

利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数

熊承仁¹, 唐辉明¹, 刘宝琛², 张家生²

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 中南大学土木建筑学院, 湖南长沙 410075

摘要: 以土工实验和计算机图像处理技术为基础, 探讨利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数的方法, 并以重塑粘性土为例进行实证分析. 为获取孔隙结构参数, 首先分 3 个步骤对土样的 SEM 照片进行图像处理: 即照片格式转换、颗粒边缘线探测和颜色充填; 然后针对黑白二元图像测算孔隙结构参数. 从设计制备的重塑粘性土的三轴试验样品中, 选择了 12 个不同水分状态和密度状态的样品, 经风干和烘干后, 进行 SEM 测试. 每个样品拍摄了 3 个尺度的 SEM 照片, 放大倍数依次为 500 倍、1000 倍、2000 倍. 之后, 对所获得的 SEM 照片进行了图像处理分析, 计算了相应的平面孔隙比和平面孔隙率. 数据分析表明: SEM 照片测算的孔隙参数与通常三相图计算的孔隙参数有关联, 测算数据可以反映土的孔隙结构特征; 样品的不同脱水方式对 SEM 照片测算的孔隙参数有影响, 与三相图法计算数据相比, 风干土样测算的数据略有偏大, 烘干土样测算的数据偏小; 同一土样不同比例尺的 SEM 照片测算出的孔隙参数有所不同, 邻近三相图法计算结果上下波动; 利用 SEM 照片提取土的结构信息是可行的, 对 SEM 照片进行图像处理分析是获取土的孔隙结构参数的有效办法.

关键词: SEM 照片; 图像处理; 孔隙结构参数; 重塑粘性土.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2007)03-0415-05

收稿日期: 2007-03-19

Using SEM Photos to Gain the Pore Structural Parameters of Soil Samples

XIONG Cheng-ren¹, TANG Hui-ming¹, LIU Bao-chen², ZHANG Jia-sheng²

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China

Abstract: Based on soil experimental technique and computer image processing, a method to gain the structural parameters of soil samples by using SEM photos has been discussed, and an example of remolded cohesive soil is offered. To gain structural parameters, three steps to process SEM photos are taken: photo transformation, edge detection and color-filling. Pore structural parameters of soil are calculated through color-filled binary images. 12 samples of remolded cohesive soil with different moisture and density states have been selected to test the method. SEM photos in 3 scales have been taken for each sample, i.e. 500 $\times$, 1000 $\times$ and 2000 $\times$. Then all the SEM photos have been processed and plane porosity and void ratio have been calculated with Matlab. According to data analysis, some conclusions can be made as follows. Firstly, pore structural parameters calculated through SEM photos are relevant to those calculated through three-phase diagram and pore structural characteristics of soil can be reflected by them. Secondly, pore structural parameters calculated through SEM photos are influenced by the way of drying SEM samples. Those of air-dried samples are larger than the results of three-phase diagram, while those of heat-dried are smaller. Thirdly, pore structural parameters of the same sample calculated through SEM photos of different scales differ from each other and they fluctuate around those of three-phase diagram. Therefore, it is both feasible and effective to obtain pore structural parameters by SEM image processing and analysis.

Key words: SEM photo; image processing; pore structural parameters; remolded cohesive soil.

基金项目: 湖北省博士后基金项目(No. [2006] 25); 中国地质调查局“鄂西恩施地区滑坡形成机制与危险性评价”项目(No. 1212010640604).

作者简介: 熊承仁(1965—), 男, 博士, 副教授, 从事岩土工程与工程地质研究. E-mail: xiongcr@126.com

0 引言

扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 技术已广泛应用于土的微观结构研究. 在对土样进行微观结构分析中, 获取了大量的 SEM 照片. 不同比例尺的 SEM 照片反映了不同结构层次上土颗粒集合体的空间分布与联结的形貌特征. 如何准确提取 SEM 照片包含的量化结构信息, 自 20 世纪 90 年代初期以来, 一直倍受关注 (周萃英, 2000; 施斌和姜洪涛, 2001). 一方面是土质学家对土结构从定性分类到定量描述的需要, 另一方面是土力学工作者将土结构对土的力学性质的影响提到了前所未有的高度 (沈珠江, 1996), 由此大大推动了土的微观结构的定量研究.

随着计算机图像处理技术的发展, 国内外的学者研制和引进了专业图像处理软件对土的 SEM 照片进行分析 (Tovey, 1990; 吴义祥, 1991; Tovey and Krinsley, 1992; 胡瑞林等, 1995; Shi and Li, 1995; 王清等, 2001), 梁双华等 (2005) 使用常用软件对土结构照片进行处理分析.

对 SEM 照片进行图像处理和统计分析, 提取其中量化的结构信息, 将有助于进一步开展土的物理效应和力学习性的分析.

在缺乏专业图像处理软件的情况下, 如何借助功能日益强大的常规软件, 简捷有效地从土样的 SEM 照片获取结构参数, 并与通常使用的土的孔隙结构参数进行对比分析, 仍然是值得进一步探索的问题. 本文首先探讨了利用 SEM 照片获取孔隙结构参数的方法, 然后以重塑非饱和粘性土为例进行了实证分析.

1 图像处理与结构参数计算

土样 SEM 照片蕴含的结构信息, 包括粒组成分、颗粒长轴定向度以及孔隙率或孔隙比等. 本文采用 Matlab 软件处理 SEM 照片, 并提取其中的量化结构信息, 主要涉及孔隙比和孔隙率 2 个参数的提取.

1.1 图像处理

以获取孔隙结构参数为目的, 土样 SEM 照片图像处理包括 3 个基本步骤, 即照片格式转换、颗粒边缘线探测和颜色充填.

1.1.1 照片格式的转换

将彩色 (RGB) 照片转换

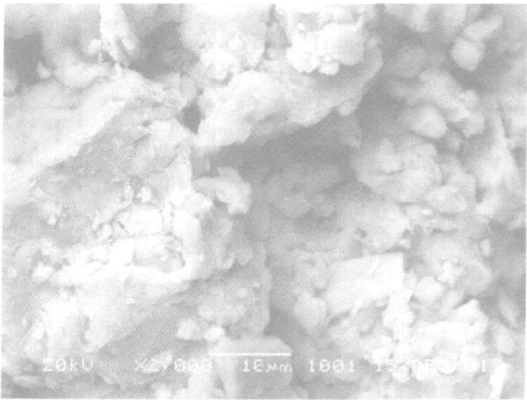


图 1 由 RGB 彩色照片转化而得到的 BW 黑白照片
Fig. 1 BW photo transformed from RGB film

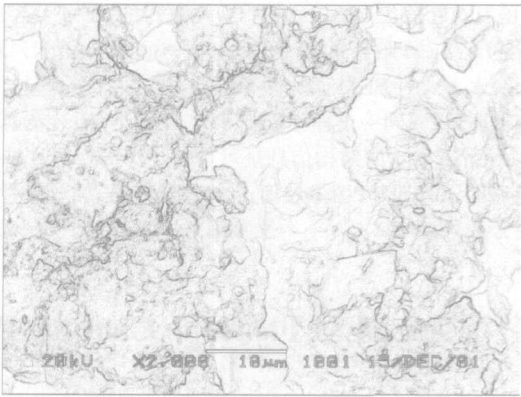


图 2 进行边缘处理后的图片
Fig. 2 Photo after edge-detected

成黑白照片或是灰度变化照片. 转化后, 可大大压缩图像的数字化容量, 节约内存并提高运算速度.

图 1 即为由 RGB 彩色照片转化而得到的 BW 黑白照片.

1.1.2 颗粒边缘探测 对格式转换后照片实施边缘线探测, 以得到该照片中颗粒对象的边缘轮廓线.

执行 edge 命令, 勾画出颗粒或颗粒集合体的边缘轮廓线, 从而便于将图像中“实体”与“虚空”部分用确定的边界线加以分别. 如果边缘不够清晰, 可试用各种不同的算法, 如 Canny、Gaussian、Sobel 算法等进行对比. 不同的算法抗噪音的能力不同.

图 2 为完成边缘处理后的图片. 边缘线是否清晰主要取决于原始图像中颗粒与空隙的对比度及颗粒原生形态. 可尝试多种算法以获得比较清晰的轮廓线.

1.1.3 颜色充填 为了便于计算, 对前述已完成 edge detection 的照片进行颜色充填. 充填后的照片

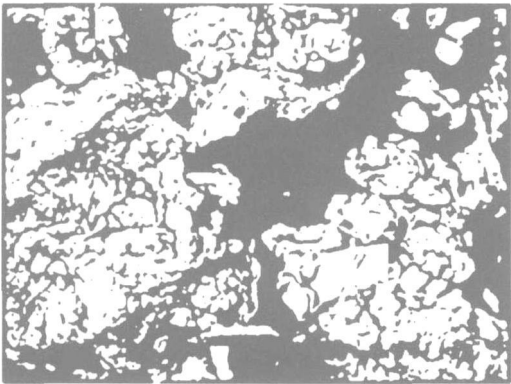


图 3 进行颜色充填后的图片
Fig. 3 Photo after color-filled

如图 3, 白色部分代表土粒骨架, 黑色部分代表孔隙. 进行颜色充填的目的是为了在确定“实体”与“虚空”的边界后, 将这两大要素明确区分开来, 以便在后续计算中准确地识别这两个图像单元, 从而为统计计算提供清晰确定的计算模型.

1.2 孔隙结构参数的计算

利用 SEM 照片计算出的是平面孔隙率和平面孔隙比, 其定义式如下:

$$n = \frac{S_a}{S} \times 100\%; \quad e = \frac{S_a}{S_s}.$$

式中: n 为土的孔隙率; e 为土的孔隙比; S 为土的横截面积; S_a 为横截面中孔隙所占的面积; S_s 为横截面中土颗粒所占的面积.

对于黑白二元图像而言, 黑色区域面积与整个视域面积的比即为孔隙率(以百分数表示). 黑色区域面积与白色区域面积的比即为孔隙比.

平面孔隙率和平面孔隙比的定义所要求的理想模型是土的平整形态断面, 然而实际的 SEM 照片反映的是有一定起伏度的断面. 起伏度在 RGB 的 SEM 照片中, 表现为色彩明暗的变化, 在 BW 的 SEM 照片中, 表现为灰度的变化. 因此在图像处理时, 由 RGB 照片转化为 BW 照片, 再到黑白二元图像的过程, 存在一定程度的失真. SEM 照片的原始视域越平整, 失真越小; 反之, 失真越大.

2 实例分析

2.1 试验用土

试验原土采自湖北荆门, 呈土黄色, 略具膨胀性. 将原土晾干, 碾碎, 过 0.5 mm 筛, 取其中细粒部分作

表 1 试验用土的基本物性参数

Table 1 Basic parameters of experimental soil

土样定名	比重 G_s ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	17 mm 液限 w_L (%)	塑限 w_p (%)	自然膨胀率 Δe (%)
粉质粘土	2.76	46.3	25.1	47.0
土样定名	砂粒含量 (%)	粉粒含量 (%)	粘粒含量 (%)	胶粒含量 (%)
粉质粘土	3.5	47.4	14.6	34.5

表 2 SEM 测试样品的编号及其密度和水分状态

Table 2 No. of SEM samples and its moisture & density states

w (%)	ρ_d ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			
	1.5	1.4	1.3	1.2
12.16	(1)	(2)		(3)
16.34	(4)	(5)	(6)	
18.16	(7)			(8)
20.13	(9)			(10)
23.45				
30.16	(11)			(12)

注: 编号为 6, 8, 10, 12 的样品为烘干样, 其他为风干样.

为本次试验用土. 试验用土的基本物性参数见表 1.

2.2 SEM 测试样品制备与选择

土样是按预先设定的干密度和含水量制备的重塑非饱和粘性土(熊承仁等, 2003), 土粒比重为 $2.76 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

试验中设计制备了不同水分状态和密度状态的三轴试样 24 组, 实际成型 23 组.

设计含水量分别为: $w = 12, 16, 18, 20, 24, 30$ (%), 实测含水量分别为: $w = 12.16, 16.34, 18.16, 20.13, 23.45, 30.16$ (%), 与设计含水量基本接近. 所制备的三轴试样包括 4 个密度状态: 即干密度 $\rho_d = 1.5, 1.4, 1.3, 1.2 (\text{g} / \text{cm}^3)$.

根据三轴试验和基质吸力测试的需要, 从上述实验样品中选择 12 个样品进行微观结构分析. SEM 测试样品的密度和含水量分布见表 2.

用于 SEM 测试的样品为风干样和烘干样. 每个 SEM 测试样品拍摄 3 个尺度的 SEM 照片, 放大倍数依次为 500 倍、1 000 倍、2 000 倍.

2.3 图像测算数据与三相图计算数据

表 3 所列为 12 个样品的 SEM 图像处理后测算的孔隙参数与根据三相图计算的孔隙比和孔隙率.

2.4 分析与讨论

与三相图法计算数据相比, 风干土样 SEM 照片测算的数据略有偏大, 这可能是由于 SEM 照片反映了一定程度的三维空间起伏情况, 在进行图像处理的过程中作平面投影时, 将一部分灰度较大的

表 3 SEM 图像处理法测算的孔隙参数与三相图计算的孔隙参数的对比

Table 3 Comparison of pore structural parameters between SEM method and 3-phase diagram method

样品 编号	孔隙率 $n(\%)$				孔隙比 e			
	SEM 法			三相 图法	SEM 法			三相 图法
	500 倍	1 000 倍	2 000 倍		500 倍	1 000 倍	2 000 倍	
1	44.2	48.6	45.4	45.7	0.793	0.946	0.831	0.840
2	49.1	43.8	51.1	49.3	0.965	0.778	1.043	0.971
3	57.5	35.8	60.3	56.5	1.353	0.556	1.520	1.300
4	43.0	48.4	43.9	45.7	0.753	0.937	0.783	0.84
5	47.2	53.7	42.6	49.3	0.898	1.162	0.742	0.971
6	42.1	44.7	44.3	52.9	0.727	0.807	0.796	1.123
7	58.3	40.0	42.3	45.7	1.399	0.668	0.733	0.840
8	50.0	37.6	37.9	56.5	1.000	0.602	0.610	1.300
9	48.4	45.6	66.9	45.7	0.938	0.838	2.018	0.840
10	41.6	40.4	37.2	56.5	0.712	0.677	0.591	1.300
11	30.7	31.5	44.7	45.7	0.444	0.459	0.808	0.840
12	41.3	36.2	44.4	56.5	0.704	0.568	0.800	1.300

区域视为孔隙的面积;烘干土样 SEM 照片测算的数据偏小,这可能是由于在烘干的过程中,土的微观结构已经发生了一定程度的变化,出现了局部烧结和局部扩孔甚至破裂,在碎裂取样时容易取到的往往是局部烧结部分。

同一土样不同比例尺的 SEM 照片测算出的孔隙参数不同,这一波动的原因与 SEM 照片的实际视域的大小有关,也与土的微结构的尺度有关。

在土结构没有扰动的理想情况下,SEM 照片测算的数据应该邻近三相图法计算结果上下波动。该计算结果是正常尺度下偏下限的值,对应于土颗粒的无缝紧密堆积。

实验中 SEM 照片测算数据,总体而言围绕三相图法计算结果波动,符合理论预期。显示 SEM 照片测算的孔隙参数与三相图计算的孔隙参数有关联。对 SEM 照片测算数据作一定修正,可以反映土的孔隙结构特征。这也说明一般假定平面孔隙比等于体积孔隙比是可行的。

3 结论

(1)利用 SEM 照片提取土的结构信息是可行的,对 SEM 照片进行图像处理分析是获取土的孔隙结构参数的有效办法。(2)SEM 照片测算出的孔隙参数与通常三相图计算的孔隙参数有关联,测算数据可以反映土的孔隙结构特征。(3)样品的不同脱水方式对 SEM 照片测算出的孔隙参数有影响,与三相图法计算数据相比,风干土样测算的数据略有

偏大,烘干土样测算的数据偏小。(4)同一土样不同比例尺的 SEM 照片测算出的孔隙参数有所不同,邻近三相图法计算结果上下波动。

References

Hu, R. L., Guan, G. L., Li X. Q., et al., 1995. Quantitative microstructure models of clayey soils and their engineering behaviors. Geological Publishing House, Beijing, 1—110 (in Chinese).

Liang, S. H., Sun R. H., Li, W. P., 2005. Using MapInfo and Photoshop to study SEM images of clay. *Journal of Henan University of Science and Technology* (Natural Science), 26(1): 55—58 (in Chinese with English abstract).

Shen, Z. J., 1996. Structural models for soil—The key issue of soil mechanics in the 21st century. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 18(1): 95—97 (in Chinese with English abstract).

Shi, B., Li S. L., 1995. Quantitative approach on SEM images of microstructure of clay soils. *Science in China (Series B)*, 38(6): 741—748.

Shi, B., Jiang, H. T., 2001. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 20(6): 864—870 (in Chinese with English abstract).

Tovey, N. K., Krinsley, D. H., 1992. Mapping of the orientation of fine-grained minerals in soils and sediments. *Bulletin of IAEG*, 46: 93—101.

Tovey, N. K., 1990. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs soil fabric. *J. of Microscopy*, 120: 303—315.

- Wang, Q., Wang, F. Y., Xiao, S. F., 2001. Quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its application to the engineering. *Journal of Chengdu University of Technology*, 28(2): 148—153 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. X., 1991. Quantitative approach on microstructure of engineering clay. *Acta Geoscientia Sinica*, (23): 143—150 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, C. R., Liu, B. C., Zhang, J. S., et al., 2003. Relation between shear strength parameters and physical state variables of remolded unsaturated cohesive soil. *China Railway Science*, 24(3): 17—20 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C. Y., 2000. Research into soil mass microstructure and some progresses on soil mechanics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(2): 215—220 (in Chinese with English abstract).
- 梁双华, 孙如华, 李文平, 2005. 基于 MapInfo 和 PhotoShop 的粘性土扫描图像处理. 河南科技大学学报(自然科学版), 26(1): 55—58.
- 沈珠江, 1996. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题. 岩土工程学报, 18(1): 95—97.
- 施斌, 姜洪涛, 2001. 粘性土微观结构分析技术研究岩石力学与工程学报, 20(6): 864—870.
- 王清, 王凤艳, 肖树芳, 2001. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用. 成都理工学院学报, 28(2): 148—153.
- 吴义祥, 1991. 工程粘性土微观结构的定量评价. 地球学报, (23): 143—150.
- 熊承仁, 刘宝琛, 张家生, 等, 2003. 重塑非饱和粘性土的抗剪强度参数与物理状态变量的关系研究. 中国铁道科学, 24(3): 17—20.
- 周萃英, 2000. 土体微观结构研究与土力学的发展方向. 地球科学——中国地质大学学报, 25(2): 215—220.

附中文参考文献

- 胡瑞林, 官国琳, 李向全, 等, 1995. 粘性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究. 北京: 地质出版社, 1—110.