

草本植物加固边坡的力学原理

言志信^{1,2}, 宋杰^{2,3}, 蔡汉成^{1,2}, 王后裕⁴

(1. 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. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明, 650224; 4. 空军工程设计研究局, 北京, 100077)

摘要:草本植物根系使边坡土体浅层成为土体和根系的复合材料,它通过根土摩擦作用和根的抗拉作用,增强了根系土层的整体抗剪强度,但至今人们对草本植物根系对边坡岩土体的作用及效应的研究仍很少,亟待深入。通过对草本植物根系加固边坡的力学原理进行了全面的分析,不但提出了根土作用的力学模型,而且对边坡增加的抗剪强度和增加的边坡稳定性系数进行了定量计算。从而为草本植物生态护坡提供了理论依据。

关键词:草本植物;力学原理;加固边坡;边坡稳定性;边坡抗剪强度

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)02-0030-05

Mechanical Analysis of Herbaceous Plant Strengthening Slope

YAN Zhi-Xin^{1,2}, SONG Jie^{2,3}, CAI Han-cheng^{1,2}, WANG Hou-yu³

(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. School of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, P. R. China; 4. Air Force Engineering Design & Research Bureau, Beijing 100077, P. R. China)

Abstract: Since there are the root systems of herbaceous plant in the shallow layer of soil masses of slope, the shallow layer of slope becomes a compound materials made of soil masses and root system. Owing to friction action and tensile resistance action of roots, the shear strength of soil layer with root system is increased. And a comprehensive mechanical analysis of how herbaceous plants strengthen slope was carried out. Not only a mechanical model of interaction between root and soil, but also a quantitative calculation of increase of shear strength and stability coefficient of slope was put forward. As a result, the theoretical basis of herbaceous plant ecological slope protection was provided.

Key words: herbaceous plant; mechanical principle; strengthening slope; slope stability; shear strength of slope

草本植物加固边坡作为一种生态护坡方法,近年来随着人们环保意识不断加强而广泛运用于工程实践^[1-3],特别是“生态文明”科学概念日益普及和深化的今天,植物生态护坡已成为边坡防护的一种主

要方式之一,也是边坡防护工程的发展方向。草本植物根系具有一定的抗拉强度,可视其为边坡土体中的一种带预应力的三维加筋材料,其加筋作用一方面表现为增加了土层的“粘聚力” c ,另一方面表现

收稿日期:2009-07-02

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项目;甘肃省科技计划资助项目(096RJZA048)

作者简介:言志信(1961-),男,教授,博士生导师,博士后,主要从事边坡工程、地下工程等方面研究,(E-mail) yzx10@163.com; yanzhx@lzu.edu.cn。

为对土粒的网兜包裹效应,从而限制土体的变形,对边坡土体起到加固作用,提高了土体抗剪强度及边坡稳定性^[1,4-5]。

由于草本植物加固边坡机理复杂,其理论研究水平远远不能适应工程应用的需要,只有明确植物固坡原理和效果后,才能确定边坡的安全稳定性,从而更好地为工程所应用。基于此,通过探讨草本植物护坡的力学机理,试图得到草本植物根系对边坡岩土体抗剪强度和稳定性系数影响的一般计算式。

1 草本植物边坡防护加固的力学原理分析

导致边坡滑坡的因素复杂多变,但其根本原因在于土体内部某个滑动面上的剪应力达到其抗剪强度,使稳定平衡遭到破坏。而草本植物护坡能够提高边坡的抗剪强度,达到边坡防护和加固的目的。草本植物根系提高土体的抗剪强度,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。

草本植物根系一般不同于乔木植物垂直根的锚固作用,土壤与植物根系之间的相互作用可以分为 3 种类型:附着粘结型、摩擦型、剪切型^[6-7]。这 3 种根土粘合作用所提供的阻力,使侧根对土壤具有牵引效应,增强了根系土层的整体抗张强度,但根对土壤的牵引效应的研究仍很不成熟,亟待进一步深入。侧根的牵引效应有 2 个不可缺少的前提:根土摩擦作用和根的抗拉强度,前者是发生在根土界面上的力学作用,有了它,应力才能够在土壤和侧根之间传递,从而形成整体的抗张强度^[8-9];而后者直接关系到含根土体的抗剪强度值的大小。

1.1 根系加固边坡土体的平面分析

传统上分析根系加固机理时,大都以 Wu^[10] 提出的根土复合介质抗剪强度的垂直根模型为基础,认为根系与土体之间通过根土粘键的作用将抗拉强度传递到周围土中^[11],如图 1 所示,由于根系的存在,土体中抗剪强度的增加值 ΔS 为:

$$\Delta S = T_r(A_r/a)(\cos \psi \tan \varphi + \sin \psi) \quad (1)$$

上式中: T_r 为穿过剪切面所有发挥作用的根系平均抗拉强度; ψ 为剪切区的剪切变形角度; φ 为土的内摩擦角; A_r 为剪切面上所有发挥作用的根系截面面积之和, A 为土体截面积, A_r/A 为剪切面上所有发挥作用的根系截面积之和与土体截面积之比,称为根面积比 (root area ratio),其中:

$$A_r = \sum_1^n n_i A_i \quad T_r = \frac{\sum_1^n T_i n_i A_i}{\sum_1^n n_i A_i} \quad (2)$$

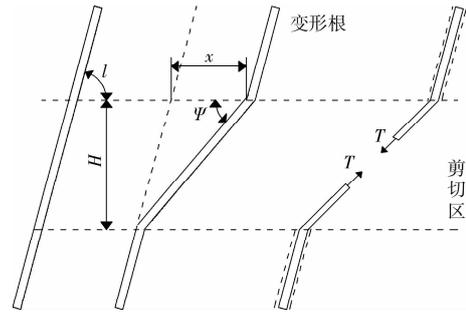


图 1 植物根系-土体剪切示意图

上式中: T_i 是直径为第 i 径级的根的抗拉强度, n_i 是直径为第 i 径级的根的数量, A_i 是直径为第 i 径级的根的平均截面积。

整个土体的抗拉强度相对于无根系土体的抗剪强度上加上一个凝聚力项^[2],若考虑空隙水压力,摩尔-库仑强度准则表达式^[12-13] 为:

$$\tau = (c + \Delta c) + (\sigma - u) \tan \varphi \quad (3)$$

上式中: c, φ 为土体的有效应力强度指标, u 为空隙水土压力, $(\sigma - u)$ 为净法向应力。

由此可见,根系的作用使土体的抗剪强度提高,但由上所述,草本植物根系大部分为水平伸展的侧根,且根系在边坡土体中为三维加筋,而上述模型局限于平面,因而不够完善^[3]。

1.2 根系加固边坡土体的空间分析

草本类植物根系深入土体深度不大,一般作用在浅层,所以仅考虑其对浅层土的作用。在如图 2 所示边坡上植有草本植物,设边坡浅层有一潜在的滑动面 AB ,其与水平面的夹角为 θ 。由图知,当浅层沿滑动面 AB 顺着坡面下滑时,在 MM' 面上侧的根系受拉,对浅层土体有加筋张拉作用,其能有效加固边坡;在 MM' 下侧的根系受压,对边坡加固不起作用。

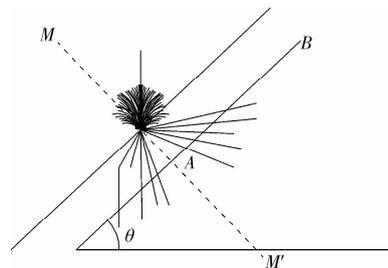


图 2 草本植物加固边坡示意图

下面分析三维空间内水平侧根对边坡加固的力学原理。如图 3,在滑动面上 $ABB'A'$ 上,设某一穿过滑动面的根 R ,其与 x, y, z 3 坐标轴的夹角分别为 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$,并设根 R 在此系统中所承受的拉力为 N_i ,拉力 N_i 在 x 方向上分量对边坡土体不起加固作用,故不考虑,其在 y, z 方向上的分量 N_{yi}, N_{zi} 分别为:

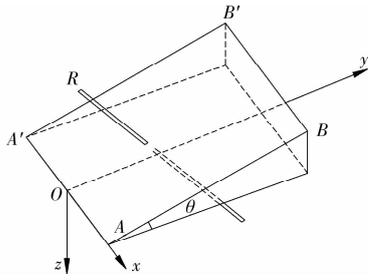


图 3 草本植物根与边坡位置示意图

$$N_{yi} = N_i \cos \beta_i \quad N_{zi} = N_i \cos \gamma_i \quad (4)$$

对 N_{yi} , 其法向分量(以斜向下为正, 斜向上为负) $N_{yi} \sin \theta$, 切向分量(以斜向上为正, 斜向下为负) $N_{yi} \cos \theta$, 所以, 在 N_{yi} 作用下增加的抗滑力 $\Delta T_{f_{yi}}$ 为:

$$\Delta T_{f_{yi}} = N_{yi} \cos \theta + N_{yi} \sin \theta \tan \varphi = N_{yi} (\cos \theta + \sin \theta \tan \varphi) \quad (5)$$

对 N_{zi} , 其法向分量(以斜向下为正, 斜向上为负) $N_{zi} \cos \theta$, 切向分量(以斜向上为正, 斜向下为负) $-N_{zi} \sin \theta$, 所以, 在 N_{zi} 作用下增加的抗滑力 $\Delta T_{f_{zi}}$ 为:

$$\Delta T_{f_{zi}} = N_{zi} \sin \theta + N_{zi} \cos \theta \tan \varphi = N_{zi} (\cos \theta \tan \varphi - \sin \theta) \quad (6)$$

则由于根系作用增加的总的抗滑力 ΔT_{fi} 为:

$$\Delta T_{fi} = \Delta T_{f_{yi}} + \Delta T_{f_{zi}} = N_i [\cos \beta_i (\cos \theta + \sin \theta \tan \varphi) - \cos \gamma_i (\sin \theta - \cos \theta \tan \varphi)] \quad (7)$$

设滑动面 AA' 长度为 a , AB 长度为 b , 共有 n 个有效根穿过滑动面 $ABB'A'$, 各根穿过滑动面时根系与 3 坐标轴的角度分别为 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 各根的拉力分别为 N_i , 则增加的抗剪强度 $\Delta \tau_f$ 为:

$$\Delta \tau_f = \frac{\Delta T_f}{A} =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n N_i [\cos \beta_i (\cos \theta + \sin \theta \tan \varphi) - \cos \gamma_i (\sin \theta - \cos \theta \tan \varphi)]}{ab} \quad (8)$$

对于某边坡, θ, φ 均为定值, 所以可设

$$\cos \theta + \sin \theta \tan \varphi = D \quad \sin \theta - \cos \theta \tan \varphi = E \quad (9)$$

并设根系的两个当量拉力 \bar{N}_1 与 \bar{N}_2 分别为:

$$\bar{N}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cos \beta_i}{n} \quad \bar{N}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cos \gamma_i}{n} \quad (10)$$

则增加的抗剪强度 $\Delta \tau_f$ 可为:

$$\Delta \tau_f = \frac{n(\bar{N}_1 D - \bar{N}_2 E)}{ab} \quad (11)$$

增加的边坡稳定性系数 ΔK 为:

$$\Delta K = \Delta T_f / T = \frac{n(\bar{N}_1 D - \bar{N}_2 E)}{G \sin \theta} \quad (12)$$

以上各式中: φ 为边坡土体内摩擦角; G 为上覆土的重量。

2 根系对边坡加固的综合分析

MM' 上侧的各根的破坏方式可能不一样, 所以其拉力 N_i 的计算也不一样, 有如下 2 种状态:

(1) 若植物根系从土体中被拔出, 则其所受的最大荷载 $N_{i_{max}}$ 以其抗拔力计算, 则:

$$N_{i_{max}} = \sigma_{zi} \pi d_i l_i \mu \quad (13)$$

式中: σ_{zi} 为第 i 根根的上覆盖土压力, 可近似按图 2 中 A 点位置确定; μ 为根土之间的摩擦系数, 由实验确定; d_i 为第 i 根根的直径; l_i 为第 i 根根在 MM' 上侧的长度。

(2) 若植物没被拔出, 则其所受的最大荷载 $N_{i_{max}}$ 以其抗拉强度计算, 则

$$N_{i_{max}} = \sigma_{pi} \pi d_i^2 / 4 \quad (14)$$

式中: σ_{pi} 为第 i 根根的极限拉应力, 由根的抗拉强度确定; d_i 为第 i 根根的直径。根系的抗拉强度一般大于抗拔强度, 所以剪切面上根系首先会处于第一状态, 待剪切面继续发展其处于第二状态。

以上考虑的是单个草本植株根系的作用, 实际边坡草本植物防护时一般草本植物覆盖率很高, 所以在滑动面 $ABB'A'$ 上侧土体中一般是多个植物根系的联合作用。设在滑动面上侧土体有 k 棵植株, 这样, 可以通过大量实验统计数据, 得出具有某一保证率(如 95%) 的以上各参数代表值, 作为每个植株根系相关量的计算值, 这样, 多个草本植株下根系对边坡的作用效果就可以用单个植株效果简单叠加而得。

为说明根系增加的土体抗剪强度 $\Delta \tau$ 和稳定性系数 ΔK 的定量效果, 下面给出边坡一例数值分析结果。边坡 φ 为 30° , 剪切面 θ 为 45° , 剪切面上覆土层厚度 0.25 m, 容重 19 kN/m^3 , 计算考虑单位面积内植被有效根数目为 n , 则增加的抗剪强度 $\Delta \tau_f$ 和增加的边坡稳定性系数 ΔK 分别为:

$$\Delta \tau_f = (1.115 \bar{N}_1 - 0.299 \bar{N}_2)$$

$$\Delta K = \Delta T_f / T = \frac{n(1.115 \bar{N}_1 - 0.299 \bar{N}_2)}{3.360} \quad (15)$$

根系一般空间分布均匀, 则当量拉力 \bar{N}_1 与 \bar{N}_2 相差不大, 但其值大小需要统计获得, 若设其相等为 N , 则上式(15)计算结果见下图 4, 可以看出, 当根系当量拉力仅为 2 N, 单位面积植被内有效草根数为 200 时, 增加的抗剪强度 ΔT_f 和增加的边坡稳定性系

数 ΔK 分别为 0.32 kPa 和 0.1, 当根系当量拉力和根系密度均较大时, 其加固效果还是明显的。

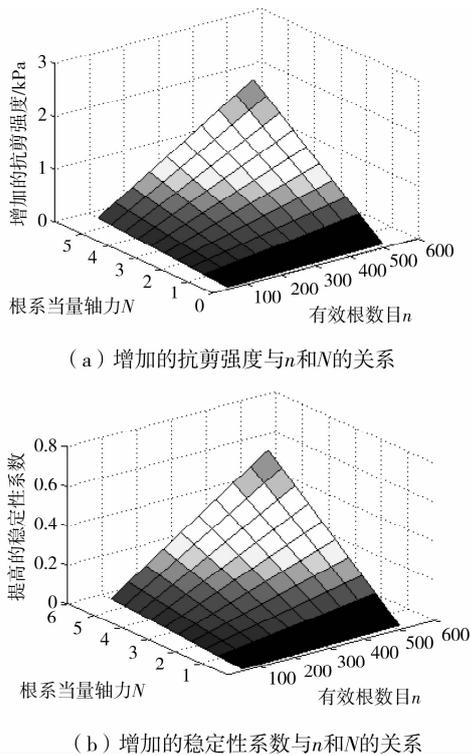


图4 草本植物固坡效果与根的含量和根系当量强度关系

由上面分析可以看出, 草本植物对边坡土体的加固作用与根系在土体中的分布形态、根的含量和根的长度等因素有关, 且随着根系含量及根系强度的提高而提高。但实验^[14]表明, 根系含量的提高并不能持续增加土体的强度, 表层根土复合介质的表观凝聚力 Δc 和边坡整体稳定性系数之间的关系随着根系的加密, 表观凝聚力的增加, 边坡的稳定系数随之增加, 但这种增加的趋势是递减的, 当土层中的含根量增加到一定的程度时, 对整体稳定性的贡献就几乎不再增加。

许多学者对根系加强土体力学性质的程度, 进行了实验测量, 张飞^[15]对含根系土做直剪试验得出: 含根系土的内聚力值比无根系土增加近 74%, 而内摩擦角值变化不是很明显; 侍倩^[16]对相同深度处种草与无草土进行室内直接剪切试验得出: 根系几乎不能提高土体的内摩擦角, 可以忽略不计, 而凝聚力却提高很多。所有实验结果均表明草本植物根系能提高边坡土体的抗剪强度, 这与本文的研究结果是一致的, 印证了本研究的正确性。

3 结论

通过深入分析草本植物根系与边坡岩土体之间

的相互作用、草本植物加固边坡的力学原理及其力学牵引效应, 建立了草本植物与岩土体力学作用的三维模型, 并获得了草本植物加固边坡岩土体所增加的抗剪强度和边坡稳定性系数的定量计算式。

从分析结果可知, 草本植物的固坡效果与根在土体中的分布形态、根的含量和根的长度等因素有关, 且随着根系含量及根系强度的提高而提高。所以合理选择一些根系发达, 强度高的植物可以很好的提高固坡能力。

该文给出的计算式中的大部分参数均需统计给出, 然而由于缺乏大量的统计数据, 统计参数的信息很少, 使得计算式应用起来不很方便, 所以今后应加强对根系分布、数量、长度以及强度等因素的统计规律的研究, 用统计特征量来量化计算固坡效果。

参考文献:

- [1] 贺红亮, 王琼, 杨知建, 等. 高等级公路植被护坡现状与展望[J]. 中南公路工程, 2007, 32(2): 150-153.
HE HONG-LIANG, WANG QIONG, YANG ZHIJIANG, et al. Slope vegetation: present situation and its prospect[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2007, 32(2): 150-153.
- [2] 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.
ZHANG JUN-YUN, ZHOU DE-PEI. Study on ecological protection mechanism of red bed mudstone slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 250-256.
- [3] 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
OU YUN-FENG, WANG HONG-LIANG, WANG GONG. Research on vegetation restoration of ecological slope protection of highway in loess plateau area[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(9): 162-166.
- [4] 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.
JIANG FENG, ZHANG JUN-YUN. Interactional mechanical characteristics between plant roots and slope soil. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2008, 19(1): 57-61.
- [5] 宋云, 言志信, 段建. 根土相互作用的力学模型[J]. 岩土力学, 2005(S0): 171-174.
SONG YUN, YAN ZHI-XIN, DUAN JIAN. Interactional mechanical characteristics between plant roots and slope soil. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2008, 19(1): 57-61.
- [6] COPPIN N J, RICHARDS I G. Use of vegetation in civil

- engineering[M]. Ciria; Butterworths (England). 1990.
- [7] GRAY D H. Role of woody vegetation in reinforcing soils and stabilizing slopes [J]. Proc. Symp. Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practice, NSW Inst. Tech., Sydney, Australia, 1978; 253-306.
- [8] WANG W L, YEN B C. Soil arching in slopes[J]. J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 1974, 100 (GT1): 61-78.
- [9] 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.
- [10] WU T H, Mc KINNELL 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.
- [11] 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.
ZHOU YUE, XU QIANG, LUO HUA-SONG. Traction effect of lateral roots of trees II - in-situ direct rest. Journal of Mountain Science, 1999, 17(1): 10-15.
- [12] ZHENG YING-REN, XU GAN-CHENG. Further research on plastic yield criterion for rock soil material [J]. Advances in Constitutive Laws for Engineering Materials, 1989.
- [13] YAN ZHI-XIN, DUAN JIAN, JIANG PING, et al. A study on constitutive model and parameters of rock slope stability[J]. Materials Science Forum, 2008(2): 1210-1216.
- [14] SINGH K P, DURGUNOGLU A. Predicting sediment loads[J]. Civil Engineering, 1992, 62: 64-65.
- [15] 钟春欣, 张玮, 王树仁. 植被护坡抗冲模型试验方法与装置研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(2): 170-174.
ZHONG CHUN-XIN, ZHANG WEI, WANG SHU-REN. Experimental research on soil erosion of turf slope reinforced by 3D vegetation net [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(2): 170-174.
- [16] 侍倩. 植被对斜坡土体土力学参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 2027-2030.
SHI QIAN. Test research on influence of vegetation on mechanical parameters of soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 2027-2030.

(编辑 王秀玲)