

木纤维添加对弃渣场渣土抗剪强度的影响

胡金竹¹, 李敏², 王玉帅², 高飞³, 王波³, 杨淦舟¹, 陈奇伯¹

(1.西南林业大学水土保持学院, 云南昆明 650224; 2.云南省滇中引水工程
有限公司, 云南昆明 650205; 3.中国电建昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650051)

摘要: [目的] 探究不同梯度木纤维添加对弃渣场渣土抗剪性能的影响, 为弃渣场的渣土改良及水土流失防治提供数据支撑。[方法] 以滇中引水工程楚雄段新普村弃渣场渣土为研究对象, 以木纤维为添加剂, 按其质量与渣土质量比设置 0(CK), 1%(ML), 3%(MM), 6%(MH) 共 4 个梯度处理进行土壤培养试验, 采用直剪试验方法获得不同梯度下改良渣土的黏聚力和内摩擦角, 系统研究不同梯度木纤维添加对渣土抗剪强度的影响。[结果] ① 添加木纤维后渣土抗剪强度显著增强, 且 ML 处理较对照的抗剪强度在 50, 100, 200 和 300 kPa 垂直应力下提升效果均最佳, 分别增强了 51.22%, 64.93%, 71.25% 和 70.35%, 在 200 kPa 垂直应力条件下增幅最大。② 添加木纤维有效提高了渣土的抗剪强度, 随木纤维梯度增加, 渣土黏聚力及内摩擦角均呈现先增加后减小的变化趋势。其中 ML 处理下渣土黏聚力和内摩擦角均为最大, 较对照分别增加了 53.56%, 77.11%; MM, MH 处理下的渣土黏聚力较对照处理分别增加了 48.67% 和 11.41%。③ Pearson 相关分析结果表明, 木纤维添加后土壤理化性质与抗剪性能关系密切。通过因子分析发现, 木纤维添加后主要通过影响土壤的容重、有机质、田间持水量、饱和持水量以及毛管持水量, 进而对抗剪强度参数产生影响。[结论] 木纤维添加能增强弃渣场渣土抗剪强度特性。1% 木纤维添加最有利于增强渣土抗剪强度, 但针对实际工程应用中与土壤培养试验研究存在差异, 实际工程需结合垂直应力等条件采用适量木纤维添加。

关键词: 木纤维; 滇中引水工程; 渣土抗剪强度; 因子分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0087-09

中图分类号: S156.99, S152.9

文献参数: 胡金竹, 李敏, 王玉帅, 等. 木纤维添加对弃渣场渣土抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 87-95. Hu Jinzhu, Li Min, Wang Yushuai, et al. Effect of wood fiber addition on shear strength of waste soil at waste disposal site [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 87-95.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.002

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.002

Effect of wood fiber addition on shear strength of waste soil at waste disposal site

Hu Jinzhu¹, Li Min², Wang Yushuai², Gao Fei³, Wang Bo³, Yang Haozhou¹, Chen Qibo¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2.Central Yunnan Water Diversion Project Construction Bureau, Kunming, Yunnan 650205, China; 3.Kunming Engineering Corporation Limited of Power China, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: [Objective] The influence of different gradients of wood fiber addition on the shear resistance of the waste soil at waste disposal site was analyzed, in order to provide data support for the improvement of the waste soil and the prevention and control of soil erosion at waste disposal site. [Methods] Taking the waste soil from the Xinpu village waste dump in the Chuxiong section of the Central Yunnan Water Diversion Project as the research object and using wood fiber as an additive, soil culture experiments were conducted by setting four gradient treatments of 0 (CK), 1% (ML), 3% (MM), and 6% (MH) according to the mass ratio of wood fiber to waste soil. The cohesion and internal friction Angle of the improved waste soil under different gradients were obtained by the direct shear test. The influence of different gradients of wood fiber addition on the shear strength of waste soil at waste disposal site was systematically studied. [Results] ① The shear strength of the waste soil was

收稿日期: 2025-03-16

修回日期: 2025-09-10

采用日期: 2025-09-11

资助项目: 云南省滇中引水工程水土保持关键技术专项“工程扰动区植被生态恢复技术研究”(DZYS-ZH-STBC-SJ-001)

第一作者: 胡金竹(2001—), 女(汉族), 贵州省普安县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持生态修复。Email: 3046398179@qq.com。

通信作者: 李敏(1990—), 男(彝族), 云南省宣威市人, 本科, 高级工程师, 主要从事滇中引水工程环境保护和水土保持管理。Email: 395964804@qq.com。

陈奇伯(1965—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持及生态恢复方面的研究。Email: chengqb@swfu.edu.cn。

significantly enhanced after the addition of wood fibers. Moreover, the improvement effect of the shear strength of the ML treatment compared with the control was the best under vertical stresses of 50, 100, 200 and 300 kPa, increasing by 51.22%, 64.93%, 71.25% and 70.35%, respectively. The greatest increase was under the vertical stress condition of 200 kPa. ② Adding wood fibers effectively enhanced the shear strength of waste soil. With the increase of the wood fiber gradient, both the cohesion and internal friction angle of the waste soil showed a changing trend of first increasing and then decreasing. Among them, under ML treatment, the cohesion and internal friction angle of the waste soil were both the largest, increasing by 53.56% and 77.11% respectively compared with the control. The cohesion of the waste soil under the MM and MH treatments increased by 48.67% and 11.41% respectively compared with the CK treatment. ③ Pearson correlation analysis indicated that the physical and chemical properties of the waste soil after the addition of wood fibers were closely related to the shear resistance performance. Through factor analysis, it was found that the addition of wood fibers mainly affects the shear strength parameters by influencing the soil bulk density, organic matter, field water holding capacity, saturated water holding capacity and capillary water holding capacity. [Conclusion] The addition of wood fibers enhances the shear strength characteristics of the waste soil in the waste dump. The addition of 1% wood fiber is most beneficial for enhancing the shear strength of waste soil. However, due to the differences between the actual engineering application and the soil culture test research, the applicable amount of wood fiber addition should be adopted simultaneously in combination with conditions such as vertical stress.

Keywords: wood fiber; Central Yunnan Water Diversion Project; shear strength of waste soil; factor analysis

随着中国基础设施建设的快速发展,大规模水利工程在优化水资源配置的同时,产生了许多固体废弃物。滇中引水工程是国务院要求加快推进建设的为解决滇中区域水资源短缺问题而实施的战略性重大工程项目,作为西南地区规模最大的标志性水利工程,施工过程中产生的弃渣量庞大,且渣土结构不稳固,土体破碎松散,力学稳定性差,在堆积过程中若处理不当,可能会因雨水冲刷和边坡失稳导致渣体滑动,极易造成严重的土壤侵蚀问题或引发滑坡等一系列灾害,影响当地生态安全和可持续发展。早在 20 世纪,国内外的研究人员均对固化渣土进行过研究,并在渣土资源化利用处理方面取得显著成效^[1]。近年来,关于渣土的研究热点多集中在工程回填及盾构渣土特性等方面,体现了渣土处理领域从“被动防控”向“智能资源化”的转型,但针对外源物质添加增强渣土抵抗剪切作用能力的研究刚处于起步阶段。因此,为预测及强化渣土稳定性^[2],亟需开展如何增强弃渣场地区渣土抗剪强度特性的研究。当前,利用改良剂稳定土体是研究较多的方法之一。欧阳森等^[3]对生物基质改良膨胀土的研究表明生物基质改良剂的黏度和胶凝性能较高,可以有效增强土颗粒之间的作用力,形成稳定的三维结构网,整体提升土体的抗拉强度。Xu 等^[4]采用数值模拟方法研究了生物炭改良剂与土颗粒之间的毛细力特性,发现添加生物炭的黏土抗剪强度随添加含量的增加而增加,且生物炭添加量为 5% 时改善效果最佳。Tamassoki 等^[5]通过无侧限抗压强度试验和

直剪试验使用活性炭和椰壳纤维作为环境友好型黏结剂来稳定红土,结果显示 3% 的活性炭和椰壳纤维可显著提高红土的抗压强度,2% 的活性炭和椰壳纤维可显著提高红土的抗剪强度。以上学者针对土体抗剪强度的研究多数是在膨胀土及红黏土等土质方面,且研究结果均表明通过施用添加剂,土体的微观结构会发生改变,土壤抗剪强度能得到明显提升。

因此,土壤改良材料能有效提高进土体黏结性及团聚程度,对土体的抗剪强度增强作用显著,木纤维添加剂是一种有机高分子化合物,来源于秸秆、棕榈纤维及自然合成纤维等物质,具有三维空间结构,能通过改变土体内部结构进而形成纤维-土复合体影响其力学性质,有利于改善土体结构及土水特性^[6]。作为生态型改良剂,已广泛应用于生态恢复及土体力学特性改良。21 世纪以来,国内外学者致力于木纤维材料特性的研究,特别是关于对纤维加筋技术的探索,在水利工程中,纤维加筋土被用于坝体加固、边坡支护等,提高了水利工程的稳定性和安全性及土体抗变形能力^[7]。Abdi 等^[8]对混合料抗剪强度、破坏应变和抗剪强度参数进行的研究发现,在黏土-石灰混合料中加入随机聚丙烯纤维,能增加土-纤维界面的相互作用,提高了土体的抗剪性能。但是,现有关于木纤维添加剂的研究多集中在对膨胀土、砂土及红黏土的力学特性改良,而在施工工程弃渣场退化渣土的性能研究方面报道较少。因此,本研究通过盆栽原状土直剪试验深入探索木纤维对渣土土

体抗剪性能的影响,旨在明确木纤维对渣体力学性质的作用机理,以期为提高弃渣场地区渣体稳定性及改良力学特性提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

滇中引水工程是云南省水资源配置的重要工程,由石鼓水源工程和输水工程组成,从金沙江干流提水向昆明、丽江、大理、楚雄、玉溪和红河地区供水,全长664.24 km。区域内年平均气温14~20℃,年平均降水量570~1 100 mm。引水工程土石方开挖总量 $8.83 \times 10^7 \text{ m}^3$,弃渣总量 $7.19 \times 10^7 \text{ m}^3$,共规划220处弃渣场。

表1 木纤维添加剂基本性质

Table 1 Basic properties of wood fiber additives

项目	pH值	长度/mm	横截面直径/mm	有机质量分数/%	灰分质量分数/%	比表面积/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	平均抗拉强度/MPa
木纤维	6	2~10	0.45	99.16	8	6.60	8.62

1.3 试验设计与样品采集

1.3.1 土壤培养试验设计

2024年5—10月在云南省元谋县热区生态农业研究所进行了土壤培养试验,其中以木纤维作为添加剂,并依次与渣土按质量比共设置4个添加梯度,分别为对照(CK),1%木纤维添加(ML),3%木纤维添加(MM),6%木纤维添加(MH),不同浓度梯度木纤维添加设置参考相关文献^[9],每种处理3个重复,共计12盆。将与添加物混合均匀的土壤装入由PVC管改制高度40 cm,直径20 cm规格的花盆中,为避免人工压实与自然堆积试样容重及孔隙率的差异,装填时仅通过轻微敲击容器侧壁促使土壤自然沉降,干密度控制在 $1.45 \sim 1.55 \text{ g/cm}^3$,并分为3次装填,每次装填高度为12~13 cm。所有试样均放置于大棚中,不同处理仅添加剂用量不同,其余试验条件均一致。

1.3.2 样品采集

试验结束后,每个处理均分别完成12个原状土环刀试样用于直剪试验,12个环刀试样用于容重、持水量的测定。环刀采样时保持环刀中土体与环刀面平行,且分别取各处理重复盆栽混合土壤1 kg装袋用于土壤理化性质测定。

1.4 试验方法

1.4.1 渣土理化性质测定

渣土含水率采用水分测定仪测定;pH值使用pH计以1:2.5土水比测量;容重、总孔隙度、田间持水量、饱和持水量以及毛管持水量采用环刀法;有机

1.2 试验材料

土壤培养试验用土取自云南省楚雄州牟定县新普村弃渣场($25^{\circ}7'43.31''\text{N}$, $101^{\circ}20'48.65''\text{E}$)堆积的渣土。渣土主要来源于隧洞及倒虹吸工程土方开挖,包括施工中产生的原生土层、隧道弃渣及碎石屑等泥土混合物。

弃渣场区域属高原亚热带季风气候,年平均气温 15.6°C ,年降水量840 mm,海拔1 931 m。渣土经5 mm孔径筛分处理后,自然风干备用。木纤维选用天然松木植物纤维,生产于安徽省宁国市东南木纤维科技有限公司。其吸附性好,抗拉能力强,其基本特征详见表1。

质采用重铬酸钾-外加热法,全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法。

1.4.2 渣土抗剪强度测定

采用ZJ型应变控制式直剪仪进行土体的抗剪试验^[10]。该仪器主要由上盒和下盒组成,试样位于上盒下盒内两块透水石之间,设置垂直压力分别为50,100,200,300 kPa对每组荷载做3次重复试验。设置剪切速率 1.2 mm/min ,最大剪切位移6 mm。在直剪仪显示最大剪切位移为6 mm时,读取仪器剪切过程中最大剪切应力,即剪切应力曲线峰值,若在剪切过程中切应力曲线无峰值出现,则以剪切位移达到4 mm时的切应力为准,为保证数据更接近真实值,均采用原状土进行试验,利用库伦公式计算抗剪强度的相关指标:黏聚力(纵轴截距)和内摩擦角(水平轴夹角),计算公式为

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ 为土壤抗剪强度(kPa); σ 为垂直应力(kPa); φ 为土壤内摩擦角($^{\circ}$); c 为土壤黏聚力(kPa)

1.5 数据处理及分析

采用Excel 2016进行数据整理,SPSS 22.0进行单因素ANOVA检验($p < 0.05$)及因子分析,使用Origin 2022进行相关性分析及图像绘制。

2 结果与分析

2.1 木纤维添加对渣土抗剪强度的影响

2.1.1 木纤维添加对渣土抗剪强度的影响

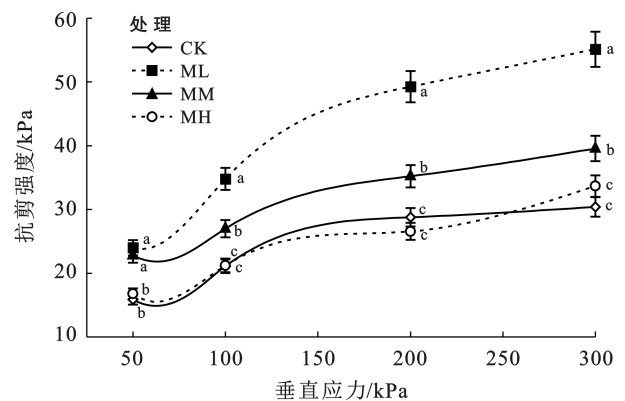
由图1可知,相同处理条件下,土壤培养试验中

渣土试样抗剪强度随垂直应力的增加而增加。CK, ML, MM 在 200 kPa 时增幅效果均最好, 分别为 28.77, 49.27, 35.23 kPa; MH 处理在 300 kPa 时增幅最高, 为 33.67 kPa。当垂直应力为 50 kPa 时, CK 和 MH 处理下渣土抗剪强度无显著差异 ($p > 0.05$), ML 和 MM 处理无显著差异 ($p > 0.05$); 当垂直应力为 100 kPa 时, 与对照相比 ML 和 MM 处理均提升, 分别提升了 64.93%, 27.97%; 当垂直应力为 200 kPa 时, MH 处理下渣土抗剪强度较对照相比降低了 7.65%, ML 和 MM 提升了 71.25%, 22.45%; 当垂直应力为 300 kPa 时, ML, MM 和 MH 处理分别较对照提升了 70.35%, 30.16% 和 10.76%, 且 ML 处理下抗剪强度值最大, 为 55.13 kPa, CK 处理下抗剪强度值最小, 为 30.40 kPa。表明木纤维添加能够增强土壤的抗剪强度, 随木纤维含量增加, 抗剪强度呈现先增加后减小的变化趋势, 且 1% 木纤维梯度添加下的抗剪强度提升效果较 MM, MH 处理相对明显, 提升效果最好。

2.1.2 木纤维添加对渣土抗剪强度参数的影响

土壤黏聚力和内摩擦角主要表现在相对位移发生面上土壤颗粒间的摩擦力和咬合力, 土壤黏聚力和内摩擦角越大, 说明土样发生相对滑动越难。对各处理下渣土的直剪试验结果进行拟合分析, 得出不同梯度木纤维添加下土样的抗剪强度回归模型, 并经过计算求解得到不同处理中的黏聚力 (c 值) 和内摩擦角 (φ 值), 计算结果详见如表 2。ML, MH 与 CK 处理下的内摩擦角存在显著差异 ($p < 0.05$), MM

差异不显著, 其中 ML 处理下的内摩擦角最大, 为 7.12° ; MH 处理下的内摩擦角最小, 为 3.09° , 不同处理内摩擦角的平均值为 4.53° 。相比 CK 处理, 添加木纤维试样的黏聚力呈现出不同程度的增大, ML 处理时黏聚力增幅最大, 为 20.73 kPa, 相较对照增大了 53.56%; MM 处理时黏聚力为 20.07 kPa, 相较对照增大了 48.67%; MH 处理时黏聚力增幅最小, 为 15.04 kPa, 相较对照增大了 11.41%。由此可知, 渣土抗剪强度的提高主要是由于黏聚力及内摩擦角得到明显的提升。



注: ①图中不同小写字母表示不同处理在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异。②CK 为对照; ML, MM, MH 分别为添加 1%, 3%, 6% 木纤维处理。下同。

图 1 不同处理下渣土垂直应力与抗剪强度的关系
Fig.1 Relationship between vertical stress and shear strength of waste soil under different treatments

表 2 不同处理下渣土抗剪强度回归模型

Table 2 Regression model of waste soil shear strength under different treatments

不同处理	线性回归方程	内摩擦角/ $^\circ$	内摩擦角平均值/ $^\circ$	黏聚力/kPa	黏聚力增幅/倍
CK	$\tau = 0.070 2\sigma + 13.500$	4.02	4.53	13.50	0
ML	$\tau = 0.123 5\sigma + 20.736$	7.12		20.73	0.54
MM	$\tau = 0.068 0\sigma + 20.070$	3.90		20.07	0.49
MH	$\tau = 0.053 4\sigma + 15.047$	3.09		15.04	0.11

试验结果显示随木纤维梯度增加, 土壤黏聚力及内摩擦角均呈现先增大后减小的趋势(图 2), 不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。ML 处理时土壤黏聚力达到峰值, 提升效果最好, 土壤内摩擦角变化数值在 $3.09^\circ \sim 7.12^\circ$ 范围内浮动。与 CK 处理相比, ML 处理下的内摩擦角提升了 77.11%, MM, MH 处理下的土壤内摩擦角均低于对照组, 且 MH 处理时达到最小值。说明渣土黏聚力和内摩擦角在不同含量木纤维的影响下较 CK 试样呈现出不同幅度的变化。

2.2 木纤维添加下渣土抗剪强度的影响因素分析

2.2.1 渣土抗剪强度的相关性分析

抗剪强度受土体颗粒分布、容重及黏聚力等多

种因素的综合影响^[11], 土壤理化性质对土壤抗剪强度存在直接或间接的影响。为研究渣土抗剪强度与渣土理化性质(表 3)之间的关系, 对抗剪强度参数(土壤黏聚力 X_1 , 内摩擦角 X_2) 和 9 项指标(容重 X_3 , 总孔隙度 X_4 , 含水率 X_5 , pH 值 X_6 , 全氮 X_7 , 有机质 X_8 , 田间持水量 X_9 , 饱和持水量 X_{10} , 毛管持水量 X_{11}) 进行 Pearson 相关性分析, 结果如图 3 所示。

4 种处理下渣土的黏聚力和内摩擦角均与土壤容重、含水率、有机质、全氮等 9 种土壤理化因素存在相关性, 且土壤抗剪强度参数与不同变化范围下的理化性质相关性程度表现各不相同。本研究试验条件下的各理化性质指标范围为容重 ($1.18 \sim 1.53 \text{ g/cm}^3$)、

总孔隙度(42.60%~61.41%)、含水率(6.60%~16.16%)、全氮(0.28~0.55 g/kg)、有机质(8.12~17.25 g/kg)、田间持水量(12.17%~19.36%)、饱和持水量(22.23%~46.41%)、毛管持水量(19.38%~32.64%)。在CK处理中,土壤黏聚力与含水率、毛管持水量及有机质均呈显著正相关关系($p < 0.05$),与容重、饱和含水率呈显著负相关($p < 0.05$);在ML处理中,土壤黏聚力和内摩擦角与含水率、全氮、有机质以及田间持水量均呈显著正相关关系($p < 0.05$),黏聚力与容重、饱和持水量呈显著负相关($p < 0.05$);在MM处理中,土壤黏聚力与有机质呈显著正相关($p < 0.05$),与土壤容重、饱和持水量及毛管持水量呈显著负相关关系($p < 0.05$),土壤内摩擦角与含水率、饱和持水量呈现负相关关系;在MH处理中,土壤黏聚力与有机质、全氮呈显著正相关($p < 0.05$),与含水率、田间持水量、饱和持水量及毛管持水量均呈现显著负相关关系($p < 0.05$),土壤内摩擦角与田间持水量呈显著正相关($p < 0.05$)。4组相关性分析结果显示,土壤黏聚力与含水率、容重、有机质及田间持水

量相关性显著($p < 0.05$),随木纤维梯度增加,土壤含水率上升,黏聚力和内摩擦角均随含水率增加呈现出先增加后减小的变化趋势,相关性也呈现出先增强后减弱的特征。总之,土壤黏聚力与渣土理化性质指标的相关性受含水率影响明显,含水率的高低会使黏聚力与内摩擦角和渣土理化性质之间的相关性产生差异。

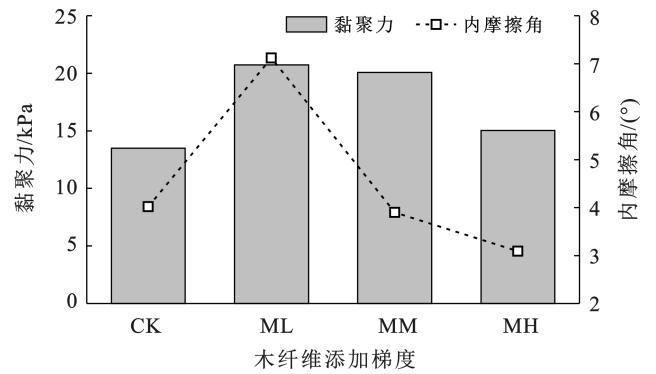


图 2 不同处理下渣土黏聚力与内摩擦角关系
Fig.2 Relationship between cohesion and internal friction angle of waste soil under different treatments

表 3 渣土基本理化性质

Table 3 Basic physical and chemical properties of waste soil

不同处理	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/ %	含水率/ %	pH值	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	田间持水量/ %	饱和持水量/ %	毛管持水量/ %
CK	1.53±0.02 ^a	61.41±1.56 ^a	6.60±0.25 ^c	7.07±0.02 ^b	0.28±0.06 ^c	8.12±1.81 ^c	12.17±0.64 ^c	22.23±1.146 ^c	19.38±0.39 ^d
ML	1.42±0.03 ^a	59.55±1.26 ^a	10.98±0.65 ^b	8.01±0.10 ^a	0.55±0.02 ^a	15.05±1.21 ^{ab}	13.31±0.33 ^c	23.92±0.24 ^c	21.22±0.38 ^c
MM	1.31±0.02 ^b	42.60±0.26 ^b	11.23±0.48 ^b	8.00±0.50 ^a	0.52±0.07 ^{ab}	17.25±1.33 ^a	14.87±1.29 ^b	29.19±0.48 ^b	23.15±0.68 ^b
MH	1.18±0.08 ^c	42.97±0.62 ^b	16.16±1.53 ^a	8.03±0.14 ^a	0.44±0.05 ^b	14.16±1.41 ^b	19.36±0.43 ^a	46.41±1.28 ^a	32.64±0.70 ^a

注:①表中数值为平均值±标准差;②不同小写字母表示不同处理在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异。

2.2.2 渣土抗剪强度因子分析

基于相关性分析,已知不同处理下渣土含水率、容重、有机质等9种指标均不同程度作用于渣土的抗剪强度。利用降维因子中KMO和Bartlett球形度检验法进行因子适用性分析,得出KMO值为0.677, Bartlett球形度检验($p < 0.01$),3个公因子累积贡献率为91.476%,适合进行因子分析。因此,对土壤含水率、容重、总孔隙度、有机质等9种指标进行因子分析,探究在不同梯度木纤维添加下各指标对渣土抗剪强度的综合作用效果。为准确得出影响渣土抗剪强度的主要因子,通过正态化四次极大旋转法得到正交变换矩阵,结果详见表4。

因子分析结果显示,第一公因子贡献率为65.008%,主导因子为田间持水量、毛管持水量以及饱和持水量,因子负荷量在0.965以上。第二公因子贡献率为20.059%,主导因子为有机质、pH值和全

氮,因子负荷量在0.546以上。第三公因子贡献率为7.612%,主导因子为土壤容重、总孔隙度及pH值,因子负荷量在0.29以上。为准确分析渣土理化性质对渣土黏聚力(c)以及内摩擦角(φ)的影响,用所计算的3个公因子得分与渣土黏聚力及内摩擦角做Pearson相关性分析。结果详见表5。黏聚力与内摩擦角均和 F_2 公因子极显著相关($p < 0.01$),与 F_1, F_3 相关性不显著,说明渣土理化性质对土壤抗剪强度的影响主要是通过影响土壤黏聚力和内摩擦角而实现的。

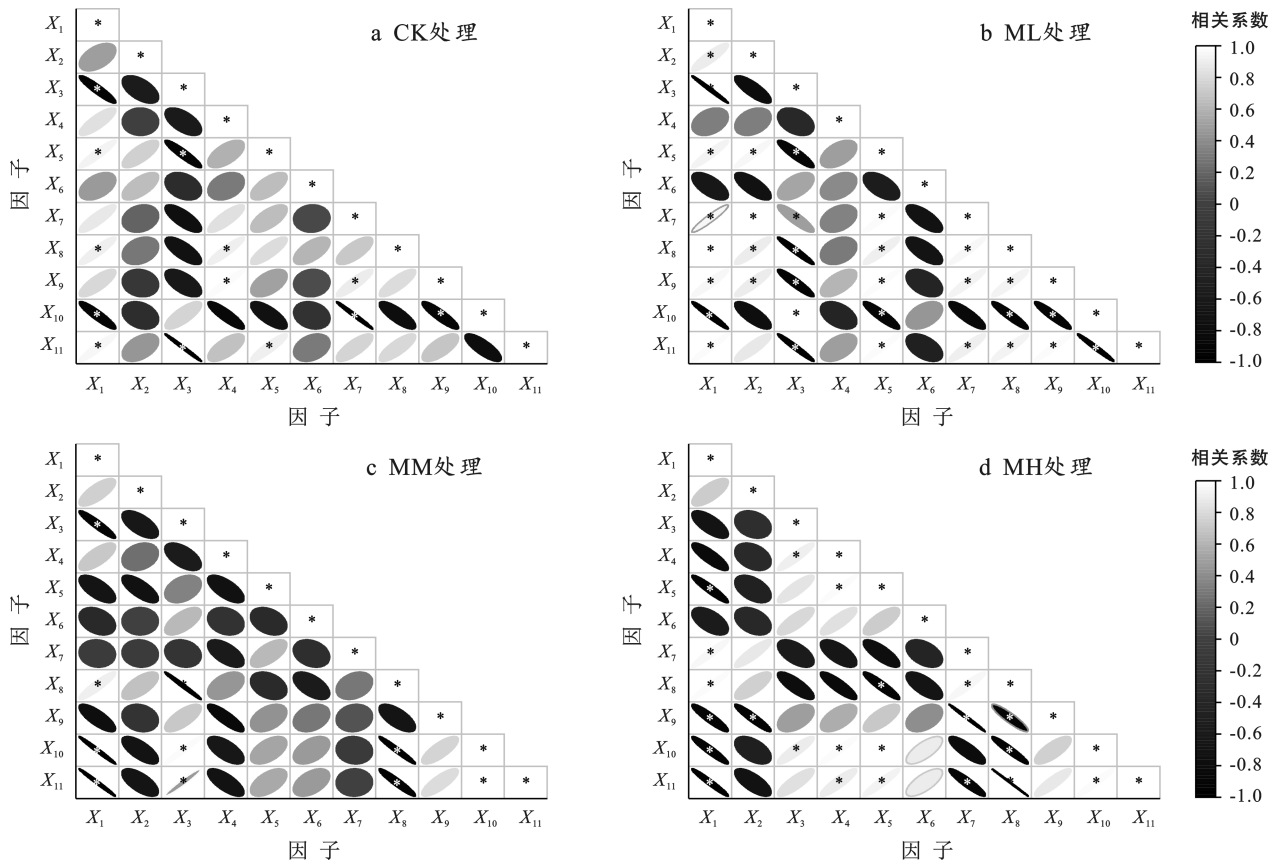
对3个公因子得分与黏聚力和内摩擦角做线性回归分析,回归方程为

$$c = -0.057F_1 + 0.973F_2 + 0.034F_3$$

$$(R^2 = 0.937, p < 0.01) \quad (2)$$

$$\varphi = -0.306F_1 + 0.770F_2 - 0.140F_3$$

$$(R^2 = 0.855, p < 0.01) \quad (3)$$



注:① $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}$ 分别表示黏聚力、内摩擦角、容重、总孔隙度、含水率、pH值、全氮、有机质、田间持水量、饱和持水量及毛管持水量。②*表示显著相关($p < 0.05$)。

图3 不同处理下渣土抗剪强度与理化指标相关关系

Fig.3 Correlation between shear strength and physicochemical indicators of waste soil under different treatments

表4 渣土理化性质指标因子分析

Table 4 Factor analysis of physical and chemical property indicators of waste soil

项目	公因子			公因子方差
	F_1	F_2	F_3	
X_3	-0.68	0.119	0.68	0.95
X_4	-0.844	0.098	-0.35	0.84
X_5	0.851	0.318	-0.21	0.87
X_6	0.713	0.596	0.29	0.95
X_7	-0.251	0.947	0.00	0.96
X_8	0.72	0.546	-0.06	0.82
X_9	0.982	-0.158	-0.04	0.99
X_{10}	0.965	-0.233	-0.04	0.99
X_{11}	0.970	-0.180	-0.07	0.98
特征值	5.851	1.805	0.685	
贡献率%	65.008	20.059	7.612	
累积贡献率%	65.008	85.067	92.679	

注: F_1, F_2, F_3 分别表示第一公因子、第二公因子、第三公因子。

F_1 公因子对渣土黏聚力及内摩擦角均为负影响, F_2 公因子对其均为正影响, F_3 公因子对黏聚力为正影响, 对内摩擦角为负影响。说明木纤维添加后

对渣土容重、有机质及持水能力等理化性质的改善效应, 主要是经过影响土体的黏聚力与内摩擦角这两个参数, 最终实现对渣土抗剪强度的提升。

表5 公因子与渣土黏聚力及内摩擦角相关性矩阵

Table 5 Correlation matrix of common factors with cohesion force and internal friction angle of waste soil

指标	F_1	F_2	F_3
黏聚力(c)	-0.072	0.971**	-0.05
内摩擦角(φ)	-0.316	0.787**	-0.204

注:*, **分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平显著相关。

3 讨论

3.1 木纤维添加对渣土抗剪强度的影响

木纤维通过物理、化学和生物作用的协同机制改变土体内部微观结构, 从而影响土体力学特性。朱锐等^[12]探究了木质素纤维对膨胀土的改良, 发现木纤维缠绕与孔隙填充, 使土体的抗拉性能改良效果得到显著增强。刘鑫等^[13]对纤维加筋黄土的直剪试验研究发现聚丙烯纤维的掺入可有效提高黄土抗

剪强度,其加固效果受到纤维长度及掺量的耦合影响。Tang等^[14]探究了聚丙烯纤维加筋土界面强度特性的影响因素,发现界面峰值强度和界面残余强度随掺量的增加而增大。

本试验研究表明,渣土抗剪强度随木纤维用量增多呈现出先增加后减小的变化趋势。在ML处理时,土粒间的孔隙相对减小,纤维与土体团聚作用得到增强,平均抗剪强度增大,为40.8 kPa;MM, MH处理时由于纤维含量过多使渣土抗剪强度均呈不同幅度减少,平均抗剪强度分别为31.14, 24.56 kPa。这与王浩等^[15]对黄原胶和木质素纤维改良粉砂土抗压强度特性及微观机理分析的研究结果相似,掺入木质素纤维后,粉砂土的抗压强度随之增加,但过量木纤维的加入会增加土体含水量,从而导致黏聚力发生改变,削弱其力学改良效果。李琦峰等^[16]探究了木质素纤维-MICP固化粉土在冻融作用下的力学性能,当纤维掺量为1.5%时,土体颗粒与其形成了更为致密的胶体结构,土体的力学强度显著增强,而掺量增加到2%时,对土体固化效果却起到相反作用。本研究中3%木纤维和6%木纤维添加后的平均抗剪强度分别为20.34和15.21 kPa,均小于1%木纤维添加下的值,为21.62 kPa。因此,低含量木纤维添加对促进渣土抗剪强度增强的效果最佳。

3.2 木纤维添加对渣土抗剪强度参数的影响

黏聚力主要是由土粒间分子引力所形成的原始黏聚力及土中化合物胶结作用形成的固化黏聚力两部分组成,是土壤颗粒间引力和斥力综合作用的结果^[17]。内摩擦角则反映了土体内部各颗粒之间的摩擦力大小,包括土颗粒之间的滑动摩擦力和咬合力^[18]。

试验中不同处理下黏聚力及内摩擦角均随容重及含水率的升高呈先增加后减小的趋势,这与韦杰等^[19]研究结果一致。随土壤容重增大,土体颗粒间距离更近、接触更紧密,黏聚力随之增加,但当木纤维添加量为3%~6%时,过多木纤维与土壤相互融合,土体处于相对松散状态时,孔隙比较大,土颗粒间的水分大多以自由水存在,随含水率增加,孔隙比逐渐减小,部分自由水转化为弱结合水,使得土颗粒周围水分子对其产生牵引作用,并减弱水膜的润滑作用,进而使黏聚力有所升高。但随土体内部含水率超过一定限度时,土粒周围水膜厚度增大,润滑作用大于牵引作用,土体颗粒间的范德华力和静电力减小,土体间相互作用变小,致使黏聚力随之降低,此时较小的孔隙度导致土壤颗粒间滑动摩擦力小,最终使相对松散状态下的土壤内摩擦角减小。这说

明木纤维的掺入改变了渣土的孔隙度、容重及含水率等物理性质,进而影响黏聚力及内摩擦角。

3.3 木纤维添加下渣土抗剪强度的影响因素分析

土壤的抗剪强度是由一系列土壤特性决定的,不仅受土壤颗粒间的黏性及摩擦力影响,还受土粒密度及垂直应力等多种因素的综合影响。从直剪试验结果得知,木纤维添加下的土壤黏聚力及内摩擦角与全氮呈显著正相关关系($p < 0.05$)。渣土中全氮含量增加通常伴随有机质积累,其矿化分解后释放出的分泌物胶结土粒,改善了土体结构,增加了土体通气性及透水性,增强了土体颗粒间的结合程度,进而提高颗粒间的摩擦咬合力,增强其渣土抗剪强度。Yildiz等^[20]总结了前人的研究结果,认为土壤中植物分泌的养分含量对土体结构会产生一定的影响。

在本研究中,容重的作用效果与王林浩等^[21]的研究结果存在相似之处,抗剪强度在一定条件下随容重的增加而增加。水分条件亦是导致土壤抗剪强度变化的重要触发因素,抗剪强度在特定含水量下可达到峰值^[22],后逐渐趋于稳定。武明娟等^[23]研究了余泥渣体的剪切强度变化规律,得出抗剪强度与含水率呈现出负相关关系,黏聚力随含水率的增加不断减小,内摩擦角随着密实度的增加而增大;张昊天等^[24]通过室内大型直剪试验发现碎石土剪切应力峰值随含水率的增加而降低,随干密度的增加而增加;Fan等^[25]研究发现相同的结论,土体抗剪强度随含水率增加呈现下降的趋势。本研究中ML处理时抗剪强度最大,MH处理时抗剪强度显著减小,正是因为过多水分导致水膜增厚,削弱了颗粒与颗粒间的直接摩擦接触,降低了表面粗糙度,使内摩擦角减小。而高含水会让土体趋于流塑状态,密实度降低,孔隙比增大,促使颗粒间电分子引力减弱,原始黏聚力减小,降低了土体抗剪强度,进而导致随木纤维含量增加,抗剪强度呈现先增加后减小的变化趋势。土壤酸碱度及养分对抗剪强度也有一定影响,本研究发现pH值增加后抗剪强度减小,这与朱春鹏等^[26]的研究结果存在差异,可能是因为随木纤维含量增加,水分含量过多导致抗剪强度变小,纤维的分解与土壤颗粒物质相互作用消耗有机酸,导致土壤中盐基离子相对增多,渣土碱性增强,pH值升高。综上所述,土体抗剪强度受容重及含水率等因素共同影响,说明施加木纤维后渣土性质及结构的变化,从而改变了土体之间力学机制。

4 结论

(1) 与CK试样相比,ML, MM和MH处理下的

渣土含水率、全氮及有机质均显著提升($p < 0.05$),而MM和MH处理下的田间持水量、饱和持水量及毛管持水量差异显著($p < 0.05$)。这说明木纤维通过影响渣土理化性质进而提高渣土抵抗剪切作用的能力。

(2) 随木纤维梯度增加,渣土黏聚力、内摩擦角均呈现先增加后减小的变化趋势,ML处理下的提升效果最好。表明本研究中1%木纤维梯度添加最有利于增强渣土抗剪强度,但针对实际工程应用中与土壤培养试验研究存在差异,需同时结合垂直应力等条件采用适用范围添加梯度。

(3) 对比CK处理,ML,MM及MH处理下的土壤黏聚力均与有机质呈显著($p < 0.05$)正相关关系,与容重呈显著负相关关系($p < 0.05$),不同含水率范围下土壤黏聚力及内摩擦角与各理化性质指标相关性不完全相同;因子分析综合表明, F_2 公因子对渣土黏聚力及内摩擦角均为显著正影响($p < 0.01$), F_1 公因子对渣土黏聚力及内摩擦角均为负影响,说明渣土容重、有机质、田间持水量、饱和持水量以及毛管持水量主要通过影响黏聚力及内摩擦角从而实现对抗剪强度的影响。

参考文献 (References)

- [1] 姬敏,伊佳雨,曹长林,等.建筑固废资源化处置技术的难点分析及提升策略[J].福建师范大学学报(自然科学版),2022,38(1):1-8.
Ji Min, Yi Jiayu, Cao Changlin, et al. Difficulty analyses and promotion strategies for construction waste resource disposal technology [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2022, 38(1): 1-8.
- [2] Fujiwara D, Tsujikawa N, Oshima T, et al. Estimation of resistance force at steady-state sinkage for cylindrical wheel-typed lunar/planetary exploration rovers with function of push-pull locomotion [J]. ROBOMECH Journal, 2020, 7(1): 1-13.
- [3] 欧阳淼,张红日,王桂尧,等.基于响应面法的生物基质改良膨胀土配比优化研究[J].岩土力学,2025,46(5): 1368-1378.
Ouyang Miao, Zhang Hongri, Wang Guiyao, et al. Optimization of the ratio of expansive soil improved by biological matrix based on response surface method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(5): 1368-1378.
- [4] Xu Ke, Yang Binbin, Wang Jianmin, et al. Improvement of mechanical properties of clay in landfill lines with biochar additive [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(13): 584.
- [5] Tamassoki S, Daud N N N, Jakarni F M, et al. Compressive and shear strengths of coir fibre reinforced activated carbon stabilised lateritic soil [J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9100.
- [6] Gruda N. The effect of wood fiber mulch on water retention, soil temperature and growth of vegetable plants [J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2008, 32 (4) : 629-643.
- [7] 孙佳俊.纤维加筋水泥固化渣土力学与耐久性能研究[D].广东广州:广州大学,2024.
Sun Jiajun. Research on the mechanics and durability of fiber reinforced cement solidified residual soil [D]. Guangzhou, Guangdong: Guangzhou University, 2024.
- [8] Abdi M R, Ghalandarzadeh A, Shafiei Chafi L. An investigation into the effects of lime on compressive and shear strength characteristics of fiber-reinforced clays [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(4): 885-898.
- [9] 张川,张玉镛,李淑芳,等.干湿交替下木纤维重构红壤的水力特性[J].农业工程学报,2023,39(8):103-110.
Zhang Chuan, Zhang Yukai, Li Shufang, et al. Hydraulic properties of the red soil with wood fiber reconstruction during dry-wet alternation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39 (8): 103-110.
- [10] 强娇娇,颜哲豪,湛芸,等.喀斯特区3种草篱根-土复合体抗剪性能及其影响因素[J].草业学报,2020,29 (12):27-37.
Qiang Jiaojiao, Yan Zhehao, Chen Yun, et al. Factors affecting the shear strength of root-soil complexes from three types of grass hedgerows in a karst area [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(12): 27-37.
- [11] Zhang Jianle, Shi Dongmei, Jin Huifang, et al. Characteristics of cultivated layer soil shear strength for sloping farmland in response to soil erosion in the Three Gorges reservoir area, China [J]. Catena, 2022, 215: 106304.
- [12] 朱锐,王燕杰,黄英豪,等.木质素纤维改良膨胀土的冻融特性及微观机理[J].农业工程学报,2024,40(2): 263-272.
Zhu Rui, Wang Yanjie, Huang Yinghao, et al. Freezing-thawing characteristics and microscopic mechanism of expansive soil treated with lignin fibers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 263-272.
- [13] 刘鑫,许伟能,黄光靖,等.考虑分布效应的纤维加筋黄土室内大型直剪试验研究[J].长江科学院院报,2025, 42(1):144-151.
Liu Xin, Xu Weineng, Huang Guangjing, et al. Large-scale indoor direct shear test on fiber-reinforced loess in consideration of distribution effect [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42 (1): 144-151.

- [14] Tang Chaosheng, Shi Bin, Zhao Lizheng. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010,28(1):54-62.
- [15] 王浩,付德伟,郭剑波,等.黄原胶和木质素纤维改良粉砂土抗压强度特性及微观机理分析[J].*科学技术与工程*,2025,25(4):1602-1612.
Wang Hao, Fu Dewei, Guo Jianbo, et al. Analysis of compressive strength characteristics and microscopic mechanism of silty soil improved by xanthan gum and lignin fiber [J]. *Science Technology and Engineering*, 2025,25(4):1602-1612.
- [16] 李琦峰,邢峥光,党冰,等.木质素纤维-MICP固化粉土在冻融循环作用下的力学性能研究[J].*冰川冻土*, 2024,46(6):1828-1838.
Li Qifeng, Xing Zhengguang, Dang Bing, et al. Study on the mechanical properties of lignin fiber-MICP solidified silt under freezing and thawing cycles [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024,46(6):1828-1838.
- [17] 李涛,吕春娟,姜成刚,等.含水率和聚丙烯酰胺分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响[J].*水土保持通报*, 2022,42(2):89-97.
Li Tao, Lyu Chunjuan, Jiang Chenggang, et al. Effects of water content and polyacrylamide molecular weight on shear strength of reconstructed iron tailing sand [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(2):89-97.
- [18] 张健乐,史东梅,刘义,等.土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J].*水土保持学报*,2020,34(3):162-167.
Zhang Jianle, Shi Dongmei, Liu Yi, et al. Effects of soil bulk density and water content on shear strength of cultivated-layer in purple soil sloping farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(3):162-167.
- [19] 韦杰,史炳林,李进林.紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J].*农业工程学报*,2016,32(20):153-160.
Wei Jie, Shi Binglin, Li Jinlin. Response of soil shear strength to soil water content in purple soil slope cropland bunds [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(20):153-160.
- [20] Yildiz A, Graf F, Rickli C, et al. Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus [J]. *Catena*, 2018,166:98-113.
- [21] 王林浩,白晓红,冯俊琴.压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J].*岩土工程学报*,2010,32(增刊2):132-135.
Wang Linhao, Bai Xiaohong, Feng Junqin. Discussion on shearing strength influencing factors of compacted loess-like backfill [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010,32(Suppl.2):132-135.
- [22] Fasinmirin J T, Olorunfemi I E, Olakuleyin F. Strength and hydraulics characteristics variations within a tropical Alfisol in southwestern Nigeria under different land use management [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,182:45-56.
- [23] 武明娟,屈川翔,熊志为,等.深圳地区余泥渣土强度参数的影响因素研究[J].*安全与环境工程*,2020,27(5):165-176.
Wu Mingjuan, Qu Chuanxiang, Xiong Zhiwei, et al. Study on influencing factors of residual soil shear strength parameters in Shenzhen area [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020,27(5):165-176.
- [24] 张昊天,王新刚,罗力,等.秦巴山区典型碎石土抗剪强度变化规律及其在堆积层滑坡机理分析中的应用[J].*中国地质灾害与防治学报*,2024,35(5):50-58.
Zhang Haotian, Wang Xingang, Luo Li, et al. Changing law of shear strength of typical gravel soil in Qinba Mountain area and its application in the analysis of landslide mechanism in accumulation layers [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024,35(5):50-58.
- [25] Fan C C, Su C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content [J]. *Ecological Engineering*, 2008,33(2):157-166.
- [26] 朱春鹏,刘汉龙,沈扬.酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J].*岩土工程学报*,2011,33(7):1146-1152.
Zhu Chunpeng, Liu Hanlong, Shen Yang. Laboratory tests on shear strength properties of soil polluted by acid and alkali [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011,33(7):1146-1152.