

[文章编号] 1003—4684(2019)01-0001-06

武神公路植物根系抗拉特性试验研究

李 志¹, 马 强¹, 胡 刚², 董核铭², 李国政²

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2 十堰市交通投资有限公司, 湖北 十堰 442000)

[摘 要] 为探究武(当山)一神(农架)公路植物根系的抗拉特性,在公路沿线选择 4 种灌木,2 种乔木和 2 种草本植物根系作为试验材料,利用万能试验机得到根系拉力和时间关系曲线,确定了各植物根系拉断时的峰值拉力,测得拉断时根系断口处的直径,计算出植物根系的抗拉强度,并通过对数函数和幂函数拟合得到了各种植物根系拉力峰值、抗拉强度与根系直径之间的拟合关系。结果表明:植物根系的拉力峰值随直径的增加而增加;除马桑、野漆树外,其他植物根系的抗拉强度随着直径的增加而降低;对数函数和幂函数均能够较好描述植物根系的抗拉强度与直径之间的关系;乔、灌、草本植物根的抗拉强度比较接近,其中草本根系平均抗拉强度最大,灌木根系的最小。探明植物根系抗拉特性,可为边坡植被护坡工程构造设计及植被类型选择提供可靠的参考。

[关键词] 植物根系; 峰值拉力; 抗拉强度; 拉断试验; 数据拟合

[中图分类号] S154.4

[文献标识码] A

利用植物根系护坡,既能够保护边坡,提高稳定性,减缓浅层滑坡、崩塌等重力侵蚀^[1-2],又能够减少人工材料的使用,降低施工成本,实现与周围环境相协调。植物根系抗拉力学特性是根系固土能力的重要指标。根系的抗拉特性可由抗拉力、抗拉强度、变形特性等方面来反映^[3-5]。

在根系抗拉力研究方面,日本学者阿部和时^[6]和野久田稔郎^[7]等人提出,日本柳杉、沿岸花旗松等树种根系抗拉力与直径呈幂函数关系,并建立了根系抗拉力与根径的方程。杨维西^[8]对 9 种黄土高原水土保持树种根系抗拉力进行测定,张建军^[9]对晋西北黄土高原沙打旺根系进行了研究,得出了根系抗拉力与根径呈幂函数关系增加的规律。封福记^[10]对河柳、紫穗槐、芦苇和菖蒲根系进行研究的结果表明,单根抗拉力与直径呈幂函数关系增加。然而,李会科^[11]和杨永红^[12]通过试验分别得出地埂花椒林根系和合欢根系的抗拉力与根径呈线性增加关系。

在根系抗拉强度方面,国内外学者的研究主要包括不同植物种根系抗拉强度的大小,根系直径与抗拉强度关系方面的研究。但是,不同学者对于不

同植物种的研究结论不尽一致。Tosi^[13]和 Norris^[14]的研究结果显示,根系抗拉强度随着直径的增加逐渐减小。De Baets^[15]发现地中海芒柄花和绒毛花的根系抗拉强度与直径没有明显的关系,而猪毛菜、滨藜、短柄草、针茅、芦苇等植物根系抗拉强度与直径具有明显的幂函数负相关关系。Genet^[16]研究得到海岸松和欧洲板栗根系的抗拉强度与直径呈幂函数负相关关系,与纤维素含量呈线性正相关关系。程洪^[17]得到了香根草根系的抗拉强度与根系直径呈幂函数负相关关系。赵丽兵^[18]和朱海丽^[19]得出植物根系抗拉强度和纤维素含量与根系直径均呈线性负相关关系的结果。田佳^[20]得到早熟禾、无芒雀麦、多年生黑麦草、高羊茅的抗拉强度与直径均呈线性关系增加的结果,这与前述学者的研究结果不相符。

综上,很多学者对植物根系的力学特性进行了研究,但不同植物类型的抗拉力和抗拉强度各不相同,为探究植物根系的抗拉特性与其直径的相关性,本文以武(当山)一神(农架)公路沿线挖取的 8 种乔、灌、草本植物根系为研究对象,对其力学特性进行研究,以期揭示植物根系的拉力峰值和抗拉强度

[收稿日期] 2018—03—20

[基金项目] 国家自然科学基金(51678223);湖北省教育厅重点项目(D20171402);湖北工业大学绿色工业科技引领计划项目(YXQN2017001)

[第一作者] 李 志(1994—),男,安徽界首人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为环境岩土工程

[通信作者] 马 强(1983—),男,湖北十堰人,工学博士,湖北工业大学副教授,研究方向为土体与结构相互作用及环境岩土

随根径变化规律,从而为分析根—土复合体的强度提供基本参数,进而可为边坡植被护坡工程构造设计及植被类型选择提供可靠的参考。

1 试验简介

在植被中,主根发达、明显,极易与侧根相区别,这种由主根及其各级侧根组成的根系,称为直根系,大多为乔木和灌木。其中乔木是指有一个直立主干、且高达 5 m 以上的木本植物,如刺槐、松树等;而灌木则是主干不明显,常在基部发出多个枝干的木本植物,如多花木兰、玫瑰等。草本植物是木质部不发达、细胞壁木质素含量少,侧根发达,茎秆柔软的一类植物,如狗牙根、野艾蒿等。

植物的主根有锚固作用,侧根有加筋作用,根系与土体之间存在着摩擦力,使得植物根系具有加固边坡的作用,可不同植物根系的力学特性差异显著,为了研究植物根系的护坡力学作用,需要对植物根系的种类及其力学性能进行全面的研究,故以武一神公路沿线常见 8 种(其中乔木 2 种、灌木 4 种、草本 2 种)水土保持植物为研究对象,探究植物根系的拉力峰值和抗拉强度随根径变化规律,为分析根—土复合体的强度提供基本参数。

1.1 试验材料及方法

本试验所用根系均系武(当山)—神(农架)公路沿线挖取的 8 种乔、灌、草本植物根系,其中,乔木 2 种,灌木 4 种,草本 2 种,详细情况类见表 1 所示。

表 1 试验植物种类一览表

| 植物类别 | 植物名称 |
|------|---|
| 灌木 | 多花木兰(<i>Indigofera amblyantha</i>)、马桑(<i>Coriaria nepalensis</i>)、小蜡(<i>Ligustrum sinense</i>)、山麻杆(<i>Alchornea davidii Franch</i>) |
| | 野漆树(<i>Rhus sylvestris Sieb. & Zucc</i>)、刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>) |
| 草本 | 苔草(<i>Carex tristachya</i>)、野艾蒿(<i>Artemisia lavandulaefolia</i>) |

1.2 试验方法

在现场挖取生长良好的植株带回试验室进行抗拉强度测试,选取顺直少弯曲,表皮较完好的根系。每种植物选取 15 个样本,即每种植物进行 15 组平行试验以确保试验结果的可靠性。测试前将植物根洗净,截成 10 cm 长的试样段。采用电子万能试验机(WDW-10E 型,荷载范围为 10 kN,精度为 0.1 N,济南耐而试验机有限公司生产)测试根系拉断时的最大拉力 F ,测试时仪器通过应变加载,设定加载速率为 10 mm/min。当根拉断时,用游标卡尺测量根断裂处的直径 D 。并通过下式计算根的抗

拉强度 σ 。

$$\sigma = 4F/(\pi D^2)$$

(1)

2 试验结果及分析

植物根系与周围土体形成复合土体,与天然土体相比具有更高的抗拉和抗剪切强度,根系作为天然加筋材料,其强度对复合土体的强度具有重要影响。因而,对根系强度进行测试,确定不同植物根系强度指标,可为确定根—土复合体的强度提供基本参数。利用前述试验手段,分别对 19 种植物根系的抗拉强度进行了分析,并建立了抗拉强度与根直径的关系曲线。

2.1 多花木兰

共截取了 15 段根进行抗拉试验,各次试验根的直径不同,图 1 绘出了断裂处直径为 0.36 mm 的样本的拉力与时间的关系曲线,其他样本均通过拉力时间曲线获得拉力峰值结果。

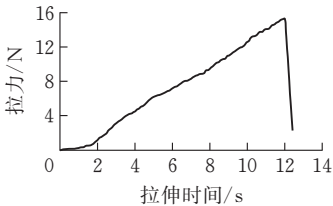


图 1 根系拉力和时间关系曲线

在获得根的拉力峰值基础上,通过式(1)可计算根的抗拉强度。

多花木兰根的抗拉力最大为 121.5 N,最小为 3.0 N。为研究多花木兰根部拉力峰值与根系直径的关系,以根系直径为横坐标,拉力峰值为纵坐标,建立两者之间的关系,如图 2 所示。

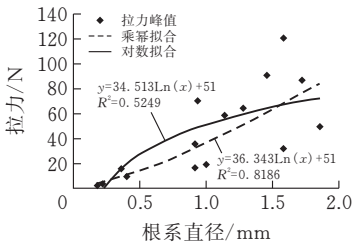


图 2 多花木兰根部拉力峰值与直径关系

由图 2 可以看出,随着根的直径的增加,拉力峰值逐渐增大,为确定根的拉力峰值与根的直径之间的关系,分别采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $F = 34.513\text{Ln}(D) + 51, R^2 = 0.5249$; $F = 36.343D^{1.3597}, R^2 = 0.8186$ 。其中: F 为根的拉力峰值, D 为根的直径, R 为相关系数。

将测得的多花木兰根的拉力峰值换算成根的抗拉强度,并以直径为横坐标,抗拉强度为纵坐标,建

立根部抗拉强度与根系直径的关系,如图 3 所示。

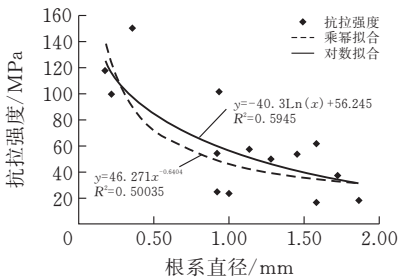


图 3 多花木兰根部抗拉强度与直径关系

由图 3 可以看出,随着多花木兰根的直径的增加,抗拉强度逐渐减小。最大抗拉强度为 150.3 MPa,最小抗拉强度为 16.2 MPa,平均抗拉强度为 63.1 MPa。采用对数函数和幂函数对测试得到的抗拉强度进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $p=-40.292\text{Ln}(D)+56.245, R^2=0.5945$; $p=46.271D^{-0.6404}, R^2=0.5003$,其中 p 为根的抗拉强度。

2.2 马桑

马桑属于灌木,其根系不发达,通过试验得到马桑根的极限抗拉力峰值,利用(1)式换算成根的抗拉强度。

马桑根部拉力峰值与直径关系,如图 4 所示。

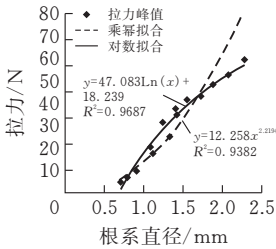


图 4 马桑根部拉力峰值与直径关系

由图 4 可知,马桑根的抗拉力随着直径增大而增大。抗拉力峰值最大为 59.3 N,最小为 9.7 N。分别采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $F=47.083\text{Ln}(D)+18.239, R^2=0.9687$; $F=13.258D^{2.2194}, R^2=0.9382$ 。

马桑根部抗拉强度与直径的关系,如图 5 所示。

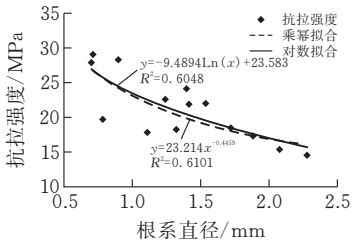


图 5 马桑根部抗拉强度与直径关系

由图 5 可以看出,随着根的直径的增加,抗拉强度有逐渐减小的趋势,最大抗拉强度为 29.3 MPa,

最小抗拉强度为 14.5 MPa,平均抗拉强度为 21.4 MPa。采用对数函数对曲线进行拟合,得到拟合函数与相关系数为: $p=-9.4894\text{Ln}(D)+23.583, R^2=0.6048$; $p=23.214D^{-0.4459}, R^2=0.6101$ 。

2.3 小蜡

小蜡为灌木,根系发达。共截取 15 段根进行抗拉试验,通过试验得到小蜡根的拉力峰值,并利用式(1)换算成根的抗拉强度。不同直径时,根的拉力峰值和抗拉强度分别绘于图 6 和图 7 中。

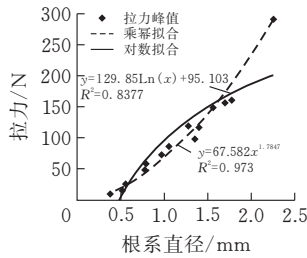


图 6 小蜡根部拉力峰值与直径关系

由图 6 可知,小蜡根的拉力峰值随着直径增大而增加,最大抗拉力为 290 N,最小为 10 N。分别采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $F=129.85\text{Ln}(D)+95.103, R^2=0.8377$; $F=67.582D^{1.7847}, R^2=0.973$ 。

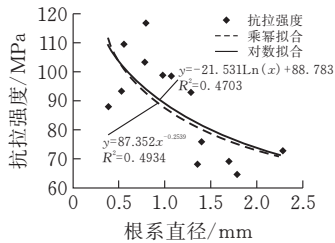


图 7 小蜡根部抗拉强度与直径关系

由图 7 可以看出,随着直径的增加,根的抗拉强度整体上呈减小的趋势,最大抗拉强度为 116.9 MPa,最小抗拉强度为 64.7 MPa,平均抗拉强度为 88.6 MPa。采用对数函数对曲线进行拟合,得到拟合函数与相关系数为: $p=-21.531\text{Ln}(D)+88.783, R^2=0.4703$; $p=87.352D^{-0.2539}, R^2=0.4934$ 。拟合曲线拟合精度较低,不能完全反映小蜡根系强度与直径的关系,只能在一定程度上说明其强度变化趋势。

2.4 山麻杆

山麻杆为草本,根系发达。通过试验得到小蜡根的拉力峰值,并利用式(1)换算成根的抗拉强度。不同直径时,根的拉力峰值和抗拉强度分别绘于图 8 和图 9 中。

由图 8 可知,山麻杆根的拉力峰值随着直径增大而增加,最大抗拉力为 483.0 N,最小为 10 N,采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟

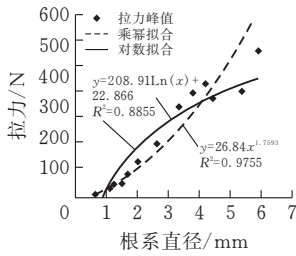


图 8 山麻杆根部拉力峰值与直径关系曲线

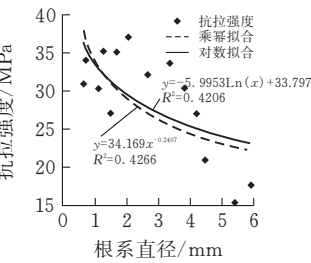


图 9 山麻杆根部抗拉强度与直径关系

由图 9 可知,随着直径的增加,根的抗拉强度整体呈减小的趋势。最大抗拉强度为 37.1 MPa,最小抗拉强度为 15.4 MPa,平均抗拉强度为 28.9 MPa。采用对数函数对曲线进行拟合,得到拟合函数与相关系数为: $p = -5.9953\text{Ln}(D) + 33.797, R^2 = 0.4206$; $p = 34.169D^{-0.2407}, R^2 = 0.4266$ 。

2.5 野漆树

截取 15 段野漆树的根进行抗拉试验,通过试验得到野漆树根的拉力峰值,并利用式(1)换算成根的抗拉强度。不同直径时,根的拉力峰值和抗拉强度分别绘于图 10 和图 11 中。

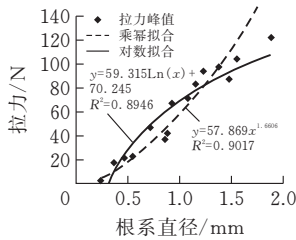


图 10 野漆树根部拉力峰值与直径关系

由图 10 可知,野漆树根的拉力峰值随着直径增加而增加,试验中其达到的最大抗拉力为 215.0 N,最小为 5.8 N,采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $F = 59.315\text{Ln}(D) + 70.245, R^2 = 0.8946$; $F = 57.869D^{1.6606}, R^2 = 0.9017$ 。

由图 11 可以看出,野漆树抗拉强度分布没有明显规律。最大抗拉强度为 84.87 MPa,最小抗拉强度为 22.05 MPa,平均抗拉强度为 50.21 MPa。采用对数函数对曲线进行拟合,得到拟合函数与相关系数为: $p = -20.666\text{Ln}(D) + 49.769, R^2 = 0.7414$;

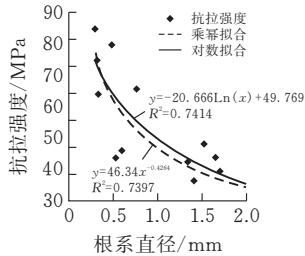


图 11 野漆树根部抗拉强度与直径关系

$p = 46.34D^{-0.4264}, R^2 = 0.7397$ 。

2.6 刺槐

截取 15 段刺槐的根进行抗拉试验,通过试验得到刺槐树根的拉力峰值,并利用式(1)换算成根的抗拉强度。不同直径时,根的拉力峰值和抗拉强度分别绘于图 12 和图 13 中。

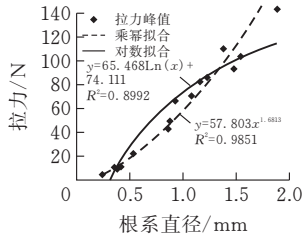


图 12 刺槐根部峰值拉力与直径关系

由图 12 可知,刺槐根的抗拉力基本随着直径增加而增加,试验中达到的最大抗拉力为 121.7 N,最小为 2.4 N。采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $F = 65.468\text{Ln}(D) + 74.111, R^2 = 0.8992$; $F = 57.803D^{1.6813}, R^2 = 0.9815$ 。

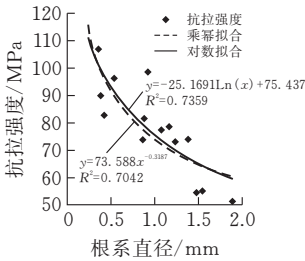


图 13 刺槐抗拉强度与直径关系

由图 13 可以看出,刺槐根的抗拉强度随着直径增加而降低。最大抗拉强度为 166.01 MPa,最小抗拉强度为 43.37 MPa,平均抗拉强度为 83.19 MPa。采用对数函数对曲线进行拟合,得到拟合函数与相关系数为: $p = -25.169\text{Ln}(D) + 75.437, R^2 = 0.7359$; $p = 73.588D^{-0.3187}, R^2 = 0.7042$ 。

2.7 苔草

苔草属于草本植物,根部直径较小,共截取 15 段根进行抗拉试验,通过试验得到苔草根的拉力峰值,利用式(1)换算成根的抗拉强度。苔草根部的拉力峰值最大为 9.2 N,最小为 1.7 N。其根部拉力峰值与根系直径关系如图 14 所示。

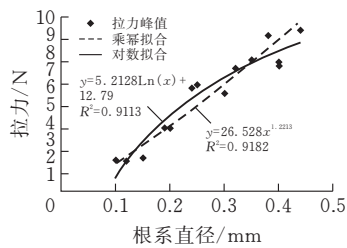


图 14 苔草根部分力峰值与直径关系

苔草根的拉力峰值随根系直径增大而增大,分别采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $F=5.2128\text{Ln}(D)+12.79$, $R^2=0.9113$; $F=26.528D^{1.2213}$, $R^2=0.9182$ 。拟合曲线的相关系数均高于 0.9,苔草根的拉力峰值与其直径之间有较好的函数关系(图 14)。

建立苔草根部分抗拉强度与根系直径的关系,如图 15 所示。

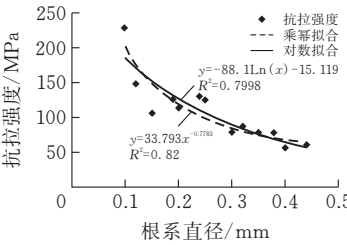


图 15 苔草根部分抗拉强度与直径关系

由图 15 可以看出,随着根直径的增加,抗拉强度逐渐减小。试验样本所得苔草根最大抗拉强度为 229.2 MPa,最小抗拉强度为 57.3 MPa,平均抗拉强度为 107.7 MPa。采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $p=-88.1\text{Ln}(D)-15.119$, $R^2=0.7998$; $p=33.793D^{-0.7785}$, $R^2=0.82$ 。

2.8 野艾蒿

野艾蒿属于草本植物,根直径较小,共截取 15 段根进行抗拉试验。通过试验得到野艾蒿根的极限抗拉力峰值,利用式(1)换算成根的抗拉强度。野艾蒿根部拉力峰值与根系直径关系如图 16 所示。

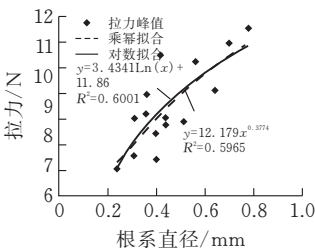


图 16 野艾蒿根部拉力峰值与直径关系

由图 16 可知,野艾蒿根的拉力峰值随根系直径增大而增大,抗拉力峰值最大为 11.6 N,最小为 6.9 N。分别采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $F=3.434\text{Ln}(D)+11.86$, $R^2=0.6001$; $F=12.179D^{0.3774}$, $R^2=0.5965$ 。

建立野艾蒿根部抗拉强度与根系直径的关系,如图 17 所示。

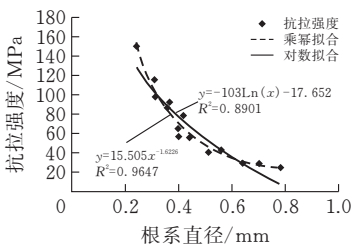


图 17 野艾蒿根部强度与直径关系

由图 17 可以看出,随着野艾蒿根部直径的增加,抗拉强度不断减小。最大抗拉强度为 150 MPa,最小抗拉强度为 24.3 MPa,平均抗拉强度为 67.8 MPa。采用对数函数和幂函数对测试结果进行拟合,得到拟合函数与相关系数分别为: $p=-103\text{Ln}(D)-17.652$, $R^2=0.8901$; $p=15.505D^{-1.6225}$, $R^2=0.9647$ 。

3 试验结果分析

将所述的 8 种植物根系的平均直径、拉力峰值与抗拉强度最大和最小值、平均抗拉强度、拟合函数及相关系数列于表 2 中。

表 2 试验植物根的各指标比较

| 植物种类 | 植物名称 | 根系平均直径/mm | 根系抗拉力 | | | 根系抗拉强度 | | |
|------|------|-----------|------------------|-------------------------------|--------|------------------|---------|--------------------------------|
| | | | 峰值/N | 拟合曲线 | 相关系数/R | 峰值/MPa | 平均值/MPa | 拟合曲线 |
| 灌木 | 多花木兰 | 1.04 | $F_{\max}=121.5$ | $F=34.513\text{Ln}(D)+51$ | 0.53 | $p_{\max}=150.3$ | 63.1 | $p=-40.292\text{Ln}(D)+56.245$ |
| | | | $F_{\min}=3.0$ | $F=36.343D^{1.3597}$ | 0.82 | $p_{\min}=16.2$ | | $p=46.271D^{-0.6404}$ |
| | 马桑 | 1.40 | $F_{\max}=59.3$ | $F=47.083\text{Ln}(D)+18.239$ | 0.97 | $p_{\max}=29.3$ | 21.4 | $p=-9.4894\text{Ln}(D)+23.583$ |
| | | | $F_{\min}=9.7$ | $F=13.258D^{2.2194}$ | 0.94 | $p_{\min}=14.5$ | | $p=23.214D^{-0.4459}$ |
| | 小蜡 | 0.96 | $F_{\max}=290.0$ | $F=129.85\text{Ln}(D)+95.103$ | 0.84 | $p_{\max}=116.9$ | 88.6 | $p=-21.531\text{Ln}(D)+88.783$ |
| | | | $F_{\min}=10.0$ | $F=67.582D^{1.7847}$ | 0.98 | $p_{\min}=64.7$ | | $p=87.352D^{-0.2539}$ |
| | 山麻杆 | 2.45 | $F_{\max}=483.0$ | $F=208.9\text{Ln}(D)+22.866$ | 0.89 | $p_{\max}=37.1$ | 28.9 | $p=-5.9953\text{Ln}(D)+33.797$ |
| | | | $F_{\min}=10.0$ | $F=26.84D^{0.2407}$ | 0.43 | $p_{\min}=15.4$ | | $p=34.169D^{-0.2407}$ |

续表 2 试验植物根的各指标比较

| 植物种类 | 植物名称 | 根系平均直径/mm | 根系抗拉力 | | | 根系抗拉强度 | | | |
|------|------|-----------|------------------|-------------------------|--------|------------------|---------|--------------------------|--------|
| | | | 峰值/N | 拟合曲线 | 相关系数/R | 峰值/MPa | 平均值/MPa | 拟合曲线 | 相关系数/R |
| 草本 | 苔草 | 0.36 | $F_{\max}=9.2$ | $F=5.2128\ln(D)+12.79$ | 0.92 | $p_{\max}=229.2$ | 107.7 | $p=-88.1\ln(D)-15.119$ | 0.80 |
| | | | $F_{\min}=1.7$ | $F=26.528D^{1.2213}$ | 0.92 | $p_{\min}=57.3$ | | $p=33.793D^{-0.7785}$ | 0.82 |
| | 野艾蒿 | 0.57 | $F_{\max}=11.6$ | $F=3.434\ln(D)+11.86$ | 0.61 | $p_{\max}=150.0$ | 67.8 | $p=-103\ln(D)-17.652$ | 0.90 |
| | | | $F_{\min}=6.9$ | $F=12.179D^{0.3774}$ | 0.60 | $p_{\min}=24.3$ | | $p=15.505D^{-1.6225}$ | 0.97 |
| 乔木 | 野漆树 | 1.21 | $F_{\max}=215.0$ | $F=59.315\ln(D)+70.245$ | 0.90 | $p_{\max}=84.9$ | 50.2 | $p=-20.666\ln(D)+49.769$ | 0.75 |
| | | | $F_{\min}=5.8$ | $F=57.869D^{1.6606}$ | 0.91 | $p_{\min}=22.1$ | | $p=46.34D^{-0.4264}$ | 0.74 |
| | 刺槐 | 0.74 | $F_{\max}=121.7$ | $F=65.468\ln(D)+74.111$ | 0.90 | $p_{\max}=166.0$ | 83.2 | $p=-25.169\ln(D)+75.437$ | 0.71 |
| | | | $F_{\min}=2.4$ | $F=57.803D^{1.6813}$ | 0.99 | $p_{\min}=43.4$ | | $p=73.588D^{-0.3187}$ | 0.74 |

4 结论

从表 2 来看,可以得到以下结论:

1)植物根系的拉力峰值随直径的增加而增加;除马桑、野漆树外,其他植物根系的抗拉强度随着直径的增加而降低。

2)植物根系的抗拉强度与直径之间基本满足对数函数和幂函数关系,即 $p=A\ln(D)+B$;或 $p=AD^B$ (A、B 为常数)。

3)乔、灌、草本植物根的抗拉强度比较接近,其中草本根系平均抗拉强度最大,灌木根系平均抗拉强度最小,基本排序为:草本(87.75 MPa)>乔木(66.7 MPa)>灌木(50.5 MPa)。

[参 考 文 献]

[1] 王萍花,陈丽华,冀晓东,等. 4 种常见乔木单根拉伸的应力应变曲线分析[J]. 水土保持通报, 2012,32(3): 17-22.

[2] Pollen N, Simon A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. Water Resour Res 2005, 41: 1-11.

[3] 周跃,张军,骆华松,等. 松属、青冈属乔木侧根 的强度在防护林固土护坡作用中的意义[J]. 植物生态学报, 2001,25(1):105-109.

[4] Chiara M, Bischetti G B, Francesco G. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species[J]. Plant and Soil, 2005, 278: 23-32.

[5] Chi L, Tessier S, Mckyes E, LagueÈ C. Modelling mechanical behaviour of agricultural soils[J]. Am. Soc. Agric. Eng,1993,36(6):1563-1570.

[6] 阿部和时,岩元贤. 用树木根系的抗拉强度测定根系固定坡面的作用[J].水土保持科技情报,1992(4): 53-57,35.

[7] 野久田稔郎,林拙郎. 由根系抗拉强度推算其固坡效

果[J].水土保持科技情报,1997(1):25-28.

[8] 杨维西,黄治江. 黄土高原九个水土保持树种根的抗拉力[J].中国水土保持,1988(9):47-49.

[9] 张建军,贺康宁,朱金兆. 晋西黄土区水土保持林林冠截留的研究[J].北京林业大学学报,1995, 17(2): 27-31.

[10] 封福记. 受损河岸生态系统生态修复与重建研究[D]. 长春:东北师范大学,2005.

[11] 李会科,王忠林,贺秀贤. 地埋花椒林根系分布及力学强度测定[J].水土保持研究,2000, 7(1):38-41.

[12] 杨永红,刘淑珍,王成华,等. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究[J].水土保持研究,2007,14(1): 138-140.

[13] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy) [J]. Geomorphology, 2007, 87(4):268-283.

[14] Norris J E. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in southern england[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1-2):43-53.

[15] Baets S D, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008, 305(1-2):207-226.

[16] 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.

[17] 程洪,张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J].水土保持通报,2002,22(5): 20-23.

[18] 赵丽兵,张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J].农业工程学报,2007,23(9): 7-12.

[19] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等. 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.

[20] 田佳,刘耀辉. 华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究[J].中国水土保持,2007(10):34-36.