

高水敷上に生育するヤナギの抵抗

RESISTANCE OF WILLOW ON FLOODPLANE TO THE FLOW

油川 曜佑¹・鈴木 優一²・渡邊 康玄³

Yousuke ABURAKAWA, Yuichi SUZUKI and Yasuharu WATANABE

¹正会員 修士(地球環境科学) 株式会社北開水工コンサルタント(〒062-0052 札幌市豊平区月寒東2条20丁目5番10号)

²正会員 北海道開発局石狩開発建設部江別河川事務所(〒067-0074 江別市高砂町5)

³正会員 博士(工学) 独立行政法人北海道開発土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

It is very important to make clear the influence of channel vegetation to the flow for river improvement works. Many researches on channel vegetation are conducted and many valuable results are reported up to now. However, most of them are mainly indoor hydraulic experiments in which cylinders are used as woods for simplification.

Therefore real willows which were 2m in height and 2cm in diameter were used in the hydraulic experiments of this research. The projected area to the flow of a willow is reduced when a branch bends in the flow. The drag coefficient of willow was estimated as 0.62 without considering the reduction of projected area. This value of the drag coefficient is useful for the river planning of actual rivers.

Keywords: drag coefficient, channel vegetation, non-uniform flow, willow

1. はじめに

多様な生態系の形成上、河道内の樹木の存在は重要な位置を占めている。一方で、洪水時において樹木は流水に対する抵抗要素となり水位の上昇をもたらすため、高水敷上に存在する樹木とこれに対する水理現象との関係を把握することは治水に極めて重要な事項である。このことから、これまで開水路中に樹木を含む植生がある場合について様々な角度からの解析が行われてきた¹⁾。しかしながら、これらの多くは円柱を樹木などに見なした室内の簡易模型実験が主であり、かなり理想化された条件での検討となっている。また、実河川での洪水時の観測なども報告されているが、種々の現象が複合的に生じており、樹木のみの影響を明確にするには至っていない。

2. 本研究の目的

これまでに、自然の樹木を用いた流水抵抗についての報告がいくつか見られる。例えば、福岡らは開水路中に樹幹を流れ方向と平行に設置した1本の樹木(竹)に作

用する抵抗係数の計測を行い(枝の密度 λ) = (葉を無視した樹木の実質体積) / (樹木による流れの影響体積)と定義することで、密生度 λ と抗力係数との関係を見出している。その結果、樹木の抗力係数は流水中における枝間の相互作用の大きさに起因しているとしている²⁾。

また、石川らは樹木の樹冠に着目しカワヤナギを用いて葉の抗力の葉の枚数に対する比例関係を見出し、木部および葉の一枚一枚の抵抗が線形重ね合わせにより表現できると推測している³⁾。これらの知見より、対象となる樹木の枝葉の状況や密生度を検討することで抵抗係数を決定する必要がある。しかしながら、実際の現場においては密生度を厳密に決定することは極めて困難であり、現地への適用にはより実際に即した把握が望まれる。

そこで本研究では多くの高水敷での植生が見られる叢生状のヤナギ樹木を用いて写真から判読できる幹・枝・葉、全てを含めた総投影面積を用いることで樹木抵抗を評価している。また、高水敷の粗度係数の推定を行い、特に樹木内では樹木密度との関係についての検討を行っている。さらに得られた値を不等流計算に反映させ高水敷の水位予測の評価を行っている。

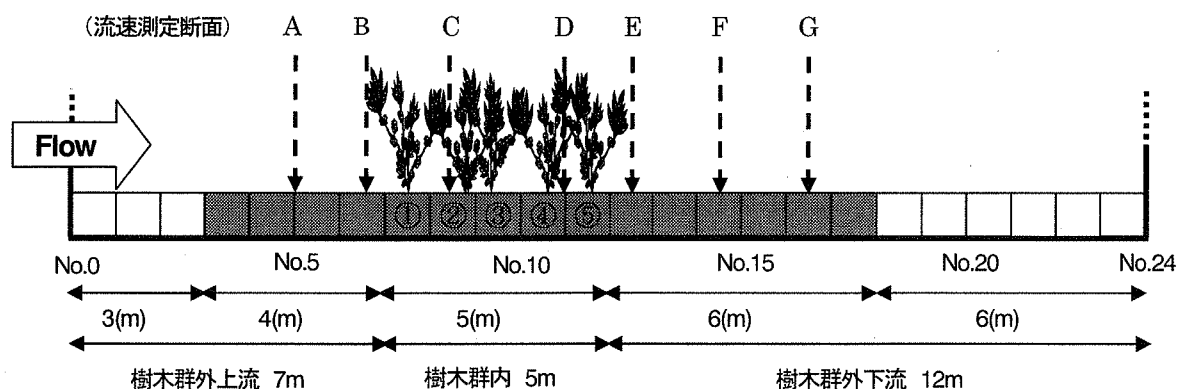


Fig.1 実験水路縦断面図

3. 実験概要

(1) 実験水路

北海道開発土木研究所が有する延長 24m、水深 1.2m、幅 1.0m の高速循環水路を用いて洪水流に対するヤナギ群の抵抗特性についての実験を行った。実験水路の最大流量は $3.0\text{m}^3/\text{s}$ である。Fig. 1 に用いた実験水路の模式図を示した。高さ 40～50cm のヨシやスズメノカタビラ、アワダチソウなどの草本類が下草として、かつ樹高約 2m 直径約 2cm の叢生状のヤナギ群が繁茂している試料を北海道開発土木研究所石狩実験場内から、根の部分の土壌をできる限り覚乱しないように深さ 50cm で縦横それぞれ 1m の大きさに切り取り実験水路の No.7～No.12 に設置した。なお、各 No. は水路上流端からの距離 (m) に対応している。また No.3～No.7、No.12～No.18 に下草として存在している草本類のみが繁茂している試料を同様に設置した。それ以外の No.0～No.3、No.18～No.24 では植生を配置していないためステンレス板の底面である。Photo.1 に植生を設置した水路の状況を示した。

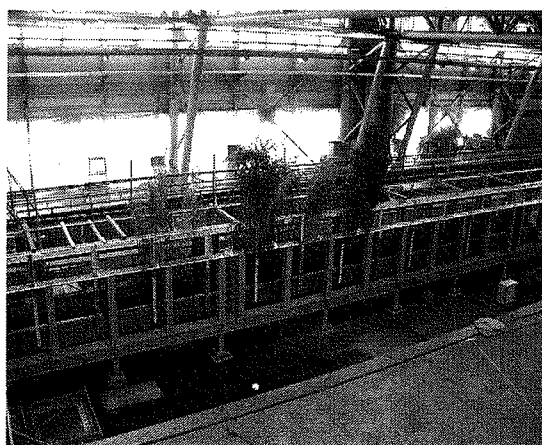


Photo.1 実験水路

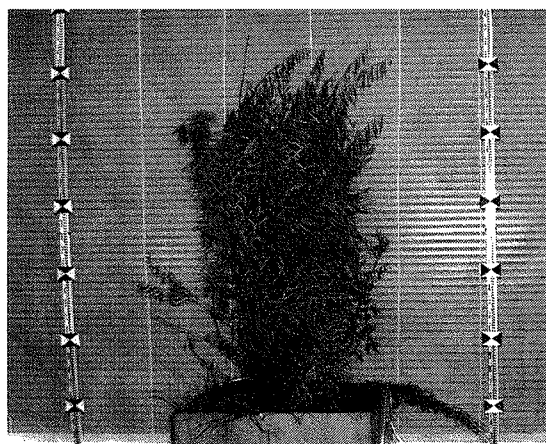


Photo.2 用いた樹木の例

(2) 測定項目

本実験においては流量 $Q \approx 1.0\text{m}^3/\text{s}$ とし、水深の測定および 3 次元電磁流速計を用いた流速の測定を行った。水深の測定は No.1～No.24 について行った。測定方法は高速循環水路の側壁に目盛りを付し、目視により読み取った。また流速は Table. 1 に示したように、流速測定断面 A～G で水深方向に数点測定した。全ての流速は高速循環水路の幅 1m に対し、右岸から 0.1 m (右岸)、0.5m (中央)、0.9m (左岸) の 3 測線で測定した。流速の測定間隔は 2 秒で 1 分間の測定値を時間平均して用いた。

(3) 樹木投影面積撮影

実験水路に設置する樹木の投影面積 (流水方向から見た断面積) を水路設定前に写真撮影により計測した。計測に際しては写真測量上最も計測精度が向上するように画像のラップ率を 60% に設定して撮影した。Photo.2 に

Table.1 流速測定断面

流速測定断面	上流からの距離 (m)	河床からの距離 (m)
A	5.0	0.1, 0.3, 0.5, 0.7
B	6.5	
C	8.5	
D	11.0	
E	12.5	0.1, 0.3, 0.5
F	14.5	
G	16.5	

用いた樹木の 1 例を示した。撮影された写真はオルソ画

像にした後、幹、枝、葉を含めた投影面積を計測した。

Table.2 に実際に用いた各樹木の状況を示した。

また通水時において樹木の倒伏が見られる場合の面積 (A') は倒伏以前の面積 (A) に倒伏角度 θ の正弦 ($\sin \theta$) を乗ずることにより算出した ($A'=A \times \sin \theta$)。

4. 実験結果

(1) 通水時における樹木の挙動

通水後間もなく流量 $0.75\text{m}^3/\text{s}$ で最上流部の樹木 (樹木ブロック 1) が傾き始め、流量 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ のときは完全に倒伏し、水没していた。ヤナギはそのままの形状で倒伏するのではなく広がった枝振りが浸水するに従い、1 点に集中し縮小することが確認された。他のヤナギは通水時間が長くなるに従い $5^\circ \sim 10^\circ$ とわずかながら倒伏したが、水没することはなかった。本解析では最上流部のヤナギのみが水没し、他の樹木の倒伏角度が一定になったときの投影面積を用いて解析を行った。

(2) 水位縦断

Fig.2 に水位縦断図を示した。水面勾配は樹木が存在する縦断距離 7m から 12m にかけて大きく変化しており、上流側の水位は樹木群の影響により堰きあがった形となっていることがわかる。

(3) 樹木群内外における流速分布

流速測定は流量が $1.0\text{m}^3/\text{s}$ になり、また流水により土壌の洗掘・堆積といった河床状態の変化がないことを確認し樹木群内外における各断面での実測の流速を水深方向に測定した。各水深において 1 分間の測定値を時間平均した流速の左岸、中央、右岸における値を平均しその水深での平均流速 (m/s) とした。各水深に対してこの操作を行い流速分布を得た。この流速分布を用いて算出した流量は、設定流量にほぼ等しいことを確認している。Table.3 に各断面における諸元を示した。

(4) 樹木の抗力係数 C_d および河床の抵抗係数 C_b の推定

(a) 樹木群外流速分布理論式と実測値の比較

水深で無次元化された高さ z における樹木群外での摩擦速度 u_* で無次元化された流速分布は渦動粘性係数 ($\varepsilon = (\kappa/6)u_*h$, ここで κ : カルマン定数, h : 水深、である。) を水深方向で一定と仮定すると (1) 式で表すことができる⁴⁾。

$$u_0 = -\frac{3}{\kappa}z^2 + \frac{6}{\kappa}z + \frac{1}{\sqrt{C_b}} \quad (1)$$

ここで、 C_b は河床の抵抗係数である。この式から水深方向に積分を行うと平均流速は (2) 式となる。

$$\langle u_0 \rangle = \frac{2}{\kappa} + \frac{1}{\sqrt{C_b}} \quad (2)$$

Table.2 各樹木の状況

樹木ブロック	根からの枝本数(本)	平均樹径(cm)
1	5	2.3
2	8	2.1
3	4	3.3
4	6	2.1
5	5	4.0

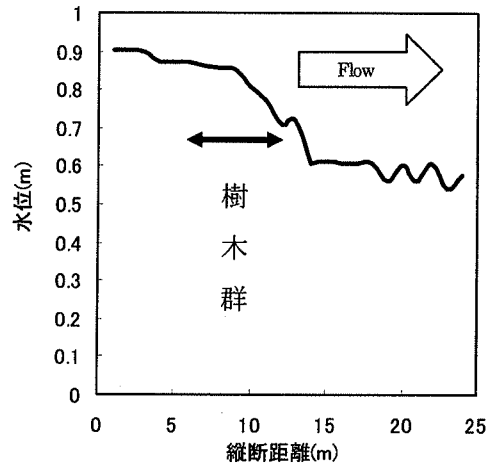


Fig.2 水位縦断図

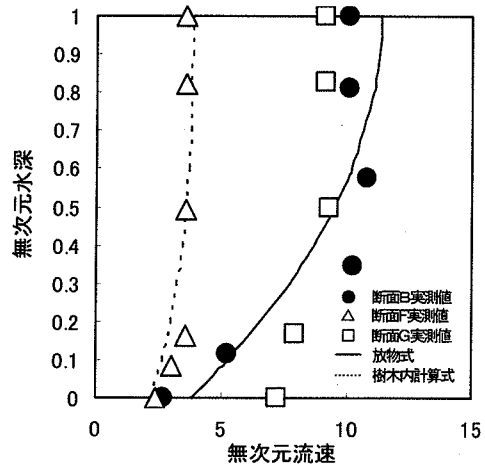


Fig.3 樹木群外流速分布

ここで実測における平均流速と比較することにより C_b を求めることとする。本解析において、断面 A は水路の上流端の影響を直接受けていると考え、断面 B での平均流速を用いた。その結果、河床の抵抗係数値 $C_b=0.068$ を得た。Fig.3 に計算値および代表的な分布形を無次元で比較した。各断面における草本類による被覆状態は若干異なるがここでは一定の値と仮定した。このとき下流側樹木群外において、特に断面 E,F では、分布形が鉛直方向に一樣な形となったことから樹木群の影響を強く受けていると考えられる。このことから測定断面 E,F は樹木群外であるにもかかわらず (1) 式であらわす事ができないと判断される。これらの断面での流速分布は後述する樹木群内での計算式に近似していることがわかる。また、断面 G は B における分布と E,F における分布の中間的な

Table.3 各断面における諸元

流速測定断面	上流からの距離(m)	水面勾配	水深(m)	摩擦速度(m/s)	無次元平均流速	平均流速(m/s)
A	5	0.0025	0.870	0.146	8.63	1.26
B	6.5	0.0025	0.865	0.146	8.84	1.29
C	8.5	0.0395	0.853	0.575	2.12	1.22
D	11	0.0395	0.800	0.556	2.32	1.29
E	12.5	0.0395	0.715	0.526	2.83	1.49
F	14.5	0.0395	0.608	0.485	3.42	1.66
G	16.5	0.0063	0.605	0.193	8.76	1.69

ものとなっていることから樹木の流速分布の影響は樹木群下流において断面G付近より上流までと考えられる。

(b) 群内流速分布理論式と実測値の比較

樹木群内での流速分布式を表す式を渡邊は(3)式で表している⁵⁾

$$u_i = \sqrt{\frac{2}{A}} \left[1 + \frac{2}{\chi^2} \{ c_0 \exp(\chi z) + c_1 \exp(-\chi z) \} \right] \quad (3)$$

ここで各記号は以下の通りである。

$$A = ac_d \quad K = \frac{\kappa}{6} \quad \chi = \left(\frac{2A}{K^2} \right)^{1/4}$$

$$\alpha = 16c_b \{ \exp(2\chi h_i) + 1 \}^2$$

$$\beta = 8\chi [C_b \chi \{ \chi(h_i - 1) \exp(\chi h_i) + 2 \}$$

$$\{ \exp(2\chi h_i) + 1 \} + A \{ \exp(2\chi h_i) - 1 \}]$$

$$\gamma = \chi^4 [C_b \{ \chi(h_i - 1) \exp(\chi h_i) + 2 \}^2 + 2A(h_i - 1) \exp(\chi h_i)]$$

$$c_0 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha}$$

$$c_1 = c_0 \exp(2\chi h_i) - \frac{\chi^3}{4} (1 - h_i) \exp(\chi h_i)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{2}{A}} \left[1 + \frac{2}{\chi^2} \{ c_0 \exp(\chi z) + c_1 \exp(-\chi z) \} + \frac{\chi^2}{4} h_i (h_i - 2) \right]$$

また、 a :無次元樹木密度($=\tilde{d} \tilde{l} / \tilde{s} \tilde{l}$)、 $\tilde{d}$:樹木の直径、 $\tilde{s}$:樹木の横断方向間隔、 $\tilde{l}$:樹木の縦断方向間隔、 h_i :樹木の無次元高さ($=\tilde{h}_i / \tilde{h}$)、 $\tilde{h}$:水深、 $\tilde{h}_i$:樹木群高さ(樹木群の高さが水深を超える場合は水深である)。Fig.4に示したように樹木群内である流速測定断面C,Dでの実測流速分布と一致するように C_d を未知数とし、トライアンドエラーで変化させると両断面において $C_d \doteq 0.62$ という値が得られた。Fig.3の計算式はこの値を用いた。また、このとき断面C,Dにおけるレイノルズ数(Re) ($Re = U \times H / \nu$ 、 U :平均流速、 H :平均水深、 ν :水の動粘性係数)を求めた結果、双方において $Re \doteq 1.0E(+6)$ となった。

林らは風洞を用いモミジ、ケヤキ、シラカバ、ヒノキを模擬した全葉の無風時における投影面積を使用し、算出した C_d と Re に対する変化特性を示している⁹⁾。その結果、いずれの樹木においても Re の増加に伴い C_d が小さくなることを確認している。この原因として、主流速度 U の増加に伴う投影面積 A_i の縮小を考えている。

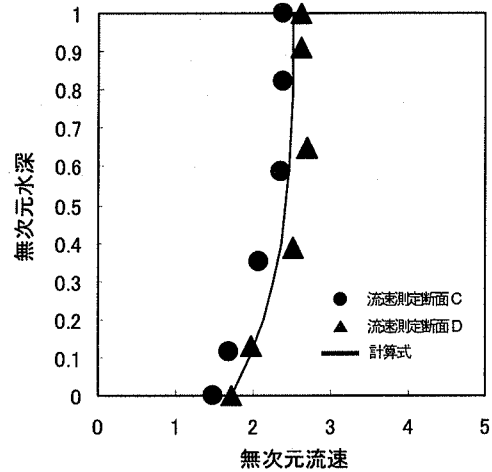


Fig.4 樹木群内流速分布

特に $Re=1.0E(+6)$ においてヒノキでは $C_d \doteq 0.80$ 、モミジでは $C_d \doteq 0.38$ 、ケヤキでは $C_d \doteq 0.43$ 、シラカバでは $C_d \doteq 0.59$ という値を得ている。これらの知見から今回の解析において抗力係数が一般に言われているよう1.0~1.2よりも小さくなった理由は、流れにおける投影面積の縮小を考慮せずに、通水前の状態で求めたためと考えることができる。つまり、一般に物体の受ける抗力は(4)式であらわす事が出来る。

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_d u^2 \quad (4)$$

通水前の投影面積及び抗力係数を A' 、 C_d' 、また通水中の投影面積及び抗力係数を A 、 C_d とすると、通水中は広がった葉や枝振りが縮小するため、総投影面積が縮小する($A' > A$)。樹木の受ける抗力は等しいため、 $A \times C_d = A' \times C_d'$ となる。その結果、見かけ上、通水前より通水中の抗力係数が大きくなる($C_d > C_d'$)と結論付けることができる。すなわち実際に樹木群内の流れを予測する場合では、樹木の投影面積は流水が存在しない場合に計測されるのが一般的であることより、樹木の抗力係数は見かけ上の C_d' を用いる必要がある。

(5) 底面粗度の評価

河床抵抗を河床の抵抗係数 C_b で評価したが、河川計画では一般にマンニングの粗度係数を用いるため、河床の抵抗をマンニングの粗度係数で表現すると(5)式である⁹⁾。

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (5)$$

ここで樹木の存在しない場合の摩擦係数 C_f は (6) 式

$$C_f = \left(\frac{2}{\kappa} + \frac{1}{\sqrt{C_b}} \right)^{-2} \quad (6)$$

となることより、河床粗度係数は (7) 式

$$n_0 = h^{1/6} \cdot \left(\frac{2}{\kappa} + \frac{1}{\sqrt{C_b}} \right)^{-1} \cdot g^{-1/2} \quad (7)$$

で表現することができる。その結果、測定した水深および河床の抗力係数 C_b を (7) 式に代入することにより各断面での水草のみの底面粗度 $n_0 = 0.034$ が得られた。ここで樹木内では樹木の抗力以外に流速分布の変化に伴う粗度係数の変化を考慮する必要があり⁴⁾、樹木群内底面粗度係数の算出式を (8) 式で与えた。

$$n_t = n_0 \left(\frac{2}{\kappa} \sqrt{C_b} + 1 \right) \frac{\left\{ \sqrt{\frac{2}{aC_d}} + \frac{\kappa}{3aC_d} C_0 [1 + \exp(2\chi)] \right\}}{\left\{ \sqrt{\frac{2}{aC_d}} - \frac{\kappa}{3aC_d} C_0 [1 - \exp(2\chi)] \right\}} \quad (8)$$

その結果 Fig.5 に示したように樹木の密度の増大とともに樹木内底面粗度係数も増加する傾向にあることが確認された。

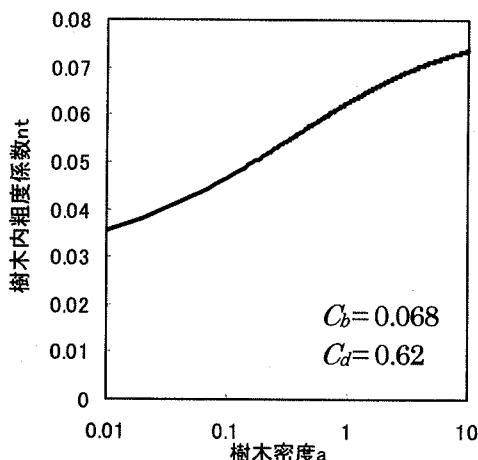


Fig.5 樹木密度と樹木内底面粗度係数との関係

(6) 不等流計算による水位予測

樹木の存在の有無によって水深方向流速分布が大きく異なる。この影響を等流を仮定した渡邊らの方法を用いて不等流計算に取り込み、実験結果との比較を行った。(9) 式は用いた不等流式の差分表示である⁷⁾。

樹木内の全抵抗は樹木内底面粗度と樹木抗力の和で表される。今回用いる不等流計算では、両辺の第 5 項で樹木の抗力を考慮しているため、用いる n は (8) 式の関係より得られる樹木内底面粗度値を用いるべきである。

$$\begin{aligned} z_2 + h_2 + \frac{Q^2}{2gB^2h_2^3} + \frac{n_2^2 Q^2 \Delta x}{2B^2h_2^{10/3}} + \frac{a_2}{2gh_2} C_d \left(\frac{Q}{Bh_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \Delta x \\ = z_1 + h_1 + \frac{Q^2}{2gB^2h_1^3} + \frac{n_1^2 Q^2 \Delta x}{2B^2h_1^{10/3}} + \frac{a_1}{2gh_1} C_d \left(\frac{Q}{Bh_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \Delta x \end{aligned} \quad (9)$$

(a) 樹木群のみを考慮したときの不等流計算

本実験においては水路縦断距離 7m~12m に樹木が繁茂しているため、不等流計算において、この範囲における樹木密度を考慮し実測値と比較した。

Fig.6 に示した不等流計算 (パターン A) は、樹木の総投影面積を樹木が繁茂する区間の底面積で除した平均密度を用いたときのものである。この時、平均密度 $a=0.49$ 、樹木内底面粗度 $n=0.057$ である。

しかしながら、実測値と計算値では一部差異が見られた。この原因として、樹木が樹木群外の流速に変化を及ぼしていることが考えられた。

(b) 樹木群外の影響を考慮した不等流計算

前述したように樹木群直下流側の流速分布が樹木群外であるにも関わらず鉛直方向に一樣化したことから、流速測定断面 F 水路縦断距離 14.5m において最下流に存在する樹木地点での水深の約 3 倍まで下流側に延長した区間まで樹木の影響により流速が変化していると判断できる。そこで不等流計算 (パターン B) において樹木総投影面積を樹木群が影響する範囲の水路の底面積で除することにより算出し直した平均密度を用いた結果を同様に Fig.6 に示した。この結果より樹木群外において樹木の影響を受けている区間を考慮することによって不等流計算と実測値との一致が見られた。この時、平均密度 $a=0.28$ 、樹木内底面粗度 $n=0.054$ である。これらの結果より 1 次元不等流計算により洪水時の水位予測を厳密に行うには、樹木の影響を受ける範囲を考慮する必要がある。

しかしながら、実河川においては対象区間が長いから、樹木が樹木群外の影響により流速に変化を及ぼす範囲は相対的に小さいものとなることから、このことは実際上考慮する必要はないものと考えられる。

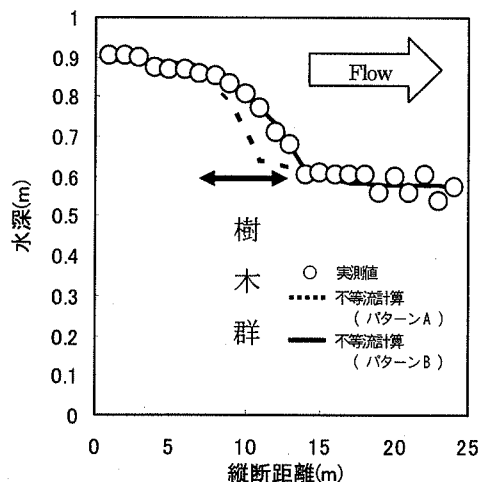


Fig.6 不等流計算による水位予測

(7) 倒伏限界モーメント

流水の作用による樹木の倒伏は、流れに起因する外力モーメントが樹木の倒伏限界モーメントより大きくなることによって起きる。渡邊らは単幹状のヤナギとケヤマハンノキを対象にして倒伏試験を行うことで平常時に行われている試験結果による倒伏限界値が実際の洪水時にどのように変化するかを把握する目的で、倒伏限界値に影響を及ぼす要因について検討しており、その中で樹径 d (cm) と倒伏限界モーメント M_c (kgfm) の関係を得ている⁸⁾。この倒伏モーメント M_c (kgfm) を式 (10) として表記している。

$$M_c = \frac{2}{7} \rho C_D u^2 d h^2 \quad (10)$$

ここで、 M_c (kgfm): 倒伏限界モーメント、 u (m/s): 流速、 h (m): 水深、また ρ は水の密度 (1000 kg/m³)、 C_D は抗力係数である。本実験では先述した通り倒伏が見られた樹木ブロック 1 の倒伏モーメントおよび樹木ブロック 2、5 での外力モーメント M を求めた。ここで外力モーメント M は (10) 式を用いている。それぞれの値は Table. 3 に示した通り樹木ブロック 2 では流速測定断面 C、また樹木ブロック 5 では流速測定断面 D での値としている。また樹木ブロック 1 は流量 0.75 m³/s での倒伏が確認されておりその時の値水深 $h=0.55$ (m)、投影面積 $A=0.237$ (m²)、流速に関しては算定により平均流速 $u=1.36$ (m/s) とした。本実験での樹木は叢生状であり、幹・枝・葉全てを含めた総投影面積 (A) を用いると式 (10) は $d \times h = A$ と仮定し、式 (11) で表すことができる。

$$M_c = \frac{2}{7} \rho C_D u^2 A h \quad (11)$$

その結果、樹木ブロック 1 では $M_{c1}=43.1$ (Nm)=4.4 (kgfm)、また樹木ブロック 2 では $M_2=134.3$ (Nm)=13.7 (kgfm)、さらに樹木ブロック 5 では $M_5=130.3$ (Nm)=13.3 (kgfm) となった。今回用いた樹木は叢生状であり、単幹状の樹木を対象とした既報の知見と単純に比較はできないが、叢生状の枝の平均樹径を用いて試験木の倒伏限界モーメントを Fig. 7 で比較した。このときの各ブロックでの平均樹径は Table. 2 に示した通りである。回帰式および下限式を同時に示した。樹木ブロック 1 では限界式に近似しており倒伏し水没した結果を再現していると判断できるが、他のブロックではより大きな流速で倒伏モーメントに達すると考えられる。このため叢生状の樹木の倒伏については単純に各枝の平均を代表径とすることでは表現できない。樹木の倒伏モーメントを算定することは、流木化防止の足がかりとなるため今後の河川環境を踏まえた河川整備や河川管理を行う上で必要不可欠要件である。しかしながら今回のケースのような叢生状樹木の引き倒し実験に関する倒伏限界モーメントの報告はなく、また、本実験では解析サンプル数が少ないため、その傾向をつかむことは極めて困難であり、今後の課題であるといえる。

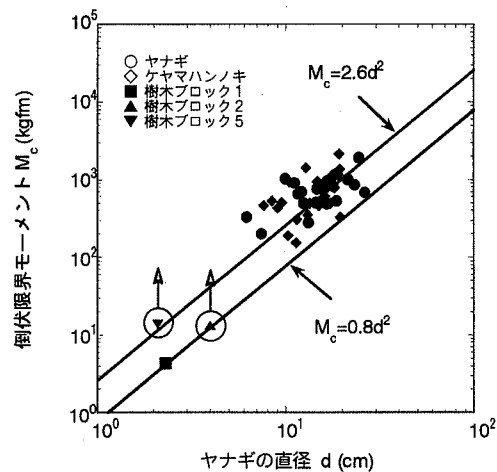


Fig.7 樹木の倒伏限界モーメント

5. まとめ

本実験において流水が存在しないときの樹木の投影面積を用いた、洪水時におけるヤナギの樹木の抗力係数は $C_D=0.62$ と推定された。また水深 1 m、流速 1 m かつ高さ 50 cm 程度のヨシなどの下草の状態での底面粗度係数は 0.034 となり、樹木密度が 0.28~0.49 の場合における樹木内底面粗度係数は 0.054~0.057 となった。さらに、樹木が存在する高水敷の洪水時の水位を厳密に予測するときは、樹木が流速の変化を与える範囲を考慮する必要があることが理解された。今回得られた樹木抗力係数、粗度係数の値を用いた実河川への適用などを課題とし検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 渡邊康玄：樹木と水理，水工シリーズ 95-A-9，土木学会水理委員会，1995。
- 2) 福岡捷二，藤田光一，平林 桂，坂野 章：樹木群の流水抵抗について，第 31 回水理講演会論文集，pp335-340，1987。
- 3) 石川忠晴，高橋和明：河道内灌木の流水抵抗特性について，第 42 回応用力学連合講演会講演予稿集，1993。
- 4) 渡邊康玄，北條紘次，清水康行：樹木の存在する河道の流況特性，水工論文集第 35 巻，pp471-476，1991。
- 5) 渡邊康玄，石田亨平，井出康郎：樹木群内の流速水深方向分布と浮遊砂濃度分布，開発土木研究所月報 No.502，1995。
- 6) 林建二郎，辰野正和，長林久夫，橋本晴行：単独樹木に作用する風力計測，流体力の評価とその応用に関する研究論文集第 2 巻，pp96-103，2003。
- 7) 目黒春彦，渡邊康玄，馬場仁志：樹木が部分的に存在する水路の流れと浮遊砂濃度分布に関する研究，開発土木研究所報告論文，1997。
- 8) 渡邊康玄，市川嘉輝，井出康郎：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，pp53-58，1996。

(2004. 4. 7 受付)