

紫穗槐根土复合体特征对黄土边坡稳定性的影响

张艳杰, 庞清刚, 刘洋, 陈啸海, 彭奕铠, 王晶

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: [目的] 研究含水率、含根量及根系布置方式对根土复合体抗剪强度影响, 揭示紫穗槐根系对黄土边坡加固机理, 为黄土边坡生态防护及提高坡面稳定性工程实践提供科学参考。[方法] 利用 ZJ 型应变控制式直剪仪进行紫穗槐根土复合体剪切试验, 以无根系土为对照, 分析不同含水率、含根量和布根方式对抗剪强度影响; 应用 FLAC 3D 软件模拟紫穗槐根系分布方式对黄土边坡稳定性影响。[结果] ① 随着含水率增加, 抗剪强度指标黏聚力和内摩擦角均降低。② 随着含根量增加, 抗剪强度在不同含水率条件下表现出不同规律。当含水率为 9.31% 时, 抗剪强度随着根面积比 (RAR) 增加呈先增加后减小的趋势, 在 RAR 为 0.15% 时, 抗剪强度达到最大值; 当含水率为 15.65% 和 17.44% 时, 抗剪强度随着 RAR 增加而增加。③ “卅”形布根方式能显著提高根土复合体抗剪强度, 当含水率为 17.44% 时, 卅形布根与无根土相比, 平均抗剪强度增加 31.81 kPa。④ 数值模拟结果表明, 根系长度、主根与铅垂方向的夹角均与稳定性呈正相关关系。[结论] 通过室内试验和数值模拟研究表明, 紫穗槐能较好提高黄土边坡稳定性, 紫穗槐交错种植, 防护效果更佳。

关键词: 边坡防护; 紫穗槐; 根土复合体; 数值模拟; 边坡稳定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0033-12

中图分类号: S714.7

文献参数: 张艳杰, 庞清刚, 刘洋, 等. 紫穗槐根土复合体特征对黄土边坡稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 33-44. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.004; Zhang Yanjie, Pang Qinggang, Liu Yang, et al. Influence of root-soil complex characteristics of *Amorpha fruticosa* on stability of loess slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 33-44.

Influence of Root-soil Complex Characteristics of *Amorpha fruticosa* on Stability of Loess Slope

Zhang Yanjie, Pang Qinggang, Liu Yang, Chen Xiaohai, Peng Yikai, Wang Jing

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of

Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: [Objective] The effects of water content, root content, and root arrangement on the shear strength of the root-soil composite were analyzed to reveal the reinforcement mechanism of *Amorpha fruticosa* root system on loess slopes, in order to provide a reference for the ecological protection of loess slopes and engineering practices for improving slope stability. [Methods] A shear test of the root-soil complex of *A. fruticosa* was conducted using a ZJ strain-controlled direct shear apparatus. This study analysed the effects of various water contents, root contents, and root distributions on the shear strength, with non-root soil serving as the control. Additionally, the FLAC 3D software was used to simulate the influence of the root distribution of *A. fruticosa* on the stability of the loess slope. [Results] ① The cohesion and internal friction angle of the shear strength index decreased with increase in water content. ② With an increase in root content, the shear strength exhibited different patterns under different water content levels. When the water content was 9.31%, the shear strength initially increased with an increase in root area ratio (RAR) but then decreased with further increase in RAR. At RAR was 0.15%, the shear strength reached its maximum value.

收稿日期: 2023-09-07

修回日期: 2024-05-26

资助项目: 山西路桥集团重点科研项目“黄土地区公路边坡生态防护及排水一体化技术研究”(202221210775)

第一作者: 张艳杰(1970—), 女(汉族), 河北省容城县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事防灾减灾与防护工程、岩土工程、环境保护与水土保持方面的研究。Email: zhangyanjie815@126.com。

通信作者: 庞清刚(1997—), 男(汉族), 陕西省汉中市人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。Email: 2022121137@chd.edu.cn。

However, when the water content was 15.65% and 17.44%, the shear strength in RAR. ③ The “卍” shape root arrangement can significantly improve the shear strength of the root soil complex. When the water content was 17.44%, the average shear strength of the root-soil composite increased by 31.81 kPa compared to the control. ④ Numerical simulation results indicated that both root length and the angle between the main root and vertical direction were positively correlated with stability. [Conclusion] The findings from laboratory tests and numerical simulations demonstrated that *A. fruticosa* can enhance the stability of loess slopes and that an interlaced planting pattern of *A. fruticosa* provides a more effective protective effect.

Keywords: slope protection; *Amorpha fruticosa*; root-soil composite; numerical simulation; slope stability

随着中国公路建设的快速发展,黄土地区出现大量边坡工程,破坏了表层土壤和原生植被群落,植被无法自行修复,并可能引发生态问题^[1-2],如水土流失、土壤侵蚀等。同时,黄土中含有较高的 CaCO_3 ,具多孔结构,垂直节理发育^[3],水敏性较强^[4],遇水强度降低,易发生崩塌、滑坡等地质灾害,严重威胁公路运营安全及沿线居民的生命安全。

黄土边坡常常利用工程措施和植被措施进行防护。框格防护、干砌片石护坡等工程措施,与周边生态环境的协调性较差。而植物措施则绿色环保,成本低^[5],且具有固土护坡、生态修复的双重作用^[6],得到了广泛应用。国内外学者针对植被根系对边坡的加固机理做了大量研究。例如,刘秀萍^[7]利用多种技术手段构建了刺槐、油松的根系形态分布模型,推导出油松根系的本构模型,探究了影响根土接触面摩擦力的各种因素,建立接触面单元的本构模型; Hunt 等^[8],胡冀嵩等^[9]通过直剪试验和三轴试验,对不同地区、不同生长条件、不同植被类型的根系土进行了研究,研究指出根系对土体抗剪强度的影响主要表现在增大黏聚力,而对内摩擦角的影响并不显著;陈萍等^[10]利用三轴试验获得根—土复合体的强度参数,在此基础上利用有限元模型分析边坡的安全系数,并通过反演得到了生态护坡根系的参数;王保辉等^[11]通过直剪试验探究了不同布根方式对草本植物根土复合体抗剪强度的影响,分析表明随着法向应力的增加,布根方式对抗剪强度的影响不能忽略; Li Yunpeng 等^[12]通过数值模拟,研究了浅根植物的根系构型空间分布对边坡稳定性的影响,研究揭示根系分布较广且呈锥形的根系在防治边坡失稳和水土流失方面效果较好; Docker B B 等^[13]通过原位剪切试验,发现根土复合体与根系含量成正比;但孔纲强等^[14]通过对高羊茅根系 5 种分布形态的研究,发现存在最优含根量可使根土复合体剪切强度最大,当根系含量为 0.35% 时,混合形态下根系增强效果最明显; Löbmann M T 等^[15]通过总结草本植物和木本植物对边坡稳定性的影响,发现不同生长环境下植物根系提高边坡稳定性存在一定差异。

紫穗槐是一种理想的多年木本护坡植物,属半旱生植物,因其突出的耐旱特性和良好的改良土壤作用^[16],被广泛用于路堑边坡植被防护^[17]。紫穗槐根系具有典型的深根性和直根性^[18],主根锚固作用明显,同时具有固沙效益^[19],改善土壤结构、保持水土作用^[20]。采用紫穗槐对黄土边坡进行生态修复,不仅能够提高浅层土壤含水率,为草灌结合边坡防护提供水分涵养的条件,并且能增强坡面稳定性^[21]。近年来,在黄土公路边坡生态防护中广泛应用,本身生长和防护效果均好。

综上所述,目前已有学者对不同植被根土复合体的抗剪强度、最优含根量等进行了研究,取得了一些有借鉴意义的成果。但是,尚有以下几方面内容有待完善: ① 尚缺乏针对根系形态对根土复合体强度影响特征的研究; ② 当前的研究成果中,针对布根方式对根土复合体力学特征影响的研究,主要集中在几种常见布根方式,对于更加符合根系生长形态的多样化布根方式(如不同根系长度、倾斜角度等)鲜有涉及; ③ 对应用广泛的紫穗槐根土复合体特征的研究较少。鉴于此,本研究以山西离隰高速公路黄土边坡绿化工程为依托,以黄土高原水土保持的主要护坡植物紫穗槐为例,针对根土复合体在土—水耦合作用下的抗剪强度问题,通过紫穗槐根系和黄土复合体直剪试验,研究含水率、含根量及根系布置方式对根土复合体抗剪强度的影响规律,探究植物防护边坡的稳定性与土壤含水率、植物根系分布方式、含根量之间关系,揭示根系与土壤相互作用机理,丰富根土复合体对黄土边坡的护坡机理,研究成果可为黄土边坡的植物防护及生态修复的工程实践提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况及试验材料

研究区位于山西省离石—隰县高速公路 K68+258—K68+540 路左侧边坡,边坡主要由马兰黄土构成,属 Q_3 黄土,其物理指标及分类详见表 1。根据交口县 30 a 气象数据统计,平均气温约为 6.7 °C,多年平均降水量 618 mm,多年平均日照时数达到

2 627 h/a。试验土样取自山西省临汾市离隰高速公路工程开挖的黄土边坡,为使土样具有代表性,在公路边坡不同位置选取 1 m×1 m 的取样区域,共 5 个取样区,清理取样区表层杂草、松散的土壤,选出没有非研究对象植物根系的采样点,然后从地表往下挖掘出 10—50 cm 的黄土土样。紫穗槐根系于 2022 年 8 月取自陕西省铜川市黄土植物种植区。半挖掘法是

指为保证试验根系的质量和数量,同时确保植株存活,对植物某一生长方向的根系进行挖掘的一种方法。为保证紫穗槐的成活,对紫穗槐某一生长方向的根系采用半挖掘法,在挖掘过程中避免对根系的机械损伤,保证根系完整。将含根土样用塑料保鲜膜进行包裹封装,防止根系水分蒸发,以减少实测根系含水率误差。

表 1 试验区黄土土样物理指标及分类

Table 1 Physical properties index and classification of loess soil samples in test area

液限/%	塑限/%	塑性指数	分类	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%
34.3	16.6	16.7	粉质黏土	1.31	14

1.2 直剪试样制备

为了分析根土复合体在含水率、含根量以及布根方式等因素影响下,根土复合体抗剪强度及强度指标规律,本研究设置了多因素耦合作用下土体直剪试验。按照《土工试验规程》分别制备含水率为 9.31%, 15.65%, 17.44%; 根面积比 RAR 为 0, 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30% 的 72 个试样,研究不同土壤含水率及含根量对土体抗剪特性的影响。描述土体根系含量的参数主要采用根面积比(RAR),是指根—土复合体剪切面上根系横截面面积与土体横截面面积的比值,计算公式为:

$$RAR = \frac{A_r}{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} \pi d_i^2 / 4}{A} \quad (1)$$

式中: A_r 为根的横截面积(cm²); A 为剪切面面积(cm²); d_i 为根径(mm); n_r 为根数(根)。

考虑到水平布根和卅形布根方式,根系与剪切面呈现非垂直关系,以往学者采用根系直径和总数保持一致的做法,即保证根系含量一致。本试验非垂直布根方式时 RAR 仍采用布置根系横截面积与土体横截面积的比值。

(1) 无根土试样制备。制样用击实筒内径为 61.8 mm,高为 125 mm,土体干密度为 1.31 g/cm³,试样质量为 492 g。分别称 492 g 上述预先制备好的不同含水率无根土,利用击实锤分 4 层击实,每层击实次数一定。待 4 层击实完毕后,拆除击实筒,将环刀(内径为 61.8 mm,高为 20 mm)刀口朝下,放置在击实土样上,垂直向下按压,使土样伸出其环刀,再用削土刀将土样两侧修平,擦净环刀外壁,称取环刀与土样的总质量,重复以上步骤,制备质量为 90% 无根土试样的备用。

(2) 根土复合体试样制备。为精确控制含水率和含根量,本研究采用室内剪切试验。虽然室内试验

试样尺寸较小,难以完全反映宏观结构对岩土性质的影响,但室内试验具有较高的精度性和重复性,所得试验结果能够反映试验规律。根据紫穗槐根系根径较粗,侧根发达以及根系之间相互交错的特点,采用垂直布根、水平布根和卅形布根来制备根土复合体试样。具体方法为:首先按照无根土试样制样方式,制备质量为 90% 的素土试样,垂直布根时,用小直径锥子在土样中钻孔,选择直径为 1 mm,长为 2 cm 的紫穗槐根段,均匀插入环刀内素土试样的钻孔,将土体表面刮毛后倒入剩余的土体,并击实土体,待土样击实到环刀制样器所规定的高度后,停止击实,得到垂直布根形式的根土复合体试样;水平布根时,首先倒入 1/2 的土体,进行击实,然后用刮土刀进行刮毛,将根系等间距摆放,再倒入另 1/2 土体进行击实,待土样击实到环刀制样器所规定的高度,停止击实,得到水平根系形式的根土复合体试样;卅形布根方式同水平布根一样,仅在放入根系时卅形布置。

1.3 试验设计及试验方法

采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪(四联剪)。直剪试验垂直压力设定为 100, 200, 300 和 400 kPa,剪切应变速率为 0.8 mm/min,具体操作步骤按《土工试验规程》进行。

2 结果与分析

2.1 含水率对无根土抗剪强度的影响

土体含水率是影响抗剪强度的一个重要因素。为研究含水率对无根土抗剪强度影响,设置 3 种含水率 9.31%, 15.56% 和 17.44%, 对 3 种情况下的抗剪强度进行曲线拟合,结果如图 1 所示。

由图 1 可知,不同含水率条件下,无根土的抗剪强度随着垂直压力增大而增加,且满足线性关系,拟合结果详见表 2。由表 2 可知,相关系数 R^2 均大于 0.96,拟合效果较好,表明本研究中无根土试样抗剪

强度符合莫尔—库伦强度准则。直线与 y 轴的交点为土体的黏聚力,直线斜率为内摩擦角。由图 1 还可看出,无根土的抗剪强度总体呈现随含水率增大而降低的趋势。同时,抗剪强度指标也发生变化。由表 2 可知,当含水率为 9.31% 时,无根系土内摩擦角可以达到 33.74° ,黏聚力为 119.91 kPa;当含水率达到 15.65% 时,内摩擦角降为 27.29° ,黏聚力降低至 94.71 kPa;当含水率为 17.44% 时,内摩擦角为 17.71° ,黏聚力降低至 68.60 kPa。由此可见,当土壤含水率增加时,无根土内摩擦角总体呈下降趋势。同时,黏聚力也随着土壤含水率的增加而逐渐降低。随着含水率增大,自由水含量增加,导致基质吸力逐渐降低。同时,土中的胶结物质也逐渐溶解,使得黏聚力随着含水率增大而减小。因此,在黄土边坡植物护坡工程

中,需重点监测边坡含水率变化,并采取有效措施及时排水,防止因含水率增大而引起的土体抗剪强度降低的边坡变形失稳。

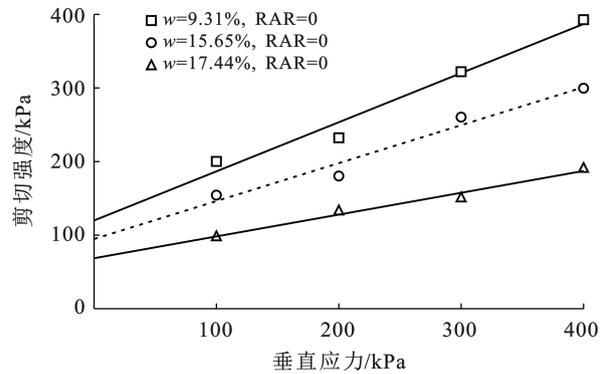


图 1 无根土的剪切强度

Fig.1 Shear strength parameters of rootless soil samples

表 2 无根土强度拟合

Table 2 Fitting of shear strength of rootless soil

含水率/%	线性拟合关系式	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	相关系数(R^2)	显著水平(p)
9.31	$y=0.668x+119.91$	119.91	33.74	0.971	0.015
15.65	$y=0.516x+94.710$	94.71	27.29	0.964	0.018
17.44	$y=0.297x+68.60$	68.60	17.71	0.981	0.009

2.2 含根量对根土复合体抗剪强度的影响

植物根系含量和含水率的变化会改变根系与土体的耦合作用,从而影响复合体的抗剪强度,本研究设置 3 种含水率和 6 种含根量的试验变量进行了直

剪试验。

图 2 为不同含水率条件下含根量对试样抗剪强度的影响特征。由试验结果分析变化规律,得到抗剪强度符合莫尔—库伦强度准则。

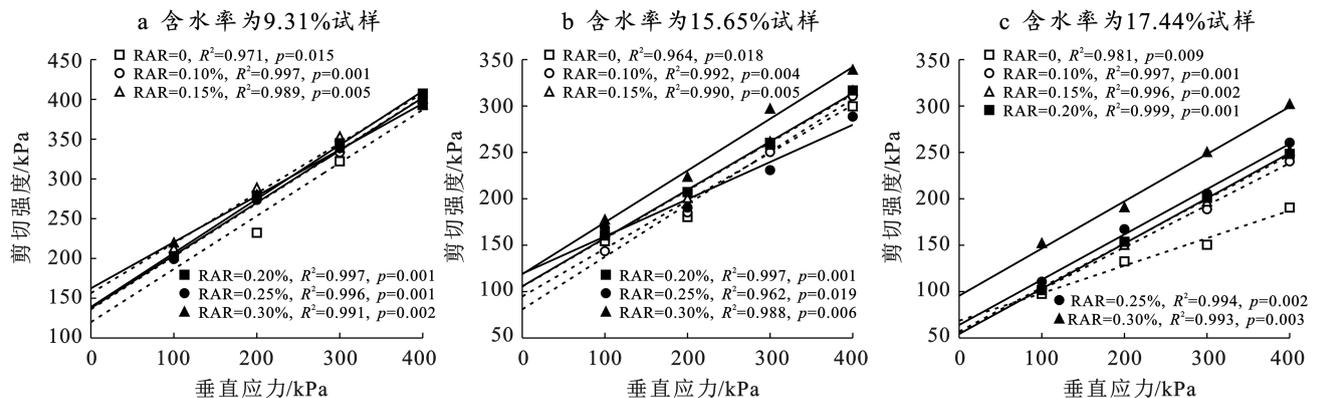


图 2 不同含水率、不同含根量试样的剪切强度

Fig.2 Shear strength of different moisture content and different root content

由图 2 可知,根系的加入使土体抗剪强度增加。并且随着含水率的增加该趋势更加明显。在含水率为 9.31% 时,根土复合体抗剪强度在同一垂直压力下,增量较小,RAR=0.3% 与无根土相比,在垂直压力为 200 kPa 下抗剪强度增幅最大,为 47.34 kPa。此时,当垂直压力大于 200 kPa,根土复合体的抗剪强度均大于无根土,但随着 RAR 的增加,根土复合体抗

剪强度先增加后减少,在 RAR=0.15% 时达到最大值。说明存在使根土复合体的抗剪强度达到峰值的最佳含根量。

根土复合体抗剪强度由黏聚力和内摩擦角两部分构成。随着垂直压力的增大,内摩擦角和黏聚力变化规律会随之变化。当垂直压力较大时,根系对抗剪强度的作用变小,其原因是土壤和根系两种材料在垂

直压力下抗剪强度增加程度不同,以及两种材料间结合时在不同垂直压力下的黏聚力和内摩擦角变化程度也不同。具体来说,在内摩擦角一定时,土在压力增加时,粒径和比表面积等一定,来自于土粒的分子间引力和电荷力线性增大,固化黏聚力同样增加,而由根系占据的原素土剪切面部分,在一定压力范围内,构成黏聚力的分子引力和电荷力并不会线性增加,固化黏聚力也不会增加,因此根土复合体的黏聚力随着垂直压力增大,呈现出非线性增大,存在极值;莫尔—库仑定律中的内摩擦角变化规律,在抗剪强度—垂直压力关系式中,在垂直压力足够大时,土粒间的总体排列方式会发生一定变化,剪切面上素土部分内摩擦角特别是咬合摩擦也会有一定程度增加,这种增加也不是线性的,存在极值,根—土间内摩擦同样如此,特别是压力大到足够破坏根系组织结构时,根—土间内摩擦会下降。因此,含根量与黏聚力、含根与内摩擦角之间都存在非线性增加关系,存在极值,也就是在不同压力下存在抗剪强度增强的最佳含根量。

本试验条件下,当含水率为 15.65% 和 17.44% 时,根土复合体抗剪强度随 RAR 增加而增加的趋势显著。由图 2 可知,当含水率为 17.44% 时,复合体抗剪强度在同一垂直压力下增量最大,垂直压力 400 kPa 下,

RAR=0.3% 与无根土相比,增幅可达 110.49 kPa,平均增幅为 80.02 kPa,且 RAR 越大抗剪强度越大。说明本研究根土复合体在较高含水率条件下,最佳含根量效应消失,根土复合体抗剪强度与含根量呈正相关。在较高含水率条件下(近饱和但非固结),土壤与根系间的黏聚力较大,但土壤颗粒间的黏聚力与内摩擦角相对较小,这时根系对根—土复合体的抗剪强度增加作用相对显著,因而在一定压力范围内,根系含量越大,抗剪强度增加越明显,当 RAR=0.3% 时,根土复合体的平均抗剪强度为 222.78 kPa,与无根土相比增幅达到 35.92%。根据莫尔—库仑理论,计算得到不同含水率条件下无根土与含根土的抗剪强度指标值,结果如图 3 所示。由图 3 可知,当含水率为 9.31% 时,含根土内摩擦角和黏聚力的平均值分别为 32.72° 和 146.26 kPa。与无根土相比,内摩擦角减少了 0.75°,黏聚力增加了 26.35 kPa;在含水率为 15.65% 的情况下,摩擦角的平均值为 27.12°,黏聚力的平均值为 104.11 kPa,比无根土的内摩擦角减少 0.21°,而黏聚力增加了 11.28 kPa;含水率为 17.44% 的含根土摩擦角平均值为 25.84°,黏聚力平均值为 65.47 kPa,在相同含水率条件下,比无根土的内摩擦角增加了 8.13°,黏聚力减少 3.13 kPa,结果详见表 3。

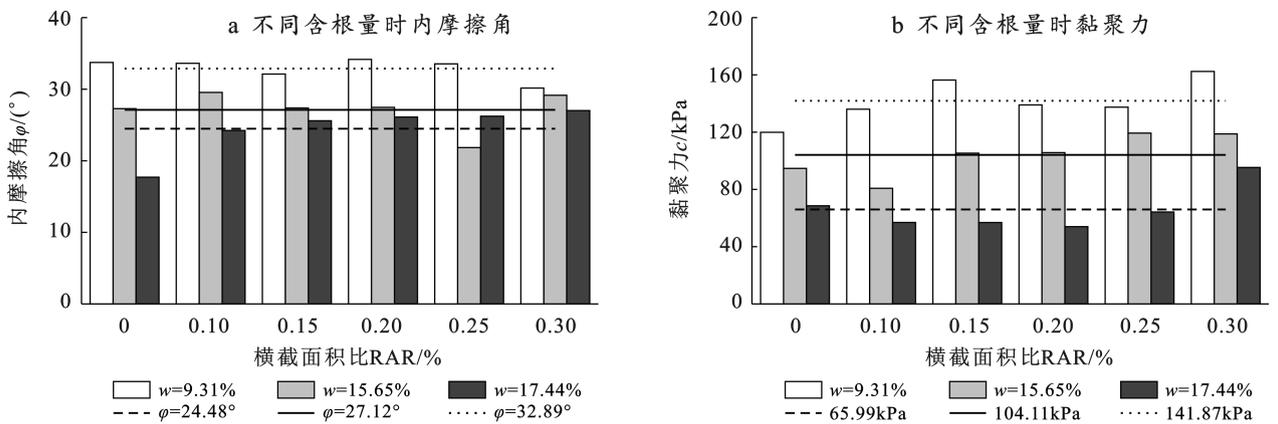


图 3 不同含水率下的不同含根量土样内摩擦角和黏聚力

Fig.3 Internal friction angle and cohesion of soil samples with different root content under different water content

表 3 根土复合体抗剪强度与无根土抗剪强度对比

Table 3 Comparison of shear strength of root-soil composite and root-free diagram

含水率/%	根土复合体抗剪强度指标		无根土抗剪强度指标		黏聚力变化值/kPa	内摩擦角/(°)
	黏聚力平均值/kPa	内摩擦角平均值/(°)	黏聚力平均值/kPa	内摩擦角平均值/(°)		
9.31	146.26	32.72	119.91	33.74	26.35	-0.75
15.65	104.11	27.12	94.71	27.29	11.28	-0.21
17.44	65.47	25.84	68.60	17.71	-3.13	8.13

在相同含水率情况下,试样随着根系的加入,黏聚力与内摩擦角都有所增大,明显提高了根土复合土

体的抗剪强度。当含水率一定时,根土复合体的黏聚力较内摩擦角变化明显。由图 3 可知,当土壤含水率

为 $\omega=9.31\%$ 时,根土复合土体相对于相同含水率的无根土黏聚力明显增大,黏聚力呈现先增加后降低的趋势。当土壤含水率为 $\omega=15.56\%$ 和 $\omega=17.44\%$ 时,根土复合体的黏聚力随含根量的增加而增加,在 $RAR=0.30\%$ 时,含根土体的黏聚力增加到最大值。这一现象与根系含量对根土复合体抗剪强度影响一致。

2.3 不同布根方式对根土复合体抗剪强度的影响

通过对素土和 3 种不同布根方式的试样进行不

同垂直荷载下的直剪试验,得到不同的根土复合体的抗剪强度。结果如图 4 所示,为不同含水率条件下不同布根方式对根土复合体抗剪强度的影响特征。由图 4 可知,不同布根方式下,抗剪强度与垂直压力线性关系强,符合莫尔—库伦强度准则。随着含水率增加,卅形布根方式增强抗剪强度效果更为显著。当含水率为 17.44% 时,卅形布根与无根土相比,平均抗剪强度增加 31.81 kPa ,增幅最大。

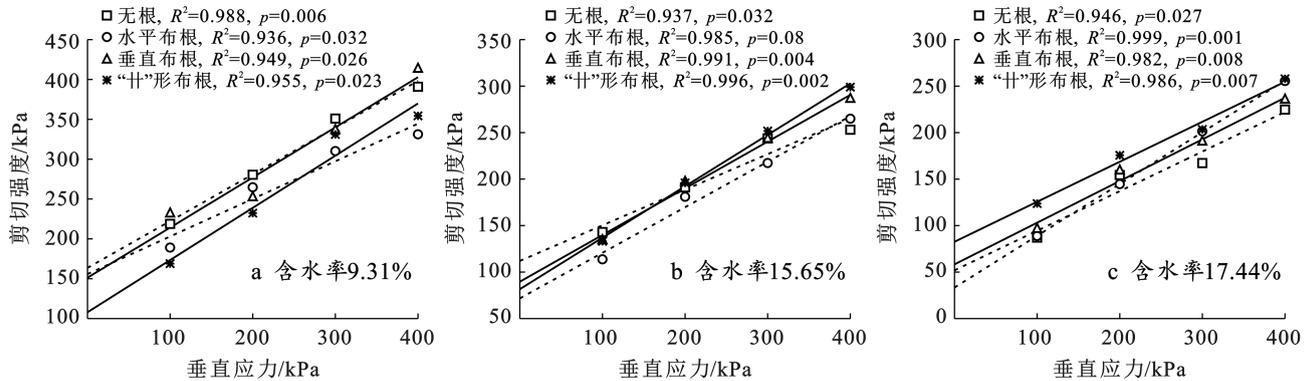


图 4 不同含水率条件下不同布根方式试样剪切强度

Fig.4 Shear strength of samples with different root distribution methods under different water content conditions

本研究对含水率为 15.56% 条件下不同布根方式根土复合体的剪切力学行为过程进行了研究。由图 5 可知,当 $RAR=0$ 时,土样受垂直压力为 100 kPa ,会出现应变软化的特性;当土样受到 200 kPa 垂直压力时,土体会出现应变硬化的特性;当土样受垂直压力达到 400 kPa 时,土体会出现明显的应变硬化特性。根系的加入影响土体内部微观结构的排列,加速了土体硬化过程,增强了土体抗剪峰值强度。含水率为 9.31% 和 17.44% 的根土复合体有相同的规律。从图 5 可以看出,无根土和不同布根方式的根土复合体在 4 种垂直压力下的剪切应力和剪切位移变化趋势相似,刚发生位移初始阶段应力增加较快,随着位移增加,剪切应力增长放缓到达抗剪强度,不同的是垂直压力越大,对应的剪切应力峰值就越高。水平布根方式下的根土复合体在垂直压力小于等于 300 kPa ,其抗剪强度均低于无根土体的抗剪强度,根土复合体抗剪强度的平均值为 194.23 kPa ,略小于无根土体的平均抗剪强度 207.73 kPa 。垂直布根和卅形布根方式均增加根土复合体的抗剪强度,卅形布根增加幅度较大,平均增幅最大可达 45 kPa ,说明卅形布根方式对土壤加固作用非常明显。由图 4—5 可知,在含水率为 15.65% 时,4 种布根方式对应的抗剪强度峰值平均值大小顺序为:水平布根 < 无根 < 垂直布根 < 卅形布根。

根据莫尔—库伦理论,计算得到不同含水率条件下无根土与含根土的抗剪强度指标值,结果如图 6 所示。根据不同布根方式下的根土复合体抗剪强度试验结果,与无根土对比,垂直布根和“卅”形布根两种方式下根土复合体的内摩擦角有所增大。在含水率为 $\omega=9.31\%$ 时,水平布根的含根土体的内摩擦角与无根土体的内摩擦角相比有所降低,但垂直布根和“卅”形布根的含根土体的内摩擦角均有所增大,基本上处于均值 30.27° 附近;在含水率为 $\omega=15.65\%$ 时,水平布根、垂直布根、“卅”形布根的含根土体的内摩擦角与无根土体的内摩擦角相比均有所增加,基本上都是处于均值 25.60° 附近;在含水率为 $\omega=17.44\%$ 时,水平布根、垂直布根、“卅”形布根的含根土体的内摩擦角与无根土体的内摩擦角相比均有所增加,基本上处于均值 24.87° 附近。在含水率为 9.31% 和 15.65% 时,内摩擦角的大小顺序为:“卅”形布根 > 垂直布根 > 水平布根,在含水率为 17.44% 时,内摩擦角的大小顺序为:水平布根 > 垂直布根 > “卅”形布根;在含水率为 9.31% 时,黏聚力的大小顺序为:水平布根 > 垂直布根 > “卅”形布根,在含水率为 15.65% 时,黏聚力的大小顺序为:垂直布根 > “卅”形布根 > 水平布根,在含水率为 17.44% 时,黏聚力的大小顺序为:“卅”形布根 > 垂直布根 > 水平布根。土体的黏聚力反映土颗粒的联结作用,随着根系的布置方式不同以

及含水率的变化,对土体颗粒间的联结产生较为复杂的影响,还需进一步研究验证。综上所述,相同 RAR

条件下,根系分布方式对根土复合体的内摩擦角的影响不很明显,与黏聚力的变化相比,可以忽略不计。

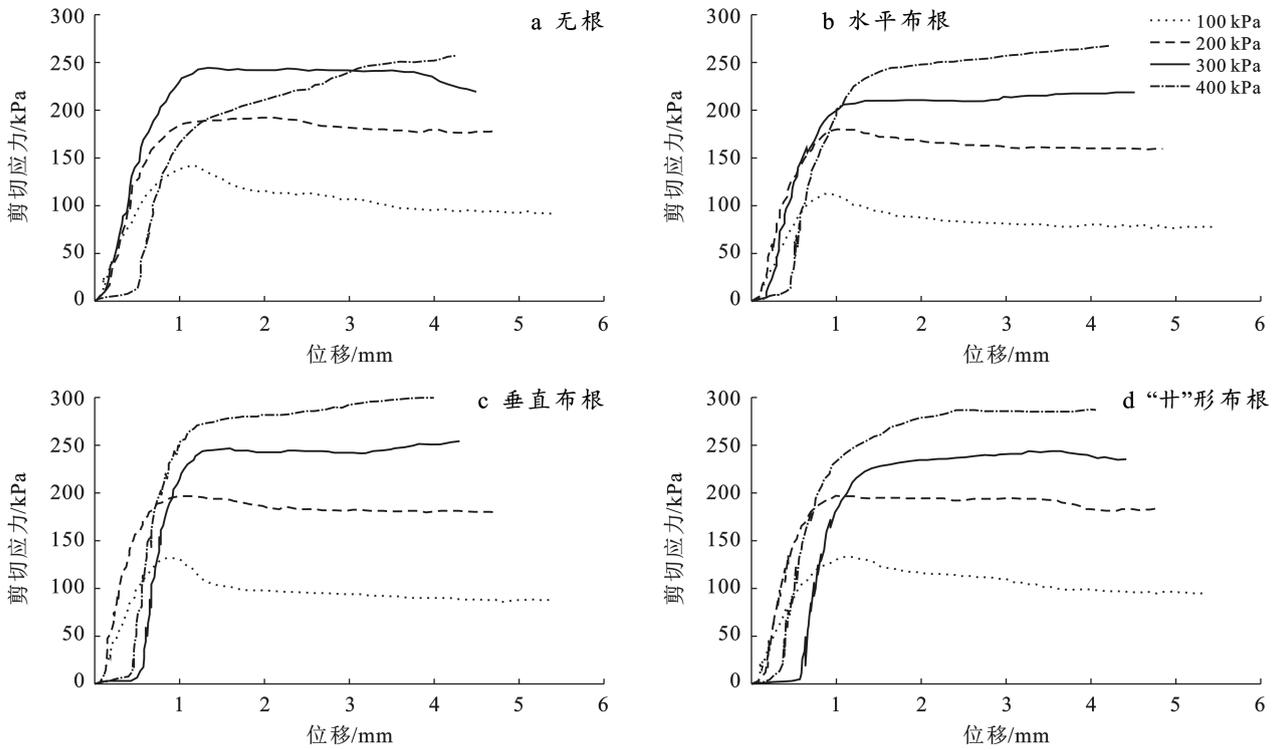


图 5 含水率为 15.65% 不同布根方式下应力位移

Fig.5 Stress-strain under different root distribution methods with water content of 15.65%

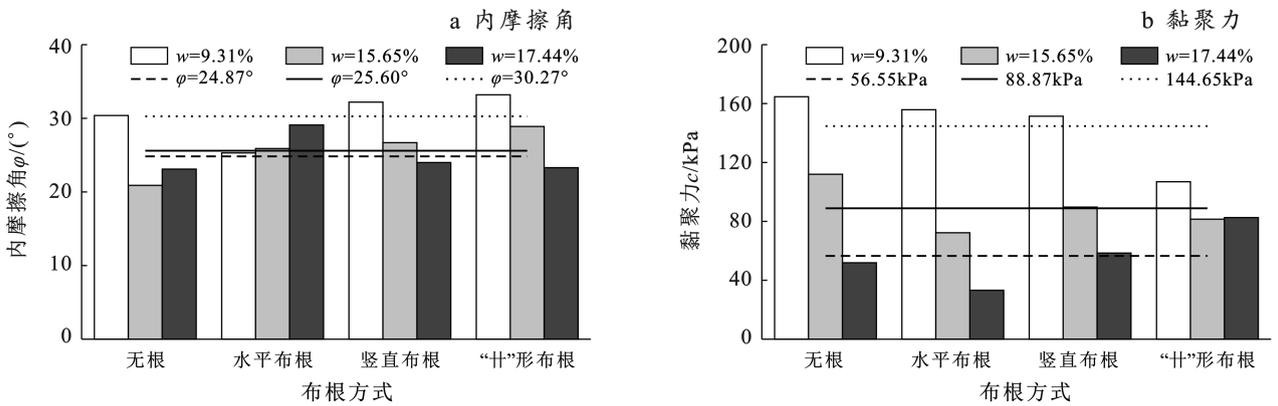


图 6 不同含水率下不同布根方式内摩擦角和黏聚力

Fig.6 Internal friction angle and cohesion of different root distribution methods under different water content

2.4 紫穗槐防护边坡稳定性分析

在山西吕梁黄土地区,紫穗槐是一种适合当地种植条件的护坡植物,在公路边坡生态防护工程中被广泛种植。室内直剪试验发现,紫穗槐根系能够增强土体的抗剪强度,这表明植物防护对边坡稳定性有一定影响,根系土体耦合对于边坡整体稳定的影响还需进一步研究。

(1) 紫穗槐生态护坡数值模拟。为探究紫穗槐根土复合体剪切特性对边坡整体稳定性的影响,通过 FLAC 3D 软件模拟边坡浅层位移。分别模拟根系长

度、倾斜程度和布根方式对于边坡稳定性的影响。根系长度设置 0, 1.0 和 1.5 m; 倾斜角度以铅垂方向逆时针转动设置 0°, 10°, 20° 和 30°。紫穗槐在边坡布置方式为均匀分布和交错分布, 设置 5 排, 水平间距 0.8 m, 每排间距 0.5 m。交错布置时, 2, 4 排插空设置。本构模型和屈服准则采用弹塑性本构和莫尔-库仑强度准则。进行边坡稳定性时, 根系单元的网格尺寸为 0.05 m, 土体单元的尺寸为 0.5 m。边坡边界条件: 垂直于 X 轴的前、后两个边界面固定住 X 方向位移, 垂直于 Y 轴的左、右两个边界面固定住 Z 方

向位移,垂直于 Z 轴的底面固定住 X, Y, Z 这 3 个方向位移,坡面为自由面。边坡几何形状尺寸为坡高 $H=6$ m,坡度 $\theta=60^\circ$ 。边坡土体及根系参数详见表 4。

表 4 边坡土体及根系参数

Table 4 Basic parameters of soil under root anchorage

类型	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	杨氏模 量/MPa	泊松比	内摩 擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/ kPa
素土	1.31	10	0.3	25.6	7.2
根系	1.30	300	0.3	—	—

(2) 主根长度对稳定性的影响。植物根系对边坡力学效应体现为深根锚固作用、浅根加筋作用,根系长度对加固效果有直接影响。本研究设置了不同布根方式、3 种根系长度进行模拟,将数值分析计算的边坡位移场数据进行了整理。图 7 为模拟试验结果按照不同主根长度整理的边坡表层总位移减少量。由图 7 可知,主根长度与边坡表层位移减少量保持正相关关系。两种分布方式下,随着紫穗槐主根系长度

的增加,边坡表层土体的位移量会显著减少。根系均匀分布,在根系与边坡铅垂方向夹角为 30° ,主根系长度为 0.5 m 时,总位移量减少 1.33 cm,总位移减小幅度为 17.64%;主根系长度为 1.0 m 时,总位移量减少 1.64 cm,总位移减小幅度为 21.75%;主根系长度为 1.5 m 时,总位移量减少 1.66 cm,降幅达 22.02%。根系交错分布,在根系与边坡的铅垂方向逆时针转动夹角为 30° ,主根系长度为 0.5 m 时,总位移量减少 1.59 cm,总位移减小幅度为 21.09%;主根系长度为 1.0 m 时,总位移量减少 1.78 cm,总位移减小幅度为 23.61%;主根系长度为 1.5 m 时,总位移量减少 1.80 cm,降幅达 23.87%。由此可以得知,随着主根长度的增加,发挥锚固作用的根系长度也随之增加,根系发挥了类似于锚索的作用,将边坡表层的剪切力传递到了土层深部,从而有效地减少边坡的表层位移。多年生紫穗槐根系主根的最大长度为 1.5 m,无法到达边坡深层潜在滑动面,紫穗槐根系的加固作用仅限于浅层。

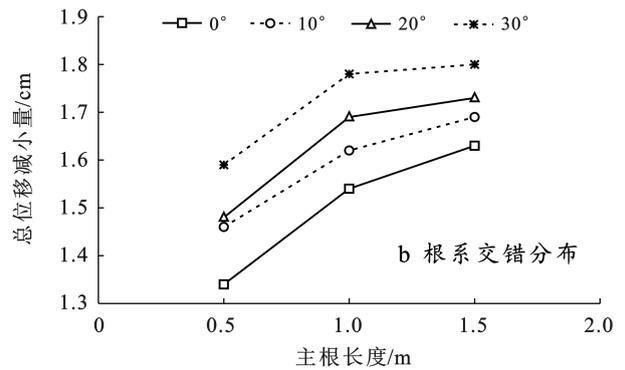
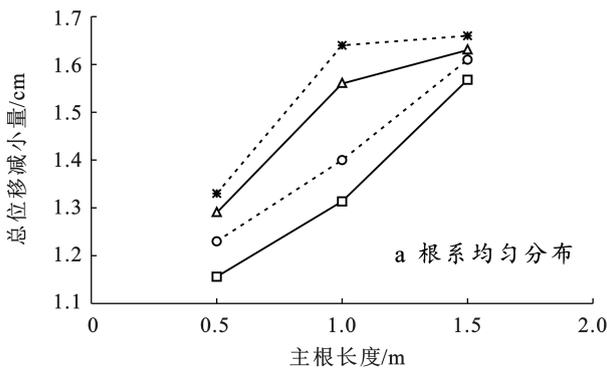


图 7 不同根系长度影响下总位移变化量

Fig.7 Total displacement variation under influence of different root length

(3) 根系倾斜程度对稳定性的影响。通过探究根系倾斜程度对边坡稳定性的影响,所得结果可为紫穗槐提高坡面稳定性的最佳种植角度提供参考。通过对根系的 4 种倾斜角度进行模拟,将数值分析计算的边坡位移场数据进行了整理。图 8 为模拟结果按照不同根系倾斜程度分类整理的边坡表层位移减少量。由图 8 可知,随着根系与铅垂方向的夹角增大,边坡表层位移的减少量会增大。在两种不同的根系分布方式下,随着紫穗槐主根系与铅垂方向夹角的增加,边坡表层土体的位移量变化的幅度也越来越大。根系均匀分布情况下,在主根系为 1.5 m,根系与铅垂方向夹角为 0° 时,总位移量减少 1.57 cm,降幅为 20.83%;根系与铅垂方向夹角为 10° 时,总位移量减少 1.59 cm,降幅为 21.03%;根系与铅垂方向夹角为

20° 时,总位移量减少 1.64 cm,降幅为 21.67%;根系与边坡的夹角为 30° 时,总位移量减少 1.66 cm,降幅为 21.96%。根系交错布置时,相同条件下,边坡位移减少量大于根系均值布置边坡位移减少量。根系与铅垂方向夹角为 30° ,主根系长度为 1.5 m 时,总位移减少 2.41 cm,降幅最大,为 40.99%。综上所述,主根系与铅垂方向夹角在 20° 时所起到的防护效果和主根系与铅垂方向夹角在 30° 所起到的防护效果比较接近,所以在黄土边坡上种植紫穗槐时,应按照与铅垂方向呈 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的夹角进行种植。通过对紫穗槐种植角度的控制,使植物根系朝着指定的方向发展以达到更好的锚固效果。考虑到不同角度种植的难度,紫穗槐生态护坡可能存在一个最佳根系倾角,有待进一步分析研究。

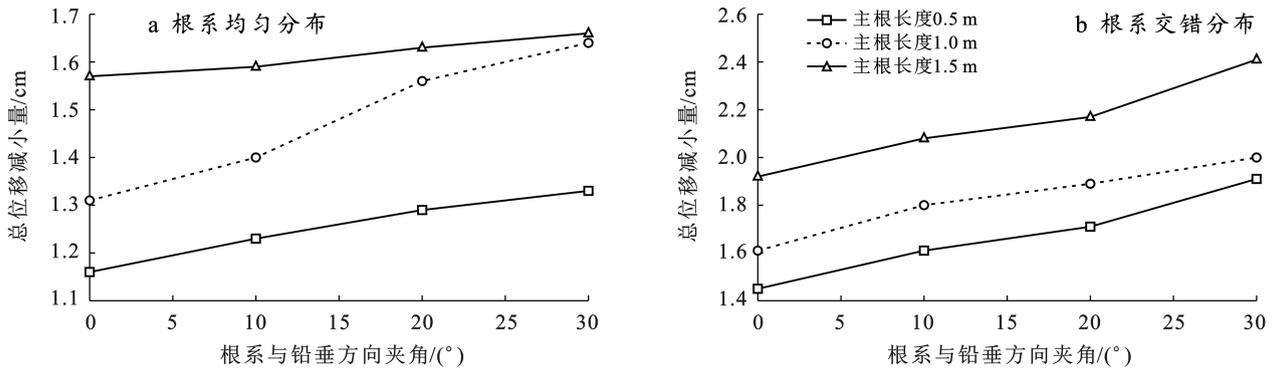


图8 不同夹角影响下总位移变化量

Fig.8 Total displacement variation under influence of different angles

(4) 根系分布方式对稳定性的影响。为分析根系空间分布对边坡稳定性的影响,选取均匀分布和交错分布两种方式进行模拟,将数值分析计算的边坡位移场数据进行整理。图9为不同布根方式下边坡表层位移减少量。由图9可知,根系交错分布情况下植被对于边坡的防护效果优于根系均匀分布的情况。当主根系为1.5 m,根系与铅垂方向夹角为 30° 时,采用根系均匀分布的边坡表层位移减少1.66 cm,降幅为22.02%;采用根系交错分布的边坡表层位移减少了1.8 cm,降幅为23.87%,结果表明根系交错分布能够更好减小边坡土体的位移量。当根系均匀分布时,坡面的应力分布并不均匀,根系的锚固作用集中于植

物周围的土壤,每列植物之间的土体产生的位移明显大于植物附近的土体;当植物交错分布时,植物根系分布范围更广,受到锚固作用的土体会对上方的土体产生支撑作用,使得表层土体位移更加均匀,避免了表面局部位移过大的情况,从而获得了更好的护坡效果。

综上所述,植物根系对于边坡的锚固效应受到根系长度、根系倾斜程度和分布方式的影响,表现出类似于锚索的性质。随着根系长度的增加锚固效果更佳,当根系与铅垂方向夹角为 30° 时,根系对于边坡的锚固作用最显著,植株交错分布时的护坡效果明显优于均匀分布的模式。

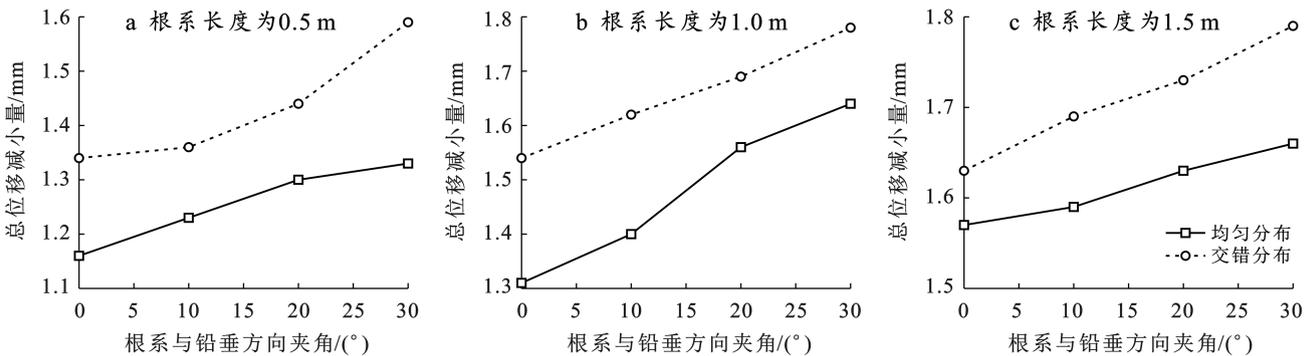


图9 不同根系分布方式下总位移变化量

Fig.9 Total displacement variation under different root distribution patterns

3 讨论

3.1 不同影响因素下紫穗槐根系增强土体抗剪强度效果

土体抗剪强度主要与土壤物理特性有关,含根土体中植物根系对抗剪强度的增强作用,主要与根系类型^[22]、根系含量、根系分布等^[23]有关。本试验研究得出含根土体与无根土体相比,其抗剪强度明显增强,该结果与雷磊等^[24]对刺槐根土复合体研究结论相同;当含水率一定时,随着含根量的增加,根土复合体

抗剪强度呈现先增加后降低的趋势,存在最优含根量,使根土复合体抗剪强度有极值,与方诗圣等^[25]对高羊茅根系的研究结果基本一致;根系对于内摩擦角和黏聚力的影响不同,随着含根量的变化,黏聚力变化幅度较大,内摩擦角影响不明显,该结果与宗华等^[26]对刺槐根土复合体的研究结果一致;FLAC 3D数值模拟结果显示:紫穗槐根系能够降低边坡位移,且紫穗槐交错种植防护效果更佳,该结果与陈航等^[27]对紫穗槐边坡防护的数值模拟提高边坡稳定安全系数的结果较为相似。本试验研究中所用紫穗槐

根系,取自黄土植物种植区,并非黄土边坡,生长环境相似,但仍可能导致试验结果存在些许误差。后续可在项目区边坡根土复合体取样进行对比试验。

3.2 植物对边坡浅层防护的讨论

木本植物对边坡浅层加固作用有两种方式:一是通过蒸散改变土壤水分状况^[28];二是植物根系对浅层土壤的加固作用。根系加固土体的抗剪力源于根土之间的咬合摩擦力^[29],因此,分析根系结构特征对评价根系增强土体抗剪强度具有重要意义。对紫穗槐根系进行挖掘采样调查,结果表明:一年生紫穗槐根系主要分布在地表以下 37 cm 的浅层土壤,对表层土体具有加固作用。紫穗槐根系的主根较为粗壮,侧根发达,且随深度增加主根逐渐变细,侧根明显减少。主根延伸较长,侧根系发育良好,纵横交错形成网状。植物根系的结构特征包括形态和层次结构^[30],不同的根系形态对边坡稳定性影响不同,主根和侧根加固方式也存在差异。主根垂直粗壮,竖直向下生长,可起到锚固作用;侧根向外侧生长与土体形成三维网状结构,增强土粒团聚效果,主要起加筋作用^[31]。然而,植被护坡由于根系的存在也有一些劣势。如,根系的生长会破坏土体结构,扩展土体内部孔隙,为雨水入渗提供通道,形成优先流^[32],易引起滑坡发生。植物根系的生长受土壤结构、水分和营养物质等条件制约,为保证植物的存活率,需要采取有效的管护措施。植物护坡虽然有一些劣势,但因其具有绿色环保、生长周期短、固土作用明显等诸多优点,仍是较好的护坡方式。

4 结论

(1) 含水率的增加使无根土的抗剪强度大幅降低。含水率对无根土抗剪强度的影响主要体现在黏聚力上,黏聚力与内摩擦角随含水率增大而减小,变化趋势与抗剪强度相同,内摩擦角变化幅度较小。在垂直压力为 400 kPa 时,土体含水率从 9.31% 增加至 17.44%,无根土的抗剪强度降低 190.48 kPa,降幅达 51.5%。

(2) 紫穗槐根系能提高土体的抗剪强度。随着含根量的增加,在不同含水率条件下,根土复合体抗剪强度变化趋势不同。当含水率为 9.31% 时,随 RAR 增加,根土复合体抗剪强度先增加后减少,在 RAR 为 0.15% 时抗剪强度达到最大值;当含水率为 15.65% 和 17.44% 时,根土复合体抗剪强度与 RAR 呈正相关关系。

(3) “卅”形布根方式对土壤加固作用明显。“卅”形布根对根土复合体抗剪强度提升最大,平均增

幅最大 45 kPa。水平布根方式下的根土复合体在垂直压力小于等于 300 kPa 其抗剪强度均低于无根土体的抗剪强度。垂直布根对根土复合体抗剪强度提升较小,4 种垂直压力下的平均抗剪强度提高 4%。

(4) 随着紫穗槐根系主根长度和根系倾斜角度的增加,边坡位移总量均减少。交错分布种植紫穗槐对边坡的防护效果明显优于均匀分布种植。由于紫穗槐自身特性,最大根系生长长度为 1.5 m,对于边坡浅层加固效果较好,在本研究中紫穗槐种植与铅垂方向呈 20°~30° 的夹角,防护效果更佳。

参考文献 (References)

- [1] 谢永利,刘新荣,晏长根,等.特殊岩土体工程边坡研究进展[J].土木工程学报,2020,53(9):93-105.
Xie Yongli, Liu Xinrong, Yan Changgen, et al. Research progress of special soil and rock engineering slopes [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53 (9):93-105.
- [2] 詹紫馨,冯天骄,梅柏寒,等.晋西黄土区典型植被恢复生态系统各层次化学计量与生态因子之间关系[J].浙江农林大学学报,2024,41(4):1-13.
Zhan Zixin, Feng Tianjiao, Mei Baihan, et al. Relationship between stoichiometry and ecological factors at various levels of typical vegetation restoration ecosystem in the loess area of western Shanxi Province[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(4):1-13.
- [3] 冯立,张茂省,胡炜,等.黄土垂直节理微观观特征及发育机制探讨[J].岩土力学,2019,40(1):235-244.
Feng Li, Zhang Maosheng, Hu Wei, et al. Discussion on microscopic, microcosmic characteristics and developmental mechanism of loess vertical joints [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1):235-244.
- [4] 张茂省,胡炜,孙萍萍,等.黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J].地球环境学报,2016,7(4):323-334.
Zhang Maosheng, Hu Wei, Sun Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(4):323-334.
- [5] 程洪,谢涛,唐春,等.植物根系力学与固土作用机理研究综述[J].水土保持通报,2006,26(1):97-102.
Cheng Hong, Xie Tao, Tang Chun, et al. Overview of mechanism of plant roots improving soil reinforcement and slope stabilization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(1):97-102.
- [6] 桂羽彤,蒋志明.公路边坡生态防护机理及技术研究进展[J].交通科学与工程,2023,39(2):31-40.
Gui Yutong, Jiang Zhiming. Research progress on ecological protection mechanism and technology of highway slope [J]. Journal of Transport Science and Engineering,

- 2023,39(2):31-40.
- [7] 刘秀萍.林木根系固土有限元数值模拟[D].北京:北京林业大学,2008.
Liu Xiuping. Finite element method numerical simulation of forest roots reinforcement [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [8] Hunt A G, Faybishenko B, Powell T L. Test of model of equivalence of tree height growth and transpiration rates in percolation-based phenomenology for root-soil interaction [J]. *Ecological Modelling*, 2022,465:109853.
- [9] 胡夏嵩,李国荣,朱海丽,等.寒旱环境灌木植物根—土相互作用及其护坡力学效应[J].*岩石力学与工程学报*, 2009,28(3):613-620.
Hu Xiasong, Li Guorong, Zhu Haili, et al. Research on interaction between vegetation root and soil for slope protection and its mechanical effect in cold and arid environments [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009,28(3):613-620.
- [10] 陈萍,余鑫,曹宝飞.镇江地区典型护坡植物根系有限元模型参数确定方法研究[C]//土木工程新材料、新技术及其工程应用交流论文集(下册).北京,2019:857-860.
Chen Ping, Yu Xing, Cao Baofei. Study on parameter determination method of finite element model of typical slope protection plant roots in Zhengjiang area [C]// Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., Mcc Group. Proceedings of the Symposium on New Materials, New Technologies and Their Engineering Applications in Civil Engineering (Volume II). Proceedings of the Symposium on New Materials, 2019:857-860.
- [11] 王保辉,朱连奇.不同布根形式对草本植物根土复合体抗剪强度试验[J].*水土保持学报*,2018,32(6):118-122.
Wang Baohui, Zhu Lianqi. Experimental study on shear strength of herbal root-soil composites under different arrangement modes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(6):118-122.
- [12] Li Yunpeng, Wang Yunqi, Ma Chao, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability [J]. *Ecological Engineering*, 2016,91:477-486.
- [13] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species [J]. *Geomorphology*, 2008,100(3/4):401-418.
- [14] 孔纲强,文磊,刘汉龙,等.植物根系分布形态及含根复合土强度特性试验[J].*岩土力学*,2019,40(10):3717-3723.
Kong Gangqiang, Wen Lei, Liu Hanlong, et al. Strength properties of root compound soil and morphological observation of plant root [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019,40(10):3717-3723.
- [15] Löbmann M T, Geitner C, Wellstein C, et al. The influence of herbaceous vegetation on slope stability: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020,209:103328.
- [16] 白潞翼,刘静,胡晶华,等.紫穗槐直根力学性质研究[J].*干旱区研究*,2021,38(4):1111-1119.
Bai Luyi, Liu Jing, Hu Jinghua, et al. Deformation characteristics of the straight roots of *Amorpha fruticosa* [J]. *Arid Zone Research*, 2021,38(4):1111-1119.
- [17] 张利军,高德彬,赵航,等.黄土地区公路路堑边坡植被防护技术研究[J].*人民黄河*,2017,39(7):110-113.
Zhang Lijun, Gao Debin, Zhao Hang, et al. Research of vegetation protection technology of highway cutting slope in loess area [J]. *Yellow River*, 2017,39(7):110-113.
- [18] 杜明新,周向睿,周志宇,等.毛乌素沙南缘紫穗槐根系垂直分布特征[J].*草业学报*,2014,23(2):125-132.
Du Mingxin, Zhou Xiangrui, Zhou Zhiyu, et al. Vertical root distribution characteristics of *Amorpha fruticosa* on southern Mu Us Sandy Land [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014,23(2):125-132.
- [19] 周心澄.紫穗槐的固沙效益[J].*中国沙漠*,1985,5(1):48-53.
Zhou Xincheng. The beneficial result of false indigo for sand stabilization [J]. *Journal of Desert Research*, 1985,5(1):48-53.
- [20] 姚亚兰,高德彬,张玉洁,等.黄土路堑边坡土壤水分空间分布特征及影响因素[J].*水土保持通报*,2014,34(6):118-122.
Yao Yalan, Gao Debin, Zhang Yujie, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil moisture on loess cutting slope [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014,34(6):118-122.
- [21] 晏长根,梁哲瑞,贾卓龙,等.黄土边坡坡面防护技术综述[J].*交通运输工程学报*,2023,23(4):1-22.
Yan Changgen, Liang Zherui, Jia Zhuolong, et al. Review on surface protection technologies of loess slope [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023,23(4):1-22.
- [22] 王连锐,严亚,商崇菊,等.两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应[J].*水土保持通报*,2024,44(2):146-154.
Wang Lianrui, Yan Ya, Shang Chongju, et al. Soil strengthening and slope protection effect of two kinds of herbaceous plant son red clay slope [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(2):146-154.
- [23] 李怡帆,张国涛,雷鸣宇,等.西南山区云南松根土复合体力学特性及其对浅层坡体稳定性的影响[J].*水土保持通报*,2022,42(6):88-96.
Li Yifan, Zhang Guotao, Lei Mingyu, et al. Mechan-

- cal properties of Yunnan pine root-soil system and its influence on shallow slope stability in southwestern mountainous region of China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6):88-96.
- [24] 雷磊, 万昊, 江涛, 等. 不同生长年限的刺槐根系对黄土边坡加固作用的研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(5):183-188.
- Lei Lei, Wan Hao, Jiang Tao, et al. Strengthening effect of *Robinia pseudoacacia* root system with different growth years on loess slopes [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(5):183-188.
- [25] 方诗圣, 姚鑫, 谭张琴, 等. 草本植物根系对高液限土的加固效应[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3):43-47.
- Fang Shisheng, Yao Xin, Tan Zhangqin, et al. Reinforcing effect of herb roots on high liquid limit soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(3):43-47.
- [26] 宗华, 谷天峰, 崔博, 等. 刺槐根土复合体抗剪强度试验[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(1):143-150.
- Zong Hua, Gu Tianfeng, Cui Bo, et al. Experimental study on shear strength of root-soil composite of *Robinia pseudoacacia* [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(1):143-150.
- [27] 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.
- Chen Hang, Zhang Huili, Tian Kanliang, et al. Experimental study on the effects of *Amorpha fruticosa* root system on loess slope reinforcement [J]. *Yellow River*, 2017, 39(10):84-88.
- [28] 张莹, 毛小青, 胡夏嵩, 等. 寒旱黄土区草本与灌木蒸腾排水作用研究[J]. *人民黄河*, 2008, 30(12):88-89.
- Zhang Ying, Mao Xiaoqing, Hu Xiasong, et al. Study on dewatering through transpiration of herbaceous and shrubs in the cold and arid loess region [J]. *Yellow River*, 2008, 30(12):88-89.
- [29] 刘亚斌, 余冬梅, 祁兆鑫, 等. 寒旱环境黄土区灌木植物根系拉拔试验及其根系表面微观结构特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1):3701-3713.
- Liu Yabin, Yu Dongmei, Qi Zhaoxin, et al. Research on pull-out test and surface microstructure features of shrubs roots in loess area of cold and arid environment [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1):3701-3713.
- [30] 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.
- Xu Hua, Yuan Haili, Wang Xinyu, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(5):926-935.
- [31] 段钊, 袁林, 毕银丽, 等. 紫花苜蓿根系—黄土复合体剪切特性与库仑修正模型[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(12):85-95.
- Duan Zhao, Yuan Lin, Bi Yinli, et al. Shear characteristics and modified Coulomb model of alfalfa root-loess composite [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12):85-95.
- [32] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability [J]. *BioScience*, 2011, 61(11):869-879.