红黏土边坡香根草根土复合体的强度特性

余 燚[1], 刘思思[1], 李某明[1], 李梓祥[1], 杨擎宇[2]

(1. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650091)

摘 要: [目的] 针对植物护坡效应,探究香根草根系的力学特性及其根土复合体强度特征影响因素,为植物护坡工程设计提供参考依据。[方法] 利用模型箱模拟红黏土填筑边坡进行香根草种植,利用根系拉拔试验和原状根土复合体直剪试验等室内试验,研究香根草的力学性能及根土复合体强度特征的影响因素。通过对试验结果进行拟合分析及 Spearman 相关性分析,分别得出了香根草根系直径与抗拉性能的关系及不同指标对其根土复合体抗剪强度的影响效果。[结果] 试验香根草根系平均抗拉力为 19.05 N,平均抗拉强度为 20.12 MPa;香根草根系的抗拉力、抗拉强度与根系直径呈显著的幂函数关系;土中的根重密度 RWD 随着深度增加而降低。Spearman 相关分析结果显示,根重密度 RWD 与根土复合体的黏聚力 c 呈正向强相关关系($R=0.882$)。[结论] 随着香根草根系直径增大,其抗拉力增大,抗拉强度降低;根重密度 RWD 的提升能显著提高香根草—红黏土根土复合体的黏聚力 c,但对于摩擦角 φ 提升效果不明显。

关键词: 香根草; 红黏土; 根土复合体; 剪切试验; 抗拉强度

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2021)01-0097-06 **中图分类号**: U416.1; U411

文献参数: 余燚, 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.014; 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.

Strength Characteristics of Vetiver Root-Soil Complex on Red Clay Slope

Yu Yi[1], Liu Sisi[1], Li Mouming[1], Li Zixiang[1], Yang Qingyu[2]

(1. *School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hu'nan* 410004, *China*; 2. *School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming, Yunnan* 650091, *China*)

Abstract: [Objective] The slope protection effect of plants, the mechanical properties of the root system of vetiver and the factors influencing the strength characteristics of the root-soil complex were studied to provide a reference basis for plant slope protection engineering design. [Methods] First, an outdoor model box was used to simulate the filling of red clay on the slope for vetiver planting conditions, and the mechanical properties of vetiver and the factors influencing the strength characteristics of the root-soil complex were studied through indoor tests, such as a root pull test and undisturbed root-soil composite direct shear test. Through fitting analysis and Spearman correlation analysis of the test results, the relationship between root diameter and tensile properties of vetiver and the effects of different indices on the shear strength of the root-soil complex were obtained. [Results] The average stretching resistance of the vetiver root system was 19.05 N, and the average tensile strength was 20.12 MPa. The stretching resistance and tensile strength of the root system of vetiver had a significant power function relationship with root diameter. Root weight density(RWD)decreased with increasing soil depth. The results of Spearman correlation analysis showed that the RWD and cohesive force c of the root-soil complex had a positive and strong correlation ($R=0.882$). [Conclusion] As the diameter of the root system of vetiver increases, its tensile strength increases and its tensile strength decreases. The increase in RWD can significantly increase the cohesive force c of the vetiver-red-clay root-soil complex, but the effect of increasing the friction angle φ is not obvious.

Keywords: **vetiver; red clay; root-soil complex; shear test; tensile strength**

收稿日期:2020-09-11 **修回日期**:2020-11-04

资助项目:国家自然科学基金项目"基于根系构型定向调控的植物边坡固土机理研究"(51608545); 中铁二十局科技研发项目(YF1900SD07B)

第一作者:余燚(1995—),男(汉族),广东梅州人,硕士研究生,主要从事生态边坡应用研究。Email:850536909@qq.com。

通讯作者:刘思思(1980—),男(汉族),湖南长沙人,副教授,博士,硕士生导师。Email:30849650@qq.com,主要从事边坡生态修复技术研究。

近年来,生态护坡技术作为一类新型绿色的护坡技术,越来越多地运用于公路、铁路及水利等工程边坡中[1]。由于香根草根系具有生长速度快和抗拉性能好的显著特点,常被作为生态护坡植物得到广泛运用[2]。

随着生态护坡技术的发展,国内外学者从不同角度对植物根系固土护坡效果进行了研究,潘天辉等[3],通过对陕北黄土区小叶杨和白羊草根系分布、形态进行研究,得到不同因素对根—土复合体的抗剪强度的影响效果;宗全利等[4],以塔里木河沿岸特色植被为对象,结合刚性假设和柔性假设,建立了相应的根土复合体抗剪强度模型;方诗圣等[5],针对不同含水率及含根量下高羊茅根—高液限土的根土复合体的强度特性,探究了高羊茅根对于高液限土的加固效应;薛海龙等[6],研究了尖萼金丝桃根系的抗拉拔强度对边坡土体抗剪强度影响;刘亚斌等[7],利用扫描电镜观察了西宁地区柠条锦鸡儿、霸王两类灌木植物根系根土结合面微观结构,进一步研究了植物根系与土相互的力学作用;徐宗恒等[8],研究了含根量对云南山原红壤根土复合体抗剪强度影响作用;Operstein 等[9],Mickovski 等[10]通过分析根土复合体的剪切试验结果,得到了根系密度对抗剪强度影响关系;van Beek 等[11],结合数值模拟及根土复合体受剪破坏特点,验证植根的护坡效应。

红黏土作为一类颗粒松散、孔隙率大、密度低的特殊土,在中国湿热多雨的南方地区广泛分布[12]。这样的土质特点及分布区气候,较适宜香根草生长。同时,由于香根草根系的存在,一定程度上可以提升边坡土体强度,促进红黏土边坡稳定。高速公路工程中,人工填筑路堤边坡一般采取就地取土的方法进行填筑,建成边坡多为贫瘠的土石坡。其中部分公路边坡由于地处偏远,护坡植物在初次栽种后,较少能维持人工管理。

为研究偏远高速公路填筑红黏土边坡中,缺少维护管理条件下自然生长的香根草根系的力学特性及根土复合体强度特征,本文以室外模型箱模拟上述情况种植香根草,以根系抗拉试验及原状根土复合体的抗剪试验结果为基础,利用回归分析和 spearman 相关分析法,研究香根草根系的力学性能及根土复合体的强度特征。

1 试验布设

试验利用模型箱种植香根草,其中模型箱长宽高分别为 140,140,120 cm。为了获得更接近人工填筑红黏土路堤边坡的土质条件,参照实际施工过程对填筑用土进行分层填筑、压实,试验土坡坡度为 45°。考虑到贫瘠条件下栽种的香根草单株根系影响范围为 25 cm[13],为避免相邻植株间的根系影响,香根草植株双向间距为 30 cm。移植时间为 2018 年 9 月中旬,移植完毕后将模拟种植装置置于室外,使其自然生长且不进行水肥管理。种植地区为长沙,属于南方红壤区典型的亚热带季风气候,年均降水量约 1 400 mm。种植超过 2 a 后,2020 年 6 月 10 日测得其株高为 2.1 m。

用于模拟种植的红黏土取自长沙市中南林业科技大学,原始土样为红褐色、硬塑态,具有较强的粘性,稍湿。对红黏土基土的物理力学指标进行测定,其中抗剪强度测定试验为直剪试验,结果如表 1 所示。

表 1 试验用红黏土物理力学指标

物理指标	土粒比重 G_s	孔隙比 e	含水率 ω/%	天然密度 P/(g·cm^{-3})	液限 ω_L	塑限 ω_P	塑性指数 I_P	最优含水率/%	天然稠度
	1.13	2.73	1.34	24.2	1.973	56.5	23.3	33.2	25.8
力学指标	自由膨胀率/%	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	压缩指数 E_s	黏聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)				
	6.8	0.22	8.68	36.3	17.6				

2 香根草根系抗拉力分析

护坡植物根系的抗拉强度不仅影响根系对土的加筋作用,同时也影响着其根土复合体强度。当土体受到剪切破坏时,剪切应力将被传递到土中的根系上,使得根系拉伸并产生拉力。由于植被根系特有的拉伸属性,可在一定程度上增加土的抗剪强度[14-15]。所以,研究根系抗拉特性也是研究根系固土效应的重要内容。

为得到香根草根系直径对抗拉力、抗剪强度的影响规律,将整株香根草根系从红黏土中人工取出,利用清水冲刷根系上泥土。选取根系形态良好的直根进行试验,取样标准长度为 10 cm,试验利用艾德堡 HLD 数显式手摇推拉力计试验机对样本根系进行拉

伸试验。查阅相关文献显示,香根草根系平均根系直径为 1.21 mm,其中 0.6～2.0 mm 直径的根系占到总比例的 90%以上[16-17],固选择 0.5～2 mm 直径的香根草根系进行抗拉试验。试验时两端锚具固定距离控制为 0.5 cm。对于拉拔试验的加力速率,已有研究表明,拉伸速率对草本植物根系抗拉特性的影响不显著[18],为便于试验操作,选择 0.5 mm/min 的试验加力速率。记录根系拉断时为最大拉力,并用游标卡尺测定断口处直径。为避免试验过程中由于应力集中影响对根系抗拉力测定的不良影响,取样本断面在试样中部 1/3 区间内试验数据为有效数据。共对 38 组根系试样进行拉拔试验,得到了 30 组有效数据,剩余 8 组根系进行试验时,出现根系在根系在两端发生断裂或从夹具中拔出,则判定数据为失效数据(图 1)。

将拉拔测定的根系抗拉力 F 代入 De Baets S 等人[18]提出的根系抗拉强度计算方法(1) 中,得到对应根系的抗拉强度,并利用拟合分析方法对相应数据进行拟合(见图 2)。

$$T_r=4F/(\pi D^2) \tag{1}$$

式中:T_r 为根系抗拉强度;F 为根系极根抗拉力;D 为样本根系直径。



图 1　香根草根系取样及拉拔试验

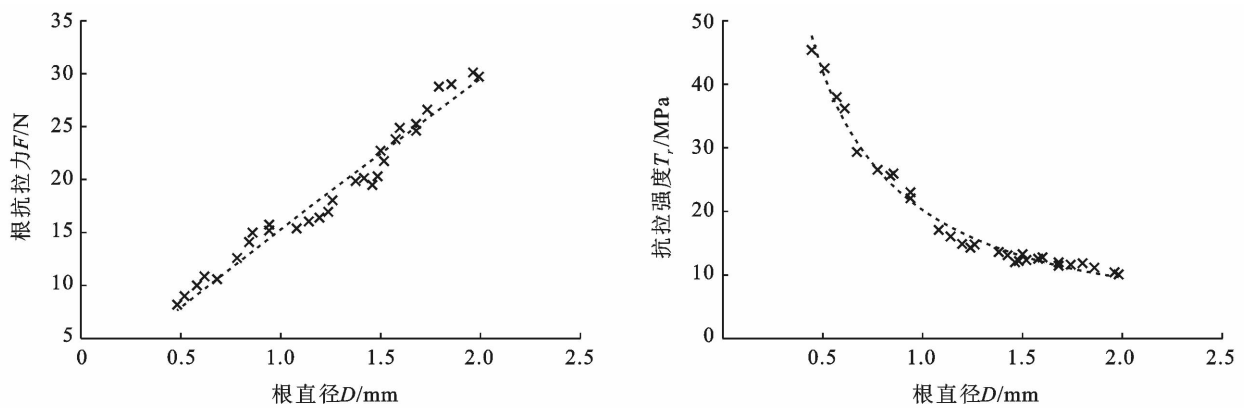


图 2　香根草根系抗拉力、抗拉强度与根系直径关系

根据香根草根系抗拉强度测试结果(图 3,表 2),该香根草根系平均抗拉力 F 为 19.05 N,平均抗拉强度为 20.12 MPa。试验结果与叶超等[19]在 2017 年对湖北红壤土中生长的香根草根系研究结果略有不同,叶超等得到香根草根系平抗拉力 22.37 N,平均抗拉强度为 50.55 MPa,显著高于本试验的测定结果。考虑到叶超等所用香根草培植于水土保持研究所内,其土壤肥力、水肥管理情况较好。所以相应香根草根系具更好的力学性能。说明地区气候、土壤肥力及种植方法的差异将对香根草根系力学性能产生显著的影响。

通过对根系拉拔试验测定的根抗拉力 F、抗拉强度 T_r 与根系直径 D 进行拟合分析,结果显示,根抗拉力 F、抗拉强度 T_r 与根直径 D 皆呈良好的幂函数关系。回归方程的优度检验 R^2 皆高于 0.9,说明拟合分析得到的根抗拉力 F、抗拉强度 T_r 与根直径 D 的回归方程具有较好的显著性及拟合度。

表 2 香根草根系抗拉力及抗拉强度拟合分析

项 目	回归方程	优度检测 R^2	回归方程检验 P	回归系数检验	
				系 数	幂指数
根抗拉力	$F=15.31D^{0.94}$	0.914	<0.000 1	$t=52.733$ $p<0.000\ 1$	$t=23.7$ $p<0.000\ 1$
抗拉强度	$T_r=20.11D^{-1.07}$	0.986	<0.000 1	$t=80.61$ $p<0.000\ 1$	$t=-45.03$ $p<0.0001$

3 根土复合体抗剪强度分析

相关研究表明,红黏土的抗剪强度与土的含水率 ω,天然密度 ρ 等土性指标密切相关,同类型的红黏土在不同含水率、密度下有着不同的抗剪强度[20]。其中土的抗剪强度由黏聚力 c,摩擦角 φ 两种指标组成。根据 Wu-Waldoron 模型[21],对于根土复合体而言,抗剪强度影响因素的除了含水率 ω,天然密度 ρ 等土性指标以外,还有根土复合体中植物根系的影响作用。其中 Wu-Waldron 模型作为目前运用广泛的根土复合体力学计算模型,其根土复合体抗剪强度计算如下式。

$$S_r=c+\sigma\tan\varphi+\Delta S \tag{2}$$

$$\Delta S=\frac{T_rT_n}{A}(\sin\beta+\cos\beta\tan\varphi) \tag{3}$$

$$T_n=(4\tau' Ez/D)^{1/2} \tag{4}$$

式中:S_r 为根土复合体抗剪强度; ΔS 为根系增强的抗剪强度; T_n 为根拉力最大值; A_r/A 为根截面面积与土表面积比; τ' 为根土最大切向摩擦力; E 为根弹性模量; z 为剪切区宽度; β 为变形角度。

为了探究香根草—红黏土根土复合体的强度特性,分析不同指标对于根土复合体抗剪强度的影响效果,将对环刀取样的原状根土复合体样本依次进行密度测定试验、室内直剪试验、根重密度测定试验及含水率试验。分别测定根土复合体的天然密度 ρ,抗剪强度指标黏聚力 c,摩擦角 φ,根重密度 D_{RM} 及含水率 ω;利用 Spearman 相关分析法对测定的结果进行量化分析,分析不同指标(含水率 ω,天然密度 ρ 及根含量 D_{RM})对根土复合体抗剪强度的影响作用。

3.1 试验方法

试验利用标准取土环刀(内径 61.8 mm;环刀高度 20 mm;环刀壁厚 2.1 mm)对原状香根草—红黏土根土复合体进行人工取样。样本取样范围为以植株为圆心半径 20 cm,深度 30 cm 范围内。取样后称重并记录得到土样的天然密度。在利用室内直剪试验抗剪强度指标黏聚力 c,摩擦角 φ。室内直剪试验采用 ZJ 型应变控制式直剪仪器,最大剪切量为6 mm,剪切速率为 0.8 mm/min。再将剪切土样取样测定含水率,同时将土样中根系取出称重,记录数据。取样试验过程如图 3。

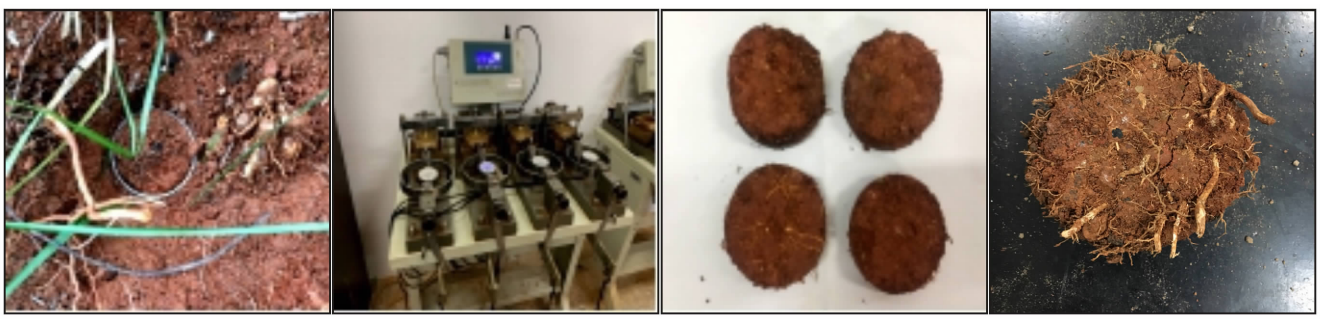


图 3 香根草根土复合体取样及直剪试验

3.2 结果与分析

将原状根土复合体按不同深度分组,依据相关试验规程进行直剪试验,测定根土复合体的黏聚力 c,摩擦角 φ。待直剪试验结束后,手动分离出样本中的根系,称重并记录。结合环刀体积计算根重密度 D_{RM},计算按公式(5),结果见表 3。

$$D_{RM}=m_{根}/V_{环刀} \tag{5}$$

式中:$m_{根}$ 为环刀试样根系质量; $V_{环刀}$ 为环刀体积。

表 3 香根草埋深与根重密度 D_{RM} 的关系

项 目	埋深/cm				
	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50
样本量	5	5	5	5	5
D_{RM}(10^{-2} g/cm^3)	3.67～3.076	3.23～2.42	2.53～1.9	2.13～1.16	1.03～0.53
D_{RM} 平均值	3.42	2.68	2.18	1.59	0.78

由表 3 及图 4 可知,随着取样深度的增加,土中香根草根系含量逐渐下降,说明随着深度的增加,香根草根系对于土体加固能力逐渐下降。

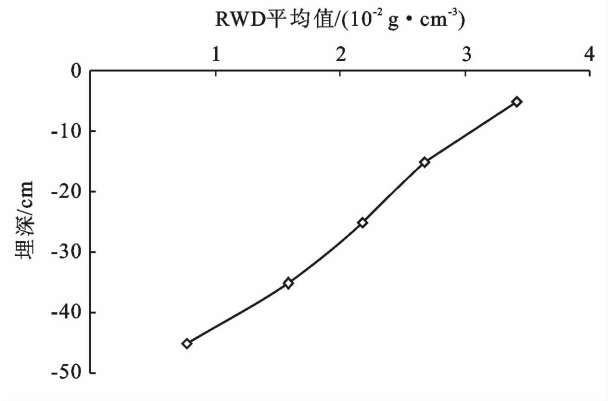


图 4　香根草根系 RWD 与埋深关系

将所测得的根土复合体物理力学指标及根重密度 RWD 进行汇总,结果见表 4。通过与红黏土基土物理力学指标(表 1)对比,香根草根系的加入,显著地提高了土体的黏聚力 c,而对于摩擦角 φ,提升效果稍微,进一步说明了香根草对于红黏土边坡土体强度提升的效果,是通过根系强化土体的黏聚力实现的。通过观察直剪试验破坏后的红黏土—香根草根土复合体(图 5),可以发现,根土复合体剪切面上产生了明显的根系滑动摩擦痕迹,同时有部分根系从土中被拔出且未有根系断裂情况出现。分析上述情况可以得出,当根土复合体发生剪切破坏时,根土复合体中的根系在剪切面上发生摩擦滑动。但是当根系发生摩擦滑动时,根系所受到的摩擦力并不足以使其发生断裂。说明当剪切破坏发生时,根土复合体中根系受到的滑动摩阻力是小于根系的最大抗拉力。由此可知,根土复合体的抗剪强度与剪切破坏时根土复合体中根系的滑动摩阻力有关。根土复合体发生剪切破坏时,忽略不同径级的植根表面粗糙程度的影响,土中根系分布的密度越高,土间根系的总滑动摩阻力越大,相应的土体抗剪强度越高。

表 4　香根草原状根土复合体直剪试验结果

指 标	埋深/cm	含水率 ω/%	样本根重/g	根重密度 RWD/(10^{-2} g·cm^{-3})	天然密度 ρ/(g·cm^{-3})	黏聚力 c/(°)	摩擦角 φ/kPa
最大值	50	25.9	2.20	3.67	2.56	107.62	19.20
最小值	0	21.1	0.32	0.53	1.49	40.92	16.89
平均值	25	23.19	1.27	2.17	1.83	78.37	18.01

注:样本量为 25。



图 5　直剪试验后的香根草根土复合体样本

3.3　根—土复合体强度指标的影响因素分析

根据上文对剪切试验破坏后的红黏土—香根草根土复合体的观察结果及分析结论,将根土复合体的含水率 ω,天然密度 ρ,土间根系分布的密度指标—根重密度 RWD 作为重点研究对象。将根土复合体土性指标—含水率 ω,天然密度 ρ,土间根系分布的密度指标根重密度 RWD 与直剪试验测定的根土复合体抗剪强度指标—黏聚力 c,摩擦角 φ 进行 Spearman 相关分析。分别分析含水率 ω,天然密度 ρ 及根重密度 RWD 与抗剪指标—黏聚力 c 与摩擦角 φ 的关联程度,得到不同指标对黏聚力 c,摩擦角 φ 不同的影响作用程度。通过对根土复合体抗剪强度影响指标的分析,得到根土复合体的强度特性,为进一步根土复合体剪切破坏机理研究提供基础。

Spearman 相关分析法作为岩土工程常用的数据处理分析方法之一,通过对不同相关系数的关系进行量化,综合分析各自变量对某一因变量指标的影响效果。Spearman 相关分析法通过对成对的等级数及各对等级数之差进行计算,利用单调方程评价两个统计变量的相关性。Spearman 相关分析法适用范围广且对数据条件要求没有积差相关系数严格,既不要求数据源满足正态分布,不及线性约束以及同方差需要严格的假设条件,因此具有更广泛的适用性[22]。红黏土—香根草根土复合体抗剪强度指标的 Spearman 相关分析结果见表 5—6。

表 5　香根草根土复合体摩擦角 φ 的 Spearman 相关分析

指 标	含水率 ω	天然密度 ρ	根重密度 RMD
Spearman 相关系数	−0.697	0.770	0.204
相关情况	中等相关	近强相关	

表 6 香根草根土复合体黏聚力 c 的 Spearman 相关分析

指标	含水率 ω	天然密度 ρ	根重密度 RMD
Spearman 相关系数	−0.36	0.408	0.882
相关情况	弱相关	弱相关	强相关

如表 5—6 所示，原状红黏土根土复合体抗剪强度指标中摩擦角 φ 与含水率 ω，天然密度 ρ 相关关系为中等相关关系，近强相关关系；根重密度 RMD 与摩擦角 φ 相关性较差，为弱相关关系。对于摩擦角 φ 而言，含水率 ω 和天然密度 ρ 的变化一定程度上将影响根土复合体摩擦角 φ，而根重密度 RMD 对摩擦角 φ 影响效果并不显著。对于根土复合体抗剪强度指标中黏聚力 c 而言，根重密度 RMD 与黏聚力 c 为强相关关系，说明根重密度 RMD 对黏聚力 c 有着显著的影响；而含水率 ω 及天然密度 ρ 与黏聚力 c 的相关性较低，说明含水率 ω 及天然密度 ρ 的变化对黏聚力 c 影响不大。

4 结 论

本文以香根草—红黏土根土复合体为研究对象，进行了根系拉拔试验及根土复合体室内直剪试验，通过统计分析方法，得到了香根草根系力学性能及根土复合体强度特性，结论如下：

(1) 随着香根草根系直径增加，其抗拉力 F 增大，抗拉强度 T_r 减小。香根草根系的抗拉力、抗拉强度与根的直径皆呈幂函数关系且显著性良好。

(2) 根土复合体发生剪切破坏时，土中的根系在剪切面上发生摩擦滑动，最终被拔出且被拔出的根系未发生断裂，说明根土复合体剪切过程中，根系的最大抗拉力大于受到的摩擦阻力。

(3) Spearman 相关分析结果表明，根土复合体的摩擦角 φ 受天然密度 ρ，含水率 ω 影响较为显著，而根重密度 RMD 对其影响作用不明显。对于根土复合体的黏聚力 c，其与根系密度 RMD 为强相关关系，说明根重密度 RMD 对黏聚力 c 影响效果显著。而天然密度 ρ，含水率 ω 对根土复合体的黏聚力 c 影响效果不明显。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 夏汉平，敖惠修，刘世忠. 香根草生态工程应用于公路护坡的效益研究[J]. 草业科学，2002，19(1)：52-56.

[3] 潘天辉，杜峰，王月. 陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析[J]. 水土保持研究，2020，27(3)：357-363.

[4] 宗全利，冯博，蔡杭兵，等. 塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(5)：1290-1300.

[5] 方诗圣，姚鑫，谭张琴，等. 草本植物根系对高液限土的加固效应[J]. 水土保持通报，2017，37(3)：43-47.

[6] 薛海龙，唐彪，张竞元，等. 尖萼金丝桃根系对边坡土体抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(3)：87-92.

[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，2018，37(5)：1270-1280.

[8] 徐宗恒，黄丽苹，杨正辉，等. 不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(5)：54-59，66.

[9] Operstein V，Frydman S. The influence of vegetation on soil strength [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement，2000，4(2)：81-89.

[10] Mickovski S B，Stokes A，van Beek R，et al. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis [J]. Ecological Engineering，2011，37(10)：1523-1532.

[11] van Beek L P H，Wint J，Cammeraat L H，et al. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes [J]. Plant and Soil，2005，278(1/2)：55-74.

[12] 任志华. 亚热带多雨地区红黏土边坡植物护坡研究[D]. 甘肃 兰州：兰州大学，2016.

[13] 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.

[14] Abe K，Iwamoto M. An evaluation of tree-root effect on slope stability by tree-root strength [J]. Journal of the Japanese Forestry Society，1986，68(12)：505-510.

[15] Gyssels G，Poesen J，Bochet E，et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water：A review [J]. Progress in Physical Geography：Earth and Environment，2005，29(2)：189-217.

[16] 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.

[17] Mickovski S B，Beek L P H. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate [J]. Plant and Soil，2009，324(1/2)：43-56.

[18] 蒋坤云. 植物根系抗拉特性的单根微观结构作用机制[D]. 北京：北京林业大学，2013.

[19] 叶超，郭忠录，蔡崇法，等. 5 种草本植物根系理化特性及其相关性[J]. 草业科学，2017，34(3)：598-606.

[20] 朱天璋，黄向京. 湖南高速公路红黏土工程特性及问题与对策探讨[J]. 公路工程，2008，33(5)：24-28.

[21] Wu T H，Mcomber R M，Erb R T，et al. Study of soil-root interaction [J]. Journal of Geotechnical Engineering，1988，14(12)：1351-1375.

[22] 樊嵘，孟大志，徐大舜. 统计相关性分析方法研究进展[J]. 数学建模及其应用，2014，3(1)：1-12.