



引文格式: 刘德锟, 杨伊怡, 郭小鹏, 等. 紫穗槐根系-黄土复合体抗剪强度试验研究[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 119-127. DOI: 10.12401/j.nwg.2025162

Citation: LIU Dekun, YANG Yiyi, GUO Xiaopeng, et al. Shear Strength of *Amorpha Fruticosa* Root-Loess Composite[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 119-127. DOI: 10.12401/j.nwg.2025162

紫穗槐根系-黄土复合体抗剪强度试验研究

刘德锟¹, 杨伊怡¹, 郭小鹏^{2,3}, 翟辉¹, 李萍^{1,4,*}

(1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 3. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119; 4. 西北大学, 中-吉特殊岩土动力灾害与防控“一带一路”联合实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 植被的浅细根通过加筋作用显著提高土体抗剪强度, 这种力学效应是植被护坡机理研究和护坡效果评价的重点。以往研究更多关注土体类型和含水率、布根方式、植物种类等因素对根系固土效应的影响, 很少关注根系特征与根土复合体强度特性的联系。笔者以紫穗槐根系-黄土复合体为对象, 基于直剪试验, 系统研究了饱和状态下含根量、根长及关键根系特征参数(根表面积指数 RAI 、根长密度、根系体积比 R_v 等)对根土复合体抗剪强度的影响规律与机制。结果表明: ①低竖向荷载下, 饱和含根土体抗剪强度随含根量增加而显著提升, 但此效应随荷载的增大而减弱; ②根系加固作用主要通过显著提高粘聚力实现, 内摩擦角则无明显变化规律; ③当根长 ≥ 2 cm 时, 存在一个“最优含根量”(1%~1.5%)使粘聚力达到最大值; ④饱和根土复合体抗剪强度与根表面积指数(RAI)、根系体积比(R_v)呈显著正相关, 而与含根量、根系生物量、根长密度、比根长相关性较弱。这表明在饱和条件下, 根系对土体的增强主要依赖于根-土界面的摩擦作用。本研究明确了根系对饱和黄土应力应变关系及抗剪强度的影响及力学机制, 确定了特定根长条件下的“最优含根量”, 揭示了根系特征参数(RAI 、 R_v 、平均根径等)与根土复合体抗剪强度的关系, 能为黄土区植被护坡力学效应的全面理解和生态边坡的科学设计提供新的理论依据。

关键词: 根土复合体; 抗剪强度; 紫穗槐; 根系特征参数; 含根量

中图分类号: P642.3; TU411.7 文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0119-09

Shear Strength of *Amorpha Fruticosa* Root-Loess Composite

LIU Dekun¹, YANG Yiyi¹, GUO Xiaopeng^{2,3}, ZHAI Hui¹, LI Ping^{1,4,*}

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory of Loess Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. Northwest University, Joint Laboratory of Special Rock and Soil Dynamic Disasters and Control between China and Kyrgyzstan under the Belt and Road

收稿日期: 2025-09-30; 修回日期: 2025-10-28; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省自然科学基金青年项目“植被对黄土填方体工后水分场再平衡过程的影响机制研究”(2025JC-YBQN-348)资助。

作者简介: 刘德锟(2002-), 男, 硕士研究生, 主要从事黄土力学与生态岩土方面的研究工作。E-mail: 791065865@qq.com。

* 通讯作者: 李萍(1988-), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程方面的研究工作。E-mail: liping_dzxx@nwwu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Initiative, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Shallow fine roots enhance soil shear strength and play a critical role in vegetated slope stability. While prior research focused on factors like soil type, moisture, root arrangement, and plant species, the relationship between root characteristics and root-soil composite strength remains underexplored. This study employs direct shear tests on saturated *Amorpha fruticosa* root-loess composites to systematically investigate the influence of root content, root length, and key parameters (root area index - *RAI*, root length density - *RLD*, root volume ratio - R_v) on shear strength. Results show: ① under low vertical loads, shear strength increases significantly with root content, but this effect weakens under higher loads; ② reinforcement primarily enhances cohesion, with minimal impact on internal friction angle; ③ for root length ≥ 2 cm, an optimal root content (1%-1.5%) maximizes cohesion; ④ shear strength correlates strongly positively with *RAI* and R_v , but weakly with root content, biomass, *RLD*, and specific root length, indicating dominance of root-soil interface friction under saturation. This work clarifies the mechanical mechanisms of root reinforcement in saturated loess, identifies a specific optimal root content, defines key root characteristic-strength relationships (*RAI*, R_v , average diameter), and provides a new theoretical basis for the comprehensive understanding of the mechanical effects of vegetation slope protection in loess areas and the scientific design of ecological slopes.

Keywords: root-soil composite; shear strength; *Amorpha fruticosa*; root parameters; root content

植被作为地球关键带的核心要素,在调控全球水、碳、氮循环,缓解气候变化诱发的自然和地质灾害及人类活动带来的环境问题等方面具有不可替代的作用(Song et al., 2025)。大量研究表明,植被能增强土体,防治水土流失和浅层滑坡,提高边坡稳定性。植被的作用包括水文效应(降雨截留、溅蚀抑制、径流调控)、水力效应(降低土体水分,提高吸力)、力学效应(根系加筋与锚固作用)及生物化学效应(根系分泌物及土壤有机质的胶结作用(尹立河等, 2025; 张文铎等, 2025; 包含等, 2025; Liu et al., 2025))。

植被的力学效应因其作用过程直观、效果显著,在植被护坡机理研究和定量评价中备受关注(Ai et al., 2024)。该效应包括深粗根的锚固作用和浅细根的加筋作用。深粗根只有穿过浅层松散土体到达深层稳定土体才能起到锚固作用,而浅细根由于在土中大量存在并广泛分布,可看作柔性加筋材料,与土体形成根土复合体(张文铎等, 2025; 尹立河等, 2025; Liu et al., 2025)。根土界面摩擦力与根系抗拉强度是影响根土复合体抗剪强度的主要因素,前者与土体类型、状态(饱和度、密实度)、根系构型有关,后者与根系含水率、根龄、根径等因素有关(Ai et al., 2024)。前期对于根土复合体强度特性的研究更多关注含根量、布根方式、土体类型、土体含水率以及植物种类的影响(包含等, 2024)。例如,包含等(2025)针对原状根系土开展直剪试验,研究了根面积比(某深度截面根系面

积与试样截面积之比)、土体含水率和法向应力对峰值强度的影响,发现影响程度表现为根面积比>含水率>法向应力。Song et al.(2025)发现冻融循环作用下根系含量高的根土复合体表现出更高的抗剪强度和变形模量。毛正君等(2023)指出随着植物生长时间的增长,坡面土体的强度逐渐增加,本质原因是根系含量的增加。Lian et al.(2019)的三轴试验结果显示,相比于水平和竖直分布,根系交叉分布的饱和粘性土具有最大的不排水抗剪强度。Wang et al.(2022)针对崩岗区的研究表明,根系对表层土和红土层的加固效果优于深层土。Wang et al.(2024)指出根土界面摩擦系数和土体含水率是影响根土复合体抗剪强度的关键因素。Liu et al.(2023)沿灌木入侵方向对青藏高原草甸区表层土体的抗压强度与抗剪强度进行了试验,发现灌木入侵导致草本植物减少、对表层土体强度产生不利影响。

相比之下,关于根系构型、根长、根径等根系特征对根土复合体强度特性影响的研究较少。根系构型是指根系的分形结构,影响应力在根系间的分配,因此对土体强度特性有着重要影响(Wang et al., 2022)。根土复合体中,即使根系含量相同,根径、根长和根系分布不同,试样亦表现出截然不同的力学行为(胡兵立等, 2024)。刘建平等(2023)指出土体抗剪强度与根面积比之间存在非线性关系(先增高后降低),在根面积比为 0.2% 时达到最大。Li et al.(2024)的试验结果

表明根系提供的粘聚力与根面积成正比。吴锐斌等(2024)发现根土界面摩擦与根径正相关。由此可见,根土复合体的强度并不随含根量单调增加,其力学行为也不单纯依赖于某个根系特征参数,而是与多个根系特征参数相关,这是因为单个参数并不能全面反映土中根系的特征(含量、形态、分布等)。尽管目前针对根土复合体抗剪强度与某些根系特征参数(如含根量和根面积比)之间的关系已有一些研究,但关于根系特征对根土复合体强度的影响仍缺乏系统研究,限制了对根系力学效应或加筋作用的全面理解。本研究制备了根长和含根量不同的紫穗槐根-黄土复合体试样,通过直剪试验、根系特征测量、抗剪强度和根系特征指标相关性分析,研究紫穗槐根系对饱和

黄土的增强效应,分析含根量、根长及各种根系特征参数对抗剪强度的影响规律与机制,以期为黄土区植被护坡机理研究和植被力学效应评价,以及生态边坡设计,提供新的理论依据。

1 试验

1.1 试验材料

试验用土取自陕西洛川,为马兰黄土,其基本物理指标如表 1 所示。试验所用根系取自生长状况良好的两年生紫穗槐。挖出后清洗去除表面土颗粒,筛选根径小于 3 mm 的根系,修剪成 1 cm、2 cm 和 4 cm 的根段,置于 75% 乙醇溶液中低温保存备用。

表 1 试样基本物理性质

Tab. 1 Physical properties of soil samples

含水率 w (%)	土粒相对密度 G _s	天然密度 ρ(g/cm ³)	液限 W _L (%)	塑限 W _p (%)	塑性指数 I _p	颗粒组成 (%)			
						砂砾	粉粒	黏粒	分类
16.8	2.71	1.48	28.2	17.7	10.5	15.1	75.1	9.8	低液限黏土

1.2 试验方法

试验采用人工制备的根土复合体试样。首先,将黄土碾碎、风干、过 2 mm 筛、烘干。将干土分成数等份,每份加入适量蒸馏水,配置特定的含水率(16.8%)。将湿土装入保鲜袋并密封,置于保湿器中静置 48 h,以使水分均匀分布。根据设计的含根量,称取不同质量的细根(≤3 mm),用吸水纸吸去根系表面的乙醇溶液。为确保根系均匀分布,将各试样所需的根和湿土均分为三等份进行混合,并充分搅拌。制样时,将 3 份根土混合物依次倒入模具并压实成型。环刀试样的直径为 61.8 mm,高度为 20 mm,干密度为 1.48 g/cm³。本次试验共有 3 组试样,对应不同的根长(1 cm、2 cm 或 4 cm),每组 15 个试样,每 3 个试样的含根量相同(0.25%、0.50%、1.00%、1.50% 或 2.00%),共有 45 个根系土试样、3 个无根土试样,用于直剪试验。考虑到浅层滑坡的表层根系土在降雨条件下极易饱和,本研究针对饱和根系土开展快速剪切试验。将环刀试样置于真空饱和器中饱和,通过称量饱和试样的质量检验试样饱和度是否满足要求(≥95%)。

1.2.1 直剪试验

利用应力应变控制式直剪仪开展快剪试验。将饱和试样放入剪切盒内,施加竖向荷载(50、100 或 200 kPa),以 1 mm/min 的速率进行剪切。试样的抗剪

强度取剪应力-剪切位移曲线的峰值应力,否则以剪切位移 6 mm 对应的剪应力作为抗剪强度。

1.2.2 根系特征参数测量

试验结束后,将试样置于 0.50 mm 的筛中,用水流小心冲洗,以确保土颗粒逐渐透过筛网,而根系留在筛网上。收集筛网上的根系,用吸水纸吸去根系表面的水分;称得根系的湿重;用镊子仔细将根系移至干净的平面,确保根系自然舒展、无缠绕或重叠,用高分辨率相机从上方拍摄;将根系移入铝盒,在 60 ℃ 烘箱内烘干,称得根系干重。使用基于 Python 程序语言的图像处理软件对根系照片进行图像处理(图 1)。读取照片,进行预处理(灰度化、去噪、增强对比度),通过自适应阈值分割和形态学操作完成二值化;提取根系骨架,进行根长连通域分析和根径分类,计算并输出关键参数(总根长、根系数量、平均根径、根系总表面积、根系总体积);根据表 2 计算根表面积指数、根长密度等根系特征参数。

2 结果与分析

2.1 饱和根土复合体抗剪强度

剪应力-位移曲线中,*L* 代表根长,*P* 代表竖向荷载,*RC* 代表含根量(图 2)。根据曲线形态,各试样的

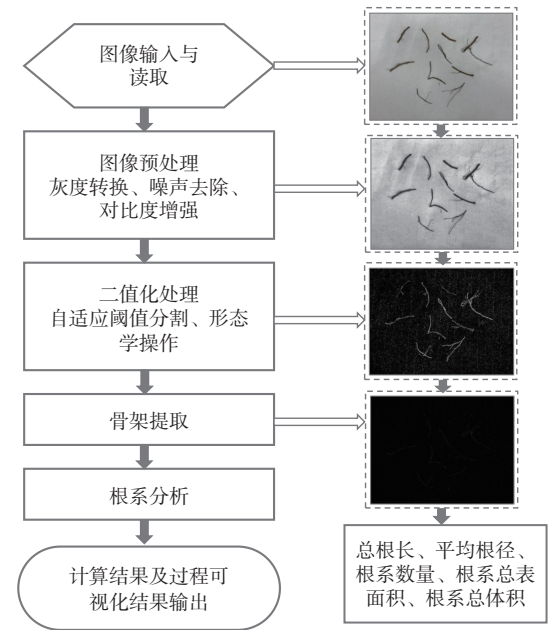


图1 根系分析处理可视化流程图

Fig. 1 Root system analysis processing and visualization

表 2 根系特征参数确定方法

Tab. 2 Methods for determining root characteristic parameters

特征参数	符号	单位	测量方法
根长	l_i	mm	
根径	d_i	mm	
湿重	m_w	g	电子天平称量
根系生物量 (根系干重)	m_d	g	60℃下烘干, 电子天平称量
根系体积比 (单位体积的 根系总体积)	R_v	mm^3/mm^3	$R_v = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4} h} l_i$
根长密度 (单位体积的 总根长)	RLD	mm/mm^3	$RLD = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\frac{\pi D^2}{4} h}$
比根长 (总根长/ 根系生物量)	SRL	mm/g	$SRL = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{m_d}$
根表面积指 数 (单位面积的 根系总表 面积)	RAI	mm^2/mm^2	$RAI = \frac{\sum_{i=1}^n \pi d_i l_i}{\frac{\pi D^2}{4}}$

剪切过程可分为初始剪切阶段、剪切阶段和破坏阶段。在初始剪切阶段,剪应力随剪切位移近似线性增长,穿过剪切面的根系逐渐承受拉力,根系抗拉强度以及根土接触面摩擦力被调动,增强土体强度。随后,在

剪切阶段,由于土体饱和,根土界面摩擦作用较弱,根土间逐渐产生相对位移,最终穿过剪切面的根系基本被拔出,剪应力急剧下降,试样破坏。

低竖向荷载下,根系土的抗剪强度普遍高于无根土试样的,而高竖向荷载下,根系对试样的增强作用不明显。当竖向荷载为 50 kPa 时,与裸土试样相比,含根试样的抗剪强度可提高 9.24%~124.57%,而当竖向荷载增大至 100 kPa 时,含根试样的抗剪强度不总是大于裸土试样的;当竖向荷载为 200 kPa 时,含根试样和裸土试样的剪应力-位移曲线以及抗剪强度相差不大,相比于裸土,含根试样抗剪强度变化-9.92%~11.14%,表明在较大竖向荷载下,剪切面法向应力增大对土体抗剪强度的贡献远超根系加固作用,导致含根量增加引起的抗剪强度变化不再显著(图 2)。这是因为在较小的竖向荷载下,土体强度与模量提升有限,根系与土体间的显著模量差异导致试样沿根土界面发生剪切破坏(即界面失效,表现为根系拔出);而在较大的竖向荷载下,土体强度与模量显著增强,此时根土界面摩擦力亦因正应力增大而提升,此时的主要破坏模式转变为土体的剪切破坏。

此外,低竖向荷载下,根系土的抗剪强度随着含根量的增大而增大,但随着竖向压力的增加,含根量增大导致的这种差异显著减小。竖向荷载为 50 kPa 时,含根量每增加 0.5%,试样的抗剪强度提高约 20%;但当竖向荷载为 100 kPa 时,试样的抗剪强度与含根量之间无显著关系;竖向荷载为 200 kPa 时,含根试样和裸土的抗剪强度差异不大(图 2)。导致这种现象的原因同上,高竖向荷载下,摩擦强度的增大占主导,远超根系对粘结强度的贡献。

随着剪切位移的发展,剪应力的增长速率逐渐减小。根系土中剪应力的增长过程更复杂,剪应力-位移曲线表现出较多波动,相比之下,裸土的剪应力-位移曲线更光滑。根系土剪应力-位移曲线的这种波动特性与根系抗拉强度和根土接触面摩擦强度的逐步调动密切相关。当多条根系穿过剪切面时,沿剪切方向根系依次承受拉力,根系抗拉强度及根土接触面摩擦强度被充分调动时,剪应力达到一个极值。部分根系发生滑移,根土界面摩擦失效,剪应力下降。随着剪切位移的持续增长,应力在剩余根系之间重新分布,剪应力又开始增加,从而逐步调动剩余根系的抗拉强度和根土接触面摩擦强度。因此,剪应力的增长过程并非平滑,曲线上每一个小的波动均代表部分根系的

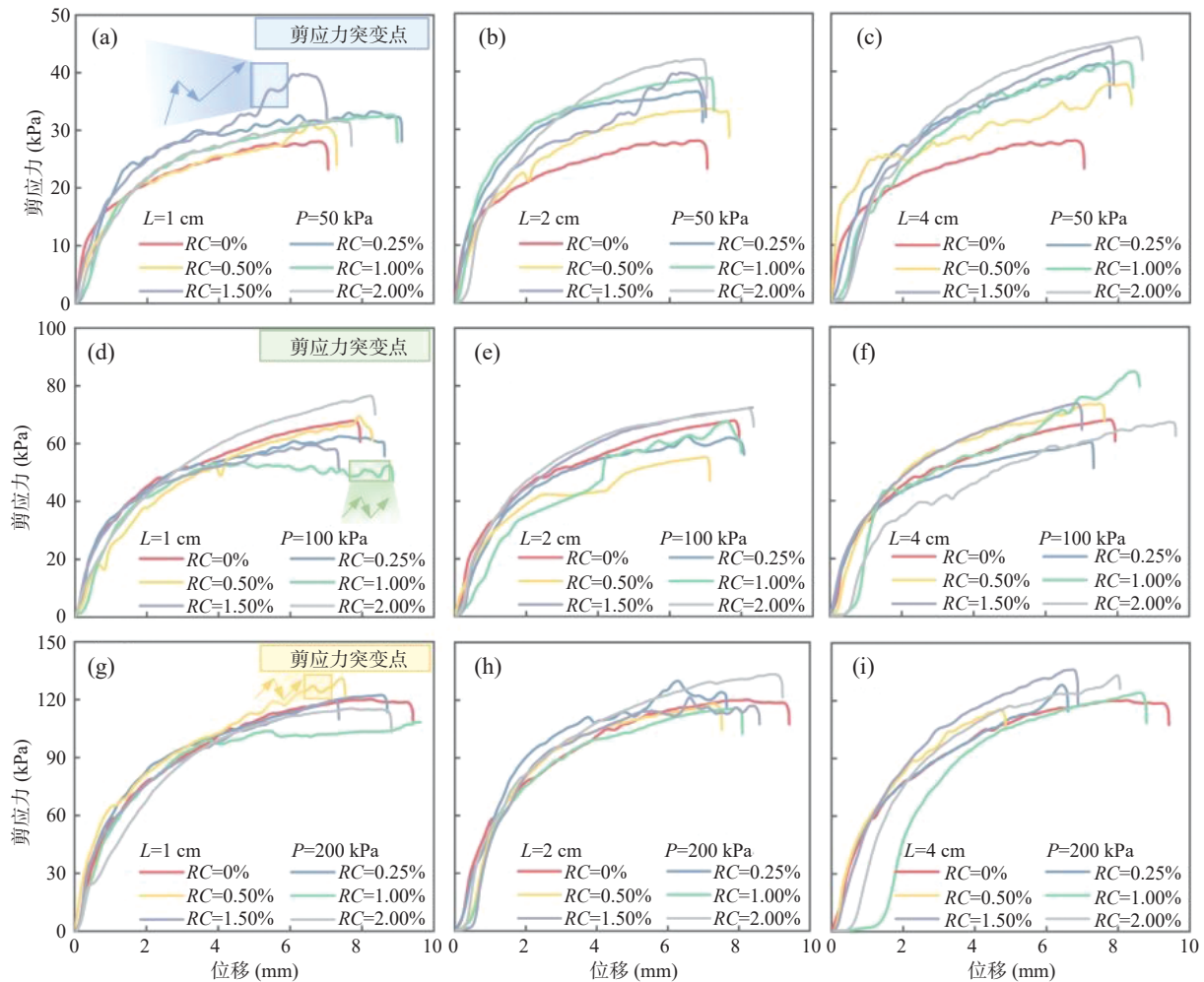


图2 根系土试样的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 2 Shear stress-shear displacement curves of root-soil samples

滑移以及另一些根系开始发挥作用。

从不同根长条件下紫穗槐根系-黄土复合体的强度包线及抗剪强度随含根量的变化曲线可以看出, 含根土体抗剪强度和竖向荷载之间的线性关系可以用一次函数表达, 偏差系数 $R^2 > 0.95$ (图 3a~图 3c)。随着含根量的增加, 强度包线的斜率变化不大, 截距显著提高, 反映了根系对土体的加固作用主要通过提高粘聚力实现。这与刘伟等 (2024) 对不同根系含量的土体进行直剪试验得出的抗剪强度指标变化规律一致, 即根系的加入改变了土体粘聚力, 但对其内摩擦角无明显改变, 他们认为根土之间充分接触, 根系表面粗糙, 根系与土颗粒间的摩擦力形成一种加筋结构, 从而提高了颗粒之间的胶结作用。

含根土体的内摩擦角随着含根量的增加变化较小, 为 $26.97^\circ \sim 32.76^\circ$ (图 3d), 这是因为内摩擦角与粒径级配和颗粒形状密切相关, 根系的加入对土体粒径

分布和矿物组成没有影响, 且根系含量总体较小 ($\leq 2.00\%$), 内摩擦角变化不大 (Xing et al., 2023)。粘聚力变化显著 (为 $3.31 \sim 32.76$ kPa), 这是由于剪切过程中穿过剪切面的根系承受拉力, 根系抗拉强度以及根土接触面摩擦强度被调动, 相当于提高了土体的粘聚强度 (程平等, 2023)。当根长 L 为 1 cm 时, 含根土体的粘聚力随含根量单调增长; 当 $L \geq 2$ cm 时, 粘聚力随含根量的增大先升后降, 存在一个“最优含根量” ($1\% \sim 1.5\%$), 对应最大粘聚力。因为在含根量相同的条件下, 短根能在土体中均匀分布, 根土有效接触面积达到最大化, 故随着含根量的增加, 根土接触面积和摩擦强度增大, 复合体的抗剪强度增大。然而, 当根系较长时, 根系很难分布均匀, 根系可能缠绕、重叠, 根系之间的摩擦作用较小。随着含根量的持续增大, 根系的增强作用 (根土复合体的粘聚力) 反而减弱 (胡其志等, 2010; Chen et al., 2022)。

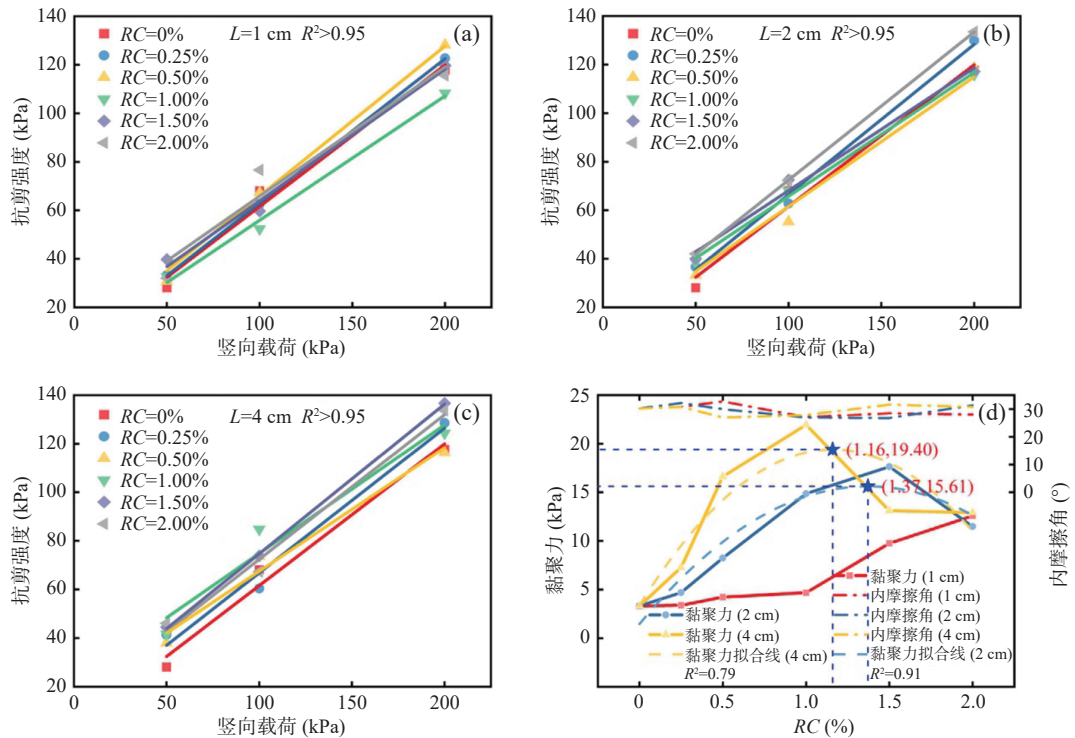


图3 根土复合体的抗剪强度及其指标

Fig. 3 Shear strength and its indexes of root-soil composites

2.2 根系特征参数分布

含根试样中根系特征参数的分布包括根系生物量(m_d)、根表面积指数(RAI)、平均根径(ARD)、根系体积比(R_v)、根长密度(RLD)及比根长(SRL)。RC 相同的试样中根系生物量几乎相等,这是因为根系的含

水率差异很小(极差 0.01 g/cm),而试样的 RC 是通过控制根系湿重控制的,故根系生物量,即根系干重,几乎相等(图 4a)。

在 RC 相同的试样中,根系的 ARD 可能不同,而且 RC 和 ARD 之间没有显著关系(图 4b)。这是因为

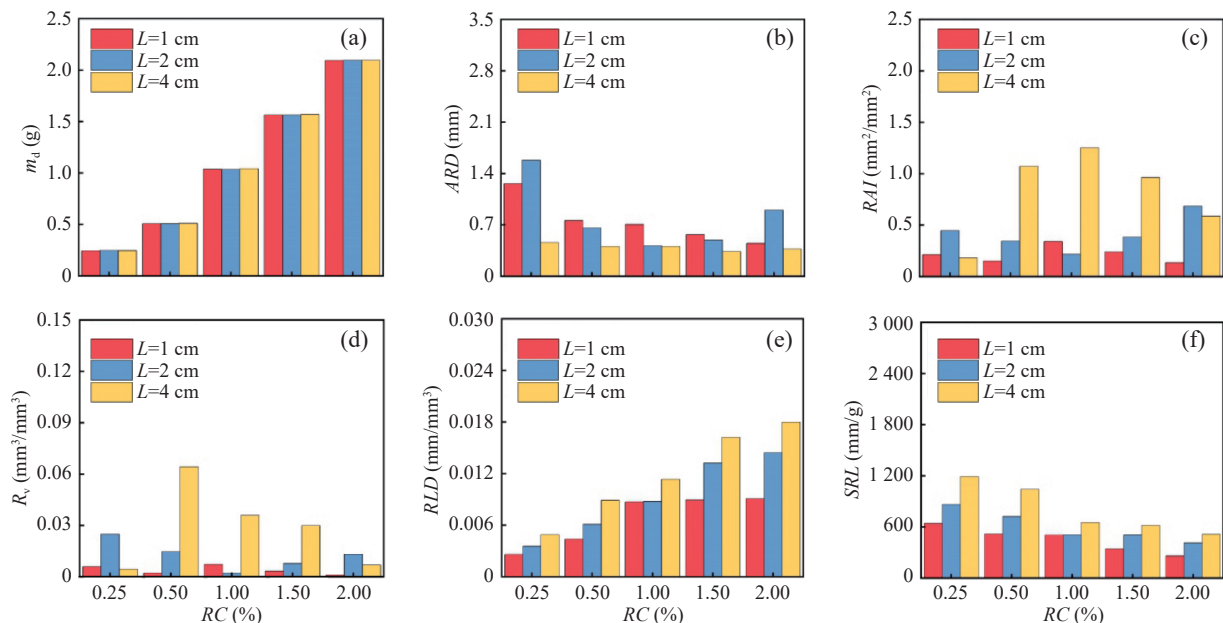


图4 试样中根系的特征参数

Fig. 4 Characteristic parameters of the root system

本次试验只控制了根系的根径(3 mm), 制样时通过控制根系湿重控制试样的 RC , 因此各试样的 ARD 有所不同。同样, RC 相同的试样 RAI 也可能不同, 而且与 RC 之间无显著关系(图 4c)。由 RAI 的计算公式(表 2)可知, RC 或根系质量一定时(假设根系密度不随根径变化), RAI 代表根系的比表面积, 与根径有关, 根系越细, 比表面积越大, 而本研究试样中的根径分布不同, RAI 也就不同。通过对比不同根长条件下 RAI 的变化趋势, 发现短根长(≤ 2 cm)情况下, RAI 随 RC 的变化较小, 而根径较长(4 cm)的情况下, RAI 变化显著。 R_v 在试样体积一定的情况下, 代表根系的体积。在 RC 或根系质量相同的试样中, R_v 不尽相同(图 4d), 这与各试样中根径分布不同以及根系密度随根径变化有关。根长较长(4 cm)的情况下, RC 不同引起的 R_v 的变化显著, R_v 的这一特性与 RAI 随 RC 的变化受根长影响一样。

此外, 因为本研究选用的根系根径变化范围较小(≤ 3 mm), 所以 RLD 与 RC 之间呈正相关关系; 而且, RC 相同的情况下, 根长越长, 试样的 RLD 越大(图 4e)。然而, SRL 与 RC 之间呈负相关关系, RC 或 m_d 相同的情况下, 根长越长, SRL 越大(图 4f)。 RC 相同的试样中(试样体积恒定), RLD 和 SRL 都代表了总根长, 因此随根长的变化是一致的, 这也预示着较长的根系根径或 ARD 略小。

2.3 根系特征与土体抗剪强度之间的相关性分析

在根系特征参数与根土复合体抗剪强度(τ)的相关性分析中, 根土复合体的抗剪强度与根表面积指数 RAI 显著相关(图 5)。这也说明饱和根土复合体中根系主要通过根土界面摩擦作用增强土体抗剪强度(根系被拔出), RAI 越大, 根土接触面积越大, 根系增强效果越明显, 试样的抗剪强度越大。根土复合体的抗剪强度还与根系体积比 R_v 显著相关, 这是因为在根径变化范围较小时(≤ 3 mm), R_v 也一定程度上反映了根系表面积以及根土接触面积的大小。

根土复合体的抗剪强度与 RC 、 m_d 、 RLD 、 SRL 的相关性较弱, 这是因为根系的增强作用取决于根土接触面积或根表面积, 而非根系质量或总根长。值得注意的是, SRL 与 RC 、 m_d 、 RLD 呈负相关。如前所述, RC 代表根系质量, 在根系含水率变化较小的情况下, 等同于 m_d ; RLD 与 RC 正相关(图 4e), SRL 与 RC 负相关(图 4f), 故 SRL 与 RLD 负相关(图 5)。上述分析表明细根(RC 相同的情况下, 根表面积指数较大)是根

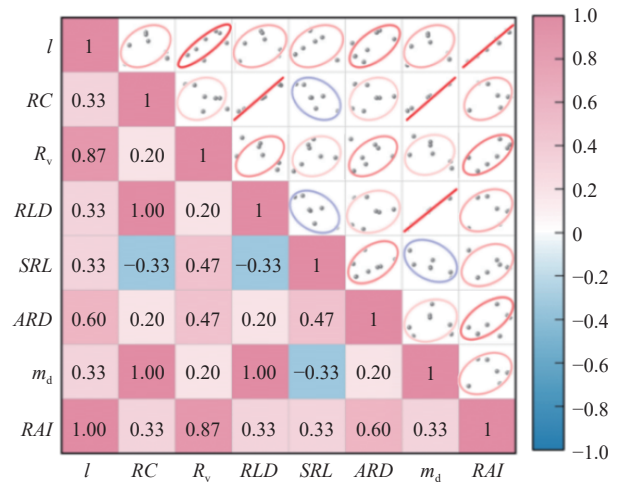


图5 根系特征参数与土体抗剪强度的 Kendall 相关矩阵

Fig. 5 Kendall correlation coefficient matrix of root parameters and soil shear strength

土复合体抗剪强度的主要贡献者。

从上述结果可知, 含根土体的抗剪强度与根系的根表面积指数 RAI 、根系体积比 R_v 、根径之间关系显著, 相关性系数 > 0.6 。下面着重分析根系引起的抗剪强度增量与这些根系特征参数的关系。考虑到本研究试验数据有限, 笔者还从国内外文献中收集了相关数据。需要说明的是, 这些研究既有针对粗粒土的, 也有针对细粒土的, 既有含草根的, 也有含树根的, 既有原状根系土的, 也有重塑根土复合体的(图 6)。为探究根土复合体抗剪强度和根系特征参数的一般性关系, 将这些研究对象不同的试验结果呈现在同一图中。利用抗剪强度增量(相对于裸土)表示根系对土体的增强效应, 能够减少抗剪强度差异太大(由于土体或根系类型不同)导致的分析偏差。

本研究的数据表明, 抗剪强度增量随着 RAI 的增大也表现出增加的趋势(图 6a)。Li et al. (2024) 通过对夹竹桃根系-膨胀土复合体进行研究, 得出一致观点, 即根土复合体抗剪强度的增长, 主要是粘聚力的增加, 并且这种由根系提供的粘聚力与 RAI 成正比。大量研究数据表明, 当 RAI 较小时($0 \sim 0.075 \text{ mm}^2/\text{mm}^2$), 抗剪强度增量与 RAI 之间存在较明显的正线性关系, 然而当 RAI 较大时($> 5 \text{ mm}^2/\text{mm}^2$), 根土复合体的抗剪强度几乎不随 RAI 的增大而变化。这是因为当 RC 或 R_v 一定时, RAI 取决于根径分布; 根系越细, 数量越多, RAI 越大, 这与 Tang et al. (2010) 关于加筋土的研究结论类似, 即土体抗剪强度的提升源于根土界面的摩擦作用。而当根系过多时, 根系在土体中密集分布, 土体

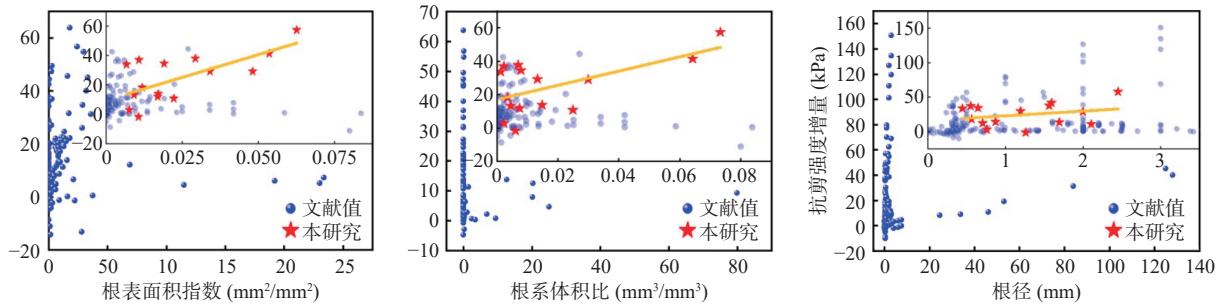


图6 植被根系特征参数和土体抗剪强度增量的关系

Fig. 6 Relation of root parameters and the soil shear strength

较难形成稳定的整体结构,剪切时易发生应力集中,在根系周围产生剪切带。根系之间可能发生物理接触和相互作用,减少了根系与土颗粒的接触面积,根系间接触增多且根系间界面摩擦较小,导致土体抗剪强度不能随着 RC 或 RAI 的增大而有效提升(图 3d)。

根土复合体的抗剪强度在根系体积比较小时($R_v \leq 0.01 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$)变化较大(图 6b)。本研究的数据表明,抗剪强度增量基本随 R_v 呈增加趋势。这与 Song et al.(2025)的结果一致,通过低压力下的直剪试验和三维结构重构,发现根系体积比小于 $4.72 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ 时与抗剪强度之间存在显著的正相关关系,并且当土体性质、根系类型不同时,这种关系仍存在(张川等, 2024)。而大量研究数据表明,当 R_v 较大时($>0.01 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$),不同根系土的抗剪强度并未呈现出一致的增强效应。这表明针对不同的植物根系需要对其具体体积比范围进行分析比较。

根系加筋作用产生的抗剪强度增量随着根径的增大而增大(图 6c),这与上节得出的 ARD 与 τ 正相关的结论一致(图 5)。但是,当根径 $\leq 10 \text{ mm}$ 时,抗剪强度增量的变幅较大($0 \sim 160 \text{ kPa}$),随根径的变化规律不明显,尤其在 $0 \sim 3 \text{ mm}$ 范围内。本研究的数据也体现了这一点。当根径 $\leq 0.5 \text{ mm}$ 时,抗剪强度增量甚至为负,这是因为这些细根不仅抵抗拉拔的作用有限,而且容易相互缠绕、重叠,导致根系的增强作用不明显,甚至产生不利影响。而且通过对本研究与前人研究成果进行对比发现,即使在根径相同的情况下,土体抗剪强度增量也会出现不同的结果。

综上所述,在评估根系特征对植被根系固土护坡效果的影响时, RAI 、 R_v 、根径是关键指标。但其并不具有一般性规律。总之,土体抗剪强度与 RAI 、 R_v 的相关性较强,同种植物在一定范围内随着它们的增加近似线性增大,而与根径的关系较弱。在植被护坡方案设计时,需综合考虑各根系特征参数的分布情况,

选择合适的植物种类或根型。

3 结论

(1) 低竖向荷载下,根系土的抗剪强度随着含根量的增大而增大,但随着竖向荷载的增加,含根量增大导致的这种差异显著减小。这是因为高竖向荷载下,摩擦强度的增大占主导,远超根系对粘结强度的贡献。

(2) 根系土中剪应力的增长过程更复杂,剪应力-位移曲线表现出较多波动,这与根系抗拉强度和根土接触面摩擦强度的逐步调动有关。

(3) 含根土体的内摩擦角随着含根量的增加变化较小,而粘聚力变化显著,表明根系对土体的加固作用主要通过提高粘聚力实现。当根长 $\geq 2 \text{ cm}$ 时,粘聚力随含根量的增大先升后降,存在一个“最优含根量”(1%~1.5%)对应最大粘聚力。

(4) 根土复合体的抗剪强度与根表面积指数 RAI 显著相关,说明饱和根土复合体中根系主要通过根土界面摩擦作用增强土体(根系被拔出), RAI 越大,根土接触面积越大,根系增强效果越明显。根土复合体的抗剪强度还与根系体积比 R_v 显著相关,而与含根量、根系生物量、根长密度、比根长的相关性较弱。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

包含,敖新林,高月升,等.黄土边坡典型护坡植被的根系加固力学效应演化分析[J].中国公路学报,2024,37(6):98-110.

- BAO Han, AO Xinlin, GAO Yuesheng, et al. Evolution analysis of root reinforcement mechanical effect of typical plant production on loess slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(6): 98–110.
- 包含, 王耿, 晏长根, 等. 公路建设碳排放核算与岩土工程低碳措施及碳补偿研究综述[J]. 中国公路学报, 2025, 38(1): 46–72.
- BAO Han, WANG Geng, YAN Changgen, et al. Highway construction carbon emission assessment and low-carbon measures and carbon compensation for geotechnical engineering: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(1): 46–72.
- 程平, 李鹏程, 钟彩尹, 等. 根土复合体依赖根系含量的力学特性及非线性破坏准则[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(12): 110–117.
- CHENG Ping, LI Pengcheng, ZHONG Caiyin, et al. Mechanical Properties and Nonlinear Failure Criteria of Root-Soil Composite Dependent on Root Content[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(12): 110–117.
- 胡兵立, 苏立君, 谢奇峻. 乔木根径、含量和分布类型对根土复合体饱和渗透系数的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(5): 16–25.
- HU Bingli, SU Lijun, XIE Qijun. Influence of tree root diameter, content and distribution type on the saturation permeability coefficient of rooted soil[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(5): 16–25.
- 胡其志, 周政, 肖本林, 等. 生态护坡中土壤含根量与抗剪强度关系试验研究[J]. 土工基础, 2010, 24(5): 85–87.
- HU Qizhi, ZHOU Zheng, XIAO Benlin, et al. Experimental Research on Relationship Between Root Weight and Shearing Strength in Soil[J]. Soil Eng and foundation, 2010, 24(5): 85–87.
- 刘建平, 周花玉, 何天奎, 等. 含根量对根-土复合体的抗剪强度影响试验初探——以垂丝海棠为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(S1): 3618–3628.
- LIU Jianping, ZHOU Huayu, HE Tiankui, et al. Experimental study on influence of root content on shear strength of root-soil-rock composite: A case study of *Malus Halliana*[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3618–3628.
- 刘伟, 闫晓宇, 刘庆朋, 等. 根土复合体增强矿区排土场边坡抗剪强度试验研究[J]. 黄金科学技术, 2024, 32(5): 871–881.
- LIU Wei, YAN Xiaoyu, LIU Qingpeng, et al. Experimental Study on Shear Strength of Dump Slope in Mining Area Enhanced by Root-Soil Composite[J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(5): 871–881.
- 毛正君, 耿咪咪, 毕银丽, 等. 紫花苜蓿-黄土复合体抗剪强度时间效应研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 234–247.
- MAO Zhengjun, GENG Mimi, BI Yinli, et al. Study on the time effect of shear strength of *Alfalfa*-loess composite[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 234–247.
- 吴锐斌, 及金楠, 杨戬哲. 不同生长阶段香根草根土复合体的邓肯—张本构模型[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 97–104.
- WU Ruibin, JI Jinnan, YANG Yuzhe. Duncan-Chang constitutive model of *Vetiver* root and soil matrix at different growth stages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 97–104.
- 尹立河, 王平, 王田野, 等. 西北地区地下水依赖型植被生态水文过程研究进展与展望[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 16–30.
- YIN Lihe, WANG Ping, WANG Tianye, et al. Review on eco-hydrological process of groundwater-dependent vegetation in NW China: progress and outlook[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 16–30.
- 张川, 谢祥荣, 段青松, 等. 木纤维重构红壤下根系特征对根土复合体抗剪特性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 138–146.
- ZHANG Chuan, XIE Xiangrong, DUAN Qingsong, et al. Effects of root characteristics on the shear characteristics of root-soil complex in wood fiber reconstructed red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4): 138–146.
- 张文铎, 包含, 兰恒星, 等. 不同坡度下生态防护黄土边坡水分迁移演化特征研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 121–135.
- ZHANG Wenduo, BAO Han, LAN Hengxing, et al. Study on water migration and evolution characteristics of ecologically protected loess slopes with different inclinations[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 121–135.
- Ai S H, Liu Z, Ai X, et al. China's road slopes need long-term protection[J]. Science, 2024, 384(6699): 2.
- Chen Y D, Tang H, He B H, et al. Root tensile strength of terrace hedgerow plants in the Karst trough valleys of SW China: Relation with root morphology and fiber content[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022(4): 677–686.
- Li Y L, Yang G L, Lin Y L, et al. Research on the shallow landslide stability of vegetated slopes with expansive soils based on root morphology[J]. Ecological Modelling, 2024, 496: 110808.
- Lian B Q, Peng, J B, Zhan, H, et al. Mechanical response of root-reinforced loess with various water contents[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 193: 85–94.
- Liu H L. Biogenic construction: The new era of civil engineering[J]. Biogeotechnics, 2025, 3(1): 100130.
- Liu Y F, Fang H, Huang Z, et al. Shrub encroachment increases soil erosion risk in hillside Alpine meadows of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Catena, 2023, 222: 106842.
- Song B, Dai N, Kawaguchi T, et al. Quantifying the shear behavior of fine-grained soil with herbaceous plant roots under freeze-thaw conditions using X-ray CT scan[J]. Soil & Tillage Research, 2025, 246.
- Tang C S, Shi B, Zhao L Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(1): 54–62.
- Wang C, Li Z W, Cai B L, et al. Effect of root system of the *Dicranopteris dichotoma* on the soil unconfined compressive strength of collapsing walls in hilly granite area of South China[J]. Catena, 2022, 216: 106411.
- Wang X, Zhou H, Tong J. Shear characteristics of root-matrix composites under various interface friction and moisture content conditions[J]. Rhizosphere, 2024, 31: 100944.
- Xing G S, Zhang G, Zhu P Z, et al. Variation in shear strength of soil-root system under five typical land use types on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2023, 231: 107380.