

土壤粒径对灌木植物根—土摩阻特性影响

郭 欢，唐丽霞，戴全厚，潘 露，阮仕航

(贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要：为了系统性研究灌木植物根系的固土力学效应,探讨土体对根系的摩阻特性,以 4 种不同土壤粒径(原级配,1.0~2.0,0.5~1.0,<0.5 mm)和 3 年生的典型护坡植物种火棘及紫穗槐为研究对象,采用室内直剪的方式对根系进行根—土界面直剪摩擦试验。结果表明:(1)根—土及土—土界面的摩阻强度与垂直荷载呈明显的正线性关系;随土体粒径的增加,根—土及土—土界面的摩阻强度、摩擦系数、黏聚力和摩擦角均呈现下降趋势,且在相同粒径范围内,火棘根—土界面摩阻特性显著优于紫穗槐和素土;(2)根—土界面与素土界面的剪应力随位移的增长速率呈现先增大后减小的趋势;根—土界面剪应力与位移关系曲线呈现曲折蜿蜒式上升,而素土曲线表现为平缓式上升;(3)土体粒径越小,根土间接触面的比表面积越大,细小的土壤颗粒与根表面发生镶嵌,加大接触面的咬合力,使摩阻能力加大。研究结果对进一步探讨灌木植物根—土相互作用力学机制,以及利用灌木植物提高试验区边坡土体稳定性、防治坡面浅层滑落具有一定的理论指导意义。

关键词：土壤粒径；灌木；根—土界面；摩阻特性

中图分类号：S154.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2021)06-0083-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.012

Effect of Soil Particle Size on Root-Soil Friction Characteristics of Shrub Plants

GUO Huan, TANG Lixia, DAI Quanhou, PAN Lu, RUAN Shihang

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: In order to systematically study the mechanical effect of shrub roots on soil consolidation and explore the friction characteristics of soil to roots, taking four different soil particle sizes (<2.0, 1.0~2.0, 0.5~1.0 and <0.5 mm) and three-year-old typical slope protection plants, *Pyracantha fortuneana* and *Amorpha fruticosa*, as the research objects, the direct shear friction test of root soil interface was carried out in laboratory. The results showed that: (1) The friction strengths of root-soil and soil-soil interface were positively related to the vertical load. With the increasing of soil particle size, the friction strengths, friction coefficients, cohesions and friction angles of root-soil and soil-soil interface all decreased, and within the same particle size range, the friction characteristics of *P. fortuneana* root soil interface were significantly better than those of *A. fruticosa* and plain soil. (2) The shear stress of the root soil interface and the plain soil interface increased first and then decreased with the increasing of displacement. The relationship curve of root soil interface shear stress and displacement showed a zigzag rise, while the plain soil curve showed a gentle rise. (3) The smaller the soil particle size was, the larger the specific surface area of the indirect contact surface between the root and soil was. The small soil particles inlayed with the root surface, which increased the bite force of the contact surface and increased the friction capacity. The above research had a certain theoretical significance for further exploring the mechanical mechanism of root soil interaction of shrub plants, and improving the stability of slope soil in the experimental area by use shrub plants and preventing the shallow sliding of slope.

Keywords: soil particle size; shrub; root-soil interface; friction characteristics

植被在控制土壤侵蚀和确保边坡稳定性方面起着至关重要的作用^[1-4]。植物根系通过深入到土壤中,与土壤内各种介质充分接触,形成有机复合体,这种复合体提高了植物根系的固土性,进而增强土体的

收稿日期:2021-06-05
资助项目:国家自然科学基金项目(31960332);贵州省高层次创新型人才项目(黔科合平台人才[2018]5641)
第一作者:郭欢(1996—),男,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:843825862@qq.com
通信作者:唐丽霞(1976—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事植物根系力学研究。E-mail:248206125@qq.com

抗剪强度^[5-7]。但是植物根系与土体之间的结合,并不像钢筋与混凝土能构成一个不容易发生相对位移的复合体,而是在一定受力条件下,根土接触面会产生错动滑移或有相互错动滑移趋势,从而使在土壤基体上的抗剪应力通过土根摩擦转移到根部,增强土壤基体的稳定性,继而达到控制或减小土体的变形^[8-9]。故根—土界面间的摩擦特性对根—土复合体的内部稳定性具有显著性的作用。

众多学者就根系锚固土壤及其影响因素进行了研究。Zhou 等^[10]、Schwarz 等^[11]通过野外试验和室内模拟提出了根—土间摩擦力主要是由 3 种摩擦力(黏结型摩擦力、非黏结型摩擦力以及剪切型摩擦力)共同作用的结果;Ji 等^[12]、郑力文等^[13]对油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)根—土界面摩擦特性研究后发现,油松根径与根土摩擦力间呈幂函数正相关;赵东晖等^[14]研究证明,不同海拔位置、不同生长方向的白桦(*Betula platyphylla* Suk.)根系根—土界面摩擦力也有所差异,且根系直径和海拔对根土摩擦力贡献力较高;刘亚斌等^[15]、张兴玲等^[16]的研究表明,侧根的存在大幅度提高根土间的摩擦阻力;管世烽等^[17]采用直接施加水平拉拔荷载的方式进行单根拉拔试验表明,多花木蓝(*Indigofera amblyantha* Craib)单根的最大抗拉拔力随着根径和土壤干密度的增加而呈线性增大趋势;蒋明镜等^[18]利用离散元方法证实了根—土界面摩擦力的峰值强度、残余强度随着根系埋深的增加而增大。

上述有关根—土界面摩擦特性研究已取得了较为突破性的成果,但现有成果主要表现在植物根系的各种影响因素等方面。土壤作为植物根系直接接触的介质,土壤本身对根—土摩擦特性的影响也是错综复杂的。刑会文等^[19]、宋维峰等^[20]分别对油松、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)和沙柳(*Salix cheilophila*)展开研究,得到摩擦系数随着土体干密度的增大而增大,随含水率增加逐渐减小的结论;朱宏慧^[21]通过直接剪切试验得到土壤种类不同对根—土界面摩擦系数、黏聚力及摩阻强度均具有显著的影响。有关土体性质对摩擦特性的影响主要侧重于土壤密度、含水率以及类型等,但土壤对植物的生长和根系形态以及固土的性能都是至关重要的,所以展开土体粒径对根—土界面摩阻特性的影响研究还有待深入,其中影响机制也有待探讨。关于该方面的研究报道相对尚少,本文采用剥皮直剪的方法来探讨土壤粒径对灌木根—土界面摩阻特性的影响来揭示其影响机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于贵州省贵阳市花溪区,地理坐标为东经 106°39',北纬 26°27',属于亚热带季风湿润气候,具有明显的高原季风湿润气候特点,降水丰沛,雨热同期,年均降水量 1 229 mm,年均气温为 15.3 ℃,阴天多,日照少,年均相对湿度为 77%。研究区为撒种自然恢复边坡,无高大乔木,多为草本及灌木。主要植被类型有构树(*Broussonetia papyrifera*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、荚蒾(*Viburnum dilatatum* Thunb.)、鼠李(*Rhamnus davurica* Pall.)、多花木蓝、马桑(*Coriaria nepalensis*)等。土壤类型多为酸性黄壤土和石灰土。

1.2 材料采集与制备

本研究选取自然种植、生长期为 3 年、长势一致的火棘(*Pyracantha fortuneana*)和紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)。首先,清除地表的枯落物和杂草,然后采用全挖掘的方法采集根系,再带回实验室挑拣顺直、生长正常的根系清洗干净备用。将直径范围为 3~5 mm^[9]的根系作为试验样品,将准备的根系用手术刀削下表皮,每一组样品上的表皮宽度尽量保持一致,最后用强力胶粘贴在圆形木块上。

试验土样为植物生长地选取。用环刀法测土壤含水率与土壤干密度,将取好的土壤带回实验室放置洁净通风处风干,去除杂质碾磨过 2 mm 筛备用。将碾磨过的土壤分别经过 1.0、0.5 mm 筛后得到原级配(<2.0 mm),1.0~2.0,0.5~1.0,<0.5 mm 的土样备用,土壤粒径级配曲线见图 1。土壤容重和土壤含水量控制为 1.26 g/cm³和 22.3%(与野外一致)。

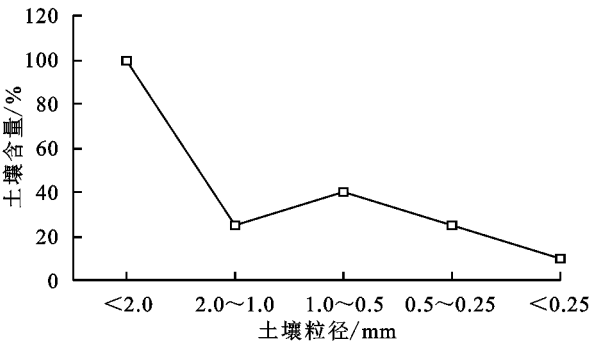


图 1 土壤粒径级配曲线

1.3 试验方法

试验采用 ZJ 应变控制式直剪仪(四联动),水平剪切力采用应变式加载,应变速率为 1.2 mm/min,剪切位移 6 mm,剪切盒试样的截面积为 30 cm²,下盒底置有 1 cm 厚的透水石,透水石上放置粘有根皮的圆形木块,保证根表面与下剪切盒表面齐平,根轴线方向与受剪方向平行,木块之上为 1 cm 厚的土样,土样上放有透水石,最上端放传压板。最后在 50,

100,200,300 kPa 4 个不同垂直压力下开始试验。本试验于 2020 年 12 月至 2021 年 1 月进行,每组试验 4 个样,每组重复 3 次,素土作为空白对照。

1.4 计算方法

对每组试样进行剪切后,得到 4 个不同垂直荷载下的剪应力,用剪应力和相应的垂直荷载依据库仑定律,根与土的界面摩擦特性可由公式(1)进行表述。

$$\tau=c+p \tan \varphi=c+p f \tag{1}$$

式中: τ 为剪应力(kPa); c 为黏聚力(kPa); p 为垂直荷载(kPa); φ 为摩擦角($^{\circ}$); f 为摩擦系数。

2 结果与分析

2.1 土壤粒径与摩阻强度的关系

通过对 4 种不同土体粒径条件下构成的根—土界面进行摩阻试验,可对比分析出土体粒径对摩阻特性的影响程度。由图 2 可知,当垂直荷载保持一致时,随着土体粒径的增大,根—土间的摩阻强度亦逐渐减小,然而在原配级 <2.0 mm 粒径土体下,其摩阻强度仅次于 0.5 mm 土体。在 4 个垂直压力条件下,火棘、紫穗槐根—土及土—土间抗剪强度均呈现出相似的结果规律。以垂直压力 100 kPa 为例,当土体粒径从 0.5 mm 改变到 0.5~1.0,1.0~2.0 mm 时,火棘根—土间摩阻强度减小

幅度分别为 17.35%,20.53%;紫穗槐根—土间摩阻强度减小幅度分别为 28.39%,37.38%;素土摩阻强度减小幅度分别为 29.36%,31.02%。从图 2 还可看出,当垂直荷载从 50 kPa 增加到 300 kPa 时,粒径 <0.5 mm 时的根—土间抗剪强度增长率显著大于其他 3 个粒径级,且火棘与紫穗槐根—土间的抗剪强度明显大于素土,也说明随着正压力的增加,土体粒径越小,其与根之间的剪应力增长幅度更大,其抵抗外界剪切及破坏能力也较强。即根系埋的越深或根土密度较高,根—土界面的剪应力越大,根—土界面的摩擦阻力越大,因而根—土界面的抗剪强度得到了增强。

表 1 为不同土体粒径下垂直荷载与 2 种根—土及土—土间的抗剪强度的拟合方程结果,通过 SPSS 对 2 种灌木根土摩阻强度与垂直荷载进行线性回归分析,结果可表明,随着垂直荷载的增加,2 种根—土及土—土间的抗剪强度逐渐递增,呈明显的正线性关系。在 50,100,200,300 kPa 垂直荷载条件下,土壤为 $<0.5,0.5\sim1.0,1.0\sim2.0,<2.0$ mm 的 4 种不同粒径级形成剪切面的抗剪强度均体现出相似的变化规律,可看出方程的拟合程度较高,决定系数 R^2 均大于 0.9,则植物根—土界面及素土剪切关系服从莫尔库仑理论。

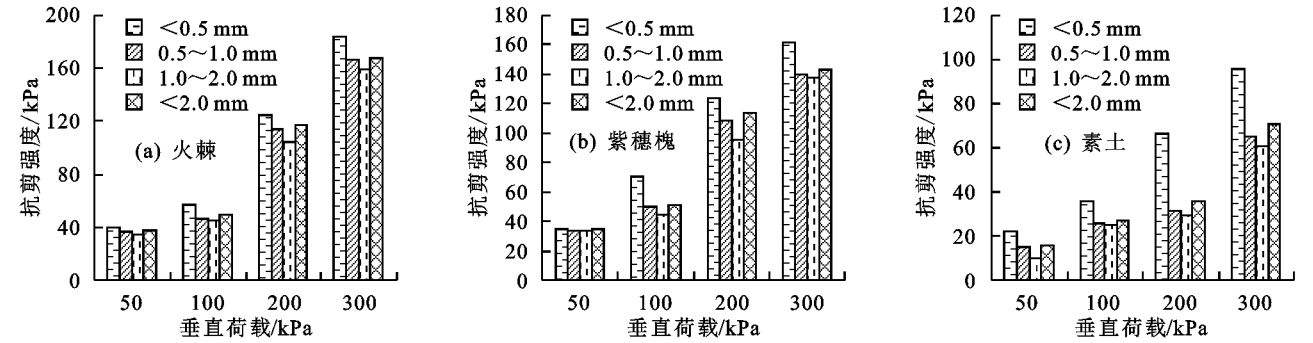


图 2 土壤粒径对摩阻强度的影响

2.2 土壤粒径对根—土界面摩擦系数及抗剪强度指标的影响

通过公式(1)可计算出根—土界面的摩擦系数和抗剪强度指标。摩擦系数是反映 2 种相互接触材料的一个重要特征。从图 3 可知,在不同剪切界面条件下,随土壤粒径的增加,根—土界面和素土界面摩擦系数呈逐渐降低的趋势。随土壤粒径的变化,火棘根—土界面摩擦系数在 0.5~0.6 范围内变化;紫穗

槐根—土界面摩擦系数在 0.4~0.5 范围内变化;素土界面摩擦系数在 0.18~0.3 范围内变化。各种试样界面对应的最大摩擦系数出现均出现在 <0.5 mm 粒径级土体;当土壤粒径 >0.5 mm 后,界面摩擦系数变化幅度趋于平缓。当土壤粒径较小时,土壤颗粒相互间排列相对紧密,此时土壤颗粒的比表面积较大,于是根—土界面摩擦系数也会增大。在相同粒径范围内,根—土界面摩擦系数为火棘 $>$ 紫穗槐 $>$ 素土。

表 1 不同粒径条件下垂直荷载与抗剪强度的拟合方程

土壤 粒径/mm	火棘		紫穗槐		素土	
	拟合方程	决定系数	拟合方程	决定系数	拟合方程	决定系数
<0.5	$y=0.5945x+4.8424$	0.9927	$y=0.5042x+15.668$	0.9866	$y=0.2935x+7.3401$	0.9998
0.5~1.0	$y=0.5461x+2.2418$	0.9856	$y=0.4434x+10.985$	0.9821	$y=0.1859x+4.0554$	0.9077
1.0~2.0	$y=0.5211x+0.9876$	0.9882	$y=0.4356x+7.0379$	0.9902	$y=0.1854x+1.1186$	0.9096
<2.0	$y=0.5458x+4.2525$	0.9883	$y=0.4579x+11.0901$	0.9742	$y=0.2069x+3.6458$	0.9266

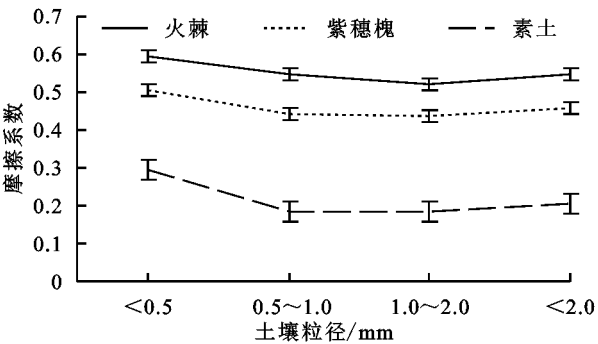


图 3 土壤粒径对根—土间摩擦系数的影响

由表 2 可知,土壤粒径对界面摩擦角和黏聚力有重要的影响。随着土体粒径增加,素土体界面和根—

表 2 根—土界面及素土界面的摩擦角和黏聚力

试样类型	<0.5 mm		0.5~1.0 mm		1.0~2.0 mm		>2.0 mm	
	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
火棘	30.73	4.84	28.64	2.24	27.52	0.99	28.63	4.25
紫穗槐	26.76	15.67	23.91	10.99	23.54	7.04	24.60	11.09
素土	16.36	5.71	10.53	4.06	10.50	1.12	11.69	3.65

2.3 不同土壤粒径条件下根—土界面剪应力与位移关系

图 4 为垂直荷载在 100 kPa、不同土体粒径条件下火棘和紫穗槐根—土界面与素土界面的剪应力与剪切位移关系曲线。从图 4 可以看出,3 种不同剪切界面的剪应力与位移变化特征都有相似的趋势,即根—土界面与素土界面的剪应力随位移的变化,其增长速率先增大后减小。在剪切开始之初,剪应力随位移的变化增长速度较快,但剪切位移增长幅度相对较小,在位移为 2 mm 时,其对应的剪应力达到最大剪应力的 50%,当剪切位移在 2~6 mm 区间内,剪切面逐渐被破坏,其黏结能力逐渐减弱,剪应力的增长速率逐渐趋于平缓;其中土壤粒径<0.5 mm 的曲线都位于其他曲线之上,反之粒径最大的 1.0~2.0 mm 曲线所对应的最大剪应力则小于其他 3 个粒径级。此外,火棘和紫穗槐的根—土界面剪应力与位移关系曲线呈现出曲折蜿蜒式上升、波动起伏较大的特点,而素土则表现为平滑式上升。

2.4 不同土壤粒径下摩阻特性的微观分析

根—土界面及素土界面摩阻强度、摩擦系数、抗剪指标随土体粒径的增加呈现递减的特征,这与夏振尧等^[22]、胡宁等^[23]、栗岳洲等^[24]得到的根—土复合体试样中的土体颗粒粒径愈大,根系对根土界面摩阻作用的贡献率愈小的结论类似。从根与土的接触界面进行切入,将土壤颗粒近似看成圆球状。从图 5a 可知,土壤粒径较小时,土壤颗粒间相互排列比较紧密,且粒间距离相对较小;当根与土体表面发生相互错动时,土体粒径越小,根土间接触面的比表面积越大,发挥的摩擦阻力越大;当土体颗粒粒径越大时,粒

土复合体界面黏聚力和界面摩擦角的值均呈现下降趋势,即土体粒径愈小,根系对根—土界面摩阻作用的贡献率愈大。当土体粒径<0.5 mm 时,火棘根—土界面摩擦角和黏聚力分别为 30.73°和 4.84 kPa,此值相较于土壤粒径 0.5~1.0,1.0~2.0 mm 而言,摩擦角分别降低 6.79%,10.45%,黏聚力分别降低 53.72%,79.55%。除了土壤粒径<0.5 mm 外,其他 3 种径级土壤与根形成的界面摩擦角变化不明显,相互间差值变化在 0~1°;而黏聚力则随土壤粒径的增加具有明显的差值变化。紫穗槐和素土试样均表现出与火棘相似的结果。

间孔隙较大,土壤与根系接触不充分,其摩阻能力会相对减弱。

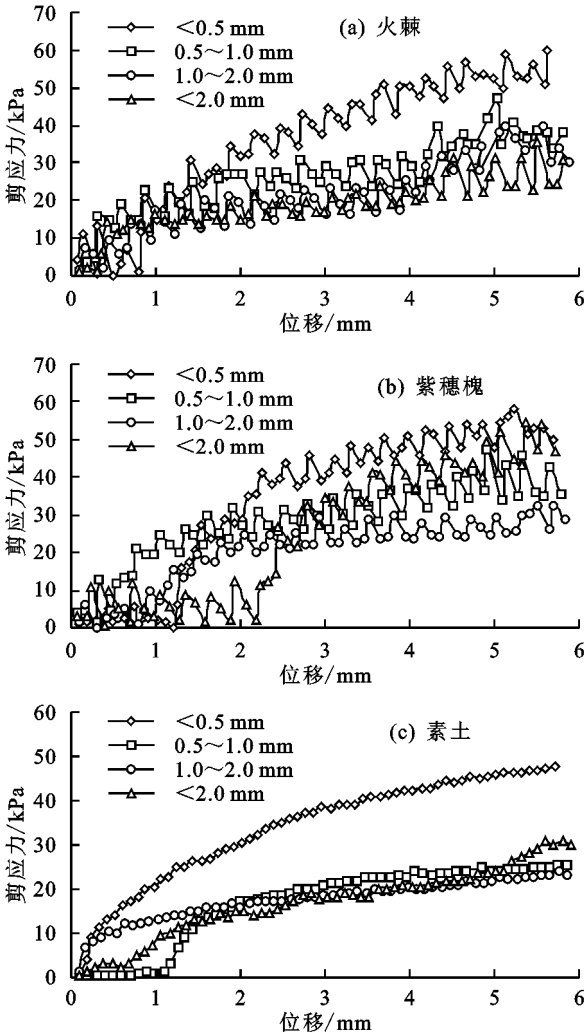
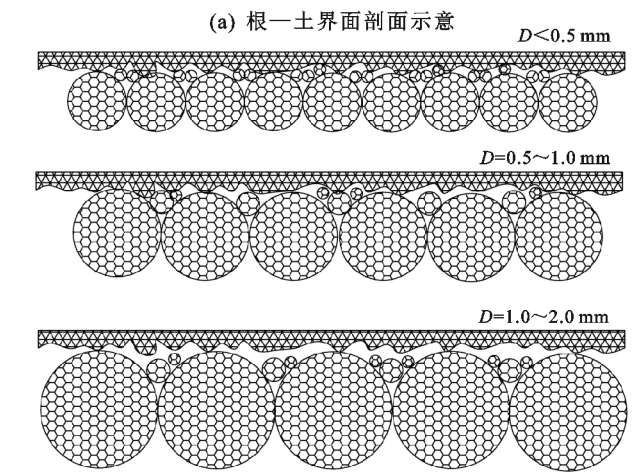


图 4 剪应力与位移关系曲线

此外,由于根表面凹凸不平(图 5b),形成大小不一

的凹槽,当接触面相互滑动时,发生嵌锁作用,一些细小的颗粒嵌入凹槽中,从而加大接触面的咬合力,这种作用也有效增加根—土界面间的摩擦系数;由于根表面的不平整,因此导致剪应力与位移关系曲线不平滑,当滑动面经过凹槽时发生力的起伏变化;而素土间表面是均匀的,所以曲线较平滑。由于区域、气候和母质发育等



不同,形成的土壤亦有区别,当不同区域存在土壤径级差异时,选择适宜的树种固土护坡也是关注的重点。

本文从根—土界面摩阻特性的角度旨在揭示护坡工程的植物措施中做到合理选择和搭配植物,进行科学配置,有利于最大程度地发挥根系的固土抗蚀作用。

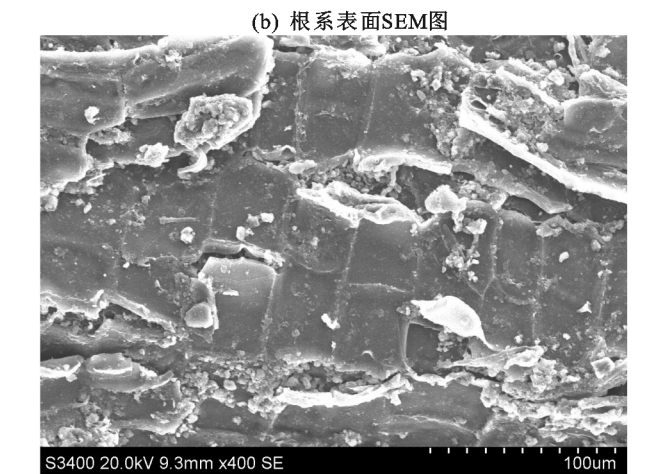


图 5 根—土界面剖面示意及根系表面 SEM 图

3 结论

(1)随土体粒径的增加,根—土及土—土界面的摩阻强度呈现下降趋势;但随着垂直荷载的增加却逐渐递增,呈明显的正线性关系,拟合方程的决定系数 R^2 均大于0.9。

(2)随土壤粒径的增加,根—土界面和素土界面摩擦系数呈逐渐降低趋势,火棘根—土界面摩擦系数在0.5~0.6范围内变化;紫穗槐根—土界面摩擦系数在0.4~0.5范围内变化;素土界面摩擦系数在0.18~0.3范围内变化。界面黏聚力和摩擦角值也均呈现减小趋势。

(3)火棘和紫穗槐根—土界面与素土界面的剪应力随位移增加不断上升,其增长速率呈现先增大后减小的趋势,剪切位移在前2 mm,剪应力增长速度快,当位移在2~6 mm区间,剪应力增长速率逐渐趋于平缓,且根—土界面剪应力与位移关系曲线呈现出曲折蜿蜒式上升,素土曲线表现为平滑式上升。

(4)土体粒径越小,根土间接触面的比表面积越大,根系对根土界面摩阻作用的贡献率愈大;其次根表面凹槽和土壤会发生嵌锁作用,一些细小的颗粒嵌入凹槽中,加大接触面的咬合力,这种作用有效增加根—土界面间的摩阻能力。

参考文献:

[1] 杨永红,刘淑珍,王成华,等.浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究[J].水土保持研究,2007,14(1):138-140.

[2] Chiantantesupa D, Beltottosupa M, Onellisupb E, et al.

New branch roots produced by vascular cambium derivatives in woody parental roots of *Populus nigra* L.[J]. Plant Biosystems,2010,144(2):420-433.

[3] Zegeye A D, Langendoen E J, Tilahun S A, et al. Root reinforcement to soils provided by common Ethiopian highland plants for gully erosion control[J].Ecohydrology,2018,11(6):e1940.

[4] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2001.

[5] Pallewattha M, Indraratna B, Heitor A, et al. Shear strength of a vegetated soil incorporating both root reinforcement and suction[J].Transportation Geotechnics, 2018,18:72-82.

[6] 王可钧,李焯芬.植物固坡的力学简析[J].岩石力学与工程学报,1998,166(6):687-691.

[7] 王金霞,杨旻,李亚伟,等.含根系土体抗剪强度试验研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(18):36-39.

[8] 刘福全,刘静,璁珉,等.植物枝叶与根系耦合固土抗蚀的差异性[J].应用生态学报,2015,26(2):411-418.

[9] 邢会文.4种植物根—土界面摩阻特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[10] Zhou Y, Watts D, Li Y, et al. A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement[J] Forest Ecology and Management, 1998,103(2/3):107-120.

[11] Schwarz M, Cohen D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(4):701-719.

- [8] 赵安周,张安兵,刘海新等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J].自然资源学报,2017,32(3):449-460.
- [9] 宋敏敏,张青峰,吴发启,等.基于 NDVI 的延河流域时空演变分析[J].水土保持研究,2017,24(4):6-11.
- [10] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [11] Ouyang W, Hao F H, Skidmore A K, et al. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River[J].Science of the Total Environment,2010,409:396-403.
- [12] Wang L, Huang X, Fang N F, et al. Selective transport of soil organic and inorganic carbon in eroded sediment in response to raindrop sizes and inflow rates in rainstorms[J].Journal of Hydrology,2019,575:42-53.
- [13] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
- [14] Lamine S, Petropoulos G P, Singh S K, et al. Quantifying land use/land cover spatio-temporal landscape pattern dynamics from Hyperion using SVMs classifier and FRAGSTATS ©[J].Geocarto International,2018,33(8):862-878.
- [15] 高玄娜,肖培青,张攀,等.复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒特征[J].水土保持学报,2021,35(1):44-49.
- [16] 山仑,徐炳成.新时期黄土高原退耕还林(草)有关问题探讨[J].水土保持通报,2020,39(6):295-297.
- [17] Zhao G J, Mu X M, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J].Land Degradation and Development,2013,24:499-510.
- [18] 刘宇.景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性[J].生态学报,2017,37(15):4923-4935.
- [19] Zhou Z X, Li J. The correlation analysis on the landscape pattern index and hydrological processes in the Yanhe watershed, China[J].Journal of Hydrology,2015,524:417-426.
- [20] Shi Z H, Ai L, Li X, et al. Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds[J].Journal of Hydrology,2013,498:165-176.
- [21] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics[J].Journal of Geographical Sciences,2018,28:59-78.

(上接第 87 页)

- [12] Ji X D, Cong X, Dai X Q, et al. Studying the mechanical properties of the soil-root interface using the pull-out test method[J].Journal of Mountain Science,2018,15(4):882-893.
- [13] 郑力文,刘小光,陈丽华,等.油松根系直径对根—土界面摩擦性能的影响[J].北京林业大学学报,2014,36(3):90-94.
- [14] 赵东晖,冀晓东,张晓,等.冀西北地区白桦根系—土壤界面摩擦性能[J].农业工程学报,2021,37(3):124-131.
- [15] 刘亚斌,余冬梅,胡夏嵩,等.黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土间摩擦力学机制试验研究[J].农业工程学报,2017,33(10):198-205.
- [16] 张兴玲,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区护坡灌木柠条锦鸡儿根系拉拔摩擦试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊 2):3739-3745.
- [17] 管世烽,夏振尧,张伦,等.水平荷载作用下多花木蓝根系拉拔试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(6):24-28.
- [18] 蒋明镜,朱云刚.重塑黄土与植物根系界面摩擦离散元分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(2):210-215,221.
- [19] 邢会文,刘静,王林和,等.柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J].摩擦学学报,2010,30(1):87-91.
- [20] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍.根系与土体接触面相互作用特性试验[J].中国水土保持科学,2006,4(2):62-65.
- [21] 朱宏慧.4 类土根—土界面摩阻特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [22] 夏振尧,刘琦,许文年,等.多花木蓝根系与土体界面摩阻特征[J].水土保持学报,2018,32(1):128-134.
- [23] 胡宁,刘静,姚喜军,等.快剪条件下柠条根对 3 种土壤土工特性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):106-111.
- [24] 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.