

岩土工程国家重点学科专著系列

NATIONAL KEY SUBJECT GEOTECHNICAL
ENGINEERING MONOGRAPH SERIES

土体微细结构理论与试验

洪宝宁 刘 鑫 著



科学出版社

www.sciencep.com

岩土工程国家重点学科专著系列

土体微细结构理论与试验

洪宝宁 刘 鑫 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者在土体微细结构理论与试验方面已取得的研究成果的基础上撰写而成的。全书共分十一章,包括土体微细结构研究方法、土体微细结构光学测试系统、土体微细结构图像的处理方法、利用数字图像测量微细观几何量的方法、黏性土压缩变形的微细结构变化分析、黏性土的微细结构变化试验研究、温度变化对水泥土强度影响的微细结构试验研究、侵蚀环境下水泥土的微观变化试验研究、连续荷载作用下生态土微细结构变化试验研究、化学溶蚀作用下生态土微细结构变化试验研究、微细结构试验研究在理论分析中的应用。

本书可供土木、水利、交通等领域从事科研、设计工作的科研人员参考,也可作为高等院校岩土工程等相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土体微细结构理论与试验/洪宝宁,刘鑫著. —北京:科学出版社,2010
(岩土工程国家重点学科专著系列)
ISBN 978-7-03-027162-4

I. 土… II. ①洪… ②刘… III. 土体-结构-研究 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 059012 号

责任编辑:章安齐 / 责任校对:耿 耘
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 4 月第 1 次印刷 印张:16

印数:1—1 500 字数:310 000

定价:56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026(BZ08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

土体力学性质差异很大,具有非常复杂的非线性特征。长期的工程实践表明,土体的宏观工程性质受微细结构状态和变化规律影响,其复杂的物理力学性状是微细结构特性的具体体现。土体微细结构的多样性和易变性决定了土体工程性质在宏观上的非连续性、不均匀性、各向异性和非确定性。土体微细结构的特性很难用传统的、基于线性分析基础之上的技术方法加以准确表达。因此,土体微细结构变化规律及其对宏观力学行为影响的研究是近年来岩土学术界和工程界的前沿课题,也是岩土力学进一步发展必须解决的问题之一。该方向的研究对合理解释和准确模拟岩土材料在宏观上的非连续性、不均匀性、各向异性和非确定性具有重要意义。

通过开展土体微细结构变化规律的试验研究和理论分析,可以为土体宏观理论建立提供重要的依据,有利于土体固结、流变机理的深入研究,而且对分析和评价土体工程性质及其对工程建筑的适应性也有着明显的现实性。本书是在作者总结近年来岩土微细结构研究成果的基础上撰写而成的,代表了作者多年来在这方面的最新研究成果。本书共十一章。第一章介绍了土体微细结构研究历程,以及土体微细结构的理论和试验研究方法;第二章介绍了作者自行开发的岩土材料微细结构光学测试系统的特点、组成和试验方法;第三章介绍了图像数据的采集和处理,以及结构参数的提取;第四章介绍了利用数字图像信息测量位移、变形,以及土体微细结构形态特征的方法;第五章研究了黏性土压缩变形过程中微细结构的特征和特征量的确定方法,以及黏性土压缩变形与微细结构特征参数的关系;第六章研究了三轴压缩条件下黏性土强度特性与结构要素之间对应的变化关系和压缩特性与微细结构特征参数的内在相关性;第七章从微细结构变化角度研究和探讨了水泥土强度增长机理和受载破坏机制;第八章研究了水泥土在环境侵蚀过程中微结构形态的变化规律,以及水泥土在环境侵蚀过程中宏观力学特征参数与微细结构特征参数间的关联性;第九章研究了生态土在连续荷载作用下微细

结构特征参数变化规律;第十章研究了生态土在化学溶蚀作用下微细结构特征参数变化规律;第十一章在微细结构定量试验研究的基础上,深入研究了黏性土固结变形和剪切破坏非均匀性随微细结构的变化情况。

本课题在研究过程中,作者所在课题组的博士生胡昕、韩尚宇、刘敬辉,硕士生周宇泉、孙秋、张华杰等都进行了大量的试验和理论分析工作,本书中的部分研究成果是他们工作的总结和提炼。另外,博士生查文华、刘鑫、方庆军、化君晖,以及硕士生陈艳丽、林峥、钟四军等在研究成果总结和撰写方面也付出了辛勤劳动。

本书研究工作得到了国家自然科学基金资助项目(编号:50279008)、广东省交通厅指导性科技项目(编号:200903005)、盐城市科技发展计划项目(编号:YKJ2004002)的资助,在此表示衷心的感谢。同时感谢河海大学岩土工程国家重点学科建设经费对本书出版的资助。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正!

目 录

前言

第一章 土体微细结构研究方法	1
1.1 土体微细结构力学	1
1.2 土体微细结构研究历程	2
1.3 土体微细结构的研究方法	6
1.3.1 微细结构	6
1.3.2 连续介质力学的研究方法	7
1.3.3 试验研究方法	8
1.4 土体微细结构试验的研究手段.....	10
1.4.1 直接试验手段	10
1.4.2 间接试验手段	13
第二章 土体微细结构光学测试系统	21
2.1 土体微细结构光学静态测试系统结构与试验原理.....	21
2.1.1 测试系统组成	21
2.1.2 试验原理.....	24
2.2 试验方法.....	24
2.2.1 试验步骤.....	24
2.2.2 适用范围和主要特点	25
2.3 土体微细结构全自动三维跟踪光学动、静态测试系统.....	26
2.3.1 全自动三维跟踪控制系统.....	27
2.3.2 图像采集系统和同步控制系统	29
2.4 土体显微成像跟踪技术.....	30
2.4.1 目标运动参量在图像平面上的表示方法	30
2.4.2 适于土颗粒运动跟踪的相关公式	31
2.4.3 图像跟踪步骤	33
第三章 土体微细结构图像的处理方法	34
3.1 试验图像采集和处理.....	34
3.1.1 图像的输入和输出	34
3.1.2 图像的前处理	34

3.1.3	图像预处理	38
3.1.4	图像的处理	41
3.1.5	图像的分割	44
3.1.6	图像的融合	48
3.2	微细结构图像特征的提取	52
3.2.1	纹理特征提取	52
3.2.2	形状特征提取	59
3.2.3	其他特征提取	64
第四章	利用数字图像测量微细观几何量的方法	66
4.1	数字图像相关检测的数学模型	66
4.1.1	数字图像相关检测的数学模型	67
4.1.2	识别过程的数学描述	69
4.1.3	识别函数	71
4.2	相对变形对数字图像相关检测的影响	74
4.2.1	图像位移的近似数学表达式	74
4.2.2	消除相对变形对图像识别影响的方法	75
4.2.3	提高数字图像识别的措施	77
4.3	利用数字图像测量位移和变形的的方法	78
4.3.1	图像位移与实际位移的关系	78
4.3.2	两时刻间相对位移和变形的计算方法	80
4.3.3	连续计算相对位移和变形的步骤	81
4.3.4	误差分析	83
4.4	土体微细结构几何特征参数的测量方法	84
4.4.1	边界的提取方法	84
4.4.2	形状特征参数的提取方法	88
第五章	黏性土压缩变形的微细结构变化分析	90
5.1	黏性土的微细结构特征	90
5.1.1	黏性土微细结构和存在形式	90
5.1.2	黏性土微细结构的特征	92
5.1.3	微细结构与土体工程特性	93
5.2	黏性土压缩变形过程中微细结构的变化	95
5.2.1	颗粒形态	95
5.2.2	颗粒排列形式	97
5.2.3	孔隙性	98
5.2.4	联结形式	99

5.3 黏性土微细结构特征参数	100
5.3.1 颗粒几何特征参数	101
5.3.2 孔隙性特征参数	102
5.3.3 联结形式特征参数	103
5.4 黏性土压缩变形与微细结构特征参数的关系	104
5.4.1 黏性土压缩试验结果分析	105
5.4.2 黏性土压缩变形与微细结构特征参数的关系	107
第六章 黏性土的微细结构变化试验研究	109
6.1 三轴压缩试验中黏性土的微细结构变化规律	109
6.1.1 微细结构定量分析试验步骤	109
6.1.2 加载过程中微细结构变化规律	110
6.2 黏性土的强度特性与微细结构特征关联分析	122
6.2.1 黏性土的强度特性	122
6.2.2 结构参数与强度特性的多元回归分析	123
6.3 黏性土微细结构特征参数与压缩特性分析	124
6.3.1 黏性土的宏观物理力学试验	125
6.3.2 黏性土微细结构试验	126
6.3.3 压缩系数与微结构参数的回归分析	138
第七章 温度变化对水泥土强度影响的微细结构试验研究	142
7.1 试验方案	142
7.2 水泥土微细结构试验数据分析	143
7.2.1 随龄期增长水泥土微细结构变化试验	143
7.2.2 单轴压缩条件下水泥土微细结构变化试验	144
7.3 从微细结构变化分析水泥土强度增长机理	147
7.3.1 水泥土不同龄期强度演化特性分析	148
7.3.2 从微细结构演化角度分析水泥土强度增长	149
7.4 单轴压缩状态下水泥土微细结构变化研究	153
7.4.1 微细结构演化与宏观力学响应的关系	153
7.4.2 荷载作用下水泥土微细结构演化特性分析	154
第八章 侵蚀环境下水泥土的微观变化试验研究	159
8.1 水泥土侵蚀环境设计	159
8.1.1 试验材料	159
8.1.2 试样制备	160
8.1.3 侵蚀溶液制备及其 pH 的维护	161
8.1.4 试验步骤	163

8.2	侵蚀性环境下水泥土的微结构变化规律分析	164
8.2.1	侵蚀过程中水泥土微结构形态变化的定性分析	164
8.2.2	侵蚀过程中水泥土微结构形态变化的定量分析	170
8.3	侵蚀性环境下水泥土力学性能变化的微观机理分析	179
8.3.1	酸性溶液侵蚀下水泥土抗剪强度指标的微结构特征	179
8.3.2	碱性溶液侵蚀下水泥土抗剪强度指标的微结构特征	182
8.3.3	NaCl 溶液侵蚀下水泥土抗剪强度指标的微结构特征	185
8.3.4	无污染水侵蚀下水泥土抗剪强度指标的微结构特征	188
8.3.5	侵蚀性环境下水泥土抗剪强度指标的微结构特征分析	191
第九章	连续荷载作用下生态土微细结构变化试验研究	193
9.1	生态土的物理特性	193
9.1.1	物理指标	193
9.1.2	有机质分析	193
9.1.3	化学分析	194
9.2	试验方案	194
9.2.1	试样制备	194
9.2.2	试验步骤	195
9.3	试验结果	196
9.4	微细结构特征参数变化规律分析	200
9.4.1	颗粒、孔隙面积比例变化规律	200
9.4.2	图像灰度熵变化规律	201
9.4.3	颗粒、孔隙数目及粒度变化规律	201
9.4.4	颗粒、孔隙定向度变化规律	202
9.4.5	颗粒、孔隙分布分维变化规律	203
9.4.6	颗粒圆度变化规律	205
9.4.7	欧拉数变化规律	206
9.4.8	微细结构特性演化与宏观力学响应的关系	206
9.5	连续荷载作用下不同土性的微细结构演化规律比较	207
9.5.1	三种土的宏观力学特性	207
9.5.2	三种土微细结构演化特性比较	208
第十章	化学溶蚀作用下生态土微细结构变化试验研究	212
10.1	试验方案	212
10.1.1	化学溶液的配制	212
10.1.2	pH 的控制	213
10.1.3	容器、温度、时间的选择	213

10.1.4	试验步骤	214
10.2	试验结果分析	214
10.2.1	土的质量损失率	214
10.2.2	溶蚀反应的化学机理	216
10.2.3	溶蚀反应的微观变化	219
第十一章	微细结构试验研究在理论分析中的应用	227
11.1	黏性土固结变形的递推计算方法	227
11.1.1	固结过程中微细结构的变化	227
11.1.2	土体固结的本构方程	229
11.1.3	土体固结变形的数值计算方法	230
11.1.4	计算步骤和算例	232
11.2	黏性土剪切破坏的非均匀性分析	234
11.2.1	抗剪强度参数与微细结构的相关性	234
11.2.2	分布函数	235
11.2.3	分布函数中待定常数的确定方法	236
11.2.4	试验结果的计算和分析	239
	主要参考文献	241

第一章 土体微细结构研究方法

1.1 土体微细结构力学

土体既是一种地质历史产物,残留着各种地质作用的痕迹,又明显受到现代人类各种活动的强烈改造。自然界中,土体力学性质的差异很大,主要取决于内因和外因两个方面,表现为土体的微细观物质基础与宏观力学效应二者的辩证关系。内因是指土体本身的颗粒性状、孔隙性状、含水量及矿物成分等因素的不同组合,可使土体具有不同的初始结构性,从而具有不同的力学性质。例如,由于土体中孔隙形状不同使其具有不同的排水特征,反映在土体固结速率的固结系数和渗透系数等有较大的差异;由于颗粒的特殊排列方式和联结特性,有的土体具有不同抗剪强度和各向异性特征。外因是指荷载,广义上说,也包括水、温度、风化作用等,外因可以改变土体本身的结构,形成次生结构,使同一种土体在不同应力路径和应力水平下具有不同的力学性质,如土体的应力-应变关系、孔隙水压力-应变曲线和固结曲线等表现出与土体的微细结构性的明显相关性。

由于土体具有非常复杂的非线性特征,而这种特征在微细观上主要表现为结构的非连续性和不确定性,很难用传统的、基于线性分析基础之上的技术方法加以准确表达。长期的工程实践表明,土体的宏观工程性状在很大程度上受到微细结构系统状态和变化规律影响,复杂的物理力学性状是其微细结构特性的具体体现,任何一种基于适度均匀化处理的连续介质模式都很难准确地表述其结构的复杂性,难以逾越土体微细结构的多样性和不确定性这一巨大的障碍。在土力学中人们通常用宏观方法来建立土体的变形和强度模型,这种从室内实验→唯象分析→建立数学、力学模型的方法,已历经百年,并建立了很多经典的模型。这些模型在工程实践中起到了很大的作用,但大量事实证明采用这种方法建立的模型其计算结果往往与现场监测结果存在较大的偏差,有时甚至会给工程建设造成一些困难和损失。其主要原因之一在于现有的许多本构模型(计算模型)都是针对饱和扰动土或砂土而发展起来的,未能考虑实际土体(原状样)的结构性,因而计算结果难以模拟土体的真实状态,往往会出现较大计算误差(这种误差有时可高达数十倍)。例如,在进行路基变形计算并确定相应的加固范围时(图 1-1),由于模型本身存在明显的结构性偏差,致使其实测变形深度往往要小于计算变形深度。如果以计算值作为设计加固深度的话,设计的有效加固范围将被人为地扩大化,从而造成浪费。目前,对于这类问题的处理多依赖于设计者的经验修正,缺乏有

力的理论依据,其人为性之大、可靠性之难以评断,是可想而知的。

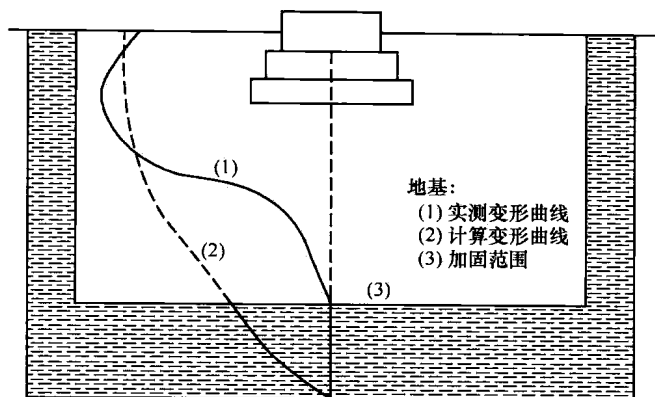


图 1-1 建筑地基变形计算实例

从微细结构着手研究土体的问题与传统土力学有很大的区别,主要表现在:其一是在研究思路,前者是通过对微细观结构的研究取得对宏观行为的模拟,是一个由微细观到宏观的过程,而后者则主要通过宏观的力学性质试验去模拟和解释土体的变化机制;其二,前者视土体为非均质和非连续体,而后者将土体视为连续的均质体;其三,前者强调结构的显著作用,而后者忽视土体的结构性。所以,土体的微细结构问题研究有其独特的理论和方法体系,应当建立独立分支加以系统研究。该分支将以土体的微细结构性变化为基本研究点,以建立含土体微细结构变化特征的本构模型为核心内容,以土体工程问题中微细结构变化的量化模拟和预测为目标,称之“土体微细结构力学”。

1.2 土体微细结构研究历程

自 1925 年土力学之父 Terzaghi 提出“在评价黏土类和岩石的工程地质性质时,应当注意考虑其微结构的必要性”的思想已深入人心;著名土力学家沈珠江院士曾强调指出“土体结构性数学模型的建立将成为 21 世纪土力学的核心问题”;谢定义认为,微观结构分析试验与宏观力学特性试验的结合,将对创立黏土结构性指标和结构性模型方面做出有益的贡献。此外,基于微细结构变化的土体损伤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,许多学者开始重视土体力学的微细观行为,共同认识到宏观的变形破坏为微细结构变形的积累扩展而成,掌握微细结构变形破坏的规律,可以为岩土工程出现的问题给予更科学的解释并加以解决。Terzaghi 提出土体微结构(microstructure)概念和思想以来,大量学者对土体微细结构进行了研究和探讨,提出了许多土体微细结

构模型。纵观这 80 多年的发展历史,土体微细结构研究的发展历程大致可分为以下五个阶段。

第一阶段(1925~1930)

该阶段采用的观察技术手段主要是肉眼和低倍放大镜,多局限于黏土悬液的室内模拟研究,而忽视对天然土体的结构复杂性及其颗粒排列的研究。由于缺乏有效的观测手段,对土体微细结构的认识是建立在“逻辑推断”和“模拟推测”的基础上,这一时期主要是研究土体微细结构的分类及概念,是土体微细结构概念形成的阶段,主要成果是 1925 年 Terzaghi 首次提出了土体微细结构(microstructure)概念,揭示了单粒、絮状、蜂窝状结构的概念,其倡导的“蜂窝状结构”至今仍具有普遍的指导意义和价值。在 Terzaghi 的研究基础上,Goldschmidt(1926)提出了片架(card house)结构,明确了高灵敏度黏土结构的不稳定性。

第二阶段(1931~1958)

该阶段采用的观察技术手段主要是光学显微镜、偏光显微镜、X 射线衍射等,通过对土样薄片和光片的观察,成功分析了土样的矿物成分,提出了一些新的结构模型。这一时期主要的研究是基于光学显微镜观测土体的结构形态和结构成因,是土体微细结构概念的发展阶段。主要成果有:Casagrande(1932)发展了 Terzaghi 的蜂窝结构,提出了蜂窝结构中基质(matrix)和键合黏土(bond)的概念,指出蜂窝结构存在于高灵敏度的海相沉积的黏土中;澳大利亚土壤学家、土壤微形态学的创始人 Kubiena(1938)最先给出微结构确切的定义,使用的是“组构”(microfabric)一词,其最重要的著作《微观土壤学》为微结构理论的形成和发展奠定了重要基础,他提出的土壤微形态描述体系及其大量概念和术语,在很长一段时期内一直是微结构分类的最主要依据之一;Попов 于 1944 年对经受压密或其他变形黏土(主要是高岭黏土)的观察,提出了隐结构概念;Lambe(1953~1958)从胶体化学、双电层理论出发,提出了黏土的两种主要结构类型:边-边、边-面接触的开放形式(open)非盐絮凝结构和面-面、边-面接触的“盐絮”结构,以及面-面接触的分散(dispersion)排列结构,这种土粒间点、线和面的接触关系之假设由 Rosengquist 于 1959 年应用电子显微镜观察证实;Weymouth 和 Williamson 于 1953 年分析了分别用揉搓、滚动和挤压等方法制成试样的不同微细结构,特别是 Altermuller 发明了“浸胶法”,使得大量制作高质量的土体薄片变的容易起来,因而大大推动了微细结构研究的发展。在 Frese 和 Altermuller 的联合倡导下,1958 年在 Brauschweig Volkenrode 成功地举行了第一届国际土壤微形态学工作会议,使微结构研究上了一个新的台阶。至此,微结构研究已开始进入国际化的稳定发展轨道,并每隔 4~5 年举行一次同样类型的会议。当时比较著名的学者还有荷兰的 Jongerius、德国的

Altermuller 和俄罗斯的 Parfenova 等。

第三阶段(1959~1970)

该阶段采用的观察技术手段主要是扫描电镜、电子探针、透射电镜等新兴技术,不仅可观察大量的天然土样,而且也能大量观察室内制备的土样,并在这一基础上分析了土体微细结构与工程性质的关系,先后提出了许多新的结构模型和新概念,从而使得微细结构研究在结构层次的深度和结构要素联系的广度上都取得了飞跃的发展。主要成果有:Rosenqvist 于 1959 年首次应用电子显微镜对海洋土的微细结构进行了研究,电子显微镜的应用大大加速了土体微细结构研究的进程;Aylmore 等(1959~1960)提出了“畴”(domain)和流状(turbostratic)排列的概念;Van Olphen(1963)综合并丰富了已有模型,提出边-边、边-面的“絮凝集合”(aggregate)的结构模型,这种模型类似后来的“片堆架”或“书本架”(bookhouse)结构;Brewer(1964)注意到结构要素的完整性,特别是结构单元体的定向分布特征,并在 Kubiena 的结构描述体系基础上提出了全新的土壤微形态分析体系,在其编写的《土壤组构与矿物》中第一次完整地提出了土壤的“组构”概念,是对早期微细结构研究成果的一次系统总结和提高;Warkentin 于 1966 年把黏土结构接触模型归纳为点-面接触和点-点接触及点-面、面-面接触以及点-点、点-面接触四种基本类型;Push 和 Bowles 等于 1966~1973 年,提出了“集聚体”(aggregate)的概念,他们把“集聚体”看作一个组构单元,单元内单个的土颗粒可以以不同的方式相互作用;Gillott 于 1969 年发表了用扫描电镜系统研究细粒土组构的论文;Dudley 于 1970 年提出了环状支撑(ringbutteress)和集合黏土组粒(aggregated clay grains)状排列的结构模型,描述了黏性土片状颗粒与砂粒或粉粒的相互作用关系。

第四阶段(1971~1984)

这一阶段在第三阶段研究的基础上继续对土体微细结构开展定性研究,并深入研究了土粒的排列特性、孔隙性、单矿物及其集合体的相关属性以及结构联结特性,同时对颗粒的定向性研究方面做了一些有益的尝试。与此同时,微细结构量化的工作也开始取得了实质性的进展。由于电子计算机技术的不断提高,计算机图像处理系统被引进岩土结构的研究中,使微细结构的量化水平上了一个新的台阶。主要成果有: Mitchell、Collins 和 McGown(1973~1983)提出了许多微细结构的概念,分析了工程意义,并揭示出黏土中存在的三种胶结情况,即不规则胶结、规则胶结和纤维状胶结;Tovey 等(1973)首次对土结构的电子显微镜照片进行了定量分析尝试。在结构试样制备技术方面,Tovey 做出了杰出的贡献,他提出了孔隙液移出的液氮法冻干技术以及用于电镜扫描的胶带剥离技术等;Osipov(1973)对黏土类微细结构进行了系统

研究; Mitchell(1976)在其编写的 *Fundamentals of Soil Behavior* 一书中对黏土类和岩石微细结构及其控制因素的定量分析进行了系统的阐述; Tovey 等(1980)应用计算机图像处理系统对微细结构的图像形貌进行了定量分析, 取得了一批有价值的成果; Kanatani 于 1984 年通过微结构体参数——微裂隙密度来表征岩石的开裂程度; 1973 年, 成功举办多届的国际土壤微形态学工作会议并入了国际土壤科学协会(ISSS); 1978 年, 国际岩土工程学会在瑞典专门召开了一次国际土体结构学术会议, 针对土木工程中的结构问题进行了深入的研究和总结, 对岩土工程的发展产生了重大影响, 以至在以后的各次国际土壤工作会议以及国际原状土次微观研究工作会议(IWGSUSM)上出现了越来越多的岩土工程学的论文。

第五阶段(1985 年至今)

这一阶段土体微细结构的定性研究逐渐向定量研究发展, 也是定量技术研究在不断探索的时期, 主要集中在结构的量化和土体微结构特征变化与工程性质分析上。在微细结构计算机处理方面又有了一定的进展, 开发了一系列的软件, 取得了许多重要的成果。主要成果有: Prat 和 Bazant 于 1989 年、Carol 等于 1990 年相继对黏性土的变形、蠕变、岩石和混凝土断裂等方面建立了微观力学模型, 虽然在土体微细结构参数选取方面还有许多问题, 但毕竟第一次在建立本构关系中考虑了微细结构因素, 这是一个了不起的突破, 标志着土体微细结构研究进入到一个更加辉煌的新时期; Tovey(1990, 1991)、Sukharev 和 Soklov(1992)在微细结构计算机处理方面进行了大量工作, 开发出一系列的软件, 取得了许多成果; Bai 和 Smart(1997)对黏性土排列的定向性及固结不排水剪切过程中土体微细结构的变化进行了定量分析, 给出了十分有意义的结果; 这一时期一些重要的土体微细结构成果在 1988 年美国密西西比 Stennis 海洋研究和发展中心召开的名为 *The Clay Microstructure of Fine-Grained Terrigenous Marine Sediments* 的国际会议上得到充分展示, 这些成果后来编辑成册, 并于 1991 年正式出版, 书名为 *Microstructure of Fine-Grained Sediments*; Oda 于 1986 年和 Suzuki 于 1998 年说明了微结构体参数与超声波波速以及渗透性之间的相互关系; Howarth 等于 1987 年通过对岩石切片的图像分析, 建立了量化岩石微细颗粒参数(形状、方位角和相对比例等)的方法, 并与岩样的力学强度进行了比较, 得到了两者的相互关系; Campbell、Donald 等于 1991 年讨论了利用光学显微镜进行岩石、砖和水泥等材料微观量化的可行性, 并与 X 射线方法进行了比较; Moore 等于 1995 年探讨了花岗岩微裂缝对剪切裂隙扩展的影响作用; Robina 于 1996 年研究了初始微裂缝密度和岩石微颗粒尺寸对于 Yuen Long 大理石岩样单轴压缩强度的影响; Hatzor 等于 1997 年研究了白云石的细观结构与微裂缝起裂的初始应力和试样最终强度之间的关系, 发现岩

石微结构对其强度极限的影响非常大;Wu 等于 2000 年利用光学显微镜和 SEM 研究了 Darley Dale 砂岩在压缩破坏中各向异性损伤的微观力学演化过程,得到了微裂缝密度与应变之间的关系;Steven 等于 2001 年用微结构信息来计算砂岩的孔隙率和渗透率;Prikry 于 2001 年利用岩相图像分析观测在单轴压缩下表现不同力学性质的相同岩性岩样的微观结构,发现微观结构参数——颗粒尺寸对岩样的强度影响最大,而且岩样的各向异性越大,则其颗粒形状也越呈现方向性;Menendez 等于 2001 年探讨了运用激光共焦点扫描显微镜研究岩石中微裂隙和微孔洞网络的方法;单位体积的微裂隙数量和微裂隙的平均长度常被用来表征开裂程度,同样也作为不同微裂隙开裂演化理论的佐证(Hadley, 1976; Wong, 1985; Tappo-
niet and Brace, 1976; Zhao, 1998),然而这些参数的结果有时会出现不一致的情况,一些学者(Hadley, 1976; Wong, 1985)得到平均微裂隙长度会随着主应力差增加而增加,而其他一些学者(Zhao, 1998)得到微裂隙的平均长度近似为一个常数。

1.3 土体微细结构的研究方法

从国内外相关文献和资料上看,土体微细结构的研究主要有两类,即连续介质力学的研究方法和试验研究方法,除这两类主要研究方法外,还有一类即宏观定量、微细观定性的研究方法,该类方法主要的研究成果均在宏观范围内(或者是对已有理论和模型的补充论证与说明),微细观研究和分析只作为辅助的说明。

1.3.1 微细结构

土体的宏观结构是指自然土体或原状土体中可用肉眼观察到特征的结构。结构单元体的大小可由数米到几毫米($10\text{m} \sim 2\text{mm}$),结构单元体的形状、大小、状态,以及相互间的排列及接触特征、裂隙方向、大小、有无充填及充填物的性质,再加上土体的颜色特征等一起构成土体的宏观结构特征。

土体的微观结构是指通过各种电子显微镜和 X 射线衍射仪等现代技术手段才能揭示特征的结构。结构单元体的尺寸一般小于 0.05mm ,它由单粒、团聚体、叠聚体和孔隙等组成。微观结构包括这种微小单元体的特征、在空间的分布状况以及它们之间的接触特点和微细孔隙特征。通过对微观结构的研究可以认识许多工程性质的本质,了解人工改良的机理,为建立正确的土体本构关系、解释宏观现象均有重要意义。

土体的微细观结构是指利用偏光显微镜(光学显微仪器)对薄片、光片进行观察可获得特征的结构,结构单元体的大小一般为 $2 \sim 0.05\text{mm}$,即由砂、粉粒组、原生矿物颗粒及集聚体组成。这种结构在宏观层次上看,它足够地小,能反映土体的局部特征。例如,诱发形成滑移带的结构形式,以及滑移带萌生、演化的过程,膨胀土裂隙随

含水量不同的变化情况。在微观层次上看,它足够地大,能反映土体微观性状的统计特征。例如,颗粒的排列、取向,孔隙的分布、大小,连接带的力学特性等。

关于土体结构概念,目前比较混乱,国内外最常见的是结构、组构和构造三词。前苏联及东欧一些国家的文献中三词混用,而美英等西方国家的文献中很少应用构造一词,结构和组构二词在应用时也有明确区别。Raymond、Tuncer 和 Kutay 于 1975 年认为组构为颗粒排列的几何特征,而结构包括组构与相邻颗粒间的相互连接力。我国对结构的理解比较一致,认为土体结构是表征土在各个层次上结构特征的术语。

结构组成的基本单元称结构单元体。它是指在相应比例尺下具有固定的轮廓界限及特殊力学作用的单元体。根据比例尺的大小不同,单元体可从宏观的单层(土层)、土层块体(被裂隙分割的土层——土力学中研究稳定性时的滑动整体)到微观的微集聚体及矿物晶体微粒。

1.3.2 连续介质力学的研究方法

该类研究方法以宏观唯象学为基础,在连续介质力学理论框架下,建立土体的本构关系。宏观层次与微细观层次的区别在于模型参数的取法上和获取途径上有区别。

1. 宏观本构模型

该类本构模型由宏观土工试验确定模型参数,因而易于为工程设计人员所接受,目前广泛应用于许多实际工程的设计中。这类本构模型所基于的基本理论主要有弹性理论、内时理论及塑性理论,相应地有:

(1) 弹性理论模型,如 Duncan 模型、K-G 模型等。目前,广泛应用在基础沉降和堤坝应力、变形的计算和分析中。

(2) 塑性理论模型,如 Lade-Duncan 模型、剑桥模型等。弹性理论模型不能描述岩土体的残余变形特性,Druck 和 Prager 于 1952 年最早建议采用塑性理论模型。目前,塑性理论模型有两类:一类是以破坏准则(如 Von Mises 准则、Tresca 准则、Mohr-Coulomb 准则等)为屈服面的理想塑性模型,它们常常用于土体破坏计算;另一类是带有帽盖屈服面的塑性模型,如 Drucker 和 Gibson 于 1955 年提出在圆锥形屈服面上加一个球形帽盖的塑性模型,Roscoe 等提出具有炮弹形帽盖的 Cam-clay 模型,Burland 于 1967 年、Roscoe 和 Burland 于 1968 年提出具有椭圆形帽盖的 Cam-clay 改进模型,Desai 于 1984 年、Farugue 于 1987 年分别提出只包含两个和三个应力不变量的帽盖模型。魏汝龙于 1964 年、Sandler 于 1976 年、Baladi 于 1979 年,以及沈珠江、殷宗泽等根据自己的研究也提出过帽盖的塑性理论模型。这类模型可用于各种较复杂情况下的土体应力应变计算。

(3) 内时理论模型。内时理论建立在不可逆热力学及内变量理论基础之上,它虽属于塑性理论范畴,但传统的塑性理论不同,最大的区别在于它不需要屈服面的