

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0049-04

饱和软土微结构分形特征的试验研究

许 勇, 张季超, 李伍平

(广州大学 土木工程学院, 广州 510006)

摘 要: 分形几何学是研究具有自相似性的不规则曲线、具有自反演性的不规则图形、具有自平方性的分形变换以及具有自仿射的分形集等内容的一种理论, 是岩土微观结构力学研究和应用的新的生长点。将分形几何学的理论运用于饱和软土微结构研究, 关键是获得微结构的参数。利用液氮真空冷冻制样技术、扫描电子显微镜技术和计算机图像处理技术, 对广东科学中心饱和软土颗粒分布分维值和孔隙分布分维值等微结构分形参数进行了提取, 采用回归分析的方法, 对颗粒分布分维值、孔隙分布分维值和孔隙度的关系进行了分析, 明确了颗粒分布分维、孔隙分布分维等微结构参数的分形特征的宏观本质。

关 键 词: 饱和软土; 微结构; 分形特征; 分布分维

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Research on microstructure fractal features of the saturation soft soil

XU Yong, ZHANG Ji-chao, LI Wu-ping

(College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Fractal geometry is a method of discovering the rules such as self-similarity of irregular curves, the self-inverse of irregular figures, the self-squaring of fractal translations, the self-affine of fractal groups and so on. If it applies on the research jobs of micro-structural fractal features, some key-techniques of soil microstructure mechanic would soon be solved. To use the fractal geometry in micro-analysis of saturation soft soil, the most important thing is to get microstructure fractal features parameters such as the fractal dimension of grains, the fractal dimension of holes. With the liquid nitrogen refrigeration sample-made technique, the scan electronic microscope technique (SEM) and the image-processing-analysis and computer-vision technique, 46 group samples' microstructure fractal features parameters of saturation soft soil which withdraw from Guangdong Scientific Center are extracted. By adopting variable gradually linearization regress analyses, the relationship between the fractal features and the porosity are discussed.

Key words: saturation soft soil; microstructure; fractal features; fractal dimension

1 引 言

分形几何学理论是 1975 年由法国数学家 B. B. Mandelbrot 首先提出的, 该理论的主体内容是自相似分形, 即认为维数变化可以是连续的, 不必是整数而可以是分数, 处理的对象只有非规则性和自相似性 (局部是整体成比例缩小的性质)^[1]。借助分形几何学的有关理论, 通过研究岩石力学中的一些具有自相似性的不规则曲线、具有自反演性的不规则图形、具有自平方性的分形变换以及具有自仿射的分形集等内容, 岩石力学理论取得了重大进展。

分形几何学可能是应用于岩土力学研究、解决实际问题 and 开创新局面的一个新的生长点^[2]。

饱和软土微结构分形特征的量化研究尚存在较大的困难。受制样技术的制约, 原状饱和软土的制取是研究工作取得突破性发展的瓶颈。迄今为止, 国内外主要是针对黄土等非饱和土的微结构开展了相应的定性研究^[3]。

20 世纪 90 年代, 真空冷冻制样技术、扫描电子显微镜技术和计算机图像处理技术获得了迅猛的发展, 为进行饱和软土的定量试验研究提供了有力的手段。借助技术, 利用分形几何学的有关理论,

收稿日期: 2007-02-28

基金项目: 广东省重点科技攻关资助项目 (No. 2004B10101048)。

作者简介: 许勇, 男, 1975 年生, 硕士, 讲师, 主要从事软土地基处理研究方面的工作。E-mail: xyjerry1975@126.com

对广东科学中心饱和软土的分形特征（颗粒分布分维特征和孔隙分布分维特征）进行了量化研究探讨。

2 试样的制作及图像处理

2.1 饱和软土液氮真空冷冻制样

为尽量减小制样时对饱和软土试样的扰动，本次试验采用 $\phi 100$ mm 的不锈钢薄壁取土器对广东科学中心试验场地进行钻孔取样，共钻 13 孔，每孔在 2.2~2.5 m, 4.2~4.5 m, 6.2~6.5 m, 8.2~8.5 m, 10.2~10.5 m 深处各取两份试样，一份作常规岩土测试，一份作微结构分析。通过室内土工试验，获得典型土样物理力学指标如表 1 所示。

表 1 典型试样物理力学指标

Table 1 The typical physico-mechanical index of test samples

孔隙度 $n/\%$	塑性 指数 I_p	液性 指数 I_L	压缩 系数 α_{v1-2} /MPa ⁻¹	压缩 模量 E_{s1-2} /MPa	凝聚力 c/kPa	内摩 擦角 $\varphi/(\circ)$	承载力 特征值 f_{ak}/kPa
59.3	16.2	1.54	1.091	2.25	13.2	4.9	70
51.9	10.4	1.40	0.826	2.52	16.2	3.5	90
48.6	12.7	0.75	0.581	3.35	28.5	4.2	125
33.3	8.4	0.31	0.184	8.15	20.4	21.9	300
36.1	7.0	0.96	0.082	19.07	31.9	26.5	220

饱和软土由于含水率较高，如果采用的干燥方法不当，容易产生冻胀或收缩开裂现象，导致试样产生大量微裂纹，使微观结构受到扰动乃至破坏^[4]。为了充分保持饱和软土的天然微结构，制样时使用了“软土微结构真空冷冻制样仪”，利用液氮真空冷冻制样技术制备了 46 组 2 mm × 4 mm × 10 mm 的正梯形截面的饱和软土试样^[5-7]，制样原理如图 1 所示。

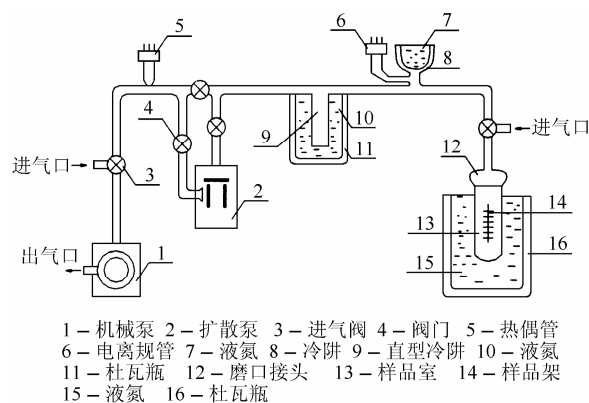


图 1 液氮真空冷冻制样系统示意图

Fig.1 The theory figure of liquid nitrogen vacuum-freeze-sample-made system

2.2 饱和软土微结构照片拍摄

将利用液氮真空冷冻制样技术制备的试样掰开并使其保持自然状态，将自然断面保持向上，选择平整断面用导电胶将其牢固粘贴在样品托板上，并对其进行编号。经过液氮冷冻制样制出的样品非常干燥，导电性差，为了防止拍摄过程中由于电子束轰击试样激起表面粉尘、引起放电现象、污染物镜，保证样品能够在高真空度的电镜室内顺利进行观察和拍照，在上电镜之前，将样品放进真空蒸发镀膜仪进行喷镀金膜，使金粉均匀附在样品表面，喷金厚度为 20~30 nm。

将喷金处理后的 46 组试样放入日本 Hitachi S-3500N 型扫描电镜的电镜室进行观察，每个试样分别拍摄了放大倍数为 3 000 倍和 300 倍的数码照片，共计拍摄 96 幅数码照片。拍摄时选择自然掰断的断面，先在较高放大倍数下找到典型的结构单元体，再逐步降低放大倍数拍摄，以保证所得图像的清晰度。

2.3 饱和软土微结构图像处理

借助计算机图像处理技术中的去噪声、直方图均衡化和直方图规定化等方法对扫描电镜拍摄的照片进行图像预处理，并按照结构要素基本构成的模式进行图像分解、筛选和标定^[6]，最终获取用以进行微结构分形特征研究的图像。

3 微结构分形特征分析

3.1 分维的定义

分形特征通常可以用分维值来表现。分形几何学中的分维通常用 Hausdorff 维数来表示，其具体定义如下：设 E 是一个点集， $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n, I_{n+1}, \dots$ 是一串合在一起能覆盖点集 E 的开区间， α 为大于零的实数， δ 为区间的最大长度。对于点集 E 的 Hausdorff 外测度 $H_\delta^\alpha(E)$ ：

$$H_\delta^\alpha(E) = \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} |I_i|^\alpha : \bigcup_{i=1}^{\infty} I_i \in E, |I_i| \leq \delta \right\} \quad (1)$$

如果存在 D_H ，使得：当 $0 < \alpha < D_H$ 时， $H_\delta^\alpha(E) \rightarrow \infty$ ；当 $D_H < \alpha < \infty$ 时， $H_\delta^\alpha(E) \rightarrow 0$ ，则称这样的 D_H 为点集 E 的 Hausdorff 维数。

分维是立足于自相似性的，因此，对于某一图形，按照某种尺度 ε 可分为 $N(\varepsilon)$ 个各自相似，且与整个图形相似的部分，这个图形的分维值可表示为

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (2)$$

式中： ε 为标度； $N(\varepsilon)$ 为在该标度下所得到的量度值； D 为研究对象的分维。

3.2 分维的算法

式(2)提供了测定微结构分形分维值的方法：测出一系列的 ε 和与之相应的 $N(\varepsilon)$ 。在双对数座标下， $\ln N(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ 直线部分的斜率就是所研究对象的分维值 D 。因此，饱和软土微结构的分形特征参数如颗粒分布分维值 D_{pd} 和孔隙分维值 D_{bd} 的计算方法可以采用表2所示的算法。

表2 微结构分维算法简表
Table 2 The microstructure fractal dimensions calculation method

结构参数	数学模型	ε /nm	$N(\varepsilon)$ /个
D_{pd}	$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$	图像分割 网格边长	对应于 ε 的图像上 含有颗粒网格总数
D_{bd}	$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$	图像分割 网格边长	对应于 ε 的图像上 含有孔隙网格总数

3.3 颗粒分布分维特征

根据表2给出的分维的有关算法，绘制出饱和软土试样的有关 $\ln N(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ 散点图，这里 ε 为网格边长， $N(\varepsilon)$ 为相应于 ε 的平面格网中含有颗粒的网格总数。图2为所取饱和软土试样典型颗粒分布分维散点图。分析结果表明，所取46组饱和软土试样的 $\ln N(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ 曲线均具有稳定且良好的线性段，且区间范围（即无标度区）较大。因此，颗粒分布具有明显的分形结构特征。

由式(2)可以计算出所取的46组饱和软土试样的颗粒分布分维值，将颗粒分布分维值随孔隙度变化的规律绘制成图3。由图可见：

(1)饱和软土颗粒分布的分维值一般在1.65~1.90之间，变动范围为0.25左右，其均值为1.7901。

(2)颗粒分布分维值与孔隙度具有较好的线性关系（ $R^2 = 0.6463$ ），其线性关系可以表示为

$$D_{pd} = 2.0388 - 0.0049n \quad (3)$$

式中： n 为孔隙度。

(3)随着孔隙度的减小，颗粒分布分维值呈增大趋势。

(4)颗粒分布分维值是土体密度的微观表

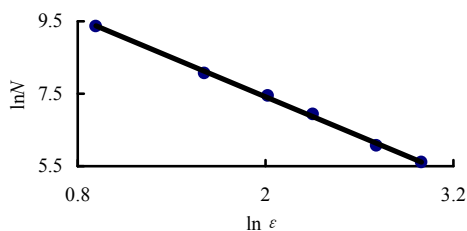


图2 典型颗粒分布分维散点图
Fig.2 The chart of grain fractal dimension

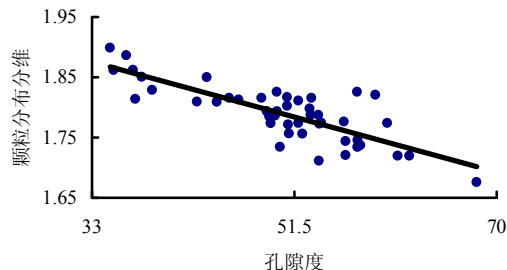


图3 颗粒分布分维值随孔隙度变化规律图
Fig.3 The relationship between grain fractal dimension and porosity

现，其值越高，反映土体的密实度越大，颗粒分布形态越复杂。

3.4 孔隙分布分维特征

根据表2的有关算法，可得饱和软土试样有关的典型 $\ln N(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ 散点图如图4所示。图中 ε 为网格边长， $N(\varepsilon)$ 为相应于 ε 的平面格网中含有孔隙的网格总数。由图4可知，所取46组饱和软土的 $\ln N(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ 曲线具有稳定且良好的线性段，这说明饱和软土孔隙分布与颗粒分布相似，具有明显的分形结构特征。

由式(2)可以计算出所取的46组饱和软土试样的孔隙分布分维值，将孔隙分布分维值随孔隙度及取样深度的变化规律绘制成图5和表3。由图和表可见：

(1)饱和软土孔隙分布的分维值一般在1.61~1.91之间，变动范围为0.3左右，其均值为1.7696。

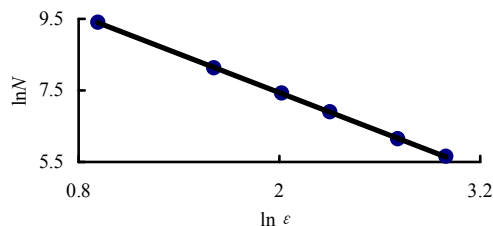


图4 典型孔隙分布分维散点图
Fig.4 The chart of hole fractal dimension

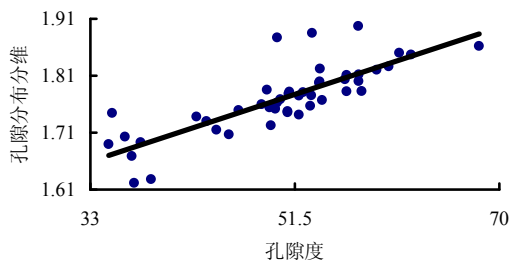


图5 孔隙分布分维值随孔隙度变化规律图
Fig.5 The relationship between hole fractal dimension and porosity

表 3 土体孔隙分布分维值
Table 3 The hole fractal dimension of soft soil

取样点	深度/ m				
	2.3~2.5	4.3~4.5	6.3~6.5	8.3~8.5	10.3~10.5
ZK1-1	/	1.768 3	/	1.782 7	1.782 4
ZK1-2	1.869 2	1.828 2	/	1.897 1	1.689 5
ZK2-1	/	1.749 2	/	1.775 3	1.668 5
ZK2-2	1.714 7	/	1.797 4	1.756 8	/
ZK3-1	/	1.758 0	/	/	/
ZK3-2	1.799 7	/	1.783 6	1.702 6	1.627 9
ZK4-1	1.762 6	1.737 9	1.785 0	1.621 3	/
ZK4-2	1.755 9	1.706 7	1.778 2	1.692 9	/
ZK5-1	1.803 5	1.800 3	1.884 9	/	/
ZK5-2	1.767 0	1.846 5	1.876 9	1.846 9	/
ZK6	1.780 7	1.722 5	1.812 0	1.772 8	/
ZK7	1.820 2	1.850 0	1.751 7	/	/
ZK8	1.861 9	1.822 2	1.781 8	1.826 2	/

(2) 孔隙分布分维值与孔隙度有较好的线性关系 ($R^2 = 0.6581$), 其线性关系可以表示为

$$D_{bd} = 1.449 + 0.064n \quad (4)$$

式 (4) 表明: 随着孔隙度的减小, 孔隙分布分维值呈减小趋势。因此, 孔隙分布分维值是饱和软土密实程度的表现, 土体越密实, 孔隙分布分维值就越小。

(3) 孔隙发育程度越低, 密度越大, 孔隙度越小, 孔隙分布分维值就越小。

4 结 论

通过联合运用饱和软土液氮真空冷冻制样技术、扫描电子显微镜技术和计算机图像处理技术, 对 46 组饱和软土试样开展微结构分形参数变化研究分析, 可以得出以下主要结论:

(1) 饱和软土微结构实质上是一种物质状态, 是指饱和软土颗粒排列形式、颗粒形态及孔隙的排列、形状等的组合形式, 可以用孔隙度、颗粒分布分维值、孔隙分布分维值等状态参数加以确定。

(2) 饱和软土微结构分形参数存在着统计意义上的层次性和自相似性, 具有较为明显的分形特征, 可以利用分形分维参数对饱和软土微结构进行量化处理。

(3) 颗粒分布分维值和孔隙分布分维值均与饱和软土的孔隙度存在较好的线性回归关系。颗粒

分布分维值与孔隙度存在显著的负相关性, 孔隙分布分维值与孔隙度存在显著的正相关性, 这说明随着孔隙度的减小, 饱和软土的孔隙分布分维值将减小, 颗粒分布分维值将增大, 土体将变得密实。

参 考 文 献

- [1] 肯尼恩 J. 法尔科内[英]. 分形几何学—数学基础及其应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2001.
Kenneth J. Falconer. Fractal Geometry-Mathematical Foundations and Applications[M]. Shenyang: North-eastern University Press.
- [2] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科技出版社, 1996.
- [3] 胡瑞林, 王思敬. 21 世纪工程地质学生长点: 土体微结构力学[J]. 水文地质工程地质, 1999(4): 5—8.
HU Rui-ling, WANG Si-jing. A growing point of engineering geology in 21st century soil micromechanics[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1999(4): 5—8.
- [4] 刘惠珊, 徐攸在. 地基基础工程 283 问[M]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- [5] 陈嘉鸥, 叶斌. 珠江三角洲软土 SEM 微结构定量研究[J]. 电子显微学报, 2001, (1): 72—75.
CHEN Jia-ou, YE Bin. Quantitative analysis of SEM image of soft ground microstructure in Zhujiang delta[J]. **Journal of Chinese Electron Microscopy Society**, 2001, (1): 72—75.
- [6] 张季超, 许勇. 广东科学中心饱和软土微结构定量分析[J]. 建筑科学, 2005(3): 34—38.
ZHANG Ji-chao, XU Yong. Quantitative analysis of saturation soft soil microstructure for Guangdong Scientific Center[J]. **Building Science**, 2005(3): 34—38.
- [7] 柴寿喜, 韩文峰. 用冻干法制备微结构测试用土样的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, (2): 46—48.
CAI Shou-xi, HAN Wen-feng. Experiment on artificially-prepared clay samples by freeze-drying for SEM[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2005, (2): 46—48.