

# 植物根系固坡效应模拟及稳定性数值分析

付海峰<sup>1</sup>, 姜志强<sup>2</sup>, 张书丰<sup>2</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300450; 2. 河海大学 地质岩土工程系, 南京 210098)

**摘要:** 随着生态环境保护的要求日益提高, 植物护坡工程的理论和实践研究得到了发展。由于植物根系及其分布的随机性和复杂性, 根土相互作用机理以及根系固坡的定量化研究工作还很不深入。本文对根系固土力学机制和根土复合介质抗剪强度模型进行了评述, 将根系对土体的强度贡献以“表观凝聚力”表示, 采用数值方法对植物根系固坡效应及其稳定性进行了分析, 考虑根系强度增量以及护坡深度, 在多种情况下进行了边坡整体安全系数计算。分析结果可为植物根系的力学效应评判、护坡植物的选取, 以及其优化布设等纵深研究方面提供了理论基础。

**关键词:** 根系; 植物护坡; 表观凝聚力; 数值计算; 强度折减

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2007)01-0092-03

中图分类号: S157.2

## Numerical Simulation of Root Reinforcement to Stability of Slope

FU Hai-feng<sup>1</sup>, JIANG Zhi-qiang<sup>2</sup>, ZHANG Shu-feng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjing 300450, China;

2. Department of Geological and Geotechnical Engineering, Hehai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** With the demand of ecological environment protection, research on slope protection engineering by vegetation has received extensive development. However, few quantitative works have been done for the root-soil interaction and the effects of root reinforcement to slope due to the randomness and complexity of the root distribution. The mechanism of root reinforcement to soil and the shearing model of root-soil composite medium are discussed. The contribution of root reinforcement to shear strength is considered to have the characteristics of cohesion, and the effects of root reinforcement to slope are analyzed by numerical simulation. The safety factors of slope are computed in several kinds of cases. The results of this study may provide theoretical foundations to the deeper research works such as assessments of root reinforcement, selections of vegetation and the corresponding arrangement.

**Keywords:** plant roots; slope protection by vegetation; apparent cohesion; numerical simulation; strength reduction

随着生态环境保护和协调的要求日益提高, 在自然边坡的保护和治理上, 越来越多地选择植物方法与传统的岩土工程技术相结合的方法, 从而使得植物护坡工程的理论和实践研究得到了重视。从护坡效应力学机制的视角出发, 根土的相互作用机理以及根系对岩土介质加固作用的定量化评价工作还很不深入, 这是因为根系是一个复杂的动态系统, 生长于容易变异的岩土介质中, 很难对其实施非破坏性监控; 同时护坡植物的种类包括乔、草、灌等多种类型, 其特性受所赋存的土壤环境影响而使得根系的分布和强度具有随机性和多变异性。在山林坡地、公路铁路边坡以及堤防工程中的大量实践表明<sup>[5-9]</sup>, 植物根系的存在对边坡稳定性的积极影响是显著的。植物护坡稳定性的研究是个涉及多因素的系统课题, 本文着重从根系固土效应出发, 采用有限元数值模拟方法研究了

在一般边坡环境下植物固坡效果, 从而为此类课题中植物根系的力学效应评判、护坡植物的选取, 以及其优化布设等纵深研究方面提供了理论基础。

## 1 根系固土力学机制

通常根据植物根系的抗拉强度和抗弯刚度, 将根系分为深粗根系和浅细根系。植物的深粗根本身具备一定的强度和刚度, 当其穿过坡体浅层的松散风化带深入到深处坚硬的土层上, 会起到锚固体系的作用。禾本科、豆科植物和小灌木在地下 0.75~1.50 m 深度处有明显的土壤加强作用, 树木根系的锚固作用可以影响到地下更深的岩土层。深粗根具有一定的刚度, 周覆土体发生移动趋势时, 将产生一定的摩擦力, 此时深粗根系类似于锚杆系统, 通过扶壁和土拱作用抵抗坡体下滑趋势。

植草的浅细根系在坡体浅层错综盘结, 不具有抗弯刚度, 草根可视为带预应力的三维加筋材料。草根的张拉将限制土体的变形, 由此产生的加固效应与草根密度、强度及土体性质有关。若不考虑根系之间的强度和尺寸差异, 根土相互作用可看成纤维加筋土的模式。关于纤维加筋作用对复合介质的强度影响, 可以通过等效围压理论和表观凝聚力来阐述<sup>[4]</sup>。

## 2 根土复合介质抗剪强度模型

根土复合介质体统类似于钢筋混凝土, 根系具有相对土体较大的抗拉强度, 根系与土体之间通过根土粘合键作用将抗拉强度传递到周围的土体中, 根据该力学机制, Wu 提出了根土复合介质抗剪强度的垂直根模型<sup>[1]</sup>。由于根系的存在, 土体抗剪强度的提高值  $\Delta C$  为:

$$\Delta C = T(A_r/A)(\sin\theta + \cos\theta \tan\varphi) \quad (1)$$

式中:  $T$  —— 根系的平均抗拉力(N);  $A_r/A$  —— 剪切面上根系剖面率;  $\theta$  —— 根系倾斜角度( $^\circ$ );  $\varphi$  —— 土体的内摩擦角度( $^\circ$ )。

整个土体的抗拉强度相当于在无根系土体的抗剪强度上又增加了一个凝聚力项, 若考虑空隙水应力, 摩尔—库仑强度准则表达式为:

$$\tau = (c' + \Delta c) + (\sigma - u)\tan\varphi \quad (2)$$

式中:  $c'$ ,  $\varphi$  —— 土体有效应力强度指标。

公式(2)为饱和土强度公式, 如考虑非饱和情况, 需在公式中增加吸力项。

Wu 和 Gray 采用无限坡模型<sup>[1-2]</sup>, 对根系固土稳定性进行了分析, 由于考虑了植物根系的作用, 边坡的安全系数得到提高。无限坡法建立在静力平衡分析上, 无法考虑根土复合介质的整体应力应变特性, 一般用于岩石边坡的表层松散堆积介质的根系加固效应分析, 滑动面被理想化为无限延伸的平面, 而自然界中植被坡面系统是非常复杂的。显然, 极限平衡法不能从根本上很好地描述根土相互作用的机理。

## 3 植物根系固坡的数值分析

### 3.1 安全系数

本文采用快速拉格朗日(FLAC)强度折减系数法进行边坡整体安全系数的评价。强度折减系数法的基本原理<sup>[10]</sup>是将坡体强度参数: 粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  值同时除以一个折减系数  $F_s$ , 得到一组新的  $c$ 、 $\varphi$  值, 然后作为新的资料参数输入, 再进行试算, 当计算不收敛时, 对应的  $F_s$  被称为坡体的最小稳定安全系数, 此时坡体达到极限状态, 发生剪切破坏, 同时可得到坡体的破坏滑动面。安全系数  $F_s$  的表达式为:

$$F_s = \frac{c}{c'} = \frac{\tan\varphi}{\tan\varphi'} \quad (3)$$

### 3.2 计算分析模型

将边坡简化为平面应变问题, 采用二维有限差分进行计算分析, 计算网格模型(如图 1)所示, 边界条件为: 底边的水平和竖直位移约束, 模型的左右边界上水平位移约束, 边坡表面为自由面。边坡土体的计算参数为凝聚力  $c' = 0$ , 内摩擦角  $\varphi' = 25^\circ$ , 重度  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ 。不考虑地下水的影响。

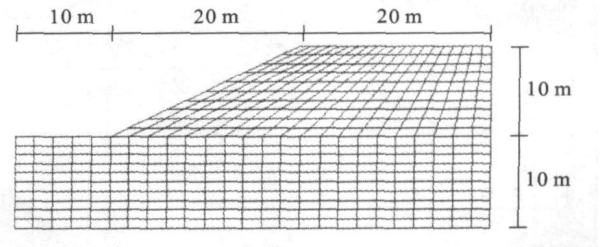


图 1 计算模型图

为研究根系固土效应, 算例考虑 2 个参数的影响, 分别为根系提供的强度增量  $\Delta c$  和根系作用影响带, 以厚度  $h_R$  表示, 在坡面垂直深度  $h_R$  以下根系的固土效应消失。考虑植物根系分布的 2 种情况, 分别为仅在斜坡面上分布植物和在整個边坡的上覆表面都分布植物。

## 4 结果分析

### 4.1 根系强度增量 $\Delta c$ 对边坡稳定性的作用

无植被边坡的天然稳定安全系数为 0.97, 斜坡面的顶部为潜在破坏区域, 属于浅层破坏。

当边坡表面生长植被, 将在坡面浅层提高坡体的抗剪强度, Gray<sup>[2]</sup>曾在纤维砂土的强度试验中发现, 随着土体中的纤维量增加, 抗剪强度也随之增大, 并指出在剪切面上当纤维截面积所占比例在 0~1.7% 之间是成立的, 而 1.7% 也是自然界中植被根系在所赋存的土体中的根量的上限。

根据试验室实测渗透性砂中根系强度影响可知, 根系或纤维能在砂质土中增加内聚力 1.7~8.3 kPa<sup>[3]</sup>。本文取  $\Delta c = 5 \text{ kPa}$ ,  $h_R = 1 \text{ m}$ , 按植被仅分布在斜坡面和植被遍布整个边坡表面分布 2 种情况进行计算, 图 2, 3 分别为这 2 种情况的计算网格剖分图。经过计算, 在 2 种情况下安全系数分别为 1.08 和 1.09。

由于有了植被根系对坡面土体的加固, 使得边坡的整体安全系数提高, 无植被覆盖时为 0.97, 边坡处于理论上的不稳定状态, 经过植被护坡, 安全系数提高到 1.08~1.09。数值计算表明, 此时坡体属于浅

层破坏,这 2 种植被分布情况下其整体安全系数相差不大,斜坡表面土层的强度参数对整体稳定性起控制性作用。

在人工植物护坡工程实施中,需重视斜坡面的植物选择,尽可能选取根系发达且根系强度高的植物种类,此类植物的存在不仅能很好地控制坡体的水土流失,防止坡面侵蚀,而且能提高坡面土体的强度,增加整体稳定性。

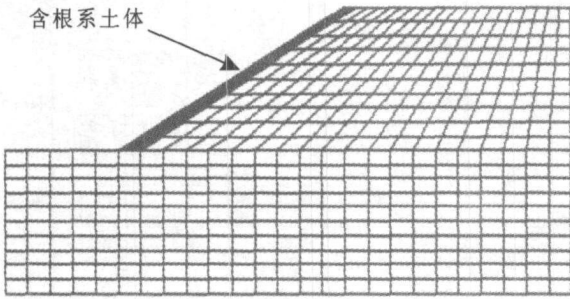


图 2 斜坡面分布植被网格图

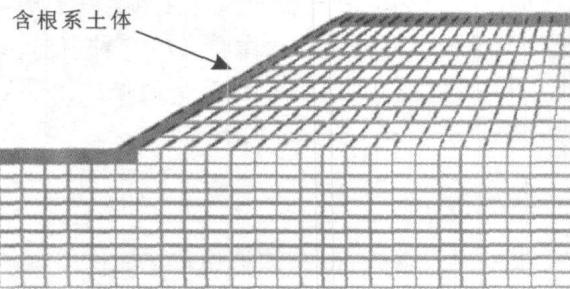


图 3 整个边坡表面分布植被网格图

试验表明,根系含量的提高并不能持续增加土体强度<sup>[3]</sup>。以斜坡表面分布植被的情况进行计算,如图 4 为随着表层根土复合介质的“表观凝聚力” $\Delta c$ 和边坡整体稳定系数之间的关系,由图中可见,随着根系的加密,亦即“表观凝聚力”的增加,边坡的稳定安全系数是增加的,但是这种增加的趋势是递减的,当土层中的根量增加到了一定程度,对整体稳定性的贡献将几乎不再增加。

#### 4.2 护坡深度的影响

植物加固边坡仅在其根系影响范围之内,通常根系分布在地下 1.5 m 以内,有些乔木根系可延伸至地下 3 m。取为 1, 2, 3 m, 如图 5 所示,随着根系分布范围的增加,边坡的整体安全系数亦增大,但随着“表观凝聚力” $\Delta c$  的增加,这种增加的趋势是递减的。因此,在护坡工程实践中,对于同等强度的植物根系,应选取根系发达,向坡体延伸长度大的植物种类。

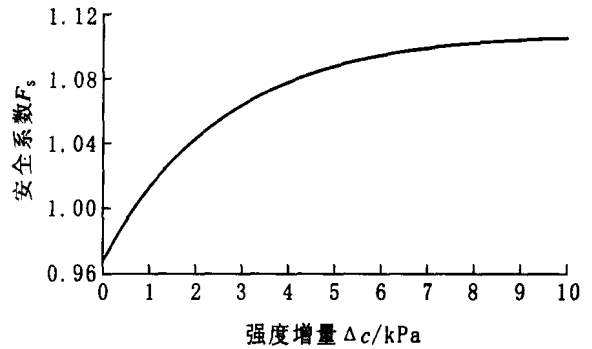


图 4 安全系数  $F_s$  与强度增量  $\Delta c$  的关系

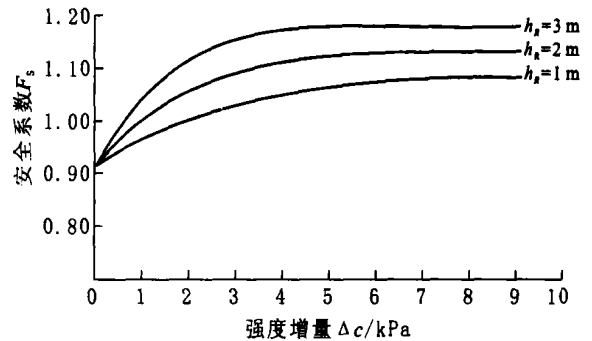


图 5 不同  $h_R$  下安全系数  $F_s$  与强度增量  $\Delta c$  的关系

## 5 结 论

采用数值方法对植物根系固坡效应及其稳定性进行了分析,由于植物根系及其分布的随机性和复杂性,将根系对土体的强度贡献以“表观凝聚力”表示,在多种情况下进行了边坡整体安全系数计算。

(1) 由于植物根系的抗拉强度,使得根土复合介质类似的力学形态类似于钢筋混凝土,根系作为三维筋材增加了根土之间的联结力和摩擦力,从而增加了土体的抗剪强度。FLAC 强度折减法计算表明,由于根系的存在,明显提高了边坡的整体稳定性。

(2) 植物加固边坡仅在其根系影响范围之内,是防止浅层破坏的良好措施。斜坡表面土层的强度参数对整体稳定性起控制性作用。在人工植物护坡工程实施中,需重视斜坡面的植物选择,尽可能选取根系发达且根系强度高的植物种类,此类植物的存在不仅能很好控制坡体的水土流失,防止坡面侵蚀,而且能提高坡面土体的强度,增加整体稳定性。

(3) 随着根系的加密,亦即“表观凝聚力”的增加,边坡的稳定安全系数增加,但是这种增加的趋势是递减的,当土层中的根量增加到了一定程度,对整体稳定性的贡献将几乎不再增加。

(下转第 98 页)

- Vanoni V A. American Society of Civil Engineers, Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54. American Society of Civil Engineers, New York, 1975.
- [ 3 ] Singh K P, Durgunoglu A. Predicting sediment loads[ J ]. Civil Engineering, 1992, 62: 64—65.
- [ 4 ] Wischmeier W H. Use and misuse of the universal soil loss equation[ J ]. Journal of Soil and Water Conservation, 1976, 31: 5—9.
- [ 5 ] Lane L J, Nearing M A, Laflen J M, et al. Description of the US Department of Agriculture Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model[ M ]. in: Overland Flow, 1993.
- [ 6 ] Gomez B, Church M. An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers[ J ]. Water Resources Research, 1989, 25: 1161—1186.
- [ 7 ] Whipple K X, Dunne T. The influence of debris flow rheology on fan morphology[ J ]. Owens Valley, California, Bulletin of the Geological Society of America, 1992, 104: 887—900.
- [ 8 ] Johnson A M, Rodine J R. Debris flow[ M ]. in: Slope Instability, edited by Brunsden D, Prior D B, Wiley, Chichester, 1984. 257—361.
- [ 9 ] Lorenz E. The Essence of Chaos, University of Washington[ J ]. Seattle, 1993: 227.
- [ 10 ] Ruelle D. Where can one hope to profitably apply the ideas of chaos[ J ]. Physics Today, 1994, 47: 24—30.
- [ 11 ] Tetzlaff D M. Limits to the predictive stability of dynamic models that simulate clastic sedimentation[ M ]. in: Quantitative Dynamic Stratigraphy, edited by Cross T A, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989. 55—65.
- [ 12 ] Howard A D. A detachment-limited model of drainage basin evolution[ J ]. Water Resources Research, 1994, 30: 2261—2285.
- [ 13 ] Howard A D, Dietrich W E, Seidl M A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales[ J ]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 13971—13986.
- [ 14 ] Murray A B, Paola C. A cellular model of braided rivers[ J ]. Nature, 1994, 371: 54—56.
- [ 15 ] Baird A J, Thornes J B, Watts G P. Extending overland flow models to problems of slope evolution and the representation of complex slope-surface topographies[ M ]. in: Overland Flow, edited by Parsons A J, Abrahams A D, Chapman and Hall, New York, 1993. 199—223.
- [ 16 ] Tetzlaff D M, Harbaugh J W. Simulating Clastic Sedimentation, van Nostrand Reinhold[ M ]. New York, 1989. 202.

(上接第 94 页)

(4) 安全系数随着植物根系分布范围的增加而提高,在护坡工程实践中,对于同等强度的植物根系,应选取根系发达,向坡体延伸长度大的植物种类。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Wu T H, McKinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[ J ]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 114(12): 19—33.
- [ 2 ] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and Soil Bioengineering, Slope Stabilization, A Practical Guide for Erosion Control[ M ]. New York: John Wiley & Son, 1996.
- [ 3 ] Barker D H. Continuing and future developments in vegetative slope engineering or ecoengineering[ A ]. in: Proceedings of the International Conference on Vegetation and Slopes[ C ]. Oxford: [ s. n. ], 1994. 29—30.
- [ 4 ] 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 ]. 勘查科学技术, 2005, 4: 12—14.
- [ 5 ] 姜志强,孙树林. 堤防工程生态固坡浅析[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2133—2136.
- [ 6 ] 胡利文,陈汉宁. 锚固三维网生态防护理论及其在边坡工程中的应用[ J ]. 水运工程, 2003(4): 13—15.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 周跃,骆华松,徐强,等. 乔木的斜向支撑效能及其坡面稳定意义[ J ]. 山地学报, 2000, 18(4): 306—312.
- [ 9 ] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究[ J ]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 7—14.
- [ 10 ] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折剪法求边坡稳定安全系数[ J ]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343—346.