

下草を伴う実際のヤナギの流水抵抗に関する水理実験

Hydraulic experiment on flow resistance of willow with lower grass

(株)北開水工コンサルタント ○ 正員 油川曜佑 (Yousuke Aburakawa)
 独立行政法人北海道開発土木研究所 正員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)
 独立行政法人北海道開発土木研究所 正員 鈴木優一 (Yuichi Suzuki)

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洪水水位の上昇をもたらすため、治水上、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繁茂している場合、洪水時におけ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^{1,2)}。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模型実験であり、かなり理想化された条件での検討となっている。これらの検討から樹木と流水との概略の関係は把握されてきているが、現地への適用にはより実際に即した現地の把握が望まれる。本研究では実際のヤナギ樹木を用いて洪水時における樹木抵抗を評価することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 実験水路

北海道開発土木研究所が有する延長24m、水深1.0m、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Photo.1に示した樹高約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不覚乱となるよう深さ50cmで縦横それぞれ1mの大ききで切り取り、実験水路のNo.7~No.12に設置した。

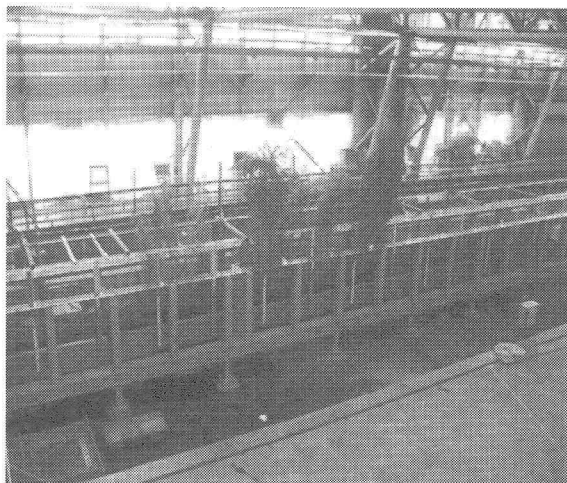


Photo.1 高速循環水路および実験水路写真

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。

2.2 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0.1m(右岸)、0.5m(中央)、0.9m(左岸)の3測点で測定した。流速は測定間隔2秒で1分間の測定値を時間平均している。

2.3 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、樹木やカメラを設置して撮影した。Photo.2に用いた写真の1例を示した。撮影された写真はオルソ画像にし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。解析上、用いる面積は河床から通水中に水没した部分までとした。Table.2に実際に用いた各樹木投影面積を示した。この値は通水前の値であるが、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 $\sin \theta$ を乗ずることにより算出し得ると仮定した($A' = A \times \sin \theta$)。

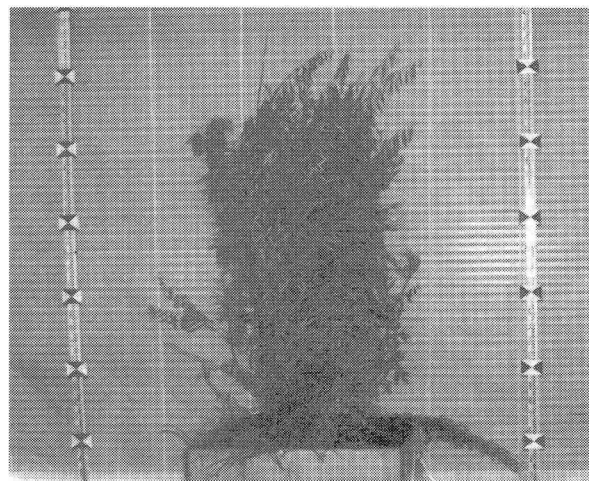


Photo.2 撮影に用いた樹木群の例

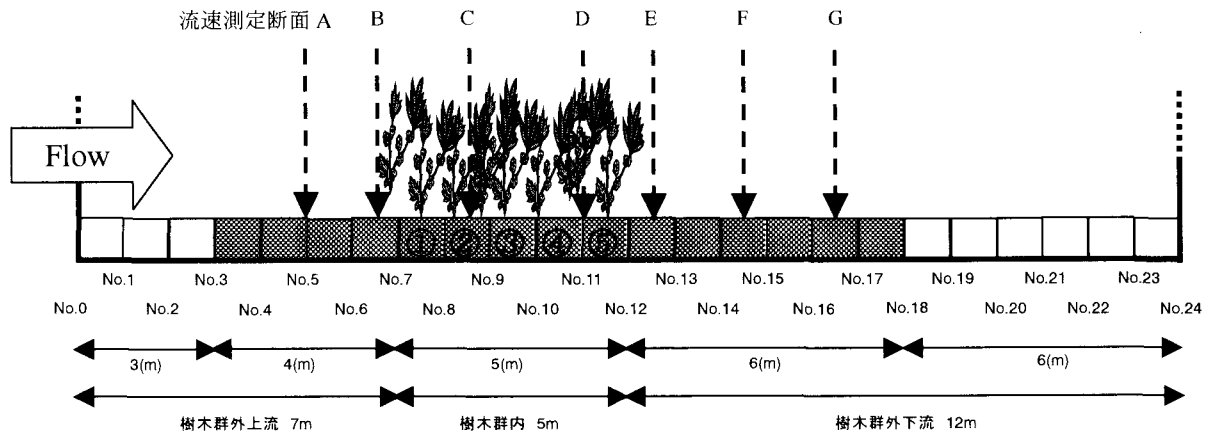


Fig.1 実験水路縦断面図

Table.1 流速測定断面

流速測定断面	上流からの距離 (m)	水深方向測定 (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	

Table.2 通水前における各樹木投影面積
(水没した高さ z での値)

樹木ブロック	通水前の投影面積 (m ²)
1	0.264
2	0.597
3	0.376
4	0.763
5	0.547

3. 実験結果

3.1 樹木群内外における流速分布

樹木群内外における代表的な実測の流速分布図を Fig.2 に示した。本実験では、各水深において 1 分間の測定値を時間平均した流速を、左岸、中央、右岸における値を平均しその水深における平均流速 (m/s) とした。各水深に対してこの操作を行い、実測における 1 次元平均流速分布を得た。ここで流速は水路縦断面方向の流速である。

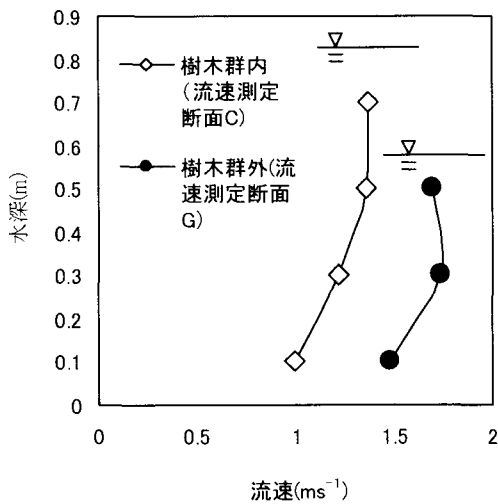


Fig.2 樹木群内外の実測流速分布の比較

3.2 水位縦断

Fig.3 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。

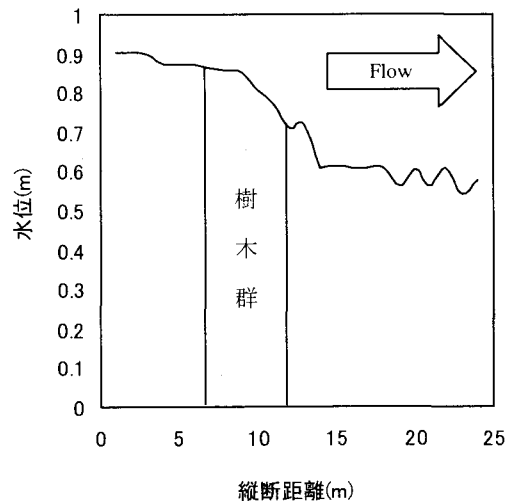


Fig.3 水位変化

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	0.008	0.87	0.2612	4.81	1.256
B	6.5	0.008	0.865	0.2604	5.03	1.310
C	8.5	0.0347	0.853	0.5384	2.27	1.222
D	11	0.0347	0.770	0.5117	2.59	1.324
E	12.5	0.0347	0.715	0.4931	3.00	1.479
F	14.5	0.0347	0.608	0.4545	3.16	1.436
G	16.5	0.005	0.605	0.1722	10.0	1.722

3.3 樹木抵抗係数 C_d および河床抵抗係数 C_b の推定

3.3.1 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_* ($u_* = \sqrt{gh_i}$) で無次元化された流速分布は渦動粘性係数 ($\varepsilon = (\kappa/6)u_*h$) を水深方向で一定と仮定すると次式で表すことができる³⁾。

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

この式から、水深方向に積分を行うと無次元の平均流速 $\langle u_0 \rangle$ は

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

となる。ここで実測における平均流速と比較することにより河床抵抗係数 C_b を求めることとする。本解析において、樹木群外にあたる流速測定断面は A,B,E,F,G であるが A,B での分布形は中央部が出張った形となった。この形状は樹木群内の流速分布形と樹木群外におけるものの中間的分布であると考えられ、これは樹木群の影響が及ぼす範囲であることが示唆された。また流速測定断面 E,F においては、流速測定断面 A、B 同様、樹木群外にあるにもかかわらず、分布形は鉛直方向になったことから樹木群の影響を強く受けていると判断することができた。このことから、流速測定断面 A,B,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。ゆえに流速測定地点 G での平均流速より河床抵抗係数 C_b を算出した。

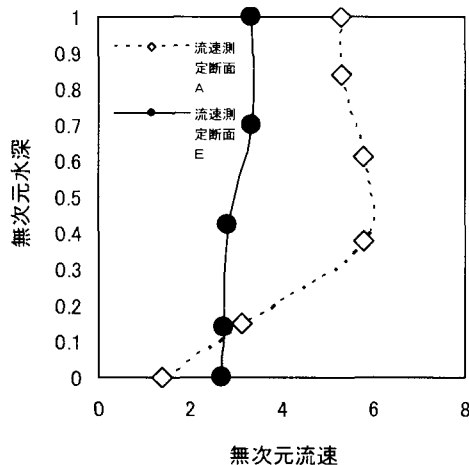


Fig.4 樹木群外における流速分布

各断面における草本類による被覆状態は弱冠異なるが、ここでは一定の値と仮定した。このようにして河床抵抗係数値 $C_b=0.040$ を得た。

3.3.2 樹木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次式で表している⁵⁾。

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

各記号のパラメーターは割愛する。

樹木群内である流速測定断面 C,D ではその流速分布は(3)式に類似し、そのときの樹木抵抗係数に着目すると洪水時の樹木抵抗係数 $C_d \doteq 0.62$ という値が得られた。このときのレイノルズ数 ($Re = U \times H / \nu$, U : 流速測定断面 C における平均流速、 H : 平均水深、 ν : 水の動粘性係数) を以下の諸元に示した。今回の実験では $Re = 1.0E(+6)$ である。

林らは風洞を用いモミジ、ケヤキ、シラカバ、ヒノキを模擬した無風時における実樹木の投影面積を使用し算出した C_{dm} と Re 数 ($Re = U \times H / \nu$, U : 主流速度、 H : 樹高、 ν : 空気動粘性係数) に対する変化特性を示している⁵⁾。その結果 Re 数=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。本実験で用いたヤナギは広葉樹であり、モミジ、ケヤキ、シラカバと比較するのが妥当であると考えられる。この値は本解析結果とほぼ一致していると判断できる。抵抗係数が一般に言われているよう 0.8-1.2 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。しかし、実際に用いる場合に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、この場合は本値を用いるべきである。 $C_d=0.62$ 、および $C_b=0.040$ とした場合の理論値と実測値を比較したものが Fig.4 であるが両者はよく一致している。

Table.4 Re 数算出における諸元

主流速度 (cm / s)	122
水深 (cm)	85
水の動粘性係数 (cm ² / s)	0.01
Re 数	1.00E+06

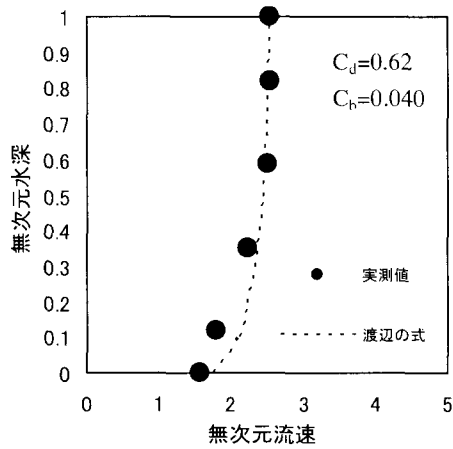


Fig.4 実測値と渡辺の式との比較

3.4 底面粗度の評価

河床抵抗を河床摩擦係数 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ていることから、河床の抵抗をマンニングの粗度係数で表現することを試みた。その結果、下草のみの河床の粗度は $n \approx 0.03$ を得た。

3.5 不等流計算による河床粗度係数の推定

3.5.1 不等流式の差分表示の導入

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辺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。次式は用いた不等流式の差分表示である⁶⁾。

$$z_2 + h_2 + \frac{Q^2}{2gB^3h_2^2} + \frac{n_2^2 Q^2 \Delta x}{2B^2 h_2^{10/3}} + \frac{a_2}{2gh_2} C_d \left(\frac{Q}{Bh_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \Delta x$$

$$= z_1 + h_1 + \frac{Q^2}{2gB^3h_1^2} - \frac{n_1^2 Q^2 \Delta x}{2B^2 h_1^{10/3}} - \frac{a_1}{2gh_1} C_d \left(\frac{Q}{Bh_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \Delta x$$

3.5.2 不等流式の差分表示を用いた河床粗度係数の推定

3.5.2.1 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。

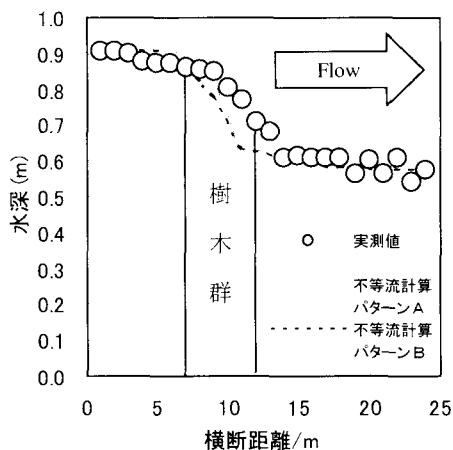


Fig.5 樹木群内のみを考慮した不等流計算

Fig.5 は樹木の存在する区間全体の平均密度を用いたとき (パターンA)、また各縦断距離に対応する樹木密度を導入したとき (パターンB) のものである。しかしながら両不等流計算は樹木内において実測値との大きな差が見られた。

3.5.2.2 樹木群外の影響を考慮した不等流計算

3.3.1 において水路縦断距離 14.5m の流速分布が鉛直方向に一様化したことから、この付近にまで樹木の影響があると判断できる。本解析では樹木が存在しないが、樹木の影響により流速が変化している区間を考慮する必要がある。そこで不等流計算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た平均樹木密度を用いた結果を Fig.6 に表した。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。

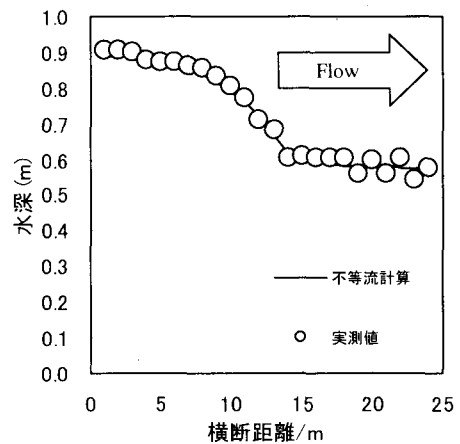


Fig.6 樹木群外を考慮した不等流計算

4. 結論

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抵抗係数は $C_d=0.62$ と推定された。また高さ 50cm 程度のヨシなどの下草を局所的に有する河床抵抗係数は $C_b=0.040$ となった。樹木および草本類が繁茂する河床状態の河床粗度係数は流速が 1m 程度、水深が 1m 程度の場合 $n=0.03$ と推定することができた。

5. 参考文献

1. 渡邊康玄・樹木と水理, 土木学会水理委員会, 1995年7月
2. 白川裕之・水路中の樹木群に作用する流体力について, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第2巻, 2003年1月
3. 渡邊康玄・樹木の存在する河道の流況特性, 水工論文集第35巻, 1991年2月
4. 渡邊康玄・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年3月
5. 林・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, pp96-103, 2003
6. 渡邊康玄・縦断方向に樹木群の分布が異なる河道の浮遊砂濃度分布, 土木学会北海道支部論文報告集第52号(B)