

关于“土孔隙的分形几何研究”的讨论

徐永福

(名古屋工业大学 VBL, 日本 名古屋 466-8555)

笔者近来学习了王清教授等人于 2000 年在《岩土工程学报》第 4 期发表的“土孔隙的分形几何研究”一文(以下简称原文),受益匪浅。原文用汞压法研究“土孔隙的分形几何”具有重要的学术意义,为建立孔隙的分形模型奠定了基础。笔者经过反复学习,仍有以下问题认为值得提出来讨论:*

(1) 原文笼统地讲“土孔隙的分形几何”似有不妥,应该指明是孔隙表面分形或是孔隙分布分形,原文表 2 和表 3 中给出的分维,笔者有些糊涂。分形几何最初是由 Mandelbort 提出的^[1],分形最重要的概念是分维。分维的定义是:对于某一图形(或现象),按某种尺度 r 可分为 $N(r)$ 个各自相似,且与整个图形相似的部分,这个图形的分维^[1]为 $D = -\frac{\log N(r)}{\log r}$ 。原文没有给出分维计算的表达式,不知原文表 2 和表 3 中的分维是如何算出来的。原文表 2 和表 3 中给出的分维是孔隙表面的分维呢,还是孔隙分布的分维,亦或是别的什么含义的分维。汞压法一般用来测量孔隙表面分维和孔隙分布的分维^[2,3]。就孔隙表面分形而言,孔隙的累积表面积 $A(r)$ 与孔径 r 的关系^[2]为 $A(r)r^{2-D_s}$,分维应该大于 2.0,因为一般平面的分维是 2.0,而孔隙表面凹凸不平,介于二维和三维之间,即分维应该是在 2.0~3.0 之间。很显然,原文表 2 和表 3 中给出的分维与孔隙表面的分维不符。孔隙分布的分维是大于 1.0 的,也就是说,原文表 2 和表 3 中给出的分维也不是孔隙分布的分维。因此,无法理解原文表 2 和表 3 的分维含义,也无法了解表 2 和表 3 的分维是如何算出的。

(2) 图 1 和图 2 表示方法不确切。图中纵坐标是“大于某一孔径的孔隙累积含量”,而在确定孔隙表面和孔隙分布的分维

时,采用的是“小于某一孔径的孔隙累积面积”,两者恰好相反;另外,“孔隙累积含量”不知是何种物理量。因此,根据图 1 和图 2 是无法计算孔隙分布的分维。

(3) 土孔隙一般分为两类:宏观孔隙(土粒聚集体间的孔隙,孔径较大);微观孔隙(土粒聚集体内的孔隙,孔径较小)^[4]。宏观孔隙和微观孔隙的孔径界限一般为 $1\text{ }\mu\text{m}$ ^[5]。原文中先是总结前人经验,将孔隙分为 4 级,图 2 中“折线有三段”,表 2 中给出 2 种孔隙的分维,似乎不太统一。“小于 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙相当于粘土矿物晶层或晶体之间的孔隙”有何依据,当前的汞压法是无法将水银压进粘土矿物晶层或晶体之间的孔隙中的。

以上讨论仅是笔者的个人观点,这里提出来讨论,意在加深对土孔隙的分形几何的认识和理解,不当之处,还请不吝赐教。

参考文献:

- [1] Mandelbort B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: Freeman W H, 1982.
- [2] Xu Y F, Yin Z Z. Fractal structure of soils—a case study[A]. Shen Z J, eds. 2nd Int Conf on Soft Soil Engng[C]. Nanjing, 1996. 78~85.
- [3] Xu Y F, Liu S Y. Fractal character of grain size distribution of expansive soil[J]. Fractals, 1999, 7(4): 359~366.
- [4] Xu Y F, Sun D A. Application of fractal micropores to determination of expansive soil strength[J]. Fractals, 2000, 8(4).
- [5] Delage P, Audiguier M. Microstructure of a compacted silt[J]. Can Geotech J, 1996, 33: 150~158.

对“土孔隙的分形几何研究”讨论的答复

王 清

(吉林大学 环境与建设工程学院, 吉林 长春 130026)

非常感谢对“土孔隙的分形几何研究”的讨论,文中对讨论一文中所提出的孔隙分形和孔隙的分类等问题作了一些讨论,现就有关问题答复如下:

(1) 原文题为“土孔隙的分形几何研究”,是借助压汞实验结果来研究土孔隙分布分形。因为决定土体工程地质特性的本质原因是构成土体的物质组成,而这组成的存在形式是土的结构特征,土孔隙的大小与分布特征在一定程度上反映了成分和结构的特点,因此,称为“分形几何研究”。

显然,原文求解分维的方法是源于 Mandelbort 关于求海岸线分维的定义,称之为数方格方法。数方格法是针对自然中具有统计自相似特征的对象。土孔隙分布特征分析是认为是一

类典型的具统计自相似的分形。由于原文为短文,篇幅有限,没能给出具体计算过程,请原谅。

(2) 原文中图 1 是按照工程地质研究中土粒度成分分析曲线来表示的,图 2 是把纵轴取了对数后,成为双对数坐标体系,计算分维时是将双对数坐标系中孔径在 $0.03\sim 0.07\text{ }\mu\text{m}$ 之间的直线段的斜率,作为孔隙分布的分维数。

(3) 土中孔隙受颗粒排列和胶结等诸多因素的影响,对孔隙的研究主要从孔隙大小、形状、分布及连通性等特征上进行

* 讨论稿收稿日期: 2000-09-07

答复稿收稿日期: 2000-10-08

分析评价。由于孔隙所受的控制因素较多,而且还存在着分析尺度和方法的影响,加之研究的方法和手段具有一定的局限性和时代性,因而土孔隙的分类各家说法一直得不到统一,众说纷纭。目前国内外有许多分类方案,但无论从定性和定量的角度来看,都没有一个统一的分类标准。国外比较流行的分类有:①颗粒间的、粒群间的、集合体内的、集合体间的、贯穿集合体的孔隙几种类型(K. Idins & A. Mc. Gown, 1974年);②土的自然结构体内孔隙是成壤颗粒之间形成的粒间孔隙和粒内孔隙。土的天然结构体内孔隙涉及到单个成壤颗粒界限以外土的横向孔隙与成壤颗粒并无特殊关系^[1]。而国内被大多数学者所认可的孔隙分类方案有:①架空孔隙、单元体间孔隙、单元体内孔隙、大孔隙和溶蚀性孔隙^[2];②按孔隙存在的型式分为:粒间孔隙、粒内孔隙和溶孔^[3];③按土体成因分类:次生孔隙和原生孔隙,原生孔隙又根据碎屑排列方式分为:支架孔隙、镶嵌孔隙、胶结物孔隙^[4]。(雷祥义按孔隙大小,特大孔隙 $r > 250 \mu\text{m}$,大孔隙 $r = 250 \sim 16 \mu\text{m}$,中孔隙 $r = 16 \sim 4 \mu\text{m}$,小孔隙 $r = 4 \sim 1 \mu\text{m}$,微孔隙 $r < 1 \mu\text{m}$);④按孔隙的大小:通常将孔隙划分为大孔隙($d > 4 \mu\text{m}$)、中孔隙($0.4 \mu\text{m} < d \leq 4 \mu\text{m}$)、小孔隙($0.04 \mu\text{m} < d \leq 0.4 \mu\text{m}$)和微孔隙($d \leq 0.04 \mu\text{m}$)^[5]。国内外的分类方案还很多,这里不再一一列出,出现如此之多的孔隙分类的主要原因之一是目前没有统一的尺度加以描绘土体中孔隙的特征,本文试图通过分形几何的原理对土体中孔隙进行分类,以达到通过试验的方法结合定量的数学分析理论,力争克服以往区分孔隙大小的盲目性(自然包括笔者以往所作的孔隙划分工作),为解决目前孔隙研究中孔径划分界限的杂乱现状提供一些

理论依据。在以往的试验研究中,笔者通过电子扫描显微镜对红土、黄土等土体进行分析时发现,高岭石的晶体之间孔隙具有微孔隙($0.02 \mu\text{m}$)的特征^[6]。有关此类的工作正在进一步的进行中。研究土的微观结构是研究其基本结构单元体的组合、关联形式,结构单元体通常分为单粒和集粒两种基本类型,集粒又根据其存在的形态分为絮凝体、团聚体、凝块体等类型,所谓粒间孔隙是指结构单元体之间的孔隙,从结构角度来看,粒间孔隙是微观意义上的^[7]。讨论一文中所参考的文献[5]是研究粉土的内容,它本意是否表征所有土体,尤其是粘性土。

非常感谢读者对“土孔隙的分形几何研究”的讨论,并请有兴趣的广大同行批评指正。

参考文献:

- [1] 阿基诺夫 K. 粘性土及强度与变形本质[M]. 长春, 1986.
- [2] 高国瑞. 近代土质学[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990.
- [3] 唐大雄, 王 清. 我国南方红土的工程地质特性[A]. 全国第三届工程地质勘察会议论文集[C]. 1988.
- [4] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987, 12: 309~318.
- [5] 唐大雄, 王 清, 等. 微观结构理论认识及发展[J]. 水文地质与工程地质, 1991, 18(4): 45~47.
- [6] 王 清. 残积土微观结构探讨[J]. 长春地质学院学报, 1992(专辑): 176~182.
- [7] 王 清. 粘性土的变形、强度特征的定量微观表现[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29: 148~152.

2001年《煤炭学报》征订启事

《煤炭学报》中文版和英文版是中国煤炭学会主办的刊物,是向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。《煤炭学报》(中文版)刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被EI、IEA Coal Abstract CD-Rom、中国科学引文数据库、SCI、P & W、科学技术文摘速报、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外20多种重要文摘检索系统所收录。1992年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,荣获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,荣获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。2000年荣获由中华人民共和国新闻出版署颁发的首届中国期刊奖。《煤炭学报》英文版(JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING(CHI-

NA))是向世界传播我国煤炭科技的重要媒体,对加强中外科学技术交流,宣传我国煤炭科技成就,提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用,及时报道我国煤炭科技新理论、新技术、新经验也是《煤炭学报》英文版的主要任务。《煤炭学报》(中文版)是双月刊,每册订价15.00元,全年共收费90.00元。《煤炭学报》(英文版)是半年刊,每年6月份和12月份出版。每期112页,每册国内订价20元,全年共收费40元。欲订者可直接向本编辑部索取订单,订单函索即寄,编辑部随时办理订阅手续。联系电话:(010)84262930。订阅款可由银行信汇,也可从邮局邮汇,请务必在汇款凭证上注明:订《煤炭学报》杂志款。订阅者请按订单要求逐项填写清楚,订阅单随汇款单由银行转至我处或直接寄回本编辑部,收据联留下与汇款凭证一起作为报销单据,请妥为保存。

开户银行:北京市工商银行和平里分理处 户名:煤炭科学研究总院《煤炭学报》编辑部;帐号:561045-73-15 本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部。 邮政编码:100013

《煤炭学报》编辑部