

DOI: 10.11779/CJGE2020S2027

根系与植筋带固土护坡的力学机理试验研究

曾红艳^{1, 2}, 吴美苏^{1, 2}, 周成^{1, 2}, 陈群^{1, 2}, 龚震^{1, 2}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 降雨作用下植物边坡经常会发生沿着根系以下土层的滑坡, 主要是因为植物根系短于降雨影响深度和力学加筋不足而不能有效防护坡土, 因此可在边坡中布置竖向植筋带以便弥补和提高植物短根系的力学加筋抵抗降雨滑坡的能力。为探究根系与植筋带对土体力学强度的增强效应, 采用自制大型直剪试验装置, 开展不同倾角(0°, 30°, 45°, 60°)根系-土复合体的直剪试验, 以及不同含水率(0%, 5%, 10%)和不同植筋带数量(0, 2, 4, 6, 8根)的植筋带-土复合体的大型剪切试验。结果表明: 根系能显著增加土体的力学强度, 随着根系倾角增加, 根系断裂时产生的拉伸变形量增加, 根-土复合体抗剪强度提高; 根系初始倾角顺着剪切方向越大, 根系断裂时剪切位移越小。土体含水率、植筋带数量及其干湿状态均影响植筋带-土复合体的界面抗剪强度, 随土体含水率的增大而减小, 随布筋数量增加而增大; 5%土体含水率时湿润植筋带的黏聚力和内摩擦角相比于干燥的显著降低。试验结果为植筋带应用于植物护坡工程提供理论参考, 有利于浅层滑坡的防治。

关键词: 植被护坡; 根系固土; 根系倾角; 植筋带护坡; 直剪试验

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0151-06

作者简介: 曾红艳(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: 1354194258@qq.com。

Experimental study on reinforcement mechanism of vegetated slopes with root system and vertical geotextile belts

ZENG Hong-yan^{1, 2}, WU Mei-su^{1, 2}, ZHOU Cheng^{1, 2}, CHEN Qun^{1, 2}, GONG Zhen^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Water

Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Under rainfall the vegetated slope often slides along the soil layer below the root system. The main reason is that the root system is shorter than the influence depth of the rainfall, and the mechanical reinforcement is insufficient to effectively protect the slope soils. In order to compensate and improve the capability of the mechanical reinforcement of short roots to resist-rainfall induced landslides, the vertical geotextile belts can be arranged in the slope. A large-scale direct shear test device is designed to explore the reinforcement effect of the root system and geotextile belts on the mechanical strength of soils. The direct shear tests on the root-soil composite with different inclinations (0°, 30°, 45°, 60°) and the belt-soil composite with different moisture contents (0%, 5%, 10%) and different numbers of belts (0, 2, 4, 6, 8) are carried out. The results show that the root system can significantly increase the mechanical strength of the soils. With the increase of the root inclination, the tensile deformation increases, and the shear strength of the root-soil composite increases. The greater the initial inclination of the root along the shear direction is, the smaller the shear displacement occurs when the root fractures. The interfacial shear strength of the belt-soil composite is affected by the moisture content of the soils, the number of geotextile belts and their dry and wet state. The strength decreases with the increase of the soil moisture and increases with the increase of the number of belts. Under the moisture content of 5% in the soils, the cohesion and internal friction angle of the wet geotextile belts are significantly lower than those of the dry ones. The test results provide theoretical reference for the application of geotextile belts in the vegetated slopes, which is beneficial to prevention and control of shallow landslides.

Key words: vegetated slope; root-reinforced soil; root angle; geotextile belt-stabilized slope; direct shear test

0 引言

随着中国基础设施建设迅速发展, 出现了一系列边坡问题和生态环境问题, 生态护坡技术受到广泛使

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51579167, 41977239); 四川省重点研发项目(2020YFS0295); 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新全作项目(2019YFH0076)

收稿日期: 2020-09-01

*通信作者(E-mail: czhou@scu.edu.cn)

用和认可。生态护坡目前是以工程技术如格构梁和挡墙为主，辅之以植被护坡。植被护坡的主要机理是利用根系穿插在土壤中形成对土体“加筋锚固”的作用，达到加固边坡的目的。根系增加土体抗剪强度的特性对防治浅层滑坡等地质灾害具有理论指导意义^[1-2]。

植被根系在土体中交错穿插，构成复杂的生物网络，显著提高土体的抗剪强度，由于根系的作用和植物对土壤饱和度指标的改变进而对边坡起到很强的加固作用^[3]。影响根系固土作用的因素包括根系因素和土壤因素，目前很多学者开展了室内直剪试验和现场原位试验，探究不同因素对根-土复合体抗剪强度特性的影响。Operstein 等^[4]与 Mickovski 等^[5]对不同植物根系与土体形成的根土复合体开展直剪试验，发现根密度对抗剪强度影响较大。Mao 等^[6]和 Bourrier 等^[7]通过含根土体的室内直剪试验验证在土体含水率相同时，抗剪强度随根径增大而增大。周云艳等^[8]利用樟树根系进行原位剪切试验，发现剪切断面上的总根长、根面积比与土体抗剪强度的增量呈正相关。另外植被种类、埋根方式^[9]、根系生长形态等也在不同程度上影响植被根系的固土阻滑效果。

关于根土复合体中土体因素对抗剪强度影响研究方面。周成等^[10]开展了侧限膨胀试验和直剪试验，测定有、无香根草根系的试样在不同初始含水率时的膨胀力和抗剪强度指标。Fan 等^[11]通过原位剪切试验，研究土体含水率对根-土复合体抗剪强度的影响，表明土壤抗剪强度随含水率增大而减小，在土体含水率较大时根系增加抗剪强度更明显。

以上均是关于植被根系对土体的力学加固作用，有学者认为降雨入渗优先流使地下水上升和坡土强度降低对边坡稳定性的负面影响更值得关注^[12]。降雨作用下植物边坡经常会发生沿着根系以下土层的滑坡，可能意味着降雨入渗优先流所导致的降雨影响深度和坡土强度损失值，都大于根系力学加筋的作用深度和坡土强度提高值。降雨入渗优先流和植物根系太短是造成植被覆盖边坡降雨失稳破坏的两大主因。受水平向加筋土技术的启发^[13]，拟用竖向植筋带来弥补和提高植物短根系的力学加筋抵抗降雨滑坡的能力^[14-15]。

本文选择植筋带和根系结构简单的空心莲子草根系，通过自制的大型剪切试验装置，开展根系固土与植筋带固土的剪切试验，研究空心莲子草根系不同倾角对土体抗剪强度的影响从而探究植被护坡的力学机理，研究植筋带数量、植筋带干湿状态和土体含水率对植筋带固土效果的影响，为植筋带应用于植物边坡的浅层滑坡防治提供理论参考。

1 试验方案

为测定不同根系倾角根-土复合体的强度变化规律，与不同应力水平、不同植筋带数量和土体含水率等条件下植筋带增加的界面抗剪强度值，分别开展根系和植筋带固土的大型直剪试验。

1.1 试验材料

试验用根系为形态简单的空心莲子草根系^[16]，野外挖掘的根系假植于实验室模型箱中，用试验土料浅埋并保持土壤湿润，保证试验根系的活性。植筋带为 1 cm 宽的尼龙织带，具有较大的抗拉强度。根系和植筋带固土的剪切试验所用土料分别为含砾和粉土质砂的低液限黏土，物理力学参数见表 1。

表 1 试验土体物理力学参数

大型根系直剪试验		植筋带剪切试验	
参数	取值	参数	取值
相对密度 G_s	2.66	相对密度 G_s	2.68
液限 $w_L/\%$	33.7	不均匀系数 C_u	11.1
塑限 $w_p/\%$	20	曲率系数 C_c	1.44
$\rho_{dmax}/(g\cdot cm^{-3})$	1.75	$\rho_{dmax}/(g\cdot cm^{-3})$	1.89
$w_{op}/\%$	17	$\rho_{dmin}/(g\cdot cm^{-3})$	1.39
$k_{sat}/(cm\cdot s^{-1})$	8.15×10^{-5}	黏聚力 c/kPa	9.1
		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	30.3

1.2 试验装置

为探究根系在不同倾角下的固土效应和植筋带的加固效果，自行设计和加工剪切试验装置，包括剪切盒、大量程百分表（量程 1~50 mm）、千斤顶（最大量程 1 T，最大位移 442 mm）、测力计系统（包括力传感器及附带的电子显示器，最大量程 500 kg，精度 0.1 kg）。剪切盒由厚 2 cm 的工程塑料板加工而成，尺寸为 20 cm×20 cm×20 cm（长×宽×高）。大型剪切盒下的基土放置在尺寸为 755 mm×530 mm×500 mm 的模型箱中，如图 1 所示（ α 为根系与竖直方向的夹角）。在植筋带固土的剪切试验中，为了主要测定竖向植筋带的固土效应，省掉了下面的直剪盒，在上剪切盒的底部固定一排竹筏模拟滑床并锚固植筋带，如图 2 所示。

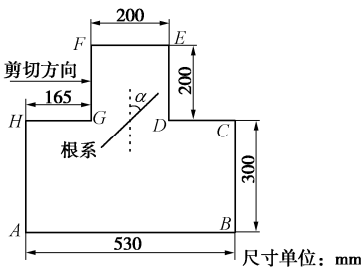


图 1 根系固土的直剪试验侧视图

Fig. 1 Side view of direct shear tests on soil reinforcement by roots

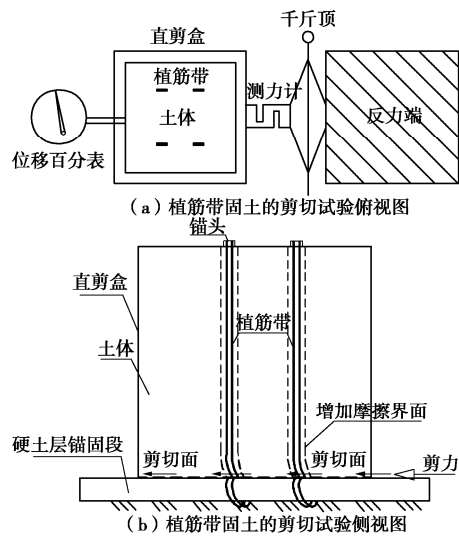


图 2 植筋带固土的直剪试验布置图

Fig. 2 Layout of direct shear tests on soil reinforcement by geotextile belts

1.3 试样制备

根系固土的大型直剪试验：大直剪盒中土体试样填筑干密度参考了其他学者测定的天然边坡密度，最终取值为 1.48 g/cm³，含水率为 12%。制样前在剪切盒内壁和轨道上涂抹凡士林，以减小剪切盒内壁与土体及剪切盒和轨道之间的摩擦。模型箱与剪切盒均采用分层静压的填筑方法，每层填筑完成后凿毛表面进行下一层填筑，保证上下填筑层接触紧密。为防止产生薄弱剪切面，需将模型箱表面土体凿毛深约 5 cm，并将模型箱最后一层土体和剪切部分第一层土体一起填筑，以便使剪切面不会发生在制样分层处。在填筑有根系试样时，选取无损伤、生长平直的活性根系，填筑时用小锉刀轻轻击实根系周围土体，以保证根系和周围土体接触良好，有效发挥根系固土作用。将试样遮盖静置，使其在自重应力下固结稳定并让水分充分扩散均匀。

植筋带固土的大型剪切试验：制样前在剪切盒底部铺一层无纺布，防止土料漏出。为保证填筑的均匀性，采用分层填土、分层压实的方法，填筑干密度控制为 1.45 g/cm³。制备含植筋带试样时，首先将相应数量的植筋带按设计间距锚固在模拟滑动面的竹竿上，穿过预先在无纺布上剪好的小孔，再分层填土压实，整个制样过程始终保持植筋带处于垂直拉紧状态。考虑到根系埋深较浅，自重应都力较小，因此通过在试样顶部施加均匀的 3.0, 12.9, 22.7 kPa 的法向应力，来近似模拟现场根系固土试样的法向应力。

1.4 剪切过程

将千斤顶、测力计系统、百分表安装至平行于剪切方向的试样两侧，确保百分表指针垂直于剪切盒，

并将百分表初始读数和测力计电子显示器读数都调为零。为避免剪切过程中剪切盒上翘，测力计应尽量靠近剪切面中心线，以减小剪力产生的弯矩作用。剪切装置安装完成后，检查测力计与剪切盒、百分表指针与剪切盒是否接触良好，确定无误后开始剪切，控制加载速率约为 2~3 mm/min。为保证剪力和剪切位移的一一对应，整个试验全程采用视频记录，每隔 5 s 自动读取测力计和百分表读数。

2 试验结果与分析

2.1 单根根系加固土体的直剪试验结果分析

在根系固土的大型直剪试验中，试样发生较大的剪切变形，数据处理时考虑面积修正，并扣除系统的摩擦，采用下式计算剪应力大小：

$$\tau = \frac{F - f}{S}$$
 (1)

式中， S 为剪切面有效面积 (m²)， $S = B \times (L - x)$ ， B 为剪切面宽度 (m)， L 为剪切面长度 (m)， x 为剪切位移 (m)， F 为千斤顶推力 (kN)， f 为空剪切盒与基土之间的滑动摩擦力 (kN)。

素土试样的剪切结果表明，其剪切破坏面较光滑，剪切曲线呈软化型，在剪切位移为 1.5 mm 左右即达到峰值强度，测得素土的抗剪强度指标 c 为 6.94 kPa， φ 为 27.8°。

(1) 剪切面破坏形态分析

无法向应力时，得到不同倾角单根根系的剪切面的破坏形态。与素土相比，单根工况下的剪切面较为粗糙，凹凸不平，根系的存在增加了剪切面摩擦作用，有效提高土体抗剪强度。单根 0° 时，根系在剪切面处被拉断；而单根 30°，45° 和 60° 工况下，根系在剪切面以下被拉断，根系拉拔现象明显。但根系与周围土体接触良好，没有被整体拔出，根土界面摩擦作用能有效发挥，剪切完成后根系的变形特征详见表 2。

表 2 试验前后根系长度变化

Table 2 Change of root length before and after tests				
根系倾角/(°)	原长度/cm	剪切后长度/cm	拉伸长度/cm	根系拉伸应变/%
0	29.1	29.9	0.8	2.75
30	28.0	28.9	0.9	3.21
45	29.5	30.5	1.0	3.39
60	30.5	32.3	1.8	5.90

(2) 剪切曲线分析

剪切过程中严格控制剪切速率，使剪切盒在剪切过程中几乎做匀速运动。不同倾角单根根系的固土剪切曲线如图 3 所示，结果表明，根系在剪切过程中均发生断裂，对应剪切曲线上剪应力突然陡降的突变点，

但根系倾角不同,根系断裂对应的剪切位移不一样,根系提高的强度也不一样,汇总出不同倾角单根根系固土的剪切试验结果如表3所示。

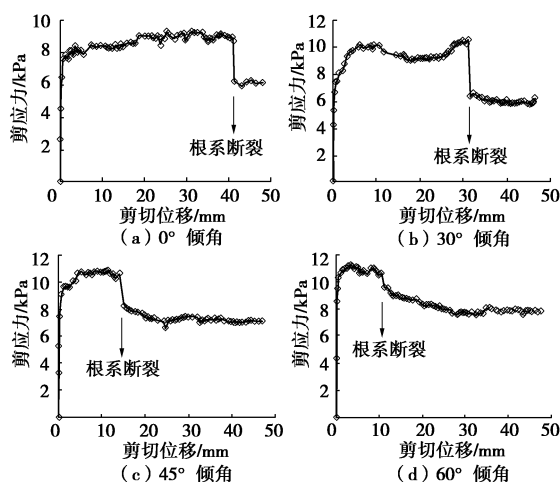


图3 单根根系不同倾角下的剪切曲线

Fig. 3 Shear curves of single root under different inclinations

表3 单根根系不同倾角时根-土复合体抗剪强度对比

Table 3 Comparison of shear strengths of root-soil composite under different inclinations of single root

工况	根系倾角/ $^{\circ}$	峰值抗剪强度/kPa	残余强度/kPa	峰值强度增幅/%	残余强度增幅/%
素土	—	7.84	4.3	—	—
单根	0	9.31	6.2	18.75	44.19
	30	10.57	6.0	34.82	37.21
	45	10.89	7.1	38.90	65.12
	60	11.26	7.9	42.22	83.72

由试验结果对比可知,有根系存在时根-土复合体抗剪强度高于素土,倾斜根系较垂直根系固土效果好,随单根倾角的增加,根系的拉伸变形量增加,根系提供的峰值抗剪强度增加,峰值强度增加的幅度也随之增加。不同倾角单根根系断裂对应的剪切位移不一样,倾斜根系较垂直根系而言更易发生断裂,且随着根系倾角的增加,根系断裂时对应剪切位移减小。 0° 单根在剪切位移为41 mm时发生断裂, 30° 单根在剪切位移为31 mm时发生断裂, 45° 单根在剪切位移为14 mm时发生断裂, 60° 单根在剪切位移为11 mm时发生断裂。

2.2 竖向植筋带固土的直剪试验结果及分析

通过对土样开展不同土体含水率、不同植筋带数量、不同法向应力下的直剪试验,得到剪应力与剪切位移关系曲线如图4所示,限于篇幅仅展示无植筋带与2根植筋带加固工况下的剪切曲线。有植筋带时扣除了素土样在底部滑面上的摩擦阻力(即扣除了直剪盒水平剪切面的抗剪强度贡献)以便主要测定分析竖向植筋带-土体界面的抗剪强度贡献。

图4反映了不同土体含水率下、不同布筋数量植筋带固土的抗剪强度增强效果。从图4(a)看出,无植筋带时剪应力与剪切位移曲线在剪切初期较陡,随着剪切位移增大,曲线趋于平缓。从图4(b)可以看出,有植筋带时,随着剪切的发生,含植筋带试样的剪应力与剪切位移大致呈线性增长关系。

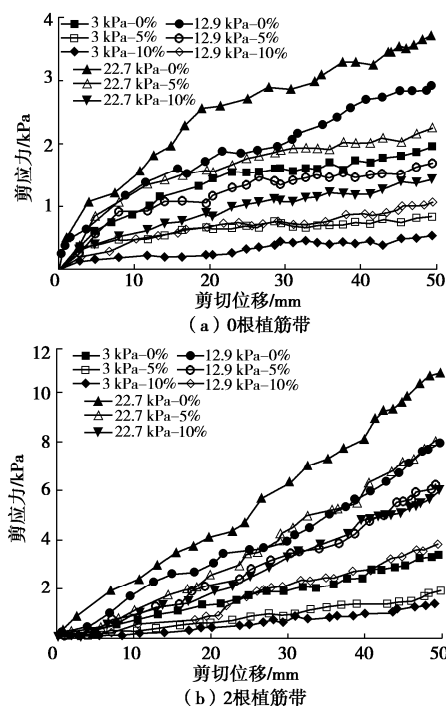


图4 不同加固工况下剪应力与剪切位移的关系曲线

Fig. 4 Relation curves between shear stress and shear displacement under different working conditions

(1) 土体含水率对抗剪强度的影响

从图4可以看出,植筋带数量与法向应力一定时,含水率越大,剪切位移曲线位置相对越低。在其他条件一定时,抗剪强度随含水率的增大而减小,依次为 $\tau_{0\%} > \tau_{5\%} > \tau_{10\%}$ 。

以不同土体含水率条件下布置2条植筋带的抗剪强度为例,利用Origin软件对含水率分别为0%,5%,10%的土体在竖向植筋带加固下的筋带-土界面抗剪强度试验结果(即扣除了素土样在底部滑面上摩擦阻力后的计算结果)进行拟合,拟合结果如图5所示。

从图5可知,在不同土体含水率下,正应力与抗剪强度之间的拟合曲线为直线,相关系数均大于0.9,证明了竖向植筋带对土体抗剪强度的增加作用符合库伦强度理论。图5中拟合曲线的斜率表示植筋带固土对内摩擦角的影响,曲线截距则反映黏聚力的影响。显然随着土体含水率增大,内摩擦角与黏聚力均减小,该结论与王华等^[17]对狗牙根、早熟禾边坡客土层剪切得到的结果一致,即随着土体含水量增加,抗剪强度随之减小,呈负相关的关系。

图 6 为筋带-土体界面抗剪强度指标随植筋带数量的变化曲线(按扣除素土样在底部滑面上摩阻力后的计算结果绘制),从该图看出在竖向植筋带固土作用下,无论是内摩擦角还是黏聚力,土体含水率低的曲线始终位于含水率高的曲线上面。土体含水率从 0% 增至 5%,10%,内摩擦角每次降低的值相差不大,但黏聚力在含水率 0% 增至 5% 时,减小幅度较小,从 5% 含水率增至 10% 时,黏聚力大幅度减小。

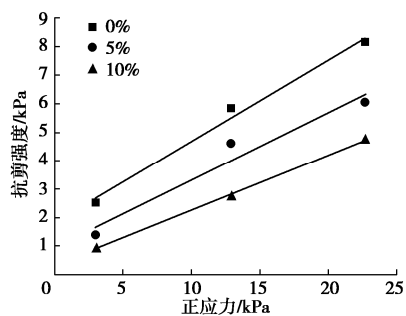


图 5 竖向植筋带固土作用下的抗剪强度包线
Fig. 5 Envelopes of shear strength reinforced by vertical geotextile belts

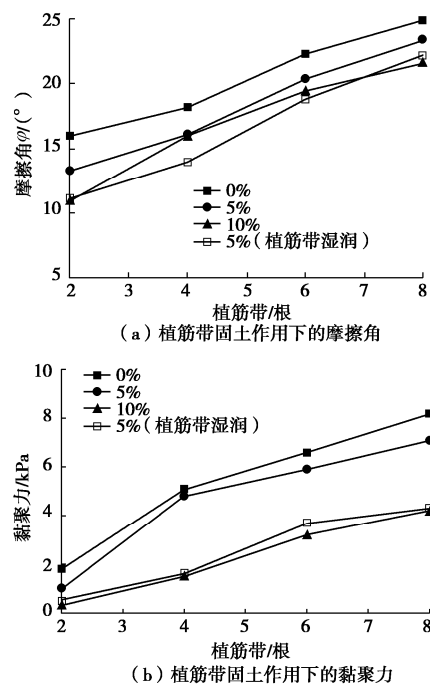


图 6 竖向植筋带固土作用下的界面抗剪强度指标与植筋带数量之间的关系曲线
Fig. 6 Relation curves between interfacial shear strength index and quantity of belts reinforced by geotextile belts

如果竖向植筋带本身是湿润的,则相同土体含水率(5%)的曲线比干燥的还要下移,相应筋带-土界面抗剪强度及其指标整理于表 4 中。土体含水率一定时(例如 5%),相比干燥状态,植筋带湿润会显著降低黏聚力与内摩擦角的值。

表 4 竖向植筋带湿润状态下的筋带-土体界面抗剪强度与抗剪强度指标(5%土体含水率)

植筋带数量	不同法向应力下的界面抗剪强度/kPa			界面抗剪强度指标	
	3.0	12.9	22.7	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
2	0.97	3.38	4.83	0.5	11.1
4	2.40	4.78	7.30	1.6	14.0
6	4.47	8.76	11.18	3.7	18.8
8	5.76	8.96	13.79	4.3	22.2

注:整理的试验结果没有考虑水平剪切面的抗剪强度,相当于额外增加了剪切面和抗剪强度。

(2) 植筋带数量对抗剪强度的影响

从图 6 看出,土体含水率一定时,随着植筋带数量增加,测定的内摩擦角与黏聚力明显增大,这是植筋带与土体界面之间摩擦力增加的结果,因为植筋带自身具备较高的抗拉强度,推力在植筋带范围的土中产生的剪切应力通过植筋带的表面黏结摩擦力转化为对它的拉力,从而实现加筋作用,增大抗剪强度值,含水率较高则会减小这种加筋作用。

从图 6 还可知,“竖向植筋带湿润+5%的土体含水率”的曲线与“竖向植筋带干燥+10%的土体含水率”的曲线十分接近,前者摩擦角在植筋带数量为 4 根与 6 根时甚至低于后者,表明此时竖向植筋带的干湿状态对内摩擦角的影响大于土体含水率的影响,这也说明竖向植筋带-土体界面特性的重要性。竖向植筋带与实际根系在与土体界面的相互作用方面存在差异,实际根系与土壤接触处由于生物化学作用提高土体的黏聚力。因此在实际护坡应用时,在坡面把植筋带周围土体压密实防止降雨优势流的发生,同时考虑减少降雨沿着竖向植筋带与土体之间界面入渗的工程措施。

3 结 论

- (1) 根系加筋能增加土体的力学强度,随着根系顺剪切方向的倾角增加,根系断裂时所产生的拉伸变形量增加,根系断裂时的剪切位移越小,根系固土效果增强,根-土复合体抗剪强度提高。
- (2) 竖向植筋带能显著增加土体的抗剪强度,其它条件一定时,界面抗剪强度随土体含水率增大而减小,依次为 $\tau_{0\%} > \tau_{5\%} > \tau_{10\%}$; 竖向植筋带数量增加可显著增加抗剪强度值。
- (3) 试验结果表明,竖向植筋带可以帮助灌木植株增加根系长度(相当于延长根),解决植物根系短于降雨影响深度和力学加筋不足而不能有效防护坡土的问题,拓展植物护坡的工程应用。

(4)竖向植筋带湿润会显著降低界面黏聚力与内摩擦角的值,这也说明了竖向植筋带-土体界面特性的重要性。在实际护坡应用时,在坡面把植筋带周围土体压密实防止降雨优势流的发生,同时考虑减少降雨沿着竖向植筋带与土体之间界面入渗的工程措施。

参考文献:

- [1] 余芹芹, 乔娜, 卢海静, 等. 植物根系对土体加筋效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 1): 3216 - 3223. (YU Qin-qin, QIAO Na, LU Hai-jing, et al. Effect study of plant roots reinforcement on soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S1): 3216 - 3223. (in Chinese))
- [2] ABE K, ZIEMER R R. Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1991, **21**(7): 1012 - 1019.
- [3] ZIEMER R R. The role of vegetation in the stability of forested slopes[C]// Proceedings of the International Union of Forestry Research Organizations, XVII World Congress, 1981, Kyoto.
- [4] OPERSTEIN V, FRYDMAN S. The influence of vegetation on soil strength[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2000, **4**(2): 81 - 89.
- [5] MICKOVSKI S B, STOKES A, VAN BEEK R, et al. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis[J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(10): 1523 - 1532.
- [6] MAO Z, YANG M, BOURRIER F, et al. Evaluation of root reinforcement models using numerical modelling approaches[J]. Plant and soil, 2014, **381**(1/2): 249 - 270.
- [7] BOURRIER F, KNEIB F, CHAREYRE B, et al. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots[J]. Ecological Engineering, 2013, **61**: 646 - 657.
- [8] 周云艳, 陈建平, 杨倩, 等. 植物根系固土护坡效应的原位测定[J]. 北京林业大学学报, 2010, **32**(6): 66 - 70. (ZHOU Yunyan, CHEN Jianping, YANG Qian, et al. In situ measurement of mechanical effect of plant root systems on soil reinforcement and slope protection[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, **32**(6): 66 - 70. (in Chinese))
- [9] 王涵, 周成, 刘伟, 等. 植物根系倾角对土体抗剪强度影响试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, **49**(增刊 1): 81 - 88. (WANG Han, ZHOU Cheng, LIU Wei, et al. Shear test for root reinforced soil samples considering the inclination of roots[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, **49**(S1): 81 - 88. (in Chinese))
- [10] 周成, 路永珍, 黄月华. 香根草加固不同含水率膨胀土的侧限膨胀和直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 2): 30 - 35. (ZHOU Cheng, LU Yong-zhen, HUANG Yue-hua. Oedometer expansion and direct shear tests on vetiver root-reinforced expansive soil with different water contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 30 - 35. (in Chinese))
- [11] FAN C C, SU C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. Ecological Engineering, 2008, **33**(2): 157 - 166.
- [12] HU X, LI Z C, LI X Y, et al. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, **150**: 1 - 9.
- [13] ABDELOUHAB, A., DIASA, et al. Numerical analysis of the behaviour of mechanically stabilized earth walls reinforced with different types of strips[J]. Geotext Geomembr, 2011, **29**(2): 116 - 129.
- [14] 周成, 杨文琦, 党晓强, 等. 根系联合拉筋带加固膨胀土边坡的方法: 中国, 发明专利 ZL201710124645. X[P]. 2018-09-14. (ZHOU Cheng, YANG Wen-qi, DANG Xiao-qiang, et al. Method of reinforcing expansive soil slope with root system combined with lacing belt: China, invention patent ZL201710124645. X[P]. 2018-09-14. (in Chinese))
- [15] 周成, 吴美苏, 党晓强, 等. 根系联合框架拉筋带生态防护黄土边坡的方法: 中国, 发明专利 ZL201710124952. 8[P]. 2019-02-12. (ZHOU Cheng, WU Mei-su, DANG Xiao-qiang, et al. Method of ecological protection of loess slope by root system combined with frame lacing belt: China, invention patent ZL201710124952. 8[P]. 2019-02-12. (in Chinese))
- [16] 吴美苏. 根系固土剪切特性的试验与数值模拟[D]. 成都: 四川大学, 2019. (WU Mei-su. Experiment and Numerical Simulation of Shear Characteristics of Root Reinforcement on Soil[D]. Chengdu: Sichuan University, 2019. (in Chinese))
- [17] 王华, 赵志明, 何刘. 不同植被类型根系固土效应的试验研究[J]. 铁道建筑, 2009(11): 61 - 63. (WANG Hua, ZHAO Zhi-ming, HE Liu. Experimental study on the soil consolidation effect of root system of different vegetation types[J]. Railway Engineering, 2009(11): 61 - 63. (in Chinese))