

软土扫描电子显微镜图像的微观参数特征分析

施爱勇,徐金明,李德明

(上海大学土木工程系,上海 200072)

摘要: 本文在使用扫描电子显微镜(SEM)获得软土微观图像基础上,将图像进行灰度化处理和二值化处理,使用Canny边缘检测技术得到了软土微观图像中颗粒的分布情况与土的面孔隙比的大小,进而获得了偏心率、扁圆度、圆形成度、离散指数、内切圆半径等土颗粒形状特征参数,进行了这些形状特征参数之间的相关性分析和因子分析。结果表明,偏心率和各向异性率等参数之间具有很好的相关性;周长和离散指数等参数之间具有较好的相关性;而各向异性率和面积等参数之间则不具有相关性;所有特征参数可以由区域因子、周长因子和弦因子等3个主因子来反映。

关键词: 边缘检测; 形状特征参数; 相关性; 因子分析

中图分类号: TU411.92; P642.13⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)03-0069-05

软土工程性质决定于软土的微细结构,因此,软土矿物、颗粒形态等微细结构的研究具有非常重要的工程意义。唐朝生等^[1]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的影响; Shi和Li^[2]阐述了检测粘性土微结构的方法; 张敏江等^[3]利用扫描电子显微镜(SEM)图像和计算机图像处理技术,提取了代表软土流变特征的微观参数; 刘雪梅等^[4]研究了粘性土孔隙结构及其分形特性; 熊承仁等^[5]探讨了利用SEM图像获取土孔隙结构参数的方法; 王清等^[6]讨论了土微观结构单元体的表征方法,提出了描述孔隙大小、形态、定向性等微观结构要素的定量评价指标; 周晖等^[7]利用环境扫描电子显微镜所得图像研究了不同固结压力条件下的软土微结构参数; 施斌^[8]应用Videolab图像分析系统,对击实过程中粘性土的微观结构进行了定量评价。此外, Wang等^[9]使用地理信息系统(GIS)定量分析了土颗粒的定向性; Chun等^[10]基于面积、周长、方向等几何参数,使用概率熵、概率分布指数和分形维数描述了孔隙的方向、面积和形状因子; 王宝军等^[11]研究了利用SEM图像计算土样孔隙度的二维和三维方法; Nattaporn等^[12]根据土中砂粒SEM图像的特征分析,提出了母质成分的判断方法; Liu等^[13]研

究了放大倍数对膨胀土SEM图像的影响; 王宝军等^[14]采用GIS空间分析技术对扫描电镜图像进行了边缘提取和定向分析; 周翠英和林春秀^[15]分析了软土微结构参数与荷载、变形和强度之间的关系。

本文拟以软土SEM图像为研究对象,在使用边缘检测技术确定图像中土颗粒形状特征基础上,探讨形状特征参数的相关性并进行不同参数的主因子分析。

1 图像的获取方法

将工程现场土块用小刀切割成大小为8mm × 8mm × 5mm的小块土样。受时间限制,将切好的土样放在烘箱中烘干(8h); 然后用胶带移除土样表面的小颗粒,以防这些小颗粒静电附着到显微镜物镜镜片; 最后在土样表面喷金。所用仪器为上海大学分析测试中心的JSM-6700F型扫描电子显微镜(SEM)。

2 微观特征参数的计算

根据所摄SEM图像,在进行土颗粒边缘检测基础上,计算土的面孔隙比和土颗粒的形状特征参数。

2.1 土颗粒分布的确定

图1为使用扫描电镜获得的SEM图像。因样本由小刀切割而成,故样本表面可能有粉末状的颗粒。对图1进行灰度化得到图像的灰度图(图2)。采用边缘检测方法将图像中的土颗粒和孔隙区分出来。该方法的核心是确定土颗粒和孔隙之间的灰度阈值: 阈值过大,可能会把部分土颗粒误作孔隙; 阈值过小,又可能使部分孔隙误作土颗粒。研究时根据灰度分布曲线和灰度等值线图来确定这一灰度阈值。

由图2可以看出,灰度分布范围在64~255之间,

收稿日期: 2012-08-23; 修订日期: 2012-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972191)

作者简介: 施爱勇(1989-),男,硕士研究生,主要从事软土微观结构研究。

通讯作者: 徐金明(1963-),男,教授,博士生导师,从事岩土工程与工程地质计算技术教学和科研工作。

E-mail: xjming@163.com

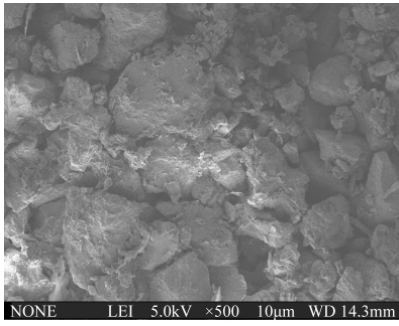


图 1 放大倍数为 500 倍的 SEM 图像
Fig. 1 SEM images of 500 times large

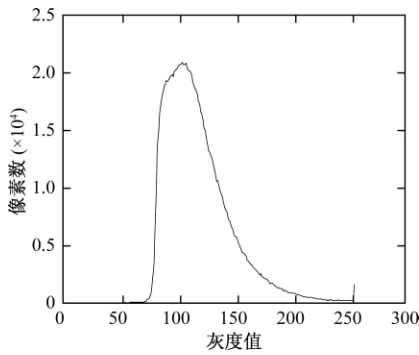


图 2 灰度分布曲线
Fig. 2 Grayscale distribution

波峰出现在灰度值 110 附近(即灰度值 110 左右的像素较多)。图 3 为取左上角像素点(328, 132)、长宽均为 360 像素区域的灰度等值线图。由图 3 可以看出,孔隙灰度值大多分布在 100~120 之间。根据图 1 和图 3,可以将土颗粒和孔隙的灰度阈值选为 120。

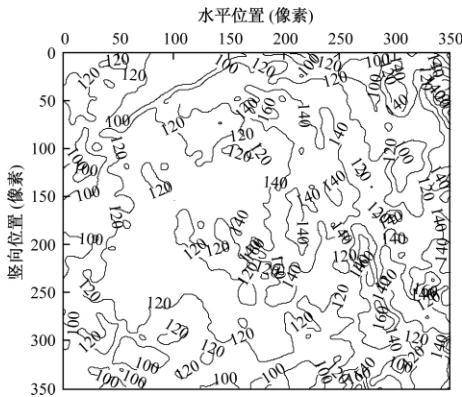


图 3 图像左上角某一区域的灰度等值线图
Fig. 3 Grayscale contour map in the upper-left region

常用边缘检测方法 (Robert 法、Prewitt 法、sobel 法、LOG 法、Canny 法) 中, Canny 法可以检测到强边缘和弱边缘,检测结果最为精细。因此,本文采用 Canny 边缘检测法来检测图像中的土颗粒。

根据上述灰度阈值与 Canny 边缘检测方法,得到图 1 图像去除下边缘后的二值图(图 4),图中白色和黑色分别代表土颗粒和孔隙。

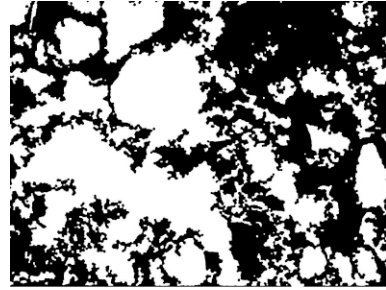


图 4 去除下边缘后的二值图
Fig. 4 Binary images after edges removed

2.2 面孔隙比的计算

由图 4 可以计算土中孔隙的百分含量。由于 SEM 图像是二维像素点的集合,这一百分含量不同于“孔隙比”的传统含义,研究时把图像中孔隙的百分含量称作面孔隙比,计算公式为:

$$n = (s - s_1) / s_1 \quad (1)$$

式中: n ——面孔隙比;

s_1 ——白色区域(土颗粒)面积;

s ——总面积。

图 4 白色区域面积为 635 271 像素,图的总面积为 1280 × 966 像素,由式(1)可得面孔隙比为 0.95。

2.3 土颗粒形状特征参数的计算

形状特征参数的具体计算公式为:

$$\text{扁圆度: } K = B/L \quad (2)$$

$$\text{圆形度: } R = 4\pi A/z^2 \quad (3)$$

$$\text{离散指数: } e = z^2/A \quad (4)$$

$$\text{内切圆半径: } r = 2A/z \quad (5)$$

$$\text{等效直径: } D = 2\sqrt{A/\pi} \quad (6)$$

$$\text{各向异性率}^{[8]}: I = (R - r) / R \quad (7)$$

式中: L ——图像上颗粒的最长弦;

B ——垂直于最长弦的颗粒宽度;

A, z ——区域面积和周长;

R, r ——与区域有着相同二阶矩的椭圆的长轴长度和短轴长度。

形状特征参数能较好反映土颗粒形状的特点。比如圆形度能够描述形状与圆形的接近程度,离散指数能描述土颗粒外形的复杂程度,各向异性率能够描述土颗粒整体的定向性。由图 4 可以得到 SEM 图像中土颗粒的几何特征参数(长短、面积、周长等)和形状特征参数(扁圆度、圆形度、离散指数、内切圆半径、等

效直径、各向异性率)。

3 微观参数计算及其相关性分析

3.1 微观参数计算方法

通过标记图中区域,可以提取土颗粒分布,进而计算任一土颗粒的几何形态特征参数和形状特征参数。图4中部分土颗粒的几何特征参数见表1,形状特征参数见表2,这些特征参数统计量见表3。

表1 土颗粒的几何特征参数

Table 1 Characteristic geometric parameters of soil particles

颗粒编号	面积(像素)	周长(像素)	长轴长度(像素)	短轴长度(像素)
1	4584	332	96.0	66.3
2	1279	190	52.8	36.0
17	990	226	102.0	14.3
24	2201	260	90.7	35.5
27	18251	844	170.0	150.0
39	3600	346	110.3	46.1
57	29991	956	246.9	177.0
97	6238	891	232.2	65.9
102	39306	2940	442.5	164.0
125	4307	520	98.0	79.1
147	18353	1690	344.2	138.0
150	8692	613	159.3	81.8
159	594	113	40.64	21.4
165	12536	1030	169.6	127.0
175	6122	703	116.6	81.5
178	836	134	37.0	33.2
183	19257	796	232.2	111.0
186	4759	545	122.9	76.3

表2 土颗粒的形状特征参数

Table 2 Characteristic shape parameters of soil particles

颗粒编号	偏心率	扁圆度	圆形度	内切圆半径(像素)	离散指数	等效直径(像素)	各向异性率
1	0.72	0.69	0.52	27.6	24.1	76.4	0.31
2	0.73	0.68	0.44	13.4	28.3	40.4	0.32
17	0.99	0.14	0.24	8.8	51.5	35.5	0.86
24	0.92	0.39	0.41	16.9	30.8	52.9	0.61
27	0.48	0.88	0.32	43.3	39.0	152.4	0.12
39	0.91	0.42	0.38	20.8	33.3	67.7	0.58
57	0.70	0.72	0.41	62.7	30.5	195.4	0.29
97	0.96	0.28	0.10	14.0	127.1	89.1	0.72
102	0.93	0.37	0.06	26.7	220.2	223.7	0.63
125	0.59	0.81	0.20	16.6	62.8	74.1	0.19
147	0.92	0.40	0.08	21.8	155.2	152.8	0.60
150	0.86	0.51	0.29	28.4	43.2	105.2	0.49
159	0.85	0.53	0.59	10.5	21.4	27.5	0.48
165	0.66	0.75	0.15	24.4	84.3	126.3	0.25
175	0.72	0.70	0.16	17.4	80.8	88.3	0.30
178	0.44	0.90	0.58	12.5	21.6	32.6	0.10
183	0.88	0.48	0.38	48.4	32.9	156.6	0.52
186	0.78	0.62	0.20	17.5	62.5	77.8	0.38

表3 土颗粒特征参数统计量

Table 3 Statistic of characteristic parameters of soil particles

	均值	方差	标准差
面积	10105	113324601	10645
长轴长度	159.1	10812	104
短轴长度	83.5	2383	48.8
偏心率	0.78	0.025	0.16
周长	729	438517	662
扁圆度	0.57	0.042	0.206
圆形度	0.31	0.027	0.16
内切圆半径	24.0	4323	65.7
离散指数	63.9	2735	52.3
等效直径	98.6	3143	56.0
各向异性率	0.43	0.042	0.21

由表1~表3可以看出,偏心率分布比较集中,其它参数分布比较分散,方差值和标准差值比较大,表明土颗粒的几何尺寸、外形复杂程度、颗粒定向性等相差较大,颗粒大小分布不均匀。

3.2 微观参数相关性分析

对土颗粒特征参数进行相关性分析,相关系数 $R(i, j)$ 采用积差相关的含义,计算式为:

$$R(i, j) = \text{cov}(i, j) / \sqrt{\text{cov}(i, i) \cdot \text{cov}(j, j)} \quad (8)$$

式中: i, j ——向量;

$R(i, j)$ ——向量 i, j 的相关系数;

$\text{cov}(i, j)$ ——协方差。

由式(8)可得到微观参数之间的相关系数(表4)。由表4可以看出,面积和短轴长度、面积和等效直径、长轴长度和周长、短轴长度和等效直径、偏心率和各向异性率之间具有很好的相关性,相关系数在0.9以上;面积和长轴长度、长轴长度和短轴长度、长轴长度和离散指数、周长和离散指数、圆形度和等效直径、短轴长度和内切圆半径之间具有较好的相关性,相关系数0.7~0.9;面积和离散指数、离散指数和等效直径之间具有一定的相关性,相关系数0.5~0.7;其它参数间相关性较小,相关系数小于0.5。

3.3 微观参数的因子分析

因子提取方法有主成分分析法、未加权最小平方方法、综合最小平方方法、最大似然估计法、主轴因子法、 α 因子法、影像因子等7种。为了分析土颗粒微观参数间的关系,本次研究基于SPSS软件,使用主成分分析法对因子进行提取,并对表1、2中的土颗粒参数进行因子分析。表5是总方差解释表,表6是旋转(采用正交旋转)成分矩阵表,表7是成份得分系数矩阵表。

表 4 特征参数的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between characteristic parameters

	面积	长轴长度	短轴长度	偏心率	周长	扁圆度	内切圆半径	圆形度	离散指数	等效直径	各向异性率
面积	1.000	0.887	0.910	0.062	0.869	0.211	0.704	0.394	0.584	0.972	0.028
长轴长度	0.887	1.000	0.791	0.363	0.947	0.288	0.439	0.652	0.827	0.890	0.336
短轴长度	0.910	0.791	1.000	0.167	0.766	0.246	0.762	0.457	0.488	0.962	0.223
偏心率	0.062	0.363	0.167	1.000	0.226	0.529	0.192	0.316	0.362	0.038	0.957
周长	0.869	0.947	0.766	0.226	1.000	0.220	0.297	0.672	0.898	0.845	0.207
扁圆度	0.211	0.288	0.246	0.529	0.220	1.000	0.197	0.412	0.200	0.284	0.397
内切圆半径	0.704	0.439	0.762	0.192	0.297	0.197	1.000	0.068	0.100	0.755	0.259
圆形度	0.394	0.652	0.457	0.316	0.672	0.412	0.068	1.000	0.817	0.473	0.331
离散指数	0.584	0.827	0.488	0.362	0.898	0.200	0.100	0.817	1.000	0.566	0.375
等效直径	0.972	0.890	0.962	0.038	0.845	0.284	0.755	0.473	0.566	1.000	0.013
各向异性率	0.028	0.336	0.223	0.957	0.207	0.397	0.259	0.331	0.375	0.013	1.000

表 5 解释的总方差

Table 5 Total variance explained

成分		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
初始特征值	合计	5.898	3.47	1.181	0.330	0.059	0.035	0.015	0.007	0.004	0.000	-7.63E-17
	方差%	53.619	31.553	10.737	3.002	0.533	0.316	0.133	0.067	0.037	0.003	-6.94E-16
	累积%	53.619	85.172	95.909	98.911	99.444	99.759	99.893	99.960	99.997	100.000	100.000

表 6 旋转成份矩阵

Table 6 Rotated component matrix

成分	内切圆半径	等效直径	面积	短轴长度	长轴长度	离散指数	圆形度	周长	各向异性率	扁圆度	偏心率
1	0.937	0.909	0.894	0.867	0.698	0.208	-0.110	0.585	-0.074	0.074	-0.010
2	-0.252	0.414	0.401	0.408	0.640	0.934	-0.873	0.770	0.171	-0.171	0.143
3	-0.154	-0.016	0.025	-0.234	0.285	0.240	-0.186	0.127	0.978	-0.978	0.970

表 7 得分系数矩阵

Table 7 Score coefficient matrix

成分	面积	长轴长度	短轴长度	偏心率	周长	扁圆度	圆形度	内切圆半径	离散指数	等效直径	各向异性率
1	0.230	0.122	0.190	0.065	0.028	-0.035	0.171	0.401	-0.145	0.228	0.035
2	-0.029	0.100	0.034	-0.114	0.231	0.084	-0.401	-0.354	0.396	-0.018	-0.084
3	0.029	0.062	-0.078	0.353	-0.038	-0.344	0.088	0.093	-0.068	0.012	0.344

由表 5 可知,前 3 个成分的特征值分别为 5.898、3.471、1.181,描述因子的方差依次减少。在旋转前后,前 3 个因子变量的累计贡献率保持不变,达到 95.909%。因此,前 3 个因子可以反映出原变量的大部分信息。由表 6 可知,第 1 因子反映了内切圆半径、等效直径、面积、短轴长度、长轴长度等 5 个参数,前 3 个参数都和面积相关,长短轴长度和区域相关,因子 1 可解释为区域因子;第 2 个因子反映了离散指数、圆形度、周长等 3 个参数,这 3 个参数都和周长相关,因子 2 可解释为周长因子;第 3 个因子反映了各向异性率、扁圆度、偏心率等 3 个参数,这 3 个因子和长短轴长度(或者弦)相关,因子 3 可解释为弦因子。

由表 7 得到因子变量表示的线性组合为:

$$F_i = a_i x_1 - b_i x_2 + c_i x_3 \quad (i = 1, 2, \dots, 11)$$

式中: F_i ——对应于表 7 中第 1 行的参数;

a_i, b_i, c_i ——对应于第 2 行、第 3 行和第 4 行中的数据;

x_1, x_2, x_3 ——对应于第 2 行、第 3 行和第 4 行的未知量。

4 结论

(1) 软土 SEM 图像参数间的相关性不同,偏心率和各向异性率等参数之间具有很好的相关性;周长和离散指数等参数之间具有较好的相关性;面积和离散指数等参数之间具有一定的相关性;而各向异性率和面积等参数之间则不具有相关性。

(2) 根据主因子分析,软土 SEM 图像中土颗粒特征参数可以由区域因子、周长因子和弦因子反映,区域因子反映了内切圆半径等参数;周长因子反映了离散指数等参数;弦因子反映了各向异性率等参数。

(3) 由于土的工程性质取决于土的微观结构,微观参数特征研究对软土微观结构特征和宏观变形机制具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 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 C S, SHI B, WANG B J. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2008, 30(4): 560 - 565. (in Chinese)]
- [2] Shi Bin, Li Sheng-Lin, M Tolkachev. Quantitative approach on SEM images of microstructure of clay soils [J]. Science in China, Series B, 1995, 36(8): 741 - 748.
- [3] 张敏江, 阎婧, 初红霞. 结构性软土微观结构量化参数的研究[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(5): 455 - 458. [ZHANG M J, YAN J, CHU H X. The quantitative analysis of microstructure parameter of soft soil [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2005, 21(5): 455 - 458. (in Chinese)]
- [4] 刘雪梅, 吴长富, 尹小涛. 基于 SEM 试验的粘性土孔隙分形特性研究[J]. 城市勘测, 2008(5): 143 - 145. [LIU X M, WU C F, YIN X T. Study on fractal characteristics of clay pore based on SEM test [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(5): 143 - 145. (in Chinese)]
- [5] 熊承仁, 唐辉明, 刘宝琛, 等. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数[J]. 地球科学 - 中国地质大学学报, 2007, 32(3): 415 - 419. [XIONG C R, TANG H M, LIU B C, et al. Using SEM photos to gain the pore structural parameters of soil samples [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(3): 415 - 419. (in Chinese)]
- [6] 王清, 陈慧娥, 蔡可易. 水泥石微观结构特征的定量评价[J]. 岩土力学, 2005, 24(增1): 12 - 16. [WANG Q, CHEN H E, CAI K Y. Quantitative evaluation of microstructure features of soil contained some cement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 24(s1): 12 - 16. (in Chinese)]
- [7] 周晖, 房营光, 李勇. 珠三角软土微观结构试验分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 24(18): 5397 - 5402. [ZHOU H, FANG Y G, LI Y. Analysis on microstructural characteristics of soft soil in PRD during consolidation test [J]. Science Technology and Engineering 2009, 24(18): 5397 - 5402. (in Chinese)]
- [8] 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, 1(4): 57 - 62. [SHI B. 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. (in Chinese)]
- [9] Wang Bao-Jun, Shi Bin, Hilary I Inyang. GIS-based quantitative analysis of orientation anisotropy of contaminant barrier particles using standard deviational ellipse [J]. Soil and Sediment Contamination, 2008, 17(4): 437 - 447.
- [10] Liu Chun, Shi Bin, Zhou-Jian, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials [J]. Applied Clay Science, 2011, 54: 97 - 106.
- [11] 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 B J, SHI B, CAI Y, 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)]
- [12] Nattaporn P, Anchalee S, Irb K, et al. SEM image analysis for characterization of sand grain in Thai paddy soils [J]. Geodema, 2010, 156: 20 - 31.
- [13] Liu Zhi-bin, Shi Bin, Hilary I I, et al. Magnification effects on the interpretation of SEM images of expansive soils [J]. Engineering Geology, 2005, 78: 89 - 94.
- [14] 王宝军, 张明瑞, 施斌. 基于坡度坡向原理的黏性土扫描电镜图像颗粒定向性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2951 - 2957. [WANG B J, ZHANG M R, SHI B. Quantitative analysis of orientation distribution of soil grains based on slope-aspect theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(s1): 2951 - 2957. (in Chinese)]
- [15] 周翠英, 林春秀. 基于微观结构的软土变形计算模型[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(1): 16 - 20. [ZHOU C Y, LIN C X. Research on deformation deformation calculation model of soil based on microstructure [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(1): 16 - 20. (in Chinese)]

(下转第 109 页)

survey in Hebei Province [R]. 2006. (in Chinese)
 [10] Wei Zhiyuan , Wang Dengfeng. Assessment of Soil
 Heavy Metal Pollution with Principal Component

Analysis and Geoaccumulation Index [J]. Procedia
 Environmental Sciences ,2011 ,10: 1946 – 1952.

Vulnerability evaluation of the Caofeidian coastal area based on coastal vulnerability index method

LIU Hong-wei¹ , SUN Xiao-ming² , WEN Dong-guang³ , FANG Cheng¹ , HU Yun-zhuang¹ , MA Zhen¹
 (1. Tianjin Center of China Geological Survey , Tianjin 300170 , China;
 2. China Geological Survey , Beijing 100037 , China)

Abstract: It is important to understand the degree of vulnerability for sustainable development and disaster prevention in coastal areas. Based on index system including six factors and take the storm surge disaster as an example , this paper examines and evaluates the vulnerability degree of the Caofeidian coastal area. Two kinds of determination weight methods are used to compare the reliability of the vulnerability degree. The results show that the vulnerability of the coastal area is gradually reduced from near-shore to inland; serious vulnerable district and relative vulnerable district mainly occur in the nearshore area , from the Jianhe estuary to the Luannan third saltern and from the Gaoshangpu saltern to the Daqinghe saltern. Storm surge disaster risk and land subsidence rate are the two most important indicators among the index system which may affect the vulnerability of the Caofeidian coastal area.

Key words: coastal vulnerability index; vulnerability; coastal area; Caofeidian

责任编辑:汪美华

(上接第73页)

Microscopic features of scanning electron microscopy images of soft soil

SHI Ai-yong , XU Jin-ming , LI De-ming
 (Department of Civil Engineering , Shanghai University , Shanghai 200072 , China)

Abstract: Soil microstructure has a significant effect on the engineering properties of the soil. In the current study , the images of a soft soil are obtained using the Scanning Electron Microscopy (SEM) technique. After converting the original images into the grayscale and binary ones , the Canny edge detection technique is utilized to detect the particle edges and compute the planar porosity ratio of the soil and the characteristic shape parameters of the particle in the SEM images , including eccentricity , flat circular degree , circular degree , discrete index , radius of inscribe circle. The analysis of correlation and factor analysis between these shape parameters are performed. The results show that some parameters , such as eccentricity and anisotropic rate , has a close correlation; other parameters , such as perimeter and discrete index , has a good correlation; and some parameters , such as anisotropic rate and area , has no correlation. All of the characteristic parameters are reflected by 3 main factors , including the region , perimeter and chord parameters.

Key words: edge detection; characteristic shape parameters; correlation; factor analysis

责任编辑:张明霞