

徳島大学工学部 正 員 瑞 野 道 夫
 徳島大学大学院 学生員 〇猪 熊 秀 之
 前 田 道 路 谷 上 輝 真

1. は し が き

実山地斜面部の表面流出抵抗則を解明するための基本的知見を得るために、一連の室内実験を行ってきた。粗度要素として、平均粒径 $d_m = 9, 14.5 \text{ mm}$ の造粒型人工軽量骨材を用いた第一報では、¹⁾ f - Re 関係から乱流則よりも層流則が卓越すること、また、流出解析手法は Kinematic Wave 法(以下 K.W 法と略す)でもよいことが明らかとなった。第二報では、²⁾ 粗度要素の平均粒径を変え、 Re 数の範囲を広げ、等流および定常降雨実験を行ない、層流則が卓越する Re 数の範囲が、約 $100 < Re < 7000$ とかなり広いことを指摘した。また、層流粗度パラメータ $C (= f \cdot Re)$ は斜面勾配 I の 0.7 乗、平均粒径 d_m の 1.5 乗、 Re 数の -0.2 乗(完全な層流形態でない)にそれぞれ比例することが明らかとなった。さらに、低 Re 数領域(数百以下)では、 f は Re 数とともに増加する、いわゆる中間流と類似の領域があることが等流実験で見られた。

今回、実流域の流出解析に活用できると思われる貯留型モデルの妥当性を検討することにし、そのために、粗度高 $d_m = 9 \text{ mm}$ 、斜面勾配 $I = 0.155$ に対する等流および定常降雨実験を再度行ない計測精度に留意した。また、解析法の検証データを得るために、一定強度の降雨を与えたときの斜面下流端流量の上昇部と降雨遮断後の流量減衰部について、特殊三角碑の水位変化をビデオに記録し、1秒ごと流量に変換した。

2. 貯留型モデルと K.W 法の関係

$$\frac{\partial(h\lambda)}{\partial t} + \frac{\partial(g\ell)}{\partial x} = r \quad (1) \quad h = g(\ell)^P \quad (2)$$

K.W 法の基礎式は(1)、(2)式で与えられる。

ここに、 λ : 空隙率、 h : 水路底面からの水深、 ℓ : 斜面長、 g : 斜面単位面積当りの流量、 r : 降雨強度、 P あり、 g, P は (i) $P = 1$ (Darcy 則) のとき $g = 1/\mu I$ (μ : 透水係数)、(ii) $P = 1/3$ (層流則) のとき $g = (CU/8gI)^P$ (C : 層流粗度パラメータ)、(iii) $P = 3/5$ (Manning 則) のとき $g = (N/\sqrt{I})^P$ (N : Manning の粗度係数)、である。一方、貯留型モデルの 1 つとして Prasad は (3)、(4) 式を提案した。³⁾

$$\frac{dS}{dt} = r - g \quad (3)$$

ここに、 S は貯留高で、 g は K.W 法の g と (5) 式の関係がある。また、(4)

$$S = g' g^P + K \frac{dg}{dt} \quad (4)$$

式右辺第 2 項の係数 K は、一定降雨を与えたときの上昇部と降雨遮断後の減

$$g' = \lambda g^{1/P} / (1+P) \quad (5)$$

衰部によって異なり、それぞれ記式のように誘導される。

$$\text{上昇部: } K = (1+P)^2 g'^2 \left(1 - \frac{g}{g'}\right) \frac{g}{g'} g^{2P-2} \quad (6) \quad \text{減衰部: } K = (1+P)^2 g'^2 \left(1 - \frac{g}{g'}\right) \left\{1 - P \left(1 - \frac{g}{g'}\right)\right\} g^{2P-2} \quad (7)$$

この係数 K は貯留高 S と流量 g の関係における非定常効果を表現しているものであり、不村の貯留間数 U の遅滞時間 T_L に対応するものと理解される。遅滞時間 T_L の物理的意義についてはかなり議論のあるところであり、明確な解析が困難であるのに対し、この K は K.W 法によって、その特性が容易に理解できる点に利点があると考えられる。ところで、実山地流域への適用を考えた場合、K.W 法に比べ、本貯留型モデルの方が流域分割、計算時間等の点で有利であると予想され、K.W 法の近似解法として十分耐えられると思われる。

なお、実山地流域の場合、水深 h に関する空隙率 λ が不明なことが多く、 λ を粗度の中に含めて抵抗を評価しても許されるだろう。たとえば、層流則のとき、 λ を含めた粗度パラメータの値を C_λ とすれば、含めない粗度パラメータの値 C との間には $C_\lambda = \lambda^P \cdot C$ なる関係があり、 C_λ は C よりかなり小さくなる。

3. 本実験データの定常特性と非定常特性

等流および定常降雨実験の水深 h 、流量 g より抵抗係数 f を求め、 Re 数との関係を図示すれば、図-1 のようであり、 $Re = 63$ を境にして、以下では中間流形態が、以上では層流形態が卓越しているようである。なお、層

流則を形式的に適用し、粗度パラメータ C の値を $C = f \cdot R_e$ とあてはめ式: $f = C / 394329 R_e^{1/46}$ とから求め併示した。また、このときの λ と $C_\lambda = \lambda^2 C$ も図示した。
図-1から明らかなように、完全な層流形態 (C or $C_\lambda = \text{const.}$) ではなく、 R_e 数の影響が若干残っていることは否定できない。しかし、Manning 則を採用すれば、この矛盾は一段と大きくなることはいうまでもない。

つぎに、非定常流出実験 (降雨強度: 9 種類) における貯留高 S と流量 q の関係 f を両対数紙に示せば、図-2 のようである。減衰部における傾きはほぼ $1/3$ で、実験ケース間に大きな差は見られない。しかし、上昇部では、流出開始直後、貯留高は急激に増大し、特に降雨強度が大であるほどこの傾向が顕著で、 $q = 10 \text{ mm/hr}$ までは傾きの変化がほぼ $1/3$ 以上になると、傾きはほぼ一定となるが、減衰部のそれに比べ小さい。このように、上昇部と減衰部で S - q 関係は様相が著しく異なることがわかる。(4) 式の表現を用いれば、非定常効果は減衰部ではほとんど現れないが、上昇部では無視できないといえよう。このようなことは実流域でもよく経験される。

4. 貯留型モデルと K.W 法による層流粗度の推定

解析法の実流域への適用性を考慮し、降雨・流量資料から粗度パラメータの値を推定することにする。本実験データの場合、Manning 則は適当でないこと、および、図-2から理解できるように、中間流形態が等流実験 (図-1) ほど明確に現れないことから、層流則のみを用いる。また、 λ を粗度を含めた層流粗度 C_λ を、各々のデータの上昇部、減衰部で一定として、推定する。推定手順は、層流粗度 C_λ の初期値を適当に設定し、流量の計算値と実測値との標準誤差が最小になるまで C_λ を適宜変化させる方法を用いた。

貯留型モデルおよび K.W 法による流量の計算値と実測値の適合性を示せば、図-3 のようである。まず、K.W 法の結果を見れば、上昇部、減衰部とも全般的に流形の適合性は良好であり、低流量で中間流扱いをしなくとも良いことがわかる。しかし、推定された C_λ は上昇部、減衰部とも図-1の等流および定常降雨実験のそれに比べ異なる。すなわち、減衰部の推定 C_λ は実験ケースにほぼ無関係に一定と見なせるが、上昇部の推定 C_λ は降雨強度とともに漸次増加する傾向がある。いずれにせよ、推定 C_λ から図-1の $C_\lambda - R_e$ を再現することは困難である。この主原因は、やはり $C_\lambda = \text{一定}$ としたためであると考えられ、たとえば $C_\lambda = \alpha R_e^b$ なる形で推定せねばならないと思われる。

一方、貯留型モデル (上昇部は非定常効果考慮) の結果によれば、減衰部は非定常効果を考慮せずとも K.W 法と同程度の適合性が得られるが、上昇部では非定常効果は無視できない。推定 C_λ の傾向は K.W 法の場合とまったく同じであり、本貯留型モデルは K.W 法の近似解法として十分利用できる。推定 C_λ については K.W 法と同様の問題が残る。

参考文献

- 1) 2) 鶴野・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, (第一報), 昭. 51. 5, (第二報), 昭. 52. 5
- 3) Prasad, R.: A Nonlinear Hydrologic System Response model, ASCE, vol. 93, No. HY4, 1967

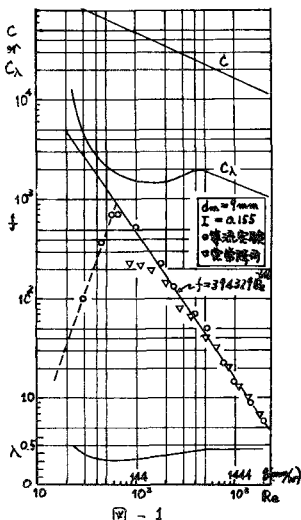


図-1

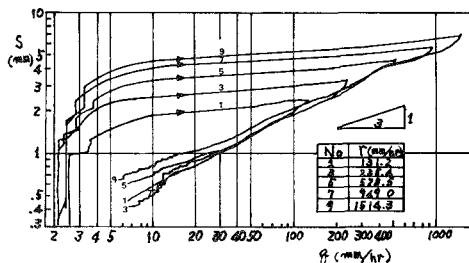


図-2

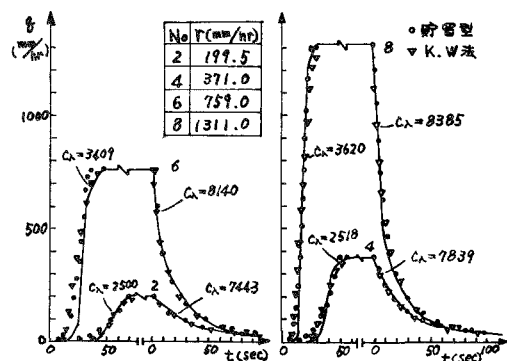


図-3 (パラメータ値 C_λ は K.W 法の場合)