

DOI: 10.11779/CJGE201607004

不同含水率下黄土冻融循环对湿陷性影响探讨

谷 琪, 王家鼎*, 司冬冬, 许元珺, 陈 朋, 李 彬

(西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 黄土通常可作为公路路基主要的填筑材料, 湿陷性黄土经压实后, 很大程度消除了湿陷性, 能够满足路基整体强度和稳定性的要求, 但在季节冻土区, 黄土路基运营几年后仍发生大量的不均匀沉降、塌陷等病害。为分析冻融循环作用下各级含水率对黄土湿陷性的影响, 采用室内试验的方法, 对湿陷性黄土进行不同的冻融次数, 探究其在冻融循环过程中变形及冻融循环后湿陷情况。实验结果表明: 冻融循环之后的各级含水率重塑黄土仍具有二次湿陷性; 冻融循环作用下高含水率的土体结构比低含水率的土体结构破坏的较早; 干密度一定时, 低含水率的土体冻融循环之后的净变形量越大, 湿陷系数越小, 冻融循环之后的净变形量越小, 湿陷系数越大。

关键词: 冻土; 湿陷性; 黄土; 冻胀; 融沉; 冻融循环

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)07-1187-06

作者简介: 谷 琪(1990-), 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事黄土湿陷、滑坡等灾害防治方面的研究。E-mail: 164349355@qq.com。

Effect of freeze-thaw cycles on collapsibility of loess under different moisture contents

GU Qi, WANG Jia-ding, SI Dong-dong, XU Yuan-jun, CHEN-peng, LI Bin

(Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Loess is usually used as the main building materials for road subgrade. The collapsibility can be greatly eliminated after compaction of collapsible loess, and it can satisfy the requirements of whole intensity and stability of road subgrade. However, a lot of disasters such as differential settlement and collapse occur after the road subgrade of loess has been used for several years in seasonally frozen soil zone. In order to analyze the influence of various levels of moisture contents on collapsibility of loess under freeze-thaw cycles, deformation and collapsibility of collapsible loess are studied under different freeze-thaw cycles in laboratory. The test results indicate that the remolded loess at every level of moisture content still has secondary collapsibility after freeze-thaw cycles. The soil structure with higher moisture content is damaged earlier than that with lower moisture content under freeze-thaw cycles. When the dry density is certain, the larger the net amount of deformation with low soil moisture content after freeze-thaw cycles is, the smaller the collapsible coefficient is, and vice versa.

Key word: permafrost; collapsibility; loess; frost heave; thaw collapse; freeze thaw cycle

0 引言

黄土孔隙发育, 具有易渗透性、易湿陷性、易崩解性和水稳定性差等特性, 尤其在季节冻土区, 黄土路基运营几年后仍发生大量的不均匀沉降、塌陷等病害。大量研究表明, 不同的冻融次数, 土的微观结构在很大程度有很大变化。进而影响其湿陷性。高国瑞等^[1]对黄土的微结构进行了分类, 探讨了黄土湿陷的微观机理, 从微观和宏观两个角度研究了黄土的工程性质。王家鼎^[2]曾对黄土自重湿陷的机理进行深入探讨, 提出一种饱和黄土脉动弱化观点。冻胀和融沉作用是造成冻土地区路基破坏的主要原因^[3]。Edwin等^[4]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^[5]、宋春霞等^[6]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。王泉等^[7]研究了冻融循环对黄土二次湿陷特性的影响。表明重塑黄土与原状黄土的二次湿陷系数随着冻融循环次数的增加趋向于同一个特定值。如果土冻结时的体积膨胀(冻胀)受约束或不允许变形, 将对建筑物产生数值相当大的冻胀力。在

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372269); 高等学校博士学科重点基金项目(2011610113001); 大陆动力学国家重点实验室重点基金项目

收稿日期: 2015-06-16

*通讯作者

自然条件下,地基土和构筑物本身的土质、水文及冻结条件往往是不均一的,因而造成建筑物的不均匀冻胀变形使其不能正常运行、甚至遭破坏,或者即使在冻结时尚能运行,一经融化便丧失承载能力而被破坏^[7]。因此,对冻土的水分场的研究有相当重要的意义。本文通过冻融循环和含水率双重影响因素下对湿陷性黄土湿陷性进行研究,为季节冻土区黄土湿陷产生的原因和机制研究提供解释,为黄土湿陷灾害防治提供了科学依据。

1 试验概况

1.1 试验样品基本物理指标

在咸阳地区采取黄土土样,按照《土工试验方法标准》对土样进行含水率、液塑限、比重及最大干密度等进行测试,测试结果:比重为 2.702,干密度为 1.64 g/cm^3 ,含水率 w 为 15.4,液限 w_L 为 35.5%,塑限 w_p 为 17.9%。

1.2 试样制备和试验方法

众所周知,土体冻结过程中,土矿物颗粒自身要发生冷缩,而土中水冻结则要发生冻胀,决定土体冻胀或冻缩的是土中含水率。含水土层产生膨胀或融沉的量的大小主要取决于原土层中含水状况及水分迁移量的多寡。薄膜水迁移造成水分重分布的最主要因为土体冻结过程中的温度场、水分场的耦合作用。此次研究的是水分场,故控制温度场恒定。同时影响薄膜水迁移量的大小是土体干密度,故将干密度控制在很小的区间内。按照规范要求对湿陷性黄土做击实并制取环刀,并将制取的环刀放在固结容器上后周围用凡士林密封(图 1),防止水分散失引起含水率变化对实验结果造成影响。将土样安装在固结容器上之后放入可控式的超低温特制冰箱,在箱体内铺两层气泡膜,防止冰箱震动对读数影响(图 2)。



图 1 密封土样

Fig. 1 Sealed soil sample

箱体内的环境温度精度可以达到 0.1°C 。试样在 -20°C 的冻结温度下冷冻,在 25°C 的融化环境融化(图

3),冻融期间间隔 1 h 读一次数据,数据相连 6 个或以上一样认为土体已经冻融稳定。此为一次冻融循环。重复以上过程,试样冻融循环次数分别为 0 次、3 次、5 次、10 次。每次冻融循环完成后,按要求对土样进行黄土湿陷试验。将冻融循环后的土体在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行扫描电镜。黄土湿陷实验按照规范要求的方法进行。



图 2 冷冻土样

Fig. 2 Frozen soil sample



图 3 解冻土样

Fig. 3 Thawing soil sample

2 试验结果分析

2.1 冻融引起的土体变形结果分析

土体冻结或融化过程中,会发生水—冰或冰—水的相态变化。冻结时,孔隙中水变成冰,冰在土体中形成各种结构,土颗粒发生位移,土体发生冻胀。冰融化后,留下的大孔隙又不能恢复到冻前的细小孔隙,致使土壤变的疏松,孔隙度增大,影响了土体的各物理指标。现对各级含水率的土体进行冻融,取典型的 6%, 13%, 25% 土体进行分析,其变形结果如图 4~6。

从图 4 可以看出,此含水率下的土体冷冻后出现冻胀,解冻后其体积缩小出现融沉。第 1 次冻胀变形量是 0.009 mm ,解冻后变形量是 0.014 mm 。相比未冻前出现体积减小。之后每次冷冻都出现冻缩,并且一次次冻缩量增大,最大冻缩量为 0.07 mm 。冷冻第

7 次时基本处于稳定状态。第 4 次冻融土体融沉量最大, 说明土体结构已破坏。

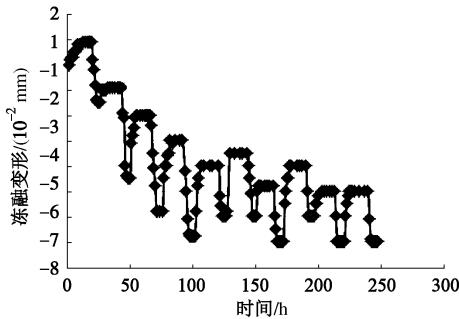


图 4 含水率为 6% 土体-20℃冻融变形图

Fig. 4 Freeze and thaw deformation of loess with moisture content of 6% at -20°C

从图 5 可以看出, 此含水率下的土体冷冻以后直接出现冻缩。第 1 次冻缩变形量是 0.05 mm, 解冻后其出现体积膨胀且变形量是 0.012 mm。第 2 次同第 1 次一样均出现冻缩和解冻时体积膨胀, 但膨胀变形量只为 0.002 mm, 随后每次解冻未出现体积膨胀, 在此含水率下对土体进行冻融, 其最大冻缩量为 0.1 mm。冷冻第 7 次时基本处于稳定状态。从图中可看出第四次冻融变形量最大, 说明土体结构已破坏。

从图 6 可以看出, 此含水率下的土体一直是处于冻胀状态。第一次冻胀变形量是 0.142 mm, 解冻后其体积缩小且变形量是 0.028 mm。之后每次冻融虽然土体均出现冻胀和融沉, 但相对于冻融之前而言其体积均是膨胀。在此含水率下对土体进行冻融, 其最大冻胀量为 0.345 mm。冷冻第 7 次时基本处于稳定状态。从图中可看出第 3 次冻胀量最大, 说明土体结构已破坏。

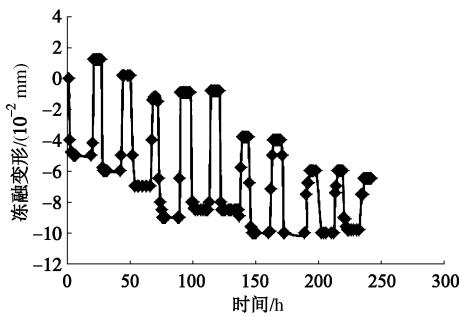


图 5 含水率为 13% 土体-20℃冻融变形图

Fig. 5 Freeze and thaw deformation of loess with moisture content of 13% at -20°C

最后为了更加明确地看到含水率为 6%, 13%, 25% 土体在经历冻融次数为 1, 3, 5, 10 时的变形量, 现将它们列于表 1。

在土水系统中, 当土体温度下降至土中水冻结起始温度点及其以下时, 土颗粒间和孔隙中部分水相变结晶, 体积膨胀, 使间隙体积变大而推动土颗粒移动

的总体宏观现象, 称为冻胀。故出现了图 4, 6 现象。但从相关资料了解到, 并非所有的低于零度的土体都会产生冻胀, 一般只有水-冰发生相变的时候才会产生, 因负温下土温度愈低, 冷缩颗粒和冰都遵循热胀冷缩的规律。如果土体中无足够的水分参与冻结, 那么不但不产生冻胀, 相反却有冷缩现象。只有在热力势和土水势等的作用下, 未冻结区的水分向冻结前缘迁移、聚集, 并与冻前初始含水率共同参与冻结, 才产生体积膨胀。

表 1 不同冻融次数下各级含水率土体变形量表

Table 1 Deformations of soil with various levels of moisture contents under different freeze thaw cycles (0.01 mm)

冻融次数	含水率 6%		含水率 13%		含水率 25%	
	冻	融	冻	融	冻	融
1	0.9	-1.4	-5	1.2	14.2	-2.8
3	-2.0	-5.8	-6.8	-1.4	29.6	2.2
5	-4.1	-6.2	-8.2	-0.8	32.4	4.7
10	-5.1	-7.0	-9.8	-6.5	34.5	6.4

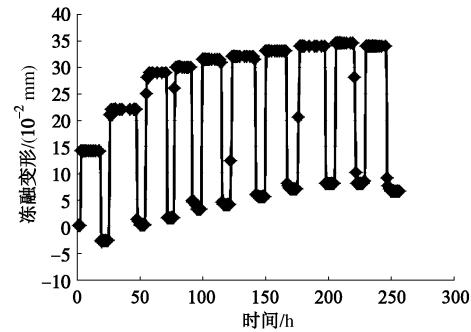


图 6 含水率为 25% 土体-20℃冻融变形图

Fig. 6 Freezing and thawing deformation with 25% of water at -20°C

试验中土质和初始含水率一定, 水分迁移的强度主要取决于冻结速率的大小。土体之中水分迁移量的大小与冻结锋面推进的快慢有直接关系, 而冻结锋面的推进程度又依赖于冻结速率。冻结速率大时, 冻结锋面处的原始水分冻结快, 其原来的能量平衡和物质平衡被破坏, 冻结锋面相对稳定时间变短, 迁移来的水分的数量难以维持相变所需含水率, 为了维持相变界面的能量和物质平衡, 冻结锋面推进加快, 以达到新的平衡。而这样水分迁移相对时间要短, 迁移量也相对要小。冻结速率小时, 冻结锋面推进相对缓慢, 显然维持时间增长, 水分有足够的时间向锋面处迁移, 以维持相变处的能量和物质平衡, 随之而来的是水分迁移量和相变量的增加。这进一步阻滞冰锋面的推进, 造成水分向锋面处集聚加剧。故出现土体冻胀变形图中的含水率越大, 对应每次冻、融土体变形量越大的现象。

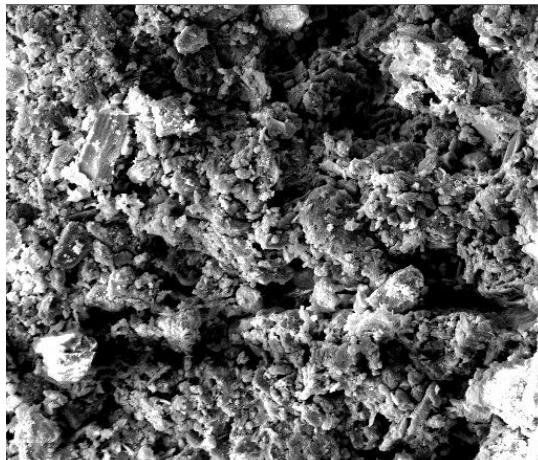
一般情况下, 在温度、土密度等相同的条件下, 初始含水率愈大, 水分迁移量愈大, 反之则愈小。初

始含水率本身对水分迁移并无影响,真正产生影响的是含水的相变作用所延缓冰结锋面推进能力。这种能力使冻结过程相对延长。如果冻结速率足够大,水分尚未迁移就已经完全冻结,这时不论初始含水率再大,对水分迁移均无影响。又若导水系数等于零时,哪怕初始含水率再大,也同样不会对水分迁移产生影响。总之,只有在相同的常规冻结速率等条件下初始含水率大,冻深发展慢,为水分迁移提供的有效时间增多,

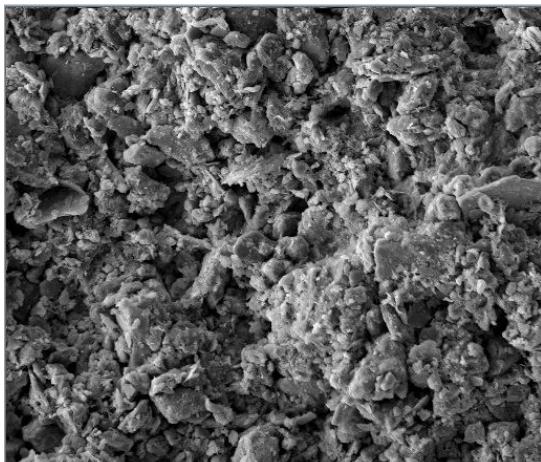
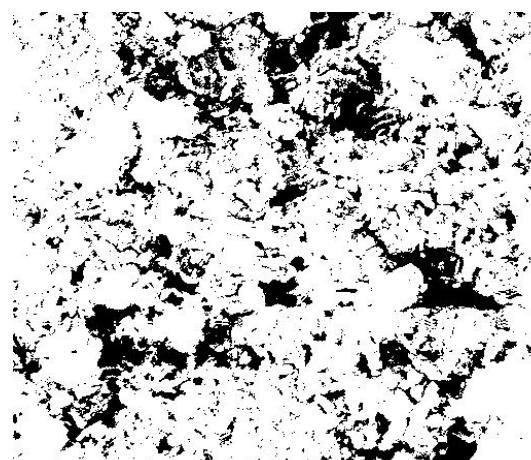
迁移水分的累积量增加,客观上表现为初始含水率对水分迁移的作用。

2.2 冻融循环影响土体湿陷性分析

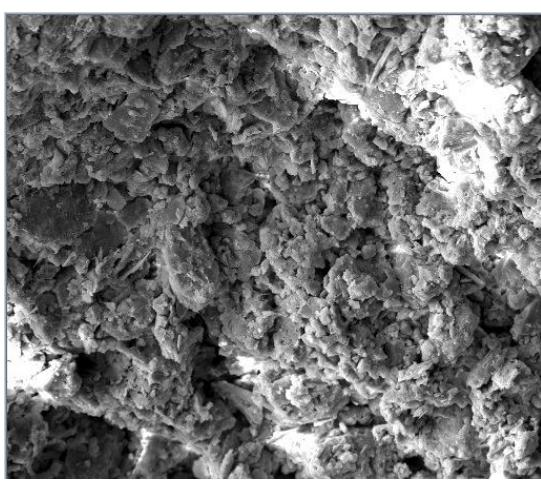
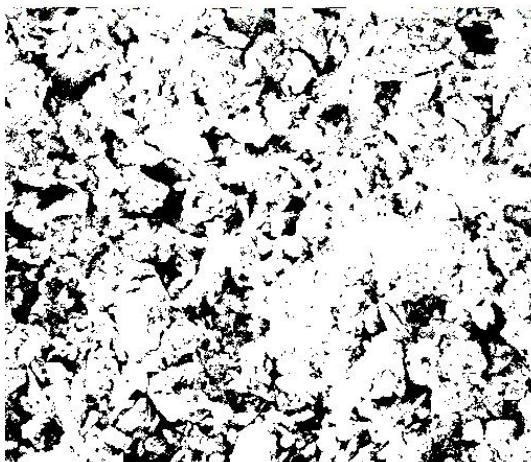
对于原状黄土而言,含水率的多寡对黄土湿陷有一定的影响。其呈现的规律为含水率越大,湿陷系数越小^[9]。为了更加清楚的揭示冻融循环对黄土湿陷性的影响,现对含水率为 13% 的土体在经历冻融 0, 3, 5, 10 次后做扫描电镜见图 7。



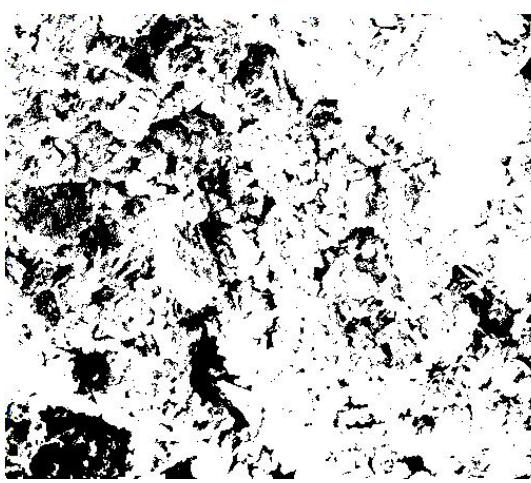
(a) 冻融循环次数为 0 次的土体微观结构图

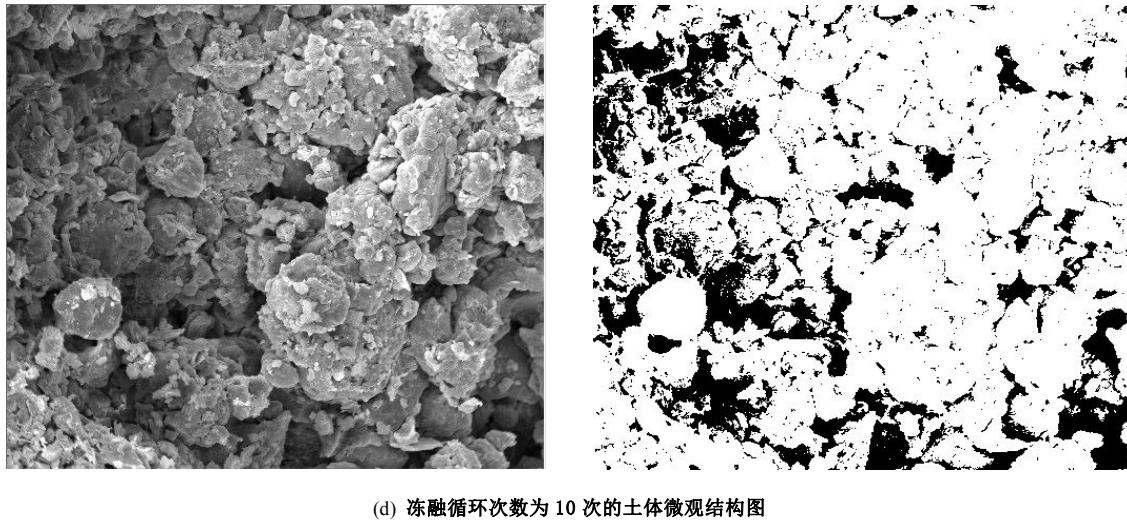


(b) 冻融循环次数为 3 次的土体微观结构图



(c) 冻融循环次数为 5 次的土体微观结构图





(d) 冻融循环次数为 10 次的土体微观结构图

图 7 含水率为 13% 的土体冻融循环微观结构图

Fig. 7 Microstructure of loess with moisture content of 13% after freeze-thaw cycles

对图 7 中含水率为 13% 的土体冻融循环微观结构图用 IPP(Image-Pro Plus)进行处理, 得出颗粒面积、孔隙面积、平面孔隙率。具体情况见表 2。

表 2 含水率为 13% 的土体经历冻融后孔隙率变化表

Table 2 Change of soil porosity with moisture content of 13% after freeze-thaw cycles

冻融 次数	颗粒面积 / μm^2	孔隙面积 / μm^2	总面积 / μm^2	平面孔 隙率/%
0	255	6547.428721	10733.34639	62.11
3	255	8035.338744	10558.07946	56.78
5	255	5145.398136	11980.31559	69.96
10	255	8867.566544	9893.300085	52.73

对经历了冻融循环之后的各级含水率土体进行试验, 测定其湿陷系数, 见图 8。可以看到冻融第 3 次时黄土体湿陷系数均出现明显变化, 说明此次冻融循环所有土体结构已破坏或已接近破坏。同时知道影响黄土湿陷的主要特征包括骨架颗粒形态、连接形式和排列方式。而连接形式和排列方式势必会影响颗粒孔隙。进而会影响湿陷系数。从图 7 和表 3 可知 3 次冻融循环后土颗粒排列较开始更为紧密, 说明土体开始破坏或已接近破坏。而 5 次冻融循环后土颗粒排列疏松多孔, 这是由于土体中水分的冻胀作用, 破坏了土颗粒之间的连结, 体积增大, 土体孔隙增大。而当土体融化时, 随着土体中的固态冰变成液态的水, 土颗粒之间冻胀形成的大孔隙由于土颗粒的重力作用下, 颗粒下沉, 使得土体内原有的大孔隙减少, 小孔隙增多, 从而使孔隙比增大。到第十次的时候土体孔隙开始变小, 说明已经稳定。冻融主要破坏了土体的排列方式, 进而改变了黄土的湿陷性^[10]。

2.3 冻融循环之后的净变形量与湿陷系数关系分析

研究土体在冻融循环次数作用下的变形量时发现, 在干密度一定情况下, 低含水率的土体的冻融循环之后的净变形量越大, 湿陷系数越小; 冻融循环之后的净变形量越小, 湿陷系数越大(冻融零次除外)。反之, 高含水率的土体冻融循环之后的净变形量越大, 湿陷系数越大, 冻融循环之后的净变形量越小, 湿陷系数越小(冻融零次除外)。例如, 从图 8, 9 中含水率为 13% 的土体, 其在冻融 3 次、5 次、10 次的情况下, 变形量分别为 0.014, 0.008, 0.065 mm 相应的湿陷系数为 0.0204, 0.02683, 0.0194。究其原因, 笔者认为, 若土体在未冻融时压缩量的大小是一定的, 后期经过反复的冻融循环, 破坏了土体结构, 高含水率土体出现冻胀, 低含水率土体出现冻缩, 对其进行湿陷实验时, 故高含水率的土体冻融变形量大湿陷系数大, 低含水率的土体冻融变形量小湿陷系数大。由此可见冻融变形量与湿陷系数间有必然的关系。

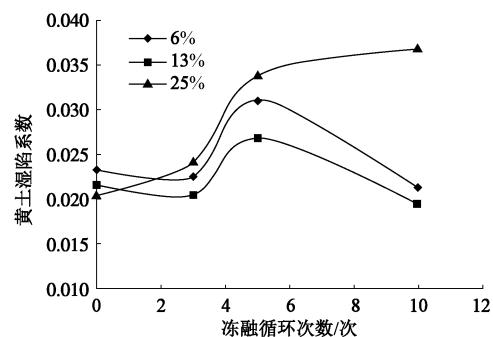


图 8 黄土湿陷系数随冻融循环次数变化

Fig. 8 Change of collapsibility coefficient of loess with freeze-thaw cycles

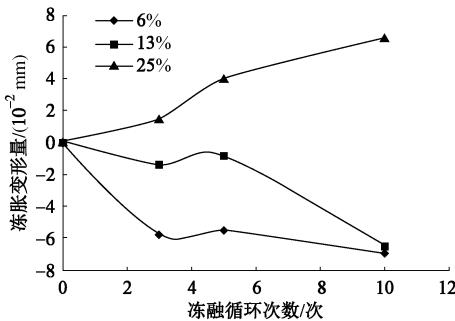


图 9 各冻融循环次数下冻胀变形量图

Fig. 9 Frost-heave deformations of loess under different freeze-thaw cycles

3 结 论

(1) 冻融循环之后的各级含水率重塑黄土二次湿陷系数大于 0.015, 说明冻融条件下仍具有二次湿陷性。

(2) 冻融循环作用下, 高含水率的土体与低含水率的土体相比, 高含水率的土体结构破坏的较早。并且每次冻融中高含水率土体变形相对舒缓。

(3) 在土质和初始含水率一定时, 含水率越大, 对应每次冻、融土体变形量越大。

(4) 干密度一定时, 低含水率的土体冻融循环之后的净变形量越大, 湿陷系数越小, 冻融循环之后的净变形量越小, 湿陷系数越大。反之, 高含水率的土体冻融循环之后的净变形量大, 湿陷系数越大, 冻融循环之后的净变形量越小, 湿陷系数越小。

(5) 由于土体中水分的冻胀作用, 破坏了土颗粒之间的连结, 体积增大, 土体孔隙增大, 进而改变了黄土的湿陷性。

参考文献:

- [1] 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, 1979(2): 123 – 134. (GAO Guo-rui. Study of the microstructures and collapse mechanism in loess soil from Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou University, 1979(2): 123 – 134. (in Chinese))
- [2] 王家鼎, 张倬元, 李保雄. 黄土自重湿陷变形的脉动液化机理[J]. 地理科学, 1999(3): 80 – 85. (WANG Jia-ding, ZHANG Zhuo-yuan, LI Bao-xiong. A mechanism in loess self-load collapse[J]. Scientia Geog Ra Phicasinica, 1999(3): 80 – 85. (in Chinese))
- [3] GANDAHL R. The damaging effects of frost action in roads, overview of types of damage and preventive measures, VTI report No.230[R]. Linkoping: Swedish Road and Traffic Research Institute, 1980: 418 – 423.
- [4] 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.
- [5] 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(12): 2082 – 2086. (QI Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082 – 2086. (in Chinese))
- [6] 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+1086. (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+1086. (in Chinese))
- [7] 王 泉, 马 巍, 张 泽, 等. 冻融循环对黄土二次湿陷特性的影响研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 376 – 382. (WANG Quan, MA Wei, ZHANG Ze, et al. Research on the secondary collapse properties of loess under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 376 – 382. (in Chinese))
- [8] GANDAHL R. The Damaging effects of frost action in roads, overview of types of damage and preventive measures, VTI report No.230[R]. Linkoping: Swedish Road and Traffic Research Institute, 1980: 418 – 423.
- [9] 高凌霞, 杨向军. 西安地区黄土湿陷性的影响因素[J]. 大连民族学院学报, 2003, 4(1): 66 – 69. (GAO Ling-xia, YANG Xiang-jun. Factors affecting the loess collapsibility in Xi'an[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2003, 4(1): 66 – 69. (in Chinese))
- [10] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980, 11(12): 1203 – 1208, 1237 – 1240. (GAO Guo-rui. Loess microstructure classification and collapsibility[J]. Science China, 1980, 11(12): 1203 – 1208, 1237 – 1240. (in Chinese))