

DOI: 10.11779/CJGE202105018

基于电镜成像原理的黏土微结构参数提取方法

申志福¹, 孙天佑¹, 白宇帆¹, 蒋明镜², 周 峰^{*1}

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210000; 2. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300350)

摘要: 土体受静、动力作用发生变形的过程必然伴随着微观结构的变化。土体微结构变化的定量化描述是宏微观土力学中非常重要且具有挑战性的内容。提出了一种基于电镜扫描原理、从扫描图像中提取黏土微观结构局部几何信息的方法。首先基于电镜扫描过程中成像二次电子的产生数量、不同逸出方向的电子流强度基本原理和描述方程, 从理论上建立了“高亮—阴影”过渡区电镜扫描图像的灰度与上、下两搭接黏土片的相对倾角、间距等局部黏土片排列几何参数间的理论关系。随后将该方法用于真实扫描图像分析, 成功提取出成对黏土片的间距和相对倾角, 理论预测的遮挡因子—距离关系与实测关系规律一致, 证明了该方法的可行性; 理论上, 该方法受电镜扫描图像中常见的欠“曝光”、过“曝光”、随机噪声缺陷影响较小。

关键词: 黏土; 微观结构; 电镜扫描; SEM 图像; 几何参数

中图分类号: TU43; TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)05-0933-07

作者简介: 申志福(1988—), 男, 四川绵阳人, 工学博士, 副教授, 主要从事宏微观土力学方面的研究工作。E-mail: zhifu.shen@njtech.edu.cn。

Extraction method for micro-structure parameters of clay based on imaging principles of scanning electron microscope

SHEN Zhi-fu¹, SUN Tian-you¹, BAI Yu-fan¹, JIANG Ming-jing², ZHOU Feng¹

(1. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210000, China; 2. Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Soil deformation under static or dynamic loads is accompanied by adjustment of its microscopic structure. It is an essential and challenging task to quantitatively describe the micro-structure evolutions of soil for micro-to-macro geomechanics. This study proposes a method to extract information of relative arrangement of clay plates from scanning electron microscope (SEM) images based on the physical principles of SEM imaging techniques. First, a theoretical relationship between the grey scale of SEM images in the high-contrast transition zone (with very high and very low grey scales) and the local geometric quantity describing the clay plate arrangement is derived. This relationship considers the laws and functions about the generation rate and angular intensity distribution of the secondary electrons. The local geometric quantities include inclinations of the scanned clay plates and the distance between the two neighboring clay plates. Then, the proposed method is validated by applying it to the analysis of a real SEM image. The distance and relative inclination of two neighboring clay plates are successfully extracted. The relationship between the shadow factor and the distance predicted theoretically by this method and that obtained from the real SEM image are consistent, validating the correctness and capability of the proposed method. Theoretically, the proposed method is not sensitive to the defects in the SEM image such as overexposure, underexposure and random noise.

Key words: clay; micro-structure; scanning electron microscope; SEM image; geometric parameter

0 引言

土力学自诞生起就伴随着对土体微观结构的不断探索。光学显微镜、X光衍射、透射电镜、扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)等技术已逐步被用于直接观察土的微观结构^[1]。其中, SEM图像因其立体感强, 分辨率高, 放大倍数可调范围大,

使用方便等优点而被广泛应用。如 SEM 图像能揭示

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51908284); 江苏省科技厅自然科学基金青年基金项目(BK20190667); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB560015); 国家自然科学基金面上项目(51772827); 国家自然科学基金重大项目(51890911)

收稿日期: 2020-07-06

*通信作者 (E-mail: zhousheng@njtech.edu.cn)

软土在不同沉积环境中所形成的不均匀的复杂微观结构^[2-5]。在受到各种静、动荷载变形过程中,微观结构中的边-边、边-面不稳定接触向定向的面-面接触转化,大孔隙结构受损坍塌^[6-9]。

除上述定性观察外,许多学者还尝试用定量分析方法以期从 SEM 图像中提取更多有用信息。如采用二值化 SEM 图像量化描述微结构,据此获得受力变形过程中微观孔隙率,颗粒接触面积率,颗粒组构,各向异性程度,分形特征等微观结构统计信息^[10-12]。然而,SEM 图像处理中灰度阈值、分析区域大小、扫描点位置、放大倍率等因素都会影响分析结果,分析结果具有很强的主观性^[11]。

此外,已有学者尝试通过三维恢复来提取土体的完整结构信息^[4, 13-15]。这些研究中常常假设图像灰度与电镜扫描试样表面高程线性相关,这与电镜扫描原理不相符;实际上,根据电镜扫描成像原理,SEM 图像灰度由黏土片与入射电子间夹角控制。遵循这一原理,Zhu 等^[16]成功重建了黑硅的三维纳米结构,但同样的技术却在黏土微结构重构中无法取得理想效果^[17]。这主要是因为土体为离散结构,不具有类似黑硅的连续表面。因此,从连续表面出发,基于表面倾角反推表面形貌对土体并不能直接适用。

当前已有的微观图像定量分析方法尚难以获得黏土片间倾角、间距等三维几何参数,而这些几何参数对黏土微观物理、化学作用(如范德华力和静电力)影响非常显著^[18],是黏土宏观力学特性的关键微观机制。为此,本文拟针对黏土微观结构离散性强的特点,在电镜扫描成像原理基础上,利用黏土 SEM 图像中高亮边缘与高暗阴影伴生这一关键特征,提取局部几何参数(黏土片倾角、间距),初步实现对黏土局部三维微观结构的科学量化。

1 电子扫描显微镜下黏土的成像特征

如图 1 所示,从电子枪发出的电子经多级聚焦形成一束极细电子入射到试样表面。在真空中,试样表面被激发并逃逸出的二次电子在偏转电场作用下向右运动,被二次电子捕获器收集,在成像系统中形成扫描图像。入射电子在试样表面做栅格状逐线扫描,试样表面每一被扫描微小区域对应成像系统中同步形成的一个像素点。完整的典型黏土扫描电镜图像如图 2 所示。各像素点灰度由试样表面对应点的形貌确定。由此,扫描电镜图像的灰度信息描述了试样表面的形貌特征。由图 2 可见清晰的片状高岭石矿物,黏土片上下交相重叠搭接,交错排列;各片形状各异,极不规则,每一片灰度不尽相同,这与黏土表面被激发、逃逸并被捕获的二次电子数量相关;黏土片边缘高亮,

高亮区附近伴随阴影区;而位置较深处颜色最暗,这是由于从此次逃逸并被捕获的二次电子太少,无法形成可辨识图像。

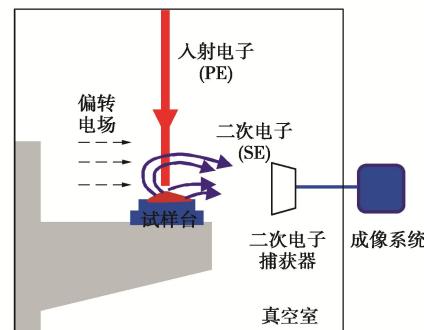


图 1 电子扫描显微镜核心结构

Fig. 1 Key components of scanning electron microscope

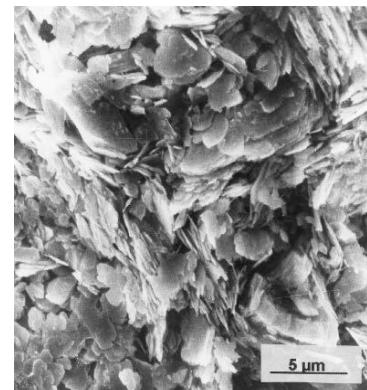


图 2 黏土的典型电镜扫描照片^[6]

Fig. 2 Typical SEM image of clay^[6]

为说明“黏土片边缘高亮,高亮区附近伴随阴影区”的形成机理,图 3 给出了两上下搭接的黏土片;图中坐标系的 xoy 平面与上片平面平行,假定上、下片在 y 方向倾角相同,假定上片范围无限扩展,这对于分析局部问题适用。图 3 中,入射电子与镀金层相互作用激发出各个方向的二次电子。这些二次电子被捕获器捕获,形成成像电流。二次电子产生越多,成像电流越大,图像越亮,灰度值(范围 0—255, 0 表示纯黑, 255 表示纯白)越大。平整表面受激发产生的二次电子数 N_{SE} 可表示为

$$N_{SE} = \delta N_{PE} \quad , \quad (1)$$

式中, δ 为二次电子产生系数, N_{PE} 为入射电子数目。

在平整面上, δ 与被激发材料原子质量 Z , 入射电子能量 E 有关。此外, δ 与入射电子束跟平面法向的夹角 ϕ 有关,二者关系由试验结果拟合得^[19]

$$\delta(Z, E, \phi) = \delta(Z, E, 0)(\sec \phi)^n \quad , \quad (2)$$

式中, $\delta(Z, E, 0)$ 为 $\phi=0^\circ$ 时的二次电子产生系数, n 为拟合参数,取 0.8~1.3。 $\delta(Z, E, 0)$ 和 n 与被激材料性质有关。

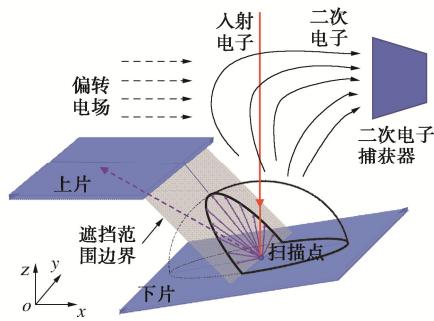


图3 二次电子遮挡示意图

Fig. 3 Schematic view of interruption of secondary electrons

而实际上, 由于上片的存在, 图3中遮挡范围边界左下侧逸出的电子都将被上片遮挡而无法参与成像。以图4(c)两搭接黏土片从左往右水平扫描线上的成像过程为例说明图像灰度变化与颗粒排列的关系。将图4(c)中两黏土片沿扫描线剖切可得图4(b)剖视图, 入射电子在剖视图中垂直射向黏土片表面(表面镀有金层)。

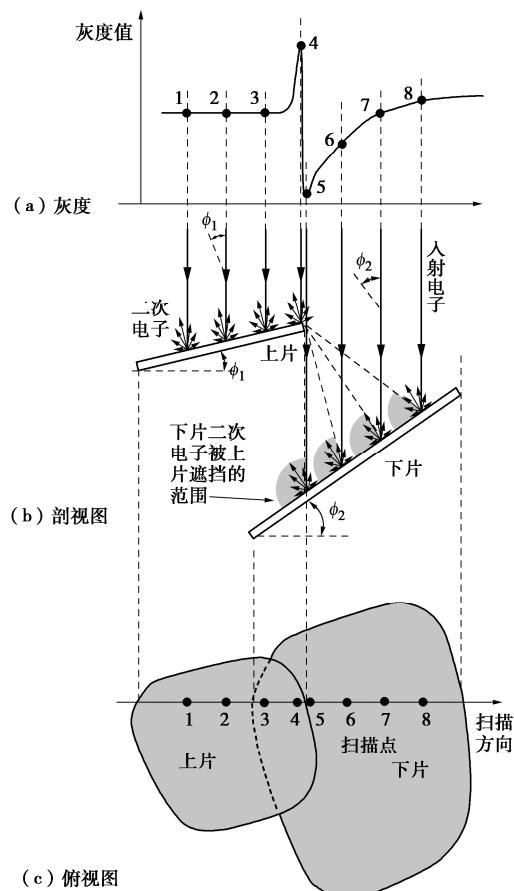


图4 电子扫描显微镜在黏土中的成像原理

Fig. 4 Principle of scanning electron microscope imaging for clay

由式(2)可知, 图4中扫描点1, 2, 3处二次电子产生系数相同, SEM图像在这三处的灰度也应很接近。在图4中扫描点4处, 二次电子扫描到上片边缘, 边缘效应(边缘位置二次电子更容易从材料中逸出)

使得此处二次电子产生系数剧增, 在SEM图像中此处形成高亮区域, 灰度值激增。当扫描位置进入下片时, 以扫描点5为例, 入射电子在下片激发的二次电子沿各个方向逸出, 但部分角度范围内(图中深色扇形区域)的二次电子被上片所遮挡, 无法逸出试样表面被捕获器捕获, 因而扫描点5处有效二次电子数量大减, 在SEM图像中此处形成阴影区。随着扫描点距离点5越来越远, 下片二次电子被遮挡的比例越来越小, 扫描点6, 7, 8处有效二次电子数目逐渐增多, 使得SEM图像中的亮度随聚上片边缘距离的增大而提高。当距离超过一定值后, 上片的遮挡作用逐渐减弱至可忽略, SEM图像亮度又可由式(2)确定。

2 二次电子遮挡的量化分析

据此即可求得下片扫描点在距离上片边缘不同距离处, 下片的有效二次电子产生系数。现考虑图5所示几何关系, 其中 d 为扫描点在扫描方向距上片边缘的水平距离, h 为上下片在上片边缘处的垂直距离。首先考虑图5(a)中的特殊情形, 即一半二次电子被上片遮挡, 即图5(a)中扇形阴影范围。此时, 下片上的电子入射点(也是逸出点)与上片边缘连线需恰与下片垂直。此时有几何关系:

$$d_0 \tan \phi + d_0 \tan(\pi/2 - \phi) = h \quad (3)$$

由此可求得临界距离 d_0 (即当下片上的电子入射点与上片边缘连线恰与下片垂直时的 d 值):

$$d_0 = \frac{h}{\tan \phi + \tan(\pi/2 - \phi)} \quad (4)$$

当 $d < d_0$ 时, 如图5(b)所示, 用 ζ 表示一束二次电子与被激发平面法向的夹角, 则有以下几何关系:

$$d \tan \phi + d \tan(\pi/2 - \phi + \zeta) = h \quad (5)$$

当 $d > d_0$ 时, 如图5(c)所示, 几何关系为

$$d \tan \phi + d \tan(\pi/2 - \phi - \zeta) = h \quad (6)$$

为更好表征有效二次电子的数量变化并与SEM图像灰度关联, 首先定义下片的遮挡因子 i :

$$i = \frac{\delta_e}{\delta_{e,\min}} - 1 \quad (7)$$

式中, δ_e 为下片某点有效二次电子产生系数, 由式(2)中 δ 扣除图5所示被遮挡二次电子后得到, $\delta_{e,\min}$ 为上片边缘正下方处有效二次电子产生系数, 对应下片有效二次电子产生最少的点。

为量化上片对下片二次电子的阻挡作用, 需描述激发的二次电子沿不同方向的强度分布。试验结果表明, 由物质平面激发射出的二次电子在不同方向密度不同(图6), Lambert定律描述了二次电子密度与方向 ζ 的关系^[19]:

$$\frac{d\delta(Z, E, \phi, \zeta)}{d\Omega} = \frac{\delta(Z, E, \phi, \pi/2)}{\pi} \cos \zeta, \quad (8)$$

式中, $\delta(Z, E, \phi, \zeta)$ 为在 $(0, \zeta)$ 范围内的累计二次电子产生系数。由定义可知, $\delta(Z, E, \phi, \pi/2)$ 为所有电子的累计二次电子产生系数, 即 $\delta(Z, E, \phi)$ 。

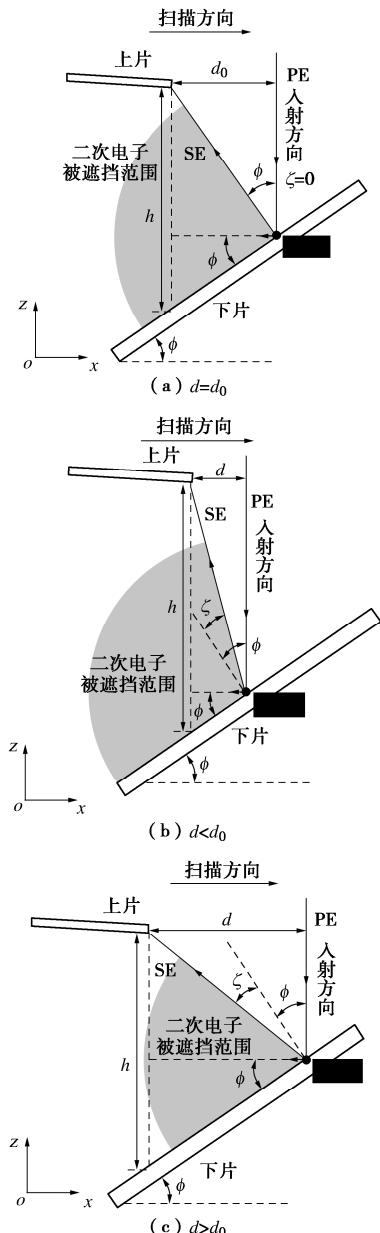


图 5 二次电子遮挡几何关系

Fig. 5 Geometric relationship in terms of interruption of secondary electrons

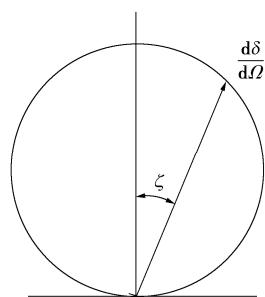


图 6 二次电子密度的方向分布

Fig. 6 Angular distribution of secondary electrons

根据式 (3) ~ (6) 可求得某 d 取值下的角度 ζ , 再利用式 (8) 在被遮挡角度范围内积分即可求得相应的下片遮挡因子 i 。由于积分解析解不可求, 采用数值积分可得到 $i - d$ 关系理论解如图 7 所示。由图可知, 黏土片倾角 ϕ 主要控制 i 在 d 无限增大时的渐进值, 而 h 值对渐进值影响不大; 上、下黏土片间距 h 主要控制 i 的增长速率, 而倾角 ϕ 对此影响也较小。

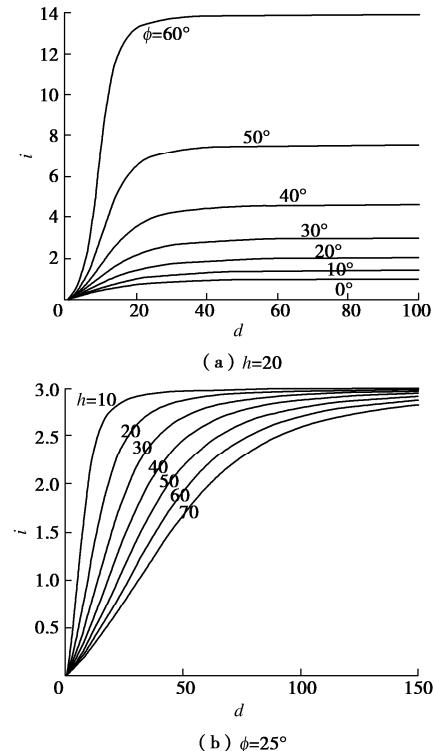


图 7 遮挡因子 i 与距离 d 的理论关系

Fig. 7 Theoretical relationship between shadow factor i and distance d

3 基于电镜扫描图像的几何参数提取

因 SEM 图像灰度值与有效二次电子电流强度成正比, 式 (7) 中的遮挡因子 i 也可由 SEM 图像灰度值定确定:

$$i = \frac{G}{G_{\min}} - 1, \quad (9)$$

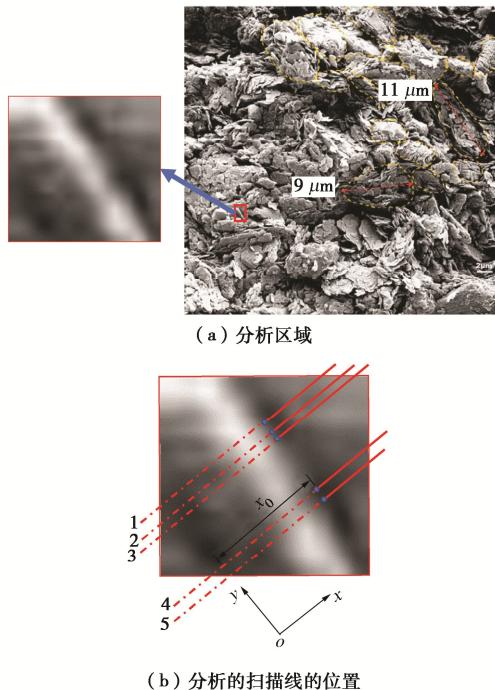
式中, G 为下片某扫描点处像素点灰度值, G_{\min} 为上片边缘正下方处扫描点 (最暗) 处像素点的灰度值。

在上下片重叠区附近, 根据 SEM 图像即可得 $i - d$ 实测关系, 将其与图 7 的理论解曲线组对比即可确定几何参数 h , ϕ , 由此实现根据 SEM 图像中黏土片重叠区“高亮—阴影”灰度信息反演局部几何参数, 达到充分挖掘、利用 SEM 图像信息的目的。

选用 Hattab 等^[20]报道的一种高岭石含量约为 95% 的黄色高岭土电镜扫描图像进行分析。这种黏土液塑

限分别为40%和20%, 颗粒相对质量密度2.65。高岭石矿物呈平片状, 与本文对黏土片形状的假定相符, 且该图片中黏土片拍摄清晰, 放大比例合适, 是理想的分析对象。在如图8(a)所示SEM图像中选择一个“高亮—阴影”过渡区作为分析对象。建立如图8(b)所示局部坐标系, 其中x向代表扫描方向, y向与高亮边缘平行。沿图8(b)中5条代表性扫描线的实线部分得到的灰度值随距离d的变化如图9所示, 其中距离 $d=x-x_0$, x_0 为扫描线的实线部分起点的横坐标。5条扫描线的代表性表现为: 扫描线1—3, 4—5可考察表征小间距扫描线上的数据噪声影响; 而1—3组与4—5组两组扫描线的对比可分析下片沿y方向的倾角。

对图9中灰度值按照式(9)无量纲化处理, 并与理论曲线对比获得局部几何参数 h 和 ϕ 的估计值。首先, 与图7(a)对比, 基于渐进值一致反推倾角 ϕ : 图9中各扫描线上 i 在 d 无限增大时的渐进值在2.4~2.8, 可反推得到 ϕ 值在 $23^\circ \sim 28^\circ$, 即图8(b)中的下片在各条扫描线上沿x方向的倾角非常接近, 这与高岭石的平片特征相一致。其次, 与图7(b)对比, 基于 i 的增长速率一致反推 h 值: 以扫描线3为例, 如图10所示, 因实际SEM成像过程中伴随多种噪声源影响, 实测曲线具有一定波动; 尽管如此, 当 h 估计值为30像素时, 理论的 i - d 关系与实测关系的定量规律基本一致, 也说明了理论推导的合理性。

图8 高岭土电镜扫描照片^[20]Fig. 8 SEM image of kaolinite clay^[20]

根据各扫描线上的像素灰度提取的局部几何参数

如表1所示, 表中实际 h 值列为根据SEM图像比例换算所得。扫描线1, 2, 3处 h 平均值为35(像素), 扫描线4, 5处 h 平均值为17(像素)。扫描线2, 4在图8(b)中y方向的间距为111(像素), 由此可估计下片相对于上片在y方向倾角为 9° , 与上述理论推导时假设的上下片y方向相对倾角为 0° 相差不大。

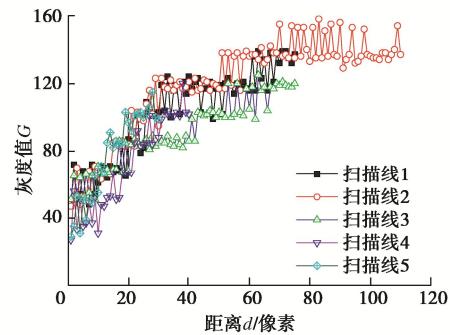


图9 扫描线上灰度随距离的变化

Fig. 9 Variation of grey scale with distance

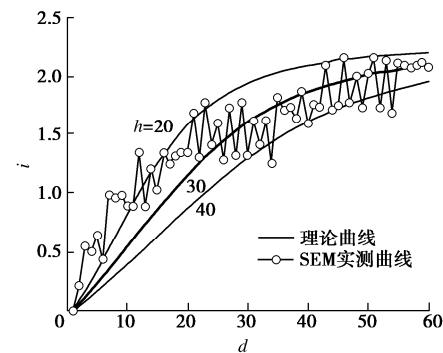


图10 SEM实测曲线与理论曲线对比(沿扫描线3)

Fig. 10 Comparison between SEM data and theoretical data along scanning line 3

表1 局部几何参数

Table 1 Geometric parameters in local areas

参数	SEM中 h (像素)	实际 $h/\mu\text{m}$	倾角 $\phi/^\circ$
扫描线1	40	0.25	23
扫描线2	35	0.22	23
扫描线3	30	0.19	23
扫描线4	18	0.11	28
扫描线5	16	0.10	25

采用上述方法对图8中另外34对黏土片进行了局部几何参数提取(排除了下片沿y向倾角大于 10° 的情况), 得到的倾角 ϕ 范围在 $10^\circ \sim 60^\circ$, 表现出很大的空间变异性; 其物理、力学意义将在后续研究中进一步分析。

本文提出的黏土微观结构几何参数提取方法具有3点优势: ①几何参数提取依据的是“高亮—阴影”过渡区SEM图像灰度的相对值(式(9)), 对SEM图像拍摄中普遍存在的“曝光”不足或过“曝光”缺

陷在理论上并不敏感; ②几何参数的提取是基于遮挡因子的增长速率及其渐进值, 对 SEM 图像中无可避免的随机噪声引起的灰度波动在理论上并不敏感; ③真实的黏土片表面往往存在高低起伏, SEM 图像中的灰度因而有所波动, 但本文参数反演基于均值的整体变化趋势, 因此不受黏土片局部形貌的影响。

4 结语

本文提出了一种基于电镜扫描原理从黏土 SEM 图像中提取局部微观结构几何参数的方法。该方法利用二次电子的产生系数与激发射出方向的关系, 上、下黏土片相对间距、倾角对下片二次电子的遮挡关系, 建立了 SEM 图像灰度与局部黏土片排列几何参数间的理论关系。该方法充分利用了 SEM 图像中黏土片上下重叠区附近“高亮—阴影”过渡这一关键特征, 基于图像灰度信息与理论关系对比即可反推提取两搭接黏土片的局部相对排列关系, 即相对倾角和间距两个微观参数。这些微观参数将有助于对黏土微观组织的全面认识。

将该方法用于某真实高岭土 SEM 图像分析结果表明, 理论推导的遮挡因子—位置关系与实测关系定量规律基本一致。该方法成功提取出 SEM 图像中局部某两黏土片间距和相对倾角, 证明了该方法的可行性。值得注意的是, 本文方法适用于黏土片为空间多边形平面片状的情形, 一般是以高岭石为代表的厚度较大、空间弯曲度很小的一类黏土矿物。

本文重点是介绍从黏土 SEM 图像中提取局部微观结构几何参数的方法, 并用于简单情况下的参数提取。后续研究将进一步推广至黏土片在 x , y 向均有倾角的一般情形。本文方法仅是对一部分局部微观信息的提取, 后续研究将结合其他微观结构参数(如黏土片或孔隙的尺寸、面积等)形成对黏土 SEM 图像的全局分析方法, 并分析在各种静、动荷载作用下黏土微观结构的演变规律及其与宏观力学特性的关联。此外, 本文方法提取的黏土微观结构几何参数也可用于指导离散元黏土数值模型的建立^[18]。

参考文献:

- [1] 施斌, 姜洪涛, 王宝军, 等. 工程黏性土微观结构分析技术[J]. 工程地质学报, 2000, 8(6): 386–388. (SHI Bin, JIANG Hong-tao, WANG Bao-Jun, et al. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(6): 386–388. (in Chinese))
- [2] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野——宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 195–254. (JIANG Ming-jing, New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195–254. (in Chinese))
- [3] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils: I surface charges and structural characterizations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(6): 587–600.
- [4] 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. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 406–412. (in Chinese))
- [5] 高国瑞. 近代土质学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013. (GAO Guo-rui. Neoteric Soil Geotechnology[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [6] HICHER P Y, WAHYUDI H, TESSIER D. Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay[J]. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 2000, 5(5): 341–371.
- [7] 雷华阳, 肖树芳. 软土结构性的试验研究及其对工程特性的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(1): 106–110. (LEI Hua-ying, XIAO Shu-fun. Experimental study on soft soil structural property and its influences on engineering characteristics[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(1): 106–110. (in Chinese))
- [8] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils: II effects of structure on mechanical properties[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(6): 601–617.
- [9] 刘治清, 宋晶, 杨玉双, 等. 饱和细粒土固结过程的三维孔隙演化特征[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 931–940. (LIU Zhi-qing, SONG Jing, YANG Yu-shuang, et al. Three-dimensional pores evolution characteristics during consolidation process of saturated fine-grained soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 931–940. (in Chinese))
- [10] 王国欣, 黄宏伟, 肖树芳. 软土微结构特征的试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(2): 190–196. (WANG Guo-xin, HUANG Hong-wei, XIAO Shu-fun. Experimental study on micro-structural characteristics of soft soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(2): 190–196. (in Chinese))

- [11] 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 560 - 565. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, WANG Bao-jun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560 - 565. (in Chinese))
- [12] 施爱勇, 徐金明, 李德明. 软土扫描电子显微镜图像的微观参数特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 69 - 73. (SHI Ai-yong, XU Jin-ming, LI De-ming. Microscopic features of scanning electron microscopy images of soft soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 69 - 73. (in Chinese))
- [13] ANANDARAJAH A, KUGANENTHIRA N, ZHAO D. Variation of fabric anisotropy of kaolinite in triaxial loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(8): 633 - 640.
- [14] 王宝军, 施斌, 蔡奕, 等. 基于 GIS 的黏性土 SEM 图像三维可视化与孔隙度计算[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 251 - 255. (WANG Bao-jun, SHI Bin, CAI Yi, et al. 3D visualization and porosity computation of clay soil SEM image by GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 251 - 255. (in Chinese))
- [15] 徐日庆, 邓纬文. 软黏土微观结构分析及宏观力学计算[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (XU Ri-qing, DENG Yi-wen. Micro-Structure Analysis and Macro-Mechanical Calculation of Soft Clay[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))
- [16] ZHU F Y, WANG Q Q, ZHANG X S, et al. 3D nanostructure reconstruction based on the SEM imaging principle, and applications[J]. Nanotechnology, 2014, 25(18): 185705.
- [17] 黄艳. 基于 SEM 图片的黏性土壤微观结构三维重建技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. (HUANG Yan. The Research of 3D Reconstruction from SEM Image of Clay Soil[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [18] YAO M, ANANDARAJAH A. Three-Dimensional discrete element method of analysis of clays[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(6): 585 - 596.
- [19] REIMER L. Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis[M]. 2nd ed. Berlin, 1998.
- [20] HATTAB M, FLEUREAU J M. Experimental analysis of kaolinite particle orientation during triaxial path[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(8): 947 - 968.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex”数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。