

DOI: 10.11779/CJGE201604019

# 路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验研究

包卫星<sup>1, 2, 3</sup>, 张莎莎<sup>4</sup>

(1. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100083; 3. 新疆交通建筑管理局, 乌鲁木齐 830049;

4. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 砂类硫酸盐及亚硫酸盐渍土广泛分布于中国西部地区, 研究其作为路堤填料的可用性, 可充分利用当地资源和节约建设资金。以路基填筑标准及合理的防排水设施为前提条件, 基于 5 mm 筛法配制盐分, 研究了不同含盐量水平下砂类盐渍土的盐胀变化特点和在冻融循环作用下砂类盐渍土体的融陷特性, 试验结果表明: 砂类亚硫酸盐渍土比砂类硫酸盐渍土的盐胀起胀温度和敏感温度区间低约 5℃; 对于 4 砂类硫酸盐渍土, 含盐量不大于 1% 时, 盐胀率小于 1.5%; 对于砂类亚硫酸盐渍土, 含盐量小于 2.3%~2.5% 时, 盐胀率小于 1%; 在冻融循环作用下, 砂类亚硫酸盐渍土具有较强的融(溶)陷特性; 路面容许变形量取 2 cm, 下路堤填筑厚度为 2.0 m 时, 砂类硫酸盐渍土的含盐量极限值为 1.0%, 砂类亚硫酸盐渍土的含盐量极限值为 2.3%。

**关键词:** 道路工程; 路基; 砂类盐渍土; 盐胀; 融陷率

中图分类号: TU44; U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)04-0734-06

**作者简介:** 包卫星(1979-), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事特殊土路基研究。E-mail: baowx@163.com。

## Experimental study on salt expansion and thawing subsidence properties of sandy saline soil

BAO Wei-Xing<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG Sha-sha<sup>4</sup>

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University,

Beijing 100083, China; 3. Xinjiang Management Bureau of Traffic Construction, Urumqi 830001, China; 4. School of Highway, Chang'an

University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In Northwest China, there is a large amount of sandy sulphate and sulfite saline soil. This saline soil can be used as embankment fill, which can make full use of local resources and save construction cost of highways. Taking the subgrade filling standards and reasonable drainage facilities as the prerequisite conditions, based on the soluble salt content preparation method of screening method of 5 mm, the salt expansion change characteristics of sandy saline soil from the single cooling tests and the thawing subsidence characteristics of sandy saline soil from the experiments on freeze-thaw cycles are studied under different salinity levels. It is shown that the inception temperature and sensitive temperature range of the sandy sulfite saline soil are 5℃ lower than those of the sandy sulphate saline soil. When the salt content is less than 1%, the salt expansion rate of sandy sulphate saline soil is less than 1.5%. When the salt content is less than 2.3%~2.5%, the salt expansion rate of sandy sulfite saline soil is less than 1.0%. Under several freeze-thaw cycles, the sandy sulfite saline soil has strong thawing subsidence characteristics. Under the conditions of allowable deformation of pavement being 2 cm and embankment thickness 2.0 m, the limit of sandy sulphate saline soil is 1.0% and the limit of sandy sulfite saline soil is 2.3% for subgrade fill.

**Key words:** road engineering; roadbed; sandy saline soil; salt expansion; thawing subsidence rate

## 0 引言

粗粒土具有压实性能好, 透水性能强, 填筑密度大, 沉陷变形小, 抗剪强度高, 承载力高等优良特性, 其已在高土石坝、公路路堤、高速铁路路基、建筑物地基、海岸港湾护岸、人工筑岛等工程中得到了广泛应用。其中, 级配良好的粗粒土尤其是砂类土通常是路堤填料的首选材料。

在中国西北地区, 砂类土分布面积广阔, 将其合理的加以利用可以保证公路工程的施工质量。但是, 由于西北地区的自然气候条件和地质因素, 使得当地

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209006); 新疆交通运输厅科技项目(2014-08); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(0009-2014G1211008); 长安大学基础研究支持计划专项基金项目

收稿日期: 2015-01-21

土体矿化度极高, 形成了大面积的盐渍化砂类土。而其中的易溶盐会因为温差变化与蒸发作用, 产生相态的改变。由已有研究资料可知<sup>[1-7]</sup>, 细粒盐渍土中水溶液中的盐分会因为环境条件变化而部分分离析出并结晶, 同时部分盐分将由暖区向冷区、湿区向干区迁移、聚集结晶, 使得土体积膨胀, 导致细粒盐渍土地区路基强度大幅度衰减, 变形加剧, 产生路基鼓胀、路面开裂、道路翻浆等病害现象。但是对砂类盐渍土而言, 由于其不同于细粒土的颗粒特征使得其工程特性与细粒盐渍土具有一定区别, 如果能将砂类盐渍土有效的加以利用, 则在西北地区修筑路基可以就地取材节约工程造价, 避免远运土和大量挖方土以维护生态环境平衡。

为了深入研究砂类盐渍土的路用性能, 本文在对现有盐胀和融(溶)陷试验仪器改造的基础上, 对级配良好的砂类盐渍土开展了降温作用下的盐胀试验和升温作用下的融(溶)陷试验, 以分析砂类盐渍土的公路工程特性, 为砂类盐渍土能够应用于实际工程提供理论基础。

1 砂类盐渍土工程特性试验方案

1.1 试验土样配制

为了研究砂类盐渍土的路用性能, 并使试验土样具有广泛的代表性, 根据细粒土含量的极限值 15%和 50%, 分别以细粒土含量在 15%左右的含细粒土砂和细粒土含量在 50%左右的细粒土质砂配制级配良好的试验土样。

试验土样主要级配参数及击实试验结果如表 1 所示。

表 1 土样级配参数和击实试验结果

Table 1 Gradation parameters and test results of compaction		
土类	细粒土质砂	含细粒土砂
不均匀系数 $C_u$	15	25
曲率系数 $C_s$	1.1	2.25
最大干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	2.13	1.98
最佳含水率 $w_{op}/\%$	8.40	11.00

1.2 盐胀试验方案

在西北地区, 砂类盐渍土中的盐分主要包括硫酸盐和亚硫酸盐两大类, 为了研究这两类盐渍土的不同含盐量对路基工程特性的影响, 以及充分发挥试验土样中盐分对盐胀量的促进作用, 根据这一特征本盐胀试验方案中设计了两大类盐渍土(即砂类硫酸盐渍土和砂类亚硫酸盐渍土), 其中根据已有研究成果<sup>[8]</sup>, 粗粒盐渍土中的易溶盐配置采用 5 mm 筛法, 即过 5 mm 筛的土体的含盐量(质量法)。

为了模拟路面结构和路床部分对盐渍土路基的抑制作用, 盐胀试验过程中试样土体表面附加 25 kPa 的

荷载(路面结构厚度按照 40 cm, 密度约  $2.4\times 10^3\text{ kg/m}^3$  取值, 路床部分厚度按照 80 cm, 密度约  $2.0\times 10^3\text{ kg/m}^3$  取值)。试验土样模拟实际路基的压实度标准 93%, 含水率以最佳含水率控制。盐胀试验方案如表 2 所示。

表 2 盐胀试验方案设计

Table 2 Experimental schemes of salt expansion	
土类	含盐量的变化/%
砂类硫酸盐渍土	0.3→0.5→0.8→1.1→1.4→1.7→2→2.3→2.6→2.9→3.2→3.5→4.1
砂类亚硫酸盐渍土(C <sub>L</sub> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> =0.5)	0.3→0.5→0.8→1.1→1.4→1.7→2→2.3→2.6→2.9→3.2→3.5→4.7
降温过程为: 25℃→20℃→15℃→10℃→5℃→0℃→-5℃→-10℃→-15℃; 每级降温持续时间 1 h; 降温结束后-15℃的恒温时间为 6 h。	

1.3 融(溶)陷试验方案

当盐渍土地基浸水以后, 会出现沉陷变形, 但是在路基排水系统设置合理的情况下, 粗粒盐渍土路基在没有外来水源补给情况下产生沉陷的主要原因<sup>[9-10]</sup>之一是降温 and 升温循环交替出现后导致的路基土体积的变化, 其会影响路基安全运营。所以为了模拟西北地区路基在经历夜晚降温及次日升温过程中路基土的融(溶)陷特性, 并评判该特性对路基使用功能的影响。融(溶)陷试验程序设计为: 设定低温-15℃, 持续降温 12 h, 升温采用自然升温亦持续 12 h, 此过程为一个周期, 如此往复共经历 10 个冻融周期, 记录试验土样的融(溶)陷量。试验土样按照最佳含水率及 93%的初始压实度配制。融(溶)陷试验土样中的盐分配制以盐胀试验结果为基础, 选择路基填土的容许含盐量限值为试验标准进行试验。

1.4 试验仪器设计

为了避免颗粒尺寸效应、提高试验精度和试验效率, 以高低温试验箱为基础, 设计了适用于砂类盐渍土的有侧向限制的盐胀和融(溶)陷试验装置。高低温试验箱的温控范围为-40℃~60℃, 可实现自动降温及升温并能够保持恒温, 盐胀试验装置(如图 1)的内径为 24.5 cm, 高为 25 cm; 融(溶)陷试验装置(如图 2)的内径为 28 cm, 高为 25 cm。

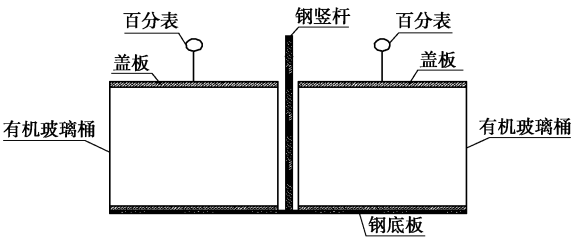


图 1 盐胀试验装置

Fig. 1 Test device of salt expansion

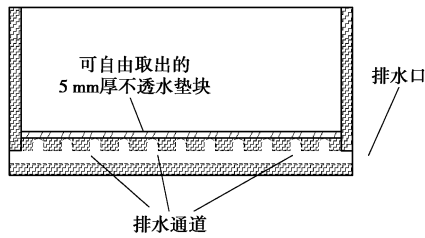


图2 融(溶)陷试验装置

Fig. 2 Test device of collapsibility

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 盐胀试验结果分析

在实际施工过程中,下路基的压实度和含水率均是按规范取值,盐胀量的大小直接影响路基容许含盐量的确定,此时盐分就成为产生盐胀的基础条件,为了研究盐胀随盐分改变的变化规律,分析盐分对盐胀率的影响,以确定容许含盐量,采用素土参配硫酸钠和氯化钠,在相同的降温条件下进行盐胀试验。通过逐级降温,不同含盐量的细粒土质砂硫酸盐渍土和亚硫酸盐渍土的盐胀试验曲线如图3,4所示。

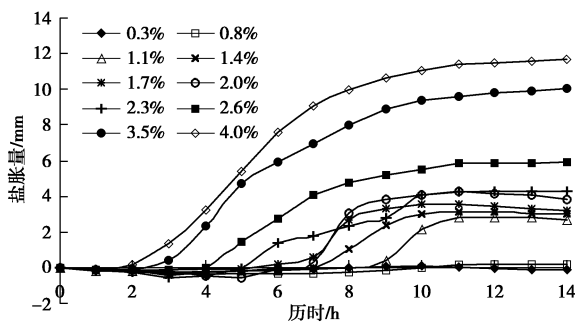


图3 细粒土质砂硫酸盐渍土盐胀量变化曲线

Fig. 3 Curves of salt expansion of fine sandy sulphate saline soil

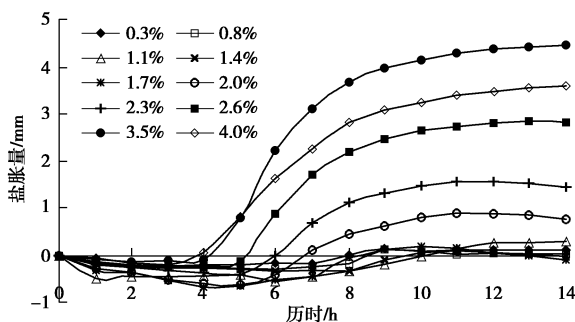


图4 细粒土质砂亚硫酸盐渍土盐胀量变化曲线

Fig. 4 Curves of salt expansion of fine sandy sulfite saline soil

从图3,4可以看出,随着含盐量的逐渐增大,盐胀量亦逐渐增大;含盐量越大,盐胀起胀温度越高;盐胀敏感温度区间与含盐量亦有直接关系,盐胀敏感温度区间随着含盐量的增大而逐渐升高。基于试验方案中降温过程的设定,对于细粒土质砂硫酸盐渍土,

当含盐量小于2%时,盐胀敏感温度区间为 $-5^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ ;当含盐量大于2%时,盐胀敏感温度区间为 $5^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 。对于细粒土质砂亚硫酸盐渍土,当含盐量小于2%时,盐胀敏感温度区间为 $-15^{\circ}\text{C}$ 左右;当含盐量大于2%时,盐胀敏感温度区间为 $0^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ 。

通过逐级降温,不同含盐量的含细粒土砂硫酸盐渍土和亚硫酸盐渍土的盐胀试验曲线如图5,6所示。

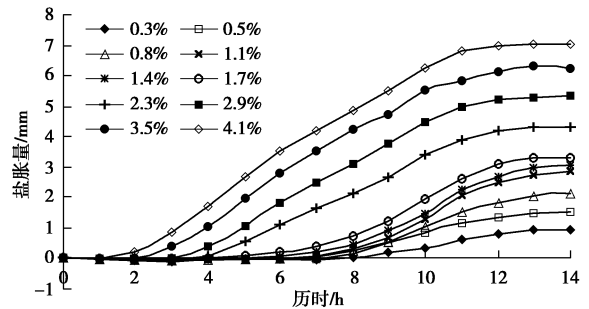


图5 含细粒土砂硫酸盐渍土盐胀量变化曲线

Fig. 5 Curves of salt expansion of fine-grained sand sulphate saline soil

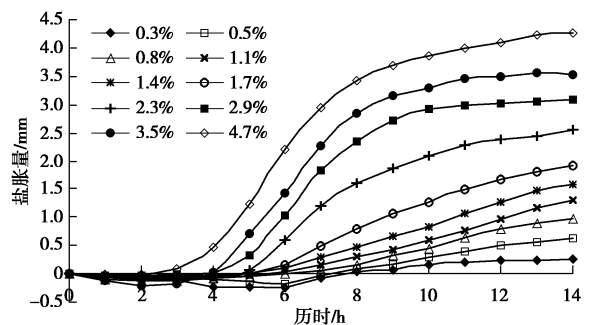


图6 含细粒土砂亚硫酸盐渍土盐胀量变化曲线

Fig. 6 Curves of salt expansion of fine-grained sand sulfite saline soil

从图5,6可以看出,两种砂类盐渍土均是随着含盐量的增大,盐胀量逐渐增大;盐胀起胀温度亦随着含盐量的增大而升高;盐胀敏感温度区间随着含盐量的增大亦逐渐升高。基于试验方案中降温过程的设定,对于含细粒土砂硫酸盐渍土,当含盐量小于2%时,盐胀敏感温度区间为 $-15^{\circ}\text{C}$ 左右;当含盐量大于2%时,盐胀敏感温度区间为 $5^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 。对于含细粒土砂亚硫酸盐渍土,当含盐量小于2%时,盐胀敏感温度区间为 $-15^{\circ}\text{C}$ 左右;当含盐量大于2%时,盐胀敏感温度区间为 $-5^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ 。

从上述不同土类的盐胀试验结果可以看出,含盐量的大小及其类型的变化对于砂类盐渍土的盐胀量、盐胀起胀温度、盐胀敏感温度区间都有直接影响,1%的含盐量是砂类硫酸盐渍土盐胀量增长突变的界限,2.3%的含盐量是砂类亚硫酸盐渍土盐胀量增长突变的界限。含细粒土砂(粗粒土相对较多)的盐胀起胀

温度和温度敏感区间相对较低。

在上覆 25 kPa 外荷载,最佳含水率和压实度 93% 的条件下,不同含盐量的砂类盐渍土盐胀率曲线如图 7 所示。

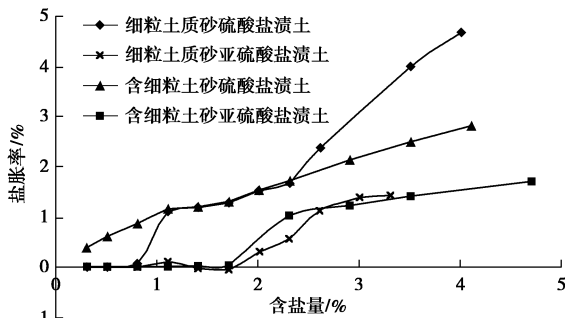


图 7 随着含盐量的变化砂类盐渍土盐胀率变化曲线

Fig. 7 Relationship between salt content and salt expansion

从图 7 可以看出,砂类硫酸盐渍土的盐胀量明显大于亚硫酸盐渍土的盐胀量;细粒土含量较多的细粒土质砂的盐胀量相对含细粒土砂的盐胀量大。对于砂类硫酸盐渍土,含盐量不大于 1% 时,盐胀率小于 1.5%;含盐量在 1%~2% 之间时,盐胀率增长相对平缓;含盐量超过 2%,盐胀率增长加快;试验工况下,含盐量小于 2%,盐胀率小于 2%,相对较小。对于砂类亚硫酸盐渍土,含盐量小于 2.3%~2.5% 时,盐胀率总体小于 1%;含盐量大于 2.3%~2.5% 时,盐胀率总体大于 1%。

导致天然粗颗粒盐渍土盐胀的主要因素是温度场、硫酸盐及氯化盐。其中硫酸盐对盐胀的贡献量最大,由于温度场的变化,盐分在溶液状态和结晶状态之间相互转化,当温度降低,硫酸盐溶解度减小,很容易形成过饱和溶液,盐分从中析出,成为含冰晶体,体积亦随之膨胀,使土体鼓胀,颗粒结构破坏,硫酸盐含量愈多,鼓胀愈严重。硫酸盐在结晶时能结合一定量水分子,这是导致盐胀的主要原因。在亚硫酸盐渍土中,氯化钠对于盐胀的作用在 0℃ 及负温以下较显著,氯化钠水合生成冰盐 ( $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 轻微地加剧土体膨胀,所以亚硫酸盐渍土的起胀温度相对较低,其盐胀量也没有硫酸盐渍土高。

## 2.2 融(溶)陷试验结果分析

由于本次融(溶)陷试验是为了模拟在路基防排水系统设置合理的情况下(即无外来水源补给,不同与常规溶陷工况),因温度变化而导致的路基土体积缩陷的特性。所以,本试验中盐渍土发生沉陷的主要原因是由于温度升高过程中,土体中的冰及盐结晶融化后而形成的渗流压力很小的静水,即水力梯度较小无渗流时(小于起始水力梯度),盐渍土体在静水作用下,土中部分或全部盐溶解,导致土体结构破坏,孔隙减

小,产生的融(溶)陷。

根据上述盐胀试验结果可知,对于砂类硫酸盐渍土,含盐量 1% 是盐胀率突变的节点;对于砂类亚硫酸盐渍土,含盐量 2.3% 是盐胀率突变的节点。为了分析该含盐量标准下砂类盐渍土的融陷特性,以确定砂类盐渍土用于路基的适用性,本次试验针对含盐量为 1% 的砂类硫酸盐渍土、含盐量分别为 2%, 2.3%, 2.5% 的细粒土质砂亚硫酸盐渍土和含细粒土砂亚硫酸盐渍土开展了冻融循环条件下的盐胀及融陷特性试验,试验结果如图 8~10 所示。

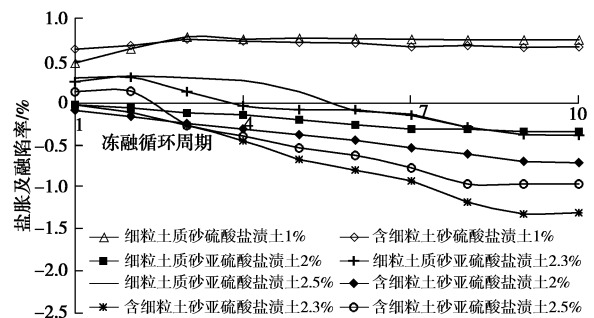


图 8 砂类盐渍土融陷率随冻融循环次数变化规律

Fig. 8 Variation of thawing subsidence rate with freeze-thaw cycles

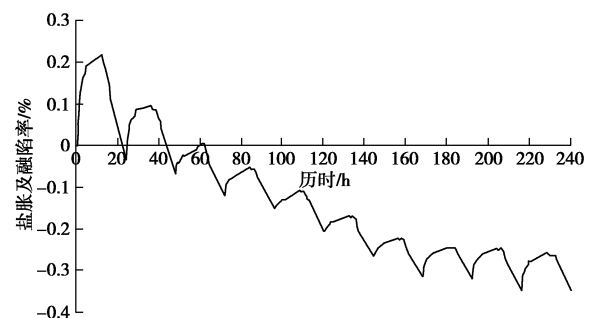


图 9 细粒土质砂亚硫酸盐渍土(含盐量 2%) 盐胀率及融陷率变化曲线

Fig. 9 Variation of thawing subsidence rate with freeze-thaw cycles for fine sandy sulfite saline soil

图 8 是不同含盐量和含盐类型的砂类盐渍土的盐胀率及融陷率随着冻融循环周期次数的增加而变化的规律图。从图中可知,随着外界温度的降低和升高而产生的冻融变化,含盐量 1% 的砂类硫酸盐渍土以盐胀累加为主;随着冻融循环次数的增加,砂类亚硫酸盐渍土以融陷累加为主。其中,在相同含盐量的条件下,含细粒土较多的细粒土质砂亚硫酸盐渍土的溶陷率小于含细粒土相对较少的含细粒土砂的融陷率,其原因是细粒土充填于颗粒孔隙之间,对于土体骨架具有一定的支撑作用;对于同一类土体而言,融陷率随着含盐量的增加先增大后减小,这主要是因为试验土

样均以最佳含水率配制,含盐量过大时,部分盐分是以固体或固体胶接形态存在与土体中间。

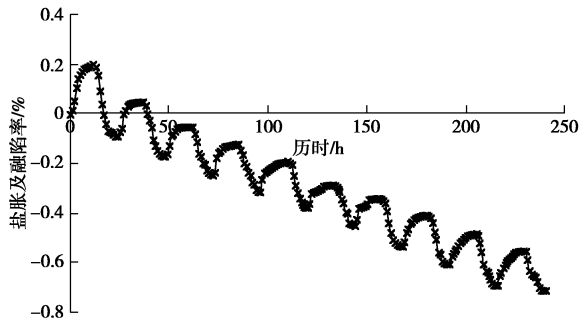


图 10 含细粒土砂亚硫酸盐渍土(含盐量 2%)盐胀率及融陷率变化曲线

Fig. 10 Variation of thawing subsidence rate with freeze-thawing cycles for fine-grained sand sulfite saline

图 9, 10 分别为含盐量 2% 的细粒土质砂亚硫酸盐渍土和含细粒土砂亚硫酸盐渍土的盐胀率及融陷率随时间增加的变化曲线。从图中可知,融陷率随着冻融循环次数的增加而增大,最后融陷率累加量的变化趋于平稳。

由试验结果可知,对于砂类亚硫酸盐渍土,在降温升温频率比较大时,其盐胀量较小,起主导作用的是融(溶)陷。在历经 10 个冻融循环周期后,最大融(溶)陷率接近于 1.5%。其主要原因是砂类亚硫酸盐渍土常呈现架空的点接触或胶结接触,具有不稳定的结构性,土体的孔隙度较大,盐胀过程中盐渍土结晶膨胀不仅部分的填充了砂类亚硫酸盐渍土之间的孔隙,而且还破坏了其土体结构<sup>[11-12]</sup>。

当温度自然升温时,砂类亚硫酸盐渍土的结晶盐开始溶化,每一个硫酸钠和氯化钠结晶分子将会释放水分子,结晶盐体积减小,被破坏的土体在没有支撑力的情况下,开始下陷。并且,由于温度升高,结晶盐释放水分子,水又使土中部分其它与土颗粒胶结并共同起骨架作用的结晶盐胶结溶解,造成土体中的胶接结构破坏,土中盐分充填的孔隙在一定的荷载作用下失稳塌陷,土体的结构破坏,强度降低,土颗粒重新排列,大孔隙减小,产生融(溶)陷。如此反复,盐渍土的结晶、溶解反复破坏着砂类盐渍土土体的结构,致使融(溶)陷量越来越大。

### 3 结论与建议

为了研究路用砂类盐渍土作为路基填料的适用性,基于最佳含水率、93%压实度、颗粒级配良好、防排水设施合理的前提条件,研究了不同含盐量水平下砂类盐渍土的盐胀变化特点和在冻融循环作用下砂类盐渍土体融陷的特性,得到以下 3 点主要结论。

(1) 砂类盐渍土中,当粗粒土相对较多时,其盐胀起胀温度和温度敏感区间相对较低;粗粒亚硫酸盐渍土较硫酸盐渍土的盐胀起胀温度和敏感温度区间更低。其中,对于砂类硫酸盐渍土和亚硫酸盐渍土,当含盐量小于 2% 时,盐胀敏感温度区间主要集中于 -15℃ 左右;当含盐量大于 2% 时,盐胀敏感温度区间主要集中于 5℃ ~ -10℃。对于砂类亚硫酸盐渍土,当含盐量大于 2% 时,盐胀敏感温度区间为 -10℃ ~ -15℃。

(2) 对于砂类硫酸盐渍土,含盐量不大于 1% 时,盐胀率小于 1.5%;含盐量在 1% ~ 2% 之间时,盐胀率增长相对平缓;含盐量超过 2%,盐胀率增长加快;含盐量小于 2%,盐胀率小于 2%,相对较小。对于砂类亚硫酸盐渍土,含盐量小于 2.3% ~ 2.5% 时,盐胀率总体小于 1%;含盐量大于 2.3% ~ 2.5% 时,盐胀率总体大于 1%。

(3) 对于砂类硫酸盐渍土,其融陷特性并不明显;对于砂类亚硫酸盐渍土,在降温升温频率比较大时,其盐胀量较小,起主导作用的是融(溶)陷。在历经 10 个冻融循环周期后,最大融(溶)陷率接近于 1.5%。

(4) 通过盐胀和融陷试验可知,路面容许变形量取 2 cm,下路堤填筑厚度为 2.0 m 时,砂类硫酸盐渍土的含盐量极限值为 1.0%,砂类亚硫酸盐渍土的含盐量极限值为 2.3%。

### 参考文献:

- [1] 袁红,李斌.硫酸盐渍土起胀含盐量及容许含盐量的研究[J].中国公路学报,1995,8(3):10-14. (YUAN Hong, LI Bin. On the minimum salt content and allowable salt content of sulphate salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(3): 10-14. (in Chinese))
- [2] 高江平,吴家惠,杨荣尚.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 the 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))
- [3] 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,2001,9(3):238-2431. (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, 9(3): 238-2431. (in Chinese))
- [4] 包卫星,杨晓华,谢永利.典型天然盐渍土多次冻融循环

- 盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 1991 - 1995. (BAO Wei-xing, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 1991 - 1995. (in Chinese))
- [5] 张莎莎, 杨晓华, 张秋美. 天然粗粒盐渍土大型路堤模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 842 - 847. (ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, ZHANG Qiu-mei. Research on large-scale embankment model test of crude coarse grained saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 842 - 847. (in Chinese))
- [6] 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**(1): 253 - 258. (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**(1): 2090 - 2096. (in Chinese))
- [7] 张莎莎, 杨晓华, 谢永利, 等. 路用粗粒盐渍土盐胀特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, **29**(1): 20 - 25. (ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. Salt-expansion laws of coarse-grained salty soil in road subgrade[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, **29**(1): 20 - 25. (in Chinese))
- [8] 包卫星, 李志农, 罗炳芳. 公路工程粗粒盐渍土易溶盐试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(5): 792 - 797. (BAO Wei-xing, LI Zhi-nong, LUO Bing-fang. Test method for soluble salt in saline soil in highway engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(5): 792 - 797. (in Chinese))
- [9] 张莎莎, 谢永利, 杨晓华, 等. 典型天然粗粒盐渍土盐胀微观机制分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 123 - 127. (ZHANG Sha-sha, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Research on microstructure of crude coarse grain saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 123 - 127. (in Chinese))
- [10] 汪为巍, 杨保存, 王 荣. 南疆盐渍土地区城区道路病害规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 253 - 258. (WANG Wei-wei, YANG Bao-cun, WANG Rong. Road diseases in southern saline soil areas of Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 253 - 258. (in Chinese))
- [11] 褚彩萍, 李 斌. 硫酸盐渍土在多次冻融循环时的盐胀累加规律[J]. 冰川冻土, 1998, **20**(2): 89 - 91. (CHU Cai-ping, LI Bin. Salt expansion accumulation of sulphate salty soil under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(2): 89 - 91. (in Chinese))
- [12] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 天然粗颗粒盐渍土多次冻融循环盐胀试验[J]. 中国公路学报, 2009, **22**(4): 28 - 32. (ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, DAI Zhi-ren. Freezing-thawing cycles and salt expansion test of crude coarse grain clay salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, **22**(4): 28 - 32. (in Chinese))