

文章编号:1671-6833(2023)04-0120-07

含盐冻土冻结温度及导热系数试验研究

靳贻杰, 陶 勇, 张 婷, 杨 平

(南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘 要:为研究粉质黏土含盐量和初始含水率对热物理特性的影响规律,通过开展室内温度试验测得不同含盐量和含水率粉质黏土的冻结温度和导热系数,分析了不同因素对含盐粉质黏土冻结温度和导热系数的影响。结果表明:NaCl含盐粉质黏土冻结温度及过冷温度随含盐量增加均呈线性降低,而 Na_2SO_4 含盐粉质黏土均先降低后略增加,两种含盐粉质黏土导热系数均随含盐量的增加而减小;冻结温度及导热系数均与初始含水率成正相关关系,低于饱和含水率时含水率对冻结温度的影响占主导作用,超过时含盐量成为主要影响因素,且随着含水率增加两种含盐土导热系数增加速率均变缓。同时给出了不同条件下冻结温度和导热系数的经验公式,将水-盐-温度变量与冻结温度和导热系数建立起联系,为含盐土壤分布地区工程建设提供参考。

关键词:含盐冻土;冻结温度;导热系数;含盐量;初始含水率

中图分类号: TU445

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2022.04.021

冻土是由土粒、冰、未冻水和空气组成的四相体系^[1]。含盐冻土中的盐分对土壤冻结温度、导热系数等参数性质具有决定性作用,其中冻结温度和过冷温度通常在土体冻结过程中同时出现。冻结温度是孔隙溶液与冰晶共存时的临界温度^[2],是判断土体冻结状态、预测冻结体量、控制冻胀变形等工程的重要物理指标,冻结温度均衡地反映土体水分与所有其他成分之间的内部联结作用^[3];而导热系数是研究冻土区温度场和热工计算的基础指标,是土体在负温下热传导能力的表征^[4]。在沿海地区道路及地下工程进行施工时常采用人工冻结法进行加固和抢修,含盐土冻结温度的测量直接关联到路基冻结深度和人工冻土冻结壁厚度计算^[5-7];导热系数对寒区冻土工程以及多年冻土区灾害中热量补偿等温度场问题直接关联。

沿海地区盐渍土以含氯盐为主,氯盐的热物理参数测量在人工冻结施工过程中具有代表性意义^[8];冻融循环中盐胀现象对于寒区工程危害极大,同等温度条件下硫酸盐更易饱和析出结晶盐^[9],因此对硫酸盐的热物理参数的测量在研究冻土盐胀灾害时具有典型性意义。含盐冻土中水分和盐分的迁移、相变是一个水热盐耦合过程,冻融状态

的土体随水盐迁移和溶液变化热参数有较大差异,进而影响到热流传播和温度场分布^[10]。Wan等^[11]、路建国等^[12]通过室内降温试验得出结晶温度与含盐质量分数的关系曲线,本文在此基础上分析得出含盐量分别对冻结温度和导热系数的影响。

对于含盐冻土冻结温度和导热系数热物理参数试验方面,冻结温度大多利用探针结合计算机进行实时测量。张婷等^[13]、邴慧等^[14]分析比较得出溶液中不同离子对冻结温度影响能力大小;司轩昂等^[15]研究发现土体粒径与其冻结温度成正相关。导热系数测量方面,Li等^[16]通过研究高纬度地区土壤的导热系数,得出含水率对导热系数的影响关系;邓友生等^[17]对含盐土的导热系数进行了测量,得出正、负温区段导热系数的变化规律;徐捷等^[18]利用热探针瞬态法研究了高温条件下的导热系数,分析得出导热系数随着温度的升高而增大,其增大的速率随温度的增加而减小的结论。

土体冻结温度和导热系数不仅取决于土质,同时还受土壤中含盐类型、含盐量和初始含水率的影响,导热系数与水盐的关系也是研究土体内部热量平衡的重要因素。但对于冻结温度和导热系数影响因素分析尚不够全面,各试验对参数的

收稿日期:2022-04-10;修订日期:2022-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178337)

通信作者:杨平(1964—),男,江西樟树人,南京林业大学教授,博士生导师,主要从事环境岩土与地下工程的教学与研究
工作,E-mail: yangping@njfu.edu.cn。

引用本文:靳贻杰,陶勇,张婷,等.含盐冻土冻结温度及导热系数试验研究[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(4):120-126.(JIN Y J, TAO Y, ZHANG T, et al. Experimental study on freezing temperature and thermal conductivity of salty frozen soil[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(4): 120-126.)

测量在准确性和合理性方面也有待商榷;同时前人对热物理参数的讨论大多只停留在选取其中 1 个参数进行试验研究,而系统性地对热物理参数进行研究更具理论和工程意义。因此本文针对含盐粉质黏土,研究了含盐量和初始含水率对冻结温度及导热系数的影响,为不同含盐土地区的冻结工程设计提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

为使研究对实际工程更具有指导意义,试验采用南京地区典型粉质黏土进行含盐土的制备,原状土基本物理指标见表 1。

表 1 原状土基本物理特性				
Table 1 Physical properties of soils				
比重 d_s	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	塑限 $\omega_p/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 I_p
2.7	22.4	21.2	34.7	13.5

原状土中 NaCl 和 Na_2SO_4 的总含量(质量分数,下同)远低于试验规划的含盐量(1.0%~4.0%),因此原状土中的初始离子含量对含盐土的影响可以忽略不计。试验采用重塑土,将土料放入烘箱,105℃烘 24 h,碾碎,过 2 mm 粒径筛,筛过后置于袋中密封备用。

1.2 试验方法

本文冻结温度测定选用的是冻融循环中冻结过程的数据,导热系数是在融化过程中测定的。这是因为冻结过程中伴随有温度突变,而融化过程中温度变化是渐变的,且已有研究表明未扰动土体结构情况下冻融循环对导热系数的影响不大^[19],因此融化过程更利于导热系数参数的测试。

1.2.1 冻结温度试验

试验采用自行研制的冻结温度试验系统,主要由多功能转换箱、冷浴箱、DataTake 采集仪、电脑、热电偶传感器组成,具体装置原理如图 1 所示。试验主要研究饱和含水率(26%)下 NaCl 、 Na_2SO_4 在不同含盐量(0、1%、2%和 4%)及相同含盐量(1%)下不同含水率(15%、20%、25%、30%、35%和 40%)含盐土冻结温度变化规律。

根据试验需要确定土样的含盐量和含水率后按《土工试验方法标准》^[20]进行制样。将静置后的土样分层填入 80 mm×100 mm 模具内,为模拟覆土 10 m 左右冻结施工,将试样在 200 kPa 条件下固结 24 h。放入冷浴箱中进行冻结温度测定。15%、20%、25%、26%、30%、35%和 40% 含水率固结后含水率为

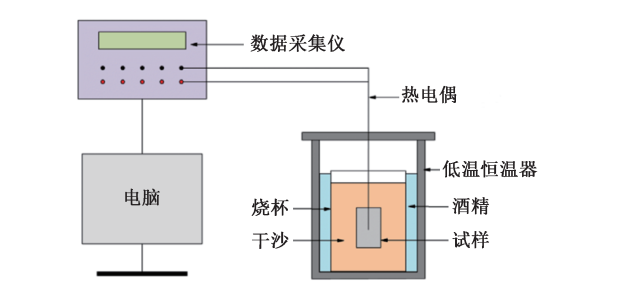


图 1 冻结温度试验原理示意图
Figure 1 Freezing temperature test diagram

14.7%、19.4%、24.2%、25.2%、29%、34.1%、38.8%。

1.2.2 导热系数试验测试原理及设备

本试验采用热特性分析仪进行含盐土导热系数测定,研究不同温度条件(0、-5、-10、-15、-20℃)下,饱和含水率情况时不同含盐量(0、1%、2%和 4%),和一定含盐量(1%)时不同含水率(15%、20%、25%、30%和 35%)的导热系数及其变化规律。

根据试验需要确定土样的含盐量和含水率后按《土工试验方法标准》^[20]进行制样。将静置后的土样分层填入 80 mm×100 mm 模具,振捣压实,然后在 200 kPa 条件下固结 24 h 后脱模,土样放置在环境箱进行温度分级监测,温度按试验规划从 0℃逐渐降低到-20℃,再从-20℃逐渐升到 0℃,每一级温度留出足够的时间达到热平衡,进行导热系数测试,然后调至下一温度。

2 试验结果与分析

2.1 冻结温度试验结果分析

2.1.1 含盐量对不同含盐土冻结温度影响

图 2 为饱和含水率条件下不同含盐量的 NaCl 和 Na_2SO_4 在冻结过程中温度-时间曲线。可以看出相比 Na_2SO_4 含盐土冻结曲线, NaCl 含盐土对含盐量变化更为敏感。随着含盐量的增加,自由水冻结所用时间递减,对于 NaCl 含盐土是由于饱和含水率下随着含盐量增加,盐溶液的溶质势增加,对自由水的吸附能力增强;对于 Na_2SO_4 含盐土溶质势变化的同时还有含盐晶体吸水析出的作用。

以温度-时间曲线第 1 次到达最低点为过冷温度、突变后稳定阶段为冻结温度,可以绘制得到不同含盐量对冻结温度和过冷温度的影响曲线如图 3 所示。由图 3 可知, NaCl 含盐土的冻结温度和过冷温度随着含盐量的增加而基本呈线性降低。这是因为含盐量增加,土颗粒对水分的吸附能力提升,更易形成水化膜,使得自由水达到冻结状态的温度越低,此时冻结温度变化是由于孔隙结构对水的毛细作用和土颗粒对水的吸附作用的共同影响。

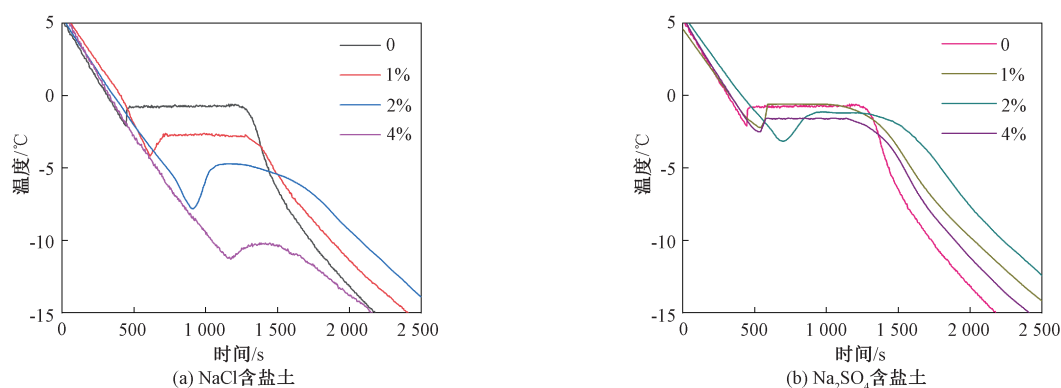


图2 不同含盐量下土体冻结过程中温度-时间曲线

Figure 2 Temperature-time curve during soil freezing with different salt content

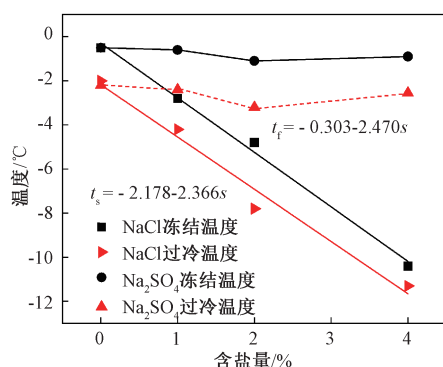


图3 不同类型含盐土冻结温度及过冷温度关系曲线

Figure 3 Relationship between freezing temperature and supercooling temperature of different saline soils

同时从图3可以看出 Na_2SO_4 冻结温度变化规律不同的是:在低含盐量($0 < s \leq 2\%$)条件下,两种含盐土冻结温度和过冷温度均随含盐量增加而降低,且二者差值随含盐量的增加而增大;在较高含盐量($2\% < s \leq 4\%$)下, Na_2SO_4 含盐土随含盐量增加冻结温度和过冷温度反而升高,这是由于冻结过程中水分相变的同时, Na_2SO_4 含盐土还伴随着盐溶液的相变,吸水析出 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,同时冰晶和土颗粒接触角减小,导致冻结温度上升。

2.1.2 含水率对不同含盐土冻结温度影响

图4为不同初始含水率下土体冻结过程中NaCl含盐土和 Na_2SO_4 含盐土温度-时间变化曲线,从中可以看出不同含水率下均出现了过冷现象,且随含水率增加过冷现象更为显著。这是由于初始含水率小的土样自由水含量也较低,在到达过冷温度以前已有相变发生。同时可以看出初始含水率在达到饱和含水率以前,冻结温度随初始含水率变化明显,且随含水率增加,冻结稳定段持续时间增大,超过饱和含水率之后冻结温度和冻结稳定段的持续时间则变化不大。这是由于到达饱和含水率以前,冰晶成核后随着含水率的增

加,盐溶液的基质势绝对值减小,对水分的吸附能力减弱,转化为冰的自由水越少;到达饱和含水率以后,基质势值为0,同时不论是大孔隙还是小孔隙,此时均已被水分子充盈,小孔隙对冻结特征的影响可以忽略。

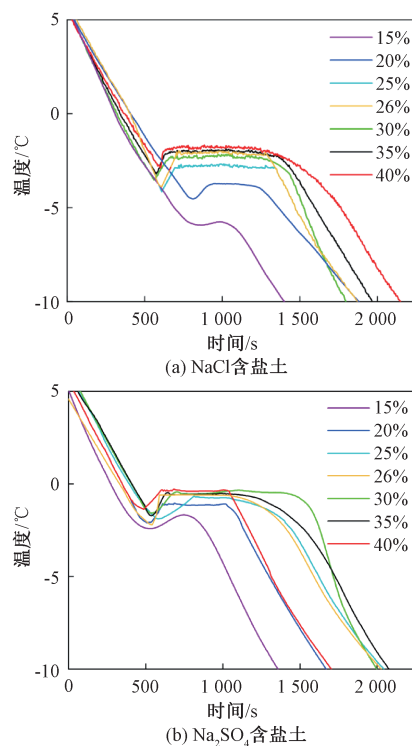


图4 不同初始含水率下土体冻结降温曲线

Figure 4 Freezing and cooling curves of soil with different initial moisture contents

根据NaCl和 Na_2SO_4 含盐土在不同初始含水率下土体冻结过程中的过冷温度和冻结温度可以拟合得到图5,可以看出在相同初始含水率条件下 Na_2SO_4 含盐土的冻结温度和过冷温度均高于NaCl含盐土。

从图5还可以看出含水率和温度成正相关关系,这是由于含水率越低,土颗粒表面对水的吸附作

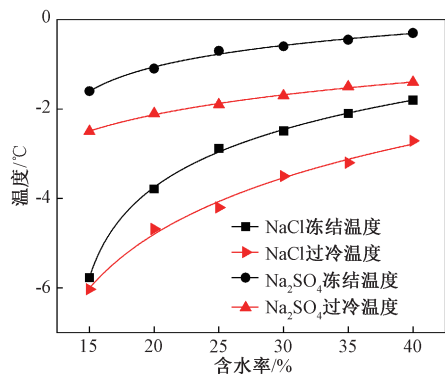


图 5 不同类型含盐土冻结温度及过冷温度与初始含水率关系曲线

Figure 5 Relationship between freezing and overcooling temperature and initial water content of different saline soils

		冻结温度拟合系数			过冷温度拟合系数		
含盐类型	含盐量/%	A_1	B_1	C_1	A_2	B_2	C_2
NaCl	1	-6.356	1.379	-13.478	-9.320	1.910	-9.328
Na ₂ SO ₄	1	-2.398	0.626	-11.441	-4.300	0.826	-6.058

2.2 导热系数试验结果分析

2.2.1 含盐量对不同含盐土导热系数影响

图 6 为融化状态下两种含盐土导热系数变化曲线图。由图 6 可知,不同类型含盐土,其导热系数变化规律相差较大:随着含盐量增加,Na₂SO₄ 导热系数增加的幅度小于 NaCl 含盐土。这是由于 Na₂SO₄ 吸水结晶,且含盐量越高,越容易结晶析出,因此过高含盐量的 Na₂SO₄ 含盐土对导热系数控制作用小。两种含盐土变化规律相同点在于:负温范围内随含盐量变化,不同温度土样的导热系数变化趋势相同,即随温度升高,各含盐量下含盐土导热系数均逐渐减小,这是由于随温度升高,未冻水含量增大,导致冰含量减小,且分子碰撞运动逐渐剧烈;随着含盐量增加,在负温范围内含盐土的导热系数减小,这是由于含盐量增加,使得未冻水含量增加,即导热性较好的冰所占比例减小。

从图 6 还可看出,同一种含盐土的负温和 0℃ 时的拟合曲线线型不同,因为此时土中未发生冰水相变。在 0℃ 时,随含盐量增加,NaCl 含盐土导热系数增大,而 Na₂SO₄ 含盐土导热系数减小,Na₂SO₄ 溶解度小于 NaCl,随含盐量增加,0℃ 时 Na₂SO₄ 盐会吸水结晶,含盐量越高失水越多,而 0℃ 时 NaCl 溶解度较大,随着离子浓度增大,导热系数也增大。

由图 6 可知负温区段温度和含盐量都会影响导

用越强,冻结需要达到的温度也就越低。

图 5 中冻结温度随含水率变化拟合曲线,可用对数函数式(1)表示:

$$T_f = A_1 + B_1 \ln(w + C_1) \quad (1)$$

过冷温度随含水率变化拟合曲线见式(2):

$$T_s = A_2 + B_2 \ln(w + C_2) \quad (2)$$

式中: T_f 、 T_s 分别为冻结温度和过冷温度,℃; w 为含水率,%; A_1 、 B_1 、 C_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 均为拟合系数。

表 2 给出冻结温度及过冷温度随含水率变化拟合系数。可以看出,土体的冻结温度随含水率的增加而增加,且随着含水率增加,冻结温度和过冷温度的变化幅度逐渐减小。结合图 3 和图 5 可知,对于 NaCl 含盐土,含盐量对含盐土冻结温度及过冷温度的影响作用更大,而对于 Na₂SO₄ 含盐土含水率影响相对更大。

表 2 冻结温度及过冷温度随含水率变化曲线拟合系数

Table 2 Fitting coefficient of freezing and supercooling temperature with water content

含盐类型	含盐量/%	冻结温度拟合系数			过冷温度拟合系数		
		A_1	B_1	C_1	A_2	B_2	C_2
NaCl	1	-6.356	1.379	-13.478	-9.320	1.910	-9.328
Na ₂ SO ₄	1	-2.398	0.626	-11.441	-4.300	0.826	-6.058

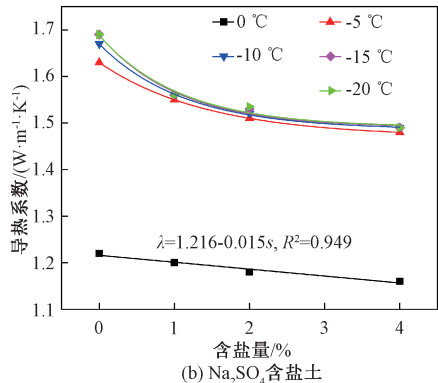
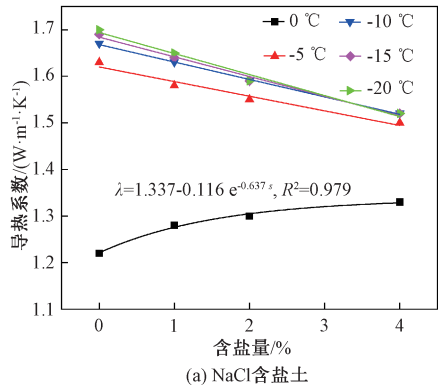


图 6 含盐土导热系数与含盐量关系拟合曲线

Figure 6 Fitting curve of relationship between thermal conductivity and salt content of saline soil

热系数,在此基础上对不同含盐量和温度下的含盐土的导热系数进行拟合,得到经验公式(3):

$$\lambda = a_1 \left(\frac{b_1 + c_1 s}{T} \right)^{d_1} \quad (3)$$

式中： λ 为导热系数， $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$ ； s 为含盐量，%； T 为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 为相关的拟合系数。

表 3 给出了含盐土融化过程的拟合系数， R^2 值分别为 0.936、0.980，说明该公式拟合效果良好，适用于对导热系数的估算。

表 3 NaCl、Na₂SO₄ 含盐土导热系数拟合系数

Table 3 Fitting coefficient of thermal conductivity in NaCl, Na₂SO₄ saline soil

含盐土类型	a_1	b_1	c_1	d_1
NaCl 含盐土	1.552	-1.111	-3.174	-0.034
Na ₂ SO ₄ 含盐土	1.404	-0.004	-0.138	-0.222

2.2.2 含水率对不同含盐土导热系数影响

土的导热系数与含水率密切相关，图 7 为融化

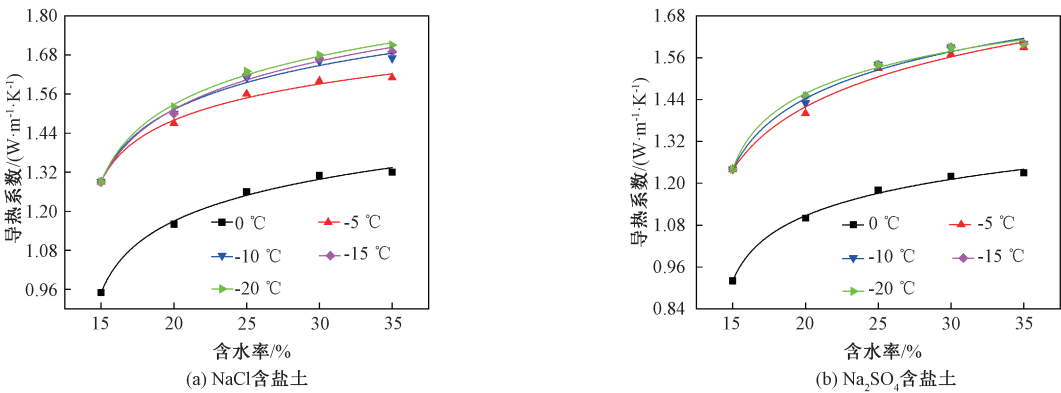


图 7 含盐土导热系数与初始含水率关系曲线

Figure 7 Relation curve of thermal conductivity and initial moisture content of saline soil

由图 7 可知，温度和含水率对含盐土的导热系数都有较大的影响，进一步研究温度和含水率与导热系数的关系，对 NaCl 和 Na₂SO₄ 含盐土拟合，得到式(4)：

$$\lambda = a_2 + b_2 e^{c_2 T} + d_2 \ln w \quad (4)$$

式中： λ 为导热系数， $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$ ； w 为含水率，%； T 为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； a_2 、 b_2 、 c_2 为拟合系数。表 4 为 NaCl 和 Na₂SO₄ 含盐土导热系数拟合系数。 R^2 值分别为 0.961、0.964，说明该公式拟合效果良好，可以用来估算一定含水率和温度条件下的导热系数。

表 4 NaCl、Na₂SO₄ 含盐土导热系数拟合系数

Table 4 Fitting coefficient of thermal conductivity in NaCl, Na₂SO₄ saline soil

含盐土类型	a_2	b_2	c_2	d_2	R^2
NaCl 含盐土	0.134	-0.159	0.193	0.451	0.961
Na ₂ SO ₄ 含盐土	0.126	-0.079	0.288	0.428	0.964

状态两种含盐土导热系数随温度及含水率变化拟合曲线，两种含盐土导热系数变化规律共同点为负温范围内随着温度升高，两种含盐土导热系数均逐渐减小；随着含水率增加，两种含盐土导热系数均逐渐增大，且增长至一定程度后速率逐渐变缓，这是因为低含水率时，土体孔隙中存在相当比例热传导性较差的气体。

从图 7 还可看出，两种含盐土导热系数变化规律不同点在于：同一温度和含盐量下，NaCl 含盐土导热系数大于 Na₂SO₄ 含盐土，这是由于 Na₂SO₄ 含盐土在冻结过程中析出晶体，盐结晶并吸收大量水，可发生相变成冰的水的含量要小于 NaCl 含盐土，在融化过程中冰含量仍小于 NaCl 含盐土；含水率相同时，随着温度升高，负温下 NaCl 含盐土导热系数逐渐减小，且减小速率变大，而 Na₂SO₄ 含盐土在高含水率时导热系数基本不变。

3 结论

本文通过粉质黏土的室内试验，研究分析了含盐类型、含盐量以及初始含水率对冻结温度、导热系数的影响，得出以下结论。

- (1)随着含盐量的增加，NaCl 含盐土的冻结温度及过冷温度基本呈线性降低，而对于冻结过程中有结晶盐析出的 Na₂SO₄ 含盐土，冻结温度和过冷温度均先降低后增加，且在 2% 含盐量处达到最低点。
- (2)两种含盐土冻结温度及过冷温度均随初始含水率增大而增加，且增长速率逐渐减小。对于 NaCl 含盐土，含盐量对含盐土冻结温度及过冷温度的影响作用更大，而对于 Na₂SO₄ 含盐土含水率的影响相对更大。
- (3)负温范围内，两种含盐粉质黏土的导热系数均随含盐量增加而减小；相同温度和含盐量条件下 NaCl 含盐土导热系数大于 Na₂SO₄ 含盐土。高含

盐量条件下 Na_2SO_4 更容易吸水析出结晶盐,随着含盐量的增加 Na_2SO_4 对导热系数的控制作用逐渐变小。

(4)两种含盐土初始含水率与导热系数均成正相关关系,且随着含水率增加其增长速率均逐渐变缓。

参考文献:

- [1] ALDAAEF A A, RAYHANI M T. Interface shear strength characteristics of steel piles in frozen clay under varying exposure temperature[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(6): 2110-2124.
- [2] 应赛,周凤玺,文桃,等. 盐渍土冻结过程中的特征温度研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(1): 53-61.
YING S, ZHOU F X, WEN T, et al. Characteristic temperatures of saline soil during freezing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(1): 53-61.
- [3] XIAO Z A, LAI Y M, ZHANG M Y. Study on the freezing temperature of saline soil[J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13(1): 195-205.
- [4] 朱志武,宁建国,马巍. 土体冻融过程中水、热、力三场耦合本构问题及数值分析[J]. *工程力学*, 2007, 24(5): 138-144, 137.
ZHU Z W, NING J G, MA W. Constitutive model and numerical analysis for the coupled problem of water, temperature and stress fields in the process of soil freeze-thaw[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(5): 138-144, 137.
- [5] HAN L, YE G L, LI Y H, et al. In situ monitoring of frost heave pressure during cross passage construction using ground-freezing method[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(3): 530-539.
- [6] 胡俊,杨平. 大直径杯型冻土壁温度场数值分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 523-531.
HU J, YANG P. Numerical analysis of temperature field within large-diameter cup-shaped frozen soil wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 523-531.
- [7] 夏江涛,杨平. 盾构出洞水平冻结加固杯形冻土壁温度场监测分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2010, 31(2): 27-30.
XIA J T, YANG P. Survey analysis of temperature field in cup-shaped frozen soil wall of horizontal freezing reinforcement for shield tunnelling[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2010, 31(2): 27-30.
- [8] 杨平,刘健鹏,张婷. 含盐冻土物理力学特性研究现状与展望[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(6): 11-19.
YANG P, LIU J P, ZHANG T. Physical and mechanical properties of frozen saline soil: research status and prospect[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2019, 4(6): 11-19.
- [9] 李星星,王思敬,肖锐铎,等. 硫酸钠溶液在降温结晶过程中的盐胀与冻胀[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(11): 2069-2077.
LI X X, WANG S J, XIAO R H, et al. Saline expansion and frost heave of sodium sulfate solution during cooling crystallization process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(11): 2069-2077.
- [10] 刘月,王正中,王羿,等. 考虑水分迁移及相变对温度场影响的渠道冻胀模型[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 83-88.
LIU Y, WANG Z Z, WANG Y, et al. Frost heave model of canal considering influence of moisture migration and phase transformation on temperature field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(17): 83-88.
- [11] WAN X S, ZHONG C M, YANG Z H, et al. Water and salt phase change in sodium sulfate soil based on differential scanning calorimetry[J]. *Soils and Foundations*, 2021, 61(2): 401-415.
- [12] 路建国,万旭升,刘力,等. 降温过程硫酸钠盐渍土水-热-盐相互作用过程[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(2): 126-134.
LU J G, WAN X S, LIU L, et al. Water-heat-salt interaction of sodium sulfate saline soil during a cooling process[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(2): 126-134.
- [13] 张婷,杨平. 不同因素对浅表土冻结温度的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(4): 132-134.
ZHANG T, YANG P. Effect of different factors on the freezing temperature of shallow top soil[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2009, 33(4): 132-134.
- [14] 邴慧,马巍. 盐渍土冻结温度的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 1106-1113.
BING H, MA W. Experimental study on freezing point of saline soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1106-1113.
- [15] 司轩昂,杨平,刘健鹏. 土质对人工冻土冻结温度影响的试验研究[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(5): 1166-1172.
SI X A, YANG P, LIU J P. An experimental study on influence of soil properties on freezing temperature of artificial frozen soil[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(5): 1166-1172.
- [16] LI R, ZHAO L, WU T H, et al. Soil thermal conductivity and its influencing factors at the Tanggula permafrost

- region on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 264: 235–246.
- [17] 邓友生, 何平, 周成林. 含盐土导热系数的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 319–323.
- DENG Y S, HE P, ZHOU C L. An experimental research on the thermal conductivity coefficient of saline soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 319–323.
- [18] 徐婕, 朱合华, 闫治国. 淤泥质黏土火灾高温下导热系数的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(11): 2108–2113.
- XU J, ZHU H H, YAN Z G. Experimental studies on coefficient of thermal conductivity of silty clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(11): 2108–2113.
- [19] 肖泽岸, 赖远明, 尤哲敏. 冻融循环作用下含盐量对 Na_2SO_4 土体变形特性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 953–960.
- XIAO Z A, LAI Y M, YOU Z M. Experimental study on impact of salt content on deformation characteristics of sodium sulfate soil under freeze-thaw conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 953–960.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

Experimental Study on Freezing Temperature and Thermal Conductivity of Salty Frozen Soil

JIN Yijie, TAO Yong, ZHANG Ting, YANG Ping

(School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The purpose of this study was to reveal the effect of salt content and initial water content on the thermal physical properties of silty clay, the freezing temperature and thermal conductivity of silty clay with distinct salt content and water content were measured by indoor temperature test, and the effects of distinct factors on freezing temperature and thermal conductivity of silty clay with distinct salt content and water content were revealed. The results demonstrated that: The freezing temperature and supercooling temperature of NaCl salty silty clay permafrost diminished linearly with the increase of salt content, while the freezing temperature and supercooling temperature of Na_2SO_4 salty silty clay permafrost first diminished and then increased slightly, and the thermal conductivity of both salty silty clays diminished with the augment of salt content. At the moment of the initial water cut was inferior to the saturated water cut, there was a positive correlation between initial moisture content and freezing temperature and thermal conductivity, and the moisture rate was the dominant element that could affect the freezing temperature, and after it surpassed the saturated water cut, the salt content became the dominant element. When the rate of water close to the liquid limit, the thermal conductivity of the two saline soils increased tardily. At the same time, the empirical formulas of freezing temperature and thermal conductivity in different conditions were given, and the water-salt-temperature variables were linked with freezing temperature and thermal conductivity, which could provide a reference for engineering construction in salty soil distribution areas.

Keywords: salty frozen soil; freezing temperature; thermal conductivity; salt content; initial moisture content