

柴达木盆地大柴旦盐湖区盐生植物 根-土复合体力学强度试验研究

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

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室,
青海 西宁 810008; 2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008;
3. 青海大学, 青海 西宁 810016)

摘要:以柴达木盆地大柴旦盐湖区作为试验区, 分别筛选出5种优势盐生植物, 即海韭菜 (*Triglochin maritimum* Linn.)、芦苇 (*Phragmites australis* Trin.)、赖草 (*Leymus secalinus* Tzvel.)、毛穗赖草 (*Leymus paboanus* Claus.) 和无脉苔草 (*Carex enervis* C. A. Mey.) 作为试验供试种, 分别对5种盐生植物根-土复合体试样和不含根系素土试样进行了室内直接剪切试验和三轴压缩试验, 对比了不含根系素土试样与根-土复合体试样的抗剪强度指标; 在此基础上, 评价了5种盐生植物根系增强土体抗剪强度作用。试验结果表明: (1) 当含水量和密度值分别为29.01%和1.65 g/cm³时, 5种盐生植物根-土复合体试样的抗剪强度指标粘聚力 *c* 值为10.38~19.19 kPa, 且显著大于素土试样的粘聚力 *c* 值5.95 kPa, 内摩擦角 φ 值未表现出变化规律; (2) 相对于不含根系的素土试样, 由直剪试验和三轴试验得到的5种盐生植物根-土复合体试样的粘聚力增长幅度分别为16.8%~108.7%、19.2%~113.6%; (3) 由直剪试验与三轴试验结果表明, 区内5种盐生植物根-土复合体试样抗剪强度大小变化顺序表现出一致的规律性, 即由大至小依次为, 芦苇、海韭菜、赖草、毛穗赖草、无脉苔草和素土。该项研究结果为区内进一步开展盐生植物增强土体抗剪强度机理等方面的研究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; 盐渍土; 根-土复合体; 抗剪强度

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2017)01-0037-12

引言

我国盐渍土分布广泛, 总面积约为3 600 × 10⁴ hm², 占全国可利用土地面积的4.88%, 西北、华北、东北地区及东南沿海地区是盐渍土主要集中分布地区, 其中陕、甘、宁、青、蒙、新等6省(区)盐渍土面积约占全国的69.03%^[1-2]。已有研究表明, 改良盐渍化土壤主要采用的方法包括农业改良、生物改良、化学改良和水利工程改良等, 采用生物改良方法则是相对最具有

环境生态效益和经济效益最合理的措施^[3]。国内外学者对生物改良盐渍土开展了大量研究, Waldron^[4-5]通过直剪试验验证了根系的存在增加了土体剪切强度, 且根系增强土体抗剪强度是随土体内根系含量和根系的横截面积增加而增大。Hu等分别对霸王 (*Zygophyllum xanthoxylon* Bunge.)、四翅滨藜 (*Atriplex Canescens* Pursh.)、白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobr.)、柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii* Kom.) 和北方枸杞 (*Lycium chinense* Mill.) 等5种灌木进行了根-土复合体扰动试样的直剪试验和三轴试

收稿日期: 2016-01-29; 修回日期: 2016-03-15

基金项目:中国科学院青海盐湖所“青年基金”项目资助(Y360441058); 青海省自然科学基金资助项目(2014-ZJ-906); 中国科学院“百人计划”资助项目(Y110091068)

作者简介:余冬梅(1986-), 女, 助理研究员, 主要从事地质工程等方面的研究工作。Email: ydm2011@isl.ac.cn。

通信作者:胡夏嵩。Email: huxiasong@tsinghua.org.cn。

验,认为这 5 种植物根系提供了一个附加粘聚力,即 5 种植物根系对土体抗剪强度的增长量为 0.87 ~ 11.64 kPa,其增幅为 29.4% ~ 394.6%^[6]。李光莹等通过对黄河源玛沁地区分别选取未退化草地优势草本小嵩草(*Kobresia pygmaea* C. B. Clarke.)等 6 种高寒草地植物分别进行了根-土复合体原状试样的室内直剪试验,其粘聚力值为 14.01 ~ 20.42 kPa,且认为这 6 种草本根-土复合体其抗剪强度由大至小依次为小嵩草、紫花针茅、矮火绒草、二裂委陵菜、细叶亚菊和盐地风毛菊^[7]。Comino 对素土和草甸羊茅(*Festuca pratensis* Huds)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)、草地早熟禾(*Poa pratensis* L.)等 3 种草本的根-土复合体试样分别进行了剪切试验,认为根-土复合体抗剪强度相对于素土试样的增幅为 50% ~ 325%,且由根-土复合体的剪切试验得到的抗剪强度值反映出草本的存在对于边坡稳定性起重要作用^[8]。

关于根-土复合体及不含根系素土的直剪试验、三轴试验对比研究方面,亦取得了大量研究成果。王文志等对土体分别进行了直剪试验与三轴试验,两种试验分别得出粘聚力 c 值为 15 ~ 32 kPa、27 ~ 48 kPa,其平均值分别为 24.6 kPa、39.6 kPa,而内摩擦角 φ 值分别为 $10^\circ \sim 35^\circ$ 、 $2.4^\circ \sim 4.9^\circ$,其平均值为 18.3° 、 3.3° 。在此基础上认为由直剪试验得到粘聚力 c 值较三轴试验得出的粘聚力 c 值偏小,而三轴试验得到的内摩擦角 φ 值则较直剪试验得出的内摩擦角 φ 值则偏大^[9]。闫龙芳对不同含水量和密度条件下的 14 组原状土体试样开展了直剪与三轴试验,即当含水量为 17.2%,密度为 1.89 g/cm^3 时,由直剪和三轴试验得到的粘聚力 c 值分别为 41 kPa 和 32.8 kPa,内摩擦角分别为 23.5° 和 13.2° ,同时反映出了直剪试验较三轴试验得到土体的抗剪强度值普遍偏大,认为三轴试验结果相对更接近实际理论值^[10]。宋效兰^[11]采用直剪和三轴试验测定原状土体的抗剪强度指标,制取 4 组原状土体试样分别进行两种试验,由直剪试验得到的抗剪强度指标 c 值结果为 13.53 kPa、16.93 kPa、35.60 kPa 和 18.87 kPa,而三轴试验得到的抗剪强度指标 c 值结果为 18.50 kPa、20.30 kPa、

31.20 kPa 和 29.30 kPa,由以上试验结果可知,直剪试验得到的抗剪强度指标 c 值明显小于三轴试验。徐彬等^[12]通过直剪和三轴试验探讨了膨胀土原状试样抗剪强度的变化规律及影响因素,即由直剪与三轴试验得到的抗剪强度指标 c 值分别为 31.8 kPa 和 23.9 kPa,由直剪试验所得土体抗剪强度指标总体略大于三轴试验。刘炜等^[13]通过对素土和掺入量为 5% 的水泥稳定土进行了常规直剪试验、大尺寸直剪和三轴压缩试验,探讨了 3 种试验方法对土体抗剪强度指标的影响,认为相对于素土,大尺寸直剪试验所得素土粘聚力值为三轴试验所得到的粘聚力值的 67%,大尺寸直剪试验为常规直剪试验所得粘聚力的 26%,由常规直剪试验所得到的素土粘聚力值相对大于三轴试验所得到的素土粘聚力值。

由上述分析可知,已有的研究成果更多的是采用直剪试验和三轴试验的方法,分别对土体试样的抗剪强度指标进行试验研究。相比较而言,将上述直剪试验和三轴试验两种方法结合起来,并探讨两种试验方法所得结果间的差异性和可比性分析等方面的研究尚有待于进一步深入。鉴于上述实际情况,本项研究选择柴达木盆地大柴旦盐湖区及其周边地区,通过对试验区 5 种不同盐生植物根-土复合体的抗剪强度试验,获得了根-土复合体抗剪强度指标,探讨了由直剪和三轴试验两种方法所得到的结果之间的相互关系;在此基础上,评价了区内 5 种植物对增强边坡土体抗剪强度的贡献。该项研究成果为研究区以及与其地质条件相似的其他地区,促进基础工程建设与环境保护之间的协调发展具有一定的理论研究价值和实际指导意义。

1 研究区概况

研究区位于柴达木盆地大柴旦盐湖区及其周边地区,区内寒冷干燥,多风沙,属于干旱风成地貌组合,因区内气候干旱,形成荒漠生态景观,并伴有大量盐沼和碱滩^[14-16]。区内年平均气温为 1.9°C ,温度最高为 7 月平均气温为 15.7°C ,最低温度为 1 月其平均气温为

-13.3℃,年降水量为89.4mm,年蒸发量为2167.1mm,年蒸发量是降水量的24倍多,日照时数为3239.5h,区内可划分出高山草甸、

高寒荒漠草原、砾石戈壁、沙地、冲积扇、盐漠和荒漠平原等自然单元^[14-16]。研究区盐生植物生长情况如图1所示。

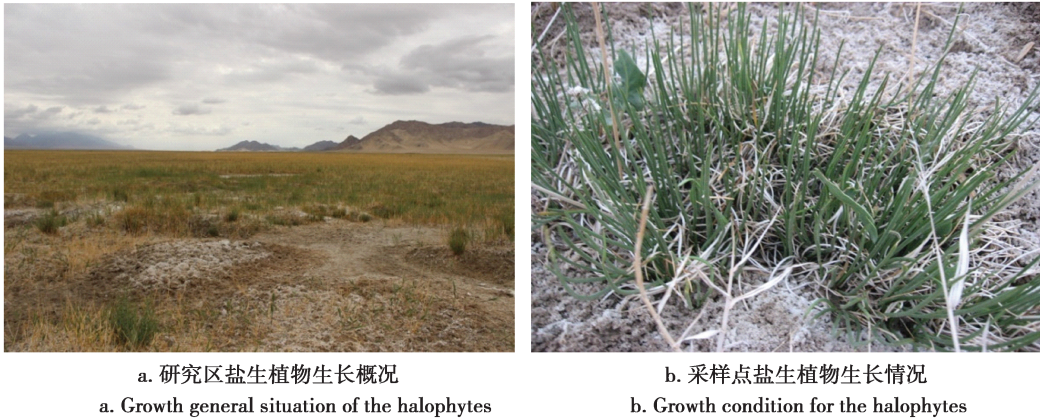


图 1 研究区基本情况

Fig. 1 General condition in test site

2 试验材料和方法

本项研究试验样品采集于区内大柴旦盐湖南岸,筛选出分布相对广泛的5种优势盐生植物种,即海韭菜(*Triglochin maritimum* Linn.)、芦苇(*Phragmites australis* Trin.)、赖草(*Leymus secalinus* Tzvel.)、毛穗赖草(*Leymus paboanus* Claus.)和无脉苔草(*Carex enervis* C. A. Mey.)。5种盐生植物根-土复合体试样采样原则为,选取生长正常且株高和覆盖度基本相近的草本种,采取整株挖掘的方法将其移入盆

口直径36cm、盆深24cm、盆底直径18cm的试样盆中并及时带回实验室,同时采用塑料袋封住植株以有效制止水分流失,并用土样盒采集植株周围土体用于测量植物生长区土体含水率和密度值。

区内5种盐生植物生长区土体物理化学性质指标测试结果如表1所示,5种盐生植物生长区土体的平均含水率、平均密度分别为29.1%、1.66g·cm⁻³。区内土体主要以粉砂质土为主,土体类型为亚硫酸盐渍土,盐渍化程度主要为强盐渍土型。

表 1 研究区盐生植物生长区根周土体物理性质指标试验结果
Table 1 Test results of physical property indices for the soil around halophyte roots in test site

根-土复合体类型	颗粒分析/%			土体类型	盐渍土类型	盐渍化程度
	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005			
赖草根-土复合体	62.5	31.1	6.4	粉土	亚硫酸盐渍土	强盐渍土
海韭菜根-土复合体	61.5	28.7	9.8	粉土	亚硫酸盐渍土	强盐渍土
毛穗赖草根-土复合体	72.3	25.0	2.7	粉土	亚硫酸盐渍土	强盐渍土
无脉苔草根-土复合体	61.8	13.2	25.0	粉土	亚硫酸盐渍土	强盐渍土
芦苇根-土复合体	54.0	34.5	11.5	粉质粘土	亚硫酸盐渍土	中盐渍土

此外,本项研究中所制备的素土试样、根-土复合体试样中的土体含水率和密度值均与试验区原位取样位置处的土体一致;5种植物

根-土复合体试样中的根系布设方法,结合根系在土体中分布情况,表现出海韭菜、芦苇其根径相对较粗,且在土体中多呈近似垂直状分布,

故采用根面积比方法计算根-土复合体试样中的根系含量;赖草、毛穗赖草和无脉苔草 3 种根径相对较细的草本,则按称重法计算根-土复合体试样中应加入的含根量^[17-18]。

2.1 直接剪切试验

5 种盐生植物自然条件下土体中含根量测定和计算方法为,海韭菜、芦苇采用根面积比计算根-土复合体中根系的含根量。具体在区内选取正常生长的海韭菜和芦苇,采用大环刀(内径为 100 mm,高为 63.7 mm)分别制取 2 个根-土复合体原状试样,在室内分别进行洗根,然后进行环刀内的根系数量统计,得到海韭菜和芦苇根系数量的平均值,依次为 148 根和 29 根。鉴于本项研究根-土复合体的剪切试验采

用室内常规方法时,小环刀(内径为 61.8 mm,高为 20 mm)与大环刀横截面积的比值为 0.38,因此在每个小环刀内的海韭菜、芦苇的根-土复合体扰动试样中,应布设的根系数量分别为 56 根、11 根,其根-土复合体中的含根量具体计算结果如表 2 所示。对于赖草、毛穗赖草和无脉苔草 3 种植物根-土复合体原状试样,然而在室内清洗根系表面泥土,用滤纸将其根系表面水分吸干,分别进行称重,记录赖草、毛穗赖草、无脉苔草等 3 种植物根-土复合体原状试样中的根系质量,即得出根-土复合体中植物根系加根量分别为 3.68 g、4.99 g、3.71 g,其含根量计算结果如表 3 所示。

表 2 研究区海韭菜和芦苇 2 种盐生植物根-土复合体试样中的含根量计算结果

Table 2 The calculating results of root content in root-soil composite sample of 2 kinds of halophytes of *Phragmites australis* and *Triglochin maritimum* in test site

根-土复合体试样	根径范围/mm	平均根径/mm	大环刀内根量/根	根面积比/%	小环刀内根量/根
海韭菜	0.76 ~ 1.45	1.07	147	1.68	56
芦 苇	0.44 ~ 3.52	2.48	29	1.77	11

①表中大环刀指的是野外取样时采用规格内径 100 mm、高 63.7 mm 的规格环刀;②小环刀内根量指的是室内直剪试验及三轴试验根-土复合体试样横截面积内的根数,其横截面积内径为 61.8 mm

表 3 研究区 3 种须根型盐生植物根-土复合体中的根量计算结果

Table 3 Calculated results of root content in rooted soil for three halophytes with fibrous root in test site

根-土复合体试样	试样层位	平均根径/mm	环刀内鲜根质量/g	含根量/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	分层加根量/g	加根量/g
赖 草	上层位	1.08	0.74	0.012	1.53	3.68
	中层位	1.05	0.63	0.011	1.31	
	下层位	0.97	0.41	0.007	0.84	
毛穗赖草	上层位	1.02	1.22	0.020	2.53	4.99
	中层位	0.99	0.72	0.012	1.50	
	下层位	0.92	0.47	0.008	0.97	
无脉苔草	上层位	0.89	0.78	0.013	1.62	3.71
	中层位	0.52	0.62	0.010	1.28	
	下层位	0.48	0.39	0.007	0.81	

①表中上层位指的是地表以下 5 cm 位置处,中层位指的是地表以下 10 cm 位置处,下层位指的是地表以下 15 cm 位置处;②环刀内径为 61.8 mm,高为 20 mm,且环刀内鲜根质量是指一组剪切试样中每个环刀内的平均值;③含根量即为环刀内鲜根质量(m)与环刀体积(V)之比

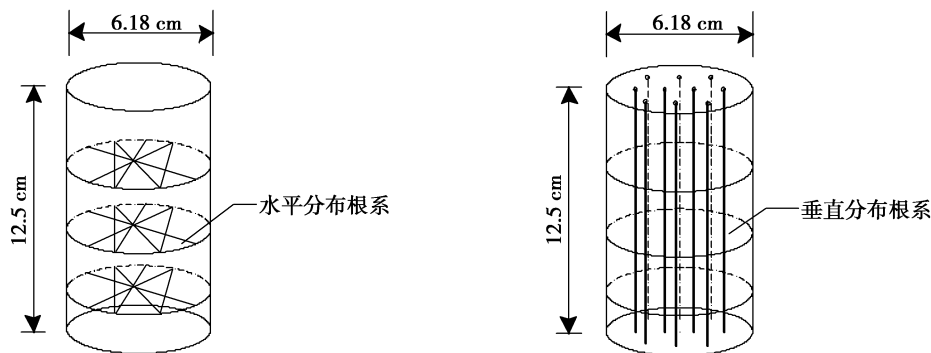


图2 研究区5种盐生植物根-土复合体试样中的根系布设分布示意图

Fig. 2 Diagram for root arrangement in rooted soil for the five halophytes in test site

试验过程中海韭菜、芦苇根-土复合体中的根系采用扦插法布根方式,海韭菜、芦苇根系在野外实际状态为垂直分布状态,在根-土复合体扰动试样中也按照垂直分布状态制样。其制取试样的具体方法为,先采用击实法制备素土试样,然后用细铁丝(直径为1.1 mm)将这2种植物根系垂直插入环刀内的素土试样中,制取过程中为确保根系在试样中的均匀分布,将根系从筛孔中均匀插入制样,使根系在试样中具有等距分布特点。无脉苔草、赖草、毛穗赖草等3种盐生植物根-土复合体试样布设方法为,先按表3中所示的含根量称取3种盐生植物复合体试样中所需的根量,然后将这3种植物根系剪至20 mm长根段,将其与素土充分拌匀后制备根-土复合体扰动试样。

根据以上试样的制取方法,具体制备直剪试验时单个环刀试样的制备方法是,先每组制取4个相同的试件,用内径为61.8 mm,高为20 mm的环刀从试样柱中制取根-土复合体试样,在制成的试样柱上取样,将准备好的4个环刀用旋转法套上该试样柱,每个环刀之间的间距为2~3 mm;然后用削土刀沿着环刀下边缘以外2~3 mm的位置旋转着轻轻切割,依次制取4个带环刀的试样,将取好的4个环刀试样均沿着环刀口削平,备用。在垂直压力分别为50、100、200和300 kPa等4级荷载作用下进行直接剪切试验。

2.2 三轴压缩试验

本项试验中供试种海韭菜、芦苇根-土复

合体试样中的含根量计算结果如表2所示。海韭菜和芦苇根面积比分别为1.68%和1.77%,由根面积比计算得到的复合体试样中的海韭菜和芦苇的根量分别为56根和11根,按照三轴试验扰动样品制备方法选取新鲜的海韭菜和芦苇,将其根长剪至125 mm,用湿毛巾覆盖和备用,然后制备根-土复合体三轴扰动试样。试样的制样方法为,先按照击实筒的规格(内径为61.8 mm,高为125 mm),实测土体密度为 $1.66 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土体含水率为29.1%,称取相应质量素土,将素土平均分为4等份,采用分层击实法分4层击实,且各层间的接触面采用小刀刮毛;然后采用扦插法布根,即采用直径为1.1 mm的细铁丝将已准备好的新鲜海韭菜、芦苇根系均匀插入位于环刀内的土体中,根系插入完毕后,在击实筒中继续加入素土进行击实,直至根-土复合体试样制备完毕(图2)。

赖草、毛穗赖草和无脉苔草等3种草本按称重法称取制备每层环刀试样中的加根量,每层所制备的环刀试样中的含根量计算结果如表3所示。赖草、毛穗赖草、无脉苔草等3种根-土复合体三轴扰动试样的制备方法是,先称取相应质量的素土,将3种植物根系按照计算出来的每层根系质量与素土充分拌匀后均分为4份,再采用分层击实法将根-土复合体试样分4层击实,击实过程中各层间的接触面均采用小刀刮毛,以制备根-土复合体扰动试样。制取试样过程中,将制备好的根-土复合体试样均采用保鲜膜密封,以有效地防止试样中水分蒸发。

3 根-土复合体直剪试验和三轴试验结果分析

3.1 直剪试验结果

由试验区 5 种盐生植物根-土复合体试样抗剪强度指标粘聚力 c 值、内摩擦角 φ 可知,复合体抗剪强度指标粘聚力 c 值、内摩擦角 φ 显著高于素土,其中复合体中根系呈垂直状态分布的海韭菜和芦苇的粘聚力 c 值分别为 19.19 kPa 和 15.94 kPa,而其它 3 种呈水平状态分布根系的赖草、毛穗赖草和无脉苔草的复合体的粘聚力 c 值则分别为 11.09 kPa、

10.84 kPa 和 10.38 kPa。故相比较于素土试样粘聚力 c 值,海韭菜和芦苇复合体粘聚力 c 值增幅分别为 82.8% 和 120.1%;赖草、毛穗赖草和无脉苔草根-土复合体的粘聚力 c 值增幅分别为 27.2%、24.3% 和 19.0%。直剪试验结果表明,试验区 5 种盐生植物根-土复合体的粘聚力 c 值由大至小依次为芦苇根-土复合体、海韭菜根-土复合体、赖草根-土复合体、毛穗赖草根-土复合体和无脉苔草根-土复合体、素土;此外,区内 5 种盐生植物根-土复合体的内摩擦角 φ 值为 24.2°~28.3°,5 种盐生植物根-土复合体和素土试样抗剪强度指标试验结果如表 4 所示。

表 4 研究区 5 种盐生植物根-土复合体试样与素土试样直剪试验结果

Table 4 Direct shear test results of non-rooted and rooted soil for the five halophytes in test site

试样类型	布根方式	粘聚力 c 值/kPa	粘聚力 c 值增幅度/%	内摩擦角 φ 值/°
素土试样	—	8.72	—	28.3
赖草根-土复合体	垂直布根	11.09	27.2	28.2
海韭菜根-土复合体	垂直布根	15.94	82.8	27.2
毛穗赖草根-土复合体	水平或倾斜布根	10.84	24.3	28.0
芦苇根-土复合体	水平或倾斜布根	19.19	120.1	24.2
无脉苔草根-土复合体	水平或倾斜布根	10.38	19.0	28.1

①表中粘聚力 c 值增幅指的是根-土复合体试样粘聚力 c 值较素土粘聚力 c 值的增加幅度,具体计算方法为,[(根-土复合体试样粘聚力 c 值-素土粘聚力 c 值)/素土粘聚力 c 值]×100%;②表中“—”指的是无该项相应数据

区内素土与 5 种盐生植物根-土复合体试样抗剪强度与垂直压力关系如图 3 所示。抗剪强度与剪切面上的法向压力呈正比,抗剪强度随垂直压力增加呈线性增大,即当垂直压力分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 时,5 种盐生植物根-土复合体试样其抗剪强度粘聚力 c 值分别为 33.1~40.6 kPa、60.2~68.9 kPa、105.9~123.7 kPa、155.9~170.9 kPa,由抗剪强度 c 值试验结果可知,5 种盐生植物根-土复合体试样其抗剪强度随垂直压力增加而呈线性增长趋势^[18-19]。

此外,研究区 5 种盐生植物根-土复合体试样与素土试样剪应力与剪切位移关系如图 4 所示。图 4 中曲线 P1、P2、P3、P4 分别代表试样在垂直压力分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、

300 kPa 等 4 种荷载作用下的剪应力与剪切位移之间关系。这种关系主要表现为,5 种盐生植物根-土复合体试样及其素土试样在剪切作用的初始阶段呈线性关系,随着剪切过程的进行,当剪切位移大于 0.1 mm 时,则由线性关系转化为非线性关系;同时在相同剪应力作用下,与初始剪切阶段相比,非线性阶段形成相对显著的剪切位移,直至剪切破坏后剪应力呈近似为水平线。另外,5 种盐生植物根-土复合体和素土试样剪切试验过程中,相同剪应力作用下,5 种盐生植物根-土复合体试样所形成的剪切位移量,均显著小于相同条件下素土试样所形成的剪切位移量。例如当剪应力值 τ 为 80 kPa 时,选择 P1、P2、P3、P4 等 4 级荷载中的任一荷载 P3 时,赖草、海韭菜、毛穗赖草、芦苇、

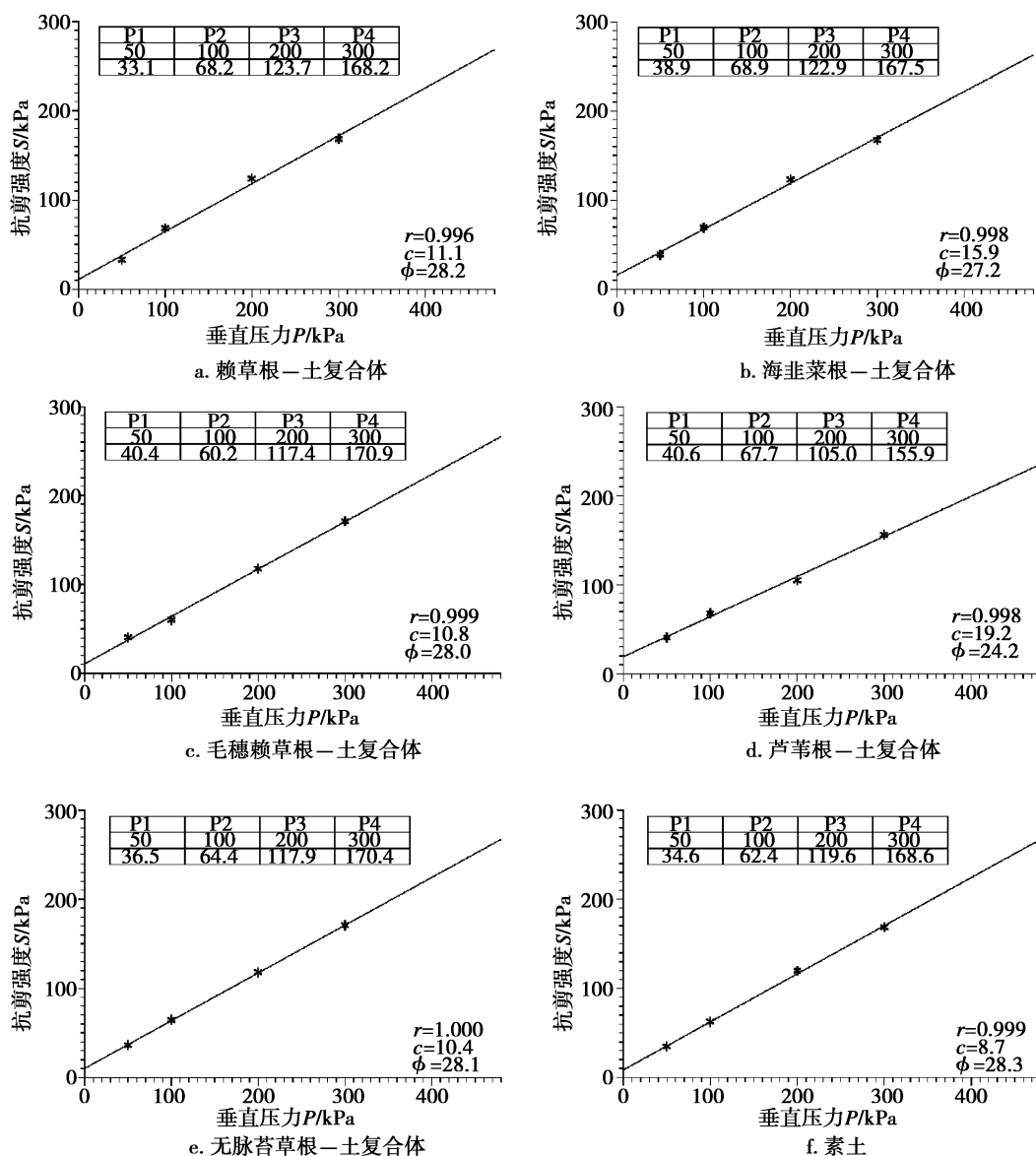


图3 研究区5种盐生植物根-土复合体与不含根系素土试样抗剪强度与垂直压力关系

Fig. 3 Relationship between shear strength and vertical pressure of non-rooted and rooted soil for the five halophytes in test site

无脉苔草等5种植物根-土复合体的剪切位移量分别为1.15 mm、0.95 mm、1.32 mm、0.95 mm和1.22 mm,而素土剪切位移量为1.68 mm;反映出在相同剪应力及垂向荷载作用下,5种植物的根-土复合体所形成的剪切位移量显著小于素土,这在一定程度上反映了本项研究的5种植物根系对边坡土体抗剪强度的增强作用,使得根-土复合体抵御边坡变形程度得到显著提高^[18-19]。

3.2 三轴试验结果分析

通过对试验区5种植物根-土复合体试样的三轴试验,分别得到了赖草、海韭菜、毛穗赖草、芦苇、无脉苔草根-土复合体试样的抗剪强度指标粘聚力 c 值,结果如表5所示。由表5可知,复合体的粘聚力 c 值分别为8.17 kPa、11.65 kPa、7.39 kPa、12.71 kPa、7.09 kPa,素土试样的抗剪强度指标粘聚力 c 值为5.95 kPa。5种盐生植物根-土复合体的粘聚力 c 值由大

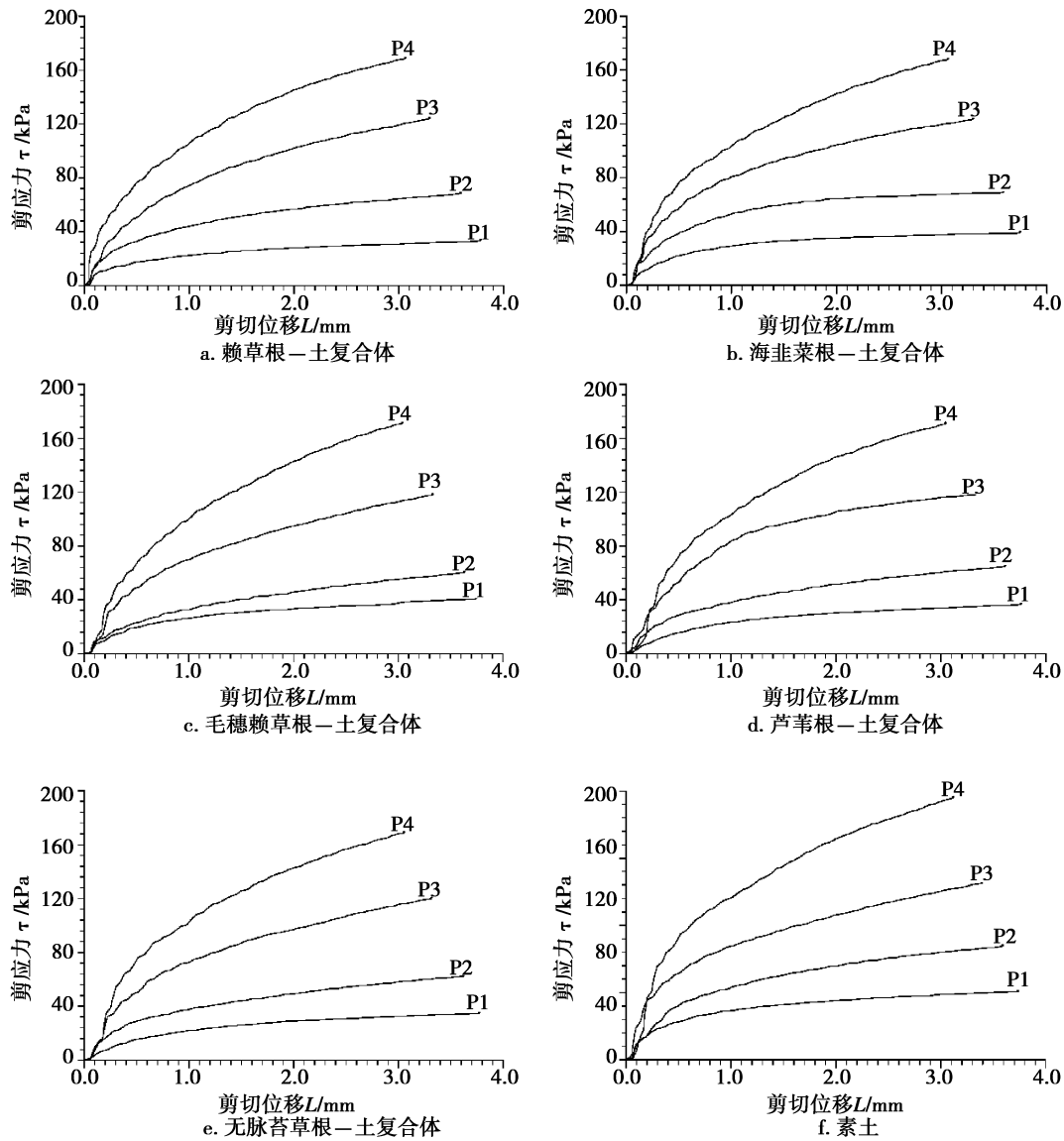


图 4 研究区 5 种盐生植物根—土复合体与不含根系素土试样剪应力与剪切位移关系

Fig. 4 Relationship between shear strength and shear displacement of non-rooted and rooted soil for the five halophytes in test site

到小依次为芦苇根—土复合体、海韭菜根—土复合体、赖草根—土复合体、毛穗赖草根—土复合体、无脉苔草根—土复合体、素土。此外,根—土复合体试样中粘聚力 c 值相对最大的为根系呈垂直状态分布的 2 种盐生植物,相对于素土试样的粘聚力 c 值,其增幅分别为 95.8% 和 113.6%;根系呈水平状态分布的赖草、毛穗赖草、无脉苔草试样粘聚力 c 值的分别为 37.3%、24.2%、19.2%。此外 5 种盐生植物根—土复合体试样内摩擦角 φ 值为 $27.5^{\circ} \sim 33.0^{\circ}$,素土的内摩擦角 φ 值为 27.8° ,根—土复合体、素土

试样内摩擦角未体现出显著变化规律。

三轴试验中由土工试验数据采集系统,自动生成得到的素土和 5 种优势盐生植物根—土复合体的主应力差值 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 与轴向应变 ε_1 关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知,在围压分别为 10 kPa、20 kPa、30 kPa 和 40 kPa 作用下,素土和根—土复合体的主应力差随着轴向应变的增大而表现出增大趋势,且逐渐趋于稳定。此外,当轴向应变 $< 0.5\%$ 时,5 种盐生植物根—土复合体与不含根系素土试样主应力差与轴向应变关系曲线相对较为接近;随着轴向应变

表 5 研究区 5 种盐生植物根-土复合体试样与素土试样抗剪强度指标三轴试验结果

Table 5 Test result of shear strength of non-rooted and rooted soil for the five halophytes obtained by direct shear and tri-axial compression test in test site

试样类型	根-土复合体中 根系布根方式	粘聚力 c 值/kPa	粘聚力 c 值增幅/%	内摩擦角 φ 值/ $^{\circ}$
赖草根-土复合体	垂直布根	8.17	37.3	28.4
海韭菜根-土复合体	垂直布根	11.65	95.8	27.5
毛穗赖草根-土复合体	水平或倾斜布根	7.39	24.2	29.8
芦苇根-土复合体	水平或倾斜布根	12.71	113.6	28.5
无脉苔草根-土复合体	水平或倾斜布根	7.09	19.2	33.0
素土试样	—	5.95	—	27.8

①表中粘聚力 c 值的增幅指的是根-土复合体试样粘聚力值较素土粘聚力 c 值的增加幅度,其计算方法是:
[(根-土复合体试样粘聚力 c 值-素土粘聚力 c 值)/素土粘聚力 c 值] $\times 100\%$; ②“-”指的是无该项相应数据

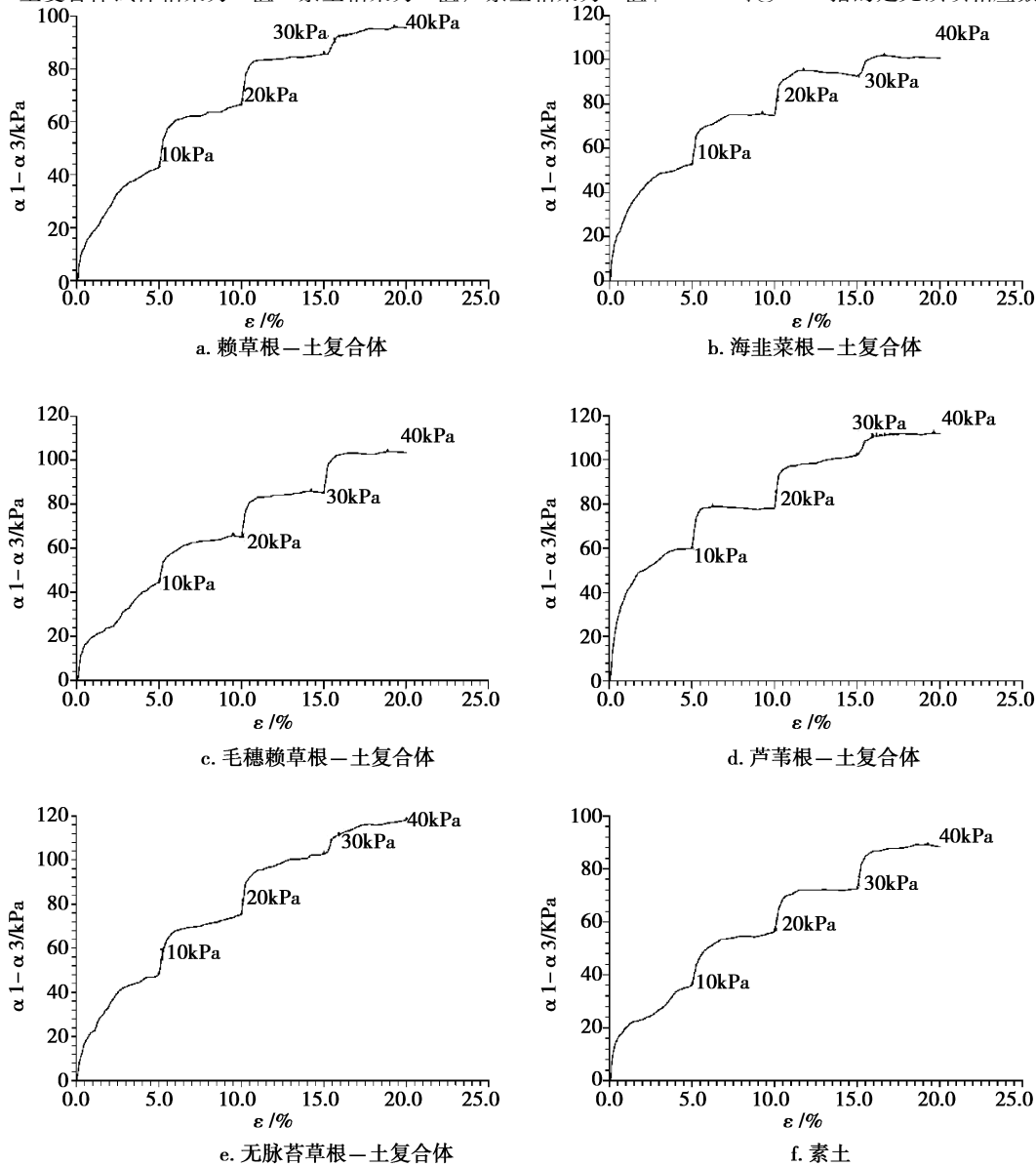


图 5 研究区 5 种盐生植物根-土复合体及其不含根系素土试样主应力差与轴向应变关系

Fig. 5 Relationship between principal stress difference and axial strain of non-rooted and rooted soil for the five halophytes in test site

的逐渐增大,根-土复合体试样的主应力差与轴向应变关系曲线差异逐渐显著,且最终趋于一稳定值。再者,在相同的主应力差条件下,根-土复合体试样的应变小于素土试样的应变。例如,主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为 40 kPa 时,赖草、海韭菜、毛穗赖草、芦苇、无脉苔草等 5 种盐生植物的根-土复合体所对应的轴向应变 ε 分别为 4.0%、1.8%、3.9%、1.0%、2.5%,而素土所对应的轴向应变 ε 为 5.1%。轴向应变 ε 由小至大依次为芦苇根-土复合体、海韭菜根-土复合体、无脉苔草根-土复合体、毛穗赖草根-土复合体、赖草根-土复合体、素土。5 种植物根-土复合体具有显著的抵抗边坡土体变形能力,起到增强浅层边坡土体抗剪强度和

3.3 根-土复合体直剪试验与三轴试验结果对比

本项研究针对试验区 5 种盐生植物根-土

复合体及其素土试样,分别采用直剪和三轴试验,得到了其粘聚力 c 值和内摩擦角 φ 值,如表 6 所示。其中赖草、海韭菜、毛穗赖草、芦苇、无脉苔草等 5 种植物根-土复合体及素土试样,由直剪试验获得的复合体粘聚力 c 值分别为 11.09 kPa、15.94 kPa、10.84 kPa、19.19 kPa、10.38 kPa、8.72 kPa,内摩擦角为 24.2 ~ 28.3°;相应地,由三轴压缩试验获得的复合体试样粘聚力 c 值分别为 8.17 kPa、11.65 kPa、7.39 kPa、12.71 kPa、7.09 kPa、5.95 kPa,内摩擦角 φ 值为 27.5 ~ 33.03°。由此可知,5 种盐生植物根-土复合体及素土试样的直剪和三轴试验所得到的粘聚力 c 值相对较为接近,主要表现在由直剪试验得到的复合体粘聚力 c 值与由三轴试验所得的复合体粘聚力 c 值的差值分别为 2.92 kPa、4.29 kPa、3.45 kPa、6.48 kPa、3.29 kPa、2.77 kPa,两种方法得到的复合体粘聚力的相对相差率为 26.33%、26.91%、31.83%、33.77%、31.70%、31.77%。

表 6 研究区 5 种盐生植物根-土复合体试样及素土试样直剪与三轴试验抗剪强度指标试验结果

Table 6 Test result of shear strength indices of non-rooted and rooted soil for the five halophytes obtained by direct shear and triaxial compression test in test site

复合体试样类型	粘聚力 c 值/kPa		粘聚力 c 值 相对差值/kPa	粘聚力 c 值 相差率/%	内摩擦角 φ 值/°		内摩擦角 φ 值差值/°
	直剪 试验	三轴 试验			直剪 试验	三轴 试验	
赖草根-土复合体	11.09	8.17	2.92	26.33	28.20	28.36	-0.16
海韭菜根-土复合体	15.94	11.65	4.29	26.91	27.20	27.50	-0.3
毛穗赖草根-土复合体	10.84	7.39	3.45	31.83	28.00	29.82	-1.82
芦苇根-土复合体	19.19	12.71	6.48	33.77	24.20	28.46	-4.26
无脉苔草根-土复合体	10.38	7.09	3.29	31.70	28.10	33.03	-4.93
素土试样	8.72	5.95	2.77	31.77	28.30	27.83	0.47

①表中粘聚力 c 值相对差值指的是两种试验结果中粘聚力 c 值的差值,其具体的计算方法为,由直剪试验所得的粘聚力 c 值-三轴试验所得粘聚力 c 值;②内摩擦角 φ 值的差值指的是两种试验结果中内摩擦角 φ 值的差值,其具体的计算方法,直剪试验所得的内摩擦角 φ 值-三轴试验所得内摩擦角 φ 值;③粘聚力 c 值的相差率指的是两种试验结果中粘聚力 c 值的相差率=相对差值/直剪试验粘聚力 c 值

由以上结果可知,直剪试验所得到的 5 种盐生植物根-土复合体和素土试样粘聚力 c 值普遍大于三轴试验结果;内摩擦角 φ 值无明显的变化规律,其原因主要与两种试验的试样尺寸大小之间的差异有一定程度关系^[9-10,18],可

反映在三轴试验的试样体积显著大于直剪试样体积。与此同时,有关上述两种试验方法结果存在差异性的原因还有待于进一步探讨。此外,本项研究中直剪与三轴试验所得到的复合体的粘聚力 c 值之间的相差率相对较小,由两

种方法得到的区内5种盐生植物复合体抗剪强度值大小均表现出一致性变化,即粘聚力 c 值由大至小依次为芦苇根-土复合体、海韭菜根-土复合体、赖草根-土复合体、毛穗赖草根-土复合体、无脉苔草根-土复合体、素土;粘聚力 c 值大小的变化顺序,同时在一定程度上亦反映出了区内5种盐生植物根系增强土体抗剪强度的贡献^[18]。

4 结 论

1)直剪试验结果表明,区内赖草、海韭菜、毛穗赖草、芦苇和无脉苔草根-土复合体试样的粘聚力 c 值相对于素土试样较大,其增幅分别为21.4%、45.3%、19.6%、54.6%和16.0%;5种盐生植物根-土复合体试样及素土试样的内摩擦角未表现出显著的规律性,其变化范围为 $24.2^{\circ} \sim 28.3^{\circ}$ 。

2)三轴试验得到5种盐生植物根-土复合体试样及素土试样粘聚力 c 值和内摩擦角 φ 值,其中复合体中呈垂直状态分布的芦苇和海韭菜根-土复合体试样与素土比较,其增幅为113.6%和95.8%;复合体根系呈水平状态分布的赖草、毛穗赖草及无脉苔草根-土复合体试样的增幅分别为37.3%、24.2%、19.2%。

3)从直剪与三轴试验两种试验的对比结果可知,由直剪和三轴试验两种方法所得到的复合体粘聚力 c 值的差值分别为2.92 kPa、4.29 kPa、3.45 kPa、6.48 kPa、3.29 kPa、2.77 kPa,粘聚力 c 值的相差率为26.33%、26.91%、31.83%、33.77%、31.70%、31.77%。总体而言,由三轴试验得到的抗剪强度指标粘聚力 c 值相对于直剪试验的结果偏小,两种试验中赖草、海韭菜、毛穗赖草、芦苇及无脉苔草等5种植物根-土复合体的抗剪强度指标粘聚力 c 值均显著大于素土试样。

4)由直剪和三轴试验两种方法所得到的根-土复合体试样粘聚力 c 值其大小顺序表现出一致的变化规律,即粘聚力 c 值由大至小依次为芦苇根-土复合体、海韭菜根-土复合体、赖草根-土复合体、毛穗赖草根-土复合体、无脉苔草根-土复合体、素土。

参考文献:

- [1] 石玉林.《中国1:100万土地资源图》土地资源数据集[M].北京:中国人民大学出版社,1991.
- [2] 徐攸在.盐渍土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [3] 王玉珍,刘永信,魏春兰,等.6种盐生植物对盐碱地土壤改良情况的研究[J].安徽农业科学,2006,34(5):951-952.
- [4] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Science Society of American Journal,1977,41(5):843-849.
- [5] Waldron L J, Dakessian Suren. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science,1981,132(6):427-435.
- [6] Hu X, Gary B, Zhu H, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science,2013,10(4):668-686.
- [7] 李光莹,虎啸天,李希来,等.黄河源玛沁地区高寒草地植物固土护坡的力学效应[J].山地学报,2014,32(5):550-560.
- [8] 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.
- [9] 王文志,孙红,石志亮.浅谈直剪试验与三轴试验的异同[J].内蒙古水利,2011,2:19-20.
- [10] 闫龙芳.直剪试验与三轴试验的对比探讨[J].山西建筑,2004,30(24):64-65.
- [11] 宋效兰.直剪饱和固结快剪与三轴固结不排水剪切试验比较[J].山西水利,2013,1:32-34.
- [12] 徐彬,殷宗泽,刘述丽.膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J].岩土力学,2011,32(1):44-50.
- [13] 刘伟,汪益敏,陈页开,等.土工格室加筋土的大尺寸直剪试验研究[J].岩土力学,2008,29(11):3133-3138.
- [14] 高春亮,余俊清,闵秀云,等.柴达木盆地大柴旦硼矿床地质特征及成矿机理[J].地质学报,2015,89(3):659-670.
- [15] 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.
- [16] 何先虎,余俊清,张丽莎,等.大柴旦盐湖DCD03剖面的矿物学记录及其环境指示意义[J].盐湖研究,2013,21(4):10-15.
- [17] Preti F, Dani A, Laio F. Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes[J]. Ecological Engineering,2010,36(3):305-316.
- [18] 栗岳洲,付江涛,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.
- [19] 虎啸天, 胡夏嵩, 李光莹, 等. 大柴旦盐湖采卤区地层剖面盐渍土基本类型及其抗剪强度试验研究[J]. 盐湖研究, 2014, 22(4): 38 - 49.
- [20] 杨悦舒, 夏振尧, 肖海, 等. 多花木蓝根 - 土复合体抗剪强度试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(4): 72 - 76.
- [21] 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.

Experimental Research on Mechanical Strength of Rooted Soil of Halophytes in Da Qaidam Salt Lake Area in the Qaidam Basin, Qinghai Province

YU Dong-mei^{1,2}, FU Jiang-tao^{1,2}, HU Xia-song^{1,2,3}, ZHAO Dan^{1,2}, LIU Ya-bin^{1,2},
QI Zhao-xin^{1,2}, LI Shu-xia^{1,2}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;

2. Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province, Xining, 810008, China;

3. Qinghai University, Xining, 810016, China)

Abstract: Da Qaidam salt lake and surrounding areas have been selected as the test sites and 5 predominant halophytes (*Triglochin maritimum* Linn., *Phragmites australis* Trin., *Leymus secalinus* Tzvel., *Leymus paboanus* Claus., and *Carex enervis* C. A. Mey.) have been selected as the test species. Direct shear tests and triaxial compression tests have been performed to rooted soil samples for the five halophytes as well as non-rooted soil samples to compare shear strength indices for these samples. Based on these, contributions by roots for the 5 halophytes in increasing shear strength of soil have been evaluated, and the following results have been achieved: (1) As moisture content and soil density remain constant, shear strength indices, cohesion forces (c) of rooted soil for the five halophytes are 10.38 kPa ~ 19.19 kPa, markedly greater than that for non-rooted soil, while the internal frictional angle (φ) exhibit no marked regularity; (2) In contrast to non-rooted soil, incremental rates of cohesion force rooted soil for the five halophytes obtained by direct shear tests and triaxial compression tests are 16.8% ~ 108.7%, and 19.2% ~ 113.6%, respectively; (3) Direct shear test and triaxial compression test results show variability of shear strength values of non-rooted and rooted soil for the five halophytes obtained by direct shear test are in accordance well with what obtained by triaxial compression test, and value magnitude of shear strength of rooted soil for the five halophytes from larger to smaller are *P. australis*, *T. maritimum*, *L. secalinus*, *L. paboanus*, and *C. enervis*, and non-rooted soil has minimum value in shear strength. The conclusion has a great significance and real value in implementing studies in the mechanism of soil shear strength reinforcement by halophyte roots in the test site.

Key words: Da Qaidam salt lake area; Halophytes; Rooted soil; Shear strength