

王施涵, 牛富俊, 张恒. 纳米材料在土体改性方面的研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(4): 209-219.

WANG Shihan, NIU Fujun, ZHANG Heng. Progress of study on application of nanomaterials to soil modification[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(4): 209-219.

# 纳米材料在土体改性方面的研究进展

王施涵<sup>1,2</sup>, 牛富俊<sup>1,2</sup>, 张恒<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 华南岩土工程研究院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 随着纳米技术的发展和多学科的交叉应用, 纳米材料作为一种新型添加剂应用于土体改良。为深入认识纳米材料对土体性质产生的影响以及作用机理, 提高对纳米技术与岩土工程之间关系的理解, 对不同类型纳米材料在土体改性方面的研究现状、有效性、适用性进行回顾与总结。重点讨论了纳米硅溶胶、纳米二氧化硅、纳米黏土矿物、纳米氧化铝等纳米材料对土体改性的影响, 结合宏观力学性质以及微观结构变化解释纳米颗粒与土颗粒之间的相互作用机制。纳米粉末状颗粒通过提高抗压强度、降低水力传导系数加固土体; 利用纳米硅溶胶、膨润土悬浮液、硅酸镁锂的可渗透性和触变性缓解土体液化。尽管相关试验研究表明添加少量纳米材料可引起土体性质的显著改善, 但是大部分研究仍局限于室内试验, 需要进一步探索易于现场施工、成本低、环境友好的新方法和新技术。

**关键词:** 纳米技术; 纳米材料; 土体改性; 水力传导系数; 土体液化; 作用机理; 膨胀土; 力学性能

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.04.023

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)04-0209-11



## Progress of study on application of nanomaterials to soil modification

WANG Shihan<sup>1,2</sup>, NIU Fujun<sup>1,2</sup>, ZHANG Heng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640,

Guangdong, China; 2. South China Institute of Geotechnical Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** With the development of nanotechnology and the relevant interdisciplinary application, the nanomaterials are applied to soil improvement as new kinds of additives. In order to deeply understand the influence of nanomaterials on soil properties and the related function mechanisms and enhance the understanding of the relationship between nanotechnology and geotechnical engineering, the study statuses, effectivenesses and applicabilities of different types of nanomaterials in the aspect of soil modification are briefly reviewed and summarized herein. The influences from nano silica sol, nano-silica, nano-clay minerals, nano-alumina and other nanomaterials on the soil modification are mainly discussed, while the interaction mechanism between nanoparticles and soil particles are explained in combination with the macroscopic mechanical properties and microstructure changes concerned. Nano-powder particles strengthen soil mass through enhancing compressive strength and lowering hydraulic conductivity, meanwhile, alleviate the liquefaction of soil mass with the permeabilities and thixotropies of nano silica sol, bentonite suspension and magnesium

收稿日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41901074); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-STZ-ZDTP-037)

作者简介: 王施涵(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事软土加固研究。E-mail: wang\_shihanscut@163.com

lithium silicate. Although the relevant experimental studies show that the properties of soil mass can be significantly improved by adding a small amount of nanomaterials, most of them are still limited to the lab-experiments, for which the new environment-friendly methods and techniques those are easy for the in situ construction with low costs are necessary to be further explored.

**Keywords:** nanotechnology; nanomaterial; soil modification; hydraulic conductivity; liquefaction of soil mass; function mechanism; expansive soil; mechanical properties

## 0 引言

天然土体常常因为承载力低、沉降变形大、收缩开裂、地震液化等问题不能满足实际工程的需要。针对这些情况,通常采用物理化学手段对土体进行改性,以达到改善土体力学性质和控制其潜在变形的目的。通过振动、强夯、爆破夯实土体,提高土体承载力和抗液化能力是最常见的物理手段,但这种方法对周围基础设施具有很大影响,并且压实深度有限,不适合在发达地区使用。传统的固化材料水泥浆液具有黏度高,粒径大的特点,需要足够的压力才能灌注到目标土体,而且很难进入到细微裂隙中实现对整片场地的均匀加固<sup>[1]</sup>。其他典型化学灌浆材料例如丙烯酸盐以及环氧树脂的溶剂具有一定毒性,处理不当会对周围的生态环境产生不利影响。纤维加筋材料如聚丙烯纤维、碳纤维、钢纤维、玻璃纤维等<sup>[2]</sup>在土体加固中的研究也有大量报道,利用纤维的“桥接效应”可以有效阻碍土体裂缝的进一步发展<sup>[3-5]</sup>,但是纤维材料会导致渗透性的增加,不适合作为垃圾填埋场,水坝中防渗衬垫的外掺剂。针对以上问题,纳米材料的出现为土体改良提供了新颖的解决思路。

纳米技术的概念源自于1959年理查德·费曼在加州理工学院举行的美国物理学会年会上所作的一次题为“物质底部大有空间”的著名演讲<sup>[6]</sup>,此后纳米科学与技术作为探索纳米尺度微观世界的新领域开始快速发展。纳米材料指的是在三维空间中至少一维处于1~100 nm之间的微粒,由于其特有的表面效应、体积效应、量子尺寸效应被广泛应用于微电子、生物工程、化工、医学等领域,纳米材料的出现打破了不同学科之间的界限,被公认为是21世纪最有前途的领域<sup>[7]</sup>。

随着纳米技术的成熟,纳米材料成本的降低,以及交叉学科之间的发展,其在土木工程领域的应用引起了广泛重视,尤其在水泥基材料和涂层材料的应用方面已经取得一系列的进展。例如(1)改善混凝土的渗透性和主要力学性质<sup>[8-12]</sup>; (2)向水泥基材料中添加纳米材料,在内部形成导电网络和导电通道,使其具有有机敏性,研制纳米传感器和自感应混凝土,实现对结构的健康监测<sup>[13-15]</sup>; (3)研制防腐、自清洁涂层<sup>[16-17]</sup>。

纳米材料作为新型添加材料,为土体加固提供了一种新颖、智能、可持续性的方案,未来在岩土工程中必将获得广泛的应用。然而,纳米技术在岩土工程中的应用研究仍处于探索阶段,其中大部分为室内试验,主要围绕改善土体抗压、抗剪强度、水力传导系数、抗液化能力等开展一系列试验。本文以纳米材料改良土体的试验研究为背景,按照不同纳米材料种类,梳理总结纳米材料在土体改性中的研究现状和存在的问题,旨在为未来开展此方面研究提供一些参考。

## 1 纳米硅溶胶

硅溶胶(CS)是二氧化硅在水中均匀分散形成的悬浮液,可提取自饱和硅酸溶液,胶团大小通常为7~22 nm,黏度小,同时具有永久性、无毒、生物化学惰性,以及优良的耐久性等特点<sup>[18]</sup>,图1所示为其胶团示意图。在制作过程中,往往加入碱性溶液来使二氧化硅颗粒之间相互排斥,进而抑制硅溶胶的胶凝,保证溶液的稳定性。硅溶胶的胶凝时间与二氧化硅含量、粒径、溶液pH值、盐的浓度有关,胶凝时间随着二氧化硅含量和粒径的增大而增大,随着溶液中含盐浓度的增加而减小,最小胶凝时间出现在 $5 < \text{pH}$ 值 $< 6$ ;在硅溶胶质量分数为5%时,黏度与纯水接近,约为1.5~2 CP。相比传统灌浆材料,硅溶胶的低黏度和纳米尺度使其更加容易在土层中流动,渗透到需要加固的区域,并且对土体扰动小,不会对土体造成污染,如图2所示,可通过注浆井和抽取井增强

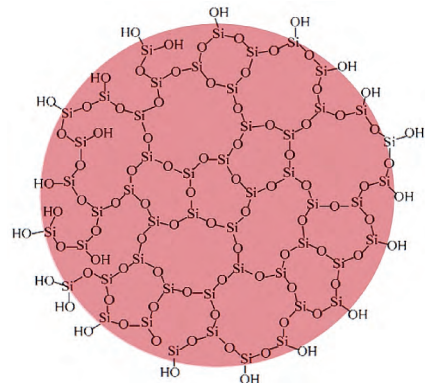


图1 硅溶胶团示意<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Schematic of colloidal silica particle<sup>[18]</sup>

地下水流使其稳定输送到指定部位提高土体承载力和抗液化能力。基于硅溶胶的优异特性, 学者们围绕以下三个方面研究硅溶胶对土体性质的影响。

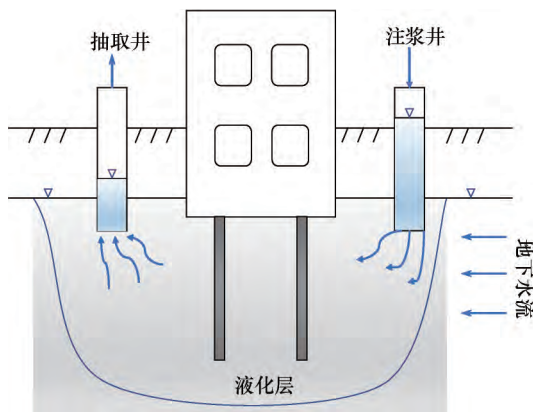


图2 硅溶胶场地加固概念<sup>[29]</sup>

Fig.2 Concept of silica sol stabilizing liquefiable site<sup>[29]</sup>

### 1.1 硅溶胶对土体静力学特性影响

PERSOFF 等<sup>[19]</sup>将硅溶胶演化为刚性胶体的胶凝过程归纳为 11 个阶段, 并且指出灌浆砂的抗压强度随硅溶胶浓度的增加而增加, 7 d 后最大可达 400 kPa, 而水力传导系数则呈指数下降, 在浓度 > 7.4% 时, 水力传导系数  $< 1 \times 10^{-7}$  cm/s。此外, BUTRÓN 等<sup>[20]</sup>将硅溶胶溶液置于不同储存环境下来模拟隧道环境, 结果表明其适合作为隧道工程中岩石的灌浆材料来阻断水的入渗。

国内的邓陈艳等<sup>[21]</sup>通过常规三轴固结不排水试验得出灌浆后标准砂的破坏应力随纳米硅溶胶浓度、养护时间、围压的增大而增大, 破坏应变则相反; 试样在剪切过程中均表现为前期剪缩、后期剪胀的特点。徐岗等<sup>[22]</sup>向纳米二氧化硅中掺加可溶性聚丙烯酰胺配置水溶液加固剂对松散砂土进行加固, 提高了砂土的抗压和抗剪强度, 同时改善其抗崩解特性。卜思敏<sup>[23]</sup>研究了不同粒径、不同掺量纳米硅溶胶对黄土强度特性的影响及固化机理。总体上, 纳米硅溶胶溶液可以显著改善土体的静力学特性。

### 1.2 硅溶胶的运输机制研究

在实际应用中, 硅溶胶需要在形成刚性凝胶之前输送到指定的加固位置。GALLAGHER 等<sup>[24]</sup>对 15 个装有砂土样、高 0.9 m 的短柱展开试验, 研究不同变量对硅溶胶运输机制的影响。试验发现影响输送的主要因素包括硅溶胶稳定剂的黏度、水力坡度以及砂土的渗透系数。HAMDERI 等<sup>[25]</sup>制作了 10 m<sup>3</sup> 的中试模型, 试验显示在每个井注浆速率为 65 mL/min 和 130 mL/min 时, 浆体产生下沉而不是水平运输, 当

注浆速率超过 1 900 mL/min 时, 足够的水平压力保证浆液进行水平输送, 同时通过数值模拟进行了验证。PEDROTTI 等<sup>[26]</sup>建立了考虑不同 pH 值、电解质溶液、二氧化硅浓度和粒径条件下, 预测胶凝时间和黏度变化的通用模型。

### 1.3 硅溶胶对砂土液化特性影响

GALLAGHER 等<sup>[27]</sup>研究了循环荷载下经硅溶胶处理后松砂的变形特性。试验发现硅溶胶可以增强松砂抵抗变形的能力, 在循环荷载作用下, 未处理的土样在 13 次循环后液化塌陷, 而经过 10% 硅溶胶处理的土样可以抵抗至少 100 次循环, 并且所有处理过的松砂在循环荷载下应变均匀增加, 表现出一定完整性。

随后, GALLAGHER 等<sup>[28]</sup>和 CONLEE 等<sup>[29]</sup>采用离心机模型试验来评估硅溶胶对延缓砂土液化效应的能力, 在一系列振动荷载下的响应, 发现随着硅溶胶浓度的增加, 地面变形显著减小, 剪切波速增大, 同时循环阻力比增加和循环剪切应变减小, 充分证明了经过硅溶胶处理后的砂土抗液化能力的提高。此外, GALLAGHER 等<sup>[30]</sup>对加拿大某地区可液化场地进行硅溶胶注浆试验。由八个注浆井围绕一个抽取井形成直径为 9 m 的圆形区域, 缓慢注入 8% 的硅溶胶对深度 6.5~8.5 m 的砂土层进行加固, 利用炸药爆炸振动诱导液化。虽然出现液化, 但是经过处理的区域最大沉降为 0.3 m, 而未经过处理的区域达到 0.5 m, 因此还需要进一步研究来衡量硅溶胶延缓现场砂土液化行为的能力。

## 2 纳米二氧化硅

二氧化硅纳米材料具有成本低、耐久性好、稳定可靠等优点, 是一种很有发展前途的软弱土加固材料。

### 2.1 对软弱土性质影响

CHANGIZI 等<sup>[31]</sup>对掺入 Nano-SiO<sub>2</sub> 黏土的力学性质展开研究, 发现最大干密度 (MDD) 和最佳含水率 (OMC) 均有所增加, 如图 3 所示, 内摩擦角和黏聚力分别为初土样的 2.1 倍和 1.23 倍, 同时纳米材料处理后的土样表现出明显脆性特点。

KONG 等<sup>[32]</sup>向黄土中加入 Nano-SiO<sub>2</sub> 发现随着含量和养护时间的增加, 抗压强度不断提高, 将宏观结构与微观结构变化结合解释加固机理, 指出在加固过程中物理结构的改变而非化学成分的变化主导着土体力学性质。BUAZAR<sup>[33]</sup>则从小麦壳中提取出二氧化硅纳米颗粒, 用于路基软土的加固中。这种具有绿色和创新性的加固剂可以进一步促进基础设施建设的可持续性和生物相容性。

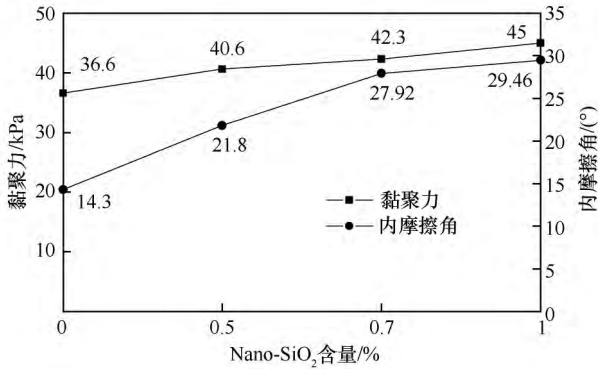


图3 Nano-SiO<sub>2</sub>对剪切参数的影响<sup>[31]</sup>

Fig. 3 Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> on soil shear parameters<sup>[31]</sup>

REN 等<sup>[34]</sup>将纳米材料应用于冻土领域, 试验结果显示粉质黏土产生的冻胀量和平均孔隙尺寸随着 Nano-SiO<sub>2</sub> 的增加减小。KALHOR 等<sup>[35]</sup>研究了 Nano-SiO<sub>2</sub> 对细粒土冻融循环后力学性质的影响, 发现液限、塑限以及最佳含水率均随着 Nano-SiO<sub>2</sub> 含量的增加而增大, 但最大干密度和塑性指数的变化规律则与其相反。如图 4 所示, 无侧限抗压强度(UCS)最大值出现在 2% Nano-SiO<sub>2</sub> 时, 超过 2% 表现为下降趋势。在 9 次冻融循环后, 未改良的土样和 2% Nano-SiO<sub>2</sub> 处理的混合土样抗压强度分别下降 64% 和 42%, 由此可见纳米材料可以减小土体冻融循环后的强度损失率。胡凯等<sup>[36]</sup>探究了 1% 纳米二氧化硅掺量下冻结黏性砂土的强度变化, 结果表明改良后土体的三轴压缩强度可提高约 1 倍。

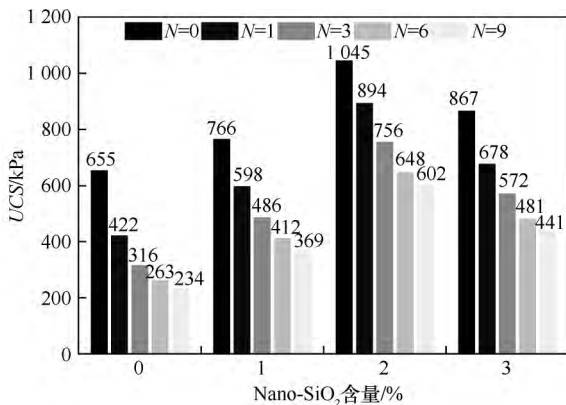


图4 冻融循环对土样 UCS 的影响<sup>[35]</sup>

Fig. 4 Effect of freeze-thaw cycles on UCS of specimens<sup>[35]</sup>

当适当纳米二氧化硅均匀分散在土体中时, 纳米粒子吸附周围的水分子形成凝胶, 通过这种凝胶形成的联结力比靠结合水形成的联结力强, 如图 5 所示, 土颗粒间的距离更加紧密, 形成以纳米材料为核心的网状结构, 改善了相应的摩擦效应。换句话说, 纳米

材料作为颗粒之间空隙的填料, 在土体中形成微结构, 获得细观上十分致密的纳米材料-土的复合增强体。但过量的纳米材料会形成团聚体, 造成土颗粒间空隙增大, 强度提高不明显。

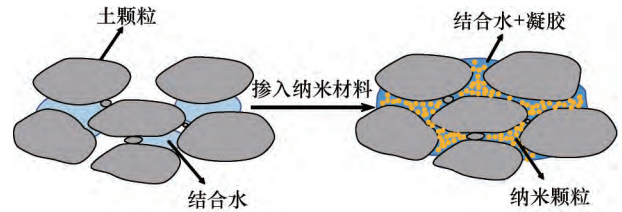


图5 纳米材料加固土样机理示意

Fig. 5 Sketch drawing of nanomaterials strengthening soil

## 2.2 对水泥土性质影响

BAHMANI 等<sup>[37]</sup>掺入不同粒径 Nano-SiO<sub>2</sub> (0.2%、0.4%、0.8%、1%) 和水泥(4%、6%、8%) 对花岗岩残积土进行加固。UCS 在 0.4% Nano-SiO<sub>2</sub> 和 8% 水泥时达到最大值, 水力传导系数也表现出类似的特点, 原因是过量的纳米颗粒不利于在土中均匀分散。为了进一步研究 Nano-SiO<sub>2</sub> 的含量和粒径大小对残积土的加固过程, BAHMANI 等<sup>[38]</sup>对土样进行了无侧限抗压强度、电阻率、XRD、FTIR、Zeta 电势、阳离子交换能力(CEC)测定以及 SEM 扫描, 结果显示 Nano-SiO<sub>2</sub> 的加入促进二次水化产物的形成, 并且由于小粒径有着更大的比表面积, 性能优于大粒径 Nano-SiO<sub>2</sub>, UCS 最大达到 2 000 kPa, 如图 6 所示。

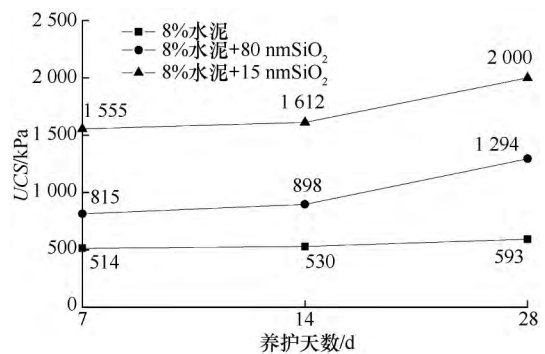
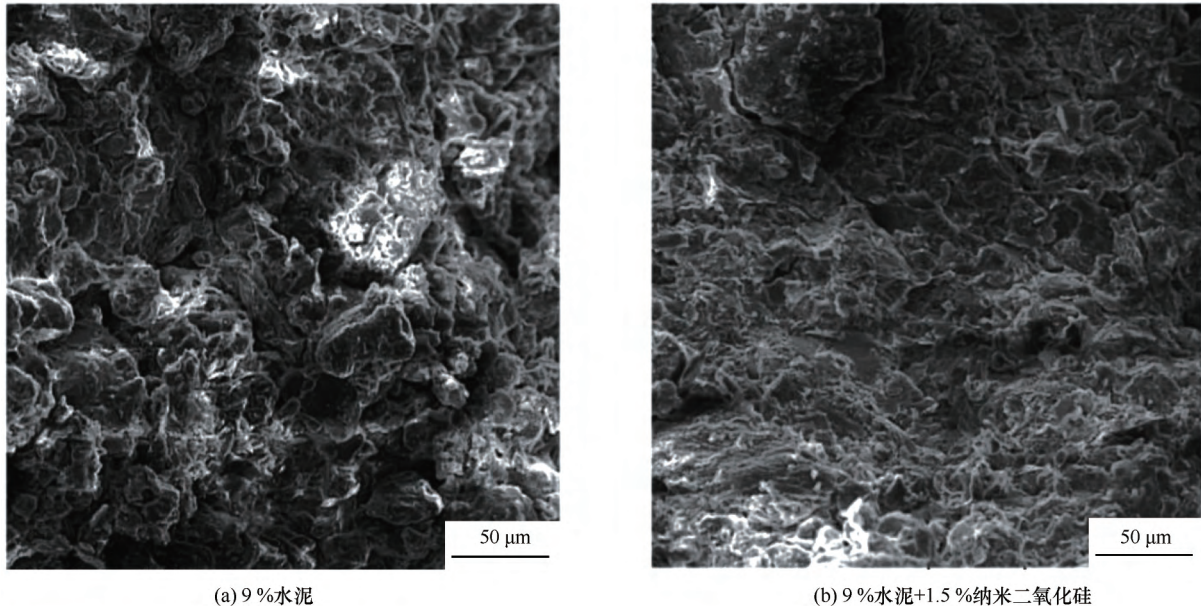


图6 不同粒径对土样 UCS 的影响<sup>[38]</sup>

Fig. 6 Effect of different sizes on UCS for samples<sup>[38]</sup>

同样, GHASABKOLAEI 等<sup>[39]</sup>向水泥土(9% 水泥)中添加不同含量的 Nano-SiO<sub>2</sub>, 含量 1.5% 时抗压强度达到普通的水泥土的 1.38 倍, 此时加州承载比和弹性模量处于最大值, 如图 7 所示, 纳米材料使得微观结构更加密实均匀。CHOBBASTI 等<sup>[40]</sup>从微观结构方面分析水泥和 Nano-SiO<sub>2</sub> (水泥质量的 0%、4%、8%、12%) 共同作用下砂土的加固机理。试验

图7 试样 SEM 图像<sup>[39]</sup>Fig. 7 SEM images of the specimens<sup>[39]</sup>

表明: 过量的纳米材料阻碍了氢氧化钙晶体的生成, 进而导致水化硅酸钙凝胶的减少, 强度下降。

纳米硅粉也称硅灰, 为工业电炉在熔炼硅铁合金或半导体硅时, 从废气中收集的飞灰, 二氧化硅含量高达 95% 以上, 粒度基本处于纳米级别。王文军等<sup>[41]</sup>采用纳米硅粉作为外掺剂, 探究不同硅粉掺量和养护龄期对水泥土抗压强度的影响, 同时阐述其固化机理。王立峰等<sup>[42-44]</sup>通过正交试验和回归分析得出结论: 纳米硅粉可以提高水泥土抗压强度, 影响抗压强度因素主次顺序分别为水泥掺量, 围压, 纳米硅掺量, 水灰比。此外, 王立峰等<sup>[43-44]</sup>还建立了纳米硅水泥土弹塑性本构模型和破坏准则。

纳米二氧化硅水泥土的固化过程包含胶结硬化、离子交换反应、填充效应以及火山灰反应。纳米二氧化硅的在水化初期充当结晶核, 促进水化反应, 与水化产物氢氧化钙反应生成 C-S-H 凝胶, 改善微观结构, 减少孔隙率, 从而进一步提高水泥土的强度特性。然而, 在土体中添加超过最优含量的纳米粒子, 将会形成弱而不稳定的团块, 降低 Ca(OH)<sub>2</sub> 晶体的生长, 抑制火山灰反应, 对强度产生不利影响。

### 2.3 纳米二氧化硅联合纤维材料

CHANGIZI 等<sup>[45]</sup>研究了 0.5%、0.7%、1% Nano-SiO<sub>2</sub> 和 0.1%、0.3%、0.5% 聚酯纤维两者共同使用时对软土的影响。试验指出, 抗剪强度随 Nano-SiO<sub>2</sub> 和聚酯纤维含量的增大而增加, 试样的内摩擦角和黏

聚力在 1% Nano-SiO<sub>2</sub> 和 0.3% 聚酯纤维时分别增长为原来的 2.71 倍和 2.81 倍, 在提高土体刚度方面, 添加 Nano-SiO<sub>2</sub> 的效果优于聚酯纤维, 当两者协同作用时可显著提高软土的弹性模量。CUI 等<sup>[46]</sup>通过直剪试验对比碳纤维, Nano-SiO<sub>2</sub> 在不同含量(0、1%、2%、3%)以及两者协同作用下土体力学性质的变化, 并结合微观结构说明其变化原因。单独掺入时, 碳纤维含量为 2% 时抗剪强度最大, 超过 2% 时由于纤维形成聚集体导致抗剪强度有所下降。土体抗剪强度则随着 Nano-SiO<sub>2</sub> 含量的增加而增加, 其中黏聚力提高显著, 而内摩擦角无明显变化。在两者共同掺入的试验中抗剪强度峰值达到最大, 协同作用效果明显。原因是, 一方面碳纤维可以在土中形成联锁的网格, 与纳米材料共同填充土颗粒间的孔隙, 另一方面纳米颗粒会吸引水分子形成凝胶附着在碳纤维表面, 进而增大碳纤维与土颗粒界面间的摩擦力。类似的, KUTANAIEI 等<sup>[47]</sup>发现 Nano-SiO<sub>2</sub> 和 PVA 纤维联合作用可以提高水泥胶结砂的无侧限抗压强度, 同时纳米材料的添加可以有效抵抗氯离子的渗透。

## 3 纳米黏土矿物

### 3.1 纳米黏土固体颗粒

纳米黏土是层状硅酸盐矿物的纳米颗粒, 根据其化学组成和纳米粒子形貌分类, 常见的纳米土有纳米蒙脱土、纳米高岭土、纳米膨润土等。可通过球磨机

粉碎法、插层法等制取,从经济效益的角度来看,是所有纳米材料中成本最低的材料之一。

为了防止渗滤液污染周围土壤和地下水,垃圾填埋场的衬垫工程通常采用压实黏土作为防渗帷幕,并且要求渗透系数 $<10^{-7}$  cm/s。KANANIZADEH 等<sup>[48]</sup>研究了纳米黏土对压实黏土水力传导系数的影响。试验表明,水力传导系数不断降低直到纳米土含量 3% 时,此后纳米土的增加对水力传导系数无明显影响,同时试验表明添加纳米土可以减少压实黏土对渗滤液中重金属离子的吸收。BAZIAR 等<sup>[49]</sup>探究了纳米黏土对土坝核心材料-黏土砂的改良,将高岭土、砂分别按照 1:9 和 1:4 的比例混合,掺入 1%~4% 的纳米蒙脱土制成试样。在纳米黏土含量 3% 时,两种配比土样水力传导系数均最低,分别从  $1.60 \times 10^{-3}$  cm/s 减少至  $5.51 \times 10^{-5}$  cm/s,  $3.32 \times 10^{-4}$  cm/s 减少至  $8.44 \times 10^{-7}$  cm/s。EMMANUEL 等<sup>[50]</sup>探究了 5% 埃洛石纳米管(HNTs)对海相黏土的加固效果。加固后土样的最优含水率减少;细颗粒含量、最大干密度、抗压强度、液限和塑限均增加;养护 28 d 后,土样的水力传导系数明显降低。

IRANPOUR 等<sup>[51]</sup>对比了纳米黏土、Nano- $Al_2O_3$ 、Nano-CuO、Nano- $SiO_2$  分别在质量分数 0.1%、0.2%、0.4%、0.6% 条件下对湿陷性土的影响。结果如图 8 所示,4 种纳米材料添加量均为 0.1% 时,土体湿陷性最小,并且其中比表面积最大的纳米土表现最优。TABARSA 等<sup>[52]</sup>通过室内试验和现场试验评估纳米黏土对湿陷性黄土的加固效果。温亚楠等<sup>[53]</sup>发现,土样的抗压强度随着纳米膨润土含量的增加呈非线性递增,在纳米膨润土存在条件下,抗压强度随含水率的增加表现为先减小后增大,随干密度的增加而增加。

一般来说,随着纳米黏土颗粒的掺入,土体的塑性和液限均有所提高,较高的塑性进一步增加了土体潜在的收缩膨胀能力,较高的液限意味着更高的含水量,从而降低强度。对强度和压缩性具有较高要求的结构(如路基和挡土墙),使用纳米黏土可能是不利的。但是,增加的塑性指数一般也意味着水力传导系数的降低,此外纳米黏土的加入提高了土体膨胀以及自我修复的能力,在土坝、垃圾填埋场衬垫中添加纳米黏土是一种防止水体泄露和管涌的有效方法。

## 3.2 纳米黏土溶胶

### 3.2.1 膨润土悬浮液

膨润土被称为天然纳米材料,其成分主要为蒙脱石,片状颗粒的厚度约为 1 nm,直径 200~1 000 nm,具有极高的吸水膨胀性。一般认为土体的液化阻力随

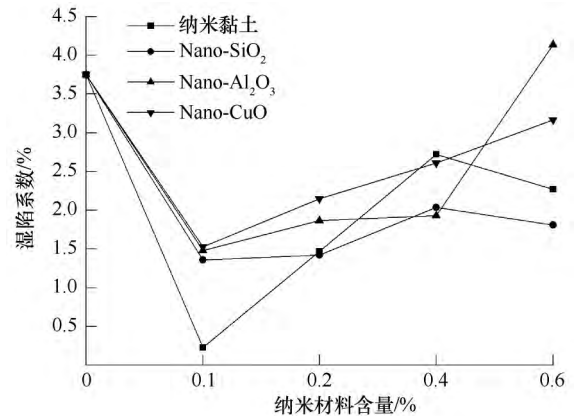


图 8 纳米材料对土样湿陷特性的影响<sup>[51]</sup>

Fig. 8 Effect of nanomaterials on the collapse potential for soil sample<sup>[51]</sup>

着塑性指数的增大而增加,由于膨润土的高塑性以及悬浮液的触变性,是处理砂土液化的理想材料。

膨润土在分散时具有较高黏度,凝胶化时间很短,不利于在砂土中大面积且均匀运输。SANTAGA-TA 等<sup>[54]</sup>通过掺入焦磷酸钠来降低膨润土悬浮液的初始屈服应力和黏度,提高注浆渗透的可行性。EL MOHTAR 等<sup>[55]</sup>通过共振柱和循环三轴试验表明膨润土的存在增加了液化阻力,并且随着水化龄期的推移,循环阻力可增大 10 倍,液化所需的循环次数显著增加,证明了 10% 膨润土、0.5% 焦磷酸钠分散液渗透改善土体液化能力的可行性和有效性。WITTHOEFT 等<sup>[56]</sup>利用有限差分软件 FLAC 证实膨润土预防现场土体液化的可靠性。膨润土能有效增强砂土的液化阻力,这是因为膨润土具有孔隙流体的流变特性,在孔隙空间中形成具有固体性质的膨润土凝胶可以抑制地震作用下砂粒的运动。基于膨润土的低成本、环境友好以及对其的使用已有较多工程经验,可以作为土体改良剂广泛使用。

### 3.2.2 硅酸镁锂

硅酸镁锂又称锂皂石,是一种蒙脱石类黏土矿物,为硅-氧四面体和镁-氧八面体按 2:1 周期性排列形成的层状硅酸盐纳米颗粒,通常直径为 25 nm,厚度为 1 nm,大概是膨润土尺寸的十分之一,并且塑性指数可高达 1 100%,在水中分散时水化膨胀形成单分散悬浮液,具有良好增稠性和触变性<sup>[57-58]</sup>。HUANG 等<sup>[59]</sup>探究了硅酸镁锂对粉砂抗液化能力的影响,试验指出了硅酸镁锂溶胶黏度随时间的变化规律,发现随着时间的增长,孔隙中的硅酸镁锂胶体表现出类似固体的性质,对土颗粒产生胶结作用,同时由于硅酸镁锂胶体具有触变性,随着循环荷载次数的

增加, 液化阻力会有所下降, 但延缓了粉砂的液化行为。OCHOA-CORNEJO 等<sup>[60]</sup>指出即使 1% 的高酸镁锂也可以增加液化循环次数, 主要原因是高酸镁锂在静电作用下吸附到砂颗粒表面, 在砂粒接触面间产生胶结。相比膨润土, 人工合成的硅酸镁锂性质更一致, 尺寸更小, 易在土体中渗透运输, 值得继续深入研究和扩大应用。

#### 4 纳米氧化铝

LUO 等<sup>[61]</sup>向软土中加入 15% 的 3:1 污泥灰/水泥混合物以及 0%~3% 的 Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 结果力学指标提高程度有限, 考虑经济效应, Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  的最优添加量为 1%。周斌等<sup>[62]</sup>将 Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为外掺剂改善黏土力学性质, 在含量为 4% 时抗压强度增幅最大。王文军等<sup>[63]</sup>按 1:2 的比例将 Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Nano- $\text{SiO}_2$  进行混合, 用于滩涂淤泥固化土的强度改性。试验表明, 在硫酸盐溶液或者海水的养护条件下, 固化土的强度总体呈现增加趋势, 说明纳米混合物均表现出良好的抗侵蚀效果。

TAHA 等<sup>[64]</sup>对比了纳米黏土、Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Nano-CuO 对土体膨胀和收缩性质的影响, 研究表明纳米材料在改善土体干燥收缩裂缝开展的同时不会造成土体水力传导系数的增大。类似的, COO 等<sup>[65]</sup>通过收缩试验研究 Nano-CuO 和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  在质量分数 2%、4%、6% 条件下的收缩极限和体积变化情况, 无收缩阶段与收缩阶段的交点, 即孔隙比不变时对应的含水率为收缩极限, 在 Nano-CuO 和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 6% 时收缩极限达到最大, 相比未掺入纳米材料的土样, 增加比例 17% 和 8%; 体积变化量随着纳米材料含量增大而减小, 在含量 2% 时, 与未加纳米材料时对比下降幅度最大, 分别可达 10% 和 6%。对于采用黏土等作为水力屏障的工程来说, 添加纳米材料可以有效减少因体积的收缩变形所带来的裂缝。

#### 5 其他纳米材料

碳纳米管由科学家 IJIMA<sup>[66]</sup>于 1991 年率先发现, 是迄今为止纳米技术中涌现的最有前途的新材料之一。它的名字来源于它的长而中空的结构, 管壁由石墨烯片卷曲构成, 属于富勒烯家族成员。碳纳米管的弹性模量和抗拉强度分别可高达 1 TPa 和 200 GPa, 理论强度是钢材料的 100 倍, 却又比其轻 6 倍<sup>[67]</sup>。TAHA 等<sup>[68]</sup>对比了碳纳米管 (MWCNTs) 和碳纳米纤维 (CNFs) 对软土加固的影响, 纳米碳的加入使土样抗压强度、杨氏模量和抗拉强度显著提高。王鑫<sup>[69]</sup>

将掺有碳纳米管的硅溶胶注入砂土中, 通过静三轴、循环动三轴、损伤试验和电镜扫描分析, 指出碳纳米管可以抑制硅凝胶裂纹的开展, 从而提高试样强度。纳米碳的纳米直径和极高长径比使其在更小尺度上分布和桥接土颗粒间空隙成为可能, 在纳米水平上与土体形成复合增强体, 更好实现土体强化的目的。

CHOBBASTI 等<sup>[70]</sup>探究纳米碳酸钙和废旧地毯纤维对黏土的加固效果。超声波脉冲速度测定显示速度随着纳米碳酸钙的增加而增加, 原因是纳米材料促进土颗粒胶结, 减少土中孔隙和裂缝, 有利于超声波的传播。MENG 等<sup>[71]</sup>发现纳米碳酸钙可以提高水泥土在海洋环境下的力学性能, 添加 3% 纳米碳酸钙于水泥含量分别为 15%、22% 的土样中, 在海洋环境的养护条件下, 30 d 抗压强度分别提高 14.2% 和 7.8%, 180 d 抗压强度提高 22.8% 和 14.8%, 结合微观结构分析, 原因是纳米碳酸钙促进水泥水化产物生成, 使得土体结构更加密实, 拥有更高的强度和抵抗海洋环境侵蚀的能力。陈学军等<sup>[72]</sup>向红黏土中掺入 0.8%、1.6%、2.4% 纳米碳酸钙, 发现其抗剪强度先减小后增大, 但是仍低于未处理土样的强度, 原因是碱性纳米碳酸钙有效减少氧化铁胶结, 导致重塑红黏土的黏聚力和内摩擦角均减小。

任真等<sup>[73]</sup>开展了不同含水率, 不同含量下纳米氧化镁改性黏土试验。LI 等<sup>[74]</sup>通过快速沉淀法制备  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  纳米颗粒, 并对比了两者对土体的加固效果。纳米颗粒的加入使得双电层厚度减小, 阿太堡界限减小。ZHANG 等<sup>[75]</sup>将纳米技术结合电渗排水法, 利用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  胶体包裹 Nano- $\text{SiO}_2$  微粒, 通过修饰使其表面带正电荷, 电渗试验中发现这种复合微粒可以增强土体在电渗排水过程中的电流强度和排水效率。

#### 6 结论与展望

从目前的研究成果来看, 纳米材料正作为一种新型的外掺剂应用于土体的改良中。现有研究内容主要围绕纳米材料-土复合体的塑性特性、压实特性、强度性质、水力传导系数、抗液化能力等展开研究, 将宏观力学性质变化结合微观结构和成分变化验证不同纳米材料包括纳米二氧化硅、纳米黏土、纳米氧化铝、纳米碳酸钙等粉末状颗粒以及纳米硅溶胶、膨润土悬浮液、硅酸镁锂等溶胶类改善土体性质的可行性和有效性。通过对研究现状的总结得到以下结论。

(1) 尽管不同纳米材料, 不同试验条件下得到的数据结果在基本特性如液塑限、塑性指数、最优含水

率、最大干密度方面有所区别,但是毫无疑问的是只需掺入少量的纳米材料就可以显著改善土体的物理力学性质,这种积极影响主要得益于于纳米粒子的高表面积和表面电荷。其中,纳米二氧化硅作为最常见的材料可用于促进水泥土中的水化反应;纳米黏土提高土体的自修复能力,适用于土坝、垃圾填埋场等工程;纳米氧化铝则可减少土体的收缩裂缝,未来可根据实际工程情况选择最佳的纳米材料。

(2) 为了对软黏土性质产生明显影响,应适当量化纳米粒子的加入以减少团聚,最优掺量一般在土体总质量的 0.1%~5% 之间。同时均匀混合对获得预期结果也起着至关重要的作用,目前的研究对于固体颗粒常采用两种混合方式,一是将干燥土样与纳米粉末均匀混合后加水搅拌,另一种方式为将粉末颗粒在水中分散后,分层喷洒拌合制备土样。由于缺少统一的混合程序,在现场工程中操作性难,纳米粉末状颗粒的应用仍然局限于室内试验。

(3) 在减轻砂土的液化效应方面,主要采用的纳米溶胶有纳米硅溶胶、膨润土悬浮液、硅酸镁锂,利用其在适当龄期后表现出的高黏度性质,增加循环荷载阻力,缓解液化行为。由于在实际工程中的可操作性和环境友好性,纳米溶胶在土体液化缓解方面有很大的应用前景。

总的来看,纳米材料改良土体可以应用于地基、道路、垃圾填埋场、水坝等实际工程来改善土体性质,应从微观层面对土进行全面的研究以及促进纳米技术的发展。预计随着生产技术和制造水平的改进,未来纳米材料的成本会不断降低,在岩土工程中的应用将带来更好的经济效益。近 20 年来,许多学者在纳米材料对土体力学性质改良方面进行了初步的试验探索,取得了有价值的研究成果,但仍有许多方面值得进一步探究:

(1) 考虑如何使纳米材料在土体中均匀分散,建立统一的混合程序,减少其团聚现象提高利用率;进一步研究纳米颗粒对土体冻胀量、冻融循环后力学性质的影响,将其运用于寒区冻土工程。

(2) 土体宏观性质由微观层面的相互作用所控制,因此研究矿物成分和结构排列对于解释土体性质变化具有很大意义,可从纳米力学、分析化学的角度解释颗粒间的力学行为,例如摩擦、蠕变、热效应、化学效应等。

(3) 建立系统的纳米技术与岩土工程结合的研究方法,提出相应的应用技术和行业标准,着重于将纳米材料运用于实际工程中,对比分析与室内试验的区

别,总结规律经验。

(4) 纳米胶体溶液渗透加固实际现场的案例仍很少,其中关键问题在于保证溶胶在土体中的运输、加固区域的控制,需要进一步对胶凝时间以及胶凝条件展开系统研究,结合数值模拟优化浓度、pH 值、水力梯度等参数的选择,预测加固范围,为实际工程提供切实可行的设计方法。

(5) 已有研究表明,部分纳米材料可以加快电渗排水,未来研究可对纳米材料表面进行功能性修饰,将纳米材料结合电渗法加固土体,跨越不同学科探究和理解纳米材料的加固机制。

#### 参考文献(References):

- [1] HUANG Y, WEN Z. Recent developments of soil improvement methods for seismic liquefaction mitigation [J]. *Natural Hazards*, 2015, 76 (3): 1927-1938.
- [2] HEJAZI S M, SHEIKHZADEH M, ABTAHI S M, et al. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 100-116.
- [3] XUE Q, LU H J, LI Z Z, et al. Cracking, water permeability and deformation of compacted clay liners improved by straw fiber [J]. *Engineering Geology*, 2014, 178: 82-90.
- [4] 刘宝生,唐朝生,李建,等. 纤维加筋土工程性质研究进展 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21(4): 540-547.  
LIU Baosheng, TANG Chaosheng, LI Jian, et al. Advances in engineering properties of fiber reinforced soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(4): 540-547
- [5] SENOL A. Effect of fly ash and polypropylene fibres content on the soft soils [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71(2): 379-387.
- [6] FEYNMAN R P. There's plenty of room at the bottom [J]. *Eng. Sci.* 1960, 23(5): 22-36.
- [7] 张中太,林元华,唐子龙,等. 纳米材料及其技术的应用前景 [J]. *材料工程*, 2000(3): 42-48.  
ZHANG Zhongtai, LIN Yuanhua, TANG Zilong, et al. Nanometer materials & nanotechnology and their application prospect [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2000(3): 42-48
- [8] LI H, XIAO H G, YUAN J, et al. Microstructure of cement mortar with nano-particles [J]. *Composites Part B Engineering*, 2004, 35 (2): 185-189.
- [9] OLTULU M, SAHUN 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*, 2011, 528(22-23): 7012-7019.
- [10] SHEKARI A H, RAZZAGHI M S. Influence of nanoparticles on durability and mechanical properties of high performance concrete [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14: 3036-3041.
- [11] LI Z H, WANG H F, HE S, et al. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite [J]. *Material Letters*, 2006, 60(3): 356-359.

- [12] CHAIPANICH A , NOCHAIYA T , WONGKEO W , et al. Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites[J]. *Materials Science and Engineering* , 2010 , 527 ( 4 / 5 ) : 1063-1067.
- [13] SAAFI M. Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures [J]. *Nanotechnology* , 2009 , 20 ( 39 ) : 395502.
- [14] ZUO J Q , YAO W , LIU X Y , et al. Sensing properties of carbon nanotube-carbon fiber/cement nanocomposites [J]. *Journal of Testing and Evaluation* , 2012 , 40( 5 ) : 838-843.
- [15] LI H , XIAO H G , OU J P. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials [J]. *Cement and Concrete Research* , 2004 , 34( 3 ) : 435-438.
- [16] SHI X , NGUYEN T A , SUO Z , et al. Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating [J]. *Surface and Coatings Technology* , 2009 , 204( 3 ) : 237-245.
- [17] GUO Y G , WANG Q H. Facile approach in fabricating superhydrophobic coatings from silica-based nanocomposite [J]. *Applied Surface Science* , 2010 , 257( 1 ) : 33-36.
- [18] SPENCER L , RIX G J , GALLAGHER P. Colloidal silica gel and sand mixture dynamic properties [C]//ZENG D , MANZARI M T , HILTUNEN D R. *Geotechnical Earthquake Engineering Soil Dynamics IV*. Reston: American Society of Civil Engineers , 2008: 1-10.
- [19] PERSOFF P , APPS J A , MORIDIS G J. Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 1999 , 125( 6 ) : 461-469.
- [20] BUTRÓN C , AXELSSON M , GUSTAFSON G. Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength , fracture behaviour and hydraulic conductivity [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* , 2009 , 24( 6 ) : 603-607.
- [21] 邓陈艳,金炜枫,程泽海,等. 纳米硅溶胶加固标准砂三轴试验研究[J]. *科技通报* , 2019 , 35( 4 ) : 157-162.  
DENG Chenyan , JIN Weifeng , CHEN Zehai , et al. Triaxial test study on standard sand modified by nano Silica Sol [J]. *Bulletin of Science and Technology* , 2019 , 35( 4 ) : 157-162
- [22] 徐岗,裴向军,袁进科,等. 改性纳米硅材料加固松散砂土的工程特性研究[J]. *水文地质工程地质* , 2019 , 46( 4 ) : 142-149.  
XU Gang , PEI Xiangjun , YUAN Jinke , et al. A study of the engineering characteristics of reinforced loose sand by modified nano-Si materials [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology* , 2019 , 46( 4 ) : 142-149
- [23] 卜思敏. 纳米硅溶胶固化黄土的强度特性及其固化机理 [D]. 兰州: 兰州大学, 2016.  
BU Simin. Strength characteristics and modification theory of loess modified by nano silica sol [D]. Lanzhou: Lanzhou University , 2016
- [24] GALLAGHER P M , LIN Y. Colloidal silica transport through liquefiable porous media [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 2009 , 135( 11 ) : 1702-1712.
- [25] HAMDERI M , GALLAGHER P M. Pilot-scale modeling of colloidal silica delivery to liquefiable sands [J]. *Soils and Found* , 2015 , 55 ( 1 ) : 143-153.
- [26] PEDROTTI M , WONG C , EL MOUNTASSIR G , et al. An analytical model for the control of silica grout penetration in natural groundwater systems [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* , 2017 , 70: 105-113.
- [27] GALLAGHER P M , MITCHEL J K. Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , 2002 , 22 ( 9 ) : 1017-1026.
- [28] GALLAGHER P M , PAMUK A , ABDOUN T. Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering* , 2007 , 19( 1 ) : 33-40.
- [29] CONLEE T C , GALLAGHER P M , BOULANGER W B , et al. Centrifuge modeling for liquefaction mitigation using colloidal silica stabilizer [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 2012 , 138( 11 ) : 1334-1345.
- [30] GALLAGHER P M , CONLEE C T , ROLLINS K M. Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 2007 , 133( 2 ) : 186-196.
- [31] CHANGIZI F , HADDAD A. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on the geotechnical properties of cohesive soil [J]. *Geotechnical and Geological Engineering* , 2016 , 34 ( 2 ) : 725-733.
- [32] KONG R , ZHANG F Y , WANG G H , et al. Stabilization of loess using nano-SiO<sub>2</sub> [J]. *Materials* , 2018 , 11( 6 ) : 1014.
- [33] BUAZAR F. Impact of Biocompatible nanosilica on green stabilization of subgrade soil [J]. *Scientific Reports* , 2019 , 9( 1 ) : 15147.
- [34] REN X C , HU K. Effect of nanosilica on the physical and mechanical properties of silty clay [J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters* , 2014 , 6( 11 ) : 1010-1013.
- [35] KALHOR A , GHAZAVI M , ROUSTAEI M , et al. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Cold Regions Science and Technology* , 2019 , 161: 129-136.
- [36] 胡凯,陈晓清. 纳米硅对冻结黏性砂土强度影响试验研究[J]. *冰川冻土* , 2017 , 39( 3 ) : 602-608.  
HU Kai , CHEN Xiaoqing. Experimental study on the effect of nanosilicon on frozen clay sand strength [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 2017 , 39( 3 ) : 602-608
- [37] BAHMANI S H , HUAT B B , ASADI A , et al. Stabilization of residual soil using SiO<sub>2</sub> nanoparticles and cement [J]. *Construction and Building Materials* , 2014 , 64: 350-359.
- [38] BAHMANI S H , FARZADNIA N , ASADI A , et al. The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil [J]. *Construction and Building Materials* , 2016 , 118: 294-306.
- [39] GHASABKOLAEI N , JANALIZADEH N , JAHANSHAHI M , et al. Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: an experimental study [J]. *European Physical Journal Plus* , 2016 , 131 ( 5 ) : 1-11.
- [40] CHOBBASTI A J , KUTANAEI S S. Microstructure characteristics of cement stabilized sandy soil using nanosilica [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* , 2017 , 9( 5 ) : 981-988.

- [41] 王文军,朱向荣,方鹏飞. 纳米硅粉水泥土固化机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 149-154.  
WANG Wenjun, ZHU Xiangrong, FANG Pengfei. Analysis on reinforcement mechanism of nanometer silica fume reinforced cemented clay [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(1): 149-154
- [42] 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(S1): 452-457.  
WANG Lifeng, ZHAI Huiyun. Orthogonal test and regression analysis of compressive strength of nanometer silicon and cement-stabilized soils [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 452-457
- [43] 王立峰,黄洪勉. 纳米硅水泥土弹塑性有限元分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 143-146.  
WANG Lifeng, HUANG Hongmian. Elastoplastic finite element analysis of nanometer silicon and cement-stabilized soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 143-146
- [44] 王立峰,夏建中,朱向荣. 纳米硅水泥土破坏准则研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1767-1771.  
WANG Lifeng, XIA Jianzhong, ZHU Xiangrong. Research on failure criterion of nanometer silicon and cement-stabilized soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1767-1771
- [45] CHANGIZI F, HADDAD A. Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO<sub>2</sub> and recycled polyester fiber [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7: 367-378.
- [46] CUI H Z, JIN Z Y, BAO X H, et al. Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189(20): 286-295.
- [47] KUTANA EI S S, CHOBBASTI A J. Experimental study of combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical properties of cemented sand [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(6): 1-3.
- [48] KANANIZADEH N, EBADI T, KHOSHNIAT S A, et al. The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate [J]. Clean Soil Air Water, 2011, 39(7): 605-611.
- [49] BAZIAR M H, SAEIDASKARI J, ALIBOLANDI M. Effects of nanoclay on the treatment of core material in earth dams [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(10): 04018250.
- [50] EMMANUEL E, LAU C C, ANGGRAINI V, et al. Stabilization of a soft marine clay using halloysite nanotubes: A Multi-Scale approach [J]. Applied Clay Science, 2019, 173: 65-78.
- [51] IRANPOUR B, HADDAD A. The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment [J]. Engineering Geology, 2016, 205: 40-53.
- [52] TABARSA A, LATIFI N, MEEHAN C L, et al. Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay—A sustainable material for construction [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 454-463.
- [53] 温亚楠,朱鸿鹄,施斌. 纳米膨润土加固黏土强度的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 39-43.  
WEN Yanan, ZHU Honghu, SHI Bing. Experimental study on improving clay strength using nano-bentonite [J]. Chinese Journal of Under-
- ground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 39-43
- [54] SANTAGATA M, CLARKE J P, BOBET A, et al. Rheology of concentrated bentonite dispersions treated with sodium pyrophosphate for application in mitigating earthquake-induced liquefaction [J]. Applied Clay Science, 2014, 99: 24-34.
- [55] EL MOHTAR C S, BOBET A, SANTAGATA M C, et al. Liquefaction mitigation using bentonite suspensions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 139(8): 1369-1380.
- [56] WITTHOEF T A F, SANTAGATA M C, BOBET A. Numerical study of effectiveness of bentonite treatment for liquefaction mitigation [C]// HRYCIW R D. GeoCongress 2012 State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. Reston: American Society of Civil Engineers, 2012: 1958-1967.
- [57] BAO X H, JIN Z Y, CUI H Z, et al. Soil liquefaction mitigation in geotechnical engineering: An overview of recently developed methods [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 120: 273-291.
- [58] MONGONDRIY P, TASSIN J F, NICOLAI T. Revised state diagram of Laponite dispersions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 283(2): 397-405.
- [59] HUANG Y, WANG L. Laboratory investigation of liquefaction mitigation in silty sand using nanoparticles [J]. Engineering Geology, 2016, 204: 23-32.
- [60] OCHOA-CORNEJO F, BOBET A, JOHNSTON C T, et al. Cyclic behavior and pore pressure generation in sands with laponite, a superplastic nanoparticle [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 88: 265-279.
- [61] LUO H L, HSIAO D H, LIN D F, et al. Cohesive soil stabilized using sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2012, 1(1): 83-100.
- [62] 周斌,高磊,余湘娟. 纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 改性黏土试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 74-78.  
ZHOU Bin, GAO Lei, YU Xiangjuan. Experimental research on nanometer alumina modified clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 74-78.
- [63] 王文军,刘志明,汪鹏飞,等. 侵蚀性环境下纳米矿粉—水泥固化滩涂淤泥的强度特性研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(5): 1-5.  
WANG Wenjun, LIU Zhiming, WANG Pengfei, et al. Study on strength characteristics of cemented beach clay mixed with nanometer mineral powder under corrosive environment [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(5): 1-5
- [64] TAHA M R, TAHA O M E. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14: 1190.
- [65] COO J L, SO Z P, NG C W. Effect of nanoparticles on the shrinkage properties of clay [J]. Engineering Geology, 2016, 213: 84-88.
- [66] IJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon [J]. Nature, 1991, 354(6348): 56-58.
- [67] TREACY M M J, EBBESEN T W, GIBSON J M. Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes [J]. Nature, 1996, 381(6584): 678-680.

- [68] TAHA M R ,ALSHAREF J M A ,KHAN T A ,et al. Compressive and tensile strength enhancement of soft soils using nanocarbons [J]. *Geomechanics and Engineering* ,2018 ,16( 5) : 559-567.
- [69] 王鑫. 碳纳米管增强的纳米硅溶胶渗透加固砂土的试验研究 [D]. 杭州: 浙江科技学院, 2019.  
WANG Xin. Experimental study on sand soil reinforcement by carbon nanotubes reinforced nano-silica sol infiltration [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology ,2019
- [70] CHOBBASTI A J ,SAMAKOOSH M A ,KUTANAEI S S. Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers [J]. *Construction and Building Materials* ,2019 ,211: 1094-1104.
- [71] MENG T ,QIANG Y J ,HU A F ,et al. Effect of compound nano-CaCO<sub>3</sub> addition on strength development and microstructure of cement-stabilized soil in the marine environment [J]. *Construction and Building Materials* ,2017 ,151: 775-781.
- [72] 陈学军,胡舒伟,黄耀意,等. 纳米碳酸钙影响下红黏土强度特性试验研究 [J]. *工程地质学报* ,2017 ,25( 5) : 1293-1298.  
CHEN Xuejun , HU Shuwei , HUANG Yaoyi , et al. Experimental study on strength characteristics of red clay under influence of nano-CaCO<sub>3</sub> [J]. *Journal of Engineering Geology* ,2017 ,25( 5) : 1293-1298
- [73] 任真,余湘娟,高磊. 纳米氧化镁改性黏土强度特性试验 [J]. *水利水运工程学报* ,2016( 5) : 85-90.  
REN Zhen , YU Xiangjuan , GAO Lei. Experimental research on strength characteristics of nano-MgO modified soil [J]. *Hydro-Science and Engineering* ,2016( 5) : 85-90
- [74] YONG L L ,NAMAL S V A D ,SYAMSIR A ,et al. Stabilization of a residual soil using calcium and magnesium hydroxide nanoparticles: A quick precipitation method [J]. *Applied Sciences-Basel* ,2019 ,9( 20) : 1-15.
- [75] ZHANG H ,ZHOU G X ,ZHONG J ,et al. Effect of nanomaterials and electrode configuration on soil consolidation by electroosmosis: experimental and modeling studies [J]. *RSC Advances* ,2017 ,7( 20) : 12103-12112.

(责任编辑 王海锋)