

软黏土微观结构分析及宏观力学计算

MICRO-STRUCTURE ANALYSIS AND
MACRO-MECHANICAL CALCULATION OF SOFT CLAY

徐日庆 邓祎文 等著



科学出版社

软黏土微观结构分析及宏观力学计算

徐日庆 邓祎文 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先介绍了软黏土的微观结构试验测试方法,提出软黏土的接触面概念和测试方法。其次,介绍了基于微观结构的软土孔隙率定量方法和软土平均接触面积率定量方法,建立平均接触面积率与宏观孔隙率之间的关系。然后,介绍了基于平均接触面积率的软土渗流分析、饱和软土固结理论、土压力理论和土坡稳定理论。最后,介绍了基于平均接触面积率的抗剪强度理论。

本书内容切中国际研究热点,学术思想新颖,逻辑性强,结构体系好,对土力学理论注入了新鲜活力。

本书主要读者对象为高等院校研究生、高年级本科生以及科研单位研究人员和高级技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

软黏土微观结构分析及宏观力学计算/徐日庆,邓伟文等著. —北京:科学出版社, 2017.2

ISBN 978-7-03-051894-1

I. ①软… II. ①徐… ②邓… III. ①软黏土-土力学-研究 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 036799 号

责任编辑:许 健 高慧元/责任校对:彭珍珍

责任印制:谭宏宇/封面设计:殷 靓

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:11

字数:223 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

土的微观结构决定土的宏观力学性质，但长期以来，许多土力学理论都是借助固体力学的理论建立起来的，没有充分考虑土的工程特性。学术界和工程界都认识到土的结构对土的工程性质有重要影响，开展了大量的微观结构研究，但其成果很难在宏观力学计算中应用。本书通过研究软黏土的微观结构，以接触面积为突破口，建立了微观结构与宏观力学计算之间的桥梁，并将成果应用于土力学的主要问题——渗流问题、固结问题、稳定问题、土压力问题和抗剪强度问题。

本书首先介绍了软黏土的微观结构试验测试方法，提出软黏土的接触面概念和测试方法。其次，介绍了基于微观结构的软土孔隙率定量方法和软土平均接触面积率定量方法，建立平均接触面积率与宏观孔隙率之间的关系。然后，介绍了基于平均接触面积率的软土渗流分析、饱和软土固结理论、土压力理论和土坡稳定理论。最后，介绍了基于平均接触面积率的抗剪强度理论。

本书从微观角度揭示了软黏土的结构特点，发展了有效应力，建立了微观与宏观的内在联系，展示了微观结构影响宏观力学的内涵，使微观结构研究成果得到实际应用。本书成果刷新了土力学许多理论，学术价值和应用价值十分显著。

本书由徐日庆和邓玮文编著，徐丽阳参加了第2~4章的研究工作，朱亦弘参加了第3章的研究工作，冯苏阳参加了第4章的研究工作。

感谢国家自然科学基金的资助——项目“基于软黏土微观结构研究的宏观力学机制研究”（批准号41672264），“考虑土非连续性的强度和变形理论研究”。

感谢浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心同事们的支持和帮助。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2016年11月

于浙大紫金港

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 土体微观研究制样技术现状	3
1.2.2 土体微观测试技术应用现状	6
1.2.3 土体微观定量研究现状	11
1.2.4 土体微观本构模型研究现状	12
1.2.5 土体微观动态研究现状	14
1.2.6 土体宏微观关系研究现状	15
1.3 目前存在的问题	18
1.4 本书的主要工作	19
第 2 章 基于微观结构的软土孔隙率定量研究	21
2.1 引言	21
2.2 试验介绍	22
2.2.1 试验设备简介	22
2.2.2 试验材料及其特性	24
2.2.3 试样的制备	24
2.3 软土微观孔隙率研究	25
2.3.1 软土三维孔隙率定性评价及定量计算方法	25
2.3.2 孔隙数量、大小及变化趋势的三维体现	27
2.3.3 软土微观孔隙率的定量分析	30
2.3.4 三维孔隙率的影响因素分析	32

2.4 本章小结	37
第3章 基于微观结构的软土平均接触面积率定量研究	39
3.1 引言	39
3.2 软土接触面积微观定性评价	40
3.3 软土平均接触面积率研究	41
3.3.1 平均接触面积率的定义	41
3.3.2 平均接触面积率的统计分析	43
3.3.3 平均接触面积率与孔隙率关系研究	45
3.4 平均接触面积率统计影响因素分析	46
3.4.1 不同阈值步距的影响	46
3.4.2 不同放大倍数的影响	47
3.4.3 不同阈值的影响	50
3.4.4 选区像素大小的影响	51
3.4.5 误差分析	52
3.5 本章小结	53
第4章 平均接触面积率与宏观孔隙率之间的关系研究	55
4.1 引言	55
4.2 试验介绍	56
4.2.1 试验材料及特性	56
4.2.2 试样制备及物理特性	57
4.2.3 电镜测试方案	60
4.3 测试结果及分析	62
4.4 本章小结	71
第5章 基于平均接触面积率的渗流分析	73
5.1 引言	73
5.2 考虑接触面积率的软土地下水渗流速度	75
5.2.1 一维渗透试验与达西定律	75
5.2.2 土中水的渗透速度	76

5.3 考虑接触面积的渗流作用力	77
5.3.1 静水压力	77
5.3.2 动水压力	78
5.3.3 流土与管涌	81
5.4 考虑接触面积的渗流出口临界水力坡度	82
5.5 本章小结	84
第 6 章 基于接触面积的固结理论	86
6.1 引言	86
6.2 考虑接触面积率的饱和土有效应力原理	87
6.2.1 有效应力公式推导	87
6.2.2 与 Terzaghi 有效应力公式的对比讨论	89
6.3 考虑土体接触面积的一维固结理论	90
6.4 考虑土体接触面积的 Biot 固结理论	93
6.5 本章小结	98
第 7 章 基于接触面积的土压力理论	100
7.1 引言	100
7.2 考虑颗粒接触面积的水土分算静止土压力	102
7.2.1 方程的引出	102
7.2.2 算例分析及结果讨论	105
7.3 考虑颗粒接触面积的水土分算朗肯土压力	109
7.3.1 朗肯土压力理论	109
7.3.2 不同条件下的水土分算朗肯土压力	111
7.4 本章小结	117
第 8 章 基于接触面积的土坡稳定理论	119
8.1 引言	119
8.2 考虑接触面积的稳定分析法	120
8.2.1 瑞典条分法	120
8.2.2 简化 Bishop 法	123

8.3 考虑接触面积的各种因素对土坡稳定性分析·····	126
8.3.1 坡顶超载对边坡稳定性的影响·····	128
8.3.2 浮力和渗流力对边坡稳定性的影响·····	129
8.3.3 地震力和其他振动力对边坡稳定性的影响·····	131
8.4 本章小结·····	132
第9章 基于平均接触面积率的土抗剪强度理论 ·····	134
9.1 引言·····	134
9.2 考虑接触面积的土抗剪强度理论和极限平衡条件·····	135
9.2.1 莫尔-库仑强度理论·····	135
9.2.2 土的抗剪强度与抗剪强度指标·····	137
9.2.3 土的极限平衡条件·····	139
9.3 考虑接触面积的无黏性土抗剪强度理论·····	142
9.4 考虑接触面积的饱和黏土抗剪强度理论·····	144
9.4.1 孔隙压力系数·····	144
9.4.2 正常固结和超固结土的抗剪强度·····	149
9.5 抗剪强度的影响因素·····	153
9.5.1 土的结构性影响·····	153
9.5.2 应力历史的影响·····	154
9.5.3 土体各向异性的影响·····	154
9.5.4 加荷速率的影响·····	155
9.5.5 蠕变对土体抗剪强度的影响·····	156
9.5.6 土体固结对黏性土抗剪强度的影响·····	156
9.6 本章小结·····	157
参考文献 ·····	159

第1章 绪 论

1.1 研究背景

土作为一种工程材料,其特性跟一般的材料有明显的差别,各向异性及材料的非线性是其主要特征,除此之外,它的受力计算还涉及弹性力学、塑性力学、流体力学、地质学、矿物学、数学等多种学科的交叉影响,同时与水文地质学、地震工程学等许多学科发生密切的关系,还受其环境条件、工程材料、施工技术条件等的因素影响。因此,从根本上讲,任何基于传统的数学、力学理论和线性分析方法都难以将之准确地表达。同时,土体又作为一种结构性体,一个完整的系统结构,其系统内部演化必然存在一种相互关联和协调作用,构成土体结构共同特征的各项要素绝非孤立的,也绝非固定不变的,土体所表现出来的各种强度和变形特性是其系统内部各种结构要素发生变化的外在反映,土体内部结构的各要素对土结构特性的变化起着重要作用。

研究表明,土体在宏观上表现的一系列物理力学性状均是其微观结构的具体表现,土体的宏观性质在一定程度上受微观结构状态和变化的影响。土力学研究中,人们通常采用的是传统方法来建立土的力学模型和本构关系:利用理论假设—室内实验—数据分析—力学、数学模型这一过程来建立计算模型,此方法经历了上百年,且已建立的许多经典模型被广泛用于计算分析,在实际工程中起了很大的作用。这种模型通常是经过宏观方法来建立的,土体结构的微观作用在模型中难以体现,实际工程中也经常会发现计算结果与监测结果存在较大偏差,有时也会给工程建设指引带来一些困惑。其主要原因是土是一种很复杂的材料,大多数的模型都是基于饱和土或砂在连续和均匀假设条件下建立和发展起来的,难以全面表达土体结构的复杂性。因此,在土力学理论中,有必要对其工程的实用性进行提升和完善,通过土体的微观内在联系,建立一套能与土体的真实力学行为相对应的,以土体微观结构为基础的相关土力学理论,进一步揭示土体微观结构特性对

其宏观性质的影响,同时建立基于微观结构演化机制的土体计算模型,将土体微观结构引入土力学中,研究宏微观之间的联系以及在土力学中的应用,为工程中出现的实际问题给予更加科学的解释,并提供解决方法。

从微观结构上着手研究土力学的相关问题意义重大,对土体微观结构进行系统的研究,可以进一步认识土体受力及变形的宏观行为,掌握土体结构变形和破坏的内部机制。与传统的土力学相比,从微观结构上对土体进行研究,是一个从材料内部机制到外部表现的研究过程,其结果是从本质上揭示土体的结构问题,而传统土力学则是从现象上揭示土体的一些特征问题;微观研究以颗粒为主体,考虑的是非连续性问题,而宏观土力学则假设土体材料是连续性的,其结果在表征土体材料的实际情况上存在一定的差异,微观更能体现土体的真实情况;微观强调的是颗粒之间的结构性,而传统研究考虑的是一个整体,忽略了土体内部的结构性。因此,土体微观研究的方法和理论与传统的研究相比,具有其独特的一面,建立基于微观结构特性的研究体系并用于土力学计算,将对岩土工程有极大的贡献。

1.2 国内外研究现状

早在 1925 年,土力学鼻祖 Terzaghi 就提出了:在评价软黏土的工程地质性质时,应当注意考虑其微结构的影响。著名土力学专家沈珠江院士(1996)曾指出“土体结构性的数学模型的建立将成为 21 世纪土力学的核心问题”,并认为这是人们在深化土体力学特性的认识方面完成的第二次飞跃。谢定义(1997)认为,20 世纪土力学研究中一个具有根本性的事件是土质结构的微观细观研究与宏观力学特性的结合(土质学与土力学在更深更细层次上的结合)。并于 1999 年提出了一个既能反映结构性关于颗粒排列(即几何特征影响),又能反映结构性关于颗粒联结(即力学特征影响),并具有简便、明晰特点的结构定量指标(综合结构势)。然后通过试验检验了这个定量化参数在表征结构性对土性影响方面的良好功能和合理性。

由此可见,基于微观结构变化的土体力学特性研究是当前土力学领域中广泛

关注的前沿课题之一,越来越多的学者已经着手对土体力学的微观行为进行了研究,并取得了一定的成果。土体在宏观上表现的变形破坏等特征,均是由微观结构的变化积累扩展引起已经得到众多学者的认同,掌握土体微细结构破坏规律,已对软土微观结构进行了大量的研究,总结起来主要包含以下几个方面:制样技术、测试技术、定量研究、微观本构模型、微观动态研究以及微观与宏观力学之间关系的建立问题。

1.2.1 土体微观研究制样技术现状

目前,软土微观试验研究最常用的方法是仪器扫描成像,主要使用的是电子显微镜(简称电镜),电镜扫描成像条件要求较高,无论背散射电子还是二次电子成像,只有少数样品表面能产生电子。因此在扫描前要进行相应的处理,对样品的最基本要求为干燥的固体,对于不导电样品,如混凝土、软土等材料,常用的方法是喷金、喷碳处理或使用导电胶。经过多年的发展,制样技术得到了很大发展,国内外常用的软土微观研究试样制备主要有风干法、烘干法、置换法、临界点干燥法、真空冷冻升华干燥法(洪宝宁等,2010;李妥德等,1985)。

(1)风干法。该方法是将样品在常温条件下自然风干,该方法不需要复杂的设备,简单易行。但实践表明,对于含水量较高或亲水性较强的黏土或黏粒含量高的土样,用风干法制样时,由于孔隙液体表面张力较大,容易引起土样收缩开裂,土体孔隙状态发生改变,当含水量较高时,孔隙收缩量可以达到50%以上,严重改变了土体的原状结构。因此,该方法只适用于含水量低、黏粒含量少或胶结良好的土体。鉴于该方法简单、实用、经济的特点,仍为许多研究者采用。

(2)烘干法。将样品置于烘箱中,在105℃的温度条件下烘干,这种方法比较简便,制样速度也较快,由于液体的表面张力随温度的升高而降低(表1-1),试样烘干时的收缩率要比风干时小一些。张平等(2011)通过采用风干法、烘干法和冻干法分别对不同含水量的重塑膨润土进行干燥制样,得到采用风干法、烘干法和冻干法干燥制样后土体孔隙分布的差异性,土样的含水量越高,差异越明显,烘干土样收缩要比风干小的结论。但因干燥速度过快,土样收缩也大,加上土样中

水分迁移时，分子应力分布不均匀常导致样品内部产生微裂隙，同时高温作用下对土体内部的有机质成分还会产生一定的影响。

表 1-1 不同温度下水的表面张力

温度/℃	0	20	35	60	75	80	100
表面张力/Pa	7.53	7.28	7.02	6.71	6.43	6.13	5.03

(3) 置换法。该方法是一种为了减少土中孔隙水溶液的表面张力而采用的方法。该方法在样品干燥之前用低表面张力的置换液(乙醇或丙酮)置换样品中的孔隙液体，然后再让它自然蒸发，由于置换液体的选择及置换过程中会使土样发生变化，目前也不常用。

(4) 临界点干燥法。将试样放入密封容器中加热至略高于孔隙液体的临界点时，由于液-气之间不存在界面，样品的孔隙液体在稍超过其界点的状态下，从液态变成气态时不产生相变，表面张力为零，这样可以大大降低样品的收缩。李妥德等(1985)研究并改进了临界点干燥法在土体微观研究中的应用。通过对比不同方法制作的土样，得到土样收缩率的大小排列是：风干法>烘干法>丙临法>置换法>不过渡法>改进后的临界点干燥法。并通过不同塑性是指数土样，证明了土样的收缩性是随塑性指数的增大而增大的。只有当土体塑性指数较低时，土样的收缩率才接近于零，对比其他方法，该方法是制备土体微观结构研究试样较为理想的，可供采用。

(5) 真空冷冻升华干燥法。20 世纪 90 年代，土体制备装置随科技发展相继得到开发，这一技术难点的突破使得研究人员能更加真实地看到土体内部的实际情况，真空冷冻升华干燥法便是这一时期发展并得到提升的一种，也是目前被认为对土体扰动影响最小，土样收缩最小的方法。苏联的奥西波夫(1985)最早对此法进行过较深入的研究，由于制样速度太慢，国内学者吴义祥(1991)、李生林等(1992)相继开发了新的结构土样制备装置，使得制样速度提升了 3 倍之多，并成功地制备了宁波软土结构分析试样，通过定量分析，描述了黏土结构状态参数——结构熵、结构单元的平均粒径、平均形状系数的变化规律，并分析了结构变化与黏土

特殊物理力学性质之间的关系。

Tovey 等(1973)在国际土壤结构会议上对土及其他地质材料微观研究的扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)图像制样进行了介绍。

李榴芬(2000)为了说明液氮冷冻升华制样的具体操作过程,进行了大量的试验,并得出在条件简陋的实验室进行液氮冷冻处理样品的步骤。

软土微观试验研究的制样技术作为土微观研究的奠基石,在土力学研究者的努力下取得了巨大的成就。早期土微观结构的组成及特性,基本上是基于解释天然黏性土的某些性质而来,并没有相应的仪器设备及技术手段对其作进一步的认识。由于电镜,特别是扫描电镜的应用,人们对土体微观结构的研究有了较大的进展,不仅用它观察了大量的天然土样和室内制备的土样,随着制样技术的发展,更是看到了原状土样的内部结构,并为土体微观结构进行更深入的研究奠定了坚实的基础。

虽然目前制样技术得到了空前发展,但仍有许多未解决的问题。真空冷冻升华干燥法作为目前最优的土微观研究试样制备方法,其试验成本较高,难以普及,且对于孔隙比大、含水量高的软黏土试样,土体干燥后结构容易酥松,难以制成原状试样对其结构进行研究。土体具有结构性(沈珠江,1996),无论通过何种方法令其干燥,均难免体积的改变,只是改变量的大小问题,对于真空冷冻升华干燥法制备的试样,其体积变化大小随土体自身物理性质(如孔隙比、含水量、塑性指数等)改变而变化的情况目前在国内外均未见报道,该问题还有待进一步研究。

柴寿喜等(2005)通过冻干法制备微观研究试样,进一步证明了该法在制样过程中不会破坏软土的结构性,样品质量满足试验的精度要求,冻干后样品的线缩率和体缩率都很小,但没给出具体的收缩率和影响因素。

李妥德等(1985)对不同干燥法的收缩率进行了研究,即使采用改进后的临界点干燥法制备试样,当试样塑性指数较高时,虽然其体积收缩率相对于其他制样方法小得多,但仍不能忽视,文献中只报道了塑性指数与收缩率之间的关系,对于其他物理指标与干燥方法之间的关系仍有待进一步研究。而作为成本廉价、容易普及的风干法、干燥法虽然在制样过程中土体体积改变量较其他方法要大,但是其体积

收缩率随塑性指数的减小是逐渐降低的, 是否存在一种可能, 当土体的物理力学指标满足一定条件时, 无论采用何种方法来制作试验样品, 均能满足研究要求, 如式(1-1)所示:

$$W = \sum_{i=1}^n I_i w_i \quad (1-1)$$

式中, W 代表权值, 综合反映了土体各项物理指标对土样干燥收缩的影响; I_i 代表第 i 个土体物理指标参数; w_i 代表第 i 个物理指标在土样制备中收缩率的权重。

当 W 满足某一范围时, 土体可以用某一种方式进行制样, 此时, 将大大降低试验成本和提升试验效率。

1.2.2 土体微观测试技术应用现状

土体微观结构研究测试技术主要包含两方面内容: 一是图像采集技术; 二是图像信息处理技术。

1. 图像采集技术

图像采集技术包括两种方式, 即直接法和间接法。

1) 直接法

直接法观察的代表主要有光学显微镜观测和电子显微镜观测。光学显微镜观测是早期土体微观结构研究中应用较多的方法, 该法手段陈旧, 但设备简单、成本低, 能直接获取土样表面的颗粒结构组成情况, 可以测定试样中扁平颗粒的定向度, 还可以弥补间接观测法中仪器不能鉴别的矿物成分, 由于其制样简单, 观测条件要求不高, 早期经常被采用。

20 世纪初, 奥地利土壤地理学家 Kubiena(1938)将地质学的偏光显微镜技术和方法引入土壤学研究, 并在 1938 年发表了 *Micropedology*(《微土壤学》), 标志着土壤微形态学的建立。

Morgenstem 和 Tchalenko(1967)基于黏土矿物的双折射性质, 利用偏光显微镜测得的双折射比来确定试样中扁平黏土矿物颗粒的定向程度。

张粹雯和王遵亲(1987)用偏光显微镜对三种不同类型的盐渍土中盐结晶进行观察研究,分析易溶性盐和难溶性盐的矿物形态特征以及盐分对土壤结构的影响。

谭罗荣和张梅英(1982)用偏光显微镜、扫描电子显微镜和X射线衍射仪分别对湛江沿海软土的组构特征和扁平颗粒定向排列特征作了观察和测定,并研究了联结组构单元和颗粒单元之间的胶结物质的作用,提出一种结构模式,用以阐述湛江土的某些特殊性质的形成原因。

除此之外,Casagrande(1932)研究了黏土的结构在基础工程中的重要性,提出了建筑物基础施工要注意的两个问题;Lambe(1958)详细研究了压实黏土的结构性;Lafeber(1962)则用显微镜研究了土壤的网状骨架颗粒分布格局,并根据其强度和变形特性给出了土壤结构元素的定义。但随着仪器设备技术的发展,该法获取的图像信息逐渐被高精度的电子显微镜所取代。目前常用的有扫描电镜,其特点是放大倍数大、分辨率高、立体感强,使得土体在微观图像中的组构形态更加直观,由于观测条件较高,其试样制作过程比较复杂。但作为目前土微观研究的主要设备,深受研究人员的欢迎,并发表了大量的研究成果。

通过电子显微镜,研究人员不仅能够观察大量的天然土样,同时能大量观察室内制备的土样,还可以对不同土样进行不同目的的观察,从普通土到特殊土都进行了大量的研究。各种土的微观研究代表主要包括:海洋土(Rosenqvist, 1961)、黄土(高国瑞, 1979; 胡瑞林等, 1999; 王永炎等, 1982; 雷胜友等, 2004)、膨胀土(徐水福等, 1997; 刘志彬等, 2004)、饱和土(Romero et al., 2008; 李涛等, 2011)、固化土(郭印等, 2006)、吹填土(刘莹等, 2006; 牛岑岑等, 2011)和软土(吴义祥, 1991; Shi et al., 1995; 毛灵涛等, 2005; 王宝军等, 2004; 唐朝生等, 2008; 施斌等, 2001; 张先伟等, 2012)。研究很多,难以一一举例,不可否认,扫描电镜的出现,使得土体微观结构的研究不仅在结构层次的深度上得到了提升,在土体结构要素联系的广度上也取得了质的飞跃,也提出了多种新的结构模型,扫描电镜大大加速了土体微观结构的研究进程。

2) 间接法

间接法就是通过测定土的孔径分布、介电分散、电导、声波传递、热传导、

磁化系数等参数间接获取土体结构内部信息,并用于土体结构分析。间接法有电弥散法、磁化率法、渗透性法、声波法、能谱分析法、电子探针等,常用的主要有 X 射线衍射仪和 CT 扫描仪。

X 射线衍射仪的原理是将 X 射线照射到物体上,反射出来的波在空间特性方向上形成相互干涉而发生衍射现象,根据衍射线的方向、强度和线性所包含的大量物质结构信息来分析物体的晶体排列、晶体内部各元素的性质、原子在晶包中的位置和晶体内部的缺陷。该仪器在土微观研究中可以测定土样中扁平状黏土矿物颗粒的定向特征,相比于直接法,它不能给出直观的组构形态特征,但是能够量测较大面积和深度内扁平颗粒的平均定向情况。

Brindley(1980)用 X 射线对黏土的矿物进行定量分析;Johns(1954)通过衍射方法,对软土矿物进行了定量评估;Brown 等(1980, 1984)也用 X 射线鉴定黏土矿物的晶体结构;Sankaran 等(1973)则利用扁平黏土矿物不同晶面的衍射强度之比来定量分析蒙脱土的定向度。

CT 扫描技术在土体微观结构中的分析应用是近年来发展的新技术,它利用 X 射线穿透物体断面进行旋转扫描,收集 X 射线经此层面不同物质衰减后的信息,进行放大和模数转换后,由计算机在 CT 的探测空间范围内,与空间点相关的各个方向射线进行空间结算,得出数字图像。与光学显微镜和电子显微镜相比,CT 扫描具有非破坏、连续性、展示样本三维形态特征等优点。

孙卫等(2006)用 X-CT 扫描成像技术观察了压力作用下砂岩岩心的渗透问题,分析了注入水微观驱替渗流机理及不同注入压力下的水驱油效率变化分布规律(实验岩心的水驱油效率最高为 62%,最低为 42%,平均为 51.6%),定量评价了储层微观孔隙结构特征,得到注水驱油效率低的原因。

吴紫汪等(1997)用 CT 技术观察冻土单轴及三轴蠕变过程中细微结构的变化情况,发现了蠕变过程中结构缺陷的增长与扩展制约着土结构的强化与弱化作用,控制着蠕变变形的特征,进一步揭示了冻土变形过程中结构的强化和弱化作用。

蒲毅彬等(2000)对陇东地区黄土在单轴、三轴、渗水及其综合作用条件下进行了 CT 扫描,并更新和改造了原有的 CT 机,使得 CT 机与计算机的软、硬件连

接,实现了CT图像的彩色显示,纠正了扫描过程的数据偏差,为数据图像的深入处理提供了基础。

陈正汉等(2001)研究了可以跟CT机一起工作的三轴仪,并应用于非饱和土,成功地追踪了膨胀土试样在三轴剪切试验过程中的特性。

施斌等(2000)设计了一台能连续观测的CT仪,并将之成功应用于观测土体内部裂隙发展过程。

CT技术应用对土的微观研究有不少优势,对土体内部受力变化的压缩和击实的观察尤为适应,且已取得一定的成绩,但也有其自身的不足:试验成本偏高,当分析微粒粒径($<5\mu\text{m}$)的黏土时,其连续性就欠准确。各种分析手段对土体形貌的观测选取(李炎,2011)见图1-1。

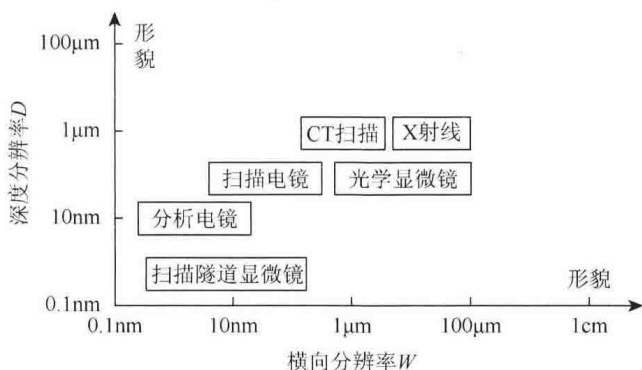


图 1-1 土体微观形貌特性分析技术的选择

无论通过直接法还是间接法得到土体微观图像,其本质均是为了得到土体的微观信息并用于结构分析,土体结构是一个整体,任何局部信息均难以完全表达出土体的真实情况,但任何局部又是整体的一个或多个信息的外部表现,只要结合内外的所有信息,并进行综合分析就能得到合理的土体结构信息。

2. 图像信息处理技术

图像研究有利于认识土体的力学行为和工程现象的本质,然而土体细微结构研究的基础是定量获取图像信息及其变化特征,由于影响土体微观图像成像的因素较多,其往往不能直接用于定量分析,因此需要通过图像处理技术来相对准确