切取的土条放在 $-196\ ^\circ\text{C}$ 液氮中进行快速冷冻 15 min,再将土样放到冷冻真空干燥仪中保持 $-45\ ^\circ\text{C}$ 低温状态真空干燥 24 h,使土样既干燥又不变形保持原始结构形态。冻干之后,将土样小心掰断,获得未受扰动的断面,作为电镜扫描的观察面,并用洗耳球吹去试样表面的扰动颗粒。

试样扫描结束后需对得到的 SEM 图像进行二值化处理,进行孔隙和颗粒的识别;然后将二值化图像上的信息提取并转化为基础的量度参数,最后对

定量化的结构参数进行研究分析。图像经过处理后便可得到表征土样孔隙尺度特征的孔隙比、孔隙个数;表征孔隙形态特征的孔隙形状系数、表征孔隙排列特征的概率熵等统计定量结构参数。

2 宏观试验结果分析

根据不同固结压力下获取的宏观试验数据及微观结构初始图像,从孔隙的尺度、分布、排列、形态等方面对土体固结过程微观结构特征变化进行分析,并研究微观结构参数与固结压力的相关性。

2.1 不同固结压力下微观结构的变化特征

图 2 为 $\times 10\ 000$ 放大倍数下,试样在 50、100、200、400、800、1 600、3 200 kPa 固结压力的 SEM 图像。由图 2 可知,原状土呈现片状结构。具有一定的定向排列性,土颗粒形状呈不规则多边形,且颗粒间接触主要如鱼鳞片状通过面面接触,表面有较多小颗粒粘附。根据土颗粒粘附的微观结果组成形式。在 50~200 kPa 固结压力下,土体结构完整性较好,土颗粒主要为扁平状和团块状,孔隙逐渐发育。400 kPa 下,大量小块状或片块状土颗粒粘连,颗粒间通过点面和线面接触,结构遭受损伤。800 kPa 下,可以肉眼观察到裂隙发育,土颗粒间粘接性不强,结构空间排列有序性增强,土颗粒排列向水平向集中。1 600 kPa 压力后,结构面扭曲变形,出现局部方向一致的褶皱状土粒层结构,孔隙被破碎小颗粒填充,结构损伤较大。上海第四层土不同固结压力下的结构示意图如图 3 所示。

2.2 孔隙比及孔隙个数的变化特征

图 4 为所有压力级下平行试验土样的压缩曲线。图 5 是五个放大倍数下土样扫描面孔隙比随固结压力的变化曲线。两图对比可知,在 0~200 kPa 固结压力下,宏观试验下的孔隙比均随着固结压力的增长显著降低,压力大于 200 kPa 后,孔隙比均逐渐平缓减小,固结压力加载到 1 600 kPa 后,宏观试验下的孔隙比在 0.520 左右,微观试验下的孔隙比在 0.560 左右。宏观实验得到的 $e-p$ 曲线变化规律一致,且到达最终固结压力时,孔隙比相差 0.04 左右。说明微观结构参数能够反映宏观力学性能。

由图 5 还可观察到,不同放大倍数下各级固结压力的孔隙比变化规律一致。放大倍数并不改变土

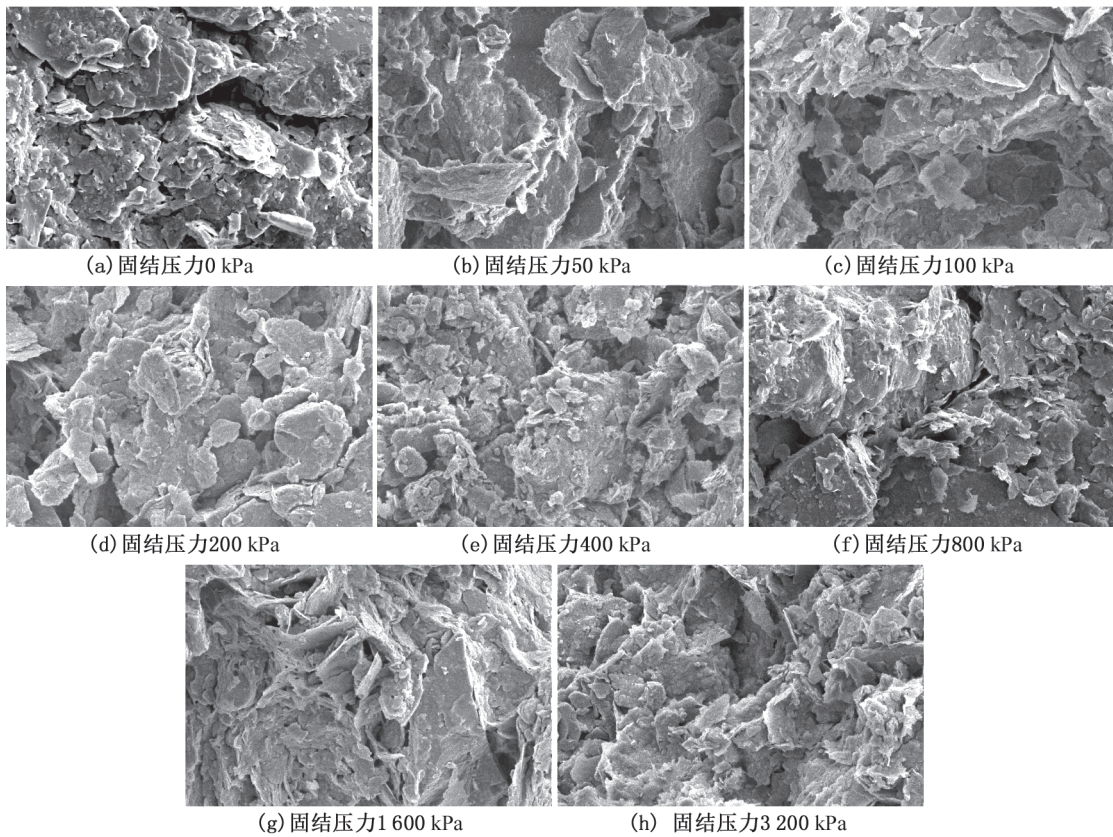


图 2 不同固结压力下土样的 SEM 图像

Fig.2 SEM images of soft soil under different pressures

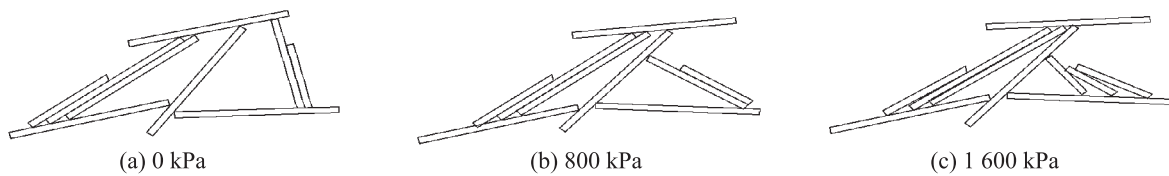


图 3 上海第四层软土不同固结压力下的结构示意图

Fig.3 Soil structure of shanghai 4th clay under different pressure

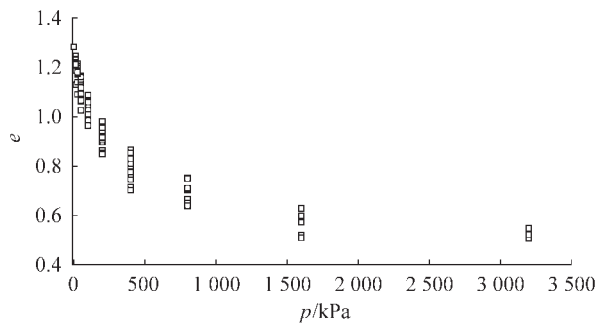


图 4 宏观试验下土的压缩曲线

Fig. 4 Soil compression curve in macro test

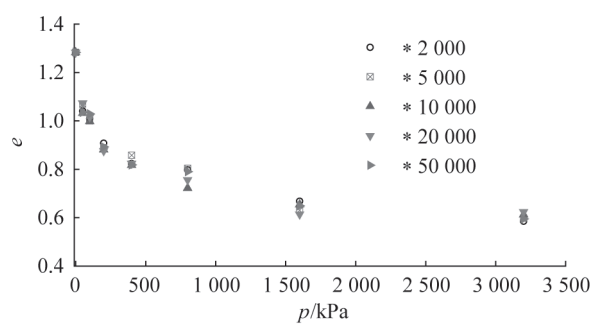


图 5 微观试验下土的压缩曲线

Fig.5 Soil compression curve in micro test

的结构，但由于放大倍数增长，扫描范围缩小，土的微观图片的区域差异性越来越突出，所以不同放大倍数下的孔隙比也有相应的微小变化。

土样孔隙个数随固结压力的变化见图 6。随着固结压力的增大，孔隙个数先显著增加后平缓减少。在 0~200 kPa 时，孔隙个数显著增加，这是因为孔隙

不断破碎，较多大孔隙逐渐破碎成小孔隙；压力大于 200 kPa 后，土粒相互靠拢、压紧，部分孔隙逐渐被挤密、消失，孔隙数减少。当压力加载至 1 600 kPa 时，孔隙个数随压力的增长已无明显变化。

由图 6 还可观察到，不同放大倍数下的孔隙个数不同。孔隙个数会随着扫描放大倍数的增加而下

降,这是因为放大倍数越大,扫描的区域越小,区域中的孔隙个数也相应减小。

2.3 形状系数的变化特征

形状系数用来描述孔隙的不规则程度,其公式为

$$F_i = 4\pi S/C^2 \quad (1)$$

式中: S 为孔隙包含的区域面积, C 为相应区域的周长。单个孔隙的形状系数没有意义,故需采用平均形状系数统计分析土样的孔隙特征。平均形状系数的计算公式为

$$F = \sum_{i=1}^n F_i/n \quad (2)$$

式中: n 为孔隙数量, F 值越大代表土样的整体孔隙特征越圆滑, F 值越小则孔隙越狭长。

图7为5个放大倍数下土样孔隙平均形状系数随固结压力的变化曲线。由图7可见:各放大倍数下的孔隙平均形状系数变化具有一定的规律性。当固结压力在0~200 kPa时,平均形状系数随着固结压力的增加显著增长,表明在固结初期,孔隙形状变化较大,对压力的敏感度大,在较小压力范围内孔隙已较为圆滑。当固结压力到达400~800 kPa后,平均形状系数增速放缓,曲线到达拐点,当加载至1 600 kPa时曲线逐渐趋于平缓,表明孔隙的形状系数到达一定值后,对压力的敏感度降低,固结压力的作用更多的是使其空间排列越紧密。

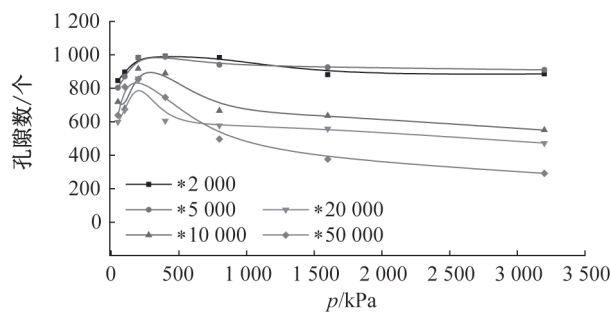


图6 孔隙个数随固结压力的变化

Fig.6 Variation of pore number on pressure

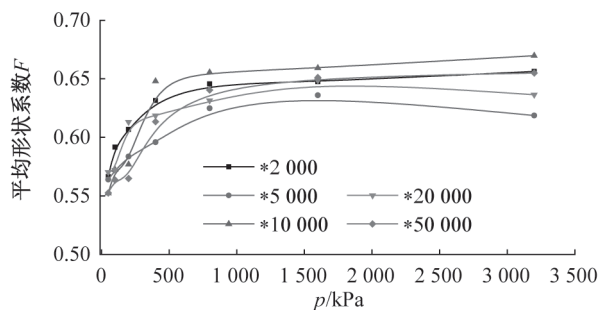


图7 孔隙平均形状系数随着固结压力的变化

Fig.7 Variation of average form factor on pressure

2.4 概率熵的变化特征

概率熵^[10]是用来反映土体微观结构排列有序性的微观参数。其定义为

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \log_n P_i \quad (3)$$

式中, H 为概率熵, P_i 为孔隙在某一方位区间的定向角分布概率, n 为方位区间的总数。概率熵的取值在0到1之间,当 H 取值为1时,说明孔隙定向角在各方向上的分布概率相同,当 H 为0时,孔隙只朝某一个方向分布。

图8为各放大倍数下土样孔隙概率熵随着固结压力的变化曲线。当固结压力在0~200 kPa时,概率熵显著降低。压力到达200 kPa后,概率熵均逐渐减小,表明孔隙排列的定向性逐渐增强。因为在固结压力作用下,颗粒不断地移动以调整结构,使其逐渐向新的平衡状态发展。加载后期压力达到1 600 kPa后,孔隙个数概率熵逐渐平缓,表明土样结构已到达新的平衡状态,孔隙位置的排列及分布已相对稳定。

3 结论

1) 初始图像的定性分析中,土颗粒在固结初期如鱼鳞片状通过面面接触,表面有较多小颗粒粘附。0~200 kPa固结压力下,孔隙不断发育,土颗粒增多,土颗粒间粘接性减弱;压力到达400 kPa下,结构完整性不断破坏,结构出现损伤。加载后期压力水平为1 600 kPa时,结构已出现较大损伤,颗粒间通过点面和线面接触,裂隙进一步发育,结构空间排列有序性增强,向水平方向集中。

2) 固结压力将显著改变土体的孔隙尺度特征。土体在固结压力的作用下孔隙体积减小,土体密度增大。固结初期0~200 kPa下,孔隙比先急剧降低后缓慢下降,孔隙个数先显著增加后逐渐下降,表明孔隙的尺度特征加载初期对固结压力敏感度较

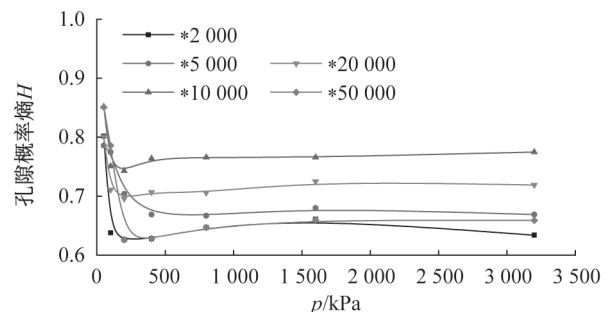


图8 孔隙概率熵随着固结压力的变化

Fig. 8 Variation of probability entropy on pressure

高, 加载后期, 孔隙个数随压力增长无明显变化。

3) 在固结压力的作用下, 孔隙的形状逐渐圆滑, 空间排列越加紧密。加载初期 0~200 kPa 下, 平均形状系数显著增加; 压力大于 400 kPa 后, 平均形状系数上升逐渐缓慢; 压力到达 1 600 kPa 后, 其平均形状系数逐渐趋于定值。

4) 固结压力对土体的排列特征影响明显。随着固结压力增大, 概率熵逐渐减小, 孔隙的定向性增强, 孔隙的排列更加有序。当固结压力达到 1 600 kPa 后, 概率熵逐渐平缓, 表明土样孔隙位置的排列及分布已相对稳定。

参考文献:

- [1] 周翠英, 牟春梅. 珠江三角洲软土分布及其结构类型划分 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 3(6): 81-84.
- [2] 谢晓华, 周永章, 张澄博, 等. 珠三角饱和软土固结过程中微观孔隙结构的演化规律 [J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(3): 368-373.
- [3] 薛茹, 胡瑞林, 毛灵涛. 软土加固过程中微结构变化的分形研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 87-91.
- [4] 梁仕华, 齐添, 谢康和, 等. 超固结土的一维固结理论及其试验研究 [J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 268-273.
- [5] HICHER P Y, WAHYUDI H, TESSIER D. Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay [J]. Mechanics of Cohesive Frictional Materials, 2000(5): 341-371.
- [6] 张先伟, 杨爱武, 孔令伟, 等. 天津滨海吹填泥浆的自重沉降固结特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 769-776.
- [7] ZHANG Jiru, TAO Gaoliang. A New Model for Soil Consolidation Based on Microstructure [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, 16(1): 78-82.
- [8] 孔令荣, 黄宏伟, HICHER P Y, 等. 上海淤泥质黏土微结构特性及固结过程中的结构变化研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3287-3292.
- [9] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 406-412.
- [10] 施斌. 粘性土击实过程中微观结构的定量评价 [J]. 岩石工程学报, 1996, 18(4): 57-62.

(责任编辑 王利君)

(上接第 8 页)

5 结论

1) 通过改变桩径尺寸, 得到桩径越大, 桩的水平位移就越小, 安全性也随之变高。但在工程实际中, 还要考虑到安全性和经济性等因素, 选择 0.8 m 桩径的方案最为合适。

2) 随着开挖深度的增加, 桩体本身的水平位移最大发生在桩顶, 最小发生在桩底, 整个曲线呈现先陡后缓且逐渐减少的趋势。

3) 基坑土体随着深度的增加, 整个土体水平位移走势为从土体顶部往下均匀分布, 并依次递减, 最大水平位移出现在顶部; 整个土体沉降走势为从土体顶端向下均匀分布, 并且依次递减。

参考文献:

- [1] MONHAMED Ashour, NORRIS G. Modelling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 126: 420-428.
- [2] CORDING EJ, LONG J L, SON M, et al. Assessment of excavation-induced building damage [C]//Earth Retention Conference 3(ER2010): 101-120.
- [3] JOHNSON K, LEMCKE P, KARUNASENA W, et al. Modelling the load-deformation response of deep foundations under oblique loading [J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(9): 1375-1380.
- [4] 张洪, 易发成. 基坑支护形式及支护技术发展分析与研究 [J]. 山西建筑, 2010, 36(31): 75-76.
- [5] 杨丰年. 长春某基坑支护方案优化研究 [D]. 吉林: 吉林建筑大学, 2015.
- [6] 李幼辉. 软土深基坑桩锚支护设计与数值模拟分析 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2015.
- [7] 孙龙才. 桩—锚支护结构在成都某深基坑支护工程中的应用 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [8] 龚晓南. 关于基坑工程的几点思考 [J]. 土木工程学报, 2005(9): 99-102.
- [9] 申永江, 杨明, 项正良, 等. 双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(Z2): 96-100.
- [10] JGJ94-2008, 建筑桩基技术规范 [S].

(责任编辑 王利君)