

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.014

风载荷下树木稳定性的无损评估方法

谭旭,张潇巍,李爽,吕生华,徐凌飞,文剑*

(北京林业大学工学院,北京100083)

摘要:为解决树木在风载荷下易发生安全事故,造成人员伤亡和财产损失的问题,研究一种基于无损重构技术和有限元分析的风载荷下树木稳定性的评估方法,通过探地雷达(Ground Penetrating Radar,GPR)无损获取根系构型,结合三维重构技术和阻力公式构建风载荷下的树木模型,根据模型的有限元分析结果评估树木稳定性状况。通过仿真和对古侧柏(*Platycladus orientalis*)现场试验,分析不同根系构型和不同土壤参数对树木稳定性的影响。结果表明,水平浅根和土壤参数是影响树木稳定性的2个重要因素,得到与现有研究中相同的等效应力变化趋势。研究证明GPR所获取的根系构型可以作为树木稳定性的重要评价指标,验证研究结果在实际树木风险评估工作中的可行性。

关键词:根系锚固结构;树木稳定性;探地雷达(GPR);树木模型;Ansys;有限元法;侧柏

中图分类号:S718.43

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0127-15

A Non-destructive Method for Assessing Tree Stability under Wind Loading

TAN Xu, ZHANG Xiaowei, LI Shuang, LÜ Shenghua, XU Lingfei, WEN Jian*

(The School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that trees are prone to safety accidents under wind loads, which cause casualties and property losses, a method of assessing the stability of trees under wind loads based on nondestructive reconstruction technology and finite element analysis was investigated, in which the root system configuration was obtained nondestructively by Ground Penetrating Radar (GPR), and a tree model was constructed by combining the three-dimensional reconstruction technology and the resistance formula under wind load. The effects of different root configurations and soil parameters on tree stability were analyzed through simulation and field tests on *Platycladus orientalis*, and the results showed that horizontal shallow roots and soil parameters were two important factors affecting tree stability, and the same trend of equivalent stress change was obtained as that in the existing study. The study proved that the root configuration obtained by GPR can be used as an important evaluation index of tree stability, and verifies the feasibility of the results of the study in the actual tree risk assessment work.

Keywords: Root anchorage structure; tree stability; ground penetrating radar (GPR); tree modelling; Ansys; finite element method; lateral cypress

0 引言

风灾是导致树木倒伏的主要自然灾害^[1-2],会

极大地影响树木结构的稳定性,严重威胁周围的生命和财产安全^[3]。目前,评价树木稳定性最常用的方法是通过树木风险评估表,对各项可视化指标进行打分和归类,划分风险等级^[4-5]。然而,评估人员对专业知识不同的掌握程度和不同的判断标准导致了该方法主观性强、评估指标繁多且难以统一的问题,极大地影响了树木风险评估的准确性。

多项研究表明,根系是维持树木稳定性的主要结构之一^[6]。根系的生长受到树种、环境等因素的影响,呈现出很大的随机性^[7]。因此,对根系锚固结构进行研究至关重要。Yang等^[8]开发了一个基于有限元法的仿真模型,分析了树木在风力作用下的应力分布情况,模拟了根系折断和树木倒伏的过程。Zhu等^[9]提出了一种改进的嵌入梁元素(Estimated Beam Element)模型,用于模拟植物根系在受

收稿日期:2023-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32071679);北京市自然科学基金项目(6202023)。

第一作者简介:谭旭,硕士研究生。研究方向为树木无损检测。E-mail:419987460@qq.com

*通信作者:文剑,博士,教授。研究方向为树木无损检测。E-mail:wenjian@bjfu.edu.cn

引文格式:谭旭,张潇巍,李爽,等.风载荷下树木稳定性的无损评估方法[J].森林工程,2024,40(2):127-141.

TAN X, ZHANG X W, LI S, et al. A non-destructive method for assessing tree stability under wind loading[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):127-141.

力时的机械行为以及根系的脱离和失效模式。Jiang 等^[10]通过总结不同深度处的根系试验数据,得到了一个用直径表达根系力学特性的函数公式,用于解释根系的拉拔行为。目前对于根系锚固结构的研究主要是通过拉伸试验来获取根系模型和相关数据,但这种方法往往会树木造成严重伤害。因此,开发一种无损构建根系模型的方法是非常必要的。

现阶段树木力学的研究从多个角度对树木的力学参数和特性进行了分析,为风载荷下树木模型的构建做出了重要贡献。例如,Kane 等^[11]通过拉伸试验研究了槭树的力学性质以及树干结构对稳定性的影响;Rahardjo 等^[12]则通过拉伸试验和数值模拟分析了不同土壤介质下树木倾倒的模式;Dahle 等^[13]通过测量分支不同部位的弹性模量,研究了树木枝条在风雪等载荷下材料性质的变化情况。然而,目前的研究往往只关注树木的某一结构,忽视了树木整体性,且大部分仍处于试验数据分析的阶段,尚未应用于实际的树木风险评估工作中。因此,综合考虑树木各个结构要素,并构建一个全面且实用的风载荷树木模型,对于树木风险评估工作具有极其重要的意义。

根据现阶段检测技术的相关应用^[14-15],本研究提出一种风载荷下树木力学稳定性建模和分析方法,将风载荷通过冠层和树干施加于根系锚固结构中,并通过有限元法分析树木的等效应力分布情况。该方法使用探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)检测浅根分布情况,构建现阶段难以获取的树木根系构型,并根据公式计算风载荷下的冠层阻力,通过树干将其施加于树根,得到风载荷下的根系锚固结构分析模型,之后导入 Ansys,使用有限元法分析等效应力分布情况,应用于实际的风险评估工作中。为了验证 GPR 获取根系构型的可行性,本研究设置相关的仿真试验来分析不同根系构型和不同土壤参数对树木稳定性的影响。最后,对一个古侧柏(*Platyclusus orientalis*)群落进行模型构建和仿真分析,以其中 00127 号侧柏为例,阐明侧柏群落的建模及分析过程,得出古侧柏群落的风险评估结果,并验证了该方法在实际风险评估工作中的可行性。

1 材料和方法

树木主要分为树冠、树干、树根和土壤 4 部分,

树冠迎风面积较大,是风的主要作用部位^[16],在风阻力作用下树冠发生的偏移导致了树干的弯曲,产生的弯矩和树木地上部分的自重驱动了根系在土壤中的滑移,土壤则抵抗这种根系的位移^[17-18],整体示意图如图 1 所示。因此,风载荷下的树木模型可以简化为一个悬臂梁结构,树干作为梁单元,根系锚固结构作为固定端,树冠在风作用下产生的阻力作为自由端的加载力。风力以树冠等效阻力的形式,通过树干传递到根系锚固结构,从而影响树木的稳定性。

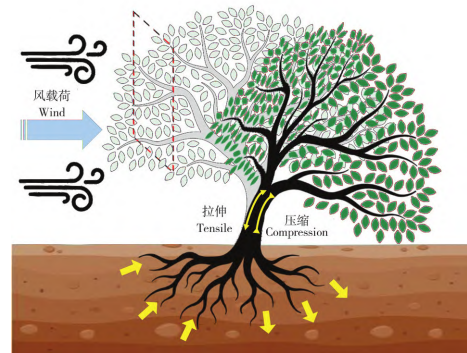


图 1 风载荷下树木示意图

Fig. 1 Schematic diagram of trees under wind load

现有研究中,主要采用拉伸和仿真试验分析风载荷下的树木模型。在树干上端用套索、牵引绳和电机拉动树木,施加沿某一方向的力或位移,模拟风载荷下树冠等效阻力导致树干弯曲的过程^[11-13]。根系模型的构建主要通过挖根试验实现^[19],而树冠在受到风载荷时产生的阻力则可以通过公式计算得出^[20]。以上这些方法被广泛应用于树木在风载荷下的力学行为和稳定性研究之中。

为解决现有方法中根系构型难以获取、分析模型组成单一的问题,本研究使用 GPR 无损检测浅根分布,构建根系模型,并与树干、土壤组合,完善根系锚固结构。将模型导入 Ansys 中,施加树冠等效阻力于树干上端,使用有限元法分析模型的等效应力分布情况。其流程如图 2 所示。图 2 中: A 为迎风面积; C_D 为阻力系数; v 为风速; ρ 为空气密度; c 为凝聚力; φ 为摩擦角; τ_f 为抗剪强度; σ 为应力。

根据研究内容,本研究的关键技术点包括:

- 1) 使用 GPR 无损检测树木浅根分布,结合取样试验构建根-土模型。
- 2) 完善风载荷下的树木模型并导入 Ansys,通过有限元法分析根系锚固结构的等效应力分布情况。

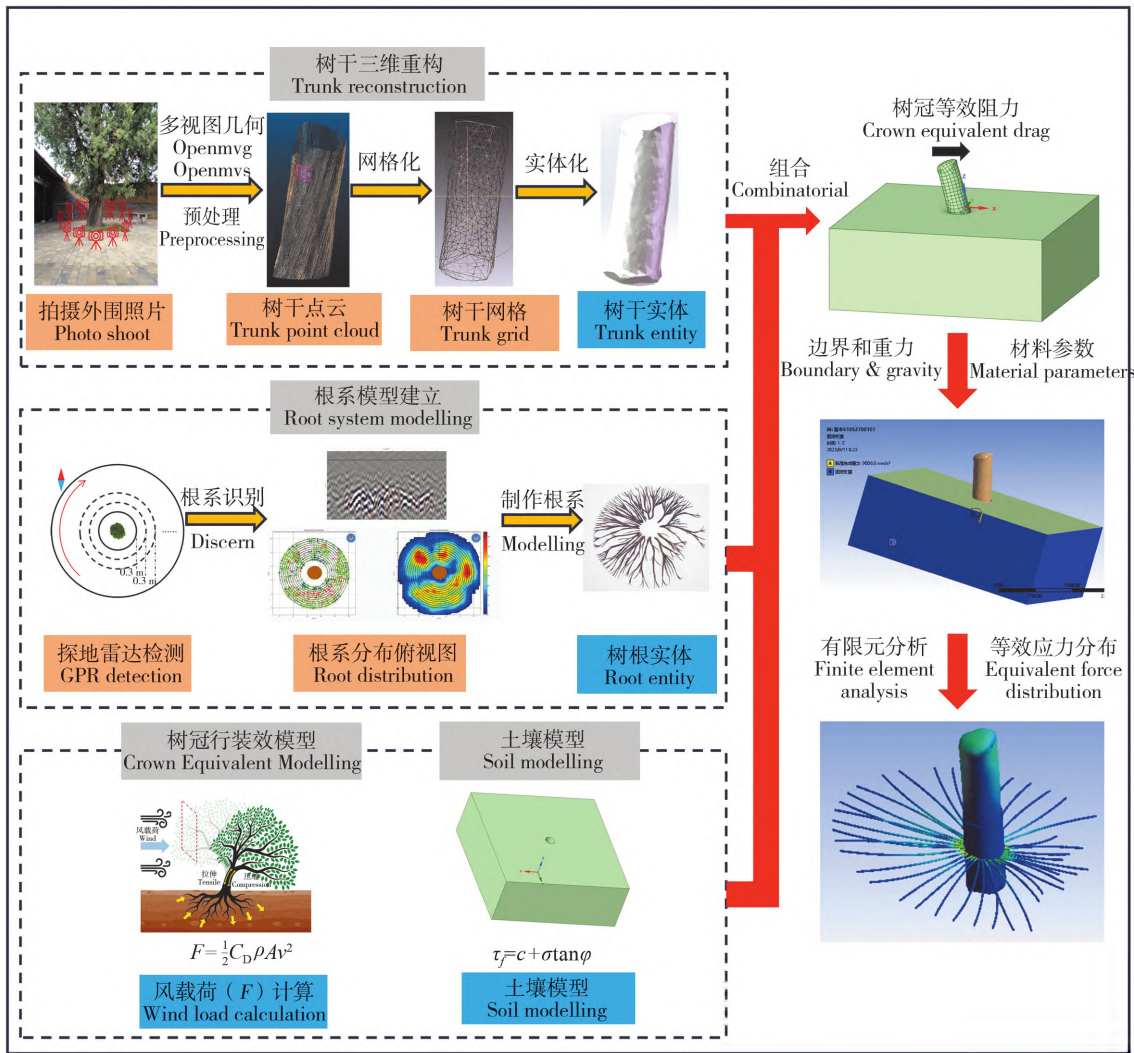


图 2 风载荷下树木模型的构建及有限元分析流程图

Fig. 2 Flow chart of tree model construction and finite element analysis under wind loads

3) 设置相关仿真试验,研究不同根系构型和土壤参数对树木稳定性的影响,验证 GPR 获取根系构型的可行性。

1.1 GPR 构建根-土模型

本研究采用 GPR (SIR-3000, GSSI, USA) 在树木周围进行圆周轨迹检测,天线频率 900 MHz,目的是检测地下 0.6 m 范围内水平方向浅根的分布情况。检测过程由内向外进行,每次间隔 0.3 m (根据实际环境条件可以适当调整),直至覆盖树冠投影区域,扫描路径示意图见图 2 中根系模型建立模块的探地雷达检测部分,图 3 为现场检测试验图。

通过之前的检测获取每个扫描断面的 B-scan 图,识别其中存在的根点。由于每个断面在实际环境中都是一个柱面,高 0.6 m,半径为检测位置到树

木中心的距离,因此需要将二维 B-scan 图中识别出的根点转换至笛卡尔坐标系中。图 4 为一张 B-scan 图及其转换后的柱面,其中的红点为识别出的根点。



图 3 GPR 检测根系试验

Fig. 3 Root detection experiment using GPR

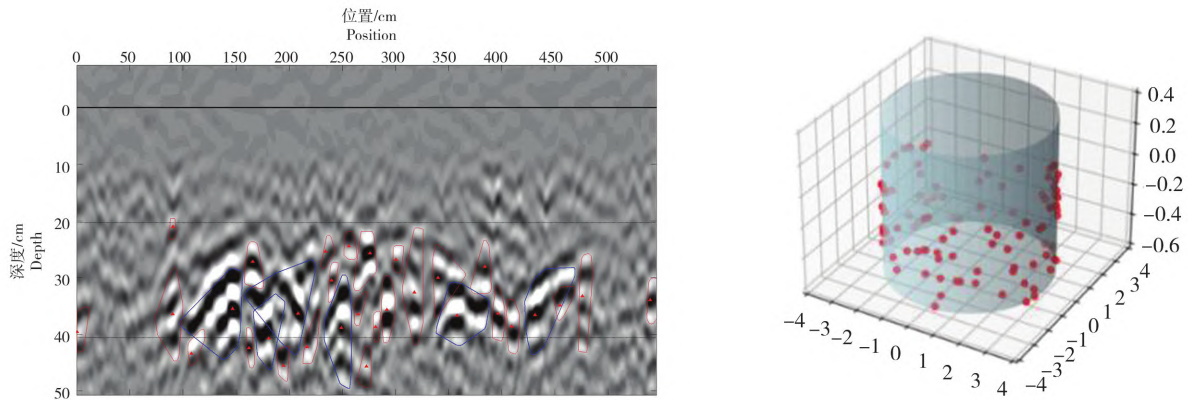


图4 根点坐标转换

Fig. 4 Conversion of root point coordinates

将所有断面的根点转换至笛卡尔坐标系之后,由内向外连接相匹配的根点,每组相连的根点构成树木的一条浅根,所有相连的根点即为浅根模型。至此完成二维根点到三维浅根模型的转换过程。图5是2个柱面间根点连接的示意图。

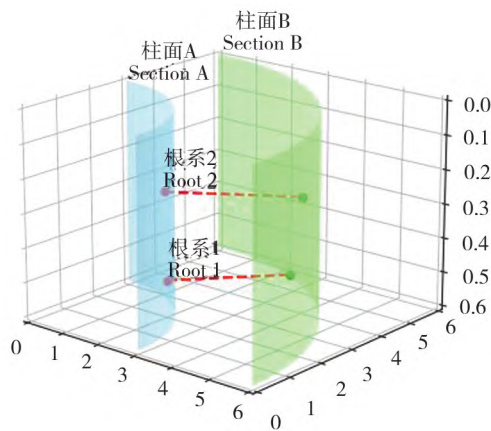


图5 根点的连接示意图

Fig. 5 Schematic diagram of root point connection

生成的模型为点云文件,其中包括多余的细小根和重复点信息,需要对其进行适当的去噪和抽稀,之后即可导入 SolidWorks 实体化,并在 Ansys 中完成有限元分析。实体化方法和有限元分析过程会在后文中介绍。

另外,土壤和树根是一个密不可分的整体。本研究的土壤模型为一个覆盖面积大于根系模型的长方体,质地均匀并且去除了与浅根模型的重合部分,见图2中土壤模型部分。采用弹性力学和摩尔-库仑强度理论,后者是岩土力学的经典理论,用较少的参数准确解释了岩土与金属材料的本质区别,公式如下

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

c 和 φ 是该模型下土壤的材料参数,决定了 τ_f 和 σ 的函数关系。可通过根系范围内的挖掘试验获取土样,测量弹性模量、泊松比和摩尔-库仑理论参数,如图6所示。



图6 取样试验

Fig. 6 Sampling experiment

1.2 风载荷下树木模型的完善

树木所承受的风力可以被视为黏性阻力和压力阻力的共同效应^[21]。黏性阻力是指气体在树枝、树叶表面流动时所产生的摩擦力,而压力阻力则来源于树木两侧表面的气压差。随着风速的增加,压力阻力会逐渐占据主导地位^[22]。考虑到树枝、树叶在风力作用下的随机性,通常使用阻力方程来计算某一风速(v)下作用于树木的风力(F)

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (2)$$

式中: C_D 为无量纲阻力系数; A 为树木迎风面积; ρ 为空气密度。通过公式计算树冠在某一风力下的等效阻力值并施加于树冠上端,可以简化树冠模型,避免树冠随机性强、复杂度高的问题,树冠风阻力模型如图7所示。

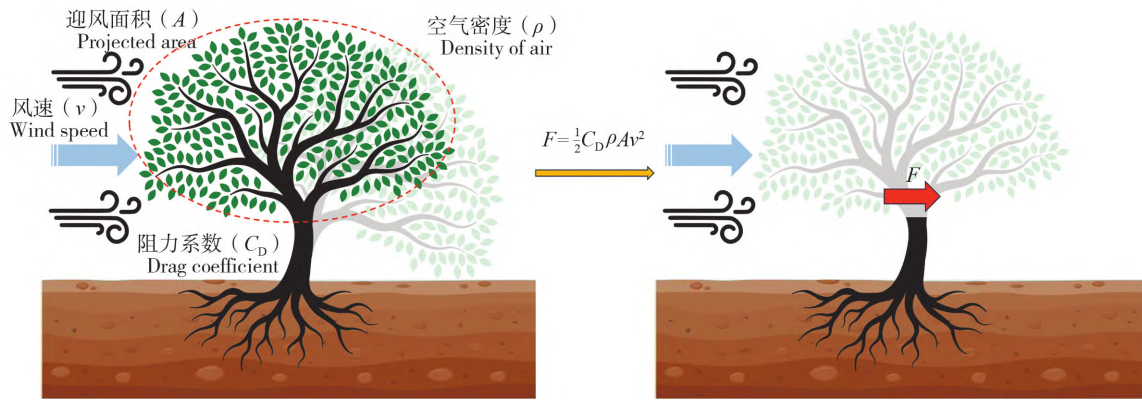


图 7 树冠风阻力模型

Fig. 7 Canopy wind resistance modelling

树干轮廓模型通过三维重构的方法绘制。在同一高度下,按照顺时针方向围绕树干拍摄照片,以获取树干的轮廓数据集。然后通过 OpenMVG 和 OpenMVS 算法初步获取树干点云图,并对点云进行去噪、

抽稀,删除冗余的环境信息和重复点。该算法是一种计算机视觉领域处理多视角几何的开源库,通过相机的内外参数建立某一点在二维图像中的坐标 $n_i(u_i, v_i, w_i)$ 与实际三维坐标 $N_i(X_i, Y_i, Z_i, W_i)$ 之间的关系

$$n_i = \begin{bmatrix} f \times k_u & c_u \\ f \times k_v & c_v \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ W_i \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: f 为相机焦距; \mathbf{R} 为相机旋转矩阵; t_x 、 t_y 、 t_z 为相机平移矩阵; (c_u, c_v) 为像主点坐标; k_u 、 k_v 为比例系数,一般为1。

通过上述算法,可以将所有二维图像中的各点转换至三维坐标系中,并进行特征点匹配,最终生成树干轮廓的点云图。接下来,使用 MeshLab 对点云进行网格化处理,生成树干结构的网格模型。然后,将该网格模型导入 SolidWorks 中,利用 ScanTo3D 插件将网格实体化,从而得到树干的实体模型,完成了树干轮廓模型的三维重构过程,流程示意图见图 2 中树干三维重构部分。

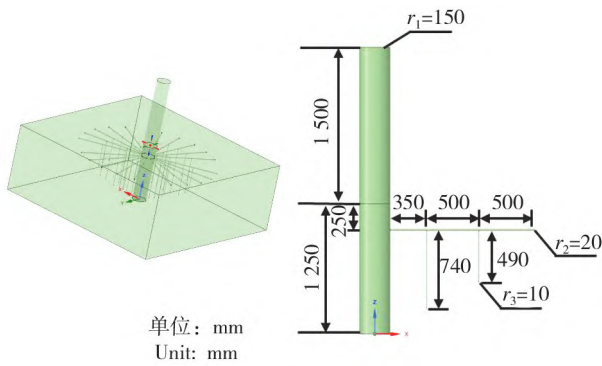
将树干轮廓与模型组合,嵌入土壤模型,并设定接触类型为摩擦接触。然后,在树干上端施加树冠等效阻力值作为载荷,以完善风荷载下的树木模型。条件设置方面,在土壤侧面和底面添加固定约束,并增加标准地球重力作为重力载荷。接下来,对模型进行网格划分,并输出等效应力分布图,作为评估树木事故风险的依据。组合后的分析流程见图 2 中右侧,建模与分析过程均在 SolidWorks 和

Ansys 中完成。

1.3 风荷载下树木模型的验证

树木的根系结构非常复杂,不同的根系具有不同的功能。根据形态特征可以将根系分为核心根系、浅根根系和主根根系,根据径级和功能则可以分为主根、侧根和毛细根等^[7,23]。而 GPR 的检测范围限制在地下 0.6 m 以内的浅侧根。为了探究这种浅侧根对树木稳定性的影响,本研究设计了力学仿真试验,以侧柏为研究对象,参考相关学者的研究^[24-26],构建了基于主根根系的树根模型,其中包括主根、一级水平浅根及其衍生的两簇垂直二级根,并在 4 个方向上均匀分布,如图 8 所示,树木模型的参数源自相关文献^[27-28]。土壤模型为长 4 m、宽 4 m、高 1.5 m 的均匀长方体,

Manickathan 等^[29]通过风洞试验测得侧柏的阻力系数为 0.95 左右,迎风面积定为 15 m²,空气密度为 1.225 kg/m³(标准气压,15 ℃),风力 8 级,根据中国风力等级标准,8 级风对应风速 17.2~20.7 m/s,取中间值 18.95 m/s,通过公式(2)计算树冠等效风阻力。



单位: mm
Unit: mm

r_1 为主干半径; r_2 为水平浅根半径; r_3 为垂直二级根半径。

r_1 is radius of stem, r_2 is radius of shallow root, r_3 is radius of secondary root.

图 8 验证模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of validation model

共绘制 5 种根系结构模型(主根缺失模型,主根长度由 1 250 mm 缩短至 450 mm),如图 9 所示。共绘制 5 种根系结构模型(主根缺失模型,主根长度由 1 250 mm 缩短至 450 mm),如图 9 所示。在现有研究^[19]的基础上增加二级根缺失模型,分析二级根对树木稳定性的贡献。对这 5 种结构施加沿 x 正方向(风向)的树冠等效阻力和标准地球重力作为负载,设置边界条件,在 Ansys 中进行力学分析。土壤参数参考相关学者的试验结果^[7-8],见表 1。试验中风载荷大小作为自变量,由初始载荷逐渐增加至 10 倍载荷,绘制等效应力随载荷变化的曲线。

表 1 验证模型参数表

Tab. 1 Validation model parameters table

模型 Model	杨氏模量(E) /MPa Young's modulus	泊松比(μ) Poisson's ratio	密度(ρ) / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Density	摩擦角(φ) / ($^\circ$) Friction angle	凝聚力(c) / Pa Cohesion
树木模型 Tree model	8 000	0.25	500		
土壤模型 Soil model	19.86	0.33	1 410	14.62	21 402

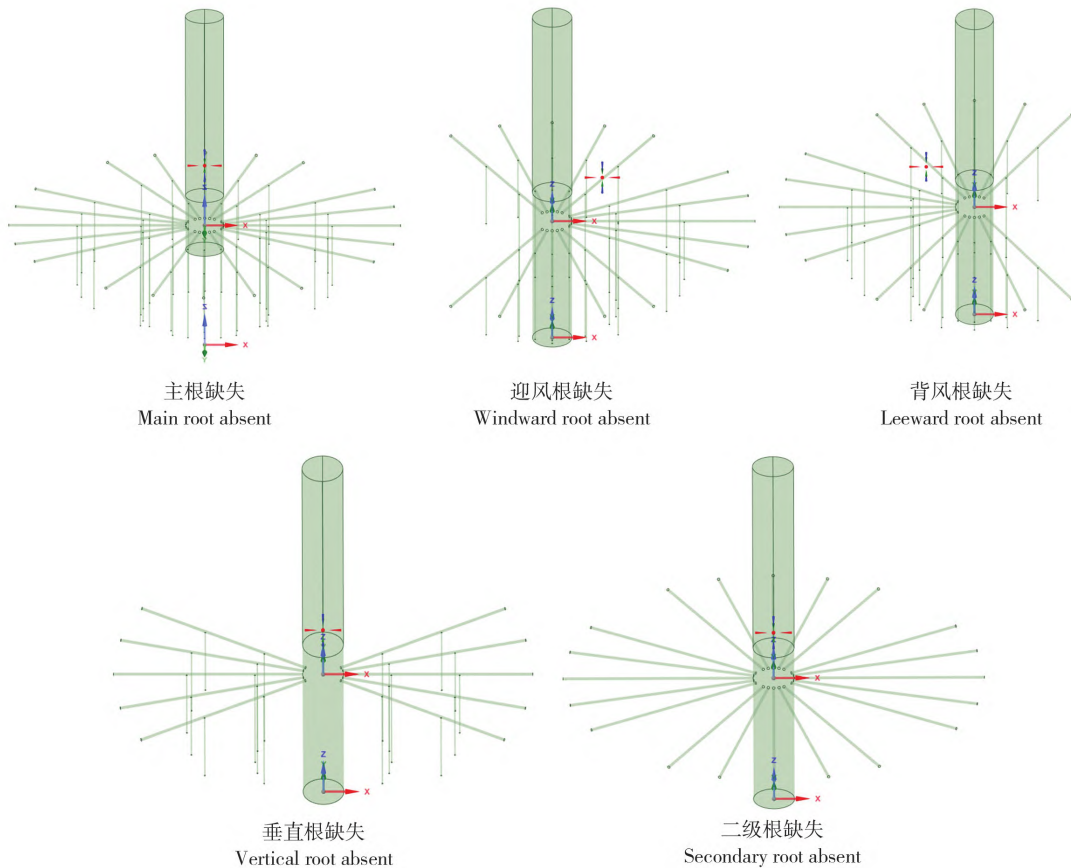


图 9 5 种根系结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of five root system structures

多项研究表明,土壤与树根是紧密结合的一个整体,不同的土质也会对树木稳定性产生影响^[7,30]。因此在根系结构仿真试验的基础上,添加土壤参数对比试验,研究不同土壤参数对树木稳定性的影响。模型和各项条件参考前文,按照一定的倍数分别改变杨氏模量、泊松比、摩擦角和凝聚力的大小,分析每种参数的变化对树木稳定性的影响。

2 结果与讨论

整体而言,模型的最大等效应力值点主要集中在浅根与主根连接处,如图 10 所示,这表明模型存在较高的根系事故风险。同时,树干部分也存在一些等效应力值较高的区域,最大应力值约为 5.7 MPa,虽然低于树根部分的 18.5 MPa,但为了更

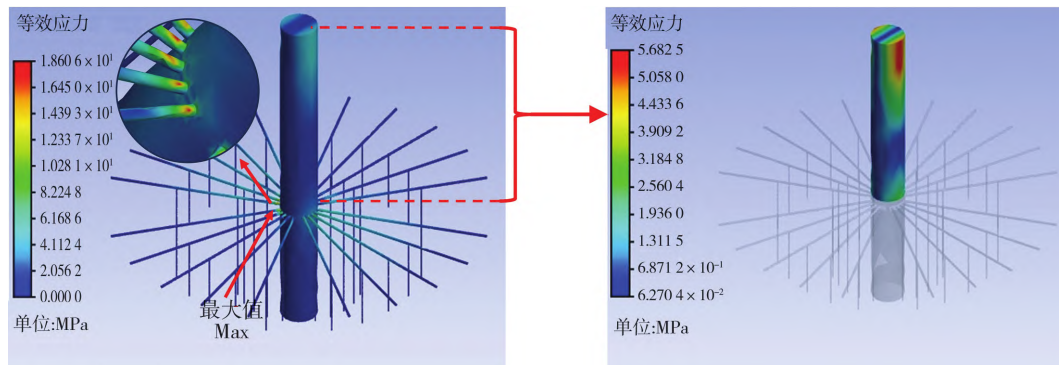


图 10 最大等效应力值点位及树干输出区域示意图

Fig. 10 Schematic diagram of maximum equivalent stress value points and trunk output areas

加全面地分析结果,在此添加了树干部分的输出,并对树干的等效应力值分布情况进行了分析。本研究将综合考虑树干和树根 2 个方面进行仿真试验结果分析。

2.1 根系结构模型仿真试验分析

根据试验结果,在树根方面,5 种不同的根系结构对应的最大等效应力值从高到低排列依次为:迎风根缺失、背风根缺失、垂直根缺失、主根缺失、二级根缺失,如图 11 所示。而仅有迎风根缺失和背风根缺失 2 种情况下,最大等效应力值高于正常模型。这意味着在这 2 种根系结构下,树根会产生比正常情况下更大的等效应力,因此树根出现折断等事故的风险更高。

值得注意的是,迎风根、背风根和垂直根的定义是由树冠等效阻力施加方向来确定的。如果在试验中,外部载荷的施加方向从 x 轴正方向变为 y 轴正方向,那么原试验中的垂直根对树木稳定性的贡献会更大。因此,在面对方向不确定的外部载荷时,浅侧根对树木的稳定性起着重要作用,这与 Yang 等^[7]的试验结论相一致。树木浅根的分布可以作为评估树木稳定性的重要指标,进而表明通过 GPR 获得的根系模型是在风载荷下评估树木稳定

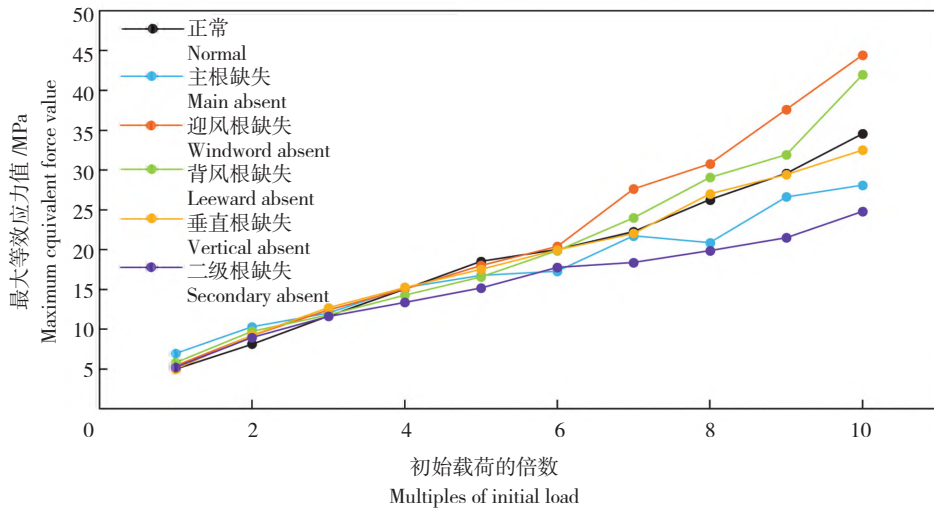
性的重要组成部分。

根据图 12 的试验结果,在 5 种根系结构下,仅主根缺失和二级根缺失情况下,树干的等效应力值高于正常模型。这意味着当这 2 种根系缺失时,树干会承受比正常情况下更大的等效应力。但其数值明显低于树根部分,且各种情况之间的差距不大。由此可以看出,主要风险部位仍然是靠近浅根连接处的区域。

在树根部分的仿真试验中,主根缺失和二级根缺失模型的最大等效应力低于正常模型,这与 Yang 等^[7]的试验结论略有出入。然而,在树干部分的试验中,模型展示出了更高的等效应力值和更大的高应力面积,参考图 13。因此可以推断,主根和二级根这种垂直生长的根系发生缺失时,原本由其承载的应力可能会转移到树干部分,增加树干的等效应力值和高应力面积。这一结论合理地解释了不同试验结果之间的差异。

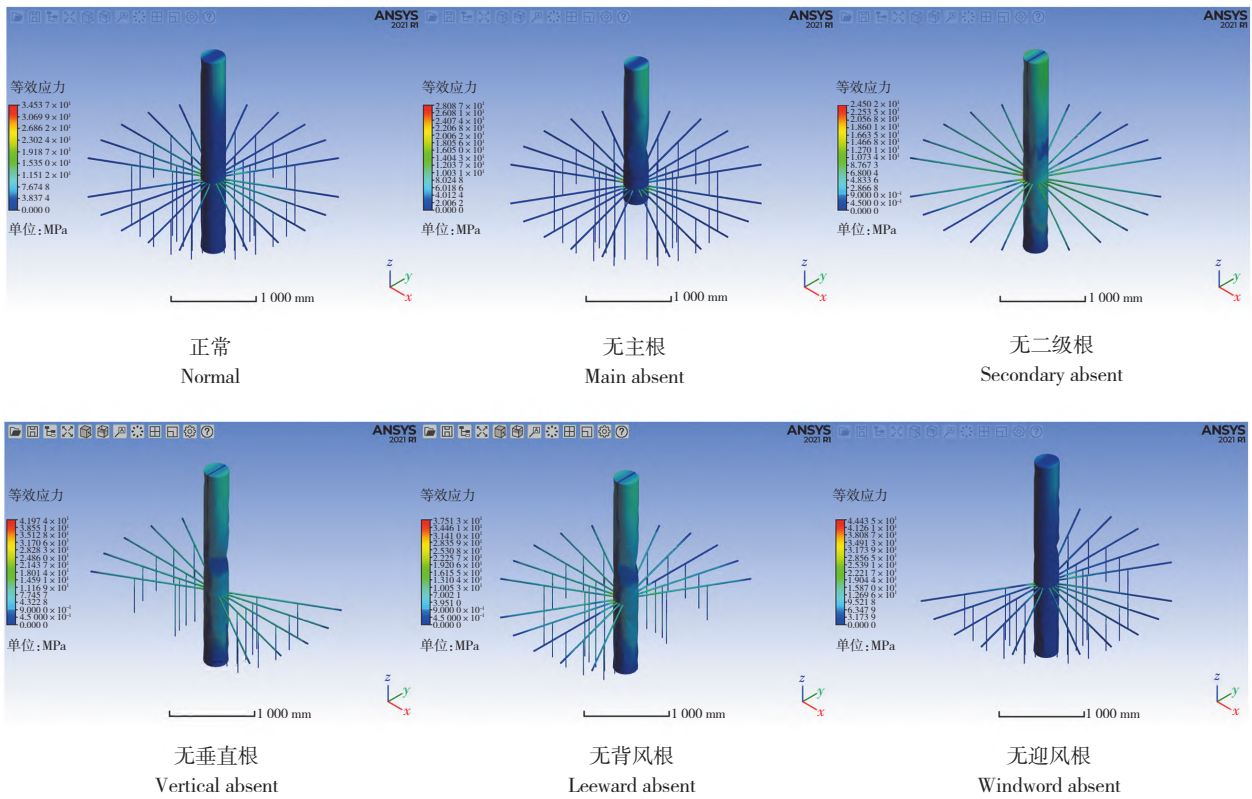
2.2 土壤参数仿真试验的分析

试验中,对土壤参数改动范围比较大,为避免结果不收敛,计算树冠等效阻力时将风力等级调整为 5 级,对应风速为 8.0~10.7 m/s,取中间值 9.35 m/s。



(a) 最大等效应力值曲线

(a) Maximum equivalent force value curve

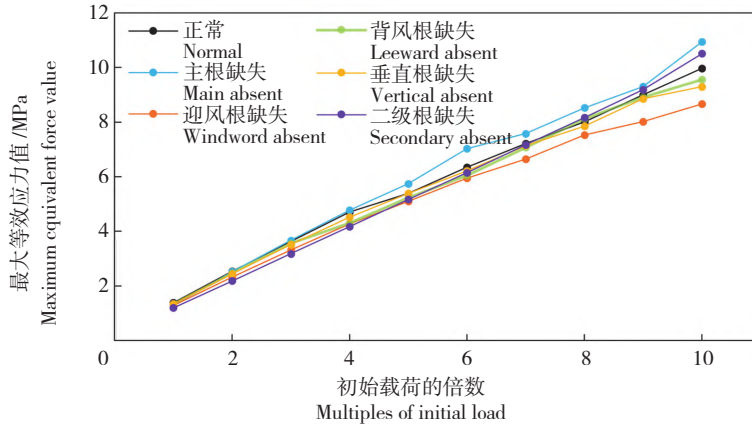


(b) 等效应力分布图

(b) Equivalent force distribution graph

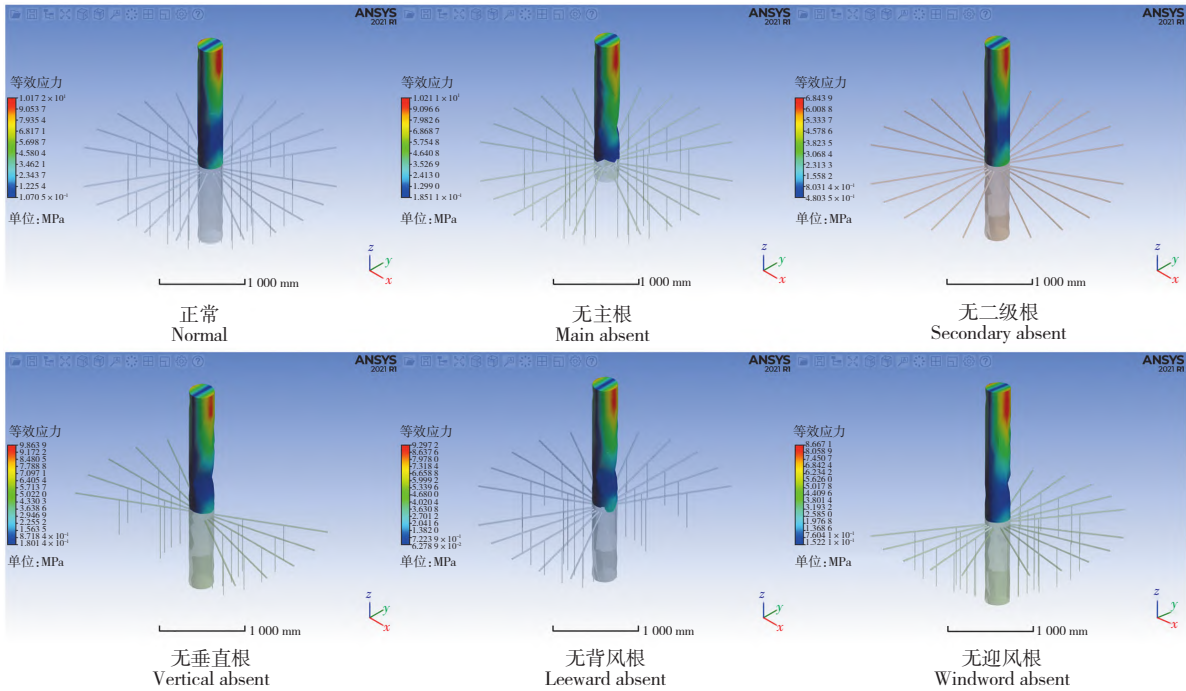
图 11 树根部分试验结果

Fig. 11 Results of experiments on the root portion



(a) 最大等效应力值曲线

(a) Maximum equivalent force value curve

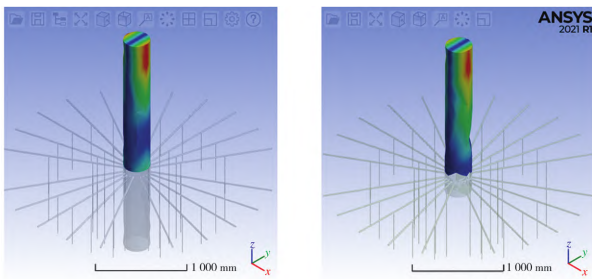


(b) 等效应力分布图

(b) Equivalent force distribution graph

图 12 树干部分试验结果

Fig. 12 Results of experiments on the trunk portion



(a) 正常 (a) Normal (b) 无主根 (b) Main absent

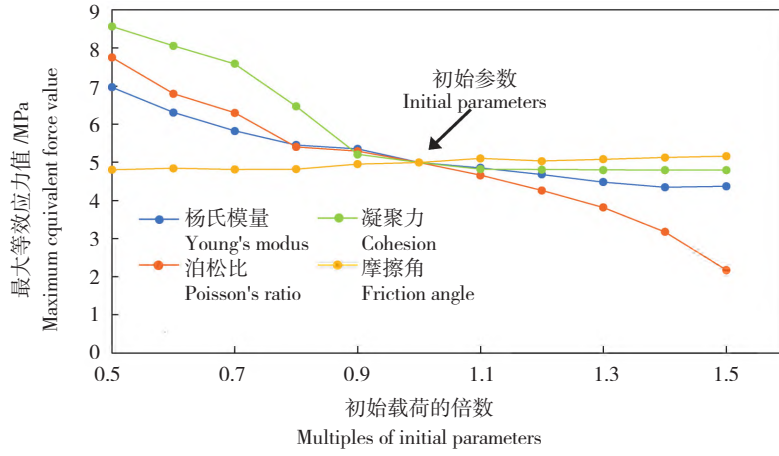
图 13 主根缺失模型与正常模型的对比

Fig. 13 Comparison of the primary root deletion model with the normal model

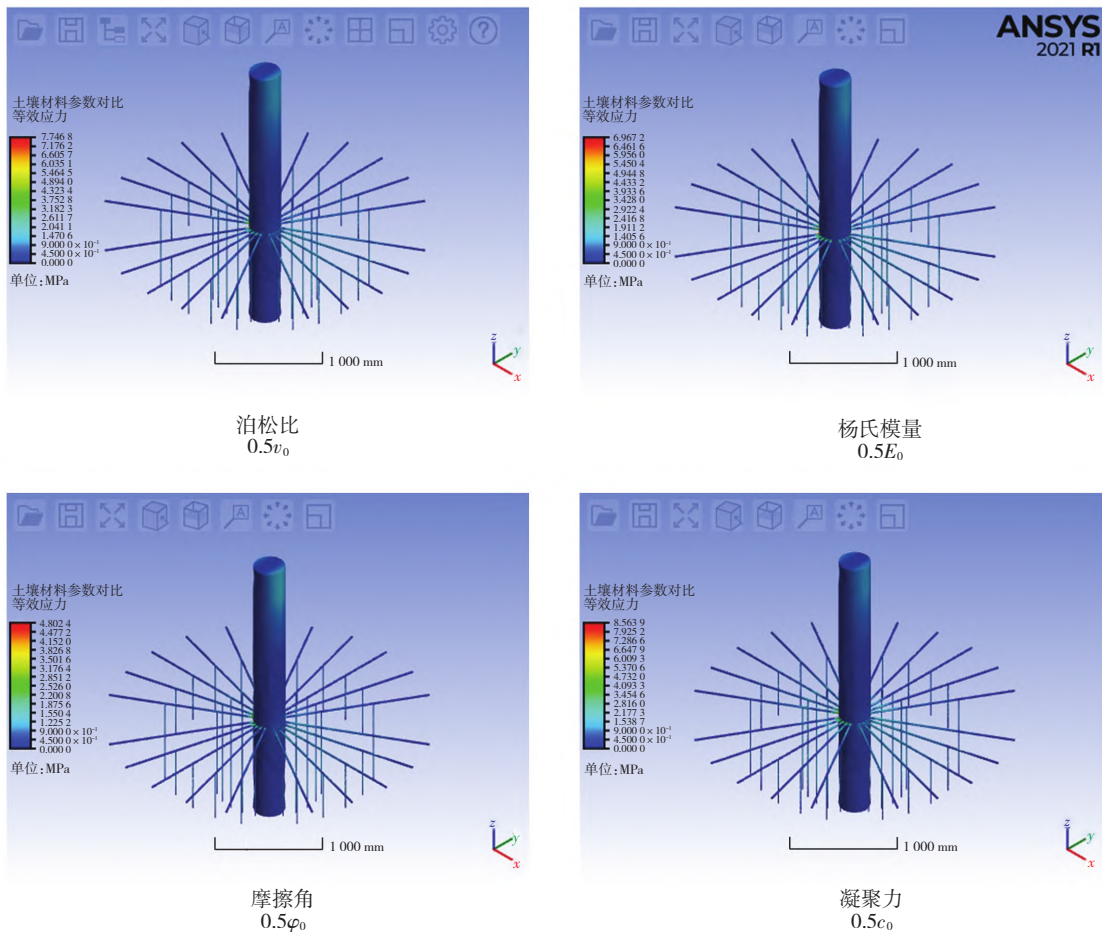
土壤参数仿真试验结果如图 14 所示。整体上,除摩擦角外,其余 3 种土壤参数的变化均会对树根和树干的^{最大等效应力}产生一定的影响。在树根部分,当杨氏模量、泊松比和凝聚力的试验参数小于初始参数时,参数值越小,树根的最大等效应力值就越大,并且高于初始参数对应的试验结果(图 14 中曲线的交点)。这表明在这个阶段树根发生事故的风险较高。而在树干部分,虽然有部分曲线对应的最大等效应力值高于初始参数,但差异很小,且等效应力值不超过 1.5 MPa,明显低于树根部分。

因此,树干发生事故的风险较低。综上所述,杨氏模量、泊松比和凝聚力这3种土壤参数的变化会明显影响树根等效应力的分布。较低的参数值会显

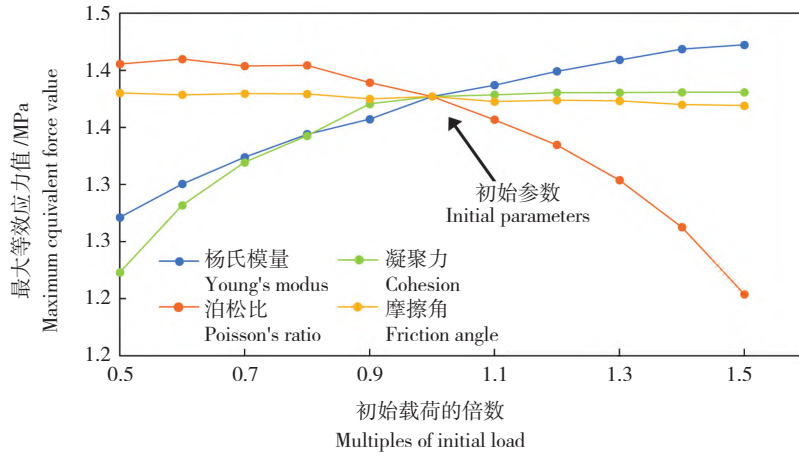
著提升浅根连接处的最大等效应力值,增加树木事故的风险。这证明了在构建风载荷下树木模型的过程中,通过取样试验来确定土壤参数的必要性。



(a) 树根最大等效应力值曲线
(a) Maximum equivalent force value curve of roots

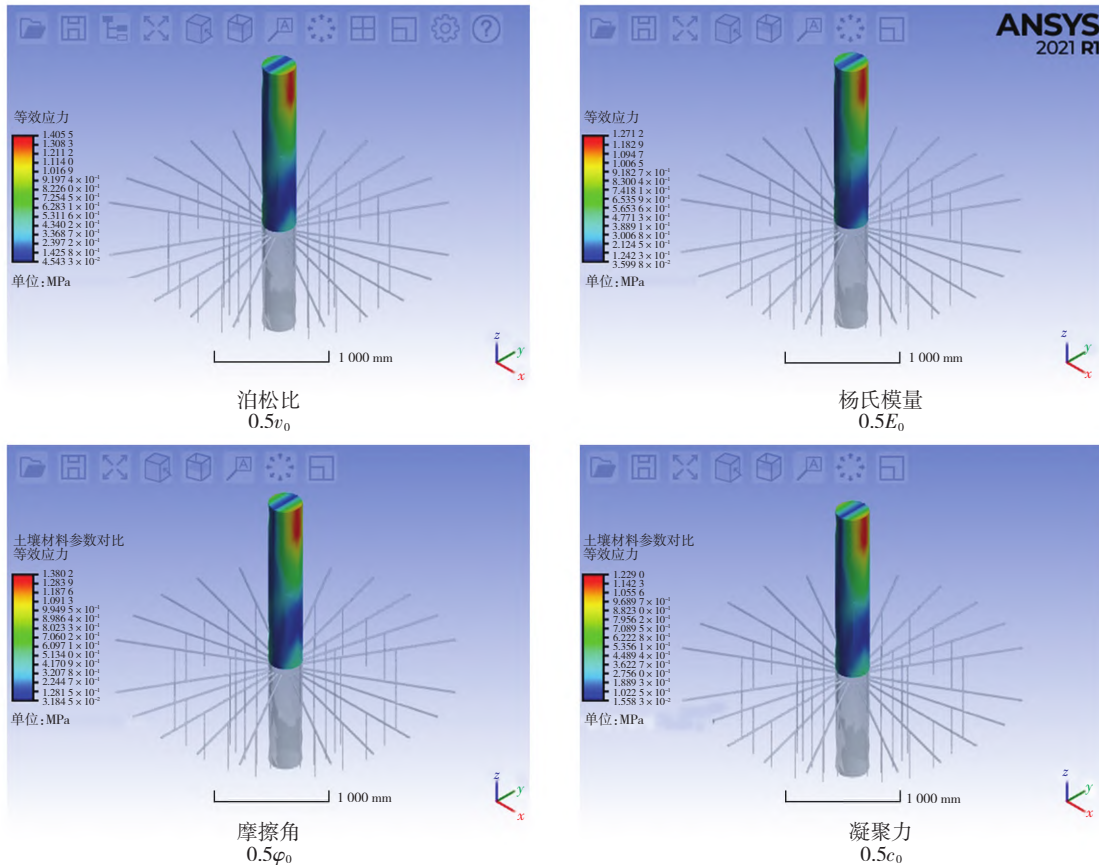


(b) 树根等效应力分布图
(b) Equivalent force distribution graph of roots



(c) 树干最大等效应力值曲线

(c) Maximum equivalent stress value curve of trunk



(d) 树干等效应力分布图

(d) Equivalent force distribution graph of trunk

图 14 土壤特性参数试验结果

Fig. 14 Soil parameters experiment results

随着土壤泊松比 (μ) 的增加,树根和树干 2 部分的最大等效应力值均呈现明显的下降趋势。为了确定减少的等效应力是否转移至土壤中,绘制了土壤最大等效应力值变化曲线,如图 15 所

示。结果表明,土壤的最大等效应力值基本处于 10^{-2} MPa 量级,在整个试验过程中均远小于树木。因此其变化程度可以忽略不计,即减少的等效应力并没有在土壤中体现。考虑到泊松比是用来描

述材料横向变形的系数,土壤的泊松比越大,在受外力作用时产生的横向位移也会越大。因此,土壤对树木的横向位移约束能力减弱。尽管树根和树干的 σ_{eq} 有所降低,但这会增加树

木的横向位移量,从而使树木发生倾倒事故的风险上升。综上所述,随着土壤泊松比的增加,土壤对根系横向位移的约束能力减弱,树木发生倾倒事故的风险会增加。

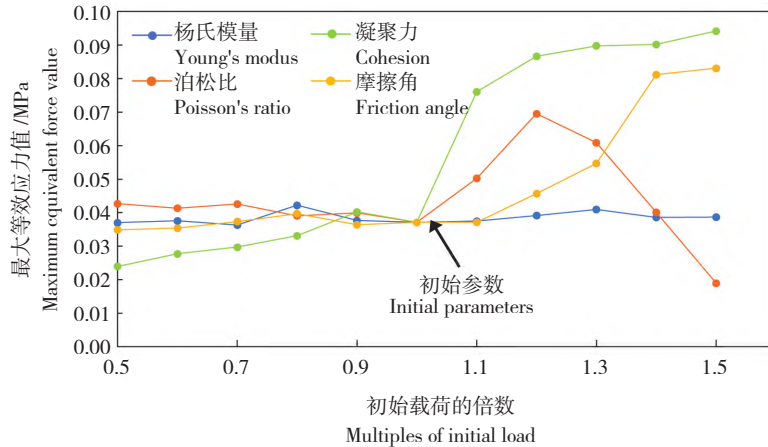


图 15 土壤最大等效应力值变化曲线

Fig. 15 Maximum equivalent stress value variation curve of soil

2.3 古侧柏群落的风险评估

虽然前文中证明了 GPR 获取根系构型的可行性,但考虑到仿真试验中的树木模型均由柱体组成,不符合一般树木的不规则轮廓形态。于是使用 1.1 和 1.2 中树木模型的构建和分析方法,对一个位于中国陕西省的古侧柏群落进行风险评估,验证本方法在实际评估工作中的准确性和可行性。现以编号 00127 的侧柏为例,阐述模型的构建及分析结果。位置及部分数据信息如图 16 和表 2 所示。



图 16 古树群落分布图及示例古树

Fig. 16 Ancient tree community map and demonstration tree

表 2 示例古树数据

Tab. 2 Data of demonstration tree

编号 Number	树龄/a Age	树高/m Height	胸围/m Circumference	东西冠幅/m East-west crown	南北冠幅/m South-north crown
00127	2 800	11.4	2.65	10.5	16.6

参照前面的步骤,使用 GPR 检测浅根分布情况,构建根系模型,并通过取样试验测定土壤参数,构建根系锚固结构。根据式(2)计算树冠等效阻力,重构树干轮廓,完善风载荷下的树木模型。之后将模型导入 Ansys 进行力学分析,根据等效应力分布评估树木事故风险,如图 17 和 18 所示。

根据力学分析结果,该侧柏的最大等效应力值位于浅根连接处,大小为 17.587 MPa。树干部分的分布比较均匀,只有在 x 轴负半侧的几个单元中出

现较大的等效应力值,为 12.085 MPa。这些单元位于模型上表面和侧面的交界处,考虑是网格划分不平滑导致个别单元出现较大的等效应力值。

将载荷方向设置为 x 正方向,那么 00127 侧柏的浅根属于背风根缺失的情况。通过分析该侧柏树模型和仿真模型在不同载荷下最大等效应力随载荷变化的情况,由图 19 可以发现,其具有相同的趋势,从而验证了风载荷下树木模型构建方法的准确性和可行性。

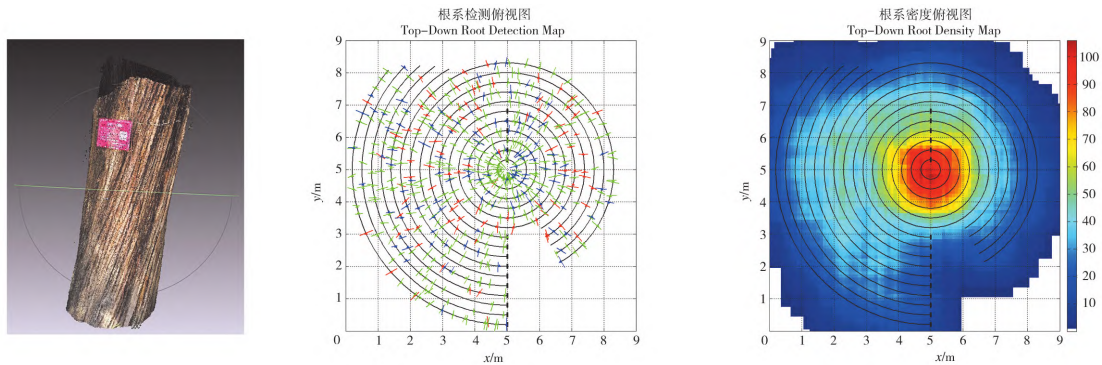


图 17 三维重构和 GPR 检测结果

Fig. 17 3D reconstruction and GPR detection results

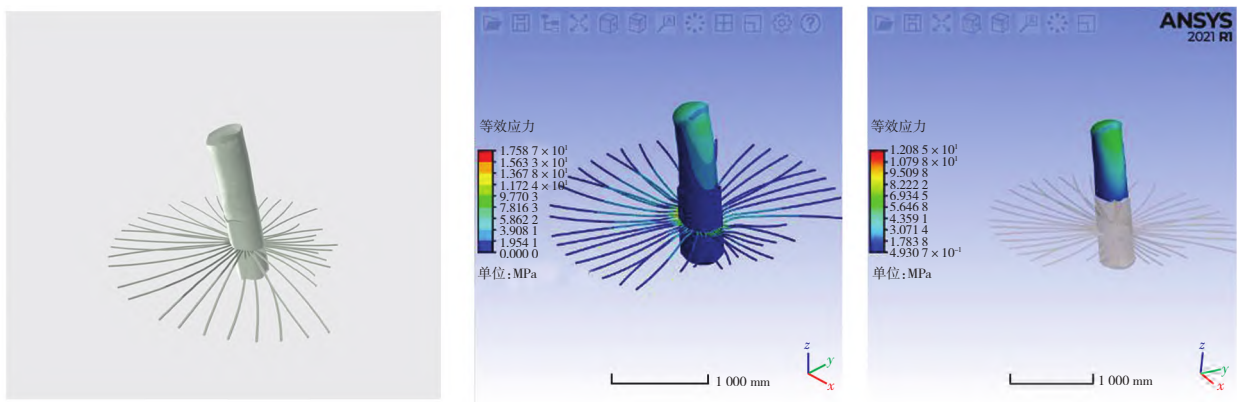


图 18 风载荷下的树木模型及力学分析结果

Fig. 18 Tree modelling under wind loads and mechanical analysis results

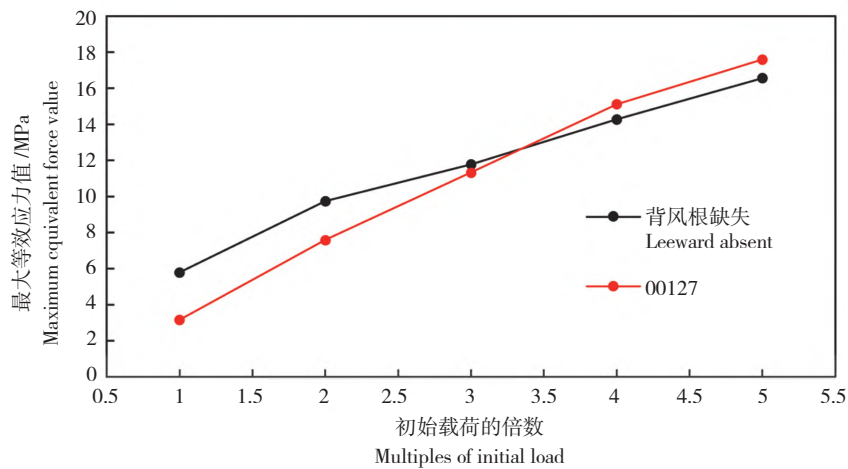


图 19 与仿真模型的对比

Fig. 19 Comparison with simulation model

根据对该群落共 45 棵侧柏进行建模分析的结果显示,其中 13 棵侧柏存在范围较大的浅根缺失,如图 20 所示。这些树木的树根部分等效应力分布明显高于其他树木,因此其事故风险较高。此外,还有 24 棵侧柏存在一定程度的浅根缺失,尽管范围

相对较小,但其事故风险仍属于中等水平。另外,剩余 8 棵侧柏展示了均匀的浅根分布,其根系的等效应力值相对较小,因此事故风险较低。试验区的土壤环境良好,土质均匀,在整个区域内没有出现土壤参数过低或过高的现象,因此对树木的稳定性

影响较小。此外,还有 26 棵侧柏因树干的倾斜或分支情况,显示出较高的树干等效应力分布水平。针

对这些树木,应在树干高应力区域采取加固措施,以防止树干发生折断等安全事故。

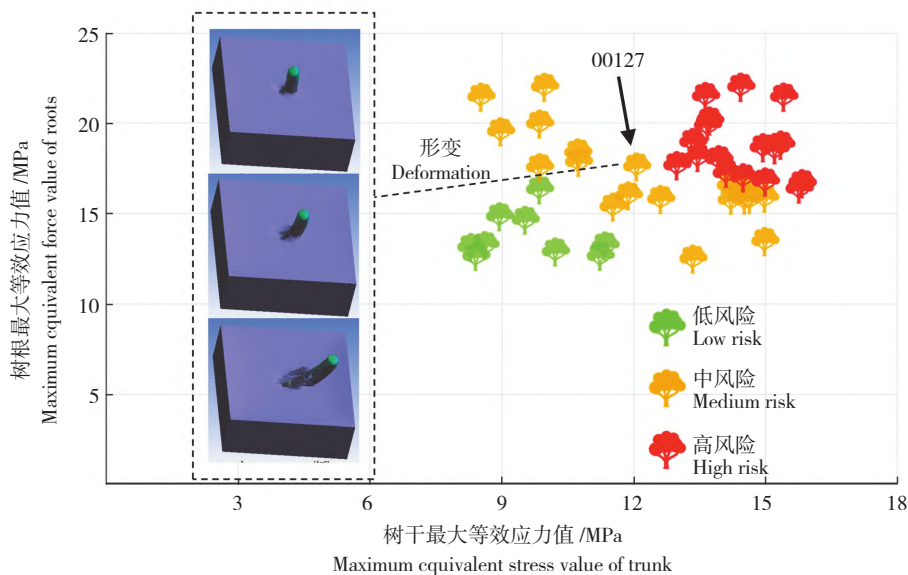


图 20 古树群落分析结果

Fig. 20 Ancient tree communities analysis results

3 结论

本研究主要分析了一种基于无损重构技术和有限元分析的风载荷下树木稳定性的评估方法,通过 GPR 无损获取根系构型,结合三维重构技术和阻力公式构建风载荷下的树木模型,根据模型的有限元分析结果评估树木稳定性状况。这一方法不仅可以在不损伤树木的情况下获取树木模型,还能通过等效应力分布图直观地展示力学分析结果,辅助评估人员判断树木风险区域。相比传统研究方法,解决了主观性强、模型不完整和根系获取困难等问题。

通过相关仿真试验的分析,探究了不同根系结构和土壤参数对树木稳定性的影响,并得出了水平浅根和土壤参数是影响树木稳定性的 2 个重要因素的结论。同时,验证了使用 GPR 获取树木根系构型的可行性。

对一个古侧柏群落进行风险评估工作,以该群落中的 00127 号侧柏为例,阐明群落中树木根系构型的建模及分析过程,得出了古侧柏群落的风险评估结果,证明了重构模型与理想模型具有相同的应力变化趋势,同时也验证了本方法在实际风险评估工作中的准确性和可行性。

目前,GPR 技术仅能够探测到横向生长的侧根,对于向地下延伸的主根尚缺乏相关的无损检测方法。传统的挖根试验虽然可以精确获取根系构

型,但会对树木造成巨大的伤害,并不适用于实际的风险评估工作。此外,大多数树木的树冠具有随机性强、结构复杂的特点,准确测量其投影面积,完善风载荷下树冠的响应,能够提高模型的准确性。因此,在后续的研究中,主根的无损建模方法和风载荷下树冠模型的完善是 2 个值得深入探索的方向。

【参 考 文 献】

- [1] GARDINER B. Wind damage to forests and trees: a review with an emphasis on planted and managed forests[J]. Journal of Forest Research, 2021, 26(4): 248-266.
- [2] GARDINER B, BYRNE K, HALE S, et al. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests[J]. Forestry: an International Journal of Forest Research, 2008, 81(3): 447-463.
- [3] JIM C Y, LIU H H T. Storm damage on urban trees in Guangzhou, China[J]. Landscape and Urban Planning, 1997, 38(1/2): 45-59.
- [4] KLEIN R, KOESER A, HAUER R, et al. Risk assessment and risk perception of trees: a review of literature relating to arboriculture and urban forestry[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2019, 45(1): 26-38.
- [5] DUNSTER J A, SMILEY E T, MATHENY N, et al. Tree risk assessment manual[M]. Champaign, IL: International Society of Arboriculture, 2013.
- [6] 岳小泉,王立海,葛晓雯. 风荷载作用下树木力学特性研究进展[J]. 森林工程,2015,31(6):33-36,40.

- YUE X Q, WANG L H, GE X W. Research progress of mechanical properties of trees under wind load action[J]. Forest Engineering, 2015, 31(6): 33-36, 40.
- [7] YANG M. Tree root anchorage: Modelling and numerical analyses of key contributing factors of wind firmness of *Pinus pinaster*[D]. Bordeaux: Université de Bordeaux, 2014.
- [8] YANG M, DEFOSSEZ P, DANJON F, et al. Tree stability under wind: simulating uprooting with root breakage using a finite element method[J]. Annals of botany, 2014, 114(4): 695-709.
- [9] ZHU J, LEUNG A K, WANG Y. Modelling root - soil mechanical interaction considering root pull - out and breakage failure modes[J]. Plant and Soil, 2022, 480(1/2): 675-701.
- [10] JIANG B, ZHANG G, HE N, et al. Analytical model for pullout behavior of root system[J]. Ecological Modelling, 2023, 479.
- [11] KANE B C, CLOUSTON P. Tree pulling tests of large shade trees in the genus *Acer*[J]. Arboriculture and Urban Forestry, 2008, 34(2): 101-109.
- [12] RAHARDJO H, HARNAS F R, INDRAWAN I G B, et al. Understanding the stability of *Samanea saman* trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models[J]. Urban Forestry Urban Greening, 2014, 13(2): 355-364.
- [13] DAHLE G A, GRABOSKY J C. Variation in modulus of elasticity (E) along *Acer platanoides* L. (Aceraceae) branches[J]. Urban Forestry Urban Greening, 2010, 9(3): 227-233.
- [14] 王明凯,李文彬,文剑. 基于探地雷达对粗根的识别技术研究[J]. 森林工程, 2020, 36(3): 21-27.
- WANG M K, LI W B, WEN J. Study on recognition technology of coarse roots using ground-penetrating radar[J]. Forest Engineering, 2020, 36(3): 21-27.
- [15] ZEYGOLIS Y G, ALSAMAIL M Z, AKRIOTIS T, et al. Detecting, quantifying, and mapping urban trees' structural defects using infrared thermography: Implications for tree risk assessment and management[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 75: 127691.
- [16] LAI C, XIAO B, FENG J L, et al. Crown feature effect evaluation on wind load for evergreen species based on laser scanning and wind tunnel experiments[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 21475.
- [17] GU D L, ZHAO P J, CHEN W, et al. Near real-time prediction of wind-induced tree damage at a city scale: simulation framework and case study for Tsinghua University campus[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 53: 102003.
- [18] ENNOS R. Trees[M]. Bruxelles: Smithsonian, 2001.
- [19] YANG M, DEFOSSEZ P, DUPONT S. A root-to-foilage tree dynamic model for gusty winds during windstorm conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 287: 107949.
- [20] HIGHAM T E, FERRY L A, SCHMITZ L, et al. Linking ecomechanical models and functional traits to understand phenotypic diversity[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2021, 36(9): 860-873.
- [21] PATTON E G, FINNIGAN J J. Canopy turbulence[M]// Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume One. CRC Press, 2012: 329-346.
- [22] GEITMANN A, GRIL J. Tree mechanics and wind loading[M]// Plant Biomechanics. Cham: Springer, 2018: 79-106.
- [23] DEL CARMEN OROZCO-MOSQUEDA M, FADIJI A E, BABALOLA O O, et al. Rhizobiome engineering: Unveiling complex rhizosphere interactions to enhance plant growth and health[J]. Microbiological Research, 2022, 263: 127137.
- [24] 李云鹏. 北京典型植物根系固土机理及含植被坡体稳定分析研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- LI Y P. Research on root reinforcement mechanisms and evaluation of vegetation slope stability in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [25] FENG Z P, KONG D L, KONG Y H, et al. Coordination of root growth with root morphology, physiology and defense functions in response to root pruning in *Platycladus orientalis*[J]. Journal of Advanced Research, 2022, 36: 187-199.
- [26] 陈晓阳,王东洋,吴栓柱. 侧柏种源苗木根系性状遗传变异的研究[J]. 北京林业大学学报, 1990, 12(2): 13-20.
- CHEN X Y, WANG D Y, WU S Z. Studies on the genetic variations of seedling root characteristics in provenance trials of *Platycladus orientalis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1990, 12(2): 13-20.
- [27] 江泽慧. 世界主要树种木材科学特性[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2016.
- JIANG Z H. Wood properties of the global important tree species[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [28] 吴晗军. 风雪灾害下树木断裂机制及风险评估与防护[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- WU Y J. Fracture mechanism of trees by wind and snow disaster and risk assessment and cabling, bracing and other support systems for trees[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- [29] MANICKATHAN L, DEFRAEYE T, ALLEGRINI J, et al. Comparative study of flow field and drag coefficient of model and small natural trees in a wind tunnel[J]. Urban Forestry Urban Greening, 2018, 35: 230-239.
- [30] GREGORY P J. RUSSELL REVIEW Are plant roots only "in" soil or are they "of" it? Roots, soil formation and function[J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(1): e13219.