

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.001.

李佳静, 杨建英, 王新, 等. 北川县典型林分根—土复合体抗剪强度[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 93-101.

Li Jiajing, Yang Jianying, Wang Xin, et al. Shear Strength of Typical Stand Root-soil Composites in Beichuan County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 93-101.

北川县典型林分根—土复合体抗剪强度

李佳静, 杨建英, 王新, 杨欣蕊, 杨春艳

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 探讨不同林分根—土复合体的抗剪强度特征和其差异性, 为更好地解决当地的水土流失问题提供理论依据。[方法] 以四川省北川县为研究区, 对当地几种典型林分的原状根—土复合体进行直剪试验, 测量其抗剪强度、土壤性质及根系特性等相关指标, 并利用主成分法进行抗剪强度影响因素的分析。[结果] (1) 不同林分根—土复合体抗剪强度差异明显。30年辛夷林(XY)抗剪强度最大, 斑竹林(BZ)抗剪强度次之, 5年柳杉林抗剪强度最小; (2) 植物根系固土效果显著, 根—土复合体的抗剪强度较素土增加值为0.13~0.99 kPa, 平均增幅为350.0%; 同时, 根—土复合体的峰值点位移、软化段长度、残余剪切强度均得到增强, 平均增幅分别为75.0%, 66.7%, 262.5%; 不同林分类型根—土复合体的能量消耗总值出现不同程度的差异, 但与其抗剪强度的大小变化基本保持一致; (3) 通过主成分分析法对抗剪强度影响因素进行综合分析得出, 除土壤容重与5~8 mm根系的干湿重外, 其余指标均与之密切相关。[结论] 植物根系可以很好地发挥固土效果, 不同林分之间根—土复合体抗剪强度差异明显。

关键词: 抗剪强度; 能量消耗; 原状根—土复合体; 影响因素

中图分类号: S157; S718.5; S727

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0093-09

Shear Strength of Typical Stand Root-soil Composites in Beichuan County

Li Jiajing, Yang Jianying, Wang Xin, Yang Xinrui, Yang Chunyan

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the characteristics and disparities in shear strength of root-soil complexes in different forest stands, and to provide a theoretical basis for addressing local soil erosion issues more effectively. [Methods] This study focuses on Beichuan County, Sichuan Province. Direct shear tests were conducted on intact root-soil complexes of several typical forest stands in the area, measuring relevant indicators such as shear strength, soil properties, and root characteristics. Principal component analysis was utilized to analyze the influencing factors of shear strength. [Results] (1) There were significant differences in shear strength among root-soil composites of different forest stands. The shear strength of 30-year-old *Magnolia liliiflora* forest (XY) was the highest, followed by Spotted bamboo *Phyllostachys bambusoides* forest (BZ), while the shear strength of 5-year-old *Cryptomeria* forest was the lowest. (2) The plant root system significantly contributed to soil stabilization, with an increase in shear strength of root-soil composites ranging from 0.13 kPa to 0.99 kPa, with an average increase of 350.0%. Additionally, the peak displacement, softening segment length, and residual shear strength of root-soil composites were enhanced, with average increases of 75.0%, 66.7%, and 262.5%, respectively. The total energy consumption of

收稿日期: 2023-09-17

修回日期: 2023-10-16

资助项目: 国家林业局林业科技成果推广计划“张家口市剪子岭林场废弃矿山生态修复综合技术”([2017]01), “张宣铁矿区干排尾矿库坝植被恢复技术研究”(2021HXFWBSBX007)

第一作者: 李佳静(1998—), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: rhlijiaj@163.com

通信作者: 杨建英(1965—), 女, 河北石家庄人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: jyyang@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

root-soil composites varied among different forest types but generally correlated with their shear strength. (3) Comprehensive analysis through principal component analysis revealed that, apart from soil bulk density and the dry and wet weights of 5~8 mm roots, all other indicators were closely related to shear strength. [Conclusion] Plant roots play a significant role in soil stabilization. The notable differences in shear strength of root-soil complexes were observed among different forest stands.

Keywords: shear strength; energy consumption; undisturbed root-soil complex; influence factor

土壤为森林生态系统的形成提供了重要的条件,是其重要的组成部分和物质基础。森林具有一定的减灾作用,森林植被对地质灾害的减灾,主要以降低浅表层滑坡灾害风险为代表,其减灾机制主要包括3个方面,第一,森林植被的降雨截留削弱了降雨对滑坡的诱发作用;第二,森林的乔灌木复合结构,形成了由土壤表层到深层的地下根系网络,对土壤和石块产生胶结作用,有效降低了滑坡发生的频率;第三,某些深根性树种的根系扎入深层母岩的裂隙内,起到抗滑桩的效果。

植物根系的“机械效应”和“水文效应”是体现植被减灾功能的两个主要方面^[1]。“机械效应”即根系对土体强度的增强效应,主要体现是深根的锚固作用和浅根的加筋作用。具体而言,根系的机械效应分为根系抗拉拔和根—土复合体抗剪切等两个方面^[2]。

对于根—土复合体抗剪切的研究方法主要有室内直剪试验、三轴试验、原位剪切试验等。林嘉辉等^[3]通过室内直剪试验,研究不同含水率条件下芒萁根系对红土层抗剪强度的影响;吕春娟等^[4]研究根系对土体的加固效应,通过制备重塑土的方式,利用全自动三轴仪进行固结不排水剪切试验;郭翬等^[5]在研究根系逐渐破坏过程中的破坏效果时,利用自制的大型直剪仪在室内对重塑根—土复合体的抗剪强度进行了测量,并与WU模型进行了对比;邢书昆等^[6]对黄土丘陵沟壑区的根—土复合体进行原位剪切试验测定,得到不同土层根—土复合体的抗剪强度。孙丽文等^[7]通过研究北川县4个树种的抗拉特性,得出:4个树种单根的抗拉强度为柳杉>桫欏>厚朴>楠竹;不同林龄的柳杉单根的最大抗拉力随林龄增加而增加;李晓凤等^[8]研究北川地区的不同柳杉树龄根系加筋作用对边坡稳定性的影响得出:随着柳杉年龄的增长,根系生物量不断增加,其根系加筋作用使边坡稳定性有所提高;宋恒川^[9]对北川县几种常见的造林树种:柳杉、厚朴、桫欏木进行根系形态研究,并选取它们的根系进行重塑土直剪试验,对复合体的剪切特性进行研究分析,得出:不同植物根系对土体的抗剪强度增强幅度不一样,相同含根量的条件下,厚朴>桫欏木>柳杉。关于北川地区大多研究都是关于植物根系本身特性,而对原状根—土复合体的

抗剪强度研究并不多。自汶川地震以来,北川地区植被破坏也很严重、浅层滑坡等地质灾害频繁,植物根系对于防止边坡破坏起着重要的作用。

有鉴于此,本研究运用自制的大型剪切设备对北川县几种典型林分根—土复合体的抗剪强度进行现场测定,并从根—土复合体剪切做功过程的角度进一步深入探究根和土之间的作用机理,有助于为地质灾害频繁的地区边坡稳定性研究、水土流失防治提供科学的理论依据。

1 研究区概况

研究区位于四川省绵阳市的北川县境内,界于103°44′—104°24′E,31°14′—32°14′N。北川县地形上随四川盆地向川西高原过渡而西北部海拔高,东南部海拔低,在此变化方向上平均每公里海拔递降46 m。县境内多山,有较大的海拔落差,最高海拔4 769 m,最低海拔540 m。降雨充沛,处于亚热带湿润季风气候区,年均降水量在1 400 mm左右。年平均气温15.6℃,年平均最高温度为16.1℃,最低温度为14.8℃^[7]。植被的分布受海拔、气候、地形和土壤等多方面的影响,大体沿等高线呈带状分布。自下而上依次为亚热带常绿阔叶林—常绿阔叶落叶阔叶混交林—针阔混交林—针叶林—亚高山灌丛草甸—高山草甸—流石滩植被^[10]。

2 材料与方法

2.1 样地设置

典型林分的根系对土壤具有固定作用,但不同植物种产生的影响不尽相同;选择能够反映区域内植被基本特征,具有代表性的地段,尽量选择坡向一致,坡度、坡位大致相似的地段设置样地。在研究区内选取不同林分的9块样地,主要树种包括柳杉、楠竹、斑竹、厚朴、辛夷、喜树、桫欏木,树龄4~30 a以上不等。针对不同树种、不同树龄的林分,我们又将其划分为4类进行对比:不同竹林(斑竹、楠竹);不同树龄(5 a, 10 a, 30 a)柳杉林;树龄30 a以上林分(辛夷、柳杉、喜树—桫欏木混交);树龄在10 a左右林分(柳杉、厚朴),各样地基本情况见表1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample land

编号	样地号	树龄/a	植被	根系分型	海拔/m	坡度/(°)	纬度 N	经度 E	坡向
1	LS ₁	5	柳杉	复合型	991	10	31°45.850′	104°31.994′	西北
2	LS ₂	10	柳杉		968	29	31°45.850′	104°31.992′	东北
3	LS ₃	30	柳杉		1056	27	31°46.906′	104°27.151′	西北
4	BZ	4	斑竹	须根型	862	20	31°46.173′	104°32.512′	东南
5	NZ ₁	8	楠竹	须根型	763	28	31°46.471′	104°25.608′	北
6	NZ ₂	7	楠竹		763	28	31°46.471′	104°25.608′	北
7	HP	10	厚朴	斜生根	1320	21	31°52.947′	104°40.699′	西北
8	XY	30	辛夷	根蘖型	1330	10	31°52.873′	104°40.571′	南
9	X-Q	30	喜树—桉木	垂直—水平	762	10	31°46.468′	104°25.66′	东北

2.2 样品采集

在样方内进行“S”型取土,取出去除地表枯枝落叶的整块土壤样块(土样),规格为 30 cm×30 cm×15 cm,一个样方内取 3 个重复,并在其样方内取相应的环刀和周围散土。剪切结束后将剪切槽中的根系取出,进行植物根系生物量和含水率的测定。

2.3 指标测定

土壤容重和含水率测定采用环刀法。土壤颗粒组成采用甲种比重计法^[11]。根系含水率采用烘干法:测定前先将根系表面土用毛刷轻轻刷去,再将其放入水中静置,待根系上面残余土壤沉降,捞出后用清水再次洗涤根系至其表面基本无土,最后捞出用滤纸吸去根系表面水分。将根系按径级分为<2 mm, 2~5 mm, 5~8 mm、>8 mm 四组进行称量。用精度为 0.01 g 的天平称取不同根系范围的根系鲜重,记作根系的湿重 M_1 ,在 80 ℃ 的烘箱内将其烘 24 h 小时至恒重,然后测定烘干后根系的重量,记作根系的干重 M_2 。

根系含水率 = $(M_1 - M_2) / M_1 \times 100\%$

抗剪强度测定采用快剪法。即保持土样在自然状况下,匀速施加水平剪切力,剪切至 30%(9 cm)时完全剪切破坏。根土复合体的抗剪强度以试样完全剪坏时的极限剪切强度表示。此方法的土体在自重条件下进行,旨在测定纯自然状况下林地表层土壤的抗剪切能力,故不施加法向应力。

剪切装置主要是由剪切箱和施力杆两部分构成,试验时转动施力杆从而带动上层剪切箱,使其以 0.3 mm/s 速度移动,每 1 cm 记录一次拉力计读数。以下是剪切装置操作示意图 1 和具体装置结构图 2。

2.4 数据处理

主要采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 进行统计分析,利用 Origin 2022 进行绘图。

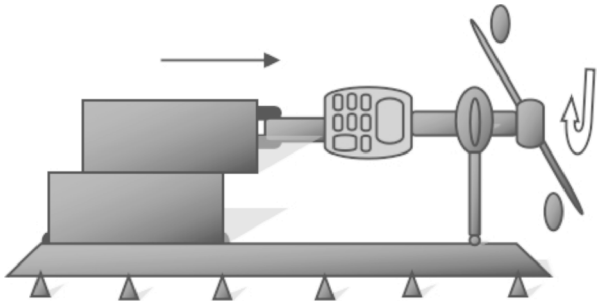
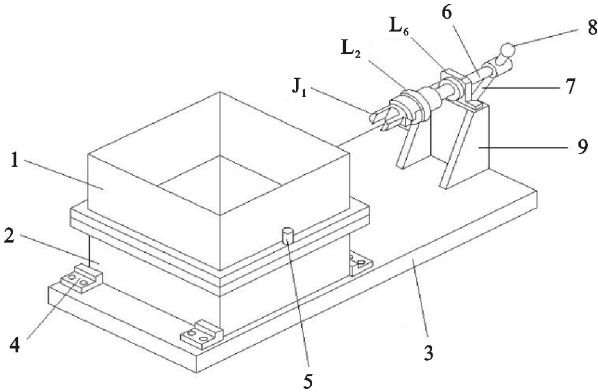


图 1 根—土复合体抗剪强度测定仪操作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the operation of the root soil composite shear strength tester



注:1 表示上层土壤样块箱体;2 表示下层土壤样块箱体;3 表示测定稳固底座;4 表示箱体固定卡槽;5 表示固定栓(2 个);6 表示施力传导杆;7 表示施力杆;8 表示施力杆端头;9 表示施力杆支撑架;L₂ 表示第一连接套管;L₆ 表示固定转换件;J₁ 表示第一应力传感器连接口。

图 2 根—土复合体抗剪强度测定仪具体装置结构图

Fig. 2 Specific device structure diagram of the root-soil composite shear strength tester

3 结果与分析

3.1 不同林分根—土复合体抗剪能力

3.1.1 根—土复合体剪切强度分析 从表 2 可以看出,在各个林分中植物根系都可以有效提高土壤抗剪强度,其抗剪强度较素土增加 0.13~0.99 kPa,平均增幅为 350.0%,残余剪切强度平均增幅为 262.5%,根系增加前者的效果更显著。各样地根—土复合体

的起始剪切强度比值为 1.4~9.1,抗剪强度比值为 1.8~7.2。各林分的抗剪强度比值与起始剪切强度比值相差较大,从侧面反映了根系具有增强土体剪切强度的作用。

在竹林(BZ,NZ₁,NZ₂)中,BZ 的抗剪强度最大,为 1.12 kPa,但起始剪切强度最小,说明剪切强度随位移变化速率较快,根系在土体破坏过程中发挥作用明显。

在柳杉纯林(LS₁,LS₂,LS₃)中,抗剪强度大小为 LS₂>LS₃>LS₁。LS₂ 的抗剪强度相比素土增加了 0.31 kPa;残余剪切强度为 0.36 kPa,相比素土增加了 0.24 kPa,根系提高土体残余剪切强度的幅度更显著。

表 2 各样地根—土复合体和素土剪切强度

Table 2 Shear strength of various root-soil complexes and plain soil

样地	起始剪切强度/ kPa	强度比值 1	抗剪强度/kPa (极限剪切强度)	强度比值 2	剪切增值/ kPa	残余剪切 强度/kPa	强度比值 3
BZ	0.13bc	1.6	1.12a	7.0	0.96	—	—
NZ ₁	0.35b	4.4	0.73ab	4.6	0.57	—	—
NZ ₂	0.27bc	3.4	0.87ab	5.4	0.71	—	—
LS ₁	0.11c	1.4	0.29b	1.8	0.13	—	—
LS ₂	0.19bc	2.4	0.47b	2.9	0.31	0.36	3.0
LS ₃	0.18bc	2.3	0.37b	2.3	0.21	—	—
HP	0.13bc	1.6	0.41b	2.6	0.25	—	—
XY	0.73a	9.1	1.15a	7.2	0.99	0.51	4.3
X-Q	0.15bc	1.9	0.42b	2.6	0.26	—	—
素土	0.08	1.0	0.16	1.0	—	0.12	1.0

注:剪切强度(kPa)=(剪切力(N)/(剪切盒横截面积(m²)×1000);剪切强度比值(1/2/3)=各样地的(起始/极限/残余)剪切强度/素土的(起始/极限/残余)剪切强度;剪切增值=各样地的抗剪强度—素土的抗剪强度。

3.1.2 根—土复合体剪切破坏延性分析 从表 3 可以看出,除 LS₂,XY 之外,根—土复合体的最大剪切强度对应的峰值点位移较素土试样有所增加,增量为 1—5 cm,增幅为 25%~125%。素土在滑动位移 4 cm 处出现剪切峰值,含根土体位移量为 2~9 cm,与前者相比峰值点位移显著后移,这与刘治兴^[12]通过对高速公路不同植物防护边坡的根—土复合体进行研究得出根—土复合体位移增量为 11.76%~135.3%的结论相似。软化段位移增量为 2 cm,残余点位移增量为 0~2 cm,残余点位移增幅较之素土变化不大。大部分样地应力应变呈现应变硬化型,极少数呈现应变软化型。由方差分析可知,除不同竹林林分中峰值点位移不显著,其余均极显著($p<0.01$)。

3.1.3 根—土复合体剪切力与剪切位移关系曲线

如图 3 所示,不同竹林条件下,根—土复合体剪切力与剪切位移关系曲线均位于素土之上,说明根系确实可以提高土体的抗剪能力。随着位移的增大,土体的剪切力达到峰值,然后趋于平稳,最终都呈现应变硬化型。在剪切位移 0~6 cm,各竹林剪切力峰值均值

在 30 a 生树木林分(XY,X-Q,LS₃)中,XY 抗剪强度最大,剪切强度增加值也最大,抗剪强度相比素土增加了 0.99 kPa;残余剪切强度为 0.51 kPa,与素土相比,提高了 0.39 kPa,根系提高土体抗剪强度的作用幅度更大。

在 10 a 生树木林分(LS₂,HP)中,LS₂ 的抗剪强度最大,为 0.47 kPa;HP 次之,两者均大于素土对照组。

由方差分析可知,只有在 30 a 生树木林分(XY,X-Q,LS₃)中,起始剪切强度与抗剪强度差异达到了显著性水平($p<0.05$),其余 3 类林分的测量指标差异均不显著($p>0.05$)。

为 70 N,相比素土增加了 56 N。与其他竹林相比,斑竹(BZ)根—土复合体剪切力峰值最大,说明复合体抵抗破坏的能力较好,四者的剪切力峰值 BZ(100.86 N)>NZ₂(65.81 N)>NZ₁(78.62 N)>素土(14.23 N)。

表 3 各样地根—土复合体抗剪延性指标

Table 3 Shear ductility indicators of various root soil composites

样地	峰值点位移/cm	软化段位移/cm	残余点位移/cm
BZ	9ab	—	—
NZ ₁	8ab	—	—
NZ ₂	9a	—	—
LS ₁	7abc	—	—
LS ₂	4cd	5	9
LS ₃	6ab	—	—
HP	7ab	—	—
XY	2d	5	7
X-Q	5bcd	—	—
素土	4	3	7

注:软化段位移=残余点位移—峰值点位移。

不同树龄柳杉林林分的根—土复合体剪切力与剪切位移关系曲线的整体变化趋势是从开始随位移的增加

快速升高之后到达峰值后逐渐变得平稳,曲线整体在素土的上方。剪切力峰值表现为10 a 柳杉林林分最高,为42.58 N,高于30 a 生的柳杉林(33.07 N)和5 a 生的柳杉林(26.02 N)。10 a 生柳杉林林分中的根—土复合体剪切力与剪切位移关系曲线呈现应变软化,其余均呈现应变硬化型,但30 a 生柳杉在达到峰值后仍有小幅度起伏,表明部分根系仍在发挥机械稳定效应。

树龄30 a 以上林分中,XY林分中的根—土复合体剪切力峰值最大,为103.17 N。三者与对照组相比,XY增强效果也最好,显著高于X-Q与LS₃,且剪切力与剪切位移关系呈现为应变软化型,软化阶段的剪切力较小,但始终高于X-Q,LS₃与对照组,峰值出现的时间较早,这说明土体过早地被剪切破坏且根系发挥作用较早,但根系在抵抗土体剪切破坏延性上发挥的作用并不好。X-Q与LS₃呈现为应变硬化型,根系发挥作用较迟,土壤延性得到了提高。

树龄在10 a 左右林分中,LS₂根土复合体剪切力峰值高于HP,且剪切力与剪切位移关系呈现应变硬化型,LS₂达到剪切力峰值的剪切位移比HP小。两者剪切力峰值远高于素土对照组,素土对照组呈现应变软化型,但软化程度较低。

3.1.4 根—土复合体剪切过程能量消耗 由图4可以看出,BZ在剪切过程中累计能量消耗值最大,为0.061 kJ/m²,NZ₁最小,为0.046 kJ/m²,BZ,NZ₁,NZ₂三者分别在剪切位移9 cm,8 cm,9 cm处剪切完全破坏。BZ在剪切过程中单位位移消耗的能量变化较大,NZ₂次之,NZ₁变化最稳定且剪切过程中达到峰值时的位移较小,所以累计能量消耗较少。

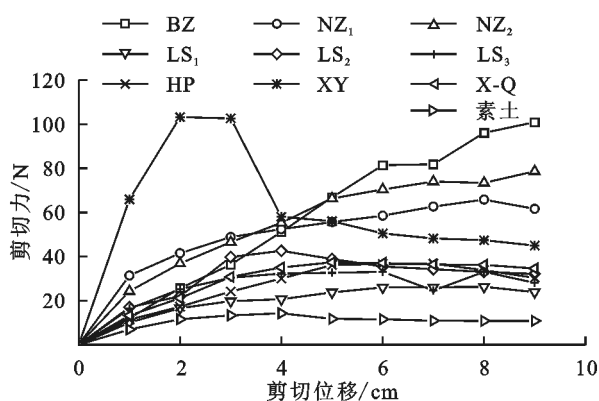


图3 剪切力—位移曲线

Fig. 3 Shear force-displacement curve

LS₃在剪切过程中累计能量消耗值最大,为0.019 kJ/m²,LS₂最小,为0.013 kJ/m²,LS₁,LS₂,LS₃三者分别在剪切位移7 cm,4 cm,6 cm处剪切完全破坏。在剪切过程的前期,LS₁和LS₃在剪切过程中单位位移消耗的能量变化较大,后面逐渐稳定,且剪切持续的时间较长,

所以累计消耗能量较多;而LS₂与之相反。

HP在剪切过程中累计能量消耗值最大,为0.019 kJ/m²,X-Q累计能量消耗值最小,为0.015 kJ/m²,HP,XY,X-Q三者分别在剪切位移7 cm,2 cm,5 cm处剪切完全破坏。HP,X-Q在剪切过程中单位位移消耗的能量变化较稳定,而XY与之相反。

综合以上分析,不同样地内根—土复合体的能量消耗总值出现不同程度的差异,但与其抗剪强度的大小趋势基本保持一致,一些样地内根—土复合体的能量消耗总值较大,可能与根系是否存在明显的主根有关。

3.2 根—土复合体抗剪强度影响因素综合评价

为了更加清楚地解释根—土复合体抗剪强度与土壤性质和根系特征之间的关系,本研究采用了主成分分析法,在减少冗余的基础上进行更全面的评价^[13]。土壤相关的因子指标分别为:土壤容重、土壤含水率、土壤颗粒0~0.002 mm、土壤颗粒0.002~0.02 mm、土壤颗粒0.02~2 mm;根系相关的指标有根系总湿重、根系总干重、根系含水率、<2 mm根系干重、2~5 mm根系干重、5~8 mm根系干重、>8 mm根系干重、<2 mm根系湿重、2~5 mm根系湿重、5~8 mm根系湿重、>8 mm根系湿重。

如表4所示,通过主成分分析发现第一主成分贡献率达44.11%,第二主成分贡献率达22.03%,第三主成分贡献率达15.96%,第四主成分贡献率达8.84%,累计方差贡献率达90.94%,信息损失为9.06%,特征值均大于1,满足主成分分析最高信息损失量的标准。第一主成分中根系总的干重和湿重、<2 mm根系的干重、2~5 mm根系的干重和湿重、>8 mm根系的干重和湿重具有较高的载荷;第二主成分中根系总含水率、土壤含水率、土壤颗粒0~0.002 mm、土壤颗粒0.002~0.02 mm、土壤颗粒0.02~2 mm具有较高载荷,但前三者载荷为负,且黏粒含量与其负相关性最强;第三主成分中5~8 mm根系的干湿重和<2 mm根系的湿重载荷量较高;第四主成分只有土壤容重。张晓明等^[14]在对重庆缙云山典型植被原状土抗剪强度分析中得出土的干密度、根系密度和<0.001 mm颗粒与抗剪强度相关,蒋定生^[15]、余宏明^[16]和赵景波^[17]等也得出类似结论。综上所述,总结为影响抗剪强度的因素除了土壤容重与5~8 mm根系的干湿重外,其余指标均与之密切相关。

4 讨论

通过对试样施加外部剪切力,使土体发生剪切形变,为了抵抗这种形变,试样内部产生抗剪力,直至试样完全破坏。整个根—土复合体及素土的剪切破坏过程

主要分为 3 个阶段:在剪切初期,根系和土体均处于弹性变形阶段,曲线的斜率较大并且基本保持稳定,这时根系变形较小,根系作用还未发挥,抗剪力主要由土体本身提供;随着剪切力的增大,试样进入塑性变形阶段,根—土复合体内部根系和土体有相对滑动的趋向,此时

抗剪力由根系自身提供的抗拉力和与土壤相互错动产生的根—土界面摩擦力转化而来,也呈现逐渐增大的趋势,曲线小幅度上升;当剪切力达到峰值后,超出了根—土复合体的抗剪能力,曲线在峰值点后趋于平缓或略微下降后趋稳(即应变硬化与应变软化)。

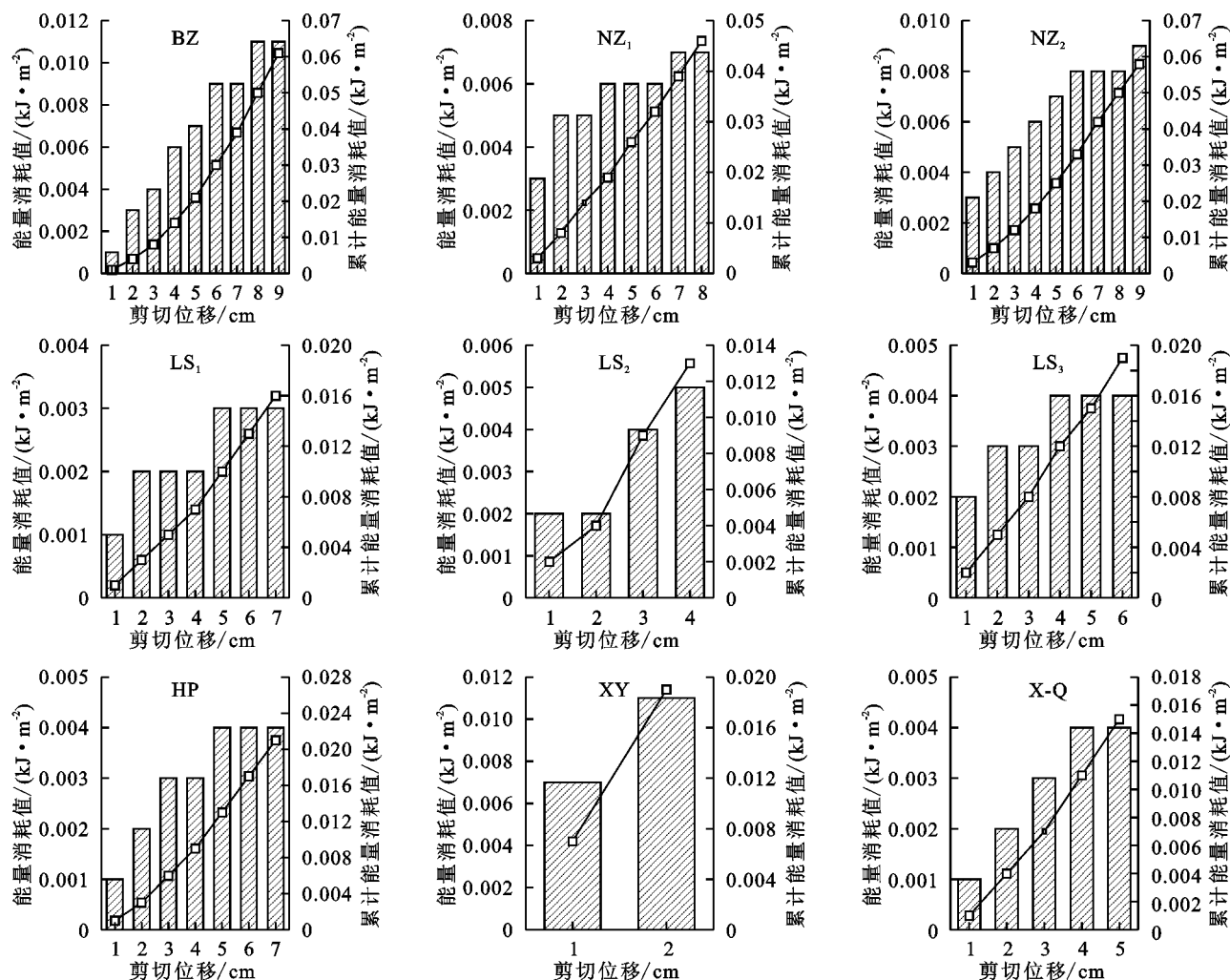


图 4 根—土复合体能量消耗过程

Fig. 4 Energy consumption process of root-soil composite

在不同年限的柳杉纯林中,10 a 柳杉林林分抗剪强度表现为最大,说明不是随着年限的增加,根—土复合体抗剪能力呈线性增加,刘杰^[18]在对柳杉根系加固试验研究中得出:种植 9 a 生的柳杉有最大的根系密度和较低的根系抗拉强度,而 30 a 生的柳杉与之相反;9 a 生植株在年龄、根系量和额外黏聚力上有较大优势,是最优的植株年龄。由于根系密度与土体抗剪能力有关^[19],因此从侧面反映出 10 a 生植株根—土复合体最大剪切力优于其他年龄。王俭成^[20]也得出相同的结论,但其抗剪强度是利用应变式直剪仪进行测定的,本研究是利用大型自制剪切设备进行野外原状土测定,所以得到的强度值两者会有所差异。田刚等^[21]通过对钱塘江地区 6 种不同林分类型及 2 个对照类型的土壤抗剪强度进行研究,发现毛竹

林和灌木林土壤抗剪性能最强。结合本文以及其他研究,说明不同植物的根系对于土体的抗剪强度的增加效果也不同。

Ekanayake J C 等^[22]提出了一种计算植物根系增强土壤抗剪强度的新模型,即能量法模型。该模型是通过分析根—土复合体和素土的应力—应变曲线,根据试样做功来估计植物根系对土壤抗剪强度的增强作用。其假设条件有 3 个:(1) 对于素土来说,随着应变的增大,其应力由零增加到峰值,而后快速减小;对于根—土复合体,其应力—应变关系曲线出现峰值后,应力随应变增加逐渐减小;(2) 应力—应变关系曲线与坐标横轴所围起来的区域面积为直剪试验中所消耗的能量;(3) 根—土复合体承受剪切应变能力的提高反映了植物根系对土壤抗剪强度的增强作用。

表 4 根—土复合体抗剪强度与根系参数和土壤性质的
主成分方差贡献率和成分矩阵

Table 4 Principal component variance contribution rate
and component matrix of root soil composite
shear strength, root parameters, and soil properties

指标	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
根系总湿重	0.99	0.15	0.04	-0.01
根系总干重	0.99	0.01	0.06	-0.08
根系总含水率	-0.28	-0.79	-0.06	-0.36
土壤容重	-0.02	0.08	0.05	0.98
土壤含水率	-0.03	-0.69	0.03	0.41
0~0.002 mm 土壤颗粒	0.27	-0.85	0.30	0.01
0.002~0.02 mm 土壤颗粒	-0.20	0.91	0.04	0.02
0.02~2 mm 土壤颗粒	-0.26	0.76	-0.38	-0.02
<2 mm 根系干重	0.84	0.28	0.39	0.15
2~5 mm 根系干重	0.97	0.10	-0.13	0.04
5~8 mm 根系干重	-0.25	0.33	0.87	-0.14
>8 mm 根系干重	0.96	0.06	-0.13	-0.14
<2 mm 根系湿重	0.57	-0.12	0.70	0.19
2~5 mm 根系湿重	0.95	-0.04	-0.19	-0.08
5~8 mm 根系湿重	-0.25	0.21	0.90	-0.22
>8 mm 根系湿重	0.96	0.06	-0.15	-0.13
特征值	7.06	3.52	2.55	1.42
方差贡献率/%	44.11	22.03	15.96	8.84
累积方差贡献率/%	44.11	66.14	82.10	90.94

注:PC₁,PC₂,PC₃,PC₄ 分别表示第一成分、第二成分、第三成分、第四成分。

在对不同林分根—土复合体抗剪强度影响因素研究中,得出其抗剪强度主要与根系总含水率、土壤含水率、土壤颗粒 0~0.002 mm 含量等因素呈负相关,相关研究^[23-28]也表明土壤抗剪强度与土壤含水量之间呈非线性负相关关系,与根系总干湿重、<2 mm 根系干湿重、2~5 mm 根系干湿重、>8 mm 根系干湿重呈正相关。祁兆鑫等^[29]在对寒旱盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素研究中得出抗剪强度与根面积比和试样含根量成正比。孙庆敏等^[30]对汶川典型植物根—土复合体抗剪强度影响因素通过灰色关联法分析得出:根—土复合体抗剪强度与根系的根重密度具有相关性。

5 结 论

(1) 植物根系固土效果显著,根—土复合体的抗剪强度较素土增加值为 0.13~0.99 kPa,平均增幅为 350.0%;同时,根—土复合体的峰值点位移、软化段长度、残余剪切强度均得到增强,平均增幅分别为 75.0%,66.7%,262.5%,土体延性得到提高。

(2) 不同林分根—土复合体抗剪强度差异明显。竹林中,斑竹林(BZ)根—土复合体抗剪强度最大,为 1.12 kPa;不同年限的柳杉纯林中,表现为 10 a 柳杉林林分的根—土复合体抗剪强度最大,为 0.47 kPa;同种年限(30 a)不同树种,30 a 辛夷林(XY)抗剪强度最大,为 1.15 kPa;同种年限(10 a)不同树种表现出 10 a 生柳杉林(LS₂)根—土复合体抗剪强度高于 10 a 生厚朴林(HP)。不同林分根—土复合体的能量消耗总值出现不同程度的差异,但与其抗剪强度的大小变化基本保持一致。

(3) 通过主成分分析法对抗剪强度影响因素进行综合分析得出:除土壤容重与 5~8 mm 根系的干湿重外,其余指标均与之密切相关。

参考文献(References):

[1] Gonzalez-Ollauri A, Munro K, Mickovski S B, et al. The ‘rocket framework’: A novel framework to define key performance indicators for nature-based solutions against shallow landslides and erosion[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021,9:676059.

[2] 丁雪坤,张守红,王玉杰,等.含植被坡体稳定性的年际变化规律研究[J].*中国水土保持科学*,2017,15(2):18-24.
Ding X K, Zhang S H, Wang Y J, et al. On the inter-annual variability of vegetated slope stability[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017,15(2):18-24.

[3] 林嘉辉,黄梦元,张莉婷,等.芒萁根系对崩岗红土层土壤抗剪强度的影响[J].*水土保持学报*,2020,34(6):159-165.
Lin J H, Huang M Y, Zhang L T, et al. Effects of *dicranopteris dichotoma* roots on soil shear strength of red soil layer in Benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(6):159-165.

[4] 吕春娟,陈丽华,陈卫国,等.根土复合体的抗剪特性研究[J].*灌溉排水学报*,2016,35(3):13-19.
Lv C J, Chen L H, Chen W G, et al. Study on Shear Performance of Soil-root Composite[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016,35(3):13-19.

[5] 郭翬,王云琦,王青兰,等.根系逐渐破坏过程中固土效果研究[J].*北京林业大学学报*,2015,37(6):85-92.
Guo H, Wang Y Q, Wang Q L, et al. Change of soil fixation effects in the process of gradual damage[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015,37(6):85-92.

[6] 邢书昆,张光辉,朱平宗,黄土丘陵沟壑区退耕年限对根—土复合体抗剪强度的影响[J].*水土保持学报*,2021,35(4):41-48,54.
Xing S K, Zhang G H, Zhu P Z. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(4):41-48,54.

- [7] 孙丽文,史常青,赵廷宁,等.北川县4个树种根系抗拉特性研究[J].四川农业大学学报,2014,32(1):34-40,58.
Sun L W, Shi C Q, Zhao T N, et al. Characteristics of root tension resistance of four trees in Beichuan county [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2014, 32(1):34-40,58.
- [8] 李晓凤,陈丽华,宋恒川,等.柳杉不同树龄根系加筋作用对边坡稳定性的影响[J].四川农业大学学报,2013,31(3):258-263.
Li X F, Chen L H, Song H C, et al. Reinforcement effects of *Cryptomeria fortunei* roots of different ages on slope stability [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2013,31(3):258-263.
- [9] 宋恒川.北川县四个树种根系的分布及力学性能研究[D].北京:北京林业大学,2013.
Song H C. Study on the distribution and mechanical properties of root system of four tree species in Beichuan county[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [10] 王俭成,杨建英,史常青,等.北川地区典型林分土壤抗蚀性分析[J].水土保持学报,2013,27(1):71-75.
Wang J C, Yang J Y, Shi C Q, et al. Analysis of soil anti-erodibility of different typical forests in Beichuan area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1):71-75.
- [11] 韦杰,史炳林,李进林.紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J].农业工程学报,2016,32(20):153-160.
Wei J, Shi B L, Li J L. Response of soil shear strength to soil water content in purple soil slope cropland bunds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(20):153-160.
- [12] 刘治兴,杨建英,杨阳,等.高速公路不同植物防护边坡根土复合体抗剪能力研究[J].生态环境学报,2015,24(4):631-637.
Liu Z X, Yang J Y, Yang Y, et al. Research on the root-soil composite anti-shearing strength on expressway slope in different plant protection measures[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015,24(4):631-637.
- [13] 颜哲豪,谌芸,刘泉宏,等.喀斯特坡地2种地埂篱根-土复合体抗剪和抗冲性能综合评价[J].生态学报,2022,42(5):1811-1820.
Yan Z H, Chen Y, Liu X H, et al. Comprehensive evaluation of shear strength and anti-scourability of root-soil complex of two grass hedgerows in karst slope land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1811-1820.
- [14] 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.
Zhang X M, Wang Y J, Xia Y P, et al. Shear strengths of undisturbed and remolded soils of typical vegetations in Jinyun mountain of Chongqing city [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006,22(11):6-9.
- [15] 蒋定生.黄土高原水土流失与治理模式[M].北京:中国水利水电出版社,1997:99-105.
Jiang D S. Soil erosion and control models in the Loess Plateau [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1997:99-105.
- [16] 余宏明,胡艳欣,唐辉明.红色泥岩风化含砾粘土的抗剪强度参数与物理性质相关性研究[J].地质科技情报,2002,21(4):93-95.
Yu H M, Hu Y X, Tang H M. Research on the relativity between the strength of red mudstone weathered pebble soil and physical characters [J]. Geological Science and Technology Information, 2002,21(4):93-95.
- [17] 赵景波.淀积理论与黄土高原环境演变[M].北京:科学出版社,2002.
Zhao J B. Deposition theory and environmental evolution of Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [18] 刘杰.柳杉根系加固边坡土壤的试验研究[J].路基工程,2017(3):103-106.
Liu J. Experimental Study on the soil of reinforced slope of *cryptomeria fortunei* root system [J]. Subgrade Engineering, 2017(3):103-106.
- [19] 胡文利,李为萍,陈军.不同含水率水平下根-土复合体抗剪强度试验研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2011,32(1):215-219.
Hu W L, Li W P, Chen J. The root-soil composite shear strength in different soil moisture levels [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2011,32(1):215-219.
- [20] 王俭成.北川地区典型林分土壤抗蚀性与抗冲性研究[D].北京:北京林业大学,2013.
Wang J C. Research on soil anti-erodibility and soil anti-scourability of typical forests in Beichuan area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [21] 田刚,张晓勉,张金池,等.钱塘江源头地区主要植被类型土壤抗蚀性研究[J].浙江林业科技,2015,35(3):31-35.
Tian G, Zhang X M, Zhang J C, et al. Soil anti-erodibility under different vegetation types in Kaihua [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2015,35(3):31-35.
- [22] Ekanayake J C, Phillips C J. Slope stability thresholds for vegetated hillslopes: A composite model [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002,39(4):849-862.
- [23] 王鑫皓.林分类型和根系构型对斜坡稳定性的影响

- [D].北京:北京林业大学,2021.
- Wang X H. Effect of forest stand type and root architecture on hillslope stability[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [24] 张红霞,彭新华,郭自春,等.土壤含水量和容重对砂姜黑土抗剪强度的影响及其传递函数构建[J].土壤通报,2022,53(3):524-531.
- Zhang H X, Peng X H, Guo Z C, et al. Influence of soil water content and bulk density on shear strength of Shajiang black soil and its pedo-transfer function construction[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3):524-531.
- [25] 刘建平,周花玉,何天奎,等.含根量对根-土石复合体的抗剪强度影响试验初探:以垂丝海棠为例[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S1):3618-3628.
- Liu J P, Zhou H Y, He T K, et al. Experimental study on the influence of root content on the shear strength of root-soil-rock composite: taking *Malus halliana koehne* as an example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(S1):3618-3628.
- [26] 曹玉莹,苏雪萌,周正朝,等.黄土高原典型草本植物根-土复合体抗剪性能的空间差异性及其影响因素研究[J].草业学报,2023,32(5):94-105.
- Cao Y Y, Su X M, Zhou Z C, et al. Spatial differences in, and factors influencing, the shear strength of typical herb root-soil complexes in the Loess Plateau of China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(5):94-105.
- [27] 孙术发,王敬凯,赵浩然,等.大兴安岭土壤抗剪强度及影响因素研究[J].森林工程,2022,38(6):104-114.
- Sun S F, Wang J K, Zhao H R, et al. Study on soil shear strength and influencing factors in Daxing'an mountains[J]. Forest Engineering, 2022,38(6):104-114.
- [28] 杨馥铖,刘昌义,胡夏嵩,等.黄河源区不同退化程度高寒草地理化性质及复合体抗剪强度研究[J].干旱区研究,2022,39(2):560-571.
- Yang F C, Liu C Y, Hu X S, et al. Study on physical and chemical properties and shear strength characteristics of root-soil composite system with different degradation degrees of alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2022,39(2):560-571.
- [29] 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.
- [30] 孙庆敏,葛永刚,陈攀,等.汶川典型植物根-土复合体抗剪强度影响因素评价[J].水土保持学报,2022,36(1):58-65.
- Sun Q M, Ge Y G, Chen P, et al. Evaluation of factors affecting the shear strength of root-soil composite of typical plants in Wenchuan county[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):58-65.

~~~~~

(上接第92页)

- [25] Tang Z S, Deng L, An H, et al. The effect of nitrogen addition on community structure and productivity in grasslands: A meta-analysis[J]. Ecological Engineering, 2017,99:31-38.
- [26] Lee M, Manning P, Rist J, et al. A global comparison of grassland biomass responses to CO<sub>2</sub> and nitrogen enrichment[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2010, 365(1549):2047-2056.
- [27] 韩小雨,郭宁,李冬冬,等.氮添加对内蒙古不同草原生物量及土壤碳氮变化特征的影响[J].草业学报,2022,31(1):13-25.
- Han X Y, Guo N, Li D D, et al. Effects of nitrogen addition on soil carbon and nitrogen and biomass change in different grassland types in Inner Mongolia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022,31(1):13-25.
- [28] Luo Q P, Gong J R, Yang L L, et al. Impacts of nitrogen addition on the carbon balance in a temperate semiarid grassland ecosystem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017,53:911-927.
- [29] Bai W M, Wang Z W, Chen Q S, et al. Spatial and temporal effects of nitrogen addition on root life span of *leymus chinensis* in a typical steppe of Inner Mongolia[J]. Functional Ecology, 2008,22(4):583-591.
- [30] 于雯超,宋晓龙,王慧,等.氮沉降对草原凋落物分解的影响[J].农业资源与环境学报,2013,30(6):14-19.
- Yu W C, Song X L, Wang H, et al. Advances in the effect of nitrogen deposition on grassland litter decomposition[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2013,30(6):14-19.