

砂礫州上における繁茂場所の相違が樹木の 洪水時流失限界に及ぼす影響

DIFFERENCE OF WASH-OUT CONDITION OF TREES DUE TO FLOODS WITH
RESPECT TO THE VEGETATED LOCATION ON GRAVEL-BED BARS

田中規夫¹・八木澤順治²・福岡捷二³

Norio TANAKA, Junji YAGISAWA 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 the wash-out condition of trees with different location on a gravel bar, the tree wash-out situation after two flood events (October 2006 and September 2007 flood) were investigated in the Arakawa River. 2D unsteady depth-averaged flow model was applied to the Arakawa River between 76 km to 82 km for evaluating two floods. The model expressed well the peak water levels of the floods. Threshold drag moments and shear stresses at bed for washing out the representative vegetation, *Salix subfragilis* and *Robinia pseudoacacia*, which grew on the gravel-bed bar in the upstream of the Kumagaya-Ohashi were evaluated using the numerical simulation results and the washed-out situation at the site. Shear stress was more suitable than the drag moment for expressing the wash-out situation. Trees near the bank side on the gravel-bed bar were washed out easily in comparison with trees on the flat area. When the wash-out condition of tree-type vegetation was evaluated by threshold of gravel movement around the vegetated location, the dimensionless shear stress of $d_{84}(\tau_{*84})$ can evaluate the wash-out situation more accurately than the dimensionless shear stress of $d_{50}(\tau_{*50})$.

Key Words : *threshold moment and shear stress for wash-out, threshold of gravel movement, Salix subfragilis, Robinia pseudo-acacia*

1. はじめに

2007年9月の台風9号による洪水は、荒川上流・中流区間において近年まれにみる大出水を引き起こし、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。

洪水時の樹木流失は主に1)抗力モーメント^{1), 2), 3)}あるいは、2)底面せん断力(無次元掃流力)^{4), 5), 6)}によって評価される場合が多い。しかし、両者の樹木流失メカニズムは異なる。抗力モーメントは根鉢の回転を引き起こすことによって樹木を流失させる。それに対して、底面せん断力は、樹木の生育基盤を流出させ、根と基盤とのせん断抵抗を減少させることによって樹木を流失させる。既往研究において、どちらの指標が樹木の流失を評価する際に適切なのかを示したものはない。そのため、樹木

流失の評価に適切な指標を把握する必要がある。

樹木の流失限界は繁茂場所の特性によって変化する。例えば、田中ら⁷⁾は生育基盤の相違が流失限界モーメントに及ぼす影響を調べており、堆積層に繁茂した樹木は、礫層に繁茂した樹木よりもはるかに小さなモーメントで転倒することを明らかにしている。また、田中ら⁷⁾は、2007年の洪水後に実施した多摩川における現地観測より、樹木の流失が生じやすい別の条件として、砂礫州上における繁茂場所の違いを指摘している。砂礫州の端部に繁茂した樹木(図-1(a))は、側方侵食による基盤の流出を伴うため、砂礫州の内部に繁茂した樹木(図-1(b))よりも流失しやすくなると考えられる。しかし、従来の研究において、繁茂場所の違いが樹木の流失限界に及ぼす影響を定量的に把握した例はない。

そこで本研究では、荒川中流域の砂礫州を対象とし、2006年10月出水、2007年9月出水における流失実績から、1)樹木流失の適切な評価指標を明らかにすること、2)繁茂場所による洪水時の樹木流失限界の相違を把握すること、を目的とする。

2. 解析方法

(1) 洪水流解析

細田ら⁸⁾による一般座標系を用いた平面流計算法に、Takemura and Tanaka⁹⁾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。

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

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uq_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vq_x}{J} \right) = -gh \left(\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_x}{\rho l} - \frac{f_x}{\rho l} +$$

$$\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u^2}h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v}h) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u^2}h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v}h)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uq_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vq_y}{J} \right) = -gh \left(\frac{\xi_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_y}{\rho l} - \frac{f_y}{\rho l} + \quad (2)$$

$$\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v}h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v^2}h) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v}h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v^2}h)$$

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)、 $-\overline{u^2}$ 、 $-\overline{u'v}$ 、 $-\overline{v^2}$: x-y座標系の水深平均レイノルズ応力(m²/s²)、 (f_x, f_y) : 単位面積当りの植生抵抗(N/m²)である。植生抵抗は田中・佐々木¹⁰⁾と同様、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、

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

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

$$F = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (5) \quad \alpha(z) = \frac{d(z)}{d_{BH}}, \quad \beta(z) = \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} \quad (6)$$

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における主幹幅(m)、 $\alpha(z)$: 樹形の相違(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、 $\beta(z)$: 葉層の付加抗力を表す付加係数である。 $\alpha(z)$ は樹木の画像解析から鉛直分布を算出し、 $\beta(z)$ は田中・佐々木¹⁰⁾と同様、葉層を1.25とした。なお、式(3)、(4)は沈水状態の式であり、抽水状態では $h=h_v(h_v$: 樹高(m))とした。

(2) 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(図-2(a))。対象とした砂礫州の植生分布を図-2(b)、(c)に示す。境界条件は2007年9月台風9号(6日16時から7日2時までの10時間)の実測

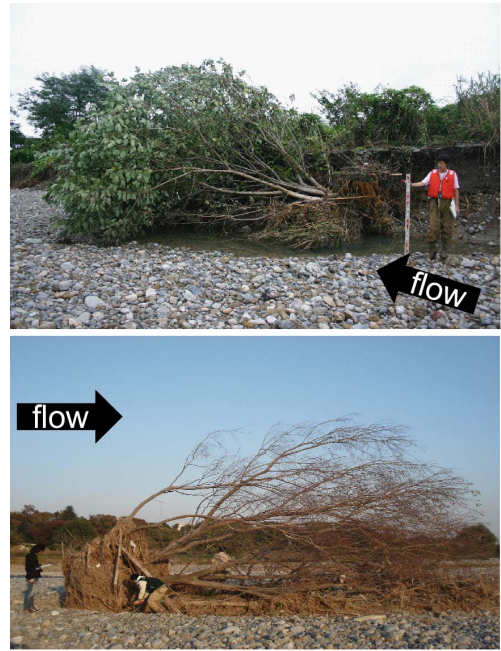


図-1 河道内における樹木の流失例
(a) 砂礫州端部における側方侵食を伴う流失
(b) 平坦河床上における流失

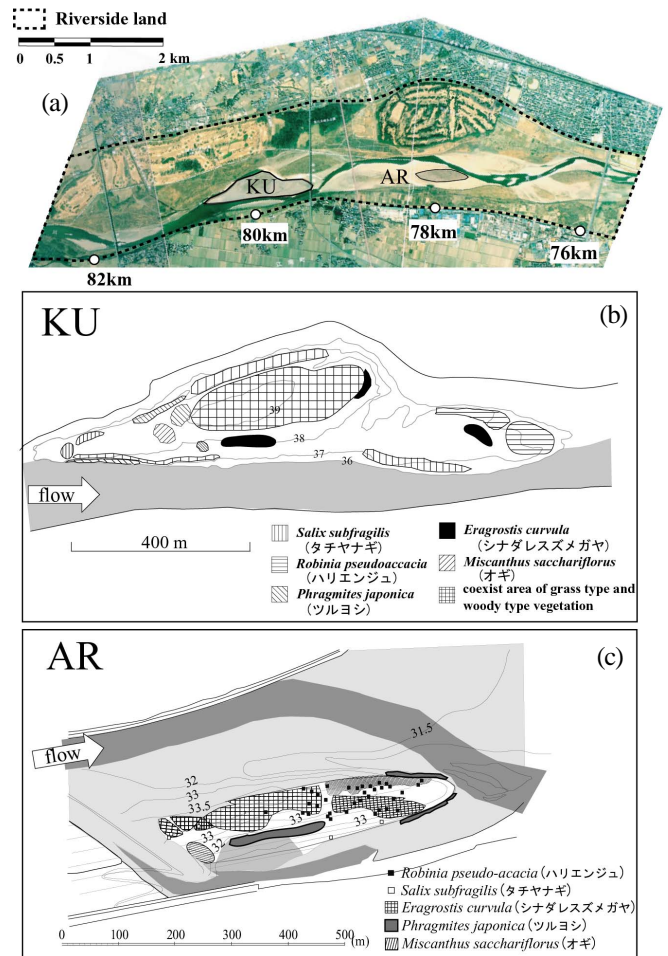


図-2 解析対象区間概要

- (a) 解析対象区間全景(航空写真; 2005年撮影)
(b) 熊谷大橋上流地点(KU)の植生分布図(2007.4作成)
(c) 荒川大橋上流地点(AR)の植生分布図(2007.4作成)

表-1 洪水解析モデルに考慮した草本類の繁茂特性および抗力特性

Species	Plant density m (Num. of plants / m^2)	Diameter of stem D_c (m)	Plant height h_v (m)	Drag coefficient $C_d^{12)}$		
				$h_v / h < 0.8$ (SC [†])	$0.8 < h_v / h < 1.0$ (SC [†])	$h_v / h > 1.0$ (EC ^{††})
<i>Eragrostis curvula</i> (シナダレスズメガヤ)	1*	0.3**	1.2	0.3	0.3 - 1.0	1.0
<i>Phragmites japonica</i> (ツルヨシ)	100	0.005	1.5	0.8	0.8 - 1.2	1.2
<i>Miscanthus sacchariflorus</i> (オギ)	100	0.005	2.0	0.8	0.8 - 1.2	1.2

† : Submergent condition †† : Emergent condition * : m of *E. curvula* is defined as number of clumps per m^2

** : D_c of *E. curvula* is defined as outer diameter of a clump

データとして、上流端には植松橋水位・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(図-3)。2006年出水の再現計算においては、熊谷水位観測所の実測水位がえられなかったため、当該地点における等流計算により推定した水位を境界条件として与えた。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、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、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。樹種については、タチヤナギ・ハリエンジュの2種のみを対象とした。それは、砂礫州上の樹木本数の約80%を占めている、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、という理由からである。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た。樹高、胸高直径に関しては各グリッド内の平均的な値を算出し洪水解析モデルに反映させた。また、解析対象区間内の砂礫州上には、表-1に示すような草本類も多く繁茂している。そのため、草本類の抵抗を以下の粗度係数評価式¹¹⁾

$$n_w = \sqrt{n_b^2 + \frac{C_d}{2g} a_w h_v^3} \quad (7)$$

を用いて洪水解析中で考慮した。ここに、 n_b : 河床の粗度係数($m^{-1/3}s$)(全グリッド同一に0.035を与えた)、 a_w : 単位体積あたりの投影面積(m^2/m^3)、 h_v : 各草本の高さ(m)、 C_d : 抗力係数である。本研究では、表-1に示すように各草本類の繁茂特性を設定し、粗度水深比(h_v/h)の値によって抗力係数を変化させた¹²⁾。

(3) 洪水時の樹木破壊評価指標の算出

a) 抗力モーメントおよび底面せん断力

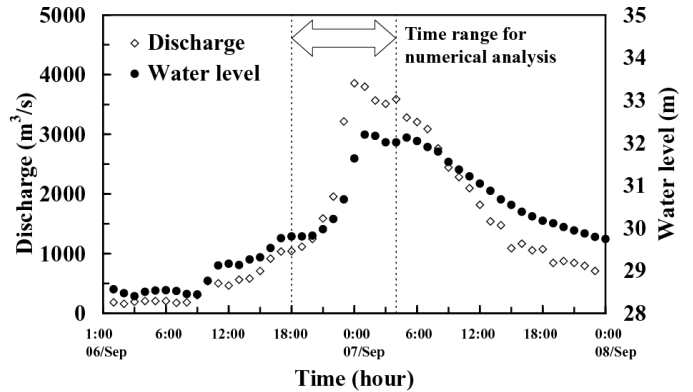


図-3 数値解析に用いた上流端(距離標82 km)の流量ハイドロおよび下流端(熊谷水位観測所: 76 km)の水位ハイドロ(2007年9月洪水)

解析対象である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¹⁰⁾と同様の方法で以下の式(8)より算出した。

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

式(8)は沈水状態の式であり、抽水状態では $h=h_v$ とした。また、式(2)より、底面せん断力 τ を以下の式を用いて算出した。

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} \quad (9)$$

b) 樹木繁茂地点の河床材料の無次元限界掃流力

樹木の流失を繁茂場所の河床材料の移動によって表現可能であるとした。本研究では、50%粒径(d_{50})と84%粒径(d_{84})を流失評価に用いた。 d_{50} 、 d_{84} それぞれの無次元限界掃流力 τ_{*50} 、 τ_{*84} を以下の式(10)より算出した。また、50%粒径の無次元限界掃流力 τ_{*c50} を0.06とし、 τ_{*84} を式(11)(河村¹³⁾)より算出した。

$$\tau_{*i} = \frac{H_{max} I_e}{S d_i} \quad (10)$$

$$\frac{\tau_{*c84}}{\tau_{*c50}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_{84}/d_{50})} \right]^2 \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} \right) \quad (11)$$

ここに、 d_i は樹木繁茂地点における i %粒径(m)、 S :土粒子の水中比重である。

3. 解析結果

(1) 2007年9月洪水の計算結果と痕跡水位の比較

最大流量時の解析区間における水深コンター、実際の流況を示す航空写真を図-4(a), (b)に示す。両者を比較すると、流れが乗り上げなかった砂礫州(図中のA部分)や、解析区間下流側で若干高水敷に乗り上げていること(図中のB部分)を再現していることがわかる。しかしながら、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。そこで、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。その結果を図-5に示す。痕跡水位は国土交通省荒川上流河川事務所によって、洪水後の流下物の分布状況をもとに右岸、左岸200m間隔で計測した結果を示している。一方、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、下流端付近では解析水位が痕跡水位を上回っている。これは本解析モデルが河床変動を考慮していないため、洪水時の河床高を再現できていないことなどが考えられ今後改善する必要がある。また、植生抵抗の有無が解析水位に与える影響を検討した。植生抵抗を考慮した場合、考慮しない場合に比べ、対象砂礫州(ARおよびKU)の上流側において若干の水位上昇(最大で15cm程度)がみられた。今回の洪水では図-4(b)に示すように、解析区間内において樹木繁茂量の多い高水敷にほとんど流れが乗り上げていない。そのため、植生抵抗の有無がそれほど水位に影響を与えなかったと考えられる。また、AR区間では、植生抵抗を考慮しない方が、痕跡水位に近い値を示していた。この原因として、今回の解析では河床変動を考慮していないため、植生抵抗を考慮した解析水位が、痕跡水位よりもやや大きくなったと考えられる。

(2) 抗力モーメントおよび底面せん断力による樹木の流失評価

2006, 2007年の2洪水時に樹木に作用した抗力モーメントと樹木繁茂地点に作用した底面せん断力との関係を図-6に示す。当該砂礫州における流失限界モーメント M_c の幅を、1)未流失であった樹木に作用していた抗力モーメントのうち最大値、2)流失した樹木に作用していた抗力モーメントのうち最小値、と定義すると、タチヤナギ、ハリエンジュともに抗力モーメント値によって流失条件を明確にすることは難しいことがわかる。ここで、胸高直径のみで決まる流失限界モーメント¹⁾との比較を行わずに流失条件を検討した。その理由として、1)生育基盤の河床材料によって胸高直径が同じでも M_c が大きく変化すること⁷⁾、2)図-6で対象とした樹木はそれぞれ河床材料が異なる生育基盤に繁茂しており、 M_c が異なると考えられること、からである。一方、底面せん断

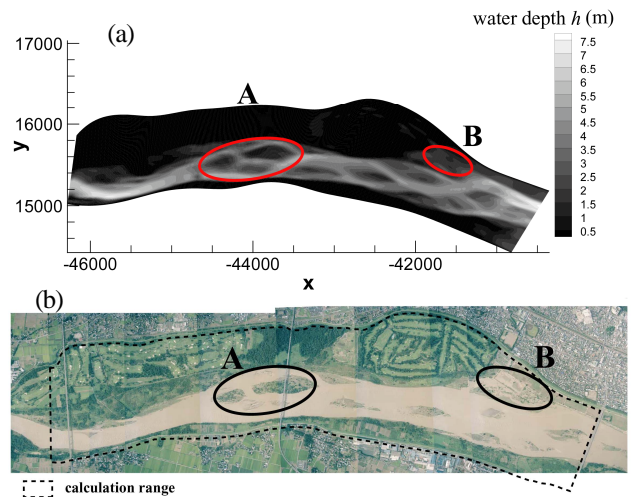


図-4 解析区間の最大流量時における流況

(a) 解析より得られた水深のコンター図(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) (b) 実際の流況(航空写真は国土交通省荒川上流河川事務所より提供)

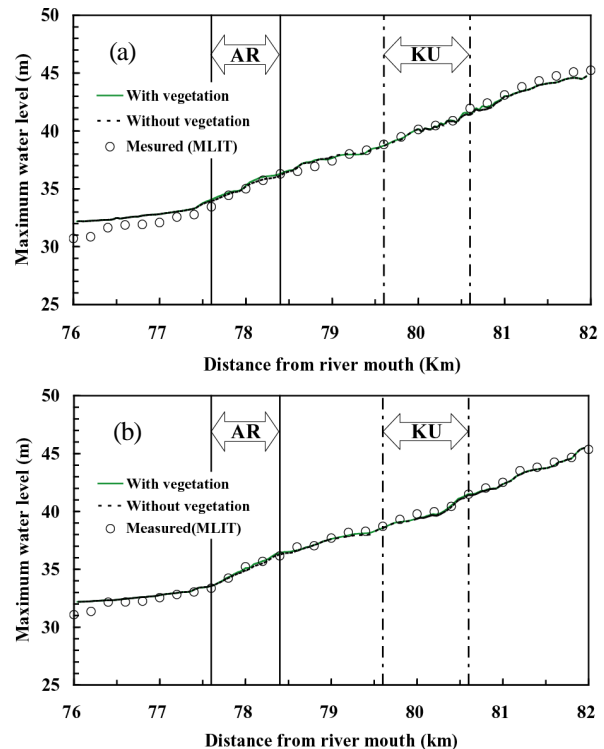


図-5 2007年9月洪水の解析区間における解析水位と痕跡水位(A.P.)との比較 (a) 左岸, (b) 右岸(AR; 荒川大橋地点の砂礫州範囲, KU; 熊谷大橋地点の砂礫州範囲)

力に関して、抗力モーメントと同様に流失限界値を定義すると、タチヤナギ、ハリエンジュの流失限界せん断力 τ_c の範囲はそれぞれ、 $70 \sim 77(N/m^2)$ 、 $59 \sim 69(N/m^2)$ である。ハリエンジュに関しては、 τ_c の幅が若干大きいものの、 τ_c によって両種の流失・未流失を概ね表現できることがわかる。流失限界せん断力 τ_c の幅は、流失限界モーメント M_c の幅と比較して、はるかに誤差が少ないことから、樹木流失の評価指標として底面せん断力が適切であると言える。これは、基盤条件が樹木の流失限界には大きく効いてくるため(Tanakaら¹⁴⁾)と考えられる。

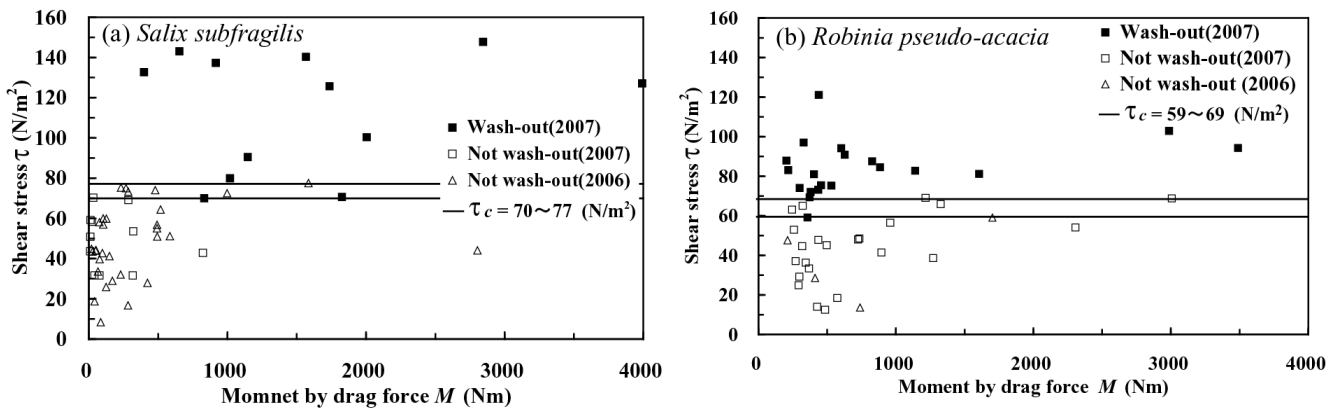


図-6 洪水時に樹木に作用した抗力モーメント M と底面せん断力 τ との比較

(a) タチヤナギ, (b) ハリエンジュ (図中の τ_c は流失限界せん断力であり, 各凡例の数値は対象洪水の生起年を示す)

□ Not Washed-out(2007) ■ Washed-out(2007) △ Not washed-out(2006)

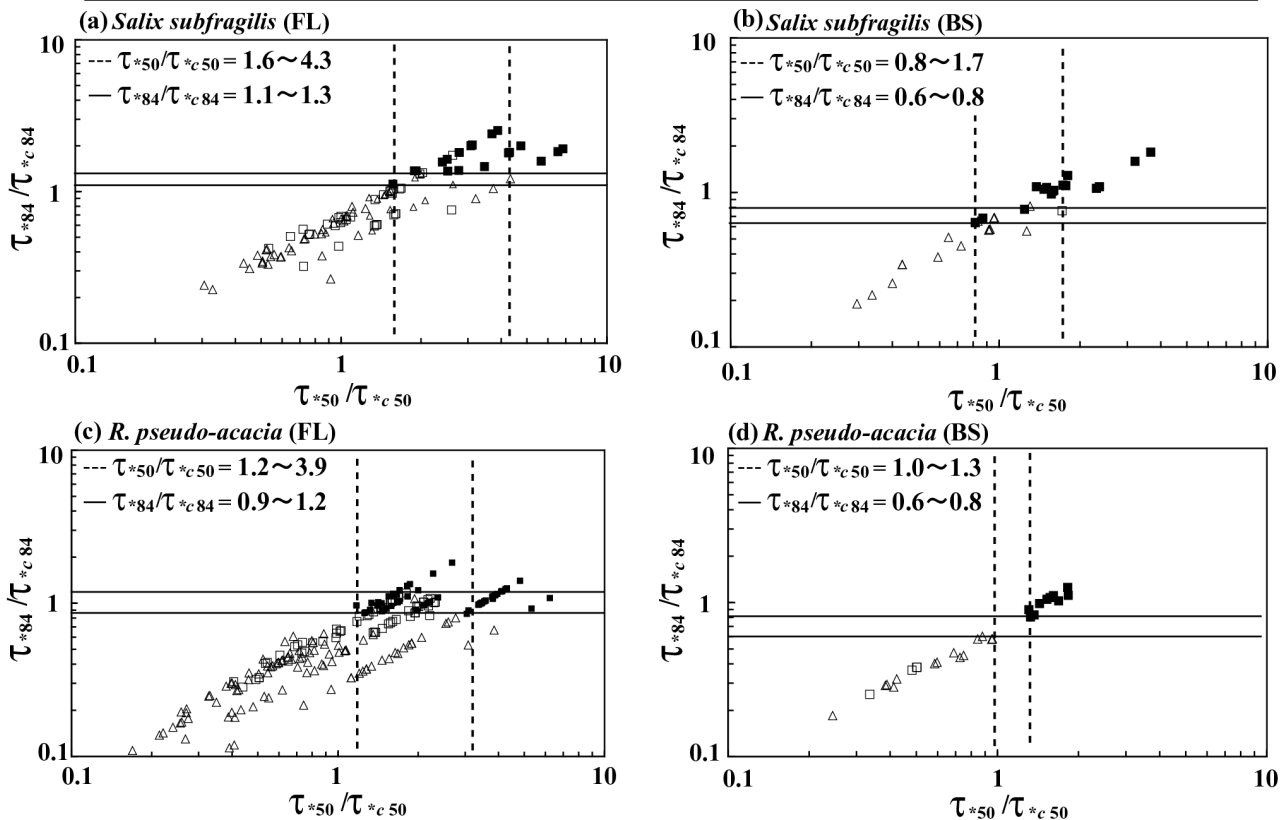


図-7 繁茂場所の相違が流失限界無次元掃流力におよぼす影響

(a) 砂礫州上の平坦な場所(FL)に繁茂したタチヤナギ, (b) 砂礫州上の端部(BS)に繁茂したタチヤナギ

(c) 砂礫州上の平坦な場所(FL)に繁茂したハリエンジュ, (d) 砂礫州上の端部(BS)に繁茂したハリエンジュ

(各凡例の数値は対象洪水の生起年を表す)

(3) 繁茂場所の相違が樹木の破壊限界に及ぼす影響

砂礫州の端部, 平坦部という河床材料の移動特性が大きく異なる場所に着目し, 繁茂場所の相違が樹木の破壊限界に及ぼす影響を把握した. タチヤナギとハリエンジュ繁茂地点の τ_{*50} / τ_{*c50} と τ_{*84} / τ_{*c84} の関係を図-7に示す. 1) 未流失であった樹木周辺の基盤に作用していた τ_{*50} / τ_{*c50} と τ_{*84} / τ_{*c84} の最大値, 2) 流失した樹木周辺の基盤に作用していた τ_{*50} / τ_{*c50} と τ_{*84} / τ_{*c84} の最小値でその限界値の幅を整理すると, τ_{*84} / τ_{*c84} のほうがその幅も小さく, 樹木の流失限界を表現するのにより適切なパラメータであること

がわかる. これは, 当該砂州のように粒径集団の幅が比較的大きい場合 ($d_{50}=2.0-10.4\text{cm}$, $d_{84}=5.3-14.9\text{cm}$, $d_{84}/d_{50}=1.6-2.8$)には, 大粒径の礫によりアーミングが起こり, 樹木周辺の河床低下に限界がある場合が存在する. そのため, τ_{*50} / τ_{*c50} の方が τ_{*84} / τ_{*c84} よりも限界値の幅が大きくなったと考えられる. さらに, 図中に示してあるように, タチヤナギの場合で $\tau_{*84} / \tau_{*c84} = 1.1 \sim 1.3$ (砂礫州上: 端部ではない), $\tau_{*84} / \tau_{*c84} = 0.6 \sim 0.8$ (端部), ハリエンジュの場合で $\tau_{*84} / \tau_{*c84} = 0.9 \sim 1.2$ (砂礫州上: 端部ではない), $\tau_{*84} / \tau_{*c84} = 0.6 \sim 0.8$ (端部)となる. この

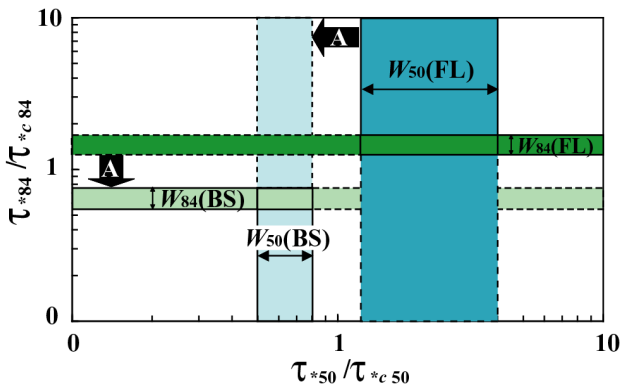


図-8 繁茂場所の違いが流失限界に及ぼす影響を表す模式図 ($W_{50}(FL)$, $W_{50}(BS)$ はそれぞれ、平坦部、端部に繁茂した樹木のうち、未流失であった樹木周辺の基盤に作用していた τ_{*50}/τ_{*c50} の最大値と、流失した樹木周辺の基盤に作用していた τ_{*50}/τ_{*c50} の最小値の幅である。 $W_{84}(FL)$, $W_{84}(BS)$ は W_{50} と同様の定義で、84%粒径に関するものである。図中の矢印Aは、端部と平坦部の流失限界値の範囲が変化することを示している。)

ことから、砂礫州上端部の樹木は内部の樹木に比べて流失限界値が小さく、区別する必要があることを示している。実際に2007年9月の台風9号による出水では、多摩川においても流失の多くは端部に繁茂した樹木であったことが確認されている(田中ら⁷⁾)。ハリエンジュのほうがタチヤナギよりもやや小さい限界値を示しているのは、タチヤナギの根系は根が深く張るのに対し、ハリエンジュは浅根系であるためと考えられる。図-8に、図-7の結果を整理したものを示す。 τ_{*50}/τ_{*c50} , τ_{*84}/τ_{*c84} という異なる粒径の移動限界のうち、どちらが植物の流失を評価できるかに関しては、限界値自体が幅を持ち、 $W_{50} > W_{84}$ であることから、 τ_{*84}/τ_{*c84} の方が適切であると判断できる。また、その幅は矢印Aが示すように砂礫州端部(BS)、平坦部(FL)によって変化するということがわかった。

5. おわりに

本研究では、砂礫州の端部、平坦部という河床材料の移動特性が異なる場所に着目し、洪水時の樹木の流失限界値の相違を明らかにした。得られた結果を以下に示す。

2006, 2007年の洪水時に樹木に作用した抗力モーメント、樹木繁茂地点における底面せん断力と流失実績を比較したところ、底面せん断力の方が樹木の流失を評価できる。

樹木流失を繁茂地点の河床材料の移動で表現した場合、50%粒径の移動限界で整理するよりも、84%粒径の移動限界で整理した方が、流失を評価できる。対象とした熊谷中流域の砂礫州では、平坦部より、側岸部の方が小さい流失限界値で流失する。

繁茂場所による流失限界の相違を考慮することで、砂礫州上の樹木群の流失範囲を正確に把握できる可能性があると考えられる。

謝辞：国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所に資料を多数提供して頂いた。平成20年度河川整備基金・助成事業(代表：佐々木寧)の一部を使用した。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.147-171，1999.
- 2) 茂木信祥，須賀堯三，池田裕一：河道内高木群落の形成過程，水工学論文集，第44巻，pp.837-842，2000.
- 3) 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.
- 4) 藤田光一，李參熙，渡辺敏，塚原隆夫，山本晃一，望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション，土木学会論文集，No.747/ -65，pp.41-60，2003.
- 5) 末次忠司，藤田光一，服部敦，瀬崎智之，伊藤政彦，榎本真二：礫床河川に繁茂する植生の洪水攪乱に対する応答，遷移および群落拡大の特性-多摩川と千曲川の礫河原を対象として-，国土技術政策総合研究所資料，第161，pp.1-6，2004.
- 6) Egger, E., Benjankar, R., Davis, L. and Jorde, K. : Simulated effects of dam operation and water diversion on riparian vegetation of the lower bois river IDAHO, USA, 32nd IAHR congress(CD-ROM), 2007.
- 7) 田中規夫・八木澤順治・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.649-654，2008.2.
- 8) 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/ -34，pp.267-272，1996.
- 9) Takemura, T. and Tanaka, N.: Evaluation of expansion threshold for *Typha angustifolia* in river, XXXI-IAHR, pp.1884-1893, 2005.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Tanaka, N. Ito, S. and Yagisawa, J., Flow structures and sedimentation characteristics around colony-type vegetation at flood events, 16th IAHR-APD & 3rd IAHR-ISHS, 2008 (in press)
- 13) 河村三郎：土砂水理学1，森北出版，pp.65-69，2005.
- 14) Tanaka, N. and Yagisawa, J., Differences of Tree-breaking Pattern and Breaking Moment by Floods with Different Tree Age and Substrate Condition under Two Flood Disturbances, Advances in Hydroscience and Engineering Vol.VIII (CD-ROM), 2008.

(2008.9.30 受付)