

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.06.001

基于 Matlab 的水泥土细观结构孔隙率分析方法

何杰, 熊猛, 王忍, 高建喜

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为探讨水泥土细观结构孔隙率分析方法的优劣, 在 Matlab 图像处理技术的基础上, 采用阈值分割法和灰度图像识别法分别对水泥土扫描电镜图像进行了处理和分析, 获得了不同阈值分割后的水泥土细观结构形态图和灰度图像识别法处理过程图, 并对两种方法处理得到的图像进行了比较分析。研究表明: 对于同一扫描区不同倍数下得到的 SEM 图像, 在用阈值分割法进行处理时, 可先测定宏观表面孔隙率, 再去寻找合理的阈值区间, 阈值分割法适用于试样表面较为平整的 SEM 图像处理; 灰度图像识别法适用于结构走向性明显且结构元素形式单一的 SEM 图像处理。

关键词: 水泥土; 细观结构; 孔隙率; 阈值分割法; 灰度图像识别法

中图分类号: TP391.41; TU411.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2018)06-0001-06

Matlab-Based Study on Porosity Analysis Method of Soil Mesoscopic Structure

HE Jie, XIONG Meng, WANG Ren, GAO Jianxi

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of a tentative investigation on the porosity analysis method of soil mesoscopic structure, and on the basis of Matlab image processing technology, by adopting the threshold segmentation and gray image recognition methods, a processing and analysis have been conducted on the SEM images of cement soil, thus obtaining the process map of cement soil microstructure and gray image recognition undergoing different threshold segmentation, followed by a comparative analysis of the images processed by the two methods. The results show that, for the same scanning area, the SEM images obtained under different multiple times can first determine the macroscopic surface porosity and find a reasonable threshold interval with the threshold segmentation method adopted. The threshold segmentation method is also applicable to the SEM image processing of specimens with relatively smooth surface. Meanwhile the gray scale image recognition method is suitable to the process of SEM image processing with obvious structural direction and single structural elements.

Keywords: cement-soil; mesoscopic structure; porosity; threshold segmentation method; grayscale image recognition method

0 引言

土体微观结构的差异决定土体宏观性质的不同,

所以在研究事物宏观性质的同时, 也需要探究其微观结构的性质。扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 是一种直接观察土体微观结构的

收稿日期: 2018-07-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (16JJ5007)

作者简介: 何杰 (1976-), 男, 湖南汨罗人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事软土地基处理等方面的教学与研究, E-mail: hejie_76@sina.com

工具。近年来国内外很多学者^[1-12]运用SEM对土体的有关性质,如结构分形、孔隙率、渗透性等做了相关研究。其中,王宝军等^[13-14]借助ArcGIS软件对土体扫描电镜图像进行了定量分析,指出黏性土微观结构存在分形特征。唐朝生等^[15]对大量的SEM图像进行了统计,分析了分形维数与阈值的关系,并指出在较小的阈值条件下得到的孔隙结构参数较接近真实情况,且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,故建议阈值取值区间为[60, 100]。徐日庆等^[16]采用Image-Pro Plus (IPP)软件对软土三维孔隙率进行了计算,并建议阈值取值区间为[200, 220]。

利用水泥土处理不良地基的施工方案已经在工程实践中得到了广泛的应用。目前,关于水泥土加固软土的研究主要集中在宏观方面,利用SEM进行水泥土固化机理的研究还没有深入到定量的阶段。所以,本研究采用Matlab软件对水泥土SEM图像进行处理,提取出与研究内容相关的信息,计算水泥土的表观孔隙率,并且对阈值分割法和灰度图像识别法进行比较,分析两种方法的优缺点,以期为水泥土微观结构的研究提供参考,也为充分挖掘SEM图像信息提供参考依据。

1 研究方法

由扫描电镜得到的原始图像为灰度图像,该灰度图像不能直接用于定量分析。扫描电镜的扫描过程中,由于试样的导电性差异、电子飘逸等原因,造成扫描原始图像存在多噪点等问题,因而在提取信息前需要对图像进行消噪、增强等处理。

对图像进行分析时,采用阈值分割法和灰度图像识别法进行对比研究。阈值分割法需要设定相应的阈值,低于阈值的数值转换为0,高于阈值的数值转换为1,这使得原来的灰度图像变为二值图像。阈值分割法中最关键的参数就是阈值的选择,而灰度图像识别法控制的变量较多。本文主要从如何进行图像识别及其对统计结果影响的角度进行阐述。

数据统计时,孔洞部分被标记为黑色0,突出部分被标记为白色1,则土体表观孔隙率的计算可以通过黑色区域面积与总面积之比求得。即

$$P_0 = \frac{S_0}{S_0 + S_1} \times 100\% = \frac{S_0}{M \times N} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: P_0 为土体计算表观孔隙率;

S_0 为黑色0像素点总数;

S_1 为白色1像素点总数;

M 为扫描图像长边像素数;

N 为扫描图像宽边像素大小。

对比研究2种分析方法时,对同一张SEM图像,采用2种方法分别计算其表观孔隙率,并测量表观孔隙率,观察处理过程中两者图像形态上的差异,分析差异产生的原因,进而得出相关结论。

2 水泥土细观结构孔隙率试验研究

2.1 样品制备

土的三相体系复杂,本身固体物质大小不一,且分布不均,导电性不好,所以土体试样制备的好坏将直接影响SEM成像的质量。将取自株洲市天元区某基坑的黏土作为试验用土,烘干、碾碎、过1mm筛后备用,土的物理力学性能参数见表1。

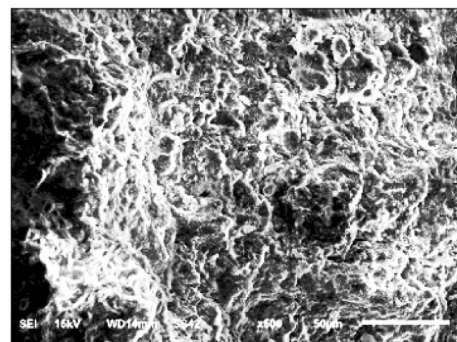
表1 土的物理力学参数

重度 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角 / ($^\circ$)	黏聚力 / kPa	压缩模量 / MPa	含水率 / %	泊松比
17.8	10.2	9.4	4.3	35.4	0.28

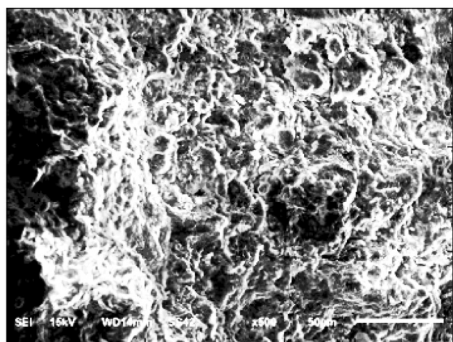
根据不同的水泥配比制备水泥土试样,试样放置于环刀内,在标准养护室养护28d,严格控制温度与湿度。为避免水分对成像的影响,采用烘干法将试样放置于烘箱中烘制24h,烘干温度设定为100℃。烘干后,用手掰开土饼,取小块样本进行制样。由于水泥土本身属于非导体材料,所以要进行喷金处理。黏土颗粒小,在烘干掰开取样过程中,可能引起试样表面颗粒松散,所以放入试样前用橡皮球吹去试样表面松动颗粒。

2.2 阈值分割法

文献[13]与文献[14]中均指出黏性土细观结构中存在分形特征,即可以通过对宏观表观孔隙率的测定估计细观条件下的试样表观孔隙率。本试验所用土样为重塑土样,首先选用低倍视野下的图像进行分析。通过对宏观土样的测量,得到其表观孔隙率为35.62%。图1所示为通过SEM获得的500倍条件下试样的原图像以及经过预处理后的图像,图像大小为1280×960像素。



a) 原图



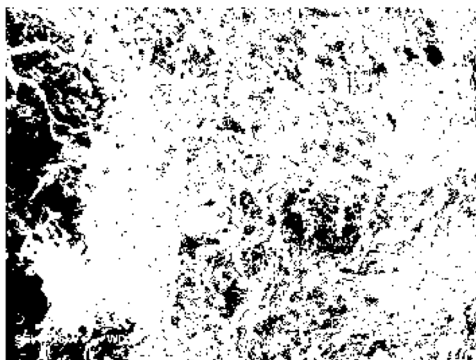
b) 消噪增强处理图

图 1 样品图像预处理前后对比

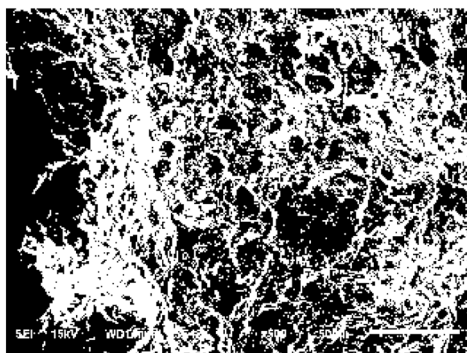
Fig. 1 Comparison of sample images before and after the pretreatment

由图 1 可知, 图像经预处理后, 消除了噪点, 可提高其在后处理中提取数据的精确度, 同时其清晰度变高, 视觉效果更优。

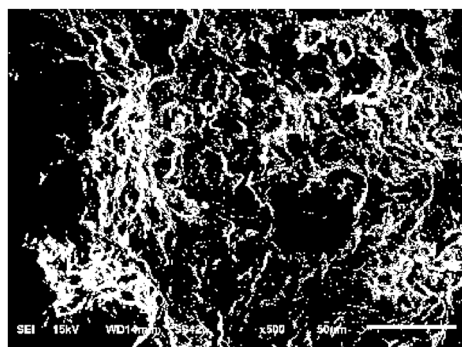
图 2 是不同阈值分割后样品的结构形态图。



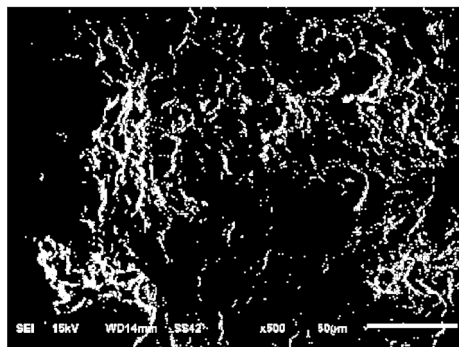
a) 阈值为 50



b) 阈值为 100



c) 阈值为 150



d) 阈值为 200

图 2 不同阈值时的样品结构形态

Fig. 2 Structure morphologies of samples at different thresholds

由图 2 可知, 阈值分割后的图像为二值化图像, 根据图像可以得出, 阈值越小, 黑色区域越小, 即计算表观孔隙率越小; 阈值越大, 黑色区域越大, 即计算表观孔隙率越大。通过计算可以发现, 当阈值为 70 时, 计算表观孔隙率为 35.23%, 这与文献 [15] 中所分析的结果吻合。

仔细观察图 2d 可以发现, 由于 SEM 本身成像的问题, 会导致“图像失真”, 即部分区域应该属于凸起的部分也会被纳入黑色区域。这是因为一束电子射下去, 没有被结构表面反射回来, 而是被折射或者被吸收了, 导致成像灰度值低, 一旦阈值选择稍大, 该区域就容易被认为是凹处, 进而使得计算表观密度变大。

图 3 是计算表观孔隙率与阈值之间的关系曲线。

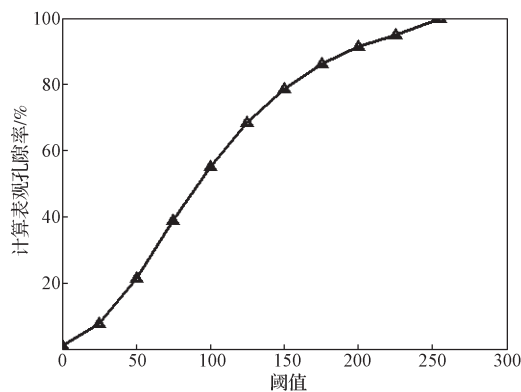


图 3 计算表观孔隙率与阈值之间的关系

Fig. 3 Relationship between calculated apparent porosity and threshold value

由图 3 可知, 计算表观孔隙率与阈值之间存在正相关关系, 但根据这种关系不能具体确定后处理时阈值的大小。当扫描电镜灰度图像放大倍数为 1 500 时, 建议阈值区间为 [60, 100]^[14]; 当图像放大倍数为 1 000 时, 阈值区间取为 [200, 220]^[9]。这表明并没有固定的阈值区间可以直接套用。这是因为随着

扫描电镜焦距、电压、对比度、亮度等因素的变化,扫描得出的图像信息存在“失真”现象。由于以上问题的存在,即使对于同一区域,不同倍数的扫描图像也会存在阈值区间不一致的问题。所以在批量处理 SEM 图像时,如何将所有图像标定到一个基准灰度上是一个亟需解决的问题。

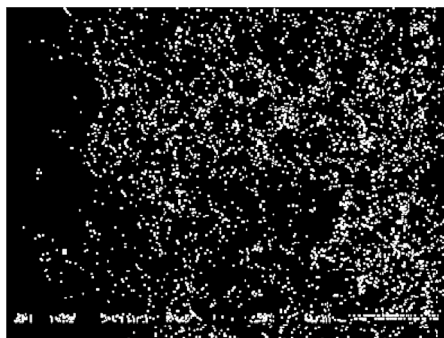
2.3 灰度图像识别法

二维图像的灰度值函数为 $f(x, y)$, 图像边缘检测的原理是通过考察它上下左右邻点灰度的加权差, 以及与之接近的邻点的权大。Sobel 梯度算子掩模包含如下所示的 w_1 和 w_2 两个梯度算子:

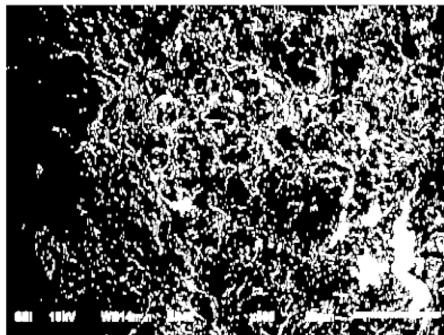
$$w_1 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$w_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

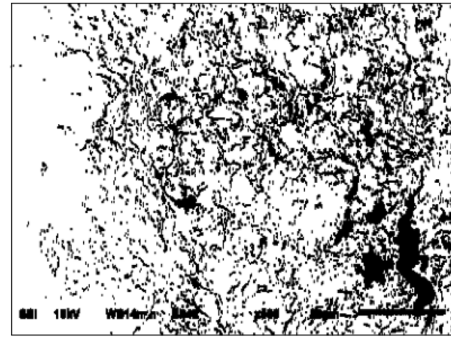
其中 w_1 对水平边缘有较大响应, w_2 对垂直边缘有较大响应, 且受噪点影响较小。本研究采用 Sobel 算子进行边缘检测, 具体的运算过程如下: 首先, 设定容差系数, 计算图像亮度函数的一阶梯度; 其次, 用线性形态结构元素构建膨胀梯度掩模; 再次, 填充空洞; 最后, 通过逻辑运算, 使经过预处理后的图像变为只有 0, 1 的二值图像。经灰度图像识别法处理后的结果如图 4 所示。



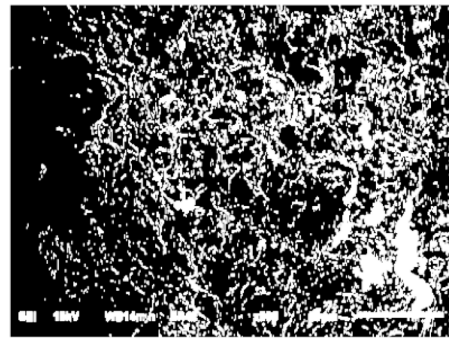
a) 边缘梯度掩模



b) 空洞填充



c) 结构元素识别



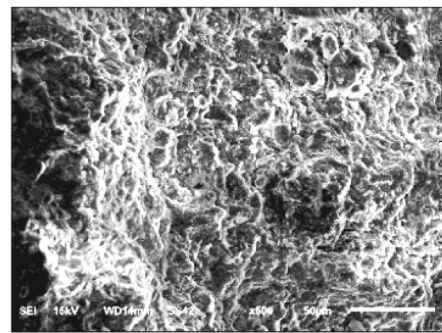
d) 最终图像

图 4 灰度图像识别法处理结果

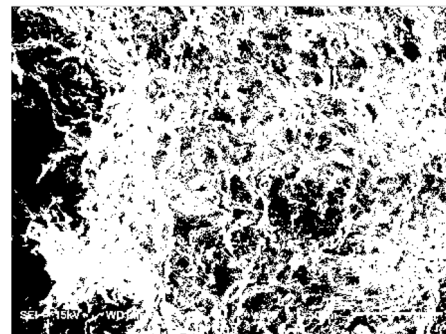
Fig. 4 Results of gray image recognition processing

2.4 2 种方法处理图像的效果比较

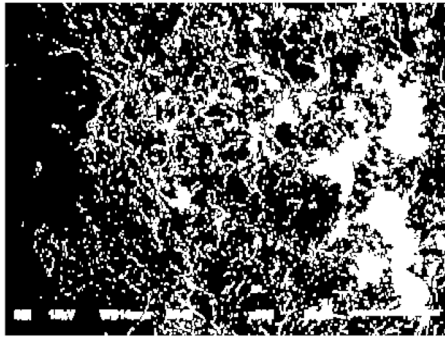
为了比较阈值分割法与灰度图像识别法处理图像的效果, 将用这 2 种方法得到的计算表观孔隙率接近实际值 (宏观样本表观孔隙率 35.62%) 时, 处理后的图像进行对比, 如图 5 所示。



a) 原图



b) 阈值分割法



c) 灰度图像识别法

图5 2种方法处理前后的图像

Fig. 5 Two different methods of image processing

对比图 5b 与 5c 两张图像右侧区域,发现对于较平整区域,2种处理方法效果均较好,且阈值分割法更为细致。对比 2 图像左下方区域,发现阈值分割法显得有点“一刀切”,而灰度图像识别法显得较为符合客观事实。

从图 5b 可以看出:阈值分割法构建的图像右边区域与图 5a 中的原图走向一致,但是其左下方区域明显不一致。呈现这种形态的主要原因可能是,微观结构的凹凸对电子的反射、折射和吸收能力不同,导致在图像上反应出不同明暗的变化,进而经阈值分割而最终呈现出不同的图像。也就是说阈值分割法处理图像不仅仅是对阈值的选择有要求,而且对图像扫描过程也存在一定的要求,最好是使电子直射试样表面,且对不同的照片进行分析时,需对其特征区域进行标定。

灰度图像识别法是根据图像亮度差异计算一阶梯度来进行边缘检测,然后通过自定义结构元素构建图像。这样的分析方法可以避免阈值分割法中因为阈值选择不当而导致的分析误差。水泥土细观结构的凹凸并不是绝对尺度的问题,而是一个相对尺度的问题,需要注意处理过程中存在的容差性。当结构呈现一定的走向性和结构形式较为统一时,采用灰度图像识别法比较好。由于 Sobel 算子对边缘具有很强的方向性,而本文分析的图像中,水泥形成的包裹体结构呈现片状,结构形式单一,走向一致性高。所以分析时采用的结构元素为线性结构元素,故灰度图像识别法适用于结构走向性明显且结构元素形式单一的 SEM 图像处理。

3 结论与建议

综上所述,可以得出以下结论:

1) 对于试样表面较为平整的 SEM 图像,宜采用阈值分割法进行二值化定量分析。阈值的选择对统

计结果的影响很大,而影响阈值选择的因素又很多,所以应根据具体的图像选择阈值。对于同一扫描区域,不同倍数下得到的 SEM 图像,建议在采用阈值分割法进行处理时,先测定宏观表面孔隙率,再寻找合理的阈值区间。

2) 对于结构走向性明显且结构元素形式单一时的 SEM 图像,宜采用灰度图像识别法进行二值化定量分析。为提高识别的准确度和更好地构建识别图像,形态结构元素最好与原图像中特征结构元素相似,形态结构元素的方向也尽量与特征区域的走势相一致。

本文对阈值分割法中存在的一些问题进行了分析,对灰度图像识别法提取 SEM 信息的有关问题进行了探讨,并得到了相关的结论,但还有一些问题,例如,不同图像的标定问题、结构元素的选择问题等,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] TOVEY N K. A Digital Computer Technique for Orientation Analysis of Micrographs of Soil Fabric[J]. *Journal Microscopy*, 2011, 120(3): 303-315.
- [2] VOSS R F, LAIBOWITZ R B, ALESSANDRINI E I. Fractal Geometry of Percolation in Thin Gold Films[M]// *Scaling Phenomena in Disordered Systems*. [S. l.]: Springer, 1985: 279-288.
- [3] SMART P, LENG X. Present Developments in Image Analysis[J]. *Scanning Microscopy*, 1993, 7(1): 5-16.
- [4] MOORE C A, DONALDSON C F. Quantifying Soil Microstructure Using Fractals[J]. *Geotechnique*, 1995, 45(1): 105-116.
- [5] 施斌. 粘性土击实过程中微观结构的定量评价[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(4): 57-62.
SHI Bin. Quantitative Assessment of Changes of Microstructure for Clayey Soil in the Process of Compaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(4): 57-62.
- [6] 施斌, 姜洪涛. 粘性土的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 Hongtao. Research on the Analysis Techniques for Clayey Soil Microstructure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 864-870.
- [7] 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 Luorong, KONG Lingwei. Fundamental Property and Microstructure Model of Red Clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4):

- 458-462.
- [8] 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 Zhibin, SHI Bin, WANG Baojun. Quantitative Research on Micropores of Modified Expansive Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 526-530.
- [9] ROMERO E, SIMMS P H. Microstructure Investigation in Unsaturated Soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(6): 705-727.
- [10] LIN B T, CERATO A B. Prediction of Expansive Soil Swelling Based on Four Micro-Scale Properties[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71(1): 71-78.
- [11] 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 Zhibin. Research on Fabric and Strength of Soil Aggregates in Unsaturated Soils[D]. Nanjing: Nanjing University, 2004.
- [12] 张梅英. 利用扫描电镜研究土的微结构有关问题 [J]. 岩土力学, 1986, 7(1): 53-58.
ZHANG Meiyang. Some Problems on the Application of SEM to the Study of Soil Microstructure[J]. Rock and Soil Mechanics, 1986, 7(1): 53-58.
- [13] 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 Baojun, 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): 215-255.
- [14] 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 Baojun, SHI Bin, LIU Zhibin, et al. Fractal Study on Microstructure of Clayey Soil by GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 244-247.
- [15] 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 Zhaosheng, SHI Bin, WANG Baojun. Factors Affecting Analysis of Soil Microstructure Using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560-565.
- [16] 徐日庆, 邓祎文, 徐 波, 等. 基于 SEM 图像的软土三维孔隙率计算及影响因素分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1497-1502.
XU Riqing, DENG Yiwen, XU Bo, et al. Calculation of Three-Dimensional Porosity of Soft Soil Based on SEM Image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1497-1502.

(责任编辑: 邓光辉)