

単一斜面における土壌特性の空間分布が降雨流出に与える影響に関する研究

中央大学理工学部 学生員 ○富沢 彰仁 中央大学大学院 学生員 呉 修一
中央大学大学院 フェロー会員 江花 亮 中央大学理工学部 フェロー会員 山田 正

1. はじめに:

山地流域における降雨流出機構を解明する上で、土壌特性が降雨流出に与える影響および、地下水流れの挙動を把握することは非常に重要である。著者らは物理的観点に立脚した洪水予測システムの構築を目的とし、山地流域における降雨流出計算手法を提案している。本論文は、単一斜面における土壌特性の空間分布が降雨流出に与える影響の把握を目的とし、著者らが提案する集中定数系方程式と不飽和浸透方程式の解の比較を行うとともに土壌特性を空間的に分布させ計算を行った。

2. 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出:

様々な流出形態に対応させるため一般化された断面平均流速を(1)式とし、連続式は(2)式で表す。(1)式を(2)式へ代入し q について整理することにより、(3)式で示される表面流に関するKinematic Wave方程式が得られる。ここに、 v :断面平均流速[mm/hr]、 h :湛水深[mm]、 $q(t)$:単位幅流量[mm²/hr]、 $r(t)$:有効降雨量[mm/hr]、 α 、 m は流域の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(河道及び河道近傍の湿潤領域)のみからの流出と考えると、(4)式の変数分離形の近似式が仮定できる。ここに、 q_* :流出高[mm/hr]である。斜面長 L の末端で考え $x=L$ とすると(3)式は(5)式で示される流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$v = \alpha h^m, \quad q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (1), \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2), \quad \frac{\partial q}{\partial t} + a q^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q}{\partial x} = a q^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (3), \quad q(x, t) \cong x q_*(t) \quad (4)$$

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (5), \quad a = (m+1) \alpha^{\frac{1}{m+1}}, \quad a_0 = a L^{\beta-1} = (m+1) \alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (6), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (7)$$

(5)式は斜面流下方向を対象とし、一般化された単一斜面からの降雨流出を表す基礎式となる。以後本論分において(5)式を集中定数系方程式と呼ぶ。また、流出パラメータ α 、 m に関して、地中水などの土壌内の流れを対象とする場合は、Kinematic Wave方程式と不飽和浸透方程式の関係より(8)式、(9)式に示すように、土壌、地形特性から決定される。

$$\gamma = m+1 \quad (8), \quad \alpha = \frac{k_s \sin \omega}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (9)$$

3. 集中定数系方程式と不飽和浸透方程式の解の比較:

(5)式によって示された集中定数系方程式の集中化の影響を把握するため、鉛直浸透流を考慮した不飽和浸透方程式と集中定数系方程式の解の比較を行う。以下に不飽和浸透理論の概要を示す。

不飽和領域に拡張したダルシー則(10)式と、地中水に関する連続式(11)式より(12)式を得る。

(12)式を圧力水頭を唯一の変数とする形に変形すると(13)式を得る。ここで透水係数と有効飽和度の関係には(14)式の一般化Kozney式を用いた。また、含水率 θ と有効飽和度 S_e の関係を(15)式に示す。

$$q = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \quad (10), \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (11), \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (12)$$

$$c \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (13), \quad k = k_s S_e^\gamma \quad (14), \quad \theta = S_e \cdot w + \theta_r \quad (15)$$

ここに、 θ :含水率、 $K(\theta)$:不飽和透水係数、 c :水分特性曲線の勾配、 ψ :圧力水頭、 γ :透水性を表す無次元パラメータ、 w :有効空隙率である。また、不飽和鉛直浸透の後、斜面下層において飽和に達した時点より飽和ダルシー則に従い飽和側方流が発生するものとして計算を行う。

計算条件としては、斜面長 $L=5\text{m}$ 、 10m 、 20m 、飽和透水係数 $K_s=0.035\text{cm/s}$ 、斜面勾配 $i=26.6^\circ$ 、表層土層厚 $D=20\text{cm}$ 、有効空隙率 $w=0.35$ 、 $q_{*0}=0.1\text{mm/hr}$ 、降雨強度 $r=5\text{mm/hr}$ 、降雨継続時間 $T=10\text{hr}$ 、抵抗則に関しては、土壌中の水の流れを斜面下層にて飽和に達した後、飽和側方流として斜面方向に流れると考え、 $m=0$ つまり飽和ダルシー則として計算を行った。 Δx は 10cm で(13)式を差分化して解いている。なお、時間的には前進差分、空間的には中心差分を用いた。

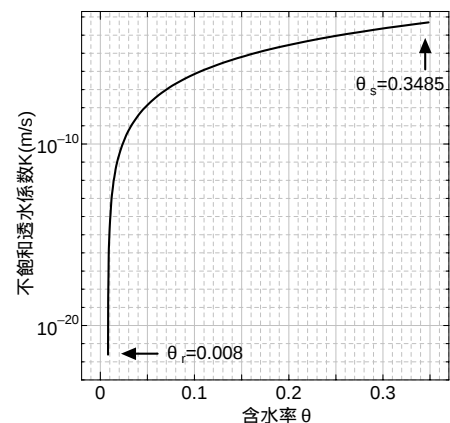


図-1 含水率と不飽和透水係数の関係

キーワード 土壌特性、空間分布、単一斜面、不飽和浸透理論

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL:03-3817-1807 FAX:03-3817-1803

また、本研究で用いた不飽和透水係数と含水率の関係を図-1に示す。境界条件は、斜面上流端で不透水条件、斜面流下方向末端で自由流出条件を用いた。集中定数系方程式は斜面鉛直構造を考慮していないため、土壌特性値を断面平均として与えている。

比較した結果を図-2,3 示す：図-2,3 に示されるように、ピーク到達までと流出高の逓減部に多少の違いはあるが、ハイドログラフはよく一致している。これにより、著者らが提案している集中定数系方程式が物理的意味を損なわずに集中化を行っていることを示した。また、計算時間から考えても実用的な手法であり、これにより、不飽和鉛直浸透過程を考慮せずに斜面流下方向流れのみを対象とした降雨流出計算が実行可能であることを示した。

4. 土壌特性の空間分布が降雨流出に与える影響：

3 章にて不飽和浸透方程式と集中定数系方程式の解の比較を行ったことにより、単一斜面では鉛直浸透過程を考慮せずに、土壌特性値を断面平均として扱えることがわかった。本章では、実地形上において空間分布している土壌特性値が、降雨流出に与える影響を、不飽和浸透理論を用い、数値計算により検討する。計算条件は、斜面長 $L=8\text{m}$ 、表層土層厚 $D=100\text{cm}$ 、有効空隙率 0.42 、斜面勾配 $i=26.6^\circ$ 、単一斜面を鉛直方向に 3 層、斜面流下方向に 20 層、合計 60 個のグリッドに分割し、各グリッドに対して飽和透水係数の値を与えた。飽和透水係数の値としては、平均値を 0.02cm/s とし、変化させる振れ幅をそれぞれ $\pm 10\%$ 、 50% 、 90% の乱数で与えた。一方、各グリッドすべてに平均値 0.02cm/s の飽和透水係数の値を与え空間分布を考慮せずに計算を行い、乱数で与えた場合との比較を行った。計算結果を図-5に示す。求めた結果より、飽和透水係数の値を空間的に分布させた時と、一定値として与えた時とで流出高の値は、ピーク時で多少の違いがあるものの、グラフの立ち上がり、逓減部においてよく一致していると言える。これにより、空間的にばらつきを持っている実地形上の斜面の飽和透水係数においても、平均値として、土壌中の水の流れを扱えることが可能となった。

5. まとめ：

1) 土壌水の斜面流下方向の流れを飽和側方流として考え、著者らが提案している集中定数系方程式において、流出パラメータの値を $m=0$ つまり、飽和ダルシー則として不飽和浸透方程式との解の比較を行った結果、ハイドログラフの立ち上がり、逓減部において多少の違いはあるものの、よく一致している。以上のことから、斜面の鉛直浸透過程を考慮せずに、土壌特性値を断面平均として与える事により、降雨流出の表現が可能であるという事が示された。

2) 単一斜面での降雨流出に関して、飽和透水係数を空間的に分布させた場合と、飽和透水係数の平均値を空間的に一様に与えた場合を比較した結果、両者ともハイドログラフはよく一致しており、飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響は小さいことが示された。

参考文献

- 1) 塚本良則：森林水文学，文永堂出版，1992
- 2) 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, 2003.

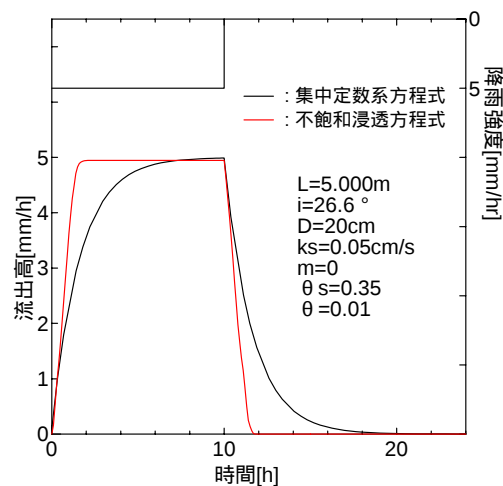


図-2 不飽和浸透方程式と集中定数系方程式の解の比較($L=5\text{m}$)

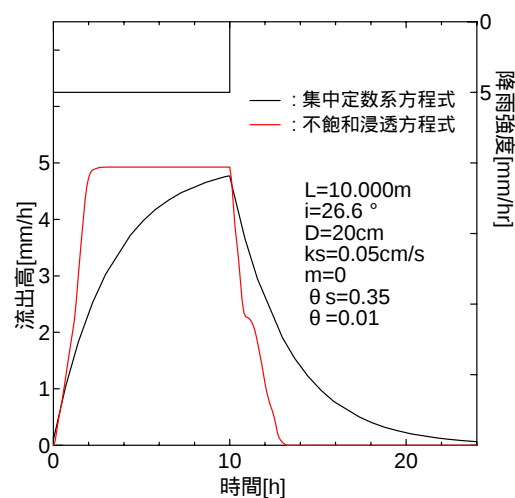


図-3 不飽和浸透方程式と集中定数系方程式の解の比較($L=10\text{m}$)

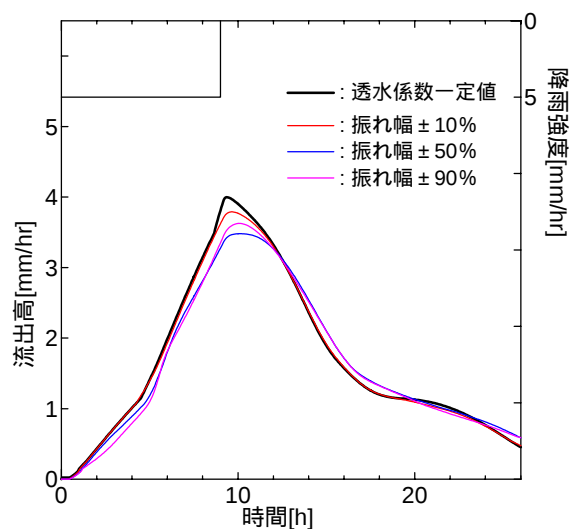


図-5 飽和透水係数の空間分布が流出高に与える影響