



冻融循环对原状黄土的持水特性影响

张小辉¹, 乔斯嘉², 张登飞², 王勇华¹, 李世雄², 苏铁志³

(1. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710021; 2. 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; 3. 航天规划设计集团有限公司, 北京 100162)

摘要 冻融作用是引起黄土边坡溜塌和路基沉陷等工程病害不可忽视的重要因素。持水特性作为分析非饱和黄土水力-力学特性的关键物性, 有关冻融作用对黄土持水特性的影响有待深入研究。该文以冻融循环后原状黄土为研究对象, 研究了冻融循环次数和冻融前含水率对持水曲线及其特征参数的影响。研究结果表明, 冻融循环对持水曲线的影响呈波动性变化, 影响程度受控于循环次数与冻融前初始含水率水平; 不同冻融条件下饱和度与吸力比(吸力与进气值之比)关系可以归一; 通过建立进气值与构度指标之间的定量联系, 构建了可统一考虑冻融循环作用影响的修正持水模型; 初步证实了冻融循环条件对原状黄土持水曲线的影响, 可以通过土的构度指标变化引起进气值的改变来反映。

关键词 原状黄土; 冻融循环; 持水特性

中图分类号: TU473 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-01-002

Water retention behaviours of intact loess exposed to freeze-thaw cycles

ZHANG Xiaohui¹, QIAO Sijia², ZHANG Dengfei²,
WANG Yonghua¹, LI Shixiong², SU Tiezhi³

(1. China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an 710021, China;
2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;
3. China Aerospace Planning and Design Group Co., Ltd., Beijing 100162, China)

Abstract Freeze-thaw acting is an important factor that can't be ignored in engineering disasters such as loess slope slump and roadbed subsidence. Water retention behaviour is the key physical property for analyzing the hydraulic-mechanical properties of unsaturated loess, and it needs to be further studied that how freeze-thaw cycle affects water retention behaviours of loess. This test took intact loess after freeze-thaw cycles as research objects and studied how both the number of freeze-thaw cycles and the water content before freeze-thaw affect the soil-water retention curve (SWRC) and its characteristic parameters. The results show that the effect of freeze-thaw cycles on SWRC is fluctuating, and the degree of influence is controlled by the number of cycles and the initial water content before freeze-thaw. The relationship between saturation and ratio of suction (ratio

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 国家自然科学基金 (42027806, 42372324, 41907233)。

第一作者: 张小辉, 男, 高级工程师, 从事岩土工程勘察、设计等研究, 295069134@qq.com。

通信作者: 张登飞, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事黄土动力灾害与防控研究, dfzhang87@nwu.edu.cn。

between suction and air-entry value) can be normalized under different freeze-thaw conditions. By establishing quantitative relationship between the air-entry value and the structure index, a modified water-retention model was proposed to consider the effect of freeze-thaw cycles uniformly. The effect of freeze-thaw cycle conditions on the SWRC of intact loess is preliminarily confirmed, which can be reflected by the change of air-entry value caused by the change of soil structure index.

Keywords intact loess; freeze-thaw cycles; water retention behaviours

黄土作为特殊土,在中国西北地区分布广泛,且多处于季节性冻土区^[1-2]。位于该区的诸如黄土边坡、路基等工程遭受冻融循环的强风化作用后,时常出现开裂、渗漏、坍塌和沉陷等工程病害。对此,黄土力学研究中考虑了冻融循环作用的影响,关注了冻结速率、冻结温度以及含水率和冻融循环次数对黄土的物理性质、微观结构和变形强度的影响,取得了丰硕研究成果^[3-11]。

工程中遇到的黄土常位于地下水位以上,处于非饱和状态。从现代非饱和土力学中寻求黄土力学的理论支撑是非常必要的,其中,吸力特性是最具代表性的参量^[12]。描述吸力与湿度之间的关系称为土的持水特性,它与土物性及其结构的内部因素^[13-15]、应力和干湿循环的外部因素密切相关^[16-17]。冻融循环作用会引起土中结构的改变,势必会对持水特性产生影响。然而,除针对膨胀土开展了相关的试验研究外^[18-19],对湿陷性黄土的研究还鲜有报道,冻融循环作用后,黄土的持水特性如何变化及其特征参数与冻融循环次数之间的联系尚不清楚,有待深入开展。基于此,本文以原状黄土为研究对象,考虑冻融循环次数和冻融前初始含水率影响,利用压力膜仪开展持水特性试验,探讨冻融循环条件对原状黄土持水特性的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验用土及试样制备

试验所用土样采自陕西泾阳某斜坡侧壁,为Q₃黄土,取土深度4~5 m,其物理指标见表1,按土的液塑限分类属于粉质黏土。由土的颗粒级配曲线可知(见图1),试样黄土主要以粉粒为主(含量68%),含有部分黏粒(含量26%)和少量的砂粒(含量6%)。用专门的削样器,将现场采集的原状土块制备成直径38 mm、高度10 mm的特制小环刀试样。环刀尺寸是为了缩短吸力平衡时间和节约压力膜中的占比空间。

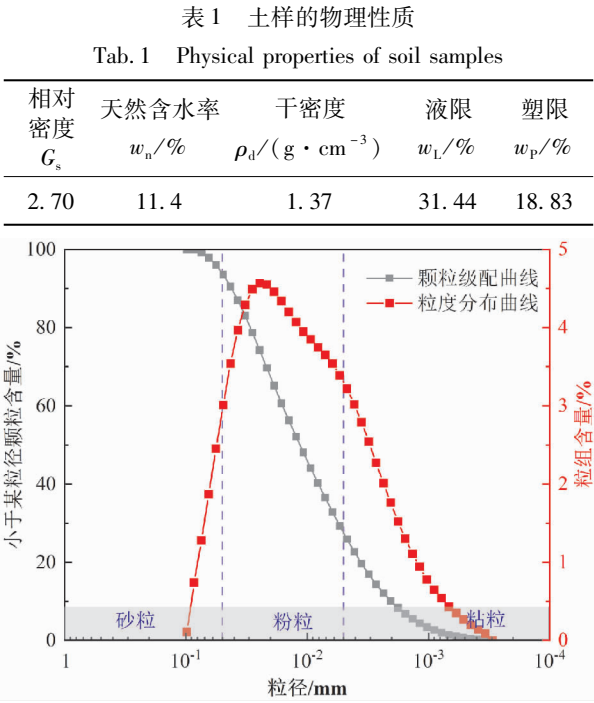


图 1 泾阳黄土颗粒级配曲线和粒度分布曲线

Fig. 1 Grading curve and particle-size distribution curve of Jingyang loess

1.2 试验方案

为研究冻融循环次数对持水特性的影响,对天然含水率的原状黄土试样先进行冻融循环,再进行减湿路径下的持水试验。近10年黄土高原的大气温度为-20~20℃,因此,冻结阶段采用最低温度(-20℃),解冻阶段采用最高温度(20℃)^[20]。试样在-20℃恒温箱中冷冻12 h,然后在20℃融化12 h,即为1个冻融循环。设定的冻融循环次数为0、1、2、3、4、5、6,其中0次冻融循环即为未经冻融作用。考虑已有研究证实了初始5次冻融后黄土结构趋于稳定^[20],设置初始冻融循环次数为6次。

为研究冻融前初始含水率对持水特性的影响,对天然含水率的原状黄土试样通过预湿法达到目标含水率,先进行冻融循环,再进行减湿路径下的持水试验。预湿法是采用滴水喷洒方式增湿到目标含水率,用保鲜膜包裹后在保湿缸中放

置 72 h,以保证试样中水分均匀。设定的目标含水率(w) 分别为 11.4% ($= w_n$)、18.8% ($= w_p$) 和 25.0% ($> w_p$);冻融循环次数 $N = 1、4、6$ 。

1.3 试验仪器及方法

试验仪器是基于轴平移技术,由美国 Soil Moisture 公司生产的压力膜仪(见图 2),吸力测量范围为 0 ~ 1 500 kPa。

试验主要包括试样饱和、气压施加和含水率测定 3 个阶段。先将经历不同冻融循环条件的试样通过真空抽气饱和法进行饱和,再将饱和试样放进压力膜仪中,采用空气压缩机分级施加孔隙气压力,孔隙气压力依次为 5、7、9、11、15、25、35、50、100、200、400、600、800、1 050 kPa。待每级排水稳定后对试样称重,计算出试样施加气压稳定后的含水率和对应的基质吸力(简称吸力)。前期预试验发现,即使对于抽真空饱和的试验饱和度达 95% 以上,初始吸力约为 1 kPa,故假定试样饱和时的吸力值为 0.01 kPa。对于所研究的黄土,在无应力条件下,湿度变化产生的变形很小^[16],由此假定减湿过程中未发生变形,进而可得到由饱和度与吸力关系表征的持水曲线。

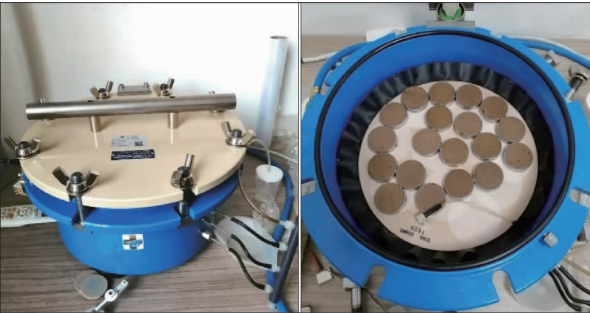


图 2 压力膜仪
Fig.2 Pressure membrane instrument

1.4 持水模型

Van Genuchten 模型(简称 VG 模型)广泛应用于描述常孔隙比下土的持水特性^[21]。该模型总饱和度 S_r 表示为

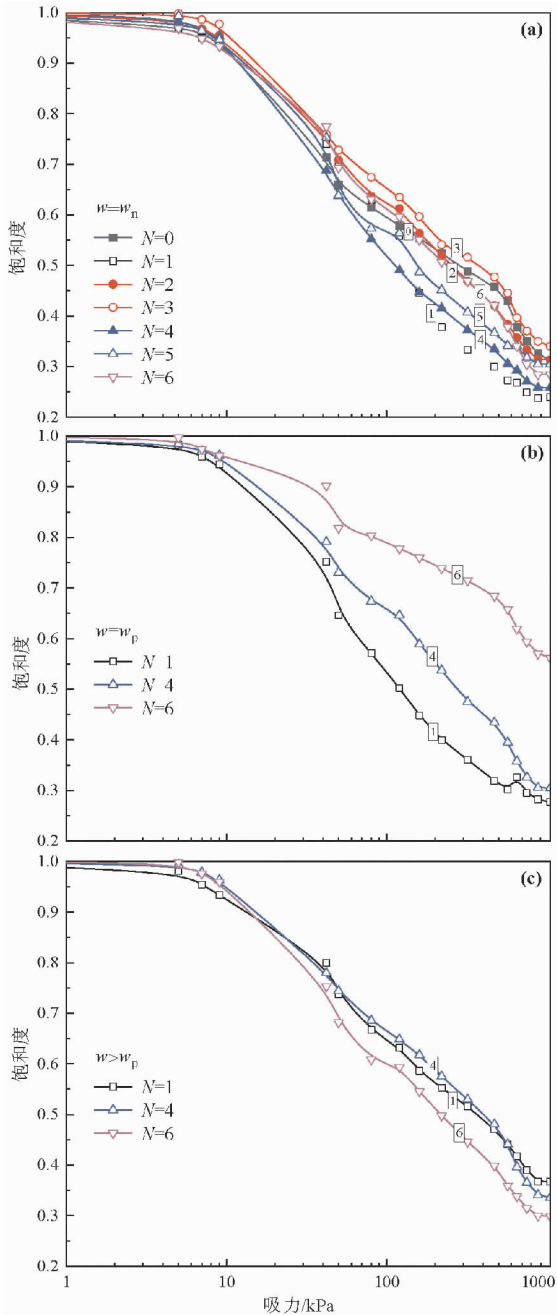
$$S_r = [1 + (\alpha s)^n]^{-m}$$

(1)

式中: s 为吸力; $\alpha、n、m$ 为土性参数,其中 $m = 1 - 1/n$ 。在双对数坐标系中, $mn(= n - 1)$ 为 S_r-s 曲线渐进线斜率,反映了减湿速率; $1/\alpha$ 为渐进线与直线 $S_r = 1$ 交点,对应的吸力即为进气值 s_d 。试验测定的持水曲线试验结果将采用 S_r-s 关系进行表征,用 VG 模型进行拟合,进而探讨冻融循环次数与冻融前初始含水率对 VG 模型的特征参数的影响。

2 结果与讨论

相同冻融前初始含水率(w_0),不同冻融循环次数(N) 条件下,饱和度(S_r) 与吸力(s) 典型曲线如图 3 所示。



注:(a) 11.4%; (b) 18.8%; (c) 25.0%。

图 3 相同初始含水率下持水曲线

Fig.3 Water retention curves at the same w_0

1) 当 $w = w_n < w_p$ 时,冻融循环作用对 S_r-s 曲线的影响较为显著,但并非呈单调性变化趋势。 N 为 0 ~ 1 和 3 ~ 4 时,持水曲线随着冻融循环次

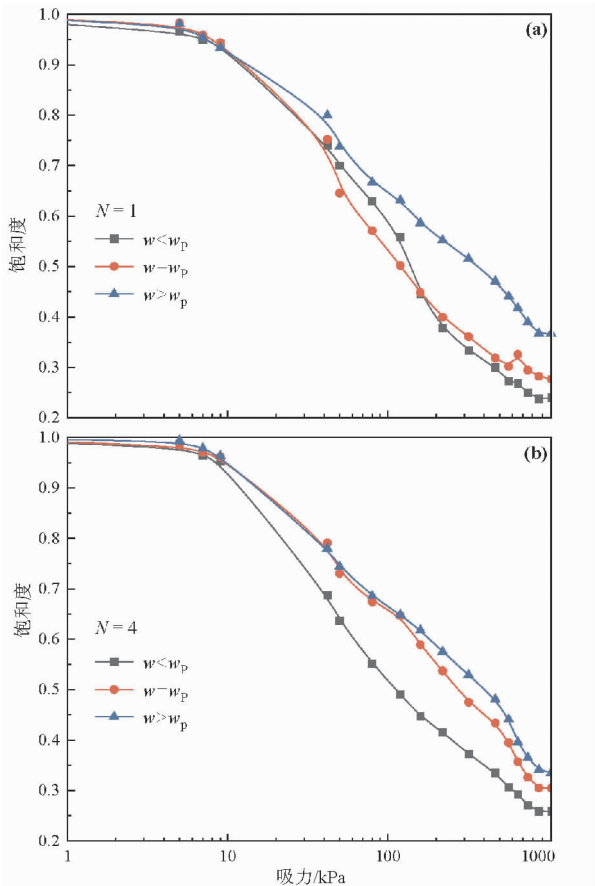
数增大呈下移趋势,即冻融循环作用减小了黄土的持水能力。 N 为 1 ~ 3 和 4 ~ 6 时,曲线随着冻融循环次数增大而整体呈上移趋势,即冻融循环对其变化趋势有影响,多次冻融循环作用会增大黄土孔隙的持水能力。这与膨胀土随着冻融循环次数的增大而呈现单调性下移趋势不同^[18-19]。可能的原因是原状黄土具有较强的初始结构性,首次冻融循环作用未使原状黄土初始结构破坏,但会改变黄土团粒内孔隙,而对团粒间孔隙影响较小,致使冻融循环作用对大吸力范围的持水曲线有较为明显影响。随着冻融循环作用的增强,初始结构性遭受破坏,处于初始结构与次生结构形成的耦合变化过程而整体呈类似于“压密”作用,改变了黄土团粒间孔隙和团粒内孔隙,致使持水曲线整体呈上移趋势。

2) 在 $w = w_p$ 和 $w > w_p$ 时,冻融循环作用对持水特性的影响趋势与 $w = w_n$ 情况大体相似(除 $w_0 > w_p$, N 为 6 情况外),其差别在于影响程度不同,其中又以 $w_0 = w_p$ 情况下冻融循环作用的影响程度最为显著。这反映了在所研究的初始含水率范围内,冻融循环作用对原状黄土持水特性的影响规律具有一定的普适性,在遭受冻融循环作用后,相同饱和度下,冻融循环作用会增大土中吸力,即孔隙间的收缩膜的表面张力。相同吸力下,冻融循环作用会增大土中饱和程度而呈现强持水能力。

相同 N , 不同 w_0 条件下, S_r - s 典型曲线如图 4 所示。可见,冻融前初始含水率对持水曲线亦有明显的影响。除个别区域有所交叉外,整体上呈现出随着 w_0 的增大,持水曲线上移趋势,即持水能力增强。这是由于初始含水率愈大,土中水相参与水-冰相变的程度愈大,产生的冻胀作用就愈加明显,进而对土中水相占比的团粒间孔隙与团粒内孔隙的扰动程度愈凸显,致使土中孔隙的持水能力增强。

在 $\lg S_r$ - $\lg s$ 双对数坐标系中,基于图 3 试验曲线渐进线与直线 $S_r = 1$ 交点,确定出进气值 s_d (篇幅所限,具体确定未示出)。不同 N 和 w_0 条件下, s_d 值如表 2 所示。尝试用进气值对吸力进行规格化处理,由图 3 结果汇制饱和度 S_r 与吸力比 s/s_d 关系,如图 5 所示。可见,不同冻融条件下试验点分布在较狭窄的范围内,可以近似归一。这反映出虽然冻融循环次数与冻融前含水率对持水曲线皆有较为明显的影响,且影响程度有所不

同。但对 S_r - s/s_d 关系影响较小,且可用同一函数来描述,论证了冻融循环条件对所研究原状黄土的持水曲线的影响可以通过进气值的变化来反映。



注:(a) $N = 1$; (b) $N = 4$ 。

图 4 相同冻融循环次数下持水曲线

Fig. 4 Water retention curves at the same N

表 2 不同冻融条件下的进气值和构度

Tab. 2 Values of parameter s_d and m_u on intact loess under different freeze-thaw conditions

冻融前含 水率 w_0 /%	冻融循环 次数 N /次	进气值 s_d /kPa	构度 ^[21] m_u
< w_p	0	29.3	9.3
	1	17.1	10.0
	2	31.7	10.3
	3	36.6	10.7
	4	15.9	10.2
	5	20.5	10.0
= w_p	6	26.3	9.1
	1	12.7	4.6
	4	30.5	4.3
	6	113.4	4.8
> w_p	1	35.4	2.8
	4	37.8	3.2
	6	25.6	2.9

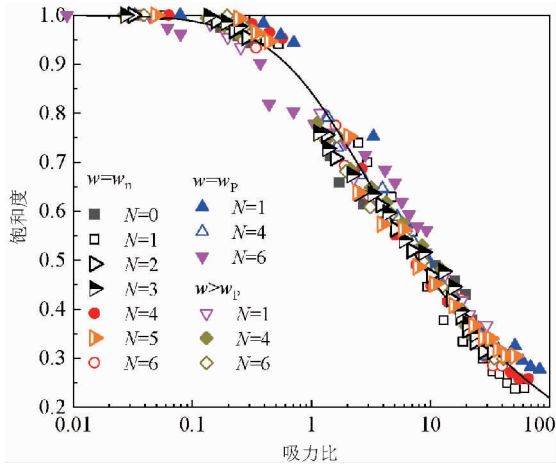


图 5 不同冻融循环条件下饱和度与吸力比关系
Fig. 5 Degree of saturation as a function of suction ratio under different freeze-thaw conditions

考虑到进气值变化与黄土内部的孔隙结构有关。为此,基于表征土物性的综合物理特征量($I_L\rho_d/\rho_w e$),将冻融前含水率视为当前含水率 w 确定出液性指数 I_L ,进而整理出反映黄土结构性参数的构度指标 m_u ^[22](式 2)。不同冻融循环条件下 m_u 值如表 2 所示,进气值 s_d 与 N 关系、 m_u 与 N 关系如图 6 所示。可见,随着冻融次数的增加,进气值和构度指标大体上呈现相同的变化趋势。

绘制出构度与进气值关系时(见图 7),发现除了歧义点外,两者呈现一定的正相关性,初步可用幂函数描述(式 3)。

$$m_u = 10.7 \exp \left[-0.98 - \left(\frac{I_L \rho_d}{\rho_w e_0} \right) \right] + 1 \quad (2)$$

$$s_d = s_{d0} + \lambda (m_u - 1)^\delta \quad (3)$$

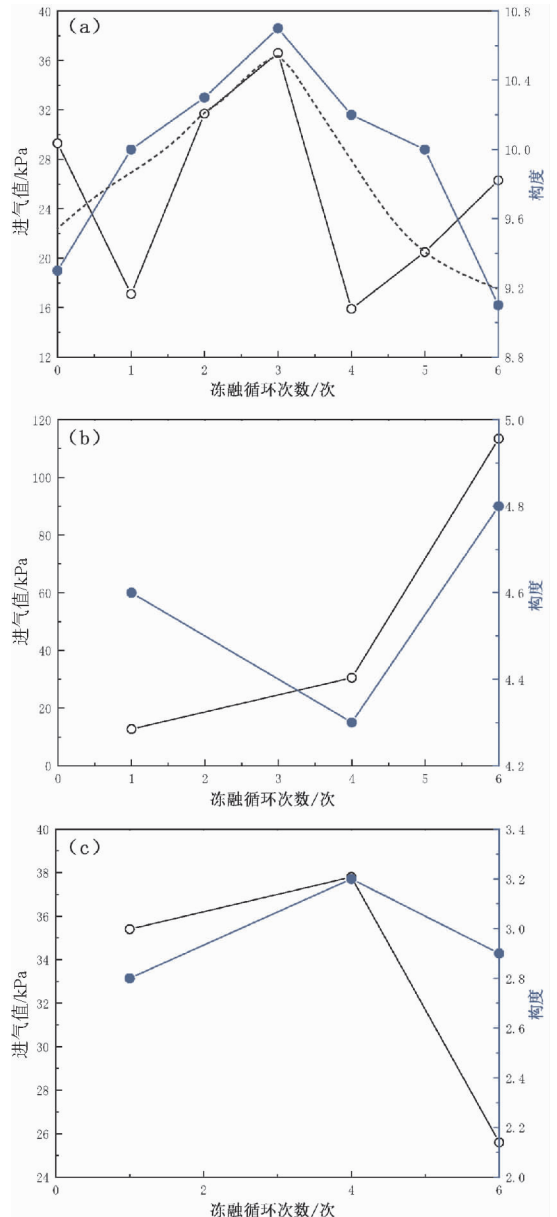
式中: ρ_d 、 ρ_w 分别为干密度和水的密度; s_{d0} 为重塑饱和黄土($m_u = 1$)对应的进气值; λ 和 δ 为反映进气值随构度而增大的程度。对于本研究的黄土,拟合得到 $s_{d0} = 24.5 \text{ kPa}$, $\lambda = 1.35 \times 10^{-4} \text{ kPa}$, $\delta = 4.637$ 。

把 $\alpha = 1/s_d$ 和式(2)代入式(1),得到

$$S_r = \left\{ 1 + \left[s / (s_{d0} + \lambda (m_u - 1)^\delta) \right]^n \right\}^{-(1-1/n)} \quad (4)$$

式(4)为考虑冻融循环条件影响的修正 VG 模型。它反映了冻融循环次数和冻融前含水率对 S_r - s 关系表征的持水特性影响,可归于二者影响改变了土的构度指标,进而引起持水特性变化。换言之,不同冻融循环条件的影响可通过土的构度指标变化来体现,且这种影响程度主要反映在进气值的变化上。

本文所构建的修正的 VG 模型,包括 s_{d0} 、 λ 、 δ 、 n 共 4 个参数,可通过 3 ~ 5 次冻融循环持水试验确定。对于研究的泾阳原状 Q_3 黄土,用式(4)及其模型参数(其中 n 通过图 5 渐近线斜率确定为 1.33),计算出不同冻融循环次数与冻融前含水率条件下实测吸力 s 对应的预测饱和度 S_r ,绘出实测和预测饱和度关系(见图 8)。可见,除 $w = w_p$ 下 N 为 6 情况外,预测与实测结果吻合较好(相关系数 $R^2 = 0.952$),初步论证了本文所构建的修正 VG 模型思路的可行性与合理性。



注:(a) $w < w_p$; (b) $w = w_p$; (c) $w > w_p$ 。

图 6 进气值、构度与冻融循环次数关系

Fig. 6 Changes in air-entry value and structural index with freeze-thaw cycles

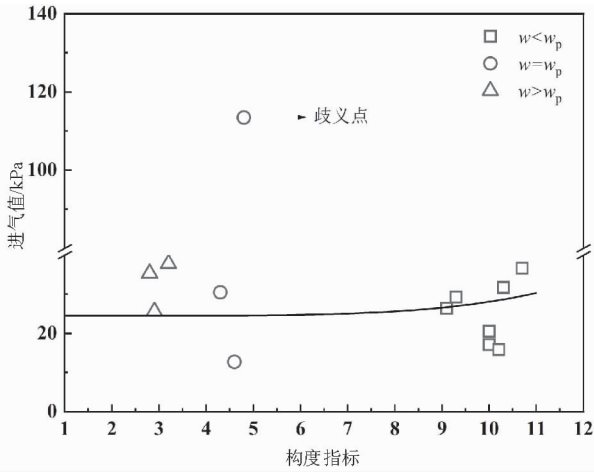


图 7 进气值与构度指标之间的关系

Fig. 7 Air-entry value and structural index relations

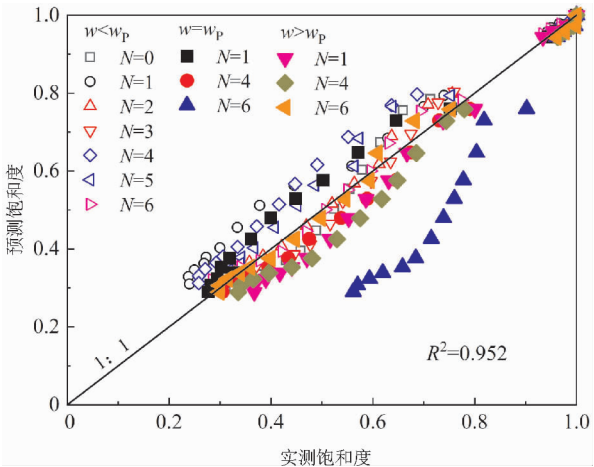


图 8 不同冻融循环条件下饱和度的预测结果

Fig. 8 Comparisons between calculated results of degree of saturation and that measured for intact loess at different freeze-thaw conditions

3 结论

对历经不同冻融循环作用后的原状黄土测定了持水曲线,探讨了冻融循环次数与冻融前含水率对持水特性及其特征参数的影响,得到了如下结论。

1) 冻融循环对持水特性具有明显的影响。随着冻融循环次数的增加,持水曲线并非单调变化,而是呈波动式移动,其程度与冻融前初始含水率水平有关。随着冻融前初始含水率的增大,持水曲线呈上移趋势,持水能力增强。

2) 不同冻融条件下,饱和度与吸力比之间呈良好的归一化关系,可用同一函数来描述,初步论证了冻融循环条件对原状黄土的持水曲线的影响

可以通过进气值的变化来反映。

3) 将冻融循环条件的影响归于土的结构变化,初步搭建了进气值与构度指标之间的定量联系,进而构建了考虑冻融循环条件影响的修正 VG 模型,实测与预测结果吻合较好。

参考文献

[1] 孙建忠. 黄土学[M]. 香港: 香港考古学会出版社, 2005.

[2] 周幼吾. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[3] 叶万军, 杨更社, 李喜安, 等. 冻结速率对 Q₂ 黄土性状影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1912-1917.

YE W J, YANG G S, LI X A, et al. Test study of effect of freezing speed on behavior of Q₂ loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1912-1917.

[4] 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[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1187-1192.

GU Q, WANG J D, SI D D, et al. Effect of freeze-thaw cycles on collapsibility of loess under different moisture contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1187-1192.

[5] 付翔宇, 张泽, 杨成松, 等. 冻融循环作用下富平黄土微观结构几何类型变化研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 484-496.

FU X Y, ZHANG Z, YANG C S, et al. Study on geometric type changes of Fuping loess microstructure under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 484-496.

[6] 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 J L, MA W. Influence of freeze-thaw on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082-2086.

[7] 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 H, ZHANG Z, QIN Q, et al. Research on variability of basic physical properties of loess under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 162-168.

[8] 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 W K, SHI H Q. Influence of freeze-thaw cycles on micro-structure and shear strength of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922-

- 927.
- [9] 秦辉,刘鑫,兰恒星. 用波速评价冻融循环作用下压实黄土强度特性的试验研究[J]. 工程地质学报, 2023,31(5): 1507-1515.
- QIN H, LIU X, LAN H X. Evaluation of uniaxial compressive strength of compacted loess subjected to freeze-thaw cycling by wave velocity [J]. Journal of Engineering Geology, 2023,31(5): 1507-1515.
- [10] GRAHAM J, AU V C S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(1): 69-78.
- [11] LEROUEIL S, TARDIF J, ROY M, et al. Effects of frost on the mechanical behavior of Champlain Sea clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(5): 690-697.
- [12] 谢定义,邢义川. 黄土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [13] CAI G Q, ZHOU A N, LIU Y, et al. Soil water retention behavior and microstructure evolution of lateritic soil in the suction range of 0—286.7 MPa [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(12): 3327-3341.
- [14] 文宝萍,胡艳青. 颗粒级配为非饱和黏性土基质吸力的影响规律[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 50-55.
- WEN B P, HU Y Q. Effect of particle size distribution on the metric suction of unsaturated clayey soils [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(6): 50-55.
- [15] 汪东林,栾茂田,杨庆. 重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 751-756.
- WANG D L, LUAN M T, YANG Q. Experimental study of soil-water characteristic curve of remolded unsaturated clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 751-756.
- [16] 陈存礼,褚峰,李雷雷,等. 侧限压缩条件下非饱和原状黄土的土水特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 610-615.
- CHEN C L, CHU F, LI L L, et al. Soil-water characteristics of unsaturated intact loess under confined compression condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 610-615.
- [17] 张芳枝,陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.
- ZHANG F Z, CHEN X P. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 41-46.
- [18] DING L Q, VANAPALLI S K, ZOU W L, et al. Freeze-thaw and wetting-drying effects on the hydromechanical behavior of a stabilized expansive soil [J]. Construction and Building Materials, 2021, 275(11): 122162.
- [19] 赵贵涛,韩仲,邹维列,等. 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1139-1146.
- ZHAO G T, HAN Z, ZOU W L, et al. Influences of drying-wetting-freeze-thaw cycles on soil-water and shrinkage characteristics of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1139-1146.
- [20] XU J, LI Y F, REN C, et al. Influence of freeze-thaw cycles on microstructure and hydraulic conductivity of saline intact loess [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 181: 103183.
- [21] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [22] 邵生俊,王丽琴,邵帅,等. 黄土的结构屈服及湿陷变形的分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1357-1365.
- SHAO S J, WANG L Q, SHAO S, et al. Structural yield and collapse deformation of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1357-1365.

(编辑 李波)