

边坡防护工程中植物根系的加固机制与能力分析

肖盛燮¹, 周 辉^{1, 2}, 凌天清¹

(1. 重庆交通大学 防灾减灾工程研究所, 重庆 400074; 2. 华杰工程咨询有限公司, 北京 100029)

摘要: 植物根系在岩土介质中受力的复杂性和多变性, 使得确定其加固能力十分困难。根据植被护坡作用机制和应力、应变模式分析, 建立加固作用力学模型, 导出植物根系的抗滑力一般计算式, 并推导植物根系加固能力的计算式。

关键词: 边坡工程; 植被防护; 作用机制; 力学分析; 加固能力

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 1 - 2670 - 05

MECHANISM AND ABILITY ANALYSIS OF PLANT ROOT REINFORCEMENT IN SLOPE PROTECTION

XIAO Shengxie¹, ZHOU Hui^{1, 2}, LING Tianqing¹

(1. *Research Institute of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 2. *CHELBI Engineering Consultant Inc., Beijing 100029, China*)

Abstract: The stress, which acts on the plant root in the crag earth medium, has the characters of extreme complexity and polytropy, so the determination of its reinforcement ability is considerably difficult. According to the slope protection action mechanism of the vegetation and the stress-strain pattern analysis, the model of reinforcement mechanism and the general mathematical formulae of the root system's resist-slipping stress, and the plant root system's reinforcement ability are established.

Key words: slope engineering; vegetation protection; action mechanism; mechanical analysis; reinforcement ability

1 引 言

植被护坡是对边坡浅层的一种防护措施, 其作用效果是建立在边坡自身必须稳定的基础上的。另外, 其防护设计合理与否直接关系到工程的控制效果与成败, 且不同植物对坡面的防护效果也不相同。草本植物, 其护坡作用主要表现为增强坡面的抗冲刷能力; 木本植物, 其固坡效果则更为显著。植物防护设计最基本的指标是植物根系的加固能力, 植

物根系在岩土介质中受力的复杂性和多变性, 使得其加固能力的计算十分困难。在许多工程问题中, 植被护坡的设计计算仍停留在经验阶段。近年来, 国内外许多学者进行了大量的研究工作, 如: 采用数值模拟、相似材料模拟以及工程量测动态信息处理法等, 获得大量的资料和数据, 这些研究成果为分析研究植物根系对岩土体的加固能力、防护设计和参数确定起到了积极作用。

周 跃等^[1, 2]针对木本植物的抗拔性做了大量的野外现场测试。张俊云等^[3~7]对木本植物根系的抗

收稿日期: 2005 - 11 - 08; **修回日期:** 2005 - 12 - 06

基金项目: 国家科技攻关计划“西部开发科技行动”重大项目(2004BA901A02)

作者简介: 肖盛燮(1937 -), 男, 1963 年毕业于重庆交通学院公路与城市道路专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事防灾减灾工程及防护工程方面的教学与研究工作。E-mail: xiaoshengxie@sina.com

拔性和植物根系对边坡的加固作用通过建立力学模型进行了分析,其所建力学模型的基本思路为:植物根系与岩土体相互作用的摩擦力在铅垂方向的合力即为此植被的抗拔力,而水平根系与土粒间的摩擦力对土体有加固作用。

以上力学模型偏重于分析植物根系与土体间的相互相互作用,并没有对植物根系与边坡表层岩土体的力学加固机制和加固效果进行系统分析。本文仅根据植被护坡作用机制、试验与力学模型分析,探讨了植被根系单根护坡能力的理论计算解,从而为边坡植物防护设计提供了理论依据。

2 不同结构岩体边坡植被护坡机制

不同结构的岩体边坡的表层岩土体直接影响到植物根系的生长状态,进而影响到植物防护的护坡效果。

2.1 整体结构岩质边坡表层植被防护机制

目前,国内外对这类边坡大多采用向边坡表层喷射种植基材以提供植物生长所必需的营养物质。当坡度较低时,则应采用框架护坡、框架内填土植草的方法。

生长在此类边坡上的植被,其根系不能深入到基岩,起不到固定边坡表层种植基材(或风化层或种植土)的作用,必须采取一定的工程措施稳定基材(或风化层或种植土层),为植物提供稳定的生长环境。植物根系在种植基材内的分布见图 1。此类岩质边坡一般都很稳定,对这种边坡进行植物绿色防护有以下两种目的:一是为了特殊目的;二是由于边坡靠近车站、城市,为了改善人们日常生活环境,但植物很难在这种边坡上生根成长。

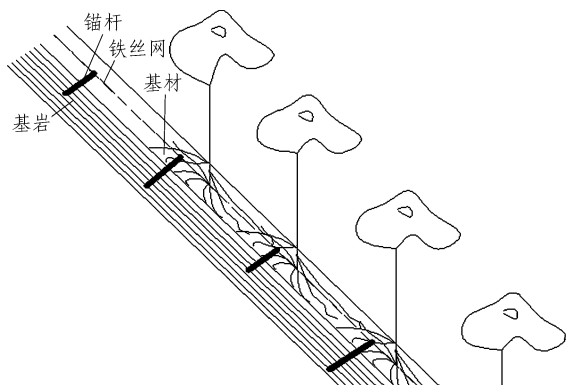


图 1 植物根系在种植基材内分布

Fig.1 Plant root system distribution in the matrix

当坡度较小、坡面上可以稳定存在一定厚度的土层时,可以采用种植低矮灌木和草本植物的混合绿化防护方式。但要做好排水工程,以防止土层在浸水后出现顺坡滑塌。

2.2 块状结构岩质边坡表层植被防护机制

对于边坡表层岩体呈块状结构,岩体较完整,虽有节理裂隙发育,但仍能保持岩体自身稳定性的岩质边坡,在其上生长的木本植物根系,能够深入岩体裂隙,起到植物根系对边坡的加固作用。植被根系在岩体裂隙中的分布见图 2。

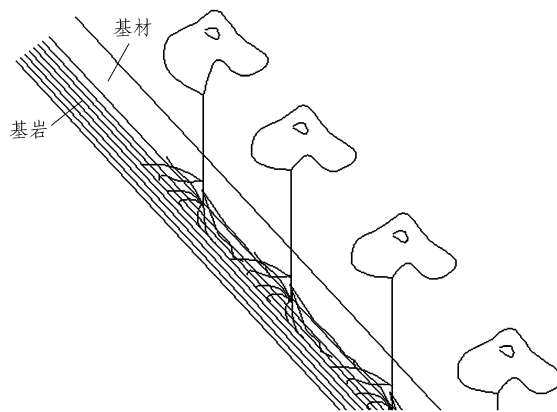


图 2 植物根系在岩体裂隙中的分布

Fig.2 Sketch of the plant root system in fissure of the slope

基材(或客土)中的植物根系相互连结,形成有机的根系网络。将基材(或客土)结为一体,深入到岩层裂隙的根系将对边坡起到加固作用。当边坡表层岩土体沿岩石表面顺层滑动时,深入岩石裂隙中的根系就起到锚固作用(见图 3)。下面计算植物根系产生的抗滑力。

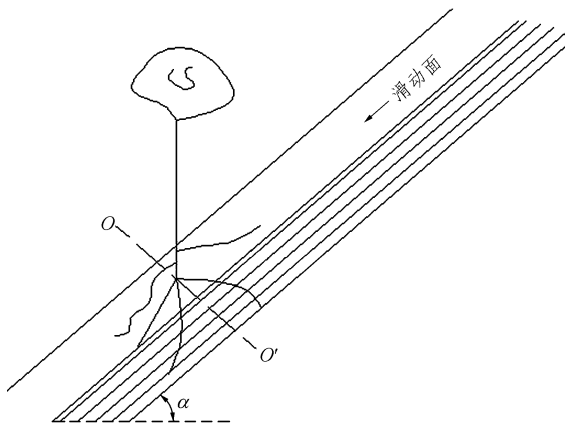


图 3 木本植物根系对边坡的加固作用

Fig.3 Sketch of the plant root system for slope reinforcement

当表层土体沿滑动面顺坡面下滑(见图 3)时,植物 OO' 右侧穿过滑动面的根系受到拉力作用,对表层土体起到锚固作用;植物 OO' 左侧根系受压力作用,对滑动岩土体起不到加固作用。

植物 OO' 右侧根系受到拉力作用会发生两种类型的破坏形式:(1) 植物根系从岩石裂隙中被拔出;(2) 根系受拉力作用而被拉断。两种破坏方式所产生的力的大小各不相同,这里假设某一穿过滑动面的根系所产生的拉力为 T ,则此根系产生的抗滑力为

$$E' = T \cos(\alpha - \beta) + T \sin(\alpha - \beta) \tan \varphi \quad (1)$$

式中: E' 为根系产生的抗滑力(kN/m); α 为滑动面倾角($^\circ$); β 为植物根系与水平面夹角($^\circ$),有正、负之分(以水平面为基线,逆时针方向为正); φ 为滑动面处岩土体的内摩擦角($^\circ$)。

由式(1)进一步可得

$$E' = T[\cos \varphi \cos(\alpha - \beta) + \sin \varphi \sin(\alpha - \beta)] \frac{1}{\cos \varphi} = T \cos[\varphi - (\alpha - \beta)] \frac{1}{\cos \varphi} \quad (2)$$

对于一具体的边坡, α , φ 为已知的定值,则表层滑动面的安全系数 k 为

$$K = \frac{W \cos \alpha \tan \varphi + \sum_1^n T_i \cos[\varphi - (\alpha - \beta_i)] \frac{1}{\cos \alpha} + cl}{W \sin \alpha} \quad (3)$$

式中: W 为表层滑动土层的重力(kN), c 为滑动面土(含植物根系)的黏聚力(kPa), l 为滑动面长度(m)。

当式(2)达到最大值时,有

$$\varphi - (\alpha - \beta) = 0$$

即

$$\beta = \alpha - \varphi \quad (4)$$

此时有

$$E' = \frac{T}{\cos \varphi}$$

由式(4)可知,植物根系与水平面夹角为 $\alpha - \varphi$ 的根系对边坡表层起到的加固作用最大。

此结论可以指导人们在设计施工阶段采取一定的技术手段,使植物根系按最有利于边坡稳定的方向发展。

2.3 碎裂结构岩质边坡表层植被防护机制

碎裂结构岩质边坡,是指边坡一定厚度范围内的岩体,节理裂隙发育,岩体破碎。当边坡坡度较缓时,岩体能够稳定。针对此种边坡可以采用种植

灌木和草本植物,植物群落长成后,其根系会深入边坡表层岩体裂隙中,并与表层破碎岩体结合为一体,可以有效地防止坡面岩块的崩落,起到防水冲刷的作用,发挥植被根系的网络作用。当边坡坡度较大时,会发生表层岩块的崩落和掉块现象,不能直接在边坡上种植植被,必须首先对边坡表层岩体进行工程防护,如采用挂网、喷射混凝土等固定表层岩体,然后再考虑种植植被。

植物根系对表层岩体的加固力学作用与前面所述一致。

2.4 散体结构岩质边坡表层植被防护机制

岩质边坡有一定的风化土层,对此类边坡进行植被护坡起到固定边坡风化土层、防止雨水冲刷的作用。当植物根系伸入较深稳定岩层裂隙后,对边坡表层土体起到力学加固作用。

土质路堑边坡或路堑填土边坡,最大的工程问题即为雨水冲刷及由水引起的填土沿圆弧面滑动,对此类边坡进行绿色防护,当植被完全覆盖坡面后,在表土层中形成盘根错节的根系,可以有效地抑制雨水对边坡的侵蚀、增加土体的抗剪强度、减小孔隙水压力和土体自重,从而大幅提高边坡的稳定性和抗冲刷能力。

3 植物根系对边坡切向加固能力的分析计算

图 4 给出的根系切向加固力试验模型。通过单一弱面的根系,弱面错动施加给根系的力为 T' ,则根系会发生轴向力 N 和切向力 Q ,于是有

$$N = T' \cos \alpha' \leq [N] \quad (5)$$

$$Q = T' \sin \alpha' \leq [Q] \quad (6)$$

式中: $[N]$ 为根系的极限轴向力, $[Q]$ 为根系的极限切向力, α' 为植物根系与弱面的夹角。

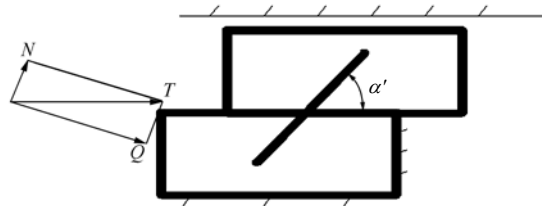


图 4 根系切向加固力试验模型

Fig.4 Testing model for the tangential reinforcement of the plant root system

则

$$T_{\max} = \min \left\{ \frac{[N]}{\cos \alpha'}, \frac{[Q]}{\sin \alpha'} \right\} \quad (7)$$

式中: T_{\max} 为根系最大切向加固能力。

单一弱面是理想的情况, 只有在围岩完整性较好, 或者弱面分布属同一方向时才会出现。软弱围岩中根系通过的弱面复杂多变, 植物根系的切向加固能力随着根系与弱面的夹角不同而变化, 以根系与弱面夹角为 $0 \sim \pi/2$ 内的平均值计算切向加固能力, 则有

$$T_{\max} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_{\max}(\alpha) d\alpha = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \min \left\{ \frac{[N]}{\cos \alpha'}, \frac{[Q]}{\sin \alpha'} \right\} d\alpha \quad (8)$$

根的抗拉强度 T 值根据植物类型(材料), 并依据下式计算可得

$$T = nd^m \quad (9)$$

式中: d 为根的直径(mm); n, m 均为对于给定树种的经验系数。

切向加固能力对控制岩土体扩容、离层、剪切破坏起着重要作用, 是边坡防护设计的重要参数之一。

4 基质 - 根系复合体的加固能力分析

4.1 基质 - 根系复合体抗拔力计算

基质 - 根系复合体是岩石边坡植被护坡工程的主要功能构件, 由于引入了活的植物, 它不仅具有工程属性, 而且具有生物属性。护坡功能效应决定于坡面岩体、基质和根系之间的相互作用, 如何从力学稳定角度对其定量评价, 也是对岩石边坡植被护坡机制探索的重要内容。

复合体受拉力破坏的过程中, 植物根系逐渐与基质分离而被拉出, 存在一个拉力峰值, 在复合体断裂面相对位移为 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 时达到最大值。由于土体一般不具有抗拉能力, 基质 - 根系复合体表现出这种特性的原因主要有两个方面: 一是根系间的交错缠绕, 对基质具有三维加筋效应, 使复合体具有弹塑性变形能力; 二是根系与基质颗粒间存在摩擦力和黏结力。因此, 可以对基质(或须根) - 根系复合体进行拉拔试验以寻求其加固能力的计算方法。图 5 给出了基质 - 根系复合体拉拔试验时根系受力分析图。由图 5 有

$$\tau(x) = Ks(x) / B = K \int_{l_1}^x \varepsilon(x) dx / B \quad (10)$$

式中: $s(x)$ 为 x 点处根系和孔壁之间的相对位移

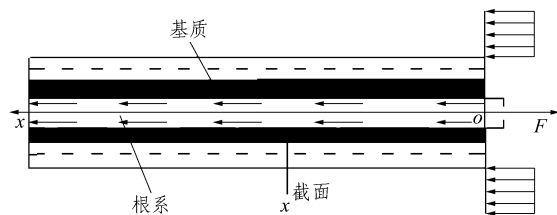


图 5 基质 - 根系复合体拉拔试验时根系受力分析图

Fig.5 Mechanical analysis of the matrix-root system's resist-slipping stress

(m); $\tau(x)$ 为 x 点处基质(或须根)对根系的作用力(摩擦力和黏结力)(MPa); K 为黏剪系数, 且有 $K = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$, K_1 为来自基质(或须根)的剪切刚度, K_2 为

危岩体的剪切刚度; $\varepsilon(x)$ 为 x 点处根系的拉应变; B 为根系与孔壁之间的间隙宽, 可取为 $0.5 D$; l_1 为根系的长度(m)。 x 点处根的轴力 $F(x)$ 可表示为

$$F(x) = \pi \int_{l_1}^x \tau(x) D dx \quad (11)$$

式中: D 为钻孔直径(mm)。则有

$$\varepsilon(x) = 4F(x) / (\pi E D^2) \quad (12)$$

式中: E 为压缩模量(MPa)。

联立式(10)~(12)有

$$F(x) = \pi \int_{l_1}^x \tau(x) D dx = \pi D K B^{-1} \int_{l_1}^x \left(\int_{l_1}^x \varepsilon(x) dx \right) dx = \pi D K B^{-1} \int_{l_1}^x \left[\int_{l_1}^x 4F(x) dx / (\pi E D^2) \right] dx \quad (13)$$

由此可得

$$F''(x) = 4KF(x) / (EDB) \quad (14)$$

将式(10), (11)代入式(14)可得

$$\tau''(x) = 4K\tau(x) / (EDB) \quad (15)$$

解式(15)可得

$$\tau(x) = ce^{-\frac{4}{D}\sqrt{8K/E}x} \quad (16)$$

式中: c 为积分常数。由式(16)可以看出, 根系上剪应力分布为负指数曲线, 且有:

(1) 当 $x=0$ 时, $\tau(0) = c \leq [\tau]$ ($[\tau]$ 为基质与根系间黏结力(或摩擦力)产生的黏结强度)。

(2) 当 $x=l_1$ 时, $\tau(l_1) = ce^{-\frac{4}{D}\sqrt{8K/E}l_1}$ 。

例如, 当根系深入至中硬岩时, 可取 $K=(1/50 \sim 1/10)E$, $l_1=15D$, 则有

$$\tau(l_1) = 1.1 \times 10^{-6} c \leq c = \tau(0)$$

当根系深入至软岩中时, 可取 $E=(100 \sim$

1 000)K, 则有 $\tau(l_1) = ce^{-\frac{l_1}{D}\sqrt{8K/E}} = 0.015 \sim 0.230$ MPa。

可见, 在中硬岩中, 根长度达到根系直径的 15 倍时, 根系的继续生长对复合体的抗拔力已无明显作用; 在软岩中, 剪应力衰减较慢, 根系的蔓延生长仍然可提高复合体的抗拔力。

(3) 由于 $\tau(0) \leq [\tau]$, 拉拔力 $F(0)$ 逐渐增大, $\tau(0)$ 也逐渐增大; 当 $\tau(0) = [\tau]$ 时, 基质与根系间发生黏结破坏, 破坏过程从孔口逐渐往深处破坏, 则最大剪应力点也逐渐向深部转移。

4.2 基质 - 根系复合体最大抗拔力的计算

假设基质与根系间的黏结破坏到根系长度中性点(中性点受力最大, 见图 6), 拉拔力 F_{1max} 达到最大, 即

$$F_{1max} = \pi \int_{l_1}^{l_1/2} aD\tau(x)dx = \pi aD[\tau] \int_{l_1}^{l_1/2} e^{-\frac{(x-l_1/2)\sqrt{8K/E}}{D}} dx = \pi aD^2 \sqrt{E/(8K)} [\tau] \left(1 - e^{-\frac{l_1}{2D}\sqrt{8K/E}} \right) \quad (17)$$

式中: a 为剪应力影响系数, 可取为 1.5。

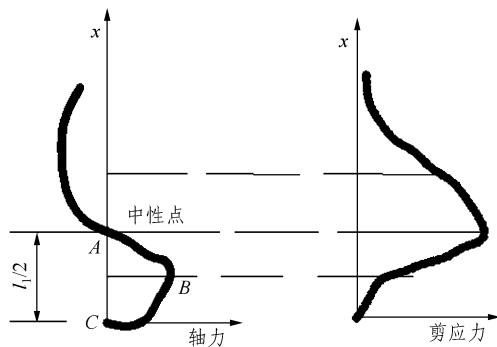


图 6 根系轴力和剪应力分布

Fig.6 Axial force and shear stress distribution in the plant root system

若取 $l_1 = 15D$, 且根系深入至软岩中, 则有

$$F_{1max} = (5.8 \sim 8.0)\pi D^2 [\tau] = (0.39 \sim 0.53)\pi D l_1 [\tau]$$

若取 $l_1 = 15D$, 且根系深入至中硬岩中, 则有

$$F_{1max} = (2.3 \sim 3.6)\pi D^2 [\tau] = (0.15 \sim 0.24)\pi D l_1 [\tau]$$

5 结 语

(1) 切向加固能力对控制岩土体破坏起着重要作用, 是支护设计的主要参数之一, 确定植物根系对岩土体的加固能力是十分困难的。

(2) 植物根系的锚固作用, 体现在其提供的抗

滑力上, 植物根系对边坡加固能力明显, 植被护坡将是今后边坡防护的重点。

(3) 对不同结构的岩土体, 植被防护的作用和机制均不相同, 对整体结构岩体进行植被护坡, 其根系不能深入基岩, 起不到固定边坡表层种植基材(或风化层或种植土)的作用。而对块状、碎裂、散体结构岩体进行植被护坡, 则可以起到很好的加固作用。

(4) 根系在岩土体中受力具有复杂性和多变性, 其加固能力来源于根系本身的强度, 提供给岩土体的额外强度反映了根系的加固能力。

(5) 植被护坡功能效应决定于坡面岩体、基质和根系之间的相互作用, 从力学稳定角度对其定量评价, 也是对岩石边坡植被护坡机制探索的重要内容。

参考文献(References):

- [1] 周 跃, 徐 强, 络华松, 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应(I 原理和计算模型)[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 4 - 9.(Zhou Yue, Xu Qiang, Luo Huasong, et al. Traction effect of lateral roots of trees(I principle and calculation)[J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(1): 4 - 9.(in Chinese))
- [2] 周 跃, 徐 强, 络华松, 等. 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 Huasong, et al. Traction effect of lateral roots of trees(II in-situ direct rest)[J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(1): 10 - 15.(in Chinese))
- [3] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 36 - 38.(Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Brief introduction to the study on slope eco-engineering for rock slope protection[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(4): 36 - 38.(in Chinese))
- [4] Gray D H, Sotir B. Biotechnical stabilization of steepened slopes[A]. In: Paper Present at the Transportation Research Board of the 746th Annual Meeting[C]. [s. l.]: [s. n.], 1995. 1 - 5.
- [5] Gray D H, Sotir B. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization—a Practical Guide for Erosion Control[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1996. 6 - 8.
- [6] Lin H D, Kung J H S. Rainfall-induced slope failure in Taiwan[A]. In: Asian Conf. on Unsaturated Soils from Theory to Practice[C]. [s. l.]: [s. n.], 2000. 801 - 806.
- [7] 王可钧, 李焯芬. 植被固坡的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687 - 691.(Wang Kejun, Lee C F. Brief mechanics analysis of bioengineering techniques for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687 - 691.(in Chinese))