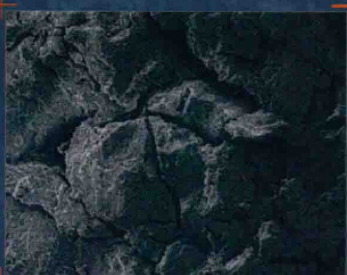




膨胀土裂隙演化三维分布特征及 微观结构分形规律研究



汪为巍 · 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

膨胀土裂隙演化三维分布特征及 微观结构分形规律研究

汪为巍 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

膨胀土裂隙演化三维分布特征及微观结构分形规律研究/汪为巍著.—武汉:武汉大学出版社,2019.3

ISBN 978-7-307-20703-5

I.膨… II.汪… III.膨胀土—研究 IV.TU475

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 023988 号

责任编辑:邓 瑶

责任校对:郭 芳

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮箱:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:北京虎彩文化传播有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:15 字数:286 千字

版次:2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-20703-5 定价:79.00 元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

本书是作者在武汉轻工大学根据近年来对膨胀土的研究成果进行撰写的,主要针对膨胀土的裂隙性展开研究,内容系统全面,资料翔实可靠,具有较为深刻的理论和实际工程意义。

膨胀土主要由蒙脱石等亲水性黏土矿物组成,是一类工程性状独特的高塑性黏土,具有明显的吸水膨胀和失水收缩特性,对气候和水文因素有较强的敏感性,这种敏感性对工程建筑物会产生严重的危害。膨胀土的主要不良工程性质表现为多裂隙性、超固结性、强亲水性、反复胀缩性和破坏的浅层性。膨胀土颗粒组成中黏粒含量超过 30%,且蒙脱石、伊利石或蒙-伊混成等强亲水性矿物占主导地位。其“三性”(胀缩性、裂隙性和超固结性)对其强度都有强烈的影响,使得膨胀土的工程稳定性极差。

多年来,膨胀土及其工程问题一直是岩土工程和工程地质研究领域世界中性的重大课题之一,虽经半个多世纪的广泛深入研究,但至今在各国工程建设中膨胀土引起的工程问题仍时有发生,并造成重大经济损失。

本书以膨胀土边坡开裂变形和失稳为背景,以南阳膨胀土为研究对象,通过数码摄影结合数字图像处理办法研究膨胀土平面裂隙扩展的规律,同时通过 CT 扫描试验研究膨胀土裂隙的三维扩展规律,采用油渗的办法间接定量分析膨胀土内部裂隙的扩展规律,并采用压汞法(MIP)和扫描电子显微镜分析法(SEM)相结合的办法研究南阳膨胀土脱湿干燥后微结构变化,分析其微观机理,利用分形理论和分形模型对压汞试验数据进行分形维数计算,利用分形维数对微观结构的演变规律进行研究和分析,进行膨胀土裂隙发育、渗流的综合性室内试验,深入研究裂隙膨胀土的渗透特性,揭示膨胀土裂隙性的作用机制及工程效应,以期膨胀土边坡灾害评估及坡面防护理论与设计提供依据或参考,借鉴多孔介质渗流的双重孔隙模型建立考虑裂隙作用的膨胀土渗流模型及其参数确定办法,深入认识裂隙对膨胀土渗流特性的影响,为膨胀土边坡变形、稳定性评价、灾害预测提供理论依据和技术支持。本书的撰写主要得到以下课题的支持。

1. 国家自然科学基金项目(11602183):膨胀土裂隙演化三维分布特征及渗流

特性研究。

2. 国家自然科学基金项目(51509274):卸荷路径下超固结膨胀土的力学特性与水化时间效应。

在本书的撰写过程中,得到很多的帮助,在这里首先感谢孔令伟研究员在研究过程中给予的指导与帮助,感谢张先伟老师在微观试验方面给予的指导和帮助,感谢黎伟博士、太俊硕士在试验中给予的大力支持,感谢臧濛博士在英文翻译方面给予的帮助,还有易远同学在分形计算中付出的努力。

由于本书为黑白印刷,书中相关彩图可扫描下方二维码查看。

由于作者的水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

汪为巍

2018年10月



本书彩图

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究的背景与意义	(1)
1.2 膨胀土的裂隙性与结构特征研究	(2)
1.3 分形几何在土体微结构研究中的应用	(8)
1.4 裂隙膨胀土渗流特性研究	(14)
1.5 主要研究内容	(16)
2 南阳膨胀土平面裂隙发育规律	(26)
2.1 引言	(26)
2.2 试验土样与研究方法	(27)
2.3 膨胀土平面裂隙图像处理	(29)
2.4 试样均匀性对裂隙发育的影响	(48)
2.5 裂隙发育的温度敏感性	(52)
2.6 裂隙发育的尺寸效应	(54)
2.7 原状土样试件表面裂隙发育形态研究	(61)
2.8 重塑土样试件与原状土样试件表面裂隙比较	(67)
2.9 本章小结	(68)
3 南阳膨胀土裂隙三维空间分布特征	(71)
3.1 引言	(71)
3.2 裂隙膨胀土工业三维 CT 扫描试验	(72)
3.3 重塑膨胀土裂隙发育过程 CT 扫描与空间分布特征分析	(78)
3.4 本章小结	(85)
4 膨胀土干缩开裂微观结构变化特性	(87)
4.1 引言	(87)
4.2 原状土样微观试验	(88)
4.3 不同初始含水率相同压实度重塑膨胀土样微观试验	(95)

4.4	不同压实度相同初始含水率重塑膨胀土样微观试验	(105)
4.5	不同脱湿环境下重塑膨胀土样微观试验	(115)
4.6	压汞试验模型分析	(121)
4.6	本章小结	(127)
5	微观试验数据分形研究	(130)
5.1	压汞试验结果分形模型与计算方法	(130)
5.2	压汞试验分形维数计算	(131)
5.3	扫描电镜试验结果分形研究	(150)
5.4	本章小结	(155)
6	膨胀土裂隙扩展规律定量试验研究	(156)
6.1	引言	(156)
6.2	相同初始状态重塑膨胀土裂隙扩展及油渗试验	(156)
6.3	不同压实度膨胀土裂隙扩展及油渗试验	(162)
6.4	不同初始含水率膨胀土裂隙扩展及油渗试验	(171)
6.5	本章小结	(177)
7	南阳裂隙膨胀土室内降雨入渗试验研究	(179)
7.1	引言	(179)
7.2	土水特征曲线的测定	(180)
7.3	相同初始状态膨胀土不同裂隙发育程度室内降雨入渗试验研究	(187)
7.4	不同压实度裂隙膨胀土室内降雨入渗试验	(192)
7.5	不同初始含水率裂隙膨胀土室内降雨入渗试验	(194)
7.6	本章小结	(197)
8	裂隙膨胀土双重孔隙介质渗流模型	(199)
8.1	引言	(199)
8.2	不考虑裂隙的饱和-非饱和渗流	(200)
8.3	裂隙膨胀土双重孔隙介质渗流模型概述	(203)
8.4	裂隙膨胀土降雨入渗	(214)
8.5	本章小结	(224)
9	结论与展望	(227)
9.1	结论	(227)
9.2	应用前景和展望	(230)

1 绪 论

1.1 研究的背景与意义

膨胀土主要由蒙脱石等亲水性黏土矿物组成,是一类工程性状独特的高塑性黏土,具有明显的吸水膨胀和失水收缩特性^[1-2],是一类结构性不稳定的特殊土,也是典型的非饱和土,在世界范围内分布极广,迄今发现存在膨胀土的国家达 40 多个,遍及六大洲。我国是膨胀土分布最广的国家之一,先后有 20 多个省、市和自治区发现膨胀土,总面积在 10 万平方千米以上。

膨胀土在天然状态下常处于较坚硬状态,对气候和水文因素有较强的敏感性,这种敏感性对工程建筑物会产生严重的危害。膨胀土给工程建筑物带来的危害,既表现在地表建筑物上,也反映在地下工程中,成为浅表层轻型工程建设的全球性技术难题。

膨胀土的主要不良工程性质表现为多裂隙性、超固结性、强亲水性、反复胀缩性和破坏的浅层性。膨胀土颗粒组成中黏粒含量超过 30%,且蒙脱石、伊利石或蒙-伊混成等强亲水性矿物占主导地位。其“三性”(胀缩性、裂隙性和超固结性)对其强度都有很大影响,使得膨胀土的工程稳定性极差,病害十分严重。

膨胀土的工程问题已成为世界性的研究课题,引起了各国学术界和工程界的高度重视,首届国际膨胀土会议自 1965 年在美国召开之后,每四年一届。此外,国际工程地质大会、国际土力学及基础工程大会以及许多地区性的国际会议都将膨胀土工程问题列为重要的议题。英国、美国、中国、日本和罗马尼亚等都先后组织力量专门研究膨胀土的工程性质,制定有关的规范,充分反映了各国对膨胀土工程问题的高度重视。

多年来,膨胀土及其工程问题一直是岩土工程和工程地质研究领域世界性的重大课题之一,虽经半个多世纪的广泛深入研究,但至今在各国的工程建设中膨

胀土引起的工程问题仍时有发生,并造成重大经济损失。

1.2 膨胀土的裂隙性与结构特征研究

(1) 膨胀土裂隙性研究

与一般黏土相比,膨胀土具有膨胀性、裂隙性和超固结性^[3]这三个特性。通常情况下,把岩土体中产生的无明显位移的断裂称为裂隙^[4]。

非饱和膨胀土中因黏土矿物含水量高而容易吸水膨胀、失水收缩形成的胀缩裂隙是最主要的裂隙类型^[5];另外,因开挖卸荷或失稳滑动等作用形成的张拉裂隙,因不均匀膨胀及沉降形成的剪切裂隙,因水力作用形成的溶蚀裂隙,因地震等作用形成的震陷裂隙等,也是膨胀土中的常见裂隙形式。实际膨胀土裂隙往往是由上述几种外因共同作用产生的,且各种因素作用产生的裂隙差别有时并不明显,所以一般观测到的裂隙是各种类型裂隙的共存,无法具体区别开来,袁俊平(2003)^[6]参照 Chertkov 分类方法,考虑膨胀土裂隙的复杂性及不确定性,在裂隙网络分类中增加了随机裂隙网络的新类型。裂隙在气候干湿循环过程中发生、发育、扩展,破坏了土体的完整性,同时为水分的渗流提供了通道,裂隙性是影响膨胀土边坡稳定的关键因素^[7]。

天然情况下膨胀土裂隙分布大都呈混乱型裂隙网络,为了综合反映裂隙的分布特征和影响,通常采用裂隙率作为裂隙度量分析指标。裂隙率可以定义为单位面积上裂隙面积,或单位面积上裂隙长度,或单位面积上的分块平均面积,以及单位面积上分块个数等^[8]。

裂隙量测开始是通过肉眼发现,采用钢尺、罗盘或量角器等工具简单量测其宽度、长度、产状,通过素描等记录裂隙分布情况,综合得到对裂隙定性或半定量的记录,随着技术发展,研究者采用数码相机照相、计算机断面成像技术(CT法)、远距显微镜、电阻率法和超声波法等来获得更加清晰的裂隙图像^[9-16],将获取的数字图像,采用各种图像处理方法^[17-19]进行统计分析,并建立各种模型。对于土体裂隙的研究主要集中在土体表面裂隙,暂时还没有较为方便、可靠的裂隙深度的直接量测和描述方法,部分学者采用间接手段^[20]或建立模型^[21]对其进行量测和描述。

Terzaghi(1936)^[22]最早注意到裂隙发育对土体强度的影响,指出裂隙是超固结黏土的结构特性,并指出裂隙对土体强度有重要影响;Archie(1942)^[23]最早提出了只适用于饱和和无黏性土的电阻率模型;Skempton(1964)^[24]提出裂隙会引起应力集中,超过黏土抗剪强度峰值,导致土体破坏;Waxman等(1968)^[25]则提出了适用于非饱和黏性土的电阻率模型;蒲毅彬(1993)^[26]在国内率先使用CT技术研究冻

土的结构性;赵中秀等(1994)^[27]在研究超固结黏土过程中发现土中存在的节理和裂隙是引起滑动的原因;卢再华、陈正汉等(2002)^[28]则把CT法用于湿干循环条件下膨胀土胀缩裂隙的演化研究;袁俊平等(2003—2004)^[29-30]利用远距光学显微镜对膨胀土试样进行观测,定量地描述膨胀土表面裂隙;刘松玉、查甫生等(2006—2009)^[31-33]将电阻率指标引入膨胀土的质量评价中;龚永康等(2009)^[34]采用电阻率对室内膨胀土裂隙发育进行了研究;赵明阶等(1999—2000)^[35-37]利用超声波法对岩石裂纹进行了研究,但目前超声波法尚未应用于膨胀土裂隙量测;易顺民等(1999)^[38]将分形理论应用于膨胀土裂隙结构的分形特征研究,定量地描述膨胀土裂隙的力学效应特征与膨胀土的抗剪强度指标之间的相关性;Chertkov(2000)^[39]提出利用表面裂隙平均间距来估算裂隙发育区深度以及裂隙最大深度;姚海林等(2002)^[40]推导得到膨胀土裂隙深度的表达式,求得在地下水水位趋于无穷大时的裂隙扩展深度的极值;尹小涛、党发宁等(2005—2006)^[41-42]利用图像处理技术对裂纹进行提取、几何量测及空间描述;陈尚星(2006)^[43]利用摄影确定膨胀土裂隙分形维数,并用分形插值法很好地模拟了土裂隙的细部特征;潘宗俊等(2006)^[44]采用Mitchell公式和裂隙扩展深度方程确定安康地区膨胀土大气影响深度和裂隙开展深度;李培勇等(2008)^[45]得出了同时考虑土体有效黏聚力和有效内摩擦角等参数的非饱和膨胀土裂隙开展深度的线弹性理论关系式;刘春等(2008)^[46]对含有裂隙的图像提取裂隙的宽度、长度、方向等裂隙形态参数,实现裂隙图像的计算机定量分析;冯欣(2009)^[10]通过数码摄影结合自编程序对不同脱湿速率下的室内膨胀土裂隙扩展特征信息进行提取并分析其开裂规律;李雄威等(2009)^[11]基于MATLAB软件二值化像素统计的方法对膨胀土表面裂隙的发展规律进行了分析;王军(2010)^[47]对干湿循环后的膨胀土样进行多个切面的CT扫描并形成了三轴试样的裂隙重构图;周伟(2011)^[13]提出使用试样收缩面积和裂隙面积来定义土体的收缩开裂裂隙度;张家俊等(2011)^[48]提出矢量图技术提取及分析裂隙的几何要素;刘艳强(2012)^[49]结合MATLAB图像处理技术分析不同压实度、干湿循环次数及加筋与否条件下填筑膨胀土中裂隙的产生和扩展规律;包惠明等(2011)^[50]获得膨胀土试样在整个干湿循环过程中的裂隙分维变化规律。

(2) 膨胀土结构特性研究

土的微观结构是影响土体强度、变形、渗透等工程特性的内在因素,是影响膨胀土工程性质的重要因素。20世纪60年代末期,随着扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)等测试技术的发展以及数字化图像处理技术的应用,人们对土的微观结构的认识更进一步,通过微观试验研究可以认识土的许多工程特性的本质原因。

自1925年Terzaghi提出土的微结构(microstructure)概念和思想以来,大量

学者^[51-54]对岩土材料的微结构进行了研究和探讨,提出了许多岩土材料微结构模型,强调了研究土的微观结构的重要意义,正是基于对红土、黄土、膨胀土以及冻土等特殊土的微观结构研究,认识到导致各种土的力学性质具有较大差异是由各自不同的微观结构造成的,并指出采用宏观和微观相结合的方法对认识土的基本特性和建立土的结构模型等具有重要作用,1973年专门召开过一次微结构国际会议,表明了人们对膨胀土结构研究的重视程度。

目前已研制和发展了大量的微结构测试方法,如压汞法(MIP)、扫描电子显微镜分析法(SEM)、磁化率法、声波法、渗透法、气体吸附法、X射线衍射法、计算机断层分析法及微结构光学测试系统等。其中,压汞试验与扫描电子显微镜试验众所周知,国内外大量研究成果表明:扫描电子显微镜分析法可以定性分析土中孔隙的分布状况;而压汞法可以定量给出土中孔隙的体积分布状况,定量研究微观孔隙结构最常用的一种方法。压汞法测定孔径的范围较其他方法宽很多,一般可测量的孔径范围为 $4\text{nm}\sim 200\mu\text{m}$,可以反映大多数材料的孔隙结构状况^[55]。因此压汞法和扫描电子显微镜分析法相结合是研究土微结构变化的有效方法^[56-58]。以下介绍几种常用的微结构测试方法及其应用。

压汞法:压汞法是依据非浸润性液体(比如汞)在没有压力作用时不会流入固体孔隙的原理来测定土体孔隙分布的。测量简单,测量时只需记录压力和体积的变化量,测量孔直径范围也很广,一般在几十纳米到几百微米之间,能反映大多数岩土材料孔直径状况。该测试法的不足之处:所测试样的孔隙中必须是干燥无水的,孔隙必须是连通的,对必须先通过较小孔隙才能进入的大孔隙的一些汞,测不出结果。

扫描电子显微镜分析法:扫描电子显微镜是近代研究物体表面微观结构的一种全能电子光学仪器,其基本工作原理是利用电子束作为照明源,电子束经聚焦变成电子探针,电子探针在试样表面扫描,其高能量电子与所分析试样物质相互作用,就会产生各种信息,这些信息的强度和分布与试样的表面形貌、成分、晶体取向以及表面状态等因素有关,通过采集和处理这些信息,便可以获得表达试样微结构形态的量。由于扫描电子显微镜具有分辨率高、景深长、成像富有立体感及分析功能多等优点,其已成为目前岩土材料微结构研究中最普遍、最重要的手段之一。扫描电子显微镜分析法的缺点:①所观测的样品必须为固体,并在真空下具有长时间的稳定性;②测试前,需事先对土样进行脱水干燥处理;③只能观测到物体表面的形状,很难测试到物体内部结构的变化状况。

计算机断层分析法:计算机断层分析法(computerized tomography, CT)是以计算机为基础对被测体断层中某种特性进行定量描述的一种技术,其基本原理是利用X射线通过物体时会产生衰变,这些衰变是由物体的密度、活性原子数量及厚度决定的,因而可以得到被测物体的微结构信息。该技术具有无损、动态、

定量检测、分层识别材料内部组成与结构信息、高分辨率及数字图像显示等优点,因此在岩土工程中得到了广泛应用。但由于CT技术的CT数是一个标量,根本无法表明岩土材料微结构的空間排列方式或其定向程度,目前对CT图像的刻画还停留在宏观和定性分析阶段,对其所表达的微观信息的准确刻画还未得到充分发展。

光学图像测试法:目前,在岩土工程中采用的光学仪器主要是固体器件摄像机(chagre couled device, CCD)。该光学图像测试法的工作原理是通过固体器件摄像机这一图像探测器,将景物通过物镜成像在一块电荷感应光板(电荷耦合探测器)上,用感应光板上的感应电压模拟物镜的光亮变化,再通过视频图像采集卡将摄像机取得的模拟图像信号转换成数字图像信号,使计算机得到所需要的数字图像信号,再对数字图像信号进行处理来得到反映物体的微结构变化特征的量。该测试法可以获得岩土材料土样微结构图片上所有的结构信息,能反映其微结构的变化情况,能实现颗粒大小、形状、分布、定向性、孔隙大小和形状、粒间联结方式等结构要素的量化分析,因此在研究岩土材料的微结构测试方面得到了应用。虽然光学图像测试法是一种新的测试手段,但测量时如果土样亮度过高或过低,图像数据的分布将出现极限饱和的情况,会对图像处理结果的正确性产生影响;其测量土体微结构的精度还受实验装置的优劣、图像处理算法选择的合理性的影响。

X射线衍射分析法:X射线衍射分析法是根据光学中的干涉原理来研究土体结晶构造和矿物成分的。当X射线射入土体矿物晶格中时,将产生衍射现象,不同的土体矿物,晶格构造各异,会产生不同的衍射图谱,从而可得到其衍射峰值,然后根据衍射峰值就可判断出矿物类型。X射线衍射分析法只适用于单一矿物组成的土结构研究,当土中含有多种矿物时,对其成果的准确分析尚有待进一步完善。

微结构测试方法在分析土体微观结构中得到广泛应用。高国瑞(1981, 1984)^[59-60]对黏土矿物叠片体与其工程性质的关系做了较多的研究。Delage P 和 Guy Lefebvre (1984)^[61]利用压汞法和扫描电子显微镜分析法研究了原状Champlain 灵敏性黏土在不同的固结压力下的孔隙变化特征,试验表明,土样在压力增大过程中最先压缩的是集合体之间的大孔隙。廖世文(1984)^[62]、李生林等(1992)^[63]通过对膨胀土微结构的研究,得出了膨胀土的胀缩性、强度特性及变形特性在很大程度上取决于膨胀土的微观结构特性的结论。张梅英等(1993)^[64]实现了扫描电子显微镜对土体在受力过程中的微结构观测的动态实验。在这里,仅从扫描电子显微镜的静态观测成果对其进行介绍。谭罗荣等(1994)^[65]提出了一个评价试样定向度的公式。目前,微结构的研究已经发展到定量研究阶段,现在的问题是定量研究如何向简化测试手段发展,以便为工程所用。施斌等(1995)^[66]开

发了土体微观结构 DIPIX 图像处理系统,并利用该系统对膨胀土击实土样微结构 SEM 图像进行分析研究。刘小明等(1997)^[67]利用扫描电子显微镜对在各种受力下的拉西瓦花岗岩破坏断口的微结构进行了扫描,分析了其微观破坏形貌特征和微观破坏力学机制之间的关系。黄俊(1999)^[68]用压汞法分析了泥炭土在固结过程中孔隙结构变化的状况,及其经过改良后在加固过程中微细结构变化情况。胡瑞林等(2000)^[69]用自行研制的微结构图像处理系统对黄土在静、动载下的微结构 SEM 图像进行了研究分析,解释了黄土宏观变形的微结构控制机理。赵永红等(2002)^[70]对不同荷载作用下细砂岩的加、卸载扫描电镜图像进行了数字散斑相关处理,分析了其表面微裂纹的变形情况。卢再华、陈正汉等(2002)^[28]研制了能和 CT 机配套使用的非饱和膨胀土三轴仪,并利用该仪器对膨胀土在三轴剪切过程中内部结构的变化进行了一系列研究分析。吴紫汪、马巍等(1997)^[71],刘增利等(2002)^[72],孙星亮等(2005)^[73]对冻土在蠕变过程中、在单轴压缩及三轴剪切下的内部结构变化进行了 CT 观测分析。Cui Y J 等(2002)^[74]在体积限制状态下对 Kunigel 黏土土样施加不同的吸力,通过孔隙分布观察土样在不同吸力作用下的孔隙变化特征,发现随着吸力下降至零,土样孔隙逐渐呈现均质,集合体中晶层的分散以及集合体的变形使大孔隙被压缩是造成这一现象的主要原因。吕海波等(2003)^[75]对单向压缩下天然结构性软土进行了压汞试验,分析了其在压缩条件下的孔隙大小分布状况。河海大学岩土所(2003)^[76]根据该光学图像测试法的工作原理,研制了适用于岩土材料微结构分析的光学测试系统。洪振舜等(2004)^[54]采用压汞法对不同固结压力下的天然沉积硅藻土的微观孔隙进行了压汞分析,探索了其微观孔隙入口孔径分布与应力水平的关系。王洪兴等(2003)^[77]对水往返作用下的滑带土的黏土矿物定向性进行了 X 射线衍射研究,并分析了其对滑坡的作用。叶为民等(2005)^[78]通过水银注入累积曲线以及孔隙分布图研究了 MX80 在自由膨胀状态下的体积变化特征,发现压实膨胀土水化过程中,土体积的膨胀主要是由于膨胀土集合体结构中集合体之间的大孔的扩张。徐春华等(2005)^[79]对在动三轴下的冻结粉质黏土进行了 CT 观测,定量分析了试验后土样结构微裂纹及密度变化规律。董好刚等(2006)^[80]用扫描电子显微镜对循环振动荷载下的黄河三角洲潮坪土在振动前后微结构变化情况进行了分析研究。雷胜友、唐文栋等(2006)^[81],王朝阳、倪万魁等(2006)^[82]对黄土在不同受力状态下的微结构特性进行了 CT 分析,探讨了其力学机制。姜岩等(2010)^[83]对天津滨海新区典型结构性软土进行动三轴试验和压汞试验,对交通荷载作用下结构性软土微观结构变化进行了研究,结果表明:在动荷载作用后,天津滨海新区典型软土的孔隙分布发生改变,可分为 3 种类型。丁建文等(2011)^[84]采用压汞法对疏浚淤泥流动固化土进行了微观孔隙结构的研究,分析了固化土的孔隙体积及入口孔径分布特征与固化材

料掺量及固化土龄期的关系,并将微观试验结果与固化土的物理指标和强度特性进行了比较。张先伟等(2012)^[85]为探求土体在变形过程中微结构形态的演化规律,对湛江结构性黏土进行室内压缩试验,通过真空冷冻升华干燥法对天然土和压缩后土制样,进行扫描电子显微镜扫描试验和压汞试验,基于灰度计算土的三维孔隙率,分析压缩过程中微观孔隙的变化规律。蒋明镜等(2012)^[86]应用压汞试验研究了不同应力路径试验前后原状和重塑黄土孔隙分布的变化,探讨了宏观力学特性与孔隙分布的联系。叶为民等(2013)^[87]针对高庙子膨润土在不同含水率和不同干密度条件下的微观孔隙结构时效性进行了试验研究,分别采用压汞法和扫描电子显微镜分析法对静置不同时间后试样的微观孔隙结构进行量测。试验结果表明,高庙子膨润土集合体间大孔隙随静置时间增加逐渐减少,而集合体内孔隙和小于压汞仪最小探测粒径的极小孔隙逐渐增多;随着静置时间的延长,膨润土微观孔隙结构趋于均匀化。王婧(2013)^[88]通过宏观与微观试验,系统地介绍了研究珠海软土工程性质的手段方法,分别从宏观及微观的角度分析了珠海软土固结等工程特性及其固结过程变化的微观机制。张先伟等(2014)^[89]利用扫描电镜与压汞试验,分析湛江黏土扰动后不同静置龄期下的结构演变规律。结果表明:黏土触变过程中的强度恢复主要是颗粒间引力与斥力的相互作用的力场变化使结构由分散趋向絮凝发展所导致,这一过程中结构产生自适应调整,孔隙分布均匀化发展,微观结构向亚稳定结构转变,在一定时期内表现出触变现象。

(3) 膨胀土微观结构模型

膨胀土具有何种微观结构特征,与膨胀土的含水量大小、组成的矿物成分,以及所处的地理环境有关。早在1958年,土力学家T W Lambe对不同含水量和击实能量下击实黏性土的微观结构及其对工程性质的影响进行了研究^[90],由于测试技术的限制,无法观测击实黏性土的真实微观结构形态,只是提出了一种假想的微结构模型来讨论微结构与工程性质的关系;谭罗荣等^[91]通过研究我国一些典型的膨胀土微观结构特征,将膨胀土中的微观结构单元归纳为三种类型,即片状颗粒、扁平状聚集体颗粒和粒状颗粒单元。在此基础上,将由微结构单元组成的微结构特征分为六种,即絮凝结构、定向排列结构、紊流结构、粒状堆积结构、胶黏式结构和复合式结构。李生林^[63]的研究结果表明,击实土和原状土在微结构上的差异很大,因此在相同的密度和含水量条件下,击实膨胀土的胀缩性比原状膨胀土要高,也决定了它们在许多工程性质上的差异,如原状土有较高的强度,较低的渗透性和压缩性。而相应击实土的强度较低,渗透性和压缩性都较大。同时通过对大量击实膨胀土样的扫描照片的分析研究,得出以下四种典型的微结构模型:①集粒结构,这种结构是由原生矿物颗粒(单粒)、外表包有黏土的集聚颗粒(包粒)和由黏土颗粒无序组合的团聚体组成,这种结构是在低-中等含水量下制备,由于较大吸力

的作用团聚体不易击实变形而成。②镶嵌结构,由单粒、包粒、团聚体和由黏粒有序组合的叠聚体组成,叠聚体沿大颗粒边缘呈定向排列,这种结构在击实土中常见。它是在碎屑矿物颗粒、包粒、强度较高的团聚体与含水量较高的团聚体、叠聚体所占比例差不多的击实土中,由于挤压而成。③紊流状结构,由单粒、包粒、强度较高的团聚体与呈良好定向的叶片状黏粒共同组成。击实土中的这种结构,是由较少的单粒、包粒、较大的团聚体与含水量较高的叠聚体、团聚体经单向挤压而成。④定向排列结构,由定向排列的叠聚体组成,这种结构只有在含水量很高、原生矿物颗粒较少的土经击实后而成。

综上所述,与一般黏土相比,膨胀土具有胀缩性、裂隙性和超固结性,针对膨胀土这三个特性及其对工程性质的影响,目前的研究主要集中在胀缩性和裂隙性方面。膨胀土裂隙是由几种外因共同作用产生的,且各种因素作用产生的裂隙差别有时并不明显,膨胀土裂隙具有复杂性及不确定性,其中胀缩裂隙是最主要的裂隙类型。裂隙量测由开始的简单量测到采用数码相机、CT、远距显微镜等先进的仪器观测来获得高清晰的裂隙图像,对获取的数字图像采用各种图像处理方法进行统计分析,并建立各种模型。目前,裂隙直接量测和描述主要集中在土体表面裂隙,深度量测主要采用间接手段或建立模型对其进行量测和描述。岩土材料微结构及其与宏观物理力学特性响应的研究已取得了长足进展,能观察到岩土材料的颗粒、孔隙大小及形状等,揭示土体工程特性与其微细结构变化之间的内在规律性,建立具有微细结构变化特征背景的关系,很多学者提出许多微细观模型,尝试建立微细观和宏观的联系,使之能通过测定微细观结构而得到宏观参数。虽然岩土材料微结构研究有了大量成果,但在实际测定中仪器不能连续测试岩土材料在荷载下微结构的真实变化状况,因此也无法得到岩土材料微颗粒及孔隙的实际变形和位移信息,主要还是用于定性分析,因而有其局限性。

1.3 分形几何在土体微结构研究中的应用

人类生活的世界充满了各种复杂、不规则的现象,传统的欧氏几何学难以对这些复杂、不规则的现象进行描述,而分形几何则解决了这个问题。换句话说,分形几何就是对不规则但具有某种意义的自相似图形进行研究的几何学。不同于传统几何学的是,它有两个基本特征:自相似性与分形维数^[92]。

(1) 标度不变性和维数

想要了解自相似性,首先要了解什么是标度不变性。无标度性是指研究对象没有特征长度的性质。众所周知,在传统欧氏几何中,只要特征长度没有变化,那么其本身的性质也不会产生太大的改变,而自相似性则是不具有特征长度的对象的重要特征。由此可知,分形是不具有特征长度的,尽管如此,它在每一个尺度上却有着十分复杂的细节,它给出了自然界中复杂几何形态的一种定量描述。其在数学上可表示为:

$$f(\lambda r) = \lambda^m f(r) \quad (1-1)$$

当 r 扩大为 λr 后,新的函数就增大为原来的 λ^m 倍,即标度改变了 λ 倍后,函数具有自相似性。

在欧氏空间中维数定义的数学表达式如下所示:

$$N(r) = \frac{1}{r^d}, \quad d = \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}, \quad d = 1, 2, 3 \quad (1-2)$$

它是维数本质的数学特征。在分形中,如果研究图形具有严格的自相似性,则它的维数可以用此式求得。但是对于一般的分形维数的计算公式则要根据不同情况来定。

(2) 分形维数的计算

分形维数有着很多不同的定义和计算方法,这里只列举常用的几种计算方法。

① Hausdorff 维数。

对于具有严格自相似的几何对象,当把它的线度放大 L 倍时,它本身成了原来几何体的 K 倍,则这个对象的维数为:

$$D = \frac{\ln K}{\ln L} \quad (1-3)$$

例如,把一个正方形每边放大 4 倍,图形本身则会变为原来的 16 倍,所以 $L=4$, $K=16$, 而 $D = \ln 16 / \ln 4 = 2$, 即正方形的维数为 2。

② 容量维数。

设球的个数的最小值为 $N(\epsilon)$, 容量维数 D_c 则可用下式来定义:

$$D_c = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)} \quad (1-4)$$

这是测量几何实体分形维数的有效方法。

(3) 分形几何在岩土领域中常用模型

分形几何的模型基本都是根据自相似性和标度不变性建立起来的,而大量研究表明,岩土内部微观孔隙具有统计意义上的自相似性,可以使用分形几何进行研究,目前使用得较多的模型是 Koch 曲线、Sierpinski 垫片和地毯、Menger 海绵等模型,其图形见图 1-1。

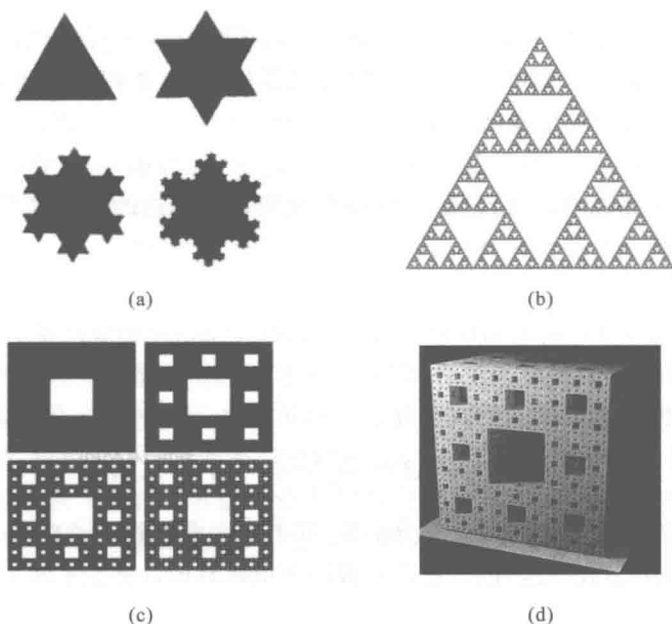


图 1-1 常用分形几何模型

(a) Koch 曲线; (b) Sierpinski 垫片; (c) Sierpinski 地毯; (d) Menger 海绵

以上这几种分形模型是目前讨论最多的,其中 Sierpinski 垫片和地毯、Menger 海绵模型与孔隙结构比较相似而被研究者用来建立孔隙结构的分形数学模型,二维孔隙表面分布模型多使用 Sierpinski 垫片和地毯建立,而三维孔隙体积分布模型则多使用 Menger 海绵来建立。其中 Menger 海绵模型是 Sierpinski 地毯模型的三维扩展,可以发现 Menger 海绵的每一个面都是 Sierpinski 地毯,所以 Menger 海绵又被称为 Menger-Sierpinski 海绵。Koch 曲线则经常被用来构造描述孔隙边缘轮廓的分形数学模型。

本书采取的试验为压汞试验和扫描电镜试验,而 Menger 海绵的建立与压汞试验测量孔隙过程相似,即先进入大孔隙,再到小孔隙,所以 Menger 海绵与压汞试验数据相似性很好,已有很多研究者利用 Menger 海绵模型来处理压汞试验数据,从而得到分形维数,这是目前使用较多且可靠的方法。扫描电镜图片得到的土体表面微观孔隙可认为是孔隙在土体表面的分散系统,是一种二维的孔隙表面分布结构,而 Sierpinski 地毯模型比较适合描述这种离散的结构,因此使用基于 Sierpinski 地毯建立的分形模型来计算二维孔隙结构和变化规律是比较好的选择。

(4) 孔隙分形模型概述

分形几何在岩土领域内的应用主要分为三个部分,第一个部分是证明所研究土体具有分形特性,即分形几何应用到岩土上的可行性,目前已经有大量研究证实