

# 考虑水分迁移影响的浅层膨胀土抗剪强度冻融劣化特征

李彦龙<sup>1,2</sup>, 汪自力<sup>2</sup>

(1. 许昌学院 土木工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 冻融作用下的水分迁移及其伴生现象会使浅层膨胀土的抗剪强度发生劣化, 探明水分迁移对浅层膨胀土抗剪强度的影响对于膨胀土工程冻融病害的防治是必要的。首先, 模拟实际冻融边界条件开展膨胀土在单向冻结-双向融化作用下的水分迁移试验, 在此基础上进一步开展膨胀土的直剪试验; 试验过程中对土样的水分场、温度场、竖向变形均加以监测。研究结果表明: (1) 冻结温度梯度对水分迁移量的影响较大, 冻融后膨胀土表现出冻胀融沉的特点且融沉量略大于冻胀量; (2) 抗剪强度的变化与含水量的重分布沿深度方向上表现出了高度的相关性, 抗剪强度在含水量增高的冻土区均表现出衰减的特点, 在含水量降低的未冻区则表现出小幅度增加的特点, 抗剪强度变化幅度随含水量变化幅度的增加而增大; (3) 沿土样深度方向上抗剪强度指标的变化特征与含水量的变化特征也表现出了较高的相关性, 含水量降低区的抗剪强度指标均有小幅增加, 含水量增高区中基本上都呈现出衰减趋势, 黏聚力的大幅减小是膨胀土抗剪强度冻融劣化的主要原因。

**关键词:** 土力学; 膨胀土; 水分迁移; 冻融; 抗剪强度

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2019)06-1261-00

## Shear strength degradation characteristics of expansive soil during freeze-thaw process considering moisture migration

LI Yanlong<sup>1,2</sup>, WANG Zili<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xuchang College, Xuchang, Henan 461000, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, Henan 450003, China)

**Abstract:** The shear strength of soil would be deteriorated by moisture migration and the accompanying phenomenon during freeze-thaw process. For the prevention and treatment of freeze-thaw diseases in expansive soil engineering, it is necessary to ascertain the degradation effect of moisture migration on the shear strength of expansive soil. By simulating real freeze-thaw boundary conditions, the moisture migration experiments of expansive soil under the axial freezing and bidirectional thawing action were carried out, and direct shear tests were conducted. The moisture field, temperature field and vertical deformation of expansive soil were monitored during the test. The research results show that the moisture migration quantity is influenced by the freezing temperature gradient, and that the expansive soil during freezing-thawing shows frost heave and thawing settlement characteristics and the thawing settlement is slightly larger than the frost heave. The variation of the shear strength has a high consistency with the water content redistribution along the depth direction. For specific performance, the shear strength of frozen soil attenuates when the water content increases, while the shear strength

**收稿日期:** 2018-09-06; **修回日期:** 2018-10-30

**基金项目:** 河南省高等学校重点科研项目(19A560019); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(192102310220)

Supported by the Key Scientific Research Projects of Henan Colleges and Universities(Grant No. 19A560019) and Key R&D and Promotion Projects of Henan Province(Grant No. 192102310220)

**作者简介:** 李彦龙(1985-), 男, 2016年于西安建筑科技大学岩土工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事膨胀土工程力学性能方面的研究工作。

E-mail: liyanlong1229@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1061

of unfrozen soil increases mildly with decreasing the water content. The variations of shear strength indexes and moisture field redistribution also show a high consistency along the depth direction. Specifically, shear strength indexes decrease when the water content increases. The attenuation degree of the cohesive force is significantly greater than that of the internal friction angle. The decrease of the cohesive force is the main reason of freeze-thaw deterioration the shear strength for expansive soil.

**Key words:** soil mechanics; expansion soil; moisture migration; freeze-thaw; shear strength

## 1 引言

膨胀土在我国分布广泛, 多达 20 余省(自治区、直辖市)<sup>[1]</sup>, 季节性冻土区内的膨胀土在冻融期内不可避免地受到冻融循环作用的影响。大气影响深度内的浅层土体在冻融期内通常表现为单向冻结 - 双向融化的特点并伴随着显著的水分迁移<sup>[2-3]</sup>, 水分迁移导致土体的水分场重分布, 水分迁移过程中的伴生现象改变土体的结构<sup>[4-5]</sup>, 使得土体的强度发生劣化, 也使浅层土体的抗剪强度在深度上表现出了不同的变化特征。目前考虑水分迁移对浅层土体抗剪强度影响的研究还鲜有报道。胡田飞等<sup>[4, 6-7]</sup>在开展冻融循环后土体抗剪强度试验时, 基本上都是用保鲜膜或密封袋对土样进行密封以防止冻融过程水分的散失, 这显然与土体的实际水分状态条件不一致。膨胀土因富含亲水性黏土矿物致使其水分敏感性极强, 抗剪强度具有明显的变动性<sup>[8-9]</sup>。目前膨胀土抗剪强度及强度参数与土性条件和冻融边界条件之间的定量关系尚未建立, 考虑水分迁移影响的膨胀土抗剪强度的研究更是少见。鉴于此, 本文模拟实际冻融边界条件, 首先开展膨胀土在单向冻结 - 双向融化条件下的水分迁移试验; 在此基础上开展冻融后膨胀土的直剪试验以探明浅层膨胀土抗剪强度和强度参数的变化特征。

## 2 水分迁移试验和直剪试验

### 2.1 土样基本物理指标

膨胀土土样取自南阳地区, 依照标准<sup>[10]</sup>和规范<sup>[11]</sup>

对土样进行了基本物理指标测试, 其中, 冻结温度的测试采用 Beckmann 温度计(量程为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 分辨率为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。测试结果如表 1 所示。

### 2.2 水分迁移试验

寒季到来时, 季冻区的土体自地表向下单向冻结, 直至达到最大冻结深度; 暖季到来时, 又从地表向下和从最大季节冻结深度向上双向融化<sup>[2]</sup>。冻结过程中, 土体中的水分在温度梯度作用下向低温区迁移。根据季冻区土体的这一实际冻融边界条件<sup>[12]</sup>, 设置 3 种温度梯度各异的单向冻结方案 F1~F3(见表 2); 融化时, 将土样放置于  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温箱中。通过 Xutemp 冻融循环试验设备的 2 个换热器对土样两端施加不同的温度以满足试验所需的温度梯度。换热器的控温范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 精度为 $\pm(0.1\sim 0.2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

土样的高度为 36 cm, 在直径为 10 cm、高为 42 cm 的 PVC 桶内通过击样法制样, 土样两端分别留 3 cm 放置换热器, 并在 PVC 桶外壁缠绕保温材料以尽可能减少侧向热交换。沿土样长度方向可将土柱等分为 9 段, 每段的高度为 4 cm, 自上而下在各段均埋置型号为 CWDZ31 的温度传感器(量程为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ )以动态检测土样温度场的变化。试验结束后将土样切成 9 段并用环刀(直径 61.8 mm、高 20 mm)在每段取样以备后续开展直剪试验(见图 1)。将土样的初始含水量控制为 18%, 干密度控制为  $1.6\text{ g/cm}^3$  以接近原状土的实际含水量和干密度<sup>[13]</sup>。在土样顶端施加 5 kPa 的竖向荷载使其应力水平接近于实际状态。试验时通过土样顶端的位移传感器监测土样在冻融过程中的竖向变形。

水分迁移试验的具体步骤如下:

表 1 膨胀土土样的基本物理指标

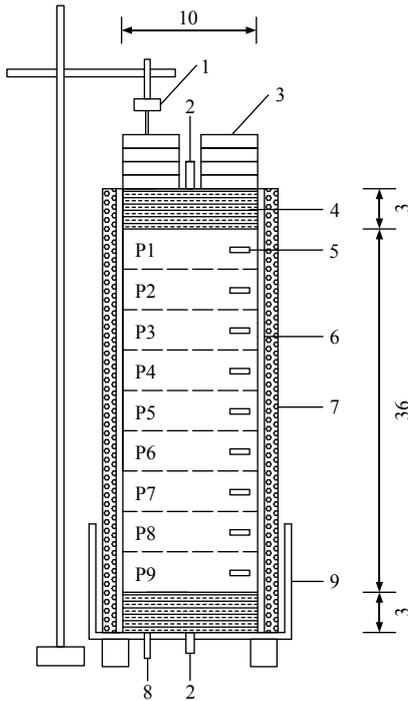
Table 1 Physical indicators of expansive soil samples

液限/ %	塑限/ %	颗粒组成/%			最优含 水量/%	最大干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	相对 密度	自由膨 胀率/%	膨胀潜势	冻结温 度/ $^{\circ}\text{C}$
		>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm						
63.1	28.3	2.6	53.6	43.8	22.9	1.71	2.74	103	强	-1.64

注:  $-1.64\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冻结温度为干密度为  $1.6\text{ g/cm}^3$ 、初始含水量为 18% 的土样。

表 2 单向冻结过程中的温度设置方案  
Table 2 Temperature settings during axial freezing

方案编号	换热器温度/°C		温度梯度/ (°C·cm <sup>-1</sup> )
	顶端	底端	
F1	-5	1	0.17
F2	-10	1	0.31
F3	-15	1	0.44



1—位移传感器；2—换热器与冷源接口；3—加荷载码；  
4—换热器；5—温度传感器孔；6—PVC 桶；7—保温层；  
8—补水口；9—试样支座

图 1 水分迁移试验装置示意图(单位: cm)

Fig.1 Schematic diagram of the moisture migration experiment device(unit: cm)

(1) 制样并安置温度传感器。

(2) 冻结过程。首先将土样放置于 1 °C 的环境中直至土样温度场恒定，按表 2 中的方案给土样两端分别施加不同的温度并通过温度传感器动态检测土样的温度场，待温度场稳定后继续保持 72 h 以使水分在温度梯度作用下能充分迁移。

(3) 融化过程。将土样放置于 15 °C 的环境中，拆掉土样两端的换热器并用保鲜膜封闭 PVC 桶的两端以防止融化过程中水分的散失。通过温度传感器动态检测土样的温度场，待温度场稳定后融化过程结束。

(4) 含水量、干密度的测定和直剪试样的制备。

① 待土样融化完毕后将 PVC 桶剖开，把土样均匀地切为 9 段以制备环刀样，通过烘干法测环刀取样后各段剩余土样的含水量；② 称取环刀内土样的质量以计算各段土样的干密度；③ 通过击样法制备与冻融试验中含水量和干密度相同的环刀样以开展未经冻融循环作用的直剪试验。

需要说明的是：(1) 较多的研究表明土体在历经第 1 次冻融循环后，抗剪强度的衰减幅度最大<sup>[14]</sup>，因此，本试验中对膨胀土土样暂时只进行 1 次冻融循环；(2) 令土样在 15 °C 下恒温融化，这可能与土体的实际融化边界条件并不完全一致，这样设定是基于如下两方面考虑，一方面，恒温融化可使问题得以简化且满足双向融化的边界条件，另一方面，T. Kamei 等<sup>[15]</sup>的研究结果表明融化温度对土体力学性质基本无影响；(3) 本试验为封闭系统的水分迁移试验，暂不考虑外界补水情况。

### 2.3 直剪试验

采用 ZJ 型应变控制式直剪仪对土样开展快剪试验。由于受冻融作用的膨胀土为分布于大气影响深度范围内的浅层土体，其在实际工况中所受的竖向应力通常较低<sup>[16]</sup>。鉴于此，在开展直剪试验时采用较低的竖向应力，分别为 25, 50, 75 和 100 kPa。由于该直剪仪标准配荷的最小压力为 50 kPa，试验时 25 kPa 的压力采取等效荷载的重块直接施加，其余竖向压力均按仪器操作说明由杠杆配重施加。剪切速率设定为 0.8 mm/min。试验过程、破坏标准以及数据处理均遵守标准<sup>[10]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 温度场的变化特征

土样在冻结过程和融化过程中温度场的动态变化如图 2 所示，可以看到：(1) 冻结过程中，土样的温度场在 16~24 h 均能达到稳定状态且稳定后的温度场沿土样长度方向为线性分布，这是由于试验过程中土样顶端和底端的温度保持恒定且土样是均质的；(2) 融化过程中，历经 16 h 不同冻结方案作用后土样的温度场均已恒定。试验所用膨胀土土样的冻结温度为-1.64 °C(见表 1)，据此可以将土样分为冻土区和未冻区。从图 2 中可以看出，土样在冻结方案 F1, F2, F3 作用下的冻结深度分别能达到第 5, 7 和 8 段，表明冻结深度随着冻结温度梯度的增加而增加。

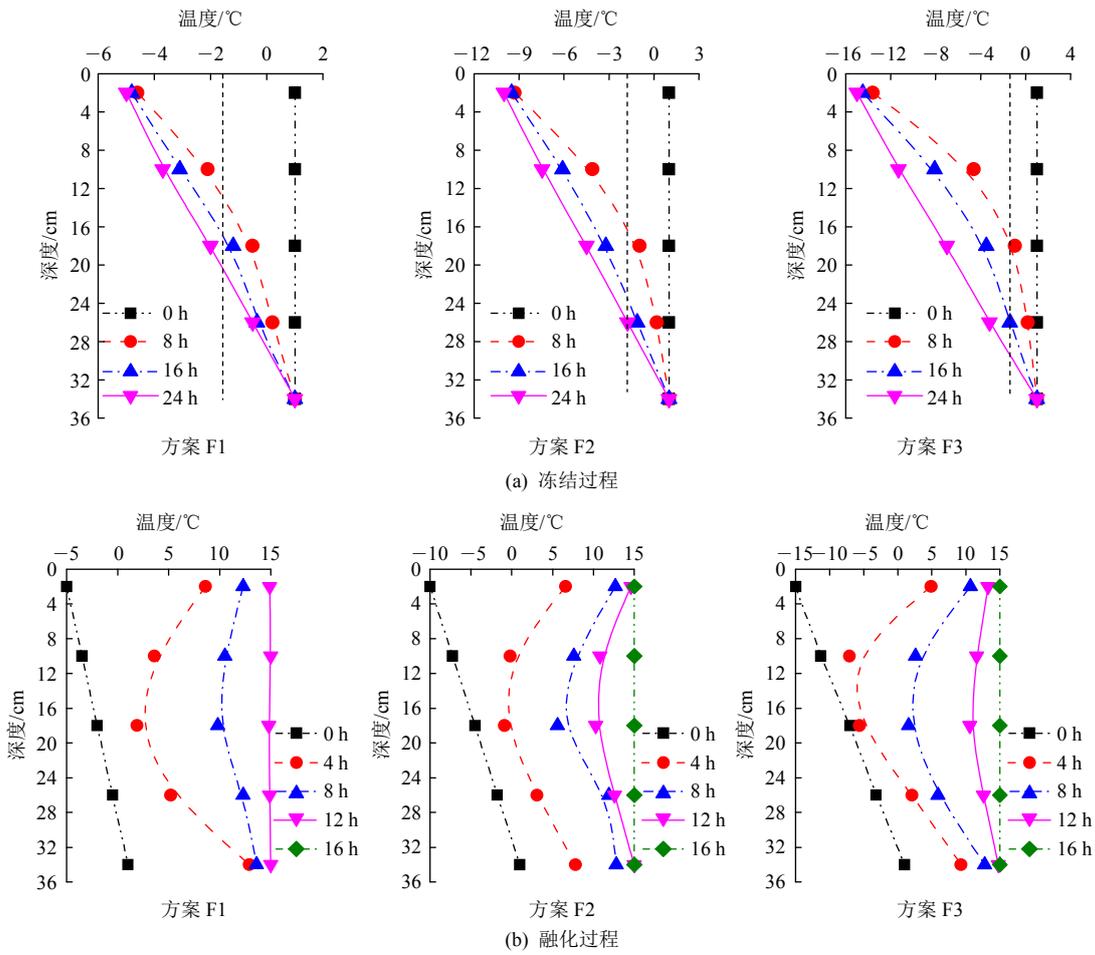


图2 冻融过程中温度场的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of the temperature field during freeze-thaw

### 3.2 含水量和干密度的变化特征

冻融后土样的含水量沿竖向的变化特征见图3，可以发现：(1) 冻土区的含水量明显高于初始含水量，未冻区的含水量则低于初始含水量，这表明在温度梯度作用下水分从未冻区向冻土区迁移；(2) 不

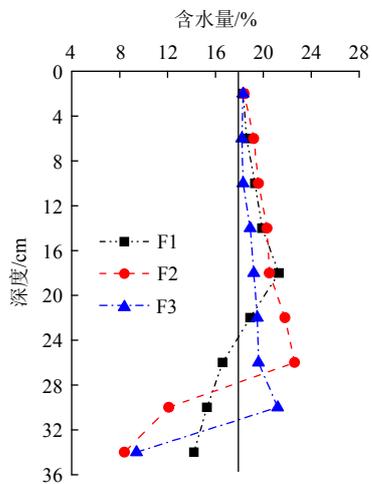


图3 冻融后土样含水量的分布特征

Fig.3 Water content distribution of soil samples after freeze-thaw

同冻结方案作用下的水分迁移量从大到小依次为 F2, F1, F3, 相应的冻土区含水量的平均增长率分别为 12.3%, 7.7%和 4.1%; 对该现象可做如下解释: 冻土中的水分迁移主要是从未冻土段向冻土段迁移, 其必要条件是水分迁移速率必须大于冻结速率, 过大的冻结温度梯度会增大冻结速率导致水分迁移不充分, 温度梯度过小则导致水分迁移的驱动力不够<sup>[17-18]</sup>, 因此, 适中的温度梯度作用下的水分迁移量最大<sup>[19]</sup>; (3) 土样含水量的最大值与冻结深度基本一致, 这是由于冻结过程中水分大量汇聚与冻结锋面处所致。

冻融后土样干密度的分布特征如图4所示, 可以发现: (1) 融化后土样的平均干密度表现出了小幅增加趋势, 但是增幅不大, F1, F2 和 F3 方案下土样的干密度分别为 1.608, 1.606 和 1.604 g/cm<sup>3</sup>; (2) 未冻段土样的干密度均有所增大, 冻结锋面处的干密度表现出了明显的减小特征。现有的研究表明松散土在冻融后会表现出压密的特征, 密实土因扰动作用则表现为密度减小的特征; 为此, P.

Viklander<sup>[20]</sup>提出了残余孔隙比的概念，认为初始密度不同的同种土样在历经多次冻融循环后，其孔隙比(密度)会趋于稳定。齐吉琳和马巍<sup>[21]</sup>通过试验证实了残余孔隙比这一概念。可见冻融后土样的干密度取决于土样的初始密度、冻融循环次数等因素，本试验中土样顶端承受 5 kPa 的竖向应力，水分迁移又导致土样内部含水量不均匀，在上述因素的综合作用下土样的干密度沿深度方向便呈现出如图 4 所示的特征。

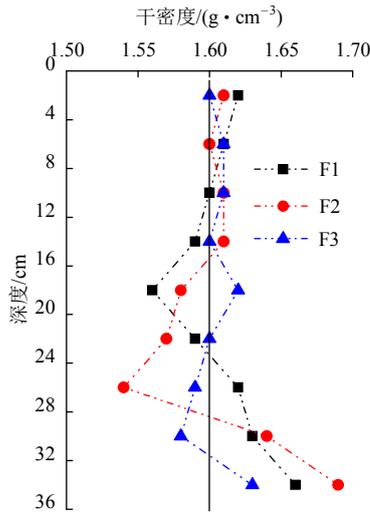


图 4 冻融后土样干密度的变化特征

Fig.4 Dry density of soil samples after freeze-thaw

### 3.3 冻融过程中的变形特征

竖向变化率的计算表达式如下：

$$\varepsilon = \frac{z_p - z_0}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $h_0$  为土样的原始高度(mm)， $z_p$  为冻结或融化后位移传感器的读数(mm)， $z_0$  为试验开始时位移传感器的初始读数(mm)。

冻融过程中膨胀土的竖向变形率如图 5 所示，可以看到如下几个变化特征：(1) 土样在冻结后均

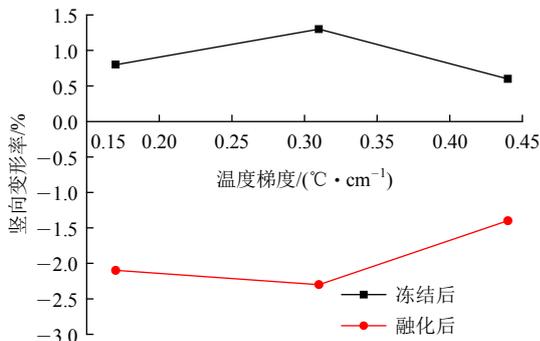


图 5 土样的竖向变形率

Fig.5 Vertical deformation rate of soil samples

表现出了冻胀的特点，融化后则表现出融沉的特点；(2) 中等温度梯度作用下的冻胀量和融沉量最大，其中融沉量略大于其冻胀量。上述变化特征的原因如下：含水量、干密度、温度和应力等是影响冻胀量的主要因素。当含水量大于起胀含水量时，土体才可能会产生冻胀。相同水分条件下，土样的冻胀量随干密度的增加而增加，当密度超过某一值之后，冻胀量则随密度的增加而减小。土体外部附加应力对土体冻胀有一定的抑制作用，一方面外部压力会导致土体冻结点的降低，另一方面，外部压力会影响土体内水分的重分布。对融沉而言，初始含水量和干密度是影响土体融沉最直接的 2 个因素，当含水量小于起始融化下沉含水量时，土体在融化后并不会表现出下沉现象；当土体的干密度大于起始融化下沉干密度后，土体在融化后并不会发生明显的变化<sup>[18]</sup>。试验时，土样顶端施加的 5 kPa 竖向应力也会抑制膨胀土的竖向变形。因此，土样在冻结或融化后所表现出的竖向变形特点是上述各种因素综合作用的结果。

### 3.4 抗剪强度的变化特征

直剪试验结果表明未经冻融作用的膨胀土土样在 25, 50, 75 和 100 kPa 的竖向应力作用下的抗剪强度分别为 36.9, 62.3, 95.3 和 126.3 kPa。经冻融作用后，土样不同深度处的抗剪强度( $\tau_f$ )试验结果如表 3 所示。为了能更好地揭示冻融循环后土样抗剪强度的变化特征，引入量纲一的强度变化率和含水量变化率对抗剪强度进行分析，强度变化率  $\Delta_t$  和含水量变化率  $\Delta_w$  的定义如下：

$$\Delta_t = \frac{\tau'_f - \tau_{f0}}{\tau_{f0}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\Delta_w = \frac{\omega' - \omega_0}{\omega_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $\tau_{f0}$  为冻融前土样的抗剪强度(kPa)， $\tau'_f$  为冻融后土样的抗剪强度(kPa)， $\omega_0$  为初始含水量(%)， $\omega'$  为冻融后土样的含水量(%)。

将表 3 中的试验结果按式(2)进行处理，图 6 为不同冻结温度梯度作用下土样抗剪强度变化率沿深度的分布特征，图 7 为强度变化率与含水量变化率的关系。结合图 6 和 7 可以看到：(1) 抗剪强度沿深度方向表现出了明显的不均匀性，不同温度梯度作用下的变化特征也有较大的差异性；(2) 抗剪强度的变化与含水量的变化在深度方向具有高度的相关性，即，抗剪强度在含水量增高的冻土区均表现出衰减的特征，而在含水量降低的非冻土区则

表3 冻融后土样不同深度处的抗剪强度

Table 3 Shearing strength of expansive soil at different depths after freeze-thaw

试样位置	抗剪强度/kPa											
	F1(0.17 °C/cm)				F2(0.31 °C/cm)				F2(0.44 °C/cm)			
	25 kPa	50 kPa	75 kPa	100 kPa	25 kPa	50 kPa	75 kPa	100 kPa	25 kPa	50 kPa	75 kPa	100 kPa
P1	31.3	55.3	86.1	117.7	26.6	50.7	80.2	108.9	33.3	57.4	90.2	123.6
P2	31.3	55.3	86.5	117.3	26.8	50.2	79.7	108.5	33.6	57.8	90.3	123.9
P3	31.3	55.5	86.8	118.6	26.8	49.2	79.0	107.5	33.4	57.8	90.3	122.1
P4	30.7	53.3	86.2	117.1	25.1	49.7	78.0	105.8	33.5	57.4	90.7	121.4
P5	30.1	51.6	82.3	111.3	24.8	48.4	76.1	103.1	33.4	57.6	90.0	121.4
P6	31.3	55.9	87.8	119.5	24.4	47.9	75.1	100.5	32.9	58.0	90.0	122.8
P7	37.2	63.5	98.3	133.0	23.9	46.7	73.2	103.4	32.4	55.9	87.5	121.8
P8	38.0	64.9	101.1	136.7	39.8	68.0	106.1	144.4	30.7	54.5	85.2	117.6
P9	38.4	65.6	102.2	138.4	43.2	73.9	114.3	154.8	40.2	68.7	107.9	144.2

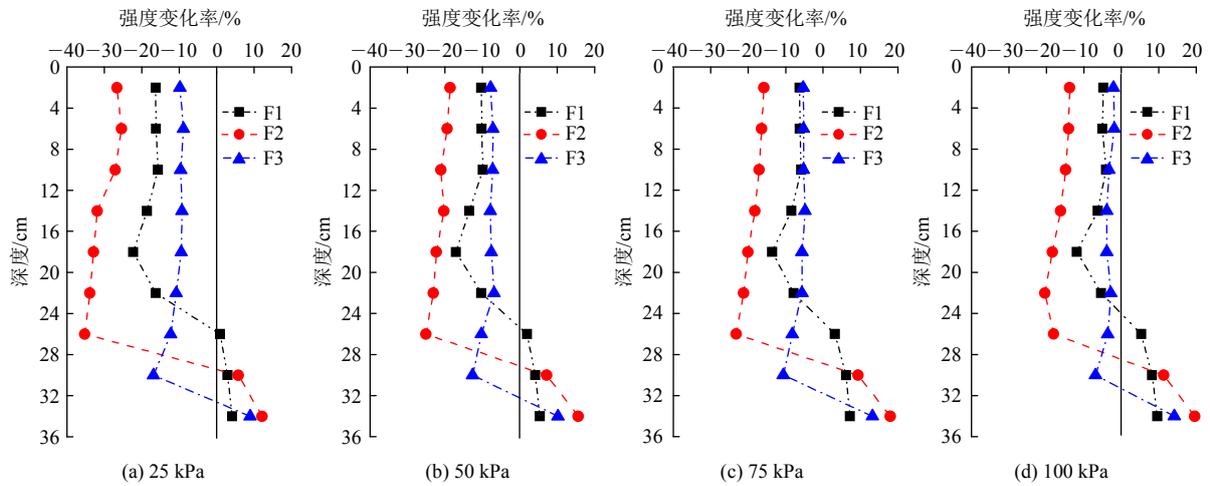


图6 冻融后抗剪强度变化率沿深度的分布特征

Fig.6 Variation of the shearing strength along the depth after freeze-thaw

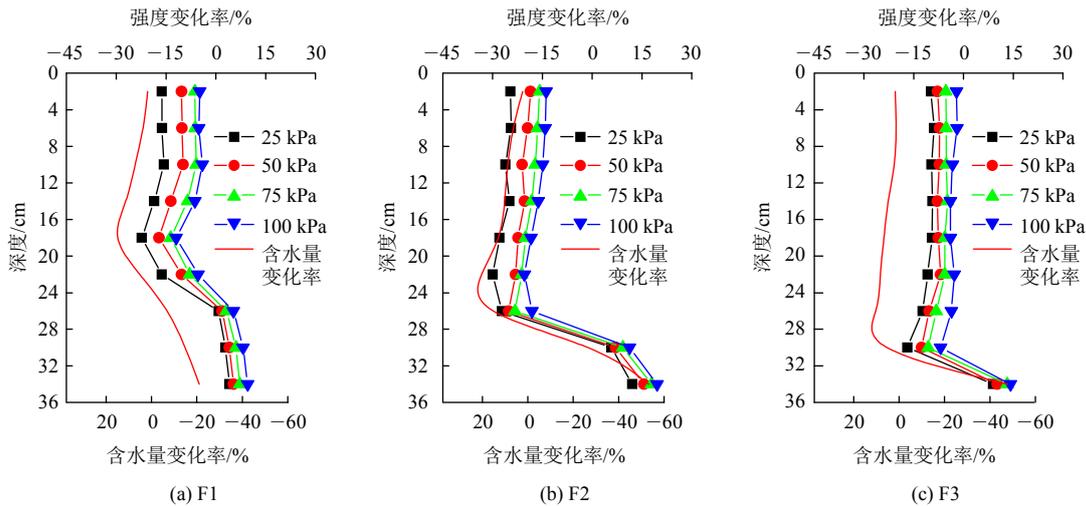


图7 抗剪强度变化率与含水量变化率

Fig.7 Shearing strength change rate versus water content change rate

表现为强度的小幅提高；土样中含水量变化率越大处，相应的抗剪强度变化率也越大，具体表现为冻结锋处抗剪强度的减小率最大，土样底端抗剪强度

的增长率最大；(3) 冻土区的强度衰减率显著地大于未冻区的强度增高率，可见，膨胀土抗剪强度在冻融过程中主要表现为由水分迁移而引起的强度

劣化。

冻土区和未冻区抗剪强度的平均变化率与含水量平均变化率的关系如图 8 所示，可以看到：(1) 冻土区抗剪强度均随含水量的增加而衰减，二者近似呈线性关系；(2) 未冻区的抗剪强度随含水量的减小而增加；(3) 冻土区抗剪强度对水分变化的敏感性要显著地强于未冻区，以 F2 作用下竖向应力 100 kPa 的抗剪强度为例，冻土区含水量平均增幅为 12.3%，相应的抗剪强度减小率为 16.5%；未冻区含水量平均减幅分别为 43.1%，其相应的抗剪强度增幅仅为 18.5%。

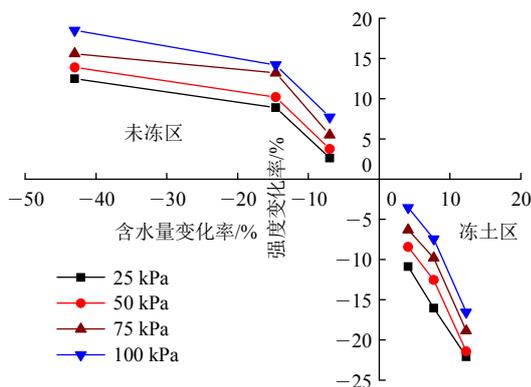


图 8 抗剪强度平均变化率和含水量平均变化率

Fig.8 Average change rate of the shear strength versus average change rate of the water content

上述现象直观地表明冻融后土体内含水量的重分布与土体抗剪强度的变化具有高度的关联性。在相同的密度和应力条件下，非饱和土抗剪强度随含水量的增高而降低，这是 A. Zhou 等<sup>[22-23]</sup>普遍认同的规律。冻融过程中土体产生贯穿的孔隙和裂隙使土颗粒骨架与颗粒特征发生改变，导致土骨架的结构性转移，受力体系发生改变，从而改变土体强度<sup>[24]</sup>。冻融过程中水分相变和冰晶生长对土颗粒和孔隙的反作用力是冻融循环对土结构性影响的根本原因<sup>[5]</sup>。冻融后，冻土区中含水量越高的土体所经受的结构损伤越强烈，因此，其对应的抗剪强度越低。对于未冻区的土体而言，水分迁移致使其含水量降低并引起吸力的增加，进而对土体有挤密作用，最终表现为强度的增加<sup>[2, 4]</sup>。

### 3.5 抗剪强度指标的变化特征

直剪试验结果表明未经冻融作用的膨胀土的初始黏聚力为 37.8 kPa，内摩擦角为 23°。经冻融作用后土样的抗剪强度指标如表 4 所示。在此同样引入量纲一的黏聚力变化率  $\Delta_c$  和内摩擦角变化率  $\Delta_\phi$ ，其表达式分别如下：

$$\Delta_c = \frac{c' - c_0}{c_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$\Delta_\phi = \frac{\phi' - \phi_0}{\phi_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $c_0$  和  $\phi_0$  分别为初始黏聚力(kPa)和初始内摩擦角(°)， $c'$  和  $\phi'$  分别为冻融后黏聚力(kPa)和内摩擦角(°)。将表 4 中的试验结果按式(4)和(5)进行处理，得到膨胀土抗剪强度参数的变化率。

表 4 冻融后土样的抗剪强度指标

Table 4 Shearing strength indices of expansive soil after freeze-thaw

试样位置	黏聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
P1	25.3	25.3	25.3	23.2	22.1	23.4
P2	25.4	25.4	25.4	22.6	21.6	23.3
P3	24.3	24.3	24.3	22.4	21.1	23.3
P4	23.9	23.9	23.9	21.9	20.9	22.9
P5	23.1	23.1	23.1	21.6	20.4	22.8
P6	21.3	21.3	21.3	22.4	20.3	22.8
P7	37.9	37.9	37.9	22.8	19.9	22.7
P8	38.1	38.1	38.1	23.6	23.9	22.5
P9	38.2	38.2	38.2	24.4	24.8	23.6

膨胀土黏聚力的变化特征如图 9 所示，可以发现：(1) 冻土区的黏聚力均减小，未冻区的黏聚力略有提升；冻融作用后黏聚力的降低主要是由于冰晶的生长增加了土体内贯穿的孔隙和裂隙，使土体的胶结减弱，破坏了土颗粒间联结而引起结构弱化所致<sup>[24-25]</sup>；(2) 黏聚力的减幅  $F2 > F1 > F3$ ，与水分状态的变幅一致，即，含水量增幅越大处相应的黏聚力减幅越大，以往的研究结果也证实了这一点，

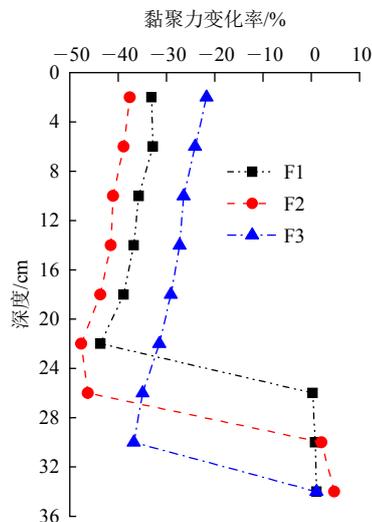


图 9 冻融后黏聚力的变化特征

Fig.9 Characteristics of the cohesion after freeze-thaw

比如,凌华等<sup>[26-27]</sup>报道黏聚力随含水量的增加而减小,二者之间存在着良好的线性关系。

冻融后膨胀土内摩擦角的变化特征如图 10 所示,可以看到:未冻区的内摩擦角有小幅的增加,冻土区内摩擦角基本都呈减小趋势,F2 作用下内摩擦角的衰减程度最大,F3 作用下内摩擦角基本不变,F1 作用下的内摩擦角介于二者之间。对冻土区的膨胀土而言,一方面冻融过程中大孔隙所占的比例下降,土颗粒间接触点的增多会引起内摩擦角的增大<sup>[25, 28]</sup>;另一方面含水量的增加会导致内摩擦角的减小<sup>[26-27]</sup>。冻土区内摩擦角的最终结果是上述 2 种相反作用效应的综合结果所致,因此不同冻结方案作用下的内摩擦角呈现出了不同的变化特征。对比图 9 和 10 可以看到:冻土区的黏聚力和内摩擦角基本上都呈现出衰减趋势,黏聚力的衰减幅度要显著地大于内摩擦角的衰减幅度,表明膨胀土经冻融后黏聚力的减小是强度劣化的主要原因。

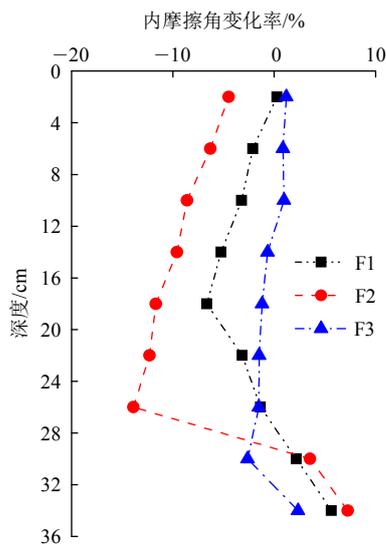


图 10 冻融后内摩擦角的变化特征

Fig.10 Variation characteristics of the internal friction angle after freeze-thaw

## 4 结 论

冻融作用下的水分迁移是引起浅层膨胀土抗剪强度变化的直接原因,本文模拟浅层膨胀土的实际冻融边界条件,在膨胀土单向冻结-双向融化作用下水分迁移试验的基础上开展直剪试验,并对膨胀土的温度场、水分场、竖向变形率加以测试。主要研究结论如下:

(1) 冻结温度梯度对水分迁移量的影响较大,过大和过小的冻结温度梯度均会制约水分迁移;膨

胀土在冻融过程中表现出冻胀融沉的特点,其中融沉量略大于冻胀量。

(2) 浅层膨胀土抗剪强度的变化与含水量的重分布沿深度方向上表现出了高度的相关性;抗剪强度在含水量增高的冻土区均表现出衰减的特点,在含水量降低的非冻土区则表现出小幅增加的特点;抗剪强度变化幅度随含水量变化幅度的增加而增大。

(3) 抗剪强度指标与含水量在深度方向的变化也表现出了较高的相关性;含水量降低区的强度参数均有小幅增加,含水量增高区的强度参数基本上都呈现出衰减趋势;经冻融后黏聚力的减小是膨胀土强度劣化的主要原因。

目前,膨胀土抗剪强度冻融劣化特征方面的研究文献尚缺乏,研究结果属于膨胀土抗剪强度冻融劣化研究的初步成果,针对补水条件下膨胀土抗剪强度冻融劣化的研究尚需进一步开展。

## 参考文献(References):

- [1] 程展林, 龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 23 - 24.(CHENG Zhanlin, GONG Biwei. Expansive soil slope[M]. Beijing: Science Press, 2015: 23 - 24.(in Chinese))
- [2] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 134 - 144.(XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Permafrost Physics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010: 134 - 144.(in Chinese))
- [3] 张熙胤, 张明义, 路建国, 等. 土体冻融特征研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1 644 - 1 657.(ZHANG Xiyin, ZHANG Mingyi, LU Jianguo, et al. Study of the freezing and thawing features of soil: current situation and outlook[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1 644 - 1 657.(in Chinese))
- [4] 胡田飞, 刘建坤, 房建宏, 等. 冻融循环下压实度对粉质黏土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1 495 - 1 503.(HU Tianfei, LIU Jiankun, FANG Jianhong, et al. Experimental study on the effect of cyclic freezing-thawing on mechanical properties of silty clay with different degrees of compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1 495 - 1 503.(in Chinese))
- [5] 郑 郇, 马 巍, 祁 慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1 282 - 1 287.(ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1 282 - 1287.(in Chinese))
- [6] 刘寒冰, 张互助, 王 静. 冻融及含水率对压实黏土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 1 - 7.(LIU Hanbing, ZHANG Huzhu, WANG Jing. Effect of freeze-thaw and water content on

- mechanical properties of compacted clayey soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 1 - 7.(in Chinese))
- [7] 王 淼, 孟上九, 袁晓铭, 等. 季冻区典型土类抗剪强度冻融修正系数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增 1): 3 756 - 3 764. (WANG Miao, MENG Shangjiu, YUAN Xiaoming, et al. Research on freezing-thawing correction coefficients of shear strength parameters of seasonal frozen soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Supp.1): 3 756 - 3 764.(in Chinese))
- [8] HOU T S, XU G L, SHEN Y J, et al. Tormation mechanism and stability analysis of the Houba expansive soil landslide[J]. *Engineering Geology*, 2013, 161(14): 34 - 43.
- [9] SHI B, JIANG H, LIU Z, et al. Engineering geological characteristics of expansive soils in China[J]. *Engineering Geology*, 2002, 67(1): 63 - 71.
- [10] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 南京: 南京水利科学研究院, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50123—1999 Standard for geotechnical test methods[S]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1999.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50112—2013 Technical specification for construction in expansive soil area[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.(in Chinese))
- [12] 陈 博, 李建平. 近 50 年来中国季节性冻土与短时冻土的时空变化特征[J]. *大气科学*, 2008, 32(3): 432 - 443.(CHEN Bo, LI Jianping. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in China in recent 50 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(3): 432 - 443.(in Chinese))
- [13] 陈善雄, 赵 旻, 冷火星, 等. 强膨胀土渠坡破坏机理及处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 24 - 29.(CHEN Shanxiong, ZHAO Min, LENG Huoxing, et al. Failure mechanism and treatment technology of expansive soil gully slope with strong expansion potential[M]. Beijing: Science Press, 2016: 24 - 29.(in Chinese))
- [14] LIU J K, CHANG D, YU Q M. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand[J]. *Engineering Geology*, 2016, 210(5): 23 - 32.
- [15] KAMEI T, AHMED A, SHIBI T. Effect of treeze-thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilized with recycled Bassanite[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 82(8): 124 - 129.
- [16] KHAN M S, HOSSAIN S, AHMED A, et al. Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in Texas[J]. *Engineering Geology*, 2016, 219: 118 - 129.
- [17] 李彦龙, 王 俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(10): 2 839 - 2 844.(LI Yanlong, WANG Jun, WANG Tiehang. Moisture migration of unsaturated soil due to thermal gradients[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10): 2 839 - 2 844.(in Chinese))
- [18] 马 巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 41 - 46.(MA Wei, WANG Dayan. *Frozen soil mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 41 - 46.(in Chinese))
- [19] 阴琪翔, 周国庆, 赵晓东, 等. 双向冻结 - 单向融化土压缩性及水分迁移试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 1 021 - 1 026.(YIN Qixiang, ZHOU Guoqing, ZHAO Xiaodong, et al. Experimental study of the water migration and compression of soils under double direction freezing-one direction thawing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 1 021 - 1 026.(in Chinese))
- [20] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(3): 471 - 477.
- [21] 齐吉琳, 马 巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 133 - 143.(QI Jilin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 133 - 143.(in Chinese))
- [22] ZHOU A, SHENG D. Relating shear strength of unsaturated soils with capillary water retention curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(6): 974 - 987.
- [23] HAMID T B, MILLER G A. Shear strength of unsaturated soil intertaces[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(5): 595 - 606.
- [24] 张 英, 郇 慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增 1): 3 597 - 3 603.(ZHANG Ying, BING Hui, YANG Chengsong. Influences of freeze-thaw cycles on mechanical properties of silty clay based on SEM and MIP test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Supp.1): 3 597 - 3 603.(in Chinese))
- [25] 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): 2 082 - 2 086.(QI Jilin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2 082 - 2 086.(in Chinese))
- [26] 凌 华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水量的变化[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1 499 - 1 503.(LING Hua, YIN Zongze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1 499 - 1 503.(in Chinese))
- [27] 张连杰, 武 雄, 谢 永, 等. 含水量及上覆压力对重塑膨胀土抗剪强度的影响分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(4): 138 - 143.(ZHANG Lianjie, WU Xiong, XIE Yong, et al. Influence of water content and overlying pressure on shear strength of remolded expansive soil[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(4): 138 - 143.(in Chinese))
- [28] 方丽莉, 齐吉琳, 马 巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(2): 435 - 440.(FANG Lili, QI Jilin, MA Wei. Free-thaw induced changes in soil structure and its relationship with variations in strength[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 435 - 440.(in Chinese))