

针叶与阔叶树根系对土壤抗剪强度及坡体稳定性的影响

李云鹏, 张会兰, 王玉杰, 王云琦, 朱锦奇, 刘勇

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 重庆缙云山地处三峡库区, 是国家重点自然保护区。由于地势特点, 坡面极易发生土壤侵蚀及浅层滑坡, 因此, 在不破坏原有生态环境的前提下, 有效防止灾害发生是该地区的重点防治工作。选取了同种根构型的针叶树种(马尾松 *Pinus massoniana* Lamb)和阔叶树种(四川大头茶 *Gordonia acuminata*), 比较其提高土壤抗剪强度的作用强弱, 并分析根面积比率、剪切带根系径级比、根系位置范围, 以及根系角度等因素对土壤抗剪强度的影响。结果表明, 针叶树种对土壤抗剪强度增强效果强于阔叶树种; 针叶树种根系平均抗拉强度较大, 其对土壤抗剪强度的增量更大; 针叶树种根系分布范围较广且存在更多与剪切方向成 60° 的根系, 表现出更好的固坡作用; 根面积比率对土壤抗剪强度影响不明显。

关键词: 根构型; 根系分布; 土壤抗剪强度; 边坡稳定

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0040-06

中图分类号: S714

Effects of Acerola and Broad Leaved Tree Roots on Soil Shear Strength and Slope Stability

LI Yun-peng, ZHANG Hui-lan, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, ZHU Jin-qi, LIU Yong

(Department of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Located in the Three Gorges Reservoir area, the Jinyun Mountains of Chongqing City is the national natural reserve. Due to the topographic characteristics, soil erosion and shallow landslides are easy to occur on slope. Therefore, effective disaster prevention without destroying original ecological environment is the key control work in this region. *Pinus massoniana* Lamb as Coniferous species and *Gordonia acuminata* as broad-leaf species, with the same root architecture, were selected, and their relative effects on the increment of soil shear strength were compared. Effects of crucial factors, e. g., root area ratio, shear zone root diameter level, spectrum of root position and angle distribution, on the shear strength were further discussed. Results show that the soil reinforcement effect for coniferous species was greater than those for broad-leaf species. The greater averaged tensile strength of coniferous tree led to a larger increment of soil shear strength. The coniferous species, presenting better steadiness on slope, had a larger spectrum of root position distribution and a greater amount of roots at an angle of 60° with shear direction. Effect of the root area ratio to soil shear strength is not notable.

Keywords: root architecture; root distribution; soil shear strength; slope stability

随着社会的发展,越来越多的人开始关注环境问题,人们在发展的同时,通过工程手段改善周边的环境,防止灾害的发生。利用植物以及它们的根系来防止土壤侵蚀以及浅层滑坡的发生已经在世界范围内被认为是一种可行的生态工程方法。而对于植物来说,事实上对斜坡稳定性的增强作用主要是通过根系实现的^[1]。研究表明,由植物根系导致的土壤抗剪强度增加的原因不仅仅来源于根系特性(根系自身强度

和根土之间相互作用),大部分还是由于根系在土壤中的形态特性以及空间分布的作用^[2]。除此之外,根系对土壤的影响以及根系自身也是影响土壤抗剪强度的重要因素,例如土壤含水量、土壤紧实度、根系长度密度、根面积比率、根锥形和根系分枝模式等^[3]。

关于不同植物根系对土壤抗剪强度的影响国内外研究比较多,杨亚川等^[4]以草本植物为研究对象,最早提出了“土壤—根系复合体”这一概念,随着研究

收稿日期:2013-02-09

修回日期:2013-04-26

资助项目:中央高校基本科研业务费专项基金项目“水土保持生态工程坡面稳定性机理研究”(TD2011-01)

作者简介:李云鹏(1989—),男(汉族),河北省承德县人,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:liyunpengyouxiang@126.com。

通信作者:张会兰(1984—),女(汉族),河北省保定市人,博士,讲师,主要从事生态水文研究。E-mail:wangyunqi@bjfu.edu.cn。

的深入,封金材等^[5]在根系固坡研究中提出了根面积比率这一概念。而后,由于学者研究目标集中在根系整体结构上,对根系整体形态进行分类,例如宋维峰^[6]和刘秀萍等^[7]的研究中,将油松认定为垂直根结构,刺槐认定为水平根结构。胡其志等^[8]进而通过对根土复合体进行直接剪切实验,研究不同根系指标对根土复合体抗剪强度的影响。国外对根系护坡机理的研究更侧重于土壤与根系的综合考虑,如 Docker 等^[9]通过研究不同树种根面积比率的差别来评价植物种类对土壤抗剪强度的影响,Norris 等^[10]将根系整体结构作为研究对象来探讨植物种类不同的影响,Stokes 等^[11]对不同植物根系抵抗浅层滑坡的过程做了细致的分析。

重庆缙云山地处三峡库区附近,由于特殊的地理位置,其坡面极易发生土壤侵蚀以及浅层滑坡,所以,如何在不破坏原有生态环境的前提下,有效防止灾害的发生是该地区防治的重点。本文通过对该地区同种根构型的针叶树种和阔叶树种根系结构中的一些重要指标的对比分析,进一步探讨植物根系稳定坡体的作用机理,以期缙云山边坡稳定提供科学支撑。

1 研究区概况

试验点位于重庆市北碚区缙云山,属典型的亚热带季风湿润气候,年平均气温 13.6℃,年平均降水量 1 783.8 mm,最高海拔 951 m。本试验所采样本位于缙云山南部,平均坡度在 20°左右。研究区域内分布有大面积的常绿阔叶林,乔木以马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)和四川大头茶(*Gordonia acuminata*)为主,同时伴有多种灌木及草本。

1.1 树种

试验所选取的两种树种为马尾松和四川大头茶。前者为针叶树种,后者为阔叶树种,皆为缙云山常见优势树种,每种树种采集 3 个样本。马尾松和四川大头茶是直根性树种,主根粗长,侧须根细少。按照 Yen^[12]关于根结构分类标准分类,这两种树种属于 VH 型,即主根延伸长,水平根较少,倾斜根较多。

1.2 土壤

为了保证在剪切过程中得到有效的试验结果,本次直剪试验土壤取自深度为 200—300 mm 的土层。人工剔除土壤中含有的生物及杂质后,置于规格为 300 mm×300 mm×200 mm 的直剪盒内,采用 TDR 测定试验土壤的含水率,并采用人工加水的方法保证试验过程中重塑土的含水率维持在一定范围,试验中的土壤容重为 $1.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,土壤含水率为 21.3%。

1.3 仪器设备

图 1 所示的是试验所用的大型自制直剪盒简易结构图,剪切装置主要由上下直剪盒、上盒盖、挡板、导轨、拉力计和支架组成,直剪盒尺寸为 300 mm×300 mm×200 mm,其中上盒高为 100 mm,下盒为 100 mm,盒体材料为 10 mm 厚度的 PVC 板,盒体内部抛光打磨。下直剪盒通过螺栓与钢底板固定在地面,试验过程中,下直剪盒始终固定不动。下直剪盒与上直剪盒之间在滑动方向的盒壁上安放有钢珠,因此自由滑动时摩擦力很小可忽略不计。

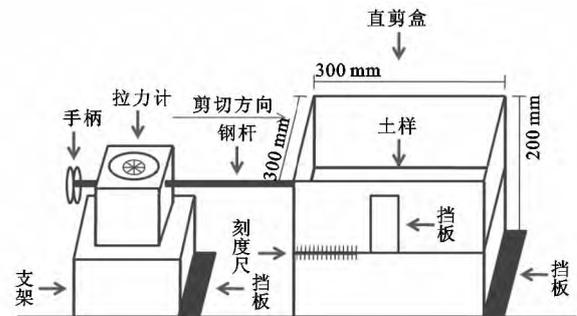


图 1 大型自制直剪盒结构

1.4 试验方法

1.4.1 直剪盒操作方法 在试验开始前,先将直剪盒上下对齐并将钢杆轻轻地靠在上盒中部表面,同时,调整拉力计读数使其归零。然后,将已经处理完毕的植物根系放置于土样中(在放入土样前,需要对根系进行拍照,拍照的方向需要与剪切方向一致),并人工压实表面土壤,使根系充分与土样接触。之后,顺时针旋转手柄,转速约为 5 s/圈(每圈的水平位移为 2 mm),在记下每圈拉力计读数的同时通过刻度尺记录上下直剪盒的位移差。规定当剪切位移到 26 mm 时停止试验。为了保证试验数据的准确,同时测量上下直剪盒的位移差以便校验数据。

1.4.2 树根样本采取原则 试验所选取的两种植物皆是研究区常见优势树种,为了最大限度减小植物之间由于生长所造成的相互影响,在选择样本时尽量选择周围 300 mm 内无其他植物生长的树木,并选择生长状况良好的样本。由于试验所用样本皆是幼小树木,所以无法确定树龄,为了减小所选取树种间的生长差异,故选取地上直径为 20 mm 左右的幼树,并且保证所有样本尽可能分布在同一区域内。同时,为了防止在采集样本根系时对根系的损害,故采取人工挖掘的方式最大限度地保证根系的整体结构,开挖深度为 600 mm。待割除茎基部以上部分并用手将附着于根系上的块土去除后,装于黑色塑料袋中带回实验室进行后续实验。

1.5 数据分析

运用 Excel 2007 进行数据的线性分析及比较, 借助 SPSS 18.0 处理数据。

2 结果与分析

2.1 植物根系对坡体稳定性的作用

2.1.1 根系抗剪强度特征 图 2 表示的是两种植物根系与土壤整体抗剪强度与位移的关系曲线, 同时测量了素土的抗剪强度作为对照, 素土的抗剪强度为 1.93 kPa。

结合图 2 可知, 两种植物都能够很好地提高土壤的抗剪强度, 但是两种植物根系与土壤整体抗剪强度与位移的关系因植物种类的不同而不同, 这表现在发生完全剪切破坏的位移量和所能承受的最大抗剪能力两个方面。针叶树种发生剪切破坏时位移量为 10 mm, 最大抗剪强度为 6.67 kPa; 阔叶树种发生剪

切破坏时的位移量为 12 mm, 最大抗剪强度为 6.11 kPa。两种树种根系抗剪强度取平均值后其抗剪强度的大小关系为针叶树种(6.17 kPa) > 阔叶树种(5.61 kPa), 这与最大值的大小关系相同。由结果可知, 对于针叶树种根系, 在发生剪切破坏的时候, 土壤自身易先被破坏, 之后完全由植物根系承担主要的抗剪能力; 对于阔叶树种根系, 其与土壤的结合作用要强于针叶树种根系, 这表现在增加了土壤自身发生剪切破坏的位移量, 而在这之后由根系承担的抗剪强度的值却小于针叶树种根系。这可能是由于阔叶树种根系生长较快, 根系中的木质素含量多, 而针叶树种根系由于生长缓慢, 其根系中所含的纤维素较多, 使得阔叶树种根系的抗弯强度要好于针叶树种, 而其抗拉强度却要比针叶树种根系的差。总的来说, 植物根系都增强了土体的抗剪强度, 但是由于根系结构以及生长特性的不同而产生差异。

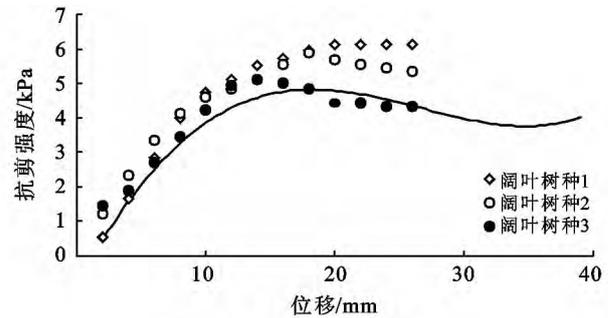
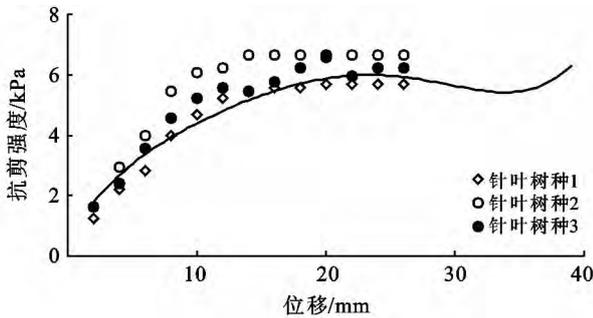


图 2 两种植物根系抗剪强度随剪切位移的变化

注: 每种树种 3 个重复, 图中标记点为两种树种根系抗剪强度最大值。

2.1.2 单根抗拉强度与土壤抗剪强度增量 通过对单根抗拉强度的大小可以间接评价植物根系对土体抗剪强度影响的强弱。Wu 等^[13]以库伦定律为基础提出的根系抗拉强度与土壤抗剪强度增量的关系式如下:

$$S = C + \sigma_N \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

$$S = C + \Delta S + \sigma_N \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

式中: S ——土壤抗剪强度(kPa); C ——土壤黏聚力(kPa); σ_N ——剪切带上的正应力(kPa); φ ——土壤内摩擦角($^\circ$); ΔS ——由根系提供的抗剪强度增量(kPa)。下同。

在 Wu 等的模型中, 对于 ΔS 的取值完全由根系的抗拉强度以及在剪切带上的根面积比率决定:

$$\Delta S = K \cdot T_R \cdot RAR = 1.2 T_R \cdot RAR \quad (3)$$

式中: K ——比例系数; T_R ——根系的抗拉强度(kPa); RAR ——根面积比率(%). 下同。

由于式(3)的使用前提是在发生剪切破坏过程中, 所有植物根系起作用并都被破坏, 故将该式进行

修正, 修正后的公式为:

$$\overline{T_R} = \frac{\overline{\Delta S}}{1.2 \overline{RAR}} = \frac{\overline{S} - S_{\pm}}{1.2 \overline{RAR}} \quad (4)$$

式中: $\overline{T_R}$ ——根系抗拉强度的平均值(kPa); S_{\pm} ——素土的抗剪强度(kPa); \overline{RAR} ——根面积比率的平均值(%).

根据式(4)可求出每种植物根系抗拉强度的平均值如表 1 所示。

表 1 两种植物根系平均抗拉强度

树种	马尾松	四川大头茶
S_{\pm} /kPa	1.93	1.93
ΔS /kPa	4.24	3.68
T_R /MPa	60.40	14.16

由表 1 可以看出, 针叶树种根系抗拉强度的平均值总体要比阔叶树种的大, 这说明尽管阔叶树种在剪切面附近的含根量要比针叶树种多, 但是由于其根系

平均抗拉强度远远小于针叶树种,其根系总的作用效果并没有针叶树种的好。但是仅通过根系平均抗拉强度的比较不能说明根系径级比对土壤抗剪强度影响的原因,因为在其他人的研究中认为根系直径与抗拉强度是成反比例关系的,对于单根来说直径越小,抗拉强度越大。

2.2 根系形态特征对边坡稳定性的影响

2.2.1 根系径级及位置分布特征 图 3 为两种植物在剪切面范围内根系的分布情况。两种植物的小直径根系都比较多,而对于大于 6 mm 的根系在针叶树种中基本不存在,但在阔叶树种根系中却有少量分布,总的含根量也表现为阔叶树种要多于针叶树种,而针叶树种根系分布的范围要比阔叶树种更广,即分布范围越大其抵抗剪切破坏的能力越强,边坡越稳

定;同时,分布范围越大其抵抗剪切破坏的效果越明显。换句话说,在发生剪切破坏的过程中,由于剪力不是在剪切面上处处相等的,在靠近剪切破坏边缘的土壤承受剪切力要大于处于剪切面内部的土壤,而处于剪切破坏边缘的根系自然承担了大部分的剪力,在较小的剪切位移下,表现出较好的抗剪能力。

总的来说,在土体发生剪切破坏的过程中,处于破坏面边缘的土壤或根系才是土体抗剪强度的主要承担者,靠近剪切面的植物根系越多,其抵抗剪切破坏的能力越强。因此,在布置植物措施稳定边坡的过程中,在不考虑高大树木根系深入土壤基岩层中所产生的锚固力作用的前提下,位于浅层的且大范围分布的根系更能保持坡体的稳定性。

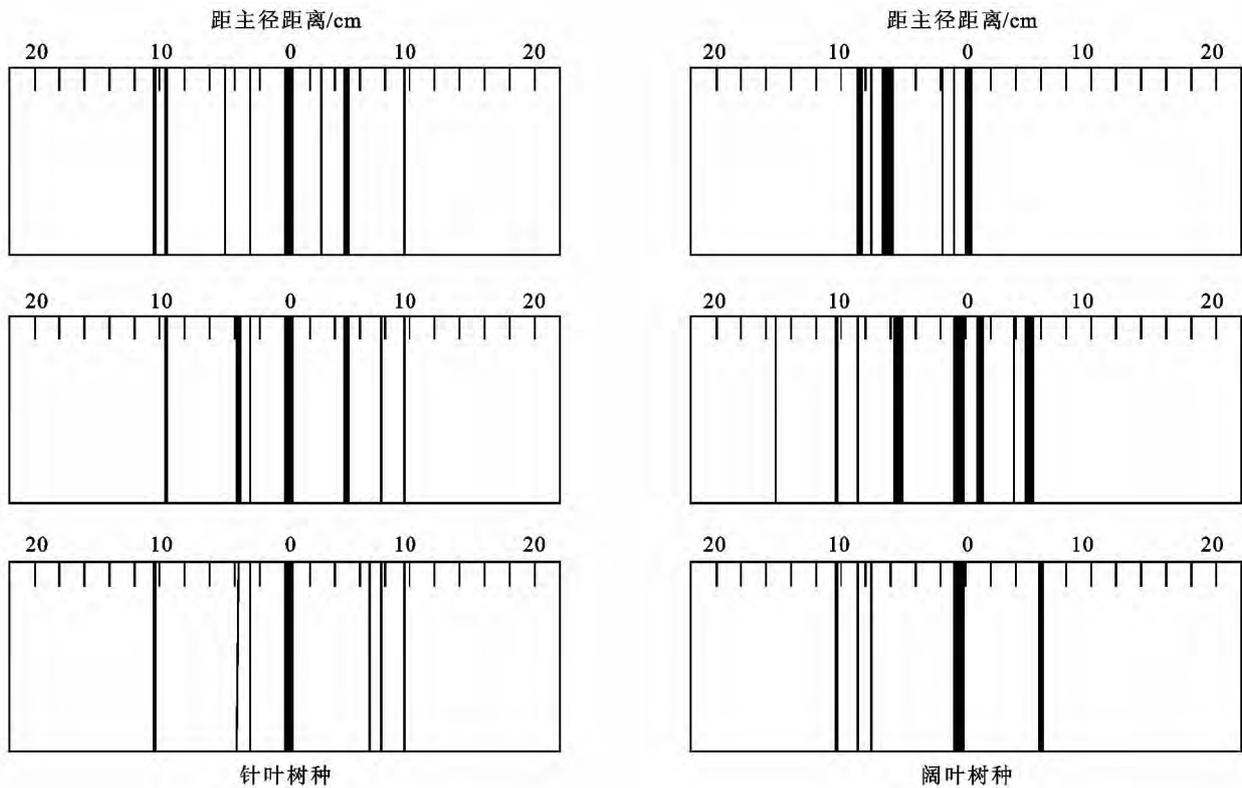


图 3 不同植物根系范围分布

注:各图框内所选取线段宽度分别为 0,0.4,0.8,1.2 和 1.6 cm,分别对应根系直径在 0~2,2~4,4~6,6~8 和 8~10 mm 这 5 种径级,根系分布左右边界为 15 cm。

2.2.2 根系角度分布特征 图 4 为两种植物在剪切面范围内根系与剪切方向的夹角的分布情况。由图 4 可知,针叶树种根系主要分布在 0°~60°,而阔叶树种除了在 0°~30°分布外,还存在一些近乎与剪切面平行的根系。在 Jewell 等^[14]的研究中,通过室内剪切实验得出当土壤中的根系与剪切方向夹角为 60°的时候抵抗土壤剪切破坏的作用最强。对比本试验所得结果可知,处在 60°左右的针叶树种根系较阔叶树种

根系更多,所以表现出更好的抗剪能力。而阔叶树种中存在的与剪切方向平行的根系并未提供抗剪强度的增量,这可能是由于当土壤发生剪切破坏的过程中,水平根系会造成土体的松动,崩坏的土壤自然不能抵挡剪切破坏的发生。在布置植物措施稳定坡体的过程中,植物种植的角度应以坡面成 60°为宜(植物与坡体的逆坡向的夹角),因为这样可以使根系提供

更大的抗剪强度增量,增强土壤的抗剪强度。

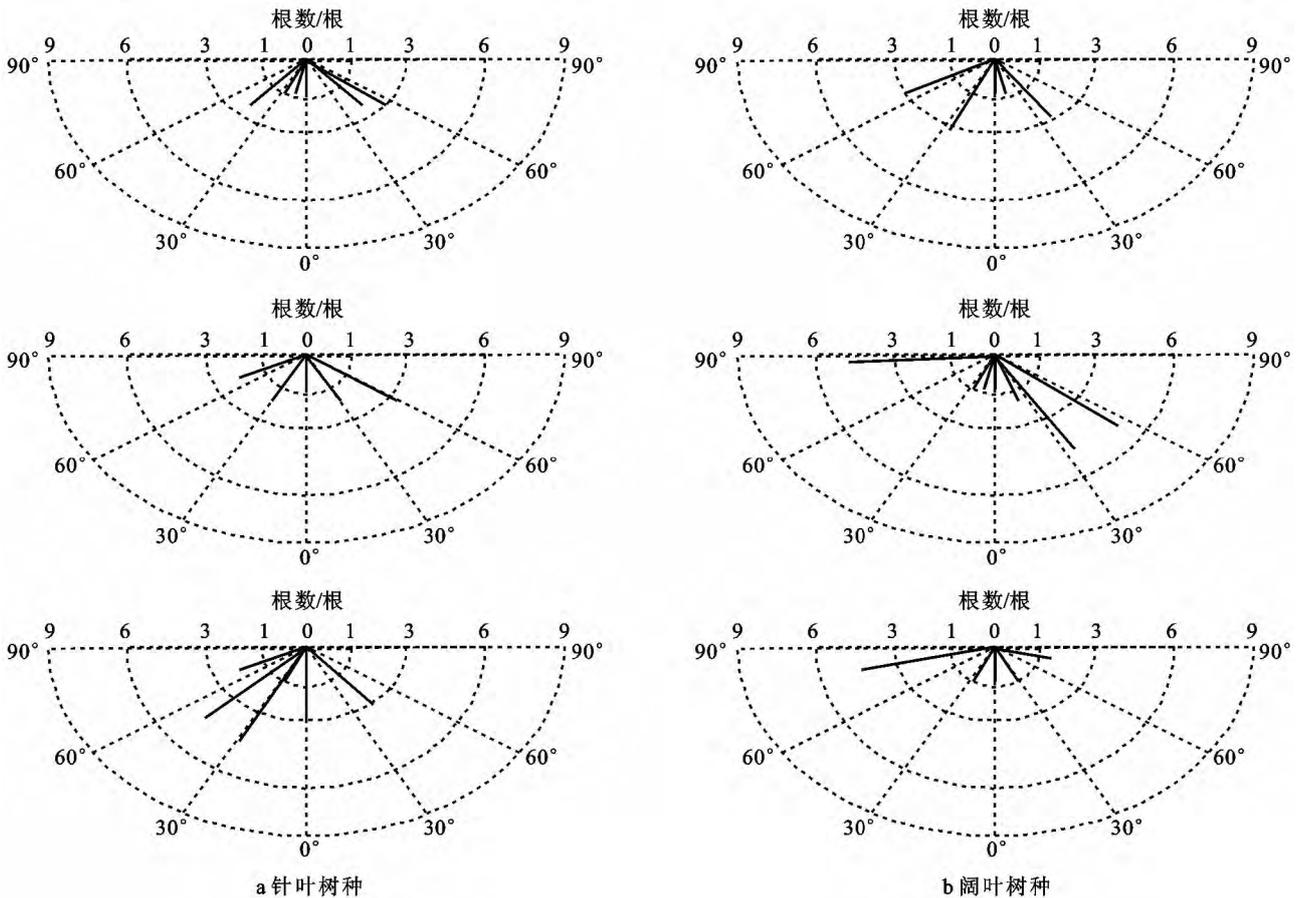


图 4 不同植物根系倾斜角度分布

2.2.3 根面积比率特征 根面积比率的值可以很好地表现剪切面土壤内含根量的比值,值越大,说明处在剪切面上的根系总和的截面积越大。根据试验过程中根系的埋深深度,在试验前通过人工计数的方法将埋深下方 50~150 mm 的根系按照 2 mm 的径级分类计数,超过 10 mm 的直径的根系在计算平均值时取 11 mm 计算。本试验对于根面积比率的测量,采用如下公式计算:

$$\text{RAR} = \sum_{i=1}^N \frac{\pi n_i d_i^2}{4} \quad (5)$$

式中: n_i ——代表 i 径级下的含根量; d —— i 径级下的根的中值直径(mm)。

通过计算可知,根面积比率大小关系为针叶树种(0.005 85%)<阔叶树种(0.021 66%)。而由前面分析可知,植物根系抗剪强度由强到弱的关系恰好与此相反,也就是说在本试验中不能用根面积比率的大小反映植物根系抗剪强度的好坏。植物根系在发生剪切破坏过程中,处于剪切面上的根系并没有全部发挥作用,而在剪切破坏后,处于剪切面上的根系也没有全部断裂,所以用根面积比率来反映植物根系抗剪强

度的好坏是不合适的。对根系整体结构的研究可以发现,对于乔木的幼树来说,根系中存在粗大的主根对整体抗剪强度的增加有很大的作用,其次是处于土壤中的一些倾斜根。至于剪切面附近根系的径级比以及根系的含量对根系抗剪强能力的影响未能体现。

3 讨论

3.1 不同植物种类提高抗剪强度的作用

针叶树种根系提高土体抗剪强度的作用强于阔叶树种根系。姜志强等^[15]将根系分为深粗根和浅细根两种,并认为深粗根体现锚固作用,浅细根体现加筋作用。在营造森林的过程中,最先作用于土壤的植物是草本,之后灌木和乔木开始慢慢生长,在生长前期,幼树对土体的加固作用直接决定着其稳定性,因为当乔木长大之后,其根系深入到岩基层,形成很强的锚固作用,对坡体的稳固作用大大增强。由于研究区域内林下灌木草本稀少,所以乔木根系对土壤的加固作用就显得极为重要。根系整体结构在很大程度上影响着剪切力在土壤中的传递,在剪切过程中,根系整体与土壤的结合可以看作是一连串加强作用的联

合,并且其整体的变形也会有效抵抗剪切破坏。尽管在不同植物中由于根数量以及直径的不同导致结构的不同,但是根系整体的这种作用却是不可忽视的。

3.2 根系分布特征对坡体稳定性的影响

关于植物根系影响坡体稳定性的研究,主要是通过讨论在剪切范围内根系的含量以及径级分布、根面积比率、分布范围和倾斜角度进行分析的。由分析可知,在剪切范围内根系的含量以及径级分布、根面积比率与根系的抗剪能力并没有明显的线性关系,这是因为在对剪切范围内根系的含量以及径级分布的测量中,由于测量方法的局限,导致测量数据不精确。加之环境的异质性,例如土壤容重、土壤含水率、植物间相互影响的作用,都在很大程度上影响着对上述指标的测量。但张飞等^[16]的研究指出,土中根系密度对土体抗剪强度影响很大,一定程度上土中根系密度与抗剪强度呈现正相关关系。而在对根系分布范围和倾斜角度的讨论中,在不考虑其他因素的情况下,可以认为在剪切破坏面附近的植物根系承受更大的剪切破坏力,也就是说,当植物根系在水平方向上的分布越广,横向倾斜角度越接近 60° 的时候,其抵抗剪切破坏的能力越强,坡体越稳定,这与 Jewel 等^[17]的研究一致。在对根系平均抗拉强度以及抗剪强度增量的分析中得出,两者有大的联系,即根系平均抗拉强度越大,其对土壤抗剪强度的增量就越大,坡体抵抗剪切破坏的能力就越强。Genet 等^[18]的研究指出,根系中存在的纤维素是导致根系具有强大抗拉强度的主要因素,而随着植物生长,根系中纤维素含量降低,取而代之的是木质素的积累,导致根系抗拉强度降低。针对于研究区植物根系生长特性,在植物生长早期,针叶树种根系内主要为纤维素,纤维素总体含量越多,根系平均抗拉强度就越大,进而增强土壤的抗剪强度。也就是说在利用植物固坡的措施中,如果需要种植乔木,应以针叶树种为主,因为其能提供更好的抗剪强度。

4 结论

通过对研究区两种植物根系大盒直剪试验以及对根系的含量、径级分布、根面积比率、分布范围和倾斜角度的测量分析,得出两种植物根系抗剪强度强弱关系和主要影响因素。结果表明,针叶树种根系强度大于阔叶树种根系;根系平均抗拉强度越大,它提高土壤抗剪强度的作用就越大,坡体抵抗剪切破坏的能力就越强。在剪切破坏面附近的植物根系承受更大的剪切破坏力,并且在植物中存在越多的与剪切方向成 60° 的根系,其增加土体剪切破坏的能力越强,坡体越稳定。根系的含量以及径级分布、根面积比率与抗

剪强度没有明显的线性关系。

[参 考 文 献]

- [1] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: Practical Guide for Erosion Control[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [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] Normaniza O, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability: Soil water and root profiles[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(1): 90-95.
- [4] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤—草本植被根系复合体抗水蚀温度与抗剪强度的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 1996, 1(2): 31-38.
- [5] 封金财, 王建华. 植物根的存在对边坡稳定性的作用[J]. *华东交通大学学报*, 2003, 20(5): 42-45.
- [6] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系固土作用数值分析[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(S2): 80-84.
- [7] 刘秀萍, 陈丽华, 张心平, 等. 黄土高原造林边坡应力应变特征及其稳定性分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(5): 97-103.
- [8] 胡其志, 周一鹏, 肖本林, 等. 根土复合体的抗剪强度研究[J]. *湖北工业大学学报*, 2011, 26(2): 101-104.
- [9] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species[J]. *Geomorphology*, 2008, 100(3): 401-418.
- [10] Norris J E, Stokes A, Mickovski S B, et al. Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [11] Stokes A, Atger C, Bengough A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. *Plant Soil*, 2009, 324(1/2): 1-30.
- [12] Yen C P. Tree root patterns and erosion control[C]// Jantawat S. Proceedings of the International Workshop on Soil Erosion and its Countermeasures. Soil and Water Conservation Society of Thailand, Bangkok, 1987: 92-111.
- [13] Wu T H, McKinell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [14] Jewell R A, Wroth C P. Direct shear tests on reinforced sand[J]. *Geotechnique*, 1987, 37(1): 53-68.
- [15] 姜志强, 孙树林, 程龙飞. 根系固土作用及植物护坡稳定性分析[J]. *勘察科学技术*, 2005(4): 12-14.
- [16] 张飞, 陈静曦, 陈向波. 边坡生态防护中表层含根系土抗剪试验研究[J]. *土工基础*, 2005, 19(3): 25-27.
- [17] Jewell R A, Wroth C P. Direct shear tests on reinforced sand[J]. *Geotechnique*, 1987, 37(1): 53-68.
- [18] Genet M, Stokes A, Mickovski S B, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. *Plant and Soil*, 2005, 278(1/2): 1-9.