

植物根土复合体抗剪强度及影响边坡稳定性研究现状分析

何雨婷, 陈鹤鸣

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 为分析边坡上植物对边坡稳定性的影响的国内外研究现状, 对植物根系力学性能、根-土复合体抗剪强度和影响边坡稳定性等方面的国内外文献进行综述。现有文献探讨了植物根系的力学特性、植物根-土复合体抗剪强度特性, 系统地阐述了植物根系对提升边坡稳定性的积极作用。但当前生态护坡工程的多种草本植物、草本和木本多种植物种植模式下, 量化多种混播植物根系对边坡稳定性的提升作用, 以及基于植物固坡与生态重构协同的边坡防护设计施工技术等方面仍有待进一步深入研究。

关键词: 植物根土复合体; 抗剪强度; 边坡稳定性

中图分类号: U416.14

文献标识码: A

Analysis of Current Situation of Research on Shear Strength of Plant Root Soil Composite and the Influence on Slope Stability

HE Yuting, CHEN Heming

(Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd. of China Communications Construction Company, Guangzhou 510230, Guangdong, China)

Abstract: In order to analyze the current status of research on the impact of plants on slope stability both domestically and internationally, the literature on the mechanical properties of plant roots, shear strength of root soil composites, and the impact on slope stability were reviewed. The existing literature explored the mechanical properties of plant roots and the shear strength characteristics of plant root soil composites, and systematically elaborated on the positive role of plant roots in improving slope stability. However, there is still room for further in-depth research on the quantitative improvement of slope stability by various mixed plant roots under the current planting modes of various herbaceous and woody plants in ecological slope protection projects, as well as the slope protection design and construction technology based on the synergy of plant slope stabilization and ecological reconstruction.

Key words: plant root soil complex; shear strength; slope stability

随着我国基础设施建设迅猛发展, 环境保护与基础设施建设间的矛盾日益突出。在道路、水利水电、城镇等基础设施建设中, 深挖高填等工程产生了大量的裸露边坡, 破坏了原有的生态环境和生物多样性, 甚至导致边坡失稳和水土流失。边坡上的植物在边坡水文与稳定性中发挥着重要的作用, 因而在国际地质科学滑坡工作组提出的边坡防护体系中, 生态护坡被认为是与刚性支挡和锚固等护坡手段并列的重要边坡加固方

法。植物主要通过根系实现加固边坡的作用, 植物根系增强土体强度, 提高边坡稳定性^[1]。植物根系和土体间的受力方式复杂, 关于根系对边坡稳定性的影响甚至提升作用, 长期以来都是生态护坡技术研究的重点和难点。本文综述了植物根系对土体抗剪强度和边坡稳定性影响的国内外研究现状, 以了解土体与根系的相互作用机制, 指导生态护坡有关植物尤其是根系对边坡稳定性影响的进一步研究方向。

收稿日期: 2023-04-19

作者简介: 何雨婷, 助理工程师, 硕士, 研究方向为生态修复

1 植物根系的力学特性研究现状

植物根系直接改善边坡的力学性能,改善效果稳定,因而较多学者对植物根系对土体的加固机理展开了深入研究。在边坡土体中,根系交叉缠绕,加筋增大了边坡土体的黏聚力和内摩擦角^[2-3]。一般土体的抗拉能力较弱,而根系作为柔性材料具有良好的抗拉能力^[2],当边坡受到外力作用趋于破坏时,土体的部分应力会被转移到根系上,根系产生拉伸变形以抵抗土体的剪切变形^[4]。针对根系的抗拉强度,杨苑君研究发现,不同树种间的化学组成和抗拉性能均有显著差异,且纤维素百分含量与根系的抗拉强度相关^[4]。毛正君等以草本植物紫花苜蓿为研究对象,通过多元线性回归分析得出,根系直径是影响其根系抗拉力学特性的主要因素^[5]。邓珊珊等在典型崩岸河段区域,对河岸典型植被芦苇取样进行抗拉强度分析,研究区域内芦苇根系抗拉强度在13~175 MPa,其随着直径的增加而减小,并存在幂函数关系^[6]。姚喜军则对5种植物的主根及侧根进行了室内轴向抗拉力试验,结果显示,较为粗壮的主根的抗拉力为其侧根的1.33~1.91倍^[7]。Su等人对不同径级的雪松根进行拔除实验发现,锚固力与根系直径呈线性正相关,并基于复合材料理论,构建了动态反映根土界面应力分布的根系拔出模型,结果显示护坡植物应优选根系粗壮、根系深厚的植物^[8]。因而根系直径是影响其抗拉强度的重要因素,植物的粗根就如同锚杆深深扎入土壤,通过锚固来提高边坡的稳定性^[9],而“锚杆”与边坡的倾斜角度同样影响着“锚杆”的抗拔力。徐洪雨等人采用全挖法,调查分析了华北土石山区公路边坡6种常见植物的根长、干质量、根系直径、根系形态等指标,当根系扎入岩石裂缝生长时,根系与岩石的摩擦系数远远大于根系与土体的摩擦系数,有利于根系锚固作用的发挥^[10]。上述结论均基于根系室内抗拉试验。而康立菲等为使结果更接近实际情况,设计了一套灌木根系原位抗拉抗折测试装置,并对柠条的直根抗拉强度进行测试检验,采集数据误差范围为 $\pm 0.05\text{ N}$ ^[11]。

综合本节的参考文献表明,植物根系具有良好的抗拉能力,可以在土体受到外力作用趋于破坏时,产生拉伸变形来抵抗土体的剪切变形。植物根系抗拉强度的影响因素主要有根系直径、根长、根系形态等。但现有研究多集中于单种植物

根系的抗拉强度试验,鲜有对混合种植的多种植物根系进行抗拉强度研究,有待于探索研究。

2 植物根-土复合体抗剪强度研究现状

荷载是导致边坡变形破坏的重要原因^[12],在边坡土体中,植物根系会穿透整个土体并改善土体结构、湿度、孔隙压力,从而增加土体阻力,提升土体抗剪强度^[13]。Gray等通过探究钢筋-土体与根-土体的强度认为,含根系的土体可以被视为一种特殊的复合材料,而根系如纤维般对土体起到加固作用^[14]。根系与土体互相依存、共同工作^[15],李勇等通过测定刺槐林根系加筋土的根系参数、土体物理性质等指标发现,有效根密度对稳定土体结构的作用最大,随着林龄的增加,除机械作用外,刺槐还可通过增加有机质间接改善土体结构^[16]。杨亚川等针对根系与土体间的相互作用,提出了“根-土复合体”的概念,并指出当复合体受剪力作用时,不仅产生土粒与土粒之间的摩擦作用,同时还会产生土粒与根系间的摩擦作用^[15]。宋云认为,可将根系视为可“三维加筋纤维”,为土层提供了附加“黏聚力”,按加筋土原理来分析边坡土体的应力状态^[17]。Li等对狗牙根、铁杆蒿、马唐、铁线莲等4种常见护坡植物进行研究,结果显示,植物根系通过改善土体结构和根系自身的力学特性来提升边坡稳定性,其中铁线莲根系具有较高的抗拉强度,铁杆蒿根系显著增加了根-土复合体的黏聚力^[18]。

植物根系对土体抗剪强度提升作用的主要评价方法有根-土复合体快速直剪试验、三轴剪切试验及现场原位剪切试验等^[19]。刘俊通过香根草三轴剪切试验研究发现,不同根系倾角影响根-土复合体的抗剪强度(包括黏聚力和内摩擦角指标),当根系倾角为 156° 左右时,固土效果最佳^[20]。何鑫南等对高羊茅、白三叶、五节芒和马棘等四种常见护坡植物进行室内直接剪切试验,结果显示根系显著增加了土体的稳定性和抗剪强度,且含根量指标对马棘根-土复合体抗剪强度的影响最为显著^[21]。陈攀等通过云南松根-土复合体的室内直剪试验探究松根对土体的加固作用,结果表明复合体的内摩擦角增加了1.31%~1.97%,黏聚力增加了16.71%~34.74%;进一步构建回归模型分析得出,相较于水的质量及干根质量指标,干土质量对根-土复合体抗剪强度的影响程度更大^[22]。刘宇飞等则基于现有护坡模式,探究了混播草本植物根系对土体抗剪强度的

影响,同时对紫花苜蓿、非洲狗尾草及混播紫花苜蓿+非洲狗尾草的根土复合体进行抗剪强度试验,发现混播根系土体的抗剪强度增量高于单播,且可用含根量来预测混播草本根系的抗剪强度增量^[23]。

上述研究大部分将边坡根-土复合材料采集回室内实验室进行剪切试验,在此过程中可能导致土体振动,因而影响试验数据准确性^[24]。同时,室内小尺寸试样的试验结果对根土复合体实际强度和变形特性的揭示存在较明显的局限,可采用现场原位大型直剪试验。现场原位大型直剪试验是指在不扰动或基本不扰动试验土体的情况下,在野外现场进行剪切试验,从而得到土体抗剪强度、黏聚力等物理力学性质指标。现场直剪试验有利于保证试样的原状性,同时剪切断面较室内试验大,得出的试验结果相对可靠且符合实际情况,但现场剪切试验设备相对复杂,且成本较高^[25]。周雨奇等在含水率和液塑限相同条件下,对草根-土复合体进行现场直剪试验和室内直剪试验,两者的内摩擦角结果相差较大,并进一步通过折减系数对室内直剪试验结果进行了校正^[26]。刘薇等采用自设计的根-土复合体原位剪切试验装置,对复合体进行了现场剪切试验,测得的剪应力、剪切位移精度满足使用要求^[24]。李东彪等对3种灌木根系特征进行研究,并对根-土复合体进行原位剪切试验表明,沙柳的根系生物量最大,且其对土体抗剪强度的提升最为明显^[27]。

综合本节的参考文献表明,由于植物根系生长,导致土体产生土体结构、湿度、孔隙压力的改变,形成根-土复合体。现有研究通过室内剪切试验、现场原位剪切试验等试验手段,对根-土复合体抗剪强度影响因素进行探究。但受限于试验类型,尚未能对多种类植物根-土复合体的加固机理进行试验和模拟分析。

3 植物根系对边坡浅层稳定性的影响研究现状

边坡的稳定性受荷载(导致破坏的驱动力)和抗力(土体-根系的强度)的影响,边坡植物虽增加了边坡负荷,但其根系作为一种变形模量高于土体的柔性加筋材料,当边坡土颗粒之间发生相互滑动或产生位移时,部分根-土界面的摩擦阻力转移至根系,根系形成拉伸抵消动能,从而减缓土体滑动,有效提升边坡的稳定性^[28]。

Hao 等对树根系统的护坡效果的研究表明,有根系支护的边坡滑动范围较无根系边坡明显减小,且根系能在一定程度上防止坡面发生裂缝^[29]。植物对边坡的加固作用主要通过根系来实现,现有的研究在分析含根土体的抗剪切强度时,多将根系作为一种加筋材料^[30]。

为进一步探究植物根系对边坡稳定性的提升作用,近年的研究多集中于量化植物根系固土的机械效果上^[31]。目前使用较为广泛的模型仍是 Wu 等提出的基于摩尔库伦公式的固土模型^[13]。Leung 等研究了4种香港本地木本植物(2种灌木+2种乔木,包括桃金娘、宽萼毛茛、鹅掌柴、梭罗树)对边坡的加固作用,基于 Wu 模型探究边坡1~1.5m深度范围内根-土复合体的黏聚力随深度的变化规律,植物在幼苗期即可使易滑坡边坡趋于稳定^[32]。李雪尔等人通过有限元模型,利用强度折减法分析边坡的稳定性,结果显示林木根系在一定程度上可以有效提高边坡的稳定性,防治浅表层滑坡^[33]。但在土体发生剪切破坏过程中,并非所有根系都会被拉断,因而 Wu 模型易高估植物根系的固土作用^[34]。朱锦奇等基于植物根土复合体直剪等试验,通过分析根系受力机制优化 Wu 模型参数,优化后的结果与实际值相差在0.04%~18.39%之间^[31]。

随着试验及数值模拟方法的发展,以及护坡工程的需要,人们逐步对根系密度、构型等影响因素展开研究。嵇晓雷等基于根-土复合体理论,提出植物根系分形维数的分形方法,并基于根系形态特征的固土机理数值分析方法,建立根系模型对边坡土体进行有限元数值分析,探究分形维数与边坡位移量的定量关系,发现随着分形维数的增大,边坡表层位移量有效减小^[35]。Saifuddin 等基于几种常见的热带植物根系分布特征探究其固坡作用,其中紫檀、银合欢和马占相思主根发达,适合种植于边坡中部区域,对深层土体进行保护;野牡丹较多的水平倾斜短根分布于边坡浅层,适宜于种植在坡顶及坡脚^[36]。Li 等通过数值模拟,将植物根-复合体结构视为由不同黏结强度组成的土体,探究不同根型根系对边坡土体抗剪强度的影响,发现 VH 型和 H 型根系结构对边坡表土的径向应力具有更强的抵抗力,在植物种植初期,其对边坡稳定性的影响较小^[37]。

综合本节的参考文献表明,边坡植物通过根系对边坡浅层土体的加筋作用,形成根-土复合

体,有效提升了边坡浅层稳定性。现有文献研究得出植物种类、根系密度、构型、种植时期等因素对边坡浅层稳定性的影响,但尚未综合考虑植物群落的固坡作用、生态重构作用,对边坡生态防护设计进行优化指导,也尚未有考虑植物群落根系加固作用的评价指标体系。

4 研究展望

现有植物根-土复合体剪切试验的研究多集中于单种植物根系-土体的抗剪强度试验,鲜有对混合种植植物边坡的根-土复合体抗剪强度进行研究,且现场原位剪切试验(包括装置)研究较少,因而不同植物种植模式(如多种草本、草本+灌木的种植方式)根系对增强土体抗剪强度作用的影响有待深入研究。

目前在量化根系对边坡稳定性提升的模型研究中仍进行了诸多假设,虽有许多学者针对模型参数,通过根系抗拉试验和根-土复合体剪切试验对参数进行优化,但受限于抗拉试验与剪切试验,仍不能对多种类植物种植边坡稳定性的提升进行很好地模拟分析。

目前的研究并没有构建考虑植物群落根系加固作用的评价指标体系,对护坡植物进行评价并提出基于植物群落根系固坡的边坡植物群落选择方案。下一步的研究可根据边坡立地条件,结合植物初筛与评价结果,确定边坡植物群落的优化配置方案。

目前的研究成果还未能较好地指导边坡生态防护设计、施工实践。下一步可开展植物固坡与生态重构协同的边坡防护设计施工养护技术研究,即综合考虑植被群落的固坡作用、生态重构作用,进行边坡生态防护优化设计,尤其是优化植被群落生物多样性恢复(生态重构)设计及施工,完善边坡生态防护养护方案。

参考文献:

- [1] LAN H, WANG D, HE S, et al. Experimental study on the effects of tree planting on slope stability [J]. *Landslides*, 2020, 17(4): 1021-1035.
- [2] SIMON A, COLLISON A J C. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(5): 527-546.
- [3] STOKES A, ATGER C, BENGOUGH A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides [J]. *Plant and Soil*, 2009, 324: 1-30.
- [4] 杨苑君. 华北典型乔木根系抗拉及土壤抗剪性能研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [5] 毛正君, 耿咪咪. 紫花苜蓿根系抗拉力学特性及其影响因素研究 [J]. *干旱区研究*, 2023, 40(2): 235-246.
- [6] 邓珊珊, 夏军强, 宗全利, 等. 下荆江典型河段芦苇根系特性及其对二元结构河岸稳定的影响 [J]. *泥沙研究*, 2020, 45(5): 13-19.
- [7] 姚喜军, 王林和, 刘静, 等. 5种植物侧根分支处的抗拉力学特性研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(11): 91-98.
- [8] SU L, HU B, XIE Q, et al. Experimental and theoretical study of mechanical properties of root-soil interface for slope protection [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(11): 2784-2795.
- [9] STOKES A, ATGER C, BENGOUGH A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides [J]. *Plant and Soil*, 2009, 324: 1-30.
- [10] 徐洪雨, 王英宇, 宋桂龙, 等. 华北土石山区公路边坡常见植物根系地下分布特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(2): 51-58.
- [11] 康立菲, 马一铭, 李梦琳, 等. 灌木根系原位抗拉抗折测试装置设计与检验 [J]. *农机化研究*, 2021, 43(7): 115-120.
- [12] WU T H. Slope stabilization using vegetation [J]. *International Journal of rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(3): 127A-127A(1).
- [13] WU T H, MCKINNELL III W P, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [14] Gray D H, OHASHI H. Mechanics of fiber reinforcement in sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(3): 335-353.
- [15] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究 [J]. *中国农业大学学报*, 1996(2): 31-38.
- [16] 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用 [J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998(2): 2-8.
- [17] 宋云. 谈植物固土的边坡稳定机理 [J]. *森林工程*, 2004(5): 51-52.
- [18] LI J, WANG X, JIA H, et al. Effect of herbaceous plant root density on slope stability in a shallow landslide-prone area [J]. *Natural Hazards*, 2022, 112(3): 2337-2360.

(下转第 33 页)

- [3]柳宏伟. 大型天桥桥梁工程支架承载力分析与支架应用[J]. 浙江水利水电学院学报, 2021, 33(5): 61-64.
- [4]张敏, 李梦微, 李盼, 等. 重庆铁路转体桥施工力学特性分析及监控[J]. 安阳工学院学报, 2021, 20(2): 52-58.
- [5]王刚. 铁路桥梁工程承台深基坑施工及安全防护[J]. 浙江水利水电学院学报, 2022, 34(4): 62-66.
- [6]张少硕, 魏喜超, 姚传勤, 等. 公路桥梁上跨既有铁路墩底转体施工技术[J]. 建筑技术, 2021, 52(11): 1334-1337.
- [7]丁仕洪. 96m 钢-混组合桁架梁桥异位成型及转体施工技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 116-120.
- [8]陈海南, 陈辉华, 卢晓栋. 跨既有铁路线桥梁转体施工安全影响因素及事故致因机理[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1595-1602.
- [9]傅安民. 高速铁路(90+200+90)m 连续刚构拱拱肋施工方法研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(6): 14-19.

(上接第 17 页)

- [19]卢海静, 王磊, 翟国良, 等. 植物根-土复合体原位剪切试验研究现状及其进展[J]. 中国水土保持, 2013(7): 42-46, 77.
- [20]刘俊. 植物根系分布对边坡稳定性的影响[J]. 人民珠江, 2020, 41(4): 140-145.
- [21]何鑫南, 董晨霄, 耿嫣然, 等. 常见护坡植物的根土复合体力学特性分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(8): 68-70.
- [22]陈攀, 葛永刚, 孙庆敏, 等. 根-土复合体抗剪强度影响因素研究[J]. 应用力学学报, 2024, 4: 1-8.
- [23]刘宇飞, 赵燚柯, 杨苑君, 等. 2 种草本植物混播根系对土体抗剪强度的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(3): 81-88.
- [24]刘薇, 杜文亮, 苏禹, 等. 植物根-土复合体原位剪切试验装置的设计与分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 82-86.
- [25]刘明维, 傅华, 吴进良. 岩体结构面抗剪强度参数确定方法的现状及思考[J]. 重庆交通学院学报, 2005(5): 65-67.
- [26]周雨奇, 张志远, 王颖慧, 等. 浅层土坡草根加筋土原位剪切与室内直剪试验比较研究[J]. 科技创新与应用, 2017(20): 50-51, 53.
- [27]李东彪, 朱磊. 穿沙公路边坡植被根系固土力学特征比较研究[J]. 路基工程, 2022(1): 8-13.
- [28]BURYLO M, HUDEK C, REY F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous slopes (Southern Alps, France) [J]. Catena, 2011, 84(1/2): 70-78.
- [29]DING H, XUE L, LI L, et al. Influence of Root Volume, Plant Spacing, and Planting Pattern of Tap-like Tree Root System on Slope Protection Effect [J]. Forests, 2022, 13(11): 1925.
- [30]POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model [J]. Water Resources Research, 2005, 41(7): 226-244.
- [31]朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 等. 基于植物生长过程的根系固土机制及 Wu 模型参数优化[J]. 林业科学, 2018, 54(4): 49-57.
- [32]LEUNG F T Y, YAN W M, HAU B C H, et al. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability [J]. Catena, 2015, 125: 102-110.
- [33]李雪尔, 谢春燕, 李岩, 等. 植物根系护坡的有限元数值分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 76-82.
- [34]POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model [J]. Water Resources Research, 2005, 41(7): 226-244.
- [35]嵇晓雷, 杨平. 基于植被根系分形维数的生态边坡位移场研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1462-1468.
- [36]SAIFUDDIN M, NORMANIZA O. Rooting characteristics of some tropical plants for slope protection [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2016: 469-478.
- [37]LI Y, Wang Y, Ma C, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability [J]. Ecological Engineering, 2016(91): 477-486.