

多花木蓝根系与土体界面摩阻特征

夏振尧^{1,2}, 刘琦¹, 许文年^{1,2}, 饶云康¹, 张航¹

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为研究灌木植物根系的固土护坡力学效应, 探讨根系与土体间相互作用的特性。以多花木蓝为供试植物, 进行植物根系切片并计算根系的表面凹凸度, 选取 0~0.5, 0.5~1.0, 1.0~1.5, 1.5~2.0 mm 4 种粒径的粉质黏土, 在不同的土体含水率和根径条件下, 制备根土复合体扰动试样, 进行单根抗拔摩阻试验和直剪摩阻试验, 探讨土体含水率、植物根径以及土体粒径对根土界面摩阻特性的影响。结果表明: 多花木蓝根系的表面凹凸度随根径变化无显著性差异, 根系的拉拔剪应力集中在 17.36~32.76 kPa, 而根土界面的摩擦系数为 0.10~0.20; 根系拉拔剪应力和根土界面摩擦系数随土体粒径和土体含水率的增加逐渐下降; 土体含水率和土体粒径愈低, 根系形态特征对根系的拉拔剪应力和根土界面摩擦系数的影响愈显著。研究结果对分析根土界面摩阻特性的影响因素, 以及利用灌木植物提高边坡土体结构稳定和防治水土流失、土壤侵蚀等地质灾害具有重大的指导意义。

关键词: 多花木蓝; 土体粒径; 土体含水率; 根系径级; 摩阻特性

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0128-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.021

Characteristics of Interface Friction Between *Indigofera amblyantha* Root System and Soil

XIA Zhenyao^{1,2}, LIU Qi¹, XU Wennian^{1,2}, RAO Yunkang¹, ZHANG Hang¹

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area of Hubei Province, Yichang, Hubei 443002)

Abstract: To study the mechanical effect of shrub plants on slope protection and to investigate the friction characteristics of root-soil interface, the roots of *Indigofera amblyantha* were sliced and the root surface roughness of this kind of plant were calculated. In order to evaluate the influence of different root diameters, soil moisture content and soil particle size on friction characteristics of root-soil interface, pull-out friction tests and shear friction tests were conducted on the root-soil composites with the particle size of 0~0.5, 0.5~1.0, 1.0~1.5 and 1.5~2.0 mm which prepared by sieving and remolding. The results showed that there was no significant difference in root surface roughness of *I. amblyantha* with the gradual increasing of root diameter, the pull-out shear stress of root system was concentrated in 17.36~32.76 kPa, and the friction coefficient of root-soil interface varied between 0.10 and 0.20. The pull-out shear stress of roots and the friction coefficient of root-soil interface in soil-root composites presented a downward trend with the increase of soil moisture content and soil particle size. When soil particle size and soil moisture content were small, the effects of root morphology on the pull-out shear stress of *I. amblyantha* roots and the friction coefficient of root-soil interface were more significant. These results were great guiding significance to analyze the influence factors of root-soil interface friction characteristics, and use shrub plants to improve the stability of slope soil structure and prevent soil erosion and other geological disasters.

Keywords: *Indigofera amblyantha*; soil particle size; soil moisture content; root diameter; friction characteristics

植物根系在固土护坡中通过深粗根的锚固作用、浅细根的加筋作用和侧根的牵引作用可显著提高边

坡土体的稳定性^[1]。根系能提高坡体稳定性的主要原因在于根系的形变模量远大于土体, 当根土复合体

破坏时,根系相对土体会发生错动或存在相互错动的趋势,这种错动或错动趋势被根土间存在的摩擦阻力和咬合力所抵抗,根土间的摩擦作用将根系的抗拉强度和土体的抗压强度有效地结合起来,从而提高了根土复合体的强度^[2],因此根土界面摩阻特性的研究是根系固土机制研究的关键。

宋维峰等^[1]、邢会文^[3]用直剪试验分别研究了油松、刺槐、沙柳和柠条根系与土体的界面摩阻特性,并认为根土界面的摩擦系数随土体含水率增加而逐渐减小;刘小光等^[4]通过单根拉拔试验研究了油松和落叶松根系与土体界面的摩阻特性,结果表明,根系与土体界面的最大摩擦力与根系直径存在明显的线性正相关关系;周跃等^[5]通过计算模型和野外直测的方法研究了云南松侧根对土体的斜向牵引效应,得出云南松侧根能有效提高根系土层的斜向抗张强度,并且侧根牵引效应的增量值与根生物量具有正相关关系;张云伟等^[6]通过建立多侧根对土体的牵引效应模型研究了云南松侧根土体牵引效应的破坏机制;赵亚楠^[7]通过对芦苇根系进行拉拔试验得出当含根土体遭受破坏产生滑动面时,根系与土体的侧向摩擦阻力能把土体中的剪应力转变为植物根系的拉拔力,从而增强土体的抗剪强度;杨永红等^[8-9]根据综合 μ_x 法求出了合欢根系与周围土体之间的静摩擦系数。

目前关于乔木和灌木根系的根土界面摩阻特性进行了较多的研究,由于不同根系的生物学特性和生物力学特性不同,所以已有的研究成果并不能完全适用于固土护坡中的草、灌植物。多花木蓝(*Indigofera amblyantha*)是一种优良的水土保持植物,被广泛地应用于边坡绿化防护和防治水土流失、土壤侵蚀等工程实践中,但是目前对于多花木蓝根系根土界面摩阻特性的

研究报道则并不多。有关土体性质对根土界面摩阻特性的影响,只有土体干密度、土体含水率和土体类型方面的研究^[1-9],而试样中土体粒径对根土界面摩阻特性的研究则未见报道。本文以多花木蓝为供试植物,通过室内单根抗拔摩阻试验和直剪摩阻试验确定多花木蓝根系的抗拔剪切应力与根土界面的摩擦系数,研究土体含水率、根径和土体粒径对根土界面摩阻特性的影响,同时从根系表面凹凸度的微观角度定量分析多花木蓝根土界面的摩阻特性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物选取宜昌市峡州大道一期快速道边坡生态恢复中长势较好的灌木植物多花木蓝。多花木蓝为多年生落叶灌木,具有抗旱、耐贫瘠的特点,能固土保水,有效截留降水,是一种优良的水土保持及绿化护坡植物。采用整株挖掘法挖掘 30 株生长期达 1 年、长势相同的多花木蓝,在静水中将根系的土壤洗去,待到植物根系上的水滞晾干后,用剪刀剪取生长正常、茎干通直均匀的主根,剪取的根长为 70 mm,用精度为 0.001 mm 的电子游标卡尺测量剪取的根系的平均直径,直径范围为 0.35~3.48 mm,且以 1.0~2.5 mm 居多,将 0.5~3.0 mm 根径范围的多花木蓝根系按 0.5 mm 的径级范围分类,分类后的根系用密封袋密封,并在低温的状态下保存并尽快测定^[10-11]。

试验土样为宜昌市峡州大道一期快速道的路基填筑土,取土深度为 0.3 m,去除土壤中的杂质,经风干、碾压、过 2 mm 筛后,用筛分法测定试验土样的颗粒组成,并按 0.5 mm 的粒径范围将过筛风干土分为 0~0.5, 0.5~1.0, 1.0~1.5, 1.5~2.0 mm 4 个土体粒径^[12-15]。试验土样为粉质黏土,其基本物理性质详见表 1。

表 1 试验用土的基本物理性质

土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤天然 含水率/%	风干土 含水率/%	pH	小于某粒径的土所占的百分数/%					
				2.00 mm	1.50 mm	1.00 mm	0.50 mm	0.25 mm	0.10 mm
1.38	14.37	2.78	6.2	100	82.32	60.57	36.13	17.04	10.13
									0.075 mm
									4.62

1.2 试验设计

(1)根系表面凹凸度。植物根系的表面凹凸度是根系表面粗糙程度的一个评价指标,根系表面凹凸度越大表明根系表面越粗糙,根土间的摩擦和咬合作用也就越显著^[3]。

为了更好地进行植物根系切片以测量根系的表面凹凸度,本文选取 0.5 mm 以上的根径为研究对象。沿根系轴线方向进行根系切片,在放大 200 倍的电子显微镜下对根系表面凹凸面清晰可见的切片样本进行拍照,每个切片在放大状态沿根系表面拍 5 个片子。

用 MAPGIS 软件对图形进行处理,分析凹凸面的基本特征,并沿着根系表面的凹凸面绘一条曲线和一条

直线,统计每条线段的长度。每个切片样本的 5 条曲线和直线分别相加,根系的表面凹凸度^[2-3]计算公式为:

$$T = \frac{L_q - L_z}{L_z} \times 100\%$$
 (1)

式中: T 为根系表面凹凸度; L_q 为根系切片凹凸面曲线总长(mm); L_z 为根系切片表面直线总长(mm)。

按照上述操作将多花木蓝各个径级范围内的根系切片进行处理,各径级范围取 5 根植物根系,每根根系只取 2 个切片,每个径级共计 10 个切片样本的表面凹凸度取平均值作为这个径级的凹凸度。通过 SPSS 软件对各径级根系的表面凹凸度做方差分析。

(2)单根抗拔摩阻。用烘干法测定过筛风干试验土

样的含水率,因土样的天然含水率为 14.37%,将试验土样土体含水率设计为 12.00%,14.37%,16.00% 3 个含水率梯度^[16-19]。分别称取各粒径的过筛风干土适量,计算不同设计含水率土样需要的加水量,依据《土工试验规程三轴压缩实验》进行试验。

室内模拟天然条件,控制土壤容重为采样时测量的土样容重,按照土力学试验规范重塑制样方法分别将单根垂直埋于直径 61.8 mm、高为 40 mm 环形装土盒中心,分 3 层压实,制备根土复合体试样。环形装土盒的高度为 40 mm,故单根埋深为 40 mm,采用改装的 HP-50 型艾德堡数显推拉力计试验装置对多花木蓝根系进行单根抗拔摩阻试验,其加载速率控制在 10 mm/min,每种条件下进行 3 次单根抗拔试验^[1-3]。

在单根拉拔过程中,假设根系与土体界面的摩擦应力分布均匀且根土界面均匀分布的拉拔剪应力与拉拔力满足静力平衡^[2],则根系抗拔摩阻试验计算模式为:

$$\tau \pi d l - F = 0 \tag{2}$$

式中: τ 为根土界面拉拔剪应力(kPa); d 为根系的平均直径(mm); l 为根系在土中的长度(mm); F 为根系被拔出时的拉力(N)。

(3)直剪摩阻。直剪摩阻试验中设计的土体含水率和容重与单根抗拔摩阻试验中的相同,依据土工试验规程制备试样。试验使用的直剪仪为南京土壤仪

器有限公司生产的 ZJ 型应变控制式四联直剪仪,直剪仪上盒放试样,下盒嵌入表面粘有根系的圆木块,木块直径与试样直径相同,将根系固定在木块上,使根的轴线方向与受剪方向平行^[12,16-19]。每组试验取 4 个试样,试样装好后分别加载,由于取土深度较浅,为有效测量根土复合体的界面强度指标,考虑到土体在实际土层深度中所受到的围压,分别在 25,50,75,100 kPa 的垂直压力下,以 0.8 mm/min 的速率进行剪切,直至测力计读数随剪切位移的增加不再发生变化,获得每级垂直荷载下的最大剪力。

将试验结果点绘成 $\tau-p$ 曲线,从而求得根土界面黏聚力(c)、根土界面摩擦角(φ)和根土界面摩擦系数(f)依据库仑定律,根系与土体的界面摩阻特性表达式为^[1-3]:

$$\tau = c_a + p f = c_a + p \tan \varphi \tag{3}$$

式中: τ 为试样的剪切应力(kPa); c_a 为根土界面黏聚力(kPa); φ 为根土界面摩擦角($^{\circ}$); p 为法向应力(kPa); f 为根土界面摩擦系数。

2 结果与分析

2.1 多花木蓝根系表面凹凸度

图 1 为各径级多花木蓝根系切片图,从微观角度分析根系表面凹凸面的基本特征如表 2 所示。

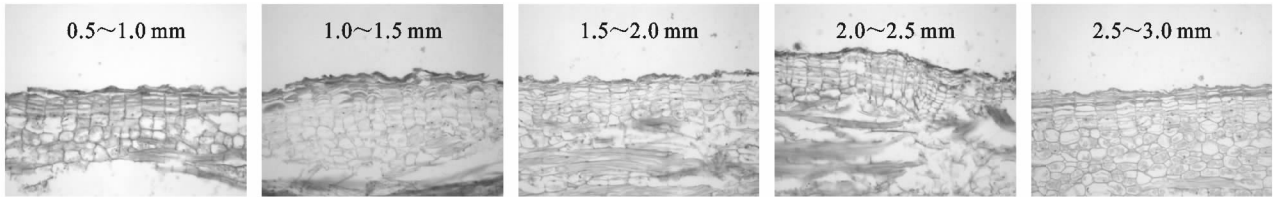


图 1 多花木蓝根系不同根径切片

表 2 多花木蓝根系表面凹凸面的基本特征

根径/ mm	小于某凹凸度所占的百分比/%						小于某凹凸深度所占的百分比/%					
	0.50 mm	0.25 mm	0.10 mm	0.075 mm	0.050 mm	0.025 mm	0.50 mm	0.25 mm	0.10 mm	0.075 mm	0.050 mm	0.025 mm
0.5~1.0	100	95.36	73.05	50.23	35.30	24.64	100	100.00	67.08	46.57	30.61	12.26
1.0~1.5	100	94.10	72.45	51.16	32.37	20.21	100	95.77	60.83	39.35	22.39	15.17
1.5~2.0	100	88.75	68.90	47.58	36.84	18.15	100	98.86	62.28	35.87	26.37	10.64
2.0~2.5	100	89.31	70.26	46.65	34.28	18.05	100	92.04	65.96	30.07	18.13	9.60
2.5~3.0	100	94.48	67.87	50.77	41.66	23.56	100	96.55	72.65	36.24	28.38	13.00

由表 3 可知,随根径的变化,多花木蓝根系的表面凹凸度差异性不显著(ANOVA, $\alpha=0.134$)。多花木蓝根径为 1.0~2.5 mm 时,凹凸度最大,为 6.88%~7.36%;而根径为 0.5~1.0,2.5~3.0 mm 时,凹凸度相对较小,分别为 4.05%和 5.17%,但是各径级多花木蓝根系的表面凹凸度无显著性差异。因此,并不是根径越大的根系对根土界面的摩阻作用越大,多花木蓝的根径在 1.0~2.5 mm 范围内时固土抗裂能力较强。

表 3 多花木蓝根系表面凹凸度及差异性分析

根径/ mm	平均凹 凸度/%	标准差	差异显著 性检验	径级间 的 F 值	径级间显 著性差异
0.5~1.0	4.05	1.81	2.36		
1.0~1.5	7.36	3.76	1.64		
1.5~2.0	6.88	3.97	1.35	1.913	0.134
2.0~2.5	7.17	3.63	1.73		
2.5~3.0	5.17	1.04	2.75		

2.2 拉拔剪应力

2.2.1 土体含水率和土体粒径对根系拉拔剪应力的影响 由图 2 可知,在同一土体粒径下,根系的拉拔

剪应力随土体含水率增加而逐渐下降,这与邢会文^[3]在不同的土体含水率下得到的柠条、白沙蒿、沙柳和沙地柏根系与黄土的根土界面摩擦系数的变化特征相同。根土复合体中,根系表面的凹凸构造与土体颗粒交错排列,根土界面处的土体颗粒在单根拉拔剪切过程中会发生移动和重新排列,直至根土界面趋于平滑。当土体含水率逐渐增大时,水溶液中的电解质浓度降低,土颗粒间距增大,根土界面的结合水膜逐渐变厚,土颗粒和根系表面的连接强度降低,从而使根系的拉拔剪应力降低。

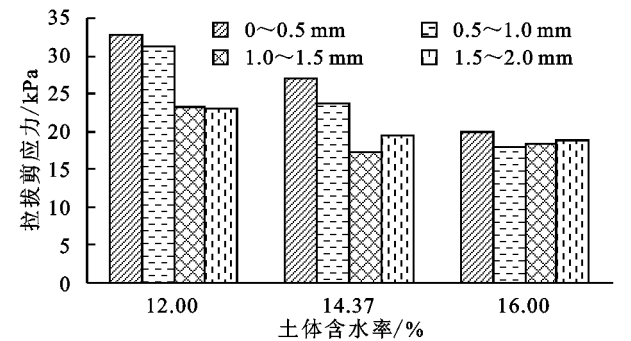


图 2 土体含水率对根系拉拔剪切应力的影响

土体含水率相同时,根系的拉拔剪应力随着土体粒径的增大总体呈下降趋势,但土体含水率较大时,根系的拉拔剪应力在土体粒径为 1.5~2.0 mm 时较 1.0~1.5 mm 略有提高。根土界面的摩阻作用可以描述为根系与土体的黏结嵌固作用,当试验土样的粒径较小时,根土界面处的土体颗粒和根系表面凹凸构造形成紧密锁嵌,当单根拉拔剪切时,土体颗粒发生

剪切破坏或提升、错动与根系表面产生摩擦作用,表现为较高的拉拔剪应力。

土体含水率从 12.00% 增加到 16.00% 时,0~0.5,0.5~1.0 mm 土体粒径下根系的拉拔剪应力下降幅度分别为 39.01%,42.31%,而 1.0~1.5,1.5~2.0 mm 土体粒径下根系的拉拔剪应力下降幅度分别为 20.83%,17.94%,这表明土体颗粒较小时,含水率的变化对根系拉拔剪应力的影响较为明显;土体颗粒相对较大时,土体含水率的变化对根系拉拔剪应力的影响程度下降。由于粒径较小的土体,持水能力较强,当土体粒径较小时,较少的水分子也可以对土颗粒产生牵引凝聚力,故土体含水率变化对根系的拉拔剪应力的影响较为显著;而土体粒径较大时,达到与小粒径土体相同的基质吸力和负孔隙压力需要较大的含水率,所以土体粒径为 1.5~2.0 mm 时,随着含水率增加,根系的拉拔剪应力较 1.0~1.5 mm 的土体有所提高。

随土体粒径和土体含水率的变化,多花木蓝根系的拉拔剪应力在 17.36~32.76 kPa 变化,由公式(2)可知,根系的拉拔剪应力为根系抗拔力与根土接触面积的比值,在根土界面摩擦角较小的情况下,根系的拉拔剪应力可被视为根土界面黏聚力,而由表 4 可知,素土体界面黏聚力集中在 9.16~20.57 kPa,这表明当根土复合体发生破坏时,多花木蓝根系与土体的界面摩擦作用可以将根系的抗拉强度和土体的抗压强度有效地结合起来,从而提高土体的整体强度。

表 4 素土体界面及多花木蓝根土界面的黏聚力和摩擦角

土体 含水率/%	试样 类型	0~0.5 mm 粒径土体			0.5~1.0 mm 粒径土体			1.0~1.5 mm 粒径土体			1.5~2.0 mm 粒径土体		
		c/kPa	Δc /kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	Δc /kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	Δc /kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	Δc /kPa	$\varphi/(^{\circ})$
12.00	素土体	20.57		6.5	18.50		7.3	17.12		7.4	13.38		7.7
	根土复合体	28.31	7.74	8.7	25.20	6.70	9.2	19.86	2.74	9.3	16.75	3.37	8.8
14.37	素土体	16.19		6.2	14.15		6.9	12.91		7.0	10.27		7.5
	根土复合体	22.28	6.09	7.8	20.19	6.04	8.2	14.27	1.36	7.8	13.59	3.32	8.0
16.00	素土体	13.85		6.0	11.10		6.5	10.46		6.9	9.16		7.1
	根土复合体	17.44	3.59	6.8	15.06	3.96	7.3	12.67	2.21	7.5	12.96	3.80	7.6

2.2.2 根径对根系拉拔剪应力的影响 由图 3 可知,当土体粒径在 0~0.5 mm 且土体含水率为 12.00% 和 14.37% 时,根土复合体中根径增加,根系拉拔剪应力呈现先上升后下降的趋势,这与根系表面凹凸度随根径增加的变化特征显著正相关。土体含水率较低时,根土间的相互作用主要表现为土体颗粒和根系表面凹凸面的摩擦咬合作用,0~0.5 mm 范围的土体颗粒可以有效地接触根系表面凹凸面,所以根系的拉拔剪应力与根系表面凹凸度的变化显著正相关。当土体含水率为 16.00% 时,根系的拉拔剪应力随根径的增加呈下降的趋势,此时根土界面的水膜逐渐增厚,根系表面凹凸度对根系拉拔剪应

力的作用明显下降。这表明在土体含水率较低时,根系表面凹凸度对根土界面摩阻特性的影响较为显著,而土体含水率能显著影响根系形态特征在根土界面摩阻特性中的作用。土体含水率为 14.37% 时,土体粒径在 0~0.5,0.5~1.0 mm 范围内时,随着根径增加,根系的拉拔剪应力先增大后减小,而土体粒径在 1.0~2.0 mm 时,根系的拉拔剪应力随着根径增加呈下降的趋势。这是由于土体粒径较小时,土颗粒与根系相对紧密接触产生咬合力,此时根土界面的摩阻特性与根径的表面凹凸度呈现正相关;当土体粒径较大时,土颗粒与根系表面的凹凸构造不能形成有效的联结,此时根系表面形态对根土界面的摩

阻作用没有体现出来,而根径增大则降低了根系与土体接触的比表面积,所以根系的拉拔剪应力降低。同

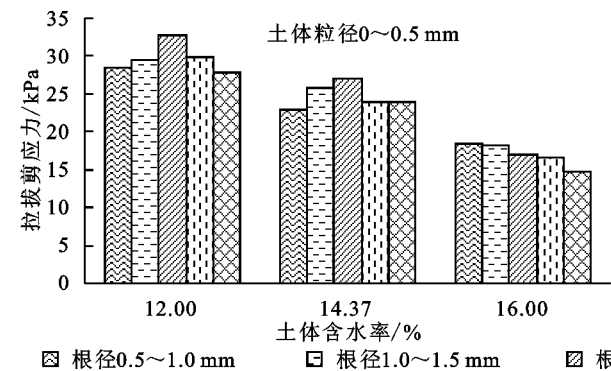


图 3 不同土体含水率和土体粒径下根径对根系拉拔剪应力的影响

由图 4 可知,土体含水率为 14.37%时,随着根径增加,根系的拉拔剪应力在逐渐减小,按照偏差平方和最小的原则选择拟合曲线,最后采取二项式方程对数据进行拟合,即采用最小二乘法对数据进行拟合,相关系数 $R^2>0.58$ (表 5)。说明根径较细的根系的固土抗裂作用优于粗根,这与邢会文^[3]的研究结果相似。

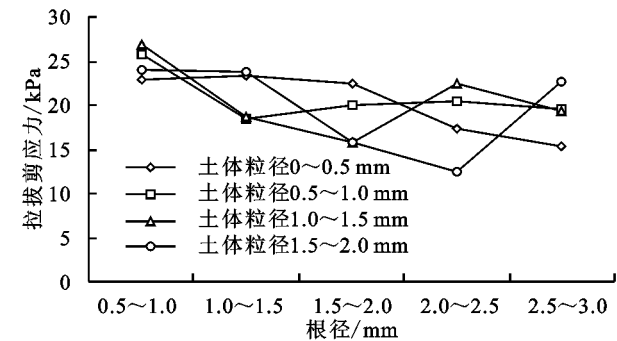


图 4 根系拉拔剪应力与根径的关系

表 5 根系拉拔剪应力与根径的回归方程

土体粒径/mm	回归方程	R^2	n
0~0.5	$\tau=-0.6529d^2+1.7903d+22.046$	0.9426	5
0.5~1.0	$\tau=0.8552d^2-6.1896d+29.958$	0.6410	5
1.0~1.5	$\tau=1.4350d^2-9.7653d+34.132$	0.5812	5
1.5~2.0	$\tau=1.8157d^2-12.281d+36.565$	0.5967	5

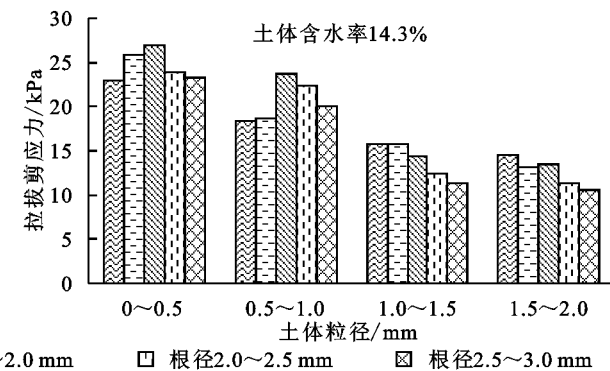
注: τ 为根系拉拔剪应力(kPa); d 为根径(mm)。

2.3 摩擦系数

2.3.1 素土体界面和根土界面的抗剪强度指标 由表 4 可知,根径在 1.5~2.0 mm 时,土体粒径对界面黏聚力和界面摩擦角有重要的影响。相同土体含水率下,随着土体粒径增加,素土体界面黏聚力呈下降趋势,而界面摩擦角则逐渐增大,根土复合体界面黏聚力和界面摩擦角增量值均随土体粒径增加而下降,即土体粒径愈小,根系对根土界面摩擦阻作用的贡献值愈大,这与栗岳洲等^[20]、胡宁等^[21]得到的根土复合体试样中的土体颗粒粒径愈大,则黏聚力值相对较小的结论相似。

控制试样容重为采样时的土壤容重,土体粒径越小,则土颗粒间的距离越小,颗粒排列越紧密,土颗粒间的胶结作用和各种物理—化学键力作用随之增大,

时,根系的拉拔剪应力随土体粒径的增大总体呈下降趋势,但是下降趋势减缓。



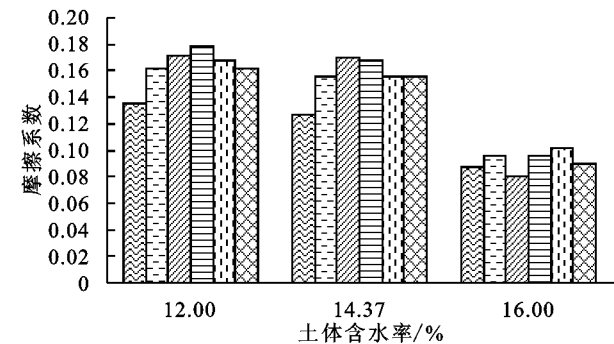
因而素土体的界面黏聚力增加;相反,土体粒径愈大,土颗粒间的表面摩擦力以及嵌锁作用产生的咬合力愈强,所以素土体的界面摩擦角值随之增大;植物根系对土体的加筋作用则主要表现为增加了根土界面的黏聚力,而根土界面的摩擦角则更多地与土体内部构造相关。

素土体界面和根土复合体根土界面黏聚力和摩擦角随土体含水率增加呈下降的趋势,而土体含水率增加对土体粒径较小的土体的界面黏聚力和摩擦角,尤其是土体界面黏聚力的影响较大。土体含水率为 16.00%时,土体粒径的变化对土体界面黏聚力和摩擦角的影响较小,此时根系对土体的加筋作用效果不明显。因为土体粒径较小时,自由水能有效填充土体颗粒间的空隙,此时的土体通过基质吸力的作用对界面摩擦作用产生影响;而土体颗粒较大时,自由水不能有效填充土体颗粒间隙,此时水在根土界面起的润滑作用使根土界面形成软弱滑动面,同时,含水率增加使土颗粒周围的结合水膜增厚,从而减小了土体对根系的咬合力作用。

2.3.2 土体含水率对根土界面摩擦系数的影响 由图 5 可知,土体粒径为 1.5~2.0 mm 时,土体含水率对界面摩擦系数有很大的影响,土体含水率增加,界面摩擦系数显著下降。当土体含水率为 12.00%和 14.37%时,根土界面的摩擦系数值下降不明显,而土体含水率为 16.00%时,根土界面的摩擦系数出现大幅的下降,下降幅度达 43.83%。根土界面摩擦系数随土体含水率增加而降低,这与宋维峰等^[1]、邢会文等^[2]的研究结果相同,一方面随着土体含水率增加,土颗粒周围的结合水膜变厚,土颗粒间距增大,根土界面实际接触面面积减少,从而土体对根系的咬合作用降低;另一方面当土体含水率较高时,水的润滑作用降低了土颗粒与根系的摩擦作用,根土界面形成软弱滑动面;除此之外,从有效应力原理上讲,在荷载的作用下,土体含水率的增加使根土界面上的自由水增

加,根土复合体中的孔隙水压力增大而有效应力减小,从而降低了根土的界面摩擦。

土体含水率较低时,根土界面的摩擦系数随根径的增加有先上升后下降的趋势,土体含水率较大时,根径变化对根土界面摩擦系数的影响不显著。当土体含水率为 12.00%和 14.37%时,界面摩擦系数增



强比为 1.2~1.4,而土体含水率为 16.00%时,界面摩擦系数增强比在 1.0~1.2 变化,界面摩擦系数增强比没有发生显著性变化,其中摩擦系数增强比为根土界面的摩擦系数与素土体界面摩擦系数的比值,这表明土体中根系的存在并没有影响土体含水率的变化对土体界面摩擦系数产生的作用。

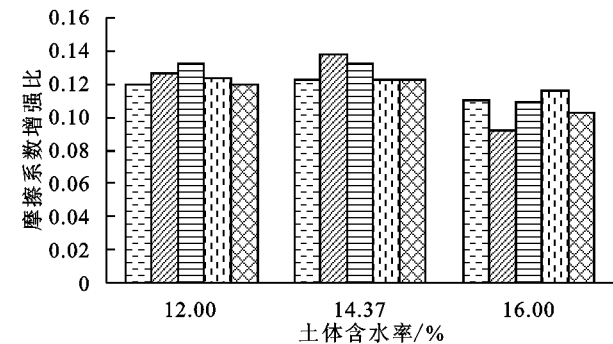
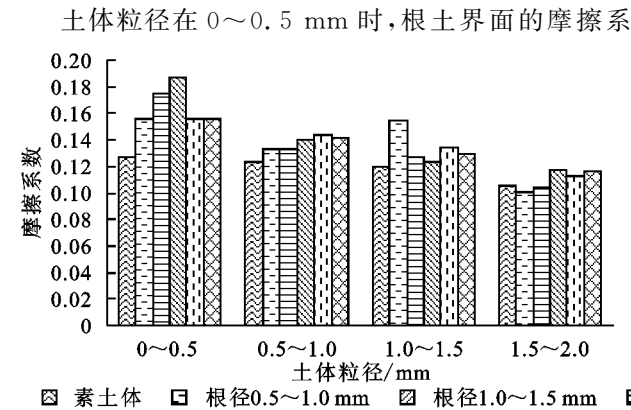


图 5 土体含水率对根土界面摩擦系数和摩擦系数增强比的影响

2.3.3 土体粒径对根土界面摩擦系数的影响 由图 6 可知,土体含水率为 14.37%时,随土体粒径的变化,素土体和根土复合体的界面摩擦系数在 0.10~0.20 变化,土体粒径增大,界面摩擦系数呈下降趋势。当土体粒径逐渐减小时,土体颗粒的比表面积增大,土颗粒间距缩小且排列更加致密,土体颗粒与根系表面凹凸面的接触面增大,此时根土界面的摩擦系数较大,这与土与加筋材料的摩擦系数随土密度的增大而增大的结论相似^[4]。



数随根径增加表现出先上升后下降的趋势,此时根系的表面凹凸度对根土界面摩阻特性的影响较为明显;土体粒径大于 0.5 mm 时,根土界面的摩擦系数随根径变化没有发生显著性变化。摩擦系数增强比为根土界面的摩擦系数与素土体的摩擦系数的比值,土体粒径在 0~0.5 mm 时,根系对土体的摩擦系数增强比最高,且在 1.5~2.0 mm 的根径范围内出现极值,摩擦系数增强比可达 1.46;土体粒径大于 0.5 mm 时,在同一粒径范围内,根径对土体摩擦系数增强比的影响随根径增加基本持平。

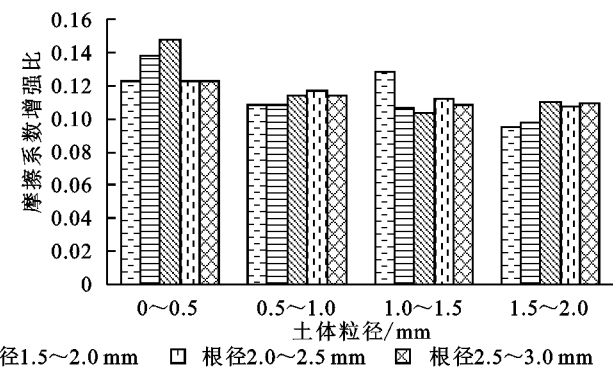


图 6 土体粒径对根土界面摩擦系数和摩擦系数增强比的影响

3 结论

(1)不同径级的多花木蓝根系表面凹凸度无显著性差异,但 1.0~2.5 mm 根径范围的根系表面凹凸度大于 0.5~1.0,2.5~3.0 mm 根径范围内根系的表面凹凸度。

(2)随土体粒径和土体含水率的变化,多花木蓝根系的拉拔剪应力主要集中在 17.36~32.76 kPa,根土界面的摩擦因素在 0.10~0.20 变化。土体粒径和含水率增加,多花木蓝根系的拉拔剪应力和根土界面的摩擦系数均呈下降的趋势。当土体粒径较小时,

根系表面特征和土体含水率的变化对根系拉拔剪应力和根土界面摩擦系数的影响较为显著;而土体含水率较小时,土体粒径和根系表面特征对根土界面摩阻特性的影响较为明显。

(3)多花木蓝根系的拉拔剪应力随根径的增加呈下降趋势,而根径增加对根土界面的摩擦因素没有影响。

参考文献:

[1] 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.
[2] 邢会文,刘静,王林和,等.柠条和沙柳根与土及土与土

- 界面摩擦特性[J]. 摩擦学报, 2010, 30(1): 87-91.
- [3] 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.
- [4] 刘小光, 赵红华, 冀晓东, 等. 油松和落叶松根与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(6): 550-556.
- [5] 周跃, 徐强, 络华松, 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应(I 原理和计算模型)[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 4-9.
- [6] 张云伟, 刘跃明, 周跃. 云南松侧根摩擦型根土粘合键的破坏机制及模型[J]. 山地学报, 2002, 20(5): 628-631.
- [7] 赵亚楠. 芦苇的快速繁育方法及其根茎抗阻拉力研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.
- [8] 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.
- [9] 杨永红. 东川砾石土地区植被固土护坡机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [10] 夏振尧, 管也锋, 牛鹏辉, 等. 麦冬和多花木蓝根系抗拉拔特性试验研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 110-113.
- [11] 李为萍, 史海斌, 胡斌. 沙地柏根系级数对根土复合体抗剪强度的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 934-937.
- [12] 逯海叶, 李平. 地表温度和土壤颗粒组成对抗剪强度的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2005, 26(1): 75-78.
- [13] 余宏明, 胡艳欣, 唐辉明. 红色泥岩风化含砾黏土的抗剪强度参数与物理性质相关性研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(4): 93-95.
- [14] 张爱国, 李锐, 杨勤科. 中国水蚀土壤抗剪强度研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 5-9.
- [15] 钟守琴, 刘波, 魏朝富, 等. 紫色泥岩土壤 < 2 mm 岩屑及其对抗剪强度的作用机制[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4846-4858.
- [16] 江浩浩, 董希斌, 王海飙. 边坡土壤含水率对不同植被土壤抗剪强度的影响[J]. 森林工程, 2009, 25(3): 77-80.
- [17] 张存根, 张怀静. 粉质黏土含水量与抗剪强度参数关系的试验研究[J]. 华北科技学院学报, 2011, 8(2): 27-29.
- [18] 王丽, 梁鸿. 含水率对粉质黏土抗剪强度的影响研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2009, 30(1): 170-175.
- [19] 倪九派, 袁天泽, 高明, 等. 土壤干密度和含水率对两种紫色土抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 72-77.
- [20] 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体颗粒对盐生植物根—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.
- [21] 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.

(上接第 127 页)

- [8] Mesh J S, Free R G. Movement of soil during tillage operations [J]. *Agricultural Engineering*, 1942, 23(12): 379-382.
- [9] 苏正安, 张建辉. 耕作导致的土壤再分布对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 194-198.
- [10] Su Z A, Zhang J H, Qin F C, et al. Landform change due to soil redistribution by intense tillage based on high-resolution DEMs [J]. *Geomorphology*, 2012, 175/176: 190-198.
- [11] 霍云云, 吴淑芳, 冯浩, 等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 32-37.
- [12] 杨超, 苏正安, 马菁, 等. 基于无人机影像快速估算矿山排土场边坡土壤侵蚀速率的方法[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 126-130.
- [13] Van Oost K, Van Muysen W, Govers G, et al. From water to tillage erosion dominated landform evolution [J]. *Geomorphology*, 2005, 72(1/4): 193-203.
- [14] Lindstrom M J, Nelson W W, Schumacher T E, et al. Soil movement by tillage as affected by slope [J]. *Soil and Tillage Research*, 1990, 17: 255-264.
- [15] 张建辉, 李勇, Lobb D A, 等. 我国南方丘陵区土壤耕作侵蚀的定量研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 1-4.
- [16] 赵丽, 何玉晓, 刘刚才, 等. 干热河谷区紫色土玉米季协调农学、水体环境和经济效益的容许施肥量[J]. 中国农学通报, 2016, 32(33): 55-63.
- [17] 慕凯, 罗明良, 岳彦利, 等. 基于点云构建干热河谷典型冲沟 DEM 的参数优选: 以析取克里格插值方法为例[J]. 中国农学通报, 2016, 32(27): 126-131.
- [18] 魏占玉, Ramon A, 何宏林, 等. 基于 SfM 方法的高密度点云数据生成及精度分析[J]. 地震地质, 2015, 37(2): 636-648.
- [19] 李瑾杨, 范建容, 徐京华. 基于点云数据内插 DEM 的精度比较研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(1): 37-40.
- [20] Lobb D A, Kachanoski R G. Modelling tillage erosion in the topographically complex landscapes of southwestern Ontario, Canada [J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 51(3): 261-277.
- [21] 聂小军, 苏艳艳. 川中丘陵区紫色土坡耕地土壤侵蚀特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 682-686.