

大阪大学工学部 正員 福原 輝幸
大阪大学工学部 正員 室田 明

1. 緒論

開水路粗面乱流の研究は従来、固定型の粗度要素を対象としたものが多いが、水草のような柔軟性のある(揺動する)粗度上の流れを扱った研究は極めて少ないようである。空気流体力学の分野ではChamberlain¹⁾により、一方水理学の分野ではKouwen²⁾によって柔軟な粗度上の流速分布が対数則に従うことが報告されている。しかしながら上述の研究はともに平均場の流れ構造のみに評価が留まっており、乱れに関する情報は皆無に等しい。水性植物が繁茂するような河川においては、生態系に及ぼす水草の影響を知る上でも平均量は勿論のこと、乱れの特性を知ることが必須である。

本研究では、揺動する粗度上の流速分布および乱れ強さの特性について得られた知見を報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した粗度の材料、配置および密生度Cの定義方法については参考文献[3]を参照されたい。実験諸元は表-1に示す通りであり、2成分熱膜流速計を用いて流速の測定を行った。

表-1 水理諸元

CASE	h(cm)	U _{max} (cm/s)	U _m (cm/s)	U _a (cm/s)	U _k (cm/s)	Re	S(×10 ³)	C	Q(l/s)	Tw(°C)	F(×10 ³)
S-1	4.46	30.53	23.32	1.30	20.82	8760	0.34	0.00	5.20	20.6	2.51
D-1	2.11	17.70	13.27	1.41	9.75	2120	1.15	1.44	1.40	12.2	9.01
D-2	2.00	16.42	12.00	1.39	8.62	1820	1.26	1.44	1.20	12.4	10.69
D-3	3.40	11.22	8.12	0.86	4.28	1990	0.93	1.44	1.38	12.5	8.90
E-1	2.81	34.36	25.84	2.31	19.86	5560	2.12	1.44	3.63	13.9	6.41
E-2	2.46	27.65	20.38	2.00	14.39	4020	1.75	1.44	2.58	13.9	7.26
E-3	2.86	24.73	17.48	1.75	14.00	3820	1.68	1.44	2.50	13.9	8.03
F-1	4.29	26.97	20.05	1.72	12.45	6280	0.85	1.44	4.30	14.1	5.86
F-2	3.98	20.21	14.97	1.43	11.30	4370	0.99	1.44	2.98	13.9	7.33
G-1	4.50	28.57	23.56	1.68	17.81	10360	0.76	0.72	5.30	26.6	4.09
G-2	2.46	31.25	26.83	2.11	21.25	7000	2.04	0.72	3.30	27.0	4.95
G-3	6.06	26.52	22.28	1.54	15.09	12580	0.53	0.72	6.75	26.7	3.85
G-4	6.54	33.33	26.20	1.74	17.75	15290	0.56	0.72	8.70	24.9	3.54
G-5	3.22	12.60	11.18	0.90	7.92	3650	0.39	0.72	1.80	26.2	5.19
G-6	8.72	21.86	18.46	1.26	12.95	13580	0.19	0.72	8.05	25.8	3.72

C: density of vegetation

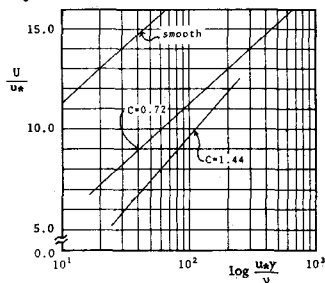


図-1 流速分布(δa を考慮しない場合)

3. 水深の基点

平均流速分布を摩擦速度 $u_* = \sqrt{g S_e R}$ (S_e : エネルギー勾配, R : 径深) と動粘性係数 ν を用いて模式的に示したのが図-1である。密生度 $C=0.72$ のケースでは直線の傾きが5.75となるのに対して、 $C=1.44$ のケースでは5.75よりも急な勾配となった。この原因としては密生度の増加に伴う粗度の遮水効果が考えられる。そこで仮想水深の概念を導入して、後者の勾配が前者のそれに適合するような基準面上の上昇高さ δa を決定した。その結果が表-2であり、 δa と平均的な粗度高さ k の比 $\delta a/k$ はばらつきがあるものの、オーダー的には $O(\delta a/k) = 0.2$ となる。

4. 平均流速分布

図-2は壁法則に従って整理した流速分布であり、密生度 C の違いにより流速分布はそれぞれ異なる。

$$u/u_* = 5.75 \log(y'u_*/\nu) + C_k \quad (1)$$

ここに、定数 C_k は $C=0.72$ に対して

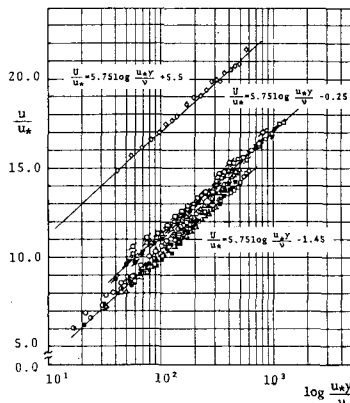


図-2 流速分布

表-2 基準面上の上昇高さ

CASE	δa (mm)	k (mm)	$\delta a/k$
D-1	0.7	3	0.233
D-2	0.8	3	0.267
D-3	1.0	3	0.333
E-1	0.4	3	0.133
E-2	0.6	3	0.200
E-3	0.1	3	0.033
F-1	0.6	3	0.200
F-2	0.4	3	0.133

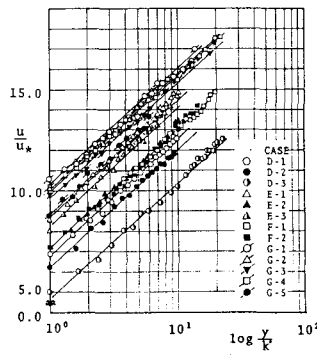


図-3 流速分布

$C_k = -0.25$, $C = 1.44$ に対して $C_k = -1.45$ となる。上式より、滑面よりは粗面の方が、また同じ粗面でも密生度の大きな方が抵抗は大きいと判断できる。

次に、より実用的に流速分布を予測することを目的として、 $y = k$ での流速“すべり速度” u_k を用いて表現した流速分布の結果が図-3である。粗度上より流速分布はほぼ直線的であることから、次式が成立する。

$$u/u_* = 5.75 \log(y/k') + u_k/u_* \quad (2)$$

ただし、 $y' = y - \delta_d$, $y = y_n - k$, $k' = k - \delta_d$, y_n : 路床から鉛直上向きの距離

5. すべり速度

図-3の結果に基づけば、すべり速度 u_k は流速分布を予測する上で最も重要な物理量であることが判る。そこで流れの変化に伴う u_k の特性を詳細に調べるために流速を広範囲に変化させ、直径3mmの小型プロペラ流速計を併用して u_k の測定を行った。その結果が図-4であり、次式のように u_k/u_* は粗度レイノルズ数 Re_k ($\equiv u_* k'/\nu$) と密接な関係にあることがわかる。

$$u_k/u_* = a \cdot Re_k^b \quad (3)$$

ここに、 $C = 0.72$ に対して $a = 3.17$, $b = 0.25$ 、一方 $C = 1.44$ に対しては $a = 2.75$, $b = 0.27$ となる。これより、レイノルズ数の増大に伴う摩擦係数 f の減少が理解できる³⁾。

6. 乱れ強度

乱れ強度の水深方向変化 (y/h') を示したのが図-5～図-7である。同図より結果を系統的に整理すると次のようになる。なお、 $h' = h_n - k$ と定義する。

〔レイノルズ数による違い〕 (h_n : 路床から水面までの距離)

(A) $U_{rms}/u_* \approx \tilde{U}'$: 粗度近くでは $\tilde{U}'$ の値に際だった差異はないが、相対的にレイノルズ数の小さなケース D のグループでは、粗度から離れるに従っての ($y/h' \leq 0.5$) $\tilde{U}'$ の減衰が大きいようである。 (B) $V_{rms}/u_* \approx \tilde{V}'$: レイノルズ数が多いほど粗度上方の $y/h' = 0.2 \sim 0.6$ の領域で $\tilde{V}'$ は増大する傾向にあるが、水面近傍になると有意な差異がない。

〔密生度による違い〕

(A) $\tilde{U}'$: 粗度近傍では密生度の低い ($C = 0.72$) グループ (G) の方が密生度の高い ($C = 1.44$) のグループ (D, E, F) に比べて $\tilde{U}'$ は大きい、水面近くになるとそれほど有意な差異がない。 (B) $\tilde{V}'$: $\tilde{U}'$ ほどの系統だった差異はない。

なお、同図には乱れ強度と y/h' の関係の回帰曲線を示しており、大略的な乱れ強度の水深方向変化を予測しようとするれば、次式の適用が可能と思われる。

$$U_{rms}/u_* = D_0 \exp[-\lambda_0 (y/h')] \quad (4)$$

$$V_{rms}/u_* = D_1 [1 - \{\lambda_1 (y/h')\}^n] \quad (5)$$

ここに、 λ_0 , λ_1 , D_0 , D_1 および n は実験定数を表わす。

上述の結果のうち、レイノルズ数による乱れの変化は低速グループ (D) と高速グループ (E, F) における揺動状態の違いが反映されたものと推察される。

〔参考文献〕 (1) Chamberlain: Proc. Roy. Soc., 1966. (2) Kouwen et al.: ASCE, 1973. (3) 室田・福原・村越: 昭和57年度関西支部年講, 1982.

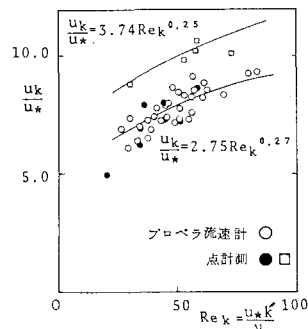


図-4 すべり速度

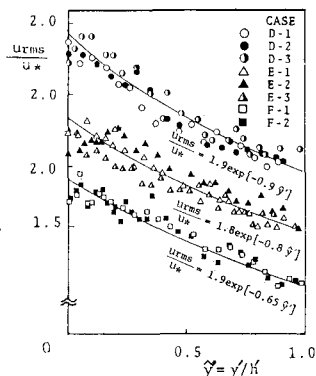


図-5 乱れ強度 (U_{rms})

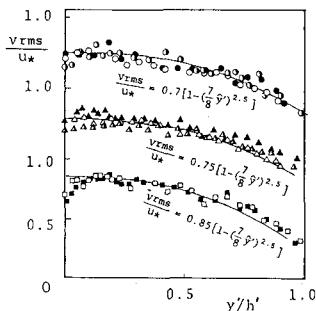


図-6 乱れ強度 (V_{rms})

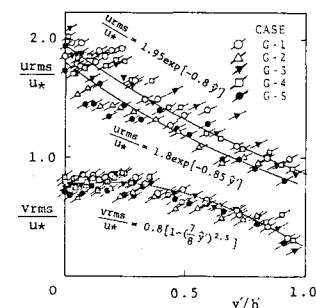


図-7 乱れ強度 (Gグループ)