第33卷第5期
2022年 10月

水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering

Vol. 33 No. 5
Oct. ,2022

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.23

不同生长年限的刺槐根系对黄土边坡加固作用的研究

雷 磊[1,2], 万 昊[1,2], 江 涛[3], 师一卿[3], 吕平海[1], 田堪良[4,5], 王晓东[5], 杨傲秋[5]

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 国网(西安)环保技术中心有限公司, 陕西 西安 710100; 3. 国网陕西省电力有限公司, 陕西 西安 710048; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘　要: 植物根系护坡工程措施对黄土边坡稳定性的提升及生态环境保护具有重要作用。采用大型直接剪切仪测试了原状刺槐根系复合土体的抗剪强度,并采用FLAC3D岩土工程数值计算软件分析了不同生长年限的刺槐根系对黄土边坡的加固作用。结果表明:植物根系通过其对土体的加筋锚固作用,使根系复合土体的抗剪强度指数显著提高,抗剪强度规律符合摩尔-库伦强度准则;根系复合土体的抗剪强度随根系生长年限的增加而增大,3~7 a生刺槐的原状根系复合土体的黏聚力(c)和内摩擦角(φ)分别在44.46~88.91 kPa和23.89°~28.85°之间,7 a生刺槐根系复合土体的抗剪强度最大,c和φ分别比无根土体提高了211%和31%;植物根系对边坡具有一定的加固作用,提高了黄土边坡的稳定性,使边坡不易发生滑动,但由于刺槐根系加固土体的深度较浅,植物对边坡的加固作用有限,相较于无刺槐的黄土边坡,7 a生刺槐根系对边坡稳定安全系数的提升也仅为9%。研究成果可为刺槐等植物护坡工程的设计和施工提供科学依据。

关键词: 植物根系; 黄土边坡; 根系复合土体; 抗剪强度; 边坡加固; 稳定性分析

中图分类号:S157.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2022)05-0183-06

Strengthening effect of *Robinia pseudoacacia* root system with different growth years on loess slopes

LEI Lei[1,2], WAN Hao[1,2], JIANG Tao[3], SHI Yiqing[3], LÜ Pinghai[1], TIAN Kanliang[4,5], WANG Xiaodong[5], YANG Aoqiu[5]

(1. *Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited*, *Xi'an* 710100, *China*; 2. *State Grid (Xi'an) Environmental Protection Technology Center Company Limited*, *Xi'an* 710100, *China*; 3. *State Grid Shaanxi Power Company Limited*, *Xi'an* 710048, *China*; 4. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*, *Yangling* 712100, *China*; 5. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *China*)

Abstract: Plant slope protection measures play an important role in the improvement of loess slope stability and the restoration of ecological environment. Here, the shear strength of undisturbed *Robinia pseudoacacia* root composite soil was measured by a large direct shear device, and the reinforcement effects of *Robinia pseudoacacia* root system with different growth years on loess slopes were analyzed by the geotechnical engineering numerical calculation software FLAC3D. The results show that the plant roots can improve the shear strength of root composite soil significantly because the root system plays the role of reinforcement anchoring in the soil, and the shear strength of root composite soil conforms to Mohr-Coulomb strength criterion. The shear strength of root composite soil increased with the increase of root growth years, the cohesion (c) and internal friction angle (φ) of 3-7 a *Robinia pseudoacacia* undisturbed root composite soil were 44.46-88.91 kPa and 23.89°-28.85° respectively, and 7 a *Robinia pseudoacacia* root composite soil had the highest shear strength, its c and φ were 211% and 31% higher than rootless soil respectively. Plant roots can strengthen the loess slope and improve its stability,

收稿日期:2022-03-30;　**修回日期**:2022-04-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504703);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTDZ03-03-01)

作者简介:雷　磊(1985-),男,陕西渭南人,硕士,高级工程师,从事电网环水保技术研究。

通讯作者:杨傲秋(1996-),男,河南新乡人,硕士,研究方向为水土保持工程以及黄土边坡稳定性计算分析。

make it less prone to displacement; however, due to the shallow depth of the soil reinforced by the *Robinia pseudoacacia* root system, the reinforcement effect on the slope is limited. Compared with the loess slope without the planting of *Robinia pseudoacacia*, the improvement of the safety factor of the 7 a *Robinia pseudoacacia* root system on the slope stability was only accounted for 9%. The research results can provide a technical support for the design and construction of control measures of plant slope protection such as *Robinia pseudoacacia*.

Key words: plant root system; loess slope; root composite soil; shear strength; slope reinforcement; stability analysis

1 研究背景

随着国家经济的迅速发展,在黄土高原地区资源开发和大规模基础设施建设中有大量的人工边坡工程,由于黄土高原地区内土壤质地较为疏松,因此在自身重力、自然侵蚀的影响下极易引发滑坡、崩塌等地质灾害,造成严重的水土流失,生态环境尤为脆弱,亟待治理和保护[1-4]。因此,采取合适的边坡加固措施,提高黄土边坡的稳定性,对黄土高原地区的可持续发展和生态环境修复具有极其重要的意义。

相较于在施工过程中会扰乱生态平衡、造成大量水土流失的传统边坡支护措施,合理地使用生态措施,运用植物根系“加筋锚固”效应进行边坡固结,既可以达到边坡防护要求,又能够与边坡自然环境相互兼容,具有良好的工程和生态景观效应,所以在边坡上栽种植物是一种行之有效的护坡措施[5-9]。1976 年 Wu 等[10]和 1977 年 Waldron[11]以摩尔-库伦理论为基础,先后建立了根增强土的先驱模型,提出了加筋土理论,随后国内外大量学者对于植物护坡技术进行了理论与试验的探索与研究,Zhu 等[12]通过对植被自然生长条件下的根长、位置、方向等特性进行试验研究,探究了根系特征对边坡稳定性的影响作用;徐华等[13]以黑麦草为研究对象,探究了其不同形态和层次结构根系对土体固结作用的影响,阐明了根系形态与层次结构对根土复合体的力学特性影响及固土作用机理;余燚等[14]对红黏土边坡香根草展开了研究,探究了根重指数 *RWD* 指标对土体抗剪强度的影响作用;张立芸等[15]以坡耕地玉米和大豆根系为研究对象,采用无侧限压缩试验方法进行了根长、表面积指数、体积指数等对抗剪强度的影响研究;刘宇飞等[16]以紫花苜蓿、非洲狗尾草两种植物混播,探究了含根量、根密度对草本植物固土效应作用的影响。

综上所述,目前对根系土抗剪强度的研究大多以灌草根系与重塑土的结合形式为主,研究内容也大多以土壤干密度、含水率、根系形态等单一因素为主,而对于不同年限的乔木根系同黄土相结合,以自然生长所组成的原状根系复合土体及其对边坡加固作用的研究极少。随着植物生长年限的增加,其根系不断发育,加固边坡土体的体积和强度也会发生变化,需要开展原状根系复合土体的大型直接剪切试验,才能揭示根系加固的机理和规律,分析其对边坡的加固作用。刺槐在黄土高原地区分布广泛。由于其具有生长迅速、耐瘠薄、耐干旱的特点,故被广泛用于防风固沙、改良土壤、保持水土和四旁绿化中[17-18]。本研究在黄土地区采集了 4 种不同生长年限刺槐的原状根系复合土体试样,采用大型直接剪切试验设备测试了试样的抗剪强度及其变化规律,计算分析了刺槐根系对黄土边坡的加固作用,以期为黄土高原地区植物根系边坡加固的研究和应用提供理论和技术支撑。

2 材料与方法

2.1 研究材料

通过对自然生长条件下刺槐根系的生长规律进行调查发现,刺槐的快速生长期通常在 8 a 以前,此后生长速度逐渐放缓[19-20],而刺槐根系对边坡的加固作用主要体现在坡面以下 30~60 cm 深度范围之内,随刺槐生长年限的增加,根系不断向下生长,根系密度不断增大。因此,采集了具有典型性、代表性的生长期为 3、4、5 和 7 a 的刺槐根系复合土体试样作为研究对象,同时,也采集了不含根系的原状土样用于对比分析。

试验所用黄土试样及刺槐根系复合土体试样取自陕西省咸阳市杨陵区五泉镇境内的中国科学院水利部水土保持研究所的水土保持实验站,地理位置为 107°59′51″E、34°19′28″N。在试验站的黄土边坡上,于 2021 年 5 月 7 日采集了原状黄土及根系复合土体试样,为便于运输,采集的试样被削成边长为 60 cm、高度为 50 cm 的长方体,在现场进行封装,然后吊运至大型直接剪切试验室。刺槐根系复合土体试样的采集如图 1 所示。试验区内土质较为单一,

均属 Q_3 黄土(马兰黄土),其物理力学指标及分类　见表 1。

表 1　试验区黄土土样物理力学指标及分类

液限/%	塑限/%	塑性指数/%	分类	干密度/(g·cm^{-3})	含水率/%	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
35.6	18.3	17.3	粉质黏土	1.61	14.7	5.1	0.4

2.2　研究方法

2.2.1　*试验设备*　根系复合土体直接剪切试验于 2021 年 5 月 9 – 12 日在西北农林科技大学水利与建筑工程学院(原水利部西北水利科学研究所)粗粒土试验室进行。采用 ZJ500 – 1 大型直接剪切仪测试试样的抗剪强度。剪切室直径为 50 cm,深度为 40 cm,由上、下剪切室组成,高度分别为 20 cm。剪切时,上剪切室固定,下剪切室在荷载作用下向前移动,施加剪切力。试样顶部的垂直应力和试样中部的水平剪切应力分别由两台千斤顶提供,应力和剪切速率的大小由人工控制。

2.2.2　*试验方法*　首先,将根系复合土体试样修整成直径为 50 cm,高度为 40 cm 的圆柱体,吊装进直剪仪的剪切室中,然后将装有试样的剪切室用龙门吊吊起,放置在剪切平台上。试验前,在试样顶部放置加压盖板,再将千斤顶放置在盖板上面,调节垂直和水平加力千斤顶,使千斤顶与加力点相接触;试验时,在上、下剪切室之间开启 1 cm 宽的剪切缝,然后先施加垂直压应力,再按照 1.2 mm/min 的剪切速率施加水平剪切应力,当剪应力出现峰值或剪应变达到 15% 时,结束试验。分别对 3、4、5 及 7 a 生的刺槐根系复合土体试样进行了直接剪切试验,每组试验中,试样顶部设置的垂直压应力数值分别为 50、100 和 150 kPa。

3　结果与分析

3.1　根系复合土体的抗剪强度

通过对不同生长年限的刺槐原状根系复合土体抗剪强度进行测试,抗剪强度与法向应力的关系曲线以及抗剪强度参数与根系生长年限的关系曲线分别如图 2、3 所示。由图 2、3 可见,原状根系复合土体的抗剪强度与法向应力呈线性相关关系,符合摩尔 – 库伦强度准则;无根黄土的黏聚力和内摩擦角分别为 28.54 kPa 和 22.0°,不同年限刺槐根系复合土体的黏聚力和内摩擦角分别在 44.46 ~ 88.91 kPa 和 23.89 ~ 28.85°之间,根系复合土体的抗剪强度明显大于无根土体的抗剪强度,并随根系生长年限的增长而增大,7 a 生刺槐根系复合土体的抗剪强度最大,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 分别比无根土体提高了 211% 和 31%;在根系对土体的加固作用中,黏聚力比内摩擦角增大的幅度更大,表明植物根系对土体具有显著的锚固作用。

图 1　刺槐根系复合土体试样

3.2　根系结构分析

通过对不同生长年限的刺槐根系进行测量分析,得到的不同直径根系的分布情况见表 2。由表 2 可知,单位根系复合土体中,刺槐的细根(根径 D < 2 mm)、中根(2 mm ≤ 根径 D ≤ 5 mm)和粗根(根径 D > 5 mm)分布密度均随生长年限的增长而增大,其中细根的增长幅度最大,7 a 生比 3 a 生的刺槐细根密度增大了约 7.6 倍,而中根和粗根密度分别增大了约 1 倍和 5 倍。

表 2　不同生长年限刺槐根系各根径密度分布　m/m^3

根系生长年限/a	细根(D <2 mm)	中根(D =2 ~5 mm)	粗根(D >5 mm)
3	45.7	34.6	6.8
4	65.6	37.6	9.2
5	115.3	45.1	20.0
7	392.9	67.6	41.4

3.3　根系对土体的加固机理

图 4 为根系复合土体剪切破坏后的状态。由图 4 可以看出,根系复合土体被剪切破坏后,植物根系并没有被剪断,而是被从土体中拔出,在剪切过程中,根系对土体具有锚固作用。在土体承受剪切荷载时,根系

与土体之间存在着粘结力(当根系和土体之间没有发生相对位移时)和摩擦力(当根系克服了与土体之间的粘结力,发生相对位移时),对剪切变形具有抵抗作用,这种抵抗土体发生剪切变形的力即为抗剪强度的一部分,而这部分抗剪强度是无根系土体所没有的,因此,

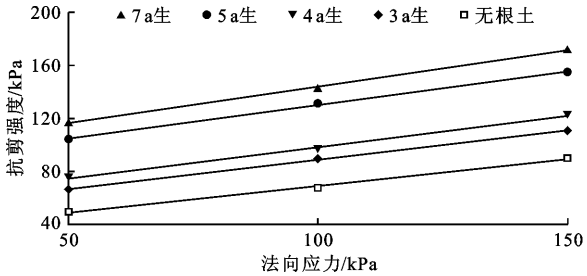


图 2 不同生长年限刺槐根系复合土体试样法向应力与抗剪强度的关系曲线

图 4 根系复合土体剪切破坏后的状态

4 刺槐根系对边坡加固作用的计算分析

刺槐根系对土体具有加固作用,增大了土体的抗剪强度,从而提高了黄土边坡的稳定性。为了对不同生长年限刺槐根系对黄土边坡的加固作用进行详细计算和分析,采用 FLAC3D 岩土工程数值计算软件分析刺槐根系对边坡稳定的影响,使用安全系数法进行稳定性状态的评价。作为边坡稳定性分析中重要的判定指标和概念,安全系数法原理简单,物理意义明确,能够更直观而准确地得到分析结果。该计算软件利用强度折减法计算边坡稳定安全系数,主要计算原理为[21-22]:

$$c_F = c/F_{trial} \tag{1}$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}((\tan\varphi)/F_{trial}) \tag{2}$$

式中:c_F 为折减后的黏聚力,kPa; φ_F 为折减后的内摩擦角,(°); F_{trial} 为折减系数。

在边坡安全系数数值模拟及运算过程中,通过不断增大折减系数,对边坡稳定状态进行反复运算,直至其达到稳定与破坏的临界状态,此时得到的折减系数即为安全系数 F_s。

根系的锚固作用提高了土体的抗剪强度,根系复合土体的抗剪强度均大于无根系土体的抗剪强度。随着生长年限的增加,土体中根系的密度也不断增加,根系对土体的锚固作用增强,根系密度越大,根系复合土体的抗剪强度也越大。

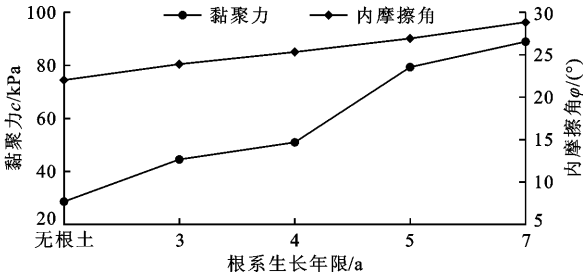


图 3 刺槐根系复合土体试样抗剪强度参数与根系生长年限的关系曲线

根据黄土高原区边坡开挖工程的实际情况,按照边坡坡度的不同建立两种刺槐根系加固黄土边坡的数值计算模型,即模型Ⅰ边坡为 1∶1,模型Ⅱ边坡为 1∶0.5。两种模型均设置两级边坡,单级边坡高度为 4 m,两级边坡之间设置 2 m 宽的平台,如图 5 所示。在模型中,分别设置生长年限为 3、4、5、7 a 生的的刺槐,刺槐种植株距均为 1 m,根系加固坡面土体的深度分别为 30、40、50、60 cm。

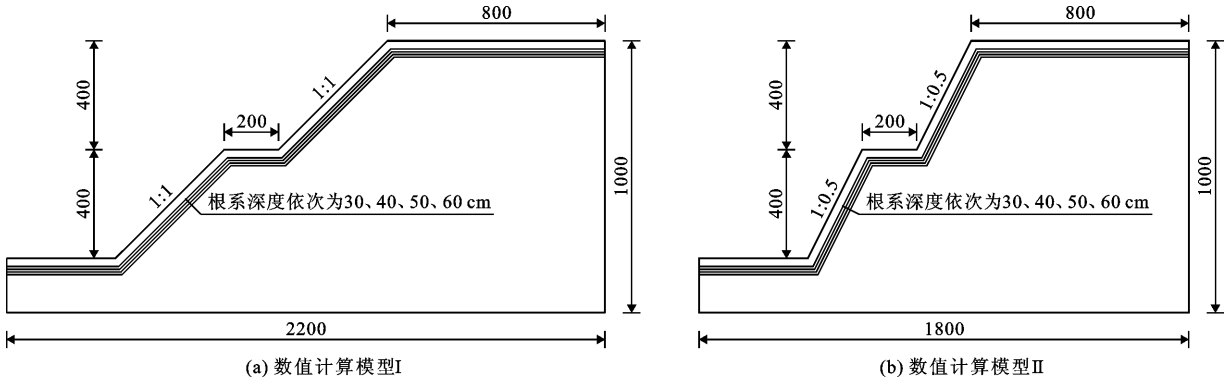
采用 Mohr-Ccoulomb 力学模型进行计算分析,得到的两种边坡模型的稳定安全系数见表 3。不同生长年限刺槐根系加固边坡的典型最大剪应变率云图如图 6 所示。

表 3 两种边坡模型的稳定安全系数计算结果

根系生长年限/a	计算模型Ⅰ	计算模型Ⅱ
无根	2.59	2.12
3	2.61	2.15
4	2.63	2.17
5	2.73	2.27
7	2.78	2.31

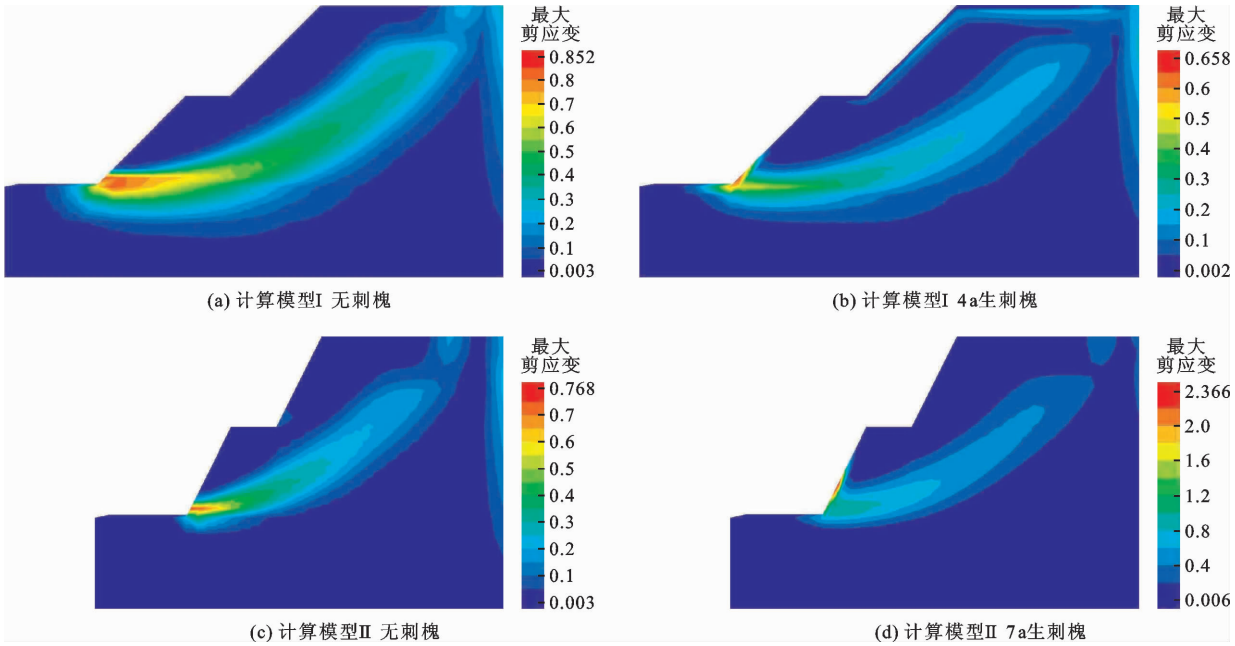
表 3 中的计算结果表明,坡比为 1∶1 的黄土边坡(模型Ⅰ)的稳定安全系数由无刺槐根系状态下的 2.59,经 3、4、5 和 7 a 生长期的刺槐加固后,分别增大至 2.61、2.63、2.73、2.78,增大幅度为 0.77% ~ 7.34%;坡比为 1∶0.5 的黄土边坡(模型Ⅱ)的稳定安全系数由无刺槐根系状态下的 2.12,经 3、4、5 和 7 a 生长期的刺槐加固后,分别增大至 2.15、2.17、2.27、2.31,增大幅度为 1.42% ~8.96%。可见种植刺槐的

黄土边坡的稳定安全系数均大于无刺槐边坡的稳定安全系数,刺槐根系对黄土边坡具有一定的加固作用,而且随着刺槐生长年限的增加,根系密度和加固土体的深度也逐渐增大,对边坡的加固作用也更加明显。但总体来看,由于刺槐根系加固边坡土体的深度较小,而边坡失稳的潜在滑动面一般比较深,没有穿过根系所加固的土层,因此,刺槐根系对黄土边坡的加固作用有限,边坡稳定安全系数最大仅提高了约 9%。由图 6 可以看出,坡脚处的剪切应变较大,坡脚为潜在的最先可能发生塑性变形破坏之处。



(a) 数值计算模型Ⅰ　　(b) 数值计算模型Ⅱ

图 5　刺槐根系加固黄土边坡稳定分析数值计算模型



(a) 计算模型Ⅰ 无刺槐　　(b) 计算模型Ⅰ 4a生刺槐

(c) 计算模型Ⅱ 无刺槐　　(d) 计算模型Ⅱ 7a生刺槐

图 6　两种模型不同生长年限刺槐根系加固边坡的典型最大剪应变率分布

5　讨　论

本试验得出含根土体较不含根土体的抗剪强度指标明显增强,该结果与杨锐婷等[23]对土壤 - 柠条根系复合土体的研究结论相同;植物根系通过增大根系复合土体的黏聚力来影响土体的抗剪强度,而对土体内摩擦角的影响程度较小,该结果与孙庆敏等[24]对汶川典型乔木的研究结果较为一致;在 FLAC3D 数值模拟过程中,根系生长年限对坡面安全系数的提升效果呈正相关关系,该结果与陈航等[25]对紫穗槐根系的 FLAC3D 软件模拟结果较为相似。

本试验表明,相较于根系加固作用,坡度对于边坡安全系数也有较大的影响,但考虑到工程施工实际情况以及成本因素,坡面植物措施的布设依然是工程中普遍使用的增强边坡稳定性方式。在本次试验中,经植物措施固结后的黄土边坡稳定安全系数较高,根据边坡工程技术相关规范要求,该类边坡一级安全等级要求的边坡稳定安全系数为 1.35,试验所得安全系数指标均大于规范标准,故坡面整体处于稳定状态,但坡脚处剪切应变值偏高,坡面在降雨条件下有失稳滑动的隐患,滑动面位于坡面较深处,而浅根系植物对较深坡面的加固作用有限,因此在

以后的研究中需要进一步探究如何选用深根系植物对深层坡面进行加固,并对坡脚剪切应变状况的改善进行具体研究。

本试验以天然含水率状态的根系复合土体为研究对象,但在自然状态中,植被在短历时降雨条件下,其地表以上部分例(如树冠、叶面)可能截留一部分雨水[26],但在降雨量较大、降雨时间较长的情况下,一般而言,植被会增加降雨入渗、减少产流、降低径流系数,这些因素均会增大边坡土体的含水率和自重,减小了根系与土体之间的锚固作用和土体的抗剪强度,从而降低边坡的稳定性。不同含水率状态下原状根系复合土体的抗剪强度及其对边坡稳定性的影响有待进一步研究,以完善植物根系加固黄土边坡的相关理论。

刺槐浅层根系通过对土体的加筋作用以及主根对较深层土体的锚固作用,提高了边坡的稳定性,最终体现在边坡稳定安全系数的提升。采用大型直剪仪定量测出自然生长的刺槐根系对黄土坡面浅层土体的固结作用,能够对黄土高原地区植物固结边坡的实际工程措施提供参考。

6 结 论

(1)采用大型直接剪切仪测试了黄土与刺槐组成的原状根系复合土体的抗剪强度,根系复合土体的抗剪强度符合摩尔-库伦强度准则。

(2)植物根系通过其对土体的锚固作用,提高了根系复合土体的抗剪强度,从而增加了黄土边坡的稳定性。

(3)根系复合土体的抗剪强度随根系生长年限的增加而增大,3~7 a 生刺槐原状根系复合土体的黏聚力和内摩擦角分别在 44.46~88.91 kPa 和 23.89~28.85°之间。7 a 生刺槐根系复合土体的抗剪强度最大,其黏聚力和内摩擦角分别比无根土体提高了 211% 和 31%。

(4)根系对边坡的加固作用随根系生长年限的增大而增加,但由于刺槐根系加固土体的深度较浅,相较于没有种植刺槐的黄土边坡,7 a 生刺槐根系对边坡稳定安全系数也仅提升 9%。

参考文献:

[1] 周云艳,陈建平,王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报,2012,21(6):1171-1177.

[2] 章林平. CF 网植草喷播生态防护技术在山区公路边坡防护中的应用[J]. 江西建材,2021(8):136-137+139.

[3] 高素芳,盛志战,吴晓娲,等. 稳定岩质边坡陡岩的植被护坡可行性研究[J]. 能源与环境,2021(6):82-84+105.

[4] SUN Meimei, ZHAI Bochao, CHEN Qiuwen, et al. Effects of soil nutrients and stand structure on aboveground net primary productivity of oak secondary forests in the forest - steppe transition zone of Loess Plateau, China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2020, 51(9): 1208-1217.

[5] 陈 杰. 高陡边坡 CBS 植被混凝土生态恢复技术[J]. 人民黄河,2021,43(S2):231-232+234.

[6] 郑启萍,徐得潜. 草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(2):225-228.

[7] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍. 树木根系固土力学机制研究综述[J]. 浙江林学院学报,2008,25(3):376-381.

[8] 刘向峰,郝国亮,于 冰. 两种植物根的分布特征及其对露天矿边坡表层加固效果研究[J/OL]. 长江科学院院报,2021:1-8[2022-04-28](2021-10-12). http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20211012.1308.002.html.

[9] 张学宁,王德成,尤 泳,等. 基于草地切根的根土复合体本构关系研究[J/OL]. 农业机械学报,2022:1-17[2022-06-11](2022-04-22). http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20220422.1140.004.html.

[10] WU T H, MCKINNELL 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.

[11] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5): 843-849.

[12] ZHU Hong, ZHANG Limin, XIAO Te, et al. Enhancement of slope stability by vegetation considering uncertainties in root distribution[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 85: 84-89.

[13] 徐 华,袁海莉,王歆宇,等. 根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(5):926-935.

[14] 余 燚,刘思思,李某明,等. 红黏土边坡香根草根土复合体的强度特性[J]. 水土保持通报,2021,41(1):97-102.

[15] 张立芸,段青松,范茂攀,等. 玉米和大豆根系对滇中地区坡耕地红黏土抗剪强度的影响[J/OL]. 土壤学报,2022:1-11[2022-04-28](2022-01-21). http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220120.1355.002.html.

[16] 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.

[17] 孙中峰,张学培,朱金兆. 晋西黄土区坡面刺槐林分生长规律研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2006,22(1):46-49.

(下转第 199 页)

of the Geological Society of India, 2014, 83: 586 – 594.
[14] 孙子涵,王述红,杨天娇,等. 降雨条件下多层土坡入渗机理与稳定性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2020,41(8):1201 – 1208.
[15] 马少坤,童唯峰,冯 野,等. 极端气候下互层边坡的温湿耦合特性及稳定性分析[J]. 长江科学院院报,2017,34(8):72 – 78.
[16] 贺小黑,彭 鑫,谭建民,等. 地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(6):96 – 103.
[17] ALI A, HUANG Jingsong, LYAMIN A V, et al. Boundary effects of rainfall-induced landslides[J]. Computers and Geotechnics,2014,61:341 – 354.
[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 降水量等级:GB/T 28592—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
[19] 李 赛. 鲁中山地天然降雨对径流小区产流产沙的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2016.
[20] 季 娟,宋林辉,范钦珊. 边坡面层破坏敏感性分析[J]. 煤矿安全,2015,46(1):186 – 189.
[21] 付宏渊,曾 铃,王桂尧,等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学,2012,33(8):2359 – 2365.

(上接第 188 页)

[18] 陈 飞,施 康,钱 乾,等. 根土复合体材料的抗剪强度特性研究进展[J]. 有色金属科学与工程,2021,12(6):96 – 104.
[19] 杨茂林,冀晓东,孙 恒,等. 不同年龄刺槐枝、干和根的物理力学性质对比[J]. 林业科学,2020,56(7):115 – 122.
[20] 郝嘉阳,许朝阳. 植草根系的加筋效果及机理研究[J]. 山西建筑,2021,47(20):69 – 71.
[21] 张新启,龚爱民,徐兴倩,等. 考虑含水率变化影响的红黏土边坡双强度折减法研究[J]. 水利水电技术,2020,51(9):181 – 186.
[22] 张学清,潘福营,殷 康,等. 基于强度折减的洛宁抽水蓄能电站黄土边坡稳定性研究[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(1):64 – 68 + 120.
[23] 杨锐婷,格日乐,郝需婷,等. 不同类型土壤 – 柠条根系复合抗剪力学特性的比较[J]. 土壤通报,2021,52(4):821 – 827.
[24] 孙庆敏,葛永刚,陈 攀,等. 汶川典型植物根 – 土复合体抗剪强度影响因素评价[J]. 水土保持学报,2022,36(1):58 – 65.
[25] 陈 航,张慧莉,田堪良,等. 紫穗槐根系对黄土边坡加固作用的试验研究[J]. 人民黄河,2017,39(10):84 – 88.
[26] 代智盛,王云琦,马 超,等. 黄土丘陵沟壑区刺槐动态固坡效应[J]. 水土保持学报,2020,34(5):145 – 152 + 161.