

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.02.012

不同土质下香根草根系分布与现场大尺寸直剪试验

王洪兵^{1,2}, 陈贺^{*2,3}, 任禾³, 郭彪⁴, 赵志成³

(1. 云南交投集团投资有限公司, 云南 昆明 650103;

2. 云南省交通投资建设集团有限公司, 云南 昆明 650103;

3. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司, 云南 昆明 650041; 4. 重庆市勘测院, 重庆 401121)

摘要:【目标】探讨不同土质条件下香根草根系分布特征与根土复合体的抗剪力学性能。【方法】选取云南省普洱市澜沧县广泛分布的滑坡堆积粉质黏土、残坡积粉质黏土、残坡积次生红黏土作为基体种植土, 开展了45组根系测量试验和大尺寸现场原状根土复合体直剪试验; 分析了不同土质、养护时长和深度条件下根系长度、根系横截面面积、分蘖数、剪切力、剪切力增量与位移之间的关系, 并与室内直剪试验进行了对比分析。【结果】根系早期以主根向地生长为主, 后期以侧向根增多、主根增粗为主, 养护8个月根系横截面面积是4个月的6~10倍, 50 cm深度范围内根系最发达, 滑坡堆积粉质黏土最适宜香根草的生长; 增加根系不仅能够大幅度提高土体的抗剪强度, 而且还会改变力-位移曲线特性, 由硬化型转变为软化型, 峰值剪切力增量随深度增加而线性减小, 养护8个月峰值剪切力增量是4个月的8~10倍; 养护4个月时3类根土复合体的力-位移曲线之间差异显著, 而8个月时差异明显缩小。【结论】相比室内小尺寸直剪试验, 现场大尺寸直剪试样中根系分布更均匀, 试验后根系完全剪断, 试验结果更可靠, 相关研究结果可为同类地区香根草防护边坡应用提供理论支撑。

关键词: 道路工程; 不同土质; 大尺寸直剪试验; 香根草根系; 峰值剪切力

中图分类号: U

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2025) 02-0103-08

Vetiver root distribution under different soil conditions and in-situ large-scale direct shear test

WANG Hongbing^{1,2}, CHEN He^{*2,3}, REN He³, GUO Biao⁴, ZHAO Zhicheng³

(1. Yunnan Communications Investment Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650103, China;

2. Yunnan Communications Investment & Construction Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650103, China;

3. Broadvision Engineering Consultants, Kunming, Yunnan 650041, China;

4. Chongqing Survey Institute, Chongqing 401121, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the vetiver root distribution characteristics and the shear mechanical properties of root-soil composite under different soil conditions. [Method] The widely-distributed landslide deposit silty clay, residual slope silty clay and residual slope secondary red clay in Lancang County, Pu'er, Yunnan Province were selected as the substrate planting soils. 45 sets of test were carried out on

收稿日期: 2024-06-03 修改日期: 2025-02-02

基金项目: 云南省基础研究面上项目 (202401AT070154); 兴滇英才支持计划项目 ([2022] 51); 云南交投科技创新计划项目 (YCIC-YF-2022-09)

作者简介: 王洪兵 (1986-), 男, 云南昆明人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为地质灾害防治。(548836867@qq.com)

* 通讯作者: 陈贺 (1986-), 男, 安徽宿州人, 博士, 高级工程师, 研究方向为岩土工程数值计算、地质灾害监测预警预报与处置。(chenhe_2009@163.com)

引用格式: 王洪兵, 陈贺, 任禾, 等. 不同土质下香根草根系分布与现场大尺寸直剪试验 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (2): 103-110.

WANG Hongbing, CHEN He, REN He, et al. Vetiver root distribution under different soil conditions and in-situ large-scale direct shear test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42 (2): 103-110.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

root system measurement and in-situ large-scale direct shear for undisturbed root-soil composite. The root length, root area, tillering number, as well as the relations of shear force and its increment with displacement under different soil conditions, maintenance time and depths were analyzed. The results were compared with those by using laboratory direct shear tests. [Result] The vetical taproot are predominant at early stage, whereas the increment of lateral roots and coarsening of vetical taproot play a major part at latter stage. The root cross-sectional area maintaining for 8 months is 6–10 times that maintaining for 4 months; the root system in 50-cm-depth range is most well-developed; and the landslide deposit silty clay is most suitable for vetiver growth. The increase of roots not only improves the shear strength of soil, but also shifts the feature of shear force-displacement curve towards strain-softening from strain-hardening. The peak shear force increment decreases linearly with increasing of depth, the value of which increases to be 8–10 times as the maintenance time increases from 4 months to 8 months. There is a significant difference for shear force-displacement curves obtained from three root-soil systems when their maintenance time is 4 months, whereas such discrepancy reduces when the maintenance time increases to 8 months. [Conclusion] Compared with the small-scale laboratory direct shear test, the root distribution is more uniform with the in-situ large-scale direct shear test. All roots are cut off after test, indicating that the results obtained with large-scale direct shear test are more reliable. The relevant study result can provide theoretical support for the application of vetiver protection slope in similar regions.

Key words: road engineering; different soils; large-scale direct shear test; vetiver root; peak shear force

0 引言

香根草是一种无性繁殖的禾本科草本植物,原产于热带、亚热带、地中海等地区,广泛分布于中国云南、广东、广西、贵州、浙江、福建等地区。香根草根系生长速度快,纵向根系深长发达,最长可达3 m,被誉为世界上根系最长的草本植物。香根草可以在低温、干旱等恶劣气候环境条件与强酸碱和贫瘠土体中生长,且生态绿化效果显著^[1]。

香根草被运用于公路、铁路、矿山、水库等边坡生态防护中^[2]。利用香根草及其深长纵向根系加筋、锚固边坡土体,一方面形成根土复合体,增强土体抗剪强度,加固边坡浅表层土体;另一方面,可以涵养水源,减少雨水径流侵蚀坡面,减少水土流失^[3];还能够兼顾边坡环境绿化,可有效解决边坡混凝土防护结构与生态环境保护之间的矛盾^[4-6]。

香根草根系分布特征与抗剪强度是评价根系固土能力的重要内容。李建兴等^[7]对比分析了三峡库区香根草、百喜草、狗牙根、紫花苜蓿根系分布特征,得出香根草的根系表面积密度最大,且多以细根为主;闫海燕^[8]从复合材料角度出发,将土体看作基体相材料,将根系看作增强相材料,引出了根土复合体的概念;李润发等^[9]开展了含香根草根系的弱膨胀土试样室内直剪试验,探讨了根土复合体抗剪强度指标与含根量之间的关系;肖宏彬等^[10-11]

利用现场取样、拉伸试验、室内直剪试验等手段研究了黏土种植条件下香根草根系的分布形态、抗拉强度、抗剪强度等;刘川顺等^[12]通过室内直剪试验研究了风化砂岩种植环境下香根草根土复合体抗剪强度特点,并指出小尺寸室内直剪试验难以剪断香根草根系;周成等^[13]针对不同初始含水率条件下香根草根土复合体膨胀土试样,开展了室内侧限膨胀试验和直剪试验;Wang等^[14]通过现场种植、室内试验等手段分析了香根草根系对膨胀土膨胀性的影响规律;邓友生等^[15]将香根草根系放进土体中配制形成三轴压缩试样,通过三轴压缩试验研究了不同根系分布情况下含根量与抗剪强度之间的关系;Hoque等^[16]开展了含香根草根系砂土试样的三轴压缩试验,得出香根草根系能够增加砂土的黏聚力、减小内摩擦角;余燧等^[17]利用根系拉拔试验和根土复合体直剪试验研究了红黏土种植条件下香根草根土复合体的力学性能;肖海等^[18]通过室内拉拔试验研究了不同根系倾角条件下根土复合体的力学性能与破坏形式;邓友生等^[19]通过室内外大比例模型试验探讨了坡顶分级加载作用下香根草与微型桩协同护坡效果;鉴于根系加固不仅取决于根的拉伸强度,而且还受根系分布形态影响,李珍玉等^[20]在具有坡度的模型试验槽中种植香根草,通过全断面开挖法研究了2 a生香根草根系的分布特征;Phan等^[21]通过图像处理技术研究了香根草根系生长及其分布状态特征;陈婧逸等^[22]开展了相关根系室内直剪试

验,试验结束后几乎没有根系剪断。

综上所述,国内外学者为探明香根草根系在土体中的生长分布形态、根土复合体抗剪强度等力学性能,多通过环刀法、挖掘法、土钻法等现场离土取样方法获取香根草根系,再利用香根草根系与土体配制形成室内试样。通过室内直剪试验和拉伸试验,获得了不同含根量、生长倾角等条件下香根草根系抗拉强度、根土复合体抗剪强度,为评价香根草根系的加固作用效果研究及推广应用奠定了良好的基础。然而,室内试验采用的配制试样忽略了根系在土体中生长过程形态,小尺寸的室内直剪试验难以剪断香根草根系,无法全面评价香根草根系对边坡加固效果^[1, 12, 22];另外,不同种植土条件下香根草根系分布及其剪切试验结果对于香根草加固边坡推广应用也很重要,但目前相关研究却鲜见报道。

本研究选取云南省普洱市澜沧县境内分布的滑坡堆积粉质黏土、残坡积粉质黏土、残坡积次生红黏土作为香根草种植土;利用大尺寸PVC管完成香根草种植养护,基于自主研发的现场直剪试验装置开展了系列根系生长状态试验和现场原状根土复合体大尺寸直剪试验;分析了不同土质和养护时长条件下香根草根系分布特征与剪切力学特性。研究结果可为该地区乃至同类地区香根草加固边坡应用提供理论支撑。

1 种植土条件

试验种植土取样地点位于云南省普洱市澜沧县境内,地处北纬 $22^{\circ}01' \sim 23^{\circ}16'$,东经 $99^{\circ}29' \sim 100^{\circ}35'$,北回归线以南,属南亚热带湿润气候,降雨充沛,日照充足,冬无严寒,夏无酷暑,干湿分明,气温为 $23.1 \sim 28.9^{\circ}\text{C}$ 。为研究不同土质条件下香根草根系分布特征和根土复合体物理力学性质,选取当地分布的3种土体作为种植土。

(1) 滑坡堆积粉质黏土:黄褐色,硬塑状,含25%~40%碎石和角砾,粒径一般为10~30 mm,最大为50 mm,次棱角状,成分为全~强风化砂岩,土质均匀性较差。

(2) 全新统残坡积粉质黏土:红褐色,硬塑状,含5%~10%碎石,粒径为5~10 mm,成分为全~强风化砂岩。

(3) 全新统残坡积次生红黏土:灰红、褐黄色,硬塑状,含少量角砾,呈棱角~次棱角状,成分为强风化砂岩和白云质灰岩,土质较均匀,切面粗糙,

干强度高。

通过室内试验测得3种植土的物理力学参数(见表1)。滑坡堆积粉质黏土的天然密度和压缩模量最大,天然孔隙比、天然含水量、液性指数最小;残坡积次生红黏土的天然孔隙比、天然含水量、塑性指数最大。

表1 种植土的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of planting soil

土质	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	天然 孔隙比	天然含 水量/%	液性 指数	塑性 指数	压缩模 量/MPa
滑坡堆积粉质黏土	2.11	0.537	18.80	0.06	0.15	6.69
残坡积粉质黏土	1.83	0.990	31.48	0.28	0.12	3.88
残坡积次生红黏土	1.82	1.048	35.30	0.42	0.27	6.10

2 试验方法与方案

2.1 香根草种植养护

(1) 李珍玉等^[20]研究认为,2 a生香根草根系原位长度一般约为1 m,横向分布在直径25 cm范围内,因而种植养护采用45根直径为35 cm、高度为1.2 m的PVC管作为种植桶。

(2) 现场挖取大量滑坡堆积粉质黏土、残坡积粉质黏土、残坡积次生红黏土,并运送至距离取样点约为4 km的试验场地备用。

(3) 为使得种植桶内土体物理力学性能尽量与现场取样点保持一致,采用分层填筑、分层压实方法填筑土体,通过灌砂法测量每层土体的密度,待该层土体密度与现场取样点基本一致后再填筑下一层,直至填满种植桶。

(4) 分别在每个PVC管种植桶中种植1株香根草,并定期浇水养护,养护时间分别为4个月和8个月,从种植当日算起分别达到120 d和240 d为止,即月份分别位于当年3~7月和3~11月期间。

(5) 养护过程中,香根草放在室外接受阳光照射,自然降雨条件下自然生长,长期未降雨时辅助浇水。

2.2 香根草根系分布试验

待香根草种植养护4个月和8个月时,考虑到试验种植数量,为消除人为误差,随机选取对应3种土质的香根草种植桶各2个,将种植桶水平放置,采用锯子慢慢切开PVC管,利用压力水进行反复冲洗,直至将泥土冲洗干净,采用毛刷清除根系之间的土体,避免人工损伤根系。

从根系加固边坡角度而言^[22-23],根长主要反映根系的穿透和延伸能力,根系面积反映根系与土壤

接触紧密程度。采用测绳先后测量养护4个月和8个月的香根草分蘖数、茎高及其根系的长度、横截面面积。

2.3 现场剪切试验

2.3.1 大尺寸现场直剪试验装置

为克服现场取样、配制试样、小尺寸室内直剪试验等不足,研发了一套可开展香根草根土复合体现场原位剪切试验的装置^[24],如图1所示。该现场原状土剪切试验装置主要由圆环剪切盒、推力施加装置、推力测试装置3个部分组成,其中圆环剪切盒包括剪切圆环和固定圆环,由直径325 mm的不锈钢管制作;推力施加装置包括螺纹丝杆、底座、摇杆等;推力测试装置包括标注刻度的导向槽和导向杆、测力传感器、读数仪等。

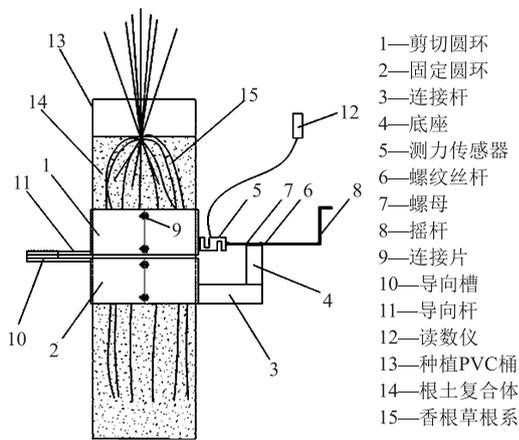


图1 现场剪切试验装置

Fig.1 In-situ shear test device

2.3.2 试验过程

(1) 确定剪切面位置,将固定圆环固定在剪切面下侧,采用钢锯、切割机等切割并移除剪切面及其以上PVC管,切割过程中要谨防损毁香根草根系。

(2) 安装剪切圆环、推力施加装置、推力测试装置,将导向杆置于导向槽中并对齐。

(3) 缓慢匀速转动摇杆,对剪切圆环施加荷载,并按照等位移间隔记录推力读数仪的读数。

2.4 试验方案

为研究香根草根系分布特征和根土复合体抗剪强度特征,先后完成了养护4个月和8个月条件下测量试验和大尺寸剪切试验。测量试验主要测量茎叶高度、分蘖数、香根草根长、根系面积等参数,其中根系测量深度自上而下分别为10,30,50,70,90,110,130,150 cm。

现场剪切试验采用的试样分别为3种不同土质对应的素土和根土复合体,鉴于深度0~50 cm范围内根系集中且面积变化较大,大于80 cm深处根系面积变化较小,且考虑大型直剪试验装置剪切圆环和固定圆环高度,剪切面深度自上而下分别为20,50,80 cm。为保障试验结果可靠性,分别开展2组平行的滑坡堆积粉质黏土、残坡积粉质黏土、残坡积次生红黏土根土复合体大尺寸剪切试验,试验编号为1#和2#。同时完成了这3种黏土的大尺寸剪切试验。

3 试验结果

3.1 香根草根系分布

不同土质和养护时长条件下香根草分布参数如表2所示。香根草种植养护4个月时分蘖数为10~56个,茎高达到134~198 cm,根长为88~167 cm;养护8个月时分蘖数达到25~73个,茎高达到157~210 cm,根长为150~180 cm;养护4个月时滑坡堆积粉质黏土对应的分蘖数和茎高最大,其次为残坡积次生红黏土,残坡积粉质黏土对应的分蘖数、茎高最小;而养护8个月时滑坡堆积粉质黏土对应的分蘖数、茎高、根长均最大,其次为残坡积次生红黏土,最后为残坡积粉质黏土。由此说明,滑坡堆积粉质黏土更加适宜香根草的生长。

表2 不同土质和养护时长条件下香根草分布参数

Table 2 Distribution parameter under different soil and curing time conditions

土质	养护时长/月	试样编号	分布参数		
			蘖数/单位	茎高/cm	根长/cm
滑坡堆积粉质黏土	4	1#	47	198	144
		2#	56	187	120
	8	1#	73	210	180
		2#	60	201	180
残坡积粉质黏土	4	1#	17	134	94
		2#	10	134	88
	8	1#	30	160	150
		2#	25	157	150
残坡积次生红黏土	4	1#	14	165	167
		2#	22	158	160
	8	1#	32	205	170
		2#	28	202	170

养护8个月时香根草根系要比养护4个月的关系更加发达;香根草的根系均以纵向发展为主,其

中浅层以根颈为中心向地下各个方向作辐射状发展, 并扩展形成网状结构; 随着土层深度的增加, 根系多为垂直向下生长, 较粗根系向地生长, 较细根系向四周生长。

养护 4 个月和 8 个月条件下不同土质对应的根系横截面面积与深度之间的关系如图 2 所示。其中横截面面积通过细测绳量取周长后换算得到。由图可知, 随着深度增加, 根系面积首先快速减小, 当深度大于 50 cm 时面积近似呈线性减小, 由此说明香根草对浅层 50 cm 边坡土体加固效果更为显著; 养护 8 个月时横截面面积是养护 4 个月时的 6~10 倍, 结合表 2 表明香根草根系首先向地生长, 而后增粗纵向主根, 并以纵向主根为中心增加侧向根生长, 其中滑坡堆积粉质黏土中根系最为发达。

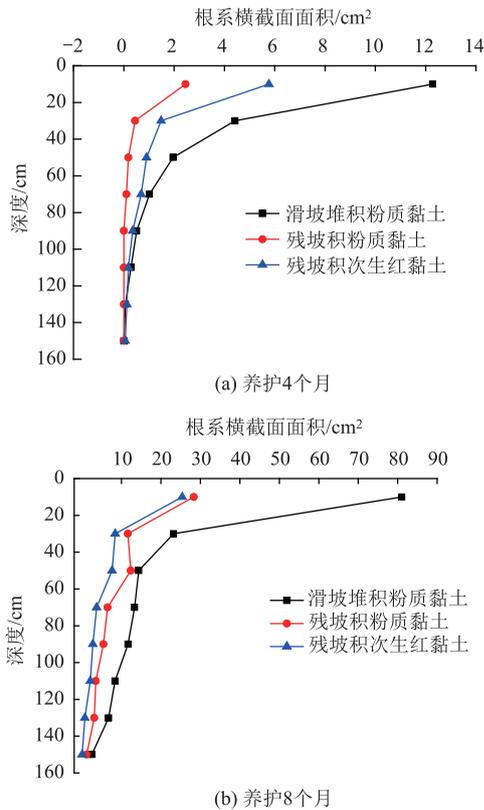


图 2 根系横截面面积与深度之间关系
Fig. 2 Relation between root cross-section area and depth

3.2 原状根土复合体现场剪切试验结果

室内直剪试验和现场大尺寸直剪试验中, 室内根土复合体试样采用标准环刀 (内径为 61.8 mm, 高度为 20 mm) 切取模型箱种植的原状香根草-黏土体获取。由于现场直剪试验试样尺寸较大, 其香根草根系相互缠绕交织, 较室内直剪试验更为均匀, 由此表明原位直剪试验结果更具可靠性。

3.2.1 养护 4 个月

养护 4 个月条件下根土复合体典型剪切力与剪切位移之间的关系如图 3 所示。由图可见, 不论是何种土质, 根土复合体剪切力均在素土基础上有大幅提高, 剪切面越浅提高幅度越大, 由此表明香根草根系的加固效果显著, 随着深度减小加固效果越显著; 随着剪切位移增加, 剪切力首先线性增大, 达到峰值后近似线性减小; 残坡积粉质黏土和残坡积次生红黏土素土及其根土复合体剪切面 80 cm 处对应的曲线呈现应变硬化特征, 而剪切面为 20 cm 和 50 cm 对应的曲线呈现应变软化特征, 另外随着

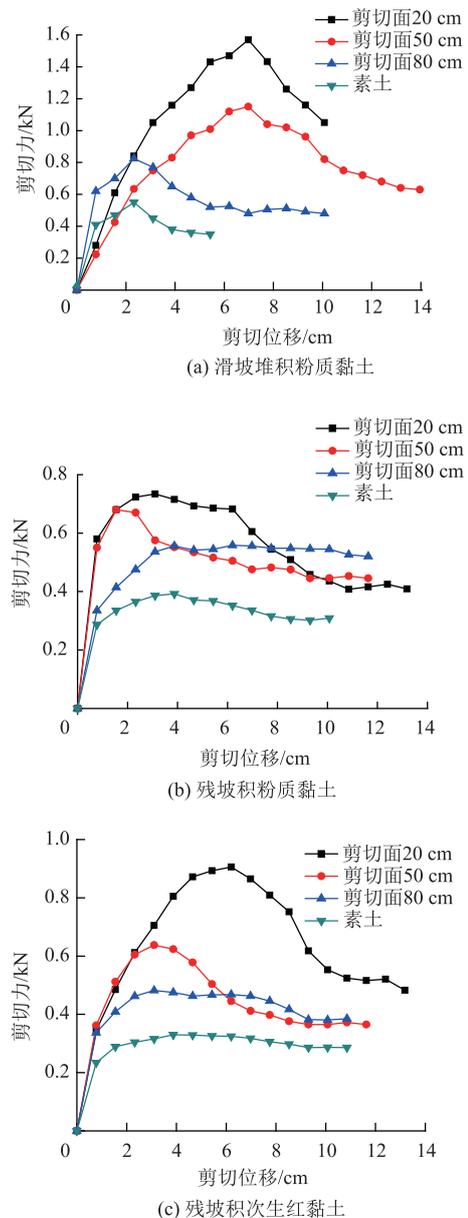


图 3 养护 4 个月条件下根土复合体剪切力与位移关系
Fig. 3 Relation between shear force and displacement of root-soil composite for 4-month curing

剪切面深度减小,初始剪切模量呈增大趋势,由此可以表明香根草根系的增强作用可以改变土体的剪切曲线特性;对比图3中的3个图可知,滑坡堆积粉质黏土剪切峰值最大,而后为残坡积次生红黏土,最后为残坡积粉质黏土。

养护4个月时不同土质条件下峰值剪切力增量与剪切面深度之间的关系如图4所示。其中峰值剪切力增量为根土复合体峰值剪切力与对应的素土峰值剪切力之差。由图可知,峰值剪切力增量随剪切面深度增大而近似呈线性减小,滑坡堆积粉质黏土的峰值剪切力增量最大,而后为残坡积次生红黏土,最后为残坡积粉质黏土。

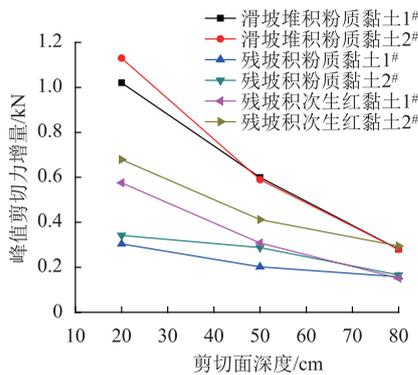


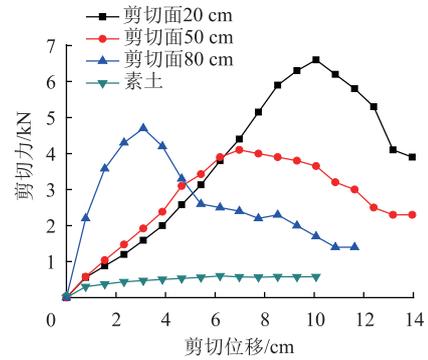
图4 养护4个月峰值剪切力增量与剪切面深度关系

Fig.4 Relation between shear force peak increment and shear depth for 4-month curing

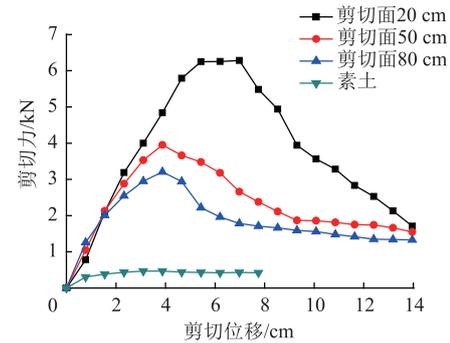
3.2.2 养护8个月

养护8个月条件下典型根土复合体剪切力与剪切位移之间的关系曲线如图5所示。相比4个月条件下根土复合体(见图3),剪切力提高幅度更加显著,由此表明种植养护8个月条件下香根草根系的加固效果倍增,尤其是浅层土体加固效果;随着剪切位移增加,剪切力首先线性增大,达到峰值后近似线性减小;除素土外,不同剪切面处的根土复合体剪切力-剪切位移曲线均呈现应变硬化特征,由此可以表明养护8个月时香根根系较多,直剪试验结果主要由根系决定。含石量最大、密度最大、孔隙比最小(见表1)的滑坡堆积粉质黏土剪切变形模量较大,含根量越少土体变形特征越显著,根土复合体剪切变形模量越大,因此剪切面80cm处首先出现峰值,剪切面20cm处最后出现峰值。

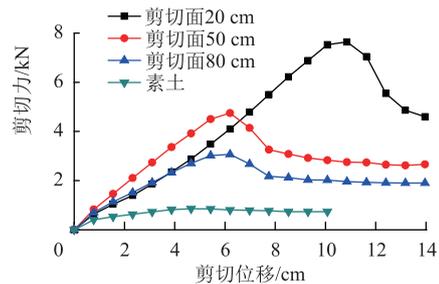
养护8个月时不同土质条件下峰值剪切力增量与剪切面深度之间的关系如图6所示。其中峰值剪切力增量为根土复合体峰值剪切力与对应素土峰值剪切力之差。除滑坡堆积粉质黏土之外,其余峰值剪切力增



(a) 滑坡堆积粉质黏土



(b) 残坡积粉质黏土



(c) 残坡积次生红黏土

图5 养护8个月条件下根土复合体剪切力与位移关系

Fig.5 Relation between shear force and displacement of root-soil composite for 8-month curing

量均随着剪切面深度增加而减小;养护8个月时峰值剪切力增量是养护4个月的8~10倍,但不同土质对应的根土复合体峰值剪切力增量差别减小;相比文献[13]所述的配制试样室内直剪试验结果,现场原状根土复合体试验结果得到的剪切力增幅更大。

室内直剪试验和现场大尺寸直剪试验后,室内直剪试验位移较小,香根根系未剪断,而现场大尺寸直剪试验对应的香根根系已完全被剪断,试验结果更可靠。

4 结论

通过根系和土体配制而成的根土复合体室内直剪试样忽略了根系在土体中原生长分布形态,小尺寸室内直剪试验难以剪断香根根系。为探讨香

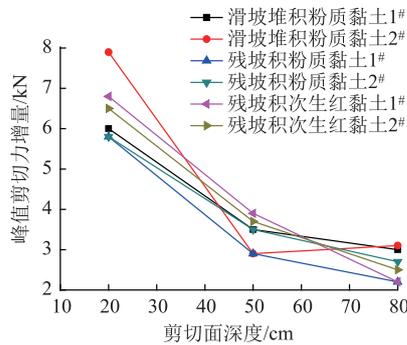


图6 养护8个月峰值剪切力增量与剪切面深度关系

Fig.6 Relation between shear force peak increment and shear depth for 8-month curing

根根系分布特征与抗剪力学特性, 选取云南省普洱市澜沧县分布的滑坡堆积粉质黏土、残坡积粉质黏土、残坡积次生红黏土作为基体种植土。现场完成45组香根草的种植与养护后, 开展了系列根系测量试验和原状根土复合体大尺寸现场直剪试验, 分析了不同土质、养护时长和深度条件下根系长度、根系横截面积、分蘖数与剪切力-位移曲线、峰值剪切力增量-位移曲线, 并与室内直剪试验进行了对比分析。

(1) 早期根系以纵向主根生长为主, 后期以侧向根增多、主根增粗为主, 50 cm 深度范围内根系最发达, 养护8个月根系横截面积是养护4个月的6~10倍, 滑坡堆积粉质黏土最适宜于香根草的生长。

(2) 根系的增加不仅能够大幅度提高土体的抗剪强度, 而且还会改变剪切力-位移曲线特性, 由硬化型转变为软化型, 峰值剪切力增量随深度增加而近似呈线性减小, 养护8个月峰值剪切力增量是养护4个月的8~10倍。

(3) 养护4个月时, 滑坡堆积粉质黏土、残坡积粉质黏土、残坡积次生红黏土作为基体的根土复合体力-位移曲线之间差异显著, 而养护8个月时该差异明显缩小。

(4) 现场大尺寸直剪试验采用的试样中香根草根系分布更均匀, 试验后剪切面处根系完全剪断, 相比室内直剪试验更全面, 相关研究结论可为该地区乃至同类地区香根草加固边坡应用提供理论支撑。

参考文献:

References:

[1] PHAN T N, LIKITLERSUANG S, KAMCHOOM V, et al. Root biomechanical properties of *chrysopogon zizanioides* and *chrysopogon nemoralis* for soil reinforcement and slope stabilization [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32 (16): 4624-4636.

[2] ISLAM M S, SHAHRIAR B A M, NAYAR F. Biotechnical solution for Dyke protection in saline zone of Bangladesh [C] // *Proceedings of the 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research (ACEM14)*. Busan: [s. n.], 2014.

[3] 王帅. 不同配比深、浅根系植物对边坡抗冲、抗剪性能影响试验 [J]. *公路交通科技*, 2013, 30 (12): 39-44.
WANG Shuai. Experiment on influence of different proportions of deep-root and shallow-root plants on anti-erosion and shear performance of slope soil [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30 (12): 39-44.

[4] 程鹏, 李锦辉, 宋磊. 生态边坡的水力和力学特性分析: 试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39 (10): 1901-1907.
CHENG Peng, LI Jinhui, SONG Lei. Hydraulic and mechanical characteristics of ecological slopes: Experimental study [J]. *Chinise Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39 (10): 1901-1907.

[5] 张红日, 王桂尧, 沙琳川. 一种稻秸秆泥皮护坡材料及抗冲刷试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2017, 34 (1): 24-31.
ZHANG Hongri, WANG Guiyao, SHA Linchuan. Experiment study on a rice-straw mud material for slope protection and anti erosion [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34 (1): 24-31.

[6] SINGH S R, PRAKASH A, HAZRA B, et al. Stochastic modelling of relative water permeability in vegetative soils with implications on stability of bioengineered slope [J]. *Stochastic Environment Research and Risk Assessment*, 2018, 32 (12): 3541-3559.

[7] 李建兴, 何丙辉, 湛芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (5): 1535-1544.
LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (5): 1535-1544.

[8] 闫海燕. 香根草根土复合体力学性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
YAN Haiyan. Research on mechanical properties of vetiver root-soil composite [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.

[9] 李润发, 王桂尧, 张永杰, 等. 种植香根草根系对膨胀土特征影响的试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2020, 37 (5): 43-52.
LI Runfa, WANG Guiyao, ZHANG Yongjie, et al. Experiment study on influence of planting vetiver root on characteristics of expansive soil [J]. *Journal of Highway*

- and Transportation Research and Development, 2020, 37 (5): 43-52.
- [10] 肖宏彬, 田青青, 李珍玉, 等. 林草混交根-土复合体的抗剪强度特性 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34 (2): 1-5.
XIAO Hongbin, TIAN Qingqing, LI Zhenyu, et al. Shear strength characteristics of root and soil composite formed from mixed forest and grass [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34 (2): 1-5.
- [11] 肖宏彬, 赵亮, 李珍玉, 等. 香根草根系的分布形态及抗拉强度试验研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34 (3): 6-10.
XIAO Hongbin, ZHAO Liang, LI Zhenyu, et al. Experimental study on vetiveria zizanioides root system distribution and tensile strength [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34 (3): 6-10.
- [12] 刘川顺, 吴洪亮, 张路. 香根草根土复合体抗剪强度试验研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2012, 45 (5): 580-583.
LIU Chuanshun, WU Hongliang, ZHANG Lu. Experimental study of shear strength of soil rooted with vetiver roots [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45 (5): 580-583.
- [13] 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 (增2): 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.
- [14] WANG G Y, HUANG Y G, LI R F, et al. Influence of vetiver root system on mechanical performance of expansive soil: Experimental studies [J/OL]. Advances in Civil Engineering, 2020. (2020-12-31) [2024-04-30]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244818>.
- [15] 邓友生, 姚志刚, 段邦政, 等. 基于分形理论的香根草根系护坡力学性能分析 [J]. 农业工程学报, 2024, 40 (4): 147-154.
DENG Yousheng, YAO Zhigang, DUAN Bangzheng, et al. Mechanical properties of slope protection by vetiver root using fractal theory [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40 (4): 147-154.
- [16] HOQUE I L, ISLAM M S, HOQUE E. Effect of vetiver root on triaxial shear strength of a cohesionless soil [J]. Geomechanics and Geoenvironment, 2022, 17 (3): 857-871.
- [17] 余焱, 刘思思, 李某明, 等. 红黏土边坡香根草根土复合体的强度特性 [J]. 水土保持通报, 2021, 41 (1): 97-102.
YU Yi, LIU Sisi, LI Mouming, et al. Strength characteristics of vetiver root-soil complex on red clay slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41 (1): 97-102.
- [18] 肖海, 张千恒, 夏振尧, 等. 拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能 [J]. 农业工程学报, 2022, 38 (11): 91-97.
XIAO Hai, ZHANG Qianheng, XIA Zhenyao, et al. Mechanical properties of roots of vetiveria zizanioides as protection slope plants under tensile and pullout conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (11): 91-97.
- [19] 邓友生, 孙雅妮, 赵明华, 等. 微型桩-香根草协同护坡试验与计算研究 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (7): 68-75.
DENG Yousheng, SUN Ya'ni, ZHAO Minghua, et al. Experimental and calculation analysis of slope protection by collaborated micropiles and vetiver [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (7): 68-75.
- [20] 李珍玉, 王丽锋, 肖宏彬, 等. 香根草根系在公路边坡土体中的分布特征 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25 (1): 102-112.
LI Zhenyu, WANG Lifeng, XIAO Hongbin, et al. Distribution characteristics of vetiver's roots in highway slope [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25 (1): 102-112.
- [21] PHAN T N, LIKITLERSUANG S. Root system architecture of two vetiver species for root reinforcement modelling [J]. Modelling Earth Systems and Environment, 2024, 10: 233-241.
- [22] 陈婧逸, 陈晓清, 宋东日, 等. 灌木根系形态对土体强度影响的大直剪试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41 (8): 120-127, 163.
CHEN Jingyi, CHEN Xiaoqing, SONG Dongri, et al. Effect of shrub root morphology on root-soil complex strength: A study based on large-scale direct-shear test [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41 (8): 120-127, 163.
- [23] 刘英, 宋子轩, 马力杰. 公路生态边坡植生技术与抗冲刷效果试验研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (增2): 82-89.
LIU Ying, SONG Zixuan, MA Lijie. Experimental study on vegetation technology and anti-scour effect on highway ecological slope [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (S2): 82-89.
- [24] 郭彪, 汤永华, 李世民, 等. 一种根土复合体原位剪切试验装置及应用方法: 20161078888.9 [P]. 2016-12-14.
GUO Biao, TANG Yonghua, LI Shimin, et al. An in-situ shear test device and application method for root-soil complex: 20161078888.9 [P]. 2016-12-14.