

古树断裂、倒伏方式及其力学机制

邵卓平*

(安徽农业大学林学与园林学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 自然界中造成古树断裂和倒伏的主要外因是灾害性天气,能够直接造成古树破坏的是风、雪、冻雨,简称风力雪载。目前,人们把古树破坏方式仅分为断裂和倒伏2种,没有对复杂的断裂行为再细分研究。但木材作为一种多胞层状生物复合材料,在力学方面具有强烈的各向异性性质。古树在不同的受力条件下会发生不同的断裂行为,这不仅与树材的各向异性性质有关,还与树木形态结构所导致的不同内力、树干中腐朽空洞的大小和位置有关。当中空的树壁由厚至薄,古树展示了不同的断裂方式,如弯曲断裂、扭转开裂、顺纹张裂以及压溃弯折等。认知古树破坏的力学机制,可指导开展分级防护:当树干空洞内外径比小于0.7时,应优先开展根系与根基稳固性检测;介于0.7~0.8区间时,需重点排查树体潜在的大扭矩风险;若大于0.8,则需在抑制弯曲—扭转变形的同时增设钢箍加固。该研究为精准制订古树极端天气防御措施提供了坚实的科学依据和操作指引。

关键词: 古树; 风力雪载; 破坏形式; 破坏机制

中图分类号: S761 文献标识码: A 文章编号: 2097-5279(2025)03-0061-13

Fracture, lodging mode and mechanical mechanism of ancient trees

SHAO Zhuoping*

(College of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The main external causes of ancient trees breaking and falling in nature are disastrous weather conditions. The ones that can directly damage ancient trees are wind, snow and freezing rain, which are briefly referred to as wind and snow load. At present, the damage methods of ancient trees are only divided into two types: fracture and loading, without further detailed research on the complex fracture behavior. However, as a multi-cellular layered biological composite material, tree wood has strong anisotropic properties in terms of mechanics. Ancient trees will undergo different fracture adamage modes under different force conditions. This is not only related to the anisotropic nature of the tree material, but also to the different internal forces caused by the morphological structure, as well as the size and location of the decayed cavities in the trunk. The hollow tree walls vary from thick to thin, and the ancient trees exhibit various fracture behaviors, such as bending fractures, torsional cracking, along the grain cracking, and crushing bending, etc. Understanding the mechanical mechanism of ancient tree destruction can guide the development of grading protection measures: when the ratio of the inner and outer diameters of tree trunk cavities is less than 0.7, priority should be given to conducting root and foundation stability tests. When it is within the range of 0.7 to 0.8, it is necessary to focus on investigating the potential high torque risk of the tree. If it is greater than 0.8, steel hoops should be added for reinforcement while suppressing the bending and torsional deformation. This research provides a solid scientific basis and operational guidance for precisely formulating extreme weather defense measures for ancient trees.

Keywords: ancient trees; wind and snow load; destructive form; destruction mechanism

随着全球气候变暖,风雪灾害的发生频率和强度正呈现增加趋势(Emanuel, 1987; Gray, 1990),不仅对森林生态系统的稳定性造成很大影响,同时也给林业生产带来巨大的经济损失。据统计,在森林生态系统中,因风雪灾害引起的受害木采伐量已占总采伐量的20%,并呈逐年上升趋势(Hou, 1992)。同时,一些高大的行道树和园林古树,在经历了长期风雨

洗礼后,都存在不同程度的安全隐患,若其突然遭遇狂风暴雪,断裂、倒伏的可能性激增,对行人及游客的生命安全造成严重威胁。

风力雪载是自然界中造成树木断裂、倒伏的主要外因之一。因此,树木对风雪灾害承受能力的相关研究是树木安全性评估的重要内容。目前,这方面的研究多集中于美国、加拿大和一些欧洲国家(Peltola

收稿日期: 2025-05-10; 修回日期: 2025-06-21。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570715)。

* 通信作者: 邵卓平(E-mail: 15955173171@163.com), 教授。

and Kellomaki, 1993; Peltola, 2006)。常用的风雪灾害对树木破坏的评估方法包括经验观察 (Mattheck et al., 1993)、统计学方法 (李秀芬等, 2006) 和力学方法 (Kamimura and Shiraiishi, 2007)。前期的大部分研究都依赖于观察和统计学方法, 尽管这些研究能够定性描述风雪灾害的破坏程度, 但却无法说明风力雪载与树木强度及稳定性之间的关系。因此, 对于树木断裂、倒伏的风险性评估存在许多不确定性。近年来, 欧洲开始使用力学方法评价风雪灾害对树木的破坏性 (Gardiner and Quine, 2000; Kohnle and Gauck, 2003), 但仅将风雪灾害对树木的破坏区分为断裂、倒伏, 并未对复杂的断裂行为再细分研究。

树干在某种程度上是由同心圆筒状 (年轮层次) 的薄层组成, 因而在宏观力学行为上可视为一种典型的圆柱对称性复合材料 (Shao and Wang, 2018), 并在强度和刚度方面展示了强烈的各向异性性质, 也使其断裂破坏机制较其他材料更为复杂。当中空的树壁由厚至薄, 古树展示了不同的断裂方式, 这除了与树材的各向异性有关, 还受到树干中腐朽空洞的大小和位置以及由于树木形态结构差异带来的不同内力的影响。认知古树的断裂方式及其力学机制, 对于从业人员采取有针对性的防护措施具有指导意义。为此, 本文简要介绍了风力雪载的特性, 详细阐述了在自然力作用下, 具有不同缺陷特征的古树的破坏形式及其力学机制, 并讨论了认知破坏机制对古树安全防护设计的指导意义。

1 风力雪载

我国地域辽阔, 横跨热带、亚热带、暖温带、温带、寒温带等 5 个气候带。大陆东濒太平洋, 西部为世界地势最高的青藏高原, 气候多变, 地形复杂, 是受台风影响较多的国家之一; 平均每年登陆和影响我国的台风多达 8 个左右, 最多可达 14 个 (高建华等, 1999), 而内陆强风也经常发生。此外, 冬季及早春季节, 也时常发生持续性的大雪、冰冻等灾害性天气。灾害性天气包括冻雨、冰挂、降雪、大风、暴雨、连阴雨、雷电和干旱 8 类, 其中能够直接破坏古树的是风、雪、冻雨, 简称风力雪载。

1.1 风

风是空气运动形成的, 在风的顺风向时程曲线中, 包括平均风和脉动风。在对风力风速等级进行划分时, 主要依据平均风速 (图 1)。平均风速的大小与时距的选择有关, 因此在研究结构物所承受的风压时, 可以选取不同的时距计算。脉动风又称阵风脉动,

其风速是描述极短时间内的平均风速, 一般时距小于 3 s, 因而可以认为是瞬时风速。在天气预报中听到的“阵风八级”, 此时的风速, 是指这一天或者某个确定时间段内脉动风的瞬时风速的最大值。

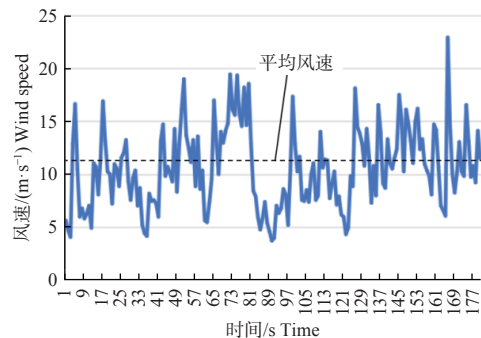


图 1 风的时程曲线

Fig. 1 The time history curve of the wind

风速的流动形成风压, 对结构产生风载荷, 根据近代流体力学, 风压可由伯努利方程表示为:

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

式中: p 为风压 (kN/m^2), v 为风速 (m/s), ρ 为空气密度 (kg/m^3)。

Mayer (1987) 和 Peltola (1993) 通过引入树冠阻力系数 C_d , 将式 (1) 用来计算风压对单株树和林区边缘树木形成的风力, 其公式为:

$$F_{wind} = 0.5 \rho v^2 A C_d \quad (2)$$

式中: F_{wind} 为风载荷 (N), ρ 为空气密度 (kg/m^3), A 为树木迎风面积 (m^2), v 为距离水平面特定高度处的风速 (m/s), C_d 为树木的风阻系数。

从式 (2) 中可见, 作用在树冠上的风力随风速增大呈二次幂函数增加。风速越大, 风载荷越大, 树木越容易破坏。如果设 $F_{wind}/(0.5 \rho A C_d)$ 为风力系数, 则图 2 直观反映了风力系数与风速的倍增关系。

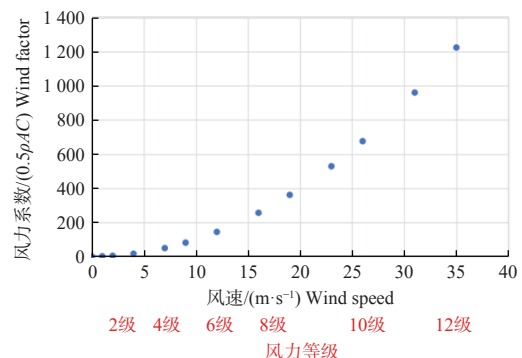


图 2 风力系数与风速关系曲线

Fig. 2 The curve of the relationship between wind force coefficient and wind speed

1.2 雪

降雪是一种自然的降水现象, 又有干雪与湿雪

之分,其形成主要与暖湿气流及近地层温度有关。

干雪的空隙被空气充满,其液态水含量很少,干雪粘附作用弱,风一吹即可散开;湿雪是雪中的空隙包含大量液态水的雪,当其冻结在物体表面时,会呈现白色堆积状。在华北、西北地区,雪的密度为0.11~0.13 g/cm³,南方雪的密度高于北方,这也是发生暴雪灾害时我国南方的林木损失大于北方的原因之一。相对于阔叶树种,雪更容易附着在针叶树上(图3;吴贻军,2016)。

1.3 冻雨

冻雨是一种非固态降水,不同于一般的水滴,是由过冷水滴组成的,降落到0℃物体时立刻冻结。若

条件允许,会持续凝结,形成很粗的冰柱。

雪的密度为0.11~0.14 g/cm³,冰的密度为0.9 g/cm³。冻雨因为形成速度快,而又不易清除,加上其密度是雪的7~8倍,在树枝上容易形成大的冻雨荷载,其重量超过树枝自身重量的数十倍(图4)。因此,冻雨常造成林木的断裂和倒伏,是危害古树最严重的一种降水形式,而且其发生的频率与强度又变化无常,具有不可预测性。只要某小块地域的气象条件符合过冷降水的形成并持续数日,就会给古树带来严重危害。为了防止冻雨压断古树的树枝,黄山、九华山景区会采用玻纤增强树脂管制作的支撑杆应急支撑防护(图5)。

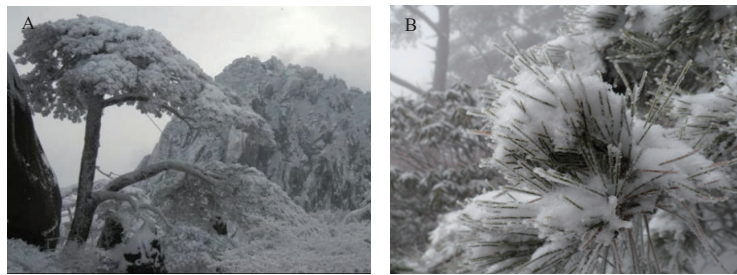


图3 雪在针叶树上的附着情况
Fig. 3 Attachment of snow on coniferous tree

注: A. 迎客松树冠的积雪; B. 松针叶的积雪。本图及本文后续所有图片均由作者独立拍摄,无外部引用。

Notes: A. The snow on the crown of the welcoming pine tree; B. Snow on the pine needles. This figure and all subsequent figures in this paper were independently taken by the authors, with no external citations.

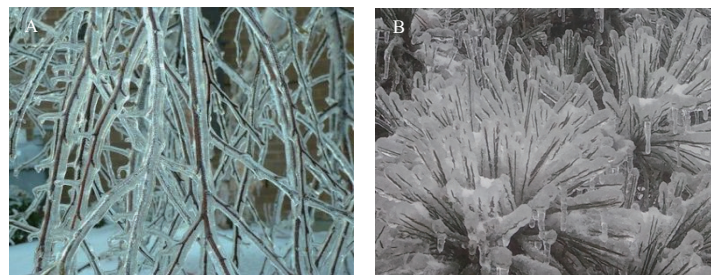


图4 冻雨在不同树种上的凝结情况
Fig. 4 Condensation of freezing rain on different tree species

注: A. 冻雨凝结在树枝上; B. 冻雨凝结在松树针叶上。

Notes: A. Freezing rain condenses on the branches; B. Freezing rain condenses on the pine needles.

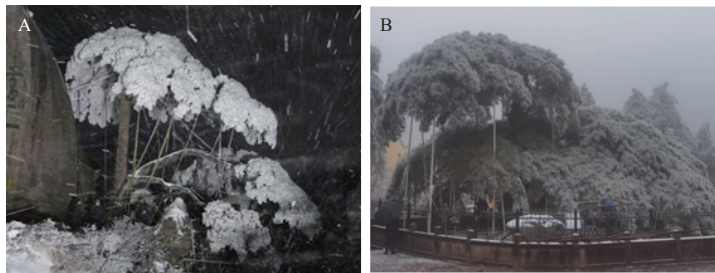


图5 冻雨天气下的应急防护支撑
Fig. 5 Emergency protection support in freezing rain weather

注: A. 迎客松; B. 凤凰松。

Notes: A. Welcoming Pine; B. Phoenix Pine.

2 古树破坏的形式

木材在力学方面具有强烈的各向异性,即沿不同的方向,材料的力学性质显著不同。顺纹方向,木材抗拉强度可达 100~300 MPa,抗剪切强度不足抗拉强度的 1/10;横纹方向,抗拉强度不足顺纹方向抗拉强度的 1/20。因此,在风力雪载作用下,树木除了会发生弯曲断裂外,还会发生在顺纹平面上的开裂。从形式上,古树的破坏可归结为断裂和倒伏 2 种,其中断裂又分有干断、枝断、根兜断。



图 6 树干破坏类型

Fig. 6 Types of tree trunk damage

注: A. 拦腰折断; B. 先扭裂再折断; C. 先顺纹开裂再折断。

Note: A. Broken in half; B. First twist and then break; C. Crack along the grain first and then break.

2.1.2 树枝断裂

树枝是树的主干或大枝上生长的枝条,是树木的主要分支结构。树枝折断是风雪灾害中的常见现象



图 7 树枝断裂

Fig. 7 Branch breakage

注: A. 雪压断树枝; B. 大风吹断树枝。

Notes: A. Snow breaks branches; B. The strong wind broke the branches.

2.1.3 树杈断裂

树杈是指树枝分叉的部位,是树枝的分支点。树杈断裂也是在冰雪灾害天气下极易发生的破坏现象之一(图 8A)。当树枝前端叶冠面积较大,可能因荷载超限引发断裂风险;冬季枝叶积雪或冻雨形成

2.1 树木断裂

2.1.1 树干断裂

树干断裂是风雪灾害中常见的破坏类型,尤其是在中龄林和成熟林中表现更为突出,其破坏方式常是拦腰折断(图 6A)。但是,对于偏冠严重的树木,如果树干还有腐朽空洞,在受到大风作用下,树干常会先发生顺纹扭转开裂后再断裂(图 6B)。特别对于树干空腐严重、树壁很薄的树木,在风力雪载作用下,弯曲的薄壁树干会因椭圆效应导致顺纹开裂,使树干丧失整体刚度后再弯曲折断(图 6C)。

(图 7)。折断多见于前伸较长或有缺陷的枝干,因无法承受前端枝冠积雪和冻雨形成的冰挂荷载而发生断裂。

的冰挂荷载易导致树杈撕裂;大风天气中,作用于大型树冠的风荷载力矩过大,致使树杈处发生断裂;夏季暴雨期间,宽大叶片滞留雨水增重,若排水不及时,将因枝干承重失效而断裂。树杈在树木结构中承担支撑和保护的作用,但部分树杈在自然形成过程中,

会因分叉角过小而出现夹皮或夹隙,使分叉处成为强度薄弱处。譬如城市街道上的法国梧桐 *Platanus ×*

acerifolia (Aiton) Willd., 在狂风暴雨下主枝干常会在分叉处断裂(图8B)。



图8 树枝断裂

Fig. 8 Branch breakage

注: A. 雪压树枝断裂; B. 法国梧桐的主枝干在分叉处断裂。

Notes: A. Branch breakage caused by snow pressure; B. The main branch of the plane tree broke at the fork.

2.2 树木倒伏

树木倒伏是指作用在树冠上的风力雪载对根基部形成的树弯矩,超过了根土复合体的掘根阻力矩所导致的连根拔出的破坏现象(Coutts, 1983),多发生在雨水多的季节和土壤松散的地方。仅是连根拔出,没有树干断裂现象(图9A),所以又称为掘根。在我

国南方沿海地区,受台风影响,树木倒伏现象特别严重。在有些地区,风害中的树木倒伏与树木断裂之比接近2:1(Wei and Shao, 2008)。此外,根的发育状况和立地条件也影响树木倒伏程度。例如,行道树由于树根生长受到地面硬化的影响,根系浅或受损伤而烂根,树木掘根危害比较严重(图9B)。



图9 树木倒伏

Fig. 9 Trees lodging

注: A. 大树因迎风向主根断裂而倒伏; B. 路面硬化使根系生长不健全。

Notes: A. The big tree fell down because its main root broke against the wind; B. The hardening of the road surface causes the root system to grow unhealthily.

3 古树破坏的力学机制

古树在风雪灾害下可能会遭到各种破坏。除了与树材的各向异性性质有关,还与由于树木形态结构差异、树干腐朽空洞的大小和位置、根系土壤盘特性等因素有关。风力雪载下大树可能发生的几种破坏方式见图10。

3.1 树木断裂的力学机制

3.1.1 树干断裂

3.1.1.1 风力作用下的树木断裂

1) 无偏冠古树

第一种情况:无空洞无偏冠古树。受到如图11A

所示的风力作用时,树干仅发生弯曲变形。如果不考虑树木自重(下面若无特别说明,都视为不考虑树木自重),在树干横截面上,只有弯矩 $M=Fh$ 和横向力 $F_s=F_{wind}$ 2个内力元素(图11B)。通常情况下,对于无空腐或少空腐的树干,横截面上由横向力引起的切应力很小,可以忽略不计。对于轻度偏冠树木,横截面上由风扭矩引起的扭转切应力也可以忽略不计。当树干在风荷载下弯曲时,由风弯矩 M 引起的弯曲正应力与半径成线性分布(图11C)。因此,在迎风向和背风向的树干外围木质部分别受到顺纹向的最大拉、压应力,计算公式为:

$$\sigma_{\max}^{\pm} = \pm \frac{M}{W} = \pm \frac{32M}{\pi D^3} \quad (3)$$

式中： $M=hF$ 为风弯矩； D 为树干去皮后的外径； $W=\pi D^3/32$ 为圆截面树干的抗弯截面系数。



图 10 风力雪载下大树可能发生的几种破坏方式示意图

Fig. 10 Schematic diagram of several possible ways of damage to large trees carried by wind and snow

相关报道表明,应用公式(3)计算的树干截面上

最大正应力值与树木力学实验测试结果是一致的 (Wu and Shao, 2016; 邵卓平等, 2017)。

在弯曲过程初期,迎风和背风向树干外围的最大拉、压应力同时呈线性增加。但因木材抗压强度仅为抗拉强度的一半,随着风力增大,背风向的压应力达到抗压极限后会先将木细胞压皱缩,并形成压塑性区。在这过程中,中性轴不再与形心轴重合,而是向受拉一侧产生偏移,直至最大拉应力达到抗拉强度,木纤维就会被拉断,树干发生断裂破坏(图 11D)。所以,树木的抗弯曲断裂能力由木材的抗拉强度决定,并与迎风向树干木质部的完整性密切相关。

第二种情况:树干有中心空洞但无偏冠古树。这种类型的古树在受到如图 12A 所示的风力作用时,树干也仅发生弯曲变形。在树干横截面上的内力元素有弯矩 $M=F_{\text{wind}}h$ 和横向力 $F_s=F_{\text{wind}}$ (图 12B),相应的应力有弯曲正应力和切应力(图 12C)。

设 D 为树干去皮后的外径、 d 为树干空洞内径,则最大弯曲应力和横向切应力计算公式如下:

$$\sigma_{\max}^{\pm} = \pm \frac{M}{W} = \pm \frac{32F_{\text{wind}}h}{\pi D^3(1-\alpha^4)} \quad (4)$$

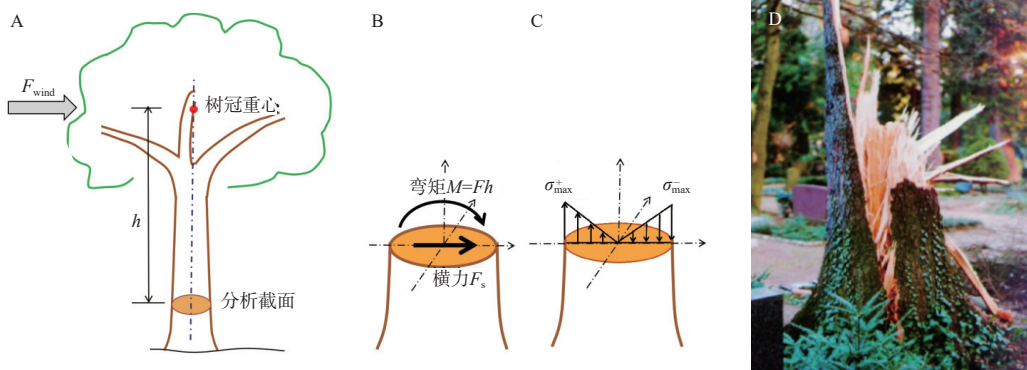


图 11 无空洞无偏冠古树在风力作用下的力学分析及示例

Fig. 11 Mechanical analysis and examples of ancient trees without holes and unbalanced crowns under wind force

注: A. 树木受风力作用; B. 横截面上内力; C. 横截面上应力及分布; D. 树干弯曲断裂。

Notes: A. Trees are affected by wind force; B. Internal forces on the cross-section; C. Stress and distribution; D. The trunk is bent and broken.

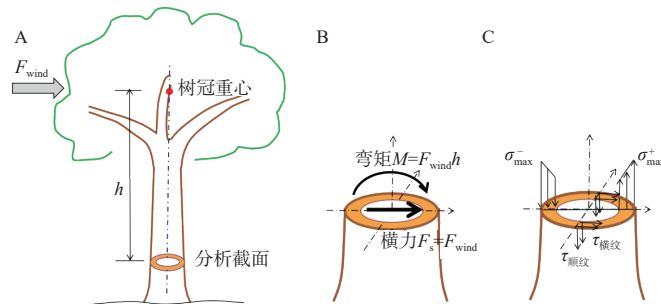


图 12 中心空洞树木在风力作用下的力学分析图

Fig. 12 Mechanical analysis diagram of the stress of trees in the central hole under the action of wind

注: A. 中心空洞树木受到风力作用; B. 横截面上的内力; C. 横截面上的应力及分布。

Notes: A. The trees in the central cavity are affected by wind force; B. Internal forces on the cross-section; C. Stress and distribution on the cross-section.

$$\tau_{\max} = \beta \frac{F_s}{A} = \beta \frac{4F_{\text{wind}}}{\pi D^2(1-\alpha^2)} \quad (5)$$

式(4)中：抗弯截面系数 $W = \pi D^3(1-\alpha^4)/32$, $\alpha = d/D$ 为内外径比。 α 是评价树干强度和刚度的重要特征值,与健康树木相比较,中心空洞树木的内外径比的4次方为该树干强刚度的下降程度 $\eta = \alpha^4 = (d/D)^4$ 。式(5)中：系数 β 随树干壁从厚壁至薄壁在 1.3~2.0 之间,考虑安全可以取 $\beta = 2$ 。

国外学者通过对大量的观察统计发现,当树干空洞内外径比 $\alpha > 0.7$, 树木才具有较高破断率(Mattheck, 1993)。吴贻军(2016)应用有限元技术对中心空洞树干的计算机模拟分析证实了这一结论,即当树洞内外径比大于 0.7, 若设破坏系数为树干最大应力与树干极限应力的比值,无论是弯曲破坏系数还是扭矩与弯矩比为 β 时的扭转破坏系数都会快速增大(图 13)。

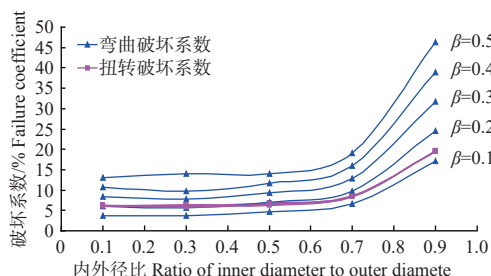


图 13 破坏系数与树洞内外径比 α 的关系

Fig. 13 The relationship between the failure coefficient and the ratio of the inner and outer diameters of the tree hole (α)

在多数情形下,主导树木强度的是弯曲正应力。但当树洞内径较大时,由式(5)计算得到的中空树干横截面上的切应力不可忽视。根据切应力互等定理,横截面上的切应力与顺纹面上的切应力相等,但木材在顺纹面上抗剪切强度很低,低于抗拉强度的 10%,所以对于一些树干短粗又过熟的中空古树,在剪切应力的作用下,树干就有可能沿顺纹面开裂



图 14 树干沿顺纹面的开裂

Fig. 14 The trunk cracks along the grain

(图 14)。

第三种情况：树干有偏心空洞。在古树断裂风险评估中,树干腐朽空洞的大小、位置都是重要的评价依据。相对于中心空洞的树干,偏心树洞更具风险性,其强度下降程度 η 可以用下式估算(邵卓平, 2024)：

$$\eta = \frac{2\alpha^2 e D + D^2(1-\alpha^2)\alpha^4 + 16\alpha^2 e^2}{D^2(1-\alpha^2) + 2\alpha^2 e D} \quad (6)$$

图 15A 是中心空洞树干截面,设外径 $D = 80$ cm, 内径为 d ; 图 15B 是同尺寸的偏心树洞截面,偏心距为 $e = 10$ cm。图 16 是中心空洞树干和偏心空洞树干的强度下降程度 η 随内外径比 α 变化的关系曲线图。可见,当内外径比 $\alpha = 0.6$ 时,中心空洞树干的强度下降程度 $\eta = \alpha^4$ 仅为 13%,安全无虞;而偏心空洞树干的强度下降程度已达 64%(或剩余强度仅 34%),已具有较大的安全风险。

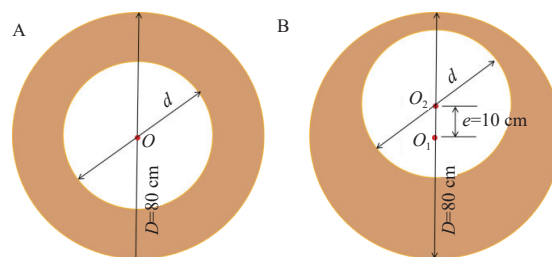


图 15 树干空洞横截面

Fig. 15 Trunk cavity cross section

注：A. 中心树洞横截面；B. 偏心树洞横截面,偏心距 10 cm。

Notes: A. Cross-section of the central tree hole; B. Eccentric cross-section of the tree hole, with an eccentricity of 10 cm.

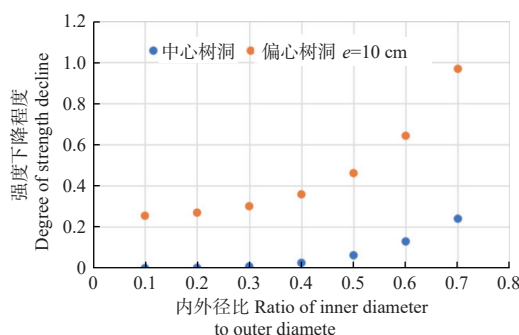


图 16 强度下降程度 η 与内外径比 α 的关系曲线

Fig. 16 The relationship curve between the degree of strength reduction η and the ratio of inner to outer diameters α

第四种情况：树干空腐严重、树壁很薄。对于无偏冠古树,如果树干空腐严重、树壁很薄,由于木材沿垂直纹理方向的抗拉强度很低,薄壁树干会在横向力的作用下,因椭圆效应在短轴内侧和长轴外侧受到张力而顺纹开裂(图 17A),使树干丧失了整体刚

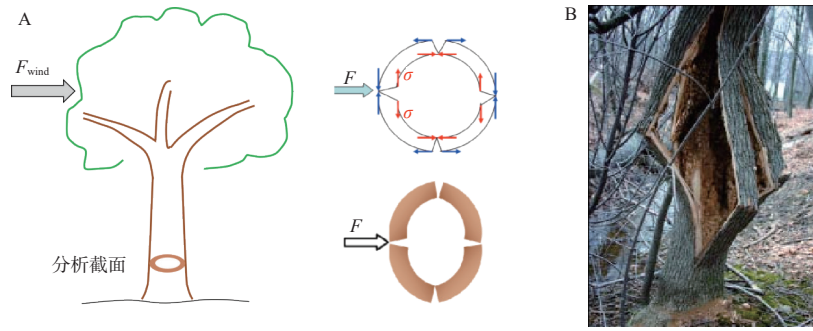


图 17 薄壁树干受力分析及示例

Fig. 17 Stress analysis and examples of thin-walled trunk

注: A. 薄壁树干受力分析图; B. 先顺纹开裂再分 4 瓣开断。

Notes: A. Force analysis diagram of thin-walled tree trunks; B. First crack along the grain and then break in four pieces.

度后再弯曲折断,而且多是分 4 瓣开裂折断(图 17B)。

2) 偏冠树木

偏冠树木在受到如图 18A 所示的风力作用时,树干将发生弯曲和扭转的组合变形,此时在树干横截面上的内力元素,除了有弯矩 $M=F_{\text{wind}}h$ 和横向力 $F_s=F_{\text{wind}}$ 外,还有扭矩 $T=F_{\text{wind}}e$ (图 18B)。对于无空洞或空洞较小的树干(称之为厚壁树干),由横向力 F_s 引起的横向切应力很小,可以忽略不计。因此,横截面上存在由风弯矩 M 引起的弯曲正应力和由风扭矩 T 引起扭转切应力(图 18C),其均与半径呈线性分布,其中最大弯曲正应力的计算公式与公式(4)相同,最大扭转切应力的计算公式如下:

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_n} = \frac{16T}{\pi D^3(1-\alpha^4)} \quad (7)$$

式中: W_n 为圆截面树干的抗扭截面系数或抗扭截面模量,其为抗弯截面系数的 2 倍,即 $W_n=2W$ 。

与抗弯截面系数一样,抗扭截面系数是反映树干截面抵抗扭转变形能力的几何参数,其值越大,树干抗扭能力越强。同前面定义,式(7)中的 D 为树干去皮后的外径、 d 为树干空洞内径, $\alpha=d/D$ 为内外径比,内外径比的 4 次方表征该树干抗扭强度的下降程度。相关研究表明,应用公式(7)计算树干截面上的最大切应力值与树木力学实验测试结果一致(Wu and Shao, 2016; 邵卓平等, 2017)。

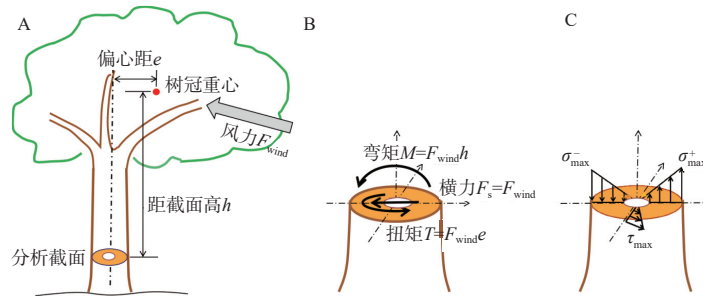


图 18 偏冠树木的力学分析图

Fig. 18 Mechanical analysis diagram of partial crown trees

注: A. 偏冠树木受到风力作用; B. 横截面上的内力元素; C. 横截面上弯曲正应力和扭转切应力及分布。

Notes: A. The crown trees are affected by wind force; B. Internal force elements on the cross-section; C. Bending normal stress and torsional shear stress on the cross-section and their distribution.

但是,当树洞内外径比较大且树冠偏心距也较大时,需要考虑扭转切应力的影响。根据切应力互等原理,树干顺纹面上的切应力等于横截面上的切应力(图 19A),而木材顺纹面上抗剪切强度低于木材顺纹向抗拉强度的 10%,因此,当树材顺纹面上有较大的剪切应力时,树干会先扭转开裂,在失去整体刚度后再弯曲断裂(图 19B)。

偏冠树木在大风作用下是先发生弯曲断裂,还是先发生扭转开裂,举例分析说明。设某树材的抗拉强度为 σ_u 、顺纹抗剪强度为 τ_u ,树冠中心到树干分析横截面的高度为 h 、到树干长轴线的偏心距为 e (图 18A),则该截面上的最大弯曲正应力和最大弯曲切应力分别为:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{Fh}{W} \quad (8)$$

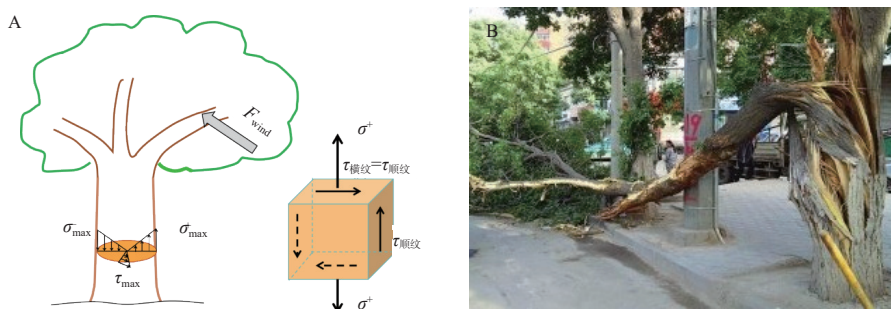


图 19 切应力的力学分析及示例

Fig. 19 Mechanical analysis and examples of shear stress

注: A. 树干顺纹面上的切应力等于横截面上的切应力; B. 空腐树干先扭转开裂, 在失去整体刚度后被压折。

Notes: A. The shear stress along the grain of the trunk is equal to that on the cross-section; B. The hollow and rotten tree trunk first twists and cracks, and then is crushed after losing its overall rigidity.

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_n} = \frac{Fe}{2W} \quad (9)$$

若树干发生弯曲断裂和扭转开裂的破坏机率相同:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} = \frac{Fh}{W} / \frac{Fe}{2W} = \frac{2h}{e} = \frac{\sigma_u}{\tau_u} \quad (10)$$

于是, 当 $h > \frac{e\sigma_u}{2\tau_u}$, 树干优先发生弯曲断裂; 当 $h < \frac{e\sigma_u}{2\tau_u}$, 树干优先发生扭转开裂。

通常情况下, 偏心树冠中心的偏心距 e 远小于树冠中心的高度 h , 所以树木更易发生弯曲断裂。

3.1.1.2 雪载作用下的树木断裂

对于没有偏冠的树木, 在雪荷载和树冠自重的作用下, 树干仅受到压力, 通常不会发生断裂破坏。雪压断裂破坏常发生在偏冠或倾斜的树木上。如果不计树冠自重, 偏冠树木在雪荷载 F_{snow} 作用下, 树干将发生压弯组合变形(图 20A)。此时在树干横截面上有 2 个内力元素, 轴向压力 $N=F_{\text{snow}}$ 和弯矩 $M=$

eF_{snow} (图 20B)。

在轴向压力 N 和弯矩 M 的共同作用下, 树干横截面上的正应力分布如图 19C 所示, 最大压应力和最大拉应力计算公式为:

$$\sigma_{\max}^{\pm} = \sigma_N \pm \sigma_M = -\frac{N}{\pi D^2(1-\alpha^2)} \pm \frac{32M}{\pi D^3(1-\alpha^4)} \quad (11)$$

树干在压弯组合变形下, 其最大压应力大于最大拉应力。当压应力先达到临界应力后, 受压区木细胞皱缩、中性层偏移, 直至最大拉应力拉断木纤维而导致树干断裂。但通常情况下, 由于树冠重心的偏心距不大, 因此雪荷载下的断裂破坏较少发生在主干上, 而更多发生在枝干和树杈上。然而, 对于腐朽空洞严重的薄壁树干古树, 木材的顺纹抗压强度仅为顺纹抗拉强度的一半, 在雪荷载下受轴向压力 N 和弯矩 M 的共同作用下, 弯曲树干的内侧会因压应力过大, 压溃薄壁木质部, 造成古树弯折破坏。

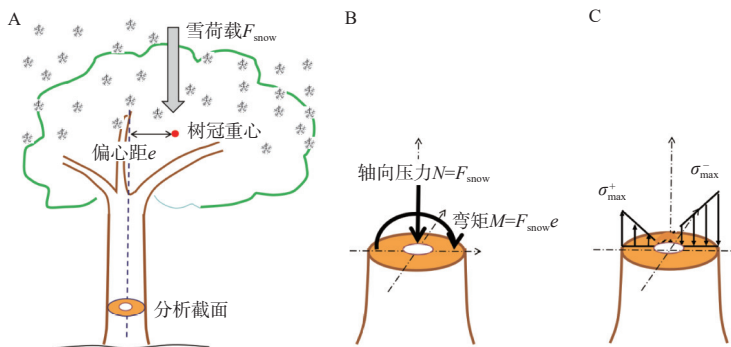


图 20 偏冠树木在雪载作用下的力学分析图

Fig. 20 Mechanical analysis diagram of partial crown trees under snow load

注: A. 偏冠树木受到雪载作用; B. 树干横截面上的内力元素; C. 横截面上的应力分布。

Notes: A. Snow load on the tree with a slightly sloping crown; B. Internal force elements on the cross-section of the trunk; C. Stress distribution on the cross-section.

3.1.1.3 风雪交加时的树木断裂

当偏冠古树在同时受到风力雪载作用时, 树干将

发生压弯扭组合变形(图 21A)。在不考虑树冠自重的条件下, 树干横截面上的内力元素分别是: 轴向压力 $N=$

F_{snow} 、横向力 $F_s = F_{wind}$ 、扭矩 $T = eF_{wind}$ 和 $\overline{M} = \overline{M}_{wind} + \overline{M}_{snow}$ 。
 其中, $M_{wind} = F_{wind}h$, $M_{snow} = F_e$ 。(图 21B)。如果树干无
 空洞或空洞不大(即非薄壁),可以忽略轴向压力和
 横向力的影响,则树干横截面上的应力只考虑弯曲正应

力和扭转切应力,应力分布如图 21C 所示。最大弯曲正
 应力的计算公式同式(4)、最大扭转切应力的计算公式
 同式(7)。但是,对于腐朽空洞严重的薄壁树干古树,
 需要重视风雪交加作用下存在的扭弯和弯折风险。

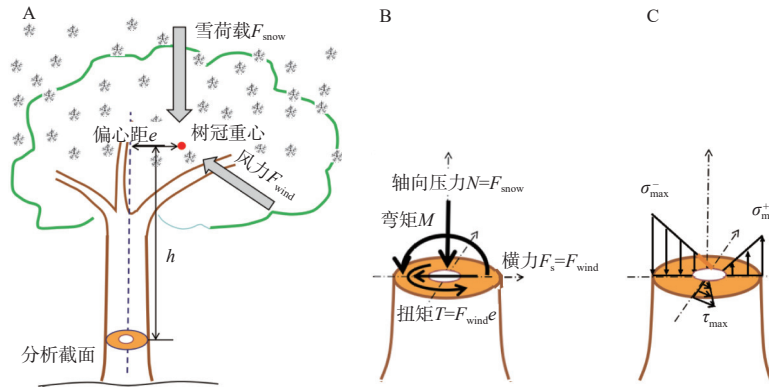


图 21 风雪交加时树木及其横截面的力学分析图

Fig. 21 Mechanical analysis diagram of trees and their cross sections during snowstorm

A. 风雪交加时树木受力分析; B. 树干横截面上内力元素; C. 横截面上应力分布。

Notes: A. Analysis of the forces on Trees during wind and snow; B. Internal force elements on the cross-section of the tree trunk; C. Stress distribution on the cross-section.

3.1.2 树枝、树杈断裂的力学机制

古树在大雪和暴雨天气下,积雪太厚或雨水落在叶面上不能及时消散时,常会发生树枝和树杈断裂。外伸过长的树枝,在大风的作用下也会发生扭劈断裂。当树枝前端叶冠承受雪载 F_{snow} 或雨水荷载 F_{rain} ,会在枝干上产生弯矩 M ,造成在枝干某强度薄弱

处断裂(图 22A)。树杈角较小的树枝,前端叶冠承受荷载 F_{snow} 或 F_{rain} 并在枝干上产生弯矩 M 。由于树杈处有夹皮或裂隙,是强度薄弱处,在树杈处会发生撕裂(图 22B)。当树枝前端叶冠受到水平风力 F_{wind} 作用,树杈端会同时产生弯矩和扭矩,并在该处发生扭劈断裂(图 22C)。

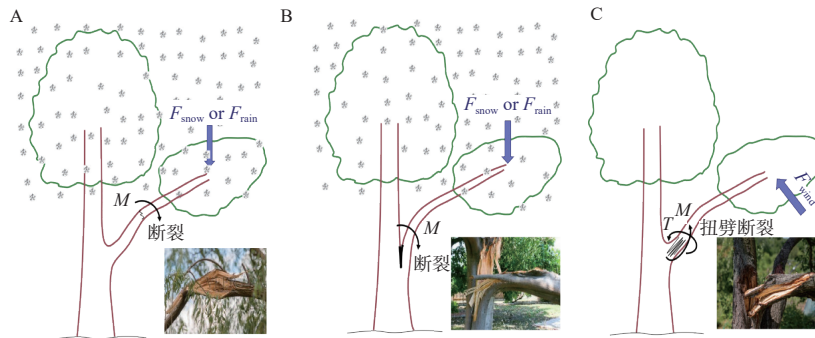


图 22 树枝、树杈断裂破坏分析

Fig. 22 Analysis of branch and twine breakage and damage

注: A. 雪载下树枝折断; B. 雪载下树杈撕裂; C. 风力下树枝、树杈扭裂。

Notes: A. Branches broken under snow load; B. Tree branches torn by snow; C. Branches and twigs are twisted under wind force.

3.2 树木倒伏的力学机制

树木根系在结构上具有维持支撑树木的作用。粗大的主根具有较大抗拉强度,起加筋作用;须根通过与土壤的摩擦阻力将土层中的剪应力变换成树根的拉应力,并使根系与土壤组成一个复合体,称之为根系土壤盘(图 23),这样的结构具有很强的锚固力

作用。风力雪载对树木根基形成的弯矩是最大弯矩 M_{max} ;而根系土壤盘在抵抗风雪载荷所形成弯矩过程中所具有的抗矩,称之为掘根阻力矩 M_{over} 。理论上建立评估树木临界倒伏的条件如下:

$$M_{max} = M_{over} \tag{12}$$

但是,得到树木的掘根阻力矩是比较困难的,其

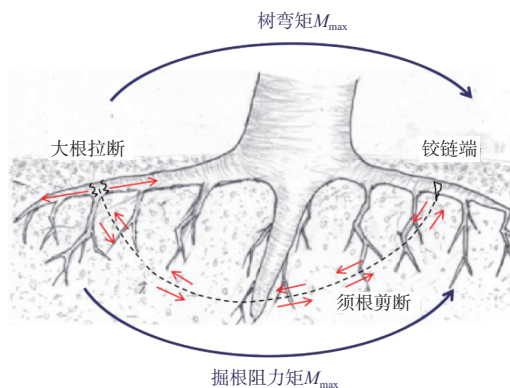


图 23 根系土壤盘与掘根受力分析

Fig. 23 Root system soil plate and root excavation force analysis

难度在于土壤中的根系分布复杂,长短、粗细不易探明。从根土力学的角度而言,树木掘根阻力矩应至少取决于以下4个要素:主根的抗拉强度、根系的分布结构、铰链端根的抗弯折强度和土壤的剪切强度。由此可见,试图通过测量树根的粗细、数量及分布,再依据根土力学实验结果计算根系土壤盘提供的掘根阻力矩是极为困难,甚至是不可能的。

Fraser and Gardiner 和 Nicoll and Ray 先后在 1967 年和 1998 年对生长在芬兰近 2 000 株云杉树进行拉力掘根实验,实验中仔细测量并记录了每株树木的主要生物量参数和拉力数据,通过与掘根阻力矩 M_{over} 进行回归分析,结果发现回归方程中线性度最好的是 M_{over} 与树干重量 W_{tree} 之间的关系,即:

$$M_{over} = C_{reg} W_{tree} \quad (13)$$

式中: C_{reg} 为回归常数。

根据地面上的生物量测算地面下根系的掘根阻力矩简便、易应用。此后又有许多类似的拉力实验结果都表明,干、冠体量大的树木比干、冠体量小的树木具有更大的掘根阻力矩 (Telewski, 1995; Urata et al., 2002)。但这一结果并不意味着体量大的树木比体量小的树木有较大的抗倒伏能力,因为树大“招风”,体量大的树木会承受更多的风力雪载。

依据植物生长适应性原理,树木为了防止折断或倒伏,其树干、树冠和根部生长是与当地气候相适应的 (Telewski, 1995; Nicoll and Ray, 1996),破坏常常发生在树木从未适应过的疾风暴雨和暴雪或生长地环境异常变化 (Schindler et al., 2012)。倒伏常发生在以下情形: 1) 树木遭受狂风暴雨,由于饱水的土壤与树根之间的摩擦阻力降低,树木抗倒伏能力下降 (图 24); 2) 建房修路致使树木主根被切断,尤其迎风向主根是否缺失决定了树木抗倒伏能力的大小; 3) 地面人为硬化,致使地下树根生长渐衰而烂根 (图 25); 4) 根



图 24 狂风暴雨下倒伏的树木

Fig. 24 The fallen trees in the violent storm

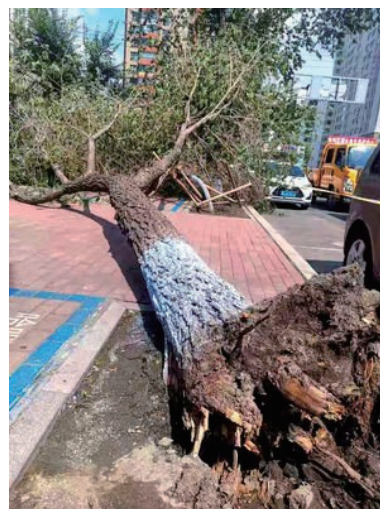


图 25 树木因路面硬化而烂根倒伏

Fig. 25 Trees have rotten roots and fallen over due to the hardening of the road surface

基部树皮缺失,在缺失树皮下方的根系得不到营养而死去,降低了该方向的掘根阻力矩。

4 认知破坏机制对古树安全防护设计指导意义的讨论

古树在经历了数百年风雨洗礼之后,多数存在不同程度的安全隐患,突然遭到风雪等恶劣天气就有可能发生断裂、倒伏。我们将这些构成安全隐患的缺陷称之为古树的强度缺陷。认知不同缺陷特征对古树破坏形式的影响以及力学机制,对于在古树保护工作中采取有针对性的安全防护措施具有重要指导意义。

1) 树干空洞内外径比小于 0.7 的古树,可称为厚壁古树。这类树干常常是由于最大弯曲拉应力过大而发生断裂。但在大多数情况下,如果古树长势良好,空洞内外径比小于 0.7 的树干通常不会发生断裂。这类古树的防护重点,应沿着树洞向下检查根基和

根系是否存在更严重的腐朽。通常,人们习惯用仪器只检测树干中上部的空腐情况,容易忽视对树干根基部的检测。如果古树长势衰弱,通常是根土有问题。

2)对于树干空洞内外径比在0.7~0.8之间的古树,除了应考虑弯曲正应力,还应观察树体形态结构是否异常,是否存在风力作用下产生过大扭矩的条件,如偏冠、过度倾斜或大枝平延外伸过长等。如果有,需要采取相应的防护措施,防止树干因扭矩过大而造成扭转开裂。

3)对于树干空洞内外径比在0.8以上的古树,属于薄壁树干。这类古树通常不会因弯曲拉应力过大而发生木细胞被拉断的弯曲断裂,多会因压应力过大发生木细胞被压溃,继而导致树壁弯折破坏。除此之外,扭矩、横向力都易导致薄壁木质部或发生顺纹面的剪切开裂,或因薄壁圆管的椭圆效应而发生张裂。对这类古树,除了需要设计相应的固定支撑防止树干遭受弯曲、扭转的同时,还应为薄壁的树干增加钢箍,以防止椭圆效应的发生。到了冬季,还应准备一些应急支撑分担古树所承受的冰雪载荷。

4)如果需要对薄壁的古树做拉纤防护,纤绳的仰角不能过大(如超过 45°)。否则,大风施加在树冠上的风力会通过纤绳全部甚至更多施加在树干上,过大的压力有可能压溃薄壁的树干。

5 结论

自然界中造成古树断裂、倒伏的主要是受风力雪载作用引起的。木材作为一种多胞层状生物复合材料,在力学方面具有典型的各向异性性质,所以古树的断裂破坏会有不同行为方式,如弯曲断裂、扭转开裂与顺纹张裂以及压溃弯折等。不同的断裂方式除了与树材的各向异性性质有关外,还与树木形态结构、树干中腐朽空洞的大小和位置有关。当中空的树壁由厚至薄,古树的断裂方式也有不同。通常,对于树干空洞内外径比小于0.7的厚壁古树,断裂破坏是因最大弯曲拉应力过大而发生的弯曲断裂;对于树干空洞内外径比在0.7~0.8之间的古树,除了要考虑弯曲正应力,还应观察树体形态结构是否异常,是否存在在风力作用下产生过大扭矩而导致树干扭转的条件;对于树干空洞内外径比0.8以上的薄壁古树,一般不会因弯曲拉应力过大而导致弯曲断裂,薄壁的树干多会因压应力过大而发生弯折破坏,或因切应力过大而发生顺纹面的剪切开裂,或因椭圆效应而发生顺纹张裂。树木倒伏则是风力雪载所形成

的最大树弯矩超过了根系土壤盘的掘根阻力矩所致。认知古树断裂、倒伏破坏的力学机制,对设计有针对性的防护措施具有重要指导意义。

参 考 文 献

- 高建华,朱晓东,余有胜,等. 1999. 我国沿海地区台风灾害影响研究[J]. 灾害学, 14(2): 73-77.
- Gao J H, Zhu X D, Yu Y S, et al. 1999. Study of the impact of typhoon disaster on coastal region of China[J]. Journal of Catastrophology, 14(2): 73-77. (in Chinese)
- 李秀芬,朱教君,王庆礼,等. 2006. 次生林雪风害干扰与树种及林型的关系[J]. 北京林业大学学报, 28(4): 28-33.
- Li X F, Zhu J J, Wang Q L, et al. 2006. Relationships between snow/wind damage and tree species as well as forest types in secondary forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 28(4): 28-33. (in Chinese)
- 邵卓平. 2024. 古树断裂倒伏风险评估原理与防护设计[J]. 安徽林业科技, 50(2): 9-15.
- Shao Z P. 2024. Principles for assessing fracture and lodging risks in ancient trees and protective design[J]. Anhui Forestry Science and Technology, 50(2): 9-15. (in Chinese)
- 邵卓平,吴贻军,黄天来,等. 2017. 风灾害下树木强度分析的理论、方法及应用[J]. 林业科学, 53(5): 170-178.
- Shao Z P, Wu Y J, Huang T L, et al. 2017. Theory and method of tree stem strength analysis under wind disaster and its application[J]. Scientia Silvae Sinicae, 53(5): 170-178. (in Chinese)
- 吴贻军. 2016. 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.
- Wu Y J. 2016. 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. (in Chinese)
- Coutts M P. 1983. Root architecture and tree stability[J]. Plant and Soil, 71(1): 171-188.
- Emanuel K A. 1987. The dependence of hurricane intensity on climate[J]. Nature, 326(6112): 483-485.
- Fraser A. I., Gardiner J. B. H. 1967. Rooting and stability in Sitka spruce[R]. London: HMSO, London Forestry Commission Bulletin: 40.
- Gardiner B A, Quine C P. 2000. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage: A review with particular reference to the effects of strong winds[J]. Forest Ecology and Management, 135(1/3): 261-277.
- Gray W M. 1990. Strong association between West African rainfall and US landfall of intense hurricanes[J]. Science, 249(4974): 1251-1256.
- Hou Y Z. 1992. Review on forest conservation: Questions and tendency[J]. World Forest Research, 5(1): 1-6.
- Kamimura K, Shiraishi N. 2007. A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests[J]. Journal of Forest Research, 12(3): 162-176.
- Kohnle U, Gauckler S. 2003. Vulnerability of Forests to storm damage in a forest district of southwestern Germany situated in the periphery of the 1999 storm (Lothar)[R]. Germany: Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe: 151-157.

- Mattheck C, Bethge K, Erb D. 1993. Failure criteria for trees[J]. *Arboricultural Journal*, 17(2): 201–209.
- Mayer H. 1987. Wind-induced tree sways[J]. *Trees*, 1(4): 195–206.
- Nicoll B C, Ray D. 1996. Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions[J]. *Tree Physiology*, 16(11/12): 891–898.
- Peltola H, Kellomäki S. 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand age[J]. *Silva Fennica*, 27(2): 99–111.
- Peltola H M. 2006. Mechanical stability of trees under static loads[J]. *American Journal of Botany*, 93(10): 1501–1511.
- Ray D, Nicoll B C. 1998. The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce[J]. *Forestry*, 71(2): 169–182.
- Shao Z P, Wang F L. 2018. The fracture mechanics of plant materials: wood and bamboo[M]. Singapore: Springer Singapore.
- Schindler D, Bauhus J, Mayer H. 2012. Wind effects on trees[J]. *European Journal of Forest Research*, 131(1): 159–163.
- Telewski F. 1995. Wind-induced physiological and developmental response in trees[D]. Coutts M. P., Grace J. (Eds.). Cambridge: Wind and Trees Cambridge University Press: 237–263.
- Urata T, Shibuya M, Koizumi A, *et al.* 2012. Both stem and crown mass affect tree resistance to uprooting[J]. *Journal of Forest Research*, 17(1): 65–71.
- Wei H Z, Shao J D. 2008. Study of prevent typhoon in Shenzhen garden[M]. Beijing: China Forest Press: 4.
- Wu Y J, Shao Z P. 2016. Measurement and mechanical analysis of the strains–stresses induced by tree-pulling experiments in tree stems[J]. *Trees*, 30(3): 675–684.