

麦冬和多花木蓝根系抗拉拔特性试验研究

夏振尧^{1,2}, 管世烽^{2,3}, 牛鹏辉^{1,2}, 梁永哲², 胡文静¹, 许文年^{1,2}

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境
湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 广西大藤峡水利枢纽开发有限责任公司, 广西 南宁 530029)

摘要: [目的] 揭示麦冬和多花木蓝根系根土界面的抗拉拔力特性, 为根土界面摩擦特性的进一步研究提供依据。[方法] 通过控制 5 个梯度的土壤含水率, 采用直接施加垂直拉拔荷载的单根拉拔试验方法。[结果] 麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力随根径的增加而增大且呈非线性幂函数关系; 在相同土壤容重条件下, 麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力随土壤含水率的增加而呈先增加后减小的趋势。在土壤含水率介于一定范围内时, 多花木蓝根的最大抗拉拔力大于麦冬根的最大抗拉拔力, 而在其它土壤含水率条件下, 麦冬根的最大抗拉拔力大于多花木蓝根的最大抗拉拔力; 并发现麦冬根的最大抗拉拔力的最大值在含水率为 10.43% 附近, 而多花木蓝根的最大抗拉拔力的最大值则在含水率为 13.00% 附近。[结论] 根径、土壤含水率和植物种类影响根土界面的抗拉拔力。

关键词: 根土界面; 固土作用; 拉拔试验; 抗拉拔力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0110-04

中图分类号: S157.9

Experimental Study on Pull-out Resistive Properties of *Ophiopogon Japonicus* and *Indigofera Amblyantha* Roots

XIA Zhenyao^{1,2}, GUAN Shifeng^{2,3}, NIU Penghui^{1,2},
LIANG Yongzhe², HU Wenjing¹, XU Wennian^{1,2}

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area of Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Guangxi Datengxia Gorge Water Conservancy Development Co. Ltd., Nanning, Guangxi 530029, China)

Abstract: [Objective] The pull-out resistive properties of *Ophiopogon japonicus* and *Indigofera amblyantha* root were tested in order to provide guides for further research on the friction characteristics of the root soil interface. [Methods] Five levels of soil moisture content were designed to carry out single-root direct pull-out tests with vertical outward load. [Results] The maximum pull-out resistive force of the two plant root were both increased by nonlinear power function with root diameter as independent variable. Under the condition of constant soil bulk density, the maximum pull-out resistive force of root experienced an increases firstly and then declined as soil moisture content increased. The maximum pull-out resistive force of *Indigofera amblyantha* root was greater than that of *Ophiopogon japonicus* within a certain range of soil moisture content. While the maximum pull-out resistive force of *Ophiopogon japonicus* root was greater than that of *Indigofera amblyantha* under other conditions. Results also revealed that the pull-out resistive force of *Ophiopogon japonicus* root reached the maximum when the soil moisture content was close to 10.43%, while the pull-out resistive force of *Indigofera amblyantha* root reached the maximum when the soil moisture content was close to 13.00%. [Conclusion] Root diameter, soil moisture content and plants species have influences to some extent on the pull-out resistive force of root-soil interface.

Keywords: root-soil interface; soil-reinforcement; pull-out test; pull-out resistive force

收稿日期: 2014-05-21

修回日期: 2014-09-30

资助项目: 国家科技支撑计划项目“金沙江梯级水电开发区生态保护与入库泥沙调控关键技术与示范”(2012BAC06B02-04); 国家自然科学基金项目(51278281; 41202250)

第一作者: 夏振尧(1981—)男(汉族), 湖北省武汉市人, 博士, 副教授, 主要从事边坡生态防护方面的研究。E-mail: xzy_yc@126.com。

通信作者: 许文年(1960—)男(汉族), 河北省元氏县人, 博士, 教授, 主要从事边坡生态防护方面的研究。E-mail: xwn@ctgu.edu.cn。

植物固土主要通过根系的加筋和锚固作用来实现^[1],根—土复合体在外力作用下,其变形小于素土^[2-3]。加筋理论模型认为,植物根系的弹性模量要远远高于土体,植物根系与土体相互作用时,会在根系与土壤接触面而产生摩擦阻力,这不仅限制了根系周围土体的变形而且使根系周围的土体受到压缩而增大土体的内聚力,提高了土体的强度从而起到固持土体的作用^[4-6]。因此,根土界面的摩擦特性是根系固土机制研究的关键之一。根系与土壤的摩擦特性研究,目前常借鉴土壤与其他材料的界面摩擦特性研究方法,如采用直剪试验研究乔木与灌木根系与土体界面摩擦特性^[2,7],采用拉拔试验模拟加筋材料被拔出的特性^[8]。

植物根系的抗拉拔力是表征植物根—土摩擦特征的一个重要参数。当土体遭受破坏产生滑动面时,根系将所承受的荷载向土体深层传递及周围扩散,降低根土复合体的应力水平,改善土体变形性能。本文基于前人研究结果,应用土力学原理,以常用水土保持植物——麦冬(*Ophiopogon japonicus*)和多花木蓝(*Indigofera amblyantha*)的根系为对象,采用施加直接垂直拉拔荷载的单根拉拔试验,研究根系抗拉拔力的影响因素,为根土界面摩擦特性的研究提供基础和依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

植物选取宜昌市三峡大学校园内植被修复边坡中长势较好的草本植物麦冬和灌木植物多花木蓝。麦冬,是百合科沿阶草属多年生常绿草本植物,主要生长于海拔 50~1400 m 的山坡、山谷林下、路旁或

湿地;对土壤环境的要求不高,具有较强的穿透力和剪切力,使其具有固土、切断土表径流防止水土流失的优良特性,是一种固土护坡的优良地被植物,也是园林中常用的边缘材料。多花木蓝,为豆科木蓝属多年生落叶灌木,多生于 1 200 m 以下的山坡,在林缘、路边、荒山阳面坡、灌丛都较常见,具有抗旱、耐寒、耐瘠薄、根系发达的特点,能固定土壤,增加土壤通透性,能有效截留降水,因此,可以防治水土流失,还能和其他草种混播在高速公路、铁路两侧的坡面土壤中,是一种优秀的水土保持及绿化护坡植物。植物植株于 2013 年 8 月采用整株挖掘法挖掘,分别选取长势相同的 10 株麦冬和多花木蓝,挖出后置于静水中洗去土壤,待根系表面的水渍晾干后进行观察测量,麦冬根数量多,直径范围 0.8~2.5 mm,而多花木蓝根数量少,直径范围 0.6~5.8 mm,且以 1~2.5 mm 居多。然后用剪刀分别剪取根较直、表面较平整的单根作为拉拔试验材料,剪取的根长为 50 mm,直径范围为 0.8~2.5 mm,并用测量精度为 0.01 mm 的电子游标卡尺测量单根平均直径(测量根系的两端和中部的直径,其平均值作为这一单根的平均直径)。将测量后的单根放入自封袋并编号,然后放入冰箱内保鲜储存,且于 24 h 内进行试验。

试验土壤于 2013 年 8 月降雨后的第 3 天晴天的上午 9:00 时,取自麦冬和多花木蓝植株挖掘样地内,其土壤类型均为黄棕壤,取土深度为 0.2 m 表层土,去除土内的石子、根系等杂质,将其带回实验室并将土壤风干,土壤风干后过 2 mm 土壤筛制备试验土样,并采用筛分法测定土样的颗粒组成,黄棕壤的基本物理性质详见表 1。采用烘干法测定土壤天然含水量,采用环刀法测定土壤容重。pH 值采用电位法测定。

表 1 黄棕壤的基本物理性质指标

土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤天然 含水率/%	pH 值	土颗粒组成/%				
			2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	≤ 0.075 mm
1.38	10.43	6.4	38.14	26.77	15.69	9.53	8.86

1.2 试验设计

采用烘干法测定风干且过筛后土壤的含水率 w_0 ,因天然含水率为 10.43%,将试验土样土体含水率 w_i 设计为 5.00%,8.00%,10.43%,13.00% 和 16.00% 共 5 个梯度,然后用天平称量风干土质量 m (本试验为 1 500 g),根据公式(1)分别计算设计含水率 w_i 条件下制备土样所需要的加水量 m_{wi} 将称量的风干土样 m 平铺于搪瓷盘内,并分别用量筒量取 m_{wi} ,然后将水均匀喷洒在土样上,拌匀后装入盛土容器内盖紧,润湿 24 h,制备成不同设计含水率土样。计算

公式为:

$$m_{wi} = \frac{m}{1+0.01w_0} \times 0.01(w_i - w_0) \quad (1)$$

$$m_i = (1+0.01w_i)\gamma_d V \quad (2)$$

式中: m_{wi} ——制备土样时所需的加水量(g); m ——制备土样时称量的风干土质量(g); m_i ——制备试样时所需的土质量(g); w_i ——土样设计含水率(%); w_0 ——风干土含水率(%); γ_d ——土壤容重(g/cm^3); V ——装土盒容积(g/cm^3)。

室内模拟天然条件,控制土壤容重 $\gamma_d = 1.38$

g/cm^3 ,根据公式(2)计算装土盒体积时不同设计含水率 ω_i 条件下制备试样所需的土质量 m_i ,并从制备的不同设计含水率土样中称量制备试样所需的土质量 m_i ,然后按土力学试验规范^[9]重塑制样方法分别将单根垂直埋于直径为 100 mm、高为 40 mm 环形装土盒的中心,分二层压实,制备成麦冬和多花木蓝单根根—土复合体,由于装土盒高度仅有 40 mm,因此单根埋深亦仅为 40 mm;然后采用改装的 HP-50 型艾德堡数显推拉力计试验装置分别对麦冬和多花木蓝单根根—土复合体进行拉拔试验,其加载速度控制为 10 mm/min,每组合含水率进行 12 根单根拉拔试验,每根单根进行 3 次重塑根—土复合体拉拔试验。采用 Excel 软件对数据进行初步处理及回归方程拟合。

2 结果与讨论

2.1 根径对单根抗拉拔力的影响

图 1—2 为两种植物单根的最大抗拉拔力与根径的回归拟合关系曲线。由图 1—2 可以看出,在各土壤含水率条件下,麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力均随着根径的增大呈幂函数增大的趋势。各土壤含水率条件下麦冬和多花木蓝根系的最大抗拉拔力与根径拟合回归方程的相关系数 R^2 均大于 0.876,说明其回归方程拟合较好。当土壤含水率为 8.00% 和 16.00% 时,麦冬单根拟合回归方程的相关系数最小,其值为 0.920;当土壤含水率为 8.00% 时,多花木蓝单根拟合回归方程的相关系数最小,其值仅为 0.876。

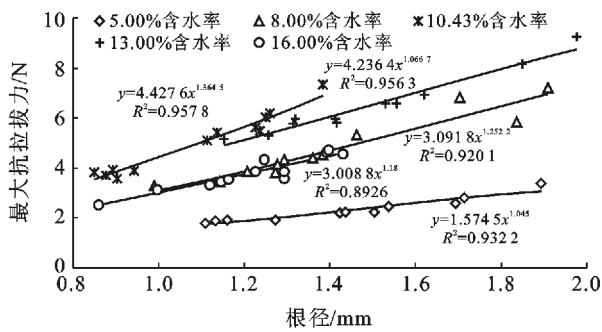


图 1 麦冬根土间最大抗拉拔力与根径的关系

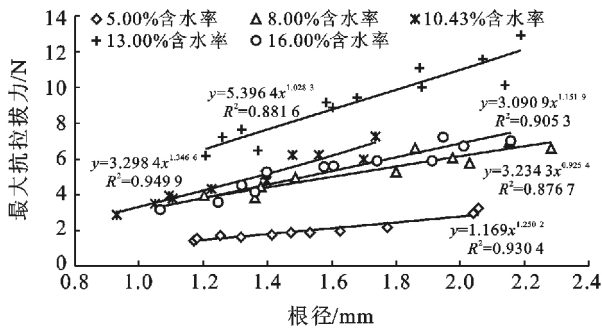


图 2 多花木蓝根土间最大抗拉拔力与根径的关系

2.2 土壤含水率对单根抗拉拔力的影响

根据两种植物根径与单根的最大抗拉拔力回归方程分别计算麦冬和多花木蓝根径分别为 1.5 和 2.0 mm 时单根的最大抗拉拔力,并绘制单根的最大抗拉拔力与土壤含水率关系曲线,如图 3 所示。可知,不同根径条件的麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力均随土壤含水率的增加呈现先增加后减小的趋势。在土壤含水率等于 5.00% 时,麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力较小;当土壤含水率增加到 10.43% 附近时,麦冬单根的最大抗拉拔力先达到最大值,多花木蓝单根的最大抗拉拔力继续增大;随着土壤含水率的增加,麦冬单根的最大抗拉拔力达到最大值后开始减小,当土壤含水率为 13.00% 附近时,多花木蓝单根的最大抗拉拔力也达到最大值;随着土壤含水率的继续增加,多花木蓝单根的最大抗拉拔力也开始减小。

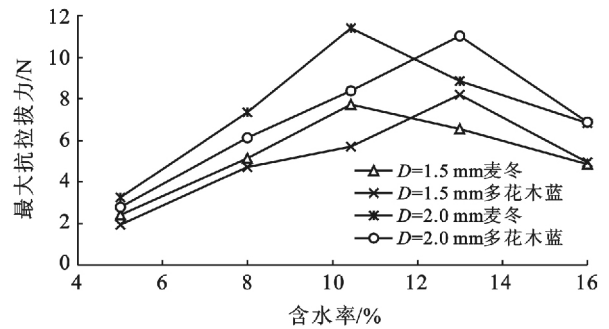


图 3 根系最大抗拉拔力与含水量的关系曲线

2.3 不同物种根对单根抗拉拔力的影响

从图 1—3 可以看出,麦冬和多花木蓝两种单根的抗拉拔力显著不同。虽然两种根的最大抗拉拔力都随根径的增加而增大且呈现出幂函数关系,但二者在相同土壤含水率及相同根径时,其最大抗拉拔力大小显著不同。由图 3 可知,同一根径条件下,当土壤含水率小于某一含水率 ω_1 (其分界点介于 10.43% ~ 13.00%) 时,麦冬单根的最大抗拉拔力整体上大于多花木蓝单根的最大抗拉拔力;当土壤含水率大于含水率 ω_1 后,多花木蓝单根的最大抗拉拔力将大于麦冬单根的最大抗拉拔力。但由曲线的趋势发现,随着土壤含水率的增加,必然存在另一含水率 ω_2 (其分界点大于 16.00%) 使得麦冬单根的最大抗拉拔力大于多花木蓝单根的最大抗拉拔力。同时发现,二者不同根径单根的最大抗拉拔力在不同的含水率下达到最大值。因此,总体来看,在表层土中,当土壤含水率介于 ω_1 ~ ω_2 时,多花木蓝根对土壤的锚固作用优于麦冬;而在其他含水率条件下,麦冬根的锚固作用优于多花木蓝。

2.4 讨论

麦冬和多花木蓝单根拉拔试验研究表明,麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力均随根径的增加而增大,呈幂函数非线性关系。这是因为植物单根的直径越大,表面积越大,根土接触面就越大,根土界面摩擦力发挥越充分,从而导致根与土壤间的摩擦力就越大,从而增加了根系的抗拉拔力。刘小光等^[10]通过直接拉拔试验研究了油松和落叶松根与土界面摩擦特性,其试验表明植物根的抗拉拔力随着根径的增大而增大且呈现出幂函数关系。本试验结果与刘小光等的研究结果一致。朱清科等^[11]和封福记^[12]均指出由于根在被拉拔的过程中会由弹性形变到塑性形变,当植物根径增大到一定程度时,其抗拉拔力也会有明显的跃迁。但本试验两种植物根的最大抗拉拔力并没有出现明显的跃迁,这是因为试验两种植物根径尚未达到发生跃迁的极限值。朱清科等^[11]对长江上游贡嘎山峨眉冷杉和冬瓜杨根的拔根试验研究表明,这两种植物根的抗拉拔力发生明显跃迁时,其根的平均直径均大于10 mm。张永亮等^[13]采用拉拔试验研究了内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗乌兰木伦镇境内柠条和沙柳灌木根的抗拉拔特性,试验表明柠条和沙柳的抗拉拔力随根径的增加呈直线增大的趋势。因此,采用线性回归方程分别拟合麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力与根径的关系。通过比较幂函数和线性函数的相关系数发现,采用幂函数方程拟合根系的抗拉拔力与根径的关系,其拟合度更高,效果更好,说明试验结果是准确的。

刘小光^[14]对油松和落叶松单根拉拔试验和本试验的结果均表明,在相同土壤容重条件下,根的最大抗拉拔力随着土壤含水率的增加呈现先增大后减小的趋势。因为含水量较小时,土颗粒空隙大而较为松散,尚未形成较强的结合键,土颗粒与根系表面的接触也较松散,从而使根—土间的联结力较弱,根系的摩擦力也较弱,根系的抗拉拔力也较弱。随着含水量的增加,土颗粒与水的结合水膜增强,水胶结也增强,土体粘聚力相应增大,提高了土体和根系表面的咬合力,也提高了根系的摩擦力,亦提高了根系的抗拉拔力。当超过一定含水量时,土体周围的结合水厚度变厚,使土颗粒间距增大,这时通过结合水膜的水胶结能力就逐渐减弱,土体粘聚力相应减小,从而减弱了根系和土颗粒间的咬合力,导致了根土间的摩擦力减小,减小了根系的抗拉拔力。因此,在土壤容重一致的情况下,土壤含水率在一定范围内增大有利于根系

的锚固作用,土壤含水率超过一定范围根土的摩擦锚固作用将会减低。

3 结论

麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力随根径的增加而增大且呈现非线性幂函数关系;在相同土壤容重条件下,麦冬和多花木蓝单根的最大抗拉拔力随土壤含水率的增加而呈先增加后减小的趋势。在相同土壤含水率及相同根径条件下,麦冬和多花木蓝两种单根的抗拉拔力显著不同;总体来看,在表层土中,当土壤含水率介于 $w_1 \sim w_2$ 时,多花木蓝根的最大抗拉拔力优于麦冬的最大抗拉拔力,而在其他含水率条件下,麦冬根的最大抗拉拔力优于多花木蓝的最大抗拉拔力;同时发现麦冬根的最大抗拉拔力的最大值在含水率为10.43%附近,而多花木蓝根的最大抗拉拔力的最大值则在含水率为13%附近。

[参 考 文 献]

- [1] 杨永红. 东川砾石土地区植被固土护坡机理研究[D]. 四川成都:西南交通大学,2006.
- [2] 邢会文,刘静,王林和,等. 柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学学报,2010,30(1):87-91.
- [3] 及金楠. 基于根土相互作用机理的根锚固作用研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [4] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
- [5] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍. 林木根系固土的理论基础[J]. 水土保持通报,2008,28(6):180-185.
- [6] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [7] 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.
- [8] 赵亚楠. 芦苇的快速繁育方法及其根茎抗阻拉力研究[D]. 吉林长春:东北师范大学,2006.
- [9] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [10] 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.
- [11] 朱清科,陈丽华,张东升,等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4):64-67.
- [12] 封福记. 受损河岸生态系统生态修复与重建研究[D]. 吉林长春:东北师范大学,2005.
- [13] 张永亮,邢会文,刘静,等. 柠条和沙柳根—土界面抗阻拉力特性研究[J]. 世界林业研究,2009,9(22):52-56.
- [14] 刘小光. 林业根系与土壤摩擦锚固性能研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.