

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.03.015

百喜草根系对土壤渗透性能的影响

邹全, 王桂尧, 张文豪, 郭一鹏

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 研制室内渗透试验装置, 通过对比试验, 研究百喜草根系对砂质黏土渗透性能的影响, 同时进行染色示踪优先流试验, 探究百喜草根系对砂质黏土渗透性能的影响机理。结果表明, 百喜草根系能较大幅度提高砂质黏土的渗透系数, 其渗透系数是无根系土体的 7.1~20.4 倍; 土体渗透系数随百喜草根系质量的增加而增大; 渗透系数随土体深度的增大而减小, 深度 20~30 cm 处有根系砂质黏土的渗透系数接近素土; 根系的生长促进了土体内优先流的产生, 有根系砂质黏土的染色面积占比及优先流路径长度均大于素土。

关键词: 公路; 砂质黏土; 百喜草; 渗透性能

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0060-05

植草护坡作为一种生态边坡防护措施近年来在公路工程中得到广泛应用。草本植物主要通过影响侵蚀动力和土壤本身抗侵蚀能力来增强坡面浅层土壤, 植物茎叶、枯落物等通过削弱雨滴溅蚀、截流吸附坡面雨水等方式减弱坡面水流的侵蚀; 植物地下根系在土壤中生长、穿插形成根-土复合体固结土壤, 提高土体强度和抗崩解能力, 从而增强坡面土壤的抗侵蚀能力。目前大量研究集中于植物根系的力学加筋效应, 而实质上其水力学特性更重要。文献[12-15]指出植物根系可显著改变土壤的渗透特性, 影响土壤中水分的运移, 改变降雨过程中土质边坡的地表径流, 从而影响边坡坡面侵蚀; 李雄威等通过膨胀土原位渗透试验, 发现植物根系可增大土体渗透性能; 张伟伟等研究砂质土壤根-土复合体的土水特征, 发现植物根系的存在可增大素土的渗透系数; 赵记领等发现由细叶结缕草构成的边坡保护层能减小雨水入渗速度; 陈晋龙等发现直根系(香根草)可增大边坡表层的渗透系数, 须根系(狗牙草)会降低边坡表层的渗透系数; 桑凯新、李建兴等的研究表明随着土层深度的增加, 不同植物类型和同一植物不同土层之间土壤的渗透特性存在较大差异。

近年来, 草本植物百喜草因其根系发达、地下茎粗壮等特点受到越来越多的关注。目前大多数研究侧重于百喜草根系的力学加筋性能, 而对其对坡面抗侵蚀能力影响的研究较少。该文分析百喜草根系对砂质黏土渗透性能的影响, 探讨不同深度处土体渗透性能差异, 并通过染色示踪优先流试验分析百

喜草根系对土体渗透性能的影响机理。

1 试验材料及方法

1.1 试验土样

试验用砂质黏土取自长沙某工地, 风干后过 5 mm 筛。土样的基本物理性质见表 1, 颗粒级配见图 1。

表 1 砂质黏土的基本物理参数

参数名称	参数值
最优含水量/%	13.6
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.87
天然干密度/(g·cm ⁻³)	1.74
塑限/%	11.2
液限/%	23.8
渗透系数/(mm·min ⁻¹)	0.023 6

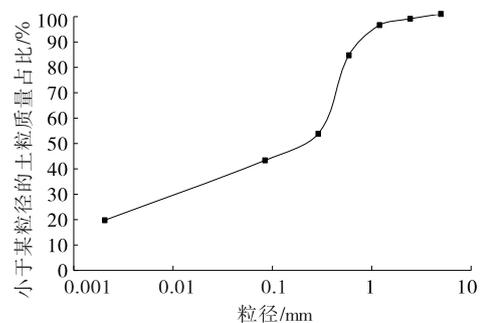


图 1 砂质黏土的级配曲线

1.2 试样制备

(1) 有根系砂质黏土(简称植根土)。在 PVC

管内种植百喜草,管径为 104 mm,高度为 330 mm,分 10 层(每层 3 cm)压实,初始含水量为 13.6%,干密度为 1.74 g/cm³。底部采用土工布封底,播种种子质量为 0.8 g,在室外种植 3 个月(见图 2)。



图 2 有根系砂质黏土试样制备

(2) 无根系砂质黏土(简称素土)。采用同样的方法制备,只是不播种种子,放置在相同环境下开展对比试验。

1.3 渗透试验

1.3.1 试验装置与步骤

如图 3 所示,渗透试验装置由电子秤、支架、烧杯、漏斗、铁丝网、带刻度的有机玻璃管(外径 110 mm,厚度 3 mm)组成。

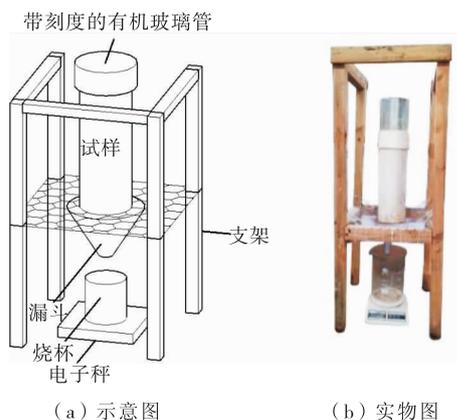


图 3 渗透试验装置

试验步骤:剪去试样上部的茎叶,去除试样底部土工布,将带刻度的有机玻璃管套在试样顶部,注水至 5 cm 高水头。试验过程中每隔一段时间记录水头和水温,读数完成后立即加水,将水头恢复为 5 cm。第一次读数为试验开始后 2 min,第二次为 3 min,之后视水头下降速度定时间。利用底部的烧杯收集渗漏液并称量,当称量的水在各间隔内稳定时,试验结束。

1.3.2 植根土渗透试验

选用 10 个素土试样和 10 个植根土试样进行渗透试验,取出试样中的根系,洗净风干后称其质量,

分析根系对土体渗透特性的影响。植根土渗透系数 K_t 按下式计算:

$$K_t = \frac{10Q_n}{t_n S} \times \frac{L}{H} \quad (1)$$

式中: Q_n 为间隔时间内渗入的水量; t_n 为间隔时间; S 为 PVC 管的截面积; L 为 PVC 管中土样深度; H 为试验时的水头高度。

按下式换算为 10 °C 下渗透系数:

$$K_{10} = \frac{K_t}{0.7 + 0.03t} \quad (2)$$

式中: K_t 为温度 t 时渗透系数; t 为试验时测定的水温。

1.3.3 植根土分段渗透试验

取 10 个植根土试样,沿高度方向将试样均分为 3 段(对应深度为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm),开展不同深度植根土变水头渗透试验。取出试样中的根系,洗净风干后称其质量,分析不同深度根系对土体渗透特性的影响。

1.4 染色示踪优先流试验

优先流是指土壤水分沿植物根系生长等作用下形成的孔隙通道绕过大部分土壤基质快速通过土壤的现象。采用亮蓝染色剂溶液(浓度 4 g/L)进行染色示踪优先流试验,步骤如下:将染色剂以 0.019 mm/s 的强度均匀喷洒在土体表面,喷洒时间约 30 min,静置 24 h 后将试样取出,将土层剖开(水平方向 1.5 cm 剖开一次,竖直方向 2 cm 剖开一次)后,拍照记录不同高度土体染色情况。

先利用 Photoshop 将染色区域变为黑色、未染色区域变为白色,再利用 MATLAB 软件计算染色部分的面积。

2 试验结果与分析

2.1 渗透特性

2.1.1 植根土整体渗透特性

根系质量与渗透系数的关系见图 4。

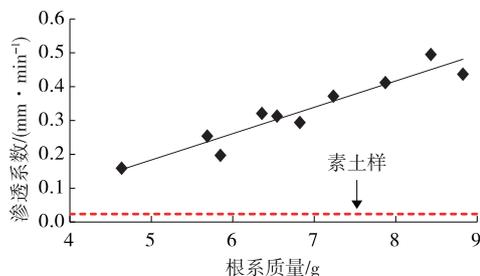


图 4 根系质量与渗透系数的关系

由图4可知:1)随着根系质量的增加,植根土渗透系数增大,两者呈正相关。2)植根土的渗透系数(0.159~0.495 mm/min)远大于素土(0.022 4~0.024 3 mm/min),是素土的7.1~20.4倍,百喜草根系可提高土体的渗透性能。这是因为植物根系可促进土体形成微型滤水团聚体,阻止土颗粒的搬运,直接增加水分的入渗;植物根系在土体中生长形成孔隙,促使土体形成广泛且连续的大孔隙,水分可快速进入土体内部,增强土壤的渗透特性。3)每组植根土的根系质量存在较大差异,其渗透系数波动范围较大,最大值约为最小值的3倍。这是由植根土中植物根系发育程度不同所引起。

2.1.2 植根土不同深度渗透特性

不同深度根系质量与渗透系数的关系见图5。

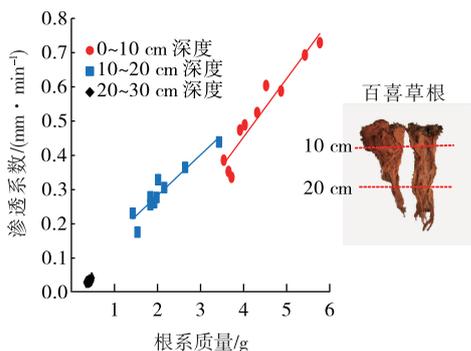


图5 不同深度根系质量与渗透系数的关系

从图5可以看出:1)随着土体深度的增大,植根土的渗透系数和根系质量减小。2)土体深度为20~30 cm时,植根土的渗透系数接近于素土。根系在土中的生长形态为倒三角形,在土体浅层,百喜草根系分布范围广,根系形态规则,根系质量和渗透系数呈明显的线性关系;土体深度为20~30 cm时,根系生长不规则,且只有小部分根系贯穿土体,当水分通过根系生长产生的新孔隙流动至该深度时,根系带来的渗流路径消失,植根土的渗透系数接近于素土。

2.2 染色特性

2.2.1 水平剖面下优先流规律

图6为试样水平剖面染色面积占比随深度的变化曲线,表2为部分试样水平剖面染色二值化图片。从图6和表2可看出:1)土体深度0~5 cm处,2组试样剖面几乎全部染色。2)植根土的染色深度和染色面积占比均大于素土。这是由于植根土表层参与渗流的孔隙多,以基质流的形式为主;随着深度的增大,渗流以根系生长产生的大孔隙优先流为主,染

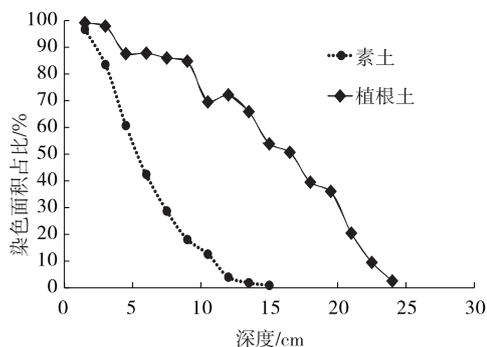


图6 染色面积占比和深度的关系

表2 部分试样水平剖面染色二值化图片

深度/cm	水平剖面染色二值化图片	
	素土	植根土
1.5		
7.5		
13.5		

色溶液沿着这些大孔隙向下渗透,大孔隙周围基质染色,故植根土染色面积大,优先流路径更长。说明百喜草的存在增加了土壤优先流路径,提高了砂质黏土的渗透性能。3)素土的染色面积随深度的变化曲线比植根土平滑,染色面积占比随深度的增大而均匀减小;植根土部分区域染色面积占比随深度增大呈现减小或基本不变的趋势。这是由于分层压实过程中试样顶部压实度低于底部,顶部的渗透性能大于底部,染色面积占比随深度增大而减小;根系一般为先向下生长后侧向伸长,在某些深度范围内水平根系的存在使该剖面的渗流路径增多,染色面积占比基本不变。

2.2.2 垂直剖面下优先流规律

图7为垂直剖面图片染色二值化图片。从图7可以看出:1)植根土表层(0~5 cm)几乎全部染色,水分以基质流的形式入渗;染色面积随着深度的增大而减小,在10 cm深度处染色区域开始分散,水分的入渗由基质流转向优先流,与水平剖面的优先流规律相同。2)黑白交界处为植根土24 h后湿润锋在土体中的位置。植根土的湿润锋扩张深度达到24.48 cm,而素土湿润锋最大为15 cm左右,植根土的湿润锋扩张深度比素土大。将植根土垂直剖面与水平剖面的数据对比,发现两者最大染色深度差不多。

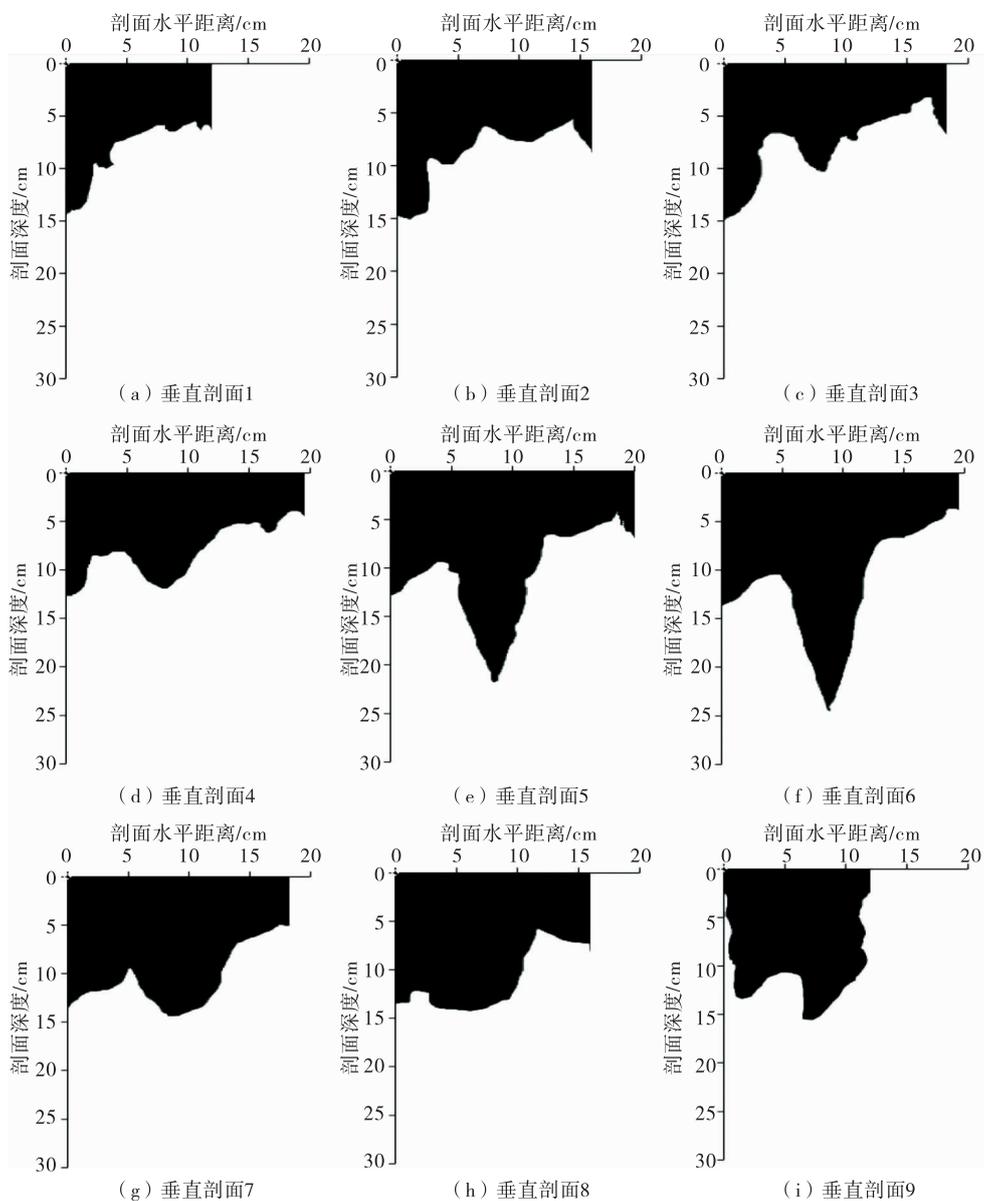


图7 植根土垂直剖面染色二值化图片

3 结论

(1) 百喜草根系可提高土体的渗透性能,有根系砂质黏土的渗透系数是无根系土体的 7.1~20.4 倍。有根系砂质黏土的渗透系数因植物根系发育程度不同产生很大波动,最大值约为最小值的 3 倍。

(2) 根系质量与渗透系数呈线性关系,即渗透系数随土体内根系质量增大而增大。

(3) 植根土根系质量和渗透系数随深度增大而减小,且植根土在 20~30 cm 深度处的渗透系数与素土较接近。

(4) 根系的生长对土体内优先流的产生有促进作用。砂质黏土在有根系时的染色深度比无根系时

更大;所有试样的染色面积占比随深度增大均呈减小趋势;有根系砂质黏土的优先流路径长度比无根系砂质黏土的长,且染色面积占比与染色深度比无根系砂质黏土大幅提高。

参考文献:

- [1] 曾昌禄,李荣建,关晓迪,等.不同雨强条件下黄土边坡降雨入渗特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(增刊1):111-115.
- [2] 陶志刚,李华鑫,曹辉,等.降雨条件下全段高排土场边坡稳定性模型实验研究[J].煤炭学报,2020,45(11):3793-3805.
- [3] 郭一鹏,冷伍明,聂如松,等.一种新型排水结构的排水性能试验研究[J].铁道学报,2019,41(4):133-141.

- [4] 刘黎明,邱卫民,许文年,等.传统护坡与生态护坡比较与分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2007,29(6):528—532.
- [5] 缪海波,柴少峰,王功辉.强降雨下无黏性土坡破坏的影响因素试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(2):300—308.
- [6] 乔娜,余芹芹,胡夏嵩,等.植物对土壤加强作用及其生态护坡研究综述[J].人民黄河,2011,33(7):106—109+143.
- [7] 王桂尧,周欢,夏旖琪,等.草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验[J].中国公路学报,2018,31(2):234—241.
- [8] 程谅,占海歌,郭忠录.3种草本植物根系对土壤抗蚀特性的响应[J].草业科学,2019,36(2):284—294.
- [9] 王文生,杨晓华,谢永利.公路边坡植物的护坡机理[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(4):26—30.
- [10] MARSTON R A, HESSION W C, WYNN T, et al. Geomorphology and vegetation on hillslopes: Interactions, dependencies, and feedback loops[J]. Geomorphology, 2010, 116(3—4): 206—217.
- [11] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1—47.
- [12] 王鑫皓,王云琦,马超,等.根系构型对土壤渗透性能的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):73—82.
- [13] 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.
- [14] NI J J, CHEN X W, NG C W W, et al. Effects of biochar on water retention and matric suction of vegetated soil[J]. Géotechnique Lett, 2018, 8: 124—129.
- [15] BORDOLOI S, GARG A, SREEDEEP S, et al. Investigation of cracking and water availability of soil-biochar composite synthesized from invasive weed water hyacinth [J]. Bioresource Technology, 2018, 263: 665—677.
- [16] 李雄威,孔令伟,郭爱国.植被作用下膨胀土渗透和力学特性及铎坡防护机制[J].岩土力学,2013,34(1):85—91.
- [17] 张伟伟,江朝华,程星,等.草本植物根系对黄河故道区非饱和土特性的影响[J].水利水电科技进展,2017,37(1):73—78.
- [18] 赵记领,李光范,胡伟,等.不同降雨形式下植被边坡含水率变化对比试验研究[J].自然灾害学报,2017,26(3):193—199.
- [19] 陈晋龙,李锦辉,程鹏,等.植被作用下土质覆盖层渗透特性的现场试验[J].岩土力学,2018,39(1):222—228.
- [20] 桑凯新,胡淦林,黄超,等.黄河河岸带5种植物类型根系结构特征对土壤渗透性的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(5):1—8.
- [21] 李建兴,何丙辉,湛芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535—1544.
- [22] 廖绵浚,张贤明.水土保持作物百喜草研究[J].中国水土保持科学,2003,1(2):8—17.
- [23] 张超波,周霞,李东嵘,等.山西土石山区3种草本植物根拉拔特性[J].水土保持研究,2019,26(3):300—304.
- [24] 陈洁,雷学文,黄俊达,等.花岗岩残积土边坡草本植物根固效应试验[J].水土保持学报,2018,32(1):104—108.
- [25] 欧阳前超,魏杨,周霞,等.土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性[J].中国水土保持科学,2017,15(4):35—41.
- [26] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227—241.
- [27] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:北京科学出版社,1978:140.
- [28] 吴庆华,张家发,蔺文静,等.土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J].农业工程学报,2014,30(7):82—90.
- [29] FATTET M, FU Y, GHESTEM M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength [J]. CATENA, 2011, 87(1): 60—69.
- [30] 王晶,赵文武,刘月,等.植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J].生态学报,2019,39(9):3355—3364.
- [31] LASKOWSKI M, TUSSCHER K T. Periodic lateral root priming: What makes it tick? [J]. Plant Cell, 2017, 29(3): 432—444.

收稿日期:2021—06—29

(上接第50页)

(1):52—60.

- [10] 教淳宗,郭乃胜,李薇,等.溶解性胶粉改性沥青的制备及其流变性能[J].建筑材料学报,2020,23(1):93—99+107.

- [11] 周志刚,蔡扬发,谭军.聚酯纤维对橡胶改性沥青混凝土性能的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(2):1—8.

收稿日期:2021—08—08