

边坡植被的护坡效应探讨

任志华^{1,2}, 言志信¹, 江平¹, 宋云³

1. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000
2. 云南省公路科学技术研究院, 昆明 650051
3. 中南林业科技大学建工学院, 长沙 410004

摘要 边坡植被借助根系使边坡土体成为土与根的复合材料, 从而明显提高了边坡土体的抗剪强度和安全性, 具有稳定土壤结构, 提高土壤抗冲性, 防治土壤侵蚀的作用; 并且边坡植被地上部分的树冠、茎叶和枯枝落叶具有截留降雨和减弱高速落下的雨滴对边坡溅蚀的功能。但由于岩土介质的多变性和边坡植被受力的复杂性, 目前的研究仍然停留在定性分析上。通过对边坡植被固土的力学相互作用和护坡效应的研究, 探讨了边坡植被摩擦型根系和锚固型根系对边坡岩土体的力学作用机理, 分析了边坡植被改善土壤环境, 提高边坡的抗冲性, 截留降雨, 减弱雨滴溅蚀的效应。

关键词 边坡植被; 力学模型; 护坡效应; 固型根系; 护坡

中图分类号 TU43

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.23.002

Slope Protection by Slope Vegetation

REN Zhihua^{1,2}, YAN Zhixin¹, JIANG Ping¹, SONG Yun³

1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
2. Institute of Highway Science and Technology of Yunnan Province, Kunming 650051, China
3. College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract With the help of plant roots, the slope vegetation makes the slope soil mass a composite material of soil and roots, therefore, significantly enhances the shear strength of the slope soil mass and the stability of the slope. Meanwhile, the plant roots within the soil also have the functions of stabilizing the soil structure, enhancing the soil mass impact resistance and preventing the soil erosion. Moreover, the tree crown, the stem leaf and the fallen leaf over the slope vegetation are helpful in intercepting the rainfall and reducing the erosion that the high-speed rain drop may cause on the slope. However, due to the complexity of the force condition of the plant roots and the volatility of the rock and soil medium, the correlative studies remain as qualitative analysis. The interaction and the mechanical action of the slope vegetation and the soil strengthening are studied, to reveal the effects of the frictional roots and anchorage roots on the slope rock and soil. The roles of the slope vegetation in the soil environment optimization, the enhancement of the slope impact resistance, the rainfall interception, and the reduction of the raindrop erosion are analyzed.

Keywords slope vegetation; mechanical model; slope protection effect; anchorage root; slope protection

0 引言

中国地域辽阔, 山地众多, 岩土体破碎, 滑坡和泥石流侵蚀严重。随着铁路公路建设的快速发展, 地质灾害的发生更加频繁, 水土流失更为严重。边坡植被因其具有的独特护坡

效应和生态环境功能而在护坡工程中发挥重要作用, 从而使植被护坡工程技术的应用受到了前所未有的重视^[1-2], 但到目前为止, 其理论研究成果仍十分有限, 对边坡植被的护坡效应探讨更是鲜有涉及, 严重制约了该技术的发展^[3-4], 与环境

收稿日期: 2012-05-23; 修回日期: 2012-07-06

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金课题(20090211110016); 云南省科技厅项目(云交科 2010(A)06-b)

作者简介: 任志华, 博士研究生, 研究方向为道路工程, 电子信箱: rzh2002225410@yahoo.com.cn; 言志信(通信作者), 教授, 研究方向为边坡工程、地下工程和道路工程, 电子信箱: yzx10@163.com

保护和社会发展要求不相适应,迫切需要探索其对边坡浅层岩土体的加固作用和效果,以提高边坡的稳定性,防止水土流失,同时减少次生灾害,恢复和美化生态环境^[1-4]。

1 边坡植被对土体的作用效应

1.1 摩擦型根对土体的作用效应

工程实践和实验均表明,草本植物、灌木植物及木本植物的侧根与土相互作用机理类似。具有根系分布的边坡岩土体可看作由根和土构成的复合材料,此时的根系类似加筋纤维对岩土体施加作用,在为岩土体提供附加“黏聚力” Δc 的同时,岩土体的侧向膨胀也受到一定程度的限制,致使压力不变的情况下最大剪应力减小,岩土体的侧向变形减小^[5],对边坡岩土体起到摩擦加筋的作用,有利于边坡的稳定。

设面积为 A 的边坡岩土体共有 n 个根,则由根的摩擦加筋作用所增加的总抗剪强度为

$$\tau_r = \frac{\sum_{j=1}^n T_j \cos \delta_j}{A} + \frac{\sum_{j=1}^n T_j \sin \delta_j}{A} \tan \varphi \quad (1)$$

其中, φ 为土体的内摩擦角,可通过土的剪切实验获得; n 通过野外截取含根岩土体获取; δ_j 为第 j 个根与水平轴所成的角,由野外实验获得; T_j 为第 j 个根的抗拉力,由野外实验获得。

由式(1)可知,根的摩擦加筋作用所增加的抗剪强度大小主要取决于根的抗拉强度和岩土体中根系的分布。进而可以得到,植物根系作用下土体总的抗剪强度为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi + \tau_r \quad (2)$$

其中, c 为土的黏聚力; σ 为土的正应力。

1.2 锚固型根对土体的作用效应

木本植物的主根可以扎入土体的深层,在斜坡上相当于抗滑桩的作用,能增加岩土体的抗滑阻力,可以简化为垂直锚杆来研究其对周围岩土体的作用效果。

对于整个根系来说,设地表以下 z 处的侧向土压力系数为 K_0 ,岩土体的容重为 γ ,根土之间的摩擦系数为 μ ,根随深度而变化,其平均半径的分布函数为 $\bar{r}=P(z)$,其数量的分布函数为 $N=Q(z)$ 。由此可得,根系的最大摩擦力在垂直方向的分量为

$$F = \int_0^{\infty} \sum df_z = \int_0^{\infty} N 2\pi \bar{r} K_0 \mu \gamma z dz = 2\pi K_0 \mu \gamma \int_0^{\infty} P(z) Q(z) z dz \quad (3)$$

其中, $P(z)$ 和 $Q(z)$ 可通过现场测量获得^[6]。

1.3 木本植物干对土体的作用效应

(1) 木本植物干的支撑作用

树干能阻止上侧浅层土体的下滑,迫使松散物如地表枯枝落叶等堆积在树干上侧的小范围内,从而形成一定的地表高差,这样有利于抑制地表径流和减弱土层表面遭受雨滴的溅蚀。

根据土压力理论和计算方法,可定量分析和计算单棵树

干基部对浅层土体滑移的抑制和挡护作用。设直径为 D 的树干上下土体堆积形成的地表高差为 H ,由朗金土压力理论^[7]可得树干所受的土压力为

$$P = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 D \quad (4)$$

其中, γ 为土的重度, kN/m^3 ; K_a 为土的主动土压力系数, $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$, φ 为土的内摩擦角。

(2) 树干的拱作用

在边坡上,当树之间的距离较小时,向下滑移的土体不仅受到树干的支撑作用,而且树之间会形成土拱,产生拱效应,使树之间的土体受到拱作用。形成土拱的土体是堆积在相对稳定土层上的浅层残积土、坡积土、冲洪积土。

通过合理设计,优化树木的种植间距,可发挥出最大的拱效应。道路工程绿化中,植物栽植间距应考虑树干对岩土体的作用,根据树种及其冠幅,确定合理的株行距。各种植物的行间,应以品字形交错分布。

2 边坡植被对土壤性能的增强效应

植被能通过改善土壤的性能,更好地发挥植物根系在稳定土壤结构,提高土壤抗冲性,防治土壤侵蚀方面的作用,从而提高边坡岩土体强度和抗侵蚀能力,以利于边坡的稳定。

2.1 边坡植被根系的土壤稳定效应

在不同的含水状态下,土体的抗剪强度存在明显差异。非饱和土的内聚力和内摩擦角均随含水量的增大而减小,且内聚力的变化比内摩擦角的变化更显著,但非简单的线性关系,这就决定了其抗剪强度随含水量的增大而减小。同样,水对含根岩土体抗剪强度的影响也很大。当含根岩土体的根量一定时,随含水量的增加,含根岩土体的土粒与土粒、土粒与根系之间的凝聚力,以及根系与土体之间的锚固力等都相应减小,因此含根岩土体的强度随含水量的增加而减小,而且含根岩土体的强度受含水量的影响明显,比无根土体更大。

由于含根岩土体受到植被根系的作用,其孔隙率较无植被土壤大得多,形成了土壤的较大储水空间,使含根岩土体具有较强的储水能力,导致根际区土壤储存了入渗的大部分的水,因此降水使含根岩土体含水量明显增大。

研究表明,小于 1mm 径级的根密度及根量是不同植物群落提高含根岩土体抗剪强度,加强岩土体稳定性,增强岩土体抗冲性的有效根系参数,进而提出岩土体剖面中 100cm² 截面上对岩土体抗冲性有增强效应的小于 1mm 径级须根的根数为有效根密度^[8]。植被不仅可以通过根系缠绕作用固定岩土体,还可以通过增加有机质间接固定岩土体,并且后者的作用随植被龄期的增长而增长。研究还表明,林木根系径级小于 1mm 须根能提高土壤水稳性团聚体的数量,原因在于死根提供有机质,活根提供分泌物,它们作为土粒团聚体的胶结剂,配合须根的穿插和缠结,促进土粒团聚,使土壤中直径较大的水稳性团聚体增加,从而增强土壤抗分散、悬浮的能力。

2.2 边坡植被土壤抗冲性的增强效应

植被的根系通过缠绕、固结、串连等方式加固岩土体, 强化土壤抗冲性。首先, 植被的根系能够明显降低土壤的容重、增加非毛管孔隙度等, 从而使土壤的物理性质得到改善。其次, 植被的根系还能增加土壤的水稳性团粒含量和强化土壤的入渗性能, 创造抗冲性的土体结构类型。其三, 植被的根系能增加土壤的有机质含量, 如土壤中的各种动植物残体、微生物体及其分解和合成的有机物质。有机质与土壤中的活根存在因果关系, 它们呈线性正相关关系。因为有机质在黏结土壤和水稳性方面起决定性作用, 所以有机质对土壤抗冲性有重要影响。

植被通过增加土壤胶结物质改善土壤结构和提高抗冲性, 通过根系的连接作用、根土黏结作用和生物化学作用改善土壤的水力学性能及物理性质, 使土体有较高的水稳结构和抗蚀强度, 从而不易被径流带走。植被的根系提高土壤抗冲性的直接作用是增强了土壤抗冲力, 间接作用是强化了土壤的渗透力, 而根系创造抗冲性土体结构的物理性质是土壤抗冲性的物质基础。大量野外调查显示, 根系与土壤的抗冲性有很好的相关性。小于 1mm 根径的细根对土壤抗冲性的强化效应显著, 大量细根的包裹、死亡分解及根系分泌物对土壤结构产生间接作用, 从而使土体抵抗风蚀和流水冲刷的能力增大, 抗冲性明显提高。

根系对不同土层抗冲性增强效应的差异非常显著。随土层深度加大, 根系对土壤抗冲性的增强作用减小^[8-9]。不同径级的根量及根密度也对土壤抗冲性产生重要影响, 与小于 1mm 径级的须根密度关系最为密切, 草本植物根系在提高土壤抗冲刷过程中起主导作用。原因在于须根径小, 因而密度很大, 对改良土壤和增强抗冲性具有粗根不可比拟的作用。由于植物根系在土中的分布特征, 植物根系提高土壤抗冲性能的范围主要局限于浅土层。草本植物在不同土层间作用的明显差异是由根密度和根量随深度的同步变化所致。此外, 根系还具有推迟、延缓产流、产沙时间的作用。

3 边坡植被的抗雨效应

3.1 边坡植被的拦雨效应

边坡植被的冠层和枯枝落叶层具有截留降雨的作用, 借助它们的这种作用及其含水性能, 以及特殊的土壤结构, 植被区内的降水量、降水强度和降水历时可以发生很大的变化, 从而影响植被区的地表径流及其对坡面的冲刷等, 弱化土壤侵蚀。

植被的地上部分的水土保持功能主要是由于冠层的截流和枯枝落叶层的涵水作用。弱的降雨被植被茎叶截留, 并暂时贮存于茎叶中, 雨停后重新蒸发到大气中; 强降雨时则被截留的雨再落至坡面。

本文于 2003 年 9 月至 2004 年 9 月多次实测某人工樟树林地的实际降水, 调查樟树林树冠的降水截留作用, 并进行

了统计和回归分析。结果表明: 林地的年降水量为 1321.4mm, 年截留量为 345.749mm, 年截留量为降水量的 26.17%; 其中林内的净降水量占总降水量的 73.73%, 为 974.22mm, 但绝大部分为穿透水, 占净降水总量的 98.27%, 为 957.4mm; 树干径流为 16.869mm, 仅占净降水总量的 1.73%。

当林地的降雨量小于 0.65mm 时, 被林木覆盖范围的降雨被全部截留; 当降雨量大于 0.65mm 而小于 100mm 时, 截留量与降雨量的关系遵从方程 $I = aP^b$ 。回归结果为 $I = 0.5468P^{0.718}$, $n=84$, $r=0.9328$ 。降雨量较小时, 林冠对降雨的截留作用效果明显。

研究^[10]表明, 地面上大量的枯枝落叶能有效阻止雨滴直接打击在边坡的坡面上, 从而防止边坡坡面板结, 还能增加地表粗糙度, 从而加大对坡面流水的阻力; 枯枝落叶还是坡面径流的障碍物, 机械地阻挡并分散水流, 使径流所携带的泥沙沉积下来, 从而大大削弱降雨对坡面的侵蚀, 减少水土流失量。

3.2 边坡植被的抗溅蚀效应

雨滴在重力作用下从空中高速下落, 其加速过程受到空气阻力作用的制约, 但降雨对边坡坡面的溅蚀作用仍然是必须充分重视的问题之一。而边坡植被构成了边坡坡面的降雨溅蚀作用的立体防护网。

首先, 边坡植被的茎叶不仅能拦截高速落下的雨滴, 消耗雨滴大量动能, 还能使雨滴分解为更小的雨滴, 从而把雨滴的动能大大降低^[1]。当质量为 m 的雨滴从距地表 H 的高空落下时, 不计雨滴下落时的空气阻力, 则着地前的动能为 $E = mgH$ 。若地表被植被覆盖, 雨滴的动能被覆盖的植被所消耗, 速度几乎减小为 0, 可认为植被基本消除了雨滴的溅蚀作用。

其次, 边坡坡面的枯枝落叶是阻止雨滴溅蚀的第二道屏障。下落雨滴的动能经边坡植被的消耗后所剩无几, 可近似认为等于 0, 但茎叶上的雨滴仍然受到重力的作用, 将进一步下落至坡面, 在下落过程中由于重力的作用而获得加速, 落至坡面时将产生溅蚀效应。如果坡面被枯枝落叶所覆盖, 雨滴将落在枯枝落叶上, 如雨量较小则被枯枝落叶全部吸收; 如雨量过大以至于枯枝落叶不能全部吸收, 则剩余的雨量流至边坡岩土体, 溅蚀得到彻底消除。

其三, 通过植被根系对坡面岩土体的加固作用^[11], 以及植被通过有机质、胶结物等对土壤水力学性能和物理学性质的改善, 坡面抵抗雨滴溅蚀的能力大为加强, 直接高速下落到裸露岩土体坡面上的雨滴所产生的溅蚀也大为削弱。

4 结论

边坡植被根系构成的根网不仅对浅层岩土体具有加固作用还能改善土壤环境, 并且边坡植被的冠层和枯枝落叶层可拦截下落的降雨和消耗降雨的动能, 从而加强了边坡的抗侵蚀性, 减少了水土流失, 提高了边坡的稳定性。本文主要结论如下。

- (1) 基于草本植物根系(木本植物的侧根)特征,定量分析了边坡植被根系对边坡岩土体强度的增强效应。
- (2) 基于木本植物主根的形态特征,分析边坡植被对岩石体的锚固型护坡效应、支撑作用和拱效应。
- (3) 边坡植被对土壤性能具有增强效应。
- (4) 边坡植被茎叶具有降雨截留效应和削弱溅蚀效应。

参考文献 (References)

- [1] 张谢东,石明强,赵来,等.公路边坡植物根系固土的力学分析研究[J].交通科技,2008(1):50-52.
Zhang Xiedong, Shi Mingqiang, Zhao Lai, et al. *Transportation Science & Technology*, 2008(1): 50-52.
- [2] 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 Junyun. *Journal of Geological Hazards and Environmental Preservation*, 2008, 19(1): 57-61.
- [3] 单炜,孙玉英,王强,等.高等级公路边坡植物护坡机理与深根锚固作用[J].东北林业大学学报,2008,36(11):59-61.
Shan Wei, Sun Yuying, Wang Qiang, et al. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(11): 59-61.
- [4] Yan Z, Song Y, Jiang P, et al. Preliminary study on interaction between plant frictional root and rock-soil mass [J]. *Science China-Technological Sciences*, 2010, 53(7): 1938-1942.
- [5] 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.
- [6] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,1997,17(3):34-37.
Liu Dinghui, Li Yong. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1997, 17(3): 34-37.
- [7] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.
Chen Zhongyi, Zhou Jingxing, Wang Hongjin. *Soil mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [8] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J].农业工程学报,2009,25(5):40-46.
Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5): 40-46.
- [9] 刘国彬.黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J].水土保持学报,1998(1):93-96.
Liu Guobin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998(1): 93-96.
- [10] 曾思齐,余济云,肖育檀.马尾松水土保持林水文功能计量研究——I 林冠截留与土壤贮水能力[J].中南林学院学报,1996,16(3):1-8.
Zeng Siqi, She Jiyun, Xiao Yutan. *Journal of Central South Forestry University*, 1996, 16(3): 1-8.
- [11] Yan Zhixin, Yan Changming, Wang Houyu. Mechanical interaction between roots and soil mass in slope vegetation [J]. *Science China-Technological Sciences*, 2010, 53(11): 3039-3044.

(责任编辑 安莹,吴晓丽)

·学术动态·

“中国环境科学学会室内环境与健康分会第五届学术年会”征文



中国环境科学学会室内环境与健康分会第五届学术年会定于2012年11月16—18日在湖南省株洲市召开。本届年会由中国环境科学学会室内环境与健康分会主办,中南大学和湖南工业大学承办、国内多所高校协办。本次会议主题“健康生活,从室内环境开始”。

征稿范围:通风与室内空气质量、室内有机(半)挥发性污染、室内生物污染与疾病传播、室内热环境与热舒适、室内污染源特性与控制、室内环境污染健康效应、室内环境污染毒理学、室内颗粒物污染、室内空气净化技术、室内电磁辐射与污染、室内空气质量评价方法、室内空气污染综合控制、室外气候对室内环境的影响、室内环境与健康相关政策、法规与标准、室内环境与健康问题多学科交叉研究

全文截稿日期:2012年9月20日。

联系电话:13786187290。

电子邮箱:IEHB2012@csu.edu.cn。

通信地址:湖南省长沙市麓山南路中南大学能源科学与工程学院(410083)。

会议网站:<http://www.chinaiehb2012.org/>。