

DOI: 10.11779/CJGE2020S2030

# 基于数字图像技术的黏性土颗粒形状分析

王雪奎<sup>1,2</sup>, 李东军<sup>1</sup>, 朱耀庭<sup>1</sup>, 张嘉莹<sup>1</sup>, 袁方龙<sup>1</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

**摘要:** 土的宏观物理力学性质与其微观颗粒形状有着密切的关系, 以天津港地区的典型黏性土为研究对象, 采用数字图像技术对其颗粒形状特性进行了分析研究, 得到以下结论: ①土样的长径比主要集中到1~2, 并且随着细颗粒含量的增加, 土颗粒整体的长径比逐渐降低, 细长形的颗粒逐渐减小, 土颗粒越趋向于规则状; ②土样的圆形度主要集中在0.9~1.0, 并且颗粒越细, 土样的整体圆形度越大, 土颗粒的形状越趋向于圆形; ③土样具有较好的粗糙度分形特性, 并且颗粒越细, 这种分形特性表现的越明显, 其中黏土、粉质黏土、粉土的颗粒表面粗糙度分形维数分别为0.9590, 0.9574, 0.9654, 这说明土颗粒越细, 其表面起伏越小, 表面越光滑。

**关键词:** 形状参数; 数字图像技术; 黏性土; 分形特性

中图分类号: TD32 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0168-04

作者简介: 王雪奎(1989—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事土工试验技术及地基处理研究。E-mail: 454917485@qq.com。

## Particle shape analysis of clay based on digital image technology

WANG Xue-kui<sup>1,2</sup>, LI Dong-jun<sup>1</sup>, ZHU Yao-ting<sup>1</sup>, ZHANG Jia-ying<sup>1</sup>, YUAN Fang-long<sup>1</sup>

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2.CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** The macro-physical and mechanical properties of clay are closely related to its micro-particle shape. The typical soft clay in Tianjin Port area of China is taken as the research object, and its particle shape characteristics are analyzed and studied by the digital image technology. The main conclusions are as follows: (1) The ratio of long to short diameter of soil samples is mainly concentrated between 1 and 2, and the ratio of soil particles gradually decreases with the increase of fine particle content. Moreover the slender particles gradually decrease, and the soil particles tend to be regular. (2) The roundness of soil samples mainly concentrates between 0.9~1.0, and the finer the particles, the larger the overall roundness of soil samples, the more rounded the shape of soil particles. (3) The fractal dimension of the surface roughness of clay, silty clay and silt is 0.9590, 0.9574 and 0.9654, respectively, which indicates that the finer the soil particles are, the smaller the surface fluctuation is and the smoother the surface is.

**Key word:** shape parameter; digital image technology; clay; fractal characteristic

## 0 引言

中国沿海地区分布着广泛的黏性土, 其工程性质与土颗粒的形状、大小和级配等有着密切的关系<sup>[1]</sup>。根据前人的研究<sup>[2-4]</sup>, 颗粒的形状特征主要表现在3个方面: ①颗粒的伸长属性, 反映颗粒整体上接近柱形、长条形、方形等特征; ②颗粒的边界数目和形态, 反映颗粒在几何特征上的边数、边边关系等; ③边界曲线特征, 反映颗粒间的咬合能力和空间填充能力。目前大部分的研究<sup>[5-7]</sup>主要集中在分析土颗粒和孔隙的空间分布或非黏性土的形状参数上, 对黏性土的形状分析尚不多。

本文通过选取天津港地区的典型黏性土, 采用数字图像技术, 开展颗粒形状分析试验, 对土颗粒的面

积、周长、直径、长径比、圆形度、分形维数等参数进行统计分析, 为黏性土的微观分析积累经验, 也为黏性土的宏观力学特性研究和地基加固技术提供参考。

## 1 颗粒形状参数定义

颗粒形状参数的定义目前尚无统一标准, 在工程中, 人们通常用球状、多角状、纤维状、粒状、针片状、粒状、不规则状等术语进行描述<sup>[8]</sup>, 但这种描述基本都是定性的, 难以进行定量分析。因此, 本文通过综合分析以往颗粒形状分析的研究成果, 特定义以

以下几个形状参数, 以便提取颗粒的形状信息进行定量描述。

### 1.1 长径比

长径比为颗粒投影的最大直径和最小直径之比,

$$\alpha = \frac{L}{B} , \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为长径比,  $L$  为颗粒投影的最大直径,  $B$  为颗粒投影的最小直径。

长径比可以反映颗粒的伸长属性, 即颗粒整体上接近圆形、长条形、方形的程度。长径比可以粗略的描述颗粒的形状, 在以往的研究中得到大量的应用, 一般颗粒越接近方形或圆形, 其值越接近于 1, 颗粒越狭长, 其值越大。

### 1.2 圆形度

圆形度为颗粒投影的等效面积圆周长与颗粒投影的实际周长之比,

$$\theta = \frac{2\sqrt{\pi A}}{P} , \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为圆形度,  $A$  为颗粒等效面积,  $P$  为颗粒投影的边界轮廓周长。

圆形度可以整体上描述颗粒的形貌特征, 一般颗粒越接近标准圆形, 其值越接近于 1, 颗粒越偏离圆形或者边界轮廓起伏越大(包含突出棱角), 其值越小。

### 1.3 颗粒表面粗糙度分形维数

分形理论<sup>[9]</sup>是用来描述自然界中不规则图形和混乱现象的强有力的数学工具, 自引入岩土工程领域后, 取得了一系列的研究成果<sup>[10-13]</sup>。在颗粒的形状分析方面, 分形理论被认为是可以定量描述颗粒轮廓复杂程度的重要方法, 其分形维数表示颗粒轮廓线的不平整程度或粗糙度, 分形维数越大, 颗粒表面越粗糙。目前常用的获取分形维数的方法主要分为两种: 固定尺码法和变尺码法。其中固定尺码法又分为周长—最大直径法、周长—面积法、计盒法等。本文采用周长—面积法获取颗粒表面粗糙度的分形维数。对于形状不规则的几何图形, 根据分形理论, 其周长和面积存在如下关系:

$$c = \frac{P^{1/D_R}}{A^{1/2}} , \quad (3)$$

式中,  $c$  为常数,  $A$  为颗粒等效面积,  $P$  为颗粒投影的边界轮廓周长,  $D_R$  为分形维数。

对式(3)两边取对数可得

$$D_R = 2k , \quad (4)$$

式中,  $k$  为直线  $\lg P - \lg A$  的斜率。

## 2 颗粒形状分析试验

### 2.1 试验土样

试验用的 3 种土样按照通常的土样分类标准, 可大致分为黏土、粉质黏土、粉土 3 类, 其具体的物理性质指标如表 1 所示。3 种土样的颗粒级配如表 2 所示。

表 1 试验土样的物理性质指标

Table 1 Physical properties of test soil samples

土样	含水率 /%	湿密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
黏土	43.1	1.77	46.7	22.1	24.6
粉质黏土	34.9	1.84	35.1	18.8	16.3
粉土	25.0	1.95	20.2	14.5	5.7

表 2 试验土样的颗粒级配

Table 2 Grain-size distribution of test soil samples

土样	粒径级/mm			
	<0.002	<0.005	0.005~0.075	>0.075
黏土	18.91	46.14	45.57	8.29
粉质黏土	8.10	19.34	66.15	14.51
粉土	3.05	5.57	66.64	27.79

### 2.2 试验过程

试验采用国内某公司生产的激光图像粒度粒形分析仪, 其设备主要由自动循环分散系统、Led 光源、光学显微镜、CCD 摄像机、计算机采集系统组成, 可对颗粒边缘进行自动识别并强化, 操作方便、重复性较好。

试验时, 以纯净水为介质, 并加入 4% 浓度的六偏磷酸钠做为分散剂, 将土样加水稀释成泥浆, 开启超声波分散系统, 然后通过循环系统使得土颗粒形成稳定的颗粒流; 当土颗粒通过观测窗口时, Led 光束照射土颗粒上, 通过光学显微镜将待测的微小颗粒放大, 并成像在 CCD 像机的光敏面上, CCD 像机将光学信号转换为数字信号并传递给计算机系统; 计算机收到数字化的显微图像信号后, 将图像进行增强处理, 然后转化成黑白的二值化图像, 并提取颗粒的边界轮廓特征; 最后, 通过系统计算软件, 计算出颗粒轮廓投影的周长(像素数)、面积(像素数)、长轴短轴(像素数), 并根据仪器的放大倍数计算出颗粒的周长、面积、长径、短径、长径比、圆形度、等效直径等参数。

## 3 试验结果分析

### 3.1 长径比

图 1 给出了土颗粒的长径比分布, 从图中可以看出, 天津港地区的典型黏性土由于沉积环境和颗粒组成比较复杂, 其颗粒长径比分布跨度比较大, 从 1 到 7 都有分布, 但长径比主要集中在 1~2, 并且随着土

样中细颗粒含量的增加, 其长径比更趋向于集中到1~2, 这表现为黏土长径比在1~2区间的颗粒所占比例最大, 粉质黏土次之, 粉土最小。进一步分析, 黏土、粉质黏土、粉土的平均长径比分别为1.56, 1.58, 1.65, 这说明随着土样中细颗粒含量的增加, 土颗粒整体的长径比逐渐降低, 细长形的颗粒逐渐减小, 土颗粒越趋向于规则状。

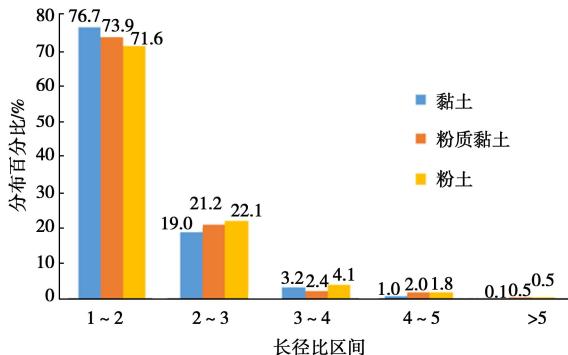


图1 土颗粒长径比分布图

Fig. 1 Distribution of long-short diameter ratio of soil particles

### 3.2 圆形度

图2给出了土颗粒的圆形度分布, 从图中可以看出, 各土样的圆形度分布范围为0.4~1.0, 主要集中在0.9~1.0, 并且随着土样中细颗粒的增加, 圆形度更集中于0.9~1.0。进一步分析, 黏土、粉质黏土、粉土的平均圆形度分别为0.91, 0.89, 0.88, 这说明颗粒越细, 土样的整体圆形度越大, 土颗粒的形状越趋向于圆形。

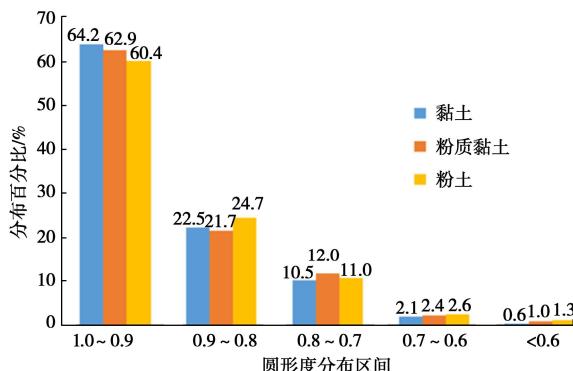


图2 土颗粒圆形度分布图

Fig. 2 Distribution of roundness of soil particles

### 3.3 颗粒表面粗糙度分形维数

根据颗粒表面粗糙度分形理论, 图3给出了各土样颗粒的周长与面积对数关系, 表3进一步给出了各土样粗糙度分形维数统计。从图表中可以看出, 天津港地区的典型黏性土具有比较好的分形特性, 黏土、粉质黏土、粉土的颗粒表面粗糙度分形维数分别为0.9590, 0.9574, 0.9654, 这说明土颗粒越细, 其表面起伏越小, 即表面越光滑, 颗粒形状越接近于圆形。

同时, 黏土、粉质黏土、粉土的周长与面积对数关系的相关系数分别为0.9176, 0.8912, 0.8660, 这说明颗粒越细, 其相关关系越明显, 颗粒的分形特性表现的也越明显。需要指出的是本文采用周长-面积法所得到的颗粒表面粗糙度分形维数仅具有统计学意义上的分形维数, 反映的是颗粒之间的统计自相似性, 不同于颗粒自身的严格意义上的自相似性。

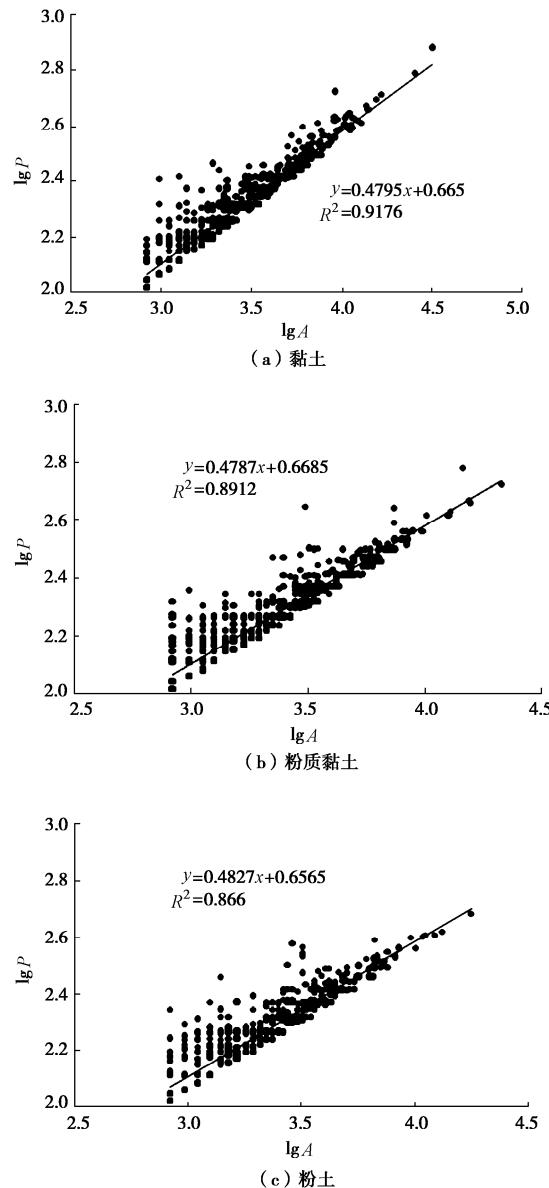


图3 土颗粒的周长与面积对数关系

Fig. 3 Logarithmic relationship between perimeter and area of soil particles

表3 土颗粒表面粗糙度分形维数

Table 3 Fractal dimensions of surface roughness of soil particles

土样类别	斜率 $k$	分形维数 $D_R$	相关系数 $R^2$
黏土	0.4795	0.9590	0.9176
粉质黏土	0.4787	0.9574	0.8912
粉土	0.4827	0.9654	0.8660

## 4 结 论

本文采用数字图像技术对我国天津港地区的典型黏性土开展了颗粒形状分析试验, 并对土样的长径比、圆形度、粗糙度分形维数进行了统计分析, 主要得到以下结论。

(1) 天津港土样的长径比主要集中到 1~2, 其中黏土、粉质黏土、粉土的平均长径比分别为 1.56, 1.58, 1.65, 这说明随着土样中细颗粒含量的增加, 土颗粒整体的长径比逐渐降低, 细长形的颗粒逐渐减小, 土颗粒越趋向于规则状。

(2) 土样的圆形度主要集中在 0.9~1.0, 其中黏土、粉质黏土、粉土的平均圆形度分别为 0.91, 0.89, 0.88, 这说明颗粒越细, 土样的整体圆形度越大, 土颗粒的形状越趋向于圆形。

(3) 土样具有较好的粗糙度分形特性, 并且颗粒越细, 这种分形特性表现的越明显, 其中黏土、粉质黏土、粉土的颗粒表面粗糙度分形维数分别为 0.9590, 0.9574, 0.9654, 这说明土颗粒越细, 其表面起伏越小, 表面越光滑。

## 参考文献:

- [1] 施斌. 黏性土微观结构研究回顾与展望[J]. 工程地质学报, 1996(1): 39~44. (SHI Bin. Review and prospect on the microstructure of clayey soil[J]. Journal of Engineering Geology, 1996(1): 39~44. (in Chinese))
- [2] 涂新斌, 王思敬. 图像分析的颗粒形状参数描述[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 659~662. TU Xin-bin, WANG Si-jing. Particle shape descriptor in digital image analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 659~662. (in Chinese))
- [3] 周健, 余荣传, 贾敏才. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2047~2052. (ZHOU Jian, YU Rong-chuan, JIA Min-cai. Microstructure parameters measurement for granular soil model using digital image technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2047~2052. (in Chinese))
- [4] HYSLIP James P, VALLEJO Luis E. Fractal analysis of the roughness sand size distribution of granular materials[J]. Engineering Geology, 1997, 48: 231~243.
- [5] ALTUHAFI F, O SULLIVAN C, CAVARRETTA I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(8): 1290~1307.
- [6] YANG J, LUO X D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 84: 196~213.
- [7] KUO C Y, FOST J D, A CHAMEAU J L. Image analysis determination of stereology based fabriktensors[J]. Géotechnique, 1998, 48(4): 515~525.
- [8] 曾凡, 胡永平, 杨毅, 等. 矿物加工颗粒学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 19~20. (ZENG Fan, HU Yong-ping, YANG Yi, et al. Particle Technology of Mineral Processing[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 19~20. (in Chinese))
- [9] MANDELBORT B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. New York: W H Freeman, 1982.
- [10] 田堪良, 张惠莉, 张伯平, 等. 天然沉积砂卵石粒度分布的分形结构研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 85~89. (TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, ZHANG Bo-ping, et al. Fractal structure of granularity distribution of natural sedimentary sandy gravel[J]. Journal of Northwest Science Technology University of Agriculture and Forest, 2002, 30(5): 85~89. (in Chinese))
- [11] 谢和平. 分形——岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (XIE He-ping. Fractal Theory—Introduction to Rock Mechanics[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 1997. (in Chinese))
- [12] 陈江峰, 王振芬, 闫纯忠. 碎屑颗粒圆度的分形描述[J]. 煤田地质勘探, 2002, 30(4): 16~17. (CHEN Jiang-feng, WANG Zhen-fen, YAN Chun-zhong. Fractal description of roundness of clastic particles[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(4): 16~17. (in Chinese))
- [13] 陈海洋, 汪稔, 李建国. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389~1392. (CHEN Hai-yan, WANG Ren, LI Jian-guo. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1389~1392. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)