

基于土-水特征曲线的植物边坡抗剪强度研究

王 轩, 李珍玉, 肖宏彬, 刘思思, 刘 俊

(中南林业科技大学土木工程学院, 长沙 410004)

摘要: 土-水特征曲线通常用于估计非饱和土壤的抗剪强度,但是由于植物根系的吸水作用和加筋效应,使得植物边坡的抗剪强度不能直接利用基于基质吸力的非饱和土抗剪强度计算公式进行计算。以裸露边坡和植被边坡为研究对象,采用张力计现场测试和室内剪切试验相结合的方法,拟合水土特征曲线关系。结果表明:(1)植物根系的植入有效地提高了边坡土体的进气值,较素土进气吸力值增幅 41.10%。在同等含水率条件下,植物边坡基质吸力明显大于素土边坡,提高了边坡土体的持水能力。(2)边坡红黏土基质吸力与含水率的关系符合 V-G 模型,利用最小二乘法得到模型参数。(3)随着体积含水率的增大,带根土与素土的抗剪强度参数值变化趋势大致相同,均呈现先增大后减小的趋势,但带根土的变化参数大,当含水率 21.29%时,带根土黏聚力相较于素土增加了 4.86 kPa,增幅 18.55%,而内摩擦角对根系存在的敏感程度不如黏聚力。(4)随着土壤基质吸力不断增大,植被边坡与素土边坡的抗剪强度力学参数变化趋势大体相同,当土基质吸力为 60~90 kPa 土体的黏聚力提高最为明显,但植被边坡由于植物根系的存在,土体内基质吸力对边坡土体的抗剪强度提高幅度更大,黏聚力与内摩擦角最大增长幅度分别为 37.34%和 40.30%。通过建立土-水特征曲线参数与植物边坡抗剪强度的关系,可计算不同含水率或基质吸力条件下植物边坡的抗剪强度,为进一步分析工程实际中植物边坡的稳定性提供理论依据。

关键词: 植物护坡; 土-水特征曲线; 基质吸力; 抗剪强度; 香根草

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0057-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.009

Study on Shear Strength of Plant Slope Based on Soil-water Characteristic Curve

WANG Xuan, LI Zhenyu, XIAO Hongbin, LIU Sisi, LIU Jun

(College of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

Abstract: Soil-water characteristic curve is usually used to estimate the shear strength of unsaturated soil. In consideration of the water absorption and reinforcement effect of plant roots, the shear strength of plant slope can not be directly calculated by the formula of unsaturated soil shear strength based on matrix suction. In this paper, the bare slope and vegetation slope are taken as the research objects, and the soil and water characteristic curve of the test soil is obtained by combining the tensiometer field test and indoor shear test. The results show that the plant root implantation can effectively improve the air intake value of slope soil, which is 41.10% higher than that of plain soil. Under the same water content, the matric suction of plant slope is significantly higher than that of plain soil slope, which improves the water holding capacity of slope soil. The Van Genuchten model can be used perfectly to fit the datum from the soil water characteristic curve. With the increase of water content, the shear strength parameters of the soil with root and plain soil are similar, which are both increasing first and then decreasing. But the change parameters of the soil with root are large. When the water content is 21.29%, the cohesion of the soil with root increases by 4.86 kPa, and the increase is 18.55%, while the sensitivity of the internal friction angle to the root system is not as good as the cohesion. With the increase of soil matric suction, the change trend of mechanical parameters of shear strength of vegetation slope and plain soil slope is basically the same, and the cohesion of soil increases most obviously in the range of matric suction of 60~90 kPa. However, the matric suction of vegetation slope in-

收稿日期: 2021-05-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(51608545)

第一作者: 王轩(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事边坡稳定研究。E-mail: 413163745@qq.com

通信作者: 李珍玉(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事边坡稳定研究。E-mail: hdlizhenyu@163.com

creases the shear strength of slope soil more greatly due to the existence of plant roots, The maximum increases of cohesion and internal friction angle are 37.34% and 40.30% respectively. By establishing the relationship between the parameters of soil water characteristic curve and the shear strength of plant slope, the shear strength of plant slope under different water content or matric suction can be calculated, which provides a theoretical basis for further analysis of the stability of plant slope in engineering practice.

Keywords: plant slope protection; soil-water characteristic curve; matric suction; shear strength; vetiver

雨水入渗使植物边坡土体从非饱和状态变为饱和状态,土体中的基质吸力减小,抗剪强度降低,导致植物边坡发生滑坡^[1]。抗剪强度作为土壤力学性质的一个主要指标,反映土壤在外力作用时抵抗变形破坏的能力^[2]。国内外学者围绕土体抗剪强度展开了许多相关方面的研究。已有研究^[3]表明,随着土壤含水率的增加,黏聚力呈先增大后减小的趋势,内摩擦角呈减小的趋势。由于植物边坡表层土体大多时候为非饱和状态,基于非饱和土的基质吸力与土壤含水率之间存在着密切的关系,国内外学者以土壤基质吸力作为切入点探究其对土壤抗剪强度的影响。Fredlund 等^[4]认为,非饱和土抗剪强度中包含基质吸力的贡献,并建立了非饱和土抗剪强度公式。大量研究^[5-9]结果显示,非饱和土抗剪强度随基质吸力变化的影响较大,但具体的表现形式并不完全一致。闫亚景等^[5]研究表明,黏聚力随基质吸力增大呈现出先增大后减小的变化规律,内摩擦角随基质吸力的增大呈线性增长的关系,同时其对基质吸力的敏感程度远低于黏聚力。林鸿州等^[6]则发现,黏聚力随基质吸力的变化存在峰值,内摩擦角随吸力的增大而增大,且受基质吸力产生的变化同样显著。吴宏伟^[7]研究表明,植被土的最大吸力可达到裸露土的 1.3 倍,利用非饱和土抗剪强度公式计算其抗剪强度,结果发现,其抗剪强度相比裸露土增加 30%。土-水特征曲线作为描述非饱和土含水率和基质吸力之间对应关系的曲线,掌握特征曲线与强度等力学参数之间的关系对于边坡治理等工程问题意义重大^[8]。通过土-水特征曲线预测土体强度等力学参数不仅可以减少成本,而且可以保证预测效果^[9]。

综上所述,非饱和土强度特性的研究日益完善,许多学者在此基础上对根系如何作用土壤强度特性开展了进一步的研究。多数研究^[10-11]表明,植物根系的加筋、锚固作用能够显著提升土体的抗剪强度。但是,目前考虑根系水文作用的文献较少,而植物通过蒸腾作用吸收土体水分,在土体内产生吸力,从而改变土体工程性质这一性能是不可忽略的。因此,本文从试验的角度出发,研究植物根系作用下边坡土体的持水能力,解析植被边坡土体土-水特征曲线与抗剪强度力学参数的影响关系,为工程实践中植物边坡的稳定性分析提供理论思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 香根草特性 香根草是一种适应性极强的固土护坡植物,根系非常发达,抗拉强度一般能达到 40~180 MPa。香根草主根不太明显,须根数量多,根系大致以根茎为中心向周围扩张,多为垂直向下生长,根系直径主要在 1~2 mm,从上到下变化不大,深入土层可达 2 m 多,根系数量随着土层深度增加而逐渐减少^[12-13],可较好地提高边坡的稳定性。因此,本次试验选定在红黏土边坡上种植边坡工程中较为常见的香根草植物。

1.1.2 土体的基本物理力学性质 在室外边坡取红黏土原状样,并用保鲜膜覆盖置于密闭盒中保存,减少运回实验室途中水分的散失。在实验室里,通过土工试验测定得到,红黏土的天然密度 1.82 g/cm³,最大干密度 1.68 g/cm³,天然含水率 14.83%,最佳含水率 21.5%,液限 41.5%,塑限 25.4%,黏聚力 27.17 kPa,内摩擦角 23.57°。

1.1.3 土壤水分传感器 土壤水分传感器又称土壤水分仪,主要用来测量土壤含水量。土壤含水量可用质量含水量或体积含水量表示,其中质量含水量通常采用烘干法室内试验测量得到;而体积含水量通过土壤水分传感器测量得到。本次试验采用型号为 WaterScout SM100 的 TDR 水分传感器测量土壤的体积含水率,该仪器感应面积 6 cm×2 cm,测量范围 0~饱和,分辨率 0.1%的体积含水率。

1.1.4 张力计 土壤对水产生的吸力大小值称为土壤水张力,通常可由张力计直接测出。土体的体积含水率越小,土体水张力越大。相反当土壤中所有土颗粒间空隙充满水,即土壤含水率达到了饱和状态时,土壤水的张力将趋于 0。本试验主要采用 Watermark 土壤水势传感器测量土壤的基质吸力。将已饱和的张力计传感器分别埋入素土与植被边坡中,张力计内的自由水通过多孔壁与土壤内的孔隙水构建相应的联系,在水力平衡的过程中土壤有部分的水流入陶头或从陶头流出,达到平衡后,产生的负压值通过仪器表显示出来,即为土壤的基质吸力。

1.2 试验方法

1.2.1 室内试验 2020 年 7 月,课题组在红黏土最优含水率附近制备 5 组不同含水率、相同含根量的

土样(含水率分别为 17.5%,19.5%,21.5%,23.5%),其中每组有素土与带根土进行对比试验。对于带根土样,土样按有关土工试验的标准规范击实成型之后,将 6 根直径为 2 mm 的香根草根系均匀地竖向插入土体中,形成根土复合体试样。待所有土样制作后,然后在不同垂直压力荷载条件下进行直剪试验,研究素土及带根土的抗剪强度力学参数随不同含水率的变化规律。

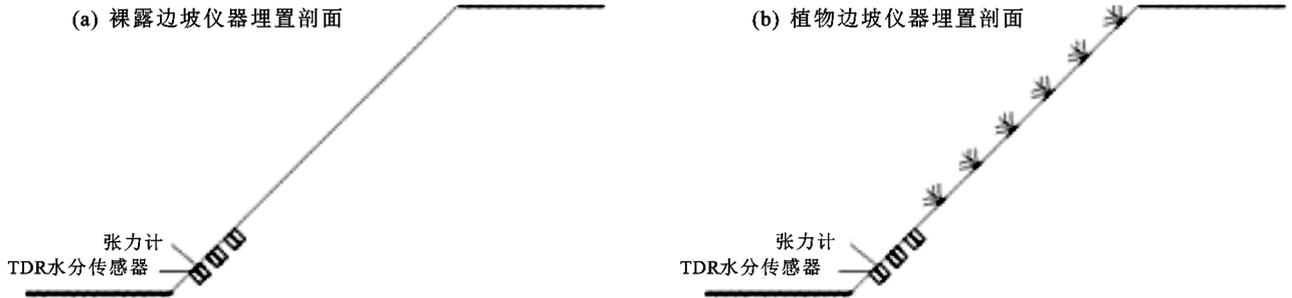


图 1 仪器埋置剖面示意

1.3 水土特征曲线理论模型

土壤水分特征曲线也称为土壤特征曲线,它描述了土壤体积含水率与土壤基质吸力之间的关系,可反映土壤的释水与持水性能,得到土壤相应的水分特征指标。近年来,许多学者^[15-16]对土-水特征曲线进行了众多研究,但由于土-水特征曲线影响因素复杂,至今尚未从理论上建立土体含水率与吸力间的关系,通常采用经验模型描述,常用的有 Fredlund-Xing 模型、Brooks&Corey 模型以及 Van Genuchten 模型^[17],其中 Van Genuchten 模型是目前最为常用的描述土壤水-土特征曲线的数学模型。该模型对于不同类型的土壤均有较高的拟合精度,能够较全面地描述全负压范围内的土-水特征曲线,适用性较为普遍。其具体表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m}$$

式中: θ 为土体体积含水率(%); ψ 为土体基质吸力(kPa); θ_s 为饱和含水率(%); θ_r 为残余含水率(%); α 为与进气吸力相关的参数; n, m 为形状参数,且参数 $m = 1 - n^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 根系对红黏土土-水特征曲线的影响

本文对室外试验测定的数据进行分析,通过 Van Genuchten 模型进行曲线拟合,结果见图 2 和表 1。根据 V-G 模型拟合结果发现,土-水特征曲线明显分为边界效应段、过渡段、非饱和残余段 3 个阶段。在边界效应阶段,土体提升微小的吸力,含水率仍维持饱和值。在过渡阶段,吸力增加至土体进气吸力值,气体开始进入土体中的大孔隙,土体开始排水,随

1.2.2 室外试验 红黏土在我国的湖南、贵州、广西、云南等省大量的分布,课题组选择在湖南境内选择一坡比为 1:1 的红黏土质边坡,并与相同情况下的素土边坡进行对比研究。在种植香根草边坡和素土边坡的下坡向相同位置处同时埋入 TDR 水分传感器及张力计仪器,采集 2019 年 9 月至 2020 年 8 月剖面含水率和土壤吸力,利用张力计法^[14]得到土水特征曲线。仪器埋置剖面见图 1。

之含水率开始降低,且变化显著。在非饱和残余段,含水率受吸力的影响逐渐减弱,当含水率减小到某个临界点时,吸力的增大不再导致含水率的降低,这一临界点称为残余含水率。结合图 2、表 1 及土水特征曲线的主要特性^[18],得到植被边坡及素土边坡的进气值分别为 9.95,7.05 kPa,植被边坡及素土边坡的残余含水率分别为 17.98%和 14.97%。植被边坡得到的进气吸力值及残余含水率参数均要明显高于素土,一般而言,土体的孔隙结构对进气吸力值及残余含水率的影响至关重要。因此,可以推测,植物根系通过对土颗粒间孔隙的填充作用减小土体的孔隙比及改变孔隙分布,进而增大了土体的进气吸力值以及残余含水量。

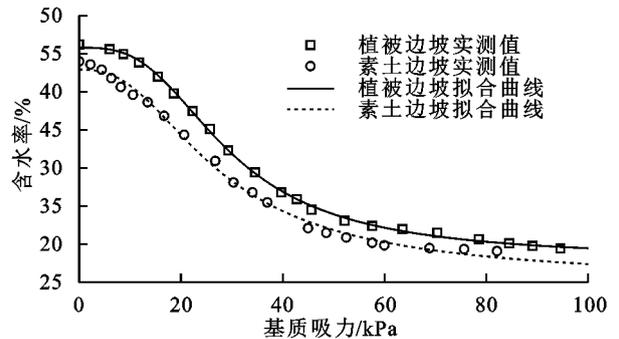


图 2 边坡土体的土-水特征拟合曲线

表 1 不同边坡类型的 VG 模型拟合参数值

边坡类型	拟合参数					回归系数(R ²)
	θ_r	θ_s	α	n	m	
素土边坡	14.96918	42.91061	0.04625	2.59212	0.61422	0.99483
植被边坡	17.97986	45.79453	0.04015	3.10864	0.67832	0.99925

由图 2 可知,在相同含水率情况下,植被边坡的基质吸力明显大于素土边坡。当土体含水率较低时,吸力主要由土壤颗粒表面的短程吸附作用产生;当含

水率较高时,吸力主要由孔隙水的毛细作用产生。而土壤颗粒、孔隙结构和孔隙尺寸对毛细作用的影响非常显著,因此基质吸力受土壤颗粒及孔隙结构等因素的影响较大^[7],植物根系填充土体间孔隙减小孔隙尺寸而提升了基质吸力从侧面证实了上述结论。一般认为,V-G模型中的参数 α 是进气吸力的相关参数,经模拟不同数值的参数 α 对拟合曲线的影响,由图3可知, α 越大,土-水特征曲线变化越陡直,反之,变化越平缓。植被边坡对应的参数 α 为0.040 15小于素土的0.046 25,反映在土-水特征曲线上,则较素土拟合曲线变化趋势更显平缓,从而在同等含水率情况下,植物边坡基质吸力大于素土。

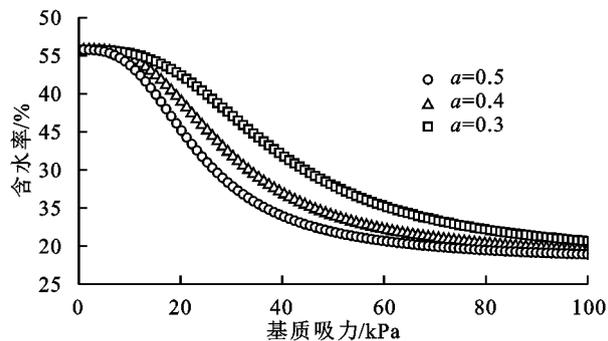


图3 参数 α 值变化对应的V-G模型拟合曲线

综上所述,本次土-水特征曲线试验表明,植物根系能够提高土体的持水能力。一方面是土体颗粒间的孔隙大部分会被植物根系所填充,使得土体间孔隙相对更小,从而提高土体的持水能力;另一方面也可能是由于植物根系的吸水、涵水的特点所导致。

2.2 根系及含水率对红黏土抗剪强度力学参数的影响

通过大量素土与带根土室内直剪试验得到不同含水率的根土复合体的抗剪强度。分别对素土与带根土的含水率与抗剪强度参数关系进行回归分析,其拟合曲线表达式分别为带根土黏聚力: $C = -0.4525W^2 + 19.6345W - 181.61362$,素土黏聚力: $C = -0.36536W^2 + 15.93136W - 147.13298$,带根土内摩擦角: $\varphi = -1.65W + 59.26$,素土内摩擦角: $\varphi = -1.56W + 57.93$,相关系数依次为0.944 82,0.933 25,0.997 00,0.995 08,拟合曲线见图4。植被边坡与素土边坡的体积含水率与黏聚力之间大致呈抛物线关系。对内摩擦角拟合而言,不管是植被边坡还是素土边坡都是随着土体的含水率增大,内摩擦角不断减小,含水率与内摩擦角之间呈线性递减的直线函数关系。

由图4可知,在土样的干密度处于不变的状态下,随着土体含水率的增大,带根土与素土的抗剪强度参数值呈大致相同的变化趋势。以最佳含水率21.5%为临界点,黏聚力随着含水率的增大呈先增大后减小

的趋势,带根土及素土含水率均在最佳含水率附近时,土样黏聚力达到最大,此时带根土的含水率及黏聚力分别为21.69%,31.38 kPa,素土的含水率及黏聚力分别为21.80%,26.54 kPa。而内摩擦角随着含水率的增大一直呈递减的趋势。带根土相对于素土而言,随着土样含水率的变化,带根土抗剪强度的增幅值相对更大;当含水率21.29%时,带根土黏聚力相较于素土黏聚力增加了4.86 kPa,增幅18.55%达到峰值。表明土样的抗剪强度在根系的作用下得到了提升。同时发现,根系对土壤内摩擦力的影响较小,不如对黏聚力的影响显著。

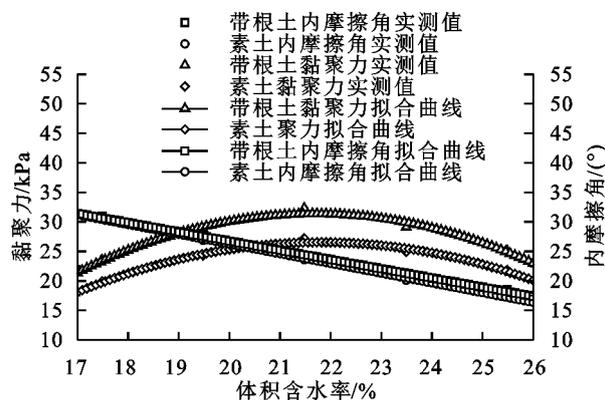


图4 边坡体积含水率与抗剪强度参数关系曲线

对于植被土与素土边坡中随着土体内部体积含水率的增大,黏聚力和内摩擦角的变化见图4。若从土体孔隙结构和水对土的润滑及黏合作用的角度解释,主要原因可能在于当土体含水率偏小时,土体颗粒之间由于缺乏水的润滑,摩擦系数偏大,从而导致黏聚力偏低,而内摩擦角偏大。随着含水率的增大,逐渐达到土体的最佳含水率,土中水的润滑及黏合作用逐渐达到最大,使得土体颗粒之间紧密接触,孔隙结构变得更为密实,此时黏聚力与内摩擦角都较大。但当含水率继续增大至最佳含水率后,由于土体颗粒间自由水分增多,水膜作用面变大,土体颗粒之间摩擦系数减小,孔隙结构反而更为疏松,导致土体的抗剪强度力学参数黏聚力与内摩擦角都减小,不利于边坡土体稳定性。

2.3 根系及基质吸力对土体抗剪强度力学参数的影响

室内直剪试验结果说明,土体含水率与土体抗剪强度存在一定的相关性,室外试验表明,边坡土体中不同的含水率会影响基质吸力,即土体对水的吸力表现。相对于裸露边坡,植被边坡由于植物根系的蒸腾作用和持水作用,土体内部的含水率与裸露边坡土体必然有所差异,从而导致土体基质吸力的不同。

为了进一步探究有无植被边坡土体中基质吸力对土体抗剪强度的影响。本文基于边坡土体的体积含水

率与抗剪强度参数的回归关系,结合室外所测出的土-水特征曲线,研究边坡土体中基质吸力与抗剪强度力学参数的关系。通过建立有无植被边坡土体的基质吸力与抗剪强度力学参数的关系,进而探究植物根系作用下基质吸力对边坡土体的抗剪强度的变化。

由图 5 可知,随着边坡土体的基质吸力不断增大,黏聚力与内摩擦角都发生变化,植被边坡与素土边坡的抗剪强度力学参数变化趋势大致相同。黏聚力随着边坡土体基质吸力的增大大致呈先增大后减小的趋势变化,内摩擦角随着基质吸力增大呈递增的趋势。但在相同基质吸力下,植被边坡相对素土边坡的抗剪强度力学参数值更大,变化幅度也更为明显,植被边坡黏聚力随吸力变化最大增长幅度达到 37.34%,内摩擦角最大增长幅度为 40.30%。因而,土体的基质吸力能提高抗剪强度力学参数值,从而提高边坡的稳定性。由于植被的存在,使得土体基质吸力增加更大,土体的抗剪强度提高更为明显,更有利于边坡稳定。

将植被边坡与素土边坡的基质吸力与抗剪强度力学参数的关系分别进行回归分析发现,植被边坡与素土边坡的基质吸力与抗剪强度力学参数的变化关系大体相同。随着土体基质吸力的增大,黏聚力与基质吸力的关系呈先减小后增大的趋势,大致符合二次函数关系;而内摩擦角与基质吸力一直呈线性递增关系,其拟合曲线表达式分别为带根土黏聚力: $C = -0.00556\psi^2 + 0.83954\psi - 0.03101$,素土黏聚力: $C = -0.00444\psi^2 + 0.66162\psi - 2.04732$,带根土内摩擦角: $\varphi = 0.16498\psi + 12.11909$,素土内摩擦角: $\varphi = 0.17495\psi + 10.62976$,相关系数依次为 0.822 24,0.847 98,0.978 20,0.976 13。

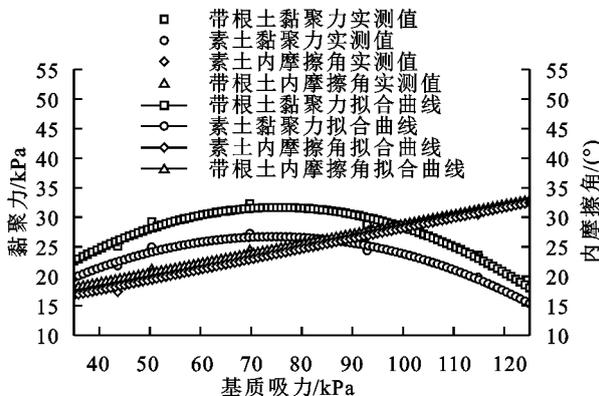


图 5 边坡体积含水率与抗剪强度参数关系曲线

结合图 5 可知,植被边坡与素土边坡在基质吸力为 60~90 kPa 范围内土体的黏聚力提高都最为明显,随后在基质吸力 100 kPa 左右,黏聚力也都达到了最低点。这说明基质吸力是在一定范围内对土体抗剪强度的提高作用更大,超过之后基质吸力对于土

体抗剪强度的提高也是具有局限性的。从土体有效基质吸力角度去解释,主要原因可能是当基质吸力为 0~60 kPa 范围时,土体饱和度较大,孔隙大多数被水占据,孔隙气较少,因而仅产生较小的有效基质吸力,提高土体的抗剪强度能力较弱。随着土体孔隙水的流出,孔隙气渐渐进入占据孔隙,孔隙水与孔隙气接触的界面逐渐发生变化,土体颗粒间的摩擦系数增大,基质吸力不断增大,作用在土体中的有效基质吸力从而增大,使得边坡土体的黏聚力与内摩擦角增大。当基质吸力增大到 70 kPa 左右,此时土体孔隙的水与空气接触膜的界面达到最佳状态,从而产生的有效基质吸力达到最大,更利于提高土体的黏聚力与内摩擦角。当基质吸力达到 100 kPa 左右,土体孔隙水进一步减少,随着孔隙气的进入,土体的水与气体的界面也不断发生变化,土颗粒间的系数进一步增大,使得土体有效基质吸力开始减小,黏聚力呈现开始减小趋势,而内摩擦角继续趋于增大。由此出现了土体抗剪强度力学参数随着有效基质吸力影响而随之发生的变化。

3 讨论

3.1 根系对土-水特征曲线的影响

本研究表明,室外所测的红黏土基质吸力与含水率所得的土-水特征曲线符合 V-G 模型。通过对比有无植被的边坡土体的土-水特征曲线发现,在植物根系的加持作用下,土体的进气值及残余含水率均得到明显提高。陶高粱等^[19]在不同初始孔隙比土体研究中发现,孔隙比越大,土体的进气吸力值越小。植物根系通过对土颗粒间孔隙的填充作用减小土体的孔隙比及改变孔隙分布,进而提高了土体的进气值,这也从侧面证实了上述结论。V-G 模型中参数 α 越小,土-水特征曲线更加平缓,这与陈卫金等^[17]的研究结果一致。在本次试验中表现为相同含水率情况下,植被边坡对应的基质吸力比素土边坡所对应的基质吸力大,即根土复合体的持水能力更强。田佳等^[20]研究表明,不同根系的根土复合体土-水特征曲线存在显著性差异,相同含水率下根土复合体的基质吸力为山杨>青海云杉>油松;由于山杨根土复合体的基质吸力明显高于其他 2 种树种,从而导致其根土复合体力学特性也显著高于青海云杉及油松。因此,可以认为,根系对土-水特征曲线有明显的影,提高了土体的持水能力。

3.2 根系及含水率对抗剪强度力学参数的影响

本文关于根系及含水率对土体抗剪强度力学参数的研究发现,随着土体含水率增大,根土复合体及

素土的黏聚力均呈现先增大后减少的趋势,且峰值均在最优含水率附近,而内摩擦角均呈现线性减小的趋势。格日乐等^[21]对 3 种植物重塑的根—土复合体及素土进行的室内剪切试验结果显示,随着土壤含水率的增加,3 种植物根土复合体抗剪强度及黏聚力均呈现先增大后减少的趋势。林嘉辉等^[22]通过研究不同含水率条件下芒萁根系对红土层抗剪强度的影响得出相同的结论,同时,倪九派等^[2]、王永璐等^[3]也得出相似的结论。本研究还发现,在根系的加持下,根土复合体黏聚力较素土的增幅最高达到 18.55%,而内摩擦角较素土变化不大,格日乐等^[21]、刘春红等^[23]的研究也得出相同的结论。说明根系主要通过参与土体的黏聚力的提升来增强其抗剪强度,并不能显著改变土体之间的摩擦咬合作用。

3.3 根系及基质吸力对抗剪强度力学参数的影响

本文基于边坡土体的体积含水率与抗剪强度参数的回归关系,结合室外所测出的土—水特征曲线,研究边坡土体中基质吸力与抗剪强度力学参数的关系发现,随着边坡土体的基质吸力不断增大,黏聚力与内摩擦角都发生变化,植被边坡与素土边坡的抗剪强度力学参数变化趋势大致相同。黏聚力随着边坡土体基质吸力的增大大致呈先增大后减小的趋势变化,内摩擦角随着基质吸力增大呈递增的趋势。但在相同基质吸力下,植被边坡相对素土边坡的抗剪强度力学参数值更大,变化幅度也更为明显。闫亚景等^[5]认为,抗剪强度随基质吸力的增大表现为 4 个阶段性增、降和逐渐稳定特征,内摩擦角呈现阶段性增大趋势,黏聚力对基质吸力的敏感程度显著大于表观内摩擦角。宋会娟等^[24]研究表明,黏聚力随基质吸力增大呈现出先增大后减小的变化规律,内摩擦角随基质吸力的增大呈线性增长的关系,同时其对基质吸力的敏感程度远低于黏聚力。郑文晓等^[25]研究表明,黏聚力与基质吸力呈线性关系,内摩擦角随基质吸力增大而增大,但变化幅度很小。林鸿州等^[6]发现,黏聚力随基质吸力的变化存在峰值,内摩擦角随吸力的增大而增大,其受基质吸力产生的变化同样显著。本研究结果与上述研究得出的结论大致相似,均得出黏聚力随边坡土体基质吸力的增大大致呈先增大后减小的变化规律,以及内摩擦角随着基质吸力增大呈递增的规律。本研究发现,内摩擦角受基质吸力产生的变化同样显著,植被边坡的内摩擦角随吸力变化的最大增长幅度为 40.30%,甚至高于黏聚力最大增长幅度 37.34%,这与林鸿州等^[6]得出的结论一致。综上,黏聚力随基质吸力变化的规律大致相同,而内摩擦角的

变化规律还需进一步研究。

4 结论

(1)通过试验得到裸坡和香根草植物边坡的土—水特征曲线,两者对比发现,根系对土—水特征曲线有明显的影 响。在相同含水率情况下,植被边坡对应的基质吸力比素土边坡所对应的基质吸力大,植物根系的存在能够有效提高土体的进气值,提高土体的持水能力。

(2)在土样的干密度保持不变的情况下,随着体积含水率的增大,带根土与素土所对应的抗剪强度参数值均发生相同的变化趋势,黏聚力相对内摩擦角整体变化较为敏感。

(3)在相同干密度与体积含水率条件下,带根土相对于素土,其抗剪强度力学参数值整体较大,尤其是黏聚力更为明显,最大提高到 18.55%,更有利于提高土体的抗剪强度。

(4)随着边坡土体的基质吸力不断增大,黏聚力与内摩擦角均发生相应变化,植被边坡与素土边坡的抗剪强度力学参数变化趋势相同,黏聚力随着基质吸力的增大大致呈先增大后减小的变化趋势,内摩擦角与基质吸力呈正相关。

参考文献:

- [1] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.降雨特性对土质边坡失稳的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.
- [2] 倪九派,高明,魏朝富,等.土壤含水率对浅层滑坡体不同层次土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):48-50.
- [3] 王永璐,刘顺青,姜朋明.含水率及吸力对非饱和下蜀土强度特性影响试验研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2020,42(4):48-52.
- [4] Fredlund D G, Xing A, Fredlund M D, et al. The relationship of unsaturated soil shear strength to the soil-watercharacter-istic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal,1996,33(3):440-448.
- [5] 闫亚景,文宝萍,计博勋.基质吸力对非饱和重塑黄土抗剪强度的贡献[J].工程地质学报,2011,19(6):865-874.
- [6] 林鸿州,李广信,于玉贞,等.基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J].岩土力学,2007,28(9):1931-1936.
- [7] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.
- [8] 郝康宁.非饱和和网纹红土土—水特征曲线的研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [9] 翟军亮.非饱和土抗剪强度试验与土水特征曲线反演初探[D].辽宁 大连:大连理工大学,2019.

- 玉米田土壤冻融特性和水热分布的影响[J].应用生态学报,2020,31(4):1146-1154.
- [15] 银敏华,李援农,张天乐,等.集雨模式对农田土壤水热状况与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2015,46(12):194-203,211.
- [16] 付强,侯仁杰,王子龙,等.积雪覆盖下土壤热状况及其对气象因素的响应研究[J].农业机械学报,2015,46(7):154-161.
- [17] Lu H D, Xia Z Q, Fu Y F, et al. Response of soil temperature, moisture, and spring maize (*Zea mays* L.) root/shoot growth to different mulching materials in semi-arid areas of Northwest China[J].Agronomy, 2020,10(4):453-468.
- [18] Wu Y, Huang F Y, Zhang C, et al. Effects of different mulching patterns on soil moisture, temperature, and maize yield in a semi-arid region of the Loess Plateau, China[J].Arid Land Research and Management, 2016,30(4):490-504.
- [19] 张音,海米旦·贺力力,古力米热·哈那提,等.天山北坡积雪消融对不同冻融阶段土壤温湿度的影响[J].生态学报,2020,40(5):1602-1609.
- [20] 刘帅,于贵瑞,浅沼顺,等.蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J].土壤学报,2009,46(1):46-51.
- [21] 唐文政,王春霞,范文波,等.积雪与地表联合覆盖条件下冻融土壤水盐运移规律[J].水土保持学报,2017,31(3):337-343.
- [22] 付强,颜培儒,李天霄,等.冻融期不同覆盖和气象因子对土壤导热率和热通量的影响[J].农业工程学报,2017,33(20):98-105.
- [23] 吴芹芹,莫淑红,程圣东,等.黄土区冻融期不同土地利用土壤水分与温度的关系[J].干旱区研究,2020,37(3):627-635.
- (上接第 62 页)
- [10] Ghestem M, Veylon G, Bernard A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J].Plant and Soil,2014,377(1/2):43-61.
- [11] Mahannopkul K, Jotisankasa A. Influences of root concentration and suction on *Chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil[J].Soils and Foundations,2019,59(2):500-516.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王磊,杨松.土壤吸力测试方法对土壤水分特征曲线的影响[J].节水灌溉,2018(8):5-8.
- [15] 蔡国庆,张策,李舰,等.考虑初始干密度影响的 SWCC 预测方法研究[J].岩土工程学报,2018,40(增刊 2):27-31.
- [16] 刘小文,叶云雪.不同影响因素下非饱和红土土-水特征曲线的试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(2):97-104.
- [17] 陈卫金,程东会,陶伟.van Genuchten 模型参数的物理意义[J].水文地质工程地质,2017,44(6):147-153.
- [18] 何秋奇.基于土水特征曲线的非饱和和橡胶颗粒改良粉煤灰土强度研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [19] 陶高梁,孔令伟.不同初始孔隙比土体进气值及土-水特征曲线预测[J].岩土工程学报,2018,40(增刊 1):34-38.
- [20] 田佳,卞莹莹,于江珊,等.贺兰山 3 种乔木单根及根土复合体力学特性[J].水土保持学报,2018,32(6):123-129.
- [21] 格日乐,张成福,蒙仲举,等.3 种植物根-土复合体抗剪特性对比分析[J].水土保持学报,2014,28(2):85-90.
- [22] 林嘉辉,黄梦元,张莉婷,等.芒萁根系对崩岗红土层土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):159-165.
- [23] 刘春红,韦杰,史炳林,等.加筋材料对紫色土坡耕地埂坝土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):103-109,175.
- [24] 宋会娟,李建中,葛延明.基质吸力对非饱和网纹红土抗剪强度影响研究[J].工业建筑,2017,47(12):7-10,16.
- [25] 郑文晓,甘建军,李荐华.基质吸力对灰岩区滑带土强度影响的试验分析[J].长江科学院院报,2020,37(7):120-124,129.