

DOI: 10.11779/CJGE2021S1041

# 复杂应力条件下冻融作用对黄土强度的影响

郑方<sup>1</sup>, 邵生俊<sup>\*1,2</sup>, 王松鹤<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了研究复杂应力路径下冻融循环作用对黄土强度特性的影响作用, 利用真三轴试验仪对经历了不同冻融循环作用的重塑黄土, 进行了等  $p$  应力路径下的固结排水剪切试验。在冻融试验中设定试样分别经历 5 个不同的冻融循环为 0, 1, 3, 5, 10, 在剪切试验中控制球应力  $p$  恒定分别为 200, 300, 400 kPa, 并分别设定五个中主应力参数  $b$  值为 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1。试验结果给出重塑黄土的应力应变曲线, 重塑黄土  $p$ - $q$  面上的强度破坏线, 研究了冻融循环作用在不同  $b$  时对土体应力应变的曲线的影响及冻融作用和  $b$  值对重塑黄土强度参数的影响。研究结果表明: 冻融作用对土体的应力应变曲线形态基本没有影响, 而  $b$  的改变对对其形态影响显著。抗剪强度随冻融次数先降低而后略有升高最后趋于稳定, 而随着  $b$  值一直在减小。黏聚力随冻融次数先减小而后趋于稳定, 随  $b$  值先增大而后减小; 内摩擦角随冻融次数无规律的小范围波动, 随  $b$  值小范围的先增大后减小。

**关键词:** 重塑黄土; 真三轴仪; 冻融作用; 中主应力参数; 强度

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2021)S1-0224-05

**作者简介:** 郑方(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事黄土力学与非饱和土力学方面的研究工作。E-mail: zhshirley@126.com。

## Influences of freeze-thaw on strength of loess under complex stress path

ZHENG Fang<sup>1</sup>, SHAO Sheng-jun<sup>1,2</sup>, WANG Song-he<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to investigate the influences of freeze-thaw on the strength characteristics of loess under complex stress path, the true-triaxial apparatus is used to carry out consolidation drained shear tests under the constant  $p$  stress path for the remolded loess experiencing different freeze-thaw cycles. In the freeze-thaw tests, the samples are set to go through five different freeze-thaw cycles as 0, 1, 3, 5 and 10. In the shear tests, the constant spherical stress  $p$  is controlled as 200, 300 and 400 kPa, and the  $b$ -values of the five intermediate principal stress parameters are respectively set at the value of 0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1. The stress-strain curve of remolded loess and the strength failure line on the  $p$ - $q$  surface of remolded loess are given. The influences of freeze-thaw cycles on the stress-strain curves of soil under different  $b$ -value conditions and the effects of freeze-thaw and  $b$ -values on the strength parameters of remolded loess are discussed. The results show that the freeze-thaw cycles have little effect on the shape of the stress-strain curve of soil, while the change of  $b$ -value has significant effect on the shape. The shear strength first decreases and then slightly increases with the number of freeze-thaw, and finally tends to be stable, while it decreases with the value of  $b$ . The cohesion first decreases with the number of freeze-thaw cycles and then tends to be stable, while it increases with the  $b$ -value and then decreases. The internal friction angle fluctuates irregularly in a small range with the number of freeze-thaw cycles, while it increases first and then decreases with the value of  $b$  in a small range.

**Key words:** remolded loess; true-triaxial apparatus; freeze-thaw; intermediate principal stress parameter; strength

## 0 引言

黄土作为一种特殊土, 在中国西部地区广泛分布, 而该区域也是中国季节性冻土区广泛分布的区域, 位于该区的黄土构筑物, 如边坡、堤防、土坝、路基等, 在建设和运行期间势必会经历冻融循环作用的影响。随着“一带一路”战略构想的实施和西部大开发战略的持续发展, 势必会为西部地区带来更多的黄土工程建设, 因而很有必要进行有关冻融循环作用对黄土的物

理、力学特性的影响方面进行研究。

已有很多学者对冻融循环对黄土体物理性质的影响做了研究<sup>[1-4]</sup>, 研究成果表明冻融循环作用对黄土的密度、渗透性、微观结构、液塑限等都会产生影响。还

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(11572245, 41272320, 51778528)

**收稿日期:** 2020-12-15

**\*通信作者:** (E-mail: sjshao@xaut.edu.cn)

有很多学者通过试验研究了冻融循环作用对黄土的力学性质的影响,宋春霞等<sup>[5]</sup>、董晓宏等<sup>[6]</sup>等利用直剪试验研究了冻融作用对黄土的强度变形特性的影响;倪万魁等<sup>[7]</sup>、李双好等<sup>[8]</sup>、齐吉林等<sup>[9]</sup>等也利用常规三轴试验探究了冻融循环作用对黄土强度以及相关强度参数的影响。但是以往冻融循环作用对黄土抗剪强度特性的影响的试验研究多数仅局限在直剪试验和常规三轴试验,在直剪试验过程中,剪切试验中的剪切面是认为确定的,而在三轴试验中试样的侧向受力是对称的,但在实际工程中,土体受力复杂,三向受力往往是不相等的。

因此对于在复杂应力条件下来进行冻融循环作用对土体力学特性的研究方面的试验数据是比较缺乏的。基于此,本文利用西安理工大学的真三轴试验仪对经历冻融循环后的重塑黄土进行了复杂应力路径下真三轴剪切试验,在试验过程中控制球应力 $p$ 保持恒定,测试不同冻融循环次数下和不同中主应力参数下重塑黄土的应力应变曲线,将冻融循环作用和中主应力参数对黄土的特性的影响进行了综合考虑,更加真实的模拟了土体在实际工程中的复杂受力状态,为分析与冻融循环作用相关的黄土工程问题奠定了理论基础,弥补了冻融循环作用在复杂应力条件下对土体性质影响方面研究的欠缺。

## 1 试验仪器

本次试验采用的是西安理工大学的一向刚性加载,两向柔性加载的刚柔复合型真三轴试验仪,该仪器可以实现对试样进行三向独立加载,互不干扰,可以对试样进行加载来模拟更接近实际工况中的复杂应力路径。

## 2 试验方案

### 2.1 样品制备

该试验所用土取自西安市东郊某一施工现场,根据 GB/T50123—2019《土工试验方法标准》测得所取土样的基本物性指标如表 1。首先根据《土工试验方法标准》将从原状样品上切削下来的碎土配制含水率为 18.6% 的散土,静置待土料中水分运移均匀后,然后使用自制的真三轴压样器将土料分七层压实,制备成尺寸为 70.0 mm×70.0 mm×140.0 mm,干密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup> 的重塑试样。

表 1 试验用土的基本物性指标

| Table 1 Basic physical indexes of soil samples |                                 |            |             |             |            |
|------------------------------------------------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|------------|
| 土粒相对质量密度 $G_s$                                 | 天然干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$ | 含水率 $w/\%$ | 液限 $w_L/\%$ | 塑限 $w_p/\%$ | 塑性指数 $I_p$ |
| 2.70                                           | 1.40                            | 21         | 34.2        | 18.6        | 15.6       |

### 2.2 冻融试验

制备好的每一个重塑试样都采用塑料袋密封,以防止水分散发,将样品放置在可控温度的恒温箱内,一个密封袋可视为一个封闭的循环系统。设置恒温箱温度为 -20°,使试样先在该温度下冷冻 12 h;然后再设置温度为 20°,使试样再在该温度下融化 12 h,此为一个冻融循环。重复以上操作,即可对试样进行多次冻融循环。本次试验设计的冻融循环分别为 0,1,3,5,10 五个不同冻融循环试验,其中 0 次冻融循环即为未经冻融作用。

### 2.3 真三轴剪切试验

为了研究冻融作用在复杂应力路径条件下对重塑黄土的强度和变形的影响,此次利用真三轴试验仪对经历不同冻融(0,1,3,5,10)循环作用下的重塑黄土试样进行等 $p$ 应力路径下,不同中主应力参数 $b$ 的固结排水剪切试验。剪切时分别控制球应力为 200,300,400 kPa,设定中主应力参数为 0,0.25,0.5,0.75,1。该试验过程分均压等向固结和真三轴剪切阶段。固结时当轴向方向的变形速率不大于 0.1 mm/h 时即为固结完成。试验剪切时采用应变控制,设定剪切速率为 0.05 mm/min,设定试验结束标准为当轴向应变 $\varepsilon_1$ 达到 15%。

## 3 试验结果

### 3.1 应力应变曲线

通过对重塑黄土试样进行 0,1,3,5,10 次的不同冻融循环后,利用真三轴试验仪,对未冻融和冻融后的试样进行了等 $p$ 应力路径下的真三轴剪切试验,得到了重塑黄土在不同冻融循环次数( $N$ )下,不同中主应力参数( $b$ )下的应力应变曲线,为节省篇幅,在此只列出 $p=300$  kPa 时的应力应变曲线。如图 1 分别给出了不同 $b$ 值时,不同冻融循环次数下的剪应力( $q$ )与轴向应变( $\varepsilon_1$ )的关系曲线。应力应变曲线整体呈应变硬化型。

对于同一 $b$ 值,从应力应变关系曲线可以看出,随着冻融循环次数的增多,土体的抗剪强度是随之降低的,但当冻融循环次数 $N$ 达到 5 次时,土体的抗剪强度又有所增加,当冻融循环次数大于 5 次之后,即 $N=10$ 时,此时土体的抗剪强度基本与 $N=5$ 次时的土体强度一致。且从应力应变曲线可以看出试样的抗剪强度在经历第 3 次冻融循环后到达强度的最低点,同时可以看出第 1 次冻融循环作用对土体抗剪强度的影响是最大的。这主要是由于冻融作用导致土体孔隙结构发生变化,从而引起土体抗剪强度的变化。未经冻融作用的土体颗粒之间多以集粒状和凝块状为主,连接多为面-面接触。当土体第一次经历冻融循环时,土体孔

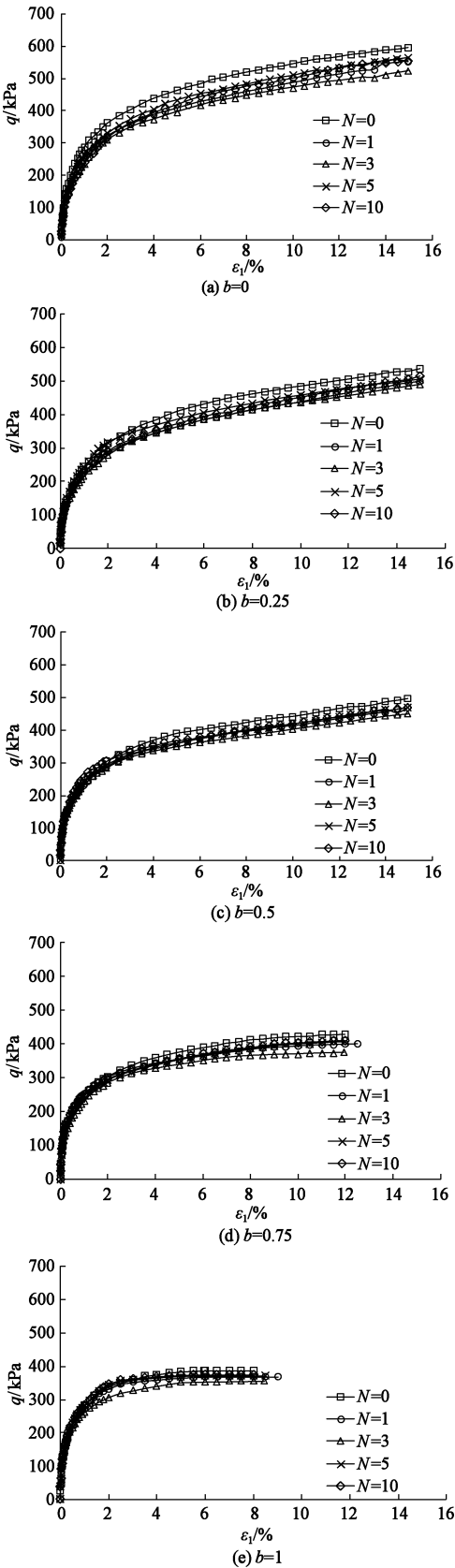


图1 不同  $b$  值时不同冻融循环下的  $q$ - $\varepsilon_1$  关系曲线

Fig.1 Relation curves of  $q$ - $\varepsilon_1$  under different freeze-thaw cycles at different  $b$ -values

隙中的液态水冻结成冰,土样中孔隙冰挤压土体颗粒,土体内部形成较大的团粒,但破坏了原有土体的均匀的黏聚性,增大了土体内的孔隙,使土体强度降低,因

此,第一个冻融循环对土体抗剪强度的影响最大。随着冻融循环次数的增加,冻融循环作用使土的孔隙分布发生改变,即小孔隙逐渐转变为中孔隙,孔隙大小增大,孔隙增多,经历冻融循环后土体结构相对松散,导致土体颗粒间黏结力降低,导致土体抗剪强度逐渐降低。但当土壤经历更多的冻融循环时,土体内部孔隙结构达到一个新的稳定状态,不再受冻融循环作用的影响。在本试验中,经过5次冻融循环后,土体结构达到一个新的平衡,抗剪强度不受冻融循环作用的影响。不同  $b$  下冻融循环次数对土体应力应变曲线的影响规律基本是一致的,冻融循环作用基本没有对土体应力应变形态产生影响,只是对土体强度的影响较大。

从纵向来看,同一冻融循环作用下,不同  $b$  值下的应力应变曲线,随着  $b$  值从0增大到1的过程,土体的应力应变曲线逐渐从应变硬化型向理想弹塑型转化,土体的抗剪强度随着  $b$  的增大而降低,这主要是由于随  $b$  值的增大,施加在土体上的中主应力  $\sigma_2$  逐渐增大,而施加在土体上的小主应力  $\sigma_3$  却一直在减小,从而使土体在剪切过程中呈现压损性,导致土体的强度随  $b$  的增大而逐渐降低。不同冻融循环作用下的应力应变曲线随着  $b$  的变化呈现出类似的变化规律。中主应力参数不仅对土体的应力应变曲线形态有明显影响,同时还对土体抗剪强度也有明显影响。

3.2 强度参数

根据  $p = 200$  kPa,  $p = 300$  kPa 及  $p = 400$  kPa 下的抗剪强度值,绘制出不同  $b$  下不同冻融循环次数下重塑黄土试样在  $p$ - $q$  面上的强度破坏线,如图2所示。在  $p$ - $q$  面上,重塑黄土的强度破坏线可以拟合为直线,该拟合直线的方程可以表示为

$$q = Mp + \mu \quad (1)$$

该直线的斜率  $M$ 、截距  $\mu$  与土体的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  的关系为

$$\sin\varphi = \frac{\sqrt{3}M\cos\theta_\sigma}{3 - M\sin\theta_\sigma} \quad (2)$$

$$c = \frac{\mu(\sqrt{3}\cos\theta_\sigma + \sin\theta_\sigma\sin\varphi)}{3\cos\varphi} \quad (3)$$

式中,  $\theta_\sigma$  表示罗德角。

根据式(1),(2),(3),计算得到重塑黄土在经历不同冻融循环次数后不同  $b$  值时的黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、重塑黄土试样的强度参数。

依据重塑黄土试样的强度参数,绘制出黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与中主应力参数  $b$  值的关系曲线(图3)和黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与冻融循环次数  $N$  的关系曲线(图4)。从图3可以看出,随着  $b$  的增大,黏聚力  $c$  呈现出先增大然后再减小的变化趋势,内摩擦角  $\varphi$  随着  $b$  增大也呈现出先增大,再减小的趋势,但是变化浮动

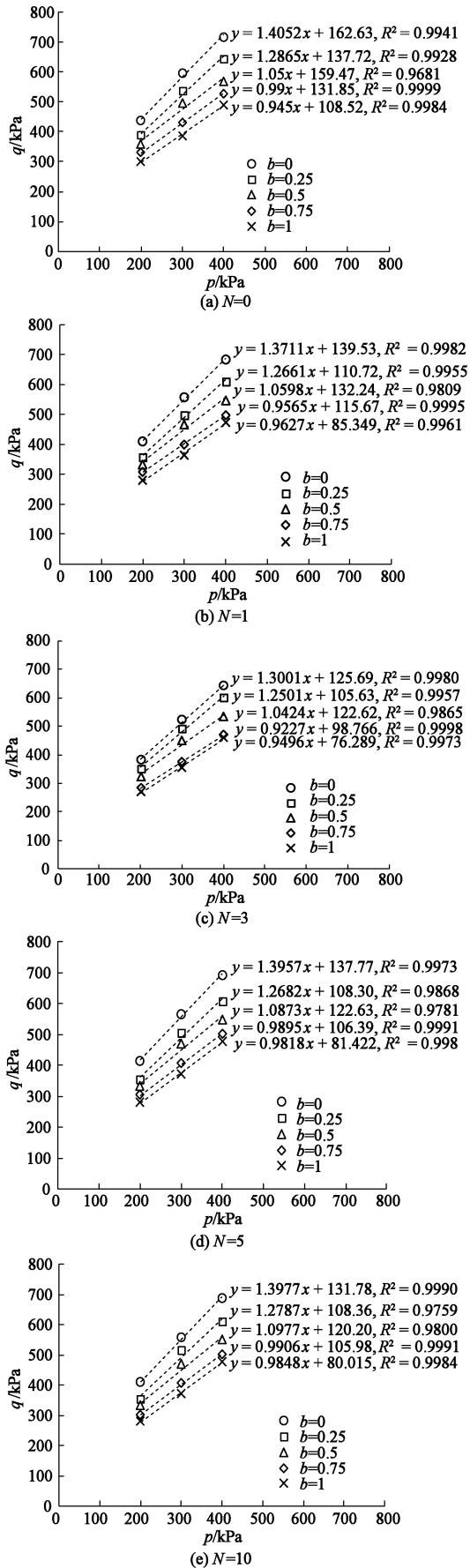


图2 不同  $b$  值时不同冻融循环下的  $q$ - $\varepsilon_1$  关系曲线  
Fig. 2 Relation curves of  $q$ - $\varepsilon_1$  under different freeze-thaw cycles at different  $b$ -values

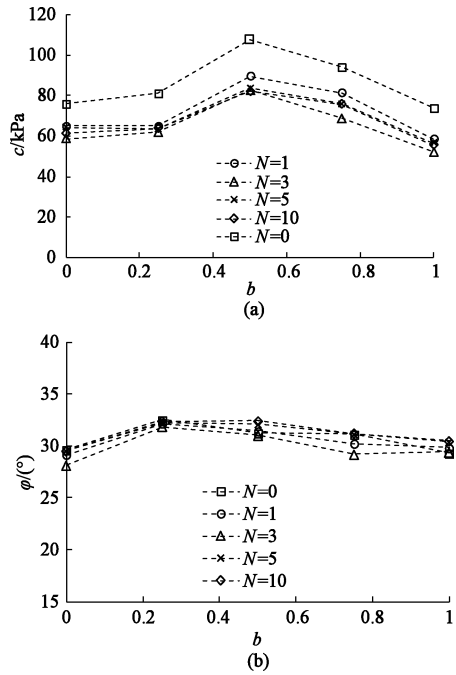


图3 强度参数与  $b$  值的关系曲线  
Fig. 3 Relation curves of strength parameter and  $b$ -values

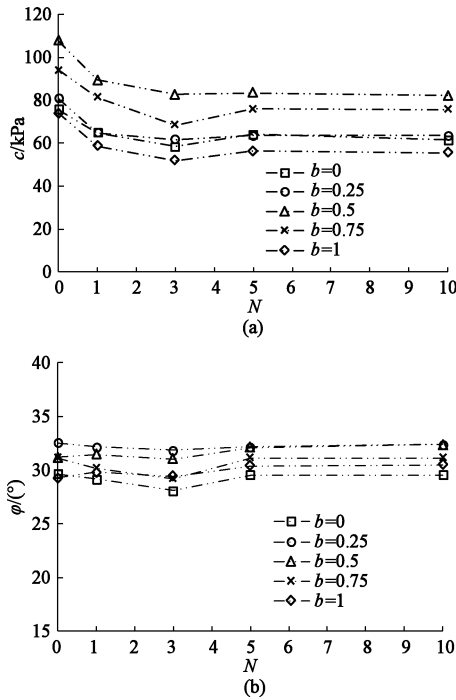


图4 强度参数与  $N$  的关系曲线  
Fig. 4 Relation curves of strength parameter and  $N$   
较小。这可能是由于在真三轴剪切过程各个主应力的加载方式的不同所导致的,中间和小主体之间的压剪作用随着  $b$  值的增加而增强,导致了土壤颗粒的排列和尺寸的变化。从图4可以看出,黏聚力  $c$  随着冻融次数的增大逐渐减小而后趋于一稳定值,而内摩擦角  $\phi$  随冻融次数  $N$  的变化在一个小范围内波动。冻融循环增加了土壤颗粒之间的距离,从而降低了凝聚力。经历更多次的冻融循环后,土壤颗粒的排列逐渐稳定,

黏聚力的变化不再显著。而内摩擦角主要反应的是颗粒与颗粒间的相互移动和咬合作用,冻融循环对土壤颗粒的形状的影响并不大。

## 4 结 论

(1) 利用真三轴仪对经历冻融循环后的重塑黄土进行了真三轴剪切试验,探究了在复杂应力路径下冻融循环对土体强度的影响,弥补了这类试验数据的缺乏。

(2) 冻融循环作用和中主应力参数都会对土体的强度产生影响,随着冻融次数的增多,重塑黄土抗剪强度先降低然后略有升高最后趋于稳定,而随着  $b$  值的增大,强度一直在减小,但是冻融作用对土体的应力应变曲线形态基本没有影响,而  $b$  的改变对对其形态产生明显的影响。

(3) 冻融作用和  $b$  值都会对土体的黏聚力和内摩擦角产生影响,黏聚力随冻融次数先减小而后趋于稳定,随  $b$  值先增大而后减小;内摩擦角随冻融次数无规律的小范围波动,随  $b$  值小范围的先增大后减小。

## 参考文献:

- [1] 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[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1919 – 1924. (MU Yan-hu, MA Wei, LI Guo-yu, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1919 – 1924. (in Chinese))
- [2] 连江波. 冻融循环作用下黄土物理性质变化规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. (LIAN Jiang-bo. Study on the Variation of Physical Properties of Loess under Freezing-thawing Cycles [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese))
- [3] 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[J]. 冰川冻土, 2015, **37**(1): 162 – 168. (ZHOU Hong, ZHANG Ze, QIN Qi, et al. Research on variability of basic physical properties of loess under freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, **37**(1): 162 – 168. (in Chinese))
- [4] 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[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2017, **45**(7): 134 – 142. (Xu Jian, Wang Zhang-quan, Ren Jian-wei, et al. Experimental analysis on permeability law of remolded loess under freezing-thawing condition [J]. Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.), 2017, **45**(7): 134 – 142. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(6): 887 – 893. (DONG Xiao-hong, ZHANG Ai-jun, LIAN Jiang-bo, et al. Laboratory study on shear strength deterioration of loess with long-term freezing-thawing cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6): 887 – 893. (in Chinese))
- [7] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(4): 922 – 927. (NI Wan-kui, SHI Hua-qiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, **36**(4): 922 – 927. (in Chinese))
- [8] 李双好, 李元勋, 高欣亚, 等. 冻融作用对原状黄土抗剪强度的影响规律[J]. 土木与环境工程学报, 2020, **42**(1): 48 – 55. (LI Shuan-hao, LI Yuan-xun, GAO Xin-ya, et al. Effect of freezing and thawing on shear strength of intact loess [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, **42**(1): 48 – 55. (in Chinese))
- [9] 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**(增刊2): 2690 – 2694. (QI Ji-lin, ZHANG Jian-ming, ZHU Yuan-lin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(S2): 2690 – 2694. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)