

冻融循环作用下黄土的物理力学特性研究综述

刘晴晴*, 郭亚茹, 张小虎

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年4月17日; 录用日期: 2024年5月7日; 发布日期: 2024年5月15日

摘要

我国分布着众多的黄土, 尤其西北和华北部分地区大面积存在。这些区域又属于季节性冻土区, 区域内的路基、边坡等与黄土密切相关的岩土工程不可避免地受到干湿-冻融循环的劣化作用, 产生复杂变形。情况严重时甚至会诱发诸如不均匀沉降、边坡失稳等工程病害, 严重威胁相关工程的安全性和稳定性, 亟需对干湿-冻融循环作用下压实黄土的变形特性开展全面研究。针对黄土在经历冻融循环后的土体强度问题, 本文归纳总结了冻融循环对黄土微结构以及力学性质和参数产生的影响、改性黄土提高土体强度等的研究进展。

关键词

黄土, 冻融循环, 力学特性

Research Review of Physical and Mechanical Properties of Loess under Freeze-Thaw Cycle

Qingqing Liu*, Yaru Guo, Xiaohu Zhang

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

Received: Apr. 17th, 2024; accepted: May 7th, 2024; published: May 15th, 2024

Abstract

There are numerous loess in China, especially in the northwest and north parts of large area, these areas also belong to seasonal frozen regions, and the soil engineering closely related to loess, such as area of subgrade and slope, is inevitable subject to the deterioration of under dry-wet-freeze-thaw cycle, resulting in complex deformation. If the situation is serious, it will induce serious engineering diseases, such as uneven settlement and slope instability. It is a serious threat to the safety and stability of related projects, and it is urgent to carry out a comprehensive study on the deformation characteristics of compacted loess under the action of dry-wet-freeze-thaw cycle. In this paper, aim-

*通讯作者。

ing at the soil strength problem of loess after freeze-thaw cycle, the influence of freeze-thaw cycle on loess microstructure, mechanical properties and parameters was summarized, and the research progress of modified loess to improve soil strength was summarized.

Keywords

Loess, Freeze-Thaw Cycle, Mechanical Properties

Copyright © 2024 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

黄土是一种特殊的大陆松散堆积物，具有一系列内部物质成分和复杂的外部形态特征。这种独特的结构性直接影响着黄土的力学性状和工程性质。我国的黄土具有地层厚、发育好、地层全、分布连续的特征，这为我们对黄土的研究提供了很好的条件；且这些地区的黄土大多是季节性冻土，因此，随着黄土地区经济建设的发展，关于黄土的研究尤其是冻融作用对黄土物理力学特性的研究具有一定的理论和工程实际价值。一般认为，人为地对天然黄土进行压实能够消除其遇水强度骤降和变形突增的特性，基本上能够满足建筑物对于强度和稳定性的要求。但在实际工程中，压实的黄土会受到诸多自然环境的影响，如周期性的降雨和高温导致的干湿和冻融交替循环作用。原本压实的黄土基础在自然界经历反复的干湿交替后，其物理力学性质也随之发生变化。最为明显的就是产生裂缝、不均匀沉降和局部塌陷等工程问题，甚至出现二次或多次湿陷病害，这些病害严重影响了工程项目的性能，对运行安全也产生了不利影响。基于这些已出现的工程问题，本文主要对国内部分学者的相关研究进行梳理。

2. 研究背景及意义

一直以来，世界上很多的技术工作者和科学家们对冻融循环作用下黄土的物理力学特性进行了多方面的研究，取得了很大的成果。自然界的大部分表层土体多处于非饱和状态，不同于饱和土，非饱和土由固、液、气三相所组成[1]，其物理化学性质更加复杂。而黄土是非饱和土的典型代表之一，与其它类型土体相比，黄土粉土具有较大的孔隙结构、垂直节理发育和对水敏感等特征[2] [3] [4]。冻融循环作为一种强风化作用[5] [6]，是指气温降至 0℃ 以下又升至 0℃ 以上，温度作用使土体产生冻结和融化的一种物理现象。在降雨和蒸发的作用下，黄土土体将受到强烈的破坏，导致其强度发生削减并加剧了变形[7]。黄土在循环作用下，其内部结构不断劣化，强度发生衰减[8] [9]，变形不断增加。

3. 研究现状

3.1. 冻融作用对黄土湿陷性的影响

关于冻融循环作用下黄土的力学特性变化规律，国内外相关学者已取得较为丰富的成果。孙德安等人[10]通过研究发现，不同的土样内部结构会导致进气值的差异。高立成[11]通过配备不同比例的水泥、石灰和 SH 添加到黄土中，通过室内试验结果分析，得到最佳配比方案，为改良黄土在路基土中的应用提供了有效的理论依据和可靠的参考价值。Zhi 等人[12]通过进行室内试验，研究了水泥石灰改良黄土的物理性质并分析其作用机理。由研究结果可知，水泥石灰改良黄土的强度特性以及液塑限值受含水率、龄期等不同条件的影响。Gao 等人[13] [14] [15] [16]研究了石灰改良黄土对黄土湿陷性的影响，并且建立

了其本构方程,从试验结果发现,黄土湿陷性会由于石灰添加剂的增多,得到更好的改善。通过进行微观试验阐明石灰的作用机理,并且建立起石灰改良黄土的本构模型。众多学者通过研究[17] [18] [19],发现影响土-水特征曲线滞洄效应的因素有“瓶颈效应”、水气分界面的接触角差异、试样的初始干密度、含水率以及干湿循环次数等。原状黄土是一种具有各向异性的结构性土,其各向异性对受力状态较为复杂的边坡和隧道及地下结构等工程的稳定性影响较大。

3.2. 冻融作用对重塑黄土压缩性能的影响

王丽琴等人[20]研究了在不同取土角度不同含水率对原状和重塑土样无侧限抗压强度的影响。为研究黄土强度与结构的各向异性,对不同取土角度不同含水率的原状、重塑黄土试样进行了无侧限抗压强度试验,获得了相应试样的无侧限抗压强度,并计算得到其初始结构性指标。分析黄土的无侧限抗压强度、结构性指标与取土角度、含水率的关系。为探究赤泥对水泥复合土的无侧限抗压强度、抗冻性能和疲劳特性的影响,借助扫描电镜观察了试件微观结构,利用能谱仪对试件内部元素成分的变化规律进行了机理分析。张城芋等人[21]研究了在相同冻融条件下,水泥掺量对赤泥-水泥复合土无侧限抗压强度的影响。结果表明,试件微观结构与元素成分变化表明,赤泥掺量的增加能够有效增强颗粒物之间粘结强度,提高骨架致密程度。通过流动度测试、无侧限抗压强度试验来研究含泥量对砂质土流态固化处理效果的影响。同时,基于响应面法,以水灰比为 2:1 的混合样为例,分别建立了含泥量与流动度、无侧限抗压强度的关系模型,并分析其影响规律。林泓民等人[22]研究了含泥量对砂质土无侧限抗压强度的影响。结果表明,含泥量等因素均对流动度、无侧限抗压强度产生影响;根据试验结果拟合得到的模型显示,存在某个含泥量,使得流动度和强度均存在峰值。为有效降低黄土地区遇水产生的湿陷性,以兰州黄土为研究对象,利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对黄土湿陷性进行研究。首先对 MICP 处理前后黄土的无侧限抗压强度及湿陷系数进行评价,然后利用 CT 扫描技术分析 MICP 改良后的黄土微观特征,进一步探究 MICP 改良机理。孔德成等人[23]研究了经过微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术处理过的黄土的无侧限抗压强度显著提高。试验结果表明:经 MICP 处理后的黄土试样无侧限抗压强度显著提高,最高可达 150 kPa,黄土湿陷性有效降低;随着胶结液浓度不断增加,碳酸钙生成量持续增加,但在胶结液浓度大于 1.25 mol/L 时,碳酸钙生成量呈下降趋势;改良后黄土试样的孔隙率、孔隙等效直径等指标均降低。木质素磺酸钙掺入黄土后,能够显著改善黄土的工程性质。以木质素磺酸钙作为土体改良剂,对兰州地区黄土进行改良,研究改良黄土在不同密实度条件下无侧限抗压强度的变化规律。刘辰麟等人[24]将木质素磺酸钙作为土体改良剂加入黄土,提高了黄土的无侧限抗压强度,改良黄土的无侧限抗压强度最低为 700 kPa。掺入木质素磺酸钙后,黄土的最大干密度增大,最优含水率减小;素土和改良黄土的无侧限抗压强度都超过了 700 kPa,改良黄土的无侧限抗压强度随密实度的增大而增大;5%掺量改良黄土无侧限抗压强度随干密度变大显著提高,随孔隙比增大而减小。以石灰粉煤灰稳定黄土为对象,通过标准击实试验、无侧限抗压强度试验,研究养护龄期和石灰粉煤灰掺量对稳定黄土最佳含水率、最大干密度及无侧限抗压强度的影响。周小虎[25]建立了石灰粉煤灰稳定黄土无侧限抗压强度与孔隙率、粉煤灰与石灰的比值(F/L)及石灰粉煤灰总体积掺量的关系。结果表明,随石灰粉煤灰掺量的增加,稳定黄土最佳含水率增大,最大干密度减小;石灰粉煤灰掺量一定时,随粉煤灰掺量的增加,最大干密度增大,最佳含水率减小;无侧限抗压强度随养护龄期的增长、石灰粉煤灰掺量的增加而增大。研究结果可为黄土地区渠道、土坝护坡、边坡等工程的加固改良提供依据和指导。

3.3. 冻融作用对人工结构性黄土抗剪性能的影响

胡安栋和符勇[26]采用 G2 固化剂对黄土进行改性,发现改性黄土的无侧限抗压强度随吸水率的增加

而减弱,但具有良好的抗冻融效果。以石灰高炉矿渣稳定黄土为对象,通过无侧限抗压强度试验和重型标准击实试验,研究石灰高炉矿渣掺量和养护时间对稳定黄土最大干密度、最优含水率和无侧限抗压强度的影响。结果表明:随着无机结合材料掺量的增加,稳定黄土最优含水率增大、最大干密度减小;在无机结合材料掺量一定的条件下,随着高炉矿渣掺量的增加,最大干密度增大,最优含水率减小;稳定黄土的无侧限抗压强度随养护龄期的增长而增大、随稳定材料掺量的增加而增大;通过对无侧限抗压强度数据的拟合回归,建立了稳定黄土的无侧限抗压强度与孔隙率、石灰与高炉矿渣的比值(L/S)及无机结合材料体积掺量的关系。唐斌科[27]建立了石灰高炉矿渣稳定黄土无侧限抗压强度孔隙率、石灰与高炉矿渣的比值(L/S)及无机结合材料体积掺量的关系。以石灰、粉煤灰和硫铝酸盐水泥共同稳定的黄土试样为研究对象,通过标准击实及无侧限抗压强度试验,研究了石灰、粉煤灰和硫铝酸盐水泥的掺量和养护龄期对稳定黄土最大干密度、最优含水率和无侧限抗压强度的影响。结果表明:随无机结合材料掺量的增加,稳定黄土最优含水率逐渐增大、最大干密度减小;在无机结合材料掺量一定的条件下,随着硫铝酸盐水泥掺量的增加,最优含水率和最大干密度同时增大;无侧限抗压强度随无机结合材料掺量(20%~30%)的增加而增大,随养护龄期的发展总体上不断增长,前期(1~7 d)强度增长速度慢,后期强度增长速度变快;通过对无侧限抗压强度数据的拟合回归,建立了稳定黄土的无侧限抗压强度与孔隙率、硫铝酸盐水泥体积掺量、无机结合材料体积掺量的关系。所得成果为稳定黄土的设计和施工提供了一种新思路。刘雄美[28]建立了稳定黄土的无侧限抗压强度与孔隙率、硫铝酸盐水泥体积掺量、无机结合材料体积掺量的关系。以活性氧化镁和微生物共同作用固化的黄土试样为研究对象,通过含水率、无侧限抗压强度、X射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)等试验,研究了活性氧化镁掺量、养护龄期和初始含水率对固化试样含水率、无侧限抗压强度、固化产物和微观结构等的影响。结果表明:随着氧化镁掺量增加,水化后未进一步反应的氢氧化镁越多;反应生成的水合碳酸镁具有膨胀性和胶结性,对土颗粒间缝隙进行填充,并将土颗粒胶结在一起。黄涛等人[29]以活性氧化镁和微生物共同作用固化的黄土试样为研究对象,通过含水率、无侧限抗压强度、X射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)等试验,研究了活性氧化镁掺量、养护龄期和初始含水率对固化试样含水率、无侧限抗压强度、固化产物和微观结构等的影响。

4. 结语

在理论上,冻融对黄土的微观结构造成影响,破坏了土颗粒之间的连接。多次冻融循环作用使黄土的结构更加疏松,当压力超过自重应力时会产生更大的附加变形。冻融造成黄土中水分重分布,在补水条件下,水分通过毛细通道向土体表面迁移,使土体表面结构发生严重的冻融破坏,土体强度发生改变。此类研究对于基础理论的应用已经比较成熟,但是目前大部分对冻融后土体强度影响的研究仅仅止步于单向冻融循环后对土体强度进行剪切强度和抗压强度的测定,而对于双向冻融循环后冻胀和融沉规律以及强度规律的研究还很少,文献资料仍然不算丰富,对于像黄土岸坡这类开放的黄土工程而言,双向冻融作用对黄土的影响研究就显得尤为必要。

黄土的力学性质研究是黄土力学以及土力学研究的重要课题,其中对于黄土结构性的研究比较多,而关于冻融作用对人工结构性黄土和重塑黄土力学性质的研究比较少。因此,进一步开展更深层次的研究对指导现实的实践具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] Lu, N. and Likos, W.J. (2004) *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons Ltd., Hoboken.
- [2] 陈仲颐. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 王清雅. 中国黄土研究简史[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.

- [4] 陈存利, 高鹏, 胡再强. 黄土的增湿变形特性及其与结构性的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1352-1360.
- [5] 宋春霞. 冻融作用对土物理力学性质影响的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [6] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985.
- [7] Zeng, Z.T., Lu, H.B. and Zhao, Y.L. (2012) Wetting-Drying Effect of Expansive Soils and Its Influence on Slope Stability. *Applied Mechanics & Materials*, **170-173**, 889-893. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.170-173.889>
- [8] Guan, G.S., Rahardjo, H. and Leongeng, C. (2010) Shear Strength Equations for Unsaturated Soil under Drying and Wetting. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**, 594-606. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000261)
- [9] Gallage, C.P.K. and Uchimura, T. (2006) Effects of Wetting and Drying on the Unsaturated Shear Strength of a Silty Sand under Low Suction. *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, Carefree, 2-6 April 2006, 1247-1258. [https://doi.org/10.1061/40802\(189\)102](https://doi.org/10.1061/40802(189)102)
- [10] 孙德安, 高游. 不同制样方法非饱和土的土水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 91-97.
- [11] 高立成. 固化剂改良黄土力学特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [12] Zhi, B., Yang, L. and Liu, E.L. (2014) Study on the Mechanical Properties of Lime-Cement-Treated Loess Soils. *Applied Mechanics and Materials*, **638-640**, 1408-1413.
- [13] Fredlund, D.G. (2000) The 1999 R.M. Hardy Lecture: The Implementation of Unsaturated Soil Mechanics into Geotechnical Engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**, 963-985. <https://doi.org/10.1139/t00-026>
- [14] Ghasabkolaei, N., Choobbasti, A.J., Roshan, N. and Ghasemi, S.E. (2017) Geotechnical Properties of the Soils Modified with Nanomaterials: A Comprehensive Review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **17**, 639-650. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.01.010>
- [15] Huang, Y. and Wang, L. (2016) Experimental Studies on Nanomaterials for Soil Improvement: A Review. *Environmental Earth Sciences*, **75**, Article No. 497. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5118-8>
- [16] Gao, Y., Qian, H., Li, X., Chen, J. and Jia, H. (2018) Effects of Lime Treatment on the Hydraulic Conductivity and Microstructure of Loess. *Environmental Earth Sciences*, **77**, 435-461. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7715-9>
- [17] Ng, C.W.W. and Pang, Y.W. (2000) Experimental Investigations of the Soil-Water Characteristics of a Volcanic Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**, 1252-1254. <https://doi.org/10.1139/t00-056>
- [18] Klausner, Y. (1991) *Fundamentals of Continuum Mechanics of Soils*. Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1677-6>
- [19] 李军, 刘奉银, 王磊, 等. 关于土水特征曲线滞回特性影响因素的研究[J]. 水利学报, 2015, 46(s1): 194-199.
- [20] 王丽琴, 赵聪, 胡向阳, 等. 黄土强度及结构的各向异性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(z1): 25-29.
- [21] 张城芋, 江双双, 陈四利, 等. 赤泥-水泥复合土的工程特性试验研究[J/OL]. 排灌机械工程学报, 2022: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.th.20220926.1712.002.html>, 2022-10-15.
- [22] 林泓民, 白兰兰, 彭劫, 等. 含泥量对砂质土流态固化处理效果的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(3): 30-35.
- [23] 孔德成, 孙治国, 贾方方. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术改良黄土湿陷性研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(3): 969-975.
- [24] 刘辰麟, 王学文, 王沈力, 等. 木质素磺酸钙改良黄土无侧限抗压强度试验研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2022, 58(2): 19-21.
- [25] 周小虎. 石灰粉煤灰稳定黄土的无侧限抗压强度研究[J]. 中国建材科技, 2021, 30(5): 90-93.
- [26] 胡安栋, 符勇. 黄土改性与机理研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(10): 116-121.
- [27] 唐斌科. 石灰高炉矿渣稳定黄土的无侧限抗压强度研究[J]. 甘肃科技纵横, 2021, 50(9): 28-31.
- [28] 刘雄美. 石灰粉煤灰水泥稳定黄土的力学性能研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(9): 4-8.
- [29] 黄涛, 方祥位, 张伟, 等. 活性氧化镁-微生物固化黄土试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3300-3306+3316.