

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0529-05

单轴压缩条件下水泥土细观结构的试验研究

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, 南京 210098; 2. 江苏新筑预应力工程有限公司, 南京 210003)

摘 要: 为了探讨单轴压缩条件下水泥土微细结构内部变化规律及对其工程特性的影响, 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, 研究水泥土受荷时微细结构的演化规律。利用 Geoimage 软件提取水泥土微细结构形态参数并进行定量分析, 研究孔隙面积比例、颗粒分布分维、颗粒圆度、颗粒定向度、孔隙定向度和欧拉数的演化特性及其对水泥土的密实度, 凝聚力, 抗压性能的影响。证实土样虽未破坏, 但其细部结构形态和参数均发生了明显变化, 该变化对水泥土的工程特性影响显著。

关 键 词: 水泥土; 细观结构; 定量分析; 形态参数

中图分类号: TU 411.92

文献标识码: A

Experimental research on mesostructure of cement-soil under uniaxial compression

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

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

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

Abstract: In order to study the inside changing regularity of cement-soil mesostructure and its effect on engineering characters, by the experiment of mesostructure change of different earth material cement-soil at different conservation temperatures and under uniaxial compression, to research the evolvement regularity of cement-soil mesostructure under load. Configuration parameters of mesostructure can be obtained by using the Geoimage software, and to make the quantitative analysis. The evolution characters of proportion of pore surface area, grain discontinuity distributy, grain roundness, grain orientation, pores orientation and Euler number, and its action on compactness, cohesion, compression resistance of cement-soil can also be obtained. It's certified that though soil sample isn't failed, its mesostructure configuration and parameters are changed obviously; consequently engineering characters of cement-soil is effected apparently.

Key words: cement-soil; mesostructure; quantitative analysis; configuration parameters

1 引 言

水泥土是由水, 天然土及波特兰水泥强制搅拌混合而成, 可对土体实施加固。由于水泥土的物理性能远大于原状土, 通常用于河道护坡、水池护壁、基坑支护、土体加固或用作街道、停车、机场等。在我国沿海地区, 水泥土是常用的软土地基加固处理措施; 而在基坑支护中也常用水泥土加固。

国内对水泥土微观结构的研究并不深入, 严重阻碍了水泥土的应用和发展。其中, 顾明芬^[1]采用电阻率结构参数法反映水泥土宏观强度, 揭示出水

泥土试块强度的形成机理及其抗压破坏过程的微观结构变化规律。李俊才等^[2]利用扫描电镜, x 射线衍射仪进行微观的物理化学测定, 同时对现场水泥粉喷桩的水泥土样品的结构类型作了微观分析, 从另一侧面分析研究了水泥土加固软土的作用机理和存在的问题。王清等^[3]利用图像处理技术对水泥土进行微观结构定量分析, 讨论了表征结构单元体和孔隙大小、形态及定向等结构要素的定量评价指标。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, 无法得到土体在荷载作用下微观颗粒和孔隙的实际变形和位移信息, 存

收稿日期: 2006-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50279008)

作者简介: 孙秋, 女, 1982 年生, 硕士, 主要从事岩土微细结构和数字图像处理技术的研究。

在较大的误差。

笔者采用微细结构光学测试系统，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。与上述研究方法相比，该方法具有可获得同一土体在不同荷载、不同时刻下微结构信息连续变化情况 & 非接触性、土壤原始性质影响小、精度高等优点。对采集的微细结构照片序列运用 Geoimage^[4] 软件进行研究分析，提取孔隙面积比例、颗粒分布分维、颗粒圆度、颗粒定向度、孔隙定向度和欧拉数，进行定量分析，以研究水泥土受荷时微细结构的演化规律和对水泥土工程特性的影响。

2 试验概述

2.1 试样制备

考虑到湿喷桩桩体是水泥浆与具体土层的素土搅拌而成的多相混合体，本文试验的素土分别为取自连盐高速公路（盐城段）的黏土和粉土，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。先将拌合好的水泥土制成普通三轴试验的圆柱形试样 $\phi 39.1\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ ，然后沿径向对半切割一定深度后掰开（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，保持其真实的天然结构。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了水泥粉土和水泥黏土样，并将其在 0℃、10℃ 及 25℃ 等温度状态下进行养护。

表 1 试验用素土的基本物理力学参数
Table 1 The basic physico-mechanics parameters of plain soil test

类别	天然含水率 / %	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	液限 / %	塑限 / %	渗透系数 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	压缩模量 / MPa
粉土	27.8	1.52	1.94	22.2	16.7	5.6×10^{-5}	14.8
黏土	36.7	1.31	1.81	47.2	28.3	1.1×10^{-7}	2.55

表 2 水泥的主要技术指标测试值
Table 2 The main technical indexes test data of cement

需水量 / %	凝结时间 / h		安定性	胶砂强度抗折 / 抗压 (MPa)		
	初凝	终凝		3 d	7 d	28 d
25.2	2	3.5	合格	4.17/22.4	5.32/29.9	6.42/38.76

2.2 试验内容

试验采用的岩土微细结构光学测试系统（如图 1 所示）由河海大学岩土重点实验室特别设计研制，

由加载系统、图像采集系统和图像处理系统 3 部分组成。可在试验过程中控制加载装置，在镜下对试样进行单轴和三轴加载试验，并可实时、动态地原位观测和记录加载过程中试件发生的微细观结构变化，精确地测量试样轴向荷载和变形量。

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 4~6 个观测点，每隔 0.5 % 的应变对每一观测点拍摄一次微细结构照片。

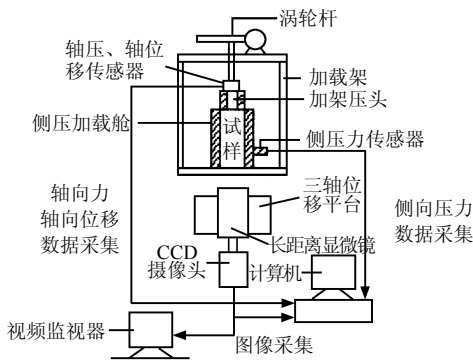


图 1 微细结构光学测试系统示意图
Fig.1 The sketch of the optical test system

2.3 试验结果

试验得到宏细观部分图像分别见图 2 和图 3。对采集的微细结构照片序列运用岩土所微细结构实验室自行编制的 Geoimage^[4] 软件进行研究分析，提取土样微结构形态参数，以做进一步分析所用。提取的形态参数部分结果如表 3 所示。

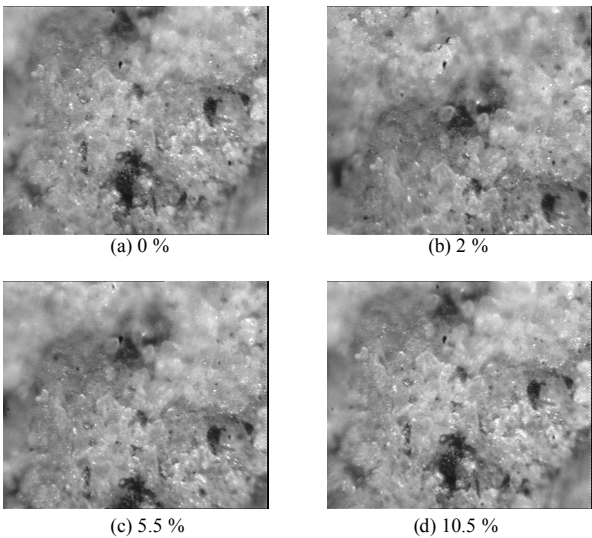


图 2 不同应变率水泥粉土的微细结构图片
（养护温度 25℃，14 d 龄期，放大 200 倍）
Fig.2 The microscopic pictures of the cement-silty soil
(conservation temperature 25℃, age 14 days, by zooming 200 times)

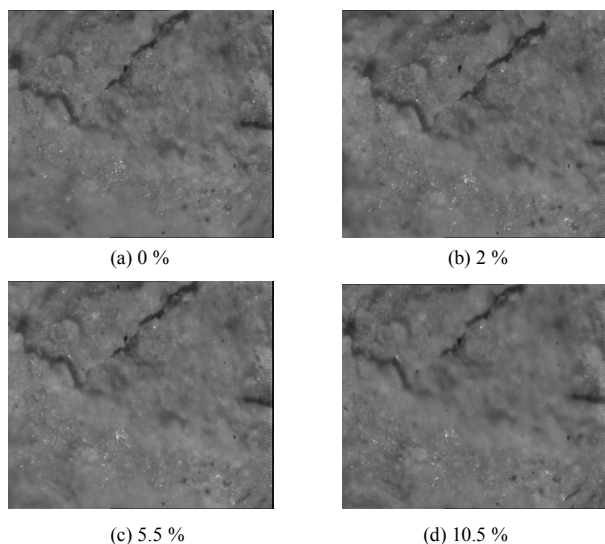


图3 不同应变率水泥黏土的微细结构图片
(养护温度 10℃, 14 d 龄期, 放大 200 倍)

Fig.3 The microscopic pictures of the cement-clay soil
(conservation temperature 10℃, age 14 days,
by zooming 200 times)

表3 微细结构定量分析成果表

Table 3 The quantitative analysis result of microstructure

应变 /%	颗粒 面积 比例 /%	孔隙 面积 比例 /%	颗粒 定向度	颗粒 分布分维	孔隙 定向度	孔隙 分布分维	欧拉数	颗粒 圆度
0.0	89.7	10.3	1.56	0.37	1.67	0.82	0.67	0.87
2.0	89.7	10.3	1.5	0.4	1.65	0.84	0.71	0.9
4.0	87.5	12.5	1.5	0.47	1.56	0.77	0.65	0.85
6.0	83.9	16.1	1.4	0.49	1.48	0.67	0.56	0.77
8.0	77.8	22.2	1.31	0.57	1.39	0.53	0.43	0.66
10.0	70.9	29.1	1.18	0.71	1.19	0.35	0.3	0.5

3 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(孔隙)面积、颗粒(孔隙)等效粒径、颗粒(孔隙)圆度、颗粒(孔隙)分布分维、颗粒(孔隙)定向度以及颗粒(孔隙)的粒度等结构参数刻画。随荷载和应变的增加, 其内部结构不断调整, 以适应新的荷载和变形的需要。该过程不仅涉及其内部孔隙大小的变化, 且与颗粒(孔隙)大小、颗粒(孔隙)形态及分布形式等变化密切相关。为了对水泥土微细结构演化过程有更为清楚的认识, 下文将着重对荷载作用下颗粒(孔隙)大小、颗粒(孔隙)形态以及分布形式等变化规律进行探讨。

3.1 孔隙面积比例演化特性分析

孔隙面积是描述孔隙所占区域大小的最基本特征。图5给出了不同养护温度下28 d龄期水泥土的孔隙面积比例-应变关系曲线。从图中可以看出:

总的来说, 随着应变的增加, 孔隙所占面积增

大, 颗粒所占面积减小。以0℃养护的水泥黏土为例, 其试样表面孔隙所占面积比例由24.8%增加到49.2%, 颗粒、孔隙所占面积均有明显变化。但在加载变形的初期, 孔隙面积比例略有减小趋势, 发展到一定阶段, 又呈现较为稳定的上升趋势。出现这种变化趋势是因为在加载初期, 水泥土内部固有的微孔洞及微裂缝部分闭合, 水泥土各断面的受力面增加, 但随着轴向荷载的继续增加, 水泥土颗粒集聚体之间的联接开始断裂, 使得微孔洞及微裂缝开始重新扩展, 导致孔隙面积比例增加, 水泥土开始出现破坏。当养护温度低于0℃时, 水泥土孔隙面积比例大幅增加, 主要有以下两方面的原因: ①水泥土内部的自由水呈冰晶体状, 水泥基本无法进行水化反应或反应缓慢, 在此过程中孔隙面积比例基本无减小; ②水泥土内部的自由水冻结成冰, 体积膨胀促使其周边的水泥土颗粒产生移动, 导致孔隙面积比例显著增大。

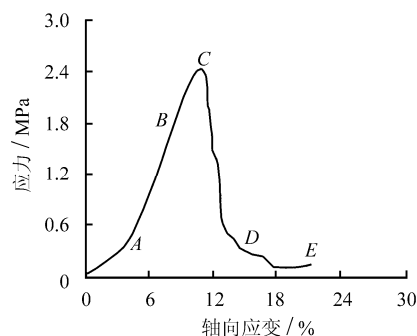


图4 典型的水泥土全应力-应变曲线

Fig.4 Complete stress-strain curve of typical sandstone

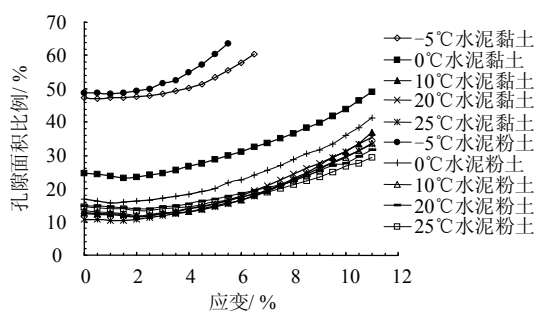


图5 一定温度下水泥土孔隙面积比例-应变关系曲线

Fig.5 The relationship between proportion of interstitial surface area and strain under certain temperature

3.2 颗粒分布分维演化特性分析

颗粒分布分维数在整体上定量确定土粒的平面分布情况, 同时反映了土体的密实程度。一般说来, 颗粒分布分维越大, 反映土中颗粒分布分散, 集团化程度低, 土体密度也越大; 颗粒分布分维与土的凝聚力成反比关系, 即土体分布分维愈大, 土

颗粒分布愈混乱,越松散,凝聚力愈小。图6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。从图中可以看出:

在荷载作用下,水泥土的颗粒分布分维随应变的增加总体上趋于增大,说明颗粒的集团化程度降低,颗粒的凌乱化加剧,土的密实度增大,黏聚力减小。但当应变率在0%~2%之间时,颗粒分布分维相对于初始值略有减小。这恰好与图4中全应力-应变曲线的OA段一劣化段减弱对应,说明该阶段水泥土由于受到力的作用,部分孔隙、裂隙等缺陷逐渐闭合,颗粒分布趋于紧凑;当应变率超过2%后,颗粒分布分维稳步增大,说明随着荷载和应变的增大,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,致使水泥土结构趋于松散化,产生较大的宏观变形,水泥土黏聚力不断减小。养护温度不仅对颗粒分布分维随龄期增加的变化趋势有显著影响,而且对颗粒分布分维随应变增加的变化趋势也有显著影响。对于养护温度为-5℃和0℃的水泥土,颗粒分布分维的增加速度远大于养护温度为10℃,20℃和25℃的水泥土。同时可注意到养护温度为10℃,20℃和25℃的水泥土颗粒分布分维的变化趋势基本一致,只是养护温度为10℃的水泥土颗粒分布分维相对较小。一般认为,颗粒分布分维的变化与孔隙分布分维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,则孔隙分布越为集中。进而可知,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。

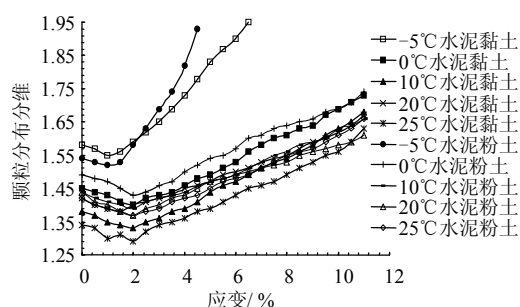


图6 一定温度下水泥土颗粒分布分维-应变关系曲线
Fig.6 The relationship between grain discontinuity distribution and strain under certain temperature

3.3 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,它可以表示结构单元体在二维平面中所展示的几何形状特征。一般来说,颗粒圆度与压缩系数

呈负的相关关系。图7给出了不同养护温度下28d龄期水泥土的颗粒圆度-应变关系曲线。从图中可以看出:随着荷载和应变的增加,水泥土圆度总体上呈降低趋势,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。颗粒圆度的变化呈现较为明显的“阻尼振荡”现象。当荷载不足以使颗粒破碎时,颗粒间的固有黏性联结和水泥水化产生的胶结物在荷载作用下逐步断裂,上述联结物的随机性导致颗粒圆度变化具有“振荡”性;但随着荷载的进一步增大,颗粒及集聚体难以抵抗增大的荷载而发生崩解,使颗粒长短轴差值增大,颗粒向扁长形状发展。同类水泥土,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,其在荷载作用下的“振荡”幅度相对越小,如图中-5℃时的颗粒圆度所示。

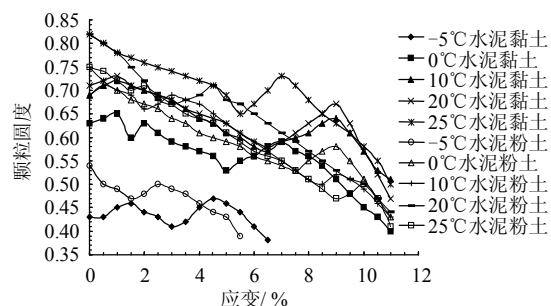


图7 不同温度下水泥土颗粒圆度-应变关系曲线
Fig.7 The relationship between grain roundness and strain under different temperatures

3.4 颗粒和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,分析微结构中单元体或孔隙在各个分区内的定向强度。定向度越小,反映颗粒(孔隙)排列的有序性越好。图8和图9分别给出了不同养护温度下28d龄期水泥土的孔隙定向度-应变关系曲线及颗粒定向度-应变关系曲线。从图中可以看出:各龄期水泥土样的初始孔隙定向度皆大于0.5,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。这是因为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,所以孔隙初始定向度较大,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。而水泥土的颗

粒定向度变化趋势恰好与孔隙定向度相反, 变形增大, 颗粒定向度逐步增大, 颗粒向着无序化发展, 水泥土内部孔隙的连通性不断提高, 这就意味着土体结构骨架松散程度加大, 加剧了水泥土的压缩变形。由此可知水泥土抵抗变形的能力与其颗粒定向度成反比关系。 -5°C 养护的水泥粉土和水泥黏土在荷载作用下, 其孔隙定向度呈直线衰减。

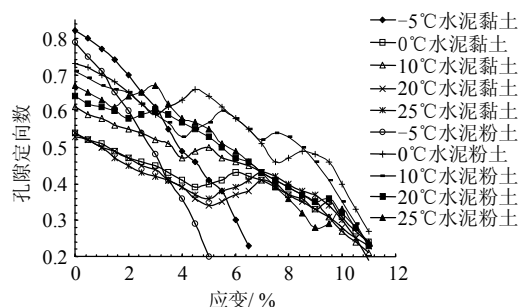


图 8 不同温度下水泥土孔隙定向度-应变关系曲线
Fig.8 The relationship between pores orientation and strain under different temperatures

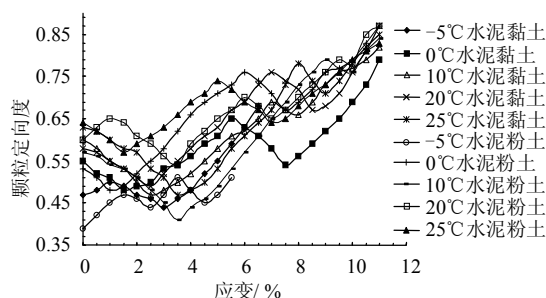


图 9 不同温度下水泥土颗粒定向度-应变关系曲线
Fig.9 The relationship between grain orientation and strain under different temperatures

3.5 欧拉数演化特性分析

欧拉数是一种区域的拓扑描述符, 它描述的是区域的连通性。图 10 给出了不同养护温度下 28 d 龄期水泥土的欧拉数-应变关系曲线。

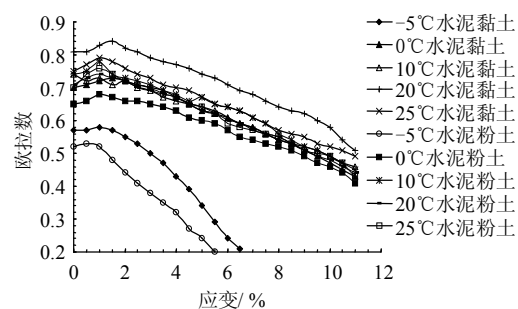


图 10 不同温度下水泥土欧拉数-应变关系曲线
Fig.10 The relationship between euler number and strain under different temperatures

从图中可以看出: 随着荷载和应变的增大, 水泥土欧拉数经历了 3 个变化阶段: ①当应变率小于 2% 时, 欧拉数缓慢增大; ②当应变率在 2%~9% 之间时, 欧拉数稳步减小; ③当应变率超过 9% 后, 欧拉数减小速度减缓, 逐步趋于定值。欧拉数的变化规律印证了水泥土内部孔隙、微裂缝等缺陷的演化特征。对于同种水泥土, 当养护温度低于 20°C 时, 欧拉数与养护温度成正比例关系, 即养护温度越高, 水泥土的欧拉数越大, 强度越高。

4 结 论

本文通过微细结构光学测试系统对某实际工程中的湿喷桩桩体进行了试验观测, 通过提取及分析不同养护温度及不同土料的水泥土微细结构参数, 研究水泥土受荷时微细结构的演化规律。发现在轴向应变达到 11% 的压缩过程中, 水泥土样表面并没有表现出明显的破坏特征, 但微细结构形态和微细结构参数均发生了显著变化, 对土的工程特性影响明显, 主要表现在以下几个方面:

(1) 在加荷变形过程中, 总体上, 孔隙面积增大, 颗粒面积减小, 土样抗压强度减小; 颗粒圆度的变化呈现较明显的“阻尼振荡”现象, 压缩性降低。

(2) 随应变的增加, 水泥土的颗粒分布分维总体上趋于增大, 说明颗粒的集团化程度降低, 颗粒凌乱化加剧, 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的趋势发展, 颗粒定向度逐步增大, 颗粒排列向着无序化的趋势发展, 水泥土抗压性降低。

(3) 欧拉数的三个变化阶段印证了水泥土内部孔隙、微裂缝等缺陷的演化特征。

参 考 文 献

- [1] 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): 85-90.
- [2] 李俊才, 赵泽三, 高国瑞. 水泥土的微结构特征及分析[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(4):
- [3] 王清, 王凤艳, 肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 20-24.
- [4] Casagrande A. The structure of clay and its importance in foundation engineering[J]. Journ. Boston Soc. Civil Eng., 1932, 19: 156-162.