

洪水流出模型の時間スケールについて

京大防災研究所 正員 石原安雄

京大防災研究所 正員 〇下島栄一

1. 相似模型の構成法

水理模型によつて山地流域における洪水流出機構を解明するために、模型の構成法について研究を行つた。こゝで、洪水時の主要な流出成分は中間及表面流出であるという認識のもとに、重力と摩擦力が他の項に比して卓越していることを明瞭にした運動方程式と質量保存式を用いて相似則を示し、又、具体的な構成法を示した。即ち、模型に於て毛管上号が小さい多孔質材料で任意の透水係数(k_m)、空隙率(δ_m)のものを作り出す事が極めて困難であるので、おおよそのなな幾何学的模型流域に毛管上号が小さく、効果が小さい多孔質材料を用いて(k_m, δ_m の測定は可能)、これに人工降雨を与えて hydrograph を測定し、prototype での hydrograph とを比較することにより他の相似比を定めなければならない事を明らかにした。その結果は次表の様である。

変 量	実 物	模 型	相似比	決定順序
長	$x_p \pm$	$x_m \pm$	$\lambda \pm$	
時 間	$t_p \pm$	$t_m \pm$	$\tau \pm$	$\tau : 1$
初期降雨強度	$y_{ep} \pm$	$y_{em} \pm$	$\gamma_e \pm$	$\gamma_e : 2$
透水係数	k_p	$k_m \pm$	k	$\delta/k : 3$
初期空隙率	δ_p	$\delta_m \pm$	δ	
表面粗度	n_p	$n_m \pm$	n	$n_m : 5$
河谷粗度	$n_{xp} \pm$	$n_{xm} \pm$	$n_x \pm$	
表面厚	d_p	$d_m \pm$	d	$d_m : 4$

すなわち、

- i) 実用可能な表面材料(k_m, δ_m)を模型に設置する。
- ii) $n_x = \gamma_e \tau$ の関係に於いて γ_e と τ を変化させ、中間流のみが發生していると考えられる時の hydrograph $y_{ep} \sim t_p$ を用いて実験によつて hydrograph $Q_m \sim t_m$ を求め、これを実測の hydrograph $Q_p \sim t_p$ と比較して最も適合性の良い γ_e を決定する。
- iii) $\tau = \delta x/k$ より δ/k を求めるが、 δ_m/k_m が与えられているので $\delta p/k_p$ が求まる。

対して τ で決定した γ_e を用いて実験し、模型と実流域での hydrograph に差異が生ずる時刻の Q_p, t_p を推定し、これに対応して模型での d_m を求める。

iv) 決定された厚さ d_m に表面を整え、その表面に適當な人工粗度を付けた後、大出水に對して流出実験を行ない、その結果が実流域の hydrograph に適合する様に試行錯誤的に粗度 n_m を決定する。

v) 以上の諸量が決定されると他の量は基本式から求められる相似条件を与えられた式により決まる。

2. 誤差の算定

以上の相似模型の決定過程のうち、ii) iv) v) の過程において、模型上で得られた hydrograph と実測の hydrograph とを比較しなければならないので、かなりの誤差を含むことを覚悟しなければならぬ。いま、正しい比較が行なわれ直ちに相似比が決定された模型に対して、上表の諸量に添字 "0" を付して表現すると、誤差を含んで決定される相似比は、 $\lambda = \lambda_0 (1 \pm \epsilon)$... ①と書くことが出来る。いまの問題はこの時間の相似比の誤差が以前の相似比の決定に對してどの様に伝播するかが明確にできることである。

(1) γ_e に対しては, $N_x = \gamma_e^{-1/2} t_0^{1/2} = \gamma_{e0}^{-1/2} t_0^{1/2}$ が成立しているから, $\gamma_e = \gamma_{e0}(1+2\varepsilon) \dots \textcircled{2}$ となる。

(2) 中間流のみが発生している時, 河谷の下流端での流量に対しては, 次式が成立する。

$$\frac{Q_x}{Q_{x0}} = \frac{Q_{xm}}{Q_{xm0}} = \frac{\gamma_{em}(\bar{t}_x, \gamma_s)}{\gamma_{em0}(\bar{t}_x, \gamma_{s0})} = \frac{\gamma_e}{\gamma_{e0}} \left\{ 1 + \beta \left(\frac{t_0}{\bar{t}_x} - 1 \right) + O \right\} \quad \text{--- ② ---}$$

$$\frac{\gamma_e}{\gamma_{emj}(\bar{t}_j, \gamma_s)} = \frac{1}{\gamma_s} \int_{\bar{t}_j}^{\bar{t}_j} \gamma_{emj}(3) d\gamma$$

$\Rightarrow \beta$ は反播時間内の hydrograph の形状で決まる無次元量。一対, $d/d_0 = Q_x/Q_{x0}$ であるから, 表層厚さに対しては,

$$d = d_0 \{ 1 + (2-\beta)\varepsilon \} \dots \textcircled{3}$$

(3) 表面流も発生している時, 表面流の発生域の誤差をも考慮せねばならぬので, 表面流出分のみを対象とし, 模型上での表面流発生域の長さ L'_m, L'_m0 とおくと,

$$\frac{Q_x}{Q_{x0}} = \frac{L'_m}{L'_m0} \frac{\gamma_{em}(\bar{t}_x, \gamma_s)}{\gamma_{em0}(\bar{t}_x, \gamma_{s0})} = \frac{L'_m}{L'_m0} \frac{\gamma_e}{\gamma_{e0}} \left[1 + \beta \left\{ -1 + \frac{t_0}{\bar{t}_x} \left(\frac{L'_m}{L'_m0} \frac{\gamma'_s}{\gamma_{s0}} \right)^{1/2} \left(\frac{\gamma_{e0}}{\gamma_s} \right)^{1/2} \right\} + O \right]$$

さらに, L'_m/L'_m0 を計算し, 適当な近似をすると結局次式をうる。

$$Q_x = Q_{x0} \left[1 + \frac{2}{5} \gamma \beta + \frac{2\beta_2(1+0.6\beta)}{1-\beta} + \left\{ \frac{2(1+0.6\beta)}{1-\beta} - 3\beta \right\} \varepsilon \right] \dots \textcircled{4} \quad \text{但し, } 1 > \beta > 0$$

$\Rightarrow$ ①, $\beta_2 = \beta_1 - (2-\beta)(1-\beta_1)\varepsilon$, β_1 は反播速度に内挿する無次元量 $\beta = (L_s - L'_m0)/L_s$, L_s : 模型の平均斜面長, $\gamma'_s = \gamma'_{s0}(1+\eta)$ --- ⑤

3. 結果の考察

前述した様に, 模型に於てはたとえ顕著な毛管上昇を呈して実流域では無視出来る様な効果が強調される様な多孔性材料を用いる事に許される, 従って使用可能な材料が限定される。よって, 上述した様な手続には多少の相似比を決定しなければならぬので, 必然的に①式で与えられる時間の相似比の誤差が含まれることになる。そのため, 後で決定される相似比には必然的に②~④式で与えられる誤差を含むことになる。例えば, $\varepsilon = 0.1$, $\gamma = 0.1$ と $\beta = -0.3$, $\beta_1 = 0.2$, $\beta = 0.5$ と仮定すると, ②式より $\gamma_e = \gamma_{e0}(1+0.2)$, ③式より $d = d_0(1+0.23)$ ④式より $Q_x = Q_{x0}(1-0.02+0.01+0.42) = Q_{x0}(1+0.41)$ となる。= の例では, 時間スケールの誤差 10% の, 有効降雨限度に対して 20%, 表層厚さには 23% の誤差をもたらし。さらに表面流出に対しては 41% となるが, これらの値は β, β_1, β 及び β により変化する。すなわち, $\varepsilon \rightarrow 0$ になるとすると, γ_e と d に対しては誤差 0 となるが, Q_x に対しては④式の右辺カッコ内の 2 項, 3 項が残る。上記の数値例では 7% 程度の誤差となる。そのうち 2 項は粗度係数の誤差であるが, 上の数値例から判る様に Q_x への影響は微小される。又, 表面流発生域に内包してある項も, 同様に微小される。

しかしながら, 実流域では上の検討で考慮した要素以外にも関連する他の要素も存在すると考えられるが, 結局のところ, 予て中間流出が卓越している prototype の hydrograph を用いて時間スケールを慎重に決め, さらに, 特に大きな出水の hydrograph での流量スケールを定め, こうした手続を繰返し 2 両者の誤差が同じ程度となる様な相似比を決定する様にしなければならぬ。

参) 石原・下島: 洪水流出模型の構成とその精度について,
土木学会, 刊行 昭 49.9 II-125