

直立性の植物を有する開水路の流れ構造について
Flow structure in a vegetated open channel

大阪大学工学部 正 員 室田 明
大阪大学工学部 正 員 福原輝幸

1. 結 論

筆者らは河川の植物の水理的機能を明らかにすべく一連の研究を進めており、特に河川高水敷におけるがとく水辺植物（直立性の植物）のある場合と、他方、沈水性の多年生草である藻の密生した場合の2つの典型的な潤辺状態を有する開水路を取り上げ、それぞれの流水抵抗および乱流構造について検討を行っている。植物を有する流れの特筆すべき点は2つ挙げられる。1つは植物の揺動であり、揺動が活発な状態と微弱かつ緩慢な状態とで乱流構造が変化することである。¹⁾ もう1つは植物群落の遮水効果であり、農業気象学や微気象学で言うところのCanopy流れと同様に、群落内部の流れの遅滞が著しいことである。²⁾ 水理学の分野では上述した2つのタイプの流れのうちでも、後者に関しては極めて研究例が少なく、模擬植物としてプラスチック製の合成樹脂の薄片を用いたKouwenの研究³⁾が唯一と思われる。彼はその中で、群落上の流れが対数則に従うことを示した。しかしながら乱れに関する情報は皆無に等しく、また群落内部の平均流速分布の特性についても何らわかっていないのが現状である。河川工学の観点から重要となる流水抵抗の問題に関しても、流れの内部構造を明らかにしない限り、植物を有する水路の抵抗則は理解し難い。

そのために本研究は河川高水敷上の植物を対象として、冠水時の流れ構造と抵抗則の把握に努める。

2. 模擬植物のモデル化および実験方法

実河川に繁茂する植物はその大きさ、形状などの幾何学的性質や剛性、表層状態などの物理的性質が千差万別である。そのために実験水路で実河川高水敷の再現を試みる際には想定する植物を特定し、単純にモデル化する必要がある。本研究では河川高水敷の代表的植物であるヨシを対象とすべく、モデル高水敷を選定し、半年間にわたり毎月1回、植生状態と茎部の剛性（ヤング率）等を調べた。さらに模擬植物の屈撓特性（流速と変形状態との関係）を検討するために、現地の密生状態を再現したヨシ群を船舶試験水槽の曳航用台車に取り付け、水中カメラを用いて実際の屈撓性を調べた。そして得られた結果にフルード則を考慮してもっとも好ましい粗度素材が選択された⁴⁾。模擬植物（モノフィラメント）の大きさ等は、以下のとおりである。長さ $\ell_0=6.8\text{ cm}$ 、直径 $d=0.024\text{ cm}$ 、曲げ剛性 $EI=1.45\times10^4\text{ g/cm}^2$ 。水路の概要は図-1のごとくであり、模擬植物は水路上流端より5 m下流の位置から7 m区間にわたり、間隔5 mmの千鳥型配置でもって路床に設置された。冠水時における流れ場の状況は後に示す写真-1のとおりである。

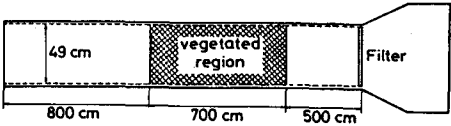


図-1 水 路 の 概 要

1 cm²当りの模擬植物の本数は2本であり、本実験における空隙率（100から模擬植物の体積比を差し引いた百分率）は99%以上になる。

水理諸元は表-1に示されたとおりである。

表-1 水 理 諸 元

CASE	Q(l/sec)	h(cm)	S($\times 10^3$)	k(cm)	T _w (°C)	Re	Fr
A-1	7.35	11.60	1.00	5.80	20.8	15190	0.121
A-3	10.10	10.60	2.00	5.20	20.5	20300	0.191
A-6	11.80	10.30	3.00	5.20	20.0	24060	0.233
A-7	5.40	10.95	0.50	6.00	20.8	11160	0.097
A-12	4.89	10.20	1.12	5.90	20.5	10030	0.098
A-13	4.00	9.40	0.87	6.00	21.0	8300	0.090
A-14	8.50	10.15	1.92	5.45	21.0	17650	0.171
A-20	9.15	10.58	1.48	5.28	20.9	18940	0.173
A-21	11.80	9.15	3.83	4.75	20.9	24420	0.278
A-22	4.10	9.65	0.73	5.75	21.0	8510	0.089

表中の摩擦速度 u_* は群落上下流端における局所流の影響が含まれないように、群落中央部分の 4 m の等流に近い区間に対して、エネルギー勾配法 ($u_* = \sqrt{g S_e h}$, S_e : エネルギー勾配) から決定された。

流速の測定にはプロベラ流速計, 2 成分熱膜流速計が用いられ, 測定位置は模擬植物群落の下流端より 1.5 m 上流の水路中央部とした。ただし, 測定部分では群落内部まで計測できるように, 模擬植物個々の間隔を若干広げている。サンプリング周波数は 2 成分熱膜流速計の場合, 100 Hz とした。

なお以下では, 模擬植物は単に植物と呼ぶことにする。

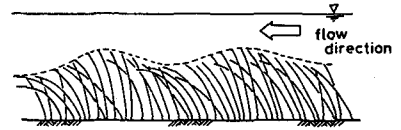


図-2 大規模かつ組織だった植物群落の揺動現象

3. 大規模かつ組織だった植物群落の揺動現象

極めて柔軟性の高い水草の群落では観察されなかったような興味深い揺動現象が直立性の植物群落において確認された。この現象は風の強い日に稲田で見られるような穂波現象に類似したものであり, 穂波現象と同様に高流速場で発生しやすい。水路側壁から眺めると図-2 のように群落の波動があたかも下流へ伝播するように揺動する。この発生のメカニズムも重要であるが, まずは組織だった揺動現象が流水の乱れにいかなる影響を及ぼしているかを明らかにすることが先決である。揺動と乱れとの相互作用については後の 5.1 で詳細に述べることにする。

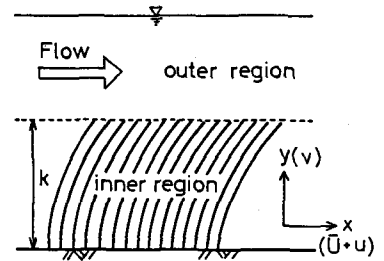


図-3 流れ場の状況(冠水時)

4. 植物の屈撓と流れ構造との関係

4.1 理論的考察

屈撓性を有する植物が水流中に存在する場合, 植物自身が流速の増大とともに屈曲を増し, さらに揺動が加わることにより, 流れは極めて複雑となる。このような流れ場に対する理論的アプローチでは運動方程式中に流れの抵抗を表わす項(流体自身からみれば付加応力に対応する項)が導入されなければならないが, 上述したような植物の動的特性を基礎的に陽的に組み入れることは不可能に近い。そのため本モデルでは流れは等流定常状態で, 植物の揺動による効果は他のパラメータに暗示的に含むことにし, 植物の変形は静力学にもとづくといった簡略化された流れ場のモデルを用いて解析を進める。

今, 図-3 に示すような冠水状態の流れ場を考えることにし, 植物群落内部を内部領域, その外側を外部領域とそれぞれ呼ぶことにする。なお, 図中の k は平均的な植物の高さを表わす。

内部領域における運動方程式は次式で表わされる。

$$\frac{d\tau}{dy} = -\rho g S_e + \frac{1}{2} \rho c_r c_v d\bar{U}^2 \quad (\tau = \mu \frac{d\bar{U}}{dy} - \rho \bar{u}v) \quad (1)$$

ここに, 右辺第 2 項は植物に起因する単位面積当りの抵抗力を示しており, c_r は植物 1 本当りの抵抗係数を, c_v は水平面内における植物の面密度をそれぞれ表わす。特に, c_v は揺動を考慮した路床からの高さ y の関数として, 後述する式(15)で与えられる。一方, 左辺の τ は全剪断応力を表わす。

内部領域では遮水効果により流れの遅滞や乱れの逓減が予想されるゆえ, 高密度状態では粘性剪断応力の項が無視できなくなる。そのため, レイノルズ応力 $\bar{u}v$ に混合距離理論を適用すれば, 速度勾配は次のようになる。

$$\frac{d\bar{U}}{dy} = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{\nu}{l^2} + \frac{1}{l} \sqrt{\left(\frac{\nu}{l}\right)^2 + \frac{4\tau}{\rho}} \right\} \quad (2)$$

従って内部領域における $\bar{U}$ と $-\rho \bar{u}v (= \tau - \mu d\bar{U}/dy)$ は式(1)と式(2)の連立常微分方程式を解くことにより求まる。

一方、外部領域に対する運動方程式および速度勾配に関する式はそれぞれ次のようになる。

$$\frac{d\tau'}{dy} = -\rho g S_e \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{U}}{dy} = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\tau'}{\rho}} \quad (4)$$

ここに、 $\tau' = -\rho \bar{u} \bar{v}$ であり、式(4)は粘性剪断応力を無視することより導かれる。よって外部領域では、式(3)と式(4)を連立させることにより、 $\bar{U}$ および $\bar{u} \bar{v}$ が計算される。

基礎方程式の無次元化は d 、 ρ 、 h 、 g 、 S_e 、 ν 、 a を用いて次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \bar{U}^+ &= \bar{U} / \sqrt{g S_e h}, \quad c_v^+ = c_v dh, \quad a^+ = a/h \\ \tau^+ &= \tau / \rho g S_e h, \quad k^+ = k/h, \quad l^+ = l/h \quad (5) \\ \tau'^+ &= \tau' / \rho g S_e h, \quad d^+ = d/h, \quad y^+ = y/h \end{aligned}$$

以上が水理学的側面からみて流れ場が満たすべき基礎方程式であるが、同様に植物の物理系に関しても満たされなければならない力学条件がある。以下で説明するが、式はすべて無次元表示されている。

流水中の植物に作用する抵抗力 $dF^+(y^+)$ は植物の投影面積と流速の2乗に比例するから、任意点 $y^+ = Y^+$ における曲げモーメント M^+ は次式より求められる。

$$M^+ = \frac{1}{2} \int_{Y^+}^{k^+} (y^+ - Y^+) c_r d^+ \bar{U}^{+2} dy^+ \quad (6)$$

曲げモーメントと植物の変位 $\delta^+ (= \delta/h)$ の間には次の関係が成立する。

$$M^+ = (EI)^+ \frac{d^2 \delta^+}{dy^{+2}} / \left\{ 1 + \left(\frac{d\delta^+}{dy^+} \right)^2 \right\}^{3/2} \quad (7)$$

ここに、 $(EI)^+ = EI / (\rho g S_e h l_0^4)$ 、 l_0 は植物の全長を表す。従って、流れによる抵抗力と植物の変形との関係は、式(6)と式(7)を連立させることより導かれ、差分を用いて δ^+ の分布は計算される。

その際、境界条件は次式で与えられる。

$$\frac{d\delta^+}{dy^+} = \delta^+ = 0 \quad : y^+ = 0 \quad (8)$$

さらに、植物の高さ k^+ と全長 l_0^+ の間には次の関係が満たされなければならない。

$$l_0^+ = \int_0^{k^+} \sqrt{1 + \left(\frac{d\delta^+}{dy^+} \right)^2} dy^+ \quad (9)$$

このようにして導かれた流れの運動方程式と植物の静力学方程式の両者を用いて、 $\bar{U}^+$ 、 $\bar{u} \bar{v}^+$ および δ^+ を計算することになるが、最終的には内部、外部領域を含めた全流れ場に対する境界条件が満たされなければならない。

すなわち、水面境界条件および底面境界条件はそれぞれ次式で与えられる。

$$\bar{U}^+ = U_s^+, \quad \tau^+ = 0 \quad : y^+ = 1 \quad (10-1) \quad \bar{U}^+ = 0, \quad \tau^+ = \tau_w^+ \quad : y^+ = 0 \quad (10-2)$$

式(10)において、壁面剪断応力 τ_w^+ を除く残りの境界値はすべて既知である。そこで計算方法としては表面流速 U_s^+ を設定して、初期値問題として式(1)と式(2)および式(3)と式(4)の連立常微分

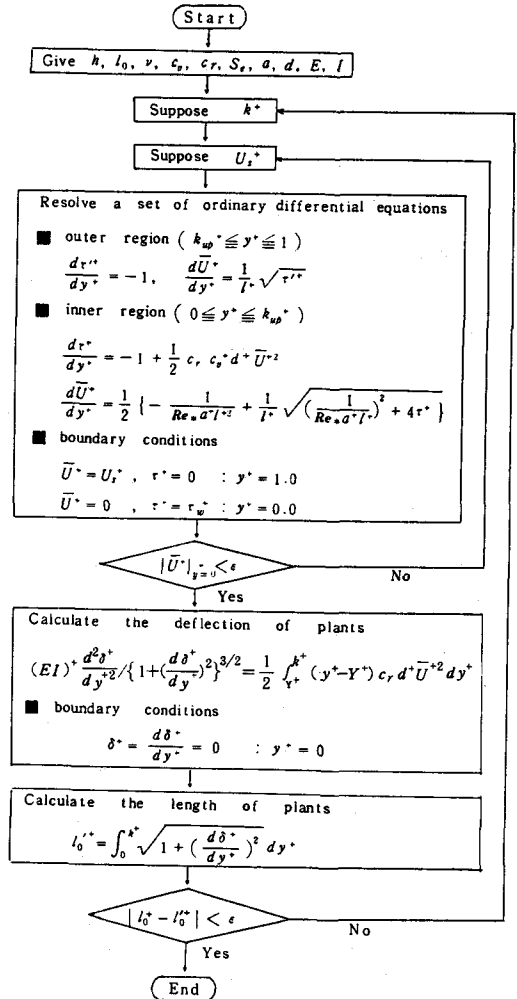


図-4 計算のフローチャート

方程式をそれぞれ Runge-Kutta-Gill 法で解き、終端条件の式 (10-2) を満たすまで U_s^+ を変化させて、繰り返し計算する方法を採用した。そして、その時の $y^+ = 0$ での τ^+ を τ_w^+ とした。

最後に、計算の手順を図-4に示す。なお、図中の k_{up}^+ は揺動の最上面の位置であるが、その他の考察に関しては、内部・外部領域の境界をすべて k^+ とする。また、 Re_* は $Re_* = \sqrt{g S_e h} h / \nu$ と定義される。

4.2 基礎方程式に含まれるパラメータの表示方法

(1) 混合距離

一般に混合距離 l は単純な仮定 ($l = \kappa y$, κ : カルマン定数 $= 0.4$) により与えられる場合が多いが、植物群落のある流れでは l は Re や揺動状態によって分布形を異にするために、ここでは実験的に分布形を与えることにする。

l の分布の一例を図-5に示す。(a) が微弱な揺動状態、(b) が活発な揺動状態における結果である。両図にもとづけば、 l の分布形は次のような関数形で近似できる。

■ 微弱な揺動状態 (Re が小さい場合)

$$\begin{aligned} l^+ &= a_0^+ (y^+)^m & 0 \leq y^+ \leq y_l^+ \\ l^+ &= a_0^+ + \kappa_0 (y^+ - y_l^+) & y_l^+ \leq y^+ \leq 1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} a_0^+ &= 0.03 \sim 0.05, \quad \kappa_0 = 0.18 \sim 0.25 \\ y_l^+ &= (0.7 \sim 0.8) k^+, \quad m = 0.3 \sim 0.4. \end{aligned} \quad (12)$$

■ 活発な揺動状態 (Re が大きい場合)

$$l^+ = \kappa_1 y^+ \quad 0 \leq y^+ \leq 1 \quad (13)$$

$$\text{ここに、} \kappa_1 = 0.18 \sim 0.25 \quad (14)$$

(2) 植物の面密度

植物の揺動を考慮して、面密度 c_v の分布を図-6のように仮定する。同図は揺動の下限位置以下 ($y^+ \leq k_{low}^+$) では $c_v = c_{v0}$ で一定とし、揺動の上限位置 k_{up}^+ に向かうにつれて c_v が線形的に減少することを示している。すなわち、

$$\begin{aligned} c_v &= c_{v0} & y^+ \leq k_{low}^+ \\ c_v &= c_{v0} \left(\frac{k_{up}^+ - y^+}{k_{up}^+ - k_{low}^+} \right) & k_{low}^+ \leq y^+ \leq k_{up}^+ \end{aligned} \quad (15)$$

ただし、 c_{v0} の決定方法については次の(3)で述べる。

(3) 植物の抵抗係数

植物が密生して群落を形成する場合、 τ_w を無視して流体の体積力と群落の抵抗とで流れ場が釣り合うものと仮定すれば、次式の運動量方程式が成立する。

$$\rho g S_e h = \frac{1}{2} \rho c_r C U_m^2, \quad C = \frac{N d k}{B L} \quad (16), (17)$$

式(17)は密生度の定義式であり、 U_m は断面平均流速、 N は植物の本数、 $B L$ は植生の面積をそれぞれ表わす。

以上、式(16)と式(17)より植物1本当りの抵抗係数のオーダーは推算でき、図-7に示すごとく c_r

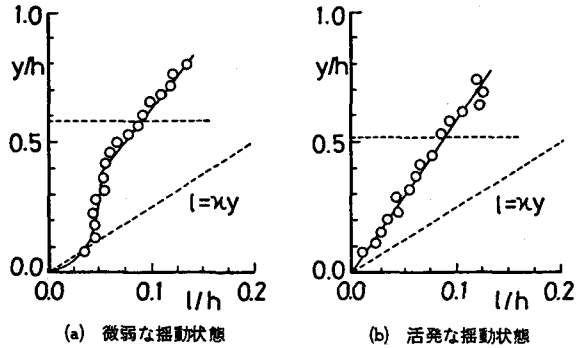


図-5 混合距離分布

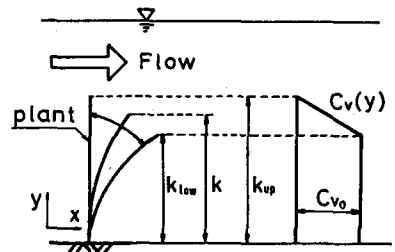


図-6 面密度の鉛直方向分布

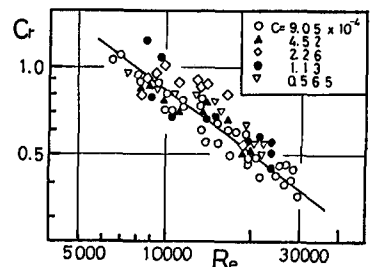


図-7 植物1本当りの抵抗係数

は R_g の関数として考えられ、一般的に次式で与えられる。

$$c_r = \alpha R_g^{-\beta} \quad (\alpha = 640, \beta = 0.72) \quad (18)$$

ここに、 α および β は実験定数であり、本実験の範囲内の密生度では両者の値に大きな変化は生じない。一方、剪断応力項を無視した式(16)と式(1)との対応より、 c_v と C の関係は容易に求まり、 $c_v^+ \equiv c_v d h$ が導かれる。実際には、 c_r 、 c_v^+ は厳密に評価できないから、そのオーダーを捉えることが重要となる。本論文では、 $(k_{up} - k_{low}) \ll h$ であることから、近似的に $c_{v0}^+ = C$ とおいた。

5. 乱流場に及ぼす揺動、レイノルズ数の影響

5.1 組織だった揺動と乱れとの相互作用

緒論でも少し触れたように、揺動と乱れとの相互作用、特に組織的な揺動がある場合の乱れ構造に一体どのような性質があるかを明らかにすることは、植物を有する流れの乱れ構造を理解する上で必須と考えられる。そのためにここでは、レイノルズ数の大小、すなわち大規模かつ組織だった揺動の発生の有無による乱流構造の変化をスペクトルを介して調べる。

図-8は活発な揺動状態における変動流速 u のスペクトルの一例である。全水深にわたり低周波数部分でエネルギー集中がみられ、しかもこの周波数 f_p は $0.5 \text{ Hz} \sim 1.0 \text{ Hz}$ でほとんど変化していない。中でも、植物が揺動しないような路床に近い領域においてさえ明瞭なエネルギー集中、換言すれば明瞭な周期性をもった乱れが存在することは注目値する。

ところが揺動が微弱になると全体的にエネルギーレベルが低下するだけでなく、低周波数部分でのエネルギー集中も不明瞭となる。

そこで卓越周波数 f_p の物理的意味を明確にするために、図-8と同じような水理条件での植物の揺動スペクトルを調べてみた。その結果が図-9であり、両図を比較するとピーク周波数は互いに良好に一致していることがわかる。しかもこのピーク周波数の一致は揺動が活発な場合にのみ現われることより、植物と乱れとの間の線形的な相互作用は組織だった揺動に起因するものと推察できる。

5.2 平均流速分布と植物の屈撓

図-10(a)と(b)は揺動が微弱な状態(CASE A-7)と活発な状態(CASE A-3)における平均流速 $\bar{U}^+$ と植物の変位 δ^+ の理論値および実験値を併示したものである。両ケースとも理論値は実験値を良好に再現している。両図を比較すると、前者では内部領域

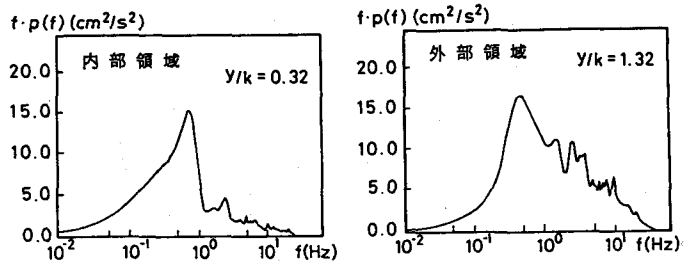


図-8 乱れのスペクトル(揺動が活発な状態)

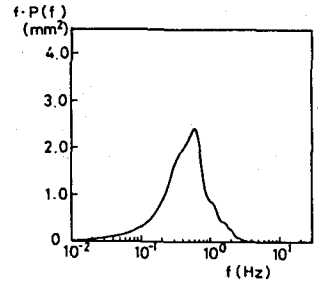
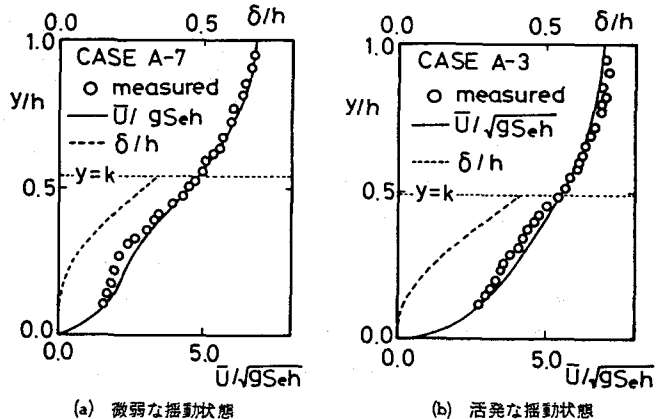


図-9 揺動スペクトル



(a) 微弱な揺動状態

(b) 活発な揺動状態

図-10 平均流速分布と植物の変形

での $\bar{U}^+$ の逓減が著しいために、 $\bar{U}^+$ は変曲点をもつような分布となるが、後者ではそれほど大きな逓減とはならず、内部領域では直線的な分布となる。このことより、 Re が小さく揺動が微弱な場合には群落による遮水効果が現われやすいと言える。

破線で示される植物の変形は当然ながら後者の方で大きくなっており、ともにビデオ解析から得られた揺動の包絡線の中間的な変形状態を良好に再現している。

5.3 乱れ強度分布

図-11に乱れ強度分布の鉛直方向分布を示す。(a)と(b)の両図を比較すると、外部領域では差異はないが、内部領域になると揺動が微弱な(a)の方で乱れ強度の逓減が著しい。すなわち、遮水効果が顕著になるほど乱れの逓減も大きくなることが知れる。

乱れ強度の値自身は群落頂部で最大となることから、乱流場は群落頂部付近から発生する乱れにより支配されており、もはや壁面乱流による影響は考えなくてよい。

次に、相対乱れ強度分布を図-12に示す。(a)、(b)とも最大値は $y/k \approx 0.8$ に現われる。両図を比較すると、 u_* で無次元化した乱れ強度分布ほどの違いはないが、低 Re (CASE A-7)の方で全体的に値が大きくなっている。

5.4 レイノルズ応力分布

レイノルズ応力分布 $-\bar{uv}^+$ の鉛

直方向分布を図-13に示す。外部領域では Re に関係なく $-\bar{uv}^+$ は直線分布($-\bar{uv}^+ = 1 - y^+$)に従う。内部領域では乱れ強度分布と同様に、揺動が微弱なCASE A-7の方で逓減が著しい。理論値と実験値を比較すると路床付近で理論値の方が実験値より少し大きくなっている以外は、両者は良好に一致している。両者の値の違いは c_r を内部領域で一定としたこと、および内部領域でのレイノルズ数 $Re_i (= \sqrt{g S_e h} a / \nu)$ の定義に問題があると考えられる。また、 $y \approx k$ で $-\bar{uv}$ も最大になることより、群落頂部付近から発生する乱れは内部・外部領域間の運動量交換に対しても支配的な役割を果たしていることが理解できる。

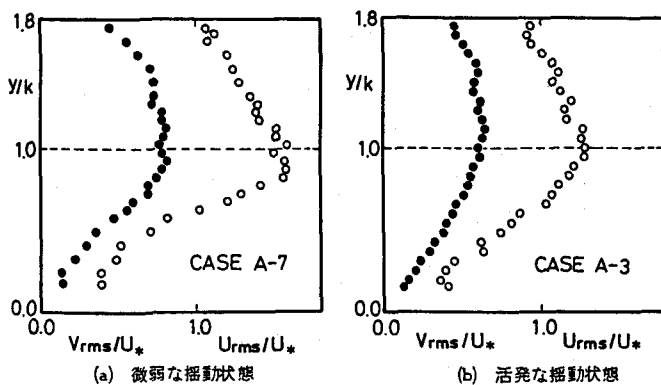


図-11 乱れ強度分布

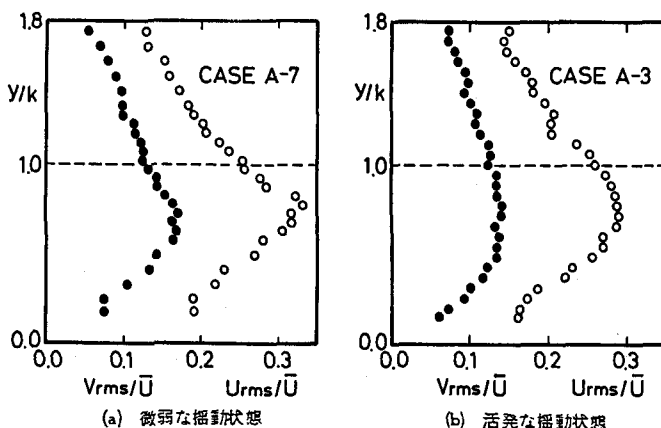


図-12 相対乱れ強度分布

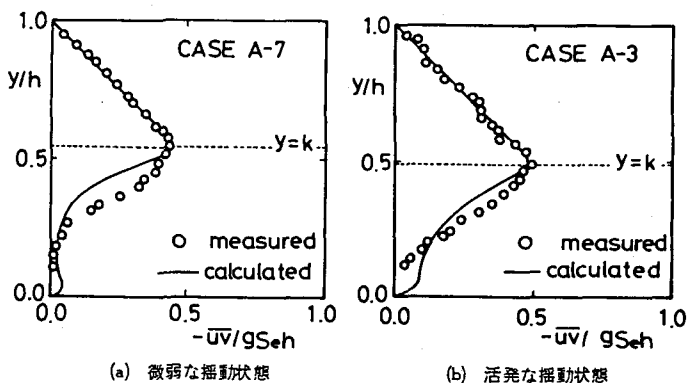


図-13 レイノルズ応力分布

5.5 植物群落の潤辺保護機能

潤辺に繁茂する植物が水路表面の侵食・土砂移動の抑制に貢献し、水路形状の安定化に果たす役割りの大きなことは、U. S. Soil Conservation Serviceの一連の研究⁵⁾以降、多くの研究者から指摘されている。

ここでは、理論的に推算された壁面剪断応力 τ_w^+ ($\equiv \tau_w / \rho g S_e h$) から、上述した植物群落の潤辺保護機能を評価してみる。通常、路床の壁面剪断応力は $\tau_w^+ = 1$ となるわけだが、植物群落の存在により揺動が微弱なCASE A-7では $\tau_w^+ = 0.16$ 、揺動が活発なCASE A-3では $\tau_w^+ = 0.22$ となる。レイノルズ数が大きく(揺動が活発に)なると τ_w^+ はわずかながら増大するようであるが、いずれにせよ流水抵抗に対して底面剪断応力の受けも割合はかなり減少しており、数値的に見積っても植物群落が河床の安定に大きく関与していることが再確認される。

6. 抵抗則

Darcy-Weisbachの抵抗係数 f は次式を用いて容易に計算できる。

$$f = 8 \left(\int_0^1 \bar{U}^+ dy^+ \right)^{-2} \quad (19)$$

本計算モデルではまた R_e ($\equiv U_m h / \nu$) が自動的に計算できるから、 f と R_e の関係を導くことができる。その結果が図-14であり、 $5000 \leq R_e < 20000$ の間では実験値⁶⁾と理論値は良く一致している。このことから、植物を有する水路では通常の水路で適用されるようなKármán-Prandtl流に力学的相似則から抵抗則を導くようなアプローチはもはやできず、 f と R_e の関係は R_e にともなう流速分布の変化の度合いによって規定されることがわかる。

7. 結論

河川高水敷の代表的な植物であるヨシを有する開水路流れを想定し、そこにおける基本的な流れの構造や抵抗則について実験のかつ理論的に検討を行った。得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) 模擬植物の静力学を考慮したモデルにより、流速分布、レイノルズ応力分布および平均的な植物の屈撓状態、さらには抵抗係数とレイノルズ数との関係の再現が可能となった。

(2) 植物群落による遮水効果はレイノルズ数や揺動状態により変化し、レイノルズ数が小さい場合において遮水効果は明瞭である。

(3) 計算より得られた壁面剪断応力はエネルギー勾配法から算定される値の約20%となり、河床の安定に果たす植物群落の貢献の大きいことが理解できた。

(4) 乱れ強度やレイノルズ応力は群落頂部付近で最大となり、乱流構造は群落頂部付近から発生する乱れに支配される。

本研究の遂行に当っては、当時本学大学院生だった佐藤勝君(現:建設技研㈱)の協力を得たことに感謝するとともに昭和58年度文部省科学研究費、奨励(A)の援助を受けたことを記しておく。

〔参考文献〕

- 1) 室田・福原:土木学会論文報告集, 第338号, 1983
- 2) 室田・福原・佐藤:昭和58年度関西支部講演集, 1983
- 3) Kouwen, Unny and Hill: ASCE, Vol. 95, IR.2, 1969
- 4) 佐藤 勝:大阪大学修士論文, 1983
- 5) 例えばRee and Palmer:U.S.Soil Conservation Service, No.967, 1949
- 6) 室田・福原:第38回年次学術講演会講演概要集, 1983

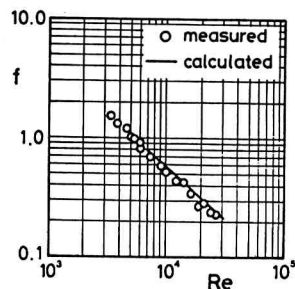


図-14 抵抗則



写真-1 流水中の模擬植物の変形