

两种方法测定根—土复合体抗剪强度试验对比研究

宋路¹, 朱海丽^{1,2}, 李国荣¹, 王涛¹, 陈文婷¹

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

摘要:为了便捷、有效且减少地表破坏面积地原位测定根—土复合体抗剪强度,采用改制后的十字剪切仪在青海大学校内原生植被生长的试验区,分别进行了三种植被覆盖度和三种含水量条件下根—土复合体原位十字剪切试验和室内直接剪切试验。试验结果显示:当土体含水量相同时,室内直剪试验测得的根—土复合体平均粘聚力为 20.39~36.49 kPa,原位十字剪切试验测得的根—土复合体抗剪强度为 35.92~102.36 kPa;当植被覆盖度相同时,室内直剪试验测得的根—土复合体平均粘聚力为 32.46~23.32 kPa,原位十字剪切试验测得的根—土复合体抗剪强度为 109.7~68.12 kPa。两种试验结果均表现为:根—土复合体的抗剪强度随植被覆盖度的增大而增大,随含水量的增大而减小。原位十字剪切试验测得的根—土复合体抗剪强度值大于直接剪切试验所测得的剪切强度值,平均增幅达到 94.23%。两种试验结果产生差异的主要原因是由于剪切过程中剪切方式、破坏面积、受剪根系的数量及破坏程度不同而造成。其中,原位十字剪切试验是在原位不破坏土体结构和根系分布的基础上,将根—土复合体完全剪破,相对更能准确、直观地反映边坡滑坡过程中的变化规律。

关键词:原位十字剪切试验;直接剪切试验;抗剪强度;覆盖度;含水量

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)04-0282-06

Comparative Research for Two Experimental Methods to Determine Soil-Root Composite Shear Strength

SONG Lu¹, ZHU Haili^{1,2}, LI Guorong¹, WANG Tao¹, CHEN Wenting¹

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xi'ning 810016, China; 2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'ning 810008, China)

Abstract: In order to determine the shear strength of soil-root composite more effectively and conveniently, and decrease the surface damage area, shear tests were carried out with different vegetation coverage and different water contents by using reformed in-situ vane shear apparatus and direct shear apparatus respectively on the campus of Qinghai University. The experimental results showed that the average cohesion of soil-root composites ranges from 20.39 kPa to 36.49 kPa under same water content by direct shear test, while the average shear strength of soil-root composites ranges from 35.92 kPa to 102.36 kPa through in-situ vane shear test. Then the average cohesion of soil-root composites ranges from 32.46 kPa to 23.32 kPa under same vegetation coverage by direct shear apparatus, while the average shear strength ranges from 109.7 kPa to 68.12 kPa by in-situ vane shear test. The results of two test methods both showed that the shear strength of soil-root composite increased with the increase of vegetation coverage, and decreased with increase of water content. The soil-root composite shear strength of in-situ vane shear test was higher than that of the direct shear test, the average increment reached to 94.23%. The main reasons for making differences between the two methods are due to various shear mode, shear failure area, the number of roots available to shear and damage degree. In situ vane shear test can reflect the change pattern more accurately and visually in the process of landslide because soil-root composites were destroyed completely and the soil structure and root distribution were not destroyed compared with the direct shear test.

Keywords: In-situ vane shear test; direct shear test; shear strength; vegetation coverage; water content

收稿日期: 2015-10-15

修回日期: 2015-11-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41302258); 青海大学“123 高层次人才培养工程”资助项目; 青海大学“地质资源与地质工程创新团队”项目(4056051201)

第一作者: 宋路(1991—), 男, 新疆哈密人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害及其防治研究。E-mail: songlu.2007@163.com

通信作者: 朱海丽(1977—), 女, 江苏溧阳人, 副教授, 主要从事植被护坡与滨河生态学研究。E-mail: qdzhuhaili@163.com

随着边坡防护技术的不断发展,生态护坡、混凝土工程护坡、土工织物护坡和植物工程措施复合护坡技术方法越来越多地被运用到公路边坡、铁路边坡、库岸边坡、自然边坡等防护与生态保护^[1-4]。由此,关于植被护坡的理论研究也逐渐深入,如植物根系增强边坡稳定性^[4-7]、根—土相互作用机理^[6,8-10]、不同植被类型的护坡作用^[11-13]、植被截雨防渗作用^[14-16]等多方面都取得了较丰富的研究成果。其中,对于植物根系增强土体强度研究方法主要采用室内剪切试验^[11,17-21]和原位剪切试验^[22-24]两种方法。室内剪切试验主要通过现场直接取样,室内制样的方法进行根—土复合体直接剪切试验^[11,17-19]或三轴压缩试验^[20-21],但在现场取样过程中,难以避免深层取样时应力释放引起的扰动^[25];与室内直剪试样相对比,原位剪切试样能包含土体的宏观结构,试验条件较接近于实际情况。然而,大多原位剪切试验使用的仪器较大、重,不便于携带,且在原地开挖创面较大,使用范围具有局限性。因此,为了更加便利、准确且减小开挖创面进行根—土复合体的原位剪切试验,本文采用改制后的十字剪切仪对根—土复合体的抗剪强度进行了测定,并与室内直剪试验进行对比分析。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设在西宁市城北区廿里铺青海大学校园内,地理坐标为 $101^{\circ}44'28''\text{E}$, $36^{\circ}43'25''\text{N}$,研究区地处青海东部湟水流域河谷,黄土高原西缘,属于高原寒冷干旱一半干旱气候,年平均气温为 7.6°C ,夏季日极端最高气温为 34.6°C ,冬季日极端最低气温为 -26.3°C ;该地降水量少,蒸发强烈,多年平均降水量为 380 mm ,蒸发量为 $1\,363.6\text{ mm}$,试验区气候属于典型的高原大陆性气候^[26]。试验区植被为原生植物,主要为赖草(*Leymus secalinus* Georgi)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和冷蒿(*Artemisia frigida* Willd. Sp. Pl.)等。

1.2 试验装置

根据一般十字剪切仪十字板头尺寸较小、量程小等特性,结合根—土复合体抗剪强度峰值及破坏特征^[27-30],对现有的十字剪切仪主要从板头尺寸、量程和使用性能等方面进行优化改制,改制后的十字剪切仪如图1所示。主要由十字板头、传感器、探杆、旋转杆及静探仪五部分组成:其中十字板头尺寸为高 115 mm ,直径 76 mm ^[24],高径比 $H/D=1.51$ ^[31];试验用探杆长 1.0 m ,直径 3.0 cm ,旋转杆长 1.0 m ,直径 2.0 cm 。试验时十字剪切板头与传感器相连,并接到探杆上;探杆为中间空心,传感器传输线直接通过探杆中间空心处从下端至上

端穿出连到静探仪上,结构简单,拆卸、携带及使用方便。试验时,通过施加扭力,在剪切时土体的抗剪强度可以通过传感器直接将剪切强度传输到静探仪中,并直接绘制出剪切强度与时间关系曲线。

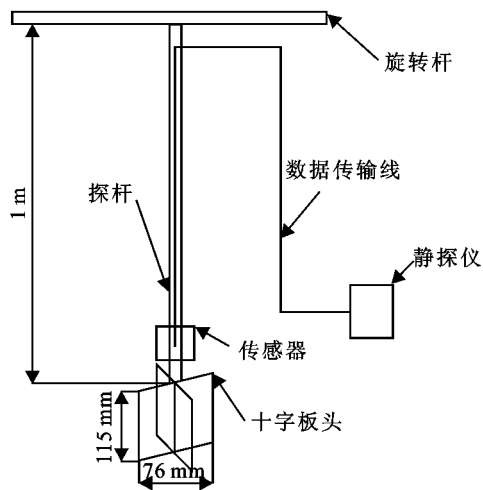
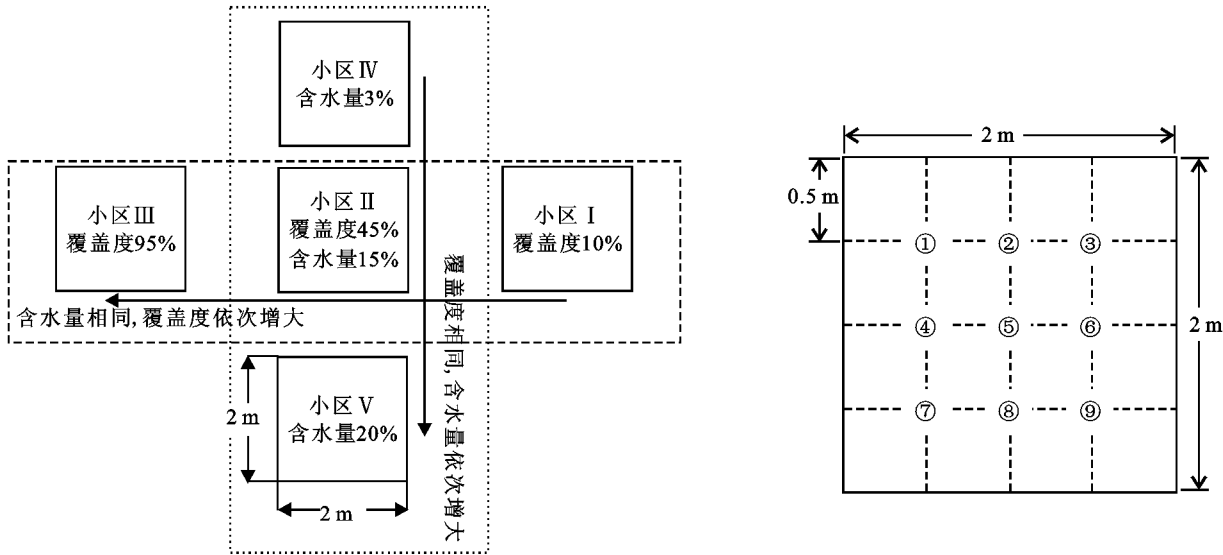


图1 十字剪切仪装置图

1.3 试验设计及方法

为了更好地验证改制后的十字剪切仪对根—土复合体抗剪强度测定结果,本研究分别进行根—土复合体的直接剪切试验与原位十字剪切试验,以此进行两种试验结果的对比和验证。在试验区内,选定植被覆盖度分别为 10% 、 45% 、 95% 的3块平地,用卷尺、木钉、细绳等工具圈定出 $2.0\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 的试验小区,圈定的每一小区覆盖度基本均一;此外选定3块面积相等的小区,通过自然蒸发或天然降雨、人工浇灌的方式设置出含水量分别为 3% 、 15% 、 20% 的3块平地,用同样方法圈定出来,以备原位十字剪切试验和直接剪切试验,试验小区设置如图2所示。

1.3.1 原位十字剪切试验 试验时间为2014年5月中旬,试验时依次在每个试验小区量出 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的对角点,并标记,标记点即为原位十字剪切试验的剪切点(共9个),即设置试验重复9次(图2);试验前用剪刀将已标记点为圆心、 10 cm 为半径范围内的地表下 0.5 cm 以上的所有植被剪除,并装到自封袋中,密封后用记号笔做好标签,带回实验室称量地上鲜重并测量其含水量。打开原位十字剪切仪电源开关,将板头用铁锤垂直贯入到剪切点土壤中,剪切深度为 12.0 cm ,静待 $2\sim 3\text{ min}$,使受贯入扰动的周围土体能基本恢复到原来的应力状态;剪切时,由两人匀速转动扭力杆,平均 10 s 转动 1° ,转动持续时间最少为 100 s ,直至根—土复合体剪切破坏。试验结束后,取出剪切破坏后的圆柱土体装入自封袋中贴上标签,密封后带回实验室,进行地下生物量统计工作。生物量统计工作包括地上植被茎叶鲜重、茎叶含水量以及地下植被根径、根系鲜重、根系含水量等测定。



注:①—⑨表示每个试验小区内设定的原位十字剪切试验点

图 2 试验小区设置及试验剪切点布置图

1.3.2 直接剪切试验 直剪试验是在 5 个试验小区采用原位取样,采样时间为 2014 年 5 月中旬,为了使试验结果更具有代表性,每个试验小区分不同方位随机设定 3 个取样点,每个取样点取样深度为 4 cm,取四个环刀试样。取得的试样装入环刀盒内后在原地用胶带塑封,防止水分散失,在 4~6 h 内带回实验室进行室内快剪试验,剪切速度为 2.4 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 生物量统计结果与分析

在实验室对试验点上以 10 cm 为半径范围内地表植被的净含量、含水量,以及剪切破坏后破坏的圆柱土体内植物根系的净含量、含水量进行测定。结

果如表 1 所示。由表 1 可得出,在含水量相同的条件下,随着植被覆盖度的逐渐增大,地上茎叶质量、地下根系质量依次增大。当植被覆盖度从 10% 增至 45%, 95% 时,其地上茎叶质量增幅依次为 331.65%,1395.29%;地下 12 cm 以内根系质量平均增幅依次为 335.35%,500.67%,在相同植被覆盖度条件下,地上植被茎叶鲜重和地下植被根系质量变化幅度较小。

2.2 不同植被覆盖度对根—土复合体抗剪强度的影响

含水量均为 15% 条件下,对试验区内植被覆盖度分别为 10%,45%,95% 的试验小区,分别进行了原位十字剪切试验和室内直接剪切试验,两种试验方法测得的根—土复合体抗剪强度结果如表 2 所示。

表 1 试验区根—土复合体物理性质指标及植被生物量指标

试验区 编号	复合体密度/ (g·cm ⁻³)	复合体 含水量/%	地上生物量			地下生物量		
			茎叶鲜重/g	茎叶含水量/%	覆盖度/%	根径范围/mm	根系质量/g	根系含水量/%
I	1.61	15	2.97	117.83	10	0.1~0.3	4.47	67.34
II	1.78	3	12.82	147.93	45	0.4~0.9	17.46	55.45
III	1.64	15	44.41	297.95	95	0.6~1.3	26.85	77.12
IV	1.60	15	12.63	209.4	45	0.4~0.9	18.78	71.37
V	1.61	20	12.91	253.4	45	0.4~0.9	19.82	82.28

表 2 不同植被覆盖度下两种试验方法抗剪强度指标

植被 覆盖 度/%	原位十字剪切试验		室内直接剪切试验		
	平均剪切 强度/kPa	增大 幅度/%	平均黏聚 力 c/kPa	增大 幅度/%	内摩 擦角 φ/(°)
10	35.92	—	20.39	—	22.7
45	56.32	56.79	27.67	35.70	22.9
95	102.36	184.79	36.49	78.96	18.3

10%植被覆盖度下的抗剪强度相比,当植被覆盖度增至 45%,95% 时,原位十字剪切试验测得的根—土复合体抗剪强度的增大幅度依次为 56.79%,184.97%;室内直接剪切试验平均粘聚力的增大幅度依次为 35.7%,78.96%,而内摩擦角无明显变化规律。由于在十字剪切试验过程中,被剪切根—土复合体未受到垂直压力作用,故垂直压力为零。根据莫尔—库伦定律,即 $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$,其中法向压力 $\sigma = 0$ 条件下,直剪试验测得的复合体粘聚力即为复合体抗剪强度。

当植被覆盖度从 10% 增大至 45%,95% 时,根—土复合体的抗剪强度也呈现增大的趋势,且两种试验方法所测得的复合体剪切强度变化趋势一致。与

因此当植被覆盖度为 10%,45%和 95%时,原位十字剪切试验的平均剪切强度较室内直剪试验平均剪切强度,增大幅度依次为 76.16%,103.54%,180.52%;由此可见,两种试验方法所测得的根—土复合体抗剪强度存在一定的差异,但随着植被覆盖度的增大,均呈现逐渐增大的趋势。两种试验方法在剪切强度值表现出的差异,一是由于剪切破坏面不同,十字剪切试验的剪切破坏面有水平和垂直两个方向上的,而直剪试验仅在水平方向上,且剪切面积仅为 30 cm²,远远小于十字

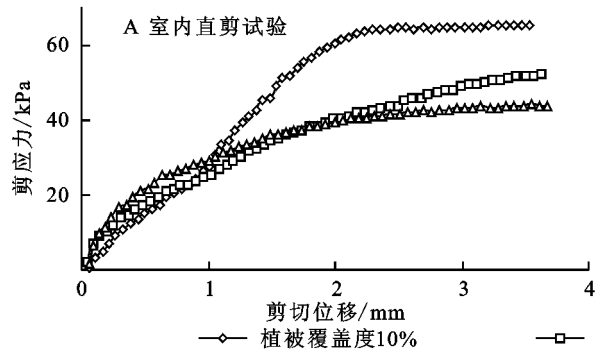


图 3 不同植被覆盖度下根—土复合体剪应力与剪切位移关系曲线

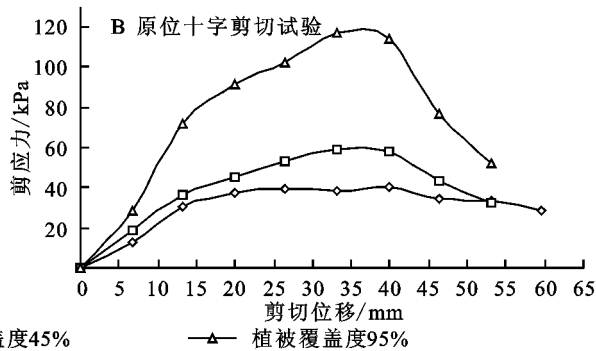
根—土复合体在剪切作用下,其应力—应变曲线亦呈现一定规律,现分别以 I、Ⅲ、V 三个试验小区中垂直压力为 50 kPa 下的直剪试验与原位十字剪切试验剪应力与剪切位移曲线为例,由图 3 可以看出,直剪试验时,在剪切位移为 0~1 mm 阶段(图 3A),剪应力与剪切位移曲线非常接近,剪切位移在 0~1 mm 阶段复合体的抗剪强度呈线性增大;之后,随着剪切位移的不断增大,复合体开始出现塑性变形,此阶段根系对土体的增强作用逐渐发挥出来,复合体中的剪应力逐渐转换成根的拉应力而被转移和扩散,当剪切位移达到 4 mm 时,复合体的抗剪强度达到了峰值;原位十字剪切试验在剪切位移在 0~15 mm 阶段(图 3B),复合体的抗剪强度呈线性增大,复合体处于弹性变形阶段,剪应力的增长速率随植被覆盖度的增大而增大;在剪切位移约达到 34 mm 时,复合体剪应力达到峰值。由于十字剪切试验过程使试样完全剪破,因此其剪切位移可达到 60 mm 左右,随着剪切继续,剪应力逐渐下降。并且根据图 3,均可以看出在含水量相同条件下,剪应力达到峰值前,在相同剪切位移条件下,植被覆盖度越大,其剪应力相应越大。

2.3 不同含水量对根—土复合体抗剪强度的影响分析

在含水量分别为 3%,15%,20%,植被覆盖度均为 45%下的试验小区Ⅱ,Ⅳ,V 分别进行原位十字剪切试验和直接剪切试验,两种试验方法测得的根—土复合体抗剪强度结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,随着含水量的增大,根—土复

剪切试验的剪切破坏面积 320 cm²;二是根系作用不同,十字剪切试验最终剪切破坏的是一个圆柱体,故剪切破坏过程中不仅承受剪切高度范围内水平方向根系的加筋、牵拉、缠绕作用,且承受剪切圆柱底面垂直或近垂直方向根系的作用,而直剪试验剪切破坏过程中不存在水平方向根系的作用;三是剪切位移量不同,直剪试验的剪切位移量为 4 mm,剪切结束时复合体未完全剪破,而十字剪切试验的剪切位移量是从试验开始直至复合体完全剪破,平均位移可达 60 mm。



合体的抗剪强度呈现减小的趋势,且两种试验方法所测得的复合体剪切强度变化趋势一致。原位十字剪切试验测得的根—土复合体抗剪强度,与 3%土壤含水量条件下的抗剪强度相比,当含水量增至 15%,20%时,抗剪强度的减小幅度为 18.69%,37.89%,而室内直剪试验测得的复合体平均粘聚力减小幅度为 14.69%,28.16%;同样根据在法向压力 $\sigma=0$ 条件下,直剪试验测得的复合体粘聚力即为复合体抗剪强度,将复合体含水量为 3%,15%和 20%时的原位十字剪切试验测得的平均剪切强度与室内直剪试验平均剪切强度比较,增大幅度依次为 70.4%,68.98%,65.77%。由此可见,室内直接剪切试验所测得的复合体抗剪强度减小幅度略小于原位十字剪切试验,原位十字剪切试验测得的抗剪强度值大于室内直剪试验。

土壤含水量/%	原位十字剪切试验		室内直接剪切试验		
	平均剪切	减小	平均黏聚	减小	内摩
	强度/kPa	幅度/%	力 c/kPa	幅度/%	擦角 φ (°)
3	109.7	—	32.46	—	28.4
15	89.2	18.69	27.67	14.69	22.9
20	68.12	37.89	23.32	28.16	24.1

分别以Ⅱ,Ⅳ,V 三个试验小区中垂直压力为 50 kPa 下的直剪试验与原位十字剪切试验剪应力与剪切位移曲线为例(图 4)。根据图 4A 室内直剪试验可以看出,在剪切位移为 0~0.5 mm 阶段,复合体的抗剪强度呈线性增大;随着剪切继续,剪应力与剪切位移表现为非线性关系。根据图 4B 可以看出,原位十

字剪切试验,在剪切位移为0~15 mm阶段,复合体的抗剪强度呈线性增大,此时,复合体处于弹性变形阶段,且剪应力的增长速率随复合体含水量的增大而减小;在剪切位移约达到30 mm时,含水量为15%和20%复合体剪应力均达到了峰值,而剪切位移达

到45 mm时,含水量为3%的复合体的剪应力最终达到峰值。这表明复合体含水量愈大,其达到剪切峰值的剪切位移相对越小,剪切强度愈低,这从一方面解释了青藏高原黄土区降雨季节,边坡滑坡现象增多的原因。

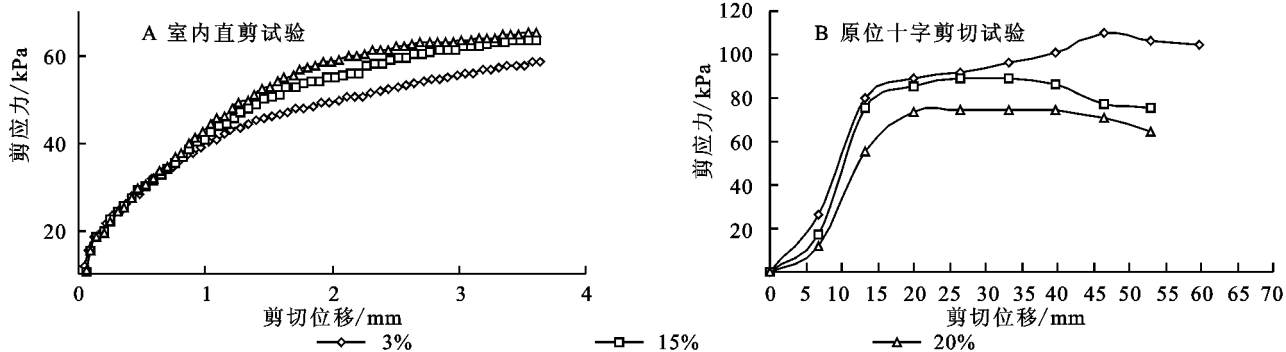


图4 不同含水量根—土复合体剪应力与剪切位移关系曲线

两种试验方法所测得的复合体剪切强度存在着一定的差异,但随着复合体含水量的增大,两种试验方法测得的复合体剪切强度均呈现减小的趋势,其主要原因是由于含水量的增加,根—土界面上的含水量变高,土颗粒间结合水膜的厚度增加而起到润滑作用,同时水分子将根系与土体及土颗粒间牢固的连接分开,摩擦力降低,由此使复合体的强度减弱。浅层边坡土体抵抗剪切破坏能力变弱,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害发生,危害人类生命财产安全。

3 结论与讨论

(1) 两种试验方法测得的根—土复合体抗剪强度在相同含水量的条件下,均随覆盖度的增大而增大;在相同植被覆盖度条件下,均随含水量的增加而减小。原位十字剪切试验抗剪强度值明显高于直接剪切试验抗剪强度值,平均增大48.94 kPa,主要原因是由于两种试验方法在试验过程中剪切方式、剪切破坏面积、受剪根系的数量以及破坏程度不同而产生。

(2) 直接剪切试验一般多是采用室内重塑土制样或原位取样并运回室内进行剪切试验,在一定程度上破坏了土体固有的结构和根系在空间的展布状态,且剪切试样较小、剪切面固定、剪切破坏不完全;而原位十字剪切试验是在原位不破坏土体结构和根系分布的基础上,将根—土复合体剪破,因此更能全面地反映根—土复合体的剪切破坏过程,其剪切位移远远超过直剪试验的4 mm,可达到70 mm左右,因此能够更直观地反映边坡滑坡过程中的变化规律。

(3) 经改制后的原位十字剪切试验仪在剪切过程中,在水平方向施加扭力,试样受到剪切作用力,当试样完全剪切破坏后试验结束,最终得到根—土复合体的抗剪强度值;而直剪试验仅对受剪试样施加水平

方向的剪切作用力,当达到固定的剪切位移时试验结束,最终通过建立垂直压力与抗剪强度峰值的函数关系式,从而可得到根—土复合体两个抗剪强度指标,即粘聚力和内摩擦角,更便于对根—土相互作用进行理论分析和对比研究。

此外,改制后的十字剪切仪测定根—土复合体的抗剪强度,但仍存在不足之处,如:加载方式为手动加载,旋转时不能更好地保持持续的匀速转动;静探仪每10 s采集一次剪切数值,不能更精确、清晰地反映剪应力变化特征;且该仪器不能通过试验直接测根土复合体的粘聚力和内摩擦角,因此目前还未能正确建立两种试验结果的函数关系式,对分析根系作用机制存在一定局限性;以上不足之处,有待进一步试验研究工作。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谭少华,汪益敏. 高速公路边坡生态防护技术研究进展与思考[J]. 水土保持研究,2004,11(3):81-84.
- [3] 孔东莲,郭小平,赵廷宁. 植被护坡技术研究[J]. 水土保持研究,2007,14(1):69-71.
- [4] 刘小燕. 根系土的工程性状研究及其在生态边坡稳定分析中的应用[D]. 江西赣州:江西理工大学,2014.
- [5] Niu J T, Liu Z Y, Jin C. Physical and numerical simulation of materials processing[M]. Switzerland: Trans Tech Publications Inc., 2008:1210-1216.
- [6] 言志信,宋云,江平,等. 植被护坡中植物根和岩土相互作用的力学分析[J]. 应用数学和力学,2010,31(5):585-590.
- [7] 卢海静,王磊,翟国良,等. 植物根—土复合体原位剪切试验研究现状及其进展[J]. 中国水土保持,2013(7):42-46.
- [8] Frydman S, Operstein V. Numerical simulation of direct shear of root-reinforced soil[J]. Ground Improvement, 2001,5(1):41-48.

- [9] 周云艳,陈建平,王晓梅.植物须根固土护坡的复合材料理论[J].武汉理工大学学报,2010,32(18):103-107.
- [10] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等.林木根系固土力学机制[M].北京:科学出版社,2008.
- [11] 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.
- [12] 程洪,颜传盛,李建庆,等.草本植物根系的固土机制模式与力学试验研究[J].水土保持研究,2006,13(1):62-65.
- [13] 胡其志,周一鹏,肖本林,等.根土复合体的抗剪强度研究[J].湖北工业大学学报,2011,26(2):101-104.
- [14] 刘艳丽,王全九,杨婷,等.植物叶片截留特征分析[J].水土保持研究,2015,22(4):143-154.
- [15] 余冬立,刘营营,邵明安,等.黄土坡面不同植被冠层降雨截留模型模拟效果及适用性评价[J].农业工程学报,2012,28(16):115-120.
- [16] 余新晓.森林植被减弱降雨侵蚀能量的数理分析[J].水土保持学报,1988,2(2):24-30.
- [17] 胡夏嵩,李国荣,朱海丽,等.寒旱环境灌木植物根—土相互作用及其护坡力学效应[J].岩土力学与工程学报,2009,28(3):613-620.
- [18] Gray D H, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983,109(3):335-353.
- [19] 格日乐,左志严,蒙仲举,等.杨柴根系提高土体抗剪特性的研究[J].水土保持学报,2014,28(4):72-77.
- [20] 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,2007,18(10):2041-2045.
- [21] 冀晓东,陈丽华,张超波.林木根系对土壤的增强作用与机理分析[J].中国水土保持,2009(10):19-21.
- [22] Wu T H, Beal P E, Lan C. In-situ shear test of soil-root systems[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988,114(12):1376-1394.
- [23] 周云艳,陈建平,杨倩,等.植物根系固土护坡效应的原位测定[J].北京林业大学学报,2010,32(6):66-70.
- [24] Micheli E R, Kirchner J W. Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 2. Measurements of vegetated bank strength and consequences for failure mechanics [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002,27(7):687-697.
- [25] 陈昌富,刘怀星,李亚平.草根加筋土的护坡机理及强度准则试验研究[J].中南公路工程,2006,31(2):14-17.
- [26] 赵惇廉.西宁市山地崩塌、滑坡灾害及其防治对策[J].青海环境,2004,4(1):29-31.
- [27] 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(Z1):3216-3223.
- [28] 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.
- [29] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区草本与灌木植物根—土相互作用力学机理及其模型研究[J].中国水土保持,2013(7):37-41.
- [30] 张兴玲,胡夏嵩.青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J].水土保持通报,2013,33(4):185-188.
- [31] 孟高头.土体原位测试机理、方法及其工程应用[M].北京:地质出版社,1997.

~~~~~  
(上接第281页)

- [10] 杨金明,范文义,李明泽,等.长白山林区森林生物量变化定量驱动分析[J].应用生态学报,2011,22(1):47-52.
- [11] 杨丽韞,罗天祥,罗松涛.长白山原始阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林及其次生林细根生物量与垂直分布特征[J].生态学报,2007,27(9):3609-3618.
- [12] 齐麟,与大炮,周旺明,等.采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响[J].生态学报,2013,33(10):3065-3073.
- [13] 徐振邦,李昕,戴洪才.长白山阔叶红松林生物生产量的研究[J].森林生态系统研究,1985(5):33-48.
- [14] 姜萍,叶吉,吴刚.长白山阔叶红松林大样地木本植物组成及主要树种的生物量[J].北京林业大学学报,2005,27:112-115.
- [15] 李明泽.东北林区森林生物量遥感估算及分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [16] 汪金松,张春雨,范秀华,等.臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型[J].生态学报,2011,31(14):3918-3927.
- [17] 董利虎.黑龙江省主要树种相容性生物量模型研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2012.
- [18] 邢邵朋.吉林森林[M].长春:吉林科学技术出版社,1988.
- [19] 王淼,关德新,王跃思,等.长白山红松针阔叶混交林生态系统生产力的估算[J].中国科学: D 辑,2006,36(A01):70-82.
- [20] 赵俊卉.长白山云冷杉混交林生长模型的研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [21] 唐凤德,韩士杰,张军辉.长白山阔叶红松林生态系统碳动态及其对气候变化的响应[J].应用生态学报,2009,20(6):1285-1292.
- [22] 闫平,冯晓川.原始阔叶红松林碳素储量及空间分布[J].东北林业大学学报,2006,34(5):23-25.
- [23] 谷会岩,代力民.人为干扰对长白山红松针阔叶混交林粗木质残体的影响[J].林业科学,2006,42(10):1-5.
- [24] 方升佐,田野.人工林生态系统生物多样性与生产力的关系[J].南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(4):1-5