

根系及裂隙角度对基材原位剪切特性的影响

李紫娟¹, 夏振尧^{1,2}, 张伦², 高峰²,
沈已桐², 杨悦舒^{1,2}, 肖海^{1,2}, 夏栋^{1,2}, 许文年^{1,2}

1.三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002;

2.三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002

摘要: [目的] 研究岩体裂隙角度对不同植物根系下基材原位剪切特性的影响,旨在为水土保持与生态修复工作提供科学参考。[方法] 设置无植物、狗牙根和多花木兰 3 种条件,对试样养护 90 d 后,在岩体裂隙与剪切垂直方向为 15°,30°,45°,60°,75°和 90°下开展基材原位剪切试验。[结果] ①狗牙根和多花木兰根—基材复合体的抗剪强度和残余抗剪强度均明显大于无根基材,抗剪强度平均增幅分别为 33.87%~65.18%,44.94%~73.65%。②无植物基材试样在位移量为 8~11 mm 时抗剪强度达到峰值,狗牙根根—基材复合体和多花木兰根—基材复合体则在 20~36 mm 时达到峰值位移,根系能够滞后植被混凝土的峰值位移,含根基材试样能够承受更大的变形。③同种植物,不同的岩隙分布形式对根系的固土能力影响不同。随着裂隙角度的增加其抗剪强度呈先增加后减小的趋势,在裂隙角度为 60°时其抗剪强度达到最大值。[结论] 根系能显著增强植被混凝土基材的抗剪强度,提高残余剪切应力,不同裂隙的分布方式对提高基材的抗剪强度的作用呈现差异性,但对于残余抗剪强度,裂隙分布影响不明显。

关键词: 原位剪切; 根—基材复合体; 裂隙角度; 抗剪强度; 固土护坡

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0051-07

中图分类号: TU411.7

文献参数: 李紫娟, 夏振尧, 张伦, 等.根系及裂隙角度对基材原位剪切特性的影响[J].水土保持通报, 2021,41(2):51-57.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20210316.001; Li Zijuan, Xia Zhenyao, Zhang Lun, et al. Effects of root system and fissure angle on in-situ shear characteristics of substrate [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(2):51-57.

Effects of Root System and Fissure Angle on In-situ Shear Characteristics of Substrate

Li Zijuan¹, Xia Zhenyao^{1,2}, Zhang Lun², Gao Feng²,

Shen Yitong², Yang Yueshu^{1,2}, Xiao Hai^{1,2}, Xia Dong^{1,2}, Xu Wennian^{1,2}

1.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 2.Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China

Abstract: [Objective] The effects of rock fissure angle on the in-situ shear characteristics of the base material under different plant root systems were studied, in order to provide a scientific reference for water and soil conservation and ecological restoration. [Methods] The samples were cured for 90 days under three conditions: plant-free, bermudagrass and multi-flowered magnolia. The in-situ shear test of the substrate was carried out under the angle of 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90° between the rock crack and the vertical direction of shear. [Results] ① The shear strength and residual shear strength of bermudagrass and magnolia root-substrate composites were significantly greater than those of non-rooted substrates. The average increase in shear strength was 33.87%—65.18% and 44.94%—73.65% respectively. ② The shear strength of samples without plant substrate reached the peak value when the displacement was 8—11 mm, while the bermudagrass

收稿日期:2020-09-28

修回日期:2020-11-25

资助项目:国家重点研发计划项目“西南高山亚高山区工程创面生态修复关键材料制备与优化应用技术”(2017YFC0504902);湖北省自然科学基金项目(2020CFB317);长江科学院开放基金项目(CKWV2018488/KY)

第一作者:李紫娟(1995—),女(土家族),湖北省五峰县人,硕士研究生,主要研究方向为边坡生态防护。Email:lizj_aa@163.com。

通讯作者:肖海(1988—),男(汉族),湖南省安仁县人,博士,讲师,主要从事土壤侵蚀与生态防护方面的研究。Email:oceanshawctgu@163.com。

root-substrate composite and the multifloral magnolia root-soil composite reached the peak value when the displacement was 20—36 mm. The root system could lag the peak displacement of the vegetation concrete, and root-containing substrate sample could withstand greater deformation. ③ For the same plant, different distribution of rock fissures had different effects on the soil consolidation ability of the root system. As the fissure angle increased, its shear strength increased first and then decreased. When the fissure angle was 60° , its shear strength reached maximum. [Conclusion] The root system can significantly enhance the shear strength of the vegetation concrete substrate and increase the residual shear stress. The distribution of different cracks has different effects on improving the shear strength of the substrate, but the effect of crack distribution on residual shear strength is not obvious.

Keywords: in-situ shear; root-substrate composite; crack angle; shear strength; soil consolidation and slope protection

由于国内工程不断发展与建设,形成了大量裸露的边坡,造成原有的植被破坏,导致严重的水土流失和生态失衡,加剧了自然灾害的形成,给人们的生命财产带来危害。传统护坡加固技术往往采用喷混凝土、浆砌石等护坡结构,这些虽然起到保护边坡水土流失的作用,但不利于生态环境的保护和生态环境的和谐发展^[1-2]。植被混凝土是一种生态护坡技术,它既能够加固边坡,又能够与自然环境和谐发展。植被混凝土是将水泥、土、有机质、添加剂、混合植绿种子按特定比例,加一定量的水充分搅拌后形成的混合物^[3]。水泥作为胶结材料,能加强植被混凝土拌和物的强度和黏聚性,有机质能增加空隙率,腐烂后能为植物提供各种养分,增加肥力,而添加剂则能改良基材性能,促进植物生长^[4-5]。植被混凝土中植物主要通过根系的力学作用(浅根加筋和深根锚固)来加固边坡。

根—土复合体的抗剪强度特性研究目的主要是为了解决根系加固机理。研究表明,根—土复合体的抗剪强度与以下因素密切相关:植物的种类、含根量、土壤的含水率、干密度等^[6-10]。蒋希雁等^[11]利用常规三轴不固结不排水试验,通过重塑样得出,黏聚力与含水率相关,受含根量影响,并得出根系加筋效应公式。蒋必凤等^[12]对草本植物进行直剪试验得出,植物根系能够显著提高抗剪切强度,其黏聚力与含根率成正相关关系,与含水率则相反,但对于内摩擦角的影响较小。以上研究主要针对重塑根—土复合体试样,且试样的尺寸较小,难以真实反映植物根系加固边坡效果。同时岩石边坡常常存在方向各异的裂隙,岩体裂隙里的水分条件要高于其他区域,干旱胁迫条件下会诱导根系的扎入生长^[13],而裂隙角度及根系对岩面基材剪切特性影响关注较少。因此,本文选用常用护坡植物狗牙根、多花木兰和植被混凝土基材所形成的根—基材复合体为对象,以无植物基材试样为空白对照,设置 6 种不同的裂隙角度,对试样养护

90 d后,进行原位剪切试验,探讨多花木兰、狗牙根根系对植被混凝土抗剪切强度的影响,以期为水土保持与生态修复提供一定的参考。

1 试验设计

1.1 试验区状况

宜昌市位于湖北省西南部,属亚热带季风性湿润气候。四季分明,水热同季,寒旱同季。多年平均降水量 1 215.6 mm,平均气温 16.9°C 。境内地貌类型多样,地势起伏大,水系发育充分,形成黄壤、黄棕壤和棕壤、红壤 4 个地带性土类以及紫色土、石灰(岩)土、潮土、(山地)草甸土和水稻土 5 个非地带性土类^[14]。全市植被良好,森林资源居全省第 2 位,覆盖率为 48.5%,生物种类呈多样性。

1.2 试验材料

选取低矮草本植物狗牙根和直立灌木植物多花木兰,这两种都是生态护坡中常用的物种。狗牙根具有发达的根茎和匍匐茎,繁殖力强,抗旱。多花木兰属于豆科多年生落叶灌木,分枝多,耐旱,根系发达,固土力强。试验土为黄棕壤,取自宜昌市区,土壤采回后迅速风干,去除杂质后过 2 mm 筛待用。土粒相对密度 2.65,干筛后 1.0~2.0 mm 含量占 21.34%, 0.074~1.0 mm 占 70.39%, <0.074 mm 占 8.27%。根据《水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范(NB/T35082-2016)》配置植被混凝土基材,黄棕壤土样与水泥、棕树锯末、添加剂混合比例为 100:8:6:4,水泥采用 P.C 32.5 复合硅酸盐水泥。

1.3 试验方案

样地种植时间为 2018 年 8 月,试验时间为 2018 年 11 月,植物生长期为 90 d。本试验采用混凝土试块代替岩体,为保证岩隙布置形式,在混凝土试块上预留大小相同、但不同倾斜程度的 3 行 3 列裂隙,裂隙角度设置成与剪切垂直方向为 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 和 90° 的 6 种角度(图 1)。两种植物在 6 种裂隙角

度下共 12 个处理试样,对应 6 个无植物基材对照试样,重复 3 组,共 54 个试样。

试验方案主要分为以下 5 个步骤:①首先对试验场地进行整理,将已制备好的尺寸 30 cm×30 cm×10 cm 的混凝土试块放入已挖好的沟槽中,相邻试块横向间隔 10 cm,纵向间隔 20 cm;②在混凝土试块上安装 30 cm×30 cm×10 cm 的模具以进行土壤基材装填;③按照《水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范(NB/T35082-2016)》,对基材进行分层

装填。先按照设定的干密度 1.35 g/cm³,称取一定质量的基材土,在基层铺设 8 cm 厚度的植被混凝土,再将剩余的基材土与种子均匀混合,然后在面层平铺 2 cm 厚度,进行压实并拆除模具;④最后在横向和纵向间隔的土体上插上木桩,作为标识。⑤期间进行洒水养护,并开展杂草清除和病虫害防治工作。因为植物都在相同的气候和自然环境下生长,所以土体的含水率基本保持一致。植物养护 90 d 后,进行根—基材复合剪切试验。

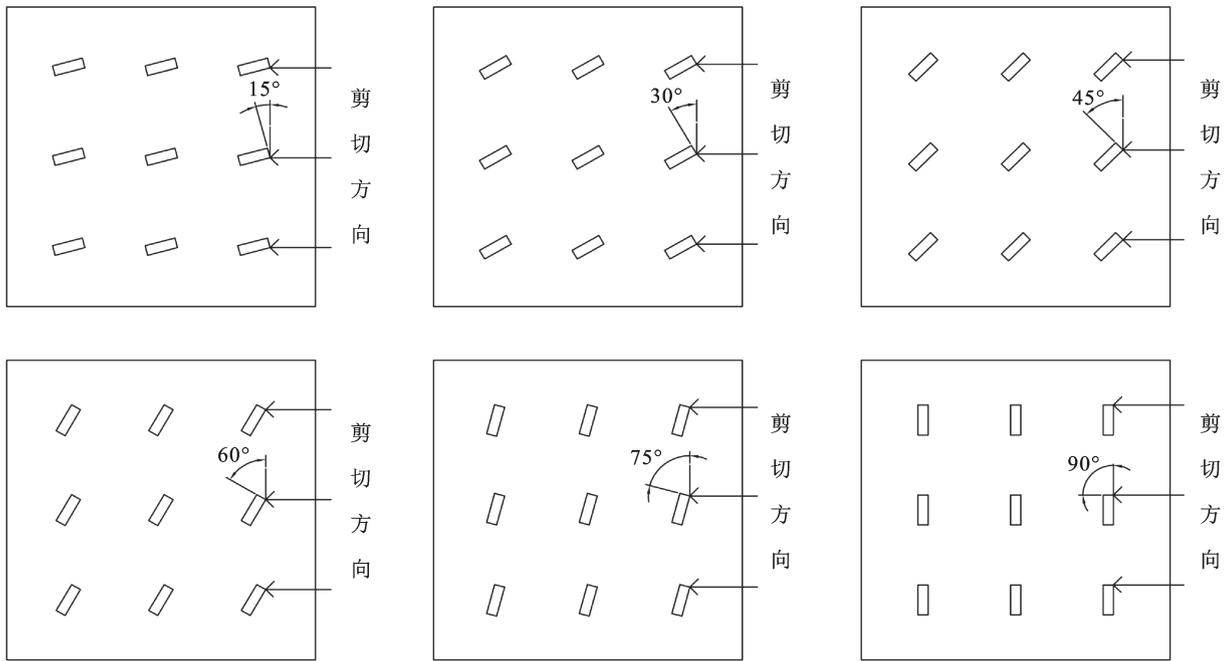


图 1 混凝土试块裂隙角度分布示意图

1.4 试验装置

本试验使用自制原位直剪仪进行试验,试验装置如图 2 所示。主要由机架、剪切盒、千斤顶、液压泵、数显游标卡尺,数显式推拉力计、压力传感器等部分组成。其中,剪切盒尺寸为 30 cm×30 cm,并分为上下剪切盒,最大剪切位移为 100 mm。进行试验时,固定在上剪切盒上的压力传感器受千斤顶作用,使上剪切盒向前推动,对试样进行剪切,并将实时推力和位移数据传递给推拉力计和游标卡尺。具体试验步骤为:①安装原位直剪仪,对游标卡尺和推拉力计进行复位位置零;②按照标识将试样周围的土铲除,并对试样进行适当削切,保证试样的规整性,使土体与直剪盒尺寸一致;③将试样放置在直剪盒内,调整拍摄设备支架位置,保证试验过程中能完整清晰地记录数据的变化;④打开电源开关,控制千斤顶匀速的对试样进行剪切,当剪切位移达到最大量程时关闭电源,停

止剪切;⑤试验结束后,拆除仪器,并对试验场地清洁打扫。

1.5 试验数据处理

根据录制的影像,用播放器对视频每秒进行截图,读取图片中的位移数据和推拉力计数据。按照公式(1)计算抗剪强度,绘制试样抗剪强度位移曲线。

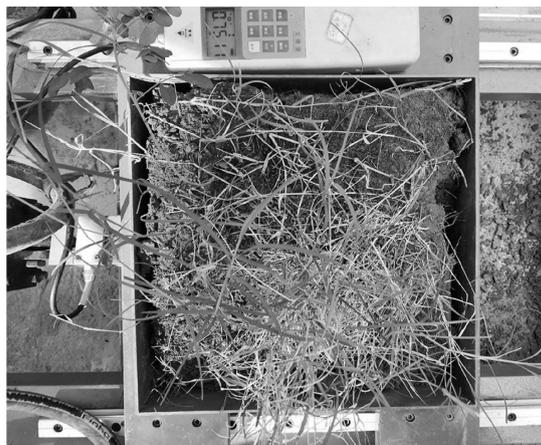
$$\tau_t = \frac{F_t}{A} \quad (1)$$

式中: F_t 为在 t 时刻作用在剪切盒上的剪切应力(kN); τ_t 为试样在 t 时刻的抗剪强度(kPa); A 为试样的剪切面积 $A=0.09$ (m²)。剪切破坏过程中,抗剪强度—位移曲线过程线顶点所对应的值即为该试样的抗剪强度。

采用 Excel 处理数据并绘制相应图表,利用 SPSS 22.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验(LSD法),以 $p<0.05$ 作为显著性差异水平。



原位直剪仪



现场剪切过程

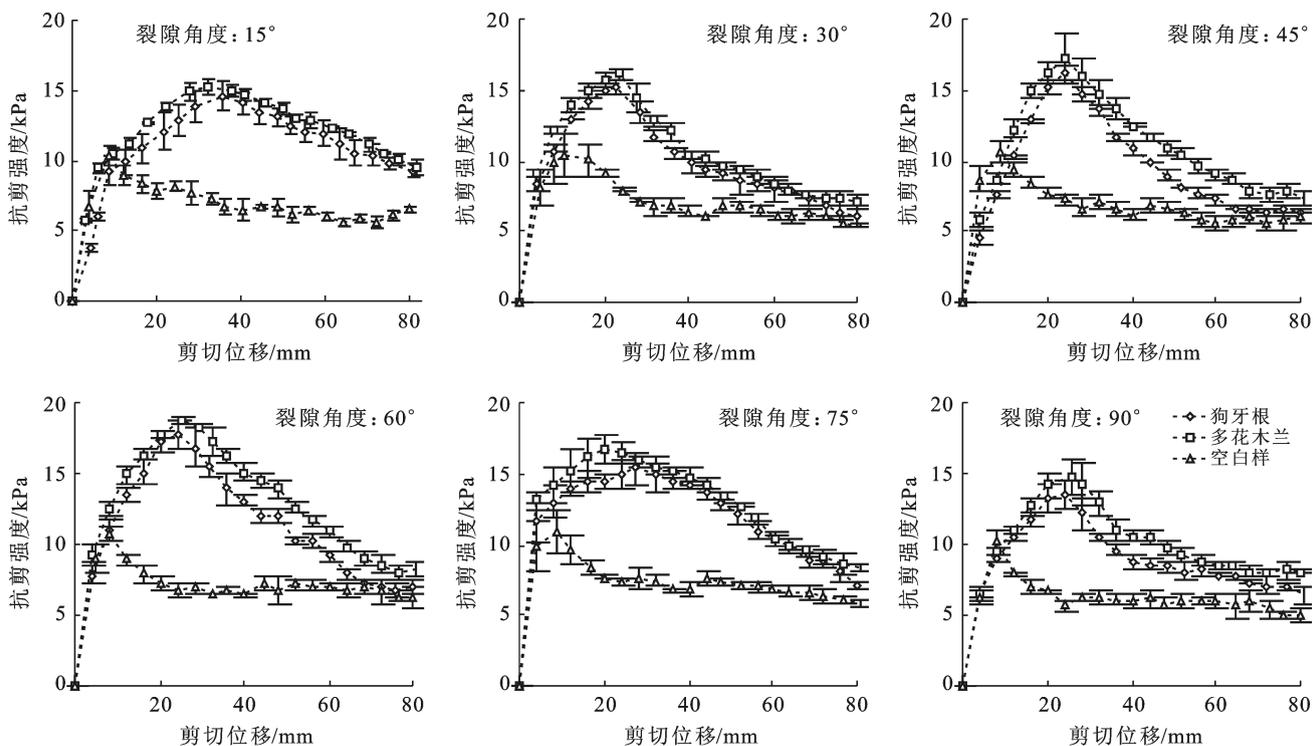
图 2 原位直剪仪剪切试验装置及现场剪切过程

2 结果与分析

2.1 根—基材复合体剪切破坏过程

根—基材复合体的剪切破坏过程呈现典型的软化特性(图 3),这与周跃等^[15]有根土体达到一定位移量时,剪切应力接近零有所区别,本试验存在残余变形阶段,此时土体仍具有一定的抗剪强度,但随着剪切位移的递增,变化幅度较小。这可能与植物种类有关,多花木兰和狗牙根根系发达,根系分布范围更广。

剪切初始阶段,随着剪切位移的增加,抗剪强度增长迅速,曲线呈线性增加,根系开始受力,发生弹性变形。随后速率减小,随着剪切位移的增加,逐渐达到峰值,根系网络被破坏,植物根系被拔出或者断裂。当位移继续增大时,由于未剪断的根系对剪切面上下土体的连接作用,抗剪强度—位移曲线下降相对较为平缓,随后趋于稳定。无植物的空白样,其抗剪强度在受剪后即刻便达到峰值,随后迅速下降,在一定范围内浮动,此时试样沿着破坏面发生滑移摩擦。



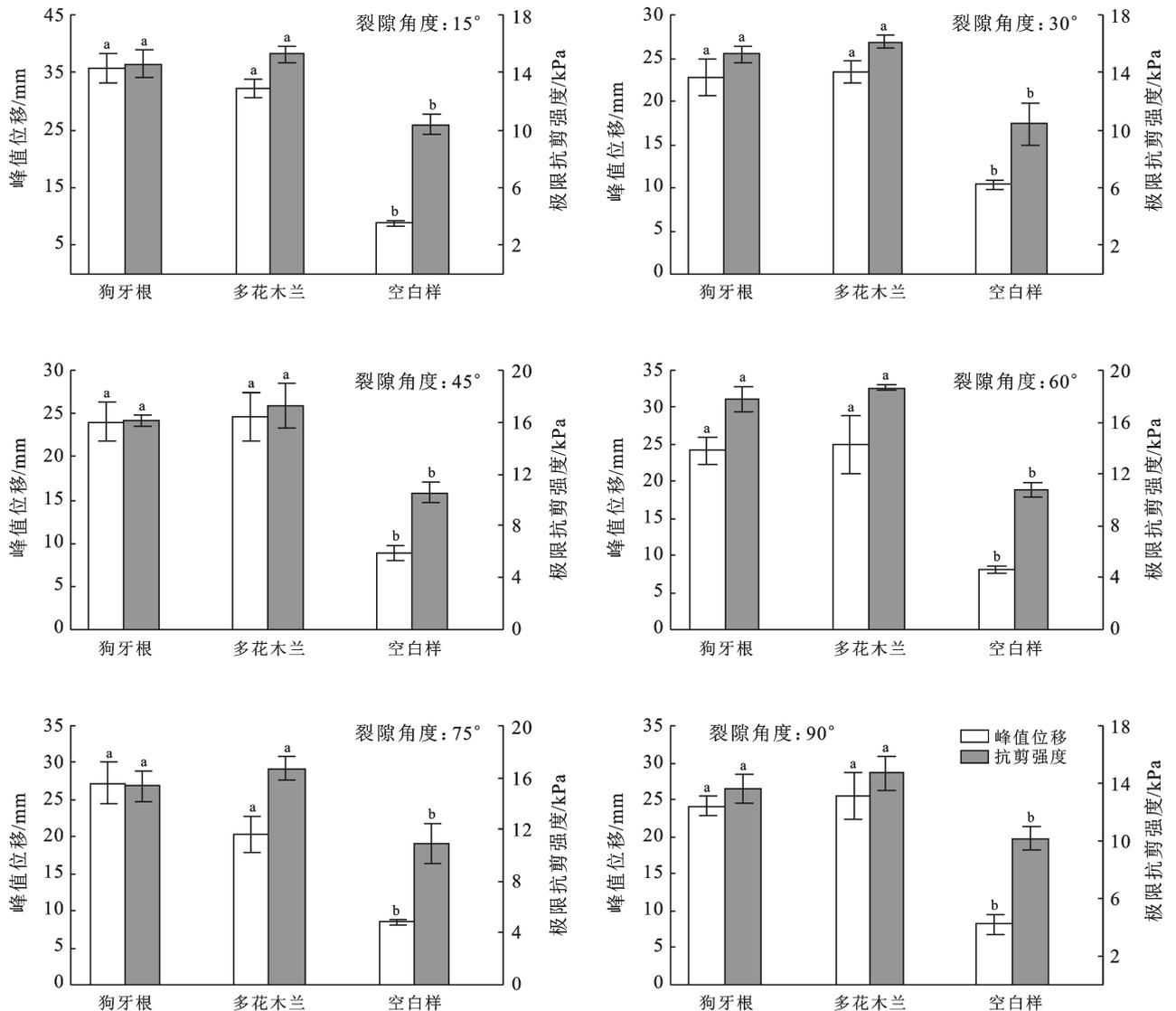
注:图中误差线以标准误表示。下同。

图 3 不同植物根—基材复合体抗剪强度—位移曲线

2.2 不同植物根系对植被混凝土抗剪切强度的影响

多花木兰、狗牙根根—基材复合体的抗剪强度—位移曲线明显高于空白样,抗剪强度显著提高(图 3)。同一裂隙条件下,极限抗剪强度表现为:多花木兰 > 狗牙根 > 空白样(图 4)。两种植物基材试样极限抗剪强度无明显性差异,但均与无植物基材试样结果存在显著性差异($p < 0.05$)。狗牙根和多花木兰根—基材复合体平均极限抗剪强度分别为 13.58~17.75 kPa, 14.71~18.66 kPa,空白样平均极限抗剪强度为

10.15~10.90 kPa,抗剪强度增量为 3.44~7.91 kPa。在植物生长过程中,多花木兰根系可以穿过基材伸入更深处岩隙中,增加土体的迁移阻力,而狗牙根根系数量多,直径小,易在土中形成网状结构,因此根—基材复合体抗剪强度相较于空白样明显增加。狗牙根根系为须根系,根系数量明显多于多花木兰根系的数量,而多花木兰为直根系,根系直径较大,根系直径越大,单根抗拉力就越大^[16],提供的抗剪切力也越大,因此多花木兰增强植被混凝土抗剪强度效果更佳。



注:不同字母表示不同试样种类间差异达显著水平($p < 0.05$)。下同。

图 4 空白样和根土复合体峰值位移和极限抗剪强度直方图

空白样在 8~11 mm 时出现峰值位移,含根试样该位移为 20~36 mm,位移增量 12~27 mm,平均增幅为 120.33%~319.32%。同一裂隙条件下,含根土体和空白样峰值位移存在显著性差异($p < 0.05$)。含根土体的峰值位移相较空白样有明显延后,这与

Comino^[17]根—土复合体剪切位移增量为 93%~1544% 的结论相似。植物根系在土体中相互缠绕,构成根系网络,将土壤束缚形成具有一定强度的整体^[18]。受剪时,土壤和根系之间会发生错动或有相互错动的趋势,为了抵抗剪切变形,根系被伸长,根内产生拉力,

根—基材界面的摩擦作用和根系的抗拉作用在剪切过程中逐步转化为根—基材复合体的抗剪能力,延缓了基材变形破坏发生的位移^[19]。而空白样一旦发生位移就意味着剪切能力的全部发挥,土壤颗粒之间的黏结作用被破坏,抗剪能力达到最大^[20]。

2.3 根系在不同裂隙分布对植被混凝土剪切应力的影响

多花木兰和狗牙根根系基材极限剪切应力随着裂隙角度的增加呈先增加后减小的趋势(图 5)。有根基材极限剪切应力在不同裂隙角度间存在显著性差异($p < 0.05$),而对于无根基材不存在显著性差异($p > 0.05$),这表明裂隙角度对于含根基材极限剪切应力具有明显影响。在角度为 60° 时,两者的极限剪切应力平均增幅达到最大值,角度 90° 时平均增幅最小。狗牙根根—基材复合体极限剪切应力增幅为 $33.87\% \sim 65.18\%$,多花木兰根—基材复合体极限剪切应力增幅为 $44.94\% \sim 73.65\%$ 。裂隙角度 15° ,

$30^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 中狗牙根和多花木兰平均极限剪切应力增幅相比 60° 时增幅分别减小了 $24.27\%, 18.21\%, 12.23\%, 24.56\%, 31.31\%$; $26.33\%, 18.65\%, 9.89\%, 20.33\%, 28.71\%$ 。可见岩面裂隙角度对极限剪切应力的影响是不可忽略的。有根基材的残余剪切应力则在一定的区域里波动,裂隙角度影响不明显,狗牙根—基材复合体残余剪切应力在不同裂隙角度间存在显著性差异($p < 0.05$),而对于多花木兰和无根基材复合体在不同裂隙角度间不存在显著性差异($p > 0.05$),残余剪切应力在一定的区域里波动。具体表现为狗牙根根—基材复合体残余剪切应力在 $0.5 \sim 0.7$ kN 范围内波动,多花木兰根—基材复合体残余剪切应力在 $0.6 \sim 0.7$ kN 之间。受根系加筋的影响,有根基材的残余剪切应力曲线总是高于较空白样有一定的增幅,狗牙根根—基材复合体和多花木兰根—基材复合体残余剪切应力平均增幅分别为 $4.21\% \sim 35.94\%$, $26.65\% \sim 55.84\%$ 。

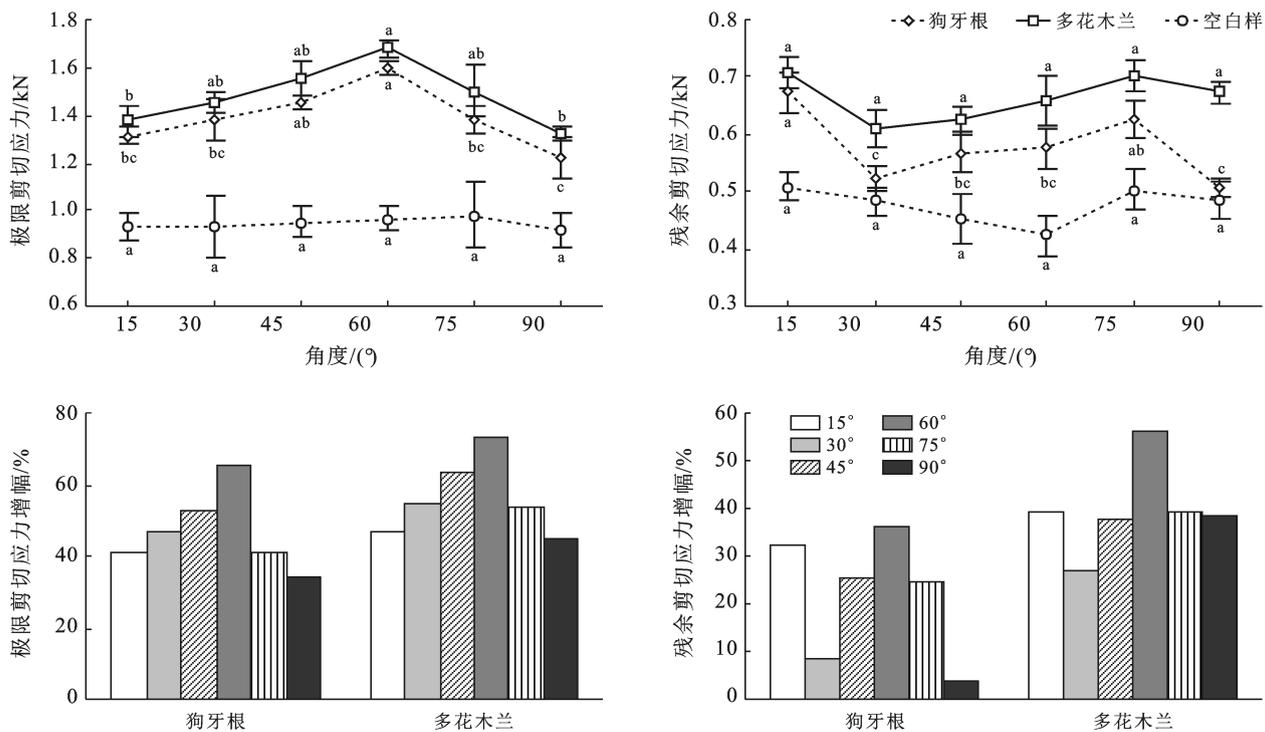


图 5 不同植物不同布置情况下的极限剪切应力与残余剪切应力变化

进行生态修复时,为了保持基材在岩体上的稳定性,除了在施工时采取一定的工程措施,防止基材的脱落、滑落等问题,不断生长的植物根系还能穿过基材扎入到岩体的裂隙中,产生锚固作用,使根—基材复合体与岩体间的作用力增强,增强保持基材的稳定。植物对岩隙形态结构具有适应性,岩体的裂隙分布形式不同,根系扎入到岩体中后对基材的稳定性影

响存在差异。冀晓东等^[21]通过试验得出根系复合布置时对土壤的增强作用最显著,水平布置时最次。王保辉等^[22]通过对 3 种不同根系布置形式(方形、梅花形、环形)的土体进行剪切试验得出,当根—土面积置换率较小时,布置形式对抗剪强度的影响是不同的。且当植物受剪切力时,若植物根系与剪切面成锐角,土体的抗剪强度能最大限度地增强^[23],从而使不同

的裂隙分布的根—基材复合体抗剪强度存在差异。

3 结论

(1) 狗牙根和多花木兰根—基材复合体的抗剪强度和残余抗剪强度均明显大于无根基材,抗剪强度增量为 3.44~7.91 kPa。植物根系可显著提高基材的抗剪能力,多花木兰根系增强效果更佳。

(2) 根—基材复合体的峰值位移均较空白样相对滞后,增量为 12~27 mm,平均增幅为 120.33%~319.32%,试样能够承受更大的变形。

(3) 对于同种类型的植物来讲,根—基材复合体的抗剪强度随着裂隙角度的增加呈先增加再逐渐减小的趋势,在 60°时抗剪强度最大,表明不同裂隙的分布方式对提高基材的抗剪强度的作用也是完全不同的,但对于残余抗剪强度,则在一定范围内浮动,裂隙分布影响不明显。

本研究主要关注根系及裂隙角度对基材原位剪切特性影响,仅考虑了有无根系情况,未考虑植物生长阶段以及根系具体状况。因此后续可以对试验进行优化,更真实的反映野外情况,为水土保持与生态修复提供更科学的理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 朱海丽,毛小青,倪三川,等.植被护坡研究进展与展望[J].中国水土保持,2007(4):26-29,60.
- [3] 许文年,王铁桥,叶建军.岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J].水利水电技术,2002,33(7):35-36,40.
- [4] 王俊.植被混凝土绿化法在岩石边坡水土保持中的应用[J].科技创新导报,2008(9):123.
- [5] 周正军,许文年,刘大翔,等.岩质边坡植被混凝土护坡基材力学稳定性探讨[J].三峡大学学报(自然科学版),2010,32(3):57-60.
- [6] 陈春晖,晏鄂川.植物根系对土体抗剪强度影响的研究[J].地质科技情报,2012,31(4):123-126.
- [7] 格日乐,张成福,蒙仲举,等.三种植物根—土复合体抗剪

特性对比分析[J].水土保持学报,2014,28(2):85-90.

- [8] 廖晶晶,罗绪强,罗光杰,等.三种护坡植物根—土复合体抗剪强度比较[J].水土保持通报,2013,33(5):118-122.
- [9] Wei Jie, Shi Binglin, Li Jinlin, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges reservoir area, China [J]. Catena, 2018,166:124-133.
- [10] 杨悦舒,夏振尧,肖海,等.多花木兰根—土复合体抗剪强度试验研究[J].长江科学院院报,2014,31(4):72-76.
- [11] 蒋希雁,何春晓,周占学,等.生态护坡中根系对土体抗剪强度的影响[J].中国水土保持,2019(3):43-46,69.
- [12] 蒋必凤,王海飙,李淑敏.草本植物根系对土体加筋的效应[J].东北林业大学学报,2017,45(7):51-54,68.
- [13] 张丞,李绍才,孙海龙,等.黄荆根系在风化岩石边坡上的锚固研究[J].四川建筑,2011,31(3):84-87.
- [14] 朱艳,刘云,王府京.宜昌市城区土壤特性与适种园林植物研究[J].湖北农业科学,2019,58(S2):207-211.
- [15] 周跃,李宏伟,徐强.云南松幼树垂直根的土壤增强作用[J].水土保持学报,2000,14(5):110-113,121.
- [16] 胡卸文,侯羿腾,王严,等.火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响[J].水文地质工程地质,2019,46(5):106-112.
- [17] Comin O E, Druett A A. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment [J]. Soil and Tillage Research, 2010,106(2):194-201.
- [18] 程洪,张新全.草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J].水土保持通报,2002,22(5):20-23.
- [19] 周霞,魏杨,李东嵘,等.黄土区紫花苜蓿根系对土体抗剪性能的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(2):53-59.
- [20] 余芹芹,胡夏嵩,李国荣,等.寒旱环境灌木植物根—土复合体强度模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):1020-1031.
- [21] 冀晓东,陈丽华,张超波.林木根系对土壤的增强作用与机理分析[J].中国水土保持,2009(10):19-21.
- [22] 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.
- [23] 王多栋,高金晖.岩石边坡的两种绿化技术的应用研究[J].中国农村水利水电,2010(6):153-156.