

西南山区云南松根土复合体力学特性及其对浅层坡体稳定性的影响

李怡帆^{1,2}, 张国涛^{1,2}, 雷鸣宇³, 方海燕^{1,2}, 李朝月^{1,2}

(1.中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: [目的] 探究西南山区云南松根土复合体力学特性及其对坡体稳定性的影响, 为该区浅层滑坡机理认识, 识别预警与防治等提供理论基础与数据支持。[方法] 以四川省凉山州中研究极为缺乏且与浅层滑坡密切相关的云南松根系为研究对象, 开展根土复合体抗剪强度试验和 FLAC 3D 边坡安全系数数值模拟, 探究了不同根系密度、根系分布方式与土壤含水量组合下乔木根土复合体的力学性质及浅层边坡稳定性。[结果] 较高的植物根系密度可明显提高土体的抗剪强度, 与素土相比, 黏聚力、内摩擦角提高比例分别高达 45.5%, 9.6%。然而, 根径与根系抗拉强度却呈显著的幂函数负相关关系 ($p < 0.05$), 根径低于 2 mm 的细根抗拉强度最强; 同时, 乔木根系水平或垂直分布方式下, 土壤含水量的增加均会降低土体的抗剪强度, 不利于边坡稳定, 而乔木交错分布最有利于提高土壤的抗剪强度和边坡稳定性。[结论] 乔木根系的高密度发育, 复杂交错分布, 细根丛生等特点对提高根土复合体抗剪强度与边坡稳定性具有重要作用, 适度地增加边坡植被覆盖是控制浅层滑坡发生的重要措施之一。通过评价地质灾害多发区不同条件下乔木根系护土固坡效应, 可为震后地质活跃区开展生态修复提供理论支持。

关键词: 根土复合体; 根系密度; 根系分布方式; 含水量; 力学特性; 浅层边坡稳定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0088-09

中图分类号: TU432

文献参数: 李怡帆, 张国涛, 雷鸣宇, 等. 西南山区云南松根土复合体力学特性及其对浅层坡体稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 88-96. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.012; Li Yifan, Zhang Guotao, Lei Mingyu, et al. Mechanical properties of Yunnan pine root-soil system and its influence on shallow slope stability in southwestern mountainous region of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 88-96.

Mechanical Properties of Yunnan Pine Root-Soil System and Its Influence on Shallow Slope Stability in Southwestern Mountainous Region of China

Li Yifan^{1,2}, Zhang Guotao^{1,2}, Lei Mingyu³, Fang Haiyan^{1,2}, Li Chaoyue^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process,

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: [Objective] The mechanical properties of the root-soil system of Yunnan pine and its influence on slope stability in the southwestern mountainous area of China were determined in order to provide a theoretical basis and data support for the understanding, identification, early warning, and prevention of shallow

收稿日期: 2022-01-17

修回日期: 2022-05-08

资助项目: 国家自然科学基金重大项目“青藏高原东缘地形急变带山地生态—水文过程与山地灾害互馈机制及灾害风险调控”(41790432); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23090303); 中国博士后科学基金第 70 批面上项目(2021M703180); 中国科学院特别研究助理资助项目

第一作者: 李怡帆(1998—), 女(汉族), 山东省滨州市人, 博士研究生, 研究方向为山地灾害及植被调控下的水文力学效应。Email: lyf_yifan@163.com。

通讯作者: 张国涛(1991—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 博士, 特别研究助理, 主要从事水文地质灾害形成机理研究。Email: zhangguotao@igsrr.ac.cn。

landslides in this area. [Methods] Research regarding the root system of Yunnan pine is extremely lacking as it relates to shallow landslides in Liangshan Prefecture, Sichuan Province. The shear strength test of the root-soil system and FLAC 3D numerical simulation were carried out to explore the mechanical properties of tree-root-soil system and shallow slope stability under different combinations of root density, root distribution, and soil water content. [Results] Higher plant root density could significantly improve soil shear strength. Compared with soil without roots, the cohesion and internal friction angle of soil with roots increased by 45.5% and 9.6%, respectively. However, there was a significant negative power function relationship between root diameter and root tensile strength ($p < 0.05$), and the tensile strength of fine roots with diameters less than 2 mm was the strongest. At the same time, under the horizontal or vertical distribution of the root system, an increase in soil water content would reduce the shear strength of the soil, and this situation was not conducive to slope stability. Staggered distribution of trees was most conducive to improving soil shear strength and slope stability. [Conclusion] The characteristics of high density, complex staggered distribution, and clustering of fine roots play an important role in increasing the shear strength of the root-soil system and slope stability. Moderately increasing vegetation coverage is one of the important measures that could be implemented to control the occurrence of shallow landslides. Evaluating the effect of soil protection and slope stabilization provided by tree roots under different conditions in geologically disaster-prone areas could provide theoretical support for ecological restoration in geologically active areas after earthquakes.

Keywords: root-soil system; root density; root distribution; soil water content; shallow slope stability

浅层滑坡是在地壳运动、地形地貌、土壤、气候和植被覆盖等多因素作用下产生的,其中地震活动是滑坡发生的主要原因之一。2008年汶川地震引发了中国西南四川省数千起的山体滑坡^[1-3]。开挖建设活动、森林砍伐等人类干扰也将降低浅层边坡土体稳定性^[4]。在未来气候变化背景下,极端降水、融雪入渗等可增加边坡失稳的风险和山体滑坡等灾害发生的次数^[3,5-6],严重威胁人类的生命安全。

植被作为一种可以进行人工配置和干预的生物工程,在提高土壤抗剪强度、稳定边坡方面的作用已经得到广泛证实^[7]。Li等^[8]研究得出,植被覆盖是滑坡发生的控制因素,相对于植被覆盖茂密边坡,在植被覆盖稀疏边坡发生滑坡的概率更高。植被对边坡稳定性主要从机械和水文两方面起作用,根系的力学加筋和锚固作用可稳定边坡^[9],同时也可通过增加基质吸力、降低土壤含水量、拦截降水等^[7,10-11]减小浅层滑坡发生的概率。

由于根系与土壤的变形模量存在巨大差异,因此受到剪切应力时,它们在变形过程中存在相互错动。在这个过程中,根系本身产生的拉应力、根土界面的摩擦阻力以及根系之间的土体侧向约束力发挥作用,从而提高根土复合体的抗剪强度^[12]。自然界中,植被类型多样、根系分布复杂,不同类型植被的生理特征不同,根系力学性能存在差异,其对边坡稳定性的影响也不同^[13]。根系稳定边坡的作用,与其形态、埋深、结构、生长状态等密切相关^[14-16]。不同土层深度的根系土,根系含量、根系分布方式具有明显差别。

因此本试验设计不同的根系密度与根系分布方式,试图探究不同深度根系土的抗剪强度差异。同时,滑坡的发生与降雨密不可分,这是由于降雨过程导致土壤含水量变化从而引起边坡失稳。关于土壤含水量与土体抗剪强度之间关系的研究已取得较多成果,然而,综合考虑根系密度、根系分布方式与土壤含水量对根土复合体抗剪强度的影响还需要进行深入的探究。

抗剪强度反映了土体抵抗外力剪切的能力,是衡量土壤力学特性的重要指标之一。在浅层滑坡发生过程中,普遍存在土壤力学特性改变的过程,以抗剪强度为指标探究根土复合体力学特性是研究根系固土、浅层滑坡发生机理的重要手段,对于滑坡预警具有重要指示作用。对于根系固土力学特性的研究,国内外已取得很多成果,但多集中于草本或灌木细小根系的研究,限于试验条件,针对乔木根系固土力学机制、稳定浅层边坡的研究较少,理论滞后于实践^[14,17-18]。四川省凉山州全州森林覆盖面积约为 2.60×10^6 hm²,主要优势树种云南松、冷杉、丝栗、栎类与华山松分布广泛,其中云南松 1.18×10^6 hm²,占该州森林总面积的45.3%。相关研究表明^[19],松属通过其侧根牵引对提高根际土层的强度、控制浅层滑坡具有重要意义。四川省地质灾害频发,而针对该地区乔木根系固土的理论探究较为不足,在中国西南四川省山区地质构造活跃、地形急变、土层较薄、降雨分布不均等自然条件下,开展乔木根系对于稳固边坡的研究具有重要意义。

因此,本文选取四川省凉山州西南山区云南松根土复合体开展研究,通过室内试验与数值模拟相结合的方式,探究不同根系密度、根系分布方式与土壤含水量下乔木根土复合体力学特性及浅层边坡稳定性,为西南山区浅层滑坡机理认识、识别预警与防治措施等提供理论基础与数据支持,对揭示大梯度环境植被—水—土耦合下山地灾害防治具有积极意义。

1 材料与方法

1.1 研究区样地概况

取样位置位于四川省西南部、金沙江下游的凉山彝族自治州热水河流域内一植被覆盖的斜坡,地处北纬 $26^{\circ}03'—29^{\circ}18'$,东经 $100^{\circ}03'—103^{\circ}52'$,位于青藏高原与四川盆地中间过渡地带^[20]。该州地势西北高、东南低,地质地貌复杂,多山地、高原,州内自然灾害种类多、发生频繁、受灾范围广^[21]。凉山州属亚热带季风气候区,年均温 $10.1\sim 19.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降雨量

$776\sim 1\ 170\text{ mm}$ ^[22]。冬季干冷,降雨稀少,夏季暖湿,集中了全年 90% 以上的降雨量,形成干湿季节分明、降雨集中的特点,从而极易发生山洪、滑坡、泥石流等自然灾害^[23-24]。州内土壤类型多样,土层较薄,多数厚度不足 100 cm ^[20]。取样地位于大凉山云南松 (*Pinus yunnanensis*) 纯林内,树高 $12.7\pm 1.2\text{ m}$,林地密度 $508\pm 77\text{ 株}/\text{hm}^2$,林龄约 20 a,林下为自然生长的灌草植物,坡面坡度约 35° ,土壤类型为壤土。

1.2 采样及制样方法

2019 年 9 月 16 日,在采样地内斜坡区域选定灌草植被覆盖较少的 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 取样区域,清除表面植被和表层腐殖质,采集 $10\text{—}50\text{ cm}$ 深度范围内土壤放入密封袋内带回实验室。实验室条件下,挑出根系、石块,按照《土工试验方法标准 (GB/T50123-1999)》^[25] 采用室内试验采集土壤常规参数 (表 1)。将土样烘干至恒定重量,过 2 mm 筛后平铺在干燥的盘子中备用。

表 1 土体常规物理与力学性质指标

指标项目	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	孔隙比	饱和度/ %	液限/ %	塑限/ %
数值	1.75	1.45	20.93	0.74	71.47	40.38	28.75

采用人工整株挖掘的方法采集云南松竖向主直根系,取样时确保含根系土壤中根系的完整,避免人为破坏根系。随机选取生长正常、茎秆通直均匀、径级 2 mm 左右的根系,小心去除细根、须根及附着土壤后,洗净,自然风干,剪成长 2 cm 垂直根系,用密封袋密封,放置于实验室冰箱 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中冷藏保存并尽快制样。

本试验方法严格按照国家规范《土工试验方法标准 (GB/T50123-1999)》^[25] 制备根—土复合体土样,制样过程主要包括土壤含水量控制,压样,削土等。具体操作流程为:

(1) 利用取样点土体的干密度、设计含水量 (10% , 15% , 20%) 及土样质量,计算所需加水量,将土样平铺于容器中,用喷水工具均匀加水,搅拌均匀使风干土与水充分接触,用保鲜膜封闭样品,静置 24 h ,使土样含水量均匀。加水量公式为^[10]:

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01w_0} \times 0.01(w' - w_0) \quad (1)$$

式中: m_w 为所需加水量 (g); m 为土壤样品质量 (g); w_0 为风干含水量 ($\%$); w' 为设计含水量 ($\%$)。

(2) 将根系与土体分层放入直径 61.8 mm ,高 20 mm 的圆柱形试样盒中,分 3 层击实。根据试验设

计,制备 3 种根系分布形式的复合材料 (图 1),根系垂直分布于材料中心 (垂直分布),根系在材料中心水平分布 (水平分布),根系交叉分布在样品中心 (相交分布)。在每种根系分布方式下,制备 3 种根系密度的试验样品,即根系含量 $0.006, 0.012$ 和 $0.018\text{ g}/\text{cm}^3$ 。同时为了考虑土壤含水量对根土复合材料抗剪强度的影响,以 5% 为变化梯度,制备不同含水量 10% , 15% , 20% 3 种条件下的试验样品。每种根系分布方式、每级根系密度、每种含水量各制备 4 个土样,共计 108 个根土复合土样。此外,利用原状土制备素土试验样品 4 个,以便比较根系存在产生的抗剪强度差异。

1.3 直剪试验

试验于 2019 年 9 月在中国科学院成都山地所土工实验室进行。采用应变控制直接剪切装置 (图 2),在 4 个竖向压力 ($50, 100, 150, 200\text{ kPa}$) 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散点图,并根据库仑定律计算相应的黏聚力与内摩擦角:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: τ_f 为土的抗剪强度 (kPa); σ 为法向应力 (kPa); c 为土的黏聚力 (kPa); φ 为土的内摩擦角 ($^{\circ}$)。

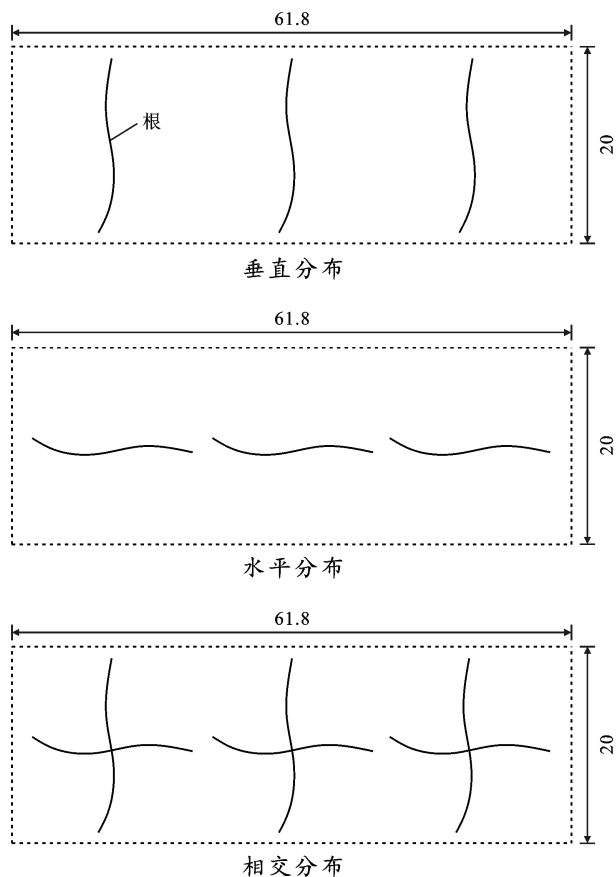


图 1 根系排列方式 (mm)

1.4 单根拉伸试验

选取根长约 5~10 cm 表皮完好的根系,用游标卡尺测定根样上、中、下 3 段处的直径,取其平均值作为该根样直径。使用电子万能试验机测量单根抗拉强度。试验时,只有当断裂面处于根段的中间位置时,被认为是由拉力引起的破坏而非其他测试过程中的损伤引起的。单根抗拉强度(F)的计算方法为:

$$F = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (3)$$

式中: P 是极限抗拉力(N); d 是平均根径(mm)。

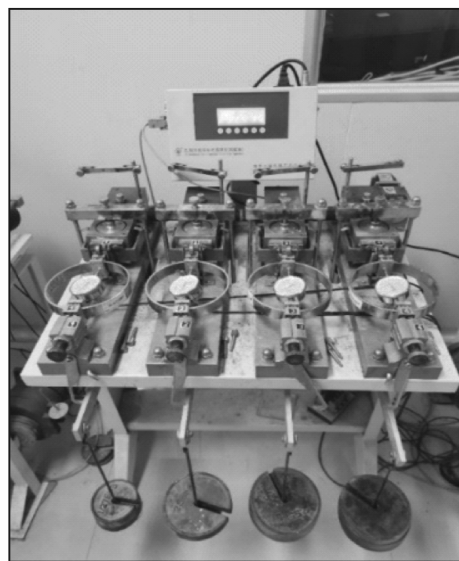


图 2 应变控制式直剪仪

1.5 数值模拟

由于本试验主要分析浅表层土体的应力应变特性,研究根系对表层边坡土体稳定性的影响,因此把边坡底层基岩与表层根土材料区分开。根据浅表层的含义,将其深度设置为 2 m,根据取样地坡面情况,设计边坡几何模型,坡高 10 m,坡度 30°,土体下部为基岩(图 3)。在建模过程中,假设素土与含根系土的根土复合体为均质材料,且坡体的初始应力场由坡体自重产生。土体采用常规理想弹塑性体模型,即摩尔库伦单元进行模拟,根据文献[26]与土体物理性质试验,确定土体的材料属性(表 2)。

表 2 试验土体材料属性

材料	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
土体	13.1	27.1	17.51	10	0.32

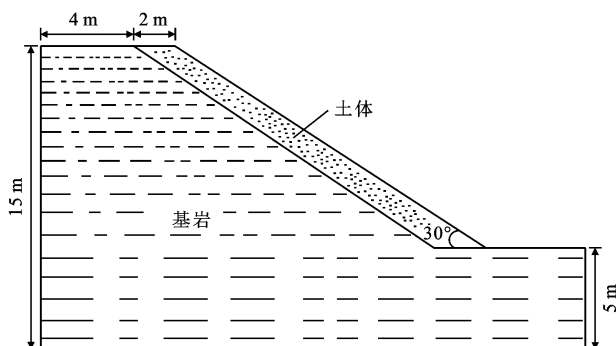


图 3 浅层边坡几何模型

根据根土材料直剪试验得到的黏聚力(c)与内摩擦(φ)采用 FLAC 3D 软件的强度折减法计算边坡安全系数。即通过折减系数 F 将土的黏聚力(c)与内摩擦(φ)逐渐降低,使某单元应力超过屈服强度,当多余的应力转移到周围单元而产生连续滑动面时,土体发生破坏,此时的 F 即为边坡的稳定安全系数,其计算公式为:

$$c_m = \frac{c}{F_r} \quad (4)$$

$$\varphi_m = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi}{F_r} \right) \quad (5)$$

式中： c_m 、 φ_m 是土强度折减后的黏聚力(kPa)和内摩擦角($^{\circ}$)； F_r 是强度折减系数。

1.6 数据处理与分析

数据统计分析采用 Excel 2019。显著性检验采用无重复方差分析,借助 SPSS 26.0 操作完成。

2 结果与讨论

2.1 根系密度对复合体力学特性的影响

不同根系密度下复合体力学特性测试表明,土壤黏聚力与内摩擦角均具有显著的差异性($P_c=0.04<0.05$, $P_{\varphi}=0.044<0.05$, 详见表 3—4)。根系分布方式与含水量一定的情况下,在各法向应力下根土复合体的抗剪强度随根系密度的增加呈现增加;相对于含水量 10%与 15%条件下,含水量 20%时不同根系密度之间的抗剪强度差异明显减小。与素土相比,各条

件下,黏聚力与内摩擦角均随根系密度的增加而增加,根土复合体黏聚力增量变化范围为 1.05~6.05 kPa,内摩擦角增量变化范围为 $-1.0^{\circ}\sim 2.6^{\circ}$ 。根系垂直分布、土壤含水量 10%时,根系密度由 0.006 g/cm^3 增至 0.018 g/cm^3 时,黏聚力分别增加了 22.93%, 28.95%和 34.59%,内摩擦角分别增加 2.95%, 4.80%和 5.90%,即在固定的根系分布方式与含水量条件下,随根系密度的增加,黏聚力与内摩擦角均呈增加趋势。在根系相交分布、土壤含水量 20%时,黏聚力与内摩擦角随根系密度变化的规律表现不明显,可能是由于根系分布复杂、土壤含水量较高多种因素综合作用下的表现。相比于素土,在根系相交分布、含水量 20%条件下黏聚力增量最高,达 45.49%;在根系相交分布,含水量 10%条件下内摩擦角增量最高,达到 9.59%。

表 3 不同条件下试样对应法向应力下土体抗剪强度值

根系排列方式	含水量/%	根系密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	不同法向应力(kPa)下土体抗剪强度				
			50	100	150	200	
素土	20.93	—	37.53	65.47	92.13	113.93	
		0.006	41.79	65.71	97.45	117.98	
		0.012	43.84	67.60	101.11	121.67	
	水平排列	10	0.018	46.51	70.22	104.83	125.84
			0.006	40.00	63.10	92.28	113.01
			0.012	41.10	66.17	97.77	116.97
		15	0.018	42.07	70.10	101.29	119.54
			0.006	39.93	61.58	90.50	111.94
			0.012	41.00	63.58	93.28	115.28
	垂直排列	20	0.018	41.62	63.59	91.85	114.93
			0.006	42.08	68.31	99.99	119.77
			0.012	44.49	69.22	101.35	123.89
10		0.018	46.41	71.00	99.96	128.01	
		0.006	40.77	63.08	90.74	115.02	
		0.012	41.66	63.78	91.39	117.00	
		15	0.018	43.50	65.53	96.35	119.63
			0.006	40.08	63.46	92.59	114.92
			0.012	43.03	64.04	95.66	118.51
相交排列		20	0.018	45.58	65.04	95.10	122.70
			0.006	45.18	71.93	101.72	126.89
			0.012	45.06	71.02	103.10	125.23
	10	0.018	47.69	75.53	104.45	133.11	
		0.006	44.34	67.38	95.58	120.96	
		0.012	45.35	68.82	97.89	123.92	
		15	0.018	45.97	71.84	100.31	126.99
			0.006	46.64	72.52	103.33	127.99
			0.012	48.32	74.73	103.30	133.87
	20	0.018	47.43	73.97	101.89	130.12	

分析表明,根系的存在可以提高根土复合体的抗剪强度,并随根系密度的增加而增加,根系增加抗剪强度的效应可能受土壤含水量的影响。这是由于根系的加入使得土体周围的容重增大,增强了土体的摩擦力。同时根系的存在改变了土壤颗粒之间的接触条件,在含有大量根系的复合体中,根系与土体之间产生更多的接触面,进而产生更强的根—土界面间的相互作用力,在进行剪切时,这种作用力转化为根系的抗拉力,因而提高了复合体的抗剪强度^[27]。不仅乔木根土复合体具有这种性质,由草本^[28]和灌木等^[29]植被根系组成的根土复合体同样如此。

根系样本的根径范围为 0.5~9.4 mm,抗拉强度范围为 6.50~169.85 MPa,根系抗拉强度与根径之间具有明显的幂函数负相关关系(图 4),其抗拉强度与根系直径拟合方程为:

$$F = 63.66d^{-0.86} \quad (R^2 = 0.53, p < 0.05)$$

随根径增大,抗拉强度减小,当根径小于 2 mm 时,抗拉强度递减速率最快,在 2~10 mm 根径范围内,根系抗拉强度随根径变化平缓。这说明细根相比粗根具有更强的抗拉强度,在土体中的加筋作用更为明显,其将土体的剪应力转化为自身的拉应力从而增强土体抗剪强度的作用更为显著。众多研究也得出了类似的结论,李牧阳^[30]对油松、华山松、日本落叶松和锐齿槲栎的研究证实了根系抗拉强度随根径增加呈负指数减少;李佳^[31]对陇南地区 4 种灌木研究也得出了类似的结论。

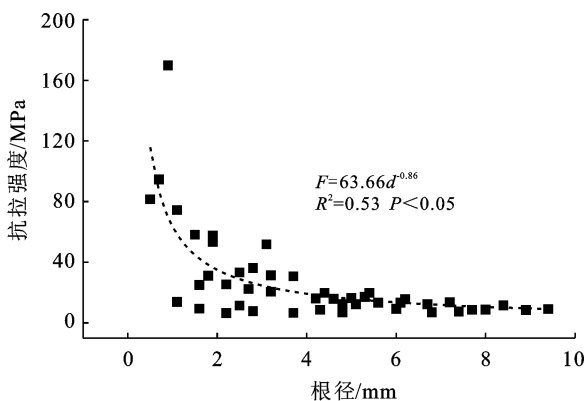


图 4 根系抗拉强度和根径的关系图及拟合曲线

2.2 根系分布方式对复合体力学特性的影响

在固定的根系密度与土壤含水量条件下,不同根系分布方式下根土复合体的力学特性有明显的规律。土壤含水量 10% 时,随根系密度的增加,根系垂直分布方式下,黏聚力分别为 16.35, 17.15 和 17.9 kPa,内摩擦角分别为 27.9°, 28.4° 和 28.7°,根系水平分布方式下,黏聚力分别为 15.65, 16.8 和 18.7 kPa,内摩擦

角分别为 27.5°, 28.1° 和 28.6°(表 4)。根系相交分布方式下,黏聚力分别为 17.7, 17.95 和 18.9,内摩擦角分别为 28.8°, 28.6° 和 29.7°。由此可知,根系垂直分布方式与水平分布方式对增强力学特性的效果相差不大,根系相交分布方式下,黏聚力与内摩擦角均高于同条件下垂直与水平分布的数值。在抗剪强度上,同样具有这样的规律;且相比于含水量 10% 与 15% 条件下,含水量 20% 时,根系相交分布下的抗剪强度与另外两种分布方式下抗剪强度的差异要明显。

表 4 不同条件下试样黏聚力与内摩擦角

根系排列方式	含水量/%	根系密度/(g·cm ⁻³)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	
素土	20.93	—	13.3	27.1	
		水平排列	0.006	15.65	27.5
			0.012	16.8	28.1
			0.018	18.7	28.6
			0.006	15.05	26.4
			0.012	15.7	27.4
			0.018	17.35	27.8
		垂直排列	0.006	14.75	26.1
			0.012	15.15	26.8
			0.018	15.95	26.4
			0.006	16.35	27.9
			0.012	17.15	28.4
0.018	17.9		28.7		
相交排列	10	0.006	14.8	26.6	
		0.012	15.05	26.9	
		0.018	16.45	27.4	
		0.006	14.35	26.9	
		0.012	15.8	27.3	
		0.018	16.75	27.6	
	20	0.006	17.7	28.8	
		0.012	17.95	28.6	
		0.018	18.9	29.7	
		0.006	17.55	27.3	
		0.012	17.8	27.9	
		0.018	18.4	28.5	
15	0.006	18.9	28.8		
	0.012	18.75	29.7		
	0.018	19.35	28.9		

研究表明,根系相交分布方式下,抗剪强度、黏聚力与内摩擦角均明显高于同条件下根系水平分布与垂直分布,相较于根系单一分布方式,复杂根系分布方式对提高根土复合体抗剪强度的作用更显著。这主要是相交分布方式下垂直方向的根系起到锚固作用,水平方向的根系起到牵拉作用^[32],在剪切过程

中,土粒之间的摩擦力转化为根系的剪切与拉伸,根系的存在多角度上增强了复合体的抗剪强度,使复合体的理化性质发生显著的变化,即根系纵横交错状态下固土护坡效果最为显著。已有研究^[14]表明,在水平根、垂直根和复合根 3 种形态的根型中,复合根最适合于增强土体强度、保持土体稳定。

2.3 土壤含水量对复合体力学特性的影响

在根系垂直分布、根系密度 0.018 g/cm^3 时,根土复合体的黏聚力与内摩擦角随含水量的增加而减小,如土壤含水量从 10% 增至 20%,黏聚力减少 10.91%,内摩擦角减少 4.79%。根系水平分布、根系密度 0.018 g/cm^3 条件下,根土复合体的黏聚力与内摩擦角也存在相似的变化规律。然而,根系相交分布方式下,黏聚力和内摩擦角不随含水量的增加而减小,而是当含水量由 10% 增至 15% 时,黏聚力和内摩擦角减小,含水量由 15% 增至 20% 时,黏聚力和内摩擦角增加。由此可知,根系水平或垂直分布条件下,黏聚力与内摩擦角随含水量的增加而减小,根系相交分布条件下,黏聚力与内摩擦角随含水量的增加,均表现为先减小后增加的趋势。同样地,根系水平与垂直分布方式下,根土复合体的抗剪强度随含水量的增加而减小,在根系相交分布方式下,这种规律表现不明显。

土壤的抗剪强度主要取决于黏聚力和摩擦力,黏聚力与法向应力无关,主要由基质吸力或负孔隙水压力产生^[33],受黏粒含量、含水量影响;摩擦力与法向应力有关,来源于剪切面土粒之间的摩擦和互相嵌入所产生的咬合力,受应力状态、土壤颗粒级配、土粒表面粗糙度等影响。本试验采用过 2 mm 筛的重塑土,故土壤细颗粒含量高,比表面积大,含水量提高使土壤颗粒之间的水膜增厚,土粒之间基质吸力减小,故黏聚力降低;当含水量继续增加时,水分产生的吸力对土壤颗粒的牵引力持续增强,因此表现为黏聚力增

大。水分在土粒中表现为润滑作用,从而使摩擦力减小;高含水量可以增强团粒之间的咬合作用,有利于提高摩擦力。在根系相交分布方式下,复杂根系的加入改变了根土复合体物理力学性质,故在剪切过程中,表现为黏聚力与内摩擦角随含水量的增加,表现为先减小后增加的趋势。

灌木和草本根系与土壤之间的摩擦效应同样具有这样的规律。Li 等^[10]研究结果与本文一致,灌木根际土壤的黏聚力随土壤含水量的增加显著降低,内摩擦角降低但不显著。Wang 等^[34]根据根系拔出试验得出,牧草水稻根系与土壤之间的界面摩擦效应随土壤水分含量的增加而迅速降低。但本研究并没有得到王晨洋等^[33]研究得出的黏聚力随含水量增加先增加后减少的结论。这可能是由于本试验中各种性质根系的加入,使得不同含水量下根土复合体的抗剪强度变化不同于土壤。

2.4 边坡稳定分析

基于不同根土特性下数值模拟表明(表 5),边坡安全系数模拟结果与复合体力学特性表现一致。根系存在下的边坡安全系数均高于素土条件下的边坡安全系数,同时边坡安全系数随着根系密度的增加而提高。因此,在进行护坡植被选择时,可将根系是否发达作为选择指标进行考虑。以往的研究多认为植被可以控制滑坡发生,然而有学者通过黄土高原降雨条件下植被覆盖斜坡上滑坡的失效机制研究,发现植被根系增加浅层土壤含水量而不能控制滑坡侵蚀^[35]。同时,边坡植被增加了坡体自重载荷,进而增加了坡体失稳的风险。因而,在气候、地形、土壤等条件存在显著差异的地区,如西南山区、黄土高原和华北土石山区等,植被对浅层滑坡的影响存在差异。因此,如何从水—土—植被耦合的角度多层次定量表达植被对浅层滑坡的作用,还需要进一步的研究。

表 5 不同根土特性条件下边坡安全系数对比

根系排列方式	根系密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	不同含水量土体边坡安全系数			不同含水量土体稳定性提高比例		
		10%	15%	20%	10%	15%	20%
水平排列	0.006	3.310	3.180	3.100	12.59%	8.16%	5.44%
	0.012	3.520	3.320	3.211	19.73%	12.93%	9.22%
	0.018	3.830	3.586	3.320	30.27%	21.97%	12.93%
垂直排列	0.006	3.440	3.148	3.090	17.01%	7.07%	5.10%
	0.012	3.580	3.195	3.330	21.77%	8.67%	13.27%
	0.018	3.700	3.430	3.480	25.85%	16.67%	18.37%
相交排列	0.006	3.680	3.590	3.860	25.17%	22.11%	31.29%
	0.012	3.711	3.660	3.900	26.22%	24.49%	32.65%
	0.018	3.898	3.773	3.940	32.59%	28.33%	34.01%

边坡安全系数在根系水平分布与垂直分布方式下相差不大,根系相交分布时,边坡安全系数明显高于同条件下其他两种分布方式,说明不同形态根系对土体稳定影响很大。因此,护坡植被配置时,纵向主根系与横向须根系发达的植被搭配护坡效果比单一植被下要好。选择不同根系形态的护坡植物,采用不同种类植物混交,形成植物根系纵横交错状态更有利于减少滑坡等山地灾害的发生^[15]。

基于根系相交分布方式、最大和最小根系密度等多工况下的边坡 x 向位移云图,边坡安全系数随含水量增加的变化规律与土壤抗剪强度一致。在根系水平分布与垂直分布方式下,边坡安全系数随含水量的增加而减小。这也揭示了降雨降低边坡稳定性、诱发浅层滑坡的一个重要原因:降雨入渗会增加土壤载荷和孔隙压力^[35-37],减弱土粒聚集性^[7],减少浅层土壤的基质吸力^[11],降低根系抗拉强度^[37]和土壤抗剪强度。在相交分布方式下,边坡安全系数随含水量增加表现出先减小后增加的趋势。在不同根系排列方式之下,边坡稳定性随含水量变化的不同表现可能是由于根系排列方式造成的根土复合体的物理力学性质不同造成的。

土壤水分是植物生长的重要基础,同时植被会对土壤水分分布和含量产生影响^[38-41],因此单纯进行不同含水量下重塑土根土复合体的抗剪强度试验无法确定自然界中不同类型植被地下根系与土壤水分变化如何影响边坡稳定性^[10],需要将野外原位观测试验与室内试验结合展开进一步研究。同时在本试验中,根土复合体是通过室内人工添加根系配置的,这样制成重塑土根土复合体与野外原状根土的理化性质存在一定差别,如没有考虑在根系生长过程中根系分泌物、根瘤菌、根菌等对土壤和根土复合体理化性质的影响,因此,需要通过野外采集原状土进行试验以得到更符合真实情况的结果。

3 结论

(1) 土体中根系的存在有效提高了土壤的抗剪强度,且随根系密度增加而增加,与素土相比,黏聚力、内摩擦角提高比例分别高达45.5%和9.6%。

(2) 根系粗细特征可影响根系的抗拉强度,对根土复合体力学过程、覆被边坡稳定性分析具有重要的实际应用意义,如较细的根径可有效地提高抗拉强度,当根径小于2 mm时,抗拉强度递减速率最快,根径在2~10 mm范围,根系抗拉强度随根径变化平缓。

(3) 根系分布方式可明显地改变根土复合体的

抗剪强度与浅层边坡稳定性,如根系交错分布方式下,抗剪强度与边坡稳定性最大,植物根系纵横交错的状态最有利于固土护坡。

(4) 此外,土壤的含水量也可有效地改变根土复合体的抗剪强度和边坡稳定性,如较高的土壤含水量可降低根土复合体的抗剪强度、黏聚力与内摩擦角,边坡安全系数减少,浅层滑坡更易发生。

因此,乔木根系的高密度发育、复交错分布、细根丛生等特点可有效地提高根土复合体抗剪强度与边坡稳定性,关注土壤含水量的变化特征、适度地增加边坡植被覆盖是认识和预防浅层滑坡发生的重要措施之一。

[参 考 文 献]

- [1] Huang Runqiu, Li Weile. Analysis of the geo-hazards triggered by the 12 may 2008 Wenchuan earthquake, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009,68(3):363-371.
- [2] Li Congrong, Wang Ming, Liu Kai. A decadal evolution of landslides and debris flows after the Wenchuan earthquake [J]. Geomorphology, 2018,323:1-12.
- [3] Zhong Cheng, Li Chang, Gao Peng, et al. Discovering vegetation recovery and landslide activities in the Wenchuan earthquake area with landsat imagery [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021,21(15):5243.
- [4] Knapen A, Kitutu M G, Poesen J, et al. Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon (Uganda): Characteristics and causal factors [J]. Geomorphology, 2006,73(1/2):149-165.
- [5] Ciabatta L, Camici S, Brocca L, et al. Assessing the impact of climate-change scenarios on landslide occurrence in Umbria Region, Italy [J]. Journal of Hydrology, 2016,541:285-295.
- [6] Wu Kanglin, Chen Ningsheng, Hu Guisheng, et al. Failure mechanism of the Yaoba loess landslide on March 5, 2020: The early-spring dry spell in Southwest China [J]. Landslides, 2021,18(9):3183-3195.
- [7] Mulyono A, Subardja A, Ekasari I, et al. The hydromechanics of vegetation for slope stabilization [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018,118(1):12038.
- [8] Li Muyang, Ma Chao, Du Cui, et al. Landslide response to vegetation by example of July 25-26, 2013, extreme rainstorm, Tianshui, Gansu Province, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021,80(2):751-764.
- [9] 周云艳.植物根系固土机理与护坡技术研究[D].湖北武汉:中国地质大学,2010.

- [10] Li Jia, Wang Xia, Jia Haixia, et al. Assessing the soil moisture effects of planted vegetation on slope stability in shallow landslide-prone areas [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(7): 2551-2565.
- [11] Yang Yang, Su Chao, Yan Mingjiao, et al. Modeling hydromechanical reinforcement of vegetation to improve the stability of a shallow slope [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, 57(5): 422-428.
- [12] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 根系与土体接触面相互作用特性试验[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(2): 62-65.
- [13] Bordoni M, Cislighi A, Vercesi A, et al. Effects of plant roots on soil shear strength and shallow landslide proneness in an area of Northern Italian Apennines [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(7): 3361-3381.
- [14] 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.
- [15] 嵇晓雷. 基于植被根系分布形态的生态边坡稳定性研究[D]. 江苏南京: 南京林业大学, 2013.
- [16] 陈潮, 张俊云, 赵晓黎, 等. 植物根系生长形态对边坡浅层稳定性影响数值研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(4): 126-130.
- [17] 廖博, 刘建平, 周花玉. 含根量对秋枫根—土复合体抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 104-110.
- [18] 文伟, 李光范, 胡伟, 等. 浅层滑坡中的乔木根系阻滑效应及变形特性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(4): 588-594.
- [19] 周跃, 张军, 林锦屏, 等. 西南地区松属侧根的强度特征对其防护林固土护坡作用的影响[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(6): 1-4.
- [20] 黄凤琴, 第宝锋, 黄成敏, 等. 基于日降雨量的年均降雨侵蚀力估算模型及其应用: 以四川省凉山州为例[J]. *山地学报*, 2013, 31(1): 55-64.
- [21] 刘莎. 凉山州农业经济发展的调查与思考[J]. *西南民族大学学报(人文社科版)*, 2003, 24(11): 75-79.
- [22] 罗清, 刘晓迎. 凉山州马铃薯气象产量模型研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 36(5): 114-118.
- [23] 刘永碧, 赵建民. 凉山州水土流失治理现状及对策[J]. *西昌学院学报(自然科学版)*, 2004, 18(3): 4-5.
- [24] 王维平. 凉山州干热河谷困难地带生态恢复与重建对策和建议[J]. *四川林业科技*, 2012, 33(1): 77-79.
- [25] 中华人民共和国水利部. 新版 GB/T50123-2019 土工试验方法标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [26] 王一峰, 李建明. 长江中上游地区坡耕地土壤抗剪强度特征[J]. *中国水土保持*, 2019(12): 78-82.
- [27] 王楠. 凤阳山典型植被类型土壤抗剪强度及其影响因素研究[D]. 江苏南京: 南京林业大学, 2019.
- [28] 奚灵智, 王龙威, 王颖, 等. 植被根系固土抗剪强度试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(4): 84-89.
- [29] 朱锦奇, 苏伯儒, 王云琦, 等. 荆条根系的固土功能随土壤含水率的变化[J]. *林业科学*, 2020, 56(6): 202-208.
- [30] 李牧阳, 王云琦, 王玉杰, 等. 甘肃天水浅表层滑坡易发区滑坡分布与植被根系特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 101-109.
- [31] 李佳, 汪霞, 贾海霞, 等. 浅层滑坡多发区典型灌木根系对边坡土体抗剪强度的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5117-5126.
- [32] 韩勇, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系: 以富县“7·21”特大暴雨为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4635-4643.
- [33] 王晨洋, 张守红, 王彬, 等. 不同土壤前期含水量对土壤分离临界水动力学特性及其抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 91-96.
- [34] Wang Hengxing, He Yulong, Shang Zufeng, et al. Model test of the reinforcement of surface soil by plant roots under the influence of precipitation [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 3625053.
- [35] Guo Wenzhao, Chen Zhuoxin, Wang Wenlong, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2020, 350: 106879.
- [36] von Ruette J, Lehmann P, Or D. Effects of rainfall spatial variability and intermittency on shallow landslide triggering patterns at a catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(10): 7780-7799.
- [37] Hales T C, Miniat C F. Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(5): 803-813.
- [38] 乔文英, 安琪琪, 常小峰, 等. 黄土高原草地灌丛化对潜在植被截留和土壤蓄水能力的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 69-76.
- [39] 李海防, 赵明秀, 樊亚明, 等. 漓江上游猫儿山 3 种典型植被不同层次土壤的含水量[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 69-73.
- [40] Zhou Qiuwen, Sun Zhiyan, Liu Xiaolin, et al. Temporal soil moisture variations in different vegetation cover types in Karst areas of southwest China: A plot scale case study [J]. *Water*, 2019, 11(7): 1423.
- [41] Zhou Tairan, Han Chun, Qiao Linjie, et al. Seasonal dynamics of soil water content in the typical vegetation and its response to precipitation in a semi-arid area of Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(10): 1015-1025.