

黄河上游河岸根土复合体抗剪强度特性试验研究

陈欢欢, 张峻岭, 张子刚, 曾阳益, 吕娜, 丁云龙, 梁凯, 张鼎

四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072

DOI:10.61369/WCEST.2026020015

摘 要 : 为探究黄河上游河岸草本植物根系对边坡浅层土体的加固机理, 定量揭示含水率与含根率对根土复合体抗剪强度的影响规律, 本文以狗牙根根系和砂质粉土为研究对象, 采用室内应变控制式直接剪切试验, 设置4组含水率梯度、5组含根率梯度, 在50~300kPa四级法向应力下开展试验测试, 剖析根土复合体应力-位移特征、抗剪强度演化规律及抗剪强度指标响应特性。结果表明: 素土与根土复合体应力-位移曲线均呈应变硬化型, 狗牙根根系可有效提升土体抵抗变形能力; 含水率与含根率均存在最优值, 含水率20% (接近土样最优含水率18.3%)、含根率0.75%时根系加筋效果最佳, 抗剪强度最大增幅达44.17%; 含水率和含根率对复合体黏聚力影响显著, 对内摩擦角扰动较小, 黏聚力最大增幅可达83.39%, 草本根系主要通过提升土体黏聚力实现固土护坡效果。研究成果可为植被护坡工程的参数设计与稳定性评估提供试验依据。

关 键 词 : 根土复合体; 狗牙根; 抗剪强度; 含水率; 含根率; 直剪试验; 植被护坡

Experimental Study on Shear Strength Characteristics of Shore Root-soil Complex in the Upper Reaches of the Yellow River

Chen Huanhuan, Zhang Junling, Zhang Zigang, Zeng Yangyi, Lv Na, Ding Yunlong, Liang Kai, Zhang Ding

Sichuan Academy of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610072

Abstract : To investigate the reinforcement mechanism of root systems of herbaceous plants on the upper Yellow River riverbanks on shallow soil layers and quantitatively reveal the influence patterns of moisture content and root content on shear strength of root-soil composite, this study focused on foxtail millet root systems and sandy silt. Using strain-controlled direct shear tests in laboratory conditions, four moisture content gradients and five root content gradients were established, with experimental measurements conducted under four-stage normal stress ranging from 50 to 300 kPa. The study analyzed stress-displacement characteristics, shear strength evolution patterns, and response characteristics of shear strength indicators in root-soil composite systems. Results demonstrated that both native soil and root-soil composite exhibited strain-hardening stress-displacement curves, with foxtail millet roots significantly enhancing soil deformation resistance. Optimal values were identified for moisture content (20% vs. 18.3% optimal soil moisture content) and root content (0.75%), where root reinforcement achieved maximum shear strength increase of 44.17%. Moisture and root content significantly influenced composite cohesion while causing minimal disturbance to internal friction angles, with maximum cohesion enhancement reaching 83.39%. Herbaceous root systems primarily stabilized slopes by increasing soil cohesion. These findings provide experimental evidence for parameter design and stability assessment in vegetation slope protection engineering.

Keywords : root-soil complex; polygonum aviculare; shear strength; moisture content; root content; direct shear test; vegetation slope protection

引言

边坡浅层失稳是岩土工程与生态防护领域的常见病害, 土体抗剪强度不足是诱发滑坡、坍塌的核心诱因。传统刚性护坡技术虽能提升边坡稳定性, 但易破坏生态环境、造价偏高, 而植被护坡作为生态友好型防护技术, 凭借植物根系的加筋作用、固土作用, 可有效改善浅层土体力学性能, 兼具工程效益与生态效益。草本植物根系密集发达、分布浅层, 能快速与土体形成复合结构, 是边坡生态护坡的优选植被类型^[1]。

基金项目: 水利部重大科技项目《黄河上游生态脆弱区防洪治理工程关键技术研究》(SKS-2022023)。四川省省级科研院所基本科研项目(2025-SKY-ZXKY-03)。

作者简介: 陈欢欢(1995.12-), 女, 汉族, 广西来宾人, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事水利水电工程设计、咨询与管理工作。

目前学界针对根土复合体力学特性已开展大量研究，Wu、Waldron、Gray^[2-4]等学者先后构建垂直根系、倾斜根系固土力学模型，奠定了根系加筋理论基础。植物根系对土壤抗剪强度的增强效应主要通过根土复合体直剪试验、三轴剪切试验以及原位剪切测试等方法进行评估^[5]。大量室内外试验证实，植物根系可通过抗拉、摩擦作用分担土体剪应力，提升复合体抗剪强度，但含水率、含根率、根系类型等因素均会影响加固效果。狗牙根作为多年生草本植物，具有存活率高、适应性强、须根致密、力学性能优异等特点，广泛应用于边坡护坡工程^[6]，但针对砂质粉土地质条件下，根土复合体抗剪强度随含水率、含根率的定量演化规律仍有待深入研究。基于此，本文通过室内直剪试验，系统分析不同工况下根土复合体抗剪强度特性，揭示根系固土力学机制，为植被护坡工程设计提供理论支撑。

一、草本植物根系固土力学机制

（一）根土复合体作用原理

草本植物根系多分布于边坡浅层土体，密集的根系在土体孔隙中穿插、缠绕、包络土颗粒，形成整体性较强的根土复合结构，可将根系视作天然加筋材料，将根土复合体等效为加筋土。土体自身抗压强度高、抗拉性能差，而植被根系抗拉性能优异，两者优势互补可显著提升复合体抵抗变形与破坏的能力。土体受剪过程中，根系与土颗粒接触面产生摩擦作用，将土体剪应力转化为根系拉应力，根系通过抗拉作用承担部分剪切力，根系力学性能越优，分担剪应力能力越强。

（二）根系固土力学模型

Waldron率先提出垂直根系固土模型，假定根系与剪切面垂直，土体受剪时剪应力传递至根系，界面摩擦力将剪应力转化为根系拉力，拉力可分解为平行剪切面的水平应力与垂直剪切面的法向应力。在此基础上，Gray等针对倾斜根系工况，推导了根系与剪切面斜交时的抗剪强度增量公式，完善了单根固土力学模型，如图1所示。

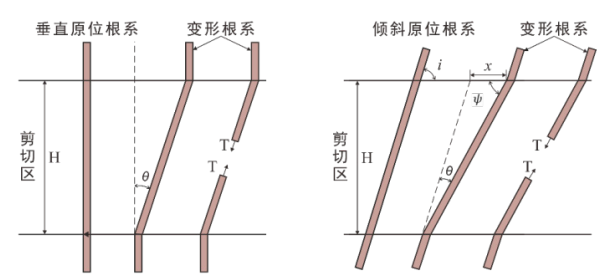


图1 根土剪切力学模型

基于单根模型，将其推广至多根系实际工况，假定土体中含 n 个根系，其中垂直根系 m 个，斜交根系 $n-m$ 个。综合垂直根系与倾斜根系抗剪强度增量公式，推导得到根系加筋土体总抗剪强度增量 S_r ，进而得出根土复合体抗剪强度计算公式：

$$s'=s+s_r=c+\sigma\tan\phi+s_r \tag{1}$$

式中：为根土复合体抗剪强度（kPa）； s 为素土抗剪强度（kPa）； s_r 为根系加筋抗剪强度增量（kPa）； C 为土体黏聚力（kPa）； ϕ 为剪切面法向应力（kPa）； δ 为土体内摩擦角（°）。

二、室内直剪试验设计

（一）试验材料

试验选用狗牙根的根系作为加筋材料。该植被为多年生草

本，须根致密、根径均匀，抗拉抗剪性能优异，环境适应性强。试验用土为砂质粉土，依据《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）、《土的工程分类标准》（GB/T 50145-2007）测试土样基本物理指标，结果如表1所示；土样颗粒级配采用筛分法测定，结果如表2所示。

表1 试验土样基本物理指标

土样类型	比重	最优含水率 / %	最大干密度 / (g · cm ⁻³)	液限 / %	塑限 / %
砂质粉土	2.65	18.3	1.58	26.1	20.2

表2 试验土样颗粒级配

土颗粒粒径分布				
>0.2mm	0.25 ~ 2.0mm	0.05 ~ 0.25mm	0.005-0.05	< 0.005
19.5	48.7	13.5	3.8	14.5

（二）工况与仪器设计

含水率、含根率计算公式如下：

$$\omega=\frac{m_w}{m_s}\times100\% \quad \rho_r=\frac{m_r}{m_s}\times100\% \tag{2}$$

式中： ω 为含水率（%）； m_w 为水分质量（g）； m_s 为干土质量（g）； ρ_r 为含根率（%）； m_r 为根系质量（g）。

试验采用四川大学土工实验室 ZJ型应变控制式直剪仪，剪切速率设定为4r/min，法向应力设置50kPa、100kPa、200kPa、300kPa四级。为控制变量、定量分析影响规律，设置4组含水率梯度（10%、15%、20%、25%）、5组含根率梯度（0.00%、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%），共划分20组试验工况，具体试验组别与变量梯度如表3、表4所示。

表3 直剪试验变量梯度表

试验变量	I	II	III	IV	V
含水率	10%	15%	20%	25%	/
含根率	0.00%	0.25%	0.50%	0.75%	0.10%

表4 直剪试验组别

试验组别	试样含水率 / %	组内编号	试样含根率 / %
I	10%	1	0.00%
		2	0.25%
		3	0.50%
		4	0.75%
		5	0.10%
II	15%	1	0.00%
		2	0.25%
		3	0.50%
		4	0.75%
		5	0.10%

Ⅲ	20%	1	0.00%
		2	0.25%
		3	0.50%
		4	0.75%
		5	0.10%
Ⅳ	25%	1	0.00%
		2	0.25%
		3	0.50%
		4	0.75%
		5	0.10%

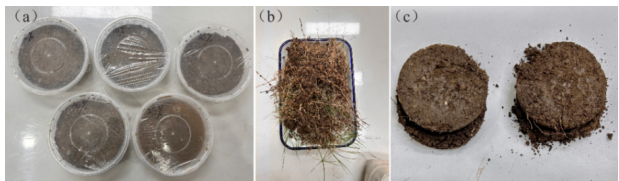
(三) 试样制备与试验步骤

试验采用室内重塑试样,具体流程为:①将试验用土过2mm筛,放入105℃烘箱烘干12h,碾碎后按设计含水率喷洒水分,充分搅拌并浸润1~2天;②采集狗牙根根系,洗净风干后剪至20mm长度,按设计含根率称重备用;③将根系与土样均匀拌合,压实密封静置24h,装入环刀并刮毛、二次压实;④将试样装入直剪仪,按照土工试验标准开展直接剪切试验,记录剪应力与剪切位移数据。



(a) ZJ型应变控制式直剪仪; (b) 烘箱

图2 直剪试验仪器设备



(a) 配制不同含水率试样; (b) 狗牙根根系; (c) 最终剪环试样

图3 试样制作

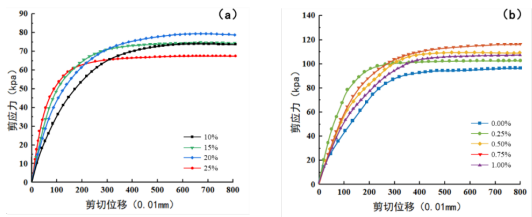
三、试验结果与分析

(一) 应力-位移曲线特征

由于不同含根率、含水率水平下的应力-位移曲线类似,故以含根率0.75%、法向应力100 kPa及含水率20%、法向应力200 kPa为例,将相应的应力-位移曲线分别绘制如图4所示。由图4(a)可知,试样剪切呈应变硬化型:在剪切初始阶段,剪应力随剪切位移增大均呈近似线性上升,随着位移增加剪应力增量逐渐减小,最终趋于一定值。相同含根率及法向应力条件下,不同含水率曲线对应的剪应力峰值不同,当含水率为20%时,土体剪应力峰值最大。

由图4(b)可知,素土及加筋土试样剪切均呈应变硬化型。剪切过程中,素土试样的初始增长速率最大,剪应力峰值最小。随着剪切的进行,在同一剪切位移下,根土复合体试样的剪应力

大于素土,且剪应力差值与含根率有关,也就是说,在相同剪应力水平下,加筋土试样的剪切位移小于素土试样,说明狗牙根根系的存在能够提升土体抵抗变形的能力,且抵抗剪切变形能力的增长幅度与含根率有关。



(a) 含根率0.75%、法向应力100kPa; (b) 含水率20%、法向应力200kPa

图4 不同含水率情况下应力-位移曲线

(二) 抗剪强度变化规律

将不同含水率、含根率试样在各法向应力下的抗剪强度数据进行整理,如图5、图6所示。由图5可知,同一法向应力下,随着含水率的增大,试样抗剪强度总体上呈现先增后减的规律,拐点在含水率15%~25%之间、含水率20%附近。由图6可知,相比于10%、15%、25%的含水率,含水率为20%时,各含根率下的根土复合体试样相对于素土试样的抗剪强度增幅最大。当含水率为20%、含根率为0.75%时,各法向应力下对应的抗剪强度增幅最大,分别为44.17%、32.60%、23.08%、22.21%。试验所用土样的最优含水率为18.3%,说明当试样含水率接近最优含水率时,抗剪强度提升幅度最大,根系加筋效果最佳。

由图6(d)可知,相较于其他含水率,当试样含水率为25%时,无论含根率大小,试样抗剪强度的提升幅度均较为有限。考虑其原因可能是:根系主要通过根土摩擦发挥自身的抗拉强度来抵抗受剪破坏,而当试样的含水率较高时,在根土接触面上存在着大量的水分,使得根系与土颗粒间的摩擦力下降,此时根系可能会直接被拔出而非拉断。因此,相比于根系对土壤的加固作用,含水率对土壤抗剪强度的影响更大,当土壤含水率较高时,根系对土壤抗剪强度的增强作用会大大削弱。

由图6可知,根土复合体的抗剪强度因根系的加入而提升,说明根系能够在一定程度上提升土体抗剪强度。且含水率一定时,不同含根率、同一围压下,根土复合体的抗剪强度增幅不同,表明不同含根率对于抗剪强度的提升效果不同。如图6所示,随着含根率增大,各围压下的抗剪强度增幅大体上呈现先增大而减小的规律,当试样的含根率为0.5%和0.75%时,在各含水率下其抗剪强度提升幅度最显著。

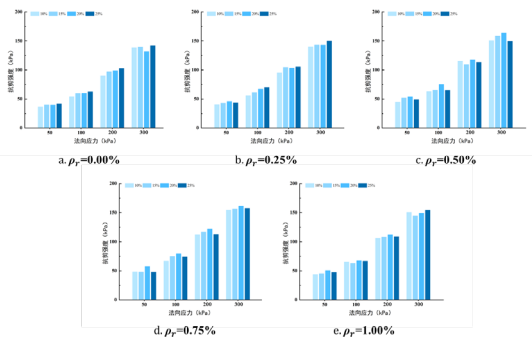


图5 各法向应力下含水率对试样抗剪强度的影响

当含根率较小时,根土复合体的抗剪强度增幅较小,普遍在0%~10%范围内,表明含根率较低时加筋效果不佳。考虑是因为根系较少时,重塑试样中根系对土体的包络与结合程度不高,因此抗剪强度提升幅度较小。当含根率较大时,一部分根系不能与土体接触,而形成根-根接触面,使得摩阻力变小,导致黏聚力和抗剪能力降低,因此1.00%含根率试样的抗剪强度增幅较0.75%含根率试样有所下降。综上,存在某个最优含根率使得根土复合体试样抗剪强度增幅最大,且各法向应力所对应的最优含根率不同。

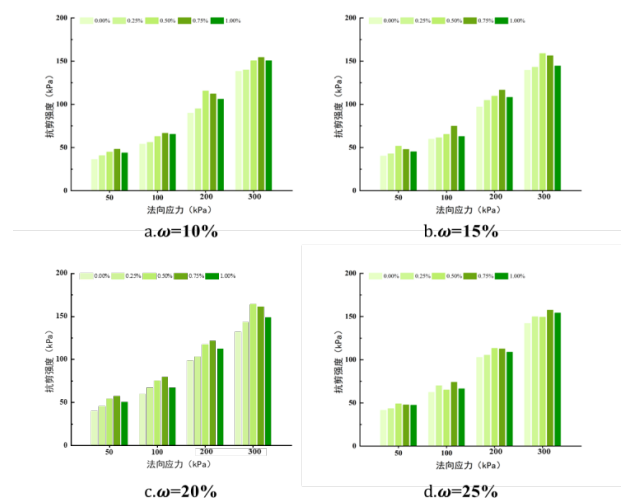


图6 各法向应力下含根率对试样抗剪强度的影响

(三) 抗剪强度指标演化特性

采用最小二乘法拟合抗剪强度与法向应力数据,拟合相关系数 R^2 均大于0.95,拟合精度较高,证明素土与根土复合体抗剪强度均遵循摩尔-库仑定律。由图7可知,各含根率水平下,黏聚力随着含水率的增大而先增后减,含水率为20%时黏聚力达到峰值,黏聚力增幅在10%~85%区间,可见含水率能够显著地影响黏聚力。内摩擦角在较小范围内上下波动,变化幅度范围为-0.09%~17%,说明在试验设计的含水率梯度之内,含水率对内摩擦角的影响较小。含水率在15%~25%范围内时,黏聚力对含水率变化最为敏感,且黏聚力峰值所对应的含水率均为20%。

由图8可知,各含水率水平下,随着含根率的增加,试样黏聚力数值随含根率增加先增大后减小,因此加筋土中存在一个最

优含根率;试样内摩擦角数值上下波动,变化幅度较小。本研究中,当含根率为0.75%时,试样的黏聚力达到最大值。与素土相比,加筋土的黏聚力增长较为显著,各含水率水平下根土复合体试样的黏聚力分别最多提升了83.39%、46.33%、51.32%、27.7%,且对应的含根率均为0.75%。因此,植物根系能有效提高黏土颗粒间的胶结作用以及表观黏聚力,而含根率对内摩擦角的影响相对较小,影响规律并不显著。

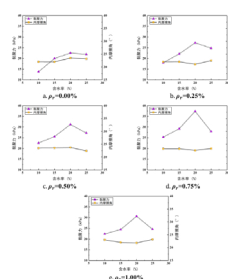


图7 含水率对抗剪强度指标的影响

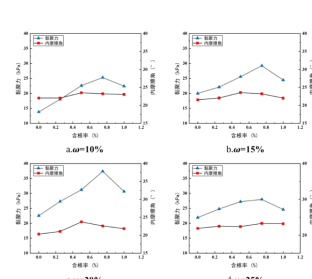


图8 含根率对抗剪强度指标的影响

四、结论

本文通过室内直接剪切试验,系统研究了不同含水率、含根率下根土复合体抗剪强度特性,揭示了根系固土力学机制与强度演化规律,得出主要结论如下:

- (1) 在50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa法向应力下,素土和根土复合体的应力-位移曲线均呈应变硬化型。相同剪应力下,含根加筋土的剪切位移较小,表明根系增强土体抗变形能力,且增强幅度与含根率相关。
- (2) 含水率和含根率影响根土复合体抗剪强度,各有一个最优值使增幅最大。不同法向应力下最优含根率不同。含水率影响更为主导,高含水率削弱根系增强效果。
- (3) 根土复合体试样的抗剪强度随法向应力的增加而呈线性增长,两者关系符合摩尔库仑定律。
- (4) 含水率和含根率显著影响根土复合体的黏聚力,但不影响内摩擦角。黏聚力随含水率增加先增后减,在含水率20%时达峰值,增幅10.47%~83.35%。黏聚力也随含根率增加先增后减,最优含根率为0.75%。草本植物根系主要通过提升黏聚力增强土体抗剪强度,有利于边坡稳定。

参考文献

- [1]周云艳.植物根系固土机理与护坡技术研究[D].中国地质大学,2010.
- [2]Wu,TH,Watson,et al.In situ shear tests of soil blocks with roots[J].Canadian Geotechnical Journal, 1998.
- [3]Waldron L J .The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil[J].Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5):843-849.
- [4]Gray H D ,Ohashi H .Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand[J].Journal of Geotechnical Engineering,1983,109(3):335-353.DOI:10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335).
- [5]卢海静,王磊,翟国良,等.植物根-土复合体原位剪切试验研究现状及其进展[J].中国水土保持,2013(7):5.
- [6]王华,赵志明,何刘.不同植被类型根系固土效应的试验研究[J].铁道建筑,2009(11):3.