

DOI: 10.11779/CJGE202106018

# 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响

赵贵涛<sup>1</sup>, 韩 仲<sup>\*1, 2</sup>, 邹维列<sup>1, 2</sup>, 王协群<sup>3</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学教育部水工岩石力学重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:** 研究了冻融循环、干湿循环和交替的干湿—冻融循环对压实膨胀土的微观结构、土-水特征曲线和收缩特征曲线的影响。试验结果表明: 冻融、干湿以及干湿—冻融循环显著改变了压实膨胀土的大孔隙系统; 干湿循环使压实土样的大孔隙消失, 但产生可见的宏观裂隙; 冻融循环导致土样产生肉眼不可见的微裂隙; 干湿—冻融循环既产生可见的宏观裂缝, 又产生不可见的微裂隙。宏观及微观裂隙的产生显著降低了膨胀土在低吸力范围内的持水能力以及从饱和状态到干燥状态的收缩量, 但对高吸力范围内的持水能力和土样的缩限和塑限无显著影响; 收缩特征曲线等比例收缩段和残余收缩段的斜率在冻融循环和交替的干湿—冻融循环后减小, 但在干湿循环后基本保持不变; 受 3 种循环作用后的试样的含水率-孔隙比-吸力关系分布在同一个土-水特征曲面上, 该曲面可由本文所提的改进土-水特征曲面模型加以描述。

**关键词:** 膨胀土; 干湿—冻融循环; 土-水特征曲线; 收缩特征曲线; 微观结构

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2021)06-1139-08

**作者简介:** 赵贵涛(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事特殊土土力学与非饱和土力学方面的研究工作。E-mail: zgt-aspirations@whu.edu.cn。

## Influences of drying-wetting-freeze-thaw cycles on soil-water and shrinkage characteristics of expansive soil

ZHAO Gui-tao<sup>1</sup>, HAN Zhong<sup>\*1, 2</sup>, ZOU Wei-lie<sup>1, 2</sup>, WANG Xie-qun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic Rock Mechanics of Ministry

of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of

Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The effects of freeze-thaw (FT), drying-wetting (DW) and alternative drying-wetting-freeze-thaw (DWFT) cycles on the micro-structure, soil-water characteristic curve (SWCC) and soil shrinkage characteristic curve (SSCC) of a compacted expansive soil are investigated. The experimental results show that the three investigated cyclic treatments significantly change the macro-pore system of soil. The macro-pores formed during compaction disappear during DW cycles while visible cracks are introduced. FT cycles induce invisible micro-cracks, and macro- and micro-cracks are both discovered in DWFT specimens. Macro- and micro-cracks significantly reduce the water retention capacity of soil in the low suction range and the amount of shrinkage from saturated condition to oven dryness. They have no influences on the SWCC in the high suction range and the shrinkage limit and plastic limit of soil. The slope of the SSCC at the proportional and residual shrinkage stages decreases after FT and DWFT cycles but remains constant after DW cycles. The relationships among moisture content, void ratio and suction of soil after different FT, DW and DWFT cycles are distributed on a unique surface which can be reasonably described by the proposed modified model. This study is useful for understanding the hydro-mechanical behavior of expansive soil under the influences of environmental factors.

**Key words:** expansive soil; drying-wetting-freeze-thaw cycle; soil-water characteristic curve; shrinkage curve; microstructure

## 0 引 言

膨胀土含有强亲水性黏土矿物, 如“蒙脱石”和“伊利石”, 通常情况下表现出较差的工程性质, 如在干燥过程中体积发生明显收缩, 且伴随着土体开裂,

而在增湿过程中发生明显的体积膨胀, 且强度和刚度显著降低<sup>[1-2]</sup>。在季节性冻土地区, 膨胀土既经历干湿

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779191, 51809199)

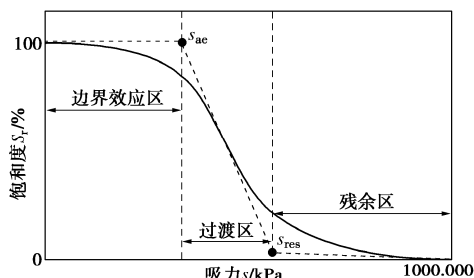
收稿日期: 2020-09-01

\*通信作者(E-mail: zhong.han@whu.edu.cn)

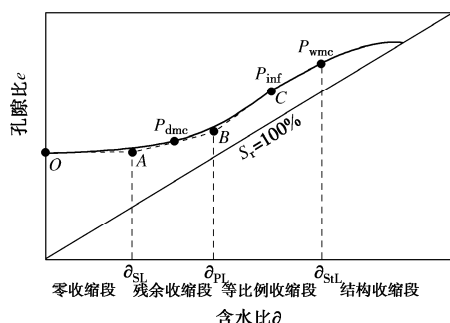
循环作用, 又经历冻融循环作用, 故受干湿—冻融循环的共同影响。在冻融过程中, 温度变化、冰透镜体的形成和水分迁移作用显著改变土颗粒之间的排列和组合<sup>[3-4]</sup>, 从而导致土体工程性质的复杂变化<sup>[5]</sup>。因此, 季节性冻土地区膨胀土的工程性质演变规律更为复杂, 对季冻区土工结构的合理设计和建设提出了挑战。

土-水特征曲线(SWCC)和收缩特征曲线(SSCC)是分析非饱和土(包括膨胀土)的水力-力学行为的关键本构关系<sup>[6]</sup>。SWCC定义了土中水的含量(可由重力含水率 $w$ 、体积含水率 $\theta$ 、饱和度 $S_r$ 或含水比 $\vartheta$ 表示, 其中 $\vartheta = wG_s = eS_r = V_w/V_s$ ,  $G_s$ 为土的相对质量密度,  $e$ 为孔隙比,  $V_w$ 为水的体积,  $V_s$ 为土颗粒的体积)与吸力 $s$ 之间的关系。SSCC描述了土体干燥过程中 $e$ 随水的含量(通常由 $\vartheta$ 或 $w$ 表示)的变化关系。事实上, SWCC和SSCC是土体含水率状态-吸力-孔隙比这一统一关系的两种描述<sup>[6]</sup>。

图1(a)为典型的SWCC( $S_r - \lg s$ 关系)。White等<sup>[7]</sup>和Vanapalli等<sup>[8]</sup>依据进气吸力 $s_{ae}$ 和残余吸力 $s_{res}$ 将SWCC划分为3个阶段。在吸力小于 $s_{ae}$ 的边界效应区, 土体通常处于饱和或接近饱和状态( $S_r \approx 100\%$ )。在过渡区( $s_{ae} < s < s_{res}$ ), 空气进入土体孔隙系统, 随吸力增大, 土体饱和度显著降低。当吸力大于 $s_{res}$ 时, 土体脱湿速率显著降低。



(a) 典型土-水特征曲线



(b) 典型收缩特征曲线

图1 土-水特征曲线和收缩特征曲线示意图

Fig. 1 Typical SWCC and SSCC

图1(b)所示为典型的SSCC。SSCC可呈现4个阶段。对结构性强的土体, 在脱水初期, 通常表现出结构性收缩阶段。期间 $\vartheta$ 显著下降, 但体积收缩不

明显。这一现象与土体内部存在的大孔隙、裂缝或根系孔洞有关, 其保水性差, 脱水主要由重力引起, 不会引起较大的体积收缩。结构性弱的土体(如泥炭固结土)通常没有结构性收缩阶段<sup>[9]</sup>。随着 $\vartheta$ 的进一步降低, 土体进入等比例收缩阶段, 其失水量通常与体积收缩量成固定比例。随着土体进一步干燥, 土体收缩进入残余收缩阶段, SSCC的斜率逐渐减小, 最终在零收缩阶段降为0。

SSCC的4个阶段被3个界限含水率隔开, 即结构限 $\vartheta_{SL}$ 、塑限 $\vartheta_{PL}$ 和缩限 $\vartheta_{SL}$ 。Groenevelt等<sup>[10]</sup>提出了一种确定3个界限含水率的方法, 如图1(b)中所示。首先确定SSCC的反弯点 $P_{inf}$ , 将SSCC分为湿侧(含水率较高侧)和干侧(含水率较低侧); 然后分别确定湿侧和干侧的曲率最大点(即点 $P_{wmc}$ 和 $P_{dmc}$ )。对应于 $P_{wmc}$ 的 $\vartheta$ 即为结构限 $\vartheta_{SL}$ 。分别过点 $P_{dmc}$ 和 $P_{inf}$ 做SSCC的切线AB和BC, 两者交点B对应的 $\vartheta$ 即为塑限 $\vartheta_{PL}$ 。过含水率为零的点做SSCC的切线OA, 与AB交点A对应的 $\vartheta$ 即为缩限 $\vartheta_{SL}$ 。

文献中针对干湿循环作用下膨胀土的微观结构、体变和力学性能的演化规律开展了大量研究<sup>[11-12]</sup>。研究发现, 膨胀土在干湿循环过程中极易产生裂缝, 导致原有的土体结构破坏, 渗透性显著提高, 结构整体性减弱, 强度和刚度均发生较大衰减。同时, 干湿循环也对土体持水特性和收缩特性具有显著影响<sup>[13]</sup>。

以往针对土体冻融循环的试验探究主要集中于土体结构、渗透系数和强度。研究表明, 冻融循环通常导致土体渗透系数增加<sup>[14]</sup>, 强度和刚度降低<sup>[15-16]</sup>, 以及体积显著变化<sup>[15]</sup>。虽然交替的干湿—冻融循环作用下土体的持水特性和收缩特性的演化规律对季节性冻土地区膨胀土相关土工结构的设计更具现实意义, 但相关研究却鲜有报道。

本文以中国东北地区膨胀土为研究对象, 考虑当地气候环境, 设计了多次干湿、冻融以及交替的干湿—冻融循环试验, 测定了循环处理前后膨胀土试样的微观结构、土-水特征曲线和收缩特征曲线。在此基础上, 分别讨论了冻融循环、干湿循环以及交替的干湿—冻融循环对膨胀土持水特性和收缩特性的影响规律, 结合微观结构试验结果揭示其演化机理。提出了一个改进的土-水特征曲面模型以描述膨胀土在经历过冻融、干湿以及干湿—冻融循环后含水率-吸力-孔隙比关系。

## 1 试验材料

### 1.1 试验用土

试验用膨胀土取自黑龙江省齐齐哈尔市。齐齐哈

表 1 黑龙江膨胀土的基本物理性质指标及主要化学成分  
Table 1 Basic index properties and main chemical components of expansive soil

相对质量 密度 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_{PL}/\%$	塑性指数 $I_p$	自由膨胀率 $/\%$	pH 值	主要化学成分及质量分数/%				
						SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO
2.68	42.84	22.40	20	67	8.2	60.48	18.53	6.63	3.05	4

尔市属季节性冻土区域, 夏季降水丰富, 平均气温 23.1℃。冬季较为干旱, 平均气温-18.6℃。研究所用膨胀土的天然重力含水率  $w_n$  为 26.3%, 天然干密度  $\rho_{dn}$  为 1540 kg/m<sup>3</sup>。采集的膨胀土经风干、研磨后过 2 mm 筛子以去除大颗粒。其基本物理性质和化学成分如表 1 所示。经颗粒分析试验测得土样中砂粒占 18%, 粉粒占 70%, 黏粒占 12%。X 射线衍射试验显示该膨胀土的主要矿物成分为石英、伊利石、钠长石、方解石。

1.2 试样制备及干湿、冻融循环处理

将干土与蒸馏水混合并配制到天然含水率  $w_n = 26.3\%$  (误差±0.02%内)。采用静压方式将配置好的湿土压制成直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀试样, 试样干密度为天然干密度 1540 kg/m<sup>3</sup>。

利用恒温恒湿试验箱对试样进行冻融 (FT)、干湿 (WD) 和干湿—冻融 (WDFT) 处理。每种处理方式循环次数为 1, 4, 6, 10 次。考虑到膨胀土渗透系数很低 (特别在非饱和或冻结条件下), 冻融过程中含水率变化很小, 故采用常含水率下的冻融模式。参考齐齐哈尔年均温度变化范围, 试样首先在-20℃下冻结 12 h, 然后在 20℃下融化 12 h, 完成一次冻融循环。

在干湿循环过程中, 含水率的变化范围选定为饱和含水率 ( $w_{sat}$ ,  $S_r \approx 100\%$ ) 和缩限 ( $w_{SL}$ ) 之间。首先将试样从初始状态饱和至  $S_r \approx 100\%$ , 再脱湿至  $w_{SL}$ , 最后增湿至  $w_n$ , 完成一次干湿循环。在增湿过程中, 试样完全被滤纸覆盖, 用喷壶将蒸馏水均匀喷洒在滤纸上以不断湿润试样。每次喷水后, 将试样连同滤纸包在一层塑料薄膜中静置 24 h, 以达到水分平衡。重复此过程, 直到试样质量停止增加。经计算, 此时试样  $S_r \geq 97\%$ , 视为达到饱和状态; 干燥过程中, 将试样放入恒温恒湿试验箱中, 温度设定为 25℃, 相对湿度 60%。每隔一段时间测记试样质量, 直至试样质量停止减小, 通常需要 5~6 d 的时间, 使试样从  $w_{sat}$  脱湿至  $w_{SL}$ , 此时试样饱和度为 30.86%。

干湿—冻融循环处理时, 首先进行干湿处理, 而后进行冻融处理, 方法步骤同上所述, 完成一次干湿—冻融循环。

2 试验方法

2.1 收缩特征曲线的测定

将试样饱和后放置于多孔塑料板上, 每隔 1~2 h

用精度为 0.01 g 的电子天平称量试样质量, 用精度为 0.005 mm 的游标卡尺测量试样尺寸以计算其体积。当试样尺寸不再随含水率降低而变化时, 将试样转移至 40℃ 的烘箱中烘干, 并测量烘干试样的质量和尺寸。由试样体积及质量数据可计算  $e$  与  $\theta$ , 得到收缩曲线。

2.2 土-水特征曲线的测定

采用轴平移法和蒸汽平衡法测量全吸力范围内的土 - 水特征曲线<sup>[17]</sup>。轴平移法中施加的吸力梯度为 20, 45, 108, 176, 375, 525, 940 kPa, 每一级吸力一般维持 4~5 d 以使试样达到平衡状态。轴平移法结束后, 对试样进行切块并转移至干燥器内, 在 25℃ 下运用蒸汽平衡法进行高吸力段土 - 水特征曲线的测定, 测量的吸力范围为 2~367 MPa。

2.3 试样微观结构的测定

本研究选用压汞试验 (MIP) 及扫描电子显微镜试验 (SEM) 来观察试样在经历 3 种循环处理之后微观结构的变化。在循环处理之后的试样上取 1~2 g 进行试验。试验前用液氮冻干法去除试样中的水分。

3 试验结果

3.1 3 种循环处理后试样宏观尺度的变化

如图 2 所示, 未经循环处理的试样饱和后, 表面光滑平整, 没有明显裂隙。冻融循环处理后的试样, 在冻结过程中由于冰透镜体的形成, 会在土样孔隙内形成向外的挤压力, 造成孔隙体积的增大及裂隙的产生。然而, 这种微结构变化并不直接反映在土样表面, 即没有明显裂隙 (见图 2 (b))。在干湿过程中试样产生非均匀变形, 试样表面形成了肉眼可见的裂隙 (见图 2 (c))。与干湿循环导致的可见宏观裂隙相比, 冻融循环导致的裂隙肉眼不可见, 以下简称微裂隙 (详见 3.2 节)。图 2 (d) 所示为干湿—冻融循环之后的试样, 在循环过程中, 试样既受到干湿循环的影响又受到冻融循环的影响, 因此, 循环之后的试样表面同样发育有肉眼可见的裂隙。

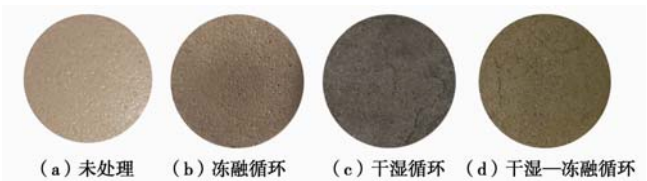


图 2 饱和后的未处理的试样及经历 10 次循环的试样

Fig. 2 Saturated specimens before and after 10 cyclic treatments

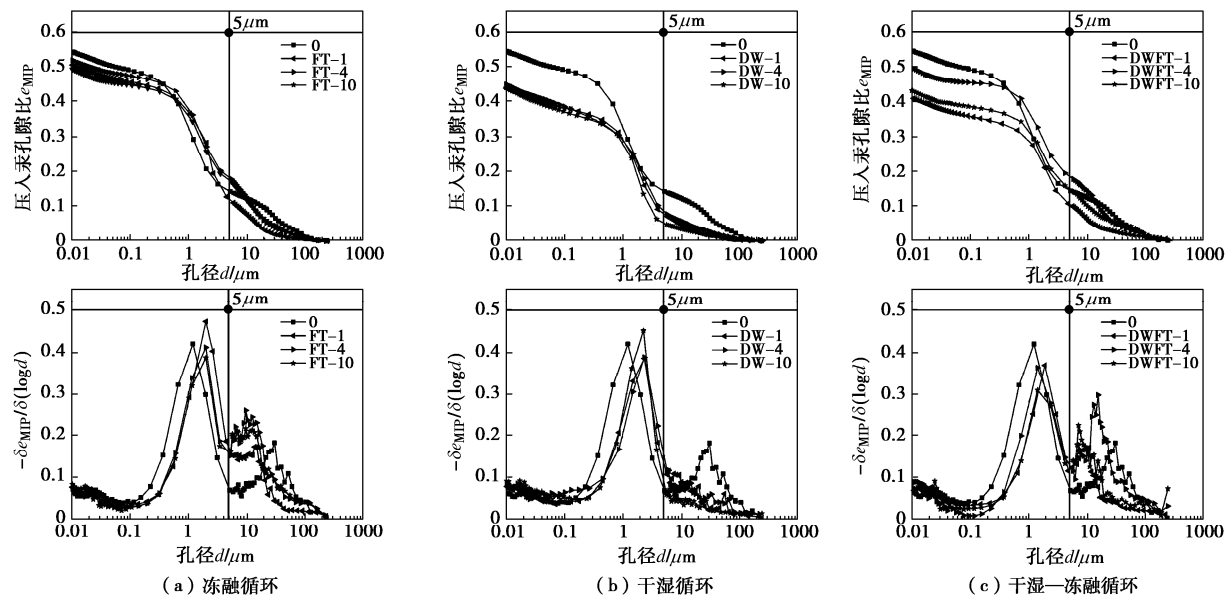


图 3 试样经历 3 种循环处理之后的压汞实验结果

Fig. 3 MIP test results of specimens after 3 cyclic treatments

表 2 收缩曲线模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters for SSCC

循环次数	冻融循环					干湿循环					干湿-冻融循环				
	$e_{\text{sat}}$	$e_0$	$\alpha$	$\zeta$	$\zeta'$	$e_{\text{sat}}$	$e_0$	$\alpha$	$\zeta$	$\zeta'$	$e_{\text{sat}}$	$e_0$	$\alpha$	$\zeta$	$\zeta'$
0	0.74	0.32	2.99	1.54	0.83	0.74	0.32	2.99	1.54	0.83	0.74	0.32	2.99	1.54	0.83
1	0.77	0.43	0.55	0.26	2.10	0.74	0.38	0.84	0.55	1.38	0.74	0.38	0.94	0.62	1.23
4	0.75	0.47	0.46	0.30	1.89	0.71	0.41	0.53	0.31	1.75	0.74	0.42	0.90	0.72	1.13
6	0.76	0.49	0.60	0.56	1.38	0.69	0.44	0.47	0.27	1.76	0.73	0.45	0.60	0.49	1.36
10	0.74	0.49	0.63	0.60	1.38	0.69	0.43	0.39	0.16	2.20	0.74	0.46	0.56	0.44	1.45

3.2 3 种循环作用对试样微观结构的影响

未处理及经历不同冻融、干湿和干湿—冻融循环作用的饱和试样的 MIP 试验结果,即累计进汞量曲线 (CI) 和孔径分布曲线 (PSD),如图 3 所示 (图例中 FT-1、FT-4、FT-10, DW-1、DW-4、DW-10, DWFT-1、DWFT-4、DWFT-10 分别表示经历过 1, 4, 10 次 3 种循环处理)。未处理及经历 10 次冻融、10 次干湿和 10 次干湿—冻融循环处理之后试样的 SEM 图像如图 4 所示。压实膨胀土试样的 PSD 曲线具有双峰结构,两个主峰分别为 1.3 μm 左右的微孔峰和 30 μm 左右的大孔峰。图 4 (a) 中也可以观察到大孔隙的存在。为定量描述 3 种循环对 CI 和 PSD 曲线的影响,在 5 μm 处将 CI 和 PSD 曲线划分为两个区域,即孔径小于 5 μm 的微孔隙系统和孔径大于 5 μm 的大孔隙系统。从 MIP 和 SEM 试验结果中可观察到: PSD 曲线变化最明显的是大孔隙系统,3 种循环处理之后,在压实过程中形成的 30 μm 大孔峰消失,表明此区域内的大孔隙是不稳定的,容易在 3 种循环作用下坍塌。在干湿循环过程中,大孔隙减少的更加明显, PSD 曲线逐渐变为单峰形态。相应地,10 次干湿循环试样的 SEM 图像中未发现孔径为 30 μm 的大孔隙,土样结构变得均匀。冻融循环作用也引起了大孔隙的坍塌,与

干湿循环不同的是,其 PSD 曲线在 5~20 μm 内形成了一个平台,且随着冻融循环次数的增加逐渐稳定。这与冻融循环过程中微裂隙 (尺寸为 5~20 μm) 的产生和扩展有关。如图 4 (b) 所示。干湿—冻融循环作用同样也造成了试样内部大孔隙的消失,然而在干湿、冻融过程的共同作用下,试样内部形成了峰值尺寸在 7~11 μm 的大孔隙/裂隙区域,裂隙发育见图 4 (d)。

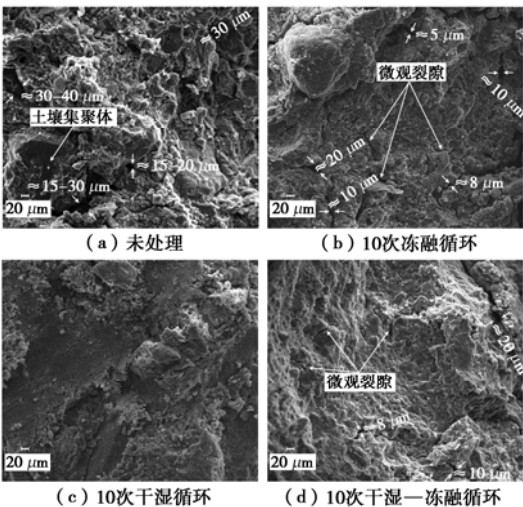


图 4 未经循环处理及经历 10 次循环处理试样的 SEM 图像  
Fig. 4 SEM images of untreated specimens and after 10 cyclic treatments

3 种循环对于微孔隙系统影响相对较小。微孔隙 PSD 曲线的形态保持不变,其峰值孔径由  $1.3 \mu\text{m}$  增加到  $2.5 \mu\text{m}$  并向右平移。 $0.1 \mu\text{m}$  以下的孔隙变化不明显。

### 3.3 3 种循环作用对土样收缩曲线的影响

图 5 为试样在经历 0, 1, 4, 6, 10 次冻融、干湿和交替的干湿—冻融循环之后的收缩特征曲线。试验结果可用 Cornelis 等<sup>[18]</sup>进行拟合:

$$e = e_0 + \alpha \exp(-\xi g^\zeta) \quad (1)$$

式中,  $e_0$  为烘干时土样孔隙比,  $\alpha$ ,  $\xi$  和  $\zeta$  为拟合参数。饱和状态下试样孔隙比和模型参数值如表 2 所示,其拟合度  $R^2$  均大于 0.97。

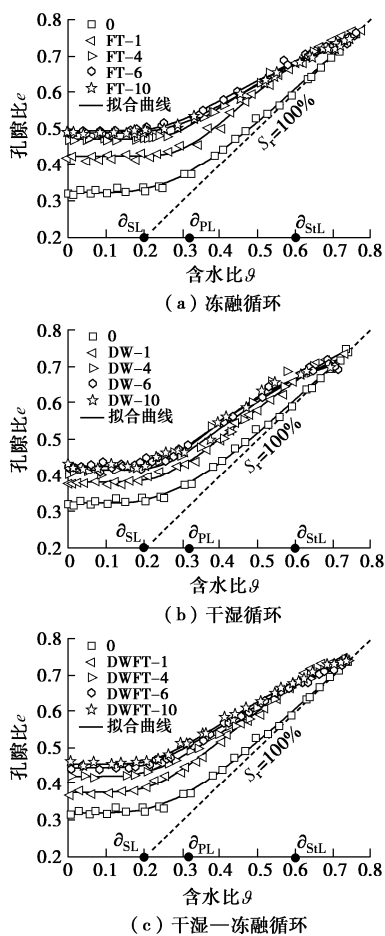


图 5 3 种循环后试样的收缩曲线

Fig. 5 SSCCs of specimens after 3 cyclic treatments

用文献[10]中的方法来确定 SSCC 上的界限含水率。未经循环处理的试样没有明显的结构性收缩阶段,而 3 种循环均使膨胀土产生了结构性收缩段,且结构限  $g_{SL}$  均在 0.6 左右。3 种循环方式对缩限  $g_{SL}$  和塑限  $g_{PL}$  几乎没有影响( $g_{SL}=0.2$ ;  $g_{PL}=0.32$ )。这是因为  $g_{SL}$  和  $g_{PL}$  决定于矿物成分而不受循环处理过程中土样结构改变的影响。由收缩曲线结果可知:

(1) 对于 3 种处理方式,收缩曲线在首次循环过程中变化最为明显,在 4~6 次循环后,收缩曲线形态不再变化,达到稳定状态。

(2) 循环处理后,膨胀土在脱湿过程中的收缩量显著降低。若将收缩试验中孔隙比的相对降低值表达式定义为  $(e_{sat} - e_0)/e_{sat}$ , 其中  $e_0$  和  $e_{sat}$  为完全干燥状态和饱和状态下的孔隙比。则  $(e_{sat} - e_0)/e_{sat}$  从未经循环处理的 56.75% 分别降低到 10 次冻融、干湿和干湿—冻融循环之后的 33.78%, 37.68%, 37.84%。

(3) 经历干湿循环处理后试样的收缩特征曲线在等比例收缩段、残余收缩段以及零收缩段均相互平行且平行于未经循环处理试样的收缩特征曲线(见图 5(b))。冻融以及干湿—冻融循环后试样的收缩曲线仅在零收缩段相互平行,而在等比例收缩段及残余收缩段其斜率随着循环次数的增加而逐渐平缓(见图 5(a), (c))。

### 3.4 3 种循环作用对土-水特征曲线的影响

采用轴平移法和蒸汽平衡法测得的土-水特征曲线(即吸力  $s$  与质量含水率  $w$  关系,称为质量含水率土-水特征曲线,  $w$ -SWCC)如图 6 所示。

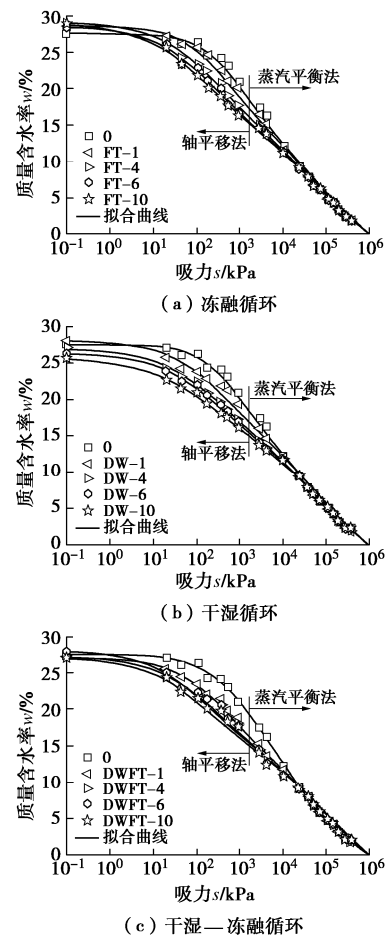


图 6 3 种循环后试样的质量含水率土-水特征曲线

Fig. 6  $w$ -SWCC of specimens after 3 cyclic treatments

表 3 质量含水率土 - 水特征曲线拟合参数

循环次数	冻融循环				干湿循环				干湿-冻融循环			
	$a_w/\text{kPa}$	$n_w$	$m_w$	$w_{\text{sat}}/\%$	$a_w/\text{kPa}$	$n_w$	$m_w$	$w_{\text{sat}}/\%$	$a_w/\text{kPa}$	$n_w$	$m_w$	$w_{\text{sat}}/\%$
0	361	0.91	0.59	27.59	361	0.91	0.59	27.59	361	0.91	0.59	27.59
1	154	0.80	0.60	28.61	130	0.63	0.68	28.13	138	0.71	0.64	27.07
4	77	0.62	0.71	29.07	95	0.56	0.72	27.11	63	0.61	0.64	27.27
6	54	0.65	0.65	28.50	76	0.60	0.65	26.42	41	0.62	0.62	28.04
10	43	0.55	0.74	29.00	64	0.51	0.71	25.79	36	0.61	0.60	27.14

表 4 饱和度土 - 水特征曲线拟合参数

循环次数	冻融循环			干湿循环			干湿-冻融循环		
	$a_s/\text{kPa}$	$n_s$	$m_s$	$a_s/\text{kPa}$	$n_s$	$m_s$	$a_s/\text{kPa}$	$n_s$	$m_s$
0	2139	1.12	0.06	2139	1.16	0.13	2139	1.16	0.13
1	493	0.50	0.44	342	0.45	0.35	378	0.33	0.50
4	116	0.58	0.40	52	0.47	0.33	89	0.48	0.40
6	52	0.61	0.38	34	0.50	0.32	42	0.60	0.33
10	49	0.58	0.38	27	0.36	0.40	39	0.49	0.41

本文使用 Fredlund 等<sup>[19]</sup>提出的 FX 模型 (式 (2)) 对质量含水率土 - 水特征曲线进行拟合。

$$w = w_{\text{sat}} \left[ 1 - \frac{\ln(1 + s/s_{\text{res}})}{\ln(1 + 10^6/s_{\text{res}})} \right] \left\{ \ln[2.718 + (s/a_w)^{n_w}] \right\}^{-m_w}, \quad (2)$$

式中,  $s_{\text{res}}$  是残余吸力,  $a_w$ ,  $n_w$ ,  $m_w$  分别是模型拟合参数 (见表 3), 拟合曲线如图 6 所示。

(1) 轴平移法和蒸汽平衡法方法所得的  $w - \text{SWCC}$  具有很好的连续性。FX 模型能够较好拟合全吸力段的  $w - \text{SWCC}$ 。

(2) 在 10 次冻融、干湿和干湿-冻融循环后,  $w - \text{SWCC}$  达到稳定状态。

(3) 在冻融、干湿和干湿-冻融循环之后, 低吸力段 ( $s < 10^4 \text{ kPa}$ ) 土样持水能力显著降低。当吸力值大于  $10^4 \text{ kPa}$  之后, 3 种循环作用均不显著影响土样的持水能力。

基于  $w - \text{SWCC}$ , 结合试验过程中试样体积测量结果可得到饱和度土 - 水特征曲线, 即  $S_r - \text{SWCC}$ 。下式形式的 FX 模型可用于拟合  $S_r - \text{SWCC}$ :

$$S_r = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + s/s_{\text{res}})}{\ln(1 + 10^6/s_{\text{res}})} \right] \left\{ \ln[2.718 + (s/a_s)^{n_s}] \right\}^{-m_s}, \quad (3)$$

式中,  $a_s$ ,  $n_s$  和  $m_s$  为模型拟合参数, 拟合参数值如表 4 所示,  $S_r - \text{SWCC}$  及其拟合曲线如图 7 所示。

3 种循环作用对  $S_r - \text{SWCC}$  和  $w - \text{SWCC}$  的影响相似。考虑体积变化,  $S_r - \text{SWCC}$  能够更准确地确定土样的进气值  $S_{\text{ae}}$ 。如图 7 所示, 未经循环处理的试样在吸力达到  $1000 \text{ kPa}$  之前一直保持饱和状态, 即  $S_{\text{ae}} > 1000 \text{ kPa}$ 。在经历冻融和干湿循环之后, 进气吸力持续降低。相应地, 反映土样进气值的模型参数  $a_s$  明显降低 (表 4)。

土样中的水可分为毛细水和吸附水, 毛细水和孔

隙结构的连通性、大小及形态有关, 而吸附水则与土壤颗粒的表面特征和矿物成分有关。在低吸力范围内, 土样的持水能力主要受储存毛细水的大孔隙的影响; 而在高吸力范围内, 土样的持水能力主要受土样中的储存水分的微孔隙及水分吸附的土样颗粒的影响。3 种循环并不会改变土颗粒吸附水的能力, 且对土样小孔隙系统的影响较小。因此, 持水能力在与大孔隙相关的低吸力范围内降低。

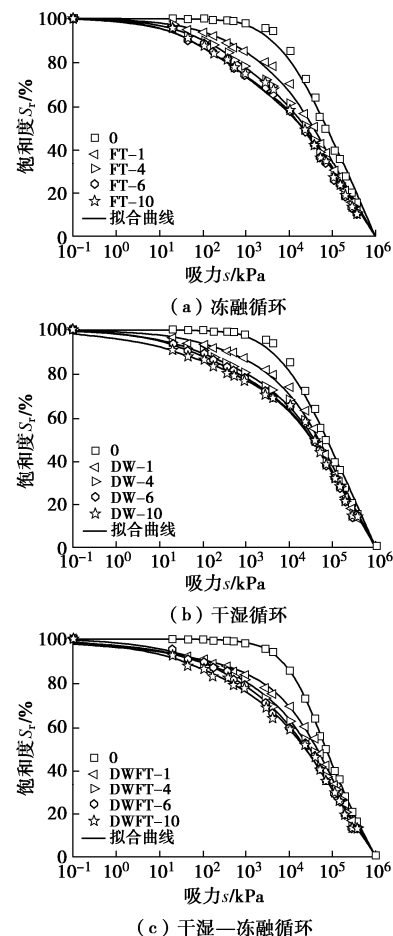


图 7 3 种循环后试样的饱和度土 - 水特征曲线  
Fig. 7  $S_r - \text{SWCC}$  of specimens after 3 cyclic treatments

### 3.5 描述3种循环作用的土-水特征曲面

在土样干湿过程中,  $\theta$ ,  $s$  和  $e$  同时变化。文献中通常以三维曲面方式表述  $\theta - s - e$  关系, 即土-水特征曲面 (SWRS)。图 8 所示为试验测得的具有不同冻融、干湿和干湿-冻融循环历史的膨胀土的  $\theta - s - e$  关系。

Gallipoli 等<sup>[20]</sup>在 SWCC 模型基础上引入孔隙比, 提出 SWRS 模型。本文结合 FX 和 Gallipoli 模型建立式 4 来拟合不同循环处理之后黑龙江膨胀土在全吸力段 (即  $0 \sim 10^6$  kPa) 的  $\theta - s - e$  关系:

$$\theta = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + s/s_{\text{res}})}{\ln(1 + 10^6/s_{\text{res}})} \right] \frac{e}{\left\{ \ln[2.718 + (\phi s e^\psi)^n] \right\}^m}, \quad (4)$$

式中,  $\psi$ ,  $\phi$ ,  $n$  和  $m$  为模型参数。式 (4) 满足  $s=0$  时  $\theta_{\text{sat}} = e_{\text{sat}}$ ,  $s=10^6$  kPa (即完全干燥状态) 时  $\theta=0$ 。式 (4) 拟合  $\theta - s - e$  关系结果如图 8 所示, 模型拟合参数分别为:  $\psi=5.91$ ,  $\phi=0.011$ ,  $n=0.56$ ,  $m=0.96$ ,  $s_{\text{res}}=20000$  kPa, 模型拟合度  $R^2=0.98$ 。可见, 存在一个统一的 SWCS 可描述未经循环处理的及经历冻融、干湿和干湿-冻融循环处理后的  $\theta - s - e$  关系。SWCS 在  $\theta - e$  平面内的投影为 SSCC, 在  $\theta - s$  平面内的投影为 SWCC, 因此, 该土-水特征曲面模型可用于描述和预测不同循环次数之后的 SSCC 和 SWCC。

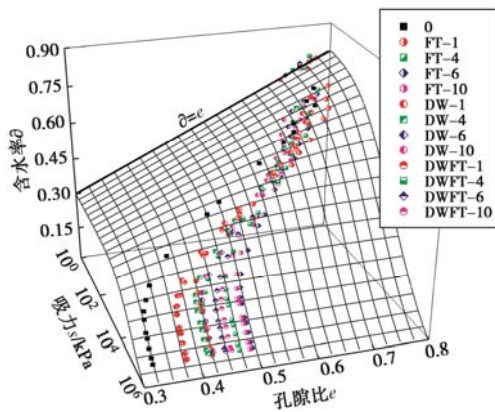


图 8 黑龙江膨胀土的  $\theta - s - e$  关系及其预测

Fig. 8  $\theta - s - e$  relationships and their predictions for test soil

## 4 结 论

本文探究了冻融、干湿和交替的干湿-冻融循环作用对膨胀土微观结构、SWCC 和 SSCC 的影响。通过试验和理论研究, 得到 3 点结论。

(1) 冻融、干湿以及干湿-冻融循环作用显著改变了膨胀土的大孔隙系统。在冻融和干湿循环中, 压实过程中形成的大孔隙产生坍塌; 冻融循环主要产生土样内部不可见的微裂隙; 干湿循环则主要产生可见的宏观裂隙; 干湿-冻融循环既使土样内部产生微观裂隙, 又产生可见的宏观裂隙。3 种循环作用对于微

孔隙系统的影响较小, 主要表现为峰值孔径的增大以及 PSD 曲线的右移。

(2) 冻融、干湿和干湿-冻融循环降低了膨胀土在低吸力范围内的持水能力和从饱和状态到干燥状态的总收缩量, 并在土样收缩特征曲线上产生结构性收缩段。3 种循环作用不改变缩限和塑限。

(3) 具有不同冻融、干湿和干湿-冻融循环历史的膨胀土的  $\theta - s - e$  关系分布在同一个土-水特征曲面上。本文结合 FX 和 Gallipoli 模型提出式 (4), 仅用一组模型参数即可合理地描述所有实测的  $\theta - s - e$  关系。该改进模型可用于预测冻融、干湿和干湿-冻融循环影响下的非饱和膨胀土的水力-力学行为。

### 参考文献:

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1997. (LIU Te-hong. Expansive Soil Problems in Engineering Construction[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997. (in Chinese))
- [2] ALONSO E E, GENS A, HIGHT D W. Special problems soils. General Report[C]// 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 1987, Dublin: 1087 - 1146.
- [3] 张 泽, 马 巍, 齐吉琳. 冻融循环作用下土体结构演化规律及其工程性质改变机理[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(6): 1904 - 1914. (ZHANG Ze, MA Wei, QI Ji-lin. Structure evolution and mechanism of engineering properties change of soils under effect of freeze-thaw cycle[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1904 - 1914. (in Chinese))
- [4] 赵鲁庆, 杨更社, 吴 迪, 等. 冻融黄土微观结构变化规律及分形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1680 - 1690. (ZHAO Lu-qing, YANG Geng-she, WU Di, et al. Micro structure and fractal characteristics loess under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1680 - 1690. (in Chinese))
- [5] 刘红军, 郭 颖, 单 炜, 等. 土质路堑边坡冻融失稳及植被护坡机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1197 - 1203. (LIU Hong-jun, GUO Ying, SHAN Wei, et al. Instability of soil cutting slopes caused by freeze-thaw and reinforcement mechanism by vegetation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1197 - 1203. (in Chinese))
- [6] FREDLUND D G. State of practice for use of the soil-water characteristic curve (SWCC) in geotechnical engineering[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56: 1059 - 1069.

- [7] WHITE N F, DUKE H R, SUNADA D K, et al. Physics of desaturation in porous materials[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1970, **96**(IR2): 165 - 191.
- [8] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique, 1999, **49**(2): 143 - 159.
- [9] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 高放废物地质处置库中缓冲回填材料的收缩特征[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1192 - 1200. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Shrinkage characteristics of buffer-backfilling materials in high-level radioactive waste geological disposal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1192 - 1200. (in Chinese))
- [10] GROENEVELT P H, GRANT C D. Re-evaluation of the structural properties of some British swelling soils[J]. European Journal of Soil Science, 2001, **52**(3): 469 - 477.
- [11] 叶为民, 万敏, 陈宝, 等. 干湿循环条件下高压实膨润土的微观结构特征[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1173 - 1177. (YE Wei-min, WAN Min, CHEN Bao, et al. Micro-structural behaviors of densely compacted GMZ01 bentonite under drying/wetting cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1173 - 1177. (in Chinese))
- [12] 魏星, 王刚. 干湿循环作用下击实膨胀土胀缩变形模拟[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1423 - 1431. (WEI Xing, WANG Gang. Modeling swell-shrink behavior of compacted expansive clays subjected to cyclic drying and wetting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1423 - 1431. (in Chinese))
- [13] LIU G, TOLL D G, KONG L, et al. Matric suction and volume characteristics of compacted clay soil under drying and wetting cycles[J]. Geotechnical Testing Journal, 2020, **43**(2): 464 - 479.
- [14] 王铁行, 杨涛, 鲁洁. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊1): 72 - 78. (WANG Tie-hang, YANG Tao, LU Jie. Influence of dry density and freezing-thawing cycles on anisotropic permeability of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S1): 72 - 78. (in Chinese))
- [15] 许雷, 刘斯宏, 鲁洋, 等. 冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊2): 167 - 174. (XU Lei, LIU Si-hong, LU Yang, et al. Physico-mechanical properties of expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 167 - 174. (in Chinese))
- [16] 王海涛, 张远芳, 成峰, 等. 冻融循环作用下盐渍土抗剪强度变化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, **12**(5): 1271 - 1276. (WANG Hai-tao, ZHANG Yuan-fang, CHENG Feng, et al. Study on the shear strength change laws of the saline soil subjected to freeze-thaw cycle[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, **12**(5): 1271 - 1276. (in Chinese))
- [17] 孙德安, 张俊然, 吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1839 - 1846. (SUN De-an, ZHANG Jun-ran, LÜ Hai-bo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1839 - 1846. (in Chinese))
- [18] CORNELIS W M, CORLUIY J, MEDINA H, et al. A simplified parametric model to describe the magnitude and geometry of soil shrinkage[J]. European Journal of Soil Science, 2006, **57**(2): 258 - 268.
- [19] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [20] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling of variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 105 - 112.