第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0226-05

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:陈静茹, 李宝平, 杨　帆, 等. 冻融循环条件下重塑黄土水分迁移及其对力学性质影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 226—230
Chen Jingru, Li Baoping, Yang Fan, et al. Moisture migration of remolded loess under freeze-thaw cycles and its effect on mechanical properties[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 226—230

冻融循环条件下重塑黄土水分迁移及其对力学性质影响

陈静茹　李宝平*　杨　帆　王元戎
(西安工业大学建筑工程学院,西安 710021)

摘　要　以西安地区黄土为研究对象,通过常规三轴剪切试验,研究了冻融循环对重塑黄土物理力学性质的影响。结果表明:试样冻融过程中水分不断向冰晶冰冻锋面迁移;即试样冻结过程中水分向试样表面迁移,融化之后水分向试样内部迁移;在此过程中试样结构性破坏,内部空隙增大,其剪切强度逐渐减小;故而试样含水率越大,冻融过程中水分迁移量越大,试样破坏越明显,其剪切强度降低越明显。

关键词　冻融循环　　常规三轴试验　　冻融黄土物理性质　　抗剪强度
中图法分类号　TU444;　　**文献标志码**　B

冻土可分为多年冻土和季节性冻土,其中季节性冻土在中国分布面积最广。西北大部分地区均处于季节性冻土区域;随着西部大开发战略的实施,在陕西地区大量建设公路、铁路、地铁等基础工程,在此过程中出现很多与冻融有关的工程病害问题;因此研究陕西地区黄土冻融特性是很有必要的。许多学者对此作出了大量研究,周泓等[1]对冻融黄土的密度、孔隙率、水理性质以及塑限液限进行了研究;穆彦虎等[2]、倪万魁等[3]采用电镜扫描对冻融黄土的微观结构进行定量研究;王铁行等[4]、肖东辉等[5]、许健等[6]通过对比原状与重塑黄土在冻融后渗透系数的变化,得出原状黄土的渗透性有明显各向异性;且其渗透系数随冻融周期的增大逐渐增大而后趋于稳定;重塑黄土渗透系数随干密度的增大而减小,随含水率的增大先增大后减小,并没有提出冻融改变黄土渗透性对其力学性质的影响;冻融对黄土湿陷性的影响与含水率有关,即低含水率时冻融后黄土净变形量越大,湿陷性系数越小,高含水率时黄土净变形量越小,湿陷性系数越大,其原因在于高含水率在反复冻融后产生冻胀,低含水率在反复冻融后产生冻缩,这时湿陷性由试样大中空隙及其组成的架空空隙控制导致的,土体冻融后空隙的分布受试样含水率的影响[6—8];王掌权等[9]、张辉等[10]通过室内直剪试验研究冻融黄土的强度特性,而在实际工程中土体甚少出现直剪受力状态。以上学者的研究对于冻融黄土的研究仅为物理性质的研究,或仅通过直剪试验研究冻融黄土的力学特性。而本文以重塑黄土为研究对象通过常规三轴试验探究冻融循环对于土体物理性质的改变及其导致的力学性质的变化。

1　试验方案

试验所用的黄土取自西安市雁塔区月登阁村,其基本物理性质如表 1 所示。

表 1　土样物理性质

Table 1　Physical properties of soil samples

干密度/($g\cdot cm^{-3}$)	塑限 W_P/%	液限 W_L/%	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	饱和含水率/%
1.7	16.5	29.7	13.2	0.455	30.5

将所取土样碾碎晒干并过 2 mm 的筛作为试验用土,用蒸馏水配制成不同含水率的土样,用干密度控制法保证土样压实度为 95% 以上分三层制样,试样直径为 39.1 mm,高为 80 mm 的标准三轴圆柱试样。采用冻融不补水冻融试验方法,将不同含水率的试样用保鲜膜包裹进行冻融循环试验,实验采用 −10 ℃冻结 12 h,室温融化 12 h 为一个冻融周期,冻融周期分别为 0 次、3 次、5 次、10 次、15 次。试样含水率分别为 16%、20%、24%。试验围压分

2018 年 7 月 27 日收到　　陕西省教育厅项目(16JK1386 17JK0384)、国家自然科学基金(11802218)、陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(LME201801)资助
第一作者简介:陈静茹(1994—),女,汉族,陕西礼泉人,硕士研究生。E-mail:15191682361@163.com。
*通信作者简介:李宝平(1971—),男,汉族,山西霍州人,硕士,副教授。E-mail:459485782@qq.com。

别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa,按照 GB—T50123—1999 标准进行固结排水试验,当轴向应变达到 15% 时认定为试样破坏,试验结束,具体试验方案见表 2,共计 60 个试样。

表 2　常规三轴试验方案

Table 2　Conventional triaxial test scheme

含水率 ω/%	冻融周期 N/次	围压 σ_3/kPa
16	0、3、5、10、15	50、100、200、300
20	0、3、5、10、15	50、100、200、300
24	0、3、5、10、15	50、100、200、300

2　试验结果及分析

2.1　水理性质分析

图 1 为 ω = 16% 试样冻融后黄土表面,分析得:ω = 16% 的试样冻融后土体表面完整,冻融 3 次、5 次分层处出现细小裂纹;而冻融 10 次、15 次出现纵向裂缝,裂缝细且长。这是由于在冻结时土体表面首先冻结,冰晶冻结表面的未冻水膜变薄而产生吸力使得土体内部水分向表面迁移,补充冰晶表面变薄的未冻水膜,使得冰晶不断扩大,冰冻锋面逐渐向土体内部延伸,土体冻结。当土体融化时土体表面冰晶首先融化,导致土体水分再次逆向迁移。土体水分来回迁移的过程中破坏土体的结构性,使得土体空隙增大,故而表现为土体表面出现裂缝或者虫孔状空隙,随着冻融周期的增加土体水分迁移次数增多土体结构性破坏明显,土体破坏愈严重。

图 2 为 ω = 20% 试样冻融后黄土表面,可知:ω = 20% 的试样冻融后土体较为完整,冻融 3 次在

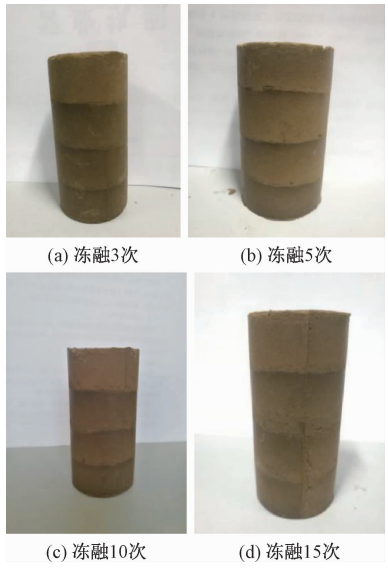

图 1　ω = 16% 试样冻融后黄土表面

Fig. 1　Loess surface after freezing and thawing of ω = 16% sample

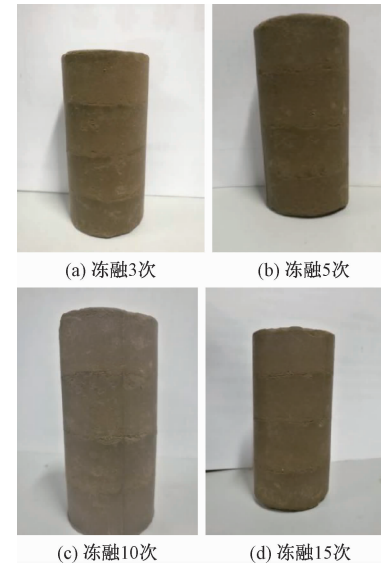

图 2　ω = 20% 试样冻融后黄土表面

Fig. 2　Loess surface after freezing and thawing of ω = 20% sample

分层处出现横向裂缝较同冻融周期下 ω = 16% 时稍宽,冻融 5 次分层处没有明显裂缝但有少量微小虫孔,冻融 10 次不仅在分层处出现横向裂缝,裂缝周围出现大量微小虫孔,同时出现少量纵向裂缝,冻融 15 次与 10 次相比虫孔稍大一些,且虫孔不仅局限于分层附近。其原因与 ω = 16% 时相同。

图 3 为 ω = 24% 试样冻融后黄土表面,可知:ω = 24% 的试样冻融后土体表面破坏严重,冻融 3 次土体表面有大量微小虫孔,土体表面稍有缺失,冻融 5 次土体表面虫孔大而密,土体表面破坏略严重,

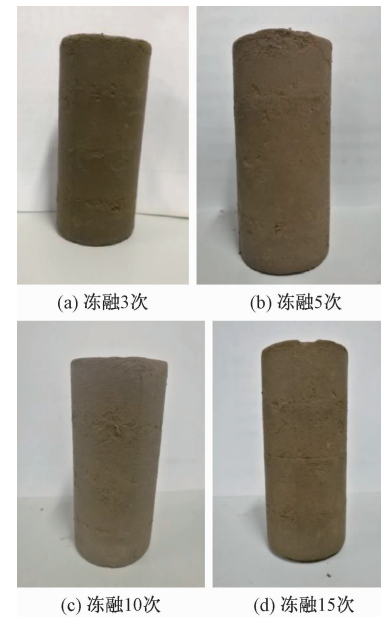

图 3　ω = 24% 试样冻融后黄土表面

Fig. 3　Loess surface after freezing and thawing of ω = 24% sample

冻融 10 次土体表面虫孔密集,并伴有冲刷痕迹,土体表面破坏严重,冻融 15 次土体分层处明显横向裂缝,并有纵向裂缝,土体表面冲刷严重,虫孔密集土体表面破坏特别严重。其原因与 $\omega=16\%$ 相同。

综上所述,随着试样含水率的增加,相同冻融周期的试样土体表面破坏越严重,这是由于含水率增大时土体冻融过程中水分迁移量增多,土体破坏越严重,高含水率的土体在融化时,土体表面冰晶首先融化,融化水分来不及分散顺着土体表面流动,故而 $\omega=24\%$ 含水率的试样在冻融 15 次后土体表面有明显的冲刷痕迹。

2.2 力学性质分析

图 4 为土体应力应变曲线,由图 4 可知,同含水率同冻融周期下,试样应力应变曲线随着围压的增

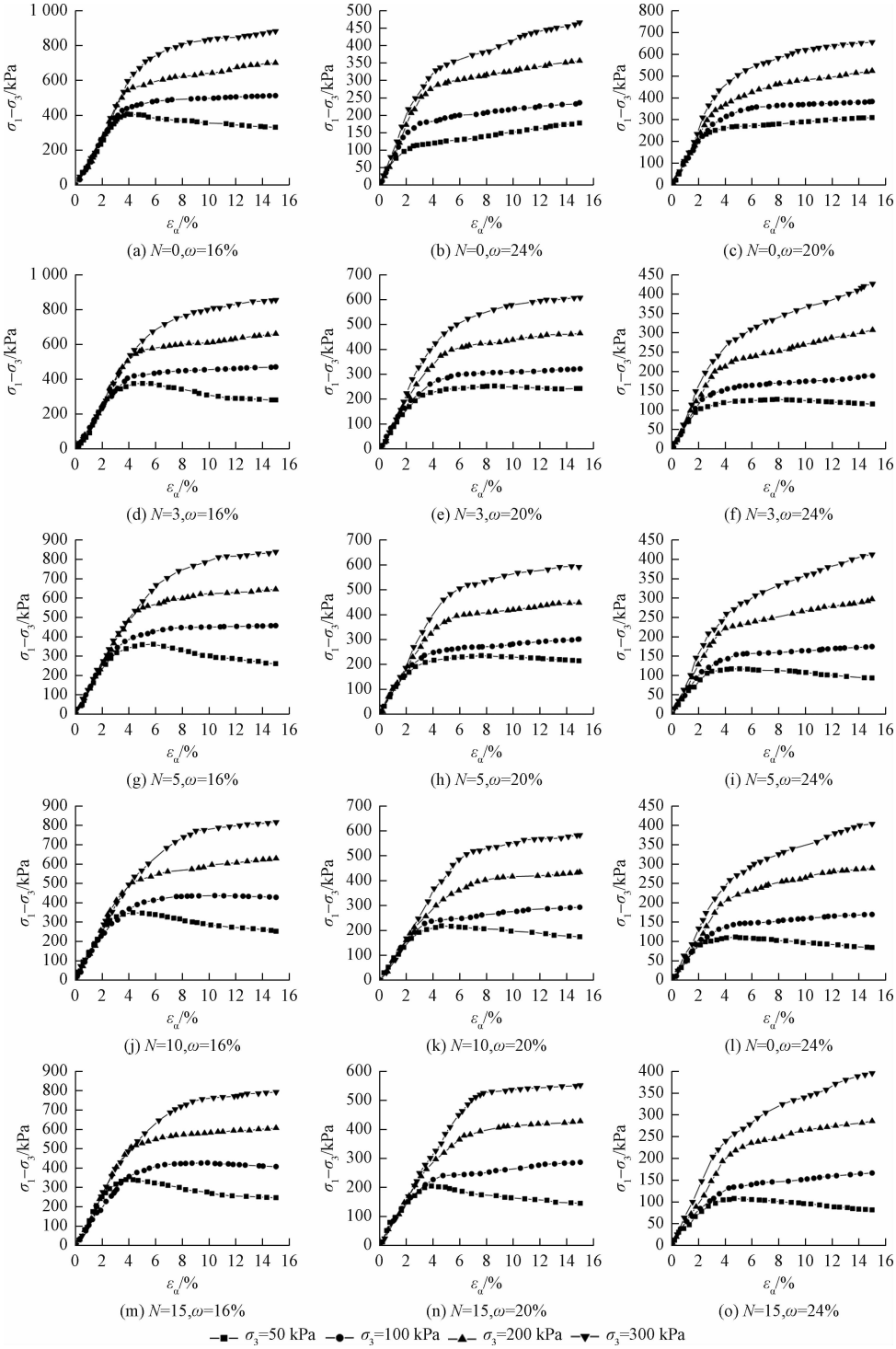

图 4 土体应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of soil

大趋于应变硬化,破坏时主应力差逐渐增大,同冻融周期同围压下,试样应力应变曲线随着含水率的增大趋于应变硬化,破坏时主应力差逐渐减小,这一性质与前人研究的未冻融黄土常规三轴试验结果相同,故此冻融重塑黄土常规三轴试验结果保持常规三轴试验破坏性质,其原因亦与前人研究的常规三轴曲线变化原因相同:随着围压的增加试样固结排水,使得土体内空隙体积减小,土体密实,从而导致其应力应变曲线由应变软化过渡为应变硬化,达到同一应变时应力值增大,破坏时主应力差逐渐增大;随着含水率的增大试样进行三轴压缩时内部水分起到润滑作用使得土体应力应变曲线趋于应变硬化,破坏时主应力差越来越小。同含水率同围压下,随着冻融周期的增大,土体应力应变曲线由应变硬化逐渐过渡为应变软化,破坏时主应力差逐渐减小,这是由于试样冻融后试样内水分迁移导致结构性遭到破坏,试样中空隙体积增大,集团颗粒减少,使得土体应力应变曲线由应变硬化过渡为应变软化,这种现象随着围压的增大逐渐减弱,这是由于随着围压的增大试样内部空气排出空隙体积减小,与冻融后空隙体积的增加相互抵消,当围压增至 200 kPa 及以上时,可完全抵消冻融空隙体积的增大,试样应力应变曲线均为应变硬化,但冻融后土体结构性遭到破坏故而其破坏时主应力差随着冻融周期的增加仍旧减小。

3　结论

(1)在含水率相同的土样下,随着冻融周期增大试样表面破坏越来越严重,不仅出现纵横向裂缝并伴有虫孔状裂隙,严重破坏土体的结构性,从而导致低围压下试样应力应变曲线趋于应变软化,破坏时主应力差逐渐减小,说明冻融对试样力学性质的影响是由物理性质的影响而造成的。

(2)同冻融周期下的土样随着含水率的增大,试样表面破坏愈严重,故而进一步说明含水率是影响冻融试样的破坏程度的重要因素。

(3)当含水率相同的条件下,随着围压的增大对试样的压密作用与冻融后试样的松散作用可以相互抵消,导致随着冻融周期的增大高围压下试样的应力应变曲线均为应变硬化。

参　考　文　献

1　周　泓, 张　泽, 秦　琦, 等. 冻融循环作用下黄土基本物理性质变异性研究. 冰川冻土, 2015; 37(1): 162—168
Zhou Hong, Zhang Ze, Qin Qi, *et al*. Study on variability of basic physical properties of loess under freeze-thaw cycle. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015; 37(1): 162—168

2　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. 岩土工程学报, 2011; 33(12): 1919—1925
Mu Yanhu, Ma Wei, Li Guoyu, *et al*. Microscopic quantitative study on the effect of freezing and thawing on the structure of compacted loess. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011; 33(12): 1919—1925

3　倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响. 冰川冻土, 2014; 36(4):922—927
Ni Wankui, Shi Huaqiang. The effect of freeze-thaw cycle on the microstructure and strength of loess. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014; 36(4): 922—927

4　王铁行, 杨　涛, 鲁　洁, 等. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响. 岩土力学,2016; 37(增刊1):72—78
Wang Tiexing, Yang Tao, Lu Jie, *et al*. Effects of dry density and freeze-thaw cycles on permeability of loess. Rock and Soil Mechanics, 2016; 37(S1): 72—78

5　肖东辉,冯文杰,张　泽,等. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响. 冰川冻土,2014; 36(5):1192—1198
Xiao Donghui, Feng Wenjie, Zhang Ze, *et al*. Effect of freezing and thawing cycle on permeability of Lanzhou loess. Journal of Glaciology and Geocryology,2014; 36(5): 1192—1198

6　许　健,王掌权,任建威,等. 冻融条件下重塑黄土渗透规律试验分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2017; 45(7): 134—142
Xu Jian, Wang Zhangquan, Ren Jianwei, *et al*. Experimental analysis on permeability of remolded loess under freeze-thaw condition. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2007; 45(7): 134—142

7　谷　琪, 王家鼎, 司冬冬, 等. 不同含水率下黄土冻融循环对湿陷性影响探讨. 岩土工程学报, 2016; 38(7): 1187—1192
Gu Qi, Wang Jiading, Si Dongdong, *et al*. The influence of loess freezing and thawing cycle on collapsibility under different moisture content is discussed. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016; 38(7): 1187—1192

8　潘俊义, 王治军, 周　鹏, 等. 庆阳黄土冻融环境下的特性研究. 地震工程学报, 2016; 38(3): 445—451
Pan Junyi, Wang Zhijun, Zhou Peng, *et al*. Study on the characteristics of Qingyang loess under freezing and thawing environment. China Earthguake Engineering Journal, 2016; 38(3): 445—451

9　王掌权,许　健,郑　翔,等. 反复冻融条件下黄土边坡稳定性分析. 中国地质灾害与防治学报,2017; 28(2):15—21
Wang Zhangquan, Xu Jian, Zheng Xiang, *et al*. Stability analysis of loess slope under repeated freezing and thawing. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2017; 28(2): 15—21

10　张　辉,王铁行, 罗　扬. 非饱和原状黄土冻融强度研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015; 43(4): 210—214,222
Zhang Hui, Wang Tiexing, Luo Yang. Study on freeze-thaw strength of unsaturated undisturbed loess. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015; 43(4): 210—214,222

Moisture Migration of Remolded Loess under Freeze-Thaw Cycles and Its Effect on Mechanical Properties

CHEN Jing-ru, LI Bao-ping*, YANG Fan, WANG Yuan-rong
(Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

[**Abstract**] The effect of freeze-thaw cycle on the physical and mechanical properties of remolded loess was studied by conventional triaxial shear test. The results show that during the freezing and thawing process, the moisture moves to the freezing front of the ice crystal, that is, the moisture moves to the surface of the sample during the freezing process, and the moisture moves to the inside of the sample after thawing, and the structural failure of the specimen occurs during the process of freezing and thawing. The larger the moisture content of the sample is, the greater the moisture migration is during the freeze-thaw process, and the more obvious the damage is, the more obvious the shear strength is.

[**Key words**] freeze-thaw cycle conventional triaxial test physical properties of freeze-thaw loess shear strength