

# 植被混凝土基材 2 种草本植物根—土 复合体直剪试验研究

黄晓乐, 许文年, 夏振尧

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘 要:**通过在植被混凝土基材上对狗牙根和紫花苜蓿 2 种有代表性的草本植物进行样地种植和室内直剪试验, 分析植被混凝土基材上不同深度根—土复合体抗剪强度的分布规律, 对比基材空白样地相应深度的抗剪强度, 证实和量化了草本植物根系增强土壤抗剪强度的作用。试验表明: 根—土复合体在 0—10 cm 土层内摩擦角变化不明显, 粘聚力随深度先增大后减小; 与基材空白样地相比, 根—土复合体内摩擦角变化不大, 粘聚力变化显著, 狗牙根粘聚力最大增幅为 129.4%, 紫花苜蓿粘聚力最大增幅为 77%; 狗牙根根—土复合体抗剪强度比同期生长的紫花苜蓿根—土复合体的抗剪强度高。

**关键词:**根—土复合体; 抗剪强度; 粘聚力; 内摩擦角

中图分类号: X171.4; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)04-0158-04

## Direct Shear Test of Root-Soil Composite System by Two Representative Herb Plants in Vegetation-Growing Concrete Base Material

HUANG Xiao-le, XU Wen-nian, XIA Zhen-yao

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China  
Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** Two representative herb plants Bermuda grass and Medicago sati are planted in the vegetation-growing concrete base material in the testing areas, then direct shear tests on the unplanted soil and root-soil composite system are conducted. The distribution pattern of the anti-shearing strength of root-soil composite system with increasing depth in different soil layers is studied. By comparing the shear strength indexes of the soil without roots and two kinds of soils with roots, the mechanical effects of the root-soil composite system of two herb plants with six-month growth period can be verified and quantified. The results showed that the variation trend of the cohesion in different soil layers of the root-soil composite systems increased in 2—4 cm soil layer and then it decreased, and there were no apparent changes in the internal friction angle with the depth increase of the soil. Compared with the cohesion of soil without roots, the maximum increasing amplitudes of the cohesion of Bermuda grass and Medicago sati were 129.4% and 77.0%, respectively. The anti-shearing strength of root-soil composite system of Bermuda grass was better than that of Medicago sati after six-months growth period.

**Key words:** root-soil composite system; anti-shearing strength; cohesion; internal friction angle

在边坡生态治理工程中, 应用植物根系的生物软措施<sup>[1]</sup>可以降雨截流、削弱溅蚀、减小孔隙水压力, 增加土体的抗剪强度, 有效地防止水土流失和土壤侵蚀, 从而大幅提高边坡的稳定性和抗冲刷能力。植物根系在土壤中错综盘结, 可视为带预应力的三维加筋

材料, 使岩土体在其延伸范围由强度相对较高的根系与强度相对较低的土体所组成的根—土复合体<sup>[2]</sup>。

国内外学者在根系固坡作用的力学模型、根系抗拉、根—土复合体抗剪、边坡稳定性分析等方面取得了一些成果<sup>[3-9]</sup>。在分析植物根系根—土复合体的抗剪

强度的研究中,较多研究均表明,根—土复合体可以明显提高土体的抗剪强度<sup>[10-11]</sup>。目前对于植物根系提高土壤抗剪切强度的研究主要集中于乔、灌木植物深根的锚固作用和草本植物根系的浅根加筋作用<sup>[12-14]</sup>。一般在研究根—土复合体的抗剪强度时是采集根系分层放置或穿插在土试样中,不足以模拟自然状态下根系在土壤中的分布形态和特征。本文通过在植被混凝土基材<sup>[15]</sup>上种植2种有代表性的植物,再用环刀现场取样进行室内直剪试验,分析根—土复合体对土壤抗剪强度的影响。采用环刀现场取样的方法能保证植物根系在土壤中的分布形态不改变;其次,采用植被混凝土基材作为试验样地基材,种植2种常用生态护坡草本植物狗牙根和紫花苜蓿,分析根—土复合体在表层0—10 cm土层抗剪强度的提高及其随深度分布的特征,对植被混凝土生态护坡技术<sup>[15]</sup>的研究、生态护坡效益评价及推广应用有重要的意义。

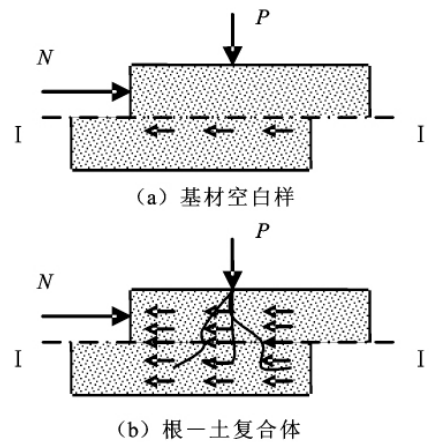
## 1 根—土复合体直剪试验的工作原理

土的抗剪强度是指土体抵抗剪切破坏的能力,其本质是由于土粒之间的滑动摩擦以及凹凸面的镶嵌作用产生的摩阻力,其大小决定于土粒表面的粗糙度、土的密实度以及土的颗粒级配等。对于黏性土,其土体抗剪强度还包括土粒之间的粘聚力,它是由于黏性土颗粒之间的胶结作用和静电引力效应等因素引起的。

应变控制式直接剪切仪测定土体抗剪强度的原理是利用加压活塞和上透水石对土样施加一垂直压力,然后通过等速转动手轮施加水平推力,使土样在上下盒之间产生剪切变形,直到破坏,通过量力环的变形值计算剪应力的大小,土壤的抗剪强度用土壤剪切破坏时的剪应力来度量。

如图1,本试验中土样在垂直压力 $P$ 和水平推力 $N$ 的作用下,土样沿 $I-I$ 面发生剪切变形,土体内则沿 $I-I$ 面产生向左的摩擦力。素土样的摩阻力主要来自于 $I-I$ 剪切面上土颗粒之间的咬合和摩擦。根—土复合体在垂直压力 $P$ 和水平推力 $N$ 作用下,根系和土体共同受力、协调变形。将水平根系看作是平行加筋形式,用摩擦破坏理论分析,当土体发生变形时,根系的弹性模量比土大,根系与土体有相对滑动的趋势,根系通过与土体的摩擦来限制土体变形;对于竖向根系,当根系处在土体剪切变形区域时,根系变形会产生拉应力,提高土体的抗剪强度。根—土复合体不仅在 $I-I$ 面上通过土颗粒之间的摩擦和相互咬合产生摩阻力以抵抗变形,还通过土体和根系的相互接触及根系自身的材料力学特性在整个土

体内产生摩阻力提高土体的抗剪强度。



$P$ —垂直压力; $N$ —水平推力

图1 直接剪切实验力学分析模型

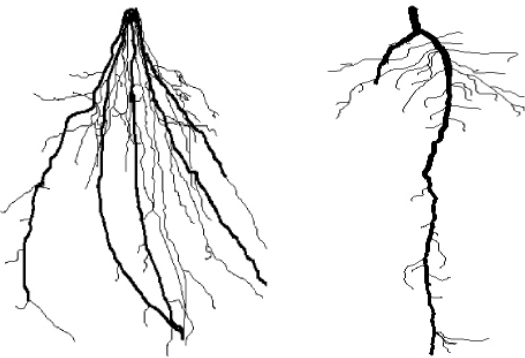
## 2 试验方案

### 2.1 试验样地

试验样地及土样来源均在湖北省三峡大学翠屏山上:首先将取回的土样风干,用木碾碾散过2 mm筛,再按照植被混凝土基材配比加入一定的水泥、有机质和添加剂,搅拌均匀后分层平铺到地面上,每层铺土厚约2 cm,每铺一层土后用喷壶将土样充分润湿,土壤总厚度约大于10 cm时停止铺土。土样共分3块,在其中的两块土样上分别种植狗牙根和紫花苜蓿,采用草坪建植时常用的单播密度,分别为8 g/m<sup>2</sup>、2 g/m<sup>2</sup>。播种方法是:在铺紫花苜蓿样地和狗牙根样地最后2 cm土层时,将称量好的种子与少量搅拌均匀的植被混凝土基材充分混合,均匀撒播到样地上,再将剩下的基材铺上,并进行一定的震压,使土样总高度略大于10 cm。第3块样地作植被混凝土基材空白样地对照。3块样地统一管理,定时定量浇水,并适时进行杂草清除和病虫害防治。

样地种植时间是2009年4月,取样时间是2009年10月,生长期为6个月。取样时,测得紫花苜蓿和狗牙根的植株密度分别约为800~1 000株/m<sup>2</sup>、2 500~3 000株/m<sup>2</sup>,植株平均高分别约为15 cm、1 m。紫花苜蓿和狗牙根的根系分布形态如图2。狗牙根根系发达,平均长12 cm,根径粗细较均匀,均小于1 mm,在0~2 cm土层中根系相对较少,在2~4 cm土层中最多,在4~10 cm土层中随深度增加而减少;紫花苜蓿主根发达,侧根稀少,主根平均长15 cm,根径粗细不均匀,粗根约1~3根/株,根径为1~4 mm,其他侧根根径均小于1 mm,主要分布在2~4 cm土层中。取样前一天对3块样地充分浇水,取样时测得狗牙根、紫花苜蓿和基材空白样3块样地的含

水率分别为 30.18%,30.05%,29.94%。



(a) 狗牙根 (b) 紫花苜蓿

图 2 根系分布形态

2.2 试验方法

取样时,将每块样地沿垂直方向分 5 层(每层 2 cm),用环刀在每层上取土样 4 个(一组),每块样地共 5 组。各组试样进行直接剪切试验,剪切时用 50,100,150,200 kPa 的 4 种垂直压力,得到不同垂直压力下的剪应力,再通过线性回归拟合推算出每组土样的粘聚力和内摩擦角聚力和内摩擦角。

试验采用南京土壤仪器厂生产的 DSJ-2 电动四联等应变直剪仪。试样直径为 6.18 cm,截面积 30 cm<sup>2</sup>,试样高 2.0 cm。4 个剪切盒的量力环率定系数

为  $C_1=5.71\text{ N}/0.01\text{ mm}$ , $C_2=5.66\text{ N}/0.01\text{ mm}$ , $C_3=5.76\text{ N}/0.01\text{ mm}$ , $C_4=5.68\text{ N}/0.01\text{ mm}$ 。

2.3 抗剪强度的计算

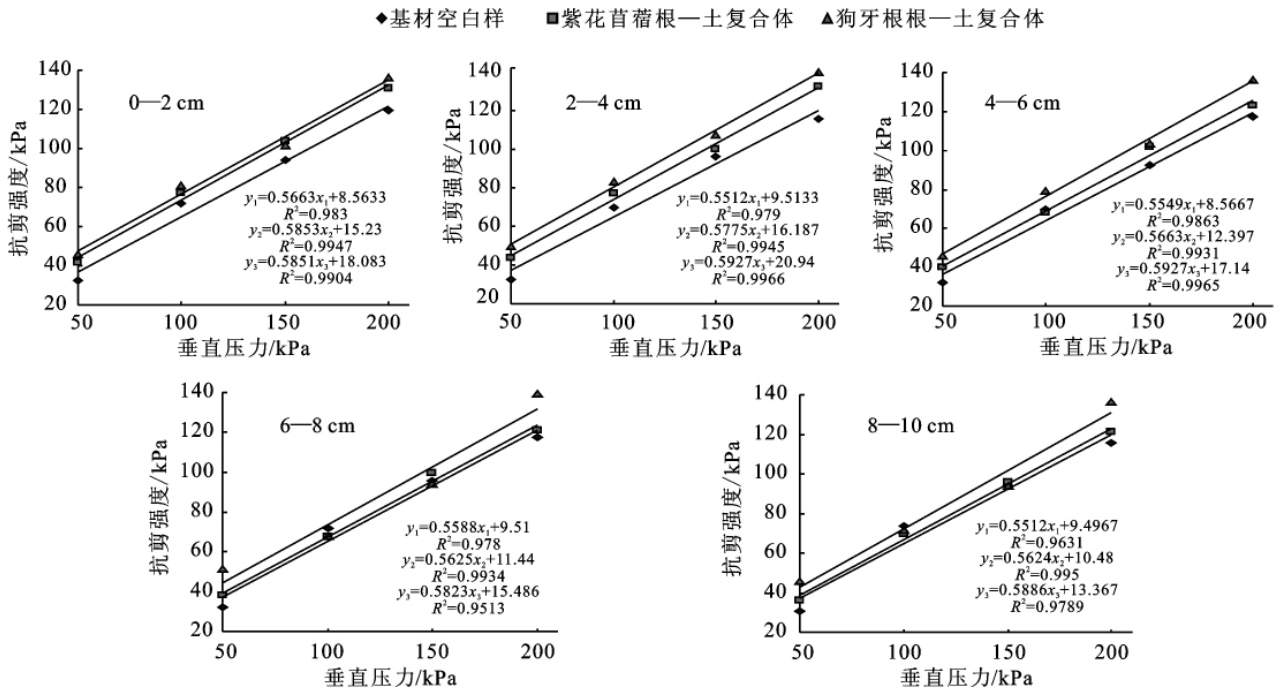
应变控制式直剪仪测定根—土复合体的抗剪强度指标,根据手轮转数和测微表读数计算每组土样在 4 个不同垂直压力下的剪应力。

$$\tau=\frac{C\times R}{A}\times 10$$

式中: $\tau$ ——垂直压力下的剪应力; $C$ ——量力环率定系数; $R$ ——量力环量表读数(0.01 mm); $A$ ——剪切盒的截面积;将每组土样的试验结果  $\tau$  值绘在图中,进行线性回归,得到各层土壤的抗剪强度曲线。

3 试验结果与分析

3 块样地不同深度试样的抗剪强度拟合曲线及各自的回归模型如图 3,同一土层试样的含根量和含水率相当,抗剪强度随垂直压力的增大而增大,相关系数最小为 0.951 3,最大可达 0.996 6,说明用直线回归拟合土体的抗剪强度效果良好,与库伦强度公式  $\tau=c+\sigma\tan\varphi$  一致,即根—土复合体服从莫尔—库伦强度破坏准则。根据线性回归模型,计算各土层土壤的粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ,结果见表 1,各组土样的粘聚力对比分析如图 4。



$y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$  分别为基材空白样、紫花苜蓿根—土复合体、狗牙根根—土复合体相应土层土体的抗剪强度回归模型,  $R^2$  为相关系数

图 3 各样地不同深度土壤的抗剪强度曲线

试验结果表明:

(1)从表 1 可以看出 3 块样地的土壤内摩擦角随深度变化均不明显,故可取各样地不同土层土壤的内

摩擦角平均值代表不同样地土壤的内摩擦角。狗牙根、紫花苜蓿和基材空白样样地的内摩擦角平均值分别为 30.5°,29.7°和 29.1°,变化幅度不大,认为根—

土复合体试样的内摩擦角与基材空白样的内摩擦角基本相同,说明植物根系对土壤内摩擦角的影响不大。

(2)表 1 中基材空白样的粘聚力随土层深度变化不明显,可取其平均值作为该样地的粘聚力,值为 9.13 kPa。狗牙根样地和紫花苜蓿样地土壤的粘聚力随土层深度变化显著,狗牙根根—土复合体的粘聚力最大为 20.94 kPa,最小为 13.37 kPa,相对基材空白样分别增加了 129.4%,46.4%,紫花苜蓿根—土复合体的粘聚力最大为 16.19 kPa,最小为 10.48 kPa,相对基材空白样分别增加了 77.3%,14.8%。

表 1 抗剪强度指标

样地	土层深度/cm	内摩擦角/(°)	内摩擦角平均值 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 c/kPa	粘聚力增幅/%
空白样	0—2	29.5	29.5	8.56	—
	2—4	28.9		9.51	—
	4—6	29.0		8.57	—
	6—8	29.2		9.51	—
	8—10	28.9		9.50	—
狗牙根	0—2	30.3	30.5	18.08	98.1
	2—4	30.7		20.94	129.4
	4—6	30.7		17.14	87.7
	6—8	30.2		15.49	69.6
	8—10	30.5		13.37	46.4
紫花苜蓿	0—2	30.3	29.7	15.23	66.8
	2—4	30.0		16.19	77.3
	4—6	29.5		12.40	35.8
	6—8	29.5		11.44	25.3
	8—10	28.9		10.48	14.8

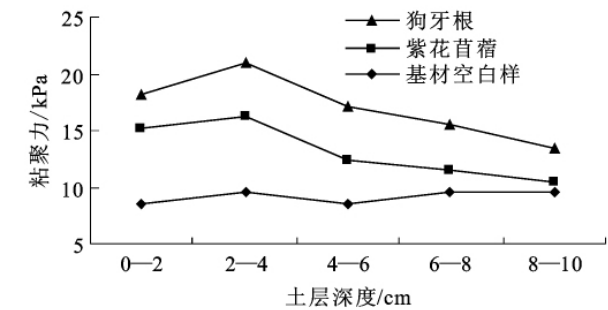


图 4 粘聚力对比分析

(3)图 4 中基材空白样土壤粘聚力随土层深度变化不显著,紫花苜蓿和狗牙根样地土壤粘聚力的变化趋势均是先增大后减小,2—4 cm 处粘聚力最大,底层最低,且每层图样的粘聚力均大于基材空白相应深度处的粘聚力。分析其原因是:基材空白样由于各层基材配比一样,当含水率一定时,土壤的粘聚力变化不大,又因其中没有根系的作用,故粘聚力相对根—土复合体较小。研究还发现根—土复合体抗剪强度的提高主要由直径小于 1 mm 的根系与土壤之间的摩擦来实现<sup>[16]</sup>,而狗牙根和紫花苜蓿根—土复合体在 2—4 cm

处根径小于 1 mm 的根系分布最多,故根—土复合体的粘聚力先增大,后随着土层深度加大,土壤中根系减少,根—土复合体的粘聚力也随之呈减小的趋势;其次,根—土复合体在 0—2 cm 处由于受到水分侵蚀等外界因素的直接影 响,其抗剪强度也会相对降低。

(4)图 4 中狗牙根根土复合体每层图样的粘聚力比紫花苜蓿根—土复合体相应土层的粘聚力均大。不同种类植物由于其各自的生理生态特性、根系力学特性和根系分布形态、播种密度等不同,抗剪强度也不一样。取样时紫花苜蓿和狗牙根的植株密度分别为 800~1 000 株/m<sup>2</sup>、2 500~3 000 株/m<sup>2</sup>,狗牙根的植株密度比紫花苜蓿的大;从单根植株根系分布特征来看,图 2 中紫花苜蓿根系稀少,根径分布极不均匀,根系在土壤中没有完全形成网络结构,而狗牙根根系比较发达,在所有土层中均有较多分布,且根径分布均匀,在土壤中基本形成了三维网络结构。故本试验中测定的狗牙根根—土复合体粘聚力比紫花苜蓿根—土复合体粘聚力大。

4 结果与讨论

(1)基材空白样和根—土复合体的内摩擦角随土层深度变化不明显,3 个样地内摩擦角基本相同。

(2)狗牙根根—土复合体的粘聚力最大为 20.94 kPa,最小为 13.37 kPa,相对基材空白样分别增加了 129.4%、46.4%,紫花苜蓿根—土复合体的粘聚力最大为 16.19 kPa,最小为 10.48 kPa,相对基材空白样分别增加了 77.3%、14.8%。

(3)基材空白样的粘聚力随土层深度变化不明显,紫花苜蓿根—土复合体和狗牙根根—土复合体的粘聚力随土层深度先增大后减小,2—4 cm 处最大。

(4)紫花苜蓿根—土复合体和狗牙根根—土复合体对土壤的抗剪强度影响不同。在工程实践中,考虑具体条件和要求选择不同的物种,以达到最佳的治理效果。

本次试验基于在植被混凝土基材上种植 2 种不同的草本植物,测定一定生长期后不同土层深度土体抗剪强度的情况,与基材空白样对比,评估植被混凝土生态护坡技术的前期效果,对植被混凝土技术的研究和应用推广,发挥生物软措施的固土潜能具有重要的指导意义。试验中样地设在平坦的地面上进行人工管理,而在实际工程中,所治理的边坡处于自然条件下,均有一定的坡度,且一般都是选取几种不同的物种混播,故对于植物混凝土生态护坡技术的研究还有待于进一步完善和改进。

密度和海拔也不同程度影响土壤入渗性能。而坡位、盖度、有机质、含水率及毛管孔隙度等因子对土壤入渗性能的影响则较小。

表 2 入选主成分的特征向量、特征根及贡献率

因子	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
$x_1$	-0.038	-0.105	-0.137	0.913
$x_2$	-0.957	-0.134	0.054	0.110
$x_3$	-0.911	0.074	-0.176	-0.074
$x_4$	0.419	-0.431	-0.749	0.115
$x_5$	0.424	-0.097	0.738	-0.214
$x_6$	-0.194	0.839	-0.112	-0.388
$x_7$	0.292	0.182	0.890	-0.001
$x_8$	0.582	-0.111	0.531	0.498
$x_9$	0.715	0.122	0.406	0.083
$x_{10}$	0.259	0.845	0.212	-0.062
$x_{11}$	0.096	-0.745	-0.302	0.424
$x_{12}$	0.097	0.825	0.013	0.268
特征根	4.096	3.352	1.533	1.242
贡献率/%	34.135	27.774	12.774	10.348

4 结 论

水文生态功能与土地利用类型、地貌部位、坡向等方面关系密切,总体来看,土壤贮水能力变化不太显著,而入渗性能变化较为显著。该区土壤水分入渗性能与坡度、坡向、株均高、容重、非毛管孔隙度、群落

密度、海拔等因子密切相关,而与坡位、盖度、有机质、土壤含水率、毛管孔隙度等因子关系甚微。

参考文献:

[1] 姜海燕,赵雨森,陈祥伟,等. 大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):149-153.

[2] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. 水土保持学报,2004,18(6):1-5.

[3] 陈致富,魏天兴,赵健,等. 陕北风蚀水蚀交错区不同植被下土壤入渗性能差异性研究[J]. 水土保持学报,2009,23(3):232-235.

[4] Sampson D A,Allen H L. Regional influences of soil a-  
vailable water holding capacity and climate;and leaf area  
index on simulated loblolly pine productivity[J]. Forest  
Ecology and Management,1999,24(1):1-12.

[5] 徐广才,康慕谨,马敏,等. 内蒙古大青山哈拉沁河流域  
中游草本植被与环境的关系[J]. 山地学报,2007,25(4):  
393-399.

[6] 林大仪. 土壤学实习指导[M]. 北京:中国林业出版社,  
2007.

[7] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙  
特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报,2008,24(5):  
65-68.

(上接第 161 页)

参考文献:

[1] 陈昌富,刘怀星,李亚平. 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.

[2] 汤劲松,刘松玉,童立元. 植物根系的加筋作用对浅埋公  
路隧道施工稳定的影响[J]. 东南大学学报:自然科学  
版,2009,39(2):334-339.

[3] Wu T H,Mckinnell W P,Swanston D N. Strength of tree  
roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J].  
Canadian Geotechnical Journal,1979(1):19-33.

[4] 高齐治,张俊斌,张新萍. 台湾西南部优势竹类籐根力  
之研究[J]. 世界竹籐通讯,2008(1):10-15.

[5] 李成凯. 青藏高原黄土区四种草本植物单根抗拉特性研  
究[J]. 中国水土保持,2008(5):33-36.

[6] 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.

[7] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪  
强度试验研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(5):67-  
72.

[8] 付海峰,姜志强,张书丰. 植物根系固坡效应模拟及稳定  
性数值分析[J]. 水土保持通报,2007,27(1):92-98.

[9] 及金楠,张志强,Fourcaud Thierry,等. 鲱骨状根构型对  
典型土体抗倾覆力的有限元分析[J]. 中国水土保持科  
学,2007,5(3):14-18.

[10] Kassiff G,Kopelovitz A. Strength properties of soil-  
root systems[J]. Israel Institute of Technology,1968  
(25):36-44.

[11] Waldron L J,Dakessian S. Soil reinforcement by roots;  
calculation of increased soil shear resistance from root  
properties[J]. Soil Science,1981,13:427-435.

[12] Nilaweera N S. Effects of tree roots on slope stability;  
the case of Khao Luang Mountain area, Thailand[M].  
Bangkok:Asian Institute of Technology,1994.

[13] 周跃,宏伟,徐强. 南松幼树垂直根的土壤增强作用  
[J]. 水土保持学报,2000,14(5):100-105.

[14] 王文生,杨晓华,谢永利. 公路边坡植物的护坡机理  
[J]. 长安大学学报,2005,5(4):26-30.

[15] 王铁桥,许文年,叶建军,等. 挖方岩石边坡绿化技术与  
方法探讨[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2003,25  
(2):101-104.

[16] 程洪,颜传盛,李建庆,等. 草本植物根系网的固土机制  
模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究,2006,13  
(1):62-65.