

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.06.16

高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡 土体抗剪强度试验研究

杨幼清^{1,2,3}, 胡夏嵩^{1,4}, 李希来⁵, 王涛⁵, 刘昌义⁴, 刘亚斌^{1,2,3}, 李淑霞^{1,2,3}, 余冬梅^{1,2}

- (1. 中国科学院青海盐湖研究所/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. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 青海大学地质工程系, 青海 西宁 810016; 5. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 为研究草本植物根系对增强高寒地区露天煤矿排土场边坡土体抗剪强度的贡献以及相关因素对边坡土体抗剪强度的影响,以青海境内祁连山北缘江仓露天煤矿排土场为试验区,在排土场边坡组合种植垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)和冷地早熟禾(*Poa pratensis* L.)2种草本植物,在边坡3个不同位置处分别制取不含根系素土和根-土复合体试样进行直剪试验,探讨土体物理力学性质以及植物根系数量与根-土复合体抗剪强度之间的关系。结果表明:(1)随着边坡海拔升高,坡面浅层素土和根-土复合体试样的密度和砂粒含量呈显著增加,含水率、粉粒和黏粒含量显著降低;(2)与边坡素土试样抗剪强度相比,坡底、坡中和坡顶位置处根-土复合体抗剪强度增幅分别为4.09%、18.92%和0.69%;(3)在素土和根-土复合体试样中,含水率与黏聚力之间呈显著负相关关系,相关系数分别为-0.943和-0.969;土体中砂粒含量与内摩擦角之间呈显著正相关关系,相关系数分别为0.940和0.926;(4)坡底至坡顶位置处根-土复合体的黏聚力与素土相比,增幅分别为29.23%、54.40%、26.45%。

关键词: 高寒地区;排土场边坡;草本植物;根-土复合体;抗剪强度;植物护坡

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)06-0105-09

An experimental study of the soil shear strength reinforcement of a mine dump slope by herbaceous root systems in alpine regions

YANG Youqing^{1,2,3}, HU Xiasong^{1,4}, LI Xilai⁵, WANG Tao⁵, LIU Changyi⁴,
LIU Yaobin^{1,2,3}, LI Shuxia^{1,2,3}, YU Dongmei^{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, Qinghai 810008, China; 2. Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of the Qinghai Province, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;
5. College of Eco-Environment Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: The contribution of herbaceous root systems to increase the shear strength of slope soil in open-pit coal mine dumps in alpine regions is examined in this study, and the influence of relevant factors on the shear strength of slope soil is also studied. The dump of the Jiangcang open cast coal mine located in the northern

收稿日期: 2018-05-18; 修订日期: 2018-07-30

基金项目: 青海省科技厅科技支撑计划项目资助(2015-SF-117);国家自然科学基金项目资助(41572306;41162010);中国科学院“百人计划”项目资助(Y110091025);青海省自然科学基金项目资助(2014-ZJ-906)

第一作者: 杨幼清(1992-),男,硕士研究生,主要从事地质工程等研究工作。E-mail: yangyouqing16@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 胡夏嵩(1965-),男,教授,从事环境岩土工程与地质工程等教学与研究工作。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

edge of the Qilian Mountains in Qinghai Province is taken as the test area. The mixture of two herbs (*Elymus nutans* Griseb., *Poa pratensis* L.) were planted in the slope of the dump and the samples of soil without roots and root-soil composite systems from the dump slope were prepared. The direct shear tests were carried out on the samples. Physical mechanics properties of soil at three different positions of the slope and the relationship between the root number and the shear strength of the root-soil composite systems are analyzed. The results indicate that (1) with the increasing elevation of the dump slope, the density and sand content of the samples of soil without roots and root-soil composite systems significantly increase at the shallow layer of the slope soil, but the content of water, powder and clay decrease significantly. (2) Compared with the samples of soil without roots, the increment amplitudes of the shear strength of the samples of the root-soil composite systems at the slope bottom, slope middle and slope top are 4.09%, 18.92% and 0.69% respectively. (3) In the samples of soil without roots and the root-soil composite systems, the correlation between the moisture content and the cohesion force is significantly negative, with the correlation coefficients (R^2) of -0.943 and -0.969, respectively, while the correlation between the content of sand and the internal friction angle is significantly positive, with the correlation coefficients (R^2) of 0.940 and 0.926, respectively. (4) Compared with the samples of soil without roots, the increment amplitudes of the cohesion value of the samples of the root-soil composite systems from the slope bottom to the slope top of the dump are 29.23%, 54.40% and 26.45%, respectively.

Keywords: alpine region; dump slope; herbs; root-soil composite system; shear strength; vegetated slope

目前我国能源消费量 70% 以上来自于煤炭^[1~3], 且大部分煤炭资源来源于露天煤矿开采, 排土场作为露天煤矿采矿必不可少的产物, 是由露天开采所产生的大量松散土石排弃物集中堆放所形成的一种特殊工程体^[4~5]。这种由人工堆排而成的松散堆积物边坡, 相对难以在较短时间内使排土场的裸露边坡恢复生态环境^[4~6]。在强降雨诱发作用下易导致裸露排土场边坡发生表层水土流失、滑坡和泥石流等地质灾害现象, 进一步加剧了矿区周围生态环境的退化。

近年来国内外学者研究结果表明, 通过植物恢复来保护矿山环境和综合治理矿山地质灾害是一种有效的措施^[7~9]。张丹丹等^[10]针对排土场不同位置侵蚀特点, 提出了排土场平台采用灌木与豆科牧草混播, 边坡乔木、灌木和草本混播, 坡脚沉积区为灌木林 3 种不同的植被配置类型。Vogel^[11] 研究结果表明, 在矿区排土场种植鸭茅 (*Dactylis glomerata*) 等禾本科植物, 可使土壤养分和物理性质得到显著改善, 随着种植年限增加, 土壤有机质、速效钾、全氮等的含量均呈递增趋势, 并逐渐接近原地貌含量, 土壤抗蚀性也逐渐增强, 其结果降低了土壤侵蚀。台培东等^[12]研究了沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.) 等 3 种不同人工灌木林地, 在霍林河露天煤矿排土场边坡水土保持效应, 结果表明沙棘具有独特的生物固氮能力和耐逆境特性, 护坡固土和土壤培肥作用显

著。史倩华等^[13]采用野外排水冲刷试验法, 研究了沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall.) 条播等 5 种坡面防护措施对排土场坡面径流产沙的影响, 结果表明采用植被措施使坡面径流量和产沙量较裸坡减少 0.97% ~ 93.27%, 且撒播紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 减沙效果相对较为显著。Ling Zhang 等^[14]分析了人工种植草本、乔木、乔木 + 草本组合 3 种不同植被配置类型对安太堡露天煤矿排土场边坡径流和侵蚀的影响, 研究表明生长期为 5 a 的乔木 + 草本组合, 其在防治坡面径流和土壤侵蚀作用相对较为显著, 坡面总径流量和土壤侵蚀量分别为 17.3 mm 和 6.4 kg·m⁻², 且与排土场裸坡相比降低幅度分别为 62.9% 和 76.9%。综上所述, 目前已开展的研究主要集中在对矿山排土场生态恢复的植被配置模式、植被改良排土场土壤的质量以及矿山排土场坡面地表径流试验研究等方面, 且取得了显著的研究成果。相比较而言, 在对于矿山排土场生态修复方面, 有关涉及植物根系对排土场边坡不同位置处土体抗剪强度的增强作用, 以及边坡土体物理力学参数和植物根系数量对排土场边坡土体抗剪强度影响等方面, 还尚需开展进一步深入研究。此外, 已有研究成果较多集中在气候温和、土壤较肥沃、土层较厚、植被种类丰富的温带及其南方地区^[15]; 对于地处高海拔、气候寒冷、土层薄、生态脆弱的青藏高原东北部高寒

矿区开展类似研究则甚少。

基于此,以青海境内祁连山北缘江仓露天煤矿排土场为试验区,在露天煤矿排土场边坡坡面不同位置处,通过对未种植植物裸坡素土和种植植物边坡根-土复合体试样进行直剪试验,定量评价2种草本植物根系增强排土场边坡浅层土体抗剪强度大小。同时,探讨不同位置处边坡土体物理力学指标和植物生长量的变化规律及其对抗剪强度的影响,以期为研究区及相类似的地区有效防治水土流失、浅层滑坡等地质灾害和提高矿区排土场边坡稳定性提供依据。

1 试验区基本概况

试验区地处祁连山构造断陷山间盆地中的江仓河一带,平均海拔为3 800 m,属典型高原大陆性气候,气温低,昼夜温差大,年平均气温0℃以下,降水稀少且较为集中,年平均降水量为314.5 mm,蒸发量为1 418.1 mm,雨季多集中在7—9月份^[16~17]。区内地貌类型主要为冰水堆积的倾斜平原地貌单元,以高寒草甸、沼泽为主,属于高寒沼泽湿地,地表以下3 m左右深度为多年片状冻土层,分布面积占整个矿区面积的80%以上^[17]。该区冻土层分布厚度大、地温低、受季节性热融作用影响,在边坡坡底位置处常形成融水渗出,加剧了边坡不稳定性。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

排土场边坡属于人工堆积土石边坡,其中夹杂大量黏土、粉砂质块石等采煤废弃物,试验区范围为160 m×50 m(长×宽),坡度约20°,坡高55 m,坡向属半阴半阳,平均海拔为3 850 m。排土场边坡土体平均密度为1.86 g/cm³,平均含水率为11.70%;其中边坡坡面3个不同位置处不同粒径土体颗粒含量分别为粒径0.25~0.075 mm的砂粒为8.1%~64.1%,粒径0.075~0.005 mm的粉粒为29.3%~76.8%,粒径<0.005 mm的黏粒为6.6%~15.1%。采用混播种植法,2016年5月在排土场边坡坡面种植了生长期为1年的2种适宜于区内高海拔寒旱条件下生长的乡土草本植物,即垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)和冷地早熟禾(*Poa pratensis* L.)。草本植物种植边坡如图1所示。

依据区内2种草本植物在边坡浅层土体中实际生长情况,由坡底至坡顶位置处依次划分为3段,采用环

刀(内径61.8 mm,高20 mm)在坡底、坡中和坡顶位置处,分别制取未种植植物裸坡素土和种植植物边坡根-土复合体试样。相应地,测定、制取边坡不同位置处的含水率、密度试样,密封后及时带回实验室开展相应的试验测试。

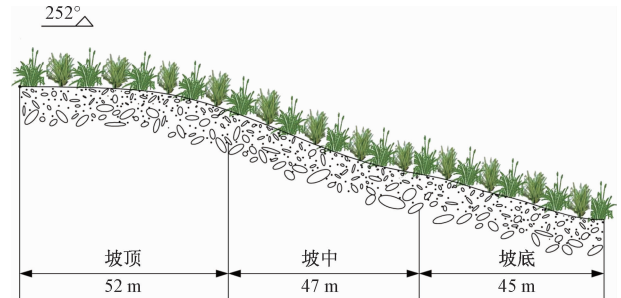


图1 试验区排土场草本植物种植边坡剖面示意图

Fig. 1 Sketch map of the herbaceous slope profile in the dump of the testing area

2.2 试验方法

(1) 植物地上生长量指标测定

对垂穗披碱草和冷地早熟禾地上部分株高、地茎、分蘖数等生长量指标进行测定。在试验区排土场3段不同位置处,分别随机选取其中的20株待测植物,采用刻度为0.1 cm的钢卷尺对植物株高进行测量;采用精度为0.01 mm的游标卡尺对植物地茎进行测量,草本分蘖数统计则采用人工计数方法进行。

(2) 直接剪切试验

素土和根-土复合体试样直剪试验采用由南京土壤仪器厂生产的ZJ型应变控制式直剪仪,对试样分级施加50,100,200,300 kPa共4级垂直压力;剪切速率设定为2.4 mm/min,取剪切位移为4 mm时所对应的剪应力为抗剪强度,按《土工试验规范》(SL237-1999)^[18]的要求进行直剪试验。

(3) 试样根系数量测定

根-土复合体试样直剪试验结束后,首先将根-土复合体试样放置于孔径为0.05 mm筛网中清洗出根系,用滤纸将根系表面水分吸干称量鲜根重量并统计根系数量;再随机选取其中10~20根根系,采用精度为0.01 mm的游标卡尺分别测量每个试样中随机选取根系的上、中、下3处根径,测量差值做到小于0.5 mm,然后统计其平均根径。根-土复合体试样中含根量确定如下^[19]:

$$m_r = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

式中: m_r ——复合体含根量/(g·cm⁻³);

m_s ——复合体内所含干根质量/g;

V ——复合体体积即环刀体积,为 60 cm^3 。

3 结果分析

3.1 土体物理性质及植物生长指标特征

(1) 土体物理力学性质

边坡不同位置处土体物理性质指标试验结果如表 1 所示。由表 1 可知,由坡顶至坡底位置处,排土场边坡土体密度呈逐渐降低变化趋势,与排土场边坡坡顶位置处相比,位于坡中、坡底位置处素土和根-土复合体试样的密度降低幅度分别为 8.29%、13.66% 和 11.06%、18.09%,且在排土场边坡相同位置处,素土密度均显著大于根-土复合体密度;与素土密度相比,根-土复合体密度由坡底至坡顶位置处降低幅度分别

为 7.91%、5.85%、2.93%。

受边坡坡面径流作用的影响,区内素土和根-土复合体的含水率均随边坡海拔升高呈显著降低的变化趋势。在坡底位置处,素土和根-土复合体的含水率相对较高,分别为 15.92% 和 15.88%;坡中和坡顶位置处素土的含水率均明显高于对应位置处的根-土复合体试样,其主要原因在于 2 种草本植物进行光合作用时,需从边坡表层以下土壤中吸收水分,其中绝大部分水分通过植物蒸腾作用散失^[20];与坡中和坡顶位置处的素土相比,根-土复合体的含水率降低幅度分别为 23.21% 和 14.16%。反映了受区内边坡表层以下土壤天然含水量影响,坡中位置处草本植物的蒸腾作用程度显著高于坡顶位置处。

表 1 边坡不同位置处土体基本物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of soil at different positions of the slope

取样位置	试样类型	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	颗粒分布/%			土质类型
				0.25 ~ 0.075 mm	0.075 ~ 0.005 mm	< 0.005 mm	
坡底	素土	1.77	15.92	8.1	76.8	15.1	粉土
	根-土复合体	1.63	15.88				
坡中	素土	1.88	12.15	41.8	46.5	11.7	粉土
	根-土复合体	1.77	9.33				
坡顶	素土	2.05	9.39	64.1	29.3	6.6	粉土
	根-土复合体	1.99	8.06				

受短时间集中降水对边坡坡面的冲刷作用和常年风蚀作用,坡面海拔位置相对愈高,坡面土体遭受侵蚀程度相对愈为严重^[21~22],造成坡面水土流失量亦愈多,从而使得边坡表层土体中粒径为 0.25 ~ 0.075 mm 的砂粒含量显著升高,分别为 8.1%、41.8%、64.1%,而粒径为 0.075 ~ 0.005 mm 的粉粒和粒径小于 0.005 mm 的黏粒含量显著降低,分别为 76.8%、46.5%、29.3% 和 15.1%、11.7%、6.6%。

(2) 2 种草本植物地上生长量指标

2 种草本植物的株高、地茎、分蘖数等生长量指标如表 2 所示。由表 2 可知,2 种草本生长一定程度上受到排土场边坡不同位置的影响,表现在株高与地茎由边坡坡底至坡顶位置处呈显著降低趋势,与坡底位置处相比,坡中、坡顶位置处的垂穗披碱草和冷地早熟禾的株高降低幅度分别为 43.10%、75.86% 和 33.33%、55.56%,地茎的降低幅度则分别为 12.30%、22.99% 和 6.25%、22.50%,而其分蘖数变化相对不显著,垂穗披碱草和冷地早熟禾的平均分蘖数分别为 8 个和 5 个,区内垂穗披碱草和冷地早熟禾的平均地茎分别为 1.65 mm 和 0.72 mm,且垂穗披碱

草平均地茎均显著大于冷地早熟禾。

表 2 2 种草本植物的地上生长量指标统计结果

Table 2 Statistical results of the above-ground growing increment indexes for tow types of herbs

取样位置	植物名称	株高/cm	平均地茎/mm	分蘖个数
坡底	垂穗披碱草	40 ~ 76	1.87	2 ~ 9
	冷地早熟禾	27 ~ 45	0.80	3 ~ 8
坡中	垂穗披碱草	5 ~ 60	1.64	5 ~ 10
	冷地早熟禾	3 ~ 45	0.75	2 ~ 5
坡顶	垂穗披碱草	3 ~ 25	1.44	10 ~ 11
	冷地早熟禾	2 ~ 30	0.62	3 ~ 8

(3) 根-土复合体中根系生长量指标

不同位置处根-土复合体试样中根系生长量指标如表 3 所示。由表 3 可知,由坡底至坡顶位置处,2 种草本植物的根-土复合体试样中所含根系鲜重、根数、含根量等 3 种生长量指标,均呈显著减小的变化趋势。坡底、坡中和坡顶位置处的平均根径分别为 0.17 mm、0.17 mm 和 0.15 mm,随海拔增加未表现出显著性变化。

通过植物根系数量能反映植物在不同条件下的生

长状况^[23],由区内2种草本植物边坡坡面3个不同位置处的草本植物根系数量可反映出区内排土场边坡坡底位置处的水土条件,较坡中、坡顶位置处相对更适宜于2种草本生长。

表3 不同位置处根-土复合体中根系生长量指标
Table 3 Root growing increment indexes for the root-soil composite systems at different positions

取样位置	平均根径/mm	鲜根重量/g	根数	含根量/(g·cm ⁻³)
坡底	0.17	1.41	176	0.024
坡中	0.17	0.37	73	0.006
坡顶	0.15	0.24	49	0.004

3.2 直接剪切试验结果

3个不同位置处素土和根-土复合体试样直接剪切试验结果如表4所示。

表4 素土和根-土复合体直剪试验结果
Table 4 Results of the direct shear test for soil without roots and the root-soil composite systems

取样位置	试样类型	抗剪强度指标		黏聚力增长幅度/%	相关系数 r
		c/kPa	$\varphi/(\text{°})$		
坡底	素土	15.53	21.30	—	0.999
	根-土复合体	20.07	20.46	29.23	0.990
坡中	素土	23.77	24.52	—	1.000
	根-土复合体	36.70	25.24	54.40	0.992
坡顶	素土	27.64	31.95	—	0.991
	根-土复合体	34.94	28.63	26.45	0.991

注:表中“—”表示不存在该项数据

由表4可知,由坡底至坡顶位置处,素土黏聚力呈增大的变化趋势,在边坡相同位置处,根-土复合体的黏聚力均显著高于素土。由坡底至坡顶处根-土复合体和素土试样内摩擦角相差为 $0.72^{\circ} \sim 3.32^{\circ}$,其变化幅度相对不显著。坡顶、坡底位置处复合体的内摩擦角小于素土,主要原因为:坡顶和坡底位置处,根系的存在使得根-土复合体中的土体结构相比较于素土试样相对疏松^[24],且坡顶、坡底位置处的根-土复合体密度均小于素土。由于复合体中根系存在,一定程度上降低了复合体试样中土体颗粒之间的咬合作用。此外,坡底位置处复合体试样中土体颗粒相对较细,且以粉粒、砂粒土为主,使得该位置处素土试样内摩擦角较复合体略大。相应地,在坡中位置处,复合体内摩擦角大于素土,其主要原因在于:该位置处素土试样含水率较根-土复合体高30%以上,土颗粒之间水的润滑作用一定程度使得素土试样中土体颗粒间的摩擦力降低。

剪切试验过程中,当垂直压力分别为50,100,200,300 kPa 4种压力时,抗剪强度随垂直压力呈线性增大,其相关系数 r 均大于0.99;与素土的抗剪强度相比,由坡底至坡顶位置处,根-土复合体抗剪强度增长幅度分别为4.09%,18.92%,0.69%。坡底、坡中、坡顶3个不同位置处素土和根-土复合体试样的剪应力与剪切位移关系如图2所示。

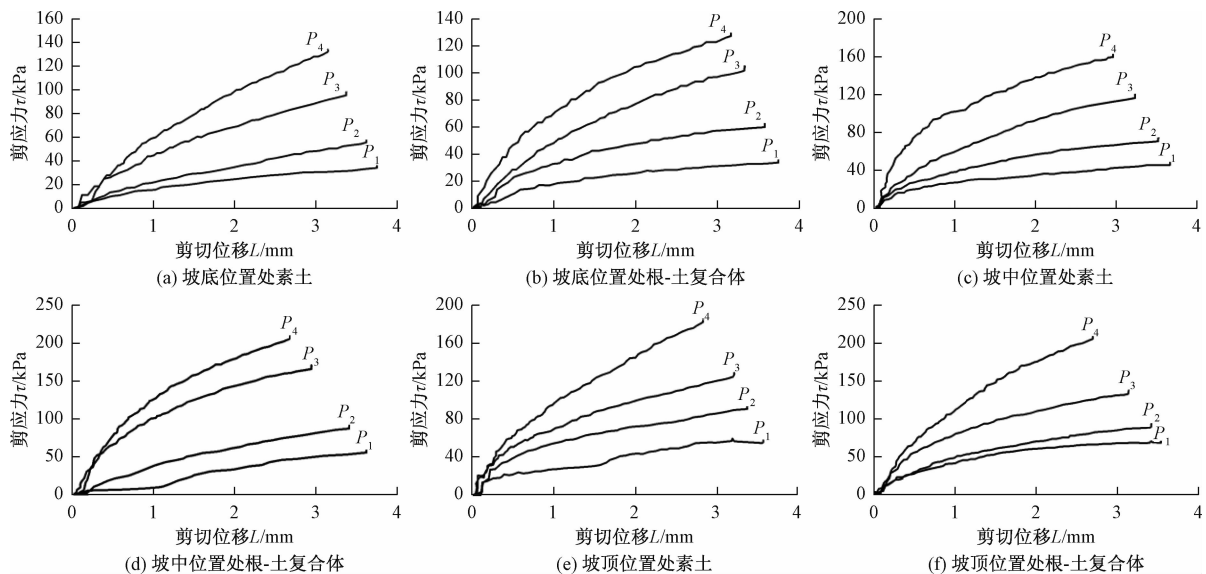


图2 试验区排土场边坡素土和根-土复合体试样剪应力与剪切位移关系

Fig. 2 Relationship between the shear stress and shear displacement of soil without roots and the root-soil composite systems of the dump slope in the testing area

由图2可知,当区内素土和根-土复合体试样受剪应力作用时,剪应力与剪切位移曲线在开始阶

段近似呈线性关系,当剪切位移超过 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,与初始阶段相比,非线性阶段形成相对显著剪切位移,直至剪切破坏后剪应力近似为水平线,且试样剪应力 τ 随着垂直压力 P 的增大呈现出显著增大的变化趋势^[25]。此外,当剪应力相同时,坡面相同位置处,素土试样剪切位移量较根-土复合体试样显著,如在垂直压力 $P_2 = 100$ kPa 作用下,当剪应力为 50 kPa 时,由坡底至坡顶素土试样剪切

位移量分别为 3.29, 1.73, 1.54 mm,根-土复合体试样剪切位移量分别为 2.85, 1.32, 1.14 mm。试验结果表明区内 2 种草本根系能显著增强排土场边坡浅层土体抗剪强度,并使其稳定性得到显著性的提高^[25~27]。

3.3 试样抗剪强度主要影响因素相关性分析

利用多因素相关分析方法,得到排土场边坡坡面不同位置处土体物理性质指标及植物根系数量与试样抗剪强度指标之间的相关性(表 5)。

表 5 素土、根-土复合体试样抗剪强度主要影响因素相关性分析

Table 5 Correlation analysis of the main factors affecting the shear strength of soil without roots, the root-soil composite systems

指标	素土					根-土复合体					
	含水率	密度	砂粒	粉粒	黏粒	含水率	密度	根数	砂粒	粉粒	黏粒
黏聚力	-0.943 **	0.406 *	0.997	-0.982	-0.995	-0.969 **	0.733 *	0.962 *	0.876	0.895	0.742
内摩擦角	-0.717	0.899	0.940 **	-0.972 *	-0.863 *	-0.963	0.975	0.870	0.926 **	-0.998 *	-0.977 *
含水率	1	-0.551 *	-0.745 *	0.997 *	0.837 *	1	-0.878	0.762	-0.968 *	0.977	0.844
密度		1	0.849 *	-0.910 *	-0.907 *		1	-0.890 **	0.970 *	0.960	-0.921 *

注:表中*和**分别代表相关系数显著性达0.05和0.01水平

由表 5 可知,素土和根-土复合体含水率与黏聚力之间相关系数分别为 -0.943 和 -0.969,呈显著的负相关关系;而根-土复合体试样黏聚力与边坡土体中草本植物根数之间呈显著的正相关关系,相关系数大于 0.9,与已有研究结果基本符合^[19,28]。同时,素土和根-土复合体的密度与黏聚力之间呈显著的正相关,相关系数分别为 0.406 和 0.733;而内摩擦角则主要受不同粒径土体颗粒含量影响,与不同的颗粒粒径含量呈显著的相关关系,其中与砂粒含量之间呈显著正相关,相关系数分别为 0.940 和 0.926。

此外,素土密度与含水率和不同粒径土体颗粒含量均呈现显著相关性,其中素土密度与含水率之间呈现出显著负相关性,相关系数为 -0.551;素土密度与不同粒径的土壤颗粒含量(砂粒、粉粒和黏粒)之间相关系数分别为 0.849、-0.910、-0.907。根-土复合体的密度与草本植物根数之间呈显著负相关性,相关系数为 -0.890,主要由于草本植物根系能够改善土体的通透性,使得边坡土体密度降低,这与邹慧^[28]在研究巨菌草(*Pennisetum* sp.)和宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)2 种草本植物根系对土体密度影响的结果相似。

3.4 排土场边坡土体抗剪强度变化规律

素土和根-土复合体的抗剪强度指标随排土场边坡位置变化关系如图 3 所示。由排土场坡底至坡

顶位置处,素土的黏聚力呈显著性增加的变化趋势,与坡底位置处相比,坡中、坡顶位置的黏聚力增长幅度为 53.06%, 77.98%;而根-土复合体黏聚力为:坡中>坡顶>坡底;与相同位置处素土相比,根-土复合体黏聚力增幅分别为 29.23%, 54.40%, 26.45%,该结果表明,区内 2 种草本根系对增强排土场边坡浅层土体抗剪强度具有相对显著性的增强作用。同时,由植物根系数量和土体含水率与土体抗剪强度之间的关系可知,根-土复合体试样中随着根系数量增多且在未达到最优含根量条件下,使得复合体抗剪强度增大;根-土复合体中含水率增大,使得复合体抗剪强度呈显著降低趋势。例如在区内排土场边坡坡底位置处,尽管根-土复合体试样中植物根系数量为 176 根,显著高于坡中和坡顶位置,但因坡底位置处的根-土复合体含水率为 15.88%,高于坡中和坡顶位置处的含水率 9.33% 和 8.06%,使得区内坡底处的根-土复合体黏聚力相对低于坡中和坡顶位置处。同时,随坡面位置海拔的增加,素土和根-土复合体内摩擦角均表现出增加的趋势,与坡底相比,坡中和坡顶素土与根-土复合体的内摩擦角增长幅度分别为 15.12%, 50.00% 和 23.36%, 39.93%。由表 5 所示,土体的内摩擦角主要是受土体中粒径为 0.25~0.075 mm 砂粒含量的影响,即由坡底至坡顶位置处,土体中砂粒含量相对增加,则使得土体的内摩擦角亦呈现增加趋势,内

摩擦角与土体中含根量之间关系相对不显著。

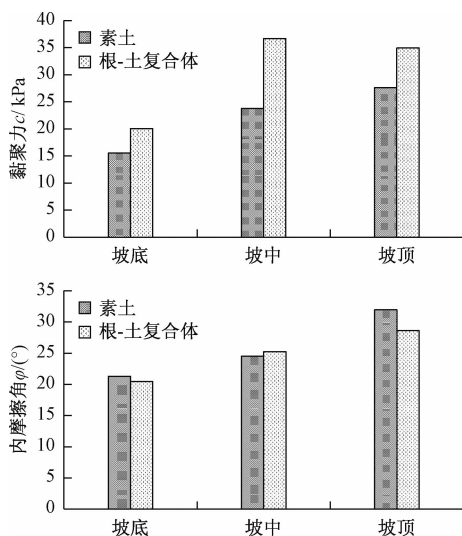


图3 素土和根-土复合体抗剪强度指标变化关系

Fig. 3 Variation in the shear strength index of soil without roots and the root-soil composite systems

综上所述,在边坡种植草本植物方法,能显著增强边坡浅层土体抗剪强度的作用;受坡面降水入渗作用的影响,坡底处含水率相对增加,草本植物根系对边坡土体抗剪强度的增强作用相对降低,与坡中、坡顶位置处的根-土复合体相比较,其抗剪强度分别降低了16.63,14.87 kPa。鉴于此,采用种植草本植物进行生态修护时,尚需加强对坡底位置处的排水作用,降低坡底土体含水率以有效地提高边坡浅层土体抗剪强度。

4 结论

(1)随坡面位置海拔的增加,未种植边坡素土和种植边坡根-土复合体试样的物理性质变化规律相一致,即密度和砂粒含量呈增加趋势,含水率和粉粒、黏粒含量呈降低趋势,2种草本其生长量指标随坡面位置上升而呈降低的趋势。

(2)直剪试验结果表明,根-土复合体的抗剪强度显著高于素土,在相同剪应力条件下,坡面相同位置处根-土复合体所产生的剪切位移量显著低于素土边坡。

(3)边坡土体抗剪强度的变化受土体物理性质及植物根系数量等多因素之间耦合作用影响,坡面3个不同位置处含水率对素土和根-土复合体黏聚力的影响相对较为显著,素土和根-土复合体的密度均与不同粒径土体颗粒含量呈显著相关性。

(4)随边坡海拔的增加,未种植边坡素土的黏聚

力和内摩擦角以及种植边坡根-土复合体的内摩擦角均表现出增大的趋势;根-土复合体的黏聚力受含水率和根系数量的影响相对较为显著,复合体的黏聚力由大至小依次为坡中、坡顶、坡底。

参考文献:

- [1] Jiahai Yuan. The future of coal in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129: 290-292.
- [2] Liu J, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. Nature, 2005, 435 (7046): 1179-1186.
- [3] Yan Wang, Li Wang, Hongbo Shao. Ecological footprint analysis applied to a coal-consumption county in China [J]. Clean Soil Air Water, 2014, 42 (7): 1004-1013.
- [4] 魏忠义, 白中科. 露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (5): 486-490. [WEI Z Y, BAI Z K. The concept and measures of runoff-dispersing on water erosion control in the large dump of opencast mine [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28 (5): 486-490. (in Chinese)]
- [5] 武强, 陈奇. 矿山环境问题诱发的环境效应研究 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 25 (5): 81-85. [WU Q, CHEN Q. An analysis of environmental effects induced by environmental problems in mines [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 25 (5): 81-85. (in Chinese)]
- [6] 胡兴定, 白中科, 张灵, 等. 黄土区大型露天矿排土场水力侵蚀计算与防治 [J]. 水土保持研究, 2017, 24 (5): 21-26. [HU X D, BAI Z K, ZHANG L, et al. Hydraulic erosion calculation and control in dumping site of large opencast coal mine in loess area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24 (5): 21-26. (in Chinese)]
- [7] Huang Lei, Zhang Peng, Hu Yigang, et al. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines [J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 638-646.
- [8] Xiaoyang Liu, Zhongke Bai, Wei Zhou, et al. Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2017, 98: 228-239.
- [9] Gastauer M, Silva J R, Junior C F C, et al. Mine land rehabilitation: Modern ecological approaches for

- more sustainable mining [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172:1409–1422.
- [10] 张丹丹, 潘德成. 露天煤矿排土场植被控制水土流失典型模式评述[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(2):90–93. [ZHANG D D, PAN D C. Typical pattern reviews of vegetation control of soil and water loss in open-cut dump [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2009, 28(2):90–93. (in Chinese)]
- [11] Vogel W G. A guide for revegetating coal minespoils in eastern United States; coal mining regions [R]. USDA Forest Service, Northeastern Forestry Experimental Stations, 1981.
- [12] 台培东, 孙铁珩, 贾宏宇, 等. 草原地区露天矿排土场土地复垦技术研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3):90–93. [TAI P D, SUN T H, JIA H Y, *et al.* Restoration for refuse dump of open-cast mine in steppe region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(3):90–93. (in Chinese)]
- [13] 史倩华, 李垚林, 王文龙, 等. 不同植被措施对露天煤矿排土场边坡径流产沙影响[J]. *草地学报*, 2016, 24(6):1263–1271. [SHI Q H, LI Y L, WANG W L, *et al.* The effect of different revegetation measures on runoff and sediment yielding of dump side slopes in open pit mine [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(6):1263–1271. (in Chinese)]
- [14] Ling Zhang, Jinman Wang, Zhongke Bai, *et al.* Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area [J]. *Catena*, 2015, 128:44–53.
- [15] 谷金锋, 蔡体久, 杨业. 高寒山区采矿迹地植被恢复研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3):29–36. [GU J F, CAI T J, YANG Y. Research on vegetation restoration of abandoned mine land in alpine areas [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):29–36. (in Chinese)]
- [16] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1):3–12. [SUN H L, ZHENG D, YAO T D, *et al.* Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1):3–12. (in Chinese)]
- [17] 刘德玉. 青海省木里煤田江仓矿区地质生态环境风险评价[D]. 北京:中国地质科学院, 2013. [LIU D Y. Risk assessment of geo-ecological environment in Jiangcang diggings Muli coal field, Qinghai Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013. (in Chinese)]
- [18] 南京水利科学研究所. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999. [SL237—1999 Nanjing Hydraulic Research Institute. Specification of soil test [S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese)]
- [19] 祁兆鑫, 余冬梅, 刘亚斌, 等. 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[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(6):1438–1448. [QI Z X, YU D M, LIU Y B, *et al.* Experimental research on factors affecting shear strength of halophyte root-soil composite systems in cold and arid environments [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(6):1438–1448. (in Chinese)]
- [20] Behzad Fatahi, Hadi Khabbaz, Buddhima Indraratna. Bioengineering ground improvement considering root water uptake model [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2):222–229.
- [21] Jiangtao FU, Xiasong HU, Gary Brierley, *et al.* The influence of plant root system architectural properties upon the stability of loess hillslopes, Northeast Qinghai, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(5):785–801.
- [22] 窦增宁, 赵玉娇, 刘昌义, 等. 模拟降雨条件下寒旱地区边坡土体位移及土压力特征[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2):117–122. [DOU Z N, ZHAO Y J, LIU C Y, *et al.* Soil displacement and earth pressure characteristics of slopes in a cold and arid region under rainfall simulation [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2):117–122. (in Chinese)]
- [23] 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. [WANG Y Z, LIU X F, ZHANG Z K, *et al.* Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(8):1405–1410. (in Chinese)]
- [24] 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3):40–45. [WANG Y Q, WANG Y J, ZHANG H J, *et al.* Impacts of soil structure on shear-resistance of soil under different land uses in Jinyun Mountain of Chongqing City [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural*

- Engineering, 2006, 22(3):40-45. (in Chinese)]
- [25] 余冬梅, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 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[J]. 盐湖研究, 2017, 25(1):37-48. [YU D M, FU J T, HU X S, *et al.* Experimental research on mechanical strength of rooted soil of halophytes in Da Qaidam salt lake area in the Qaidam basin, Qinghai Province[J]. Journal of Salt Lake Research, 2017, 25(1):37-48. (in Chinese)]
- [26] 胡夏嵩, 毛小青, 朱海丽, 等. 青藏高原植被护坡[M]. 北京:地质出版社, 2011:106-118. [HU X S, MAO X Q, ZHU H L, *et al.* Slope protection with vegetation on Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011:106-118. (in Chinese)]
- [27] 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. [LI Y Z, FU J T, YU D M, *et al.* Mechanical effects of halophytes roots and optimal root content for slope protection in cold and arid environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7):1370-1383. (in Chinese)]
- [28] 邹慧, 毕银丽, 金晶晶, 等. 采煤沉陷对植被土壤容重和水分入渗规律的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3):125-128. [ZOU H, BI Y L, JIN J J, *et al.* Mining subsidence affected to soil volume-weight and water infiltration law of different vegetation type[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3):125-128. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞

(上接第98页)

- [11] 吴普特, 周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J]. 水土保持通报, 1991(3):8-13. [WU P T, ZHOU P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991(3):8-13. (in Chinese)]
- [12] 乔勇虎, 郭东静, 陈锡云. 泾河南小河沟流域自然降雨特性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5):133-138. [QIAO Y H, GUO D J, CHEN X Y. Characteristics of Nanxiaohogou basin in Jinghe river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5):133-138. (in Chinese)]
- [13] 效文娟. 豫西山洪临界面雨量计算分析和风险预警等级预报[C]//第31届中国气象学会年会, 2014:8. [XIAO W J. Risk warning level forecast calculation and analysis of critical rainfall in mountainous areas of Western Henan[C]//The 31st Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society, 2014:8. (in Chinese)]
- [14] 韩学坤, 吴伯志, 安瞳昕, 等. 溅蚀研究进展[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4):46-51. [HAN X K, WU B Z, AN T X, *et al.* Advance of research for splash erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(4):46-51. (in Chinese)]
- [15] 肖海, 刘刚, 赵金凡, 等. 雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(4):827-835. [XIAO H, LIU G, ZHAO J F, *et al.* Characteristics of mechanical impact and slaking effect of rain drops on soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4):827-835. (in Chinese)]
- [16] 秦宁强, 赵允格. 生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9):2259-2264. [QIN N Q, ZHAO Y G. Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9):2259-2264. (in Chinese)]
- [17] 尹武君, 王健, 刘旦旦. 地表水层厚度对雨滴击溅侵蚀的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(4):115-117. [YIN W J, WANG J, LIU D D. Effect of surface water thickness on the amount of splash erosion[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(4):115-117. (in Chinese)]
- [18] 范荣生, 李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型[J]. 水利学报, 1993(6):24-29. [FAN R S, LI Z B. Slope rainfall splash and sediment transport model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(6):24-29. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞