

強風によって被災した樹木群の 倒伏破断機構に関する検討

STUDY OF TOPPLING AND BREAKING MECHANISM OF TREES STRUCK BY STRONG WIND

山田泰正¹・長林久夫²
Yasumasa YAMADA, Hisao NAGABAYASHI

¹正会員 博(工) 日本大学工学部 学術フロンティア PD フェロー (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

²正会員 博(工) 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

In this study, to examine the mechanism of toppling and breaking of the tree, we surveyed Arakawa River tree belt where is the tributary of the Abukuma River and about 800 trees were struck by the strong wind. Relation among the tree height, the breast-height diameter, and the age of a tree of the struck tree is clarified and cited why many trees and large area had been struck. In addition, toppling test of the trees was executed in struck area and bending rupture test was executed. As for result, we proposed the condition of toppling and breaking of the tree due to this gust disaster.

Key Words: gust wind disaster, trees, woods, toppling, breaking, drag force, breast-height diameter

1. はじめに

2008 年 2 月 23 日午後から翌 24 日にかけて、津軽海峡付近に中心を持つ低気圧が、太平洋側へ急速に発達しながら通過した。この低気圧はいわゆる爆弾低気圧と呼ばれ 1 日で 1002hPa から 976hPa まで気圧が下がり、最大瞬間風速は東京で 26.4m/s、白河で 34.0m/s、福島で 25.2m/s と記録され、全国的に強風が吹き荒れて各地に甚大な被害をもたらした。福島県内でもこの低気圧によって強烈な風が吹き荒れた。23 日 9:00 から 25 日 9:00 までの 48 時間に福島県荒川に吹いた風を 1 分間の平均風速を図-1 に示すと、23 日 11:00 から風が強くなり翌 24 日 21:00 まで、10m/s 以上の強風が半日吹き、特に 24 日 4:40 からの 10 分間に平均 17m/s の強風が吹いた。この風によって荒川河道内で約 800 本、隣接するあづま運動公園を含め約 2000 本の樹木が倒伏や破断の被害を受けた。

近年における風災害による樹木の被災については石川¹⁾の研究があり、2004 年台風 18 号の北海道大学構内ポプラ並木への被災から樹木にかかる流体力について述べられていて、風による幹と枝のしなりの影響や、葉による流れの透過性について示されている。また島田²⁾は 2002 年台風 21 号の北海道十勝地方のカラマツ

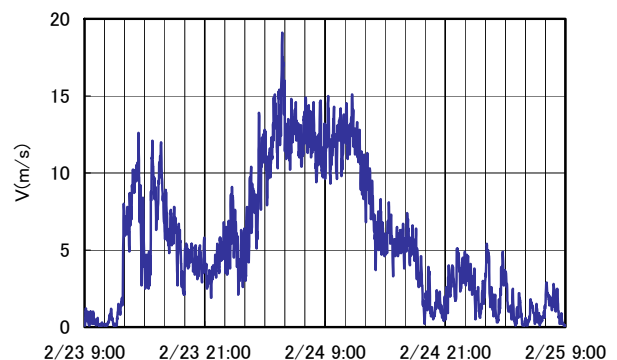


図-1 荒川の風況状況

林の被災から樹木の根返りや幹折れを調査し、その結果から樹木を力学的に評価している。

樹木抗力に関する初期の研究としては Mayhead³⁾の研究があり、英国の風災害を対象とし、4 種類の樹木に対し風洞実験を行い、樹種ごとの抗力係数について述べている。Johnson ら⁴⁾はアメリカの森林風災害を対象として、3 種の杉類を用いて風洞実験を行い、抗力特性と幼木の変形特性について検討している。

樹木の倒伏強度については「河川における樹木管理手引き」⁵⁾が示されていて、西日本を中心とする河道内の樹木について述べられている。また、北陸地方整備局羽越河川国道事務所が新潟県荒川において樹木の

引倒試験を実施している。

このように風災害の樹木に関して数多くの資料が示されているが、砂礫層の樹林帯における被災や、この風災害の特徴的である広分布に多数の樹木が被災した事例、倒伏のみならず多数の樹木の破断したことに關しての知見があまりない。このため本研究では、福島県荒川河道内樹林帯において多数の樹木が被災した原因を究明し、樹木が倒伏あるいは破断に至る力学的機構を検討することを目的とした。そのために樹林帯の被災調査結果から河道内防風林、水防林の被災の特徴を示し、そして同河道内において樹木の力学的な安定性や折損の評価のために樹木の引倒試験を行い、風による抗力算出や樹木の破断機構の検討のために引倒した樹木の樹形調査や同樹木の曲げ試験を行った。さらにそれらの結果からキャノピーを形成しているマツ林の樹木について、風災害における力学的条件の検討した。

2. 災害発生場所の概要および調査結果

福島県を流れる荒川は、一切経山や東吾妻山を水源として、福島市の阿武隈川へ合流し、河川延長 29.7km、流域面積 185.4km² の一級河川である。この荒川は古くから度々災害を起こしており、流域における災害の記録は寛永年間まで遡ることができる。このため荒川流域では霞堤の築造や水防林の植林が行われていた。そして、江戸時代の治水施設は、アカマツの水防林と霞堤の組み合わせによるものであり、これらは現在でも数多く残されている⁹⁾。

この低気圧によって主に被害を受けた倒木の箇所と本数を調査した結果について左岸側を図-2 に、右岸側を図-3 に示す。荒川の地蔵原堰堤がある 13km ポストまでに兩岸の樹林帯において 800 本近い被災があり、その中でも、12km～13km において数多くの倒木が確認できた。また樹木は主に、写真-1 に示す根返りが起き、根の部分から倒れている「倒伏」と、もう一つは写真-2 に示す幹の部分から折れて倒れている「破断」に分けることができる。

倒伏した樹木の根周りは写真-1 のように直径約 2～3.5m であり、礫を抱いていたため根は直下に生育せず、横に広がっていた。写真の樹木はアカマツであるが、一般的にアカマツの根の状況は以下の式によって表される⁵⁾。

$$H > 1.0R \quad (1)$$

ここで、H:根が張る深さ(m)、R:根が張る直径(m)である。写真から判断しても式(1)を満足するような根が張る深さがないため、一般的なアカマツと比べ根による支持力が弱かったものと思われる。さらに他の倒伏した樹木の根を調べても同様な結果であった。根の支持力が十分あった樹木で、幹部が耐えられなくなったも

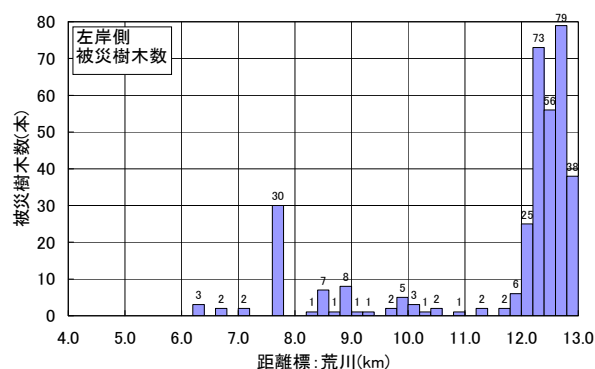


図-2 荒川の被災樹木本数(左岸側)

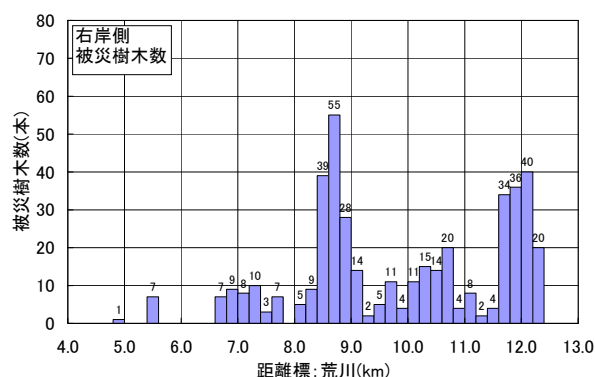


図-3 荒川の被災樹木本数(右岸側)



写真-1 根返りして倒伏した樹木



写真-2 ねじれ破断をした樹木

のが破断していた。

左岸側の被災樹木の各諸元の一部分をまとめたものが表-1 であり、これは胸高直径、円周、樹高、被災状況、樹木の種類を示したものである。胸高直径とは地面から高さ 1.2m における幹の直径で、直立している樹木に対して唯一簡単に測定できるものであり、樹木の代表的な長さとして扱われている。表中の空白は倒伏・破断の状況により、測定できなかったものである。調査結果から幹の胸高直径に関して、倒伏と破断した樹木に明確な違いはなく、同じ胸高直径と樹高を持つ樹木でも、倒伏と破断をしていることや 40cm 以上の太い幹を持つ樹木でも破断していることが確認した。

今回調査対象となった被災樹木は 122 本であるが、このうち倒伏した樹木が 80 本(65.5%)、破断した樹木が 42 本(34.4%)であった。さらに被災した樹木の種類を見ると、被災した全樹木に対して約 90%がアカマツであり、残りがアカシアを始めとした広葉樹であった。また、倒伏した樹木の樹高に対する本数を調べたものを図-4 に示すと、平均的に 18m~24m の高木が多かった。そして、同様に破断した樹木の本数を調べたものを図-5 に示すと、どの樹高に対しても平均的に同じ本数被災した。

荒川の河道は江戸期からアカマツを水防林として植樹されていて、アカマツの絶対数が多いこともアカマツが多数被災した理由として考えられるが、これ以外に針葉樹であるアカマツは冬の 2 月でも葉をつけており、この時期に葉のない広葉樹と比べ風の抗力を受ける面積が広いことが考えられる。また、アカマツは光を好む陽樹であり、林や森の中の樹木群は光合成をする太陽光を得るために、写真-3 に示すようにキャノピーと呼ばれる林冠を形成する。そして、他の木々よりも太陽光を得られるところまで高く成長し、樹木の上部のみに枝を広げて葉をつけ、下部には枝を広げなくなる。このため、キャノピー中のアカマツの樹高が高かったため、強い風の抗力によるモーメントが大きくなり倒れたものと考えられる。

3. 河道内樹木の倒伏限界モーメント

この風災害において、倒伏や破断した樹木の被災状況について明らかになったので、次にこれらの樹木が風によって被災した力を算出し、一般的に評価をする必要がある。初めに樹木の倒伏力について検討を行う。

樹木は風などの外力が根による支持力を上回ったときに倒伏する。一般的に樹木の耐力は、根に着いた土塊である根鉢の表面積が大きいほど支持力が大きくなり、樹木の代表的長さである胸高直径から根鉢の深さと幅はある程度推定できるとされている⁹⁾。しかし今回の被災調査の結果から、荒川河道内樹木の根鉢の深

表-1 調査結果表(一部)

No.	胸高直径(m)	円周(m)	樹高(m)	被災状況	樹種
1	0.18	0.565	18	倒伏	松
2	0.40	1.257	20	倒伏	松
3	0.30	0.942	20	倒伏	松
4	0.30	0.942	18	倒伏	松
5	0.30	0.942	15	倒伏	松
6	0.40	1.257	15	破断	松
7	0.40	1.257	20	破断	松
8	0.25	0.785	18	破断	松
9	0.27	0.848		破断	松
10	0.32	1.005		倒伏	松
11	0.40	1.257		破断	松
12	0.33	1.037	14	破断	松
13	0.15	0.471		破断	広葉樹
14	0.47	1.477	25	破断	松

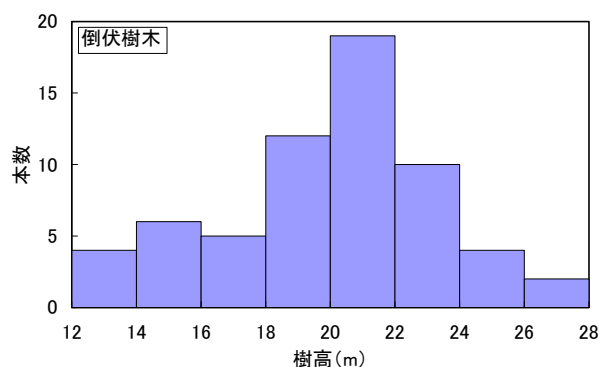


図-4 倒伏樹木の樹高と本数の関係

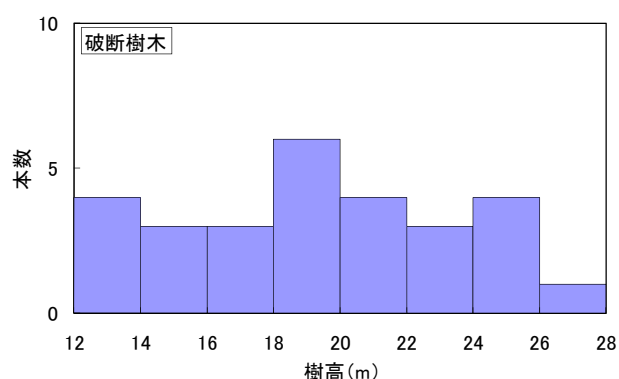


図-5 破断樹木の樹高と本数の関係



写真-3 キャノピー内のアカマツ群

さは一般的なアカマツと比べ深く根を下ろしてなく、樹木の支持力が弱いものと考えられる。そのため、このアカマツの支持力を一般的なものから算出することが難しいので、荒川河道内の樹木を用いて引倒試験を行い、支持力の推定を行った。

試験内容は写真-4に示すように、選定した樹木にワイヤロープを地面から1.2mのところにつけ、チェーンブロックおよび重機により水平に引張力を加えた。また、急に力を加えると樹木を破断させてしまう恐れがあるため、引張力はゆっくり加えた。倒伏限界力はロードセルによって測定した。選定した樹木は、被災した樹木と同じ条件にするために荒川河道内の被災樹木が多かった12km～13kmポストの樹木を使用し25本選定した。その内訳はアカマツが6本、ニセアカシアが7本、ミズナラが6本、ヤナギが3本、カエデ、クルミ、クヌギがそれぞれ1本ずつである。被災した樹木は大半がアカマツであったが、それ以外の樹木も被災していたのでこの区域に多く植生しているニセアカシアおよびミズナラなどを用いることとした。これらの年輪、樹高、胸高直径を樹種別にそれぞれ表-2に示した。アカマツは被災した樹木とほぼ同じ樹齢と樹高のものを、この区域で植生しているニセアカシアは比較的樹齢が若くて樹高が低く、ミズナラは樹高が低いものをそれぞれ使用した。また、キャノピー内部のものを使用し、アカマツは被災したものと同じく樹木上部のみに枝葉を付けていた。

試験結果について図-6を用いて説明する。この図は測定した胸高直径 D (m)と倒伏限界モーメント M_C (kNm)との関係を示し、比較するために一般的な試験結果と全樹種および土壌に対する倒伏の耐力を評価する安全側の下限式⁵⁾、著者らが行った阿武隈川における引倒試験（施工数：19本、土質：砂）を示した。この結果から胸高直径と倒伏限界モーメントは一定の関係式が成り立ち、直立している樹木から安易に測定できる胸高直径から倒伏限界モーメントを算出することが出来る。本試験における結果は一般的に言われている全樹木に対する安全下限式を上回っているが、樹種別に見るとヤナギとニセアカシアではこの一般的な値より下回っていて大量の礫が含まれているために、倒伏耐力が弱くなっているものと考えられる。また、他の河川との比較を行っていてもほぼ同様な傾向と結果が得られているので、この関係式から一般的に河道内の樹木に関して、倒伏モーメントを算出することが可能である。

4. キャノピー内樹木の倒伏破断機構

次に樹木の破断力について検討を行った。風によって抗力を受けた場合、樹木は根の支持力によって直立



写真-4 引倒試験概要

表-2 引き倒した樹木の諸元

樹種	年輪	樹高 (m)	胸高直径 (m)
マツ	34	16.40	0.200
マツ	51	19.20	0.225
マツ	52	18.40	0.180
マツ	54	19.80	0.250
マツ	57	19.10	0.190
マツ	67	16.40	0.270
ニセアカシア	12	9.80	0.110
ニセアカシア	19	13.20	0.170
ニセアカシア	19	14.50	0.150
ニセアカシア	19	13.80	0.300
ニセアカシア	20	13.10	0.150
ニセアカシア	24	13.70	0.185
ニセアカシア	25	10.60	0.200
ミズナラ	19	9.70	0.150
ミズナラ	27	12.70	0.220
ミズナラ	28	8.70	0.155
ミズナラ	33	6.00	0.160
ミズナラ	40	12.30	0.167
ミズナラ	43	13.40	0.125

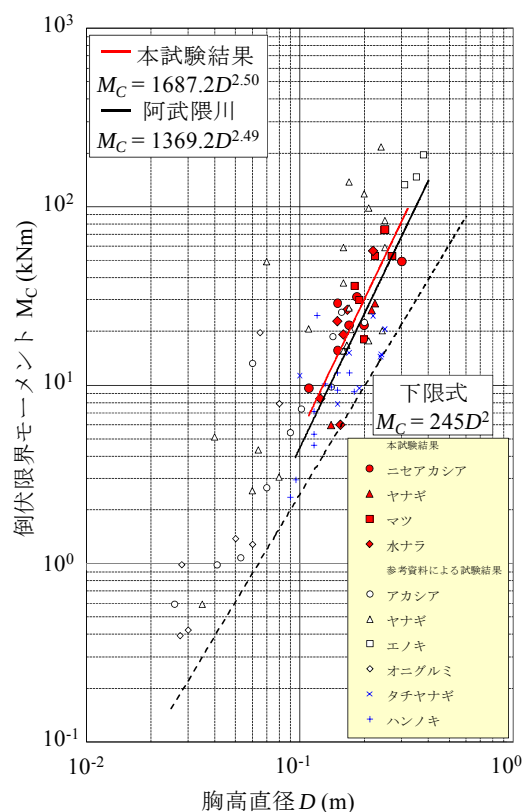


図-6 胸高直径と倒伏限界モーメント

しているが、幹の曲げ強さが抗力に耐えられない場合、樹木は幹の部分で破断することになり、幹の曲げ強さが必要になる。そのため樹木の曲げ試験を行った。使用した曲げ試験の概略図を図-7に示す。引倒試験において倒した樹木をそのまま曲げ試験に用い、上部から荷重をかけ破断させてその時の最大降伏力を測定した。その時の樹木の曲げ強さを以下のようにして求めた。ただし、部材断面は円形断面としている。

$$\sigma = \frac{a \times P_{\max}}{2Z} \quad (2)$$

$$Z = \frac{\pi d^3}{32} \quad (3)$$

ここで、 σ : 曲げ強さ(N/mm²)、 a : 支点から荷重点までの距離(=1.3m)、 $P_{\max}$: 最大降伏荷重(N)、 Z : 断面係数(m³)、 d : 部材の直径(m)である。曲げ試験による結果を表-3に示す。

これらの結果より、樹木の倒伏力算出に必要な倒伏限界モーメント、破断力算出に必要な曲げ強さが求めたので、樹木の簡易的なモデルを用いて倒伏・破断のどちらに被災するか推測を行った。樹木が風を受けた場合、樹木に作用する力を表すと図-8のようになり、樹木は根によって支えられているので片持ち梁とした。図中の記号は H : 樹高、 h_c : 樹冠高、 P : 風による抗力、 h : 抗力作用位置、 h_t : 幹部の高さ、 M_A : モーメント応力である。長林らによれば、樹木にかかる抗力は枝部と葉部に全体の90%が負担していることが実験的に示されており⁷⁾、このことから抗力は樹冠部にみに載荷しているものとした。また、同実験によれば、抗力作用位置は針葉樹のヒノキで $0.4h_c$ 程度と求められているので、抗力作用位置は

$$h = h_t + 0.4h_c \quad (4)$$

とした。また、抗力 P は以下の式で求められる。

$$P = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \quad (5)$$

ここで、 C_D : 抗力係数、 ρ : 空気の密度、 A : 樹冠部投影面積、 U : 風速である。Rundnickiらの風洞実験より lodgepole pine の場合、風を受けていない静止した投影面積から算出すると、20(m/s)で C_D はほぼ0.4であり、樹冠部はほぼ三角形として A を求められる⁸⁾と述べられているので、これを使用した。そして、抗力によるモーメント M_A は次式のように求めた。

$$M_A = P \cdot h \quad (6)$$

倒伏限界モーメント M_C は荒川樹木の引倒試験の結果から、また破断限界モーメント M_B は曲げ強さから次式のように求めた。

$$M_B = \sigma \cdot Z = \sigma \cdot \frac{\pi d^3}{32} \quad (7)$$

樹木の幹は地面と接している部分が一番太く、上部

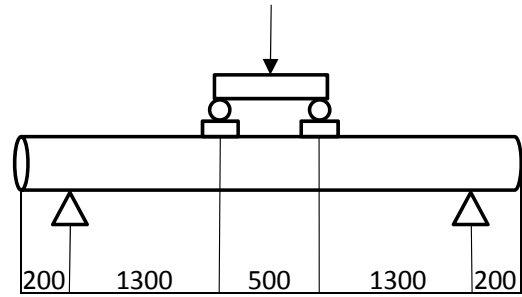


図-7 曲げ試験概略図

表-3 曲げ試験結果

樹種	直径 D (mm)	最大荷重 P (kN)	断面2次 I (mm ⁴)	a (mm)	曲げ強さ σ (N/mm ²)
アカシア	184.2	58.216	56468238	1300	61.71
アカシア	152.0	33.83	26180919	1300	63.82
アカシア	110.0	9.67	7191950	1300	48.08
アカシア	155.6	24.818	28787978	1300	43.60
アカシア	123.5	16.812	11401932	1300	59.16
アカシア	221.4	30.512	117912861	1300	18.62
クルミ	118.7	6.282	9740071	1300	24.88
マツ	182.8	28.708	54847778	1300	31.10
マツ	224.9	44.546	125610882	1300	25.92
マツ	165.4	38.36	36773281	1300	56.09
マツ	182.2	50.844	54077508	1300	55.67
マツ	241.2	101.352	166269495	1300	47.79
水ナラ	147.5	28.914	23237508	1300	59.65
水ナラ	183.7	36.974	55953595	1300	39.46
水ナラ	137.4	17.118	17482509	1300	43.72
水ナラ	113.5	6.648	8133780	1300	30.14
水ナラ	168.1	32.09	39176574	1300	44.74

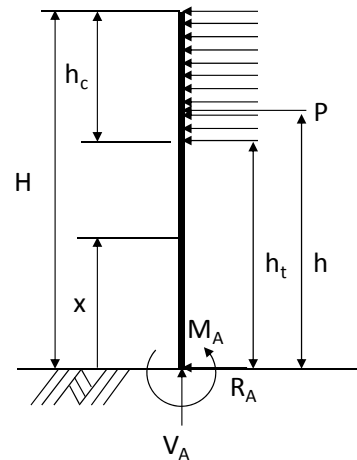


図-8 樹木の直立モデル

に行くほどに細くなっているので幹は台形とし、 d は地面からの距離 x の関数とした。また、樹木の種々の長さは引倒試験に用いた樹木の樹形調査から算出し、その結果、キャノピー内のアカマツについて、次式が成り立ったのでこれらを使用することとした。

$$\frac{D_c}{D} = 0.461 \frac{W_c}{D} = 15.441 \frac{h_t}{H} = 0.762 \quad h_t = 15.836 D^{0.089}, \quad h_c = -10.51 D + 6.6268 \quad (8)$$

ここで、 D : 胸高直径、 D_c : 幹上部直径、 W_c : 樹冠幅である。

倒伏・破断の推算結果を図-9に示す。この図はキャ

ノピー内のアカマツを対象とし、災害当時、福島県内で最も強い風が吹いた白河市の最大瞬間風速 $U=35(\text{m/s})$ における樹木被災を予測したものである。 $M_A > M_B$ ならば破断, $M_A > M_C$ ならば倒伏することが予測される。この結果 $D < 0.17(\text{m})$ で倒伏と破断, $0.17 < D < 0.22(\text{m})$ で倒伏, $D > 0.22(\text{m})$ ではどちらにも被災しない安全ということになった。被災結果とほぼ一致した結果ではあるが、これよりも太いアカマツが被災していることから、実際には強風によって樹木が前後に振動が起き、その影響で倒伏や破断を助長させたこと、ねじれ破断していることが確認されているので3次元的に風が吹きさまざまな力が作用していたことなどが考えられる。

また、樹木の破断位置について検討したものが図-10である。横軸に地面からの高さ $x(\text{m})$ 、縦軸に地点 $x(\text{m})$ における曲げ応力 (N/mm^2) を $D=0.2(\text{m})$ の樹木がそれぞれ $U=35(\text{m/s})$ と $U=45(\text{m/s})$ の風速を受けた場合について示した。それぞれの曲線の最大値が風による破断限界モーメントが最大になり、曲げ応力も最大になる点であり、この結果から $x=2\sim3(\text{m})$ の地点が最大で破断しやすく、調査結果と比べほぼ一致した結果となった。

5. まとめ

本研究で得られた諸元は以下のように要約される。

- (1) 2008年2月23日に通過した低気圧によって荒川河道内の樹木は、キャノピー内部の背の高い樹木が主に倒伏し、破断樹木に関してはさまざまな樹木が被災し、キャノピー内部や外縁部にも及んだ。
- (2) 被災地の樹木を用いて引倒試験から倒伏の実態の評価を行い、また樹木の曲げ試験から破断の力学条件の検討をし、被災した破断位置などの機構の解明を行い算出した結果、調査結果とほぼ同様な位置で樹木が破断する結果となった。
- (3) 簡易的な樹木モデルを用いて、各試験や樹木の樹形調査の結果から汎用可能な樹木の倒伏と破断の条件を作成した。調査結果とほぼ同様な結果であったが、 $U=40(\text{m/s})$ 程度の暴風域においては、風による樹木の振動など複雑な力が考えられるため、さらなる検討が必要である。

謝辞：この研究は、日本大学工学部学術フロンティア推進事業から、一部援助を頂いたことを付記する。

参考文献

- 1) 石川仁：樹木の流体力学特性の実験的解明，日本流体力学会誌「ながれ」，Vol.24，pp.483-490，2005。
- 2) 島田宏行：カラマツの風害に関する力学的評価，日本森林学会誌，Vol.91，pp.120-124，2009。

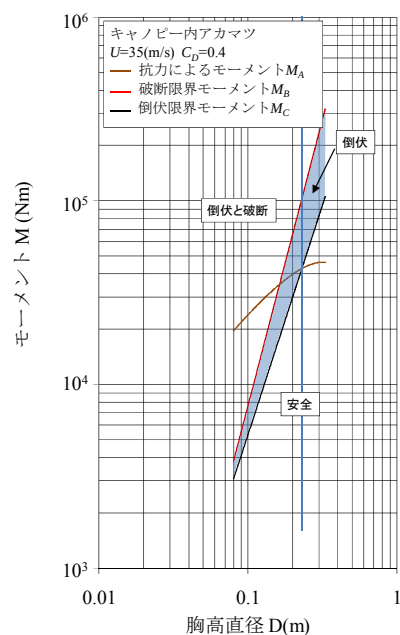


図-9 胸高直径による被災状況の条件

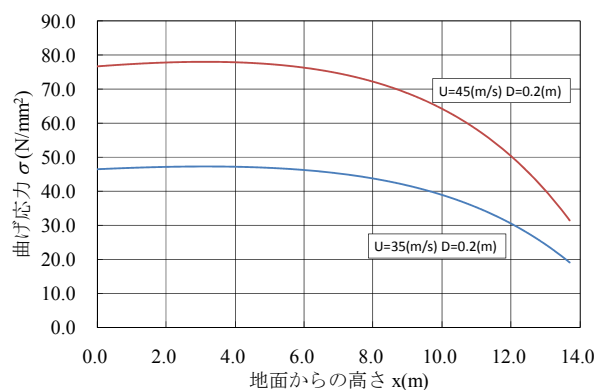


図-10 樹木の破断位置の算出結果

- 3) Mayhead, G. J.: Some Drag Coefficients for British Forest Trees Derived from Wind Tunnel Studies, Agricultural Meteorology, Vol.12, pp.123-130, 1973.
- 4) Johnson, R. C., Ramey, G.E., O'Hagan, D.S.: Wind Induced Forces on Trees, J. Fluid Eng., Vol.14, pp.25-30, 1975.
- 5) (財)リバーフロント整備センター：河川における樹木管理の手引き，海山堂，1989。
- 6) 伊藤 登，横山 公一，水越 崇，畑井 言介：選奨土木遺産—阿武隈川支川荒川の歴史的治水・砂防事業について，土木学会第63回年次学術講演会，4-187，pp.373-374，2008。
- 7) 長林久夫，鈴木達也，辰野正和，林健二郎，多田毅，橋本晴行：風応力下の広葉樹の抗力評価法に関する研究，流体力の評価とその応用に関する研究報告集，Vol.4，pp.13-18，2006。
- 8) Rudnicki, M., Mitchell, S. J., Novak, M. D.: Wind Tunnel Measurements of Crown Streamlining and Drag Relationships for Three Conifer Species, Can. J. For. Res., Vol.34, pp.666-676, 2004.

(2009. 9. 30 受付)