

直立型植生を有する開水路流れ

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎
金沢大学工学部 学生員 ○北村 忠紀

1. まえがき

近年河道内あるいは河川敷の植生が単に洪水疎通障害源としてだけでなく、自然環境保全、水質浄化、水衝・洗掘の抑制といったプラス面からも注目されており、植生を伴う開水路流れの特性の詳細な把握と適切な表現が要望されている。本研究では、上述の点に鑑み、その基礎として、河道内植生を高さの揃った円柱群としてモデル化し、そこを流れる開水路2次元等流の流速分布と抵抗則を実験的に検討するものである。

2. 実験の概要

実験は長さ12m、幅0.4mの可変勾配直線水路において、高さ(k)4.6cm、直径(D)0.15 cmの竹製円柱を水路幅方向・流下方向とも2cm 間隔(s)で配置したものを植生のモデルとし、そこに水流を導いて行った。底面はアクリル板製としてある。水路中央部の植生の間隙において、超小型プロベラ流速計を用いて流速測定を行った(1点当り50Hz, 40 秒)。流速計の出力から、時間平均流速(u)及び便宜的に標準偏差から乱れ強度(u'_{rms})を計算した。実験条件は表1に示すとおりである。ここにu: 摩擦速度(添字0, kは水路底、植生頂部での値), h: 水路底より測られた水深, i: 水路勾配である。

表1 実験条件表

RUN	s	h (cm)	U (cm/s)	h/k	Fr	u ₀	u ₀ /k
A11	1/1000	9.50	13.25	2.07	1.37	3.03	2.13
A12	1/1000	7.49	11.75	1.83	1.37	2.71	1.63
A13	1/1000	4.81	8.69	0.88	0.88	2.10	—
A31	3/1000	8.58	10.69	0.84	1.05	2.81	3.74
A32	3/1000	7.38	17.94	1.80	2.11	4.63	3.88
A33	3/1000	4.89	10.89	1.08	1.62	3.71	—
A37	3/1000	5.00	10.80	1.08	1.64	3.43	1.10
A39	3/1000	8.68	12.35	1.24	1.88	4.09	1.78
A71	7/1000	8.98	33.05	1.98	3.53	7.84	4.47
A72	7/1000	7.27	26.69	1.58	3.16	7.08	4.29
A74	7/1000	3.84	16.68	0.86	2.66	6.20	—

図1, 2には流速, 乱れ強度の分布の測定結果の例を示す。植生内の流速は、水面が植生内にあるときは一樣分布であり、植生上に流れ(表面流と呼ぶ)のある場合は速い表面流に引きずられて速度勾配をもつ領域がある。このことは、図2から植生内でも乱れが存在していることと対応し、これがこの領域での運動量交換を受け持っていることがわかる。表面流領域では乱れ強度分布は通常の開水路流れのそれと相似であり、対数則を生み出す通常の乱流構造が保存されているものと考えられる。

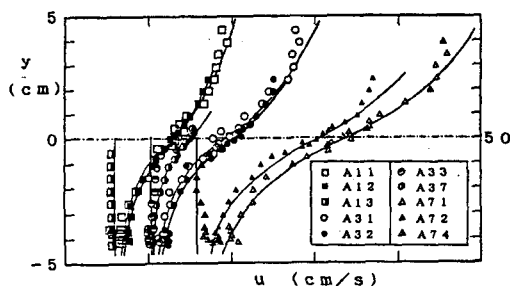


図1 流速分布図

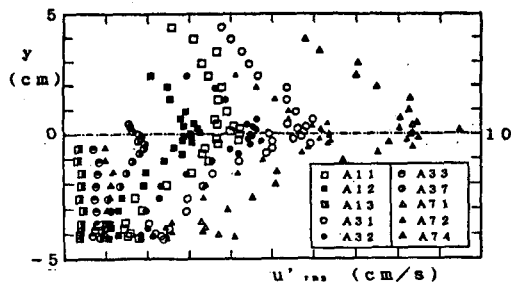


図2 乱れ強度分布図

3. 植生群を伴う流れの構造に関する考察

植生内の一様分布する領域での流速値を水路勾配に対してプロットしたのが図3で、透過係数をKとして次のように表されることがわかる。

$$u_s = K\sqrt{T} \quad (1)$$

これは浸透流速に対する非Darcy則である(誘導乱れの可能性がある)。浸透層内での流下方向の力の釣合を表す次式から、1本の植生の抗力係数を評価すると $C_d=1.5$ 程度となり、一樣流中の円柱のそれとほぼ一致している。

$$\rho g i = (1/2) \rho C_d (D/s^2) u_s^2 \quad (2)$$

すなわち、浸透流速(植生内流速の平衡値) u_s は勾配が与えられれば一意に決まる。

表面流の存在するときの植生内流れの流速分布は、表面流と植生内流れの界面($y=0$)での流速 u_k が与えられると、turbulent Couette流れとして与えられるであろうことから、次のような形式に書けよう。

$$(u-u_s)/(u_k-u_s) = \exp(\beta y) \quad (3)$$

実測結果を上式と比較した例が図4で、式(3)に含まれるパラメータ β をこの図より目視で決め、その値を $((h-k)/k)$ に対してプロットしたのが図5である。

次に u_k の実験値と浸透流速の差をそこでの摩擦速度で無次元化し $((u_k-u_s)/u_\kappa)$ 、それを $((h-k)/k)$ に対してプロットした。図6に示すように一定の増加傾向がみられる。表面流れでは乱れ強度分布に通常の開水路等流の場合との差異がないためReynolds応力分布は三角形分布にしたがっていると期待され、実測された流速分布のスプラインフィットを用いて、次式によって混合距離の水深方向分布を求めた。

$$L = u_\kappa \sqrt{1-y/(h-k)} / |du/dy| \quad (4)$$

その結果が図7に示される。計算値は実測された流速値の微係数を用いているためばらつきが大きい。図中の破線は通常の開水路で用いられる混合距離分布で、 $y=k$ では混合距離はゼロである。ところが植生上の流れでは流速分布が植生内から連続して $y=k$ で有限の速度勾配をもっており、それを式(3)から評価すると、混合距離の $y=0$ での値は次のように非零である。

$$L_0 = u_\kappa / \{\beta(u_k-u_s)\} \quad (5)$$

この値を考慮すると表面流の水深にわたる分布は次のように書ける。

$$L = (\kappa y + L_0) \sqrt{1-y/(h-k)} \quad (6)$$

上式の計算曲線を図7に併示したが、実測値の傾向を表しているように見える。

Reynolds応力の三角形分布と式(6)の混合距離の分布の仮定を用いて、また $y=k$ で $u=u_k$ を境界条件にして、植生上の流れの流速分布を計算できるが、その結果を図1に併示してある。図1の計算曲線は、植生内流れについては式(3)によるものを示している。これらは実験で得られた流速分布を忠実に表すものとなっている。

$$u/u_\kappa = (1/\kappa) \ln \{(y+L_0/\kappa)/(L_0/\kappa)\} + u_k/u_\kappa \quad (7)$$

次に式(3)、(7)で表された流速分布を積分して得られる抵抗則を示す。

$$\begin{aligned} U/u_\kappa = (1/h) [& (u_\kappa/u_\kappa)(1/\kappa)\{(h-k)-(h-k+L_0/\kappa)\ln(h-k+L_0/\kappa)/\ln(L_0/\kappa)\} \\ & + (u_k/u_\kappa)(h-k) + (u_k-u_s)/u_\kappa(1/\beta)\{1-\exp(-\beta k)\} + (u_s/u_\kappa)k] \end{aligned} \quad (8)$$

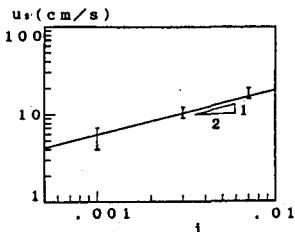


図3 浸透流速と勾配の関係

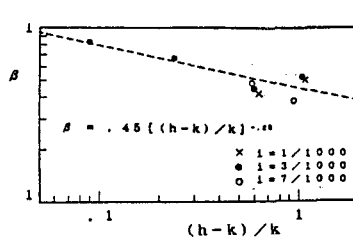


図5 β と $(h-k)/k$ の関係

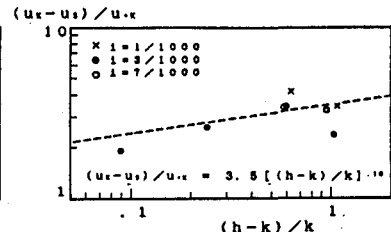


図6 $(u_k-u_s)/u_\kappa$ と $(h-k)/k$ の関係

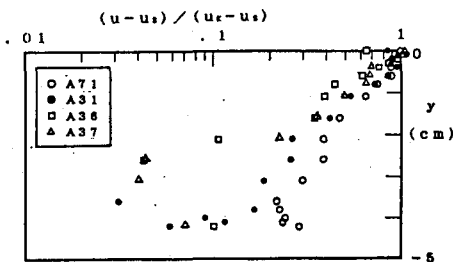


図4 表面流の存在する時の植生内流速分布

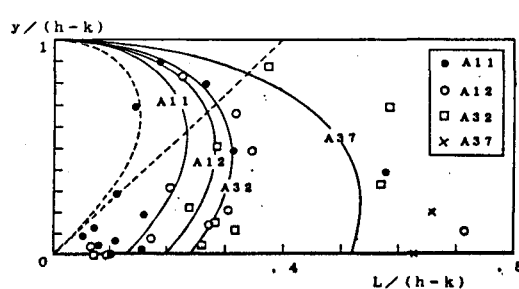


図7 混合距離の水深方向分布

4. あとがき

ここでは、いくつかのパラメータを実験的に決めたが、今後、乱流構造の詳細な検討からこれらをより合理的に検討し、さらに柔軟な植生との比較を行いたい。