DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.020 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.020
游国洋, 李万, 蒋召杰, 等. 香根草-红黏土复合体的直接剪切特性研究[J]. 水土保持研究,2026,33(6):302-310.
You Guoyang, Li Wan, Jiang Zhaojie, et al. Study on direct shear properties of *Chrysopogon zizanioides*-red clay composite[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):302-310.

香根草-红黏土复合体的直接剪切特性研究

游国洋[1], 李 万[2], 蒋召杰[2], 王艺伟[1], 方 薇[1]
(1.长沙理工大学 交通学院, 长沙 410114; 2.湖南致力工程科技有限公司, 长沙 410000)

摘 要:[目的]揭示香根草-红黏土复合体在直接剪切条件下的力学性能,探明香根草根系对红黏土抗剪性能的提升效应。[方法]通过单根室内直剪试验与模型培育根系大尺寸剪切试验研究了根段倾角与根系形态的影响。[结果](1)在相同工况下,随着根段倾斜角度α的增大,含根土抗剪强度峰值随之减小,α=30°时含根土试样抗剪强度峰值最大,为50.80 kPa。(2)大尺寸剪切试验中相较于素土试样,5个含根土试样抗剪强度分别提高了213%,447%,702%,403%和916%。(3)4个根系形态指标相关性顺序为根长密度(R^2=0.98)>根表面积密度(R^2=0.93)>根体积密度(R^2=0.81)>根截面积比(R^2=0.77),根长密度对植物根系固土效应影响更为明显。[结论]根段倾角对根土复合体黏聚力有显著影响,而根长密度可作为根系固土效应的关键评价指标,相关成果可为红黏土地区植草边坡防护设计提供参考。

关键词:植物护坡; 根-土复合体; 剪切试验; 含根红黏土; 根系形态指标
中图分类号:S157.1; TU411.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0302-09

Study on direct shear properties of *Chrysopogon zizanioides*-red clay composite

You Guoyang[1], Li Wan[2], Jiang Zhaojie[2], Wang Yiwei[1], Fang Wei[1]
(1.*School of Transportation, Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410114, *China*; 2.*Hunan Zhili Engineering Technology Co., Ltd., Changsha* 410000, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study investigates the mechanical properties of the *Chrysopogon zizanioides*-red clay composite under direct shear conditions and clarifies the improvement effect of *C. zizanioides* roots on the shear resistance of red clay. [**Methods**] The influence of root segment inclination angle and root morphology was studied through single-root indoor direct shear tests and large-scale in situ shear tests on undisturbed root systems. [**Results**] (1) Under the same conditions, as the root segment inclination angle α increased, the peak shear strength of soil with roots decreased. The peak shear strength of the soil sample with roots reached the maximum of 50.80 kPa at α=30°. (2) In the large-scale shear tests, compared with the plain soil sample, the shear strengths of the five root-containing soil samples increased by 213%, 447%, 702%, 403%, and 916%, respectively. (3) The correlation order of the four root morphology indicators was root length density (R^2=0.98) > root surface area density (R^2=0.93) > root volume density (R^2=0.81) > root cross-sectional area ratio (R^2=0.77). Root length density had a more significant effect on the soil reinforcement effect of plant roots. [**Conclusion**] The root segment inclination angle significantly affects the cohesion of the root-soil composite, and root length density can serve as a key evaluation indicator for the soil reinforcement effect of roots. The relevant findings can provide a reference for the design of grass-covered slope protection in red clay regions.

Keywords: slope protection by vegetation; root-soil composite; shear test; red clay with roots; root morphology indicators

收稿日期:2025-11-10 **修回日期:**2026-01-05 **接受日期:**2026-01-10
资助项目:国家自然科学基金面上项目(52178413);国家自然科学基金重点项目(52338009);科技部重点研发计划项目(2021YFB2600900)
第一作者:游国洋(2000—),男,河南鹤壁人,硕士研究生,研究方向为土力学。E-mail:y2801647579@163.com
通信作者:方薇(1984—),男,湖南岳阳人,博士,副教授,主要从事土力学研究。E-mail:fangwei5642366@csust.edu.cn

当前,中国正大力建设生态文明,习近平总书记提出“绿水青山就是金山银山”的科学论断,而国家基础道路建设同样与生态环境保护密不可分。植物根系的锚固作用可以减少自然因素对边坡产生的危害,而特殊土是边坡防治和处理的一个重点研究对象。红黏土作为特殊土的一种,广泛分布于我国云贵高原、两湖两广等地区,红黏土边坡破坏主要表现为强降雨之后的浅层滑塌。植草防护作为边坡浅表防护的一种有效措施,探明其对红黏土边坡浅层土体的固土效果是十分必要的。

关于植物根系固土作用的研究成果越来越丰富,如用来量化植物根系固土作用效果的根系固土理论模型[1],草本植物对红黏土边坡具有良好的固土护坡效应,香根草(*Chrysopogon zizanioides*)[2]相较于狗牙根对土体抗剪强度的增益效果更明显。草本植物对土体的加固作用表现在水文作用和力学加固作用这两个方面[3-5],水文作用表现在植物叶与茎通过蒸腾作用调节土壤含水量,提高根土复合体的稳定性,力学加固作用主要表现为根系深入土壤后,通过分泌的化学物质与土壤颗粒充分粘连形成根土复合体。草本植物根系空间分布对土体的强度影响也有一系列研究[6-8],其中王海涛等[6]以 Wu 和 Waldron 提出的根系固土模型为基础提出了改进模型,结果表明随着根系直径的增大,不同分布角度的根系对土体的加筋贡献值均增大,且大致成正比例关系,在一系列含根土试样直接剪切试验中确定了根土结构对土壤强度的影响[9-10],试验表明含根土壤黏聚力显著增加。相关研究也探讨了根-土系统的作用机制、根系分布以及不同影响因素对土体抗剪强度和边坡稳定性的影响[11-14],其中包括了不同径级、不同龄期、不同布置方式、不同含根量对根土复合体抗剪强度的差异性影响。Mao 等[15]重点分析了干湿循环作用下紫花苜蓿根-土复合体抗剪强度指标和变形指标的时间变化规律,提出了干湿循环作用下紫花苜蓿根-黄土复合体抗剪强度预测模型,具有较高的预测精度,Zhou 等[16]利用计算机断层扫描三轴压缩仪研究植物根系加固土体的细观力学特性,结果表明在细观层次上,根系抑制裂纹进一步扩展及其桥联行为有助于提高土体强度和韧性。Saadati 等[17]利用大型土壤-根系剪切仪对选定的草原植物的须根进行土壤机械加固,试验表明不同的植物根系均可以显著降低土壤的脱离速率[18-19],并且草本植物根系对土壤侵蚀的影响因植物种类和根系类型的不同而不同。一系列试验探究了植物根系形态以及特征对根土复合体抗剪强度的影响[20-24],其中 Liu 等[24]利用根土复合体剪切试验,基于灰色关联分析方法,得到了与山药根土复合体最大剪切力相关性最大的根系形态指标。以上研究表明在红黏土边坡种植植物可以有效利用植物根系对土体的锚固作用对红黏土边坡浅表层土体进行加固,根系固土理论已有几十年的发展历史,植物根系与表层土体结合在一起增加了土体的抗剪强度,提高了边坡的稳定性。

室内直剪试验仍是开展含根土抗剪强度研究的重要途径,本文在室内直剪试验的基础上,通过自行设计制作的剪切设备实现了对含天然空间分布根系的原状香根草-红黏土复合体的大尺寸剪切试验,它克服了室内直剪试验在测试香根草-红黏土复合体时存在的边缘处应力集中,无法开展包含整株根系的缺点。通过统计各含根土试样的根系形态指标数据,探究其与含根土抗剪强度增量的相关性。最终通过直剪试验与大尺寸剪切试验相结合,为全面地探究根土复合体的直接剪切特性,也进一步探明植物根系固土效果,为红黏土边坡防护治理提供重要的理论价值和工程借鉴意义。

1　含(无)根红黏土室内直剪试验

1.1　材料与方法

本文中采用的红黏土土样来自湖南省永州市某典型红黏土边坡,该地区年降雨量为 1 200～1 900 mm。土样运回后采用人工堆填边坡的方式分层填筑在室外模型箱内,箱内种植香根草幼苗。红黏土在不同降雨量和空气湿度下天然含水率也不断变化,土样在固定时期的天然含水率后,所有试验均在此时期内进行。通过液塑限联合测定仪测定液限和塑限,并采用比重瓶法测定比重,通过击实试验获得土体的最大干密度。土样相关指标见表 1。

香根草种植相对方便,环境适应性强,将室外模拟箱中生长周期为 1 a 的整株香根草挖掘取出,待根系表面浮土清理完成后,将新鲜根系放入 4 ℃的恒温箱中保存备用。试验选取根径为 1 mm 的香根草根系,制作香根草根段时选择顺直、无明显弯曲和损伤的香根草根段,用游标卡尺分别在根段两端和根段中间位置测量其直径,每个部位重复测量 3 次并取其平均值,确保根段 3 个部位直径差值不超过 0.1 mm。

在以上材料准备充分后,进行试样风干制备,从人工堆填边坡取代表性土样,均匀摊铺风干,将土样充分碾碎后过 2 mm 筛并测得风干后土样残余含水率。按照边坡土样的实测天然含水率计算试验用土所需水量,在风干土体内分次加水搅拌均匀,放入密

封的保鲜袋中静置一晚，使土样内所含水分更加均匀。根据环刀体积计算所需土样质量，将称量好的土样倒入制样容器中，待压至与环刀高度平齐时，静压十几分钟防止试样回弹。

表 1 某红黏土土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property indicators of red clay samples

天然含水率(ω)/%	天然密度(ρ)/(g·cm^{-3})	最大干密度(ρ_d)/(g·cm^{-3})	孔隙比(e)	液限(w_L)/%	塑限(w_P)/%	塑性指数(I_P)
25	1.67	1.79	1.04	59.8	28.1	31.7

对于含根土试样，为保证香根草根段与土样充分接触，试样分两次压实。第一次压实时压至高出环刀 5 mm 高度。静压后将环刀与土样同时取出，用细铁丝在对应位置按照预设角度扎出略大于根系直径的小孔，之后将剪好的香根草根段插入小孔内再将试样放进压样容器内进行第二次压实。室内直剪试验所用设备为 ZJ 型应变控制式四联直剪仪，该设备主要由剪切盒、轴向加压装置、量力环和推进系统等组成。

1.2 试验方案

试验按照根段倾斜角度不同共设置 3 种试验工况见表 2，其中 α 表示根系与剪切面夹角，β 表示根系在剪切面投影与剪切方向夹角。

表 2 不同工况条件

Table 2 Different working conditions

工况	对应根段倾角	长度/mm
S	素土	0
A_{30}	$\alpha=30°,\beta=0°$	40
A_{60}	$\alpha=60°,\beta=0°$	23
A_{90}	$\alpha=90°,\beta=0°$	20
A_{120}	$\alpha=120°,\beta=0°$	23
A_{150}	$\alpha=150°,\beta=0°$	40
B_{30}	$\alpha=30°,\beta=90°$	40
B_{60}	$\alpha=60°,\beta=90°$	23

试验在重塑土样中人工配置香根草根段模拟，根段在土体中的分布角度，如图 1 所示。工况 B 模拟根段与剪切面倾斜角度不变而空间位置改变时对土体的抗剪强度影响，可作为工况 A 的对照组。

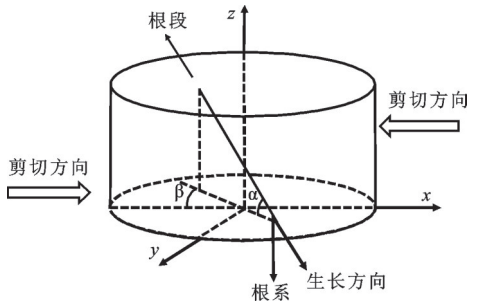


图 1 不同根系倾斜角度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different root inclination angles

1.3 结果与分析

1.3.1 *剪切位移曲线* 不同工况下以 S，A_{30}，B_{30} 为例的剪应力-剪切位移曲线绘制如图 2 所示，图中 τ 为剪应力，s 为剪切位移，每个根-土复合体试样做 3 个平行试样以保证试验结果的准确性。

在 12.5，25，50 kPa 垂直荷载下，各工况条件下剪应力随着剪切位移的不断增长，其剪应力值趋于稳定，甚至略有下降，呈现应变软化的趋势，反映出土体结构破坏后强度衰减的过程，对于 100 kPa 法向荷载，试验过程中剪应力呈单调增长的特征，峰值出现时刻大大延迟，说明高荷载下土体与根段之间的相互作用增强，根段加筋效应更为显著。

在剪切位移 2 mm 以内，各工况条件下含（无）根红黏土试样剪应力增长速度较快，后期增长速度趋于平缓，含根试样在初始阶段的剪应力增长较快，表明根段能有效提高土体的初始剪切强度，增强早期抗剪能力。此外，含根试样在峰值强度后的强度下降较素土更为缓慢，说明根段不仅能提升峰值强度，还能维持较高的残余强度，从而提高土体在剪切后的整体稳定性。

1.3.2 *抗剪强度与剪切参数* 不同工况下所得抗剪强度峰值如图 3 所示，可以看出，各工况下素土试样的抗剪强度峰值均为最小，说明根段的存在有效增加了土体的抗剪强度，根段倾斜角度 α 越小，含根土试样中放置的根系长度也越长，从而根-土界面之间的抗拔力也就越大，抗剪强度增长越明显。以 100 kPa 垂直荷载下为例，当 β 保持不变时，随着根段倾斜角度 α 的增大，抗剪强度峰值随之减小，由图可知在工况 A 条件下抗剪强度峰值次序为 $A_{30}>A_{60}>A_{90}$，同时根系长度越长抗剪强度峰值也相应有所增长，所以 A_{120} 与 A_{150} 工况下抗剪强度峰值均高于 A_{90}。

在 $\alpha=30°$ 的情况下，对比 A_{30} 与 B_{30} 抗剪强度峰值，由图可知 $A_{30}>B_{30}$，在 $\alpha=60°$ 的情况下，对比 A_{60} 与 B_{60} 抗剪强度峰值，由图可知 $A_{60}>B_{60}$，虽然工况 B 两个角度下抗剪强度峰值均较工况 A 对应角度抗剪强度峰值稍小，但由于在相同倾斜角度条件下根系长度并未发生改变，因此随着根系倾斜角度的变化，两种工况的两个角度对应的抗剪强度峰值变化规律相同。

将各工况条件不同法向应力下抗剪强度进行线性拟合，可得到对应的抗剪强度参数（表 3）。可以看出，在土体中加入根段有效提升了土体的黏聚力。根段倾角在 A_{30} 工况条件下时，黏聚力增长最大，在

所有含根土试样中,工况 A_{90} 下黏聚力增长最小,表明根段顺剪切方向生长时黏聚力提升较大,但相较于黏聚力的变化,加入根段后各根-土复合体试样的内摩擦角变化较小。

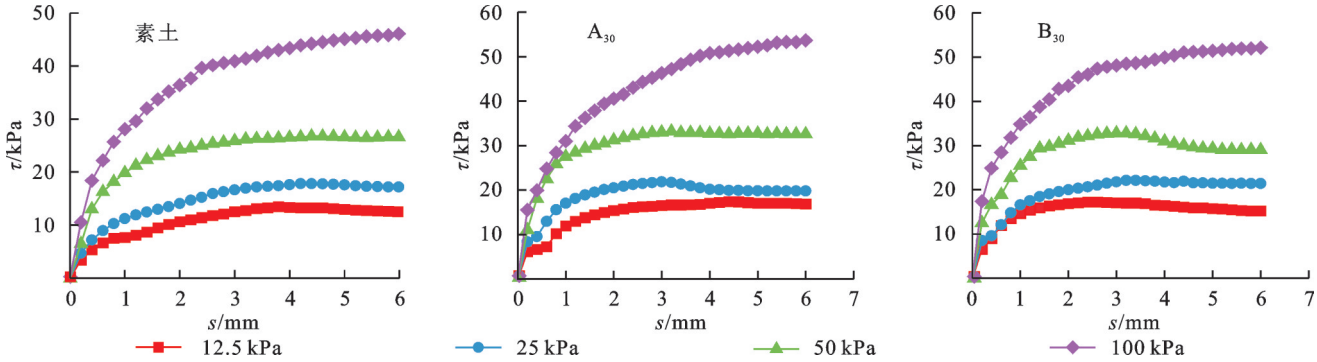


图 2　含(无)根土剪应力-剪切位移曲线

Fig. 2　Shear stress-shear displacement curves of soil with and without roots

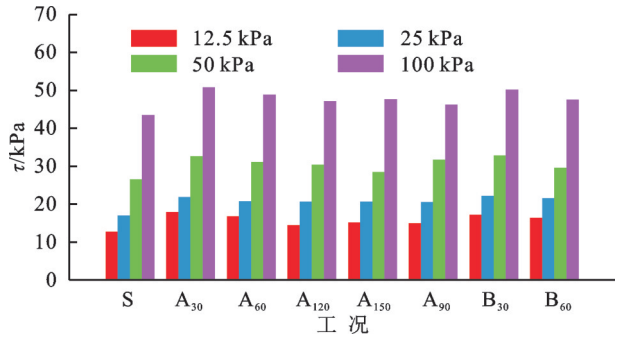


图 3　不同垂直荷载下各工况抗剪强度峰值对比

Fig. 3　Comparison of peak shear strength under different vertical loads for various working conditions

表 3　各工况条件下抗剪强度参数

Table 3　Shear strength parameters under various working conditions

工况	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
S	9.95	18.92
A_{30}	12.95	20.81
A_{60}	12.00	20.30
A_{90}	11.70	19.54
A_{120}	10.70	20.20
A_{150}	11.50	19.80
B_{30}	12.89	20.66
B_{60}	12.18	19.44

2　含(无)根红黏土大尺寸剪切试验

2.1　材料与方法

本试验采用的剪切设备为自制剪切仪,主要由反力框架、剪切盒、测力计、电动推杆以及电控箱组成,如图 4 所示。

电动推杆的拉拔速率为 20 mm/min,最大拉伸距离为 30 cm,拉伸距离可由控制箱操控。数显式测力计量程为 3 000 N,精度 0.1 N,测力计通过扣环与剪切盒和拉拔仪相连接。

铝合金剪切盒分为上盒与下盒,上剪切盒沿剪切方向一侧焊接有一个锁扣,与测力计通过钢制挂钩连接。此外,为防止在剪切过程中剪切盒发生错动,在试验箱两侧用 4 组定向滑轮固定上剪切盒,使其随着拉拔仪只发生拉拔方向移动。剪切盒内壁平面尺寸为长×宽=180 mm×180 mm,为体现不同剪切深度的影响,共设计了 3 组不同的剪切盒,上盒高度分别为 40,60,80 mm,如图 5 所示。

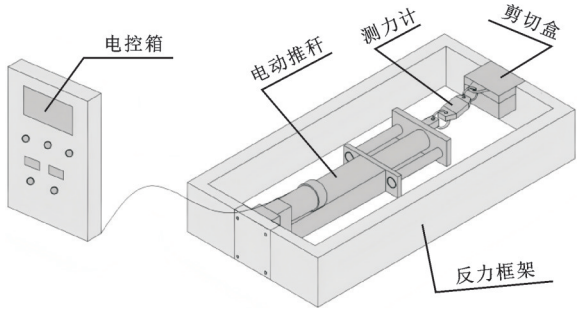


图 4　自制剪切仪

Fig. 4　Self-made shear apparatus

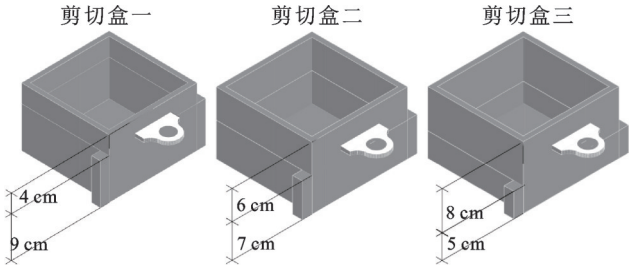


图 5　剪切盒示意图

Fig. 5　Schematic diagrams of shearing boxes

挖掘试样时,先将植株地上部分剪断,然后采取全断面挖掘法取样,在取样过程中注意保持试样的完整性,仔细切割冗余根段,并消除相邻植株根系之间的干扰。

2.2　试验方案

大尺寸剪切试验包含 1 个素土试样以及 5 个含根土试样,即 1 个素土(S)和 5 个含根土试样 R_1—R_5。

由表4可知,各试样的含水率为挖取试样时测得。试验时将剪切盒、测力计与电动推杆通过扣环和钢制挂钩连接,确保三者位于同一水平线上,最后,接通电源检验设备是否运行正常并开始试验。为避免昼夜温差带来的土体含水率变化,试样挖取工作以及剪切试验宜在一天内完成。

表4 试验方案

Table 4 Test schemes

试样编号	含水率/%	对应剪切深度/mm
S	27.6	60
R_1	27.8	60
R_2	27.9	60
R_3	28.1	60
R_4	27.2	40
R_5	27.2	80

2.3 根径与根系形态特征

探究植物根系对土体的加固效果时,根系形态是一个重要影响因素,根系形态特征指标包括根长密度(RLD)、根表面积密度(RSD)、根截面积比(RAR)以及根体积密度(RVD),结合大尺寸原状含根土剪切试验,能够进一步探究根系的固土效果。在相同剪切深度下R_1,R_2,R_3试样根系形态指标随土层深度变化情况如图6所示。其中R_1在0—60 mm深度土层范围内总根系长度占所有土层深度范围内根系长度的46%;60—120 mm土层深度范围内总根系长度占所有土层深度范围内根系长度的35%;在120—180 mm以及180—240 mm土层深度范围内总根系长度所占比例则急剧下降,分别降至16%和3%。此现象主要归因于红黏土的物理性质对根系生长的机械约束,在0—60 mm土层深度范围内形态指标数值均为最高,随着土层深度增加而减小。

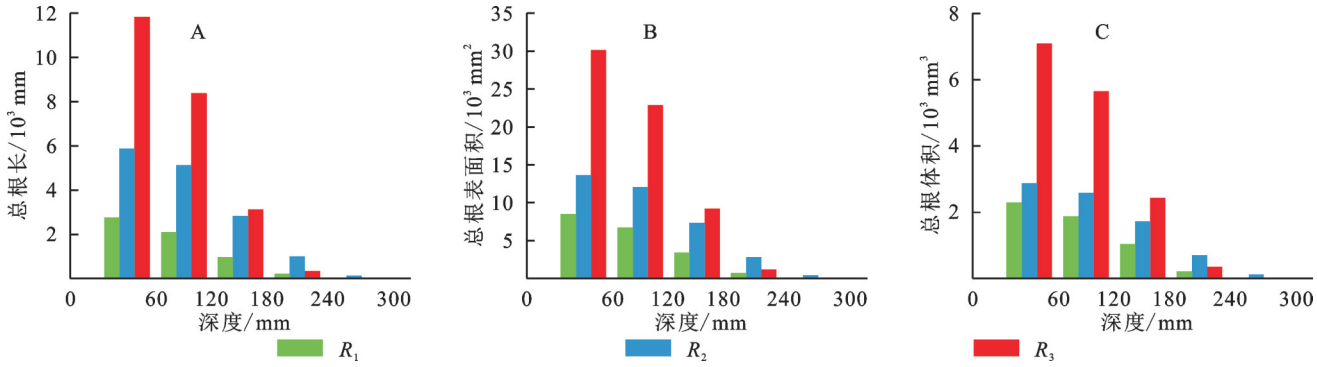


图6 不同试样根系形态特征指标随土体深度变化

Fig. 6 Variation of root morphology indicators of different samples with soil depth

在本试验中,香根草种植时间较短,因此将各含根土试样根系直径按照0~0.5 mm,0.5~1 mm,1~1.5 mm划分为3个径级,并统计各个径级区间内根系在不同土层深度范围中的分布情况(图7—9)。

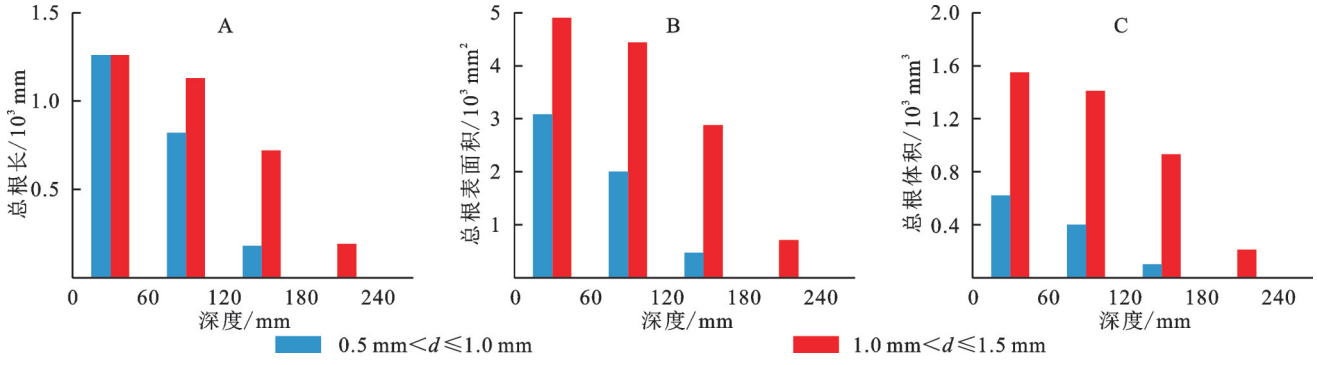


图7 R_1试样不同根径等级各根系形态特征指标图示

Fig. 7 Schematic diagrams of root morphology characteristic indicators for different root diameter grades of R_1

R_1含根土试样中,根系主要集中于1~1.5 mm径级区间内,随着土层深度的增加,这种现象趋于明显。与R_1含根土试样不同,R_2(图8)与R_3(图9)两个含根土试样根系在3个径级区间内均有分布。由于香根草属于典型的散生根型根系,不同试样根系形态具有不同特点,试验中发现R_1试样根系相较于其他试样较为稀疏,0~0.5 mm范围内根系几乎没有分布。从二者的根系长度随土层深度变化规律来看,1~1.5 mm径级区间内根系生长最为浓密,分别占据整个根系的53%与52%。0~0.5 mm,0.5~1 mm径级区间内二者根系长度则分别占据整个根系的24%和23%,15%和33%。与R_1含根土

试样相同,由于 1~1.5 mm 径级区间内根系直径更大,反映在根表面积与根体积上的二者所占比例也随之发生变化。同样以 0—60 mm 土层深度范围内根系为例,R_2 含根土试样不同径级区间内根系根表面积在整个根系中占比分别为 13%,52%,35%,根体积占比分别为 6%,46%,48%。R_3 试样不同径级区间内根系根表面积在整个根系中占比分别为 6%,48%,46%,根体积占比分别为 2%,39%,59%。由此可以看出,根系长度一定条件下,根径是影响根系形态特征的重要指标,它间接反映了根系在土体中与土体颗粒的接触状态以及根系自身在土体中的空间占据能力。

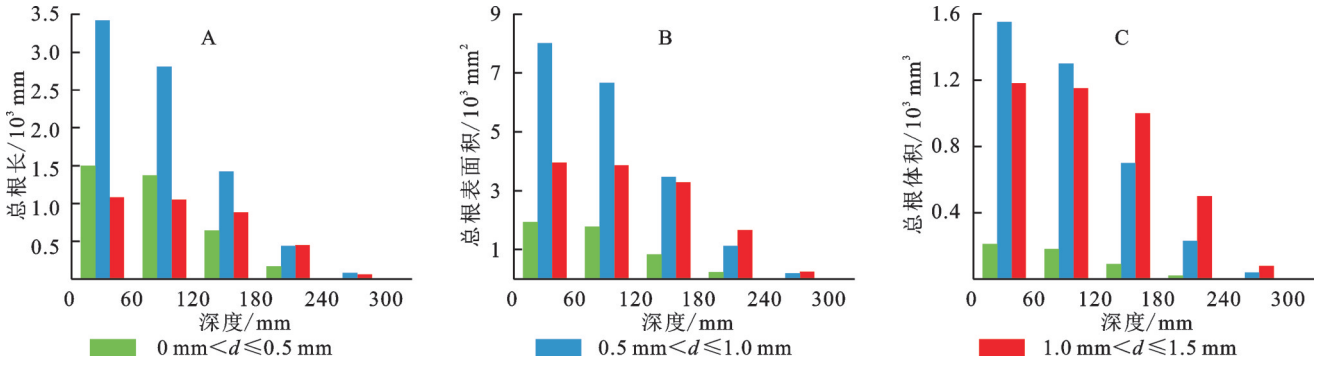


图 8　R_2 试样不同根径等级各根系形态特征指标图示

Fig. 8　Schematic diagrams of root morphology characteristic indicators for different root diameter grades of R_2

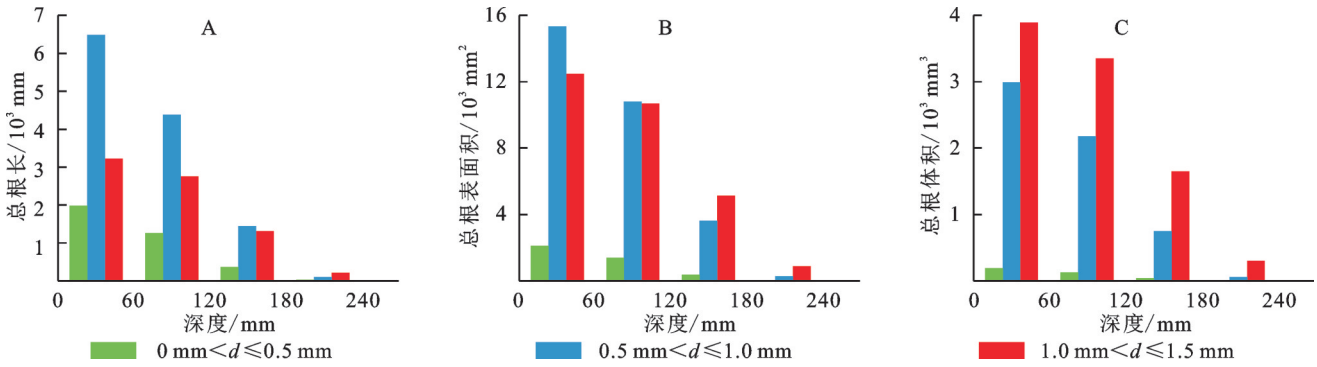


图 9　R_3 试样不同根径等级各根系形态特征指标图示

Fig. 9　Schematic diagrams of root morphology characteristic indicators for different root diameter grades of R_3

2.4　结果与分析

2.4.1　*素土与含根土的抗剪强度*　素土试样与各含根土试样的剪应力-剪切位移曲线如图 10 所示。可以看出,在剪切初期随剪切位移增长,素土试样剪应力也不断增长,在剪切位移增长至 8 mm 时剪应力达到峰值。之后随着剪切位移的增加剪应力开始下降,并趋于稳定。对于 5 个含根土试样,剪应力随着剪切位移的增加不断增长。在剪切初期,剪切力值增长速率较大,在剪切后期,增长趋势稍缓,剪应力峰值出现在拉拔末期,可知植物根系使得土体延迟破坏。

试样 S, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 的抗剪强度分别为 2.49,7.78,13.61,19.95,12.5,25.28 kPa。相较于 S 试样,5 个含根土试样的抗剪强度分别提高了 213%,447%,702%,403%,916%,这表明植物根系对提高土体的抗剪强度具有显著效果,试样间的抗剪强度提高幅度不同,可能由于植株间根系形态特征存在差异,导致对抗剪强度结果产生影响。

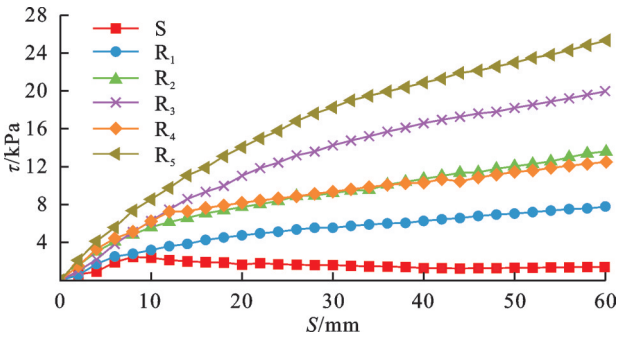


图 10　各试样剪应力剪切位移曲线

Fig. 10　Shear force-shear displacement curves of each sample

此外,通过试验对比 40,60,80 mm 剪切深度的含根土试样抗剪强度,由于 60 mm 剪切深度的含根土试样有 3 个,故取其抗剪强度平均值进行对比。可以看出,剪切面深度从 60 mm 上升至 80 mm 时抗剪强度变化幅度远大于剪切深度由 40 mm 上升至 60 mm 时的抗剪强度。对比素土与各含根土试样剪应力随剪切位移的变化规律可以看出,土体内根系的

生长对土体内部的结构造成影响，从而改变了土体的力学性能。土体自身发生破坏时，根系自身的抗拉与抗拔强度使得土体的强度得到提升。相较于直接剪切试验，在试样达到相同剪切位移时，大尺寸剪切试验中剪应力反而变小，原因主要考虑到大尺寸剪切试验中根系较多，表层根系削弱了土体结构，同时没有法向荷载，土质较为疏松，压实度也小于直剪试验中试样。

2.4.2 根系形态特征与抗剪强度增量的相关性 在本文研究中，借助该分析方法具体探究草本植物香根草根系形态指标与抗剪强度增量之间的相关性，并加以分析。香根草根系形态特征指标与抗剪强度增量之间的相关性如图 11 所示，从图中可以明显看出，R_1，R_2，R_3试样的根系形态指标与抗剪强度增量之间存在正相关关系，各指标的相关性顺序为根长密度（R^2=0.98）>根表面积密度（R^2=0.93）>根体积密度（R^2=0.81）>根截面积比（R^2=0.77），根长密度与根表面积密度对植物根系的固土效应更为明显。

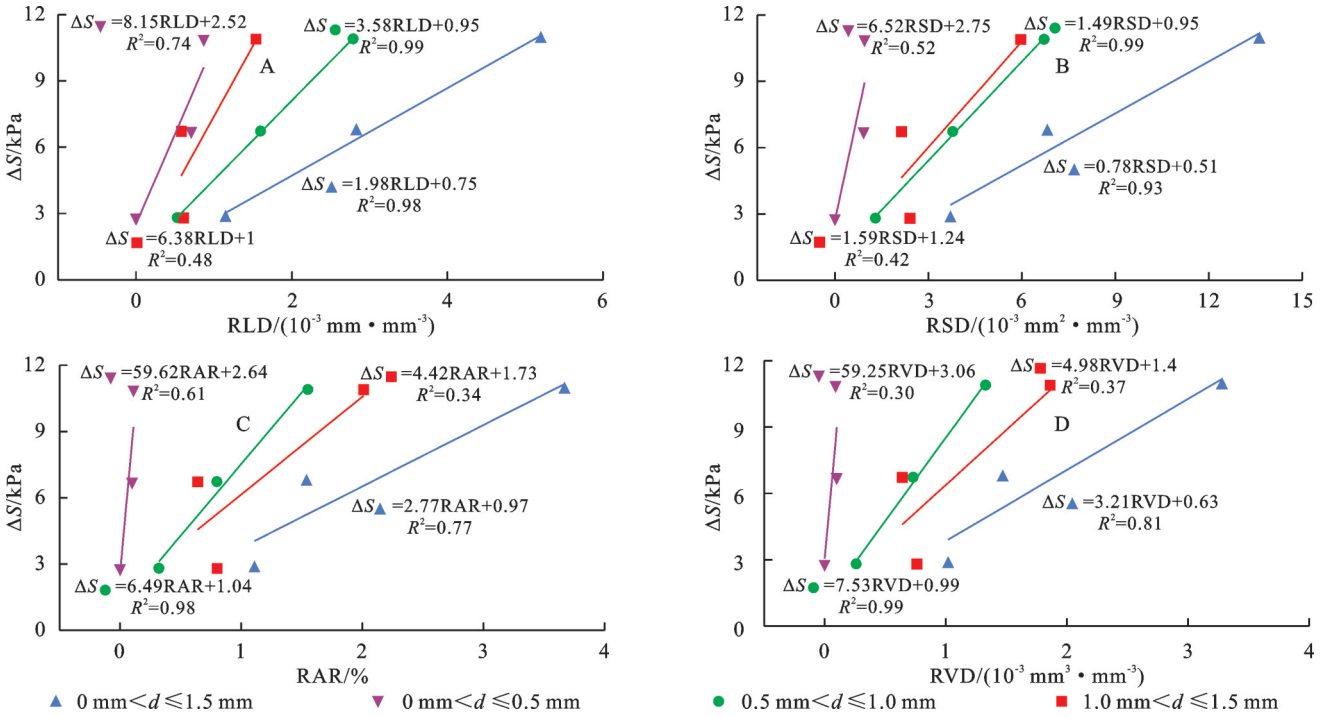


图 11 抗剪强度增量（ΔS）与根系形态指标之间相关性

Fig. 11 Correlation between shear strength increment (ΔS) and root morphology indicators

在 3 个径级区间内，0.5～1 mm 径级区间内的 4 个根系形态指标对植物根系的固土效果影响更加显著，相关系数均在 90% 以上。相比 1～1.5 mm 径级区间内根系，0～0.5 mm 径级区间内 4 个根系形态指标与抗剪强度增量间的相关性较好，在 4 个根系形态指标中，相关系数最高为 74%，最低为 37%。

3 讨 论

在本文室内直接剪切试验中根段倾斜角度越小，含根土试样中放置的根系长度就越长，从而根-土界面之间的抗拔力也就越大，当 α=30°，β=0°时，即 A_{30} 含根土试样抗剪强度峰值达到最大，为 50.80 kPa，然而在本试验中，各含根土试样在不同工况下的抗剪强度峰值变化幅度并不是很大，王海涛[6]和王保辉[8]等都进行了不同径级下草本植物根土复合体抗剪强度的试验研究，结果表明随着径级的增大对土体的强度贡献也增大，然而在本文直接剪切试验中选取的是根径为 1 mm 的香根草根系，因此在今后的试验中可以综合考虑根系不同布设角度以及不同根径对根土复合体强度的影响。

陈婧逸等[21]在根系形态对土体强度影响的大直剪试验研究中，已经表明根系形态指标与根系对土体的抗剪强度增量之间有明显的正相关性，根截面积比与根表面积密度对于抗剪强度增量相关性较好，不同的是，在本试验 4 个根系形态特征指标中，根长密度与根表面积密度对植物根系的固土效应影响更为明显。分析如下：陈婧逸等[21]研究的灌木根系存在一定的抗折刚度，与草本植物根系的固土效果产生差异，从而影响了其与抗剪强度增量的相关性变化。本文的局限性在于用于试验的香根生长周期为 1 a，在进行根系形态指标统计分析所获得的观测结果可能与生长年限较久的香根草根系形态指标有

所出入,后续可加入与不同生长周期的香根草根系形态指标对比,以获得香根草根系形态分布特征随生长周期的动态变化规律。

在含(无)根红黏土剪切试验中考虑根段倾斜角度开展室内直剪试验,以探究根段倾角对根-土复合体抗剪强度的影响,在室内直剪试验的基础上,通过自行设计的剪切设备对原状素土样品和原状含根土试样开展大尺寸剪切试验,并在剪切完成后统计各含根土试样的根系形态指标,探究其与含根土抗剪强度的相关性,为含根土直剪试验提供更全面的补充。

4　结 论

(1)试验探究了含根红黏土的抗剪强度变化规律。同时,考虑了根系长度、根系直径、根系在土体空间中的分布角度等因素并结合剪切试验结果验证了本文的合理性,其中,当β保持不变时,根系倾斜角度越小,根系长度越长,抗剪强度峰值也就越大,A_{30}试样抗剪强度峰值最大,大小次序为$A_{30}>A_{60}>A_{90}$。

(2)利用室内直剪试验横向对比了土体空间中不同根系倾斜角度条件下含根红黏土的抗剪强度。根系在倾斜布设工况下相比垂直布设工况对土体的抗剪强度提升更大。在大尺寸剪切试验中,通过改变剪切盒的上下盒高度从而改变剪切深度,结果表明:剪切深度越深,含根土试样的抗剪强度也越高,香根草根系形态指标与抗剪强度增量之间存在正相关性。

(3)根系固土理论模型发展至今,其内容越来越丰富,对根系固土作用机制的认识也愈加清晰,研究成果不断涌现。但对其深入研究之后发现,一些重要参数如变形区厚度,根系发挥固土作用时的变形机制等还需要通过经验公式或者作出相对正确的假设来实现理论分析研究的目的。因此,在后续研究中,还需对剪切过程中根系与土体的共同变形机制开展进一步的研究探索。

参考文献(References):

[1] 谢祥荣,陈正发,朱贞彦,等.根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望[J].水土保持学报,2023,38(2):13-29.
Xie X R, Chen Z F, Zhu Z Y, et al. Research progress and prospect of mechanical effects and model construction of root-soil complex[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,38(2):13-29.

[2] 王连锐,严亚,商崇菊,等.两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应[J].水土保持通报,2024,44(2):146-154.
Wang L R, Yan Y, Shang C J, et al. Effects of two herbaceous plants on soil consolidation and slope protection of red clay slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):146-154.

[3] 赵倩.不同根系类型组合模式根系生态位及护坡性能研究[D].北京:北京林业大学,2020.
Zhao Q. Study on ecological niche and slope protection performance of different root types combined models[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[4] 傅胤榕.植物根系抗倾覆性能的模型试验及数值分析研究[D].重庆:重庆大学,2019.
Fu Y R. Model test and numerical analysis of anti-overturning performance of plant roots[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[5] Feng S, Liu H W, Ng C W W. Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation on shallow slope stability [J]. Computers and Geotechnics, 2020,118:103335.

[6] 王海涛,张宇,刘琳琳,等.草本植物根系对土体的加筋作用[J].长江科学院院报,2025,42(2):100-106,128.
Wang H T, Zhang Y, Liu L L, et al. Reinforcement effect of herb root system on soil[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(2): 100-106,128.

[7] 刘向峰,张强,郝国亮,等.草本植物根系类型和分布对根土复合体无侧限抗压强度的影响[J].长江科学院院报,2023,40(9):106-111,117.
Liu X F, Zhang Q, Hao G L, et al. Effects of root type and distribution of herbaceous plants on unconfined compressive strength of root-soil complex [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(9):106-111,117.

[8] 王保辉,朱连奇.不同根系方位及径级下草本植物根土复合体抗剪强度试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(3):172-176.
Wang B H, Zhu L Q. Experimental study on shear strength of herbaceous root soil complexunder different root orientation and diameter classes[J]. Science Technology and Engineering, 2019,19(3):172-176.

[9] Tan H M, Chen F M, Chen J, et al. Direct shear tests of shear strength of soils reinforced by geomats and plant roots[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019,47(6): 780-791.

[10] 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.

[11] Zhang L K, Sun J, Shi C. Numerical simulation on the influence of plant root morphology on shear strength in the sandy soil, Northwest China [J]. Journal of Arid Land, 2024,16(10):1444-1462.

[12] 梁燊,刘亚斌,石川,等.黄土区不同龄期灌木柠条锦鸡儿根系的分布特征及其固土护坡效果[J].农业工程学报,2023,39(15):114-124.
Liang S, Liu Y B, Shi C, et al. Distribution characteris-

tics of root system of *Caragana caraganaat* different ages and its effect on soil consolidation and slope protection in loess region[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2023,39(15):114-124.

[13] Liu J P, Tang Y S, Jiang Y L, et al. Experimental study on the effect of root content on the shear strength of root-soil composite with thick and fine roots of *Cryptomeria japonica*(Thunb. ex L.f.) D. Don[J]. Forests, 2024,15(8):1306.

[14] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength [J]. Plant and soil, 2008,305(1):207-226.

[15] Mao Z J, Ma X, Liu Y C, et al. Study on time effect and prediction model of shear strength of root-soil complex under dry-wet cycle[J]. Biogeotechnics, 2024, 2(2):100079.

[16] Zhou Y Y, Wang X M. Mesomechanics characteristics of soil reinforcement by plant roots[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3719-3728.

[17] Saadati N, Mosaddeghi M R, Sabzalian M R, et al. Soil mechanical reinforcement by the fibrous roots of selected rangeland plants using a large soil-root shear apparatus [J]. Soil and Tillage Research, 2023,234:105852.

[18] Ma J Y, Li Z B, Sun B Y, et al. Mechanism and modeling of different plant root effects on soil detachment rate [J]. Catena, 2022,212:106109.

[19] Wang J F, Yang Y F, Wang B, et al. Soil detachment caused by flowing water erosion in six typical herbaceous plant root systems on the Loess Plateau, China [J]. Biosystems Engineering, 2022,217:56-67.

[20] Wang R, Qin C B, Sun H X, et al. Effects of root morphologies on shearing characteristics of the root-soil composite: an experimental case study of *Ficus virens* in Chongqing, China[J]. Catena, 2024,246:108407.

[21] 陈婧逸,陈晓清,宋东日,等.灌木根系形态对土体强度影响的大型直剪试验研究[J].长江科学院院报,2024,41(8):120-127,163.
Chen J Y, Chen X Q, Song D R, et al. Effect of shrub root morphology on root-soil complex strength: a study based on large-scale direct shear test [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024,41(8):120-127,163.

[22] 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 C, Xie X R, Duan Q S, et al. Effects of root characteristics on shear resistance of root soil complex in red soil reconstructed by wood fiber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4):138-146.

[23] 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.

[24] Liu Y G, Zhao J G, Yin B Z, et al. Discrete element modelling of the yam root-soil complex and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2022,220:55-72.

(上接第301页)

[25] 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.

[26] 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.
Li Y F, Zhang G T, Lei M Y, et al. Mechanical properties of Yunnan pine root-soil system and its influence on shallow slope stability in southwestern mountainous region of China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):88-96.

[27] Li J Y, Yu D M, Fu J T, et al. Shear characteristics of root-soil interface of caragana korshinskii in loess area of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2025,22(8):1689-1702.

[28] 程平,吴礼舟.根直径及干湿循环对根土复合体抗剪强度影响的试验研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2024,51(3):465-476.
Cheng P, Wu L Z. Experimental investigation into the influence of root diameter and dry-wet cycle on the shear strength of root-soil composite[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2024,51(3):465-476.

[29] Wang C, Hu X S, Lu H J, et al. Study on shear characteristics of herbs plant root-soil composite system in beiluhe permafrost regions under freeze-thaw cycles, Qinghai-Tibet highway, China[J]. Sustainability, 2024, 16(7):2907.

[30] Ng C W W, Hird C C, Qi S, et al. In-situ shear tests on vegetated slopes: effects of root distribution and matric suction on shear strength[J]. Géotechnique, 2022, 72(10):897-908.