

珠江三角洲软土微结构的扫描电镜研究*

李 榴

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 以扫描电镜为主要观察手段, 研究珠江三角洲的全新世软土层受压前、后的微结构变化特征, 并试图通过对一定厚度的样柱的压缩实验, 探讨在给定荷载下软土微结构在垂深方向上的变化规律。对样柱施压后的观察结果表明, 随着离施压点距离的增大(即向压力减小方向), 软土的微结构的变化规律为: 紊流状→基质状→骨架状(或凝块状)→蜂窝状(天然状态)。这一发现对于探讨应力在软土中的衰变规律、以及计算软土层在一定荷载下的压缩量等, 可能是很有意义的。

关键词: 软土; 压缩试验; 扫描电镜; 微结构; 珠江三角洲

中图分类号: P642.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 04-0102-04

珠三角地区广泛分布着一层全新世海侵形成的软土层, 其成分主要为淤泥、粉砂质淤泥和粘土等^[1]。海相成因的软土层的一般特征是天然含水量大、压缩性高、承载力低, 呈软塑到流塑状^[2,3]。在珠三角的大部分地区, 软土层的厚度一般为几 m 至十几 m 厚, 最厚可达 50 m 左右^[4,5]。随着珠江三角洲地区经济建设的进展, 在软土层分布区兴建公路、铁路、水利、电力、机场、码头、高层建筑等大型工程项目日益增多, 厚层软土引起的地基下沉和地段失稳已经成为该区一个不容忽视的环境地质问题。

地基变形在宏观上表现为土的压缩沉降, 而土体的压缩必导致其内微结构的变化。过去对各种类型土的微结构特征已作过不少研究^[6-9], 但通常采用的是常规样品的压缩实验。本文是试图通过对一定厚度的软土(样柱)施压, 然后研究其微结构在垂深方向上的变化规律及其与应力变化之间的关系。

1 材料与方法

作者分别在珠海某电厂排水明渠、广州某自来水厂和广州某排污渠 3 个不同的地点, 对全新世的海相淤泥层进行采样。其方法使用不同高度的 PVC 塑胶管, 将管口削薄并在管内涂上润滑油, 然后沿垂线方向慢慢压入淤泥层中, 从而获得不同高度的样柱。

1.1 软土压缩实验

软土样品的室内压缩实验分 2 组进行: 一组

是薄样(常规样), 另一组是样柱。

薄样实验首先用环刀切取 2 cm 厚的一组原状土样, 放入常规的三联固结仪中, 施以不同的荷载。为了不让软土产生强烈变形, 实验过程采用逐级加荷法, 即每隔 1 h 加荷一次, 加至最后一级时稳定 24 h 后卸荷。卸荷后即除去样品表层, 然后用涂了凡士林的裁纸刀, 分别平行水平面和垂直面切取约 5 mm × 15 mm × 30 mm 大小的土块各 2 块, 用于制备微结构观察样。

样柱实验是将野外用 PVC 管采集到的样品, 连管一起放入专门设计的加压仪中(图 1)。样柱两端各放一张滤水纸和一块与土柱面积相同的透水石, 底端对准有凹槽的托盘, 以便加压时孔隙水的排出, 顶端施放加压平台。放加压平台前将加压杆均匀抹上凡士林, 以减少摩擦。

本次实验在样柱顶端施加的荷载为 151 kPa。加荷也是逐级进行, 每隔 1 h 加荷一次, 加至 151 kPa 后稳定 24 h 后卸荷。

压缩实验完成后, 将土柱用小钢锯轻轻锯开, 然后由上至下, 每隔一段距离, 用涂了凡士林的裁纸刀沿垂直面和水平面平行切取 5 mm × 15 mm × 30 mm 大小块各 2 块, 用于制备扫描电镜下的微结构观察样品。

1.2 扫描电镜观察样品的制备

软土孔隙发育, 含水量高。多次试验的结果表明: 含水样品在电子束的轰击下会局部加热, 水汽向外逸出, 容易冲破表面的导电层, 造成观察部位颗粒的移动; 或者出现放电现象, 从而导

* 收稿日期: 2000-10-16; 作者简介: 李榴芬(1963-), 女, 工程师。

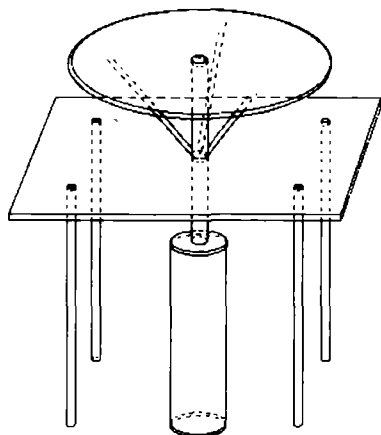


图1 样柱加压示意图

Fig.1 Sketch of the compression of soil column

致屏幕上一片空白,不能成像.另外,水汽的存在还会破坏扫描电镜镜筒的真空度.因此,样品制备过程首先要彻底除去水分.其次,样品要有良好的导电性能,因此要均匀适度地喷镀金膜.最后也是最根本的一点就是在制样过程中保证样品的微结构不受破坏,否则拍出的照片将失真.样品干燥试验的方法和步骤见文献[10].

毛坯样品干燥后,用钢丝锯沿样品四周锯1.5 mm深的沟,顺沟把毛坯折断,得到较平整的折断面.用刀片把有折断面的毛坯切成黄豆大小,用于扫描电镜下的观察.要说明的是,样品的形状对观察效果有很大影响,作者的方法是将观察样品切成上小下大的梯形体,即四面都有斜面.这样在扫描电镜下便比较容易观察到需要观察的断面,并可得到清晰的图象.对于较松散的样品,采用的方法是在毛坯约除掉80%的水分时切样.此时土样尚有一定的粘性,较易切成有斜面的样品.然后,再将切好的样品置于真空干燥器中直到干燥为止.下一步的工作,是将制好的观察样品固定在样品托上,然后对样品进行真空喷镀金膜.值得一提的是,据作者本人的经验,部分含粉质较多的颗粒,一次喷镀金膜所获得的效果往往不够理想,因为在电子束的轰击下,金膜太薄容易破裂,照相时会出现颗粒移动现象(图2:1).针对这种情况,作者采用了多次喷膜.经验表明,喷膜3~4次效果最佳,次数太多将看不到颗粒表面.按照以上所述方法拍出的扫描电镜照片可清楚看到土样本身的裂隙,没有发现土样因收缩而出现的收缩裂纹.这说明样品制备的效果较好,基本上保持了样品原来的结构.

2 结果与讨论

2.1 薄样受压后的微结构变化特征

用扫描电镜对多个样品的观察结果表明,受压前的淤泥一般为蜂窝状结构(图2:2).蜂窝状结构的特点是颗粒集聚体和孔隙的排列呈等轴的、开放性的蜂窝状形态.颗粒常在接触带上“连生”而构成微集聚体.结构中常夹杂有相当数量未分解的有机残渣和硅藻球菌的骨骼碎片,以及有孔虫类的壳体等.

对于薄样,荷载加至25 kPa时,样品仍为蜂窝状结构,但孔隙的直径明显变小,孔隙数量则明显增加.

加荷至50 kPa时,样品为骨架状结构.特点是由颗粒组成疏松的、孔隙均匀的骨架.粘土矿物常以“外衣”的形式不均匀地分布于大颗粒的表面,构成一种独特的连结颗粒之间的纽带.结构单元为无定向性排列.骨架结构物间的孔隙大小一般为 $0.1 \sim 4 \mu\text{m}$ (图2:3).

荷载增加至100 kPa时,样品出现基质状结构(图2:4).特点是在粘性土物质(基质)中无序分布的粉土粒和砂粒夹杂物,基质已集聚化.

荷载增加到150 kPa时,样品开始出现紊流状结构,粘土微聚体呈片状产出,定向性强,构成微层理.当有粗颗粒时,片状集合体围绕颗粒呈紊流状排列.荷载的进一步增加,紊流状结构越来越明显(图2:5),并逐渐趋向稳定.

从薄样的压缩实验得到了如下两点认识:

(1) 压力的大小对软土的微结构有重要影响,其中软土结构变化最大的压力区间是 $0 \sim 150 \text{ kPa}$.

(2) 荷载从0增至150 kPa,淤泥的微结构从原来的蜂窝状结构逐渐演化至骨架状结构,然后至基质状结构,最后出现紊流状结构.

2.2 样柱受压后垂深方向上的微结构变化特征

对采自珠海和广州的不同高度的样柱施于同样的压力(151 kPa),压缩稳定后沿垂线方向在样柱的不同部位采样(样品切面平行于压力方向),在扫描电镜下研究样柱受压后在垂线方向的微结构变化.结果发现,从施压点开始,土柱在垂直截面上的微结构具有如下变化规律.

2.2.1 珠海某电厂排水明渠样柱

样柱A:原始高度为27.1 cm,加荷载151 kPa,24 h后,样柱高度变为25.3 cm.此后采样

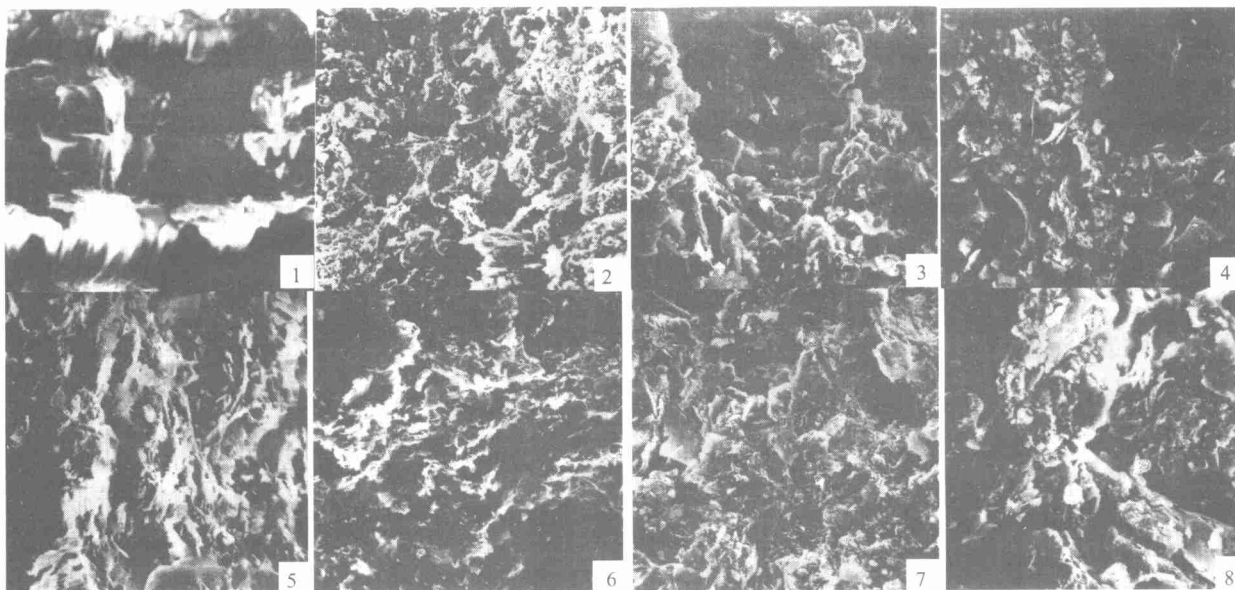


图2 软土微扫描电镜图

Fig.2 SEM photos of soft-soil tested

1 扫描电镜下观察到的颗粒移动现象; 2 珠三角海相淤泥的原始结构—蜂窝状结构; 3 骨架状结构(淤泥薄样, 荷载 50 kPa); 4 基质状结构(淤泥薄样, 荷载 100 kPa); 5 典型的紊流状结构(淤泥薄样, 荷载 200 kPa); 6 紊流状结构(珠海 A 样柱, 淤泥, 压后距施压点 1 cm 处垂直截面); 7 基质状结构(珠海 A 样柱, 淤泥, 压后距施压点 11 cm 处垂直截面); 8 骨架状结构(广州 1 号样, 淤泥, 压后距施压点 15.5 cm 处垂直截面)

在扫描电镜下观察. 结果如下:

(1) 离施压点 0~6 cm 的土样呈紊流状结构(图 2:6). 特点是颗粒以“面—面”型接触为主, 定向排列明显; 孔隙呈长条状, 结构较紧密.

(2) 离施压点 6~11 cm 处, 样品呈基质状结构(图 2:7): 基质集聚化现象明显, 集聚体大小一般 25 μm , 最大可达 60 μm . 结构密实度仅次于上层.

(3) 距施压点 11 cm 以下, 样品为骨架状结构(图 2:8), 但随着离施压点距离的增加, 样品的结构密实度有越来越小、质地越来越疏松趋势. 孔隙直径也逐渐增大到 3~5 μm .

样柱 B: 原始高度为 54.0 cm, 加压 (151 kPa), 稳定后高 51.1 cm.

与样柱 A 相同, 在施压点附近, 样品呈紊流状结构, 向下逐渐发展为基质状结构. 离施压点 15 cm 处开始逐渐变为骨架状, 孔隙直径也逐渐变大, 达到 3~6 μm ; 从距 29 cm 处开始, 骨架状结构向蜂窝状结构过渡, 约在 42 cm 处开始达到淤泥的天然结构.

2.2.2 广州某自来水厂样柱 原始高度为 50.1 cm, 加压 151 kPa 后高 48.0 cm. 样柱在施压点附

近也为紊流状结构; 在 12 cm 处开始, 紊流状结构开始演变为基质状结构; 至 20 cm 处达到骨架状结构; 再往下逐渐变为蜂窝状结构.

2.2.3 广州某排污渠样柱 与前述两处的淤泥样品不同, 该样柱的岩性为粉砂质淤泥, 且粉砂含量较高. 样品的天然状态为蜂窝状结构. 样柱原始高度为 29.4 cm, 加荷载 151 kPa, 后压缩至 28.6 cm. 压缩后样柱在垂深方向上的微结构变化规律如下:

(1) 在施压点附近, 样品并未出现紊流状结构, 而是出现基质状结构. 基质微集聚体多呈“面—面型”和“面—边型”接触; 粉砂土粒紧密夹杂, 孔隙大小较均匀, 一般为 2~3 μm , 土体也较密实.

(2) 距施压点 18 cm 处, 样柱出现海绵状结构, 巨型集聚体内部为细小蜂窝状结构, 形成网络, 孔隙多为椭圆形, 孔隙直径一般为 5~6 μm , 结构较疏松.

(3) 距施压点 26 cm 处起, 样品开始为蜂窝状结构, 但土质稍比天然状态的土样密实.

综上所述, 对样柱施加 151 kPa 荷载后, 淤泥样品在施压点附近出现紊流状结构, 向下逐渐

发展为基质状结构,然后为骨架状结构,最后为蜂窝状结构;约在离施压点40~45 cm处,蜂窝状结构到达其原始状态。但是,同样大小的荷载施加在粉砂质淤泥样柱上,靠近施压点处只出现基质状结构而不出现紊流状结构,向下则逐渐过渡到海绵状和蜂窝状结构。

3 结 论

本项研究的目的是想通过研究一定荷载下软土微结构的垂向变化规律,探讨应力在软土层垂深方向上的衰变特征。对淤泥薄样的实验结果表明,淤泥的微结构是随着压力的增大而从原始的蜂窝状结构逐渐发展到骨架状结构;压力进一步增大又变为基质状结构,最后则到达紊流状结构并趋向稳定。

对样柱的实验结果表明:在淤泥样柱的顶端施加151 kPa荷载后,从施压点往下,其微结构呈紊流状→基质状→骨架状→蜂窝状的顺序有规律地变化。比较样柱和薄样的实验结果即可发现,样柱的微结构变化反映的是压力沿垂深方向的递减过程。这一发现对于工程的设计与施工可能是很有意义的。因为软土层往往有一定的厚度,当我们知道荷载的大小后,便有可能据此估计压力可能影响到的深度。此外,样柱的实验结果还说明,当一定大小的荷载施加在软土层上并引起地面沉陷时,那么不同深度的软土对总沉降量的贡献是不一样的。这意味着如果能对软土受压后的微结构变化特征进行量化,就有可能得到有关荷载与总沉降量关系、以及压力在软土层的可能影响深度等方面的计算方程。事实上这方面

的研究已经进行并已取得了良好的进展^[11]。

以往研究软土的微结构多是在对常规样(薄样)加压后进行的,对样柱进行加压实验,并研究样柱加压后软土微结构的垂向变化,应该说是—种新的探索。因为探索才刚刚开始,而且限于实验设备、时间和经费等方面的因素,故必然存在许多考虑不周甚至错误之处。但初步研究得到的规律性应该说是令人振奋的,它表明有必要在这方面作进一步的深入探讨。

参考文献:

- [1] 黄镇国,李平日,张仲英,等.珠江三角洲形成发育演变[M].广州:广州科普出版社,1982.47-52.
- [2] 甘德福,等.上海地区淤泥质粘土结构的初步研究[J].勘察技术,1979(6):5-7.
- [3] 高国瑞.中国海相沉积土微结构研究和工程性质[J].中国科学B,1984(9):849-860.
- [4] HUANG Y K, XIA F, CHENG G N. Controlling process of faults over the origin and development of the Zhujiang Delta[J]. Acta Oceanologica, Sinica 1984, 3(3): 385-397.
- [5] 高国瑞.中国黄土的微结构[J].科学通报,1980(20):945-948.
- [6] 王幼麟.蒲圻第四纪红色粘土的物质成分和结构特性及其工程性质的关系[J].水文地质工程地质,1983(4):78-81.
- [7] 高国瑞.中国红土的微结构和工程性质[J].岩土工程学报,1985(5):10-21.
- [8] 高国瑞.膨胀土的微结构和膨胀势[J].岩土工程学报,1984(2):58-61.
- [9] 谭罗荣.灾害性膨胀土的微结构特征及其工程性质[J].岩土工程学报,1994(2):48-57.
- [10] 李榴芬.粘性土微结构样品的制备,实验教学改革与探索[M].广州:中山大学出版社,2000.195-199.
- [11] 李榴芬.珠三角软土压缩过程微结构变化及其工程意义[D].广州:中山大学,2000.

Studies of Microstructures of Soft-soil from the Pearl River Delta by Means of SEM

Li Liu-fen

(Department of Geosciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This study tries to unravel the variations of the microstructure of soft-soil after compression by means of SEM. Soft-soil columns with certain lengths were collected from different places in the Pearl River Delta, and were pressed in lab. After that, observation over the microstructures of the soil was made with SEM. It was found that the microstructure of soil changes regularly in the vertical direction of the column. From the compression point downward (or with the reducing pressure), the microstructure of soil changes from turbulence-like to mass-like, then to frame-like and finally honeycomb-like. This findings should be significant for studying the disintegration of pressure in a soft-soil layer and for accounting the settlement of the soft-soil layer under a certain pressure.

Keywords: soft-soil; compression experiments; SEM; microstructure; the Pearl River Delta