

盐生植物根系增强土体抗剪强度效应试验研究

赵丹^{1,2}, 余冬梅¹, 胡夏嵩^{1,3}, 付江涛^{1,2}, 刘亚斌^{1,2}, 祁兆鑫^{1,2}, 朱海丽^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青海大学, 西宁 810016)

摘要:以大柴旦盐湖区及其周边地区作为试验区,选取海韭菜、芦苇2种优势盐生植物作为供试种,通过对2种盐生植物根—土复合体试样和素土试样进行剪切试验,探讨了盐生植物根系对土体抗剪强度增强作用以及土体抗剪强度的影响因素。结果表明:2种植物根—土复合体试样粘聚力值为13.48~21.87 kPa,不含根系素土试样粘聚力值为8.45 kPa,与不含根系素土相比,根—土复合体的粘聚力值增长量为5.03~13.42 kPa,其增长幅度为59.53%~158.82%;海韭菜根—土复合体试样粘聚力值大于芦苇,2种盐生植物根—土复合体试样粘聚力值与2种盐生植物在一定范围内的根系含量之间呈正相关关系,同时一定程度上表明了试验区2种植物根系增强土体抗剪强度的机制表现为,在一定范围内根—土复合体中根系密度和数量愈高则其对土体抗剪强度增强程度相对愈显著,且海韭菜对土体粘聚力的增强作用显著大于芦苇。该研究成果对研究区以及与该区地质条件相类似的其他地区利用盐生植物增强土体抗剪强度,以实现有效地防治地表水土流失、浅层滑坡等地质灾害具有理论研究价值和实际指导意义。

关键词:大柴旦盐湖区; 盐生植物根系; 根—土复合体; 增强土体抗剪强度

中图分类号: P642.11⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0259-07

Study on Reinforcement Effect by Halophyte Roots in Increasing Soil Shear Strength

ZHAO Dan^{1,2}, YU Dongmei¹, HU Xiasong^{1,3}, FU Jiangtao^{1,2},

LIU Yabin^{1,2}, QI Zhaoxin^{1,2}, ZHU Haili^{1,2}

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of the Qinghai Province, Xining 810008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Da Qaidam Salt Lake and its surrounding areas were selected as the test sites. And two predominant halophytes (*Triglochin maritimum* L. Claus. and *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud) were selected as the test samples. By direct shear tests on soil without root samples and rooted soil samples for the two halophytes, the influences of the roots of the two halophytes on increasing shear strength of soil were investigated. The test results show that the cohesion forces of rooted soil for the two halophytes were 13.48~21.87 kPa, and the cohesion force of soil without roots was 8.45 kPa. In contrast to soil without root, the increment in cohesion force of rooted soil was 5.03~13.42 kPa, with the corresponding incremental rate of 59.53%~158.82%. The cohesion force of rooted soil for *T. maritimum* was greater than that for *P. australis*. Moreover, the cohesion forces of rooted soil for the two halophytes were positively correlated with root content in some extent. And in some extent, the mechanism of roots for the two halophytes in increasing the shear strength of soil was exhibited in the following. To a certain extent, the increased amount of roots and root density meant the increased effect of roots in increasing shear strength of soil, and the contribution of root for *T. maritimum* in increasing shear strength is relatively greater than that for *P. australis*. The obtained

收稿日期: 2016-06-20

修回日期: 2016-08-04

资助项目: 中国科学院“百人计划”项目(Y110091025); 国家自然科学基金(41572306); 青海省自然科学基金(2014-ZJ-906); 中国科学院青海盐湖研究所“青年基金”(Y360441058)

第一作者: 赵丹(1990—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事地质工程等方面的研究工作。E-mail: zhaodan13@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 胡夏嵩(1965—), 男, 河南开封人, 教授, 博士, 主要从事环境岩土工程与工程地质等方面的教学与科研工作。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

conclusion has the theoretical value and practical significance in increasing shear strength by roots of halophytes for Da Qaidam Salt Lake area and other areas with the similar geological condition, and meanwhile, the conclusion is conducive in the control of geological hazards like water loss and shallow landslides.

Keywords: Da Qaidam Salt Lake; halophytes root; rooted soil; increasing shear strength of soil

近年来,利用草本植物有效防治地表土壤侵蚀,减少水土流失,提高边坡土体强度、增加浅层边坡稳定性,愈来愈受到国内外学者的重视和关注^[1-3]。植物根系通过对土体固持和加筋作用来有效防治边坡浅层土体滑动和崩塌^[4]。根系对土体的加固机理主要体现在两个方面,即浅根的加筋作用与深根的锚固作用^[5]。草本植物根系通过根系穿插和缠绕与颗粒表面的摩擦力以及根系与颗粒间的嵌入作用,所产生的根系与土体间的咬合力的大小直接影响土体抗剪强度的大小^[6]。因此研究草本植物根系对土体抗剪强度的增强作用,对进一步研究植物提高边坡稳定性机理具有重要理论指导意义。

利用草本植物增强土体抗剪强度和增加边坡稳定性、防治边坡水土流失等方面的研究,国内外诸多学者开展了大量试验研究,并取得了丰富的研究成果。Comino等通过对草甸羊茅(*Festuca pratensis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)2种植物采用常规直剪试验(即剪切盒内径为61.8 mm,高为20 mm)进行根—土复合体抗剪强度试验,结果表明2种植物根—土复合体扰动试样粘聚力值与不含根系素土相比,根—土复合体的粘聚力值增长量为9.6~12.6 kPa,其增幅为117%~154%^[6]。李建兴等利用常规直剪试验对香根草(*Vetiveria zizanioides* (Lin.) Nash)、百喜草(*Paspalum notatum* Flugge)、狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)和紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)4种植物根—土复合体的试验结果表明,4种植物根—土复合体扰动试样粘聚力值与不含根系素土相比,根—土复合体的粘聚力值增长量为5.10~13.41 kPa,其增幅为43.29%~113.84%^[7]。格日乐等通过常规直剪试验对沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)和杨柴(*Hedysarum mongolicum*)3种植物根—土复合体试验结果表明,3种植物根—土复合体扰动试样粘聚力值与不含根系素土相比,根—土复合体的粘聚力值增长量为2.30~103.21 kPa,其增幅为27.54%~1236.05%^[8]。栗岳洲等通过常规直剪试验开展对海韭菜(*Triglochin aritimum* L.)、赖草(*Leymus secalinus* Tzvel.)、毛穗赖草(*Leymus paboanus* Claus.)、无脉苔草(*Carex enervis* C. A. Mey.)4种

植物根—土复合体抗剪强度试验,试验结果表明4种植物根—土复合体扰动试样粘聚力值与不含根系素土相比,根—土复合体的粘聚力值增长量为2.34~19.32 kPa,其增幅为28.89%~238.52%^[9]。此外,余芹芹等通过室内三轴试验(即剪切盒内径为61.8 mm,高为125 mm)开展对柠条锦鸡儿根—芨芨草组合种植根—土复合体、芨芨草根—土复合体、柠条锦鸡儿根—土复合体3种植物根—土复合体剪切试验,结果表明复合体的粘聚力值与不含根系素土相比,根—土复合体的粘聚力值增长量为3.17~7.61 kPa,其增幅为39.2%~94.1%^[10]。杨璞等通过室内三轴试验(即试样直径为61.8 mm,高为125 mm)开展对披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)根—土复合体抗剪强度试验,试验结果表明在10 kPa围压下,含根系体积比为0.5%和1%的根—土复合体轴压的极限载荷与不含根系素土相比,根—土复合体的极限载荷增长量为17.98~32.55 kPa,其增幅为33.13%~59.98%^[11]。陈昌富等通过室内三轴试验(即试样直径为39.1 mm,高为80 mm)开展对狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)植物根—土复合体抗剪强度试验,试验结果表明植物根—土复合体扰动试样粘聚力值与不含根系素土相比,根—土复合体的粘聚力值增长量为7.85~65.75 kPa,其增幅为105.08%~886.1%^[12]。王元战等通过室内三轴试验(即试样直径为39.1 mm,高为80 mm)开展对地毯草(*Axonopus compressus* (Sw.) Beauv.)根—土复合体抗剪强度试验,试验结果表明不同含根量的根—土复合体扰动试样粘聚力值与不含根系素土相比,根—土复合体的粘聚力值增长量为1.3~4.3 kPa,其增幅为20.97%~69.35%^[13]。

由以上分析可知,国内外学者开展根—土复合体剪切试验时所采用的室内直剪试验、三轴试验其相应的剪切盒尺寸规格,即前者普遍使用内径为61.8 mm、高为20 mm规格的剪切盒^[6-9,14];后者剪切盒尺寸内径为61.8 mm、高为125 mm^[11-12,15]以及内径为31.9 mm、高为80 mm^[12-13,16-17]。采用以上规格尺寸相对较小的剪切盒开展复合体剪切试验时,存在着如下不足或有待于深入探索的方面:首先在制取复合体试样时,对根—土这种由两相介质所组成的复合体存在着不能很好地反映根系在土体中生长分布状态的

问题,易造成与原植物根系在土体中的实际情况之间存在一定的差异,这样对复合体的试验结果精度会产生一定程度影响;其次,为使得复合体中的根系的分布状态进一步符合实际情况,进而提高试验结果准确性和精度,有关室内复合体的大剪试验尚需进一步深入开展和探索。鉴于以上实际情况,本项研究以柴达木盆地大柴旦盐湖区及其周边作为试验区,通过对海韭菜(*Triglochin matitimum* L.)、芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud) 2 种盐生植物根—土复合体进行室内剪切试验,其中所采用的剪切盒的尺寸规格为 200 mm×200 mm×120 mm(长×宽×高),探讨不含根系素土、2 种复合体的抗剪强度与垂直压力关系、剪切力与剪切位移之间的关系,以及 2 种类型的复合体对边坡土体抗剪强度的增强效果。本项研究成果对于进一步开展对研究区及与区内地质条件相似的其他地区,利用盐生植物开展对土体抗剪强度增强机理等方面的研究具有理论价值和实际意义。

1 研究区概况

研究区大柴旦盐湖区位于柴达木盆地北缘祁连山南麓的山间盆地,地形呈北西—南东走向^[18]。盆地中部为断陷湖盆区,地形具环带状分布,中心为大柴旦湖,湖面高程为 3 148 m^[18]。区内自然条件较为严酷,大柴旦盐湖区年降水量为 89.4 mm,蒸发量为 2 167. mm^[19]。区内全年平均气温为 1.6℃,其中 1 月平均气温为 -13.7℃,7 月平均气温为 14.9℃^[19]。大柴旦盐湖有常年性地表卤水,主要由高山融雪(冰)水补给^[20]。湖盆内植物以耐旱和耐盐碱为特征^[20]。

本项研究通过对区内盐生植物以及盐生植物生长区地形地貌的现场调查等相关研究基础上,筛选出了适宜于该区环境下生长的 2 种盐生植物,即海韭菜、芦苇 2 种盐生植物^[9,21],其中海韭菜为多年生草本植物,根茎短,着生多数须根^[9],株高为 15~25 cm,根系深度为 9~30 cm^[9];芦苇根状茎发达,秆直立^[21],秆高为 35~105 cm^[21],根系分布深度为 30~150 cm。此外,区内盐生植物生长区的土体类型为亚氯盐渍土,土体含盐量为 2.012%^[9],区内土壤盐渍化等现象普遍发育。

2 材料与方法

2.1 试验材料及试样制作

课题组分别于 2014 年 8 月中旬和 2015 年 8 月

中旬前往研究区现场采集试验所需试验样品,原位采集样品的过程中为确保根系试样新鲜完整,采用以原状根—土复合体试样方式,将盐生植物根—土复合体由原位挖掘后放置于试样盆中,并及时运回实验室。野外试验区原位采集根—土复合体的具体方法为:首先选取正常生长的上述 2 种优势盐生植物,然后用削土刀制取直径为 380 mm,高为 300 mm 的含根系试样柱;待试样柱制备完毕后,即放置于试样盆内,同时采用塑料袋将根—土复合体试样封住确保其密封性,以有效地防止根—土复合体试样中的水分蒸发且及时运回实验室备用。

试验所选用根系试样均为新鲜、完整、无损伤,且根径、根长等生长指标正常。试验开始前,为确保根—土复合体试样中的根系为新鲜根系,采用清水将根—土复合体中的土体部分洗去,清洗出复合体中的所有待用根系试样,然后将洗净后的根系试样置于试验托盘中静置约 1 h,使根系表面的水分充分自然蒸发。海韭菜、芦苇 2 种盐生植物选取其根长为 6~15 cm,平均根径分别为 0.71 mm,2.35 mm,研究区 2 种盐生植物自然生长条件下根系基本特征统计结果,见表 1。在制备剪切试样之前,将用于制备试样的素土放置于烘箱在 105℃ 温度条件下烘干至质量恒为 50 kg,然后过孔径为 2 mm 的标准土壤筛,再用小喷壶将蒸馏水均匀喷洒素土且充分拌匀,使得用于制作试样的素土含水率为 29.01%,然后用保鲜膜密封,浸润一昼夜后备用^[22]。

表 1 研究区 2 种盐生植物自然生长条件下根系基本特征统计结果

| 根—土复合体试样类型 | 根系形态 | 根径范围/mm | 平均根径/mm |
|------------|------|-----------|-----------|
| 海韭菜 | 须根型 | 0.44~2.66 | 0.98±0.07 |
| 芦苇 | 须根型 | 0.06~5.28 | 1.76±0.55 |

制备海韭菜、芦苇 2 种须根型植物的根—土复合体剪切试样方法是:首先在野外用大环刀(内径为 100 mm,高为 63.7 mm)制取 2 种须根型植物根—土复合体原状试样,每种须根型植物根—土复合体试样均制取 3 个,将制备好的根—土复合体原状试样带回实验室,用清水洗净根系表面泥土,再用滤纸将根系表面水分吸干,分别称取 2 种植物根—土复合体原状试样内根系质量,得到海韭菜、芦苇 2 种植物根—土复合体原状试样中平均根系质量分别为 19.5 g,11.0 g。鉴于在野外制取 2 种须根型植物根—土复合体原状试样时采用的大环刀体积为 500 cm³,故按照根系密度

与根系质量、试样体积之间的关系可得出,2种盐生植物根—土复合体根系密度分别为:海韭菜为 0.039 g/cm^3 ,芦苇为 0.022 g/cm^3 ,由表2所示。在制备复合体扰动试样的过程中,按照区内盐生植物生长区土体的平均密度、平均含水量、平均根系密度等条件制备室内剪切试验的扰动试样,以确保室内制取的复合体试样中的土体含水量、密度等指标与野外植物生长区保持一致,使得试验结果符合实际情况,故在室内制得的根—土复合体扰动土试样中土体的平均含水量为29.01%,平均密度为 1.65 g/cm^3 ,如表2所示。

根—土复合体试样中布设根系的方式,根据试验区根—土复合体原状试样体积、土体密度及野外采用大环刀制取的根—土复合体原状试样中的根系密度值,计算

表2 研究区2种植物根—土复合体试样中根系质量计算结果

| 试样类型 | 土体密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 含水量/ % | 平均根系密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 剪切盒 体积/ cm^3 | 土体 质量/kg | 根系 质量/g |
|-----------|--|-----------|--|--------------------------|-------------|------------|
| 海韭菜根—土复合体 | 1.65 | 29.01 | 0.039 | 4800 | 7.92 | 187.2 |
| 芦苇根—土复合体 | 1.65 | 29.01 | 0.022 | 4800 | 7.92 | 105.6 |
| 素土 | 1.65 | 29.01 | — | — | 7.92 | — |

注:表中(1)平均根系密度指的是根—土复合体单位体积内所含根系的鲜重,其具体计算方法为平均根系密度等于环刀内根系鲜重/环刀体积(即 500 cm^3);(2)土体质量指的是试样体积为 $4\ 800\text{ cm}^3$ (即剪切盒的体积)内的土体质量,其计算方法为土体质量等于密度 \times 剪切盒体积;(3)根系质量指的是剪切盒体积内的所含根系的鲜重,其计算方法为根系质量等于平均根系密度 \times 剪切盒体积。

2.2 试验方法

本项研究中对海韭菜、芦苇2种复合体试样的室内剪切试验,采用规格尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 深)的大剪切盒进行了室内剪切试验,分别测定试验区上述2种盐生植物根—土复合体试样以及不含根系的素土试样的抗剪强度指标,试验过程中采用4级加荷方式,即分别在 50 kPa 、 100 kPa 、 200 kPa 、 300 kPa 等垂直作用下进行剪切试验,剪切应变速率为 1.33 mm/min ,其具体试验操作方法按照《土工试验规范》^[23]进行。试验所使用的仪器为南京土壤仪器厂生产的TZY-1型土工合成材料综合测定仪。

3 结果与分析

本项研究对研究区2种盐生植物根—土复合体扰动试样,以及不含根系的素土试样分别进行了剪切试验,剪切试验结果见表3。由试验得到的海韭菜、芦苇2种复合体试样剪应力与法向应力之间的关系见图1,海韭菜、芦苇2种复合体试样以及不含根系的素土试样的剪切力与剪切位移关系见图2。

3.1 剪应力与法向应力关系

研究区2种优势盐生植物根—土复合体扰动试

室内大剪试验所需复合体中的土体质量及根系质量,由于室内大剪切盒体积为 $4\ 800\text{ cm}^3$,按照野外制取复合体时的大环刀体积与室内大剪切盒体积比,得出每个根—土复合体扰动试样中所需土体质量为 7.92 kg ,2种植物新鲜根系质量依次为:海韭菜新鲜根系质量为 187.2 g 、芦苇新鲜根系质量为 105.6 g ,如表2所示。此外,复合体试样中的根系均为剪成长度为 $4\sim 5\text{ cm}$ 根段的新鲜根系。在制取复合体试样时将所需根系及土体部分充分搅拌均匀,制成含根系复合体试样,然后再采用击实法制备直剪试样^[17]。制取试样的过程中,将制备好的根—土复合体试样均用保鲜膜密封,以防止试样中的水分蒸发。每种盐生植物制取4个根—土复合体剪切试样为一组用于试验。

样的剪应力均随垂直压力增大而呈线性增大趋势,见图1。在 50 kPa 、 100 kPa 、 200 kPa 、 300 kPa 等四级垂直压力下,2种优势盐生植物根—土复合体试样剪应力均大于素土试样,其中,海韭菜根—土复合体试样剪应力分别为 29.5 kPa 、 56.25 kPa 、 89.75 kPa 、 104.75 kPa ;芦苇根—土复合体试样剪应力分别为 23 kPa 、 54 kPa 、 74.5 kPa 、 107.75 kPa ;素土试样剪应力分别为 20.75 kPa 、 42.75 kPa 、 69 kPa 、 99.25 kPa 。与此同时,就2种复合体试样抗剪强度相比较可知,海韭菜根—土复合体抗剪强度在 50 kPa 、 100 kPa 、 200 kPa 等垂直压力下大于芦苇根—土复合体,在 300 kPa 等垂直压力下小于芦苇根—土复合体。由以上分析说明了随着垂直压力的增大,海韭菜根—土复合体抗剪强度的增加幅度相对较小,而芦苇根—土复合体抗剪强度增加幅度相对较大。

3.2 剪切力与剪切位移关系

研究区2种植物根—土复合体扰动试样及不含根系素土试样的剪切力与剪切位移关系,见图2。由该图所知,在图中所示的任一垂直压力作用下,在剪切力相同时,2种不同植物根—土复合体扰动试样的剪切位移之间的存在相对显著的差异,例如在图中所示的任一级垂直压力下(即如 200 kPa 垂直压力时),

图中不含根系素土试样在剪切力为 2 kN 时的剪切位移为 6.02 mm,海韭菜、芦苇 2 种盐生植物根—土复合体扰动试样在剪切力为 2 kN 时的剪切位移为 2.06 mm,4.42 mm;相类似地,图中 300 kPa 垂直压力下,不含根系素土试样在剪切力为 3 kN 时的剪切位移为 5.73 mm,海韭菜、芦苇 2 种根—土复合体扰动试样在剪切力为 3 kN 时的剪切位移为 3.74 mm,4.56 mm。由此可知,2 种植物根—土复合体试样的抗剪切变形能力均显著大于素土试样,且 2 种植物

根—土复合体试样抗剪切变形能力由大至小依次为海韭菜、芦苇,这在一定程度反映出了植物根系对边坡土体强度的增强作用和贡献大小,该研究结论与虎啸天等^[24]、余芹芹等^[25]研究结论相一致,即相同剪应力条件,存在于根—土复合体中的植物根系可显著减小复合体位移量,从而增强复合体抵抗变形的能力,且当复合体中根系低于最优含根量时,复合体中根系含量愈高,根系减小复合体位移量愈显著,增强复合体抵抗变形的能力亦相对愈强。

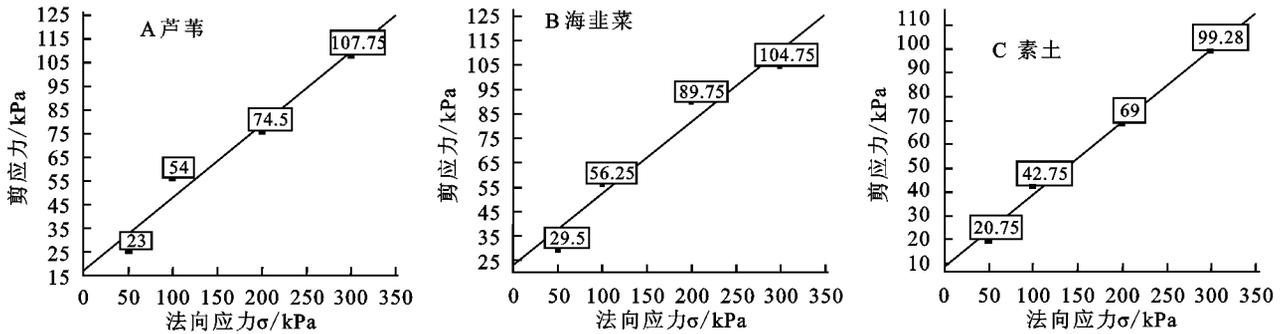


图1 研究区 2 种盐生植物根—土复合体及素土扰动试样剪应力与法向应力关系

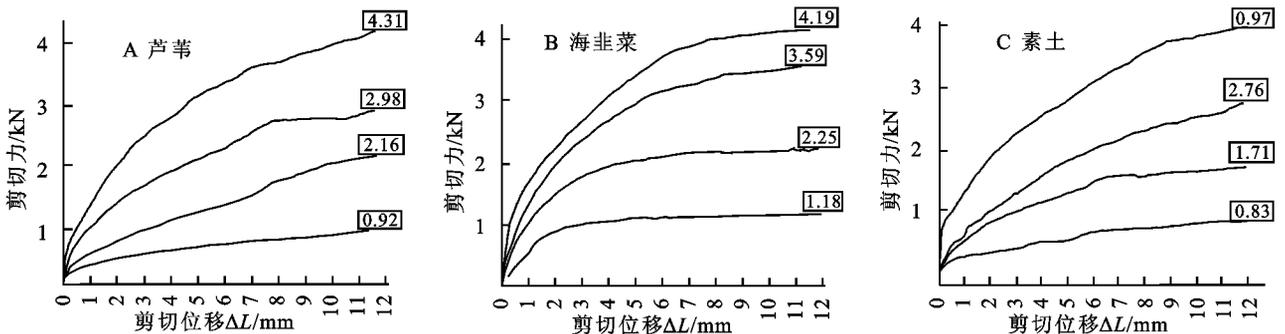


图2 研究区 2 种盐生植物根—土复合体及素土扰动试样剪切力与剪切位移关系

3.3 植物根系对土体抗剪强度增强效应

本研究对研究区 2 种盐生植物根—土复合体试样以及素土扰动试样进行了剪切试验,分别得到 2 种根—土复合体试样以及素土试样抗剪强度力学指标粘聚力(c)和内摩擦角(φ),结果见表 3。

由表 3 可知,2 种盐生植物根—土复合体粘聚力值均较素土粘聚力值大,其中海韭菜根—土复合体的粘聚力相对较大,为 21.87 kPa,相比素土粘聚力 8.45 kPa 增加 158.82%;芦苇根—土复合体粘聚力相对较小,为 13.48 kPa,相比素土粘聚力增加 59.53%。此外,通过对比 2 种复合体试样的粘聚力值表现出如下规律,即海韭菜根—土复合体粘聚力相对于芦苇根—土复合体粘聚力增加幅度为 62.24%,故 2 种复合体的粘聚力值的增加幅度由大至小依次为:海韭菜、芦苇。相关研究表明,粘聚力的增加对提高根—土复合体抗剪强度起到重要的作用^[6],由此可知,2 种盐生植物根—土复合体抗剪强度均较素土试样的抗剪强度大,

同时,2 种盐生植物根—土复合体抗剪强度由大至小依次为:海韭菜、芦苇。2 种盐生植物根—土复合体试样的内摩擦角变化规律相对不显著,相类似地,Comino 和 Druetta^[26]采用原位大剪试验(即长×宽×高分别为 300×mm×300 mm×100 mm,300×mm×300 mm×200 mm 和 300×mm×300 mm×300 mm),研究了草甸草茅、黑麦草、草地早熟禾、紫苜蓿、三叶草、百脉根等 6 种植物根系对阿尔卑斯山地地区土体抗剪强度影响,研究结果表明上述 6 种植物根系均可增强土体抗剪强度,且根系对土体抗剪强度值的增加幅度为 19.2%~875%,该结论与本项研究基本一致,即本项研究中海韭菜和芦苇对土体粘聚力值贡献为 59.53%~158.82%。此外,Fan and Su^[27]亦通过原位大剪试验(即长×宽×高为 300 mm×300 mm×200 mm)研究了刺田菁(*Sesbania cannabina* Merr.)对土体抗剪强度的影响,亦得出了相类似的结论,但需指出的是本研究分别分析了 2 种

盐生植物根系对土体粘聚力值和内摩擦角值的影响,而 Comino 和 Druetta^[26] 与 Fan 和 Su^[27] 所开展的原位大剪试验中探讨了植物根系对土体抗剪强度的影响,未进一步分析植物根系对土体粘聚力值和内摩擦角值的影响。

3.4 根—土复合体抗剪强度的影响因素分析

诸多研究结果表明,根—土复合体中的根系密度、根系数量、根系抗拉强度、根系形态等因素均会对根—土复合体的抗剪强度具有一定程度的影响^[28-40]。本项研究中,2 种盐生植物根—土复合体扰动试样土体密度均为 1.65 g/cm^3 ,含水量均为 29.01% ,而 2 种根—土复合体扰动试样平均根系质量与平均根系密度均存在一定程度差异,如表 2 所示,这种差异性在一定程度上可能是导致 2 种植物根—土复合体扰动试样的粘聚力产生差异的主要原因^[41],相类似的, Davoudi^[41] 通过原位剪切试验(剪切盒规格为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$)研究了浅根系对土体抗剪强度的影响,认为根系密度可显著增强土体抗剪强度和粘聚力值^[41],但需说明的是 Davoudi^[41] 的研究中根系密度是通过 Wu-Waldron-Model^[32] 计算模型获得的,而本项研究中根系密度是通过单位土体体积内根系的质量获得的。由表 3 可知,2 种盐生植物根—土复合体的平均根系数量由大至小依次为海韭菜、芦苇,相应的平均根系数量则依次为 203 根、32 根,因此,2 种盐生植物根—土复合体试样的粘聚力值由大至小依次为海韭菜、芦苇,其粘聚力值由大至小则依次为 21.87 kPa 、 13.48 kPa ,由平均根系数量与根—土复合体的粘聚力值的变化关系还可知,即根系数量在一定范围度内时根—土复合体中的根系数量相对愈大,则根—土复合体的粘聚力值亦随之增大,该研究结论与虎啸天^[24] 研究结论基本一致,即虎啸天^[24] 通过室内直剪试验(剪切盒内径为 6.18 cm ,高度为 2 cm)研究了芦苇和海韭菜原状根—土复合体试样的抗剪强度指标,并进一步分析了影响上述 2 种复合体试样粘聚力值的影响因素,认为 2 种复合体原状直剪试验中,海韭菜根系数量大于芦苇数量,海韭菜根系对土体粘聚力值的贡献大于芦苇,且复合体中根系数量愈多,则根系对土体粘聚力值贡献愈显著。本项研究中 2 种植物根—土复合体试样中的根系密度由大至小依次为海韭菜、芦苇,相应的平均根系密度依次为 0.039 g/cm^3 、 0.022 g/cm^3 ,所得到的 2 种植物根—土复合体试样粘聚力值由大至小依次为海韭菜(21.87 kPa)、芦苇(13.48 kPa),由平均根系密度与根—土复合体的粘聚力之间的变化关系可知,即

根系密度在一定范围度内,根—土复合体中的根系密度相对愈大,则根—土复合体的粘聚力值亦随之增大。

表 3 研究区 2 种盐生植物根—土复合体试样以及素土试样直剪试验结果

| 试样类型 | 平均根系密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 平均根系 数量/根 | 粘聚力 c 值/ kPa | 内摩擦角 φ 值/ $^\circ$ |
|-----------|--|--------------|----------------------------|-------------------------------|
| 海韭菜根—土复合体 | 0.039 | 203 | 21.87 | 16.52 |
| 芦苇根—土复合体 | 0.022 | 32 | 13.48 | 17.53 |
| 素土 | — | — | 8.45 | 16.94 |

注:(1) 平均根系密度指的是根—土复合体单位体积内所含根系的鲜重,其具体的计算方法为平均根系密度等于环刀内根系鲜重/环刀体积。(2) 平均根系数量指的是 3 个试样体积为 500 cm^3 (即大环刀的体积)内的平均根系数量,其具体的计算方法为平均根系数量等于 3 个环刀内根系数量的总和/3。

本项研究通过室内大剪试验,研究了根—土复合体扰动试样抗剪强度的变化特征,并探讨了海韭菜和芦苇对土体抗剪强度的影响,分析了影响根—土复合体抗剪强度的影响因素,认为根—土复合体抵御变形能力显著高于素土,根系可提高土体粘聚力值,且根系密度愈高则其对土体粘聚力值贡献相对愈显著,该研究结论与 Comino 等^[26] 研究结果相一致,且具有较为普遍的适用性;此外,本项研究结果表明土体中海韭菜根系数量相对多于芦苇,海韭菜根系对土体粘聚力值的贡献相对更为显著,该研究结论与虎啸天^[24] 所得相一致,且虎啸天^[24] 开展的研究中,其试验区亦为柴旦木盆地大柴旦盐湖地区。本项研究结论对于柴旦木盆地盐湖地区,以及与该地区地质气候条件相类似的地区开展水土保持和防治浅层滑坡等灾害的发生,以及对区域生态环境保护和植被恢复具有重要的理论价值和实际指导作用。

4 结论

(1) 在 50 kPa 垂直压力下,2 种优势盐生植物根—土复合体试样以及素土试样抗剪强度由大至小依次为:海韭菜、芦苇、素土;在 100 kPa 垂直压力下,抗剪强度由大至小依次为海韭菜、芦苇、素土;在 200 kPa 垂直压力下,2 种优势盐生植物根—土复合体试样以及素土试样抗剪强度由大至小依次为:海韭菜、芦苇、素土;在 300 kPa 等垂直压力下,2 种优势盐生植物根—土复合体试样以及素土试样抗剪强度由大至小依次为:芦苇、海韭菜、素土。

(2) 通过对海韭菜、芦苇 2 种盐生植物复合体扰动试样的剪切试验,获得 2 种根—土复合体试样的粘聚力值分别为:海韭菜为 21.87 kPa 、芦苇为 13.48 kPa ,相对于不含根系素土试样的粘聚力值为 8.45 kPa ,2 种盐生

植物根—土复合体试样的粘聚力值的增幅分别为158.82%,59.53%;与此同时,2种盐生植物根—土复合体内摩擦角相对表现出变化不显著的特点。

(3)区内2种盐生植物根—土复合体试样中的平均根系数量和平均根系密度由大至小依次为海韭菜、芦苇,由剪切试验所得到的2种盐生植物根—土复合体的粘聚力值由大至小依次为海韭菜、芦苇,反映出复合体中的根系数量和根系密度这两个指标在一定的变化范围内,均与复合体试样的粘聚力值之间呈正相关关系。

参考文献:

- [1] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy(Northern Italy)[J]. *Plant and Soil*, 2005,278(1): 11-22.
- [2] Matti C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species [J]. *Plant and Soil*, 2005,278(1):23-32.
- [3] 熊燕梅,夏汉平,李志安,等.植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J].*应用生态学报*,2007,18(4):895-906.
- [4] 陈安强,张丹,熊东红,等.元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J].*农业工程学报*,2012,28(5):108-113.
- [5] 薛明,刘晓旭,白如雪.盐渍土地区公路工程绿化技术[J].*公路交通科技*,2007(9):27-29.
- [6] Comino E, Druetta A. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010,106(2):194-201.
- [7] 李建兴,何丙辉,谌芸,等.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[J].*农业工程学报*, 2013,29(10):144-152.
- [8] 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.
- [9] 栗岳洲,胡夏嵩,余冬梅,等.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[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(7):1370-1383.
- [10] 余芹芹,乔娜,卢海静,等.植物根系对土体加筋效应研究[J].*岩石力学与工程学报*,2012,31(S1):3216-3223.
- [11] 杨璞,向志海,胡夏嵩,等.根对土壤加强作用的研究[J].*清华大学学报:自然科学版*,2009,49(2):305-308.
- [12] 陈昌富,刘怀星,李亚平.草根加筋土的室内三轴试验研究[J].*岩土力学*,2007,28(10):2041-2045.
- [13] 王元战,刘旭菲,张智凯,等.含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J].*岩土工程学报*,2015,37(8):1405-1410.
- [14] 卢荻秋,孙海龙,李绍才,等.石质陡边坡薄层含根土体抗剪强度试验研究[J].*中国水土保持*,2012,(4):38-41.
- [15] 孙纬宇,梁庆国,欧尔峰,等.陕西延安 Q₂ 原状与重塑黄土抗拉强度对比试验研究[J].*土木工程学报*,2015,48(S):53-58.
- [16] 张锋,凌贤长,吴李泉,等.植被须根护坡力学效应的三轴试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2010,29(S2):2979-2985.
- [17] 李识博,王常明,马建全,等.陇西黄土三轴剪切过程微观变化研究[J].*岩土力学*,2013,34(11):3299-3305.
- [18] 孙世洲,孔令韶.青海省大柴旦盆地植被.西北植物学报,1992,12(1):59-69.
- [19] 肖莲桂,石明章.大柴旦地区气候对生态环境的影响分析[J].*青海气象*,2012,(4):52-54.
- [20] 高世扬,宋彭生,夏树屏,等.盐湖化学—新类型硼锂盐湖[M].北京:科学出版社,2007:341-342.
- [21] 中国科学院中国植物志编委会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1988.
- [22] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [23] 南京水利科学研究所.土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,1999:181-186.
- [24] 虎啸天,余冬梅,付江涛,等.柴达木盆地盐湖区盐生植物根—土复合体抗剪强度试验研究[J].*冰川冻土*, 2015,37(6):1579-1590.
- [25] 余芹芹,胡夏嵩,李国荣,等.寒旱环境灌木植物根—土复合体强度模型试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2013,32(5):1020-1031.
- [26] Comino E, Druetta A. In situ shear tests of soil samples with grass roots in Alpine Environment [J]. *American Journal of Environmental Sciences*, 2009, 5 (4):475-486.
- [27] Fan Chia-Cheng, Su Chih-Feng. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33 (22):157-166.
- [28] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. *Plant and Soil*, 2008,305(1):207-226.
- [29] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2008,27(S2):3445-3452.
- [30] 王云翔,孙海龙,罗龙皂,等.人工石质边坡构树根系抗剪特性研究[J].*水土保持研究*,2012,19(3):114-118.
- [31] Ziemer R, Swanston D. Root strength changes after logging in southeast Alaska[M]. Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 1977.

- of variation(CoV)images:ground truth sampling of the Sahel along north-south transects [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000,21(2):235-260.
- [22] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. *Journal of Hydrology*, 2002,259(1/4):254-271.
- [23] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981—2007 an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121:144-158.
- [24] Jiang W, Yuan L, Wang W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2015,51:117-126.
- [25] Liang S, Yi Q, Liu J. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. *Ecological Indicators*, 2015,58:64-76.
- [26] Roderick M L, Hobbins M T, Farquhar G D. Pan evaporation trends and the terrestrial water balance. II: Energy balance and interpretation[J]. *Geography Compass*, 2009,3(2):761-780.
- [27] 何延波, Su Z, Jia L, 等. 遥感数据支持下不同地表覆盖的区域蒸散[J]. *应用生态学报*, 2007,18(2):288-296.
- [28] 郭妮, 朱燕君, 王介民, 等. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2008,32(2):319-327.
- [29] 陈忠升, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于生态服务价值的伊犁河谷土地利用变化环境影响评价[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(4):870-877.
- [30] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. *生态学报*, 2015,35(16):5331-5342.
- [31] 许玉凤, 杨井, 陈亚宁, 等. 近 32 年来新疆地区植被覆盖的时空变化[J]. *草业科学*, 2015,32(5):702-709.
- [32] 王海波, 马明国. 基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算[J]. *生态学报*, 2014,34(19):5617-5626.
- [33] 田静, 苏红波, 陈少辉, 等. 近 20 年来中国内陆地表蒸散的时空变化[J]. *资源科学*, 2012,34(7):1277-1286.
- [34] 刘朝顺, 高志强, 高炜. 基于遥感的蒸散发及地表温度对 LUCC 响应的研究[J]. *农业工程学报*, 2007,23(8):1-8.
- [35] 张殿君, 张学霞, 武鹏飞. 黄土高原典型流域土地利用变化对蒸散发影响研究[J]. *干旱区地理*, 2011(3):400-408.

(上接第 265 页)

- [32] Wu T H, Watson A. In situ shear tests of soil blocks with roots[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(4):579-590.
- [33] Ziemer R. Roots and the stability of forested slopes[C] // Davies, Timonthy R H. *Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands*, International of Hydrological Sciences, 1981.
- [34] Materechera S A, Alston A M, Kirby J M, et al. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil[J]. *Plant & Soil*, 1992, 144(2):297-303.
- [35] Hengchaovanich D. Vetiver System for Slope Stabilization Reviewer [C] // *Proceedings of 3rd International Vetiver Conference*, 2003:301-309.
- [36] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究[J]. *水土保持学报*, 1990,4(3):7-14.
- [37] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006,28(5):67-72.
- [38] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的三轴试验[J]. *林业科学*, 2007,43(5):54-58.
- [39] 王元战, 张智凯, 马殿光, 等. 植物根系加筋土剪切试验研究综述[J]. *水道港口*, 2012,33(4):330-336.
- [40] 张晓明, 王玉杰, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J]. *农业工程学报*, 2006,22(11):6-9.
- [41] Davoudi M H. Influence of willow root density on shear resistance parameters in fine grain soils using direct shear tests[J]. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2011,5(2):157-170.