

DOI: 10.11779/CJGE201801016

# 硫酸盐渍土水泥加固盐胀抑制剂研究

张佳兴<sup>1</sup>, 裴向军<sup>\*1</sup>, 韦璐<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610077)

**摘要:** 硫酸盐渍土具有遇水溶陷、强度降低、盐胀-冻胀的特性, 而传统加固材料如水泥、石灰等, 由于 $\text{SO}_4^{2-}$ 与水泥反应生成 $\text{Aft}\cdot32\text{H}_2\text{O}$ , 造成加固体膨胀、强度损失及耐久性降低。针对上述问题, 利用自主研发的抗盐胀固化剂与水泥复配对盐渍土进行改良, 探讨含盐量和固化剂对固化土膨胀性与力学性能的影响。试验结果表明, 固化剂SD抑制膨胀、维持强度的能力优于纯水泥, 在2%含盐量时, 膨胀率降低65.2%~83.4%, 抗压和抗折强度分别提高2~6倍; 含盐量为5%时, 膨胀率降低88.5%以上, 抗压和抗折强度提高1.6~4.7倍。试验表明, 在中盐渍土加固中, 低掺量抑制膨胀性强; 强盐渍土中, 高掺量抑制膨胀率强。通过盐溶液稳定性试验和冻融试验对膨胀性进行了探讨, 固化剂能够有效提高加固土的抗膨胀性, 降低强度的损失率; 在抗冻稳定性上, 对冻胀有一定抑制作用, 而对强度的稳定作用一般, 表现为温度相应“迟滞”。

**关键词:** 盐胀; 固化剂; 稳定性; 耐久性; 盐渍土

中图分类号: TU449; TQ177.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)01-0155-07

作者简介: 张佳兴(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事地质工程的研究工作。E-mail: zjx1992@outlook.com.

## Salt expansion inhibitors for sulphated salty soil

ZHANG Jia-xing<sup>1</sup>, PEI Xiang-jun<sup>1</sup>, WEI Lu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610077, China)

**Abstract:** The sulphated salty soil has the characteristics of water soluble depression, strength, salt expansion and frost heave decrease. However, for the traditional reinforcement materials such as cement and lime, because the reaction  $\text{SO}_4^{2-}$  in soil with cement generates  $\text{Aft}\cdot32\text{H}_2\text{O}$ , the increase of solid expansion, the loss of strength and the decrease of durability are easily caused. For the above problems, the self-developed curing and cement are used to improve the saline soil, and the effect of curing and salt content conditions on the expansion and mechanical properties of saline soil is analyzed. The results show that the ability of SD curing to inhibit the expansion and to maintain the strength is better than that of cement. When the salt content is 2%, the expansion ratio decreases by 65.2% to 83.4%, and the compressive and flexural strength increase by 2 to 6 times. When the salt content is 5%, the expansion ratio decreases by more than 88.5%, and the compressive and flexural strength increase by 1.6 to 4.7 times. It is shown that low content has a strong inhibitory for the expansion ratio in medium saline soil. Contrarily, higher adding has better effectiveness on heavy salt soil. The durability is analyzed by the salt solution stability tests and freeze-thaw tests. SD curing can effectively improve the durability of stabilized soil and reduce the loss rate of strength. For the stability of frost resistance, it has a certain inhibitory effect on the frost heave, but has little effect on the stability of strength, which exhibits “Hysteresis” under the corresponding temperature.

**Key words:** salt expansion; curing; stability; durability; saline soil

## 0 引言

盐渍土作为一种特殊土, 广泛分布于中国西北、华北和东部沿海, 可分为滨海盐渍区、泛滥平原盐渍区、荒漠与荒漠草原盐渍区及草原盐渍区<sup>[1]</sup>。按含盐类型, 可分为硫酸盐渍土、碳酸盐渍土及氯盐渍土<sup>[2]</sup>。盐渍土的易溶盐含量大于0.3%, 具有特殊的物理力学性质及工程特性, 如溶陷、膨胀等<sup>[3-4]</sup>。

盐渍土固化是采用一定的技术措施改善土体的物理-力学性质, 以此达到工程技术上的要求。目前, 传统固化主要是水泥、石灰、粉煤灰和硅粉等材料的单

基金项目: 国家重点基础研究计划项目(2014CB744703); 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队重点项目(SKLG2014Z001); 交通部西部项目(2015318J39250)

收稿日期: 2016-10-12

\*通讯作者(E-mail: peixj0119@tom.com)

一或复合使用<sup>[5-6]</sup>。在土体加固中粉煤灰能有效提高水泥的胶结作用,使后期强度明显提高<sup>[7-8]</sup>;硅粉的火山灰效应能有效提高固化土的强度;此外,粉煤灰与硅粉复合使用同样可以提高加固土的抗压强度<sup>[9]</sup>。陆地盐渍土主要以硫酸盐为主,作为路基填料主要病害包括路面鼓包开裂<sup>[10]</sup>、溶陷、盐胀、冻胀及次生盐渍化等。路基盐胀由硫酸盐迁移聚集、结晶膨胀和土体变形3个过程控制;同时,受到粗颗粒含量、密实度、含水率、含盐量及温度等因素影响。粗颗粒含量越大,盐胀变形越小<sup>[11-12]</sup>;含水率的影响存在临界值,大于临界值盐胀值随含水率增大而减小<sup>[13-14]</sup>;含盐量增加,致使土体冻结温度降低,盐胀率增大<sup>[15]</sup>;降温速率越大,土体变形量越小<sup>[16]</sup>。新疆区盐渍土主要由内流河、湖泊的水分蒸发沉积而成的硫酸盐渍土。用于路基填料施工中,采用传统加固材料,土体中的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子与水泥发生化学反应,生成的钙矾石、石膏等,其中一个钙矾石晶体集合32个结晶水,体积增大,致使孔隙内压力增大,体积膨胀量显著增加,路基填土产生盐胀;同时,由于新疆地区的昼夜和季节性温差大,同样使路基产生冻胀作用,对路基产生破坏;此外,有机酸对土体加固效果存在很大影响,当有机酸超过一定含量水泥土则失去加固效果<sup>[17]</sup>。针对传统材料加固硫酸盐渍土存在的抗盐胀能力差,强度折损大的问题。

本文研究了一种抗盐胀固化剂,能有效抑制硫酸盐渍土的盐胀性,提高固化土的稳定性。通过采用抗盐胀固化剂、水泥两种固化土进行纯水、盐溶液的膨胀性及冻融循环稳定性试验,对固化土的抗盐胀性、稳定及强度折损进行了研究和探讨,并对固化剂的抗盐胀-冻胀机理进行讨论。

## 1 试 验

### 1.1 试验原料

#### (1) 试验用土

引起土体膨胀的主要成分为硫酸盐,为更充分研究硫酸盐单一盐类的加固材料,试验主要采用人工配制硫酸盐盐渍土进行。试验用土为低含盐量黄土,该黄土粉粒含量为78.1%,物理性质指标见表1。该土含盐量为0.07%,根据含盐量可划定为非盐渍土,故可以配制人工硫酸钠盐渍土。

按照盐渍土硫酸钠的含量,分别配制中盐渍土(硫酸钠为2%)、强盐渍土(硫酸钠为5%)进行研究。

#### (2) 固化剂

本试验采用P.O42.5R普通硅酸盐水泥和新型抗盐胀固化材料SD(以下简称SD)作为固化剂,其中

SD为成都理工大学研发的新型固化材料,为无机非金属材料混合物,是一种灰色粉末,具有比表面大、细度高的性质,组成见表2。

表1 试验用黄土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of loess

地点	稠度指标		击实试验		
	w <sub>p</sub> /%	w <sub>L</sub> /%	I <sub>P</sub>	w <sub>opt</sub> /%	ρ <sub>d</sub> /(g·cm <sup>-3</sup> )
乌鲁木齐	16	28	12	9	1.76

表2 SD 固化剂组成

Table 2 Composition of SD

成分	SiO <sub>2</sub>	FeO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	NaO
含量/%	95.35	1.1	1	0.72	0.33	1.5

### 1.2 试样制备与测试

#### (1) 试样制备

根据最大干密度及最优含水率,采用静压法制备试样,制作纯水泥加固土和抗盐胀固化土试样,试样尺寸分别为70 mm×70 mm×70 mm的立方体试样和40 mm×40 mm×1600 mm的长方体,分别用于测定盐胀应变、抗压及抗折强度。制备Φ50 mm×100 mm圆柱形水泥土和抗盐胀固化剂加固土样,用于冻融循环的膨胀性和强度测定,试样制备配比见表3。

表3 试样配比

Table 3 The ratio of samples

No.	W/C	C	S	含盐量/%	SD/%
1	0.6	0.7	1	2	—
2	0.6	0.7	1	5	—
3	0.6	0.7	1	2	2
4	0.6	0.7	1	2	8
5	0.6	0.7	1	2	12
6	0.6	0.7	1	5	2
7	0.6	0.7	1	5	8
8	0.6	0.7	1	5	12

注: W/C为水灰比; S为土的含量; SD为固化剂所占水泥质量比例。

#### (2) 试验方法

##### a) 抗盐胀性能试验

对于试样的抗盐胀性,采用体积膨胀率和强度值衡量,测定3, 7, 14, 28 d的体膨胀率,测定7, 14, 28 d的抗压强度和抗折强度,并设置纯水泥加固土作为对比。体膨胀率采用排水法测试,即在试样制备好后用塑料薄膜包裹置于锥型杯中测定排水量,以此为起始体积V<sub>0</sub>,待到达预定养护期后,使用同一塑料薄膜包裹测定排水量为膨胀体积V<sub>t</sub>。按公式(1)计算膨胀率n。塑料薄膜包裹是防治土体吸水。以此衡量抗盐胀固化剂的抗盐胀性能和强度特点,并判断其加

量对抑制膨胀性的影响。

$$n = \frac{V_t - V_0}{V_0} \quad . \quad (1)$$

### b) 抗盐溶液稳定性

当盐渍土浸水后可溶盐溶解, 使其处于盐溶液中, 故配置浓度为 0%, 1.5% 及 3.0% 的硫酸钠水溶液。将养护 1, 3, 7, 14, 28 d 的试样浸泡在溶液中进行常温侵蚀试验, 根据试块的质量改变及强度变化来表征其抗硫酸盐侵蚀能力, 采用强度耐蚀系数和质量耐蚀系数对抗盐溶稳定性进行综合评价。

### c) 冻融循环膨胀性

根据规范将试样养护 28 d 后进行气冻—气融试验, 将在标准养护箱中的试样置于温度为  $-20 \pm 2^\circ\text{C}$  的冻融箱中冻结 8 h, 冻结温度为  $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ ; 融解时冻融循环箱温度为  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 融解时间为 8 h, 一次冻融循环后测定高度、质量变化, 当试件循环次数达到 10 次时终止试验, 并测定试件无侧限抗压强度  $R_{DC}$  和试样质量变化, 以质量损失小于 5%, 强度损失不大于 25% 作为抗冻融试验的判断标

## 2 结果分析

### 2.1 抗盐胀固化性能分析

#### (1) 抗盐胀性分析

由表 3 制得<sup>#1</sup>, <sup>#2</sup> 为含盐量 2%, 5% 的纯水泥加固土, <sup>#3~#5</sup> 为含盐量 2% 的抗盐胀固化剂加固土, <sup>#6~#8</sup> 为含盐量 5% 的抗盐胀固化剂加固土, 体膨胀率试验结果见表 4。

表 4 体膨胀率

Table 4 Volume expansion rates

编号	体膨胀率/%			
	3 d	7 d	14 d	28 d
<sup>#1</sup>	0.480	0.490	0.490	0.510
<sup>#2</sup>	1.620	1.650	1.680	1.700
<sup>#3</sup>	0.041	0.078	0.083	0.084
<sup>#4</sup>	0.052	0.085	0.120	0.141
<sup>#5</sup>	0.063	0.084	0.117	0.177
<sup>#6</sup>	0.071	0.090	0.137	0.194
<sup>#7</sup>	0.056	0.080	0.147	0.175
<sup>#8</sup>	0.082	0.096	0.128	0.164

纯水泥加固土的膨胀率均大于抗盐胀固化土, 且含盐量 5% 的膨胀率均大于含盐量 2% 的土体, 说明盐渍土的膨胀量与土体含盐量有关, 含盐量越大膨胀率越高, 这与高民欢等<sup>[17]</sup>、石兆旭等<sup>[18]</sup>得出的含盐量对膨胀性影响的结论相似。硫酸钠含量为 2% 时, 抗盐胀固化土膨胀率明显低于水泥加固土, 起始膨胀率低

86.9%~91.5%, 最终膨胀率低 65.2%~83.4%。由图 1, 2 可知, 含盐量为 2% 时, 固化剂由 2% 增加到 12%, 最终膨胀率表现为 2% < 8% < 12%, 这与硫酸钠含量为 5% 时的结果相反。这说明固化剂 SD 在中盐渍土中, 低掺量更有利于抑制膨胀; 而含盐量 5% 时, 固化剂 SD 掺量越大, 抑制膨胀作用越强。

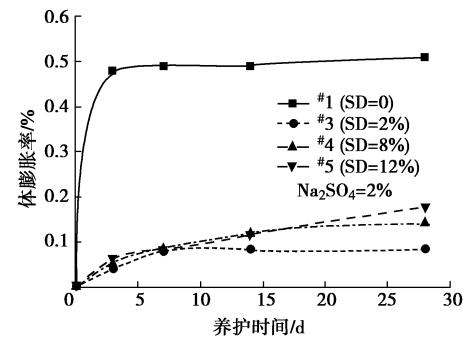


图 1  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  含量 2% 的体膨胀率

Fig. 1 Volume expansion ratios under  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  content of 2%

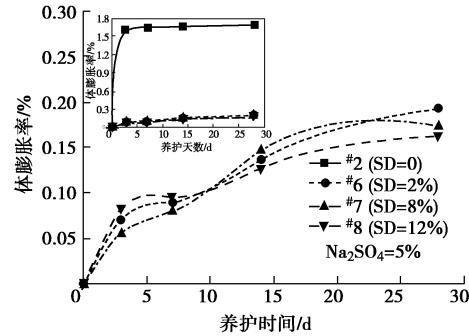


图 2  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  含量 5% 的体膨胀率

Fig. 2 Volume expansion ratios under  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  content of 5%

#### (2) 强度性能分析

试样在标准条件下养护后, 进行抗压、抗折强度试验, 试验结果见表 5。

纯水泥加固土的 7, 14, 28 d 的抗压强度、抗折强度均低于与抗盐胀固化土。含盐量 2% 时, 28 d 抗压强度提高 2.02~3.95 倍, 抗折强度提高 6.5~9.42 倍。含盐量 5% 时, 28 d 抗压强度提高 1.57~4.0 倍, 抗折强度提高 4.72~8.27 倍。在固化剂掺量水平相同的情况下, 低含盐量盐渍土的抗压强度及抗折强度均高于高含盐量盐渍土。

由图 3 可知, 在含盐量为 2% 时, 抗压强度随固化剂 SD 加量表现为先降低后升高, 抗折强度有相同表现; 抗折与抗压强度均表现为先增加后趋于稳定, 最佳掺量为 2%。依据图 4 可知, 在含盐量为 5% 时, 随着固化剂 SD 的增加抗压强度逐渐降低, 抗折强度增长缓慢, 抗折强度存在最优加量为 8%。

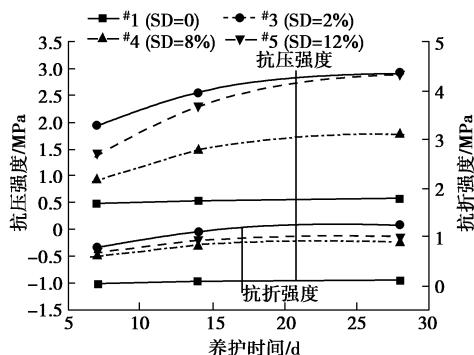
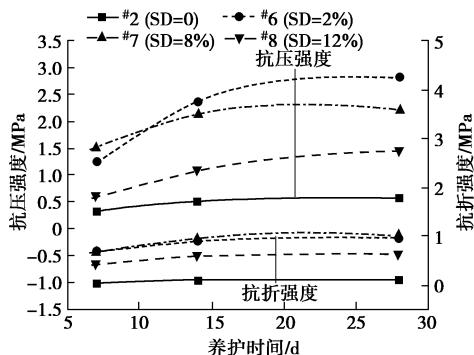
综上所述, 固化剂 SD 能有效抑制盐胀, 提高抗

折和抗压强度。在中盐渍土加固中 SD 固化剂掺量应在 2%左右，以此保证最小盐胀性和最佳强度特性；在强盐渍土加固中，如以抑制盐胀为主要目的，可增加 SD 掺量，其原因在于：①SD 固化能够促进水泥的水化反应，产生低硅钙比（简称 C/S）的 C-S-H，其强度高于高 C/S 的 C-S-H，使颗粒间的胶结相结构更致密；②SD 的掺加使钙矾石的产量降低，孔隙内压力减小，颗粒受侧向挤压位移减少，所以强度增大；③当 SD 掺量过多时，由于高比表面，吸附了大量的水及土颗粒，使参与水泥水化的水量降低，水泥水化程度降低，故出现掺量增加强度降低的现象。

表 5 不同配比土样的强度性能

Table 5 Strength properties of loess with different mix ratios

编号	抗压/MPa			抗折/MPa		
	7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d
#1	0.50	0.54	0.59	0.05	0.10	0.12
#2	0.32	0.50	0.56	0.04	0.10	0.11
#3	1.96	2.56	2.92	0.79	1.12	1.25
#4	0.93	1.48	1.78	0.61	0.83	0.90
#5	1.42	2.30	2.89	0.69	0.93	1.02
#6	1.25	2.35	2.80	0.69	0.90	0.95
#7	1.50	2.13	2.21	0.65	0.96	1.02
#8	0.59	1.09	1.44	0.43	0.58	0.63

图 3 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量 2% 的强度特性Fig. 3 Strength properties under Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> content of 2%图 4 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量 5% 的强度特性Fig. 4 Strength properties under Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> content of 5%

## 2.2 抗盐溶液稳定性分析

### (1) 质量变化分析

试样在盐溶液中浸泡的质量变化见图 5。同种盐

水浓度下，纯水泥加固土试样的质量损失比抗盐胀固化剂加固土明显，随着浸泡时间的增加，两者的变化差距增大，28 d 浸泡后质量差距达 4%~5% 左右且纯水泥加固土的质量变化的前期增长率大于抗盐胀固化土；同时，质量的损失与盐水的浓度紧密相关，盐水浓度越高，其质量增加越明显，3% 盐水浓度浸泡 1 d 时，纯水泥加固土质量增加 4.55 g，是相同浸泡时间下盐水浓度为 0% 的近两倍。

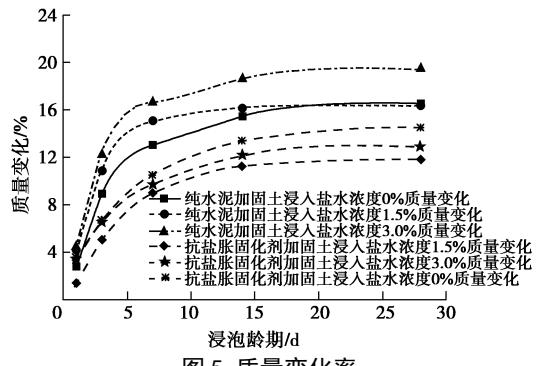


Fig. 5 Rates of quality change

### (2) 强度变化分析

不同加固材料盐溶液浸泡的抗压强度见表 6。加固土的强度损失均随浸泡龄期的增长而增加，随着盐水浓度的增大而增大，其中，相同浸泡龄期下 SD 加固土强度损失小于纯水泥加固土。相同盐水浓度下，纯水泥加固土的强度降低更为明显。纯水泥加固土在 1.5% 盐水浓度和 3.0% 盐水浓度下浸泡 7 d 的强度降低率分别为 18.36% 和 40.82%，相较之下抗盐胀固化剂加固土的强度降低率为 14.42% 和 30.77%，其耐盐溶液性能相对提高。此外，在相同浸泡时间下，浸入盐水浓度较高的试样其强度变化较快，整体强度降低率较高，盐水浓度 3% 浸泡 7 d 时，纯水泥加固土强度降低 40.82%，是相同浸泡时间下盐水浓度为 1.5% 的试样强度降低率的两倍。

表 6 试件盐水浸泡不同龄期强度变化

Table 6 Strengths of samples with different stages of salt water immersion

土样	盐水浓度/%	饱水龄期/d	检验强度/MPa	抗压强度/MPa	强度损失/%
				7	14
纯水 泥加 固土	1.5	7	0.49	0.40	18.36
		14	0.41	0.32	21.95
		28	0.34	0.25	26.47
SD 加固 土	3.0	7	0.49	0.29	40.82
		14	0.41	0.22	46.34
		28	0.34	0.16	52.94
	1.5	7	1.04	0.89	14.42
		14	0.94	0.78	17.02
		28	0.82	0.65	20.73
	3.0	7	1.04	0.72	30.77
		14	0.94	0.59	37.23
		28	0.82	0.47	42.68

综上所述, 在盐溶液侵蚀方面, 抗盐胀固化剂的效果更佳, 其对于盐溶液侵蚀的响应时间更长, 对于长期处于盐溶液侵蚀下的工程而言, 耐久性更佳。

### 2.3 抗冻融循环稳定性分析

#### (1) 质量变化分析

土中硫酸盐的溶解度受温度影响较为敏感, 随温度变化其相态表现为溶解或结晶, 硫酸钠溶液中各相存在溶解平衡<sup>[19]</sup>。图 6 为 5 次、8 次和 10 次冻融循环, 冻融硫酸钠结晶及掉块现象的对比。

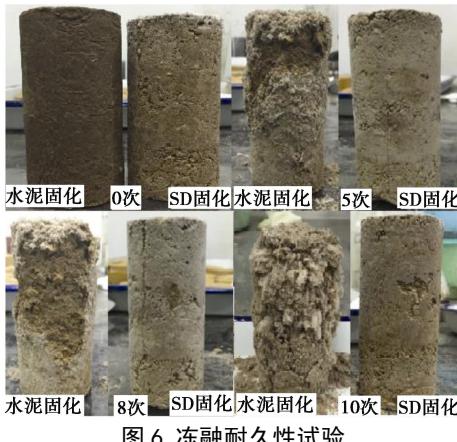


Fig. 6 Freeze-thaw durability tests

经过 5 次冻融循环后, 水泥固化土样在冻融循环中出现芒硝晶体析出, 且析出量远高于掺加固化剂土样, 这一现象与万旭升等<sup>[20]</sup>得出的低温芒硝析出的结论相似, 此外, 水泥固化土样在冻融循环过程中伴有掉块现象, 土体从试样表面剥落并向内部扩展, 呈现出逐层剥落的现象; 而掺加固化剂试样未出现土体剥落现象; 水泥固化土样 8 次冻融之后出现片状剥落、掉块, 10 次冻融后芒硝晶体大量析出, 试验表面土体由密实变为蓬松, 整体剥落; 而固化剂 SD 固化土 10 次循环后整体完好, 仅出现局部掉块现象。由此说明 SD 固化能显著提高盐渍的抗冻性, 减少芒硝晶体的析出, 减缓由于芒硝结晶过程对土体结构的破坏, 进而改善加固土的整体稳定性, 提高土体抵抗冻融损伤的能力。

通过测定每次冻融循环的质量变化得出质量变化率见图 7。水泥固化与 SD 固化试样在前 4 次循环中, 质量变化率基本一致, 累计质量 2.692% 和 2.681%, 从第 5 次循环开始, 水泥固化土质量变化率发生突变, 而 SD 固化土保持平稳增加, 未发生突变现象, 10 次循环后累计变化率分别为 12.17% 和 6.9%。由此可知, SD 固化土的抗冻融破坏能力强于水泥固化土, 整体稳定性较好。

#### (2) 冻胀性分析

由于固化土在经历通融循环后出现侧向的剥离掉

块, 对体膨胀量的测量产生影响, 故采用高度参数对冻胀特性进行分析, 试验结果见图 8。

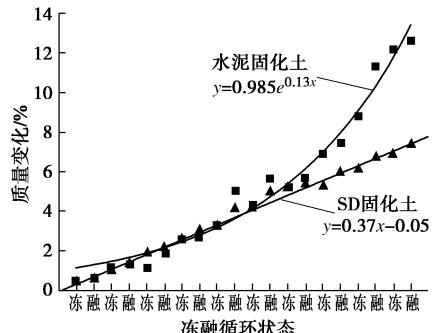


图 7 冻融循环质量变化率

Fig. 7 Quality change of freeze-thaw tests

加固土的冻融呈现出一种“冻胀融缩”的形变过程。由图 8 可知, 经过 10 次冻融循环后, 试样变形表现为体积收缩的状态; 在单次循环中, 结冻时体积膨胀, 融化时体积收缩。其中, 水泥固化土在冻融过程中体积胀缩量明显高于 SD 固化土, 且累计收缩量大于 SD 固化土; SD 固化土后期冻胀和融缩量降低并趋于稳定。这一现象说明, 在降温过程中, SD 固化土抵抗硫酸钠晶体结晶时产生的膨胀力的能力优于水泥加固土; 在升温溶解过程中, 水泥加固土颗粒间支撑的消逝, 使部分颗粒回落, 土体体积收缩, SD 固化土则表现为结构的相对自稳定性, 使最终形变趋于稳定。

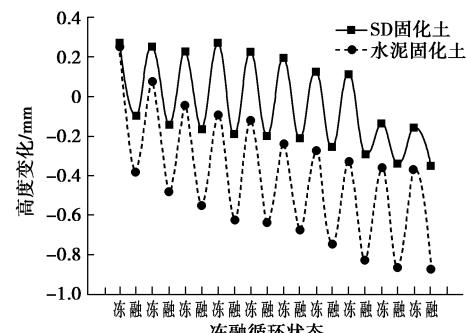


图 8 冻融循环高度变化

Fig. 8 Height change of freeze-thaw tests

#### (3) 强度损失分析

经过 5 次和 10 次循环后的试样强度变化见表 7。由表 7 可知, SD 固化土试样的抗压强度在冻融前后均高于水泥固化土。随着冻融次数的增加, 两者的强度均发生较明显的下降, 水泥固化土在冻融 5 次后的强度从 0.60 MPa 降低至 0.32 MPa, 强度降低 46.52%, 超过抗压强度变化临界值(25% 的强度), 而 10 次冻融循环后强度仅为 0.14 MPa, 损失达到 76.83%; 与之相比, SD 固化土的强度降低较小, 但是 5 次和 10 次冻融循环后强度损失达到 33.05% 和 53.62%。

试验表明, SD 固化剂的抗冻耐久性较水泥强, 但效果不佳。10 次冻融后抗盐胀固化剂加固土的质量

变化达 6.904%，超过质量变化临界值（质量损耗不超过 5%），抗压强度损失则超过一半。由此可知，抗盐胀固化剂加固土在抗冻融循环方面仍需提高，其抗冻融能力一般。

表 7 冻融循环强度变化

Table 7 Strength change of freeze-thaw tests

土样	检验强度 /MPa	冻融后强度/MPa		强度损失/%	
		5 次	10 次	5 次	10 次
水泥固化土	0.6	0.32	0.14	46.52	76.83
SD 固化土	2.71	1.81	1.26	33.05	53.62

### 3 讨论

硫酸盐渍土盐胀—冻胀受多种因素影响，包括含水率、含盐量、温度特性、土体组成等。寒旱区盐渍土盐胀—冻胀主要是因为水分迁移或降温过程中硫酸盐晶体结晶析出与自由水结晶，使晶体颗粒体积增大，对周围土体产生膨胀力，土体颗粒发生移动，原生结构被破坏，土体变为膨胀；升温或水分补充，晶体溶解，膨胀力消失，此时，颗粒在重力或上覆压力作用下发生回落，体积收缩。经过多次循环后土体丧失强度，引起局部或整体破坏。对于 SD 固化剂抑制盐胀可分两部分进行讨论：①SD 固化剂与水泥的水化反应；②SD 固化剂与土体的相互作用。

首先，盐渍土中的碱性的  $\text{SO}_4^{2-}$  与水泥中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成  $\text{CaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  结晶析出。同时， $\text{CaSO}_4$  亦能与水泥结石中的固体水化铝酸钙反应，生成水化硫铝酸钙晶体 ( $\text{Aft} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )，其中包含大量结晶水，使其体积增大。在此双重作用下，加固土体出现膨胀。当加入 SD 固化剂后，固化剂与水泥结石体中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成水化硅酸钙 (C-S-H)，一方面增加胶结产物，另一方面消耗了体系中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，减少了  $\text{CaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  的生成，使大体积晶体量减少，同时，间接的减少了  $\text{Aft} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ，这直接起到抑制膨胀的作用。此外，SD 固化剂能够促进水泥水化，提高结构的密实性，提高加固土体的强度，这一作用同样提高了抵抗膨胀破坏的能力。

SD 固化剂由于具有比表面积大、亲水的特点，可以吸附土体中的自由水，使土体硬度提高。固化剂遇水后解离出  $\text{SiO}_3^{2-}$  和  $\text{H}^+$  与土颗粒发生吸附链接，提高颗粒与颗粒之间的黏结力，进而提高土体强度。

对于冻融的破坏，主要是由于固化剂的掺入为能提高土体强度和密实度，降低硫酸钠的含量。在冻结过程中，硫酸钠结晶析出，体积膨胀，同时，孔隙水凝结体积膨胀，在二者双重作用下，使固化土内孔隙压力增大，孔隙体积增大，土颗粒受冰晶及芒硝晶体挤压，部分土颗粒间胶结度降低，部分土颗粒重新团

聚，但胶结较低，且原土体均匀性受到破坏，增加了土体内部孔隙和裂隙的贯通度；在融解过程中，硫酸钠结晶体溶解，结晶水融化，结晶水黏聚力消失，加固土在水作用下结构变松散，出现融缩和溶陷现象。SD 固化的掺加，使体系内胶凝物质含量远大于纯水泥加固土，结构密实度增加，孔隙被固化剂填充。在冻融作用下，孔隙体积变化率缩小，骨架结构向点一面及点一点接触转换缓慢，表现出温度相应“迟滞”现象；经过多次循环，造成损伤度积累，强度降低，最终趋于稳定。所以今后研究中应增加该方面的研究以此解决冻融损伤问题。

### 4 结论

通过室内试验，对抗盐胀固化剂的性能及固化土的耐久性问题进行了研究，得出以下 4 点结论。

(1) 与纯水泥加固盐渍土相比，抗盐胀固化剂—水泥固化盐渍土能够有效降低膨胀率，使初期膨胀率降低 80% 以上，抗压强度提高 1.5 倍以上。

(2) 对于 2% 和 5% 含盐量的盐渍土，SD 固化剂表现为：2% 含盐量时，固化剂掺量越大膨胀量和强度值越小；而 5% 含盐量时，随着固化剂含量的增加土体膨胀量越小，强度值越大。

(3) 从抗盐溶液稳定性试验结果可知，SD 固化剂表现优于纯水泥，能够显著提高水稳定性，降低强度折损率；此外，随着盐溶解浓度的提高，固化土的稳定性相应降低。

(4) 在冻融试验中，SD 固化土的抗盐胀性强于水泥固化土，对于冻胀破坏有一定的抑制作用，但对抑制强度损失作用不明显。

综上所述，从抑制膨胀性和强度角度出发，抗盐胀固化剂与水泥配合使用能有效保证硫酸盐盐渍土的稳定性，可以满足路基工程需求。

### 参考文献：

- [1] 熊毅. 中国盐渍土壤分区[J]. 土壤学报, 1957, 5(1): 50–59. (XIONG Yi. Dividing scheme of Chinese salty soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1957, 5(1): 50–59. (in Chinese))
- [2] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Foundation treatment manual[M]. 3 rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [3] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2002. (GB50021—2002. (in Chinese))
- [4] 程东幸, 刘志伟, 柯学. 粗颗粒盐渍土溶陷性影响因素

- 研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 110 - 114. (CHENG Dong-xing, LIU Zhi-wei, KE Xue. Field and laboratory test for influential factors on salt resolving slump of coarse particle saline soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 110 - 114. (in Chinese))
- [5] 杨志强, 郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. 岩土力学, 1991, 12(3): 11 - 23. (YANG Zhi-qiang, GUO Jian-yang. The physio-mechanical properties and micro-mechanism in lime-soil system[J]. Rock and Soil Mechanics, 1991, 12(3): 11 - 23. (in Chinese))
- [6] 盛学斌, 刘云霞, 赵玉萍. 脱硫粉煤灰于盐渍土中的试验效果研究[J]. 环境科学进展, 1999(2): 73 - 78. (SHENG Xue-bin, LIU Yun-xia, ZHAO Yu-ping. A study on test results of application of desulphurized coal cinder to saline soil[J]. Advances in Environmental Science, 1999(2): 73 - 78. (in Chinese))
- [7] KANIRAJ S R, HAVANAGI V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29: 673 - 677.
- [8] PEI X J, ZHANG F Y, WU W J, et al. Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles[J]. Applied Clay Science, 2015: 77 - 84.
- [9] RANDOLPH R B. Concentrated liquid stabilizers for railroad applications[R]. Soil Stabilization Products Company Inc, 2000.
- [10] 高江平, 王永刚. 盐渍土工程与力学性质研究进展[J]. 力学与实践, 2011, 33(4): 1 - 7. (GAO Jiang-ping, WANG Yong-gang. Research progress in engineering and mechanical properties of the saline soil[J]. Mechanics in Engineering, 2011, 33(4): 1 - 7. (in Chinese))
- [11] 张志权. 不同粉黏粒含量盐渍土的工程性质研究[D]. 西安: 长安大学, 2004. (ZHANG Zhi-quan. Study on the engineering properties of saline soil with different clay content[D]. Xi'an: Changan University, 2004. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 杨保存. 南疆盐渍土路基盐—冻胀变形特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008. (YAO Bao-cun. Study on salt frost heave deformation characteristics of saline soils subgrade in Southern Xinjiang[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese))
- [14] 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): 39 - 44. (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): 39 - 44. (in Chinese)).
- [15] 冯忠居, 乌延玲, 成超, 等. 板块状盐渍土的盐溶和盐胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1439 - 1442. (FENG Zhong-ju, WU Yan-ling, CHENG Chao, et al. salt dissolution and salt heaving characteristics of plate-like saline soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1439 - 1442. (in Chinese))
- [16] 彭铁华, 李斌. 硫酸盐渍土在不同降温速率下的盐胀规律[J]. 冰川冻土, 1997, 19(3): 62 - 67. (PENG Tie-hua, LI Bing. The salt heave of sulfate salty soil under different cooling rates[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(3): 62 - 67. (in Chinese))
- [17] 高民欢, 李斌, 金应春. 含氯盐和硫酸盐类盐渍土膨胀特性的研究[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 58 - 65. (GAO Min-huan, LI Bin, JIN Ying-chun. Experimental researcher on expansion behaviors of saline soil with NaCl and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(4): 346 - 353. (in Chinese))
- [18] 石兆旭, 李斌, 金应春. 硫酸盐渍土膨胀规律及影响因素的试验分析[J]. 西安公路交通大学学报, 1994, 14(2): 15 - 21. (SHI Zhao-xu, LI Bin, JIN Ying-chan. A experimental analysis of expanding regularity and affecting elements on sulphate salty soil[J]. Journal of Xi'an Highway Transportation University, 1994, 14(2): 15 - 21. (in Chinese))
- [19] STEIGER M, ASMUSSEN S. Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: the phase diagram Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O and the generation of stress[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2008, 72(17): 4291 - 4306.
- [20] 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))