

引用格式: 廖拉拉, 唐丽霞, 吴文丽, 阮仕航, 王子杰. 喀斯特地区棕榈根-土复合体抗剪特性[J]. 山地学报, 2024, 42(6): 827-837.

LIAO Lala, TANG Lixia, WU Wenli, RUAN Shihang, WANG Zijie. Shear resistance properties of root-soil composite of *Trachycarous fortunei* in karst area [J]. Mountain Research, 2024, 42(6): 827-837.

喀斯特地区棕榈根-土复合体抗剪特性

廖拉拉, 唐丽霞*, 吴文丽, 阮仕航, 王子杰

(贵州大学 林学院, 贵阳 550025)

摘要: 棕榈树根系发达, 生命力顽强, 是中国西南喀斯特地区生态恢复的优势树种。关于棕榈根系固土的力学特性尚不明确。本文以棕榈根系为研究对象, 将根系分为 2~3 mm、3~4 mm、4~5 mm 三个径级, 采用 TZY-1 型土工合成材料综合测定仪在 4 种垂直荷载下对棕榈根-土复合体进行直剪试验, 探讨不同含根量(2 根、4 根、9 根、16 根)和布根角度(0°、30°、60°、90°)下根-土复合体的抗剪特性。研究结果表明: (1) 相比素土, 根-土复合体的抗剪强度增加, 增幅为 0.4%~26%, 且抗剪强度整体随着含根量和布根角度的增加而增大。当含根量从 9 根增加到 16 根时, 增幅减小。当根系与剪切面的夹角趋于 90°时, 根-土复合体抗剪强度最大。(2) 抗剪强度比 F 值随含根量和布根角度的增大分别增加 23% 和 13.1%, 且低荷载下的根系有更好的抵抗剪切破坏能力。(3) 不同根系含量和分布角度分别使根-土复合体粘聚力增加 0.64~2.79 kPa 和 0.23~1.99 kPa, 同比素土提高了 2.6%~34%。根系加筋主要是通过提高附加粘聚力进而增强根-土复合体的抗剪强度, 对内摩擦角的影响并不显著。本研究成果可为棕榈根系固土效果提供有力的理论技术支撑, 为西南喀斯特地区生态恢复提供理论依据。

关键词: 根-土复合体; 根系形态; 抗剪强度; 粘聚力; 棕榈

中图分类号: S718.3

文献标志码: A

植物通过其根系实现对土壤的锚定作用, 根-土复合体的力学性质是衡量其固土能力的关键指标。当根-土复合体遭遇外力剪切时, 植物根系通过根-土界面间的摩擦和粘结效应, 将剪力转化为轴向拉伸力, 并由根系自身的抗拉强度承担, 从而约束土体变形位移, 增强土体的整体抗剪强度^[1]。

针对草本植物或细小灌木根系固土机理研究已经取得了丰富的成果。研究表明, 根-土复合体中根系效能主要与根系自身的力学性质、根-土界面特性、根系发育形态等因素相关^[2-7]。根-土复合体的

抗剪强度与根径呈正相关关系^[8-9], 随着根系密集程度的增加而增大^[10], 存在一个最优含根量使抗剪强度达到最大值^[11]。

植物根系通过提高根-土间的附加粘聚力进而提高根-土复合体间的强度^[12]。土壤粒径减小, 会降低根-土复合体内摩擦角^[13]。根-土复合体间的粘聚力随着含根量的增大而增大, 而内摩擦角与含根量相关性较小^[14]。

根系形态影响根-土复合体抗剪强度。室内直剪试验发现, 香根草(*Vetiveria zizanioides* L.) 的三种

收稿日期 (Received date): 2023-12-07; **改回日期** (Accepted date): 2024-12-07

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金(31960332); 贵州省重大专项子项目(黔科合重大专项(2014)6024-2); 贵州省基础研究(自然科学)计划项目(QKHJC-ZK[2023]YB65)。[National Nature Science Foundation of China (31960332); Sub-Project of Guizhou Provincial Major Special Project (Qiankehe Major Special Project (2014) 6024-2); Guizhou Provincial Basic Research (Natural Science) Program Project (QKHJC-ZK[2023]YB65)]

作者简介 (Biography): 廖拉拉(1998-), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水土保持。[LIAO Lala (1998-), female, born in Tongren, Guizhou Province, M. Sc. candidate, research on soil and water conservation] E-mail: gs.11liao21@gzu.edu.cn

* **通讯作者** (Corresponding author): 唐丽霞(1976-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 水土保持。[TANG Lixia (1976-), female, Ph. D., associate professor, research on soil and water conservation] E-mail: lxtang@gzu.edu.cn

布根方式(垂直、斜交、水平),其垂直布根根-土间能发挥的抗剪作用最大,水平布根时提供的抗剪作用最小,可提高粘聚力来增强根-土间抗剪强度^[15]。混合分布形态根系对表层加筋的影响最明显^[16]。

棕榈(*Trachycarpus fortunei*)广泛分布于西南喀斯特地区,生命力顽强^[17-18],是喀斯特地区生态恢复的主要树种,具有较高的观赏、经济和生态价值。棕榈属浅根乔木,根系发达,其形态通常呈中心辐射状分布(图1),对浅层土壤具有“加筋”和“网兜”等作用。然而,关于棕榈根系的力学特性还未见报道,固土力学效应尚不明确。

本文以喀斯特地区棕榈树为研究对象,通过室内重塑模拟根-土复合体进行剪切试验,探索棕榈根系分布形态(含根量和布根角度)对土体的加筋效应,分析其受力机理,为喀斯特地区生态修复提供理论依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区,该区属于亚热带湿润季风气候,年平均气温约 15.3℃,年平均相对湿度约为 77%,雨季集中在 5—10 月,年均降水量约为 1200 mm,多年平均陆地蒸发量约为 550 mm^[19]。研究区以山地和丘陵为主,是典型的喀斯特地貌,雨季易发生滑坡、泥石流等地质灾害,且在植被稀疏区极易形成侵蚀沟,导致大量水土流失。区内土壤以石灰土和酸性黄壤为主,除退耕还

林地有集中种植棕榈树外,野生棕榈也有零星分布^[20-21]。

1.2 试验材料与制备

以研究区种植 7 a 的生态修复树种棕榈为研究对象,选取长势一致的棕榈,去掉地上部分,采用整株挖掘法取出根系后将根系清理干净,对其进行分级、编号再装于密封袋中。为保持植被根系鲜活,将其放于 4℃ 冰箱中,并在 3 d 内完成试验。以研究区主要土壤类型—石灰土为试验土样,剔除其中杂质,将风干土样研磨过 2 mm 筛后备用,土壤理化性质见表 1。将试验根样裁剪成 8 cm 长,用游标卡尺测量并记录根系两端及中间的直径,通过计算取三处平均值作为该根样的根径。

1.3 试验方法

根据野外实测调查数据(表 2),将根系分为三组进行剪切试验。A 组进行不同含根量的剪切试验,根系分为 2~3 mm、3~4 mm、4~5 mm 三个径级,每个径级对应 2、4、9、16 根含量,布根角度统一为 90°;B 组进行不同分布角度的剪切试验,根系分为 2~3 mm、3~4 mm、4~5 mm 三个径级,每个径级对应 0°、30°、60°、90° 布根角度、含根量统一为 4 根;C 组为空白对照组(素土)。为模拟不同土层深度压力,每组试样分别在 20、60、120 和 180 kPa 四级垂直荷载下进行试验,通过预实验发现,剪切位移为 20 mm、速率为 0.7 mm/min 时剪切效果最好。因此,将剪切位移设为 20 mm,剪切速率设为 0.7 mm/min,每组试验重复三次,实验过程中电脑终端自动记录数据。试验样本参数如表 3、图 2 所示。



图 1 棕榈根系形态

Fig. 1 Root morphology of *Trachycarpus fortunei*

表 1 土壤物理性质
Tab. 1 Physical properties of soils

土壤类型	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	土壤粒径占比/%				
			2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.15 mm	<0.15 mm
石灰土	23	1.2	26.27	47.29	22.22	3.19	1.04

表 2 野外实测数据
Tab. 2 Field measured data of the research

实测株数/株	根深范围/cm	根径范围/mm	总根量/根	根长范围/cm	根系分叉角度范围及百分比/%		
					0°~30°	30°~60°	60°~90°
6	5~40	2~5	474	8~60	31.8	39.1	29.1

表 3 试验样本参数
Tab. 3 Parameters of test samples

组别	根径/mm	含根量/根	布根角度/(°)	垂直荷载/kPa
A	2~3 / 3~4 / 4~5	2 / 4 / 9 / 16	90	
B	2~3 / 3~4 / 4~5	4	0 / 30 / 60 / 90	20 / 60 / 120 / 180
C	CK(素土)	CK	CK	

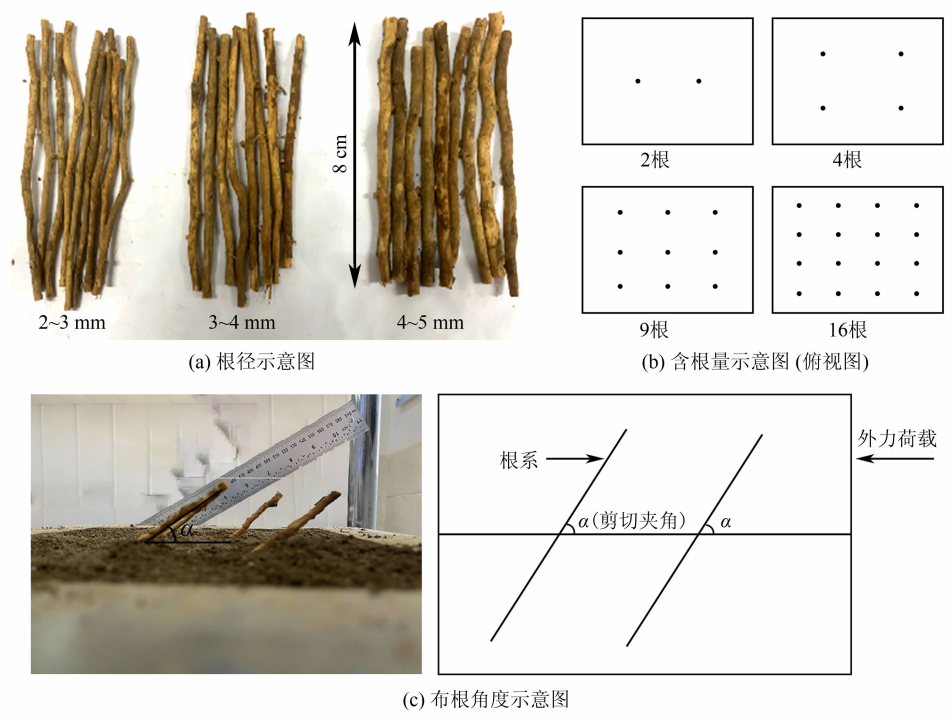


图 2 根系布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of root system arrangement

1.4 分析方法

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \tag{1}$$

式中, τ 为剪应力; c 为粘聚力; σ 为垂直荷载; φ 为

内摩擦角。

为了评价根系对土体抗剪强度的增强效应, 引入了 F (抗剪强度比)^[22]。 F 为根-土抗剪强度与素

土抗剪强度之比。 F 越大,根系对土壤抗剪强度的影响越显著。 F 表示如下:

$$F = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \quad (2)$$

式中, σ_0 为素土的破坏荷载; σ_1 为根-土复合体的破坏荷载。

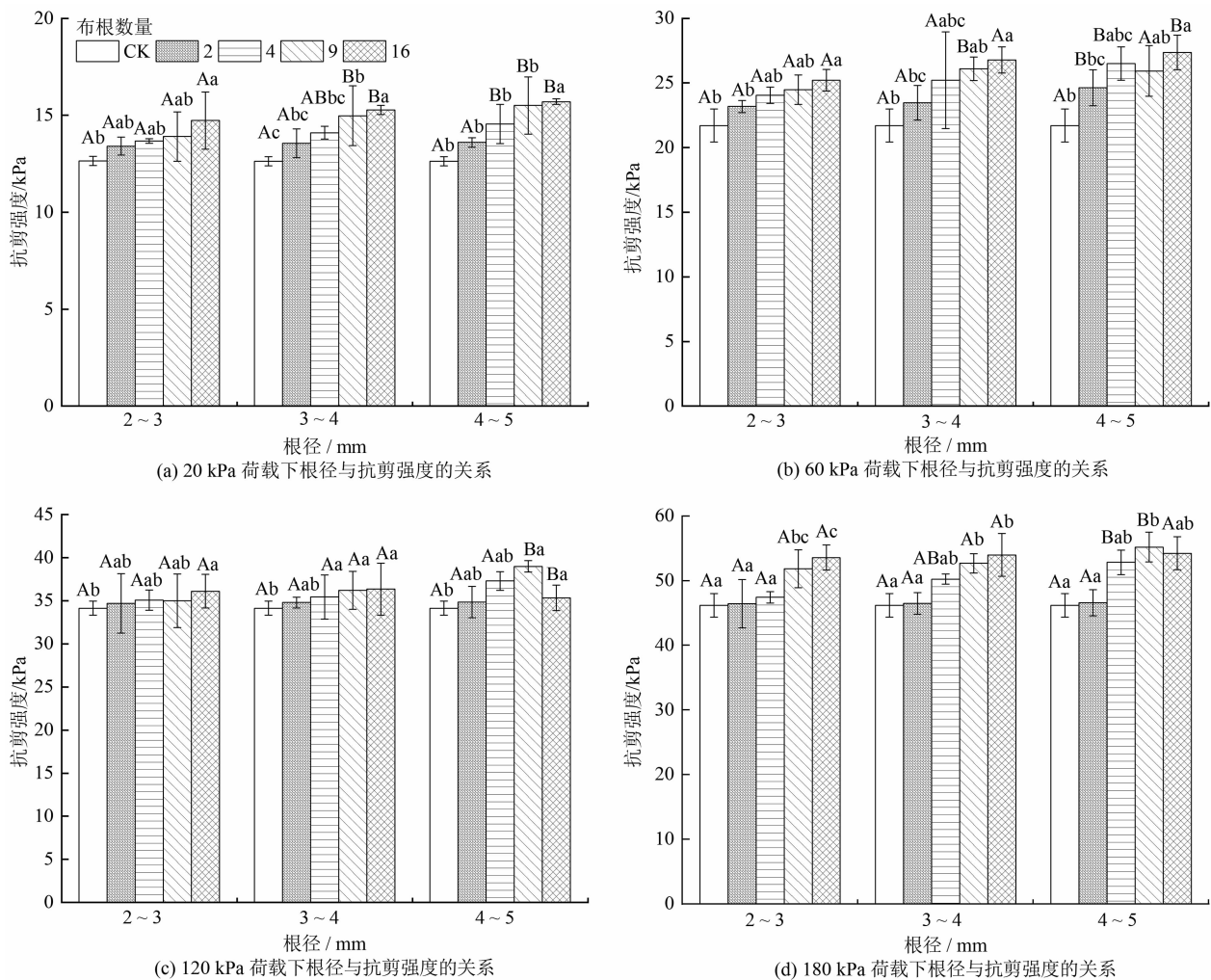
2 结果与分析

2.1 不同根系分布形态对抗剪强度的影响分析

2.1.1 含根量对抗剪强度的影响

在四级垂直荷载下,素土的抗剪强度分别为 12.625 kPa (20 kPa 荷载)、21.7 kPa (60 kPa 荷载)、34.15 kPa (120 kPa 荷载)、46.2 kPa (180 kPa 荷载)。图 3 为 4 级垂直荷载、0.05 显著水平下,

根-土复合体抗剪强度随含根量的变化图。根-土复合体的抗剪强度值均显著大于素土,说明根系的存在增强了土体的抗剪强度。含根量对根-土复合体抗剪强度影响从大到小依次为 16 根、9 根、4 根、2 根、素土。当含根量为 2 根时,抗剪强度相比素土增加 0.4 ~ 2.93 kPa,增率为 0.4% ~ 13.5%;当含根量为 4 根、9 根时,抗剪强度相比素土分别增加了 0.93 ~ 6.62 kPa、0.85 ~ 9 kPa,当含根量增加至 16 根时,根-土复合体抗剪强度有最大值,增量相对素土为 1.98 ~ 8.05 kPa,相比素土增长 5.7% ~ 26%。此外,在三种径级下,当含根量为 2 根时,抗剪强度平均增量较素土增加了 1.31 kPa;当根系含量从 2 根增加到 4 根、4 根到 9 根时,抗剪强度相对增加了 1.73 kPa 和 1.21 kPa;而当含根量从 9 根增加到 16 根时,抗剪强度的平均增量减小为 0.32 kPa,甚至存



不同大写字母代表不同径级根系抗剪强度差异性显著,不同小写字母代表不同含根量之间抗剪强度差异性显著, $P < 0.05$ 。

图 3 不同径级下含根量与抗剪强度的关系

Fig. 3 Relationship between root content and shear strength at different radial grades

在根量为 16 根时其抗剪强度小于 9 根的现象,即可能存在一个最优含根量使得根-土复合体能发挥最大的抗剪特性。

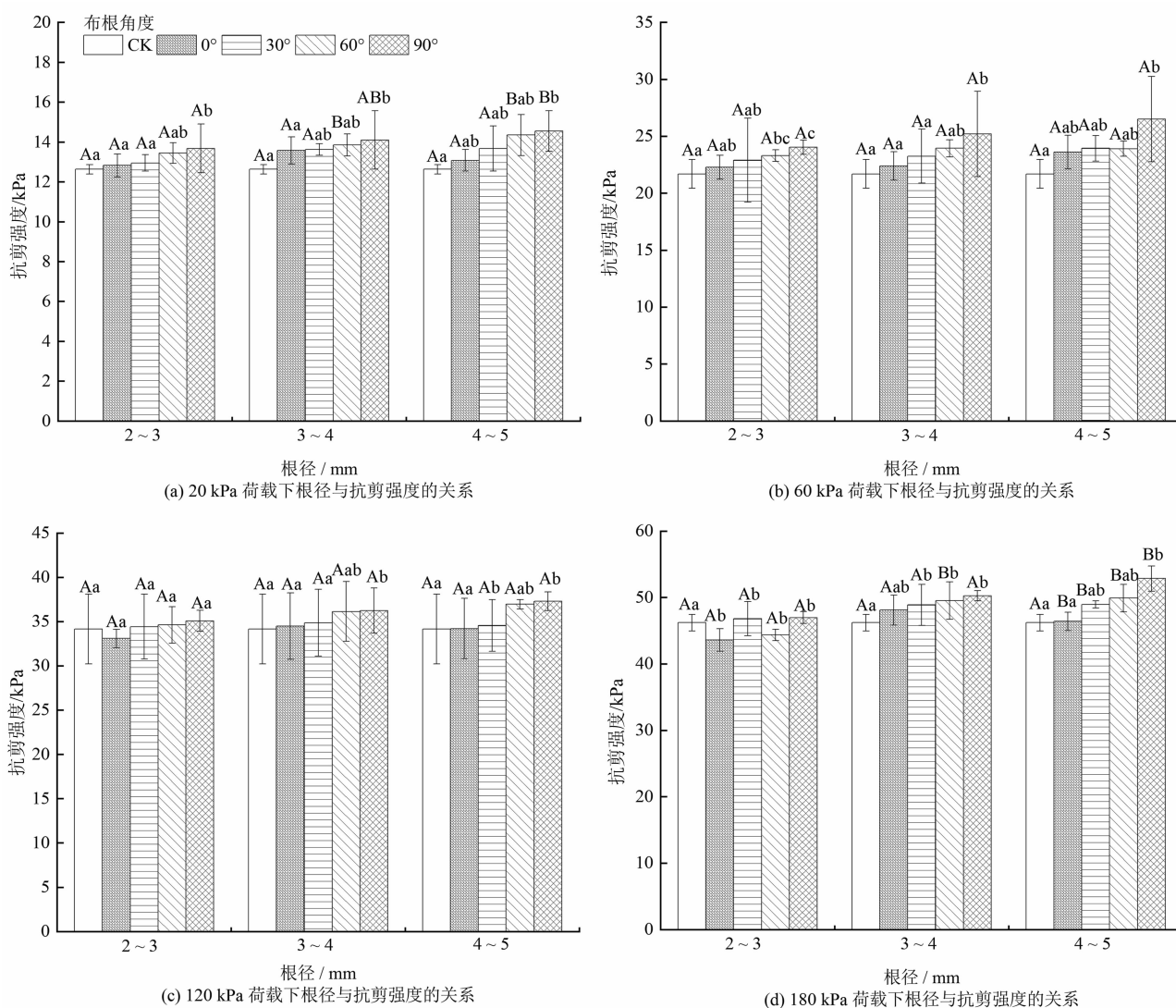
2.1.2 布根角度对抗剪强度的影响

如图 4 所示,根系与剪切面夹角也会影响根系的加固效果,从大到小为 90° 、 60° 、 30° 、 0° 、素土。在三种径级条件下,当根-土界面夹角为 0° 时,其根-土复合体抗剪强度相对素土无明显增强;当夹角为 30° 时,抗剪强度相对素土提高了 0.28 ~ 2.25 kPa,同比增长 0.8% ~ 10.4%;当夹角增大到 60° 时,其增量为 0.43 ~ 3.7 kPa;当根系与剪切面夹角为 90° 时,抗剪强度最大,最大增量为 4.8 kPa,同比增长 22.1%;当根系与剪切面夹角为 0° 和 30° 时,其抗

剪强度相比素土差异性不显著,当夹角为 60° 和 90° 时,抗剪强度相比素土差异性显著,其增量更明显,但 60° 与 90° 之间的抗剪强度无显著差异。

2.2 不同根系分布形态抗剪强度比

对不同根系形态的根-土复合体施加不同的垂直荷载,其目的在于模拟根系在不同埋深下的土重力。为了更直观地评价根系形态对抗剪强度的影响程度,引入抗剪强度比 F 。图 5 是不同含根量和布根角度在四种垂直荷载下的抗剪强度比,如图 5(a) 所示,加筋土的 F 值均大于素土,且 F 值均随着含根量的增加而增大,当根系为 2 根时, F 值相对素土的增量较小,最大增量仅 0.082;当含根量增加到 4 根时, F 值为 1.16;当含根量为 9 根时, F 值增大到



不同大写字母代表不同径级根系抗剪强度差异性显著,不同小写字母代表不同布根角度之间抗剪强度差异性显著, $P < 0.05$ 。

图 4 不同径级下布根角度与抗剪强度的关系

Fig. 4 Relationship between root angle and shear strength under different radial grades

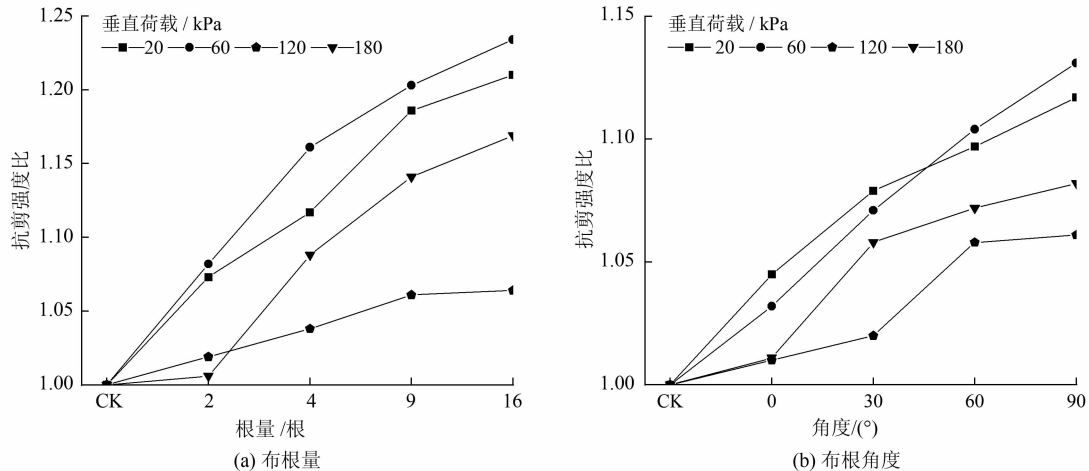


图5 抗剪强度比

Fig. 5 Ratio of shear strengths

1.2; 含根量增加到 16 根时, F 有最大值 1.23, 相比素土增加了 23%。含根量小于 9 时, 折线斜率较大, 当含根量大于 9 根时, 折线斜率变小。图 5 (b) 是不同布根角度下抗剪强度比的变化趋势, 抗剪强度比 F 随布根角度的增大呈增大趋势, 当布根角度从 60° 增长到 90° 时, 折线的斜率变小。当根系与剪切面平行时, F 值增量仅为 1% ~ 4.5%; 当布根角度为 30° 时, F 值增加了 8%; 当布根角度增大到 60° 时, F 值增率为 10.4%, 当根系与剪切面夹角为 90° 时, F 值达到了最大值 1.13, 同比增长 13.1%。

不同形态根系的抗剪强度比 F 总体随着垂直荷载的增大呈先增大后减小的变化趋势, 且低荷载 (20、60 kPa) 下的 F 值大于高荷载 (120、180 kPa) 下的 F 值, 即在低荷载下根系抵抗剪切破坏的能力更强。当垂直荷载为 60 kPa 时, 根-土复合体的 F 值较素土增幅最明显, 即存在一个最优荷载使根系充分发挥固土效应。分析其原因是荷载过低, 根系与土样的接触比较稀松, 根-土之间的咬合程度较低, 在受力时根-土复合体没有发生明显破坏, 根系变形过小, 其固土效果有限。当荷载过高时, 根-土复合体被压缩, 土壤的密实度会显著增大, 受剪切时根系会产生明显变形甚至被剪断, 土体也会出现清晰的裂缝, 根-土复合体的结构被明显破坏, 固土效果也会被削弱, 此时由土壤发挥主导作用。

2.3 不同根系分布形态对抗剪强度指标的影响

2.3.1 含根量对抗剪强度指标的影响

为了深入探究根系形态与根-土复合体抗剪特性的关系, 本研究分析了粘聚力 (c) 和内摩擦角

(φ)。不同含根量抗剪强度指标如表 4 所示。在 3 种径级条件下, 随着含根量的增加, 根-土复合体的粘聚力值均大于素土, 但有 4 组内摩擦角小于素土的情况。当含根量为 2 根时, 粘聚力最大可增大至 10.85 kPa, 平均增量为 1.6 kPa, 而内摩擦角均出现减小趋势, 增量均为负值, 均值为 -0.35° ; 当含根量为 4 根时, 粘聚力增量为 1.75 kPa、内摩擦角增量为 0.56° ; 含根量增加到 9 根, 粘聚力可增大到 10.86 kPa, 最大增量为 2.06 kPa, 内摩擦角可增大至 13.41° , 增量为 1.16° ; 当根系含量为 16 根时, 粘聚力平均增量可达到 2.12 kPa, 内摩擦角增量为 1.46° 。从表中还可得知, 当根径为 2 ~ 3 mm 时, 粘聚力的变化无明显规律; 当根径为 3 ~ 5 mm 时, 根-土间粘聚力和内摩擦角大体上都与含根量呈正相关关系; 当根径为 4 ~ 5 mm、含根量为 9 根时, 内摩擦角为 13.41° , 而当根系增加到 16 根时, 内摩擦角减小为 13.21° 。

2.3.2 布根角度对抗剪强度指标的影响

由表 5 可知, 在三种径级条件下, 0° 布置根系的粘聚力和内摩擦角相对素土都无明显增量, 甚至存在负增长的情况; 当布根角度为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 时, 根-土复合体间粘聚力和内摩擦角均随布根角度的增大而增加, 具体表现为布根角度为 30° 时, 平均粘聚力相对素土提高了 0.46 kPa、内摩擦角提高了 0.35° ; 当布根角度为 60° 时, 粘聚力增量增大到 1.51 kPa、内摩擦角增大到 0.54° ; 在布根角度增大到 90° 后, 粘聚力和内摩擦角为最大值 10.79 kPa 和 13.04° , 最大增量分别为 1.99 kPa、 1.24° , 平均增量分别为 1.

表 4 不同含根量下抗剪强度指标
Tab. 4 Shear strength index under different root contents

根径/mm	含根量/根	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	粘聚力增量/kPa	内摩擦角增量/(°)
2~3	—	8.80	11.80	0	0
	2	10.05	11.52	1.25	-0.28
	4	10.41	11.68	1.61	-0.12
	9	9.44	12.95	0.64	1.15
	16	9.97	13.50	1.17	1.70
3~4	—	8.80	11.80	0	0
	2	10.29	11.47	1.49	-0.33
	4	10.45	12.35	1.65	0.55
	9	10.86	12.83	2.06	1.03
	16	11.02	13.08	2.22	1.28
4~5	—	8.80	11.80	0	0
	2	10.85	11.35	2.05	-0.45
	4	10.79	13.05	1.99	1.25
	9	10.34	13.41	1.54	1.61
	16	11.77	13.21	2.97	1.41

表 5 不同布根角度下抗剪强度指标
Tab. 5 Shear strength index at different root angles

根径/mm	布根角度/(°)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	粘聚力增量/kPa	内摩擦角增量/(°)
2~3	—	8.80	11.80	0	0
	0	8.63	10.75	-0.17	-1.05
	30	9.46	11.78	0.66	-0.02
	60	10.76	11.82	1.96	0.02
	90	10.54	12.24	1.74	0.44
3~4	—	8.80	11.80	0	0
	0	9.29	12.09	0.49	0.29
	30	9.53	12.24	1.15	0.44
	60	9.95	12.41	1.15	0.61
	90	10.52	12.41	1.72	0.61
4~5	—	8.80	11.80	0	0
	0	9.03	11.50	0.23	-0.30
	30	9.86	12.13	1.06	0.63
	60	10.26	12.48	1.46	0.98
	90	10.79	13.04	1.99	1.24

82 kPa、0.76°。分析其原因是,根系与剪切面平行时,根系与土体之间只存在摩擦力,而在高荷载下,由于土壤的压缩作用,水平放置的根系位置会发生变化,根系既没有提供摩擦力也不分担剪切力,此时与素土无异。当布根角度为 30°~90°时,此时根系

相当于“抗滑桩”,起到了“锚固”作用,以此提高了根-土复合体抗剪强度指标,从而增强抗剪强度。

结合表 4、表 5 可知,随着径级的增大,粘聚力和内摩擦角大体上呈现增加的趋势,但增幅不大。根系的加固作用使土体更加密实、粘聚力明显增大,

增量为 0.23 ~ 2.97 kPa, 相比素土增长了 2% ~ 34%。内摩擦角增量较小, 其中有 6 组增量为负值, 其增量值为 $-1.05^{\circ} \sim 1.7^{\circ}$, 相比素土最大仅增长了 14%, 根系的存在对根-土复合体内摩擦角的影响较小, 因此可以认为根系形态对抗剪强度的提高主要是通过增大粘聚力来实现。

3 讨论

根系的加入可以显著提高土体的抗剪强度, 除土粒间的相互作用、根系自身的强度及根-土间的摩擦阻力外, 还与根系本身的形态以及分布位置有关。为进一步分析根系分布角度受剪时的力学机理, 设根-土复合体受剪力公式为^[23]:

$$F_t = F_s + F_r + f \quad (3)$$

式中, F_t 为总剪力; F_s 为土分担的剪切力; F_r 为根系分担的剪切力; f 为根-土间摩擦力。

直剪试验中, 根-土复合体在剪力的作用下整体的形态会发生破坏, 由于试验过程中土体均出现了裂缝, 因此视为土体已经充分承担剪应力, 由于土体的含水率和密度均一致, 将 F_s 视为相同且等同于素土提供的剪应力。 F_r 主要取决于根系的强度, 与自身根径有关。由于根系位于看不见的土体中, 其分布及形态结构复杂, 难以将根系的贡献作用以精准、科学、高效的方法量化出来, 而复合体抗剪强度的增量能够直观地反映根系在土体固持中的贡献作用。

许多研究者在根系加固土体效应的分析中广泛运用了计算模型, 其中, WU 氏模型因其原理清晰、输入参数少、计算简便等优点被广泛应用^[24-25]。其计算公式为:

$$\tau_i = T_i \frac{A_i}{A} \times 1.2 \quad (4)$$

式中, τ_i 为抗剪强度增量; T_i 为抗拉强度实测值; A_i 为第 i 根根径面积; A 为试样面积。

因本研究根系没有出现断裂现象, 利用 WU 模型实际计算发现误差较大, 但此模型亦不失为解决问题的有效途径, 也为进一步修正、验证 WU 模型在本研究中的适用性提供了方向。 f 是根-土之间的摩擦力, 当含水率一致时, 二者之间的摩擦力与剪切角度有关。根据摩尔-库仑定律, 破坏面与主应力面之间的夹角为 $\alpha = 45^{\circ} + (\varphi/2)$ ^[26], 但笔者认为这一结论并不适用于所有情况。如图 6 所示, 对含水率较小的复合体缓慢施压时, 根-土间未发生明显的相对位移, 此时根-土之间的摩擦力为静摩擦力, 若根系与剪切面略呈一定锐角, 根-土间的直接挤压力和摩擦力会更大, 且摩擦力在水平方向有一定的分量, 此时根-土复合体的抗剪切强度能达到最大值; 而当含水率过大时, 由于水膜的“润滑”作用, 根-土间的摩擦力较小甚至可以忽略不计, 此时布根角度对整体抗剪强度的影响变得微弱, 若此时根系与剪切面呈 90° 夹角, 刚好起到了“锚固”的作用, 从而提高根-土复合体的抗剪强度^[27]。

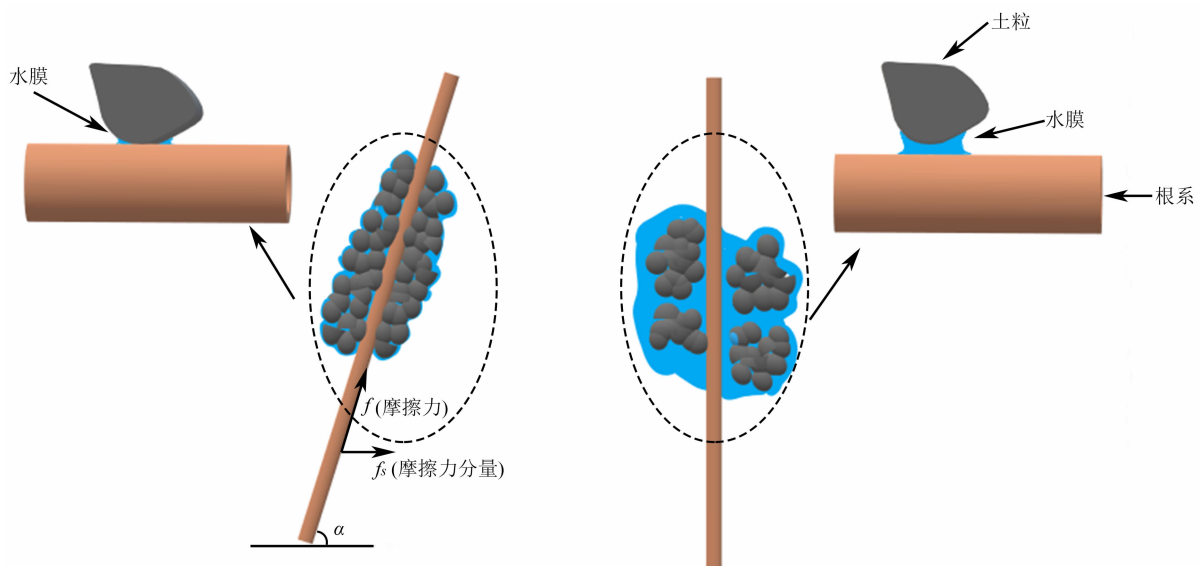


图 6 根-土界面接触状态

Fig. 6 Contact state of root-soil interface

4 结论

(1) 根系形态对根系加固效果有显著影响,根系存在能使根-土复合体的抗剪强度增大 0.4 ~ 8.05 kPa, 同比素土提高 0.8% ~ 26%。抗剪强度整体上随含根量的增大呈增大趋势, 当含根量从 9 根增加到 16 根时, 抗剪强度增幅减小, 即可能存在一个最优含根量; 抗剪强度随布根角度的增大而增加, 略呈一定锐角布根能使根-土复合体的抗剪特性得到最大发挥。

(2) 加筋土的 F 值均大于素土, 且 F 值均随含根量和布根角度的增加而增大, 最大分别可以达到 1.23 和 1.13, 同比增长 23%、13.1%; 低荷载下的根系更能发挥其抗剪切破坏能力。

(3) 不同布根方式使根-土复合体的粘聚力增加 0.23 ~ 2.97 kPa, 而内摩擦角增量为 $-1.05^{\circ} \sim 1.7^{\circ}$ 。根系对土壤的固持作用主要是通过提高附加粘聚力进而增强复合体间的抗剪强度, 对内摩擦角无显著影响。

(4) 不同形态根系固土效果不一, 为增强根-土复合体的强度, 提高根系固土效应, 在选择种植树时, 应充分考虑根系在土体中的分布形态。

参考文献 (References)

- [1] 徐华, 袁海莉, 王歆宇, 等. 根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(5): 926 - 935. [XU Hua, YUAN Haili, WANG Xinyu, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(5): 926 - 935] DOI: 10.11779/CJGE202205016
- [2] DOCKER B B, HUBBLE T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species [J]. Geomorphology, 2008, **100**(3-4): 401 - 418. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.01.009
- [3] NG C W W, WOON K X, LEUNG A K, et al. Experimental investigation of induced suction distribution in a grass-covered soil [J]. Ecological Engineering, 2013, **52**: 219 - 223. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.11.013
- [4] 周成, 路永珍, 黄月华. 香根草加固不同含水率膨胀土的侧限膨胀和直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(S2): 30 - 35. [ZHOU Cheng, LU Yongzhen, HUANG Yuehua. Oedometer expansion and direct shear tests on vetiver root-reinforced expansive soil with different water contents [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 30 - 35] DOI: 10.11779/CJGE2016S2005
- [5] GONZALEZ-OLLAURI A, MICKOVSKI S B. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes [J]. Geoderma, 2017, **285**: 141 - 150. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.10.002
- [6] KIM J H, FOURCAUD T, JOURDAN C, et al. Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: The impact of hydrological processes [J]. Geophysical Research Letters, 2017, **44**: 4897 - 4907. DOI: 10.1002/2017GL073174
- [7] 刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根-土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **37**(5): 1270 - 1280. [LIU Yabin, HU Xiasong, YU Dongmei, et al. Microstructural features and friction characteristics of the interface of shrub roots and soil in loess area of Xining basin [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **37**(5): 1270 - 1280] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1314
- [8] BISCHETTI G B, CHIARADIA E A, SIMONATO T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. Plant and Soil, 2005, **278**(1-2): 11 - 22. DOI: 10.1007/s11104-005-0605-4
- [9] MAO Zhun, YANG Ming, BOURRIER F, et al. Evaluation of root reinforcement models using numerical modeling approaches [J]. Plant and Soil, 2014, **381**(1-2): 249 - 270. DOI: 10.1007/s11104-014-2116-7
- [10] KATUWAL S, VERMANG J, COMELIS W M, et al. Effect of root density on erosion and erodibility of a loamy soil under simulated rain [J]. Soil Science, 2013, **178**(1): 29 - 36. DOI: 10.1097/SS.0b013e318285b052
- [11] FU Jiangtao, HU Xiasong, BRIERLEY G, et al. The influence of plant root system architectural properties upon the stability of loess hillslopes, northeast Qinghai, China [J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(5): 785 - 801. DOI: 10.1007/s11629-014-3275-y
- [12] HU Xiasong, BRIERLEY G, ZHU Haili, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science, 2013, **10**(4): 668 - 686. DOI: 10.1007/s11629-013-2584-x
- [13] ISLAM M S, BADHAN F F. Sandy slope stabilization using vegetation [G]// Japan Institute of Disaster Prevention & Urban Safety (BUET - JIDPUS), Bangladesh University of Engineering and Technology. Proceedings of International Conference on Disaster Risk Mitigation, September 23 - 24, 2017. Dhaka: BUET - JIDPUS, 2017: 1 - 4.
- [14] 付江涛, 余冬梅, 李晓康, 等. 柴达木盆地盐湖区盐生植物根-土复合体物理力学性质指标概率统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(8): 1696 - 1709. [FU Jiangtao, YU Dongmei,

- LI Xiaokang, et al. Statistical probability analysis of the physical index of rooted soil in Qiadam basin [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(8): 1696 – 1709] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1083
- [15] 陈终达, 肖宏彬, 张春晓, 等. 根系分布方式对根-土复合体抗剪强度的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36**(8): 130 – 135. [CHEN Zhongda, XIAO Hongbin, ZHANG Chunxiao, et al. The impact of root distribution methods on the shear strength of root-soil composite [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2016, **36**(8): 130 – 135] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.08.023
- [16] 孔纲强, 文磊, 刘汉龙, 等. 植物根系分布形态及含根复合土强度特性试验[J]. 岩土力学, 2019, **40**(10): 3717 – 3723. [KONG Gangqiang, WEN Lei, LIU Hanlong, et al. Strength properties of root compound soil and morphological observation of plant root [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(10): 3717 – 3723] DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1338
- [17] AHMED S, LIU Huimin, AHMAD A, et al. Characterization of anti-bacterial compounds from the seed coat of Chinese windmill palm tree (*Trachycarpus fortunei*) [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, **8**: 1894. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01894
- [18] LIU Yingying, WEI Xiaoli, ZHOU Zijiang, et al. Influence of heterogeneous karst microhabitats on the root foraging ability of Chinese windmill palm (*Trachycarpus fortunei*) seedlings [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(2): 434. DOI: 10.3390/ijerph17020434
- [19] 廖拉拉, 潘露, 唐丽霞, 等. 双荚决明不同弯曲程度单根抗拉变形特性[J]. 中国水土保持科学, 2024, **22**(2): 65 – 72. [LIAO Lala, PAN Lu, TANG Lixia, et al. Tensile deformation characteristics of single root with different curvature of *Cassia bicapsularis* [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, **22**(2): 65 – 72] DOI: 10.16843/j.sswc.2023060
- [20] 徐永服, 高华端, 白云星, 等. 黔中喀斯特区不同岩性发育坡耕地土力学性质差异研究[J]. 土壤通报, 2018, **49**(5): 1080 – 1084. [XU Yongfu, GAO Huaduan, BAI Yunxing, et al. Soil mechanical properties of slope cropland with different lithology development in karst area, central Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49**(5): 1080 – 1084] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2018.05.11
- [21] 郭欢, 陈龙, 唐丽霞, 等. 喀斯特区 2 种护坡灌木单根拉拔摩擦试验[J]. 中国水土保持科学, 2022, **20**(1): 128 – 135. [GUO Huan, CHEN Long, TANG Lixia, et al. Experimental study on the pull-out friction of two kinds of slope protection shrubs in karst area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, **20**(1): 128 – 135] DOI: 10.16843/j.sswc.2022.01.017
- [22] LAL D, SANKAR N, CHANDRAKARAN S. Effect of reinforcement form on the behaviour of coir geotextile-reinforced sand through laboratory triaxial compression tests [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **12**(3 – 4): 309 – 315. DOI: 10.1080/19386362.2016.1275428
- [23] POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model [J]. Water Resources Research, 2005, **41**(7): 226 – 244. DOI: 10.1029/2004WR003801
- [24] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil [J]. Journal of the Soil Science Society of America, 1977, **41**(5): 843 – 849.
- [25] 丰田, 李光范, 胡伟, 等. 乔木根土复合体的抗剪强度实验研究[J]. 应用力学学报, 2018, **35**(3): 517 – 523. [FENG Tian, LI Guangfan, HU Wei, et al. Experimental study on the influence of arborwood root on the shear strength of root-soil composite [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, **35**(3): 517 – 523] DOI: 10.11776/cjam.35.03.B017
- [26] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022: 176 – 179. [LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022: 176 – 179]
- [27] 丰田, 邱宙廷, 李光范, 等. 植被护坡中根土复合土体抗剪强度分析[J]. 水利水电技术, 2018, **49**(7): 174 – 180. [FENG Tian, QIU Zhouting, LI Guangfan, et al. Analysis on shearing strength of root-soil composite in vegetation revetment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, **49**(7): 174 – 180] DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.07.023

Shear Resistance Properties of Root-Soil Composite of *Trachycarpus Fortunei* in Karst Area

LIAO Lala, TANG Lixia*, WU Wenli, RUAN Shihang, WANG Zijie

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: *Trachycarpus fortunei* has a well-developed root system with resilient vitality, making it an advantageous

species for ecological restoration in karst areas. Unfortunately, the mechanical properties of soil reinforcement by its root are not yet clear.

In this study, the shear resistance of the root-soil composite of *Trachycarpus fortunei* with varied root morphology in the karst regions of southwestern China was investigated. It sorted the roots into three diameter classes: 2–3 mm, 3–4 mm, and 4–5 mm. Direct shear tests were conducted on the root-soil composites under four levels of vertical loads using a TZY-1 Type geosynthetic materials comprehensive tester to figure out the shear properties of the root-soil composite under different root contents (2 taproot, 4 taproot, 9 taproot, 16 taproot) and root stretching angles (0° , 30° , 60° , 90°).

(1) Compared with plain soil, the shear strength of the root-soil complex of *Trachycarpus fortunei* increased by 0.4% to 26%. The overall shear strength increased with the increase in taproot quantity and root stretching angle; however, taproot quantity increased from 9 to 16 roots, the rate of increase decreased. The shear strength of the root-soil composites reached the maximum when the angle between the root stretching and the shear plane approached 90° .

(2) The shear strength ratio (F value) increased by 23% and 13% with the increase in root quantity and root stretching angle, respectively, and the root-soil complex had better resistance to shear failure under low load.

(3) Different taproot quantities and stretching angles increased the cohesion of root-soil composites by 0.64 kPa to 2.79 kPa and 0.23 kPa to 1.99 kPa, respectively, representing an increase of 2.6% to 34% as compared with plain soil. Root reinforcement primarily enhanced the shear strength of the root-soil composites by increasing additional cohesion, with a non-significant impact on internal friction angle.

Generally, the stabilization of root-soil composite depends on the morphological features of a root system. To enhance the strength of root-soil composite and improve soil erosion resistance, a proper formation of a root system in soil should be carefully examined when selecting tree species for planting. This research would provide theoretical and technical support for soil reinforcement evaluation of *Trachycarpus fortunei* and associated ecological restoration efforts in the karst regions of southwest China.

Key words: root-soil complex; root morphology; shear strength; cohesion; *Trachycarpus fortunei*

(责任编辑 朱颖彦 李 嵘)