

重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究

张晓明¹, 王玉杰^{1*}, 夏一平², 吴云², 陈林²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 重庆缙云山国家级自然保护区管理局, 重庆 400700)

摘要: 为了从土壤力学方面探索防治水土流失的途径与措施, 该文采用直剪仪对重庆缙云山 5 种典型植被的原状土和重塑土抗剪强度进行试验测定。通过比较相同植被同干密度、同含水率的原状土与重塑土在同一垂直荷载下的剪切差异, 分析了根(极细根)在土壤-根系复合体(原状土)中的作用。研究结果表明: 原状土剪切位移小于重塑土; 在相同垂直荷载作用下, 同一植被原状土的抗剪强度大于与其同干密度、同含水率的重塑土。原状土的剪切破坏近似于塑性破坏, 而重塑土则属于弹性破坏; 原状土的抗剪强度与含根量呈正相关, 并以此建立关于原状土的抗剪强度回归模型。

关键词: 含根量; 抗剪强度; 剪切位移; 原状土; 重塑土

中图分类号: S152.4; S157

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)11-0006-04

张晓明, 王玉杰, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 6-9.

Zhang Xiaoming, Wang Yujie, Xia Yiping, et al. Shear strengths of undisturbed and remolded soils of typical vegetations in Jinyun Mountain of Chongqing City[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 6-9. (in Chinese with English abstract)

0 引言

从土壤力学上看, 土壤水蚀是雨滴对土粒的溅击剪切作用和径流对土粒的冲刷剪切作用的综合过程^[1], 因而土壤的抗剪强度是区域水土流失评价中反映土壤力学特性的重要指标之一。

土壤根系可以提高土壤的抗侵蚀能力, 张祖荣^[2]认为由于须根的穿插和缠结作用, 促进了土粒的团聚, 从而增强了土壤抗分散、悬浮的能力。王库^[3]通过植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响得出: 直径小于 1 mm 的根系在提高土壤水力学效应方面的贡献最大。陈士银的研究^[4]也证明了这一点。对于同一地区、同类土壤来说, 相同含水率和干密度的原状土与重塑土最主要的区别就是结构差异, 原状土中有植物根系, 尤其是 < 1 mm 的极细根, 通过对土壤的挤压和缠绕, 可以提高土壤团粒数量^[5], 进而具有改善土壤结构稳定性、提高土壤入渗及增强土壤抗冲性的作用^[6]。

在实际生产实践中, 通过原状土剪切试验求得其抗剪强度既费时, 又不便。本文通过比较同一植被、同干密度、同含水率原状土与重塑土在相同垂直荷载下的剪切差异, 分析根系(极细根)对提高原状土抗剪强度的机理, 并籍此通过较易得到的重塑土抗剪强度, 含根量建立方程求出同含水率、同干密度的原状土抗剪强度, 为防治水土流失和利用植物根系提高斜坡稳定性提供了科学依据。

1 材料与方法

研究区位于重庆市北碚区境内, 以嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区为研究基地, 地理坐标是东经 106°22', 北纬 29°45'。研究区最高处海拔 951.5 m, 相对高差 600 m。缙云山的土壤以酸性(pH 值 4.0~4.5)黄壤及水稻土为主, 水平地带为典型的中亚热带常绿阔叶林生物气候带, 年均气温 13.6℃, 年平均降水量 1611.8 mm, 年平均蒸发量 777.1 mm^[7]。

选取该自然保护区的 5 种主要典型植被: 混交林、阔叶林、楠竹林、灌木林和农耕地(依次编号 1~5 号), 进行土壤(原状土和重塑土)抗剪强度研究。

通过挖土壤剖面(A、B)确定土壤剖面特征, 根据土壤剖面特征取土样, 共有 10 个土样。用 61.8 mm×20 mm 环刀每层取 4 份原状土, 称根鲜重^[8], 并计算含根量^[9]。

$$m_r = R/60 \text{ cm}^3 \quad (1)$$

式中 m_r ——原状土的含根量, g/60 cm³; R ——根鲜重, g。

使用 SDJ-1 型三速电动等应变直剪仪进行快剪试验, 作出抗剪强度与垂直荷载(100、200、300、400 kPa)的关系图, 求得黏聚力 C 和内摩擦角^[10]。环刀法测定土壤容重及天然密度, 烘箱法测定土壤天然含水率。

取回土样经风干、研碎, 除去其中的根、大石砾等, 按照试验测得原状土的含水率和干密度配制成与原状土同含水率、同密度的重塑土, 进行快剪试验, 操作同原状土。为简明表示土样结果, 每种土样按典型植被头一个字加上土壤层次加上垂直荷载命名, 重塑土在层次名右上方记“'”, 如混交林 A 层原状土在垂直荷载 100 kPa 作用下的土样命名为: 混 A 100 kPa; 若是重塑土则记为混 A'100 kPa。

对原状土剪切后土中的根, 用游标卡尺测量其直

收稿日期: 2005-11-08 修订日期: 2006-07-03

基金项目: 国家“十五”科技攻关课题(2001BA510 B02-01)

作者简介: 张晓明(1980-), 男, 主要研究方向为森林水文。北京林业大学水土保持学院, 100083。Email: dancmark@163.com

*通讯作者: 王玉杰(1960-), 男, 教授, 主要研究方向为土壤侵蚀和森林水文学。北京林业大学水土保持学院, 100083

径,并依据直径分为极细根(< 1 mm);细根(1~ 2 mm);中根(2~ 5 mm);粗根(> 5 mm)^[11]。本次剪切试验中的根绝大多数都属于极细根,又称毛根。根据文献^[12]制作简易极细根拉力测定装置,该装置测定范围为 0.25~ 10 N。

2 结果与分析

2.1 根系力学特性

试验结果表明,极细根的抗拉强度随根截面面积的增加而提高,其抗拉力的计算方法如下^[13]

$$F_r = A_r \times f_r \tag{2}$$

式中 F_r ——极细根的抗拉力,N; A_r ——极细根的截面面积,mm²; f_r ——极细根的抗拉强度,kPa。

根据试验结果得出 5 种典型植被的平均抗拉强度依次为:混交林 f_{r1} = 7195 kPa;阔叶林 f_{r2} = 8429 kPa;楠竹林 f_{r3} = 7925 kPa;灌木林 f_{r4} = 7086 kPa;农耕地 f_{r5} = 7722 kPa。取上述 5 种典型植被的平均值作为极细根的抗拉强度 f_r = 7671 kPa。

2.2 原状土与重塑土剪切比较

1) 原状土与重塑土在剪切中的性状差异

由于此次试验是相同含水率和干密度的原状土和重塑土的快剪试验,且原状土骨架紧密,根系缠绕,其剪切性状类似于不排水剪,即在剪切的过程中,土样不排水,体积固定不变,但剪切要引起体积变化是土的基本特性^[14]。在剪切过程中,土逐渐摆脱根系的缠绕挤压,根系也随之拉长,土样有膨胀的趋势,为了抵消这种趋势,土体中产生负值孔隙水压力。而负值孔隙水压力可增加土骨架的有效应力,使土样承受剪应力的能力提

高,但在较大的垂直荷载作用下,随着土骨架及根系组成的紧密结构被彻底破坏,土样被彻底剪断,表现在剪应力- 剪切位移关系曲线图上就是曲线几乎是呈直线上升直至破坏;之后的曲线几乎平行于水平轴或有所下降,即存在一个峰值。见图 1a、1b(其他土样同)。

而重塑土尽管与原状土有着相同的含水率和干密度,但由于没有根系作用和紧密的土骨架,其剪切性状更类似于排水剪,在剪切的过程中,土样排水,处于剪缩状态,即体积缩小,密度不断增加,剪应力也不断增加,表现在剪应力- 剪切位移关系曲线图上就是整个曲线光滑,随着剪切位移的增加,剪应力也一直在增加。比较图 1a、1b 可知,原状土的剪切近似于塑性破坏,而重塑土则属于弹性破坏。

由表 1 知,除了阔叶林 A 层在 400 kPa 外,其余在相同垂直荷载下,原状土的剪切位移均小于重塑土。

表 1 相同垂直荷载作用下原状土与重塑土剪切位移比较
Table 1 Shear displacement comparison between undisturbed and remolded soils at the same vertical loads

土样 垂直荷载/kPa (原状土/重塑土)	剪切位移/mm(原状土/重塑土)			
	100	200	300	400
混 A	3.93/6.00	4.06/6.10	4.00/6.01	4.06/5.97
混 B	3.99/4.10	3.31/4.72	3.98/5.97	3.80/6.00
阔 A	4.06/5.42	3.98/5.19	4.09/4.92	4.04/3.81
阔 B	3.81/3.73	3.85/4.28	4.01/4.81	3.96/4.09
竹 A	3.52/6.09	4.00/6.09	3.94/5.84	4.01/5.24
竹 B	3.97/6.37	3.33/4.94	4.03/4.19	3.86/5.04
灌 A	4.00/6.22	3.92/4.30	2.89/5.41	2.00/4.70
灌 B	3.98/6.04	3.97/5.92	4.05/6.10	3.91/5.97
农 A	3.94/5.30	4.09/4.66	3.98/5.25	3.94/5.37
农 B	3.23/4.14	4.09/5.57	4.06/5.15	4.06/6.03

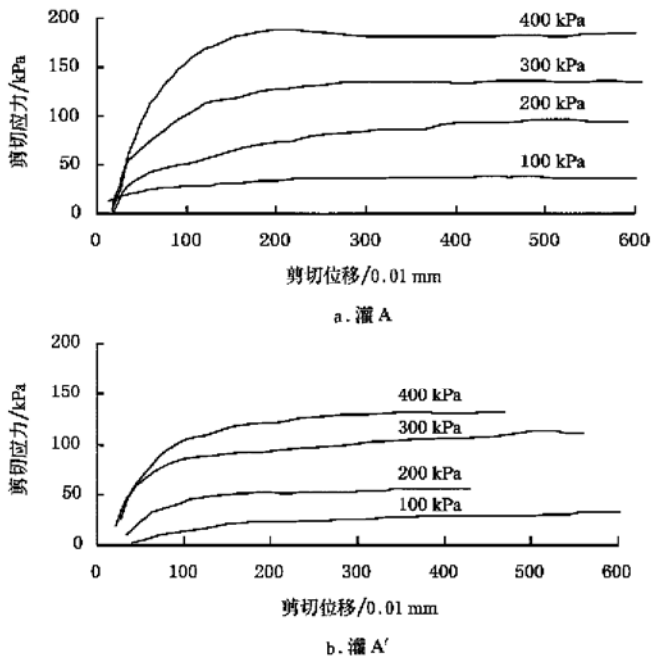


图 1 灌木材剪应力与剪切位移关系曲线
Fig. 1 Relationships between shear stress and shear displacement of shrub forest

2) 原状土与重塑土抗剪强度比较

原状土由于存在根系的缠绕挤压作用和紧密的土骨架,理论上具有较大的抗剪强度;而重塑土由于在垂直荷载作用下,体积迅速较小,密度增大,土粒之间越来越紧密,抗剪强度也会增大(图 2,图 3)。

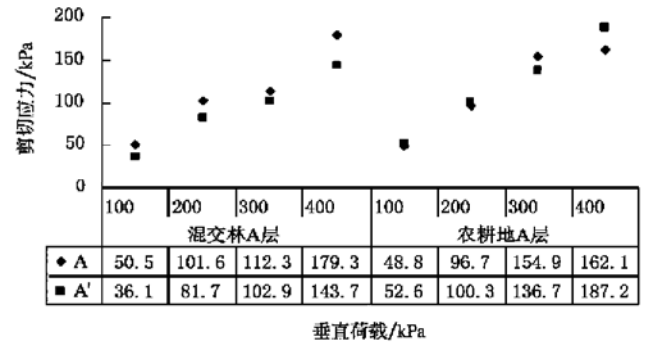


图 2 两种植被 A 层土壤剪应力与垂直荷载关系
Fig. 2 Relationships between shear stress and vertical loads for A layer soil of two vegetations

在相同的垂直荷载作用下,原状土与重塑土的抗剪强度有以下规律(图 2):除农耕地 A 层外,所有土样的原状土的抗剪强度大于重塑土(限于篇幅,仅以混交林

为例)。其原因主要是相同含水率和干密度的原状土土骨架更紧密,并且由于根系的缠绕挤压作用极大地提高了原状土的抗剪强度。而农耕地 A 层(图 2)原状土之所以出现抗剪强度先大后小的情况,可能的原因有以下方面:(1)农耕地 A 层是耕作层,由于松土、锄地等农业耕作行为,一方面减少了 A 层土壤的根系分布;另一方面破坏了紧密的土骨架,使 A 层土壤的结构疏松,进而导致抗剪强度降低。(2)由于人们对农耕地施肥等,使农耕地 A 层土壤的有机质含量较高,密度较低,而其重塑土由于粉碎、搅拌、保存等损失了部分有机质,按相同含水率和干密度配制的重塑土在同一荷载作用下体积收缩,较原状土更为密实,这也使得重塑土的抗剪强度增大。(3)原状土在较小的垂直荷载下,其所受应力较小,不足以破坏其原始结构,当在较大荷载作用下,发生剪切位移时,土骨架被破坏,土被彻底剪断,其抗剪强度相对减小。而重塑土在垂直荷载作用下,体积不断变小,密度增大,剪应力也不断增加,最终大于原状土的抗剪强度。但农耕地的土壤经过人为扰动,基本不属于原状土范畴,关于农耕地 A 层土壤的抗剪强度性质将在以后做进一步讨论。

2.3 原状土的抗剪强度组成

原状土作为土壤-根系复合体,其抗剪强度 τ 符合库仑定律,库仑抗剪强度公式

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

式中 τ ——抗剪强度, kPa; c ——土壤黏聚力, kPa; σ ——作用在剪切面上的法向应力, kPa; φ ——土壤内摩擦角, ($^{\circ}$)。

土的抗剪强度由摩擦强度 $\sigma \tan \varphi$ 和黏聚强度 c 两部分组成。对于原状土,由于根系的存在极大地提高了上述两部分的强度,进而提高土的抗剪强度。

相同含水率和干密度的原状土和重塑土相比较,主要差别是原状土结构更紧密,并且有根系。试验结果表明,原状土的抗剪强度随着极细根的含量及重塑土的抗剪强度增加而增大,基本上呈正线性相关(图 3,图 4)。

由此看出原状土的抗剪强度可以分解成 3 部分:土本身的性质(如有机质含量、粒径级配、密度、含水率等),这一部分与同含水率、同密度的重塑土完全一致;根系;在天然条件下固结形成的紧密的土壤结构。

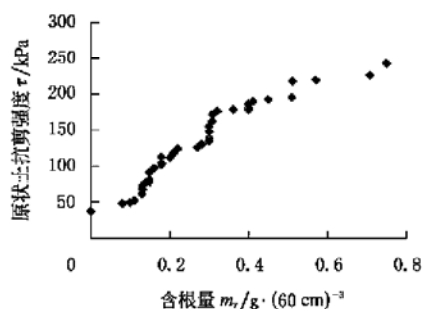


图 3 原状土抗剪强度与含根量关系

Fig. 3 Relationships between shear strength of undisturbed soils and root content

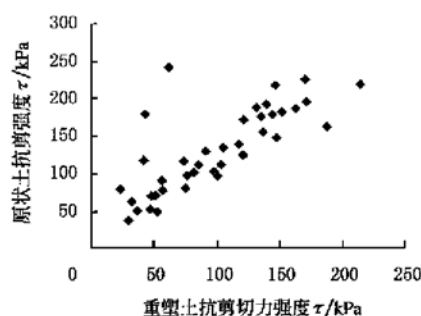


图 4 原状土与重塑土抗剪切强度关系

Fig. 4 Shear strength of undisturbed and remolded soils

以重塑土的抗剪强度 (τ_0), 原状土的含根量 (m_r) 和极细根的平均抗拉强度 (f_r) 为自变量, 原状土的抗剪强度 (τ) 为因变量。5 种典型植被 2 个层次在 4 级垂直荷载作用下共有 40 个样本, 取其中 35 个样本通过 matlab6.1 做回归分析并剔除异常数据点^[15], 另外 5 个样本做预测检验, 回归分析结果见式(4)

$$\tau = 27.7125 + 0.2763\tau_0 + 0.0355m_rf_r \quad (4)$$

式中: 回归系数 b 的置信区间: $b_0 = (18.4329, 36.9922)$; $b_1 = (0.1590, 0.3936)$; $b_2 = (0.0310, 0.0400)$ 。复相关系数 $R^2 = 0.9613$; 检验统计量 $F = 372.4717$; 显著性概率 $P = 0.0$ 。 R^2 大于 0.95, P 近似为 0, 回归效果显著。

对回归系数进行显著性检验, 结果为回归系数检验统计量 $T = 2.0423$; $T_1 = 4.8112$; $T_2 = 16.1636$, 显然, T_1 与 T_2 都显著大于 T , 所以重塑土的抗剪强度和原状土的含根量对原状土的抗剪强度的影响是显著的。

试用剩余 5 个样本进行预测, 进而检验式 4 的精确度, 见表 2。

从表 2 中看出, 除农 B400 kPa 样本的实测值与估计值相差较大外, 所有的实测值与估计值均接近, 且所有实测值均在预测的区间估计范围内, 所以式(4)具有较高的预测精度。考虑到所有的样本均在 400 kPa 以下进行的剪切, 而且有的参考文献提出作为土壤-根系复合体的原状土如同钢筋混凝土结构一样, 当垂直荷载超过一定范围后, 抗剪强度会随着垂直荷载的增加而有所降低, 所以式(4)仅适用于重庆缙云山 400 kPa 以下由重塑土的抗剪强度计算原状土的抗剪强度。

表 2 原状土抗剪强度实测值、估计值及其区间估计

Tab. 2 Observation value, estimation value and interval estimation of anti-shear strength of undisturbed soils

样本名称	实测值	估计值	区间估计(预测区间)	
农 A400 kPa	162.1	163.9	151.5	176.3
农 B100 kPa	69.9	76.4	64.8	88
农 B200 kPa	96.5	92.3	80.8	103.8
农 B300 kPa	139	141.8	130.3	153.3
农 B400 kPa	176.3	152.0	140.4	175.6

3 结 论

极细根的抗拉强度与其直径成正线性相关关系, 且

在垂直荷载 400 kPa 范围内, 极细根有助于增加土壤的抗剪强度。同一植被下, 在同一荷载作用下的具有相同含水率、干密度的原状土和重塑土相比较: 原状土的剪切近似于塑性破坏, 而重塑土则属于弹性破坏且在相同垂直荷载作用下, 原状土的剪切位移要小于重塑土; 除农 A 外, 所有土样的原状土剪切强度均大于重塑土。原状土的抗剪强度随含根量的增加而提高, 其抗剪强度取决于在天然条件下固结形成的紧密的土壤结构、土壤固有性质和极细根的含根量。可用公式(4) 计算重庆缙云山垂直荷载小于 400 kPa 的原状土的抗剪强度。

[参 考 文 献]

- [1] 张爱国, 李 锐, 杨勤科. 中国水蚀土壤抗剪强度研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 5– 9.
- [2] 张祖荣. 植物根系提高土壤抗侵蚀能力的初步研究[J]. 渝西学院学报(自然科学版), 2002, 15(1): 31– 35.
- [3] 王 库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3): 250– 252.
- [4] 陈士银, 黄月琼, 吴雪彪. 湿地松林根系对土壤抗侵蚀能力影响的研究[J]. 西南农业大学学报, 2000, 22(5): 468– 471.
- [5] 刘定辉, 李 勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34– 37.
- [6] 吴 彦, 刘世全, 王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3(2): 119– 124.
- [7] 刘玉成, 钟章成. 缙云山自然保护区植被概况. 见钟章成主编. 常绿阔叶林生态学研究[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 1988: 315– 326.
- [8] 伯 姆. 根系研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [9] 郝彤琦, 谢小妍, 洪添胜. 滩涂土壤与植物根系复合体抗剪强度的试验研究[J]. 华南农业大学学报, 2000, 21(4): 78– 80.
- [10] 中华人民共和国. 土工试验方法标准[S]. GB/T 50123– 1999.
- [11] 赵 焱. 土壤– 植物系统地理学野外实习讲义[M]. 北京: 北京师范大学资源与环境科学系, 2002.
- [12] 刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 水土保持学报, 1996, 2(3): 21– 28.
- [13] 中华人民共和国原城乡建设环境保护部. 混凝土结构设计规范(GBJ10– 89)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991: 3– 64– 3– 72.
- [14] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992: 178– 180.
- [15] 陈桂明, 戚红雨, 潘 伟. MATLAB 数理统计(6. x)[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 135– 175.

Shear strengths of undisturbed and remolded soils of typical vegetations in Jinyun Mountain of Chongqing City

Zhang Xiaoming¹, Wang Yujie^{1*}, Xia Yiping², Wu Yun², Chen Lin²

(1. Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Management Bureau of Jinyun Mountain National Nature Protection Region in Chongqing City, Chongqing 400700, China)

Abstract: In order to find the measures of preventing soil losses based on the soil mechanics, shear strengths of undisturbed and remolded soils of five typical vegetations in Jinyun Mountain of Chongqing city were measured using direct shear apparatus. Through the comparing of shear properties of undisturbed and remolded soils with the same dry density, water content and vegetation at the same vertical load, the effect of roots(the smallest roots) in soil-root composites(undisturbed soils) was analyzed. Results indicate that undisturbed soils have higher shear resistance and less shear displacement than remolded soils which have the same dry density, water content and vegetation at the same vertical loads. Shear failure of undisturbed soils approximately belongs to plastic failure, while shear failure of remolded soils is elastic failure. Shear strength of undisturbed soils has positive correlation with root content, and relevant regression models about undisturbed soil were established.

Key words: root content; shear strength; shear displacement; undisturbed soils; remolded soils