

粘性土固结过程中的微结构效应研究

李向全 胡瑞林 张 莉

(中国地质科学院水文地质工程地质研究所, 河北、正定 050803)

【摘要】从粘性土体结构系统观点出发,建立了土体结构形态概念模型。根据土体具有的非线性特征,运用分形几何理论提出了7项定量表征土体微结构状态的分维指标。在此基础上,以厦门软土为例开展了软土固结过程中的微结构变化规律研究,取得了一些成果,从而对软土力学特性有了更深层次的认识。

【关键词】粘性土;固结;微结构

【Abstract】In this paper, the concept model of soil microstructure is established from the viewpoint of soil microstructure system. According to the nonlinear features of soil, 7 fractal dimension parameters to identify structure state of soil are suggested with the help of fractal theory. On the basis of the above results, the changing characteristics of soft soil microstructure are studied during solidation using Xiamen soft soil as example, and a lot of important results are given. For this reason, more knowledge about mechanics features of soft soil is obtained.

【Key words】clayey soil; solidation; microstructure;

0 引言

粘性土体的力学特性远非弹性的或刚塑性的,具有非常复杂的非线性特征,很难用传统的、基于线性分析基础之上的技术方法加以表达。其中一个主要的原因在于未能真正考虑土体的结构性。土的工程性状在很大程度上受到其微观结构系统的控制。现有的各种土体本构模型(弹性模型、刚塑性模型和弹塑性模型)实际上都是针对饱和扰动土和砂土(无结构强度土体)而发展起来的,缺乏对土体结构特征及其演化规律的描述,因而实际的工程计算结果难以模拟土体的实际状态,往往会出现较大的计算误差。土力学的纵深发展关键在于结构性问题的解决。对此,著名土力学家沈珠江院士曾强调指出:21世纪将是结构力学的世纪,土体结构性的本构模型的建立将成为核心问题。基于这样一种认识,作者近年来针对微结构量化问题,开展了一系列研究工作,取得了一些成果。本

文所介绍的就是其中部分内容,即利用分形几何理论对软土在固结过程中的微结构状态变化规律进行了探索性分析研究。

1 粘性土体结构状态及其概念模型

自然环境中形成的土体,无论是其物质组成,还是其存在形式,均十分复杂、千变万化,很难以为数有限的模式加以概化。虽然土体的组构概念只涉及到几何形态部分,但其组合型式仍相当复杂,难以确定。我们认为土体的微结构实质是一种物质状态,我们称之为“结构状态”(Structure State)(S)。因此,这种状态总可以某些“结构要素”(Structure Factor)加以确定。亦即,土的结构状态是一系列结构要素(x_1, x_2, \dots, x_n)的函数,可表示为:

$$S \sim f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

尽管这种结构状态与结构要素之间的关系十分复杂,很难用简单的线性关系加以表达,但是结构形态在概念上还是比较明确的。一般认为,它可以由颗粒(矿物或矿物几何体)

作者简介:李向全,1966年生,男,副研究员。中国地质科学院水文地质工程地质研究所环境工程室副主任,长期从事工程地质方面的科研工作。

的形态、排列组合方式、孔隙性和接触关系(非化学联结性)等四部分特征加以概化。

这里,结构要素实际上只具有定性意义。只有首先实现结构要素的量化,才能在定量意义上对结构状态加以确定。我们称定量刻划或构成结构要素的参数为“结构参数”(Structure

Parameter)。一个结构要素可能需要一个或多个结构参数加以刻划。隶属于不同结构要素的结构参数,在功能上也非完全独立,存在着交叉影响情况。整个土体结构形态是一个复杂的、多层次的交叉系统,其概念模式见图 1。

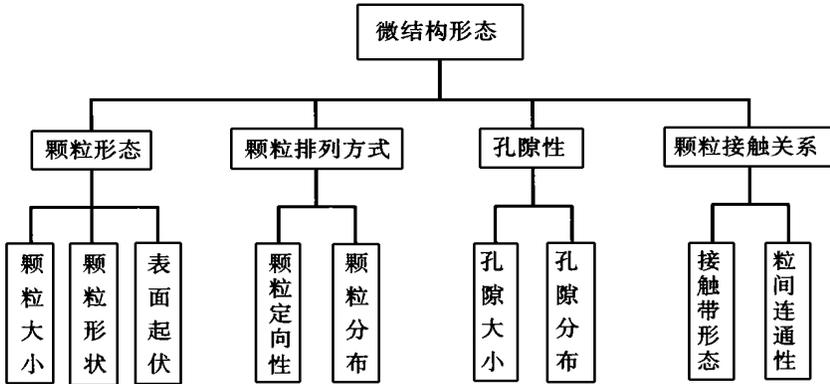


图 1 土体微结构形态体系的基本构成

土的微结构形态系统还是一个动态的开放系统,不同的环境条件(如压力环境)下系统的性质将发生显著变化。亦即,结构状态还是时间(t)的函数。所以,土的结构状态(S)总可以通过如下复杂关系式加以确定:

$$S=f(x_1, x_2, x_3, x_4, t) \quad (1)$$

式中: x_1, x_2, x_3, x_4 代表“颗粒形态”、“颗粒排列方式”、“孔隙性”和“颗粒接触关系”四项“结构要素”,它们分别为各结构参数的函数。

我们初步建立了土的微结构形态系统的概念模型。虽然这一模型的函数形式目前还难以确定,但是它为进一步实现结构量化确立了富有导向性的总体研究框架。

2 土体微结构参数分维的图像确定法

2.1 土体微结构自相似性

分形几何学主要是研究一些自相似性(Self-similar)的不规则曲线,具有自反演性的不规则图形,具有自平方性的分形变换和

自仿射分形集等。自然界中最为常见的是统计型自相似分形,即从统计意义上看几何体的空间维数变化是连续的,处理的对象具有非规则性的整体与局部的自相似特点,其重要描述参数为分维(fractal dimension)。

土体的工程性质实际上是土体结构单元体性质的综合表现,而结构单元体的性质又在很大程度上取决于土粒集合体甚至于更小的单粒矿物的性质。从这种意义上讲,它们之间具有较为明显的层次性和自相似性。关于这一点,我们可以以粒度结构的一种理想模型加以说明。例如,我们可以设计一种Serpinski垫片(见图 2),以此可以模拟土体的一类典型结构。图中方块部分可与颗粒对应,其间部分为孔隙。该图的构造规则是:设一单元立方体空间的每边均等分为 b 份,共有 b^3 份小立方体空间,使中间 $(b-2)^3$ 份小立方体空间用等体积的颗粒充填,作为第一级核心(图 2a)。该核心周围有 $b^3 - (b-2)^3$ 份小立方体

空间,从中取出 N 个,每一个立方体空间边长再继续等分为 b 份,小立方体也被分为 b³ 份。依照此规则,充填一个颗粒作为新一级核心,共得到 N 个,新一级的颗粒与前一级颗粒尺寸相似比为 b(见图 2b、b')。据此规则进行下去,就可得到逼近的粒度结构模型。这一图形为典型的颗粒分形结构模型,其模拟手段同样适合于孔隙结构模型的塑造。因此,土体微结构形态确实存在着某种统计意义上的自相似分形结构。我们完全有理由利用分形几何学的有关理论和方法开展土体微结构研究。

2.2 非确定性结构参数量化方法

开展土体微结构定量研究首先要进行结构要素量化,即确定定量刻划结构要素的结

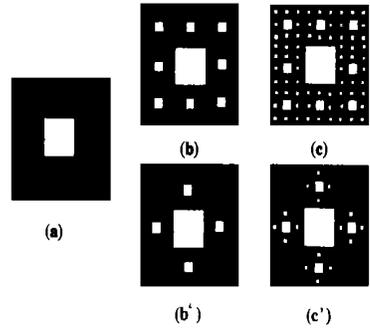


图 2 土体结构的分形模式

构参数。利用我研究所研制的图像分析系统(MIPS),通过对土结构图像分析直接求算的方法,共得粒度分维(D_{ps})、颗粒分布分维(D_{pd})等七种微结构参数分维(见表 1)。

表 1 非确定结构参数分维算法简表

数学模型及要素 结构参数名称	数学模型	要素 ε	要素相关值 N(ε)
粒度分维(D _{ps})	$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon}$	粒径	大于某粒径的颗粒数
颗粒分布分维(D _{pd})		图像分割网格边长	对应于 ε 的图像上含有颗粒格网总数
表面起伏分维(D _{pr})		测尺长度	对应于 ε 的测量步数
孔径分维(D _{bs})		孔径	大于某孔径的颗粒数
孔隙分布分维(D _{bd})		图像分割网格边长	对应于 ε 的图像上含有孔隙的格网总数
接触带分布分维(D _{co})		图像分割网格边长	对应于 ε 的图像上含有接触带的格网总数
颗粒定向分维(D _{di})		$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum P_i \cdot \ln P_i(\epsilon)}{\ln \epsilon}$	颗粒方位夹角增量

3 软土固结过程中微结构要素分维变化特征

我们以一种比较典型的结构性土体—软土为研究对象,开展该方面的研究工作。软土在其固结过程中其微结构形态将发生调整再造。然而,我们对这种结构调整再造规律至今并不十分清楚,为开展这一问题的研究,我们

以厦门原状土为例,进行了相应的结构试验和分析。固结试验采用单轴、双轴排水方式,固结压力为 0.1 MPa,时间序列设置为 1'、9'、25'、64'、400'、1 440'。通过试验和分析,初步确定了粘性土结构要素在固结过程中随时间的变化关系。鉴于篇幅所限,以下主要就粒度分维(D_{ps})、颗粒表面起伏分维(D_{pr})、颗粒

定向分维(D_{di})、颗粒分布分维(D_{pd})四种结构参数的变化规律加以讨论。

1) 粒度分维(D_{ps})的时效特征

图3展示了粘性土粒度分维随时间的变化关系。粒度分维变化具有明显的阶段性,大致可划分为两个阶段。在固结初期,曲线起伏较大,数据点间落差大;固结后期颗粒分维呈缓慢的下降趋势。粒径的这一变化规律说明,在前后两个固结时期内颗粒的调整是不同的。分析发现,固结前期随孔隙水的排放土体骨架有效应力逐渐增加,土颗粒表现为有效应力聚散交替过程,即是一种聚集→破碎→再聚集→再破碎的过程。而后期则表现了在恒定有效应力作用下颗粒的调整行为。

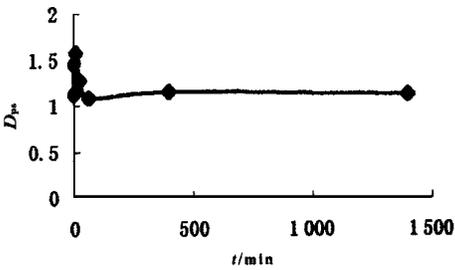


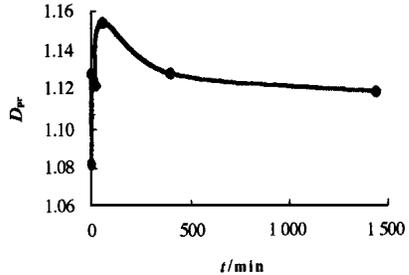
图3 试验土样粒度分维与时间关系

在固结过程中其粒度分维呈下降趋势,表明粘性土在外界压力作用下通过自身调整可以从一种颗粒级配状态向另一种新的级配状态转化,以取得最佳稳定性。

2) 颗粒起伏分维(D_{pr})随时间的变化特征

图4反映了粘性土颗粒表面起伏的变化情况。在固结过程初期,颗粒起伏分维随时间呈上升趋势,当固结时间达到1小时后,曲线呈下降趋势。这可能是由于在固结前一阶段,伴随着颗粒的聚合和破裂的交替出现,一方面直接导致颗粒表面规整性的破坏,另一方面促使应力不均匀分布,导致颗粒扭曲变

形,进而加剧了颗粒表面起伏程度。随着固结过程的进一步发展,颗粒之间的距离逐渐缩短,粒间作用增强,对颗粒表面起到一种净化 and 压平作用,颗粒起伏分维随时间减小。



4 试验土样颗粒表面起伏分维与时间关系

3) 颗粒定向分维(D_{di})的变化特征

图5反映了颗粒定向分维随时间的变化情况。其变化曲线显示出明显的阶段性。起点至64'左右这一时段内,方向变化复杂,数据点表现为大起大落振荡现象;之后呈平稳下降趋势。

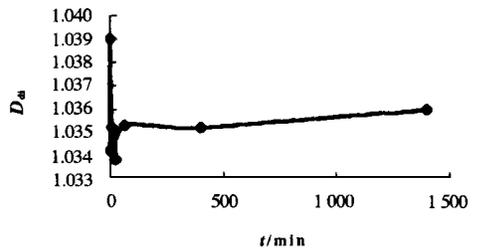


图5 试验土样颗粒定向分维与时间关系

这是由于在固结前期,土体骨架的有效应力在不断变化,使颗粒排列方向不停地变化调整;另一方面,孔隙水的排放使颗粒之间距离加大,为颗粒的调整提供了有利的空间,加之颗粒在不断的聚合和破裂,使颗粒排列方向变化更为复杂。后期随着粒间距缩小,颗粒之间作用加强,颗粒的转动受到一定的限制。颗粒的聚合和破碎减缓,因此颗粒排列出

现稳定趋向。

4) 颗粒分布分维 (D_{pd}) 变化特征

图6反映了颗粒分布分维随时间(t)的变化特征。从总体趋势看,软土颗粒分布呈下降趋势,表明高分维土随有效应力的增加颗粒集团化程度增强。

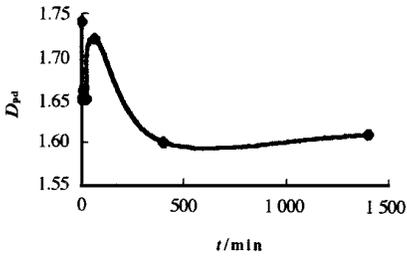


图6 试验土样颗粒分布分维与时间关系

原状软土固结过程中微结构状态的调整再造具有明显的阶段性,可划分为:前期剧烈调整阶段和后期稳定调整阶段。在前一阶段,随着压缩量的增大,孔隙水作用增强。孔隙水在抵抗外界压力的同时,将向体外渗透排放,这期间有效应力是不断增大的。在这

种应力条件下,颗粒状态的调整方式以聚合和崩解交替出现的形式为主,颗粒之间的位移和转动幅度较大。因此,结构参数的变化曲线起伏较大;后一阶段,当固结时间达到一定的时刻以后(约1小时以后),结构的调整逐步进入稳定调整状态。这一阶段的特点为调整速度缓慢,持续时间长,结构参数分维表现为持续的下降。这主要是因为在这一阶段孔隙水压力已消散至尽,有效应力基本达到恒定状态,颗粒之间作用加强,使土体总体结构向垂直于压力的展布方向进行调整。

粘性土微结构研究是难度极大的前沿性科研课题。随着非线性科学理论与方法的发展,这一问题的研究将取得突破性进展。

参考文献

- 1 B 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
- 2 胡瑞林等·粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究·北京:地质出版社,1995

收稿日期:1999-05-17

(上接第44页)

5 结论

①对于十号港区内深厚软弱粘性土地基,采用先打设塑料排水板作为竖向排水体后再进行堆载预压的地基处理方案是切实可行的,其施工经验可以推广到其它类似的软土地基处理工程中。

②在堆载预压加固软土地基的过程中,采取地表沉降、超孔隙水压力及分层沉降等项目的现场监测是十分必要的,可以起到调整和修正设计,指导施工,保证地基处理质量的效果。

③根据现场监测的地表沉降和分层沉降资料推算地基土体的固结度具有一定的局限性,笔者认为根据超孔隙水压力资料推算地基土固结度较为可靠。

④根据现场监测资料反算的地基土体固结系数要明显地高于室内土工试验测得值。

⑤根据 Biot 土体平面固结方程和双屈服面弹塑性模型分析深厚软土地基的固结沉降过程,有限元程序计算结果与现场实际监测结果比较相符。而且,计算参数可以通过常规固结不排水三轴压缩试验获得,使用较为方便。

参考文献

- 1 陈仲颐·基础工程学·北京:中国建筑工业出版社,1991
- 2 唐大雄·工程岩土学·北京:地质出版社,1990
- 3 叶书麟等·地基处理与托换技术·北京:中国建筑工业出版社,1994

收稿日期:1999-05-11