

纳米二氧化硅 - 水泥 - 玄武岩纤维改良黄土 抗压强度试验研究

张浩宇, 孙明明, 张海山

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年6月15日; 录用日期: 2025年7月6日; 发布日期: 2025年7月16日

摘要

黄土因其湿陷性强、水敏性高等特性易引发工程病害, 亟需高效改良方法。本文提出一种纳米二氧化硅 (Nano-SiO₂) - 水泥 - 玄武岩纤维协同改良技术, 通过无侧限抗压强度试验系统研究三种材料的单因素影响规律及协同作用机制。结果表明, 单因素影响下, 材料最优掺量区间为 Nano-SiO₂ 占水泥质量 10%~20%、水泥掺量 2.5%~7.5%、玄武岩纤维掺量 0.2%~0.6%。水泥掺量 5%、Nano-SiO₂ 占比 10%、玄武岩纤维 0.4% 时无侧限抗压强度达 1.059 MPa, 较未改良黄土提升约 12%, 其中水泥对强度贡献最为突出。Nano-SiO₂ 和玄武岩纤维过量添加因团聚效应导致强度降低。改良土体呈应变软化特征, 软化程度受材料配比调控。研究表明, 多材料协同配比可显著改善黄土力学性能, 为黄土工程病害防治提供新思路。

关键词

黄土, 无侧限抗压强度, 纳米二氧化硅, 玄武岩纤维, 水泥

Experimental Study on the Compressive Strength of Improved Loess with Nano Silica-Cement-Basalt Fiber

Haoyu Zhang, Mingming Sun, Haishan Zhang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 15th, 2025; accepted: Jul. 6th, 2025; published: Jul. 16th, 2025

Abstract

Loess is prone to engineering diseases due to its strong collapsibility and high water sensitivity, and efficient improvement methods are urgently needed. This paper proposes a synergistic improvement

文章引用: 张浩宇, 孙明明, 张海山. 纳米二氧化硅-水泥-玄武岩纤维改良黄土抗压强度试验研究[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1666-1671. DOI: 10.12677/hjce.2025.147179

technology of nano-silica (Nano-SiO₂)-cement-basalt fiber. The single-factor influence laws and synergistic action mechanisms of the three materials are studied through an unconfined compressive strength test system. The results show that under the influence of a single factor, the optimal dosage range of the materials is as follows: Nano-SiO₂ accounts for 10%~20% of the cement mass, the cement dosage is 2.5%~7.5%, and the basalt fiber dosage is 0.2%~0.6%. When the cement content is 5%, the proportion of Nano-SiO₂ is 10%, and the basalt fiber is 0.4%, the unbounded compressive strength reaches 1.059 MPa, which is approximately 12% higher than that of the unimproved loess. Among them, the contribution of cement to the strength is the most prominent. Excessive addition of Nano-SiO₂ and basalt fibers leads to a decrease in strength due to the agglomeration effect. The improved soil shows the characteristics of strain softening, and the degree of softening is regulated by the material ratio. Studies show that the coordinated proportioning of multiple materials can significantly improve the mechanical properties of loess, providing a new idea for the prevention and control of engineering diseases in loess.

Keywords

Loess, Unconfined Compressive Strength, Nano-Silica, Basalt Fiber, Cement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄土是一种土性特殊的易灾土,具有孔隙大、胶结性弱、压缩性高、湿陷性强等特点[1][2]。由于其特殊的水敏性,遇水后极易发生湿陷、崩解和强度骤降,导致出现地基不均匀沉降、边坡失稳、隧道塌方等工程问题,严重阻碍城市基础设施的进一步发展[3]-[5]。目前研究人员采用的压实、换填等传统方法难以彻底解决黄土的湿陷性和长期稳定性问题。因此,急需一种能有效提升黄土力学性能和稳定性的改良材料。

近年来,纳米二氧化硅(Nano-SiO₂)已广泛应用于土木工程领域,改善建筑材料的性能、减少建筑材料对周围环境的污染以及降低民用建设的相关成本。贾亮等[6]研究了纳米二氧化硅掺量对黄土路基力学性能的影响。结果表明,Nano-SiO₂的掺入快速提高了黄土的无侧限抗压强度。刘江等[7]研究了 Nano-SiO₂掺量对固化黄土最大干密度、最优含水率的影响。结果表明,Nano-SiO₂石灰综合固化黄土随着 Nano-SiO₂掺量的增加最优含水率逐渐增大、最大干密度减小,由此可以看出 Nano-SiO₂在改良黄土中效果显著。

水泥固化法在黄土改良中已经被广泛研究。瞿海洋等[8]的研究表明,通过水泥对黄土的改性,黄土的密实度能显著增强。黄土改性后无侧限抗压强度是原状黄土的两倍多。邱明明等[9]以延安新区高填方黄土为研究对象,开展不同试验条件下水泥固化黄土无侧限抗压强度试验。研究结果表明,水泥固化黄土无侧限抗压强度与水泥掺量呈线性正相关关系,掺入水泥试样无侧限抗压强度为未掺入水泥试样的 16 倍以上。因此,水泥可以显著提高黄土的抗压强度。

纤维是一种能够增强土体抗拉性能的材料,在众多纤维中,玄武岩纤维天然无污染、易于拌合、价格低廉,并且具有抗拉性能高、耐高温和腐蚀的特点。色麦尔江等[10]通过无侧限抗压试验,研究了石灰和聚丙烯纤维等无机材料对氯盐渍土的改良效果。试验结果显示,当弱盐渍土中掺入配比为 6%的石灰含量、2%的纤维含量和 12 mm 的纤维长度,能达到最优的改良效果。高磊[11]通过三轴试验对玄武岩纤维增强的黏土进行了深入探究,验证了其塑性破坏的特征。研究发现,当纤维掺入量为 0.3%时,黏土的力

学性能达到最优状态。

目前，如何通过多材料协同改良，选用最优的材料配比，充分发挥每种材料以提升黄土力学性能，是当前岩土工程领域亟待解决的关键问题。因此本研究通过在黄土中分别添加不同比例的 Nano-SiO₂、水泥以及玄武岩纤维，并采用无侧限抗压强度试验，以确定这些材料在改良黄土力学性能方面的掺比。

2. 试验准备和方法

2.1. 试验材料

本研究采用的黄土来自陕西省西安市长安区某地路基土。取样深度约为 3 m~5 m 之间，土体呈黄褐色。实验前将散状黄土风干碾碎后过 0.5 mm 筛，置于 105℃ 的烘箱中烘干 24 h 密封备用。根据《公路土工试验规程(JTG 3430-2020)》，可得黄土基本物理指标如表 1 所示。

Table 1. Basic physical indicators of loess
表 1. 黄土基本物理指标

比重 G_s	天然含水量 $w/\%$	最大干密度 $\rho/(g/cm^3)$	孔隙比 e	塑限 $W_P/\%$	液限 $W_L/\%$	塑性指数 I_P
2.7	19	1.64	0.63	20.6	34.2	13.6

Nano-SiO₂ 取自西安市某化学试剂店，表面为纯白色，尺寸介于 1~100 nm 之间，是一种极细的无定形白色粉末。水泥取自西安市某建筑材料厂，而玄武岩纤维由西安某建材工程有限公司生产，其抗拉强度在 3000~4800 MPa 之间，高弹性模量范围为 91~110 GPa，长度为 12 mm，纤维密度 2.63~2.65 g/cm³，断裂伸长率 2.1%。

2.2. 试样制备与测试方法

首先将处理好的黄土与 Nano-SiO₂、水泥和纤维材料干混，均匀搅拌十分钟，并均匀倒入 20% 含水率的水，继续搅拌十分钟，以确保均匀性。将制备好的混合物依据最大干密度 1.64 g/cm³ 分四层击实进模具中(直径 39.1 mm，高 80 mm)。最后将成型的试样密封并静置在室内 28 天，温度恒定为 20 ± 2℃。本次无侧限抗压强度试验采取的仪器是应变式无侧限压缩仪，开展了单因素无侧限抗压强度最优比试验，针对 Nano-SiO₂-水泥 - 玄武岩纤维改良黄土，分别考察了不同 Nano-SiO₂ 含量、不同水泥含量以及不同玄武岩纤维含量的影响。

3. 结果与讨论

3.1. Nano-SiO₂ 含量的影响分析

为了研究不同的 Nano-SiO₂ 含量对 Nano-SiO₂-水泥 - 玄武岩纤维改良黄土的无侧限抗压强度的影响，进行了 Nano-SiO₂ 含量占水泥比例为 0%、5%、10%、15%、20%，水泥含量均为 5%，玄武岩纤维含量均为 0.4% 的土样的无侧限抗压强度试验，其应力应变关系曲线如下图 1 所示。从不同 Nano-SiO₂ 含量下的应力 - 应变曲线中可以观察到，随着 Nano-SiO₂ 含量的增加，改良黄土的无侧限抗压强度呈现出先增强后减弱的趋势。

试验数据表明，当 Nano-SiO₂ 占水泥比例从 0% 增至 15% 时，改良黄土的无侧限抗压强度从 0.946 MPa 逐步提升至 1.042 MPa (增幅约 10.1%)；但继续增加至 20% 时，强度反而下降至 0.992 MPa。这是由于随着纳米二氧化硅含量的增加，使水泥生成了更多的水化硅酸钙(C-S-H 凝胶)，不断改善黄土结构，提高黄土的强度。但纳米二氧化硅比表面较大，具有明显的团聚效应，当纳米二氧化硅含量过多时，易导致孔隙的产生，降低黄土的强度[12]。

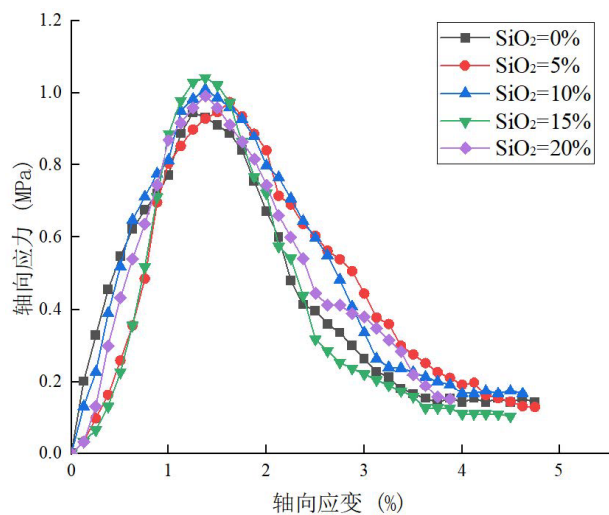


Figure 1. Stress-strain curves under different Nano-SiO₂ contents
图 1. 不同 Nano-SiO₂ 含量下的应力应变曲线

3.2. 水泥含量的影响分析

为了深入探究水泥含量对纳米 SiO₂-水泥-玄武岩纤维改良黄土无侧限抗压强度的影响,我们开展了一系列试验。在这些试验中,土样的水泥含量分别设定为 0%、2.5%、5%、7.5%、10%,同时保持 Nano-SiO₂ 含量占水泥比例为 10%和玄武岩纤维含量为 0.4%不变,以进行无侧限抗压强度的测试,其应力应变关系曲线如下图 2 所示。

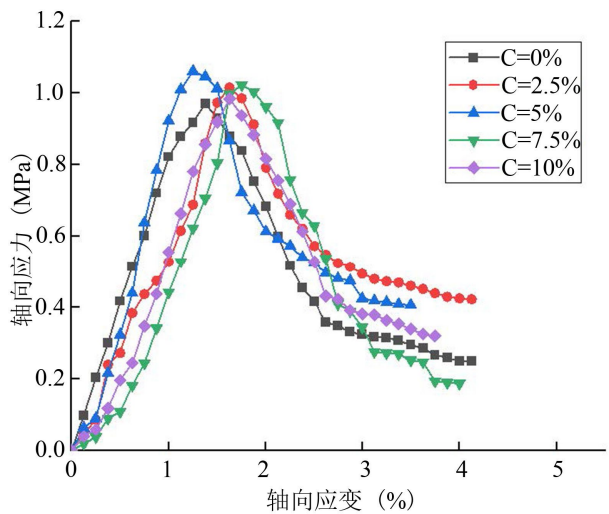


Figure 2. Stress-strain curves under different cement contents
图 2. 不同水泥含量下的应力应变曲线

试验研究表明,水泥掺量对改良黄土的无侧限抗压强度呈现先增后减的趋势。当水泥掺量为 5%时, Nano-SiO₂-水泥-玄武岩纤维复合改良体系的协同作用使抗压强度达到峰值 1.059 MPa。水泥水化生成的 C-S-H 凝胶和钙矾石逐渐填充黄土孔隙,胶结土颗粒,形成初步骨架结构,强度随掺量增加而提升。这主要是由于纳米二氧化硅具有较高的火山灰活性,与水泥水化产物 Ca(OH)₂ 进行二次水化反应生成 C-S-H 凝胶,填充黄土孔隙,提高致密性,增强了黄土抗压强度[13]。

3.3. 玄武岩纤维含量的影响分析

为了探究玄武岩纤维含量对 Nano-SiO₂-水泥 - 玄武岩纤维改良黄土无侧限抗压强度的影响, 本研究开展了试验, 其中土样的玄武岩纤维含量分别设为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%, 同时保持 Nano-SiO₂ 含量占水泥比例为 10%和水泥含量为 5%不变。相应的应力 - 应变关系曲线如图 3 所示。

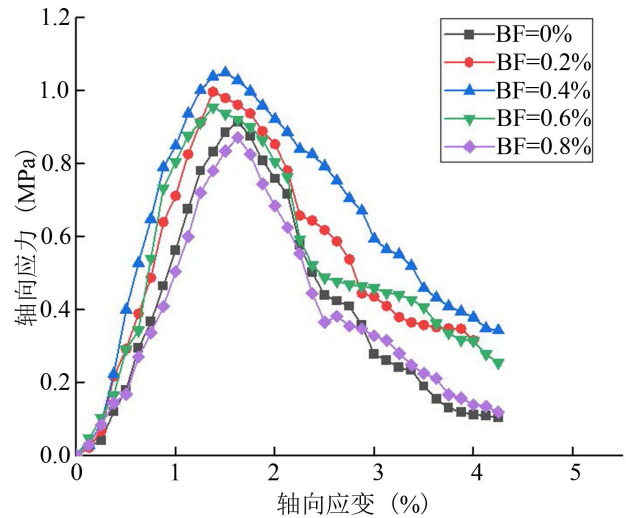


Figure 3. Stress-strain curves under different basalt fiber contents
图 3. 不同玄武岩纤维含量下的应力应变曲线

通过单因素无侧限抗压强度试验, 系统研究了玄武岩纤维掺量(0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%)对改良黄土力学性能的影响。试验结果表明, 随着纤维掺量的增加, 改良黄土的应力 - 应变曲线呈现典型的应变软化特征, 且无侧限抗压强度呈现先增后减的非线性变化趋势。当纤维掺量为 0.4%时, 改良黄土的抗压强度达到峰值, 同时破坏应变显著增大, 表明其塑性变形能力最优。这是由于纤维与纤维之间相互搭接形成网状结构。从而可以更好地承接土颗粒, 使土颗粒与纤维连接成一个密实的整体。然而纤维的过多加入会使纤维团聚在一起, 无法起到有效作用, 导致黄土抗压强度降低[14]。

4. 结果与讨论

本文研究了 Nano-SiO₂、水泥、玄武岩纤维三种材料在 Nano-SiO₂-水泥 - 玄武岩纤维协同作用改良黄土中的最优用量。并得到这些材料可能提供最佳的无侧限抗压强度值, 从中可以得出以下主要结论:

(1) 基于单因素无侧限抗压强度试验的系统研究, 本研究确定了三种改良材料的最优掺量范围: 纳米二氧化硅(Nano-SiO₂)占水泥质量的 10%~20%、水泥掺量为土体干质量的 2.5%~7.5%、玄武岩纤维掺量为土体干质量的 0.2%~0.6%。这一参数区间为黄土改良工程提供了重要的材料配比参考。

(2) 深入分析三种材料的协同作用机制发现, 当水泥掺量固定为 5%时, Nano-SiO₂-水泥 - 玄武岩纤维复合改良体系使黄土的无侧限抗压强度显著提升至 1.059 MPa。值得注意的是, 在三种材料中, 水泥对改善土体力学性能的贡献最为显著, 其水化反应产生的胶结作用是强度提升的关键因素。而 Nano-SiO₂ 的火山灰效应和玄武岩纤维的桥接作用则进一步增强了改良效果, 形成了多尺度的增强体系。

通过应力 - 应变关系分析发现, 改良土体表现出明显的应变软化特征, 且软化程度与各材料掺量密切相关。当玄武岩纤维掺量为 0.4%时, 改良土体展现出最优的塑性变形能力, 其破坏应变较素土提高了约 15%。这一现象表明, 适量纤维的加入能有效抑制裂缝扩展, 改善土体的延性性能。

参考文献

- [1] 王芮芮, 项伟, 周游, 等. 木质素磺酸钙改良黄土的水理性质及微观结构研究[J/OL]. 宁夏大学学报(自然科学版), 1-10. <https://doi.org/10.20176/j.cnki.nxdz.000067>, 2025-06-07.
- [2] 陈杰, 唐占元, 安之焕, 等. 矿粉固化黄土的力学性能及机理研究[J]. 公路, 2025, 70(3): 33-41.
- [3] 牛晓宇, 周志健, 朱荣贵, 等. 湿陷性黄土路基可持续材料加固效果与机理研究[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(10): 4309-4316.
- [4] 王爱琴. 木质素和木质素磺酸钙固化黄土的路用性能研究[J]. 甘肃科技, 2024, 40(11): 55-59.
- [5] 田威, 云伟, 贺文昊, 等. 矿渣基地聚物固化黄土抗压强度及固化机制研究[J/OL]. 土木工程学报, 1-13. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.24040258>, 2025-06-07.
- [6] 贾亮, 张玮玮, 凤翔, 等. 纳米二氧化硅-石灰固化黄土路基力学性能及微观机理[J]. 公路交通科技, 2024, 41(4): 42-50.
- [7] 刘江. 纳米二氧化硅石灰固化黄土的物理力学性能及微观性质[J]. 铁道建筑技术, 2022(11): 6-9+14.
- [8] 瞿海洋. 水泥改良黄土物理和力学特性试验研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(3): 35-39.
- [9] 邱明明, 杨萌, 李晓敏, 等. 水泥固化高填方黄土抗压强度特性及其影响因素[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(5): 1927-1938.
- [10] 色麦尔江·麦麦提玉苏普, 陶士超. 改良盐渍土强度变形及其微观特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 113-119+132.
- [11] 高磊, 胡国辉, 陈永辉, 等. 玄武岩纤维加筋黏土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 198-203.
- [12] 李小静, 李一豪, 游桢, 等. Nano-SiO₂ 改性水泥净浆结石体力学特性试验研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(8): 99-102+107.
- [13] 刘思龙. 纳米二氧化硅对复合水泥基材料性能影响研究综述[J]. 广东建材, 2023, 39(9): 140-143.
- [14] 杨若辰, 张吾渝, 童国庆, 等. 玄武岩纤维加筋黄土力学性质及微观机理研究[J]. 青海大学学报, 2022, 40(6): 61-67.