

基于 Abaqus 的对于直根抗拔强度研究

郭晓晓

(香港大学 工程学院 香港)

摘要: 树根的抗拔强度是多重因素共同影响的结果,比如树根的几何模型(长度、直径和枝杈特点)、物理属性(杨氏模量和泊松比)和土壤-树根接触属性(土壤种类、围压大小和摩擦系数)等。基于有限元的 2D 模型来研究几何属性如何影响树根的抗拔强度。结果显示,树根和土壤的总接触面积是最关键的能影响树根抗拔强度的因素。

关键词: 根土模拟; 抗拔强度; 边坡; Abaqus

中图分类号: TU17; TU4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)04-0073-04

0 引言

21 世纪初,由 Operstein 提出了以植被覆盖来增强边坡稳定性,相对于传统土钉墙法,植被覆盖能完美地达到稳定边坡和美化环境的双赢效果。

植被不仅能在美化环境方面起到关键作用,而且在稳定边坡方面也有其不可替代的作用。比如,植被自身的吸水作用,可以有效地减少土壤含水率,增强土壤强度;一般来说,柔软区和滑动面的扩散会直接导致边坡滑动,然而广泛分布的植物根部系统可以很好地链接这些柔软区和滑动面,使这个边坡变成一个更为内部稳定的系统;植被的作用不仅仅局限在物理方面,在防治水土流失,改善微环境方面也是独一无二的。因此很多国内外学者开始研究如何量化植被来提升边坡的稳定性。其中最重要的参数莫过于根的抗拔强度。

从 20 世纪 90 年代开始,很多学者开始提出用数值模拟的方法来进行树根的拔出。其中最著名的两种模型是:FBM(Fiber Bundle Model)和 RBM(Root Bundle Model)。FBM 是 Pollen 于 2005 年提出的,本意是为了解决纤维在一些刚性材料的拔出模拟。后来有学者将这个模型用于研究直根的拔出。FBM 几乎是那个时代唯一成熟的数值模拟模型,FBM 在这个模拟过程都假设纤维的杨氏模量和泊松比不变,诚然这个假设对纤维是可行的。但是,当模拟对象变成树根,树根会随着拔出渐渐变细,杨氏模量和泊松比也会随之变化,所以 FBM 会得出不太准确的结果。于是,Schwarz 于 2010 年提出了 RBM 模型。这是一个非常复杂的树根模拟模型,他将所有物理参数同几何变化联系在了一起,比如树根直径的减小会影响局部杨氏模量,进而影响树根的抗剪强度等等。整个树根的拔出于是变成了一个分析圆,所有因素被联系在一起。Schwarz 还假设,带植树根的抗拔强度是由所有树根枝杈和主根的抗拔强度的和。

虽然 RBM 模型有许多优势,但是现有的流行数值分析软件并没有 RBM 模型,使得应用 RBM 变得异常困难。使用基于有限元原理的 Abaqus-6.11 来进行对不同几何形状直根的拔出模拟^[1]。首先是用 Abaqus 找到一种可行的模拟根土相互作用的模型;其次将对不同树根模型进行拔出分析,得到几何模型的变化如何影响树根的拔出强度。

1 根土相互作用模拟

这个部分的主要目的是寻找一种方法来模拟根土相互作用。当树根从土壤中拔出时,阻止树根拔出的抗力主要是摩擦力。而每一时刻的摩擦力又同围压相关。经典库伦摩擦模型描述了两个相互接触的

收稿日期:2013-09-02

作者简介:郭晓晓 男 1989 年出生 硕士研究生

平面如何传递摩擦力和接触压力,如图1所示。图1中横坐标是接触压力,纵坐标是等效剪应力,在单方向滑动模型下等于滑动摩擦力^[2]。

1.1 对于 Abaqus 中的经典库伦摩擦模型的一些测试

在使用 Abaqus 中的库伦摩擦模型进行根土模拟之前,有必要对其可用性进行测试。在这个部分中,两个测试设计用来进一步理解 Abaqus 中的库伦摩擦模型。图2显示了用来进行测试的2D模型。如图2所示,上层的正方形是1 m×1 m,底部的基座是0.5 m×3 m。基座底部固定,无论是水平还是竖直的移动或者扭转都不可以发生。同时,基座的左右两个侧面也被固定,不允许水平和竖直的移动。两个模块的接触关系是经典库伦摩擦模型,摩擦系数为0.5。两个模块共享一个物理属性,杨氏模量 1×10^9 Pa,泊松比为0.1来移除泊松效应。整个分析过程分成两步:第一步,一个 2×10^5 Pa的压力被施加与正方形模块顶部;第二步,正方形模块被向右拉出0.1 m^[3]。

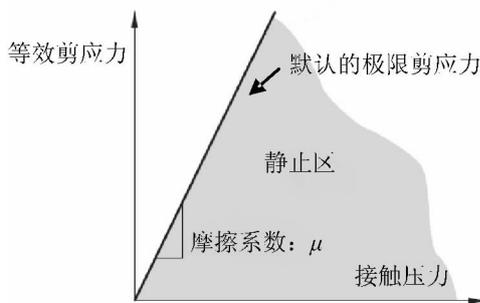


图1 接触压力与剪应力的转换关系

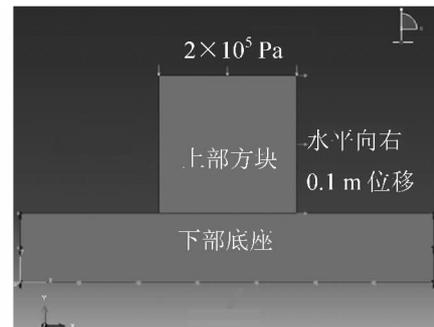


图2 测试库伦摩擦模型的测试模型

为了研究弹性滑动值,设计了两个测试。在测试1中,弹性滑动值为0.01 m,意味着两个模块之间不可恢复的滑动应该发生在0.01 m时。在测试2中,没用设定弹性滑动值,而是设定了1%的滑动允许值,也就是说不可恢复的滑动应该发生在1%长度的总接触长度时。图3是上述试验的测试结果。因为1%长度的总接触长度在这个模型下就是0.01 m,于是发现测试1和测试2的结果相差不大。所以可以得出Abaqus所提供的经典库伦摩擦模型是可用并且是可靠的。

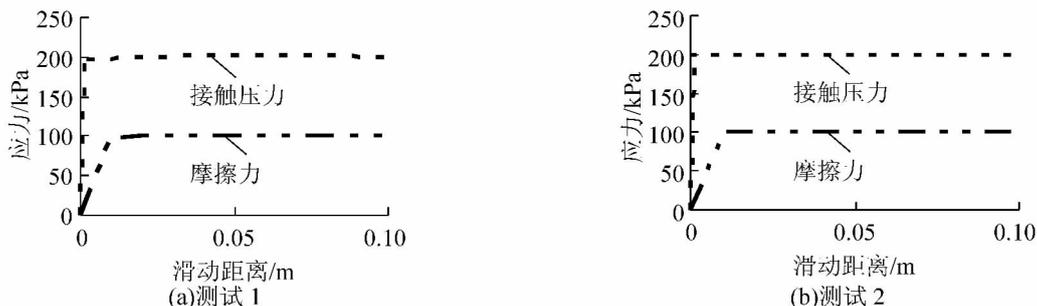


图3 测试1和测试2的结果

1.2 用库伦摩擦模型模拟根土相互作用

1.2.1 模型的输出结果

拔出力的计算:为了得到拔出力同拔出长度的曲线,实验中提取树根顶部竖向的应力值 S_{22} ,将其在顶部平面上积分便得到了树根顶部的荷载。因为树根顶部的荷载同拔出力是一对相互作用力,便得到了拔出力。具体计算过程

$$F_{\text{load}} = S_{22} \pi r^2 \quad (1)$$

式中, S_{22} 为竖向应力, r 为树根半径。

1.2.2 结果和讨论

图4展示了上述模型的实验结果。曲线为实验得出的结果,从结果中发现最大的抗拔强度为5.1 N。然而根据之前部分对于理论最大值的描述,可以计算出理论抗拔强度为6 N。这个实验值同理论值的差

异经过多次系数测试,被证实为泊松效应。另一个测试模型用以测试这个假设,其中泊松比被设为 0.01,之后结果为 5.96 N,非常接近理论值。

2 不同直根模型的抗拔强度

2.1 概述

经过之前几个部分的研究发现,尽管库伦摩擦模型所展示后峰值阶段并不具有太多实际意义,但是应用该模型来模拟前峰值阶段和峰值阶段还是合理和有意义的。于是,在接下来的研究中,采用了几种不同的直根模型,来研究几何方面的变化会对直根的抗拔强度有何影响^[4]。

2.2 模拟方法

2.2.1 直根几何模型

研究采用了直径-长度矩阵来划分直根的类型。只采用了圆台体的直根。并且改变树根的直径和长度详见表 1。

表 1 直径-长度

直径/mm	长度				
	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm
5	DL-5-100	DL-5-150	DL-5-200	DL-5-250	DL-5-300
10	DL-10-100	DL-10-150	DL-10-200	DL-10-250	DL-10-300
15	DL-15-100	DL-15-150	DL-15-200	DL-15-250	DL-15-300
20	DL-20-100	DL-20-150	DL-20-200	DL-20-250	DL-20-300

2.2.2 土体和直根物理属性

土体和直根的物理属性和测试模型的物理属性基本保持一致。土体和直根的泊松比 0.3,密度 2 000 kg/m³,土体杨氏模量 1×10^6 Pa;直根杨氏模量 1×10^7 Pa。摩擦系数定为 0.5;重力加速度为 10 m/s²;弹性滑动值一般设为总接触长度的 1%;拔出距离同具体只跟尺寸有关。

2.2.3 根土模型模拟

整个数值模拟过程是基于有限元原理构建的 Abaqus-6.11 版本^[1]。直根和土体的交互关系为库伦摩擦模型,摩擦系数为 0.5。边界条件也被施加在整个模型上,土体底部被固定,不允许竖直和水平的位移和扭转。整个模型两侧被固定,不允许水平位移的出现。土体和直根被划分为四节点双线性轴对称四边形, CAX4,如图 5 所示。有限元分析包括两部分:第一步,施加初始地应力和重力;第二步,树根被竖直提起。其中第二步中采用了迭代过程,将总位移分成多个小位移来施加。

2.3 模拟结果

对所有长度-直径矩阵中的模型都进行了模拟,并且选取了一些具有代表性的结果进行对比。首先展示出来的是长度固定,然后改变树根直径。

接下来如图 6 所示,上述四种模型的拔出力-拔出长度的比较曲线。随着直径的线性增加,拔出力的极限值也基本线性增加。这也从侧面反映出从上一部分得出的结论:影响拔出力的最关键因素是接触面积。

固定直径、线性改变树根长度的结果展示如下。图 7 展示了上述 5 个模型的抗拔力的曲线,图 7 中的结果再一次印证了之前的结果,无论更长的直径还是更长的长度,都不能最终决定树根的极限抗拔强度。只有总接触面积是最终的决定因素。

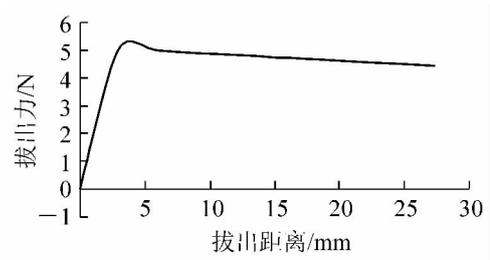


图 4 实验模型的拔出力-拔出长度曲线

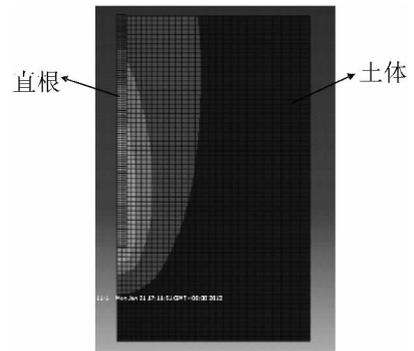


图 5 根土模型几何描述

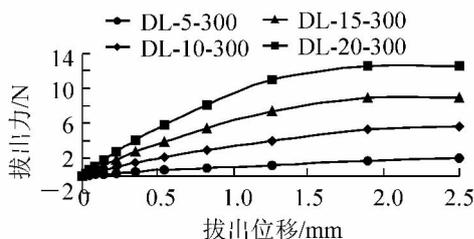


图 6 长度-直径矩阵中直根拔出曲线(长度固定)

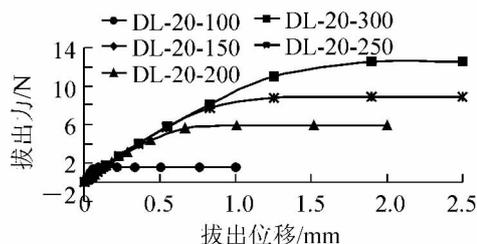


图 7 长度-直径矩阵的直根拔出曲线(直径固定)

3 结论

对 Abaqus 中的经典库伦摩擦模型进行了研究和模拟,证实了 Abaqus 的经典库伦摩擦模型可以很好地模拟树根拔出的前峰值阶段和峰值阶段,然而基本不能对后峰值阶段进行修正^[5]。

根据库伦摩擦模型,经过大量的几何参数研究,最初的结果说明了长度或者直径是影响拔出力的关键因素。然而,随着研究的深入,更多的模型被测试之后,结果说明总接触面积才是最终影响拔出力的因素。所以,单独根据长度或者直径得出的结论都是不可靠的^[6]。

树根的抗拔强度是多种因素共同作用结果,比如树根的材料、土壤的属性、树根的几何形状等。所有这些因素都有机地结合在一起共同影响树根的抗拔强度。在对一些树根模型进行模拟之后,发现树根的几何形状可以在很大程度上影响抗拔强度。最重要结论是:当树根埋入土中更深,或者蔓延更大,都会在一定程度上影响抗拔强度。树根的总埋入体积,或者总接触面积会最终决定一个树根的极限抗拔强度。

参 考 文 献

- [1] ABAQUS analysis user's manual, version 6.11 [S]. [S. l.]: Dassault Systèmes, the 3DEXPERIENCE Company 2011.
- [2] Campbell S D G, Shaw R, Chao P A et al. The Use of Soil Bioengineering Measures to Repair Selected Natural Terrain Landslides in Hong Kong (25th Annual Seminar) [M]. Hong Kong: The HKIE Geotechnical Division, 2005.
- [3] Dupuy L, Fourcaud T, Stokes A. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension [J]. European Journal of Soil Sciences, 2005, 56: 319-327.
- [4] Dupuy L, Fourcaud T, Stokes A. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage [J]. Plant and Soil, 2005, 278: 119-134.
- [5] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pull out and failure of root bundles [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115 (F4). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009JF001603/abstract>.
- [6] Schwarz M, Cohen D, Or D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling [J/OL]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2011, 116 (F2). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JF001753/abstract>.

Study on Pull-out Strength of Tap-roots Based on Abaqus

Guo Xiaoxiao

(Faculty of Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: Most studies show that the pull-out strength of root relies on a variety of factors, such as root geometry (diameter, length, and branching characteristics), mechanics properties (Young's modulus and Poisson's ratio) and soil-root interaction (soil type, confining pressure and friction coefficient). In this study, the 2D models using Finite Element Method (FEM) are applied to determine the pull-out strength of individual roots with different factors mentioned above. In conclusion, some simple 2-D Finite Element models are developed to get better understanding during root pulling-out process and the results show the geometry could affect and modify the pull-out strength of roots significantly.

Key words: soil-root simulation; pull-out strength of root; slope; Abaqus

(责任编辑 车轩玉)