ワジ洪水の移動通過損失量に関する経験モデルと水文学モデルの理論的整合性評価

Theoretical Consistency between Empirical and Hydrological Models of Transmission Losses in Wadi Floods

○ 浜口 俊雄・モハメド サベル・小尻 利治

○ Toshio Hamaguchi, Mohamed Saber, Toshiharu Kojiri

This study focuses on the considerations of the empirical approach in wadi floods with hydrological backgrounds. Initial losses at a whole basin before discharges are figured out through the empirical equations of the SCS (Soil Conservation Service) method, which is founded on the hydrologically reasonable aspects. Transmission losses along wadi river channels after discharges are estimated from the empirical equation of a regression model in wadi discharges. Such a regression model in accordance with observed data is reasonably available for a hydrological simulation in wadi flooding when the theoretical consistency and compatibility between empirical and hydrological approaches are ensured. The consistency and compatibility conditions are theoretically produced in this paper on the basis of the generalized one of empirically proposed transmission losses and the kinematic wave one. It can be shown that the appropriate infiltration rate is the key to the establishment of the theoretical consistency and compatibility.

$$I_a = \lambda S \qquad (\text{通常の}\lambda: 0 \sim 0.26) \tag{1}$$

$$S = 25.4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \left[\text{CN : 地質·土地利用·水文条件·先行湿潤に依存}\right] \tag{2}$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \tag{3}$$

(I_a：初期損失量 (mm)，S：最大保留量 (mm)，λ：初期損失係数，CN：流出曲線番号，Q：累積流出量 (mm)，P：累積降雨量 (mm))

$$V_1 = 0.026{V_A}^{0.872} \tag{4}$$

(V_A：河道の1地点を通過した河川累積流量 (m^3)，V_1：通過河川水が1km先に到達するまでの移動通過損失量 (m^3))

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \tag{5}$$

$$P = Q + F + I_a \tag{6}$$

$$f = \frac{p(1 - i/p)^2}{p(1 - i/p) + 1} \tag{7}$$

$$\frac{dV}{dx} = -C_1V^{C_2} \tag{8}$$

(V：移動通過損失量，x：河道に沿う曲線座標，C_1,C_2：移動通過損失パラメータ；式 (3) では $C_1 = 0.026, C_2 = 0.872$ に該当)

$$V_\ell = \left\{{V_A}^{1-C_2} - (1 - C_2)\,C_1\ell\right\}^{\frac{1}{1-C_2}} \tag{9}$$

(V_ℓ：距離 ℓ 先の河川累積流量)

$$V_1 = V_A - V_\ell = V_A\left[1 - \left\{1 - (1 - C_2)\,C_1\ell V_A^{C_2-1}\right\}^{\frac{1}{1-C_2}}\right] \tag{10}$$

$$1 \gg (1 - C_2)C_1\ell{V_A}^{C_2-1} \tag{11}$$

$$V_1 \approx C_1\ell{V_A}^{C_2} \tag{12}$$

$$Q_R = \frac{\sqrt{I}}{n}Wh^{\frac{5}{3}} \quad (Q_R = V_A/T,\ \ T\text{：通過所要時間 (sec)}) \tag{13}$$

$$\frac{\partial\,(hW)}{\partial t} + \frac{\partial Q_R}{\partial x} = r_e \cdot W \tag{14}$$

(h：水深 (m)，W：河道幅 (m)，Q_R：流量 (m^3/sec)，r_e：有効降雨強度 (m^3/sec)，n：等価粗度，I：勾配)

$$T = \frac{1}{r - i}\left[\left\{\frac{5n(r - i)\ell}{3\sqrt{I}}\right\}^{\frac{3}{5}} - h_0\right] \tag{15}$$

(r：降雨強度 (m^3/sec)，i：浸透強度 (m^3/sec))，h_0：V_A を計測した地点の水深 (m))

$$V_A = \frac{W\sqrt{I}{h_0}^{\frac{5}{3}}}{n\,(r - i)}\left[\left\{\frac{5n(r - i)\ell}{3\sqrt{I}}\right\}^{\frac{3}{5}} - h_0\right] \tag{16}$$

$$V_\ell = \frac{5W\ell}{3}\cdot\left[\left\{\frac{5n(r - i)\ell}{3\sqrt{I}}\right\}^{\frac{3}{5}} - h_0\right] \tag{17}$$

$$V_1 = W\left\{\frac{\sqrt{I}{h_0}^{\frac{5}{3}}}{n\,(r - i)} - \frac{5}{3}\ell\right\}\cdot\left[\left\{\frac{5n(r - i)\ell}{3\sqrt{I}}\right\}^{\frac{3}{5}} - h_0\right] \tag{18}$$

$$i_0 = \frac{5}{2}r - \frac{3\sqrt{I}{h_0}^{\frac{5}{3}}}{2n\ell} \tag{19}$$

1. 序論

北半球の乾燥地・半乾燥地は冬季のみに降雨があって，そのときだけ流出するワジ (wadi) という現象がある．その河道は浅く，普段は水涸れを起こしており，水無川の様相を呈している．しかし集中的な降雨となれば鉄砲水 (flash flood) となって恒常的に存在する河川へ向かい，その河川周辺にあるの途中の市町村に家屋倒壊や死者を伴う被害をもたらす．そうした洪水シミュレーションを流出解析で行うにあたり，ワジ洪水特有の機構をモデル化し，現存モデルとの整合を図らねばならない．本稿では，そのモデル化論と既往の経験モデルを水文学モデルの観点から理論的に検証する．

2. ワジ洪水のモデル化と理論的考察

ワジ流出機構は水文モデル化の際にとても厄介な一面を有している．乾燥地・半乾燥地の表層部は出水前の水涸れしたワジ河道も含めて透水性が高く乾燥した状態にある．そのため降雨で表面に水が供給されても乾燥した表層はなかかな飽和状態にならずに，初期浸透時に毛管現象による大量の吸水が起き，そのうち徐々に空隙が水で占め尽くされていく．吸水開始時から飽和状態に至るまでの浸透量をワジ流出の観点では初期損失量と定義されている．その後，降雨強度が地表面の飽和浸透強度を上回ればワジ流出が始まり，ワジ河道を経て恒常河川へと流出していく．その際，ワジ河道が高透水性な河床を有していることから下流へ移動する過程で大量に浸透して失われていく．この量が移動通過損失量と定義されている．初期損失量はSCS法で算出し，その手法から表面流出量も定まる．これらは式 (1)〜(3) で示される．先行湿潤度から定める．ワジ河道流出の発生後の移動通過損失量には経験式 (4) で算出する．

この両モデルは経験的・観測的に求められたものである．SCS法に関しては，最大保留量に対する累積保留量の比と初期損失後の累積降雨量に対する累積流出量の比が常に等しいという仮定の式 (5) と水量保存式 (6) のを基にしていて，これらから式 (3) が得られる．ところで流出率 f は Q/P に等しい．いま $p = P/S, i = I_a/S$ で無次元化すると式 (3) は式 (7) になる．少雨で流出があれば $p \approx i$ となって $f \approx p$ が言え，大雨時は $p \gg i, p \gg 1$ となり $f \approx 1$ が言える．移動通過損失量に関しては式 (4) の一般展開式 (8) を考える．これを下流方向に距離 ℓ 先までの積分損失量は式 (9) となり，V_1 を求めると式 (10) になる．ここで式 (11) が成り立つ場合に限り，テイラー近似により式 (12) が得られる．これは式 (8) を差分化して線形近似した結果に等しい．よってこの近似条件は差分近似計算の成立条件に等価であるとわかる．いまワジ河道断面が浅い矩形で，かつ，ワジ洪水挙動がキネマティックウェーブ近似されると仮定すると，運動方程式 (13) と連続式 (14) を用いて変数分離し，積分して解いたのち，$x = \ell$ のとき $t = T$ という条件を入れると式 (15) を得る．この結果を式 (13) に代入して式 (16) を得る．同様にすれば，ℓ 先の流量は式 (17) になり，差を取れば式 (18) を得る．i は，時空間的平均値 $V_1/W\ell T$ で近似した式 (19) の i_0 を満たすことで流出解析の理論的整合性をもたらす．なお河床飽和透水係数も i_0 に等しいことでも整合性がとれることになる．

3. 結論

本稿では，経験式を使う際に従来のモデルと理論的整合するような浸透強度値や河床透水係数を求め得た．逆に言えば，無観測の場合，i_0 を満たすように式 (8) まで逆算して C_1,C_2 を同定すれば整合性のある解析が行える．