

植被护坡中植物根和岩土 相互作用的力学分析*

言志信^{1,2}, 宋云³, 江平^{1,2}, 王后裕⁴

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000;

3. 中南林业科技大学 建工学院, 长沙 410004;

4. 空军工程设计研究局, 北京 100077)

(郭兴明推荐)

摘要: 植被护坡借助植物根系使边坡土体成为土与根的复合材料,从而明显提高边坡土体的抗剪强度,增大边坡的安全稳定性。但是,目前的相关研究仍然停留在定性分析上。文中试图在定量分析根和岩土相互作用方面进行探索性的工作,通过对草本植物的根系包括木本植物的侧根系与岩土体相互作用的分析,建立摩擦型根-土力学作用模型,并实验验证模型的正确性;对锚固型根亦即木本植物主根-土的作用也建立相互作用的力学模型。两类力学模型的建立为定量地分析植物根系与土体的相互关系提供了重要的理论指导,具有一定应用价值。

关键词: 植被护坡; 植物固坡; 力学模型; 摩擦型根; 锚固型根

中图分类号: U213.1+58 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2010.05.009

引 言

植被护坡通过植物的垂直深根穿过坡体浅层的松散风化层,锚固到深处较稳定的岩土层上,起到预应力锚杆的作用,同时盘根错节的植物浅根可看作带预应力的三维加筋材料,它使边坡土体成为土与根的复合材料,以提高土体强度^[1-4]。

1 植物根系-岩土体力学相互作用

1.1 摩擦型根-土相互作用

草本、灌木植物及木本植物的侧根与岩土体相互作用是类似的,都是起到摩擦加筋的作用,可一并建立其力学模型^[5]。

工程实践和实验均表明,草本植物根系及木本植物侧根的分布具有自身特征,草本植物的

* 收稿日期: 2009-10-07; 修订日期: 2010-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672191);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090211110016);甘肃省自然科学基金计划资助项目(096RJZA048)

作者简介: 言志信(1961—),男,湖南人,教授,博士,博士生导师(联系人, E-mail: yzx10@163.com, yanzhx@lzu.edu.cn)。

根系一般为直径小于 1 mm 的须根,根系在土体中的分布密度自地表向下逐渐减少,并逐渐细弱,在根系盘结的范围内,边坡土体可看作由土和根系组成的三维的根-土复合材料,根系如同纤维在其中发挥作用,因而可按加筋土原理来分析边坡土体的应力状态(其实加筋土最初就是源自于植物的加筋作用原理),即把土中的根分布视为加筋纤维的分布^[6-7]。

在无植物根系的土体中,竖向应力 σ_1 的作用,将使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将随之增大,直至土体破坏^[8-10]。而在存在植物根系的土体中,在同样的竖向应力 σ_1 下,其侧向变形将大大减小。原因在于植物根系与土体之间产生了摩擦作用,引起的侧向膨胀力传递给了植物根系,根系约束土体的侧向变形,一方面为土层提供了附加“粘聚力” Δc , 另一方面又因为限制了土体的侧向膨胀而使 σ_3 增大,从而在 σ_1 不变的情况下使最大的剪应力减小。

分析可知,根的加筋作用主要取决于根的分布密度、抗拉强度、张拉系数、根表面粗糙程度、连接程度和受力方向等因素。分析根-土相互作用时,为了简化,可把三维加筋的情况简化成二维的平面分析,且不考虑土体孔隙水压力的影响。

把植物根假设为一柔性构件,除了受到拉力之外,还受到土对根的侧向作用力。

根据土力学原理^[11-14],土体对根的侧向力大小为

$$\sigma_x = K_0 \sigma_z = K_0 \gamma z, \quad (1)$$

式中: K_0 为土的侧向压力系数或静止土压力系数, $K_0 = \mu / (1 - \mu)$; γ 为土的容重; z 为土的厚度; μ 为 Poisson 比。

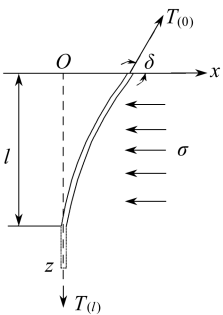


图1 单根与土体的相互作用

力的作用如图 1 所示,由式(1)可得到下列关系式:

$$T_{(0)} = \frac{\int_z^{z+l} K_0 \gamma (z + dz) dz}{\cos \delta} \approx \frac{\int_z^{z+l} K_0 \gamma dz}{\cos \delta} \approx \frac{K_0 \gamma l}{2 \cos \delta} (l + 2z). \quad (2)$$

当所研究的土层很薄即 $l \ll z$ 时,可得

$$T_{(0)} = \frac{K_0 \gamma z l}{\cos \delta}, \quad (3)$$

$$T_{(l)} = T_{(0)} \sin \delta. \quad (4)$$

从而可以得到单根所增加的抗剪强度为

$$\tau_r = \frac{T_{(0)} \cos \delta}{a} + \frac{T_{(0)} \sin \delta \tan \varphi}{a}, \quad (5)$$

式中: T 为单根的抗拉力; δ 为根与水平面的夹角; φ 为土体的内摩擦角; a 为单根对应的土体面积。

面积为 A 的土体,共有 j 个根,则根土复合体所增加的总抗剪强度为

$$\tau_r = \frac{\sum_{j=1}^n T_{(0)_j} \cos \delta_j}{A} + \frac{\sum_{j=1}^n T_{(0)_j} \sin \delta_j}{A} \tan \varphi. \quad (6)$$

周跃教授对云南松侧根所做的野外实验结果^[7]与本文推导的式(6)计算所得结果如表 1 所示。

表 1 实验测试结果与本文方法计算结果的对比

有根试件	实验测试结果			本文公式计算结果 计算所得 τ_r /kPa
	m/g	τ_r/kPa	平均 τ_r/kPa	
C1	121	5.25		
C2	342	2.20		
C3	330	16.94		
C4	342	9.53		
C5	345	4.58	5.77	2.25
C6	178	11.57		
C7	202	2.48		
C8	233	6.17		
C9	138	2.58		
C10	197	2.25		

注:表中 m 为根的生物量。

表 1 中试件 C2 的 τ_r 稍小于 2.25 kPa, 其它试件的 τ_r 均大于 2.25 kPa。实际上, 土体中的植物根系并非如公式推导中所假设的绝对柔性, 所以植物根系实际所增加的抗剪强度大于计算值, 柔性状态下计算出来的值可作为抗剪强度增加值的下限值, 并且可用该值来计算边坡土体浅层稳定的安全系数。

由式(6)可知, 为了计算根的抗剪强度, 需要参数 $\varphi, n, T_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 和 $\delta_j (j = 1, 2, \dots, n)$, 其中参数 φ 可以由土的剪切实验确定, 参数 n 则需要通过野外截取不同含根土体的剖面获得, δ_j 和 T_j 也可由野外实验而获得。此外, 还可以看出, 含根土体的抗剪强度的大小主要取决于根的抗拉强度和根系在土中的分布情况, 工程实践表明摩擦型根在一般情况下是被拉断而不是拔出。

进而可以得到, 植物根系作用下的土体总的抗剪强度为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi + \tau_r. \quad (7)$$

1.2 锚固型根-土相互作用

根据木本植物根系的形态特征, 可将其分为主直根型、散生根型和水平根型 3 种。主直根型由近乎垂直的主根和许多侧根构成, 主根发达, 垂直向下生长可达 3 ~ 5 m。散生根型由若干支原生和次生根, 大致以根颈为中心, 向地下作辐射状发展而成网状结构的、纤细的根群。水平根型由水平伸展的固着根和繁多的链状细根群组成, 侧根或不定根发达, 并向四周扩展, 根系多分布在 20 ~ 30 cm 的土体表层中^[15]。

粗略地, 可将木本植物根系分为侧向根系和垂直根系两部分, 从力学效应来看, 侧向根系可以提高根系土层的整体抗拉强度, 垂直根系通过锚固到深层土层上, 增加土体的抗滑阻力^[16-17]。

木本植物的主根可以扎入土体的深层, 通过主根和侧根与周围土体联系起来, 在土中形成根网, 在斜坡上相当于抗滑桩的作用, 增加土体的抗滑阻力。因此可以把垂直根系简化成垂直锚杆来分析其对周围土体的力学效应^[14]。

1) 单根的受力模型

木本植物根的刚度较大, 所以只考虑根的刚性受力状态。如图 2 所示, 地表以下 z 处的根段为 dl , 根段单位面积上所受的正压力为 $K_0 \gamma z$, 那么, 微段根的最大静摩擦力为

$$df = dA \cdot \mu K_0 \gamma z = 2\pi r \cdot \mu K_0 \gamma z \cdot dl, \quad (8)$$

式中: K_0 为侧向土压力系数; γ 为土的容重; μ 为根与土的摩擦系数; r 为根的半径; dA 为根段的表面积, 等于 $2\pi r \cdot dl$ 。

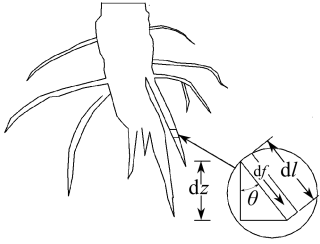


图2 木本植物根对土体的作用

df 在垂直方向上的投影为

$$df_z = df \cdot \cos\theta = 2\pi r \cdot \mu K_0 \gamma z \cdot dl \cdot \cos\theta = 2\pi r \cdot \mu K_0 \gamma z \cdot dz, \quad (9)$$

式中: θ 为根与垂直方向的夹角。

由式(9)可知, 当 $\theta = 0$ 即根为竖直时,

$$df = 2\pi r \cdot \mu K_0 \gamma z \cdot dl. \quad (10)$$

2) 根系的受力模型

对于整个根系来说, 设根的平均半径在深度方向的分布函数为 $\bar{r} = P(z)$, 根的数量在深度方向的分布函数为 $N = Q(z)$, 则根系

的最大摩擦力在垂直方向的分量为

$$F = \int_0^{\infty} \sum df_z = \int_0^{\infty} N \cdot 2\pi \bar{r} \cdot K_0 \mu \gamma \cdot z \cdot dz = 2\pi K_0 \mu \gamma \int_0^{\infty} P(z) \cdot Q(z) \cdot z \cdot dz. \quad (11)$$

函数 $P(z)$ 和 $Q(z)$ 的确定可采用现场量测, 并且进行数据拟合而获得^[14], 在测量根密度垂直分布时, 可沿水平方向把垂直根系等分为 n 个区段, 对于任意区段, 可测得根的个数 N 并测得每个根的半径 r , 从而得到区段根的平均半径 \bar{r} , 通过对平均半径拟合得到 $P(z)$, 对 N 拟合得到 $Q(z)$, 油松根分布函数 $P(z)$ 和 $Q(z)$ 如表 2 所示。

表 2 15 年油松根的分布函数 $P(z)$ 和 $Q(z)$ ($1\ 000\ \text{cm}^2$)^[14]

T/cm	$P(z)/\text{mm}$	$Q(z)/\text{mm}$	T/cm	$P(z)/\text{mm}$	$Q(z)/\text{mm}$
0~10	3.31	18	50~60	4.00	4
10~20	4.08	12	60~70	2.50	2
20~30	2.59	11	70~80	2.50	2
30~40	1.79	7	80~90	2.10	2
40~50	3.10	5	90~100	0	0

注: 表中 T 为土层, 被调查根系分布的面积为 $1\ 000\ \text{cm}^2$ 。

2 结 论

人们发现: 森林中浅层滑坡的滑动面多发生在最大根系密集层与下层土体之间, 这一现象佐证了根系对浅层滑坡的控制作用^[18]。基于上述现象, 本文对植物根系与岩土体的相互作用进行了初步分析, 取得了如下结论:

1) 建立了摩擦型根-岩土力学作用模型;

2) 依据推导的公式所做的计算其结果与实验结果符合较好, 实验验证了模型的正确性, 实验值非常接近柔性状态计算值, 在柔性状态下计算出来的值能够作为抗剪强度增加值的下限值, 直接用于计算边坡土体浅层滑动的安全系数;

3) 对木本植物主根-土的作用建立锚固型力学模型;

4) 两种模型的建立对定量地分析植物根系与土体的相互作用关系的研究具有一定的理论意义和实际应用价值。

参考文献:

- [1] Ali Faisal Haji, Osman Normaniza. Shear strength of soil containing vegetation roots[J]. *Soils and Foundations*, 2008, **48**(4): 587-596.
- [2] Van de Wiel Marco J, Darby Stephen E. A new model to analyse the impact of woody riparian vegetation on the geotechnical stability of riverbanks[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, **32**(14): 2185-2198.
- [3] YANG Pu, XIANG Zhi-hai, HU Xia-song, *et al.* Soil reinforcement by vegetation roots[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2009, **49**(2): 305-308.
- [4] Roering Joshua J, Schmidt Kevin M, Stock Jonathan D, *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.
- [5] 欧云峰,王洪亮,王宫. 黄土地区公路路堑高边坡植物防护探讨[J]. 武汉理工大学学报, 2007, **29**(9): 162-166.
- [6] Morgan R P C, Rickson R J. *Slope Stabilization and Erosion Control: a Bioengineering Approach*[M]. London: E & F N SPON, an imprint of Chapman & Hall, 1995.
- [7] 周跃,徐强,络华松. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应 II—野外直测[J]. 山地学报, 1999, **17**(1): 10-15.
- [8] 张俊云,周德培. 红层泥岩边坡生态防护机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(2): 250-256.
- [9] 江锋,张俊云. 植物根系与边坡土体间的力学特性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, **19**(1): 57-61.
- [10] Zheng Y R, Xu G C. Further research on plastic yield criterion for rock soil material[J]. *Advances in Constitutive Laws for Engineering Materials*, 1989.
- [11] Lade P V. Elastic-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface[J]. *Inter J Solids and Structure*, 1977, **13**(11): 1019-1035.
- [12] Yan Z X, Duan J, Jiang P, *et al.* A study on constitutive model and parameters of rock slope stability[C]//*Physical and Numerical Simulation of Materials Processing*. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2008: 1210-1216.
- [13] Liu Z Z, Yan Z X, Duan J. Couple analysis on strength reduction theory and rheological mechanism for slope stability[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, **15**(2): 351-356.
- [14] 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.
- [15] 周云艳,陈建,王晓梅. 植被护坡中植物根系的阻裂增强机理研究[J]. 武汉大学学报(理学版), 2009, **55**(5): 613-618.
- [16] Wu T H, Beal P E, Lan C. In-situ test of soil-root systems[J]. *J Geotech Engrg*, 1988, **114**(12):1376-1394.
- [17] Wu T H. *Soil Stabilization Using Vegetation Proceedings of a Biotechnical Stabilization* [M]. Ann Arbor, Michigan: Work-shop University of Michigan, 1991.
- [18] Riestenberg M M, Sovonick-Dunford. The role of woody vegetation in stabilizing slopes in the Cincinnati area, Ohio [J]. *Geol Soc Am*, 1983, **94**(4): 506-518.

Mechanical Analysis of Interaction Between Plant Roots and Soil Mass in Slope Vegetation

YAN Zhi-xin^{1,2}, SONG Yun³, JIANG Ping^{1,2}, WANG Hou-yu⁴

(1. *Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China (Lanzhou University), Ministry of Education, Lanzhou 730000, P. R. China;*

2. *School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China;*

3. *College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, P. R. China;*

4. *Air Force Engineering Design & Research Bureau, Beijing 100077, P. R. China)*

Abstract: With the help of plant roots, slope vegetation renders the slope soil mass a composite material of soil and roots, thereby conspicuously enhances the shear strength of slope soil mass and the stability of slope. Therefore, slope vegetation is always an optimal choice for engineers. Nevertheless, present correlative studies still remain at the stage of qualitative analysis. Some explorations in quantitatively analyzing the interaction between roots and soil mass were achieved. Through analyzing the interaction between herbaceous plant roots (including lateral roots of woody plants) and rock and soil mass, a mechanical model of the interaction between frictional roots and soil was established, and its correctness was verified. Meanwhile, a mechanical model of the interaction between anchorage root, namely, woody plant taproot, and soil was also established. The models provide a significant theoretical guidance for quantitatively analyzing the interaction between plant roots and soil and are of certain application value.

Key words: slope vegetation; vegetation for slope protection; mechanical model; frictional root; anchorage root