

砂礫州上に繁茂する植生の洪水時流失限界評価

ANALYSIS OF THE THRESHOLD DRAG MOMENT AND SHEAR STRESS AT FLOOD EVENTS FOR UPROOTING TREES VEGETATED ON GRAVEL BED BARS

八木澤順治¹・田中規夫²・福岡捷二³

Junji YAGISAWA, Norio TANAKA and Shouji FUKUOKA

¹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)

²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)

³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)

Trees in rivers sometimes become driftwoods at flood events, and it might cause a disaster. It is important to understand the uprooting condition of the trees by floods. 2D unsteady depth-averaged flow model was applied to the Arakawa River between 76 km to 82 km for evaluating September 2007 flood and October 2006 flood. This model expressed well the peak water levels of the floods. Threshold drag moment and shear stresses for up-rooting the representative vegetation, *Salix subfragilis* and *Robinia pseudoacacia*, which grew on the gravel-bed bar in the upstream of the Kumagaya-Ohashi was evaluated according to the result of numerical analysis and the washed-out situation of the plants. Threshold drag moment for tree-uprooting on the gravel-bed was larger compared with the previous experimental results by pulling test. Flood discharge for which all plants on this gravel-bed bar were washed away was evaluated by comparing the calculated shear stress in each discharge condition and the threshold shear stress for uprooting obtained by the analysis.

Key Words : threshold moment and shear stress for tree-uprooting, *Salix subfragilis*, *Robinia pseudoacacia*

1. はじめに

2007年9月の台風9号による洪水は、近年まれにみる大洪水であり、荒川扇状地区間の砂礫州上に繁茂する樹木の破壊が顕著に生じた。樹木が流木化すると下流河川における構造物の破損、河川管理施設周辺への堆積によるゲートの閉塞、等を引き起こす可能性がある。従って樹木の破壊条件を明らかにすることは重要である。

従来、転倒による樹木破壊を評価する際には、旧建設省による樹木の引き倒し試験結果から得られた転倒限界モーメント式¹⁾が用いられている²⁾。一方で、樹木の破壊は河床、すなわち生育基盤の攪乱が主要因であるという観点から、底面せん断力³⁾、⁴⁾を指標とした研究もある。洪水時の樹木破壊のメカニズムとして、油川ら⁵⁾は樹木引き倒し試験から求めた倒伏限界モーメントで表現可能であるとす一方、清水ら⁶⁾は生育基盤の攪乱が主要因であると異なる結論を導いている。従来用いられている転倒限界モーメント式は生育基盤となる土砂が細かい高水敷で行なわれた実験結果より得られた関係式であり、洪水時の洗掘等を考慮していないことから、実際の洪水時に

おける樹木の流失限界とは若干異なる可能性があると考えられる。田中ら⁷⁾は高水敷堆積層に繁茂した樹木の転倒限界モーメントを把握し、従来用いられている転倒限界モーメントよりもかなり小さな値で転倒することを示している。しかし、砂礫州のように粒度が粗い生育基盤に繁茂した樹木の転倒限界がどのように変化するかは未だ不明な点が多い。そのため、生育基盤と樹木破壊の関係を明確にする必要がある。

そこで、本研究では砂礫州上に繁茂した植生の洪水による流失限界を把握するため、2006年10月洪水、2007年9月洪水を対象に平面二次元不定流計算を行なった。数値計算より対象砂礫州(荒川の熊谷大橋上流)に繁茂する代表的樹木に作用する抗力モーメントおよび樹木周辺の底面せん断力を求め、それらと洪水による樹木流失の有無(実績)を比較し、流失限界モーメントおよび流失限界せん断力を把握した。流失限界モーメントに関しては、多摩川の複数地点の結果と比較し、生育基盤の違いが樹木破壊に及ぼす影響の度合いを把握した。さらに、得られた流失限界せん断力をもとに、砂礫州上の樹木が全て流失するために必要な洪水流量規模を検討した。

2. 研究方法

(1) 洪水解析モデル

細田ら⁶⁾による一般化座標系を用いた平面流計算法に、Takemura and Tanaka⁷⁾と同様に抗力項を加えた微分方程式を用いた。以下に連続式、運動方程式を示す。

$$\theta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uq_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vq_x}{J} \right) &= -gh \left(\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_x}{\rho l} - \frac{f_x}{\rho l} + \\ \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-u^2 h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-u^2 v h) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-u^2 h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-u^2 v h) \\ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uq_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vq_y}{J} \right) &= -gh \left(\frac{\xi_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_y}{\rho l} - \frac{f_y}{\rho l} + \\ \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-u^2 v h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-v^2 h) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-u^2 v h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-v^2 h) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 θ : 空隙率、 t : 時間、 J : ヤコビアン、 (U, V) : 流速ベクトルの反変成分(m/s)、 (u, v) : 水深平均流速(m/s)、 (q_x, q_y) : 流量フラックス(m²/s)、 g : 重力加速度(m/s²)、 h : 水深(m)、 ρ : 水の密度(kg/m³)、 Z_s : 水位(m)、 (τ_x, τ_y) : x - y 座標系の底面せん断応力の成分(N/m²)、 $-\overline{u^2}$ 、 $-\overline{u^2 v}$ 、 $-\overline{v^2}$: x - y 座標系の水深平均レイノルズ応力(m²/s²)、 (f_x, f_y) : 単位面積あたりの植生抵抗(N/m²)である。ここで植生抵抗は、田中・佐々木⁸⁾と同様の方法で、水深方向に微小面積 $dA=dzdz$ ($d(z)$: 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、

$$f_x = \frac{1}{2} m \rho C_{d-ref} d_{BH} u \sqrt{u^2 + v^2} \int_0^h \frac{d(z) C_d(z)}{d_{BH} C_{d-ref}} dz \quad (3)$$

$$f_y = \frac{1}{2} m \rho C_{d-ref} d_{BH} v \sqrt{u^2 + v^2} \int_0^h \frac{d(z) C_d(z)}{d_{BH} C_{d-ref}} dz \quad (4)$$

$$F = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (5)$$

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

とした。ここに、 m : 単位面積当りの樹木密度(Number of trees/m²)、 $C_d(z)$: 高さ z における抗力係数、 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)、 $\alpha(z)$: 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。 $\alpha(z)$ 、 $\beta(z)$ に関しては田中ら⁹⁾と同様に設定した。

(2) 平面流況解析条件

計算対象河川は、荒川の扇状地区間に位置する距離標 76 km から 82km の区間である。境界条件は図-1 に示すように 2007 年 9 月に生じた台風 9 号(6 日 16 時から 7 日 2 時までの 10 時間)のデータを与え、上流端には植松橋

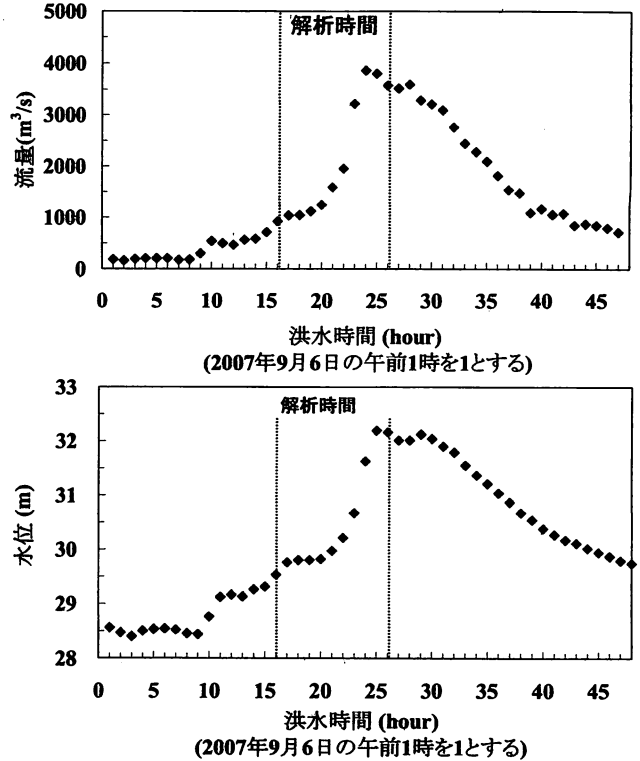


図-1 数値解析に用いた上流端(距離標 82 km)の流量ハイドロ(上)および下流端(熊谷水位観測所: 76 km)の水位ハイドロ(下)

水位・流量観測所(距離標 86km)の実測流量、下流端には熊谷水位観測所(距離標 76km)の実測水位を与えた。ここで実際に流況解析を行なう際には、上流端を距離標 82km 地点と設定した。その理由として、①距離標 84km 地点に落差の大きい箇所があり計算が不安定になること、②植松橋水位・流量観測所と今回上流端に設定した 82km 地点との間に支川がないことから、距離標 82km 地点に植松橋水位・流量観測所の実測流量データを用いても差し支えないと判断したためである。また、解析対象砂州の標高は、横断方向に約 8m、流下方向に約 50m のグリッドを作成し、2007 年 9 月の洪水前に得られた地表面の標高データを平均化することによって設定した。植生に関しては、対象洪水(2007 年 9 月)前に、熊谷大橋上流の砂礫州において国土交通省荒川上流河川事務所が行なった毎木調査の結果を用いた。各計算グリッドの範囲内にある樹木の本数より密度を定め、樹高、胸高直径に関しては平均的な値を算出し洪水解析モデルに反映させた。なお、本研究で用いた平面流況解析では植生抵抗として樹木のみを対象とした。さらに、①砂礫州上の樹木本数の約 80% を占めている、②(1)で述べたように樹木に作用する抗力の評価に必要な $\alpha(z)$ に関する知見が豊富である、という理由から、タチヤナギ・ハリエンジュの 2 種を対象とした。また、粗度係数 n (m^{-1/3}s) は Strickler が行った実験データを元にして作られた式(Andersen et al.⁹⁾)を feet 単位から m 単位に修正した以下の式を用いた。

$$n_b = 0.0617d_s^{1/6} \quad (7)$$

ここに、 d_s は河床材料の50%粒径でm単位で代入する。

(3) 荒川および多摩川の砂礫州上に繁茂する樹木の流失限界モーメントおよび流失限界せん断力

a) 荒川・熊谷大橋上流の砂礫州での検討

2007年9月の洪水時に、熊谷大橋上流の砂礫州上の樹木に作用した抗力モーメント M は田中・佐々木⁸⁾と同様の方法で以下の式(8)～式(10)より算出した。

$$M_x = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} u \sqrt{u^2 + v^2} \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \quad (8)$$

$$M_y = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} v \sqrt{u^2 + v^2} \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \quad (9)$$

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (10)$$

洪水後に実施した樹木の流失状況に関する現地調査と解析によって得られた抗力モーメントをもとに樹木(タチヤナギ, ハリエンジュ)の流失限界モーメントを把握した。また、上記樹木の流失限界せん断力を把握する際には、数値計算により得られる洪水ピーク時の樹木繁茂地点の水深 H_{max} (m)、エネルギー勾配 I_e をもとに、せん断力 τ を以下の式より算出した。

$$\tau = \rho g H_{max} I_e \quad (11)$$

b) 多摩川・複数の砂礫州における検討

転倒した樹木に関しては、多摩川の複数地点においても2007年9月洪水後に痕跡調査を行い、式(8)や式(9)と同様に抗力モーメントを算出した。ただし、多摩川では当該洪水の平面流況計算を行っていないため、式(8)や式(9)のように流速の流下方向成分、横断方向成分は得られない。そこで、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を推定することとした。流速推定には以下の3手法を用いた。

方法1: 樹木周辺で倒伏したオギ・ヨシ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¹⁰⁾がオギ、ヨシを対象として行っており、今回の洪水痕跡で見られた直径3-4mmクラスでは、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より U_b を推定した。

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に作用した流速を算定し、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、 D は樹木主幹直径)によって樹木の透過流速が変化することが Takemura & Tanaka¹¹⁾によって示されている。現地樹木の G/D をもとに、

$$u_{wake} = \gamma U_{ap} \quad (12)$$

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。例えば、 $G/D=2$ 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。本研究では両種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} を求めた。

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、水面勾配が各地点の河床勾配と同等であることを確認し、擬似的な等流状態が成立していると考え、マニングの式と高茎草本の抵抗を含む粗度係数評価式¹²⁾を用いて擬似等流流速 U_0 を求めた。

(4) 対象砂礫州を裸地に戻すために必要な洪水規模の推定

熊谷大橋上流の砂礫州上で最も標高が高い地点に繁茂した樹木が流失した場合、当該砂礫州は裸地に戻ると仮定し、流失限界せん断力を超えるために必要な流量規模を把握する。熊谷大橋上流の砂礫州では最高標高地点にタチヤナギが繁茂しており、(3)で把握するタチヤナギの流失限界せん断力とある流量規模におけるせん断力とを比較することによって砂礫州が裸地に戻るかを判断する。せん断力を把握する際には、寄居地点(距離標 95km)の計画高水流量が $6300\text{m}^3/\text{s}$ であることを考慮し、平面流況解析では1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000の流量(m^3/s)を与え解析を行なった。

(5) 無次元掃流力と無次元限界掃流力との比較

(3)において各植物種の流失限界せん断力を把握したが、地点によって河床材料の変化等があるため、せん断力値の持つ意味が変わってくる。そこで、植物の流失時の条件を、無次元掃流力と無次元限界掃流力を比較し調べることとする。(3)で得られた各植物種の流失限界せん断力 τ_c より、50%粒径(d_{50})、84%粒径(d_{84})の無次元掃流力 τ_{*50} , τ_{*84} を以下の式(13)より算出し、それぞれの無次元限界掃流力 τ_{*c50} を0.06、 τ_{*c84} を式(14) (河村¹³⁾)より算出した。84%粒径の無次元限界掃流力は Egiazaroff の式を用いた。

$$\tau_{*i} = \frac{H_{max} I_e}{S d_i} \quad (13)$$

$$\frac{\tau_{*c84}}{\tau_{*c50}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_{84}/d_{50})} \right]^2 \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} \right) \quad (14)$$

ここに、 H_{max} , I_e , d_i はそれぞれ、各植物種が繁茂していた地点の最大水深(m)、エネルギー勾配、粒径(m)、 S : 土粒子の水中比重である。粒径および無次元掃流力の下付文字 i は50%粒径、84%粒径の場合それぞれ、50, 84 である。

4. 解析結果

(1) 2007年9月洪水の計算結果と痕跡水位の比較

最大流量時の対象砂礫州における流速コンターおよび流速ベクトル、水深コンターを図-2(a), (b)に示す。こうした計算結果がどの程度洪水を再現しているのかを二次元分布のまま検証することは難しいため、解析の最大水位と実際の洪水時の痕跡水位とを比較し計算の検証を行った結果を図-3に示す。痕跡水位は洪水後の流下物の分布状況をもとに右岸、左岸1km間隔で計測し、解析水位は解析時間内における各グリッドでの最大の水位とした。その結果、解析水位は痕跡水位を概ね満足していることがわかる。しかし、右岸で痕跡水位よりも解析水位が小さい区間(距離標79km付近)があるが、今回の解析では河床変動を考慮していないため、痕跡水位よりも大きくなったと考えられる。

(2) 樹木に作用する抗力モーメントと流失限界モーメントの比較

2007年9月の洪水後に、荒川の熊谷大橋上流の砂礫州において、図-2(c)に示すように流失・未流失の樹木を把握した。その樹木に働いた抗力モーメントを数値解析により算出した。得られた抗力モーメントと樹木の流失実績を比較し、ハリエンジュとタチヤナギの流失限界モーメントを解析した(図-4)。図-4には、多摩川の稲城・永田橋・日野橋・府中四谷地点で転倒した樹木に作用した抗力モーメント値もあわせて示した。熊谷大橋上流の砂礫州の樹木(タチヤナギ、ハリエンジュ)には、従来の転倒限界値よりも高い抗力モーメント値が作用しているにもかかわらず、未流失の樹木があったことがわかる。砂礫州上の樹木がしっかりと根を張った場合の流失限界線は図中の点線(ハリエンジュの流失限界線)や一点鎖線(タチヤナギの流失限界線)で示すように、従来の転倒限界値¹⁾よりも大きくなると考えられる。

一方、主に高水敷堆積層に繁茂した樹木の転倒が見られた多摩川(永田橋地点、府中四谷地点、稲城地点)では、従来の転倒限界値よりもかなり小さい抗力モーメント値で転倒に至っていることがわかる。高水敷堆積層を生育基盤として繁茂した樹木は、図中の二点鎖線(多摩川・永田橋地点のヤマグワに作用した抗力モーメントを下限値に取った流失限界線)が示すように、粒度の粗い砂礫州に繁茂した樹木に比べ転倒しやすいと考えられる。

(3) 砂礫州上に繁茂する対象植物の流失限界せん断力 τ_c の推定

2006年10月、2007年9月の洪水より、熊谷砂州上の樹木の流失限界となるせん断力を把握した。対象植物として、熊谷砂州に繁茂する代表的な樹木(タチヤナギ、ハリエンジュ)2種類を選定した。各植物の流失実績と解析

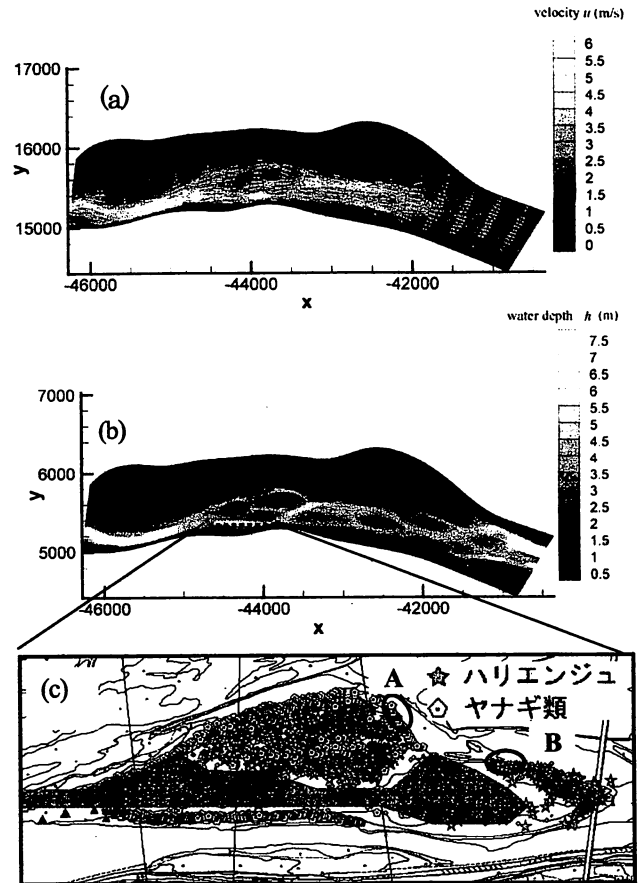


図-2 解析区間の最大流量時における流況および対象砂州の樹木繁茂状況

(a) 流速のコンター図およびベクトル図、(b) 水深のコンター図、(c) 対象砂州の洪水前の植生分布(黒塗り部分は洪水で流失した樹木群の概略位置)((a)、(b)とも横軸X、縦軸Yは平面直角座標系の座標値を示し単位はmであり、(c)の植生図は荒川上流河川事務所の調査結果を用いた)

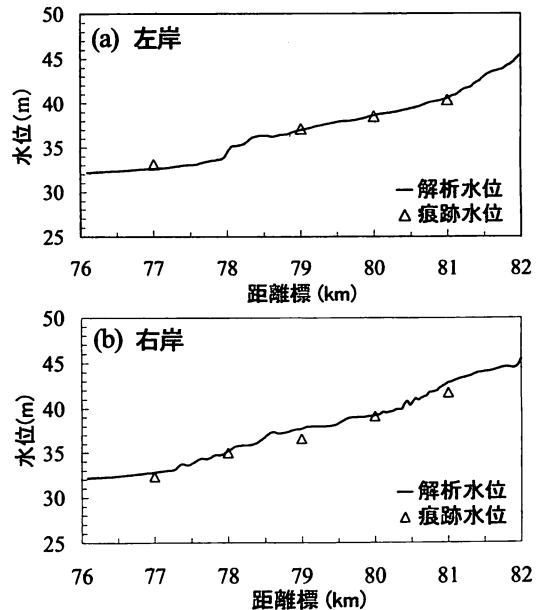


図-3 2007年9月洪水の解析区間における解析水位と痕跡水位(A.P.)との比較 (a) 左岸、(b) 右岸

により得られたせん断力をもとに各植物の流失に必要なせん断力を把握した。2006, 2007年の2洪水時に各植物の繁茂地点に作用したせん断力を図-5(a), (b)に示す。未流失のせん断力のうち、最大値を流失限界せん断力と定義すると、ハリエンジュでは $75(N/m^2)$, タチヤナギでは $67(N/m^2)$ のせん断力が必要であることがわかる。

(4) 対象砂礫州を裸地に戻すために必要な洪水流量規模の推定

図-6は流量と各流量時に熊谷大橋上流砂礫州の最高標高地点に作用したせん断力の関係を表している。図-6に示した τ_c は、図-5(b)より把握したタチヤナギの流失限界せん断力を示している。 τ_c と2007年9月洪水(最大流量 $3854(m^3/s)$)でのせん断力 τ を比較すると、 τ が τ_c を下回っており最高標高地点のタチヤナギは流失しないことを示している。実際に2007年9月洪水後に同地点のタチヤナギは流失せずに残存しており、実際の状況を表現できていると考えられる。また、どの程度の流量規模(図-6の Q_c)があれば当該砂礫州の最高標高地点のタチヤナギを流失できるか、すなわち裸地に戻るかを検討した。その結果、流量が約 $4200m^3/s$ で同地点のタチヤナギを流失可能であることがわかった。

(5) 無次元掃流力と無次元限界掃流力との比較

表-1に荒川と旭川(眞田ら¹⁴⁾)における、 τ_{50} , τ_{84} と、それぞれの無次元限界掃流力 τ_{c50} , τ_{c84} との比較結果を示す。樹木繁茂地点の50%粒径が移動すれば樹木も流失すると

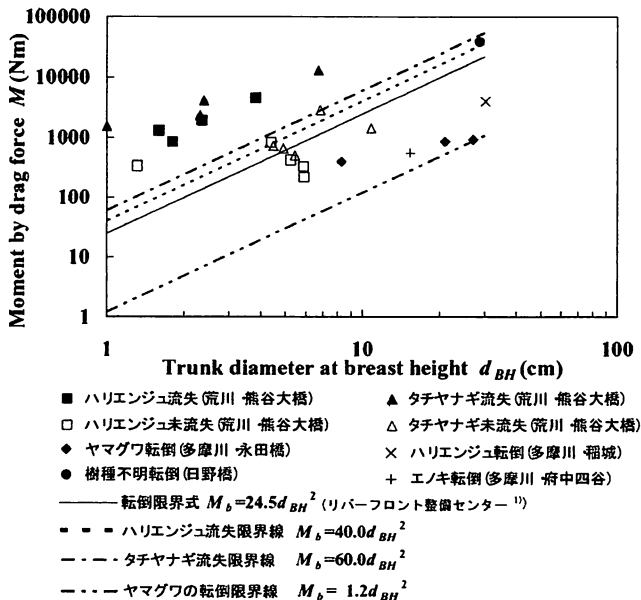


図-4 2007年9月洪水時に荒川および多摩川に繁茂していた樹木の胸高直径と抗力モーメントの関係 (荒川・熊谷大橋地点および多摩川・日野橋地点の樹木は礫層に繁茂しており、多摩川・永田橋地点、稲城地点、府中四谷地点の樹木は高水敷堆積層に繁茂)

定義した場合、どのケースにおいても τ_{50} が τ_{c50} 程度以上であり、実際に流失したという事実を概ね表現している。しかし、84%粒径が移動すれば樹木も流失すると定義した場合、 τ_{84} が τ_{c84} よりも小さい値となり流失実績と矛盾する。この理由として、①砂礫州上において30箇所程度粒度分布を洪水前に把握しておいたが、今回流失が確認された植物の繁茂地点そのものの粒度ではないこと(そのため荒川の2つの植物種は参考値扱いとした)、②樹木周辺は局所流が生じるため、数値計算で算出されたせん断力よりも大きなせん断力が作用していた可能性があるこ

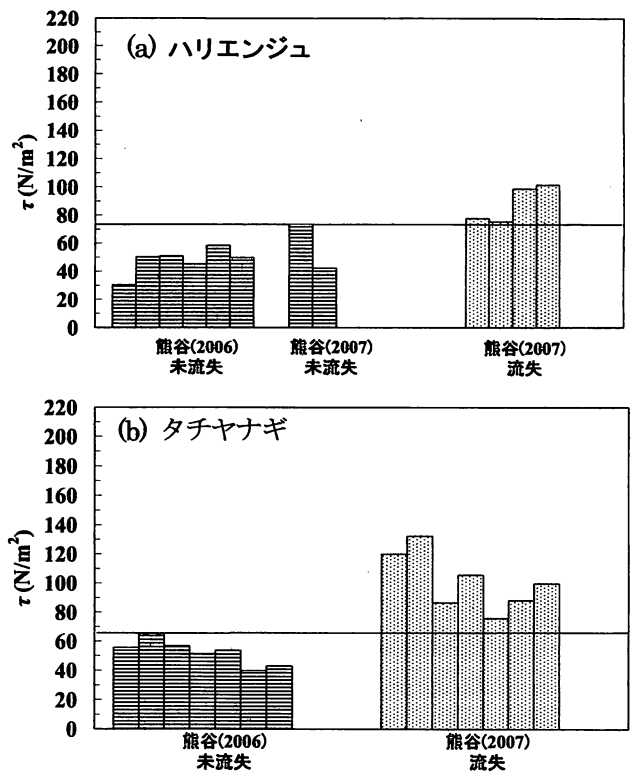


図-5 2006, 2007年の洪水解析より得られた各植物繁茂位置における底面せん断力 τ と流失実績との比較から得られる流失限界せん断力 τ_c (a) ハリエンジュ, (b) タチヤナギ

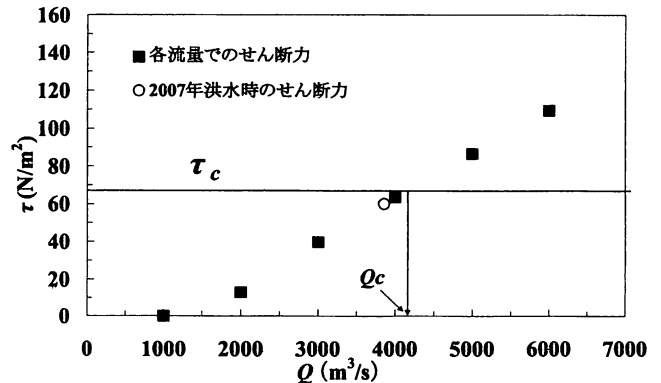


図-6 各流量 Q と砂礫州最高標高地点での底面せん断力 τ との関係 (τ_c は砂礫州最高標高地点に繁茂していたタチヤナギの流失限界せん断力意味する)

表-1 無次元掃流力 τ_{*50} , τ_{*84} とそれぞれの無次元限界掃流力 τ_{*c50} , τ_{*c84} との比較

対象河川	対象地点	I_b ***	植物種	τ_c (N/m^2)	d_{50} (cm)	τ_{*50}	τ_{*c50}	d_{84} (cm)	τ_{*84}	τ_{*c84}
荒川	熊谷大橋地点	1/375	ヤナギ	67	8.0	0.052*		10.5	0.039*	0.066
	熊谷大橋地点		ハリエンジュ	75	8.1	0.057*	0.06	10.0	0.047*	0.064
旭川**	祇園試験区	1/670	-	40	4.0~7.0	0.035~0.062		7.2~10.2	0.024~0.034	0.069~0.075

* 参考値, ** 眞田ら¹⁴⁾をもとに算出, *** 式(13)の計算では I_e を用いた

と、③樹木周辺の局所流で洗掘を受けることによって、樹木根茎の一部が支持力を失い流失しやすくなっていた可能性があること、④図-2(c)のAやBの箇所のように側岸侵食で生育基盤が流失することによって支持力を失い流失したこと、等が考えられる。

4. 結論

本研究では、熊谷大橋上流の砂礫州における樹木繁茂地点のせん断力および樹木特性を考慮した抗力モーメントの把握を試みた。荒川と河床材料特性の異なる多摩川において樹木の転倒限界を調査し、生育基盤の違いが破壊限界に与える影響を把握した。また、2007年9月の洪水で未流失の樹木が、実際に流失する規模の流量を検討した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- ① 本研究で検討した荒川の砂礫州では、従来用いられている転倒限界モーメント値よりも大きな抗力モーメント値を受けたにもかかわらず流失していない樹木が見られた。砂礫州のように河床材料の粒度が粗い場所にしっかりと根を張った場合、転倒限界は従来のものより大きくなる可能性がある。一方、多摩川の高水敷堆積層のように細かい粒度に繁茂した場合、従来の転倒限界モーメント値よりもかなり小さな抗力モーメント値で転倒することが確認された。
- ② 今回検討した砂礫州の最高標高地点に繁茂するタチヤナギが流失すれば、当該砂礫州は裸地に戻ると仮定した場合、裸地に戻すために必要な流量規模は約 $4200m^3/s$ であることがわかった。
- ③ 当該砂礫州に繁茂するタチヤナギおよびハリエンジュの流失限界せん断力は、それぞれ約 $75(N/m^2)$ 、 $67(N/m^2)$ であった。樹木繁茂地点の50%粒径が移動すれば樹木も流失すると定義した場合、どのケースにおいても τ_{*50} が τ_{*c50} 程度以上であり、実際に流失したという事実を概ね満足している。しかし、84%粒径の移動を流失の指標とした場合、 τ_{*84} が τ_{*c84} よりも小さい値となった。樹木の場合、局所流・側岸侵食も含めた検討が必要な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も多くの資料を提供頂いた。本研究の一部に河川整備基金の助成金を使用した。埼玉大学学部生(当時)の青野雅士君に解析を手伝って頂いた。記して謝意を

表します。

参考文献

- 1) (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。
- 2) 油川曜佑，渡邊康玄，安部修也：沙流川2003年8月洪水における樹木の倒伏状況から算定される流速，水工学論文集，第49巻，pp.583-588，2005。
- 3) 清水義彦，小葉竹茂機，吉川武志：出水によるハリエンジュ樹林地の破壊とその規模推定に関する考察，水工学論文集，第46巻，pp.953-958，2002。
- 4) Temple, D.M.: Tractive force design for vegetated channels, *Trans. ASAE*, 23(4), pp.884-890, 1980.
- 5) 田中規夫，八木潤順治，佐々木寧，福岡捷二：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，水工学論文集，第52巻，pp.649-654，2008。
- 6) 細田尚，長田信寿，村本嘉雄：移動一般座標系による開水路非定常流の数値解析，土木学会論文集，No.533/II-34，pp.267-272，1996。
- 7) Takemura, T. and Tanaka, N.: Evaluation of expansion threshold for *Typha angustifolia* in river, XXXI-IAHR, pp.1884-1893, 2005.
- 8) 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。
- 9) Andersen, A.G., A.S.Paintal and J.T.Davenport : Tentative Design Procedure for Riprap Lined Channels, *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Science, pp.129-130, 2001.
- 10) 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。
- 11) 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.
- 12) 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。
- 13) 河村三郎：土砂水理学1，森北出版，pp.65-69，2005。
- 14) 眞田淳二，浦上将人，渡辺敏，前野詩朗，藤塚佳晃：旭川下流部における礫河原の自立的回復に向けた実証的研究，河川技術論文集，第12巻，pp.409-414，2006。

(2008.4.3受付)