

岩土工程

天津海积软土微观结构与工程性质初探

雷华阳¹, 肖树芳²

(1. 天津大学机械学院实验力学研究室, 天津 300072; 2. 吉林大学, 长春 130026)

[摘 要]以天津地区海积软土为代表, 讨论了海积软土在固结、剪切作用下微观结构的变化, 阐述了海积软土力学行为的本质, 并将微结构参数与力学强度建立了关系。

[关键词]海积软土 微观结构 工程性质

[中图分类号]TU411.92 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2002)06-0081-05

0 引言

土力学行为的不确定性、不规则性和模糊性,正是其结构复杂性的具体反映。土体在外部荷载作用下,各种土颗粒可表现出滑动、滚动、挠曲或压碎等效应。在排水条件下,土骨架间的水和空气不断被挤出,与此同时,土颗粒重新排列,土体发生变形。在剪应力作用下,土体不仅发生剪切变形,还会产生体积改变。在静水压力作用下,土体也会产生塑性变形,进而发生屈服现象。显然,土的力学性质从本质上来说是取决于其微观结构。

土的结构是指土中各组分在空间存在的形式。其研究对象目前暂分为以下两个方面:

1)土的形态学特征,指结构单元体或孔隙的大小、形状、表面特征及其定量的比例关系、在空间上的排列状况。包括颗粒或孔隙的总面积、总周长、平均面积、平均周长、平均形状系数、平均粒径或孔径、定向角分布、主定向角和各向异性率以及它们之间的关系。

2)土的联结特征,指结构单元体或孔隙在空间上的接触关系,包括基本单元体间的接触状态和联结形式以及粒间连通性。

土体微观结构的研究对建立正确的本构关系,解释宏观工程现象均有重要的学术意义,因此上愈来愈受国内外学者的关注。特别是 70 年代后期,计算机图像处理技术的引入,使土微结构的定量化水平上了一个新的台阶,取得了一批很有价值的成果。

我们认为土体微观研究的基本目标是建立微结构变化与宏观力学行为之间的定性规律,或者说揭示宏观力学行为的微观机理。土体受荷后内部结构发生改变,在宏观上就表现出一定的塑性变形。目前理论分析和数值模拟只能得出最简单情况下(如均匀圆球堆积体)微观结构变化与宏观应力变形之间的关系,但对于复杂的真实土体,则只有通过实验观察才能揭示它们之间的联系。虽然有关微结构定量分析的研究已取得了一些进展,但试验过程中的动态观测尚难进行定量研究。下面试图建立海积软土力学行为与微观结构之间的关系。研究步骤如图 1 所示。

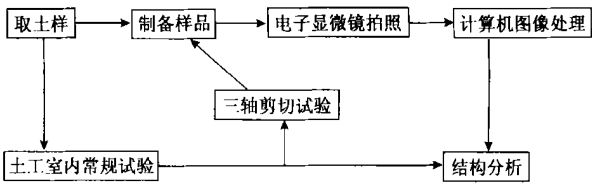


图 1 海积软土微结构研究流程图

1 研究的前期工作

为了研究海积软土的微结构与工程力学性质的关系,选用一部分土样进行土工试验(固结试验和三轴剪切试验),另一部分作为微结构分析的样品,进行下一步冻干法的样品制备工作。

扫描电子显微镜(SEM)是目前研究土微观结构的最重要的手段。在上电镜前,首要的工作是制备样品,采用“真空冷冻制样仪”制样,其目的是为了

[收稿日期]2001-11-30;[修订日期]2002-01-14;[责任编辑]李石梦。
[基金项目]国家自然科学基金与国际合作基金项目(No. 49672165)资助。
[第一作者简介]雷华阳(1974年-)女,1997年毕业于长春科技大学,获硕士学位,2001年在吉林大学建设工程学院获博士学位,现在天津大学机械学院力学系博士后流动站工作,主要研究方向为软土微观结构、本构模型和地基处理。

既彻底去掉软土中的水分,又能充分保持其真实的天然结构,使样品能在真空度很高的电镜室里被观察、拍照;其次,对样品进行镀金,主要是为了防止拍摄过程中由于样品受到电子束的轰击而产生的放电现象。另外,考虑到样品的抖动会引起像质下降,可将样品用导电胶固定在样品台上,拍摄时先从高倍找到典型的“结构单元体”,再逐步降低放大倍数,以保证图像的清晰度。为了便于定量分析,对试样采用统一的放大倍数($\times 2000$)下进行测试,为取得更广泛的统计规律,一般采用同一尺寸的照片,得出图像处理的结构参数等数据。

通过扫描电镜所获得的图像包含非常丰富的微结构信息,只有将图像输入计算机并进行数字图像处理,才能获得土的微结构量化准确数值和统计特征。计算机图像处理是土结构研究中最关键亦是难度最大的工作。通过计算机图像处理主要解决:

1) 微观结构结构参数的确定

主要参数为:结构单元体的粒径组成、结构单元体的总个数、孔隙率、孔隙总个数、孔隙总面积、孔隙总周长、孔隙平均直径、孔隙平均周长、孔隙平均面积等。

2) 微结构的几何形态

主要指微结构的空间方向性。包括孔隙(或单元体)的圆度和复杂度以及孔隙(或单元体)的方向性的统计数值。

2 微结构与工程性质关系的初步探索

一般说来,土体微观结构对其工程特性的影响包含两层内容:一是处于某一自然发展阶段的土体,其结构状态对工程特性的影响,也就是常说的初始结构状态对土的工程特性的影响;二是在外界工程环境的影响下,即受到外荷载作用后其结构状态的改变导致的相关特性。不同学者针对各种不同的粘土就其压缩特性、固结特性、应力应变关系等方面展开了研究。本文将以一种比较典型的结构性土—天津地区海相沉积软土为研究对象,展开一系列的研究工作。软土在其固结、剪切过程中其微观结构形态必然发生调整再造,为此进行了相应的结构分析,利用微观结构量化指标的变化反映出不同固结压力作用下软土的变形强度特征。

2.1 不同固结压力作用下微结构参数与荷载的变化关系

对天津地区海积软土施加荷载后,孔隙个数、孔隙孔径、孔隙丰度以及孔隙总面积均要发生变化。

下面就天津地区海积软土在不同固结压力作用下孔隙参数与荷载的变化关系展开讨论。

1) 孔隙平均孔径的变化

孔隙的平均孔径是指孔隙的长轴与短轴的平均值,可以反映出孔隙的大小。

表 1 海积软土微结构中孔隙孔径分析成果表 (μm)

编号	<1	1~2	2~5	5~10	10~20	>20
hjrt10	15	49	26	10	0	0
hjrt12	18	50	26	6	0	0
hjrt24	23	54	13	10	0	0
hjrt18	39	39	21	1	0	0
hjrt14	23	37	35	5	0	0

由表 1 可以看出,原状土样的孔径变化主要集中在 $<1\mu\text{m}$ 、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 、 $2\sim 5\mu\text{m}$ 、 $5\sim 10\mu\text{m}$,其中 $1\sim 2\mu\text{m}$ 组分占有绝对优势。对不同固结压力作用下软土孔隙孔径进行定量分析,结果表明,与原状土样的孔隙定量分析对比, <1 和 $1\sim 2\mu\text{m}$ 孔径组在所测的孔隙中占的比重比较大,约为 80%以上,而且孔隙孔径随固结压力的增大逐渐变小。表 2 为不同固结压力作用后土样中孔隙的孔径定量化分析结果。随着荷载的增加,孔径优势组集中在 $<1\mu\text{m}$ 、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 、 $2\sim 5\mu\text{m}$ 孔径组含量减少(表 2)。

表 2 海积软土不同固结压力作用下

孔隙孔径定量分析成果 (μm)

编号	P (kPa)	<1	1~2	2~5	5~10	10~20	>20
hjrt24 - 13	50	24	53	23	0	0	0
hjrt23 - 5	100	47	42	11	0	0	0
hjrt23 - 20	150	82	13	5	0	0	0
hjrt23 - 69	200	90	6	4	0	0	0

图 2 给出了孔隙平均孔径随荷载变化的关系曲线。由此可以看出,荷载的增大使得孔隙的孔径非线性减少。其原因在于:土体在受力条件下产生的变形是结构联结、基本单元体和孔隙等三要素变形的综合结果。孔隙的存在是结构要发生变形的根本原因,孔隙变形的产生与基本单元体的变形和结构联结的变形密切相关。在各向等压条件下,颗粒相互靠拢、相互镶嵌造成颗粒间距减小,孔隙的孔径也随之减小。

2) 孔隙个数的变化

通过扫描电镜所获得的原状海积软土孔隙分布情况可看出(照片 1),大孔隙含量较高;而固结后土样所反映出的是孔隙个数明显增多(照片 2)。其中小孔隙含量较大。图 3 反映了不同固结压力下孔隙个数的变化规律,其原因在于软土固结过程中,颗粒

之间的靠拢、滑移、镶嵌幅度增大,造成大孔隙逐渐被小孔隙取代,形成数量较多的小孔隙。

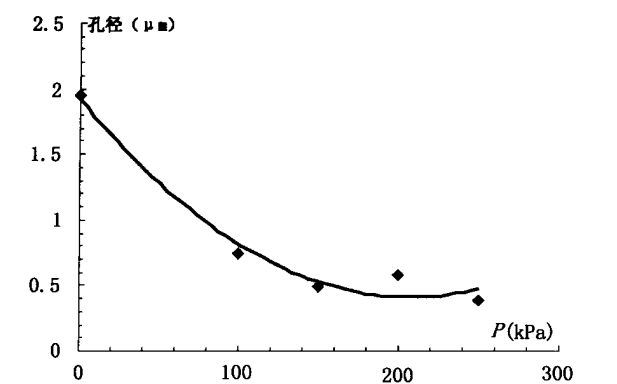


图 2 孔隙平均孔径随荷载变化曲线

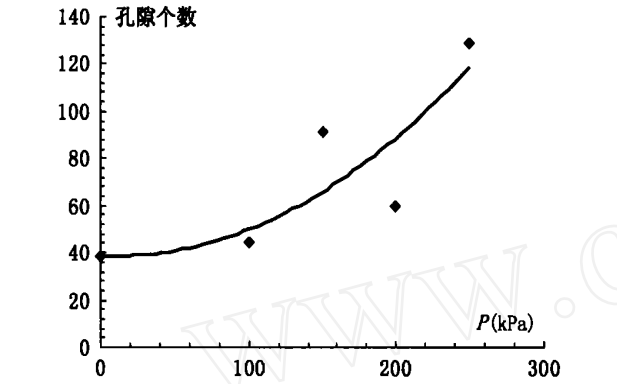
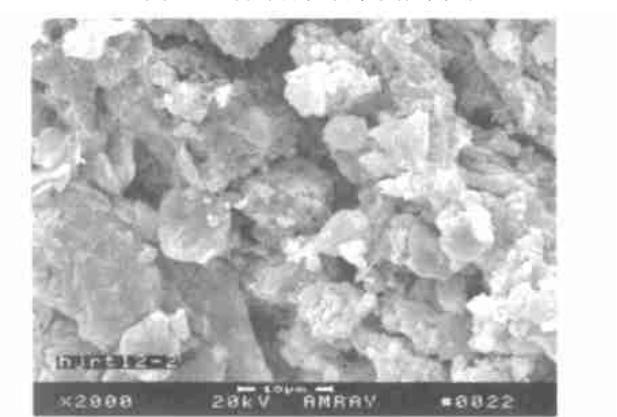


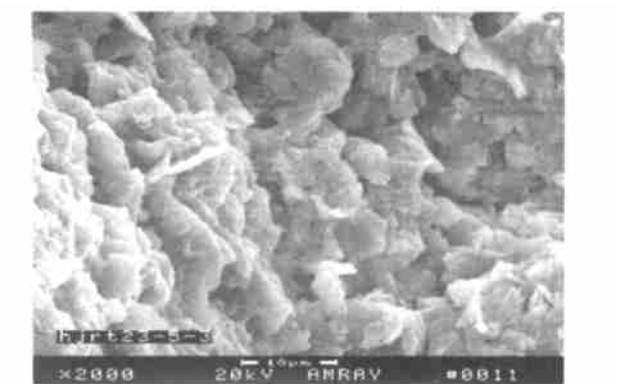
图 3 孔隙个数随荷载变化曲线



照片 1 原状土样的 SEM 照片

3) 孔隙平面平面分布分维数的变化
分维数的大小可以表示孔隙所占面积的大小。天津地区海积软土孔隙平面分布的分维数与施加荷载的关系研究表明,分维数随荷载的变化具有较好的规律性。研究表明,随压力的增加,孔隙平面分布分维数呈减小趋势。这表明孔隙发育程度随围压的增大呈降低趋势。这种变化规律反映出随着荷载的增大,孔隙的分布面积逐渐减小,结构单元体之间更加紧密。图 4 是应用分形几何方法研究海积软土在

不同围压下孔隙分布结果。



照片 2 固结后土样的 SEM 照片

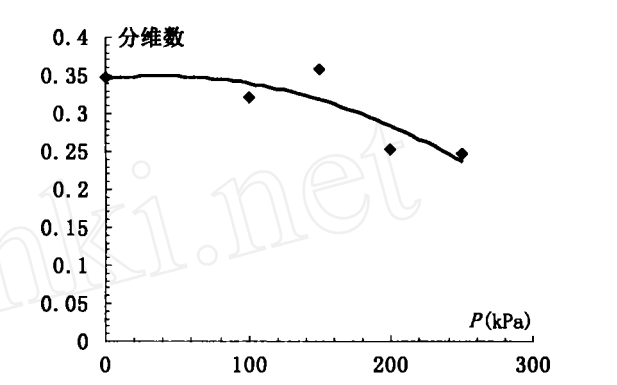


图 4 孔隙平面分布分维数随荷载变化曲线

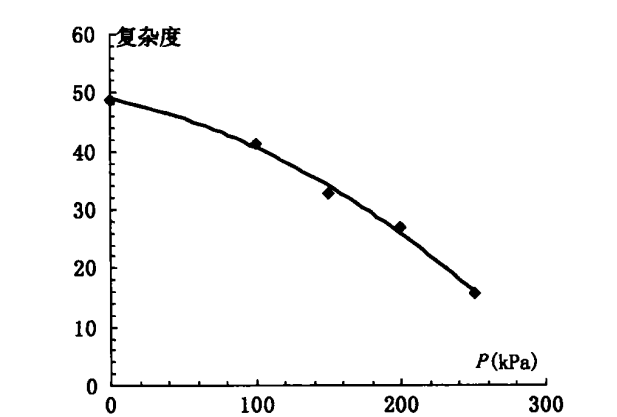


图 5 孔隙复杂度随荷载变化曲线

4) 孔隙复杂度的变化
孔隙的复杂度,或称为“特殊面积系数”,即孔隙的周长平方与孔隙面积之比。孔隙形状多种多样,有圆形、椭圆形、多边形等。图 5 给出了复杂度与压力的关系曲线。从图中可以看出,在各向等压作用下,颗粒的靠拢使得孔隙的复杂度基本上呈降低趋势,也就是说,不但孔隙的大小随压力的增加变小,其总体形状也发生相应变化。压力的增大使得孔隙复杂度变小。

2.2 剪切破坏试样剪切面上微结构定量分析

通常所考虑的土体的抗剪强度是指它处在各种密度状态下的强度值,也就是说,影响其强度的内在主要因素是密度,而有效最小主应力是决定密度的外在主要因素。故此,研究剪切条件下土的强度特征时应考虑 3 向相等的作用力—第三主应力 σ_3 。

土的宏观变形的发展,主要靠结构要素的整体性变化和部分结构参数的微观调整加以实现。宏观变形在微观层次上主要表现在孔隙形态的调整和颗粒形状的改变两个方面,其它结构要素的变化对其变形量的影响并不大。因此,剪切过程中微结构的变化仍采用孔隙参数来评价。以下是各孔隙参数与剪切时的第三主应力 σ_3 之间的关系。

1) 孔隙平均孔径的变化

土体中孔隙孔径统计值反映的是孔隙几何尺寸大小的平均状态,可以在总体上决定土的工程性状,因此具有重要的工程意义。剪切后土样的孔隙平均孔径主要集中在 $<1\mu\text{m}$ 、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 孔径组,而且随有效最小主应力 σ_3 的增大,孔隙平均孔径总体上呈递减趋势。图 6 反映不同 σ_3 下孔隙平均孔径的变化规律。

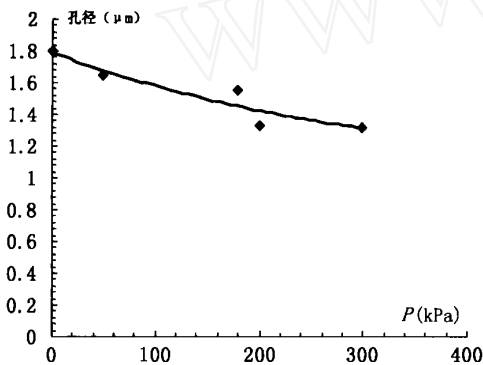


图 6 孔隙平均孔径的变化曲线

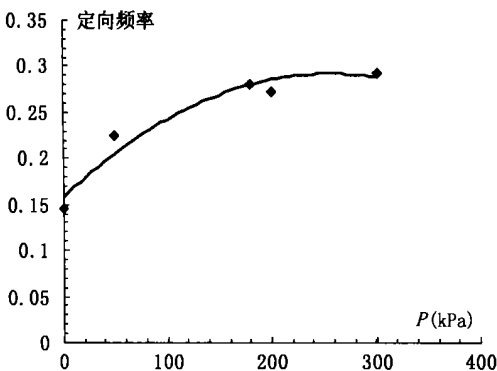


图 7 孔隙定向频率随 σ_3 的变化关系曲线

2) 孔隙定向频率的变化

孔隙定向频率可以直观形象地描述总体定向规

律。剪切前有效最小主应力 σ_3 较小时,孔隙在 0~10、10~20、120~140 区间分布几率较高,显示出明显的定向性;随着 σ_3 的继续增加,孔隙在各个区间分布缺少定向性。图 7 反映出孔隙定向频率随剪切前最小有效主应力 σ_3 的变化规律。照片 3、4、5、6 分别为最小有效应力为 50 kPa、180 kPa、200 kPa、400 kPa 的 SEM 照片。



照片 3 剪切后土样的 SEM 照片 (50 kPa)



照片 4 剪切后土样的 SEM 照片 (180 kPa)



照片 5 剪切后土样的 SEM 照片 (200 kPa)



照片 6 剪切后土样的 SEM 照片 (400 kPa)

3) 孔隙分布分维数的变化

孔隙平面分布分维数反映孔隙的平面分布状况。随着围压的增加,孔隙平面分维数逐渐减小的趋势非常明显。分维数的减小预示着颗粒分布愈紧凑,土体的强度增大。图 8 为孔隙平面分布分维数与 σ_3 的关系曲线。

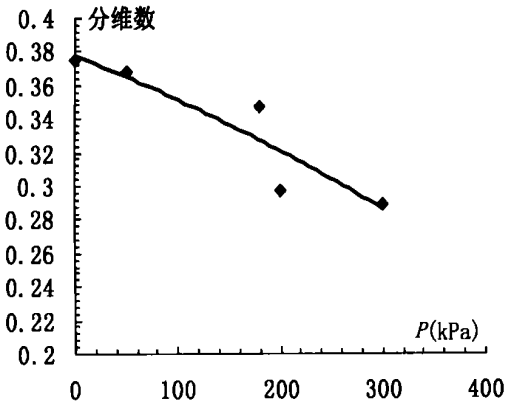


图 8 孔隙分维数与 σ_3 的关系曲线

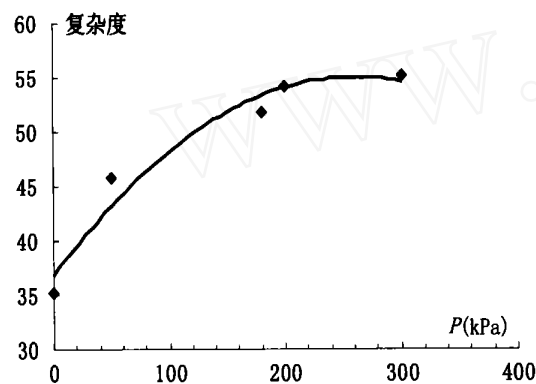


图 9 孔隙复杂度与 σ_3 的关系曲线

4) 孔隙复杂度的变化

孔隙形状的改变势必影响到土体的强度值。图

9 反映复杂度与剪切前最小有效主应力 σ_3 的关系。从中可以看出,复杂度随着 σ_3 的增大而增大,反映在孔隙的形状上。由于剪切作用,颗粒之间的相互错动,使得孔隙被拉长,形状逐渐趋向于复杂化。

3 结 语

通过对天津地区海积软土固结和剪切试验后土样的微结构参数与荷载关系分析发现,土体微结构参数的变化能够很好地反映地基土在荷载作用下的变形和强度变化;按照土力学原理,土体的变化反映了地基土的压缩量。因此,可以根据微结构参数的变化得到工程中有关沉降量、工后沉降、沉降速率和强度变化及发展趋势,用以指导工程和采取措施。

[参考文献]

[1] X BAI, P SMART. Chang in microstructure of Kaolin in consolidation and undrained shear [J]. Geotechnique, 47 (5) : 1009 ~ 1017.

[2] Jiang Mingjing. Microscopic analysis of shear band in structured clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20 (2) : 102 ~ 108.

[3] Osipov V I. Microstructure and changes associated with thixotropic phenomena in clay soi [J]. Geotechnique, 1984, 34 (2) : 293 ~ 303.

[4] 施 斌. 粘性土微观结构简易定量分析法 [J]. 水文地质工程地质, 1997 (1) : 7 ~ 10.

[5] 吴义祥. 工程粘性土微观结构的定量评价 [J]. 中国地质科学院院报, 1991, (23) : 567 ~ 572.

[6] Tovey N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs of soil fabric [C]. J. of Microscopy, 1990, 120 : 303 ~ 315.

[7] 雷华阳. 海积软土结构性模型的试验研究及其在基坑开挖工程中的应用 [D]. 博士论文, 2001.

PRIMARY EXPLORATION ON ENGINEERING PROPERTIES OF MARINE SOFT SOIL MICROSTRUCTURE IN TIANJIN REGION

L EI Hua - yang¹, XIAO Shu - fang²

(1. Tianjin University, Tianjin 300072; 2. Jilin University, Changchun 130026)

Abstract :As a example of the marine soft soil of Tianjin region , the changes of microstructure of marine soft soil under consolidation and shear are discussed , the soft soil mechanical behavior is analyzed , correlation between microstructure characteristic and mechanical strength is obtained.

Key words :marine soft soil , microstructure , engineering property