

# 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析

唐朝生, 施 斌, 王宝军

(南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093)

**摘 要:** 通过对一系列 SEM 照片计算其表观孔隙率和土颗粒形态分维数, 研究了阈值大小、分析区域大小、扫描点位置、放大倍率等因素对土体微观结构定量研究的影响, 探讨了各因素的影响机理。研究发现在相对较小的阈值条件下得到的孔隙结构参数较接近真实情况, 在相对较大的阈值条件下分析土颗粒的形态特征更具有代表性; 合理的放大倍数是分析土体微观结构的关键因素, 应根据研究对象和研究目的而定; 基于分析结果, 给出了合理的阈值和放大倍数的推荐值, 并对扫描过程中相关的测试技术、观察技术和图片处理技术提出了建议; 研究结果对今后研究人员如何利用 SEM 获得真实客观的土结构参数具有参考价值。

**关键词:** 土; 阈值; 放大倍数; 微观结构; 孔隙率; 分形维数

中图分类号: TU411.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)04-0560-06

**作者简介:** 唐朝生(1980-), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 主要从事地质工程与环境岩土工程研究。E-mail: tangchaosheng@163.com。

## Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM

TANG Chao-sheng, SHI Bin, WANG Bao-jun

(ACEI, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Based on a series of SEM images of soil, the apparent porosity and fractal dimension were calculated, the influences of threshold, analyzing size, scanning position and magnification on quantitative analysis results of soil microstructure were investigated, and their affecting mechanism were discussed. It was found that the pore structure parameters obtained at relative low threshold value were close to the real soil fabric. Relative high threshold value was necessary and reasonable when the morphological characters of soil particles were analyzed. Magnification played an important role in analyzing the microstructure of soil by using scanning electron microscope (SEM), and a reasonable magnification should be chosen on the basis of research subject and purpose. According to the obtained results, some useful threshold values and magnifications were recommended. The suggestions and comments related to testing, observing, and image analyzing techniques during scanning process were given. It was significant for obtaining real and objective microstructure parameters by using SEM.

**Key words:** soil; threshold; magnification; microstructure; porosity; fractal dimension

## 0 引 言

土体的微观结构是土体的一个重要质量指标, 它一方面反映了土体的形成条件, 另一方面又是决定土体物理、力学及其它工程性质的一个重要因素。基于扫描电镜 (SEM) 的土体微观结构研究是当前岩土工程中最有效、最直接的方法。在过去的 20 多年中, 国内外的许多学者利用扫描电镜照片对土体的结构形态、孔隙率、渗透性、分形维数、土颗粒和孔隙的定向性和分布特征等做了大量的定性和定量的研究工作<sup>[1-11]</sup>, 极大地推动了岩土微结构研究的发展, 帮助人们认识了土体的微观世界, 了解了土体强度、变形与其内部物理-化学作用之间的关联。随着近年来高倍

率、多功能扫描电镜技术的发展和计算机图片处理技术功能的不断强大, SEM 图像带给人们的土结构信息量越来越大。如何从中提取出与研究内容有关的、真实的信息, 以及如何使研究结果具有代表性、反映土体的真实组构特征, 一直是该领域一个相当重要和挑战性的课题。因为无论是基于 SEM 照片的定性还是定量研究, 都不可避免地受到多种人为和客观因素的影响。比如样品制备、扫描区的选择、阈值大小、放大倍数等, 通常这些因素都被忽视或因太复杂而鲜有

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金资助项目 (40225006); 南京大学研究生科研创新基金资助项目

**收稿日期:** 2007-06-08

研究。

对于一张普通的 SEM 图像,人们能够获得的最直观的信息主要有两个方面:孔隙和土颗粒的形态结构特征。为了研究阈值、分析选区和放大倍数等因素对土体微观孔隙和土颗粒结构定量研究的影响,本文在不同因素条件小获取了一系列土样 SEM 照片,通过计算表观孔隙率和土颗粒形态分维两个代表性参数,探索了各因素的影响机理,对土体微观结构研究中涉及的测试技术、观察技术和图片处理技术进行了论述和评价,并对其中的一些关键性问题提出了建议。研究结果对今后研究人员如何利用 SEM 获得真实客观的土结构参数具有参考价值。

## 1 研究方法

通常情况下,从扫描电镜上直接获取的图像是不能直接用于定量研究的,需要根据研究工作的目的对图像进行预处理,例如图像的增强、除噪、分割、二值化等。灰度的 SEM 图像经过二值化后变成黑白图像,孔隙和土颗粒分别用黑色和白色像素表示。本文中,土样的表观孔隙率就是通过统计一幅二值图中黑色像素个数与总像素(黑色像素+白色像素)个数之比得到的。土颗粒形态的分形维数采用面积-周长法,其基本原理如下式所示:

$$\ln(P_E) = (D/2) * \ln(A) + C \quad (1)$$

式中  $P_E$  是图像中任一个代表土颗粒的多边形的等效周长;  $A$  表示与之对应的多边形等效面,  $C$  为常数,  $D$  即为该图像对应土体颗粒形态的分维数。相关的计算过程请参考文献[4]。

考虑阈值对分析结果的影响时,对同一张 SEM 照片共选取了 12 个不同阈值进行二值化,然后分别计算了各二值化图像的表观孔隙率和土颗粒形态分维数。考虑分析选区对定量分析结果的影响时,对两种选区情况进行了讨论:一是分析选区的大小。即在同一张 SEM 照片上取不同大小的分析区域作研究对象,可以以某一点为基点选择分析窗口,也可以在照片上随机选择分析窗口。参考文献[12]对窗口的尺寸效应的研究结果,窗口的尺寸比越大,结果越可靠。因此,在本文的研究中,共选择了 7 组窗口变量,窗口的尺寸比均取最大值 1,分别为  $100 \times 100$ ,  $200 \times 200$ , ...,  $600 \times 600$ ,  $700 \times 700$  像素。以照片的中心点为基点选择分析窗口时,对每个窗口尺寸只选一组图片进行分析。在照片上随机选择分析窗口时,对每个窗口尺寸随机选取了 5 组图片进行分析,对分析结果取平均值并计算方差,研究计算结果的离散性。二是分析选区

的位置(扫描点)。即对同一个土体的不同部位进行扫描电镜分析,共选取了 6 个扫描点。考虑放大倍数影响时,共选取了 9 个倍数变量,最小放大倍数为 50,最大为 70000 倍,并对两种放大方式进行了分析:一是对同一扫描点逐级放大;二是随机取扫描点逐级放大。

## 2 结果与讨论

### 2.1 阈值的影响

#### (1) 阈值对表观孔隙率的影响

参考文献[12]的研究结果,首先选择 1500 倍放大率的 SEM 照片研究阈值大小对土体表观孔隙率和颗粒形态分维数的影响。所用的土样为重塑土,实际孔隙率为 36.31%。图 1 显示了同一张 SEM 照片在不同阈值条件下所对应的表观孔隙率,从中可以看出,土体的表观孔隙率随阈值的增加而增加。这主要是因为对同一张灰度图而言,阈值选的越大,则越多的目标点被归并为背景(黑色),黑色像素个数增加,原本代表土颗粒的像素点就有可能被误归为孔隙,从而在整体上增加了孔隙的实际尺寸和分布。当阈值为 80 时,对应的表观孔隙率为 36.6%,与实际的孔隙率(36.31%)比较接近,则该阈值应作为分析此种土样孔隙结构的推荐值。此外,通过对其他 3 组已知孔隙率的土样进行分析,当表观孔隙率与实际孔隙率接近时,对应的阈值分别为 80, 90 和 60。上述的分析结果表明,当企图通过 SEM 图像表征土体的孔隙结构时,阈值是一个非常重要的因素,大的阈值可能导致定量分析结果较实际值偏大,反之,过小的阈值也可能导致较大误差,但通常情况下宜选取相对较小的阈值(60~100)进行孔隙结构分析,本文中取 80 作为分析参考值。

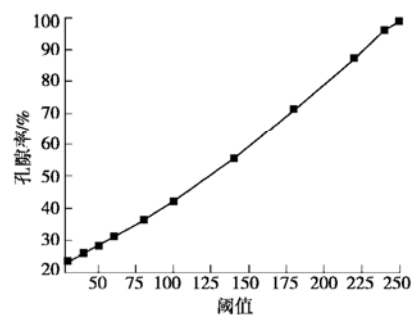


图 1 孔隙率与阈值之间的关系

Fig. 1 Relationship between porosity and threshold value

#### (2) 阈值对土颗粒的形态分维数的影响

从图 2 可以看出,当阈值小于 150 时,土颗粒的

形态分维数随阈值的增加而增加,但当阈值超过 150 时,分维数的变化基本稳定在 1.30 左右,而当阈值超过 240 时,分维数急剧减少。这一趋势与文献[4]的研究结果非常相似,主要是在较小的阈值下,图像中显示的土颗粒粒径大,更多的颗粒连接成单一的多边形,其复杂程度相对较低(如图 3(a))。相反,阈值越大,则土颗粒的粒径变小,更多的颗粒以独立的边界形式存在,其复杂程度相对较高(图 3(b))。但阈值如果取得过大(>240),SEM 照片中绝大部分为黑色像素所覆盖,代表土颗粒的白色区域太小而无法体现其复杂性(图 3(c))。通过对其它 3 组 SEM 照片做同样分析,均发现阈值大于 150 时,土颗粒的形态分维数出现相对稳定的区间。为了便于理解,以图 4 为例,图中的大多边形是小多边形放大了 5 倍的结果,如果以同一尺度的窗口(如图中的方框)观察两个多边形边界的复杂程度,很显然小多边形的形态更复杂。对于小多边形而言,当观察窗口尺度在某一较小范围内变化时,所看到的边界形态将具有明显的自相似性,表现出较好的分形特征。对图 2 而言,当阈值在 150~220 范围内变化时,土颗粒的形态分维数基本稳定,说明在该观察尺度内土颗粒的形态分维具有代表性,因此本文认为在用形态分维数描述土颗粒的结构特征时,宜选用相对较大的阈值(150~220),在下文的分析中,将采用阈值 150 对土颗粒形态分维进行计算。

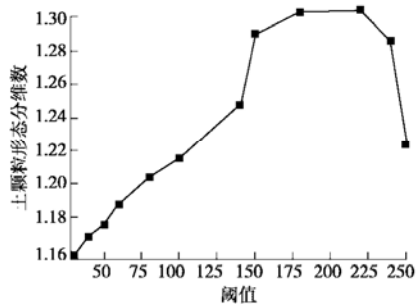


图 2 土颗粒形态分维数与阈值之间的关系

Fig. 2 Relationship between fractal dimension and threshold value

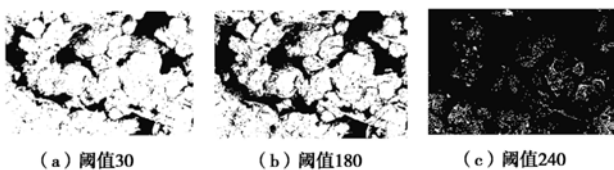


图 3 不同阈值条件下土颗粒的形态特征

Fig. 3 Morphological characters of soil particles at different threshold values

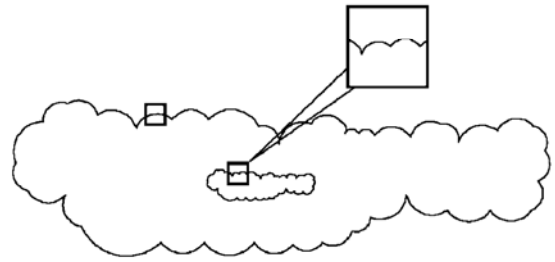


图 4 观察尺度与图形复杂性之间的关系示意图

Fig. 4 Relationship between observation scale and complexity of images

## 2.2 分析选区的影响

### (1) 选区大小的影响

以图 5 为基准图(1500 倍),其对应的土样实际孔隙率为 36.31%,阈值为 80 时计算得表观孔隙率为 36.6%。为了分析选区大小对定量分析结果的影响,在图 5 中首先以中心为基准点,分别取 7 组不同大小的区域作为研究对象。在 80 和 150 阈值下分别计算了各选择区域对应的表观孔隙率和土颗粒形态分维数,结果如图 6 和图 7 所示。从中可以看出,当分析区域小于  $400 \times 400$  像素时,表观孔隙率的结果比较离散,当窗口尺寸大于  $400 \times 400$  像素时,表观孔隙率较接近于真实值。这主要是因为土体是一种非均质的多孔介质,当选择窗口较小时,可能恰好能覆盖某一大孔隙或者土颗粒,但随着分析窗口逐渐增大,能够覆盖的孔隙或者土颗粒越来越多,由土体的多孔非均质性导致的计算误差逐渐减小。从图 7 可以看出,土颗粒的形态分维数随分析窗口大小的变化而变化,无明显规律。说明不同大小分析区域内的土颗粒也可能有不同的形态特征。这就要求在对土样进行扫描电镜分析时,应该尽可能地选择孔隙和土颗粒分布相对均匀的点,避开明显的大孔隙或者大颗粒,从而使分析区域具有普遍性和代表性。



图 5 放大 1500 倍的土样 SEM 照片

Fig. 5 SEM image at a magnification of 1500

表 1 给出了在图 5 上随机取窗口的定量分析结果,每个窗口尺寸随机取 5 次,并对 5 组结果计算平均值和方差。从中可以看出,随着窗口尺寸的增加,5

表 1 不同窗口尺寸下 SEM 照片的定量分析结果

| Table 1 Quantitative results of SEM images at different window sizes |                                   |       |        |                                        |        |        |  |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------|--------|----------------------------------------|--------|--------|--|
| 窗口尺寸/像素                                                              | 表观孔隙率/%                           | 平均值/% | 方差     | 颗粒形态分维数                                |        |        |  |
| 100×100                                                              | 38.86, 24.85, 58.26, 2.61, 37.22  | 31.96 | 335.79 | 1.0779, 1.3609, 1.3561, 1.2123, 1.2910 | 1.2596 | 111.62 |  |
| 200×200                                                              | 48.18, 28.73, 29.88, 41.01, 38.24 | 37.21 | 52.34  | 1.2299, 1.2904, 1.2493, 1.2446, 1.2260 | 1.2480 | 5.25   |  |
| 300×300                                                              | 42.59, 31.75, 42.06, 21.98, 29.59 | 33.59 | 34.94  | 1.2734, 1.2696, 1.3215, 1.2437, 1.2198 | 1.2656 | 11.56  |  |
| 400×400                                                              | 44.90, 35.75, 35.59, 35.31, 27.44 | 35.87 | 30.60  | 1.2835, 1.2883, 1.2202, 1.3038, 1.2490 | 1.2690 | 9.15   |  |
| 500×500                                                              | 45.81, 36.85, 38.42, 34.10, 30.08 | 37.06 | 27.19  | 1.2827, 1.2670, 1.3025, 1.2704, 1.2331 | 1.2711 | 5.16   |  |
| 600×600                                                              | 39.73, 35.70, 36.08, 36.83, 35.50 | 36.77 | 2.40   | 1.2730, 1.2708, 1.2610, 1.2829, 1.2699 | 1.2715 | 0.49   |  |
| 700×700                                                              | 35.16, 34.74, 35.10, 36.82, 36.11 | 35.59 | 0.59   | 1.2761, 1.2710, 1.2658, 1.2701, 1.2570 | 1.2680 | 0.41   |  |

表 2 不同扫描点的定量分析结果

| Table 2 Quantitative results at different scanning positions |         |       |         |        |
|--------------------------------------------------------------|---------|-------|---------|--------|
| 土样编号                                                         | 表观孔隙率/% | 平均值/% | 颗粒形态分维数 | 平均值    |
| 1                                                            | 35.32   | 36.45 | 1.3317  | 1.3035 |
| 2                                                            | 38.35   |       | 1.2972  |        |
| 3                                                            | 33.35   |       | 1.3166  |        |
| 4                                                            | 37.94   |       | 1.2997  |        |
| 5                                                            | 36.60   |       | 1.2821  |        |
| 6                                                            | 37.13   |       | 1.2939  |        |

组表观孔隙率和颗粒形态分维数结果的方差呈递减趋势, 说明分析区域选的越大, 结果的可靠性越高。此外, 表 1 的数据还表明, 即便是在方差相当小的情况下, 5 组数据之间还是存在一些波动, 为了使分析结果更准确, 采取多次分析取平均值是有必要的, 并尽可能地选择较大的分析区域。

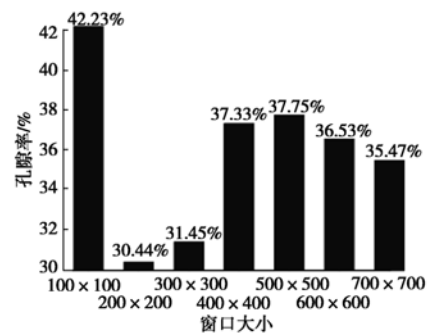


图 6 孔隙率同分析窗口大小之间的关系

Fig. 6 Relationship between porosity and size of analyzing windows

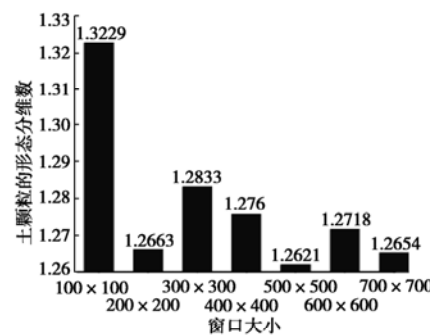


图 7 土颗粒形态分维数同窗口大小的关系

Fig. 7 Relationship between fractal dimension and size of analyzing windows

(2) 选区位置的影响

表 2 给出了同一土体的 6 个土样在同一放大倍数下 (1500 倍) 的表观孔隙率和土颗粒形态分维数以及最后的平均值。从中可以看出, 6 个土样对应 6 个不同的表观孔隙率和形态分维数, 进一步说明了土体的非均质性对分析结果的影响。6 个土样表观孔隙率的平均值为 36.45%, 非常接近实际值 36.31%, 颗粒形态分维数的平均值为 1.3035, 也基本落在图 2 中的分维数相对平缓的区间内。这说明对土体取多个平行样求平均值能有效地降低分析误差, 特别是对一些原状土, 其结构特征受形成条件、应力状态、物质组成和各种环境因素的影响, 土体的非均质性和各向异性更加显著, 在对这一类土进行扫描电镜分析时, 至少要在相同条件下制备 6 组试样 (即分别在 X、Y 和 Z 方向上至少各制 2 组试样), 并对每组试样进行多点扫描, 而对重塑土而言, 测试样品数可以适当减少, 但也不能少于 3 组。

2.3 放大倍数的影响

为了研究放大倍数对扫描电镜分析结果的影响, 本文采用了两种土样, 一种是前文分析用到的重塑素土样, 另一种是石灰改性土样 (石灰掺量 8%)。对素土样是在不同的扫描点进行放大, 而对石灰土是在同一点逐级放大。图 8 和图 9 分别给出了这两种土样在不同放大倍数下表观孔隙率和土颗粒形态分维数的计算结果。从两图中可以看出, 无论是素土还是石灰土, 其表观孔隙率和颗粒形态分维数均随放大倍数的递增而呈现递减趋势, 分维数表现的更为明显。根据本文的试验参数及常识, 石灰改性土的孔隙率应该小于素土, 但从图 8 中可以看出, 当放大倍数大于 3000 时,

石灰土的孔隙率高于素土, 这显然不符合常规, 说明该放大倍数下的土结构已经“失真”。因此, 在对土体进行扫描电镜分析时, 放大倍数一般不宜超过 3000。结合文献[12]对团聚体微观结构的研究结果, 本文将  $1500 \pm 300$  倍作为土体微观结构一般性研究的推荐范围。

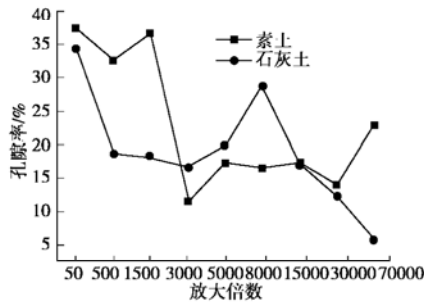


图 8 孔隙率与放大倍数之间的关系

Fig. 8 Relationship between porosity and magnification

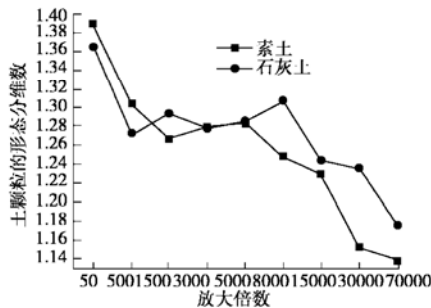


图 9 土颗粒形态分维数与放大倍数之间的关系

Fig. 9 Relationship between fractal dimension and magnification

下面结合图 10 给出的各放大倍数下的 SEM 照片对图 8 和图 9 的结果做进一步分析。其中图 10 (a) ~ (f) 为素土不同扫描点的照片, 图 10 (g) ~ (l) 为石灰土在同一扫描点的照片。当放大倍数为 50 的时候, 几乎看不出图 10 中 (a) 和 (g) 有什么区别, 但是能从两张图像中看到有明显的凹坑和突起的土体, 这一现象是由于用于扫描电镜分析的土样是直接掰开的, 其断面比较粗糙, 在二值化的过程中, 这些人为的凹坑会被转化为孔隙, 从而导致图 8 中的表观孔隙率呈现较高的值; 当放大倍数为 1500 倍时图 10 ((b) 和 (h)), 素土结构松散, 孔隙明显, 且大孔隙较多, 最大的孔径接近  $25 \mu\text{m}$ , 表观孔隙率为 36.6%, 而石灰土相对致密, 没有明显的大孔隙, 表观孔隙率为 18.13%; 当放大倍数为 3000 倍时, 图 10 (c) 和 (i) 对应扫描区域的实际长度约为  $40 \mu\text{m}$ , 较接近于素土中某些大孔隙或者大颗粒的尺寸。当在素土中随机选取扫描点时, 扫描点有可能恰好落在一个土颗粒上或者一个大孔隙中。显然图 10 (c) 的扫描点正好落在一个土颗粒上, 其表观孔隙率只有 11.51%, 低于石灰

土。说明在做扫描电镜分析土体微观结构时, 并不是放大倍数越大越好, 过大的放大倍数往往会导致覆盖或者忽略土体的真实结构, 而仅仅得到某一局部的信息, 甚至得到与实际情况完全相反的信息, 这一现象容易发生在结构松散的土样中。当放大倍数为 8000 倍时, 由于石灰土是在同一点进行扫描放大, 原来靠近扫描中心较小的孔隙被逐级放大后占据整幅图像的面积也逐渐增加, 如图 10 (i) ~ (j) 圆形标记所示, 最终导致表观孔隙率偏高 (图 8 所示)。其原因与素土在放大 3000 倍时孔隙率偏低是一样的, 都是因为放大倍数太高反映的是某一局部的信息; 随着放大倍数的进一步增加, 当放大倍数为 70000 倍时, SEM 照片中显示的是片状的黏土矿物, 其中的“孔隙”已经不是常规意义的孔隙了, 反映的是黏土颗粒之间的间距和排列紧密程度, 当结构单元体 (黏土颗粒) 排列比较疏松时 (图 10 (f)), 通过 SEM 图像计算得的表观孔隙率也大。由于石灰的消化和水化作用, 一方面可以使土颗粒粘聚成团, 另一方面石灰胶结物能够填充土体中的大小孔隙, 从而提高土体的整体密实度。对比在同样放大倍数下的图 10 (l) 和 (f), 石灰改性之后黏土颗粒之间的间隙明显变小, 表现出较好的整体性, 其表观孔隙率仅仅只有 5.76% (如图 8 所示)。除此之外, 黏土片在 SEM 图像中的排列方向也会影响表观孔隙率的计算结果。图 10 (f) 中, 黏土片近似垂直于扫描窗口, 层间空隙清晰可见, 而图 (l) 中的黏土片近似平行于扫描窗口, 层间空隙被覆盖。

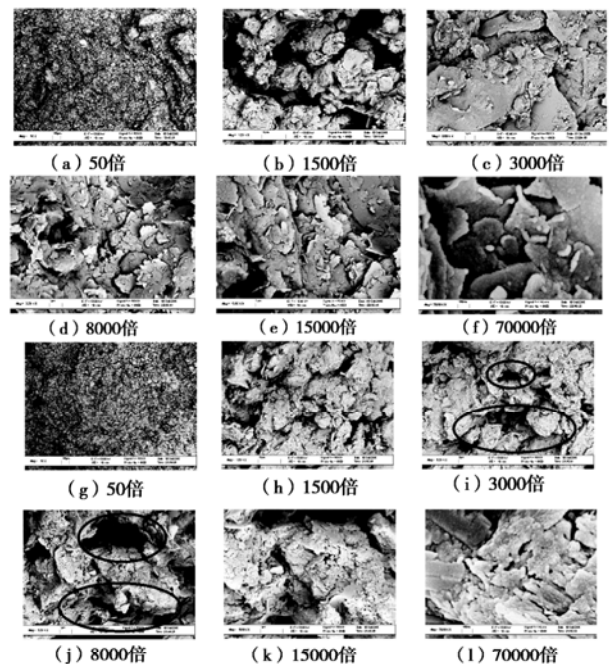


图 10 不同放大倍数下素土和石灰土的 SEM 照片 ((a) ~ (f) 为素土, (g) ~ (l) 为石灰土)

Fig. 10 SEM images of raw soil and lime treated soil at different magnifications

由于放大倍数的增加, SEM 图像中土颗粒占据的面积也相对增加, 孤立的土颗粒减小, 取而代之的是由许多颗粒连接起来形成的单一大颗粒, 其复杂程度降低, 颗粒的形态分维数逐渐减小(如图 9 所示), 这与前文中阈值大小对土颗粒形态分维数的影响机理是一致的。

### 3 结 论

通过一系列的 SEM 照片, 系统分析了阈值大小、分析区域大小、扫描点位置、放大倍率等因素对土体微观结构定量研究结果的影响, 对各因素的影响机理进行了探讨, 得到如下结论:

(1) 阈值大小对土体孔隙结构的定量研究有直接影响, 宜选取相对较小的阈值(60~100)进行分析, 其结果更接近真实情况。而在研究土颗粒的形态特征时, 则宜选取相对较大的阈值, 推荐阈值区间为 150~220。

(2) 扫描分析点应该选择在土颗粒和孔隙分布较均匀的地方, 分析窗口选的越大, 结果越具代表性和普遍性。为使分析误差降到最小, 同一土体应制备多个土样, 并取多个扫描点对结果取平均值。对结构相对均匀的重塑土, 试样个数不宜少于 3, 对各向异性显著的原状土, 至少应制备 6 个试样(即分别在 X, Y 和 Z 方向上至少各制 2 组试样)。

(3) 放大倍数应视研究目的和研究对象而定, 对于粘性土进行常规微观结构研究时, 放大倍数在 1500±300 范围内选取为佳。对结构松散、颗粒平均粒径大的土体, 宜选取相对较小的放大倍数, 对结构致密的土体, 放大倍数可适当增加。通常情况下, 放大倍数越大, 得到的信息越局部、越片面。

本文仅仅是对影响 SEM 图像定量分析结果的几个常见因素做了一些探索性的研究, 由于土体扫描电镜分析过程中的人为因素、客观因素非常多, 且存在很大的随机性, 企图通过这一方法从局部客观地反映整体、从可见准确推测不可见、将微观联系到实际的宏观还存在一定的难度和挑战性, 今后有必要在这一领域投入更多的开拓性工作。

#### 参考文献:

- [1] 施 斌, 姜洪涛. 粘性土微观结构分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 864 - 870. (SHI Bin, JIANG Hong-tao. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 864 - 870. (in Chinese))
- [2] 李德成, VELDE B, DELERUR J F, 张桃林. 孔隙结构图像分析中不同试验因素对分析结果的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 52 - 57. (LI De-cheng, VELDE B, DELERUE J F, ZHANG Tao-lin. Influences of experimental factors on analysis of pore structure using images of soil sections[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 52 - 57. (in Chinese))
- [3] 刘志彬, 施 斌, 王宝军. 改性膨胀土微观孔隙定量研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 526 - 530. (LIU Zhi-bin, SHI Bin, WANG Bao-jun. Quantitative research on micropores of modified expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2004, 26(4): 526 - 530. (in Chinese))
- [4] 王宝军, 施 斌, 刘志彬, 等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 244 - 247. (WANG Bao-jun, SHI Bin, LIU Zhi-bin, et al. Fractal study on microstructure of clayey soil by GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2004, 26(2): 244 - 247. (in Chinese))
- [5] 王宝军, 施 斌, 唐朝生. 基于 GIS 实现黏性土颗粒形态的三维分形研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 309 - 312. (WANG Bao-jun, SHI Bin, TANG Chao-sheng. Study on 3D fractal dimension of clayey soil by use of GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2007, 29(2): 309 - 312. (in Chinese))
- [6] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红粘土的基本特性与微观结构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 458 - 462. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2001, 23(4): 458 - 462. (in Chinese))
- [7] TOVEY N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs of soil fabric[J]. J Microscopy, 1980, 120: 303 - 315.
- [8] SMART P, LENG X. Present developments in image analysis[J]. Scanning Microscopy, 1993, 7: 5 - 16.
- [9] SHI B, LI S. Quantitative approach on SEM images of microstructure of clay soils[J]. Science in China, Series B, 1995, 36(8): 741 - 748.
- [10] SHI B, MURAKAMI Y, WU Z. Orientation of aggregates of fine-grained soil: quantification and application[J]. Engineering Geology, 1998, 50: 59 - 70.
- [11] MARTINEZ-NISTAL A, VENIALE F, SETTI M, COTECCHIA F. A scanning electron microscopy image processing method for quantifying fabric orientation of clay geomaterials[J]. Applied Clay Science, 1999, 14: 235 - 243.
- [12] 刘志彬. 非饱和土中团聚体的组构与强度研究[D]. 南京: 南京大学, 2004. (LIU Zhi-bin. Research on fabric and strength of soil aggregates in unsaturated soils[D]. Nanjing: Nanjing University, 2004. (in Chinese))