

# 昭通烂泥箐滑坡源区原生状态根—土复合体抗剪特征

徐宗恒, 张宇, 陶真鹏, 查玲珑, 陈云英

(云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 650500)

**摘要:**以昭通烂泥箐滑坡源区优势物种鸢尾科鸢尾属鸢尾原生根系—土复合体作为研究对象,采用直剪试验对复合体抗剪特征进行深入研究,并与室内相同含水率重塑复合体试验结果对比分析。结果表明,整体上无根系土具有应变软化特征,而复合体具有应变硬化的特性,各复合体的抗剪强度均比素土的高,且抗剪强度随着含根量的增加而增加,根系加固效应明显,但复合体并没出现与重塑土类似的最优(最佳)含根量。原状复合体的  $c$  值随含根量的增加没有明显变化规律,而  $\varphi$  值则逐渐递增,其增长率也有相同的变化趋势。复合体破坏断面显示根系为主根系且垂直贯通剪切面,垂向压力大时固土效应最优;无主根的侧根直径较小,根系在复合体中倾斜分布,特别是与剪切错动方向一致时会影响固土效应发挥。素土破坏模式为破坏面并不完全水平整体的剪切破坏,复合体则是非根系被剪断或拉断,而根系被拔出土体,根—土界面产生明显相对位移的破坏模式。研究结果可为以增强复合体抗剪强度为目的的护坡植被的选择提供基础理论依据。

**关键词:** 原生根土复合体; 抗剪强度; 破坏模式; 植被选择

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2022)04-0128-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.017

## Mechanical Characteristics of Undisturbed Roots-soil Composites from the Source Area of Lanniqing Landslide, Zhaotong

XU Zongheng, ZHANG Yu, TAO Zhenpeng, ZHA Linglong, CHEN Yuning

(Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Key Laboratory of Plateau Geographic Processes and Environment Change of Yunnan Province, Kunming 650500)

**Abstract:** In this paper, the undisturbed roots-soil composites of *Iris tectorum* Maxim., the dominant species from the source area of Lanniqing landslide, Zhaotong, were taken as the research objects, and the shear characteristics of the composites were studied in depth by direct shear tests, and compared with the experimental results of remolded composites with the same water content in lab. The results showed that the samples with no roots as a whole had the characteristics of strain softening, while the composites had the characteristics of strain hardening. The shear strength of composites was higher than that of samples with no roots, which increased with the increase of roots contents, so that the roots strengthening effect was obvious; however, the undisturbed composites did not exist the optimal root content similar to that of the remolded composites. The  $c$  value of composites has no obvious change rule, while the  $\varphi$  value increased gradually, and both increase rates also have the same trend. The sections of failure composites showed that the ability of roots to consolidate soil was optimal when they were the taproots and they were vertical through shear plane, and the vertical pressure was high. The diameter of lateral roots without taproot was smaller, and the inclined distribution in the composites, especially along with shear direction, would affect roots reinforcing effect. The failure mode of samples with no roots was the overall shear failure with incomplete horizontal failure surface, while the failure mode of composites was that the roots were pulled out of sample instead of being sheared or pulled out, and obvious relative displacement occurred between roots and soil. The results could provide a theoretical basis for the selection of slope protection vegetation in order to enhance the shear strength of composites.

收稿日期: 2021-12-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41967034); 云南省科技厅应用基础研究面上项目(202101AT070138)

第一作者: 徐宗恒(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事山地灾害与地质环境研究。E-mail: 553790356@qq.com

通信作者: 徐宗恒(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事山地灾害与地质环境研究。E-mail: 553790356@qq.com

**Keywords:** undisturbed roots-soil composites; shear strength; failure mode; vegetation choice

习近平总书记在中国共产党十九大报告中,首次将“树立和践行绿水青山就是金山银山的理念”写入报告中,成为习近平新时代中国特色社会主义思想建设的思想和基本方略<sup>[1]</sup>。在习近平生态文明思想的科学指引下,生态护坡治理工程开挖边坡的方式深入人心,运用越来越广泛。生态护坡优势一方面在于能兼顾绿色植被和工程的相融相通,实现可持续发展的绿色理念;另一方面,则是植被树冠、枯落物以及根系有利于降雨条件下水分的入渗,以及植被根系对土壤强度的提高,加强土壤的抗侵蚀能力,减小坡面侵蚀<sup>[2]</sup>。

根系固土的力学性能以及机理在生态护坡研究中尤为重要。学者们采用室内室外试验以及数值模拟的方式已开展众多有意义的研究成果,室内外试验主要采用直接剪切、原位剪切试验、三轴压缩以及无侧限抗压强度试验等,例如,姚喜军<sup>[3]</sup>、朱珊等<sup>[4]</sup>、李绍才等<sup>[5]</sup>、Kok 等<sup>[6]</sup>采用根土复合体开展三轴压缩和直剪试验;许桐等<sup>[7]</sup>选取芦苇、盐爪爪、无脉苔草、盐地风毛菊 4 种优势盐生植物根—土复合体;余燚等<sup>[8]</sup>选取红黏土边坡香根草根土复合体;张乔艳等<sup>[9]</sup>选取贵州石漠化区有代表性的灌木树种多花木蓝和双荚决明根—土复合体;杨路等<sup>[10]</sup>选取黄土区优势乡土灌木达乌里胡枝子、中国沙棘和狼牙刺根土复合体;张永亮<sup>[11]</sup>选择沙棘根—土复合体;格日乐等<sup>[12]</sup>、邢会文等<sup>[13]</sup>选择杨柴、沙棘、柠条植物重塑样采用直剪试验;赵记领等<sup>[14]</sup>、牛家永等<sup>[15]</sup>选用不同含根量下根—土复合体采用自主设计研制的新型试验装置开展单轴拉伸试验,研究各种植被根土复合体在各种影响因素下抗剪或抗拉特征。在数值模拟方面,学者们主要是利用数值模拟软件进行不同工况下根土复合体的剪切特征研究,吴美苏等<sup>[16]</sup>利用有限元软件计算降雨过程中裂隙和根土间隙对渗流场的影响,并分析降雨对根系固土作用的影响;王一冰等<sup>[17]</sup>利用 PLAXIS 数值软件进行不同工况下直剪试验数值模拟计算;黄建坤等<sup>[18]</sup>用有限元软件 ANSYS 模拟含草边坡和无草边坡的应力和应变分布规律。这些研究成果均表明,植被根系对土体具有强化作用,增强土体的抗剪强度,根系类型、根系含量、根径、分布位置、形式、形态、根系倾角、复合体含水量对根—土复合体强度增强效应不同程度的影响,但是以上的试验对象多是在野外分别提取土样和根系以后在室内重组混合形成的重塑根—土复合体(即根系在土内分布和土体的组成研究时被理想化),而进行的数值模拟采用的工况多为理想状态,这样所得抗剪特性的结果显然与原状复合

体有着本质差别,主要体现在原生条件植被根系在复合体内直径大小、分布位置、形式、形态以及倾角都具有明显的随机性。本文以昭通烂泥箐滑坡源区原生状态根—土复合体作为研究对象,采用直剪试验对原生复合体抗剪特征进行深入研究,并与室内重塑复合体试验结果对比分析,得到原生复合体的抗剪特征,从而为护坡植被的选择和配置提供基础的理论依据,能更合理有效地指导开展水土保持生态护坡设计。

## 1 研究区概况

小河镇隶属云南省昭通市巧家县东北部。巧家县在区域构造上属川滇经向构造体系,位于川滇经向构造带北段东缘与东侧滇东“多”字形构造的结合部,北西向以构造控制为主,主要构造带为药山构造带;研究区构造发育,以断裂为主,褶皱次之<sup>[19]</sup>。马鞍村烂泥箐村民小组是小河镇下辖的行政村,小河镇位于发源于昆明嵩明县的金沙江支流牛栏江流域的炉房沟与银厂沟交汇地带,境内主要为构造溶蚀侵蚀高山峡谷地貌,最高点位于山堡村满天星,海拔 3 300 m;西侧药山山顶海拔 4 040 m,小河镇政府驻地处于牛栏江干流西北侧,处于两山间河谷地带,海拔不到 1 000 m<sup>[20]</sup>,受牛栏江强烈下蚀作用以及断裂,褶皱的影响,小河镇地质灾害频发。为研究滑坡区优势物种鸢尾科鸢尾属鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.)对防治地表水土流失和固土作用,在烂泥箐滑坡源区(103.1422°E, 27.2746°N, 高程 2 315 m)获取原状根—土复合体开展相关的试验研究。

## 2 材料与方法

### 2.1 野外取样

在进行取样之前,对滑坡源区范围内植被类型、生长状况进行详细调查发现,滑坡源区的优势草本物种为鸢尾科鸢尾属鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.)和菊科蒿属艾(*Artemisia argyi* Lévl. et Van.) 2 种多年生植物,在源区成片状或者带状分布。选择长势较好、未有人为扰动的鸢尾大面积分布区域,先去除土体表层范围内的大根枯枝和杂草以及稍大砾石,并清除周围有可能妨碍取样的杂物,在清理时注意尽量不要扰动土体表层以及不要拉扯到植物植株。清理好取样现场以后,选定取样范围,然后将植株地上部分统一用锋利剪刀进行切除,将剪切用 30 cm<sup>2</sup> × 2 cm 配套环刀放置于根—土复合体表土层之上,配合橡胶锤和手柄将环刀击入土中,用环刀套住复合体,然后由环刀外围 5 cm 处开始由表及里进行缓慢切土开

挖,到预定深度以后挖取复合体,为了保证试验复合体的含水率离散性不大,在相同水平上,取样深度控制在表土层 20 cm 范围内。然后用削土刀将该土柱试样缓慢由外向内削去环刀外多余土样,使环刀内土样成规则状。为了防止试样水分损失影响试验结果,将取得的土样进行标记,迅速用保鲜薄膜包裹好,分样装入密闭的自封袋带回实验室<sup>[7,21]</sup>。本次试验所取得复合体的土体为灰色、紫色黏土、亚黏土,偶夹有少量的泥岩碎屑,细粒土黏性较强,吸水后软化效应明显。在土样表面可见有明显根系分布,根据表面暴露的根系量以及取样现场切削土样时观察到的根系分布情况,将复合体按照根系从少到多分为 4 组,分别定名为 B(g9~g12)、C(g5~g8)、D(g17~g20)、E(g13~g16)组。为了对比研究,同时获取 2 组不含根系的试验土样作为参照组(素土),定名为 A1 和 A2 组(平均值分析时定为 A 组)。

## 2.2 室内试验与研究方法

本次剪切试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制直剪仪,试验方法严格按照国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)<sup>[21]</sup>进行。采用 8 r/min 的速度以及 4 个竖向压力(100,200,300,400 kPa)条件下对素土和根—土复合体进行直接剪切试验。根据试验结果绘制剪应力与剪切位移曲线图,抗剪强度的获取方法为:曲线有峰值时取该峰值为抗剪强度,不出现峰值时取剪切位移 4 mm 对应剪应力为抗剪强度。得到各级垂直压力下的抗剪强度后,根据库伦定律( $\tau = c + P \tan \varphi$ 。式中: $\tau$  为抗剪强度(kPa); $P$  为垂向压力(kPa); $\varphi$  为内摩擦角( $^{\circ}$ ); $c$  为黏聚力(kPa)),按照垂向压力  $P$  与抗剪强度  $\tau$  的线性回归关系方程即可得到  $c$ 、 $\varphi$  值。

研究根系对土体增强作用,不仅考虑复合体的抗剪强度( $\tau$ )、黏聚力( $c$ )、内摩擦角( $\varphi$ ),还可以分析抗剪强度增长量( $\Delta\tau$ (kPa)),抗剪强度增长率( $\Delta\tau'$ (%)),黏聚力和内摩擦角增长率( $\Delta c'$ (%))和( $\Delta\varphi'$ (%))。计算公式为:

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_0$$

$$\Delta\tau' = (\tau_1 - \tau_0) / \tau_0 \times 100\%$$

$$\Delta c' = (c_1 - c_0) / c_0 \times 100\%$$

$$\Delta\varphi' = (\varphi_1 - \varphi_0) / \varphi_0 \times 100\%$$

式中: $\tau_1$ 、 $\tau_0$  分别为复合体和素土的抗剪强度(kPa); $c_1$ 、 $c_0$  分别为复合体和素土的黏聚力(kPa); $\varphi_1$ 、 $\varphi_0$  分别为复合体和素土的内摩擦角( $^{\circ}$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 应力—应变特征

根据直接剪切试验结果,绘制剪切位移与剪应力

关系曲线。由图 1 可以看出,同一垂向压力下,随着剪切位移的增加,剪应力逐渐增加,但增长速度由快及慢,直至剪切位移达到一定阶段土样被剪切破坏,变化幅度最小的为垂向压力 100 kPa 的曲线。A1、A2 原状素土与 B、C、D、E 复合体的曲线有着明显的区别,前者多数都有着密实黏土相似的性质,曲线有明显的峰值,具有应变软化特征,可以直接按峰值读取土样抗剪强度,而后者剪应力随着剪切位移增加逐渐增加或者趋于某一稳定数值,强度峰值均未出现,具有应变硬化特征,按照规定取剪切位移为 4 mm 时对应的剪应力为抗剪强度。从曲线特征可以发现,根系对土样抗剪特征影响明显,素土多数随剪切位移增加在上下盒接触面附近发生直接剪切破坏,而复合体则在土样沿接触面缓慢错动后,贯穿上下盒的根系就会逐渐进入工作而使得复合体产生应变硬化的特性,得到曲线“不低头”,不会出现峰值。

按照国家规范《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)<sup>[21]</sup>规定,可以得到素土 A1、A2 以及不同根系含量复合体的抗剪强度(图 2)。A1 和 A2 为平行试验,虽然两者剪切位移—剪应力曲线稍有区别,但抗剪强度差别不大,最大差值为 400 kPa 时的 106.42,161.82 kPa,相差 55.4 kPa,出现该差别较大的原因是该垂向压力下, A1 应变软化,有明显的峰值点,且出现得较早(在剪切位移 1.72 mm 时即出现),导致抗剪强度明显偏低,而 A2 可能是粒度组成的差异,在该垂向压力下出现与一般素土不同的硬化特征,抗剪强度较高。在相同压力下 A1 和 A2 的抗剪强度均明显低于复合体,符合规律,可用两者的抗剪强度平均值作为素土 A 抗剪强度进行分析和研究。从图 2 还可看出,在相同垂向压力下,各复合体的抗剪强度均比素土的高,根系加固效应显著,因为复合体的抗剪强度不仅来源于颗粒之间相互作用,还来源于根系,当根系存在时,复合体随剪切面错动时,剪应力一部分由根系承担,其余的由土体颗粒承担,根系的抗拉强度相对较高会对复合体的侧向变形起到阻止作用<sup>[22]</sup>,从而使土样的抗剪强度得到提高。

通过试验前对原状土样含水率进行测定可知含水率离散性不大,为 28%~33%,为了对比分析相同含水率条件下原状与重塑复合体抗剪特征的差别,此处列出笔者文献<sup>[23]</sup>中 30% 含水率时各垂向压力下重塑根土复合体的抗剪强度(图 3),随着根土复合体中含根量由 0 增值至 0.93 mg/cm<sup>3</sup>,根—土复合体的抗剪强度显著增加,这与原状复合体变化一致,但在相同垂向压力下,重塑复合体的抗剪强度一般低于原状土样。当含根量为 0.93 mg/cm<sup>3</sup>时,重塑复合体的



抗剪强度达到峰值,分别为 51,105,159,195 kPa;当含根量为 1.4 mg/cm<sup>3</sup>时,其抗剪强度反而降低,所以对于重塑复合体,随着含根量的增加,根土复合体的抗剪强度值有着先增加后降低的趋势,反映出重塑复合体中存在最优(最佳)含根量,即当含根量达到或接近最优(最佳)时,根土复合体抗剪强度达到最大值,

这与文献[24—25]结果一致。结合图 2 结果,虽然原状复合体根系固土作用明显,抗剪强度较大,在垂向压力为 400 kPa 含根量最多时抗剪强度最大,没有出现与重塑土类似的最优(最佳)含根量,这可能与根系分布的随机性有关,根系分布量较少可能也是没有出现最优(最佳)含根量的原因。

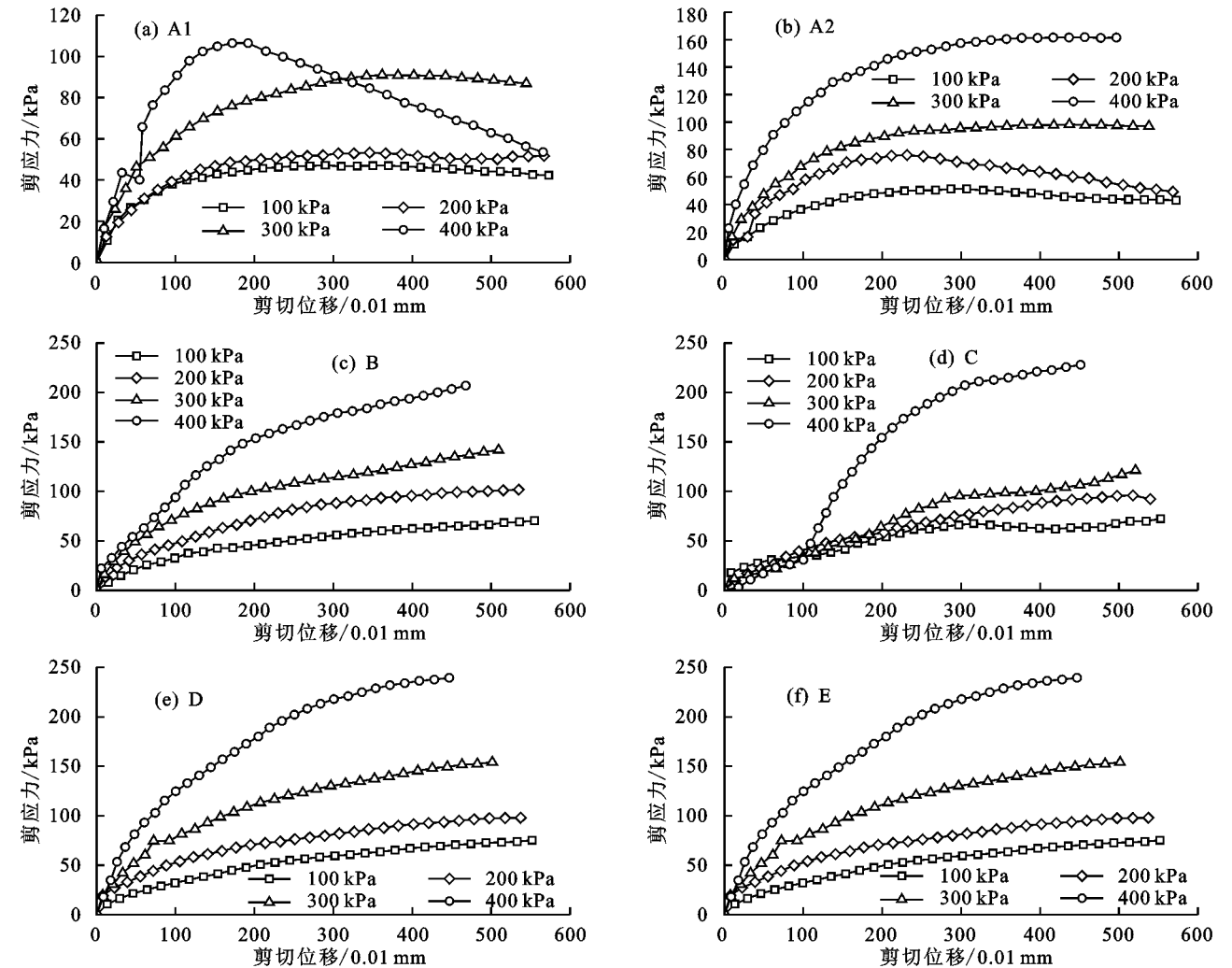


图 1 土样剪切位移—剪应力曲线

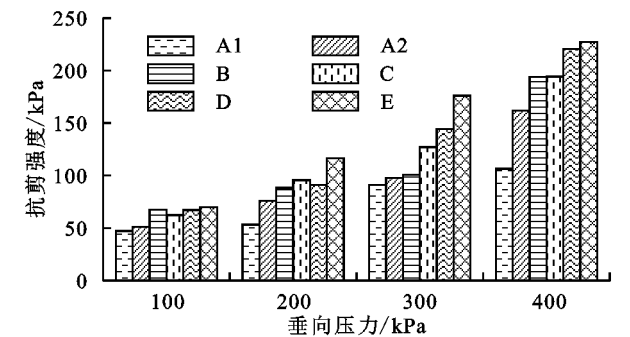


图 2 不同垂向压力时原状土样抗剪强度

从抗剪强度增长量和增长率(表 1)也能看出明显的根系加固效应,随着含根量的增加,复合体的抗剪强度增长量和增长率一直呈现增加态势。100 kPa 垂向压力时,加固效应有限,增长值和增长率偏低,含根量最多(E 组)时两者最大,分别为 20.83 kPa 和

43.32%;垂向压力为 200 kPa 时,低含根量时增长值和增长率最低,为 23.74 kPa 和 36.78%,E 组增长最明显,增长值和增长率分别达到 52.04 kPa 和 80.62%;垂向压力为 300 kPa 时,抗增长值和增长率随含根量均呈梯级增长态势,最大值 81.77 kPa 和 86.59%;垂向压力 400 kPa 时,具有与 300 kPa 时相同态势,但不同的是在低含根量时(B 组和 C 组),抗剪强度即明显提高(增长量分别为 59.88,60.11 kPa,增长率分别为 44.65% 和 44.82%),之后在含根量最多时达到最大值,分别为 93.18 kPa 和 69.48%。可知不同垂向压力下抗剪强度增长量和增长率随垂向压力的增加而不断增大,垂向压力越大,土壤颗粒在垂向压力作用下越紧密,根土界面挤压—摩擦效应越大,复合体抗剪强度增长则越明显,且复合体根系对抗剪强度增强效应显现随

着垂向压力增加逐渐提前,即高垂向压力时根系增强效应在低含根量条件时都能有很好地体现,在高含根量时增强效应更明显。

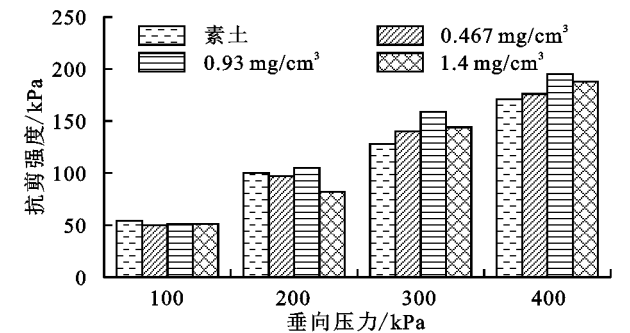


图 3 文献[23]含水量 30%时不同垂向压力下土样抗剪强度  
表 1 原状复合体抗剪强度与素土比较的增长量和增长率

| 土样 | 增长量/kPa |       |       |       | 增长率/% |       |       |       |
|----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 100     | 200   | 300   | 400   | 100   | 200   | 300   | 400   |
| A  | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| B  | 18.32   | 23.74 | 6.32  | 59.88 | 37.22 | 36.78 | 6.69  | 44.65 |
| C  | 13.06   | 31.11 | 32.78 | 60.11 | 26.54 | 48.20 | 34.71 | 44.82 |
| D  | 17.97   | 26.72 | 49.93 | 86.53 | 36.51 | 41.40 | 52.88 | 64.52 |
| E  | 20.83   | 52.04 | 81.77 | 93.18 | 43.32 | 80.62 | 86.59 | 69.48 |

3.2 抗剪强度指标特征

根据各级垂直压力下的抗剪强度和库伦定律可以计算得到不同含根量复合体的内摩擦角( $\varphi$ )和黏聚力( $c$ ), $\tau$ 和 $P$ 两者之间关系见表 2。根据垂向压力( $P$ )与抗剪强度( $\tau$ )的线性回归关系方程计算得 $c$ 、 $\varphi$ 值,由表 2 可看出,垂向压力—抗剪强度两者线性拟合度较好,计算的 $c$ 、 $\varphi$ 值可靠。

由表 2 并结合文献[23]试验结果(表 3)可以看出,根系的含量对原状土和重塑土 $c$ 、 $\varphi$ 值影响有明显的区

别,原状复合体 $c$ 值随含根量增加分别为 14.44 kPa→14.69 kPa→13 kPa→2.5 kPa→14.7 kPa,整体趋势为随含根量先小幅增加再降低而后增加(即没有明显变化规律),在含根量较少(B 组)和最多(E 组)时, $c$ 值最大,变化最明显同时也是最小是 D 复合体(2.5 kPa),与素土(14.44 kPa)相比 $c$ 值降低 82.67%。 $\varphi$ 值随含根量增加分别为 15.82°→21.4°→23.14°→27.18°→27.99°,随着含根量的增加呈逐级递增趋势,但增加的梯度(相邻不同含根量复合体之间的差值)则逐渐降低,最大值为 E 复合体 27.99°,与素土 A(15.82°)相比 $\varphi$ 值增加 76.93%。对于重塑复合体, $c$ 值随含根量呈逐级降低趋势,为 18.5 kPa→10.5 kPa→6 kPa→-2 kPa,变化最明显是含根量为 1.4 mg/cm<sup>3</sup>的复合体(-2 kPa),与素土(18.5 kPa)相比 $c$ 值降低 110.81%, $\varphi$ 值随含根量先增加后降低,为 20.76°→22.83°→25.92°→25.31°,含根量为 0.93 mg/cm<sup>3</sup>时增长量最大,与素土的 20.76°相比 $\varphi$ 值增加 27.34%,由于最优(最佳)含根量的原因,在含根量最大(1.4 mg/cm<sup>3</sup>)时, $c$ 值为-2 kPa, $\varphi$ 值为 25.31°。含根量对原状土和重塑土 $c$ 、 $\varphi$ 值影响整体趋势基本一致,但影响幅度不尽相同。

表 2 不同含根量情况下土样 $c$ 、 $\varphi$ 值

| 土样 | 垂向压力与抗剪强度关系                         | $R^2$  | $c$ /kPa | $\varphi$ /(°) |
|----|-------------------------------------|--------|----------|----------------|
| A  | $\tau = P \tan 15.89^\circ + 14.44$ | 0.9644 | 14.44    | 15.89          |
| B  | $\tau = P \tan 21.40^\circ + 14.69$ | 0.8178 | 14.69    | 21.40          |
| C  | $\tau = P \tan 23.14^\circ + 13.00$ | 0.9629 | 13.00    | 23.14          |
| D  | $\tau = P \tan 27.18^\circ + 2.50$  | 0.9507 | 2.50     | 27.18          |
| E  | $\tau = P \tan 27.99^\circ + 14.70$ | 0.9980 | 14.70    | 27.99          |

表 3 不同含根量各土样 $c$ 、 $\varphi$ 值及与素土比较的增长率

| 项目                  | 不同含根量原状土样 |       |       |        |       | 不同含根量重塑土/(mg·cm <sup>-3</sup> ) |        |        |         |
|---------------------|-----------|-------|-------|--------|-------|---------------------------------|--------|--------|---------|
|                     | A         | B     | C     | D      | E     | 0                               | 0.467  | 0.93   | 1.40    |
| $c$ /kPa            | 14.44     | 14.69 | 13.00 | 2.50   | 14.70 | 18.50                           | 10.50  | 6.00   | -2.00   |
| $\varphi$ /(°)      | 15.89     | 21.40 | 23.14 | 27.18  | 27.99 | 20.67                           | 22.83  | 25.92  | 25.31   |
| $\Delta c$ /%       | 0         | 1.73  | -9.97 | -82.67 | 1.80  | 0                               | -43.24 | -67.57 | -110.81 |
| $\Delta \varphi$ /% | 0         | 35.27 | 46.27 | 71.81  | 76.93 | 0                               | 9.97   | 27.34  | 21.92   |

含根量对抗剪强度指标具有明显影响的原因需要从决定 $c$ 、 $\varphi$ 值的因素去分析,根据前节分析,根系对土体的加固效应明显,复合体的抗剪强度由黏聚力( $c$ )和内摩擦力( $P \tan \varphi$ )决定, $c$ 、 $\varphi$ 值是土壤抗剪强度指标,由土力学知识可知,黏聚力来源土粒之间的胶结作用和电分子吸引力,受黏粒含量和含水量等因素影响;摩擦力来源剪切面土粒间表面的粗糙摩擦和互相嵌入所产生的咬合力,受垂向应力、土密度、颗粒级配及形状等影响。受原状素土和重塑素土的粒度组成和含水率的影响,两者 $c$ 、 $\varphi$ 值有差别,这属于正

常现象,对于复合体,在低根系量时, $c$ 、 $\varphi$ 值主要由土体的自身性质决定,高含根量时,随着剪切位移的增加,特别是潜在剪切面形成后,剪应力主要由根系承担,随剪切位移继续增加,复合体具有应变硬化特征, $c$ 值相对于素土降低,而此时存在根系的复合体所受部分剪应力会转化为根系张力,该张力产生的垂向分力增大颗粒之间的嵌入咬合力,且随着根系的增加而增加,所以 $\varphi$ 值随根系含量增加而增加,而水平分力则阻止剪切的进程,间接增加土体抗剪强度,当超过最优(最佳)含根量以后,复合体的抗剪强度受复合体

中存在过量根系的影响,土粒之间的胶结作用和电分子吸引力等因素作用而产生黏聚力失去主导效应,这也是重塑土含根量  $1.4 \text{ mg/cm}^3$  时抗剪强度较前一级有所降低、且  $c$  值为  $-2 \text{ kPa}$  反常的原因。

## 4 讨论

由分析可知,复合体的抗剪强度比素土的高,根系加固土体的效应明显。随着含根量的增加,复合体的抗剪强度呈增加趋势,在复合体中存在使抗剪强度达到最大值所对应的最优(最佳)含根量,该最优(最佳)含根量受不同植被类型根系、不同根系分布特征等因素影响。复合体在受剪作用初期,该剪切力主要由颗粒胶结作用和电分子吸引力,以及粒间摩擦和咬合作用承担,根系基本不承担或承担较少;当剪切面逐渐形成后,剪切力主要由根系承担,这个时候根系加固土体的作用逐渐显现,随着剪切力和位移的增加,根系固土作用随之增强,出现应变硬化的特性,最终在剪切力作用下剪切面贯通复合体破坏。根据任柯<sup>[22]</sup>的研究结果,复合体在外荷载作用下的破坏模式分为2种:一是根土复合体整体出现剪切破坏,表现为根系被拉断,土体破坏;二是根与土的接触面出现剪切破坏,表现为根系被拔出土体。

为探究原状复合体的破坏模式以及原状内复合体根系分布的情况及其对强度的影响,将试验后的典型土样沿纵断面剖开,观察断面情况。根据断面情况发现,素土破坏模式为整体破坏,破坏时沿着上下盒交界面附近形成贯通的剪切面,但并不是完全水平,在交界面处存在有毫米尺度角砾时有绕过角砾错动的痕迹;但在复合体的破坏断面上,并没有形成明显的贯穿剪切面,也没有根系被拉断的情况,仅根系有明显变形的情况,破坏模式多为第2种<sup>[22]</sup>,即破坏时表现为根系被拔出土体,根系与旁侧土体颗粒有明显的错动变形。从原状复合体的破坏断面来看,不同组的土样剖面出露的根系数量和形态有明显差别,同组土样根系直径和数量虽有所差别,但根系总量基本相同。B组复合体 g12,复合体破坏后的断面显示断面上存在有2根垂向的根系及部分细小的侧根系,受到剪切力作用直至破坏以后2根根系已有一定角度的倾斜,倾斜方向与剪切方向相一致,表明根系在剪切过程中的加强作用,虽然 g12 含根量较少,但是 g12 高垂向力(400 kPa)时抗剪强度达到 194.0 kPa,比在相同垂向荷载下素土的抗剪强度增加 59.88 kPa,仅比 C 组 g8 的抗剪强度小 0.23 kPa,可见,含根量虽少,但是加固效果较优。D 组复合体 g14 断面显示有较多根系,其中直径近 7 mm 的主根系在土内

呈平卧状态,剪切面由其下方通过,仅见部分侧根倾斜分布, g14 抗剪强度为 116.60 kPa,相同垂向压力下素土抗剪强度为 64.56 kPa,该复合体根系有加固效应,但该效应是有限的。B 组复合体 g11 断面未见主根系分布,仅可见一些侧根和须根分布,根系分布量较少,抗剪强度为 100.75 kPa,远低于 B 组前述的复合体 g12(194.0 kPa),高于 B 组 g9 垂向压力 100 kPa 时 67.54 kPa,可能受直接剪切试验复合体尺度的影响,所以强度提高不明显,但对于不存在主根但具有团簇状众多侧根的复合体在大尺度条件下增强效果明显。E 组复合体 g16 断面上含根量较多,直径近 1 cm 的主根系约  $45^\circ$  倾斜贯穿剪切面,同时还有较多的侧根系,虽然根系倾斜分布方向与剪切错动方向一致,但在剪切力作用下,根土界面产生的摩擦滑移使得根系具有较大固土能力,抗剪强度达到最大值。D 组复合体 g17 虽有与 g12 类似的垂向贯通剪切面的根系以及部分侧根和须根系,但由于为单根根系,且垂向压力较小,根系在剪切力作用下没有明显位移,未发挥明显的固土效应,抗剪强度为 67.19 kPa,仅比素土的 49.22 kPa 高出 17.97 kPa。从断面观察和抗剪强度定量分析发现,根系在复合体内分布的级别(直径大小)、分布的形态、存在状态(根系垂直或不同程度的倾斜)、是否贯穿剪切面,以及垂向压力的大小等内因和外因对根系发挥固土效应是有影响的,根系垂向分布,贯穿剪切面且垂向压力较大(g12)时,或虽不垂直分布,但根系为主根系(直径较大)(g16),固土效应相对较优;根系垂向分布且贯穿剪切面但垂向压力小(g17),或非主根的根系直径较小且数量随机分布较少(g11)时,根系作用发挥不明显;同时还发现,如果根系在复合体中倾斜分布,方向与剪切错动方向一致也影响固土作用的发挥,倾斜角度越大,作用越小,水平分布且不位于剪切面上的根系(g14),基本没有固土作用。

本研究成果可为增强复合体抗剪强度为目的的护坡植被的选择提供基础理论依据,但是由于该试验所采取的复合体尺度较小,实际斜坡土体内众多根系所组成的复杂根系网络产生的抵抗剪切变形的能力比试验值高,所以实际增强效果还需要进一步根据群根效应开展相应研究,才能使植被选择更具有科学性。

## 5 结论

(1)整体上无根素土具有应变软化特征,而原状复合体具有应变硬化的特性,各复合体的抗剪强度均比素土的高,且抗剪强度随着含根量的增加而增加,根系固土效应明显,与重塑复合体不同,由于根系分



布的随机性或根系量较少等原因,原状复合体未出现最优(最佳)含根量。

(2)根系及其含量对抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值有明显的影响, $c$  值随含根量的增加没有明显的变化规律, $\varphi$  值则呈逐级递增趋势,产生这种趋势的原因是在剪切过程中,部分剪应力会转化为根系张力,该张力的垂向分力会增加颗粒之间的嵌入咬合能力,该能力随根系的增加而增加。

(3)典型复合体破坏断面显示根系为主根系且垂直贯通剪切面,垂向压力大时固土效应最优,无主根时且侧根直径较小,根系在复合体中倾斜分布特别是与剪切错动方向一致影响固土效应发挥。素土破坏模式为破坏面并不完全水平的整体剪切破坏,复合体则是非根系被剪断或拉断而是根系被拔出土体,根土两者界面之间产生明显相对位移的破坏模式。

#### 参考文献:

- [1] 黄承梁.习近平新时代生态文明建设思想的核心价值[J].行政管理改革,2018(2):22-27.
- [2] 蒋静,张超波,张雪彪,等.土壤水分对植物根系固土力学性能的影响综述[J].中国农学通报,2015,31(11):253-261.
- [3] 姚喜军.四种植物根系提高土体抗剪强度有效性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [4] 朱珊,邵军义.根系黄土抗剪强度的特性[J].青岛建筑工程学院学报,1997,18(1):5-9.
- [5] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.坡面岩体—基质—根系互作的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2074-2081.
- [6] Kok H, Mccool D K. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength [J]. Transactions of the ASAE,1990,33(2):501-506.
- [7] 许桐,刘昌义,胡夏嵩,等.柴达木盆地 4 种盐生植物根系力学特性及根—土复合体抗剪强度研究[J].水土保持研究,2021,28(3):101-110.
- [8] 余燧,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.
- [9] 张乔艳,唐丽霞,潘露,等.石漠化区多花木蓝和双荚决明根土复合体抗剪特性研究[J].西南林业大学学报(自

然科学版),2019,39(4):18-23.

- [10] 杨路,杜峰,秦晶晶,等.黄土区 3 种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J].水土保持研究,2022,29(1):1-7.
- [11] 张永亮.沙棘根系生物力学特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [12] 格日乐,左志严,蒙仲举,等.杨柴根系提高土体抗剪特性的研究[J].水土保持学报,2014,28(4):72-77.
- [13] 邢会文,刘静,王林和,等.柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J].摩擦学报,2010,30(1):87-91.
- [14] 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):550-556.
- [15] 牛家永,周永毅,张建经,等.基于新型拉伸装置的根—土复合体抗拉强度研究[J].西南交通大学学报,2022,57(1):191-199.
- [16] 吴美苏,周成,王林,等.根系和裂隙对土体水力和力学特性影响数值模拟[J].岩土力学,2019,40(增刊 1):519-526.
- [17] 王一冰,吴美苏,周成.组合根系加固坡土的直剪试验及数值模拟[J].岩土工程学报,2020,41(增刊 1):177-182.
- [18] 黄建坤,王学林,及金楠,等.基于渐近均匀化理论的黄土高原草本植物固土效果模拟[J].农业工程学报,2020,36(9):168-176.
- [19] 赵忠生,许万忠.云南巧家县小河镇炉房沟泥石流灾害成因及防治措施探析[J].价值工程,2013,32(4):291-292.
- [20] 高安生,郭荣芬,柴秀芬,等. $\gamma$  中尺度单体合并在昭通小河镇“2010.7.13”灾害性天气中的特征分析[J].灾害学,2011,26(2):96-101.
- [21] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [22] 任柯.草本根系固土的力学机制及对土质边坡浅表层稳定性影响的研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [23] 徐宗恒,黄丽苹,杨正辉,等.不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2019,39(5):54-59,66.
- [24] 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.
- [25] 胡敏,李为萍,史海滨,等.布根方式及根系径级对根土复合体抗剪性能的影响[J].水土保持通报,2012,32(1):42-44.