

# 冻融循环作用对黄土压缩性的影响

师华强<sup>1</sup>, 倪万魁<sup>1,2</sup>, 刘魁<sup>1</sup>, 刘海松<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 黄土不同循环次数冻融试验研究表明, 冻融循环作用改变了土的粒径分布, 随着冻融循环次数的增加, 土体中细颗粒不断增加, 土体孔隙比变大, 从而使得土体密度变小, 但减少的量很小; 冻融循环作用使土的压缩系数增大, 压缩模量减小。

**关键词:** 冻融循环作用; 黄土; 压缩性

**中图分类号:** TU411.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2012)03-0045-04

在寒区进行路堑开挖、新削边坡和路基修建等工程活动时, 会使土体新近暴露于冻融作用之下, 在相关的变形计算和稳定性分析中, 必须考虑其物理力学性质的变化<sup>[1]</sup>。黄土在我国具有广泛的分布, 且主要集中在西北、华北地区, 处在季冻区。在季冻区, 伴随着黄土中水冻结成冰和黄土中冰的消融而产生路基冻胀和融沉现象, 表现出路面的裂缝、波状起伏、鼓胀、翻浆、槽沟状车辙、边沟漏水渗水、水坝融沉塌陷等。杨平等<sup>[2]</sup>研究发现土冻融后, 密度、干密度及塑性指数略有降低, 孔隙比、液性指数略有增大; 宋春霞等<sup>[3]</sup>研究发现冻融循环使低容重的土容重增大, 而高容重的土容重减小, 即对不同容重的土具有强化和弱化双重作用; 杨成松等<sup>[4]</sup>研究发现经过多次冻融循环以后, 土体的干容重趋于某一定值, 这一定值与土体的初始干容重无关, 而与土体的种类有关; 齐吉琳等<sup>[5]</sup>研究发现冻融前后土的力学性质和微观结构特征都有一定的变化, 而力学性质的变化从某种程度上都可以从微观结构的定量改变中得到解释; 王大雁等<sup>[6]</sup>研究发现冻融过程是土体从不稳定态向动态稳定态的发展过程, 冻融循环作用改变了土体的性状, 使得土体向新的动态稳定平衡状态发展; 银英姿等<sup>[7]</sup>研究发现季节冻土区地基土受温度、水分、土质及其外荷载的共同影响; 张贵生等<sup>[8]</sup>研究发现多次冻融土样的干密度逐渐减小, 且冻融循环后, 土体压缩系数增大。毕贵权

等<sup>[9]</sup>研究发现冻融循环使得黄土样的干密度逐渐减小, 且冻融循环剧烈的上部干密度较下部更小。但总体上对于冻融作用对季冻区黄土压缩性的影响研究很少见。

针对季冻区黄土施工建设中遇到的黄土工程问题, 本文通过研究反复冻融作用对土体粒度、孔隙比、密度和液塑限的影响, 研究冻融作用对黄土压缩性的影响, 以期对冻胀、融沉等路基病害进行综合性治理提出可行性的建议。

## 1 试验内容和方法

试验样品取自洛川, 取样深度为 9.85 ~ 10.00m。试验中研究了不同冻融循环次数下, 黄土粒度、孔隙比、密度和液塑限的变化, 进而分析冻融循环作用对压缩性影响的原因。

原状土取样之后, 密封送到试验室。冻融试验是在中国科学院冻土工程国家重点实验室(兰州)完成。首先对原状黄土进行常规的土工试验, 然后制冻融试验样品。冻融设备采用可控式超低温试验机(MUC-63SS5+LN2)。试验样品密封装在密封袋中, 防止样品水分散失。将密封袋放入冻融箱中冻融, 整个密封袋为一个冻融循环体系。试样在-31℃的冻结温度下冷冻12h, 保证试样完全冻透; 在29℃的温度下融化10h, 确保试样完全融化, 这样为一次冻融循环。重复以上过程, 试样分别冻融循环2次、15次和50次。冻融循环完成后, 立刻对冻融后的样品做试验。其中固结试验采用三联中低压固结仪, 界限含水率采用液塑限联合测定仪测定。密度测定使用环刀法。粒度测定使用的是陕西省师范大学 Mastersizer 2000 颗粒分析仪。

收稿日期: 2011-07-27; 修订日期: 2011-11-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030741); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE200702)

作者简介: 师华强(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为黄土的冻融。

E-mail: shihuaqiang21@126.com

## 2 试验结果及分析

### 2.1 冻融循环作用对土的物理性质的影响

#### 2.1.1 冻融循环作用对土的粒度的影响

冻融作用改变了土的粒度分配。随着冻融循环次数的增加,细颗粒粒径不断增加。表 1 所示为不同冻融循环下土颗粒含量的变化。表 1 中,冻融循环 2 次,小于 10 $\mu\text{m}$  土颗粒体积不足 10%,为 9.06%;冻融循环 15 次,小于 10 $\mu\text{m}$  土颗粒体积超过 10%,为

13.18%;冻融循环 50 次,小于 10 $\mu\text{m}$  土颗粒体积已超过 20%,为 20.69% (图 1)。冻融作用使得土体的细颗粒不断增多是由以下原因引起的:土体的冻融作用是土中水分的冻结和融化过程。在冻结温度下,土体中的水分变成冰;在融化温度下,冰又变为水。土体中冰水的转化,破坏了土颗粒之间原始的胶结,使得细小颗粒增多。在反复冻融作用下,细小土粒和矿物微裂隙中的水膜的楔开压力也随着发生变化,从而也导致细小土粒和矿物的破坏,使土颗粒粒径变小。

表 1 不同冻融循环次数对土样颗粒组成的影响

Table 1 Effect of the particles of soil samples under different freezing-thawing cycles

循环次数	砂(细中粗)	微砂组	粗粉粒组	细粉粒组	粗粘粒组	细粘粒组	胶粒组
	(%) >0.1mm	(%) 0.1~0.05mm	(%) 0.05~0.01mm	(%) 0.01~0.005mm	(%) 0.005~0.002mm	(%) 0.002~0.001mm	(%) <0.001mm
2 次	4.69	32.1	54.16	3.92	2.46	1.19	1.49
15 次	2.38	24.95	59.48	5.52	3.82	1.88	1.96
50 次	6.01	19.8	53.5	8.52	6.4	3.12	2.65

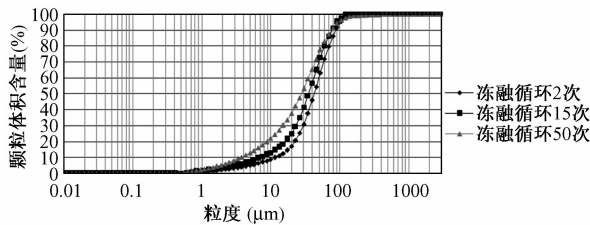


图 1 冻融循环对土颗粒的影响

Fig. 1 Effects of freezing - thawing cycle on soil particles

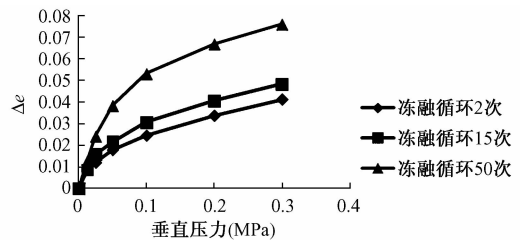


图 2 冻融循环对土孔隙比的影响

Fig. 2 Effects of freezing-thawing cycle on soil void ratio

#### 2.1.2 冻融循环作用对孔隙比的影响

冻融循环使得土的孔隙比不断增大(表 2)。图 2 是不同冻融循环次数下土的孔隙比增量的变化。在相同的外荷载下,随着冻融次数的增多,土的孔隙比的增量不断增大。这是由于在反复冻融作用下,水分的反复冻胀使得土体的孔隙不断增多,孔隙比不断地增大。

表 2 洛川黄土在不同冻融循环次数下孔隙比增量的变化

Table 2 Effect of the void ratio increment of the Luochuan loess under different freezing-thawing cycles

垂直荷载 (kPa)	冻融循环次数		
	2	15	50
12.5	0.01	0.01	0.01
25	0.01	0.02	0.02
50	0.02	0.02	0.04
100	0.02	0.03	0.05
200	0.03	0.04	0.07
300	0.04	0.05	0.08

#### 2.1.3 冻融循环作用对土体密度和液塑限的影响

冻融作用使土的密度减小,在冻融循环作用下,密

表 3 不同冻融循环次数对洛川黄土土样密度的影响

Table 3 Effect of the density of the Luochuan loess samples under different freezing-thawing cycles

冻融循环次数(次)	冻融前试样密度 (g/cm <sup>3</sup> )	冻融后试样密度 (g/cm <sup>3</sup> )	冻融后液限含水率 (%)	冻融后塑限含水率 (%)
2	1.71	1.69	33.6	17.3
	1.76	1.66		
	1.73	1.66		
15	1.75	1.68	33.4	16.7
	1.71	1.61		
50	1.68	1.59	33.5	17.4

度减小的量的变化不大,冻融循环作用对土的液塑限影响也不大。表 3 为不同冻融循环次数对土样密度和液塑限的影响。2 次、15 次和 50 次冻融循环下,冻融之前的土样密度都略大于冻融循环后的密度。这与文 [9] 得出冻融循环使得黄土样的干密度减小相符。而冻融循环对液塑限的影响不大。冻融作用中,土体水

分的冻胀使得土体孔隙比增大,从而使得密度减小。表3中,从冻融循环2次,到冻融循环15次、50次,土的密度变化已经不大。本次试验研究结果表明初期冻融循环对土体的密度、液塑限的影响大于随后的冻融循环。经过2次冻融循环后土体的密度减小的值已经与15次的接近,它们趋于的稳定值也接近。这是因为初期冻融循环次数对土的体积的影响远大于随后的冻融循环。在没有外界水分补给的情况下,初期冻融循环中水分的完全冻胀已经使得土体的体积变化趋于最大,而随后的冻融循环对土体体积影响已经不大。这种情况与Viklander提出的基于冻融作用的残余孔隙比的概念,即松散土和密实土经过若干冻融循环后趋向一个稳定的孔隙比 $e^{[10]}$ 、多次冻融循环后干容重趋于某一稳定值 $^{[4]}$ 相符。

2.2 冻融循环作用对土压缩性的影响

表4为不同冻融循环次数对压缩系数的影响。冻融循环作用使土的压缩系数增大,压缩模量减小。这与文[8]所得的结论相符。

表4 不同冻融循环次数对洛川黄土压缩系数的影响

Table 4 Effect of compression coefficient of the Luochuan loess under different freezing - thawing cycles

垂直荷载 (kPa)	压缩系数(MPa <sup>-1</sup> )			压缩模量(MPa)		
	冻融循环次数					
	2	15	50	2	15	50
12.5	0.687	0.948	1.321	2.709	1.940	1.453
25	0.223	0.567	0.914	8.333	3.247	2.101
50	0.231	0.236	0.564	8.065	7.812	3.401
100	0.132	0.178	0.294	14.085	10.309	6.536
200	0.091	0.098	0.137	20.408	18.692	13.986
300	0.074	0.078	0.091	25.000	23.529	21.053

图3为不同冻融循环次数下土压缩系数的变化。在相同的压力下,随着冻融循环次数的增加,土的压缩系数增大。这种变化是由于在冷端温度很低的情况下(本次试验冷端温度为-31℃),样品完全冻透所需要的时间比较长,因此在冻融循环中,会发生水分的迁移。冻胀从样品的顶部开始,水分不断向上迁移,这样在融沉阶段不仅是孔隙发生了变化,而且土颗粒的排列方式、颗粒之间的胶结也不断发生着变化。随着冻融循环次数的增加,土颗粒排列方式不断重组变化,颗粒之间最原始的胶结不断减少,从而使土体中的细颗粒不断增多,冻融循环中土体水分的冻胀又增大了土体的孔隙比。而且随着冻融次数的增加,融化土的孔隙比比冻融前的增大(表5)。试验是在土样完全融化的环境下做的固结试验。因此随着冻融循环次数的增

加,压缩系数不断增加。

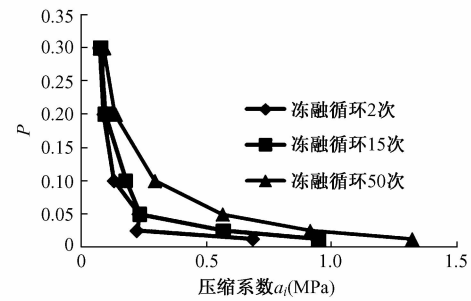


图3 不同冻融循环次数压缩系数与荷载曲线图

Fig. 3 Curve of compression factor and load under different freezing-thawing cycles

表5 不同冻融循环次数对孔隙比的影响

Table 5 Effect of the void ratio under different freezing-thawing cycles

名称	垂直荷载 (kPa)	冻融循环次数		
		2	15	50
洛川黄土	0	0.86	0.84	0.92
	12.5	0.85	0.83	0.91
	25	0.85	0.82	0.90
	50	0.84	0.82	0.88
	100	0.84	0.81	0.87
	200	0.83	0.80	0.85
	300	0.82	0.79	0.84

3 结论

(1)冻融循环作用改变了土的粒径分布。随着冻融循环次数的增加,土体中细颗粒不断增加,土体的孔隙比变大,从而使得土体密度变小,但减少的量很小。

(2)冻融循环作用使土的压缩系数增大,压缩模量减小。冻融作用对土压缩性的影响是由于冻融作用改变了土的粒径,密度和孔隙比。

致谢:感谢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试验对试验提供的帮助,感谢顾同欣、杨曙光、张淑娟和赵淑萍老师的帮助!

参考文献:

[1] 沈珠江. 抗风化设计——未来岩土工程设计的一个重要内容[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 866 - 869. [SHEN Z J. Weathering resistant design: An important aspect of future development of geotechnical engineering design [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 866 - 869. (in Chinese)]

- [ 2 ] 杨平,张婷. 人工冻融土物理力学性能研究[J]. 冰川冻土,2002,24(5):665-667. [ YANG P, ZHANG T. The study of artificial freezing and thawing of soil physical and mechanical[J]. Glacier, 2002, 24(5): 665-667. (in Chinese) ]
- [ 3 ] 宋春霞,齐吉林,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):1077-1086. [ SONG C X, QI J L, LIU F Y. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):1077-1086. (in Chinese) ]
- [ 4 ] 杨成松,何平,程国栋,等. 冻融作用对土体干容重和含水量影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003, 22(2):2695-2699. [ YANG C S, HE P, CHENG G D. Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 2695-2699. (in Chinese) ]
- [ 5 ] 齐吉琳,张建明,朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报,2003, 22(2):2690-2694. [ QI J L, ZHANG J M, ZHU Y L. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 2690-2694. (in Chinese) ]
- [ 6 ] 王大雁,马巍,常小晓,等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(23):4313-4319. [ WANG D Y, MA W, CHANG X X. Physico-Mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313-4319. (in Chinese) ]
- [ 7 ] 银英姿. 内蒙古季节冻土区地基土冻胀性研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(9):3840-3841. [ YIN Y Z. Study on the Froze Expand Performance of the Soil in Construction Ground in Seasonal Frost Region of Inner Mongolia [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2008, 36(9):3840-3841. (in Chinese) ]
- [ 8 ] 张贵生,梁波,刘德仁. 冻融循环对土体压缩参数及冻胀、融沉性影响研究[J]. 岩土工程界,2007(10):34-37. [ ZHANG G S, LIANG B, LIU D R. Studies on freeze-thaw cycles on soil compression parameters and frost heave, thaw resistance impact [J]. Geotechnical Engineering World, 2007(10):34-37. (in Chinese) ]
- [ 9 ] 毕贵权,张侠,李国玉,等. 冻融循环对黄土物理力学性质影响的试验[J]. 兰州理工大学学报,2010, 36(2):114-117. [ BI G Q, ZHANG X, LI G Y. Experiment of impact of freezing-thawing cycle on physico-mechanical properties of loess[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(2):114-117. (in Chinese) ]
- [ 10 ] Viklander Peter. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3):471-477.

## The impact of the freezing-thawing cycle to compression of the loess

SHI Hua-qiang<sup>1</sup>, NI Wan-kui<sup>1,2</sup>, LIU Kui<sup>1</sup>, LIU Hai-song<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, China;  
2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Through experimenting on the loess by different freezing-thawing cycles test, the conclusions are drawn that the freezing-thawing cycle changes soil particle size. With the increase in the number of freezing-thawing cycles, fine particles in the soil increase, soil pores become larger, and the soil density become smaller, but the reduction is very small. The freezing-thawing cycle of the soil increases the soil coefficient of compression, and the compression modulus decreases.

**Key words:** freezing-thawing cycle; loess; compression

责任编辑:张明霞