

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201125005

## 无侧限压缩条件下重塑土微观结构研究\*

孙茜<sup>1,2</sup>, 阎长虹<sup>1</sup>, 刘羊<sup>3</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 南京工业职业技术大学, 江苏南京 210023; 3. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东广州 510060)

**摘要:**近年来,基坑、隧洞等开挖工程中的卸载作用导致软土结构破坏,进而引起过大侧向变形的工程事故越来越多。土体所表现出来的各种变形及强度特性是其内部微观结构要素调整和演化的综合反映。为了研究结构遭到扰动破坏的软土在无侧限压缩变形后的微观结构特征,将原状软土重塑成不同含水率土样,在不同轴向应力作用下压缩变形稳定后,对土体微结构进行定性和定量分析,探讨无侧限条件下土体的微观结构与宏观变形的相关机理。研究表明,软土重塑样的微观结构主要以分散结构和絮凝结构为主,单元体之间多有架空,土体颗粒的接触方式以边一面和面一面接触为主。在无侧限压缩条件下,随着轴向应力和试样含水率的增大,试样的表观孔隙比减小,孔隙形状变得扁平狭长,孔隙的有序性和定向性增强。不同位置的定向性不同,在水平方向上,靠近试样边缘处的土颗粒定向性和有序性更强;在竖直方向上,靠近试样中间位置的土颗粒定向性更强。

**关键词:**无侧限压缩; 含水率; 扫描电镜; 微观结构

**中图分类号:** TU43    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0571-08

## Study on the Microstructure of the Remolded Soil under Unconfined Compression

SUN Qian<sup>1,2</sup>, YAN Changhong<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>3</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China;

3. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China)

**Abstract:** In recent years, the unloading of excavation engineering activities such as foundation pits and tunnels, has caused the structural failure of soft soil and consequently results in numerous engineering accidents related to the excessive lateral deformation. Various soil deformation and strength characteristics are the comprehensive reflections of its internal microstructure elements adjustment and evolution. In order to study the microstructure characteristics of disturbed soft soil subjected to unconfined compression deformation, the undisturbed soft soil was remolded into soil samples with different moisture contents in this paper. Unconfined compression tests were carried out on these samples under different axial stresses. The qualitative and quantitative analyses of soil microstructure were adopted

\* 收稿日期:2020-11-25;修回日期:2021-01-12

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目(18KJB170006)、江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2019705)、南京市建设系统科技计划项目(Ks2261)资助

作者简介:孙茜(1983—),女,副教授,博士。主要从事软土变形方面的研究。E-mail:sqiannju@163.com

通讯作者:阎长虹(1959—),男,教授,博导,博士。主要从事水文地质工程地质方面的研究。E-mail:yanchhh@nju.edu.cn

when the unconfined deformation was stable. The relevant mechanism of soil microstructure and macro unconfined deformation was then discussed. The results show that the remolded soft soil was mainly composed of dispersion and flocculation structures, and there were many overhead structures between the units. The soil particles were contacted with each other mostly in the form of edge-surface and surface-surface contact. With the increase of axial stress and moisture content of soil samples under unconfined compression, the apparent void ratio decreased, the shape of pores became flat and narrow, and both the order and orientation of the pores were enhanced. The orientation characteristics of soil samples varied at different positions: in the horizontal direction, the soil particles near the sample edge were more directional and ordered; in the vertical direction, the soil particles near the middle part were more directional.

**Keywords:** unconfined compression; moisture content; scanning electron microscopy (SEM); micro-structure

## 引 言

软土在我国东部沿海、沿江及湖泊地区广泛分布,具有含水率高、强度低、压缩性高等不良工程特性。基坑开挖或隧道掘进时临空面附近的软土,受到卸载作用以及工程扰动后,软土的结构部分或全部遭到破坏,导致颗粒间连接力下降,强度部分或全部丧失,极易发生侧向大变形而引起工程事故<sup>[1-3]</sup>。侧向大变形本质上是无侧限压缩变形问题<sup>[4]</sup>。土体的宏观性状在很大程度上受到其微观结构系统的控制,土体所表现出来的各种宏观变形及强度特性,追根溯源是其微观结构要素发生调整和演化的综合反映<sup>[5]</sup>。

目前相关学者借助于X射线衍射试验(XRD)、压汞试验、扫描电镜试验(SEM)、透射电镜试验(TEM)等技术方法,对软土流变过程中微观结构的变化规律以及建立微结构参数和宏观变形的相关关系等开展了相关研究,取得了一定的成果。薛茹等<sup>[6]</sup>用压汞试验和扫描电镜试验分析了软黏土的微观孔隙度及其固结机理;张先伟等<sup>[7-9]</sup>对湛江结构性黏土进行室内压缩试验、压汞试验和扫描电镜试验,定性、定量分析压缩过程中土体微观孔隙的变化规律,建立微观结构与宏观力学特性的关系;周晖等<sup>[10-11]</sup>利用不同固结压力下的广州淤泥土进行压汞试验和环境扫描电镜(ESEM)试验,定量分析软土在不同固结压力下微观结构孔隙的大小及其分布特征;陈波等<sup>[12]</sup>对上海软黏土原状样、重塑样、压实样和泥浆样分别进行压缩试验和压汞试验,试验结果表明随着固结压力的不断增大,大孔隙和中孔隙逐渐向小孔隙转化,并且固结压力并不能消除制

样方式对土体微观孔径分布的影响;X.Bai等<sup>[13]</sup>利用数字图像技术对SEM图片进行处理,强化了定向性指标,探讨关于固结不排水剪切实验中颗粒的定向性;唐益群等<sup>[14-15]</sup>对上海市饱和黏性土体中孔隙水压力对地铁振动荷载响应特征以及地铁荷载下软黏土微结构与宏观变形特征等进行相关研究。以上研究主要针对固结(完全侧限)条件下软土微结构特征,而对无侧限压缩条件下软土重塑样的微结构特征研究几乎没有涉及。无侧限压缩条件下,土体的变形规律与正常固结条件完全不同<sup>[4]</sup>,其微观机制有待进一步研究。

本文以结构完全破坏的软土重塑样为研究对象,研究其在无侧限压缩条件下的微观结构特征,可以深入理解受结构扰动软土的无侧限变形规律,具有重要的理论价值和实际意义。

## 1 试验方案

### 1.1 试样准备

试验土样取自南京市江北新城区的第四系河流冲积相淤泥质粉质黏土,物理力学指标见表1。经重塑后,土体的结构被破坏,强度较原状土大大降低。通过配置不同含水率土样进行试验,发现当含水率高于28%时,土样失去自稳能力,无法进行试验,且相关实测资料表明,南京软土基坑经降水疏干后,实际含水率为20%~30%<sup>[16]</sup>。因此,将土样制成含水率分别为20%、24%、28%的重塑样,控制干密度为1.48 g/cm<sup>3</sup>左右。

采用在WG型三联中压固结仪的基础上改装而成的无侧限压缩试验装置<sup>[17]</sup>,无侧限压缩试验装

表1 软土的物理力学性质指标

Table 1 Soil physical parameters

指标	天然含水率/%	天然孔隙比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	塑限/%	液限/%	液性指数	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
取值	39.9	1.130	17.7	18.6	31.3	1.68	5.4	11.9

置如图1所示。将试样分别在轴向应力 12.5、50、100、200 kPa作用下进行压缩试验,当压缩变形达到稳定时试验结束。试验方案见表2。

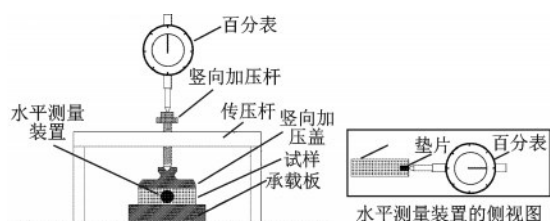


图1 无侧限压缩试验装置简图

Fig.1 Sketch of the unconfined compression test device

表2 不同含水率无侧限压缩试样加载方案

Table 2 Loading scheme of soil samples with different moisture contents

试样编号	含水率/%	轴向应力/kPa
1-1	20	12.5
1-2		12.5、50
1-3		12.5、50、100
1-4		12.5、50、100、200
2-1	24	12.5
2-2		12.5、50
2-3		12.5、50、100
2-4		12.5、50、100、200
3-1	28	12.5
3-2		12.5、50
3-3		12.5、50、100
3-4		12.5、50、100、200

选取土样中心位置的垂直剖面,磨制定向光片,取样位置如图2所示。由于土样结构疏松,强度较低,应在磨制前制靶,即用胶包裹样品,使土颗粒位置固定。先用粗金刚砂粗磨,用清水清洗干净



图2 取样位置

Fig.2 Sampling location

后,再用细金刚砂细磨。细磨前为了防止土颗粒掉下,再用胶再次胶结。最后,将土样表面粘在载玻片上,封边。定向光片如图3所示。



图3 定向光片

Fig.3 Directional light sheet

## 1.2 场发射扫描电镜试验

本次试验采用南京大学地球科学与工程学院的场发射扫描电子显微镜,型号为 Carl Zeiss Supra 55,试验设备如图4所示。由于土体导电性能不好,试验仪器对土体所照射的非反射电子容易聚集形成静电,从而影响扫描电镜的观测效果。因此,试验开始前需要在试样表面喷上一层导电薄膜,增加SEM图像的清晰程度,提高试验测量结果的可靠性和准确性。喷膜后,将定向光片牢固地粘结在观测台上,将喷过导电薄膜的土样断面作为观测面,一个观测台放两个定向光片(图5)。最后,将观测台缓慢推入扫描电镜仪器仓内。

土样进入仪器仓后,首先在低倍率下观测土样,找到观测土样位置,并使该土样位置位于电脑视野中央,逐渐增加土样的放大倍数,直至看到土颗粒内部复杂的堆砌结构和孔隙特征。扫描土样表面后,存储图像,每个土样观测9个位置(图6)。

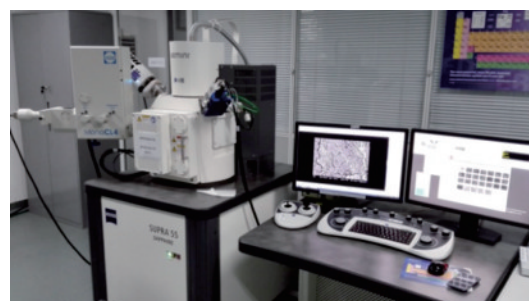


图4 场发射扫描电子显微镜

Fig.4 Field emission scanning electron microscope

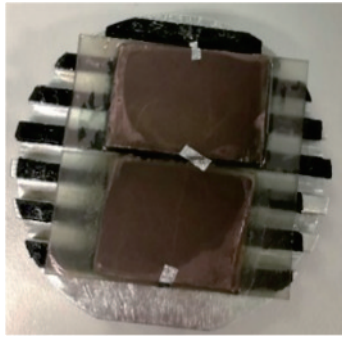


图5 观测台  
Fig.5 Observatory

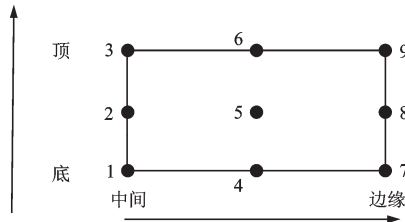


图6 土样观测点位置

Fig.6 Location of observation points of the soil sample

## 2 微观结构特征分析

### 2.1 微结构分析方法

运用PCAS软件<sup>[18-19]</sup>对扫描电镜图像进行二值化处理,自动去除杂点,分割并识别颗粒和孔隙。在SEM图像中,与土颗粒相比,孔隙通常处于较低(较暗)的灰度级,可以通过不同的灰度级区分孔隙和土颗粒。灰度的SEM图像经过二值化处理之后变为黑白图像,即白色像素表示土颗粒、黑色像素表示孔隙。输出所有孔隙的个数、面积、长度、宽度、方向等各种几何参数,统计得到表观孔隙比、定向性、形状系数、概率熵等统计参数,并绘制定向频率玫瑰图。SEM图像处理过程如图7所示。

### 2.2 微观结构定性分析

图8为含水率20%试样受各级荷载作用下的扫描电镜SEM图像(左侧)和二值化图像(右侧)。试样均在6000倍的放大倍数条件下进行观测,通过图像可以非常清晰地看到土颗粒和土体内部孔隙的大小特征及其分布情况。由SEM图像对比发现,土颗粒以片状为主,软土重塑样的内部结构主要是分散结构和絮凝结构,土颗粒多以面一面接触

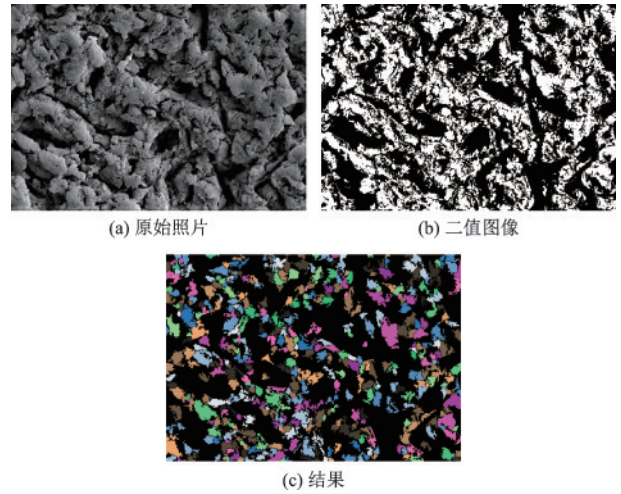


图7 SEM图像处理过程

Fig.7 SEM image processing

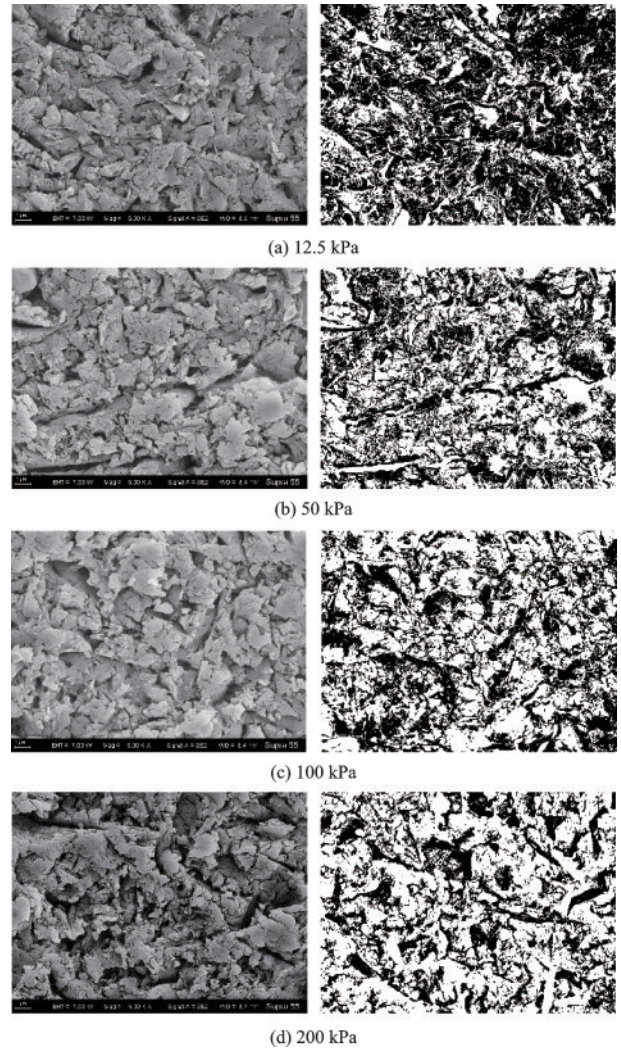


图8 各级轴向应力作用下试样SEM及二值化图像  
Fig.8 SEM images of specimens under different axial stress

和边一面接触的方式,单元体之间多有架空结构。随着轴向应力的增加,孔隙体积变小,土体密实度

提高,定向性和有序性明显,孔隙沿与水平方向成一定角度发展。

### 2.3 微观结构定量分析

定量分析无侧限压缩条件下,轴向压力、土样含水率对微观孔隙的大小、形状和定向性的影响,并与正常固结条件进行比较。

#### (1) 表观孔隙比

表观孔隙比是SEM图像上孔隙面积与颗粒面积的比值。将试样9个位置的表观孔隙比取平均值,得到该试样的平均表观孔隙比。含水率分别为20%、24%、28%试样在各级荷载作用下的平均表观孔隙比如图9所示。从图中看出,随着轴向应力的增加,表观孔隙比减小。这是因为在轴向荷载作用下土体发生压缩变形,进而导致孔隙体积减小。在相同荷载水平下,含水率低的试样表观孔隙比大于含水率高的试样。刘羊等<sup>[17]</sup>研究表明,各试样的初始孔隙比相等,而含水率低的土样压缩量小,因此孔隙比大,该结论与表观孔隙比一致。可见,表观孔隙比的规律与无侧限压缩变形是一致的,说明微观结构参数可以反映宏观变形。

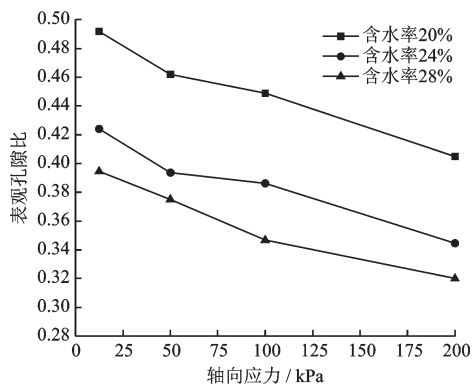


图9 表观孔隙比随轴向压力的变化

Fig.9 Variations of apparent pore ratio with axial pressure

对比常规固结试验试样,随着固结压力从50 kPa增加到400 kPa,表观孔隙比从0.25减小到0.08<sup>[20]</sup>,其表观孔隙比的减小幅度远大于无侧限压缩试样。导致试样在无侧限压缩条件下发生压缩变形的原因,除了孔隙体积减小以外,试样侧向变形也是重要因素。由于试样可以发生侧向变形,一定程度上削弱了孔隙体积的减小量。因此,土体发生无侧限压缩后变形量发生明显变化,但是孔隙体积的变化不如有侧限压缩显著。

#### (2) 形状系数

$$\text{形状系数 } F_i = \frac{C_c}{S_a} \quad (1)$$

式中, $C_c$ 为与孔隙等面积的圆周长; $S_a$ 为孔隙的实际周长。

一般采用统计分析数据平均形状系数描述土体孔隙的形状特征,平均形状系数的定义式为:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i / n \quad (2)$$

式中, $n$ 为孔隙数。

形状系数 $F$ 的取值范围为0~1, $F$ 越接近于1,孔隙的形状越圆滑; $F$ 越接近于0,孔隙的形状越狭长。图10是土体孔隙的形状系数随轴向应力的变化。可见,轴向应力越大,试样的含水率越高,形状系数越小,说明孔隙形状由圆滑变得狭长。作用在试样上的轴向应力越大,土颗粒发生相对位移和旋转的动能越大。竖直方向上颗粒的排列变得紧密,孔隙被压缩,而水平方向上的孔隙被拉长,因而孔隙形状变得狭长。

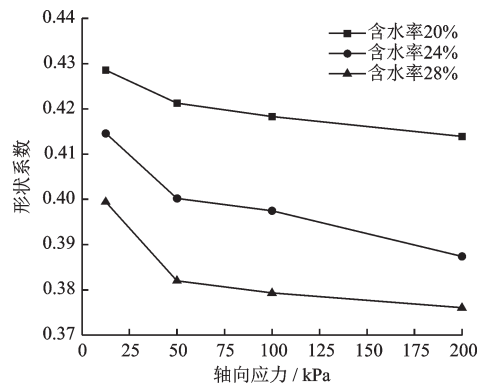


图10 形状系数随轴向压力的变化

Fig.10 Variations of shape factor with axial pressure

土样的含水率也是影响孔隙形状的重要因素。含水率越高,结合水膜越厚,而结合水膜起到润滑的作用,减小了土颗粒之间的摩擦力,使颗粒间的相对运动更容易发生,孔隙的形状变化更明显。随着轴向应力的增加和土样含水率的增大,土样轴向、侧向应变均增大,土样变形显著<sup>[4]</sup>。土样的变形是土颗粒发生相对运动的结果,而土颗粒的相对运动导致土体内孔隙形状发生变化。由此可见,孔隙形状系数的变化规律与试样的宏观变形规律一致。

有关研究表明,软土在正常固结条件下,固结压力使孔隙的形状变得圆滑<sup>[7]</sup>,此规律与无侧限压缩条件下孔隙的形状规律不同。因此,无侧限变形

条件下土体的微结构特征与正常固结不同,有必要进一步研究。

### (3) 定向性频率玫瑰图

定向性频率玫瑰图表示结构单元体定向角落入各区间的概率。将 $180^\circ$ 分为若干份,各方向的长度代表孔隙数。图11为含水率20%的土样在50 kPa轴向应力作用下,竖向剖面上不同水平位置的定向性频率玫瑰图。从图中看出,靠近试样中间位置的孔隙,沿各个方向的分布比较均匀。水平方向上距离试样中心越远,定向性逐渐增强,且定向角发生转动,靠近试样边缘处,定向角接近 $45^\circ$ 。在轴向均匀压力作用下,试样中心位置的土颗粒变形受到四周土颗粒的约束,而接近试样外侧的土颗粒,受到周围土颗粒的约束较小,孔隙变化更加明显,定向性和有序性更强。由于土体变形没有侧向限制,轴向和侧向均可以发生变形,多数孔隙的定向角不沿着水平方向,而是与水平方向成近 $45^\circ$ 角。在杭州饱和软土固结过程中,随着固结压力的增加,孔隙的排列向水平方向集中<sup>[20]</sup>。因此,无侧限压缩条件下土样孔隙的排列方向不同于正常压缩固结条件。

图12为含水率20%的土样在50 kPa轴向应力作用下,竖向剖面上不同竖向位置的定向性频率玫瑰图。通过比较看出,土样顶部和底部由于受到加载板摩擦力的影响,孔隙的水平向张拉受到限制,多数孔隙的定向角接近竖直方向。而土样中间位

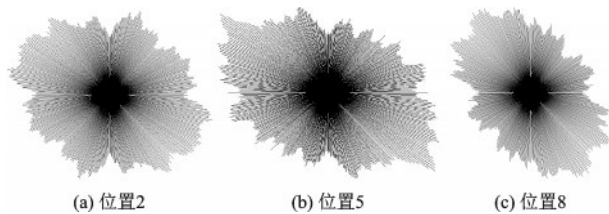


图11 竖向剖面不同水平位置定向性频率玫瑰图

Fig.11 Directional frequency rose diagrams of different horizontal positions in the vertical section

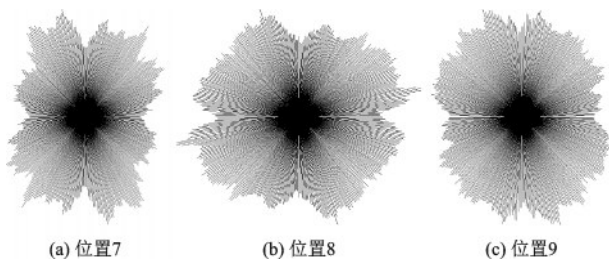


图12 竖向剖面不同竖向位置定向性频率玫瑰图

Fig.12 Directional frequency rose diagrams of different vertical positions in the vertical section

置的孔隙,水平方向得到充分的拉伸,定向角接近水平方向。

含水率20%的试样在不同压力下的竖向剖面定向性频率玫瑰图如图13所示,为了排除取样位置对试验结果的影响,选取相同位置进行研究(位置2)。通过比较发现,随着压力的增加,孔隙的排列向水平方向集中,有序性和定向性增强。

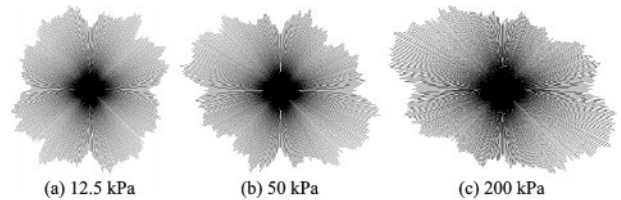


图13 不同压力下竖向剖面定向性频率玫瑰图

Fig.13 Directional frequency rose diagrams of vertical profile under different pressures

### (4) 概率熵

概率熵是反映结构单元有序性的定量参数,计算公式为:

$$H_m = - \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M} \frac{\ln(m_i/M)}{\ln n} \quad (3)$$

式中,将 $0^\circ \sim 180^\circ$ 等分为 $n$ 个长度为 $\alpha$ 的区间, $m_i$ 表示孔隙的长轴方向在第 $i$ 个区间内的个数。 $H_m$ 取值 $0 \sim 1$ , $H_m$ 值越大,表示孔隙有序性越低;反之,孔隙有序性越高。

概率熵随轴向应力的变化如图14所示。从图中看出,在无侧限压缩条件下,随着轴向应力的增加,概率熵减小,孔隙的有序性增强,这也与定向性频率玫瑰图随轴向应力的变化规律一致。相关研究成果表明,在正常固结试验中,概率熵同样随固结压力的增加而逐渐减小<sup>[20]</sup>,表明孔隙的定向性也随固结压力的增大而增强。因此,无论是否有侧向

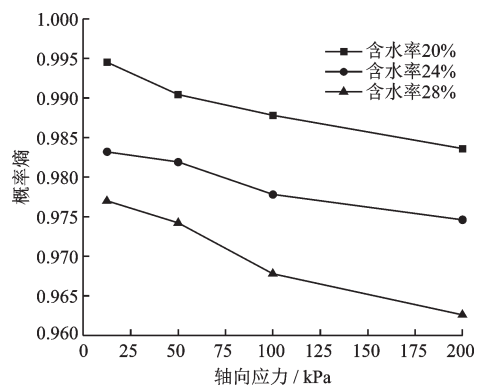


图14 概率熵随轴向压力的变化

Fig.14 Variation of probability entropy with axial pressure

限制,随着固结压力的增大,孔隙的定向性更强。试样的含水率越高,概率熵越大,孔隙有序性越强。以上结论与无侧限条件下随着土样含水率的增大,侧向变形更加显著的结论相一致<sup>[17]</sup>,从微观角度进一步验证了宏观变形规律。

土样含水率是影响土体宏观无侧限变形的重要因素。从微观上看,土中的水起到润滑的作用,减小了土颗粒间摩擦力,易发生土颗粒的相对位移。荷载作用下,含水率高的土体,表观孔隙比小,孔隙形状更狭长,定向性更强,概率熵低。

### 3 结 论

(1)观察软土重塑样的扫描电镜SEM图像,颗粒以片状为主,微观结构主要以分散结构和絮凝结构为主,单元体之间多有架空,土体内部颗粒多以面一面接触和边一面的接触方式。随着轴向应力的增加,单个孔隙体积变小,竖直方向更加密实,土颗粒沿近似与水平方向成一定角度发展,定向性和有序性明显。

(2)对SEM图像进行量化处理,分析表观孔隙比、形状系数、定向性频率玫瑰图和概率熵随轴向应力和土样含水率的变化规律。含水率较低的试样,表观孔隙比高;随着轴向应力的增加,土体发生压缩变形,表观孔隙比减小。对比常规固结试验试样,有侧限试样的表观孔隙比的减小幅度远大于无侧限压缩试样。轴向应力越大,试样的含水率越高,形状系数变小,孔隙形状变得狭长。

(3)轴向应力越大、含水率越高的土样,概率熵减小,定向性和有序性越强。试样不同位置的定向性程度不同,水平方向上,靠近试样边缘处的土颗粒定向性和有序性更强;竖直方向上,靠近试样中间位置的土颗粒定向性更强,定向角接近水平方向;随着压力的增加,孔隙的排列向水平方向集中。

### 参考文献:

[1] 王笑,陈辉,王赵明等.考虑软土蠕变效应的路基沉降有限元反演分析[J].防灾减灾工程学报,2020,40(3):460-466.  
Wang X, Chen H, Wang Z M, et al. Finite element inverse analysis for soft soil subgrade settlement considering creep behavior [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(3): 460-466. (in

Chinese)  
[2] 李家飞,梁建文,巴振宁,等.天津Z2线工程软土场地震陷分析[J].防灾减灾工程学报,2020,40(1):116-124,138.  
Li J F, Liang J W, Ba Z N, et al. Seismic settlement analysis of soft soils of Tianjin Z2 Line [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 116-124, 138. (in Chinese)  
[3] 杜晨翔.开挖引起的深厚淤泥质软土桩基变形试验研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2016.  
Du C X. Experimental study on pile foundation deformation caused by excavation in deep and thick silt soft soil [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016. (in Chinese)  
[4] 孙茜.无侧限压缩条件下重塑土变形机制研究[D].南京:南京大学,2019.  
Sun Q. Study on deformation mechanism of remolding soil under unconfined compression [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese)  
[5] 沈珠江.结构性粘土的堆砌体模型[J].岩土力学,2000,21(1):1-4.  
Shen Z J. A masonry model for structured clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 1-4. (in Chinese)  
[6] 薛茹,胡瑞林,毛灵涛.软土加固过程中微结构变化的分形研究[J].土木工程学报,2006,39(10):87-91.  
Xue R, Hu R L, Mao L T. Fractal study on the microstructure variation of soft soils in consolidation process [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 87-91. (in Chinese)  
[7] 张先伟,王常明.一维压缩蠕变前后软土的微观结构变化[J].岩土工程学报,2010,32(11):1688-1694.  
Zhang X W, Wang C M. Microstructural change of soft clay before and after one-dimensional compression creep [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1688-1694. (in Chinese)  
[8] 张先伟,王常明,李军霞,等.蠕变条件下软土微观孔隙变化特性[J].岩土力学,2010,31(4):1060-1067.  
Zhang X W, Wang C M, Li J X, et al. Variation characteristics of soft clay micropore in creep condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1060-1067. (in Chinese)  
[9] 张先伟,孔令伟.利用扫描电镜、压汞法、氮气吸附法评价近海黏土孔隙特征[J].岩土力学,2013(增2):134-142.  
Zhang X W, Kong L W. Study of pore characteristics of offshore clay by SEM and MIP and NA methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(Sup2): 134-142. (in

- Chinese)
- [10] 周晖, 房莹光, 曾铖. 广州饱和软土固结过程微孔隙变化的试验分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增1):138-144.  
Zhou H, Fang Y G, Zeng C. Experimental analysis of micropore change of Guangzhou saturated soft soil in consolidation process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1):138-144. (in Chinese)
- [11] 周晖, 房莹光, 禹长江. 广州软土固结过程微观结构的显微观测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2):3830-3837.  
Zhou H, Fang Y G, Yu C J. Micro-structure observation and analysis of Guangzhou soft soil during consolidation process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2):3830-3837. (in Chinese)
- [12] 陈波, 孙德安, 高游, 等. 上海软黏土的孔径分布试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9):2523-2530.  
Chen B, Sun D A, Gao Y, et al. Experimental study of pore-size distribution of Shanghai soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9):2523-2530. (in Chinese)
- [13] Bai X, Smart P, Leng X. Polarizing microphoto metric analysis[J]. Geotechnique, 1994, 44(4):175-180.
- [14] 唐益群, 张晓晖, 赵书凯, 等. 地铁荷载下软黏土微结构与宏观变形的相关性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(7):872-877.  
Tang Y Q, Zhang X H, Zhao S K, et al. Correlatability of microstructure change and macroscopical deformation of soft clay under subway load [J]. Journal of Tongji University (Science and Technology), 2009, 37(7):872-877. (in Chinese)
- [15] 唐益群, 赵书凯, 杨坪, 等. 饱和软黏土在地铁荷载作用下微结构量化研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(8):98-103.  
Tang Y Q, Zhao S K, Yang P, et al. Quantitative analysis of the microscopic behavior of saturated soft clays under cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(8):98-103. (in Chinese)
- [16] 徐运达. 软土区深大基坑降水对支护及周边环境影响研究—以青奥轴线基坑工程为例[D]. 南京: 南京大学, 2015.  
Xu Y D. Studies of the effect of deep excavation dewatering on support and surroundings in soft clay—Taking deep excavation of the Youth Olympic Axis Engineering as an example [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese)
- [17] 刘羊, 孙茜, 阎长虹. 含水量对软土无侧限变形影响的试验研究[J]. 土工基础, 2018, 32(4):90-95.  
Liu Y, Sun Q, Yan C H. Experimental study on the influence of moisture content on unconfined deformation of soft soil [J]. Soil Engineering and Foundation, 2018, 32(4):90-95. (in Chinese)
- [18] Liu C, Shi B, Zhou J. Quantification and characterization of micro-porosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials [J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1):97-106.
- [19] Liu C, Tang C S, Shi B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing [J]. Computers & Geosciences, 2013, 57(4):77-80.
- [20] 周建, 邓以亮, 曹洋, 等. 杭州饱和软土固结过程微观结构试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6):1998-2005.  
Zhou J, Deng Y L, Cao Y, et al. Experimental study of microstructure of Hangzhou saturated soft soil during consolidation process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6):1998-2005. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)