

单轴应力下水泥土微观结构的演化特性

孙 秋¹ 胡 昕¹ 闵紫超² 洪宝宁¹

(1. 河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098 ; 2. 江苏新筑预应力工程有限公司 ,江苏 南京 210003)

摘要 通过单轴压缩条件下不同养护温度及不同土料的水泥土微细结构变化试验 ,探讨了单轴压缩条件下水泥土微细结构内部变化规律及其与宏观力学响应的关系 .利用 Geoimage 软件定量分析了颗粒面积比例、颗粒分布分维、颗粒圆度和孔隙定向度的演化规律 ,并与全应力应变曲线进行了对比 .结果表明 ,单轴压缩条件下土样细部结构形态和参数均会发生明显变化 .

关键词 水泥土 ; 细观结构 ; 形态参数 ; 演化特性

中图分类号 :TU411.92 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)01-0059-04

研究表明 ,土体在工程环境作用下表现出的复杂的工程特性与现象 ,都与其结构状态有关^[1] .因此 ,研究并揭示水泥土工程特性与其结构状态之间的内在规律具有十分重要的意义 .张维刚等^[2-4]从微观结构特征角度分析了水泥土加固软土的作用机理 .王清等^[5]讨论了表征结构单元体和孔隙大小、形态及定向性等结构要素的定量评价指标 .顾明芬^[6]则采用电阻率结构参数法来描述水泥土的宏观强度 .上述研究制样复杂 ,费用昂贵 ,不能在承受荷载作用的情况下连续地观察土样的微观变化特征 ,无法得到荷载作用下土体微观颗粒和孔隙的实际变形和位移信息 .

笔者首先采用微细结构光学测试系统^[7] ,在单轴压缩条件下对不同养护温度及不同土料的水泥土进行微细结构变化试验 ,然后应用 Geoimage 软件^[7]对微细结构照片序列进行分析 ,最后对提取的颗粒面积比例、颗粒分布分维、颗粒圆度、孔隙定向度进行定量分析并研究了细观结构演化与宏观力学响应的关系 .

1 试验概述

1.1 试样制备

水泥土是由水、水泥和天然土强制搅拌而成的 .试验所采用的素土取自连盐高速公路(盐城段) ,其基本物理力学指标见表 1 ;水泥为双猴牌水泥(32.5P·O) ,其主要技术指标见表 2 .

表 1 试验用素土的基本物理力学参数

Table 1 Basic physical-mechanical parameters of plain soil in experiments

土的类别	含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	压缩模量/MPa ⁻¹
粉土	27.8	1.52	1.94	22.2	16.7	5.6×10 ⁻⁵	14.80
黏土	36.7	1.31	1.81	47.2	28.3	1.1×10 ⁻⁷	2.55

先将拌和好的水泥土制成普通三轴试验的圆柱形试样($\varnothing 39.1\text{ mm}\times 80\text{ mm}$) ,然后沿径向对半切割一定深度(尽量不要用机械模具 ,用刀具进行切片处理事实上已经改变了土的原始结构) ,这样既能得到半圆柱体的试样 ,又能保证所取得的试样断面中有一部分为新鲜断面 ,保持其天然结构 .为了研究温度及土层变化对水泥土强度增长和受载破坏特性的影响 ,根据试验目的分别制备

表 2 水泥的主要技术指标测试值

Table 2 Test data of main technical indexes of cement

水 灰 质量比	凝结时间/h		安定性	胶砂抗折、抗压强度/MPa		
	初凝	终凝		$t=3\text{ d}$	$t=7\text{ d}$	$t=28\text{ d}$
0.252	2	3.5	合格	4.17 22.4	5.32 29.9	6.42 38.76

注 : t 表示龄期 .

了水泥粉土和水泥黏土样,并在0℃、10℃及25℃等温度状态下对其进行了养护.

1.2 试验内容

试验采用的岩土微细结构光学测试系统是由河海大学岩土工程研究所研制的.该测试系统由加载系统、图像采集系统和图像处理系统3部分组成.为了全面准确地反映水泥土受荷时微细结构的演化规律,在每个试样的新鲜断面部分设置了4~6个观测点,每一观测点每隔0.5%的应变拍摄1张微细结构照片.

1.3 试验结果

试验得到了细观部分图像,如图1所示.利用河海大学岩土工程研究所微细结构实验室编制的Geoimage软件对微细结构照片序列进行分析研究并提取了土样微结构形态参数.

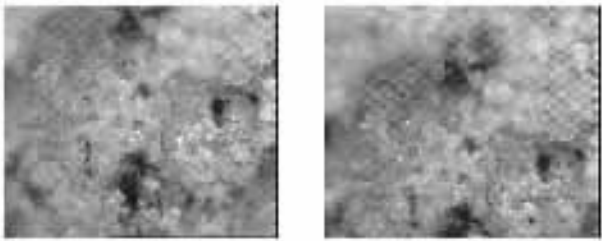


图1 不同应变率水泥粉土的微细结构图片
(养护温度25℃,龄期14d,放大200倍)

2 试验结果分析

土体结构形态要素由颗粒形态、排列组合方式、孔隙性和接触关系组成,可通过颗粒的大小、形状、表面起伏、定向度、分布,孔隙的大小、分布和接触带分布等结构参数来描述.为了更进一步了解水泥土微细结构演化过程,本文着重探讨荷载作用下的颗粒面积比、颗粒分布分维、颗粒圆度以及孔隙定向度的变化规律.

Fig.1 Images of microstructure of cement-silty soil under different strain rates (curing temperature: 25℃, age: 14 days by zooming 200 times)

2.1 颗粒面积比例演化特性分析

颗粒面积是描述颗粒所占区域大小的最基本的特征值.图2给出了不同养护温度下28d龄期水泥土的颗粒面积比例-应变关系曲线.从图2可以看出:

随着应变的增加,颗粒所占面积减小.但在加载变形初期,颗粒面积比例会有所增大,发展到一定阶段后,颗粒面积比例会不断下降.孔隙面积比例会随着颗粒面积比例的增大而减小.

2.2 颗粒分布分维演化特性分析

颗粒分布分维数可从整体上定量地确定土粒的平面分布情况,同时可反映土体的密实程度.图3给出了不同养护温度下28d龄期水泥土的颗粒分布分维-应变关系曲线.从图3可以看出:

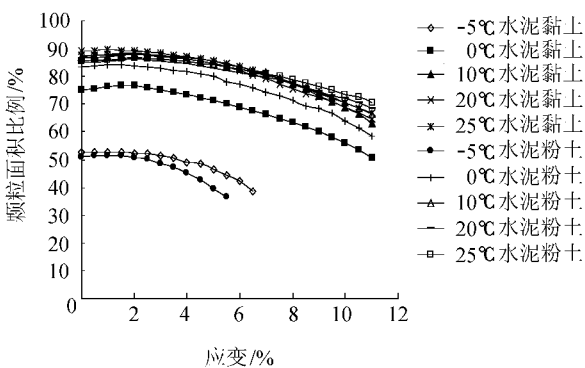


图2 不同养护温度下水泥土颗粒面积比例-应变关系曲线

Fig.2 Relationship between proportion of grain surface area and strain of cement-soil at different temperatures

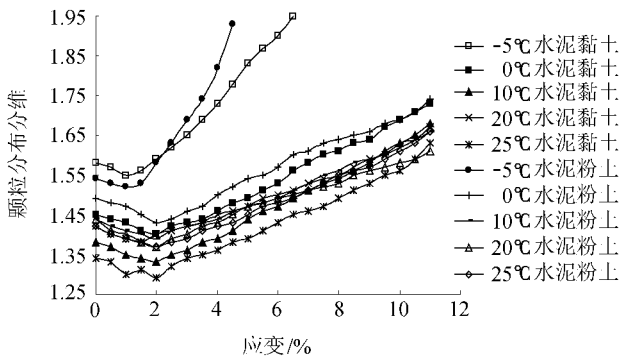


图3 不同养护温度下水泥土颗粒分布分维-应变关系曲线

Fig.3 Relationship between grain distribution and fractals and strain of cement-soil at different temperatures

水泥土的颗粒分布分维总体上随着应变的增加而增大,说明颗粒的集团化程度降低,凌乱化程度加剧.养护温度对颗粒分布分维随应变增加的变化趋势有显著影响.养护温度为10℃、20℃和25℃的水泥土颗粒分布分维的变化趋势基本一致,但其增加速度远小于养护温度为-5℃和0℃的水泥土.颗粒分布分维的变化与孔隙分布分维的变化正好相反,即随着荷载的增大,孔隙的分布分维逐渐减小,孔隙分布逐渐向着集中化、集团化的趋势发展,水泥土内部缺陷不断扩展且逐步集中.

2.3 颗粒圆度演化特性分析

颗粒圆度是指土中结构单元体的短轴与长轴之比,可表示结构单元体在二维平面中所展示的几何形状特征.图 4 给出了不同养护温度下 28 d 龄期水泥土的颗粒圆度-应变关系曲线.从图 4 可以看出:

随着荷载和应变的增加,水泥土圆度总体上呈下降趋势,即向扁长形状发展.颗粒的初始圆度越高,压缩过程中颗粒圆度值降低幅度越大.颗粒形状变化也越明显,但在加载变形后期,圆度变化趋于平缓.颗粒圆度的变化出现较为明显的“阻尼振荡”现象.对同类水泥土来说,养护温度越低,颗粒圆度越大,空间排列愈紧密,形成的颗粒骨架越浑圆,压缩性也就越低,荷载作用下的“振荡”幅度相对越小.

2.4 孔隙定向度演化特性分析

定向度可以直观地反映各定向角区间内结构单元或孔隙出现的频率,用以分析微结构中单元体或孔隙在各个分区内的定向强度.图 5 给出了不同养护温度下 28 d 龄期水泥土的孔隙定向度-应变关系曲线.从图 5 可以看出:

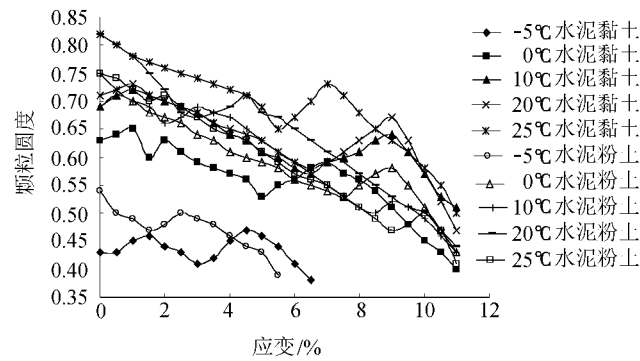


图 4 不同温度下水泥土颗粒圆度-应变关系曲线
Fig.4 Relationship between grain roundness and strain at different temperatures

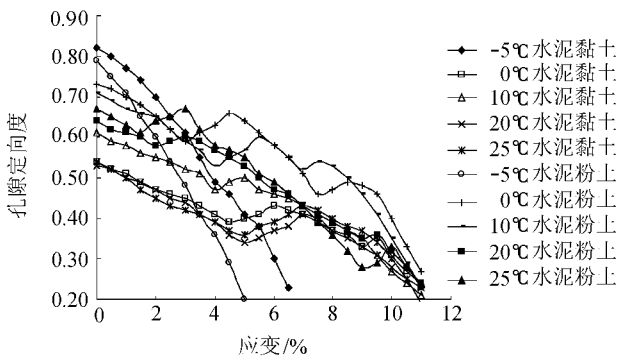


图 5 不同温度下水泥土孔隙定向度-应变关系曲线
Fig.5 Relationship between pore orientation and strain of cement-soil at different temperatures

孔隙初始排列较为混乱,随着应变的增加,孔隙定向度略有“振荡”地逐步减小,排列向着有序化的趋势发展.其原因是,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.随着变形的增加,外部荷载促使颗粒形状、大小以及位置不断调整,促使孔隙产生转动和位移以适应荷载的增大,继而使孔隙长轴向着垂直于荷载的方向发展.

3 细观结构演化与宏观力学响应的关系

水泥土应力-应变变化过程可分为压密、弹性变形、塑性变形和软化破坏 4 个阶段^[8](图 6).分析图 2~图 6 可知,水泥土细观结构演化与宏观力学响应之间存在如下关系:

- a. 压密阶段——劣化减弱阶段.加载初期,水泥土内部固有的微孔洞及微裂缝部分闭合,微观上颗粒分布趋于紧凑,颗粒面积减小,宏观上试样的密度和单轴抗压弹性模量逐渐增大,曲线呈凹形.
- b. 弹性阶段——劣化稳定阶段.由于微裂纹、弱节理面已经闭合,而外荷载增大不足以产生新的裂纹,孔隙面积保持不变,或者是增长非常缓慢,颗粒空间分布的凌乱程度加剧,宏观上应力-应变呈线性关系.
- c. 塑性强化阶段——加速劣化阶段.外荷载促使新裂纹不断产生,已有裂纹迅速增长,且不断地联合贯通,孔隙面积大幅增加,其长轴近似垂直于荷载方向,宏观上应变达到峰值.
- d. 峰后软化破坏阶段.由于试验系统只能进行柔性加载,得不到峰值后的微观量化参数,故无法进行对照分析.

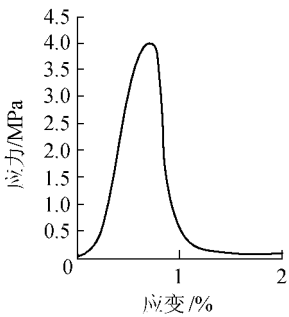


图 6 典型的水泥土全应力-应变曲线
Fig.6 Complete stress-strain curve of typical cement-soil

4 结 论

笔者对室内拌制的水泥土进行了微细观试验研究,提取了不同养护温度及不同土料的水泥土微细结构

参数,探讨了其演化规律以及结构参数演化规律与宏观力学响应之间的关系,并得到如下结论。

- a. 在加荷变形初期,颗粒分布分维减小,颗粒面积减小,应力-应变关系呈劣化减弱趋势,水泥土的密实度和抗压性均有所增大;
- b. 随着应变的增加,颗粒面积减小,孔隙面积增大,颗粒圆度变化出现较为明显的“阻尼振荡”现象。
- c. 在加载过程中,水泥土的颗粒分布分维总体上随着应变的增加而增大,说明颗粒的集团化程度降低,凌乱化程度加剧,水泥土的密实度增大,黏聚力减小,孔隙定向度逐步减小,孔隙排列向着有序化趋势发展,水泥土抗压性降低,应变达到峰值。

参考文献:

- [1] 胡瑞林,李向全,官国琳,等.黏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,1995:30-32.
- [2] 张维刚.水泥加固软土路基的强度特征及微观结构分析[J].北方交通,2006(7):31-34.
- [3] 李俊才,赵泽三,高国瑞.水泥土的微结构特征及分析[J].成都理工学院院报,2000,27(4):387-393.
- [4] 贾苍琴,黄茂松,姚环.水泥-粉煤灰加固闽江口地区软黏土试验研究[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(7):884-888.
- [5] 王清,陈慧娥,蔡可易.水泥土微观结构特征的定量评价[J].岩土力学,2003,24(增刊1):12-16.
- [6] 顾明芬.水泥土强度及其微观结构的试验性研究[J].山西建筑,2004,30(19):59-60.
- [7] 刘敬辉.岩土体微细结构定量分析及试验方法研究[D].南京:河海大学,2003.
- [8] 梁仁旺,张明,白晓红.水泥土的力学性能试验研究[J].岩土力学,2001,22(2):211-213.

Evolution characteristics of microstructure of cement-soil under uniaxial stress

SUN Qiu¹, HU Xin¹, MIN Zi-chao², HONG Bao-ning¹

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai university, Nanjing 210098, China;

2. The Xinzhu Prestress Engineering Corporation of Jiangsu Province, Nanjing 210003, China)

Abstract Based on the experiments on the microstructure of cement-soil of different soil materials at different curing temperatures under uniaxial compression, the regularity of the microstructure of cement-soil under uniaxial compression and its relationship with the macro-mechanical response were discussed. By use of the Geoimage software, a quantitative analysis was performed on the evolution of proportion of grain surface area, grain distribution and fractals, grain roundness, and pore orientation, as well as their comparison with the complete stress-strain curve. It is demonstrated that the configuration of the microstructure of cement-soil samples and their parameters will obviously change under uniaxial compression.

Key words cement-soil; microstructure; configuration parameter; evolution characteristic