

纳米土壤固化剂重构黄土力学性能的试验研究

张星辰^{1,2,3}, 高建恩^{1,2,3,4}, 樊恒辉⁵, 李兴华^{4,5},

高哲⁵, 郭子豪¹, 龙韶博², 薛利¹

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100039; 4.水利部

水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了提升土壤固化剂这一水土资源高效利用材料的固土性能,通过室内典型力学试验,研究了新型纳米土壤固化剂对重构黄土土体力学性能的影响。结果表明:(1) 纳米土壤固化剂掺量与固化土的无侧限抗压强度呈指数函数关系;(2) 纳米固化土各龄期无侧限抗压强度相较普通固化土和 32.5 号水泥土可提升 10%~30%;(3) 对比 3 种不同固化土的吸水率、干密度和颗粒粒径与抗压强度的关系,发现纳米固化土的微观结构及宏观性能表现更加优越。采用纳米固化剂能显著提升黄土的物理力学性能,在黄土高原等缺砂少石地区具有广阔的工程应用前景。

关键词:纳米固化剂; 固化土; 无侧限抗压强度; 力学性能

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0131-07

Experimental Research on Mechanical Properties of Reconsolidated Loessial Soil with Nano Soil-Stabilizer

ZHANG Xingchen^{1,2,3}, GAO Jianen^{1,2,3,4}, FAN Henghui⁵, LI Xinghua^{4,5},

GAO Zhe⁵, GUO Zihao¹, LONG Shaobo², XUE Li¹

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Research

Center on Soil & Water Conservation, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5.College of

Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to improve the properties of stabilized soil which can make full use of local soil and water resources, the effect of new nano soil-stabilizer on the mechanical properties of reconsolidated loessial soil was studied through typical laboratory mechanical tests. The results indicate that: (1) the unconfined compressive strength of stabilized soil shows the exponential function with the content of nano soil stabilizer; (2) the unconfined compressive strength of nano stabilized soil can be improved by about 10%~30% compared with ordinary stabilized soil and grade 32.5 cement soil; (3) it was found that the microstructure and mechanical properties of the nano stabilized soil were more superior by comparing the relationship between water absorption, dry density, particle size and compressive strength of three different stabilized soils. Using nano soil stabilizer can significantly improve the physical and mechanical properties of loessial soil, which has a broad engineering application prospect in the Loess Plateau and other areas lacking sand and rock.

Keywords: nano soil stabilizer; stabilized soil; unconfined compressive strength; mechanical properties

收稿日期:2020-12-13

修回日期:2020-12-25

资助项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0504703);国家自然科学基金(41877078, 41371276);中国科学院知识创新工程项目(A315021615);陕西省科技统筹创新工程计划(2013KTDZ03-03-01);陕西省自然科学基金基础研究项目(2016ZDJC-20)

第一作者:张星辰(1990—),男,陕西西安人,博士研究生,研究方向为水土保持工程材料。E-mail:zxc_cau@163.com

通信作者:高建恩(1962—),男,山西运城人,博士,研究员,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:gaojianen@126.com

在黄土高原及广大无砂石料地区开展水土保持工程建设,传统材料不但成本高,不能充分利用弃土弃渣,而且开山挖河寻找砂石原料又加剧对环境的威胁,而能利用当地水土资源的传统固土材料又面临着重构土体的力学性能亟待提升等问题。

由于利用固化剂改善各种重构土体力学性能具有广阔的应用前景,在土木、水利、港口等方面的研究一直是热点^[1-4]。首先,国内外学者在开发不同种类固化剂基础上,对不同质地和用途的重构土体性能进行了研究。樊恒辉等^[5]研究了不同固化剂集流面的力学性能和集流效率,为固化剂固结土体研究提供了理论基础;Hassan^[6]、Pu^[7]等对生物固化剂处理后的土体进行了强度和微观分析,扩展了生物固化剂领域的研究;Yin 等^[8]探讨了初始含水率对固化土压缩性的影响,丰富了土壤固化剂的强度影响因素研究。还有许多学者通过纳米材料外加剂改性等方法,在水泥基类土壤重构体性能提升方面研究取得了成果^[9-10]。其次,随着纳米技术发展,纳米材料在土体重构方面的研究逐步开展。Thomas 等^[11]发现纳米材料对水泥混合软黏土的固化土体抗压强度具有积极的影响,但强度提升机理有待进一步探索;Kong 等^[12]探索了纳米 SiO₂对黄土重构体的抗压强度影响,但对其微观结构变化的机理分析有待深入;陈泽超等^[13]研究了不同纳米材料对水泥土的力学强度影响,为纳米材料提升土体性能研究做出了积极贡献;高建恩^[14]、Zhang^[15]等发明了一种新型纳米土壤固化剂,发现纳米 SiO₂能显著提升固化剂的抗折强度和抗压强度,在固化剂的纳米改性方面提供了新的研究思路。以上研究丰富了土壤固化剂在性能提升及加固土方面的研究,但在纳米固化剂重构土体性能的影响因素及在黄土高原等无砂石料地区的应用方面仍需深入探索。

本研究基于新型纳米土壤固化剂的卓越性能,通过室内典型试验和物理化学分析等方法,探索新型纳米土壤固化剂对重构黄土力学性能的影响,为新型土壤固化剂重构土体力学性能及在水土保持工程领域的广泛应用提供科学支撑。

表 2 试验黄土的基本物理特性						
物理特性	比重	液限/ %	塑限/ %	塑性指数	最优含水率/ %	最大干密度/(g·cm ⁻³)
值	2.68	31.3	18.2	13.1	16.8	1.76

表 3 试验黄土的基本化学成分													
化学成分	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	BaO	总量
质量比/ %	1.72	2.52	13.33	55	0.2	0.06	3.13	14.35	1.06	0.15	8.2	0.2	99.92

1.3 制样及养护

试验用土自然风干后过 2 mm 筛,将各组次混合料按照最优含水率配制完毕后,采用《公路工程无机结合

1 材料与方法

1.1 纳米固化剂

本研究所用纳米土壤固化剂(N-MBER)是在土壤固化剂(MBER)的基础上,通过添加纳米二氧化硅(SiO₂)而创新升级的新型土壤固化剂^[14-15]。其主要材料由水泥熟料、粉煤灰、石膏、核心原料和纳米 SiO₂组成,并通过球磨机研磨后过 200 目筛(粒径<0.075 mm)制得。试验所用水泥熟料购自陕西省兴平市秦隆水泥厂,粉煤灰为电厂一级粉煤灰,石膏为实验室二水生石膏,纳米 SiO₂为陕西西安鼎铨生物科技有限公司生产的实验室级高活性纳米 SiO₂,纯度为 99%,平均粒径为 30 nm,比表面积为 600 m²/g。纳米固化剂各组分含量和 SO₃指标见表 1。

表 1 纳米固化剂主要成分及 SO ₃ 含量 %		
材料组分	重量比	SO ₃ 含量
水泥熟料	82.5	2.01
粉煤灰	11	0.26
石膏	3	1.40
核心原料	1	0
纳米 SiO ₂	2.5	0
纳米固化剂	100	3.67

1.2 黄 土

试验用土为中国延安万花山乡黄土,该黄土广泛分布于中国黄土高原,是典型的湿陷性土。土的粒径曲线见图1,基本物理化学特性见表 2—3,其中 0.005~0.075 mm 的颗粒约占 67%,为低液限黏土 CL。

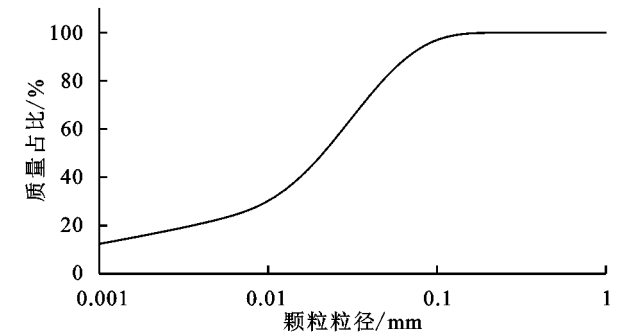


图 1 试验黄土颗粒分布

料稳定材料试验规程》JTJ057—94 中无侧限抗压强度试验原理成型,试件尺寸为直径 50 mm×高 50 mm 的圆柱体,按照双向静压法将土压实,拆模后塑封养护,到达

规定龄期后进行抗压试验。标准养护条件是温度(20±1)℃,相对湿度>95%。养护期的最后一天将试件浸泡在水中,水面高出试件顶部约 2.5 cm。

1.4 试验方法

试验所用 N-MBER 中纳米 SiO₂ 的含量为 2.5%, N-MBER 在黄土中的掺量占混合料的质量比设计 6%, 9%, 12%, 15%, 18% 共 5 个组次, 并采用 MBER 和 32.5 号水泥掺量均为 12% 的两个组次作为参照, 每组试件设计 6 个平行试样。将各组次试件分别养护 7, 28, 90 d, 到龄期后将养护好的试件从水中取出, 用软布吸去表面可见自由水, 养护前后对每个试件分别量高称重。采用 WDW-100 微机液压万能材料试验机进行无侧限抗压强度试验, 强度计算公式见式(1), 试件破型过程见图 2。

$$E=\frac{P}{A}$$
(1)

$$A=\frac{1}{4}\pi D^2$$
(2)

式中: E 为试件的无侧限抗压强度(MPa); P 为试件破坏时的最大压力(N); A 为试件的截面积(mm²); D 为试件的直径(mm)。

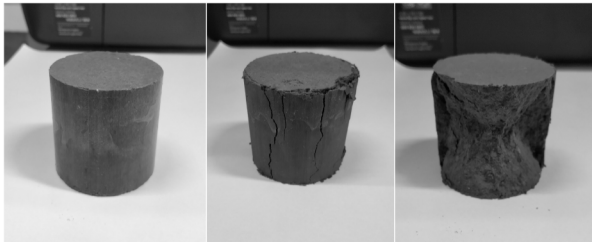


图 2 固化土试件破坏过程

2 结果与分析

2.1 纳米固化剂重构土体强度的影响因素

2.1.1 龄期和掺量对固化土强度的影响 为了研究不同掺量的 N-MBER 对黄土力学性能的影响, 将 N-MBER 掺量分别为 6%, 9%, 12%, 15%, 18% 的纳米固化土试件分别在标准条件下养护 7, 28, 90 d, 养护到期后进行无侧限抗压强度试验, 分析 N-MBER 养护龄期和掺量对纳米固化土(N-SS)强度的影响。养护龄期和掺量对无侧限抗压强度影响结果如图 3—4 所示。

图 3 为 N-SS 养护龄期和无侧限抗压强度(UCS)关系图。可见, N-SS 的 UCS 随着养护龄期的增大而增大; 同一龄期内 UCS 随着 N-MBER 的掺量增多而增大。90 d 龄期时 18% 掺量下的 N-SS 抗压强度最高可达 6.31 MPa; 不同 N-MBER 掺量下, 随着龄期的增长, 各组次 UCS 在 90 d 时较 7 d 分别提高了 90.7%, 85.4%, 73.4%, 63.0%, 85.0%。

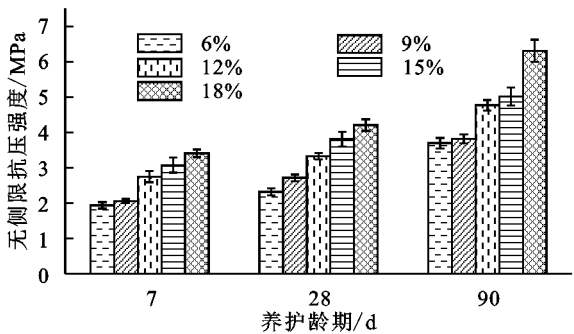


图 3 纳米固化土的强度与养护龄期关系

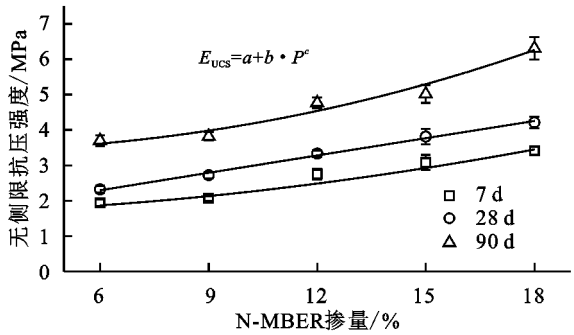


图 4 纳米固化土的强度与掺量关系

图 4 为 N-MBER 掺量和 N-SS 无侧限抗压强度(UCS)的关系。可见, 纳米固化土的无侧限抗压强度随固化剂掺量的变化规律可用 Allometric 函数进行预测, 模型方程见公式(3)。

$$E_{UCS}=a+b\cdot P^c$$
(3)

式中: E_{UCS} 为 N-SS 的无侧限抗压强度(MPa); P 为 N-MBER 的掺量(%); a, b, c 均为模型参数。

公式(3)表明, N-SS 重构土体的抗压强度 E_{UCS} 与掺量 P 服从一种指数函数关系。利用 Origin 软件对无侧限抗压强度的拟合结果进行拟合程度分析, 结果见表 3。可见该模型可以较好地模拟 N-SS 无侧限抗压强度随 N-MBER 掺量的变化趋势。

表 3 模型参数与计算结果拟合程度

龄期/d	模型参数			统计值	
	a	b	c	R^2	残差平方和
7	1.64	0.008	1.87	0.929	2.81
28	1.28	0.177	0.98	0.985	0.50
90	3.36	0.005	2.21	0.873	2.84

2.1.2 固化土单轴压缩破坏过程 水泥基类固化土试件的受压破坏过程是研究材料物理力学特性的重要指标^[16]。为了明晰纳米固化土单轴受压情况下的破坏过程, 对不同养护龄期、不同 N-MBER 掺量的 N-SS 试件在无侧限抗压强度测试中的破型过程进行数据分析, 结果如图 5 所示。

图 5A 为 7 d 龄期下不同掺量的 N-SS 试件单轴受压应力—应变关系, 由图 5A 可知, 当 N-MBER 的掺量由 6% 增大到 18% 时, 应力—应变曲线峰值位于应变量的 40%~60%, 且随着掺量的增加, 应力峰值

逐渐增大,说明抗压强度逐渐提升,同时峰值前近似直线部分的斜率逐渐增大,表明材料的脆性逐渐增强;图 5B—C 分别为 28 d 龄期和 90 d 龄期下不同掺量的 N-SS 试件单轴受压应力—应变关系,由图 5B—C 可知,龄期越大,峰值应力越大,同一龄期内不同掺量的 N-SS 试件应力—应变关系变化规律与图 5A 基本一致,图 5B 的曲线峰值位于应变量的 30%~

60%,图 5C 的曲线峰值位于应变量的 50%~60%。图 5 表明:随着养护龄期的增长,各龄期内的试件抗压强度逐渐增强,且同一龄期内随着 N-MBER 掺量的增大,材料的脆性逐渐增强,90 d 的平均峰值应力对应的应变较 7 d 和 28 d 可提升约 10%。说明养护龄期越久,试件在相同应力下应变越小,即试件的抗压性能越好。

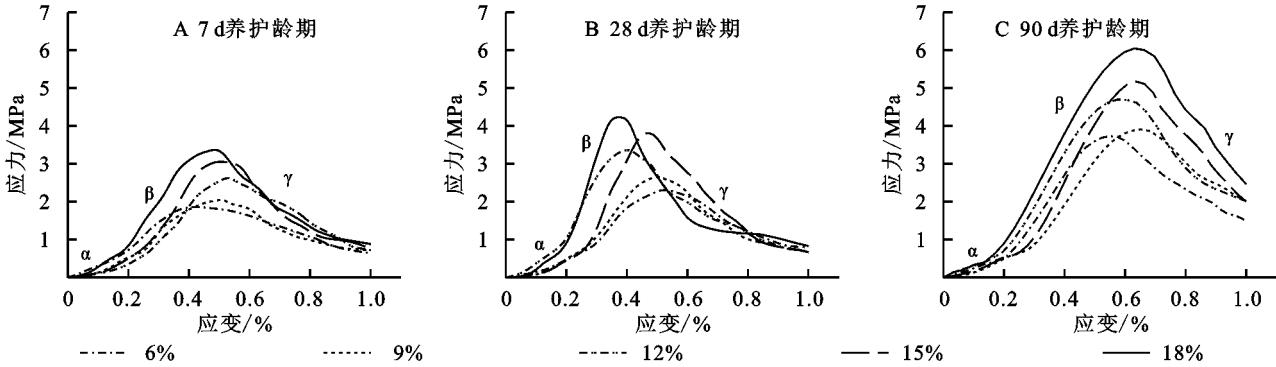


图 5 不同掺量纳米固化土各龄期单轴应力—应变关系

2.2 不同固化剂重构土体力学性能对比

2.2.1 3 种不同固化剂固土强度 以 12% 掺量为例,研究 3 种不同固化剂 N-MBER, MBER 和 32.5 号水泥对黄土抗压强度的影响,在相同试验条件下进行制样并进行同期养护,养护到期后分别将 3 种固化剂重构土体 N-SS(纳米固化土)、SS(普通固化土)和 CM(水泥土)进行无侧限抗压强度试验,结果见图 6。

为 2.75、3.33、4.77 MPa,高于 SS 的 10%~13%,高于 CM 的 20%~40%。上述结果表明:N-MBER 重构土体的强度优于 MBER 和 32.5 号水泥。由此可见,N-MBER 是一种对黄土力学性能提升更显著的固化剂材料,其固化效果优于普通固化土和 32.5 号水泥土。

2.2.2 吸水率、干密度与固化土强度关系 由于吸水率和干密度对与常规水泥基类固化土的强度变化密切相关^[17-18],因此结合 3 种不同固化剂重构土体的无侧限抗压强度结果,以 12% 固化剂掺量为例,对 3 种重构土体在不同养护龄期的吸水率和干密度进行分析,给出不同固化土试件无侧限抗压强度和吸水率及干密度的关系。图 7 为 3 种固化剂重构土体无侧限抗压强度和吸水率的关系,由图 7 可知,CM 各龄期的吸水率为 1%~6%,SS 各龄期吸水率为 3%~6%,而 N-SS 的吸水率可达 4%~6%,说明在重构土体的水化过程中 N-SS 整体吸水率更高,而随着吸水率 W_A 的增加,土体无侧限抗压强度 E_1 逐渐增大,故而 N-SS 的抗压强度高于 SS 和 CM。

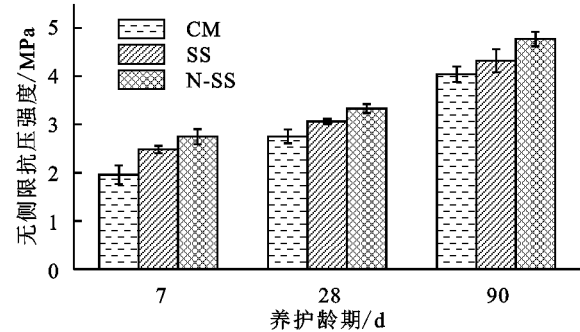


图 6 不同固化土的无侧限抗压强度

由图 6 可知,在相同掺量(12%)下,3 种固化剂重构土体中 N-SS 各龄期无侧限抗压强度最高,分别

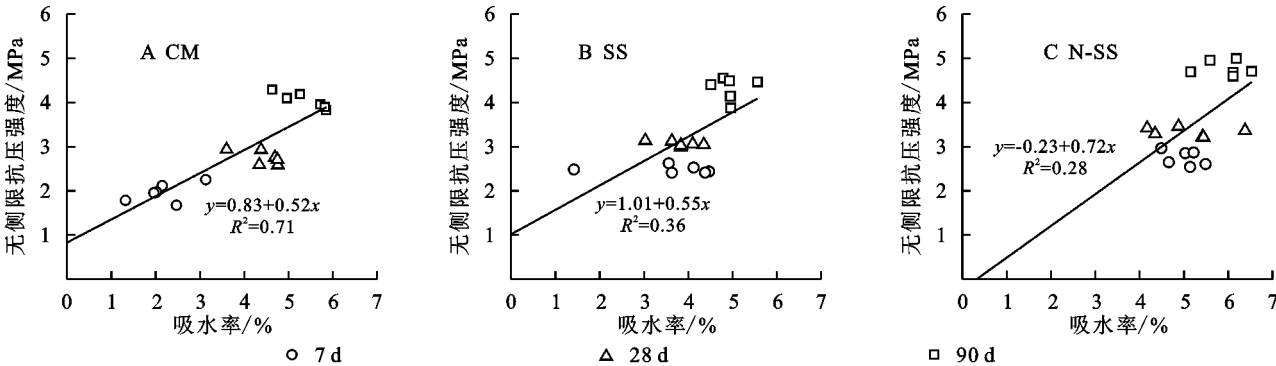


图 7 不同重构土体 UCS 和吸水率的关系

图 8 为 3 种固化剂重构土体无侧限抗压强度和干密度的关系,由图 8 可知,随着干密度的增大,SS 和 CM 重构土体的抗压强度逐渐增大,90 d 养护龄期内抗压强

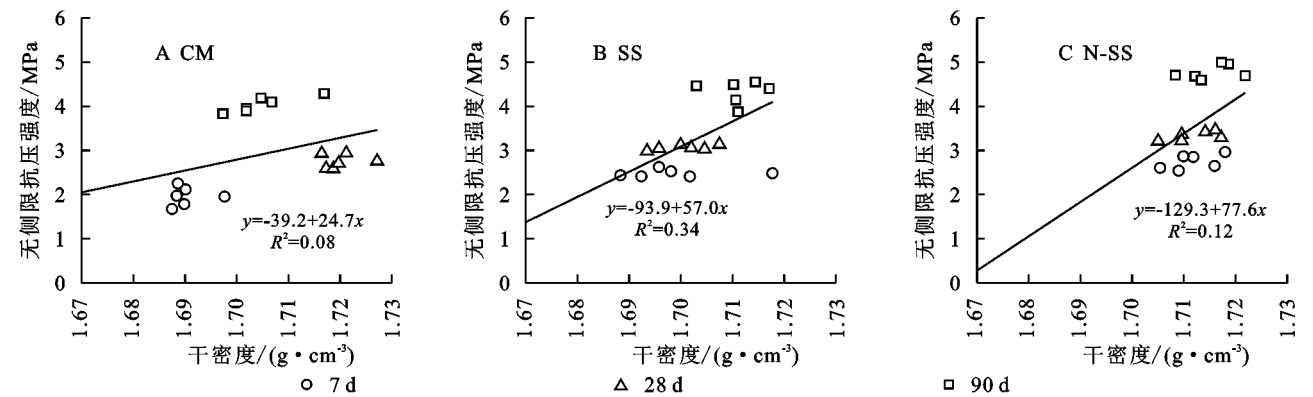


图 8 不同重构土体 UCS 和干密度的关系

2.2.3 不同固化土颗粒组成及微观结构 为了定量分析不同土壤固化剂对黄土的固结效果,利用马尔文激光粒度仪分别对养护 7, 28, 90 d 的 N-SS, SS 和 CM 试件进行颗粒粒径分析,通过对比不同固化土颗粒粒径的分布规律,对 3 种不同固化土的微观结构进行表征。不同龄期、不同掺量的 3 种固化土颗粒粒径分布见图 9。

图 9A—C 分别为不同重构土体在各个龄期下的颗粒粒径分布图,其中 N-SS 重构土体在各龄期和掺量下,其粒径分布规律基本一致。12% 掺量下的 N-SS 重构土体在各龄期的平均粒径均为最小,分别为

34.75, 32.11, 38.83 μm , 比同掺量的 SS 和 CM 重构土体小 30%~60%, 颗粒粒径数据见表 4。表 4 为马尔文激光法测得的固化土颗粒单位质量表面积和中值粒径,由表 4 还可看到,在 7, 28, 90 d 的养护龄期下,各组次的重构土体中 12% 掺量下的 N-SS 比表面积最大,分别达到 0.561, 0.582, 0.462 cm^2/g , 比同掺量的 SS 和 CM 为 30%~40%。根据土体颗粒级配分布原理^[19-20],土体颗粒比表面积越大,表明颗粒尺寸越小、土体单元结构越复杂,同时土体颗粒的中值粒径也是表征颗粒尺寸的重要参数,中值粒径越小说明整体颗粒越细,均匀度越好。

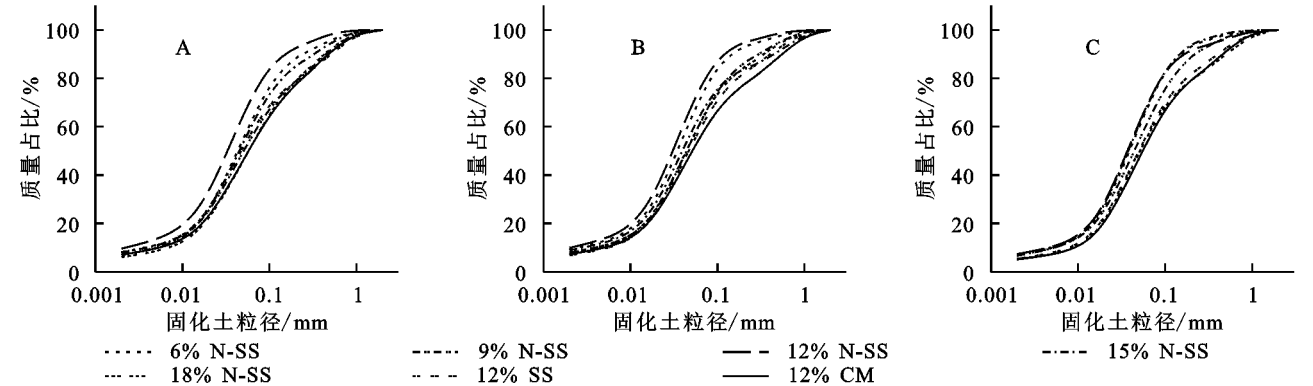


图 9 不同固化土的颗粒分布

表 4 不同固化土颗粒表面积及中值尺寸对比

指标	龄期/d	纳米固化土					固化土	水泥土
		6%	9%	12%	15%	18%	12%	12%
比表面积/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	7	0.443	0.453	0.561	0.431	0.386	0.439	0.398
	28	0.530	0.502	0.582	0.461	0.464	0.424	0.430
	90	0.443	0.455	0.462	0.434	0.345	0.363	0.336
中值粒径/ μm	7	45.35	46.59	34.75	51.47	58.39	48.11	58.20
	28	36.61	40.87	32.11	46.27	45.49	47.93	52.12
	90	41.31	39.84	38.83	46.11	51.91	51.10	56.07

在对上述 3 种固化剂重构土体颗粒粒径分析的基础上,采用 Tyler^[21]、杨培岭^[22]等提出的土壤粒径

分形维数 D 的模型,分别计算 N-SS, SS 和 CM 在 7, 28, 90 d 龄期下的土壤粒径分形维数。分形维数 D

的计算模型基本形式见公式(4)。

$$\frac{M(\delta<\overline{d}_i)}{M_0}=(\frac{\overline{d}_i}{d_{\max}})^{3-D}$$

(4)

上式两边取对数,得:

$$\lg \frac{M(\delta<\overline{d}_i)}{M_0}=(3-D)\lg \frac{\overline{d}_i}{d_{\max}}$$

(5)

式中: \overline{d}_i 为两筛分粒级第 d_i 和第 d_{i+1} 的平均值($d_i>$

$d_{i+1},i=1,2,3,\cdots$); \overline{d}_{\max} 为固化土颗粒的最大直径; $M(\delta<\overline{d}_i)$ 表示粒径小于 \overline{d}_i 的体积分数; M_0 为固化土颗粒总体积。分别以 $\lg \frac{\overline{d}_i}{d_{\max}},\lg \frac{M(\delta<\overline{d}_i)}{M_0}$ 为横、纵坐标作双对数曲线,将各组次粒径分布数据用线性回归拟合成一条直线并计算其斜率 $3-D$,即可求得不同固化土颗粒的分形维数 D 值,计算结果见表 5。

表 5 不同固化土颗粒分布的分形维数 D 值

养护龄期/d	纳米固化土					固化土	水泥土
	6%	9%	12%	15%	18%	12%	12%
7	2.5965	2.5954	2.6319	2.5830	2.5551	2.6015	2.5790
28	2.6217	2.6188	2.6355	2.5946	2.5955	2.5749	2.5875
90	2.5781	2.5693	2.5852	2.5721	2.5297	2.5383	2.5244

由表 5 可知,3 种重构土体在 7,28,90 d 养护龄期时,其颗粒的分形维数 D 分布在 2.52~2.64,其中 12% 掺量下的 N-SS 各龄期下的分形维数均大于其他组次,分别为 2.631 9,2.635 5,2.585 2,比同掺量下的 SS 体大 0.03~0.06,比同掺量下的 CM 大 0.05~0.06。

3 讨论

3.1 纳米固化剂重构土体强度规律

水泥基类固化剂重构土体的强度随固化剂掺量和养护龄期的变化规律以往多为线性规律或二次函数规律^[23-24],而本研究提出的指数函数关系表明利用 N-MBER 加固黄土,二者能够产生复杂的物理化学反应,在数学表达上更加接近于材料强度增长的实际情况,宏观上表现为 N-MBER 的加入能显著改善黄土的物理力学特性,使得 N-SS 试件材料内部结构更加密实,因而无侧限抗压强度显著提升。

对比水泥基类固化土单轴压缩过程^[25-26],N-SS 的单轴压缩破型过程可分为 3 个阶段:(1) 破型早期的 α 部分为材料内部孔隙闭合阶段,该阶段试件内裂隙逐渐被压缩闭合而产生非线性变形,土壤气相减小,固相不变,卸载后变形全部恢复,属于弹性变形;(2) 峰值应力前的 β 阶段为线弹性变形阶段,此阶段主要由固相减小所致,应力—应变曲线近似为一条直线,此时固化土的应力达到峰值应力的 70% 左右,表明其弹性变形阶段大致处于固化土轴压强度 0.7 倍左右,卸载后变形可完全恢复^[27-28];(3) 峰值应力过后的 γ 阶段为材料破型阶段,这一阶段在应变增加不大的情况下应力迅速减小,裂隙逐渐增多至贯通,应力急剧下降,试件产生了较大的塑性变形,材料破坏且不可恢复。以上 3 个阶段概括了 N-SS 试件在单轴压缩条件下的破型过程及材料内部结构受力变化,丰富了以往水泥基类固化土和纳米添加剂类固化

土受力过程的理论研究。

3.2 不同固化剂改善土体力学性能分析

吸水率和干密度作为固化土强度变化的主要影响因素,二者和土体无侧限抗压强度变化呈现显著相关^[17,29]。吸水率影响土体强度主要是由于:固化土内部水化水解反应的进行需要消耗一定的水分子,随着水化水解进程的不断发展,消耗的水分子逐渐增多,试件内部反应逐渐充分,整体抗压强度逐步提升,而纳米 SiO₂ 的亲水性及纳米颗粒巨大比表面积能够在土壤胶体的表面吸附更多的水分子^[30-32],使得固化土反应更加充分,因此相同养护龄期内 N-SS 的吸水率更大,相同吸水率条件下 N-SS 的强度更高。

干密度对土体强度的影响主要表现为:重构土体的抗压强度是由试件内部各种形状的水化硅酸钙凝胶和钙矾石及氢氧化钙晶体以不同形式组成的空间网状聚集体组成,土体干密度越大,表明单位体积内的晶体数量越多,空间结构越复杂,故而抗压强度 UCS 越大^[33-34]。而 N-SS 的内部由于具有大量高火山灰活性的纳米 SiO₂ 分子,能在激活土壤惰性矿物活性的基础上强化胶体空间网状结构,重构土体界面,因而在相同干密度条件下 N-SS 的空间网状结构更加复杂,力学性能明显优于 SS 和 CM。

通过对比不同材料固化土颗粒粒径分布规律,利用分形理论探讨 N-MBER 对重构土体强度的影响。由于分形维数 D 在土壤微观结构形态方面,表现为颗粒粒径越细,其分形维数数值越大^[35],表明 N-SS 相对于 SS 和 CM,其土体颗粒粒径更细,空间分布更均匀,土体微观结构更复杂。通过对比分析,发现 N-SS 在微观形态和结构方面明显优于 SS 和 CM,在各掺量的 N-SS 组次中,12% 掺量的土体粒径级配和微观结构最合理,而作为微观形态和结构的宏观表征,其重构土体的力学性能也更优越。

根据上述研究结果,在黄土高原等缺石少砂地区采用新型纳米土壤固化剂对土体进行重构,并在此基础上开展诸如边坡防护、蓄排水及道路修建等水土保持工程实践将具有积极广阔的前景。

4 结论

(1) 构建了固化剂掺量与纳米固化土无侧限抗压强度关系的函数计算模型,为实际应用提供了技术支撑。

(2) 提出了纳米固化土单轴压缩破坏过程的3个阶段,即孔隙闭合阶段、线弹性压缩阶段和塑性破坏阶段。为纳米固化土的应力应变研究提供了理论基础。

(3) 不同固化土的颗粒形态、微观结构和土体抗压强度等方面的分析结果表明:纳米土壤固化剂在提升黄土的力学性能方面具有显著优势,其重构土体在各龄期的无侧限抗压强度较普通固化土及水泥土可提升10%~30%。

参考文献:

- [1] Mahedi M, Cetin B, White D J. Cement, lime, and fly ashes in stabilizing expansive soils: Performance evaluation and comparison[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(7). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003260.
- [2] Islam M S, Elahi T E, Shahriar A R, et al. Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119392.
- [3] Fu G, Huo D, Shyha I, et al. Experimental investigation on micro milling of polyester/halloysite nano-clay nanocomposites[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(7). DOI: 10.3390/nano9070917.
- [4] Xiao H, Wang W, Goh S H. Effectiveness study for fly ash cement improved marine clay[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157:1053-1064.
- [5] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 等. 不同结构土壤固化剂集流面的力学与集流性能研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(7): 224-228, 234.
- [6] Hassan N, Hassan W H W, Rashid A S A, et al. Micro-structural characteristics of organic soils treated with biomass silica stabilizer[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(12): 1-9.
- [7] Pu S, Hou Y, Ma J, et al. Stabilization behavior and performance of loess using a novel biomass-based polymeric soil stabilizer[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2019, 25(2): 103-114.
- [8] Yin C, Zhang W, Jiang X, et al. Effects of initial water content on microstructure and mechanical properties of lean clay soil stabilized by compound calcium-based stabilizer[J]. *Materials*, 2018, 11(10). DOI: 10.3390/ma11101933.
- [9] 张启, 孙秀丽, 刘文化, 等. 不同水泥掺量下非饱和固化淤泥力学特性试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2020, 60(2): 184-191.
- [10] 曹智国, 章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 3446-3454.
- [11] Thomas G, Rangaswamy K. Strengthening of cement blended soft clay with nano-silica particles[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020, 20(6): 505-516.
- [12] Kong R, Zhang F, Wang G, et al. Stabilization of loess using nano-SiO₂ [J]. *Materials*, 2018, 11(6). DOI:10.3390/ma11061014.
- [13] 陈泽超, 李健, 胡铁, 等. 不同纳米材料改性水泥土力学性能的对比研究[J]. *土工基础*, 2020, 34(5): 583-586.
- [14] 高建恩, 张星辰, 高哲, 等. 一种纳米土壤固化剂及其制备方法: 中国, CN201811230538.6[P]. 2019-02-01.
- [15] 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). DOI:10.3390/nano10030405.
- [16] Guo L, Guo X, Hong J, et al. Constitutive relation of concrete containing meso-structural characteristics[J]. *Results in Physics*, 2017, 7: 1155-1160.
- [17] 樊恒辉, 吴普特, 高建恩, 等. 密度和含水率对固化土无侧限抗压强度的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(3): 54-58.
- [18] Tchakalova B. Effect of clay content on strength and permeability of plastic loess-cement[J]. *Geologica Balcanica*, 2019, 48(2): 25-30.
- [19] Wang T, Song H, Yue Z, et al. Freeze-thaw durability of cement-stabilized macadam subgrade and its compaction quality index[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 160: 13-20.
- [20] Reddy B V V, Latha M S. Influence of soil grading on the characteristics of cement stabilised soil compacts[J]. *Materials and Structures*, 2014, 47(10): 1633-1645.
- [21] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362-369.
- [22] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [23] 侯蕊, 吴家琦, 樊铁兵, 等. 水泥土室内试验无侧限抗压强度差异分析[J]. *土工基础*, 2020, 34(1): 76-79, 88.
- [24] 何云龙, 肖桃李, 汪中林. 不同土质水泥土的无侧限抗压强度研究[J]. *长江大学学报: 自然科学版*, 2020, 17(1): 102-107.