

# 基于 ANSYS 建立的油松单根复合体模型的验证

鞠青娟, 赵红华

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 为了揭示林木根系固土的力学机制,以根土复合体为研究对象,应用有限元程序 ANSYS 12.0, 研究油松单根与土壤间的摩擦特性。[方法] 将根土复合体视为根、土和根土接触面 3 部分组成的离散化模型,油松单根采用线弹性本构模型,土体采用理想弹塑性本构模型。根据三轴压缩试验及根系拉拔试验计算出的模型参数,运用非线性有限元法模拟在不同埋深,不同直径下的单根拉拔试验。分析根土复合体的摩擦力与滑移量的变化关系,绘制关系曲线。将数值分析结果与拉拔试验数据进行对比。[结果] 有限元模拟结果与根系拉拔试验结果基本一致:根土间初始摩擦力和峰值摩擦力随根系的埋深和直径的增加而增大,峰值滑移量随根系埋深增加而增大。[结论] 建立的单根复合体有限元模型可以用于根土摩擦特性的研究,并为进一步对多角度的立体群根根系进行数值分析提供依据。

**关键词:** 有限元; 接触分析; 根土复合体模型; 摩擦特性

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)05-0155-04

中图分类号: S727.22

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.094

## Verification of *Pinus Tabulaeformis* Root-Soil Model Based on ANSYS

JU Qingjuan, ZHAO Honghua

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

**Abstract:** [Objective] In order to reveal the mechanism of soil reinforcement by roots, soil-root composites was selected to study the tribological properties between roots of *Pinus tabulaeformis* and soil by using the finite element program ANSYS 12.0. [Methods] Soil-root composites was regarded as the discrete model which was composed of root, soil and root-soil contact face. The root was analyzed by the linear elastic constitutive model, and the soil was analyzed by the elastic perfectly plastic constitutive model. The model parameters were calculated according to the triaxial compression test. The pulling out test of single root was simulated by nonlinear finite element in different burial depths and various root diameters. The relationship between friction and slip is analyzed and the curve was drawn. The results from numerical analysis were used to compare with the experimental data from the pulling out test. [Results] The results of the finite element numerical simulation were agree with the pulling out tests as the initial friction and peak friction increased with the increase of burial depth and root diameter. [Conclusion] The established finite element model can be used for the analysis of the root-soil friction characteristics, and it provides the basis for further numerical analysis.

**Keywords:** finite element method; contact analysis; soil-root composite model; the friction characteristics

周仲荣等<sup>[1]</sup>在《摩擦学发展前沿》中指出计算机数值模拟可以重现摩擦学的现象和过程,它与试验研究一起成为探索摩擦学机理和规律的工具。植物根系固土力学机制建立在根系与土壤接触界面摩擦锚固性能的基础之上,对采用生物措施治理水土保持和防止土体滑坡具有重要作用<sup>[2]</sup>。多年来,人们通过不同的试验方法对不同树种的根系进行了摩擦锚固特性研究,如宋维峰等<sup>[3]</sup>引进直剪试验的方法研究了乔木和灌木根系与土体的界面摩擦特性;刘秀萍等<sup>[4]</sup>通

过根系拉伸试验研究了油松和刺槐根系与土体接触面的作用特性;刘小光等<sup>[5]</sup>通过拉拔试验对油松、落叶松、蒙古栎和榆树进行根土界面摩擦特性研究。相比剪切试验,直接拔出试验的方法可以对摩擦锚固性能进行更直观定性的研究。虽然许多学者通过试验对摩擦特性进行了研究,但是试验中所用的试验仪器限制了根系的埋置深度,对较长的天然根系进行摩擦研究不能胜任,此外仅少数文献从数值分析上研究根土界面摩擦性能。因此利用有限元软件数值模拟根

收稿日期:2014-06-12

修回日期:2014-09-15

资助项目:国家自然科学基金项目“基于应变控制的根系固土纤维来模型研究”(31400616)

第一作者:鞠青娟(1988—),女(汉族),山东省威海市人,硕士研究生,研究方向为结构工程。E-mail:278144144@qq.com。

通信作者:赵红华(1967—),女(汉族),山西省太原市人,博士后,副教授,主要从事土木学科有限元分析研究。E-mail:zhaohh@bjfu.edu.cn。

系与土壤的摩擦特性具有创新性。目前根土界面摩擦特性的研究常常借鉴桩土界面摩擦特性的研究方法<sup>[6-10]</sup>。在根系摩擦锚固性能的研究中,将根系与土体组成的复合体称为根土复合体,根土复合体中土体和根系共同受力、协调变形。为建立有限元模型首先需要将几何模型进行离散化处理,宋维峰等<sup>[11]</sup>就根土复合体的有限元离散化模型进行了探讨,其中考虑界面单元的模型是将根土复合体分为土体单元、根系单元、土和根系之间相互联系的接触单元三部分。该离散化模型考虑了根系与土体之间的相对滑动,是较能描述根土复合体实际情况的分析模式。因此本文基于刘小光<sup>[12]</sup>油松根系拉拔试验,通过建立根土复合体有限元离散化模型,利用有限元软件 ANSYS 模拟单根拉拔试验,对根土界面的摩擦特性进行研究分析与拉拔试验数据进行对比,验证 ANSYS 建立的单根复合体有限元模型可以应用于根土摩擦特性的研究中,为将来进一步对一个完整的根系体系进行数值分析提供基础和依据。

## 1 拉拔试验和有限元模型的建立

### 1.1 拉拔试验

拉拔试验通过根系拉拔试验机对根系提供拔出荷载,由采集仪采集拉拔过程中施加的载荷和根系伸长滑移(图 1)<sup>[13]</sup>。试验采用单一变量的研究方法,对直径范围 1.26~9.59 mm 的 315 个单根进行拉拔试验,研究直径对单根—土壤摩擦锚固性能的影响;同时对埋深分别为 50,100 和 150 mm 的多个单根进行拉拔试验,经过统计分析最终得到载荷与滑移量之间的变化关系,研究埋深对单根摩擦锚固性能的影响。

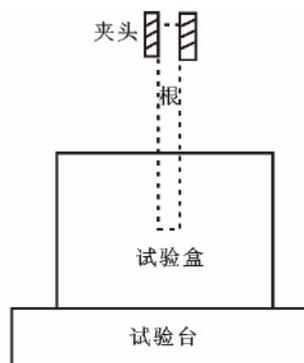


图 1 拉拔试验装置示意图

### 1.2 有限元模型的建立

Ansys 有限元数值模拟的步骤为:选择单元类型;定义材料参数;建立几何模型和网格划分;建立接触对;施加约束和载荷;求解。

#### 1.2.1 单元类型的选择 根和土都采用 solid45 实

体单元,该单元是 8 节点 6 面体单元,其中每个节点都有 X,Y,Z 这 3 个方向的自由度。具有弹性、塑性、大应力、大应变的特点。根与土间的相互作用采用面—面接触单元进行模拟,目标单元采用 Target170 单元,接触单元采用 Conta174 单元。Conta174 和 Target170 单元有 8 个节点,每个节点有 3 个自由度,没有扭转和弯曲。

1.2.2 定义根和土的材料参数 油松根系采用线弹性本构模型:弹性模量为  $6 \times 10^3$  Pa,泊松比为 0.2,密度为  $1.11 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup><sup>[14]</sup>;土体采用能够很好地反映土体非线性特性的 Drucker—Prager 模型:弹性模量为  $1.17 \times 10^6$  Pa,泊松比为 0.3,密度为  $1.52 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,黏聚力为  $1.54 \times 10^3$  Pa,内摩擦角为 24.45°,摩擦系数为 0.54。

1.2.3 实体模型及网格划分 根据拉拔试验中土体和根系的几何尺寸建立实体模型,土体模型为边长 200 mm 的立方体。根系进行等直径处理,在埋深 50 mm 且一定的情况下,单根直径分别为 1.51,3.21,5.15 和 7.82 mm 这 4 种单根模型;在直径 7.82 mm 一定的情况下,单根埋深分别为 50,100 和 150 mm 3 种单根模型。单根埋深 50 mm 时,单根模型划分为 180 个单元,土体划分为 2 555 个单元;单根埋深 100 mm 时,单根模型划分为 270 个单元,土体划分为 3 110 个单元;埋深 150 mm 时,单根模型划分为 360 个单元,土体模型划分为 3 665 个单元。

1.2.4 接触对的建立 在 ANSYS 软件接触问题的模拟中通过定义实常数来识别接触对。通过选项 Keyop(12),设置接触面的算法为罚函数法。罚函数法是通过接触刚度在接触力与接触面间穿透值的基础上建立力与位移的线性关系;在面—面接触模型中:

$$CS = CP \times \mu, CP = CT \times FKN,$$

$$FKN = \mu \times PRES / SLTO \quad (1)$$

式中:CS——接触摩擦力;CP——接触压力;CT——接触渗透值;FKN——法向接触刚度;μ——摩擦系数;PRES——接触压力;SLTO——最大滑移因子。由式(1)可知有 2 个重要的力学参数,即法向刚度 FKN 和摩擦系数 μ 控制了接触的受力行为。因此这 2 个参数的正确取值,决定接触模拟的正确性。作为非线性接触问题,FKN 取值只能采用试算的方法确定。因为 FKN 越小,计算越容易收敛,所以先用一个比较小的 FKN 开始试算,收敛后再改大些,由于接触刚度 FKN 越大,则穿透越小,结果越合理,因此,把 FKN 改大重新计算,直到有一个满意的结果<sup>[15]</sup>。

1.2.5 施加边界条件、载荷和求解 施加面约束和位移载荷。在土体模型的前后左右各面施加全约束,

对土体模型下表面施加 Y 方向(垂直方向)的约束,对埋深 50,100 和 150 mm 的根土复合体模型在根系模型的上表面分别施加 Y 方向的位移载荷 50,100 和 150 mm。接触分析为非线性问题,所以将非线性求解打开进行非线性求解。

## 2 结果与分析

### 2.1 结果对比

为了验证建立的非线性有限元接触模型可以用来模拟单根与土体接触界面的摩擦特性,对不同埋深和不同直径的单根分别进行有限元模拟,并将两种情况下的有限元分析结果分别与试验数据进行对比。

2.1.1 不同埋深的单根结果对比 图 2 表示直径为 7.82 mm 埋深分别为 50,100 和 150 mm 这 3 个单根复合体模型在数值分析中得到的摩擦力与滑移量的关系曲线。由图 2 可见在 3 种不同埋深的情况下,油松单根的摩擦力随滑移量先增大后减小。图 3 表示直径为 7.82 mm 埋深分别为 50,100 和 150 mm 这 3 个单根在拉拔试验中得到的摩擦力与滑移量的关系曲线。对比图 2 与图 3 可知数值模拟得到的摩擦力与滑移量关系曲线与拉拔试验曲线基本吻合,同时可以直观地看到峰值摩擦力随埋深的增加而增大。表 1 为不同埋深下在数值分析和拉拔试验中分别得到的初始摩擦力、峰值摩擦力和峰值滑移量的数据。从

表 1 中数值模拟数据可以看到初始摩擦力、峰值摩擦力和峰值滑移量均随单根埋深的增加而增大;对比表 1 中数值模拟和拉拔试验两组数据可知数值模拟得到的数据大小比试验值偏大。

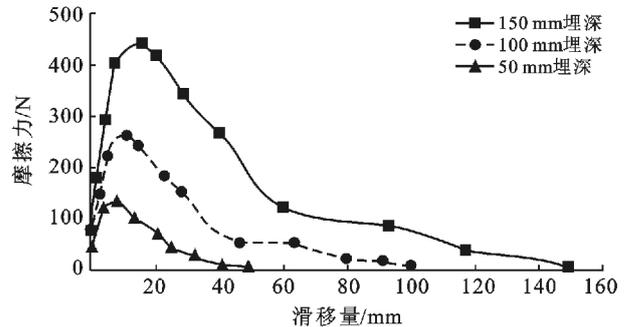


图 2 数值模拟中不同埋深单根的摩擦力-滑移量关系曲线

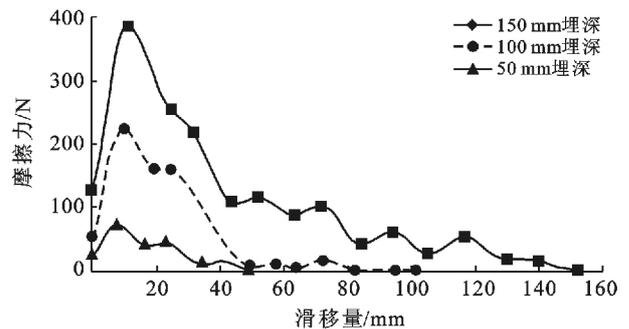


图 3 拉拔试验中不同埋深单根的摩擦力-滑移量关系曲线

表 1 不同埋深时数值模拟与拉拔试验的数据对比

埋深/mm	初始摩擦力/N		峰值摩擦力/N		峰值滑移量/mm	
	模拟数据	试验数据	模拟数据	试验数据	模拟数据	试验数据
50	39.29	22.09	133.82	71.57	8.97	7.31
100	78.57	48.58	267.66	219.68	11.96	9.35
150	130.95	120.68	446.09	377.34	15.82	11.37

2.1.2 不同直径的单根结果对比 图 4 为埋深 50 mm 直径分别为 1.51,3.21,5.15 和 7.82 mm 这 4 个单根复合体模型在有限元数值模拟中得到的摩擦力与滑移量关系曲线。图 5 为埋深 50 mm 直径分别为 1.51,3.21,5.15 和 7.82 mm 这 4 个单根复合体模型在单根拉拔试验中得到的摩擦力与滑移量关系曲线。对比图 4 与图 5 可知,数值模拟得到的摩擦力与滑移量曲线与试验曲线基本吻合,同时可以直观地看到峰值摩擦力随单根直径的增加而增大。表 2 为不同直径下在数值分析和拉拔试验中分别得到的初始摩擦力、峰值摩擦力和峰值滑移量的对比数据。从表 2 中数值模拟的数据可以看到初始摩擦力、峰值摩擦力均随单根直径的增加而增大,而峰值滑移量随直径的变化不大;对比表 2 中数值模拟和拉拔试

验两组数据可知数值模拟得到的数据大小比试验值偏大。

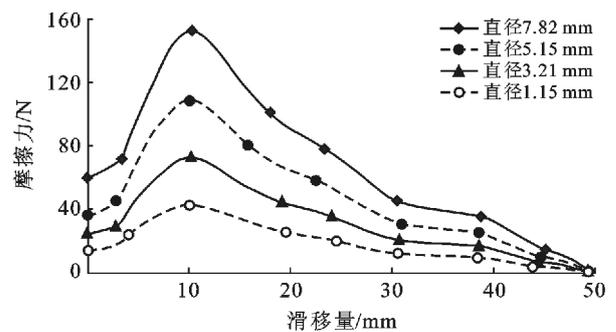


图 4 数值模拟中不同直径的单根摩擦力-滑移量关系曲线

### 2.2 结果分析

数值模拟得到的数据大小比试验值偏大。原因

有以下几方面:首先,由于有限元法是一种工程近似求解的方法,与真实值相比存在一定的误差,用有限元软件进行工程计算时重要的是对结果的审视分析,对结果要有正确的认识,从而对工程分析起到一定的指导作用;第二,有限元分析中根系模型是按等直径进行处理,由摩擦原理可知接触面积越大摩擦力越大;第三,在数据模拟中仅将单根模型简化成线弹性体,通过泊松比、弹性模量和密度来体现油松的材料特性,没有完全模拟出单根真实的材料特性,对结果造成一定误差。综上所述,虽然数值模拟的结果比试验值偏大但在误差允许范围之内,且有限元数值模拟的曲线与试验曲线基本吻合,因此数值模拟结果对

摩擦特性分析起到一定的验证作用,具有一定的意义。

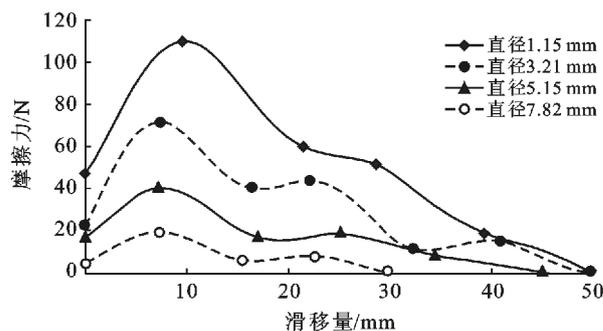


图 5 拉拔试验中不同直径单根的摩擦力-滑移量关系曲线

表 2 不同直径时数值模拟与拉拔试验的数据对比

直径/mm	初始摩擦力/N		峰值摩擦力/N		峰值滑移量/mm	
	模拟数据	试验数据	模拟数据	试验数据	模拟数据	试验数据
1.15	14.14	4.45	43.24	19.13	9.90	7.07
3.21	24.05	16.76	73.53	39.91	9.98	7.79
5.15	36.07	22.09	110.30	71.57	10.01	7.33
7.82	60.04	46.54	154.42	109.85	10.11	9.77

### 3 结论

本文基于非线性接触分析,建立由根、土、根与土之间的接触界面组成的根土复合体离散化模型,对油松单根拉拔试验进行三维有限元模拟。根系采用线弹性本构模型,土体采用理想弹塑性本构模型,将有限元分析结果与拉拔试验结果进行对比,得到相似的结论:摩擦力随滑移量先增大后减小即根在被拔出的过程中分为 2 个阶段,陡峭上升段和陡峭下降段;初始摩擦力、峰值摩擦力和峰值滑移量随根系埋深和直径的增加而增大。数值模拟根系摩擦力与滑移量的变化规律与实测资料基本吻合。

研究结果证明建立的模型用于拉拔试验中根土接触摩擦的研究是有效、可行的。在试验设备有限和耗时耗力的情况下,有限元分析无疑是最优选择。尽管根土复合体模型已经被广泛认可及应用,但是通过 ANSYS 有限元非线性接触分析来模拟根土摩擦特性具有创新性。以本次有限元分析的模拟验证作为基础可以将有限元非线性接触分析应用到复杂的根系固土机制研究中,且值得进行进一步探讨和研究。由于根系模型的等直径简化和接触参数设置等原因有限元分析结果与真实值间存在一定误差,因此还需进一步不断修改模型和调试参数以提高数值模拟的精确度。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 周仲荣,雷源忠,张嗣伟. 摩擦学发展前沿[M]. 北京: 科学出版社,2006.

[2] 封金财,王建华. 植物根系对边坡的加固作用模拟分析[J]. 江苏工业学院学报,2005,17(3):27-29.

[3] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍. 根系与土体接触面相互作用特性试验[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):62-65.

[4] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰. 油松根系抗拉应力与应变全曲线试验研究[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):66-70.

[5] 刘小光,冀晓东,赵红华,等. 油松根系与土壤摩擦性能研究[J]. 北京林业大学学报,2012,34(6):63-67.

[6] 俞轩,郭小刚. ANSYS 在桩土接触非线性中的应用[J]. 山西建筑,2012,38(26):77-79.

[7] 赵卫平. 基于 ANSYS 接触分析的粘结、滑移数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(2):44-51.

[8] 李妍. 基于 ANSYS 软件的接触问题分析及在工程中的应用[D]. 长春:吉林大学,2001.

[9] 刘云平,包华,洪俊青,等. ANSYS 的接触分析在钢筋混凝土滑移中的应用[J]. 南通大学学报:自然科学版,2009,8(2):70-73.

[10] 王辉. 桩、土、结构相互作用三维数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

[11] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍. 林木根系与土体相互作用的有限元数值模拟中几个关键问题的探讨[J]. 水土保持研究,2009,16(4):6-13.

[12] 刘小光. 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.

[13] 刘小光,赵红华,冀晓东. 油松和落叶松根与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学报,2012,32(6):550-556.

[14] 刘秀萍. 林木根系固土有限元数值模拟[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[15] 甘立刚,李碧雄,吴体,等. 桩土接触数值模拟试验[J]. 四川建筑科学研究,2009,35(2):131-134.