

# 岩土材料结构分析

● 卫振海 王梦恕 张顶立 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

责任编辑 李亮



销售分类：力学/岩土材料

ISBN 978-7-5170-0406-6



9 787517 004066 >

定价：35.00 元

# 岩土材料结构分析

© 卫振海 王梦恕 张顶立 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书通过对岩土这种具有复杂性结构的材料的分析和阐述,以岩土材料结构的颗粒模型为基础,分析了岩土材料结构的静态与动态的受力及变形特征,从理论上介绍了岩土类复杂材料的理论体系和框架。主要内容包括:岩土材料结构模型及其参数描述、岩土材料结构的静态刚度分析、岩土材料结构的临界强度理论、岩土材料结构的动态分析。

本书适用于岩土力学与结构、岩土材料及其相关领域的学者及从业人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩土材料结构分析 / 卫振海, 王梦恕, 张顶立著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5170-0406-6

I. ①岩… II. ①卫… ②王… ③张… III. ①建筑材料—岩石结构—结构分析 IV. ①TU52


中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第297870号

书 名	岩土材料结构分析
作 者	卫振海 王梦恕 张顶立 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.5印张 391千字
版 次	2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	35.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 序



岩土材料与所有常用的材料相比，从构成成分、细部结构和结构形态上讲，是最为复杂的材料之一。它集合了几乎我们常见的所有材料的特征和特点，但对于岩土材料复杂性的认识远不如它的复杂性给我们的教训那样深刻。可以这样说，对于岩土材料问题，如何想象其复杂性都不过分。岩土材料问题决不是一个简单的问题，研究岩土材料，需要综合多个学科方面的知识，需要长期的经验和认识的积累。这一问题决不纯粹是一个工程应用性的问题，它涉及对材料本质的认识，是一个相当深入的、带有普遍性的基础理论问题。

经典弹塑性理论考察的对象是均匀、连续和无限可分的材料，也就是认为材料无论在什么尺度上都保持其原有的特性和性能。这类材料是一种没有结构性的材料，也可以说是一种简单材料。而真实世界中的材料，特别是岩土材料一般意义上都具有结构性，即使在宏观尺度上也可以看作均匀、连续，在一定的微观或接近构成实质性物质的尺度上，一定能发现其颗粒性和结构性特征。所以，真实世界中的材料可以说都是具有结构性的材料。由于其结构性，使材料的特征、特性或性能变得复杂。具有结构性的材料可以称其为复杂材料，研究这类复杂材料的方法和理论，相对于研究经典理论中的简单材料力学理论，可以称之为“复杂材料力学理论”。

笔者对这一领域问题的思考，可以追溯到20世纪70年代，从大学时期就开始对材料的宏观与微观关系问题有了浓厚的兴趣。从材料的基本构成颗粒为出发点，寻找材料的结构性特征和由此构成的宏观的材料性能变化规律，是探寻真实世界中复杂材料的特征与规律的一条可行的思路与方法。本书的研究以岩土材料结构为范例，经过多年对材料的结构性问题的研究，获得了对这一问题的一些新认识。

随着对岩土这类复杂材料的深入研究，将展现给我们一个全新的领域与

天地。我们今天所做的工作，犹如在埋藏着巨大宝藏的宝库的大门上开出了一条小小的缝隙，但这已让我们窥探到了宝库中的无数宝藏。以岩土工程领域为基点，将经典的简单材料力学理论推向一个新阶段——复杂材料力学理论，应是我们努力研究探索的一个新方向。随着复杂材料力学理论的开拓、丰富与发展，将给我们带来许多新见识和新知识。希望在与大家共享新知识的同时，共同发掘和探索这一新领域。

**作者**

2012年4月

于北京

# 目 录

序

1 导言 .....	1
1.1 岩土材料的结构性问题 .....	1
1.2 岩土材料结构问题研究回顾 .....	2
1.3 对岩土结构性问题的讨论 .....	7
1.4 本书的结构、主要内容和特点 .....	11

## 第一部分 岩土材料结构模型及其参数描述

2 岩土材料结构理论概要 .....	15
2.1 岩土材料的特征 .....	15
2.2 岩土材料结构模型及相关内容 .....	19
2.3 岩土材料结构模型分析理论的主要思想和内容 .....	25
2.4 基于岩土材料结构模型的分析理论与方法讨论 .....	26
3 岩土材料颗粒形态研究 .....	33
3.1 颗粒的几何形态参数及其描述 .....	33
3.2 岩石结构面及颗粒模拟生成模型 .....	39
3.3 颗粒搬运生成及生长型模型 .....	44
4 岩土材料颗粒间连接关系及性能研究 .....	49
4.1 颗粒形态及接触类型 .....	49
4.2 颗粒接触类型及弹性域模型 .....	52
4.3 小接触面颗粒接触的刚度计算 .....	55
4.4 颗粒连接性能的影响特性分析 .....	58
5 岩土材料结构网络几何拓扑关系及其描述 .....	62
5.1 结构网络模型的基本假定 .....	62
5.2 结构网络模型的描述 .....	63
5.3 岩土材料结构网络的相关统计参数 .....	66
5.4 特殊类型岩土材料结构网络模型的描述 .....	70

## 第二部分 岩土材料结构的静态刚度分析

6 岩土材料结构静态刚度分析方法 .....	75
6.1 岩土材料结构静态刚度分析的基本条件和内容 .....	75

6.2	颗粒连接分析 .....	80
6.3	颗粒链与力链分析 .....	85
6.4	统计域分析理论 .....	89
<b>7</b>	<b>静态组构独立分布连接型颗粒材料本构模型</b> .....	<b>94</b>
7.1	模型思路及基本假定 .....	94
7.2	统计域上的能量等效均匀化 .....	96
7.3	统计域上的本构模型 .....	98
7.4	本构模型的若干问题讨论 .....	102
<b>8</b>	<b>引入形参数的颗粒系统的均匀化理论</b> .....	<b>106</b>
8.1	形参数均匀化方法 .....	106
8.2	常见类型位移模式和结构的形参数 .....	111
8.3	一般结构形参数的确定方法探索 .....	115
8.4	形参数意义及特点 .....	119
<b>9</b>	<b>稳定土体结构刚度等元胞正交模型</b> .....	<b>122</b>
9.1	模型的基本假定和孔的描述 .....	122
9.2	基于等元胞正交模型的土体性能分析 .....	125
9.3	带孔结构的性能分析 .....	128
9.4	模型分析结果的推广 .....	132

### 第三部分 岩土材料结构的临界强度理论

<b>10</b>	<b>岩土材料结构临界强度理论概述</b> .....	<b>133</b>
10.1	岩土材料结构临界强度 .....	134
10.2	岩土材料结构破坏形式及其特征分析 .....	137
10.3	岩土材料强度模型及其特点 .....	141
<b>11</b>	<b>岩土材料结构临界强度模型理论</b> .....	<b>147</b>
11.1	土体简单颗粒结构强度模型 .....	147
11.2	统计域上的结构强度 .....	150
11.3	一些问题的思考 .....	155
<b>12</b>	<b>土体颗粒链强度模型</b> .....	<b>158</b>
12.1	颗粒链强度模型 .....	158
12.2	摩擦型颗粒链强度分析 .....	164
12.3	基于颗粒稳定链的土体强度理论 .....	167
12.4	颗粒链强度理论的工程应用思考及其结论 .....	169
<b>13</b>	<b>分形结构土体强度理论</b> .....	<b>172</b>
13.1	分形结构的特点及其描述 .....	172



13.2	分形结构的强度分析 .....	175
13.3	分形土体结构强度问题的进一步讨论 .....	181

## 第四部分 岩土材料结构的动态分析

<b>14</b>	<b>岩土材料结构动态分析基础</b> .....	185
14.1	岩土材料的结构动态变化特征 .....	185
14.2	岩土材料动态分析的概念 .....	190
14.3	岩土材料结构动态分析原理及方法 .....	196
<b>15</b>	<b>岩土材料结构动态分析的马尔科夫模型</b> .....	204
15.1	基本假定和相关解释 .....	204
15.2	结构演化模型 .....	206
15.3	传递概率矩阵 .....	209
15.4	结构演化的状态统计量及本构关系 .....	213
<b>16</b>	<b>岩土材料结构全状态理论</b> .....	219
16.1	材料结构状态及状态可达网络 .....	219
16.2	材料结构全状态理论及全状态函数的概念 .....	222
16.3	基于材料结构全状态函数的本构关系模型 .....	226
16.4	材料结构全状态函数的讨论 .....	232
<b>17</b>	<b>岩土材料结构性问题研究展望</b> .....	235
17.1	理论研究 .....	235
17.2	实验验证性研究 .....	236
17.3	计算机模拟研究 .....	237
17.4	宏观计算分析研究 .....	238
	<b>参考文献</b> .....	239

## 1.1 岩土材料的结构性问题

岩土问题的复杂性，在很大程度上来自于岩土材料的结构性。由于岩土材料结构十分复杂，从而使问题的解决变得困难。这一问题对于岩土理论的重要性，在 10 多年前，沈珠江院士就提出是“21 世纪土力学的核心问题”<sup>[1,3]</sup>，这些年的理论与实践也证明了这一点。因此，这一问题的重要性，目前来讲已不需要讨论，重要的是这一问题的解决。

土力学理论的建立，已有 100 多年的历史，为什么到现在这一问题还没有很好地解决呢？一方面是由于这一问题的复杂性；另一方面（作者认为）是由于人们认识的思维惯性。在 19 世纪的中后期，为研究金属材料的力学性质，各类力学学科取得了巨大的发展，建立起了十分完善的学科理论体系<sup>[2]</sup>，一直到了 20 世纪，人们仍然在不遗余力地发展着这一学科，并且在继续取得成果。人们在研究岩土问题时，自然而然地将已取得的理论成果应用于这一领域，并且在这一领域也取得了一定的成功。在初期，很多学者认为，应用已有的力学理论是完全能够解决土力学的问题的，但土力学理论发展的实践却完全打破了人们这种美好的愿望。尽管人们几乎将力学的所有理论成果与方法（如弹性理论、塑性理论、断裂力学理论等）都应用于岩土问题的研究，但仍然无法从根本上解决问题。许多现象仍然无法解释，许多的工程问题仍然主要依赖于专家的实践经验，甚至在某些领域，专家的经验远比理论更为重要，或者说实践已远远走在了理论的前面。那么是什么原因呢？作者认为，其根本原因，是过去将力学理论应用于岩土问题的研究时，我们不自觉地将一种局部的理论，或者说是一种局部的规律，或特殊性的规律，而应用于整体，或把他作为一种普遍真理或规律在使用。我们不自觉中忽略了经典力学理论的一个本质性前提，就是过去的力学理论体系的可成功使用的条件，所研究的对象必须是连续的、均匀的和不可压缩（或压缩性非常小）的。而岩土这一对象，恰恰与此不同，既不连续，也不均匀，而且是显著可压缩的<sup>[4]</sup>。由于忽略前提条件，而将其应用到了一完全不同的领域或范围，得不到理想的结果也就十分自然了。

另外一方面，过去的力学理论是以线性理论为基础的，尽管在塑性理论中，也引入了非线性的本构关系，但在基本概念上、本质上仍然没跳出线性理论的框架。岩土在宏观上表现出来的非连续、不均匀、各向异性和非确定性等复杂的非线性特征，依赖线性理论显然是无法解决的。过去我们经常使用的一种方法，是将非线性的问题化为线性问题来解决，这种方法显然不是万能的，他只能用于某些简单的非线性问题，或可化为线性问题的简单非线性问题。这么多年，许多学者在这方面做出了大量努力和探索，但取得的成果并

不显著,或一直没有从根本上解决问题,这证明土力学问题不是一个简单的非线性问题,依靠线性理论是无法解决的。

再就是,传统的研究方法,无论是弹性力学,还是弹塑性力学及土力学的各种研究方法,绝大多数采用的是唯象学的方法。这种方法的实质是通过现象的总结和规律性的掌握,来形成描述现象的理论,对于事物本质的了解无法提供更为深入的解释。由此,我们可以发现,这种方法应用于过去力学领域中研究的对象——金属等均匀、连续的材料,其现象主要为线性特征,是比较有效的。但对于非线性问题(如土力学问题或其他非线性问题),这种方法的应用将必然受到一定的限制。

解决问题的出路在哪里?从研究土体结构着手,特别是注重研究土体的微观颗粒尺度(或称为细观)结构,并以20世纪70年代末期发展起来的一批非线性科学理论,像耗散结构理论、协同学、混沌动力学理论、自组织理论及分形理论等为理论方法,可能将是一个解决问题的方向。

## 1.2 岩土材料结构问题研究回顾

自20世纪80年代中后期,土体结构研究进展迟缓,没有明显的突破。进入20世纪90年代,在样品制作技术方面有了较大的改进,另外在土的结构量化研究方面也取得了进展。在模型理论研究和土体结构与工程性质的关系方面也取得了一些成果。下面回顾一下这些方面的成果情况。

### 1.2.1 实验研究及分析技术

实验是理论及其他研究工作的基础,在岩土工程及土力学研究方面更是如此。在早期的实验研究手段主要是一些常规的土工室内和现场实验技术,到20世纪50年代后期,一些现代物理实验方法及技术开始引入到岩土的研究工作中。主要用于对土体的物质成分、土体结构形态的定量分析和其他有关方面的研究。由于这些新技术方法的引入,大大加快了对土体结构的研究进度,并使对土体的认识有了进一步的加深。特别是对于比较复杂的黏性土的研究有了较大幅度的进展。

对于土体结构实验研究的一些新技术和方法及取得的进展,主要可以归结为以下一些方面。

#### 1. 扫描电子显微镜测试技术

这些年来,在土体结构,特别是微结构研究方面,扫描电子显微测试技术是重要且应用较为普遍的一项技术。这一技术在岩土应用研究方面的关键点,主要有两个方面:一方面是样品制备技术,好的对原状样品的制备是尽量减少对其扰动;另一方面是分析技术,即对取得的扫描图像进行有效的分析并取得合理的结果。

在样品制备方面,针对岩土样品的特殊性,施斌<sup>[13]</sup>提出了采用冷冻刀切干燥技术,较好地解决了高含水量黏土样品的制备。其他一些研究工作者也通过不同的方法,解决了一些岩土样品制备中的一些特殊问题。在分析技术方面,主要是通过扫描电子显微镜得到的信息,实现土体结构形态的定量分析。在这方面已开发出了一些计算机软件包,并且提

出了一些新的分析方法。主要有为表征结构单元有序性,施斌提出的概率熵<sup>[5]</sup>,及其简易定量分析法(SQM);Bai和Smart<sup>[6,7,8]</sup>定义了一套定性指标,用于衡量固结不排水剪过程中黏土颗粒的定向性。

扫描电子显微镜应用于岩土领域的应用研究工作,已取得了不少的成果。高国瑞等对黄土微观结构进行了研究;李晓军、张登良<sup>[9,10]</sup>利用立体测量技术,对压实黄土的孔隙分布及压实黄土方向性进行了定量分析,探讨了结构系数与土体各向异性的关系。王清等<sup>[11]</sup>通过SEM图像处理技术,提出了黏性土微观中的结构单元体形态、定向性、孔隙特征等结构要素的定量评价指标,对数种黏性土在不同剪切荷载作用下的变形进行分析;唐益群等<sup>[12]</sup>对地铁振动荷载作用下饱和软黏土性状微观进行了研究,将原状土和循环三轴试验破坏后两种状态的土样作了对比;白晓红等<sup>[6]</sup>提出了一种根据图像灰度确定土体颗粒及颗粒集合体的组合形态分布的强化定向法。

## 2. 计算机断层扫描技术(CT)

计算机断层扫描技术是从医疗领域发展起来的一项无损探测技术。这一技术应用于岩土领域是最近些年的事。这一技术应用于岩土实验研究,有许多优点:一是对试件无扰动,属于无损检测;二是可连续探测;三是可进行三维的观察和探测;四是对试件的成分及其他指标也可以进行一定程度的分析和探测。

在这一技术的应用方面,许多工作者做了工作,施斌<sup>[13]</sup>对高岭土进行的动态的测试,李晓军等<sup>[14,15]</sup>采用CT图像和数据对不同的土样进行了分析,计算了土样的结构系数和结构张量,另外进行了路基填土单轴受压细观结构CT监测分析,从CT数据和CT图像两方面分析了不同受力过程中路基填土细观结构的变化,姜洪涛<sup>[16]</sup>连续观察了对多组试样的动态试验的整个过程。

CT技术作为一种先进的无损探测手段,应用于岩土的试验是十分有效的,但从实验结果和观察得到的数据来看,在分析微观结构图像的一些细节或单独颗粒时精度显得不够,需要和其他方法结合使用,方能达到更好的效果。

## 3. 其他实验观察技术

在进行岩土的实验研究中,特别是微观结构的研究中,很多学者还应用了许多其他的技术,主要有光学显微镜、X光衍射技术和高速摄影等。在研究孔隙时,采用了压汞方法。

王树林<sup>[17]</sup>研究了运动情况下散体的运动特征,周宇泉等<sup>[18]</sup>利用土体微细结构光学测试系统对黏土在压缩过程中微细结构变化进行了定量分析研究。施斌<sup>[13]</sup>采用能谱分析技术(EDX)对黏土颗粒间的连接特征及连接力进行了分析研究。刘玉庆<sup>[19]</sup>提出了一种岩石散体渗透试验的附加装置。

当前采用的一系列微观实验技术,主要目的是对岩土的微观特征进行定量化分析,这主要包括:

- (1) 形态学特征,即微观结构单元体的大小、形态、表面特征以及它们之间的相互关系。
- (2) 几何学特征,指颗粒和孔隙的空间排布。
- (3) 能量学特征,指颗粒间的连接特征及连接力。

所取得的一些成果证明, 这些观察方法或实验方法是有效的, 基本可以满足要求。但目前都是一些零散的研究成果, 还没有看到系统地对各类土样进行测试, 形成对工程实践有指导意义的成果。

### 1.2.2 岩土结构性定量描述

岩土由大量颗粒组成, 其影响因素一般包括颗粒的形态、颗粒排列方式、孔隙形态和颗粒接触关系等。要定量的描述和评价所有这些因素还是比较困难的, 许多学者在大量实验研究和观察的基础上, 提出了一些对某些因素进行定量描述和评价的方法。

#### 1. 定向性指标

为了定量分析岩土结构中的颗粒的方向性描述, 施斌等<sup>[5]</sup>提出了各向异性率的概念, 计算方法如下:

$$I_a = \frac{R-r}{R} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中:  $I_a$  为各向异性率;  $R$  为椭圆形的长轴;  $r$  为椭圆形的短轴。  $I_a$  反映了土结构的定向性的大小。

王清等<sup>[20]</sup>用定向频率来描述土结构的定向性。具体方法如下:

$$F(a) = \frac{n_a}{n} \quad (1.2)$$

式中:  $n_a$ ,  $n$  分别为定向角落入  $[\theta_{i-1}, \theta_i]$  的测量对象数量和总的测量对象数量。

为了考虑结构单元体大小在受力过程中的影响, 王清等<sup>[11]</sup>又提出了以颗粒的面积为权量来计算土结构的平均方向角:

$$a = \frac{1}{n} \sum W_i \cdot a_i \quad (1.3)$$

式中:  $a$  为平均方向角;  $W_i$  为第  $i$  个计算结构单元的面积权重;  $a_i$  为方向角。同时提出了定向度分布函数。

#### 2. 有序性指标

为了反映土结构中颗粒的有序性, 施斌<sup>[5]</sup>提出了有序性指标概率熵的概念, 其定义如下:

$$H_m = - \sum P_i \log_n P_i \quad (1.4)$$

式中:  $H_m$  为土结构单元体排列的概率熵;  $P_i$  为结构单元体在某一方位区中呈现的概率。

#### 3. 结构单元或孔隙形状系数丰度

为了描述颗粒单元或孔隙的形状, 施斌提出了形状系数和平均形状系数的定义, 就是以颗粒或孔隙的影像面积相等的圆周长与颗粒或孔隙周长的比值作为形状系数, 所有颗粒形状系数的平均值即为平均形状系数。

同样为了描述结构单元的形状特征, 王清等<sup>[20]</sup>用颗粒短轴与长轴的比值来描述颗粒的丰度, 作为衡量颗粒形状的一个指标。

#### 4. 分布性指标

周宇泉等<sup>[18]</sup>认为黏性土的微观结构是一种混沌体, 也是一种具有统计自相似性的分形结构体。因此, 通过计算颗粒分布的维数, 来确定颗粒在空间上的分布的凌乱化程度。

### 1.2.3 岩土结构模型理论研究

近些年来, 岩土结构的研究在理论上也取得了不少的成果。理论研究主要集中在岩土结构的各特征参数的分布、描述方法, 岩土结构模型理论, 系统的计算分析和数值模拟等方面。其核心是岩土结构模型理论。

#### 1. 土体结构定量化的分形理论

分形理论是 20 世纪 70 年代发展起来的非线性的科学成果, 这一成果主要用于描述复杂非光滑曲线和图形。岩土结构中颗粒形状、空隙的复杂性, 通过学者的研究发现, 分形理论是一种有效的描述工具。

在岩石(或颗粒)块度分布方面, 高峰等<sup>[21]</sup>通过标准岩样的单轴压缩试验, 对岩样破碎后的碎块块度分布进行了统计分析, 并计算了分形维数, 认为分形维数  $D$  可以作为岩石破碎程度的统计特征量。并得到结论, 各岩样的块度分布分形维数集中在 1.7~2.0 之间, 说明不同性质的材料在相同的受力状态下, 其破碎是相似的, 块度分布也是相似的。刘熙媛等<sup>[22]</sup>对土体的微观图像采用分形理论的方法计算了土结构图像的平面分维, 认为土样的结构具有分形特征, 且平面分维值与土体的密实度有关。另外还得到一个结果, 就是经过不同的应力路径固结, 其平面分维结果明显不同。李向全等<sup>[23]</sup>提出了土体微结构自相似的观点, 并讨论了粒度、颗粒分布、表面起伏、孔径、孔隙分布、接触带分布和颗粒定向等分维的定义及计算, 并分析了其时间效应。

#### 2. 岩土结构模型理论

岩土结构模型作为岩土理论的核心内容, 许多学者从 20 世纪初就开始研究, 但由于这一问题的复杂性和对岩土结构本质认识深度不够, 这方面一直没有大的突破。近些年来, 不少学者克服困难, 做了大量这方面的探索工作。

从目前文献看, 岩土结构模型主要可以分为三类: 第一类是将弹塑性损伤力学理论引入到岩土领域, 将岩土受力变化过程看作是一个材料损伤发展的过程, 由此来考虑土的结构特性。这方面的文献主要有沈珠江、罗晓辉等<sup>[24,25]</sup>。第二类是将岩土体作为一个散体组织或作为一个由很多个节点并由连接形成的集合, 由此来建立这个集合体的模型, 如沈珠江、刘勇军等<sup>[26,27]</sup>。第三类是在传统模型的概念中, 引入岩土的结构性参数, 以反映岩土结构性的影响, 这方面的文献有饶为国、赵成刚等<sup>[28,29]</sup>。

无论哪一类模型理论, 目前都还没能完全和系统地解决岩土中的结构性问题, 这方面还有许多工作要做。

#### 3. 计算分析和模拟

岩土结构问题的分析计算不仅是土体结构问题, 在岩石问题也是同样要考虑结构性问题, 所以, 岩土结构性问题是一个统一的问题。

目前能实际应用并考虑岩土结构问题的计算分析方法主要有离散单元法 (DEM) 和不连续变形分析方法 (DDA)。这两种方法都是数值计算方法, 许多学者应用这两种方法做了大量的工作。陈兵等<sup>[30,31]</sup>依据非连续变形数值分析方法 (DDA) 的基本理论, 提出利用地壳形变观测资料解算块体运动及其应力场。蒋鹏等引入离散元法模拟夯击作用下松散块石层的变形过程。张国新等<sup>[32]</sup>开发了二阶流形元法数值仿真模型和相应的计算程序, 提高了大变形问题的计算精度。

结构性问题不只在岩土领域中存在,在其他一些非均匀性材料中,也同样存在。如混凝土材料,有一些学者对此也做了很多工作。这方面有彭一江等<sup>[33]</sup>在细观层次上采用有限元方法模拟劈拉试件的开裂过程。钱觉时等利用蒙特卡罗法建立了混凝土材料的模拟方法。

#### 4. 其他理论与方法

##### (1) 非线性流变理论。

何开胜、沈珠江等<sup>[34]</sup>考虑现广泛应用的流变本构关系,并基于由弹簧、粘壶、滑块等基本线性元件组合而成,如凯尔文(Kelvin)黏弹模型、宾哈姆(Bingha)黏塑模型等,为了描述软黏土和处于高地应力下的软岩,文<sup>[34]</sup>选择新的流变本构模型时,所采用的研究方法是基本保留原来的理论模型构架,以室内土工试验成果加以补充修正。也就是保留理论模型的线性流变部分,补充非线性流变部分。实际上属于一种半经验半理论的计算模型。

张勇慧等<sup>[35]</sup>着重于非线性非连续开裂变形的研究,提出非线性卸荷理论。在开挖作用下边坡原有的应力平衡被破坏,出现新的应力重分布。这一过程将影响岩体裂隙的稳定,导致裂隙的开裂扩展。从而形成具有不同力学性质的岩体,如强卸荷带、弱卸荷带和流变剥落带等。

##### (2) 灰色理论。

吴爱祥等<sup>[36]</sup>对岩石力学中的一些问题,例如洞室围岩的收敛变形,具有灰色系统的特点,适合灰色理论的应用条件,提出了利用灰色理论预测围岩收敛变形。对于收敛变形量测结果,是一个时间顺序的数据列,通过建立灰色理论的GM(1,1)模型,来预测未来可能发生的收敛变形,为工程的设计和施工提供有关的围岩动态信息。

##### (3) 人工神经网络方法。

郑泉水等<sup>[7]</sup>为了探索岩土流变本构模型辨识的新的有效途径,作者利用Matlab软件平台,对现已成熟的人工神经网络方法用于岩土流变本构模型辨识的可行性及有关算法进行了研究。

##### (4) 参数反演方法。

由于岩体材料的非均质、非线性、不连续性以及各种工程条件与施工因素的影响,由室内岩石试验或现场原位试验所获得的岩体力学参数往往还不能很好地反映实际岩体性能,这在很大程度上影响工程岩体的解析计算与数值分析结果的正确性与可靠性。自从李兰等<sup>[37]</sup>提出弹性岩体等效弹性模量和原岩地应力场的有限元位移反分析算法以来,利用工程现场量测得到的反映系统力学行为的某些物理量(如应变、位移、应力等),反演岩体流变参数取得了较多成果。

王清等<sup>[20,11]</sup>对5种常用的流变模型(Maxwell, Kelvin, Poyting—Thomson, 广义Kelvin及Burgers模型)进行了有限元和边界元位移反分析的系统研究,提出了逆解回归法和逆解优化法。吴恒等<sup>[38]</sup>采用三峡工程试验洞围岩变形监测资料进行了黏弹性反分析,得到了围岩初始地应力、弹模及黏弹性参数。白冰等<sup>[39]</sup>和刘玉松、蒋明镜等<sup>[13,40]</sup>建议的流变模型和现场变形监测资料,采用直接法对三峡工程船闸高边坡岩体流变参数进行了反演。

在平面位移反分析的发展过程中,三维反分析也受到人们的重视,如文<sup>[38]</sup>采用有限元法对黏弹性地层初始地应力及力学参数进行了三维反演。

蠕变柔量和广义蠕变柔量具有明确的物理意义, Raymond N·Yong<sup>[14]</sup>根据蠕变柔量和广义蠕变柔量概念,进行黏弹性参数反演。但只适于求解线黏弹性、无支护隧洞问题,无法考虑工程因素和边界较复杂、非均匀地应力、非均质和非线性问题。

从上面介绍的情况看,能考虑结构性进行分析的计算方法,主要用于岩石问题,在土体结构分析方面,其分析要更为困难。目前还鲜为看到这方面文献。由此我们看到,岩土的结构性问题,离真正解决还有相当的距离,还需要进行大量的探索工作。

## 1.3 对岩土结构性问题的讨论

从以上对岩土结构方面的文献的回顾可以看到,岩土结构性的问题历来是土力学中研究的重要课题,到目前为止,许多学者已做了大量工作,已经取得了相当的进展。但由于这一问题的复杂性,距离这一问题的完全解决,或建立一套完善的理论还有相当的差距。而且在有些概念和思维方式上可能还有许多需要讨论的方面。下面针对这一问题,进行一些讨论。

### 1.3.1 岩土结构性研究中的一些理论认识问题

自土体结构概念被提出之后,土体结构性的研究已经从概念、术语阶段到定性描述及结构分类阶段再到现今的图像分析和定量研究阶段。逐渐认识到土的结构对其性质起着决定性作用。土体为结构性体的概念的提出标志着土力学发展到了一新阶段。但目前的研究,还是存在一些问题<sup>[42]</sup>。

#### 1. 岩土土体的非线性特征的原因

分析岩土土体的非线性原因,主要源于以下3个方面。

第一,成分的复杂性。岩土可以说是目前我们在地球上能接触到的所有材料中,成分最为复杂的材料之一。因为它包括了地球上所有元素和组成物质的分子类别。尽管如此,经过科学研究工作者数百年的研究,针对岩土工程这一学科的应用,大体将其分为两大类:一类是原生矿物。这一类矿物成分虽复杂,种类也很多,但其性质比较稳定。另一类叫次生矿物,次生矿物是由原生矿物在复杂的物理和化学作用下形成的,它的重要特征是性质比较活泼,稳定性差。岩土成分的复杂,而导致其性能的巨大变化和差别,其中一个重要的原因就是次生矿物的存在和作用。

第二,结构的复杂性。岩土土体的结构是十分复杂的,到目前,我们仍还没有找到一种比较好的方法来描述。岩土土体是由许许多多大小不一、成分不一的矿物颗粒组成的。这些颗粒随成分不同、环境不同,而以不同的方式结合在一起,形成各种各样的团粒,这些团粒又在不同环境条件下形成土体的结构。而土体结构又可能在环境变化中改变结构状态。同样成分的颗粒可以形成不同的土体结构。

第三,环境的复杂性。岩土土体位于不同的环境中,会表现出不同的性质。而地球上的环境是十分复杂的,这也就使得相同的土体,由于所处的环境的变化,而表现出性质上的巨大差异。有水环境、无水环境、化学成分的变化、温度、压力的不同,等等,给岩土



土体造成了一个十分复杂的环境条件。

由于上述因素的复杂性。其弹性模量一般情况下不为常数，而且往往不仅仅是应变的函数，而是可能与多个因素相关（到目前为止，仍不很清楚与哪些因素有关），在反复荷载作用下，其变化更是难以确定。几何的非线性主要表现在，土体的变形往往是大变形，且变形量非常难以确定。微观上，土体的团粒或颗粒表现出变化的随机性，即无法准确地预测某一土体颗粒在土体受到外界作用时，其运动与变化的范围和位置。

## 2. 岩土土体变形的混沌特征

岩土土体的变形，如果从运动的观点来看，是处于持续的永久的变化之中。因为任一土体，都是在一定的环境之中，这就会受到环境的物理和化学的作用。物理的作用有力的作用，温度、湿度的变化，水的侵入和蒸发等，化学的作用有离子置换等。土体不断受到这些外界的作用，就会不断地发生变化，就是外界作用停止后，土体内部仍然会持续地发生着变化（存在滞后现象）。

岩土土体的变形，经过长期的观察和研究发现，有3个特点：一是变形的持续永久性。如建筑物的沉降，有的几十年、上百年仍然可观察到其沉降的变化，就是观察不到沉降的变化，只是观察手段和精度达不到要求而已，并不是沉降停止了。二是变形的不确定性，也就是任何观察或实验往往都很难准确地重复，这一方面是土体结构的不可重复造成的，另一方面是环境的不可重复。三是变形的不可恢复性，因为任何变形都会导致土结构的变化。而土结构受到破坏后是不可能恢复的。

在岩土工程中，我们更感兴趣的是当土体受荷载作用后，其变化情况。通过大量研究我们可以发现，当土体受到荷载较小时，应力—应变曲线或荷载—变形曲线可重复性较好（但也存在差异），当荷载较大时，特别是当荷载接近极限荷载时，几乎不可能出现重复的变形曲线。而当试验样品非常多时，可以发现，从极限荷载上开始发散，而且变形越大，发散的越大。这实际上在变形较大的区域出现了一定的随机性，我们无法预测某次实验，应该出现在某一曲线上。分析出现这一问题的原因，在大变形情况下，特别是接近和超出土体的极限变形时，变形曲线的方向极易受微小的环境扰动的影响，也就是对环境影响的敏感性。

前面是从宏观上看到的情况，现在微观上进行土体的变形的分析。土体是由许许多多的颗粒或颗粒团组成的。这些颗粒或颗粒团受到某种外力的作用后，将发生变形，并移动其位置，这个过程在初始阶段变形较小，且稳定的持续一段时间，当达到一定的阈值后，颗粒的移动变得不可预测，且这个过程，往往不可重复。也就是说，微观变形与宏观变形的过程在某种程度上具有相似性。如果我们从更进一步的微观状态看，由晶体组成的颗粒和团粒本身的变形直至破裂的过程，是和团粒结构破坏或土体的破坏是基本相似的，只不过变形直至破坏阶段不同，受力状态有所不同。

由此我们可以看到，岩土土体的变形特征，带有很强的动力学混沌系统的特征。当土体变形到一定的阶段后，变形的状态变得对环境的扰动极为敏感，环境状态（如加荷速度、温度、湿度等）的微小变化，就使今后的变化相差甚远，这种状态还具有一定的层次性。