

紫花苜蓿和通奶草根土复合体的力学特性

海龙, 谭世林, 徐博

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: [目的] 研究土壤含水率、根系面积比对紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 和通奶草 (*Euphorbia hypericifolia*) 根系固土效果影响及根土间作用机理, 为矿山生态修复中植物种类的选取, 土壤含水率的控制提供科学依据。[方法] 以辽宁省阜新市海州露天矿边坡野生紫花苜蓿、通奶草为研究对象。开展植物根系拉伸试验, 确定根系抗拉特性。开展根土复合体剪切试验, 确定2种植物根系最适宜含水率。在最优含水率基础上开展根土复合体剪切优化试验, 确定最佳固土效率根系面积比。[结果] ①2种植物根系抗拉力随根径呈幂函数增加, 抗拉强度随根径呈幂函数减小。②素土和2种根土复合体黏聚力随含水率增加呈先增加后减小趋势, 内摩擦角随含水率增加呈减小趋势; ③紫花苜蓿根系、通奶草根系在含水率分别为25%和21%时, 固土效果最佳。④在最优含水率下, 紫花苜蓿、通奶草根系面积比分别为0.04%和0.08%时, 固土效果最佳。[结论] 通奶草根系的形态学效应和力学效应使其成为较紫花苜蓿根系具有更佳固土效果的优势物种。

关键词: 剪切试验; 含水率; 根土复合体; 根系面积比; 通奶草; 紫色苜蓿

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0057-08

中图分类号: TU432

文献参数: 海龙, 谭世林, 徐博. 紫花苜蓿和通奶草根土复合体的力学特性[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 57-64. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.008; Hai Long, Tan Shilin, Xu Bo. Mechanical properties of *Medicago sativa* and *Euphorbia hypericifolia* root-soil complex [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 57-64.

Mechanical Properties of *Medicago Sativa* and *Euphorbia Hypericifolia* Root-Soil Complex

Hai Long, Tan Shilin, Xu Bo

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: [Objective] The effects of soil moisture content and root area ratio on the soil consolidation effect of *Medicago sativa* and *Euphorbia hypericifolia* root systems and the interaction mechanism of root-soil were studied in order to provide scientific basis for selecting plant species and controlling soil moisture content in ecological restoration of mines. [Methods] Wild *M. sativa* and *E. hypericifolia* were observed on a Haizhou open pit mine slope in Burin City, Liaoning Pvoince. Tests were conducted to determine the tensile properties of the root systems. The root-soil complex shear test was used to determine the optimum moisture content of the root systems of the two plants. The root-soil composite shear optimization test was conducted based on the optimal moisture content to determine the optimal root area ratio for soil consolidation efficiency. [Results] ① The tensile resistance of the root systems of the two species increased as a power function of root diameter. The tensile strength of the root systems decreased as a power function of root diameter. ② The cohesive force of the vegetative soil and the two root-soil complexes tended to increase and then decrease with increasing moisture content, and the angle of internal friction tended to decrease with increasing moisture content. ③ The *M. sativa* and *E. hypericifolia* root systems had the greatest soil consolidation effect when the moisture content was 25% and 21%, respectively. ④ At the optimal moisture content, the greatest soil consolidation efficiency was achieved when the root area ratios of the *M. sativa* and *E. hypericifolia* root systems were 0.04% and 0.08%, respectively. [Conclusion] The

收稿日期: 2023-04-06

修回日期: 2023-05-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“随机扰动下深部软岩渗流—蠕变损伤破裂耦合机理研究”(52274084)

第一作者: 海龙(1975—), 男(蒙古族), 辽宁省阜新市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事矿山环境与灾害力学方面的研究。Email: hailong8901@163.com.

通信作者: 谭世林(1996—), 男(土家族), 重庆市人, 硕士研究生, 研究方向为植物根系固土护坡。Email: tsl211@126.com.

morphological and mechanical effects of the *E. hypericifolia* root system made it the superior species because of its greater soil consolidation than the *M. sativa* root system.

Keywords: shear test; moisture content; root-soil complex; root area ratio; *Euphorbia hypericifolia*; *Medicago sativa*

采矿、筑路等工程建设产生大量人工边坡。边坡滑坡、泥石流等地质灾害的发生造成巨大财产损失、威胁人员安全,同时产生大范围的水土流失。工程护坡可有效防治边坡灾害,但建造成本高、寿命有限,还造成视觉灰色污染、生态失衡等。植物护坡能够抑制边坡土体侵蚀、防止浅层滑坡、减少水土流失,还具有建造维护成本低、生态效益高等优点。植物单独护坡或与工程护坡配合对边坡进行防护成为发展方向。植物固土护坡主要通过其茎叶和根系实现,起主导作用的是根系。植物蒸腾增加土体吸力,降低土体渗透系数且增加抗剪强度^[1];植物茎叶截留部分雨水,减少降雨对表层土的冲击。浅层草本根系和土壤相互作用形成根土复合体,提高土体抗剪强度;深层乔木和灌木的根系起到类似土钉的作用,有效抑制土体裂缝扩展。浅层和深层根系共同作用约束土体变形,增加稳定性。众多植物根系相互交织形成致密覆盖层防止土体冲蚀^[2]。

植物根系固土护坡效果一般通过其抗拉和剪切特性进行评估^[3]。植物根系抗拉特性是衡量根系固土护坡性能的基础^[4-8]。不同植物根系形态特征和抗拉性能的不同,且抗拉性能受根径、根长等因素的影响,导致了其固土能力有所差异。植物根系与土壤变形模量的差异使两者变形不同步,因此受到剪切应力时,它们在变形过程中存在相互错动。这个过程中,根系本身的拉应力、根土界面的摩擦阻力以及根系之间的土体侧向约束力发挥作用,从而提高根土复合体的抗剪强度^[9]。根系增强土体抗剪强度主要有 3 大力学模型,即 WWM^[10-11] (Waldron-WU-model), FBM^[12] (Fiber Bundle model), RBM^[13] (Root Bundle model),较为完善的模型为 RBM,但也存在一定不足^[2];故通过根土复合体剪切试验可较准确了解根系的固土效果。国内外学者主要通过直剪试验或三轴试验对根土复合体的抗剪强度进行研究,探讨了植物种类^[14-16]、根系形态^[17]、含水率^[18-21]、含根量^[20]、根系面积比^[22-23]、土体类型^[24]和粒径等^[25]因素对抗剪强度及其指标的影响。许多学者研究均表明根土复合体抗剪强度随含水率的升高而降低^[18-20],丰田等^[21]进一步研究表明当含水率大于塑限后,根土复合体的抗剪强度随含水率的增大而减小,且发现黏聚力随含根量的增加先增大后趋于平缓,内摩擦角随含根量增长但幅度较小^[21]。祁兆鑫等^[22]对赖草(*Ley-*

mus secalinus)、洽草(*Koeleria cristata*)等根土复合体进行直剪试验,发现黏聚力随根系面积比减小呈降低趋势。Hamidifar 等^[23]对香根草(*Vetiveria zizanioides*)根土复合体开展直剪试验,结果表明黏聚力和内摩擦角均与根系面积比呈正相关。综上分析,考虑土壤含水率和根系面积比(简称 RAR)与剪切特性之间关系已取得较多成果,但含水率的梯度设置较大且以 RAR 作为根系含量指标的研究较少,含水率和 RAR 对剪切特性的影响还需深入研究。为此本文以海州露天矿边坡野外生长紫花苜蓿和通奶草为研究对象。以含水率和 RAR 为变量探索对根土复合体剪切特性的影响。开展植物根系拉伸试验,确定根系抗拉特性。控制 RAR 不变,改变含水率,开展根土复合体剪切试验获取 2 种草本植物根系固土最佳含水率。以最佳含水率为基础开展根土复合体剪切优化试验,通过改变 RAR,得到最佳固土效率 RAR。研究成果可为矿山生态修复中植物种类的选取、土壤含水率的控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样和根系均源自辽宁省阜新市海州露天煤矿北帮东北角,位于东经 121°41′1.58″北纬 41°59′57.44″,海拔 143 m。用竖锹等工具选定 30 cm×30 cm 植物生长区域,清除表面植物和表层腐殖质,采集 5—10 cm 深度范围内土壤放入封装袋内带回实验室备用,参照《GB/T50123-2019》标准开展土工试验^[26]。以环刀法测得土样容重为 1.32 g/cm³;以烘干法测得土样天然含水率为 14.98%;以 pH 值法测得土样 pH 值为 8.41;以液塑限联合测定法测得液限和塑限分别为 29.25%和 19.39%,液限是指土由可塑状态到流动状态的界限含水率,塑限是指土由可塑状态过渡到半固体状态时的界限含水率;以筛分法测得土样颗粒级配中 >2.00, >1.00~2.00, >0.50~1.00, 0.25~0.50, 0.074~0.25 和 <0.074 mm 的颗粒分别占 23.70%, 10.78%, 10.02%, 17.78%, 31.05%, 6.67%。土样中挑出根系和石头后烘干到恒定质量,过 2 mm 土工筛平摊干燥铁盘中备用。即根土复合体中土样颗粒级配 >1.00~2.00, >0.50~1.00, 0.25~0.50, 0.074~0.25 和 <0.074 mm 颗粒分别占 14.14%, 13.13%, 23.30%, 40.69%, 8.74%。

通过实地调查,发现研究区域主要有 9 种草本植物分别为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、车前草(*Plantago asiatica*)、马蔺(*Iris lactea*)、通奶草(*Euphorbia hypericifolia*)、小花鬼针草(*Bidens parviflora*)、圆叶牵牛(*Pharbitis purpurea*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、班种草(*Bothriospermum chinense*)。综合生长条件、分布广度和植物特殊性等,最终选择紫花苜蓿和通奶草。紫花苜蓿属多年生草本植物,根粗壮、深入土层,常作为水土保持的首选植物^[27-28],研究区分布广,生长速度快,环境适应性强,根系发达,作为优质牧草保证矿区生态修复的可持续性;通奶草属一年生草本大戟科、大戟属植物,部分研究区域形成优势种,适应矿区气候,弯曲的根系形态使得固土效果佳,常用为中药材保证生态修复的可持续性。2 种草本植物均为研究区同处生长,生长区域的坡面坡度约为 37°,生长期均为 6 个月。采样根系均为生长正常,无病虫害的新鲜根系。采用内侧加装泡沫的采集盒运输,避免根系受到损伤。植物植株均于 2022 年 9 月采用整株挖掘法挖掘,挖出后清水冲洗去根系表面土壤,放在吸水纸上风干后立即试验,一部分根系用于根系拉伸试验,另一部分根系用于根土复合体剪切试验。未试验根系于 4 °C 冰箱保鲜,并于 7 d 内完成试验。2 种草本植物的根系均由主根和侧根组成,紫花苜蓿根系侧根较多,须根较少;通奶草根系须根发达,根系弯曲。根据吴宏伟^[1]对根系形状的划分,2 种草本植物根系均属于三角形根^[1]。

1.2 试验方法

1.2.1 单根根系拉伸试验

拉力计为艾固 zp-500 数显推拉力计(量程 500 N,精度 ±0.1 N),由夹具、拉力架、电子数显拉力计、信号收集装置等组成;游标卡尺为艾瑞泽电子数显游标卡尺(量程 150 mm,精度 ±0.01 mm)。两种植物均选用若干整株不同根径的根系,用剪刀剪取没有破损、弯曲幅度小、根径变化小的根系长为(100±5) mm 的根段,制备若干不同根径的单根为一个试验组,开展单根根系拉伸试验。根径大于 1 mm 时,根段两端直径差值需在 0.3 mm 之内,超出差值的舍弃;根径小于 1 mm 时,根段两端直径差值需在 0.1 mm 之内,超出差值的舍弃。用游标卡尺分别测量制备根段两端和中间 3 个位置的直径,取平均值作为该根段的根径并记录。将根段固定在数显推拉力计上,两端由夹具固定,固定两端根长均为 10 mm,试验端根长为 80 mm。固定根段后,拉力计归零,均匀转动滑轮,直到根系拉断,记录抗拉破坏过程中最大拉力和部分根长变化。为保证数据的准

确性仅保留根段中间 1/3 位置处拉断的数据。抗拉强度参照公式(1)计算。

$$T = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (1)$$

式中: F 为抗拉力(N); d 为根系直径(mm); T 为抗拉强度(MPa)

1.2.2 剪切试验

(1) 根土复合体剪切试验。试验按《GB/T50123-2019》标准^[26]制备根土复合体试样。两种草本植物根系均随机选取生长正常、茎秆通直均匀、根径范围为 0.3~1.00 mm。剪除细根、须根,剪成长 2 cm 垂直根段,用密封袋密封并立即制样,未制备根系于 4 °C 冰箱保鲜。剪切试样制备,尺寸为 Φ61.8 mm×20 mm(直径×高),土体横截面积为 2 999.6 mm²,将 RAR 均控制在 0.04%,即根系横截面积为 1.2 mm²,根系横截面积通过游标卡尺测量不同根段中间根径后计算获得。RAR 为根系横截面积和土体横截面积之比。土样含水率以 2% 为变化梯度,按 13%,15%,17%,19%,21%,23%,25% 和 27% 依次进行配置,每个对应含水率均设置有素土剪切试验作为参照组,共计 24 组根土复合体土样,并于密闭容器中静置 8 h。配置方法和梯度参照界限含水率试验,含水率的设定大致范围为土样天然含水率到液限之间。防止根系插入土样中形态发生改变,土样配置后分 3 次放入,第一次放 1/3 土样并轻轻压实,按要求的 RAR 将根系垂直均匀插入土样中,再放入 1/3 土样轻轻压实,待土样平整后放入最后 1/3 土样,用削土刀除去多余土样,土样容重接近原位土样。为减少水分散失对试验的影响,试样制备后立即开展根土复合体剪切试验。根土复合体剪切试验过程如图 1 所示。

根土复合体剪切试验于辽宁工程技术大学力学与工程学院土工实验室完成。剪切速率为 2.4 mm/min, ZJ 型应变控制式直剪仪(四联剪)上进行直接剪切试验,在 4 个竖向压力(50 kPa,100 kPa,150 kPa,200 kPa)条件下对根土复合体做直接剪切试验。根据试验结果线性拟合,并根据库伦定律计算相应的黏聚力和内摩擦角,计算公式为:

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

式中: τ_f 为土体抗剪强度(kPa); σ 为土体抗压强度(kPa); c 为土体黏聚力(kPa); φ 为土内摩擦角(°)。

(2) 根土复合体剪切优化试验。为了进一步探索通奶草的根土复合体黏聚力增量较大的原因,根据根土复合体剪切试验结果,将土样含水率控制在 21%,改变 RAR 开展根土复合体剪切优化试验。2 种草本植物根系 RAR 梯度设置为 0.02%,0.04%,

0.08%, 0.12% 和 0.16%, 即根系横截面积分别为 0.6, 1.2, 2.4, 3.6 和 4.8 mm², 合计 10 组根土复合土样。假设土体横截面积不变, 通过改变根系横截面积控制 RAR。其他试样制作, 剪切过程等同根土复合体剪切试验。根土复合体剪切优化试验过程如图 2 所示。

左图为直剪仪的原理图, 右图为根系在土样中的分布。纵切面 2 种根系均分布均匀和土样充分接触。紫花苜蓿根系较直, 无大幅度弯曲; 通奶草根系呈弯曲形态, 弯曲幅度大, 弯曲次数多。根土复合体组成包括根系、剪切面、上部剪切土体和下部土体。

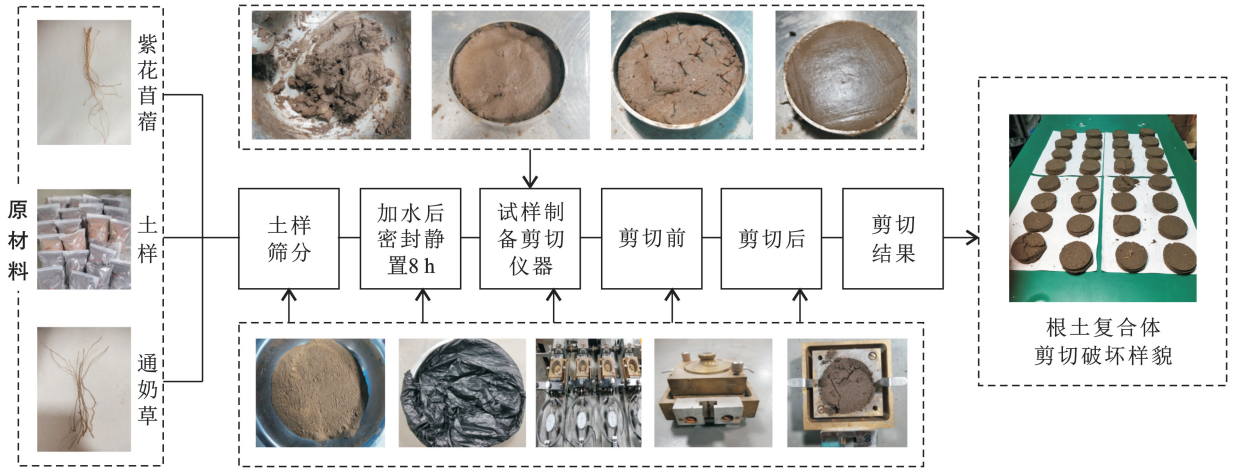


图 1 根土复合体剪切试验过程

Fig.1 Process of root-soil composite shear test

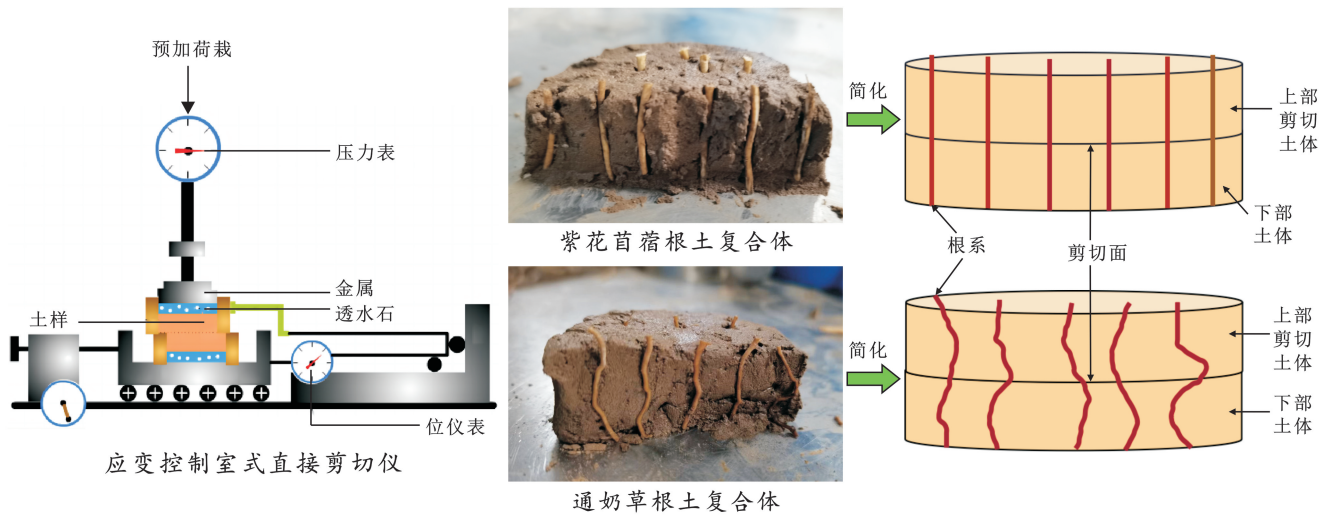


图 2 根土复合体剪切优化试验

Fig.2 Root-soil composite shear optimization test

2 结果与讨论

2.1 单根根系拉伸试验分析

2.1.1 抗拉力和抗拉强度与根径的关系 紫花苜蓿成功样本为 55 组, 根径范围为 0.24~4.76 mm, 抗拉力 1.7~141.1 N, 抗拉强度 7.67~38.20 MPa; 通奶草成功样本为 49 组, 根径范围为 0.20~3.70 mm, 抗拉力 0.6~66.2 N, 抗拉强度 5.88~76.40 MPa。将根径与抗拉力和抗拉强度关系的试验结果进行曲线回归拟合, 拟合结果为幂函数关系, 具有较好的拟合优度, 回归方程和相关关系如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 2 种野生草本植物抗拉力和抗拉强度与根径间符合幂函数关系, 抗拉力均随着根径的增大而增大, 抗拉强度均随着根径的增大而减小。与国内外学者研究的规律一致^[4-8]。试验结果与植物自然特性有关, 紫花苜蓿根系较直, 须根较少; 而通奶草根系弯曲较多且须根发达。紫花苜蓿生长速度快, 根系粗壮, 对研究区土样环境适应性强, 能快速在浅土层形成根系, 达到固土护坡的强度和深度。通奶草根系大量的须根和弯曲的形态有利于充分吸收水分和养分, 也使得与土壤接触面积更大, 固土效果较好。

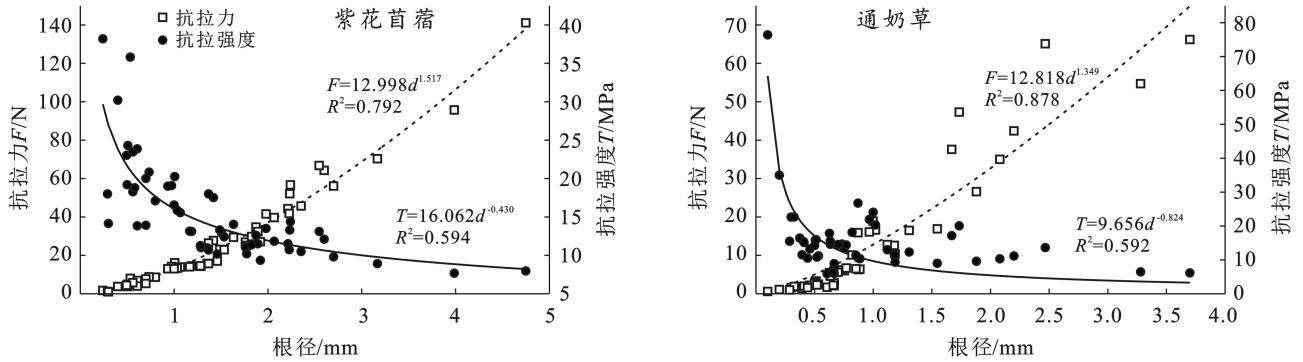


图 3 2 种草本植物根系抗拉力 (F) 和抗拉强度 (T) 与根径 (d) 的关系

Fig.3 Relationship between root tensile resistance (F) with tensile strength (T) and root diameter (d) of two herbaceous plants

2.1.2 应力与应变的关系 根系的应力—应变关系是研究根系力学性能重要指标,为根土复合体力学性能的评估提供了重要依据^[4]。2 种草本植物根系抗拉破坏过程中应力—应变关系如图 4 所示。紫花苜蓿根系在受拉过程中表现出明显弹塑性材料特征,根系受拉过程中经历了初期应力随应变呈线性增长至弹性极限的弹性变形阶段,随后应力随应变曲线斜率开始逐渐减小至接近应力极限的塑性变形阶段和最后应变急剧增加,达到根系应力极限,根系拉断的后期拉断破坏 3 个阶段^[4]。根系抗拉破坏过程中,紫花苜蓿根系最大应力随着根径的增加逐渐减小。紫花苜蓿根系不同根径受拉时应力—应变关系均满足斜

率随着应变的增加逐渐减小,无明显颈缩现象。紫花苜蓿试验根系极限延伸率的范围在 0.084 0~0.168 0 之间波动,说明根径对极限延伸率的影响较小。通奶草根系抗拉破坏过程中表现出显著的弹性材料特征,随着应变的增加,应力呈线性增加;根径越小,弹性模量越大。通奶草根系极限延伸率的范围在 0.064 5~0.083 0 之间波动,其极限延伸率范围小于紫花苜蓿根系,导致根土复合体试验中易剪断,且根系弯曲致使根土界面摩擦力较大,根系不易滑落。通奶草根系的弯曲,导致应力—应变关系的测量中初期有一定的缓冲,也使得根土复合体剪切过程中根的力学特性充分发挥。

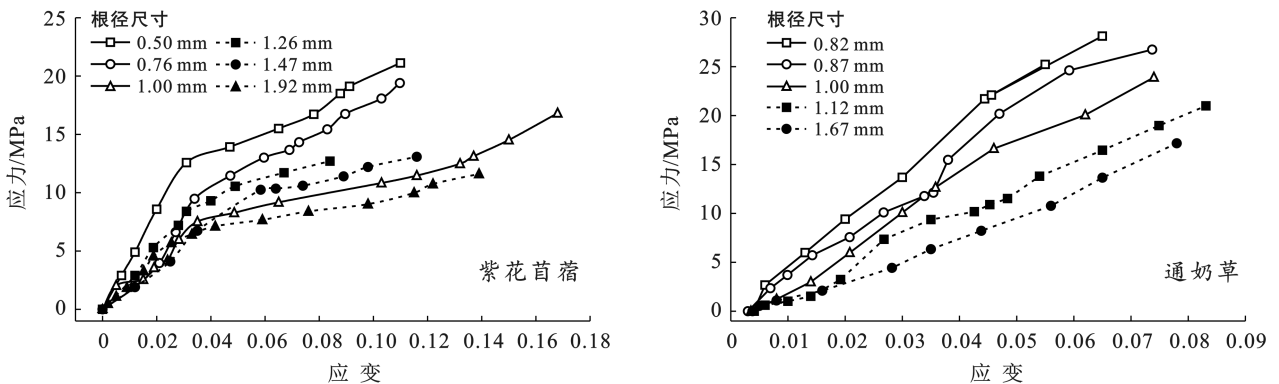


图 4 2 种草本植物根系抗拉破坏过程中应力—应变关系

Fig.4 Stress-strain relationships during tensile damage in root systems of two herbaceous species

2.2 剪切试验分析

2.2.1 含水率与根土复合体抗剪强度指标的关系

紫花苜蓿根系制备的根土复合体(以下简称根土 1),通奶草根系制备的根土复合体(以下简称根土 2)。素土和根土复合体不同含水率抗剪强度指标如表 1 所示,根土 1 和根土 2 黏聚力相对于素土均增加。素土和 2 种根土复合体黏聚力随含水率变化如图 5 所示,黏聚力均随含水率增加呈先增加后减小趋势,内摩擦角均随含水率呈减小趋势,与许多学者研究结果一致^[21,29]。当土壤含水率较小时,水分子产生的吸力

较小,对土壤颗粒的牵引能力较弱导致黏聚力较小;随土壤含水率逐渐增大,水膜所产生的黏聚效果开始逐渐增强,土壤基质吸力增强,黏聚力增大;当含水率增加到一定程度时,随着水膜越来越厚,水膜对土粒的吸力反而减少导致黏聚力的减小^[29]。含水率 19% 时,3 者黏聚力均取得峰值分别为 12.43、13.38 和 14.62 kPa。相同含水率下,黏聚力表现为:根土 2>根土 1>素土,根土 1 和根土 2 的内摩擦角接近素土,说明根系对土体内摩擦角的影响小。考虑到黏聚力主要影响因素是含水率和根系种类,以根土复合体黏聚

力增量能较好判断 2 种因素根系固土最佳效果。根土 1 黏聚力增量为 0.93 ~ 1.12 kPa,说明含水率对根土 1 黏聚力增量影响较小;含水率为 25%时黏聚力增量为最大增幅,相对于素土增幅为 16.99%。根土 2 黏聚力增量为 1.02~2.28 kPa,说明含水率对根土 2 黏聚力增量影响较大;含水率 21%时黏聚力增量为最大增幅,相对于素土增幅为 25.03%,最大增量 Δc_{\max} 为 2.28 kPa。故根土 2 最优固土含水率为 21%,根土 1 最优固土含水率为 25%。由图 5 可知,根土 1 和根土 2 黏聚力增量均随含水率增加呈先增

加后减小趋势,含水率分别为 17%和 21%,达到峰值。这种现象可能与根系自身性质、根土接触面积(根系形态)相关。由图 3 可知,紫花苜蓿根系的抗拉强度大于通奶草根系,根据 Wu 等^[9-10]的研究,抗拉强度与黏聚力增量呈正相关,但本次试验结果恰恰相反,应考虑根土接触面积的影响。由于根土 1 含水率分别 21%和 25%时根系导致黏聚力增幅相差不大,因此将土样含水率控制为 21%,通过改变 2 种草本植物根系的 RAR 进行剪切优化试验进一步研究根土接触面积对根土复合体剪切特性的影响。

表 1 素土和根土复合体不同含水率下抗剪强度指标

Table 1 Shear strength indexes of plain soil and root-soil composite at different moisture contents

含水率/ %	素土黏聚力/ kPa	素土内摩擦角/ (°)	根土 1 黏聚力/ kPa	根土 1 内摩擦角/ (°)	根土 2 黏聚力/ kPa	根土 2 内摩擦角/ (°)
13	8.16	27.52	9.17	30.25	9.30	29.68
15	9.37	30.54	10.41	29.23	10.72	30.11
17	11.57	22.36	12.69	23.46	13.35	25.85
19	12.43	18.45	13.38	19.48	14.62	21.42
21	9.11	16.74	10.18	19.29	11.39	18.09
23	7.78	17.32	8.72	17.87	9.13	19.64
25	6.18	14.64	7.23	16.78	7.34	18.33
27	5.72	14.74	6.65	16.87	6.74	17.64

注:根土 1 为紫花苜蓿根系制备的根土复合体;根土 2 为通奶草根系制备的根土复合体。下同。

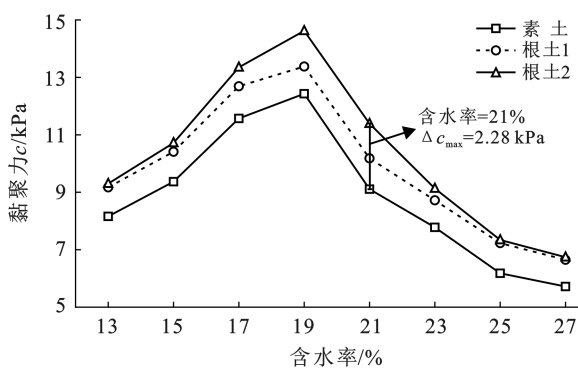


图 5 素土和根土复合体黏聚力随含水率变化

Fig.5 Variation of cohesiveness with moisture content in vegetation and root-soil complexes

2.2.2 RAR 与根土复合体抗剪强度指标的关系 2 种草本植物根土复合体优化剪切试验结果详见表 2。在相同含水率下,RAR 分别为 0.02%,0.04%,0.08%,0.12%,0.16%时,根土 1 黏聚力增量分别为 0.47,0.97,1.93,2.75 和 3.52 kPa,根土 2 黏聚力增量分别为 1.19,2.28,4.98,6.61 和 7.69 kPa。根土 1 和根土 2 黏聚力增量均随 RAR 增加而增加,内摩擦角均随 RAR 增加呈增加趋势。相同 RAR 下,根土 2 的黏聚力增量均大于根土 1,即通奶草根系固土能力更强。

为确定最佳含水率下最佳的 RAR,将 RAR 为 0.01%时视为基础黏聚力增量,记为 λ (kPa)。定义 λ 越大,植物根系的固土效率越高。计算公式为:

$$\lambda = \frac{\Delta c}{10\ 000\text{RAR}} \quad (3)$$

表 2 的数据参照公式(3)计算 λ ,可得 λ 随 RAR 变化的关系(如图 6 所示)。紫花苜蓿 RAR 为 0.04%时,最大值 $\lambda_{\max 1}$ 为 0.242 5 kPa;通奶草 RAR 为 0.08%时,最大值 $\lambda_{\max 2}$ 为 0.622 5 kPa。通奶草细小根系固土的效率远大于紫花苜蓿,两者均随 RAR 呈先增加后减小趋势,达到峰值后下降。在相同含水率下,紫花苜蓿根系、通奶草根系 RAR 分别为 0.04%,0.08%时,固土效率最佳。紫花苜蓿随 RAR 增加 λ 变化幅度小,故 RAR 对紫花苜蓿固土效率影响小。

表 2 2 种根土复合体不同 RAR 下抗剪强度指标

Table 2 Shear strength indices of 2 root-soil composites at different RARs

根土复合 体类型	RAR/ %	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ /(°)	黏聚力增量 Δc /kPa
根 土 1	0.02	9.58	17.89	0.47
	0.04	10.08	17.09	0.97
	0.08	11.04	21.01	1.93
	0.12	11.86	22.68	2.75
	0.16	12.63	22.57	3.52
根 土 2	0.02	10.30	17.74	1.19
	0.04	11.39	19.29	2.28
	0.08	14.09	22.25	4.98
	0.12	15.72	26.24	6.61
	0.16	16.80	25.68	7.69

注:RAR 为 0.01%时视为基础黏聚力增量,记为 λ (kPa)。下同。

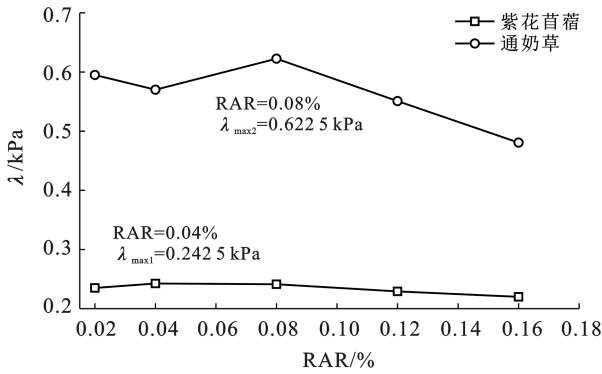
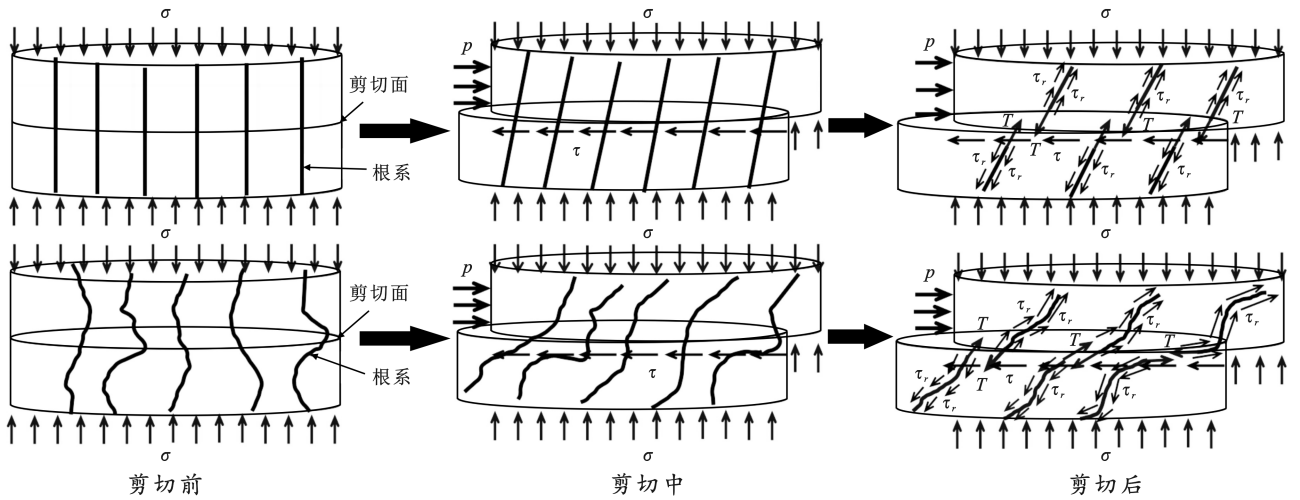


图 6 2 种草本植物的基础黏聚力增量 λ 随 RAR 变化

Fig.6 Increment of basic cohesion λ of 2 herbs varies with RAR

2.2.3 根土复合体剪切过程受力分析 根据 2 种草本植物根系形态的差异,紫花苜蓿根系均简化为根径相同且均匀分布在纵切面上;通奶草根系均简化为根径相同,形态不同且均匀分布在纵切面上。方便研究 2 种根土复合体剪切过程中受力变化,探索两种草本植物根系导致土样不同黏聚力增量的原因。以余凯等^[30]剪切过程中受力分析为基础,2 种根土复合体剪切过程受力情况如图 7 所示。图 7 各分图分别为未剪切时、根系未剪断时和根系剪断瞬间根土复合体的

受力状态。剪切前根土复合体顶部受均布压力使根土间接触紧密,通奶草根系弯曲导致根土间接触面积显著大于紫花苜蓿根系,且根系弯曲导致空间上像一个弹簧缠绕土体,根系与土样发生作用体积远大于直根。左侧面均布压力下,开始剪切,剪切方向由左向右,靠近下部土体剪切面处均匀分布着剪切应力。此时紫花苜蓿根系直根和土样间摩擦力充分作用,抵抗剪切破坏;通奶草根系缓慢拉直,根土间摩擦力逐渐增大,其抵抗剪切破坏中有一个缓冲过程。根系剪断的瞬间,根土复合体的黏聚力到达最大值,此时根土间的摩擦阻力远大于根系抗拉力。紫花苜蓿根系抗拉强度大,抗拉破坏过程中极限延伸率较大,导致其剪切过程中不易剪断;根土间接触面积小导致根土间摩擦力小,致使剪切过程中根系滑移,根系抗拉强度和延伸率均未充分发挥。通奶草根系抗拉强度小,极限延伸较小,导致其剪切过程中容易剪断,弯曲的形态致使剪切过程中根系不易滑移,抗拉力学特性充分利用。因此,通奶草根系黏聚力增量较大是因为弯曲的根系形态致使根土接触面积大,根土间接触紧密,故其剪切过程中根系的抗拉力学特性充分利用抵抗剪切破坏,固土效果和固土效率均高于紫花苜蓿根系。



注: σ 为剪切土样顶部受均布压力; p 为左侧面均布压力; τ 为剪切面上均匀分布的剪切应力; T 为根系拉力; τ_r 为根土复合体间的摩擦阻力。

图 7 根土复合体剪切过程受力情况示意图

Fig.7 Schematic diagram of forces during shearing of root-soil composite

3 结论

(1) 研究区 2 种草本植物根系抗拉力和抗拉强度与根径均呈幂函数关系,抗拉力均与根径呈正相关,抗拉强度均与根径呈负相关。

(2) 根土复合体黏聚力相对于素土均增加;素土和根土复合体黏聚力随含水率增加呈先增加后减小趋势,内摩擦角随含水率增加呈减小趋势;紫花苜蓿

根系、通奶草根系在含水率分别为 25% 和 21% 时,固土效果最佳;紫花苜蓿根土复合体和通奶草根土复合体黏聚力增量均随含水率增加呈先增加后减小趋势,含水率分别为 17% 和 21% 时,达到峰值。

(3) 根土复合体黏聚力增量均随根系面积比增加而增加,内摩擦角均随根系面积比增加呈增加趋势;通奶草固土效率大于紫花苜蓿,两者固土效率均随根系面积比呈先增加后减小趋势,达到峰值后下

降;最优含水率下,紫花苜蓿和通奶草根系根系面积比分别为 0.04% 和 0.08% 时,固土效率最佳。

(4) 通奶草根系的形态学效应和力学效应使其较紫花苜蓿根系具有更佳固土效果。

(5) 护坡工程中,通奶草根土复合体的最优根系面积比和含水率分别为 0.08%, 21%;根系面积比和含水率对紫花苜蓿根土复合体固土效果影响小,采用时只需满足生长发育即可。

[参 考 文 献]

- [1] 吴宏伟. 大气—植被—土体相互作用: 理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1-47.
- [2] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1171-1177.
- [3] Ding Heng, Zhang Hong, Liu Bing, et al. Study on mechanical properties of soil stabilization by different vegetation roots on high steep slope [J]. Sustainability, 2023, 15(3): 2569.
- [4] 肖海, 张千恒, 夏振尧, 等. 拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 91-97.
- [5] Krairoj M, Apiniti J. Influence of root suction on tensile strength of *Chrysopogon zizanioides* roots and its implication on bioslope stabilization [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(2): 275-284.
- [6] Lal R. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control [J]. Soil Science, 1997, 162(11): 850-852.
- [7] 付江涛, 杨幼清, 赵吉美, 等. 高寒矿区采样位置和生长期及坡向对草本植物根系力学特性影响[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2449-2459.
- [8] 刘亚斌, 李淑霞, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 157-166.
- [9] 朱锦奇, 苏伯儒, 王云琦, 等. 荆条根系的固土功能随土壤含水率的变化[J]. 林业科学, 2020, 56(6): 202-208.
- [10] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5): 843-849.
- [11] Wu T H, Mickinne P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19-33.
- [12] 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.
- [13] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F4): F04035.
- [14] 周林虎, 杨幼清, 胡夏嵩, 等. 高寒矿区排土场边坡土体抗剪强度特征[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 144-152.
- [15] 卢海静, 胡夏嵩, 付江涛, 等. 寒旱环境植物根系增强边坡土体抗剪强度的原位剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1712-1721.
- [16] 朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 等. 基于试验与模型的根系增强抗剪强度分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 449-458.
- [17] 袁亚楠, 刘静, 李诗文, 等. 小叶锦鸡儿根土界面摩擦阻特性及复合体抗剪强度研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 173-179.
- [18] 李怡帆, 张国涛, 雷鸣宇, 等. 西南山区云南松根土复合体力学特性及其对浅层坡体稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 88-96.
- [19] Huang Mengyuan, Sun Shujun, Feng Kaijun, et al. Effects of *Neyraudia reynaudiana* roots on the soil shear strength of collapsing wall in Benggang, South-east China [J]. Catena, 2022, 210: 105883.
- [20] 宗华, 谷天峰, 崔博, 等. 刺槐根土复合体抗剪强度试验[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2023, 53(1): 143-150.
- [21] 丰田, 李光范, 胡伟, 等. 乔木根土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(3): 517-523, 686.
- [22] 祁兆鑫, 余冬梅, 刘亚斌, 等. 寒旱环境盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1438-1448.
- [23] Hamidifar H, Keshavarzi A, Truong P. Enhancement of river bank shear strength parameters using vetiver grass root system [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(20): 1-11.
- [24] 杨锐婷, 格日乐, 郝需婷, 等. 不同类型土壤—柠条根系复合抗剪力学特性的比较[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 821-827.
- [25] 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403-412.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [27] 赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 7-12.
- [28] Yang Qihong, Zhang Chaobo, Liu Pengchong, et al. The role of root morphology and pulling direction in pullout resistance of Alfalfa roots [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 580825.
- [29] 王晨洋, 张守红, 王彬, 等. 不同土壤前期含水量对土壤分离临界水动力学特性及其抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 91-96, 102.
- [30] 余凯, 姚鑫, 张永双, 等. 基于面积和应力修正的直剪试验数据分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 118-124.