

云南松侧根摩擦型根土粘合键的破坏机制及模型

张云伟¹, 刘跃明¹, 周跃²

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 以云南松侧根为研究对象, 探讨了侧向牵引情况下, 云南松侧根与土壤之间摩擦型根土粘合键的力学作用机制, 阐述了侧根从土中拔出时, 摩擦型根土粘合键破坏的实质, 并基于莫尔-库仑破坏准则建立了极限平衡条件下的摩擦型根土粘合键破坏模型。该模型除了可以描述摩擦型根土粘合键的破坏原理外, 还可用于定量地估算、预测摩擦型根土粘合键能够提供的最大牵引阻力。最后, 通过实测与模型理论计算结果进行了比较, 结果表明, 所建立的模型具有一定的精度和适用性。

关键词: 摩擦; 根土粘合键; 破坏机制; 模型预测

中图分类号: S157 **文献标识码:** A

1 前言

利用植被保护、稳固斜坡已成为生态护坡工程的一项重要内容, 为此, 人们对植物根系的土壤增强作用和斜坡稳定作用的机械效应开展了一些定量的研究^[1,2]。对于这个问题, 目前已形成的基本观点认为^[1]: 从机械效应来看, 植物根系对土壤的加强作用主要由垂直根系和侧向根系两部分组成, 侧向根系可以提高根际土层的整体抗张强度, 垂直根系可以把根际土层锚固到深层土层上, 增加土体的迁移阻力, 从而加固土层, 抑制滑坡。

对于侧根牵引效应, 目前已建立了一些预测牵引效应量值的数学模型^[1,3,4], 但这些模型还不完善, 精度较低, 进一步研究探讨精度更高、更完善的模型仍然是这一研究领域正在积极开展的工作。侧根的牵引效应有两个不可缺少的前提: 根土粘合键和根的抗拉强度, 前者是发生在根土界面上的力学作用, 有了根土粘合键, 应力才可在土壤和侧根之间传递, 可见, 根土粘合键是侧根牵引效应的一个重要环节, 对根土粘合键的作用机制和破坏原理缺乏深入的了解研究, 是造成模型不够完善、精度较低的一个重要因素。为此, 我们以云南松侧根为例, 对侧根根土粘合键中存在最广泛的摩擦型根土粘合键的作用机制和破坏原理作进一步的研究和探讨, 建立具有一定

预测精度的摩擦型根土粘合键破坏模型。

2 根土粘合键的作用机制

根土粘合键是牵引效应中根和土之间不可缺少的联系。实质上, 我们把牵拉土壤中的根时, 阻碍土壤与根之间相互滑动的作用因素统称为根土粘合键。

通常情况下, 根据不同的作用类型, 我们可以把根土粘合键分为三类^[1], 第一类是由土壤和根之间的有机胶质、粘液及毛细作用产生的附着粘结型根土粘合键, 这种类型的根土粘合键比较弱, 容易受根土相对移动破坏, 对于一般植物根系, 在模型计算时可以省略; 第二种类型是摩擦型根土粘合键, 它是由根所受的土壤压力和两者之间的相对运动引起的, 这种类型的粘合键强度较大, 存在最普遍, 比较容易计算; 第三种类型是剪切型根土粘合键, 根有时会弯曲、分枝、形状不规则, 当根土相对移动时, 由于弯折, 根会剪切、破坏周围土壤而产生剪切作用, 阻碍根土相对移动, 这种类型产生的粘合键强度最高, 作用最强, 但计算比较麻烦。可见, 正是由于附着粘结型、摩擦型、剪切型这三种根土粘合键所提供的牵引阻力, 使侧根对土壤的具有牵引效应, 增强了根际土层的整体抗张强度, 因此, 建立这三种根土粘合键的破坏模型后, 就可定量地估算侧根对土壤的牵引效

收稿日期: 2002-06-20; 改回日期: 2002-08-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 49871054)、云南省应用基础研究基金项目(编号: 98D007M)、云南省中青年学术与技术带头人培养计划资助项目。

作者简介: 张云伟(1972-), 男(汉族), 云南昆明人。昆明理工大学现代农业工程学院讲师, 工学硕士, 主要从事有限元工程计算、计算机?1994-2025在农业上的运用等方面的教学和科研工作。
Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

应, 这对植被生长、稳固斜坡、防止水土流失等方面将具有积极的指导意义。

实际上, 可以对第三类型进行简化, 以便于模型计算和表述。当侧根较为柔软, 抗弯强度较小, 且弯折角度不大时, 可将其近似简化为摩擦型根土粘合键; 当侧根较硬, 抗弯强度较大, 或弯折角度较大时, 可将其近似简化为一附加外力, 大小等于弯折处根的拉断力或剪断力。

通过以上分析可见, 多数情况下, 所需计算、研究的根土粘合键属于摩擦型。按照现代摩擦理论, 从力学机制上来看, 其实质是一种分子现象^[9]。根与土的接触面, 放大后观察都粗糙不平, 接触仅局限于一些点上。接触点的面积很小, 应力很集中, 往往超过材料的屈服应力, 产生塑性变形。当根土相对移动时, 接触面积上的分子引力阻碍根土相对移动, 这就是摩擦型根土粘合键的微观实质。

3 摩擦型根土粘合键破坏模型的建立

对于云南松侧根, 当其从土中拔出时, 侧根表面组织没有发生破坏, 因此, 可以假设摩擦型根土粘合键的破坏实际上是根土界面上微观土层被破坏。按照莫尔-库仑破坏理论, 土体的破坏主要是剪切破坏引起的^[9], 在破裂面上, 法向应力与抗剪切强度之间存在着函数关系, 即 $\tau_b = f(\sigma)$, 这个函数所定义的曲线就是莫尔破坏包线。实践证明, 对于一般土, 在应力变化范围不很大的情况下, 莫尔破坏包线可以用库仑强度公式来表示:

$$\tau_b = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中 c 为土的粘聚力, 对于无粘性土 $c=0$; ϕ 为土的内摩擦角。此时, 土的抗剪强度与法向应力成线性函数关系。

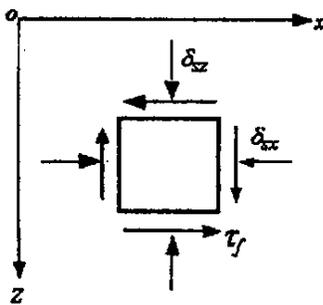


图 1 单元土体应力状况

Fig. 1 Strain status of soil unit

取出根土界面的一个单元土体, 其应力状况如图 1 所示。其中 σ_z 是该单元上土体自重应力, σ_{xx} 是侧向应力, τ_f 是摩擦粘合强度。

假设土壤可以简化为半无限空间弹性体, 即把土壤看作是一个具有水平界面、深度和广度都无限大的空间弹性体, 土壤各向同性, 并处于侧限应力状态下, 对于 σ_x 和 σ_{xx} 分别有

$$\sigma_x = z \gamma \quad (2)$$

$$\sigma_{xx} = k_0 \sigma_x \quad (3)$$

式中 z 为单元土体的深度, γ 为土的容重, k_0 为土壤的侧压力系数。当单元土体破坏时, 其大主应力 σ_1 和小主应力 σ_3 分别为

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_{xx}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_{xx}}{2}\right)^2 + \tau_f} \quad (4)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_{xx}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_{xx}}{2}\right)^2 + \tau_f} \quad (5)$$

$\sigma_1 - \sigma_3$ 就是单元土体达到破坏时的偏差应力, 在 $\tau - \sigma$ 坐标上绘制单元土体破坏的应力圆, 如图 2 所示, 按照莫尔-库仑破坏理论, 破坏圆必定与莫尔破坏包线相切。显然, 切点所代表的平面满足 $\tau = \tau_b$ 的条件, 这就是单元土体的破裂面。

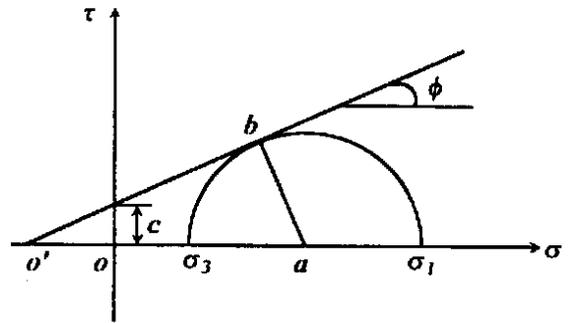


图 2 单元土体破坏面确定

Fig. 2 Confirm the soil unit destroyed position

从图 2 的几何关系有

$$\sin \phi = \frac{ab}{oa} = \frac{ab}{oo + oa}$$
$$o'o = c' \text{ctg} \phi$$

则

$$\sin \phi = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c' \text{ctg} \phi} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c' \text{ctg} \phi} \quad (6)$$

对式(6)进行整理, 有

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2c \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

进一步整理后

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \operatorname{tg}(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (7)$$

同样的方法可以推导出

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) - 2c \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \quad (8)$$

式(6)至(8)都是表示单元土体达到破坏时主应力的关系,也就是单元土体达到极限平衡状态的条件,故也可称之为极限平衡条件。将(2)(3)(4)(5)式与(7)或(8)式联立,得到一组合有5个未知量的方程组,方程数量为5个,这就是侧根摩擦型根土粘合键的破坏模型。其描述了摩擦型根土粘合键当前应力状况,给出了在极限状况下,摩擦型根土粘合键可能提供的最大粘合强度。该模型可以直接求解,得到最大粘合强度。

从模型来看,摩擦型根土粘合键可能提供的最大粘合强度 τ_f 主要与土壤容重 γ 、根际土层深度 z 、土壤粘聚力 c 、土壤内摩擦角 ϕ 和土壤侧向压力系数 k_0 等因素有关,其中土壤容重、土壤粘聚力、土壤内摩擦角、土壤侧向压力系数等土壤参数是与土壤三相(固体颗粒、水、气体)组成比例、土壤的物理状态指标、土壤结构等决定土壤物理力学性质的因素有关。

实际上, τ_f 是理论上摩擦型根土粘合键可能达

到的最大粘合强度,对于不同的树根,其能否达到这个数值还与侧根的表面粗糙度有关。

4 模型计算与实测

建立了摩擦型根土粘合键破坏模型后,在给定土壤参数条件下,即可估算、预测由摩擦型根土粘合键所提供的牵引力阻力。实际上,构建模型时,为了方便分析,对一些条件进行了简化,如把土壤简化为半无限空间弹性体,土壤各向同性,并处于侧限应力状态下,这种简化条件与真实的土壤情况不同,在这种假设条件下建立的模型与实际情况肯定会有一些差距。因此,有必要通过实测来考察模型估算与实际情况之间的差异。

由于是要测量摩擦型根土粘合键所提供的牵引力阻力,实测时应尽量避免其它两种类型根土粘合键的影响,这样的测量不宜在野外田间进行,可以在实验室内进行。一方面,土壤的各种参数容易控制,能基本保证实验条件相同;另一方面,采用的单根可以是直根、无分枝,能最大限度地避免附着粘结型、剪切型根土粘合键的影响。为此,我们自制了实验台架,配备有美国QUANTECH公司的DAQP-12高精度便携式数据采集系统及一些土壤物理参数测试仪器,在实验室内开展了若干组云南松侧根单根牵引实验,所选单根均为直根、无分枝。实测结果和模型计算结果如表1所列。

表1 单根牵引实测结果和模型计算结果

Table 1 Testing result and calculating result for single lateral root traction

序号	最大直径 D (mm)	直径差 Δ D (mm)	根长 L (mm)	深度 z (mm)	模型预测粘 合强度(N/m^2)	实测拔出 力(N)	模型预测最 大拔出力(N)	相对误差 (%)
1	10	2.4	550	100	13731.28	185.92	208.7884	12.3
2	6.2	0.6	600	105	13767.88	176.11	153.1158	13.06
3	18.6	4.2	980	150	14095.44	636.61	716.0421	12.48
4	11.8	1.8	520	95	13694.65	233.63	243.8544	4.38
5	9.8	0.4	560	80	13584.49	221.16	229.4313	3.74
6	7.85	0.7	340	100	13731.28	98.272	110.0021	11.94
7	6.5	1.8	470	130	13950.25	111.67	115.35	3.3
8	7.6	1.7	530	200	14455.83	139.38	162.4698	16.57
9	7.95	6.2	530	210	14527.49	105.83	117.3162	10.85
10	7	2	460	210	14527.49	110.34	125.9649	14.16

从实测结果来看, 和国内外的同类研究相比^[1], 模型的预测精度有一定的提高, 总体趋势与实测值较为吻合。

5 结束语

本文详细地探讨了侧向牵引情况下, 云南松侧根与土壤之间摩擦型根土粘合键的力学作用机制, 基于莫尔-库仑破坏准则建立了极限平衡条件下的摩擦型根土粘合键破坏模型。并通过实测, 与模型计算结果进行了比较, 结果表明, 用该模型估算、预测摩擦型根土粘合键所提供的牵引力阻力具有一定的精度和适用性。这些模型的建立, 为定量地研究植被根系固坡、护坡的机械效应提供了新的依据, 对

于科学地指导坡面生态工程具有积极的促进作用。当然, 由于研究时间及水平的限制, 尚有很多问题需要在今后的工作中进一步探讨研究、补充完善。

参考文献:

- [1] 周跃. 云南松林侵蚀控制潜能[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1999. 1~28 71~95.
- [2] 李会科, 王忠林, 贺秀贤. 地埂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.
- [3] 周跃, 徐强, 骆华松. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应的研究(1)原理和计算[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 4~9.
- [4] 周跃, 徐强, 骆华松. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应的研究(2)野外直测[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 10~15.
- [5] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. 3~25 160~168.

Study for the Destroy Principle and Model of the Yunnan Pine's Lateral Root-soil Friction Bond

ZHANG Yun-wei¹, LIU Yue-ming¹ and ZHOU Yue²

(1. Modern Agriculture Engineering College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, PR China;

2. Environment Science and Engineering College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, PR China)

Abstract: Today, using vegetation to protect and steady slope has been an important content in the ecologically protecting slope engineering. Therefore, researchers made many quantitative studies for the mechanical effect of reinforcing soil and steadying slope caused by plant roots. Now, there is a basic opinion among researchers as to this problem. It suggests that the action of plant roots reinforcing soil is caused by vertical roots and lateral roots mainly. Lateral roots can improve the soil layer's whole tensile strength. Vertical roots can make the shallow soil layer anchored to the deep soil layer. These will increase the soil layer's moving resistance, reinforce the soil layer, and restrain soil layer coast.

Following some quantificational studies for the lateral root traction being developed, some models have been established to forecast the lateral root traction effect. But these models are imperfect with low precision because of lacking in deep research to the root-soil bond's function regulation and destroy principle. The root-soil bond, which is a kind of mechanical action at interface between root and soil, is an important factor for the lateral root traction. The strain can be passed between soil and lateral roots only because of existence of the root-soil bond. So, it is obvious that ignoring studying dynamic function principle of the root-soil bond deeply is an important reason to make the model have a low accuracy. Now, seeking more accurate and more perfect model is still a warm work in this field.

In this paper, with Yunnan pine's lateral roots being a research object, we discuss the dynamic function regulation of the Yunnan pine's root-soil friction bond, and describe the destroyed essential of the root-soil friction bond when lateral roots are pulled out from soil. Further more, based on the Mohr-Coulomb destroy theory, the destroy model of root-soil bond is established under the utmost balance condition. This model can not only depict the destroy principle of the fiction root-soil bond, but also be used to quantificationally estimate and forecast the traction resistance provided by the friction root-soil bond. Then, the difference between theoretical result and experimental testing result shows that the model has good accuracy and applicability.

Key words: friction; root-soil bond; destroy principle; model forecast