



## 海水腐蚀环境下纳米 $\text{SiO}_2$ 改良水泥土动应力及微观分析

庄心善, 寇强

**Dynamic stress and microanalyses of the cement-soil modified by nano- $\text{SiO}_2$  in the seawater corrosive environment**

ZHUANG Xinshan and KOU Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106016>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### [分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究](#)

An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading

张振, 陈勇, 杨天亮, 叶观宝, 郑文强 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 89–96

##### [尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响](#)

Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil

陈鑫, 张泽, 李东庆 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 74–82

##### [单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究](#)

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression

耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134–141

##### [高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究](#)

Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil

邢皓枫, 张好, 李浩铭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 102–109

##### [循环荷载下水泥土桩复合体动力参数试验研究](#)

An experimental study of dynamic parameters of unit cell of deep mixed column-reinforced soft clay under dynamic loading

叶观宝, 秦粮凯, 张振, 郑文强, 陈勇 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 48–56

##### [水泥改良黄土路基动力稳定性评价参数试验研究](#)

An experimental study of the evaluation parameters of dynamic stability of the cement-improved loess subgrade

张沛云, 马学宁 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 141–141



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106016](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106016)

庄心善, 寇强. 海水腐蚀环境下纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土动应力及微观分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 86-93.  
ZHUANG Xinshan, KOU Qiang. Dynamic stress and microanalyses of the cement-soil modified by nano- $\text{SiO}_2$  in the seawater corrosive environment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 86-93.

## 海水腐蚀环境下纳米 $\text{SiO}_2$ 改良水泥土动应力 及微观分析

庄心善, 寇 强

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 为研究纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土抵抗动力荷载-海水腐蚀耦合作用效果, 通过动三轴、扫描电镜(SEM)、核磁共振试验(NMR), 获取不同海盐溶液浓度和时间下动应力参数及 NMR 曲线图、SEM 图, 探究海盐溶液浓度和腐蚀天数对改良前后水泥土的影响。试验结果表明: 改良土内部孔隙减少, 土颗粒间胶结度提高, 土体抵抗动力荷载-海水腐蚀耦合作用能力增强, 清水环境下, 养护 7, 14, 28 d 改良水泥土动强度分别提高了 4.8%、6.6%、7.3%; 经海水腐蚀后, 土体内部结构遭到破坏, 土颗粒松动且孔隙增多, 水泥土动强度明显下降, 腐蚀 28 d、清水、1 倍、2 倍、3 倍海水浓度溶液环境下, 纳米水泥土相对于普通水泥土动强度分别提高了 9.4%、7.3%、6.6%、6.3%。

**关键词:** 纳米  $\text{SiO}_2$ ; 水泥土; 动三轴; 动强度; 腐蚀环境

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0086-08

## Dynamic stress and microanalyses of the cement-soil modified by nano- $\text{SiO}_2$ in the seawater corrosive environment

ZHUANG Xinshan, KOU Qiang

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology,  
Wuhan, Hubei 430068, China)

**Abstract:** In order to study the coupling effect of nano- $\text{SiO}_2$  modified cement soil against dynamic load and seawater corrosion, dynamic stress parameters, NMR curves and SEM diagrams under different sea salt solution concentrations and times are obtained through the dynamic triaxial, scanning electron microscope and nuclear magnetic resonance tests to explore the effects of sea salt solution concentrations and corrosion days on the cement soil before and after improvement. The test results show that the internal pores of the improved soil are reduced, the cementation between the soil particles is improved, and the soil's ability to resist the coupling action of dynamic load and seawater corrosion is enhanced. Under the clear water environment, the dynamic strength of the improved cement soil after curing for 7, 14 and 28 days is increased by 4.8%, 6.6% and 7.3%, respectively. After sea water corrosion, the internal structure of soil is damaged, soil particles become loose and pores increased, and the dynamic strength of the cement soil decreases significantly. After 28 days of corrosion, the dynamic strength

收稿日期: 2021-06-04; 修订日期: 2021-09-26

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708190)

第一作者: 庄心善(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土工程与边坡工程等方面的研究。

E-mail: [zhuangxinshan@163.com](mailto:zhuangxinshan@163.com)

of the nano cement soil is increased by 9.4%, 7.3%, 6.6% and 6.3%, respectively, compared with the ordinary cement soil under the environment of clean water, double and triple seawater concentration solution.

**Keywords:** nano- $\text{SiO}_2$ ; cement soil; dynamic triaxial; dynamic strength; corrosive environment

近年来, 随着海洋、海岸和滨海等近海岩土工程建设越来越多, 深层水泥搅拌法<sup>[1]</sup>在沿海港口码头、机场跑道、人工岛围海造地、跨海工程等逐渐广泛应用于诸多大型工程地基处理中<sup>[2]</sup>。然而, 由于水泥土加固体的强度提高与增长特性受地基土性质和环境条件的影响显著<sup>[3]</sup>, 特别是在海洋、海岸和滨海工程建设中。一方面, 近海环境存在大量的  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  等腐蚀性介质, 与自然环境中的水泥土特性大有不同, 常常引起水泥土基加固体发生严重劣化<sup>[4-5]</sup>; 另一方面, 各种动荷载会对水泥土使用寿命造成影响, 如施工、海啸、海浪冲击、行驶车辆、地震和台风冲击等<sup>[6-7]</sup>。水泥土地基长期承受反复动力荷载作用, 将不可避免地加剧水泥土地基劣化, 严重危害其安全与正常使用。可见, 如何改善近海腐蚀环境下水泥土力学性能<sup>[8]</sup>、提升其抗腐蚀强度, 是我国当前近海工程建设亟待解决的一个重要课题。

纳米工艺被称为“21世纪最具发展前景的新型工艺”, 在水泥土中仅需掺入少量纳米粉末, 就可使其强度、耐久性、渗透性等方面得到很大提高和改良。同时, 纳米工艺技术发展非常迅速, 纳米材料的生产越来越方便、制造价格越来越低, 其作为一种新型外加剂用来对水泥土的性能改良研究具有良好发展前景<sup>[9]</sup>。水泥土在经过纳米粉末改良后具有更加优异的力学性能, 可以适用于很多普通水泥土不适合的施工环境和地质条件<sup>[10]</sup>。然而, 绝大多数现有成果仅局限于自然环境下纳米水泥土在静力荷载作用下强度和变形特性的研究, 如 Oltulu 等<sup>[11]</sup>认为在改良中纳米粉末具有填充作用和较高的火山灰活性。Hosseinpourpia 等<sup>[12]</sup>发现纳米颗粒具有改良水泥复合材料力学特性的性能。Mohammadi 等<sup>[13]</sup>认为纳米  $\text{SiO}_2$  可以改善水泥土微观结构。Ghasabkolaei 等<sup>[14]</sup>指出水泥土在掺入适量纳米  $\text{SiO}_2$  后力学特征得到显著提高。朱向荣等<sup>[15]</sup>、王立峰等<sup>[16]</sup>通过试验得出水泥土在经过纳米  $\text{SiO}_2$  改良后, 无侧限抗压强度远远高于普通水泥土。王亚军<sup>[17]</sup>用纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土时, 探究了纳米  $\text{SiO}_2$  掺入比对性能影响规律。而对纳米水泥土其他性能, 如动力荷载及腐蚀环境影响等方面的研究成果至今尚属少见。

综上所述, 针对水泥土地基在动力荷载-海水腐

蚀耦合作用下易发生力学性能劣化工程问题, 本次研究提出在水泥土中加入适量纳米  $\text{SiO}_2$  来改良水泥土地基工程特性, 运用 GDS 真三轴仪动力模块探究海水腐蚀环境下纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土动力特性和采用电镜扫描(SEM)、核磁共振(NMR)分析纳米  $\text{SiO}_2$  改良机理, 为相关工程研究提供参考依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验仪器

动三轴试验选用 GDS 真/动三轴仪(图 1)。该仪器可利用 GDS—lab 软件精准控制孔隙水压力、试验反压与围压、土样轴向应变等, 通过真/动三轴仪的动力模块, 开展圆柱试样的动力特性试验。试样尺寸为直径 50 mm、高度 100 mm 的圆柱体。



图 1 GDS 真三轴仪  
Fig. 1 GDS dynamic triaxial test device

扫描电镜试验选用 Phenom ProX 电镜能谱一体机(图 2)。该仪器可对试样新鲜断面进行真空干燥和表面镀金处理后扫描观察, 运用其不同倍数的聚焦拍照功能将处理后试样放大不同倍数进行观察对比。



图 2 Phenom ProX 仪  
Fig. 2 Phenom ProX electron microscope energy spectrum integrated machine

核磁共振试验选用 PQ001 低磁场核磁共振分析仪(图 3)。该仪器自带的反演软件可通过 NMR 曲线表现出试样孔隙变化关系。



图 3 核磁共振分析仪

Fig. 3 PQ001 nuclear magnetic resonance analyzer with magnetic field

## 1.2 试验材料

本次试验用土为一般黏土, 取自湖北省黄石市大冶市大桥头路二标段深挖土层, 通过地勘资料获取的物理力学性质指标见表 1。试验选用 C32.5 级普通硅酸盐水泥, 矿粉采用工厂加工生产的纳米级  $\text{SiO}_2$ , 相关参数见表 2。

表 1 试验用土基本物理指标

Table 1 Properties of the tested soil

密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	比重	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	压缩系数/(MPa <sup>-1</sup> )
1.6	2.68	1.15	39.44	19.45	19.99	1.45

表 2 纳米  $\text{SiO}_2$  的主要性能指标

Table 2 Properties of nano silicon powder

粒径/nm	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	表面羟基/%	摇实密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	松装密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\text{SiO}_{2-x}$ 含量/%	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
10±5	640±50	48	<0.22	<0.15	>99.9	2.44

## 1.3 试验方法

本次试验欲探究动荷载作用下纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土抵抗海水腐蚀效果。试验配比如表 3 所示, 已由前置试验测得动荷载作用下纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土时最佳掺量为 2.5%。

表 3 试验配比方案

Table 3 Test matching scheme

水泥掺量( $m_{\text{水泥}}/m_{\text{湿土}} \times 100\%$ )	15%
纳米 $\text{SiO}_2$ 掺量( $a_w = m_{\text{纳米} \text{SiO}_2}/m_{\text{湿土}} \times 100\%$ )	0%, 2.5%
水灰比( $w/c = m_{\text{水}}/(m_{\text{纳米} \text{SiO}_2} + m_{\text{水泥}})$ )	0.45
海盐浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0, 35, 70, 105

称取计算所得烘干碾压过筛(2 mm)土、水泥、纳米  $\text{SiO}_2$ 、水, 按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019) 手册、《JGJT233—201 水泥配合比设计规程》,

将材料在容器中均匀混合, 然后分层倒入制样器分 5 层击实, 控制该土的最优含水率 20% 和最大干密度 1.9 g/cm<sup>3</sup> 配制重塑土样, 制成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱体试样, 试样放于室温环境下 24 h。

将静置 24 h 后的试样拆模放入清水环境养护 3 d, 制备 3 组平行试验。取养护后试样放入饱和器内抽真空, 进行饱和处理, 之后将其放入配置的溶液中进行腐蚀, 分别为清水、1 倍海水浓度溶液、2 倍海水浓度溶液、3 倍海水浓度溶液。沿海地区海水的海盐含量为 35 g/L<sup>[18]</sup>, 用工厂加工生产的海水素(海盐)配置所需腐蚀溶液浓度。腐蚀时间为 7, 14, 28 d。在腐蚀结束后, 将试样放入 GDS 真三轴仪进行动三轴试验, 然后将试样处理进行扫描电镜试验、核磁共振试验。

动三轴试验加载动荷载频率  $f=1\text{Hz}$ , 加载波形采用正弦波, 围压 200 kPa, 初始轴向力 1 100 kPa。动荷载加载方式采用不排水 10 级加载, 荷载值  $\sigma_d$  分别取 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 kPa, 每级荷载作用 10 次, 得出试验所需相关参数; 扫描电镜试验取试样切片、打碎、真空镀金处理放在旋转操作台上, 挑选合适放大倍数(800, 3 000, 10 000 倍), 进行聚焦拍照, 得到不同倍数下的电镜照片, 从结构上分析对比改良前后的土体内部情况; 核磁共振试验永久磁体的磁场强度为 0.5 T, 共振频率为 22 MHz+356.390 015 kHz, 提前打开试验仪器运行, 将处理的等体积试样分别放入仪器试管内, 多次重复测量, 对数据进行处理、反演得到弛豫时间  $T_2$  和信号强度的关系曲线( $T_2$  谱), 从微观上反映出改良前后的孔隙特性。

## 2 试验结果分析

### 2.1 海水浓度对土体动应力的影响

运用 GDS 真/动三轴仪, 绘制围压 200 kPa、不同浓度海盐溶液腐蚀 7, 14, 28 d 的土体试样动应力-应变关系曲线(图 4)。由图 4 可知, 在动荷载作用下随着海盐溶液浓度增大, 水泥土动应力-应变关系曲线逐渐下降。不同海水浓度腐蚀后纳米水泥土相对于普通水泥土动强度变化情况为: 腐蚀 7 d, 纳米  $\text{SiO}_2$  改良后, 其动强度相对提高了 2.8%、2.3%、1.8%、1.6%; 腐蚀 14 d, 纳米  $\text{SiO}_2$  改良后, 其动强度相对提高了 7.2%、5.7%、4.7%、4.2%; 腐蚀 28 d, 纳米  $\text{SiO}_2$  改良后, 其动强度相对提高了 9.4%、7.3%、6.6%、6.3%。

为了进一步详细分析纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土抵抗动荷载-海水腐蚀耦合作用效果, 绘制海盐溶液浓度对动强度影响柱状图, 如图 5 所示。水泥土动强度随着

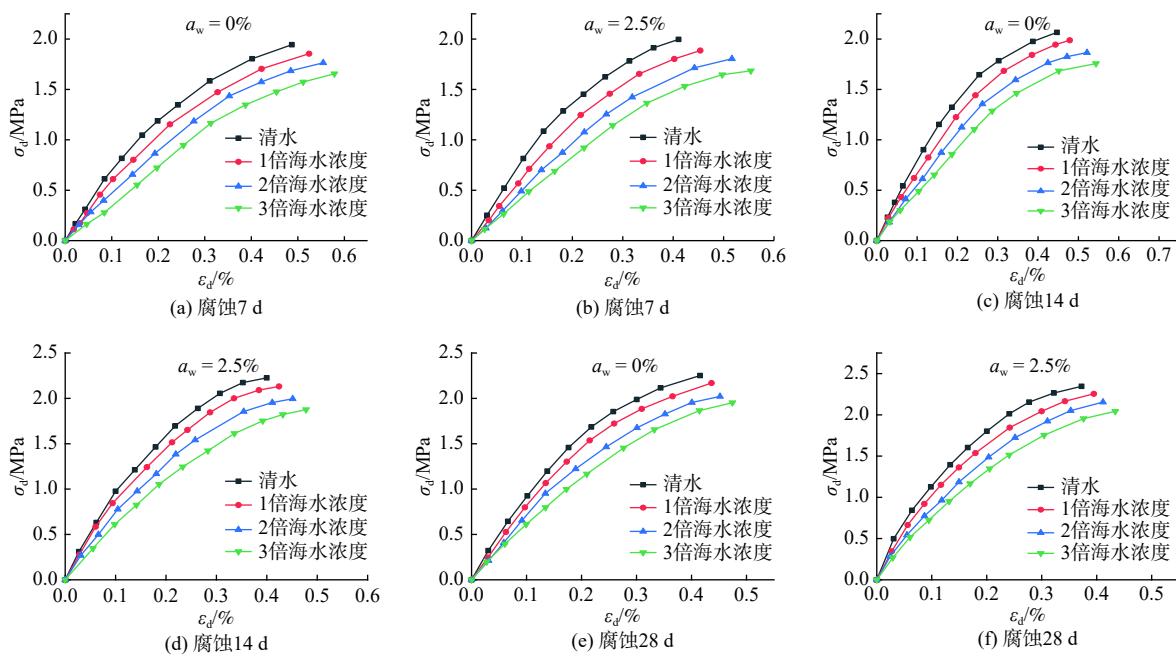


图 4 不同腐蚀时间动应力-应变关系曲线

Fig. 4 Dynamic stress-strain curves at different corrosion times

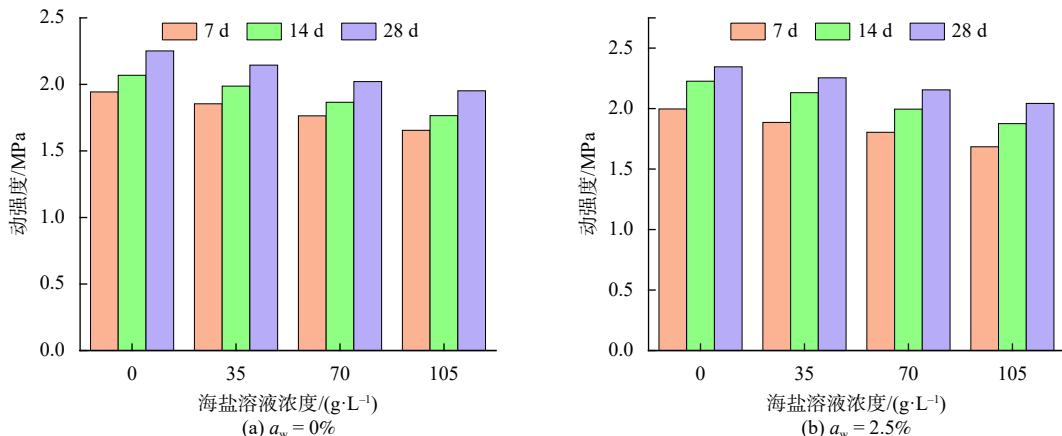


图 5 海水浓度对土体动强度影响

Fig. 5 Effect of solution concentrations on dynamic strength

海盐溶液浓度增大而减小, 在水泥土中加入适量纳米  $\text{SiO}_2$  后, 水泥土动强度得到提升。

## 2.2 腐蚀时间对动应力的影响

运用 GDS 真/动三轴仪, 绘制围压 200 kPa 下土体试样腐蚀不同时间动应力-应变的变化曲线, 见图 6。腐蚀时间为 7, 14, 28 d 的纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土相对于普通水泥土的极限强度与初始强度(未经腐蚀、清水)比较, 清水环境下提高了 4.8%、6.6%、7.3%, 1 倍海水浓度环境下提高了 2.5%、5.9%、7.1%, 2 倍海水浓度环境下提高了 2.1%、5.2%、5.8%, 3 倍海水浓度环境下提高了 1.4%、4.2%、4.7%。

进一步分析海盐溶液腐蚀时间对纳米  $\text{SiO}_2$  改良水泥土影响, 绘制腐蚀时间对动强度的影响柱状图(图 7)。由图 7 可知, 纳米  $\text{SiO}_2$  改良前后的水泥土动强度随着时间增长而增大。在相同海水浓度下, 用纳米  $\text{SiO}_2$  改良后可发现水泥土动强度随时间增长的最大值高于普通水泥土, 说明掺入适量纳米  $\text{SiO}_2$  能提高水泥土抵抗动荷载-海水腐蚀耦合作用的能力。

## 2.3 SEM 微观结构分析

由 SEM 得到在相同浓度海水腐蚀 14 d 的纳米  $\text{SiO}_2$  改良前后水泥土不同放大倍数下的扫描电镜照片(图 8)。

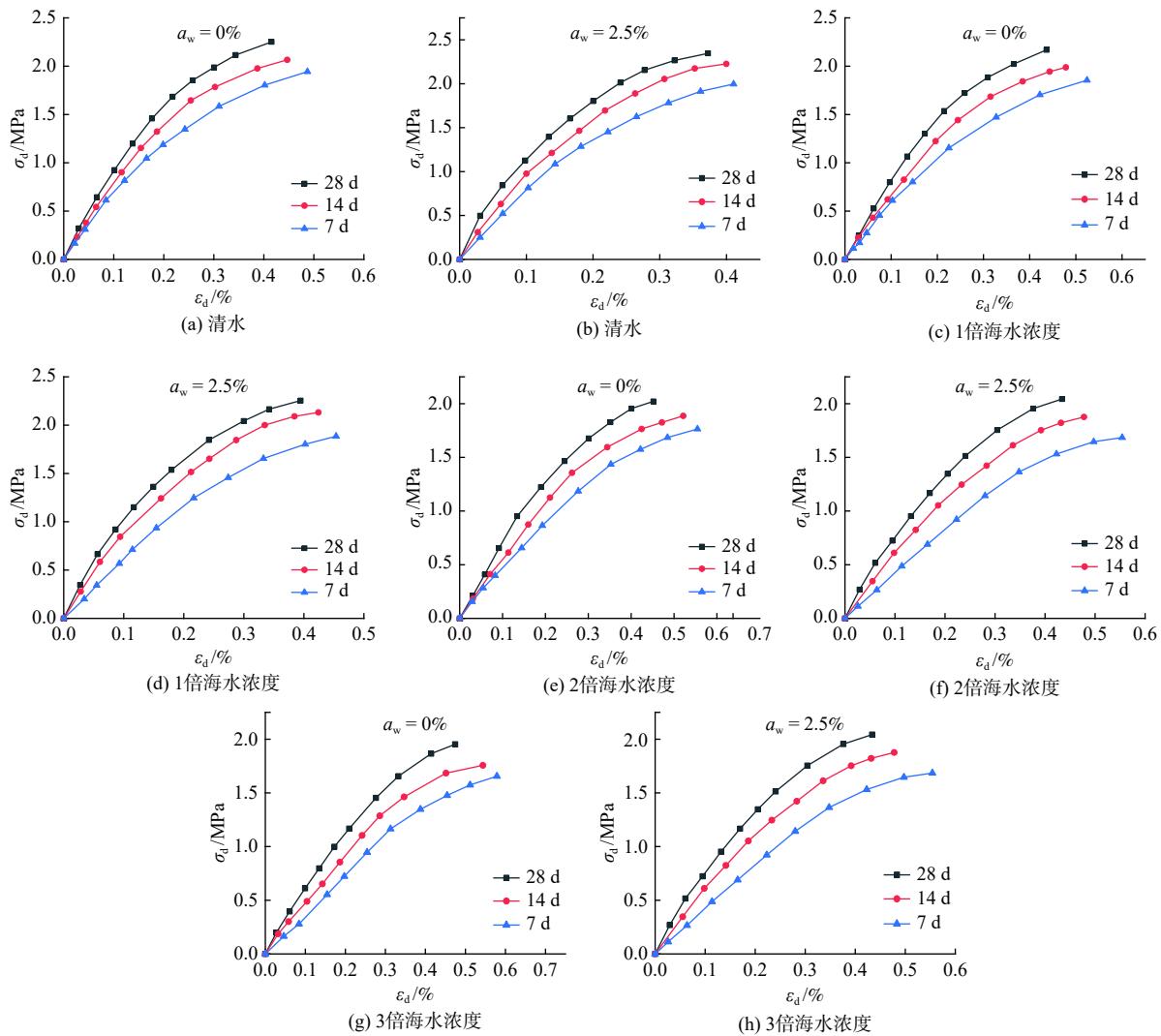


图 6 不同浓度海水腐蚀下动应力-应变关系曲线

Fig. 6 Dynamic stress-strain curves under sea water corrosion with different concentrations

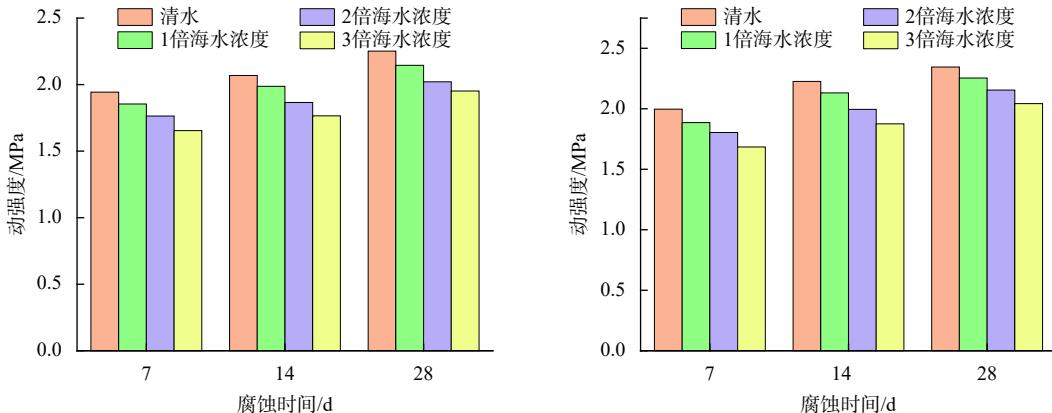


图 7 时间对动强度影响

Fig. 7 Effect of corrosion time on dynamic strength

对比图8各个放大倍数下水泥土改良前后的电镜照片。水泥土在经过纳米 $\text{SiO}_2$ 改良后,表面生成纤维

状、细针状的C-S-H和板状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,化学产物明显增多,呈现出不同状态的生成物与孔隙结构。致

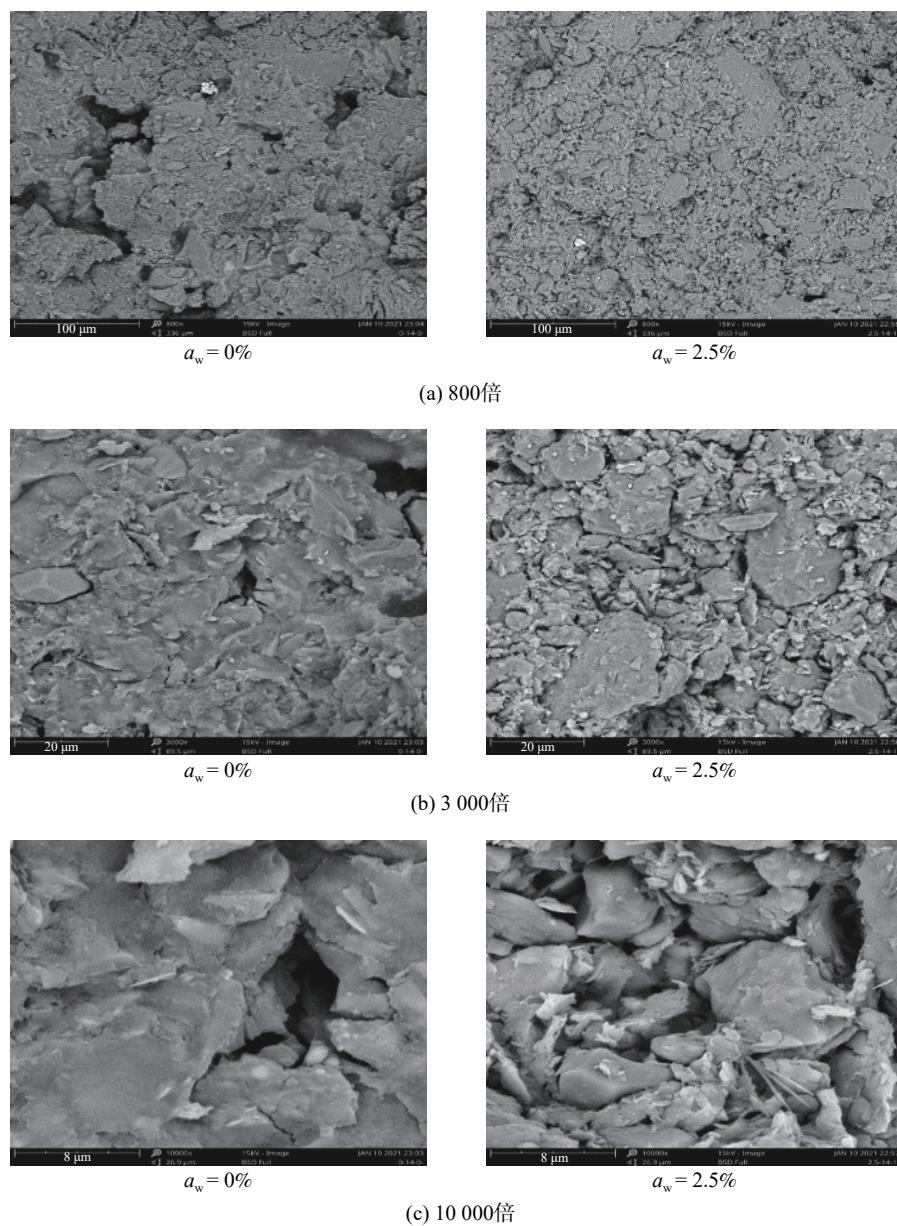


图 8 不同放大倍数的扫描电镜照片

Fig. 8 SEM photos of different times

密的凝胶体增强了土颗粒间粘结力, 改善土颗粒间的胶结程度, 减少土体孔隙, 使得土体整体框架更为稳定。

#### 2.4 NMR 孔隙特性分析

通过 NMR 曲线, 可以看出土体内部孔隙体积-孔径分布特性<sup>[19-20]</sup>。取同等体积试样块进行核磁共振试验, 得到掺量  $a_w=0\%$ 、 $2.5\%$  时土体在不同海水浓度下腐蚀 14 d 的弛豫时间  $T_2$  和信号强度的关系曲线( $T_2$  谱), 如图 9 所示。

由图 9 可知, 经纳米  $\text{SiO}_2$  改良后, NMR 曲线所围成的区域面积变小, 说明土体经改良后内部孔隙减

少, 结构更加致密。同时, 改良前后的  $T_2$  谱均有 2 个峰值, 峰值位置大致相当, 分别位于 1.0, 50.0 ms 处附近。并且改良前后的土体 NMR 曲线都出现相同的趋势, 第 2 个峰值远远小于第 1 个峰值。NMR 曲线的 2 个峰值分别表示土体内部的小孔隙体积(1.0 ms 附近)、大孔隙体积(50.0 ms 附近)。由此可知, 土体的大孔隙体积低于小孔隙体积。而改良土的 2 个峰值都低于改良前, 且经改良后曲线峰值出现时间提前, 说明土体内部孔隙结构更加均匀, 内部大、小孔隙被生成的凝胶体和部分纳米  $\text{SiO}_2$  所填充, 孔隙减少, 增强了土体的稳定性。

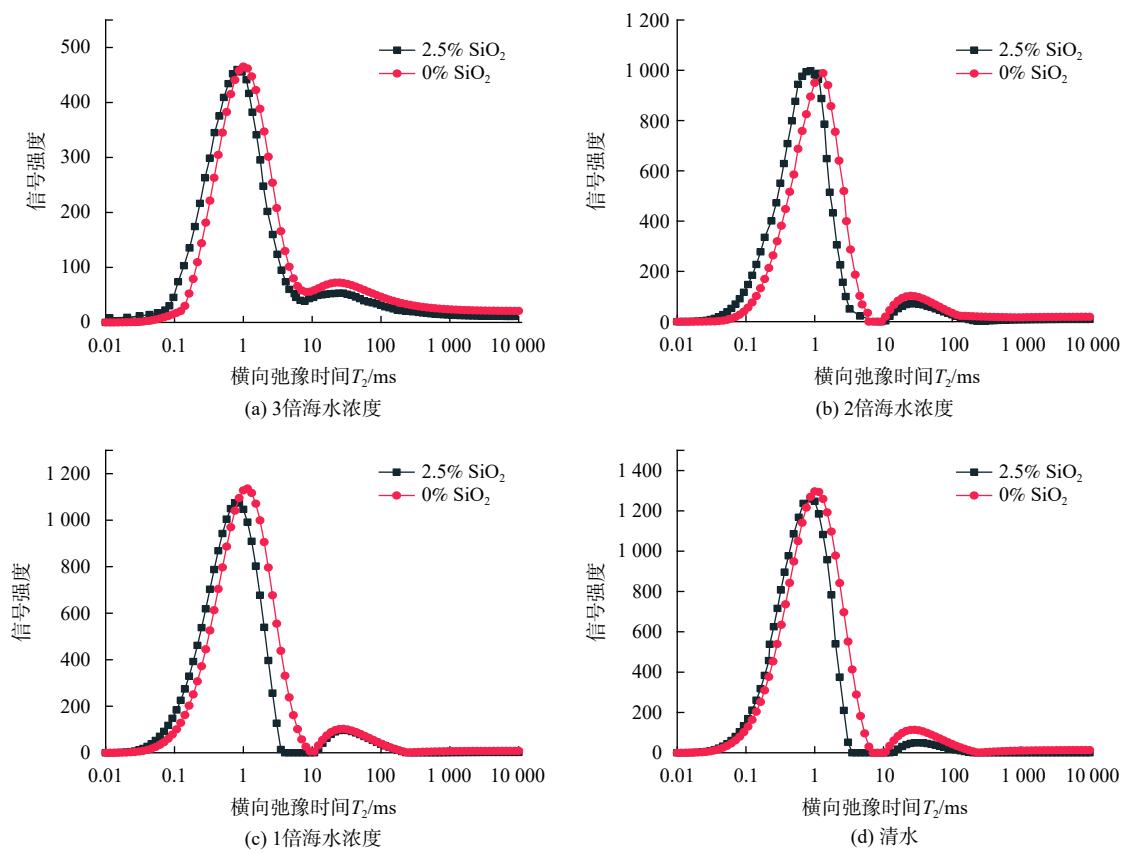


图9 反演处理后的核磁共振数据

Fig. 9 Inversed nuclear magnetic resonance data

### 3 结论

(1) 海盐溶液对水泥土整体稳定性造成严重影响, 随着海水浓度增大、腐蚀时间增长, 水泥土内部结构遭到破坏, 抵抗动荷载-海水腐蚀作用的能力减弱。

(2) 水泥土在经过适量纳米  $\text{SiO}_2$  改良后, 土体强度增大, 且在相同海水浓度、腐蚀时间下改良水泥土动强度都要高于普通水泥土, 水泥土抵抗动荷载-海水腐蚀作用的能力增强。

(3) 由扫描电镜试验看出, 适量的纳米  $\text{SiO}_2$  掺入水泥土中, 土体中的水泥会与纳米  $\text{SiO}_2$  发生一系列火山灰化学反应生成了纤维状的 C-S-H、板状的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体填充了土体孔隙, 增强了土体颗粒胶结程度。

(4) 由核磁共振试验可以看出, 水泥土中掺入纳米  $\text{SiO}_2$  后, 土体的孔隙结构分布更加均匀, 内部孔隙明显减少, 土体内部结构得到改善, 水泥土抵抗动荷载和海水腐蚀的能力增强。

### 参考文献 (References) :

- [1] 何开胜. 水泥土搅拌桩的施工质量问题和解决方法 [J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 778–781. [HE Kaisheng.

Present construction quality problem of deep mixing cement-soil piles and solving measures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 778–781. (in Chinese with English abstract) ]

[2] 熊营飞, 刘洋. 海水环境下水泥加固不同土质土体的效果研究 [J]. 人民长江, 2018, 49(17): 87–91. [XIONG Yingfei, LIU Yang. Comparative study on cement reinforcement effect to different soils under seawater environment [J]. Yangtze River, 2018, 49(17): 87–91. (in Chinese with English abstract) ]

[3] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 465–470. [GONG Xiaonan. Handbook of Foundation Treatment [M]. 3 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese) ]

[4] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 环境侵蚀下水泥土力学特性的时间效应分析 [J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 82–86. [NING Baokuan, CHEN Sili, LIU Bin. The timing effects of mechanical properties of cemented soil under environmental erosion [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(2): 82–86. (in Chinese with English abstract) ]

[5] 邢皓枫, 张好, 李浩铭. 高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3):

- 102 – 109. [ XING Haofeng, ZHANG Hao, LI Haoming. Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 102 – 109. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 丁继辉, 冯俊辉, 张攀星, 等. CFG芯水泥土环组合桩复合地基动力特性试验研究 [J]. *工程力学*, 2015, 32(增刊1): 284 – 288. [ DING Jihui, FENG Junhui, ZHANG Panxing, et al. Experimental study on dynamic characteristics of composite foundations of rammed cement-soil loop piles with CFG cores[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(Sup 1): 284 – 288. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 李普, 樊恒辉, 史祥, 等. 地震荷载下水泥土循环剪切特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊2): 4227 – 4234. [ LI Pu, FAN Henghui, SHI Xiang, et al. Study on cyclic shear characteristics of cement-soil under seismic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup 2): 4227 – 4234. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 商冉. 钢纤维陶粒混凝土抗氯离子侵蚀性能的研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 111 – 117. [ SHANG Ran. Study on resistance to chloride ion erosion of SFRLC[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 111 – 117. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] “纳米制造的基础研究”重大研究计划:“中国制造”开启纳米精度时代 [N/OL]. 中国科学报, (2019-02-25)[2021-05-10]. [ “Fundamental Research of Nanomanufacturing ” major research plan: “Made in China ” opens the era of nano precision[N/OL]. *China Science Daily*, 2019-02-25[2021-05-10]. [http://www.nsfc.gov.cn/Portals/0/fj/fj20190226\\_01.pdf](http://www.nsfc.gov.cn/Portals/0/fj/fj20190226_01.pdf). (in Chinese) ]
- [ 10 ] 朱孔赞, 李因文, 朱化雨, 等. 纳米改性水泥的研究进展 [J]. *新世纪水泥导报*, 2011, 17(3): 6 – 10. [ ZHU Kongzan, LI Yinwen, ZHU Huayu, et al. Research progress of nano-modified cement[J]. *Cement Guide for New Epoch*, 2011, 17(3): 6 – 10. (in Chinese) ]
- [ 11 ] OLTULU M, SAHIN R. Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2011, 528(22/23): 7012 – 7019.
- [ 12 ] HOSSEINPOURPIA R, VARSHOEE A, SOLTANI M, et al. Production of waste bio-fiber cement-based composites reinforced with nano-SiO<sub>2</sub> particles as a substitute for asbestos cement composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 105 – 111.
- [ 13 ] MOHAMMADI M, HESARAKI S, HAFEZI-ARDAKANI M. Investigation of biocompatible nanosized materials for development of strong calcium phosphate bone cement: comparison of nano-titania, nano-silicon carbide and amorphous nano-silica[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(6): 8377 – 8387.
- [ 14 ] GHASABKOLAEI N, JANALIZADEH A, JAHANSHAHI M, et al. Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: an experimental study[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2016, 131(5): 134.
- [ 15 ] 朱向荣, 王立峰, 丁同福. 纳米硅水泥土工程特性的试验研究 [J]. *岩土工程技术*, 2003, 17(4): 187 – 192. [ ZHU Xiangrong, WANG Lifeng, DING Tongfu. Study on engineering properties of nanometer silica and cement-stabilized soil[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2003, 17(4): 187 – 192. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 王立峰, 翟惠云. 纳米硅水泥土抗压强度的正交试验和多元线性回归分析 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(增刊1): 452 – 457. [ WANG Lifeng, ZHAI Huiyun. Orthogonal test and regression analysis of compressive strength of nanometer silicon and cement-stabilized soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(Sup 1): 452 – 457. ( in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 王文军. 纳米矿粉水泥土固化机理及损伤特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004. [ WANG Wenjun. Study on reinforcement mechanism and damage performance of cemented soil stabilized with nanometer material[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] BIN-SHAFIGUE S, RAHMAN K, YAYKIRAN M, et al. The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(10): 666 – 672.
- [ 19 ] COATES G, 肖立志, PRAMMER M. 核磁共振测井原理与应用 [M]. 孟繁萤, 译. 北京: 石油工业出版社, 2007. [ COATES G, XIAO Lizhi, PRAMMER M. Principle and application of NMR logging [M]. MENG Fanying, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007. (in Chinese) ]
- [ 20 ] YAO Y B, LIU D M, CHE Y, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR)[J]. *Fuel*, 2010, 89(7): 1371 – 1380.