

44 植生水路における流れの抵抗則に関する研究(II)

— 草生水路に関する実験 —

京都府立大学 ○平野洋一、水原邦夫、大手桂二

1. はじめに

本研究は、水路内の植生繁茂の許容度を決定することを究極の目的としている。これまで、植物の中で、特に木本類のような堅固な粗度を想定し、木生水路を対象とした場合の流速分布形と抵抗則について実験的に検討を行い、一応の成果を得ることができた。しかし、植生水路における流れの抵抗則を確立するにあたって、草本類のようなフレキシブルな粗度についても検討する必要があると思われる。つまり、このような比較的弾性定数の小さい粗度が流水中に置かれると、流体力によって粗度にたわみが生じ、初期条件として与えられた粗度の高さが低下するため、実際の流体抵抗も減少するものと考えられる。このような観点から、ここに草生水路に関して検討した結果について報告する。

2. 実験概要

本実験では、高さ、幅30cm、長さ10mで底面は、発泡スチロール、両側壁は、ガラス張りの勾配可変式水路を用い、草本の模型粗度として、高さ2.5cm、幅5mm、厚さ0.14mm、弾性定数 3.83×10^9 g/cm²のポリエステルフィルムを水路床に固定した。なお、実験に際して、粗度密度 $(\lambda = 8.75 \times 10^5 \sim 3.38 \times 10^3)$ 、水路勾配 $(I = 1/50 \sim 1/250)$ 、流量 $(Q = 1 \sim 10$ 公升)、をそれぞれ変化させ擬似等流域で流速、水深、粗度のたわみを測定した。

3. 実験結果

3.1 流速分布 流速分布の一例を対数則に従って示すと図-1になる。これによると流速分布は、木生水路を対象とした実験結果と同様に、傾きの異なる2本の対数式で表せることがわかる。対数式が交わる点、すなわち勾配変化点のX座標を t とすれば、 $Y/K \geq t$ なる部分に対して流速分布は、Prandtl-Von Kármánの普遍的流速分布として知られる対数則

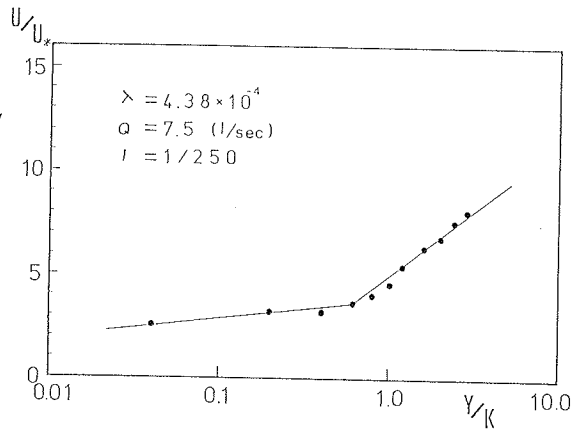


図-1 流速分布の一例

$U/U_* = A_r + 2.3 \log_{10} Y/K \dots (1)$ (U : 水深 Y における流速、 U_* : 摩擦速度、 A_r : 定数、 κ : カルマン定数、 K : 粗度高) が成り立つ。一方、水路床近傍の $Y/K < t$ なる部分では、対数式の傾きを φ とすれば、木生、草生水路に関する実験を通して、ほぼ $\varphi = 0.4/\kappa \sim 0.3/\kappa$ であり、また、(1)式と t で連続的であることから流速分布は、 $U/U_* = A_r + (2.3/\kappa - \varphi) \log_{10} t + \varphi \log_{10} Y/K \dots (2)$ で表せることがわかった。なお、(1)、(2)式中の定数 A_r は、粗度密度 (λ) 、水路勾配 (I) の関数、(1)、(2)式が変化する勾配変化点 (t) は、 λ の関数としてそれぞれ表すことができ、 $A_r = 0.1 \times \lambda^{1/2} \times I^{1/4} \dots (3)$ 、 $t = 1 + 0.1 \log_{10} \lambda$ 、 $10^{10} \leq \lambda \leq 1 \dots (4)$ を得る。

3.2 抵抗則 開水路粗面乱流の抵抗則は、流速分布式を積分して得られた対数式、 $\bar{U}/U_* = 8.5 - 1/\kappa + 2.3/\kappa \log_{10} R/k_s \dots (5)$ (\bar{U} : 平均流速, R : 径深, k_s : 相当粗度) が成り立ち、水路床の粗滑を表す重要なパラメータである k_s を適切に与えれば、実河川でも適用できることが知られている。ここに、植生水路を扱うにあたって、この(5)式を採用することにし、実際問題となる相当粗度(k_s)を決定することにした。 k_s は、木生水路の場合と同様に、

λ , I とレイノルズ数 ($Re = U_* R/\nu$) の関数で、無次元表示すれば、 $k_s/k = 8.4 \times 10^6 \times \lambda \times I^{1/2} \times Re^{-2/3} \dots (6)$ なる関係が認められた。しかし、前述したように、草本類のようなフレキシブルな粗度を対象とする場合、図-2のように流体力によって粗度にたわみが生じ、初期の粗度高(K_0)が低下し、 k_s も減少することになる。そこで、図-3のように粗度を断面一様な片持ちバリと考え、そこに、

流速分布を積分して得られる荷重(P)、すなわち $P = C_D \times \gamma_w \times b \times \int_0^{K_0} U^2/2g \, dy \dots (7)$ (C_D : 粗度の抗力係数, γ_w : 水の単位体積重量, b : 粗度の幅, g : 重力加速度) がかかるものとして力学的にたわみ量(ΔL)を推定し、さらに、たわみ角(θ)を一定として近似的に流水中での粗度高(K)を算出する方法をとった。この場合、粗度高(K)は、 $K = \phi(C_D, \gamma_w, b, g, K_0, E, I_p, \alpha, \beta, H) \dots (8)$ (E : 粗度の弾性定数, I_p : 粗度の断面二次モーメント, α : 勾配変化点, H : 平均水深) で表せ、水路床($Y=0$)における流速(U)を0とすると、 $K = [K_0^2 - \{C_D \cdot \gamma_w \cdot b \cdot K_0^4 \cdot d \cdot (\beta - \alpha)^2 / (12 \cdot g \cdot E \cdot I_p \cdot \beta^2)\}^{1/2}]^{1/2} \dots (9)$ となる。また、

式中の α , β は、流速分布式より求められ、それぞれ $\alpha = (U_*^2/6)[(t+1)\{A_r + 2.5 - 1/\kappa + (2.3/\kappa) \log_{10} t\}^2 - (t+2)(t-1)(A_r + 2.5 - 1/\kappa)^2] \dots (10)$, $\beta = (U_*^2/2)[(A_r + 2.5 - 1/\kappa + (2.3/\kappa) \log_{10} t)^2 + (1-t)(A_r + 2.5 - 1/\kappa)^2] \dots (11)$ を得る。図-4は、これらの式によって求められる \bar{U}/U_* の計算値と実測値をプロットしたもので、この図からも以上の仮定がほぼ正しいものと考えられる。

4. おわりに
ここでは、植生水路の中で、特に草生水路を想定し、流速分布形、抵抗則について検討、考察を行った。しかし、今後の課題として、木生水路での結果と合せ、実河川での実証的研究に期待する次第である。なお、実験に際して、京都大学農学部研防工学研究室の水路を使用させて頂いた。ここに深く感謝する。

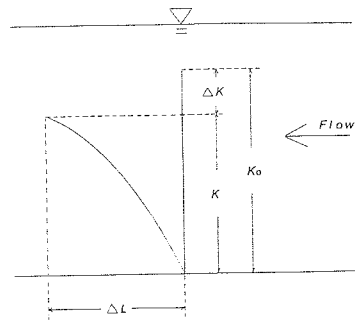


図-2 粗度のたわみ

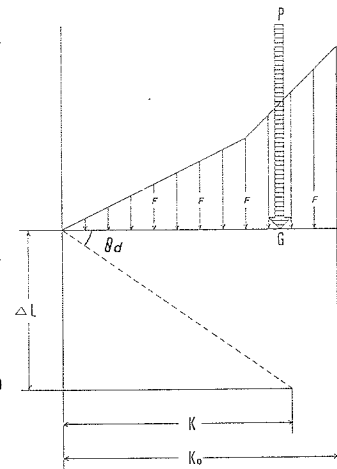


図-3 たわみの計算

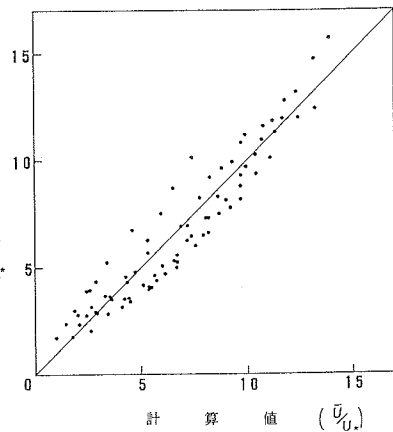


図-4 計算式の検定

ここでは、植生水路の中で、特に草生水路を想定し、流速分布形、抵抗則について検討、考察を行った。しかし、今後の課題として、木生水路での結果と合せ、実河川での実証的研究に期待する次第である。なお、実験に際して、京都大学農学部研防工学研究室の水路を使用させて頂いた。ここに深く感謝する。

注) 水路床における単位面積あたりの粗度の断面積