

文章编号: 1001-1986(2010)02-0042-04

砂性土渗流的分形特征研究

杨 靖, 汪吉林

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对砂性土颗粒结构的复杂性和不规则性, 从颗粒级配和达西定律出发, 基于分形几何理论, 通过颗粒分析和渗透试验, 建立了砂性土颗粒级配分形维数与不均匀系数的关系, 从而揭示了级配分形维数的物理意义; 通过线性回归, 进一步探讨了级配分形维数与渗透系数之间的相关关系。研究发现: 级配越好, 不均匀系数越大, 分维越小, 渗透系数也越小。结果表明, 级配分形维数是刻画砂性土的颗粒组成及其级配特征的有效参数, 直观定量地描述了土的渗透性能, 从而为多孔介质以及断层破碎带等裂隙介质的渗透性研究提供了一种较好的研究思路。

关键词: 砂性土; 分维; 颗粒级配; 渗透系数; 多孔介质

中图分类号: P641 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.02.011

Research on fractal characteristics of permeability of sandy soil

YANG Jing, WANG Jilin

(School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on the fractal geometry theory, according to the granulometry and infiltration test, the relation between the fractal dimension of grain composition and coefficient of non-uniformity was established from the grain composition and Darcy law. The physical meaning of the fractal dimension of grain composition was demonstrated by considering the complexity and irregularity of the granular structure of sandy soil. Furthermore, the relation between the fractal dimension of grain composition and permeability coefficient was discussed by using linear regression analysis. The study shows that the better the grain composition is, the greater the coefficient of non-uniformity, the smaller both the fractal dimension and the permeability coefficient. The result indicates that the fractal dimension of the grain composition, which describes the permeability of sandy soil quantitatively and directly, is an effective parameter for describing the size composition of sandy soil and its grain composition characteristics. As a result, this paper provides a new way for research on the permeability of the porous medium as well as the fractured porous medium.

Key words: sandy soil; fractal dimension; grain composition; permeability coefficient; porous medium

砂性土属典型的多孔介质, 其渗透性与土的粒度、矿物成分、土的结构和土中气体密切相关。对多孔介质渗流的研究, 目前人们主要以达西定律和地下水动力学的解析法、数值法以及一些经典统计学理论来求解其渗透系数。近年来, 很多学者从土的颗粒粒径、颗粒级配、颗粒表面特征及堆积方式、孔隙结构、水力梯度及流体性质等不同的角度对多孔介质的渗透性进行了试验与研究, 取得了许多成果^[1-4]。但由于多孔介质的颗粒和孔隙都具有不规则性、自相似性、模糊性和非线性等特点, 且整体结构表现出复杂性, 因此传统方法对多孔介质的结构及渗流过程的直观定量描述难以有更大的进展。

分形几何正是针对这种复杂性以及不规则性而

创立的一门学科, 随着分形理论的不完善, 分形几何已被广泛地应用于岩土力学领域中, 诸如地质构造、岩石断裂、岩石和土粒的表面和孔隙度、地下水渗透等等^[5]。研究表明, 岩土介质的孔隙具有随机的表面和体积分形特征^[6]。砂砾类土的分布也具有分形分布特征, 且粗粒土粒间孔隙的分布及细颗粒充填到粗颗粒孔隙之间的方式也表现出分形规律^[7]。目前分形理论已逐渐成为一种定量描述多孔介质孔隙结构、渗流过程及渗流特征的新方法^[8-10]。有的学者指出, 多孔介质的孔隙形状具有分形的特征, 分形维数正是刻画或描述不同地质成因多孔介质孔隙的一个定量指标^[11], 通过建立多孔介质孔隙分形维数与渗透率之间的函数关系, 从而较精确地

收稿日期: 2009-06-08

作者简介: 杨 靖(1986—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事构造地质及水文地质研究。

预测多孔介质的水力参数^[12]。由于以往的研究并未进一步说明如何利用多孔介质颗粒级配分形维数来估计渗透系数等参数,为此,本文以砂性土试样为例,通过研究其颗粒级配分形维数 D 与不均匀系数 C_u 及渗透系数 K 之间的关系,从而实现用分形维数来定量描述砂性土的渗流特征。结果表明:颗粒级配分维能很好地反映砂性土的颗粒大小及级配规律,能比较直观定量地描述砂性土渗透系数的大小,从而为进一步研究多孔介质以及断层带等破碎岩体的渗透性能提供了一种比较好的研究思路和方法。

1 试验原理与过程

1.1 试验原理

渗透系数是表征流体通过多孔介质难易程度的度量参数,故渗透系数与多孔介质的颗粒级配之间必然存在着一定的联系。砂性土的颗粒级配是影响渗透系数的重要因素,它在很大程度上影响着土的孔隙尺寸、形状及其孔隙度的大小^[13]。通过颗粒分析法得出砂性土的颗粒级配曲线,可以求出颗粒的不均匀系数 C_u ;在级配曲线上对小于某粒径的颗粒百分含量依次对半分,然后在颗粒粒径与百分含量的双对数坐标中进行线性回归分析,其拟合的直线斜率绝对值即为级配分形维数 D 。然后对分形维数与渗透系数进行线性回归分析,从而分析渗透系数 K 与级配分形维数 D 的相关关系。级配分形维数的物理意义如图 1 所示。

由图 1 可见,颗粒级配越好,大颗粒之间的孔隙被细小颗粒充填,不均匀系数 C_u 越大,直线斜率即分维 D 越小;反之,级配越差,不均匀系数 C_u 越小,分维 D 越大,而颗粒之间的孔隙度 n 则相对较大。

1.2 试验过程

a. 颗粒分析试验 本次试验的试样取自连云

港海边及重庆山区河谷的砂砾类土,将烘干后的试样从上至下依次放在直径为 10 mm、5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm 的标准筛上进行筛分,逐级称重,得到各组试样的级配曲线。

b. 渗透试验 由于试样大多属砾砂、粗砂、中砂类,且水力梯度较小,因此认为试样水流服从达西定律^[14]。本次试验采用的是常水头渗透试验方法,试验过程中通过控制水流从而使供水瓶中水头保持稳定。此外,由于 TST-55 型土壤渗透仪透水石的渗透性太弱,为了消除其对试验的影响,在透水石上钻了 3×4 个小孔(图 2),并在实验中铺垫纱布,增加透水性。

2 试验结果分析

2.1 级配分维与不均匀系数的相关性

由颗粒分析试验结果,在半对数坐标中绘制了各组试样的颗粒级配曲线(图 3)。在级配曲线上查读出所需的特征粒径值 d_{60} 、 d_{10} ,由公式: $C_u = d_{60}/d_{10}$,从而计算出各组试样的不均匀系数 C_u 。

由级配曲线可以查出:当各组试样颗粒粒径小于 8 mm、4 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.125 mm 时的质量分数。以颗粒粒径为横坐标,小于某粒径颗粒质量分数为纵坐标,在双对数坐标系中对其进行线性回归,从而得出分维 D ,即直线的斜率绝对值。由拟合的结果可知,相关系数 R^2 介于 0.855 5~0.983 6,拟合效果较好,这说明了颗粒粒径与小于某粒径的质量分数之间具有显著或高度的线性相关关系(图 4)。

不均匀系数 C_u 表征了土的不均匀程度和级配的优劣,反映了土的粗、细颗粒的粒径大小及组成。若粒径级配曲线是连续的, C_u 愈大,颗粒越不均匀,曲线也越平缓,表示土中含有许多粗细不同的粒组,进而影响着土的结构^[15]。

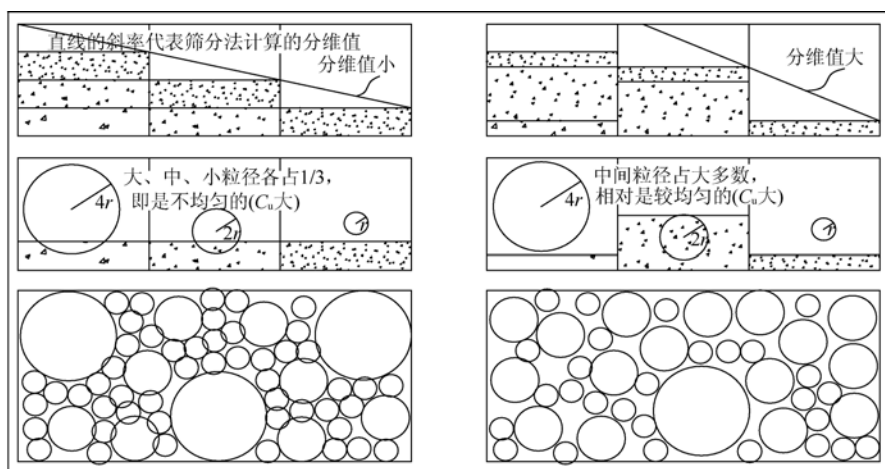


图1 级配分形维数的物理意义示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical meaning of fractal dimension of grain composition

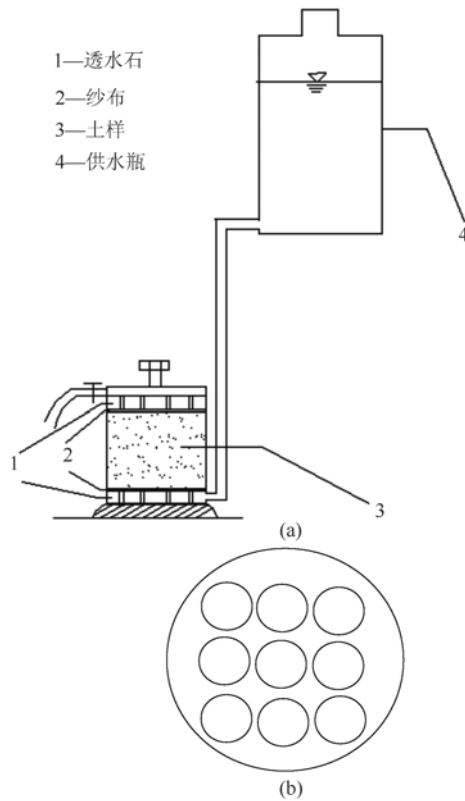


图 2 渗透试验原理及透水石示意图

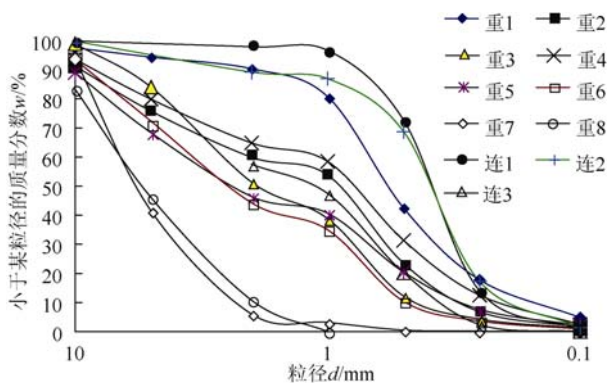
Fig. 2 Schematic diagram of infiltration test and porous stone
a——渗透试验原理图; b——透水石

图 3 各试样颗粒级配曲线

Fig. 3 Curve of grain composition of each sample

由级配分维 D 的计算过程可知,分维 D 反映的是土的颗粒粒径与小于某粒径质量分数之间的线性关系。以试样重 6 与重 7 为例,由其级配曲线(图 3)及分维 D 对比(图 4)可看出:试样重 6 的颗粒级配较好,含有不同粒径组的范围较广,级配曲线较平缓,拟合直线的斜率较小,即分维较小;而试样重 7 的颗粒级配较差,其级配曲线相对较陡,样品不同粒组的分布范围相对较窄,直线斜率也较大,即分维也相对较大。这说明级配分维能够很好地反映土的颗粒组成规律,是对土的不均匀程度及其结构的定量描述,是一种相对较好的定量描述颗粒级配的方法。

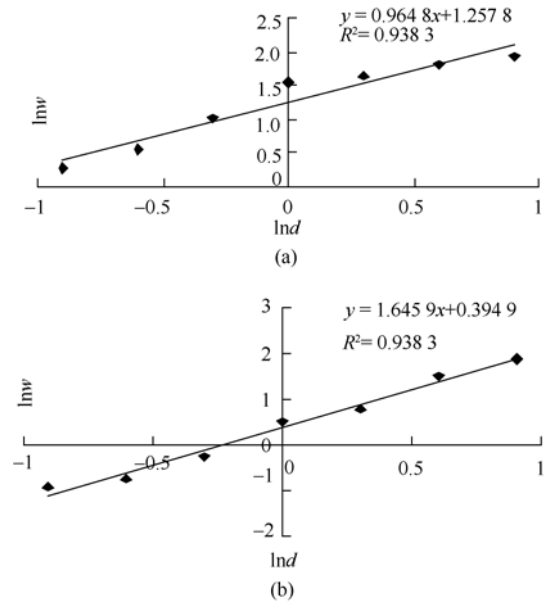
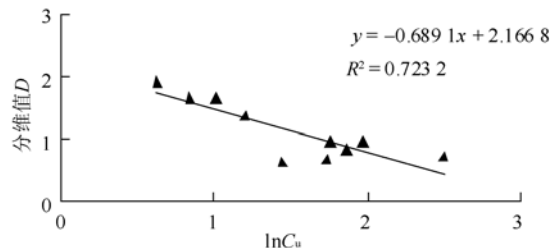


图 4 试样重 6 与重 7 分维对比图

Fig. 4 Correlation of fractal dimension of sample Chong 6 and Chong 7
a——重 6; b——重 7

为了反映分维 D 与颗粒级配之间的关系,将分维 D 与不均匀系数 C_u 进行了回归分析(图 5)。可以看出,分维 D 与 $\ln C_u$ 之间线性拟合效果较好,呈负相关关系,相关系数 R^2 为 0.723 2。利用最小二乘法对线性回归进行 t 检验,在显著性水平 α 为 0.05 的条件下,检验统计量 $|t| = 4.572 6$, $t_{0.025} = 2.306$, $|t| > t_{0.025}$,即认为接受线性回归显著的假设。由此可说明分维 D 与 $\ln C_u$ 二者之间线性关系显著。由图 5 还可看出, C_u 越大,分维 D 越小,这对于定性地了解砂性土颗粒级配分形维数的物理含义具有重要意义(图 1)。

图 5 分维 D 与 $\ln C_u$ 的相关性Fig. 5 The correlation of fractal dimension D and $\ln C_u$

2.2 级配分维与渗透系数的相关性

砂性土的渗透性较好,主要表现在它具有较大的孔隙度,且孔隙连通性较好。砂性土的渗透性主要受粒径大小与级配、孔隙度、矿物成分、土的结构以及饱和度的影响。水流通过土体的难易程度与土中孔隙的直径大小和单位土体中的孔隙体积直接相关,前者反映在颗粒大小和级配上,后者则反映在孔隙度上。因此,土的级配好坏直接影响着土的颗粒组成、结构以及孔隙度的大小,对渗透系数的大小起着决定性的

作用。根据渗透试验所测定的各试样渗透系数 K , 将分维 D 和渗透系数 K 进行线性回归分析(图 6)。

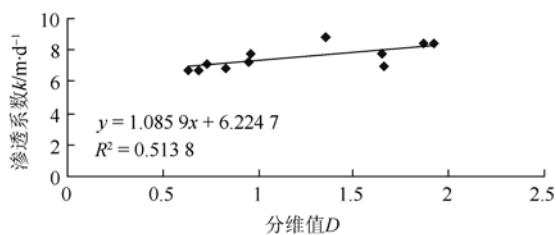


图 6 渗透系数 K 与分维值 D 的相关性

Fig. 6 The correlation of permeability coefficient K and fractal dimension D

由图 6 可看出:分维 D 与渗透系数 K 之间呈正相关关系,且相关度较好。土的级配越好,不均匀系数 C_u 越大,分维 D 越小。由于粗颗粒之间的孔隙被细颗粒充填,从而使得渗透性大大减弱,渗透系数 K 越小;反之,级配越差,颗粒均匀程度越高,分维 D 也越大,颗粒间的堆积排列方式较疏松,此时孔隙度 n 增大,过水面积增大,渗透系数 K 也越大。利用最小二乘法对线性回归进行 t 检验,在显著性水平 α 为 0.05 的条件下,检验统计量 $|t|=3.0840$, $t_{0.025}=2.2622$, $|t| > t_{0.025}$, 接受线性回归显著的假设。这说明了分维 D 与渗透系数 K 之间线性关系显著。同时,由图 6 还可以推断:分维 D 越大,孔隙度 n 越大,因此分维也可作为描述多孔介质孔隙结构的一个较好的综合指标。

此外,级配分维还反映了土的颗粒组成大小关系。颗粒越粗,分维 D 越大,渗透系数 K 越大,且随着细颗粒含量越多,其分维 D 越小,渗透系数 K 也越小。在渗透试验过程中还发现:随着时间的延长,试样的渗透性能都呈下降的趋势,最终趋于稳定。但不同的是:粗粒组在很短的时间内渗透性就能达到稳定,而细粒组的渗透系数的变化则是一个缓慢的过程,其接近稳定的时间相对较长,渗透系数也从 3.166 m/d 减小到了 1.965 m/d,可见其渗透性大大减弱了。造成这种现象的原因是:土的颗粒在水压以及渗透水流的作用下,土的骨架发生了变形,细颗粒移向粗颗粒的孔隙,并不断地充填孔隙从而使得土的渗透性逐渐减小,直至最终土的骨架趋于稳定,此时渗透性也逐渐稳定下来。由此可见,颗粒的大小及土中细颗粒的含量对渗透系数也产生着直接的影响。

综上所述,砂性土的颗粒大小、级配在很大程度上决定着土的渗透性能,级配分维数较直观地反映了土的颗粒级配特征,通过建立级配分维数与渗透系数之间的相关关系,从而可以定量地描述砂性土的渗流特征。

3 结论

a. 砂性土的颗粒及孔隙分布具有分形特征,其

颗粒级配特征及颗粒大小在很大程度上决定了渗透性的大小,其级配分维数的主要物理意义在于它较直观地反映了土的颗粒组成规律,是对土的结构、不均匀程度及其孔隙分布特征的定量描述,是一种相对较好的定量描述颗粒级配的方法。

b. 级配分维数 D 与 $\ln C_u$ 之间呈负相关关系,与渗透系数 K 、孔隙度 n 则呈正相关关系。级配越好,不均匀系数 C_u 越大,分维 D 越小,孔隙度 n 也越小,渗透系数 K 也相应越小;反之则越大。因此,分维数可以作为定量衡量砂性土渗透系数的一个重要指标。

c. 利用分形几何理论来研究砂性土的渗透性能与颗粒组成、级配规律之间的关系,为精确描述土的渗透规律及渗透过程提供了一种比较好的研究思路和方法,从而为进一步研究多孔介质以及断层破碎带等裂隙介质的渗透性能提供了可靠的参数以及理论支持。

参考文献

- [1] 史海明. 颗粒堆积多孔介质渗流特性的研究[D]. 东北大学硕士学位论文, 2005.
- [2] 邱贤德, 阎宗岭, 刘立, 等. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 950-954.
- [3] 王万杰, 束龙仓, 王志华. 河床沉积物渗透系数试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(2): 136-138.
- [4] 徐天有, 张晓宏, 孟向一. 堆石体渗透规律的试验研究[J]. 水利学报, 1998(增 1): 81-84.
- [5] 谢和平. 分形几何及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 14-23.
- [6] 谢和平. 岩土介质的分形孔隙和分形粒子[J]. 力学进展, 1993, 23(2): 145-164.
- [7] 李哲, 王芝银, 谢永利. 粗粒土类别的分形图解[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 15-19.
- [8] 黄文宇, 孙业志, 赵国彦. 散体渗流的分形行为及其计算机模拟[J]. 矿业研究与开发, 2002, 22(1): 13-15.
- [9] 叶含春. 基于分形理论的松散介质渗透系数空间预测—以河北平原为例[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2000.
- [10] 吕维先. 渗流过程的分形模拟[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1993(5): 660-671.
- [11] 胡尊国, 孙军, 李子丹. 多孔介质孔隙的分形特征与分维数计算[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(1): 10-11.
- [12] 刘晓丽, 梁冰, 薛强. 多孔介质渗透率的分形描述[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 769-773.
- [13] 赵明阶. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 40-50.
- [14] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 3-20.
- [15] 侍倩. 土工试验与测试技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 80-144.