

DOI: 10.11766/trxb201807030113

不同草本植物根系提高无侧限受压土体的抗剪强度*

段青松¹ 赵焱柯¹ 杨松² 王金霞³ 杨旻⁴ 龚爱民² 孙高峰¹
杨苍玲¹ 余建新^{1†}

(1 云南农业大学水利学院国土资源科学技术工程研究中心, 昆明 650201)

(2 云南农业大学水利学院, 昆明 650201)

(3 西南有色昆明勘测设计研究(院)股份有限公司, 昆明 650051)

(4 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要 研究草本植物根系提高无侧限受压土体的抗剪能力, 为根系固土护坡计算和草种选择提供依据。采用无侧限抗压强度试验, 测定了素土和3种草根土复合体的黏聚力(C), 分析了黏聚力增量 ΔC 与根系特征值间的关系。结果表明: 非洲狗尾草、鸭茅、紫花苜蓿的根系可将 0~25 cm 范围内土体的黏聚力提高 4.75、4.04、1.39 kPa, 25~50 cm 范围内土体提高 3.10、2.32、0.71 kPa。非洲狗尾草、鸭茅柱体破坏面根密度(RD)、根面积比(RAR)、复合体含根量(Q)与 ΔC 呈二次显著相关, 并以 Q 与 ΔC 相关性最好; 根系平均直径 T_{ra} 与 ΔC 不相关; 紫花苜蓿的 4 个量与 ΔC 没有相关性。非洲狗尾草根系提高土体抗剪强度能力最强, 鸭茅次之, 紫花苜蓿最差, 紫花苜蓿提高值的变化幅度最大; 上层根系提高值要大于下层。对非洲狗尾草、鸭茅等斜生根系草本, 在 RD、RAR、Q 三个根系特征指标中, Q 是计算根系提高土体抗剪强度的最优指标。对所计算植物边坡多点取样进行无侧限抗压强度试验, 使得采用概率论计算其稳定性成为可能。

关键词 草本植物; 根系; 无侧限受压土体; 抗剪强度

中图分类号 S157.2 **文献标识码** A

草本植物根系能固结土壤, 提高边坡稳定、减少土壤侵蚀, 在生态环境保护和改善中发挥着重要作用。根系固土作用体现在 4 个方面, 即根系对土壤的网络串联作用、根土黏结作用、根系化学作用和根系本身材料力学作用^[1]。植物根系的固土能力, 主要用土壤的抗剪强度提高值来衡量^[2], 一般通过剪切试验得到, 剪切的方法主要有直剪试验^[3-5]、三轴试验^[6-7]以及野外的原位剪切试验^[8-9]。直剪试验和原位剪切试验, 土样的受剪面

是预设的, 它不一定是最薄弱面, 且在剪切破坏过程中逐渐变小, 因此试验所测定的抗剪强度不一定能代表根系的固土能力。三轴试验中的破坏面是真正的最薄弱面, 且可以模拟不同排水状况下剪切应力的变化, 区分空隙水压力和有效应力, 可以更客观地反映根系固土的实际。但是三轴试验中, 为得到 1 条库伦曲线, 至少需要 3 个相同的土样在不同的围压下压缩破坏。对于自然生长状态下的含根土体, 让 3 个土样完全相同, 特别是根系特征值相同

* 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201511003-3) Ministry of land and resources special funds for public welfare projects (No. 201511003-3)

† 通讯作者 Corresponding author: 余建新(1958—), 男, 二级教授, 主要从事土地利用工程、水利水电工程方面的研究。

E-mail: yjxin58cn@yahoo.com.cn

作者简介: 段青松(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事农业水土工程、土地利用工程研究。E-mail: 258437886@qq.com

收稿日期: 2018-07-03; 收到修改稿日期: 2018-12-13; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-01-08

是件很困难的事。

自然状态下有根土体的破坏，主要是在垂直荷载（包括自重）作用下发生的，草本植物根系作用于浅层土体，其作用范围内土体的围压很小，可以忽略不计^[10]。同时现有研究表明^[11-12]，根土复合体中的根系会对土体产生一种侧向约束，限制土体的侧向变形，当从根土复合体中取出一单元体时，单元体内根系的侧向约束与单元体外根系对单元体的约束是相互抵消的，该状态相当于三轴压缩试验中围压为0的状态，因此可用无侧限抗压强度试验研究草本植物根系提高土体抗剪强度。无侧限抗压强度试验是一种特殊的三轴压缩试验，同样以摩尔-库伦理论为依据，围压为0，只要测出试样的最大主应力，即可确定摩尔应力圆，其顶点的切线即为库仑直线，该直线在纵轴上的截距即为黏聚力，内摩擦角为0，土体的抗剪强度全部以黏聚力的形式表现^[13]。以上两点，为采用无侧限抗压强度试验研究草本植物根系的固土能力，通过重复试验研究自然状态下根系提高土体的抗剪强度提供了依据。

现有研究表明，根系提高土体抗剪强度主要与单根的抗拉强度^[14]、剪切面的根面积比(RAR)^[15]和含根量^[16]等相关。近年来，逐渐有学者采用无侧限抗压强度试验对根系固土能力进行研究。Kleinfelder等^[17]研究认为，河岸草本植物的无侧限抗压强度随着直径小于0.5 mm根的根长密度的增加而增加，周成等^[18]、聂影等^[19]认为草本植物根系对土体的无侧限抗压强度提高影响不大，而贺长彬等^[20]则认为能增加土体的无侧限抗压强度。总体而言，对草本植物根系提高无侧限受压土体的抗剪强度研究还较少，结论也不尽相同，对根系特征与根土复合体无侧限抗压强度之间的关系尚未清楚。

为深入研究自然生长状态下草本植物根系提高土体抗剪强度的能力，采用无侧限抗压强度试验测定了3种草本植物根系提高土体的抗剪强度，观测了植物根系的形态特征，并分析了它们之间的相关性。本研究可为草本植物根系的固土护坡计算和草种选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

固土护坡的草本植物常用斜生型根系和垂直

型根系的植物。本研究选用非洲狗尾草、鸭茅代表斜生型根系，紫花苜蓿代表垂直型根系。非洲狗尾草(*Setaria anceps* Stapf ex Massey L.)，多年生禾本科狗尾草属植物，斜生型根系。鸭茅(*Dactylis glomerata* L.)，多年生丛生型禾本科草本植物，斜生根系^[4]。紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)，多年生豆科草本植物，垂直根系^[21]，根粗壮，深入土层。

1.2 试样制备

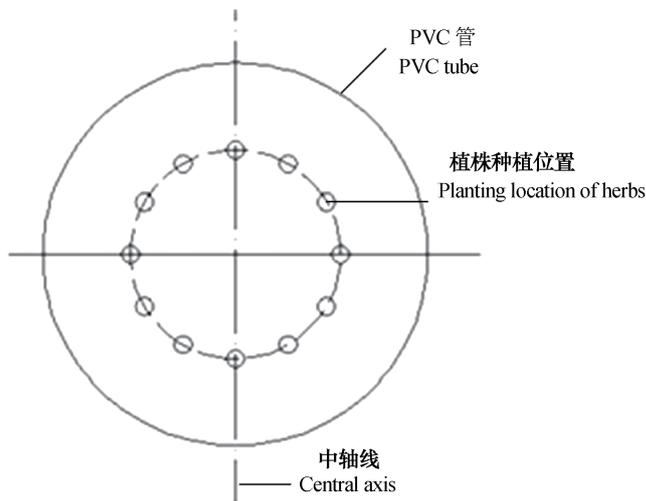
2016年1月，准备长51 cm、规格为 $\Phi 110$ mm \times 3.2 mm的PVC管40根，每根切割为两半，对合后用橡皮筋箍紧，再用塑料膜作底面。土料取自云南农业大学后山试验农场，为山原红壤^[22]，采用比重计法分析土壤颗粒，得出 <0.01 mm黏粒为58.13%，1~0.01 mm黏粒为41.87%；采用比重瓶法测得土粒比重 $G_s=2.80$ 。将土料过5 mm筛，搅拌均匀，装入准备好的PVC管中，每管装入土样高度约为50 cm，边装边均匀压实，管中土壤的质量含水量为28.31%，干密度为 0.78 g \cdot cm⁻³，和田间疏松的土壤干密度相当。装好的土柱立放于露天平地上。2016年5月在PVC管中播种鸭茅、非洲狗尾草、紫花苜蓿，加上对照的素土柱，共4个处理，每个处理设10个重复，共计40个样品。为了消除种植密度和种植间距的影响，每个柱体内种植12株植物，并均匀地种植在以柱体中点为中心，半径为30 mm的圆周上，如图1所示。

2016年5月，在云南农业大学后山农场各种植1 m²的非洲狗尾草、鸭茅、紫花苜蓿，用于测定植物根系的抗拉强度。

1.3 柱体无侧限抗压强度的测定

试验采用南京土壤仪器厂生产的SJ-1A型应变控制式三轴仪。该仪器包括轴向加压系统、压力室、周围压力系统和试样变形量测系统等。试验操作步骤按照土工试验规程进行^[23]。

2016年10月，在种草的三个处理中各选7个植株长势良好的土柱，再随机选取7个素土土柱，共28个土柱立放在水面下浸泡24 h使其充分饱和后取出，剪开PVC管的橡皮筋，取出柱体，剪去植株地上部分。用钢锯缓慢平稳地将柱体从中间锯开分为两节，每节的高度为25.0 cm，截取中间20.0 cm为试样，截面直径为10.36 cm，分别称重后计算柱体的饱和密度。每个柱体取截下的土样10 g左右，放



a. PVC管内草本植物种植位置图

a. Planting sites of herbs in the PVC tubes



b. 生长在PVC管内的草本植物

b. Herbs growing in the PVC tubes

图1 PVC管内草本植物种植图

Fig. 1 Illustration of the herbs going in the PVC tubes

入铝盒，称重后用烘干法测定土样的饱和含水量。

撤去三轴压缩仪的压力室、周围压力系统和试样变形量测系统，将柱体直接放置在轴向加压系统平台上，直接给土柱加压，剪切速率为 $4.14 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，用百分表测定柱体的垂直向变形和量力环的变形。记录应力应变过程，直至试样被压坏或者轴向应变达到20%，试验结束。对于应变达到20%仍未破坏的柱体，抗剪强度值取应变为15%对应的值，黏聚力计算公式如下^[23]：

$$C = \frac{1}{2} \sigma \quad (1)$$

式中， C 为柱体黏聚力，kPa； σ 为施加在柱体上的应力，kPa，按式(2)计算

$$\sigma = \frac{L_v R}{A} \times 1000 \quad (2)$$

式中， L_v 为测力计率定系数， $\text{N} \cdot 0.01 \text{ mm}^{-1}$ ，本实验中率定系数为 $7.238 \text{ N} \cdot 0.01 \text{ mm}^{-1}$ ； R 为测力计读数， 0.01 mm ； A 为校正后试样面积， cm^2 。

1.4 柱体根系特征值测定

破坏面上根系的直径、根数。将压缩后的柱体沿破坏面剪开，用电子卡尺测量破坏面上根系的直径并统计根数。计算破坏面根密度、平均直径、根

面积比。

破坏面根密度 (Root Density, RD) 为破坏面根的数量与破坏面面积的比值^[24]。

破坏面根系直径大小不一，强度不同，用它们的平均直径及其对应的抗拉强度代表破坏面的根系直径和强度。

根面积比为破坏面上根系的截面积之和与土体截面积之比^[15]。

柱体的含根量。将压缩破坏后的土柱放入细筛，筛子置于水中，松开土柱，在水中洗出根系，用吸水纸将根系表面水分擦干，用烘干法测定根系的生物量，含根量计算公式如下^[25]：

$$Q = MR/M \times 100 \quad (3)$$

式中， Q 为含根量，%； M_R 为柱体内根系烘干后的质量，g， M 为饱和柱体的质量，g。

1.5 单根抗拉强度测定

2016年10月挖取种在云南农业大学后山的非洲狗尾草、鸭茅、紫花苜蓿根系，洗净擦干。用电子卡尺测量根系的直径，用量程为100 N、精度为0.05 N的山度牌SN100数显拉力试验机测定单根抗拉力，紫花苜蓿粗根抗拉力可能超出100 N的量程，采用万能试验机进行拉伸^[26]，根据测得的单根直径及其抗拉力计算单根抗拉强度。拟合根系直

径-抗拉强度关系函数。试验时尽可能选择不同直径的根，尤其是极细或者极粗的根，保证单根抗拉强度-直径关系函数的可靠性。

2 结 果

2.1 草本植物根系柱体的黏聚力增量

受压试验柱体的饱和密度、饱和含水量见

表1。经方差分析，不同植物柱体的饱和含水量间、饱和密度间无显著差异，但它们与素土间的差异均达极显著。有根柱体的饱和含水量明显低于素土柱体，其原因应是有根柱体的植物根系填充了土壤颗粒间的空隙，柱体空隙减少，浸泡吸收的水量少。由于根的密度小于水的密度，因此有根柱体的饱和密度小于素土柱体的饱和密度。

表1 受压柱体的饱和密度、饱和含水量及黏聚力

Table 1 Saturate density, saturated moisture content and cohesive strength of the compressed solum

处理 Treatments	深度范围 Depth/cm	饱和密度 $\rho_{sat}/(g \cdot cm^{-3})$	饱和含水量 $\omega/\%$	黏聚力 C/kPa
素土 Bare soil	0 ~ 50	1.38±0.04	73.68±4.12	0
非洲狗尾草 <i>Setariaanceps Stapf ex Massey L.</i>	0 ~ 25	1.31±0.04	61.98±3.94	4.75±0.35
鸭茅 <i>Dactylisglomerata L.</i>	25 ~ 50	1.30±0.03	63.24±1.39	3.10±0.24
鸭茅 <i>Dactylisglomerata L.</i>	0 ~ 25	1.26±0.02	62.99±1.35	4.04±0.23
鸭茅 <i>Dactylisglomerata L.</i>	25 ~ 50	1.26±0.01	63.76±5.41	2.32±0.09
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa L.</i>	0 ~ 25	1.26±0.02	65.88±4.68	1.39±0.31
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa L.</i>	25 ~ 50	1.25±0.01	67.03±4.62	0.71±0.17

素土柱体的黏聚力。根据库伦公式黏性土的抗剪强度 $\tau_f=c+\sigma \tan \varphi$ ，式中， c 为土的黏聚力， σ 为破坏面上的法向应力， φ 为土的内摩擦角。黏聚力可分为原始黏聚力和固化黏聚力。原始黏聚力来源于土体颗粒间的静电力和范德华力，当颗粒间相互离开一定距离以后，原始黏聚力会完全丧失^[13]。固化黏聚力决定于颗粒之间的胶结物质的胶结作用，

黏性土受到扰动发生膨胀以后，固化黏聚力也会消失^[13]。本研究中PVC管中的土为重塑土且密度较低，素土柱体PVC管拆开后成散状（图2 a），说明其原始黏聚力和固化黏聚力均消失，其黏聚力值为0。但若土体受力，由土粒间相互移动和咬合作用所引起的摩擦强度依然存在，即内摩擦角不为0，此时土体的受力性质类似于粗粒土。



图2 拆开PVC管后土柱形态

Fig. 2 Shape of the soil samples with PVC tubes removed

植物根系固土的黏聚力增量(ΔC)。草本植物的柱体拆开PVC管后均成形(图2b, 图2c, 图2d), 它们无侧限受压试验的应力-应变关系曲线如图3所示, 每种草上层(0~25 cm深范围内)、下层(25~50 cm深范围内)均有7个柱体受试。鸭茅、非洲狗尾草柱体随着应力的增大变形增加, 应力未出现峰值, 但紫花苜蓿柱体有明显的峰值, 且应力值较小, 相比非洲狗尾草、鸭茅柱体, 紫花苜蓿的承压能力较低。非洲狗尾草、鸭

茅、紫花苜蓿上层柱体的黏聚力分别为4.75 kPa、4.04 kPa、1.39 kPa; 下层柱体的黏聚力分别为3.10 kPa、2.32 kPa、0.71 kPa。由于素土柱体的强度为0, 上述各值也就是 ΔC 。不同植物柱体的饱和含水量、饱和密度无显著差异, 但它们的黏聚力增量相差较多, 反映了不同植物根系固土效应的不同。

无论是柱体的上层还是下层, 均以非洲狗尾草的 ΔC 最大, 上层分别为鸭茅和紫花苜蓿的1.176

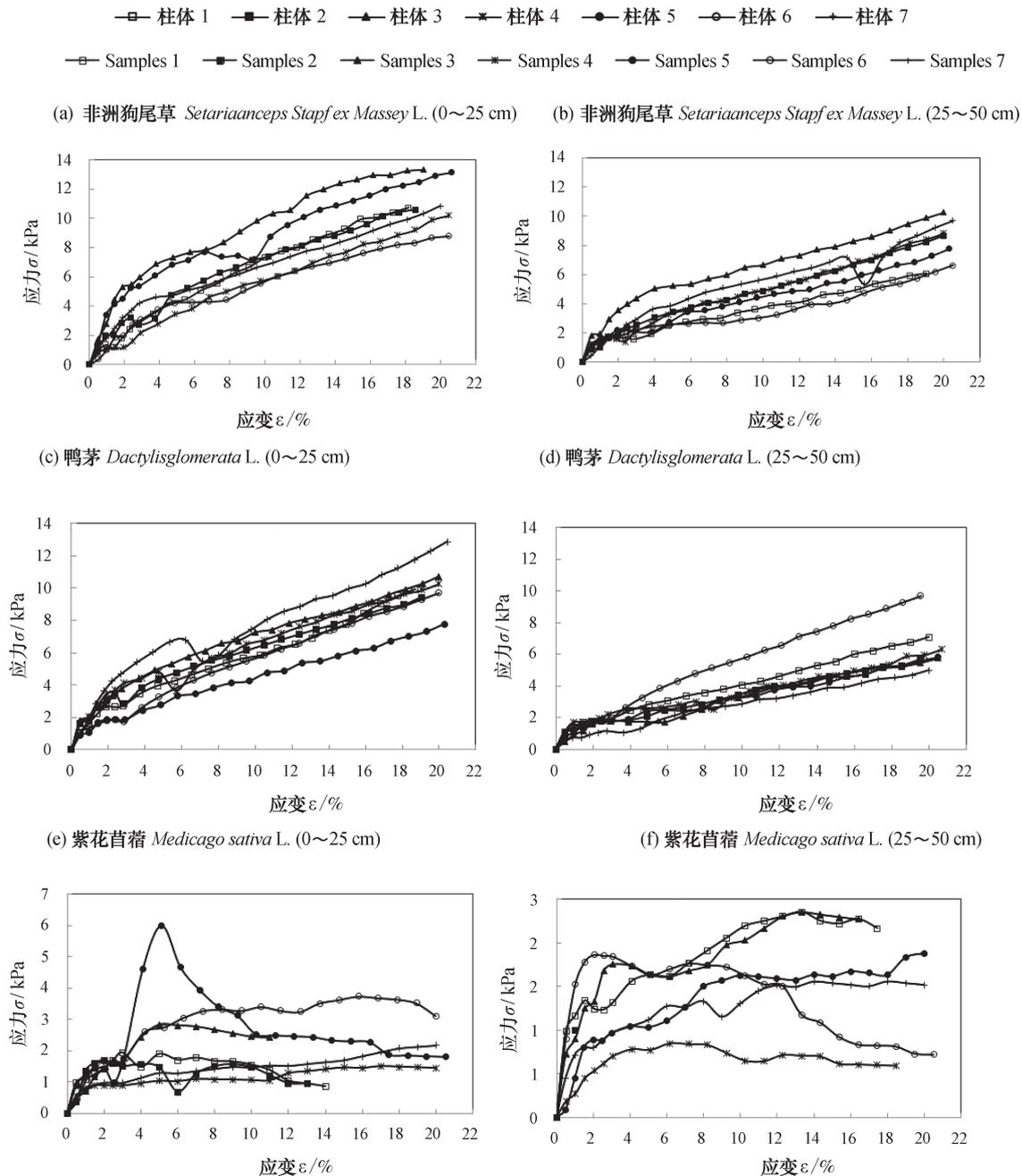


图3 根土复合体应力(σ)与应变(ϵ)关系曲线

Fig. 3 Relationship between stress (σ) and strain (ϵ) in the root-soil complex

倍、3.417倍, 下层分别为1.336倍、4.366倍。说明生长了5个月的3种草本植物, 固土能力以非洲狗尾草最优, 鸭茅次之, 紫花苜蓿最差。非洲狗尾草、鸭茅、紫花苜蓿柱体上、下层的 ΔC 之比为1.532、1.741、1.958, 说明草本植物根系上层的固土能力高于下层。

表1中黏聚力的标准误虽然反映了样本平均数的抽样误差大小, 但无法反映黏聚力均值不同的样本的离散程度, 在统计学中常用变异系数 CV 来反映样本数据的相对离散程度。非洲狗尾草黏聚力的 CV 值上层为0.195、下层为0.205, 鸭茅的分别为0.151、0.103, 紫花苜蓿的分别为0.590, 0.634, 紫花苜蓿的 CV 值最大, 为其他2

种草的2.88倍~6.16倍, 说明紫花苜蓿根系固土能力的变化幅度大于非洲狗尾草和鸭茅。如将研究结果应用于边坡稳定分析中, 紫花苜蓿由于 CV 大, 其计算结果的可靠性要低于另外两种植物。

2.2 根密度RD与黏聚力增量 ΔC 的关系

表2为每种草上、下层各7个受压柱体的根系特征值。同一深度范围内, 破坏面的根密度均为鸭茅最大、紫花苜蓿最小, 非洲狗尾草居中, 说明鸭茅的根系最为发达。非洲狗尾草上下层根密度的比值为1.712, 鸭茅的为1.591, 紫花苜蓿的为1。说明非洲狗尾草和鸭茅生长5个月后, 根系主要集中在上层, 而紫花苜蓿根系分布比较均匀。

表2 受压柱体的根系特征值

Table 2 Eigenvalues of the roots in the compressed soil column

处理 Treatments	深度范围 Depth/cm	破坏面根系平均 直径 D_a /mm	破坏面根密度 RD/(number·cm ⁻²)	破坏面根面积比 RAR/(×10 ⁻³)	柱体含根量 Q/%
非洲狗尾草 <i>Setaria anceps</i> Stapf ex Massey L	0~25	0.24±0.02	3.80±0.49	2.243±0.372	0.249±0.024
	25~50	0.17±0.01	2.22±0.31	0.853±0.261	0.083±0.011
鸭茅 <i>Dactylis glomerata</i> L.	0~25	0.19±0.01	4.09±0.41	1.327±0.183	0.209±0.028
	25~50	0.11±0.02	2.57±0.48	0.551±0.203	0.097±0.012
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	0~25	2.29±0.39	0.20±0.03	10.311±3.030	0.430±0.092
	25~50	1.35±0.20	0.20±0.02	4.640±1.704	0.184±0.044

注: 每种草在0~25 cm、25~50 cm两个深度范围内均有7个柱体受试, 表中各值为7次重复的平均值和标准误 Note: Each herbs has 7 samples in two depths of 0~25 cm and 25~50 cm, the average values and standard errors of the 7 replicates are all in the table

RD与 ΔC 相关性分析结果见表3。非洲狗尾草RD与 ΔC 呈二次函数的极显著相关, 鸭茅呈二次函数的显著相关。2个函数的二次项系数为负值, 图形开口向下, 说明存在最优RD。紫花苜蓿RD与 ΔC 不具有相关性(表3中亦未列出), 其原因应是紫花苜蓿的根密度较小(仅为非洲狗尾草、鸭茅的4.89%~9.01%), 对土体包裹、缠绕较弱, 不同根密度固土的差异性未得到有效体现。

2.3 破坏面根面积比RAR与黏聚力增量 ΔC 的关系

破坏面的RAR见表2。同一深度范围内, RAR最大的是紫花苜蓿, 上层分别是非洲狗尾草的4.597倍, 鸭茅的7.770倍, 下层分别为非洲狗尾草的5.440倍、鸭茅的8.442倍。紫花苜蓿的RAR最大, 主要原因是根的直径较大, 是其他2种草的

5.63倍~20.8倍。

RAR与 ΔC 相关性分析结果见表3。非洲狗尾草RAR与 ΔC 呈二次函数的极显著相关, 鸭茅呈二次函数的显著相关。函数二次项系数均为负值, 图形开口向下, 存在最优的RAR, 这与目前的研究结果一致^[27-28]。但紫花苜蓿的RAR与 ΔC 没有相关性, 其原因在于紫花苜蓿主根粗大, 其在RAR中占比高, 但其对土体的网络固结作用弱, 形成的固土能力低。

2.4 柱体含根量Q与黏聚力增量 ΔC 的关系

柱体的Q见表2, 上、下层柱体Q值均以紫花苜蓿的最大, 上层分别为非洲狗尾草和鸭茅的172.7%和205.7%, 下层分别为非洲狗尾草和鸭茅的221.7%和189.7%。非洲狗尾草、鸭茅和紫花苜蓿上层含根量是下层的300.0%、215.5%、

表3 受压柱体根系特征值与黏聚力增量相关性

Table 3 The relation between characteristic value of roots and increment cohesion

处理 Treatments	破坏面根密度RD /(number·cm ⁻²)	破坏面根面积比RAR /(×10 ⁻³)	柱体含根量 Q/%
非洲狗尾草 <i>Setaria anceps</i> Stapf ex Massey L.	$\Delta C = -0.211RD^2 + 2.113RD - 0.178$ ($R^2 = 0.689$)	$\Delta C = -35784RAR^2 + 1079.2RAR + 2.3792$ ($R^2 = 0.792$)	$\Delta C = -0.833Q^2 + 10.890Q + 2.150$ ($R^2 = 0.820$)
鸭茅 <i>Dactylis glomerata</i> L.	$\Delta C = -0.125RD^2 + 1.186RD + 0.837$ $R^2 = 0.564$	$\Delta C = -18728RAR^2 + 937.7RAR + 2.3281$ $R^2 = 0.617$	$\Delta C = -33.946Q^2 + 23.083Q + 0.646$ $R^2 = 0.685$

233.7%，说明非洲狗尾草上下层根的质量差别较另外两种草大。柱体的Q与 ΔC 相关性分析结果见表3。非洲狗尾草Q与 ΔC 呈二次函数的极显著相关，鸭茅呈二次函数的显著相关，函数二次项系数均为负值，图形开口向下，存在最优的Q值，这与栗岳洲等^[25]、胡其志等^[29]的研究结果一致。鸭茅峰值为0.35%左右，而非洲狗尾草未出现峰值，是因为仅生长了5个月，非洲狗尾草根数量尚未超过最优值。紫花苜蓿柱体的含根量与 ΔC 没有相关性，其主要原因是紫花苜蓿主根生物量占比大，侧根、须根占比小，而须根网络固土的作用更大，在根系生物量相同的情况下，由于须根占比不同，根系表现出的固土能力也会有很大的差异。

2.5 破坏面根系平均抗拉强度与黏聚力增量 ΔC 的关系

经拟合，三种草本植物根系直径-抗拉强度呈幂函数关系，关系式如下：

$$\text{非洲狗尾草: } T_r = 56.708d^{-0.514}, R^2 = 0.5988 \quad (4)$$

$$\text{鸭茅: } T_r = 53.091d^{-0.528}, R^2 = 0.6512 \quad (5)$$

$$\text{紫花苜蓿: } T_r = 32.8d^{-0.634}, R^2 = 0.7264 \quad (6)$$

将破坏面平均直径 D_a 代入根系直径-抗拉强度关系函数，得到每节柱体破坏面根系的平均抗拉强度 $T_{r,a}$ 。经分析， ΔC 与 $T_{r,a}$ 没有明显的相关性。这是因为试验中，按规范取15%应变变量所对应的应力作为破坏强度，此时柱体中的根系并没有因为压缩而断裂，根系的抗拉强度没有得到充分发挥。

3 讨论

周成等^[18]、聂影等^[19]的研究结果表明，扰动土含根与不含根的试样抗压强度基本相同，这是

因为人工制备试样的过程中，不仅破坏了土体自身的结构，也破坏了根土间的黏结。本研究采用原状根土复合体受压试验的结果表明，根系的存在能提高土体的无侧限抗压强度，但不同的植物根系提高的程度不同，这与贺长彬等^[20]采用原状根土复合体受压试验的结论一致。相比采用扰动土制样，采用原状根土复合体测得的抗剪强度提高值不仅反映了根系本身材料力学的固土作用，也反映了土壤网络串联、根土黏结、根系化学所起的固土作用。常规的无侧限抗压实验，试样直径为35~40 mm，柱体横截面积小，本研究中柱体直径为103.6 mm，试样直径的增大，减小了边际效应的影响，与实际状况更接近。

研究草本植物根系提高土体抗剪强度的能力主要目的之一是为根系固土护坡计算提供依据。现有研究表明，可以用根土复合体的剪切破坏面RAR^[15]、复合体的Q^[16]、复合体的RD^[24]等预测根系提高土体的抗剪强度。本研究中非洲狗尾草、鸭茅根土复合体的Q、破坏面RAR、RD与 ΔC 呈二次函数的极显著或显著相关，理论上讲也可用上述三个参数计算 ΔC 。但实际当中，既使确定了根土复合体，在其破坏前破坏面是未知的，也难以计算破坏面的RD、RAR，但可利用Q值计算所取根土复合体所代表土层的根系的 ΔC 。另一方面，RAR只是反映了受剪破坏面上根系分布的特征，根密度反映了柱体内根的个数，而柱体含根量反映了柱体内根的质量，根土复合柱体无侧限受压的承载能力是柱体内所有根系与土体共同作用的结果，从这角度而言，含根量与根系的固土能力间有着更密切的关系，研究结果也是Q值与 ΔC 的相关性要高于RD、RAR。因此在Q、RD、RAR三个

根系特征指标中, 含根量 Q 是计算非洲狗尾草、鸭茅等斜生根系草本植物提高土体抗剪强度的最优指标。

目前常用WU模型或FBM模型预测根系固土能力^[2], 两个模型均是基于直剪或原位剪切试验结果计算, 其破坏面是预定的; 而且WU模型预测精度差, FBM模型预测需要确定破坏面根系的直径和数量^[30], 草本植物根系细密, 确定破坏面根系的直径和数量是一个繁琐且易受人为影响的过程, 利用 Q 值计算根系固土能力, Q 值的获得就简单得多。同时基于WU模型或FBM模型预测根系固土能力用于边坡稳定的计算, 得到稳定安全系数。但实际上, 土的抗剪强度是随机变量, 引起边坡滑动的土体自重、水压力等荷载也是随机变量, 因此采用概率论对边坡稳定性进行可靠性分析, 得出边坡稳定的可靠度, 是更合理的方法。由于无侧限抗压强度试验中单个柱体受压破坏即可得到该柱体的根系固土的 ΔC , 对所计算边坡多点取样进行无侧限抗压强度试验, 即可得到柱体的 Q 值及相应的 ΔC , 可以计算 ΔC 的平均值、标准差、变异系数等统计参数, 从而使采用概率论分析边坡稳定成为可能。

本研究得出紫花苜蓿3个量与 ΔC 间相关性不显著, Comino 和Druetta^[8]采用原位剪切试验测定三叶草、紫花苜蓿根系固土能力中发现在两种草的 ΔC 值大小近似相等的情况下, 紫花苜蓿的RAR为三叶草的2倍。Li等^[31]认为, 根系对浅层土的固定作用, 与直径小于1 mm须根数量成正比。本研究中, 紫花苜蓿上层柱体破坏面上约70%根直径大于1 mm (7个样平均值)、下层约为40%, 而这些根在根土复合体的 Q 、破坏面RAR、RD占有较大的比重, 导致紫花苜蓿3个量与 ΔC 间相关性不显著。因此, 对于紫花苜蓿等主根较大的草本植物, 需要进一步深入研究根系特征与其固土能力的关系。

4 结 论

在自然生长状态下的3种草本植物, 非洲狗尾草根系提高土体抗剪强度的能力最强, 鸭茅次之, 紫花苜蓿最差, 而且紫花苜蓿提高值的变化幅度大; 同一种草上层根系的提高值要大于下层。对非洲狗尾草、鸭茅等斜生根系草本植物, 在破坏面

RD、RAR、柱体 Q 三个根系特征指标中, Q 是计算根系提高土体抗剪强度的最优指标。对所计算植物边坡多点取样进行无侧限抗压强度试验, 使采用概率论计算其稳定成为可能。

参 考 文 献

- [1] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究. 水土保持通报, 2002, 22 (5) : 20—23
Cheng H, Zhang X Q. An experimental study on herb plant root system for strength principle of soil-fixation (In Chinese) . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22 (5) : 20—23
- [2] 杨旸, 字淑慧, 余建新, 等. 植物根系固土机理及模型研究进展. 云南农业大学学报 (自然科学) , 2014, 29 (5) : 759—765
Yang Y, Zi S H, Yu J X, et al. Advances in research on mechanism and models of plant roots reinforcement (In Chinese) . Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science) , 2014, 29 (5) : 759—765
- [3] Slobodan B M, Alexia S, Rens V B, et al. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis. Ecological Engineering, 2011, 37 (10) : 1523—1532
- [4] Zhang B, Zhao Q G, Horn R, et al. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. Soil & Tillage Research, 2001, 59 (3) : 97—106
- [5] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Effect of root architecture on structural stability and erodibility of topsoils during concentrated flow in hilly Loess Plateau. Chinese Geographical Science, 2015, 25 (6) : 1—8
- [6] 周云艳, 徐琨, 陈建平, 等. 基于CT扫描与细观力学的植物侧根固土机理分析. 农业工程学报, 2014, 30 (1) : 1—9
Zhou Y Y, Xu K, Chen J P, et al. Mechanism of plant lateral root reinforcing soil based on CT scan and mesomechanics analysis (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (1) : 1—9
- [7] Zhang C B, Chen L H, Liu Y P, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength. Ecological Engineering, 2010, 36 (1) : 19—26
- [8] Comino E, Druetta A. The effect of Poaceae, roots on the shear strength of soils in the Italian alpine

- environment. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106 (2): 194—201
- [9] Fan C C, Tsai M H. Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear. *Soil & Tillage Research*, 2016, 156: 1—15
- [10] Rickli C, Graf F, Rickli C, et al. Effects of forests on shallow landslides – A case studies in Switzerland. *Forest Snow & Landscape Research*, 2009, 82 (1): 33—44
- [11] 宋维峰. 林木根系与均质土间相互物理作用机理研究. 北京: 北京林业大学, 2006
Song W F. Study on physical mechanism of interface between root system and loess (In Chinese). Beijing: Beijing Forestry University, 2006
- [12] 黄英, 符必昌, 金克盛, 等. 加筋红土的广义等效围压和极限平衡条件. *岩土力学*, 2007, 28 (3): 533—539
Huang Y, Fu B C, Jin K S, et al. Generalized equivalent confining pressure and limited balance conditions of reinforced laterite (In Chinese). *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28 (3): 533—539
- [13] 陈仲颐. 土力学. 北京: 清华大学出版社, 1994
Chen Z Y. Soil mechanics (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 1994
- [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. *Plant and Soil*, 2008, 305 (1/2): 207—226
- [15] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Journal of the Soil Science Society of America*, 1977, 41 (5): 843—849
- [16] Tengbeh G T. The effect of grass roots on shear strength variations with moisture content. *Soil Technology*, 1993, 6 (3): 287—295
- [17] Kleinfelder D, Swanson S, Norris G, et al. Unconfined compressive strength of some streambank soils with herbaceous roots. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56 (6): 1920—1925
- [18] 周成, 张继宝, 周荣官, 等. 香根草生态护坡的根系固土试验研究. 第二届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集 (二), 2008
Zhou C, Zhang J B, Zhou R G, et al. Experimental study on soil-reinforcement by vetiver grass root in bioengineering stabilization of slopes (In Chinese). Proceedings of the Second National Symposium on Environmental Geotechnical Engineering and Geosynthetics (2), 2008
- [19] 聂影, 陈晓红, 付征耀, 等. 生态护坡根系纤维土强度和变形特性实验研究. *铁道工程学报*, 2011, 28 (7): 6—8
Nie Y, Chen X H, Fu Z Y, et al. Experimental research on strength and deformation of root fiber stabilized soil of ecology slope (In Chinese). *Journal of Railway Engineering Society*, 2011, 28 (7): 6—8
- [20] 贺长彬, 尤泳, 王德成, 等. 退化草地复合体力学特性与影响因素研究. *农业机械学报*, 2016, 47 (4): 79—89
He C B, You Y, Wang D C, et al. Mechanical characteristics of soil-root composite and its influence factors in degenerated grassland (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47 (4): 79—89
- [21] Karizumi N. Figure that tree roots. Tokyo: Cheng Wen Tang Shinkosha, 1979
- [22] 范茂攀, 李永梅, 郑毅, 等. 不同生育期烤烟根系固土能力特征研究. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (5): 560—565
Fan M P, Li Y M, Zheng Y, et al. Soil fixing ability of flue-cured tobacco roots at different growth stages (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22 (5): 560—565
- [23] 南京水利科学研究院. 中华人民共和国行业标准: 土工试验规程 SL237-1999. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
Nanjing Hydraulic Research Institute. People's Republic of China industry standard: Geotechnical test code SL237-1999 (In Chinese). Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1999
- [24] Bordoni M, Meisina C, Vercesi A, et al. Quantifying the contribution of grapevine roots to soil mechanical reinforcement in an area susceptible to shallow landslides. *Soil & Tillage Research*, 2016, 163: 195—206
- [25] 栗岳洲, 付江涛, 余冬梅, 等. 寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34 (7): 1370—1383
Li Y Z, Fu J T, Yu D M, et al. Mechanical effects of halophytes roots and optimal root content for slope protection in cold and arid environment (In Chinese). *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34 (7): 1370—1383
- [26] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 2007, 87 (4): 268—283

- [27] Loades K W, Bengough A G, Bransby M F, et al. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. *Ecological Engineering*, 2010, 36 (3) : 276—284
- [28] Abdi E, Majnounian B, Genet M, et al. Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability, a case study: Hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran. *Ecological Engineering*, 2010, 36 (10) : 1409—1416
- [29] 胡其志, 周政, 肖本林, 等. 生态护坡中土壤含水量与抗剪强度关系试验研究. *土工基础*, 2010, 24 (5) : 85—87
- Hu Q Z, Zhou Z, Xiao B L, et al. Experimental research on relationship between root weight and shearing strength in soil (In Chinese). *Soil Engineering & Foundation*, 2010, 24 (5) : 85—87
- [30] Pollen N, Simon A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 2005, 41 (7) : W07025
- [31] Li Y, Zhu X M, Tian J Y. Effectiveness of plant roots to increase the anti-scourability of soil on the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36 (24) : 2077—2082

Effect of Herb Roots Improving Shear Strength of Unconfined Compressed Solum

DUAN Qingsong¹ ZHAO Yike¹ YANG Song² WANG Jinxia³ YANG Yang⁴
GONG Aimin² SUN Gaofeng¹ YANG Cangling¹ YU Jianxin^{1†}

(1 Engineering Research Center of Science and Technology of Land and Resources, College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

(2 College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

(3 Southwest Nonferrous Kunming Survey and Design Institute (Institute) Co., Ltd, Kunming 650051, China)

(4 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract 【Objective】The aim of this study was to explore effects and mechanism of herb roots in natural state improving shear strength of unconfined compressed solum, so as to provide a scientific basis for calculating the capacity of herb roots to reinforce slopes and selecting proper species of grasses to grow on slopes. 【Method】The experiment was carried out at the experimental farm of the Yunnan Agricultural University, China. In January 2016, a total of 40 PVC tubes, 51cm in length, 110 mm in diameter and 3.2 mm in thickness were all cut in half, and then the halves were bound together by pair with rubber bands. Upland red soil < 5 mm in particle size was packed into in these rubber band fixed tubes with the bottom sealed with plastic film up to 50 cm. The soil in the tubes was 28.31% in moisture content and 0.78 g.cm⁻³ in dry density. The tubes were divided into four groups, 10 each. Three groups were sown with seeds of *Setariaanceps Stapf ex Massey* L., *Dactylisglomerata* L. and *Medicago sativa* L. 12 seeds each tube, separately, in May, and the other group left unplanted as control for comparison. Besides, the three species of grasses were planted, separately, in the field, 1 m² each in plot area for determination of tensile strength of the grass roots. In October, out of each group, 7 tubes were picked randomly, placed in water for 24 h until they were fully saturated, and then removed out of water. The tubes were split off and the soil columns inside taken out. Shoots of the plants were cut off. The soil columns were cut into two, 25 cm each, in the middle with a hacksaw. From each half of the soil columns, a section of 20 cm in the middle was taken as test samples and the section was 10.36 cm in diameter. The samples were analyzed for saturation density and saturated water content and tested for unconfined shear strength on a SJ-1A type strain controlling

triaxial apparatus (made in Nanjing Soil Instrument Factory, China). The test went on in line with the geotechnical test code (SL237-1999) of China. Before the test the pressure cell and pressure system was removed from the apparatus and then the sample was put on the platform of the triaxial compression system for pressure test with a shearing rate of $4.14 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. A dial gauge was used to monitor deformation of the soil column and of the dynamometric ring and record the process of stress-strain until collapse of the sample or the total axial strain reaching 20%. For soil samples that stood the pressure even after the total axial strain reached 20%, their shear strength should be the value that corresponded to the one when the strain reached 15%. After the compression test, the soil columns were separated along the failure surface, and then the roots appearing on the failure surface were counted and measured with an electronic calipers for diameter; Biomass of the roots in the sample was measured after the samples were oven dried. In October, roots of the three species of grasses growing in the field were dug up and measured with an electronic calipers for diameter and with a Shandu SN100 tension tester and a universal testing machine for tensile resistance of each root. 【 Result 】 (1) The root systems of all the species of grasses enhanced the cohesive strength (ΔC) of the 0 ~ 25 cm soil layer by 4.75 kPa for *Setariaanceps Stapf ex Massey* L., by 4.40 kPa for *Dactylisglomerata* L. and by 1.39 kPa for *Medicago sativa* L., and that of the 25 ~ 50 cm soil layer by 3.10, 2.32 and 0.71 kPa, respectively; (2) ΔC (increment in tensile strength) was significantly related to root density (RD) and root area ratio (RAR) of *Setariaanceps Stapf ex Massey* L. and *Dactylisglomerata* L. roots in the failure surface and root content (Q) in the soil-root complex. The relationship between Q and ΔC was the highest. However, ΔC was not related with mean diameter of the roots ($T_{r,a}$). In the case of *Medicago sativa* L. ΔC had nothing to do with all the four root parameters. 【 Conclusion 】 *Setariaanceps Stapf ex Massey* L. is the highest and *Medicago sativa* L. the lowest in the effect of enhancing shear strength of the soil. ΔC of *Medicago sativa* L. varies sharply, being higher in the upper half section than in the lower half section. As *Setariaanceps Stapf ex Massey* L. and *Dactylisglomerata* L. are herbs dominated with oblique root, among the three root parameters, RD, RAR and Q, Q is the best index for calculating ΔC , which makes it feasible to use the probability theory to calculate stability of the unconfined compression test of samples collected from a number of sampling points on a vegetated slope.

Key words Herb; Roots; Unconfined compressive strength test; Shear strength

(责任编辑: 檀满枝)