

DOI: 10.11779/CJGE201504023

# 综合考虑盐胀和冻胀时硫酸盐渍土体积变化关系式的建立

牛玺荣<sup>1, 3</sup>, 高江平<sup>2</sup>

(1. 山西大学土木工程系, 山西 太原 030013; 2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;  
3. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 为了摸清硫酸盐渍土在降温过程中产生冰晶和引起盐胀的剧烈反应期内的体积变化规律, 假定土体中芒硝与冰晶独立存在, 并认为土体体积变化由三部分体积增加和三部分体积减少引起, 根据溶质守恒定律, 推求了考虑盐胀和冻胀综合影响下硫酸盐渍土的体积变化关系式, 发现剧烈反应期内土体体积变化主要由原始孔隙率  $n$ 、降温前后未冻水体积含量  $\theta_{u1}$  和  $\theta_{u2}$  与降温前后的硫酸钠溶解度  $r_1$  和  $r_2$  所决定。利用自行研制的恒温冷浴土壤试验系统, 观测了人工掺配硫酸盐渍土在降温过程中的体积变化; 采用冻结温度试验确定了土样冻结过程中的未冻水含量, 并引入未结晶水含量的概念, 计算了土样降温过程中的累计盐(冻)胀率, 通过分析比较土样体积变化率实测值和计算值, 验证了关系式的合理性和适用性。

**关键词:** 硫酸盐渍土; 盐胀; 冻胀; 溶质守恒; 定量关系

中图分类号: TU448

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0755-06

**作者简介:** 牛玺荣(1976-), 男, 山西高平人, 博士, 在站博士后, 副教授, 高级工程师, 主要从事道路岩土工程与特殊地区筑路技术方面的教学与研究工作。E-mail: niuxirong@sxu.edu.cn。

## Expression for volume change of sulphate saline soil considering salt expansion and frost heave

NIU Xi-rong<sup>1, 3</sup>, GAO Jiang-ping<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to clearly comprehend the volume change law of sulphate saline soil in the intense reaction period of producing ice crystals and causing salt expansion, assuming that the ice crystals and the mirabilite in the soil exist independently and the volume change of soil is composed of three increased parts and three reduced parts, and based on the law of conservation of solute, an expression for the volume change of sulphate saline soil considering salt expansion and frost heave is proposed. It is found that the expression for the volume change in the intense reaction period is largely decided by the initial void ratio  $n$ , unfrozen water content  $\theta_{u1}$  and  $\theta_{u2}$  before and after being cooled, and solubility  $r_1$  and  $r_2$  before and after being cooled. The volume of artificial sulphate saline soil samples is investigated using the test system of soil under controlled temperature. The unfrozen water content in the process of freezing is determined by the freezing temperature tests, and the concept of no precipitated water content (NPWC) is given, and the cumulative volume change rate of soil samples during being cooled is calculated. The rationality and applicability of the proposed expression is verified through analysis and comparison between the measured and calculated volume change rates of soil samples.

**Key words:** sulphate saline soil; salt expansion; frost heave; solute conservation; quantitative expression

## 0 引 言

盐渍土广泛分布在中国西北干旱地区的新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古等地势低平的盆地和平原中, 华北平原、松辽平原、大同盆地以及青藏高原的一些

湖盆洼地中也有分布, 另外滨海地区的辽东湾、渤海

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578015); 西部交通建设科技项目(20033187950, 20033187951)

收稿日期: 2014-05-30

湾、莱州湾、海州湾、杭州湾以及台湾等诸海岛沿岸,也有相当面积存在<sup>[1]</sup>,盐渍土分布面积为 19.08 万 km<sup>2</sup>,约占国土面积的 2%。盐渍土在不同地区表现出不同的工程特性,盐湖地区盐渍土的溶陷性和盐胀性均不明显,滨海盐渍土以腐蚀性为主,而干旱区盐渍土的溶陷和盐胀问题最为突出。造成盐渍土工程特性地区差异主要由盐渍土中盐分类型的不同所造成。

西北干旱区的盐渍土以硫酸盐渍土为主,其盐胀性对公路、铁路、房屋等基础设施的危害极大。以 20 世纪五、六十年代西部公路和铁路建设为契机,中国研究人员对硫酸盐渍土路基的盐胀特性和机理进行了大量研究工作<sup>[2-7]</sup>,并结合冻土研究成果取得了阶段性的研究成果<sup>[1,8-10]</sup>,为深入研究硫酸盐渍土的工程性状奠定了理论基础。

硫酸盐渍土中的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 在水分运动和降温条件下,与 10 个 H<sub>2</sub>O 结合生成芒硝 (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O),且土中水分在负温下还生成冰晶,其最终体积变形由冻胀和盐胀双重作用所致;因为这种作用,使得研究硫酸盐渍土在降温条件下的体积变化规律成为极其复杂的事情,因此,以往研究人员很少综合考虑盐胀和冻胀的双重作用来定量描述硫酸盐渍土的体积变化。本文将硫酸盐渍土体积膨胀分为降温条件下冰晶产生引起的冻胀和盐分析出产生 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 引起的盐胀两部分相对独立的成分,且认为在不同的降温区间,这两部分占据不同的主导地位<sup>[11]</sup>,并以西安黄土掺配硫酸钠溶液制成的硫酸盐渍土为研究对象,在文献[11]建立第 I 温度区间盐胀关系的基础上,综合考虑盐胀和冻胀影响探讨盐渍土在第 II 降温区间的体积变化。

## 1 条件假设和计算模型

产生冰晶和引起盐胀的剧烈反应期发生在第 II 降温区间 (10℃~−3℃)<sup>[11]</sup>,此阶段的冻胀和盐胀两部分的体积变化同时产生,且相互影响和制约,盐胀和冻胀各自计算条件假定的合理性直接关系到两部分体积变化计算的准确性。

在第 II 降温区间,土体发生冻胀时,可认为盐析在极短瞬间即完成,在计算这一过程盐渍土体积变化时,分别考虑盐胀与冻胀的体积变化,不考虑盐胀与冻胀相互耦合作用时体积的混合过渡,即不考虑盐分存在于冰晶和冰晶存在于芒硝中的互相掺杂的复杂情况。

在土体温度从 10℃ 降至 −3℃ 的区间内,通过一系列假定<sup>[11]</sup>,土体体积变化主要由 3 部分体积增加和 3 部分体积减少引起 (如图 1): ① 由于硫酸钠溶液溶解度降低,芒硝生成引起的体积增加; ② 冰晶体积含量

的增加; ③ 冰晶析出盐分生成芒硝体积的增加; ④ 未冻水中芒硝生成时结合 10 个 H<sub>2</sub>O 分子而引起的原有未冻水体积的减小; ⑤ 冰晶析出盐分生成芒硝需要结合 10 个 H<sub>2</sub>O 分子而引起的原有未冻水体积的减小 (假定此部分芒硝中的结合水来自未冻水); ⑥ 增加冰晶需要的原来未冻水体积的减少。

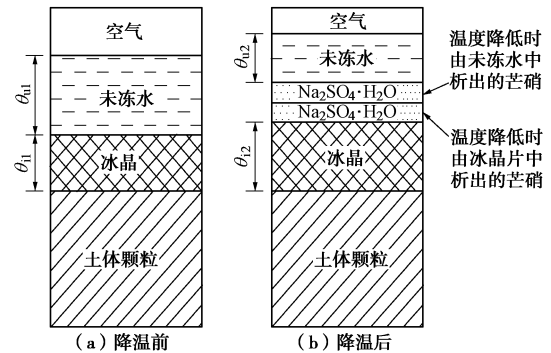


图 1 考虑冻胀和盐胀示意图

Fig. 1 Salt expansion for sulphate saline soil

## 2 关系式推导

设土体在第 II 降温区间降温前后冰的体积含量分别为  $\theta_{i1}$  和  $\theta_{i2}$ , 未冻水的体积含量分别为  $\theta_{u1}$  和  $\theta_{u2}$  (L/L); 降温前后土体盐分浓度分别为  $C_1$  和  $C_2$  (mol/L); 土体中盐溶液在降温前后的溶解度分别为  $r_1$  和  $r_2$  (g/100g); 水的密度为  $\rho_w$ , 冰晶的密度为  $\rho_i$  (g/L)。

在第 II 降温区间温度降低时增加的冰晶需要的液态水体积可表示为

$$V_{w1} = \frac{\rho_i}{\rho_w}(\theta_{i2} - \theta_{i1}), \quad (1)$$

则冰晶析出的盐产生 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 需要的结合水体积为

$$V_{w2} = 180C_1 \frac{\rho_i}{\rho_w^2}(\theta_{i2} - \theta_{i1}), \quad (2)$$

则未冻水溶解度降低产生 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 需要的结合水体积为

$$V_{w3} = \theta_{u1} - \theta_{u2} - V_{w1} - V_{w2} \\ = \theta_{u1} - \theta_{u2} - \frac{\rho_i}{\rho_w}(\theta_{i2} - \theta_{i1}) - 180C_1 \frac{\rho_i}{\rho_w^2}(\theta_{i2} - \theta_{i1}), \quad (3)$$

故降温后由于盐溶液 (未冻水) 溶解度降低产生的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 摩尔数为

$$M_1 = \frac{\rho_w}{180} \left[ \theta_{u1} - \theta_{u2} - \frac{\rho_i}{\rho_w}(\theta_{i2} - \theta_{i1}) - 180C_1 \frac{\rho_i}{\rho_w^2}(\theta_{i2} - \theta_{i1}) \right], \quad (4)$$

而冰晶析出的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 摩尔数为

$$M_2 = C_1 \frac{\rho_i}{\rho_w} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) \quad (5)$$

由溶质守恒定律可得

$$\begin{aligned} \theta_{u1} C_1 &= \theta_{u2} C_2 + M_1 + M_2 \\ &= \theta_{u2} C_2 + \frac{\rho_w}{180} \left[ \theta_{u1} - \theta_{u2} - \frac{\rho_i}{\rho_w} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) - 180 C_1 \frac{\rho_i}{\rho_w^2} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) \right] + \\ &\quad C_1 \frac{\rho_i}{\rho_w} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) \quad (6) \end{aligned}$$

即

$$\theta_{u1} C_1 = \theta_{u2} C_2 + \frac{\rho_w}{180} (\theta_{u1} - \theta_{u2}) - \frac{\rho_i}{180} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) \quad (7)$$

降温前未冻水和已冻水体积之和为

$$V_1 = \theta_{u1} + \theta_{i1} \quad (8)$$

由式(4)可得盐溶液(未冻水)溶解度降低产生的  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  的体积为

$$\begin{aligned} V_{N_{a1}} &= \frac{322\rho_w}{180\rho_N} \left[ \theta_{u1} - \theta_{u2} - \frac{\rho_i}{\rho_w} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) - \right. \\ &\quad \left. 180 C_1 \frac{\rho_i}{\rho_w^2} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

式中,  $\rho_N$  为芒硝的密度,  $\rho_N = 1480 \text{ g/L}$ 。

由式(5)可得冰晶析出的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  生成芒硝的体积为

$$V_{N_{a2}} = \frac{322\rho_i C_1}{\rho_w \rho_N} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) \quad (10)$$

则降温后未冻水、芒硝和冰晶的体积之和为

$$\begin{aligned} V_2 &= \theta_{u2} + \theta_{i2} + V_{N_{a1}} + V_{N_{a2}} \\ &= \theta_{u2} + \theta_{i2} + \frac{322\rho_i C_1}{\rho_w \rho_N} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) + \\ &\quad \frac{322\rho_w}{180\rho_N} \left[ \theta_{u1} - \theta_{u2} - \frac{\rho_i}{\rho_w} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) - 180 C_1 \frac{\rho_i}{\rho_w^2} (\theta_{i2} - \theta_{i1}) \right] \\ &= \theta_{u2} + \theta_{i2} + \frac{322\rho_w}{180\rho_N} (\theta_{u1} - \theta_{u2}) - \frac{322\rho_i}{180\rho_N} (\theta_{i1} - \theta_{i2}), \quad (11) \end{aligned}$$

故土体降温前后固相和液相之和的体积变化为

$$\begin{aligned} \Delta &= V_2 - V_1 \\ &= \theta_{u2} + \theta_{i2} + \frac{322\rho_w}{180\rho_N} (\theta_{u1} - \theta_{u2}) - \frac{322\rho_i}{180\rho_N} (\theta_{i1} - \theta_{i2}) - (\theta_{u1} + \theta_{i1}) \\ &= \left( \frac{322\rho_w}{180\rho_N} - 1 \right) (\theta_{u1} - \theta_{u2}) - \left( \frac{322\rho_i}{180\rho_N} - 1 \right) (\theta_{i2} - \theta_{i1}), \quad (12) \end{aligned}$$

联立式(7)和式(12), 消去  $(\theta_{i2} - \theta_{i1})$ , 并将  $C_1 = \frac{r_1 \rho_w}{14200}$

和  $C_2 = \frac{r_2 \rho_w}{14200}$  代入, 可得

$$\Delta = \theta_{u1} \left( \frac{322\rho_w r_1}{14200\rho_N} + \frac{\rho_w}{\rho_i} - \frac{180\rho_w r_1}{14200\rho_i} - 1 \right) -$$

$$\theta_{u2} \left( \frac{322\rho_w r_2}{14200\rho_N} + \frac{\rho_w}{\rho_i} - \frac{180\rho_w r_2}{14200\rho_i} - 1 \right) \quad (13)$$

若土体降温前空隙率为  $n$  (L/L), 则最终的综合考虑冻胀和盐胀影响时硫酸盐渍土的体积膨胀率为

$$\begin{aligned} \Delta &= \theta_{u1} \left( \frac{322\rho_w r_1}{14200\rho_N} + \frac{\rho_w}{\rho_i} - \frac{180\rho_w r_1}{14200\rho_i} - 1 \right) - \\ &\quad \theta_{u2} \left( \frac{322\rho_w r_2}{14200\rho_N} + \frac{\rho_w}{\rho_i} - \frac{180\rho_w r_2}{14200\rho_i} - 1 \right) - (n - \theta_{u1}) \quad (14) \end{aligned}$$

假定水、冰、芒硝的密度为常数, 则由式(14)可知, 综合考虑盐胀和冻胀引起硫酸盐渍土的体积变化与土体原始孔隙率  $n$ , 降温前后未冻水含水率  $\theta_{u1}$  和  $\theta_{u2}$ , 降温前后的硫酸钠溶解度  $r_1$  和  $r_2$  有关。

### 3 关系式验证

#### 3.1 室内试验

在室内配制硫酸钠溶液, 将其掺配到素土样中, 制成不同含水率的硫酸盐渍土样, 进行变温试验, 观测土样的体积变化情况, 通过比较试验观测值与本文关系式计算值的差异, 来验证综合考虑盐胀和冻胀影响下硫酸盐渍土盐(冻)胀关系式的合理性。

选取西安南郊曲江附近素黄土, 其含盐量忽略不计, 基本物理力学性能如表1。按  $12^\circ\text{C}$  硫酸钠溶解度配制饱和硫酸钠溶液, 其浓度为  $0.5 \text{ mol/L}$ 。

表1 黄土试样基本物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of soil sample

类别	密度	液限	塑限	最大	最佳	CBR
	$/(g \cdot cm^{-3})$	$\%$	$\%$	干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 $\%$	
低液限粉土	2.657	31.6	23.1	1.91	11.2	5.8

室内变温试验采用了自行研发的恒温冷浴土壤试验系统。系统主要由土壤试筒、低温冷浴、制冷管、百分表等组成。试筒高度为  $60 \text{ cm}$ , 内径为  $20 \text{ cm}$ , 见图2, 3。试样高度为  $30 \text{ cm}$ , 通过配套的试模安装在试筒中。

土样未冻水含量采用文献[10]中的冻结温度法获得。未冻水含量按下式计算:

$$\theta_u = aT^{-b} \quad (15)$$

$$a = \theta_L T_L^b \quad (16)$$

$$b = \frac{\ln \theta_L - \ln \theta_p}{\ln T_p - \ln T_L} \quad (17)$$

式中,  $\theta_u$  为未冻水含量( $\%$ ),  $\theta_p$  为塑限含水率( $\%$ ),  $\theta_L$  为液限含水率( $\%$ ),  $a$  和  $b$  为与土的性质相关的常数,  $T$  为温度绝对值( $^\circ\text{C}$ ),  $T_p$  为塑限含水率时的冻结温度绝对值( $^\circ\text{C}$ ),  $T_L$  为液限含水率时的冻结温度绝

对值 (°C)。



图 2 恒温冷浴土壤试验系统

Fig. 2 Test equipment of soil under controlled temperature

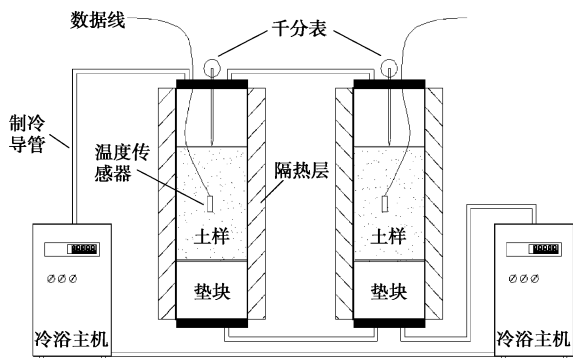


图 3 恒温冷浴土壤试验系统原理图

Fig. 3 Test equipment of soil under controlled temperature

通过冻结温度试验,得到土样的 $T_L$ 为 $-0.465^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p$ 为 $-0.544^{\circ}\text{C}$ , 则 $a=10.962$ ,  $b=1.384$ 。

硫酸盐渍土土样变温试验过程为: ①配制浓度为 $0.5\text{ mol/L}$ 的硫酸钠溶液; ②在最佳含水率附近, 将溶液与素土充分拌合, 制作硫酸盐渍土, 闷土 $12\text{ h}$ ; ③将硫酸盐渍土分层夯实至试模中, 分层厚度按 $10\text{ cm}$ 控制; ④在试样中部埋设温度传感器; ⑤称量试模与硫酸盐渍土总重, 并取样烘干检测土样实际含水率; ⑥将装有土样的试模安装在试筒中, 并与低温冷浴连接; ⑦接通温度传感器与数据采集仪, 观测初始读数并校准; ⑧检查恒温冷浴试验系统连接正常后, 设定降温速率为 $0.5^{\circ}\text{C/h}$ , 开机运行; ⑨观测试筒中土样的温度并计算未冻水含量。

本文制作了 3 个不同压实度的土样, 进行了降温试验, 其基本数据见表 2。

表 2 夯实硫酸盐渍土实测数据

Table 2 Physical properties of sulphate saline soil sample

土样编号	重量	体积	压实度	含盐量
	含水率/%	含水率/%	/%	/%
T1	11.5	21.2	96.6	0.81
T2	12.4	22.3	94.1	0.87
T3	10.8	19.2	93.2	0.76

按前述试验步骤, 将恒温冷浴从 $12^{\circ}\text{C}$ 降至 $-4^{\circ}\text{C}$ , 观测试模内土样的温度和百分表读数, 根据百分表读数, 计算试样的盐(冻)胀率, 如图 4 所示。由图可看出, 在土体温度由 $12^{\circ}\text{C}$ 降至 $-4^{\circ}\text{C}$ , 其体积变化分为 4 个阶段:  $12^{\circ}\text{C}\rightarrow 6^{\circ}\text{C}$ 区间, 由于盐溶液溶解度持续降低导致芒硝产生, 土样体积呈线性增长, 膨胀率维持在 $0.3\%$ 左右;  $6^{\circ}\text{C}\rightarrow 2^{\circ}\text{C}$ 区间, 盐溶液溶解度降低速度减缓, 土样体积膨胀幅度减缓, 膨胀率由 $0.3\%$ 降至 $0.15\%$ ;  $2^{\circ}\text{C}\rightarrow -2^{\circ}\text{C}$ 区间, 土体的膨胀包括了芒硝析出和冰晶产生的双重作用, 土样膨胀率增大, 膨胀率约为 $0.4\%$ ;  $-2^{\circ}\text{C}\rightarrow -4^{\circ}\text{C}$ 区间, 随着土体温度接近于盐分晶体析出的下限温度<sup>[12]</sup>, 土样膨胀幅度逐渐减缓, 膨胀率为 $0.1\%\sim 0.15\%$ 。在降温过程中, 土样初始含水率和压实度的不同导致了累计盐(冻)胀率的差异, 对于压实度较接近的 T2 和 T3 土样, 同一温度下初始含水率大的 T2 土样膨胀率亦大, 温度降至 $-4^{\circ}\text{C}$ 时, 初始体积含水率为 $22.3\%$ 和 $19.2\%$ 的土样体积累计膨胀率分别为 $2.1\%$ 和 $1.8\%$ ; 由于初始含水率、压实度和含盐量对体积变化的交互影响, 使得 T1 和 T2 土样在降温过程中累计体积变化率较为接近。

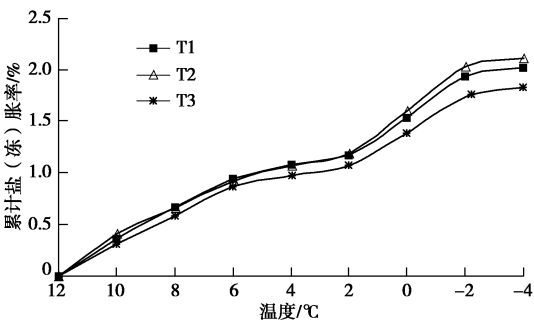


图 4 降温时累计盐(冻)胀率变化情况

Fig. 4 Variation of cumulative salt (frozen) expansion rates during cooling

### 3.2 盐(冻)胀率计算

为了确定盐渍土正温区间在不同温度时的“未冻水含量”, 并考虑计算上的方便和统一, 相对于土体在负温时的未冻水含量, 本文提出未结晶水含量(广义未冻水含量)的概念, 将其定义为盐渍土在降温过程中未被盐分结晶析出的水的含量(除盐晶结合水以外所有的结合水和自由水), 并假定硫酸盐渍土正温时的未结晶水含量与温度呈线性关系, 其关系由初始含水率和负温时未冻水含量稳定值所决定。对于本文制作的土样, 认为其在 $-4^{\circ}\text{C}$ 时未冻水含量达到稳定值<sup>[13]</sup>, 由此获得土样的未结晶水含量与温度的关系如图 5。

对于土样负温时的未冻水含量与温度的关系, 通过前述计算方法获得, 如图 6。为了计算上的连续性,

认为 0℃时的未冻水含量与未结晶水含量相等。

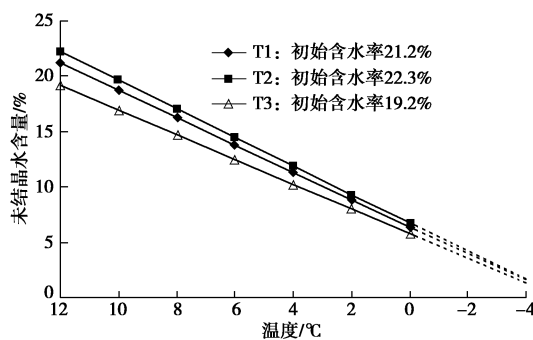


图5 未结晶水含量与温度的关系

Fig. 5 Relationship between no precipitated water and temperature

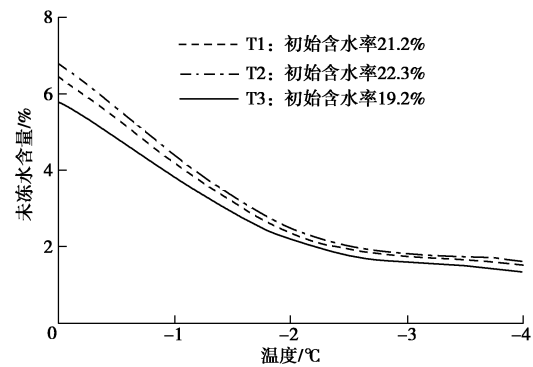


图6 未冻水含量与温度的关系

Fig. 6 Relationship between unfrozen water and temperature

为了验证本文建立的盐（冻）胀关系式的合理性，将土样不同温度时的未结晶水含量和未冻水含量带入式（14），计算不同初始含水率硫酸盐渍土在不同温度的盐胀率，并与实测盐胀率进行比较。计算时，认为 $\rho_w=1000\text{ g/L}$ ， $\rho_i=900\text{ g/L}$ 和 $\rho_N=1480\text{ g/L}$ ，并假设土体经充分压实后，土体颗粒之间除盐溶液外，孔隙忽略不计，即 $n-\theta_{u1}=0$ 。不同温度硫酸钠的溶解度通过表3内插得到，为了计算方便，认为硫酸钠负温时的溶解度等于零。

表3  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ( $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) 溶解度

Table 3 Solubility of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  or  $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$

温度/℃	0	2	4	6	8	10	12
溶解度/g	7.0	8.4	10.6	12.0	13.5	14.5	16.0
	3.1	3.7	4.7	5.3	6.0	6.4	7.1

注：溶解度数据中，横线上数据为  $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$  的溶解度，横线下为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的溶解度。

图7为盐（冻）胀率实测值与计算值的比较，由图可看出试样盐（冻）胀率计算值与实测值数据大小与变化规律基本吻合。因为在正温区间对盐渍土中未结晶水含量进行了线性假定，使得计算值与实测值在6℃→0℃区间的偏差较大，由于上覆土层对盐（冻）胀的抑制和消减作用，使得小于6℃时的盐胀率实测值小于计算值；由图可看出，由于盐胀率误差的累积，

计算值与实测值偏差随温度降低而增大，在-4℃时，初始含水率为21.2%，22.3%和19.2%的试样累计盐胀率的偏差分别达到了0.36%，0.37%和0.32%，可知偏差随着土体初始含水率的增大而增大，造成如此结果与试验期间试验装置密封不严导致水分损失有关，初始含水率越大水分损失越明显。

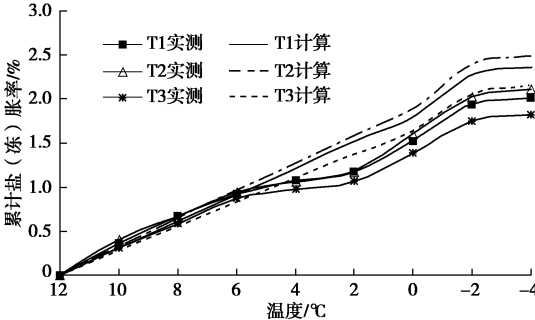


图7 降温累计盐胀率计算值与实测值比较

Fig. 7 Comparison between computed cumulative salt expansions and test values during 12℃ ~ -4℃

4 结论与展望

在推求考虑盐胀和冻胀综合影响下的体积变化关系式的基础上，通过室内试验验证后，得出如下结论：

（1）当硫酸盐渍土中初始盐溶液浓度接近饱和时，土体盐（冻）胀率变化与土体原始孔隙率 $n$ 、降温前后未冻水含量 $\theta_{u1}$ 和 $\theta_{u2}$ 、降温前后的硫酸钠溶解度 $r_1$ 和 $r_2$ 有关。

（2）土体温度从12℃降至-4℃时，累计盐（冻）胀率经过加剧→减缓→再加剧→再减缓的过程。0℃左右时由于土体冰晶产生，使得试样包含了盐胀和冻胀两部分体积膨胀，累计盐（冻）胀率增加幅度最大；土体温度接近于盐分晶体析出的下限温度，即-4℃时体积变化基本稳定。

（3）所建立的体积变化关系式，能较合理反映硫酸盐渍土在12℃→-4℃降温区间内的盐胀和冻胀变化规律。

本文建立的综合考虑盐胀和冻胀影响的体积变化关系式在一系列假定条件下获得，其应用具有局限性。尚需通过理论和实证的深入研究，包括：①本文提出的未结晶水含量合理性验证及其测定；②考虑盐渍土中非饱和盐溶液存在、上覆荷载、降温速率等影响时体积变化关系式的修正；③考虑盐渍土路基实际边界条件时路基横向和竖向体积变化的分担比例等，进一步摸清盐渍土在不同降温区间内盐胀和冻胀的变化规律。深入认识盐渍土地区道路工程的病害机理，并提出具有针对性的病害处治对策，对提高我国特殊地区公路修筑技术水平具有重要的理论和实践意义。

## 参考文献:

- [1] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. (XU You-zai. Foundation of saline soil[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 陈肖柏, 邱国庆, 王雅卿, 等. 重盐土在温度变化时的物理、化学性质和力学性质[J]. 中国科学(A辑), 1988(2): 245 - 254. (CHEN Xiao-bo, QIU Guo-qing, WANG Ya-qing, et al. The physical chemical and mechanical properties in the deep saline soil when temperature is changing[J]. Science in China (Series A), 1988(2): 245 - 254. (in Chinese))
- [3] 高江平, 吴家惠, 杨荣尚. 硫酸盐渍土盐胀特性各影响因素交互作用规律的分析[J]. 中国公路学报, 1997, 10(1): 10 - 15. (GAO Jiang-ping, WU Jia-hui, YANG Rong-shang. Analysis of interaction laws of all influencing factors upon salt heaving properties of the sulphate salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(1): 10 - 15. (in Chinese))
- [4] 黄立度, 席元伟, 李俊超. 硫酸盐渍土道路盐胀病害的基本特征及其防治[J]. 中国公路学报, 1997, 10(2): 39 - 47. (HUANG Li-du, XI Yuan-wei, LI Jun-chao. The feature and prevention of the highway salt dilating distress in the vitriol salinized soil area[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(2): 39 - 47. (in Chinese))
- [5] 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): 37 - 42. (GAO Jiang-ping, WU Jia-hui. Study on laws of the single factor effect upon heaving properties of the sulphated salty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 37 - 42. (in Chinese))
- [6] 吴青柏, 孙涛, 陶兆祥, 等. 恒温下含硫酸钠盐粗颗粒土盐胀特征及过程研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 239 - 241. (WU Qing-bai, SUN Tao, TAO Zhao-xiang, et al. Experimental studies on the salt expansion of coarse grain saline soils under constant temperature[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 239 - 241. (in Chinese))
- [7] 牛玺荣, 李志农, 高江平. 盐渍土盐胀特性与机理研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 163 - 168. (NIU Xi-rong, LI Zhi-nong, GAO Jiang-ping. Progress of the study on salt expansion characteristic and mechanism[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(1): 163 - 168. (in Chinese))
- [8] 铁道部第一勘察设计院. 盐渍土地区铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988. (The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Railway engineering in saline soilregions[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988. (in Chinese))
- [9] 罗伟甫. 盐渍土地区公路工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980. (LUO Wei-fu. Highway engineering in saline soilregions[M]. Beijing: China Communications Press, 1980. (in Chinese))
- [10] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [11] 牛玺荣, 高江平. 硫酸盐渍土纯盐胀期盐胀关系式的建立[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1058 - 1061. (NIU Xi-rong, GAO Jiang-ping. Deduction of salt expansion expression during pure salt expansion period of sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1058 - 1161. (in Chinese))
- [12] 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 sulphate solution and sodium sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2090 - 2096. (in Chinese))
- [13] 张立新, 徐学祖, 陶兆祥. 含硫酸钠冻土的未冻水含量[C]// 第五届全国冰川冻土学大会论文集. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 693 - 698. (ZHANG Li-xin, XU Xue-zu, TAO Zhao-xiang. Unfrozen water content of sulphate saline frozen[C]// Proceeding of the 5th Chinese Conference on Glaciology and Geocryology. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 693 - 698. (in Chinese))