

# 不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响

徐宗恒, 黄丽苹, 杨正辉, 尹李乐

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** [目的] 探讨云南省昆明市呈贡区段家营一植被覆盖的斜坡区不同含量植被根系对山原土壤抗剪强度的增强效应, 为相关研究提供理论依据。[方法] 制备 0(无根系空白样), 0.467, 0.93, 1.4 mg/cm<sup>3</sup> 这 4 种根系含量以及 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 这 5 种含水量的根—土复合体试验样品进行抗剪强度试验。[结果] 根—土复合体中, 植被根系能提供土壤额外的抗剪能力和抵抗土体变形来增强土体的抗剪强度, 植被根系对土体抗剪强度有明显的增强效应, 但这种增强效应是有限的。根系含量在 0.93 mg/cm<sup>3</sup> 时, 根系对土体的抗剪强度增强效果最好。随着根系含量的增加, 黏聚力和内摩擦角总是呈现负相关性的关系, 在低含水量情况下, 黏聚力随根系含量增加而先降低后增加, 内摩擦角随根系含量变化则相反。当含水量低且根系含量相对较少时(当含水量 ≤ 35%, 根系含量 ≤ 0.93 mg/cm<sup>3</sup> 时), 土壤参与剪切整个过程且为被剪主体, 得到的黏聚力和内摩擦角均为正值, 符合库仑定律; 当含水量较高且根系含量较多时(当含水量 = 35%, 根系含量 = 1.4 mg/cm<sup>3</sup> 时以及当含水量 = 45%, 根系含量 ≥ 0.467 mg/cm<sup>3</sup> 时), 被剪主体为根系, 得到的黏聚力为负值, 不符合库仑定律。[结论] 库仑定律不适用于高含水量和高含量植被根系的根—土复合体抗剪强度的研究。在采用植被护坡时可用试验确定边坡土壤抗剪强度最高时的最佳含根量和含水量。

**关键词:** 山原红壤; 根—土复合体; 直剪实验; 增强效应

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2019)05-0054-06

**中图分类号:** S157.1, TU411

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.008; Xu Zongheng, Huang Liping, Yang Zhenghui, et al. Influence of different root contents on shear strength of mountain red earth[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 54-59.

## Influence of Different Root Contents on Shear Strength of Mountain Red Earth

Xu Zongheng, Huang Liping, Yang Zhenghui, Yin Lile

(Department of Tourism and Geographic Science, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of vegetation root content on the shear strength of mountain red earth acquired from vegetated slope in Chenggong district, Kunming City of Yunnan Province were analyzed in order to provide theoretical basis for relevant research. [Methods] The shear strength tests were carried out by preparing roots-soil complex samples with four levels of root content: 0 (no root samples), 0.467, 0.93, 1.4 mg/cm<sup>3</sup>, as well as five levels of soil moisture content (20%, 25%, 30%, 35%, and 40%). [Results] The vegetation roots were found to provide soil with additional shear strength and helps soil resist deformation, which can enhance its shear strength. Vegetation roots had obvious enhancement effect on the shear strength of soil, but this enhancement effect was limited. When the root content was 0.93 mg/cm<sup>3</sup>, the root system had the best enhancement effect on the shear strength of soil. With an increase in root content, the cohesion and the angle of internal friction always presented a negative correlation. In the case of low water content, the cohesion first decreased and then increased, while the angle of internal friction changed inversely with the change of root density. When the soil moisture constant and the root content was low (water content and root content less than or equal to 35% and 0.93 mg/cm<sup>3</sup> respectively), the soil participated in the whole process of shear and they were the main object to be sheared, and the calculated cohesion and internal

收稿日期: 2019-03-29

修回日期: 2019-04-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“典型斜坡非饱和带优先域及其降雨入渗机制研究”(41502340)

第一作者: 徐宗恒(1987—), 男(汉族), 云南省永胜县人, 博士, 硕士生导师, 主要从事山地环境与地质灾害研究。E-mail: xuzongheng208@163.com.

friction angle were both positive, which was consistent with Coulomb's law. When the soil moisture and root content was high (water content and root content was 35% and 1.4 mg/cm<sup>3</sup> respectively or the root content was 45% and root content was greater than or equal to 0.467 mg/cm<sup>3</sup>), the shear object was mainly the root system, and the cohesion calculated by Coulomb's law was negative, which does not conform to Coulomb's law. [Conclusion] Coulomb's law is not applicable to the study of the shear strength of the root-soil complex which has high water content and vegetation density. When using vegetation for slope protection, it is necessary to carry out experiments to determine the optimal root and water content of the slope soil to produce the highest shear strength.

**Keywords:** mountain red earth; roots-soil complex; direct shear tests; enhancement effect.

山原红壤目前多认为是在第三纪末期以来,早期高温高湿条件下经脱硅富铝化形成的大面积深厚高富铝红色风化壳,伴随着新构造运动大面积间歇性均衡抬升隆起后发育形成的<sup>[1]</sup>。山原红壤是在云贵高原广泛分布的一种地带性古土壤,近年来,由于受自然因素和人类活动的影响,山原红壤受侵蚀严重,导致局部植被逆向演替,甚至难以生长植被。对于此严重的生态环境问题,植树种草和植被恢复是防治土壤侵蚀及提高浅层坡体稳定性比较常用的方法,这种方法利用植被根系对土壤的加固作用,以及加强土壤水分下渗等作用来防治边坡土壤侵蚀,而根系对土壤的加固作用主要是通过增强土体的抗剪强度来实现的。

众多学者针对植被根系对增强土壤强度方面作了大量的研究,已经取得了一些建设性的成果,在这个领域提供了大量的理论基础和试验研究参考。赵记领等<sup>[2]</sup>采用自行设计加工的大型根土复合体直剪仪对不同根径、根数的根土复合体进行直剪试验。朱海丽等<sup>[3]</sup>对青藏高原黄土区柠条锦鸡儿、白刺、霸王、四翅滨藜 4 种灌木进行室内单根拉伸、剪切试验。曹云生等<sup>[4]</sup>对油松根系进行了拉伸、拔出和根土复合体三轴试验。湛芸等<sup>[5]</sup>研究了三峡库区嘉陵江岸的野生狗牙根根系对土壤理化性质和抗剪强度影响并分析了其固坡抗蚀效应。研究结果均表明:根系对土壤具有强化作用,增强了土体的抗剪强度,根系不同分布位置<sup>[2,6]</sup>、不同根系直径<sup>[7-8]</sup>、不同根系形态<sup>[9]</sup>以及不同类型植被根系<sup>[10]</sup>对根—土复合体强度增强效应具有明显影响,根系含量越大则抗剪强度增量越大,甚至土壤抗剪强度和含根量之间呈指数函数关系<sup>[11]</sup>。为了研究不同含量植被根系对土壤抗剪强度的增强效应以及探究根系对土壤的抗剪强度增强效应的峰值,本文以山原红壤根—土复合体为研究对象,制备了不同含量根系的复合体进行直接剪切试验,根据试验结果分析并深入研究了根系固土效应同时讨论了在不同条件下根—土复合体不同的受剪试验过程和机理,以期对相关研究提供理论依据。

## 1 取样及试验方法

### 1.1 取样方法

取样位置位于云南省昆明市呈贡区段家营一植被覆盖的斜坡区,该斜坡区覆盖层土壤类型为山原红壤,取样点地理位置东经 102°52'31",北纬 24°51'29",海拔 2 010 m。在该斜坡区选定 1 m×1 m 取样区域,清除表面植被,选择无过多植物根系穿插的采样位置,从地表向下采集 0—100 cm 深度范围内的山原红壤土样放入封闭袋内带回实验室。实验室条件下,去除土壤中的树根、石砾等较大杂质以后,将土样摊成薄层,经 105 ℃ 烘干除去吸湿水,然后通过孔径为 2 mm 的筛分离处理,提取 <2 mm 的土样以备用。

根系选择该区域分布较为广泛的鱼骨松根系,该根系对生存环境适应性强,对土壤类型没有太高要求,各种土层深厚、疏松、湿润的酸性至微酸性的沙壤土或壤土都能生存。为了保证试验所用根系的质量和数量,对某一生长方向的根系进行半挖掘法,在挖掘过程中应尽量避免对根系的机械损伤以保证完整性。对挖掘出的根系,选取生长正常、茎秆通直均匀、径级为 0.5 mm 左右的鲜活根,去除旁系细须根后清洗并在自然状态下风干表面水分,然后密封袋密封,在实验室冰箱 4 ℃ 环境中冷藏保存以备用<sup>[4]</sup>。

### 1.2 试验方法

本试验方法严格按照国家规范《土工实验方法标准》(GB/T50123-1999)<sup>[12]</sup>进行,制备根—土复合体土样过程主要包括孔径 2 mm 的筛分土烘土,根系清理,含水量控制,压样,削土等。在根—土复合体中,垂直人工插入一定量的根系(每根根系的重量控制在 0.007 g 左右,直径约 0.5 mm),制备 4 种根系含量的试验样品,即根系含量为 0 mg/cm<sup>3</sup>(无根系空白样,以下称之为素土),0.467,0.93,1.4 mg/cm<sup>3</sup>,同时为了考虑含水量对强度的影响,以 5% 为变化梯度,制备不同含水量 20%,25%,30%,35%,40% 5 种条件下的试验样品,每级根系含量每种含水量各制备 4 个土样,共计 80 个复合体土样。

本次采用剪切试验的仪器为 ZJ 型直剪仪,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绘制散点图,并根据库仑定律计算相应的抗剪强度以及内摩擦角和黏聚力。

## 2 结果与分析

对比素土和含有鱼骨松根系的土样的剪应力—剪切位移变化特征如图 1 所示。限于篇幅此处仅以 30% 含水量土样的情况为例说明。

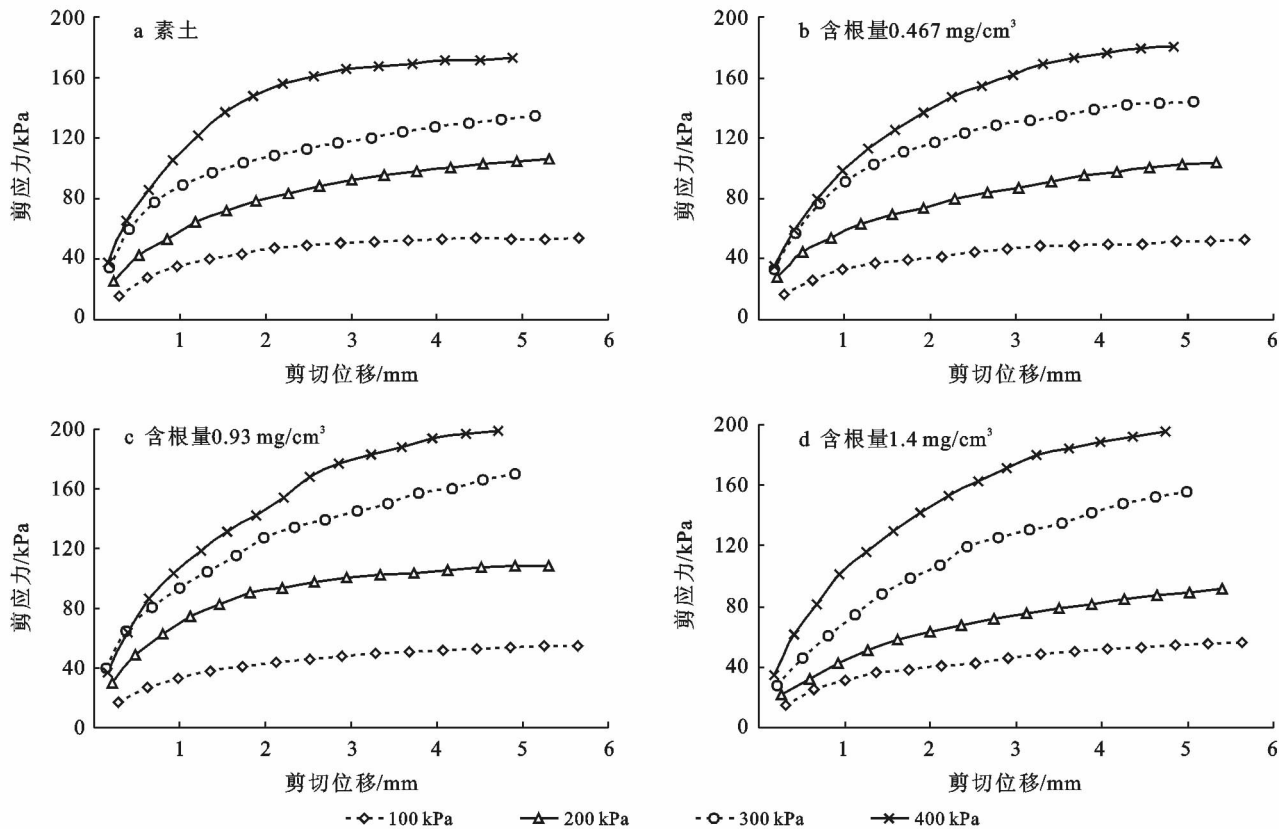


图 1 30% 含水量时不同根系含量复合体的剪切位移—剪应力关系

如图 1 所示,随着剪切位移的增加,剪应力值随之增加,在剪切位移 3 mm 之前,增加明显,在这之后,逐渐趋于平稳,但 4 种根系含量条件下根—土复合体的强度峰值均未出现,剪应力随应变增加而逐渐趋于某一稳定值,具有应变硬化的特征,按照规定则取剪切位移达到 4 mm 处对应的剪应力为抗剪强度。以 30% 含水量土样为例分析,100 kPa 垂直压力下,素土的抗剪强度为 53.751 kPa,当根系量达到 1.4 mg/cm<sup>3</sup> 时抗剪强度增加到 55.932 kPa,变化幅度不大。200 kPa 垂直压力下,素土的抗剪强度 100 kPa,含根量 1.4 mg/cm<sup>3</sup> 时为 82 kPa,其值有所下降。300 kPa 垂直压力下,由素土的抗剪强度 128 kPa 增加至 1.4 mg/cm<sup>3</sup> 时的 144 kPa;在 400 kPa 下,抗剪强由素土的 173.405 kPa 增加到 1.4 mg/cm<sup>3</sup> 根系含量时的 195.685 kPa,增幅达到 12.85%。在剪切过程中,素土和含有根系的土样均出现了明显的剪切位移,但随

着剪切位移增加,根系逐渐发挥作用之后,在同一垂直压强下和相同剪应力下,素土土样产生的剪切位移明显大于含有根系的土样产生的剪切位移。说明在土样受剪后期根系提供一定的抗剪能力,抵抗土体变形,以此增强了土体的抗剪强度。

从剪应力—剪切位移变化还可以看出,根系对土体的抗剪强度增强效应不是在剪切一开始就发挥作用的,同一垂直压力下,所有含根系土样和素土的剪切位移和剪应力在剪切一开始时几乎无差别,在低剪切位移情况下,剪应力的起点相差不大以及在剪切前期增加值均变化不大。随着剪切过程的进行,根系含量越高的土样,根系发挥作用的时间越靠前,得到的剪切位移对应的剪应力也越大。

根据剪应力—剪切位移图计算得到各土样的抗剪强度,并绘制相同含水量条件下不同含量根系土样的抗剪强度对比结果(如图 2 所示)。

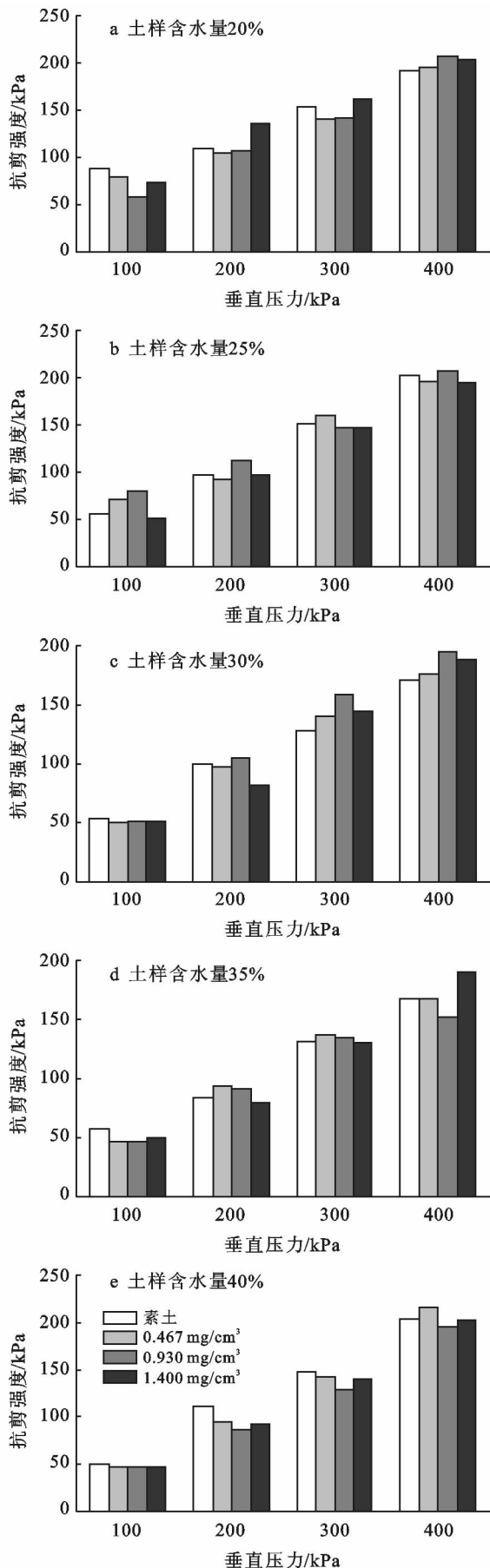


图 2 相同含水量条件下不同含量根系土样的抗剪强度

当含水量最低为 20% 时(图 2a), 100 kPa 垂直压力下, 抗剪强度变化出现反常, 随根系含量增加而降低, 由 88 kPa 降为 80, 58, 74 kPa, 出现这种情况可能的原因是在低垂直压力的作用下, 根系与土壤颗粒之间接触不致密, 在剪力作用下, 在剪切后期根系在剪切面位置产生滑移现象, 致使根—土复合体的抗剪强度得不到提升, 其他含水量条件下也存在类似的情况。当含水量达到 40%, 同一压力下, 鱼骨松根系含量由 0 增加到 0.467 mg/cm<sup>3</sup> 时, 土样的剪应力逐渐增大, 根系含量超过 0.93 mg/cm<sup>3</sup> 时抗剪强度出现下降情况, 根系含量达到 1.4 mg/cm<sup>3</sup> 时又相对回升, 但 0.93 mg/cm<sup>3</sup> 和 1.4 mg/cm<sup>3</sup> 两者情况下抗剪强度差距不大(400 kPa 垂直压力下, 5 种含水量条件下 0.93 mg/cm<sup>3</sup> 根系含量时抗剪强度分别为 207, 208, 195, 152, 196 kPa), 其他情况基本不及 0.930 mg/cm<sup>3</sup> 根系时抗剪强度水平(根系含量在 0.93 mg/cm<sup>3</sup> 时, 根系对土体的抗剪强度增强效果最好)。

根系含量 > 0.93 mg/cm<sup>3</sup> 以后, 特别是当垂向压力较小时, 土体内部颗粒未受较大垂向压力作用而出现挤压效应, 孔隙相对较大, 加入的过多根系在剪切过程中基本承担了全部剪切应力, 甚至有可能出现剪切面蠕动滑移现象, 此时剪切应力随剪应变增加而变化较小, 剪切应力—剪应变曲线较为平缓(图 1d 垂向压力为 100 kPa 时的曲线), 这也是根系含量参加过多以后抗剪强度反而下降的原因。因此, 用植被护坡技术来治理水土流失, 整治边坡冲刷严重的斜坡时, 在树种的选择上, 应当选择具有一定量侧根系且根系柔韧的树种并辅以草本植物, 必要时可采用试验确定边坡土壤抗剪强度最高时的最佳含根量, 能保证增强边坡的抗冲蚀性, 提高边坡土壤涵养水源的能力。

统计各级垂直压力下的抗剪强度, 并根据库仑定律( $\tau = c + P \tan \varphi$ , 式中  $\tau$  为抗剪强度/kPa,  $P$  为垂直压力/kPa,  $\varphi$  为内摩擦角/°,  $c$  为黏聚力/kPa)可以计算得到相同含水量条件下不同根系含量根—土复合体的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  (计算结果见图 3)。

由图 3 可知, 含水量 20% 时, 土样的黏聚力随根系含量增加而先降低后增加, 其值为 47, 35, 8, 40.50 kPa, 内摩擦角随根系含量变化则相反, 其值为 19.54°, 20.86°, 25.73° 和 22.44°, 两者呈负相关性, 且两者均为正值。含水量 25% 时, 土样的黏聚力随根系含量增加而先增加后降低, 其值为 3.75, 19.25, 32.50, 2.0 kPa, 内摩擦角随根系含量变化则相反, 其值为 29.20°, 23.89°, 22.68° 和 25.73°, 两者同样呈负相关性, 且两者也均为正值。

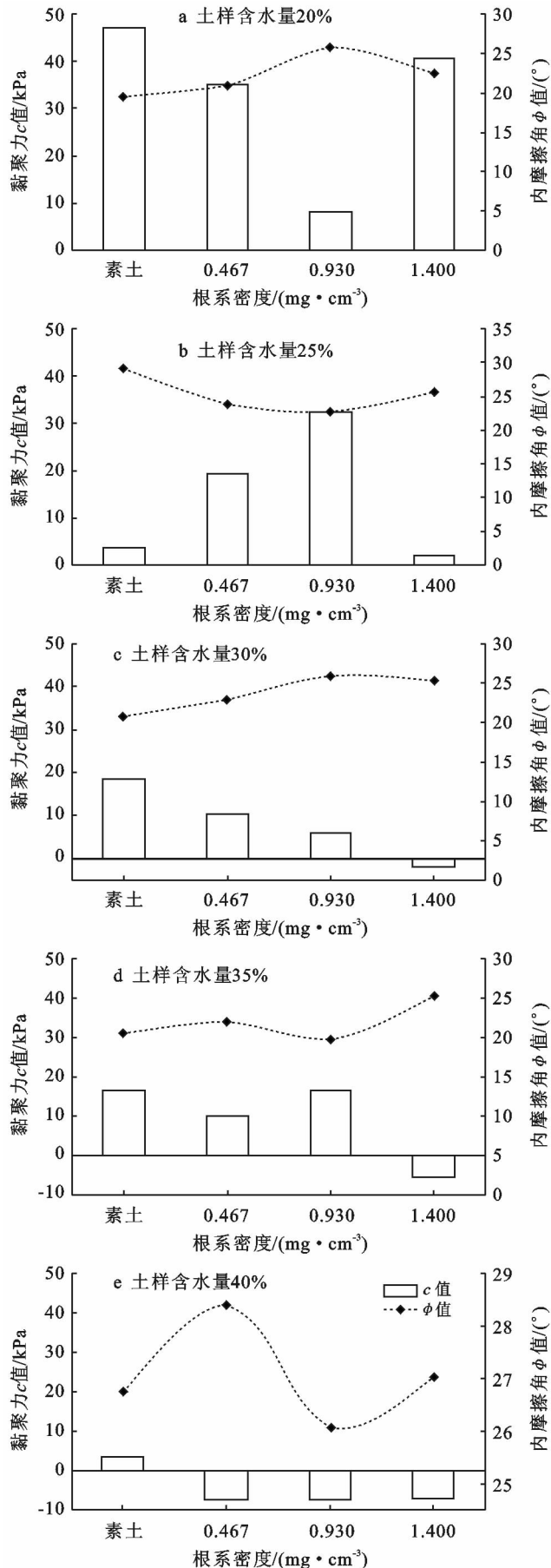


图 3 相同含水量条件下内摩擦角和黏聚力随根系含量变化

随着含水量增加,土样的黏聚力和内摩擦角随着根系增加显得无规律可循,但黏聚力和内摩擦角大致仍呈负相关性。在高含水量( $>30\%$ )和高含量根系条件下,黏聚力值开始出现异常,在 $30\%$ 和 $35\%$ 含水量下,根系含量达最大值 $1.4\text{ mg/cm}^3$ 时,黏聚力为负值,其值分别为 $-2.0\text{ kPa}$ 和 $-5.5\text{ kPa}$ 。在含水量为 $40\%$ 时,含有植物根系的土样黏聚力全为负值。从含水量角度分析,当未加根系时,含水量从 $20\%$ 增加至 $40\%$ ,黏聚力分别为 $47, 3.75, 10.85, 16.5, 3.5\text{ kPa}$ ,内摩擦角分别为 $19.54^\circ, 29.20^\circ, 20.70^\circ, 20.56^\circ, 26.75^\circ$ 。当根系含量为 $0.467\text{ mg/cm}^3$ 时,随含水量增加,黏聚力分别为 $35, 19.25, 10.50, 10, -7.5\text{ kPa}$ ,内摩擦角分别为 $20.86^\circ, 23.89^\circ, 22.83^\circ, 21.99^\circ, 28.40^\circ$ 。当根系含量为 $0.93\text{ mg/cm}^3$ 时,黏聚力分别为 $8, 32.50, 6, 16.5, -7.5\text{ kPa}$ ,内摩擦角分别为 $25.73^\circ, 22.68^\circ, 25.92^\circ, 19.75^\circ, 26.06^\circ$ 。分析数据可知,对于没有根系参与剪切的土样,随含水量的增加,黏聚力先降低后增加,内摩擦角先增加后降低,当加入根系相对少时,黏聚力随含水量逐渐降低,内摩擦角则逐渐增大,当加入根系增多以后,黏聚力和内摩擦角的变化均无规律可循。

由上可以分析知道,在土壤剪切过程中,随着根系含量的增加,黏聚力和内摩擦角是此消彼长的关系,当加入根系一定时,含水量对黏聚力和内摩擦角影响显著。由土力学理论分析可知,黏聚力和內摩擦角是土壤抗剪强度指标,黏聚力来源土粒之间的胶结作用和电分子吸引力等因素,受黏粒含量、含水量影响;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。本文所采用的土样属重塑土,由于去除了 $d \geq 2\text{ mm}$ 的颗粒,所以土样细粒颗粒含量( $d \leq 0.075\text{ mm}$ )较多,比表面积较大,随着含水量的增加,土粒表面扩散层弱结合水薄膜增厚,距离增大,会导致黏聚力的减小;但含水量增加会增强团粒之间的咬合作用,对内摩擦角的提高是有利的。对于存在较多根系的土样,抗剪强度则不完全由上述因素决定,在剪切开始时,短暂时间内剪应力—剪切位移由黏聚力和摩擦力决定,但当剪切面形成后,剪应力转由根系主要承担,土粒间的胶结和电分子吸引力以及颗粒间的咬合和摩擦力则失去作用,剪应力—剪切位移关系由植被根系决定。综上,根系含量比较低的情况下,剪切过程中被剪切的主体是土壤,鱼骨松根系的影响不明显,所以土样的黏聚力值均正常(剪切过程符合库仑定律)。当含水量增大到一定程度后,土壤几乎呈流塑状态( $40\%$ 含水量土样最为明显),随着根系含

量的不断增大,被剪切的主要对象不是土壤,而是鱼骨松根系,所以根据库仑定律计算出的土壤黏聚力值出现了负值,这是不符合经典土力学理论的,因此,库仑定律不适用于高含水量和高含量植被根系的根—土复合体。

### 3 讨论

根系含量和含水量对根—土复合体的抗剪强度均有较强的影响,但是土样在受剪切过程中,不同的含水量和根系含量条件下,复合体剪切过程有本质上的区别。当含水量较低根系含量较少时(以本文20%含水量和 $0.467\text{ mg/cm}^3$ 根系含量为例),受到低水平剪切应力时,根—土复合体基本处于弹性工作阶段,剪应力均由土体颗粒承担,随着剪切应力增加,剪切位移逐渐增大,剪切面形成,土壤颗粒之间发生错动,加入的根系开始进入工作状态,剪应力由土壤承担部分逐渐减小,而根系承担部分逐渐增大,土壤逐渐退出工作,根系将产生较大的变形,加之土壤含水量低,将会在上盒内根系右侧和下盒内根系左侧产生脱空现象<sup>[2]</sup>。最终,随着剪切应力增加,根系被剪断或者折断,根系承担应力不再增加,土壤承担的剪力增加导致剪切面彻底贯通,整体性遭到破坏,在整个过程中,土壤都将参与剪切过程且为被剪主体,计算得到的黏聚力和内摩擦角均为正值,符合库仑定律。

当含水量较高(以40%为例)而土柱内不含根系时,垂直压力为100,200,300,400 kPa 所得土样抗剪强度分别为50,111,148,204 kPa,计算的黏聚力和内摩擦角分别为3.50 kPa 和 $26.75^\circ$ ,均处于较低值。在该含水量条件下,当加入根系较多时(以 $1.4\text{ mg/cm}^3$ 为例),当根—土复合体受到剪应力作用,随着剪应力逐渐增加,在初期经历短暂土壤颗粒受剪以后,绝大部分的剪应力立即由加入的根系承担,根系的抗剪能力相对土壤来说要大得多,所以在随后的剪切过程中,土壤退出工作,根系基本承担了全部剪切应力,同时,在上盒内和下盒内根系两侧也不会产生脱空现象,因为当含水量增大到本次试验最高值时,土壤几乎呈流塑状态,抗剪强度较低,最终,根系被剪断或者折断,复合体整体性遭到破坏,在整个受剪过程中,被剪主体主要为根系,由库仑定律计算出来的黏聚力为负值,有违土力学理论,所以不符合库仑定律。换句话说,库仑定律不适用于高含水量和高含量植被根系的根—土复合体抗剪强度的研究。

### 4 结论

本文以当前云贵高原广泛分布的地带性古土

壤—山原红壤侵蚀较为严重,植被逆向演替,生态环境问题突出为研究背景,选取云南省昆明市呈贡区段家营一植被覆盖的斜坡区山原红壤为研究对象,基于采取植树种草和植被恢复来防治土壤侵蚀实际利用植被根系对土壤的加固作用的认识为基础,通过制备不同根系含量的根—土复合体进行直接剪切试验来研究不同含量植被根系对土壤抗剪强度的增强效应。主要取得以下结论。

(1) 根—土复合体中,植被根系提供给土体额外的抗剪能力,抵抗土体变形,来增强土体的抗剪强度,植被根系对土体抗剪强度有明显的增强效应,但这种增强效应是有限的。

(2) 在低含水量情况下,黏聚力随根系含量增加而先降低后增加,内摩擦角随根系含量变化则相反;随着含水量增加,土样的黏聚力和内摩擦角变化无明显规律,但随着根系含量的增加,黏聚力和内摩擦角总是呈现负相关性的关系。当根系含量不变时,含水量对黏聚力和内摩擦角也有显著影响。根系对土壤的加固作用主要是由黏聚力还是内摩擦角或者是两者共同作用决定的还需要进一步探讨。

(3) 当含水量较低根系含量较少时,土壤都将参与剪切过程且为被剪主体,计算得到的黏聚力和内摩擦角均为正值,符合库仑定律。当含水量较高且根系含量较多时,被剪主体主要为根系,由库仑定律计算出来的黏聚力为负值,有违土力学理论。库仑定律不适用于高含水量和高含量植被根系的根—土复合体抗剪强度的研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2010.
- [2] 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(S1):3663-3669.
- [3] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3445-3452.
- [4] 曹云生,陈丽华,盖小刚,等.油松根系的固土力学机制[J].水土保持通报,2014,34(5):6-10,14.
- [5] 谌芸,祝亚军,何丙辉.三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究[J].水土保持学报,2010,24(6):42-45.
- [6] 李建兴,何丙辉,谌芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
- [7] 魏华炜,罗海波,张玉环.狗牙根根系分布特征及其抗拉强度试验研究[J].水土保持通报,2011,31(4):185-189.

- spatial variation and controls of soil respiration in different primary succession stages on glacier forehead in Gongga mountain, China[J]. *PLoS One*, 2012, 7(8): e42354. DOI:10.1371/journal.pone.0042354.
- [7] Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest[J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(18):1263-1270.
- [8] Davidson E C A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [9] 王凤玉, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 水热因子对退化草原羊草恢复演替群落土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(5):644-649.
- [10] Yan M, Zhang X, Zhou G, et al. Temporal and spatial variation in soil respiration of poplar plantations at different developmental stages in Xinjiang, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(1):51-57.
- [11] Ceccon C, Panzacchi P, Scandellari F, et al. Spatial and temporal effects of soil temperature and moisture and the relation to fine root density on root and soil respiration in a mature apple orchard[J]. *Plant and Soil*, 2011, 342(1/2):195-206.
- [12] Lee M S, Mo Wenhong, Koizumi H. Soil respiration of forest ecosystems in Japan and global implications [J]. *Ecological Research*, 2006, 21(6):828-839.
- [13] Khomik M, Arain M A, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/2/3/4):244-256.
- [14] Gulledge J, Schimel J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska[J]. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 269-282.
- [15] Parker L W, Miller J, Steinberger Y, et al. Soil respiration in a chihuahuan desert rangeland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15(3):303-309.
- [16] Dörr H, Münnich K O. Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone[J]. *Tellus B*, 1987, 39B(1/2):114-121.
- [17] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2):155-165.
- [18] Luo Yiqi, Wan Shiqiang, Hui Dafeng, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856):622-625.
- [19] 李泽, 郭胜利, 张芳, 等. 退耕还果对黄土高原沟壑区坡地土壤和植被碳、氮储量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4):919-924.
- [20] 张芳, 邹俊亮, 李泽, 等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2011, 32(11):3174-3180.
- [21] 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J]. *环境科学*, 2013, 34(3):1026-1033.
- [22] 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 等. 苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(5): 1915-1921.
- [23] Wilson H M, Al-Kaisi M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO<sub>2</sub> emissions in central Iowa[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(3):264-270.
- [24] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 23(5):972-978.
- [25] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri[J]. *Ecology*, 1971, 52(5): 912-915.

(上接第 59 页)

- [8] 夏振尧, 刘琦, 许文年, 等. 多花木蓝根系与土体界面阻碍特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1):128-134.
- [9] 程磊, 姚磊华, 张生旭, 等. 根系形态对土体强度影响的试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(1):40-49.
- [10] 杨永红, 王成华, 刘淑珍, 等. 不同植被类型根系提高浅层滑坡土体抗剪强度的试验研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2):233-235.
- [11] 张兴玲, 胡夏嵩. 青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 185-188.
- [12] 中华人民共和国水利部: 中华人民共和国国家标准: 土工实验方法标准 GB/T50123-1999 [M]. 北京: 中国计划出版社, 1999.