

文章编号: 1673-9469 (2017) 03-0027-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.006

木本植物根系对边坡稳定性影响分析

丁伟¹, 孙树林^{1, 2}, 陈怿旸¹, 储浩¹, 张磊¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京211100; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京210098)

摘要: 根据木本植物根系对边坡提供轴向力和抗剪力的原理, 采用不同根系长度下的抗拔力的取值, 建立根系固坡模型并进行数值模拟分析。在模拟过程中, 针对根系长度、密度和降雨条件等主要影响因素, 研究其对边坡稳定性的影响。结果表明: 木本植物根系的存在能够提高土体的抗剪强度, 增加边坡的稳定性, 使边坡更加趋于稳定; 木本植物根系长度的增加和密度的变大, 都会增大边坡的安全系数; 在降雨条件下, 植物根系仍能增大边坡的安全系数, 对边坡有一定的加固效果。

关键词: 植物根系; 边坡; 安全系数; 抗拔力

中图分类号: TU43

文献标志码: A

Analysis of the slope stability reinforced by roots of woody plants

DING Wei¹, SUN Shulin^{1, 2}, CHEN Yiyang¹, CHU Hao¹, ZHANG Lei¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The model of slope reinforced by roots is established and the numerical simulation is carried out by using the pullout resistance of different roots length according to the principle of the axial force and the shear resistance of the woody roots system to the slope. In the process of simulation, the effects of the roots length, roots density and rainfall conditions on the slope stability are studied. The results show that the roots of woody plants can improve the shear strength of soil, increase the stability of slope and make the slope more stable. Increasing the length and density of woody plants can make the safety factor of slope larger. The roots system can still increase the safety factor of slope, and has a certain reinforcement effect on the slope under rainfall conditions.

Key words: plant roots; slope; factor of safety; pullout resistance

为促进环境友好型社会的建设, 地质灾害防治中对环境保护的要求也在提高。因此, 在滑坡治理上, 采用生态固坡的理论和实践研究得到重视。国内外一些学者也对此做了大量的研究^[1-5], 提出不同的根系固坡理论, 促进了此课题的发展。其中Zhu等^[5]采用蒙特卡罗模拟树根的随机分布对边坡稳定性影响, 但对植物根系实际的生长方向考虑不周。此外, 根在土中的抗拔力主要因为根土之间的摩擦力产生, Zhu等采用固定的抗拔力也没有考虑到地应力随深度变化对根土之间的摩擦力的影响, 即抗

拔力是一个变化的值。本文采用植物根系按照竖生长的模型, 取不同长度根系下的抗拔力进行计算。针对木本植物根系的长度、分布密度和降雨条件等因素对边坡稳定性的影响, 进行建模计算定量分析, 从而确定木本植物固坡的作用大小及影响程度。

1 根系固坡的力学原理

1.1 木本植物

图1中根系总长度为 L , 将根系在潜在滑动面

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家重点实验室开放研究基金资助项目(2005408911); 留学回国人员科研基金资助项目(20071108)

作者简介: 丁伟(1992-), 男, 河南驻马店人, 硕士, 主要研究方向为环境地质工程。

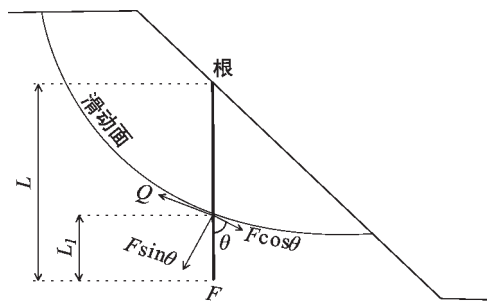


图1 根系固坡力学示意图

Fig.1 Schematic diagram of the slope reinforced by roots

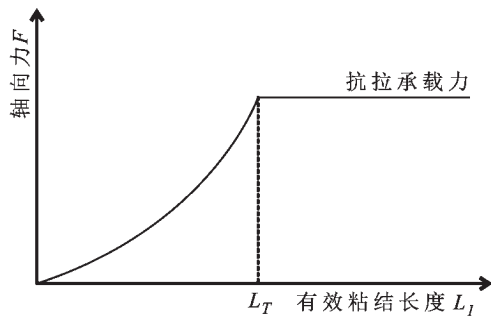


图2 轴向力与有效粘结长度函数关系图

Fig.2 Relationship between axial force and effective bond length

以下有效粘结长度记作 L_1 。本文只考虑木本植物根系在垂直方向上的主根对边坡加固作用，不计侧根的影响。由于根土之间摩擦作用，根系对土体产生一个轴向力 F 。轴向力 F 能够增加潜在滑动面上的正压力和减少下滑力来促使边坡的稳定。此外，因根的横向弯曲强度还产生一个抗剪切力 Q 。故木本植物根系对边坡产生的总共抗滑力 $F_{抗}$ 如下：

$$F_{抗} = F \sin \theta \tan \varphi - F \cos \theta + Q \quad (1)$$

其中 F 为轴向力； φ 为土的内摩擦角； θ 为植物根系与潜在滑动面之间的夹角。

图2中，当 L_1 小于根系的极限长度 L_T 时，轴向力 F 为

$$F = PL_1 \quad (2)$$

其中 P 为抗拔力， kN/m ； L_1 为有效粘结长度， m 。当 L_1 大于根系的极限长度 L_T 时，轴向力 F 等于根系的抗拉承载力 T (单位： N)，实验得到与根系直径 D (单位： mm) 关系^[6]为

$$T = 13.525D^{1.64} \quad (3)$$

根系产生的抗剪切力 Q 取值为 T 的 $1/3 \sim 1/2$ ^[7]。本文中根系直径 D 取值 100 mm ^[8]，根据式(3) Q 的取值为 12.89 kN ，方向平行于滑移面。

在抗拔力的取值上，Zhu 等^[5] 采用固定的抗拔力值。这没有考虑到地应力随深度变化对根土之间的摩擦力的影响。由于抗拔力主要是因为根系和土

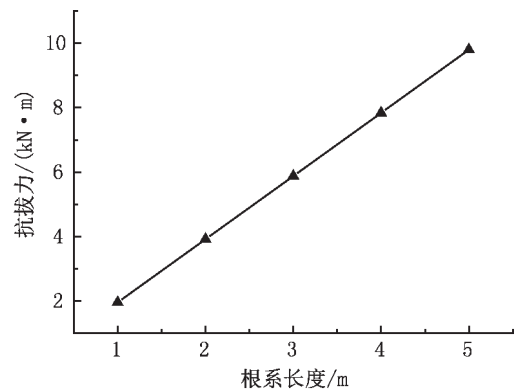


图3 抗拔力随根系长度变化图

Fig.3 Pullout resistance versus roots length

之间的摩擦力而产生的。本文依据综合 μ 法^[9]，在地下深度为 z 的一段长 dz 的根系受到的摩擦力 f_{dz} ：

$$f_{dz} = \mu \pi D \gamma z \cdot dz \quad (4)$$

其中 D 为根系直径， m ； z 为深度， m ； γ 为土体容重， kN/m^3 ； μ 为根土之间的摩擦系数。则长为 L 的整个根系在土中受到的摩擦力 f_L 为

$$f_L = \int_0^L \mu \pi D \gamma z \cdot dz \quad (5)$$

因此，根系抗拔力 P 与根系长度 L 关系式如下：

$$P = \frac{\int_0^L \mu \pi D \gamma z \cdot dz}{L} = \frac{1}{2} \mu \pi D \gamma L \quad (6)$$

文中根土之间摩擦系数 μ 为 0.733 ^[10]。本文以两种主要土类型：粘土和沙土，如表1中所示。两种土的容重相差不大，故本文将 γ 取为两者的平均值 17 kN/m^3 。图3即是根据式(6)计算得到在不同根系长度下平均粘结阻力 P 的取值。

1.2 草本植物

将草本植物的根与土看做均质体，草本植物根系对边坡加固作用主要是通过对土产生附加粘聚力 C_R ，附加粘聚力通过式(7)^[11] 计算得出：

$$C_R = t_R (\cos \theta \tan \varphi + \sin \theta) \quad (7)$$

其中 t_R 是土体平均抗拉强度； φ 是土体的内摩擦角； θ 是旋转剪切角。草本植物产生附加粘聚力 C_R 与根系深度关系^[11]，如图4所示：草本植物在 0.5 m 深度产生的附加粘聚力为 0 。本文将附加粘聚力 $C_R = 1 \text{ kPa}$ 应用于表层 0.5 m 厚度的土。

2 根系固坡的数值模拟

2.1 边坡概化模型及参数

图5是一个边坡的几何模型。坡高 H 为 20 m 保持不变，坡面倾角为 30° 。地下水在坡脚地面以下

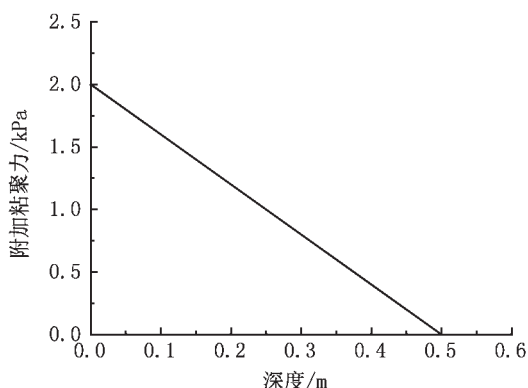


图4 附加粘聚力随深度变化图
Fig.4 Additional cohesion changes with depth

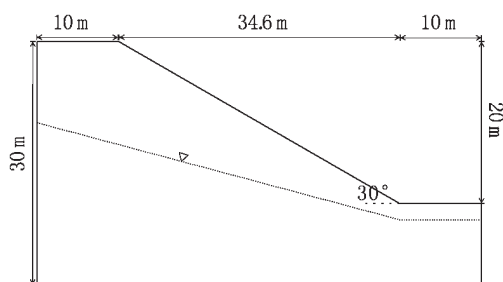


图5 边坡的几何模型
Fig.5 Geometric model of slope

2 m 深处。本文主要考虑两种不同土类型下根系对边坡稳定性影响。其力学参数见表 1。

2.2 根系固坡分析模型

图 6 是根系固坡分析模型，从中可以看出，草本植物根系分布在整个分析模型的表层土，木本植物根系均匀分布在坡面上。图中根系长度为 4 m，根密度 RD（根数/坡面长度）为 0.4。本文主要考虑木本植物根系长度 L （取值 1、2、3、4、5 m）和根密度 RD（取值 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5）的变化对边坡稳定影响。进而分析在降雨条件下木本植物根系对边坡的加固作用。

3 结果分析

3.1 根系长度对边坡安全系数的影响

木本植物根系的存在，给边坡土层增加了轴向

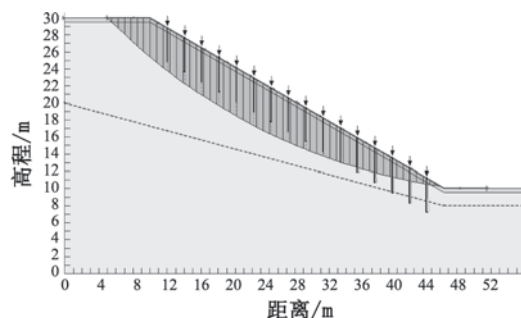
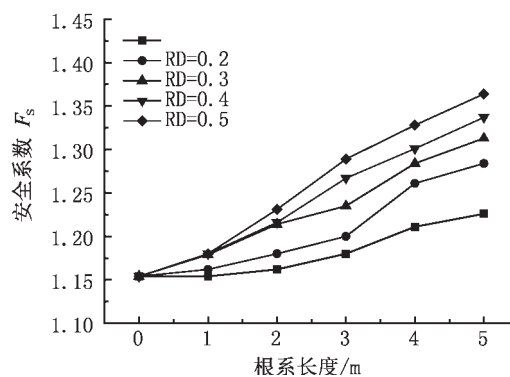


图6 根系固坡分析模型

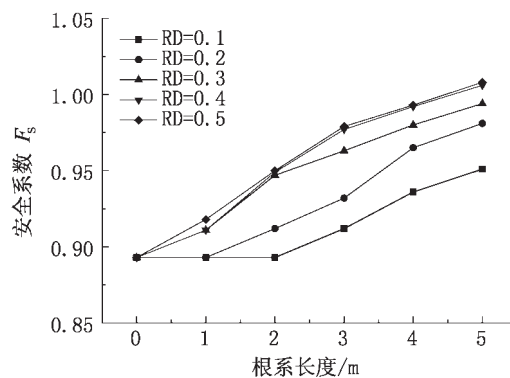
Fig.6 Analysis model of slope stability reinforced by roots

力 F 和抗剪力 Q ，这使得土层的抗剪强度增加，从而提高了边坡的稳定性。

从图 7 可以看出，随着木本植物根系的生长边坡的安全系数变大，对边坡起到加固效果。但同时随着根系长度的增长，安全系数的增加量变小。这说明在一定的植物根系密度下，木本植物根系长度



(a) 沙土

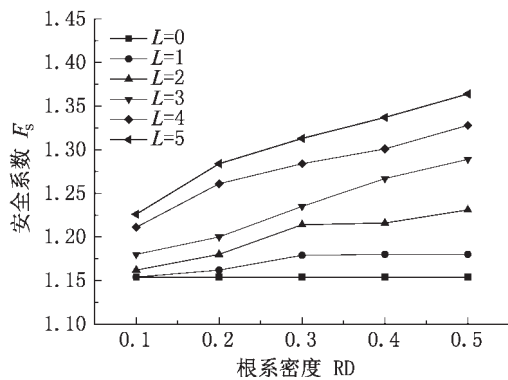


(b) 粘土

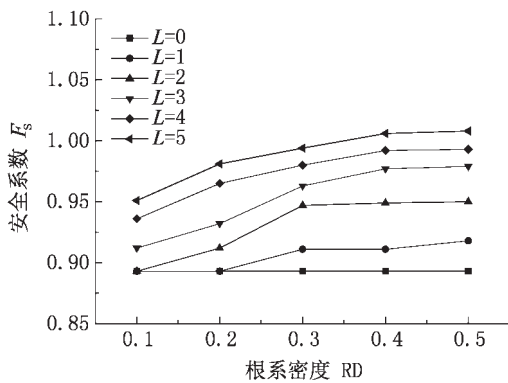
图7 安全系数随根系长度变化示意图
Fig.7 Change of safety factor with roots length

表 1 沙、粘土力学参数表
Tab.1 Mechanical parameters of sand and clay

沙土				粘土			
γ_{unsat}	γ_{sat}	c	ϕ	γ_{unsat}	γ_{sat}	c	ϕ
$/(kN \cdot m^{-3})$	$/(kN \cdot m^{-3})$	/kPa	$^{\circ}$	$/(kN \cdot m^{-3})$	$/(kN \cdot m^{-3})$	/kPa	$^{\circ}$
17.5	21	1	31	16.5	19	2.1	23



(a) 沙土



(b) 粘土

图8 安全系数随根系密度变化示意图
Fig.8 Change of safety factor with roots density

的增加对安全系数的提高逐渐减弱。

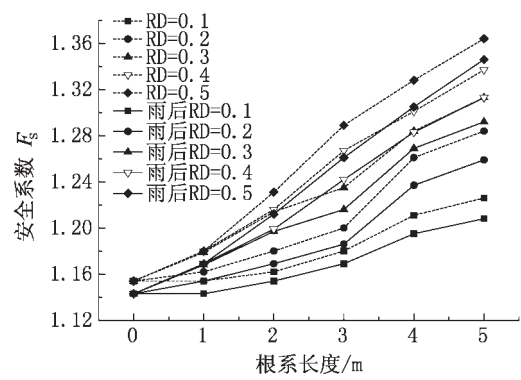
3.2 根系密度对边坡安全系数的影响

从图8中可以看出,在根系长度相同时,随着根系密度的增加,边坡安全系数变大。而在保持根系长度一定的情况下,根系密度从0.1到0.5,沙土边坡安全系数的增加量比粘土边坡安全系数的增加量大。表明植物根系对沙土质边坡的加固作用优于粘土质边坡。

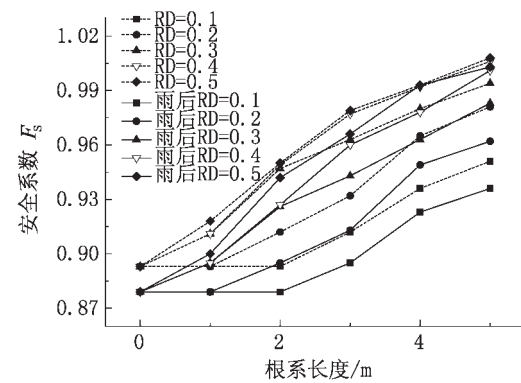
在同一根系长度条件下,安全系数随根系密度的增长趋势上来看。沙土边坡安全系数随根系密度增长一直很明显,而粘土边坡安全系数随根系密度增长会减慢。

3.3 降雨条件下根系对边坡安全系数的影响

图9中虚线是在没有降雨条件下的安全系数。从图中可以看出,在降雨条件下植物根系对边坡依然有加固作用,并没有因为降雨的原因而消失。在有降雨条件下,边坡的安全系数都有一定的减小。降雨条件下植物根系长度和密度的变化对安全系数



(a) 沙土



(b) 粘土

图9 降雨条件下植物根系对边坡安全系数的影响
Fig.9 Effects of plant roots on safety factor of slope under rainfall

的影响规律与没有降雨条件下基本相同。

4 结论

- 1) 木本植物根系会对土层产生一个轴向力和抗剪力,从而增加土层的抗剪强度,增大边坡的安全系数。
- 2) 木本植物根系长度的增加和密度的变大,都会增大边坡的安全系数。
- 3) 相同根系长度和根系密度条件下,根系对沙土边坡的安全系数增加量大于粘土边坡。
- 4) 降雨会使边坡的安全系数减小。在降雨条件下,植物根系仍能增大边坡的安全系数,对边坡有一定的加固效果。

参考文献:

- [1] 嵇晓雷, 杨平. 夹竹桃根系形态参数及其对边坡稳定的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(4): 71-75.
- [2] 邓卫东, 周群华, 严秋荣. 植物根系固坡作用的试验与计算[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 7-12.

- [3]JI J, KOKUTSE N, GENET M, et al. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2012, 92(1): 139-154.
- [4]TEMGOUA A G T, KOKUTSE N K, KAVAZOVIC Z. Influence of forest stands and root morphologies on hillslope stability[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 622-634.
- [5]ZHU H, ZHANG L M, XIAO T, et al. Enhancement of slope stability by vegetation considering uncertainties in root distribution[J]. *Computers & Geotechnics*, 2017, 85: 84-89.
- [6]吕春娟, 陈丽华. 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 69-78.
- [7]STOKES A, MATTHECK C. Variation of wood strength in tree roots[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996 47(5): 693-699.
- [8]汪万福, 武发思, 徐瑞红, 等. 基于探地雷达的树木根系空间分布及对土遗址影响 [J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1163-1170.
- [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(3): 7-14.
- [10]刘小光. 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [11]WU T H, III M K, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.

(上接第26页)束梁板子结构的抗力增加了约68%,说明板边约束增强了结构的抗倒塌能力,但同时降低了结构的延性,其失效过程整体与无约束时相近,但横向梁先于双跨梁破坏,其原因可能是,增加的板边约束使得结构产生了非对称边界条件,造成失效柱横向移动,产生了较大的变形,最终导致结构在该方向失效。

参考文献:

- [1]QIAN K, LI B. Load-resisting mechanism to mitigate progressive collapse of flat slab structures[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2015, 67(7): 349-363.
- [2]QIAN K, LI B. Quantification of Slab Influences on the Dynamic Performance of RC Frames against Progressive Collapse[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 29(1): 1-11.
- [3]DAT P X, HAI T K. Membrane actions of RC slabs in mitigating progressive collapse of building structures[J]. *Engineering Structures*, 2013, 55(4): 107-115.
- [4]DAT P X, KANG H T. Experimental study of beam-slab substructures subjected to a penultimate-internal column loss[J]. *Engineering Structures*, 2013, 55:2-15.
- [5]DAT P X, TAN K H. Experimental Response of Beam-Slab Substructures Subject to Penultimate-External Column Removal[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 141(7): 1-12.
- [6]齐宏拓, 李琪琳. 钢筋混凝土楼板抗连续倒塌性能数值模拟分析 [J]. *建筑结构*, 2010(S2): 358-364.
- [7]梁益, 陆新征, 李易, 等. 楼板对结构抗连续倒塌能力的影响 [J]. *四川建筑科学研究*, 2010, 36(2): 5-10.
- [8]GSA (2003), General Services Administration, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects[S].
- [9]Department of Defense (DoD). Design of buildings to resist progressive collapse[S].
- [10]British Standard B S. 8110-97, Structural use of concrete, Part 1, Code of practice for design and construction[S].