

河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の 基盤土壌条件による相違

DIFFERENCES OF TREE-BREAKING PATTERN AND BREAKING THRESHOLD
MOMENT BY FLOOD WITH RESPECT TO THE SUBSTRATE CONDITION

田中規夫¹・八木澤順治²・佐々木 寧³・福岡捷二⁴
Norio TANAKA, Junji YAGISAWA, Yasushi SASAKI and Shouji FUKUOKA

¹正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

²学生会員 修(工) 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

³正会員 理博 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

⁴フェロー会員 Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

For elucidating tree breakage condition with different breaking pattern, i.e. trunk breakage, tree overturn, local scour and degradation of the substrate of trees, and with different tree species, field investigation on tree damage situation after two flood events (October 2006 flood and September 2007 flood) were conducted in the Arakawa River and the Tamagawa River. Plant regeneration situation after 1 year of the 2006 flood event was also conducted. If the breaking pattern is bending or partial breakage, the tree, *Salix subfragilis*, has a high productivity for regrowth. It implies that such breaking pattern is not so important if we consider the rehabilitation of gravel-bed river environment. The threshold moment of partial overturn of *Robinia pseudo-acacia* that has thin root zone was smaller compared with the previous experimental results by pulling trees because of a local scour. If severe scouring was occurred, threshold overturning moment can be quite small. The threshold moment can be found to be expressed as a function of the substrate condition.

Key Words : critical breaking moment, scouring, regeneration, *Salix subfragilis*,
Robinia pseudo-acacia

1. はじめに

河道内樹木が洪水時に破壊されると流木集積による流水阻害という問題が生じたり(2007年9月の台風9号により大量の流木が東京湾に押し寄せたのは記憶に新しい)、橋脚などの河川構造物に対して多大な付加抵抗となり構造物が破壊される場合がある。また、河道内で樹林化が生じると洪水攪乱に依存した小型草本やそれを基本とする生態系の多様性が減じるという問題もある。そのため、洪水時における樹木の破壊条件を見積もることは治水的・生態的観点から重要である。

出水時の樹木の破壊条件については、これまでもいくつかの調査研究がある。例えば、砂田ら¹⁾は河道内に繁茂する樹木の主な破壊形態として折損(本研究では破断と定義)、倒伏、抜根という3種類に分類・定義し、出水時における河道内樹木の破壊条件と規模について系統的な検討を行っている。また、渡邊ら²⁾は出水後の樹木の破壊状況調査より、抜根限界に関する知見を得ている。

従来、樹木の破壊に関して破壊形態として抜根を評価するケースが多い。抜根を評価する際には、樹木の引き倒し試験結果³⁾から得られた抜根限界モーメントが用いられている。しかし、上記引き倒し試験は高水敷で行われたため、砂州の樹林破壊への適用可能性について検討が必要である。また、洪水後における残存樹木の観察より、多くの場合、図-1(a)に示すような付着物が樹木を取り巻くので、こうした付加抵抗を含めて破壊限界を評価する必要がある。さらに、樹木の破壊には主幹に働く曲げ応力、根鉢に働く転倒モーメント、根と地盤との間に働く力のつりあい、洗掘(図-1(b))等を考慮する必要があると考えられる。そのため、それらのメカニズムを考慮した破壊限界式への精度向上が望まれる⁴⁾。

本研究では、樹木の破壊と礫河原再生の条件を明らかにする第一段階として、i)樹木の破断破壊(2006年10月時点)⁴⁾後の再生状況(2007年9月:台風9号来襲前)からみた破壊形態の持つ意味、ii)樹木破壊限界値の土壌特性による相違を把握することを目的とする。

2. 樹木の破断限界に関する調査および解析方法

(1) 破壊樹木の痕跡調査

出水によって破壊された樹木の痕跡調査は、2006年10月出水後には、荒川の沖積河道区間に位置し、樹木の繁茂状態が異なる3地点(熊谷大橋地点(80 km), 荒川大橋地点(78 km), 久下橋地点 (72 km))の砂州, 2007年9月の台風9号の後には、荒川の熊谷大橋地点と多摩川の永田橋周辺を対象とした。図-2に2007年9月の台風9号の痕跡調査結果を整理した熊谷大橋地点の平面図を示す。本研究で対象とした樹木は、上記4地点において優占的に繁茂がみられたタチヤナギおよびハリエンジュ、ヤマグリである。樹木の破壊形態は、破断、倒伏、転倒、一部転倒に大きく分類できる。破断は、主幹に加わった曲げ引張り応力が樹木素材の曲げ引張り破断限界応力を超えたために折れるものである。倒伏(地際の主幹が曲がったまま)は、主幹に加わった曲げ引張り・圧縮応力が弾性限界値を超え塑性変形域まで達し残留ひずみが残ったと考えられるものである。転倒(根鉢がむき出しになるパターンで、以後、完全転倒)は、生育基盤の全体的洗掘により支持基盤を完全に流失したものである。一部転倒は根鉢の一部(前面や側面)がむき出しになるが、後流域側の土壌は洗掘されずにその場に残るものである。今回の洪水痕跡は、破断と倒伏が多かったが、一部転倒と破断が複合したようなものも少数であるが確認された。それぞれの破壊形態の樹木に対して、痕跡水深 H_t (m), 胸高直径 d_{BH} (m), 樹高 h_v (m)を測定した。なお、 H_t は流下物(枝やゴミ)の痕跡を、 d_{BH} は河床から1.2 mの高さにおける主幹の直径を計測し、破断が生じている樹木に関しては破断点の直径も加えて計測した。

(2) 樹木・多年生高茎草本の破断特性をもとに樹木破壊に関連した流速を算定する方法

樹木の破断限界曲げ応力は、田中ら⁴⁾がアムスラー型万能材料試験機(東京衡機製造所AU-50 最大荷重500 kN)を用いて、タチヤナギ、ハリエンジュについて求めている。それによると樹木の破断限界モーメント M_{bc} (kN・m)は、

$$M_{bc} = \frac{\sigma_{max} I}{R} \cong \frac{\sigma_{max} \pi d^4}{64} = \frac{\pi \sigma_{max} d^3}{64} = kd^3 \quad (1)$$

ここに破断断面の半径 R (m), 直径 d (m), 限界曲げ応力 σ_{max} (N/m²), 断面2次モーメント I (m⁴)である。 k (N/m²)は樹種の材質 σ_{max} によって異なる比例定数で、田中ら⁴⁾の実樹木を用いた载荷試験よりハリエンジュの場合 $k=2.0$, タチヤナギの場合 $k=3.0$ である。 σ_{max} は厳密には発芽後数年の若い樹齢のときは変化すると考えられるがここでは大きく変化しない樹齢を対象とする。樹木破壊に関連した地点の流速を精度良く求めることは、複雑な数値計算を行ったとしても樹木の抵抗係数などの評価に



図-1 樹木の破壊状況 (a)付加抵抗(熊谷大橋上流, 低水路内: 中水敷), (b)洗掘による転倒(永田橋下流, 高水敷)

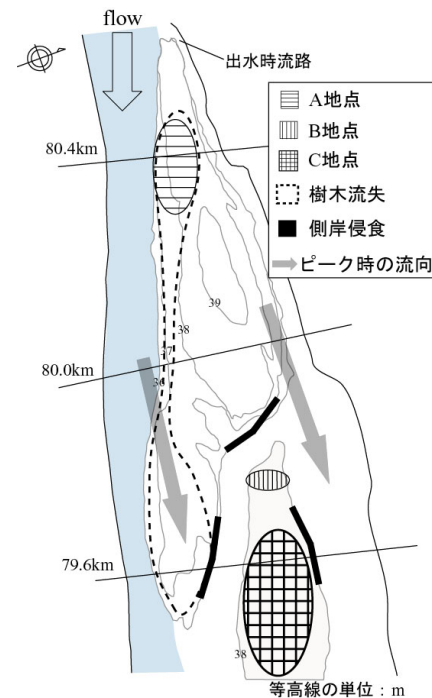


図-2 現地調査地点概要 (A地点は2006年10月洪水で倒伏した領域, B地点は2007年9月洪水で倒伏などが発生した地点, C地点は倒伏が生じていなかった地点)

課題がある。本研究では、樹木や高茎草本の破壊状況から、材料力学的特性を用いて、洪水時に作用していた流速の幅を推定することとする。流速推定には以下の3手法を用いた。

- a) 方法1: 倒伏したオギ・ヨシ(図-3(a))に作用していた流速(最低値) U_b を推定

多年生高茎草本の破断実験は、田中ら⁹⁾がオギ、ヨシを対象として行っており、今回の洪水痕跡で直径3-4mmクラスのものでは、オギは1.25Nm、ヨシは0.62Nmと示されている（標準偏差はそれぞれ、0.26Nm, 0.09Nm）。この破断限界曲げモーメント⁵⁾と後述する式(4)、(5)を用いて求めた。

- b) 方法2：株状樹木もしくは樹木群後流域で倒伏していないオギ（図-3(b)）に作用していた流速を算定し、それをもとに株状樹木もしくは樹木群前面部での流速 U_{ap} を推定

樹木（群）の G/D (G は流下方向に投影したときの投影面における樹木間ギャップ（図-3(c)）、 D は樹木主幹直径）によって樹木を透過する流速が変化することがTakemura & Tanaka⁶⁾の水理実験によって示されている。つまり、この比は流れの樹木群の迂回流量と透過流量に強く影響を与えると考えられる。また、伊藤ら⁷⁾の観測により、洪水時の土砂堆積特性から実スケールにおいても G/D による類似した後流が生じた可能性が示唆されていることから、現地樹木の G/D をもとに、

$$u_{wake} = \gamma U_{ap} \quad (2)$$

と仮定した。ここに U_{ap} は樹木への接近流速で、 γ は1以下の定数 (G/D によって変化) である。たとえば、 $G/D=2$ のタチヤナギ、 $G/D=1$ ハリエンジュの場合、それぞれ、 $\gamma=0.70$ 、 0.65 である。本研究では両樹木とも倒れていないという事実をもとに u_{wake} を求め、式(2)より U_{ap} を求めることとした。

- c) 方法3：擬似等流状態を仮定（繁茂地点の水深と水面勾配を使用）して流速 U_0 を推定

洪水ピーク時付近において、熊谷の樹木破壊痕跡調査地点の上流・下流側にある熊谷水位流量観測所と植松橋水位流量観測所の水面勾配を確認したところ、1/344から1/359の範囲で変化しており、これは両地点の河床勾配1/375に近い値となった。そこで、樹木繁茂地点において擬似的な等流状態が成り立っていると考え、 Manning の式と高茎草本の抵抗を含む以下の粗度係数評価式⁸⁾

$$n_w = \sqrt{n_b^2 + \frac{C_d}{2g} a_w h_w^4} \quad (3)$$

を用いて同地点の擬似等流流速 U_0 を求めた。ここに n_b ：底面粗度、 a_w ：単位体積あたりの投影面積、 h_w ：植物の高さ、 C_d ：抗力係数(1.0)である。

(3) 樹木の抵抗特性の評価

樹木に作用する合成抗力 F (N) は田中・佐々木⁹⁾と同様に、水深方向に微少面積 $dA=d(z)dz$ ($d(z)$ ：河床からの鉛直方向高さ z における主幹と枝の幅の和（ちぎれた枝・草本やごみなどの付加物がある場合は、その部分の幅も含む）、 dz ：鉛直方向の分割幅）を考慮して積分し、

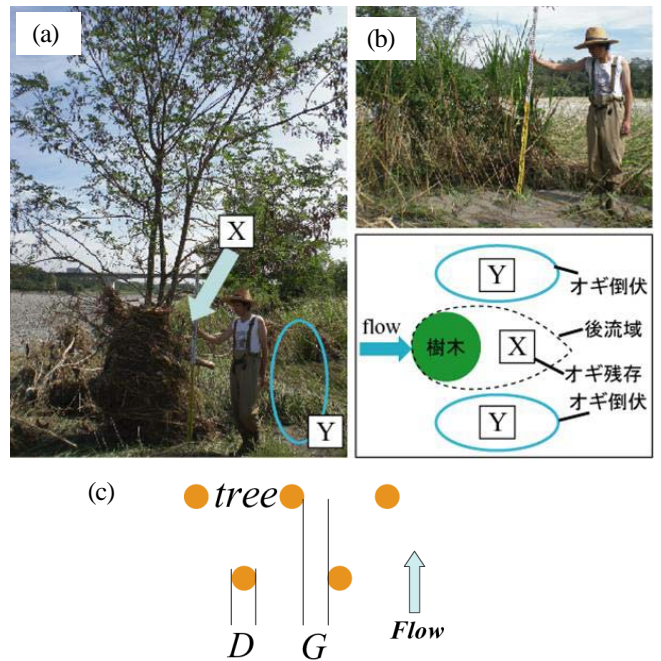


図-3 樹木周辺のオギの倒伏状況（熊谷地点）(a)倒伏したオギ、(b)ハリエンジュの後流で残存したオギ、(c)樹木群における樹木間ギャップ α の定義図

$$\begin{aligned} F &= \int_0^h \frac{1}{2} C_d(z) \rho u(z)^2 dz \\ &= \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h \frac{d(z)}{d_{BH}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz \\ &= \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h \alpha(z) \beta(z) dz \end{aligned} \quad (4)$$

$$\alpha(z) = \frac{d(z)}{d_{BH}}, \quad \beta(z) = \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} \quad (5)$$

とした。ただし、ちぎれた枝・草本やごみなどの付加物がある場合は、 $d(z)$ にはその部分の幅も含むこととする。ここに $C_d(z)$ 、 $u(z)$ ：それぞれ、高さ z における抗力係数と流速(m/s)、 C_{d-ref} ：主幹を円柱と仮定した場合の抗力係数（単一円柱では1.2程度の値が用いられるが、円柱間距離によって1.2から0.3程度まで変化すること⁶⁾、円柱の傾きによって1以下に減少すること¹⁰⁾を考慮すると、小数点のオーダーまでの厳密性はない。そのため、基準値は1とし、大きな影響を与えるものを $\beta(z)$ として評価した）、 d_{BH} ：河床からの高さ1.2mの位置における主幹幅 (m)、 H ：水深(m)、 ρ ：水の密度(kg/m^3)、 $\alpha(z)$ ：樹形（幹・枝）の相違（幹・枝の高さ z における幹・枝幅の総和を胸高における幅 d_{BH} で基準化した比）を表す付加係数、 $\beta(z)$ ：葉層による付加抗力を表す付加係数である。現地砂州に繁茂するタチヤナギは地際から株状に幹を多く生長させることから、地際から枝下高さ h_b （本研究では地際から葉層までの高さ）までの $\beta(z)$ は、武村・田中¹⁰⁾より1.5と設定した。ハリエンジュに関しては、株状での繁茂が見られなかったため、地際から枝下高さ h_b までの

$\beta(z)$ は1.0として与えた。付着物は平板のように前面部に集積することから1.5とした。葉層($h_b > z > h_v$)については、福岡・藤田⁸⁾、Armanini¹¹⁾を参考に1.25とした。なお、本研究では、 $u(z)$ の鉛直方向変化は考慮せずに、断面平均流速 U (m/s)を用いて整理した。

樹木特性調査では、式(4)、(5)で定義される d_{BH} を直接計測し、 $\alpha(z)$ に関しては、樹木の画像解析によって鉛直分布を算出した。実際に積分を行う際は、 dz を0.5 m刻みとして求めた。

(4) 樹木に作用する抗力モーメント M の算出方法

現地調査を行った3地点のヤナギ・ハリエンジュの繁茂地点における水深を算出し、両種に作用する抗力モーメント M (Nm)を以下の式より算出した。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \quad (6)$$

式(6)から得られる抗力モーメント M と既存の破断限界モーメント M_{bc} ($=24.5d_{BH}^2$: 単位をNmに変換したので原典と係数は異なる。直径 d_{BH} の単位はcm) を比較し、破断限界式の土壌条件による限界の相違を解析した。

3. 破断樹木の再生状況調査

砂州が樹林化しやすいかどうかを判定する手法として田中ら⁴⁾は、樹齢と洪水攪乱規模を変数として説明する方法を示している。こうした破壊が完全転倒であれば礫河原に戻るものの倒伏の場合には再生してしまうので、遷移の途中段階に引き戻すのみの効果となる。したがって、破断や倒伏が起こった樹木の1年後の再生状況を知り、その洪水攪乱が与えた影響を評価することは重要である。そのため、図-2のA地点において倒伏した樹木の再生状況を樹齢と胸高直径の関係、樹高と胸高直径の関係という項目で評価した。

4. 調査および解析結果

(1) 1年前に破断・倒伏したタチヤナギの再生状況

図-4(a), (b)にタチヤナギの再生状況を示す。なお(a)の実線は平均的なタチヤナギの樹齢と樹高の関係¹²⁾を表したものである。(a)の図において、破断したヤナギ(樹齢6.8年)に注目すると、洪水によって破断された1年後に胸高直径は樹齢5.7年相当になっている。しかし、このヤナギの実質の樹齢は7.8年であることから、破断を受けたヤナギが引き戻された時間 ΔT は約2年であることがわかる。また、(b)より倒伏よりも破断の方がやや回復が遅い傾向がある。倒伏の場合、再生した樹木の高さや直径が洪水前のレベルまで回復している。

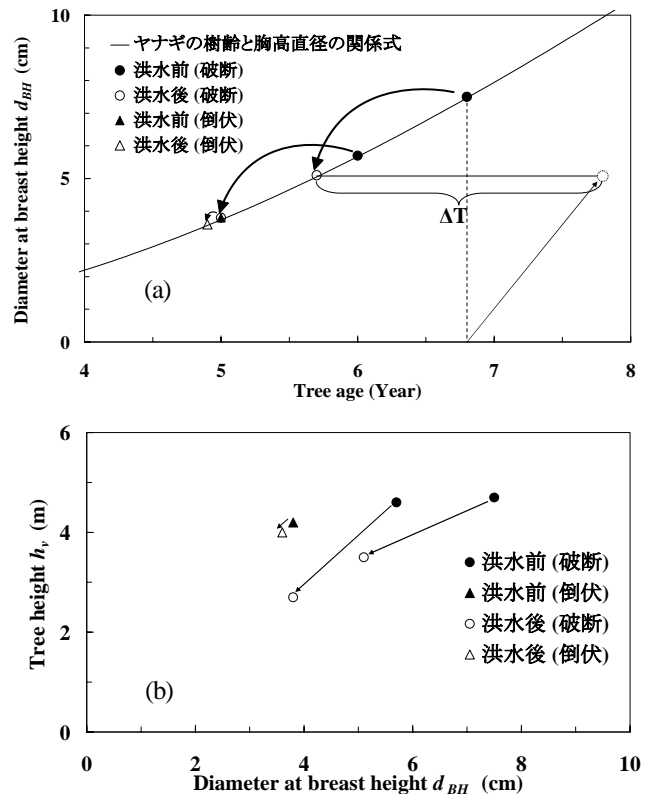


図-4 タチヤナギの再生特性 (a) 樹齢と胸高直径の関係、(b) 樹高と胸高直径の関係

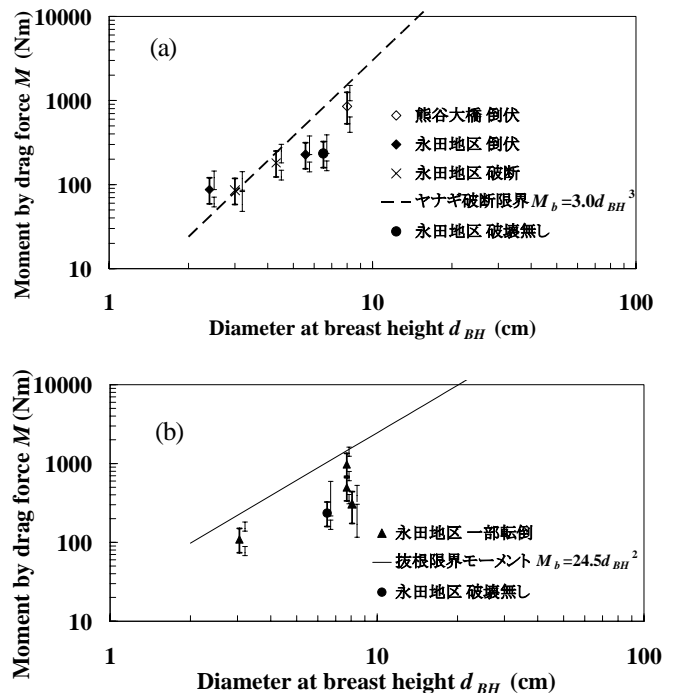


図-5 ヤナギ属(主にタチヤナギ)の胸高直径と洪水時に作用したモーメントとの関係。(a) 倒伏・破断限界との比較(破線は破断限界線)、(b) 一部転倒破壊樹木の転倒破壊限界線の比較、データ幅の最小値が方法1、最大値が方法2で求めた値。他の図も同様。なお、データ幅の最小値、最大値の右側に表示された幅は、それぞれの幅を示している。

(2) 洪水痕跡から推定される流速値

多摩川永田橋地点上流において評価した流速 U_{ap} は、方法1より $U_b=1.52$ m/s, 方法2より $U_{ap}=2.17$ m/sとなった。熊谷地点において評価した流速は、方法1より $U_b=0.59$ m/s, 方法2より $U_{ap}=0.90$ m/sとなった。また、式(3)と Manning式より求めた永田橋地点上流(ヤナギ属・ハリエンジュ繁茂域: 樹木密度が $0.125-1$ 本/ m^2)、熊谷地点の擬似等流流速 U_0 は、それぞれ、 $1.10-2.53$ m/s, 0.51 m/sであり、痕跡より評価したそれぞれの地点における流速 U_f ($U_b < U_f < U_{ap}$)の範囲、すなわち永田橋地点上流 $1.52-2.17$ m/s, 熊谷地点 $0.59-0.90$ m/s)とほぼ同程度となった。また、永田橋地点下流は流速を直接推定する材料がないが上流の推定値の範囲内となる(ヤマグワ繁茂域上流境界の接近流としては、高茎草本繁茂で相対水深が 1.6 程度なので $n_w=0.06$ とすると、 $U_0=2.03$ m/s)。したがって、痕跡より評価した2地点の流速 U_f は、樹木周辺の局所流速を概ね評価しているものと考え、以下の検討には、樹木周辺局所流速 U_f を式(4)から(6)の U として用いることとする。

(3) 推定された流速値を用いた破壊限界評価(既往の標準線との比較)

図-5に、ヤナギ属(主にタチヤナギ)の胸高直径と洪水時に作用したモーメントとの関係を示す。多摩川永田地点や荒川熊谷地点の倒伏・破断限界(図-5(a))は、田中ら⁴⁾が求めた実験曲線を概ね満足している。また、一部転倒状況(図-5(b))との比較より、洗掘を伴い根の一部が支持基盤を失った転倒は、国土交通省(実験時は旧建設省)より求められた標準的な転倒限界式よりもやや早く生じていることが確認できる。

図-6に、ハリエンジュの胸高直径と洪水時に作用したモーメントとの関係を示す。ハリエンジュについても同様の傾向が見て取れる。なお、代表粒径が大きく高水敷化していない熊谷B地点の方のハリエンジュは、一部転倒が見られなかったが、細砂やウォッシュロード堆積物で、やや高水敷化している永田橋地点では一部転倒が観測された。このことから、破壊限界線の係数は粒度分布・代表粒径によって変化すると考えられる(根が大きな粒径の土砂を捕まえている方が転倒しづらい)。

図-7は、一部転倒破壊樹木(ハリエンジュ)と完全転倒樹木(ヤマグワ)と転倒破壊限界線の比較を行ったものである。図-1に示したように高水敷堆積が進み、樹木の根鉢がその堆積深さ内に発達した場合は、樹木の転倒は土砂の洗掘深に左右される。永田橋地区のヤマグワの場合、根鉢の深さは、高水敷堆積厚さとほぼ同程度の 80 cm程度であった。なお、この完全転倒の場合の係数は 1.2 であり、一部転倒(5.0)よりも低い値となった。ここで、一部転倒は、根の大部分が残り、かつ幹の破断は生じていないことから、植生に与えるダメージは大きくないと推定される。永田橋上流地区のハリエンジュが完

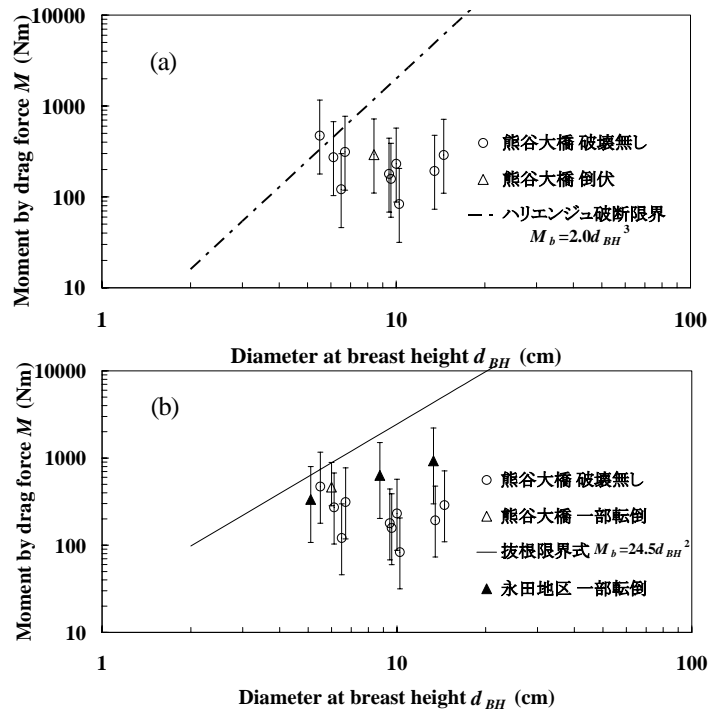


図-6 ハリエンジュの胸高直径と洪水時に作用したモーメントとの関係、(a)倒伏・破断限界との比較(破線は破断限界線)、(b)一部転倒破壊樹木の転倒

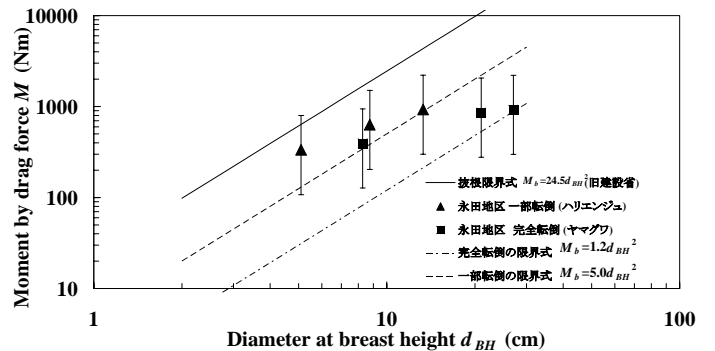


図-7 一部転倒破壊樹木(ハリエンジュ)と完全転倒樹木(ヤマグワ)と転倒破壊限界線の比較

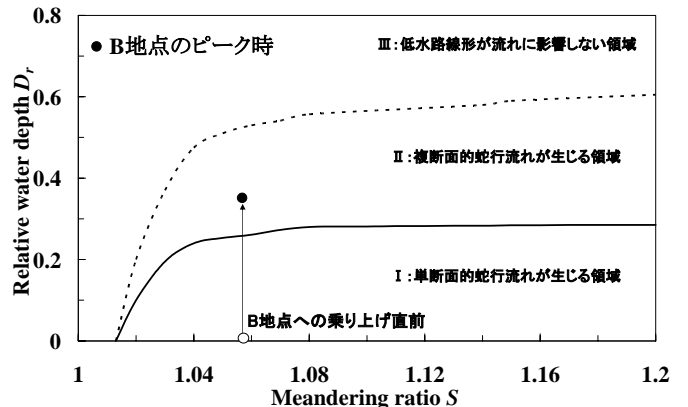


図-8 洪水ピーク時におけるB地点の洪水流特性(文献13に観測値をプロットして作成)

全転倒するには、より大きなモーメントが作用することが必要である。

5. 考察

熊谷A地点におけるタチヤナギの再生状況より、2006年10月洪水（確率規模3年程度）における熊谷大橋地点の破断・倒伏破壊は礫河原の植生遷移において、礫河原へのフィードバック機能はほとんどないことがわかる。再生したタチヤナギの樹高・胸高直径から、倒伏・破断の場合で、それぞれ1、2年程度生長を遅らせる効果があるに過ぎない。したがって洪水抵抗という観点でも、破断・倒伏破壊（ d^3 に比例する線）は、植物が流失しない限り大きな意味を成さない。一方、2007年9月の台風9号（熊谷地点で洪水確率は15年以上と推定される）では、砂州の一部に河岸侵食・砂州の移動などに伴う樹木そのものの流失が見られた。転倒もしくは流失に関係する線での限界値把握が重要と考えられる。また、残存した樹木においては、樹木周辺の局所洗掘が発生し、一部の根の支持力が失われたため、樹木の破壊限界は既往研究³⁾における樹木引き倒し試験で得られた値よりもやや小さいことが判明した。ただし、一部転倒であるため、完全転倒という意味での大小関係は更なる検討が必要である。

永田地区において、根圏厚さ程度の堆積が見られた高水敷上の樹木（ヤマグワ）は、基盤全体が洗掘されることによる破壊が発生した。この破壊限界は樹木引き倒し試験で得られている標準値よりもかなり小さい。破壊限界の基盤特性との関係を整理する必要性が示唆される。荒川で樹木が流失した箇所は、通常は流れない流路側のものが多く、洪水時において単断面的蛇行流れから複断面的蛇行流れへと移行し、樹木方向へ直進性をもって流路が変動した箇所と推定される(図-8)。真の意味で礫河原を再生するためには、こうした流れ状態の移行が低水路の砂州そのものを移動させるような効果を発揮させる水理特性を持つ河道断面である必要がある。これについては、今後検討地点を増やし、かつ数値計算等も行った上で評価していく予定である。

6. おわりに

本研究によって得られた結果を以下に示す。

- ① 樹齢4-5年のタチヤナギに破断破壊が生じた場合、翌年には同等の抵抗特性を有するまでに再生生長する。
- ② 高茎草本の材料特性（曲げ限界応力）と樹木の材料特性・後流特性を用いて、樹林帯地点の流速を推定したところ、両値は同等の値となったことから、同手法は有効であると考えられる。
- ③ 土砂堆積厚が薄く大粒径の基盤の上に繁茂した樹木の破壊限界は、樹木周辺の局所洗掘による根の支持力低下が関連した場合は、樹木が斜めになる一部転倒（根鉢の転倒）が生じる。この限界は既往研究に

において樹木引き倒し試験で得られた値よりも小さい。

- ④ 根圏厚さ程度の堆積が見られた高水敷上の樹木（ヤマグワ）は洗掘による破壊が発生した。この場合の破壊限界は、樹木引き倒し試験で得られている標準値よりもかなり小さいことが判明した。破壊限界の基盤特性との関係を整理する必要性が示唆された。

謝辞：埼玉大学学部生 伊藤貴一君、永井優一君に調査を手伝っていただいた。河川環境管理財団 河川美化・緑化調査研究助成(助成番号：2005-1(口) 代表者 田中規夫)の一部を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 砂田憲吾，河野逸朗，田中総介：出水時における河道内樹木の破壊規模の予測に関する基礎的研究，水工学論文集，第46巻，pp.947-952，2002。
- 2) 渡邊康玄，市川嘉輝，井手康郎：洪水時における河道内樹木の倒伏限界，水工学論文集，第40巻，pp.53-58，1996。
- 3) (財)リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp.147-171，1994。
- 4) 田中規夫，八木澤順治，青木信哉，福岡捷二，河道内樹木の洪水攪乱規模と樹齢による破壊限界変化，河川技術論文集，第13巻，pp.177-182，2007。
- 5) 田中規夫，北上裕規，小川友浩，浅枝隆：旧流路湿地における自然再生を目的とした適正洪水導入間隔の検討，環境システム研究論文集，Vol.32，pp.197-203，2004。
- 6) Takemura, T. and Tanaka, N., Flow structures and drag characteristics of a colony-type emergent roughness model mounted on a flat plate in uniform flow, Fluid Dynamics Research 39, pp.694-710, 2007.
- 7) 伊藤志穂，八木澤順治，田中規夫，樹木群模型周辺の流れ構造と繁茂状態の異なる実樹木群周辺の土砂堆積特性，土木学会第62回年次学術講演会，2007。
- 8) 福岡捷二，藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響，土木研究所報告，第180号，pp.137-139，1990。
- 9) 田中規夫，佐々木 寧：2006年ジャワ津波災害において海岸林が果たした役割とその破断・なぎ倒し限界，水工学論文集，第51巻，pp.1445-1450，2007。
- 10) 武村 武，田中規夫：株状粗度モデルに作用する流体力の評価に関する基礎実験，水工学論文集，第49巻，pp.871-876，2005。
- 11) Armanini, A., Righetti, M. and Grisenti, P. : Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale, Journal of Hydraulic Research, Vol.43, pp.481-487, 2005.
- 12) 池内幸司，田口隆男，原田圭助：河道内樹木の生育特性に関する基礎調査：リバーフロント研究所報告，第9号，pp.155-167，1998。
- 13) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法 —治水と環境の調和した川づくり—，森北出版，2005。

(2007. 9. 30受付)