

根系提高土体抗剪强度研究进展

路艳宾, 彭尔瑞*

云南农业大学, 水利学院, 云南 昆明

收稿日期: 2022年9月18日; 录用日期: 2022年10月17日; 发布日期: 2022年10月24日

摘要

与素土相比, 含根土的抗剪强度相对较高, 植物根系具有稳定土壤结构, 防治土壤侵蚀的作用, 可以利用植物根系达到固坡的目的。根系通过穿插、缠绕、网络、固结土壤, 具有加筋锚固的作用; 根系通过理化作用促进根系周围土壤团聚体的形成, 增加土壤黏聚力。含根土体抗剪强度不仅与根系特征参数有关还与环境因素有关。本文将从植物根系提高土壤抗剪强度的作用机理、影响因素等方面做一个详细论述, 最后探讨一下植物根系固土护坡研究的发展方向。

关键词

根系固坡, 作用机理, 影响因素, 发展方向

Progress of Research on Root System to Improve Shear Strength of Soil

Yanbin Lu, Errui Peng*

Water Conservancy College, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan

Received: Sep. 18th, 2022; accepted: Oct. 17th, 2022; published: Oct. 24th, 2022

Abstract

Compared with plain soil, the shear strength of soil containing roots is relatively high. Plant roots have the function of stabilizing soil structure and preventing soil erosion, and can be used to achieve the purpose of slope consolidation. The root system has the function of reinforcement and anchoring by interpenetrating, winding, networking and consolidating the soil; the root system promotes the formation of soil agglomerates around the root system through physical and chemical effects, and increases the soil cohesion. The shear strength of soil containing roots is not only related to the characteristic parameters of root system but also related to environmental factors.

*通讯作者。

In this paper, we will discuss in detail the mechanism of plant roots to improve soil shear strength and the influencing factors, and finally, we will discuss the development direction of plant roots for soil stabilization and slope protection research.

Keywords

Slope Fixation by Roots, Mechanism of Action, Influencing Factors, Directions for Development

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 全球生态环境形势十分严峻, 森林面积锐减、水土流失严重、山体滑坡、泥石流频发、土地沙化盐碱化速度加快, 且有愈演愈烈之势。生态环境现状已经制约了经济和社会的协调发展, 严重影响了人类的生产和生活。相比于砌石及混凝土等传统固土护坡措施植物不仅满足固土护坡, 还具有美化环境、减少污染、造价低廉、施工简便等优点。采用植物根系固土护坡的历史由来已久。早在 1591 年的中国明朝万历年间, 就有利用柳树加固河岸边坡的记载。17 世纪日本江户时期, 日本人用栽树苗的方法治理荒坡。20 世纪 30 年代, 植物根系固土护坡技术被引入欧美国家并得到迅速发展。20 世纪 60 年代以后, 植物固土护坡技术已推广到世界各地。目前植物根系固坡技术应用范围更广: 河道生态护坡、矿山修复、山体滑坡治理、路堤边坡防护、土地沙漠化治理等。国内外众多学者经过多年的理论研究和力学试验, 探究了植物根系固土机理, 形成多种物理、统计模型和众多理论体系, 发现了影响植物根系固土护坡的多种因素。为此, 本研究筛选了多篇国内外关于根系固土护坡的研究论文, 梳理其理论成果, 并提出需要重点研究的方向, 以期对植物根系固土护坡的研究提供一定的参考。

2. 根系提高土体抗剪强度的作用机理

2.1. 根系可以提高土体抗剪强度

在相同的荷载作用下根—土复合体的抗剪强度明显高于素土, 植物根系具有增强边坡土体抗剪强度的作用。吴鹏[1]通过模拟植物根系抗剪切强度的试验, 测得 3 个含根系土体的抗剪强度较无根土体抗剪强度增加的幅度分别为 30.7%、42.6% 和 50.3%。解明曙[2]对白榆根系的研究, 发现林龄 6~10a 的白榆根系提高土体抗剪强度为 $0.04 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$; 10~19、20~29、30~40、>40a 的白榆根系, 提高土体抗剪强度分别为 $0.08 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 、 $0.13 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 、 $0.15 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 、 $0.18 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 。

2.2. 根系具有加筋锚固、提高土体黏聚力的作用

植物根系固土护坡的能力主要用其提高土体的抗剪强度值来表示。测定土的抗剪强度的方法主要有室直接剪切试验、三轴剪切试验以及原位剪切试验。由莫尔—库仑抗剪强度定律 $\tau_f = c + \sigma \tan\theta$ 可知, 土的抗剪强度由土体摩擦强度 $\sigma \tan\theta$ 和黏聚力 c 两部分组成。吕春娟等[3]认为根土之间的摩阻力由土颗粒的表面摩擦力以及颗粒间的嵌入和连锁作用产生的咬合力组成, 由原始粘聚力、固化粘聚力和毛细粘聚力组成的内聚力而在根土复合体中。

2.2.1. 加筋锚固作用

植物根系提高土体的抗剪强度主要通过深浅细根的增加作用、粗根的锚固作用[4]。周云艳等[5]认为植物根系在土体内起到阻裂作用和桥联作用。含根土体中根系的存在阻止了裂缝的产生和扩展,减缓了土体的裂缝发育,同时横跨裂缝的根系将裂缝桥联起来,阻止了裂缝的扩展。根系便成为了加筋材料,植入土体形成加筋土,所谓加筋土,就是在土体中按一定方向和间距,铺设一层或多层具有一定抗拉强度的加筋材料与填土交替而形成的一种复合土体。拉筋的拉力,土体和拉筋间的摩阻力便可不同程度地提高土的强度并改善其变形特性。植物根系在土体中类似于锚杆和抗滑桩,将浅层土层与深层土体锚固在一起形成一个整体,提高土体的抗剪切强度,增强土体的抗滑移能力[6]锚固通常指岩土工程中的锚杆、土钉等被握裹在岩土当中使两者共同工作以承担各种应力,根据锚固理论,根土间相互作用成为复合体共同承受荷载,植物垂直主根的锚固作用表现为:垂直根系的增强作用;对根系层土体起着箍束骨架作用;分担荷载作用;应力传递与扩散作用[4]。植物侧根具有加筋作用,垂直根系具有锚固作用从而提高了根土复合体的抗剪强度。

2.2.2. 提高土体黏聚力

根—土复合体黏聚力明显高于素土,根系具有显著提高边坡土体黏聚力的作用[7]。朱显谟[8]认为,根系能将土壤的单粒黏结起来,同时也能将板结密实的土体分散,并通过根系自身的腐解和转化合成腐殖质,使土壤有良好团聚结构和孔隙状况。段青松[9]认为根系分泌物改善土壤结构,增大颗粒内部及颗粒间的粘聚力以增强土壤的抗剪强度。植物在生长发育过程中通过根部向土壤中释放某些有机物,微生物分解有机物的同时也增加量土壤中的养分,促进了植物根系的生长发育,这种通过植物根系与微生物互利共生的生化关系把根系分泌物与土壤结合增大土壤团聚体,增强了根土之间的粘聚力,提高根系与土体之间的摩阻力。

土体的粘聚力因植物根系种类不同而存在差异,且粘聚力随含根量的增加而逐渐提高[10]。

植物根系的抗拉强度远大于土体,当根土复合体遭到抗剪破坏时,根系相对土体会发生错动或存在相互错动的趋势,根土间存在的摩擦阻力将阻止这种错动,土体受到剪切荷载作用时,土受到的剪切应力通过土与根的界面摩擦力转化为根的拉力[11]。同时植物根系通过物理化学作用提高土体的粘聚力,根土间的摩阻作用将根系的抗拉强度和土体的抗压强度有效地结合起来,使根系与土壤成为根土复合体,共同抵抗外部应力的破坏。

2.3. 根土复合体抗剪物理、统计模型的研究

Wull [12]和 Waldronl [13]提出垂直根模型,形成了根系固土的理论基础—加筋土理论。该模型假定破坏时穿过剪切面的所有根同时被拉断,含根土体抗剪强度的增量与根系的平均抗拉强度和根面积成正比,可以定量计算分析根系固土效果。该模型表达简单应用方便,但是其假定根系受剪切破坏时同时被剪断,与实际不符导致计算结果与实际有较大偏差。Pollen [14]认为载垂直于剪切面,根系垂直于荷载面,初始荷载均匀分布在各个根上,不同径级的根抗拉强度不同,某根茎断裂后,剩余的根平均分配荷载,依次类推,直至最后一个根断裂,建立了根系渐进破坏的纤维束模型——FBM模型,相比Wu模型更加合理,更能揭示根系受力作用机理。但其受根密度影响较大,根密度较小时会高估根系增强土壤抗剪强度的作用,根密度较大时则会低估。Schwarz等[15]通过根束原位测试,发现根束的抗拉力并不是所有的单根抗拉力的累加,边坡失稳主要影响因素是侧根被拉断破坏,侧根以相同方式被同时拉断或拔出土壤。经过多次试验研究提出了根束模型——RBM模型,此模型更符合实际效果。但该模型是基于乔木根系的理论模型,对于草本根系的固坡模拟结果还是不太合理,有待于进一步研究。

3. 影响根土复合体抗剪强度的因素

3.1. 根系抗拉强度

植物根系具有较大的抗拉强度, 不同植物根系抗拉强度千差万别。杨亚川[16]等对节节草根系进行抗拉试验, 0.6 mm 的节节草草根抗拉强度达 22.32 MPa, 为 1 级钢筋抗拉强度的 1/10。程洪等[17]通过实验发现香根草根平均抗拉强度 85 MPa, 相当于钢强度的 1/6。植物根系抗拉强度越大, 越能提高土体的抗剪强度, 根-土复合体抵抗剪切破坏的能力就越强。

3.2. 根径大小

朱海丽等[18]以翅滨藜、柠条锦鸡儿、霸王和白刺四种灌木为试验对象, 发现根-土复合体抗剪强度随着根径增大而增大, 抗剪力与根径间符合幂函数或指数函数关系。朱清科[19]对峨眉冷杉、高山柳研究发现不同根系的抗拉阻力随着根系平均直径的增大而增加, 但当根系平均直径增加到一定值时, 根系的抗拉阻力会发生一个显著的跃迁, 进而导致土体抗剪强度不同。不同径级的根系对土体抗剪强度影响不同, 根系的抗拉强度与根表面积、根径成正相关, 即随树龄的增长, 其固持土壤的能力也不断增强。

3.3. 根系长度

在植物根径一定的情况下, 根系与土体之间的摩阻力随根长不同而变化, 根长越长其与土体形成的根土复合体整体性越好抗剪切能力越强。解明曙[20]的研究表明, 在植物根系横截面积一定的情况下, 长而粗的少量根系与土体间的摩阻力远大于短而细的多量根系。封金财[21]采用有限元方法对植物根系增强边坡稳定性的作用规律进行了模拟分析, 发现在根长小于 3 米时随着根的长度增加, 边坡稳定性安全系数也逐渐提高, 但当根的长度超过 3 米时, 边坡稳定性安全系数增加不明显。

3.4. 根系密度

土体中根系密度对土体的抗剪强度影响很大, 在某种程度上土中根系密度与抗剪强度呈现正相关关系[22]。土体中植物根系的存在使根-土复合体的抗剪强度增加, 根-土复合体抗剪强度存在最优含根量, 且当根土复合体含根量小于最优含根量时, 随根量增加, 根-土复合体抗剪强度呈逐渐增长趋势[23]。代全厚等[24]通过对嫩江大堤根-土复合体抗剪强度的测定分析, 发现同一地段表层土体的抗剪强度明显大于底层土体, 单位土体含根量越大其抗剪强度就越大, 土体的抗剪强度与含根量呈显著的正相关。吕建根等[10]通过素土与重塑根-土复合体的室内抗剪强度对比试验, 研究分析植物根系对土体抗剪强度的影响, 试验结果表明: 植物根系能够提高土体的抗剪强度, 且随着土体中含根量的增加, 土体抗剪强度明显提高, 同时土壤的粘聚力也增大, 粘聚力随含根量的增加而提高。

3.5. 根系分布形态

一般来说植物根系按照其分部形态可分为侧根、垂直根和须根。须根相较于直根系有更大的根表面积, 与土壤接触面更广, 根系与土壤粘接的更牢固整体性更强。卢立霞[25]研究了三峡库区岸生植物根系固坡增强效应, 结果表明: 须根系植物与直根系植物对土体抗剪强度均有显著的增强效应, 单位根量对于土壤抗剪强度的增强效应而言, 须根系植物显著高于直根系植物。由于草本植物以须根系占绝大多数, ≤ 1 mm 径级的根系比例相应地占绝对优势, 因此草本植物根系对土壤冲刷量的降低作用比乔、灌植物根系更显著[25]。黄晓乐等[26]对边坡根系的力学特性和根-土复合体对边坡加固的机理等进行了全面的研究, 认为根系的分布形态及不同的植物种类对复合土体的抗剪强度、边坡的稳定性都有明显的影响。在根系密度一定的情况, 根系的分布方式对根土复合体的抗剪强度影响明显不同, 错综复杂的根系对抗剪

强度的增加最为明显, 垂直根系次之, 水平根系最不明显[27]。

3.6. 根系含水率

植物根系在不同季节含水率不相同, 其韧性不同。格日乐等[28]对内蒙古中西部 6 种乡土植物柠条、沙棘、杨柴、沙打旺、紫花苜蓿和草木樨采用主成分分析的数学方法。发现根-土复合体抗剪特性在不同季节不同。根系固土作用计算需要考虑季节变化对根系及土壤影响, 而这种影响很大程度由根系和土壤中含水量随季节的变化造成[29]。王玉杰等[30]研究了三峡库区花岗岩山地林木对坡面稳定性的影响, 指出土层的抗剪强度与土层深度呈正相关, 不同土层深度土壤含水率不同, 林地土体的抗剪强度大于农耕地的抗剪强度。刘小燕[31]采用狗牙根对全风化花岗岩残积土进行生态护坡试验, 根-土复合体的抗剪强度随着含水率的增加而减小, 含水率与黏聚力 c 呈负相关关系。

一般来说不同种植物根系的抗拉强度, 同种植物根系根茎数量、根系长度、分布形态、根系含水率等对根土复合体抗剪强度均有较大影响。同样气候条件、土壤类型、土壤水分等一些外界环境因素对植物根系固土护坡强度都有一定的影响。

4. 结论

人类对植物根系固土护坡的作用机理研究了近一个世纪, 已经取得了丰硕的研究成果, 产生了多种力学模型以及各种理论体系。探究了植物根系提高土体抗剪强度的作用机理, 在宏观上植物根系对土体具有加筋锚固的作用, 在微观上根系通过理化作用提高土壤颗粒间的粘聚力。发现了植物根系提高土体抗剪强度的影响因素, 根系抗拉强度、根茎大小、根系密度、根系分布形态、根系含水率……对土体抗剪强度均有不同的影响。由于实际的情况比较复杂, 影响因素很多, 各种物理统计模型计算以及有限元分析与实际误差过于偏大, 加上理论体系又不丰富完善, 完全应用纯物理、统计模型定量计算根系固土护坡的强度是非常有限的, 微观上研究进展缓慢, 研究成果少之又少, 还不能完全量化计算根系固土护坡效果, 所以植物根系固土护坡机理的研究任务还是任重而道远!

5. 展望

1) 多数学者在植物根系提高土体抗剪强度研究时, 由于根系在土体中分布很不规则, 测定跟土复合体抗剪强度采用重塑根土复合土体做实验, 导致实验结果与实际结果有很大的出入, 加上植物根系在土壤中处于生长和死亡的动态变化过程中, 导致后期做数值模拟计算结果有更大的误差, 所以在做植物根系提高土体抗剪强度试验时尽可能做原位剪切试验, 这样试验数据更准确, 试验结果更真实。

2) 过去对植物根系提高土体抗剪强度的研究几乎集中在同一类植物根系, 对草本、灌木、乔木组合型根系研究甚少。由于草本、灌木、乔木在土壤中形成的根系层次不同, 可以建立草本、灌木、乔木等多类植被形成的植被群落立体固土护坡体系, 其在水文效应、力学效应、生态景观效应等方面具有很好的互补作用。

3) 不同学者在不同地点研究不同植被根系固土护坡效果。我国幅员辽阔, 地理环境千差万别, 受地理环境和气候条件影响, 研究成果难以在全国范围内推广, 如何建立统一行之有效的植被根系固土护坡理论模型以及评价指标等, 值得去深入研究。

4) 多数学者对植物根系提高土体抗剪强度影响因素的研究都集中在植物根系特征参数素, 对外部环境影响因素的研究很少, 不同土壤类型、气候环境、水文条件下植物生长情况千差万别, 研究植物根系在不同生态环境条件下的生长态势及其固土护坡效果, 因地制宜选择适合的植物满足不同地区固土护坡的要求是很有必要的。

参考文献

- [1] 吴鹏, 谢朋成, 宋文龙, 等. 基于根系形态的植物根系力学与固土护坡作用机理[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 139-142.
- [2] 解明曙. 林木根系固坡力学机制研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 7-14.
- [3] 吕春娟, 陈丽华. 植物根系固坡力学机理研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2011, 23(3): 21-28.
- [4] 陈丽华, 余新晓, 宋维峰. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 10-11, 44.
- [5] 周云艳, 徐琨, 陈建平, 等. 基于 CT 扫描与细观力学的植物侧根固土机理分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 1-9.
- [6] Roering, J.J., et al. (2003) Shallow Landsliding, Root Reinforcement, and the Spatial Distribution of Trees in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, **40**, 237-253. <https://doi.org/10.1139/t02-113>
- [7] 余芹芹, 乔娜, 卢海静 等. 植物根系对土体加筋效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 3217-3223.
- [8] 朱显谟. 黄土地区植被因素对水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-120.
- [9] 段青松, 王金霞, 和贵祥, 等. 不同草本植物根系复合体无侧限抗压强度增量与根系分布[J]. 云南大学学报, 2019, 41(4): 832-841.
- [10] 吕建根, 陈学研, 谢志雄. 边坡草本植物根系固土抗剪强度试验研究[J]. 现代园艺, 2018(19): 23-24.
- [11] Gray, D.H. and Sotir, R.B. (1996) Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control. John Wiley & Sons, New York.
- [12] Wu, T.H. (1976) Investigation of Landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Geotechnical Engineering Report No. 5, 94-95.
- [13] Waldron, L.J. (1977) The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil. *Soil Science Society of America Journal*, **41**, 843-849. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100050005x>
- [14] Pollen, N. and Simon, A. (2005) Estimating the Mechanical Effects of Riparian Vegetation on Stream Bank Stability Using a Fiber Bundle Model. *Water Resources Research*, **41**, W07025. <https://doi.org/10.1029/2004WR003801>
- [15] Schwarz, M., Cohen, D. and Or, D. (2011) Pullout Tests of Root Analogs and Natural Root Bundles in Soil: Experiments and Modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **116**, F02007. <https://doi.org/10.1029/2010JF001753>
- [16] 杨亚川, 莫永京. 土壤-草本植物根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31-38.
- [17] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学实验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20-23.
- [18] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3445-3453.
- [19] 朱清科, 陈丽华, 张东升, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 64-67.
- [20] 解明曙. 乔灌木根系固坡力学强度的有效范围与最佳组构方式[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 17-23.
- [21] 封金财. 植物根系对边坡的加固作用模拟分析[J]. 江苏工业学院学报, 2005, 17(3): 27-29.
- [22] 张飞, 陈静曦, 陈向波. 边坡生态防护中表层含根系土抗剪试验研究[J]. 土工基础, 2005, 19(3): 25-27.
- [23] 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩. 土体粒径对盐生植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403-412.
- [24] 代全厚, 张力, 刘艳军. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(6): 8-11.
- [25] 卢立霞. 三峡库区岸生植物根系固土效能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2003.
- [26] 黄晓乐, 许文年, 夏振尧. 植被混凝土基材 2 种草本植物根-土复合体直剪试验研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 158-165.
- [27] 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.
- [28] 格日乐, 刘艳琦, 左志严, 等. 根系固土主要力学因子的主成分分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 39-47.
- [29] Mao, Z., Jourdan, C. and Bonis, M.L. (2013) Modelling Root Demography in Heterogeneous Mountain Forests and Applications for Slope Stability Analysis. *Plant Soil*, **363**, 357-382. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1324-2>

- [30] 王玉杰, 解明曙, 张洪江. 三峡库区花岗岩山地林木对坡面稳定性影响的研究[J]. 北京林业大学学报, 1997, 15(4): 7-11.
- [31] 刘小燕, 桂勇, 罗嗣海. 植物根系固土护坡抗剪强度试验研究[J]. 江西理工大学学报, 2013, 34(6): 32-37.