

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

土体微观结构的研究现况评述

吴义祥 张宗祜 凌泽民

(地质矿产部水文地质研究所, 河北正定)



本文回顾了土体微观结构的研究历史, 介绍并评述了微观结构研究中各个方面的研究技术和方法, 指出了微观结构研究的最新进展和发展趋势。

关键词 土体结构 微观形态 研究现况

1 土的微观形态研究历史回顾

早在1925年, 土力学家 K. Terzaghi 就指出: 在评价土体的工程性质时, 必须注意考虑其微观结构 (microstructure)。但真正第一位使用透镜对土的微观问题进行系统研究的学者是 Austrian 土壤学家、土壤微观形态学 (soil micromorphology) 的创始人 W. L. Kubiena。1938年, Kubiena 出版了他的《微观土壤学》(Micropedology) 一书。在这本书中他提出了一套土体微观形态的描述体系和大量有关微观形态描述的概念和术语, 他使用了 microfabric 一词来表示土的微观形态特征, 其定义为: 土中的要素 (基质和骨架 plasma & skeleton) 的排列及其相互关系^[1]。

1958年由 H. Frese 和 H. J. Altermuller 倡导, 在 Braunschweig Volkenrode 举行了第一届国际土的微观形态学工作会议。以后每隔4—5年举行一次, 直到1978年该协会并入国际土体科学协会 (ISSS) 为止。

由于这第一次会议的推动, 加上 H. J. Altermuller 提出了浸胶法, 使得大量制做高质量的土体薄片变得容易了。60年代以来, 越来越多的学者开始对这一领域感兴趣。随着研究的开展, 人们感到以前一直引用的 kubiena 描述体系具有很大的局限性。因此, 1964年 R. Brewer (Austria) 在他出版的《土体组构与矿物分析》(Fabric and Mineral Analysis of Soils) 中提出了一个新的土体微观形态分析体系, 该体系以辨认土要素的定向性和分布特征为基础。在他的著作中提出了土结构 (structure) 这个概念, 其定义是指: 形成复合颗粒 (compound partical-es) 的基本颗粒和复合颗粒本身以及相应孔隙的大小、形状和排列所表示土的物理构成^[1]。

1969年第三次会议在波兰华沙举行, 这次会议上提出建立一个国际工作组, 以统一越来越混乱的微观形态描述术语和分类标准。这个工作组后来提出了5种文字的术语总汇。

60年代末期, 由于电子技术革命, 扫描电镜 (SEM)、探针 (Microprobe)、透射电镜 (TEM) 等陆续地被引进土的结构研究领域, 使该学科开始了突破性的发展, 并且有人开始尝试做定量研究工作。这时, 岩土工程学家们才开始真正关注这一领域。在以后的各次国际土壤工作会议上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家的论文。

1973 年, 在瑞典, 由岩土工程学界主持召开了一次国际土体结构会议, 这次会议重点讨论工程土体的结构问题, 在结构的定义上与以往也有所不同, 其中比较普遍接受的观点是指土粒本身的形状、大小和特征、土粒在空间的排列形式、孔隙状况以及粒间接触和连接特征的总和。显然它比微观形态学家的定义多了粒间接触和连接特征这一力学问题, 带有明显的力学痕迹。有人提出把结构划分成两个部分。其中一部分纯几何关系的问题叫组构, 后面的力学问题叫结构连结^[2]。

我国工程地质界从 60 年代就开始进行土的微观组构的研究工作 (张宗祜等)。后来由于政治因素的影响与国际联系很少, 发展也十分缓慢。70 年代末, 该领域才在我国兴盛起来。1982、1985 年国内曾召开过两次土的结构会议。这些会议的论文基本上反映了我国的微结构研究水平。总的来看, 我国在对一些特殊土体 (例: 黄土、膨胀土等) 的结构作定性描述和分类以及将这些描述和分类与土的特殊性质作定性联系上做了大量工作, 取得了较大的进展^{①②③④}^[3]。在定量分析上和结构分析体系的建立上, 目前也已开始尝试^⑤^[4]。

近年来, 微结构研究的发展趋势是: 1. 为保证结构的原状性, 改进制样方法; 2. 利用现代仪器对结构作定量分析; 3. 从微观结构角度探讨土的变形破坏机制; 4. 探讨如何利用结构作土的工程性质评价和土的工程分类。本文将对这些方面作具体评述。

2 土体微观结构的研究方法评述

目前, 用于土体微结构研究的方法从研究手段上可分为两大类: 即直接法和间接法。各种技术及其代表性应用汇总, 结果如表 1。

从表中可以看出以上各种技术手段各有千秋。大多数研究者使用这些技术来研究颗粒或孔隙的大小、形状、分布、定向性, 或者通过这些技术获得图象或数据供定性定量分析。

在我国, 目前使用较多的是: 光学显微镜、电子显微镜、X 衍射 (求定向性) 以及压汞法 (求孔隙体积) 和气体吸附。

3 观测资料的处理方法评述

通过上述的各种技术手段所获得的资料无非是两种形式: 其一是微结构图象; 其二是结构特征的直接或间接数据。作者认为: 相对于这些先进的测试手段而言, 目前在资料处理和解释方法是落后的。而这一问题又恰恰是结构分析的关键所在。只有能对所获得的结构信息作正确的提取、解释和应用才能达到结构分析的真正目的。

国际上现行的资料处理方法有两类:

3.1 结构图片的解释法

这方面的主要发展方向是作土的结构定性分类。例: Kubiena 体系, Brewer 体系, Stoop & Jongerius^[1] 分类法等。但他们的着重点偏向于土壤学。因此, 岩土工程师们一般不大引用。在土力学界、工程地质学界应用较多的粘土分类体系有以下几种: 它们大多数都以粘土颗粒彼此

① 王幼麟, 粘土的微观结构特征与强度, 第二届土和土体结构会议, 1985。

② 高国瑞, 中国红土的微结构和工程性质, 第二届土和土体结构会议, 1985。

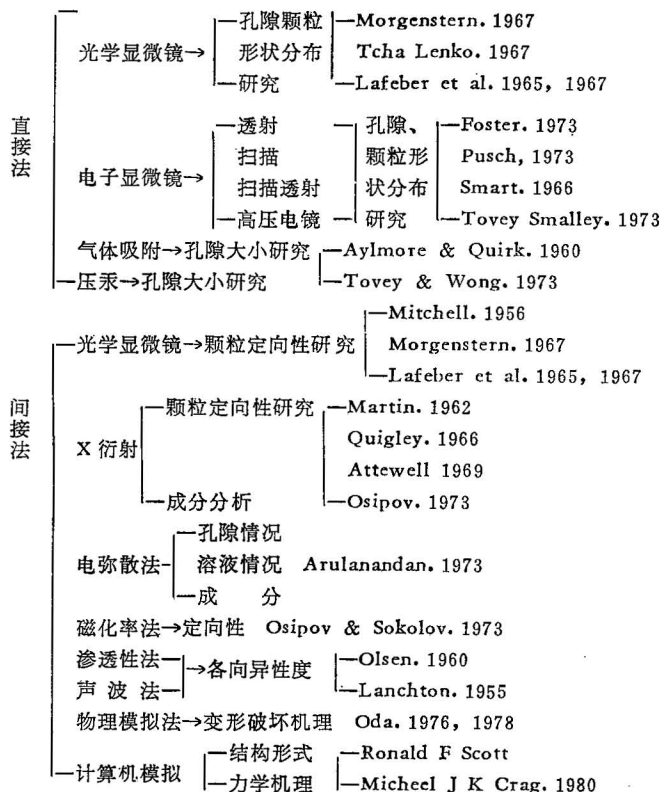
③ 谭罗荣, 片状颗粒定向排列研究中若干问题, 第二届土和土体结构会议, 1985。

④ 菇履安, 粘土颗粒定向 X 光试验中的几个问题, 第二届土和土体结构会议, 1985。

⑤ 吴义祥, 工程粘性土微观结构的定量研究 [博士学位论文], 北京: 中国地质科学院, 1988。

表 1 土体微结构的研究方法分类表

Table 1 The classification of the research method on soil microstructure



排列、接触的方式 (E-F, F-F, E-E)、聚合体的大小、形态、总体分布图案为分类准则的。

(1) 理想化模式^[5]: 片架结构(card house)、叠片支架结构(book house)、蜂窝状结构(honeycomb)、涡流状结构(turbos triatic)、弥散状结构(dispersed)、叠书状结构(stack)。

(2) 苏联粘土分类模式^[6]: 该模式除考虑形态外, 还提出了粘土成因和结构凝聚程度、岩石成分、力学指标、地质作用等因素。

他们把沉积粘土分成5类, 即: 蜂窝状(honey comb)、骨架状(skeleton)、基质状(matrix)、涡流状(turbulent)、层流状(laminar); 将残积热液粘土分成3类, 即: 畴状(domain)、假球状(pseudoglobular)、海绵状(sponge)。由于这种分类法与工程地质指标结合较多, 因而他们曾把它用来作粘土分类。

(3) 中国分类法: 我国学者^[7]①②③④大多对特殊土类作结构研究较多, 分类依据是基于

① 高国瑞. 中国红土的微结构和工程性质. 第二届土和土体结构会议, 1985.

② 孔德坊. 关于表述粘性土微结构的术语的讨论. 第二届土和土体结构会议, 1985.

③ 唐大雄, 李洪玉. 粘性土物质成分和结构研究论文集. 长春: 长春地质学院, 1985.

④ 薛守义, 卞富宗. 红土的结构与工程特性. 第二届土和土体结构会议, 1985.

辨认颗粒的形态和分布来确定结构的类型。

总的看来,在岩土工程学界,土的结构分类方面苏联和中国的学者比较感兴趣,进展也较大,但它存在以下缺点:

A. 人为因素大,标准难以掌握。同一形态各人看法可能不同,甚至有些标准实际上是无法得到的。

B. 土的不均匀程度太大。即使用同一块土样,不同观察点也很难是同一种模样。由于土是一种非平衡系统。所以试图寻找出象矿物晶态或者象电子排布那样具体的结构类型是不可能的。

C. 目前的分类法普遍带有明显的逻辑推理的痕迹,人为因素大,难以把握土的结构本质。

鉴于以上这些问题,人们越来越趋向于寻找一种比较客观的标准来提取土的结构特征。这就导致了结构研究必须向定量化方向发展。

3.2 微观信息的定量表示方法

目前使用的所有间接结构分析技术都能定量、半定量提取土的某些方面的微观信息。如何用这些信息定量表示土的微观结构是目前的一个研究重点。目前已有的方法主要是反映结构某一方面特征的参数,例如:

通过气体吸附、压汞试验所获得的数据可以整理成孔隙度、孔径分布、平均孔径等定量参数;

结构的各向异性有许多表示方法,如:

(1) 用光学显微镜技术 (Mitchell, 1956; Morgenstern, 1967) 测定光折射性质的各向异性就能判断颗粒的择优定向性。

定向度 = 最小光强度 / 最大光强度

(2) 用X衍射技术测定样品几个方向的衍射强度,经比较得到颗粒定向性的指标。例: КОТЛОВ (1975) 的定义^[6]:

$$C_p = \frac{K_{01} //}{(K_{01} // + K_{01} \perp)}$$

式中: $K_{01} = I_{001}/I_{060}$, I_{001} , I_{060} 分别为 001, 060 两个面的衍射强度。
谭罗荣等 (1981) 介绍的^[8]:

$$R = \frac{(n // - n \perp)}{(n // + n \perp)} = \frac{(\sqrt{r} - 1)}{(\sqrt{r} + 1)}$$

式中:

$$\sqrt{r} = n // / n \perp = ((I_{001}/I_{020}) // (I_{020}/I_{001}) \perp)^{1/2}$$

$n //$ 、 $n \perp$ 分别为平行和垂直基面取向的扁平颗粒数。在这方面比较先进的是使用 texture goniometer^[9,10]可直接求出颗粒定向性的分布密度图和定向椭圆。

(3) 用相干光照射显微镜图片得到一幅衍射图象,以此图象的扁平率作为结构定向程度的量度^[10]。

(4) 用物理参数^[3] (磁化率、渗透性、波速等) 的各向异性度来表示结构的各向异性。

70年代后期随着计算机技术发展起来的图象测量法 (photogrammetric method^[4,11])^①, 通过使用计算机图象分析系统来提取孔隙、颗粒的大小、形态和定向特征,是一种能同时获得最多结构定量信息的方法,该方法将是一种最有发展前途的方法。

① 吴义祥,工程粘性土微观结构的定量研究[博士学位论文],北京:中国地质科学院,1988,

有关土结构的总体定量特征参数的研究,1988年,地矿部水文所^①提出了他们的见解。他们指出:大量的观测表明,粘土的结构单元之间存在的是一种混杂的联系,几乎无法找到排列完全一样的两个样品,或者是同一样品不同部位排列完全相同,即使是同一样品的同一部位其结构随着环境也在不断变化。粘土结构的这种混乱性正是它不同于其它材料的结构特征。他们把某一确定时刻粘土系统中各个要素的这种混杂联系叫做结构状态,并且认为只要确定了此时这种结构联系的混杂程度,就把握了这一状态的特征。由此他们引入了结构熵的概念,即用熵来反映结构在排列、粒级和能级上的混乱程度。其表达式为:

$$E = E_o \& E_g \& E_e$$

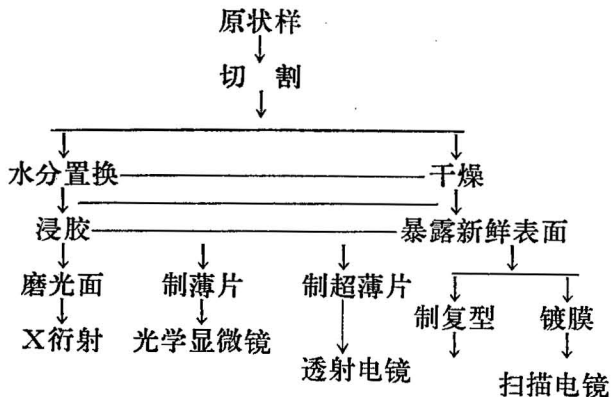
式中: E = 粘土的结构熵; E_o = 排列熵; E_g = 粒级熵; E_e = 能级熵

$$E_i = - \sum_{k=1}^n P(k) \log_a p(k)$$

1988年,他们同合肥工业大学一道研制了微观结构图片计算机定量分析系统。该系统能提取颗粒、孔隙的大小、定向、形状系数、粒级分布以及测定土的排列熵和粒级熵,并能按给定的标准进行颗粒或孔隙的分类。土的结构熵概念提供了一个土体总体结构特征的定量量度指标。可以认为是一种最有前途的定量指标。

4 微观结构土样制样技术

土的微观结构的研究重点是研究原状的土体,由于多数研究者使用光学、电子技术等手段进行微结构的直接观测,因此,如何制备非扰动的试样是一个关系到观测结果正确性的重大前提。目前,国际上流行的制样过程可归结如下:



在这些步骤中,干燥问题是比较难办的一步。干燥方法目前主要流行的有三种:

(1) 风干或烘箱干燥 (air drying) ^[12,13] (烘箱温度不应高于 60℃): 这种方法的优点是价格低廉,操作方便。但是,对于细粒土,因三相界面毛细作用引起试样的收缩和破裂,从而歪曲了原状的结构。大多数研究者目前采用的是这一方法。

(2) 临界点干燥技术 (critical point drying) ^[12,13]: 该技术的原理是通过控制温度和压力,使得其略高于孔隙溶液的临界点,在该条件下使溶液变成气体,达到干燥的目的。该技术的大多数使用者都认为效果较好。有些研究者指出,这种方法也会引起土的微裂并使土体变脆(K.

^① 吴义祥,工程粘性土微观结构的定量研究[博士学位论文],北京:中国地质科学院,1988,

Collins, 1983)。另外, 由于水的临界点很高 (37.4°C , 3266 p. s. i.), 不易直接进行临界点干燥, 因此, 必需先用其它临界点较低的液体置换。常用的置换物是 CO_2 (临界点: 31°C , 73 个大气压)。我国铁科院西北所曾报道使用过该方法, 中科院有从日本引进的这套设备, 但未见正式使用的报道。

(3) 速冻干燥法(freeze drying)^[6,13]: 该技术的原理是采用冷液 (例如: 液氮) 将土样快速冷却, 使土孔隙中的水变成非晶质的冰, 然后通过真空升华来进行干燥。这一方法的使用者普遍认为效果好。但从原理上讲, 若孔隙溶液盐分太高, 会因纯水变成玻璃质冰时形成浓度梯度而引起水的运动, 扰动原始结构 (Weiser, 1970)。1985 年南京大学地质系 (李生林等) 报道已组装了一台这种仪器但制样速率尚存在问题。1986 年地矿部水文所成功地试制了一台“温差真空干燥系统”^①, 并且用它成功地制备了宁波软土结构分析试样。由于该系统在真空干燥系统的基础上加上了温差梯度升华装置, 使其制样效率比苏联 (Osipov) 报道的指标要高出 2 倍以上。

表面暴露 (surface exposure) 也是一个维持原状性的难题, 目前使用胶带揭皮的办法比较普遍。也有人报道过使用离子轰击方法, 1953 年 Call 第一次使用该方法成功地暴露了蒙托石样品的新鲜表面。

5 结构连接问题研究现状

由于结构连接在目前进行直接测量还很困难, 因此这一方面还基本上限于利用胶体化学、物理化学理论对几个片状颗粒之间的连接作一些理论上的探讨^[6]。这方面的研究有二个方向。

5.1 土颗粒之间的主要作用力理论研究

(1) 分子力: F. London(1937) 首次提出分子相互作用的一般理论。Hamaker(1937)在其著作中第一次计算了分散颗粒之间的分子力。1948 年 Verwey, Overbeek 提出了计算二个厚度为 δ 的彼此平行的 2:1 型层状粘土间的分子相互作用能计算公式。对于单个粘土颗粒分子之间相互作用, 目前正处于研究之中。1973 年 Соколов 曾对高岭土和蒙托石粉末结构进行了测定, 试验结果是: 高岭土的平均连接强度为 $3.25 \times 10^2\text{ Pa}$, 蒙托石为 $3.35 \times 10^2\text{ Pa}$ 。而用理论计算的高岭土和蒙托石 2 的单个分子连接强度为 $1.2 \times 10^{-8}\text{ N}$ 和 $1.5 \times 10^{-8}\text{ N}$ 。

(2) 离子静电力: 离子静电力的研究主要为古依双电层理论和施恩特双电层理论的应用。Jording, Bodman 和 Gold (1962) 曾提出了对一个离子和两个带电介电板的相互作用能的表达式。后来 Jordinf, Steel, Wolfe 继续了这方面的工作, 计算了两个蒙托石层间每一结构晶包面上的离子静电引力能并得出如下结论: 即离子静电引力能曲线具有明显的势能最低点。小距离内粘粒间的离子静电作用能远大于分子引力能。

(3) 粘粒间的其他连接力: 三相界面的毛细力以及胶结粘土中的化学连接力有许多学者进行了研究并提出了计算公式。1979 年 Osipov 还提出了磁性力、库伦偶极力的存在。

5.2 粘土接触类型的研究

苏联学者认为粘土颗粒的结构连结不是沿颗粒所有相界面进行的, 而是在其最靠近的接触点上进行。这些单个接触点的量和性质是结构的重要特征。并且认为接触是指各种连结力的综合表现。1966 年 Ребиндер 曾将土体的接触划分为三种类型即: 凝聚型、过渡型和同相型。迄今为

① 吴义祥, 工程粘性土微观结构的定量研究[博士学位论文], 北京: 中国地质科学院, 1988。

止,许多学者还沿引这种分类。Юсупов(1973), Ватанов (1975) 曾报导对颗粒间的接触强度进行过直接测定,该报导未谈及具体方法。

6 土体结构与其工程地质性质之间的关系研究

6.1 结构与土的压密和固结

许多研究者都认为:粘土的固结与压密是其微观结构再造的过程。70年代,奥西波夫^[6]等研究微观结构在压缩过程中所起的作用,采用人工制备的粘土进行压缩和固结试验,同时分析其结构特征,并指出固结可以分成与结构再造有关的渗透阶段和由骨架蠕变所控制的次固结阶段,结构骨架的强度决定了它们在压缩过程中结构再造程度和内部水的排除速度,并对不同接触类型的粘土的压缩性作了论证。1988年,地矿部水文所^①用宁波软粘土进行了固结压缩各阶段的定量结构分析,根据实测结果发现粘土的结构熵在固结和压缩过程中都呈对数衰减趋势,而粒级的平均值在压缩试验中当压力达到一定数值时出现变大的现象。并认为粘土的固结过程是粘土系统为适应给定外界环境进行的内部结构通过“自组织”从较无序向较有序转化的“进化”过程。在一定压力下当粘土系统“进化”完成后,固结作用即告终止。如果在此基础上,载荷进一步增加,粘土将在更高阶段的进化过程。在低压力阶段,系统以减少熵值、增加有序度的办法来抵抗,当压力达到一定数值时,粘土系统会发生结构单元的聚合、并进一步减少下一层次的无序度,以此来求得与环境的平衡。

6.2 结构与粘土的剪切性质

结构与土体剪切性质的研究集中于两个方面:一是剪胀问题,1967年,Bjerrum研究认为剪胀单元力受到内部电场和粒间接触造成的斥力抵抗。并指出具有片架结构的粘土比具弥散结构的粘土有更大的剪胀性。地矿部水文所^②的观点认为剪胀是土系统在靠自身进化不能适应外界环境而发生系统破坏时,由熵减少转变成熵增加,结构混乱度增大而出现的体积膨胀。

有关土的抗剪强度与结构的关系,奥西波夫^[6]的研究比较深入。通过试验分析,他认为:具有定向结构的试样的抗剪强度比无定向的小。其解释为定向的结构在剪切时要发生结构定向再造,这一过程要消耗一些外能;另外具有定向结构的试样由于其要素间的接触面积较大,颗粒较接近,使相互间的作用能大,因此它的强度值与垂直荷载的从属关系比不具定向性的大,从而 φ 值较大。

奥西波夫^[6]另外还分析了具有不同结构连接的土在快剪时的强度的差异。

6.3 结构和土体膨胀性的关系

高国瑞^[13](1984)对膨胀土的微观结构进行了分类,他认为膨胀产生的条件是土中普遍存在F—F相接触的叠片体,并且,这种叠片体必须以自相聚的方式形成基质。奥西波夫^[6](1979)研究认为粘土的膨胀性是结合水溶剂膜楔入作用产生的,结构粘结是粘土在扰动时的主要膨胀因素。

6.4 土的微观结构力学模型

要建立一个包罗万象,既考虑宏观又考虑微观的土体结构力学模型是很困难的,尤其是变形

①② 吴义祥,工程粘性土微观结构的定量研究[博士学位论文],北京:中国地质科学院,1988。

过程中的土单元的结构再造十分复杂,以致于不可能找到一个准则来把每个颗粒重新定位。因此,研究者们就试图寻找在各种应力状态下最基本的结构再造模式,如:

(1) Pusch (1970) 提出引入土粒集合体的弯曲效应的结构再造模型。Pusch 指出在比例加载过程中,那些大致平行最大主应力的颗粒网络的较软弱部位对于轴向主应力偏量所引起的弯曲很敏感,最先发生破坏,并在垂直最大主应力方向重新定向。接下来是较不稳定的颗粒集合体以及由小集合体构成的柱因弯曲而破坏。根据 Euler 弯曲公式可以得出:

$$\frac{\Delta e}{e} = \frac{-\Delta \sigma_m'}{a \sigma_m'}$$

(2) 加拿大 McGILL 大学 R.N. Yong (1973)^[15]提出了两种土的组构单元相互作用的分析模型:

微应力应变分析法

设某一土系统由 N 个结构单元组成,其微观应力应变可以表示成:

$$\epsilon_{ij} = \sum_{(k)} a_{ij}^m \xi_{ij} k$$

$$\xi_{ij} = \sum_{(k)} b_{ij}^m \epsilon_{ij} k$$

式中: ϵ_{ij} = 微观应变, ξ_{ij} = 微观应力量, a_{ij} 、 b_{ij} = 微观物理常数,宏观和微观之间的关系为:

$$\sigma_{ij} = \sum_{(k)} \xi_{ij}^{(k)} a^{(k)} / A$$

σ_{ij} = 宏观应力, A = 试验样品断面总面积, $a^{(k)}$ = 单元 K 的断面积,以上微观参数均用数学期望或分布函数的第一矢量来表示。

应用 ONSAGER 法则,应变时间 $e_{ij}(t)$ 的方程为:

$$e_{ij}(t) = [1 - \exp(-b_{ij}^t a_{ij} t)] \sigma_{ij}^{(t)} / a_{ij}$$

能量分析法

设某一结构单元在某一特定能量水平 E_m 下出现的概率为:

$$P_m = F(E_m)$$

在一平衡条件下,任一单元在能量状态 i 出现概率为:

$$P_i = CW[E^0 - E_i]$$

c = 依赖于 i 的概率常数, $W[E^0 - E_i]$ = 使单元保持在标准集中的状态数, Yong & Chen (1972) 给出:

$$P_i = e^{-\beta E_i} / \sum e^{-\beta E_i}; \quad \sum e^{-\beta E_i} = \text{分配函数}; \quad B = \text{BOLTZMANN 常数}$$

1972 年 Yong & Chen 给出了如下关系式:

$$\epsilon(t) = D\sigma + \int_0^t P_1(\tau) / g_1 f(t-\tau) \sigma d\tau + B\sigma t$$

并且用它同实测资料进行了验证,表明它与实际情况有较好的一致性。

(3) 苏联 Sergeyev 等 (1973)^[16]从另一个角度提出了考虑土的结构再造的流变模型。在此模型中,除了考虑影响分散系统蠕变的常规因素外,还加入了一个结构运动单元 BK/P (偏转包) 来表示土体变形过程中粘土颗粒的重新定向。当偏转角 θ 的变化达到 θ_{lim} 时,粘土颗粒的重新排列便停止。之后承受变形的粘性偏转包达到蠕变的临界点即变成了塑性单元。偏转包的状态方程为:

$$T \cos(\theta) = \tau d_s / d_t$$

粘土的状态方程为:

$$\gamma(t) = \gamma^a \tanh \tau / t \gamma \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{2t} [\gamma^a \ln \left(\frac{\gamma^a + \gamma(t)}{\gamma^a - \gamma(t)} \right) + \alpha \gamma(t)] = \tau t \quad (2)$$

式中: $\gamma^a = \gamma^a / \sin(\theta)$, γ^a = 结构重新定向完成时的相对剪切变形, 方程 (1) 描述了当结构重新定向和相对滑移同时发生时的状态, 方程 (2) 描述重新定向完成 构 滑 动 成 为 可 能 的 状态。

(4) 1980年Ronald F. Scott和Michael J. K. Craig报导了一种粘土结构力学的计算机模拟技术。在一定条件下随机模拟沉积粘土的结构模式, 并用有限单元方法计算在加载时各单元的变化。得出以下结论:

A. 弯曲在结构变化中起控制性作用, 而轴向和剪切变形只占总应变能的1%—10%, 并且随着单元的非线性特征的增加, 后者的比例越来越低。

B. 单元的数目越大, 系统越软; 单元对整个系统特征的意义越小, 边界对整体的影响也越小。

参 考 文 献

- 1 Stoops G, Hari Eswaran H. Soil Micromorphology. Van Nostrand Reinhold Soil Science Series, 1986.
- 2 Jongerius J. Recent Developments in Soil micromorphometry. Proc. int. syp. on soil structure, 1973.
- 3 Arulanandan K. Soil structure evaluation by use of radio frequency electrical disperision Proc. Int. Syp. on Soil Structure Gethenburg, 1973.
- 4 Tovey N K, Wong K Y. Some aspects of quantitative measurement from electron micrographs of soil structure. Geotechnique, 1983.
- 5 Bisdom E B A, Ducloux J. Submicroscopic studies of soils. Developments in soil science 12#, Elsevier Science Publis hers, 1983.
- 6 Б И 奥西波夫. 粘土类土和岩石的强度与变形性能的本质, 北京: 地质出版社, 1985.
- 7 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性. 中国科学, 1980, (12).
- 8 谭罗荣. 粘土微观结构的定向性的 X 射线衍射研究. 科学通报, 1981, (4).
- 9 Tovey N K. Technique of Observation and Methods of Quantification. Proc. Int. Syp. on Soil Structure, Gethenburg, 1973.
- 10 Borodkina M M, Osipov V I. Automatic X-ray analysis of clay microfabrics. Proc. Int. Syp. on Soil Structure, Gethenburg, 1973.
- 11 Tovey N K. Quantitative analysis of electron micrographs. Proc. Int. Syp. on Soil Structure, Gethenburg, 1973.
- 12 Tovey N K. The preparation of soil and other geological materials for the S. E. M. Proc. Int. Syp. on Soil Structure, Gethenburg, 1973.
- 13 Gillott J E. Method of sample preparation for microstructure analysis of soil Proc. Int. Syp. on Soil Structure, Gethenburg, 1973.
- 14 高国瑞. 膨胀土的微观结构和膨胀势. 岩土工程学报, 1984, 6(2).
- 15 Yong R N, Sheeran DE. 1973, Fabric unit interaction and soil behavior. Proc. Int. Syp. on Soil Structure, Gethenburg, 1973.
- 16 Sergeyev Y N, et al. The importance of the fabric of Clays in estimatting their engineering-geological properties. Proc. Int. Syp. on Soil Structure, Gethenburg, 1973.

A REVIEW OF THE PRESENT STATE OF THE RESEARCH ON SOIL MICROSTRUCTURES

Wu Yixiang, Zhang Zonghu and Ling Zemin

(Institute of Hydrogeology Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengding, Hebei)

Abstract

This paper reviews the history of the research on soil microstructures, introduces and evaluates various kinds of methods and techniques employed in various aspects of soil microstructure research, and points out the new progress and development trends of the research.

Key words: soil structure, soil microfabric, present state of the research

作者简介

吴义祥, 生于 1962 年 10 月, 1982 年武汉地质学院工程地质专业毕业, 1988 年获中国地质科学院博士学位。现任地质矿产部水文地质研究所厦门环境地质开发研究中心副主任, 高级工程师。通讯处: 厦门莲花新村观远里 23 号, 邮政编码: 361009。