

61 木本植生水路における流れの抵抗則に関する研究

京都府立大学農学部 水原邦夫

1. はじめに

通常、自然の河川では、河道は石英・長石などの鉱物起源の砂礫で構成されているが、ある特定の条件が整えば、植物が河道内に侵入しその表面一面を覆うことがある。このように植物が侵入し繁茂した水路を一般に植生水路と呼んでいるが、現在のところ植生水路に関して、防災上の観点から自由に繁茂させておくことは流水疎通能の減退を招き危険であり除去すべきだという意見と、自然環境の保護という観点から自由繁茂止む無しという相反する意見も出てきている。したがって、こうした矛盾を解決するための一つの方策として、河道における植生繁茂の許容度を科学的基準に基づいて決定し、自然と調和のとれた防災体制を確立することが肝要であると考えられる。この場合、植生が流れに与える影響を科学的に評価するための基準つまり植生水路における流れの抵抗法則を明らかにすることが重要である。このような考えのもとで、従来より植生水路問題に関して取り組んでいるが、本研究では水理学的アプローチとして、灌木林の繁茂した水路を対象に実験水路に木本植生粗度モデルを千鳥状に植え付け、粗度密度、相対水深を種々変化させた実験を行い、流速分布および抵抗係数について検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は、幅、高さ30cm、長さ15mの矩形断面で勾配可変・水流循環式水路であり、流量制御はパソコンによる自動制御方式を採用している。木本植生粗度モデルとして長さ5cm、直径2.75mmの鉄製円柱を用い、水路下流端から上流13mまで所定密度で水路床に垂直に張り付けた。水理量の計測は擬似等流区間で行い、水深は1/10mm精度のポイントゲージ、流速はピトー管を用いて測定した。

本実験では、2種類の実験を行った。実験Aでは、水路勾配を1/125に固定して水路縦横断面における流速分布を詳細に測定した。実験Bでは、水路勾配(1/50, 1/100, 1/250, 1/500, 1/1000)、流量(3, 5, 10, 15, 20 l/sec)を5水準、植生粗度密度を4水準に変化させ、流れの抵抗則に関する実験を行った。植生粗度モデルは千鳥状配列とし、水路に対して縦、横の両方向に24, 8, 4, 2cmの間隔に配列し、それぞれに対してPattern 1(0.25×10^{-3}), Pattern 2(1.73×10^{-3}), Pattern 3(7.42×10^{-3}), Pattern 4(28.69×10^{-3})と呼称した。なお、上記の括弧内の数値は面積密度を意味する。

3. 結果および考察

3.1 植生粗度密度と流速分布形状の関係

図-1は、粗度密度の増大が鉛直流速分布に及ぼす影響の差異を調べるために、各粗度配列について鉛直流速分布形状を比較図示したものである。この図から明かなように、粗度密度がある程度以上大きくなると、流れの下層部と上層部における流速分布形状は異なり、粗度高よりも幾分低い位置で流速分布の勾配変化点が表れ、その勾配変化点は、粗度密度が大になるほど水路床から粗度頂の位置に

近づき、勾配変化点より下層の部分では流速の変化は少なくなることが分かる。

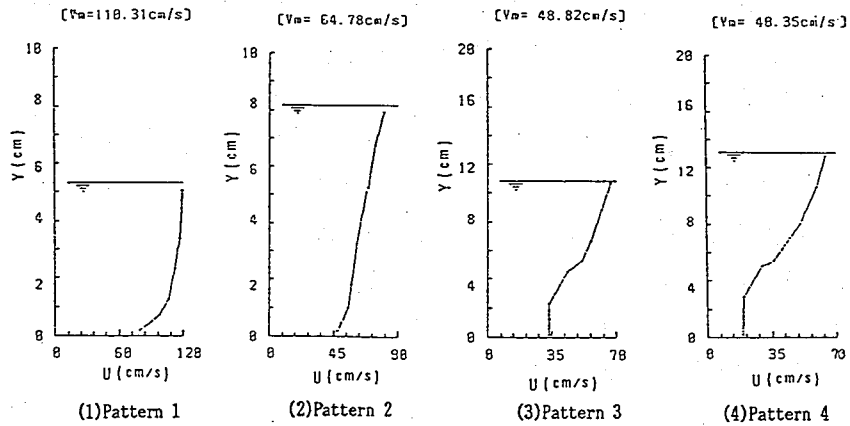


図-1 植生粗度密度の増加に伴う鉛直流速分布形状の変化 (実験条件: $Q=15 \text{ l/s}$, $I=1/100$)

図-2は、粗度密度の増大に伴う水路横断方向の流速分布の変化について検討した結果の一例を示す。この図から分かるように、植生粗度が無い場合には、水路側壁の影響をもちに受けて側壁に近づくほど流速は一段と低下し、3次元的な流れとなっているが、植生粗度が付加されると流速の減少が表れる点が側壁に近くなり、粗度密度が大きくなるにつれてその点はより側壁に近くなり、横方向の流速分布は一様化する傾向がある。なお、横方向での流速一様化傾向は、この図のように流量が小なるほど顕著になっている。以上のことから、植生粗度密度が大きくなると、流れは水路床粗度としての植生粗度の影響を支配的に受けるようになり、その反面、側壁の影響を相対的に受けにくくなって、近似的に2次元流の様相を呈するようになる。そして、粗度高の範囲内では流速の一様化傾向が表れるといえる。

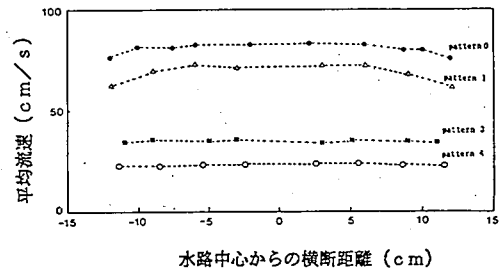


図-2 植生粗度密度の増加に伴う水路横断流速分布形状の変化 (実験条件: $Q=15 \text{ l/sec}$, $I=1/125$)

3. 2 植生粗度密度の差異による水理量 (水深・流速) の変化特性

図-3は、縦軸を植生粗度が無い場合の水深に対する粗度がある場合の水深の比として、この水深比 (h_s/h_o) と植生粗度密度 λ がどのような関係にあるかを水路勾配 I をパラメータとして調べた結果の一例を示している。この図から明かなように、粗度密度の増加とともに水深比は増大し、その増加率は漸減する傾向を示している。また、この図を同一の植生密度についてみると、水路勾配が急になるにつれ水深比は大きな値を示している。なお、本実験の範囲では、水深比の最大は約4.9 (Pattern 4, $Q=3 \text{ l/s}$, $I=1/50$) であった。一方、流速比 (粗度が無い場合の水深に対する粗度がある場合の水深の比) については、粗度密度が大になるほど流速比は減少し、その減少率は

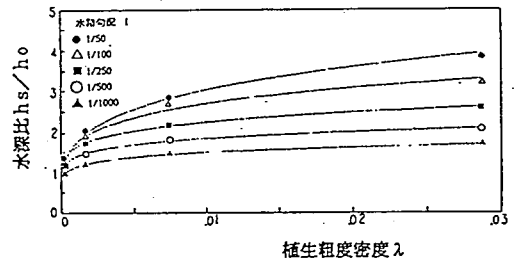


図-3 植生粗度密度 λ と水深比 h_s/h_o の関係 ($Q=15 \text{ l/s}$)

植生粗度密度の増大につれて低減する傾向を示し、本実験の範囲内では流速比の最小は約1/4であった。このように、水路に植生が侵入すると、流水の疎通能力が低下するので、今後の河道設計に当たっては植生の存在を十分に考慮に入れる必要があると思われる。

3.3 擬似木本植生水路における流れの抵抗則

一般に、河道設計を行うに当たって当該河川の洪水時における平均流速・水位などの水理量を科学的根拠に基づいて予測することが重要である。これらの水理量の中で、特に平均流速は重要な水理量であり、そのため従来より幾つかの平均流速公式が提案されているが、それらは何れも植生水路には適用不可能である。筆者らは先に格子状粗度配列の擬似木本植生水路における流れの抵抗則を提案しているが、植生水路の流れの抵抗則に関する研究は数少なく、未だ不十分である。以下では、今回の千鳥状粗度配列のもとで流れの抵抗則を検討する。

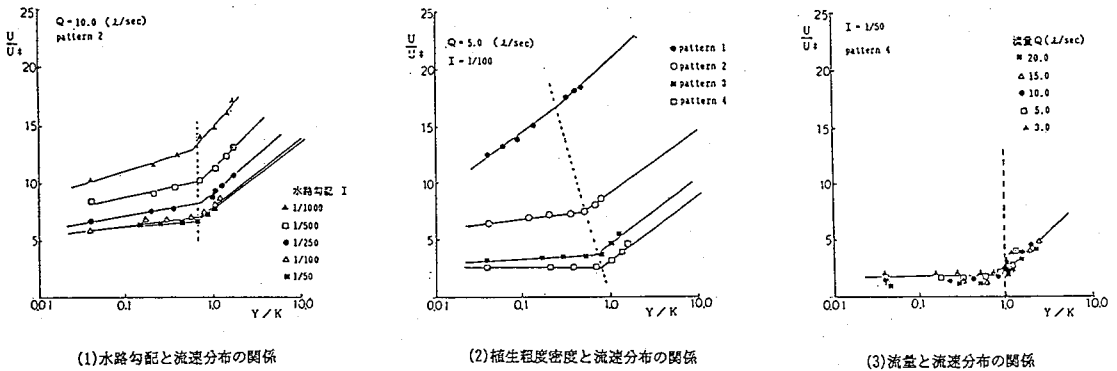


図-4 U/U_* と Y/K による流速分布の半対数表示

3.3.1 流速分布式

図-4は、流速分布を U/U_* と Y/K の関係で半対数表示した一例を示している。これらの図から判断して、流速分布形の勾配変化点 ε より上層の部分すなわち Y/K の比較的大きい部分ではPrandtl-von-Kármánの対数則に従う傾向を示し、それより下層の部分ではこの式が適用できない別の傾きをもった対数分布をしているとみなせる。そこで、このような流れの流速分布形を求めるに当たり、対数型の流速分布式に準拠して、勾配変化点 ε より上層の流れに対しては、勾配 $1/\kappa$ の開水路粗面乱流の流速分布式が適用でき、下層の部分に対しては流速分布式の傾きが ϕ で表せるものとする。即ち、

$$Y \geq \varepsilon; \quad U/U_* = A_1 + 1/\kappa \ln(Y/K) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$Y < \varepsilon; \quad U/U_* = A_2 + \phi \ln(Y/K) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 U :水路床より Y の高さでの局所流速、 U_* :摩擦速度、 K :粗度高、 A_1, A_2 :定数である。したがって、式(1)と式(2)が接続する勾配変化点 ε 、式(2)の ϕ および A_1, A_2 が決まれば、流速分布式が求まる。

まず、勾配変化点 ε は図-4から、粗度密度 λ に関係しているが、水路勾配 I 、流量 Q には無関係であることが分かる。そこで、 ε と λ の関係を半対数紙上に表すと図-5のようになる。なお、この図には草本植生水路の場合も併せて描いてある。そこで、 ε と λ の関数関係を回帰分析により求めると次式が得られた。

$$\varepsilon = (1.01 + 0.09 \ln \lambda) K \quad \dots \dots \dots (3)$$

φについては、図-4から明らかなように勾配変化点より下層の流速分布はほとんど一定の傾きを示していることから、全実験資料の平均値をとれば、

$$\phi = 0.69 \dots\dots\dots(4)$$

定数A₁は図-6に示すように、粗度密度λと水路勾配Iが関係しており、Rayleighの方法によりA₁=αλ^aI^bと置き、実験値を基に最小自乗法によりその関数形を求めたところ次式が得られた。

$$A_1 = 0.45\lambda^{-0.33}I^{-0.18} \dots\dots\dots(5)$$

一方、定数A₂に関しては式(1)と式(2)が勾配変化点εで交わるのであるから、次式のように表される。

$$A_2 = A_1 + 1/\kappa \cdot \ln(\varepsilon/K) - \phi \ln(\varepsilon/K) \dots\dots\dots(6)$$

3.3.2 抵抗則式

いま、平均流速をU_m、摩擦速度をU_{*}、水深をH、水路床からYの高さでの局所流速をUとすれば、

$$U_m/U_* = 1/H \cdot \int U/U_* \cdot dY \dots\dots\dots(7)$$

と表される。式(7)の右辺に式(1)、式(2)を代入し積分計算を行い、更に式(3)~式(6)、κ=0.4を代入すれば、擬似木本植生水路の抵抗則実験式として次式が得られた。

$$H < \varepsilon; U_m/U_* = 0.45\lambda^{-0.33}I^{-0.18}$$

$$+ 1.81 \ln(1.01 + 0.09 \ln \lambda) + 0.69 \{ \ln(H/K) - 1 \} \cdot (8)$$

$$H < \varepsilon; U_m/U_* = 0.45\lambda^{-0.33}I^{-0.18}$$

$$+ 1.81/H(1.01 + 0.09 \ln \lambda)K + 2.5 \{ \ln(H/K) - 1 \} \cdot (9)$$

なお、格子状粗度配列での実測値と上式による計算値を比較したところその適合性は良好であることが確かめられた。

4. おわりに

本研究を遂行するに当たって、六甲砂防工事事務所の前所長矢沢昭夫氏および関係各位、また京都府立大学農学部砂防工学研究室の専攻生諸君に多大なる協力を得たことをここに記して感謝したい。

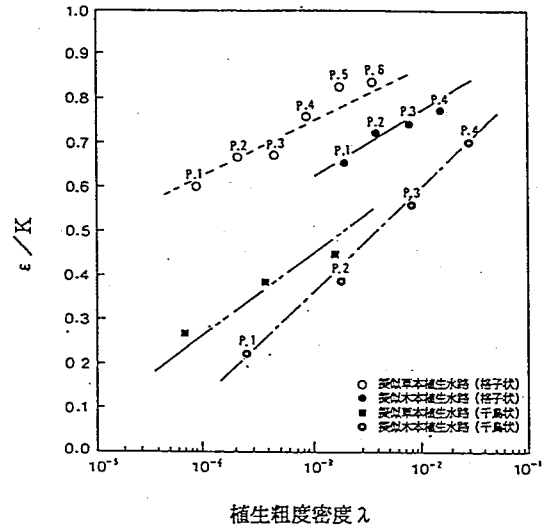


図-5 ε/Kと植生粗度密度λの関係

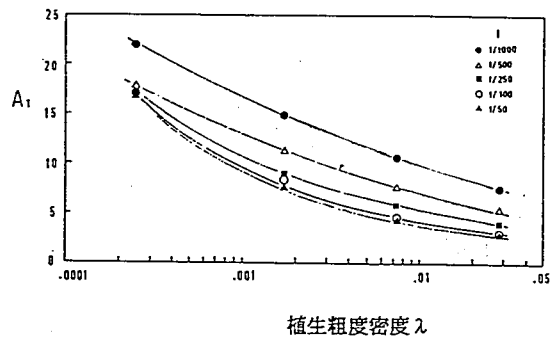


図-6.1 A₁と植生粗度密度λの関係

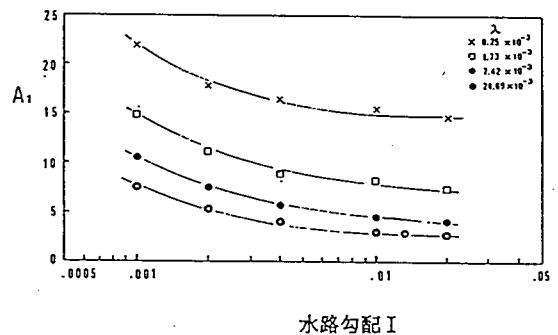


図-6.2 A₁と水路勾配Iの関係