

纳米SiO₂改性滨海水泥土的短龄期力学性能与微观机制

王伟 刘静静 李娜 马露

Mechanical properties and micro mechanism of nano-SiO₂ modified coastal cement soil at short age

WANG Wei, LIU Jingjing, LI Na, MA Lu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210702.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米SiO₂改性聚合物水泥基复合材料早期微观结构及性能

Microstructure and properties of polymer cement-based composites modified by nano SiO₂ in early age

复合材料学报. 2020, 37(9): 2272–2284 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200218.002>

纳米纤维素增强SiO₂气凝胶力学性能与微观结构

Mechanical properties and microstructure of SiO₂ aerogel reinforced with cellulose nanofibrils

复合材料学报. 2018, 35(9): 2593–2599 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171212.003>

纳米SiO₂/环氧桐马酸酐黏合剂的力学特性和老化特性

Mechanical and aging properties of nano-SiO₂/epoxy tung-maleic anhydride adhesive

复合材料学报. 2017, 34(3): 582–587 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160612.014>

氧化石墨烯增强水泥基复合材料的力学性能及微观结构

Mechanical properties and microstructure of graphene oxide reinforced cement-based composites

复合材料学报. 2018, 35(8): 2132–2139 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170919.001>

纳米SiO₂改性轻骨料混凝土性能

Properties of nano-SiO₂ modified lightweight aggregate concrete

复合材料学报. 2019, 36(2): 498–505 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180330.001>

改性纳米SiO₂/硅橡胶复合材料的制备及性能

Preparation and properties of modified nano SiO₂/silicone rubber composites

复合材料学报. 2019, 36(7): 1700–1707 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180930.001>

纳米 SiO₂ 改性滨海水泥土的短龄期力学性能与微观机制



分享本文

王伟^{1,2}, 刘静静^{1,2}, 李娜^{1,2}, 马露^{*3}

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 绍兴 312000; 2. 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室, 绍兴 312000;

3. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210009)

摘要: 为了研究纳米 SiO₂ 对滨海水泥土短龄期的力学改性效果, 开展了纳米 SiO₂ 掺量 (与水泥质量比) 分别为 0%、1.5%、3.0%、4.5% 和 6.0% 的水泥土无侧限抗压试验、劈裂抗拉试验、pH 试验、SEM 试验。力学试验表明, 纳米 SiO₂ 能够提高水泥土的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量, 但加剧了水泥土的脆性; 纳米 SiO₂ 改性水泥土的抗压强度大约为抗拉强度的 10 倍; pH 测试表明, 纳米 SiO₂ 能够改善水泥土的碱性环境。SEM 微观测试发现, 水泥土颗粒形态、孔隙特征变化规律与强度发展规律关系紧密, 随着纳米 SiO₂ 掺量的增加, 土颗粒形态分布由松散变为聚集, 并伴随孔隙的减少。综上发现, 纳米 SiO₂ 掺量为 4.5% 时, 强度改善效果最佳, 微观孔隙最少, 4.5% 为最优掺量。最后, 建立了纳米 SiO₂ 改性水泥土力学强度与微观孔隙率之间的二次多项式模型。

关键词: 水泥土; 纳米 SiO₂; 力学特性; 微观结构; 二次函数模型

中图分类号: TU43; TB383.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)04-1701-14

Mechanical properties and micro mechanism of nano-SiO₂ modified coastal cement soil at short age

WANG Wei^{1,2}, LIU Jingjing^{1,2}, LI Na^{1,2}, MA Lu^{*3}

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China;

3. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to study the mechanical modification effect of nano-SiO₂ on coastal cement soil at short age, unconfined compression test, splitting tensile test, pH test and SEM test of cement soil with nano-SiO₂ content (mass ratio to cement) of 0%, 1.5%, 3.0%, 4.5% and 6.0% were carried out. Mechanical tests show that nano-SiO₂ can improve the unconfined compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus of cement soil, but aggravate its brittleness; the compressive strength of nano-SiO₂ modified soil is about 10 times of its tensile strength. The pH test shows that nano-SiO₂ can improve the alkaline environment of cement soil. SEM micro test shows that the change law of cement soil particle morphology and pore characteristics is closely related to the strength development law. With the increase of nano-SiO₂ content, the distribution of soil particle morphology changes from loose to aggregate, and the pores decrease. In conclusion, when the nano-SiO₂ content is 4.5%, the strength improvement effect is the best, the micro pores are the least, and 4.5% is the best content. Finally, the quadratic polynomial model between mechanical strength and micro porosity of nano-SiO₂ modified cement soil is established.

Keywords: cement soil; nano-SiO₂; mechanical properties; microstructure; quadratic function model

收稿日期: 2021-04-19; 修回日期: 2021-06-11; 录用日期: 2021-06-24; 网络首发时间: 2021-07-02 13:08:33

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210702.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (41772311)

通信作者: 马露, 博士研究生, 讲师, 研究方向为软土地基处理 E-mail: mal@ahstu.edu.cn

引用格式: 王伟, 刘静静, 李娜, 等. 纳米 SiO₂ 改性滨海水泥土的短龄期力学性能与微观机制 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(4): 1701-1714.

WANG Wei, LIU Jingjing, LI Na, et al. Mechanical properties and micro mechanism of nano-SiO₂ modified coastal cement soil at short age[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4): 1701-1714(in Chinese).

为改善沿海地区滨海相软土承载力弱和变形大的工程缺陷，一般会在滨海软土中添加 6%~20% 的水泥，形成滨海水泥土 (CS) 以提高软土路基强度^[1-3]。然而，大量使用水泥将带来环境污染，造成温室效应增加和能源的损耗^[4-9]。水泥固化后的软土通常是高度碱性的，对地下水 and 植物生长存在着负面影响^[10-12]。因此，寻求环境友好和改良效果显著的添加剂是十分有必要的。目前诸多学者结合新材料已提出多种解决方法，其中，纳米材料作为新型的改良土添加剂，已被证实能够有效改善软土路基的工程性质^[13-14]。

土木工程材料中常采用的纳米材料有纳米 SiO₂、纳米 TiO₂、纳米 Al₂O₃ 及碳纳米管等^[15-17]。其中，纳米 SiO₂ 使用最广泛，其具有较高的火山灰活性和表面能等特点，能够显著改善滨海软土的稠度和抗压强度^[18]。Kong 等^[19] 对纳米 SiO₂ 固化后的黄土进行了无侧限抗压试验，试验发现加入少量的纳米 SiO₂ 便能显著提高黄土的抗压性能。Changizi 等^[20] 通过击实试验研究了 0.5%、0.7% 和 1.0% 掺量的纳米 SiO₂ 对软粘土最大干容重和最佳含水量的影响。加入纳米 SiO₂ 后，软粘土的最大干容重分别为素土的 1.05、1.1 和 1.13 倍，最佳含水量分别为素土的 1.1、1.4 和 1.2 倍。Kolhor 等^[21] 通过无侧限抗压试验发现加入纳米 SiO₂ 能改善粘土的抗冻性能。纳米 SiO₂ 与水泥复合改善 CS 力学性能的研究中发现，纳米 SiO₂ 能加速水泥的水化，并能与水泥水化过程中产生的 Ca(OH)₂ 发生化学反应生成致密的 xCaO·SiO₂·(m+x)H₂O，从而提高软土路基强度^[22-24]。Lang 等^[25] 通过对纳米 SiO₂ 改良的水泥淤泥土进行无侧限抗压强度试验，发现

纳米 SiO₂ 的添加能显著提高水泥淤泥土的强度，当纳米 SiO₂ 掺量为 1% 时，水泥淤泥土强度提高幅度最大。朱静^[26] 对纳米 SiO₂ 水泥固化土进行了无侧限抗压试验和劈裂抗拉试验。试验结果表明纳米 SiO₂ 能够提高水泥固化土的抗压强度和劈裂抗拉强度，且水泥固化土的抗压强度与劈裂抗拉强度之间呈线性关系。Zhang 等^[27] 开展 SEM 和 EDX 试验，研究了纳米 SiO₂ 水泥固化土壤的微观结构和化学成分变化。结果显示，纳米 SiO₂ 明显填充了土颗粒之间的孔隙，并且引起试样内部水化产物类型和数量的变化。

上述研究主要针对纳米 SiO₂/水泥土 (nano-SiO₂/CS) 在宏观层面上的力学性能，基于微观孔隙与强度关系的观测和分析、水泥土的碱性环境改善方面鲜有公开报道。因此，本文基于上述研究，在路基土水泥掺量 (与干土质量比) 为 7% 的情况下，对不同掺量纳米 SiO₂ 的水泥土进行了无侧限抗压强度试验、劈裂抗拉试验、pH 试验和 SEM，对纳米 SiO₂ 改性 CS 的力学特性和微观机制进行研究，以期在实际工程提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

滨海软土 (CS) 取自中国浙江省绍兴市，CS 的基本物理性质指标如表 1，SEM 图像和 EDX 图谱如图 1 所示。水泥选用 M32.5 硅酸盐水泥，基本物理性能指标如表 2 所示，SEM 图像和 EDX 图谱如图 2 所示。所用纳米 SiO₂ 平均粒径为 20 nm，性能指标如表 3，SEM 图像和 EDX 图谱如图 3 所示。

表 1 滨海软土的物理性质指标

Table 1 Physical property index of coastal soft soil

Density/(g·cm ⁻³)	Pore ratio	Water content/%	Liquid limit/%	Plastic limit/%	Liquidity index	Plastic index
1.65	1.64	30.0	46.2	26.4	0.18	19.8

1.2 试样制备及方案

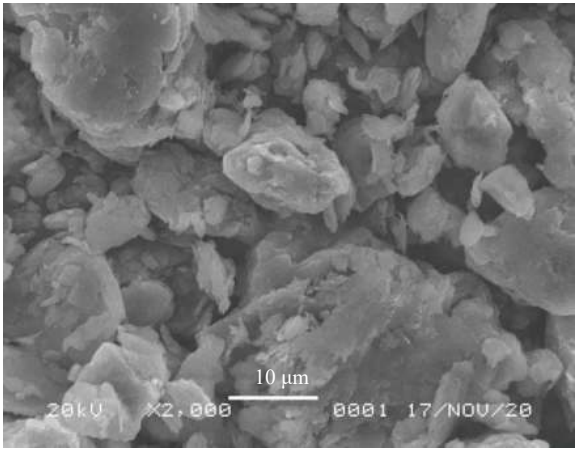
1.2.1 试样方案

试验分为 5 组，每组设置 5 个试样，每组试验结果取 5 个试样的平均值。试样的含水量、水泥含量、纳米 SiO₂ 掺量和养护龄期设计如表 4 所示。表 4 中水泥掺入比为水泥与干土的质量比，纳米 SiO₂ 的掺入比为纳米 SiO₂ 与水泥的质量比，含

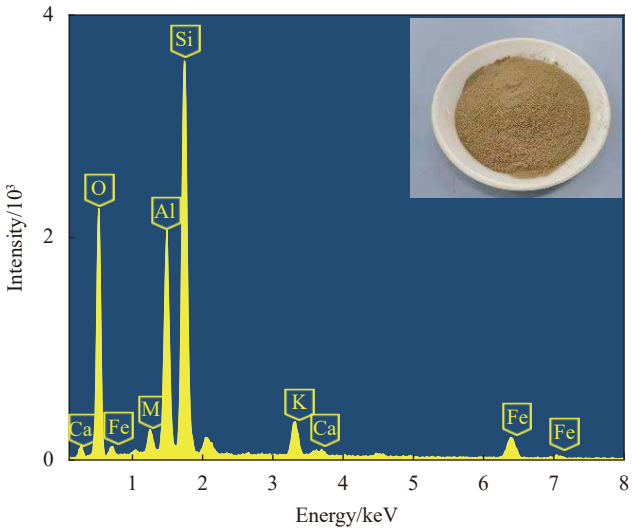
水量是水与混合料的质量比。表 4 中 x% nano-SiO₂/CS，nano-SiO₂/CS 代表纳米 SiO₂ 改性水泥土，x% 代表纳米 SiO₂ 质量比。

1.2.2 试样制备

根据土工试验标准 (GB/T 50123—2019)^[28]，无侧限抗压试验试样的高度 H=80 mm、直径 D=39.1 mm，劈裂抗拉试验试样的高度 H=50 mm，



(a) SEM image of coastal soft soil



(b) EDX spectrum of CS

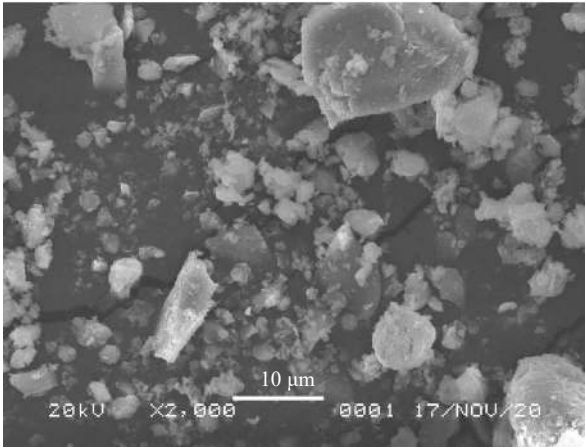
图 1 滨海软土的 SEM 图像 (a) 和 EDX 图谱 (b)

Fig. 1 SEM image (a) and EDX spectrum (b) of coastal soft soil

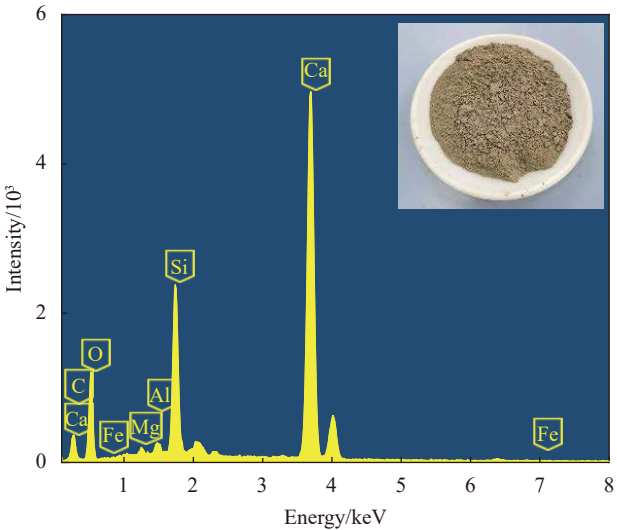
表 2 M32.5 硅酸盐水泥基本物理性能指标

Table 2 Basic physical properties of M32.5 silicate cement

Fineness/%	Initial setting time/min	Final setting time/min	Ignition loss/%	Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
				3 days	28 days	3 days	28 days
3.4	210	295	1.4	26.9	48.1	4.9	9.0



(a) SEM image of cement



(b) EDX of cement

图 2 M32.5 硅酸盐水泥 SEM 图像 (a) 和 EDX 图谱 (b)

Fig. 2 SEM image (a) and EDX spectrum (b) of M32.5 silicate cement

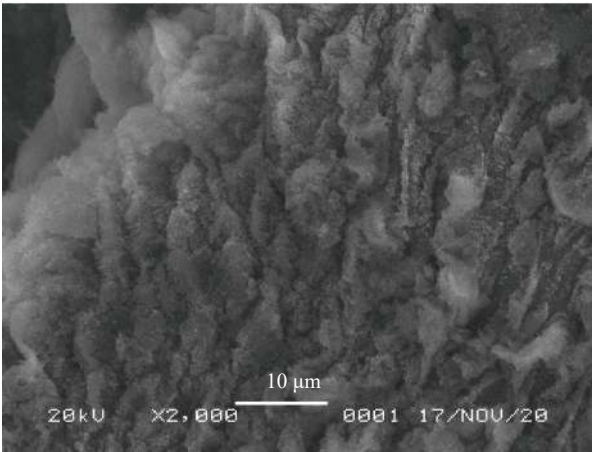
直径 $D=50\text{ mm}$ 。两种试样密度均为 2.03 g/cm^3 。试样制备分为以下几步：(1) 将 CS 放入 105°C 恒温烘箱内烘 24 h ，烘干完成后进行粉碎；(2) 用孔径为 2 mm 的筛子筛分粉碎后的 CS，筛除大粒径

的杂物；(3) 按照每组试样的配合比称取相应质量的材料，搅拌均匀；(4) 将搅拌均匀后的混合料注入相应的试样模具中，并振捣均匀；(5) 制样完成后，将所有试样放入养护箱中标准养护 7 天 。

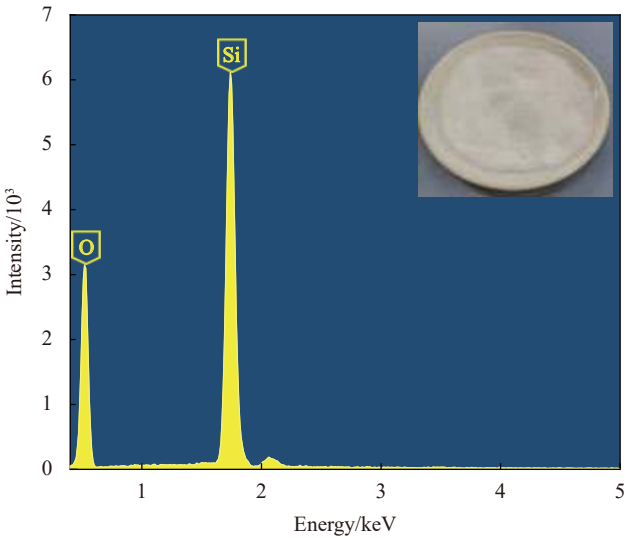
表 3 纳米 SiO₂ 基本物理性能指标

Table 3 Basic physical properties of nano-SiO₂

Color	Average particle size/nm	Bulk density/(g·L ⁻¹)	Specific surface area /(m ² ·g ⁻¹)	pH	Water content/%	Burn/%	SiO ₂ /%
White	20	50	25-200	3.7-4.7	≤1.5	≤1.0	≥99.8



(a) SEM image of nano-SiO₂



(b) EDX of nano-SiO₂

图 3 纳米 SiO₂ 的 SEM 图像 (a) 和 EDX 图谱 (b)

Fig. 3 SEM image (a) and EDX spectrum (b) of nano-SiO₂

表 4 不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土试样成分组成和测试龄期

Table 4 Composition and testing age of cement soil (CS) samples with different nano-SiO₂ contents

Sample code	Water content/%	Cement content/%	Nano-SiO ₂ content/%	Curing time/days
0% nano-SiO ₂ /CS	30	7	0	7
1.5% nano-SiO ₂ /CS	30	7	1.5	7
3.0% nano-SiO ₂ /CS	30	7	3.0	7
4.5% nano-SiO ₂ /CS	30	7	4.5	7
6.0% nano-SiO ₂ /CS	30	7	6.0	7

Notes: Water content—Mass ratio to mixture; Cement content—Mass ratio to soil; Nano-SiO₂ content—Mass ratio to cement.

1.3 试验方法

1.3.1 无侧限抗压试验

根据土工试验规范 (GB/T 50123—2019)^[28], 试样养护 7 天后, 对其进行无侧限抗压试验。试验仪器采用由南京泰克奥科技有限公司生产的 01-LH0501 全自动无侧限抗压仪。试验过程中, 试样置于底部光滑的金属置样台上, 上端放置环氧树脂压头, 以最大限度地减少端部效应^[29]。

1.3.2 劈裂抗拉试验

实际工程应用中, 土体受到拉力破坏的现象经常发生, 例如在干燥环境下土体中的裂隙就是由张拉应力所引起的。因此, 研究土体的抗拉性

能具有很大的工程实际意义。进行劈裂抗拉强度试验时, 将试样放在夹具内, 加载速率控制在 1 mm/min, 劈裂抗拉强度的计算公式如下^[30]:

$$q_t = \frac{2P}{\pi dh}$$
 (1)

式中: q_t 是劈裂抗拉强度 (kPa); P 是施加的最大荷载 (N); d 是试样直径 (mm); h 是试样高度 (mm)。

1.3.3 pH 试验

根据土工试验规范 (GB/T 50123—2019)^[28], 将试样风干碾碎, 并用 2 mm 的细筛过滤, 然后称取 10 g 过滤后的试样放入 50 mL 烧杯中, 向烧杯中加入 50 mL 蒸馏水, 搅拌几分钟后静置 30 min。

完成后用校准的 pH 计测量酸碱度。

1.3.4 微观试验

为揭示纳米 SiO₂ 对水泥土的加固机制，进行了 SEM 试验。SEM 试验采用的是日本电子株式会社生产的 JSM-6360LV 型钨灯丝高低真空扫描电镜仪器。试验之前需在 SEM 仪器专用的铝制托盘上涂抹一层导电胶，将干燥的粉末状试样粘在导电胶上，粘贴时确保试样与胶面贴实，由于岩土类材料导电性较差，须对样品进行喷镀处理，采用离子衍射技术在试样表面镀上一层铂金膜。

2 试验结果及分析

2.1 纳米 SiO₂/CS 无侧限抗压强度

2.1.1 纳米 SiO₂ 对水泥土无侧限抗压强度离散程度的影响

为分析纳米 SiO₂/CS 试样无侧限抗压强度离散程度，引入变异系数 C_V，当变异系数大于 0.15 时表示离散性较大，其变异系数公式如下^[31]：

$$C_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{(n-1)\bar{\sigma}^2}}$$

(2)

式中： σ_i 为第 i 组峰值强度实测值； $\bar{\sigma}$ 为强度平均值； n 为样本容量。

不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土 C_V 如表 5 所示。可知，nano-SiO₂/CS 试样的无侧限抗压强度变异系数均较小，最大值为 0.04<[0.15]，表明 nano-SiO₂/CS 试样的无侧限抗压强度离散程度小。

表 5 不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土的
抗压强度平均值与变异系数 C_V

Table 5 Average values and coefficients of variation C_V of
compressive strength of cement soils with different
nano-SiO₂ content

Sample code	Average compressive strength/kPa	C _V
0% nano-SiO ₂ /CS	1 021	0.04
1.5% nano-SiO ₂ /CS	1 149	0.02
3.0% nano-SiO ₂ /CS	1 307	0.03
4.5% nano-SiO ₂ /CS	1 683	0.03
6.0% nano-SiO ₂ /CS	1 524	0.03

2.1.2 峰值强度

图 4 为无侧限抗压试验获得的不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土的应力-应变曲线。图 5 为无侧限抗压试验获得的不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土峰值强度和残余强度变化。图 6 为不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土无侧限抗压试验试样破坏图。图 7 为不同纳米

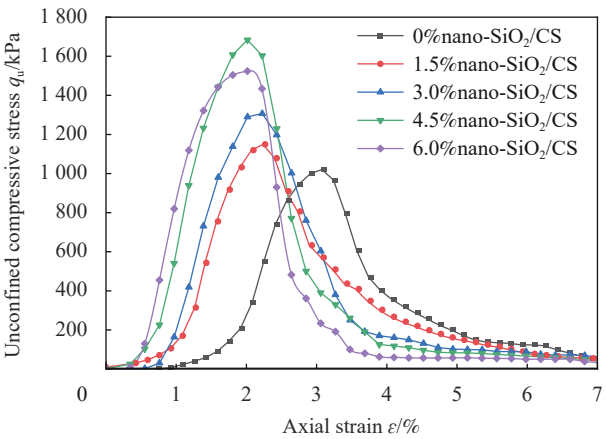


图 4 无侧限抗压试验获得的不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土
抗压强度应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of compressive strength of cement soils with different nano-SiO₂ contents obtained from unconfined compression test

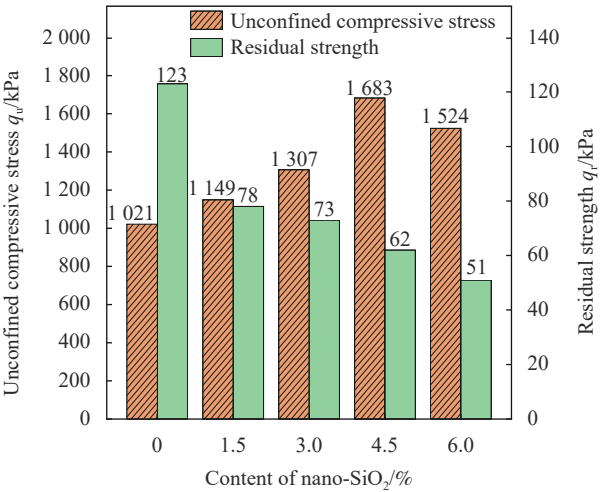


图 5 无侧限抗压试验获得的不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土
抗压强度与残余强度变化

Fig. 5 Variation of compressive strength and residual strength of cement soils with different nano-SiO₂ contents obtained from unconfined compression test

SiO₂ 掺量水泥土弹性模量变化。图 4 中，不同纳米 SiO₂ 掺量的水泥土应力-应变曲线均为软化型曲线。根据标准 GBT 50123—2019^[28] 选取峰值应变后 3% 应变对应的应力值为残余强度。由图 5 可知，随着纳米 SiO₂ 掺量的增加，nano-SiO₂/CS 试样的峰值强度先增大后减小，残余强度逐渐降低。1.5% nano-SiO₂/CS、3.0% nano-SiO₂/CS 和 4.5% nano-SiO₂/CS 峰值强度较 0% nano-SiO₂/CS 分别提高了 12.54%、27.98% 和 64.86%。分析原因为纳米 SiO₂ 具有较高的表面能，加入到水泥土中能够加速水泥的水化，另外，纳米 SiO₂ 能与 Ca(OH)₂ 生成

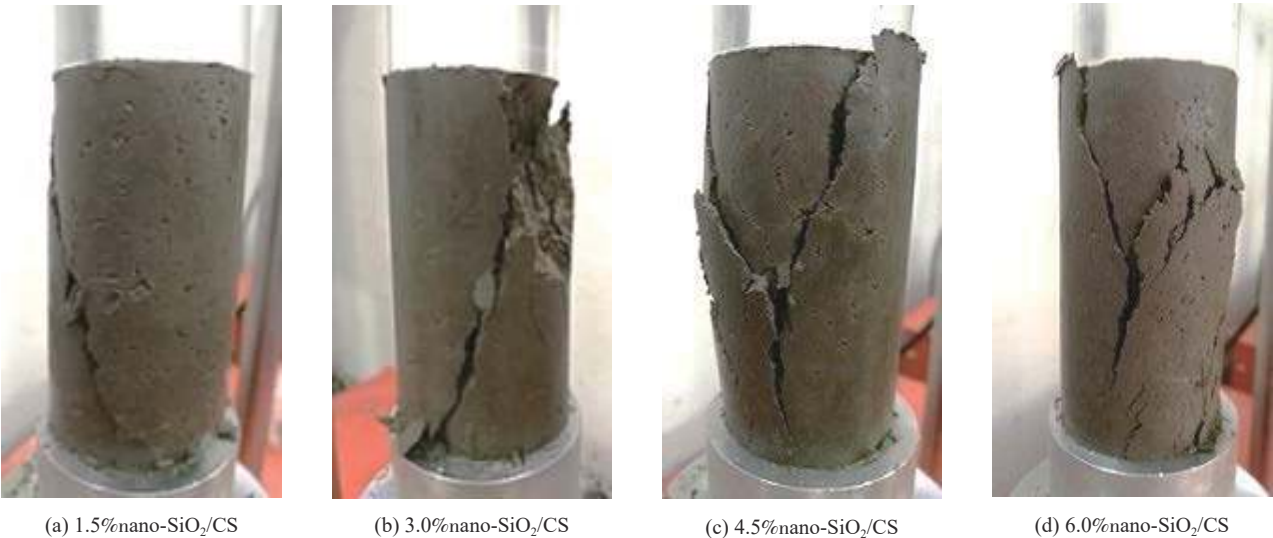


图 6 不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土无侧限抗压试验试样破坏图

Fig. 6 Failure diagrams of unconfined compression test samples of cement soils with different nano-SiO₂ contents

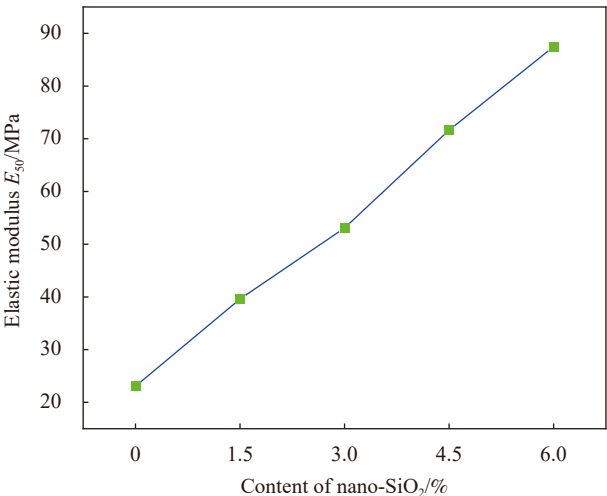


图 7 不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土弹性模量变化

Fig. 7 Variation of elastic modulus of cement soil with different nano-SiO₂ contents

$x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (m+x)\text{H}_2\text{O}$, 使内部结构更加致密, 从而提高了水泥土的无侧限抗压强度^[32-34]。6.0% nano-SiO₂/CS 的峰值强度比 0% nano-SiO₂/CS 提高了 49.28%, 但与 4.5% nano-SiO₂/CS 相比, 峰值强度却下降了 9.5%。由于纳米 SiO₂ 粒子表面积大, 表面能高, 其表面带有大量的正负电荷, 粒子与粒子之间存在化学键的作用, 粒子相互之间的范德华力远大于自身重力。因此, 当水泥土中掺入过量的纳米 SiO₂ 时, 水泥土中充斥着大量的纳米 SiO₂ 粒子, 纳米粒子之间距离极短, 粒子与粒子接触面积增大, 大量的纳米 SiO₂ 粒子吸附在一起,

导致纳米 SiO₂ 团聚, 在土中分散不均匀, 抑制了纳米 SiO₂ 的活性, 从而 6.0% nano-SiO₂/CS 的强度下降^[35]。

2.1.3 残余强度

随着纳米 SiO₂ 含量的增加, nano-SiO₂/CS 试样的残余强度与峰值强度表现出不同的变化规律, 1.5% nano-SiO₂/CS、3.0% nano-SiO₂/CS、4.5% nano-SiO₂/CS、6.0% nano-SiO₂/CS 的残余强度较 0% nano-SiO₂/CS 分别下降了 36.59%、40.55%、49.56% 及 59.01%。同样, 图 4 中, 峰值应变随着纳米 SiO₂ 掺量的增大也不断减小, 通常将改性水泥土的峰值应变与纯水泥土的峰值应变的比值作为延性指数^[28]。残余强度和延性指数均随着 SiO₂ 掺入比的增大而逐渐降低, 说明纳米 SiO₂ 的加入使水泥土的韧性下降, nano-SiO₂/CS 试样表现出脆性行为, 这种脆性行为可以进一步由 E_{50} 解释。由图 6 可以看出, nano-SiO₂/CS 试样的脆性行为极其明显, 其破坏机制是由拉伸裂纹导致的, 且拉伸裂缝宽而长, 由试样的顶部向底部扩展。

2.1.4 弹性模量

为了研究纳米 SiO₂ 对水泥土刚度的影响, 对不同纳米 SiO₂ 掺量 nano-SiO₂/CS 试样的弹性模量进行了总结, 如图 7 所示, 计算公式如下^[36]:

$$E_{50} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{3}$$

其中: E_{50} 为弹性模量; $\Delta\sigma$ 为达到 50% 峰值强度之前的应力变化; $\Delta\varepsilon$ 为达到 50% 峰值强度之前的

应变变化。

图 7 所示,随着纳米 SiO₂ 掺入量的增多,纳米 SiO₂/CS 试样的弹性模量也不断增大。1.5% nano-SiO₂/CS 弹性模量较 0% nano-SiO₂/CS 提高了 71.65%,当纳米 SiO₂ 掺入量为 3%~6% 时,试样的弹性模量 E_{50} 约为 0% nano-SiO₂/CS 的 1~3 倍。这表明纳米 SiO₂ 的添加使水泥土的硬度增强,导致其弹性模量 E_{50} 的增大。

2.2 纳米 SiO₂/CS 劈裂抗拉强度

为分析纳米 SiO₂/CS 试样劈裂抗拉强度离散程度,根据式 (2) 计算出 nano-SiO₂/CS 试样的劈裂抗拉强度变异系数不超过最大值 0.05<[0.15],表明 nano-SiO₂/CS 试样的劈裂抗拉强度离散程度小。

图 8 为劈裂试验获得的不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土抗拉强度曲线。可以看出, nano-SiO₂/CS 试样应力-应变曲线均分为上升阶段和下降阶段。其中上升阶段又分为压密阶段和破坏阶段。压密阶段位于损伤点之前的上凹段曲线,破坏阶段位于损伤点之后和峰值之前的上凸段,荷载增加速率峰值点为劈裂抗拉强度曲线的损伤点^[37]。可根据曲线损伤点对应的应变来判定试样的脆性。从图 8 看出, 1.5% nano-SiO₂/CS、3.0% nano-SiO₂/CS、4.5% nano-SiO₂/CS 曲线损伤点对应的应变值都小于 0% nano-SiO₂/CS, 其中 3.0% nano-SiO₂/CS、4.5% nano-SiO₂/CS 曲线表现的脆性特征最明显。当掺量为 6.0% 时,曲线在应变开始时存在缓慢上升阶段,其主要是由于过量的纳米 SiO₂ 在水泥土中会发挥自己的另一个衍生效应,过量的纳米粒子不能均匀地分布在水泥土中,从而抑制土颗粒或聚集体之间的接触,此时平缓阶段属于压密阶段。当压密阶段过后,曲线上升较快,很快达到损伤点,此时损伤点所对应的应变值仍小于纯水泥土,表明加入纳米 SiO₂ 后,试样表现出明显的脆性行为。

随着纳米 SiO₂ 掺量的增加,水泥土的劈裂抗拉强度先增大后减小,且在纳米 SiO₂ 掺量为 4.5% 时,劈裂抗拉强度达到最大值,为 166.52 kPa。1.5% nano-SiO₂/CS、3.0% nano-SiO₂/CS 和 4.5% nano-SiO₂/CS 的劈裂抗拉强度相对于 0% nano-SiO₂/CS 分别提高了 10.41%、21.12% 和 51.81%,而在纳米 SiO₂ 掺量为 4.5% 的基础上继续掺入 1.5% nano-SiO₂,其劈裂抗拉强度较 4.5% nano-SiO₂/CS 下降了 7.10%。这表明掺入适量的纳米 SiO₂ 能够快速提高水泥土

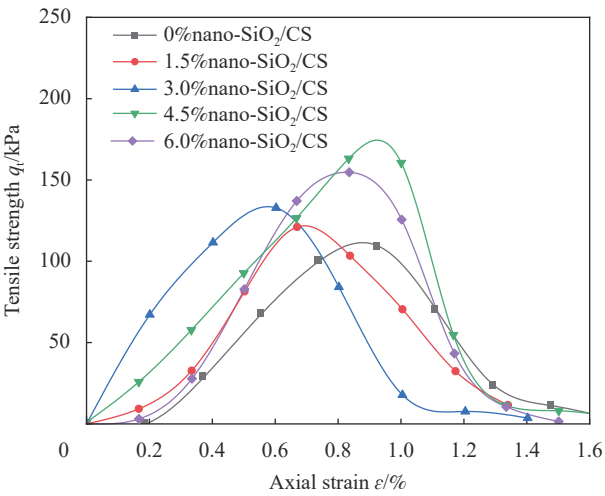


图 8 劈裂试验获得的不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土抗拉强度曲线

Fig. 8 Tensile strength curves of cement soils with different nano-SiO₂ contents obtained from splitting test

的劈裂抗拉强度,当纳米 SiO₂ 掺入过量时,劈裂抗拉强度增长幅度反而下降,这一结论与无侧限抗压强度所得结论相同。

nano-SiO₂/CS 试样的抗压强度和劈裂抗拉强度变化的主要原因是,水泥土中加入纳米 SiO₂ 后,其内部生成了更致密的 $x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (m+x)\text{H}_2\text{O}$,细化了水泥土内部结构,增强了土体整体结构的密实度,因此在劈裂过程中,纳米 SiO₂ 改性水泥土达到与 0% nano-SiO₂/CS 相同的变形时需要施加更大的荷载,在应力-应变曲线上上升阶段中体现为纳米 SiO₂ 改性水泥土比 0% nano-SiO₂/CS 的斜率大,且最终试样破坏时的峰值强度较大。

2.3 纳米 SiO₂/CS 中纳米 SiO₂ 掺量对 pH 值的影响

图 9 为无侧限抗压试验与 pH 值试验获得的无侧限抗压强度与 pH 关系曲线。图 9 中,素土 (S) 试样的 pH 值为 6.03,表明土壤呈弱酸性。当在土中加入 7% 水泥后, pH 值为 10.45 变为强碱性。主要由于水泥水化后生成了 Ca(OH)₂ 提高了水泥土的碱性,进而 pH 值增大。在 7% 水泥基础上分别加入 1.5%、3.0%、4.5% 和 6.0% 纳米 SiO₂ 后,水泥土 pH 值随着纳米 SiO₂ 掺量的增大而逐渐减小。其中, 1.5% nano-SiO₂/CS、3.0% nano-SiO₂/CS、4.5% nano-SiO₂/CS 和 6.0% nano-SiO₂/CS 的 pH 值分别为 10.36、10.24、9.96 和 9.92,与 0% nano-SiO₂/CS 相比 pH 值分别减小 0.09、0.21、0.49 和 0.45,下降趋势逐渐减缓。表明在水泥土中加入纳米 SiO₂ 能够改善水泥土土壤碱性环境,当纳米 SiO₂ 掺量超过 4.5% 时,水泥土 pH 值趋于稳定值。

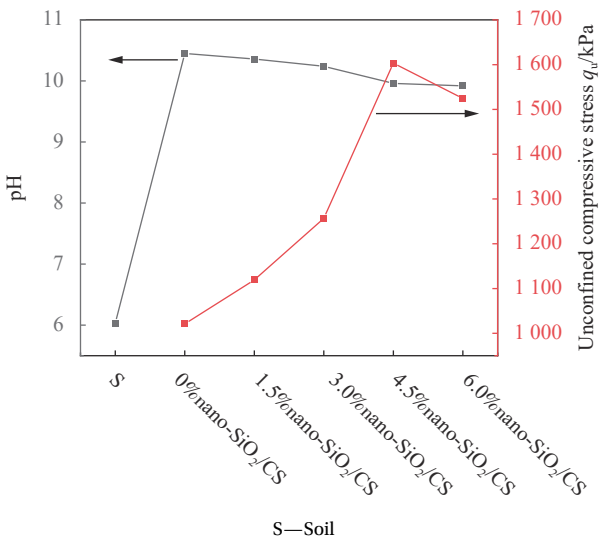


图9 无侧限试验与pH试验获得的不同纳米SiO₂掺量水泥土无侧限抗压强度与pH关系

Fig. 9 Relationship between unconfined compressive strength and pH of cement soils with different nano-SiO₂ contents obtained from unconfined test and pH test

图9中, 0% nano-SiO₂/CS、1.5% nano-SiO₂/CS、3.0% nano-SiO₂/CS、4.5% nano-SiO₂/CS和6.0% nano-SiO₂/CS的无侧限抗压强度值所对应的pH值依次减小, 其中无侧限抗压强度值较大时, 所对应的pH值反而较小。这说明适量的纳米SiO₂

不仅可以降低水泥土的碱性, 也可以提高水泥土的无侧限抗压强度。纳米SiO₂中Si—O键之间结合较弱, 遇到H₂O后易产生H₃SiO⁻离子, 当接触Ca²⁺离子会反应生成 $x\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot(m+x)\text{H}_2\text{O}$ ^[38]。因此, 纳米SiO₂的火山灰反应消耗了水泥土中大量的Ca(OH)₂降低了水泥土的碱性, 同时纳米SiO₂与Ca(OH)₂发生二次水化反应, 生成了更致密的 $x\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot(m+x)\text{H}_2\text{O}$ 。

3 微观结构

3.1 纳米SiO₂/CS土颗粒形态分布

为了进一步分析纳米SiO₂水泥土的强度增长机制, 对不同nano-SiO₂掺量水泥土进行了SEM试验, 图10为纳米SiO₂掺量为0%、1.5%、3.0%、4.5%和6.0%的水泥土2000放大倍数下的SEM图像。图10(a)为0% Nano-SiO₂/CS的微观结构。0% nano-SiO₂/CS试样土颗粒被水泥水化物包裹形成较大的颗粒物, 但颗粒物之间胶结程度较差, 起胶结作用的小颗粒球状与针状物较少, 整体骨架较分散, 表现为大颗粒-大孔隙-土颗粒结构。为进一步分析水泥水化包裹大颗粒结构, 将图10(a)中水泥水化包裹大颗粒a₁点处放大到5000倍, 如图11(a)所示。水泥水化包裹大颗粒表面水化物呈散乱堆积状态, 水化物与水化物之间存在孔

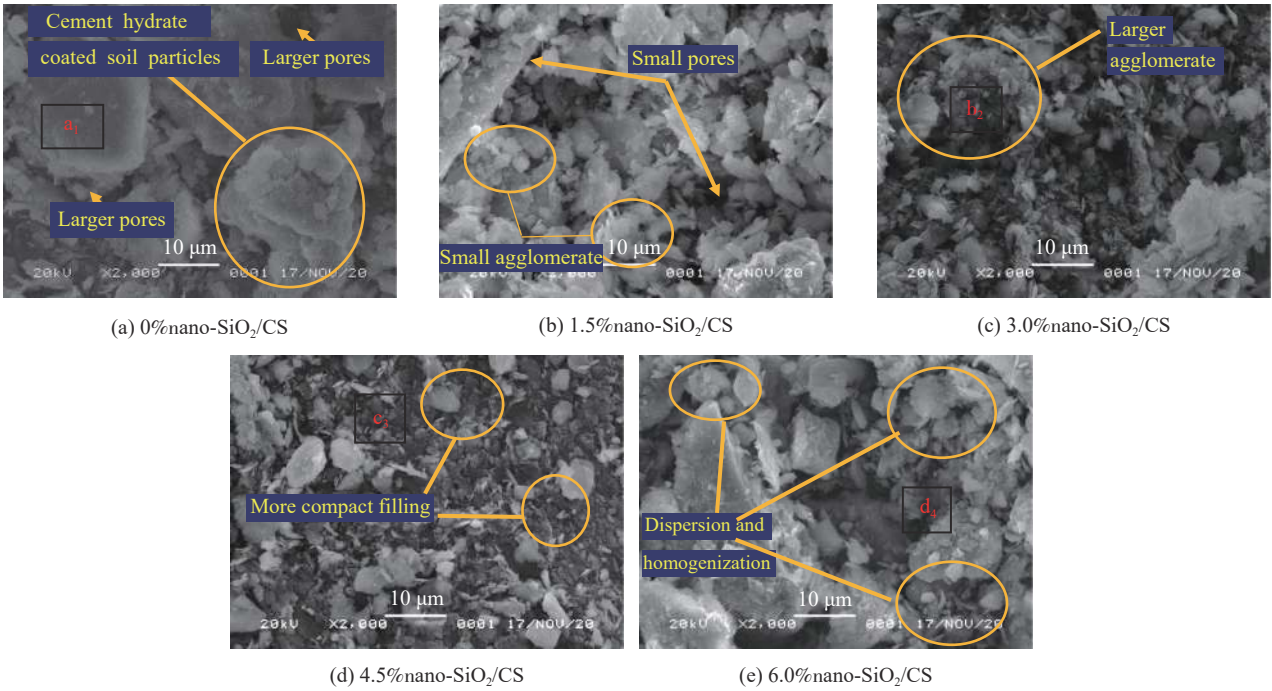
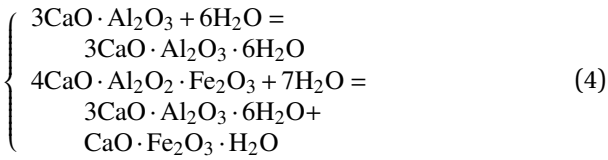


图10 2000放大倍数下 nano-SiO₂/CS 试样 SEM 图像

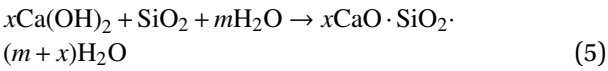
Fig. 10 SEM images of nano-SiO₂/CS at 2000 magnification

隙,导致水泥水化包裹大颗粒之间胶结效果较差,接触面上粘结的小颗粒物较少;图 10(b) 显示 1.5% nano-SiO₂/CS 试样小颗粒单元体增多,大颗粒上遍布着球状与针状的小颗粒,且大颗粒与大颗粒接触面上小颗粒以联结方式堆积在粒间孔隙内。但小颗粒数量有限,未能完全填充大颗粒接触面孔隙,整体呈大颗粒-小颗粒-微孔隙-大颗粒结构;由图 10(c) 可见 3.0% nano-SiO₂/CS 试样的微孔隙明显减少,小颗粒大量聚集形成大聚粒,其堆积在大颗粒与大颗粒接触面上,很好地填充了大颗粒接触面间的孔隙,整体呈大颗粒-大聚粒-大颗粒结构。为进一步分析大聚粒结构,将图 10(c) 大聚粒上 b₁ 点放大到 5 000 倍,如图 11(b) 所示,小颗粒紧密胶结在一起,但小部分小颗粒胶结未充分,仍存在微小孔隙;图 10(d) 显示 4.5% nano-SiO₂/CS 试样结构更加致密,分散的颗粒单元体较少,基本紧密胶结在一起,形成牢固的密实结构。为进一步观察 4.5% Nano-SiO₂/CS 密实结构,将图 10(d) 中 c₃ 点放大到 5 000 倍,如图 11(c) 所示,由小颗粒聚集而成的大颗粒微孔隙明显被填充,小颗粒更紧密的堆叠在一起,呈密实的整体结构;图 10(e) 显示 6.0% nano-SiO₂/CS 试样中颗粒物呈现出松散的堆积状态,颗粒物之间有较大的孔隙,颗粒与颗粒之间胶结效果较差,形成颗粒架空结构。为分析 6.0% nano-SiO₂/CS 的颗粒架空结构,将图 10(e) 中 d₄ 点放大 5 000 倍,如图 11(d) 小颗粒物聚集在大颗粒边缘处,形成的大聚粒相

互胶结不明显,存在明显的孔隙。由此可见, nano-SiO₂/CS 试样的微观密实度与纳米 SiO₂ 掺量有关,且纳米 SiO₂ 掺入量存在一个临界值,超过临界值后,水泥土密实度反而降低。只掺入水泥进行软土加固时,土颗粒之间存在大孔隙,水泥水化包裹大颗粒接触面胶结效果很差。由于水泥早期水化产物主要为铝酸三钙 (3CaO·Al₂O₃·6H₂O) 和铁铝酸四钙 (3CaO·Al₂O₃·6H₂O+CaO·Fe₂O₃·H₂O),这两种水化产物改善水泥土密实度效果不明显,强度较低,其反应方程式如下^[39]:



掺入 1.5% 纳米 SiO₂ 后,大颗粒与大颗粒接触面上遍布小颗粒和针状物,并堆积成小聚粒。在此基础上继续加入 1.5% 的纳米 SiO₂,小颗粒相互胶结形成大聚粒,密实填充了大颗粒之间的孔隙,但大聚粒上小颗粒胶结不充分,存在微小的孔隙。当纳米 SiO₂ 掺量为 4.5% 时,小颗粒堆积成连贯的整体,大聚粒上小孔隙被填充,形成密实牢固的结构。同时,纳米 SiO₂ 活性高,颗粒细,加入水泥土中首先发挥纳米填充效应,充填土壤中的微孔隙。其次,纳米 SiO₂ 会与水泥水化产生的 Ca(OH)₂ 反应生成 xCaO·SiO₂·(m+x)H₂O 凝胶,这种凝胶将聚集包裹住土壤颗粒,使土壤形态分布由松散变为聚集,同时填充了土颗粒之间的孔隙。化学反应方程式如下^[40]:



这些小颗粒随着纳米 SiO₂ 掺量的增大而增多,附着在水泥水化物包裹的大颗粒物上逐渐形成大聚粒。纳米 SiO₂ 掺量达到临界值时,与 Ca(OH)₂ 反应多余的纳米 SiO₂ 会发挥分散特性,其颗粒纳米填充效应将填充大聚粒上的微孔隙,使水泥土呈现连贯密实的整体。纳米 SiO₂ 掺量超过临界值时,纳米 SiO₂ 会发挥自己的另一个衍生效应^[19],过量的纳米粒子不能均匀地分布在水泥土中,从而抑制土颗粒或聚集体之间的接触,降低纳米 SiO₂ 的活性和部分火山灰反应,导致生成的水化硅酸钙 xCaO·SiO₂·(m+x)H₂O 的量减少。

3.2 纳米 SiO₂/CS 微观孔隙

SEM 图像中颗粒与孔隙间的灰度值有一个明

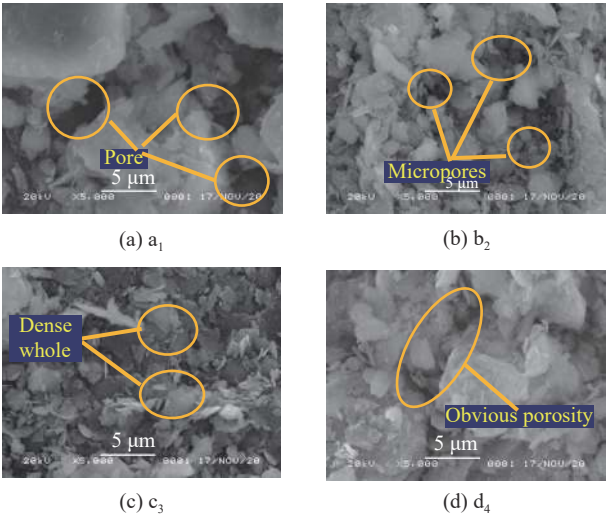


图 11 取自图 10a₁、b₂、c₃、d₄ 点的 nano-SiO₂/CS 5 000 放大倍数下 SEM 图像

Fig. 11 SEM images of a₁, b₂, c₃ and d₄ at 5 000 magnification from Figure 10

显的跳变，可据此将颗粒或孔隙从背景中分割出来，进一步的分析与测量。为了减小测试中人为主观因素影响，利用软件对 500 倍、2000 倍、5 000 倍放大倍数下的 0% nano-SiO₂/CS、1.5% nano-SiO₂/CS、3.0% nano-SiO₂/CS、4.5% nano-SiO₂/CS 和 6.0% nano-SiO₂/CS 的 SEM 图像进行处理，分别分析相同倍数下不同掺量纳米 SiO₂ 试样孔隙率变化规律。首先将图像阈值 (Threshold) 分割，调整图像整体阈值，利用边界上灰度值的跳跃将颗粒从背景中分割出来，将图像中的水泥土颗粒记为白色，孔隙记为黑色从而将灰度图转化为黑白二值图像^[41]，如图 12 所示，然后根据黑白二值图计算

表观孔隙率 n ，计算公式如下^[42]：

$$n = \frac{A_p}{A_t} \times 100\%$$

(6)

式中： A_p 为 SEM 图像中的总孔隙面积 (μm^2)； A_t 为是 SEM 图像的面积 (μm^2)。根据式 (6) 计算出 0% nano-SiO₂/CS、1.5% nano-SiO₂/CS、3.0% nano-SiO₂/CS、4.5% nano-SiO₂/CS 和 6.0% nano-SiO₂/CS 试样在 500 倍、2 000 倍和 5 000 倍下的孔隙率，如图 13 所示。同一放大倍数下，nano-SiO₂/CS 试样的孔隙率均随着纳米 SiO₂ 掺量的增加先减小后增大；在纳米 SiO₂ 掺量为 4.5% 时孔隙率达到最小值，其 500 倍、2000 倍和 5 000 倍下 4.5% nano-SiO₂/CS

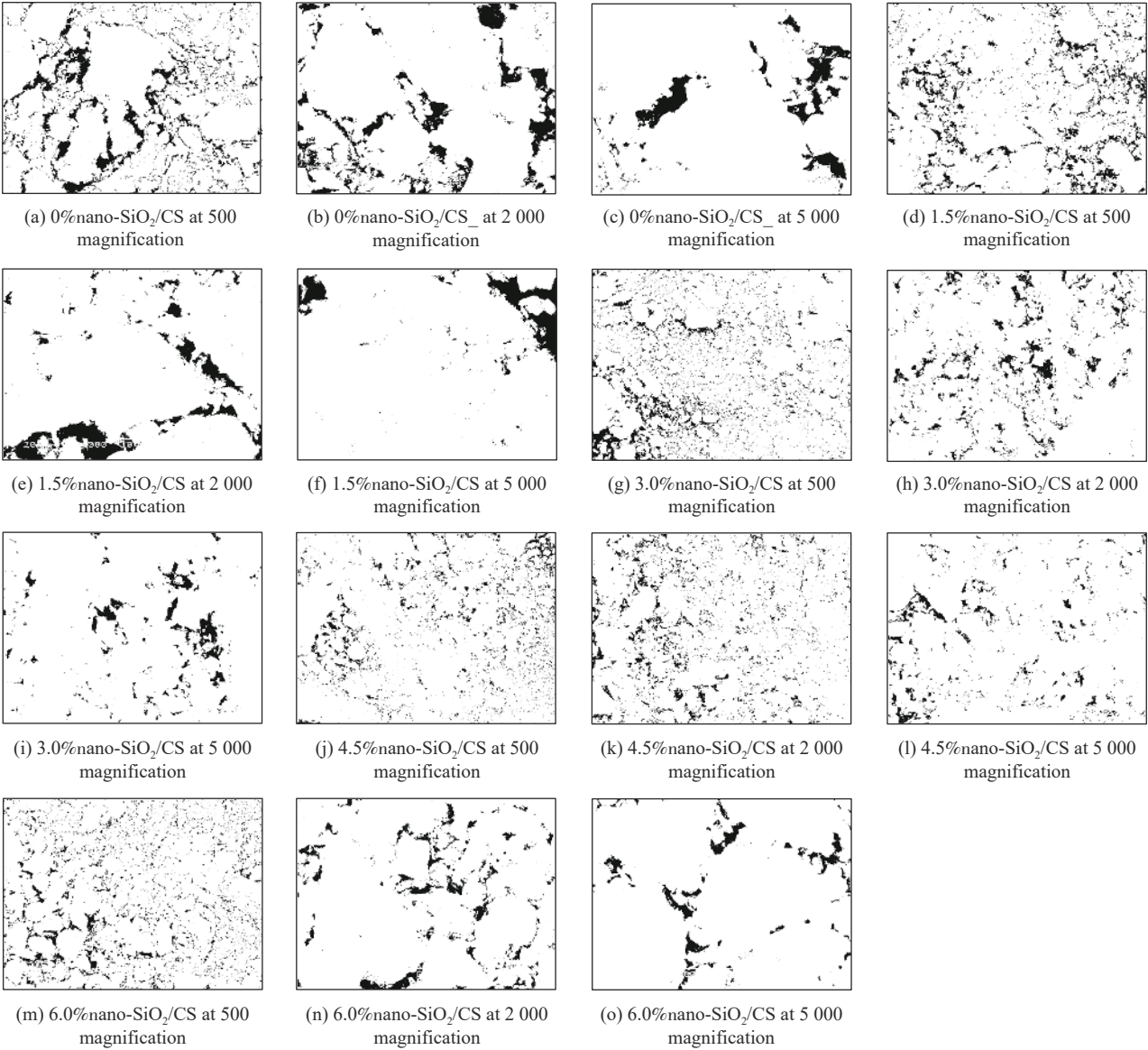


图 12 不同倍数下纳米 SiO₂/CS 孔隙率灰白二值图

Fig. 12 Gray binary diagrams of nano-SiO₂/CS porosity at different times

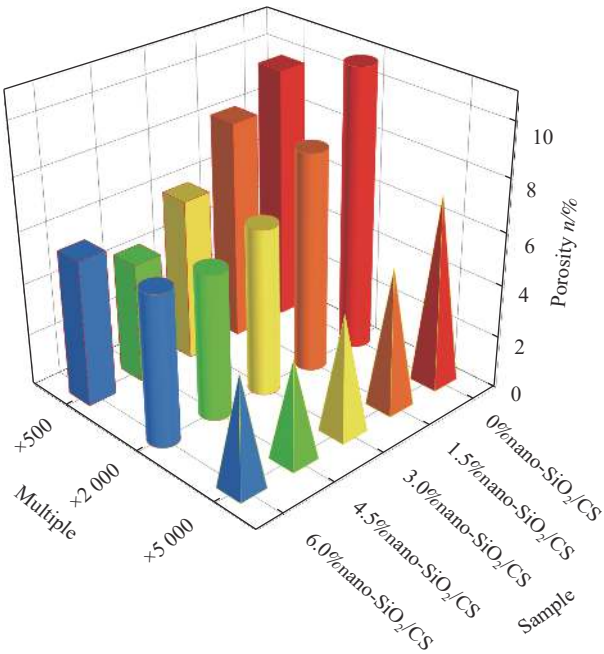


图 13 不同放大倍数下纳米 SiO₂/CS 孔隙率变化
Fig. 13 Porosity variation of nano-SiO₂/CS at different magnifications

孔隙率分别为 4.6%、5.6% 和 3.8%。为了研究无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度与孔隙率的关系，列出无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度与孔隙率关系表，如表 6 所示。可以看出，无侧限抗压强度大约为劈裂抗拉强度的 10 倍，这与朱静^[26]所得结论大致相同，且 500 倍、2 000 倍、5 000 倍下孔隙率表现出相同的规律，即先减小后增大。无侧限抗压强度与劈裂抗拉强度与孔隙率之间存在一定的非线性关系，由无侧限抗压强度与加权平均公式得出的孔隙率值绘制不同纳米 SiO₂ 掺量下水泥土无侧限抗压强度与孔隙率的拟合曲线图，如图 14 所示，加权平均公式如下^[43]：

$$\bar{x} = \frac{x_1 f_1 + x_2 f_2 + x_3 f_3 + \cdots + x_k f_k}{\sum_{i=1}^k f_i} \tag{7}$$

表 6 不同放大倍数下纳米 SiO₂/CS 孔隙率 *n* 与强度的关系

Table 6 Relationship between porosity <i>n</i> and strength of nano-SiO ₂ /CS at different magnifications					
Sample code	Compressive strength/kPa	Tensile strength/kPa	Porosity <i>n</i> /%		
			×500	×2 000	×5 000
0%nano-SiO ₂ /CS	1 021	110	9.7	10.8	7.2
1.5%nano-SiO ₂ /CS	1 149	121	8.4	8.4	5.3
3.0%nano-SiO ₂ /CS	1 307	133	6.2	6.4	4.5
4.5%nano-SiO ₂ /CS	1 683	167	4.6	5.6	3.8
6.0%nano-SiO ₂ /CS	1 524	155	5.6	5.8	4.3

式中： $\bar{x}$ 为平均值； f_k 为权重数。SEM 500 倍放大倍数下所扫描试样的面积较大，所测得试样的孔隙数较多，因此权重数设为 10。2 000 倍、5 000 倍放大倍数下所扫描试样面积依次减小，所测得的孔隙数较少，根据放大倍数关系权重数分别设为 500 倍权重数的 1/4 和 1/10，其值分别为 2.5 和 1。

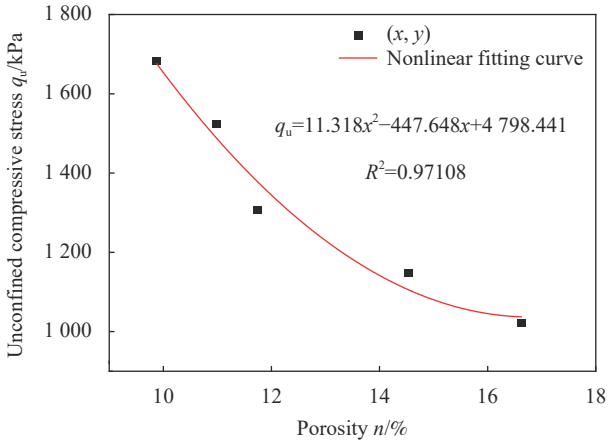


图 14 无侧限抗压试验获得的不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土抗压强度与孔隙率的拟合曲线
Fig. 14 Curve of unconfined compressive strength and porosity of cement soils with different nano-SiO₂ contents obtained by unconfined compression test

图 14 中，不同纳米 SiO₂ 掺量水泥土的无侧限抗压强度与孔隙率关系式为

$$q_u = 11.318x^2 - 447.648x + 4 798.441 \tag{8}$$
$$R^2 = 0.97108$$

由式 (8) 可以看出无侧限抗压强度与孔隙率呈很强的二次多项式关系。由于无侧限抗压强度大约为抗拉强度的 10 倍，可据此推算出劈裂抗拉强度与孔隙率的关系式，其关系式为

$$q_t = 1.1318x^2 - 44.7647x + 479.8441 \tag{9}$$

4 结论与讨论

4.1 讨论

(1) 只研究了短龄期下纳米 SiO_2 改性水泥土 (CS) 的力学特性与微观机制, 还需探讨纳米 SiO_2 长期龄期下的改性效果。同时需进一步研究物理分散法、化学分散法及超声波分散法分散纳米 SiO_2 后, 掺入 CS 强度改善效果。

(2) 仅对纳米 SiO_2 改性水泥土的无侧限抗压强度和劈裂抗拉强度进行了研究, 还需要多元化的试验、探索复杂环境下 CS 强度变化及 CS 本身纳米级 SiO_2 等矿物的影响。应对真三轴、共振柱和动三轴试验进行更全面的力学研究, 探究试样在盐性环境下强度变化规律及 CS 本身纳米级 SiO_2 对水泥土强度发展影响, 以充分揭示材料的机制, 扩大工程应用范围。

4.2 结论

以滨海水泥土为研究对象, 开展一系列试验, 得出以下主要结论:

(1) 纳米 SiO_2 能够提高水泥土的无侧限抗压强度与劈裂抗拉强度, 且无侧限抗压强度大约为劈裂抗拉强度的 10 倍。随着纳米 SiO_2 掺量的增加, nano- SiO_2 /CS 试样的峰值强度先增大后减小, 残余强度逐渐降低, 弹性模量逐渐增大。4.5% nano- SiO_2 /CS 无侧限抗压强度和劈裂抗拉强度最大, 分别为 1 683.46 kPa、166.52 kPa。同时掺加纳米 SiO_2 能提高 CS 的弹性模量, 增幅为 1~3 倍。另一方面, 掺加纳米 SiO_2 可以改善 CS 的碱性影响, CS 的 pH 值随着纳米 SiO_2 掺量的增大逐渐减小;

(2) 纳米 SiO_2 的掺入能够改善 CS 土颗粒形态的分布。分别在 500、2 000 和 5 000 三个放大倍数观察下, SEM 试验结果均表明适量的 nano- SiO_2 的掺入能够改善颗粒分布及减小孔隙的产生, 形态分布上大颗粒与大颗粒之间上遍布着球状和针状小颗粒, 小颗粒逐渐增多形成聚集体, 堆积在孔隙内, 使微观孔隙减少, 其中 4.5% nano- SiO_2 /CS 在 500、2 000 和 5 000 放大倍数下孔隙率最小, 分别为 4.6%、5.6% 和 3.8%, 且孔隙率与无侧限抗压强度之间基本呈二次多项式关系。

参考文献:

[1] HAJI A F, ADNAN A, KAM C C. Geotechnical properties of a chemically stabilized soil from Malaysia with rice husk ash as an additive[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 1992, 10(2): 117-134.

[2] EA B, ROSLAN H, HB M, et al. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(6): 448-453.

[3] CATTON M D. Research on the physical relations of soil and soil-cement mixtures[C]//Highway Research Board Proceedings. Washington, 1941.

[4] ARULRAJAH A, YAGHOUBI M, DISFANI M M, et al. Evaluation of fly ash-and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(6): 1358-1370.

[5] AHMAD M R, CHEN B, YU J. A comprehensive study of basalt fiber reinforced magnesium phosphate cement incorporating ultrafine fly ash[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 168: 204-217.

[6] ODERJI S Y, CHEN B, AHMAD M R, et al. Fresh and hardened properties of one-part fly ash-based geopolymer binders cured at room temperature: Effect of slag and alkali activators[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225: 1-10.

[7] QIN L, GAO X. Properties of coal gangue-Portland cement mixture with carbonation[J]. Fuel, 2019, 245: 1-12.

[8] 梅利芳, 徐光黎. 纤维聚苯乙烯泡沫颗粒轻质土的制备及力学性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(10): 2355-2362.

MEI L F, XU G L. Preparation and mechanical properties of fiber expanded polystyrene particle lightweight soil[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(10): 2355-2362(in Chinese).

[9] 高常辉, 马芹永. 水泥砂浆固化粉质黏土分离式Hopkinson压杆试验与分析[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1629-1635.

GAO C H, MA Q Y. Analysis of silty clay stabilized by cement mortar based on split Hopkinson pressure bar experiment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1629-1635(in Chinese).

[10] ZHANG T, GAI G, LIU S. Reclaimed lignin-stabilized silty soil: Undrained shear strength, atterberg limits, and microstructure characteristics[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(11): 04018277.

[11] YAO K, WANG W, LI N, et al. Investigation on strength and microstructure characteristics of nano-MgO admixed with cemented soft soil[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 160-168.

[12] 马冬冬, 马芹永, 黄坤, 等. 基于NMR的地聚合物水泥土孔隙结构与动态力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 572-578.

MA D D, MA Q Y, HUANG K, et al. Pore structure and dynamic mechanical properties of geopolymer cement soil based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 572-578(in Chinese).

- [13] LIN D, LIN K, CHANG W et al. Improvements of nano-SiO₂ on sludge/fly ash mortar[J]. *Waste Management*, 2008, 28(6): 1081-1087.
- [14] KUO W, LIN K, CHANG W, et al. Effects of nano-materials on properties of waterworks sludge ash cement paste[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2006, 12(5): 702-709.
- [15] YUN W C, YONG J K, CHOI O, et al. Utilization of tailings from tungsten mine waste as a substitution material for cement[J]. *Construction & Building Materials*, 2009, 23(7): 2481-2486.
- [16] SOBOLEV K, FLORES I, HERMOSILLO R, et al. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites[J]. *ACI Materials Journal*, 2008, 254: 91-118.
- [17] NIMA F, ABANG A, DEMIRBOGA R. Development of nanotechnology in high performance concrete[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 364: 115-118.
- [18] KONG R, ZHANG F Y, WANG G, et al. Stabilization of loess using nano-SiO₂[J]. *Materials*, 2018, 11(6): 1014.
- [19] KONG R, YAN B, XU J, et al. Physical homogenization and chemical stability of nano-SiO₂ treated loess[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2019, 56(5): 336-339.
- [20] CHANGIZI F, HADDAD A. Effect of nano-SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2016, 34(2): 725-733.
- [21] AK A, MG B, MR C, et al. Influence of nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 161: 129-136.
- [22] GIVI A N, RASHID S A, AZIZ F, et al. The effects of lime solution on the properties of SiO₂ nanoparticles binary blended concrete[J]. *Composites*, 2011, 42B(3): 562-569.
- [23] KAWASHIMA S, HOU P, CORR D J, et al. Modification of cement-based materials with nanoparticles[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2016, 36(1): 8-15.
- [24] LI H X, ZHANG H, LI L, et al. Utilization of low-quality desulfurized ash from semi-dry flue gas desulfurization by mixing with hemihydrate gypsum[J]. *Fuel*, 2019, 255: 115783.
- [25] LANG L, LIU N, CHEN B. Strength development of solidified dredged sludge containing humic acid with cement, lime and nano-SiO₂[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 116971.
- [26] 朱静. 掺加纳米SiO₂水泥复合固化土力学性能研究及数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- ZHU J. Study on effect of mechanical property test of cement composite stabilized soil mixed with nanometer-SiO₂ and numerical analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016(in Chinese).
- [27] ZHANG X, GAO J, FAN H, et al. Study on the mechanism of nano-SiO₂ for improving the properties of cement-based soil stabilizer[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(3): 405.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for soil test methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019(in Chinese).
- [29] LO K W, LIN K L, CHENG T W, et al. Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of spent catalyst metakaolin-based geopolymers[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 143(JUL.15): 455-463.
- [30] 姜恒超, 李青林, 杨志勇, 等. 玻璃纤维水泥改良土劈裂抗拉强度试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(11): 2742-2747.
- JIANG H C, LI Q L, YANG Z Y, et al. Experimental study on split tensile strength of glass fiber cement improved soil[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(11): 2742-2747(in Chinese).
- [31] 刘永翔, 张经双, 段雪雷. 聚丙烯纤维水泥土强度增长机理分析[J]. *中国科技论文*, 2020, 15(6): 622-627.
- LIU Y X, ZHANG J S, DUAN X L. Mechanism analysis of strength growth of polypropylene fiber cement soil[J]. *China Sciencepaper*, 2020, 15(6): 622-627(in Chinese).
- [32] TAHA M R, TAHA O. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, 14(10): 1190.
- [33] GIVI A N, RASHID S A, AZIZ F, et al. Influence of 15 and 80 nano-SiO₂ particles addition on mechanical and physical properties of ternary blended concrete incorporating rice husk ash[J]. *Journal of Experimental Nanoscience*, 2013, 8(1): 1-18.
- [34] ZYGANITIDIS I, STEFANIDOU M, KALFAGIANNIS N, et al. Nanomechanical characterization of cement-based pastes enriched with SiO₂ nanoparticles[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2011, 176(19): 1580-1584.
- [35] HESSAM B S, BK H B, AFSHIN A, et al. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 64: 350-359.
- [36] AHMADI H, JANATI S, CHENARI R J. Strength parameters of stabilized clay using polypropylene fibers and nano-MgO: An experimental study[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38(3): 2845-2858.
- [37] 吕东东, 李彦荣, 赵金贵. 山西晋中马兰黄土劈裂特性及抗拉强度研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(2):

173-178.

LV D D, LI Y R, ZHAO J G. Study on splitting characteristics and tensile strength of Malan loess in Jinzhong, Shanxi Province[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2021, 40(2): 173-178(in Chinese).

[38]

AHMADI H, SHAFIEE O. Experimental comparative study on the performance of nano-SiO₂ and microsilica in stabilization of clay[J]. The European Physical Journal Plus, 2019, 134(9): 459.

[39]

JANALIZADEH C A, ALI V, SAMAN S K. Static and cyclic tri-axial behavior of cemented sand with nanosilica[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(10): 04018269.

[40]

LIN D F, LUO H L, DARN-HORNG Hsiao. Enhancing soft subgrade soil with a sewage sludge ash/cement mixture and nano-silicon dioxide[J]. Environmental Earth Sci-

ences, 2016, 75(7): 619.1-619.11.

[41]

LIU Y, CHEN E J, QUEK S T, et al. Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab[J]. Géotechnique, 2015, 65(10): 851-865.

[42]

孔冉. 纳米二氧化硅固化黄土力学性能和结构特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.

KONG R. Study on mechanical properties and structural characteristics of nano-SiO₂ stabilized loess[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019(in Chinese).

[43]

付艳华. 一种基于证据综合权重折扣的加权平均法[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2010, 31(7): 917-920.

FU Y H. A weighted averaging method based on overall weight of discounted evidences[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(7): 917-920(in Chinese).