

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.006.

展鹏, 张超波, 张强, 等. 干湿交替下苜蓿根系对黄土抗剪力学性能影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 222-230.

Zhan Peng, Zhang Chaobo, Zhang Qiang, et al. Effects of Alfalfa Roots on the Shear Properties of Loess Under Alternate Drying-Wetting Conditions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 222-230.

干湿交替下苜蓿根系对黄土抗剪力学性能影响

展鹏, 张超波, 张强, 冯潇慧, 丁阳, 蒋静

(太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: [目的]探究干湿交替下植物根系对黄土抗剪性能的影响,为常年处于干湿交替状态下的黄土区生态建设和工程建设提供理论基础。[方法]以黄土区典型草本植物苜蓿为研究对象,采用室内直剪试验,研究黄土抗剪特性与干湿交替作用、根系尺寸(根长、根径)、土体容重、含水率等影响因素的关系,并基于 Wu 模型评估了根系对土体抗剪特性的增强作用。[结果]经历干湿交替后的根土复合体表面变得粗糙、松散、易脱落,并出现不均匀裂隙,而且其抗剪性能指标均呈降低趋势。干湿交替下,根系尺寸显著影响根土复合体抗剪特性,根长越长,根径越大,其抗剪强度越大。在一定范围内,黏聚力、内摩擦角与土体容重呈正相关关系。不同容重的根土复合体,经历干湿交替作用后,其黏聚力、内摩擦角均降低。相同干湿交替作用下,黏聚力随着含水率的增加呈先增加再降低的趋势;相同含水率水平下,进行干湿交替土体抗剪强度指标均弱于原状土体。Wu 模型的局限性导致模型估算根系附加黏聚力结果与实际值相差较大,可以采用根系抗拔强度替换根系抗拉强度,优化 Wu 模型对根系附加黏聚力的估算结果。[结论]干湿交替下,植物根系尺寸、土壤容重与土壤含水率都对黄土抗剪性能有一定影响。

关键词: 干湿交替; 根土复合体; 抗剪强度; Wu 模型; 根黏聚力

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0222-09

Effects of Alfalfa Roots on the Shear Properties of Loess Under Alternate Drying-Wetting Conditions

Zhan Peng, Zhang Chaobo, Zhang Qiang, Feng Xiaohui, Ding Yang, Jiang Jing

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the influence of plant roots on shear properties of loess under alternate drying-wetting conditions and provide a theoretical basis for the ecological construction and engineering construction in the loess region under the state of alternate drying-wetting. [Methods] Direct shear test in laboratory was conducted on loess samples with/without alfalfa roots to study the relationship between shear properties of loess and influencing factors including alternate drying-wetting, root size (root length, root diameter), soil bulk density and water content, and to evaluate the reinforcement of roots on shear resistance of loess based on the Wu model. [Results] The surface of root-soil composite became rough, loose and easy to fall off after alternate drying-wetting, and uneven cracks appeared. The shear indexes of the composite decreased after alternate drying-wetting. Root size significantly affected the shear behavior of root-soil composite under alternate drying-wetting conditions. Longer and larger roots resulted in greater soil shear strength. Soil cohesion and internal friction angle were positively correlated with soil bulk density in a certain range, and they decreased after alternate drying-wetting. Under the same alternate drying-wetting condition, the cohesion first increased and then decreased with soil water content. At the same level of soil

收稿日期: 2022-08-25

修回日期: 2022-09-19

资助项目: 山西省基础研究计划项目(20210302123105); 山西省回国留学人员科研资助项目(2020-054)

第一作者: 展鹏(1999—), 男, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 研究方向为生态水利工程。E-mail: 1906529398@qq.com

通信作者: 张超波(1984—), 男, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 主要从事流域生态修复和边坡保护工程研究。E-mail: zhangchaobo@tyut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

water content, shear strength was weaker in soil under alternate drying-wetting than in soil without alternate drying-wetting. The limitations of the Wu model led to the relatively wide difference between the results by the model and the values by the shear tests. The estimation results of root cohesion by Wu model could be optimized by replacing root tensile strength with root pullout strength. [Conclusion] Under alternate drying-wetting conditions, the size of plant roots, soil bulk density, and soil moisture content all have a certain impact on the shear resistance of loess.

Keywords: alternate drying-wetting; root-soil composite; shear strength; Wu model; root cohesion

黄土区土地以丘陵山地为主^[1],存在农业单一经营、广种薄收、粗放耕作等问题,同时,乱垦滥挖现象较为严重,形成了“越垦越穷,越穷越垦”的恶性循环。目前,黄土区水土流失存在面积广,强度大,速度快的特点,造成部分区域千沟万壑、光山秃岭的景象^[2]。水土保持措施主要有植物措施、工程措施以及植物与工程相结合措施。植物措施是目前提高边坡稳定性,防治水土流失最基础、高效的办法^[3],不仅施工便利、造价成本低,而且具有生态调节作用及绿化观赏价值。

植物保持水土的作用主要分为水文效应与力学效应。植物通过地上茎叶部分削弱雨水冲刷,地下根系部分通过自身抗拉力以及根土间的摩擦锚固作用,与土体紧密粘结,对土体进行加筋,使其抗剪性能得以提升,地上地下作用相结合,可提高边坡整体稳定性^[4]。植物根系在固土护坡方面的作用已得到许多学者的关注与认可^[5]。根系力学固土作用是其提升土体剪切强度,实现水土保持作用最主要的原因^[6]。然而,黄土具有孔隙大、遇水易湿陷等性质,使得黄土内部结构易发生破坏^[7]。在降雨、蒸发和地下水位的升降作用下,黄土会处于干湿交替状态。干湿交替影响土壤渗透性和抗剪性能^[8]。已有学者在干湿交替对土体抗剪特性影响方面进行了初步探究^[9-11]。Mao等^[12]通过量化干湿交替前后压实黄土的物理及力学特性发现,土体经历一定干湿交替次数后,其孔隙增加、孔隙比升高、干密度及抗剪强度有所下降。付理想等^[13]通过分析对比原状黄土与重塑黄土在干湿交替条件下其渗透特性变化规律,发现两种状态的黄土在干湿交替作用下其孔隙结构均发生变化,土体渗透特性也随之改变。刘宏泰等^[14]选择重塑黄土进行室内三轴压缩试验,研究发现重塑黄土抗剪强度、黏聚力、内摩擦角在经历首次干湿交替作用后降幅最大,且均与干湿交替次数呈负相关关系。但是,目前缺乏干湿交替循环状态下根系对土体抗剪力学效应影响规律的研究。

植物根系固土的力学效应受多种因素影响,分析量化根系对土体力学性能影响是植物护坡方向研究的重点难点。Wu等^[15]基于库伦理论建立了最初的

根系固土力学模型;随后 Pollen 等^[16]把根系断裂视为一个动态过程,并基于此建立纤维素模型;在此基础上 Schwarz 等^[17]考虑根系拉伸应力应变关系发展了纤维增强模型;此外还有以土体剪切位移为基础建立的强度模型^[18]以及考虑根-土界面粘结效应的根土复合体抗剪强度极限估算模型^[19]。这些模型对根系和土体相互作用机理进行了深入探究,但由于模型参数的复杂性,其应用在工程实践及数值计算中难以实现,因此 Wu 模型仍是当前适用性最广的根系固土模型,但在实际应用中应对 Wu 模型中参数进行修正^[20-22]。

针对以上情况,本试验以黄土区典型草本植物苜蓿根系为研究对象,采用室内直剪试验,研究干湿交替条件下根系对黄土抗剪力学性能的影响,分析抗剪特性与干湿交替作用、根系尺寸、土体容重与土体含水率等影响因素的关系,并结合 Wu 模型评估根系对土体抗剪特性的增强作用,研究结果对干湿交替下根土间受力关系和边坡稳定性研究及评估具有重要意义,可为处于干湿交替状态下的黄土区生态建设和工程建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区太原市位于山西省中部地区及晋中盆地北部地区,平均海拔约 800 m,地理坐标为北纬 37°27′—38°25′,东经 111°30′—113°09′。太原市为暖温带大陆性季风气候。夏季湿热多雨,冬季干冷漫长,春季升温急剧,秋季降温迅速,春秋两季短暂多风,干湿季节分明。年平均气温 9.5℃,1 月平均 -6.5℃,7 月平均 21.5℃。降雨主要集中在 7—9 月,年平均降水量约为 470 mm。

1.2 样品采集与制备

1.2.1 根系采集 在试验区内选取生长周期 3 个月,长势良好的苜蓿植株。采用水冲法开挖苜蓿根系并进行根系形态调查。利用中晶 ScanMaker i800 plus 扫描仪和 LA-S 系列植物根系分析仪(杭州万深检测科技有限公司),扫描根系形态,得出根系直径、根系长度等数据。将采集的苜蓿根系冷藏于 -4℃ 的冰箱内以保证根系的鲜活性与完整性,便于后期室内

直剪试验、单根拉伸试验以及单根拉拔试验的进行。

1.2.2 土样采集 试验所用土样取自山西省太原市。用容积为 100 cm³ (底面积 20 cm², 高度 5 cm) 的环刀按品字形分布采集距表面 20 cm 左右深度处的原状土壤, 挖取足量原状土壤, 密封带回室内风干并碾碎, 过 2 mm 筛待用, 风干后的土样一部分用于直剪试验, 另一部分用于测定土壤理化基本性质。经测定土样类型为砂质壤土。

1.2.3 重塑土的制备 选取完整无损的根系修剪成所需长度备用; 将土样分层装入试验盒内, 当土样压至第二层后放置根系, 共填 4~5 层 (根据设计的试验水平控制试样容重与含水率), 并用试验机以 50 mm/min 速度压实, 每层之间进行抛毛; 为了使根系与土体更好地粘结, 将试样静置 24 h 后进行试验。

1.3 室内直剪试验

干湿交替下室内直剪试验主要研究根系尺寸 (根径和根长)、土体容重及土壤含水率等因素在干湿交替下对含根土体抗剪特性的影响。根据以往研究显示, 根系尺寸、容重对土壤抗剪强度均为单调影响^[23-25], 因此本试验在 363 个样本数的基础上, 设置根系直径 3 个水平: 小于 0.5 mm, 0.5~1.0 mm, 大于 1.0 mm, 分别编组 D_1, D_2, D_3 ; 根系长度 3 个水平: 40, 60, 80 mm, 分别编组 L_1, L_2, L_3 ; 土体容重 3 个水平: $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ (1.2, 1.3, 1.4 g/cm³) (研究区野外实测土体容重范围为 1.15~1.4 g/cm³); 土体含水率设定采用含水率饱和度 (含水率饱和度是指通过试验测量出各容重土体饱和质量含水率, 以此含水率饱和度为 100%, 根据土体容重选取饱和度按 8% 阶梯递减变化控制水平的变化量), 控制 4 个水平 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ (24%, 32%, 40%, 48%)。根据以往研究显示, 干湿交替一次对土体抗剪强度影响最大^[8, 14, 26], 且本试验为突出干湿交替条件下各因素对黄土抗剪强度影响, 因此本试验设置干湿交替两个水平: 0 次、1 次。

本试验干湿交替过程是通过浸泡增湿, 烘箱减湿的方法来实现。将试样浸泡至饱和含水率, 时间为 3~4 h, 此过程为一次增湿过程; 将吸水饱和的试样放入托盘内, 置于设定温度为 40℃ 烘箱内, 烘干至初始含水率状态, 时间为 6~10 h, 此为一次减湿过程。至此, 完成一次干湿交替过程。将完成干湿交替的试样垂直放入直剪仪, 然后将垂直应力分别为 0, 0.75, 1.5, 2.25 kPa 所对应的砝码放于土体顶部, 进行有附加应力的剪切试验。启动电推杆使其以 3 mm/s 的速度匀速推动剪切盒至土体发生完全剪切破坏, 剪切盒上部与下部完全分离视为剪切过程结束, 并记录其抗剪强度数据。

土抗剪强度是指土体抵抗剪切破坏的极限强度^[27]。其抗剪强度计算公式为:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: τ 为含根土体或素土抗剪强度 (kPa); F 为水平推力 (N); A 为剪切截面积 (mm²)。

1.4 Wu 模型

本文以 Wu 模型为理论依据, 按下式计算苜蓿根土复合体的根系附加黏聚力值 (C_r):

$$C_r = k T_r \frac{A_r}{A_s} \quad (2)$$

式中: k 取值 1.2; T_r 为根系抗拉强度; $\frac{A_r}{A_s}$ 为根面积比。

通过对比根系抗拉强度与抗拔强度, 探讨其合理性, 再与试验实测根系附加黏聚力值对比, 提出 Wu 模型优化建议。

1.5 单根拉伸试验

室内单根拉伸试验研究最大抗拉力和极限抗拉强度与直径的变化规律, 试验得出的平均抗拉强度用于根系固土模型预测。试验中对苜蓿根系采用 50 mm/min 匀速加载速率, 标距设定 50 mm。选取优良根样, 除去须根, 选取长度均为 10 cm 的根系试样。测量单根直径。使用 SH-20 艾德堡数显式推拉力计 (量程为 20 N, 分度值为 0.01 N, 精度 $\pm 0.5\%$) 并调整电动立式单柱测试机至设定标距, 固定根系。进行拉伸试验。选取正常拉断数据记录其抗拉力。

1.6 单根拉拔试验

室内单根拉拔试验研究根系直径与抗拔强度特性关系。选取长度为 10 cm、根径均匀的根系, 设定土体容重 1.3 g/cm³, 土体含水率 32%, 试样根径为范围 0.31~0.73 mm。试验所得苜蓿抗拔强度用于 Wu 模型估算根系附加黏聚力中。测量单根直径, 将其埋入土体。制备完成的含根土体试样静置 3 h 以保证根系与土体更好地粘结。使用 SH-20 艾德堡数显式推拉力计以 50 mm/min 的恒定加载速度进行拉拔试验, 测得其最大抗拔力。

1.7 数据分析

本文采用 SPSS 26 软件进行显著性水平检验和双因素方差分析, 分析影响黄土抗剪力性能指标各因素水平的作用差异。通过 Excel 绘制图表, 图中标注的不同小写字母代表各因素不同水平下抗剪强度指标的显著性差异 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 干湿交替下土样直剪试验破坏形态

未干湿交替与干湿交替一次后, 容重 1.3 g/cm³

素土与含根土试样,在含水率为 32%时完成直剪试验的表观形态存在一定差异。未干湿交替素土试样剪切后,土体完整,表面平整密实,无孔隙裂纹出现;干湿交替一次后,素土试样表面出现碎屑,并产生较小孔隙或裂纹;相同含水率和容重的含根土试样,未经历干湿交替试样表面平整密实,无孔隙裂缝;干湿交替一次后,土体表面开始脱落,出现明显孔隙;与素土相对比,经历干湿交替的根土复合体形态完整度明显优于素土,由此可见,干湿交替下,根系具有一定的加筋固土作用。

2.2 干湿交替下含根黄土抗剪力学性能与根系尺寸的关系

试验发现,干湿交替及根系尺寸对黄土最大抗剪强度的影响极显著($p<0.01$)(表 1)。含根土体最大抗剪强度与根径、根长成正比,根径越大、根系越长其抗剪强度越大(图 1)。并且,根径和干湿交替对抗剪强度的交互影响极显著($p<0.01$),而根长和干湿交替对抗剪强度的交互影响不显著($p>0.05$)。对于不同级别的根径含根组来说,干湿交替一次后,含根土体抗剪强度显著低于未干湿交替土体($p<0.01$)。

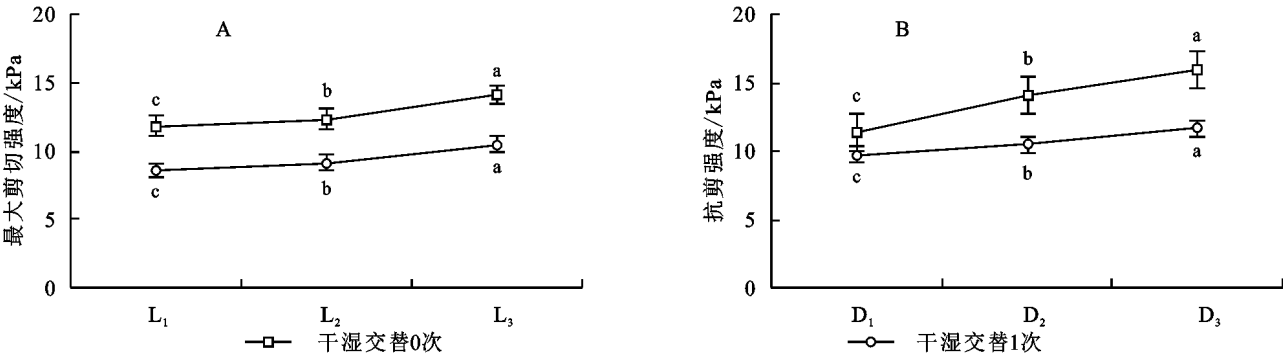


图 1 干湿交替下黄土抗剪强度与根系长度(A)和根系直径(B)的关系

Fig. 1 Relationships between loess shear strength and root length (A) and root diameter (B) under alternate wetting and drying

2.3 干湿交替下含根黄土抗剪力学性能与土壤容重关系

试验发现,干湿交替和容重对黄土抗剪强度影响极显著($p<0.01$)。并且,干湿交替和容重对土体抗剪强度的交互影响显著($p<0.05$)(表 2)。黏聚力、内摩擦角和抗剪强度均与容重呈正相关关系,土体容重越大,其黏聚力越大,根系附加黏聚力越大,内摩擦角和抗剪强度也越大(图 2)。但随着干湿交替作用的影响,土体黏聚力、内摩擦角和抗剪强度又均发生不同程度的劣化,其主要原因为土体在增湿过程中,土体颗粒间大小及间距改变及其联结作用被破坏,导致其黏聚力强度劣化,抗剪强度减弱。而干燥减湿过程又使土体基质吸力增大,土体经历吸湿膨胀与脱水收缩变形,其孔隙数量不断增加,使土体内摩擦角在

D_1 干湿交替一次后,最大抗剪强度由 11.34 kPa 减少到 9.71 kPa,降幅为 14.31%。但 D_1 最大抗剪强度降幅远小于 D_2 (25.85%)与 D_3 (26.85%)组含根土体;可以看出,干湿交替作用对含细根土体的劣化程度较小。由此可以推测,干湿交替下,细根根系固土效果优于中、粗根根系固土效果。干湿交替下,根长对土体抗剪强度也有显著影响($p<0.01$)。不同根长下含根土体最大抗剪强度差异显著,且根系越长抗剪强度越大。在干湿交替下, L_1 最大抗剪强度显著小于 L_2 , L_3 ,说明中长根根系固土效果优于短根根系。

表 1 根系尺寸与抗剪强度方差分析

Table 1 Analysis of variance between root size and shear strength

	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性
根系直径	41.756	2	20.878	170.712	<0.01
干湿交替	59.756	1	59.756	488.605	<0.01
根系直径*干湿交替	7.35	2	3.675	30.051	<0.01
误差	2.201	18	0.122		
根系长度	18.863	2	9.431	228.846	<0.01
干湿交替	68.04	1	68.04	1650.964	<0.01
根系长度*干湿交替	0.237	2	0.119	2.878	>0.05
误差	0.742	18	0.041		

干湿交替作用下整体劣化。但劣化程度远小于黏聚力,可见干湿交替作用对抗剪强度的影响主要为影响其黏聚力,而对内摩擦角影响较小。且与无根组对比发现,有无干湿交替影响,含根土体的黏聚力、内摩擦角和抗剪强度均大于无根土体。说明根系的存在能增强土壤黏聚力,并且增加土体的内摩擦角,从而提高边坡稳定性。

表 2 容重与抗剪强度方差分析

Table 2 Analysis of variance of bulk density and shear strength

项目	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性
干湿交替	45.019	1	45.019	122.463	<0.01
容重	18.208	2	9.104	24.765	<0.01
干湿交替*容重	2.381	2	1.191	3.239	<0.05
误差	24.263	66	0.368		

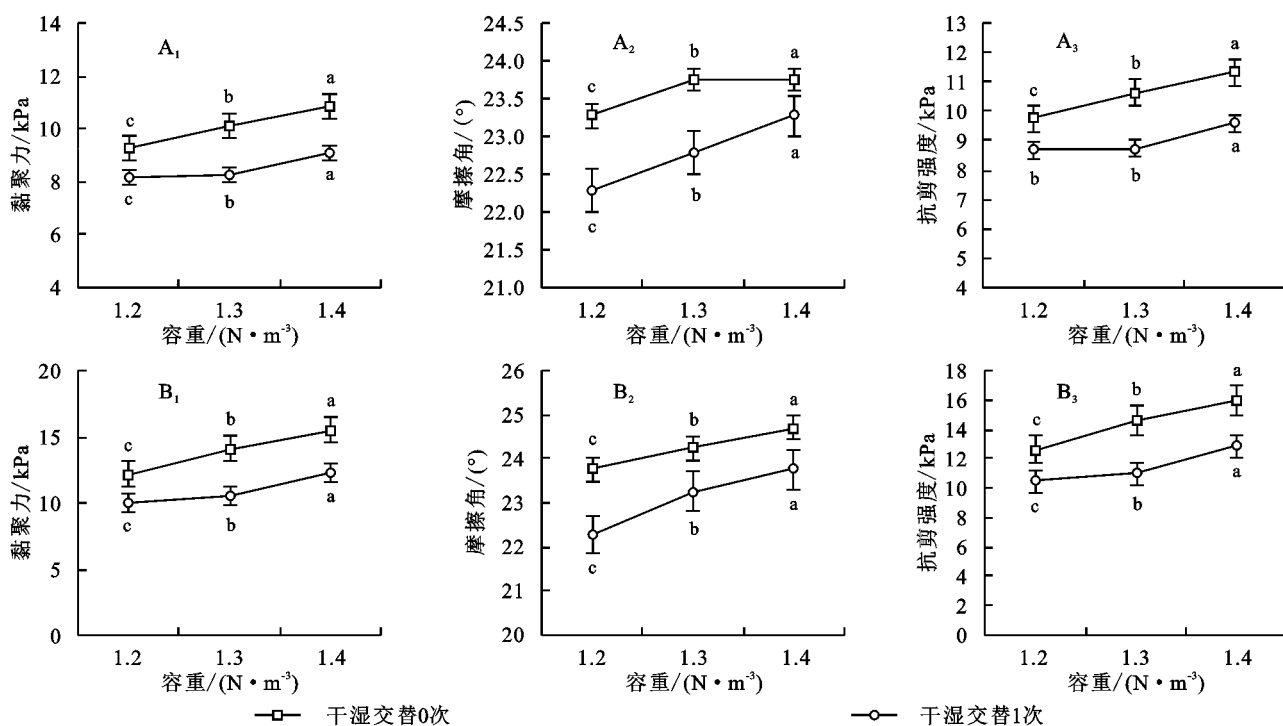


图2 干湿交替下黄土黏聚力、内摩擦角、抗剪强度与容重的关系(A 无根组;B 含根组)

Fig. 2 Relationships between cohesion, internal friction angle, shear strength and soil bulk density of loess under alternate wetting and drying (A. group without root; B. group with root)

未干湿交替时,各容重含根土体黏聚力分别为 12.14, 14.12, 15.48 kPa, 无根组黏聚力分别为 9.25, 10.12, 10.84 kPa。含根土体经历干湿交替后,各容重土体黏聚力分别为 9.98, 10.47, 12.33 kPa, 显著低于未干湿交替的土体($p < 0.01$),但仍大于无根土体黏聚力。未经干湿交替的各容重含根土体试样内摩擦角分别为 23.75° , 24.23° , 24.70° , 无根组内摩擦角为 23.27° , 23.75° , 23.76° , 干湿交替一次后,含根土和无根土内摩擦角均减小,但下降幅度远小于黏聚力,且含根土体内摩擦角仍大于无根土体。未干湿交替的各容重含根土体抗剪强度分别为 12.64, 14.63, 15.99 kPa, 无根土体抗剪强度为 9.77, 10.63, 11.33 kPa, 含根土体抗剪强度显著大于无根土体。干湿交替一次后,含根土体抗剪强度降低到 10.45, 10.95, 12.83 kPa, 无根土体抗剪强度也同样降低,但含根土体抗剪强度仍大于无根土体。

2.4 干湿交替下含根黄土抗剪力性能与土壤含水率关系

试验发现,干湿交替及含水率对含根土体抗剪强度影响极显著($p < 0.01$)。并且,干湿交替和含水率对含根土体抗剪强度的交互影响也极显著($p < 0.01$) (表3)。相同干湿交替次数下,抗剪强度和黏聚力均随含水率的增加呈先增加后降低的趋势。试验过程中,抗剪强度和黏聚力在含水率为 ω_2 时达到最佳;

干湿交替后,抗剪强度和黏聚力明显衰减,不同含水率含根组减幅分别为 27.31%, 25.85%, 24.96%, 24.13%, 初始含水率饱和度越低,干湿循环幅度越大,导致干湿交替一次后抗剪强度和黏聚力降幅越大。而内摩擦角随含水率的增加大体呈降低趋势。并且在相同含水率条件下,未经干湿交替作用的含根土体内摩擦角显著大于干湿交替后的含根土体(图3)。内摩擦角在干湿交替作用下明显劣化,同时饱和度 24% 和 32% 间土体内摩擦角差异不显著,32% 与 40% 间也未发现显著性差异,但饱和度为 48% 时根土复合体内摩擦角显著降低,在饱和度为 24%, 40% 与 48% 间,发现显著性差异。究其原因可能是含水率对内摩擦角的影响无确定规律,不同试验条件、根系条件、土体性状导致试验结果各异。

表3 含水率与抗剪强度方差分析

Table 3 Analysis of variance between soil moisture content and soil shear strength

项目	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性
土体含水率	37.614	3	12.538	377.617	< 0.01
干湿交替	76.107	1	76.107	2292.162	< 0.01
含水率 * 干湿交替	7.633	3	2.544	76.628	< 0.01
误差	0.797	24	0.033		

2.5 根黏聚力估算与 Wu 模型优化

室内拉伸试验研究苜蓿根系不同根径范围内根

系抗拉力学特性。试验表明,随根径的增加,根系最大抗拉力增加,平均最大抗拉力 10.04 N;抗拉强度与根径呈负相关关系,平均抗拉强度 113.09 MPa(图 4)。抗拉特性与根径拟合为幂函数回归方程为:抗拉力 $F=28.445D^{1.1064}$, $R^2=0.4181$, $p<0.05$;抗拉强度 $P=36.217D^{-0.894}$, $R^2=0.3191$, $p<0.05$ 。

室内拉拔试验试样根系平均直径 0.56 mm,所有试样根系均拔出,无拔断。抗拔力随根径增加而呈幂函数增加($F=19.324D^{1.4346}$, $R^2=0.94$, $p<0.05$);抗拔强度随根径增加而呈幂函数减小($P=24.604D^{-0.565}$, $R^2=0.72$, $p<0.05$)。平均抗拔力 8.61 N,平均抗拔强度 35.21 MPa。

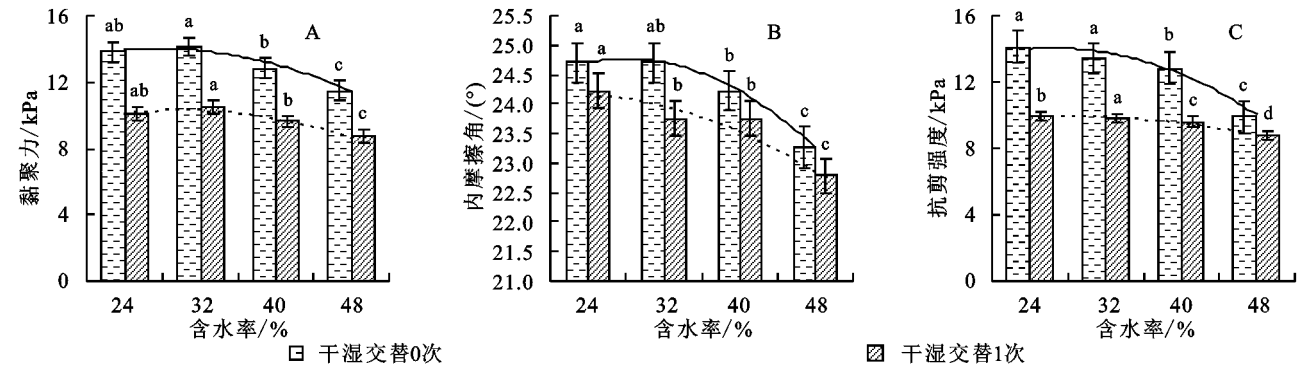


图 3 干湿交替下含根黄土黏聚力、内摩擦角、抗剪强度与土壤含水率关系

Fig. 3 Relationships between soil moisture content and cohesion, internal friction angle and shear strength of loess with roots under alternate drying-wetting conditions

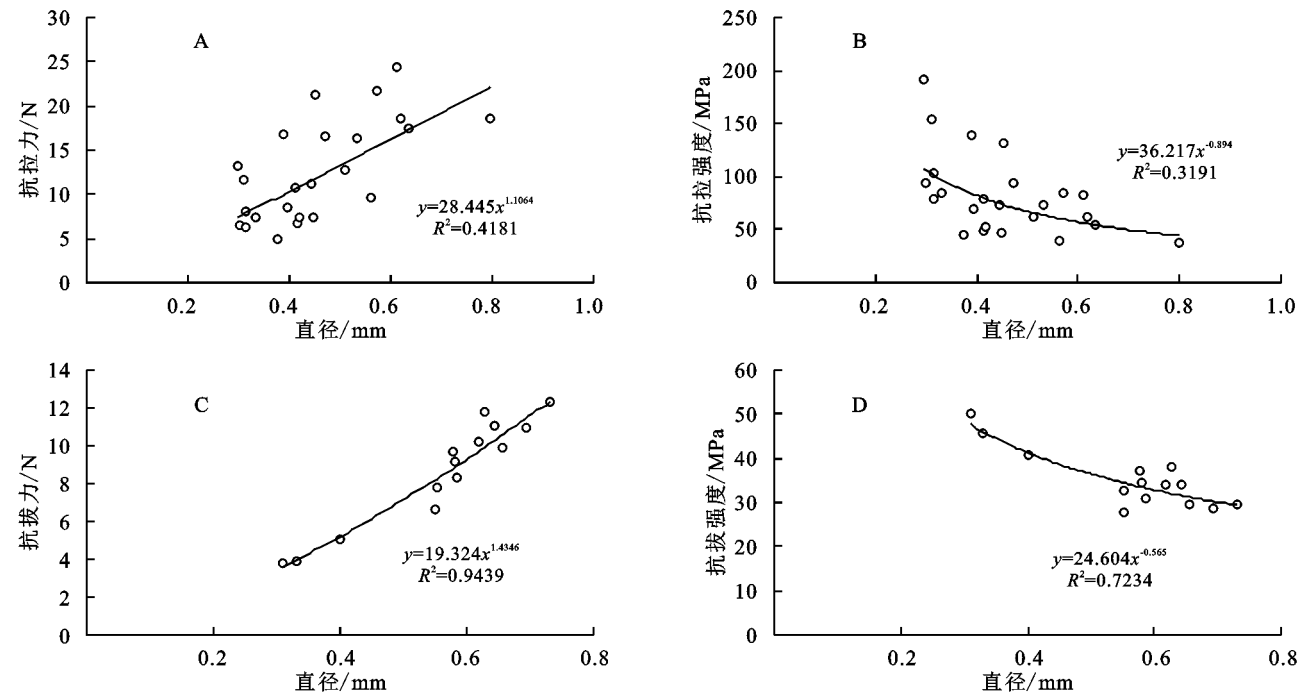


图 4 苜蓿根系抗拉特性、抗拔特性与根系直径关系

Fig. 4 Relationships between root tensile characteristics, root pullout characteristics and root diameter

在苜蓿根系自身抗拉性能及其抗拔特性研究基础上,分别采用单根抗拉强度与抗拔强度来计算根系所带来的固土效果,并与实际根系增强土体抗剪强度效应对比^[28]。本试验中测得,容重为 1.3 g/cm³,根径范围 0.5~1.0 mm、未干湿交替根系实际附加黏聚力仅 4.00 kPa。但是,若以在重塑土体条件下的苜蓿根系拉伸试验的结果[加权抗拉强度(T_r)80.96 MPa]为基础, W_u 模型计算公式得到根系理论附加黏聚力为

6.09 kPa,对植物根系的固土值高估达 52.25%,而在同样条件下以单根拉拔试验的结果[加权抗拔强度(T_p)34.00 MPa]为基础, W_u 模型理论根系附加黏聚力为 5.56 kPa,固土效果与实际值相差 39%,优化后模型拟合准确度提升了 13.25%。弥补了目前 W_u 模型仅基于土体剪切破坏时根系的拉伸断裂破坏进行考虑,未考虑根系拔出等破坏方式的缺陷。但由于本研究需控制根系尺寸以及土体含水率等以及试验

条件的局限,采用重塑土进行根系埋置的研究方法,无法完全模拟真实条件下根系与土体之间的粘结效应。因此,针对植物生长过程的固土效应仍需探索与研究。而且对于 Wu 模型的优化,应该充分考虑土体性质等其他因素以及它们之间的相互作用,才能更好地提高其模拟精确度。

3 讨论

土体抗剪强度主要与土体类型、粒径级配、容重、含水率等有关因素相关^[29];而含根土体中植物根系所附加的抗剪强度,则主要与根系类型、根面积比、根长密度、根系拉伸特性等有关^[30]。由此可见,影响根土复合体抗剪强度的因素众多,余冬梅等^[23]通过灰色关联法评价后发现,与含水率、根重密度、根长密度相比,容重对其影响程度最大。干湿交替作用会影响土体结构、对其容重等也有一定影响,二者效应交互,导致其抗剪强度变化。

本试验研究发现根土复合体在干湿交替作用下,吸水膨胀脱水收缩变形,土体颗粒大小及间距改变,联结作用被破坏,导致其表面变得粗糙、松散、易脱落,并出现不均匀裂隙。且随着干湿交替作用的影响,土体黏聚力、内摩擦角和抗剪强度均发生不同程度的劣化,这与曾召田等^[26]的研究结果一致;干湿交替下,根系尺寸显著影响根土复合体抗剪特性,根长越长、根径越大,其抗剪强度越大。且在干湿交替作用下,细长根根系固土效果优于粗短根根系固土效果。这与杨路等^[24]的研究结果一致;这主要是因为细根与土壤颗粒更能充分接触,在剪切时可以产生更大的摩擦力,并且细根也具有更强的柔韧性^[25]。试验发现,含水率与干湿交替作用显著影响含根土体抗剪特性。相同干湿交替次数下,抗剪强度随含水率的增加,呈先增加再降低趋势;初始含水率越低,干湿循环幅度越大,导致干湿交替后黏聚力和抗剪强度降幅越大,这与甘凤玲等^[31]的研究结果一致。但含水率波动对含根土体内摩擦角影响无确定规律。

为进一步研究植物根系在干湿交替作用下对土壤抗剪性能影响,以及对 Wu 模型的改进展开更深入的研究,在未来的研究中需进一步探究不同干湿交替次数对黄土抗剪强度的影响,不同种类植物根系含根原状土体在干湿交替下根系的力学性能规律,并且在 Wu 模型的基础上,探寻出适用于不同破坏条件下的根系固土模型。并且需考虑到植物的种植方法、种植密度以及不同植物的选择等方面对根系固土效率的影响。

4 结论

(1) 根土复合体在干湿交替作用下,表面变得粗糙、松散、易脱落,并出现不均匀裂隙。经历干湿交替后,根土复合体黏聚力、内摩擦角均降低,土体最大抗剪强度也随之减小。

(2) 干湿交替下,根系尺寸、土体容重、土壤含水率均对根土复合体抗剪特性有显著影响。干湿交替下,根长越长、根径越大,其抗剪强度越大;在一定范围内,根土复合体极限抗剪强度、黏聚力、内摩擦角与土体容重呈正相关关系;含水率与干湿交替作用均显著影响含根土体抗剪特性,相同干湿交替条件下,抗剪强度随含水率的增加,呈先增加再降低趋势;相同含水率水平下,进行干湿交替土体的抗剪强度指标显著低于未进行干湿交替的,且初始含水率饱和度越低,干湿循环幅度越大,干湿交替后黏聚力降幅越大。

(3) 根系理论附加黏聚力为 6.09 kPa 或 5.56 kPa,与实测根系附加黏聚力 4.00 kPa 相比,Wu 模型估算结果与实际值相差甚远。原因为除了根系自身性质(根系尺寸、生物成分等)对根系固土效率有重要影响外,土体本身的性质如容重、含水率以及干湿交替作用等也紧密影响着含根土体的抗剪强度。而 Wu 模型仅考虑了根系本身的影响因素(根面积比、根系抗拉强度),而实际上根土相互作用为一个复杂的动态过程,该模型并未考虑全面。

参考文献:

- [1] 程士源.山西黄土地区地质灾害与工程活动特殊性的研究[D].太原:太原理工大学,2017.
Cheng S Y. Research on the Geological Hazards and the Particularity of Engineering Activities in the Loess Area of Shanxi[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [2] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20):7398-7409.
- [3] 徐华,袁海莉,王歆宇,等.根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J].岩土工程学报,2022,44(5):926-935.
Xu H, Yuan H L, Wang X Y, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2022,44(5):926-935.
- [4] 邢书昆,张光辉,朱平宗.黄土丘陵沟壑区退耕年限对根-土复合体抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):41-48,54.
- Xing S K, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):41-48,54.
- [5] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,等.西宁盆地黄土区草本和灌木组合根系分布特征及其增强土体抗剪强度效应[J].工程地质学报,2020,28(3):471-481.
- Liu Y B, Hu X S, Yu D M, et al. Distribution characteristics of combined herb and shrub roots in loess area of Xining basin and their effect on enhancing soil shear strength[J]. Journal of Engineering Geology, 2020,28(3):471-481.
- [6] Gray D H. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control[J]. Soil Science, 1998,163(1):83-85.
- [7] 董超凡,张吾渝,孙翔龙,等.木质素纤维改良黄土抗剪强度的试验研究[J].安全与环境工程,2022,29(2):102-110.
- Dong C F, Zhang W Y, Sun X L, et al. Experimental study on the shear strength of lignin fiber-improved loess[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022,29(2):102-110.
- [8] 孙召军,李金山,贾艳辉,等.干湿交替次数对土壤干密度和饱和导水率的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(6):89-96.
- Sun Z J, Li J S, Jia Y H, et al. Effects of wetting-drying cycles on bulk density and saturated hydraulic conductivity of soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(6):89-96.
- [9] 尹宏磊,徐千军,李仲奎.抗剪强度随干湿循环变化对边坡安定性的影响[J].水利学报,2008,39(5):568-572,579.
- Yin H L, Xu Q J, Li Z K. Analysis on spatial and temporal variability of groundwater level based on spherical sampling model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(5):568-572,579.
- [10] 汪时机,杨振北,李贤,等.干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J].农业工程学报,2021,37(5):113-122.
- Wang S J, Yang Z B, Li X, et al. Experimental study on crack evolution and strength attenuation of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(5):113-122.
- [11] 宋鹏帅,王健,陈琳,等.模拟干湿交替对夯实土壤抗剪强度的影响[J].水土保持研究,2021,28(2):74-79.
- Song P S, Wang J, Chen L, et al. Effect of wet-dry cycle on shear strength of compacted soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(2):74-79.
- [12] Mao Y C, Li G Y, Lei J X, et al. Experimental study on the effects of wetting-drying cycles of compacted loess[J]. Advanced Materials Research, 2014,831:326-330.
- [13] 付理想,梅岭.干湿循环对原状及重塑黄土渗透系数的影响分析[J].洛阳理工学院学报:自然科学版,2018,28(1):1-6.
- Fu L X, Mei L. Influence analysis of drying and wetting cycles on permeability coefficient of intact and remolded loess[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018,28(1):1-6.
- [14] 刘宏泰,张爱军,段涛,等.干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J].水利水运工程学报,2010,126(4):38-42.
- Liu H T, Zhang A J, Duan T, et al. The influence of alternate dry-wet on the strength and permeability of remolded loess[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010,126(4):38-42.
- [15] Wu T H, McKinnell III W P, Swanson D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979,16(1):19-33.
- [16] Pollen N, Simon A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. Water Resources Research, 2005,41(7):226-244.
- [17] Schwarz M, Cohen D, Or D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2011,116:F02007.
- [18] Fan C C. A displacement-based model for estimating the shear resistance of root-permeated soils[J]. Plant and Soil, 2012,355(1):103-119.
- [19] 夏鑫,姜元俊,苏立君,等.基于界面黏结的含根土抗剪强度极限值估算模型[J].岩土力学,2021,42(8):2173-2184.
- Xia X, Jiang Y J, Su L J, et al. Estimation model of limit values of shear strength of root-bearing soil based on interface bonding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(8):2173-2184.
- [20] 文伟,李光范,胡伟,等.草本植物根系对土体的加筋作用模型修正[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):4211-4217.
- Wen W, Li G F, Hu W, et al. Modification of rein-

- forcement effect model of herbs root system in soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(S2):4211-4217.
- [21] Docker B B, Hubble T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species[J]. Geomorphology, 2008,100(3/4):401-418.
- [22] Waldron L J, Dakessian S. Effect of grass, legume, and tree roots on soil shearing resistance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982,46(5):894-899.
- [23] 余冬梅,祁兆鑫,刘亚斌,等.青海柴达木盆地盐湖区5种盐生植物根-土复合体抗剪强度影响因素及评价[J]. 水土保持研究,2019,26(4):157-165.
- Yu D M, Qi Z X, Liu Y B, et al. Factors affecting shear and contribution evaluation of root-soil composite systems of five halophytes in the salt lake region of northwest Qaidam Basin, Qinghai Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(4):157-165.
- [24] 杨路,杜峰,秦晶晶,等.黄土区3种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J]. 水土保持研究,2022,29(1):295-300,310.
- Yang L, Du F, Qin J J, et al. Research on shear strength of root-soil complexes of three dominant shrubs in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(1):295-300,310.
- [25] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,207(S2):3445-3452.
- Zhu H L, Hu X S, Mao X Q, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 207 (S2): 3445-3452.
- [26] 曾召田,吕海波,赵艳林,等.膨胀土干湿循环效应及其对边坡稳定性的影响[J].工程地质学报,2012,20(6):934-939.
- Zeng Z T, Lv H B, Zhao Y L, et al. Wetting-drying effect of expansive soils and its influence on slope stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2012,20(6):934-939.
- [27] 周霞,魏杨,李东嵘,等.黄土区紫花苜蓿根系对土体抗剪性能的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(2):53-59.
- Zhou X, Wei Y, Li D R, et al. Strengthening effects of alfalfa roots on soil shear resistance in loess region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(2):53-59.
- [28] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,等.基于植物生长过程的根系固土机制及 Wu 模型参数优化[J].林业科学,2018,54(4):49-57.
- Zhu J Q, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Analyses on root reinforcement mechanism based on plant growth process and parameters optimization of Wu model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018,54(4):49-57.
- [29] 陈安强,张丹,熊东红,等.元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J].农业工程学报,2012,28(5):108-113.
- Chen A Q, Zhang D, Xiong D H, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5):108-113.
- [30] 赵玉娇,胡夏嵩,李华坦,等.寒旱环境灌木根系增强边坡土体抗剪强度特征[J].农业工程学报,2016,32(11):174-180.
- Zhao Y J, Hu X S, Li H T, et al. Characteristics of slope soil shear strength reinforced by shrub roots in cold and arid environments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(11):174-180.
- [31] 甘凤玲,韦杰,李沙沙.紫色土埂坎典型草本根系摩阻特性对土壤含水率的响应[J].草业学报,2022,31(7):28-37.
- Gan F L, Wei J, Li S S. Response of root-soil friction characteristics of three common grasses to soil water content in purple soil bunds[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022,31(7):28-37.