

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0024

ZHANG Jingshuang, DUAN Xuelei, MA Dongdong. Strength and failure characteristics of soil-cement under coupling of chloride salt and freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):515-522. [张经双, 段雪雷, 马冬冬. 氯盐和冻融耦合下水泥土的强度和破坏特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):515-522.]

## 氯盐和冻融耦合下水泥土的强度和破坏特征

张经双<sup>1,2</sup>, 段雪雷<sup>1,2</sup>, 马冬冬<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 为了研究氯盐侵蚀和冻融循环耦合下水泥土无侧限抗压强度和破坏特征, 进行了不同浓度氯化钠溶液下的水泥土冻融循环试验, 得到了冻融前后的冻融腐蚀因子、体积变化率和变形模量, 分析了微观结构特征。结果表明: 在氯盐侵蚀和冻融循环耦合下, 水泥土的无侧限抗压强度、冻融腐蚀因子均随着冻融循环次数的增加而呈现下降趋势; 氯盐浓度越高, 水泥土的无侧限抗压强度、冻融腐蚀因子下降的幅度越大。随着冻融循环次数的增加, 在同种浓度溶液中, 水泥土的体积变化率增大, 变形模量减小; 氯盐浓度增大, 水泥土体积膨胀变大, 内部结构松散, 抵抗变形的能力减弱。相同冻融循环次数下, 氯盐溶液产生的损伤要大于清水中的损伤, 随着氯盐溶液浓度的增加, 水泥土内部微观结构损伤越严重。

**关键词:** 氯盐; 冻融循环; 水泥土; 无侧限抗压强度; 破坏特征; 微观结构

**中图分类号:** TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0515-08

### 0 引言

水泥土因具有价格低廉、经济环保等优点, 被广泛应用于中国西北、东北和部分沿海地区的道路工程、水工建筑等低强度、高压缩的软土地基处理中<sup>[1-3]</sup>。在工程实际中, 冻融循环作用常引起水泥土地基的损伤破坏。崔宏环等<sup>[4]</sup>进行了冻融循环下不同养护龄期水泥土的抗压强度试验, 得到抗压强度与冻融循环次数的关系。候淑鹏等<sup>[5]</sup>研究不同冻融循环次数对水泥土强度的衰减规律, 分析了冻融损伤机理。张泽等<sup>[6]</sup>、王升福等<sup>[7]</sup>研究了冻融循环下黏土的孔隙分布特征, 结果表明冻融循环使得土体内部孔隙率逐渐增大, 复杂程度和不均匀性降低。Kravchenko 等<sup>[8]</sup>、Li 等<sup>[9]</sup>研究了在水泥土中添加纤维能够改善水泥土冻融循环下的峰值应力和残余强度。在盐渍土和沿海的水工建筑物中, 水泥土地基常产生盐类侵蚀破坏。张华杰等<sup>[10]</sup>进行了不同氯化钠溶液侵蚀下水泥土抗剪试验, 得出水泥土的

抗剪强度随氯化钠浓度的增加而减小的结论。刘东锋<sup>[11]</sup>通过水泥土的室内侵蚀试验, 讨论了氯化钠侵蚀下水泥土的无侧限抗压强度的变化规律, 并分析了侵蚀机理。江国龙等<sup>[12]</sup>分析了水泥土在不同浓度钠盐和酸碱溶液中的力学性能, 得出酸和钠盐对水泥土的腐蚀比碱和钠盐的腐蚀更严重的结论。刘泉声等<sup>[13]</sup>通过模拟海水侵蚀环境, 得到了水泥土抗压强度、微观结构和内部离子浓度随侵蚀时间的变化规律。吕伟等<sup>[14]</sup>介绍了不同侵蚀离子对水泥土桩强度的腐蚀影响, 并分析各侵蚀离子之间的相互量化关系。Lü 等<sup>[15]</sup>研究了硫酸盐对碱激发地聚合物强度的影响, 得出了不同碱激发下地聚合物的无侧限抗压强度随含盐量的增加先增大后减小的结论。Han 等<sup>[16]</sup>、Cui 等<sup>[17]</sup>和 Zhang 等<sup>[18]</sup>对盐渍土进行了三轴压缩试验, 分析了含盐量对土体抗剪强度及各项指标的影响。但同时受氯盐侵蚀和冻融循环耦合下水泥土力学性能和微观机理分析的研究较少。

收稿日期: 2019-03-29; 修订日期: 2020-06-08

基金项目: 安徽省自然科学基金(1908085QE212)资助

作者简介: 张经双(1977-), 男, 安徽六安人, 副教授, 2014年在安徽理工大学获博士学位, 现为安徽理工大学在站博士后, 从事水泥土结构与材料的研究. E-mail: hnaust@163.com

通信作者: 段雪雷, 硕士研究生, 从事水泥土材料方向研究. E-mail: dxlaust@163.com.

本文进行了不同浓度氯盐侵蚀和冻融循环耦合下水泥土无侧限抗压强度、破坏形态的试验研究,分析了水泥石的微观损伤机理,为工程实际提供试验依据。

## 1 试验材料与配合比

### 1.1 试验材料

原状土样取自淮南市某工地基坑黏土,其物理性质指标和颗粒级配分别见表1和表2;水泥选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;粉煤灰选用II

级;选用长度12 mm和直径48  $\mu\text{m}$ 聚丙烯纤维;拌合用水选用淮南市自来水;氯化钠和氢氧化钙分别选用含量不少于99.5%和95.0%的分析纯。

配制 $4.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $30.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 三种浓度的氯化钠溶液,浸泡装置为耐酸碱的塑料箱。试验中,水灰比取0.5,水泥、粉煤灰和聚丙烯纤维分别按干土质量的15.0%、8.0%和0.4%掺入;为了激发粉煤灰的活性成分,掺加水泥土总质量1.0%的氢氧化钙<sup>[19]</sup>。

表1 黏土的物理性质指标

Table 1 Physical properties of the clay

天然含水率/%	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数
23.80	19.20	0.74	41.60	22.00	19.60

表2 黏土的颗粒级配

Table 2 Particle distribution of the clay

粒径/mm	(0, 0.005]	(0.005, 0.075]	(0.075, 0.25]	(0.25, 0.5]	(0.5, 1]	(1, 2]
含量/%	0.20	24.70	35.25	11.74	9.31	18.80

### 1.2 水泥石试样制作

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999),按天然含水率进行土样配置,密封静置24 h。根据设计配合比,加入水泥、粉煤灰、氢氧化钙和聚丙烯纤维制作尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 试样,用保鲜膜包裹并静置24 h。试样在标准养护室内养护28 d。将达到养护条件的试样放入清水和不同浓度氯化钠溶液中浸泡,浸泡溶液高于试样20 mm,浸泡4 d后取出擦干表面水分,用保鲜膜包裹后置于冻融循环试验机。

冻融循环试验采用TEST-1000型快速冻融试验机。参照季节冻土区温度变化选取冻结和融化温度分别为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻结和融化均为12 h,采取风

冻风融,冻融循环次数分别设置为0、1、3、6、10、15次。然后,按照《水泥石配合比设计规程》(JGJ/T 233-2011)进行冻融循环下不同浓度氯化钠溶液的无侧限抗压强度试验,仪器采用WDW-20微机控制电子式压力试验机,加载按位移控制,速率为 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。选取部分压碎试样进行扫描电镜试验(SEM),试验采用日立产S-3400N型扫描电镜。

## 2 无侧限抗压强度结果与分析

### 2.1 无侧限抗压强度

不同溶液、不同冻融循环次数(0、1、3、6、10、15次)下的水泥石进行无侧限抗压强度试验,试验结果如表3所示。

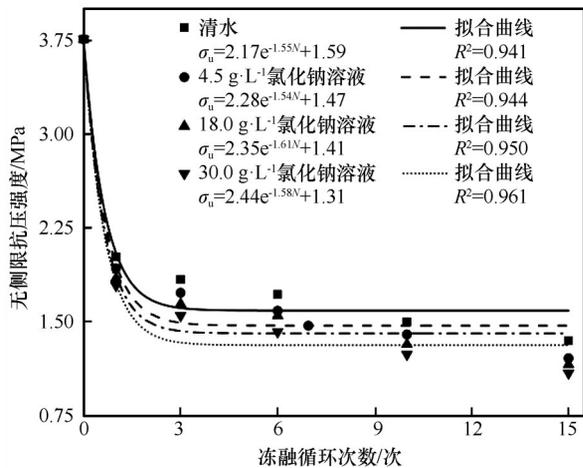
表3 水泥石的无侧限抗压强度值

Table 3 Unconfined compressive strength of the soil-cement

冻融循环次数/次	下列浸泡溶液浓度下无侧限抗压强度值/MPa			
	清水	$4.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液	$18.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液	$30.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液
0	3.76	3.76	3.76	3.76
1	2.02	1.93	1.85	1.79
3	1.84	1.73	1.64	1.55
6	1.72	1.59	1.55	1.42
10	1.50	1.40	1.32	1.24
15	1.35	1.21	1.16	1.09

经过 15 次冻融循环后, 在清水、 $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  氯化钠溶液中水泥土无侧限抗压强度较冻融循环前分别下降了 64.10%、67.82%、69.15% 和 71.01%。可知氯盐冻融较清水冻融对水泥土无侧限抗压强度影响更大。原因主要有: (1) 随着冻融循环次数的增加, 水泥土内部的裂缝逐渐扩展发育, 使得内部孔隙结构变大, 氯化钠溶液进入水泥土内部, 与氢氧化钙发生化学-交换反应, 减少了水泥土内部水化反应, 使得结构更加松散; (2) 水泥土在浸泡饱和时, 氯化钠溶液的浓度在水泥土内部的扩散逐渐减弱, 使得水泥土内外形成了浓度差; (3) 由于氯化钠溶液在结冰时能够降低冰点, 同时结冰和融化时需要释放和吸收热量, 导致水泥土内部产生了温度差<sup>[20]</sup>; (4) 氯化钠溶液的浓度越高, 水泥土内部的饱和度越大, 冻结时所产生的拉应力越大<sup>[21]</sup>。经过前 3 次冻融循环时, 水泥土的无侧限抗压强度下降较快; 3 次冻融循环后, 水泥土的无侧限抗压强度下降较慢。原因是水泥土在清水和不同浓度氯化钠溶液中浸泡饱和, 经过冻融循环后, 内部孔隙的溶液由液态变为固态, 造成体积膨胀<sup>[22]</sup>, 后期由于没有新的溶液补充, 只有内部微小饱和溶液的裂缝继续发育。

通过表 3 数据进行了不同溶液浸泡下水泥土无侧限抗压强度和冻融循环次数的关系拟合, 如图 1 所示。



注: 图内公式中  $\sigma_u$  为水泥土无侧限抗压强度值 (MPa);  $N$  为冻融循环次数 (次)

图 1 水泥土无侧限抗压强度与冻融循环次数的关系  
Fig. 1 Relationship between unconfined compressive strength of soil-cement and freeze-thaw cycles

## 2.2 冻融腐蚀因子

为了描述氯盐与冻融循环对水泥土无侧限抗压

强度损伤的影响, 引入冻融腐蚀因子  $K$  来评价水泥土抗冻融腐蚀的能力<sup>[23-24]</sup>。冻融腐蚀因子的定义:

$$K_i(N) = \frac{f_i(N)}{f_w(N)} \quad (1)$$

式中:  $K_i(N)$  为冻融腐蚀因子;  $f_w(N)$  为水泥土试样在清水中浸泡冻融第  $N$  次的无侧限抗压强度 (MPa);  $f_i(N)$ 、 $f_2(N)$ 、 $f_3(N)$  分别为水泥土试样在  $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  氯化钠溶液中浸泡冻融第  $N$  次的无侧限抗压强度 (MPa)。通过对水泥土无侧限抗压强度的分析计算, 得到不同氯化钠溶液侵蚀下水泥土冻融腐蚀因子和冻融循环次数的关系, 如图 2 所示。

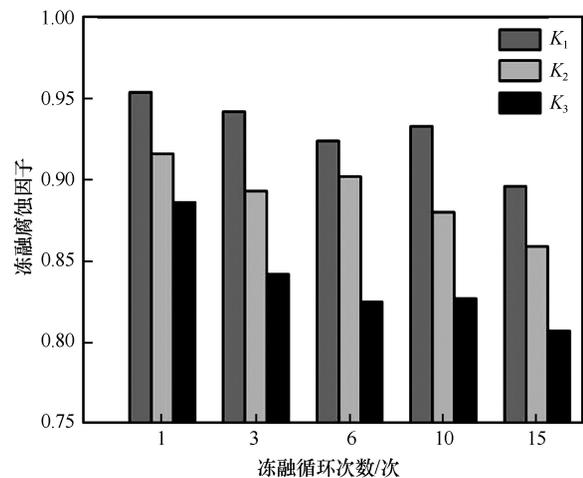


图 2 水泥土冻融腐蚀因子与冻融循环次数的关系

Fig. 2 Relationship between freeze-thaw corrosion factors of soil-cement and freeze-thaw cycles

在  $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  氯化钠溶液中水泥土的冻融腐蚀因子整体上随着冻融循环次数的增加呈下降趋势。经过 15 次冻融循环后,  $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  氯化钠溶液的冻融腐蚀因子分别为 0.896、0.859、0.807, 分别下降了 6.07%、6.22%、8.92%。这表明随着冻融循环次数的增加, 水泥土的抗冻融腐蚀能力越差。经过 6 次冻融循环时, 在  $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  氯化钠溶液中水泥土的冻融腐蚀因子下降速度较快, 6 次冻融循环后, 下降速度趋于缓慢。而  $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的氯化钠溶液冻融循环 10 次前下降较慢, 冻融循环 10 次后下降较快。这反映了氯化钠浓度越高, 冻融循环对水泥土前期损伤越严重, 裂缝随着冻融次数增加逐渐发育, 低浓度的氯盐沿着裂缝更容易渗入水泥土内部, 致使损伤加剧。

### 3 水泥石受压破坏特征与分析

#### 3.1 单轴受压破坏形态

图3为不同溶液、经过15次冻融循环下水泥石的受压破坏形态。不同溶液冻融循环下水泥石单轴受压破坏特征基本相似,随着荷载的增加,应力逐渐增大,水泥石表面由最初的细小裂纹逐渐扩展成多条竖向贯通的裂缝,由于纤维的掺入,在水泥石基体中三维空间乱向分布形成网状结构,

阻止了水泥石产生的裂缝向任意方向发展<sup>[25]</sup>,使得水泥石在遭受氯盐侵蚀和冻融循环下形成多条竖向裂缝。但随着氯盐浓度的增大,水泥石试样产生的裂缝呈现宽大的特征,通过对氯盐浸泡下压碎的水泥石试样分析,发现水泥石经受冻融循环后的主要破坏面发生在水泥与黏土接触面,这说明氯盐侵蚀主要破坏了水泥石内部结构,分解了水化硅酸钙凝胶,导致了水泥石内部黏结力降低。

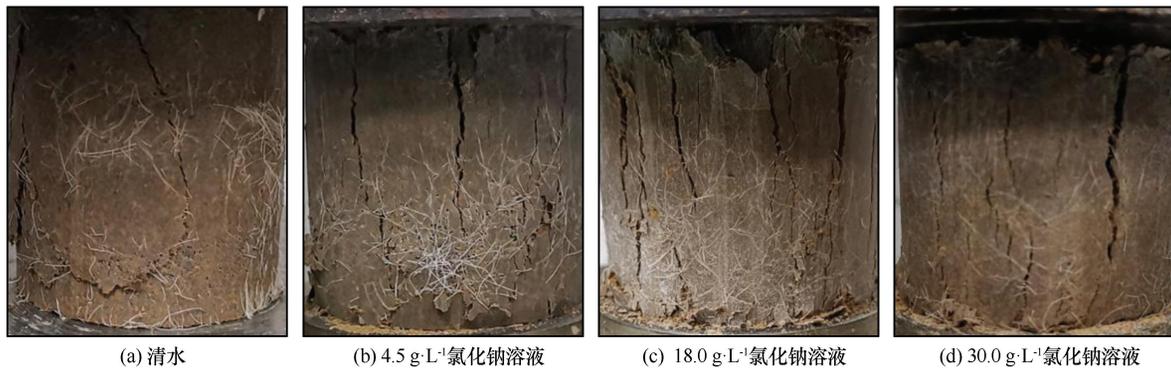


图3 水泥石受压破坏形态

Fig. 3 Failure modes of soil-cement samples under uniaxial loading: fresh water only (a), with sodium chloride solution of  $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (b), with sodium chloride solution of  $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (c) and with sodium chloride solution of  $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (d)

#### 3.2 体积变化率

水泥石试样在冻融循环试验后,由于冻胀,造成试样体积变化,通过测量冻融前后试样的直径和高度,计算冻融前后体积变化量,结果如表4所示。

为了更直观反映体积变化,用体积变化率 $\eta$ 表示<sup>[26]</sup>。用下式计算:

$$\eta = \frac{V_N - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\eta$ 为水泥石试样体积变化率(%); $V_0$ 、 $V_N$ 分别为冻融循环前和第 $N$ 次冻融循环后水泥石试样体积( $\text{mm}^3$ )。通过计算分析得到不同溶液下水泥石体积变化率与冻融循环次数之间的关系,如图4所示。

表4 水泥石冻融前后体积变化量

Table 4 Volume changes of soil-cement before and after freeze-thaw cycles

冻融循环次数/次	下列浸泡溶液浓度下体积变化量/ $\text{mm}^3$			
	清水	$4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液	$18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液	$30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液
1	297.8	337.9	499.9	692.4
3	462.4	740.8	584.9	1 004.5
6	738.2	988.2	1 132.0	1 476.4
10	1 089.9	1 043.6	1 302.4	1 617.6
15	1 243.7	1 445.1	2 134.0	2 502.8

由表4和图4可以看出,不同溶液下水泥石的体积变化率的规律相似,但变化的幅度有所不同。在清水条件下,随着冻融循环次数的增加,体积变化率呈上升趋势,经过15次冻融循环后,体积变化率增大了1.23%,基本呈线性变化。在 $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液中,体积变化率

均随着冻融循环次数的增加而增大,经过15次冻融循环,体积变化率分别增大了1.43%、2.11%和2.48%,但增幅出现了先减小后增大的趋势。其原因在于冻融循环前期时,氯化钠溶液降低了结冰的冰点,一定程度上缓解了冻融损伤。随着冻融循环次数的增加,进入水泥石内部的氯化钠溶液不断有

结晶析出, 氯化钠溶液浓度越高, 析出氯化钠结晶越多, 产生的结晶压力越大, 造成水泥土内部膨胀开裂。

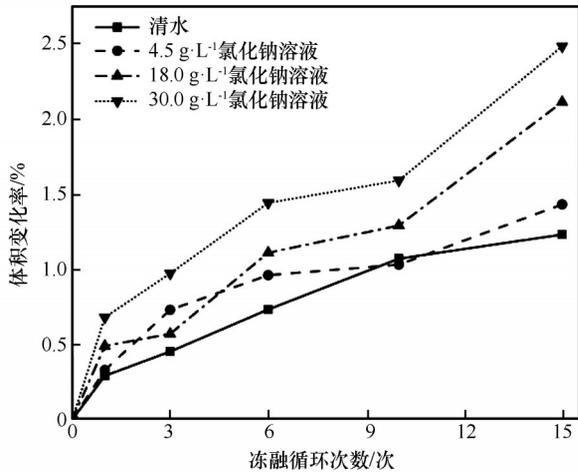


图4 水泥土体积变化率与冻融循环次数的关系

Fig. 4 Relationship between the rate of change of soil-cement diameter and number of freeze-thaw cycles

### 3.3 变形模量

为了更好的描述水泥土在氯盐侵蚀和冻融循环下的变形, 引入变形模量  $E_{50}$  来表示, 变形模量的定义公式:

$$E_{50} = \frac{\sigma_u}{2\varepsilon} \quad (3)$$

式中:  $E_{50}$  为水泥土的变形模量(MPa);  $\sigma_u$  为水泥土的峰值应力(MPa);  $\varepsilon$  为水泥土一半峰值应力时对应的应变(Pa)。图5为水泥土在清水、4.5 g·L<sup>-1</sup>氯化钠溶液、18.0 g·L<sup>-1</sup>氯化钠溶液和30.0 g·L<sup>-1</sup>氯化钠溶液中水泥土变形模量与冻融循环次数的关系。

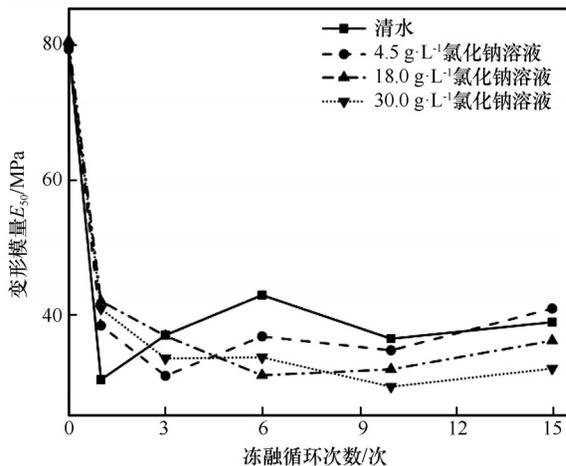


图5 水泥土变形模量与冻融循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between deformation modulus of soil-cement and number of freeze-thaw cycles

由图5可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 水泥土变形模量在清水、4.5 g·L<sup>-1</sup>、18.0 g·L<sup>-1</sup>和30.0 g·L<sup>-1</sup>氯化钠溶液中离散性逐渐减小。经过1次冻融循环时, 水泥土在清水、4.5 g·L<sup>-1</sup>和18.0 g·L<sup>-1</sup>氯化钠溶液中变形模量分别下降了61.71%、51.48%、48.52%和47.76%。可以看出, 水泥土在清水中下降最大。原因在于冻融前期, 氯化钠溶液浸泡下的水泥土内部进入部分氯盐结晶, 填充了一部分内部孔隙, 使得变形模量较水中浸泡有所提高。经过1次冻融循环后, 在清水、4.5 g·L<sup>-1</sup>、18.0 g·L<sup>-1</sup>、30.0 g·L<sup>-1</sup>氯化钠溶液中水泥土变形模量呈现上下波动趋势。但整体上清水中的变形模量要大于氯化钠溶液浸泡下的水泥土变形模量。原因在于氯盐和冻融循环反复作用下, 水泥土会产生疲劳破坏, 当水泥土中盐类结晶的损伤负效应大于填充孔隙的正效应时, 水泥土的盐冻破坏较水冻作用更大。

### 4 氯盐侵蚀下水泥土微观分析

图6为不同溶液、经过15次冻融循环下水泥土的微观结构图。从图6(a)可以看出, 未受冻融和氯盐侵蚀时, 水泥土内部有微小的孔隙, 产生的水化产物包裹着内部土团颗粒, 凝胶材料镶嵌在土团颗粒上, 能使土团颗粒黏结的更加致密。与图6(a)相比, 图6(b)中水泥土在清水冻融下, 水泥土内部颗粒之间的空隙逐渐增大, 内部孔隙逐渐扩展、发育成连通孔, 结构变得更加松散。针对这种现象, 有研究人员提出了冰胀压和渗透压理论<sup>[27-28]</sup>, 该理论认为水泥土内部水的蒸汽压大于冰的蒸汽压, 大孔的冰点较小孔高, 通常先结冰, 导致水泥土内部冰水之间产生了压力差, 该压力差会将水泥土内部未结冰水向着已冻结区域进行推进, 这就在水泥土内部形成了渗透压。中国水利水电科学研究院提出了静水压<sup>[29]</sup>, 水泥土试样在饱和浸泡时, 其内部的空气泡在常压下无法达到饱和状态, 导致内部还有无水存在的区域, 周围孔饱水结冰膨胀, 将水泥土内部未结冰水沿着结冰棱角处产生的裂纹向着无水区域迁移, 形成了静水压力, 多次反复冻融循环, 导致裂纹在未结冰水的作用下逐渐扩展至贯通。

从图6(c)、6(d)和6(e)可以看出, 水泥土在氯化钠溶液侵蚀和冻融循环耦合下, 随着氯化钠浓度的增加, 内部孔隙逐渐扩大, 结构变得更加稀疏,

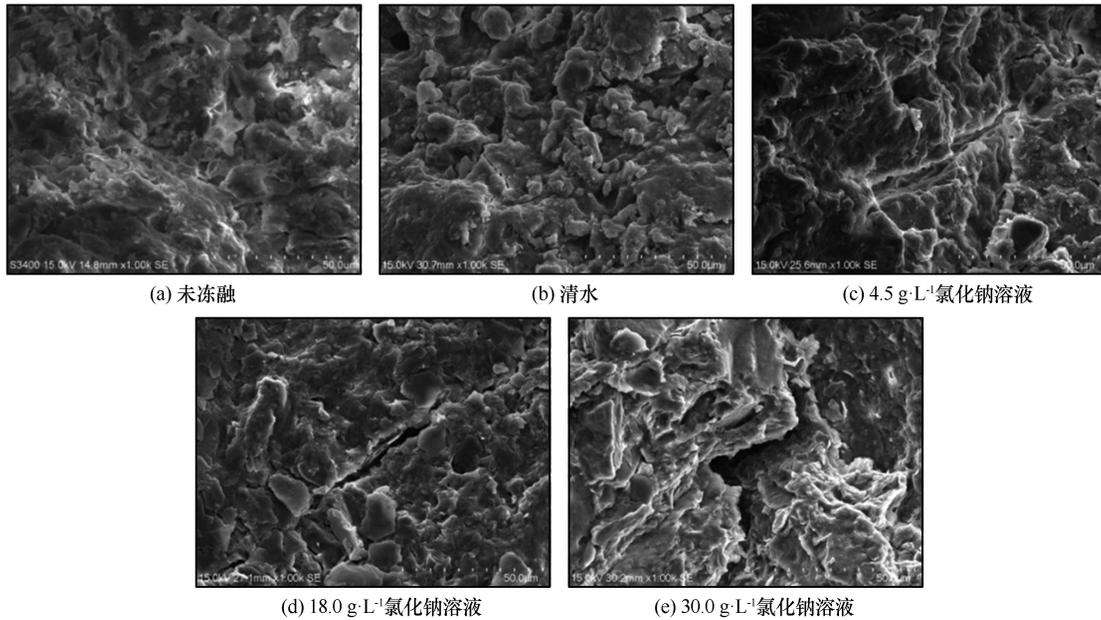


图6 不同溶液下水泥土经过15次冻融循环的微观结构

Fig. 6 Microstructures of soil-cement under different solutions subjected to 15 freeze-thaw cycles: before freeze-thaw (a), fresh water only (b), with sodium chloride solution of  $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (c), with sodium chloride solution of  $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (d) and with sodium chloride solution of  $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (e)

孔隙之间析出的氯化钠结晶逐渐增多,在反复冻融循环作用下,内部逐渐形成贯通的裂缝,且裂缝的数量随着浓度的增加逐渐增多。这是由于氯化钠溶液进入水泥石内部,分离了大量氯离子和钠离子,氯离子与氢氧化钙易于产生化学-交换反应,生成易溶于水的氯化钙,使得水泥石内部水化产物C-S-H减少,内部结构松散。同时钠离子以游离态在水泥石内部存在,土颗粒表面带有负电荷,钠离子由于电荷作用吸附于土颗粒表面,阻断了水泥石内部水化反应的继续进行。随着氯化钠浓度的逐渐提高,氯化钠结晶不断被析出,产生巨大的结晶压力,引起水泥石内部结构的膨胀开裂。导致无侧限抗压强度和变形模量的降低、体积膨胀变大。

由疲劳损伤理论可知<sup>[29]</sup>,在冻融循环交替作用下,水泥石均会产生疲劳损伤,水泥石疲劳损伤的程度和冻融循环次数有关,每次冻融产生的损伤不能恢复,多次冻融循环后累积损伤等于每次冻融损伤之和。但是,从水泥石试样无侧限抗压强度、体积变化率、变形模量和破坏特征方面来看,氯化钠溶液中的水泥石冻融损伤都比水中的严重。这表明氯化钠溶液对水泥石的冻胀损伤更大,且水泥石的宏观破坏和微观内部结构也印证了氯盐结晶的存在加剧了水泥石的冻融破坏。

## 5 结论

进行了不同浓度氯化钠溶液下的水泥石冻融循环试验,分析了氯盐侵蚀和冻融循环耦合作用下水泥石强度和破坏特征的变化规律,得到如下结论:

(1) 随着冻融循环次数的增加,在清水、 $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液中,经过15次冻融循环后,在清水、 $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液中水泥石无侧限抗压强度较冻融循环前分别下降了64.10%、67.82%、69.15%和71.01%。相同冻融循环次数下,氯化钠溶液浸泡整体小于清水浸泡下水泥石的无侧限抗压强度,氯化钠溶液浓度越高,水泥石抵抗冻融腐蚀的能力越弱。

(2) 在同种浓度溶液中,经过15次冻融循环后,在清水、 $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $18.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液中水泥石体积变化率较冻融循环前分别增加了1.23%、1.43%、2.11%和2.48%,而变形模量较冻融循环前整体呈下降趋势。这表明随着浓度的增高,水泥石体积膨胀变大,内部结构松散,抵抗变形的能力越弱。

(3) 相同冻融循环次数下,氯化钠溶液和冻融循环耦合下产生的损伤要大于清水中冻融损伤,

氯化钠溶液浓度越高, 水泥土内部微观损伤越严重。

### 参考文献(References):

- [1] Gao Changhui, Ma Qinyong, Ma Dongdong. SHPB test and analysis on cemented silty clay under confining pressure conditions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(14): 162 – 167. [高常辉, 马芹永, 马冬冬. 主动围压作用下水泥粉质黏土 SHPB 试验与分析[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(14): 162 – 167.]
- [2] Liu Yutong, Yang Lin. Study on mechanical properties of PPF stabilized soil under freezing and thawing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 850 – 857. [刘雨彤, 杨林. 冻融作用下 PPF 稳定土力学性能研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 850 – 857.]
- [3] Pham V N, Turner B, Huang Jinsong, et al. Long-term strength of soil-cement columns in coastal areas[J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57(4): 645 – 654.
- [4] Cui Honghuan, Pei Guolu, Yao Shijun, et al. Experimental study of mechanical properties of cement soil of different curing time subjected to freezing-thawing cycles[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 110 – 115. [崔宏环, 裴国陆, 姚世军, 等. 不同养生龄期下水泥土经冻融循环后力学性能试验探究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 110 – 115.]
- [5] Hou Shupeng, Chen Liyi, Wang Sheng, et al. Degradation and deterioration behaviors of cemented soil under cyclic freezing-thawing[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(12): 124 – 127, 132. [侯淑鹏, 陈礼仪, 王胜, 等. 冻融循环条件下水泥土损伤劣化特征研究[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(12): 124 – 127, 132.]
- [6] Zhang Ze, Zhou Hong, Qin Qi, et al. Experimental study on porosity characteristics of loess under freezing-thawing cycle[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(3): 839 – 847. [张泽, 周泓, 秦琦, 等. 冻融循环作用下黄土的孔隙特征试验[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(3): 839 – 847.]
- [7] Wang Shengfu, Yang Ping, Liu Guanrong, et al. Micro pore change and fractal characteristics of artificial freeze thaw soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(7): 1254 – 1261. [王升福, 杨平, 刘贯荣, 等. 人工冻融软黏土微观孔隙变化及分形特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(7): 1254 – 1261.]
- [8] Kravchenko E, Liu Jiankun, Niu Weiwei, et al. Performance of clay soil reinforced with fibers subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 153: 18 – 24.
- [9] Li Yan, Ling Xianzhang, Su Lei, et al. Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 146: 53 – 59.
- [10] Zhang Huajie, Han Shangyu, Jiang Minmin, et al. An analysis of the macro-and-micro properties of cement-soil under NaCl erosion environment[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(2): 49 – 54. [张华杰, 韩尚宇, 蒋敏敏, 等. NaCl 侵蚀环境下水泥土的宏微观特性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2012(2): 49 – 54.]
- [11] Liu Dongfeng. Experimental study of cemented soil under sodium chloride and magnesium chloride erosion environment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(26): 131 – 135. [刘东锋. 氯化钠、氯化镁侵蚀环境下水泥土力学性质影响试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(26): 131 – 135.]
- [12] Jiang Guolong, Chen Sili, Wang Junxiang. Study on the erosion of cement soil by the coupling environment of acid-base and sodium salt[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2018, 38(6): 223 – 227. [江国龙, 陈四利, 王军祥. 酸碱与钠盐耦合环境对水泥土的侵蚀研究[J]. *中外公路*, 2018, 38(6): 223 – 227.]
- [13] Liu Quansheng, Qu Jiawang, Liu Zhiping, et al. Experimental study on mechanical properties of cemented soil under the influence of erosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3377 – 3384. [刘泉声, 屈家旺, 柳志平, 等. 侵蚀影响下水泥土的力学性质试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3377 – 3384.]
- [14] Lü Wei, Hu Ronghua. Influence of erosive ion on the strength of cement-soil pile based on analytic hierarchy process (AHP)[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(3): 65 – 67. [吕伟, 胡荣华. 基于 AHP 法的侵蚀离子对水泥土桩强度影响研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(3): 65 – 67.]
- [15] Lü Qingfeng, Jiang Lusha, Ma Bo, et al. A study on the effect of the salt content on the solidification of sulfate saline soil solidified with an alkali-activated geopolymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 68 – 74.
- [16] Han Yan, Wang Qing, Wang Ning, et al. Effect of freeze-thaw cycles on shear strength of saline soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 154: 42 – 53.
- [17] Cui Kai, Wu Guopeng, Du Yumin, et al. The coupling effects of freeze-thaw cycles and salinization due to snowfall on the rammed earth used in historical freeze-thaw cycles relics in northwest China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 160: 288 – 299.
- [18] Zhang Weibing, Ma Junze, Tang Lian. Experimental study on shear strength characteristics of sulfate saline soil in Ningxia region under long-term freeze-thaw cycles[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 160: 48 – 57.
- [19] Zhang Jingshuang, Duan Xuelei. Effects of freeze-thaw cycles on damage characteristics and energy dissipation of soil-cement at different ages[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7): 2144 – 2151. [张经双, 段雪雷. 冻融循环下不同龄期水泥土损伤特性和能量耗散[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7): 2144 – 2151.]
- [20] Rui Dahu, Guo Cheng, Lu Ming, et al. Experimental study on water and salt migrations in clay under freezing effect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 109 – 116. [芮大虎, 郭成, 芦明, 等. 冻结作用下黏土中水、盐迁移试验研究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(1): 109 – 116.]
- [21] Zhao Yanru, Fan Xiaoqi, Wang Liqiang, et al. Attenuation model of mechanical properties of concrete under different freezing and thawing media[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 34(2): 463 – 470. [赵燕茹, 范晓奇, 王利强, 等. 不同冻融介质作用下混凝土力学性能衰减模型[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(2): 463 – 470.]
- [22] Zhang Shuling, Ni Jing, Ma Lei, et al. Experimental study on mechanical properties of cemented soil and fly ash after freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(4): 196 – 201. [张淑玲, 倪静, 马蕾, 等. 冻融循环作用后水泥土及粉煤灰土的力学性能试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4): 196 – 201.]
- [23] Ma Qinyong, Wu Jinrong, Qin Kai. Tests and analyses of the influence of chlorine salt on freezing-thawing splitting tensile strength of asphalt concrete[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1202 – 1208. [马芹永, 吴金荣, 秦凯. 氯盐对沥青混凝土冻融劈裂抗拉强度影响的试验与分析

- 析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1202 - 1208. ]
- [24] Xiong Rui, Chen Yufa, Guan Bowen, et al. Study on properties of asphalt concrete under the coupling of freeze-thaw and corrosion [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(2): 72 - 76. [熊锐, 陈拴发, 关博文, 等. 冻融与腐蚀耦合作用下沥青混凝土性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(2): 72 - 76. ]
- [25] Liu Shuguang, Yin Liqiang, Yan Changwang, et al. Improved flexural strength resistance of PVA fiber-reinforced concrete subjected to freezing and thawing cycles in chloride environment [J]. Materials Review, 2015, 29(24): 92 - 97. [刘曙光, 尹立强, 闫长旺, 等. 聚乙烯醇纤维对盐冻混凝土抗折强度的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(24): 92 - 97. ]
- [26] Wu Yaping, Wang Ning, Pan Gaofeng, et al. Study on frost heaving characteristics of high-salt fine sand in northern Qinghai [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 307 - 313. [吴亚平, 王宁, 潘高峰, 等. 青海北部高含盐细砂冻胀特性研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 307 - 313. ]
- [27] Liu Yaowu, Wang Qing, Liu Shouwei, et al. Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 32 - 42.
- [28] Su Xiaoping, Wang Qing, Wang Wenhua, et al. Frost resistance and durability mechanism of concrete under saline-alkali condition in seasonal frozen soil area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(4): 1244 - 1253. [宿晓萍, 王清, 王文华, 等. 季节冻土区盐渍土环境下混凝土抗冻耐久性机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(4): 1244 - 1253. ]
- [29] Shang Huaishuai, Ou Jinping, Song Yupu. Analysis on reliability and freeze-thaw damage theory of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 70 - 74. [商怀帅, 欧进萍, 宋玉普. 混凝土结构冻融损伤理论及冻融可靠度分析[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 70 - 74. ]

## Strength and failure characteristics of soil-cement under coupling of chloride salt and freeze-thaw cycles

ZHANG Jingshuang<sup>1,2</sup>, DUAN Xuelei<sup>1,2</sup>, MA Dongdong<sup>1,2</sup>

(1. Engineering Research Center of Mine Underground Engineering, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

**Abstract:** In order to study the unconfined compressive strength and failure characteristics of soil-cement under the coupling of chloride salt erosion and freeze-thaw cycles, the freeze-thaw cycle test of soil-cement with different concentrations of sodium chloride solution was carried out, and the freeze-thaw corrosion factor, volume change rate and modulus of deformation before and after freeze-thaw were obtained. The damage amount and microstructure characteristics were analyzed. It is found that the unconfined compressive strength and freeze-thaw corrosion factors of soil-cement under the coupling of chloride salt and freeze-thaw cycles decrease with increasing freeze-thaw cycles, and as the concentration of chloride salt increases gradually, the unconfined compressive strength and freeze-thaw corrosion factor of soil-cement decrease rapidly. In a same concentration solution, the volume change rate of soil-cement increases with increasing the number of freeze-thaw cycles, but the deformation modulus decreases with increasing the number of freeze-thaw cycles. As the concentration of chloride solution increases, the volume expansion of soil-cement increases, which results in a weaker internal structure and a weaker resistance to deformation. Under the same number of freeze-thaw cycles, the damage caused by sodium chloride solution is greater than that in specimen from clear water. As the concentration of sodium chloride solution increases, the damage of microstructure inside soil-cement becomes more serious.

**Key words:** chloride salt; freeze-thaw cycle; soil-cement; unconfined compressive strength; failure characteristics; microstructures

(责任编辑: 周成林; 编辑: 庞瑜, 周成林)