

55. 斜面多層流れを考慮した流出計算手法における鉛直構造の比較に関する基礎的研究

範 園^{1*}・清水 雄太¹・吉見 和紘¹・山田 正²

¹中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

²中央大学理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

* E-mail: han_i@civil.chuo-u.ac.jp

地球温暖化により、雨の降り方、規模が変化すると指摘されている。そのような中で、現在に至るまでに、多くの降雨流出モデルが開発されている。これに伴って、個々の流域による相応しい流出モデル構造を選択することは重要である。本論文では、流域の特性を考慮し、再現性が高い流出モデル構造を選択する為に、斜面多層流れを考慮した流出計算手法における鉛直構造の比較を行う。過去の出水から流出パラメータを推定し、そのパラメータを用いて再現計算することで、ピークや総流出高や立ち上がり、逓減部及び波形全体を見て、流出計算手法の鉛直構造の違いが流出計算に与える影響を示す。

Key Words : vertical infiltration, multi-layer runoff, rain type, rainfall duration

1. はじめに

近年、自然現象の極端化とともに、雨の降り方、規模が変化する事が指摘されている。様々な降雨流出現象を再現する事は、河川計画を立案するための指標になるので重要である。この為、様々な降雨流出モデルを用いて洪水が予測がされている。しかし、同一の降雨流出モデルでもモデル構造によって再現精度が異なる。そこで、降雨流出モデルの構造の違いが流出現象の再現に与える影響を解明する事は重要である。

本論文では、個々の流域による相応しい流出モデル構造の選択を目的として、吉見・山田¹⁾が提案した鉛直浸透機構を考慮した単一斜面における降雨流出の基礎式に着目し、様々な流出計算手法の構造を比較し、鉛直構造の違いが流出計算に与える影響を評価する。

2. 降雨流出計算の概要

(1) 対象流域の概要

対象流域としては、利根川水系の渡良瀬川上流から78km地点に位置する多目的ダムである草木ダム流域である。流域面積は254km²であり、全体的に山地流域と言

える。本研究で用いる降雨イベントは草木ダム流域で1978年から2003年までに発生した降雨イベント19イベントである。

(2) 単一斜面における降雨流出の基礎式

山田らは従来から単一斜面における一般化した降雨流出の基礎式を提案している。以下にその理論の概要を記す。

連続式は(1)式、一般化した運動則は(2)式で表現される。(1),(2)式を q について整理すると(3)式を得られる。

$$\frac{\partial h(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = r(t) \quad (1)$$

$$v = \alpha h^m, \quad q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (2)$$

$$\frac{\partial q(x,t)}{\partial t} + a q(x,t)^\beta \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = a q(x,t)^\beta r(t) \quad (3)$$

$$\text{ただし, } a = \frac{1}{1-\beta} \alpha^{1-\beta} \quad (4), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (5)$$

ここに、 v : 断面平均流速[mm/h], $h(x,t)$: 湛水深[mm], $q(x,t)$: 単位幅流量[mm²/h], $r(t)$: 有効降雨強度[mm/h], α

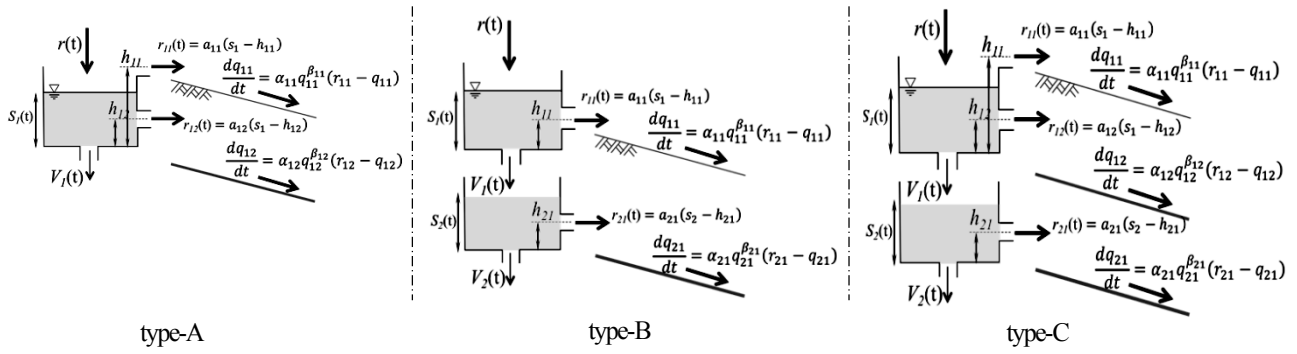


図-1 鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の三つの層構造

m : 流出特性を表すパラメータである。直接流出は流出寄与域のみからの流出と考えると、斜面長は実地形上の斜面長より十分短いものと考えられ、(6)式に示す変数分離形の近似式が仮定できる。

$$q(x, t) \equiv x q_*(t) \quad (6)$$

ここに、 $q_*(t)$: 流出高[mm/h]。流出寄与域斜面長 L の末端で考え $x = L$ として(6)式を用いると、(3)式は(7)式に示すように流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$\frac{dq_*(t)}{dt} = a_0 q_*(t)^\beta (r(t) - q_*(t)) \quad (7)$$

$$a_0 = (m+1) \alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (8)$$

(7)式は単一斜面における斜面流出を表す基礎式となる。また、流出パラメータ α, m は、斜面流として土壌内の流れを対象とする場合に、(9)、(10)式のように土壌・地形特性から決定される。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (9), \quad \gamma = m+1 \quad (10)$$

ここに、 i : 斜面勾配、 D : 表層土層厚[mm]、 k_s : 飽和透水係数[mm/h]、 w : 有効空隙率である。

(3) 斜面多層流れを考慮した流出計算手法の概要

一般的に山地流域における流出現象では、表面流より中間流が卓越することが知られている²⁾。このため、表面流と中間流の2層構造である既存モデルでは、斜面多層流れを多層構造として扱う必要がある。

まず、山腹斜面が複数の層で構成されていると考え、 n 層目における鉛直浸透について考える。 $n-1$ 層目から n 層目への浸透量、 n 層目から $n+1$ 層目への浸透量と各層における流出に寄与する雨量の連続関係から(11)式を得る。各層の流出に寄与する降雨量は(13)式に示すように土層内水位 s_n が各層の保水力を表す土層内の側方成分までの高さ h_{nm} を超えた時点で発生する。また、鉛直方向への浸透量 V_n は土層内水位 s_n に比例するとする。さらに、(11)式中の r_{nm} を(12)式中の基礎式に代入降雨として与え

ることで一連の斜面計算が行われる。

$$\frac{ds_n(t)}{dt} = V_{n-1}(t) - r_{nm}(t) - V_n(t) \quad (11)$$

$$\frac{dq_{nm}(t)}{dt} = \alpha_{nm} q_{nm}(t)^{\beta_{nm}} (r_{nm}(t) - q_{nm}(t)) \quad (12)$$

$$\begin{cases} r_{nm}(t) = 0 & (s_n(t) < h_{nm}) \\ r_{nm}(t) = a_{nm}(s_n(t) - h_{nm}) & (s_n(t) > h_{nm}) \end{cases} \quad (13)$$

$$V_n(t) = b_n s_n(t) \quad (14)$$

ここに、 n : 層数、 m : 各層における側方成分の数である。また、 $s_n(t)$: 各層の土壌内水位[mm]、 a_{nm}, b_n : 各側方成分浸透成分の比例定数[1/h]、 h_{nm} : 流出成分発生の閾値[mm]、 $r_{nm}(t)$: 斜面流出に寄与する雨量[mm/h]、 $V_n(t)$: 鉛直浸透量[mm/h]である。 α_{nm}, β_{nm} : 単一斜面における降雨流出の基礎式の a_0, β にそれぞれ対応する。この鉛直浸透機構は、降雨が流出に寄与するまでの遅れ時間や損失雨量を表現することが出来る。

3. 比較手法

(1) パラメータの推定

本研究では、図-1に示すような3つの層構造で、それぞれをtype-A, type-B, type-Cと定義し、Gauss-Newton法で推定したパラメータを用いて再現計算を行い、その結果からそれぞれのモデル構造の再現精度を評価する。その評価手法としては、流出計算の3つの層構造で対象降雨イベント19ケースを用いて、それぞれパラメータセット3×19セットを推定する。次にそのパラメータセットを用い、推定に用いた降雨イベント以外の18ケースの降雨流出を再現計算する。それらの再現精度をNash-Sutcliffe係数³⁾(以下NS値)を指標として評価し、最も妥当なパラメータを3×19×19回の再現結果から決定する。そして、三つの層構造で、NS値、望月が提案しており、河川砂防

● 流出高の実測値[mm/h] 時間降雨強度[mm/h]

上部：—— 有効降雨量[mm/h]

----- 第二層に寄与する雨量[mm/h]

----- 第一層に寄与する雨量[mm/h]

—— 第三層に寄与する雨量[mm/h]

下部：—— 流出高[mm/h]

----- 第一層流出高[mm/h]

----- 第二層流出高[mm/h]

—— 第三層流出高[mm/h]

(※ 図-2, 図-3 ともに上記の同例を用いる。)

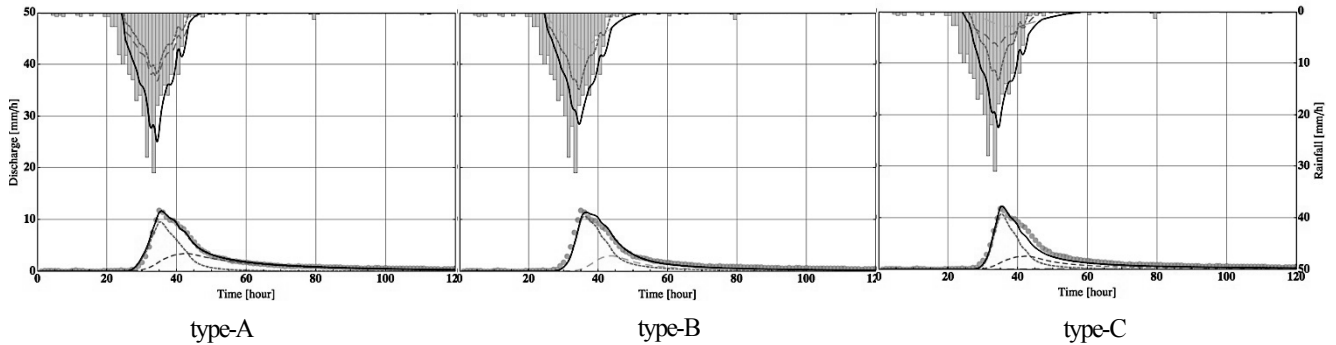


図-2 各構造で推定した短時間降雨型ハイドログラフ

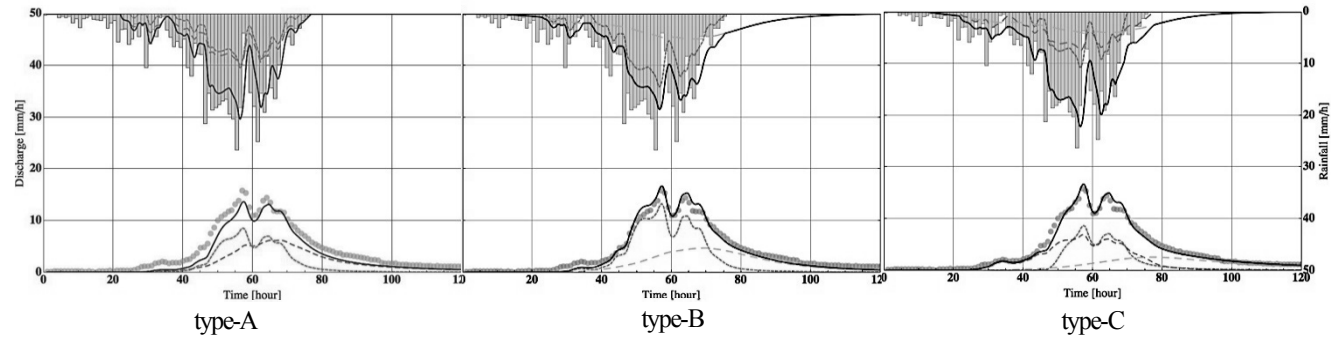


図-3 各構造で推定した長時間降雨型ハイドログラフ

技術基準にも記載のある誤差評価指標E値⁴⁾を指標として再現結果の比較を行い、再現精度を評価する。

NS値は(15)式のように、実測流量と計算流量との誤差で評価し、モデルの精度検証をできる評価指標である。

E値は(16)式のように、ハイドログラフの波形全体に関する誤差評価指標である。

$$\left\{ \begin{aligned} NS &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \{q_0(i) - q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^n \{q_0(i) - q_{av}\}^2} \\ q_{av} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_0(i) \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$EP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{q_0(i) - q_c(i)}{q_{op}} \right\}^2 \quad (16)$$

ここに、 n : 降雨時間数. $q_0(i)$: i 時の実測流出高[mm/h]. $q_c(i)$: i 時の計算流出高[mm/h]. q_{av} : 実測流量の平均値[mm/h]. q_{op} : 実測の最大流出高[mm/h].

(2) パラメータの分析

計算した $3 \times 19 \times 19$ セットの再現結果から、NS値によって、各構造の最も妥当なパラメータ19セットを決定した。また、一つの降雨イベントを例に各構造の最も妥当なパラメータセットを用いて再現精度を比較する。

洪水ハイドログラフに対して、短時間降雨型洪水（降雨継続時間が24時間以下の洪水とする）に着目する。図-2に示すように、type-Bでは、立ち上がりを過小評価しているが、逓減部を過大評価している。type-Cでは、立ち上がりは良好であるが、逓減部を過小評価している。type-Aでは、実測値に対する実測値と計算値の総流出高の差との比が0.7%であり、3つの構造で最も精度が良好である。また、いずれのタイプでも、浅い層の流出量が多く、短時間降雨型洪水は大部分が流出の早い成分で形成されていると考えられる。

一方で、長時間降雨型洪水（降雨継続時間が72時間以上の洪水とする）に着目する。図-3に示すように、type-Cでは逓減部が良好であるが、立ち上がりを過小評価している。type-Bを見ると、洪水ハイドログラフの立ち上がりと逓減部では中間流出成分が多くを占め、ピーク付近では早い流出成分が多くを占めていることがわかる。また、type-Cでは、早い流出成分がtype-Bに

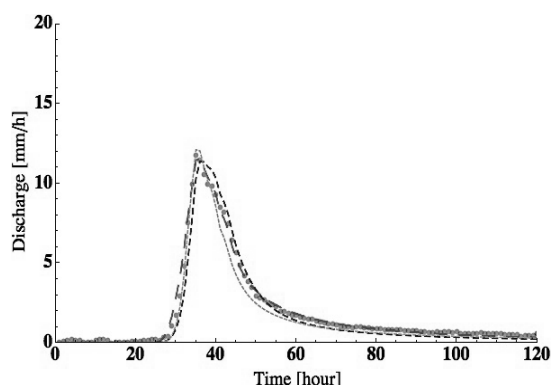


図4 短時間降雨型で三つの層構造による計算再現結果の比較

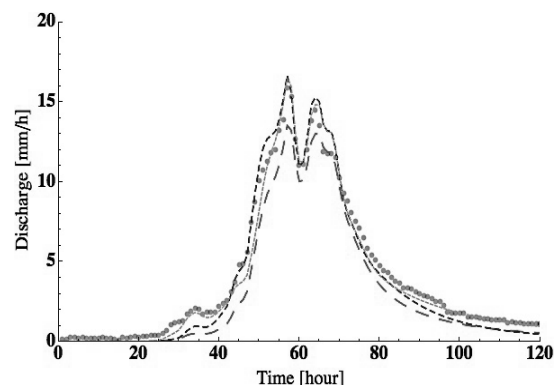


図5 長時間降雨型で三つの層構造による計算再現結果の比較

● 実測流出値 [mm/h]
 - - - type-A による再現結果 - - - - type-B による再現結果 - - - - - type-C による再現結果

比べて少なく、深層構造があるため鉛直浸透を再現している事がわかる。type-Aの構造では遅い流出成分を表現できないため、降雨は深層へ浸透しているが、土壌に貯留されていて、早い流出成分でハイドログラフが形成されている事が原因であると考えられる。

ピークの生起時間、ピーク流出高を確認すると、降雨時間が短い小規模洪水におけるtype-Aの推定結果は良好であり、流量ハイドログラフの波形全体についてE値を用いて評価すると、同様な結果を得られる。NS値(0.7以上が良い)、E値(0.05以下が良い)で比較した結果は表-1に示す。

表-1 各構造の再現精度の比較

		type-A	type-B	type-C
短時間降雨 型洪水	NS値	0.985	0.962	0.971
	E値	0.00082	0.00199	0.00151
長時間降雨 型洪水	NS値	0.963	0.978	0.984
	E値	0.00283	0.00183	0.00132

また、流出高に関して再現精度を考察するため、図-4、図-5に示すように、同じ降雨で三つの層構造を用いて再現計算した結果を比較する。

降雨継続時間が24時間以下の洪水で、三つの層構造によって、立ち上がり、ピーク、逓減部及びNS値、E値を見ると、いずれも再現結果が良いと評価できる。この為、短時間降雨型の流出再現計算に対して、流出計算手法の簡単な鉛直構造でも十分だと考えられる。しかしながら、降雨継続時間が長くなると、再現結果が流出計算手法の鉛直構造によって再現精度が異なると考えられる。逓減部と立ち上がりの流出成分を詳細に表現するため、流出計算手法の鉛直構造の層数が多ければ多いほど再現精度が良好であると考えられる。

4. まとめ

本論文では、個々の流域における流出計算手法の相応しい鉛直構造を選択する事を目的として、草木ダム流域を一例として異なる降雨タイプを用いて層構造による再現結果を比較した。以下に得られた知見をまとめる。

- 同じモデルでも流出計算手法の鉛直構造によって、再現精度が異なる事がわかった。
- 降雨時間が短い洪水は少段数の構造を用いても再現精度が良好と考えられる。
- 今後は本研究の結果に基づいて、個々の流域の特性と流出計算手法の鉛直構造の関係を明らかにしたいと考えている。複数の流域で同様の検証を行い、鉛直構造による再現結果を比較し、土壌・地形特性や植生や土地利用等の流域特性と流出計算手法の鉛直構造の関係を解明する。

謝辞：

本研究は「可能最大洪水に対応できる数理科学的な河川計画手法の確立」（代表者、山田正）の支援を受けて、行われたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 吉見和紘，山田正：鉛直浸透を考慮した流出計算手法の提案，土木学会論文集 G（環境），Vol. 69, No. 5, I_145-I_150, 2013.
- 山田正：山地流出の非線形性に関する研究，土木学会水理講演会論文集，Vol. 47, pp.259-264, 2004.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles, Journal of Hydrology, Vol.10, pp 282-290, 1970.
- 河川砂防技術基準 調査編。