

模型実験による流出現象に及ぼす不規則性の効果について

京大防災研 正員 石原安雄
京大大学院口学生員 下島栄一

1. まえがき

雨水の流出現象を考えると、いろいろの不規則性がある。降雨強度の時間的微小変動、降雨の面積的・非一様性、流域表面状態の非一様性などがある。こうした不規則性が流出過程に与えるような影響を及ぼすかと検討することは、複雑な雨水流出現象を理解するうえの重要な事項の一つである。こうした観点から、本研究では1/100の幾何学的な流域模型において、表面流出のみを対象としたときの流出実験を行なつて、上述のような各種の不規則性が流出過程にどのような影響を及ぼすかと考察した。

2. 表面流出の基礎式

(a) 斜面上の流れ 複雑な表面状態にある流域斜面上に、時間的・場地的に変動している降雨があったときの連続式は、山腹斜面をう配が比較的急な場合、近似的に次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h u)}{\partial x} + \frac{\partial (h v)}{\partial y} = \gamma \quad (1)$$

こゝに、 h は水深、 t は時間、 γ は降雨強度、 x, y は等高線方向の座標、 u, v は最急をう配方向の座標で下方向を正、 u は x 方向の流速成分、 v は y 方向の流速成分である。いま $D = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t$ についての平均値をとまつて表わし、それからの変動量を $'$ とつけて表わすと、

$$h = \bar{h} + h', \quad u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad \gamma = \bar{\gamma} + \gamma' \quad (2)$$

と書ける。 $\bar{\gamma} = \bar{u} = \bar{v} = \bar{h} = 0$ であることを考慮して、(2)と(1)式を用い、さらに $\bar{v} = 0, \bar{h}'v' = 0$ と仮定すると、次式がえられる。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{h} \cdot \bar{u}) = \bar{\gamma} - \frac{\partial}{\partial x}(\bar{h}'u') \quad (3)$$

上式と(1)式と比較すると、いろいろの不規則性の効果は、(3)式右辺第2項のような形で表わされることになる。一方向運動の条件式については、重力加速度と流水抵抗がほぼ釣り合った流れであると仮定することができるので、上述の意味での平均の水理量について次式がえられる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{乱流: } \bar{u} = \frac{1}{N} \bar{h}^* \sqrt{\sin \theta} & (N: \text{等価粗度係数}) \\ \text{層流: } \bar{u} = \frac{g}{3\nu} \bar{h}^2 \sin \theta & (g: \text{重力加速度}, \nu: \text{動粘性係数}) \end{array} \right\} \quad (4)$$

(b) 河道内の流れ 河道内の流れは、いろいろの斜面長をもつ斜面からの流入を受けながら下流にゆくに従つて流量が増大する流況を呈する。この場合、斜面長や斜面をう配が河道に沿って一様に分布するわけではなへので、横からの流入量も一様ではなへ。さらに、河道そのものの形状も場所によつて変化しているの、これらの不規則性を考慮すると、基礎式は次式のようになる。

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{A}\bar{V}) = \bar{q} - \frac{\partial}{\partial x}(\bar{A}\bar{V}') \\ \bar{V} = \frac{1}{\pi} R^2 \sin \theta$$

(5)

(6)

==に、 A は流水断面面積、 V は平均流速、 q は斜面からの流入強度、 R は径深である。

3. 表面流出の模型実験

縦横とも $1/100$ のモルタル製の流域模型(野洲川左支川荒川上流部で面積 0.84 km^2)を用いて、近似的な相似律、すなわち、(3)(4)(5)(6)式で不規則性の項を無視して与えられる相似律を用いて、表面流出の実験を行った。このときの時間、降雨強度、流量はほぼ $1/30$, $1/1$, $1/10,000$ と考えてよい。実験は、2つの流域を対象とし、その一つは、比較的一様性が保たれていると思われる小流域(図-1のA流域で現地面積 0.18 km^2)、他は全流域である。

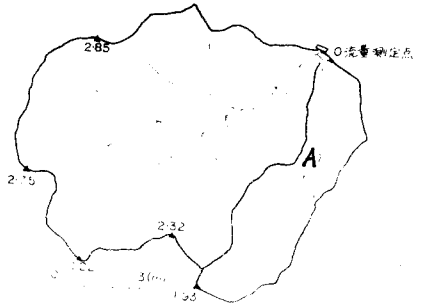


図-1 流域模型平面図

4. 実験結果と考察

全流域について正弦波的に変化する降雨を与えた場合の実験結果の1例が図-2であり、図-3は、降雨の急変部付近における流出量の変化の様相を抽出したもので、これから、流域全体を対象としたときの伝播時間は、 20 mm/hr のとき約 35 sec 、 40 mm/hr のとき約 30 sec 、 60 mm/hr のとき約 20 sec 、 80 mm/hr のとき約 15 sec であることがわかる。

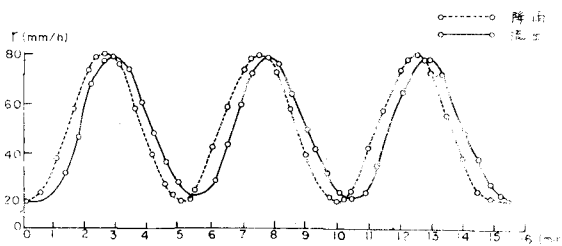


図-2. 連続正弦波の場合の実験結果(全流域)

つぎに、図-4は小流域のみを対象として1波の正弦波的に変化する降雨に対して行った実験結果と、通常の方法によって長方形流域に変換後、不規則的効果を表わす項を無視した(3)(4)および(5)(6)式によって求めた計算結果とを比較したものである。その結果、斜面上の流れと層流と考えたときと、乱流と考えたときとでは若干に差異があるが、乱流と考えたときの等価粗度係数は $N = 0.042$ と非常に大きくとらねばならなかった。実験的には層流に近い流れであったので、いまの場合層流の流れとすべきと思われる、実験値と計算値との差異は上述した各種の不

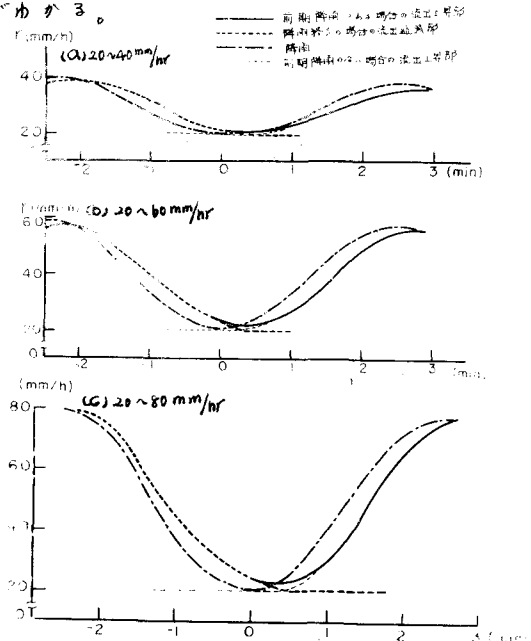


図-3. 連続正弦波の場合の応答特性(全流域)

規則さの効果と考えられる。

つぎに、図5は、全流域を対象としたときの実験値と斜面上の流れを層流と考えたときの計算値とを比較したものであって、両者の差異は、小流域の場合より大きくなっている。

図4および5について一般的にいえることは、1)計算値の雨が流量増加が早くはじまるが、ピーク付近では両者がほぼ一致する。2)小流域の雨が全流域の場合より計算値の適合性がよい、というところである。後者については、前述したように、流域形状が比較的規則的で、いま考えているような不規則さの効果は小さいと思われる。一雨、流量の増大に伴って、両者が一致するような傾向を示すことは、流量したがって降雨強度の増大とともに不規則さの効果は相対的に小さくなるためと思われる。

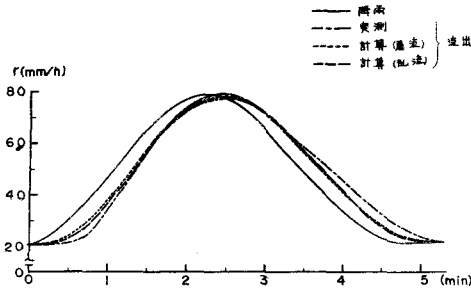


図4 A流域の場合の計算結果の比較

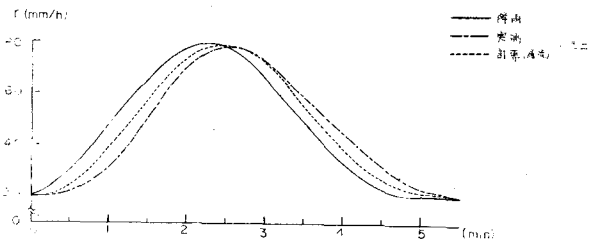


図5 全流域の場合の計算結果の比較

こゝでいう不規則さの効果とは、複雑な流域地形を計算上単純な長方形の一定こう配の斜面と一様断面で一定こう配の河道との組合せで置きかえたための影響と、本来の流域地形の不規則さと降雨の時間的場所的な変動の効果とが重なったものである。単純な形状の流域に置きかえたことは、いへるが、平均化を行なったことをと考えることができるので、結局のところ、図4および図5に現われてゐる計算値と実験値との差が不規則さの効果を示すものと考へてもよいであらう。

不規則さの効果は(3)および(5)式の右辺の2項で与えられ、それぞれ $-\frac{\partial \bar{H}'\bar{U}}{\partial x}$, $-\frac{\partial \bar{A}'\bar{V}}{\partial x}$ である。形式的には斜面上の流れについても河道内の流れについても同じである。すなわち、 $\bar{H}'$ と $\bar{U}$ との関係および $\bar{A}'$ と $\bar{V}$ との関係は水理学的にいて本質的な差があるとは考へられず、 $\bar{H}'$ と $\bar{U}$ 、 $\bar{A}'$ と $\bar{V}$ の相関と流れ方向の模様が問題となる。したがって、図4,5において、実験値が計算値よりピーク付近を除いて遅く立ち上り、かつ遅く低下しているという事実を考えると、 $\frac{\partial (\bar{H}'\bar{U})}{\partial x}$, $\frac{\partial (\bar{A}'\bar{V})}{\partial x}$ は共に正であって、 $\bar{r}$ および $\bar{q}$ を減少させるような効果を持ち、さらに降雨強度が大きくなると、こうした効果が減少するものと考えることができよう。しかしながら、現在のところ、これらの変動量の構造を知るまでには至っていないが、今後こうした面からの理論的実験的研究を進めていくつもりである。