

# 青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性

张兴玲<sup>1</sup>, 胡夏嵩<sup>2,3</sup>

(1. 青海大学 水利电力学院, 青海 西宁 810016;

2. 青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 3. 中国科学院 青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

**摘要:** 为了分析草本植物根系加筋土的抗剪特性,以青藏高原东北部黄土区生长时间为 1 a 的芨芨草根系作为加筋土的筋材,通过将根系加筋土试样制成 9 组不同含根量的扰动试样,进行了直剪摩擦试验。结果表明,当含根量与含水量一定时,根系加筋土的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的增加基本呈线性增大;当根系加筋土含水量与垂直压力一定时,抗剪强度随含根量的增加而呈增大趋势,其黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  均有不同程度的提高, $c$  值明显增加,且  $c$  值与含根量之间呈指数函数关系, $\varphi$  值变化不大;在 20.5, 61.5, 102.5, 和 143.5 kPa 这 4 种垂直压力下,根系加筋土抗剪强度和含根量之间均呈指数函数关系。说明供试种芨芨草根系可以显著提高试验区土体的抗剪强度,同时有助于增强坡体稳定性。

**关键词:** 青藏高原; 黄土区; 芨芨草; 根系; 加筋土; 抗剪特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0185-04

中图分类号: S157.1, TU43

## Shear Characteristics of Reinforced Soil of Herb Roots in Loess Area of Northeast Qinghai—Tibetan Plateau

ZHANG Xing-ling<sup>1</sup>, HU Xia-song<sup>2,3</sup>

(1. College of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 3. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China)

**Abstract:** To study the shear characteristics of the soil reinforced with herb roots, annual plant *Achnatherum splendens* roots were adopted as the web of the reinforced soil, and which were planted on the slopes of the test area. The reinforced soil of the roots was divided into nine groups of remolding proof samples according to different root amounts. The shear friction test on the samples showed that: under certain root amount and moisture content, a positive linear relationship was showed between the shear strength of the reinforced soil of roots and the normal pressure of the shear plane, as shear strength increased with the increasing vertical pressure. While under certain moisture content and vertical pressure, shear strength increased with the increasing root amount, cohesion  $c$  and internal friction angle  $\varphi$  increased as well, and an exponential relation was showed between cohesion  $c$  and root amount, but no significant changes occurred to internal friction angle  $\varphi$ . Exponential relationships were showed between the shear strength of the reinforced soil of the roots and root amount, when the vertical pressure was 20.5, 61.5, 102.5 and 143.5 kPa. This study showed that roots of *Achnatherum splendens* can improve the shear strength in the testing areas and enhance the slope stability.

**Keywords:** Qinghai—Tibetan Plateau; loess area; *Achnatherum splendens*; root system; reinforced soil; shear character

边坡防护传统的工程防护技术,一定程度上会影响到坡面原有的植被覆盖层,达不到环境保护和生态

平衡的作用<sup>[1]</sup>;然而相对于工程护坡技术,植被护坡措施是利用植被涵水固土的原理稳定岩土边坡同时

收稿日期:2012-05-14

修回日期:2012-07-01

资助项目:国家自然科学基金项目“寒旱环境植物护坡力学机理与护坡效应研究”(40762002);青海省重点科技攻关项目(2003-N-134);长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开放基金项目(CHD2011SY016)

作者简介:张兴玲(1978—),青海省贵德县人,女(汉族),硕士研究生,副教授,主要从事生态边坡工程、水利工程等方面科研与教学工作。  
E-mail: xinglingzh68@163.com.

美化生态环境的一种新技术<sup>[2]</sup>,该项技术已经能够达到保护坡面,增强边坡稳定,防治坡面水土流失、浅层滑坡等地质灾害的发生,同时起到美化和保护环境的目的<sup>[3-4]</sup>。近年来,国内外诸多学者对根系加筋坡面土体开展了大量的研究工作,其中代表性的研究者如 Wu, Watson<sup>[5]</sup>开展了大量有关根系对土壤加筋作用的前期性研究,并系统描述了根—土复合体的原位剪切试验。学者们研究认为根系通过根纤维加筋产生显著的黏聚力,从而有效提高斜坡浅层土壤稳定性,根系的黏聚力变化随着植物类型、生长时间的不同而不同<sup>[6]</sup>。研究者将根系在土壤中的分布形态概括为水平、垂直和复合分布三种,且分别对三种形态的根—土复合体进行剪切试验等相关试验研究,得出这种类型的根土复合体其固土护坡效果依次为:复合根系>垂直根系>水平根系<sup>[7-8]</sup>。诸多学者认为浅层的植草根系对边坡土体具有加筋作用<sup>[9-11]</sup>,其根系如同纤维的作用,根系的分布视为加筋纤维的分布且为三维加筋,对土体起到加筋增强作用<sup>[12-15]</sup>。

本研究依据自建试验区所处的地质地理和气候条件等诸因素,在自建试验区种植了根系发达的乡土草本植物芨芨草(*Achnatherum splendens*),并以芨芨草根系作为加筋土的筋材。为了更精确分析芨芨草根系在不同的含根量、含水量及不同外力等的作用下对增强边坡稳定性的现实意义,采用了重塑土试样,并通过直剪摩擦试验来分析芨芨草根系加筋土的抗剪特性。

## 1 研究区概况

研究区位于青海省西宁市城东中庄小寨红沟,地处青海省东北部湟水谷地中部西宁盆地,试验区地理位置处于北纬 $36^{\circ}35'$ ,东经 $101^{\circ}50'$ ,海拔约2 250 m,边坡属于人工堆积的土质边坡,土体类型为粉土,坡向半阴半阳,坡度约 $40^{\circ}$ 。区内属高原半干旱大陆性气候,年平均气温 $5.9^{\circ}\text{C}$ ,1月平均气温 $-8.5^{\circ}\text{C}$ ,7月平均气温 $17.2^{\circ}\text{C}$ ,冬季时间长,寒冷、干燥、多风;蒸发量为1 729 mm,是降水量的3.7倍,降水量年内分布极不均匀,集中在6—9月份,占全年降水量的60%左右,且多以暴雨和阵雨形式出现,具有强度大、历时短、降雨集中等特点<sup>[16]</sup>。研究区基础设施建设工程较多,已建和在建的包括青藏铁路西宁—格尔木(西格)段、兰州—西宁(兰西)高速公路<sup>[17]</sup>、兰新铁路第二双线等重要交通工程设施。研究区内深厚黄土覆盖,湿陷性黄土发育,坡度陡,植被覆盖差,周边居民活动集中,暴雨频繁,水土流失严重,洪水、滑坡等灾害现象频繁<sup>[18]</sup>。通过对研究区内88处各类地质

灾害的调查表明,地质灾害类型主要为滑坡、崩塌、泥石流3种,其中滑坡31处,崩塌19处,泥石流沟38条<sup>[19]</sup>。每逢夏季暴雨期间,各种地质灾害现象的发生,给研究区及其周围交通运输和居民正常生产和生活带来严重影响。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料

所用土样采用相同试验区不含根的土体。选择试验区生长时间为1年的草本植物芨芨草根系作为加筋材料,采样过程中,保留植株地上部分,挖取整株植物根系。制样时所用的芨芨草根系均为无病虫害的新鲜根系,试验根长范围为60~150 mm,根径范围为0.2~0.7 mm。试验制样过程中通过芨芨草根系加筋土的含根量来控制加筋数量,试验所需的根系质量,按照逐渐递增的方法,即在每次试验前首先称量鲜根重,待试验结束后,对根系清洗、烘干并分别测定加筋土的含根量,含根量用根土复合体单位体积的根质量来表示<sup>[14]</sup>,计算公式为:

$$\text{含根量} = \frac{\text{复合体内所含干根质量}(\text{mg})}{\text{复合体体积}(\text{cm}^3)} \quad (1)$$

式中:复合体体积=剪切盒体积=

$$20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 11.5 \text{ cm} = 4\ 600 \text{ cm}^3$$

### 2.2 试验方法

试验试件为重塑土,控制土体的含水量为16.3%,湿密度为 $1.46 \text{ g/cm}^3$ 。试验分素土和不同含根量的加筋土试样,共9组,制作加筋土试样时分别在土样中混合均匀加入不同质量的鲜根系,每组制作试样数为4个;装好试样后,在剪切盒上放置传压板和钢球,将汽缸的活塞对准传压板上的钢球,使试样分别在垂直压力为20.5,61.5,102.5和143.5 kPa共4种等级的压力下分级进行直剪摩擦试验,试验前拔出定位锁紧螺杆;开启数据采集处理系统,以2.67 mm/min的速率对下盒施加水平推力,使试样在上、下盒的水平接触面上产生剪切变形。

## 3 结果与分析

### 3.1 芨芨草根系垂直分布特点

试验区草本植物芨芨草具有较发达的根系,根据现场试验统计结果可知,试验中所采用的芨芨草根系随边坡土层深度的递增表现出3个显著特点,具体表现为:在0—30 cm的土层中,根系分布相对密集,随着土层深度的增加,根系密度急剧减少;在30—60 cm的土层中根系密度相对于前一深度范围呈逐渐减少变化趋势;60 cm以下的土层中根系数量相对较

少。现场进一步统计结果表明,在 0—30 cm 土层中根系数量约占总根数的 92%,在 30—60 cm 的土层中根系数量约占总根数的 6%,而 60 cm 以下的土层中根系数量仅占总根数的 2%左右。因此试验区芨芨草根系基本密集分布在边坡浅层土体中,根系与根系之间交错分布,在土体中形成根系网,通过草本植物根系的力学作用,使边坡土体构成根系加筋土<sup>[20]</sup>,从而有效提高了试验区边坡浅层土体强度,对防治浅层滑坡等地质灾害现象的发生起到了有效的抑制作用。

### 3.2 垂直压力对抗剪强度的影响

将 9 组试样的不同垂直压力  $\sigma$  和相对应的抗剪强度  $\tau$  做成散点图并拟合线性趋势线,分别得到 9 条抗剪强度线(图 1)。由图 1 可以看出,中抗剪强度线在纵轴上的截距即为土的黏聚力  $c$ ,该直线的倾角即为土的内摩擦角  $\varphi$ 。图 1 中 9 组不同含根量的抗剪强度线,当垂直压力从 20.5 kPa 逐渐增加到 143.5 kPa 时,其抗剪强度均呈线性增长。因此,当含根量与含水量一定时,抗剪强度与剪切面上的法向压力成正比,抗剪强度随垂直压力的增加基本上呈线性增大。这表明在本项试验的垂直压力范围内发生剪切破坏的根系加筋土仍然符合库仑定律。

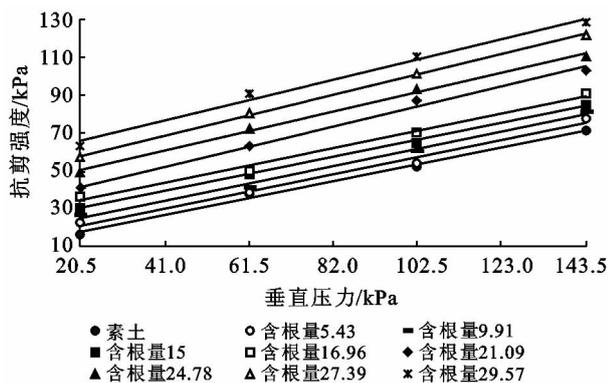


图 1 试验区 9 组合根量根系加筋土的抗剪强度线

试验区种植的芨芨草根系生长在土壤的孔隙之中时,一方面将其周围的细土粒凝聚在一起,使土壤凝聚力增大,同时根系又被其周围细土粒层层包住,而被包裹在土壤之中,如同在土体中增设了许多微细钢筋,使芨芨草根系对土壤产生显著的加筋作用。

### 3.3 含根量对抗剪强度的影响

为了研究含根量对含根系土体抗剪强度的影响程度,从图 1 可以看出,在相同的垂直压力下,芨芨草根系加筋土的抗剪强度随含根量的增加而呈不断增大的趋势。例如,在 20.5 kPa 的垂直压力下,当含根

量从 0 逐渐增加到 29.57 mg/cm<sup>3</sup> 时,其抗剪强度从 16.50 kPa 逐渐增加到 63.55 kPa。

从图 1 可知,9 种含根量所对应的 9 条抗剪强度线均不断上移且斜率渐趋增大,同时 9 条抗剪强度线在纵坐标轴上的截距也都呈不断增大趋势,这说明随着含根量增加,根系加筋土的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  都有不同程度的提高,表 1 为 9 组合根量情况下土的抗剪强度指标相对于素土的绝对增量,其中当含根量从 0 逐渐增加到 29.57 mg/cm<sup>3</sup> 时, $\varphi$  的变化范围为 23.70°~27.62°,增量  $\Delta\varphi$  为 3.92,数值变化相对较小;而黏聚力  $c$  从 8.500 kPa 增加到了 55.525 kPa,增量  $\Delta c$  为 47.025 kPa,提高幅度较内摩擦角  $\varphi$  相对显著。分析其原因是由于当含根系土体中的含根量增加时,根的总数量增多,因此根系的加筋作用显著增大,即  $c$  值明显增加,将本次试验的黏聚力  $c$  值与含根量之间做拟合曲线可知, $c$  值与含根量之间呈指数函数关系且相关系数达 0.9 以上,由该拟合关系可知,当含根量在 0~16.96 mg/cm<sup>3</sup>, $c$  值的增加幅度相对比较小,当含根量介于 16.96~29.57 mg/cm<sup>3</sup>,则  $c$  值的增加幅度相对较大。对  $\varphi$  来说,虽然根系的总数量增多,而根系与土粒间接触面积的增加并不显著,故  $\varphi$  值变化相对不大<sup>[14]</sup>。因此含根量对土体内摩擦角  $\varphi$  的影响不大,含根量使土体抗剪强度提高的主要原因是黏聚力  $c$  值增加的结果。

表 1 试验区 9 组合根量条件下土体的抗剪强度指标增量

组号	含根量/ (mg · cm <sup>-3</sup> )	试验值 $c$ /kPa	绝对增量 $\Delta c$ /kPa	试验值 $\varphi$ (°)	绝对增量 $\Delta\varphi$ (°)
1	0	8.500		23.70	
2	5.43	11.858	3.358	24.01	0.31
3	9.91	15.700	7.200	24.17	0.47
4	15.00	21.140	12.640	23.86	0.16
5	16.96	25.040	16.540	23.32	0.62
6	21.09	34.543	26.043	26.10	2.40
7	24.78	40.488	31.988	26.54	2.84
8	27.39	47.475	38.975	27.62	3.92
9	29.57	55.525	47.025	27.62	3.92

含根量对含根系土体抗剪强度的试验研究结果表明,芨芨草根系加筋土含水量与垂直压力一定时,抗剪强度随含根量的增加而增大,并且抗剪强度和含根量之间呈指数函数关系,其关系曲线如图 2 所示,由图 2 可知,在 20.5,61.5,102.5 和 143.5 kPa 这 4 种垂直压力下,芨芨草根系加筋土的抗剪强度除了受垂直压力的影响外,含根量也是重要影响因素之一,当含根量较小时,如在 0~9.91 mg/cm<sup>3</sup> 时,抗剪强

度和含根量之间基本呈线性关系;当含根量超过 $9.91 \text{ mg/cm}^3$ 后,抗剪强度和含根量之间偏离了直线关系而呈指数关系,这种关系的存在反映了研究区根系加筋土中,含根量增加到一定程度时,芨芨草根系的加筋作用相对较为显著,同时对试验区边坡的增强作用贡献相对显著地发挥出来。

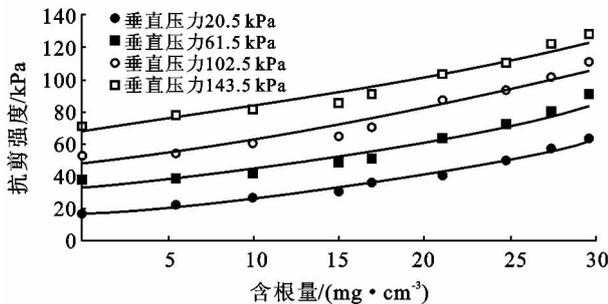


图 2 试验区根系加筋土含根量与抗剪强度的关系

## 4 结论

(1) 当含根量与含水量一定时,复合体的抗剪强度与剪切面上的法向压力呈正比,9组不同含根量试样的抗剪强度随垂直压力的增加基本呈线性增大,表明本试验采用的垂直压力范围内发生剪切破坏的根系加筋土仍然符合库仑定律。

(2) 为了研究含根量对含根系土体抗剪强度的影响程度,当根系加筋土的含水量一定时,在相同的垂直压力下,供试种芨芨草根系的加筋土的抗剪强度随含根量的增加不断增大,即随含根量增加,根系加筋土的黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 都有不同程度提高,其中, $c$ 值显著增加, $\varphi$ 值变化不大。

(3) 当复合体含水量与垂直压力一定时,黏聚力 $c$ 值与含根量之间呈指数函数关系,且相关系数达0.9以上,含根量在 $0 \sim 16.96 \text{ mg/cm}^3$ , $c$ 值的增加幅度相对较小,当含根量介于 $16.96 \sim 29.57 \text{ mg/cm}^3$ ,则 $c$ 值的增加幅度相对较大。

(4) 当复合体含水量与垂直压力一定时,影响复合体抗剪强度的重要因素之一是含根量,不论垂直压力的大小,抗剪强度和含根量之间均呈指数函数关系。当含根量较小时,即在 $0 \sim 9.91 \text{ mg/cm}^3$ 时,抗剪强度和含根量之间基本呈线性关系;当含根量超过 $9.91 \text{ mg/cm}^3$ 后,抗剪强度和含根量之间就偏离了直线关系而呈指数关系,说明此种状态下芨芨草根系的加筋作用相对较为显著,对边坡土体的增强作用可最大限度地发挥出来。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吕惠明. 我国高速公路建设现状及边坡防护研究[J]. 中国科技信息, 2009, 17(9): 74-76.
- [2] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 1-2.
- [3] Lee I W Y. A review of vegetative slope stabilization[J]. Hong Kong Inst. of Engineer, 1985, 13(7): 9-12.
- [4] 李光明. 浅析边坡工程的植被防护问题[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2008, 37(5): 249-252.
- [5] Operstein V, Frydman S. The influence of vegetation on soil strength[J]. Ground Improvement, 2000, 4(2): 81-89.
- [6] Schmidt K M, Roering J J, Stock J D, et al. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range[J]. Can. Geotech., 2001, 38(5): 995-1024.
- [7] 宋维峰. 林木根系与均质土间相互物理作用机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [8] 石明强. 高速公路边坡生态防护与植物固坡的力学分析[D]. 湖北 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [9] 王可钧, 李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687-691.
- [10] 张俊云, 周德培, 李绍才. 高速公路岩石边坡绿化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1400-1403.
- [11] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2220-2225.
- [12] 杨永兵. 东芦山环境边坡工程研究[D]. 江苏 南京: 南京大学, 2002.
- [13] 周晓, 谭红霞. 高等级公路生态景观路堑边坡防护探讨[J]. 交通科技, 2004(4): 73-76.
- [14] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤—草本植物根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31-38.
- [15] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 坡面岩体—基质—根系互作的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2074-2081.
- [16] 张忠孝. 青海地理[M]. 青海 西宁: 青海人民出版社, 2004: 317-319.
- [17] 李国荣, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原东北部黄土区灌木植物根系护坡效应的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1877-1884.
- [18] 文忠祥. 西宁市城市灾害与绿地减灾效应[J]. 青海师范大学学报: 自然科学版, 1999(1): 56-59.
- [19] 任永胜. 西宁市地质灾害及其防治对策[J]. 青海国土经略, 2004(3): 31-33.
- [20] 李国荣, 毛小青, 倪三川, 等. 浅析灌木与草本植物护坡效应[J]. 草业科学, 2007, 24(6): 86-89.