

刺槐林边坡稳定性有限元分析

陈丽华¹ 刘秀萍¹ 宋维峰² 张超波¹

(1 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京林业大学水土保持学院 2 西南林学院环境科学与工程系)

摘要: 该文以刺槐林固坡为例,将根土复合体看作是由土体、根系以及土体与根系之间的接触面单元所联系起来的有机体,运用有限元方法分析了刺槐林木根系边坡的应力和变形特性,探讨了刺槐根系对边坡稳定性的影响。结果表明:无林边坡坡脚向土体内侧存在一个应力和位移的集中带,根系的存在使得有林边坡在坡脚集中带的区域范围减小;根系周围位移等值线变化剧烈,有林边坡最大水平位移发生在边坡根系分布区;斜坡中同一位置处有林边坡的垂直位移明显小于无林边坡的;边坡最大、最小主应力等值线随土层深度的增加而增加,有林边坡最大主应力、最小主应力的最大值小于无林边坡的,说明有林边坡更趋于稳定。

关键词: 刺槐;根系;有限元法;边坡;稳定性

中图分类号: S714.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1522(2008)增刊2-0206-05

CHEN Li-hua¹; LIU Xiu-ping¹; SONG Wei-feng²; ZHANG Chao-bo¹. Finite element analysis of *Robinia pseudoacacia* forest slope stability. *Journal of Beijing Forestry University* (2008)30(Supp. 2)206-210 [Ch, 8 ref.]

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry College, Kunming, 650224, P. R. China.

Taking *Robinia pseudoacacia* forest for slope protection as an example, based on finite element method this paper researched the stress and deformation characteristics of *R. pseudoacacia* root-soil composite slope, which combines roots, soil and the interface unit, and analyzed the impact of root system of *R. pseudoacacia* forest on slope stability. Results show that there is a concentration zone of stress and displacement in the area streteches inward of soil from the toe of none forest slope. Root system can make the concentration zone of afforested slope decrease. The displacement isoline around the roots changes severely, and the maximum horizontal displacement of the afforested slope happens in the area of root system. At the same part of the slope, the vertical displacement of afforested slope is apparently smaller than that of the non-forested slope. The isolines of the maximum and minimum principal stresses increase with the soil depth. The maximum values of the maximum and minimum principal stresses of the afforested slope are smaller than those of the non-forested slope, which explains that the afforested slope is more stable.

Key words *Robinia pseudoacacia*; root system; finite element method (FEM); side slope; stability

近年来,国内外学者针对生态环境建设、水土保持各项工程的开发建设中遇到的植物根系作用进行了大量的研究。研究表明,植物根系本身的抗拉、抗剪强度一般都大于土体,在根系-土体摩擦阻力的作用下,可以提高土体的抗剪强度,具有一定的护坡功效^[1-5]。这一点目前已经得到了大家的认可,但是

在已有的成果中,绝大多数将土壤与根系分离,单独进行试验研究,而将土壤与根系作为一个系统来研究的目前并不多见。本文以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林边坡为例,将生长有刺槐林木的边坡视为一个整体作为分析对象,运用GPDA2005软件分析了边坡的应力和变形特性,探讨了刺槐林木根

收稿日期: 2008-05-21

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(30571531)、“973”国家重大基础研究项目(2002CB111502)。

第一作者: 陈丽华,教授,博士生导师。主要研究方向:流域治理、城镇规划、森林水文。电话:010-62336108 Email:c-lihua@bjfu.edu.cn

地址: 100083北京林业大学水土保持学院 Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系对边坡的应力和变形的影响。

1 试验材料

试验用土取自甘肃省天水市吕二沟流域,属于典型的陇西 Q_3 黄土,取土深度为 50~100 cm,天然含水量 6.2%~9.7%,天然密度 $1.35\sim 1.58\text{ g/cm}^3$ 。土样的颗粒组成主要为 0.05~0.005 mm 粒径,占总量的 44.8%;其次是 0.1~0.05 mm 的颗粒,占 32.8%。根据刺槐根系的生长特性,试验用根的直径取用范围为 $2\text{ cm} \leq D \leq 5\text{ cm}$ 。

2 计算模型及参数

2.1 根系形态简化模型及假定条件

向师庆等^[6]将林木的根型分为5大类:水平根

型、垂直根型、斜生根型、复合根型和变态根型。通过对试验流域的刺槐林进行典型调查,结果表明刺槐根系为水平根型,其简化后的平面模型如图1所示。

模型假定:①将空间分布的根系沿树干垂直于坡面简化为一平面,且根据调查结果向坡面一侧根系分布较密集,而指向坡体内部一侧的根系分布较稀疏(图1);②将垂直根和侧根均假设为等径,主根取为直径10 cm,长60 cm,③假设侧根全部平行于地表,并将每10 cm土层中的全部侧根以一根水平根替代,并据调查结果设分布于0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm和50~60 cm土层中的侧根长度分别为80、100、120、150、130和110 cm,相应直径分别为2、2.5、2.5、2.5、2和2 cm。

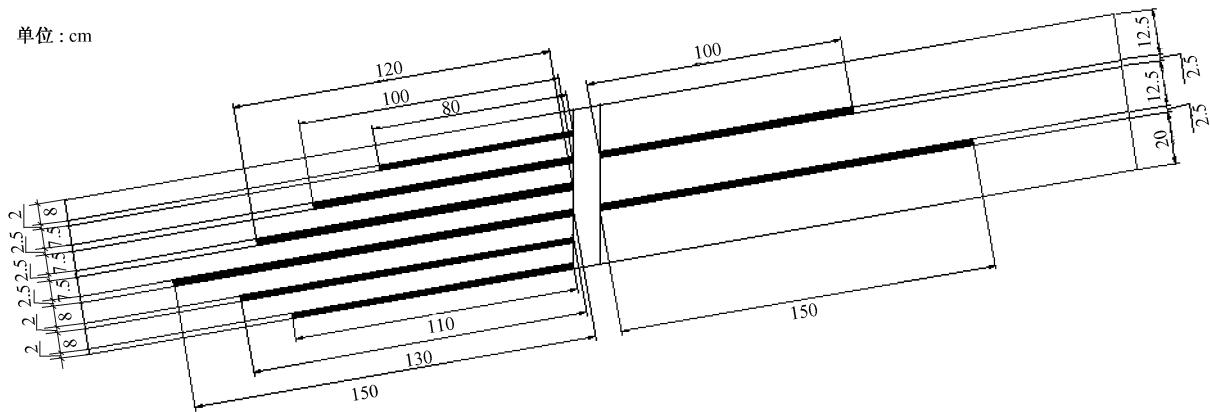


图 1 根系形态简化模型

FIGURE 1 Simplified model of root system morpholog

2.2 计算剖面划分及典型计算点坐标

计算剖面刺槐林土坡坡度为 20° ，边坡长度为20 m，根据中华人民共和国《造林技术规范 GB/T 15776—1995》，考虑到当地林木成活的主要控制因子降水因素，以及实地调查研究结果，研究地区刺槐林的最优造林密度株行距均为3 m。考虑边坡地形条件在坡上和坡下加大计算范围。为了便于资料整理和分析，计算坐标以剖面左下角为坐标原点， x 轴向右为正， y 轴向上为正。根据地形特点，对根系、土体和根土接触面进行离散，除了边角采用少数三角形单元外，其余都采用四边形单元，共划分成4 470个结点，4 358个单元。计算侧边界采用水平向约束，垂直向自由；底边界水平向、垂直向均约束；坡面和坡顶则完全自由。计算区域及有限元网格部分结果见图2。

为详细分析林木根系层的应力和位移情况,在边坡根系层选取7个有代表性的点,分别对其应力、位移和应力水平进行比较。

在 7 个点中点 1 在坡顶部, 点 2 在坡脚, 在水平方向上除距坡上部和下部较近的两个点没有单独考虑之外, 中间的 5 个点平均分布, 在垂直方向上除 1、2 两点在地表, 点 3、4 和 5 到坡面垂直距离为 0.5 m, 点 6 和 7 到坡面垂直距离为 1.5 m, 详见表 1 和图 2。

表 1 坡面典型计算点的坐标

TABLE 1 Coordinates of control points of the slope

| 点号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| x 坐标 | 28.79 | 10 | 24.29 | 19.62 | 14.95 | 22.37 | 17.69 |
| y 坐标 | 16.84 | 10 | 14.70 | 13.00 | 11.30 | 12.90 | 11.20 |

2.3 计算参数

三轴压缩试验和根土接触面摩擦试验的土体含水量为 15%, 干密度 1.4 g/m^3 , 土体和根土接触面材料的计算参数见表 2。

刺槐根系容重为 12.60 kN/m^3 , 弹性模量为 5000 kPa , 泊松比为 0.3.

20年生刺槐树体鲜重分别为40.40 kg,树体自重应力按面力荷载施加于其径为10 mm的树根

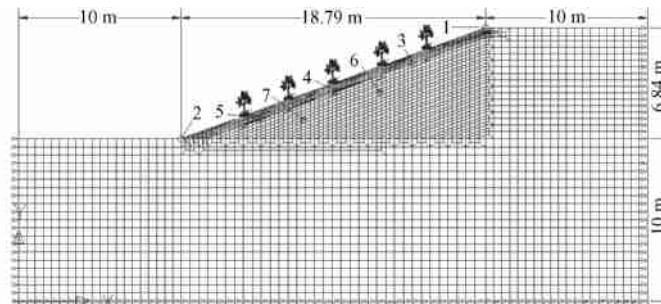


图2 造林边坡网格剖分图

FIGURE 2 Meshes partition of the afforested slope

表2 材料计算参数表

TABLE 2 Calculating parameters of materials

| 材料 | 土容重 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$ | 弹性模量 基数 K | 卸载弹性模 量基数 K_{ur} | 弹性模量 指数 n | 破坏比 R_f | 体积模量 参数 K_b | 体积模量 指数 m | 凝聚力 C/kPa | 内摩擦角 $\phi/^\circ$ | 影响系数 $\Delta\phi/^\circ$ | 侧压力 系数 K_0 |
|-----|-----------------------------------|----------------|-----------------------|----------------|--------------|------------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------|
| 黄土 | 16.10 | 204.40 | 245.28 | 0.70 | 0.75 | 34.80 | 0.60 | 25.00 | 24.60 | 0 | 0.50 |
| 接触面 | | 4 604.07 | 0 | 0.76 | 0.70 | 0 | 0 | 20.75 | 29.18 | 0 | 0.50 |

桩上。

为了更好地模拟刺槐林木根系边坡的应力和变形特性,较好地反映材料的非线性影响,计算中采用分级加载的方式。荷载分为38级,其中素土部分分为35级,根土复合体部分分为2级,林木荷载按1级考虑。为使计算结果更准确,计算时林木荷载增量划分为两级微增量,其余增量为一级微增量。

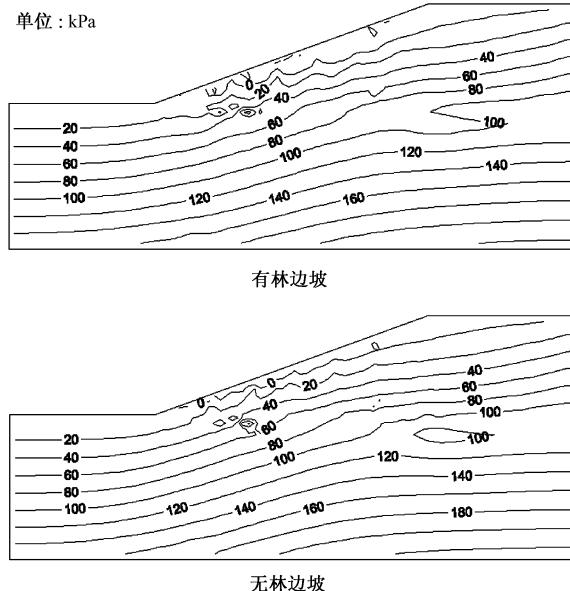
3 结果与分析

本文分别就无林边坡和刺槐林边坡的应力和位移进行了计算,并由后处理程序绘出位移和应力等值线图。

3.1 边坡应力

图3~5分别为有林边坡、无林边坡的最大主应力、最小主应力和剪应力等值线图。从图中可以看出,有林边坡、无林边坡最大、最小主应力等值线总体上随深度的增加而增加,增加的幅度比较缓慢。造林对最大主应力分布并未产生影响,但对于最小主应力和剪应力的影响明显,特别是从图5剪应力分布图可以看出在林木根系处形成了明显的应力集中。说明树根与土的相互作用所引起的土中应力集中主要发生在树根附近,该处应力等值线密集,树根起到了抗拉桩的作用^[7-8]。同时可以看出由边坡的坡脚向土体内侧存在一个应力的集中带,最大、最小主应力最大值都出现在边坡底部,而无林边坡的应力等值线基本与地面平行。

坡面典型计算点的计算结果(见表3)显示:由于有林边坡中4号点距离根系主根最近,该处的最大主应力、最小主应力大于无林边坡。说明根系的存在,改变了有林边坡应力场的分布。一般认为:由于根系有很高的抗拉、抗剪强度和土体无法相比的

图3 最大主应力 σ_1 等值线图FIGURE 3 Isolines of maximum principal stress σ_1

抗弯刚度,有林边坡中的土体受力向根系转移,根系分担了土体的部分应力,并通过应力扩散作用传递到周围土体,使边坡的应力向土层深部传递,起到弱化根系层应力的作用,增强了根系对土体的分担作用,减小土体的应力集中;同时根系与土体之间的相互挤压,在根系与土体之间产生摩擦力,均会对控制边坡的变形和提高边坡的稳定性有利。由于上述原因不仅导致坡面中部,而是整个有林地边坡的最大、最小主应力减小,其应力最大值小于无林边坡(见图3、4)。

在无林边坡坡面产生了拉应力区域,由有限元计算结果及应力等值线图分析得知,其值在0.04~36 kPa之间。坡面拉应力的产生,正是边坡产生崩塌的内在原因。有林边坡减小了边坡上部拉应力

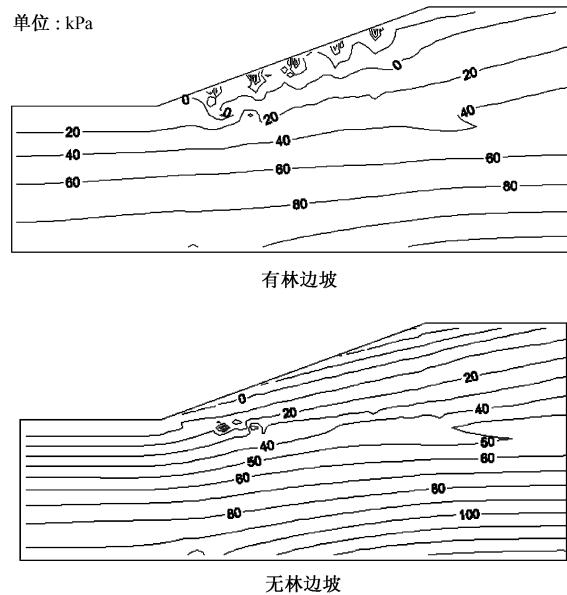
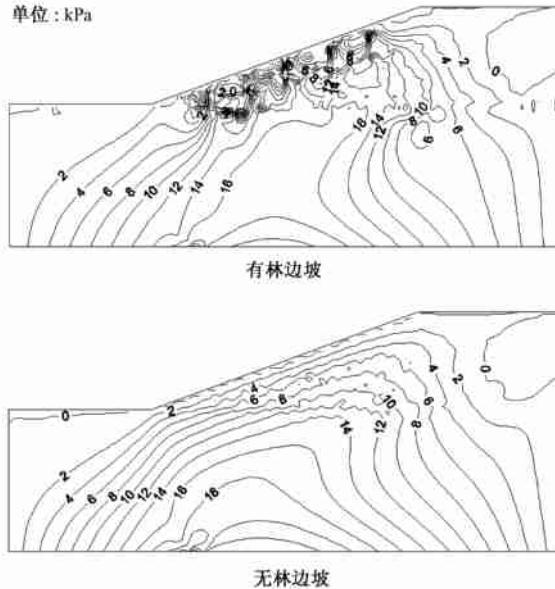
图 4 最小主应力 σ_3 等值线图FIGURE 4 Isoline of minimum principal stress σ_3 图 5 剪应力 τ_{xy} 等值线图FIGURE 5 Isoline of shearing stress τ_{xy}

表 3 边坡代表性点的应力值 kPa

TABLE 3 Stresses of representative points of the slope

| 点号 | 最大主应力 σ_1 | | 最小主应力 σ_3 | | 剪应力 τ_{xy} | |
|----|------------------|--------|------------------|------|-----------------|------|
| | 有林 | 无林 | 有林 | 无林 | 有林 | 无林 |
| 1 | -19.84 | -18.45 | -35.07 | 0.56 | 0.73 | 0 |
| 2 | 9.84 | 8.42 | 4.25 | 0.07 | 0.05 | 0 |
| 3 | -15.71 | -7.83 | -27.59 | 0.08 | 0.22 | 1.79 |
| 4 | -9.31 | -1.86 | -38.04 | 0.85 | 0.10 | 1.95 |
| 5 | 1.03 | 4.46 | -16.16 | 0.36 | 0.05 | 2.12 |
| 6 | -2.38 | 13.71 | -22.85 | 0.49 | 0.14 | 4.73 |
| 7 | -7.80 | 20.14 | -0.03 | 0.39 | 0.13 | 3.75 |

区范围,大大提高了边坡的稳定性。

3.2 边坡位移

(C图6~7) 分别为有林边坡和无林边坡的水平位移等值线图。

移和垂直位移等值线图。由图可知位移趋势呈现出明显的分区性,在边坡深层稳定区域等值线梯度变化比较均匀,位移主要以竖向压缩位移为主,水平位移较小。变形主要发生在坡面附近,顺坡和坡顶的浅层土坡不仅具有较大的竖向位移,而且具有较大的水平位移。

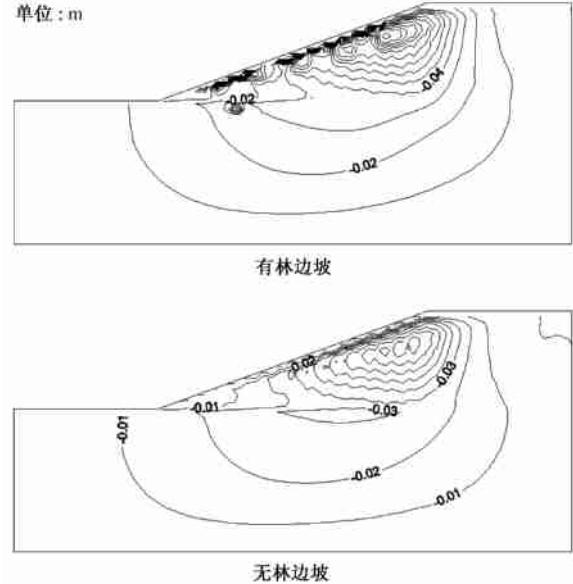


图 6 水平位移等值线图

FIGURE 6 Isoline of horizontal displacement

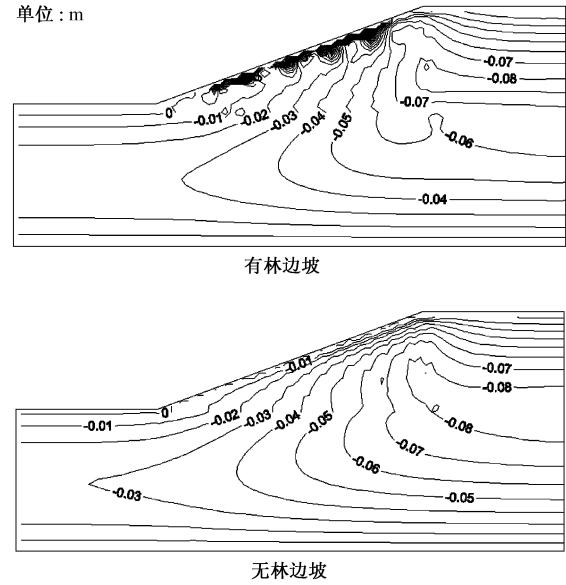


图 7 垂直位移等值线图

FIGURE 7 Isoline of vertical displacement

无林边坡坡脚向土体内侧存在一个水平位移的集中带,为变形的最大区域,坡脚集中带的最大水平位移在0.01~0.03 m范围内,是边坡不稳定的主要部位,一旦应力集中造成土体破坏,就会导致该处土体强度降低,使滑动区的范围不断向上扩展;有林边坡在坡脚集中带的区域范围减小。也就是说,无林边坡的坡脚更容易达到破坏状态。

从表4可以看出,在边坡重力的作用下,全断面几乎均发生了指向边坡下部的水平位移。有林边坡的根系对其后的土体有较大的阻挡作用,因而会产生被动的抗力,此抗力一方面改变了土体的位移模式,另一方面也导致了根系自身的弯曲变形。根系和土体构成一个整体,联合作用,缩小了坡顶拉应力区范围,显著提高了边坡的稳定性,并可有效控制边坡的水平位移和坡顶沉降。树木根系的存在,使得根系周围水平位移等值线变化剧烈,使得有林边坡最大水平位移发生在边坡根系分布区。树体的重力作用会对根系间土壤产生明显的侧向土压力,使得部分土体从根系间流动挤出形成土的绕流。而本文采用的平面应变有限元分析忽略了根系间土的错移和绕流,相当于因根系水平位移而产生的压力全部作用在了根系间土体上,这会使得有限元计算出的坡面水平位移值比实测值略大。与无林边坡相比,有林边坡坡脚处的位移量减小,相应地阻挡了根系分布区较大的水平位移,减弱了边坡不稳定的趋势。

表4 边坡代表性点的位移和应力水平值

TABLE 4 Displacement and stress level of representative points of the slope

| 点号 | 水平位移/m | | 垂直位移/m | | 应力水平 S | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| | 有林 | 无林 | 有林 | 无林 | 有林 | 无林 |
| 1 | -0.026 | 0 | -0.017 | 0 | 0.56 | 0.73 |
| 2 | -0.014 | -0.014 | 0.003 | 0.003 | 0.07 | 0.05 |
| 3 | -0.061 | -0.042 | -0.095 | -0.022 | 0.08 | 0.22 |
| 4 | -0.091 | -0.027 | 0.019 | -0.015 | 0.85 | 0.10 |
| 5 | -0.021 | -0.010 | -0.016 | -0.008 | 0.36 | 0.05 |
| 6 | -0.093 | -0.060 | -0.015 | -0.044 | 0.49 | 0.14 |
| 7 | -0.031 | -0.021 | -0.014 | -0.025 | 0.39 | 0.13 |

边坡垂直位移随深度的增加而减小,有林边坡和无林边坡最大垂直位移均发生在边坡肩部向下约5.5 m的地方,最大垂直位移在0.08~0.09 m范围内(图7)。根系弹性模量比土体大得多,在树体重力作用下,树木根系挤压根系周围土体,有林边坡表层土体会产生向上的位移量。

4 结 论

采用有限元方法,揭示了林木根系对边坡加固的机理,形象地展示了边坡内部的应力状态,数量化了林木根系对于边坡表层土体的作用。根据分析,得出两点结论:

1)边坡最大、最小主应力等值线总体上随深度的增加而增加,根系的存在改变了有林边坡应力场的分布,林木根系使边坡的应力向土层深部传递,弱化了根系层土体应力,使有林边坡更趋于稳定。

2)边坡位移等值线呈现出明显的分区性。在边坡深层稳定区域等值线梯度变化比较均匀,变形主要发生在坡面附近。无林边坡坡脚向土体内侧存在一个位移的集中带,与无林边坡相比,有林边坡在坡脚集中带的区域范围减小。

参 考 文 献

[1] 史敏华,王棣,李任敏.石灰岩区主要水保灌木根系水分分布特征与根抗拉力研究初报[J].山西林业科技,1994(2):17~19.
SHI M H, WANG D, LI R M. Research on soil water distribution and root preliminary of shrubs in limestone area [J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 1994(2):17~19.

[2] 刘国彬,蒋定生,朱显漠.黄土区草地根系生物力学特性研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):21~28.
LIU G B, JIANG D S, ZHU X M. Study on grasses root biomechanics in Loess Plateau [J]. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation*, 1996, 2(3):21~28.

[3] 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.
CHENG H, YAN C S, LI J Q, et al. An experimental study on mechanic performance and mechanism of soil-reinforcement by herb root system [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1):62~65.

[4] 郭维俊,黄高宝,王芬娥,等.土壤-植物根系复合体本构关系的理论研究[J].中国农业大学学报,2006,11(2):35~38.
GUO W J, HUANG G B, WANG F E, et al. Study on constitutive relation of soil-root composite [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2006, 11(2):35~38.

[5] 周跃,陈晓平,李玉辉,等.云南松侧根对浅层土体的水平牵引效应的初步研究[J].植物生态学报,1999,23(5):458~465.
ZHOU Y, CHEN X P, LI Y H, et al. Preliminary study of tractive effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil mass [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(5):458~465.

[6] 向师庆,赵相华.北京主要造林树种的根系研究[J].北京林学院学报,1981,3(2):19~32.
XIANG S Q, ZHAO X H. Study on the root system of major tree species of afforestation in Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry College*, 1981, 3(2):19~32.

[7] 孙少锐,吴继敏,魏继红,等.树根桩加固边坡的稳定性分析与评价[J].岩土力学,2003,24(5):776~780.
SUN S R, WU J M, WEI J H, et al. Stability analysis and evaluation of slope reinforced with root piles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(5):776~780.

[8] 徐中华,钭逢光,陈锦剑,等.活树桩固坡对边坡稳定性影响的数值分析[J].岩土力学,2004,25(增刊2):275~279.
XU Z H, DOU F G, CHEN J J, et al. Numerical analysis of the stability of slopes reinforced by live staking [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Suppl. 2):275~279.

(责任编辑 董晓燕)