

II-373 柔軟な植生に覆われた路床をもつ開水路流れの特性

金沢大学大学院 学生員 岡田 敏治

金沢大学大学院 学生員 北村 忠紀

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

1. まえがき

灌漑用水路ではしばしば路床が植生に覆われているし、洪水時にはしばしば葦などの植生の繁茂している領域の流れが問題になる。さらには、親水機能の高い流路として路床に植生のある場合の澄んだ表面流を期待することも考えられる。多くの植生粗度の水理学的研究では剛な円柱群で模擬されるが、上記のような場では、植生は柔軟である（変形・振動・揺動を伴う）ために、植生層と表面流の間の混合特性はそれらと大きく異なっていることが予想される。本研究はこれに鑑み、実験室水路で、剛な円柱群模擬植生と柔軟な模擬植生を比較する実験を行ない、その上の流れ特性の相違を検討した。

2. 実験の概要

実験は長さ12m、幅40cmの可変勾配水路で、流速測定に小型プロペラ流速計を用いて行なった。剛な植生のモデルとして直径 $D=1.5\text{mm}$ 、高さ $k_0=4.6\text{cm}$ の竹製円柱を $s=2\text{cm}$ の間隔で配置したもの、柔軟な植生モデルとしてはOHP用透明シートを幅 $D=1.5\text{mm}$ の短冊状に切断したものを高さ $k_0=5.0\text{cm}$ 、間隔 $s=2\text{cm}$ で配置したものを用いた。前者は流れによって変形も振動もしないのに対し、後者は著しく変形・振動あるいは揺動する。変形程度、振動程度を表す指標として $\Delta \equiv k/k_0$ 、 $\Delta' \equiv \delta k/k$ を図1のように定義した。植生近傍の代表流速 u_d （水深が植生高さ k より小さい場合（ $H < k$ ）は後述の固有浸透流速 u_s 、 $H > k$ の場合は植生頂部流速 u_k ）に対し Δ の変化を調べたのが図2であり、 Δ' については植生層上の流れの掃流力の無次元量（ hi/k 、 $h \equiv H - K$ ）に対する変化を図3に示した。

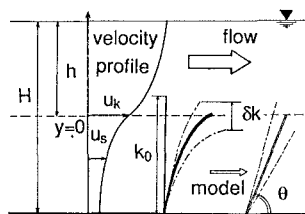


図1 概念図

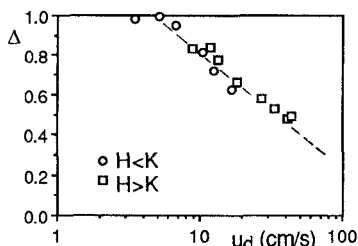


図2 柔軟な植生モデルの変形程度

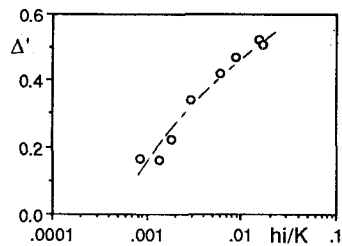


図3 柔軟な植生モデルの揺動程度

3. 柔軟な植生の変形による固有浸透流速の増加

植生高さより低い水深（ $H < k$ 、表面流の「引きずり」効果のない条件）での流速分布はほぼ一様で、この流速を「固有浸透流速」 u_s と定義する。透過係数 $K_s = u_s / \sqrt{i}$ （ i ：路床勾配）と u_d の関係を図4に示したが、剛な植生の場合に比べ柔軟な場合には K_s は u_d に対して著しい増加を示す。 $H < k$ の場合植生層内で du/dy がほとんどゼロであることを力の釣り合い式に考慮し、植生層内で平均化して植生の変形を図1のようにモデル化する（この時変形は角度 θ で代表され、 θ は Δ と次のように関係付けられる： $\theta = \arcsin \Delta$ ）と、 $K_s = \sqrt{2gs^2 / (C_d D \Delta)}$ …… (1) が得られる。この関係を用いて図2、4より C_d と u_d の関係を調べたのが図5であり、 C_d はReynolds数の大きい領域では一定となる傾向を示す。すなわち、柔軟な植生では変形により透過係数を式(1)で評価できる程度に増加する。ただし、今回の実験では柔軟な植生では変形によって流れやすくなったにもかかわらず抗力係数の差のためなお剛な植生の場合に比べ流れにくくなっている（図4に示す□は $H > k$ のデータについて $C_d = 3.14$ として式(1)より計算したもの）。

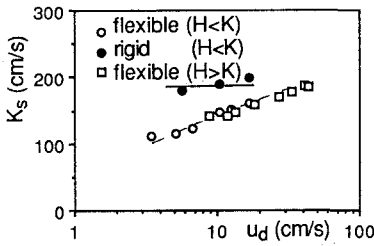


図4 透過係数

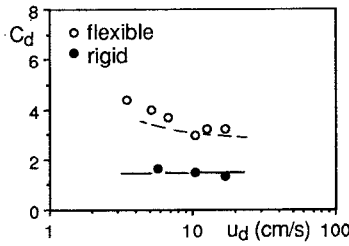


図5 抗力係数

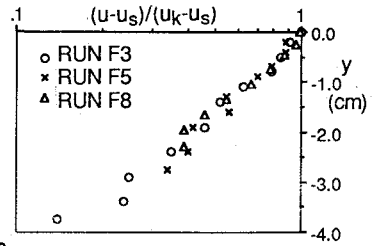


図6 植生層内流速分布

4. 柔軟な植生の揺れによる流れ構造の変化

表面流領域が存在する場合 ($H > k$) の植生上の流れは、表面流の速い流速によって植生層にせん断流領域の現われることが特徴で、この領域の流速分布は柔軟な植生の場合も剛な植生の場合と同様近似的に次のように定式化できる。 $(u-u_s)/(u_k-u_s) = \exp \beta y$ (2) (図6参照、 y : 植生層頂部から上向きに測った距離)。すなわち、表面流が存在する場合の流れは $u_s (= \sqrt{2g s^2 i / (C_d D A)})$ に加えて u_k , β で特徴づけられる。 $(u_k-u_s)/\sqrt{u_s u_{*k}}$ ($u_{*k} \equiv \sqrt{\tau_k/\rho}$, τ_k : 植生界面でのせん断応力), $\beta \sqrt{s K}$ を表面流の境界面 ($y=0$) で持つせん断応力の無次元量 (h_i/K) に対してプロットしたのが図7及び8で、柔軟な植生の方が u_k-u_s が大きく、 β が小さくなる傾向が認められる。 β は運動量の「染み込み深さ」スケールの逆数で、小さい β は混合の活発さを示す。すなわち、柔軟な植生では表面流からの運動量混合が大きく、それゆえに（表面流が速くなればなるほど）植生層内の流れやすさが増すことがわかる。なお、 $y=0$ での植生層側速度勾配は $\beta(u_k-u_s)$ となり、これが表面流の速度勾配と接続することから、表面流の $y=0$ での混合距離が非ゼロの値で決められる。これと u_k が表面流の構造を決める。図7及び8には、剛な植生の場合の値も併示しており、柔軟な植生と剛な植生との差は h_i/K が大きいほど顕著となる。すでに変形の効果は考慮してあるから、この差は図3でその特性 (Δ' が h_i/K の増加関数) が示された植生の「揺れ」によってもたらされるものとするのが妥当である。振動・揺動の効果を考えない場合、植生層内での力の釣り合い式は、次のようである。

$dt/dy = -\rho g y i + (1/2) \rho C_d u^2 D \Delta / s^2$ (3) ここに、 τ : Reynolds応力である。剛な植生の場合、中川ら¹⁾の実測結果より抗力項とReynolds応力項を求めると、図9に示すように外力項（三角形分布）と一致している。ところで植生という浸透層内にReynolds応力を生む機構がChu-Gelhar²⁾のイメージであるとすれば、それは「透水係数」に依存するから、今対象としている剛な植生も柔軟な植生も、 h_i/K , u_s の等しい条件では同じ程度の植生層内Reynolds応力が生まれていると考えてよい。ところが、柔軟な流速分布（すなわち、 u_k , β ）が先述のように変化しており、この変化した流速分布によって式(3)の右辺第2項を与えると、せん断応力の合計が図9のように外力項の三角形分布よりはみだす。抗力項は植生を後流のほか変形させるため消費されたエネルギーを含むこと、Reynolds応力項は乱れによるエネルギー消散を表すことを考えると、この三角形分布からはみだし分は植生の揺動が流れに付加的に供給しているエネルギーに相当するといえる。この機構を的確に表現することが重要と考えられる。

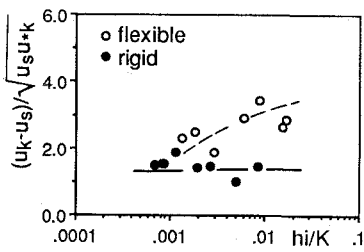


図7 植生界面での流速

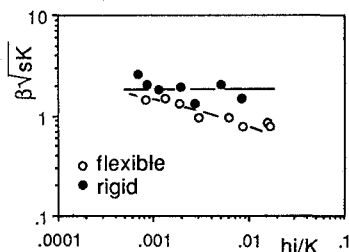


図8 パラメータβの変化

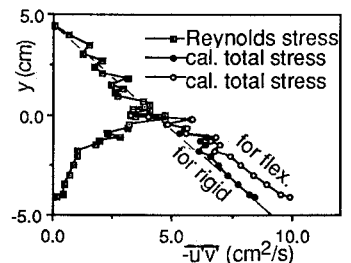


図9 植生層内のせん断応力分布の構成

- 参考文献 1) 中川・辻本・清水：植生を伴う開水路流れの構造に関する研究，水工学論文集，第34巻，1990.,
2) Chu & Gelhar: Turbulent pipe flow with granular permeable boundaries, M.I.T., Ralph Parsons Lab., Rep., No.148, 1972.