

PP纤维 - 粉煤灰改良黄土抗剪强度试验研究

李宇航, 张海山*, 汪佳欣, 张浩宇, 陈树峰

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年12月18日; 录用日期: 2024年1月18日; 发布日期: 2024年1月29日

摘要

为研究在冻融循环条件下影响聚丙烯纤维 - 粉煤灰改良黄土的因素; 探究粉煤灰掺量和PP纤维掺量对冻融循环作用下黄土抗剪强度特性的影响, 并建立黏聚力和内摩擦角估测模型。实验结果表明: 粉煤灰掺量和PP纤维掺量的增加, 能显著提高土体抗剪强度。粉煤灰掺量为20%和PP纤维掺量为0.5%时的改良黄土抗剪性能最优。随着粉煤灰和PP纤维掺量的增加, 内摩擦角和黏聚力先增后减, 其中黏聚力增长较为显著, 最大增幅分别为22.4%和15.1%, 内摩擦角增幅均相对较小。基于此, 建立考虑PP纤维与粉煤灰掺量影响的PP纤维 - 粉煤灰改良黄土抗剪强度参数预测模型, 为季冻区改良黄土路基工程设计提供参考。

关键词

黄土, 冻融循环, 粉煤灰, PP纤维, 抗剪强度

Experimental Study on the Shear Strength of PP Fiber-Fly Ash Modified Loess

Yuhang Li, Haishan Zhang*, Jiaxin Wang, Haoyu Zhang, Shufeng Chen

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

Received: Dec. 18th, 2023; accepted: Jan. 18th, 2024; published: Jan. 29th, 2024

Abstract

To study the factors affecting the improvement of loess by polypropylene fiber-fly ash under freeze-thaw cycle, the effects of fly ash content and PP fiber content on the shear strength of loess under freeze-thaw cycle were investigated, and the models for estimating cohesion and internal friction Angle were established. The experimental results show that the increase of fly ash and PP

*通讯作者。

fiber content can significantly improve the shear strength of soil. When fly ash content is 20% and PP fiber content is 0.5%, the shear resistance of improved loess is the best. With the increase of fly ash and PP fiber content, the internal friction Angle and cohesion increased first and then decreased, and the cohesion increased significantly, with the largest increases of 22.4% and 15.1%, respectively, and the internal friction Angle increased relatively little. Based on this, a prediction model of the shear strength parameters of PP fiber-fly ash improved loess was established, which considered the influence of PP fiber and fly ash content, and provided a reference for the engineering design of improved loess roadbed in seasonal freezing area.

Keywords

Loess, Freeze-Thaw Cycles, Fly Ash, PP Fiber, Shear Strength

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

随着国家“一带一路”持续推进,大量的基础设施建设正在西北黄土地区实施。黄土由于具有孔隙大、遇水易湿陷等性质,使得黄土内部结构易发生破坏[1],继而引发一系列工程事故。因此需要对土体进行处理后再应用于实际工程中。目前,国家大力倡导“低碳”理念,将建筑废料回收利用成为重要的可持续发展方向[2]。粉煤灰作为一种工业废弃物,对空气和环境造成极大的污染和危害,但粉煤灰具有较好的工程性能[3]。掺入粉煤灰能较好提高黄土的稳定性以及强度[4] [5] [6],应用于工程中,能对社会产生许多经济效益[7]同时还能减少空气污染,保护环境。但由于其自身材质的局限性而不能有效地提高黄土路基的抗裂性和抗拉强度。聚丙烯(PP)纤维具有强度高、耐化学侵蚀和耐腐蚀性等优点[8],可用于加固黄土路基工程,使外部荷载均匀分布于纤维与土上,从而让路基沉降均匀,地面龟裂减少[9] [10]。吴远成等[11]通过纤维加筋千枚岩残积土,认为PP纤维能显著提高千枚岩残积土的抗拉强度。Tang C等[12]基于直接拉伸试验分析了PP纤维含量、干密度和含水率对拉伸强度的影响,认为纤维与土体的界面相互作用是影响土体抗拉强度的主要因素。此外在西北寒冷地区土体受周期性的冻融循环的影响,土体的抗剪强度以及耐久性力学性能会随冻融循环下降[13]。

本文拟采用PP纤维和粉煤灰作为改良剂,在冻融循环条件下通过粉煤灰掺量和PP纤维掺量,研究改良黄土的抗剪强度。通过改良土应力-应变特性,分析其黏聚力和内摩擦角变化规律,建立适用于PP纤维-粉煤灰改良土的抗剪强度参数量化分析模型,为其实际应用提供参考。

2. 试验准备和方法

2.1. 试验材料

黄土取自陕西省西安市长安区路基土。试验用土取样深度为3 m~5 m之间,土体呈黄褐色,质地较为均匀,在场内连续分布。实验前先将粉碎过的0.5 mm筛土样,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)》,测得黄土基本物理指标如表1所示。粉煤灰取自山西某热电厂的一级粉煤灰,含水率为2.8%,干密度为0.82 g/cm³,相对质量密度2.02。试验采用的聚丙烯纤维由山东皓隆建材工程有限公司提供,基本物理力学参数如表2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/%	天然干密度 $\rho/(g/cm^3)$	孔隙比 e	塑限 $W_p/%$	液限 $W_L/%$	塑性指数 I_p
2.7	19	1.43	0.63	20.6	34.2	13.6

Table 2. Physical property parameters of polypropylene fiber**表 2.** 聚丙烯纤维的物理力学性能

纤维类型	长度(mm)	直径 (mm)	密度 (g/cm^3)	弹性模量 (GPa)	断裂伸长率 (%)	断裂抗拉强度 (MPa)
单纤维	12	0.048	0.91	4.8	15	486

2.2. 试样制备与测试方法

先将粉煤灰和黄土研磨粉碎至无大颗粒状，烘干、过 0.5 mm 筛，随后按照预定比例称量 PP 纤维、粉煤灰和蒸馏水，再将准备好的各种试验材料进行混合并搅拌均匀。含水率恒定为 19%，纤维质量掺入比设置 0%、0.25%、0.75%、1% 四个梯度，粉煤灰质量掺入比设置 0%、5%、10%、15%、30% 五个梯度。将制备好的混合物按 3 层依次浇铸到标准金属环刀模具(直径 61.8 mm，高 20 mm)中并击实，再用保鲜膜将其包裹。最后将新成型的试样密封并静置在室内 7 天，温度恒定为 $20.0 \pm 2^\circ\text{C}$ 。而后，将试样中的土样取出并放置在冻融试验装置中，首先土样先放置在 -20°C 条件下冻结 12 小时，然后放置在 20°C 的环境中解冻 12 小时，并将此过程重复 5 次。直剪试验用仪器为 ZJ 型应变控制式直剪仪，应变速率控制在 0.8 mm/min。以试样产生 6 mm 剪切位移作为破坏标准，试验方案如表 3 所示。

Table 3. Direct shear test scheme**表 3.** 直剪试验方案

含水率/%	冻融循环/次	粉煤灰/%	PP 纤维/%	垂直应力/kPa
19	5	0, 5, 10, 15, 30, 20	0.5, 0, 0.25, 0.75, 1	50, 100, 150, 200

2.3. 试验参数确定

根据直剪试验所测得参数，改良土体受到的剪切应力 τ ：

$$\tau = \frac{CR}{A_0} \times 10 \quad (1)$$

式中， C 为测力计率定系数(N/0.01mm)； R 为测力计读数(0.01 mm)； A_0 为试样的面积(cm^2)。

以抗剪强度峰值 τ_{\max} 为纵坐标，垂直荷载 σ 为横坐标，作抗剪强度与垂直荷载的关系曲线。根据图上各点，绘制拟合直线，从而确定黏聚力和内摩擦角。

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

式中， c 为黏聚力(kPa)； φ 为内摩擦角($^\circ$)。

3. 结果与讨论

3.1. 粉煤灰对抗剪强度影响

图 1 为粉煤灰掺量对改良黄土的内摩擦角和黏聚力的影响。随着粉煤灰掺量的增加，改良黄土的内

摩擦角均呈先增后减趋势。当粉煤灰的掺量为 20% 时,内摩擦角由 23.30° 增长至 24.70°,黏聚力由 21.87kPa 增长至 26.73 kPa; 其中内摩擦角增幅为 6%,黏聚力增幅为 22.4%,且变化幅度皆随着粉煤灰掺量的继续增长有逐渐减弱的趋势。这是由于随着粉煤灰掺量的增加,大量粉煤灰与水反应且填充了黄土孔隙,对土壤内部进行加固,表现出抗剪强度增大的现象。但当粉煤灰在土体内的掺加量进一步增加时,由于其本身与其生成物过多,对土壤内部孔隙进行挤压,弱化土壤本身的骨架,导致粉煤灰对土体的提升效果减弱的现象。

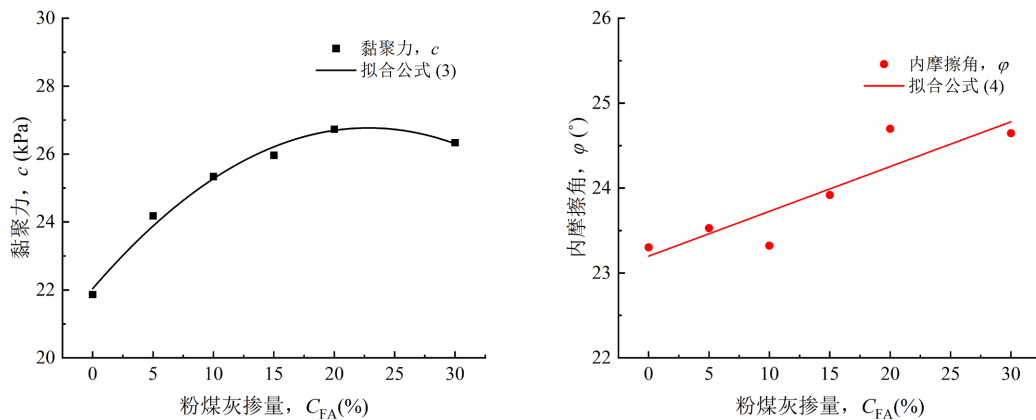


Figure 1. Effect of fly ash content on internal friction angle and cohesion

图 1. 粉煤灰掺量对内摩擦角和黏聚力的影响

3.2. PP 纤维对抗剪强度的影响

图 2 为 PP 纤维掺量对改良黄土的内摩擦角和黏聚力的影响。随着 PP 纤维掺量的增加,改良黄土内摩擦角和黏聚力均呈先增后减的趋势。在纤维掺量为 0.5% 时,内摩擦角由 23.43° 增长到 24.70°,黏聚力由 23.225 kPa 增长至 26.73 kPa; 其中黏聚力增长较为显著,累计增幅达 15.1%,但随着掺量继续增加呈下降趋势。该现象与钱叶琳等[14]针对黄麻加筋土进行的直剪试验结果类似。出现该现象是由于纤维的掺入可以有效地阻止裂缝在土体中扩展,提高土体的韧性和抗裂性,减轻应力集中,同时纤维与土体颗粒之间的摩擦力可以增加土体内部的黏聚力和内摩擦角,增加土体的整体抗剪能力。但当纤维掺量过高时,纤维之间可能会发生交错、聚集的现象,导致纤维在一些区域形成团状体,从而在这些区域产生了区域架空的现象。在架空区域,相互作用减弱,交织网络的连通性降低,土体的整体抗剪强度和黏聚力随之降低[15][16]。

4. 改良黄土抗剪强度定量化分析

基于上述试验结果,在冻融循序一定时建立考虑 PP 纤维掺量和粉煤灰掺量的改良黄土黏聚力和内摩擦角的量化分析模型。为对数据进行归一化处理,记冻融循环 5 次和含水率 19% 时的改良黄土黏聚力和内摩擦角标准值 \bar{c} 和内摩擦角标准值 $\bar{\varphi}$, 分别为 26.39 kPa 和 24.7°。采用指数函数拟合试验结果,获得黏聚力和内摩擦角与粉煤灰掺量的关系式,如下所示:

$$c = -0.00908 \cdot C_{FA}^2 + 0.4146 \cdot C_{FA} + 22.04 = g_f(C_{FA}) \cdot \bar{c} \quad (3)$$

$$\varphi = 0.05277 \cdot C_{FA} + 23.2 = d_f(C_{FA}) \cdot \bar{\varphi} \quad (4)$$

其中, $g_f(C_{FA})$ 和 $d_f(C_{FA})$ 表示粉煤灰掺量影响规律的归一化函数。

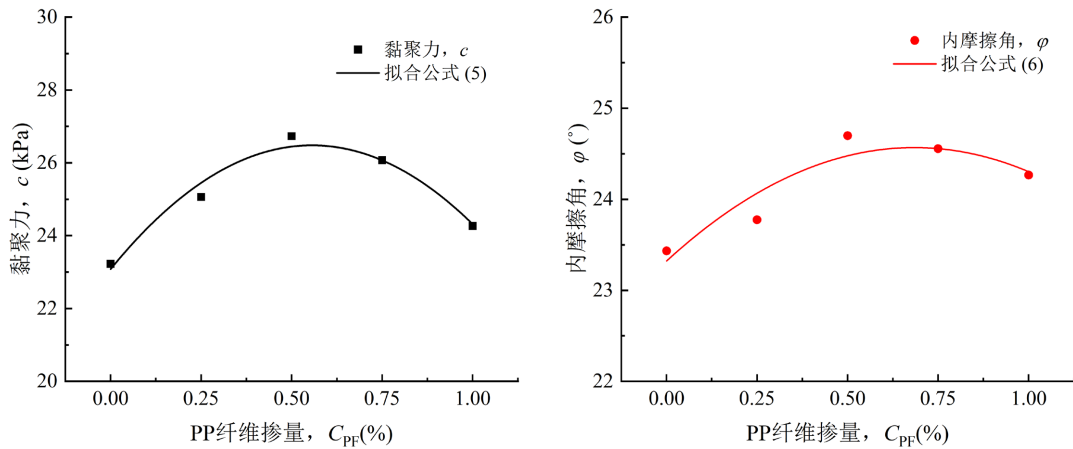


Figure 2. Effect of PP fiber content on cohesion and internal friction angle

图 2. PP 纤维掺量对黏聚力和内摩擦角的影响

根据数据变化规律,分别采用指数函数和线性函数拟合试验结果,获得黏聚力和内摩擦角与 PP 纤维掺量的关系式,如下所示:

$$c = -10.99 \cdot C_{PA}^2 + 12.23 \cdot C_{PF} + 23.08 = g_p(C_{PF}) \cdot \bar{c} \quad (5)$$

$$\varphi = -2.662 \cdot C_{PF}^2 + 3.642 \cdot C_{PF} + 23.32 = d_p(C_{PF}) \cdot \bar{\varphi} \quad (6)$$

其中, $g_p(C_{PF})$ 和 $d_p(C_{PF})$ 为 PP 纤维掺量影响的归一化参数。

考虑粉煤灰掺量和 PP 纤维掺量的影响,提出公式(7)和(8)来预测公式(1)和(2)中改良黄土的黏聚力和内摩擦角:

$$c = \bar{c} \cdot g_f(C_{FA}) \cdot g_p(C_{PF}) \cdot \bar{c}^{-2} \quad (7)$$

$$\varphi = \bar{\varphi} \cdot d_f(C_{FA}) \cdot d_p(C_{PF}) \cdot \bar{\varphi}^{-2} \quad (8)$$

图 3 为黏聚力和内摩擦角的试验值与公式(7)和(8)的预测值的比较。拟合度分别为 0.976 和 0.885,拟合良好。结果表明,该预测模型可用于 PP 纤维-粉煤灰改良黄土的黏聚力和内摩擦角的估算。

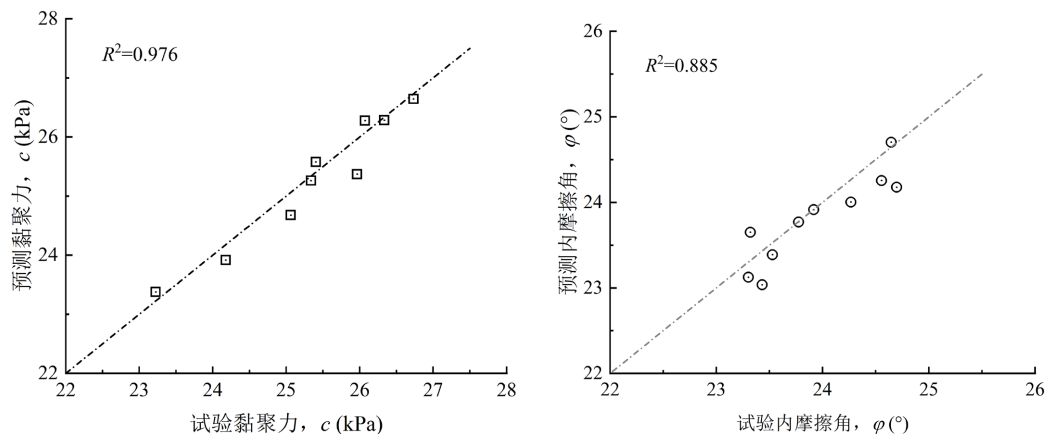


Figure 3. Comparison of the predicted results of modified loess with the experimental results

图 3. 改良黄土的预测结果与试验结果的对比

5. 结论

本文对参加粉煤灰和 PP 纤维的改良黄土进行直剪试验, 研究两种材料对改良黄土抗剪强度、黏聚力和内摩擦角。最后, 将这些因素的影响纳入建立的模型中, 通过预测值与试验值比较, 确定黏聚力和内摩擦角模型的准确性。从中可以得出以下主要结论:

1) 随着粉煤灰掺量和 PP 纤维掺量的增加, 改良黄土黏聚力和内摩擦角均呈先增后减的趋势。其中粉煤灰掺量为 20% 时黏聚力增长最为显著, 增幅最大 22.4%, 内摩擦角增幅仅为 6%。PP 纤维掺量为 0.5% 时, 黏聚力增幅最为显著为 15.1%, 内摩擦角增幅仅为 6%。

2) 粉煤灰掺量为 20% 且 PP 纤维掺量为 0.5% 时的改良黄土的抗剪性能最优。

3) 利用公式的推导, 建立 PP 纤维 - 粉煤灰改良黄土抗剪强度参数的量化分析模型。预测结果与试验数据吻合较好。该模型可为季冻区改良黄土路基工程的设计提供参考。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(X202212715019)。

参考文献

- [1] 高英, 马艳霞, 张吾渝, 等. 西宁地区黄土增湿变形特性及微观结构分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 803-810. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.vt2019416>
- [2] 严国全. 废旧水泥稳定碎石冷再生利用疲劳寿命研究[J]. 中国市政工程, 2018(2): 84-87.
- [3] 何军志. 水泥固化废弃物中有害金属离子的研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [4] 刘永河, 叶彩娟. 养护温度对水泥粉煤灰搅拌饱和黄土强度影响的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(10): 121-124+132.
- [5] 岳建平, 杨有海. 石灰及其与粉煤灰混合改良黄土强度特性试验研究[J]. 兰州工业学院学报, 2013, 20(5): 41-45.
- [6] 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.
- [7] 冯海宁, 杨有海, 龚晓南. 粉煤灰工程特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 579-582.
- [8] 王凯文, 黄景华, 朱羽, 等. 添加造孔剂制备钨尾矿多孔陶瓷[J]. 高校化学工程学报, 2022, 36(6): 879-885.
- [9] 孙延飞, 李双喜, 陆瑶, 等. 骨料碱活性检验及抑制碱骨料反应的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(3): 72-74+84.
- [10] 王成, 李楨怡, 葛广华, 等. 复合盐侵蚀-干湿耦合作用下聚丙烯纤维混凝土抗盐蚀性能试验研究[J]. 混凝土, 2023(4): 29-35+39.
- [11] 吴远成, 黄世光, 颜荣涛, 等. 聚丙烯纤维加筋千枚岩残积土的抗拉强度特性[J/OL]. 桂林理工大学学报, 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.N.20230804.1248.002.html>, 2023-10-29.
- [12] Tang, C., Wang, D., Cui, Y., et al. (2016) Tensile Strength of Fiber-Reinforced Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546)
- [13] 穆彦虎, 马巍, 牛富俊, 等. 多年冻土区道路工程病害类型及特征研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3): 259-267. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.2014.03.005>
- [14] 钱叶琳, 王洁, 吕卫柯, 等. 黄麻纤维加筋土的强度特性及增强机理研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(2): 19-24.
- [15] 卢浩, 晏长根, 贾卓龙, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土的抗剪强度和崩解特性[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 82-92. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.02.007>
- [16] 陈志波, 郭学文, 戴梦兰, 等. 纤维含量对加筋土宏观特性的影响[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20230703.1315.002.html>, 2023-12-25.