

[文章编号] 1003-4684(2019)02-0083-04

基于计盒维数的黏土导热系数分形研究

胡其志, 刘璇, 程佳会, 潘浩川

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘要] 土壤孔隙结构参数是评价土壤导热系数的重要指标,采用 DRE-III 多功能快速导热系数测试仪量测出不同干密度、不同固结压力下黏土的导热系数,对已经量测的试样进行 CT 扫描,采用 MATLAB2016B 软件处理得到二值化图形,基于计盒维数的分形理论分析了土壤结构中孔隙数目、面积及孔隙率对黏土导热系数的影响。分析结果表明:随着干密度、固结压力的增大,黏土试样的孔隙率减小,其分形维数也随之减小,利用分形维数变化规律可以得到黏土导热系数随着其分形维数的减少而增大。

[关键词] 重塑黏土; 导热系数; 计盒维数

[中图分类号] TK124; TU443

[文献标识码] A

土壤的细观孔隙由相连或不相连的大小不同孔隙或通道随机组合,其结构与数量决定了土壤热传导能力,进而影响土壤的导热系数^[1]。基于土壤孔隙结构的复杂特性、不规则特性采用分形几何研究土壤孔隙参数分布及导热性能的性质^[2]。李守巨^[3]等有限元方法模拟了多孔材料的导热系数与孔隙率和分形维数之间的非线性关系,得到多孔材料模型等效导热系数随着孔隙分形维数的增加而减小;张东辉^[4]通过对多孔介质结构的分形描述和对多孔介质传热传质过程的分形研究,发现了多孔介质结构对传热传质过程影响的一些初步规律;黄永平^[5]利用布朗运动分形模型对所研究多孔介质进行几何重建和几何定量结构分析,建立了导热机理模型与介质的内部结构传热流动并运用数值模拟证明:多孔介质有效传热系数受其分形维数的变化规律影响,随着多孔介质分形维数的增大,其传热能力减小。

自医用 CT^[6]问世以后,因其可在不损伤材料结构的情况下对材料进行无损检测等优点,广泛运用于各类科学技术试验中检测材料的内部结构^[7]。Raynaud 等^[8]通过运用医用 CT 方法对花岗岩、白云岩等岩石试样横断面 CT 细观图像进行扫描,使其岩石试样的内部裂隙结构得到清晰观察;彭瑞东^[9]等运用 CT 扫描技术对岩石孔隙分形维数进行计算得出:基于 CT 扫描图像计算的岩石孔隙分形

维数可以很好的刻画岩石孔隙的分形特征;王巍^[10]通过对岩石裂变过程进行 CT 扫描,得到结论:岩石裂变程度可用其分形维数进行定量分析。

研究者对土壤导热系数的研究主要在宏观力学方面,通过宏观力学试验找出土壤热物性与其影响因素间的变化规律,而对土壤细观结构变化对土壤导热系数的变化规律研究较少。笔者从细观角度出发,以武汉典型软黏土为研究对象,制取不同干密度、不同固结压力下的黏土土样,通过 CT 扫描仪得到不同条件下试样 CT 图像,采用分形理论中的计盒维数揭示了土壤细观孔隙结构参数对软黏土导热系数的影响。

1 试验材料

试验所用软黏土取自武汉轨道交通地铁 7 号线湖工站,颜色为灰黑色,手摸有滑腻感。

试样控制含水率 25% 不变,向试验所用软黏土加入等配比的水均匀搅拌,搅拌完成后装入塑料袋中进行密封保存,放置于保湿玻璃缸中,静置 24 h 取出,制作直径为 6.18 cm,高为 2 cm 黏土试样,安装在快速固结仪上取固结压力 50, 200, 800 kPa 三级加压,为防止土样回弹,固结压缩时间设定为 24 h。施加每级压力稳定之后,土样变形量达到每小时 0.01 mm 时,可以认为在此压力下土样已经压实。

[收稿日期] 2018-09-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(516090801);(51408201)

[第一作者] 胡其志(1969-),男,湖北红安人,工学博士,湖北工业大学教授,研究方向为岩土材料工程性质

[通信作者] 刘璇(1994-),男,湖北荆门人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土材料工程性质

其试样基本物理指标参数如表 1。



图 1 土样固结完成

经固结完成的试样采用 DRE-III 多功能快速导热系数测试仪^[11]进行导热系数的量测。

试样 CT 图像的获取选用湖北省红安县人民医院提供高端螺旋 CT 扫描仪。CT 扫描仪对土样进行扫描,设定扫描参数峰值电压定 120 kV,电流 200 mAs,扫描厚度为 1 mm。

表 1 试样基本物理指标参数

含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	相对密度/Gs	孔隙率/%
25	1.4~1.7	2.72	47.6~36.3

2 试验方案

如何运用分形维数^[12]来描述研究对象,关键取决于研究对象的特征及目的。事物所具有的物理分形在自然界中的表现形式一般为随机、尺度性,即从统计学角度上表示为在某一限定范围内表现出分形。因此,所运用的方式不一样,定义分形维数也有所不同^[13],根据研究对象的复杂程度,所运用分形维数模型计算方法也不相同。

分形特征遍布于土壤微观孔隙结构。孔隙相对大小与位置分布具有统计学一致性。通过对土壤孔隙各项参数计算发现,孔隙率与孔径范围高度相关,若要考虑所有范围的细观孔隙结构时,其对应孔隙率的换算也会增加,但将细观孔隙结构锁定在某一限定范围内,其孔隙率将减少。在分形维数中最常用的一种方法是计盒维数^[14],许多维数概念在分形维数理论研究中的提出都是由计盒维数变形得到,由于计盒维数是由相同形状集的覆盖确定的,相比于 Hausdorff 维数计算起来简单,因其计算方便、简易,计算结果能够直观呈现,使得其广泛运用于各种科学研究。因此,基于 CT 图像可以采用计盒维数来表征土壤孔隙结构的分形维数,能够形象刻画土壤的孔隙结构变化。

计盒维数有一系列的等价定义,最为我们所知的是网络覆盖法^[15],可以将网络覆盖点定义为像素点覆盖法,即在对最佳阈值 CT 图像运用计盒维数时,保存在计算机中边长为 ϵ 的像素点的集合。具体步骤为:

1) 运用 Matlab2016B 图像处理软件对 CT 图像

进行阈值分割,二值化图像是在 0~255 的阈值范围内挑选阈值,通过对比选出最佳阈值所得,通常图像中目标图与背景图采用 1 和 0 进行定义。

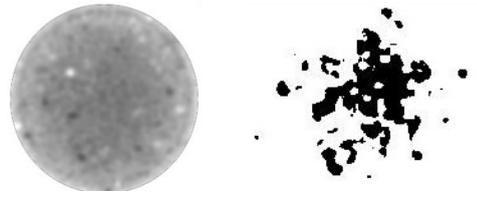


图 2 CT 图像及二值化图像

2) 如图 2 所示,经过二值化处理后,可以清晰看到土壤大孔隙颗粒分布结构,其中黑色像素用来表示土壤孔隙。图中黑色像素即为土壤孔隙结构,将所得二值化图像用边长为 ϵ_i 的等效网格进行划分,其中黑色像素所占网格数定义为 $N(\epsilon)$,则当 $\epsilon \rightarrow 0$ 时, $\lg N(\epsilon_i)/\lg(1/\epsilon) \rightarrow D$ 。因此,对于特定的递减序列 $\{\epsilon_i\}$,对于分形维数的定义近似于其斜率,通常运用二等分法定义递减序列 $\{\epsilon_i\}$,即 $\{M, M/2, M/4, \dots\}$ 。则计盒维数可以定义为

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\epsilon)}{\lg(1/\epsilon)}$$

对于边长 ϵ 不同的盒子,覆盖其图像区域黑色像素所需的盒子 $N(\epsilon)$ 数量也不同,考虑到二值化图像灰度值相对性,像素灰度占比只需用特定边长 ϵ 的盒子去覆盖即可。对于所求线性方程通过运用最小二乘法对数据点 $(-\lg(1/\epsilon), \lg N(\epsilon))$ 进行线性拟合得:

$$\lg N(\epsilon) = a \cdot [-\lg(1/\epsilon)] + b$$

其中分形维数 D 即为式中斜率 a 。

3 试验结果对比分析

保持试样含水率不变,分别对不同干密度、固结压力下黏土的导热系数进行量测,结果如表 2、图 3 所示。

如图 3 所示,在含水率不变的情况下,黏土导热系数随着孔隙率的增大而减小,这是由于伴随着试样孔隙率的增大,土壤颗粒间的湿度连续性降低,间内空气增加,单位体积内的颗粒减少,阻碍了热流传播,从而导致了其导热系数的降低。另一方面,相同固结压力下的黏土试样导热系数与干密度呈正相关关系,导热系数会随着干密度的增大而线性增大,不难发现,在密实度一定的情况下,随着固结压力的增大,试样导热系数亦随着增大,这是由于伴随着试样固结压力的增大,土体中颗粒间空气会随着固结压力从土体孔隙排出,单位体积内的颗粒越密实,孔隙比越小,使得导热系数增大。

表 2 导热系数实测结果

干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	固结压 力/kPa	导热系数/ ($\text{w}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{k}^{-1}$)
1.4	0	0.537
1.5	0	0.58
1.6	0	0.618
1.7	0	0.648
1.4	50	0.548
1.5	50	0.607
1.6	50	0.634
1.7	50	0.663
1.4	200	0.553
1.5	200	0.619
1.6	200	0.652
1.7	200	0.681
1.4	800	0.563
1.5	800	0.619
1.6	800	0.667
1.7	800	0.691

表 3 试样截面分形维数结果

干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	固结压力/kPa	分形维数/N
1.4	50	1.3334
1.4	200	1.3148
1.4	800	1.3124
1.5	50	1.3304
1.5	200	1.3109
1.5	800	1.2698
1.6	50	1.2874
1.6	200	1.2634
1.6	800	1.2132
1.7	50	1.2523
1.7	200	1.2202
1.7	800	1.1997

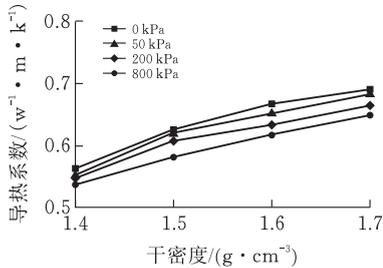


图 3 不同条件下试样导热系数变化曲线

针对二值化图像所得的黏土试样分形维数如图 4、图 5、图 6 所示,二值化的选取对计算结果有很大的影响,相关系数 R^2 都维持在 0.9 以上,这表明所得的分形维数具有说服力^[16]。以上结果表明,随着孔隙率的增大,试样颗粒结构所占像素增大,基于计盒尾数计算试样的分形维数亦增大,并且在相同干密度情况下,随着固结压力的增加,其分形维数越小。因此,分形维数能够很好地刻画试样孔隙结构的特点,为进一步研究试样的导热系数奠定了基础。

根据导热系数实测结果与基于计盒维数计算得到的分形维数结果对比(图 7)可知,回归分析了不

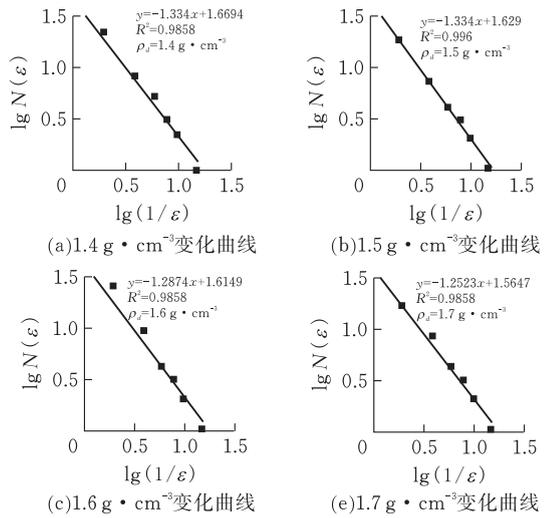


图 4 黏土分形维数在固结压力为 50 kPa 下的变化曲线

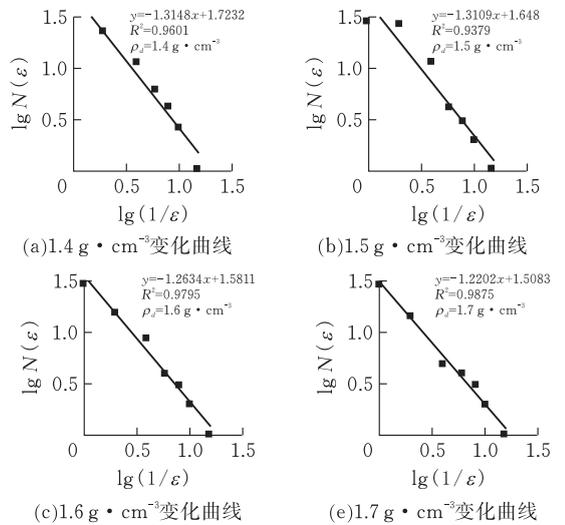


图 5 黏土分形维数在固结压力为 200 kPa 下的变化曲线

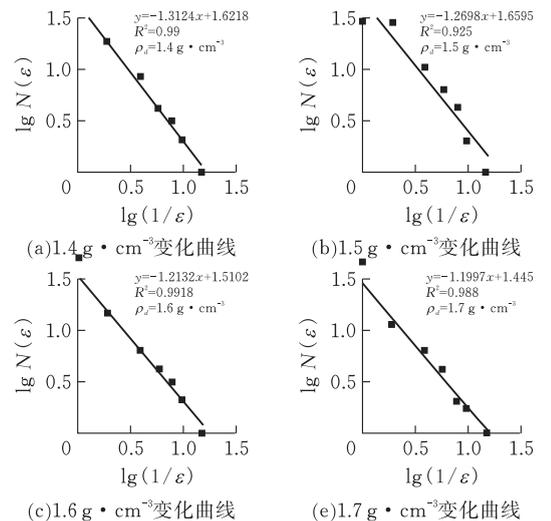


图 6 黏土分形维数在固结压力为 800 kPa 下的变化曲线

同干密度、固结压力下的黏土试样导热系数与分形维数的关系,在干密度不变的情况下,随着固结压力

增大,黏土孔隙结构因压力导致所占网格减少,土颗粒受挤压结构变得密实,所对应的黏土分形维数逐渐减小,进而导致黏土导热系数的增大。在固结压力不变的情况下,随着干密度的增大,试样颗粒结构间密度更高,孔隙率减少,分形维数减少,其导热系数增大。

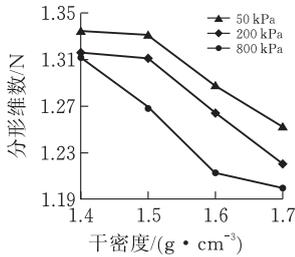


图7 干密度、固结压力与分形维数的变化曲线

4 结论

试验就重塑黏土 CT 图像通过分形维数对其导热系数进行分析,对软黏土试样 CT 图像运用 MATLAB2016B 图像处理软件进行二值化处理,通过运用计盒维数估算不同干密度、不同固结压力下黏土试样的分形维数,最后通过分析得到了其分形维数变化规律对黏土导热系数的增减变化影响机理,得出了以下结论:

1) 试验结果表明,通过计盒维数计算经 MATLAB2016B 处理过的黏土 CT 图像是可行的,这不仅规避了在 CT 图像处理中所带来的噪声干扰,计算过程简化,使其结果更具说服力,而且能够反映出黏土细观孔隙结构对黏土导热系数的影响规律,这对进一步研究试样导热系数奠定了基础。

2) 随着试样干密度的增大,固结压力的增大,黏土试样的孔隙率逐渐减小,其试样孔隙结构的分形维数也随之减小,导致黏土试样导热系数减小。保持固结压力不变的情况下,孔隙结构的复杂程度与其分形维数呈正相关,越是复杂的试样孔隙结构其分形维数也就越复杂,干密度大的黏土试样所对应的分形维数小,进而其导热系数较小。因此,运用基于计盒尾数计算土壤孔隙结构的分形维数能够预测土壤导热系数。

[参 考 文 献]

[1] Nicolsky D J, Romanovsky V E, Panteleev G G. Estimation of soil thermal properties using insitu temperature measurements in the active layer and permafrost [J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2009, 55 (1):120-129.

[2] Tokumoto I, Noborio K, Koga K. Coupled water and heat flow in a grass field with aggregated Andisol during soilfreezing periods. *Cold Regions Science & Technology*, 2010, 62:98-106.

[3] 李守巨,刘迎曦,于贺.多孔材料等效导热系数与分形维数关系的数值模拟研究[J].*岩土力学*,2009,30(5):1465-1470.

[4] 张东辉.多孔介质扩散、导热、渗流分形模型的研究[D].南京:东南大学,2003.

[5] 黄永平.多孔介质的分形描述及其流动与传热特性研究[D].南京:东南大学,2016.

[6] 王杭,李宗利,商玉娟,等.基于环状分区和区域生长的混凝土 CT 图像分割[J].*人民长江*,2017,48(23):8,9-93.

[7] Cnudde V, Masschaele B, Dierick M, et al. Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21(5):826-832.

[8] Raynaud S, Fabre D, Mazerolle F, et al. Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a nondestructive method: X-ray tomodensitometry[J]. *Tectonophysics*, 1989, 159(1):149-159.

[9] 彭瑞东,杨彦从,鞠杨,等.基于灰度 CT 图像的岩石孔隙分形维数计算[J].*科学通报*,2011,56(26):2256-2266.

[10] 王巍,刘京红,史攀飞.基于 CT 处理技术的岩石细观破裂过程的分形分析[J].*河北农业大学学报*,2015,38(3):124-127.

[11] 胡其志,谢超,林键,等.砂石混合体的导热性能影响因素分析[J].*可再生能源*,2016;34(11):1690-1695.

[12] 邹飞,夏怡.红黏土平面裂纹扩展的分形特征[J].*人民长江*,2011,42(15):58-62.

[13] 谢和平.分形-岩石力学导论[M].北京:科学出版社,1997.

[14] 杨彦从,彭瑞东,周宏伟.三维空间数字图像的分形维数计算方法[J].*中国矿业大学学报*,2009,38(2):251-258.

[15] 袁全勇,李春,杨阳,等.基于分形学的湍流风谱特性对比研究[J].*热能动力工程*,2017,32(5):118-124,141-142.

[16] 杨彦从,彭瑞东,周宏伟.三维空间数字图像的分形维数计算方法[J].*中国矿业大学学报*,2009,38(2):251-258.

(下转第 117 页)