

DOI: 10.11779/CJGE202210020

水盐相变对硫酸盐渍土基质吸力影响规律研究

肖泽岸, 朱霖泽, 侯振荣, 董晓强

(太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 硫酸盐渍土是中国西北寒旱区盐渍土的主要类型, 在温度变化过程中, 水分和盐分的相变会引起盐渍土基质吸力发生改变。以硫酸钠盐渍黄土为研究对象, 探究了降温过程中的水盐相变对土体基质吸力的影响规律。结果表明: 当土体尚未发生相变时, 土体的基质吸力随温度的降低线性增加, 而当土体中存在冰或者水合盐结晶时, 土体的基质吸力在相变点处发生突变, 盐渍土的基质吸力与土体的液态水含量息息相关。由于硫酸钠盐渍土在降温过程中会发生二次相变, 二次相变使得盐渍土的基质吸力在二次相变点处同样产生突变, 二次相变量的多少也会直接影响土体基质吸力的增加量。基于试验结果, 进一步分析了不含盐素土基质吸力的预测方法, 并讨论了硫酸钠盐渍土在冻结过程中的水分迁移驱动力。该研究不仅为深刻理解盐渍土水分迁移驱动力提供重要的参考, 而且为盐渍土多场耦合理论的发展提供借鉴。

关键词: 硫酸盐渍土; 基质吸力; pF meter; 相变; Clapeyron 方程

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)10-1935-07

作者简介: 肖泽岸(1989—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事寒区盐渍土理论与试验研究工作。E-mail: xiaozean@tyut.edu.cn。

Effects of water/salt phase transition on matric suction of sulfate saline soil

XIAO Ze-an, ZHU Lin-ze, HOU Zhen-rong, DONG Xiao-qiang

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The sulfate saline soil is the main type of saline soil in cold and arid regions of Northwest China. As the environmental temperature changes, the ice formation and salt crystallization may change the matric suction of saline soil. The effects of water/salt phase transition on the matric suction of soil are investigated. The results show that the matric suction of soil linearly increases with the decreasing temperature before the phase transition occurs, and when ice forms or salt hydrate crystallizes in the soil, the matric suction of saline soil changes abruptly at the phase transition point. The matric suction of saline soil is closely related to the liquid water fraction of soil. Because the second phase transition occurs in the sulfate saline soil during cooling, the matric suction of saline soil also has a sudden change at the eutectic point, and the amount of the second phase transition directly affects the value of matric suction. Based on the experimental results, the prediction method for the matric suction of desalinized soil is further analyzed, and the water migration driving force of sodium sulfate saline soil is discussed during the freezing process. This study is helpful for the deep understanding of water migration driving force of saline soil and provides a reference for the development of multi-physical field coupling theory of saline soil.

Key words: sulfate saline soil; matric suction; pF meter; phase transition; Clapeyron equation

0 引言

盐渍土是一系列受盐碱作用的各种盐土和碱土的统称, 广泛分布于中国西北寒旱区^[1]。在恶劣的气候条件下, 水分的冻结与融化、盐分的结晶和溶解都会引起土体性质的显著改变; 同时, 伴随着水盐相变, 水分和盐分的迁移与聚集造成盐渍土产生冻胀与盐胀变形, 给工程建筑物的稳定性带来极大的危害^[2]。目前, 认为土水势^[3]是引起土体水分迁移的驱动力, 而盐随水走使得水分在迁移过程中也同时带动盐分的迁

移聚集。因此研究盐渍土的水分迁移驱动力对认识盐渍土水盐动态具有重要的理论意义。

对于非饱和土, 基质势是土水势的重要组成部分。土壤水的基质势为负值, 为了方便使用, 将基质势的负数定义为基质吸力, 基质吸力和含水率密切相关, 往往通过土水特征曲线直接得出。对盐渍土的土水特

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801044, 51978438); 山西省应用基础研究计划项目(201901D211003); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0304)

收稿日期: 2021-07-27

征曲线,学者们从不同方面进行了研究,主要集中于研究在常温下干密度^[4]、含盐量^[5-9]、压力^[10]等对盐渍土的土水特征曲线的影响。由于温度的变化会影响土体的表面张力和润湿系数,从而进一步影响了土体的基质吸力。高燕希等^[11]、蔡国庆等^[12]、王叶娇等^[13]、张宏等^[14]针对非饱和土体吸力温度效应进行了相关研究,发现非饱和土的基质吸力随温度的增加而线性减小,并建立了能够反映温度变化效应的土水曲线模型。尽管学者们对土体基质吸力的温度效应进行了较多研究,但只停留在研究土体在正温条件下的基质吸力,对土体在负温条件下的基质吸力变化规律却鲜有研究。这是因为常规测量基质吸力的手段(如张力计法、压力板法、滤纸法)很难应用到负温条件的测试中,故在冻土水热研究中经常使用 Clapeyron 方程来间接转换得到基质吸力,但是其准确性还有待进一步论证^[15-16]。为了准确研究冻土水热变化形态,Wen 等^[17]率先采用 pF meter 基质势传感器测试了青藏高原粉质黏土在冻结过程中基质势变化规律,发现粉质黏土的基质势随温度变化规律和未冻水随温度变化规律相似。张熙胤^[18]将 pF meter 测试脱湿过程中的土水曲线结果与传统压力膜仪的结果进行了对比,证实了 pF meter 测试土体基质吸力的可靠性,并查明了土体在冻结和脱湿过程中的土水特征。薛珂等^[19-20]利用 pF meter 测试了不同种类土体在冻结与融化过程中的基质势,揭示了负温冻土中未冻水含量与基质势随冻结与融化过程的变化关系。以上研究为盐渍土基质吸力的研究提供了新思路。对于硫酸钠盐渍土而言,硫酸钠的溶解度对温度敏感,硫酸钠盐渍土在外界气温发生剧烈波动时会发生水盐相变,水盐相变密切影响着土体的液态水含量,并进一步影响了土体的基质吸力,但目前针对水盐相变与盐渍土基质吸力的关系方面的研究却比较匮乏,故探究盐渍土水盐相变对基质吸力的影响规律具有非常重要的理论价值。

pF meter 是基于摩尔热容原理设计,传感器内部包含一个陶瓷热容探头,通过计算陶瓷探头的热容量来得到土壤的基质吸力,测试结果为土体的 pF 值(范围:0~7)。该传感器可适用于高盐碱性土体(pH 值范围:1~11)的基质吸力的测量,具有长期的高稳定性。其测试时间间隔要求至少为 30 min,无需标定,相当于无需注水的张力计,在极端干旱和低温条件下也可测量。由于 pF meter 测量范围广(0~10⁶ kPa),温度适应性强(-40~80℃),且测量值不受酸碱和盐分影响,故可以满足盐渍土基质吸力的测试条件。为了深入探究水盐相变对盐渍土基质吸力的影响,本文采用 pF meter 测试了不同含盐量条件下 Na₂SO₄ 盐渍黄土在不同温度条件下的基质吸力,分析了盐渍土在

相变前后基质吸力随温度的变化规律,探究了水分冻结、盐分结晶、二次相变对盐渍土基质吸力的影响。此外,进一步对不含盐素土基质吸力的预测方法进行了探讨,并分析了硫酸钠盐渍土在冻结过程中的水分迁移驱动力。该研究不仅对进一步认识盐渍土水盐迁移过程有积极作用,同时对理解盐渍土盐胀和冻胀的病害形成机理及选择合理的工程防治措施具有重要的现实意义。

1 试样制备与试验方法

试验所用盐渍土取自山西省大同盆地,为准确探究盐分对盐渍土基质吸力的影响,首先将所取盐渍土洗盐,得到不含盐素土。经测试不含盐素土的液限、塑限分别为 27.7%和 17.3%,颗粒级配曲线如图 1 所示。其次将所添加的 Na₂SO₄ 充分溶解到去离子的蒸馏水中,配置成不同浓度的盐溶液。再将不含盐素土与不同浓度的盐溶液混合,配置成不同含盐量(1%, 2%, 4%)且含水率为 20%的盐渍土,最后将混合好的土样密封一段时间,使土体中的水分和盐分均匀分布。为了得出盐分对冻结过程中土体基质吸力的影响规律,同时配置含水率为 20%的不含盐土样来进行对比。

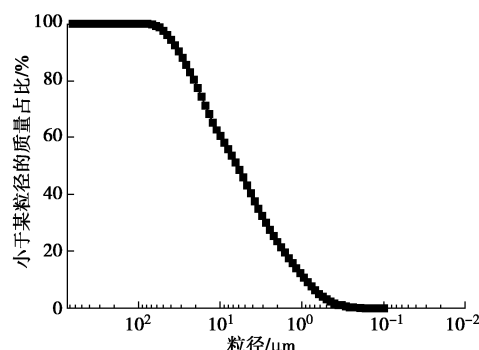


图1 土样颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of soil samples

将配置好的土样装入到矩形试验装置内(图2),尺寸为 0.37 m×0.25 m×0.22 m(长×宽×高)。分层击实土样,土样的干密度约 1.62 g/cm³。将传感器布设到土样同一高度处,同时保证传感器距土样外侧的距离相等。最后将土样放入到冻融箱(TMS9018)中进行控温。试验土样先在冻融箱中室温静置一段时间,然后从室温线性降温到-20℃,降温速率为 0.5℃/h。为了减少试验过程中水分的蒸发,在试样表面覆盖一层塑料薄膜。试验过程中土体的液态水含量通过土壤温湿盐传感器 Hydro Probe II(响应时间:小于 1 s,稳定时间:通电后 2 s)进行测试,与之相对应的基质吸力利用 pF meter 传感器来获得,试验数据通过 CR300

数据采集仪自动采集到计算机上, 土体液态水含量的采样间隔为 3 min, pF meter 的采样间隔为 30 min。

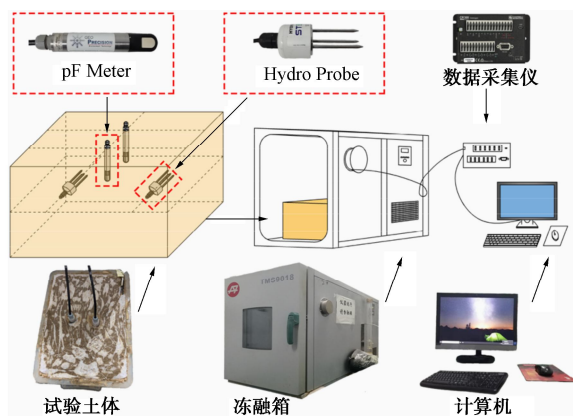


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test devices

2 试验结果

2.1 温度变化规律

为了验证 pF meter 和 Hydro Probe II 传感器温度变化规律是一致的, 对 4 次试验温度变化数据进行比较, 结果如图 3 所示。由于在试验过程中控制的降温速率一致, 故 4 个试样在降温过程中都先呈现线性降温的状态, 直到土体孔隙溶液发生相变后, 土体的温度曲线产生突变。Hydro Probe II 传感器和 pF meter 测试的土体温度突变规律几乎是一致的, 说明这两种传感器所测位置处含水率、含盐量几乎相等, 土体中的水分和盐分分布均匀。当土体中未添加盐分时, 土样冻结温度为 -0.2°C , 而含盐量为 1% 时, 冻结温度为 -1.2°C , 说明 Na_2SO_4 的加入降低了土体的冻结温度。而当含盐量提高为 2% 时, 土样的相变温度仅为 -1.3°C , 与含盐量为 1% 条件下的盐渍土相比差异较小, 此时 Na_2SO_4 浓度的增加对土体冻结温度的影响很小, 这是因为 Na_2SO_4 对温度非常敏感, 在较低温度条件下, Na_2SO_4 的溶解度很小, 当土体孔隙溶液在负温条件下达到饱和时, 此时继续增加 Na_2SO_4 的含量就不会对土体冻结温度产生较大影响。当含盐量为 4% 时, 土体在正温就发生了温度突变, 这是因为 Na_2SO_4 结晶生成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 时释放盐结晶潜热, 导致温度产生波动。从试验结果来看, 4% 含盐量的 Na_2SO_4 盐渍土的盐结晶温度为 12.8°C , 低于同浓度条件下溶液的盐结晶温度 (21.2°C) [21], 说明土颗粒的影响或者过饱和比所导致的土体盐结晶温度和溶液结晶温度存在一定的差异。当土体温度继续下降, 土体在负温时产生第二次温度突变, 二次温度突变点的温度为 -1.5°C 。Xiao 等 [22] 在研究盐渍土相变温度时指出, 土体在发生二次相变 (冰和盐共晶) 时, 第一次相变

的量 (水分冻结或者盐分结晶) 会对土体二次相变的温度产生一定的影响, Na_2SO_4 盐渍土二次相变点的温度并不是一个定值, 而是随初始浓度的增加呈先增加后降低的趋势。由于在第一次相变过程中盐分结晶消耗了部分液态水, 故在负温条件下, 二次相变的量有所减小, 从而使二次相变温度突变的持续时间与不含盐土相比有所减小。

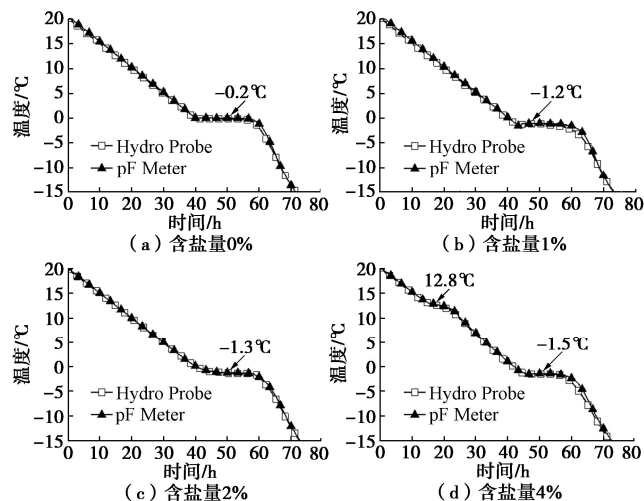


图 3 土样温度变化规律

Fig. 3 Variation of temperature of soil samples

2.2 降温过程中液态水含量与基质吸力

图 4 为不含盐土体在冻结前后液态水含量与基质吸力的对应关系图。在正温条件下, 随着土体温度的降低, 土体的体积含水率几乎不变, 而土体的基质吸力呈现轻微的线性增加的趋势, 这和学者们得到的融土在不同温度条件下基质吸力随温度变化的规律是一致的 [14, 23-25]。当土体温度低于 -0.2°C 时, 土体中的孔隙水相变成冰, 造成土体液态水含量显著降低, 从而导致土体的基质吸力产生显著增加。由于土体孔径分布的不均匀性, 且不同孔径对冻结温度的影响不同, 土体在冻结后仍然存在部分未冻水。土体的基质吸力和未冻水含量的对应关系是: 未冻水含量降低的越多, 相应的基质吸力增加量的越大; 随着温度的降低, 未冻水含量减小的速率逐渐变缓, 故使得基质吸力的增长率也逐渐减小。当未冻水含量逐渐趋近于残余含水率时, 土体的基质吸力的变化率也逐渐趋于平缓, 这与薛珂等 [19] 的试验结果是一致的。

2.3 盐分结晶对基质吸力的影响

试验中仅 4% 含盐量的土样在正温时有产生了明显的盐分相变, 故选择含盐量为 4% 试样的基质吸力结果来说明盐分结晶对土体基质吸力的影响规律。图 5 是含盐量为 4% 试样的基质吸力与温度的关系曲线。可以看出土样的基质吸力随温度的变化过程可以划分为 3 个区 (未相变区、盐分结晶区、冰盐共晶区)。在

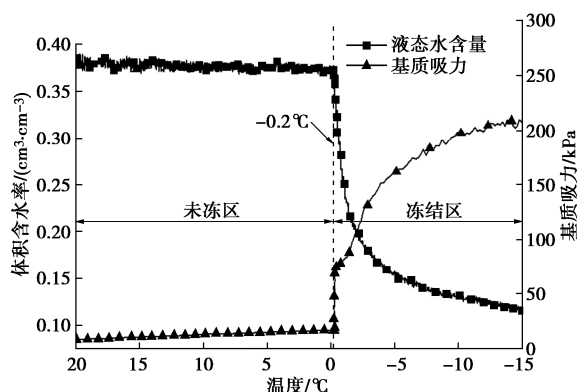


图4 无盐土体未冻水含量与基质吸力的变化规律

Fig. 4 Variation of unfrozen water content and matric potential in desalinized soil

未相变区, 土体的基质吸力随温度的下降呈线性增加的趋势。而当土体温度在 12.8°C 时, 土体孔隙溶液中的盐分超过孔隙溶液的溶解度, 以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的形式析出, 导致土体液态水含量显著降低, 从而进一步使得基质吸力显著增加。可见, 盐分结晶同样会对土体的基质势产生重要的影响。随着盐析出速率的减缓, 基质吸力的增加速率也随之降低。当土体温度继续下降, 硫酸盐渍土在 -1.5°C 时产生二次相变。根据水溶液相图, Na_2SO_4 溶液二次相变是冰和水合盐以一定比例共同析出的过程, 析出的冰和水合盐晶体进一步导致液态水含量降低, 并引起基质吸力在冰盐共晶点处产生突变后继续增加。结合图 3 中温度突变持续时间来判断, 尽管第二次相变所发生的相变量比第一次相变量多, 但第一次相变对基质吸力的影响明显比第二次相变更大。

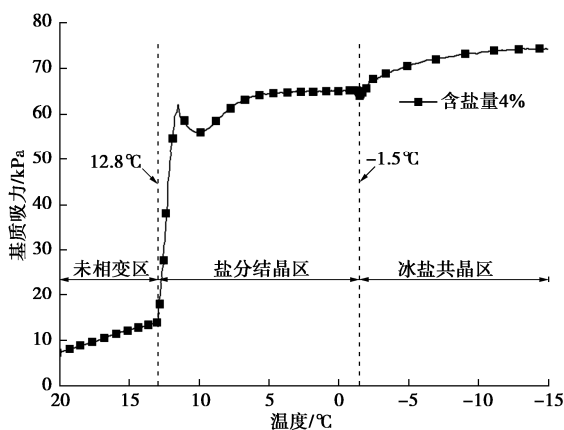


图5 盐分结晶对基质吸力的影响

Fig. 5 Effects of salt crystallization on matric suction of soil samples

2.4 二次相变过程中基质吸力变化规律

图 6 给出了 2% 含盐量条件下二次相变过程中基质吸力随温度的变化曲线。结合文献[22]的结果, 含

盐量为 2% 的硫酸盐渍土冰盐共晶点的温度与盐分结晶差别不大, 受限于传感器的测试精度, 在含盐量为 2% 条件下的土体降温曲线中仅观测到一次温度突变, 但结合含盐量为 1% 和 2% 时所测温度突变变化很小的条件, 可以判定在 2% 含盐量条件下土体在负温条件下的相变包括水分冻结和盐分结晶。由于 2% 含盐量条件下的盐渍土在正温条件下几乎没有盐分结晶, 而在土体冻结时, 水盐相变几乎同时产生, 故含盐量 2% 盐渍土在冻结时基质吸力增加的量比 4% 含盐量的盐渍土增加的多。说明在二次相变过程中, 冰盐相变的量越多, 基质吸力增加量就越大。最后随着液态水含量的逐渐稳定, 土体的基质吸力也逐渐稳定。

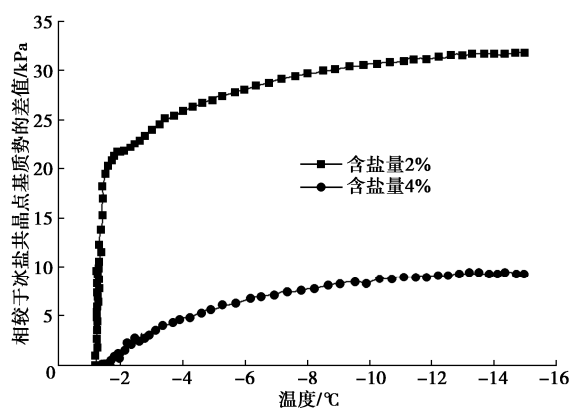


图6 二次相变过程中基质吸力的变化

Fig. 6 Variation of matric suction during secondary phase transition process

3 讨论

3.1 不含盐冻土基质吸力预测

在非饱和土理论中, 基质吸力的定义为孔隙气压与孔隙水之间的压力差, 而冻结条件下土体的基质吸力为孔隙冰压力和未冻孔隙水之间的压力差^[26], 根据 Young-Laplace 方程, 则可以得到

$$p_g - p_l = \frac{2\gamma_{gl} \cos(\theta_D)}{r}, \quad (1a)$$

$$p_i - p_l = \frac{2\gamma_{il} \cos(\theta_F)}{r}, \quad (1b)$$

式中, p_g , p_i 和 p_l 分别代表孔隙气、冰、水之的压力, γ_{gl} 和 γ_{il} 分别代表着孔隙气/水和孔隙冰/水界面之间的表面张力, θ_D 和 θ_F 分别代表着干燥和冻结过程中相界面的接触角, r 代表土体毛细管的曲率半径。两式联立并消去 r 则可以得到

$$p_g - p_l = \chi(p_i - p_l), \quad (2)$$

式中, $\chi = \frac{\gamma_{gl} \cos(\theta_D)}{\gamma_{il} \cos(\theta_F)}$, 可见土体在冻结后的基质吸力可以通过冻结前的基质吸力除以 χ 来估算得出, 这也

是研究者们将土水特征曲线和土体冻结特征曲线结合起来研究的原因。根据文献[27], $\chi = 2.2$ 。由于土水特征曲线所表征的是含水率同基质吸力之间的关系, 结合 VG 模型, 土体的基质吸力 S 可以表述如下:

$$S = f(\theta) = \beta \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{\text{sat}} - \theta_r} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1-m}, \quad (3)$$

式中, S 为土体的基质吸力, θ 为土体的体积含水率, θ_{sat} 为饱和的体积含水率或初始体积含水率, 而 θ_r 为残余体积含水率, β 和 m 为拟合参数, 冻结特征曲线表征的是未冻水含量同温度之间的关系, 表述如下[3]:

$$\theta_u = g(T) = a(T_0 - T)^b, \quad (4)$$

式中, T_0 为土体冻结温度, T 为低于冻结温度的土体温度。 a 和 b 为拟合参数, 与土的种类有关。考虑干湿和冻融在物理学原理的相似性, VG 模型中的含水率可以等效为土体冻结后的未冻水含量。故将 θ 替换为 θ_u , 则可以得出土体冻结后基质吸力与温度之间的关系为

$$S = f(g(T)) = \beta \left[\left(\frac{a(T_0 - T)^b - \theta_r}{\theta_{\text{sat}} - \theta_r} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1-m}. \quad (5)$$

式(5)反映了不含盐土体在冻结后的基质吸力随温度的变化规律, 可以看出土体在冻结之后的基质吸力随温度的降低并不是线性变化的。利用式(4)拟合得出参数 a 和 b 的值, 再利用式(5)对不含盐土基质吸力的试验结果进行拟合, 结果如图 7 所示。

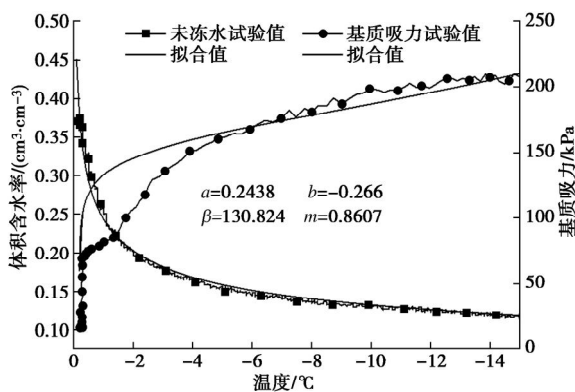


图 7 不含盐土体基质吸力及体积含水率拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of matrix suction and volumetric water content of desalinized soil

可见式(5)可以较好反映冻结过程中土体基质吸力随温度变化规律。在冻土水热耦合模拟过程中, 很多学者选用 Clapeyron 方程来模拟冻土中的水分迁移规律[28-29], 表述如下:

$$p_i - p_l = \Delta S_m (T_0 - T), \quad (6)$$

式中, ΔS_m 为单位摩尔体积冰水相变的熵变, $\Delta S_m = 1.223 \text{ MPa/K}$ 。 T_0 与 T 意义同上。在式(6)中, 冰水相变引起基质吸力随温度的降低呈线性增加, 且和土的种类无关。当温度降低 1°C 时, 基质吸力变化 1.223 MPa 。而根据试验结果来判断(图 4), 无盐土体温度在降低到 -15°C 时才达到 209 kPa 左右, 薛珂等[19]在进行不同种土类土体的基质吸力测试过程中发现, 粉质黏土在 -16°C 时基质吸力也仅为 1200 kPa 左右, 可见, Clapeyron 方程得出的基质吸力和实际的基质吸力之间存在极大的差异, Clapeyron 方程在确定冻土的基质吸力方面的有效性仍待深入探讨。

3.2 盐渍土在冻结过程中的水分迁移驱动力

图 4, 5 结果表明土体孔隙溶液中水分的冻结和盐分的结晶都会引起土体基质吸力增加。主要原因在于水盐相变导致土体液态水含量降低, 而基质吸力又与液态水含量的多少密切相关。由于基质吸力是土体水分迁移的一个驱动力, 故水盐相变会造成盐渍土中水分发生迁移, 而水分的迁移必然会带动土体孔隙水中溶解盐分的迁移, 从而影响土体中水盐迁移动态。另外, 高含盐量 Na_2SO_4 盐渍土在冻结时, 负温发生的水分冻结和盐分共同结晶的二次相变, 二次相变同样也会引起水分的迁移, 因此准确确定盐渍土中冰盐结晶量及冰盐产生比例对确定盐渍土在不同温度条件下的基质吸力有非常重要的作用。

土体中盐分的存在必然会使得盐渍土中存在着渗透吸力, 渗透吸力和基质吸力共同构成了盐渍土水分迁移的驱动力[30], 都会影响盐渍土的水盐迁移动态和盐冻胀变形。渗透吸力 S_c [31] 表示为

$$S_c = \frac{c}{\mu} RT, \quad (7)$$

式中, c 是单位体积溶液中含有溶质的质量, μ 为溶质的摩尔质量, R 为摩尔气体常数, T 为热力学温度。式(7)仅表示溶解在溶液中的溶质所引起的渗透吸力。对于低含盐量盐渍土, 孔隙溶液中往往没有盐晶体, 则渗透吸力随含盐量的增加而逐步增大。而在高含盐量条件下, 盐渍土中存在盐晶体, 盐晶体和溶解在孔隙溶液中的盐分处于相平衡状态, 此时孔隙溶液的浓度为溶质的饱和浓度, 渗透吸力的大小则由孔隙溶液的饱和浓度确定。随着外界温度的波动, 盐分的溶解度若发生改变, 也会造成渗透吸力产生差异。此外, 水分冻结和盐分结晶也会影响土体基质吸力的改变, 故实际情况中的硫酸盐渍土水分迁移驱动力受多方因素影响, 仍然有待深入研究。

4 结 论

基于 pF meter 测试了不同含盐量盐渍土在不同温度下的基质吸力, 分析了在降温过程中水盐相变对盐渍土基质吸力的影响规律, 得到以下结论:

(1) 若土体孔隙溶液不存在相变, 则土体基质吸力随温度的降低呈线性增加的趋势。而当孔隙溶液中水分冻结或者盐分结晶时, 土体液态水含量降低, 造成土体的基质吸力显著增加。在降温过程中, 盐渍土基质吸力的变化规律与液态水含量的变化趋势一致。随着液态水含量的变化速率减小, 基质吸力的增加速率也逐渐减弱。

(2) 盐渍土中水分迁移驱动力包括渗透吸力和基质吸力。若盐渍土中存在盐晶体, 则土体的渗透吸力的大小与盐分溶解度大小密切相关, 盐分溶解度对温度的敏感性决定了渗透吸力随温度的变化规律。由于水分和盐分相变也会引起盐渍土基质吸力发生变化, 硫酸盐渍土的水分迁移驱动力需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993. (WANG Zhun-qin, ZHU Shou-quan, YU Ren-pei, et al. Saline Soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 房建宏, 霍明, 章金钊. 多年冻土及盐渍土地区公路工程技术[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2011. (FANG Jian-hong, HUO Ming, ZHANG Jin-zhao. Technology for Highway Engineering in Permafrost and Saline Soil Regions[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2011. (in Chinese))
- [3] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of Frozen Soils[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [4] 于沉香, 张虎元, 王志硕, 等. 盐渍土土水特征曲线测试及预测[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 113 - 118. (YU Chen-xiang, ZHANG Hu-yuan, WANG Zhi-shuo, et al. Test and prediction of SWCC of saline soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 113 - 118. (in Chinese))
- [5] 孙德安, 张谨绎, 宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 955 - 960. (SUN De-an, ZHANG Jin-yi, SONG Guo-sen. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 955 - 960. (in Chinese))
- [6] 姜浩, 郝慧. 硫酸钠盐渍土土-水特征曲线的试验与理论研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 497 - 509. (JIANG Hao, BING Hui. Experimental and theoretical study on soil-water characteristic curve of sodium sulfate saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 497 - 509. (in Chinese))
- [7] THYAGARAJ T, SALINI U. Effect of pore fluid osmotic suction on matric and total suctions of compacted clay[J]. Géotechnique, 2015, 65(11): 952 - 960.
- [8] 张悦, 叶为民, 王琼, 等. 含盐遗址重塑土的吸力测定及土水特征曲线拟合[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1661 - 1669. (ZHANG Yue, YE Wei-min, WANG Qiong, et al. Suction measurement and SWRC modelling for reconstituted salt-laden soils in earthen heritages[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1661 - 1669. (in Chinese))
- [9] FATTAH M Y, YAHYA A Y, ALHADIDI M T, et al. Effect of salt content on total and matric suction of unsaturated soils[J]. European Journal of Scientific Research, 2013(9): 228 - 245.
- [10] 王利莉, 党进谦, 杨晓松. 盐渍土土水特征曲线的研究[J]. 工程勘察, 2009, 37(2): 19 - 23. (WANG Li-li, DANG Jin-qian, YANG Xiao-song. The research of soil-water characteristic curves of saline soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(2): 19 - 23. (in Chinese))
- [11] 高燕希, 符力平. 非饱和土吸力的温度性质[J]. 力学与实践, 2003, 25(3): 55 - 57. (GAO Yan-xi, FU Li-ping. The temperature property of soil suction for unsaturated soils[J]. Mechanics and Engineering, 2003, 25(3): 55 - 57. (in Chinese))
- [12] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1055 - 1060. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1055 - 1060. (in Chinese))
- [13] 王叶娇, 靳奉雨, 孙德安, 等. 非饱和黄土持水特性的温度效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 189 - 194. (WANG Ye-jiao, JIN Feng-yu, SUN De-an, et al. Investigating the effect of temperature on the water retention curve of unsaturated loess sample[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 189 - 194. (in Chinese))
- [14] 张宏, 刘海洋, 李聪. 风积沙路基土土-水特征曲线

- 温度效应研究[J]. 中国公路学报, 2020, **33**(7): 42 - 49. (ZHANG Hong, LIU Hai-yang, LI Cong. Temperature effect of soil-water on characteristic curve of aeolian sand subgrade soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(7): 42 - 49. (in Chinese))
- [15] MA W, ZHANG L H, YANG C S. Discussion of the applicability of the generalized Clausius-Clapeyron equation and the frozen fringe process[J]. Earth-Science Reviews, 2015, **142**: 47 - 59.
- [16] HANSSON K, SIMUNEK J, MIZOGUCHI M, et al. Water flow and heat transport in frozen soil: numerical solution and freeze-thaw applications[J]. Vadose Zone Journal, 2004, **3**(2): 693 - 704.
- [17] WEN Z, MA W, FENG W J, et al. Experimental study on unfrozen water content and soil matric potential of Qinghai-Tibetan silty clay[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **66**(5): 1467 - 1476.
- [18] 张熙胤. 土体冻融水热变化特征及变形过程研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017. (ZHANG Xiyin. Study on Hydro-thermal Characteristics and Deformation Behavior of Soils during Freezing and Thawing Processes[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese))
- [19] 薛珂, 温智, 张明礼, 等. 基于 pF meter 传感器的土体冻融过程中基质势与未冻水量关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(12): 155 - 160. (XUE Ke, WEN Zhi, ZHANG Ming-li, et al. PF meter-based study on the relationship between soil matric potential and unfrozen water content during soil freezing and thawing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, **31**(12): 155 - 160. (in Chinese))
- [20] 薛珂, 杨明彬, 温智, 等. 基于 pF Meter 的土体冻结特征曲线研究[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(3): 22 - 29. (XUE Ke, YANG Ming-bin, WEN Zhi, et al. pF meter-based research on soil freezing characteristic curves[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(3): 22 - 29. (in Chinese))
- [21] WAN X S, LAI Y M, WANG C. Experimental study on the freezing temperatures of saline silty soils[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, **26**(2): 175 - 187.
- [22] XIAO Z A, HOU Z R, ZHU L Z, et al. Experimental investigation of the influence of salt on the phase transition temperature in saline soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, **183**(1): 103229.
- [23] SHE H Y, SLEEP B E. The effect of temperature on capillary pressure-saturation relationships for air-water and perchloroethylene-water systems[J]. Water Resources Research, 1998, **34**(10): 2587 - 2597.
- [24] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2001, **19**(3/4): 311 - 332.
- [25] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 1 - 5. (WANG Tie-hang, LU Jing, YUE Cai-kun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [26] MIZOGUCHI M. A derivation of matric potential in frozen soil[J]. The bulletin of the Faculty of Bioresources, 1993, **10**: 175 - 182.
- [27] KOOPMANS R W R, MILLER R D. Soil freezing and soil water characteristic curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, **30**(6): 680 - 685.
- [28] THOMAS H R, CLEALL P, LI Y C, et al. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils[J]. Géotechnique, 2009, **59**(3): 173 - 184.
- [29] LAI Y M, PEI W S, ZHANG M Y, et al. Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, **78**: 805 - 819.
- [30] 周凤玺, 王立业, 赖远明. 饱和盐渍土渗透吸力的回顾及研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(7): 1199 - 1210. (ZHOU Feng-xi, WANG Li-ye, LAI Yuan-ming. Review and research on osmotic suction of saturated saline soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(7): 1199 - 1210. (in Chinese))
- [31] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Seng-chuan. Soil Water Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))