

冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究

穆彦虎¹, 马 巍¹, 李国玉¹, 毛云程²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省交通科学研究有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要:通过补水条件下的冻融循环试验, 对经历不同冻融次数的压实黄土土样进行电镜扫描图像的定量分析, 同时进行土样宏观物理性质的测试, 探讨微观结构与宏观性质之间的关系, 揭示冻融循环对压实黄土结构影响的过程与机理。研究结果表明, 随着冻融循环次数的增加, 土样内部冰晶的生长及冷生结构的形成导致土样中孔隙体积增加, 土颗粒受到挤压并形成新的土骨架结构。大中孔隙个数及其所占孔隙总面积百分比显著增加, 由2次冻融循环后的78%增加至31次冻融循环后的90%。同时, 土样中出现一些由大中孔隙组成的、对黄土湿陷性起控制作用的架空孔隙。宏观物理性质测试表明, 随着冻融循环次数的增加, 土样含水率显著增加并出现重分布, 而干密度则先减小而后基本保持不变。31次冻融循环后, 土样上下层含水率相比于初始值增加分别超过140%, 55%, 而干密度则由初始的1.86 g/cm³减小为1.55 g/cm³, 减幅为17%。微观结构和宏观性质的改变均表明了冻融作用对于压实黄土结构的弱化作用。

关键词:压实黄土; 冻融循环; 电镜; 宏观和微观特性

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)12-1919-07

作者简介: 穆彦虎(1985-), 男, 新疆昌吉人, 博士研究生, 主要从事冻土力学与寒区工程方面的研究工作。E-mail: muyanh@hotmai.com。

Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess

MU Yan-hu¹, MA Wei¹, LI Guo-yu¹, MAO Yun-cheng²

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. Transportation Research Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: After a series of laboratory experiments in an open system, the impacts of freeze-thaw cycles on the structure of compacted loess are studied by means of the quantitative analysis of scanning electron microscope images. The physical properties of the soils are tested simultaneously to discuss the relationship between microstructure and macro-properties of the loess. The results of microstructure analysis show that, with the increase of freeze-thaw cycles, the formation of cryogenesis results in obvious enlargement of pore volumes and therefore extrusion and redistribution of soil particles. The ratio of big- and mid-pore area to the total pore area increases from 78% after 2 cycles to 90% after 31 cycles. Meanwhile, some pores with open structure, which controls the loess collapsibility, are formed during the cycles. The results of macro-properties test show that, during the cycles, the water content of the samples increases significantly and is redistributed, and the dry density of the samples decreases initially and then keeps almost constant. After 31 cycles, the water contents at the upper and lower parts of the sample increase by more than 140% and 55%, respectively, whereas the dry density of the sample decreases from the initial value of 1.86 g/cm³ to 1.55 g/cm³, about a depression of 17%. Collectively, the results from both the micro- and macro-analyses indicate that the freeze-thaw action significantly weakens the structure of compacted loess.

Key words: compacted loess; freeze-thaw cycle; scanning electron microscope; microscopic and macroscopic property

0 引言

作为一种路基填土, 黄土经过压实后, 很大程度消除了其湿陷性, 能够基本满足路基强度与稳定性的要求。然而随着黄土地区高等级公路的大量修筑, 仍有不少工程在运行过程中出现了一定的湿陷变形及不均匀沉降等病害, 尤其在强湿陷性黄土广泛分布的西

北地区。由于地处季节冻土区, 该地区黄土路基经历着较强的冻融作用。作为一种强风化作用, 冻融作用

基金项目: 国家自然科学基金项目(40821001, 41001041, 40801022, 40801026, 41071048); 西部交通建设科技项目(200831800025); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-10); 冻土工程国家重点实验室研究项目(SKLSE-ZQ-02, SKLFSE-ZY-03)

收稿日期: 2010-10-19

会影响土的结构性及物理力学性质^[1]，进而可能影响到黄土路基的稳定性。

土体工程性质的变化根本原因在于其结构性的改变，因此某种程度上可以通过微观结构的研究进行解释^[2-3]。N.K. Tovery 及 P. Smart 等学者基于扫描电子显微镜对不同土体微观结构定向及定量研究技术等方面进行了研究^[4-5]。近年来，中国学者通过显微结构的研究揭示的黄土颗粒排列、胶结方式及孔隙分布的特殊性，很好地定性解释了黄土的一系列物理力学特性^[6]。通过对兰州黄土的显微结构的研究，高国瑞^[7]提出了兰州黄土的架空结构是其湿陷性的基本条件。高国瑞^[8-9]、杨运来^[10]，雷祥义等^[11]基于黄土微观结构特征对黄土湿陷机制进行了系统研究。Bai 等^[12]、张德华等^[13]对潞城黄土的微观结构进行了研究，初步建立了黄土微观结构与其宏观力学间的定量关系。李喜安等^[14]、王生新等^[15]对路基黄土微观结构与其湿陷性的关系进行了研究。卢玉东等^[16]、孙建中等^[17]探讨了黄土湿陷性与湿度的关系，提出了黄土多级湿陷的可能性。王兰民等^[18]基于数字扫描电镜获得的微观架空孔隙面积量化数据，结合相关原理，建立了黄土震陷系数计算公式。王梅等^[19]探讨了湿陷性黄土微观结构分析土样的制备方法。

冻融作用会引起土体的物理力学性质的改变。马巍等^[20]通过试验研究发现随冻融循环次数的增加，石灰粉土的剪切强度逐渐衰减。王大雁等^[21]发现冻融循环后土样的弹性模量和黏聚力降低，内摩擦角增大；杨成松等^[22]研究了冻融循环对土体干重度和含水率等物理性质的影响；Edwin 等^[23]对细颗粒土进行了室内冻融循环试验，发现冻融循环作用强烈地改变了土体的结构。齐吉琳等^[2, 24]、宋春霞等^[25]对经历一次冻融循环前后的土样进行了电镜图像扫描分析和土力学试验，讨论了冻融作用对土结构性影响的土力学意义。对于冻融作用引起土体物理力学性质的改变，研究者们均会提到冻融作用对土体结构性的影响，并试图从结构性上做出解释，但这种解释多是建立在定性观察上的理论推测^[1]。

本文以兰州地区现场路基土所经历实际冻融过程为研究背景，拟通过室内冻融循环试验对经历不同冻融次数的压实黄土土样进行电镜扫描及其图像的微观定量分析，从微观结构角度研究冻融作用对土样结构的影响。同时进行土样物理性质的测试，探讨土样宏观性质与微观结构改变之间的定性定量关系，以期更好地研究冻融作用对压实黄土结构影响的过程与机理。

1 试验方法

1.1 土样采集与制备

在原国道 G312 线路基断面 K2300+100 (36°36'34"N, 103°22'05"E, 海拔 1917 m) 附近(永登县)采集黄土土样。采集区在中国湿陷性黄土工程地质分区图中属于陇西黄土区，湿陷性黄土层厚度约为 10~15 m。按照《土工试验方法标准》对土样进行颗粒、液塑限、比重及最大干密度等进行测试，测试结果见表 1、2。从测试结果可以看出，所采土样为低液塑限粉土。

表 1 土样颗粒组成

Table 1 Soil particle distribution of loess

粒径范围/mm	0.1~0.074~0.05~0.01~0.005~<0.002	0.047	0.05	0.01	0.005	0.002
土质量百分含量/%	0.1	10.2	49.2	37.2	1.2	2.0

表 2 土样基本物理性质

Table 2 Basic physical parameters of loess

土样	比重	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	最大干密度 $(g \cdot m^{-3})$	最佳含水率 /%
兰州 黄土	2.704	26.9	18.7	1.91	11.6

将采集土样配成最佳含水率逐层放置到有机玻璃筒中，在冻土工程国家重点实验室的自动制样机上压实成高度为 10.13 cm、直径为 10.1 cm 的圆柱体。控制土样干密度为 1.86 g/cm³，接近其最大干密度 1.91 g/cm³，保证压实度超过 95%。土样压好后先在室温下固结 24 h，使其含水率均匀，然后进行冻融循环试验。

1.2 试验仪器及试验条件

利用冻土工程国家重点实验室研制的冻融循环仪，示意图如图 1 所示，对压实土样进行补水条件下的冻融循环试验。

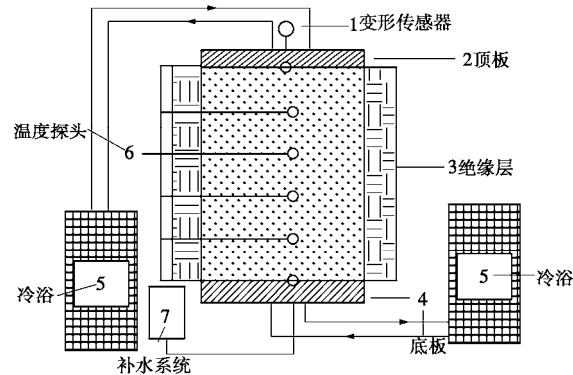


图 1 冻融循环仪示意图

Fig. 1 Schematic drawing of experimental system for freeze-thaw cycles

试验期间装样的有机玻璃筒外围用海绵隔热, 以保证样品单向冻结和单向融化。根据取样点附近兰州市气象站 30 a (1971 年—2000 年) 均地表温度资料, 确定冻融循环试验顶板温度, 控制如图 2 所示。底板和箱体温度控制在 +1 °C。顶板、底板和箱体温度均通过循环冷浴精确控温。底板进行补水, 模拟季节冻土区黄土路基在秋末至初春期间可能的降水、积雪融化及地下水等的补给。1 个冻融循环周期为 24 h。

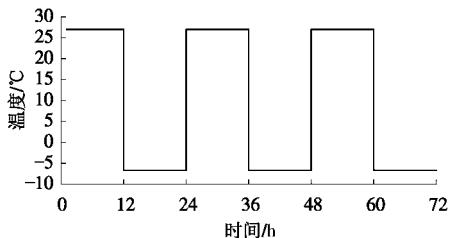
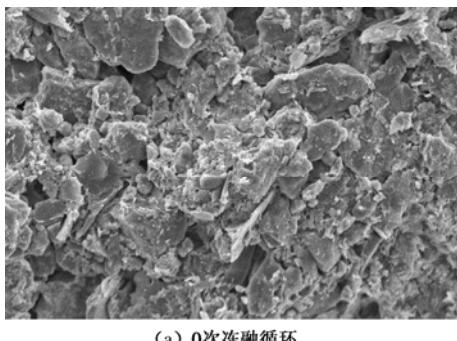


图 2 冻融循环顶板温度随时间变化

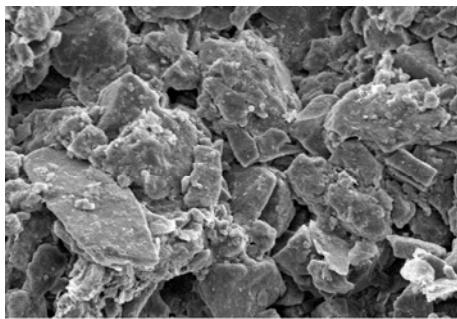
Fig. 2 Temperature of top plate during freeze-thaw cycles

2 电镜扫描图片的获取与处理

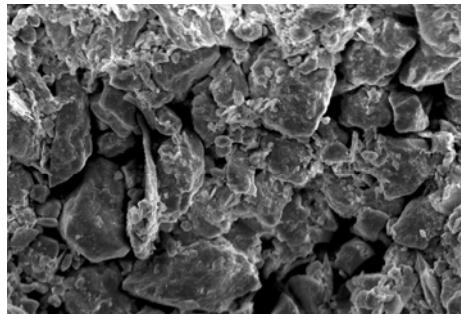
冻融循环试验结束后, 在冻结状态下进行土样的拆除。进行土样物理性质测试的同时, 在土样中部随机提取两个小块土样进行电镜扫描土样的制备和扫描。对于每个电镜扫描土样, 在具有代表性的区域连续拍摄 10 张照片, 因此每个不同冻融次数的土样就有 20 张电镜扫描照片, 照片选用放大倍数为 400 倍。图 3 分别给出了经历 0, 2, 31 次冻融循环后的土样电镜扫描图像。



(a) 0次冻融循环



(b) 2次冻融循环



(c) 31次冻融循环

图 3 典型冻融循环次数后土样电镜扫描图像

Fig. 3 SEM images of samples after typical freeze-thaw cycles

对于压实黄土, 如图 3 (a) 所示, 颗粒与颗粒之间接触紧密, 挤密镶嵌结构明显, 且该土样中“填充质”(粒径在 0.002~0.01 mm)^[8]的含量较高, 因此在电镜扫描图像的处理时, 颗粒的分割非常困难^[3]。然而在图像中孔隙往往表现为暗色调, 而土颗粒的色调要亮一些, 因此可以从图片灰度上来区分土颗粒和孔隙, 对图像进行二值化处理^[26]。通常这个区分阈值的选取存在较大的人为因素, 需要多次与原始图像的比对来确定。本文采用 GIS 软件对图像中的孔隙进行数据提取, 统计分析其主要特征参数。首先将电镜扫描图像读入到 ArcMap 9.2 中, 利用其重分类功能按所选灰度阈值对图片进行二值化处理。重分类之后的图片格式为栅格文件, 利用 ArcMap 9.2 提供的自动矢量化功能, 将其转化为多边形矢量文件。此时, 可以通过矢量文件与原始电镜照片的比对, 进一步对矢量文件中的孔隙和土颗粒多边形进行修正, 以期更为准确地反映土样中孔隙与颗粒的真实结构。修正完毕之后, 即可利用 ArcMap 9.2 的属性选择功能, 计算所有矢量多边形即孔隙的周长、面积及等效直径等参数。

在电镜扫描图像处理中, 尽管可以看出孔隙的立体结构, 但无法对其体积进行统计分析, 只能从平面上测量孔隙的分布情况, 可以从面孔隙度和孔隙分布曲线两方面进行。面孔隙度是指孔隙面积之和占图像总面积的百分比^[26]。孔隙分布曲线主要包括孔隙面积及孔隙等效直径(与孔隙面积相等的圆的直径)分布曲线, 其中孔隙面积分布曲线指小于某个面积的孔隙的面积之和占所有孔隙面积之和的百分比, 而孔隙等效直径分布曲线是指小于某个等效直径的孔隙个数占所有孔隙个数的百分比^[2]。上述 3 个参数用于后续分析的定量统计结果均为剔除奇异点之后的平均值。

3 冻融作用后土样微观结构分析

通过肉眼可以对电镜扫描图像的土骨架颗粒形态及其连接形式进行观察。图 3 (a) 中, 土样经历了 0

次冻融循环，即为原始压实土样，压实度为97%。可以看出其土骨架颗粒形态多为集粒和凝块，骨架连接方式多为面接触。这种骨架颗粒形态及连接方式从微观结构上表明压实黄土基本上消除了其湿陷性^[8]，因此能够基本保证路基的强度和稳定性要求。但随着冻融循环次数的增加，土样孔隙中冰晶的生长导致土颗粒受到挤压，增加了土颗粒的团聚性，孔隙体积增加。由此也导致土样骨架颗粒连接方式发生转变，出现了一些点接触（图3(c)）。骨架颗粒连接方式的转变对黄土的湿陷性会产生一定的影响。

图4给出了不同冻融次数后的土样图像面孔隙度的统计结果。图4中，2次冻融循环后土样面孔隙度为8.9%，随着冻融循环次数的增加，面孔隙度不断增加，至11次冻融循环后为16.7%，之后变化不大，31次冻融循环后为15.2%。土样面孔隙度随着循环次数的增加是由土样内部冰晶的生长和冷生结构的形成造成的。对于压实黄土土样来说，冻融作用打破了其原有的平衡状态。冻融作用初期，冻结过程中内部冰晶的生长和冷生结构的形成使得孔隙面积增加，土颗粒受到挤压并形成新的土骨架结构，宏观上土样表现为冻胀变形；而融化过程中，内部冰晶的融化不能引起土骨架结构的完全恢复。因此总的来说，土样表现为冻胀变形，即微观上面孔隙度不断增加。尤其在本次实验中，有外界水的补给，因此既有原位水又有迁移水的成冰类型。在土样拆除过程中，可以通过肉眼直接观察到微层状的冷生结构的形成。随着冻融循环的继续，土样内部含水率不断增加，孔隙个数及体积的增加，使得土样黏聚力下降，此时冻结和融化过程中的变形量基本相当，土样体积基本保持不变，反映在微观上其面孔隙度则变化不大。此时土样随着冻融作用的继续达到一个新的平衡状态。

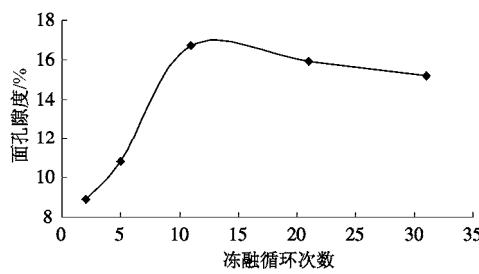


图4 不同冻融循环次数土样面孔隙度

Fig. 4 Ratios of pore area to image area for samples after different freeze-thaw cycles

图5给出了经历不同冻融次数后的土样孔隙面积分布情况，即小于某个面积的孔隙的面积之和占总的孔隙面积的百分比。可以看出，随着冻融次数的增加，面积较大的孔隙所占孔隙总面积的百分比不断增加。

根据雷祥义等^[27]对黄土孔隙粒径大小的划分，本次试验中土样经历2次冻融循环后，微小孔隙面积占孔隙总面积百分比为22%，而大中孔隙面积占孔隙总面积百分比为78%，且其中多为中孔隙。而经历31冻融循环后，上述两数值分别变为约10%，90%，并且主要以大孔隙为主，即大中孔隙所占孔隙总面积百分比相比2次冻融循环增加12%。土样的最大及平均孔隙面积，2次冻融循环后分别为 $2414, 32 \mu\text{m}^2$ ，而31次冻融循环后分别增加至 $6612, 72 \mu\text{m}^2$ ，其中平均孔隙面积增加超过1倍。对于黄土而言，大中孔隙及由其组成的架空孔隙控制着黄土的湿陷性^[7]。

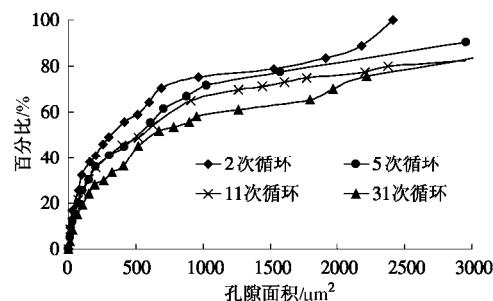


图5 不同冻融循环次数后土样孔隙面积分布图

Fig. 5 Pore area distributions for samples after different freeze-thaw cycles

孔隙等效直径分布图可以更好地反映出土样中所有孔隙的大小分布情况。图6给出了2, 31次冻融循环后土样中孔隙的等效直径分布图。由于孔隙等效直径分布图随冻融循环次数变化不大，但仍有较好的规律性，因此其它冻融循环次数孔隙等效直径分布未在该图中给出。可以看出，冻融次数增加后，等效直径较大的孔隙所占孔隙总个数的百分比有所增加。这与图5中所反映的大中孔隙所占孔隙总面积的百分比随冻融次数的增加而增加是一致的。

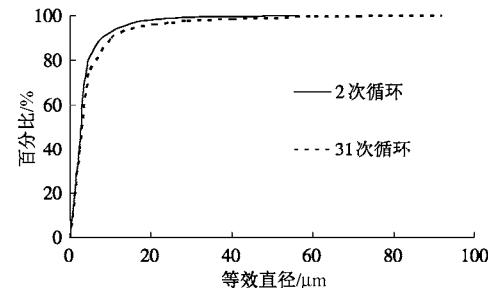


图6 第2, 31次冻融循环后土样孔隙等效直径分布图

Fig. 6 Distribution of equivalent pore diameter of samples after 2 and 31 freeze-thaw cycles

4 冻融作用后土样物理性质的分析

冻融循环后，土样在冻结状态下进行拆除，对其

分层含水率、干密度等物理性质进行测试, 部分测试结果可见文献[28]。

图 7 给出了经历不同冻融循环次数后的土样含水率沿高度分布情况。图 7 中, 2 次冻融循环后土样底部含水率由初始值 11.6% 增加至 16.6%, 而顶层含水率增加至 22%。之后, 随着冻融循环的进行, 土样上部含水率仍继续快速增加, 而下部含水率增加缓慢。31 次冻融循环后, 土样上层含水率最大达 28%, 底层含水率接近 18%, 即冻融作用引起土样内部含水率的显著增加及不均匀分布。由于底板温度一直保持在 $+1^{\circ}\text{C}$, 因此土样底层约 2 cm 范围内土体始终为融化层, 在该层内含水率分布基本无梯度。而顶板温度变化剧烈, 冻结过程中, 水分自融化区向冻结锋面即自下而上不断迁移, 导致上层含水率迅速增加。融化过程中, 水分由下部融化区及上部已融区不断向融化锋面迁移, 是一个双向融化过程。如次循环, 使得土样内部水分及外界补水不断向土样上层迁移, 造成其上部含水率显著大于下部含水率。

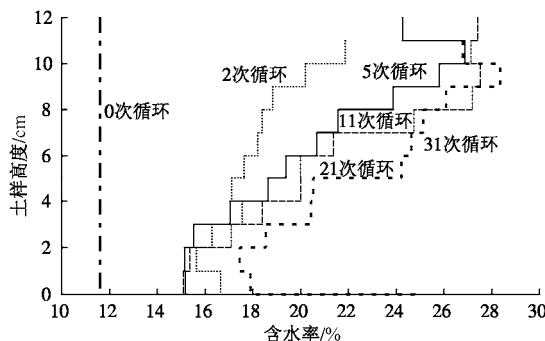


图 7 不同冻融循环次数后土样含水率分布图

Fig. 7 Distributions of water content of samples after different freeze-thaw cycles

图 8 中给出了经历不同冻融循环次数后的土样干密度及其面孔隙度。可以看出, 土样初始干密度为 $1.86 \text{ g}/\text{cm}^3$, 随着冻融循环的进行, 其干密度不断减小, 11 次冻融循环后减小为 $1.59 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。之后随冻融次数的增加变化不大, 至 31 次冻融循环土样干密度减小为 $1.55 \text{ g}/\text{cm}^3$, 与初始干密度相比减小约 17%。这与微观定量分析中土样的面孔隙度随冻融循环次数增加所表现出的变化规律正好相反, 且在趋势上有很好的一致性。

通过上述分析, 压实黄土土样经历冻融循环后, 土样微观结构上骨架颗粒连接方式的转变、面孔隙度的增加、大中孔隙及由其组成的架空孔隙的出现, 以及宏观物理性质上土样含水率的增加、干密度的降低均能表明冻融作用对压实黄土的结构将产生较大的弱化作用, 对其湿陷性有一定的推动作用。宏观物理性

质测试与微观结构定量分析的结果表现出良好的一致性。

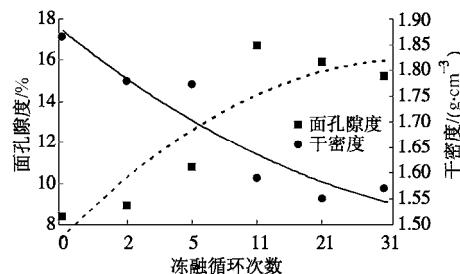


图 8 土样面孔隙度及干密度与冻融循环次数间的关系

Fig. 8 Ratios of pore area to image area and dry densities of samples after different freeze-thaw cycles

5 结 论

(1) 随冻融循环次数的增加, 土样面孔隙度先增加而后基本保持恒定。31 次冻融循环后面孔隙度可达 15.2%, 较 2 次冻融循环后增加超过 70%。

(2) 随冻融循环次数的增加, 土样中大中孔隙的个数及面积不断增加, 其占孔隙总面积的百分比也相应增加。31 次冻融循环后, 大中孔隙所占孔隙总的面积百分比达到 90%, 同时土样中出现一些有大中孔隙组成的架空孔隙。

(3) 随冻融循环次数的增加, 土样含水率显著增加且出现重分布。相对于初始值, 31 次冻融循环后土样上下层含水率增加分别超过 140%、50%; 土样干密度则先减小而后基本保持不变。相对于初始值, 31 次冻融循环后土样干密度减小约 17%。

(4) 冻融循环后, 土样微观结构与宏观性质的改变均表明冻融作用对压实黄土结构的弱化作用, 该弱化作用可能是季节冻土区黄土路基在运行过程中出现路基病害的原因之一。

参考文献 :

- [1] 齐吉琳, 马 巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133–143. (QI Ji-lin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133–143. (in Chinese))
- [2] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2690–2694. (QI Ji-lin, ZHANG Jian-ming, ZHU Yuan-lin. Influence of Freeze-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2690–2694. (in Chinese))
- [3] 沙爱民, 陈开圣. 压实黄土的湿陷性与微观结构的关系[J].

- 长安大学学报, 2006, **26**(4): 1–4. (SHA Ai-min, CHEN Kai-sheng. Relationship between collapsibility and microstructure of compacted loess[J]. Journal of Chang'an University, 2006, **26**(4): 1–4. (in Chinese))
- [4] TOVEY N K, KRINSLEY D H, DENT D L, et al. Techniques to quantitatively study the microfabric of soils[J]. Geoderma, 1992, **53**(3-4): 217–235.
- [5] TOVEY N K, SMART P, HOUNSLOW M W, et al. Automatic orientation mapping of some types of soil fabric[J]. Geoderma, 1992, **53**(3-4): 179–200.
- [6] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, **19**(4): 273–284. (XIE Ding-yi. The past, present and future of the research on mechanical characteristics and application of loess[J]. Underground Space, 1999, **19**(4): 273–284. (in Chinese))
- [7] 高国瑞. 兰州黄土显微结构和湿陷机理的探讨[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1972(2): 123–134. (GAO Guo-rui. Research on the microstructure and collapsible mechanism of loess soil in Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1972(2): 123–134. (in Chinese))
- [8] 高国瑞. 黄土的显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980(12): 1203–1208. (GAO Guo-rui. Micro texture type and collapsibility of loess soil[J]. Science in China, 1980(12): 1203–1208. (in Chinese))
- [9] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(4): 1–10. (GAO Guo-rui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(4): 1–10. (in Chinese))
- [10] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学(B辑), 1988(7): 756–766. (YANG Yun-lai. Study on the collapsible mechanism of loess[J]. Science in China (Series B), 1988(7): 756–766. (in Chinese))
- [11] 雷祥义. 黄土显微结构类型与物理力学性质指标之间的关系[J]. 地质学报, 1989, **63**(2): 182–191. (LEI Xiang-yi. Relationship between type of loess microstructure and physical mechanic property index[J]. Acta Geological Sinica, 1989, **63**(2): 182–191. (in Chinese))
- [12] BAI X H, SMART P. Engineering properties of lucheng loess in Shanxi[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(4): 515–518.
- [13] 张德华, 白晓红. 黄土湿陷性的微观研究[J]. 西部探矿工程, 1996, **8**(增刊): 7–9. (ZHANG De-hua, BAI Xiao-hong. Micro study of collapsibility of loess[J]. West-China Exploration Engineering, 1996, **8**(S0): 7–9. (in Chinese))
- [14] 李喜安, 彭建兵, 陈志新. 公路路基黄土湿陷性的室内实验研究[J]. 公路交通科技, 2005, **22**(9): 93–96. (LI Xi-an, PENG Jian-bing, CHEN Zhi-xin. Study on collapse causes of loess based on experimental methods[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, **22**(9): 93–96. (in Chinese))
- [15] 王生新, 韩文峰, 谌文武, 等. 冲击压实路基黄土的微观特征研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(6): 939–944. (WANG Sheng-xin, HAN Wen-feng, CHEN Wen-wu, et al. Micro study on roadbed loess improvement by impact compaction technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(6): 939–944. (in Chinese))
- [16] 卢玉东, 孙建中. 黄土的多级湿陷性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, **33**(4): 63–64. (LU Yu-dong, SUN Jian-zhong. Discussion on multilevel collapsibility of loess[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, **33**(4): 63–64. (in Chinese))
- [17] 孙建中, 刘健民. 黄土的未饱和湿陷、剩余湿陷和多次湿陷[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(3): 365–367. (SUN Jan-zhong, LIU Jian-min. On unsaturated collapse, remnant collapse and multiple collapse of the loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(3): 365–367. (in Chinese))
- [18] 王兰民, 邓 津, 黄 媛. 黄土震陷性的微观结构量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 1): 3025–3031. (WANG Lan-min, DENG Jin, HUANG Yuan. Quantitative analysis of microstructure of loess Seismic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S1): 3025–3031. (in Chinese))
- [19] 王 梅, 白晓红, 杨 晶. 湿陷性黄土微观结构分析的试样制备[J]. 太原理工大学学报, 2010, **41**(3): 283–286. (WANG Mei, BAI Xiao-hong, YANG Jing. Method of specimen preparation for collapsible loess microstructure research[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2010, **41**(3): 283–286. (in Chinese))
- [20] 马 巍, 徐学祖, 张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(2): 158–160. (MA Wei, XU Xue-zu, ZHANG Li-xing. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(2): 158–160. (in Chinese))
- [21] WANG Da-yan, MA Wei, NIU Yong-hong, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, **48**(1): 34–43.

- [22] 杨成松, 何平, 程国栋, 等. 冻融作用对土体干重度和含水率影响的试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2695 – 2699. (YANG Cheng-song, HE Ping, CHENG Guo-dong, et al. Testing study on the influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2695 – 2699. (in Chinese))
- [23] EDWIN J C, ANTHONY J G. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979(13): 73 – 92.
- [24] 齐吉琳, 马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 2082 – 2086. (QI Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 2082 – 2086. (in Chinese))
- [25] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077 – 1080. (SONG Chun-xia, QI Ji-lin, LIU Feng-yin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077 – 1080. (in Chinese))
- [26] 王家鼎, 袁中夏, 任权. 高速铁路地基黄土液化前后微观结构变化研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 480 – 483. (WANG Jia-ding, YUAN Zhong-xia, REN Quan. A study on loess microstructure pre and post liquefaction of high-speed railway foundation[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(3): 480 – 483. (in Chinese))
- [27] 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(5): 15 – 18. (LEI Xiang-yi, WANG Shu-fa. Size of loess pores in relation to collapsibility[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987(5): 15 – 18. (in Chinese))
- [28] LI Guo-yu, MA Wei, JIN Hui-jun, et al. Experimental research on impact of freeze-thaw cycle on geotechnical properties of compacted loess[C]// Proceedings of 63rd Canadian Geotechnical Conference and the 6th Canadian Permafrost Conference, Calgary, Alberta.

第八届全国工程排水与加固技术研讨会会议纪要

由中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会主办, 福建省建筑科学研究院承办的第八届全国工程排水与加固技术研讨会于 2011 年 11 月 11~13 日在福州顺利召开。来自高校、科研、设计、施工及土工材料生产企业等单位的 148 名代表出席了本次研讨会。

本次会议是工程排水与加固专业委员会自 1992 年成立以来连续举办的第八次全国性技术研讨会。大会邀请港口工程分会理事长、中交水运规划设计研究院吴澎教授和长江科学院包承纲教授分别作了题为《我国港口工程的发展及相关岩土工程问题》和《加筋土结构设计中存在的问题和解决途径》的特邀报告。另外, 会议邀请相关专家就大面积围海造陆技术、基坑工程降水、土工合成材料测试技术、海洋岩土工程进展等方面作大会主题报告。来自全国各行业从事工程排水与加固的专家、学者、工程技术人员和有关厂家代表汇聚一堂, 深入探讨工程排水与加固领域的热点和难点问题, 介绍新技术、新材料、

新工艺的开发与应用, 讨论如何进一步发展和提高我国工程排水与加固的技术水平, 更好地为国家经济建设和社会发展服务。

本次会议由中国水利水电出版社出版了《第八届全国工程排水与加固技术研讨会论文集》, 收录论文 39 篇。内容涉及地基加固的理论研究和数值分析、工程排水与加固材料的应用与测试、重大工程的设计、施工与现场试验等。为鼓励青年学者的技术创新, 本次大会评选出十篇学会优秀论文。

会议期间召开了工程排水与加固专业委员会年会, 各位委员对如何扩大学会影响力、增强对外交流、推动土工材料检测方法和设备的标准化、推进现有行业标准上升到国家标准、更好地发挥学会的平台作用等方面进行了广泛的交流。会议选举产生了新一届学术委员会组成人员, 南京水利科学研究院副院长戴济群教授当选为工程排水与加固专业委员会新一届主任委员。

(中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会秘书处 关云飞供稿)