

融化压缩下水泥改良冻土的微观孔隙特征演变

尹振华, 张建明, 张 虎, 王宏磊

Microcosmic pore characteristics evolution of the cement improved frozen soil after thawing compression

YIN Zhenhua, ZHANG Jianming, ZHANG Hu, and WANG Honglei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响

Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil

陈鑫, 张泽, 李东庆 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 74-82

单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression

耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134-141

高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究

Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil

邢皓枫, 张好, 李浩铭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 102-109

无黏性土的压缩特性及模型

Compression characteristics and models of cohesionless soil

马露 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 72-77

典型地貌区原状黄土孔隙细观特征研究

Research on pore microscopic characteristics of undisturbed loess in typical geomorphologies

刘钊钊, 钟秀梅, 张洪伟, 高中南, 梁收运, 王谦 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 148-148

上海黏土压缩回弹变形的微观机理

Micro-mechanism of compression and rebound of clay in Shanghai

顾迪, 严学新, 张云, 白杨, 杨天亮 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 123-131



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007037

融化压缩下水泥改良冻土的微观孔隙特征演变

尹振华^{1,2}, 张建明¹, 张 虎¹, 王宏磊^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水泥改良冻土在融化压缩下的微观孔隙演变特征研究, 对了解水泥改良冻土的过程具有重要意义。将水泥改良后的冻土进行融化压缩实验, 通过冷冻干燥法对试验后的土样进行电镜样品制取并获取其微观特征图像。对试验土样进行比重测试, 得到土样真实的三维孔隙比。最后以真实孔隙比作参考, 确定图像分割所选取的灰度值并提取其孔隙特征。结合融化压缩试验结果, 对水泥改良冻土的孔隙数量、面积、定向角及丰度值随改良土压缩量的变化关系进行了分析。研究表明: 经过水泥改良后的冻土, 大孔隙结构强度增大明显; 随着水泥掺量及养护龄期的增加, 孔隙比与孔隙面积变大, 压缩量变小; 随着土体压缩量的增大, 孔隙的定向角分布逐渐由均匀状向锯齿状发展; 土样压缩过程中, 丰度值大于 0.5 的孔隙发生压缩明显, 孔隙逐渐趋于细长状, 并且随着压缩量的增大, 孔隙丰度值的分布越来越趋于正态分布。孔隙微观结构演变研究为阐释水泥改良冻土宏观力学特性增强的机制提供了科学依据。

关键词: 水泥改良冻土; 融化压缩; 微观孔隙特征; 定向角; 丰度值

中图分类号: TU411.92

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0097-09

Microcosmic pore characteristics evolution of the cement improved frozen soil after thawing compression

YIN Zhenhua^{1,2}, ZHANG Jianming¹, ZHANG Hu¹, WANG Honglei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The research on microcosmic characteristics evolution of the cement improved frozen soil under thawing compression is of great significance to understand the process of the improvement. In this study, Thawing compression test is conducted with the cement treated frozen soil. The specimens of SEM are prepared with the method of freezing- drying and the microscopic characteristic images are obtained. The real three-dimensional pore ratio is obtained by the specific gravity test. The gray value is selected for image segmentation as the reference of the real pore ratio and the microscopic pore characteristic is extracted. Based on the results of the compression test, the pore characteristics, such as the diameter, quantity, area, directional angle and abundance, are quantitatively analyzed. The results show that the strength of macropore structures is enhanced when the frozen soil is improved by cement, causing an increasing pore ratio and pore area, and a decreasing compression. With the development of the compression, the orientation angle distribution of the pores transfers from the originally uniform style to the serrated style. The pores tend to be elongated with the compaction of the pores with the abundance value greater than 0.5 while the whole pore abundances tend gradually to be normal distribution. The

收稿日期: 2020-07-16; 修订日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471062; 41971085)

第一作者: 尹振华(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事冻土改良研究。E-mail: yinz@lzb.ac.cn

通讯作者: 张虎(1986-), 男, 副研究员, 主要从事冻土物理力学性质研究。E-mail: zhanghu@lzb.ac.cn

research on microstructure evolution provides a scientific basis for interpreting the mechanism of the enhancement on the macroscopic mechanical properties of the cement improved frozen soil.

Keywords: cement improved frozen soil; thaw compression; microscopic pore characteristics; orientation angle; abundance value

冻土高含冰量、强压缩性、低抗剪强度,不能直接用作土工材料^[1-3]。但经过水泥改良后的冻土,可以成为满足工程应用的优质土方材料^[4-7]。水泥改良冻土的过程,宏观上表现为强度增高,抵抗压缩性增强等力学参数的提升,实际上是微观结构发生了变化^[8-9]。宏观力学性质是其微观结构的具体表现,而微观结构则在很大程度上控制着土体的工程性状^[10-11]。因此研究水泥改良冻土在融化压缩下微观孔隙特征的演变,对了解水泥改良冻土的过程具有重要意义

土体的微观结构主要是指颗粒及孔隙的大小、形状、表面特征及定量的比例关系^[12]。其中孔隙的变化是结构发生变形的重要体现^[13]。目前对于水泥土微观孔隙研究的方法主要有光学显微镜、电子显微镜及压汞法^[14-18]。其中扫描电子显微镜(SEM)和光学显微镜是目前研究土体微观孔隙特征最简便有效的手段^[19]。通过 SEM 得到的图像结果可以直观地对土样表面孔隙特征进行定性分析^[20]。随着图像处理技术的发展,土样孔隙的形态、排列及分布等结构要素及变化规律可以进行提取和量化,从而可以更加准确地对土体的微观孔隙结构进行分析^[21]。基于不同的图像处理方法及微观孔隙信息提取技术,众多学者对固结条件下黏土的孔隙大小、形态及数量的演变规律进行了深入研究^[22-24]。以上研究多是基于孔隙的二维信息提取来对土体的微结构进行分析,得到的孔隙比不能较为真实地反映实际情况。近些年来,基于灰度值的孔隙三维信息提取技术,使得到的三维孔隙比物理意义明确且更加接近孔隙真实值^[25-26]。但是由于用于 SEM 观察土样的制取规格要求较高,这导致得到的三维信息从一开始就与土样的真实情况存在一定程度的偏差^[27]。

为了真实反映水泥改良冻土在融化固结过程中微观孔隙结构的演化特征,本文通过水泥改良土比重试验得到土样的孔隙比,以土样的真实孔隙比作参考,基于 SEM 图像确定出图像分割的阈值,此时微观信息采集得到的孔隙比与真实的孔隙比相同。然后获取水泥改良冻土在融化固结条件下微观结构参数,从孔隙的数量、形态、分布等方面入手,对水泥改良冻土的孔隙特征进行定量研究,分析水泥改良冻土在

压缩过程中的孔隙特征变化规律,从孔隙变化的角度反映水泥改良冻土的过程。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验土样选取青藏高原北麓河盆地的黏土,将土样烘干后碾碎并过 2 mm 筛,土样的颗粒级配情况如图 1 所示。试验分别选用硫铝酸盐水泥(SAC)和普通硅酸盐水泥(OPC)。水泥标号分别为 C52.5、P.O 42.5。

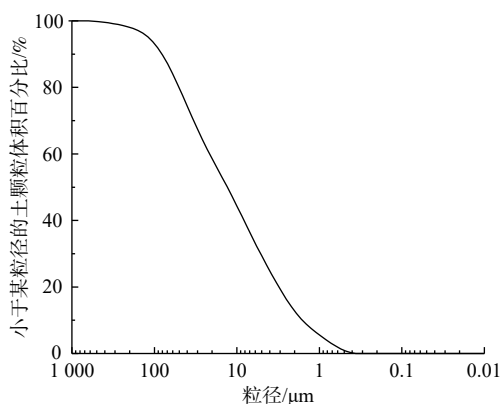


图 1 青藏黏土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of test soil of the Qinghai-Tibet Plateau

1.2 融化压缩试验

1.2.1 试样制备

将过筛土进行预冷,与由去离子水制成的粉碎冰(过 2 mm 筛)充分拌和,制备含冰量为 33% 的冻土,再分别与 3 种水泥进行充分拌和。其中水泥用量分别设置为 5.0%、10.0%、15.0%。同时在拌和过程中加入 1.0% 的抗冻剂(NaNO_2)。把拌和均匀的水泥土分层放入模具并压密,制成直径为 61.8 mm、高为 40.0 mm 的圆柱形土样,干密度控制为 1.25 g/cm^3 。制样过程在温度为 $-10.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右的冷库中完成,避免冻土在制样时发生融化。将制好的试样脱模并用保鲜膜密封,最后放入 $-1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温箱进行养护,分别养护到 3 d 和 28 d 后取出进行融化压缩试验。

1.2.2 试验过程

将养护好的土样两端铺上滤纸和透水石置于固

结仪中, 固结压力设置为 0.2 MPa, 试验温度设置为 2.0 °C, 当变形量在 2 h 内小于 0.05 mm 时停止。分别测量试验土样试验前后的高度, 获取水泥改良冻土的融化压缩量(图 2)。

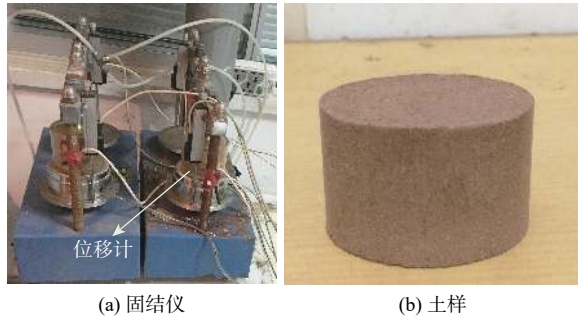


图 2 融化压缩试验用固结仪 (a) 和土样 (b)
 Fig. 2 Consolidometer (a) and soil sample (b) used in the thawing compression test

1.3 比重试验

比重试验用来测得水泥土的比重, 进而得到水泥土的孔隙比。本文使用比重瓶法来进行测试。试验严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) 进行^[28], 对不同水泥、不同掺量及不同养护龄期的水泥改良冻土进行比重试验, 得到水泥改良冻土的比重(表 1)。

表 1 不同水泥土的比重结果

Table 1 Different soil-cement specific gravity results

掺量/%	SAC		OPC	
	3 d	28 d	3 d	28 d
5	2.935	3.016	2.988	3.013
10	2.948	3.027	3.017	3.025
15	2.954	3.034	3.034	3.033

1.4 扫描电镜试验

本次试验采用型号为 JSM-6 510 扫描电子显微镜

采集水泥改良土图像, 获取土样截面的原始信息。试验土样制备采用冻干法, 将融化压缩后的土样放入冻干机中冻干, 将干燥后的土样沿横向截面掰断获取新鲜的断面。将制备好的样品先放入真空溅射镀膜仪进行镀膜处理, 然后移至电子显微镜的样品室中进行观察拍摄。对比不同放大倍数的试样照片, 选取 1 000 倍放大倍数的照片作为土样截面原始信息的照片, 在此放大倍数下, 土样结构包含的信息更加具有代表性^[29]。

1.5 孔隙计算方法及图像处理

在 SEM 图像中, 每个图像均是由多个像素组成。每个像素的长宽均为单位 1, 而每个像素的灰度则表示像素的高。灰度的范围为 0~255, 亮度从深到浅, 表示着图像表面至结构表面的距离从小到大。因此单位像素的体积即可以用此像素的灰度数值来表示。取某一单位灰度值厚度作为观察区域, 在此区域范围内, 可以得到长宽为若干像素、高为 1 个灰度值的一层土样作为研究目标。将该范围内得到的图像进行二值化处理, 即可对此范围内的孔隙和颗粒进行有效的划分, 如图 3 所示。因为此区域高为 1, 因此计算得到的孔隙体积与孔隙面积在数值上是相同的。因此, 可以用此研究区域的二维孔隙特征表征三维孔隙的演化规律。

基于扫描电镜试验得到的电镜照片, 通过对所得到的照片进行图像处理、信息采集, 对 SEM 图像进行定量分析。首先对图像的颜色、轮廓进行调整, 然后对图像进行滤波、降噪处理。在对图像进行上述预处理后, 选择合适的阈值对图像进行二值化处理, 其中黑色和白色分别表示土颗粒(团聚体)和孔隙, 分别对土颗粒和孔隙进行识别。根据以上试验得到土样的比重结果, 计算得出土样的真实孔隙比。然后以真实

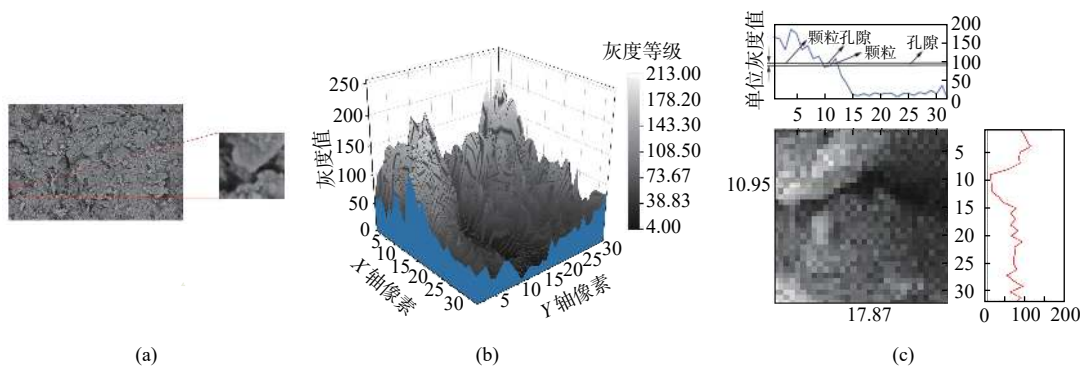


图 3 基于灰度值的孔隙计算原理示意图

Fig. 3 Sketches of computation of soil porosity based on the gray scale

的孔隙比作参考, 确定出阈值划分的灰度值进行二值化处理, 即确定出与真实孔隙比相同的观察区域, 具体过程如图 4 所示。经过二值化分割处理后, 对二值图像数据进行提取分析, 测量颗粒聚集孔隙的大小、

数量、丰度等微观结构参数进行分析。通过以上方法, 不仅仅可以避免由于 SEM 样品质量问题造成的微观图像信息不准确, 还可以更加真实地反映出微观孔隙的演化特征。

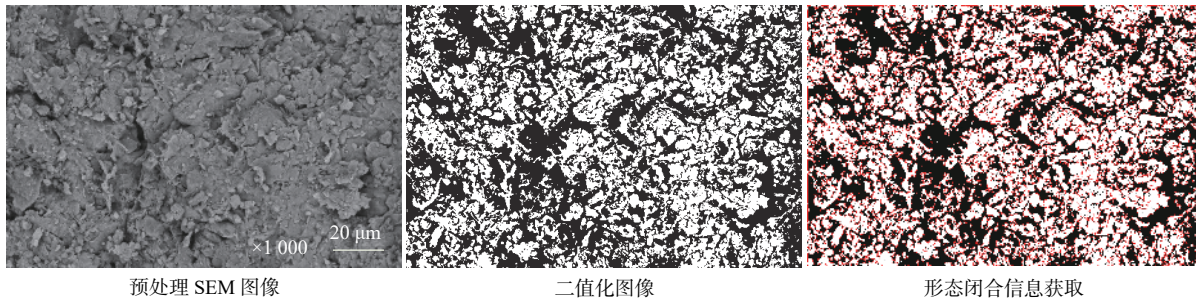


图 4 图像处理过程
Fig. 4 Image processing

2 试验结果与分析

2.1 融化压缩量及孔隙比

孔隙比是根据比重试验确定的, 通过测量土样融化压缩前后的质量和尺寸, 根据水泥土的比重结果, 计算得到融化压缩土样的孔隙比。不同水泥种类、掺量及不同养护龄期下水泥改良冻土的融化压缩量和孔隙比如图 5 所示。由图 5 可以看出, 对于同种水泥改良冻土, 土样的融化压缩量越大, 其孔隙比越小。这是因为土样在融化压缩过程中, 原来由冰晶占据的空间由于冰的融化而形成较多的孔隙。在固结压力的作用下, 土样发生压缩, 土中孔隙不断减小、闭合, 孔隙比减小。相比于 32.5% 未改良冻土的融化压缩量, 水泥改良冻土的融化压缩量均减小。

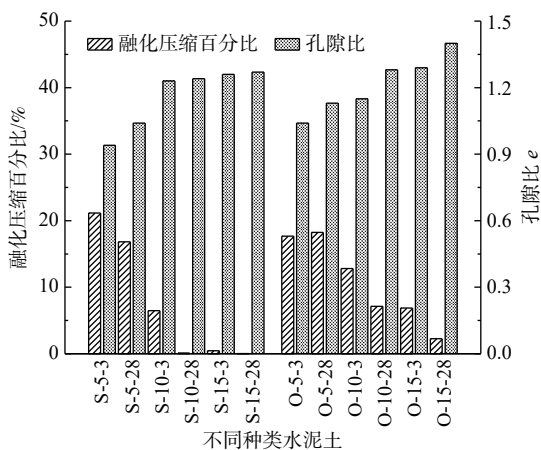


图 5 不同种类、掺量及养护龄期水泥土融化压缩量及孔隙比
Fig. 5 Thawing compression valve and pore ratio of the cement improved frozen soil at different cements, dosages and curing ages

水泥改良冻土的过程, 就是水化反应生成的产物对土体产生加固的过程。加固后的冻土在融化压缩过程中, 可以抵抗固结压力的作用。加固效果越好, 其孔隙发生减小、闭合的数量越少, 宏观上表现出融化压缩量小, 微观层面则表现出孔隙比较大的特征。

2.2 孔隙分布变化

水泥改良冻土的孔隙大小, 可根据雷详义等^[30]定义的不同孔隙直径的标准进行分类, 可将孔隙大小分为微孔隙、小孔隙、中孔隙和大孔隙。其中微孔隙的直径小于 0.1 μm, 小孔隙的直径介于 1 ~ 4 μm 之间, 中孔隙的直径介于 4 ~ 16 μm 之间, 大孔隙的直径大于 16 μm。根据上述孔隙划分原则, 对不同水泥改良冻土融化压缩后的孔隙分布进行统计、分析。

由图 6 可以看出 SAC 改良冻土中微孔隙和小孔隙占据主要的孔隙数量, 中孔隙和大小孔占比很低。而孔隙面积的分布与孔隙数量的分布趋势几乎相反, 大孔隙占据了主要的孔隙面积。微孔隙数量随着水泥掺量和养护龄期的增加而增加, 小孔隙则随着水泥掺量和养护龄期的增加而减小, 而中孔隙和大孔隙数量的变化不显著。孔隙面积则表现出大孔隙面积随着水泥掺量及养护龄期的增加而增加。图 7 为 OPC 改良冻土的孔隙数量及面积分布图, 分布规律基本与 SAC 改良冻土相同。因为 2 种水泥的成分及产物相似, 因此其对冻土改良原理也基本相同^[31]。

结合水泥土融化压缩量及孔隙比的结果可知, 当水泥掺量较小、养护龄期较短时, 水泥加固冻土的效果较差, 融化压缩量较大, 孔隙比较小, 孔隙面积较小。因为大孔隙面积占据了主要的孔隙面积, 因此大

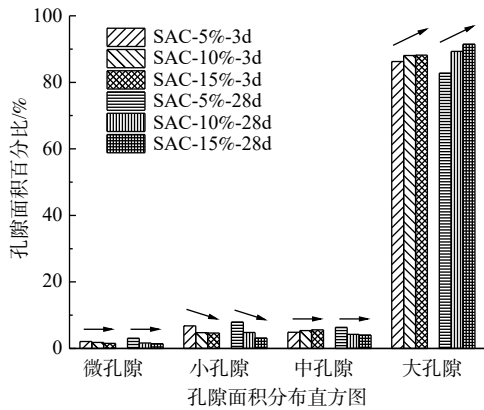
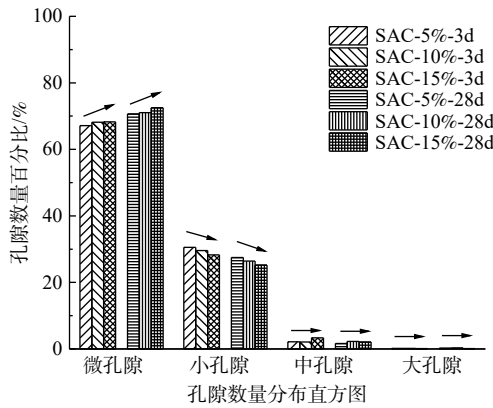


图 6 SAC 水泥改良冻土的孔隙数量和孔隙面积分布

Fig. 6 Pore quantity and pore area distribution of the SAC cement improved frozen soil

孔隙面积决定了孔隙的面积。其孔隙面积规律与孔隙比结果相符合。水泥掺量和养护龄期的增加,使得水泥改良冻土的强度增高,因为大孔隙是水泥发生水化反应的主要场所,因此水泥土在融化压缩的条件下大孔隙骨架的强度较高,大孔隙在固结压力下不容易变形闭合,面积较大。土样在固结压力的作用下,微孔隙发生闭合,孔隙数量减少。压缩量越大,微孔隙数量减少越多。但是因为微孔隙的面积占比较小,因此面积变化不明显。小孔隙在固结压力作用下数量减少,原来的小孔隙减小后变为微孔隙,小孔隙面积减小。

2.3 孔隙定向角特征

本文中孔隙的定向角是指孔隙长轴与垂直线的夹角,可以直观地反映在各定向角区间内孔隙出现的频率,从而可以了解水泥改良冻土在融化压缩过程中孔隙的平面定向性规律。将角度区间 $0^\circ \sim 180^\circ$ 等分成 18 份,对不同角度区间的孔隙进行统计,绘制孔隙定向角分布图。图 8 为 SAC 和 OPC 改良冻土融化压缩后的孔隙定向角分布图。当 SAC 掺量为 5%、养护时

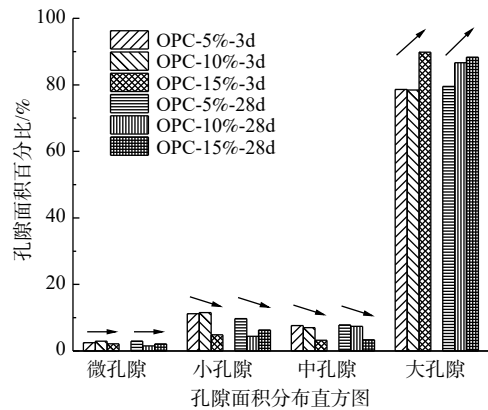
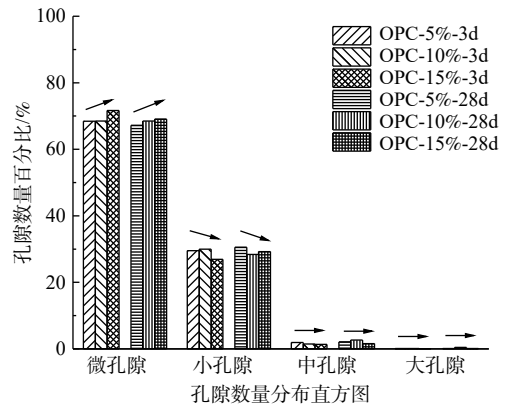


图 7 OPC 水泥改良冻土的孔隙数量和孔隙面积分布

Fig. 7 Pore quantity and pore area distribution of the OPC cement improved frozen soil

间为 3 d 时,改良土的融化压缩量较大,孔隙定向角显示出明显的锯齿状特征,在 $70^\circ \sim 100^\circ$ 定向角区间显著突出。当 SAC 掺量增加到 10% 时,土样融化压缩量较小,改良土孔隙定向角整体趋于均匀,只是在个别区间略有突出。当 SAC 掺量增加到 15%、养护龄期为 28 d 时,土样的融化压缩量几乎为 0。此时的孔隙定向角在各个区间分布更加均匀,定向角没有明显突出。由于 OPC 改良冻土的孔隙定向角分布也可以看出,其孔隙定向角的变化与 SAC 改良冻土相似。

2.4 孔隙形态变化

对孔隙形态的描述通常用丰度值来表示。孔隙丰度值指的是孔隙短轴与长轴之比,用 C 表示。 C 的大小可以反映孔隙在二维平面内的形状特征。丰度值在 $0 \sim 1$ 之间, C 值越小,表示孔隙越趋于长条状; C 值越大,表示孔隙越趋于圆形。对未经改良和改良后冻土的孔隙丰度值进行统计,绘制孔隙丰度值图。图 9 为 SAC 和 OPC 改良冻土融化压缩后的孔隙丰度值图。当 SAC 掺量为 5%、养护时间为 3 d 时,改良土的融化压缩量较大,此时的孔隙丰度值大致呈正态分布,主要集中在 $0.3 \sim 0.6$ 范围内,其中 $0.4 \sim 0.5$ 的

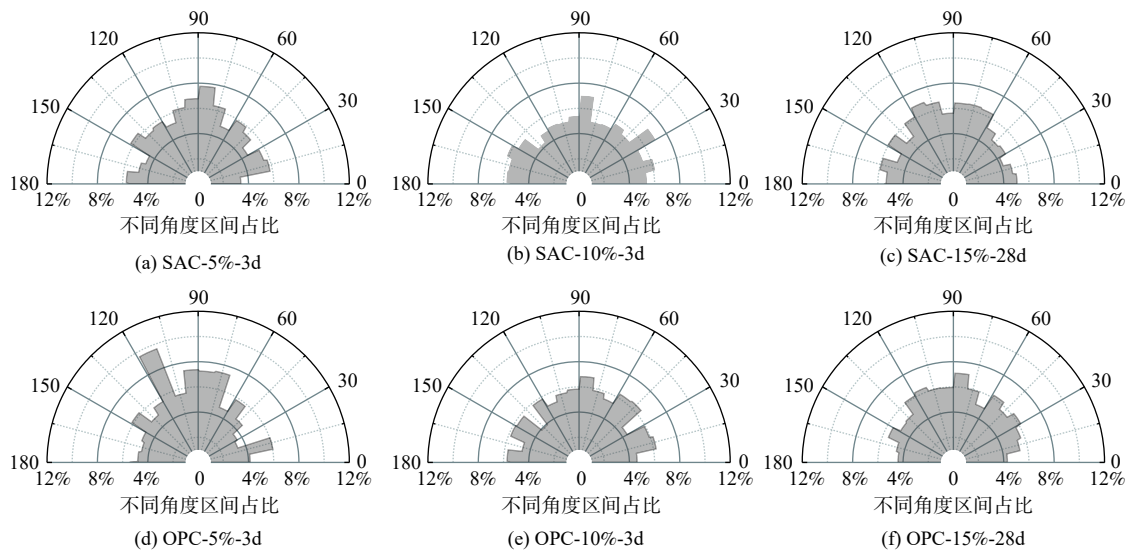


图 8 改良冻土的孔隙定向分布

Fig. 8 Distribution of the pore orientation angle of the improved frozen soil

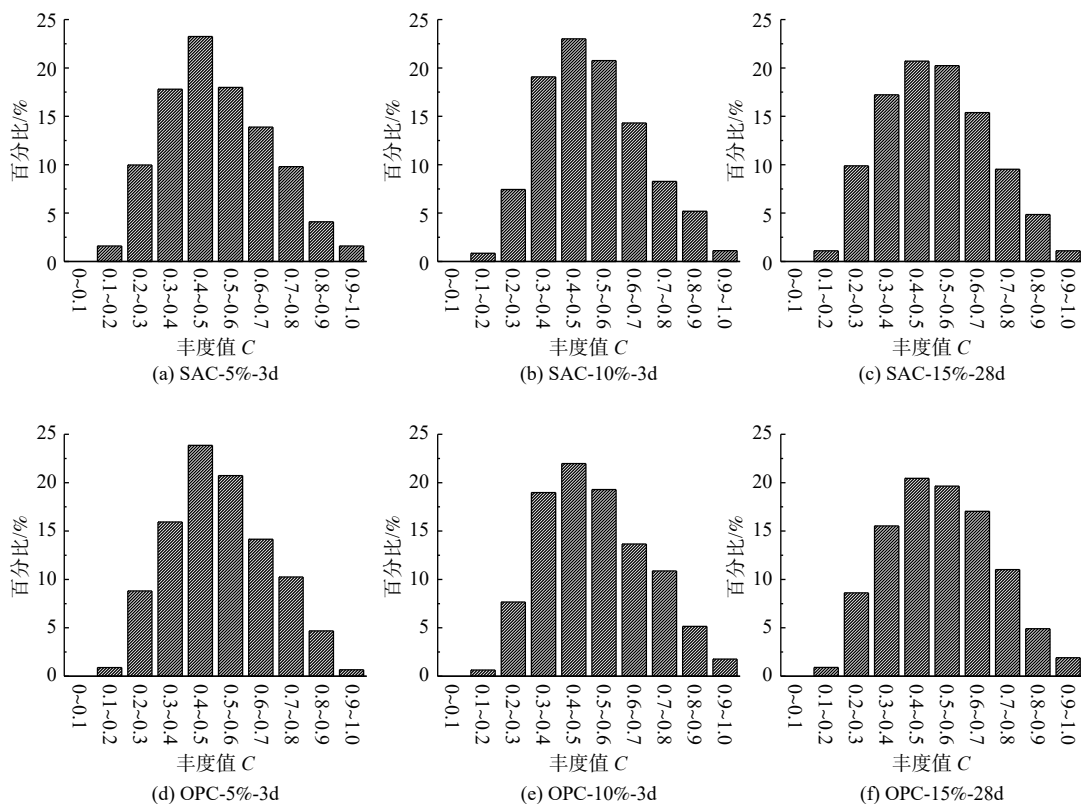


图 9 改良冻土的孔隙丰度值 C

Fig. 9 Pore abundance value C of the improved frozen soil

孔隙占比最大。丰度值偏离 0.4~0.5 越大,其占比越小。随着水泥掺量及养护龄期的增加,改良冻土的融化压缩量越小,0.4~0.5 区间孔隙占比减小,且随着融化压缩量的减小,在 0.3~0.7 每个区间内的孔隙数量与 0.4~0.5 区间内孔隙占比越来越接近。由 OPC 改良冻土的孔隙丰度值也可以看出,其孔隙丰度值的变

化与 SAC 改良冻土相似。

3 讨论

水泥改良后的冻土在水泥掺量为 15%、养护 28 d 时,其融化压缩量几乎为 0,可以认为此时水泥土样的

孔隙特征在压缩前后是一样的。此时土样的孔隙定向角分布较为均匀,定向角没有明显的锯齿状。随着水泥掺量和养护龄期的减少,压缩变形增大,土样孔隙的定向角锯齿状越来越明显,越来越多的定向角区间出现骤增或骤减。这是因为水泥改良冻土在发生融化压缩后,土样内部的颗粒和团聚体发生了滑移和转动,从而使得孔隙的长轴方向发生了改变,孔隙的定向性由分布均匀趋于定向性显著。

土样内部颗粒及团聚体的变化不仅使得孔隙长轴方向发生了变化,同时孔隙长轴与短轴的比值也发生了变化,即丰度值发生了变化。将丰度值大于0.5的孔隙比例进行统计,得到了不同水泥掺量、不同养护龄期下丰度值大于0.5的孔隙比例,即不同压缩变形下丰度值大于0.5的孔隙比例(图10)。由图10可以看出,随着水泥掺量及养护龄期的增加,即随着压缩量的减小,丰度值大于0.5的孔隙比例整体呈增加的趋势。这说明水泥改良冻土在压缩过程中,主要是丰度值大于0.5的孔隙发生压缩,孔隙短轴变短,长轴变长,孔隙趋于细长,即孔隙的压缩过程主要为扁圆的孔隙向细长孔隙发展的过程,从而丰度值小于0.5的孔隙数量增加。由孔隙丰度值的变化可以得出,土样的压缩量越大,丰度值为0.4~0.5的孔隙占比越多。这与以上分析结果相一致。

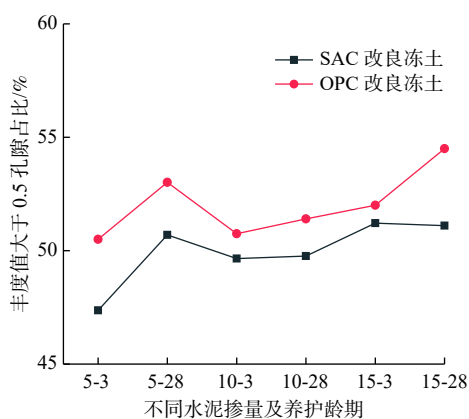


图10 不同水泥掺量和不同养护龄期改良土丰度值大于0.5的孔隙比例

Fig. 10 Pore proportion greater than 0.5 at different dosages and curing ages

4 结论

(1)SAC改良的冻土较OPC在0.2MPa下融化压缩量小,孔隙比大,对孔隙的支撑强度较高,更适合用来改良冻土。

(2)水泥改良冻土中的大孔隙数量最少,面积最大,而微孔隙的数量最多,但面积最小。水泥改良冻土的压缩性主要是加强了大孔隙的强度,因此压缩量小,孔隙比大。

(3)水泥改良冻土随着压缩量的增大,孔隙的定向角逐渐由均匀分布向锯齿状发展。

(4)水泥改良土压缩过程中主要是丰度值大于0.5的孔隙发生压缩,孔隙趋于细长。随着压缩量的增大,孔隙丰度值分布越来越趋于正态分布。

参考文献 (References) :

- [1] 张虎,张建明,苏凯,等.高温-高含冰量冻土原位旁压蠕变试验[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(6):1950-1957. [ZHANG Hu, ZHANG Jianming, SU Kai, et al. In-situ pressuremeter creep test on high-temperature and high ice-rich permafrost[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1950-1957. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张虎,张建明,苏凯,等.冻土原位旁压蠕变试验粘弹性模型分析[J].土木建筑与环境工程,2013,35(6):22-27. [ZHANG Hu, ZHANG Jianming, SU Kai, et al. Viscoelastic model analysis of in situ pressuremeter creep test in permafrost[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(6): 22-27. (in Chinese with English abstract)]
- [3] YAO X L, QI J L, ZHANG J M, et al. A one-dimensional creep model for frozen soils taking temperature as an independent variable[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(3): 627-640.
- [4] ZHANG Z L, ZHANG J M, ZHANG H. Effects and mechanisms of ionic soil stabilizers on warm frozen soil[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(10): 5657-5666.
- [5] ZHANG Z L, ZHANG H, ZHANG J M, et al. Effectiveness of ionic polymer soil stabilizers on warm frozen soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(7): 2867-2876.
- [6] CHAI M T, ZHANG J M. Improvement of compressibility and thaw-settlement properties of warm and ice-rich frozen soil with cement and additives[J]. Materials, 2019, 12(7): 1068.
- [7] CHAI M T, ZHANG H, ZHANG J M, et al. Effect of cement additives on unconfined compressive strength of warm and ice-rich frozen soil[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 861-868.

- [8] 孙杲辰, 张建明, 党迎生, 等. 高温冻土固化前后结构性变化对融化压缩特性影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(2): 17 - 25. [SUN Gaochen, ZHANG Jianming, DANG Yingsheng, et al. Structural properties changes before and after solidification and their effects on melting and compression characteristics of high warm and frozen soil[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(2): 17 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [9] SUN G C, ZHANG J M, DANG Y S, et al. Microstructure and strength features of warm and ice-rich frozen soil treated with high-performance cements[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(6): 1470 - 1482.
- [10] 廖一蕾, 张子新, 肖时辉, 等. 水泥加固黏性土微观特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊 2): 4318 - 4327. [LIAO Yilei, ZHANG Zixin, XIAO Shihui, et al. Microstructure research on cement stabilized clays[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup 2): 4318 - 4327. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 黄春霞, 黄敏, 蔡伟, 等. 不同黏粒含量粉土的微观结构研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(4): 758 - 764. [HUANG Chunxia, HUANG Min, CAI Wei, et al. Microstructure of silt with different clay contents[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 758 - 764. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 周晖, 房营光, 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(增刊 2): 3830 - 3837. [ZHOU Hui, FANG Yingguang, YU Changjiang. Micro-structure observation and analysis of Guangzhou soft soil during consolidation process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup 2): 3830 - 3837. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于SEM和MIP试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 406 - 412. [ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 406 - 412. (in Chinese with English abstract)]
- [14] DELAGE P. Microstructure features in the behaviour of engineered barriers for nuclear waste disposal[C]// *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, 112: 11-32.
- [15] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(6): 3 - 5. [XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 3 - 5. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 1 - 11. [CHEN Zhenghan, FANG Xiangwei, ZHU Yuanqing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 1 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 叶为民, 万敏, 陈宝, 等. 干湿循环条件下高压实膨润土的微观结构特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 1173 - 1177. [YE Weimin, WAN Min, CHEN Bao, et al. Micro-structural behaviors of densely compacted GMZ01 bentonite under drying/wetting cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1173 - 1177. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张先伟, 孔令伟, 李峻, 等. 黏土触变过程中强度恢复的微观机理[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(8): 1407 - 1413. [ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, LI Jun, et al. Microscopic mechanism of strength increase of clay during thixotropic process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(8): 1407 - 1413. (in Chinese)]
- [19] 王东伟, 陆武萍, 唐朝生, 等. 砂土微观结构样品制备技术及量化方法研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4783 - 4792. [WANG Dongwei, LU Wuping, TANG Chaosheng, et al. Sample preparation technique and microstructure quantification method for sandy soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4783 - 4792. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 施斌, 姜洪涛. 粘性土的微观结构分析技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 864 - 870. [SHI Bin, JIANG Hongtao. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 864 - 870. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 侯超群, 席瑶, 孙志彬, 等. 基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 156 - 161. [HOU Chaoqun, XI Yao, SUN Zhibin, et al. A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 156 - 161. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张季如, 祝杰, 黄丽, 等. 固结条件下软黏土微观孔隙

- 结构的演化及其分形描述[J]. *水利学报*, 2008, 39(4): 394 - 400. [ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Li, et al. Evolution of micro pore structure of soft clay and its fractal features under consolidation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(4): 394 - 400. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 房后国, 刘娉慧, 袁志刚. 海积软土固结过程中微观结构变化特征分析[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(2): 49 - 52. [FANG Houguo, LIU Pinhui, YUAN Zhigang. Analysis on characteristics of microstructure change during marine soft soil consolidation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(2): 49 - 52. (in Chinese with English abstract)]
- [24] GRIFFITHS F J, JOSHI R C. Change in pore size distribution due to consolidation of clays[J]. *Géotechnique*, 1989, 39(1): 159 - 167.
- [25] 王宝军, 施斌, 蔡奕, 等. 基于GIS的黏性土SEM图像三维可视化与孔隙度计算[J]. *岩土力学*, 2008, 29(1): 251 - 255. [WANG Baojun, SHI Bin, CAI Yi, et al. 3D visualization and porosity computation of clay soil SEM image by GIS[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 251 - 255. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 袁则循, 毛灵涛, 赵丹. 基于数字地形模型土微结构三维孔隙度的计算方法[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(5): 734 - 737. [YUAN Zexun, MAO Lingtao, ZHAO D. Computation method on 3D porosity of soil microstructure based on digital terrain model[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2011, 30(5): 734 - 737. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 赵柯迪. 大连高城山地区粘性土微观结构研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2019. [ZHAO Kedi. Study on microstructure of cohesive soil in Gaocheng mountain area, Dalian[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)]
- [29] 袁中夏, 王兰民, 邓津. 电镜图像在黄土结构性研究中应用的几个问题[J]. *西北地震学报*, 2005, 27(2): 115 - 121. [YUAN Zhongxia, WANG Lanmin, DENG Jin. Several problems on application of SEM image in the structure properties study of loess[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2005, 27(2): 115 - 121. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 雷祥义, 王书法. 黄土的孔隙大小与湿陷性[J]. *水文地质工程地质*, 1987, 14(5): 15 - 18. [LEI Xiangyi, WANG Shufa. Size of loess pores in relation to collapsibility[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1987, 14(5): 15 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 胡建伟, 谢永江, 刘子科, 等. 纳米C-S-H/PCE对硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥凝结硬化的影响[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*: 1-12. [2020-05-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20200517.1459.004.html>. [HU Jianwei, XIE Yongjiang, LIU Zike, et al. Effect of nano-C-S-H/PCE on the setting and hardening process of portland-sulphoaluminate composite cement[J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*: 1-12. [2020-05-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20200517.1459.004.html>. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞