

基于两种计算模型的油松与元宝枫根系固土效能分析

朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 张会兰, 李云鹏, 刘勇

(北京林业大学 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: [目的] 定量分析北方常见植物(油松、元宝枫)根系对提高土壤抗剪能力的作用, 为更好地评价植物根系固土效能提供理论基础。[方法] 选取不同根系面积比(RAR)的油松(*Pinus tabulaeformis*)根土复合体、元宝枫(*Acer truncatum*)根土复合体及素土分别进行了不同垂直压力下的直剪试验, 得出了油松根土复合体、元宝枫根土复合体及素土的抗剪强度增量。并通过根系的拉伸试验测定了植物根系的抗拉强度, 同时使用 W_u 的根土复合体模型和 Pollen 的纤维束模型对抗剪强度增量进行模拟并与实际测定的抗剪强度增量进行对比分析。[结果] (1) 根系主要通过增强土壤的黏聚力来增强土壤的抗剪切强度; (2) 植物根系抗拉强度、拔出强度与根系直径都符合幂函数关系, 抗拉强度和拔出强度大小存在阈值, 根系大于 2 mm 时, 根系拔出强度小于根系抗拉强度, 小于 2 mm 时则反之; (3) W_u 的根土复合体模型高估植物根系固土效果值平均为 26.81%, 而纤维束模型对根系提高土壤抗剪强度则平均高估 9.82%。[结论] 相对于 W_u 模型, 纤维束模型对土壤的固土效果的计算更为准确。

关键词: 抗剪切应力; 植物根系; 根土复合体; 纤维束模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0277-06

中图分类号: TU 411.7

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.048

An Analysis on Soil Physical Enhancement Effects of Root System of *Pinus Tabulaeformis* and *Acer Truncatum* Based on Two Models

ZHU Jinqi, WANG Yunqi, WANG Yujie, ZHANG Huilan, LI Yunpeng, LIU Yong

(Beijing Forestry University, Soil and Water Conservation of Beijing Engineering Research Center, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Analyzing the effects of two common plants' root system on improving soil shear resistance quantitatively in order to provide some theoretical bases for the evaluation of soil enhancement effect of plant's root system. [Methods] Direct shear and two kinds of model (W_u model, the fiber bundle model) were conducted to compare the shear strengths of root-soil composites with different RAR (root area ratio) of *Pinus tabulaeformis* and *Acer truncatum* with that of plain soil. A universal testing machine was used to measure the root's pull-out strength and tensile strength. [Results] (1) Mainly through enhancing soil cohesion, roots could enhance soil shear strength; (2) The relationship between root strength (include tensile strength and pull-out strength) and root diameter agreed with power function. When root diameter $D > 2$ mm, pull-out strength was less than tensile strength, and vice versa; (3) The W_u model overestimated the shear strength of root-soil composite at an average of 26.81%, and the fiber bundle model also overestimated with an average of 9.82%. [Conclusion] As comparing to the W_u model, the fiber bundle model is more accurate in describing the effect of root's soil enhancement.

Keywords: shear stress; root system; root-soil composite; fiber bundle model

天然土壤属于脆性材料, 有一定的抗压能力, 但几乎没有抗拉能力, 抗剪切能力也比较低。根土复合体中的植物根系, 可相当于钢筋和泥土中钢筋的作用, 使土体与根系形成被纤维加强的复合材料。根系相对土体具有较高的抗拉强度和延性, 且根系与土体

在变形模量方面存在着巨大的差异, 所以当含根土受外力作用变形时, 根系和土体间存在相互错动的趋势, 这种错动被根系与土体界面上摩擦黏结产生的黏结力所抵抗, 而使根系受拉。所以在土体进入塑性状态后, 土体中剪应力逐渐向根系转移并被扩散, 从而

收稿日期: 2014-06-11

修回日期: 2014-06-18

资助项目: 科学研究与研究生培养共建项目“北京山区生态风险监测与评估技术研究”

第一作者: 朱锦奇(1991—), 男(汉族), 江西省修水县人, 博士研究生, 研究方向为山地灾害防治。E-mail: zhu-jinqi@163.com。

通信作者: 王云琦(1979—), 男(汉族), 山西省灵石县人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn。

提高根土复合体的抗剪强度,延缓了根土复合体塑性区的开展及渐进开裂面的出现,增加了根土复合体的延性,最终提高边坡的稳定性。同时对于植物覆盖度不高的边坡,植物的细根根系能较快生长在浅层土壤中,减小了土壤径流量与产沙量^[1]。植物根系中直径小于 2 mm 的细根数量仅占植物总根系量的 5%,却保持了土壤中 90% 的水分和有机质。浅层土壤的细根对于浅层滑坡的控制起着十分重要的作用^[2]。植物细根固土效能的研究主要集中在细根根系对土壤抗剪强度的增加值 ΔS 上,通过对土壤抗剪强度增加值 ΔS 与直剪试验抗剪强度值的对比,分析 W_u 所用的模型对抗剪强度估计值的准确程度。 W_u 模型假定当土受剪切时,穿过剪切面的所有根系在同一时刻全部达到最大抗拉强度,即同时被拉断,因此研究者们认为 W_u 模型高估了植物根系固土的效果。 W_u 模型中存在的一个假设是植物根系在土壤被剪切时都是被拉断的,在试验中却发现大量根系在土壤被剪切过程中只是被拔出,模型中的根系强度应该使用根系的抗拉强度还是根系的拔出强度一直都是未解决的问题。Pollen 等^[3]在对河岸含根土的室内和野外强度测试中发现在所有的根系在理论上达到抗拉强度之前就已被破坏。Reinstenberg^[4]在根的拉拔试验,Docker 等^[5]在根的拉拔测试和含根土的直剪试验中证实了根系的逐渐破坏现象。Pollen 提出了一个比 W_u 模型更加复杂的纤维束模型,对以后研究定量计算的根系固土模型提供了依据。虽然已有众多研究者称 W_u 模型高估了植物提高土壤抗剪强度值,但是缺少 W_u 模型与其他模型(如纤维束模型)的对比研究。本文通过油松(*Pinus tabulaeformis*)与元宝枫(*Acer truncatum*)细根和整根的直剪试验,得到了这两种树种的根系固土效果以及根面积比率与根系增强土壤抗剪强度的关系。通过根系的拉拔试验得出根系抗拉强度,把根系抗拉强度与根系面积比率分别代入 W_u 的根土复合体模型和 Pollon 的纤维束模型,计算出模型的模拟结果并与直剪试验的结果进行对比,得出一种能够更为客观地评估细根固土效能的模型。

1 试验区概况

试验选择的树种为油松与元宝枫两种北方地区的常见造林树种。植物根系样本采集于北京林业大学鹫峰国家森林公园,鹫峰国家森林公园坐落于北京市海淀区北安河境内,横跨海淀和门头沟两区,距市区约 18 km,东经 116°28',北纬 39°54',总面积约 811.73 hm²。公园属太行山脉,园内最低海拔

100 m,最高山峰海拔为 1 153 m,为华北暖温带半湿润半干旱大陆性气候,年平均气温 12.2℃,植物生长期为 220 d,年平均降雨量 700 mm,多集中在 7—9 月。特殊的地理位置和气候,为公园内的林场内的动植物提供了很好的自然生长条件。

2 研究材料与方法

2.1 植物根系采集

为了减小植物之间的相互影响,在同一片林地内,选择生长状况良好、胸径 5 cm 左右、周围 300 mm 范围内无其它植物的树木。开挖深度为 0.6 m,采取人工挖掘的方式以防止在采集样本时对根系的损害,保证根系的整体结构。待割除茎基部以上部分并用刷子刷去附着于根系上的土块后,装于黑色塑料袋中带回实验室进行后续试验,采样时间为 2012 年 7 月 28 日至 2012 年 8 月 5 日。共挖取 6 株植物整根样品,取根系直径 0.5~2 mm 的细根,剪为高 2 cm 的小段,为细根直剪试验做准备。同时剪下直径为 0.5~7 mm 长度大于 6 cm 的植物根系,为植物根系强度的测定做准备。

2.1.2 土壤试样制备 采样区的土壤为砾石土,故本次试验采用重塑土进行制样,土壤样品和植物根系样品同时采集。土壤试样的高度为 20 mm,直径为 61.8 mm。把风干土过 2 mm 的筛孔,称取适量过筛风干土,依试验要求的含水量计算所需的水量,然后将所取土样平铺于不吸水的盘内,用喷雾设备喷洒预计的加水量,充分搅拌后装入干燥器盖紧,浸润一昼夜备用。依试验要求的干密度,将一定重量的土样放入装样器,分层击实。本次试验所加入的根系为垂直根系。由于受试样规格的限制,试样的高度为 20 mm,将野外所采回的根系按不同的直径分别剪成长 2 cm 的垂直根系,然后按照含根量的多少,将剪好的油松和元宝枫根系垂直放置在土柱中间。总共制备 13 组试验,12 个试验组和 1 个对照组,土壤样品制备时间为 2012 年 8 月 6 日。

2.1.3 研究方法 通过小尺寸根系式样的室内直剪试验和植物整根的野外直剪试验,对 W_u 模型与 FBM 模型的评估效果进行对比分析。该试验具有简单、经济、易行等特点,而且还能获得比较好的试验结果。试验时间为 8 月 7 日至 8 月 15 日。

小盒直剪情况详见如表 1,每组试验至少取 4 个试样,将击实后的试样放入剪切盒中,调节变速箱,控制剪切速率为 4 r/min,分别采用 100,200,300 和 400 kPa 这 4 种垂直压力进行直剪试验,对应的量力环系数为 1.813。分别对不同含根量的式样及素土

试件进行剪切试验。根系的面积比率(RAR)为剪切面上根系面积与剪切面总面积的比值。编号为①的样品为无根土的对照组。编号②,③,④土样中插入了油松根系,其中②和④中分别插入了2条与8条平均直径为1.1 mm的油松根系,用于对比不同根系面积比率对根土复合体抗剪强度的影响。③与④分别插入了根系平均直径为1.5与1.1 mm的油松根系,为控制根系面积比率接近,控制数量分别为4和8,为对比在相同根系面积比率下,根系数量对根土复合体抗剪强度的影响。同理设置⑤,⑥,⑦的元宝枫根系样品。每组试验重复4次,重复过程都使用同样的击实器击实土壤,每次试验都从冰箱中取出新使用新鲜的植物根系进行试验。该测试在8月7日至8月8日完成。

表1 小盒试样设计

样品类型	编号	平均直径/mm	根数/根	根面积比率/%	含水量/%
素土	①	0	0	0	20.8
含油松根	②	1.1	2	0.063 4	20.8
	③	1.5	4	0.235 6	20.8
	④	1.1	8	0.253 5	20.8
含元宝枫根	⑤	1	2	0.052 4	20.8
	⑥	1.4	5	0.256 6	20.8
	⑦	1	10	0.261 8	20.8

整根直剪的剪切系统主要由上下直剪盒、上盒盖、挡板、导轨组成,总高度为200 mm,其中上盒为100 mm,下盒为100 mm,盒体材料为5 mm厚度的PVC板,盒体内部抛光打磨。下直剪盒通过螺栓与钢底板固定在地面上,整个直剪试验中,下直剪盒固定不动。经过反复测试自由滑动时摩擦力平均为4.6 N,在记录测力计数字后,将摩擦力减去后计算根土复合体抗剪强度。

2.2 根系强度测定

2.2.1 植物根系抗拉强度测试 存在于土壤中的植物根系在土体发生破坏的时,根系所产生的两种破坏形式分别是:根系被拔出(根系表面与土壤之间的键合力);根系被拉断(根系本身的强度)。根系抗拉强度符合公式:

$$T_b = k_b \cdot d_b^{2.03} \quad (1)$$

式中: T_b ——根系的抗拉强度(MPa); k_b ——系数; d_b ——根系直径(mm)。

采用单柱式电子拉力试验机对植物根系的抗拉强度进行测试,拉伸速度为2 mm/s,根系长度为10 cm。为保护两端夹具夹住的根系不至于在拉伸中首先破坏,使用电胶布绑住根系两端。试验成功率约为30%。

2.2.2 植物根系拔出强度测试 根系拔出时候强度,也就是使根系与土壤之间的键合发生破坏的附加荷载的大小,该强度与土壤的性质和根系表面的粗糙度程度有关^[6]。

$$F_p = 2\tau' L/d \quad (2)$$

式中: F_p ——拔出强度(MPa); τ' ——正切压力的最大值(MPa); L ——根系的长度(mm)。

根系拔出强度也通过万能测试仪测试而来,将长度10 cm,不同径级的植物根系埋入土壤中,控制土壤的紧实度为71 kPa,通过万能测试仪,每次拔出速度为2 mm/s。为保护根系,与抗拉强度测试时一致,在根系夹具的一端缠上电胶带。试验成功率约为60%。

2.3 增强模型

2.3.1 根土复合体模型 Wu和Waldron的根土复合体模型是用于分析和计算根系固土效果的常用模型,该模型的计算基于土壤的黏聚力与内摩擦角^[7]。该模型认为植物根系增强土壤抗剪强度主要体现在增强土壤黏聚力上,根系增强量(ΔS)与素土强度相加得到根土复合体的抗剪强度。

$$S = c + \Delta S + \sigma_N \tan \varphi \quad (3)$$

式中: S ——土壤的抗剪强度(kPa); c ——黏聚系数(kPa); σ_N ——荷载(kPa); φ ——内摩擦角; ΔS ——根系增加的抗剪强度值(kPa)

$$\Delta S = T(A_R/A) \times 1.2 \quad (4)$$

式中: T ——植物根系强度(kPa); A_R/A ——根系面积比例。其中1.2为模型中校正后的根系系数。根据简单Wu的垂直根系模型,根系增强的抗剪强度仅仅与根系的数量和根系的强度相关。

$$\Delta S = \frac{1.2}{A_{\text{shearplane}}} \overline{T_r} \sum_{i=1}^n A_i \quad (5)$$

式中: $A_{\text{shearplane}}$ ——剪切面的大小; ΔS ——在 $A_{\text{shearplane}}$ 的剪切面上的所有根系所能产生的抗剪强度增强总量; $\overline{T_r}$ ——根系的强度为平面上根系的平均强度。

2.3.2 纤维束模型 纤维束模型的基本原理就是纤维束的总强度小于单个纤维强度的总和。当纤维束受到外加的荷载作用,荷载并不会平均的分配在所有的纤维上,而在纤维束发生破坏的时,同样也不会所有的纤维束同时发生破坏。纤维束模型为了解决计算中的这些问题,增加一个赋值荷载于一个数量为 n 的纤维束束上。在最初的阶段,荷载平均的分配于各个纤维上。随着荷载增加,纤维束中的其中一个纤维到达抗拉强度值,随后被破坏,此时荷载的作用就将由剩下未被破坏的纤维束($n-1$)来重新分配,所以剩下的纤维束将承受比开始更大的荷载,也会更加容易被破坏^[8]。

在纤维束模型中,最重要的一个假设就是纤维束的弹性模量都为一致的,还有其他的假设,包括纤维束与纤维束之间相互的平行,作用力的方向也一致。

$$\sigma_r = T_r \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A_{\text{shearplane}}} \quad (6)$$

式中: σ_r ——根系增强的总应力(kPa); $\sum_{i=1}^n A_i$ ——剪切面上根系的总面积(m^2); $A_{\text{shearplane}}$ ——剪切面的面积; T_{rj} ——剩余根系中最小的根系抗拉强度值; A ——每个根系的面积。

植物根系有强度比较强的根系,也有强度较低的根系,而在根土复合体发生剪切破坏时,强度比较小的根系首先破坏,而此时根土复合体的抗剪抗剪强度由为发生破坏的根系与土壤提供。试验数据计算与分析时间为 8 月 15 日至 9 月 1 日。

3 结果与讨论

3.1 直剪试验

3.1.1 根系对土体抗剪强度指标的影响 表 2 所示,含有油松或者元宝枫的根系的土壤,根土复合体的抗剪强度指标黏聚力 c 值比相同含水量的素土的黏聚力 c 值明显的增大,其增加范围是 7.25~21.67 kPa。土壤的内摩擦角随着植物根系面积比率的变化并无明显的变化。根系对于土壤而言,通过根土间摩擦的黏聚力来提高土壤在发生剪切破坏时候的阻力,根系对于土壤具有牵引作用,当土体发生破坏时,对土壤的开裂有一定的闲置约束作用,从而提高土体的抗剪强度。在很多研究中,根系面积比率的增加会导致土体抗剪强度的增加已经被证实。同时由于植物根系对土壤具有一定的改造,植物根系分泌物会使根系与土壤直剪的摩擦力更大,同时忽略了植物根系也将导致土壤含水量变化等因素,试验中使用的多为重塑土,低估了根系对土壤的增强量。

表 2 含水量为 20.8% 时素土及各种含根量的根土复合体的抗剪强度的各项指标值

样品类型	编号	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\Delta S/\text{kPa}$	φ 增量/ (°)
素土	①	17.14	0.270	—	—
	②	24.39	0.294	7.25	0.025
含油松根	③	38.195	0.296	21.055	0.026
	④	38.805	0.296	21.665	0.027
	⑤	21.32	0.288	4.18	0.018
含元宝枫根	⑥	32.665	0.283	15.525	0.013
	⑦	35.325	0.289	18.185	0.019

注: c 为黏聚系数; φ 为内摩擦角; ΔS 为根系增加的抗剪强度值。

3.1.2 根土体积比与含根数量对抗剪强度的影响 分析可知,土壤的含水量、干密度一定时,随着根系面积比率的增加,根土复合体的黏聚力 c 值明显增加。第 2 组油松根系中,根系面积比率增加时,黏聚力 c 值明显增加, ΔS 值为 7.25 kPa,第 4 组根系面积比率达到 0.26% 时,为 21.055 kPa,明显大于第 2 组试验中油松根系面积比率仅为 0.078% 的 ΔS 值。第 3 组试验中增加的值几乎是第 1 组的 3 倍(表 2),说明影响根土复合体抗剪强度的增量的一个重要因素是所含根系的面积比率^[9]。

在本试验中当土壤的含水量、干密度一定时,对比③和④试验与⑥和⑦试验,在根系面积比率类似的情况下,含根系数量分别为:4,8 根和 5,10 根。此时的抗剪强度的增量为 21.055,21.665 kPa;15.525,18.185 kPa。这说明影响根土复合体抗剪强度的因素主要为根系面积比率,与含根系数量关系并不显著。也就是提高了根系的接触面积,对根土复合体的抗剪强度提升值并不明显。在本试验中使用的是重塑土插入细根的方式来进行根土复合体的构建,使用的植物根系都为细根,因此根系表面与土壤的摩擦力所能产生对土壤的加固作用并没有表现出很明显的差距。

3.1.3 根系强度与直径 W_u 的模型中,假设所有的根系与土壤之间都稳定的锚固在一起,在根系强度计算的时候所使用的为根系的抗拉强度。室内试验和野外的试验显示当根土复合体发生剪切破坏时,有两种机械的根系破坏方式:根系拔出或者是根系的断裂。根系的单根抗拉强度受直径影响较大,大部分学者^[10]认为,单根抗拉强度与根径呈幂函数或指数函数关系,不同植物的根系抗拉力与根径的回归关系差异较大,这与植物生长的立地条件及根系种类、根生长方位和组织结构等有关。根系强度为每单位面积上的根系强度。根系抗拉强度与根系直径之间的关系并不是线性的,本试验使用了 6 组不同直径的油松与元宝枫根系的强度试验发现,幂函数可较好地拟合根系直径和强度之间的关系(图 1)^[11]。伴随着根系直径的增加,根系的抗拉强度降低。在很多其他研究者的试验中也得到了证实^[12-13]。对比油松根系抗拉强度与元宝枫直径的抗拉强度,直径比较小时,不同植物种的根系强度相差比较大,而随着植物根系直径的增加,油松与元宝枫根系的抗拉强度之间的差距逐渐变小。

在使用模型计算植物根系强度时,使用根系拔出强度计算还是根系的抗拉强度作为参数都是学者们一直争论的话题。试验发现,在植物根系直径小于

2 mm,植物根系的拔出强度将大于植物根系的抗拉强度,而植物根系大于 2 mm 的范围内,植物根系的拔出强度将远小于植物根系的抗拉强度。本研究中的 2 个植物种的阈值都为 2 mm,在 Pollen 的研究中,该阈值在 2~3 mm 之间^[5]。为使得 Wu 模型与 Pollen 模型的计算结果更加准确,在根系拔出强度与抗拉强度的选择中,2 mm 以下将使用抗拉强度作为根系强度计算,根系直径在 2 mm 以上的部分将使用根系的拔出强度值作为计算。

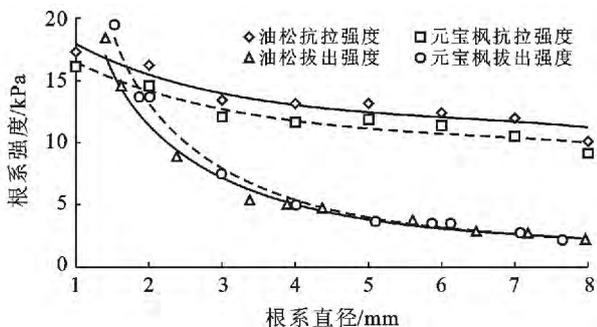


图 1 植物根系抗拉强度与拔出强度与直径的关系

3.2 模型计算结果

3.2.1 Wu 模型计算值与实际值对比 在直剪和野外试验的基础上,对比试验结果与 Wu 模型计算的抗剪强度结果,植物细根的直剪试验与 Wu 模型计算的植物抗剪强度增强值有较大的差别如图 2 所示。小盒直剪试验中,Wu 的模型高估了根系增强的抗剪强度值在 16.5%~32.7%之间,野外试验中的抗剪强度高估值在 22%~34%之间。Wu 模型假设在土壤收到剪切破坏时,所有的根能够同时达到抗拉强度的最大值,导致计算的根系增强值 ΔS 偏高。在使用 Wu 模型计算植物根系的固土强度时,都使用根系的抗拉强度计算时,发现 Wu 模型计算值约比试验实际结果大约 50%。本次试验同时采用抗拉强度与拔出强度作为计算依据,更加准确地修订了 Wu 模型的计算方法。Pollen 的研究发现 Wu 的模型高估了根系的抗剪强度值在 10%~100%之间。

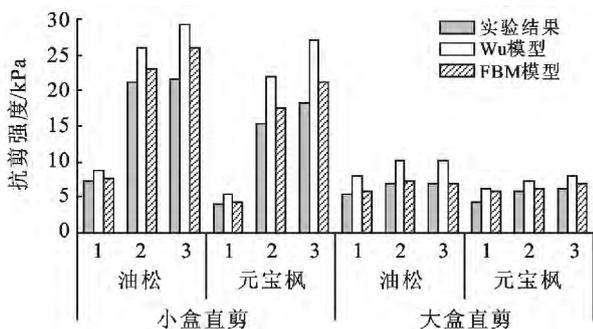


图 2 油松与元宝枫抗拉强度实际值与模型计算值

3.2.2 纤维束模型与实际值对比 Pollen 的纤维束模型提供了一个更加精确的估计根系对土体增强效果的方法,在纤维束模型中考虑了根系中单根被破坏时候,总体抗剪强度减小的因素,所以在估计根系对土壤抗剪强度增强时更加的准确^[14]。同时,植物根系的密度也对模型估计值的准确有一定影响,对比同种植物中 3 个不同根系面积比率的根土复合体,随着根系面积比的增加,纤维束模型计算值对抗剪强度愈加的高估。在纤维束模型的计算中,不同植物类型对计算值的准确性没有太明显的影响。

本文通过计算后发现纤维束模型高估根系抗剪强度在 1%~11%之间,而野外试验高估在 2%~20%直剪。在 Schwarz 的研究中,纤维束模型高估根系抗剪强度在 0%~60%之间,同时证实了纤维束模型计算的根系抗剪强度的准确性^[15]。在纤维束模型的进一步研究中,比 Wu 模型准确的一个重要因素就是利用了几何学与工程力学来对根系的进一步破坏机制进行讨论^[16]。本研究中纤维束模型计算值都是高估了根系增强抗剪强度值,最重要的原因是本试验选用重塑土进行试验,土壤与根系的摩擦力有限,导致了实测根土复合体的抗剪强度值偏小。扩展的纤维束模型同时考虑了根系在拉断以后,荷载从新再分配的过程,更加详细地阐述了根系固土的力学机制^[17-18]。

4 结论

- (1) 直剪试验证实根系面积比率的增加会对土壤抗剪强度增加,得出含根土比素土增加的主要为土壤的黏聚系数及 ΔS 值。
- (2) 通过对根系拔出强度与根系抗拉强度的测定发现了植物根系强度阈值的存在,而对油松与元宝枫两种植物根系,该阈值为 2 mm,大于 2 mm 的植物根系拔出强度远小于抗拉强度,小于该阈值的植物根系拔出强度大于抗拉强度。
- (3) 根系直剪试验的结果与 Wu 模型和纤维束模型的对比发现,在小盒直剪盒和整根直剪中,Wu 模型高估植物根系增强抗剪强度值平均为 24.96% 和 28.67%,而纤维束模型对根系提高土壤抗剪强度则高估为 10.16% 和 9.49%。纤维束模型能更加合理的计算根系对土壤抗剪强度的增强量,根系面积比率的增加会使模型高估抗剪强度的值增加,不同的植物根系类型对模型计算抗剪强度的准确性也不同。纤维束模型对根系增强抗剪强度的计算比早期的 Wu 模型更加准确,特别是当植物根系面积比率较大时。随后的研究将采用更多不同种类的植物对纤维

束模型的计算准确性进行评估。纤维束模型也有需要进一步的研究的部分,包括分析根系随后破坏的机制等,以便为更好地评价植物根系固土效能与定量的计算植物根系固土效果提供了理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4): 371-384.
- [2] Majdi H, Pregitzer K, Moren A S, et al. Measuring fine root turnover in forest ecosystems[J]. *Plant and Soil*, 2005, 276(1/2): 1-8.
- [3] Pollen N, Simon A, Collison A. Advances in assessing the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability[J]. *Water Science and Application*, 2004, 8: 125-139.
- [4] Riestenberg M M. Anchoring of thin colluvium by roots of sugar maple and white ash on hillslopes in Cincinnati [M]. US: Government Printing Office, 1994.
- [5] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species [J]. *Geomorphology*, 2008, 100(3): 401-418.
- [6] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. *Soil Science*, 1981, 132(6): 427-435.
- [7] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(5): 843-849.
- [8] Hidalgo R C, Kun F, Herrmann H J. Bursts in a fiber bundle model with continuous damage [J]. *Physical Review(E)*, 2001, 64(6): 111-122.
- [9] Kanji K, Toshiro N, Setsuo H. Analytical study on the role of tree roots system in slope stability[J]. *Journal of the Japan Landslide Society*, 2004, 41(3): 255-263.
- [10] Coppin N, Richards I G. Use of Vegetation in Civil Engineering[M]. London: Butterworths, 1990.
- [11] 高齐治,张俊斌,张新萍.台湾西南部优势竹类籐竹根力之研究[J].*世界竹藤通讯*,2008(1):10-15.
- [12] 程洪,张新全.草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J].*水土保持通报*,2002(5):20-30.
- [13] 陈丽华,余新晓,张东升,等.整株林木垂向拔拉试验研究[J].*资源科学*,2004(1):39-43.
- [14] Cohen D, Lehmann P O. Fiber bundle model for multi-scale modeling of hydromechanical triggering of shallow landslides[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(10): 3-7.
- [15] Raischel F, Kun F, Hidalgo R C, et al. Statistical Damage Models: Fiber Bundle Models[M]// *Damage and Its Evolution in Fiber-composite Materials: Simulation and Non-destructive Evaluation*. Busse G, Kroppl B H, Wittel F K, Editors, Stuttgart: ISD Verlag, 2006: 443-471.
- [16] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture[J]. *Catena*, 2007, 69(3): 197-205.
- [17] Schwarz M, Lehmann P, O. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes—from a bundle of roots to tree stands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(3): 354-367.
- [18] Schwarz M, Preti F, Giadrossich F, et al. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy)[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(3): 285-291.