

云南东川蒋家沟银合欢林区原状土 抗剪强度试验分析

矫震^{1,2,3},王道杰^{1,3},谢洪^{1,3},张金山^{1,3},郭灵辉^{1,2,3}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,四川成都 610041; 2. 中国科学院研究生院,北京 100049;
3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室,四川成都 610041)

[关键词] 银合欢林区;原状土;剪切强度;影响因素;MATLAB 回归分析;蒋家沟

[摘要] 在中国科学院东川蒋家沟泥石流观测研究站东部银合欢林区,选择 5 棵不同树龄的银合欢树,于植株附近 1 m 之外分别挖取深 2 m、宽 1 m 的土壤剖面,在每个剖面上按不同深度取原状土样进行剪切试验,并测定土壤相应层的含根量和机械组成。通过试验发现,原状土的抗剪强度与土体含根量、土层所处深度及土颗粒不均匀系数有着紧密关系,利用 MATLAB 对试验数据进行回归分析,得到各因子对抗剪强度的影响程度为:含根量 > 不均匀系数 > 深度;同时得出,在一定程度上,此区域原状土的抗剪强度与含根量、不均匀系数及深度均呈正相关。

[中图分类号] S714.5 [文献标识码] A [文章编号] 1000-0941(2009)11-0037-04

生物措施是防治泥石流和水土流失的一种重要措施,同时具有很好的生态护坡作用^[1-2],已在国内外广泛应用。特别在我国云南大盈江、东川大桥河及四川西昌黑沙河等泥石流沟谷,通过实施生物工程措施与土建工程措施相结合的综合治理,取得了显著的防灾减灾效益、生态效益和经济效益。

在生物措施防治泥石流的实践中,固氮植物常作为优良的先锋树种被广泛地引种试用。中国科学院东川泥石流观测研究站(以下简称东川站)在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初,先后开展了生物措施治理泥石流的品种选育和种植技术研究^[3-5]。长期的观测和研究表明,银合欢和马桑等固氮植物是小江流域干热河谷区生物措施治理泥石流较为理想的植物品种,其主要优点是:具有结瘤固氮和改土功能;耐旱耐瘠薄,抗逆性强,适生性广;生长速度快,萌芽力及覆盖能力强,能在短期内起到保水固土作用;自我繁殖和更新能力强,有较高的生态和经济效益。

通过典型剖面调查发现,银合欢树根际土体不同深度的根系形态、数量、分布呈规律性的变化。为探索银合欢树根系的固土机理和固土性能,我们对根际土体不同深度的原状土土样进行了剪切试验,初步探寻了原状土抗剪强度在不同深度变化的特征及引起这种变化的原因。

1 研究区自然概况

研究区位于云南省昆明市东川区绿茂乡蒋家沟下游东川站附近。蒋家沟属金沙江一级支流小江的支流,其地貌类型为侵蚀中山,海拔 1 042—3 269 m;旱季、雨季分明,降雨集中在雨季(5—10 月),雨季降雨量占到全年的 88%;多年平均降水量为 693 mm,平均蒸发量为 3 638 mm,蒸发量约为降水量的 5

倍^[3],属于干热河谷气候地带。

在东川站东 300 m 左右,种植有银合欢树林,林区面积约 1.5 hm²,林中混生少量马桑、桉树等^[6]。所选 5 棵树的树干平均胸径约为 6 cm,平均树高约为 9.8 m。

2 试验设备与材料

2.1 试验设备

试验设备采用常规应变控制式直接剪切仪。该仪器由剪切盒、垂直加压设备、剪切传动装置、测力计以及位移量测系统等组成,加压设备采用杠杆传动,测力计采用应变圈,量表为百分表。环刀内径 6.18 cm,高 2.0 cm。原状土试样底面直径 5 cm,高 2 cm,试验时对土样与装土盒间隙进行充分填充,以使土样受力均匀。

2.2 试验土样

原状土取自蒋家沟左岸银合欢树林根系土体剖面,距离东川泥石流观测站大约 300 m。选取了 5 棵树龄分别为 3、5、9、14、20 年的典型植株,并挖掘了深 2 m、宽 1 m 的 5 个断面,编号分别为 2、3、17、21、22。其中,17 号和 22 号断面每隔 20 cm 取一层土样,其余断面每隔 40 cm 取一层土样,每层均取 4 个原状土土样。取土时,先将环刀放在土层上,然后用电工刀一点点地沿环刀切割取得,取样时间为 2008 年 7 月。

所取的大多数原状土土样含小石块较多,固结性能较好,平均含水率在 5% 左右,以小于 2 mm 的细颗粒土为主,完整性较好,能覆盖环刀面积的 90% 以上。

将切割好的每层 4 个土样分别放入 4 个剪切盒,在土样与剪切盒的缝隙间加土填充,使剪切盒与土样能够紧密接触,然后放上透水石,盖上剪切盒的上盒,加压后开始直剪试验。在试验中,采用不固结快剪^[7]方式,控制直剪仪的剪切速率在 0.8 mm/min,4 个土样依次在 50、100、150、200 kPa 的荷重序列下进行水平剪切,水平位移达到 4 mm 时记录土样的抗剪强度峰值,

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(40771025);国家科技支撑计划项目(2006BAC10B04)和中国科学院知识工程重要方向项目(KZCX2-YW-332)共同资助项目

水平位移达到 6 mm 时停止试验。

3 试验数据处理与分析

3.1 数据处理方法

(1)分析抗剪强度与深度、含根量及颗粒不均匀系数^[8]的关系,首先控制两个因素不变,然后分析抗剪强度与第三个因素的关系。

(2)分析抗剪强度与含根量的关系,含根量的计算公式为^[9]

$$m_r = R/1\ 000\ \text{cm}^3 \quad (1)$$

式中: m_r 为原状土的含根量, $\text{g}/1\ 000\ \text{cm}^3$,其中 $1\ 000\ \text{cm}^3$ 为取原状土所用方槽刀的体积; R 为根鲜重^[10], g 。

(3)分析抗剪强度与颗粒不均匀系数^[8]的关系,不均匀系数的计算公式为

$$U_H = d_{60}/d_{10} \quad (2)$$

式中: U_H 为颗粒不均匀系数; d_{60} 为原状土级配曲线中累计百分含量为 60% 的粒径; d_{10} 为原状土级配曲线中累计百分含量为 10% 的粒径。

求不均匀系数的方法:根据原状土中各粒径土颗粒的百分含量画出原状土的级配曲线,首先读出累计百分含量为 60% 的粒径即 d_{60} ,以 17 号断面 0—20 cm 土层原状土的级配曲线(图 1)为例,从图 1 可以得出 d_{60} 为 14 mm,然后读出累计百分含量为 10% 的粒径 d_{10} ,即有效粒径^[8],从图 1 可以得出 d_{10} 为 0.01 mm,代入公式(2)中,得

$$U_H = d_{60}/d_{10} = 14/0.01 = 1\ 400$$

不均匀系数 $U_H > 5$ 的土称为“不均粒土”^[8]。由图 1 知,级配曲线越陡直,则不均匀系数越小,说明土颗粒级配越差;级配曲线越平缓,则不均匀系数越大,土颗粒级配越好。

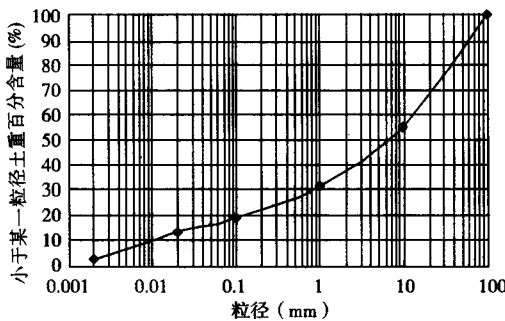


图 1 17 号断面 0—20 cm 土层原状土级配曲线

3.2 抗剪强度与深度的关系

先将各断面每层所取的 4 个土样进行剪切试验,分别得到 4 个抗剪强度值,将其加权平均得到每层原状土的综合抗剪强度值,然后在含根量和颗粒不均匀系数不同的情况下,分析各断面原状土抗剪强度随深度变化的关系,得图 2;最后在含根量和颗粒不均匀系数相近情况下,分析各断面每层土的抗剪强度随深度变化特征。

图 2 是 2、3、17、21、22 号断面不同深度原状土剪切试验综合曲线。由图可见,随着深度的增加,土体的抗剪强度变化的大致方向是由高到低,这与含根量、颗粒不均匀系数及土体固结度有较大关系。图 2 说明,土体抗剪强度随深度增大而减

小,与土体含根量及颗粒不均匀系数逐渐减小有关;虽然随着深度的增加土体固结度有所提高,但改变不了抗剪强度总体降低的趋势。曲线峰值的出现,一方面是由于含根量较高,根系本身的存在以及根系与土颗粒能够紧密结合,提高了抗剪强度;另一方面,土颗粒不均匀系数较大,土颗粒级配优越性较高,从而使土颗粒之间接触得较为紧密;同时,土样较完整,土体固结度较好,整体结构性较强。综上所述,在含根量、颗粒不均匀系数及土体本身固结度的多重作用下,土体的抗剪强度显著提升。图 2 中,21 号断面的原状土剪切试验曲线出现异常,土体的抗剪强度随着深度的增加而增大,说明土体抗剪强度的提高有时并不仅仅依赖于含根量的多少,土体固结度的高低也最终决定土体整体的抗剪强度高低。因为随着土体深度的增加,土体固结度增大,土颗粒间接触得较为紧密,从而使抗剪强度增大。

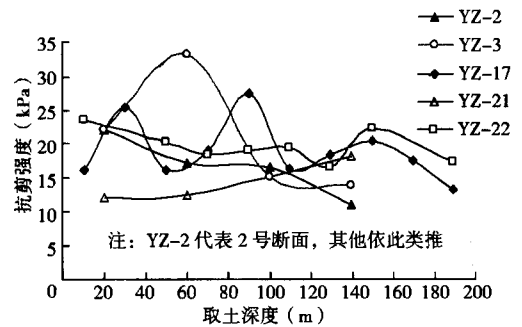


图 2 各断面原状土抗剪强度随深度变化曲线

在 5 个断面的各层原状土数据中(表 1),分析含根量和不均匀系数相近的原状土抗剪强度与深度的关系,得到两者的关系曲线(见图 3)。由图 3 知,随着深度的增加,抗剪强度总体上呈增大趋势,即抗剪强度与深度呈正相关。这与土体的固结度有较大关系,随着深度的增加,土体固结度增大,在一定程度上增大了土体的抗剪强度。

表 1 各断面含根量和不均匀系数相近的原状土土体参数

土体编号	深度 (cm)	含根量 ($\text{g}/1\ 000\ \text{cm}^3$)	不均匀系数	抗剪强度 (kPa)
17-3	50	1.610	1 000	16.3
22-6	110	1.677	1 500	19.5
17-7	130	1.754	1 200	18.5
2-4	150	1.626	1 375	20.1
22-9	170	1.766	833	22.4

注:表中 17-3 代表 17 号断面第 3 层土体,其他依此类推。

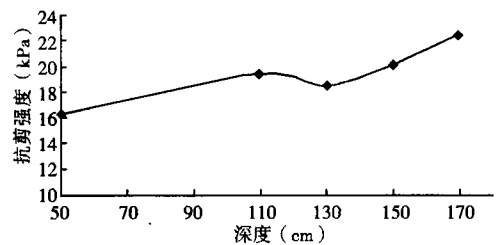


图 3 原状土抗剪强度与深度关系曲线

3.3 抗剪强度与含根量的关系

用 $10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}$ 的方形槽刀取原状土,称量原状土中的鲜根重^[10],由公式(1)计算各土层所取原状土的含根量^[11]。

在5个断面的各层原状土数据中(表2),分析深度为100 cm、颗粒不均匀系数在1 500左右的原状土抗剪强度与含根量的关系,得到原状土的抗剪强度与含根量的关系曲线如图4所示。由图4可知,随着含根量的增大,原状土抗剪强度增大,即抗剪强度与含根量呈正相关。

表2 各断面深度和不均匀系数相近的原状土土体参数

土体编号	深度 (cm)	含根量 (g/1 000 cm ³)	不均匀系数	抗剪强度 (kPa)
2-3	100	1.389	1 897	16.6
3-3	100	0.946	1 307	15.2
17-5	100	2.360	1 600	27.5
21-3	100	0.790	1 250	12.4
22-5	100	1.677	1 500	19.5

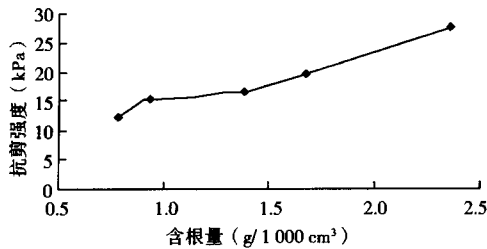


图4 原状土抗剪强度与含根量关系曲线

3.4 抗剪强度与土颗粒不均匀系数的关系

利用公式(2)计算出各断面分层土体的不均匀系数,然后分析深度为60 cm、含根量在3.5 g/1 000 cm³左右的原状土抗剪强度与不均匀系数的关系(表3),得两者的关系曲线如图5所示。

表3 各断面深度和含根量相近的原状土土体参数

土体编号	深度 (cm)	含根量 (g/1 000 cm ³)	不均匀系数	抗剪强度 (kPa)
2-2	60	3.830	2 450	17.2
3-2	60	3.220	1 447	39.3
17-3	60	3.350	1 000	16.3
21-2	60	3.690	950	12.5
22-3	60	3.733	1 889	18.2

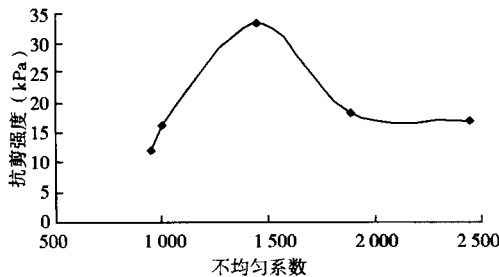


图5 原状土抗剪强度与不均匀系数关系曲线

由图5知,原状土抗剪强度与土颗粒不均匀系数局部呈正相关,当不均匀系数在1 500左右时,抗剪强度出现峰值。3-2土层的原状土抗剪强度最高,这与原状土颗粒总体级配有较大关系,由图6可知,3-2的土体颗粒级配曲线最缓,土体颗粒总体级配最不均匀(优越性最高),土体颗粒间接触紧密,有效地提高了抗剪强度。

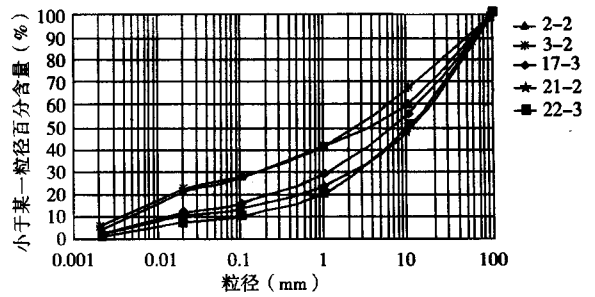


图6 各断面第3层原状土颗粒级配曲线

由上面的分析及图5、图6可知,在深度和含根量相近的情况下,土体的抗剪强度在一定程度上受到土体颗粒不均匀系数的影响,但更大程度上取决于土颗粒总体级配是否良好,因为土体颗粒不均匀系数只是局部反映了土颗粒级配性能。纵观图6,土颗粒级配曲线越缓,土颗粒总体级配越不均匀,说明土体总体级配优越性越高,从而抗剪强度越大。

4 抗剪强度影响因子回归分析

(1)在回归分析中,如果有两个或两个以上的自变量,就称为多元回归分析。事实上,一种现象常常是与多个因素相联系的,由多个自变量的最优组合共同来预测或估计因变量,比只用一个自变量进行预测或估计更有效,更符合实际。MARLAB数学软件是实现多元线性回归分析的强有力工具,能够对试验数据进行有效的分析并建立模型。

(2)分别以土体的深度、含根量及不均匀系数作为自变量,以抗剪强度为因变量进行分析。5个剖面共有28个样本,剔除异常点^[12]并作归一化处理^[13],取其中26个在MATLAB中进行多元线性回归^[14-16]并作区间估计,得到各断面抗剪强度(Y)与深度(X₁)、含根量(X₂)、不均匀系数(X₃)的函数关系式为

$$Y = 11.739 6X_1 + 23.018 3X_2 + 16.492 3X_3$$

式中:回归系数b的置信区间为b₁ = [3.218 2, 20.260 9], b₂ = [10.934 4, 35.102 1], b₃ = [7.888 6, 25.096 0];置信度为0.98;抗剪强度Y的相对残差为0.283 4。

由此可知,深度、含根量及不均匀系数与抗剪强度均呈正相关,它们对抗剪强度的影响程度为:含根量 > 不均匀系数 > 深度。

5 试验结论

5.1 土体抗剪强度的影响因素

土体的抗剪强度与土的含根量、深度、土颗粒不均匀系数有着紧密关系。

(1)土体中的根系改良了土壤结构,使得土壤颗粒之间能够紧密接触,凝聚性增强,增大了土体抗剪切强度。一般说来,土体含根量越多,根系与土颗粒结合得越好,形成的土壤团聚体越多,则土体的抗剪切强度越高。据文献[2,17],土体的抗剪强度与含根量呈正相关,本试验的结果与其所述一致。

(2)土体埋藏深度与土体的抗剪强度有着较大的关系。综合本文中5个断面,抗剪强度与深度呈正相关,即随着深度的增加抗剪强度呈增大趋势,这与土体的固结度有较大关系;随着深度的增加土体固结度增大,在一定程度上增大了土体的抗

剪强度。

(3) 土体颗粒不均匀系数对土体抗剪切强度也会产生较大影响。据文献[18], 不均匀系数比含根量对土体抗剪强度的影响要大。剪切试验结果说明, 不均匀系数越大, 土颗粒级配越好, 颗粒间孔隙越小, 结合越紧密, 则抗剪强度越高; 相反, 土体颗粒级配越差, 土颗粒间结合的紧密度越低, 抗剪强度越差。本试验中, 由于根系在土体中近乎垂直分布, 并且根系本身柔韧性很好, 更大程度上提高了土体的抗剪强度, 因而试验结果中含根量对土体抗剪强度的影响程度更大。

(4) 本试验得出的结论是: 含根量对土体的抗剪强度影响最大, 土颗粒不均匀系数次之, 土层埋藏深度对土体抗剪强度的影响最小。

5.2 试验存在的问题及改进措施

(1) 完整原状土土样的采取非常困难, 取土样的土层砾石含量较高, 稍不注意土样就遭到破坏, 因此在进行剪切试验时不得不对土样进行填充, 造成了一定的试验误差。

(2) 土体的不均匀性, 导致不同断面的土体性状差别较大, 即使同一层的土体在进行重复试验时也表现出较大的力学性质差异, 这使得今后试验的可重复性操作变得困难。

鉴于以上问题, 拟在下一步试验中采用人工合成土进行相应的剪切试验, 通过插根的方法模拟实际土体中的根系, 并通过有根和无根土样的对比试验来观测根系对土体的作用。

(在野外试验和室内试验过程中, 得到了何淑芬老师、洪勇站长、杨德伟博士、张云红硕士及中国科学院东川泥石流观测研究站全体工作人员的大力支持, 其中颗分试验和根含量测定等工作由他们完成, 在此对他们表示衷心感谢!)

【参考文献】

- [1] 张谢东, 石明强, 赵来, 等. 公路边坡植物根系固土的力学分析研究[J]. 交通科技, 2008(1): 50-52.
- [2] 肖东升, 张涛. 边坡土体强度与植被根系作用的研究[J]. 路基工程, 2008(1): 135-137.
- [3] 崔鹏, 王道杰, 韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应——以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 60-64.
- [4] 王道杰, 陈吕容, 周麟, 等. 山地灾害治理中生物工程存在的问题[J]. 山地学报, 2004, 22(4): 461-466.
- [5] 王道杰, 崔鹏, 朱波, 等. 金沙江干热河谷植被恢复技术及

生态效应[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 95-98.

- [6] 林勇明, 崔鹏, 葛永刚, 等. 泥石流频发区人工恢复新银合欢林种内竞争——以云南东川蒋家沟流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 13-17.
- [7] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48-51, 57.
- [8] 张咸恭. 工程地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1979: 24-25.
- [9] 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.
- [10] 伯姆. 根系研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈丽华, 马生全, 李丽. 基于人工神经网络样本优化法识别的河流溶解氧模型[J]. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2008, 21(4): 372-376.
- [14] 何仁斌. MATLAB6. 0 工程计算及应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2001: 5.
- [15] 吴燕. 非线性曲线拟合的实证分析[J]. 大众科技, 2008(9): 17-18.
- [16] 杨宁, 李建国. 基于 MATLAB 分析油菜若干性状之间的关系[J]. 农业生物技术科学, 2008, 24(9): 36-38.
- [17] 代全厚, 张力, 刘艳军, 等. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(6): 36-37.
- [18] 张晓明, 王玉杰, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型植被原状土抗剪强度的灰色关联度分析与评价[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 145-147, 151.

【作者简介】 矫震(1985-), 男, 山东德州市人, 硕士研究生, 主要从事泥石流、滑坡等地质灾害的勘察工作; 王道杰(1968-), 男, 四川成都市人, 责任作者, 副研究员, 主要从事水土保持及生态修复等研究工作。

【收稿日期】 2009-05-15

(责任编辑 徐素霞)