DOI: 10.5846/stxb202104201025

熊寿德,段青松,方雪峰,李建兴,黄广杰,刘宇飞,刘武江,张立芸.三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力.生态学报,2022,42 (17);7210-7221.

Xiong S D, Duan Q S, Fang X F, Li J X, Huang G J, Liu Y F, Liu W J, Zhang L Y.Soil-fixing capacity of suitable herbaceous plant roots in the water-level-fluctuating zone of hydropower station in the Three Parallel Rivers. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17):7210-7221.

三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力

熊寿德1,段青松2,方雪峰3,李建兴4,黄广杰1,刘宇飞2,刘武江1,张立芸3,*

- 1 云南农业大学资源与环境学院,昆明 650201
- 2 云南农业大学水利学院,昆明 650201
- 3 云南农业大学机电工程学院,昆明 650201
- 4 中国电建昆明勘测设计研究院有限公司,昆明 650201

摘要:三江并流区生态脆弱敏感,水电站库周消落带土壤侵蚀严重,为研究消落带适生草本植物的根系固土效应,并为重建植被、控制土壤侵蚀提供依据,以生长期为 18 个月的风车草(Cyperus alternifolius L.)、美人蕉(Canna indica L.)、花叶芦竹(Arundo donax var. versicolor)和菖蒲(Acorus calamus L.)4种草本植物为研究对象,采用自制的原位剪切仪测定根土复合体和素土的抗剪强度;用根系拉力试验机测定根系的抗拉强度,用 Wu 和 Waldron 模型(WWM)对根系提高土体抗剪强度进行预测,并评价模型的可靠性。结果表明:①4种适生草本植物根系都能增强土体的抗剪强度,风车草、美人蕉、花叶芦竹和菖蒲根系使土体的抗剪强度分别提高了 403.89%、248.32%、388.50%和 200.71%;②4种草本植物根系的抗拉强度均与直径呈现负幂函数关系;③根系抗拉强度较大、破坏面上根面积比较高和根系直径(D)<1 mm 细根较多的草本植物,固土效应更加显著;④4种草本植物根系对土体强度增量的 WWM 模型计算值是实测值的 9.37—43.85 倍,该模型对高含水率土壤中草本植物根系的预测精度较低。风车草、美人蕉、花叶芦竹和菖蒲的根系均有较强的固土能力,尤其是风车草和花叶芦竹,是三江并流区黄登水库消落带植被重建和固土抗蚀的优选物种。

关键词:消落带;草本植物根系;抗剪强度;Wu 和 Waldron 模型

Soil-fixing capacity of suitable herbaceous plant roots in the water-level-fluctuating zone of hydropower station in the Three Parallel Rivers

XIONG Shoude¹, DUAN Qingsong², FANG Xuefeng³, LI Jianxing⁴, HUANG Guangjie¹, LIU Yufei², LIU Wujiang¹, ZHANG Liyun^{3,*}

- 1 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China
- 2 College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China
- 3 College of Mechanical and Electrical Engineering , Yunnan Agricultural University , Kunming 650201 , China
- 4 China Electric Power Construction Kunming Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Kunming 650201, China

Abstract: The Three Parallel Rivers area is located in the northwest of Yunnan Province and is the core area of an important ecological barrier in Southwest China. The area has serious soil erosion, but is rich in hydropower resources, so a large number of hydropower stations have been planned and built. With the operation of the power station, the long-term and repeated changes of the reservoir's water level have made it difficult for many native plants to survive, and a large-scale water level fluctuation zone has been formed around the reservoir. The erosion of the soil in the water-level fluctuating zone

基金项目:国家自然科学基金项目(42167046);云南澜沧江黄登水电站库周消落带治理试验工程科研合作项目(H20200133);云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y165)

收稿日期:2021-04-20; 采用日期:2022-01-06

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: 37545459@ qq.com

is intensified under the effects of rainfall and changes in water level of the reservoir. Therefore, studying the mechanism of soil consolidation by herbaceous plant roots in the reservoir water level fluctuating zone and selecting suitable plants with strong soil-fixing ability is of great significance for restoring vegetation in the water level fluctuating zone of the reservoir, controlling soil erosion, and improving the stability of the reservoir bank. In this study, four herbaceous plants including Cyperus alternifolius L., Canna indica L., Arundo donax var. versicolor, and Acorus calamus L. with a growth period of 18 months were taken as research objects. The self-made in-situ shearing instrument was used to measure the shear strength of the root-soil complexes and the rootless soil; the root tensile testing machine was used to measure the tensile strength of the roots. The Wu and Waldron model (WWM) was used to predict the increment in the shear strength of the soil by the root system and to evaluate the reliability of the model. The results showed that: ① the roots of the four suitable herbaceous plants could increase the shear strength of the soil. Compared with the rootless soil, the shear strength of root-soil complexes with roots of Cyperus alternifolius L., Canna indica L., Arundo donax var. versicolor, and Acorus calamus L. were increased by 403.89%, 248.32%, 388.50% and 200.71%, respectively; 2 The tensile strength of the roots of the four herbaceous plants all showed a negative power function relationship with the diameter; ③ Herbs with higher root tensile strength, higher root area ratio on the damaged surface, and more fine roots with D < 1 mm, the soil-fixing effect were more significant: 4 The calculated value of the WWM model for the 4 herbaceous plant roots to increase the soil shear strength was 9.37-43.85 times of the measured value, so the model had a low prediction accuracy for the herbaceous plant roots. In conclusion, the root systems of Cyperus alternifolius L., Canna indica L., Arundo donax var. versicolor, and Acorus calamus L. all had strong soil-fixing ability, especially the root systems of Cyperus alternifolius L. and Arundo donax var. versicolor, which were the preferred species for vegetation reconstruction and soil consolidation in Huangdeng Reservoir hydrofluctuating zone in the Three Parallel Rivers area.

Key Words: water-level-fluctuating zone; herbaceous plant roots; shear strength; Wu and Waldron Model

消落带因水库周期性的水位涨落而形成,该区域土壤侵蚀严重、生态环境敏感等问题威胁着水库的安全运行和库区生态系统的可持续发展^[1]。黄登水电站位于云贵高原的澜沧江上游,处于三江并流的核心区域,该电站水库消落带因人为干扰使水位不定期的涨落波动,进一步导致生态系统失衡和功能紊乱,其原生植物因不能忍受反复淹水而死亡^[2],适生植物逐年减少,加剧了生态环境的退化,亟待进行生态治理。

研究表明,消落带生态治理以植被恢复为主^[3-4]。当前消落带适生植物的研究主要集中于植物在水淹^[5]、干旱^[6]、贫瘠^[7]、泥沙掩埋^[8]等胁迫下的适应性和生理生化特征。植物根系在固结土壤、提高土壤抗侵蚀能力方面有重要作用^[9-10],评价根系固土能力的重要指标是根系对土体抗剪强度的增强作用^[11]。草本植物根系作为天然生物纤维,具有一定抗拉强度,在土体中发挥加筋效应来增强土体抗剪强度^[11];根系也通过增加土壤颗粒与根表面之间的摩擦力、土粒之间的黏聚力来增大土壤抗剪强度^[9-10]。前人在三峡库区消落带对不同适生植物根系提高土体抗剪强度进行了研究。如李建兴等^[12]用直接剪切试验测定了香根草等4种草本植物根土复合体的抗剪强度,发现香根草和百喜草的根系固土能力最强;徐少君等^[13]对4种耐水淹植物的根土复合体进行了直剪试验,发现灌木、林木和草本植物根系对不同深度土体强度的提高程度不同;但以上研究均使用室内直接剪切试验来测定抗剪强度。原位剪切试验也是测定土体抗剪强度的主要方法之一,该试验可以在野外对体量较大的原状含根土进行剪切,对土样的扰动较小,可以忽略不计^[14],因此所测数据相较于室内直剪试验更具有实际意义^[15];同时,现有库周消落带适生植物根系固土能力的研究集中于三峡库区,针对云贵高原上三江并流区消落带适生植物根系固土能力的研究鲜有报道。

在根系固土模型研究方面,主要有 Wu 和 Waldron 模型(WWM 模型) [16-17]、纤维束根增强模型(FBM) [18] 和根束增强模型(RBM) [19],这些模型主要建立了根系抗拉强度、剪切面根面积比等参数与抗剪强度增量的关系,其中 Wu 和 Waldron 模型因基本概念清晰且理论成熟而被广泛应用。本文使用 Wu 和 Waldron 模型进

行预测,以明确该模型对消落带适生植物的适用性及预测精度。

综上,本研究使用自行设计改进的大型原位剪切仪测定了黄登水电站库周消落带4种适生草本植物根土复合体的抗剪强度,并利用 WWM 模型进行预测,从固土抗蚀的角度为消落带筛选优势物种,研究结果可为黄登水电站库周及三江并流区消落带的植被修复和生态重建提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄登水电站是澜沧江上游的古水至苗尾河段水电梯级开发的第五级水电站,位于云南省兰坪县境内,地处三江并流区的核心地带,坝址地理坐标约为99°07′11″E,26°33′35″N。该水电站于2018年6月底首台机组投产发电,2019年6月工程完建。水库最低运行水位1586 m,最高水位1619 m,运行过程中形成了水位差达33 m的消落带。黄登水电站库区地势陡峭、河谷深切、基岩风化度高,水土流失严重。据姚鑫等^[20]在2020年的分析统计结果,沿江88 km长度范围的库岸在该年度内发生了近60处活动性滑坡,超过了怒江、澜沧江和金沙江三江干流流域滑坡总数的10%,是三江并流区沿江滑坡发育最频繁、最密集的区段,生态极度脆弱,在该地区开展实验有较强的代表性。

研究区位于黄登水电站库尾,海拔为 1618—1620 m,属中温带低纬季风气候区,平均气温 11.4 °C,年平均降雨量为 945.7 mm,一年中 5—10 月份的降雨量约占全年的 66%,坡度 1—3°,土壤质地为黏土,具体位置见图 1。

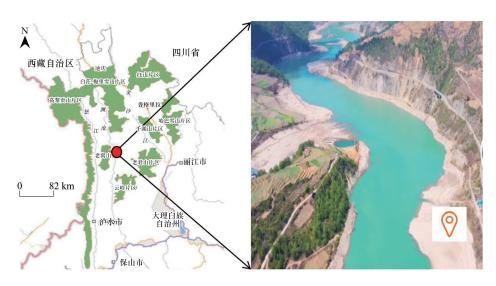


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 试验地点及材料

本实验在迪庆藏族自治州维西傈僳族自治县维登乡小庄社(27°6′56″N,99°10′29″E)进行,处于黄登水电站库尾左岸平缓开阔的消落带。风车草(Cyperus alternifolius L)、美人蕉(Canna indica L.)、花叶芦竹(Arundo donax var. versicolor)和菖蒲(Acorus calamus L.)均为典型的多年生湿地草本植物,是用于生态修复的先锋物种。课题组前期的根系调查结果表明4种草本均为须根系植物,参考Yen于1987年提出的根系结构类型分类方法^[21],4种草本均为M型根系(无主根,须根发达),该分类为揭示不同根系结构对土壤加固作用提供了很好的基础^[22-23]。但4种草本的根系形态又有一定差别,风车草和花叶芦竹根系分支多而密,根毛发达,呈团网状分布;美人蕉和菖蒲的根系结构相对较为特殊,含有根状茎,其中美人蕉的须根呈散射状分布于地下根状茎上;而菖蒲则有长条型根状茎,其根状茎沿地面匍匐生长,须根均匀向下生长于根状茎上且根系较粗,方

向单一,根毛稀疏不发达。

2019年3月15日—4月30日在试验区平整场地后,按照30cm深度对土地进行翻耕。于2019年5月1—15日栽植风车草、美人蕉、花叶芦竹和菖蒲;试验小区宽4m,长10m,各试验小区布置如图2所示,栽培株距和行距均为0.3m。

1.3 研究方法

1.3.1 原位剪切试验

试验装置参照 Comino E 等[14]和段青松等[15]自行设计(图 3)。主要由三部分组成,一是剪切单元,主要

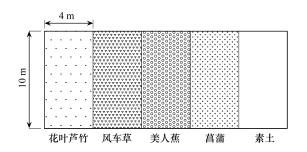


图 2 试验小区布置图 Fig.2 Layout of the test plot

包括剪切盒、支架,支架上有与剪切盒连接的导轨,以降低剪切过程中的摩擦力;二是液压系统,主要由小型液压站、控制阀和液压缸组成,提供可控的水平剪力;三是数据采集系统,主要由精度为 0.01 mm 的拉绳位移传感器、精度为 0.01 N 的 S 型压力传感器(布置在液压缸和剪切盒间)和数据采集箱(内置位移传感器和压力传感器等)组成,数据采集箱与电脑连接,自编程序,每秒采集一次。原位剪切实验装置长宽为 1300 mm×590 mm,机架由等边角钢焊接而成,由于横梁在试验中为受力构件,角钢规格为 L 100 mm×8 mm,两侧则用 L 100 mm×6 mm 的角钢。剪切盒尺寸为 300 mm×300 mm×100 mm(长×宽×高),液压缸的一端采用法兰固定在机架横梁上,另一端作用于固定在剪切盒上的压力传感器上,定位板和导向板起到固定机架和防止液压缸错位的作用。

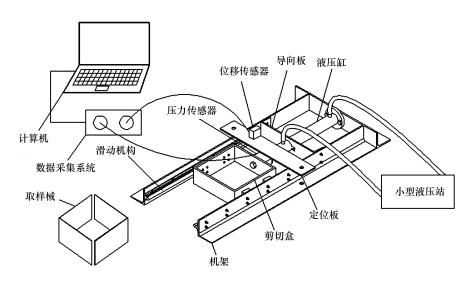


图 3 原位剪切试验装置示意图

Fig.3 Device schematic diagram of in situ shear measurement

试验设5个处理,素土(不含根土体)和4种草本的根土复合体,每个处理3次重复;于2020年11月下旬,在试验地选取长势良好的植株作为供试样株,去掉地上部分,用取样框小心打入地下150mm并清理周围土壤,尽量减少对土体的扰动。随后将剪切盒套在根土复合体上,固定之后开始加载至土体破坏。剪切时,加载速率控制为2mm/s,加载过程中数据采集系统自动采集荷载(F)及位移(S)数据,生成F-S关系曲线,荷载出现峰值后,继续加载直至荷载基本稳定不变或位移达到220mm,试验结束。在破坏土样中用环刀取余土测定湿密度和容重,并装入铝盒密封带回实验室用烘干法测定含水量。

作用在剪切面上的剪应力计算公式[15]如下:

$$\tau = \frac{F}{A} \times 1000 \tag{1}$$

式中: τ 为剪切面上的应力,kPa;F 为推力,N;A 为试样受剪面积, $A = 90000 \text{ mm}^2$ 。

以剪应力为纵坐标,应变为横坐标,绘制试样的剪应力-应变曲线,曲线的峰值应力即为试样的抗剪强度。根系提高土体抗剪强度的计算公式[24-25]如下:

$$C_r = \tau_{\text{rmax}} - \tau_{\text{smax}} \tag{2}$$

式中: C_r 为根系提高土体抗剪强度的实测值,kPa; τ_{max} 为含根土试样的抗剪强度实测值,kPa; τ_{smax} 为素土试样的抗剪强度实测值,kPa。

根面积比(RAR)和剪切面根数的测定。试验结束后用精度 0.01 mm 的数显游标卡尺测定根土复合体破坏面的根系直径并且记录破坏面内的根数。RAR 计算公式[17]如下:

$$RAR = A_r/A \tag{3}$$

式中:A,为破坏面根系的总横截面积, mm^2 :A 为试样受剪面积, $A = 90000 \text{ mm}^2$ 。

1.3.2 根系抗拉强度的测定

每种植物在实验地按照 S 型取样法选取 5 丛植株,采用全挖掘法连根带土运回实验室,去除土壤并洗净根系后,每种植物选取 100 根不同直径、顺直无损坏的根系进行单根拉伸试验。用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺测定根系直径,用量程为 100.00 N、精度为 0.05 N 的山度牌 SN100 数显拉力试验机测定单根抗拉强度。试验时,将根系两端缠上胶布避免根系与夹具之间产生滑移,并用上下端夹具夹紧,标距为 50 mm,调整夹具位置使根系在轴向受拉状态下被拉断;匀速转动手轮,对根缓慢施加拉力直至拉断并记录拉力峰值 F。破坏时根系断裂处靠近夹具的样根数据视为无效。根系单根抗拉强度按下式计算[17]:

$$T_r = 4F/3.14 D^2 (4)$$

式中:T,为单根抗拉强度,MPa;F 为单根抗拉力,N;D 为单根直径,mm。

1.3.3 Wu 和 Waldron 模型预测

WWM 模型假设土体剪切区有足够厚度且厚度恒定,植物根系为垂直穿插剪切面且沿根长方向受拉的杆件,且根系的线弹性、柔软性、直径随着长度变化不变,剪切面的所有根系达到抗拉极限时同时断裂,无拔出现象^[25-26]。根系提高土体抗剪强度值计算如下式所示^[16,24]:

$$\overline{C_r} = 1.2 \times T_r \times \text{RAR}$$
 (5)

式中: \overline{C}_r 为根系增强土体抗剪强度预测值, MPa; 1.2 为根方向修正系数^[25]; RAR 为破坏面根面积比; T_r 为穿过剪切面所有根系的平均抗拉强度。许多学者通过研究发现,该式有时并不能很好的预测灌木和草本植物根系对土体抗剪强度的增加值^[26], Preti 等于 2006 年提出以 0.4 为修正系数^[27], 则公式(5)可分别表达为:

$$\overline{C_r}' = 0.4 \times T_r \times RAR \tag{6}$$

模型中的根系抗拉强度(T_r)可通过其与根系直径(D)的拟合函数关系计算得出,二者的关系为如下式 $\text{所示}^{[16,24]}$.

$$T_{r} = a D^{b} \tag{7}$$

式中:T.为根系单根抗拉强度,MPa:D 为根系直径,mm:a,b 由抗拉强度与根径的拟合函数得出。

1.4 数据处理及统计分析

本研究数据使用 Excel 2010 和 SPSS 25 进行统计分析,使用 Origin 2017 和 Excel 2010 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 消落带草本植物根系抗拉强度及其与直径的关系

将被测根系的直径和抗拉强度进行回归分析,4种根系的拟合曲线皆以负幂函数关系曲线的拟合程度最高,均达到了极显著水平。4种植物根系直径与抗拉强度幂函数拟合特征值见表1。

表 1 植物根系直径与抗拉强度关系幂函数拟合特征值

Table 1 Fitting parameters of the power law relationship between root tensile strength and root diameter

植物类型 Species	N	a	b	R^2	P	平均抗拉强度 Tensile strength /MPa
风车草 Cyperus alternifolius L	33	16.755	-1.059	0.746	* * *	15.13
美人蕉 Cyperus alternifolius L	33	10.558	-1.482	0.680	* * *	8.17
花叶芦竹 Arundo donax var. versicolor	27	34.640	-1.263	0.740	* * *	37.89
菖蒲 Acorus calamus L	44	19.423	-1.558	0.773	* * *	20.07

N 为样本数,a,b 分别为幂函数的系数, ***表示 P<0.001 的极显著

4 种草本植物根系平均抗拉强度大小依次为:花叶芦竹>菖蒲>风车草>美人蕉,且根系的抗拉强度均随着直径的增大而呈幂函数减小趋势,直径越小的根系反而表现出较大的抗拉强度;被测根系中,花叶芦竹、菖蒲、风车草和美人蕉根系的最大抗拉强度依次达到了 79.23 MPa、62.42 MPa、47.84 MPa、和 21.30 MPa,可见此 4 种草本植物根系作为生物纤维材料具备较大的抗拉强度,能在土体中发挥加筋效应。

2.2 根土复合体物理特征和抗剪强度实测值

各处理的抗剪强度实测值、土体基本物理特性参数列于表 2。

表 2 根土复合体物理特性及抗剪强度

Table 2 Physical properties of root soil complex and shear strength

植物类型 Species	含水量 Water content/%	容重 Volumetric weight/(g/cm³)	抗剪强度 Shear strength/kPa
风车草 Cyperus alternifolius L	29.64±0.44a	1.32±0.00b	28.47a
美人蕉 Canna indica L	$30.73 \pm 0.35 a$	$1.31 \pm 0.00 \mathrm{b}$	19.68b
花叶芦竹 Arundo donax var. versicolor	29.67±0.33a	$1.31 \pm 0.01 \mathrm{b}$	27.60a
菖蒲 Acoruscalamus L	30.70±0.68a	1.31 ± 0.01 b	16.99b
素土 Rootless soil	$26.71 \pm 0.36 \mathrm{b}$	$1.34 \pm 0.00a$	5.65e

表中数据为平均值±标准差(n=3);不同小写字母表示不同处理在P<0.05 水平上差异显著

由表 2 可知,各处理的含水率均较高,介于 26%—32%之间;方差分析表明 4 种含根土之间的含水率无显著差异,但素土与各含根土的含水率之间差异显著(P<0.05),素土平均含水率相对较低;这可能是因为根系的存在增加了土壤毛管孔隙含量,改善了土壤的持水能力。土壤容重则是随着含水率的降低呈增大趋势,不同处理间,素土的容重大于含根土。前人研究表明,土体抗剪强度随着含水率的增加而降低,随着土壤容重的增加而增加^[28],而剪切试验数据表明,4 种含根土在含水率较高但容重较小的情况下,抗剪强度均显著高于素土(P<0.05),说明根系的存在能有效增强高含水率土体的抗剪强度;但不同类型的植物根系对土体强度的增强效果不同,素土试样的平均抗剪强度为 5.65 kPa,风车草、美人蕉、花叶芦竹和菖蒲的根系对土体抗剪强度的平均增量分别为 22.82 kPa、14.03 kPa、21.95 kPa 和 11.34 kPa;上述 4 种根土复合体样本的最大抗剪强度依次可达 30.92 kPa、24.13 kPa、32.68 kPa 和 20.56 kPa;风车草和花叶芦竹根土复合体的平均抗剪强度显著高于另 2 种草本(P<0.05)。这说明草本植物的根系类型和形态差异影响其固土效应。

2.3 根土复合体破坏面根系特征参数与应力应变曲线

剪切试验结束后,测算4种草本植物根土复合体剪切破坏面上的根系数量,并测量各根系直径,计算各径级根系在总根数中所占的比例和根系总横截面积,具体参数见表3。

表 3 可见,4 种植物原位剪切破坏面上,直径 $D \le 0.1$ mm 的根系均较少,约占了总根数的 6%—9%;以 D = 1 mm 为分界点,风车草和花叶芦竹在破坏面的根系中,0 \le D < 1 mm 的根系数量占比较高,分别为 80.11%和 74.10%,而美人蕉和菖蒲则分别为 59.24%和 58.81%。 $1 \le D < 2$ mm 的根系数量则是美人蕉和菖蒲的占比较大。4 种草本植物根系在破坏面的平均直径大小依次为花叶芦竹(1.61 mm) >风车草(1.23 mm) >菖蒲(1.08 mm) >美人蕉(1.01 mm)。

表 3 破坏面根系径级分布百分比、总根数、平均直径和总横截面积

Table 3 Proportion of root diameter distribution, total number and average diameter of roots on the damaged surface

径级 Diameter class/mm	风车草 Cyperus alternifolius L	美人蕉 Cyperus alternifolius L	花叶芦竹 Arundo donax var. versicolor	菖蒲 Acorus calamus L
≤0.1mm/%	8.76±0.01	8.95±0.01	6.30±0.01	8.26±0.01
0.1-0.2mm/%	13.92±0.01	8.36±0.01	11.30±0.01	11.66±0.02
0.2-0.3mm/%	17.01 ± 0.01	5.80 ± 0.01	16.46±0.01	11.46±0.01
0.3-0.5mm/%	16.77 ± 0.02	9.79±0.01	17.06±0.01	13.06±0.04
0.5—1mm/%	23.65 ± 0.03	26.34±0.02	22.97±0.03	14.38±0.02
1—2mm/%	11.63±0.01	29.22±0.01	16.97±0.03	28.28±0.06
>2mm/%	8.26±0.01	11.54±0.01	8.93±0.01	12.91±0.04
平均直径 Average diameter/mm	1.23	1.01	1.61	1.08
平均总根数 Average total number of roots	243.33	106	206.67	144
平均根系总横截面积 Average total root cross-sectional area/ mm ²	207.31	119.11	235.29	142.67

依据前文所述根系形态特征,4种草本均为须根系,但又各有特点,风车草和花叶芦竹表现出了较为典型的团网状 M 型根系特征,分支多而密,且细根较多;从破坏面总根数和横截面积来看,风车草总根数显著高于其余3种草本植物,但根系总横截面积的平均值却低于花叶芦竹,说明其破坏面上 D<1 mm 的细根数量确实较多;花叶芦竹的破坏面总根系横截面积最大,但平均总根数少于风车草,为 206.67 根,这是因为花叶芦竹的平均直径在4种草本中最大;美人蕉和菖蒲的破坏面上总根数和总横截面积差别不大,但均低于风车草和花叶芦竹。总体而言,剪切面所测根系径级分布、数量和截面积特征与根系形态调查结果相吻合;剪切面上D<1 mm的根系数量占比较大的根系类型对土体抗剪强度的增强效应较大。

4 种草本植物根土复合体原位剪切试验的应力应变曲线见图 4。由图可见,素土与根土复合体受剪直至破坏的应力应变曲线总体呈应变软化型特征。但含根土的峰值应力和应变值均明显高于素土,且 4 种含根土的应力应变曲线特征均与素土不同,表明含根土在外力作用下的力学和变形特性不同于素土;4 种不同草本植物根系均能提高根土复合体的抗剪强度、残余强度并增大破坏位移,其中风车草根土复合体的破坏位移最大,花叶芦竹根土复合体的强度峰值最大,说明根系的抗拉强度、破坏面的根系数量和总横截面积大小都会影响根土复合体的抗剪强度、抗变形能力和延性。

剪切过程中,素土没有出现明显的应力峰值和落差,而 4 种植物的根土复合体都出现了明显了应力峰值。含根土的破坏过程大致都包含了 4 个阶段,分别是应力快速上升阶段、应力缓慢增加阶段、应力快速衰减阶段和残余应力阶段。素土的峰值应变约为 10%,但风车草根土复合体在应变达到 35%—40%时才到达峰值剪应力,且应变在 20%—40%之间剪应力增长速率放缓,说明其在外力不断增长、土体产生了较大变形的情况下依然能具备较大的抗剪强度,土体的韧性和延性相较素土有了较大提升,表明风车草根系对土体的固持效应好于其他植物根系;但风车草单根根系的平均抗拉强度仅为 15.13 MPa,远低于花叶芦竹的37.89 MPa,其根土复合体却表现出了较大的抗剪强度和抵抗变形的能力,同时风车草 D<1 mm 根系的占比在 4 中草本中最大,为80.11%,剪切面上的平均根系数量为 243.33 根,也是 4 种草本中的最大值,这说明除了根系抗拉性能之外,剪切面上的根系数量和细根所占比例也是影响土体强度的因素之一。

花叶芦竹根土复合体也表现出较大的峰值剪应力,但应力增长速率和衰减速率均较大,没有明显的应力增速放缓阶段,即峰值应力出现后,土体快速崩解破坏;这可能是因为花叶芦竹根系的抗拉强度较大,一定程度上增强了土体的抗剪强度,但是根系的平均直径较大,且 D<1 mm 根系占比为 74.10%,细根占比和破坏面上根系数量也少于风车草,所以土体达到极限应力后,径级较大的根系与土颗粒的接触面上产生应力集中现象,根系无法进一步黏结串联土颗粒,导致土体迅速破坏。美人蕉和菖蒲对土体抗剪强度的增强效应低于风车草和花叶芦竹,这是因为美人蕉和菖蒲根系的平均抗拉强度、破坏面总根数、根系总截面积相对较小,且其

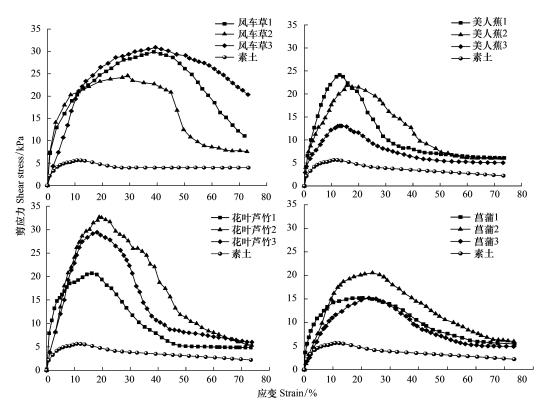


图 4 原位剪切试验根土复合体应力-应变曲线

Fig.4 Shearing strength-displacement curves of root-soil composite in situ measurement

根系形态相对特殊,因此根系固土能力较弱。因此,在黄登水电站库周消落带的适生植物中,风车草和花叶芦竹根系的固土能力优于美人蕉和菖蒲。

图 5 为花叶芦竹根土复合体受剪和破坏时的根系状态。剪切过程中,大量根系被拔出而不是被拉断,说明花叶芦竹根系不仅具有较大的抗拉强度,还具有较大的弹性变形能力,这与许多弹性纤维材料的特性类似;且土体破坏时,多数根系并未能完全发挥其最大抗拉力。另一方面,剪切面上明显可见花叶芦竹的散射型须根与剪切面倾斜相交,这更有利于土体受剪时,根系通过发挥其抗拉能力来增强土体的抗剪强度。

2.4 消落带草本植物根土复合体抗剪强度模型计算值与实测值比较 通过对不同草本植物根系提高土体抗剪强度的 Wu 和 Waldron 模型和 0.4 修正系数下的计算值和原位剪



图 5 花叶芦竹根土复合体受剪及破坏时的根系状态

Fig.5 State of root system in the root-soil complex of Arundo donax var. versicolor under shearing and destruction

切试验所得实测值进行比较(表 4),发现根土复合体强度的 WWM 模型计算值与实测值的比值(R_w)在 4 种草本中差异较大,风车草的 R_w 最小,但花叶芦竹和菖蒲的 R_w 分别高达 38.79 和 43.85,模型预测精度较低。引入校正后更适用于草本植物根系的断裂修正系数 0.4, R_w 值大幅降低,但仍然与实测值存在一定偏差。

表 4 根系提高土体抗剪能力原位试验实测值和模型预测值

Table 4 In-situ test and modeling prediction values of anti-shear enhancement of herb root systems

植物类型及抗拉强度与根径的拟合函数 Species and fitting function of tensile strength and root diameter	实测值 $C_{ m r}$ Measured value/kPa		RAR/×10 ⁻⁵	模型预测 Model prediction				
		T₁/MPa		Wu 和 Waldron 模型 WWM		0.4 修正系数 0.4 Correction coefficient		
				$\overline{C_r}$ /kPa	R_{w}	$\overline{C_r}'/\mathrm{kPa}$	$R_{ m w}$	
风车草 Cyperus alternifolius L $y = 16.755x^{-1.059}$	22.82	79.29	225.71	214.09	9.37	71.36	3.12	
美人蕉 Canna indica L y = 10.558x ^{-1.482}	14.03	117.63	132.34	182.61	14.31	60.87	4.77	
花叶芦竹 Arundo donax var.versicolor y = 34.64x ^{-1.263}	21.95	295.38	235.50	843.74	38.78	90.28	12.93	
菖蒲 Acorus calamus L $y = 19.423x^{-1.558}$	11.34	246.32	158.53	468.25	43.85	156.08	14.62	

 C_r 为根系提高土体抗剪强度的实测值, T_r 为计算根系抗拉强度,RAR为根面积比, $\overline{C_r}$ 为根系增强土体抗剪强度预测值, $\overline{C_r}$ 7为 0.4 修正系数下的根系增强土体抗剪强度预测值, R_w 为模型计算值与实测值的比值

3 讨论

3.1 不同草本植物根系对消落带土体力学特性的影响

原位剪切试验保留了土壤颗粒的原始黏结构造[17],且较大的剪切盒尺寸避免了同类试验中的尺寸效应,能最大限度地反应含根土的自然状况^[29]。本研究用大型原位剪切试验测定并发现 4 种三江并流区水库消落带适生草本植物根系均能显著提高土体的抗剪强度,风车草、美人蕉、花叶芦竹和菖蒲的根系对土体抗剪强度的增幅分别为 403.89%、248.32%、388.50%和 200.71%。李建兴等^[12]在三峡库区消落带用室内直剪试验测得香根草、百喜草、紫花苜蓿和狗牙根对土体黏聚力的平均增加幅度分别为 121.11%、113.94%、47.61%和12.54%;强度增量的差异可能是因为不同区域的土壤质地和含水量不同^[9]、不同植物类型的根系抗拉强度和在土壤中的空间分布状态不同^[11]。段青松等^[15]在金沙江干热河谷的红壤上测得扭黄茅、芸香草、旱茅这3种多年生禾本科须根系植物的根系使土体的抗剪强度分别提高了 2.8%、13.6%和 72.5%,增幅与本研究差距较大,除了根系形态和根系密度的差异之外,也可能是因为干热河谷的土壤含水量较低,仅为 5.61%,本身素土的抗剪强度就较大,而本研究中含根土的含水率均在 30%左右。因此,在土壤含水量较高的消落带地区,适生植物根系对土体抗剪强度的增强效应尤为显著。

前人在根系固土机理的研究中普遍认为植物根系对土体有加筋效应^[11],根系在土中穿插交织并在土体受力时发挥其抗拉力来增强土体的抗剪强度^[30—31],同时根土接触界面越大,产生的摩擦力和咬合力越大,则根系对土体黏聚力的增强效应越显著^[32];Fan 等^[30]、赵玉娇等^[31]发现根土复合体的黏聚力与单根抗拉强度存在正相关关系;祁兆鑫等^[33]研究发现,根土复合体抗剪强度随着含根量和根面积比的减少而降低,且含根量和根面积比的影响程度大于含水量。本研究发现,根系的抗拉强度、破坏面的根系数量和总横截面积大小都会影响根土复合体的抗剪强度和应力应变特性,4种适生植物中,花叶芦竹根系的平均抗拉强度最大(37.89 MPa),其根土复合体的抗剪强度也最大;风车草根系抗拉强度仅为15.13 MPa,但破坏面含根量和总横截面积在4种草本中较大,因此其根土复合体的抗剪强度显著高于美人蕉和菖蒲;4种草本植物中,风车草根系不仅大幅提高了土体破坏的峰值应力即抗剪强度,也增大了破坏应变和残余应力,这表明风车草根系使土体在变形较大的情况下仍然具备一定的强度,延缓了土体的破坏进程。Gao等^[34]研究表明,纤维在土体内均匀且呈随机分布状态时能形成一个交错搭接的纤维网,形成三维织网效应,增强纤维和土颗粒之间的啮合

程度^[35]和对土颗粒的约束作用,土体受力开裂后,裂缝上的纤维会因纤维与土的摩擦而承受土体内部的张力,有效地阻止裂缝拓展,增大破坏应变来提高土壤的延展性和韧性^[36];且有研究表明 $D \leq 2$ mm 径级的细根,尤其是 $D \leq 0.5$ mm 细根的根长密度和根表面积密度与土体抗侵蚀能力显著正相关^[37]。风车草根系分支多而密,根毛发达,剪切面上 D < 1 mm 的细根占比最大,根系为典型的团网状散射型须根系,因此能在受力时更加有效的固持土体。而美人蕉和菖蒲则因根系结构相对特殊,含有根状茎,在土体受力时易产生应力集中现象而加速土体崩塌,使得试样中根系的加筋作用未能完全发挥出来,所以对土体强度的增强效应相对较弱。因此,在消落带植被恢复和根系固土的应用中,除了依据草本植物的适生性来筛选植被,更应结合根系形态特征,选用细根较多的团网状须根系植物混合种植来增强其固土效应。

3.2 WWM 模型预测的精度

WWM 模型虽然计算简便、参数较少、原理清晰,但其对根系破坏方式与过程^[26]、根与土相互作用等方面 缺乏深入研究,过高评估了根系固土能力[38],从而降低了模型精度[25,27]。刘治兴等[29]对公路边坡的草本植 物根系固土能力进行了模型预测,测得的平均 R_w 值为 2.72, 瞿文斌等 $^{[39]}$ 在对黄土高原的油松、刺槐、荆条和 丁香 4 种植物的根系固土能力预测中测得 R_w 为 2.56—5.38。本研究中 R_w 为 9.37—43.85,模型计算值远高于 实测值。究其原因,主要是根系对土体抗剪切强度的增量与达到抗拉强度极限值的根系数量相关[29],WWM 模型假设根为均匀的弹性体[25-26],穿过剪切面的根系在同时达到最大抗拉强度的瞬间全部且同时断裂[39], 而本试验中所涉及植物根系在土体中分布状态决定了不可能所有根系都垂直穿过剪切面;Docker 等[40]在原 位直剪试验过程中发现根土复合体剪应力的下降伴随着根系连续断裂的声音,证实了穿过剪切面的根系在受 剪时并非同时断裂,而是逐渐破坏,本试验也观察到了根系的渐进断裂过程。本研究中植物根系的细根较多, 且大量研究表明,根系的抗拉强度与根径呈显著负相关关系,抗拉力则与之相反^[14,30],细根具备较大的抗拉 强度,破坏面上细根较多则更容易高估T.值;加之消落带土壤含水量高,土壤结构松软,剪切过程中存在大量 D>1 mm 根系的拉拔现象,即根系未能全部发挥其抗拉能力即与土壤颗粒剥离。这些因素都导致了模型预测 值高于实测值。基于采用传统 WWM 模型模拟灌草植物高估较严重^[26], Docker 等^[40]与 Pollen 等^[41]认为对 于草本或较小的林木,公式中的修正系数应该更小一些,因此,Preti [27] 提出了断裂修正系数 0.4。本文引入 0.4修正系数进行计算后, R_w 大幅降低,但仍然与实测值存在偏差。因此,基于草本植物根系形态各异,且根系 的抗拉强度和弹性模量等差异较大,影响土体强度的因素多而复杂,预测消落带适生草本植物根系对于长期 水淹条件下的高含水量土体抗剪强度的增强值,WWM模型的适用性及其断裂修正系数还需进一步研究。

4 结论

- (1)风车草、美人蕉、花叶芦竹和菖蒲的根系相较于素土分别提高了土体的抗剪强度 403.89%、248.32%、388.50%和 200.71%。
- (2)4种草本植物根系的单根抗拉强度、破坏面的根系数量和总横截面积大小以及 *D*<1 mm 细根占比均为根系提高土体抗剪强度的影响因素。根系平均抗拉强度较大、细根较多且呈团网状分布的须根系草本植物,对土体的固持效应较为显著。
- (3)4种草本植物根系提高土体抗剪强度 WWM 模型预测值是实测值的 9.37—43.58 倍,精度较低;针对草本植物根系的断裂修正系数 0.4 仍然使预测值与实测值存在一定偏差,应进一步研究高含水率土壤适用的模型修正系数。

综上,本研究中的4种消落带适生草本植物中,风车草和花叶芦竹根系固土能力较强,是三江并流区水电站库周消落带植被重建、生态修复和防治水土流失的优选物种。

参考文献(References):

[1] 周永娟, 仇江啸, 王姣, 王效科, 吴庆标. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价. 生态学报, 2010, 30(24): 6726-6733.

- [2] 朱妮妮, 郭泉水,秦爱丽,裴顺祥,马凡强,朱莉,简尊吉. 三峡水库奉节以东秭归和巫山段消落带植物群落动态特征. 生态学报, 2015, 35(23): 7852-7867.
- [3] 李丽娟, 谢婷婷, 张松林, 袁中勋, 刘明辉, 李昌晓. 三峡库区消落带 4 种适生植物根际与非根际土壤养分与酶活性特征研究. 生态学报, 2020, 40(21): 7611-7620.
- [4] 王娅儆,陈芳清,张淼,吴阳,陈韶华.不同植被恢复模式下三峡库区万州段消落带土壤养分及其空间分布特征.农业资源与环境学报, 2016,33(2):127-133.
- [5] 徐子棋, 饶良懿, 朱金兆, 赵洋. 水淹胁迫下饲料桑苗的生长及光合响应. 农业工程学报, 2015, 31(22): 105-114.
- [6] 白林利,李昌晓. 水淹对水杉苗木耐旱性的影响. 林业科学, 2014, 50(11): 166-174.
- [7] 廖世纯, 韦桥现, 蒙炎成, 高国庆, 蔡健和, 李扬瑞, 张永祥. 4 种植物的耐淹耐旱性及在消落带中的应用. 中国水土保持, 2009, (5): 13-14.
- [8] 李强. 泥沙掩埋和干旱对三峡库区消落带狗牙根生长恢复的影响. 生态学报, 2016, 36(1): 200-208.
- [9] 熊燕梅,夏汉平,李志安,蔡锡安. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895-904.
- [10] 郭明明,王文龙,史倩华,陈同德,李建明,康宏亮,朱宝才,李艳富.黄土高塬沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系.农业工程学报,2016,32(10):129-136.
- [11] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,胡夏嵩,朱海丽,李光莹,虎啸天.寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨.岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
- [12] 李建兴,何丙辉,谌芸,黄茹,陶俊,田太强.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响.农业工程学报,2013,29 (10):144-152.
- [13] 徐少君, 类淑桐, 曾波. 三峡库区 4 种库岸边坡的植被根系固土效应研究. 水土保持研究, 2017, 24(2): 119-123, 131-131.
- [14] Comino E, Marengo P, Rolli V. Root reinforcement effect of different grass species: a comparison between experimental and models results. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1): 60-68.
- [15] 段青松,何丙辉,余建新,张川,字淑慧,杨旸,李亚伟.金沙江干热河谷乡土草本植物根系固土能力原位测定.云南大学学报:自然科学版,2015,37(5):779-785.
- [16] Wu T H. Investigation of Landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Columbus, OH, USA: Ohio State University, 1976.
- [17] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5): 843-849.
- [18] Pollen N, Simon A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. Water Resources Research, 2005, 41(7): W07025.
- [19] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F4): F04035.
- [20] 姚鑫,邓建辉,刘星洪,周振凯,姚佳明,戴福初,任开瑀,李凌婧.青藏高原泛三江并流区活动性滑坡 InSAR 初步识别与发育规律分析.工程科学与技术,2020,52(5):16-37.
- [21] Yen C P. The major patterns of root growth of the useful plants for soil conservation in Taiwan. Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 1973, 4(1): 65-85.
- [22] Wang X H, Ma C, Wang Y Q, Wang Y J, Li T, Dai Z S, Li M Y. Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root-soil composite. Landslides, 2020, 17(8): 1965-1977.
- [23] 伍红燕. 模拟边坡条件下不同植物根构型及其单根抗拉特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [24] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,张会兰,李云鹏,刘勇.基于试验与模型的根系增强抗剪强度分析.岩土力学,2014,35(2):449-458.
- [25] 段青松,王金霞,杨旸,字淑慧,张川,张建生,孙高峰,余建新.金沙江干热河谷乡土草本植物根系提高土体抗剪强度及其模型预测. 中国水土保持科学,2017,15(4):87-95.
- [26] 及金楠, 田佳, 瞿文斌. 基于连续断裂过程的根系黏聚力 Wu 氏模型修正系数的确定. 林业科学, 2017, 53(11): 170-178.
- [27] Preti F. Stabilità dei versanti vegetati//Sauli G, Cornelini P, Preti F, eds. Manuale 3 d'Ingegneria Naturalistica Sistemazione dei Versanti. Roma: Regione Lazio, 2006; 137-168.

- [28] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54.
- [29] 刘治兴,杨建英,杨阳,许泽宁,马亚云,黄琴焕.高速公路不同植物防护边坡根土复合体抗剪能力研究.生态环境学报,2015,24(4):631-637.
- [30] Fan C C, Tsai M H. Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 1-15.
- [31] 赵玉娇, 胡夏嵩, 李华坦, 刘昌义, 李国荣, 朱海丽. 寒旱环境灌木根系增强边坡土体抗剪强度特征. 农业工程学报, 2016, 32(11): 174-180.
- [32] 冯舒悦,王军光,文慧,倪世民,华丽,蔡崇法. 赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及影响因素研究. 土壤学报, 2020, 57(1):71-83.
- [33] 祁兆鑫, 余冬梅, 刘亚斌, 付江涛, 胡夏嵩, 李淑霞, 赵丹. 寒旱环境盐生植物根-土复合体抗剪强度影响因素试验研究. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1438-1448.
- [34] Gao L, Hu G H, Xu N, Fu J Y, Xiang C, Yang C. Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil.

 Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015; 561293.
- [35] 安宁,晏长根,王亚冲,兰恒星,包含,许江波,石玉玲,孙巍锋.聚丙烯纤维加筋黄土抗侵蚀性能试验研究.岩土力学,2021,42(2):501-510.
- [36] Li M D, Li L, Ogbonnaya U, Wen K J, Tian A G, Amini F. Influence of fiber addition on mechanical properties of MICP-treated sand. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(4): 04015166.
- [37] 徐少君,曾波,类淑桐,苏晓磊.三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应.土壤学报,2011,48(1):160-167.
- [38] Schwarz M, Preti F, Giadrossich F, Lehmann P, Or D. Quantifying the role of vegetation in slope stability: a case study in Tuscany (Italy). Ecological Engineering, 2010, 36(3): 285-291.
- [39] 瞿文斌, 及金楠, 陈丽华, 胡雨村. 黄土高原植物根系增强土体抗剪强度的模型与试验研究. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 79-87.
- [40] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. Geomorphology, 2008, 100(3/4): 401-418.
- [41] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks; accounting for soil shear strength and moisture. CATENA, 2007, 69 (3): 197-205.