

速報

スギ引き倒し試験における樹幹の曲げ応力分布*¹茅島信行*² ・ 佐々木重行*²

茅島信行・佐々木重行：スギ引き倒し試験における樹幹の曲げ応力分布 九州森林研究 64：98-101, 2011 スギの引き倒し試験を行い、樹幹のたわみを考慮した曲げ応力の分布について調査した。その結果、樹幹の曲げ応力の分布は荷重によって変化することが分かった。また、任意の高さにおける最大曲げ応力計算値の分布は、樹幹形状が円錐の場合は樹高の1/3以下ではほぼ一様な応力分布を示すのに対し、樹幹形状が完満な場合は根元付近で最大となる応力分布を示すことが分かった。以上より、樹幹形状が円錐から完満になるにしたがって、幹折れ高さやモメが入る範囲は低く狭くなるが、一方で根返りが発生しやすくなることが示唆された。

キーワード：引き倒し試験、幹折れ、曲げ応力、樹幹形状、たわみ

I. はじめに

台風災害に強い森林づくりを進めるにあたっては、根返りや幹折れといった風害に関する立木の力学的な検討を行い、樹木の耐風性を評価する必要がある（上村ほか, 2007；茅島・佐々木, 2010；野々田ほか, 1996）。幹折れについて、風圧に対する樹幹の曲げ応力の分布は樹幹形状によって異なる（千葉, 1993；森岡ほか, 1991；野々田ほか, 2004）とされており、樹幹のたわみを考慮しないモデルでは、樹幹形状を円錐と仮定すると、枝下高付近に明瞭なピークを持つ応力分布を示す（森岡ほか, 1991；野々田ほか, 2004）と考えられている（図-1）。しかしながら中尾ほか（1993）は、計算値と実測値の間で幹折れ高さが異なることから、樹幹のたわみを考慮しないモデルでは、曲げ応力を過大評価する恐れがあることを指摘している。そこで今回、立木の引き倒し試験を実施し、樹幹のたわみを考慮した曲げ応力分布を算定し、任意の高さにおける最大曲げ応力の分布について検討を行った。

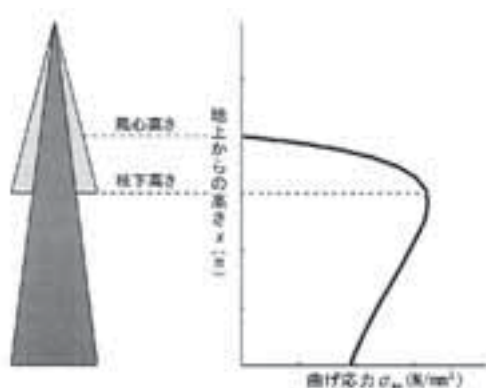


図-1. 樹幹のたわみを考慮しない円錐形樹幹モデルの曲げ応力分布

II. 調査地および測定と解析方法

試験木は、福岡県久留米市山本町にある福岡県森林林業技術センター内のスギ品種別試験林において、2009年に引き倒し試験を行った（茅島・佐々木, 2010）15本のうち、14年生のスギ1本であり、品種はシチゾウである。試験木のサイズは、樹高11.10m、胸高直径18.4cm、形状比は60.3、樹冠長率は82.3%であり、形状比が低く、樹冠長率が高い個体であった。

引き倒し試験は図-2に示す様に、試験木の樹高のおよそ1/2の高さにワイヤーを固定し、ロードセル（TEAC TT-RF、ティアック電子計測株式会社製、最大測定荷重10kN）、データロガー（DATAMARK LS-3000 PtV、白山工業株式会社製）によって荷重を測定しながら、他の立木の根元に固定したチルホールを用いて引き倒すことによって行った。

樹幹の任意の高さ x における外力による曲げモーメント M_{bx} (kNm) は、引張り荷重 F (kN) と任意の地点から引っ張り荷重の作用線へ下ろした垂線の長さ l (m) との積として式(1)で表される。

$$M_{bx} = Fl \quad (1)$$

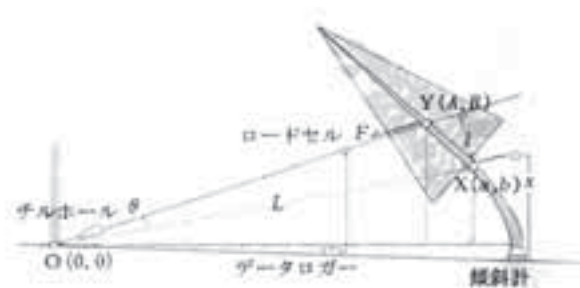


図-2. 引き倒し試験の概要

*¹ Kayashima, N. and Sasaki, S. : Bending stress distributions of a tree stem in the case of Sugi (*Cryptomeria japonica*) tree-pulling experiments.

*² 福岡県森林林業技術センター Fukuoka Pref. For. Res. & Tech. Ctr., Kurume, Fukuoka 839-0827

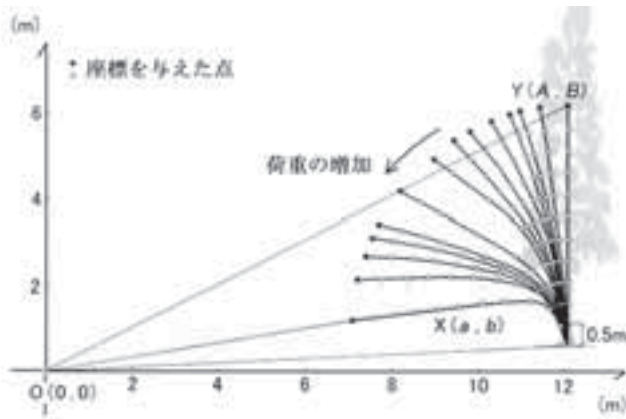


図-3. 荷重の増加に伴う樹幹上の任意の点の座標変化

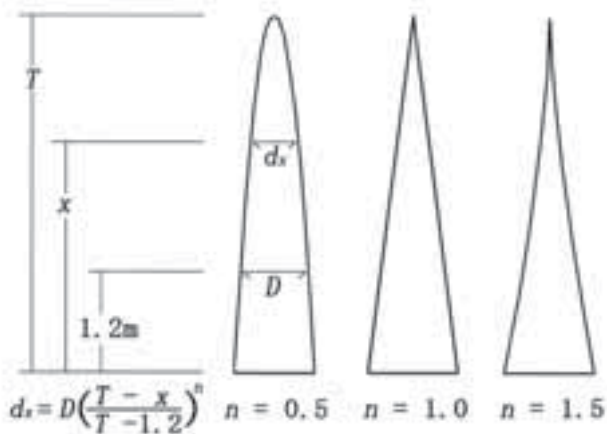


図-4. KUNZE の幹曲線

ここで l は、チルホルの固定点を原点 $O(0, 0)$ とし、任意の高さの地点 $X(a, b)$ 、および立木における荷重の作用点 $Y(A, B)$ の2点の座標を与えることにより、式(5)から求めた。

$$l = L \sin \theta \quad (2)$$

$$F = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1}(B/A) - \tan^{-1}(b/a) \quad (4)$$

式(2)～(4)より

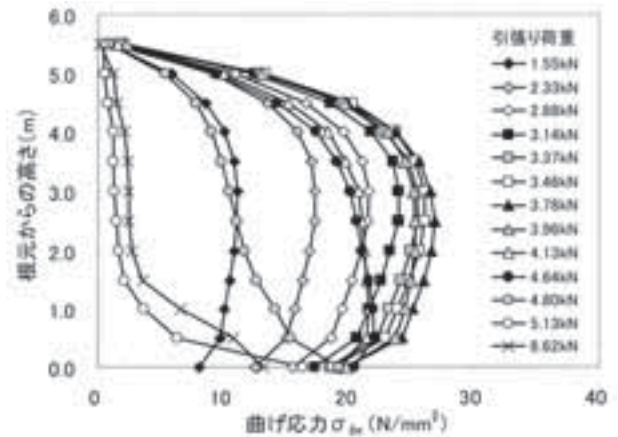
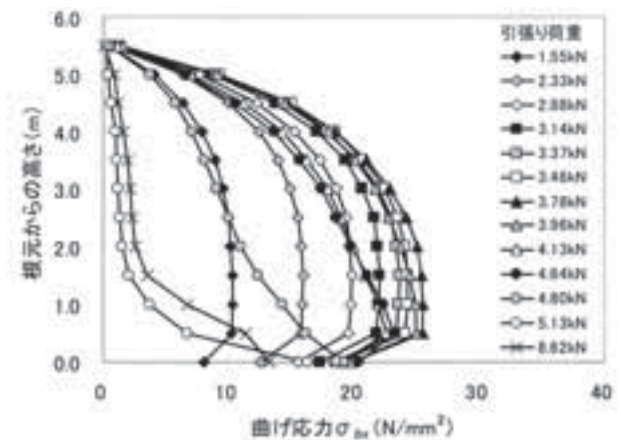
$$l = \sqrt{a^2 + b^2} \sin \{ \tan^{-1}(B/A) - \tan^{-1}(b/a) \} \quad (5)$$

なお、今回は計算を簡略化するため自重の影響は考慮せず、座標を与える樹幹上の任意の地点は根元から0.5m毎に設定した。また、引き倒し試験中における各点の座標は、チルホルの固定点から立木の根元までの距離や傾斜角、引き倒し中のワイヤーの角度や立木根元の傾斜角が分かっているので、その時々撮影した写真より詳細な座標を決定した(図-3)。

次に、樹幹の曲げ応力 σ_{bx} は、任意の高さ x における樹幹の直径を dx (cm) とすると、任意の高さにおける樹幹の曲げモーメント M_{bx} を円形の断面係数である $\pi dx^3/32$ で除すことによって求められるため、式(6)により求めた。

$$\sigma_{bx} = 32M_{bx} / \pi dx^3 \quad (6)$$

ここで、任意の高さ x における樹幹の直径 dx は、KUNZEの幹曲線を応用し、式(7)によって求めた。

図-5. 荷重ごとの曲げ応力分布 ($n=1.0$)図-6. 荷重ごとの曲げ応力分布 ($n=0.75$)

$$dx = D \left(\frac{T-x}{T-1.2} \right)^n \quad (7)$$

D : 胸高直径 (cm) T : 樹高 (m)

式中の n は樹幹形状を決めるパラメータであり、 $n=1.0$ の時は円錐形の樹幹を示し、 n が1.0より小さくなる場合は完満な樹幹を、 n が1.0より大きくなる場合はうらごけの樹幹を示す(図-4)。今回は地上高0.5m以上において式(6)を適用し、地上高さ0mにおいては高さ20cmの地点で測定した根元直径の値を用いた。なお、樹幹形状が異なると引き倒し試験時の $X(a, b)$ や $Y(A, B)$ の座標も変化すると想定されるが、今回はその影響を無視している。

Ⅲ. 結果と考察

1. 樹幹形状が円錐の場合

KUNZEの幹曲線に $n=1.0$ を与え、樹幹形状を円錐と仮定した場合の、荷重に応じた樹幹の曲げ応力分布の変化を図-5に示す。まず、荷重が小さい段階から明確なピークを持たない応力分布を示し、樹高のおよそ1/3 (3.70m) 以下にほぼ一様に曲げ応力が分布していた。次に、荷重が幹折れ発生時のおよそ75%である3.00kNを超えると、荷重が増加しても曲げ応力は増加しなくなり、樹幹上における応力分布はほとんど変化しなくなった。

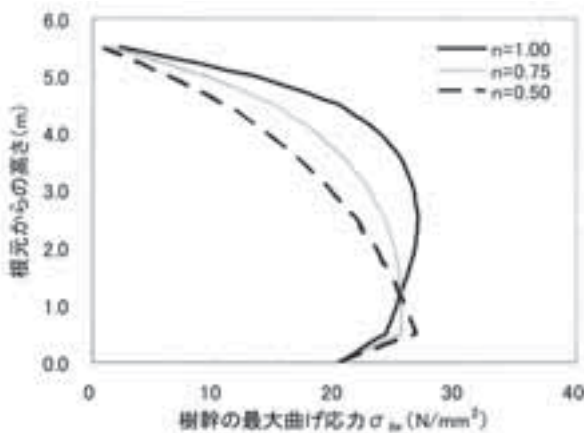


図-7. 根元からの高さ と 樹幹の最大曲げ応力の関係

そして、荷重を 3.96 kN 加えた時点で高さ 1.50 m において幹折れが発生したが、幹折れが生じた高さは応力分布が一様な高い範囲と一致し、幹折れ時の外力による曲げ応力は 24.4 N/mm^2 であった。幹折れ発生後、曲げ応力のピークが根元付近へと下がった後、荷重の増加に伴い樹幹上部の応力は低下し、最終的には根元付近で最大値を取るような応力分布へと変化した。

樹幹のたわみを考慮しなければ、荷重が大きくなっても曲げ応力の絶対値が変化しただけで応力分布の形状は変化せず、樹幹形状が円錐の場合には、枝下高付近に明確なピークを持つ応力分布を示す(森岡ほか, 1991; 野々田ほか, 2004)と考えられている(図-1)。しかしながら、実際の引き倒し試験においては、荷重によって応力分布の形状が変化する傾向が見られた(図-5)。また、幹折れが発生するまでは、比較的似通った応力分布の形状を示したが、枝下高 (1.96 m) 付近に明確なピークを持たない、樹高のおよそ 1/3 付近から下方の曲げ応力がほぼ一様とみなせる応力分布を示した。このように実際の引き倒し試験において荷重によって応力分布が変化したのは、樹幹が荷重によって大きくたわむためと考えられた(図-3)。そして樹幹が円錐形の場合には、樹幹がたわむことにより、枝下高付近に明確なピークを持たない、樹高の 1/3 以下の曲げ応力がほぼ一様となる分布を示すと考えられた。今回の結果は、実際の風害では幹折れやモメが生じやすい高さが樹高の 1/3 付近を中心に多く見られること(椋山ほか, 1974; 中尾ほか, 1993; 千葉, 1993; 野田, 1993; 米丸, 1998)と一致する結果である。なお、幹折れが発生した高さと、幹折れ発生時の曲げ応力分布が高くなった範囲とが一致したことから、試験木の樹幹形状は円錐形に近いと考えられた。

2. 樹幹形状が完満な場合

次に、KUNZE の幹曲線に $n = 0.75$ を与え、樹幹形状をやや完満と仮定した場合の、荷重に応じた樹幹の曲げ応力分布の変化を図-6 に示す。まず、荷重が小さい段階から根元付近で最大値を取るような曲げ応力分布を示した。次に、荷重がある程度大きくなると、荷重が増加しても曲げ応力は増加しなくなり、樹幹上における応力分布はほとんど変化しなくなった。その後幹折れが発生したが、幹折れは曲げ応力の最大値を示した高さよりも高い位置で発生していた。幹折れ後、根元付近の応力が最大となる傾向は明確となり、根元付近で最大値を取ったまま荷重の増加に伴い樹幹上部の曲げ応力は低下していった。

樹幹形状を完満と仮定した場合においても、円錐と仮定した場合と同様に、荷重によって応力分布の形状が変化する傾向が見られた。しかしながら完満な場合には、荷重が小さい段階から一貫して根元付近で最大値を取るような応力分布を示し、円錐の場合と異なり常に根元付近の応力が最大となる傾向が見られた。よって、樹幹形状が完満な場合には、幹折れ高さが著しく低くなるか、根返りが発生しやすくなるものと考えられた。

3. 樹幹形状による最大曲げ応力の比較

図-7 に KUNZE の幹曲線において $n = 1.0, 0.75, 0.50$ と樹幹形状を円錐から完満へ変化させた場合における、根元からの高さ と 樹幹の最大曲げ応力の関係を示す。樹幹形状が円錐の場合には樹高の 1/3 以下の最大曲げ応力がほぼ一様な分布を示したが、樹幹形状が完満になるにつれて樹幹の高い位置での応力が減少し、根元付近で最大値を取るような分布へと変化した。また、最大曲げ応力の絶対値は樹幹形状が円錐の場合 ($n = 1.0$ の時, 26.9 N/mm^2) と完満な場合 ($n = 0.75$ の時, 25.5 N/mm^2 ; $n = 0.50$ の時, 26.9 N/mm^2) との間に明確な差はみられなかった。

樹幹形状が完満な場合には、根元付近での最大曲げ応力が樹幹を通して最大となることから、幹折れ高さが著しく低くなるか、根返りが発生しやすくなるものと考えられた。また、樹幹形状が円錐の場合と比較して、樹幹上部での最大曲げ応力は低下し、全体的に曲げ応力の高い範囲は狭くなることから、モメなどの被害を受ける範囲は、樹幹形状が円錐から完満になるにつれて低く狭くなると考えられた。一方で樹幹形状が円錐の場合には、完満な場合と比較して、幹折れやモメなどの被害範囲が高く広くなると想定されるが、最大曲げ応力の絶対値は完満な場合と同程度の値を示すことから、必ずしも幹折れが生じやすいとは言えない。樹幹のパイプモデルからすると、樹幹長が長く、形状比の低い立木ほど円錐形の樹幹形状を示しやすく、一方で樹幹長が短く、形状比の高い立木ほど完満な樹幹形状を示しやすくと考えられる。そのため、樹幹形状による樹幹の曲げ応力分布の変化は、単に樹幹形状だけでなく、樹冠長や形状比と連動して説明されるのではないかと推測された。

IV. おわりに

今回、スギの引き倒し試験において、樹幹のたわみを考慮した曲げ応力の分布について調査した。その結果、樹幹の曲げ応力の分布は荷重によって変化することが分かった。また、任意の高さにおける最大曲げ応力計算値の分布は、樹幹形状が円錐の場合には樹高の 1/3 以下ではほぼ一様な応力分布を示すのに対し、樹幹形状が完満な場合は根元付近で最大となる応力分布を示すことが分かった。以上より、樹幹形状が円錐から完満になるにしたがって、幹折れ高さやモメが入る範囲は低く狭くなるが、一方で根返りが発生しやすくなることが示唆された。

今回は幹折れを生じた 1 個体の調査結果であるため、今後は解析個体数を増やすと共に、幹折れが発生しなかった個体についても解析を行うことにより、樹幹のたわみを考慮した曲げ応力の傾向を明らかにしていきたい。また、実際の風害では自重による影響も無視できない(森岡・北川; 1987, 中尾ほか; 1993)ため、自重が曲げ応力の分布に与える影響についても解析する必要がある。

ると考える。

引用文献

千葉幸弘 (1993) 日林誌 75 : 372 - 374.

上村佳奈ほか (2007) 森林資源管理と数理モデル 6 : 19-28.

檜山徳治ほか (1974) 林木の気象被害, 114 pp, 日本林業技術協会, 東京.

茅島信行・佐々木重行 (2010) 九州森林研究 63 : 25-28.

森岡昇・北川勝弘 (1987) 名大演報 9 : 1-5.

森岡昇ほか (1991) 日林誌 73 : 380-383.

中尾博美ほか (1993) 九大演報 68 : 11-48.

野田亮 (1993) 森林立地 35 (1) : 50-59.

野々田稔郎ほか (1996) 日林誌 78 : 390-397.

野々田稔郎ほか (2004) 日林論 115 : 824.

米丸伸一 (1998) 鹿児島県林試報 4 : 1-23.

(2010年10月23日受付; 2011年3月2日受理)