

紫色土埂坎根—土复合体土水特性与抗剪强度

郑文娇¹, 韦杰^{1,2}, 唐强³, 李进林⁴, 何颖¹

(1.重庆师范大学地理与旅游学院,三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,重庆 401331;

2.三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站,重庆 401331;3.西南大学地理科学学院,

重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站,重庆 400715;4.中国科学院重庆绿色智能技术研究院,重庆 400714)

摘要: 研究根—土复合体土—水特征曲线与抗剪强度的关系,可为紫色土埂坎根—土复合体强化机理的揭示与埂坎稳定性的维持提供科学依据。选取三峡库区典型紫色土坡耕地埂坎草本植物根—土复合体为研究对象,结合 Hyprop2 土壤水分特征曲线测量仪、滤纸法与直剪试验,拟合土—水特征曲线,揭示基质吸力对根—土复合体抗剪强度的影响。结果表明:(1)根—土复合体土—水特征曲线明显分为边界效应区、过渡区与非饱和残余区,3 种常用模型(B-C、VG、F-X)中 F-X 模型拟合该曲线效果最好,根—土复合体饱和含水率、进气吸力、残余区含水率以及相同体积含水率下的基质吸力均高于素土。(2)随着体积含水率降低,根—土复合体黏聚力先增大后减小,试验范围内黏聚力最大值 51.25 kPa 出现在体积含水率约 23%时,内摩擦角则线性增大。相同体积含水率下,根—土复合体黏聚力较素土最大增加 50%,内摩擦角提升不大。(3)基质吸力对根—土复合体抗剪强度的增强作用具有阶段性特征,各阶段临界吸力值与土—水特征曲线一致,过渡区(基质吸力为 3~500 kPa)土体抗剪强度提高明显,进入非饱和残余区后(基质吸力>500 kPa)由于黏聚力下降,土体抗剪强度增速减慢,根—土复合体抗剪强度随基质吸力增大而提升的幅度大于素土。通过建立埂坎根—土复合体土—水特征曲线和抗剪强度的关系,可估测实际工况下的埂坎土体抗剪强度,进而为坡耕地埂坎的建设、维护管理以及坡耕地侵蚀阻控提供理论依据。

关键词: 根—土复合体; 土—水特征曲线; 抗剪强度; 基质吸力; 埂坎

中图分类号: S157.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)04-0075-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.011

Soil-water Characteristics and Shear Strength of Root-soil Composites from Purple-soiled Bunds

ZHENG Wenjiao¹, WEI Jie^{1,2}, TANG Qiang³, LI Jinlin⁴, HE Ying¹

(1.Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the

Three Gorges Reservoir Area, School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University,

Chongqing 401331; 2.Chongqing Observation and Research Station of Earth Surface Ecological Processes in

the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331; 3.Chongqing Jinpo Mountain Karst Ecosystem National

Observation and Research Station, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715,

China; 4.Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714)

Abstract: Investigating the relationship between soil-water characteristic curve (SWCC) and shear strength of root-soil composites is expected to provide a scientific basis for revealing the strengthening mechanism of purple-soiled root-soil composites and maintaining the stability of soil bunds. The root-soil composites of herbaceous plants on the soil bunds of typical purple-soiled sloping farmlands in the Three Gorges Reservoir region was selected as the research object, and the effect of matrix suction on the shear strength of root-soil composites was constructed by using Hyprop2 soil moisture characteristic curve measuring instrument, filter paper method combined with the direct shear test. Major findings were: (1) SWCC of the root-soil composites could be divided into boundary effect zone, transition zone, and unsaturated residual zone, and the F-X

收稿日期:2022-12-04

资助项目:重庆市杰出青年科学基金项目(cstc2019jcyjX0025);重庆英才青年拔尖人才项目(CQYC201905009);四川省科技计划项目(2020YJ0202,2021YFS0288);国家级大学生创新创业训练计划项目(202110637004)

第一作者:郑文娇(1998—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:joeyhere2022@foxmail.com

通信作者:韦杰(1979—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wei_jie@mails.ucas.ac.cn

model fitted best among the three commonly used models (B-C, VG, F-X). The saturated water content, air intake suction, residual water content, and suction at the same volumetric water content of the root-soil composites were all higher than those of the plain soil. (2) The cohesion of the root-soil composites first increased and then decreased with the decreasing volumetric moisture content, and the maximum cohesion of 51.25 kPa in the test range occurred at a volumetric moisture content of about 23%. At the same time, the angle of internal friction increased linearly. The cohesion of root-soil composites increased by 50% compared with plain soil at the same volumetric water content, and the internal friction angle was not greatly enhanced. (3) The enhancement effect of matrix suction on the shear strength of root-soil composites and its parameters had a stage-specific characteristic, and the critical suction value of each stage was consistent with the SWCC. The shear strength of soil in the transition zone (where the matrix suction was 3~500 kPa) was most obviously improved. After entering the unsaturated residual zone (matrix suction was greater than 500 kPa), the shear strength of soil increased at a slower rate due to the decrease of cohesion. In addition, the shear strength of the root-soil composites raised with increasing matrix suction to a greater extent than that of the plain soil. Establishing the relationship between SWCC and shear strength of the root-soil composites of purple-soiled bunds could estimate the shear strength of soil bunds under actual working conditions, which provides an important theoretical support for the construction, maintenance and management of slope cultivated land and the erosion control of slope cultivated land.

Keywords: root-soil composites; soil-water characteristic curve; shear strength; matrix suction; soil bunds

埂坎是防止集水冲毁耕地而修筑的高出田面的台阶与其外侧坡组合而成的复合体,是阻控坡耕地侵蚀的重要措施^[1]。土坎因造价低廉且生态适应性好成为现有紫色土坡耕地埂坎的主要类型^[2]。紫色土区多降雨且蒸发强,埂坎土体经常在饱和与非饱和态切换,抗剪强度随土体含水率、基质吸力变化,容易发生滑移、坍塌等现象,阻碍其水土保持功能的发挥^[3]。近年来,生物埂坎、地埂篱等植物措施被广泛用于埂坎垮塌防治,具有良好的水土保持效果和显著的生态效益。植物根系通过缠绕固结、分泌物胶结、膨压作用等形成根-土复合体,使土体工程力学与水力学性能明显提高,工程力学机制主要体现为浅层根系、深层垂直根系和水平根系对土体进行牵引、锚固与加筋,增强土体的抗剪抗蚀能力^[4-5]。水力学机制则表现为根系吸水、蒸腾及对孔隙的膨压填充等作用引起土体基质吸力变化,从而产生附加剪切强度^[6]。目前,对于埂坎根-土复合体的研究主要集中于工程力学效益方面,如根系的抗拉特性^[7]、根-土界面摩擦阻特性^[8]与抗剪抗冲性能^[9]等。然而根系作用引起的基质吸力变化也会改变土体抗剪强度,埂坎根-土复合体中基质吸力对土体稳定性的影响报道不多。

基质吸力是控制非饱和土应力应变状态的重要变量,国内外大量研究证实了非饱和土抗剪强度包含基质吸力的贡献^[10-14],因此表征土体基质吸力与含水状态关系的土-水特征曲线(soil-water characteristic curve)常被用于非饱和土抗剪强度的预测,可以减少成本且预测精度较高。有研究^[10-14]表明,不同土

体抗剪强度及其参数随基质吸力的变化规律具有明显的差异性,砂土、粉土由于其孔隙连通性大、渗透性高,抗剪强度在土-水特征曲线过渡区随基质吸力增加呈非线性增加,而在非饱和残余区可能降低或不变,其黏聚力和内摩擦角对基质吸力的敏感程度均较高^[11-13],黏性土因非饱和残余区界限不明显,抗剪强度随着基质吸力增加而持续增大,黏聚力受基质吸力影响显著而内摩擦角受影响不大^[14]。紫色土埂坎根-土复合体紧实度、粒径组成等与耕地土壤不同,土-水特征曲线与抗剪强度的对应关系也必然存在差异,且根系作用引起的基质吸力的变化也会对其抗剪强度产生影响。因此,本研究以基质吸力为切入点,解析埂坎根-土复合体土水特性与抗剪强度的关系,以期对紫色土坡耕地埂坎的维护提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区腹地的重庆市忠县(107°03'—108°14'E, 30°03'—30°35'N)境内,该区域海拔 117~1 680 m,70%以上为低山地形。土壤以三叠纪至第三纪发育的紫色土为主,土层厚度 0.3~0.6 m,具有水稳性差、易风化、抗蚀性弱的特点。属亚热带季风性湿润气候,年降水量 1 100~1 400 mm,降水年内分配不均,70%以上降水集中在 4—10 月。年均气温 18.2℃,年日照时间 1 327 h,无霜期 340 天,相对湿度 70%~80%。自然植被类型为常绿与落叶阔叶混交林、落叶阔叶与常绿针叶混交林、针叶林和灌草丛

等,郁闭度较高。种植作物有红薯(*Ipomoea batatas*)、玉米(*Zea mays*)、水稻(*Oryza glaberrima*)和柑橘(*Citrus reticulata*)等^[3]。研究区内曾实施多项水土保持工程治理坡耕地水土流失,土质埂坎是最重要的措施之一,典型埂坎外边坡 56°~90°,高度 0.5~2.2 m,顶宽 0.3~0.8 m^[2]。

1.2 样地选择与采样

采样时间为 2022 年 5 月,选取植被覆盖度 85% 以上的埂坎,以埂坎上生长的狗牙根(*Cynodon dactylon*)、蓼草(*Eulaliopsis binata*)、稗草(*Echinochloa crusgalli*)3 种典型草本植物为对象,采集根—土复合体土样,埂坎高度 1.44 m,顶宽 0.35 m,外边坡 76°,采样时选择健壮草本植株剪去地上茎叶部分,去

除埂坎上覆枯枝落叶、砾石,露出新鲜土壤面,使用 60 cm³ 环刀(内径 6.18 cm,高度 2 cm)竖直向下采集根—土复合体原状土样 36 个用于直剪试验,使用 Hyprop2 土壤水分特征曲线测量仪(Hyprop2 仪)配套的 250 cm³ 环刀(内径 8 cm,高度 5 cm)采集根—土复合体原状土样 6 个用于测量土—水特征曲线。2 种环刀样均采自含根量最大的 0—10 cm 表土层,采样完成后用保鲜膜密封装入环刀盒内。选取几乎无植被覆盖的素土埂坎作为对照,按相同方法采集素土环刀样,素土坎高 1.05 m,顶宽 0.42 m,外边坡 68°。2 种土样分别采适量散土和容重环刀样用于物理性质测试,结果见表 1。上述每种采样均重复 3 次,试验结果取平均值。

表 1 土壤物理性质

试样	容重/ (g·cm ⁻³)	自然 含水率/%	总孔隙度/%	颗粒组成/%		
				黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	砂粒 (>0.05~2 mm)
根—土复合体	1.41±0.12	18.33±2.26	36.65±3.27	16.19±1.09	64.56±1.35	19.26±0.75
素土	1.38±0.09	16.56±1.04	39.20±3.05	13.54±0.92	61.44±1.11	25.01±0.21

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3 试验方法与数据处理

1.3.1 土—水特征曲线测量与数据处理 Hyprop2 仪是张力计法的一种自动化产品,可以连续自动地监测土壤基质吸力与含水量,其测量范围仅限于 0~100 kPa,使用低成本且操作简便的滤纸法增加 5 个高吸力控制点,以获取完整土—水特征曲线。

测量开始前,逆向饱和 250 cm³ 原状环刀样,选取根—土复合体、素土环刀样各 6 个,在 1 个环样底部向内打 2 个深度分别为 1.25、3.75 cm 的孔洞,插入对应长度的微型张力计并接入 Hyprop2 仪,环刀样上方裸露在空气中,使其在室内温度恒定、无外来风干扰的条件下自然蒸发。测量开始后,仪器将每隔 10 s 采集 1 次张力计测得的吸力值数据,同时由天平实时测量环刀样重量,以此计算吸力值对应的体积含水率,当吸力达到张力计最大量程(100 kPa),Hyprop2 仪测量试验结束。剩余 5 个试样水分继续自然蒸发,每隔 12 h 采用内径

61.8 mm,高 20 mm 的环刀在试样上切取 2 个环刀样用于滤纸法测定,将 3 张直径为 58 mm 的滤纸烘干冷却后置于 2 个环刀中间与土体直接接触(中间滤纸用于测量,另 2 张滤纸包裹其免于污染)。再用塑料膜将 2 个环刀样整体包裹并用胶带密封,置于恒温恒湿环境 7 天,使滤纸与试样达到水分交换平衡。随后使用高精度(0.001 g)天平迅速称量滤纸水分平衡后的重量,将滤纸烘干 6 h 后再次称重,可得滤纸的含水率,再使用率定方程求得土体基质吸力。试验所用滤纸为双圈牌 No.203 慢速型定量滤纸,该滤纸率定方程^[15]为:

$$\lg \psi = \begin{cases} -0.0767w + 5.493, & w \leq 47 \\ -0.0120w + 2.470, & w > 47 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ 为基质吸力(kPa); w 为试验测得的滤纸含水率(%)。

使用 Origin 2021 软件处理数据,获得 3 种常用土—水特征曲线模型的拟合参数(表 2)。

表 2 土—水特征曲线常用模型

模型名称	表达式	参数含义
Brooks—Corey 模型(1964) ^[16] (B—C 模型)	$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(a\psi)^{-\lambda} & \psi \geq a^{-1} \\ \theta_r & \psi < a^{-1} \end{cases}$	θ 为体积含水率(cm ³ /cm ³); θ_r 、 θ_s 分别为饱和、残余体积含水率; a 为进气值相关参数(1/kPa); λ 为孔隙尺寸分布函数; ψ 为基质吸力(kPa)
Van Genuchten 模型(1980) ^[17] (VG 模型)	$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (a\psi)^n]^{-m}$	n 为曲线形状参数, $m = 1 - n^{-1}$;其他参数含义同上
Fredlund—Xing 三参数模型(1994) ^[18] (F—X 模型)	$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \{ \ln [e + (\psi/a)^n] \}^{-m}$	m 、 n 为曲线形状参数;其他参数含义同上

1.3.2 直剪试验及数据处理 为探讨不同体积含水率下埂坎土体抗剪强度变化规律,将直剪环刀样逆向饱和,使其在室内恒温条件下自然蒸发,每隔 12 h 称

重后进行直剪试验,共获取 9 组不同体积含水率试样的抗剪强度,第 9 组试样水分蒸发时长为 4 天。试验仪器为南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪,垂

直荷载设定为 50, 100, 200, 300 kPa^[19], 按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[20] 进行操作。采取不固结快剪试验, 剪切速率设置为 1.4 mm/min, 并将隔水薄膜置于试样与透水石之间, 以保证试样剪切过程中含水率和基质吸力基本不变。剪切完成后使用烘干法测定试样含水率。计算抗剪强度指标内摩擦角(φ)和黏聚力(c)的 Mohr—Coulomb 公式为:

$$\tau_{\max} = \sigma \times \tan \varphi + c \quad (2)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为抗剪强度(kPa), 取 0~6 mm 内剪应力峰值或者剪切位移为 6 mm 时的剪应力值; σ 为轴向荷载(kPa); φ 为土壤内摩擦角($^{\circ}$); c 为土壤黏聚力(kPa)。

2 结果与分析

2.1 埂坎根—土复合体土—水特征曲线

根据含水率情况, 根—土复合体和素土试样的土—水特征曲线均明显分为接近饱和的边界效应区、明显下降的过渡区以及下降缓慢的非饱和残余区(图 1)。在基质吸力 < 3 kPa 的边界效应区, 基质吸力的微弱提升并未引起土体有效应力变化, 土体内部的孔隙仍被水分占据, 土体维持近饱和状态; 在基质吸力为 3~500 kPa 的过渡区, 吸力增加至进气值, 气体开始进入土体孔隙取代孔隙水, 体积含水率随基质吸力增大迅速降低, 因此过渡区曲线较陡; 当基质吸力 > 500 kPa, 土体进入非饱和残余区, 体积含水率受吸力影响逐渐减弱, 随着基质吸力快速增大, 体积含水率以缓慢的速率下降。

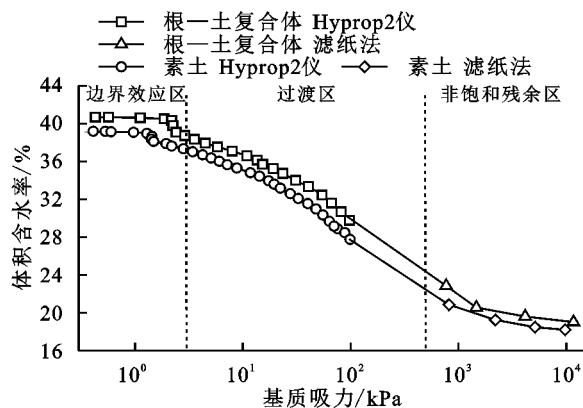


图 1 埂坎土壤土—水特征曲线

利用 3 种常用土—水特征曲线模型进行拟合, 得到各模型参数值(表 3)。因埂坎土体压实度高, 本试验范围内土样并未排除所有孔隙通道水, 残余含水量难以精确估算, 拟合时忽略参数 θ_r 。由各模型拟合参数可知, 根—土复合体饱和体积含水率 θ_s 大于素土。B—C 模型参数 α 为进气吸力值的倒数, 根—土复合体及素土进气吸力分别为 8.26, 6.71 kPa, 根—土复合体进气吸力高于素土。VG 模型参数 α 影响拟合土—水特征曲线的几何形态, α 值越小, 过渡区基质吸力变化越平缓, 相同体积含水率所对应的基质

吸力越大^[21], 根—土复合体的 α 值(0.012 8)小于素土(0.013 7), 表明在过渡区, 随着基质吸力增大, 根—土复合体的体积含水率下降更缓慢, 且在相同体积含水率下, 根—土复合体的基质吸力大于素土。土体体积含水率在非饱和残余区缓慢减小, 2 种试样的残余区含水率偏高, 约 0.18 cm³/cm³, 占饱和状态的 40% 左右, 根—土复合体残余区含水率高于素土。

根据拟合精度指标(表 3)和曲线形状(图 2)可知, 3 种模型均能较好拟合实测值, 均方根误差(RMSE)为 0.003 1~0.012 8 cm³/cm³, R^2 为 0.842~0.996。其中, 根—土复合体和素土 B—C 模型的 RMSE 分别为 0.012 8, 0.010 7 cm³/cm³, 在 3 个模型中最大, R^2 分别为 0.842, 0.867, 在 3 个模型中最小, 且 B—C 模型为分段函数, 进气转折处与实测曲线差异较大(图 2), 模拟效果不如 VG 和 F—X 模型; F—X 模型拟合的 RMSE 最小, R^2 值最大, 对 2 种试样土—水特征曲线拟合的适用性最好, 因此后续计算均基于该模型。

表 3 3 种常用模型拟合土—水特征曲线参数

模型	参数	根—土复合体	素土
B—C 模型	α	0.121	0.149
	θ_s	0.403	0.377
	λ	0.975	0.160
	RMSE	0.0128	0.0107
	R^2	0.842	0.867
VG 模型	α	0.128	0.137
	θ_s	0.403	0.387
	n	1.113	1.117
	RMSE	0.0084	0.0072
	R^2	0.987	0.991
F—X 模型	α	20.259	14.483
	θ_s	0.403	0.387
	n	0.818	0.800
	m	0.485	0.492
	RMSE	0.0047	0.0031
	R^2	0.991	0.996

2.2 埂坎根—土复合体抗剪强度与含水率

通过直剪试验得到根—土复合体及素土不同体积含水率下的抗剪强度参数, 并对两者进行回归分析(图 3)。结果表明, 埂坎根—土复合体与素土的黏聚力与体积含水率之间均呈现二次函数关系, 变化趋势大致相同, 即随着体积含水率减小, 黏聚力增大到一定峰值后减小。根—土复合体、素土黏聚力分别为 22.82~52.88, 17.12~52.07 kPa, 均在体积含水率减小至 23% 附近出现临界值, 根—土复合体临界体积含水率与黏聚力分别为 23.47%, 51.25 kPa, 素土临界体积含水率与黏聚力分别为 23.59%, 45.85 kPa。根—土复合体、素土内摩擦角分别为 7.58°~38.66°, 6.13°~36.14°, 均随体积含水率减小线性增大。

根—土复合体抗剪强度参数在不同体积含水率下均高于素土。试验范围内,根—土复合体黏聚力为相同体积含水率下素土黏聚力的 1.1~1.5 倍,当土壤近饱和时,根—土复合体黏聚力较素土提升约 50%,此时根系作用下黏聚力增幅达到峰值,而随着

水分减少,根系对黏聚力的提升作用略有减弱。根—土复合体内摩擦角为素土的 1.0~1.1 倍,增幅较小,体积含水率越低,根系对内摩擦角的提升越明显,最大增幅为 10%。根—土复合体黏聚力较素土的提升比内摩擦角更明显。

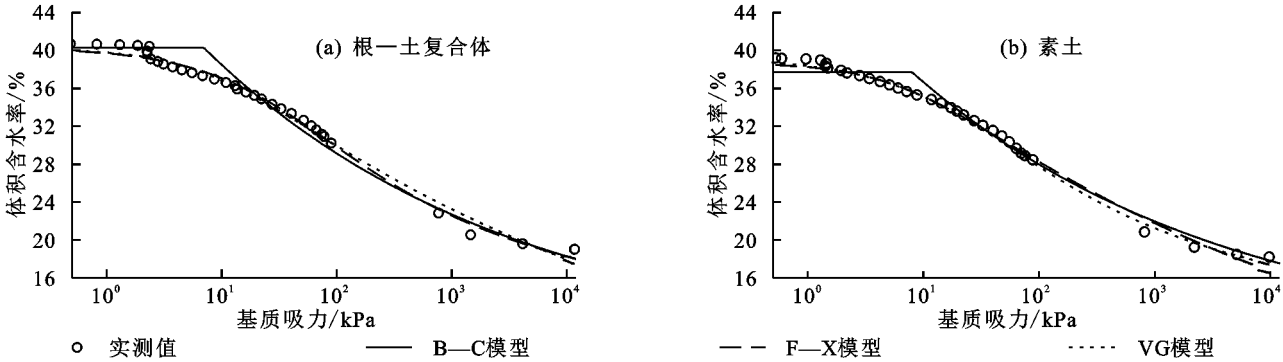


图 2 3 种常用模型拟合土—水特征曲线

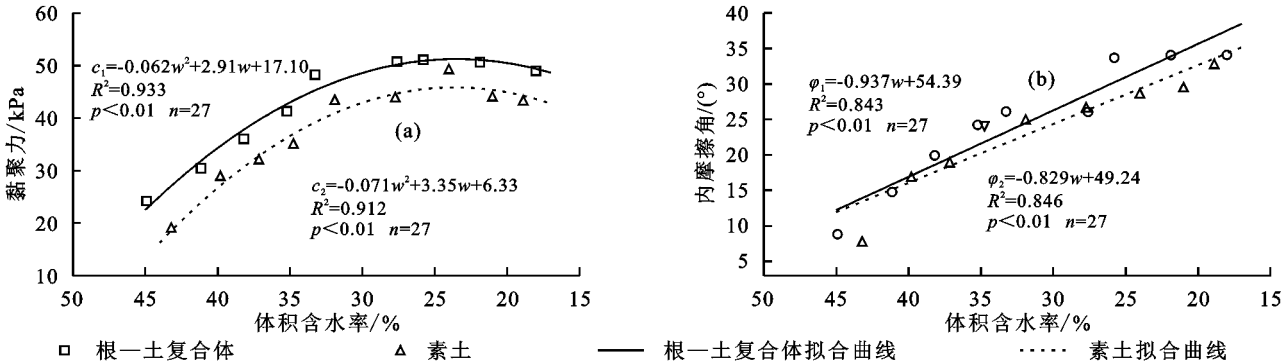


图 3 埂坎土体体积含水率与抗剪强度参数关系

2.3 埂坎根—土复合体抗剪强度与基质吸力

通过土—水特征曲线与直剪试验结果,得到不同垂直荷载下土体抗剪强度与基质吸力的关系(图 4),根—土复合体与素土试样抗剪强度在 4 组垂直荷载下的变化特征基本一致,可分为坡角不同的 2 个近似线性段,拟合结果见表 4,转折点出现在基质吸力为 335~661 kPa 时,与土—水特征曲线过渡区及非饱和和残余区转折处的特征值(500 kPa)相近。

进入非饱和残余区前,根—土复合体抗剪强度在 50,100,200,300 kPa 4 组垂直荷载下分别增长 43.97,53.30,106.22,139.77 kPa,增幅依次为 103%,

93%,125%,129%,平均增幅 113%,进入非饱和残余区后抗剪强度平均增幅仅有 8%,此阶段抗剪强度所含的基质吸力贡献作用逐渐减弱。素土抗剪强度总体低于根—土复合体,进入非饱和残余区前,素土抗剪强度在 4 组垂直荷载下分别增长 32.66,37.88,89.86,85.15 kPa,平均增幅 79%,仅为根—土复合体试样增长幅度的 0.7 倍,进入非饱和残余区后,素土试样的土壤抗剪强度增长幅度同样逐渐下降,平均增幅为 6%,为根—土复合体试样增幅的 0.8 倍,表明基质吸力对埂坎根—土复合体的贡献大于其对素土的贡献。

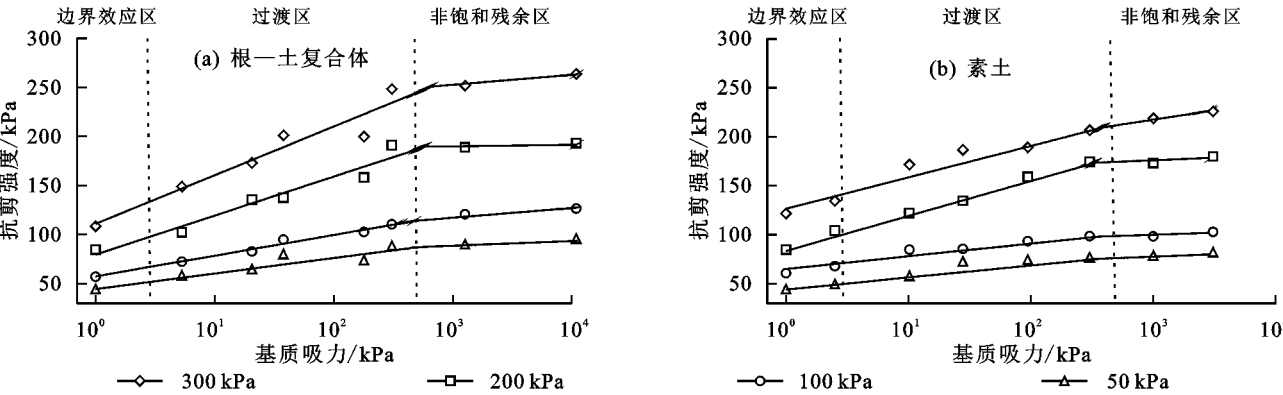


图 4 不同垂直荷载下埂坎土体抗剪强度与基质吸力关系

表 4 不同垂直荷载下埂坎土体抗剪强度与基质吸力关系拟合曲线表达式

垂直 荷载/kPa	根—土复合体		素土	
	拟合曲线表达式	R^2	拟合曲线表达式	R^2
50	$\tau = \begin{cases} 15.81 \times \lg \psi + 44.51, \psi < 500 \\ 4.81 \times \lg \psi + 72.20, \psi \geq 500 \end{cases}$	0.84	$\tau = \begin{cases} 12.28 \times \lg \psi + 44.07, \psi < 354 \\ 4.96 \times \lg \psi + 62.73, \psi \geq 354 \end{cases}$	0.90
100	$\tau = \begin{cases} 21.14 \times \lg \psi + 57.29, \psi < 475 \\ 10.00 \times \lg \psi + 87.11, \psi \geq 475 \end{cases}$	0.95	$\tau = \begin{cases} 12.98 \times \lg \psi + 65.03, \psi < 349 \\ 4.27 \times \lg \psi + 87.18, \psi \geq 349 \end{cases}$	0.88
200	$\tau = \begin{cases} 39.70 \times \lg \psi + 79.60, \psi < 585 \\ 1.61 \times \lg \psi + 185.00, \psi \geq 585 \end{cases}$	0.88	$\tau = \begin{cases} 35.63 \times \lg \psi + 83.49, \psi < 335 \\ 5.32 \times \lg \psi + 160.03, \psi \geq 335 \end{cases}$	0.89
300	$\tau = \begin{cases} 49.59 \times \lg \psi + 110.81, \psi < 661 \\ 10.21 \times \lg \psi + 221.86, \psi \geq 661 \end{cases}$	0.93	$\tau = \begin{cases} 32.10 \times \lg \psi + 126.42, \psi < 395 \\ 19.08 \times \lg \psi + 160.223, \psi \geq 395 \end{cases}$	0.94

注: τ 为抗剪强度(kPa); ψ 为基质吸力(kPa)。

与抗剪强度变化趋势相似,随着基质吸力增加,根—土复合体和素土的黏聚力和内摩擦角也呈现出阶段性变化特征(图 5)。土体从饱和状态变化至非饱和和残余状态,2 种试样黏聚力提高明显,分别提升 17.87,17.31 kPa,但并非单调递增,而是呈现非线性变化且差异明显的 3 个阶段,各阶段基质吸力与土—水特征曲线的变化基本同步。在边界效应区($\psi \leq 3$ kPa),量值很低的基质吸力微弱提升黏聚力,在过渡区($3 \text{ kPa} < \psi < 500 \text{ kPa}$),2 种试样黏聚力分别提升 48%,39%;在非饱和和残余区($\psi \geq 500 \text{ kPa}$),黏聚力较峰值降低 2%,3%。内摩擦角随基质吸力增长呈现单调

增大的特征,进入非饱和和残余段前,2 种试样内摩擦角增幅为 126%,104%,进入非饱和和残余段增长速率有所减缓,增幅为 11%,7%。

埂坎根—土复合体与素土抗剪强度及其参数随基质吸力的增大均呈现出上述规律,但根—土复合体相对素土的抗剪强度及其参数值更大,变化幅度也更明显(表 5)。过渡区黏聚力随基质吸力最大提升幅度为 48%,高于素土最大提升幅度(39%)。根—土复合体内摩擦角提升幅度(126%)同样高于素土(104%)。由此,基质吸力能提高埂坎土体抗剪强度,根—土复合体中相同基质吸力对抗剪强度及其参数的提升幅度高于素土。

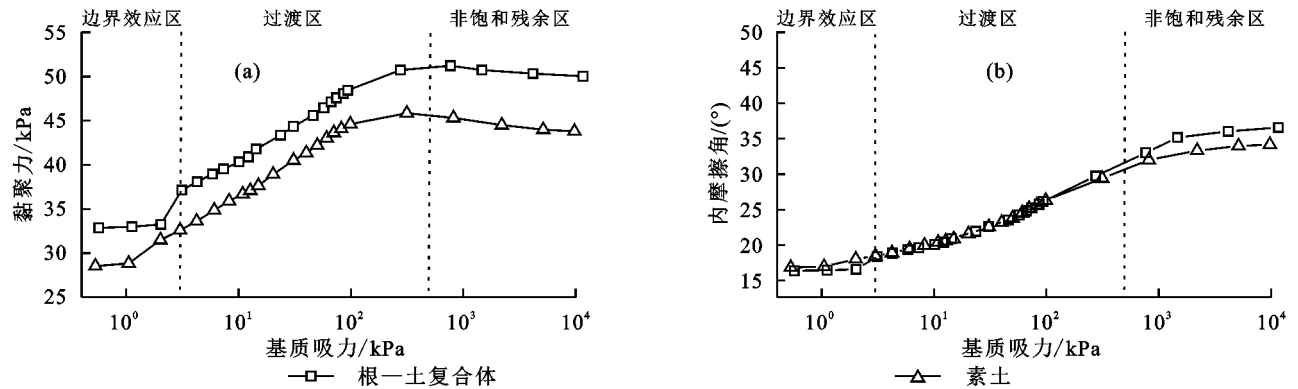


图 5 埂坎土体基质吸力与抗剪强度参数关系

根据基质吸力—体积含水率关系及抗剪强度参数—体积含水率关系式,可得到以基质吸力为变量的抗剪强度公式及其参数为:

$$\theta = \theta_s \times \{ \ln [e + (\psi/\alpha)^n] \}^{-m} \tag{3}$$

表 5 以基质吸力变量的埂坎土体抗剪强度公式参数值

试样类型	α	θ_s	n	m	B_1	C_1	A	B_2	C_2
根—土复合体	20.259	0.403	0.818	0.485	-93.7	54.39	-620	291	17.10
素土	14.483	0.387	0.800	0.492	-82.9	49.24	-710	335	6.33

3 讨论

3.1 埂坎根—土复合体与素土土水特性的差异

本研究表明,Hyprop2 土壤水分特征曲线测量

仪与滤纸法联合测定的紫色土埂坎土—水特征曲线分为边界效应区、过渡区、非饱和和残余区。埂坎土体进气吸力较低且残余区体积含水率偏高,这与紫色土

$$\tau = \sigma \times \tan(B_1 \times \theta + C_1) + A \times \theta^2 + B_2 \times \theta + C_2 \tag{4}$$

式中: τ 为抗剪强度(kPa); ψ 为基质吸力(kPa); θ 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3); σ 为正应力(kPa)。

岩性强、孔隙分布两极化的性质有关,即使在高吸力的非饱和残余区,仍有相当大体积的水滞留在紫色土基质微区孤立的微小孔隙中难以排出^[22]。根-土复合体的饱和体积含水率、进气值以及残余区体积含水率较素土有不同程度提升,这与王轩等^[23]对植物边坡的研究结果一致。通常认为,土-水特征曲线与土壤孔隙结构密切相关,埂坎根-土复合体初始饱和含水率明显高于素土,说明草本植物根系能改变埂坎土体孔隙结构,测量开始时根-土复合体试样因重力排空的大孔隙水的含量小于素土,因而具有更高的初始饱和含水量。丁小刚等^[24]在干密度对土体土水特性的影响研究中发现,大孔隙体积减小,中、小孔隙体积占比增加,土体进气吸力与残余含水率均增大,由此可推测,草本植物根系填充埂坎土颗粒间孔隙,减小土壤孔隙比,进而提高土体的进气吸力与残余区含水率。Leung 等^[25]研究发现,植物根系降低水分渗入土体和在地中运移的能力,提高表层土的抗渗能力,对于维持土体基质吸力有利。该结论进一步印证了埂坎根-土复合体因根系作用导致其具有比素土更高的基质吸力与持水能力,对维持埂坎稳定性有积极作用。

3.2 含水率对埂坎根-土复合体抗剪强度的影响

埂坎根-土复合体与素土黏聚力随体积含水率降低呈现二次函数变化特征,这与 Wei 等^[3]的研究结果一致。这是由于土体饱和时土颗粒间自由水分子多、水膜厚度大,颗粒间以点接触连接,随着体积含水率降低,土颗粒受到水分子牵引,颗粒间以面接触为主致其黏聚力上升,但体积含水率降至一定程度时,水分子对土颗粒的牵引力降低,黏聚力则又开始下降^[26]。内摩擦角随着体积含水率的下降呈线性递增趋势,这可能是由于土粒间咬合力持续增大的缘故,含水率越低,土粒剪切错动时咬合力越强,内摩擦角越大^[27]。因此,紫色土区雨季对埂坎土体抗剪能力有较大影响,可考虑排水、减缓入渗以尽可能避免因含水率过高而引发的埂坎垮塌。不同体积含水率条件下埂坎草本植物根-土复合体的黏聚力均显著高于素土,但是二者的内摩擦角差异甚小,这是由于土壤的粒径级配、颗粒形状、矿物成分等条件是影响土壤内摩擦角的主要因素,以上方面根-土复合体与素土差别不大,故内摩擦角差异较小。

3.3 基质吸力对埂坎根-土复合体抗剪强度的影响

埂坎根-土复合体和素土抗剪强度参数变化趋势大致相同,抗剪强度随着基质吸力增加而增大,在进入非饱和残余区后增速减慢,其参数黏聚力先增后减,内摩擦角持续增大,各阶段临界基质吸力值与

土-水特征曲线相同,这与闫亚景等^[10]研究结果一致,说明基质吸力在土-水特征曲线不同阶段对抗剪强度的贡献率不同,这是由于宏观基质吸力与其在土粒间的微观有效作用力存在差异所导致^[10,13]。在土-水特征曲线过渡区,空气迅速取代孔隙中的水分,土颗粒间气-水收缩膜不断增大,使土体有效基质吸力增大,因而黏聚力增加,表现为土体抗剪强度迅速提升。进入非饱和残余区后,宏观基质吸力仍在迅速增加,但由于水分过量流失致使埂坎土体中粉粒孔隙气-水收缩膜减小,尽管此时黏粒孔隙中强结合水膜增大^[10],但埂坎土体中黏粒占比($<20\%$)远不及粉粒($>60\%$),因此有效基质吸力开始降低,试样的黏聚力呈现出明显减小的趋势,由于水分减少后对土颗粒的润滑作用继续降低,内摩擦角仍在增加,两者共同作用使土体抗剪强度继续增大,但是增速明显减慢。根-土复合体抗剪强度及其参数值在各基质吸力条件下均大于素土,随基质吸力增大而提升的幅度也更为明显,以黏聚力提升为主,这可能是由于在宏观基质吸力相同情况下,埂坎草本植物根系及其产生的根际分泌物对颗粒间的填充、黏结作用提高了有效基质吸力,使根-土复合体黏聚力峰值较素土更高,即基质吸力对根-土复合体抗剪强度有更大的贡献率。因此,埂坎草本植物根-土复合体抗剪性能在不同水分条件、不同基质吸力下均优于素土,对埂坎的日常维护中应注重植物措施的合理配置,利用根-土复合体固土机制改善埂坎力学性质。

本研究通过原状土试验分析了紫色土埂坎根-土复合体的土水特性及其与抗剪强度的关系,但室内试验无法测量植物呼吸、蒸腾与吸水作用所产生的吸力,试验结果与野外实际情况存在差异,后续将开展根-土复合体基质吸力原位观测与剪切试验,更准确地刻画根-土复合体的土水特性及其对埂坎稳定性的影响和作用机制。

4 结论

(1)紫色土埂坎根-土复合体与素土的土-水特征曲线分为边界效应区、过渡区与非饱和残余区,根-土复合体饱和含水率、进气值、残余区含水率及相同体积含水率下基质吸力均高于素土。

(2)试验范围内,根-土复合体和素土黏聚力随体积含水率减小先增后减,内摩擦角线性增加。

(3)根-土复合体和素土的抗剪强度及其参数随基质吸力增大表现出明显的阶段性特征变化,各阶段临界基质吸力与土-水特征曲线一致,抗剪强度在进入非饱和残余区后增速减慢;黏聚力先增大后减小,

过渡区增幅最大;内摩擦角持续增大。

(4)根—土复合体抗剪强度及其参数值在各含水率和基质吸力水平下总体高于素土,相同基质吸力对根—土复合体抗剪强度的贡献更大,以黏聚力提升为主。

参考文献:

- [1] Luo Y L, Wei J, Tang Q, et al. Water seepage and retention in purple soil bunds on sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Land Degradation and Development, 2022, 33(9): 1410-1422.
- [2] 李进林, 韦杰. 三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 229-233.
- [3] Wei J, Shi B L, Li J L, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena, 2018, 166: 124-133.
- [4] 李珍玉, 欧阳森, 肖宏彬, 等. 植物根系生长形态对膨胀土边坡土体抗剪强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 181-189.
- [5] Shuai F, Huang M Y, Zhan Y Y, et al. Effects of herbaceous plant roots on the soil shear strength of the collapsing walls of Benggang in Southeast China[J]. Forests, 2022, 13(11): e1843.
- [6] 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.
- [7] 周萍, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区紫色土坡耕地草本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 1-6.
- [8] 甘凤玲, 韦杰, 李沙沙. 紫色土埂坎典型草根系摩阻特性对土壤含水率的响应[J]. 草业学报, 2022, 31(7): 28-37.
- [9] 颜哲豪, 湛芸, 刘泉宏, 等. 喀斯特坡 2 种地埂篱根—土复合体抗剪和抗冲性能综合评价[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1811-1820.
- [10] 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.
- [11] Zhai Q, Rahardjo H, Satyanaga A, et al. Estimation of unsaturated shear strength from soil-water characteristic curve [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14: 1977-1990.
- [12] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [13] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379-392.
- [14] 李涛, 刘波, 杨伟红, 等. 基质吸力对重塑红黏土抗剪强度影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 375-381.
- [15] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 405-408.
- [16] Corey R. Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design[J]. Transactions of the ASAE, 1964, 7(1): 26-28.
- [17] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [18] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [19] 汪时机, 杨振北, 李贤, 等. 干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 113-122.
- [20] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [21] 李文政, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地不同坡位土壤的水分特征曲线及水力学性质[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 135-142.
- [22] 王红兰, 唐翔宇, 鲜青松, 等. 紫色土水分特征曲线室内测定方法的对比[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 240-248.
- [23] 王轩, 李珍玉, 肖宏彬, 等. 基于土—水特征曲线的植物边坡抗剪强度研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 57-62.
- [24] 丁小刚, 余云燕, 蔺文博, 等. 非饱和弱膨胀土土—水特征曲线拟合与渗透系数模型预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 361-370.
- [25] Leung A K, Garg A, Coe J L, et al. Effects of the roots of Cynodon dactylon and Schefflera heptaphylla on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(15): 3342-3354.
- [26] 蔡国庆, 张策, 黄哲文, 等. 含水率对砂质 Q3 黄土抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 32-36.
- [27] 洪本根, 罗嗣海, 胡世丽, 等. 基质吸力对非饱和离子型稀土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2303-2310.