

三轴应力下黏性土微细结构试验

洪宝宁¹ 胡 昕¹ 周宇泉² 孙 秋¹

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南京市高速公路建设指挥部, 江苏 南京 210008)

摘要 利用自行研制的微细结构光学测试系统, 对三轴应力下黏性土的微细结构图像进行了连续采集, 提取了相应的微细结构量化参数, 对微细结构的演化特性进行了分析。结果表明: 随着荷载的增加, 颗粒集聚体排列向着杂乱无序的方向发展, 导致土体抵抗外界荷载的能力不断降低; 在荷载作用下, 土体通过颗粒集聚体形态和排列形式的调整变化, 逐步向稳定的承载形式过渡, 使变形向逐渐减小的趋势发展; 颗粒集聚体和孔隙的变化是相互关联的。

关键词 黏性土; 微细结构; 定向度; 分布分维

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2006)06-0047-04

Experimental study on microstructure of cohesive soil under triaxial stress// HONG Bao-ning¹, HU Xin¹, ZHOU Yu-quan², SUN Qiu¹ (1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Expressway Construction Headquarters, Nanjing 210008, China)

Abstract: The self-designed optical testing system for microstructure was employed for continuous image acquisition of microstructure of cohesive soil. Then, the quantitative parameters of the microstructure were extracted, and the variation characteristics of the microstructure were analyzed. Some conclusions are drawn: with the increase of loads, the particle conglomerates tend to be in a disordered form, which decrease the capacity of soil mass against the external loads; with the adjustment of arrangement form of particle conglomerates, the soil mass under the action of loads develops towards a stable load-bearing state, and the deformation of soil mass gradually decreases; the variations of particle conglomerates and pores are related to each other.

Key words: cohesive soil; microstructure; degree of orientation; dimension and fractal dimension

众所周知, 土体微细结构的非连续性和非确定性决定了土体工程性质在宏观上的非连续性、不均匀性、各向异性和非确定性。自 1925 年 Terzaghi 提出土的微细结构(microstructure)概念和思想以来, 大量学者对土的微细结构进行了研究和探讨, 提出了许多土体微细结构模型, 但是由于测试手段和分析方法的限制, 多数土体微细结构模型是在静态条件下建立的, 不能反映土体在动态荷载作用下微细结构的具体行为和表现。随着荷载条件的改变, 土的力学性能亦将发生相应的变化, 这种变化是通过土体结构状态的调整来实现的。因此, 在工程条件下, 土体的微细结构形态是与特定的荷载条件相适应的^[1]。

在黏性土受力过程中起主要作用的不仅有力学因素, 而且还有物理-化学因素, 其表现为土体微细结构随荷载变化的动态调整。但是, 迄今为止, 人们

对微细结构调整的细节并不十分清楚, 更谈不上定量模拟压力与结构要素之间的对应关系。

为了分析黏性土微细结构形态在三轴应力下的变化规律, 笔者利用河海大学研制的微细结构光学测试系统对取自广西宁明的黏性土进行了相应的结构试验和分析。通过试验和分析, 初步确定了三轴应力下荷载与黏性土结构要素之间的变化关系(目前土体微观结构状态由各结构要素的量化参数刻画), 为进一步分析各种复杂条件下(包括各种代表性土样)的结构变化规律打下了良好的基础。

1 试验方法

1.1 试验系统

岩土微细结构光学测试系统主要由加载系统、图像采集系统和图像处理系统三部分组成^[2-3]。该测试系统能够较好地满足采集单轴荷载和三轴荷载

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50279008/40374047)

作者简介: 洪宝宁(1960—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士, 从事岩土体微细结构力学及地基处理研究。E-mail: hongbaoning24@sohu.com

作用过程中黏性土微细结构调整信息的需要,主要具有以下优点 ①制备试样简便,对土样原始结构的扰动小;②能够连续采集同一土样在加载过程中不同时刻的微细结构变化信息;③可进行微细结构变化与宏观背景荷载、位移的实时采集;④可连续定量地对微细结构变化进行分析。

1.2 试样制备

土样制备的目的是得到与加载舱形状尺寸(如图1所示)相符的土样,同时保持土样的天然结构。试验系统采用半圆柱形土样,由普通三轴试验尺寸相同的圆柱形土样沿对称面环割到一定深度后掰开得到(尽量不要用机械模具切片处理,以免改变土的原

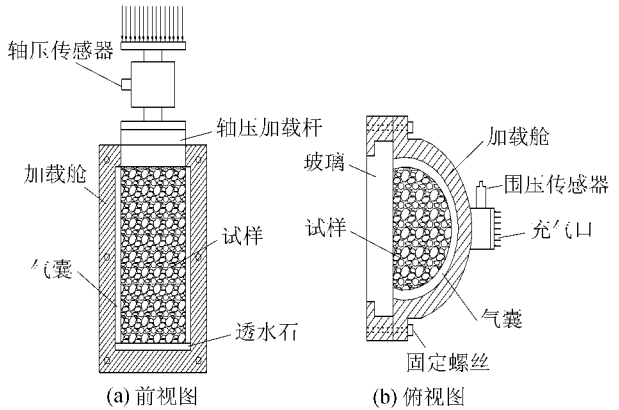


图1 加载舱示意图

始结构)这样得到的半圆柱体试样能够保证其断面中有一部分为新鲜断面,保持其真实的天然结构。

试验用土为取自广西南明的略具膨胀性的黏性土。该黏性土分散性较好,黏粒($<0.005\text{ mm}$)含量较高,土粒相对体积质量为2.70,塑限 $w_p=30.3\%$,液限 $w_L=61.4\%$,塑性指数 $I_p=31.1$,自由膨胀率为35.0%。其主要矿物成分含量为:蒙脱石10%~15%,水云母15%~25%,石英20%~30%,绿泥石/高岭石5%~15%,此外还含有少量长石。通过SEM显微结构图像可以发现该黏性土孔隙主要为集聚体和碎屑之间的孔隙,以及集聚体内部的孔隙,这些孔隙多呈等轴状。由于物理化学作用而形成的固化联结、胶结物的联结作用,使该黏性土具有结构强度,并使土的抗压能力提高。试验对风干后的土料按不同的含水率制样,见表1。

1.3 试验方案

利用微细结构测试系统采集土体在三轴应力作用下内部微细结构变化的图像(参见图2),通过轴向力传感器和轴向应变传感器获取相应的宏观力学参数。运用数字相关图像处理技术对采集的图像进行一系列的前处理(如灰度修正、去噪、亮度和对比度调整等),然后设置合适的阈值将采集到的图像转化为二值图像,并运用微细结构分析程序GEOIMAGE对二值图像进行计算分析,得出颗粒及孔隙相对面积、数目、圆度、分布分维、定向度等量化信息。

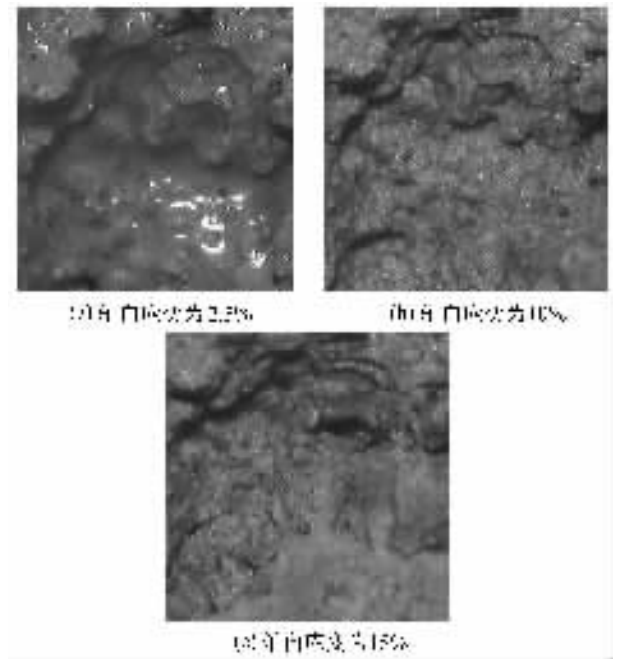


图2 放大150倍的3号土样加载时微细结构变化图像

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

本试验对每个土样在三轴应力下的微细结构变化进行了全程跟踪拍摄,每个土样取3~4个观测点,每个观测点从轴向应变为0开始,每增加0.5%拍摄微细结构图片1张,到轴向应变达到15%后停止拍摄。由于篇幅所限,仅列出3号土样在轴向应变为2.5%、10%和15%时同一观测点的微细结构图片,如图2所示。对比研究表明,黏性土起初主要由物理化学作用形成固化联结、胶结物联结,进而具有一定的

表1 土样制备情况

土样序号	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	质量/g	含水率/%	围压/kPa	初始含水率/%	加水量/g	土料用量/g	土样情况
1	1.48	1.93	185.6	30.6	50	4.74	36.7	148.8	饱和土
2	1.48	1.93	185.6	30.6	100	4.74	36.7	148.8	饱和土
3	1.42	1.82	174.4	27.9	50	4.74	31.6	142.8	非饱和土
4	1.48	1.86	178.3	25.5	50	4.74	29.5	148.8	非饱和土
5	1.48	1.86	178.3	25.5	100	4.74	29.5	148.8	非饱和土
6	1.48	1.89	181.6	27.8	100	4.74	32.8	148.8	非饱和土

结构强度和抗压能力 随着土样受剪(围压保持不变,轴向力和轴向应变增加),土体初始结构逐渐遭到破坏,微细结构中最为明显的特征是较小的颗粒集聚体通过不断兼并而增大,同时较大的颗粒集聚体因受到剥离作用而减小,孔隙和裂隙逐步缩小,使得土体密实度增加,集聚体逐步均匀化。

2.2 微细结构特征参数变化规律分析

目前,土体微细结构是通过一系列结构特征参数来定量描述的,这些参数主要包括颗粒(孔隙)大小特征参数——等效直径和相对面积,颗粒(孔隙)形状特征参数——圆度,颗粒(孔隙)分布特征参数——分布分维,颗粒(孔隙)定向排列特征参数——定向度^[1-2,4]。如1.3节所述,本试验对每个土样不同观测点获得的微细结构图像系列进行处理,获得与宏观力学参数对应的结构特征参数,并对各观测点特征参数取平均值,以求获得的结果具有代表性。考虑到土体力学性能与颗粒及孔隙的分布和定向性密切相关,本文将着重讨论荷载作用下微细结构特征参数——分布分维和定向度的变化及其与土体力学性能之间的关系(对于颗粒(孔隙)定向度和颗粒(孔隙)分布分维的定义参见文献[5])。

2.2.1 颗粒、孔隙定向排列变化特征

从现代信息系统论中引入概率熵这个指标来反映黏性土微细结构单元体排列的有序性(即定向度 H)。 H 越大,说明结构单元体排列越混乱,有序性越低^[1]。图3反映的是在三轴应力下6组土样颗粒 H 的变化情况,从图中可以发现颗粒排列初始状态较混乱,随着应变的增加,颗粒定向度也相应增大,排列继续向着无序化方向发展。这是由于试验土样系人工制作的扰动土样,未受任何后期固结改造作用的影响,结构稳定性较差,所以初始定向度较大,结构单元排列较为松散,没有明显的定向性,随着变形的增加,外部荷载力对颗粒的扰动更加明显,促使颗粒产生转动和位移以适应压力的增大,继而使排列方向向着一种更为混乱的状态发展。另外,随着

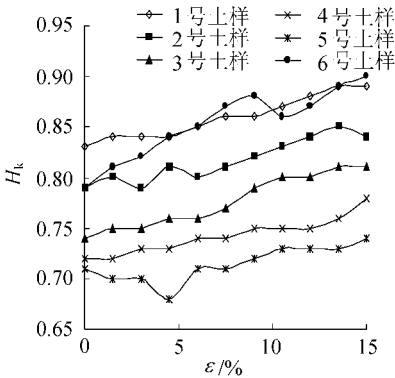


图3 试样颗粒定向度 H_k 与应变 ϵ 的关系

压缩量的增大,超静孔隙水压力增大,渗透水力度也相应增大,于是孔隙水压力在积蓄了足够的能量之后冲破了孔壁的阻碍,使孔隙间过水断面扩展,一些原来孤立的孔隙相继沟通,连通性大大增强。伴随着土体颗粒向着无序化方向发展,土颗粒之间的胶结物质不断破坏,土体结构骨架松散程度增大,颗粒自由度加大,加剧了土体的压缩变形,使土体抵抗外界荷载的能力不断降低。从图4可以看出:随着加载变形的增加,孔隙定向度逐渐减小,孔隙排列的有序性逐步增强,且制样含水量越高,其初始定向度就越低,定向程度也就越好,其变化规律与颗粒定向度的变化规律基本呈现颠倒关系。

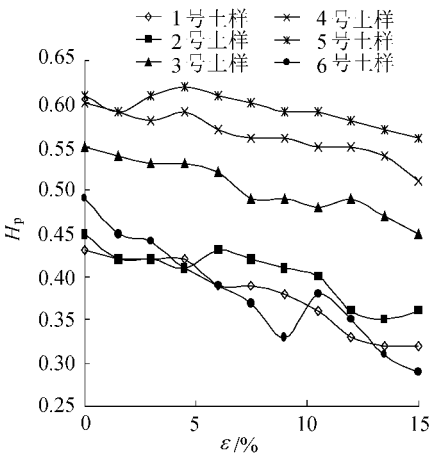


图4 试样孔隙定向度 H_p 与应变 ϵ 的关系

土样定向角分布变化也可以清楚地表明土样在加载过程中结构单元体的变化发展趋势,以6号土样为例,从表2可以看出土样颗粒的定向角在各个区间都有不同的分布几率,且分布频率相差不大,没有明显的定向特征。随着荷载的增加,各定向角区间的颗粒分布几率向着平均化的趋势变化,颗粒排列向着杂乱无序的方向发展;与颗粒的定向角分布情况相比较,孔隙的定向角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 和 $270^\circ \sim 315^\circ$ 方向上有着相对较大的分布比例,定向性优于颗粒排列。随着荷载的增加,在加载前期孔隙定向角有着较为明显的变化,而在加载后期孔隙定向角分布变化基本趋于平稳。

表2 6号土样颗粒和孔隙定向角分布比例 %

荷载/kPa	类型	0° ~ 45°	45° ~ 90°	90° ~ 135°	135° ~ 180°
117.1	颗粒	20.0	31.0	27.0	22.0
117.1	孔隙	18.7	23.9	28.1	18.5
289.7	颗粒	21.0	29.0	26.0	24.0
289.7	孔隙	19.3	25.6	28.3	25.8
388.3	颗粒	21.9	27.0	28.5	26.0
388.3	孔隙	19.7	24.7	27.7	25.5
437.6	颗粒	24.0	26.5	26.9	24.1
437.6	孔隙	24.4	27.3	26.9	24.8

注:由于计算误差,部分结果总和略大于或略小于100%。

2.2.2 颗粒、孔隙分布变化特征

一般说来,颗粒分布分维 D_k 值越大,颗粒在平面上的密布程度越高,颗粒的凌乱程度越大,集团化程度就越低^[1]。图 5 为 6 组试样在加载受压条件下土体颗粒分布分维随应变增长的变化情况。

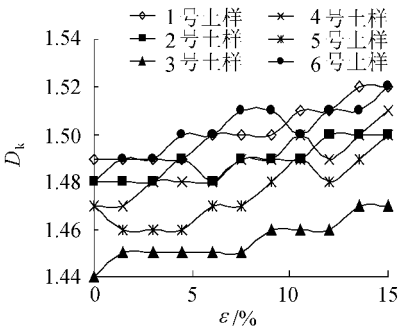


图 5 试样颗粒分布分维 D_k 与应变 ϵ 的关系

从图 5 中可以看出,颗粒的分布分维随应变的增加呈缓慢增长趋势,说明颗粒的集团化程度降低,颗粒凌乱化加剧。但分布分维变化幅度不大,分维值平均增幅不到 2%,主要是因为试样系人工制作的扰动试样,在加载初始阶段颗粒分布就已经被充分地均匀化,颗粒的空间分布已经进行过相当程度的优化选择,因此以后的压力作用不可能对其空间排列产生更大的影响。

孔隙的分布分维明显小于颗粒的分布分维(图 6),说明孔隙分布较颗粒更为集中,孔隙集团化程度较高。随着荷载的增大,孔隙的分布分维继续减小,孔隙分布继续向着集中化、集团化的趋势发展,颗粒的分布分维继续增大,颗粒在空间分布的凌乱程度不断加剧,颗粒之间的胶结质逐步遭到破坏,致使土体结构趋于松散化,产生较大的宏观变形,土体黏聚力不断减小。对比图 5 和图 6 可以发现两者的变化存在一定的关联性,即孔隙分布变化趋势与颗粒分布变化趋势正好相反,颗粒分布凌乱化程度越高,则孔隙分布更为集中,这也再一次说明颗粒变化和孔隙变化在机制上是大体相同的,二者是相互关联的,只是孔隙分布规律相对于颗粒分布来说离散性较大。

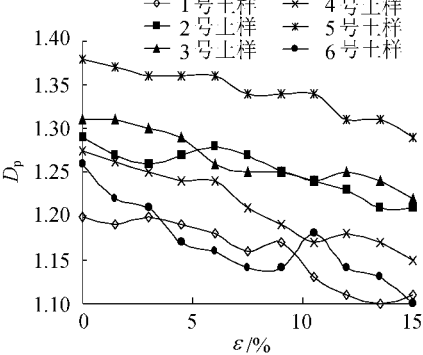


图 6 试样孔隙分布分维 D_p 与应变 ϵ 的关系

试验结果表明在轴向应变达到 15% 的压缩过程中,土样表面并没有表现出明显的破坏特征(如裂隙、剪破面等),但通过显微镜观测和定量分析,可以看到不论是微细结构形态还是结构参数均发生了明显的变化,且这种变化随着应变的增加也在逐步发展,具体体现在土体中颗粒及孔隙面积、圆度、分布分维、定向度、定向角等微细结构参数的变化规律上。

3 结论与展望

土体微细结构是通过动态调整来适应荷载条件变化的,只有在了解这一动态调整过程的基础上,才能有助于进一步深入研究微细结构对土体宏观力学行为的控制作用,并建立相应的本构关系。通过本文的试验分析可知:

a. 孔隙和颗粒集聚体的变化是相互关联的,即孔隙分布变化趋势与颗粒集聚体分布变化趋势正好相反。

b. 对于人工制作的扰动试样,随着应变的增加,颗粒集聚体的集团化程度降低,凌乱化程度加剧。这主要是因为,在加载初始阶段颗粒分布已被充分地均匀化,颗粒的空间分布已经进行了相当程度的优化选择,以后的压力作用不可能对其空间排列产生更大的影响。

c. 随着荷载的增加,各定向角区间的颗粒集聚体分布几率向着平均化的趋势变化,颗粒集聚体排列向着杂乱无序的方向发展,孔隙的定向性优于颗粒集聚体排列。

d. 土体抵抗变形的能力与土体颗粒的分布分维成正比关系,与土体颗粒的定向度成反比关系。

由于微细结构测试系统在采集微细结构图像信息的同时,对土体宏观力学特性参数的采集尚不够完整,还需进一步改造,以达到将所获得的结构要素量化参数和宏观力学特性参数综合起来评价土的工程性质,以及确定两者相互作用规律的目的。

参考文献:

[1] 胡瑞林,李向全,宫国琳,等.粘性土微观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.
[2] 周宇泉,洪宝宁.粘性土压缩过程中的微细结构变化试验研究[J].岩土力学,2005,26(增刊):82-86.
[3] 刘敬辉,洪宝宁,张海波.土体微细结构变化过程的试验研究方法[J].岩土力学,2003,24(5):744-747.
[4] 雷华阳.饱和软黏土固结变形的微结构效应[J].水利学报,2004(4):91-95.
[5] 周宇泉,胡昕,洪宝宁,等.从微细结构方面解释某黏性土压缩特性的差异[J].水利水电科技进展,2006,26(1):31-33.

(收稿日期 2006-01-04 编辑:高建群)