

综述

# 土结构性的研究方法及其现状

齐吉琳<sup>1</sup>, 谢定义<sup>2</sup>, 石玉成<sup>3</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000;

2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西西安 710048;

3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 介绍了土结构性的概念和土结构性研究的意义, 回顾了土结构性研究的历史, 对土结构性的定量化研究方法进行了分类, 在分析国内外研究现状的基础上, 提出了土力学方法是进行土结构性定量化研究的最为现实和有效的方法。

**关键词:** 土结构性; 研究方法; 土力学方法

中图分类号: P642.11<sup>+</sup>3 文献标识码: B 文章编号: 1000-0844(2001)01-0099-05

## 1 土结构性的概念

土的结构性是指土中颗粒或土颗粒集合体以及它们之间的孔隙的大小、形状、排列组合及联结等综合特征。因此土的结构性除了应包括土的骨架和孔隙的几何特征(即土颗粒和孔隙的大小、多少、形状和分布等)外, 从土力学的角度考虑还应包括颗粒之间的联结特征。如果将孔隙看作是反映颗粒排列的一个方面, 那么土的结构性就应该包括土中颗粒的排列特征(几何特征)和联结特征(力学特征)。

## 2 土结构性研究的意义

土力学性质的差异或变化取决于内因和外因<sup>2</sup>方面。土本身的颗粒性状、孔隙性状、含水量和矿物成分等因素的不同组合, 使土具有不同的初始结构性, 因而具有不同的力学性质。例如, 由于土中孔隙不同使其具有不同的排水通道, 因此反映土固结速率的固结系数和渗透系数受微结构的影响也较大; 由于颗粒的特殊排列方式和联结特性, 使有的土具有各向异性特征; 由于试样的初始微结构不同, 在含水量降低时吸力的增大引起的效应亦不同。此外, 对于非饱和土, 其渗水系数和渗气系数与土的微结构形态的关系极为密切。外因即荷载(水可看作广义的荷载), 如应力作用过程、路线和水平等。外因可以改变土本身的结构, 形成次生结构, 使同一种土在不同状态下具有不同的力学性质。土的应力-应变关系、孔隙水压力-应变曲线和固结曲线等都与土的结构性有明显的关系<sup>1)</sup>。用不同方法制备的密度、粒度和湿度等物性指标相同的土样其力学性质常具有较大差异, 这也与结构性有密切关系<sup>2)</sup>。由此可见, 土的结构性对于工程建设是非常重要的。因此, 文献<sup>[2]</sup>将土结构性的研究提到“21世纪土力学的核心问题”的高度。长期以来, 对于土的力学性质仅局限于从粒度、密度和湿度3个方面来描述, 忽视了一个极其重要的因素, 即结构性。当代土力学的发展要求定量地描述土的结构性。在过去的半个多世纪里几代岩土力学工作者一直研究这个问题, 但是到目前为止, 还没有找到能反映土结构性的定量化指标。

## 3 土结构性研究历史的回顾<sup>3)</sup>

### 3.1 微结构性研究的初步阶段(20年代中期~50年代初)

一般认为, 1925年土力学的奠基人太沙基所倡导的土的微结构概念与思想是土微结构研究的开端, 也是土结构性研究的开端。他提出了粘土的“蜂窝状结构”是在自然沉积过程中很常见的一种结构形态。其后许多

收稿日期: 2000-10-23

基金项目: 冻土工程国家重点实验室基金和地震科学联合基金资助项目(199044)。

作者简介: 齐吉琳(1969-), 男(汉族), 山东昌邑人, 副研究员, 主要从事土的本构关系方面的研究工作。

学者也注意到了土的微结构的力学意义,并进行了研究.这一时期的研究以观察土的微结构形态,研究其对土力学性质的影响为主.由于缺乏有效的观测手段,仅以放大镜为主要工具,难以对土的复杂的结构性进行系统的研究.

### 3.2 结构性研究的深化阶段(50年代中期~60年代后期)

随着科学技术的发展,光学显微镜、偏光显微镜、X射线衍射技术等 在土的微结构研究中得到了广泛应用.人们开始注意到了结构要素的完整性,特别是结构单元的定向分布特征.常宝琦和林崇义提出土结构是颗粒排列的规律性和颗粒间联结性质的规律性的统称,土结构可分为构造和粘聚性2部分,前者纯属几何特征,后者是由于土的各相间的相互作用对颗粒位移的阻力,进而研究了黄土颗粒的联结特征和受力变形特征.

### 3.3 土结构性量化研究的初步阶段(60年代末~80年代中期)

在此阶段,对土微结构的研究有了较大的发展,人们在进一步寻求定量描述微结构形态诸要素的方法.同时,对土结构联结特征的力学模拟研究也越来越受重视,提出了多种结构模式.在土结构性的研究方法上,比较有代表性的有土结构的微观图像定量分析<sup>[7,8]</sup>和土微结构受力作用下的力学模拟<sup>[9,10]</sup>.这2种方法对后来土结构性的研究起到了很大的影响.在这一时期,中国也有许多学者对土的微观结构进行了观察和分析.

### 3.4 土结构性量化研究的发展阶段(80年代中期至今)

在此阶段,尽管对描述土结构性某一要素的研究手段有所增多,研究的深度有所增加,对土的种类研究的广度有所增大,但无论是在结构性研究方法上还是在对结构性的认识上都没有太大的发展.寻找一个有效的、能应用于实际工作的、带有综合性质的结构性指标成了众多学者的一致追求,形成了土结构性研究的新高潮.计算机图像处理技术的应用,为从微结构形态方面进行土结构性量化的研究提供了新的手段.不同类型的土微结构研究成果为建立土结构性的力学模型提供了参考依据.基于土力学特性非线性的土结构性的损伤模型得到了新的发展.

## 4 土结构性研究的基本途径

### 4.1 微结构形态学的研究方法<sup>[3,7,11]</sup>

自从太沙基指出在评价粘土类土和岩石的工程地质性质中应当注意考虑其微结构的必要性以来,土的微观结构几乎成了土结构性的代名词.在半个世纪的土结构性研究中,许多学者一直把土微观结构的研究摆在重要地位,认为充分认识土的微观结构是土结构性量化研究的重要途径.在这方面开展的大量研究工作和取得的许多重要成果,使人们对土的微观结构有了一个深入的认识.给微结构以确切定义的第一位学者是Kubiena,他当时使用的是“组构”(microfabric)一词,其含义是指土的肌质(plasma)和骨架(skeleton)的排列及其相互关系.Brewer进一步完善了土的微结构的概念,提出土“结构”或“构造”一词指形成复合颗粒的基本颗粒和复合颗粒本身以及相应的孔隙的大小、形状和排列所表现出的物理构成.这种概念融入了颗粒的集合体内容,并突出考虑了颗粒和孔隙的定向性和分布特征,因而反映了更多的结构信息,具有更加明显的实用价值.在对粘土的微结构研究不断深入的同时,中国学者研究了红土、黄土、膨胀土以及冻土等特殊土的微结构.通过对更多类型土的结构性的研究,认识到各种土结构的不同是导致其力学性质具有较大差异的内在原因,从而使越来越多的学者认识到土结构性研究的重要性.目前土的微结构形态量化信息提取的方法如表1所示.信息处理方法有直接统计分析方法和分形几何方法.

#### 4.1.1 颗粒的大小

表示颗粒大小的最常用也是最简单的方法是颗分曲线.另一种方法是分形几何法.刘松玉<sup>[11]</sup>等研究了 中国粘性土的粒度特征,发现在双对数坐标下,粒度含量与粒径之间呈线性关系,表明粒度分布具有分形结构,并根据该直线的斜率 $b$ 由公式 $D = 3 - b$ 可求得相应的分维数 $D$ .

#### 4.1.2 孔隙的大小

与颗粒的大小一样,孔隙的大小可以用孔隙分布曲线来表示,但不同的是孔隙的大小不能用常规的土工方法得到.就目前来讲,最常用的量化研究方法有压汞法和电子显微镜的图像分析法.

#### 4.1.3 颗粒和接触面的形状

就颗粒的形状而言,已有的并得到广泛承认的结论认为粉土和粉质砂土的颗粒呈粒状的较多,而粘性土的颗粒呈片状的较多.粘性土的颗粒在受到压力作用发生变形时呈现出定向排列,从而使各向异性特征显

著增强. 颗粒表面起伏程度和颗粒接触面的粗糙度的定量化研究多是利用电子显微镜与图像处理系统来完成. 将土颗粒表面和颗粒接触面看作是具有分形特征的几何形状, 就可以根据不同颗粒表面形状和接触面形状的分维数  $D$ , 求得对应的粗糙度系数. 胡瑞林等给出了结构性粘土颗粒接触带的分维数的计算方法<sup>[3]</sup>.

表 1 土的微观形态研究方法<sup>[3]</sup>

研究方法	所解决的问题
压汞法	孔隙的大小和数量
气体吸附	孔隙的大小
X-射线衍射	颗粒和孔隙的定向性
电弥散法	孔隙性
磁化率法	定向性
声波法	各向异性度
渗透性法	各向异性度
偏光显微光度法	定向性
计算机图像分析法	孔隙和颗粒的大小、形状、定向度等指标

#### 4.1.4 定向性

颗粒和孔隙定向性的定量化研究最有效的方法有 X 射线衍射法和电子显微镜图像处理法. 对于由单一粘土矿物组成的土, 由于矿物颗粒往往平行排列, 会增强 X 射线的衍射强度, 因此可以根据衍射强度量测粘土颗粒的定向性. 当土中有几种矿物时, 可用电子显微镜图像处理法<sup>[7]</sup>, 对土的微观图像进行数字化处理, 从分析微观图像上显示的土颗粒的密度入手, 分析不同方向上密度梯度的变化, 取椭圆的长短轴为 2 个特征方向, 并以此来确定土的各向异性. Delage 等对高岭土固结过程中孔隙的变化进行了研究, 发现在高岭土固结过程中给定一定的压力增量时, 大孔隙并未被破坏, 只是孔隙的形状和量的对比关系发生了变化. 同时由于大孔隙被拉长, 土的各向异性增强<sup>[12]</sup>. 施斌利用图像处理系统对土的电镜图像进行了研究, 给出了表示粘性土颗粒排列定向性的量化指标<sup>[13]</sup>.

#### 4.2 固体力学的研究方法

在对土微结构形态进行定量化研究的同时, 有的学者利用微观力学方法研究土的结构性, 即用力学模型来模拟土的微结构在力的作用下的行为. Hideki Ohta 提出了基于土结构重组的理想模型, 从土颗粒重组的角度分析土的应力-应变关系<sup>[9]</sup>; Yong 根据不同的力学行为, 将土的结构分为微观结构(颗粒级的)、细观结构(结构单元级的)和宏观结构. 对饱和土来说, 在受力过程中, 不同量级的孔隙内液体的运动规律是不同的. 根据以上分析, 建立了土的 2 种分析模型, 一种是颗粒-颗粒相互作用模型, 另一种是结构单元-结构单元相互作用模型<sup>[10]</sup>. 这 2 种模型考虑了土中各种结构单元在土的力学性质方面所起的作用, 但它不能考虑土颗粒间的电化学力. 苗天德根据黄土的电子显微镜的观察结果和土力学实验结果, 提出土的湿陷变形是由于微结构失稳造成的, 利用突变理论建立了黄土的微观结构失稳模型, 并按照现代连续介质力学方法给出了湿陷性黄土的本构关系<sup>[14]</sup>. 由于微结构单元的形态、单元间的接触关系等千差万别, 在受力后的变化很难把握, 再加上水的影响, 无法按实际情况考虑进去, 因此该模型还有待于进一步完善. 还有学者直接用微观力学的方法, 将土的微观力学变量和宏观力学变量联系起来, 建立土的本构模型<sup>[15, 16]</sup>. 由于该模型没有充分考虑土颗粒间的联结特性, 而且不能充分考虑水的影响, 因此尚未得到应用.

这些研究是应用固体力学的方法来探讨粒状材料的本构关系. 固体力学方法的优越性在于避开了求取土结构性的定量化参数, 由于目前对土微结构的认识尚有欠缺, 如土颗粒的受力状态等问题, 所以该方法没有得到广泛的应用. 在受力过程中土的颗粒是在多种力的作用下由平衡状态到发生位移的, 其中包括机械力和电化学力等. 机械力又包括施加的外力, 颗粒之间的摩擦阻力, 以及由于土中水气的共同存在而产生的吸力等; 电化学力主要是粘土颗粒周围形成双电层, 由此而产生的引力和斥力等. 由于土颗粒的形态不同, 其周围土颗粒对它的支撑作用亦不同, 于是作用于其上的机械力各不相同, 且不易确定. 另外, 土中粘土矿物的种类、含量不同, 使人们对电化学力所起的作用的认识和求解产生了困难. 而机械力和电化学力二者又是相互耦合的, 如在机械外力作用下土受力变形, 于是土颗粒间距发生变化, 毛细作用变化使吸力发生变化, 双电层变化,

电化学力亦随之发生变化等,对如此复杂的受力体系目前人们还认识不够。

用损伤力学的方法来考虑在受力过程中土结构性对土的应力-应变关系的影响是一种新的见解<sup>[17,18]</sup>。该方法的前提是认为土的变形过程是土中的结构逐渐破损的过程,在这一过程中,原生结构逐渐破损,次生结构逐渐形成,因此土从受力变形到破坏的过程是原生结构逐渐破坏、次生结构逐渐形成的过程,也就是从原状土到完全扰动土的转化过程。根据以上分析,提出土的实际力学指标是原状土和损伤土的力学指标的加权平均,即

$$S = (1 - \omega)S_1 + \omega S_d$$

其中:  $S$  为土的某一力学指标;  $S_1$  和  $S_d$  分别为原状土和完全损伤土的相应力学指标;  $\omega$  为损伤比,表示原状土的损伤程度。对原状土  $\omega = 0$ , 完全损伤土  $\omega = 1$ 。同时认为,施加到土上的应力是由2种材料一起承担的,而2种材料在土的受力过程中的表现不一样,这就导致了土的力学性质的非线性和复杂性。但同时产生了一个新的问题,即如何准确确定某一状态(包括应力状态和含水量)下土的损伤比  $\omega$ 。该模型就是用一损伤比  $\omega$  来表示在不同应力状态下土结构性的变化。这一模型在解决问题的前景上是好的,但损伤比的确定仍需进一步探讨。

#### 4.3 土力学研究方法

土力学的方法就是分析土的结构性与土的工程性质的关系。实际上,用土力学方法研究土结构性由来已久。粘土土的灵敏度、黄土的湿陷系数和湿陷起始压力、膨胀土的膨胀系数和饱和砂土的抗液化剪应力等都揭示了不同土的结构性。但以往的研究大多仅就土结构性的某一个方面进行探讨。此外,张诚厚试验比较了二种结构性粘土的土工特性,得到了不同结构性的粘土的力学性质明显不同的结论<sup>[1]</sup>。张炜等研究了非饱和黄土在不同湿度和应力状态下的结构强度特性,给出了结构屈服限的概念,将土的应力-应变关系曲线称为结构强度的发挥曲线,讨论了结构强度对抗剪强度的影响<sup>[9]</sup>。这些土力学方面的工作,对于定性地揭示土结构性引起的土力学性质的某些变化是有帮助的,但对于全面认识土结构性还是不够的,也无法使土的结构性的研究成果得到应用。

土力学方法的最大优越性在于它避开了直接求取构成土结构性的2个因素及每个因素所包含的内容,直接建立土的结构性与土力学性质之间的关系。它之所以长期以来没有得到广泛应用,是因为人们一直未找到一种能够同时描述土的联结和排列2个方面信息的方法。

## 5 结语

综上所述,可以认为,土的结构性是决定土力学特性的一个最根本的因素,它在一定程度上也反映了粒度、密度和湿度3个因素的作用。

土结构性研究的根本任务在于寻求一个能够全面反映土颗粒的排列特征和联结特征的定量化指标,土结构性参数反映了在应力作用下土的力学性质的各种变化,同时在揭示土的动力学性质,如黄土震陷等方面也有较为广阔的应用前景。

用于土结构性研究的微结构形态学方法、固体力学方法和土力学方法都存在一定的缺陷,需要在工作中不断探索,寻找一种能够对土结构进行定量化研究的较为可行的方法。

## [参考文献]

- [1] 张诚厚. 两种结构性粘土的土工性质[J]. 水利水运科学研究, 1983, (4): 65—70.
- [2] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
- [3] 胡瑞林, 李向全. 粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [4] 王清. 微结构理论的认识和发展趋向[J]. 水文地质与工程地质, 1991, (4): 45—47.
- [5] 甘福德. 粘土结构的研究概况[J]. 工程勘察, 1992 (2): 63—66.
- [6] 蒋明镜. 结构性粘性土的结构性研究[Z]. 南京水利科学研究院博士学位论文, 1995.
- [7] Tovey N K. Quantitative analysis of electron micrographs of soil microstructure[z]. Proceedings of the International Symposium on Soil Structure, 1973.

- [8] 高国瑞. 黄土湿陷结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980 (12): 1203—1208.
- [9] Hideki Ohta, Toru Shibaya. An idealized model of soil structure[z]. Proceedings of the International Symposium on Soil Structure, 1973.
- [10] Yong R N and Sheeran D E. Fabric unit interaction and soil behavior[z]. Proceedings of the International Symposium on Soil Structure, 1973.
- [11] 刘松玉, 方磊. 试论粘土粒度分布的分析结构[J]. 工程勘察, 1992, (2): 1—4.
- [12] Deleg P and Lefebvre G. Study of the structure of a sensitive champlain clay and evolution during consolidation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984 (21): 21—35.
- [13] 施斌. 粘土击实过程中微观结构的定量评价[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 57—62.
- [14] 苗天德, 王正贵. 考虑微结构失稳的湿陷性和黄土变形机理[J]. 中国科学(B), 1990, (1): 86—96.
- [15] 钟晓雄, 袁建新. 散粒体的微观组构与本构关系[J]. 岩土工程学报, 1992, 4(增刊): 39—48.
- [16] Krut N P, Rothenburg L. Micromechanical definition of the strain tensor for granular materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 1996, 118: 706—711.
- [17] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1—10.
- [18] 沈珠江. 结构性粘土的非线性损伤力学模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21—28.
- [19] 张炜, 张苏民. 非饱和黄土的结构强度特性[J]. 水文地质, 1992, (1): 22—25.

## STATUS QUO AND METHOD OF QUANTITATIVE STUDY ON SOIL STRUCTURE

QI Ji-lin<sup>1</sup>, XIE Ding-yi<sup>2</sup>, SHI Yu-cheng<sup>3</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. Geoenvironment Research Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The conception and the significance of the soil structure are presented. The history of soil structure study is retrospected and the classification of the approach to quantitatively express the soil structure is made. On the basis of analysis of the domestic and foreign status quo of the study, it is proposed that the soil mechanics method is the most actual and effective for quantitative study of the soil structure.

**Key words:** Soil structure; Study approach; Soil mechanics method