

DOI: 10.11779/CJGE201607012

人工冻融软黏土微观孔隙变化及分形特性分析

王升福, 杨平*, 刘贯荣, 樊文虎

(南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 为探讨软黏土融沉及压缩特性的微观机理, 以宁波地区软黏土为研究对象, 采用冻融、压缩和压汞试验, 对冻融和压缩前后的软黏土微观孔隙分布及变化进行了研究。取原状土、融土、压缩原状土、压缩融土 4 种土样分别进行压汞试验, 提出孔径划分方法, 结合分形理论对冻融软黏土微观孔隙变化进行分析, 研究了软黏土的孔隙分布特征, 并采用容量维数对孔体积分布和孔表面积分布进行计算, 分析了冻融及压缩前后颗粒接触及孔隙变化。研究结果表明: 软黏土冻融后孔体积和孔表面积均增大; 原状土和融土压缩后孔体积和孔表面积均减小, 软黏土的孔体积和孔表面积 80% 以上分布于微孔和超微孔中; 软黏土冻融及压缩前后孔体积和孔表面积存在分形特性。

关键词: 人工冻融软黏土; 融沉特性; 微观孔隙; 压汞法; 分形理论

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)07-1254-08

作者简介: 王升福(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土与地下工程的相关研究。E-mail: nfuwangsf@foxmail.com。

Micro pore change and fractal characteristics of artificial freeze thaw soft clay

WANG Sheng-fu, YANG Ping, LIU Guan-rong, FAN Wen-hu

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to investigate the microscopic mechanism of thawing collapse and compression characteristics of soft clay, the thawing collapse tests, compression tests and mercury intrusion porosimetry (MIP) are adopted to study microscopic pore distribution and change of soft clay in Ningbo area during the period before and after freezing, thawing and compression. A method for pore diameter division of four kinds of soil samples is proposed, including undisturbed soil, melted soil, compressed undisturbed soil and compressed thawing soil. Through scanning electron microscopy and mercury intrusion tests, the microstructural changes of freeze-thaw soft clay are analyzed according to the fractal theory of mercury. The characteristics of pore diameter distribution of soft clay are investigated, and the pore volume and area distribution are calculated by the capacity dimension. The results show that the pore volume and area of soft clay both increase after melting. The pore volume and area of undisturbed soil and thawing soil both decrease after compression, and more than 80% of pore volume and area of soft clay are distributed in the micro pores and ultra-micro pores. Besides, fractal characteristics exist in the pore volume and area.

Key words: artificial freeze-thaw soft clay; thawing characteristic; microstructure of soil; mercury intrusion porosimetry; fractal theory

0 引言

软土地区城市地铁建设越来越多采用人工冻结法, 由此带来工后融沉控制成为亟待解决的关键问题。软土冻融前后微观结构变化是宏观融沉的根本原因, 因此研究土体冻融后的微观孔隙结构及分布, 并与冻融前土体进行比较分析, 从微观角度揭示人工冻土微观结构与融沉特性的内在机理, 可对融沉控制技术研究提供理论依据。

目前, 土体微细观结构研究试验手段主要有压汞法、气体吸附法、X 射线能量色散谱分析、计算机断层扫描(CT)、扫描电镜(SEM)等, 压汞法以其测

量范围宽、测量结果具有良好重复性等优点, 得到广泛应用, 越来越多的被用来定量描述土体微观结构形态。吕海波等^[1]采用压汞法对天然结构性软土压缩过程孔隙大小分布演化进行试验研究, 提出了孔隙结构破损势的概念, 并用其表征孔隙分布随荷载变化的规律; 张瑛等^[2]通过压汞试验, 揭示了冻融循环对土体强度影响的微观机制; 其他研究者^[3-8]分别通过压汞试

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478226); 江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX15_0932)

收稿日期: 2015-10-07

*通讯作者

验等微观试验手段,研究了不同压缩、固结及动荷载条件下土样孔隙变化的规律,将土体微观孔隙特性及其变化与压缩变形和渗流固结等工程性质相联系。

自Tyler等^[9]在土体结构研究中引入分形理论,众多学者在岩土介质颗粒数量分布、质量分布、体积分布、颗粒表面积及颗粒轮廓线等方面分别进行了大量的分形研究^[10-13],在非冻融土微观结构研究方面已取得了丰富的成果。

而冻土微观结构的研究主要集中在扰动的多年及季节性冻土土体压缩变形^[14]、剪切损伤^[15]、冻融循环作用下土体性质改变^[16-18]等,结合压汞试验、SEM图像处理、CT扫描技术等开展了不少定性研究^[19-21],由于微观参量较多,很难建立基于微观结构参数的宏观定量表达式来反应实际工程问题。而扰动土本身结构已发生变化,其微观颗粒状态、颗粒间接触状态、孔隙特征等不能完全反应原状土体的结构特征,关于原状人工冻融土微观机理方面研究较少。唐益群等^[22]以上海原状和冻融后的暗绿色粉质黏土为研究对象,结合该土体冻结前后的微结构电镜扫描图片,对比分析了土体冻融后动力特性变化的微观机理。洪军等^[23]以上海第四层淤泥质黏土为研究对象,研究了土体冻结温度对孔径、孔隙形状、定向性、面孔隙度和面孔隙比变化的影响。

综上所述,岩土微观结构研究已取得较多成果,而原状人工冻融土融沉特性微观机理研究较少,特别是针对原状软土、融土、压缩原状土、压缩融土4种不同状态的孔隙分布及变化规律尚缺乏系统研究,因此通过压汞试验,基于分形几何理论定量与定性结合,研究其孔隙特征及其融沉微观机理十分必要。

1 试验内容与方法

试验所用土样取自宁波地铁3号线勘察2标段,为饱和软黏土,土层编号④2,呈灰青色软塑状,试验用土基本指标:埋深25.5~26.0 m,密度为1.82 g/cm³,含水率为39.23%,比重为2.68,液限为44%,塑限为21%。开展冻胀融沉试验、压缩试验、压汞试验,每个试验均做3组平行试验。

1.1 冻融试验

冻融试验在自行研制的冻胀融沉试验仪上进行,采用单次冻融以模拟人工地层冻结法,试验装置原理如图1所示。

试验主要步骤为:①用削土器将原状土样削成直径 $\phi=79.8$ mm,高度 $h=50$ mm圆柱体;②将盛有试样的试样盒放入恒温箱内,试样周侧包裹保温层,连接顶底板冷液循环管路,安装位移传感器,调节恒温箱

温度和顶、底板温度均为1℃,试样恒温6 h,并监测温度和变形;③待试样初始温度均匀达到1℃,开启补水管路,调节供水装置水位,然后开始试验;④底板温度调节到-10℃,让试样从底面往上开始冻结,保持恒温箱和顶板温度均为1℃,记录初始水位,实时记录水位、温度和变形量,直至2 h内试样高度变化值小于0.02 mm结束冻胀试验;⑤冻胀试验结束后关闭上下制冷板冷浴和补水装置,调节环境箱温度至20℃,以模拟冻结土体在自然环境下融化,实时记录温度和变形量;⑥直至2 h内试样高度变化值小于0.05 mm结束试验,拆卸仪器各部件,取出试样,进行后续试验。

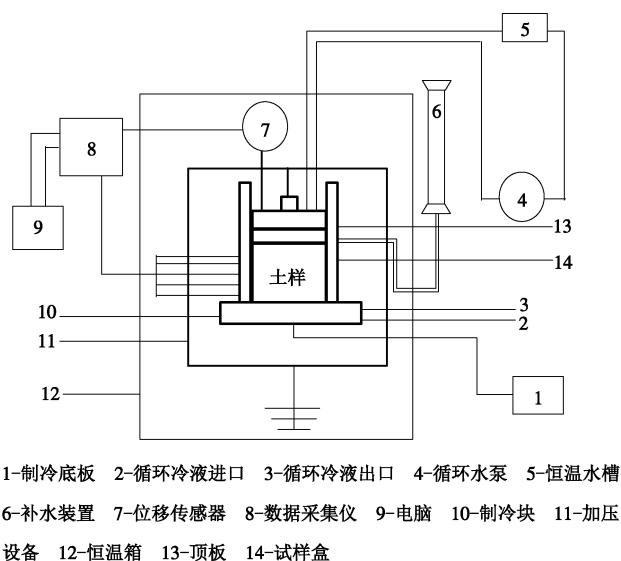


图1 冻胀融沉试验仪原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of freeze-thaw test instrument

1.2 压缩试验

研究原状土和融土的压缩性,压缩最终荷载根据埋深取600 kPa。试验依据GB/T50123—1999《土工试验方法标准》进行。

1.3 压汞试验

压汞试验在Auto-pore9500型压汞仪上进行,孔径测量范围5~360000 nm。采用对土样微观结构影响比较小的液氮冷冻真空冻干法进行试样制备。将4种不同试验条件(原状土、融土、压缩原状土、压缩融土)下制备好的试样分别浸入汞中,通过对汞施加压力使汞逐渐压入试样孔隙内。孔径与汞浸入孔隙所需压力存在对应关系^[24],即

$$p = -2\sigma \cos \alpha / r \quad (1)$$

式中, p 为施加的外部压力(psia), σ 为汞的表面张力系数(N/m),取0.484 N/m, α 为汞对土体的浸润角(°),取130°, r 为圆柱状孔隙的半径(m)。

2 试验结果与分析

2.1 冻融特性研究

通过冻融试验可得软黏土的冻融特性见表 1。

表 1 软黏土冻融特性

Table 1 Freeze-thaw characteristics of soft clay					
冻胀率 /%	融沉系数 /%	密度/(g·cm ⁻³)		含水率/%	
		原状土	融土	原状土	融土
16.54	12.91	1.82	1.76	39.23	47.57

表中可见，土样冻胀率为 16.54%，融沉系数为 12.91%。冻融后黏土的含水率比原状土增大 (21.26%)，密度比原状土减小 (3.30%)。这与文献[25]结论一致。

2.2 压缩特性研究

软黏土的 $e-p$ 曲线可分为孔隙比快速下降和孔隙比缓慢下降两个阶段 (见图 2)。荷载较小时加压主要破坏土样自身结构，冻融作用使土体中原有骨架结构发生破坏并重组形成新的结构。原状软黏土孔隙比 1.08，压缩原状土孔隙比 0.71，融土孔隙比 1.28，压缩融土孔隙比 0.75。原状软黏土压缩系数为 0.762 MPa^{-1} ，融土压缩系数 0.860 MPa^{-1} 。冻融作用扰动了软黏土的结构性，使其压缩性增大。

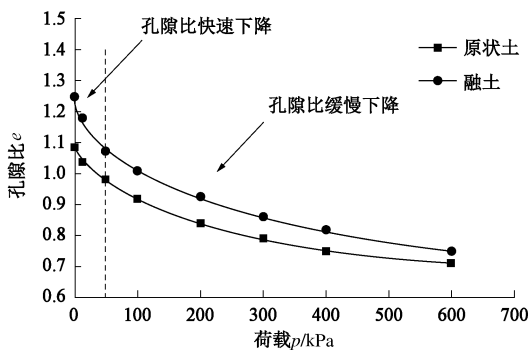


图 2 软黏土 $e-p$ 曲线

Fig. 2 $e-p$ curves of soft clay

2.3 压汞试验结果分析

根据 shear^[26]的孔径划分理论，结合宁波地区软土微观结构孔径特性将该地区软土孔径划分为 5 类，见表 2。

表 2 孔隙类型划分

Table 2 Classification of pore types		
孔隙类型	孔径范围/ μm	孔隙类型
大孔	$d>20$	团粒间孔隙与部分团粒内孔隙
中孔	$10<d<20$	团粒内孔隙
小孔	$2<d<10$	团粒内孔隙和部分颗粒间孔隙
微孔	$0.1<d<2$	颗粒间孔隙
超微孔	$d<0.1$	颗粒内孔隙

(1) 冻融及压缩前后软黏土压汞特性

4 种状态下软黏土累计进汞曲线可分为进汞曲线和退汞曲线两部分 (如图 3)，可以看出：

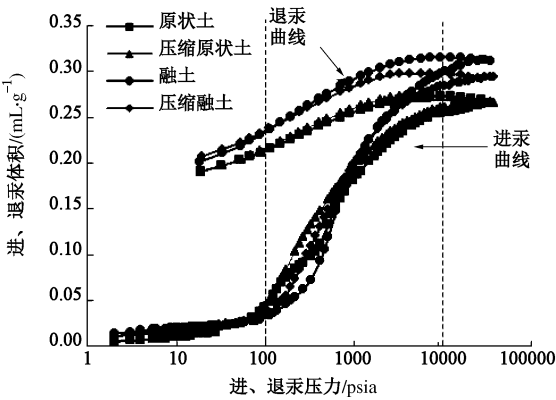


图 3 软黏土累计进汞量 - 汞压力曲线

Fig. 3 Cumulative mercury amount - mercury pressure curves of soft clay

a) 软黏土的进汞曲线都分为 3 个阶段：第一阶段压力小于 100 psia (1 psia=6.896 kPa)，第二阶段压力介于 100~10000 psia 之间，第三阶段压力大于 10000 psia 直至设定压力值。曲线整体表现出第一阶段汞压力较小，进汞量缓慢增长；第二阶段进汞压力不断增大，累计进汞量迅速增长；第三阶段汞压力继续增长至设定值，但此阶段累计进汞量增长趋于平缓。

b) 软黏土的退汞曲线较平滑，随着退汞压力减小，退汞曲线对应的体积值比进汞曲线对应的体积值要大，进汞曲线和退汞曲线不闭合，且压汞试验后土样质量增大，说明退汞后仍有一部分汞残留在土孔隙中，残留量与土样的孔隙特性有关，这与文献[27]结论一致^[27]。产生退汞滞留现象 (即一部分汞永久性地残留在土孔隙中) 的原因为：土体孔隙结构可概化为由窄通道或“细颈”、宽通道、空腔等孔隙交叉联结而形成的三维孔隙系统。由此退汞时的路径异于进汞，是与不同孔径组相联系的，造成退汞时连续的汞线条出现断裂，在许多空腔中截留下汞小球。

c) 软黏土在不同状态下其累计进汞量-汞压力曲线基本一致，融土与压缩融土的进汞量大于原状土与原状压缩土。进汞曲线各阶段过渡较平缓，无明显的转折点，各阶段曲线增长速率基本一致。

根据压汞试验所得汞压入体积与压力的关系，利用式 (1) 可转换为孔隙体积、面积与孔径的分布曲线。

(2) 累计孔体积与孔表面积分布规律

软黏土的累计孔体积、孔表面积和孔径关系如图 4、5 所示。可以看出：

a) 软黏土原状土、压缩原状土、压缩融土的孔体积主要分布于孔径小于 6000 nm 的孔径中，而融土主要分布于孔径小于 2000 nm 的孔径中。软黏土的孔表

面积均主要分布于孔径小于 1000 nm 的孔隙中。分析可知, 软黏土在冻结过程中随着冻结锋面的发展和冰透镜体的形成, 破坏了软黏土本身的孔隙结构和土颗粒之间的联结, 而冻结力作用下土体会萌生细微裂隙和微孔隙, 此外冻结土体融化过程会有部分孔隙闭合, 或某些孔隙间的连通道封闭, 即表现出超微孔的比例增大。

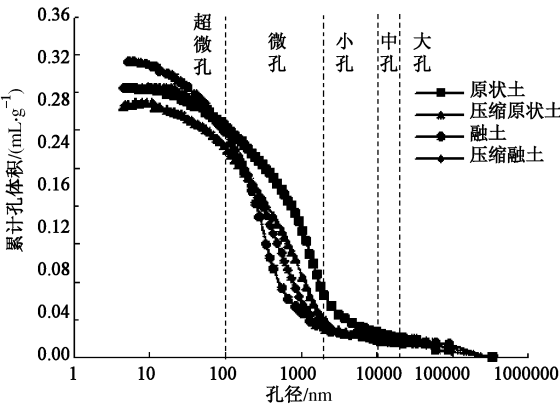


图 4 软黏土累计孔体积 - 孔径曲线

Fig. 4 Cumulative pore volume-aperture curves of soft clay

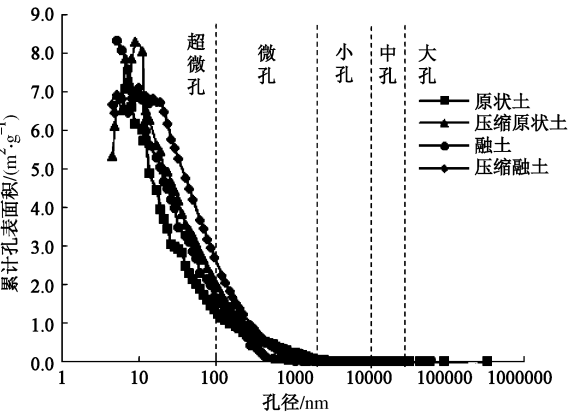


图 5 软黏土累计孔表面积 - 孔径曲线

Fig. 5 Cumulative pore area-aperture curves of soft clay

b) 压缩作用形成的微裂隙导致某些孔隙间连通, 表现为超微孔和微孔范围内, 融土压缩后的累计孔体积和孔表面积大于原状融土。

(3) 冻融软黏土孔隙分布特性分析

不同状态下软黏土的总孔体积和总孔表面积见表 3。软黏土融后孔体积和孔表面积均增加, 冻融使软黏土孔隙比变大。软黏土融土比原状土孔体积增加了 9.99%, 孔表面积增加了 15.62%。原状土和融土压缩后孔体积分别减小了 7.33%和 10.11%, 孔表面积分别减小 32.43%和 22.47%。

软黏土各类孔隙的孔体积分布见图 6, 可知:

a) 不同状态下软黏土的孔体积均主要分布于超微孔和微孔中, 微孔和超微孔的孔体积均占 75%以上,

其余类型的孔隙分布约 10%~25%不等。微孔比例大于超微孔的比例, 超微孔比例均在 20%左右, 而微孔比例在 65%左右, 是超微孔体积的 3 倍。

表 3 软黏土总孔体积和总孔表面积

Table 3 Total pore volumes and areas of soft clay		
试样状态	总孔体积/(mL·g ⁻¹)	总孔表面积/(m ² ·g ⁻¹)
原状土	0.2841	7.0484
压缩原状土	0.2647	5.3223
融土	0.3125	8.1481
压缩融土	0.2838	6.6531

b) 融土较原状土各范围孔径内的孔体积均增大。原状土超微孔和微孔的孔体积为 76%, 而融土为 85%。说明冻融作用使软黏土中孔以上的孔隙向微孔和超微孔进行了转化, 使孔径变的更小; 使部分团粒内的孔隙向颗粒间和颗粒内的孔隙进行转化。

c) 原状软黏土和融土压缩后微孔和超微孔的孔体积比例均增大, 而小孔的比例减少, 究其原因为: 压缩使部分小孔湮灭或分裂成微孔和超微孔, 以及压缩过程萌生的微裂纹和微孔隙促使微孔和超微孔孔体积的相对比例增大。

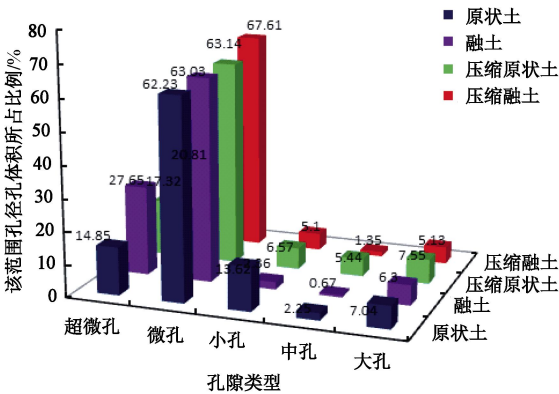


图 6 软黏土孔体积分布

Fig. 6 Distribution of pore volume of soft clay

软黏土各类孔隙中的孔表面积分布见图 7, 可知:

a) 软黏土各状态下的孔表面积主要分布在超微孔和微孔中, 均占到 99%。相比于微孔, 超微孔的面积分布比例更大。

b) 原状土和压缩原状土在超微孔范围内的孔表面积占 80%左右, 而融土和压缩融土在 70%左右, 冻融使超微孔孔表面积减少, 变成了微孔以上的孔隙。其原因可能是“墨水瓶”型孔隙的存在或其特殊的空间孔隙网格系统造成的^[16]。

3 冻融软黏土孔隙分形特性分析

3.1 容量维数及分形维数计算

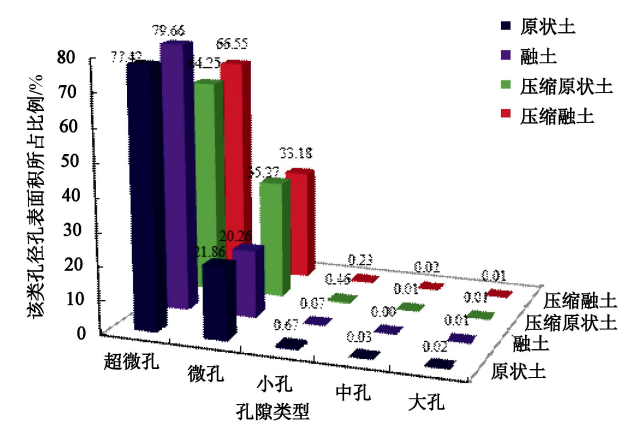


图 7 软黏土孔表面积分布

Fig. 7 Distribution of pore area of soft clay

分形特征通常用分形维数表示, 通过分形维数 D 来定量刻画不同分形图形的复杂度及不规则度, D 越大, 细节越丰富。

为解决存在大量统计意义下自相似体的维数计算, 基于分形几何学中常用的 Hausdorff 维数定义容量维数: 计算相似比时可以用任意维数的边长为 r 的立方体 (或球体) 去填充 (或覆盖) 被测对象, 统计覆盖其所需的立方体或球体数目 $N(r)$ 来计算其维数。用此方法计算出的分形维数称为容量维数, 记为 D_c 。对于 D_c 的物体, 有

$$N(r) \propto (1/r)^{D_c} \rightarrow \lim_{r \rightarrow 0} N(r) = (1/r)^{D_c}, \quad (2)$$

两边取对数即得到容量维数的计算方法为

$$D_c = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r} \quad (3)$$

孔体积分布和孔表面积分布分维采用容量维数方法计算, 计算时以 $\ln d$ (d 为粒径或孔径) 为横坐标, 大于孔径的孔体积对数 $\ln V(d)$ 或孔表面积对数 $\ln A(d)$ 为纵坐标, 如果曲线存在线性段, 则说明孔体积分布和孔表面积分布具有分形特征, 取稳定的直线段斜率负值作为孔体积分布和孔表面积分布分维值。孔隙的孔径和孔体积及孔表面积都可由压汞试验直接获得。

孔体积分布和孔表面积分布分维的几何含义: 分维数越大, 表明孔体积的分布越不均匀, 孔隙直径越小的孔隙孔体积 (孔表面积) 越大。综合考虑软黏土孔体积、孔表面积的孔径分布范围和特定粒径范围内的线性相关程度, 确定自相似区间。最终确定软黏土孔体积分布分形特性研究孔径范围为 $0.4 \sim 3.5 \mu\text{m}$, 孔表面积分布分形特性研究孔径范围为 $0.01 \sim 0.25 \mu\text{m}$ 。

3.2 孔体积分布分形特征

根据式 (3) 给出的分维算法, 绘制软黏土 $\ln V(d) - \ln(d)$ 散点图, 这里 d 为孔径, $V(d)$ 为相应大于该孔径的孔体积。图 8 为黏土各状态下孔体积分维散

点图, 可以看出各试样 $\ln V(d) - \ln(d)$ 曲线均具有较好的线性关系, 且区间范围较大, 孔体积分布具有明显的分形特征。分形维数越大, 表明孔体积的分布越不均匀, 孔隙直径越小的孔隙孔体积越多。

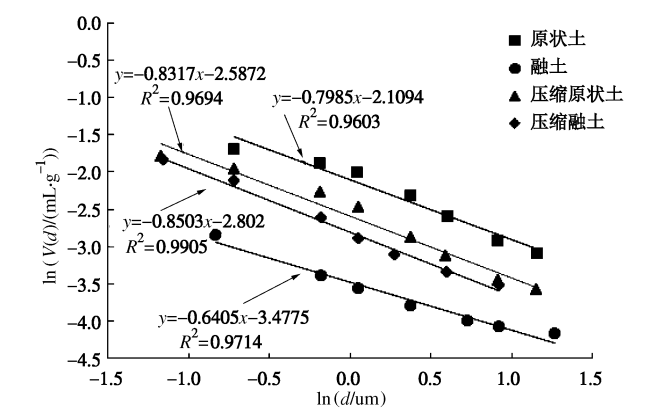


图 8 软黏土孔体积分布分维回归曲线

Fig. 8 Fractal dimension regression curves for distribution of pore volume of soft clay

由图 8 可计算出各状态下的分形维数, 从表 4 可以看出:

表 4 软黏土孔隙体积分维

Table 4 Fractal dimension for distribution of pore volume of soft clay

土样状态	该孔径范围内孔体积比例/%	分形维数	相关系数 R^2
原状土	62.23	0.7985	0.9603
压缩原状土	68.14	0.8317	0.9694
融土	63.03	0.6405	0.9714
压缩融土	67.61	0.8503	0.9905

(1) 软黏土融后孔体积分布分维减小了 19.79%, 孔体积分布分形维数融土小于原状土, 说明冻融作用使软黏土在该孔径范围内的孔隙体积分布呈均匀化趋势。

(2) 压缩使原状土和融土的孔体积分布分维分别增大了 4.51% 和 32.81%, 压缩后孔体积分布分形维数增大, 说明压缩作用使软黏土孔体积在其各孔径范围内分布不均匀化, 尤其是融土压缩后孔径范围更加趋于不均匀化。

(3) 孔体积分布分维和该范围内孔体积所占比例近似正相关, 该范围内孔体积所占比例越大, 孔体积分布分维越大。

3.3 孔表面积分布分形特征

图 9 为黏土各状态下孔表面积分维散点图, 可以看出各试样 $\ln A(d) - \ln(d)$ 曲线均具有较好的线性关系, 孔表面积分布具有明显的分形特征。分形维数越大, 表明孔表面积的分布越不均匀, 即孔隙直径越

小的孔隙孔表面积越多。

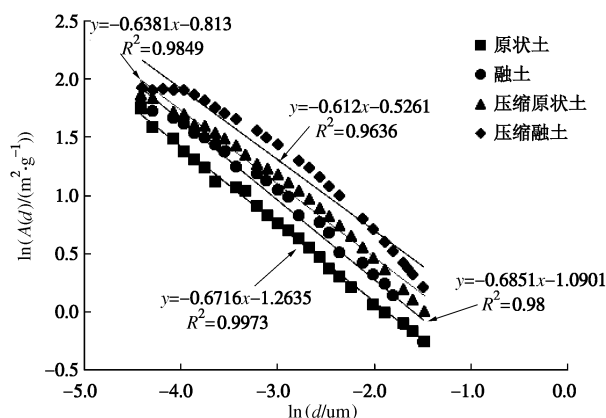


图 9 软黏土孔表面积分布分维回归曲线

Fig. 9 Fractal dimension regression curves for distribution of pore area of soft clay

各状态下软黏土孔表面积分维在数值上没有显著变化,但有一定的规律性,融后孔表面积分布分维增大,原状土和融土压缩后孔表面积分维有所减小。表 5 给出了软黏土孔表面积分布分维的具体数值。

表 5 软黏土孔表面积分布分维

Table 5 Fractal dimension for distribution of pore area of soft clay

土样状态	该孔径范围内孔 表面积比例/%	分形维数	相关系数 R^2
原状土	69.63	0.6716	0.9973
压缩原状土	72.52	0.6381	0.9849
融土	61.80	0.6851	0.9800
压缩融土	60.24	0.6120	0.9636

由表 5 可以看出:

(1) 软黏土孔表面积分布分维其融土比原状土增大 2.08%,孔表面积分布分形维数融土大于原状土,说明冻融作用使软黏土在该孔径范围内的孔隙面积分布呈不均匀化趋势。

(2) 压缩使原状土和融土的孔表面积分布分维减小,分别减小 4.90%和 10.66%。压缩后孔表面积分布分形维数减小,说明压缩作用使软黏土孔表面积在各孔径范围内分布均匀化,尤其是融土压缩后孔径范围更加趋于均匀化。

(3) 孔表面积分布分维和该范围内孔表面积所占比例近似正相关,该范围内孔表面积所占比例越大,孔表面积分布分维越大。

土体颗粒间孔隙的存在及各种孔隙之间的转变是引起宏观土体融沉的主要因素。上述分析表明土粒间特定尺度范围的孔隙具有分形特性,可得出土体的融沉亦表现出分形特性。孔隙的不同分形维数变化,可从不同角度反映土体的融沉特性。在实际工程中,若能根据合适的分形维数来实现土体的融沉预测,将为

人工冻融土融沉预测及控制提供新的途径,具有显著的工程意义。

4 结 论

以宁波地区典型软黏土为研究对象,采用冻融、压缩和压汞试验方法,对软黏土原状土、融土、压缩原状土、压缩融土的微观孔隙分布及变化进行了研究,得到如下主要结论:

(1) 软黏土开放系统条件下的冻胀率为 16.54%,融沉系数为 12.91%,属于强冻融土。软黏土冻融后密度减小,含水率增大,孔隙比增大。冻融扰动了其结构性,软黏土融后压缩性增大。

(2) 软黏土冻融前后及压缩前后进汞曲线均分为 3 个阶段,退汞曲线存在明显滞留现象。软黏土融后孔体积和孔表面积均增大;原状土和融土压缩后孔体积和孔表面积均减小。

(3) 软黏土的孔体积主要分布于微孔和超微孔中,约占总体积的 75%以上,孔体积微孔所占比例约是超微孔的 3 倍。孔表面积亦主要分布于微孔和超微孔中,约占总孔表面积的 99%,孔表面积超微孔所占比例约为微孔的 4 倍。

(4) 软黏土孔体积和孔表面积分布存在统计意义上的自相似性,分别在 0.4~3.5 um 和 0.01~0.25 um 孔径范围内具有明显的分形特征,利用分形分维参数为软黏土冻融及压缩前后的微结构变化进行量化处理是可行的,可为揭示软黏土融沉特性的内在机理提供新的途径。

参考文献:

[1] 吕海波, 汪 稔, 赵艳林, 等. 软土结构性破损的孔径分布试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 573 - 578. (LÜ Hai-bo, WANG Ren, ZHAO Yan-lin, et al. Study of structure characteristics evolution of soft clay by pore size distribution test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 573 - 578. (in Chinese))

[2] 张 英, 邴 慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3597 - 3603. (ZHANG Ying, BING Hui, YANG Cheng-song. Influences of freeze-thaw cycles on mechanical porperties of silty clay based on SEM and MIP test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3597 - 3603. (in Chinese))

[3] 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 Ru, HU Rui-lin, MAO Lin-tao. Fractal study on the

- microstructure variation of soft soils in consolidation process[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, **39**(10): 87 - 91. (in Chinese))
- [4] 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定量化研究[J]. 土木工程学报, 2009, **42**(8): 98 - 103. (TANG Yi-qun, ZHAO Shu-kai, Yang Ping, et al. Analysis of the microscopic behavior of saturated soft clays under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, **42**(8): 98 - 103. (in Chinese))
- [5] 周 晖, 房营光, 曾 钺. 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**(增刊 1): 138 - 144. (ZHOU Hui, FANG Ying-guang, ZENG Cheng. Experimental analysis of micro pore change of Guangzhou saturated soft soil in consolidation process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 138 - 144. (in Chinese))
- [6] 姜 岩, 雷华阳, 郑 刚, 等. 动荷载作用下结构性软土微结构变化的分形研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3075 - 3080. (JIANG Yan, LEI Hua-yang, ZHENG Gang, et al. Fractal study of microstructure variation of structured clays under dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3075 - 3080. (in Chinese))
- [7] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1427 - 1430. (TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Research on effect of compaction on pore size distribution of laterite soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1427 - 1430. (in Chinese))
- [8] 徐日庆, 邓玮文, 徐 波, 等. 基于 SEM 图像信息的软土三维孔隙率定量分析[J]. 地球科学与环境学报, 2015, **37**(3): 104 - 110. (XU Ri-qing, DENG Yi-wen, XU Bo, et al. Quantitative analysis of soft clay three-dimensional porosity based on SEM image information[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, **37**(3): 104 - 110. (in Chinese))
- [9] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, **56**(2): 362 - 369.
- [10] 许 勇, 张季超, 李伍平. 饱和软土微结构分形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊 1): 49 - 52. (XU Yong, ZHANG Ji-chao, LI Wu-ping. Research on microstructure fractal features of the saturation soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 49 - 52. (in Chinese))
- [11] 王宝军, 施 斌, 刘志彬, 等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 244 - 247. (WANG Bao-jun, SHI Bin, LIU Zhi-bin, et al. Fractal study on microstructure of clayey soil by GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 244 - 247. (in Chinese))
- [12] 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): 1061 - 1067. (ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming, LI Jun-xia, et al. Variation characteristics of soft clay micropore in the creep condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1061 - 1067. (in Chinese))
- [13] 尹振宇. 土体微观力学解析模型: 进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 993 - 1009. (YIN Zhen-yu. Micromechanics-based analytical model for soils: review and development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 993 - 1009. (in Chinese))
- [14] 李国玉, 马 巍, 穆彦虎, 等. 季节冻土区压实黄土湿陷特性研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(4): 934 - 943. (LI Guo-yu, MA Wei, MU Yan-hu, et al. Progress and prospects of the research on collapsibility of compacted loess in seasonally frozen ground regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, **36**(4): 934 - 943. (in Chinese))
- [15] LAI Y, LI J, LI Q. Study on damage statistical constitutive model and stochastic simulation for warm ice-rich frozen silt[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, **71**(2): 102 - 110.
- [16] GHAZAVI M, ROUSTAIE M. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, **61**(2/3): 125 - 131.
- [17] 王天亮, 卜建清, 王 扬, 等. 多次冻融条件下土体的融沉性质研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(4): 625 - 632. (WANG Tian-liang, BU Jian-qing, WANG Yang, et al. Thaw subsidence properties of soils under repeated freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 625 - 632. (in Chinese))
- [18] 穆彦虎, 马 巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1919 - 1925. (MU Yan-hu, MA Wei, LI Guo-yu, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1919 - 1925. (in Chinese))
- [19] TORRANCE J K, ELLIOT T, MARTIN R, et al. X-ray computed tomography of frozen soil[J]. Cold Regions

- Science and Technology, 2008, **53**(1): 75 - 82.
- [20] 郑剑锋, 马巍, 赵淑萍, 等. 三轴压缩条件下基于CT实时监测的冻结兰州黄土细观损伤变化研究[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(4): 839 - 845. (ZHENG Jian-feng, MA Wei, ZHAO Shu-ping, et al. Study of meso-damage changes of frozen Lanzhou loess under triaxial compression based on CT real-time monitoring[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(4): 839 - 845. (in Chinese)).
- [21] 陈世杰, 赵淑萍, 马巍, 等. 利用CT扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(1): 193 - 200. (CHEN Shi-jie, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Studying frozen soil with CT technology: present studies and prospects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(1): 193 - 200. (in Chinese)).
- [22] 唐益群, 沈峰, 胡向东, 等. 上海地区冻融后暗绿色粉质黏土动本构关系与微结构研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1249 - 1252. (TANG Yi-qun, SHEN Feng, HU Xiang-dong, et al. Study on dynamic constitutive relation and microstructure of melted dark green silty soil in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1249 - 1252. (in Chinese)).
- [23] 洪军. 人工冻结条件下上海饱和软黏土的力学特性试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (HONG Jun. The mechanical properties tests of saturated silty soft clay in Shanghai under artificial freezing method[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)).
- [24] WASHBURN E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1921, **7**: 115 - 116.
- [25] 杨平, 张婷. 人工冻融土物理力学性能研究[J]. 冰川冻土, 2002, **4**(5): 665 - 667. (YANG Ping, ZHANG Ting. The physical and the mechanical properties of original and frozen-thawed soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **4**(5): 665 - 667. (in Chinese)).
- [26] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay[R]. Washington D C: Transportation research record, NRC National academy press. 1993: 1365 - 1370.
- [27] 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, **34**(增刊 2): 134 - 142. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei. Study of pore characteristics of offshore clay by SEM and MIP and NA methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 134 - 142. (in Chinese)).

2016年城市岩土工程西湖论坛（第2号通知）

随着中国新型城镇化的推进, 城市地下工程快速发展, 呈现出巨大的社会需求, 对地下空间资源的开发利用及城市安全也提出了更高的要求。针对城市岩土工程中重大国家需求, 举办本次“2016年城市岩土工程西湖论坛”。

主办单位: 中国工程院土木、水利与建筑工程学部中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心

协办单位: 泰昌建设有限公司; 浙江开天工程技术有限公司; 中淳高科桩业股份有限公司(浙东建材) 中铁四局集团城市轨道交通分公司; 解放军理工大学; 等。

会议宗旨: 会议将就近年来城市岩土工程的热点与重点问题, 邀请著名专家、学者及相关企事业单位领导进行深入探讨, 寻找解决有关问题的思路和方法。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者、工程技术人员和研究生踊跃参加。

会议主题: ①城市地下综合体、城市地下管廊、城市地下交通和城市地质灾害防治; ②专题研讨会: 岩土本构理论前沿问题。

会议时间: 2016年10月10~11号(9日报到)。

联系方式: 王笑笑13646828087, wangxiuxiu713@163.com; 陆水琴15967126989, lusq87@163.com。

(大会组委会 供稿)