

徳島大学工学部 正員 端野 道夫
会計検査院 正員 藤原 敏

1. はじめに 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、流出抵抗の大きさから見ても河道部に比して卓越していることから、こうした斜面部における流出抵抗則、特に斜面部表面流の抵抗則を解明することは災害の予知、防御に関する重要な知見を与えよう。従来、表面流抵抗則は乱流則であるManning則が採用されているものの、このManning則仮定の妥当性についてはかなり議論のあるところであり、筆者らは関連の研究を行ってきた。本報告は表面流抵抗則としてManning則を用いた場合の疑問点を述べ、実験室における粗面薄層流の抵抗則に関する実験成果を要約する。さらに、実山地斜面部の流出抵抗則の推定を試みる。

2. 表面流抵抗則としてのManning則の疑問点 筆者らが解析した四国の山地小流域における中間流出最大強度 γ_a は、 $\gamma_a \div 1.5 \sim 6.0 \text{ mm/hr}$ 程度で、数 10 mm/hr もの豪雨時には山地斜面上に表面流が生起していると考えられる。従来、このような豪雨の流出解析をKinematic Wave法により実施すると、同一流域にもかかわらず等価粗度係数 N は出水ごとに大きく異なり、流域固有の値と見なせなりことがよく経験される。また、斜面部の抵抗が河道部のそれと比べ卓越しているような山地小流域では、貯留関数法の指数 p によって流出形態が推察できることを利用して出水時のピーク流出高 $g_{\max}$ と p の関係を調べると、 γ_a より $g_{\max}$ が大きくなるにつれて p 値は $p=1$ より次第に小さくなり $p=1/3$ (層流形態) に近づく²⁾。このことはManning則の $p=3/5$ なる一定値と矛盾する。以上、二点のManning則の矛盾点に着目し、若干の理論的考察と実山地斜面を想定した急勾配粗面上の薄層流実験の成果をつぎに述べる。

3. 粗面薄層流の抵抗則の理論的考察 層流、乱流形態に無関係に成立するDarcy-Weisbachの平均流速式を図-1のような単一斜面上の流に適用し、斜面単位面積当りの流出高 g と水深 h の関係に書き直せば、

$$(g \cdot l)^2 = (8gI/f) \cdot h^3 \quad (1)$$

となる。一方、Kinematic Wave法での水深 h と流出高 g は、

$$h = R(g \cdot l)^p \quad (2)$$

で $p=1, 1/3, 3/5$ はそれぞれ中間流(Darcy則)、層流表面流、乱流表面流に対応する。これらの流出形態を(1)式の抵抗係数 f で統一的に表わせば次式のようなのである。

$$f = 8gI R^3 (g \cdot l)^{3p-2} \quad (3)$$

ここに、 g :重力加速度、 ν :動粘性係数、 I :斜面勾配、 l :斜面長、
(i) $p=1$ のとき $R=1/KI$ (K :透水係数)、(ii) $p=1/3$ のとき $R=(\frac{C \cdot \nu}{8gI})^{1/3}$ (C :層流粗度 15×10^{-4})、(iii) $p=3/5$ のとき $R=(\frac{g}{148})^{1/5}$ (N :Manningの粗度係数)。

さらに、貯留型モデル: $S = R' g^{p'}$ のパラメータ R', p' と(2)式の p, R との定常時における関係式³⁾: $R' = R l^{p'/(1+p)}$, $p' = p$ (4)

を用いれば、(2)式は $f = 8gI \nu^{3p-2} l^{-3p} [R' (1+p)]^3 R_e^{3p-2}$, $R_e = \frac{g l}{\nu}$ (5)

となる。(3)式を模式図的に示せば、図-2のようであり、中間流出強度 γ_a より流出高が增大すると、まず層流表面流の抵抗形態が現われやすくなり、 f は流量の増加に逆比例して小さくなる。さらに流量が増大すると乱流表面流に移行し、ほとんど流量に無関係な f 値になると考えられる。

4. 粗面薄層流の実験成果 粗面上の薄層流に関する既往の実験は、主として緩勾配で牧草あるいは芝生を用いた植生斜面上のものが多い⁴⁾。我国では流出土砂に関連した粗面薄層流の研究は、三見らによるものの、流出抵抗則の面からのアプローチはほとんどなく、筆者らは人工骨材(平均粒径 $d=3.3, 5.5, 9.0, 14.5 \text{ mm}$)を用いた比較的急勾配の実験を行ってきた⁵⁾⁶⁾。

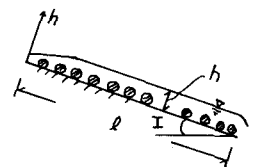


図-1 粗面上の流の模式図

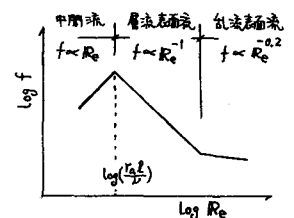


図-2 流出形態の分類

筆者らの「等流」および「降雨」実験で得られた結果を列挙すればつぎのようである。

- (i) 各斜面勾配 $I (=0.011 \sim 0.333)$ について、 $f = C/R_e$ の成立する層流表面流領域が存在する。
- (ii) 実験範囲内 (約 $10^2 < R_e < \text{約 } 7 \times 10^3$) では層流形態であり、斜面勾配 I のほぼ 0.6 集に、粗度高 d の 1.7 集に比例して C 値が大きくなる。ちなみに、滑面層流の場合 $C = 24$ であるのに対し、本実験範囲での C 値は $C \approx 3 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ と極めて大きい。
- (iii) 層流領域と遷移乱流領域の限界 Reynolds 数は数万のオーダーと予想される。
- (iv) 低 Reynolds 数の領域 ($< \text{数 } 100$) では、 f が R_e とともに増加し、いわゆる中間流の拘抗形態を示す。
- (v) 本実験のような相対粗度の大きな流れ ($d/h > 0.4 \sim 0.7$) では降雨パルスの影響は顕著でない。

以上の実験結果は植生斜面上の流れの結果ともほぼ同じであることを確認された。したがって、粗面上の薄層流でも、 $f = C/R_e$ の成立する層流形態がかなり広い Reynolds 数の範囲で卓越することがわかる。

5. 実山地斜面部の流出抵抗則の推定法 流域のモデル化の問題を回避するために、次式のような貯留型基礎式により推定を試みる。

$$\frac{dS}{dt} = r_e - g, \quad r_e = \alpha \cdot r - i, \quad i = i_c + (i_0 - i_c) \cdot e^{-bt} \quad (6)$$

$$S = R_s \cdot g \quad (g \leq r_a) \quad \text{or} \quad S = R_0 \cdot (g - r_a)^p + R_s \cdot r_a \quad (7)$$

ここに、 S : 貯留高、 i_0, i_c : それぞれ、初期、最終浸透能、 b : 指数、 r : 降雨強度、 α : 代表降雨 r の補正係数、 R_s : R_s : 中間流出を規定する定数、 R_0, p : 表面流出を規定する定数、 r_a : 中間流出最大強度。パラメータは有初降雨に関するもの (α, i_0, i_c, b の 4 つ) と流出に関するもの (R_s, r_a, R_0, p の 4 つ) に大別される。これらすべてのパラメータが未知である場合を考え、一出水時の降雨 r と流量 g の資料より各パラメータの最適値を求める。最適化として (6) 式の両辺を微分し、(7) 式との残差の二乗和を最小にする方法をとる。非線形項を含むので最尤法 - Newton-Raphson 法による繰り返し計算を必要とする。

解析例として、吉野川水系・大森川ダム流域 (流域面積 21.5 km^2 , 斜面長 $l = 1075 \text{ m}$, 斜面平均勾配 $I = 0.510$) の各出水時のダム地点時間雨量と流量資料を用いた。得られたパラメータ f_c, b, R_s, r_a の平均値は $f_c = 0.85, b = 0.51, r_a = 4.23, R_s = 10.97$ で、別途従来の方法により求めた値とオーダー的に矛盾はない。推定流量の精度は $\text{Error}/g_{\max} = 0.06 \sim 0.10$ で従来の貯留関数法に比べまるとも劣らないことが明らかとなった。各出水ごとの最適パラメータ R_0, p および表面流出起始の有初斜面長 l_0, r_a 以上の平均流量を (5) 式に用い、表面流出の f を求め、 $R_e = g_{\max} l_0 / \omega$ との関係を図示すれば、図-3 のようである。全般的には流量の増加とともに f が急激に減少するように見えるが、斜面流実験のような $f = C/R_e$ なる層流形態とも断定し得る。等価粗度係数 N に換算しても、 $N = 0.20 \sim 7.23$ (平均 $2.12 \text{ m}^2/\text{sec}$) とはげしく変化する。一出水中 R_0, p を固定した点にかなり無理があるようである。また、地点雨量でしかも 1 時間単位であること、降雨域の移動の影響等今後の検討に行つてこそ少なくなり、今後の課題とした。

参考文献

- 1) 端野; 山地小流域の表面流抵抗則について, 創大流域研究代表科研報告書, 昭和 51.3
- 2) M. HASHINO: Analysis of Runoff Regime by Storage Function Method and Equivalent Friction Factor, Bulletin of Faculty of Tokushima Univ. vol. 10, 1974
- 3) 端野; 流出機構から見た流域の貯留特性と等価抵抗係数, 土研年報, 728号, 昭和 48.10
- 4) 佐々木, Cheng-Lung Chen: Flow Resistance in Broad Shallow Grassed Channels, ASCE, HY3, March, 1976
- 5), 6) 端野・藤原; 急勾配粗面上の薄層流に関する実験的研究, 中国支部年報, 第 1 報, 昭和 51.5, 第 2 報, 昭和 52.5

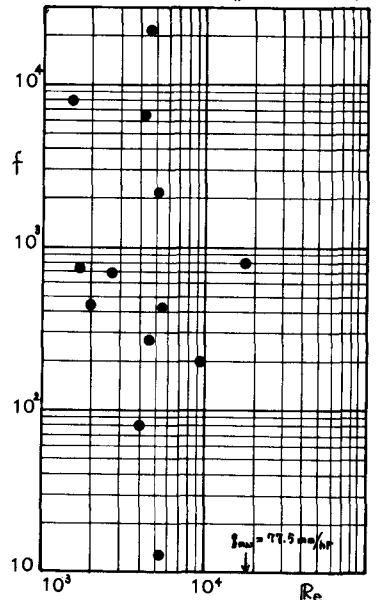


図-3 大森川ダム流域の $f \sim R_e$