

文章编号:1007-9629(2021)03-0508-09

## 氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土的力学性能

张经双<sup>1,2</sup>, 段雪雷<sup>1,2</sup>, 吴倩云<sup>1,2</sup>, 刘永翔<sup>1,2</sup>, 夏香港<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:** 为研究氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土的力学性能, 针对纤维改良水泥黏土进行无侧限抗压强度、超声波检测、扫描电镜(SEM)及 X 射线衍射(XRD)试验, 分析了水泥土质量损失率、相对波速、峰值应力、残余应力、变形模量的变化规律和微观结构特征。结果表明: 随着氯盐质量浓度和干湿循环次数的增加, 水泥土的内部微观结构更加疏松, 质量损失率增大, 纵波波速下降; 在氯盐-干湿循环耦合作用下, 水泥土的应力-应变曲线存在压密阶段、弹塑性阶段、破坏阶段和残余阶段; 水泥土的峰值应力和残余应力均符合指数函数下降规律, 在清水、4.5、18.0、30.0 g/L NaCl 溶液中经历 28 次干湿循环后, 水泥土的峰值应力、残余应力和变形模量分别下降 48.79%、57.71% 和 49.33%, 52.63%、48.76% 和 54.37%, 56.88%、59.70% 和 57.50%, 57.89%、57.71% 和 65.67%, 水泥土破坏后的残余应力为峰值应力的 20%~40%。

**关键词:** 水泥土; 氯盐; 干湿循环; 应力-应变曲线; 微观结构

中图分类号: TU411

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.009

## Mechanical Properties of Cement Soil Subject to Coupling Effect of Chloride Salt Solution and Dry-Wet Cycles

ZHANG Jingshuang<sup>1,2</sup>, DUAN Xuelei<sup>1,2</sup>, WU Qianyun<sup>1,2</sup>, LIU Yongxiang<sup>1,2</sup>, XIA Xianggang<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of cement soil subjected to the coupling effect of chloride salt solution and dry-wet cycles, unconfined compression test, ultrasonic test, scanning electron microscope(SEM) test and X-ray diffraction(XRD) test were performed. The change rules of mass loss rate, relative wave velocity, peak stress, residual stress, deformation modulus and microstructure characteristics of cement soil were investigated. The results show that with increasing chloride salt concentration and the number of dry-wet cycles, the internal microstructure of cement soil becomes more loose, and the mass loss rate increases, but the P-wave velocity decreases. The stress-strain curve of cement soil subjected to the coupling effect of chloride salt and dry-wet cycles can be divided into compaction phase, elastic-plastic phase, failure phase and residual phase. The peak stress and residual stress of cement soil comply with the exponential decline law. Compared with those before the wet-dry cycle, the peak stress, residual stress and deformation modulus subjected to 28 wet-dry cycles in water, 4.5, 18.0, 30.0 g/L NaCl solutions decrease by 48.79%, 57.71% and 49.33%, 52.63%, 48.76% and 54.37%, 56.88%, 59.70% and 57.5%, 57.89%, 57.71% and 65.67%, respectively. And the residual stress is 20%–40% of the peak stress.

**Key words:** cement soil; chloride salt; dry-wet cycle; stress-strain curve; microstructure

收稿日期:2020-01-01; 修订日期:2020-02-11

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2015A135)

第一作者:张经双(1977—),男,安徽六安人,安徽理工大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:hnaust@163.com

当工程中遇到软土地基时,一般采用水泥土搅拌桩进行加固<sup>[1-2]</sup>。由于水泥材料脆性较大,通常添加固化剂和纤维来改善水泥土搅拌桩的物理与力学性能<sup>[3-5]</sup>。中国地质环境复杂,水泥土桩的结构耐久性问题显得更加突出<sup>[6-7]</sup>。尤其是在盐类侵蚀环境下,复合水泥土的内部组成和微观结构均会发生变化,从而影响其物理参数<sup>[8-9]</sup>、力学性质<sup>[10-11]</sup>和变形特征<sup>[12-13]</sup>。查甫生等<sup>[11]</sup>将水泥固化铅污染土放入NaCl溶液中进行浸泡,发现NaCl溶液导致固化土内部结构疏松,压缩性增大,强度降低。吴燕开等<sup>[12]</sup>通过在土体中加入钢渣粉和水泥固化剂,探究了固化土抵抗海水的侵蚀能力,发现钢渣粉可以降低海水对固化土的侵蚀作用。另外,地下水位的升降、潮汐变化、降雨及暴晒均会对水泥土搅拌桩路基产生干湿交替作用,导致其产生类似“疲劳作用”的破坏<sup>[14]</sup>。国内外学者对干湿循环作用下土体及改良土体的损伤研究已取得一些成果<sup>[15-18]</sup>。如任克彬等<sup>[15]</sup>开展了干湿循环作用下遗址粉土的三轴排水剪切试验,得到遗址粉土的黏聚力和变形模量随干湿循环次数先增后减的结论。Helson等<sup>[16]</sup>进行了固化土在干湿循环作用下的耐久性试验,并定义了水泥土中水泥的临界阈值。

以往研究成果为改良土体在盐类侵蚀和干湿循环单一作用机制方面奠定了良好的基础,但中国西北盐渍土地区和沿海地区修建的桥梁路基工程等实际工程建设中,水泥土常常同时遭受盐类侵蚀和干湿循环破坏。因此,开展水泥土内部微观结构和物相分析研究,避免以往单纯从强度和物理参数变化分析的片面性,能够对水泥土在氯盐和干湿循环环境下的力学性能进行综合评估。

本文以纤维改良水泥黏土为研究对象,进行了氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土无侧限抗压强度、超声波检测、扫描电镜(SEM)和X射线衍射(XRD)试验,分析了氯盐-干湿耦合环境下水泥土试件的劣化参数和应力-应变曲线,揭示了水泥土在耦合作用下的力学性能演化规律,并阐述其微观作用机制,以期为水泥土在复杂工程地质环境下的应用提供试验数据。

## 1 试验

### 1.1 原材料和配合比

黏土选用淮南某地区地下5 m基坑土,重度为 $1.92 \text{ kN/m}^3$ ,天然含水率(质量分数,文中涉及的含量、水胶比等均为质量分数或质量比)为23.8%,液

限为41.60%,塑限为22.00%,其颗粒级配如图1所示。水泥选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥。粉煤灰选用淮南平圩电厂Ⅱ级粉煤灰,其主要化学成分为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。纤维选用耐腐蚀的单丝聚丙烯纤维,直径 $48 \mu\text{m}$ ,长度12 mm。碱激发剂 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 选用天津市致远化学试剂有限公司产的分析纯。水为实验室自来水。按干土质量15.0%、8.0%和0.4%分别掺入水泥、粉煤灰和聚丙烯纤维,水胶比取0.5<sup>[5]</sup>;按水泥土总质量1.0%掺入碱激发剂 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。将以上原材料拌和均匀并采用分层击实法,制作成尺寸为 $\phi 50 \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱形试件。

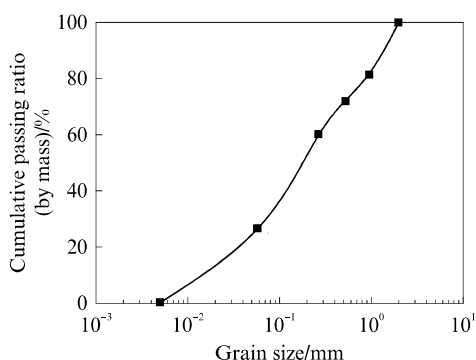


图1 黏土的颗粒级配

Fig. 1 Particle distribution of clay

### 1.2 试验方法

对达到养护龄期90 d的水泥土试件进行编号,其中将未浸泡的水泥土试件作为参照组,编号为NS,其他试件编号如表1所示。为减少试件制作差异对试验结果的影响,采用NM-4A非金属声波检测仪进行超声波检测。干湿循环(DW)和氯盐侵蚀试验分别参照ASTM D4843-88《Standard test method for wetting and drying test of solid wastes》和文献[19]中的改进方法,将养护完成的试件放入 $40^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干12 h后取出,分别置于恒温 $20^\circ\text{C}$ 的清水(W)、4.5 g/L NaCl溶液(SC4.5)、18.0 g/L NaCl溶液(SC18)和30.0 g/L NaCl溶液(SC30)中浸泡12 h,1次干湿循环时间为24 h,如此进行0、4、8、12、16、20、28次干湿循环。达到设定干湿循环次数后,将在不同质量浓度氯盐溶液和清水浸泡下的试件取出,进行拍照、称重,再次进行超声波检测,并采用WDW-20微机控制电子式压力试验机进行无侧限抗压强度试验,采用位移加载方式,加载速率为 $1 \text{ mm/min}$ 。同时针对部分试件采用S-3400N型扫描电镜和SMARTLAB9KW型X射线衍射仪进行SEM和XRD分析。

表 1 水泥土试件编号  
Table 1 Numbers of cement soil specimens

| Number of dry-wet cycle/times | Type of solution |                       |                        |                        |
|-------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|                               | Water            | 4.5 g/L NaCl solution | 18.0 g/L NaCl solution | 30.0 g/L NaCl solution |
| 4                             | W-DW4            | SC4.5-DW4             | SC18-DW4               | SC30-DW4               |
| 8                             | W-DW8            | SC4.5-DW8             | SC18-DW8               | SC30-DW8               |
| 12                            | W-DW12           | SC4.5-DW12            | SC18-DW12              | SC30-DW12              |
| 16                            | W-DW16           | SC4.5-DW16            | SC18-DW16              | SC30-DW16              |
| 20                            | W-DW20           | SC4.5-DW20            | SC18-DW20              | SC30-DW20              |
| 28                            | W-DW28           | SC4.5-DW28            | SC18-DW28              | SC30-DW28              |

## 2 结果分析

### 2.1 氯盐-干湿循环耦合作用对水泥土的劣化作用

#### 2.1.1 表观劣化特征

图 2 为水泥土试件在不同溶液和干湿循环耦合作用下的外观形貌. 水泥土为不均匀复合材料, 其内部存在微裂纹和孔洞等初始损伤. 由图 2 可见: 在氯盐-干湿循环耦合作用下, 经历 12 次干湿循环时, 水泥土试件表层裂纹不断扩大, 少量水泥土微颗粒剥落, 其表面由原来的相对光滑演变为

粗糙; 经历 20 次干湿循环后, 水泥土试件表面剥落更加严重, 出现水泥土块片状脱落, 是由于底部氯盐溶液有些许沉淀, 且上部溶液压小于下部溶液压, 致使渗入水泥土试件下部的溶液多于上部, 试件有所膨胀, 在脱水状态下失水较多, 产生的尺寸效应更加明显; 经历 28 次干湿循环后, 水泥土试件呈现小块状脱落, 表层几乎全部剥落, 结构变得更加疏松; 随着氯盐溶液质量浓度的增加, 水泥土表层发生破坏的时间有所提前, 劣化程度愈发严重.

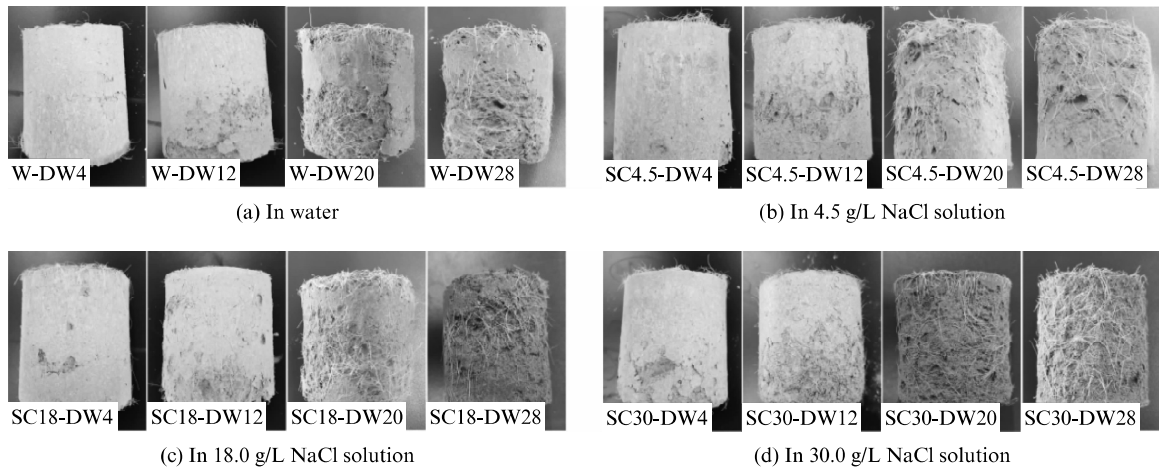


图 2 水泥土试件在不同溶液和干湿循环耦合作用下的外观形貌  
Fig. 2 Deformation appearance of cement soil specimens subjected to coupling effects of different solutions and dry-wet cycles

#### 2.1.2 质量变化率和相对波速

为直观反映氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土表皮脱落、内部结构和强度变化等损伤情况, 将质量变化率  $\Delta w$  和相对波速  $v_r$  作为评价指标, 两者计算表达式如下:

$$\Delta w = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$v_r = \frac{v_n}{v_0} \tag{2}$$

式中:  $w_0$ 、 $w_n$  分别为水泥土试件的初始质量和第  $n$

次干湿循环后的质量, g;  $v_0$ 、 $v_n$  分别为水泥土试件的初始波速和第  $n$  次干湿循环后的纵波波速, m/s.

氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土试件的质量变化率、相对波速与干湿循环次数之间的关系如图 3 所示. 由图 3 可见: (1) 水泥土试件在氯盐-干湿循环耦合作用下质量损失逐渐增大, 且增速由慢到快; 在各溶液浸泡下, 试件质量变化率随干湿循环次数增加的规律基本一致; 氯盐质量浓度越高, 其外观表皮脱落越多, 质量损失越大. (2) 水泥土试件的相对波速随着干湿循环次数的增加逐渐减小, 且下降

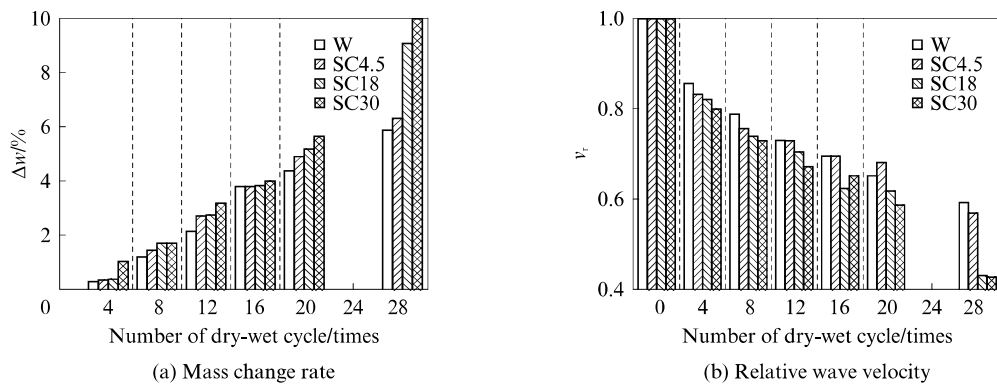


图3 水泥土试件的质量变化率、相对波速与干湿循环次数的关系

Fig. 3 Relationship between mass change rate, relative wave velocity and number of dry-wet cycles of cement soil specimens

速度逐渐减缓;随着氯盐质量浓度的增加,试件相对波速的下降速度先慢后快。氯盐侵蚀水泥土表皮,致使其脱落,干湿循环和氯盐侵蚀交替进行,加速盐类侵蚀,致使试件内部结构疏松;同时随着氯盐质量浓度的升高,试件内部结构侵蚀更加严重。

## 2.2 水泥土在氯盐-干湿耦合作用下的应力-应变曲线

### 2.2.1 应力-应变曲线

图4为水泥土试件NS和W-DW4的应力-应变

变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线。由图4可以看出,干湿循环作用下水泥土试件W-DW4的应力-应变曲线与未浸泡试件NS相似,分为压密阶段、弹塑性阶段、破坏阶段和残余阶段。其他各组试件的应力-应变曲线与试件W-DW4基本相同。

对在不同溶液和干湿循环耦合作用下的水泥土试件进行无侧限抗压试验,得到其应力-应变曲线,如图5所示。图5中水泥土试件的应力-应变曲线各阶段特征为:

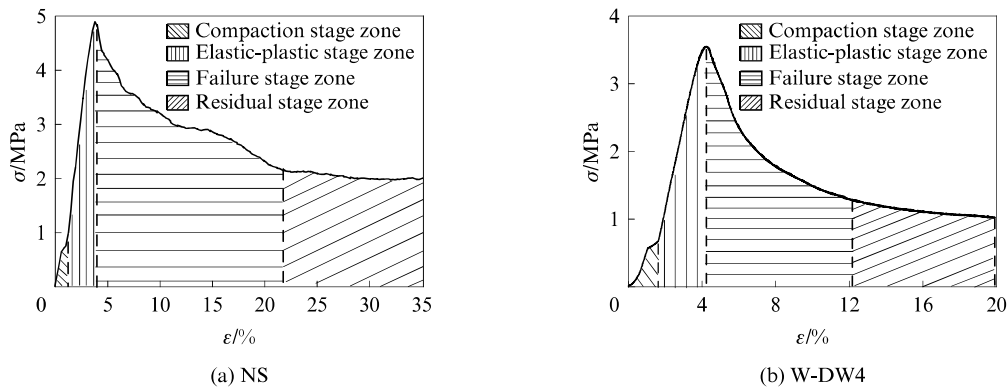


图4 不同溶液下水泥土试件的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of cement soil specimens in different solutions

(1)压密阶段 从受荷开始到15%~30%破坏荷载时为压密阶段。该阶段水泥土试件内部的孔隙逐渐压密,应力-应变曲线相对平缓,曲线斜率可以近似反映水泥土内部孔隙变化状况。结合图4(a)可知,水泥土试件的应力-应变曲线斜率较大,且应变较小,为0.062~0.084,而在氯盐溶液和干湿循环耦合作用下,水泥土试件的应力-应变曲线斜率随着氯盐溶液质量浓度和干湿循环次数的增加逐渐变小,且应变整体大于未浸泡试件。

(2)弹塑性阶段 从压密阶段结束到70%~80%破坏荷载时水泥土进入为弹塑性阶段。该阶段应力-应变近似呈线性关系,水泥土试件内部孔隙和裂缝稳定发育、扩展。与未浸泡的水泥土试件相比,在清水和氯盐溶液中的水泥土试件应力-应变曲线斜率均出现不同程度的减小趋势,且应变增大10%~70%;与清水相比,相同应力条件下,氯盐浸泡的水泥土试件峰值应变略微增大。表明氯盐溶液进入水泥土内部,软化侵蚀其内部结构,变形增大。

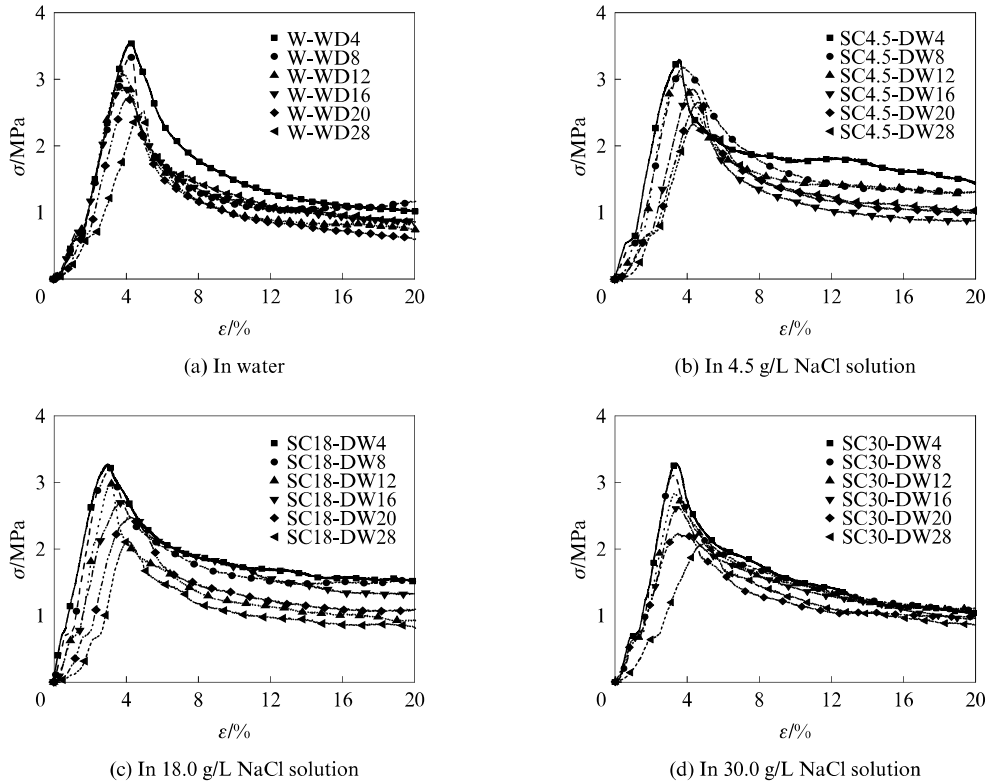


图5 不同溶液和干湿循环耦合作用下水泥土试件的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of cement soil specimens subjected to coupling effects of different solutions and dry-wet cycles

(3) 破坏阶段 当轴向荷载增大至80%~100%破坏荷载时,水泥土试件逐渐扩展并形成贯通裂缝,该阶段应变增加0.02~0.04,而应力下降30%~50%。随着干湿循环次数的增加,复合水泥土破坏下降速率趋缓,表明NaCl溶液进入水泥土内部并与水化产物发生反应和离子交换反应,析出氯盐结晶,增大了密实度,减缓了破坏下降速率。

(4) 残余阶段 应力-应变曲线下降段拐点之后,当应变增至0.08~0.12时,水泥土试件在清水、4.5、18.0、30.0 g/L NaCl溶液中的应力基本保持不变,表明在氯盐-干湿循环耦合作用下,水泥土试件破坏后仍存在残余应力。在不同溶液浸泡下,水泥土试件的残余应力相差不大,为其峰值应力的20%~40%。

### 2.2.2 峰值应力和残余应力

图6分别为水泥土试件在清水、4.5、18.0、30.0 g/L NaCl溶液下的峰值应力( $\sigma_u$ )和残余应力( $\sigma_{cr}$ )随干湿循环次数变化曲线。由图6可以看出:不同溶液浸泡下水泥土试件的峰值应力和残余应力随着干湿循环次数的增加而减小;其关系曲线随着循环次数的增加而趋于平缓;采用指数函数关系模型能够较好地描述氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土的峰值应力和残余应力变化规律。由图6还可见:(1)干湿循

环前,水泥土试件的峰值应力和残余应力分别为4.94、2.01 MPa;28次干湿循环后,在清水、4.5、18.0、30.0 g/L NaCl溶液中水泥土的峰值应力与残余应力分别下降48.79%和57.71%、52.63%和48.76%、56.88%和59.70%、57.89%和57.71%。(2)随着氯盐质量浓度的增加,水泥土试件的峰值应力逐渐下降,而残余应力并无明显降低。原因在于水泥土经历干湿循环后,其内部结构发生干缩湿胀现象,引起内部薄弱结构产生应力集中,诱发内部微裂纹不断发育、扩展,溶液沿着裂缝进入内部,溶蚀矿物颗粒<sup>[18]</sup>;随着干湿循环次数的增加,水泥土内部的矿物颗粒流失逐渐增多,土骨架承受能力逐渐减弱,从而导致其峰值应力和残余应力逐渐降低。

### 2.2.3 变形模量

在无侧限抗压强度作用下,氯盐-干湿循环耦合作用会直接影响水泥土的变形能力。引入变形模量 $E_{50}$  (MPa)来衡量水泥土在复杂环境下的变形特征,其计算表达式为:

$$E_{50} = \frac{0.5\sigma_u}{\epsilon} \quad (3)$$

式中: $\epsilon$ 为水泥土50%峰值应力时对应的应变。

图7为水泥土试件变形模量与干湿循环次数、峰值应力的关系。

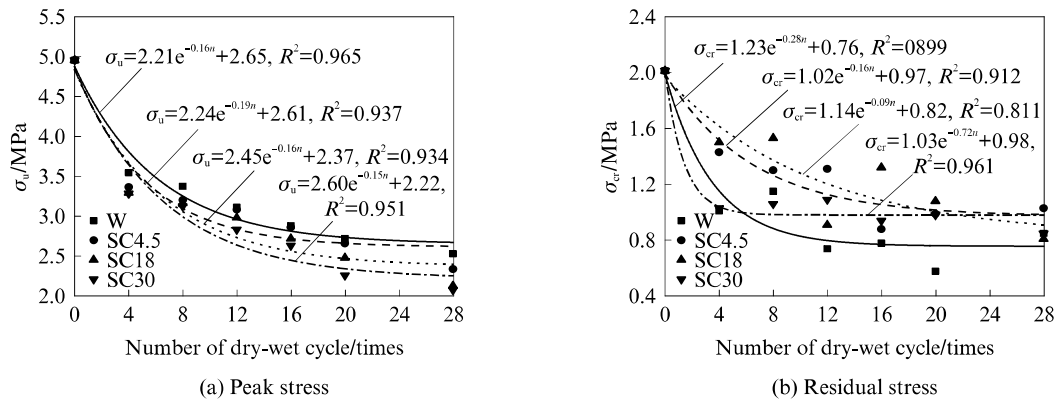


图6 水泥土试件峰值应力、残余应力与干湿循环次数关系

Fig. 6 Relationship between peak stress, residual stress and dry-wet cycles of cement soil specimens

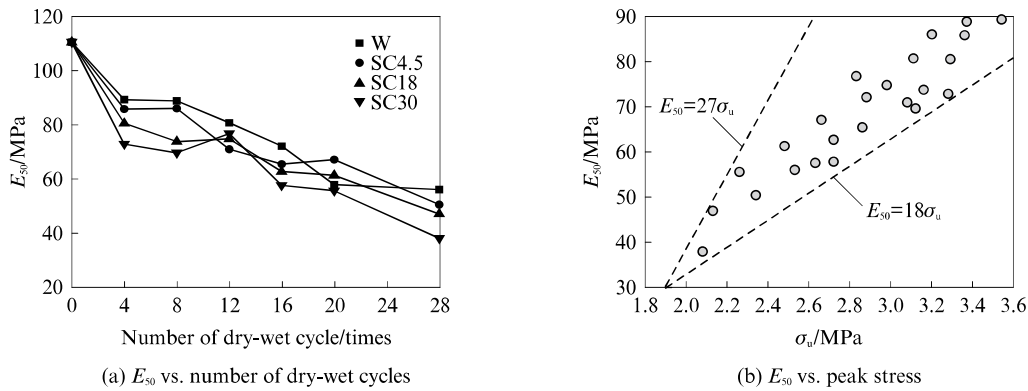


图7 水泥土试件变形模量与干湿循环次数、峰值应力的关系

Fig. 7 Relationship between deformation modulus and dry-wet cycles, peak stress of cement soil specimens

由图7可以看出:(1)随着干湿循环次数的增加,不同溶液下水泥土试件的变形模量逐渐减小,经历4次干湿循环时,水泥土试件在清水、4.5、18.0、30.0 g/L NaCl 溶液中的变形模量值分别下降19.24%、22.38%、27.18%和34.11%;经历4~20次干湿循环,水泥土试件的变形模量呈波动式下降,下降速度逐渐减缓;经历28次干湿循环后,水泥土试件的变形模量在清水中趋向平缓,与干湿循环前相比,在4.5、18.0、30.0 g/L NaCl 溶液中呈线性下降,其变形模量值分别下降了49.33%、54.37%、57.50%和65.67%。原因在于水泥土脱湿时表面失水率高于内部失水率,在其内外部形成含水差,表面收缩变形大于内部,诱发内部产生裂缝,脱湿之后的增湿吸水沿着裂缝继续侵蚀内部结构,使其产生不可修复变形<sup>[18]</sup>,多次反复作用使得内部结构逐渐破坏,变形逐渐增大。由图7还可知,氯盐-干湿耦合作用下水泥土试件基本满足 $E_{50}=18\sigma_u\sim 27\sigma_u$ ,可以反映氯盐侵蚀和干湿循环耦合作用下水泥土试件强度与弹塑性变形之间的关系。

### 2.3 氯盐-干湿循环作用下水泥土微观结构特征

氯盐-干湿循环耦合作用导致水泥土试件外观形貌侵蚀剥落、宏观强度衰减,改变了水泥土的内部结构和化学成分。图8、9分别为氯盐-干湿循环前和不同溶液下水泥土试件经历28次干湿循环后的SEM照片和XRD图谱。由图8、9可知,未浸泡试件内部结构裂纹和孔隙较少,原因在于经过养护120 d时,水泥土内部水化反应几乎完成,生成了较多的C-S-H凝胶物质和钙矾石(Aft),填充于内部结构中,使其更加致密。在清水浸泡下,水泥土内部产生许多孔隙和裂缝,内部颗粒表面坑槽增多,且土体的破碎程度增加,出现团粒状结构并趋向疏松,原因在于饱和和干湿作用下,自由水分子沿着水泥土内部的纤维、微裂纹及微孔隙渗入其内部,逐渐溶蚀内部的矿物颗粒,水解内部的胶结物质,多次干湿作用后,水泥土内部孔隙和裂纹逐渐贯通为裂缝,增湿饱和后,裂缝中的水带走溶解物质,致使内部裂缝逐渐增大。在氯盐溶液浸泡作用下,水泥土试件内部在4.5 g/L NaCl 溶液中出现大量片状晶体结构 Friedel

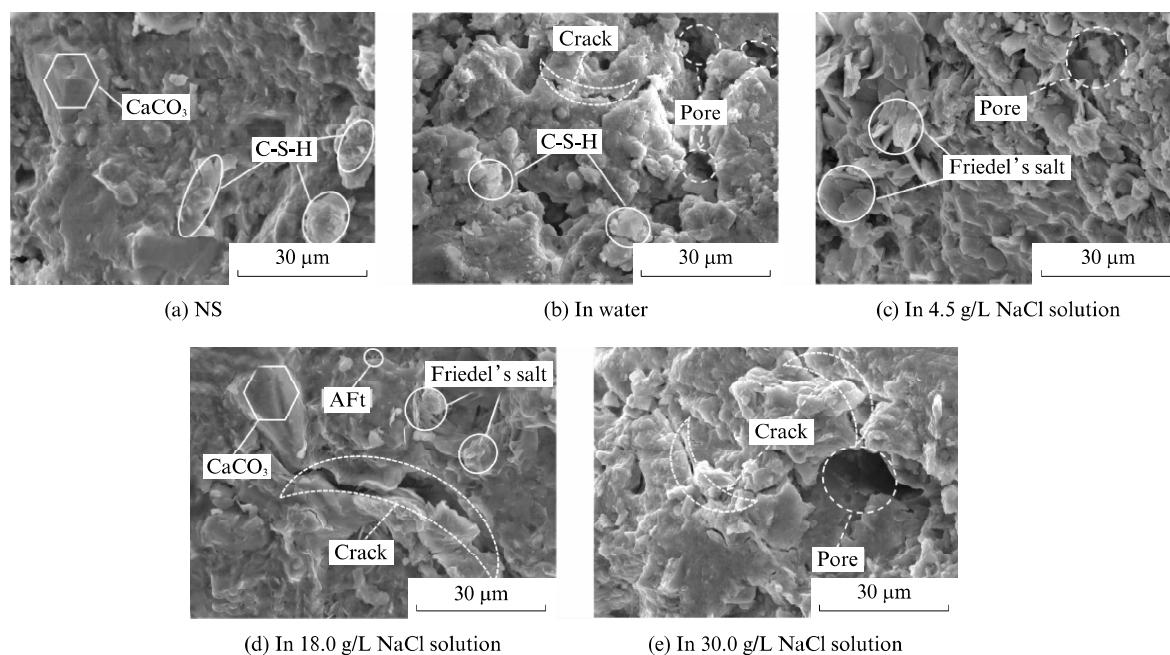


图8 氯盐-干湿循环作用下水泥土试样的 SEM 照片

Fig. 8 SEM photos of cement soil samples subjected to chloride and dry-wet cycles

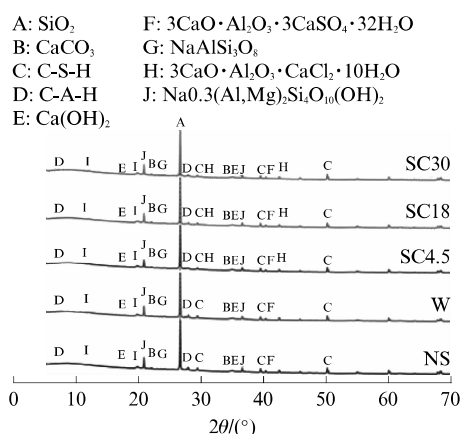


图9 氯盐-干湿循环下水泥土试样的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD patterns of cement soil samples subjected to chloride and dry-wet cycles

盐,随着氯盐质量浓度的增高,内部裂缝逐渐变宽,孔隙逐渐增大,结构更加松散.原因在于氯盐溶液中的  $\text{Cl}^-$  有着较强的渗透性<sup>[20]</sup>,与水泥土内存在的  $\text{C}_3\text{A}$  生成了 Friedel 盐,减少了 AFt 的生成<sup>[21]</sup>,且溶液中的  $\text{Cl}^-$  可渗透进入水泥土基体中,吸附在内部生成的 AFt 上,削弱了水化产物的胶结能力<sup>[22]</sup>;同时溶液中的  $\text{Na}^+$  加强了土体颗粒表面的双电层,弱化了土颗粒结构之间的黏结力<sup>[11]</sup>,从而降低宏观强度和增大变形.上述微观分析结果与氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土宏观力学性能的规律基本一致.

### 3 结论

(1)在氯盐-干湿循环耦合作用下,水泥土的应力-应变曲线存在压密阶段、弹塑性阶段、破坏阶段和残余阶段;随着氯盐质量浓度和干湿循环次数的增加,水泥土试件应力-应变曲线阶段的斜率逐渐减小而应变逐渐增大,且经历 28 次干湿循环后,在清水、4.5、18.0、30.0 g/L NaCl 溶液中水泥土的峰值应力和残余应力分别下降 48.79% 和 57.71%、52.63% 和 48.76%、56.88% 和 59.70%、57.89% 和 57.71%,水泥土破坏后的残余应力为峰值应力的 20%~40%.氯盐浸泡对水泥土的峰值应力有劣化效应,而对残余应力的影响不明显,峰值应力、残余应力与干湿循环次数近似呈指数函数下降关系.

(2)随着干湿循环次数的增加,水泥土变形模量逐渐减小.与干湿循环前相比,经历 28 次干湿循环后,水泥土的变形模量在清水、4.5、18.0、30.0 g/L NaCl 溶液中分别下降了 49.33%、54.37%、57.50% 和 65.67%.

(3)氯盐-干湿循环耦合作用改变了水泥土的内部微观结构,在清水与氯盐溶液浸泡下,水泥土内部胶结物质溶蚀流失,内部矿物反应生成易溶物质,诱发了裂纹和孔隙的扩展、贯通,导致其宏观强度降低、变形增大.

## 参考文献:

- [1] 郑刚,郭知一,杨新煜,等.桩体刚度对复合地基支承路堤失稳破坏模式的影响研究[J].岩土工程学报,2019,41(增刊1):49-52.  
ZHENG Gang, GUO Zhiyi, YANG Xinyu, et al. Influences of stiffness of piles on failure modes of embankment of composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Suppl 1): 49-52. (in Chinese)
- [2] 崔新壮,张娜,王聪,等.黄河三角洲改性含盐水泥土搅拌桩耐久性研究[J].建筑材料学报,2013,16(3):481-486.  
CUI Xinzhuang, ZHANG Na, WANG Cong, et al. Durability of salty soil-cement mixed pile in the yellow river delta[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(3): 481-486. (in Chinese)
- [3] TRAN K Q, SATOMI T, TAKAHASHI H. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste corn silk fibers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178(30): 204-210.
- [4] ZAK P, ASHOUR T, KORJENIC A, et al. The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 179-188.
- [5] DUAN X L, ZHANG J S. Mechanical properties, failure mode, and microstructure of soil-cement modified with fly ash and polypropylene fiber[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019: 9561794.
- [6] YAO K, CHEN Q, HO J, et al. Strain-dependent shear stiffness of cement-treated marine clay[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(10): 04018255.
- [7] 潘晓燕,张广兴,张晏清,等.纳米SiO<sub>2</sub>改性水泥土钉注浆体性能的研究[J].建筑材料学报,2017,20(2):255-260.  
PAN Xiaoyan, ZHANG Guangxing, ZHANG Yanqing, et al. Study on properties of nano-SiO<sub>2</sub> blended cement pastes for grouting soil nailing[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2): 255-260. (in Chinese)
- [8] JIN L, SONG W, SHU X, et al. Use of water reducer to enhance the mechanical and durability properties of cement-treated soil[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 690-694.
- [9] 闫楠,杨俊杰,刘强,等.海水环境下水泥土强度衰减过程室内试验研究[J].土木工程学报,2017,50(11):115-124.  
YAN Nan, YANG Junjie, LIU Qiang, et al. Laboratory test on strength deterioration process of soil cement in seawater environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 115-124. (in Chinese)
- [10] ZHANG W B, MA J Z, TANG L. 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.
- [11] 查甫生,刘晶晶,郝爱玲,等. NaCl 侵蚀环境下水泥固化铅污染土强度及微观特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4325-4332.
- ZHA Fusheng, LIU Jingjing, HAO Ailing, et al. Experimental study of strength and microstructure characteristics of cement solidified lead contaminated soil eroded by sodium chloride solution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Suppl 2): 4325-4332. (in Chinese)
- [12] 吴燕开,史可健,胡晓士,等.海水侵蚀下钢渣粉+水泥固化土强度劣化试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(6):1014-1022.  
WU Yankai, SHI Kejian, HU Xiaoshi, et al. Experimental study on strength degradation of steel slag+cement-solidified soil under seawater erosion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1014-1022. (in Chinese)
- [13] LÜ Q F, JIANG L S, MA B, 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.
- [14] 邓华锋,李建林,朱敏,等.饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J].岩土力学,2012,33(11):3306-3312.  
DENG Huafeng, LI Jianlin, ZHU Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under "saturation-air dry" circulation function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3306-3312. (in Chinese)
- [15] 任克彬,王博,李新明,等.低应力水平下土遗址力学特性的干湿循环效应[J].岩石力学与工程学报,2019,38(2):376-385.  
REN Kebin, WANG Bo, LI Xinming, et al. Effect of dry-wet cycles on the mechanical properties of earthen archaeological site under low stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 376-385. (in Chinese)
- [16] HELSON O, ESLAMI J, BEAUCOUR A L, et al. Durability of soil mix material subjected to wetting/drying cycles and external sulfate attacks[J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 416-428.
- [17] 郑旭,刘松玉,蔡光华,等.活性MgO碳化固化土的干湿循环特性试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(2):297-304.  
ZHENG Xu, LIU Songyu, CAI Guanghua, et al. Experimental study on drying-wetting properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 297-304. (in Chinese)
- [18] 胡长明,袁一力,王雪艳,等.干湿循环作用下压实黄土强度劣化模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(12):2804-2818.  
HU Changming, YUAN Yili, WANG Xueyan, et al. Experimental study on strength deterioration model of compacted loess under wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2804-2818. (in Chinese)
- [19] 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.  
LIU Quansheng, QU Jiawang, LIU Zhiping, et al. Experimental study of mechanical properties of cemented soil under corrosion influence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3377-3384. (in Chinese)