

河道内樹木の洪水攪乱規模と樹齢による破壊限界変化

CHANGE OF CRITICAL BREAKING MOMENT OF TREES IN A RIVER BY THE DIFFERENCE OF MAGNITUDE OF FLOOD DISTURBANCE AND TREE AGE

田中規夫¹・八木澤順治²・青木信哉³・福岡捷二⁴

Norio TANAKA, Junji YAGISAWA, Shinya AOKI 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学生会員 学士 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 tree species and tree age, field investigation on tree height h , trunk diameter at breast height d_{BH} , and tree projected area in vertical section, of *Salix subfragilis* and *Robinia pseudoacacia* were conducted on three gravel-bed bars in midstream of the Arakawa River. After a flood on October 2006, h , d_{BH} and trace water depth were investigated for trees which were broken or bent down by the flood. Loading test was conducted for deriving critical breaking moment of the tree trunk. Critical breaking moment of the two tree species were expressed by the function of d_{BH} .³ The critical breaking moment of *Robinia pseudoacacia* is lower than that of *Salix subfragilis* when the diameter is the same. Drag and drag moment acting on trees were calculated with different tree age and magnitude of flood disturbance. Return period of floods (T_2) was compared with the maximum tree age (T_1) at which tree is broken under critical breaking moment. Comparing T_1 with T_2 has the possibility to become an effective method for evaluating whether the habitat in a river has a tendency to be a forest or not.

Key Words : loading test, critical breaking moment, return period of floods, *Salix subfragilis*, *Robinia pseudoacacia*

1. はじめに

河道内に繁茂する樹木が出水時に破壊され流木化すると、流木集積による流水障害に伴う氾濫が生じたり、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生物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と考えられる。

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破壊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場合が多い。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樹木特性(樹高

や樹形)を考慮せずに、荷重をかける高さ(地上1.0m)を固定した状態で実施している。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試験法への精度向上が望まれる。さらに、洪水時に働く抗力等は分布荷重であるが、試験では集中荷重として引き倒しを行うことを考慮すると、洪水時に樹木に作用する合成抗力(分布抗力の積分値)の作用高さの樹種・樹齢による変化を考慮する必要があると考えられる。また、洪水外力による樹木破壊を検討する場合、特定の樹齢、水理条件下で検討している場合が多い。しかし、樹木は経年的に胸高直径、樹高、繁茂状態が変化するため、洪水攪乱を受ける時点での繁茂状態を評価する必要がある。

本研究では樹木の破壊条件を明らかにする第一段階として、①樹木の破断実験により両種の破断限界を明らかにすること、②樹木特性(樹齢による樹高・胸高直径・樹形)の変化によって、作用する合成抗力とその作用高さの変化を把握すること、③洪水攪乱規模と樹齢による樹木破壊限界の変化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実験方法

(1) 洪水による破断樹木の痕跡調査

出水によって破壊された樹木の痕跡調査は、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))の砂州を対象とした。本研究で対象とした樹木は上記3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である。2006年10月出水の後に、流水によってダメージを受けたタチヤナギの痕跡調査を行った。本調査においては、樹木の破壊形態として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越えたために折れる「破断」と、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「倒伏(地際の主幹が曲がったまま)」が確認された(図-1)。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_t (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) 樹木の破断実験

樹木の破断実験は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)を用いて行った(図-2(a))。タチヤナギ、ハリエンジュについてそれぞれ6本ずつ、載荷点の直径が2.7~10.7 cm, 2.6~12.0 cmの範囲の幹を試験体として用いた。図-2(b)に示すように、支点間距離 L (m)を定め、 L の中央に集中荷重を加える三点曲げ試験を実施した。試験体に載荷を開始してから一定時間間隔で荷重、載荷点断面における鉛直方向変位を計測し、樹木が破断(本研究においては表皮破壊)した時の荷重 P (kN)、載荷点断面における鉛直方向変位 l (mm)を把握した。また、樹木が破断した時の曲げモーメントを破断限界モーメント M_{bc} (kN・m)と定義し、 M_{bc} を以下の式より求めた。

$$M_{bc} = \frac{PL}{4} \quad (1)$$

また、 M_{bc} は破断断面の半径 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)とすると、

$$M_{bc} = \frac{\sigma_{max} I}{R} \cong k \sigma_{max} d^3 \quad (2)$$

と表され、 d の3乗に比例することがわかる。ここに、 k は樹種によって異なる比例定数である。

3. 樹木の破壊限界に関する解析方法

(1) 樹木の抵抗特性の評価

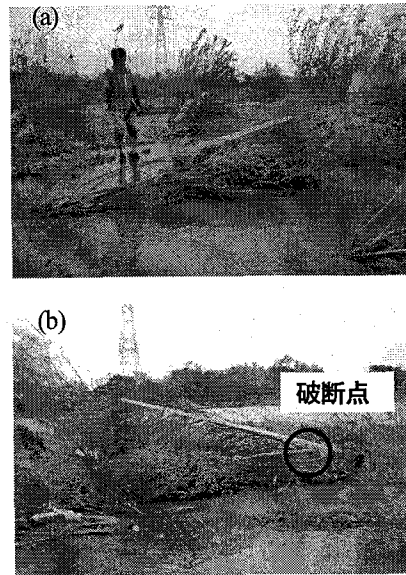


図-1 2006年10月出水後の樹木の破壊状況(熊谷大橋地点)
(a) 倒伏, (b) 幹の破断

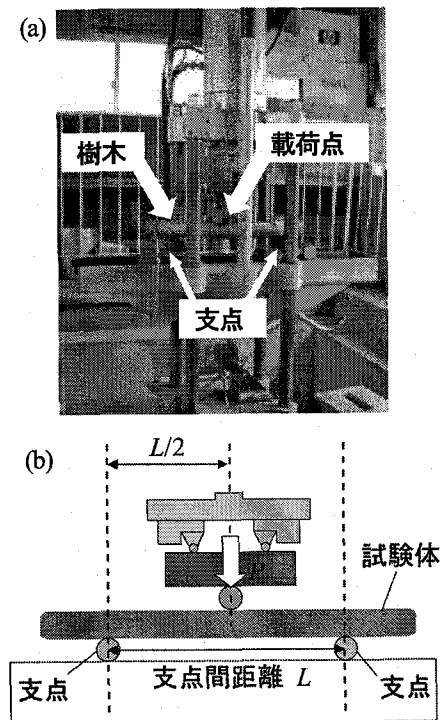


図-2 樹木の載荷実験説明図
(a) 載荷中の様子, (b) 実験概要図

樹木に作用する合成抗力 F (N)は田中・佐々木⁴⁾と同様に、水深方向に微小面積 $dA=d(z)dz$ ($d(z)$:河床からの鉛直方向高さ z における主幹と枝の幅の和、 dz :鉛直方向の分割幅)を考慮して積分し、

$$\begin{aligned} F &= \int_0^h \frac{1}{2} C_d(z) \rho u(z)^2 d(z) dz \\ &= \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h \frac{d(z)}{d_{BH}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz \end{aligned} \quad (3)$$

とした。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(本研究では1とした)、 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/m³)である。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。さらに、葉の付加投影面積・付加抗力影響を含む合成抗力係数 C_{d-all} を次式で定義した。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_{d-all} U^2 d_{BH} h \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_{d-all} &= C_{d-ref} \frac{1}{h} \int_0^h \frac{d(z)}{d_{BH}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz \\ &= C_{d-ref} \frac{1}{h} \int_0^h \alpha(z) \beta(z) dz \end{aligned} \quad (5)$$

$$\alpha(z) = \frac{d(z)}{d_{BH}}, \quad \beta(z) = \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} \quad (6)$$

ここに、 $\alpha(z)$ ：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⁹⁾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。葉層($h_b < z < h_v$)については、両種とも福岡・藤田⁸⁾、Armaniniら⁷⁾を参考に1.25とした。(図-3)

樹木特性調査では、式(3)～(6)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。画像解析にはタチヤナギ・ハリエンジュともに樹齢1～10年の範囲で、それぞれ12本、14本に対して実施した。実際に積分を行う際は、図-3の dA_i を0.5m刻みの水平方向投影面積とし合成抗力係数 C_{d-all} に反映させた。

(2) 樹木に作用する抗力モーメント M の算出方法

既往出水時の一次元不定流計算から、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。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \quad (7)$$

式(7)から得られる抗力モーメント M と破断限界モーメント M_{bc} とを比較することによって破断判定を行った。また、抗力モーメント M を算出する際に、樹齢ごとに胸

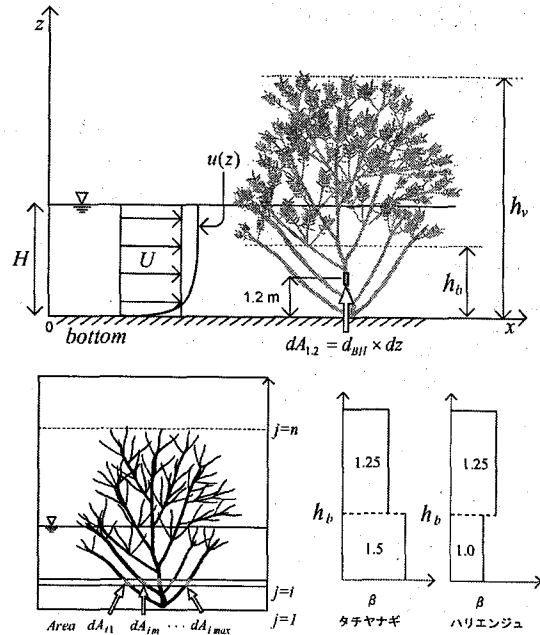


図-3 合成抗力係数 C_{d-all} の定義図(上図の $dA_{1,2}$ は胸高における面積 $=d_{BH}dz$ を表す。下図左の各分割領域における面積 dA_{im} を足し合わせ、その層における面積とする。)

表-1 抗力モーメント算出時に用いた既往出水時の水深と洪水確率年一覧

生起年	地点名	樹木繁茂地点の水深 h (m)	確率洪水年
2001	熊谷大橋	1.0	1.5
	荒川大橋	0.3	
	久下橋	1.1	
2004	熊谷大橋	1.7	2.5
	荒川大橋	0.9	
	久下橋	4.1	
2002	熊谷大橋	2.2	4.0
	荒川大橋	1.3	
	久下橋	4.5	
-	熊谷大橋	2.6	8.8
		2.9	
-	荒川大橋	3.1	6.8
		3.3	

高直径 d_{BH} 、樹高 h_v が変化するが、タチヤナギに関しては池内ら⁸⁾、ハリエンジュに関しては森⁹⁾、茂木ら¹⁰⁾の調査結果を用いて、胸高直径および樹高を樹齢の関数として与えた。また、繁茂地点の水深を算出する際に用いた出水の一覧を表-1に示す。なお、表-1において生起年が明記されていないデータに関しては、観測地点より上流に位置する寄居水位・流量観測所(94.7km)の1955～2005年の年最大流量をもとにWeibull法を用いて確率洪水年に対応する流量を推定し、調査地点断面で等流計算を行うことによって樹木繁茂地点の水深を推定した。また、式(7)に示される断面平均流速 U は等流状態を仮定し、平均流速公式を用いてManningの粗度係数を0.035(m^{1/3}s)、河床勾配を1/375として与えた。

4. 調査および解析結果

(1) 樹木の破壊限界の推定

タチヤナギ・ハリエンジュの破断実験より、それぞれの破断限界モーメントを求めた結果を図-4に示す。この図より、今回破断実験を行った直径の範囲では、両種とも胸高直径の3乗に比例することがわかる。Gardinerら¹¹⁾は樹木の破断限界モーメントは直径の3乗に比例するという結果を得ており、本実験の結果も同様の傾向を示している。また、樹種による破断限界モーメントの違いに注目し、タチヤナギとハリエンジュを比較すると、ハリエンジュの方が破断しやすい。これはハリエンジュの方が曲げ剛性 $EI(Nm^2)$ が小さいためであると考えられる。

図-4には、樹木の抜根に着目した引き倒し試験³⁾によって得られた抜根限界式 $M_{uc}=24.5d_{BH}^2(Nm)$ (d_{BH} はcm単位で代入)も合わせて示した。これと破断実験より得られた破断限界式を比較すると、抜根より破断が先に生じるのは、タチヤナギ・ハリエンジュに関してそれぞれ、直径 $d=9cm$ 程度、 $d=12cm$ 程度であることがわかる。ここで、現地調査で破断が確認されたタチヤナギに作用した抗力モーメントも合わせて示した。これらのプロットは破断実験より得られた破断限界モーメントよりも大きな値となっている。その理由として、現地調査で確認された破断は完全に幹が折れているのに対し、破断実験では実験装置の制約から表皮破壊を対象としているためであると考えられる。さらに、現地に繁茂するタチヤナギに関しては、A点で抜根よりも先に破断が生じているという事実から、抜根限界式は従来用いられている抜根限界式よりも上側にシフトすると考えられる。そのことから、タチヤナギに関しては抜根限界式を $M_{uc}=80.0d_{BH}^2$ とする(係数は起こりうる一番小さな値として設定)と、破断限界式との交点が右側に移動し、胸高直径 d_{BH} が25cm程度までは破断が先に生じることがわかる。

以上より、破断限界線は樹種ごとに異なる物性値によってある程度決定されるが、抜根限界線は樹木の生育基盤や根の張り方によって上下することがわかる。そのため、樹木の破壊を破断と抜根に区別して検討する際には、破断限界式・抜根限界式を正確に見積もり、2つの線の交点を把握することが重要であると考えられる。なお、ハリエンジュに関しては今回の出水による破断が確認されなかったためタチヤナギと同様な交点を求めることはできなかった。そのため今後出水による破断が確認された後に追加調査を行う必要がある。

(2) 樹木に作用する抗力モーメントと破断最大樹齢との関係

図-5は、各樹種の樹齢による $\alpha(z)$ の変化を示している。図中に示す α_1 、 α_2 はそれぞれ枝下高さ h_b 以下の $\alpha(z)$ の平均値、 h_b 以上の $\alpha(z)$ の平均値である。タチヤナギは樹齢の

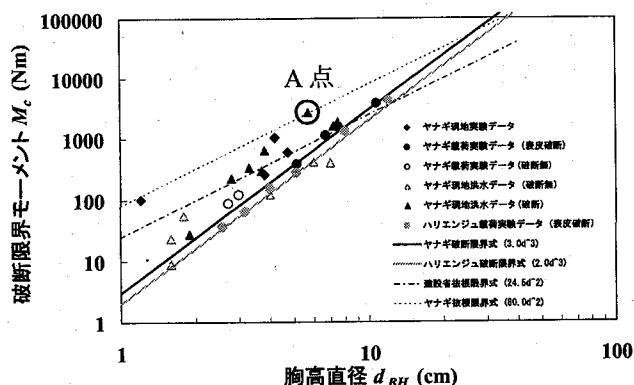


図-4 タチヤナギ及びハリエンジュの破断限界と倒伏限界の関係

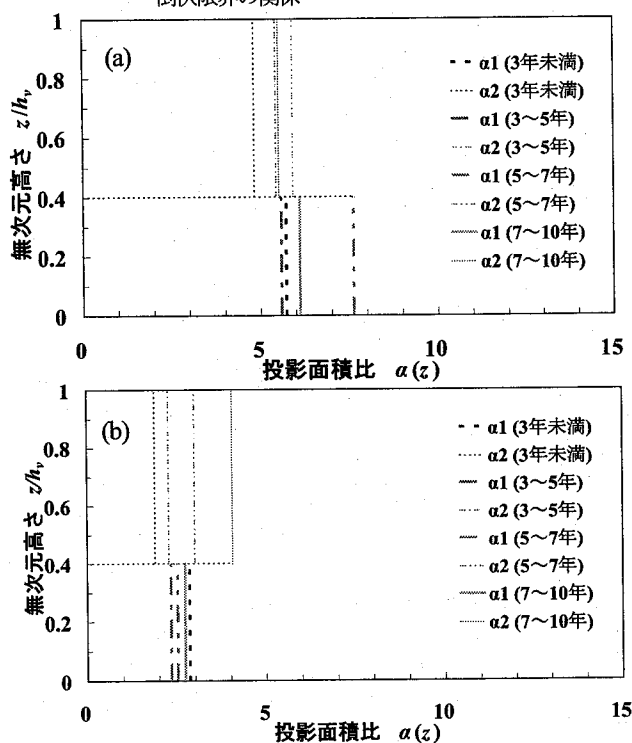


図-5 樹齢による $\alpha(z)$ の変化

(a) タチヤナギ, (b) ハリエンジュ

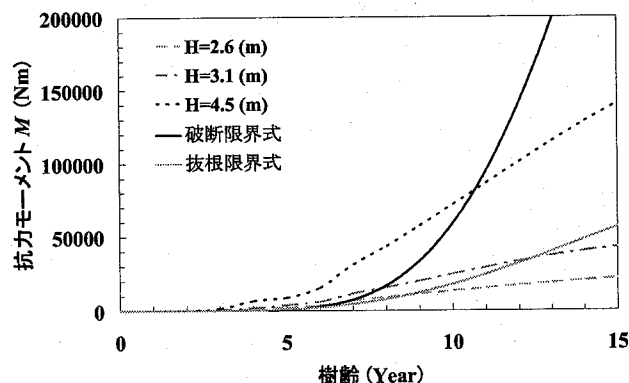


図-6 異なる樹齢・水深時の抗力モーメントと破壊限界モーメントとの関係(タチヤナギ)

範囲によらず $\alpha_1 > \alpha_2$ であるが、ハリエンジュの場合、樹齢5年以上になると $\alpha_1 < \alpha_2$ となり、重心が上側に移動す

ることがわかる。タチヤナギは若樹齢時に地際から多数の枝を出し、株状のまま生長し続けるのに対し、ハリエンジュは若樹齢時に地際付近に枝を出すものの、洪水攪乱による萌芽再生をしていない場合には、生長とともに枝下高さ h_b が大きくなるのが原因と考えられる。

図-6はタチヤナギに関して、異なる樹齢・水深時の抗力モーメントと破壊限界モーメントとの関係を示している。抗力モーメントを算出する際は、表-1に示した出水時の水深全ケースに対して計算を行っているが、図が煩雑となるため、ここでは $H=2.6\text{m}$ （熊谷地点：8.8年確率洪水）、 $H=3.1\text{m}$ （荒川地点：6.8年確率洪水）、 $H=4.5\text{m}$ （久下地点：4年確率洪水）のみを示している。また、図-4より得られたタチヤナギの破断限界線を示した。この破断限界線よりも上側の領域では、樹木が破断することを意味しており、水深が大きく作用する抗力モーメントが大きい程、より高い樹齢の樹木を破断させることがわかる。また、それぞれの水深において、抗力モーメントと破断限界線との交点が得られる。この交点での樹齢を破断最大樹齢（この樹齢より小さいものは破断する）と定義すると、破断最大樹齢と確率洪水年の関係が得られる。すなわち、洪水確率規模（図-6では水深）に応じてどの程度の樹齢まで破断されるかについて、各地点ごとに関連付けることができる。

図-7に洪水による破断樹木の痕跡調査から得られた胸高直径 d_{BH} と痕跡水深 H_i の関係をプロットしてある。また、図中に示した実線は、各水深時の破断最大樹齢より胸高直径 d_{BH} を推定し、破断最大樹齢に対応する水深より得られたものである。この実線より上側の領域では樹木が破断されることを意味しており、解析より得られた破断限界（実線）は現地の破断痕跡で見られた状況を概ね満足していることがわかる。一方点線は、図-6に示した抜根限界式に関して破断限界式と同様の手順により得られるものである。これら2つの式から得られる曲線を比較すると、抜根限界式では、胸高直径 d_{BH} が小さい領域（ $d_{BH}=2\text{cm}$ 程度）、大きい領域（ $d_{BH}=7\text{cm}$ 程度）では現地の状況と異なる結果を示していることから、従来の抜根限界式では破断を表現できない。

(3) 洪水時合成抗力とその作用高さに関する検討

図-7において、従来の抜根限界式では破断限界を表現することが困難であることを示したが、樹木のどの位置に力を加えて引張試験を実施すれば、抜根と破断を同時に考慮できるかについて、タチヤナギとハリエンジュに関して検討を行った。図-8は水深 H と h_e/h_v の関係を示している。ここに、 h_e は合成抗力 F の作用高さ(m)であり、抗力モーメント M と合成抗力 F が同時に表現できるように（ $M=h_e \times F$ ）算出した。また、各樹齢において、水深が増加しても作用高さ割合が一定となる領域があるが、これは水深が各樹齢に対応した樹高を越えるためである。こ

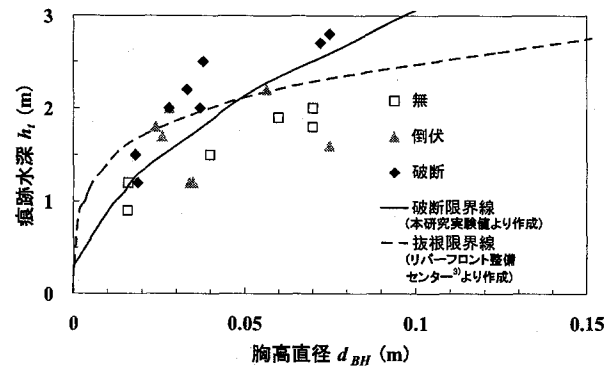


図-7 タチヤナギの破断痕跡と破断限界モーメント時の胸高直径と痕跡水深の比較

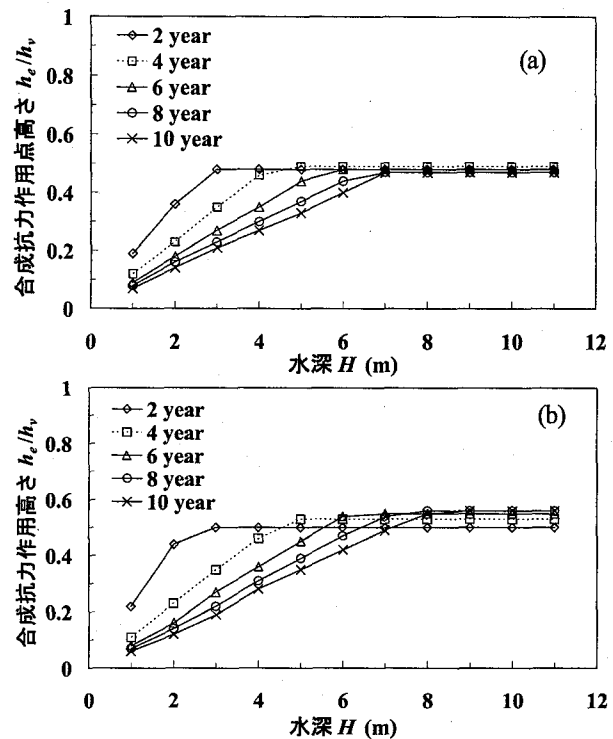


図-8 水深 H と合成抗力の作用高さ h_e/h_v の関係
(a) タチヤナギ, (b) ハリエンジュ

の作用高さ割合 h_e/h_v が一定となる時の値を両種で比較すると、タチヤナギに関しては樹齢の変化によらず h_e/h_v が0.5を若干下回る程度で一定値となる。それに対してハリエンジュは樹齢が大きくなるにつれて h_e/h_v が一定となる時の値が大きくなることがわかる。この理由として、図-5で示したように、タチヤナギは重心がやや下がる樹形であり、ハリエンジュは樹齢が大きくなるにつれて重心が上がる樹形であることが考えられる。

(4) 破断最大樹齢と確率洪水年との関係に関する検討

上記解析より得られるヤナギおよびハリエンジュの破断最大樹齢（ T_2 ）を縦軸に、洪水確率年（ T_1 ）を横軸にとり、3地点における樹木の破断特性をプロットした。 $T_1-T_2 > 0$ の場合、樹林化しやすい、 $T_1-T_2 < 0$ の場合、樹林化しづらいと定義したところ、タチヤナギに関しては、荒川

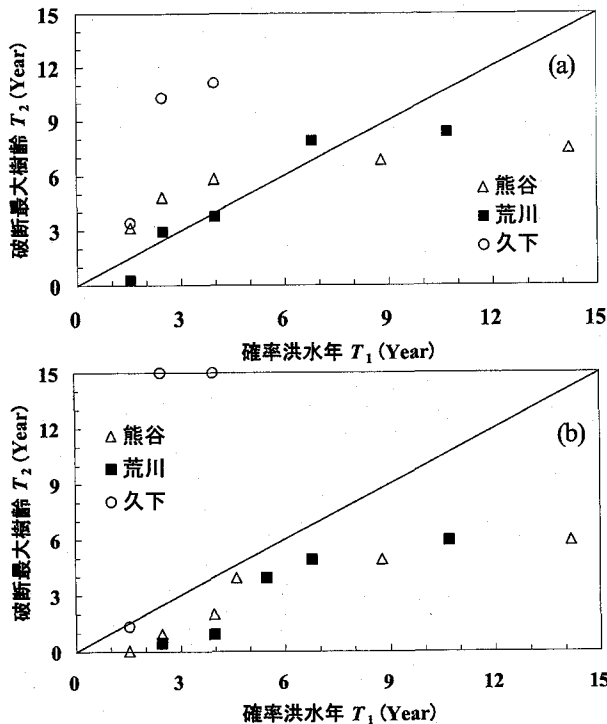


図-9 洪水確率年(T_1)と破断最大樹齢(T_2)の関係
(a) タチヤナギ, (b) ハリエンジュ

大橋地点では確率洪水年が7年程度までは $T_1 = T_2$ 付近にプロットされ樹林化傾向を判断しづらいが、確率洪水年が7年以降は樹林化しやすい傾向となる。熊谷大橋地点では確率洪水年が4年程度までは樹林化しづらい傾向であるが、荒川大橋地点同様、それ以降になると樹林化しやすい傾向となることがわかる。久下橋地点においては樹林化しづらい傾向であった。また、ハリエンジュに関しては、繁茂が確認された荒川大橋地点・熊谷大橋地点において樹林化しやすい傾向であった。また、久下橋地点においてもタチヤナギの繁茂地点と同じ位置にハリエンジュが繁茂していたと仮定した場合、確率洪水年が4.5年でも破断最大樹齢が15年以上であったことから、ハリエンジュが繁茂することが困難であることが推測できる。これらは、現地観測における破壊状況や樹木の存在状況から概ね妥当と判断されることから、 T_1 と T_2 をもとにした分類は樹林化しやすさを判定するのに有効な指標となる可能性があることが示された。

4. 結論

本研究によって得られた結果を以下に示す。

- ① タチヤナギ・ハリエンジュの破断実験より、両種の破断限界モーメントは直径の3乗で概ね表現できること、同じ胸高直径の場合はハリエンジュの破断限界値のほうが低いことが明らかとなった。
- ② タチヤナギに関して、異なる樹齢(胸高直径、樹高)、水深を考慮して算出した抗力モーメントと破断限界モーメントとの比較から得られた破断条件は、出水

後の調査地点で確認された破断状況を概ね満足していたことから、本研究で用いた抗力モーメントの算出手法は妥当であると考えられる。

- ③ 樹齢が大きくなるに従って、樹木の鉛直構造に変化が生じることを考慮して、樹木に作用する合成抗力の作用高さが変化することを把握した。
- ④ 樹林化しやすい砂州の判定法として、確率洪水年 T_1 と破断最大樹齢 T_2 をもとにした手法が有効である可能性が示唆された。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、国土交通省荒川上流河川事務所に水位・流量観測所の資料を提供頂いた。樹木の破壊実験を行うにあたり、埼玉大学大学院理工学研究科 牧剛史准教授、浅本晋吾助教に御指導頂いた。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・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.
- 5) 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.
- 6) 福岡捷二・藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水利的影響, 土木研究所報告, 第180号, pp.137-139, 1990.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 森千春: 河道管理のための植生の長期変動予測に関する研究, 東京大学修士論文, pp.42-45, 1999.
- 10) 茂木信祥, 須賀堯三, 池田裕一: 鬼怒川河道における高木の育成特性について, 土木学会第54回年次学術講演会, pp.252-253, 1999.
- 11) Gardiner, B., Peltola, H. and Kellomäki, S.: Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees, *Ecological Modelling*, Vol.129, pp.1-23, 2000.

(2007.4.5 受付)