

文章编号: 1000-7598-(2008)07-1759-05

动力排水固结前后软土微观结构分析

孟庆山¹, 杨 超¹, 许孝祖², 雷学文², 孙士玲²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.武汉科技大学, 武汉 430070)

摘 要: 通过液氮冷冻干燥制样技术制备饱和软土试样, 借助扫描电子显微镜技术, 得到经室内动力排水固结前后土样的微观结构图像, 用编制的计算机程序分析其微观结构参数变化。通过比较试样的孔隙个数、总面积、总周长、面积分级、平均孔径、形状系数、圆度和各向异性率、分形维数, 研究了在动力排水固结作用下土体微观结构在垂直向和水平向发生的变化。

关 键 词: 软土; 动力固结; 扫描电镜; 微观结构

中图分类号: TU 411.92

文献标识码: A

Analysis of microstructure of soft clay before and after its improvement with dynamic consolidation by drainage

MENG Qing-shan¹, YANG Chao¹, XU Xiao-zu², LEI Xu-wen², SUN Shi-ling²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the sample-made technology of the liquid nitrogen freeze-dry, samples of saturation soft soil have been prepared. With the help of scanning electron microscope (SEM) technology, the microstructure images of the soft clay before and after its laboratory improvement with dynamic consolidation by drainage are obtained. The change of its microstructure parameters is studied by a developed computer program. Through comparing the results in terms of the number of pore, total area, total perimeter, the classification of area, the average diameter, and the shape coefficient, the roundness, the anisotropy, fractal dimension, the change of the soil microstructure after the improvement with dynamic consolidation by drainage has been studied preliminarily.

Key words: soft clay; dynamic consolidation; scanning electron microscope(SEM); microstructure

1 前 言

土体在受力过程中, 其工程性质将发生相应的变化, 这种变化是通过其结构状态的调整来实现。岩土体众多的工程现象在很大程度上受微细结构状态和变化的影响, 任何复杂的物理力学性状都是其微细结构特性和变化的综合体现。要想揭示物理力学行为的本质规律, 必须掌握土体在受力过程中微细结构相应的变化情况。

自 20 世纪以来, 扫描电子显微镜技术得到了飞速的发展^[1], 借助这一技术, 土体微观结构的定量分析得到了长足的发展。本文对软土室内动力排水固结前后的土样进行扫描电镜试验, 对其扫描图像进行定量分析, 通过比较, 得出固结前后土体微观

结构在水平和垂直方向的变化情况。

2 土体微观结构图像的获得

2.1 制样

原状土样采自武汉汉阳四新大道路基下的淤泥质软黏土。采用水头饱和法对试样进行饱和, 使饱和度达到 93 % 以上。

通过室内模拟试验, 得出了动力排水固结条件下, 强夯的最佳夯击能量、锤重与落距的组合、夯击遍数、锤重与落距的组合以及能量施加顺序等方面的施工工艺特征^[2], 在此最佳夯击方案下实验所得到的土体, 用于制作扫描电镜试验的样品。

为获得较真实的土样微观结构, 本试验采用液氮冷冻真空升华干燥来处理土样^[1]。由于淤泥质软

收稿日期: 2007-07-27

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所知识创新工程领域前沿项目(No. O712041Q01)、国家自然科学基金重点项目(No. 50639010)和中国科学院岩土力学重点实验室开放课题(No. Z000602)。

作者简介: 孟庆山, 男, 1974 年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩土力学和软基加固处理研究。Email: mqs749720@yahoo.com.cn

黏土呈软塑-可塑状,很难在不破坏其结构的情况下得到扫描电镜所需要的小块样品,故先将之前切好的高 80 mm 的圆柱原状土样和夯击后的圆柱土样进行一次液氮冷冻真空升华干燥,使得较好的获取扫描电镜所需的小块样品成为可能。这次冻干之后,采用掰断法:用锋利的切土钢刀,将干燥后的土样切成长约 2 cm,水平断面约 0.5 cm 的细长条后,将土样小心掰开,以获得未受扰动的新鲜结构面,作为扫描电镜的工作面。注意尽量保持新鲜面的平整,即使其处于土样未开采前的水平面或垂直面上。由于这次是在大圆柱土样的形状下冻干的,为完全去除内部土体所含水分,再对这次掰断得到的小块土样进行一次冻干试验。为去除试样表面的扰动颗粒,在试样表面轻涂一薄层胶水,待胶水干后把胶皮撕下,并用橡皮球吹去松动的颗粒,即获得试样的新鲜表面^[3]。这样将土条制成底面平整、厚约 2 mm 的薄片。为对比夯击前后土样的水平面和垂直面的微观结构变化,原状土和夯击后的土体分别做了 1 个水平面薄片,1 个垂直面薄片,共 4 个样块。

最后,用环氧树脂把样品黏在小胶片上,用洗耳球将样品表面的尘土吹去,再用双面胶把样品黏牢在样品盘上,放进真空镀膜仪中进行喷金 2~3 次,使其具有良好的导电性,以便镜下观察清晰。

2.2 土体微观结构图像的获得

土体经过前面所述的制样方法制备土样后,通过扫描电镜就可以得到不同放大倍数、不同位置的土体微观结构图像^[4,5]。

对黏土来说,由于颗粒比较微小,因此,在不同的放大倍数下鉴别土的不同级别的微结构。鉴于此,本文首先在比较低的放大倍数(500)下观测样品总的结构特征,圈定有代表性的区域,然后放大倍数增至 2 000,这代表了中等结构水平,摄制有代表性的微结构图像,进一步评价孔隙特征和土颗粒的组构。最后,放大倍数增至 6 000,观测黏土矿物颗粒、集聚体及选聚体内部结构的特征,详细研究颗粒内部孔隙的分布^[6]。对 4 个扫描电镜样块进行了 3 种不同的放大倍率的扫描电镜,共获得图像 12 张。

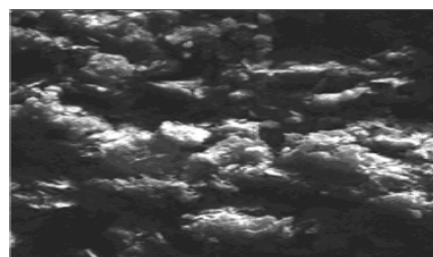
为取得更广泛的统计规律,一般采用同一尺寸的照片进行分析,得出图像处理的结构参数等数据。本文分析采用放大倍率为 2 000 的照片,共 4 张,图片大小均为 440×431 (单位为像素)。通过电镜图片标尺转换,得到其实际尺寸为 116 mm×114 mm,则 1 个单位像素代表 0.131 82 μm。

3 土体微观图像的处理与分析

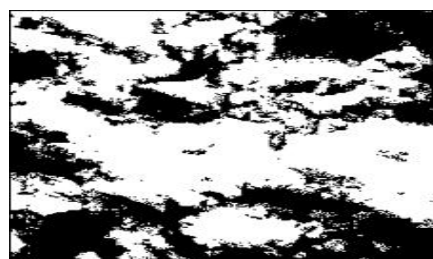
3.1 图像处理

试验取得的原始显微照片为真彩色图像,通过去噪、亮度和对比度调节,使图像更加清晰,再将其转换成灰度图像,通过目测法确定阈值。首先通过肉眼观察,对较大孔隙的边界的像素值进行统计,尽可能找出在该分辨率条件下的真实边界的像素值,将该像素值设定为二值化阈值,将小于该阈值的像素点重新定义为 0,大于该像素阈值的像素点重新定义为 1,则所得图像即为二值化图像。对比二值化后的图像与原始图像进行阈值修正,最终确定在某一分辨率下的最优阈值。

运用 MATLAB 图像处理软件进行图像分析^[7],通过上述方法对得到的电镜照片数字化处理,二值化成为 0 和 1 的数字矩阵,0 表示孔隙,1 表示土体。为便于孔隙区分及标定,将二值化后的图像反色,即将像素值为 1 的变为 0,像素值为 0 的变为 1。典型处理过程如图 1 所示。



(a) 原始图像



(b) 二值图像



(c) 二值化反色图像

图 1 电镜图片的二值化

Fig.1 Binaryzation of SEM images

运用 MATLAB 图像处理函数库，并编制相应的程序，进行相关孔隙参数计算。

3.2 图像分析

通过扫描电镜得到的土体微观结构图像，经计算机图像处理，才能获得土的微观结构量化数值和统计特征。计算机图像处理是土结构研究中最关键的工作，通过计算机图像处理主要得到微观结构参数、几何形态的变化，研究其孔隙的分形特征。

（为方便表示，以下各表中用字母 YH 代表原状土水平断面，YV 代表原状土垂直断面，HH 代表夯击土水平断面，HV 代表夯击土垂直断面。）

3.2.1 微观结构参数

主要参数包括：孔隙个数、总面积、总周长、面积分级、平均孔径等。对于上述参数的精确计算是通过将二值化图像的孔隙计算机识别、标记、边缘跟踪后完成对每个孔隙的结构参数计算统计后得出的。

（1）孔隙个数的变化

由分形的自相似性直接产生一定尺寸的孔隙个数。从表 1 可以看出，经夯击，土体断面内孔隙数目增多，且水平断面比垂直断面增加幅度大。说明水平方向孔隙裂变的程度高于垂直方向孔隙的裂变。

表 1 孔隙个数

Table 1 The number of pore

水平断面			垂直断面		
YH	HH	增幅/%	YV	HV	增幅/%
42	90	114.3	94	122	29.7

（2）孔隙总面积的变化

孔隙的面积可以对该图形的像素进行计数求得。从表 2 可以看出，夯击后，土体断面内孔隙面积在水平方向和垂直方向变化具有差异性，水平断面孔隙面积增大，垂直断面孔隙面积减小，同时参照表 1 可知，单个孔隙的面积，水平垂直断面均是减小的。这说明土体在受夯击方向上压缩，孔隙面积减小，垂直夯击的方向有挤土现象。

表 2 孔隙总面积的变化（单位： μm^2 ）

Table 2 The total area of pore (unit: μm^2)

水平断面			垂直断面		
YH	HH	增幅/%	YV	HV	增幅/%
11 999.3	12 365.5	3.05	12 351.0	12 087.9	-2.13

（3）孔隙总周长的变化

孔隙周长可以通过对图形边界线的算法跟踪图

形时的步数计算。表 3 和表 2 表现相对应，动力固结后，水平方向孔隙总周长增大，而垂直方向的孔隙总周长略有减小。

表 3 孔隙总周长的变化（单位： μm ）

Table 3 The total perimeter of pore (unit: μm)

水平断面			垂直断面		
YH	HH	增幅/%	YV	HV	增幅/%
1 129.6	1 554.8	37.64	1 430.0	1 257.5	-12.06

（4）孔隙面积的变化

从表 4 可以看出，夯击后，土体水平垂直断面大孔隙均出现明显的减少，且垂直断面减少的程度高于水平断面，这一点和前面的分析相一致。在垂直方向，面积介于中间 $0.1\sim 100\mu\text{m}^2$ 的孔隙经夯击，出现同步的减小，与之对应，水平方向 $1\sim 100\mu\text{m}^2$ 的孔隙经夯击反而增多。

表 4 孔隙面积(μm^2)分级(占总孔隙数目的百分比)

Table 4 Area(μm^2) classify

(percentage of the total pore number)

类别	<0.1	0.1~1	1~10	10~100	100~1 000	>1 000
YH	16.67	54.76	11.90	4.76	11.90	0
HH	16.67	52.22	17.78	10	3.33	0
YV	15.96	53.19	21.28	8.51	0	1.06
HV	24.59	50.82	14.75	6.56	3.28	0

（5）平均孔径的变化

从表 5 可以看出，无论哪种断面，微小孔径（小于 $1\mu\text{m}$ ）占有绝对数量。经夯击，土体水平垂直断面大孔径的孔隙均减少，对于水平断面，经过夯击，小于 $1\mu\text{m}$ 孔径孔隙的数目减小， $1\sim 10\mu\text{m}$ 孔径孔隙的数目增多， $10\mu\text{m}$ 以上孔径孔隙的数目减小，而垂直断面与之刚好相反，小于 $1\mu\text{m}$ 孔径孔隙数目增多， $1\sim 10\mu\text{m}$ 孔径孔隙数目减少， $10\mu\text{m}$ 以上孔径孔隙的数目增多，即土体在受夯击方向上特小孔径孔隙增多，垂直于夯击的方向孔隙有集中于中等孔径的趋势。

表 5 孔径(μm)分级(占总孔隙数目的百分比)

Table 5 Average diameter (μm) classify

(percentage of the total pore number)

类别	<1	1~2	2~5	5~10	10~20	>20
YH	73.81	7.14	4.76	2.38	9.52	2.38
HH	63.33	17.78	12.22	3.33	2.22	1.11
YV	65.96	17.02	8.51	7.45	0.00	1.06
HV	72.13	13.93	9.02	1.64	1.64	1.64

3.2.2 微观结构的几何形态

主要指微结构的空方向性，包括形状系数、

圆度和各向异性率等。

(1) 形状系数的变化

孔隙的几何形状影响着土的物性。长条形孔隙与圆形孔隙对土物性的影响显然是不同的。

评价孔隙的形状最常用的指标是形状系数 F_i 。

$$F_i = C_e / S_a \quad (1)$$

式中: C_e 为与颗粒或孔隙等面积的圆周长; S_a 为颗粒或孔隙的实际周长。 F_i 的取值范围在 (0, 1] 之间, 当 $F_i = 1$ 时, 其形状为圆形; F_i 取值越小, 形状越狭长; 当 $F_i \rightarrow 0$ 时, 形状趋于一直线。

平均形状系数则定义为

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

式中: n 为统计颗粒或孔隙数。

由表 6 可以看出, 夯击后土体水平断面孔隙平均形状系数增大, 说明其孔隙变得圆滑, 而垂直断面孔隙平均系数减小, 说明其孔隙变得狭长。

表 6 平均形状系数
Table 6 Average shape coefficient

水平断面			垂直断面		
YH	HH	增幅/ %	YV	HV	增幅/ %
0.553 0	0.601 0	8.68	0.617 7	0.567 5	-8.13

(2) 孔隙圆度变化

为进一步研究其形状的变化, 引入圆度这一参数。

孔隙圆度定义如下:

$$\text{Roundness} = \frac{4\pi S}{C^2} \times 100 \% \quad (3)$$

式中: S 为构成孔隙轮廓的多边形的面积; C 为孔隙周长。显然, 圆的圆度为 1, 正多边形的圆度为 $(\pi/n) \text{ctg}(\pi/n)$, n 趋向于无穷大时的极限恰好是圆的圆度值 1。圆度越接近 1, 图形越接近圆。

从表 7 可以看出, 经夯击, 水平断面圆度大的孔隙数目增多, 垂直断面与其相反, 这一点与上述分析相一致。

表 7 孔隙圆度分级(占总孔隙数目的百分比)
Table 7 Pore roundness classify
(percentage of the total pore number)

类别	0~0.3	0.3~0.604 6	0.604 6~0.785 4	0.785 4~1
YH	42.86	45.24	9.52	2.38
HH	32.22	45.56	17.78	4.44
YV	26.60	55.32	12.77	5.32
HV	36.07	50.00	11.48	2.46

注: 表中 0.604 6 为三角形的圆度, 0.785 4 为正方形的圆度。

(3) 各向异性率的变化

各向异性率的概念, 可表达如下:

$$I_n = \frac{R-r}{R} \times 100 \% \quad (4)$$

式中: I_n 为各向异性率; R 为椭圆形的长轴长度; r 为椭圆形的短轴长度。可见 I_n 的变化范围在 0~100 % 之间, 当 $I_n = 0$ 时, 颗粒或孔隙呈随机分布, 为各向同性; 而当 $I_n = 100$ % 时, 为完全各向异性。

表 8 各向异性率(%)分级(占总孔隙数目的百分比)
Table 8 Pore anisotropy (%) classify
(percentage of the total pore number)

类别	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
YH	14.29	14.29	33.33	38.10	0.00
HH	5.56	20.00	47.78	24.44	2.22
YV	9.57	20.21	50.00	18.09	2.13
HV	6.56	27.05	37.70	28.69	0.00

从表 8 可以看出, 各向异性率小的孔隙数目, 在水平断面和垂直断面均减少, 即各向异性率均增大, 表明其趋于各向异性。但与水平断面相比, 垂直断面的各向异性率介于中值附近的孔隙数目减少, 介于高值的增多。表明垂直断面经夯击更加趋于各向异性。

3.2.3 微观结构分形^[8]研究

如果孔隙的存在形态存在分形特征, 则图像中孔隙的等效周长 L 和面积 A 之间存在下面关系, 即

$$\lg L = D/2 \times \lg A + C \quad (5)$$

式中: L 为图中任意一个多边形的等效周长; A 为与之对应的多边形的等效面积; C 为常数; D 是该图像对应的软土的孔隙形态的分形维数。分形维数越大, 结构越复杂。

通过计算得出每一个孔隙的等效面积和周长, 将这些数据绘制在双对数坐标系中, 如果这些数据点可以拟合成一条直线, 那么通过直线的斜率就可以获得该土样中孔隙形态的分形维数, 即

$$D = K \times 2 \quad (6)$$

式中: K 为双对数坐标下的直线的斜率; D 为土样中孔隙形态的分形维数。

双对数坐标曲线如图 2 所示。

分析结果如表 9 所示, 从表可以看出, 孔隙形态的分形维数, 在夯击前后, 均介于 1~2 之间, 具有较好的形态分形特征。经夯击, 在水平和垂直断面, 孔隙形态的分形维数均减小。

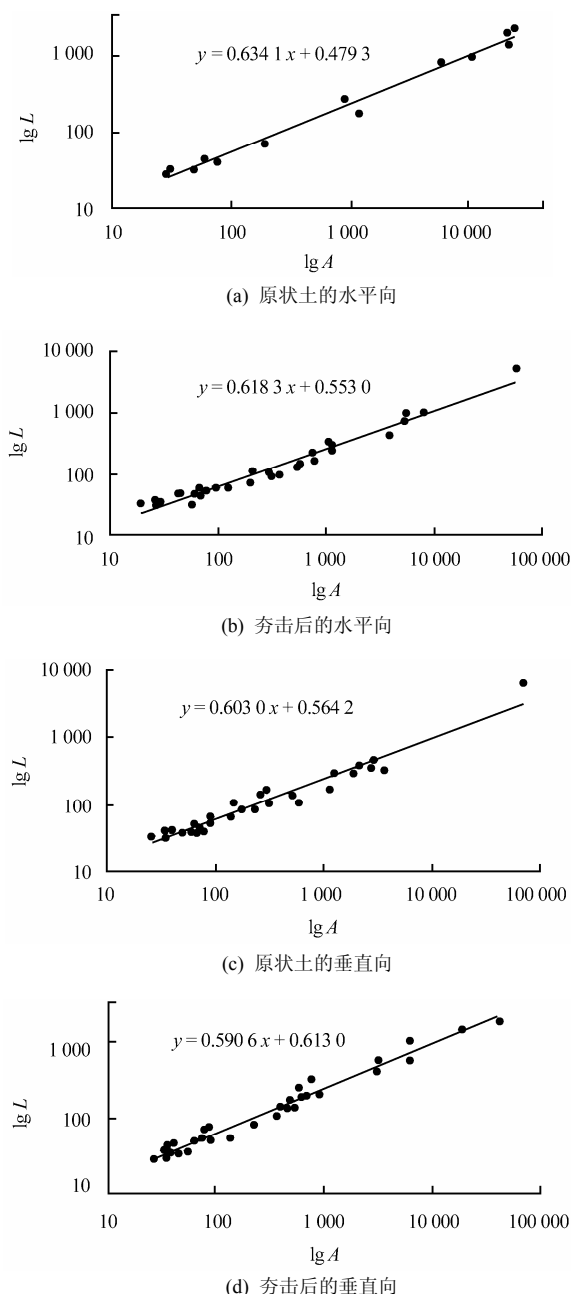


图2 试验数据的面积-周长双对数图

Fig.2 $\lg A \lg L$ graph of test data

表9 孔隙形态的分形维数

Table 9 Pore fractal dimension

水平断面			垂直断面		
YH	HH	增幅/ %	YV	HV	增幅/ %
1.268 2	1.236 6	-2.49	1.206 0	1.181 2	-2.06

4 结 论

通过对室内动力排水固结前后土体的微观结构参数分析, 可以得出以下结论:

(1) 动力排水固结后, 软土中孔隙数目增多, 单个孔隙尺寸减小。土体水平断面孔隙数目增加的幅度明显大于垂直断面, 其孔隙总面积经夯击变大, 垂直

断面孔隙总面积减小。说明土体在受夯击方向上压缩, 孔隙面积减小, 水平断面有挤土现象。

(2) 经过动力固结, 土体在受夯击方向上特小孔径孔隙增多, 水平断面孔隙有集中于中等孔径的趋势, 且孔隙变得圆滑, 而垂直断面孔隙变得不规则。水平垂直断面趋于各向异性, 垂直断面各向异性率更高。

(3) 土体孔隙形态具有分形特征, 分形维数介于1~2之间。且经夯击, 水平与垂直断面的分形维数均出现减小。

参 考 文 献

- [1] 白冰, 周健. 扫描电子显微镜测试技术在岩土工程中的应用与进展[J]. 电子显微镜学报, 2001, 20(2): 154—155.
BAI Bing, ZHOU Jian. The applications and advances of SEM in geotechnical engineering[J]. **Journal of Chinese Electron Microscopy Society**, 2001, 20(2): 154—155.
- [2] 孟庆山, 汪稔, 刘观仕. 冲击荷载下饱和软黏土的孔压和变形特性[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 466—472.
MENG Qing-shan; WANG Ren, LIU Guan-shi. Experimental study of pore water pressure and axial strain of saturated soft clay under impact load[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2005, 36(4): 466—472.
- [3] 苏彤, 成晓平. 微观土样的制作、撕皮与镀膜[J]. 检测技术, 2001, 3: 38—38.
- [4] 曹永华, 闫澍旺, 赵乐军. 固化污泥的工程性质及微观结构特征[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 740—744.
CAO Yong-hua, YAN Shu-wang, ZHAO Le-jun. Engineering properties and microstructure feature of solidified sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 740—744.
- [5] 颜志平. 高水速凝材料-软土微观结构的 SEM 研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 275—279.
YAN Zhi-ping. SEM study of microstructure of soft soil mixed with high-water-content and quick-setting materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 275—279.
- [6] 赵常洲, 王晖, 杨为民. 夯实地基土的微结构特性及其对工程性质的影响[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(2): 77—77.
- [7] GONZALEZ R C, RIHHARD E W, EDDINS S L. Digital Image Processing Using MATLAB[M]. USA: Prentice Hall, 2004.
- [8] MOORE C A, DONALDSON C F. Quantifying soil microstructure using fractals[J]. **Geotechnique**, 1995, 11(45): 105—116.