

急勾配粗面上の雨水流実験と抵抗則の推定

Experiments of Overland Flow on Steep Rough Surfaces and
Estimation of Resistance Formula徳島大学工学部 正員 〇端 野 道 夫
徳島大学大学院 学生員 猪 熊 秀 之

1. は し が き

山地小流域での雨水の流動場はほとんど山地斜面部であり、豪雨時には山腹粗面上に薄層流 (Thin sheet flow) としての表面流が生起すると考えられる。このような急勾配粗面上の薄層流の抵抗則は流出解析における根本的課題の一つであり、多くの研究がなされているものの、不明確な点は少なくない。そこで、筆者らは流出解析の立場より、急勾配粗面上の薄層流について一連の実験的研究を行ってきた。

本論文では、粗面薄層流の抵抗則に関する既往の研究について概説し問題点を述べ、筆者らの実験結果と比較検討する。さらに、実山地流域への応用を目的として、抵抗則を Darcy-Weisbach のマサツ抵抗係数 f と Reynolds 数 R の関係でモデル化し、降雨・流量の非定常データのみからモデル抵抗則のパラメータを推定する方法について、数値実験的に考察する。

2. 粗面薄層流に関する既往の研究成果

ここでは、主として、断面形状の影響が無視でき、かつ相対粗度が大きく、流れが層流形態に近い領域についての研究に注目することにする。まず、1939年頃より始まる Ree, Palmer らの一連の実験的研究があげられる。¹⁾²⁾³⁾ 彼らは種々の牧草 (Bermuda grass), 芝, その他の地面浸食防止用植物を用いた屋外水路で、Manning の粗度係数 n と水深 h , 単位幅当りの流量 q との関係を調べた。植生の高さより低い水深の流れ (Low flow) では n はほぼ一定であるが、次第に水深が大きくなると n は急激に小さくなることを見出した。このとき、Low flow では、水路土表面上の一樣水深の流れでなく、小さな水みち部分に流れがかったより水深の評価に問題が残されていることを Palmer 自身指摘している。¹⁾

一方、Izzard は空港、道路面上の雨水流解析の目的から、人工降雨発生装置付きの室内実験水路に種々の舗装用骨材あるいは芝生 (Blue grass) を敷き、平均水深 h と単位幅流量 q の間に次式のような関係を得た。⁴⁾⁵⁾

$$h = \alpha q^{1/3}, \quad \alpha = (0.0007r + \beta) / I^{1/3} \quad (1)$$

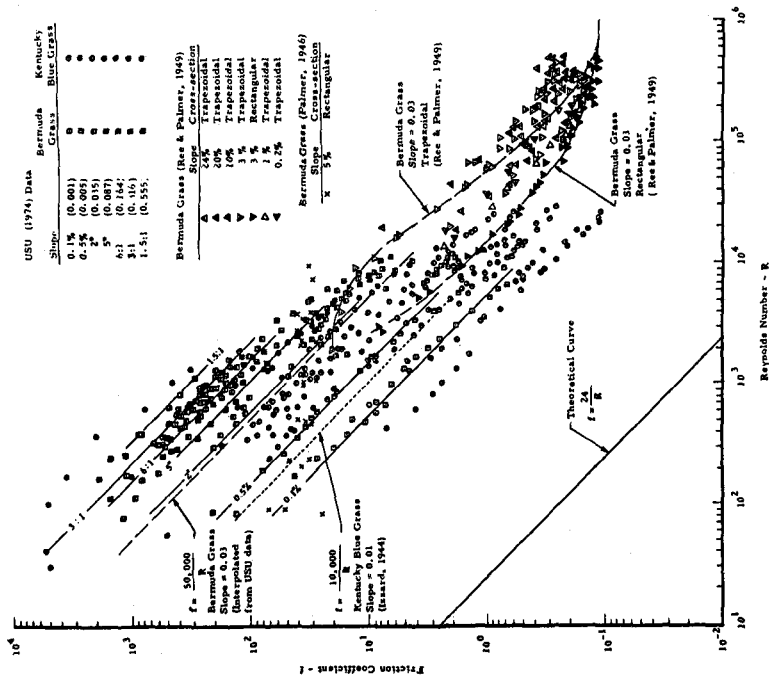
ここに、 r : 降雨強度 (inch/hr), β : 粗度要素のみであたえられるとし、別途求められている。(1)式を Darcy-Weisbach の f と $R = q/\nu$ の関係に書き直せば、

$$f = C/R \quad (2) \quad C = \frac{8g}{\nu} (0.0007r + \beta)^3 \quad (3)$$

となり、層流形態の抵抗則を示すことが明らかにされた。とくに、滑面層流では $C = 24$ であるのに対し、Blue grass では $C \approx 10^4$ にも達することは注目される。

その後、Wood・Brater は比較的相対粗度の小さい流れで、(2)式の C 値に対する勾配、雨滴インパクト効果を調べ、砂粒床では水路勾配とともに C 値が増加し、緩勾配の方が雨滴インパクト効果が大であるとしている。⁶⁾⁷⁾ しかし、Wenzel はロスアンゼルス空港の現地データを解析し、 f 値に対する雨滴インパクト効果はほとんどないことを明らかにした。⁸⁾ Phelps は人工芝、砂粒等を用いた実験で層流領域の f を相対粗度 d/h と R の関数とし、 f 値に対する相対粗度の影響を調べ、相対粗度の増加とともに f 値が大きくなり、また、遷移領域が始まる限界 Reynolds 数 R_c は相対粗度が大きいほど小さく、 $R_c \approx 100 \sim 750$ と変化している。⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾

Chen は Bermuda grass を急勾配水路に植込み、 $f-R$ 関係を図-1のように整理し、Palmer, Ree・



Palmer, Izzard らの実験と比較検討した。その結果、自然芝生に対する層流領域の f は水路勾 I と R の関数で表されるとし、

$$f = 510,000 I^{0.662} / R \quad (4)$$

なる関係を得た。¹²⁾ また、このような層流領域は水路勾配が小さいほど大であり、図-1より1.5:1勾配では $R_0 \div 10^3$ 、1%勾配で $R_0 \div 10^4$ 程度になるだろうとしている。

一方、我が国での粗面薄層流の研究は主として乱流領域に焦点を置いた岩垣の研究¹³⁾が最初のものである。その後、土屋は土砂面上の水深の小さい流れの実験を行い、Reynolds数の小さい領域では、滑面水路における層流の抵抗則と同様の傾向を示すが、 f 値はかなり大きく、その支配要素として h/d をあげることができるとしている。¹⁴⁾ 高樺・岸本はガラスウール、土砂を敷いた急勾配水路で中間流のある表面流の非定常流実験(降雨一定、流量変化)を行い、水深を用いずにManning則を仮定した理論より間接的に n 値を計算し、流量に関係なく n 値はほぼ一定と見なせるとした。¹⁵⁾ しかし、この場合の実験、解析方法は前出までの研究とかなり異なる点で、厳密な比較検討は無理のようである。最近では、地面浸食に関連した芦田らの研究¹⁶⁾、粗度要素の粒径と集中度を変化させた神田らの研究^{17) 18)} があげられる。

3. 筆者らの実験結果

3.1 実験装置と実験方法

実験は大別して、水路上流端より一定流量を流す「等流実験」と水路上部の降雨発生装置より一定強度の雨水を供給する「降雨実験」に分けられる。さらに、降雨実験は、降雨一定でかつ流れも定常な「定常実験」と初期流量が0である状態で一定降雨を供給し、流量が立ち上がり定常に達した後に降雨を停止し、十分に流量がてい減するまでの一出水記録をとった「非定常実験」に分けられる。前者の定常実験データが次項3.2での解析に用いられ、後者の非定常実験データは後節4.で用いられる。水路は E_1 水路(長さ $l=610$ cm, 幅 $B=34.5$ cm)と E_2 水路($l=520$ cm, $B=22.5$ cm)の2種類を用い、前者は勾配を $\sin\theta=0.155$ に固定し、後者は $\sin\theta=0.01\sim0.333$ の範囲で変化させた。 E_1 水路を用いた実験では¹⁹⁾、降雨実験のみを行い、斜面粗度材料として、さらし布、ネット(1 cmメッシュの金網)、ステラシート等を組み合わせたもの、および粗度をつけない場合(木板床)の4種類を用いた。この場合の水深はほとんど測定不可能であったので、下流側110 cm区間での流速をトレーサーにより測定し、下流端に設けられた三角堰によって測定された流量とより、水深を逆算した。 E_2 水路を用いた実験ではベニヤ板上に人工軽量骨材(ライオナイト、平均粒径 $d=0.9, 1.45$ cmの2種類)^{20) 22)}、砂礫($d=0.33, 0.55$ cmの2種類)²¹⁾、または人工芝(三菱アストロターフ、芝高2.5 cm)を一層に接着した水路床を設けた。人工芝の場合は降雨実験のみを、その他の場合は等流および降雨実験を行った。流量測定は E_1 水路同様に三角堰で測定したが、流量がとくに小さい等流実験ではメスシリンダーを併用した。水深基面は、流出解析上の都合を考慮して、ベニヤ板面にとり、水面までの距離をポイントゲージで測定し、断面方向3点の平均を水深 h とした。各粗度材料の間隙率 λ と水深 h の関係も別途求めた。なお、降雨実験の水深測定位置は下流端近傍であり、非定常実験では、ビデオで三角堰の越流水深を記録したものを1秒ごとの流量に変換した。

3.2 $f-R$ 関係

前述の降雨実験(定常実験)と等流実験データの主なものより、 $f=8gIh^3/q^2$ を計算し、 $R=q/\nu$ との関係で図示すれば、図-2のようである。この図より明らかなように、滑面層流の直線($f=24/R$)にほぼ平行な領域が存在する。この部分を図-1の場合と同様に層流領域と定義すれば、布、ネット、ステラシート等の比較的粗度の小さい流れでは滑面と同様の挙動を呈し、 $R_0=400\sim500$ である。ところが、砂礫($d=0.33, 0.55$ cm)を用いた等流実験では層流領域は $R\div 3\times 10^3\sim 6\times 10^3$ にも達するように見える。さらに、人工骨材($d=0.9, 1.45$ cm)を用いた等流実験では、層流の傾きよりもさらに大きくなるが、ほぼ直線的減少を f は示す。この領域を擬似層流領域と呼ぶことにする。このような擬似層流形態は図-1のよう

な植生粗度では見られず、ここで使用した人工骨材の特性であるのか、あるいはここで用いた水深基面の取り方によって現れたのかは今後の検討を要する。なお本実験範囲では、この場合の遷移領域および乱流領域は不明であるので、参考資料として遷移領域にあると思われる粗面開水路の実験値 ($d = 0.75, 1.5, 2.5$ cm, $I = 0.0167, 0.0125$)²³⁾を図-2に併示した。

砂礫および人工骨材の等流実験値を用い、(擬)層流領域の f を R, I 、および砂粒 Reynolds 数 $u_* d/\nu$ の関数として多変量解析すれば、次式のように、 f は勾配、粗度の増加とともに大きくなるという既往の

$$f = 43.67 R^{-1.369} I^{0.157} (u_* d/\nu)^{1.217} \quad (\text{重相関係数 } 0.981) \quad (5)$$

知見とほぼ一致する。なお、砂粒 Reynolds 数の替りに相対粗度 d/h を用いた場合、(5)式の R の指数は -0.784 と図-2の傾きより小さくなるため、独立変量として相対粗度は不適当であると思われる。

図-2には砂礫および人工骨材の降雨実験データはプロットされていないが、傾向は等流実験とほぼ同様で雨滴インパクト効果は顕著に現れなかった。²¹⁾

次に、 $d = 0.9$ cmの人工骨材での低 Reynolds 数での $f-R$ 関係に注目する。 $R \approx 60 \sim 200$ ($h \approx 0.4 \sim 0.5$ cm) 以下では、 f 値は Reynolds 数の増加とともに急激に大きくなる。この領域ではもはや表面流というよりも Porous media 中の流れに類似していると考えたほうが妥当であろう。いま、Darcy 則を仮定すれば、次式のように、透水係数 μ が一定ならば f は R に比例することになる。しかし、いまの場合の間隙率 λ は、

$$f = \frac{8g\nu}{\mu^3 I^2} \cdot R \quad (6)$$

図-3に見られるように、 $h \approx 0.65$ cm 以下では h の増加とともに減少し、したがって透水係数も減少すると考えられる。したがって、図-2に見られるような $f \propto R^b$ ($b > 1$) なる関係は数値的には信頼性が低いものの定性的には容認されるものと思われる。このような極端な例は既往の研究には見られないが、低 Reynolds 数になると $f \propto R^{-1}$ の傾きよりはずれ、ほぼ $f = \text{一定}$ あるいは $f \propto R$ の傾向が若干見られる。

芝高 2.5 cm の人工芝を用いた降雨実験は前述までのとかなり様相が異なる。すなわち、 $R < 30$ ではほぼ $f \propto R$ 、 $30 < R < 200$ で $f \propto R^{-1}$ 、 $200 < R < 2,000$ で $f = \text{一定}$ 、 $2,000 < R$ で $f \propto R^{-1.4}$ と変化している。各変曲点に対する水深 h はそれぞれ、 $h = 0.3, 0.6, 2.64$ である。こうした変化は図-1の自然芝の場合には見られず、用いた人工芝特有のものと思われる。しかし、このようなデータは次節 4. で述べるモデル抵抗則のパラメータ推定法の考察には好都合である。

以上のように、人工芝以外の植生および砂粒粗面上の雨水流では、Reynolds 数、斜面勾配、相対粗度、粗度要素の特性等の影響を受ける層流領域がかなり広く、実際の流出解析でもこの領域を無視することができないであろう。とくに、従来、道路、空港、ゴルフ場等の丘陵地の雨水流解析では Manning 則を前提としたものが見られるが、今後の詳細な検討が必要であろう。

4. 抵抗則の推定

4.1 概 説

本節では実際の流出解析への応用を目的として、非定常データ (降雨・流量) のみから、図-2のような抵抗則を推定する方法を考察する。本実験データの場合、Kinematic Wave (K.W.) 式から始めれば十分であるが²⁴⁾、間隙率 λ の変化を考慮する必要がある。また、流域あるいは斜面の下流端からの流出量を対象とすることが多いので、K.W. 式の近似式としての貯留型モデルを用い、抵抗則のパラメータ推定を行うことにする。

4.2 間隙率の変化を考慮した貯留型モデルと K.W. 式の関係

K.W. 式は周知のように次式のようにである。

$$\frac{\partial (\lambda h)}{\partial t} + \frac{l \cdot \partial q}{\partial x} = r \quad (7) \quad h = k l^p q^p \quad (8)$$

ここに、 l ：斜面長、 h ：水深、 q ：斜面単位面積当りの流出量、すなわち流出高、 t ：時刻、 x ：斜面上流端よりの距離、 λ ：粗面の間隙率。 k 、 p は流出形態によって、次式のように与えられ、Reynolds数によって式の使い分けができるとする。

$$(i) \text{ 中間流 (Darcy 則) } ; p = 1, \quad k = 1/\mu I \quad (\mu : \text{透水係数}) \quad (9)$$

$$(ii) \text{ 層流表面流 } ; p = 1/3, \quad k = (C\nu/8gI)^p \quad (10)$$

$$(iii) \text{ 乱流表面流 (Chezy 則) } ; p = 2/3, \quad k = (f/8gI)^{1/3} \quad (11)$$

また、間隙率 λ は本実験データ (人工骨材、人工芝) の場合の $\lambda-h$ 関係 (図-3 参照) を参考に、水深 h の 2 次多項式で表されるものとする。すなわち

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 h + \lambda_3 h^2 \quad (12)$$

いま、 $r = \text{const.}$ とすれば、降り始め時 ($t=0$, $h=q=0$) より、定常時 ($t=t_0$, $h_0=k l^p q_0^p$, $r=q_0$)

までの貯留高 s は次式のように与えられる。

$$s = r t - \int_0^t q dt \quad (13)$$

(13) 式に (7)、(8) 式の特性方程式から得られる関係式：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 h + \lambda_2 h^2 + \lambda_3 h^3 &= r t \\ \int_0^t q dt &= \frac{p \cdot q}{r} \left\{ \frac{\lambda_1}{(1+p)} \cdot h + \frac{2\lambda_2}{(1+2p)} h^2 + \frac{3\lambda_3}{(1+3p)} h^3 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

を代入すれば次式が得られる。

$$s = \frac{\lambda_1}{(1+p)} h \left\{ 1+p \left(1-\frac{q}{r} \right) \right\} + \frac{\lambda_2}{(1+2p)} h^2 \left\{ 1+2p \left(1-\frac{q}{r} \right) \right\} + \frac{\lambda_3}{(1+3p)} h^3 \left\{ 1+3p \left(1-\frac{q}{r} \right) \right\} \quad (15)$$

ここに、定常状態 ($q=q_0=r$) のとき、

$$s = s_0 = \frac{\lambda_1}{(1+p)} h_0 + \frac{\lambda_2}{(1+2p)} h_0^2 + \frac{\lambda_3}{(1+3p)} h_0^3 \quad (16)$$

さらに、定常状態より降雨が止み、貯留高 s がてい減するとき、時間軸を降雨停止時 ($t'=0$) に合せ、

$$s = s_0 - \int_0^{t'} q dt' \quad (17)$$

(17) 式に、このときの特性方程式から得られる関係式：

$$\int_0^{t'} q dt' = - \int_{h_0}^h \left\{ (\lambda_1 + 2\lambda_2 h + 3\lambda_3 h^2) - p \left(1-\frac{q}{r} \right) \cdot (\lambda_1 + 4\lambda_2 h + 9\lambda_3 h^2) \right\} dh \quad (18)$$

を代入すれば次式が得られる。

$$s = \frac{\lambda_1 h}{(1+p)} \left\{ 1-p^2 \left(1-\frac{q}{r} \right) \right\} + \frac{\lambda_2 h^2}{(1+2p)} \left\{ 1-4p^2 \left(1-\frac{q}{r} \right) \right\} + \frac{\lambda_3 h^3}{(1+3p)} \left\{ 1-9p^2 \left(1-\frac{q}{r} \right) \right\} \quad (19)$$

とくに、 $\lambda = \text{const.} = \lambda_1$, $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$ の場合を考えれば、 $s-q$ 関係がループを描くことが (19) 式より容易に理解できる。 $q = q_0 = r$ のときの $s-q$ 関係のみ (18) 式のような 1 価関係が成り立つが、そうでない場合、

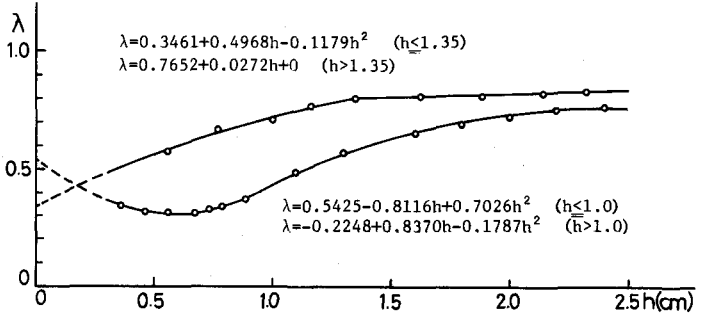


図-3 $\lambda-h$ 関係 (人工骨材、人工芝)

10式からの偏りは、 $0 < p \leq 1$ ゆえ、てい減部 (10式) よりも上昇部 (10式) で顕著であることが判る。このような $s-q$ 関係のループを Prasad²⁵⁾ は $s = K_1 q^p + K_2 dq/dt$ の非定常項 $K_2 dq/dt$ でモデル化した。このパラメータ K_2 は 10, 10式で説明ができる。²²⁾ しかし、間隙率 λ が h の関数として変化する場合の $s-q$ 関係のループはかなり複雑である。とくに、中間流⇄層流表面流あるいは層流表面流⇄乱流表面流、と流れが特定の Reynolds 数 R_c を境に変化する場合、この遷移点 R_c での 10 あるいは 10式の両者の値は一致せず、 s の連続条件より是正する必要がある。たとえば、上昇部で、中間流 ($p=1$) から層流表面流 ($p=1/3$) へと流出形態が変化するとき、遷移点 R_c での 10式による両者の s の差 Δs を R_c 以上の層流表面流に対して 10式より求めた s に加えねばならないことになる。

4.3 流出形態が変化する場合のパラメータ推定

いま、3. の定常実験あるいは等流実験の結果をもとに、(I) 中間流 - (擬) 層流表面流、あるいは (II) (擬) 層流 - 乱流表面流が卓越する場合を考え、それぞれの $f-R$ 関係を図-4 のようにモデル化すれば、他の領域の必要なパラメータは、遷移点 R_c の連続条件より、 a 、 b 、 R_c の関数として与えられる。ここでパラメータ b は (9) ~ (11) 式の p と、 $p = (b+1)/3$ なる関係があり、 R_c は既知とすれば、 p (or b) と a の二つのパラメータを推定すればよいことになる。

計算式として、10式に対応する差分表示の連続式と (8) 式の運動式および $s-q$ 関係の 10式または 10式を用いる。10, 10式はパラメータ p に変化なく、一定降雨なる仮定のもとに誘導したものであるから、 p が変化する遷移点 R_c では 10 あるいは 10式を s に関する連続条件から前述のように是正せねばならない。

また、間隙率 λ と水深 h との関係式の係数が図-3 に示すように変化する場合も s に関する同様な注意が必要である。ところで、一定降雨でない場合、図-5 のように微小単位時間 Δt に注目すれば、 Δt 内では r = 一定とでき、 Δt 前の $q = q_{i-1}$ と比較し、 $r \geq q_{i-1}$ ならば上昇部の 10式がそのまま利用できるはずである。また、 $r < q_{i-1}$ ならば、てい減部の 10式で q を $(q-r)$ 、 r を $(q_{i-1}-r)$ と形式的に置き替えたものが近似的に利用できるだろう。

解析対象として勾配 $I = 0.155$ の人工骨材 ($d = 0.9 \text{ cm}$) および人工芝粗度の場合を選び、3.1 で述べたような「非定常実験」から得られたハイドログラフから $f-R$ 関係のパラメータ a 、 p (or b) を推定することにし、遷移点 R_c は一応既知とする。最適パラメータの推定手順は次のようにした。すなわち、i) p (or b) を特定値に固定し、ii) a の初期値を適当に設定し、iii) 計算流出高 q_c と実測流出高 q との差の $r.m.s.$ 誤差 E_r を計算し、iv) E_r が極小になるまで a を等比率的に変化させ iii) をくり返し、最小 E_r を与える a を最適値とする。v) p を変化させ ($p = 2/3, 1/2, 1/3, 1/4, \dots, 1/8$)、ii) ~ iv) をくり返し、最も小さい E_r を与える p (or b) と a を最終的な最適値とする。

人工骨材 ($d = 0.9 \text{ cm}$) の場合を (I) 中間流 - (擬) 層流表面流モデルで、人工芝の場合では $R < 2,000$ の範囲に対して (II) (擬) 層流 - 乱流表面流モデルで解析することにし、それぞれの遷移点 R_c は図-2 の実験結果を参考に、前者は $R_c = 60$ 、後者は $R_c = 200$ とした。得られた結果より、 $s-q$ 関係、 $q-t$ 関係の実測値と計算値を図示すれば、図-6、7 のようである。以下、(I)、(II) の場合に分けて比較考察する。

(I) 中間流 - (擬) 層流表面流の場合 まず、降雨開始直後よりハイドログラフの立ち上がり付近までに注目すれば、この場合の計算値 (○印) の方が立ち上がりが早く、推定されたパラメータ p の値は $p = 1/8$ となり図-2 の等流実験結果 ($p = 1/5 \sim 1/6$) とかなり差が見られる。この原因として、1) 低水深での間隙率 λ の不正確さ、2) 遷移点 R_c 以下の $f-R$ 関係のモデル化の不正確さ、3) 等流実験の低 Reynolds 数領域

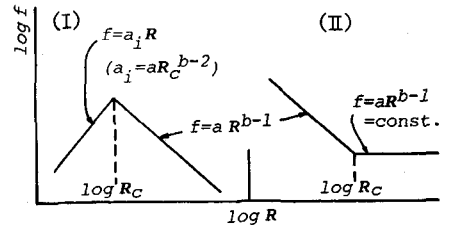


図-4 $f-R$ 関係のモデル化

i) 上昇部 (15) 式 ii) てい減部 (19) 式

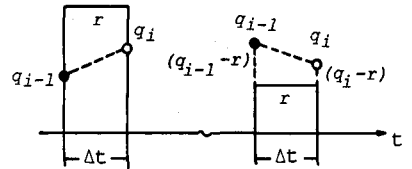


図-5 $s-q$ 関係式の使い分け

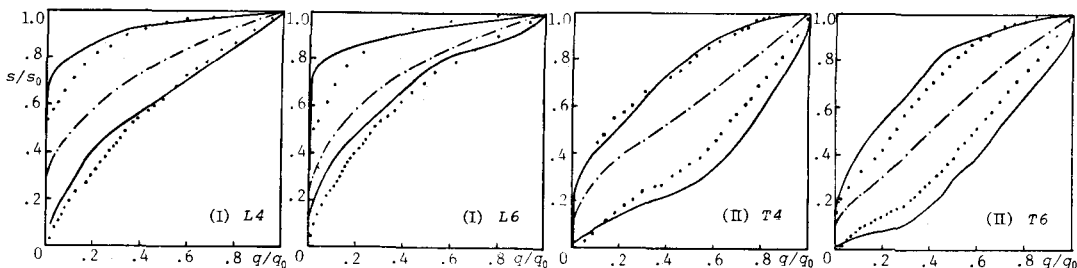


図-6 $s-q$ 関係 (実線: 実測値, 鎖線: $q\theta$ 式による定常値)

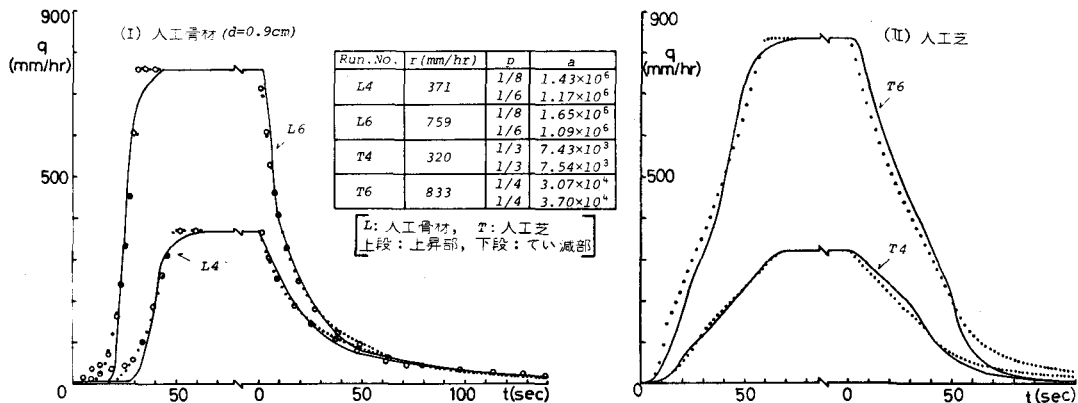


図-7 $q-t$ 関係 (実線: 実測値)

($R < 60$) の f 値の算定誤差, 等が考えられる。一方, てい減部ではこうした問題点はほとんど現れず推定パラメータもほぼ妥当であり, 今後, 上昇部立ち上がり付近に重点を置いた詳細な検討が必要である。

いま便宜的に中間流領域を無視し, すべての領域が(擬)層流領域であると仮定すれば図中の点線のように, てい減部では上述の中間流考慮の場合同様にほぼ妥当な結果となる。しかし, 上昇部では立ち上がり付近での実測値との差がかなり改善されるが, 推定パラメータは中間流考慮の場合と同様に等流実験のそれと一致しない。このことから, 本ケースのように, ハイドログラフの立ち上がりが極めて遅い場合は上昇部データからのパラメータ推定はむずかしいが, てい減部データではほぼ妥当な値が推定できるといえよう。なお, $s-q$ 関係における定常関係($q\theta$ 式)からの差はてい減部でも上昇部と同程度の大きさとなっている。これは λ が一定でないことによるものであり, このような場合に近似的に定常関係を用いれば, 上述のように波形は一致しても推定されたパラメータは信頼できなくなることが予想される。

Ⅳ (擬)層流-乱流表面流の場合 人工芝の定常実験結果によれば $p \approx 1/3 \sim 1/4$ であり, 上昇部, てい減部のデータによる両者の計算結果とはほぼ一致する。この場合の中間流領域は上昇部にもほとんど影響がなく無視できると考えられる。 $q-t$ 関係によれば, 遷移点 R_c の影響がてい減部で顕著に現れているようであり, $R_c = 200$ ($q_c = 138 \text{ mm/hr}$) 付近で計算値と実測値が交叉している。定常降雨実験で得られた R_c とてい減部に対応する等流実験との相違, 静水時での $\lambda-h$ 関係を用いたこと, 等の原因が考えられる。 $s-q$ 関係によれば, 前述の人工骨材の場合よりも一層非定常性が強いことがわかる。

以上の解析例より明らかなように, K. W. 法の近似解法としての貯留型モデルは抵抗則のパラメータ推定に十分利用できるものと思われる。とくに中間流領域が無視しう程度の層流あるいは乱流領域には有力であるといえる。ここでの解析データのように, λ の変化が大きい場合には $\lambda-h$ 関係がパラメータ推定に与える影響が大きい点で注意が必要である。

5. あとがき

本論文では流出解析のための抵抗則 ($f-R$ 関係) に関する基礎的知見を得るために、急勾配粗面上の雨水流実験を行い、既往の研究成果と比較検討した。 f 値は Reynolds 数, 勾配, 相対粗度, 粗度特性, 等により大きく変化し、普遍的な定量化は困難であるが、層流あるいはそれに近い擬層流の領域が植生粗度, 人工骨材粗度では極めて広いことが明らかとなった。さらに、実流域でのこのような $f-R$ 関係を推定する方法として、K.W. 法の近似解としての貯留型モデル (間隙率の変化および非定常項考慮) を提案した。人工骨材, 人工芝を用いた、(擬) 層流表面流あるいは層流-乱流表面流の遷移点を含む場合の解析結果はほぼ満足なものであり、実流域に対しても有効であることが期待できる。

最後に、本研究は文部省科学研究費 (豊国教授代表) の研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) V. J. Palmer ; Retardance Coefficients for Low Flows in Channels Lined with Vegetation, AGU, Vol. 27, 1946
- 2) W. O. Ree ; Hydraulic Characteristics of Vegetation for Vegetated Waterways, Agricultural Engineering, Vol. 30, No. 4, 1949
- 3) W. O. Ree and V. J. Palmer ; Flow of Water in Channels Protected by Vegetative Linings, U. S. Soil Conservation Technical Bulletin No. 967, 1949
- 4) C. F. Izzard ; The Surface-Profile of Overland Flow, AGU, Vol. 25, 1944
- 5) C. F. Izzard ; Hydraulics of Runoff from Developed Surfaces, Proc. the 26th Annual Meeting of the Highway Research Board, Vol. 26, 1946
- 6) D. C. Woo and E. F. Brater ; Laminar Flow in Rough Rectangular Channels, Jour. Geophysical Research, Vol. 66, No. 12, 1961
- 7) D. C. Woo and E. F. Brater ; Spatially Varied Flow from Controlled Rainfall, ASCE, Vol. 88, No. HY 6, 1962
- 8) H. G. Wenzel, Jr. ; The Effects of Raindrops Impact and Surface Roughness on Sheet Flows, WRC Research Report No. 34, University of Illinois, Water Resources Center, 1970
- 9) H. O. Phelps ; The Friction Coefficient for Shallow Flows over a Simulated Turf Surface, WRR, Vol. 6, No. 4, 1970
- 10) H. O. Phelps ; Friction Coefficients for Laminar Sheet Flow over Rough Surfaces, Proc. Instn. Civil Eng. Part 2, 59, 1975
- 11) H. O. Phelps ; Shallow Laminar Flows over Rough Granular Surfaces, ASCE, Vol. 101, No. HY 3, 1975
- 12) C. L. Chen ; Flow Resistance in Broad Shallow Grassed Channels, ASCE, Vol. 102, No. HY 3, 1976
- 13) 岩垣雄一 ; 雨水流による地面浸食機構に関する基礎的研究, 学位論文, 昭. 30
- 14) 土屋義一 ; 地面浸食に関する二, 三の水理学的考察, 土木学会論文集, No. 59, 昭. 33
- 15) 高橋・岸本 ; 雨水流の実験的研究, 京大防災研究所年報, 第 4 号, 昭. 36
- 16) 芦田・大同・高橋・水山 ; 急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 16 号 B, 昭. 48
- 17) 神田・喜久里 ; 粗面上の薄層流の抵抗則に関する実験的研究, 土木学会年講概要集, 第 32 回, 昭. 52
- 18) 神田・喜久里 ; 粗面上薄層流の抵抗則, 土木学会年講概要集, 第 33 回, 昭. 53
- 19) 端野・地紙 ; 山地斜面流の抵抗則に関する実験的研究, 中四支部年講概要集, 第 25 回, 昭. 50
- 20) 端野・藤原 ; 急勾配粗面上の薄層流に関する実験的研究, 中四支部年講概要集, 第 26 回, 昭. 51
- 21) 端野・藤原 ; 急勾配粗面上の薄層流に関する実験的研究 (第 2 報), 中四支部年講, 第 27 回, 昭. 52
- 22) 端野・猪熊・谷上 ; 急勾配粗面上の薄層流に関する実験的研究 (第 3 報), 中四支部年講, 第 28 回, 昭. 53
- 23) 中西良考 ; 砂利河床上の流れの抵抗則, 徳島大学卒業論文, 昭. 47
- 24) D. A. Woolhiser and J. A. Liggett ; Unsteady One-dimensional Flow over a Plane - the Rising Hydrograph, WRR, Vol. 3, No. 3, 1967
- 25) R. Prasad ; A Nonlinear Hydrologic System Response Model, ASCE, Vol. 93, No. HY 4, 1967