

DOI: 10.11779/CJGE201512006

# 硫酸盐渍土未相变含水率与温度关系研究

万旭升<sup>1, 2</sup>, 赖远明<sup>1</sup>, 廖孟柯<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 西南石油大学土木工程与建筑学院, 四川 成都 610513)

**摘要:** 以硫酸盐渍土为研究对象, 从理论上建立了冻结温度以上未相变含水率与温度的关系, 并通过室内试验测试了硫酸盐土体及对应溶液中盐晶体初始析出温度和硫酸盐渍土未相变含水率在不同温度环境下的变化。从土体降温温度曲线、不同温度下核磁共振信号强度分析了温度对未相变含水率的影响。研究结果表明: 在特定降温速率下, 十水硫酸钠晶体析出存在滞后性, 初始析出温度均低于其饱和浓度所对应的温度, 并随着初始含盐量的减小, 初始析出温度大幅度降低, 且与土体比较, 溶液中盐晶体易于析出; 土体中十水硫酸钠晶体的析出造成含水率的减小明显大于溶液中晶体的析出引起的减小, 且随着温度递降, 未相变含水率递减; 冻结温度以下, 高含盐量的硫酸盐渍土未冻含水率与温度呈指数规律减小,  $-10^{\circ}\text{C}$ 以下, 其含水率不再变化。对于低含盐量硫酸盐渍土, 冻结温度以下其未冻含水率随温度降低同样按指数规律减小, 且随着含盐量的增加, 土体的含水率有所增加。

**关键词:** 硫酸盐渍土; 未相变含水率; 指数规律; 冰液表面自由能

中图分类号: TU448 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)12-2175-07

**作者简介:** 万旭升(1987-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 讲师, 主要从事寒区工程数值模拟与计算。E-mail: xinyanwanxusheng@163.com。

## Relationship between temperature and water content of sodium saline soils without phase transformation

WAN Xu-sheng, LAI Yuan-ming, LIAO Meng-ke

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Institute, Chinese

Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University,

Chengdu 610513, China)

**Abstract:** The relationship between water content without phase transformation of sodium sulfate saline soils and temperature is established above the freezing temperature of soils through theoretical analysis. In order to find the mechanism of the initial precipitation temperature of salt crystals in sodium sulfate saline soils and solution and change of water content under different temperature conditions, saline soil samples and solutions are tested in laboratory. By analyzing the cooling curves of soil samples and NMR single strength under different temperatures, the influence of temperature on water content without phase transformation is obtained. The research results show that, the precipitation of sodium sulfate decahydrate usually lags under specific cooling rate. Besides, the initial precipitation temperature is lower than the temperature of saturated solution. And also, the initial precipitation temperature decreases as the salt content of soil decreases. Meanwhile, the initial salt crystals are easier to form in solution than in soils. In addition, the decrease of water content in saline soils is greater than that in solution, and the water content without phase change decreases as the temperature decreases. The unfrozen water content of sodium sulfate saline soils with high salt content decreases exponentially, and the water content no longer changes when the temperature of soils is up to  $-10^{\circ}\text{C}$ . For the sodium sulfate saline soils with low salt content, the unfrozen water content also decreases exponentially, and under the same temperature, the unfrozen water content of soils increases as the salt content increases.

**Key words:** sodium saline soil; water content without phase transformation; exponential rule; ice-liquid surface free energy

## 0 引言

盐渍土是盐土和碱土的总称。现行国家标准(GB 50021—2001)《岩土工程勘察规范》6.8.1条规定:“岩土中易溶盐含量大于0.3%, 并具有溶陷、盐胀、腐蚀

等工程特性时, 应判断为盐渍土”。新疆、青海、甘肃、

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230630); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-19)

收稿日期: 2014-10-28

宁夏、陕西和内蒙古，是中国盐渍土分布面积最广最多的地域<sup>[1]</sup>。盐渍化土在四季气温周期变化过程中，土壤中盐分的迁移和聚集，反复结晶与溶解，使地基土的物理力学性质发生剧烈变化，给这些地区的交通、工业与民用建筑带来严重的危害。对于硫酸盐渍土，当温度降低时硫酸钠结合水形成芒硝（十水硫酸钠），引发土体膨胀，即盐胀，对工程危害很大。

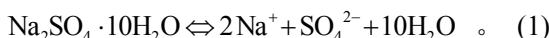
十水硫酸钠晶体析出会造成未相变含水率的减小，导致土体的性质发生变化。工程中引起融沉的部分原因是温度升高使土体中的盐晶体失水，造成土体含水率增大，引起建筑物基础沉降。不管是盐胀、融沉还是盐分迁移归结其本质问题为水热盐力耦合效果<sup>[2]</sup>，未相变含水率与温度的关系则是其耦合计算必不可少的条件。对于低温下未冻水含量与温度的关系已有大量研究：黄兴法等<sup>[3]</sup>研究了土壤中水盐热运动，对于低温下土体液态水含量提出了幂函数关系；徐学祖等<sup>[4-5]</sup>通过大量试验研究回归了冻结温度以下含盐土的含水率与温度之间的关系大致符合幂函数关系；Kujala<sup>[6]</sup>、Sheng 等<sup>[7]</sup>回归了负温下含水率与温度之间的指数关系，并运用其关系计算冻土的冻胀。但对于冻结温度以上由于盐晶体析出而引起的含水率的变化方面的试验以及理论分析相对很少。

本文以具有严重盐胀破坏性质的硫酸钠盐渍土作为研究对象，通过理论分析和试验研究，建立整个降温过程中含水率的变化与温度之间的关系，从而为低温盐渍土区域工程防盐胀问题提供参考和依据。

## 1 理论分析

### 1.1 硫酸钠溶液中十水硫酸钠晶体析出引起水分质量变化

假定降温时硫酸钠溶液中生成的盐晶体全是十水硫酸钠晶体，则存在



1 mol 十水硫酸钠晶体的生成会消耗 1 mol 的硫酸钠和 10 mol 的水分子。根据降温前后的溶质质量平衡，有

$$\frac{m_0}{\rho_w} \cdot c_0 = \frac{m'}{\rho_w} \cdot c' + \frac{m_0 - m'}{180} \quad (2)$$

式中  $m_0$  为溶液降温前  $T_0$  温度的水分质量(g)， $m'$  为降温后  $T'$  温度的水分质量(g)， $c_0$  表示溶液的初始摩尔浓度(mol/L)， $c'$  表示溶液的降温后的摩尔浓度(mol/L)， $\rho_w$  表示水的密度(g/L)。

若以降温前的水的质量作为总质量，在溶液中，则降温后液态水与降温前液态水的质量比  $\theta_w$  可以表示为

$$\theta_w = \frac{m'}{m_0} \quad (3)$$

结合式(2)、(3)可得

$$\theta_w = \frac{180c_0 - \rho_w}{180c' - \rho_w} \quad (4)$$

根据硫酸钠溶液饱和度曲线，温度  $T'$  时对应溶液的浓度  $c'$  可表达为

$$c' = \frac{r'\rho_w}{142} \quad (5)$$

式中， $r'$  为  $T'$  温度时溶液的溶解度(g/100g)，水的密度设为 1000 g/L，则结合式(4)、(5)可得

$$\theta_w = \frac{710 - 127.8c_0}{710 - 900r'} \quad (6)$$

硫酸钠溶液饱和度表达式为

$$r = 4.4943 \times 1.0773^T \quad (7)$$

式中， $T$  为摄氏温度。

将式(7)代入式(6)中有

$$\theta_w = \frac{710 - 127.8c_0}{710 - 40.4487 \times 1.0773^T} \quad (8)$$

式(8)可用于计算正温度以上不同温度下硫酸钠溶液中的含水率。

### 1.2 硫酸钠盐渍土中十水硫酸钠晶体析出引起的含水率变化

对于土体而言，假定土体中初始含水率较大，降温前硫酸钠以饱和状态存在于土体水分中而未析出。不考虑相对湿度对晶体形态影响，降温后硫酸钠会生成十水硫酸钠晶体而存在土体中，所以总的土体固相的质量增加，则土体的含水率为

$$\theta = \frac{m'}{m_{\pm} + \frac{322}{180}(m_0 - m')} \quad (9)$$

式中， $m_{\pm}$  为土体的质量，其中包含未溶解盐的质量。

根据土体中含水率的定义

$$\theta_0 = m_0 / m_{\pm} \quad (10)$$

式中， $\theta_0$  表示土体初始含水率。将式(2)、(10)代入式(9)中，得

$$\theta = \frac{(180c_0 - \rho_w)\theta_0}{180c' - \rho_w + 322\theta_0(c' - c_0)} \quad (11)$$

将式(5)代入式(11)化简可得

$$\theta = \frac{(180c_0 - \rho_w)\theta_0}{(1.2676r' - 1)\rho_w + 2.2676\theta_0(\rho_w r' - 142c_0)} \quad (12)$$

式中， $r'$  为土体中溶液的溶解度。

盐晶体的析出是发生含水率变化的先决条件，为此首先通过试验研究特定降温速率下盐晶体的析出。

## 2 硫酸钠盐渍土与硫酸钠溶液试验

### 2.1 硫酸钠盐渍土降温试验

土样为青藏高原粉质黏土(塑限 14.5%，液限

23.8%), 为了减少土中其它离子干扰, 事先应对土样进行脱盐并风干待用。工程实践表明, 当含盐量超过2%时, 其盐胀现象比较明显<sup>[8]</sup>。试验中, 分别配置硫酸钠含盐量为0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.1%, 2.6%, 3.2%, 3.8%含水率为18%的硫酸盐渍土, 以含盐量为2.1%~3.8%的土样作为高含盐量土样研究, 把试验样品装置到特制的铁容器中, 干密度控制为1.72~1.75 g/cm<sup>3</sup>, 插入温度探头(精度为±0.01℃)并密封容器, 让容器放置到可程式超低温仪器中进行降温试验, 初始温度控制为25℃。对于2.1%~3.8%含盐量的硫酸钠盐渍土样品降温至0℃后即可。对于0%~1.5%含盐量的硫酸盐渍土样品降温至-20℃, 降温速率为0.02℃/min。其降温曲线如图1所示。

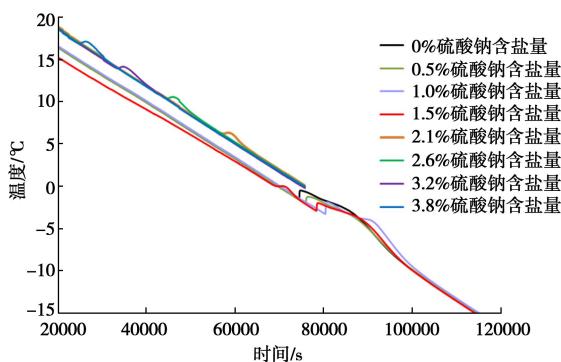


图1 硫酸盐渍土样降温曲线

Fig.1 Temperature dropping curves of sodium saline soils

从图1可以看出随着土样温度降低, 含盐量高的土样最先发生温度的跳跃, 由于硫酸钠溶液饱和度(在32.4℃以下)随着温度降低不断减小, 1分子硫酸钠会结合10分子水分子形成十水硫酸钠, 该反应是放热反应, 故反映在降温曲线上, 温度会瞬间升高。

随着土样温度降低, 含盐量高的土样最先发生温度的跳跃, 跳跃后的恒定温度认为是十水硫酸钠晶体初始析出温度, 该相变过程中水分子不断损失, 导致了土体中的未相变水分的减小。随着含盐量的降低其析出温度不断降低, 析出点温度降低的趋势随含盐量的递减而增大。当含盐量小于1.5%时, 在土体的冻结温度以上不会发生盐晶体的析出。为了更好地比较低含盐量的析出规律, 将0%~1.5%含盐量的硫酸钠盐渍土样的降温曲线单独提出, 如图2所示。

从图2可以看出硫酸钠含盐量为0%和0.5%的土样其降温曲线一致, 负温下温度的跳跃为该土样的冻结温度。说明此阶段只有冰水相变, 没有盐晶体的析出, 而对于含盐量1%的土样, 在发生冰水相变后, 再次出现了温度的跳跃, 有盐晶体的析出, 当土体进入冰水相变后, 大量的自由水变成冰晶, 导致溶液的

浓度急剧增大, 达到过饱和状态而析出。1.5%硫酸钠含盐量土样, 当温度接近0℃时, 温度出现跳跃, 说明该温度下有盐晶体析出<sup>[9]</sup>, 盐晶体的析出导致了溶液浓度的减小, 此温度后的温度曲线与未含盐量的一致。

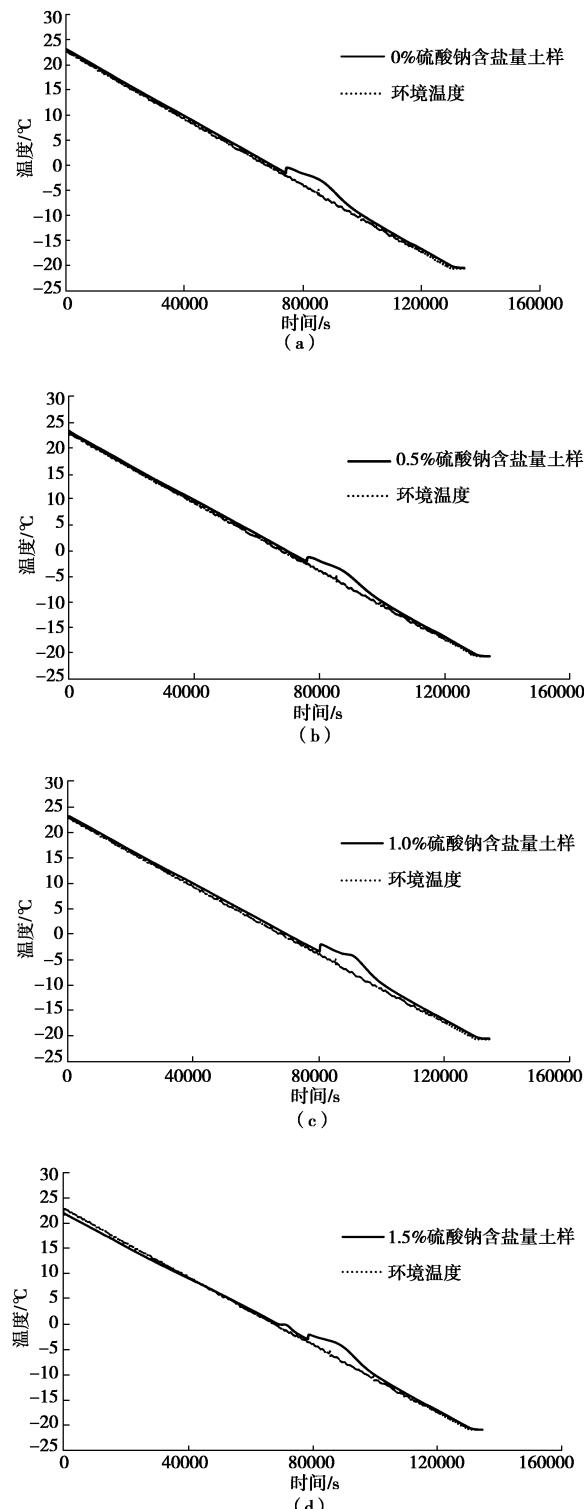


图2 低含盐量硫酸盐渍土降温曲线

Fig.2 Temperature dropping curves of sodium saline soils with low salt content

从试验看出,在特定降温速率下,十水硫酸钠晶体的初始析出温度表现出滞后性,由于土颗粒表面自由能的影响,降低了盐晶体初始析出温度。为了进行对比,配置了与2.1%,2.6%,3.2%,3.8%硫酸钠含盐量土样浓度一致的硫酸钠溶液,其对应的溶液浓度分别为0.8218,1.0169,1.2521,1.4866 mol/L。将溶液装置到玻璃杯中,用防水塑料密封杯口,温度探头悬空插入溶液中,用胶泥密封并固定。将安装好的仪器放置到可程式超低温仪器中,初始温度为25℃,降温速率为0.02℃/min。其溶液的降温曲线如图3所示。

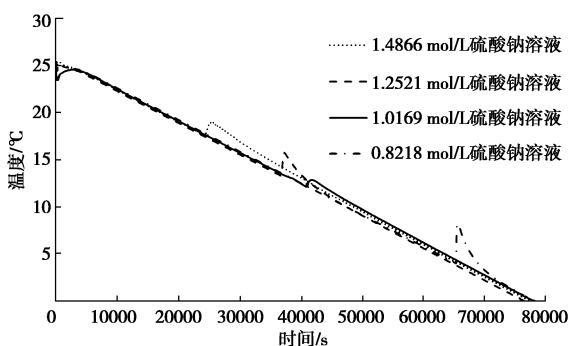


图3 硫酸钠溶液降温曲线

Fig. 3 Temperature dropping curves of sodium sulfate solution

对比图1,3可知,硫酸钠溶液中晶体析出的初始温度较土体中高,且表现出的过冷度较大,降温后溶液中有大量十水硫酸钠晶体,呈针状分布,长1~2 cm,宽2~3 mm。为了更好地比较十水硫酸钠晶体在土体和溶液中的析出规律,研究晶体初始析出温度与初始浓度之间的关系,将试验结果绘制成图4。

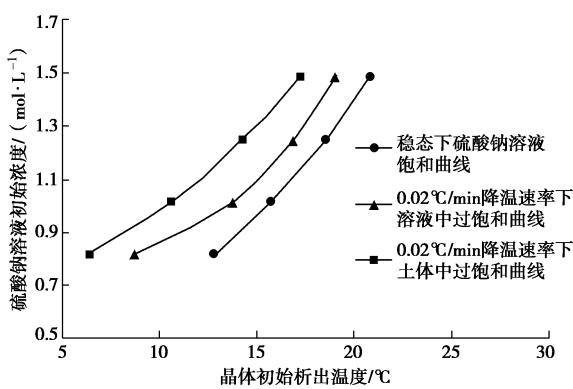


图4 硫酸盐渍土和溶液中盐晶体初始析出温度与初始浓度的关系

Fig. 4 Relationship between initial precipitation temperature of salt crystal and initial concentration in saline soils and solution

从图4可以看出不论在土体还是溶液中十水硫酸钠晶体的析出温度均要低于其饱和溶液温度,由于特定降温速率下溶液处于非稳定态,盐晶体析出过饱和

比大于1,盐晶体析出温度滞后于其饱和溶液对应的温度。

图4同样说明了土颗粒的吸附作用降低了盐晶体初始析出温度点。

## 2.2 正温下硫酸钠盐渍土及硫酸钠溶液中未相变含水率与温度关系

分别配置含盐量为0%,1.0%,2.1%,2.6%,3.2%,3.8%,含水率为18%的硫酸钠盐渍土样,其干密度与以上试验一致。采用核磁共振技术测其信号强度与温度变化关系,如图5所示。土体对应浓度的硫酸钠溶液信号强度和温度的关系如图6所示。

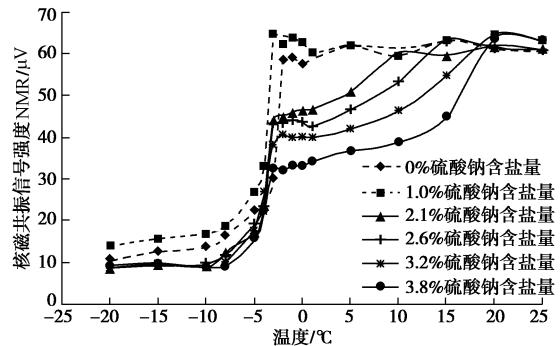


图5 硫酸盐渍土信号强度与温度关系

Fig. 5 Relationship between single strength of sodium sulfate saline soils and temperature

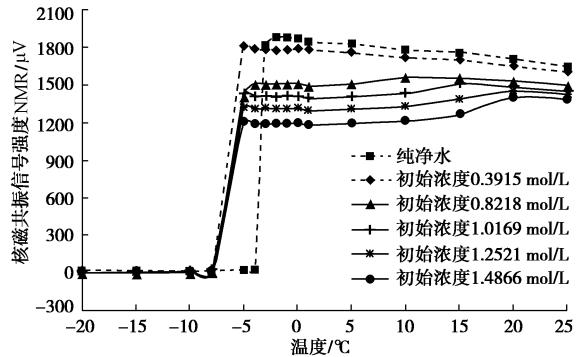


图6 硫酸钠溶液信号强度与温度关系

Fig. 6 Relationship between single strength of sodium sulfate solution and temperature

结合图5,6分析得出,正温下硫酸钠盐渍土的信号强度变化较硫酸钠溶液中信号强度变化大,晶体析出初始温度区间大体相同,在负温下两者差别非常明显,由于土体中的水分分布在孔隙中,在低温下信号强度的变化随温度呈现一定的指数关系。对于溶液而言,当温度处在冻结温度以下时,其信号强度立刻变为0,溶液全部冻结。将信号值转化为含水率<sup>[10]</sup>,并利用式(8)计算正温下溶液中由于盐晶体析出而引起的含水率变化,式(12)计算土体中由于盐晶体析出

引起的含水率变化, 硫酸钠溶液的饱和浓度采用式(7)。令溶液中初始未相变水质量为 1, 为了便于和土体中含水率比较, 乘以 0.18 的系数, 两者对比图如图 7 所示。

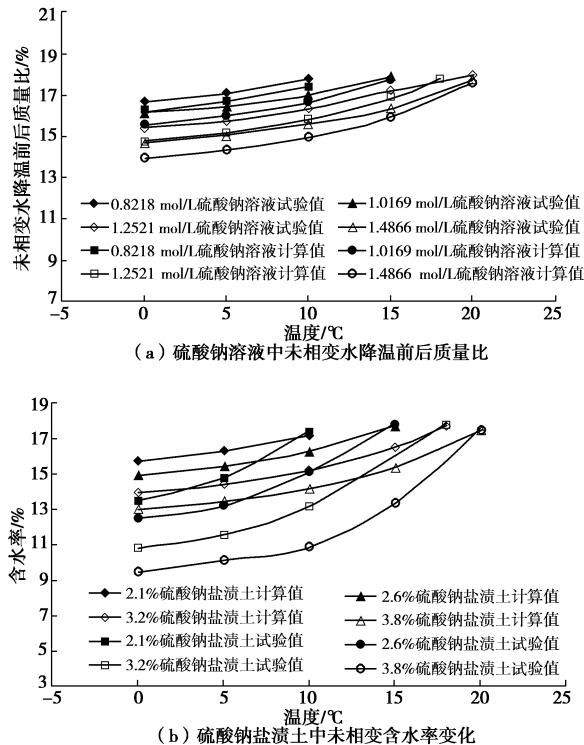


图 7 计算值与试验值对比

Fig. 7 Comparison between calculated values and experimental data

从图 7 中可以看出利用硫酸钠溶液饱和曲线计算出的正温下未相变水降温前后质量比与硫酸钠溶液中未相变水降温前后质量比试验值很接近, 随着初始浓度的增大, 差值增大。其最大差值不超过 0.7%, 该差值主要是由于溶液的非稳定态决定的, 溶液处在亚稳定区间造成了晶体析出的滞后性, 另外包括部分试验误差(如溶液浓度误差、测温误差等)。

然而硫酸钠溶液的饱和曲线已不能准确计算土体中未相变含水率的变化, 试验值与计算值的含水率最大差值可达近 3.5%。土体中盐晶体的析出造成了未相变含水率的大量损失, 该现象同样反映出土体中盐胀要明显大于溶液中的盐胀。为了研究土体中硫酸钠溶液的溶解度发生了变化, 则利用式(12)及试验结果回归正温度下土体中未相变含水率与温度的关系:

$$\theta = \eta \frac{(180c_0 - \rho_w)\theta_0}{(1.2676r' - 1)\rho_w + 2.2676\theta_0(\rho_w r' - 142c_0)}, \quad (13)$$

式中,  $\eta$  表示土体影响系数, 其表达式如下:

$$\eta = (-0.2343c_0 + 1.0485)e^{0.015T}, \quad (14)$$

式中,  $0.5866 \text{ mol/L} \leq c_0 \leq 1.4866 \text{ mol/L}$ ,  $T_f < T < T_c$ ,  $T_f$

为土体的冻结温度,  $T_c$  为晶体的初始析出温度, 对于晶体初始析出温度时含水率的变化可近似利用式(12)计算。修正后的土体未相变含水率与试验值比较如图 8 所示。

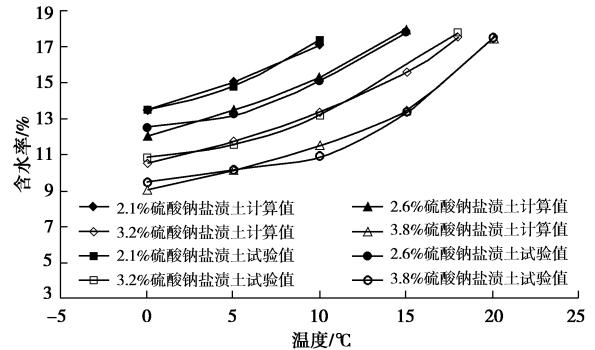


图 8 修正后硫酸盐渍土未相变含水率的计算值与试验值对比

Fig. 8 Comparison between calculated values by improved formula and experimental data of water content without phase transformation in sodium saline soils

从图 8 可以看出修正后的硫酸盐渍土未相变含水率与试验值最大差值不超过 0.4%, 提高了准确度。所以对于高含盐的硫酸盐渍土在正温的未相变含水率变化可参考式(13)进行计算。

### 2.3 负温下硫酸盐渍土未冻含水率与温度关系

根据硫酸钠溶液饱和度曲线, 盐晶体在负温下析出很少, 忽略冻结温度以下盐晶体的析出, 认为冻结温度以下含水率的变化主要由冰水相变决定。故利用试验结果回归硫酸钠盐渍土低温下未冻水量变化规律。从图 5 可以看出对于冻结温度以上有盐晶体析出的土样, 其在冻结温度以下未冻含水率随温度变化规律一致。通过数据拟合, 可得到较高含盐量硫酸盐渍土未冻含水率表达式:

$$\theta_f = Ae^{\varepsilon T} + k, \quad (15)$$

式中,  $A = -1.763 \ln c_0 + 1$ ,  $\varepsilon = -0.645 \ln c_0 + 0.7787$ ,  $k = 0.0265$ 。

对于低含盐量硫酸盐渍土, 在负温下其盐分析出十分微弱, 冰水相变对未冻含水率的变化占主导作用。大量的冰水相变导致溶液浓度升高, 水分冻结变难, 所以低含盐量的土体未冻水含量会微弱增加。根据试验结果回归其与温度之间的关系, 可得较低含盐量硫酸盐渍土未冻含水率表达式:

$$\theta_f = 0.233e^{0.415T} + 0.03, \quad (16)$$

式中,  $T < T_f$ , 当土中含盐量较低时(含盐量小于 1.5%), 随着含盐量的增加, 各参数均有微弱增加。

### 3 讨论与分析

正温下十水硫酸钠晶体的析出不仅造成土体的盐

胀, 对土体的各组分含量变化产生了直接影响。但盐晶体析出后溶液浓度减小, 相对含盐量减小, 其负温下含水率变化基本稳定, 而且规律明显。因此着重讨论低含盐量在负温下的冻结。土体冻结时会发生冰水相变, 冰晶生长时会承受各向非均匀压力  $\Delta p$ , 其大小为冰压力与溶液压力之差即  $\Delta p = p_i - p_l$ <sup>[11]</sup>, 若假定冰晶均匀生长则有

$$\Delta p = \gamma_{il} \frac{dA}{dV} , \quad (17)$$

式中,  $\gamma_{il}$  为冰液表面自由能,  $A$  为冰液接触面积,  $V$  为接触面所包裹的冰晶体积。可以认为土体的冻结温度主要受冰液表面自由能和孔隙半径的影响。土体进入冻结温度前提条件是冰水相变潜热产生的热量与克服表面自由能相等。则有

$$\frac{L_{wi}}{T_f} \Delta T = v_s \gamma_{il} \frac{dA}{dV} . \quad (18)$$

式中  $L_{wi}$  表示冰水相变潜热,  $T_f$  为溶液的冻结温度,  $v_s$  为冰的摩尔体积。若假定冰晶在冻结过程中填充孔隙为球形, 则其可简化为

$$r_0 = \frac{2\gamma_{il} T_f}{L_{wi} \Delta T} , \quad (19)$$

式中,  $r_0$  为土体初始冻结半径。

对于溶液的冻结温度可利用水分活度利用 Pitzer 离子模型求解<sup>[12-14]</sup>。若已知温度的变化量, 则可计算初始冻结温度所对应的孔隙半径大小。

则当  $r > r_0$  时, 填充该孔隙中的自由水会全部冻结, 忽略土颗粒的水膜质量, 则未冻含水率为

$$\theta = V_{r=r_{max}} , \quad (20)$$

式中,  $V$  表示孔隙半径累计百分比,  $0 \leq V \leq 1$ 。

该方法涉及冰液表面自由能大小, 溶液冻结温度等, 计算较为困难, 然而该公式能更好地解释低温下土体孔隙中水的冻结问题, 孔隙越小其越难冻结, 在外界温度一定情况下, 当土样温度接近外界温度时其含水率将不再变化。

## 4 结 论

(1) 特定降温速率下, 十水硫酸钠晶体析出存在滞后性, 均小于其饱和浓度所对应的温度。土体中十水硫酸钠晶体的初始析出温度小于其溶液中的初始析出温度。

(2) 土体中十水硫酸钠晶体的析出造成含水率的减小明显大于溶液中晶体的析出引起的减小, 在 0℃ 左右其未相变含水率基本不再随温度降低而变化。在降温过程中, 未相变含水率随着初始硫酸钠含盐量的增加而减小。

(3) 冻结温度以下, 高含盐量的硫酸盐渍土其未冻含水率呈指数规律减小, 达到-10℃后, 其含水率不再变化。对于低含盐量硫酸钠盐渍土而言, 冻结温度以下其未冻含水率随温度降低同样按指数规律减小。在同等温度下, 比高含盐量土体的含水率有所增加。

(4) 不同温度下含水率大小受到溶液浓度、孔隙直径大小及冰液表面自由能大小的影响。同等温度条件下, 表面自由能越小, 溶液浓度越小, 土体孔隙越大, 其含水率变化越大。

## 参 考 文 献:

- [1] 汪 林, 甘 泓, 于福亮, 等. 西北地区盐渍土及其开发利用中存在的对策[J]. 水利学报, 2001(6): 90 - 95. (WANG Lin, GAN Hong, YU Fu-liang, et al. Salted soil and its development in Northwest China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(6): 90 - 95. (in Chinese))
- [2] 高江平, 吴家惠. 硫酸盐渍土盐胀特性的单因素影响规律研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 15 - 19. (GAO Jiang-ping, WU Jia-hui. Study on laws of the single factor effect upon heaving properties of the sulfated salty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 15 - 19. (in Chinese))
- [3] 黄兴法, 曾德超, 练国平. 土壤水热盐运动模型的建立与初步验证[J]. 农业工程学报, 1997, 13(3): 32 - 36. (HUANG Xing-fa, ZENG De-chao, LIAN Guo-ping. A numerical model for coupling movement of water heat and salt in soil under the conditions of frozen, unfrozen, saturated and unsaturated[J]. Chinese Society of Agriculture Engineering, 1997, 13(3): 32 - 36. (in Chinese))
- [4] 徐学祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体的冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin, et al. Mechanisms of frost heave and soil expansion of soils[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [5] XU X Z, OLIPHANT J L, TICE A R. Prediction of unfrozen water contents in frozen soils by a two-points or one-point method[C]// Proceedings of 4th Int Symp on Ground Freezing. 1985: 83 - 87.
- [6] KUJIALA K. Unfrozen water content of Finish soils measured by NMR[C]// Proc Int Symp on Frost in Geotechnical Engineering. Espoo, 1989: 301 - 310.
- [7] SHENG D, AXELSSON K, KNUTSSON S. Frost heave due to ice lens formation in freezing soils: 1 theory and verification[J]. Nordic Hydrology, 1995, 26: 125 - 146.

- [8] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun, LIU Hong-xu, et al. Frost action of soil and foundation engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [9] 万旭升, 赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2090 - 2096. (WAN Xu-sheng, LAI Yuan-ming. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulfate solution and sodium sulfate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2090 - 2096. (in Chinese))
- [10] TICE A R, BURROUS C M, ANDERSON D M. Phase composition measurements on soils at very high water contents by the pulsed nuclear magnetic resonance technique[J]. Transportation Research Record, 1978, 675(3): 11 - 14.
- [11] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Transactions of the Faraday Society, 1961, 57: 1541 - 1551.
- [12] PRAUSNITZ J M, LICHTENTHALER N R, DE AZEVEDO E G. Molecular thermodynamics of fluid-phase equilibria[M]. 3rd ed. London: Prentice Hall Press, 1999.
- [13] STEIGER M. Crystal growth in porous materials: I The crystallization pressure of large crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 282: 455 - 469.
- [14] STEIGER M, KIEKBUSCH J, NICOLAI A. An improved model incorporating Pitzer's equations for calculations of thermodynamic properties of pore solutions implemented into an effect program code[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22: 1841 - 1850.

## 大型专业辞书《水利大辞典》出版发行

一部系统介绍当代水利科学技术的大型专业辞书《水利大辞典》，在纪念水利高等教育百年、河海大学百年校庆的前夕正式发行了。该书是在上海辞书出版社 1994 年出版的《水利词典》基础上，由河海大学组织学校相关学科教师百余人精心编纂修订而成的，由姜弘道教授、唐洪武教授担任执行主编。这是进入 21 世纪以来，我国总结水利科技发展、普及水利科技知识、传承水利科技文化的又一标志性力作。该书特别适合具有中等以上文化程度的水利工作者以及中等以上水利类专业的教师、学生阅读和使用。

新出版的《水利大辞典》内容全面、选词科学、取材精当、格式规范、资料新而丰富。具有如下学科特点和时代特色：

(1) 反映现代水利新发展。在基本保持原《水利词典》框架的基础上，根据水利事业的新发展，由原来的 5 类 23 个分支调整为 8 类 31 个分支。调整后的分支学科包括：水利(综合)，水利史；水文学，水资源，地质；工程力学，水力学，河流动力学，土力学，岩石力学，工程结构，水工材料；防洪抗旱，农业水利，城市水利，给水排水工程，水力发电，水电设备，水工建筑物，水利工程施工；海洋水文学与海岸动力学，港口，航道，河口，海岸；环境水利，生态水利；水利经济，水利管理；水利科技，水利信息化，水文化等，很好地体现了现代水利的新发展。

(2) 词目更新与时俱进。在不大量增加《水利词典》词目总量和总字数的基础上，通过删旧增新，重点增加了近 20 年来水利学科与水利事业新领域中的词目，新增词目近三分之

一。

(3) 释文内容修订更新。对 20 年前出版的《水利词典》老词条逐条仔细审视，决定取舍，更新内容，核准数据，反复修改。全书共收编词目 4700 余条，计 142 万字。

(4) 附录资料数据可靠。全书 12 个附录，除保留《中国分区水资源总量估算》外，其余附录均根据最新资料和数据作了大幅度的修订和更新，包括中国水利史略年表、中国总库容 20 亿 m<sup>3</sup> 以上的水电站大型水库、中国高度 100 m 以上的大坝、中国装机容量 25 万 kW 以上的抽水蓄能电站、中国装机容量 25 万 kW 以上的水电站、国外总库容大于 300 亿 m<sup>3</sup> 立方米上的大型水库、国外高度 220 m 以上的大坝、国外装机容量 200 万 kW 以上的水电站、国外主要港口、中国主要水利及相关期刊、国外主要水利及相关期刊。此外还附有词目英汉对照索引、词目音序索引。

《水利大辞典》的出版是一项充分体现河海大学专业特色的文化工程，又是一项专业面宽、参编人员多、十分耗时费力的编纂工作。有近 60 位河海大学各学科的学术带头人、学术骨干参加了《水利大辞典》的编撰和修订；有 80 位专家，包括特聘的校外专家，参加了《水利大辞典》的三轮审稿。他们严谨治学、字斟句酌、反复推敲、认真审订，为保证和提升《水利大辞典》的编纂质量发挥了关键性的作用。

《水利大辞典》每册定价 298.00 元。邮购联系：021-62676853 上海辞书出版社邮购部。

(河海大学《水利大辞典》修编办公室 供稿)