

人工石质边坡构树根系抗剪特性研究

王云翔¹, 孙海龙², 罗龙皂³, 李绍才^{2,4}, 罗双⁴, 卢荻秋¹, 龙凤⁴, 刘冲⁴

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610064; 2. 水力学与山区河流保护国家重点实验室, 成都 610064; 3. 贵州省土壤肥料研究所, 贵阳 550006; 4. 四川大学 生命科学学院, 成都 610064)

摘要:研究构树根系抗剪切特性,可为岩石边坡生态防护提供理论依据。采用室内单根抗剪切试验分析了上、下坡向,一级、二级、三级侧根的抗剪切强度和应力—应变曲线。结果表明:下坡向根系数量、根径大于上坡向,根系平均长度小于下坡向;根系的剪切力—应变曲线与其生长方位、根径、根系分级有相似的曲线形状;分级根系的剪切力为一级>二级,下坡向一级根系剪切力大于上坡向,但二级根系剪切力反而小,最大剪切力随根径增加而增大;根系的抗剪强度随着根径的增大而减小,呈线性关系;抗剪强度值随着根径的而增大;下坡向根系平均抗剪强度大于上坡向,各根系平均抗剪强度为一级>二级>三级,但上下坡向和各级根系间无显著差异。抗剪强度是影响边坡稳定的重要因素,它既可以加固土体,又能影响植物的锚固作用。

关键词:石质陡边坡; 抗剪强度; 根系分级; 剪切力

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0114-05

Study on Characteristics of Root Shear of *Broussonetia papyrifera* L. on Rocky-steep Slope

WANG Yun-xiang¹, SUN Hai-long², LUO Long-zao³, LI Shao-cai^{2,4},
LUO Shuang⁴, LU Di-qiu¹, LONG Feng⁴, LIU Chong⁴

(1. College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 3. Guizhou Institute of Soil and Fertilizer, Guiyang 550006, China; 4. School of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In order to investigate how *Broussonetia papyrifera* L. root shearing characteristics varied with root diameter, growth direction and lateral order, shearing forces of these samples were measured by an electronic universal testing machine. Relationships between growth direction, lateral order and shear characteristics were analyzed systematically. The results showed that both root amount and average diameter of downslope were larger than those of upslope, while the average length of upslope was larger than that of downslope. Force-displacement curves of roots with different orders, root diameters, growth directions had the similar shapes, shear force of the 1st-order was larger than the 2nd-order's. Maximum shear force increased with increase of root diameter. Linear relationship between shear strength and diameter was observed, shear strengths decreased with increase of diameters. There were no significant differences of shear strength which were observed among the 1st-order, 2nd-order, 3rd-order laterals of downslope, although the rank was 1st-order>2nd-order>3rd-order; and no significant differences of shear strength between upslope and downslope were observed. Shear strength is key factor affecting the stability of slope. In all, downslope roots with the 1st-order and 2nd-order maintained the slope soil shearing properties.

Key words: rocky-steep slope; shear strength; lateral order; shear force

随着中国经济的发展,资源开发和基础设施建设越来越频繁,大量的裸露边坡,尤其是石质边坡随之

产生,边坡崩塌、滑坡、泥石流等失稳破坏是生态破坏中一种常见和重大的地质灾害^[1-2]。如何对边坡灾害

收稿日期:2011-10-21

修回日期:2011-11-20

资助项目:国家自然科学基金“基于岩体裂隙及植物适应的根系锚固模型研究”(50974092)

作者简介:王云翔(1985—),男,浙江丽水人,硕士研究生,从事岩土工程和灾害治理方向研究。E-mail: goodyet@163.com

通信作者:孙海龙(1976—),男,黑龙江人,讲师,博士,从事生态工程方面的研究。E-mail: lizist@vip.sina.com

进行防御已经成为一个世界性的问题。植物根系在提高坡面稳定性和防止其整体垮塌中扮演着重要的角色^[3]。以植被为主的生态治理是目前国内外边坡灾害防治的重要途径,植物根系通过锚固土层,并与土层形成复合体来提高土体的抗剪强度,同时也可以增加剪切带的宽度^[3-5]。植物生长在边坡的复杂环境条件下,受到多种应力的作用,如植物的自重、风力、植物和土体倾斜造成的转矩等^[6]。因此,探明植物根系如何抵抗外力与单根的抗剪强度就显得尤为重要^[7-8]。迄今为止,有关根系力学特性的研究大多集中在平地或土质边坡上分析风荷载导致的植株倒根^[9],原位拉拔^[10]和单根抗拉强度试验^[11-13]以及根系锚固^[9,14]等,但有关其在石质边坡上的力学特性,尤其是抗剪特性如何变化这方面的研究很少。

因此,本文以石质陡坡生境下构树为研究对象,对构树根系单根抗剪强度特性进行研究,探讨构树根系抗剪切强度与根径、坡向和不同根系分级之间的关系,同时也对单根抗剪试验过程的力—位移曲线作分析,探讨根系抗剪特性在石质陡边坡上的变化,为岩石边坡生态防护提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地介绍

试验地位于四川省彭州市升平镇四川励自生态技术有限公司实验基地(103°53'E,30°59'N),本地区气候属亚热带季风气候,年平均气温 16.3℃,7 月平均气温 25.8℃,1 月平均气温 5.6℃,年平均降水量 1 146.5 mm,年平均相对湿度 79%,年均蒸发量 1 536.4 mm。

试验边坡(坡向 S)是人工模拟石质边坡,坡度为 44.2°,面积为 4.75 m×15 m,总孔隙度为 14.1%。岩面是由砂岩石板砌成。基质土壤类型为紫色土与绿化基材^[15]按重量比 10:1 混合,采用干喷法喷射(12 m³ 空压机、5 m³/h 混凝土喷射机)至试验坡面,

厚度 10 cm。测得基质混合物的容重为 1.07 g/cm³,有机质含量为 47.06 g/kg,pH 值为 6.57。

该实验于 2005 年 6 月以喷播方式与刺槐、桑树等种子进行混合播种,观察记录。

1.2 根系的选取与挖掘^[11]

随机选定试验植株 10 棵,植株高度为 3~5 m,基径为 30~50 cm,截去高于坡面 0.5 m 的植株部分,通过对含根土体浇水至饱和,24 h 后进行根系人工挖掘,挖至 5 cm 左右。选取根系中比较直的部分,长度为 150 mm,剪取,标记,装入自封袋于 4℃ 冰箱保存,待用。根系分级按照标准分级方法^[16-17]分为一级侧根(由主根分出的侧根)、二级侧根(由一级侧根分出的下一级侧根)和三级侧根(由二级侧根分出的下一级侧根)。

1.3 根系抗剪强度的测量^[18]

根系抗剪强度计算公式如下:

$$\tau = \frac{F_a}{2A_0} = \frac{2F_a}{\pi D^2}$$

式中: τ ——抗剪强度(MPa); F_a ——最大剪切力(N); A_0 ——剪切处原始横截面积(mm²); D ——断裂处直径(mm)。

1.4 数据分析

采用 SPSS 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 根系生长与分布

生长在石质陡边坡上的构树根系为水平根系,主根生长受到阻碍,侧根较发达,沿着坡面延伸,与表层土交错一体。为了分析根系的生长与分布,我们选择了一棵具有代表性的植株 A 样本见表 1。由于所选植株只有一根主根,并且三级以上的侧根数量很少,所以只对前三级根系进行分析,所采用的方法是配对样本 T 检验,结果见表 1。

表 1 植株 A 根系样本信息

生长方位	根系分级	样本数/个	平均长度/cm	平均根径/mm	生长年限/a	平均含水率/%
下坡向	一级侧根	1	7.95	17.45	4	7.95
	二级侧根	11	4.48	4.91	4	
	三级侧根	4	4.10	2.91	4	
上坡向	一级侧根	5	15.10	16.00	4	4.96
	二级侧根	25	5.78	2.44	4	
	三级侧根	28	4.80	0.89	4	

分析结果表明:上、下坡向的一、二、三级侧根的数量和平均长度之间没有显著性差异($P=0.136$, 0.271)。但下坡向根系的数量明显高于上坡向,而上坡向根系的平均根长要大于下坡向。上、下坡向的

一、二、三级侧根的平均根径存在显著性差异($P<0.05$)。环境因子(如水分)和力学刺激(如风,树自重)可能会影响根系的分布^[19-20]。下坡向根系的数量和平均根径都要大于上坡向根系,这意味着下坡向根系

比上坡向根系长得更好。坡面下坡向土壤的含水量要高于上坡向(表 1),也就是说,根系在高含水量的土壤中长势更好。很多前人的研究表明,根系在外力荷载作用下会长得更粗,并且数量也会更多^[21-22]。根系长度的变化取决于土壤中的水分分布。在干旱的季节,植物为了获得储存在土壤深处的水分就需要更长的主根轴。相反,如果水分很容易获得,只需一小部分根长就足够了^[23]。本研究中,上坡向土壤比下坡向土壤更干燥。所以上坡向根系的平均根长要大于下坡向根系。

2.2 根系剪切力—位移曲线

由于上坡向根系的直径都比较小,同一植株中,适合进行力学分析根系相对下坡向根系来说比较少,因此我们在研究不同分级和根径根系的剪切力—位移关系时,选取的都是下坡向根系,这些根系样本取自同一植株。分析相同根径(5.95 mm)的一级、二级侧根剪切力—位移曲线图表明(图 1):下坡向一级侧根,二级侧根的剪切力—位移曲线具有相似的形状,二级侧根的最大剪切力略大于一级侧根。也就是说不同分级根系在剪切力的作用下,变形机制相似。由图 2 可知:上、下坡向的一级侧根剪切力—位移曲线形状之间存在差异,并且下坡向一级侧根的最大剪切力要高于上坡向根系。这表明根系在剪切力作用下的变形机制与根系生长方向有关。这可能是根系对外部环境(如水分)和力学刺激(如风,植株自重)的一种表现形式。当水分和力学刺激不同时,根系的生长也不同^[21-23]。而坡面上、下坡向上,这两个因子不尽相同。同一植株的下坡向二级侧根在不同根径时,具有不同的剪切力—位移曲线。此外,分析同一植株不同根径的下坡向二级侧根剪切力—位移曲线(图 3)发现:根径为 12.65, 10.45, 6.45 mm 的根系曲线形状相似,曲线变化较陡,且与根径为 4.05 mm 和 1.85 mm 的曲线明显不同。而根径为 4.05 mm 的根系与 5.25 mm 的根系具有类似的曲线形状。在 5 个根径对比中,最大剪切力随根径增大而增大,当剪切力达到最大值时位移也随根径增大而增大,这与朱海丽等人研究根系最大剪切力随根系直径增大而增大的结论相一致^[12,18]。由于根系纤维含量随着根径的减小而增加^[24],所以根径可能会影响根系的变形机制,这有待进一步研究。

由此可见,根系剪切力—位移曲线与生长方向有密切关系,同一根径在不同剪切力的作用下,变形机制相似且与根系的生长方向有关,下坡向的变化大于上坡向,这是由于不同生长坡位上根系的水分、受力均有差异,使得根系的力学特性受到影响。根系剪切

力与位移的关系表现为随着位移的增加而到达峰值,后随位移的继续增大而变小。比较同一根径下的一级、二级、三级侧根的最大剪切力发现:根径越接近的根系最大剪切力也越接近,所以根径相同,分级侧根的抗剪强度影响不是很明显。对于侧根分级相同而根径不同的根系来说,抗剪力随着根径的增大而增大。

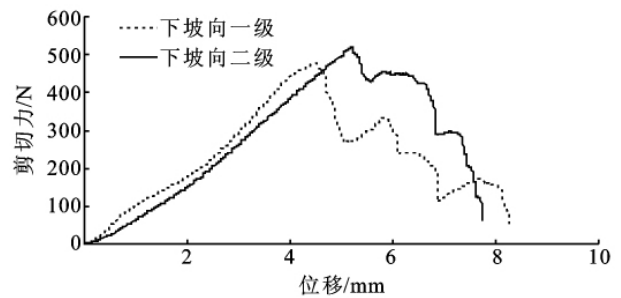


图 1 根径 5.95 mm 的一、二级侧根力—位移曲线

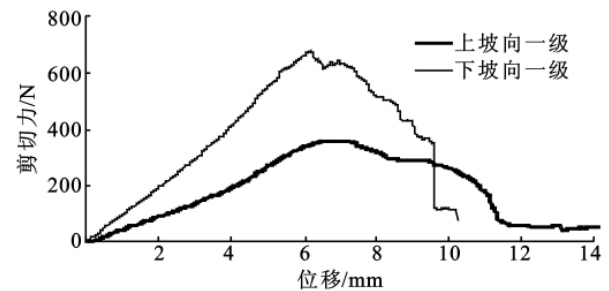


图 2 不同坡向抗剪力—位移曲线

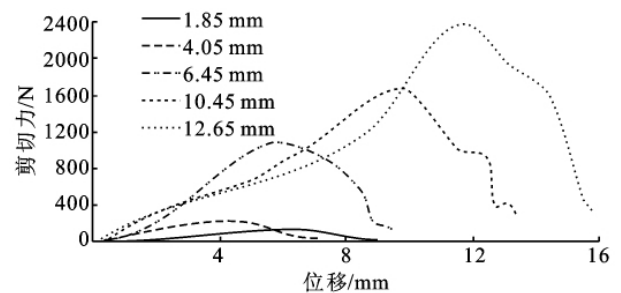


图 3 不同根径的二级侧根抗剪力—位移曲线

2.3 抗剪强度与根径

对上、下坡向一、二、三级侧根的抗剪强度和根径进行线性回归分析,具体结果见表 2。表 2 表明,抗剪强度和根径之间具有很好的线性关系,且随着根径的增大而减小。上、下坡向的一级侧根方程的斜率和截距均相近(图 4a)。下坡向一、二、三级侧根的回归方程具有相同的截距。下坡向二级侧根方程斜率要低于其一级和三级侧根(图 4b)。已有研究表明,根系的强度与根径有很大的关系^[14]。这与本实验研究相一致。根系纤维含量随根径的减小而增加,从而导致根系抗拉强度的增加^[24]。抗剪强度和根径的关系也可能归因于根系纤维含量。此现象有待进一步研究。

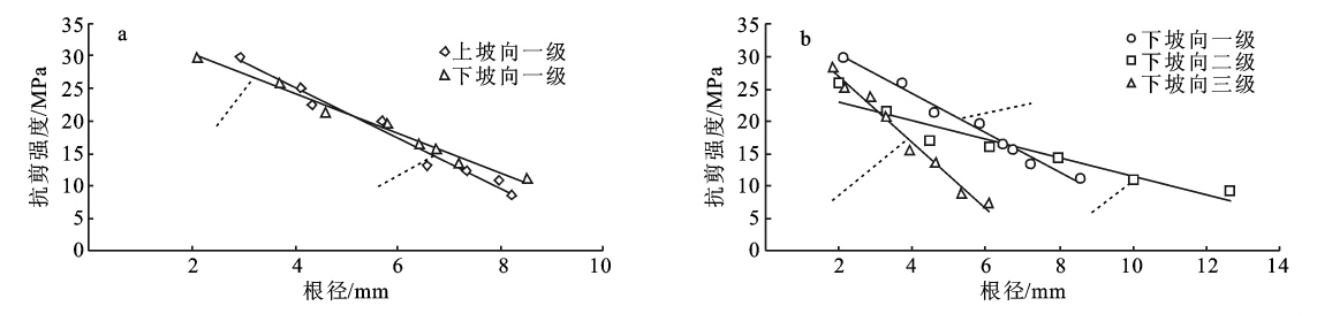


图 4 根径与抗剪切强度线性回归分析

表 2 根径与抗剪切强度线性回归分析有关参数

坡向	根系分级	斜率	常数项	根径/mm	R^2	样本数
下坡向	一级侧根	-3.0473	36.40	2.10~8.54	0.9853	8
	二级侧根	-1.4529	26.08	2.01~3.94	0.9109	7
上坡向	三级侧根	-5.0800	37.08	4.65~4.68	0.9782	8
	一级侧根	-4.0078	41.25	5.69~8.25	0.9748	8

2.4 抗剪强度的影响因素

由于进行抗剪强度实验的根系要求一定的直径且不能太细,而上坡向二级和三级侧根中适合进行抗剪强度分析的根系较少。因此这里只针对上下坡向一级侧根进行抗剪强度分析。各选取上下坡中 5 组根径相同的一级侧根(平均根径 6.82 mm)。对这些根系的抗剪强度采用样本配对 T 检验分析表明,上下坡向根系的抗剪强度不存在显著性差异($P>0.05$),但下坡向根系的抗剪强度平均值要略高于上坡向根系(图 5)。这可能受水分、养分、重力等因素的影响,造成上、下坡向根系木质化程度、纤维素含量的差异,从而导致上、下坡向根系抗剪强度大小的不同^[25-26],有待进一步的研究。

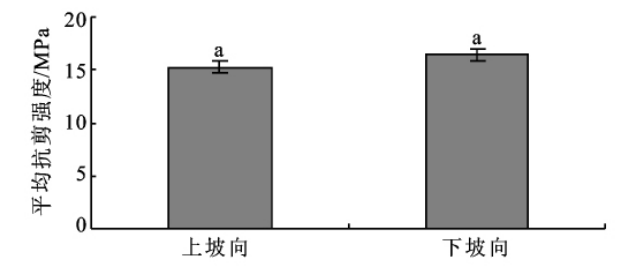


图 5 不同坡向根系的抗剪强度

有研究表明,不同分级根系对环境刺激的反应不尽相同^[27],从而导致它们的力学特性也不相同。然而,本研究中没有发现下坡向一、二、三级侧根的抗剪强度之间存在显著性差异($P>0.05$)。这与根系抗剪力-位移曲线的结果一致。此外,根系抗剪强度与根径的线性回归方程中,不同坡向的一级侧根回归方程的斜率相同。下坡向根一级和三级侧根的回归方程斜率也相同,只是下坡向二级侧根的斜率比下坡向一级和下坡向三级的斜率要小。各分级根系的抗剪强度平均值关系为一级>二级>三级(图 6)。

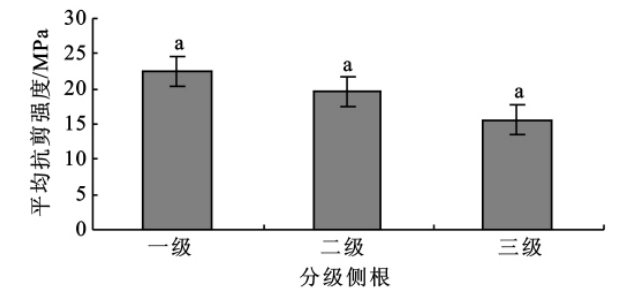


图 6 根系分级的平均抗剪强度

3 结论

下坡向构树根系的数量和平均根径都要大于上坡向根系,下坡向根系比上坡向根系生长情况要好。在根径相同的情况下,对于同一植株中不同分级根系在剪切力的作用下变形机制相似且与根系生长方向有关,根系在剪切力作用下所承受的最大剪切力随根径的增大而增加。上下坡向根系的抗剪强度不存在显著性差异,但下坡向根系的抗剪强度平均值要略高于上坡向根系。

参考文献:

[1] 张俊云,周德培,李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报,2000,20(4):36-38.

[2] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

[3] Norris J E, Cammeraat LH, Stokes A, et al. The use of vegetation to improve slop stability[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2006(4):427-428.

[4] Schmidt K, Roering J, Stock J, et al. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range[J]. Canadian Geotechnical Journal,2001,38(5):995-1024.

[5] Shewbridge S E, Sitar N. Deformation characteristics of

- reinforced sand in direct shear[J]. J. Geotech. Engrg. , 1989,115(8):1134-1147.
- [6] Di Iorio A, Lasserre B. Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions[J]. Annals of Botany,2005,95(2):351-361.
- [7] Watson A, Marden M, Rowan D. Root-wood strength deterioration in kanuka after clearfelling[J]. New Zealand Journal of Forestry Science. 1997,27:205-215.
- [8] Terwilliger V J, Waldron L J. Effects of root reinforcement on soil-slip patterns in the Transverse Ranges of southern California[J], Geol. Soc. Am. Bull., 1991, 103(6):775-785.
- [9] Cucchi V, Meredieu C, Stokes A, et al. Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions[J]. Trees,2004,18(4):460-466.
- [10] Stokes A, Fitter A, Coutts M. Responses of young trees to wind and shading: effects on root architecture [J]. Journal of Experimental Botany, 1995, 46 (9): 1139-1146.
- [11] 罗龙皂,李绍才,孙海龙,等. 石质陡边坡构树根系抗拉特性研究[J]. 中国水土保持,2011(4):37-41.
- [12] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等. 陈桂琛护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系 [J]. 农业工程学报,2009,25 (5):40-46.
- [13] Khuder H, Stokes A, Danjo K G, et al. Is it possible to manipulate root anchorage in young trees[J]. Plant and soil,2007,294(1/2):87-102.
- [14] Goodman A M, Crook M J, Ennos A R, et al. Anchorage mechanics of the tap root system of winter-sown oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Annals of Botany,2001,87(3):397-304.
- [15] 张俊云,周德培,李绍才. 厚层基材喷射护坡试验研究 [J]. 水土保持通报,2001,21(4):45-48.
- [16] Hackket C, Bartlette B O. A study of the root system of barley: III Branching Pattern [J]. New Phytol. , 1971,70(2):409-413.
- [17] Hackket C. A study of the root system of barley: I Effects of nutrition on two varieties[J]. New Phytol. , 1968,67(2):287-300.
- [18] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(2):3445-3452.
- [19] Coutts M. Developmental process in tree root systems [J]. Can. J. For. Res. ,1987,17(8):761-767.
- [20] Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J R, et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale[J]. Oecologia,1996,108(4):583-595.
- [21] Goodman A, Ennos A. A comparative study of the response of the roots and shoots of sunflower and maize to mechanical stimulation[J]. J. Exp. Bot. ,1996,47 (10):1499-1507.
- [22] Mickovski S, Ennos A. Anchorage and asymmetry in the root system of *Pinus peuce* [J]. Silva. Fenn. ,2003, 37(2):161-173.
- [23] Bengough A G, Bransby M F, Hans J, et al. Roots responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell[J]. Journal of Experimental Botany, 2005,57(2):437-447.
- [24] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil, 2005,278(1/2):1-9.
- [25] Sun H L, Li S C, Xiong W L, et al. Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis* [J]. Ecological Engineering,2008,32(1):60-67.
- [26] Plomion C, Leprovost G, Stokes A. Wood formation in trees[J]. Plant Physiol,2001,127(4):1513-1533.
- [27] Waisel Y and Eshel A. Functional diversity of various constituents of a single root system[M] // Waisel Y. Plant roots: the hidden half. New York: Marcel Dekker,2002:157-174.