

蒙古栎根系单根抗拉力学特性

李长暄, 陈丽华, 周娟, 郭文体

(北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为探究蒙古栎根系的基本力学性质, 对试验机夹具进行了改进并对根进行了预处理。选取直径范围为 1~17 mm 的蒙古栎根系在不同标距下进行了室内单根拉伸试验。结果表明, 根系的抗拉力随直径的增大而增大, 且呈显著的幂函数关系; 抗拉强度随直径增加呈减小趋势; 蒙古栎单根应力应变曲线在各个径级下皆为单峰曲线, 呈弹塑性材料特征。说明蒙古栎通过其较强的抗拉性能和变形能力可对维持坡面稳定起到了积极作用。

关键词: 蒙古栎根系; 室内拉伸试验; 抗拉强度; 应力—应变曲线

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0232-04

中图分类号: S157.2, S714.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.059

Tensile Mechanical Properties of Single Root of *Quercus Mongolica*

LI Chang-xuan, CHEN Li-hua, ZHOU Juan, GUO Wen-ti

(Key Lab. of Soil & Water Conservation and Desertification Combating Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the mechanical property of *Quercus mongolica* roots, the drawing machine fixture was improved and the roots were preprocessed before the test, and *Quercus mongolica* roots of which diameter between 1 and 17 mm were picked out to conduct single root tensile test indoor under different gauge length. The results show that tensile resistance of *Quercus mongolica* roots increase with the increase of root diameter according to a power function, and its tensile strength decreased with the increase of root diameter. Moreover, the stress—strain curve of single *Quercus mongolica* root was a single-peak curve under different diameter class which exhibiting the elastic-plastic material characteristics. It indicates that the *Quercus mongolica* root has positive effects on maintaining slope stability through strong ability of tensile properties and deformation ability.

Keywords: *Quercus mongolica* roots; indoor tensile test; tensile strength; stress—strain curve

林木根系在支撑树体, 固持土壤和预防浅层滑坡上起到了十分重要的作用^[1]。大量研究^[2-6]表明, 根系通过其三维网状结构以及所表现出来的附加黏聚力加固了土壤。当土体受到剪切破坏力时, 根土界面的摩擦阻力将剪切带内土体受到的剪应力转化为根的拉应力, 增加了土体的抗剪强度, 提高了土体的稳定性。林木根系对浅层斜坡的稳定加固作用, 重要的基础就是根系具有较强的抗拉能力和变形特性。根系单根抗拉强度和变形能力是评估植被防止土体破坏能力的重要指标^[7]。不同根系的力学性能不一样, 所起的加固效果也显著不同。以往研究主要集中在

油松、落叶松径级在 8 mm 以下的根系^[8-9], 但对蒙古栎根系力学特性以及直径在 8 mm 以上的单根定量化研究较少。蒙古栎(*Quercus mongolica*)主要分布于在我国华北地区和东北地区, 具有较深的根系分布轮廓^[10-11], 生长在贫瘠的坡地上, 是我国温带地区针阔混交林及落叶阔叶林的主栽树种^[12], 是防风固沙林的主要树种。本研究通过对根进行预处理^[10]以及对夹具进行改进等办法, 对蒙古栎粗根(>8 mm)力学性能展开研究。为分析蒙古栎根系与土壤之间的相互作用机制, 建立边坡稳定模型、抗风倒模型提供数据支持。

收稿日期: 2013-12-10

修回日期: 2013-12-20

资助项目: 林业公益性行业科研专项项目“森林对 PM_{2.5} 等颗粒物的调控功能与技术研究”(20130430104); 中国教育部博士基金项目(20090014110002); 国家自然科学基金项目

作者简介: 李长暄(1985—), 男(汉族), 黑龙江省抚远县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: changxuan_li@126.com。

通信作者: 陈丽华(1957—), 女(汉族), 北京市人, 教授, 博士生导师, 主要从事流域治理、森林水文、城镇规划等研究。E-mail: c_lihua@bjfu.edu.cn。

1 试验区概况

研究区位于河北省承德市围场县境内的北沟林场,地理坐标为 $116^{\circ}32'$ — $118^{\circ}14'E$, $41^{\circ}35'$ — $42^{\circ}40'N$ 。属于中温带向寒温带过渡、半干旱向半湿润过渡的山地气候, ≥ 6 级大风时间28 d;年降水量为370~550 mm,主要集中在6—8月份,占全年降水量的69%,降雨多以暴雨形式出现。该林场高等维管植物有600余种,以天然次生林和人工林为主,主要乔木树种有白桦(*Betula platyphylla*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和蒙古栎等。

2 研究方法

2.1 根系的采集

选取4棵立地条件相近、正常生长22~23 a的蒙古栎树种进行全挖。为避免对根系造成机械损伤,用铲子和毛刷小心挖出全部的根;从挖出的根中,选取无病虫害、相对顺直的活根,用枝剪将其剪成长度为600 mm左右的根段,放入自封袋中密封,用油性记号笔注明采样日期,带回试验室放入冰箱中并在4℃条件下低温保存。

2.2 夹具的加工与根的预处理

本实验中,细根(< 8 mm)利用试验机自带夹具进行拉伸实验,粗根(> 8 mm)则需利用自行加工的夹具进行测试。为了增加根与夹具的接触面积,夹持面采用弧状设计,并附有螺纹。

对粗根进行预处理,以提高夹具夹持位置根的硬度并防止根在水的作用下滑出夹具,具体方法是将根剪成210 mm,放入试验机夹具中,夹紧夹具,将根两端的水挤出,再用热风枪以300℃左右的温度,对着根两端伸入夹具的部分进行轮流烘烤,时间约为30 min,在室温下放置1 h后进行实验。

2.3 室内拉伸试验

用WDW-100E微机控制电子式万能试验机进行单根抗拉试验,研究蒙古栎单根力学性能。试验机的最大量程为100 kN,全程自动换挡,速度范围为0.005~500 mm/min,系统对数据以及试验力变形曲线进行自动记录。均匀选取根上的4个部位,取平均值作为该根段的直径。调整万能试验机标距到试验设计中的设定根长度,伸入上下夹具两端的树根长度各约55 mm。夹紧以后,以10 mm/min的速度匀速拉伸根直至其被完全被拉断为止。根在夹口处断裂则视实验失败,剔除该数据。

本研究设计在3种不同标距下的匀速拉伸实验,标距分别为50,100和250 mm,3个标距下的数据量

分别为:50 mm标距下的33根,直径范围为1.99~6.5 mm;100 mm标距下的68根,直径范围为1.17~17.24 mm,其中直径在8 mm以上的数据12组;250 mm标距下的33根,直径范围为2.06~6.34 mm。共计拉根301根,细根成功122根,粗根成功12根,总成功率为40.3%。

2.4 基本参数的定义

抗拉强度是指单位面积上根系的极限抗拉力,表征材料在外力拉伸条件下抵抗破断的能力,是评价根系力学特性的重要指标。其计算公式为:

$$P = 4F_{\max} / \pi D^2 \quad (1)$$

式中: P ——根系抗拉强度(MPa); F_{\max} ——最大抗拉力(N); D ——根系平均直径(mm); π ——系数。

2.5 数据处理与分析方法

进行分析之前对数据进行了正态性检验与方差齐性检验。采用回归分析法探讨3种标距之下直径与抗拉力、直径与抗拉强度之间的关系;对3种标距下的细根抗拉强度数据进行协方差分析,研究不同标距对根系抗拉强度是否产生显著影响。其中,根径作为协变量,标距作为固定效应的控制变量,抗拉强度作为为因变量分析它们之间的差异。采用的分析软件为Excel和SPSS 18.0软件进行。

3 结果与分析

3.1 根系抗拉力、抗拉强度与直径的关系

在3个标距下,抗拉力均随直径的增加而增加,且呈显著的幂函数关系($p < 0.001$)。由实验取得的有效数据,得到各标距下抗拉力与直径的关系(图1)。

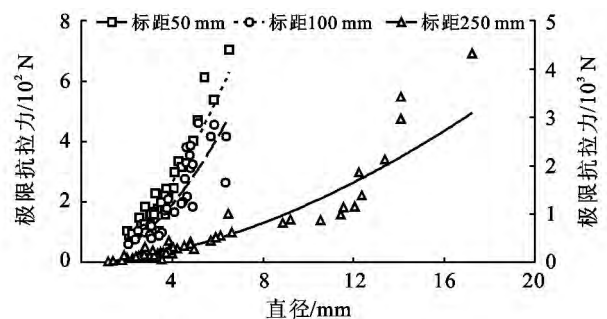


图1 不同标距下根系抗拉力与直径的关系曲线

蒙古栎单根抗拉强度与直径呈现负相关关系,但随着直径的增加抗拉强度呈逐渐减小的趋势,拟合最佳的是对数函数,但关系并不显著,这与前人的研究结果一致^[12-14]。各标距下抗拉强度与直径的关系如图2所示。

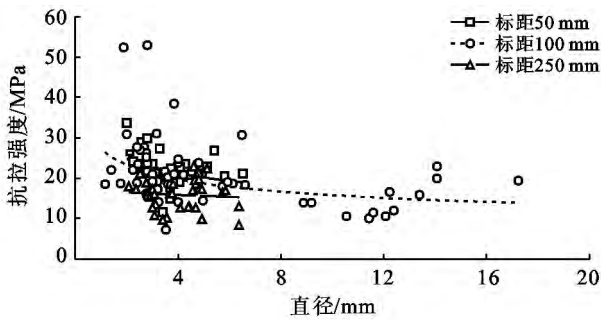
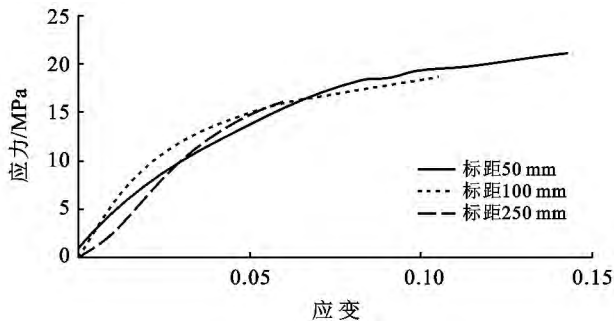


图 2 不同标距下根系抗拉强度与直径的关系曲线

单根抗拉实验的本质就是在轴向拉力的作用下,根顺纤维的抗拉过程^[15],当荷载达到一定程度后,根系会在最弱处发生断裂。在本实验中,蒙古栎根系单根表现出了较强的抗拉性能,直径 17.24 mm 的蒙古栎单根抗拉力可达 4 300 N。单根抗拉力与直径呈正相关关系,抗拉强度与直径呈现负相关关系,粗根依然满足此规律。这是由于蒙古栎不同径级根系中的化学成分含量的差异所导致的。化学成分是影响



根系抗拉力和抗拉强度的一个重要因素。研究^[16]表明,根系抗拉力与纤维素和半纤维素含量呈正相关,与木质素含量呈负相关;而抗拉强度与纤维素和半纤维素含量呈负相关,与木质素含量呈正相关。随着根直径的增加,纤维素和半纤维素含量逐渐增加,而木质素的含量逐渐减少。

3.2 根系应力—应变曲线

在不同标距下同直径级蒙古栎根系的应力应变曲线如图 3 所示。在加载的初期阶段,应力与应变呈线性增长,3 个标距下,应力随应变的增长幅度均比较明显,体现了蒙古栎单根对外界刺激响应较快的特点,当应力超过一定数值后,迅速呈现出非线性增长,直至达到极限,根被拉断为止。由图 3 可以看出,标距较小的根有着更好的应变特征。

标距为 50 mm 下不同直径根的应力应变曲线如图 3 所示,在相同标距之下,不同直径根的应力应变曲线变化趋势基本一致。根的直径越小,曲线越不光滑,其包覆范围越广。

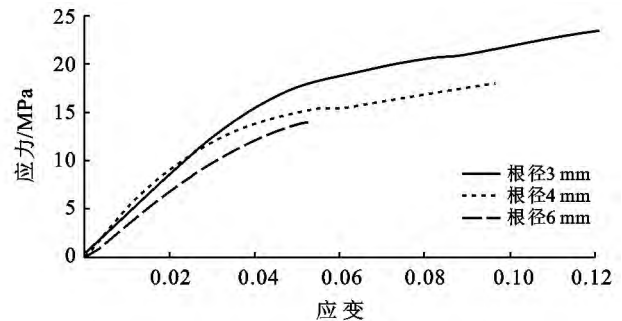


图 3 不同条件下根系的应力—应变曲线

蒙古栎根系在的应力应变曲线均为从圆点出发的单峰曲线,表现出了弹塑性材料的特征。然而,每条曲线的极限应力和极限应变特征参数存在比较大的差异。在根抵抗拉力的开始阶段的低负荷时,应力与应变呈比例增长,表现为很好的线弹性关系,此时为弹性变形,表明卸载外力以后变形可恢复;但当应力达到一定数值,一般为极限抗拉强度的 30%~70%,此时的高负荷将使得曲线逐渐偏离直线,进入塑性变形阶段,此阶段不可逆,直至根被拉断。

林木根系单根的应力—应变曲线的绘制是实验中的一个重点。该曲线可以清晰、直观地反映出单根的力学性能指标以及完整的受拉过程,曲线弹性段的斜率反映了在拉伸过程中应力随应变增加的情况,弹性段内的应力与相应的应变之比表征了根抵抗弹性变形的能力;曲线中应变的最大值为极限延伸率与标距的比值,应力的最大值为极限抗拉强度。同时,应力应变曲线的测定也是一个难点,欲将其精确绘制出还存在

着一定难度。主要是因为根系在被夹紧、拉伸的过程中会与夹具间发生不同程度的滑动,而且,由于根系并不是完全通直的,这也就导致了拉伸过程中有一部分的形变是根系从弯到直的过程,从而影响了最后测得数值的精确度。因此,如何减少根系在被拉伸过程中与夹具之间产生的相对滑动,以及确定根系由弯到直所对应的数值变化的影响也将成为继续讨论的重点。

3.3 标距对抗拉强度的影响

3 个标距下,细根抗拉强度的协方差分析结果(表 1)表明标距对根系的抗拉强度存在着显著影响($p < 0.05$),且随着标距的增加,抗拉强度的均值明显呈减小的趋势,标距为 50 和 250 mm 根系的抗拉强度的均值差异十分显著($p = 0.05$)。

为了保证实验结果的可靠性以及实验成功率,单根拉伸实验需要一定的标距^[17]。通常选取的标距为 50, 100, 150, 200 和 250 mm^[18-19]。在不同标距下根的抗拉强度显著不同,反映了不同宽度的土壤剪切带

内根固土抗滑能力的差别。蒙古栎单根的抗拉强度随着标距的增加而逐渐减小,这是由于根系生长在复杂的地下环境中,单根内存在着不同程度的缺陷,缺陷处的抗拉强度偏低。在轴向拉力的作用下,根会优先在缺陷处断裂,随着标距的增加,遇到缺陷的概率也随之增加,导致根抗拉强度的降低^[20]。

表1 不同标距抗拉强度的协方差分析结果

标距/mm	均值±标准差	F 值	p
50	22.22±4.08 ^a		
100	19.97±4.08 ^{ab}	19.67	0.001
250	15.85±3.80 ^a		

注:“均值±标准差”一栏表中不同字母表明其均值差值在0.05水平上差异显著。

4 结论

(1) 蒙古栎根系拥有比较强的抗拉能力,直径范围为1.99~6.5 mm的单根在标距50 mm下,平均抗拉强度达到22.22±4.08 MPa,明显高于这一标距下同径级的油松和落叶松的平均抗拉强度(14.35±3.19 MPa和11.72±2.71 MPa)。

(2) 蒙古栎单根抗拉力随直径增加呈幂函数增长,且关系显著;抗拉强度随直径增加呈递减趋势,但关系并不显著。

(3) 不同实验条件下,蒙古栎单根的应力应变曲线均为从圆点出发的单峰曲线,表现出了弹塑性材料的特征,标距和直径对曲线形态和参数均有不同程度的影响。

(4) 标距对蒙古栎根系的抗拉强度有着显著的影响,其影响规律表现为同径级之下,标距越大,抗拉强度越低。

综上所述,当含有蒙古栎根系的土体失稳开始出现裂缝的时候,蒙古栎根系的弹性应变十分有利于将根系所受的力向土体的深层传递。土中的根在受拉的过程中,其较强的变形能力、较大的抗拉强度都有利于对土体开裂的趋势进行缓冲和抑制,从而对抗滑和抗风倒起到积极的作用,但随着裂缝的逐渐增大,这种作用将会逐渐减小。

[参 考 文 献]

[1] 谢春华,关文彬,张东升,等. 长江上游暗针叶林生态系统主要树种的根系结构与土体稳定性研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):76-79.
[2] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Con-

trol[M]. New York: Wiley, 1996.

- [3] Roering J J, Stock J D, Schmidt K M, et al. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003,40(2):237-253.
[4] Waldron L J, Dakessian S. Effect of grass, legume, and tree roots and soil shearing resistance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982,46(5):894-899.
[5] Abe K, Iwamoto M. An evaluation of tree-root effete on slope stability by tree-root strength[J]. Journal of Japanese Forestry Science, 1986,69(1):505-510.
[6] Cammeraat E, van Beek R, Kooijman A. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain[J]. Plant, 2005,278(1):135-147.
[7] 吴征镒. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社,1980.
[8] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰,等. 油松根系抗拉应力—应变全曲线试验研究[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):66-70.
[9] 李晓凤,陈丽华,王萍花. 华北落叶松根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学,2012,10(1):82-87.
[10] Hales T C, Clara C H, Laurence L, et al. Assessing the accuracy of simple field based root strength measurements[J]. Plant and Soil, 2013,372(1/2):553-565.
[11] 宋恒川,陈丽华. 华北土石山区四种常见乔木根系的形态研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(11):194-199.
[12] 于顺利,马克平,陈灵芝. 中国北方蒙古栎起源和发展的初步探讨[J]. 广西植物, 2000,5(2):131-137.
[13] 李贺鹏,岳春雷,赵广琦,等. 中亚热带常绿阔叶林中主要灌木根系力学特性[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):33-36.
[14] 王剑敏,沈烈英,赵广琦. 中亚热带优势灌木根系对土壤抗剪力度的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(2):47-50.
[15] 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.
[16] 吕春娟,陈丽华,周硕,等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报,2011,27(S1):329-335.
[17] Cofie P, Koolen A J. Test speed and other factors affecting the measurements of tree root properties used in soil reinforcement models[J]. Soil Till Res., 2001,63(5):51-56.
[18] Sun Hailong, Li Shaocai, Xiong Wenlan, et al. Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis*[J]. Ecol. Eng., 2008,32(1):60-67.
[19] 尹恩慈. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,1996.
[20] Zhang Chaobo, Chen Lihua, Jiang Jing, et al. Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots[J]. Trees, 2012,26(5):1577-1584.