

# 林木根系固土的理论基础

宋维峰<sup>1</sup>, 陈丽华<sup>2</sup>, 刘秀萍<sup>3</sup>

(1. 西南林学院 环境科学与工程系, 云南 昆明 650224; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 3. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 为了探索林木根系的固土作用, 半个多世纪以来许多学者从不同侧面对根系的固土作用进行了大量的研究和探索, 在根系固土理论研究上取得了一定成果。鉴于此, 概述了莫尔—库仑强度理论、加筋理论、锚固理论等根系固土基础理论以及须根理论模型(W 氏模型)、垂直根系木本植物根—土相互作用力学模型、水平根系根—土相互作用力学模型等根系固土的分析模型。依据固土理论, 提出了今后根系固土作用研究重点是根系的分布特征, 根系与土的摩擦特性以及根系的力学性能。

**关键词:** 林木; 根系; 固土; 理论

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)06-0180-70

中图分类号: S157.5

## Review of Theories of Soil Reinforcement by Root System in Forest

SONG WEIFENG<sup>1</sup>, CHEN LIHUA<sup>2</sup>, LIU XIUPING<sup>3</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry College, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China; 3. Research Center for Agricultural Resources, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

**Abstract:** Over the last half century, tremendous theoretical results have been achieved in the study of soil reinforcement by root system in various aspects. This paper focuses on the brief description of the relevant theoretical models of soil reinforcement by root system, including Mohr-Coulomb Strength Theory, Reinforced Theory, and Anchorage Theory, as well as major mathematical models covering Side Roots Theoretical Model(W-Model), Vertical Root-soil Interacting Mechanics Model, and Lateral Root-soil Interacting Mechanics Model. In addition, key study fields are analyzed and recommended pertaining to root distribution, friction of root-soil, and root mechanics.

**Keywords:** forest; roots; soil reinforcement; theory

半个多世纪的根系固土研究在不同侧面对根系的固土作用进行了大量的研究和探索, 取得了一定的成果, 对根系固土的机理有了一定的认识, 形成了林木根系固土的理论基础<sup>[1-11]</sup>。

综合根系的研究成果, 根系的固土作用集中在以下几个方面。(1) 深粗根的锚固作用。林木根系的垂直根系穿过坡体浅层的松散风化层, 锚固到深处较稳定的土层上, 起到锚固体系的作用。深粗根具有一定的刚度, 周围覆盖土体具有移动趋势时, 将产生一定的摩擦力, 此时深粗根系类似于锚杆系统, 锚固在土层中的根系可起到抗滑桩和扶壁的作用, 以抵抗坡体产生的剪应力<sup>[12-17]</sup>。(2) 浅细根的加筋作用。林木根系在土中盘根错节, 使边坡土体成为土与树根的复合材料, 根系可视为带预应力的三维加筋材料, 使

土体强度提高。根通过把土层中的剪应力转化成根的拉应力, 从而增强了土的抗剪强度<sup>[18-19]</sup>。(3) 降低坡体孔隙水压力。边坡的失稳与边坡孔隙水压力的大小密切相关, 树木通过吸收和蒸腾土体内水分, 降低土体的孔隙水压力, 提高土体的抗剪强度, 有利于边坡体的稳定<sup>[20]</sup>。(4) 降雨截留, 消弱溅蚀。在降雨的过程中, 一部分降雨在到达坡面之前就被植被截留, 抑制地表径流并削弱雨滴溅蚀, 从而能控制土粒的流失。植被调节近地面气候、地表和地下水文状况, 使植被生长地区的水循环途径发生一定的变化, 因而影响了侵蚀过程。

林木根系固土的这一系列作用, 集中建立在土的强度理论, 也就是莫尔—库仑强度理论之上的。在一定应力范围内, 莫尔—库仑强度理论可表示为

$$\tau_r = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中:  $\tau_r$ ——土的剪切破坏强度(kPa);  $c$ ——土的黏聚力(kPa);  $\sigma$ ——土的正压力(kPa);  $\varphi$ ——土的内摩擦角( $^\circ$ )。

从式(1)中可见, 土的强度由两部分组成, 前者为黏聚强度; 后者为摩擦强度, 其强度是由土颗粒间的相互移动和咬合作用而形成的摩擦阻力所产生<sup>[20]</sup>。

林木根系固土的基本理论依据就是林木根系的存在, 通过其加筋作用、锚固作用、蒸腾降低孔压的作用而提高了土体的抗剪强度, 表现为根系的存在提高土体的黏聚强度以及根系与土体之间的摩擦力, 提高了土体的摩擦强度。

对于边坡而言, 由于根系的弹性模量远比土层为大, 因此在土层变形过程中两者产生的变形差就形成了对土层的约束力。这种约束力是通过垂直根系土体之间的剪应力来传递的。

如果是浅层滑动, 滑裂面通过垂直根系, 那么垂直根系不但在它和孔壁之间存在剪应力来阻止边坡产生变形, 还会产生由于土层错动而引起的垂直根系自身的剪应力。这样垂直根系可能会对阻止边坡滑动起到更大的作用。

如果滑裂面较深, 超出了土层中垂直根系的深度, 则垂直根系不能真正阻止边坡的下滑。

对应于根系的固土作用, 形成了根系固土的理论, 主要是加筋理论、锚固理论。

需要说明的是, 林木根系的固土理论, 主要侧重于根系对土体斜坡稳定性的影响, 而对根系是否提高土壤抵抗径流冲刷作用没有深入研究。

## 1 加筋理论

在工程领域, 1965年法国工程师维达尔(Henri Vidal)提出了加筋土的设计理论, 并成功地修建了第一座现代化的加筋土挡墙<sup>[21-22]</sup>。其后, 国内外的许多科学家对加筋土的机理做了大量的试验和研究, 使加筋土技术上升到一定的理论高度。

所谓加筋土<sup>[22]</sup>就是由一层或多层水平加筋构件与填土交替铺设而成的一种复合体。土体具有一定的抗压和抗剪切强度, 而其抗拉强度很低。在土内掺入适量的加强筋, 可以改善土的强度和变形特性, 形成加筋土(reinforced earth)。根系可以看作是天然的加筋材料, 根土复合体可以看作是加筋土, 只是林木根系的分布要比工程中加筋材料的分布复杂的多。林木根系可分为垂直根和侧根, 垂直根主要起锚固作用, 而侧根主要起加筋的作用。所以加筋土的作用机理与林木根系侧根的固土机理有相似之处<sup>[23]</sup>。

根土复合体是由土和根系共同组成的复合体, 这一复合体改变了土的力学性能, 提高了土体的抗剪强度。根据加筋理论, 根系提高土体强度的根本原因在于土体与根系在变形模量方面存在着巨大的差异, 因而它们在共同变形过程中, 存在相互错动的趋势。这种错动被根系与土体之间存在的摩阻联结产生的摩阻力所抵抗, 从而使根系承受很大拉力, 同时根系之间的土体侧向约束力提高了根土复合体的强度。维达尔(H. Vidal)、斯奇洛瑟(F. Schlosser)、姆克冈(A. McGwon)以及杨果林等人的加筋土试验证实了这一点<sup>[24-25]</sup>。

### 1.1 根土复合体的强度特性及破坏模式

土单元体在大主应力作用下产生压缩变形, 侧向发生膨胀, 随着荷载增大, 变形发展越来越大, 直到破坏。根土复合单元体通过根与土颗粒之间的摩擦作用, 将侧向变形引起的拉力传递给根, 由于根的拉伸模量较大, 因此, 根土复合单元体侧向变形受到了限制。

根土复合体在外荷作用下的破坏模式总体上可概括为根土复合体整体发生剪切破坏和根与土发生接触面剪切破坏两种方式。前者包含了整体剪切破坏时的根系拉断, 后者包含了根系拔出破坏。

### 1.2 加根效果的分析模式

有根系的土体作为复合结构与原土体相比, 不仅提高了内聚力, 而且提高了内摩擦角, 改良了土的力学性质。目前, 有两种观点揭示根土复合体的这种力学特性变化机理, 它们是摩擦加筋原理、准黏聚力原理<sup>[22]</sup>。摩擦加筋原理认为<sup>[22-26]</sup>, 根系是土体中的受拉构件, 土与根系间的摩阻作用既可将根系的拉力传递到土中, 又可阻止土层的侧向变形发展。即当土层相对根系运动时, 接触面的摩阻力阻止这种运动; 当根系受拉力作用时, 接触面上的摩阻力又阻止根系拔出。因此, 只要根系具有足够的强度, 并与土产生足够的摩阻力, 则根土复合体就可保持稳定。实际上是土—根—土相互作用原理。

准黏聚力原理认为, 根系与土体的共同作用包括土体本身的抗剪力, 根系与根系的摩阻力及根系的抗拉力, 它们使得根土复合体的强度明显提高。在侧限应力给定的条件下, 破坏时加于根土单元的轴向应力大于素土单元的轴向应力。实际上是等效材料原理<sup>[27-28]</sup>。

### 1.3 似(准)黏聚力理论

根土复合体可以看作是各向异性的复合材料, 由于树木根系的弹性模量远大于土体, 在这种情况下, 根系与土的共同作用, 包括土的抗剪力、土与根系的摩擦阻力及根系的抗拉力, 使得带有根系的土体的强度明显提高。根土复合体的基本应力状态如图1所

示。在没有根系的土体中,在竖向应力  $\sigma_1$  的作用下,土体产生竖向压缩变形。随着竖向应力的加大,压缩变形和侧向变形也随之加大,直到破坏(如图 1a 所示)。如果在土体中设置了水平方向的根系,则在同样的竖向应力  $\sigma_1$  作用下,其侧向变形则会大大减小(如图 1b 所示)。

这是由于水平根系与土体之间产生了摩擦作用,将引起侧向膨胀的拉力传递给根系,使土体侧向变形受到约束。根系的约束力  $\sigma_R$  相当于在土体侧向施加了一个侧压力  $\Delta\sigma_3$ ,其关系可用莫尔圆表示,如图 2a 所示。

莫尔圆为土体未破坏时的弹性应力状态;圆 II 则是未加根系的土体极限应力状态;圆 III 是加根土体的应力状态,土体中加入高模量的根系后,根系对土体提供了一个约束力  $\sigma_R$ ,即水平应力增量  $\Delta\sigma_3 (= \sigma_R)$ ,使得侧向压力减小,亦即在相同的轴向变形条件下,加根土能承受较大的主应力差。这还可以通过常规三轴试验中的应力变化情况来看表示,如图 2b 所示,图 2 中圆 IV 为

无根土极限状态时的莫尔圆,圆 V 为加根土的莫尔圆,圆 V 的  $\sigma_3$  与圆 IV 的  $\sigma_3$  相等,而能承受的压力则增加了  $\Delta\sigma_1$ ,圆 VI 为加根土中填土的极限莫尔圆,其最大主应力  $\sigma_3$ ,与圆 V 的相等,而最小主应力却减少了  $\Delta\sigma_3$ ,上述分析说明,加根土体的强度有了增加,应有一条新的抗剪强度线来反映这种关系,如图 2c 所示。

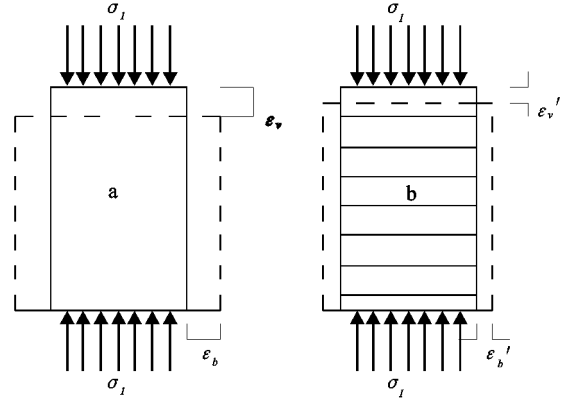


图 1 加根土的基本应力状态

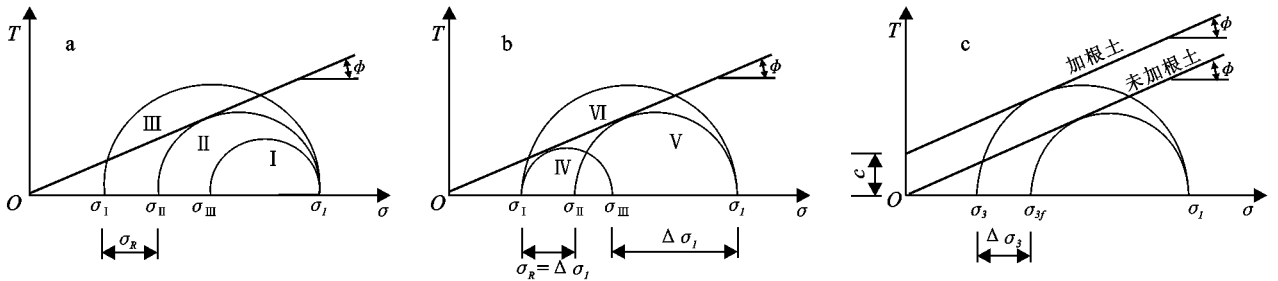


图 2 加根土与未加根土的应力圆分析

在试验中对加根土仍施加  $\sigma_3$  并保持不变,欲使试样达到新的极限平衡状态,必须要将  $\sigma_1$  增大至  $\sigma_{1f}$ 。根据摩尔-库仑破坏准则,由图 2 可以得到试样处于新的极限平衡状态下的数学表达式<sup>[22, 28]</sup>

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{1f}$  ——加根土样破坏时的最大主应力;  
 $\sigma_3$  ——作用于土样侧面的最小主应力;  $\phi$  ——未加根土的内摩擦角;  $c$  ——加根土样的“似黏聚力”。

将式(2)和未加根土样的极限平衡条件相比,加根土中多了一项由  $c$  所引起的承载力。这是由于加根土力学性质的改变是由于新的复合土体(即根土复合体)具有某种“黏聚力”的缘故,这种黏聚力不是原来的土所具有的,而是加根的结果。由于根与土之间的相互作用,相应地对原来的土体产生一种侧向的约束,就像钢筋混凝土中的箍筋一样,限制了土体的侧向变形,就相当于在原来的土体小单元中提供了一个侧压力增量  $\Delta\sigma_3$ ,提高了土体的抗压强度,这种侧压力增量在式(2)

中用“黏聚力  $c$ ”来代替了。因此,我们称这个“黏聚力”为“似黏聚力”,它反映了加根土这种复合结构的材料特性。似黏聚力可以通过下述关系来推导。

将加根土看作是未加根土,欲使其达到极限平衡状态有

$$\sigma_{1f} = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (3)$$

式(3)又可以写作

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + \Delta\sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (4)$$

式中:  $\Delta\sigma_3$  ——因加根而产生的侧向应力增量。

比较式(3)和式(4)可得

$$\sigma_{1f} = 2c \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + \Delta\sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (5)$$

$$c = \frac{\Delta\sigma_3 \sqrt{k_p}}{2} \quad (6)$$

式中:  $k_p$  ——被动土压力系数。

$$k_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (7)$$

式(4)中的等效应力增量  $\Delta\sigma_3$  由于是加根土中的拉根产生的, 无法直接测量, 可按下式计算

$$\Delta\sigma_3 = \sigma_3 \left( \frac{\Delta\sigma_{1f}}{\sigma_1} \right) \quad (8)$$

式中:  $\sigma_1$  ——未加根土试样破坏时的最大主应力;  
 $\Delta\sigma_{1f}$  ——加根土试样破坏时的最大主应力增量;  $\Delta\sigma_{1f} = \sigma_{1f} - \sigma_1$

由式(4)和(6)可得似黏聚力

$$c = \frac{1}{2} \sigma_3 \frac{\sigma_{1f}}{\sigma_1} \sqrt{k_p} \quad (9)$$

### 1.4 摩擦加筋理论

在自然边坡, 在土自重和外力产生的土压力作用下, 土体外表将此土压力传递给根系, 存在着将根系从土中拉出的可能。而根系又被填土压住, 于是土与根系之间的摩擦力阻止根系被拔出。因此, 只要根系具有足够的强度, 并与土产生足够的摩擦阻力, 则有树木根系存在的土体就可保持稳定。

根土复合体在受到剪力作用时, 土体剪力会转化为根系的拉力, 从而形成根系与土体之间的摩擦阻力。

如图 3 所示<sup>[22, 29]</sup>, 在根土复合体中取一微分段  $dl$  来分析, 设由土的水平推力在该微分段所引起的拉力  $dT = T_1 - T_2$  (假定拉力沿根系长度呈非均匀分布), 垂直作用的土重和外荷载为竖向力  $N$ , 根系与土之间的摩擦系数为  $f$ , 根系宽度为  $b$ , 作用于长  $dl$  的根系上下两面垂直力为  $2N bdl$ , 根系与土体之间的摩擦阻力为  $2Nf bdl$ , 如果  $2Nf bdl > dT$ , 则根系与土之间就不会相互滑动。如果土体中的根系都能满足上式要求, 则整个根土复合体结构的内部抗拔稳定性就得到保证, 不会被拉断或破坏。

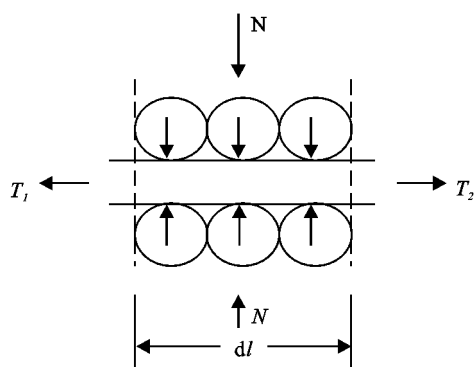


图 3 摩擦加筋原理

在加根土中取一微分段  $dl$  来分析, 设由土的水平推力在该微分段根系中所引起的拉力为  $dT = T_1 - T_2$  (假定拉力沿根长度  $dl$  范围内呈非均匀分布), 压住根的土重为法向压力  $N$ , 土颗粒与根之间的摩擦系数为  $f$  ( $f = \text{tg}\alpha$ ),  $b$  为根系的密度。

此时的摩擦力为

$$\tau = dT/2bdl \quad (10)$$

## 2 锚固理论

锚固理论是在岩土工程实践中总结出的理论, 从 20 世纪 60 年代开始至今, 已逐步形成的各种锚固支护作用理论, 得到工程和理论界认同的锚固作用机理主要集中在<sup>[30]</sup>: 悬吊作用、组合梁作用、挤压加固作用、围岩强度强化理论。

根据锚固理论, 树木垂直主根系的锚固作用表现为如下 4 个方面。

(1) 素土边坡由于自身具有一定的结构强度, 在不超过临界坡高时, 土体能保持稳定, 但由于土体的抗剪强度相对较低, 抗拉强度几乎可以忽略, 因此当坡高超过临界坡高或在超载及其它地下水位升降等因素作用下, 素土边坡将发生突然的整体失稳破坏。而具有相对土体较高的抗拉、抗剪强度的垂直根系的存在, 可以通过根系、根土接触面与土体的共同作用, 使根土复合体的抵抗滑动的能力明显增强, 变形特性得到明显改善。

(2) 垂直根系对根土复合体起着箍束骨架作用, 这是由根系自身强度以及它在土体内的空间分布作用所决定的, 它具有制约土体变形, 增强复合土体整体性与稳定性的作用。

(3) 垂直根系分担荷载作用。这是由于根系具有相对土体较高的抗拉、抗剪强度, 所以在土体进入塑性状态后, 应力逐渐向根系转移。从而延缓根土复合体塑性区的开展及渐进开裂面的出现。

(4) 垂直根系的应力传递与扩散作用。根系通过其膨胀作用紧锁围土介质, 提高围土之间的摩擦阻力, 通过咬合作用, 以及根系与根系周围土体的相互嵌制作用(共同作用), 使不稳定的表层与未遭到破坏影响并依然具有较高承载能力的深层土体形成整体, 把坡面推力传递到稳定地层, 利用稳定地层的锚固作用和被动抗力, 使坡面得到稳定。根系将所承受的荷载和剪力向土体深层传递及周围扩散的同时, 降低了根土复合体的应力水平, 改善了变形性能。

## 3 根系固土研究模型

### 3.1 须根理论模型(W 氏模型)

根纤维提高土的抗剪强度主要是通过根土接触面的摩擦力把土中的剪应力转换成根的拉应力来实现的。

假设根的表面受到足够的摩擦力和约束力使根不至于被拉出, 则当土中有剪应力发生时, 根的错动位移使根伸长从而使根内产生拉力  $T_R$ ,  $T_R$  沿剪切面

切线方向的分力可直接抵抗剪切变形,  $T_R$  沿法线方向的分力可增加剪切面上的正应力。

在根系盘结范围内, 边坡土体可看作由土和根系组成的根-土复合材料, 根系如同纤维的作用, 因此可按加筋土原理分析边坡土体的应力状态, 即把土中根的分布视为加筋纤维的分布, 且为三维加筋。这种加筋为土层提供了附加“黏聚力”  $\Delta c$ , 它一方面使原

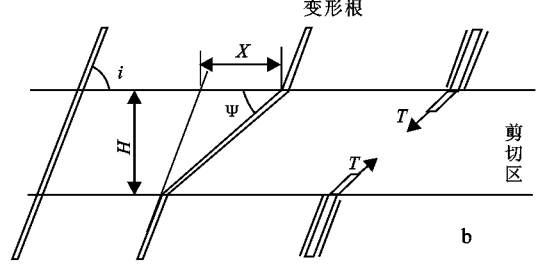
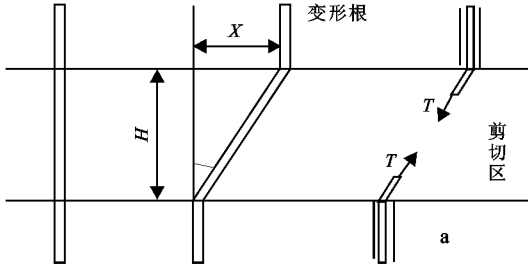


图 4 受力平衡模型分析图

根据图 4 可以推导出式

正交时

$$\tau_r = \frac{T}{a} \sin\theta + \frac{T}{a} \cos\theta \tan\varphi \quad (11)$$

斜交时

$$\tau_r = \frac{T}{a} \sin(90^\circ - \psi) + \frac{T}{a} \cos(90^\circ - \psi) \tan\varphi \quad (12)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{k + (\tan^{-1} i)^{-1}} \right] \quad (13)$$

式中:  $\tau_r$  ——由于根的加筋作用所增加的土体的抗剪强度;  $T$  ——单根的抗拉力(N);  $a$  ——单根作用的土体面积;  $\theta$  ——剪切变形角;  $\varphi$  ——土体的内摩擦角;  $i$  ——根的延伸方向与剪切面的初始夹角;  $k$  ——剪切变形比,  $k = x/H$ ;  $H$  ——剪切区厚度。

若在面积为  $A$  的土体内, 共有  $n$  个根, 根的抗拉力分别为  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , 剪切变形角分别为  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ , 根的延伸方向与剪切面的初始夹角分别为  $i_1, i_2, \dots, i_n$ , 剪切变形比分别为  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , 则式分别为

正交时

$$\tau_r = \frac{\sum_{j=1}^n T_j \sin\theta_j}{A} + \frac{\sum_{j=1}^n T_j \cos\theta_j}{A} \tan\varphi \quad (14)$$

斜交时

$$\tau_r = \frac{\sum_{j=1}^n T_j \sin(90^\circ - \psi_j)}{A} + \frac{\sum_{j=1}^n T_j \cos(90^\circ - \psi_j)}{A} \tan\varphi \quad (15)$$

$$\psi_j = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{k_j + (\tan^{-1} i_j)^{-1}} \right] \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

若在面积为  $A$  的土体内, 共有  $n$  个根, 其中有  $m$  个正交根,  $n - m$  个斜交根, 根的抗拉力分别为  $T_1,$

土体的抗剪强度向上推移了距离  $\Delta c$ , 另一方面又因限制了土体的侧向膨胀而使  $\sigma_3$  增大到  $\sigma'_3$ , 在  $\sigma_1$  不变的情况下, 使最大剪应力减小, 这两种作用使边坡土体的承载能力提高<sup>[19]</sup>。

图 4 为单根对土体的加筋力学模型, 图 4a 表示根的延伸方向与土体的剪切区正交情形, 图 4b 表示根的延伸方向与土体的剪切区斜交情形<sup>[13, 17, 19]</sup>。

$T_2, \dots, T_n$ , 正交根的剪切变形角分别为  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ , 斜交根的延伸方向与剪切面的初始夹角分别为  $i_{m+1}, i_{m+2}, \dots, i_n$ , 剪切变形比分别为  $k_{m+1}, k_{m+2}, \dots, k_n$ , 则由于根系的加筋所增加的土体的抗剪强度为

$$\tau_r = \frac{\sum_{j=1}^m T_j \sin\theta_j}{A} + \frac{\sum_{j=1}^m T_j \cos\theta_j}{A} \tan\varphi + \frac{\sum_{j=m+1}^n T_j \sin(90^\circ - \psi_j)}{A} + \frac{\sum_{j=m+1}^n T_j \cos(90^\circ - \psi_j)}{A} \tan\varphi \quad (17)$$

$$\psi_j = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{k_j + (\tan^{-1} i_j)^{-1}} \right]$$

$$(j = m+1, m+2, \dots, n) \quad (18)$$

由(17), (18)式可知, 确定  $\tau_r$  的大小需要求得参数  $\varphi, m, n, T_j (j = 1, \dots, n), \theta_j (j = 1, \dots, m), i_j (j = m+1, \dots, n)$  和  $k_j (j = m+1, \dots, n)$ 。其中, 参数  $\varphi$  可由土的直剪实验获得; 参数  $m, n$  和  $i_j (j = m+1, \dots, n)$  可通过截取不同的含根系土体纵剖面而获得;  $\theta_j (j = 1, \dots, m)$  和  $k_j (j = m+1, \dots, n)$  可由野外根系直剪实验求得; 对于参数  $T_j$ , 因大多数根从土体中拔出时都是被拉断, 可知根的抗拉力小于土体的摩擦力, 因此  $T_j$  可由根的实验室抗拉实验确定。

由上述分析, 在根系加筋的作用下, 土体的抗剪强度可写为式(19)。

### 3.2 垂直根系木本植物根-土相互作用力学模型

垂直根系木本植物的主根可扎入土体的深层, 通过主根和侧根与周边土体的摩擦作用把根系与周边土体联系起来, 结合垂直根系分布特点, 可以把根系简化为主根为轴向侧根为分支的全长粘接型锚杆来分析其对周边土体的力学作用, 其锚固力的大小可通

过各侧根与周边土体的摩擦力以及主根与周边土体

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi + \tau_R = \left[ c + \frac{\sum_{j=1}^n T_j \sin \theta}{A} + \frac{\sum_{j=m+1}^n T_j \sin(90^\circ - \phi_j)}{A} \right] + \left[ \sigma + \frac{\sum_{j=1}^n T_j \cos \theta}{A} + \frac{\sum_{j=m+1}^n T_j \cos(90^\circ - \phi_j)}{A} \right] \tan \varphi \quad (19)$$

对于地表下  $z$  深度处的根径大于 1 mm 的任意根段  $dl$ , 根段表面每单位面积上所受到的正压力为  $r_z$ , 其中,  $\gamma$  为土体的自然容重。令根—土间的静摩擦系数为  $\mu$ , 故相应的最大静摩擦力为  $\mu r_z$ 。则整个根段  $dl$  所受的最大静摩擦力合力为<sup>[31]</sup>

$$d_f = A \cdot \mu r_z = 2\pi r \cdot \mu \gamma \cdot dl \quad (20)$$

式中:  $r$  —— 根段的半径;  $A = 2\pi r \cdot dl$  —— 根段的表面积。

$d_f$  在铅垂方向上的投影分量为

$$d_f z = d_f \cdot \cos \theta = 2\pi r \cdot \mu \gamma \cdot dl \cdot \cos \theta = 2\pi r \cdot \mu \gamma \cdot dz \quad (21)$$

由式(21)知任意根段所受的最大静摩擦力在铅垂方向上的分量与根伸展的倾斜状态( $\theta$ 角)无关。

对于整个根系, 若令根的平均半径沿深度  $z$  方向的分布函数为  $\bar{r} = P(z)$ , 根的数目沿深度  $z$  方向的分布函数为  $N = Q(z)$ , 则在地下  $z - z + dz$  范围内, 根系的静摩擦力在铅垂方向上的分量为

$$\sum d_f z = N \cdot 2\pi \bar{r} \cdot \mu \gamma \cdot dz = 2\pi \mu \gamma \cdot P(z) \cdot Q(z) \cdot z \cdot dz \quad (22)$$

因而, 根系的静摩擦力在铅垂方向上的分量为

$$F = \int_0^{\infty} \sum d_f z = 2\pi \mu \gamma \int_0^{\infty} P(z) \cdot Q(z) \cdot z dz \quad (23)$$

因此, 根系的静锚固力为

$$T = F = 2\pi \mu \gamma \int_0^{\infty} P(z) \cdot Q(z) \cdot z dz \quad (24)$$

式(24)中, 函数  $P(z)$  和  $Q(z)$  的确定可采用现场量测并拟合数据而获得, 具体方法如下。

在根系延伸范围内, 沿水平方向把垂直根系等分为  $n$  个区段,  $n$  值依主根的长度而定, 对于任意区段  $[i, i+1]$  ( $1 \leq i \leq n-1$ ), 可数得根的个数  $N_i$  并测出每个根的半径  $r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN_i}$ , 从而得到区段根的平均半径  $\bar{r}_i$ 。对  $\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n$  拟合可得到  $P(z)$ , 对  $N_1, N_2, \dots, N_n$  拟合可得到  $Q(z)$ 。

### 3.3 水平根系根—土相互作用力学模型

水平根系木本植物由于主根扎入边坡土体不是足够深, 因此不能象垂直根系的木本植物一样把根系看作全长粘接型锚杆。水平根系木本植物的根系是否对边坡土体的稳定发挥作用, 还依赖于边坡的类型。水平根系在边坡岩土体中有 4 类分布, 类型 A 的覆土层较薄, 土层与基岩的界面为弱面, 根系不能扎入基岩, 因此根系对边坡浅层土体的稳定所起的作用不大; 类型 B 类似于类型 A, 但基岩有裂隙, 根系

的摩擦力的累加而获得<sup>[19]</sup>。

可伸入基岩, 根系对边坡的稳定起很大作用; 类型 C 覆土层较厚, 接近基岩处有一过渡土层, 其密度与抗剪强度随深度增加, 根系可伸进过渡层加固边坡; 类型 D 覆土层厚, 超过水平根系的延伸长度, 根系不能伸入到滑移面, 因此根系对边坡的稳定作用很小, 水平根系主要对 B 和 C 两种类型的边坡起作用<sup>[19]</sup>。

下滑土体把剩余推力  $T$  作用于主根及树干, 主根及树干再把所受的力传递给各水平侧根, 通过侧根与土体的摩擦阻力来平衡下滑土体的剩余推力。把水平根系沿主根分为左右两部分, 当土体沿弱面滑动时, 主根左侧的水平根受压, 右侧的水平根受拉, 因植物根不能承受压力, 所以左侧的水平根对抑制土体的下滑不起作用。

首先求出右侧水平根系摩擦阻力的合力沿  $x$  轴方向的分量, 以便确定它所平衡的下滑土体剩余推力的大小。假定所有侧根延伸方向都平行于水平面, 在根系延伸范围内, 沿水平方向把根系等分为  $n$  个区段,  $n$  值依主根的长度而定, 对于任意区段  $[i, i+1]$  ( $1 \leq i \leq n-1$ ) 的任意一水平根, 其摩擦阻力  $d_f$  为

$$d_f = \int_0^{L_p} 2\pi \bar{r}_i \cdot \gamma \mu (h_i + l \cos \beta_p \tan \alpha) dl = 2\pi \bar{r}_i \cdot \gamma \mu L_p (h_i + \cos \beta_p \tan \alpha \frac{L_p}{2}) \quad (25)$$

式中:  $\bar{r}_i$  —— 根的平均半径;  $\gamma$  —— 土体的容重;  $\mu$  —— 根—土间的静摩擦系数;  $L_p$  —— 根长;  $h_i$  —— 区段  $[i, i+1]$  至点  $a$  的距离;  $\beta_p$  —— 根延伸方向与  $x$  轴的夹角;  $\alpha$  —— 边坡角。

从而,  $d_f$  沿  $x$  轴方向的分量  $d_f x$  为

$$d_f x = d_f \cdot \cos \beta_p = 2\pi \bar{r}_i \cdot \gamma \mu L_p (h_i + \cos \beta_p \tan \alpha \frac{L_p}{2}) \cos \beta_p$$

在区段  $[i, i+1]$  内的所有根的摩擦阻力沿  $x$  轴方向的分量之和  $F_{ix}$  为

$$F_{ix} = \sum d_f x$$

同理可得整个根系的摩擦阻力沿  $x$  轴方向的分量之和  $F_x$  为

$$F_x = \sum_{i=1}^n F_{ix}$$

假定下滑土体的剩余推力方向平行于坡面, 则由于根系的支撑作用所平衡的剩余推力  $T_R$  为

$$T_R = F_x \cos \alpha$$

下滑体的总剩余推力  $T$  可由下式求得

$$T_x = W \sin \alpha - W \cos \alpha \tan \varphi - cL \geq 0$$

式中:  $W$  —— 滑体的重量;  $\varphi$  —— 弱面土体的内摩擦角;  $c$  —— 弱面土体的黏聚力;  $L$  —— 坡面的长度。

由上两式,若要保持土体的稳定则须满足

$$F_x \cos\alpha - W \sin\alpha - W \cos\alpha \tan\varphi - cL \geq 0$$

由上式也可确定坡面水平根系木本植物合理的间排距。

## 4 结语

根系具有固土作用,集中表现在深根的锚固作用,浅根的增加作用,树木蒸腾作用,降雨截留,消弱溅蚀等方面。综括根系固土作用,其基本理论是莫尔—库仑强度理论,根系固土的分析模型主要有须根理论模型(W氏模型),垂直根系木本植物根—土相互作用力学模型,水平根系根—土相互作用力学模型。根据以上固土理论,树木根系的形态特征、主根的深度、根系表面的粗糙度、根纤维的力学性能等决定了树木根系的固土作用的大小。因此,研究根系的固土作用就必须研究根系的分布特征、根系与土的摩擦特性以及根系的力学性能。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Chen Lihua, Yu Xinxiao. Experimental study on whole tree vertical tensile strength[ J ]. International Journal of Sediment Research, 2004, 19(2): 154—160.
- [ 2 ] Song Weifeng, Chen Lihua, Liu Xiuping. Numerical analysis of roots soil reinforcement Mechanism[ J ]. International Journal of Sediment Research, 2006, 21(3): 230—237.
- [ 3 ] Gray D H, Sotir B R. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control[ M ]. John Wiley & Sons, Toronto, 1996.
- [ 4 ] Gray D H, Leiser A T. Biotechnical Slope Protection and Erosion Control[ M ]. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1982: 271.
- [ 5 ] Gray D H, Megahan W F. Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith[ R ]. Forest Service, U. S. Dept. of Agriculture, Research Paper INT-271, 1981: 23.
- [ 6 ] Gray D H, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[ J ]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109: 335—353.
- [ 7 ] Gray D H. Effects of forest clear cutting on the stability of natural slopes[ J ]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1970, 7: 45—66.
- [ 8 ] Gray D H. Effects of forest clear cutting on the stability of natural slopes: results of field studies[ R ]. University of Michigan, Dept. of Civil Engineering Report, 1973: 119.
- [ 9 ] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties[ R ]. Soil Science, 1981, 132(6): 427—435.
- [ 10 ] Waldron L J. The shear resistance of root permeated homogenous and stratified soil[ R ]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41: 843—849.
- [ 11 ] Wu T H, Beal P E, Lan C. In situ shear test of soil root systems[ R ]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114: 1376—1394.
- [ 12 ] 陈丽华, 余新晓, 张东升. 整株林木垂向抗拉试验研究[ J ]. 资源科学, 2004, 26(S): 39—43.
- [ 13 ] 王礼先. 水土保持学[ M ]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [ 14 ] 宋维峰. 林木根系与均质土间相互物理作用机理研究[ D ]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [ 15 ] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系固土机理数值分析[ J ]. 北京林业大学学报, 2006, 28(S2): 80—84.
- [ 16 ] 宋云. 谈植物固土的边坡稳定机理[ J ]. 森林工程, 2004, 20(5): 51—52.
- [ 17 ] 封金财, 王建华. 乔木根系固坡作用机理的研究进展[ J ]. 铁道建筑, 2004(3): 29—31.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[ M ]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [ 20 ] 解明曙. 林木根系固坡力学机制研究[ J ]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 7—14.
- [ 21 ] 罗杏春, 范家参. 加筋土的力学原理及屈服条件[ J ]. 云南工业大学学报, 1996, 12(2): 14—18.
- [ 22 ] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术[ M ]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [ 23 ] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价[ M ]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [ 24 ] 杨果林, 王永和. 加筋土筋材拉拔试验研究[ J ]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 51—54.
- [ 25 ] 杨果林. 网格式加筋土挡土结构稳定分析与工程应用[ J ]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 78—81.
- [ 26 ] 吴景海, 王德群, 陈环. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[ J ]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 199—204.
- [ 27 ] 白晓红, 黄仙枝, 张苇. 加筋土技术在土木工程中的应用[ J ]. 太原理工大学学报, 2003, 34(5): 532—534.
- [ 28 ] 介玉新, 李广信. 纤维加筋土的有限元计算[ C ] // 第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会. 广州: 1998: 309—314.
- [ 29 ] 霍林. 摩擦学原理[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1975.
- [ 30 ] 阎莫明, 徐祯祥, 苏自约, 主编. 岩土锚固技术手册[ M ]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [ 31 ] 解明曙. 乔灌木根系固坡力学强度的有效范围与最佳组构方式[ J ]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 17—23.