

陈泰徐,陈筠,沙运斌,等.基于SEM图像的既有地基红黏土颗粒微观结构及分形特征研究[J].中国岩溶,2019,38(4):635-642.

DOI:10.11932/karst20190424

基于SEM图像的既有地基红黏土颗粒 微观结构及分形特征研究

陈泰徐¹,陈筠²,沙运斌³,白文胜⁴,邬忠虎⁵,王婷婷¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州理工学院, 贵阳 550003; 3. 贵州省质安交通工程监控检测中心有限责任公司, 贵阳 550081; 4. 贵州省建筑设计研究院有限责任公司, 贵阳 550003; 5. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025)

摘要:采用IPP(Image-Pro Plus)图像分析软件对贵州省贵阳市某工厂三种既有地基红黏土SEM图像的信息进行提取和处理,定性描述和定量分析土体的微观结构,并引入分形理论分析SEM图像,提出在IPP软件中获取颗粒三维分形维数的计算方法。结果表明:(1)抗剪强度参数随微观颗粒数、颗粒形态比的增大而增大,随颗粒平均面积的增大而减小;(2)颗粒分布及形态均具有明显的分形特征,分形维数介于2~3之间,抗剪强度参数均随颗粒分布及形态分形值的增大而增大;(3)与构建三维模型的方法相比,利用IPP软件计算土颗粒三维分形维数的方法具有可行性,简单易操作,结果可靠。

关键词:红黏土;微观结构;SEM图像;分形理论

中图分类号:TU446 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2019)04-0635-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

红黏土广泛分布于贵州省,厚度一般为几米至几十米不等,具有高界限含水量、高孔隙比、高含水量的物理特性,但力学性质较一般黏性土好,主要表现为较高强度和中低压缩性,是一种能够满足普通建筑物安全使用的特殊土体。因此,许多对承载力要求不高的工业厂房在建造时直接以红黏土作为地基持力层。以贵阳市某铝厂为例,该厂始建于1958年,厂区内多个生产车间皆以红黏土作为地基。厂区拆迁改建期间,课题组发现三个相邻生产车间建造前地基土的勘察值无较大差异,但受建筑荷载作用及氧化铝生产中排放的废碱液的污染后,三个车间地基土的物理力学性质均发生了明显改变^[1-2]。而

土体宏观物理力学性质的改变,本质上是由于土体内部物质及结构的差异所导致的。因此,有必要从微观角度对土体的结构进行研究,并获取表征宏观特征的微观结构参数。

而对基于电镜扫描试验获取的SEM图像的研究是当前获取土体微观结构参数的主要方法之一。宋宇^[3]通过对SEM图像的处理,发现了红黏土受荷载作用后变形的本质是由于微观结构的变化,主要体现在颗粒、孔隙和胶结方式的改变;王麒、陈筠等^[4-5]通过对碱污染红黏土孔隙和颗粒微观特征的研究,探讨了碱污染红黏土微观结构特征与宏观物理力学性质之间的关系。

分形理论是研究复杂物体形态和分布特征的有效方法之一,由数学家Benoit Mandelbrot提出^[6]。近

资助项目:贵州省地质灾害监测预警与决策支持平台建设(Z113278);碱污染红黏土宏观力学特性与微观结构关系的研究(黔科合基础[2019]1142号);贵州省水利厅科技专项经费项目(KT201804)

第一作者简介:陈泰徐(1995—),男,汉族,硕士研究生。E-mail:136297240@qq.com。

通信作者:陈筠(1970—),女,汉族,硕士,副教授。E-mail:409272272@qq.com。

收稿日期:2019-04-30

年来,这一理论方法也被运用到了土体微观结构的研究中。Moore 和 Donaldson^[7]通过对砂土的微结构照片进行研究,得出了砂性土颗粒二维形态具有明显的分形特征,且分形维数在 1~2 之间。焦鹏飞等^[8]基于海底粉土的 SEM 图像,运用图像处理软件提取了粉土的微观结构参数,并引入“周长—面积法”对海底粉土进行分形特征研究,探讨了分形维数的环境及工程意义。但上述对颗粒形态的分形研究局限于二维平面图形的分析,而忽略了对颗粒三维分形结构的研究。因此,易进翔,王宝军等^[9-10]通过 GIS 技术对 SEM 图像处理,构建了微观结构的三维模型,计算出了土颗粒的三维分形维数,认为“表面积—体积法”更能反映土体的三维特征,并且三维图像能获取的信息数量及准确度大于二维图像。

目前,土体微观结构的变化对宏观物理力学性质的影响已经成为共识,建立土体宏—微观联系以及分形理论在微观结构研究中的应用多集中在砂土、粉土或其他黏性土中,而针对贵州地区红黏土的相关研究较少。此外,近些年提出的土颗粒三维分形维数的计算方法得到的结果虽然具有较高的准确度,但计算过程较为复杂,因而限制了该方法的使用。基于此,本文通过运用 Photoshop 图像处理软件、IPP 图像分析软件、Matlab 软件并引入分形理论,研究三种既有地基重塑红黏土 SEM 图像中的颗粒微观特征,提出在 IPP 软件中实现土颗粒三维分形维数的计

算方法,并结合室内试验结果探究微观结构中颗粒特征参数与抗剪强度的关系,以期建立红黏土宏观—微观之间的联系,丰富分形理论在土体微观结构研究中的应用。

1 土样采集及室内试验

1.1 土样选取

三种既有地基红黏土取自同一工厂内前后相邻的蒸发车间基础下约 3 m 处,分别为一蒸发车间、三蒸发车间和四蒸发车间。

1.2 基本物理力学指标

根据土工试验操作规程(SL237-1999),将取回的地基土烘干后碾碎过筛(2 mm),按接近原状土样含水率制备重塑土样,并通过室内试验获取重塑土的基本物理性质。重塑土的力学性质则由抗剪强度参数表征,采用固结排水的三轴压缩试验,围压分别设定为 200 kPa,300 kPa 和 400 kPa,剪切速率为 0.1 mm·min⁻¹。

由表 1 可知,三种既有地基重塑红黏土的物理力学指标均在常规红黏土的范围之内。通过灵敏度试验得到三种地基土的灵敏度分别为 1.36、1.21、1.13,均属于低灵敏性土,间接说明了扰动对地基红黏土的结构影响不大,所以用重塑土的性质来说明原状土的性质具有可行性。

表 1 既有地基重塑红黏土物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of reshaped red clay in existing foundation

取样位置	含水率 (ω)/%	液限 (ω_L)/%	塑限 (ω_P)/%	塑性指数	比重	孔隙比	稠度 状态	粘聚力(C_{cd})/ kPa	内摩擦角 (Φ_{cd})/°	灵敏度
一蒸发车间	64.03	87.63	41.39	46.24	2.51	1.325	可塑	30.13	13.54	1.36
三蒸发车间	38.06	47.55	21.59	25.96	2.54	1.347	可塑	27.83	5.15	1.21
四蒸发车间	55.81	66.30	32.18	34.12	2.57	1.441	可塑	24.62	2.56	1.13

1.3 微观试验

土的微观结构是影响其工程性质的本质因素,为深入研究三种既有地基红黏土物理力学性质差异的原因,开展微观结构试验。使用德国蔡司电子扫描显微镜(型号:SIGMA+X-Max20)对土样进行观测,获取不同放大倍数的 SEM 图像。

2 土样微观结构

2.1 定性描述

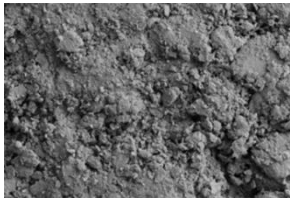
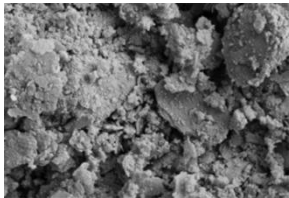
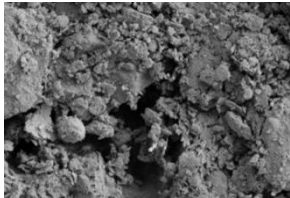
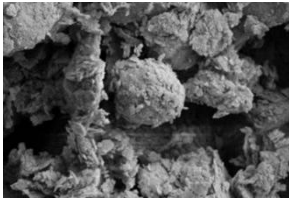
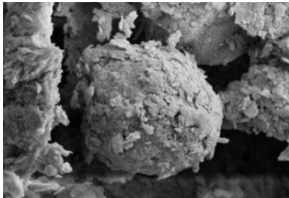
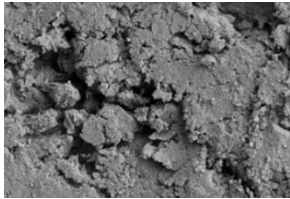
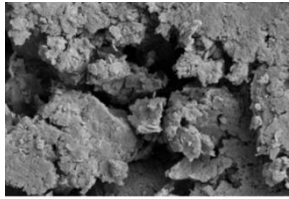
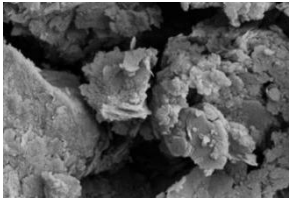
黏性土矿物片组成的多孔性集聚体是组成红黏

土的主要微结构单元,其外形主要有球状、椭球状、板状和不规则状,其构成了土体的基本骨架。黏性土矿物片间的排列则主要有面—面结合、边—面结合和边—边结合三种形式^[11]。

在低倍数(2 000 倍)SEM 图像中可看到,一蒸发车间中颗粒排列致密且分布均匀,而在三蒸发车间和四蒸发车间中,土颗粒间距较大,分布比较杂乱、松散。随着放大倍数的增加(5 000 倍,10 000 倍),可清楚观察到土颗粒集聚体中黏性土矿物片的排布方式,一蒸发车间中黏性土矿物片主要以面—面结合方式为主,颗粒集聚体主要为椭球状和板状。而三

蒸发车间和四蒸发车间中黏性土矿物片则存在较多颗粒集聚体以板状和不规则状为主(表2)。边一边结合或边一面结合的方式,形成了架空孔隙,

表2 不同放大倍数下各车间既有地基红黏土SEM图片
Table 2 SEM images of red clay under different magnifications in existing foundation

放大倍数 取样位置	2 000 倍	5 000 倍	10 000 倍
一蒸发车间			
三蒸发车间			
四蒸发车间			

2.2 定量分析

在IPP软件中对2 000倍SEM图像进行处理,提取颗粒的数量、平均面积和形态比作为微结构量化参数。其中,颗粒数量指的是电镜扫描图像中一定范围内的颗粒总数,侧面反映了颗粒的分布及相互关系;颗粒平均面积指颗粒像素面积的平均值,反应了颗粒的大小情况;颗粒形态比指颗粒的长轴和短轴长度之比,主要表征颗粒的形态,形态比越大,颗粒越趋于长条形^[12]。

SEM图像由灰度值不同的像素点构成,灰度值的取值范围在0~255之间,当灰度值逐渐增大,像素点的亮度由深到浅逐渐变化。而在获取微观结构参数时,阈值指划分颗粒与孔隙的界限值,阈值的大小会直接影响计算结果。为合理选择阈值,使其能够

准确反映颗粒的数量、面积以及形态比,本文通过调节阈值大小使得微观孔隙比数值接近宏观孔隙比,再在该阈值下提取颗粒的微观结构参数。

由表3可看出,微观颗粒数与颗粒形态比的变化趋势相同:一蒸发车间>三蒸发车间>四蒸发车间;而颗粒平均面积的变化趋势则相反:一蒸发车间<三蒸发车间<四蒸发车间。这说明一蒸发车间的土体以扁长型的小颗粒为主,且颗粒大小比较均匀,而四蒸发车间的土体则以圆度较大的大颗粒为主,颗粒尺寸波动范围较大。此外,微观颗粒数、颗粒平均面积和颗粒形态比的变化同抗剪强度参数也具有相关关系,主要表现为粘聚力和内摩擦角随微观颗粒数和颗粒形态比增大而增大,随颗粒平均面积的增大而减小。

表3 颗粒微观结构参数(2 000倍)
Table 3 Microstructure parameters of soil particles (2,000 times)

取样位置	微观颗粒数	颗粒形态比	颗粒平均面积/像素	标准差(颗粒面积)	阈值选择
一蒸发车间	881	2.125	82.19	407.78	114
三蒸发车间	653	2.109	106.71	693.77	110
四蒸发车间	390	2.086	182.51	1 366.29	126

3 颗粒分形研究

上述对 SEM 图像的分析以在 IPP 软件中提取参数的对比为主,这种方法虽然能够方便地获取并分析微观结构参数,但在提取参数过程中受阈值选择影响较大。由于电镜扫描试验获取的是图像信息,而并非准确的实验数据。因此,如何通过图像获取其他表征微观结构特征的信息,并建立与宏观力学性质的联系成为研究的重要内容。为此引入分形理论,分别计算颗粒分布和形态的分形维数。

3.1 颗粒分布的分形计算

(1) 计算方法

为定量分析土颗粒分布特征,采用分形理论中常规的计盒维数法计算土颗粒分布的分形维数。

在 IPP 软件中将 SEM 图像二值化,以白色区域表示孔隙,黑色区域表示颗粒。用边长为 ε 的正方形格子将图像分割为正交型网格,网格中与颗粒图像相交的格子数为 $N(\varepsilon)$ 。当改变 ε 的大小时, $N(\varepsilon)$ 的数值也随之变化。将这些一一对应的数据组绘制在双对数坐标中,若曲线具有明显线性特征,就表明颗粒的分布具有分形特征,拟合直线斜率的绝对值即为

分形维数(D)。

(2) 分形维数计算结果

基于上述计算方法,在 Matlab 中计算三种土体微观结构中颗粒分布的分形维数,SEM 图像的放大倍数及阈值的选择与 2.2 节中微观结构的定量分析相同。由计算结果(表 4)发现,颗粒分布具有明显的分形特征,且一蒸发车间土体微观颗粒分布分维值最大,这表明颗粒的分布复杂度大,填充孔隙的能力强。

表 4 颗粒分布分形维数计算结果

Table 4 Calculated fractal dimension of soil particle distribution

取样位置	阈值选择	分形维数	相关系数
一蒸发车间	114	2.951 2	0.985 6
三蒸发车间	110	2.903 2	0.976 3
四蒸发车间	126	2.895 9	0.982 5

为综合考虑阈值选择对颗粒分布分形维数计算结果带来的影响,在上述相应阈值附近重新选择几个阈值进行计算,并将计算结果绘制于坐标轴中(图 1)。由图 1 可知,在不同阈值范围下,颗粒分布的分形维数表现为:一蒸发车间>三蒸发车间>四蒸发车间,且单种土体颗粒的分布分维值随阈值的增大逐渐趋于稳定。

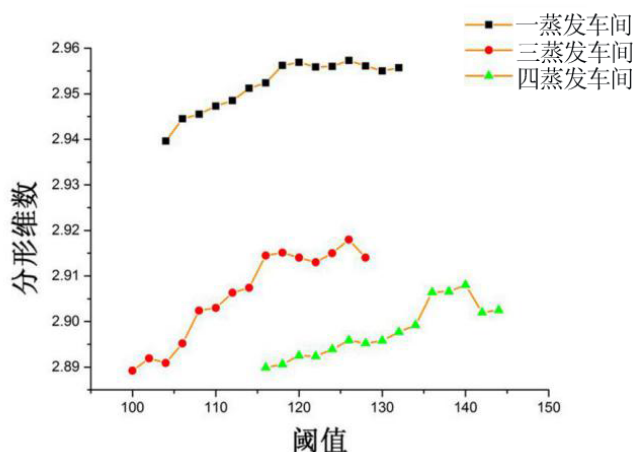


图 1 颗粒分布分形维数随阈值变化结果

Fig. 1 Fractal dimension of soil particle distribution varying with threshold values

3.2 颗粒形态的分形计算

(1) 计算方法

颗粒形态的分形维数是表征颗粒形态的参数之一,常用计算方法有“周长—面积法”和“面积—体积法”。前一种方法计算时仅考虑二维平面图像中颗粒的面积与周长之间的关系,而忽略了颗粒表面形

态的起伏对计算结果的影响,因此使用“面积—体积法”进行颗粒分形维数的计算显得更加准确。

如果颗粒的形态满足分形特征,则其面积和体积关系满足:

$$\lg A = \frac{3}{D} \times \lg V - \lg(a_0^3) \quad (1)$$

式中: A 为颗粒表面积; V 为颗粒体积; a_0 为常数。

将颗粒的表面积和体积计算结果绘制于双对数坐标系中,如果存在明显线性关系,则说明颗粒具有明显分形特征,且分形维数为 $\frac{3}{k}$, k 为拟合直线的斜率。

(2) 基于SEM图像的颗粒表面积和体积计算

在SEM图像中,颜色较亮的地方表示颗粒,较深的地方代表孔隙(图2)。为计算颗粒的体积和表面积,在GIS软件中建立见图3所示的三维图像。该三维图像是以二维图像为底平面,以每个像素点的灰度值作为高度形成的柱体组合而成的(图4)。

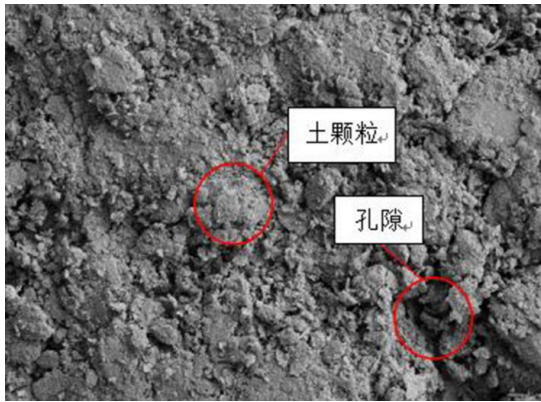


图2 土样SEM图像(2 000倍)

Fig. 2 SEM images of red clay soil(2,000 times)

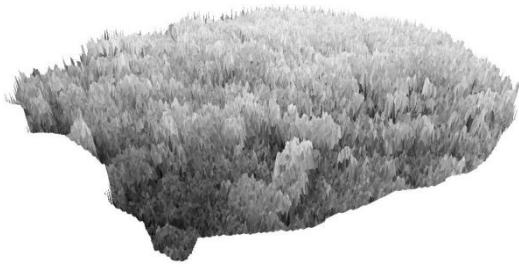


图3 颗粒3D Scene图像

Fig. 3 3D Scene image of soil particle

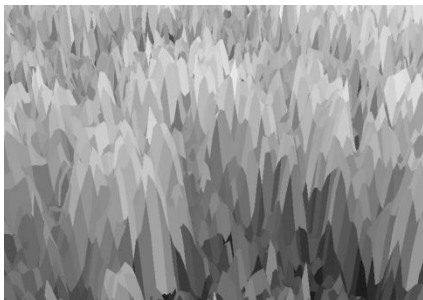


图4 颗粒3D Scene图像局部放大图

Fig. 4 Local enlarged diagram of 3D Scene image of soil particle

使用IPP软件计算不同阈值下土颗粒的二维面积,当阈值下限值为0时,阈值上限值可看作是在高度方向上浮动的平面,阈值上限值不同,与三维图像相切时所得到的截面积也不同,使得计算出的颗粒二维面积也存在差异。因此,基于上述的构想,可以采用IPP软件计算出相邻两阈值平面与颗粒截面面积的平均值,再乘以两阈值的差值,就能得到相邻两阈值平面间颗粒部分的体积,通过反复叠加就能求出颗粒的体积^[13]。与之类似,为计算出颗粒的表面积,可通过求出相邻两阈值平面间截面周长的平均值,乘以相应的阈值差后再反复叠加,就能得到颗粒的表面积。

在IPP软件中计算时,假设某阈值 Y_i 下对应的面积为 A_i ,周长为 C_i ,阈值 Y_{i-1} 下对应的面积为 A_{i-1} ,周长为 C_{i-1} ,当阈值步距取1时,则按下式可求出颗粒的体积和表面积:

$$V_{3D} = \sum_{i=1}^{255} \frac{A_i + A_{i-1}}{2} (Y_i - Y_{i-1}) \quad (2)$$

$$S_{3D} = \sum_{i=1}^{255} \frac{C_i + C_{i-1}}{2} (Y_i - Y_{i-1}) \quad (3)$$

(3) 步距和SEM图像倍数选择对颗粒体积和表面积计算结果的影响

计算颗粒的体积和表面积之前,先用Photoshop软件从原始SEM图像中裁剪出合适的颗粒图像,再将裁剪后的图像导入IPP软件中,通过调节阈值大小得到不同阈值下对应的截面面积及周长,再通过式(2)和式(3)计算出颗粒的体积和表面积。选取颗粒时,应选择表面形态完整、起伏比较明显的颗粒,避免选择灰度值单一或受亮斑影响的区域(图5)。

考虑到步距选择对结果的影响,计算了颗粒在



图5 裁剪颗粒示例图

Fig. 5 Sample of clipping image of soil particle

不同步距选择下的体积和表面积。结果表明:随着步距值的减小,颗粒体积和表面积的计算结果虽有增大,但在取对数后的结果无太大差异,对分形维数计算结果影响较小,因此步距选择5进行后续的计算(表5)。

表5 不同步距下颗粒体积与表面积计算结果

Table 5 Calculation results of particle volume and surface area under different distances

步距选择	颗粒体积/像素	颗粒表面积/像素
2	6 373 286	720 364
5	6 370 462	718 987
10	6 366 012	715 634

此外,不同放大倍数的SEM图像选择对计算结果也有影响。考虑到低倍数下难以提取完整的颗粒形态,放大倍数太高又会导致可提取颗粒数量较少,因此统一选择在5 000倍SEM图像中利用Photoshop软件截取颗粒进行分析。

(4) 分形维数计算结果

为保证分形维数计算结果的真实性与准确性,从每种土样的5 000倍SEM图像中选择10个颗粒对象进行体积和表面积的计算。以三蒸发车间为例,计算出颗粒的表面积与体积,结果见表6。再将计算结果绘制于双对数坐标中,使用Origin软件进行线性拟合,得出三种既有地基红黏土颗粒的分形维数(图6、图7、图8)。

表6 三蒸发车间SEM图像裁剪样体积与表面积计算结果

Table 6 Calculation results of volume and surface area of clipping sample in third evaporation workshop

裁剪土样编号	体积/像素	表面积/像素
1	6 370 462	718 987
2	3 183 633	459 643
3	2 294 910	274 958
4	3 129 372	390 378
5	4 788 410	580 751
6	4 311 222.5	423 264.5
7	4 165 502	458 606
8	2 134 798	262 816
9	3 100 156	380 499
10	468 640.5	75 586.5

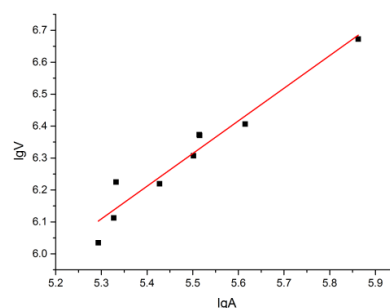


图6 一蒸发车间颗粒体积与表面积双对数关系图

Fig. 6 Double logarithmic relationship between soil particle volume and surface area in first evaporation workshop

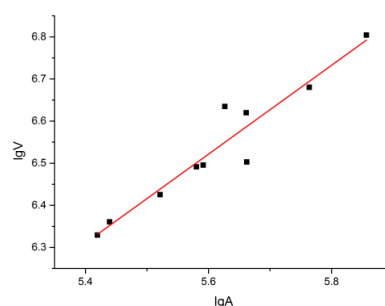


图7 三蒸发车间颗粒体积与表面积双对数关系图

Fig. 7 Double logarithmic relationship between soil particle volume and surface area in third evaporation workshop

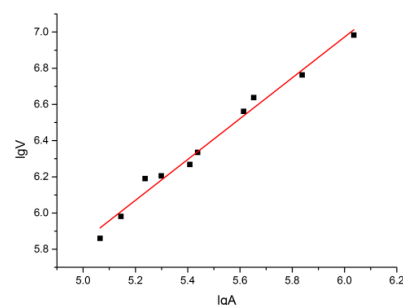


图8 四蒸发车间颗粒体积与表面积双对数关系图

Fig. 8 Double logarithmic relationship between soil particle volume and surface area in forth evaporation workshop

由颗粒分形维数的计算结果(表7)可知,三种既有地基红黏土颗粒形态均具有明显的分形特征,且分形维数介于2~3之间,该结果与相关学者关于黏性土土颗粒形态的分形维数的研究结果相同^[14],这表明基于IPP软件计算颗粒形态分形维数的方法是可靠的。此外,由结果可知一蒸发车间土体的颗粒形态分维值最大,说明颗粒表面的起伏大,颗粒形态复杂度较另外两种土体高。

表 7 颗粒三维分形维数计算结果
Table 7 Calculation results of 3D fractal dimension of soil particles

取样位置	分形维数	相关系数
一蒸发车间	2.93	0.94
三蒸发车间	2.84	0.92
四蒸发车间	2.66	0.98

4 讨 论

4.1 微观结构对抗剪强度的响应规律

土体的抗剪强度由内摩擦角和粘聚力两个参数表征。其中,内摩擦角反映了土的摩擦特性,包括颗粒之间产生相互滑动时,需要克服由于颗粒表面粗糙不平而引起的滑动摩擦,以及由于颗粒物的嵌入、连锁和脱离咬合状态而移动所产生的咬合摩擦;粘聚力则是指包括颗粒分子引力形成的原始粘聚力和土中化合物的胶结作用形成的固化粘聚力^[15]。

由上述计算结果可知,既有地基红黏土的内摩擦角和粘聚力随颗粒数量和颗粒形态比增大而增大,随颗粒平均面积减小而增大。这是因为当一定范围内颗粒数量越多,颗粒平均面积越小,颗粒形态比越大时,颗粒间接触面积也相应增大,土体在受剪过程中需要克服更大的颗粒间相互滑动时的摩擦力。而当微观颗粒数增多,颗粒平均面积减小时,颗粒之间的排列也会更加致密,颗粒与颗粒之间的距离减小,分子间引力增大,使得土体粘聚力也随之增大。

4.2 颗粒分形特征的工程地质意义

为说明颗粒分布和形态分维的工程地质意义,将室内试验所获取的抗剪强度参数与颗粒分布及颗粒形态的分形维数关系绘制于图 9 和图 10 中。由图 9、图 10 可知,粘聚力和内摩擦角都随颗粒分布和形态分维的增大而增大。因为颗粒分布的分形维数是描述颗粒分布规律参数,当颗粒分布分形维数越大,颗粒之间的排列均匀且致密,当土体受剪时,颗粒之间的咬合力和粒间连结力增大,使得内摩擦角和粘聚力也分别增大。而颗粒形态的分形维数是描述颗粒形状及表面起伏形态的参数,颗粒形态分形维数越大,则颗粒表面形态结构越复杂,土体受剪时粒间阻力增大,使得内摩擦角和粘聚力也相应增大。

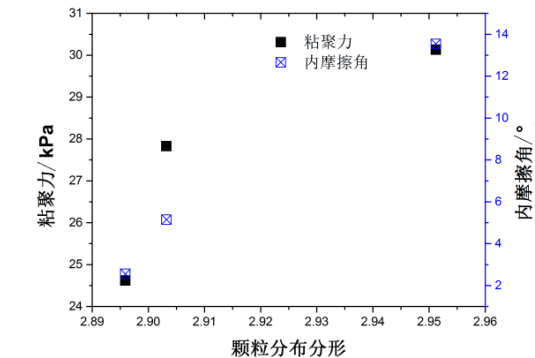


图 9 颗粒分布分形与抗剪强度参数的关系
Fig. 9 Relationship between fractal of particle distribution and shear strength parameters

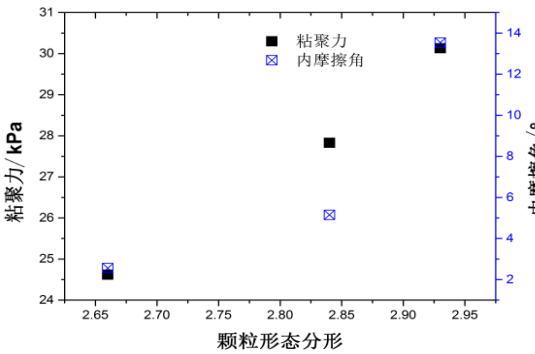


图 10 颗粒形态分形与抗剪强度参数的关系
Fig. 10 Relationship between fractal of particle morphology and shear strength parameters

5 结论与建议

- (1)既有地基红黏土抗剪强度参数随微观颗粒数和颗粒形态比的增大而增大,随颗粒平均面积的减小而增大;
- (2)既有地基红黏土的颗粒分布与形态均有明显的分形特征,分维值均介于 2~3 之间;土体抗剪强度参数随颗粒分布和形态分形维数的增大而增大;
- (3)既有地基红黏土的微观结构参数、分维值均与抗剪强度参数之间具有良好的关联性,表明微观结构参数和分形维数可表征抗剪强度参数;
- (4)基于 SEM 图像,利用 IPP 软件计算土颗粒三维分形维数的方法具有可行性,与构建三维模型计算的方法相比,此方法简单易操作,结果也可靠;
- (5)三种既有地基红黏土微观结构的变化是引

起宏观物理力学性质差异的主要原因,而微观结构的变化又受到外部因素的影响。本文中三种红黏土物理力学性质的改变与荷载作用以及废碱液污染之间有着密切的关系,而此前对受荷红黏土的力学时效特性及碱污染红黏土物理力学性质变化的研究,取得了一定的成果。因此,探究外部因素对土体微观结构的影响,并使其朝着有利于人类工程活动的方向进行也是今后相关研究的热点方向之一。

参考文献

- [1] 赵蕾,陈筠,郭忠虎,等.基于ABAQUS的红黏土地基排水固结沉降分析[J].长江科学院院报,2015,32(2):103-107.
- [2] 赵蕾,陈筠,郑莆,等.既有红黏土地基压密固结效应研究[J].科学技术与工程,2016,16(2):229-234,248.
- [3] 宋宇.碱污染黏土变形特性及微观结构演化规律的试验研究[J].中国科技论文,2015,10(13):1578-1587.
- [4] 王麒,陈筠,赵鹏,等.碱污染红黏土物理性质及微观结构试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(6):1483-1492.
- [5] 陈筠,王麒,于明圆,等.碱污染红黏土抗剪强度及破裂面微观结构特征研究[J].工程地质学报,2018,26(5):1300-1310.
- [6] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature [M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1983.
- [7] MOORE, DONALDSON. Quantifying soil microstructure using fractals[J]. Geotechnique, 1995, 45(1): 105-116.
- [8] 焦鹏飞,孙永福,刘晓瑜,等.黄河水下三角洲扰动粉土微观结构特征分析[J].海洋科学进展,2018,36(2):253-261.
- [9] 易进翔,李磊,王亮,等.基于GIS的固化污泥微观结构的三维孔隙率及分形维数的计算方法[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(12):3359-3365.
- [10] 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.
- [11] 廖义玲,朱立军.贵州碳酸盐岩红土[M].贵阳:贵州人民出版社,2004.
- [12] 杨爱武,苟乐宇,张振东.循环荷载作用下结构性软土微结构演化特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):234-242.
- [13] 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.
- [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.
- [15] 陈希哲.土力学地基基础[M].北京:清华大学出版社,2003.

Microstructure and fractal characteristics of red clay particles in existing foundation based on SEM images

CHEN Taixu¹, CHEN Jun², SHA Yunbin³, BAI Wensheng⁴, WU Zhonghu⁵, WANG Tingting¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550003, China; 3. Guizhou Province Quality and Safety Traffic Engineering Monitoring and Inspection Center Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China; 4. Guizhou Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550003, China; 5. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract The IPP (Image—Pro Plus) software was used to extract and process the information of SEM images of three kinds of existing red clay in a factory, Guizhou Province, which helps to make qualitative description and quantitative analysis to the microstructure of the soil from the study site. In addition, the fractal theory is applied to analyze the SEM images, and the method of calculating the three-dimensional fractal dimension of particles in the IPP software is proposed. The results show that, (1) The parameters of shear strength increase with the growing number of microparticles and the ratio of particle morphology, and decrease with the average area of particles. (2) The distribution and morphology of particles have obvious fractal characteristics, with fractal dimensions between 2 and 3. The parameters of shear strength increase with the increase of particle distribution and fractal dimension of particle morphology. (3) It is feasible to use the IPP software to calculate the three-dimensional fractal dimension of soil particles. Compared with the method of building three-dimensional models, this method is simple and easy to use, and its analysis results are reliable.

Key words red clay, microstructure, SEM images, fractal theory

(编辑 黄晨晖)