

# 含根量对秋枫根—土复合体抗剪强度的影响

廖 博, 刘建平, 周花玉

(四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安 625014)

**摘要:** 为研究含根量对秋枫(*Bischofia javanica*)根—土复合体抗剪强度的影响,利用纵剖面法探究了秋枫根面积比沿土层深度的分布规律,基于根面积比的分布范围,分别对 7 级不同根面积比梯度的重塑垂直根—土复合体试样在 4 级正应力下进行了改进的大盒直剪试验,定量探究了不同含根量对土体抗剪强度的影响,分析了根—土复合体黏聚力和内摩擦角的变化规律。结果表明:相比于素土,秋枫根—土复合体抗剪强度的增幅为 1%~25%;在相同根面积比情况下,根—土复合体抗剪强度随正应力的增大而增高,但其增长幅度却相应减小;随着根面积比的增大,根—土复合体抗剪强度呈现先增高后降低的趋势,存在最优含根量使根—土复合体抗剪强度达到最大值。4 级正应力下的峰值抗剪强度值分别为 100, 121, 136, 142 kPa,对应的根面积比均为 0.20%;当根系含量超过最优含根量时,根—土复合体抗剪强度出现了较大幅度的衰减,衰减率与正应力有关,正应力越大,衰减幅度越小;根面积比对根—土复合体抗剪强度指标的影响主要体现为黏聚力的改善,而对内摩擦角的影响较小。研究结果可为秋枫根系固土稳坡提供一定的理论依据,对进一步认识乔木根土相互作用具有积极意义。

**关键词:** 秋枫; 含根量; 根—土复合体; 抗剪强度

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2021)03-0104-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.015

## Effects of the Influence of Root Content on the Shear Strength of Root-Soil Composite of *Bischofia javanica*

LIAO Bo, LIU Jianping, ZHOU Huayu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sicuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014)

**Abstract:** In order to quantitatively evaluate the effect of different root contents on the shear strength of the root-soil composite, the distribution characteristics of the root area ratio of the *Bischofia javanica* with the increase of buried depth were analyzed. An improved large-box direct shear experiment was carried out on the remolded vertical root-soil composite with seven different root area ratios and four different normal stress levels. The changing rules of the soil cohesion and internal friction angle under different root area ratios were studied. The results showed that the shear strength of the root-soil composite of the *Bischofia javanica* was increased by 1% ~ 25% compared with the soil without roots. Under the same root area ratio, the shear strength of the root-soil composite increased when the normal stress increased, but with a decreased growth rate. With the increases of the root area ratio, the shear strength of the root-soil composite increased first and then decreased. There was an optimal root content to maximize the shear strength of the root-soil composite. The peak shear strengths under four different normal stress levels are 100, 121, 136, 142 kPa respectively, and the corresponding root area ratios were all 0.20%. When the root content exceeded the optimal value, the attenuation rate of the shear strength was related to the normal stress. The larger the normal stress, the smaller the attenuation. The effect of the root area ratio on enhancing the shear strength of root-soil composite was mainly reflected in the soil cohesion, while its influence on the internal friction angle was small. The results of this study could provide some theoretical bases for stabilizing slopes using *Bischofia javanica* roots and have positive significance for further understanding the interaction between the arbor roots and soil.

**Keywords:** *Bischofia javanica*; root content; root-soil composite; shear strength

收稿日期: 2020-11-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(41907242); 四川农业大学学科建设双支计划项目(03572904)

第一作者: 廖博(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事植物护坡机理研究。E-mail: Liaobo\_820@163.com

通信作者: 刘建平(1989—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事岩土工程研究。E-mail: jpliu\_whrsm@foxmail.com

随着城乡建设、基础设施的快速发展,林木超量砍伐,导致水土流失严重,剥落、滑坡、崩塌等坡面地质灾害呈逐年增加趋势<sup>[1-2]</sup>。目前植物固土护坡技术因具有造价低廉、易于维护、生态景观价值高等特点,被广泛用于坡面水土流失的治理<sup>[3]</sup>。植物通过地上茎叶拦截降雨、降低径流流速、根系吸水减压等水文效应以及地下根系的浅根加筋、深根锚固、侧根牵引等力学效应来提高土体的抗剪强度,从而达到固土稳坡的作用<sup>[4-5]</sup>。

高大乔木其树冠层可以有效拦截降雨,降低雨滴动能,而丰富的根系又可以将表层易滑动的土体锚固在深层稳定土体中,从而提高边坡稳定性。但目前关于乔木固土护坡的研究还较少,理论严重滞后于实践。含根土体抗剪强度是评价根系固土护坡效应的重要指标,国内外学者就乔木根系增强土体抗剪强度开展了系列研究。Docker 等<sup>[6]</sup>对澳大利亚河岸乔木树种木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Linn.)、广叶桉(*Eucalyptus amplifolia* Naud.Descr.)、桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)和多花相思树(*Acacia floribunda*)含根土体的抗剪强度进行了现场实测,结果表明,乔木根系能够显著提高土体的抗剪强度。由于现场直剪试验难度大、操作繁琐、影响因素多,部分学者采用重塑根土试样进行抗剪强度试验。盖小刚等<sup>[7]</sup>采用水平、垂直、水平+垂直3种埋根方式对北方4种乔木落叶松(*Larix gmelinii* (Ruprecht) Kuzeneva)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)和蒙古栎(*Quercus mongolica* Fischer ex Ledebour)根系进行了重塑土三轴试验发现,根—土复合体抗剪强度表现为水平+垂直复合体>水平根复合体>垂直根复合体;赵记领等<sup>[8]</sup>对橡胶树(*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Muell.Arg.)根—土复合体进行了大型直剪试验,结果表明,大直径根系对土体抗剪强度的增强效果大于小直径根系。

植物根系通过根土界面的摩擦作用承担了部分土体剪切荷载,提高了土体的抗剪强度,而含根量的多少直接决定了根土接触面积。因此,根系含量是影响根—土复合体抗剪强度的重要因素。Mahannopkul 等<sup>[9]</sup>测定了土壤水分在饱和状态和非饱和状态下原状香根草(*Vetiveria zizanioides* (Linn.) Vach)根—土复合体的抗剪强度,发现含根量越大,其抗剪强度越大;栗岳洲等<sup>[10]</sup>对赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)、毛穗赖草(*Leymus paboanus* (Claus) Pilger)、无脉苔草(*Carex enervis* C. A. Mey.)和海韭菜(*Triglochin*

*maritima* Linn.)不同含根量的重塑土试样进行了直剪试验发现,随着含根量的增加,根—土复合体抗剪强度呈现先增高后降低的趋势;Hamidifar 等<sup>[11]</sup>对香根草根—土复合体进行了直剪试验发现,黏聚力和内摩擦角随RAR增加而增大。

综上所述,限于乔木根—土复合体取样困难,现有直剪仪器试样较小等因素,目前乔木根系特征对边坡土体抗剪强度的影响研究还存在一定的限制和困难,对根土相互作用机理的探讨还不够深入。现有根系含量对根—土复合体抗剪强度影响的研究主要集中在草本植物,而有关含根量对乔木根—土复合体抗剪强度的试验研究却鲜有报道。因此,本研究利用纵剖面法探究了秋枫根面积比沿土层深度的分布规律,基于根面积比分布范围,利用根面积比控制重塑试样中根系的含量,通过改进的大盒直剪试验,探究了根系含量对秋枫根—土复合体抗剪强度的影响及其机理,分析了根—土复合体黏聚力和内摩擦角的变化规律。研究成果可为秋枫根系固土稳坡提供一定的理论依据,对进一步认识乔木根土相互作用具有积极意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省雅安市,地理坐标北纬28°51′10″—30°56′40″,东经101°56′26″—103°23′28″,属于成都平原与川西高原交接的低矮山丘,亚热带湿润季风气候,年均气温14.2~17.9℃,降水集中于夏季,多夜雨,年均降水量2000mm,年均蒸发量为838.8mm,土壤类型为紫色土。据相关统计<sup>[12]</sup>,雅安市2018年全市地质灾害安全隐患点1552处,其中滑坡和不稳定斜坡1041处,泥石流241处,崩塌、地裂缝、地面塌陷等270处,滑坡和不稳定斜坡为雅安市主要地质灾害安全隐患点。本研究选取雅安市雨城区山地读书公园为试验区。试验区占地约9.2hm<sup>2</sup>,海拔约750m,区内种植的主要绿化固坡乔木树种为秋枫(*Bischofia javanica*)、银杏(*Ginkgo biloba* Linn.)、柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr.)、榕树(*Ficus microcarpa* Linn.f.)等。

### 1.2 根面积比统计

秋枫为常绿或半常绿乔木,生长迅速,根系发达,抗风力强,耐水湿,能很好地适应研究区多雨湿润的环境。同时,其地上部分冠幅大,叶色随季节变化,具有很好的景观效果,近年来已成为生态景观和水土保持林的优良树种<sup>[13]</sup>。本研究以生长于雅安市山地读书公园道路边坡上的护坡植物秋枫为研究对象,因无法准确估测树种的树龄,选取胸径为16~17cm,生

长良好且所选研究对象周围无其他乔木的秋枫 3 株，其地上生长情况统计见表 1。2019 年 9 月利用纵剖面法<sup>[14]</sup>对研究对象进行根数和根径测量以获取根面积比沿土层深度的分布规律。

表 1 植株地上生长情况

| 植株样本 | 胸径/cm | 树高/m | 冠幅/m | 株距/m |
|------|-------|------|------|------|
| 秋枫 1 | 16.3  | 6.2  | 6.1  | 4.3  |
| 秋枫 2 | 16.9  | 6.5  | 8.2  | 4.5  |
| 秋枫 3 | 16.5  | 5.9  | 7.6  | 4.0  |

根面积比(RAR)为根—土复合体剪切面上根系横截面面积和土体横截面面积的比值，是目前描述土体根系含量的主要参数，其计算公式<sup>[15]</sup>为：

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

(1)

式中： $A_r$ 为根的横截面积( $\text{cm}^2$ )； $A$ 为剪切面面积( $\text{cm}^2$ )； $d_i$ 为根径(mm)； $n_r$ 为根数(根)。

具体测量方法为：以树基为中心点，沿坡向下距中心点 0.5 m 选取宽度为 1 m 的开挖带，垂直向下开挖。为避免开挖过程中对根系造成破坏，采用手动开挖，每 20 cm 为 1 级逐级向下开挖，直至开挖断面无根系为止，整体开挖深度为 1 m 左右。每开挖 1 级用 20 cm×20 cm 方框从左至右标定，每级 3 个样方，在方框内利用游标卡尺进行根系直径测量以及根系数量统计。秋枫根系较纤直，呈深红色，在 RAR 统计时能够较明显的与周围草本植物根系区分。

1.3 制样方法

本次试验根—土复合体均采用重塑土试样。从现场根系调查情况看，秋枫根系无明显主根，主要由水平和倾斜的侧根组成，而土质边坡发生失稳时破坏面多为类似圆弧滑动面，根系与潜在滑动面呈近似垂直交叉，同时为了减少不同布根方式对试验结果的影响，简化制样操作，重塑根土试样中根系采用垂直于剪切面分布。

1.3.1 土样材料 试验用土取自秋枫根系分布调查区开挖土体，采样点土体基本物理性质测定严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[16]</sup>进行，结果见表 2。

表 2 取样点土体基本物理性质

| 土体 | $\omega$ / | $\rho$ /                          | $\rho_d$ /                        | $\omega_L$ / | $\omega_P$ / |
|----|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| 类型 | %          | ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | %            | %            |
| 黏土 | 23         | 1.8                               | 1.46                              | 40           | 22           |

1.3.2 根系材料 在秋枫根系调查区现场选取新鲜、表面无破损的根系放入自封袋，带回实验室冲洗干净作为后期试验所用根系材料。为防止根系因水分流失导致干枯影响试验结果，用保鲜膜和湿毛巾将

根系包裹，放置于阴暗处保存。根面积比统计结果表明，秋枫根径主要集中在 0~6 mm，占剖面处根系总数量的 91.36%。在该范围内选取直径分布均匀的根系，将其裁剪成 9 cm 每段，即根系上下端距根—土复合体(高度为 10 cm)上下表面各空 0.5 cm，防止因正应力施加导致试样产生的竖向变形压迫根系造成根系弯曲，影响根土接触面的胶结。

1.3.3 制样流程 目前重塑根—土复合体制样一般采用分层击实法和一次压样法 2 种。分层击实法易造成土体内部分层，孔隙分布不均，结构严重损坏，而压样法制样试样孔隙分布均匀，与原状土极限强度更为接近<sup>[17]</sup>。因此，本研究采用压样法制样。试样制作采用自行设计四面可拆卸的试样盒 1 次制取 2 个试样，单个试样尺寸为 15 cm(长)×15 cm(宽)×10 cm(高)，剪切面为试样高度 5 cm 处。利用干密度控制原则进行制样，制样方法参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[16]</sup>进行，具体操作流程为：

(1)用切土刀将从调查区取回的块状土体切碎，装入瓷盘并放入烘箱中，在 105 ℃ 条件下烘干至恒重，降至室温后用木碾碾散，过 2 mm 筛保存备用。

(2)利用取样点土体的干密度及天然含水率计算重塑土试样所需的干土质量及所需加水量，称取相应质量干土，置于瓷盘中，用压力喷壶装取需加水量，缓慢朝装土瓷盘中喷洒，反复搅拌使试样无明显干土颗粒和水迹，用保鲜膜包裹瓷盘，静置 24 h，使试样含水率均匀。

(3)将根系与土体分层放入试样盒中，根系与剪切面垂直，根系与根系之间平行放置。装填完毕后将试样盒放置于压力机下压至试样所需干密度，静置 1 h 防止土体回弹，取下试样盒，将试样盒四面拆卸，沿试样中线将试样切成两半，立即用保鲜膜包裹备用。

1.4 试验装置

因常规土体直剪试验仪器所用试样过小不满足试验要求，因此，在 XJ—1 型岩石便携式剪切仪的基础上，通过重新设计制样装置、更换高精度低量程数显压力表等方式对其进行改进以符合试验要求。试验装置主要由上下剪切盒、加载系统、位移测量系统 3 部分组成(图 1)。在加载过程中，试样沿竖向方向发生变形，同时剪切面土体出现剪缩现象，使得上下剪切盒易贴合造成试验失败。为降低试样的竖向变形，更好控制上下剪切盒之间缝隙的高度，将试样的高度设置为 10 cm，同时根据不同正应力下试样的竖向位移量分别在上下剪切盒内分别垫入横截面尺寸为 15 cm×15 cm 的不同高度的木块，使试验加载过程中剪切盒缝隙高度控制在 0.5 cm 左右。



2.2 剪应力与剪切位移曲线分析

对 7 级 RAR 梯度的根—土复合体试样分别在 100, 150, 200, 250 kPa 4 级正应力下进行大盒直剪试验, 获取不同含根量根—土复合体剪应力与剪切位移关系曲线。由图 4 可知, 剪应力随剪切位移的增大呈现先上升后趋于稳定的趋势, 为“硬化型”。在相同正应力情况下, 根—土复合体破坏时抗剪强度对应的剪切位移均大于素土破坏时抗剪强度对应的剪切位移。如当正应力为 150 kPa 时, 素土抗剪强度对应的剪切位移为 6.1 mm, 而 RAR 为 0.05%, 0.10%, 0.15% 时抗剪强度对应的剪切位移分别为 6.7, 8.0, 9.1 mm, 根—土复合体试样抗剪强度所对应的剪切位移分别为素土试样抗剪强度对应位

移的 1.10, 1.31, 1.50 倍。说明根系的存在扩散和转移了土体中的剪应力, 使剪切面土体在达到抗剪强度前产生了更大位移, 增加了土体延性, 从而提高了边坡稳定性<sup>[18]</sup>。

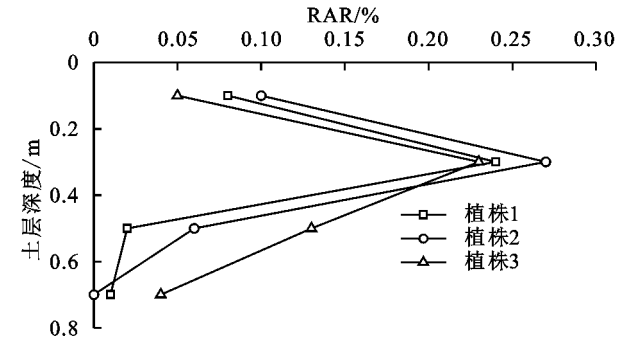


图 3 RAR 随土层深度分布

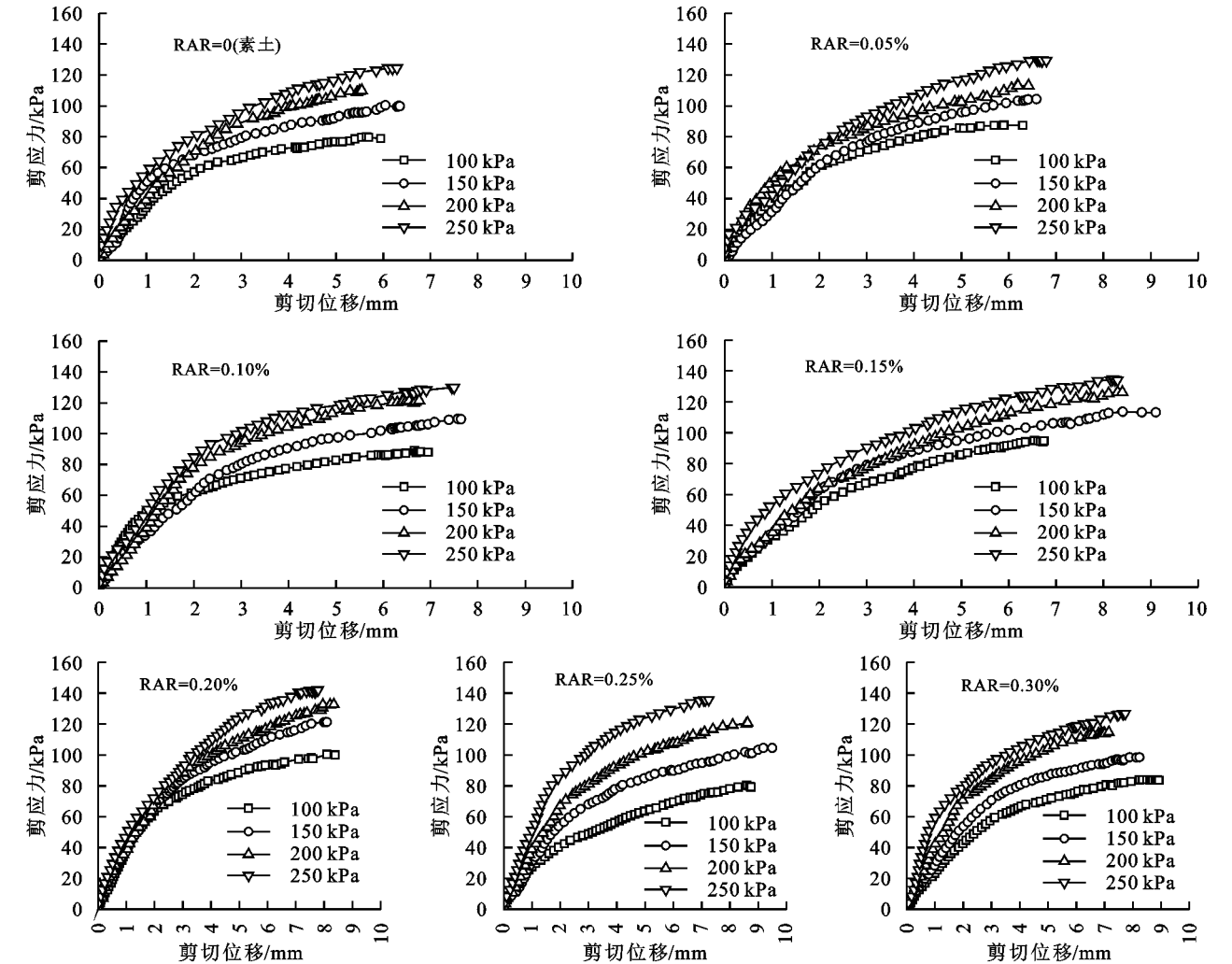


图 4 不同含根量根—土复合体剪应力与剪切位移关系曲线

2.3 含根量对根—土复合体抗剪强度影响分析

图 5 为 4 级正应力下的抗剪强度与 RAR 之间的关系曲线。由图 5 可知, 除个别试样外, 根—土复合体抗剪强度相比于素土整体增加了 1~22 kPa, 增长幅度为 1%~25%, 说明秋枫根系可以显著提高土体的抗剪强度, 从而增强边坡的稳定性。在相同含根量情况下, 根—土复合体的抗剪强度随正应力的增大而增高, 但其增长幅度却呈降低的趋势。以 RAR 取

0.20% 为例, 当正应力从 100 kPa 增至 150 kPa, 150 kPa 增至 200 kPa, 200 kPa 增至 250 kPa 时, 抗剪强度分别增高了 21, 11, 10 kPa, 增长幅度分别为 21%, 9%, 7%。此外, RAR 为 0.20% 时, 4 级正应力下所对应的抗剪强度值相对于素土分别增加了 20, 21, 22, 18 kPa, 增长幅度分别为 25%, 21%, 20%, 14%。本研究表明, 正应力较大时, 根系对土体抗剪强度的增强效果相比于正应力较小时根系对土体抗剪强度

的增强效果有所降低。这在一定程度上反映出根系对深层土体的加固效果较浅层土体有所削减,这与田佳等<sup>[20]</sup>和胡宁等<sup>[21]</sup>的研究结果类似。田佳等<sup>[20]</sup>在研究花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch.et Mey.)根系对土体加固时发现,随着垂直荷载的增加,花棒根系对土体抗剪强度的增强作用在不断减弱,并将这种削弱认为是随着正应力的增加,土体本身的抗剪强度也增大,且这种增大程度超过了根系对土体抗剪强度的增加所致。而笔者认为,由土的固结试验可知,土的固结系数随固结压力的增大而减小,随着竖向压力的增大,土粒的排列越来越紧密,试样越难产生新的压缩<sup>[22]</sup>。土颗粒越紧密,根土接触面摩擦强度就越高,由于土颗粒之间的可压缩性越来越小,根土接触界面越来越紧密的程度在减缓,从而造成根—土复合体抗剪强度的增长幅度在减小。

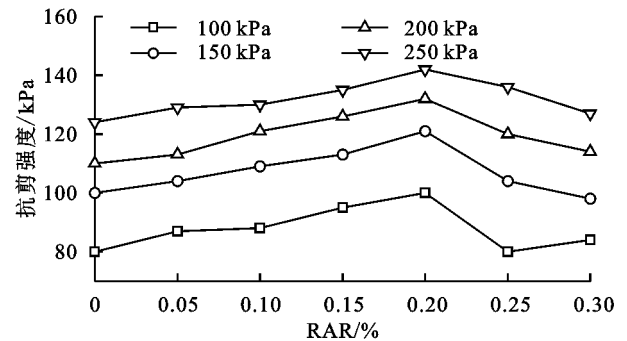


图 5 4 级正应力下抗剪强度与 RAR 关系

由图 5 可知,随着 RAR 的增加,根—土复合体抗剪强度呈现先增高后降低的趋势。当  $RAR < 0.20\%$  时,随着 RAR 的增大,根—土复合体的抗剪强度值也增加;当  $RAR > 0.20\%$  后,随着 RAR 的增大,根—土复合体的抗剪强度值减小。4 级正应力 100, 150, 200, 250 kPa 对应的峰值抗剪强度分别为 100, 121, 132, 142 kPa, 且峰值抗剪强度对应的 RAR 均为 0.20%。这表明 RAR 显著影响土体的抗剪强度,存在最优 RAR 使根—土复合体的抗剪强度达到最大值,也即是存在最优含根量使根系对土体的加固效果最优。

对剪损试样进行拆解可以发现根系未被拉断,根

系体现出与土体摩擦型作用方式,且相对较粗的根系在剪切面处存在剪切损伤。当根—土复合体中根系含量低于最优含根量时,随着含根量的增加,根系与土体的接触总面积增大,从而增大了根系与土体之间的摩擦力,增加了土体的抗剪强度。另外,粗根由于自身具有很好的抗弯折屈服性能,能抵抗试样受到的剪切力,而这一部分力同样起到增大土体抵抗剪切变形的能力。当根系含量超过最优含根量时,根—土复合体抗剪强度出现了较大程度的降低。分析其原因在于,素土在剪切荷载作用下,土体中微裂纹迅速扩展,形成贯通滑裂面,造成土体失稳破坏<sup>[18]</sup>。在根—土复合体中随着 RAR 的增大,试样中粗根随之增多,当根—土复合体承受剪切荷载作用时,粗根与土体因抗剪能力差异较大造成根系与土体不协调变形,使得根土接触面周边易形成裂纹,或者加速土体裂纹的扩展与贯通,造成根系与土体接触面胶结力下降,从而降低了根—土复合体抗剪强度。

此外,这种降低程度还与正应力的大小有关。当 RAR 从 0.20% 增加至 0.25% 时,4 级正应力下抗剪强度衰减的幅度依次为 20%, 14%, 9%, 4%。这表明,当根系含量超过最优含根量时,正应力越大,根—土复合体抗剪强度衰减幅度越小,较大正应力能更好地维持根—土复合体的抗剪强度。这主要是因为:施加正应力越大,土体内部竖向压力也越大,根土接触面接触更加紧密,有助于发挥根土界面的摩擦加筋效应,同时根土界面不易形成裂隙。对直剪试验而言,因泊松效应,当试样受到较大正应力时,因剪切盒内壁的约束作用,使剪切盒在水平方向对试样产生一定的围压,围压越大,根土接触更紧密,根—土界面摩擦也更明显。因此,正应力越大,抗剪强度衰减幅度越小。此现象也从一定程度上反映了粗根在相对深层土体中的锚固效果优于浅层的加筋效果。

2.4 含根量对根—土复合体抗剪强度指标影响分析

基于库伦强度理论,对不同含根量的根—土复合体抗剪强度指标(黏聚力  $c$ , 内摩擦角  $\varphi$ )进行统计分析,结果见表 4。

表 4 根—土复合体和素土抗剪强度指标试验结果

| RAR/% | 抗剪强度    |         |       | $\tau$ 与 $\sigma$ 关系         |                         |       |
|-------|---------|---------|-------|------------------------------|-------------------------|-------|
|       | 黏聚力 $c$ |         |       | 内摩擦角<br>$\varphi/(^{\circ})$ | 关系式                     | $R^2$ |
|       | 实测值/kPa | 增量值/kPa | 增长率/% |                              |                         |       |
| 0     | 54.0    | 0       | 0     | 15.9                         | $\tau=0.284\sigma+54.0$ | 0.982 |
| 0.05  | 61.0    | 7.0     | 13.0  | 15.1                         | $\tau=0.270\sigma+61.0$ | 0.987 |
| 0.10  | 63.7    | 9.7     | 18.0  | 15.4                         | $\tau=0.276\sigma+63.7$ | 0.962 |
| 0.15  | 70.7    | 16.7    | 30.9  | 14.9                         | $\tau=0.266\sigma+70.7$ | 0.977 |
| 0.20  | 75.8    | 21.8    | 40.4  | 15.3                         | $\tau=0.274\sigma+75.8$ | 0.965 |
| 0.25  | 45.6    | -8.4    | -15.6 | 20.2                         | $\tau=0.368\sigma+45.6$ | 0.989 |
| 0.30  | 55.0    | 1.0     | 1.9   | 16.2                         | $\tau=0.290\sigma+55.0$ | 0.998 |

注:增长量和增长率均相对于素土而言。

由表 4 可知,根系能够较大程度地提高根—土复合体的黏聚力,最大增长量为 21.8 kPa,最大增长幅度为 40.4%,而不同 RAR 条件下根—土复合体的内摩擦角变化较小。说明根系对根—土复合体抗剪强度指标的影响主要体现为黏聚力的改善,而对内摩擦角的影响相对较小,这与陈洁等<sup>[23]</sup>和 Maffra 等<sup>[24]</sup>关于草本以及灌木植物研究结果类似。

此外,由表 4 还可知,随着 RAR 的增加,根—土复合体黏聚力呈现先增大后减小的趋势。当 RAR 为 0.20%时,黏聚力出现最大值即说明根—土复合体的抗剪强度与黏聚力随 RAR 的变化趋势一致,均在 RAR 为 0.20%时出现最大值。这种一致性是因为根系对根—土复合体抗剪强度的影响主要体现在黏聚力的变化上,而对内摩擦角影响较小,根—土复合体抗剪强度的增加值近似等于根系提供给土体的附加黏聚力<sup>[25]</sup>。目前有关根系影响根—土复合体黏聚力的内在机理的研究还较少,应在今后加强相关研究。

### 3 结论

(1)秋枫根系数量沿土层深度呈现先增多后减少的趋势,根系主要分布在 0—0.8 m 深度土层中,其中 0.2—0.4 m 深度土层中根系数量最多,占总数量的 47.83%。根面积比沿土层深度呈现先增大后减小的趋势,在 0.2—0.4 m 深度土层中出现最大值。

(2)秋枫根系可以显著提高土体的抗剪强度,根—土复合体抗剪强度相比于素土提高了 1~22 kPa,其增长幅度为 1%~25%。在相同根面积比情况下,秋枫根—土复合体抗剪强度随正应力的增大而增高,但其增长幅度却相应减小。根系对深层土体的加固效果较浅层土体有所削减。

(3)随着根面积比的增大,根—土复合体抗剪强度呈现先增高后降低的趋势,4 级正应力下峰值抗剪强度值分别为 100,121,136,142 kPa,对应的根面积比均为 0.20%,存在最优含根量使得根系对土体的加固效果最优。当根系含量超过最优含根量时,抗剪强度出现一定程度的衰减,衰减率与正应力有关,正应力越大,衰减率越小。粗根在相对深层土体中的锚固效果优于浅层的加筋效果。

(4)秋枫根系对根—土复合体抗剪强度指标的影响主要体现为黏聚力的改善,而对内摩擦角的影响较小。黏聚力随根面积比的增大先增大后减小,与抗剪强度与根面积比变化趋势一致,同样存在最优含根量使其黏聚力达到最大值。

#### 参考文献:

[1] Zhao W T, Zhou Y P, Xu H. Formula and basic geochemical research to create new technology for vegetation restora-

- tion of mine slag heap (slope) [J]. Environmental Ence and Pollution Research, 2020, 27(3): 2464-2473.
- [2] 刘子壮,高照良,杜峰,等.黄土高原高速公路护坡植物根系分布及力学特性研究[J].水土保持学报,2014,28(4):66-71.
- [3] 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.
- [4] Loades K W, Bengough A G, Bransby M F, et al. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3): 276-284.
- [5] 格日乐,刘艳琦,左志严,等.土壤水分对植物根—土界面相互作用特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(1): 135-140.
- [6] Docker B B, Hubble T C T. Modelling the distribution of enhanced soil shear strength beneath riparian trees of South-eastern Australia [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 921-934.
- [7] 盖小刚,陈丽华,蒋坤云,等.4 种乔木根系不同埋根方式根—土复合体的抗剪特性[J].林业科学,2014,50(9): 105-111.
- [8] 赵记领,李光范,胡伟,等.雨林乔木直根根土复合体的抗剪强度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊 1):3663-3669.
- [9] Mahannopkul K, Jotisankasa A. Influences of root concentration and suction on *chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil [J]. Soils and Foundations, 2019, 59(2): 500-516.
- [10] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,等.寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
- [11] Hamidifar H, Keshavarzi A, Truong P. Enhancement of river bank shear strength parameters using *Vetiver grass* root system [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(20): 1-11.
- [12] 雅安市人民政府.雅安市地质灾害隐患点信息[EB/OL]. [2018-8-17]. <http://www.yaan.gov.cn/shuju/item/3eb388d5-043b-48af-a701-296763008d9b.html>.
- [13] 陈文杰.重阳木属树种重阳木和秋枫的辨别[J].现代农业科技,2013,20(16):162-163.
- [14] 洪苗苗,汪霞,赵云飞,等.浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系对土壤抗剪强度影响[J].山地学报,2018, 36(1):107-115.
- [15] Ni J J, Leung A K, Ng C W W. Influences of plant spacing on root tensile strength of *Schefflera arboricola* and soil shear strength [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2019, 15(2): 223-230.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019:8-20.

Geological Society of India, 2017, 90(3): 362-370.

- [10] Elliott G L, Lang R D, Campbell B L. The association of tree species, landform, soils and erosion on Narabeen sandstone west of Putty, New South Wales [J]. Austral Ecology, 2010, 8(3): 321-331.
- [11] Slavik M, Bruthans J, Filippi M, et al. Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion [J]. Geomorphology, 2017, 278: 298-313.
- [12] 艾宁, 魏天兴, 朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 26-30.
- [13] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平. 黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 9-16.
- [14] 李洪丽, 韩兴, 张志丹, 等. 东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 49-52, 57.
- [15] 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 124-132.
- [16] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [17] 王改玲, 王青杵, 石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 1-5.
- [18] 孙正宝, 陈治谏, 廖晓勇, 等. 侵蚀性降雨识别的模糊隶属度模型建立及应用[J]. 水科学进展, 2011, 22(6):

801-806.

- [19] 史志华, 朱华德, 陈佳, 等. 小流域土壤水分空间异质性及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 889-895.
- [20] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [21] 张岩, 朱清科. 黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 99-103.
- [22] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 48-56.
- [23] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 733-739.
- [24] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 154-161.
- [25] 贾腾斌, 吴发启, 赵龙山, 等. 坡耕地上耕作形成的微地形复杂度特征与分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 152-156.
- [26] Pinski S L, Trohman R G. Analysis of surface roughness in relation to soil loss and runoff at high rainfall intensities [J]. Hydrological Processes, 2010, 16(12): 2339-2345.
- [27] Römken M, Helming K, Prasad S. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes [J]. Catena, 2002, 46: 103-123.

(上接第 110 页)

- [17] 孟杰, 李喜安, 赵兴考, 等. 基于高精度  $\mu$ CT 扫描的重塑黄土试样均匀性分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 125-130.
- [18] 周云艳. 植物根系固土机理与护坡技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- [19] Abdi E, Saleh H R, Majnonian B, et al. Soil fixation and erosion control by *Haloxylon persicum* roots in arid lands, Iran [J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(1): 86-96.
- [20] 田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 花棒根—土复合体直剪试验的有限元数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 152-158.

- [21] 胡宁, 刘静, 姚喜军, 等. 快剪条件下柠条根对 3 种土壤土工特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 106-111.
- [22] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 128-134.
- [23] 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.
- [24] Maffra C, Sousa R, Sutuli F J, et al. The effect of roots on the shear strength of texturally distinct soils [J]. Floresta E Ambiente, 2019, 26(3): 1-11.
- [25] 宗全利, 冯博, 蔡杭兵, 等. 塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1290-1300.