

林木根系黄土复合体的非线性有限元分析

张超波 陈丽华 刘秀萍

(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)

摘要:为了揭示林木根系固土的力学机制和林木固坡的抗滑机理,以林木根系黄土复合体为研究对象,采用三轴压缩试验结合有限元模拟的方法,研究了根土复合体的应力应变传递变化。将根土复合体视作单一均匀复合材料,采用非线性弹性模型中的邓肯-张($E-B$)模型作为其复合模型,根据三轴压缩试验结果计算出的模型参数,运用非线性有限元法模拟三轴压缩试验中素土和复合根土复合体的应力场和应变场,绘制等值线图。结果表明:土体中加根能显著提高土体的承载力、限制土体的侧向变形、减少土体的沉降量,模拟结果与三轴压缩试验结果基本一致。可以将有限元方法用于造林边坡的应力应变场研究。

关键词:三轴压缩试验;根系-黄土复合体;邓肯-张($E-B$)模型;非线性有限元

中图分类号: S714.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1522(2008)增刊2-0221-07

ZHANG Chao-bo; CHEN Li-hua; LIU Xiu-ping. **Nonlinear finite element analysis of woody roots-loess composite**. *Journal of Beijing Forestry University* (2008)30(Supp.2)221-227 [Ch, 8 ref.] Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

In order to study the mechanism of woody root system in loess reinforcing and slope antisliding, triaxial compression tests combined with nonlinear finite element simulation were conducted on root-soil composite to investigate its stress-strain relationship. Throughout the whole process, root-soil composite was regarded as a single, uniform and complex material. One of nonlinear elastic models, i. e., Duncan-Chang ($E-B$) model was chosen for the composite model. Based on the results of the triaxial compression tests, parameters of the model were calculated. With these parameters, stress field and strain field of loess and compound roots-soil composite in the triaxial compression tests were simulated by nonlinear finite element method, then isoline maps were easily drawn. Results indicate that adding roots in soil could significantly improve carrying capacity, restrict lateral deformation and reduce subsidence of the soil. The simulated results are primarily the same as the triaxial compression tests, which suggests that nonlinear finite element method could be utilized to analyze stress and strain field of forested slope.

Key words triaxial compression test; root-loess composite; Duncan-Chang ($E-B$) model; nonlinear finite element method

根系是植物直接与土壤接触的器官,从土壤中获得养分和水分,满足植物生长发育,还具有支撑树体与固持土体的重要作用。近30年来,由于科学技术的发展和生态环境建设的需要,根系固坡的研究成为根系研究的热点,根系固坡力学机制研究,成为一个正在拓展的具有学科交叉性的新领域。本文以

林木根系黄土复合体为研究对象,把根系和土体视为一个有机的整体,以土壤力学试验方法探讨了目前研究中较少涉及的本构模型,并计算了模型的全部参数;运用有限元数值分析方法分析了林木根系对土体应力应变的影响,对搞清根系提高边坡稳定性和植树护坡具有指导意义。

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:张超波。主要研究方向:流域生态、山地灾害。电话:010-82380543 Email:boluozhang511@163.com 地址:100083 北京林业大学416信箱。

责任作者: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

1 材料和方法

1.1 试验仪器和软件

三轴压缩试验所用设备系北京华勘科技有限责任公司生产的 KTG-DS 应变式全自动三轴仪, 主要由试验机、压力室、试验机控制系统、周围压力控制系统、反压控制系统、主应力差量测系统、控压压力传感器、排水传感器、体变传感器、数据采集系统、微机等组成。用空气施加围压, 计算机自动采集和处理数据。有限元模拟采用有限元软件 GPDF A2005 (清华大学水利水电工程系, 2005)。

1.2 试验材料

1.2.1 土样

试验土样取自甘肃省天水市的黄土, 为了减少试验土样之间的差异, 本试验取样采取人工开挖取土, 并保证大致在同一水平处取土, 取土深度 50~100 cm, 所取黄土颜色较深, 土质均匀, 坚硬状态, 大孔隙较少。其物理力学性质见表 1。试验土样为制备土, 控制土壤含水量为 15%, 土壤干密度为 1.4 g/cm³。

表 1 土样物理力学性质指标

TABLE 1 Indices of physical and mechanical properties of loess specimen

干密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	含水量 $w/\%$	塑限指数 I_p	液限指数 I_L	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 c/kPa
1.51	13	-0.36	11.1	33.2	4

1.2.2 根系

试验根系采用刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 根系, 挖自甘肃省天水市, 根径为 8 mm, 根系布置到黄土中形成根土复合体, 布置方式分为水平布置、垂直布置和复合布置^[1], 水平根布置长度为 35 mm 的根两段, 垂直根布置长度为 70 mm 的根一段, 复合根布置两段 35 mm 的根和一段 70 mm 的根。

1.3 试样制备与试验方法

对获得的试验土样采用碾散、烘干、过筛和击实的过程重新制备试样, 具体操作制备步骤和方法严格执行现行《土工试验方法标准》^[2] (GB/T 50123-1999) 和土工试验技术手册^[3]。试验采用固结排水试验 (CD), 每组试样采用的围压分布为 $\sigma_3 = 100、200、300、400$ kPa, 剪切速率为 0.012 mm/min, 试样每产生轴向应变 0.4%, 试验仪器自动记录数据 1 次, 当出现峰值后, 再继续剪 5% 轴向应变; 若测力计读数无明显减少, 则剪切至轴向应变达到 20%, 最后把峰值或者轴向应变达到 15% 时的主应力差作为试样的破坏应力差。共对 16 个试样进行了试验, 试样编号如下表。

表 2 试样设计表

TABLE 2 Table of specimen design

围压/kPa	素土	水平根	垂直根	复合根
100	TCCD _{ST} ¹⁰⁰	TCCD _{SP} ¹⁰⁰	TCCD _{CZ} ¹⁰⁰	TCCD _{FH} ¹⁰⁰
200	TCCD _{ST} ²⁰⁰	TCCD _{SP} ²⁰⁰	TCCD _{CZ} ²⁰⁰	TCCD _{FH} ²⁰⁰
300	TCCD _{ST} ³⁰⁰	TCCD _{SP} ³⁰⁰	TCCD _{CZ} ³⁰⁰	TCCD _{FH} ³⁰⁰
400	TCCD _{ST} ⁴⁰⁰	TCCD _{SP} ⁴⁰⁰	TCCD _{CZ} ⁴⁰⁰	TCCD _{FH} ⁴⁰⁰

注: 试样编号 TC 表示常规三轴压缩, CD 表示固结排水, 上标数字表示围压, 下标字母 ST 为试样类型素土拼音缩写, 以此类推。SP 为水平, CZ 为垂直, FH 为复合的缩写。

2 结果与分析

2.1 三轴试验结果

三轴压缩试验得到的素土和各种根土复合体试样应力-应变关系曲线见图 1 中 a、c、e、g, $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 关系呈现明显非线性, 试样的应力-应变曲线在不同围压下, 随着轴向应变的增加, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 之值均在不断增加, 无应力峰值, 表现为硬化型^[4], 采用轴应变为 15% 的主应力差为破坏应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ^[5]。随着围压的不断增大, 素土和 3 种根土复合体所得主应力差逐渐提高, 相应破坏应力和应变也越来越大。

在土体的强度方面, 布置根系的复合体强度较素土要高, 尤其是当围压增加时, 强度增强效果更明显。相同围压时, 对比各复合体破坏时的强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与素土破坏时的强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fs}$, 发现根系在提高土体强度方面: 围压 100 kPa 时, 复合根的增强效果最合理有效, 水平根的效果次之, 垂直根的效果最不理想; 围压 200 kPa 时, 复合根的增强效果最合理有效, 垂直根的效果次之, 水平根的效果最不理想; 围压 300 kPa 时, 复合根的增强效果最合理有效, 垂直根的效果次之, 水平根的效果最不理想; 围压 400 kPa 时, 水平根的增强效果最合理有效, 复合根的效果次之, 垂直根的效果最不理想。可以看出复合根在增强土体强度方面效果最为显著, 复合根林木树种最适合于增强土体强度、保持土体稳定。

2.2 有限元分析

2.2.1 根土复合体的本构模型

根土复合体可以看成满足邓肯 (Duncan) 模型的土体、一定应力范围内线弹性体的根系和土体与根系之间的古德曼 (Goodman) 接触单元^[6] 三者的组合体, 也可以看成一种满足某一模型的复合材料, 本文将根土复合体视为复合材料, 探讨其本构模型问题。根土复合体在加载时的变形不仅随荷载的变化而不同, 而且还与加载前的应力路径有关, 非线性弹性模型能较好地模拟这种非弹性的应力应变关系。图 1

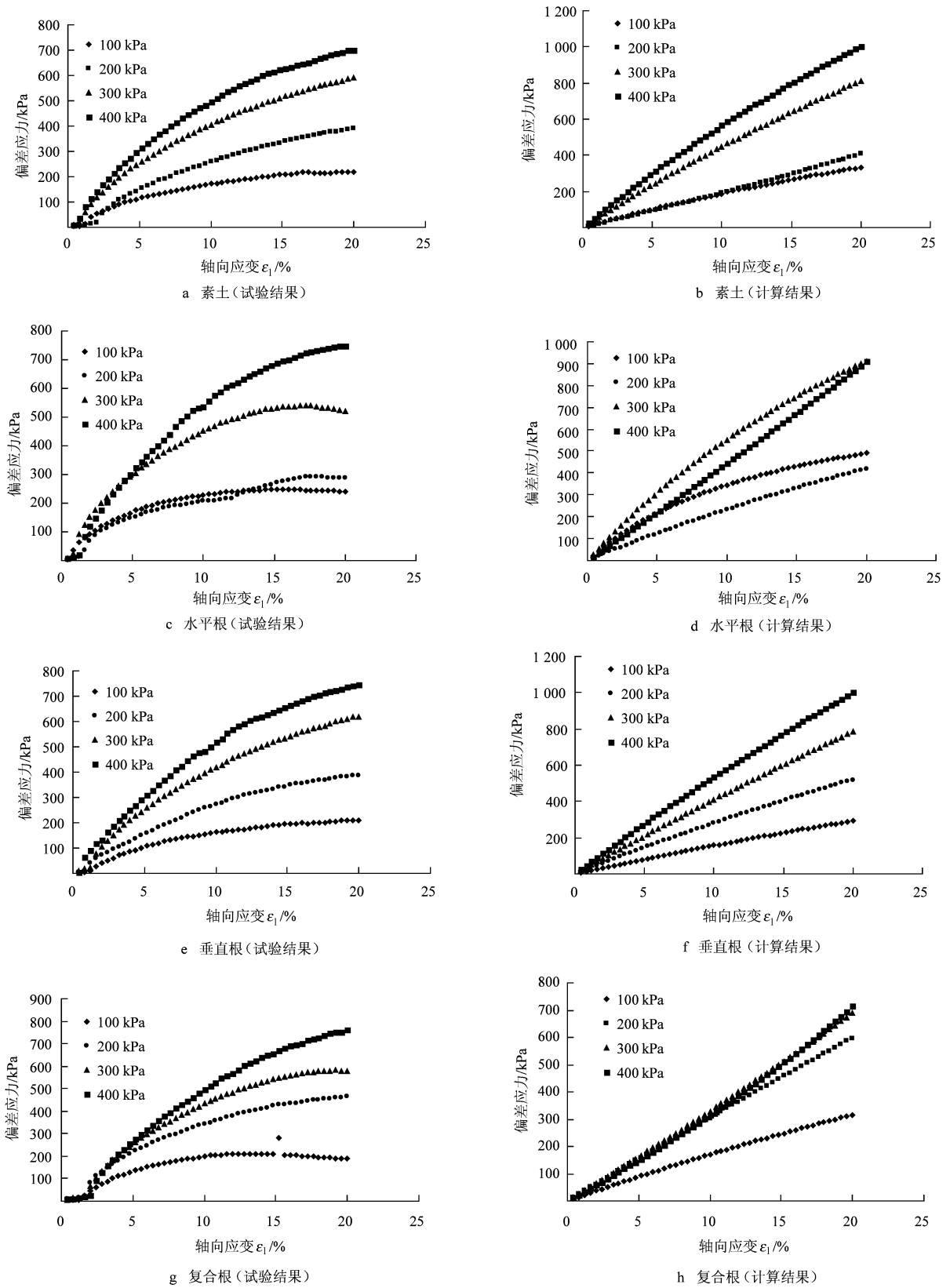


图 1 偏差应力和轴向应变曲线

FIGURE 1 Deviator stress and axial strain curves

中 a、c、e、g, $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 曲线较好的符合双曲线关系, $\epsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 呈现较好的线性关系, 因此, 根土复合体的 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 试验曲线可以用考特纳

(Kondener) 双曲线公式表示, 即邓肯-张 (Duncan-Chang) 模型^[5,7]。建立在增量广义虎克定律基础上的邓肯-张模型, 具有可以反映应力应变关系的非线性, 参数的物理意义明确和易于确定, 易于掌握和

便于在数值中运用等这一类非线性弹性模型的优点^[8],因而应用广泛。

邓肯-张($E-B$)模型共有8个参数: K (弹性模量基数)、 K_{ur} (卸载弹模基数)、 n (弹性模量指数)、 R_f (破坏比)、 K_b (体积模量参数)、 m (体积模量指数)、 c (土体粘聚力)和(土体内摩擦角)。

表3 邓肯-张($E-B$)模型参数

TABLE 3 Parameters of Duncan-Chang ($E-B$) model

	K	K_{ur}	n	R_f	K_b	m	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
素土	27.5	33.0	0.663	0.475	34.817 7	0.635 6	25	24.6
水平根	87.1	104.5	0.007	0.664	20.347 0	0.603 1	34	24.7
垂直根	27.5	33.0	0.708	0.511	15.689 2	0.692 3	53	22.7
复合根	60.3	72.4	-0.147	0.440	29.073 7	0.660 4	59	22.1

2.2.2 三轴试验数值分析

三轴试验中把根土复合体作为复合材料,看作一个整体进行了研究。下面利用有限元软件GPDF A2005对三轴试验中的复合根在围压200 kPa轴向应变15%时进行平面应变数值分析,为了试验的可比性,同时对素土在相同条件时也进行分析。为使理论计算符合实际,采用的非线性分析技术为基本增量法,计算增量包括施工增量(分成若干级,一级一级增加新单元的增量)和荷载增量(施加的面力增量)。对素土和根土复合体的应力场和应变场进行了模拟,并绘制了等值线图。计算中假定土体为均质、各向同性材料,素土和根土复合体以邓肯-张($E-B$)模型为其本构模型。

2.2.2.1 网格划分

x 轴方向为水平长度 L 方向, y 轴方向为竖直高度 H 方向, z 轴方向为垂直 xy 平面的方向。单元最简单的划分方法是用水平面按等距离高度划分试样,再用与试样同轴的竖直柱面按半径变化等分试样,三轴试验中试样为轴对称圆柱体,只取一个纵向截面进行网格划分,即坐标 z 值为0,水平长度和竖直高度值和划分结果见图2。

2.2.2.2 边界与加载条件

试样底部在三轴仪上全约束,在 x 、 y 和 z 3个方向上都不能产生位移,试样上端在 x 和 z 方向上不能移动, y 方向可以自由移动。在素土试样 y 方向上施加均布力 $\sigma_1 = 539 \text{ kPa}$,复合根土复合体试样 y 方向上施加均布力 $\sigma_1 = 627 \text{ kPa}$, σ_1 是试样轴向应变达到15%即被认为破坏时施加的主应力,在两种试样周围施加 x 方向均布力 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$,即围压200 kPa,有限元计算模型参数选择见表3中素土和复合根对应参数。

2.2.3 分析结果

根据表3中素土和复合根邓肯-张($E-B$)模型

根土复合体在不同围压时的理论曲线如图1中b、d、f和h。从图中可知,围压越大计算结果和试验结果相差会越大,但理论曲线与试验曲线走势基本一致,基本吻合。说明求出的邓肯-张模型能反应根土复合体的应力-应变特征。素土和各根土复合体的模型参数如表3。

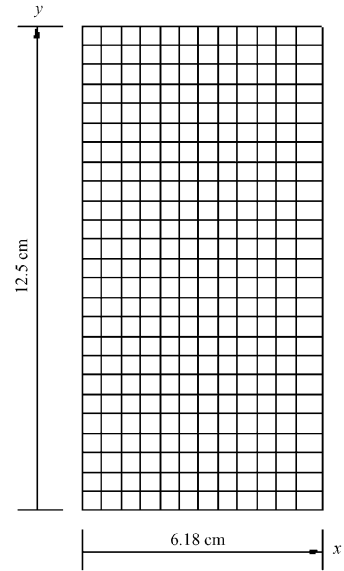


图2 试样网格划分

FIGURE 2 Mesh of specimen

参数进行计算得出的试样大主应力(图3)、小主应力(图4)等值线、水平位移(图5)、垂直位移(图6)等值线和应力水平(图7)等值线图如下。从计算结果图可得如下结论。

1)大、小主应力。图3、4表示素土和根土复合体的大主应力、小主应力。素土和根土复合体大主应力、小主应力等值线图分布规律基本类似,但素土的等值线图较为紊乱,数值上同一节点的小主应力,素土比根土复合体小100~200 kPa;同一节点的大主应力,素土比根土复合体小200~300 kPa。素土最大主应力出现在距离试样底部大约2 cm处的中心轴处,大小为600 kPa左右,最小主应力出现在距离试样顶部大约1.5 cm处的中心轴处,大小为270 kPa左右;根土复合体最大主应力出现在距离试样底部大约2 cm处的中心轴处,大小为840 kPa左右,最小主应力出现在试样底部中心轴处,大小为460 kPa左右,表明根土复合体和素土同样被破坏时,根

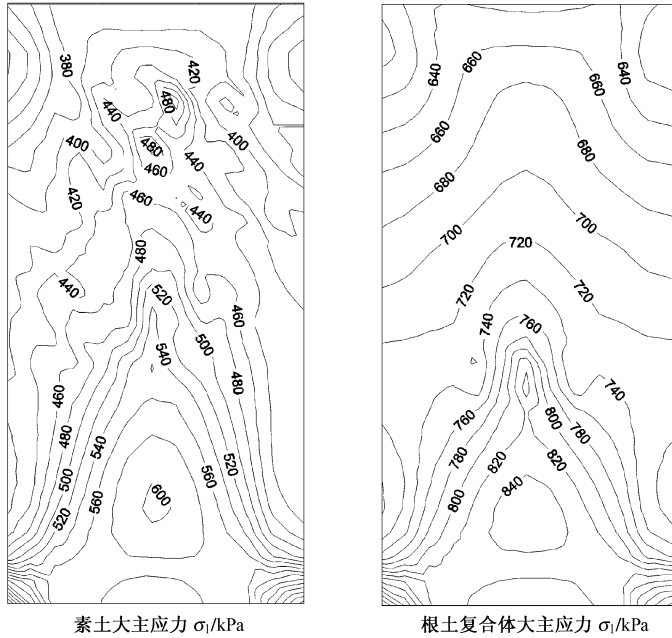


图 3 大主应力等值线图

FIGURE 3 Isolines of major principal stress σ_1

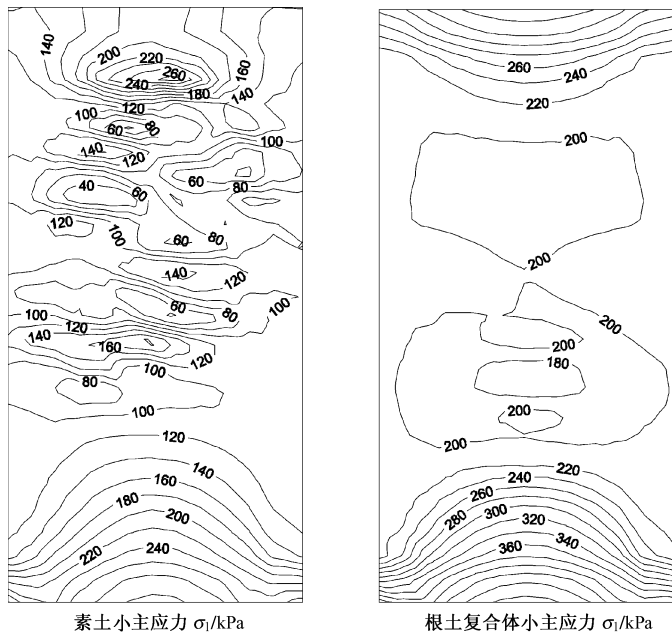


图 4 小主应力等值线图

FIGURE 4 Isolines of minor principal stress σ_3

土复合体比素土强度更大,能承受更大的外荷载作用。

2)水平位移。有限元法能直接得出各节点的水平位移,图 5 表示素土和根土复合体的水平位移,向左水平位移以负值表示,向右水平位移以正值表示。试样为轴对称体,水平位移等值线图中以试样中心轴为界左右水平位移值大小对称,方向相反。两种情况的最大水平位移都出现在高度 2~8 cm 处,且随分析点距试样中心轴水平距离而变化,距离越小水平位移越小。由于试样顶部和底部水平方向被约束,越靠近顶部和底部水平位移越小。素土最大水

平位移为 2.4 cm,根土复合体最大水平位移为 0.35 cm,根土复合体最大水平位移比素土减少了 85%,表明加根能明显限制试样的水平变形。

3)竖向位移。图 6 为素土和根土复合体的竖向位移等值线图,竖向位移实际工程中经常称为沉降量。竖向位移从试样底部往上到顶部逐渐增加,竖向位移基本以试样中心轴左右对称。素土最大竖向位移发生在距离试样顶部大约 2 cm 处,大小为 5.4 cm。根土复合体最大竖向位移发生在试样顶部,大小为 2.4 cm,根土复合体最大竖向位移比素土减少了 55.6%,表明加根还能有效地减少试样的竖向位移。

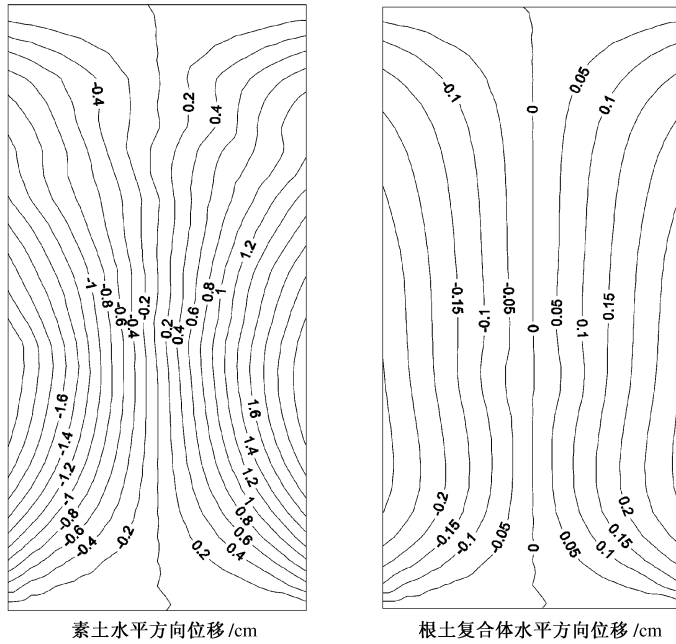


图5 水平位移等值线图

FIGURE 5 Iso-lines of horizontal displacement

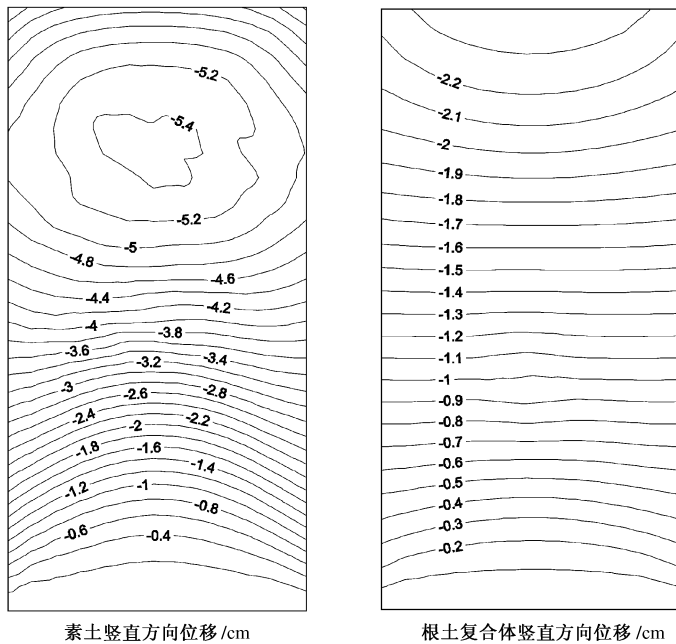


图6 垂直位移等值线图

FIGURE 6 Iso-lines of vertical displacement

4) 应力水平: 应力水平 S 用来衡量土体强度发挥的程度, 定义为计算所取点的主应力差除以破坏时的主应力差, 即 $S = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 当 $S < 1.0$, 则土体抗剪强度未得到充分发挥; $S = 1.0$, 强度发挥得正好; 越接近 1.0 单元破坏的可能性越大; $S > 1.0$, 则土体已破坏或进入塑性阶段。图 7 为素土和根土复合体的应力水平等值线图。两种情况的应力水平都服从试样顶部和底部两端较低, 中间较高的分布规律。根土复合体除了顶部和底部小部分地区外, 其他大部分区域应力水平达到了 1.0, 复合体强度充分得到发挥。同样素土大部分区域达到

1.0, 但其中有少许区域应力水平超过了 1.0, 且应力水平不均匀; 从等值线的分布素乱可以看出, 在试样顶部和底部以及中间都有小部分地区强度未得到充分发挥, 而根土复合体的应力水平等值线图从上到下分布均匀, 整个土体强度得到充分发挥。这表明树根能明显改善土体中的应力水平状态, 使应力重分布均匀。

3 结 论

本文根据弹塑性理论, 把根土复合体看成宏观上均匀的复合材料, 土与根的相互作用表现为内力,

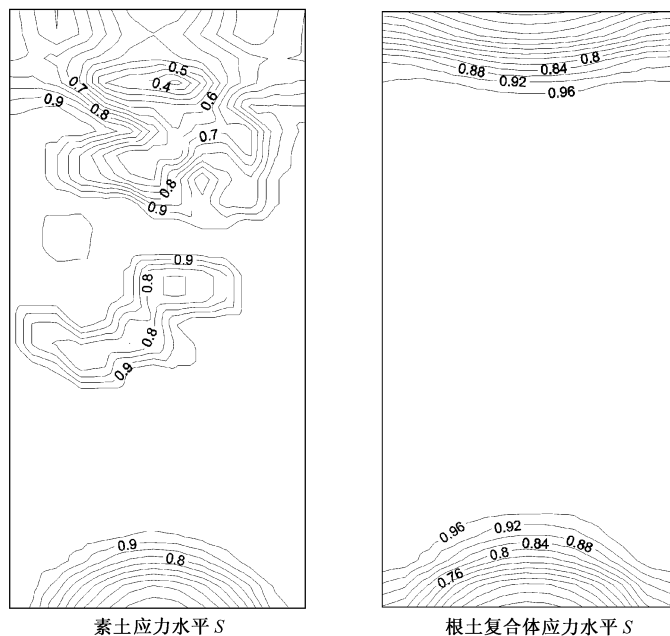


图 7 应力水平等值线图

FIGURE 7 Isolines of stress level S

只对复合材料的性质产生影响,而不直接出现到应力应变的计算当中,采用邓肯-张($E-B$)模型作为根土复合体的本构模型,该模型能较好地反应复合体的应力应变关系。

通过三轴试验研究和非线性有限元分析可以看出,试验研究和数值模拟得出了相似的结论,即土体中加根能显著提高土体的承载力,限制土体的侧向变形,减少土体的沉降量。由此可见,用有限元法来模拟根土复合体的三轴试验是可行的,可以尝试将有限元方法用于分析造林边坡的应力应变场,值得进一步探讨和研究。

但由于试验控制难度大,三轴试验结果与真值有一定偏差,以及根土相互作用的复杂性,本构模型描述有误差,所以有限元分析结果与真实值有一定差距,还有待进一步改进方法提高其精确度。

参 考 文 献

- [1] 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.
LIU X P, CHEN L H, SONG W F. Study on the shear strength of forest root-loess composite[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 67-72.
- [2] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准(GB/T 50123-1999) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 90-107.
State Bureau of Quality and Technology Supervision, Ministry of Construction of the People's Republic of China. *Standard of soil test method (GB/T 50123-1999)* [S]. Beijing: China Planning Press, 1999: 90-107.

- [3] 南京水利科学研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 86-103.
Nanjing Hydraulic Research Institute. *Handbook of soil test technology* [M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 86-103.
- [4] 刘垂远. 土工合成材料加筋土体的应力-应变特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2004: 24-33.
LIU C Y. *Study on stress-strain relationship for soils reinforced by geosynthetics* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004: 24-33.
- [5] 冯卫星, 常绍东, 胡万毅. 北京细沙土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 327-330.
FENG W X, CHANG S D, HU W Y. Experimental study on parameters of Duncan-Chang model for Beijing fine sandy soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(3): 327-330.
- [6] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系固土作用数值分析[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊 2): 80-84.
SONG W F, CHEN L H, LIU X P. Numerical analysis on the effects of forest root system on soil reinforcement [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(Supp. 2): 80-84.
- [7] 张向东, 于崇, 郝凤山. 风积土本构模型参数试验研究[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(15): 2 306-2 308.
ZHANG X D, YU C, HAO F S. Experiment study on parameters of Duncan-Chang model for aeolian soil [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(15): 2 306-2 308.
- [8] 刘世川, 刘国明. 高填路堤的非线性有限元分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 513-517.
LIU S C, LIU G M. Nonlinear FEM analysis of high filled embankment [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science)*, 2005, 33(4): 513-517.

(责任编辑 赵 勃)