

黄河水下三角洲海底粉土微观结构 分形特征研究

焦鹏飞, 孙永福, 刘晓瑜, 宋玉鹏, 周其坤, 杜 星

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛, 266061)

摘 要:以黄河水下三角洲海底粉土为研究对象, 基于扫描电子显微镜技术获得了大量的海底粉土 SEM(scanning electron microscopy)图像, 综合运用 Image-Pro Plus(IPP)和 Photoshop 图像处理软件来提取粉土的微观结构参数, 以分形理论为指导, 运用“周长-面积法”对海底粉土进行了分形特征研究, 分析了阈值、放大倍数对粉土分形维数的影响及确定方法, 并探讨了分形维数的环境及工程地质意义。研究结果表明, 黄河水下三角洲海底粉土的颗粒及孔隙具有特殊的分形特征, 分形维数为 1.6~1.8; 不同分形值在一定程度上反映了波浪扰动强度的不同; 分形维数可以表征抗剪强度参数, 粉土的黏聚力和内摩擦角随分形值的增大而增大。

关键词:海底粉土; SEM; 图像处理; 分形分维

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)04-0503-09

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.04.007

土的微观结构概念最早是在 1925 年由土力学的始祖 Terzaghi 提出并用于黏性土的工程地质性质评价的^[1]。随着技术的发明与进步, 人们逐渐意识到, 相对于关注较多的土的宏观结构, 土的微观结构更能从本质和机理上解释土的工程地质性质。土微观结构的研究建立在微观结构信息获取技术的发展之上。从最初借助于光学显微镜到后来电子显微镜的运用, 尤其是在扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)技术发明之后, 对土微观结构的研究也由定性研究逐渐过渡到定量研究, 并取得了丰硕的研究成果^[2-10]。目前, 基于 SEM 技术的土体微观结构研究逐渐成为岩土工程中最有效、最直接的方法^[2], 而合理地获取 SEM 图像信息, 建立微观结构与力学性质的关系, 并将其应用于理论研究和工程实践一直是该领域的研究难点^[8]。

分形理论是研究复杂物体形态和分布特征的有效方法, 最初由数学家 BENOIT 于 1975 年提出^[11], 之后很多学者将其运用到工程技术、物理、化学、生物医学、材料科学等多个学科的研究领域^[12]。近年来这一理论也被广泛用于土的微观结构研究中, 并取得了不少的研究成果^[13-20]。如 Moore 和 Donaldson 等在分析了大量砂土的微结构照片后得出砂土颗粒形态具有分形特征, 且分形维数为 1~2 的结论^[13]。王宝军等基于 GIS 软件研究了黏性土的 SEM 图像, 论证了黏性土颗粒的分布符合分形特征且分形维数 1~2, 并分析了分形维数与土体微观结构类型间的关系^[14]。徐永福等由非饱和土孔隙分布的分形模型导出了非饱和土的水分特征曲线、渗透系数、剪切强度的表达式, 并用已有的经验公式和试验数据进行了验证^[15]。任权等研究了动荷载作用下黄土变性前后孔隙的分形特征, 揭示了分形分维同孔隙比之间有近似直线关系^[16]。王宝军等应用 GIS 对黏性土颗粒形态进行了三维分形研究, 认为表面积-体积法更能够反应土体的三维特性^[17]。

收稿日期: 2016-09-05

资助项目: 国家海洋公益性行业科研专项——近海海底地质灾害预测评价及防控关键技术研究(201005005); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目——海底地质灾害监测预警与评估关键技术预研究(2015ASKJ03); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——北黄海海底麻坑群精细地貌特征研究及成因分析(2015G15); 国家自然科学基金项目——基于形态学特征和声学探测技术的北黄海海底麻坑群成因研究(41506069)

作者简介: 焦鹏飞(1990-), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail: jiaopf_2016@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

刘玉松等对软黏土、黄土及海相软土的孔隙进行了分形研究,发现 3 种土的孔隙分布均是分形结构并存在多重分形特征,并指出了孔隙分布之分维变化与土体演化存在密切关系^[19]。王俊超等对黄河三角洲北部潮坪上的原状土样进行了粒度成分测试,并利用分形理论进行了微观结构分析,发现粒度分维值和颗粒分布分维随深度变化呈现不同的变化特征,进而反映了沉积物的层化现象^[20]。

综上可知,前人已经研究了砂土和黏性土微观结构的分形研究,但对于粉土的研究较少。而粉土是介于砂土与黏性土之间的一种特殊土体,其物质组成和颗粒形态与前两者有显著的区别,其分形特征也具有特殊性。本文基于前人对于土微观结构分形特征的研究方法及理论基础,采用在复杂水动力环境下形成的黄河水下三角洲海底粉土为研究对象,综合应用 Photoshop 图像处理软件和 IPP(Image-Pro Plus)图像信息测量采集软件,分别考虑了阈值、放大倍数等因素对其进行微观结构分形特征研究,具有重要的环境意义和工程地质意义。与前人只对颗粒或者孔隙其中一种目标进行分形特征研究不同,我们同时考虑了颗粒和孔隙的分形特征研究,从而使得到的结果更准确可靠;另外,前人研究一般采用重塑土,本次研究对象为 4 个不同站位钻孔取样获得的原状海底粉土,对不同深度和层位土体进行全面分析,以期能为不同类型土的分形研究以及黄河水下三角洲粉土的力学性质研究提供参考。

1 研究方法

1.1 样品的制备及 SEM 图像的获取

通过钻机钻孔取得黄河水下三角洲的原状海底粉土,取部分土样用于 SEM 图像的获取。本次研究采用了 4 个不同的钻孔样品,钻孔号分别为 K1,K2,K7 和 K8(图 1)。根据浅地层剖面解译资料,K1,K2 和 K7 钻孔位于非扰动区,K8 钻孔位于扰动区。各钻孔的取样深度如表 1 所示。每个深度的样品分别进行了 500 倍、800 倍、1 000 倍三种放大倍数的扫描处理,每个放大倍数进行 3 次扫描作为对比,最终我们获取了 422 张 SEM 图像。

样品的制备过程会直接影响 SEM 照片能否真实反映样品的微观结构特征,因此制样过程的操作规范性对于研究结果的精确度至关重要。为了保证粉土的原始真实状态,本次研究采用冷冻真空干燥法进行粉土样品制备。对制备好的样品进行扫描断面的制作,与其他材料采用的切割法不同,粉土样品采用自由断裂的方法制成,目的是保证土颗粒与孔隙的原始真实形态,减小对颗粒及孔隙结构参数的影响。

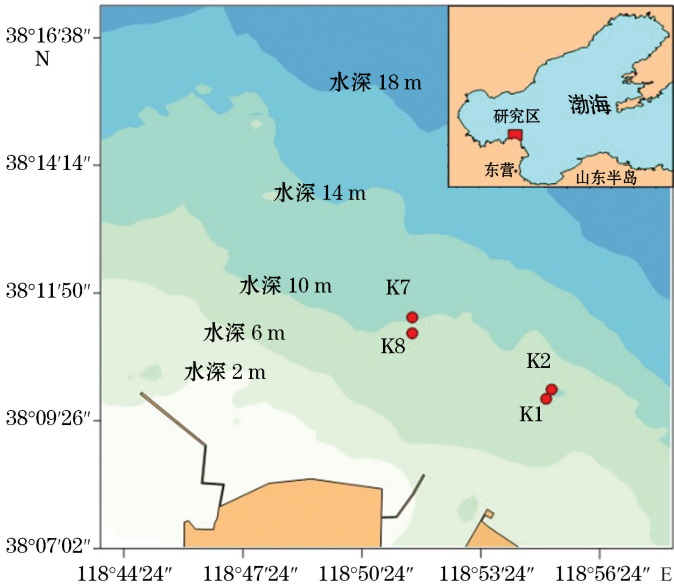


图 1 钻孔位置图

Fig.1 Location of boreholes in the Yellow River submerged delta

表 1 各钻孔取样深度表
Table1 Sampling depths of boreholes

钻孔号		取样深度/m									
K1	0.3	0.5	1.0	1.6	2.0	2.5	3.0	3.6	4.0	4.5	5.0
K2	0.3	0.5	1.1	1.5	2.1	2.5	3.1	3.6	4.0	4.5	5.0
K7	—	0.6	1.0	1.6	—	2.6	3.0	3.6	4.0	4.5	5.0
K8	0	0.6	1.0	1.4	—	—	3.0	3.6	4.0	4.5	5.0

注:“—”表示无数据

1.2 SEM 图像预处理

对于采用场发射扫描电镜获得的 SEM 图像要进行降噪、裁剪、二值化分割等的预处理,确保参数提取的准确性。降噪的目的是提高 SEM 图像的质量,利用 Photoshop 实现该过程。获得的 SEM 图像都含有标签栏,其用于说明图像的采集信息,二值化前要将其裁剪掉,以免对参数的提取造成不必要的误差。前人的研究中,由于技术原因,往往忽略了这一点对试验结果可靠性的影响。二值化的基本过程就是通过确定某一阈值,将高于此阈值的部分划为白色,反之划为黑色,白色部分表示颗粒,黑色部分代表孔隙(图 2)。二值化分割的目的是将粉土颗粒与孔隙分离开来,便于各自结构参数的提取。

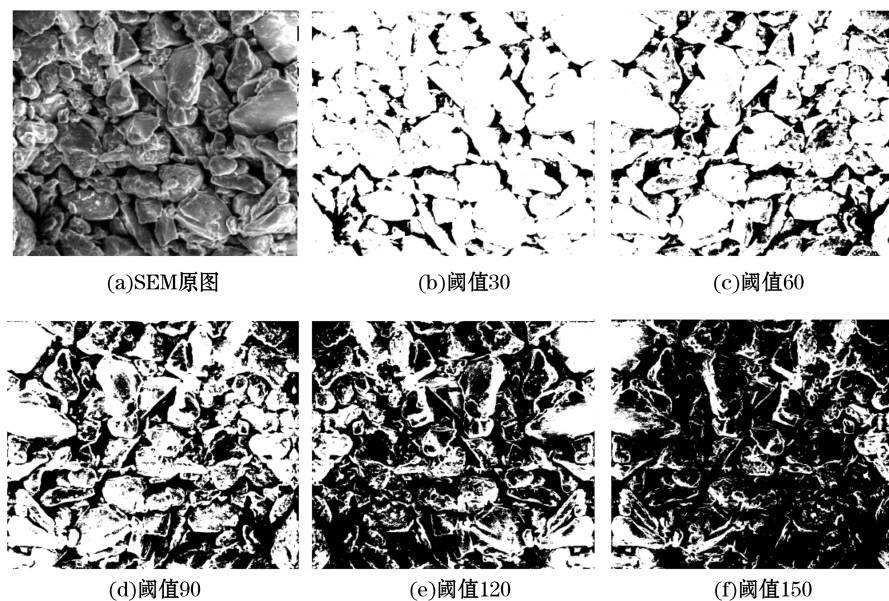


图 2 SEM 原图及各阈值二值化图

Fig.2 SEM original image and binary images with different thresholds

1.3 微观结构参数的提取

IPP 软件具有强大的 SEM 图像处理功能,它可以读取多种格式图像,可以对点、线、面积等多种参数自动识别以及图像区域、临界边缘的自动分离与识别。本次研究中,IPP 不仅可以识别 SEM 图像格式以及经过 Photoshop 二值化处理的图像格式,还可以准确标注比例尺,实现像素到长度单位的转换,使得到的面积及周长参数为实际大小。最为关键的是它可以同时选择颗粒和孔隙两种测量目标,并可以同时测量提取多种参数,诸如面积、周长、直径、平均直径等参数。

1.4 分形维数的计算方法

分形维数是分形特征的表现形式,以符号 D 表示。分形维数的计算,采用的是 Moore 和 Donaldson 提出的周长-面积法^[13]。如果土颗粒或孔隙的形态满足分形特征,则其面积和周长关系:

$$\lg P = D/2 \times \lg A + C, \quad (1)$$

式中, P 为 SEM 中颗粒或孔隙形态的周长, A 为颗粒或孔隙的面积, C 为常数, D 为颗粒或孔隙形态的分形维数。

应用上述颗粒及孔隙结构参数的提取方法得到的周长 P 和面积 A 的数据,并分别绘制 $\lg P$ - $\lg A$ 双对数趋势线图(图 3),则分形维数 D :

$$D = 2 \times K, \quad (2)$$

式中, K 为趋势线的斜率。运用线性回归分析软件即可得到斜率 K 的值, 进而得到分形维数 D 的值。

2 海底粉土的物理力学性质

黄河水下三角洲海底粉土位于老黄河口水深 5~10 m 之间的区域。本次研究中 4 个钻孔取得的原位土样也做了室内土工试验, 得到了土样的物理力学参数, 如表 2 所示。对土样颗粒分析可知, 粒度主要以 0.005~0.075 mm 的粉粒为主, 含量超过 80%, 因此定名为粉土。粉土中黏粒含量较少, 以骨架状结构为主, 因而构成松散而均匀的孔隙。由于沉积环境不同于陆地, 较高的孔隙比、高含水率(大于 25%)、高饱和度(大于 90%)以及低塑性指数是海底粉土的特点。

表 2 粉土的物理力学指标

Table 2 Physico-mechanical properties of silt

土样编号	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	干密度 $\rho_d/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重 G_s	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 $I_P/\%$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/^\circ$
K1	26.08	1.96	1.56	2.69	0.73	94.89	28.22	7.56	17.61	20.01
K2	25.91	2.00	1.59	2.68	0.69	98.40	28.00	7.20	17.76	20.44
K7	27.05	1.94	1.53	2.69	0.77	94.88	28.30	7.29	14.86	18.59
K8	25.30	1.97	1.57	2.68	0.71	96.00	27.50	6.77	15.30	19.67

3 相关参数的选择

3.1 阈值确定

SEM 成像的基本原理是利用聚集成极细的电子束轰击样品的表面并在表面的不同部位进行扫描, 高能电子束在样品表面扫描时通过电子对样品表面的轰击作用而激发出二次电子, 通过对二次电子的收集、放大和显示成 SEM 图像从而获得样品表面的形态特征。SEM 图像为灰度图, 它是因为在接受反射回来的二次电子时, 接受面不变, 而由于颗粒表面与孔隙到接受面之间的距离不同, 而呈现出不同的灰度。颜色的深浅由灰度来表达, 不同的灰度由不同的阈值控制, 阈值的取值范围是 0~255, 取最小值代表的灰度在最亮处表现为白色, 随阈值的增大颜色由白变黑。阈值是划分颗粒与孔隙的界限, 阈值的大小决定了 SEM 图像中土的颗粒形态及孔隙形态, 阈值越大使得孔隙比增大, 阈值越小使得孔隙比越小, 因此, 需要合理的选取阈值的大小, 使其能准确反映颗粒和孔隙的大小及形态。本次研究发现, 阈值的试验范围应在 30~150 之间做进一步确定。阈值小于 30 时颗粒重叠连结情况比较严重, 而大于 150 时, 孔隙的面积比实际孔隙要大出很多(图 2)。在阈值 30~150 的范围内, 间隔值为 10 进行试验。结果显示颗粒及孔隙分维值随阈值变化都不明显, 且在阈值 90 左右两者的分维值十分接近, 稳定在 1.7 左右(图 4)。同时考虑孔隙比的影响, 孔隙比随阈值变大而随之增大(图 5), 由土工试验测得以及经验可知粉土的孔隙比在 0.7 左右^[1]。因此综合考虑分维值稳定性和孔隙比的大小, 最终确定选取的阈值为 90, 并将此值运用至其他 SEM 图像的处理。这种确定阈值的方法比目视分割法更加科学合理, 使得该阈值下的微观结构参数更加接近实际。

3.2 放大倍数的选择

研究中, 也同时考虑了放大倍数对于颗粒及孔隙分维值的影响。在进行扫描电镜处理时, 得到了 500

倍、800 倍和 1 000 倍三种不同放大倍数的 SEM 图像,经过 Photoshop 处理及 IPP 的测量及计算,得到了 3 种放大倍数下的颗粒及孔隙分维值(图 6)。由图 6 可知,颗粒及孔隙的分维值随放大倍数呈现减小趋势,鉴于在合理的范围内放大倍数越大,微观结构的细节显示越清晰,因此选择 3 种常用放大倍数里的 1 000 倍作为本次试验研究中的标准放大倍数。

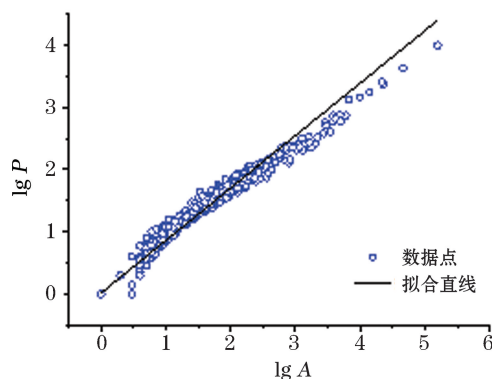


图 3 $\lg P$ - $\lg A$ 双对数趋势线

Fig.3 The trend line $\lg P$ versus $\lg A$

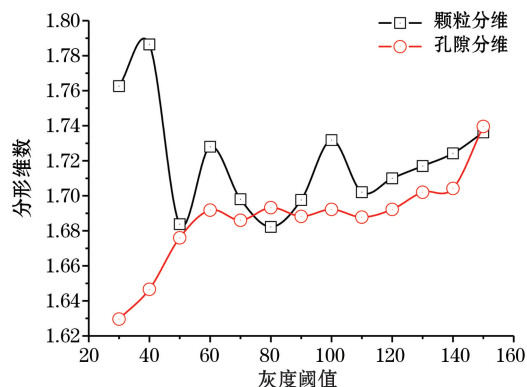


图 4 颗粒及孔隙分形维数随阈值变化

Fig.4 The variations of particles and pore fractal changing with different thresholds

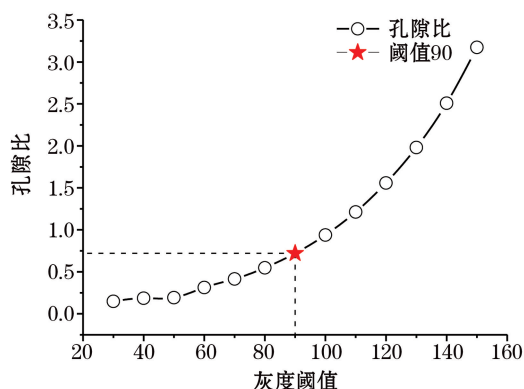


图 5 孔隙比随阈值变化

Fig.5 Pore ratios with different thresholds with different magnifications

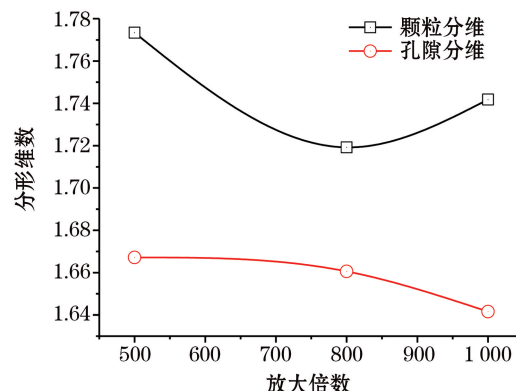


图 6 颗粒及孔隙分形维数与放大倍数关系

Fig.6 Particles and pore fractal dimensions

4 试验结果

应用上述研究方法对黄河水下三角洲的不同钻孔 K1, K2, K7 和 K8 粉土的 SEM 图像进行处理,得到了各深度的颗粒及孔隙分形维数(图 7 和图 8)。研究结果表明,黄河水下三角洲海底粉土不同深度的颗粒及孔隙都存在明显的分形特征,分形维数为 1.6~1.8。各钻孔不同深度粉土的颗粒分形维数总体高于孔隙的分形维数,在 K8 中表现最为明显(图 9),而在 K1, K2 和 K7 的个别深度粉土的孔隙分形维数略高于颗粒的分形维数。1) K1 在 4 m 以浅的颗粒分形维数略高于孔隙的分形维数,4~5 m 的深度内则反之;2) K2 在 4.5 m 处颗粒分形维数小于孔隙分形维数,其他深度均大于之;3) K7 在 0.5 m 及 4.5 m 处的颗粒分形维数小于孔隙的分形维数,1.5 m 处两者的分形维数十分接近其他深度均大于之;4) K8 在 5 m 以内的所有深度处颗粒的分形维数均大于孔隙的分形维数。

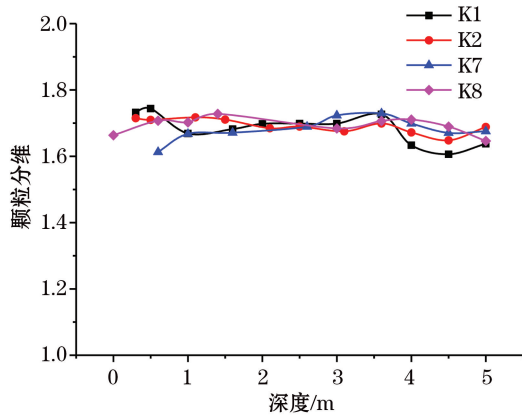


图7 各钻孔颗粒分维

Fig.7 Particles fractal dimensions in different boreholes

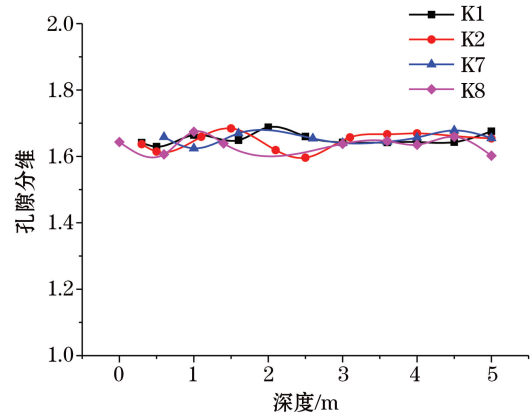


图8 各钻孔孔隙分维

Fig.8 Core fractal dimensions in different boreholes

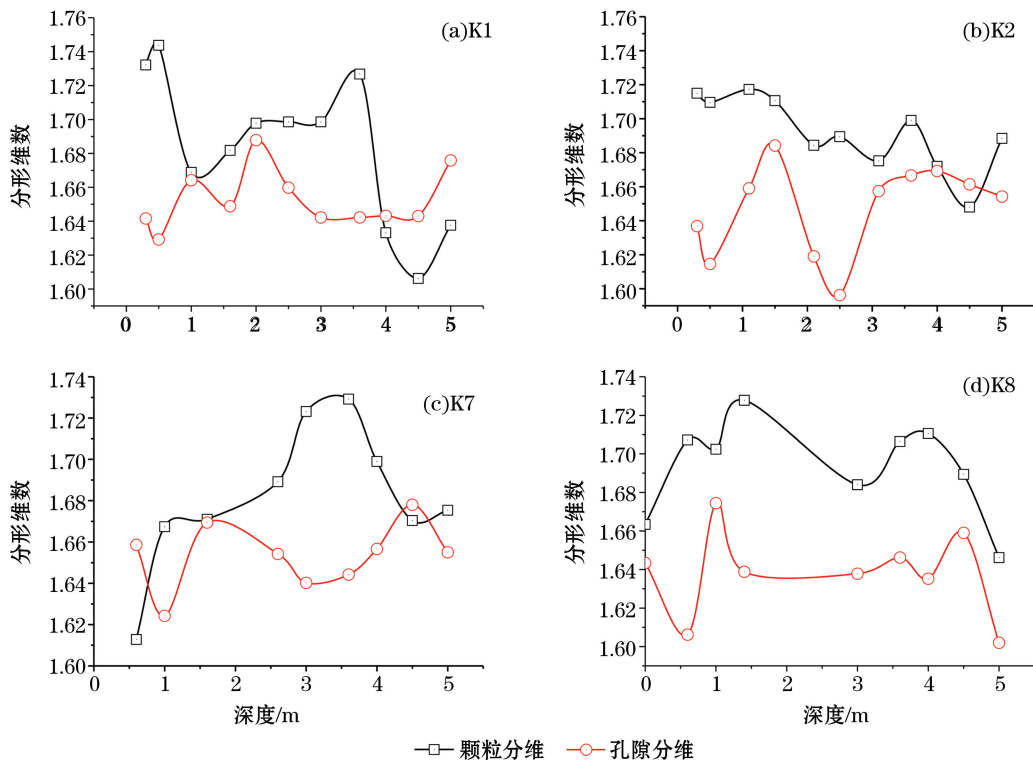


图9 钻孔 K1,K2,K7 和 K8 各深度颗粒及孔隙分维值

Fig.9 Particles and pore fractal dimensions with different depths in boreholes K1,K2,K7 and K8

5 讨论

5.1 粉土分形特征的环境意义

黄河水下三角洲的海底粉土,在不同位置所处的水动力环境不同,我们将其分为扰动区与非扰动区。扰

动区内的粉土是在波浪作用下的液化引起,非扰动区的粉土则不受波浪扰动作用影响^[21]。得到的试验结果显示了粉土的颗粒及孔隙分形维数值是在一定范围内的相近数值,但在不同钻孔的同一深度处或者同一钻孔的不同深度处的颗粒及孔隙的分形维数又不尽相同。图 9 显示了 K8 在各深度粉土的颗粒及孔隙分维值与 K1, K2 和 K7 不同, K8 各深度的颗粒分维值均高于孔隙分维值,两者完全分离。根据扰动土层在浅地层剖面图中的杂乱反射特征,可以准确识别出扰动土层。据此,我们发现 K8 位于受波浪扰动严重(存在明显的杂乱反射)区域,另外 3 个钻孔位则于受波浪扰动较轻(层理较为分明)的区域。因此,我们推测波浪扰动作用会使得海底粉土的颗粒分维与孔隙分维,在不同深度出现异于非扰动粉土的特征。波浪动力可以将粉土中的细粒物质掀起使之悬浮搬运至他处再沉积,使得原地的粉土颗粒成分变粗孔隙变大。不同钻孔不同深度的粉土在沉积过程中所受到的波浪扰动强度不同,进而导致粉土的颗粒及孔隙的分形维数不同。因此,分形维数能在一定程度上表征波浪扰动的强度,但要得出分维值与波浪强度具体关系式,需要做进一步的研究。

5.2 粉土分形特征的工程地质意义

抗剪强度是研究土体工程地质力学性质的重要内容,尤其在研究海底土体稳定性的过程中是必不可少的环节。抗剪强度是土体微观结构状态的宏观表现,其通常涉及 2 个表征参数:黏聚力和内摩擦角。粉土颗粒的分形维数作为微观结构状态的一种表征参数,其必与抗剪强度存在密切的关系。研究颗粒分形维数与抗剪强度表征参数的关系,更能建立起粉土微观结构表现与宏观力学性质之间的关系,从而更好地分析粉土抗剪强度变化的内在规律。将室内土工试验所得的抗剪强度参数与相对应的颗粒分形维数之间的关系,绘制在图 10 和图 11 中。由图可知黏聚力和内摩擦角都随颗粒分形维数的增大而增大。其原因为分维值表征颗粒表面的起伏及粗糙程度,分维值越大表示颗粒越粗糙颗粒表面越复杂,由于颗粒之间的咬合力、粒间阻力以及粒间连结力增大,使得内摩擦角和黏聚力分别增大,反之亦然。

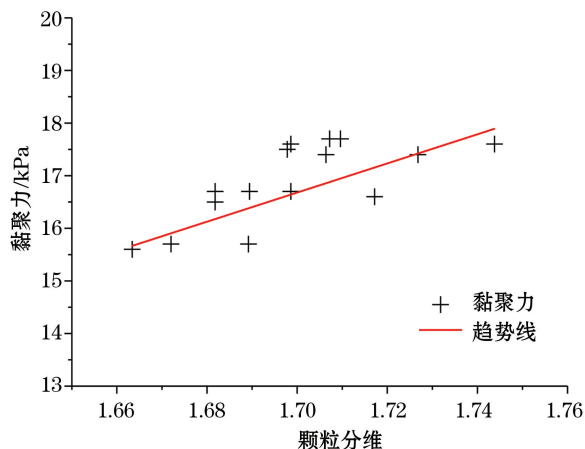


图 10 黏聚力与颗粒分维关系图

Fig.10 Relationship between cohesions and fractal dimensions

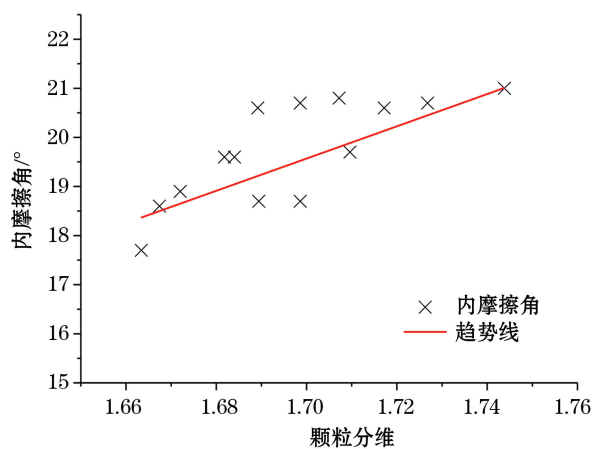


图 11 内摩擦角与颗粒分维关系

Fig.11 Relationship between angles of internal friction and fractal dimensions

6 结 论

综合使用 Image-Pro Plus(IPP)和 Photoshop 图像处理软件提取了海底粉土的微观结构参数,以分形理论为指导,运用“周长-面积法”对海底粉土进行分形特征研究,并探讨分形维数的环境及工程地质意义,得出以下结论:

1) 本文提出的基于 SEM 图像, 综合利用 Photoshop 及 IPP 软件来研究海底粉土的微观结构分形特征是可行的, 且此方法简单易操作实施, 得到的定量分析结果是可靠的。

2) 二值化分割过程的阈值选择时, 综合孔隙比和分维值稳定性两者共同作为判断标准, 建议二值化处理时选择阈值为 90, 此阈值下能准确反映土微观结构的分形特征, 阈值过大或过小皆使得粉土颗粒及孔隙的分形特征偏离真实情况。

3) 黄河水下三角洲海底粉土的颗粒及孔隙均具有明显的分形特征, 分形维数值为 1.6~1.8; 不同分维值在一定程度上反映了波浪扰动强度的不同。

4) 分形维数可以表征抗剪强度参数, 黏聚力和内摩擦角都随颗粒分形维数的增大而增大; 原因在于分维值越大表示颗粒越粗糙, 颗粒之间的咬合力、粒间阻力及粘结力增大, 使得内摩擦角和黏聚力分别增大。

5) 本研究是基于黄河水下三角洲的钻探取样而获得的, 对于其他地区的实用性还有待于进一步的研究工作; 此外, 对于海底的其他类型土的微观结构分形特征也需要做大量而深入的研究。

参考文献(References):

- [1] TANG D X. Rock and soil engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985. 唐大雄. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [2] 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. 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.
- [3] SHI B, LI S L, TOLKACHEV M. The quantitative research cohesive soil microstructure SEM mages[J]. Science in China: Series A, 1995, 25(6): 666-672. 施斌, 李生林, TOKACHEV M. 粘性土微观结构 SEM 图象的定量研究[J]. 中国科学: A 辑, 1995, 25(6): 666-672.
- [4] WANG Q, WANG Y F, XIAO S F. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its application to the engineering [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2): 148-153. 王清, 王凤艳, 肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 148-153.
- [5] 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. 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.
- [6] 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. 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.
- [7] SHI B. Quantitative researchon the orientation of microstructures of clayey soil[J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(1): 36-44. 施斌. 粘性土微观结构定向性的定量研究[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 36-44.
- [8] XU R Q, DENG W W, XU B, et al. Quantitative analysis of soft porosity based on SEM clay three-dimensional image information[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(3): 104-110. 徐日庆, 邓祎文, 徐波, 等. 基于 SEM 图像信息的软土三维孔隙率定量分析[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(3): 104-110.
- [9] LIN B T, AMY B C. Applications of SEM and ESEM in microstructural investigation of shale-weathered expansive soils along swelling-shrinkage cycles[J]. Engineering Geology, 2014(177): 66-74.
- [10] NATTAPORN P, ANCHALEE S. SEM image analysis for characterization of sand grains in Thai paddy soils[J]. Geoderma, 2010, 156(2010): 20-31.
- [11] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1983.
- [12] LIU Y, HU M, YU G Y, et al. Theory of fractal and its applications[J]. Jiangxi Science, 2006, 24(2): 205-209. 刘莹, 胡敏, 余桂英, 等. 分形理论及其应用[J]. 江西科学, 2006, 24(2): 205-209.
- [13] MOORE C A, DONALDSON C F. Quantifying soil micorstructure using fractals[J]. Geotechnique, 1995, 45(1): 105-116.
- [14] WANG B J, SHI B, LIU Z B, et al. Fractal study on microstructure of clayey soil by GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(02): 244-247. 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.

- [15] XU Y F, HUNG Y C. Fractal-textured soils and their unsaturated mechanical properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 635-638. 徐永福, 黄寅春. 分形理论在研究非饱和土力学性质中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 635-638.
- [16] REN Q, WANG J D, YUAN Z X, et al. Types of soft soil in karst laterite and its engineering properties[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(6): 76-78, 82. 任权, 王家鼎, 袁中夏, 等. 高速铁路地基黄土微结构的分形研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 76-78, 82.
- [17] WANG B J, SHI B, TANG C S. Study on 3D fractal dimension of clayey soil by use of GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 309-312. 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.
- [18] CHEN H E, WANG Q. Fractal study on microstructure of cement consolidated soil[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(2): 307-309. 陈慧娥, 王清. 水泥加固土微观结构的分形[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(2): 307-309.
- [19] LIU Y S, ZHANG J W. Fractal approach to measuring soil porosity[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 1997, 27(3): 127-130. 刘松玉, 张继文. 土中孔隙分布的分形特征研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 1997, 27(3): 127-130.
- [20] WANG J C, JIA Y G, SHI W J, et al. Case study on the fractal characteristic variations of silty soil microstructure due to differential hydrodynamics in the Yellow River estuarine area[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(2): 177-183. 王俊超, 贾永刚, 史文君, 等. 差异水动力导致黄河口粉质土微结构分形特征变化实例研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(2): 177-183.
- [21] SUN Y F, DONG L F, SONG Y P. Analysis of characteristics and formation of disturbed soil on subaqueous delta of Yellow River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1494-1499. 孙永福, 董立峰, 宋玉鹏. 黄河水下三角洲粉质土扰动土层特征及成因探析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1494-1499.

Microstructure Fractal Characteristics of Seafloor Silt on Subaqueous Delta of Yellow River

JIAO Peng-fei, SUN Yong-fu, LIU Xiao-yu, SONG Yu-peng, ZHOU Qi-kun, DU Xing

(The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: In this study we acquired a lot of Scan Electronic Microscope (SEM) images for silts in Yellow River submerged delta by using the SEM technique. By jointly using Photoshop and IPP (Image-Pro Plus) software, we obtained microstructure parameters for these silt samples. Then, guided by the fractal theory, we studied the fractal characteristics of silts by using the method of "Perimeter-Area", and discussed the influences of threshold and magnification on fractal dimension and how to select the appropriate values, and further pointed out the different environmental and engineering geological significances of different fractal dimensions. The results show that the particles and pores of silts in the Yellow River submerged delta have obvious fractal dimension characteristics, and the fractal dimension values vary from 1.6 to 1.8. The different fractal dimension values reflect the different wave disturbance intensity to certain extent. The fractal dimensions can represent the shear strength parameters, and silt cohesions and the angle of internal friction values increase with increasing fractal dimension values.

Key words: seafloor silt; SEM; image processing; fractal dimension

Received: September 5, 2016