

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.016

补水条件下压实黄土的二维冻融变形特性

仇楠, 崔自治, 占世源, 胡月

(宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为探索压实黄土的二维补水冻融变形特性, 固定饱和度为 60%, 变化压实度依次为 0.86、0.90、0.94 和 0.98, 及固定压实度为 0.94, 变化饱和度依次为 30%、40%、50% 和 60%, 用定饱和度法进行了压实黄土在 20 次冻融循环内的二维补水冻融试验。二维补水冻融试验结果表明: 试样竖向为冻胀和融沉, 水平向为冻胀和融胀; 随冻融次数的增加, 试样冻结后的高度呈先迅速增大后缓慢减小的趋势, 竖向融沉由小于竖向冻胀逐渐转化为大于竖向冻胀, 数次冻融后试样的高度小于初始高度, 试样的宽度持续增大, 水平融胀是竖向融沉增大的主要原因; 相同饱和度条件下, 试样的冻胀率、融沉系数和体变率在某冻融次数前随压实度增大而减小, 之后随压实度的增大而增大, 压实度可以延滞冻融变形的发展, 但会加大冻融变形的稳定值; 相同压实度条件下, 试样的冻胀率、融沉系数和体变率随饱和度的增大而增大, 但体变率随着循环冻融次数的增加有趋同性; 压实度不仅影响体变率达到稳定值的冻融循环次数, 而且影响稳定值的大小, 饱和度仅影响体变率达到稳定值的冻融循环次数。研究结果对季节性冻土地区压实黄土岸坡工程的冻害评价与防治有重要意义。

关键词: 岩土工程; 定饱和度法; 二维冻融; 压实黄土

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)01-0115-07

Two-dimensional freeze-thaw deformation characteristics of compacted loess under makeup water condition

QIU Nan, CUI Zizhi, ZHAN Shiyuan, HU Yue

(College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to explore the two-dimensional freeze-thaw deformation characteristics of compacted loess, fixed saturation at 60%, changed compactness to 0.86, 0.90, 0.94 and 0.98, and fixed compactness at 0.94, changed saturation to 30%, 40%, 50% and 60%, the two-dimensional freeze-thaw test of compacted loess in 20 freeze-thaw cycles is carried out by the fixed saturation method. The results of two-dimensional replenishment freeze-thaw test show that the frost heave and thaw settlement are observed vertically, and that frost heave and thaw heave are observed horizontally. With the increase of freeze-thaw times, the height of samples increases rapidly at first and then decreases slowly. The vertical thaw settlement gradually changes from less vertical frost heave to greater vertical frost heave. After several freeze-thaw cycles, the height of samples is less than the initial height. The width of samples keeps increasing, with the horizontal thaw swelling being the main reason for the increase of vertical thaw settlement. Under the same saturation condition, the frost heave rate, thaw settlement coefficient and volume change rate of the samples decrease with the increase of compactness before a certain number of freeze-thaw cycles, and then increase with the increase of compactness. The compactness can delay the development of freeze-thaw deformation, but it can increase the stability value of freeze-thaw deformation.

收稿日期: 2019-07-03; 网络出版日期: 2020-04-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200421.1657.017.html>

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”资助项目(IRT1067); 宁夏大学生创新创业训练计划资助项目(201810749127)

第一作者: 仇楠, 男, 硕士生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 121205532@qq.com

通信作者: 崔自治, 男, 教授, 研究方向为岩土工程、特殊土工程性质。E-mail: czz2062428@qq.com

Under the same compactness condition, the frost heave rate, thaw settlement coefficient and volume change rate of the samples increase with the increase of saturation, but the volume change rate tends to be the same with the increase of the number of freeze-thaw cycles. Compactness affects not only the number of freeze-thaw cycles in which the volume change rate reaches a stable value, but also the size of the stability value. Saturation only affects the number of freeze-thaw cycles in which the volume change rate reaches a stable value. The research results are of great significance to the evaluation and prevention of frost damage of compacted loess bank slope engineering in seasonal frozen soil area.

Key words: geotechnical engineering; fixed saturation method; two-dimensional freeze-thaw; compacted loess

黄土在我国西北地区分布广泛,土层深厚,冲蚀严重,冻胀性大,且处于季冻区^[1-2]。随着西部大开发的深入,高铁、高速公路、渠道等大量工程建成使用,其地基多为压实黄土岸坡。岸坡的顶面和坡面均为受冻面,为二维冻融。在冻融作用下,顶面起伏,坡面隆起。路面起伏将影响行车安全;渠道坡面隆起,将引起衬砌坍塌、滑落,影响输水效率。

反复冻融使土体微结构单元发生明显变化,粒间连接减弱^[2-3],随着冻融次数的增加,黄土孔隙率呈现先增大后减小,最后趋于稳定^[4],因孔隙率增大,渗透性增强^[5-6],冻融产生的裂缝也会导致渗透性增强^[7]。土体抗剪强度随着含水率的增大而降低^[8]。毛细水上升会影响黄土的含水率^[9]。宁夏黄土的毛细水上升高度大、冻胀性强^[10-11],饱和黄土的补水冻胀率高达14%^[12]。压实度和含水率是影响土冻融效应的重要因素^[13,14]。

目前的研究主要针对土的一维冻融变形、冻融后的结构和力学性能等,而关于土的二维冻融效应尚无报道。开展压实黄土的二维冻融变形研究,对季节性冻土区压实黄土岸坡工程的冻害评价与防治有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用黄土为宁夏最具代表性的同心县黄土,依照《土工试验方法标准》测得其密度 ρ 、含水率 w 、土粒相对密度 d_s 、液限 w_L 、塑限 w_P 、最大干密度 ρ_{max} 和最优含水率 w_{opt} 等基本物理指标如表1所示,粒径分布如表2所示。

表1 土样的基本性质

Tab.1 Basic parameters of soil samples

$\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	$w/$ %	d_s	$w_L/$ %	$w_P/$ %	$\rho_{max}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	$w_{opt}/$ %
1.49	8.2	2.72	27.2	15.0	1.72	16.0

表2 土样粒径分布

Tab.2 Particle size distribution of soil samples

粒径/ mm	≥ 0.075	0.075~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	< 0.005
含量/%	5.9	58.5	20.3	5.1	10.2

由表2可见,宁夏同心黄土的颗粒主要为粉粒,粘粒和砂粒含量较少。

1.2 因素组合方案

参照文献[14],结合当地水文、地质和气候条件,设计7组试样,研究压实度 λ_c 、饱和度 S_r 和冻融循环次数 N 对压实黄土二维冻融变形的影响。压实度、饱和度和冻融循环次数等因素的组合如表3所示。

表3 因素组合方案

Tab.3 Factor combination scheme

试样编号	λ_c	$S_r/$ %	$N/$ 次
G ₁	0.86	60	
G ₂	0.90	60	
G ₃	0.94	60	
G ₄	0.98	60	1~20
G ₅	0.94	30	
G ₆	0.94	40	
G ₇	0.94	50	

1.3 试验方法

1.3.1 试样制备

首先将黄土风干,过2mm孔径的筛,按因素组合方案确定黄土用量和加水量,将黄土与水拌和均匀,装入塑料密封袋中浸润一昼夜;之后用专制的压样工具,在有机玻璃模具中压制成边长80mm的立方体试样,如图1所示。

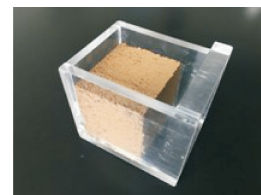


图1 二维冻融试样

Fig.1 Two-dimensional freezing-thawing sample

1.3.2 试样冻融与变形测定

结合宁夏地区气候的实际情况,设定试样冻结温度为 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$,融化温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试样成样后连同有机玻璃模具一起放入可控温度的低温试验箱中进行冻融,每个循环冻结和融化过程的持续时间均为 24 h 。用大量程百分表测定每次冻融时的竖向及水平向的冻胀量和融沉量。

每次冻融后,依据饱和度和冻融后的体积增量

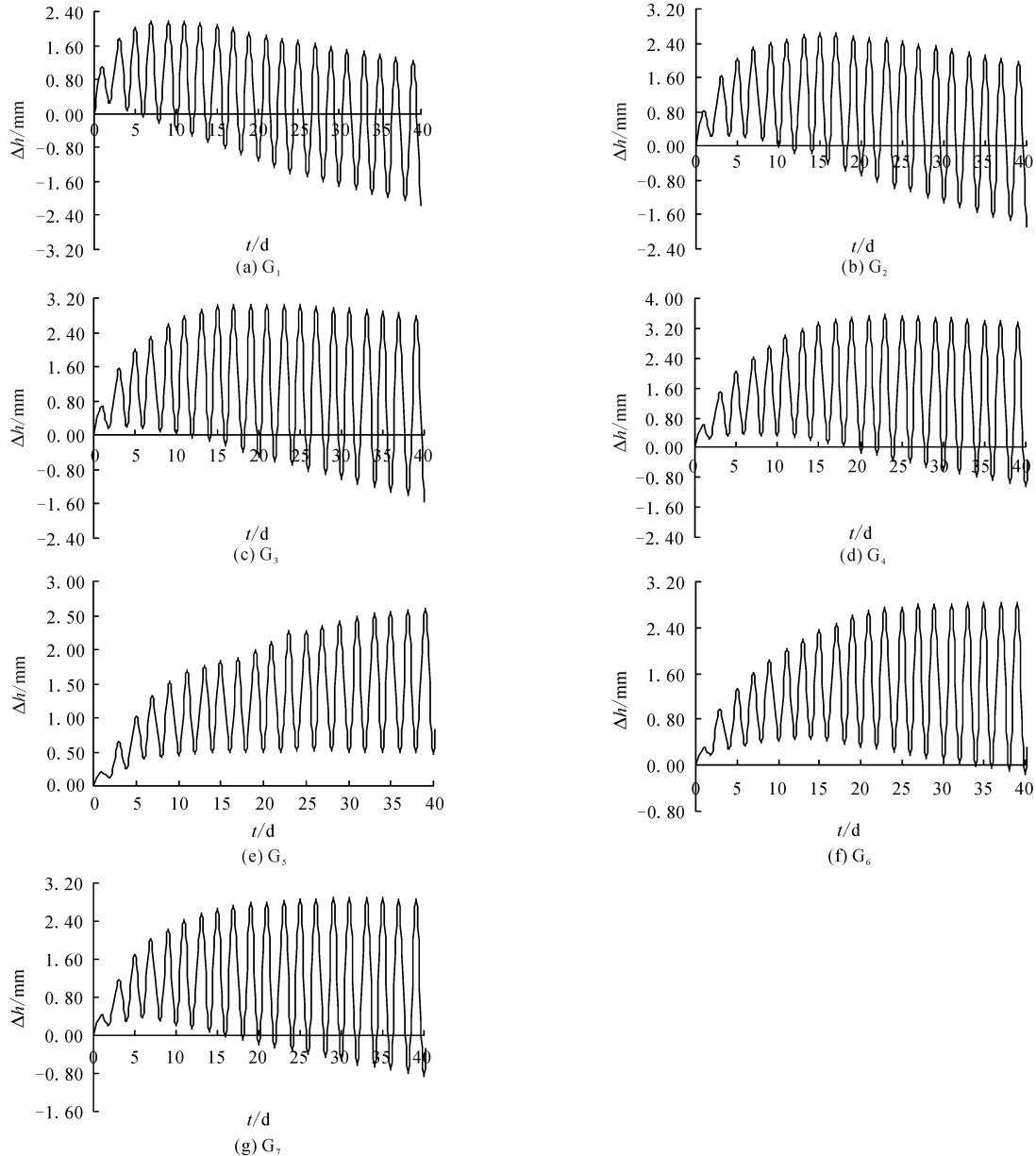


图2 试样的竖向冻融变形量与时间的过程曲线

Fig. 2 Process curve of vertical freeze-thaw deformation and time of sample

由图2可知, $G_1 \sim G_4$ 的竖向冻结变形量(试样冻结后的高度与原始高度的差)与时间均呈先迅速增大后缓慢减小的趋势。压实度小的试样相较于压实度大的试样,竖向冻结变形量达到峰值的时间更短,如压实度为 0.86 的 G_1 在第9天时竖向冻结变

计算补水量,用滴管贴着试样表面精细补水,补水后静置 24 h 。

2 试验结果与分析

2.1 二维循环冻融变形时程分析

二维循环冻融条件下,各组试样的竖向冻融变形量 Δh 与时间 t 的过程曲线如图2所示,水平向冻融变形量 Δl 与时间 t 的过程曲线如图3所示。

形量就达到了峰值,而压实度为 0.98 的 G_4 在第23天时竖向冻结变形量才达到了峰值。可见,增大压实度可延迟竖向冻结变形量达到峰值的时间。 $G_1 \sim G_4$ 的竖向冻结变形量峰值分别为 2.18 mm 、 2.65 mm 、 3.06 mm 和 3.57 mm 。可见,随压实度的

增大,竖向冻结变形量的峰值增大,压实度越高,竖向冻胀变形越大。增大压实度可以延滞竖向冻结变形量达到峰值的时间,但不能减小其峰值,反而会使其峰值增大。 $G_1 \sim G_4$ 的竖向融化变形量(试样融化后的高度与原始高度的差)与时间亦均呈先快速增大后缓慢减小的趋势,且随时间的增加,由正值逐渐转换为负值。其转换为负值的时间随压实度的增大而增大。负值表明试样下沉了,相对于竖向冻结变形量,竖向融化变形量达到峰值的时间较短。冻融40 d时, $G_1 \sim G_4$ 组试样的下沉量分别为2.16 mm、1.87 mm、1.53 mm和1.05 mm,试样的下沉量随压实度的增大而减小。

G_5 的竖向冻结变形量和融化变形量随时间的增加表现为逐渐增大的趋势; G_6 和 G_7 的竖向冻结变形量和融化变形量随时间的增加表现为先快速增大后缓慢减小的规律。 G_6 、 G_7 和 G_3 竖向冻结变形量达到峰值的时间分别为第37d、31d和19d,竖向融化变形量达到峰值的时间分别为第14d、6d和4d。竖向冻结和融化变形达到峰值的时间随饱和度的增加而减小。 G_5 尚无下沉变形, G_6 、 G_7 和 G_3 的下沉变形分别为0.16 mm、0.88 mm和2.25 mm,试样的下沉量随饱和度的增大而增大。

每个试样在冻结过程中竖向均为冻胀,且冻胀量缓慢增大并渐趋稳定。在某个初始时刻前,竖向冻胀大于融沉,试样的竖向冻结变形量随时间逐渐增大;之后,竖向冻胀小于融沉,竖向冻结变形量随时间缓慢减小,致使试样融化后上表面下沉。

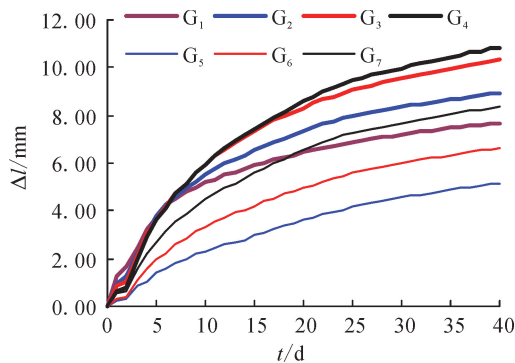


图3 试样的水平冻融变形量与时间的过程曲线
Fig. 3 Process curve of horizontal freeze-thaw deformation and time of sample

由图3可知,水平向的冻融变形均为持续的冻胀和融胀。水平冻融变形量与时间的过程曲线,在初期有明显的台阶,融胀量明显小于冻胀量;后期台阶逐渐不明显,曲线变得平滑;随冻融次数的增加,试样渐次变得松软,融胀量相对增大,以致台阶消失。试样($G_1 \sim G_4$)的水平冻融变形量随压实度的增大由减小逐渐过渡到增大。40d时, G_4 的水平冻

融变形量为10.85 mm, G_1 的水平冻融变形量为7.70 mm,二者的比值约为1.41。试样($G_5 \sim G_7$ 、 G_3)的水平冻融变形量随饱和度的增大而增大。40d时 G_3 的水平冻融变形量与 G_5 的水平冻融变形量的比值达2.0以上。

竖向融沉与水平融胀同步增长,竖向融沉增大是因水平融胀增大所致。

二维冻融较一维冻融竖向融沉变形大^[14]。

2.2 二维循环冻融变形指标分析

二维循环冻融,试样的竖向冻胀率、竖向融沉系数、水平冻胀率、水平融沉系数和体变率的表达式分别为:

$$\eta_v = \frac{h_{fi}}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta_v = \frac{h_{ti}}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_h = \frac{\sum_{i=1}^{20} l_{fi}}{l_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$\delta_h = \frac{\sum_{i=1}^{20} l_{ti}}{l_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$P = \frac{V_i - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: η_v 、 δ_v 、 η_h 、 δ_h 和 P 分别为试样经 i 次冻融循环后的竖向冻胀率、竖向融沉系数、水平冻胀率、水平融沉系数和体变率,%; h_0 、 l_0 分别为试样的初始高度和长度,mm; h_{fi} 、 h_{ti} 分别为试样经 i 次冻融循环后的竖向冻胀量和融沉量,mm; l_{fi} 、 l_{ti} 分别为试样第 i 次冻融过程的水平冻胀增量和融沉增量,mm; V_0 为试样的初始体积, mm^3 ; V_i 为试样经 i 次冻融后的体积, mm^3 。

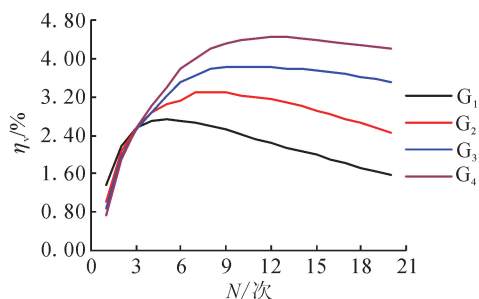
2.2.1 冻胀率

二维循环冻融,试样的竖向和水平冻胀率变化曲线,如图4和图5所示。

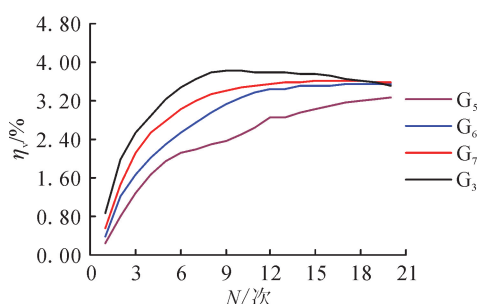
由图4可知,除 G_5 外,试样的竖向冻胀率均随冻融循环次数的增加呈先迅速增大后缓慢减小的趋势,变化规律有别于一维竖向冻融^[14]。初始饱和度相同的条件下,某个冻融循环前竖向冻胀率随压实度的增大而减小,之后随之增大。压实度相同的条件下,竖向冻胀率随饱和度的增大而增大,不同饱和度试样竖向冻胀率随冻融循环次数的增加,渐趋向于同一值。竖向冻胀率达到峰值的冻融循环次数随饱和度的增大而减小。

由图5可知,试样的水平冻胀率随冻融循环次数的增加均逐渐增大。初始饱和度相同的条件下,水平

冻胀率随压实度变化的规律与竖向冻胀率随压实度变化的规律类似。压实度相同的条件下,水平冻胀率随饱和度的增大而增大。在某个冻融循环前曲线的斜率随饱和度的增大而增大,之后随饱和度的增大而减小。



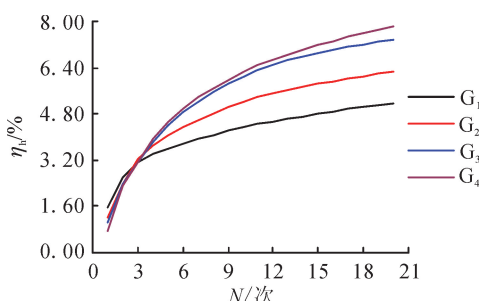
(a) 不同压实度



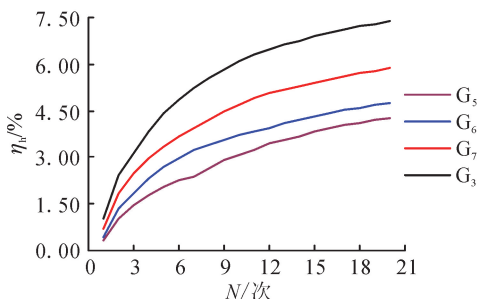
(b) 不同饱和度

图4 竖向冻胀率变化曲线

Fig. 4 Vertical frost heaving rate curve



(a) 不同压实度



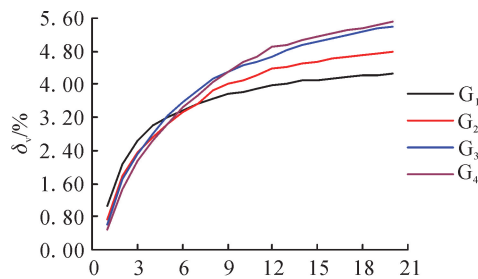
(b) 不同饱和度

图5 水平冻胀率变化曲线

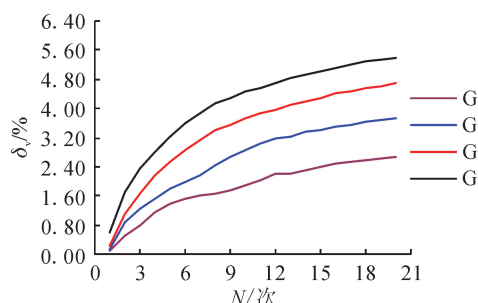
Fig. 5 Horizontal frost heaving rate curve

2.2.2 融沉系数

二维循环冻融,试样的竖向和水平融沉系数变化曲线,如图6和图7所示。



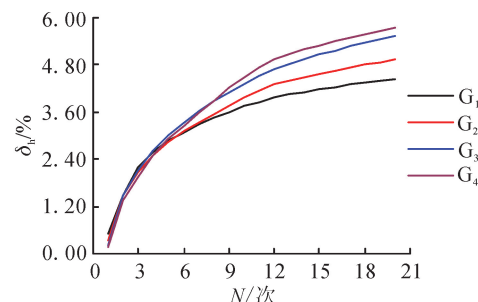
(a) 不同压实度



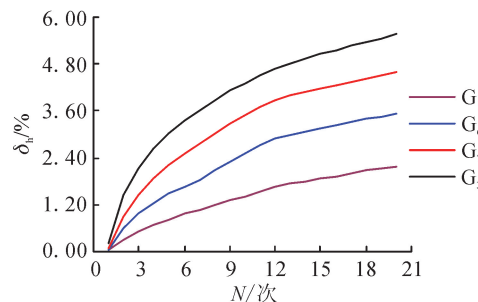
(b) 不同饱和度

图6 竖向融沉系数变化曲线

Fig. 6 Variation curve of vertical melting settlement coefficient



(a) 不同压实度



(b) 不同饱和度

图7 水平融沉系数变化曲线

Fig. 7 Variation curve of horizontal melting settlement coefficient

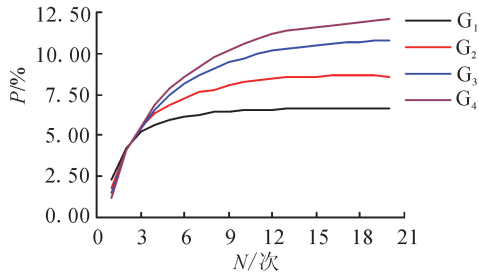
由图6可知,试样的竖向融沉系数均随冻融循环次数的增加逐次增大。初始饱和度相同的条件下,竖向融沉系数随压实度变化的规律与竖向冻胀率随压实度变化的规律类似。经多次补水冻融循环后,压实度增大将加剧竖向融沉变形的发展。压实度相同的条

件下,竖向融沉系数随饱和度的增大而增大。

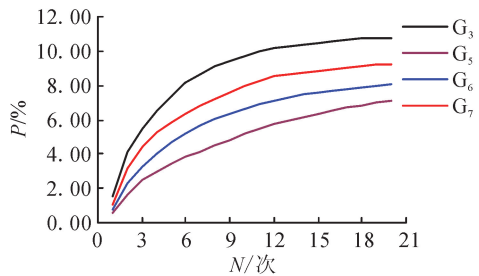
比较图7和图6可知,水平融沉系数和竖向融沉系数随冻融循环次数、压实度和饱和度变化的规律相近。

2.2.3 体变率

二维循环冻融,试样的体变率关系曲线如图8所示。



(a) 不同压实度



(b) 不同饱和度

图8 体变率变化曲线

Fig.8 Volume change rate curve

由图8可知,各组试样的体变率均大于0,冻融后体积增大,变得疏松。 $G_1 \sim G_7$ 的体变率与冻融循环次数均呈先快速增大后渐趋稳定的发展趋势。初始饱和度相同的条件下,某个冻融循环前体变率随压实度的增大而减小,之后随压实度的增大而增大。压实度小的试样,其冻融稳定循环次数(体变率达到稳定时对应的冻融循环次数)少,体变率稳定值小。冻融20次时, G_4 的体变率与 G_1 的体变率之比达1.8。压实度相同的条件下,试样的体变率随饱和度的增大而增大,但随着循环冻融次数的增加有趋同现象,即初始密实度相同的试样,有相同的体变率极限。压实度不仅影响冻融稳定循环次数,而且影响稳定值的大小,饱和度仅影响冻融稳定循环次数。

3 结论

1) 随着冻融次数的增加,试样冻结后的高度呈先迅速增大后缓慢减小的趋势,数次冻融后试样的高度小于初始高度。

2) 试样的宽度随冻融次数的增加持续增大,水平膨胀是竖向融沉增大的主要原因。

3) 试样的冻胀率、融沉系数和体变率在某冻融次数前随压实度增大而减小,之后随压实度的增大而增大;压实度可以延滞冻融变形的发展,但会加大冻融变形稳定值。

4) 试样的冻胀率、融沉系数和体变率随饱和度的增大而增大,相同压实度试样的体变率随循环冻融次数的增加有趋同性。

参考文献:

- [1] 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [2] 叶万军,李长清,杨更社,等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效应[J]. 岩土力学,2018,39(7):2336-2343,2360.
YE Wanjun, LI Changqing, YANG Gengshe, et al. Scale effects of damage to loess structure under freezing and thawing conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2336-2343,2360.
- [3] 张孟雅. 地铁循环荷载下冻融软土动力特性与微观结构试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
ZHANG Mengya. Experimental study on dynamic characteristics and microstructure of frozen-thawed soil under subway loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [4] 肖东辉,冯文杰,张泽. 冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J]. 冰川冻土,2014,36(4):907-912.
XIAO Donghui, FENG Wenjie, ZHANG Ze. The changing rule of loess's porosity under freezing-thawing cycles [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 907-912.
- [5] 梁燕,谢永利,刘保健,等. 非饱和黄土渗透性的试验研究[J]. 水文地质工程地质,2006,(2):27-30.
LIANG Yan, XIE Yongli, LIU Baojian, et al. A test study of the permeability of unsaturated typical loess [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (2): 27-30.
- [6] LEHRSCHE G A, SOJKA R E, CATER D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(5): 1401-1406.
- [7] 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 Zhangquan, REN Jianwei, et al. Experimental analysis on permeability law of remolded loess under freezing-thawing condition [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017,45(7): 134-142.
- [8] 李凌云,党进谦,王伟. 泾阳黄土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 西安理工大学学报,2015,31(1):113-119.
LI Lingyun, DANG Jinqian, WANG Wei. Research on

- ring-shear test of loess shear resistance strength in Jingyang [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31 (1): 113-119.
- [9] 李先瑞,李晓媛,王圣麟. 改性黄土垂直方向毛细水上升作用研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(28):191-195,204.
LI Xianrui, LI Xiaoyuan, WANG Shenglin. Capillary water migration effects of modified loess in vertical direction [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15 (28): 191-195,204.
- [10] 薛塞光. 宁夏寒冷地区骨干渠道砌护技术研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(1):96-98.
XUE Saiguang. Research of the main canal lining technology in the frigid districts of Ningxia [J]. Yellow River, 2012, 34(1): 96-98.
- [11] 张国军,陆立国. 影响衬砌渠道冻胀破坏严重的关键因素[J]. 中国农村水利水电, 2012, (9):105-108.
ZHANG Guojun, LU Ligu. Important factors that influence lining channel frost heaving damage [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, (9): 105-108.
- [12] 潘鹏,李剑,郝佳兴,等. 宁夏饱和黄土的冻胀融沉特性[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(18):230-233.
PAN Peng, LI Jian, HAO Jiaying, et al. Frost heaving and thawing settlement characteristics of saturated loess in Ningxia [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (18): 230-233.
- [13] 王天亮,卜建清,王扬,等. 多次冻融条件下土体的融沉性质研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 625-632.
WANG Tianliang, BU Jianqing, WANG Yang, et al. Thaw subsidence properties of soils under repeated freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (4): 625-632.
- [14] 崔自治,郝佳兴,潘鹏,等. 非充分补水条件下冬灌区压实黄土的冻融变形特性[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3):234-238.
CUI Zizhi, HAO Jiaying, PAN Peng, et al. Compacts loess' deformation characteristic of frost and thaw in winter irrigated area under non-sufficient water supplying condition [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2018, 39 (3): 234-238.
- (责任编辑 周 蓓)

(上接第 114 页)

- [3] 刘春龙,张志强,刘奉银,等. 巴基斯坦某黄土场地湿陷特性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2):177-182.
LIU Chunlong, ZHANG Zhiqiang, LIU Fengyin, et al. Research on collapsibility of a loess site in Pakistan[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 177-182.
- [4] 井彦林,仵彦卿,杨丽娜,等. 组合最小二乘支持向量机与粒子群优化算法研究黄土湿陷性[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(1):15-19.
JING Yanlin, WU Yanqing, YANG Lina, et al. A study of loess collapsibility by combining least squares support vector machines with particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(1): 15-19.
- [5] 马闫,王家鼎,彭淑君,等. 黄土湿陷性与土性指标的关系及其预测模型[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 120-128.
MA Yan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Relationships between physical-mechanical parameters and collapsibility of loess soil and its prediction model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 120-128.
- [6] 武小鹏,赵永虎,徐安花,等. 黄土湿陷性与其物理力学指标的关系及评价方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6):75-80.
WU Xiaopeng, ZHAO Yonghu, XU Anhua, et al. Relationship between collapsibility and physical-mechanical indexes of loess and evaluation methods[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35 (6): 75-80.
- [7] 王吉庆,雷胜友,李肖伦,等. 湿陷系数与物理性质参数的相关性[J]. 地质与勘探, 2013, 41(3):42-45,50.
WANG Jiqing, LEI Shengyou, LI Xiaolun, et al. Correlation of wet collapsibility coefficient and physical property parameters of loess [J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 42-45,50.
- [8] 中华人民共和国建设部. 湿陷性黄土地区建筑规范: B50025-2004[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [9] 张长飞. 固原地区马兰黄土湿陷性评价[J]. 福建建筑, 2018, 240(6):97-101.
ZHANG Changfei. The collapsibility evaluation of the Malan loess around the Guyuan area[J]. Fujian Architecture & Construction, 2018, 240(6): 97-101.
- [10] 王庆. 挖掘技术在土的工程分类和黄土力学性质研究中的应用[D]. 西安:西安理工大学, 2014.
WANG Qing. Data mining technology in the application of the engineering classification of soil and loess mechanics properties[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- (责任编辑 王绪迪)