

三种护坡植物根—土复合体抗剪强度比较

廖晶晶¹, 罗绪强¹, 罗光杰¹, 魏华炜²

(1. 贵州师范学院 地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550018; 2. 白云区环境监测站, 贵州 贵阳 550014)

摘要:以紫穗槐、胡枝子及狗牙根根系及其与土壤构成的根—土复合体为研究对象,通过对根—土复合体的室内直剪试验,比较分析了不同物种根系和不同含根量对根—土复合体的抗剪强度的影响。结果表明,根系的存在提高了土体的抗剪强度,根—土复合体的抗剪强度随着含根量的增加而增大,但当含根量达到一定值时根—土复合体的强度增加并不明显,即存在最佳含根量范围;与无根扰动土相比,根—土复合体内摩擦角无显著变化,但显著提高了黏聚力,其中紫穗槐、胡枝子、狗牙根黏聚力平均增幅分别为 47.5%, 39.2% 和 38.9%;紫穗槐、胡枝子和狗牙根根—土复合体对土壤的抗剪强度影响不同。在水土流失区种植乔灌木物种能有效增加坡体稳定性,降低土壤侵蚀。

关键词: 含根量; 根—土复合体; 抗剪强度; 黏聚力; 坡体稳定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0118-05

中图分类号: X171.4, S157

Comparison of Shear Strength of Root—Soil Composite for Three Types of Slope Protection Vegetation

LIAO Jing-jing¹, LUO Xu-qiang¹, LUO Guang-jie¹, WEI Hua-wei²

(1. College of Geography and Tourism, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou 550018, China;

2. Baiyun District Environmental Monitoring Station, Guiyang, Guizhou 550014, China)

Abstract: *Amorpha fruticosa*, *Leapedeza* and *Cynodon dactylon*, as well as their root—soil composites, were used as the research objects, a comparative analysis was made for the effects of different root contents and plant roots on the shear strength of root—soil composite through laboratory shear tests. Results showed that the shear strength was enhanced by roots and increased with the increased root amount. However, if root amount reached a certain value, the shear strength of root—soil composite did not increase obviously, i. e., there is an optimum range of root amount. Compared with the cohesion of soil without roots, there was no significant change in the internal friction angle of root—soil composite, but the cohesion was greatly increased. The increased percentages of cohesion for *Amorpha fruticosa*, *Leapedeza* and *Cynodon dactylon* were 47.5%, 39.2% and 38.9%, respectively. The effects of the root—soil composites of *Amorpha fruticosa* and *Leapedeza* and *Cynodon dactylon* on the shear strength were different. This implies that planting shrub species could effectively increase slope stability and efficiently reduce soil erosion in the regions suffering from soil and water loss.

Keywords: root content; root—soil composite; shear strength; cohesion; slope stability

生态护坡实质上是用活的植物或者用植物和非生命的材料相结合的方式以稳定坡面和防止侵蚀。植物根系的存在提高了边坡土体的黏聚强度、根系与土体之间的摩擦力,从而提高边坡土体的抗剪强度,而植物对边坡土体的稳固主要是通过浅层根系的加筋作用、深层垂直根系的锚固作用和水平根系的牵引

作用来实现的^[1]。国内外一些学者对植物根系的加筋作用进行了研究。Reubens 等^[2]通过研究得出了根系面积与根系所贡献的抗剪强度呈正比例关系。Van Beek 等^[3-5]通过有限差分法、极限平衡法、有限元法评价了植物根系对边坡土体的加强作用。刘秀萍等^[6]通过三轴试验,得出根—土复合体在含水量相

收稿日期: 2013-03-26

修回日期: 2013-05-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特植物磷、钙胁迫的生态适应性调控机制研究”(31100187); 贵州省“环境科学”省级特色重点学科专项科研项目“不同植物根—土复合体提高边坡土体抗剪强度的试验研究”(HJKX201201); 贵州师范学院自然科学研究基金项目“草本植物根系控制水土流失的抗拉强度研究”(GZSY201122); 贵州省环境科学教学团队项目(黔教高[2012]426号); 贵州师范学院环境科学教学团队项目(贵师院[2012]47号)

作者简介: 廖晶晶(1985—), 女(汉族), 贵州省遵义市人, 硕士, 助教, 主要从事土地整理与生态修复研究。E-mail: jlliao0402@126.com。

同的情况下,随根径增大,复合体的强度提高率增大;垂直根和复合根的根—土复合体明显提高土体的强度,水平根的根—土复合体对于提高土体强度不太明显。陈昌富等^[7]采用室内试验方法研究了草根加筋土护坡加筋原理,试验结果表明,其加筋机理可以用准黏聚力原理解释,并提出了加筋黏性土的准黏聚力计算方法。黄晓乐等^[8]对草本植物进行样地种植和室内直剪试验,证实和量化了草本植物根系增强土壤抗剪切强度的作用。护坡植物是控制土壤侵蚀的最积极因素之一,利用植物根系对土壤结构的强化,以及对边坡生态系统的改善等作用,能使边坡稳定和控制水土流失,同时,能确保边坡植物的水平和垂直结构合理,生态系统演替有序和景观优美。上述研究都是分别考虑以草本根—土复合体、灌木根—土复合体或林木根—土复合体状况下根系对土体强度的增强作用,而不同护坡植物根—土复合体抗剪强度的对比研究鲜有报道。随着植被护坡的不断推广应用,根—土复合体抗剪强度、黏聚力及内摩擦角值与含根量之间的变化差异在选择护坡植物中显得越来越重要,各类植物根—土复合体对增强土体抗剪强度作用效果等方面的研究已成为很迫切的课题。

本文通过在3种不同植物根系下素土、根—土复合体的抗剪强度试验,对比分析根—土复合体抗剪强度、黏聚力及内摩擦角值与含根量之间的变化差异。目的是分析不同根含量、不同物种根系分别对抗剪强度的影响,以评价其护坡力学强度增强效应。这项研究将有助于为试验区和相似地区开展边坡浅层护坡、水土流失等地质灾害的防治提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于贵州省中部的福泉市和瓮安县境内的瓮福磷矿山,海拔1170 m,坡度 $20^{\circ}\sim 55^{\circ}$,排弃的岩土混合物由粉粒、粉砂粒及碎石组成,结构松散。区内属亚热带季风湿润气候,年均温度 15°C 左右,年积温 5490°C ,无霜期270 d。年均降水量1135.1 mm,光、热、水同季,土壤类型以石灰土最多,黄壤次之,水稻土和紫色土较少^[9]。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验采用的土样取自瓮福磷矿山试验区,土质类型为粉土。试验选用的植物为灌木紫穗槐和胡枝子及草本植物狗牙根,生长期为1 a。紫穗槐喜干冷气候,耐寒耐旱,在沙地、盐碱地和贫薄土壤上均能生

长,可在荒山、沙荒、盐碱地、湿地、河岸、公路、铁路两旁栽植,有防风固沙、保持水土的作用。胡枝子为中性树种,性喜温暖干燥的气候条件,是很好的绿化材料,还是荒山、荒地的最好绿化树种^[10]。狗牙根属禾本科草本植物,具根茎,喜温暖湿润气候,极耐热和抗旱,覆盖性好,蔓延速度快,耐践踏,再生力强^[11]。

2.2 试样制备方法

土壤的物理性质对土壤的抗剪切强度影响很大,土壤的抗剪强度与土壤的颗粒组成、土壤容重、土壤含水率等因素密切相关。试验土样取自瓮福磷矿山试验区,为了避免表层杂草及其他杂质的影响,取样时从地表往下5—20 cm处取样,切取原状土试样。试验区土壤的干、湿密度分别为 $1.498, 1.648\text{ g/cm}^3$,含水率为11.87%,孔隙率为32.46%,孔隙比为0.459。土壤颗分试验在室内进行。土样粒径分布均匀性差,大颗粒主要集中在 $>5\text{ mm}$,岩粒占53.45%,这为室内配置扰动土壤提供参考。

选取直径为0.2~1.2 mm的紫穗槐、胡枝子及狗牙根根系,统一剪成长为环刀高度(2 cm)的根段进行室内直剪(快剪)试验,并确保每个根段垂直通过剪切面。每组试样设4个重复,分别在4种不同法向应力(100,200,300及400 kPa)下进行抗剪强度试验。具体步骤如下:在含水率为11.87%下,分别进行以含根量为0.1,0.3,0.5,0.7和 1.0 g/60 cm^3 的试验,同时与无根土样进行对比,以分析不同含根量的3种植物(紫穗槐、胡枝子、狗牙根)根系对瓮福磷矿山边坡岩土体抗剪强度的影响。

称取800 g扰动土样,利用轻型击实仪将试样击实25次,注意保证所有试样所受的击实功相同。具体步骤是:先击5次试样使试样初步成型。接着把统一长2 cm、含根量为 0.1 g/60 cm^3 的根系垂直均匀的倒插入环刀面积范围内,然后再击实20次,得到根土复合土饼^[12]。重复上述步骤制得其他含根量的试样。转动手轮,使上盒前端钢球刚好与量力环接触;调整量力环中的测微表读数为零。施加垂直压力后拔出固定销,开动秒表;以4~12转/min匀速旋转手轮,使试样在3~5 min内剪坏。如量力环中测微表指针不再前进,或者显著后退,则表示试样已被剪坏^[13]。

3 结果与分析

3.1 不同含根量对抗剪强度的影响

紫穗槐、胡枝子和狗牙根0.2~1.2 mm径级不同含根量的抗剪强度试验结果如表1所示。

表 1 不同含根量、法向应力对紫穗槐、胡枝子和狗牙根根系抗剪强度的影响

含根量 (g/60 cm ³)	不同法向应力下紫穗槐根系抗剪强度/kPa				显著性
	100	200	300	400	
0.0	62.78	77.71	113.51	142.39	99.10±5.86a
0.1	65.16	98.21	122.91	154.91	110.30±38.00a
0.3	70.50	119.68	146.13	174.38	127.67±44.18a
0.5	76.26	128.11	157.61	182.15	136.03±45.56a
0.7	72.82	121.24	150.48	172.63	129.29±43.13a
1.0	70.41	120.77	147.10	165.34	125.91±41.27a
含根量 (g/60 cm ³)	不同法向应力下胡枝子根系抗剪强度/kPa				显著性
	100	200	300	400	
0.0	62.78	77.71	113.51	142.39	99.10±35.86a
0.1	72.29	95.53	125.38	156.90	112.53±36.71a
0.3	77.60	104.18	134.89	175.07	122.94±41.90a
0.5	81.16	119.79	148.08	189.42	134.61±45.69a
0.7	78.74	111.09	145.21	185.03	130.02±45.62a
1.0	76.25	107.61	136.73	180.94	125.38±44.52a
含根量 (g/60 cm ³)	不同法向应力下狗牙根根系抗剪强度/kPa				显著性
	100	200	300	400	
0.0	62.78	77.71	113.51	142.39	99.10±35.86a
0.1	68.16	85.74	121.87	151.91	106.92±37.41a
0.3	72.58	96.03	127.24	159.67	113.88±37.86a
0.5	86.72	100.30	134.68	176.51	124.55±40.09a
0.7	84.91	99.16	126.94	174.18	121.30±39.34a
1.0	78.43	90.39	120.87	167.27	114.24±39.61a

注:表中显著性数据为平均值±标准值,同一列中不同字母表示具有显著性差异($p<0.01$)。

由表 1 可知,在不同法向应力作用下,有根扰动土的抗剪强度均高于无根扰动土的抗剪强度。对 3 种植物根—土复合体在不同法向应力和不同含根量的条件下进行双因素方差分析显示,法向应力、含根量对根—土复合体抗剪强度的影响极显著($p<0.01$, 表 2),表明紫穗槐、胡枝子和狗牙根根系的存在提高了土体的抗剪强度。因此,在一定条件下,可以把土壤抗剪强度的增加归结为植物根系存在的结果^[14]。在同一法向应力下,随着含根量的增大,紫穗槐、胡枝

子和狗牙根 3 种植物根—土复合体的抗剪强度均呈现出先增大后减小的趋势,并存在峰值。这说明植物根系对提高土体抗剪强度的作用存在最佳含根量区域,这与前人研究结论相一致^[12-15]。出现这种现象的原因是:当土中的含根量较少时,根土可充分接触并发挥摩擦作用,另一方面,根系的深入形成根—土复合体,使根的抗拉及抗剪能力传入到土的抗剪能力中,进而约束了土体在横向和轴向的变形,且随着含根量的增大其抗剪强度也增大,直到达到一个峰值。

表 2 3 种植物根—土复合体在不同法向应力和不同含根量条件下的双因素方差分析结果

试样	差异源	SS	df	MS	F	P-value	F-crit
紫穗槐根系	含根量	3 826.83	5	765.36	16.65	$p<0.01$	2.90
	法向应力	30 275.86	3	10 091.95	219.53	$p<0.01$	3.29
胡枝子根系	含根量	3 363.08	5	672.62	24.54	$p<0.01$	2.90
	法向应力	31 209.55	3	10 403.18	379.62	$p<0.01$	3.29
狗牙根根系	含根量	1 736.83	5	347.37	22.92	$p<0.01$	2.90
	法向应力	26 300.52	3	8 766.84	578.41	$p<0.01$	3.29

将表 1 中 3 种植物各 6 组试样的不同荷载及对应的剪切强度用 origin 软件进行拟合分析,得到法向应力与抗剪强度关系的拟合曲线(图 1—3)。根据直剪试验原理^[16],绘制关系曲线中,直线的倾角(与水

平线的夹角)为根—土复合体的内摩擦角 φ ,根—土复合体的黏聚力 c 在纵坐标上反映为截距。曲线拟合后试样的决定系数较高,其中决定系数最小为 $R^2=9.936 9$,最大为 $R^2=9.997 6$,说明用直线回归拟

合土体的抗剪强度效果良好,与库伦强度公式吻合,得出的结论是^[8]:根—土复合体服从莫尔—库仑强度破坏准则。

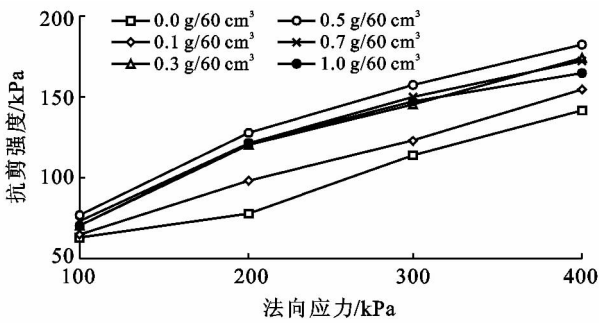


图 1 紫穗槐不同含根量根—土复合体试样剪切拟合曲线

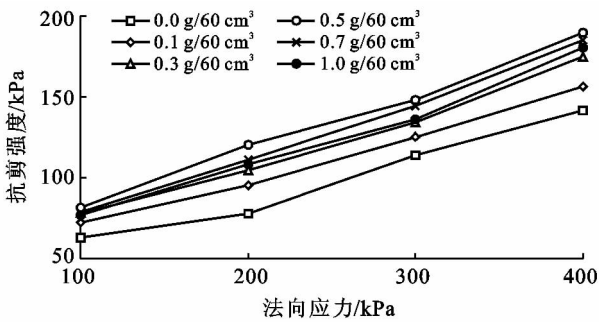


图 2 胡枝子不同含根量根—土复合体试样剪切拟合曲线

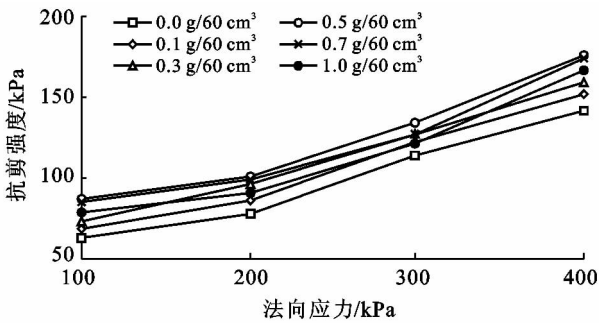


图 3 狗牙根不同含根量根—土复合体试样剪切拟合曲线

3.2 不同物种根系对抗剪强度的影响

通过 DPS 数据处理系统对表 1 的试验结果进行统计分析,得到无根系扰动土、紫穗槐、胡枝子及狗牙根根—土复合体黏聚力 c , 内摩擦角 φ 值的变化情况(表 3)。

表 3 紫穗槐、胡枝子、狗牙根根—土复合体 c, φ 值的变化

试样	c /kPa	φ (°)
无根扰动土	30.44±0.00b	15.35±0.00c
紫穗槐根系	44.89±5.07a	17.94±1.11ab
胡枝子根系	42.30±2.48a	18.32±1.52a
狗牙根根系	42.37±5.61a	16.45±0.32bc

注:表中数据为平均值±标准值,同一列中不同字母表示具有显著性差异($p < 0.05$)。

由表 3 可知,3 种植物根—土复合体的黏聚力及内摩擦角明显大于无根扰动土,但 3 种植物根—土复合体的黏聚力的变化不显著,而狗牙根根—土复合体内摩擦角 φ 的变化与无根扰动土内摩擦角 φ 的变化不显著,紫穗槐、胡枝子根—土复合体与无根土内摩擦角 φ 的变化很显著。这表明 3 种植物根系的存在能提高土体的黏聚力,进而增强土体的抗剪切强度。原因可以解释为^[17]:根系的弹性模量大于土体的弹性模量,且抗拉强度远远大于土体,当土体因剪切发生破坏时,根系和土体相互协调,一起抵抗变形,因此根系的存在能够增强土体的抗剪强度。平均提高幅度从大到小依次是紫穗槐 47.5%,狗牙根 39.2%,胡枝子 38.9%。

狗牙根根系对土体抗剪强度的增加并不体现在增大土体内摩擦角上,这与紫穗槐和胡枝子有所不同。这种现象可以解释为:试验用紫穗槐和胡枝子植物根系大多集中在直径 0.7 mm 左右,而狗牙根直径主要集中在 0.5 mm 左右,紫穗槐和胡枝子植物根系直径普遍大于狗牙根根系直径。作为木本植物,紫穗槐和胡枝子的根系硬度也远远大于狗牙根根系。在土体承受荷载产生变形破坏时,狗牙根根系依靠自身抗拉强度和增加与土颗粒之间的摩擦阻力来抵抗土体变形,起到的是加筋作用^[17],而紫穗槐和胡枝子根系硬度较大,在土体剪切破坏过程中不仅能够依靠自身抗拉强度和增加土颗粒之间的摩擦阻力来抵抗土体变形外,还能依靠自身硬度大的特性,起到支撑土体的作用。紫穗槐和胡枝子根系与狗牙根根系相比,能独立承受荷载,不仅能发挥根系抗拉强度,还能发挥其抗压强度的作用。紫穗槐和胡枝子根系增强土体强度的能力更强,其增加土体抗剪强度不仅表现在黏聚力的增长上,也表现在增大土体内摩擦角上。3 种植物根—土复合体内摩擦角平均提高幅度从大到小依次为胡枝子 19.3%,紫穗槐 16.9%,狗牙根 7.2%。

4 结论

(1) 根系的存在提高了土体的抗剪强度,根—土复合体的抗剪强度随着含根量的增加而增大,但当含根量达到一定数值时根—土复合体的强度增加并不明显,即存在最佳含根量区域。

(2) 紫穗槐、胡枝子和狗牙根根—土复合体较无根扰动土,黏聚力 c 值和内摩擦角 φ 值均有增加, c 值增加的幅度相对较大, φ 值增加的幅度相对较小。黏聚力平均提高幅度从大到小依次是紫穗槐 47.5%,狗牙根 39.2%,胡枝子 38.9%;内摩擦角提高幅度从

大到小依次是胡枝子 19.3%, 紫穗槐 16.9%, 狗牙根 7.2%。

(3) 紫穗槐及胡枝子根—土复合体和狗牙根—土复合体对土壤的抗剪强度影响不同。在工程实践中, 考虑具体条件和要求选择不同的物种, 以达到最佳的治理效果。

通过本试验研究, 阐明了在不同含根量、不同法向应力作用下, 有根系存在的根—土复合体抗剪强度明显高于无根扰动土的抗剪强度, 初步总结出不同含根量、不同植物根系对根—土复合体抗剪的影响规律, 可为试验区和相似地区开展边坡浅层护坡, 治理水土流失等地质灾害的防治提供理论依据。本试验没有对 0.2~1.2 mm 非木质化根和木质化根的根—土复合体抗剪强度进行研究, 今后应针对不同径级根系的根—土复合体抗剪性能的变化规律进行深入研究, 为防风固土, 防治荒漠化和水土流失提供更科学的理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 64-76.
- [2] Reubens B, Poesen J, Danjon F, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review[J]. *Trees*, 2007, 21(4): 385-402.
- [3] Van Beek L P H, Wint J, Cammeraat L H, et al. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes[J]. *Plant and Soil*, 2005, 278(1/2): 55-74.
- [4] Operstein V, Frydman S. The stability of soil slopes stabilized with vegetation[J]. *Ground Improvement*, 2002, 6(4): 163-168.
- [5] Greenwood J R. SLIP4EX-A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24(3): 449-465.
- [6] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的三轴试验[J]. *林业科学*, 2007, 43(5): 54-58.
- [7] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的护坡机理及强度准则试验研究[J]. *中南公路工程*, 2006, 31(2): 14-17.
- [8] 黄晓乐, 许文年, 夏振尧. 植被混凝土基材 2 种草本植物根—土复合体直剪试验研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(4): 158-161.
- [9] 刘洪伟. 瓮福磷矿英坪矿段露天采矿场边坡稳定性研究及安全治理措施[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [10] 刘晓芳. 新疆优良绿化树种[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2007: 196-197.
- [11] 陈雅君. 园林草坪学[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 50.
- [12] 钟亮根. 紫穗槐在赣南红层路基边坡防护应用的试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2008.
- [13] 南京水利科学研究所. 土工试验规程 SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [14] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(3): 250-252.
- [15] 周其志, 周政, 肖本林, 等. 生态护坡中土壤含根量与抗剪强度关系试验研究[J]. *土工基础*, 2010, 24(5): 85-87.
- [16] 王玉珏. 土工试验与土力学教学指导[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.
- [17] 王磊. 植被根系固土力学机理试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [14] Brocca L, Hasenauer S, Lacava T, et al. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: an intercomparison and validation study across Europe[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3390-3408.
- [15] 王天铎. 数值模拟在黄淮海地区生物资源评价中的应用[M]//刘昌明. 中国水问题研究. 北京: 气象出版社, 1996: 191-197.
- [16] van Keulen H, Seligman N G, Benjiami R W. Simulation of water use and herbage growth in arid regions: A reevaluation and further development of the model “ARID CROP”[J]. *Agricultural Systems*, 1981, 6(3): 159-193.
- [17] Penning F W T, van Laar H H. Simulation of plant growth and crop production[M]. PUDOC: Wageningen, 1982: 40-82.
- [18] 李明星, 刘建栋, 王馥棠, 等. 分布式水文模型在陕西省冬小麦产量模拟中的应用[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5): 148-154.
- [19] Wagner W, Lemoine G, Rott H. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1999, 70(2): 191-207.

(上接第 100 页)