

○ 名古屋大学工学部 正員 松林 幸一郎
 “ “ 高木 不折
 水資源開発公団 “ 佐々木 和実

1. はじめに

近年、流出現象を種々の山腹斜面からの雨水流出の合成過程として捉え、斜面長、斜面勾配、斜面の水理特性の分布を考慮した流出モデルの提案あるいは流出特性の説明などがなされている。これらの解析においては単位となる個々の斜面での流れを水理学的に取り扱っており、それだけに斜面流の流出機構を明らかにしておかなければならない。中間流出については(1)式を基礎方程式とする飽和浸透流として解析されているが不飽和現象も生じるため、実際現象を飽和浸透流としてどの程度説明しうるか水理模型実験を通じて検討した。ところで(1)式を実流域の斜面特性のもとに解くと例えば図1のようなハイドログラフが得られるが、模型実験では製作上、観測上の制約のため斜面長が短く、降雨強度が非常に大きくなり、図1の流出は現われず、現実を必ずしもそのまま表わしていない。このため実験結果の解釈にあたっては実際現象のどの部分に対応するかに注意する必要がある。

2. 実験および考察

実験装置および諸元は図2に示すとおりである。流出現象に影響する物理量には斜面長 l 、斜面勾配 i 、透水係数 k 、有効間隙率 γ 、降雨強度 r 、砂層厚 H 、初期含水率 q_0 などがあるが、ここではそのうち l, i, H, q_0 を変化させている。

立上り部の特性

まず最初に立上り部について考えよう。これは図1のAの部分の現象に対応している。図3は水路下流端からの流出ハイドログラフの1例であるが、この図から降雨初期に遅れが認められる。図には、実験値を(1)式の飽和浸透流モデルで表現するために考慮しなければならない遅れ t_d と実際に飽和面が水路床に現われる時刻 t_i および降雨終了時刻 t_r が示してある。まず t_i について考えよう。降雨初期には図4の説明図のような不飽和鉛直浸透が主な流出機構であり不飽和透水係数 $K_u(\theta)$ を(2)式とおき、含水率の鉛直勾配が無視できる断面I・II間の水収支より不飽和浸透前面の速度 u_f は(3)式、したがって t_i は(4)式で計算できるが、この関係は条件を変えた実験結果をほぼ説明している(図4)。一方、飽和浸透流モデルの適用性という点では、(1)式に有効降雨 $r_e = r$ を $t_d < t < t_i$ ($t_d < t_i$)の期間与えて計算したハイドログラフは、実験流量をよく説明している。この実験流量には不飽和側方浸透流量も含まれていることを考えれば、これは不飽和浸透流を

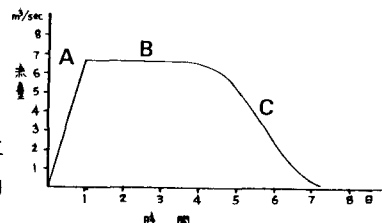
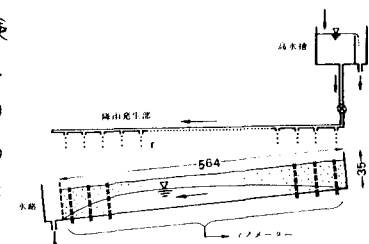


図1 単位斜面のハイドログラフ



水路長	564 m	砂層厚	26.3, 17.5 cm
水路勾配	0.06, 0.12	降雨強度	95~200 mm/時
透水係数	1.0 cm/sec	初期含水率	0.01~0.06
有効間隙率	0.33		

図2 実験装置および諸元

$$\gamma \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ kh \frac{\partial (h+z)}{\partial x} \right\} = r_e \quad (1)$$

$$K_u(\theta) = 0.00438 (\theta/0.189)^{4.13} \quad (2)$$

$$u_f = (r - q_0) / (\theta_i - \theta_0) \quad (3)$$

$$(t \neq 0, r = K_u(\theta_i), q_0 = K_u(\theta_0), \theta_0: \text{初期含水率} = S_0 / (B \cdot lH), B: \text{水路巾})$$

$$t_i = H / u_f = H(\theta_i - \theta_0) / (r - q_0) \quad (4)$$

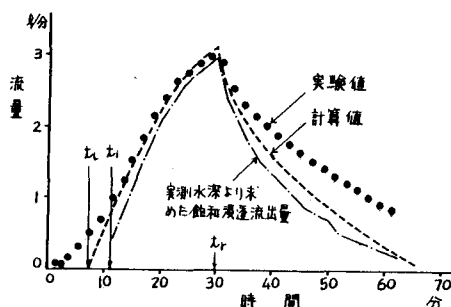


図3 ハイドログラフ

飽和浸透流で置きかえた解析の可能性を示唆するものである。図5には計算、実測の水深分布を示してある。図で計算値(---)は実測値(—)を24分まで上回っているがその差はしだいに小さくなり、30分では逆転する。この差の時間的变化は不飽和浸透流としての効果でありなお検討を要するが、計算値には不飽和浸透流も含まれていることを考えれば計算・実測値はほぼ対応しているといえよう。

他減部の特性

この部分は図1のCの部分に対応している。図3で他減部を見ると、実測値は計算値より全般に大きく、しかもその差は時間とともに増加している。実測水深より計算した流量は計算値とほぼ対応した変化を示し、また図4他減部の水深分布も実測・計算値がほぼ対応していることから、流量における実測・計算値の差は不飽和流として生じていると考えられる。また、この差の果加量は単位面積あたり1.7cmと推算され、立上り部で初期貯留として無視した0<t<t_e間の降雨量2.1cmと似た値であり、このことは前述の初期貯留は損失ではなく他減部流量の涵養源となっていることを示している。

定常実験

非定常実験は現象が複雑であることから、定常実験(これは実際の流出現象ではあまり起らない現象であるが)を行ない特性を考察する。まず流量について図6には実測水深分布より(5)式で計算される各断面での飽和浸透流量 q_s と、(6)式で計算される全断面流量 q_t およびその差として与えられる不飽和浸透流量 q_u (7)式が示されている。この図よりわかるように q_u は水路全域にわたってほぼ一様に分布している。水深分布については図7に示すように実測飽和水深 h_s (●)と計算値(—)とは差があるが図6の q_u を飽和流で置きかえ(8)式によって飽和水深に換算した不飽和水深 h_u を h_s に加えればこれは計算値とよく一致する。これらのことから不飽和水は水路にほぼ一様に分布し、その流れは飽和流で近似しうること找わかる。

$$q_s = -k h_s \left(\frac{\partial(h_s + z)}{\partial x} \right) \cdots (5), \quad q_t = \int_0^x r dx = r x \cdots (6)$$

$$q_u = q_t - q_s \cdots (7), \quad h_u = -\frac{q_u}{k \partial(h_s + z)/\partial x} \cdots (8)$$

3. まとめ

以上の検討をとりまとめるとつぎのとおりである。i)降雨初期水路底に飽和水面が生じ始める時刻 t_i までは不飽和鉛直浸透が主要な現象となり、 t_i は不飽和浸透理論で説明できる。ii)ハイドログラフの立上り部は $t_e < t < t_r$ で $r_e = r$ とした飽和浸透流モデルで解析できる。iii)降雨初期0<t<t_eでの降雨は初期貯留となるが、これは他減部で不飽和浸透流として流出する。iv)水深分布の計算・実測値はほぼ対応した。

なお、本研究では1種類の砂しか用いておらず、また現象も図1のBの部分は取り扱っていない。今後は他の砂を用いた実験、実際斜面での観測を通じて斜層流出のより普遍的な特性を明らかにする必要がある。

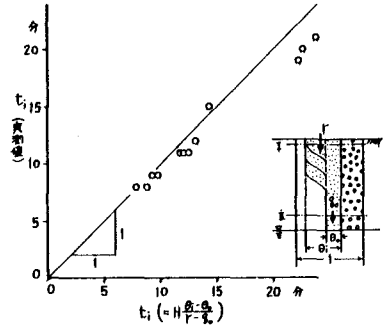


図4 飽和水面の現れる時刻 t_i

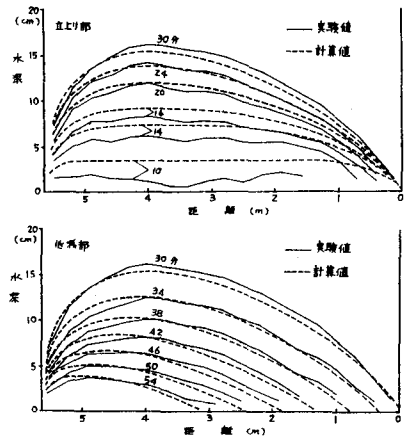


図5 水深分布

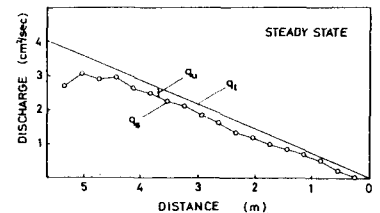


図6 各断面の流量(定常状態)

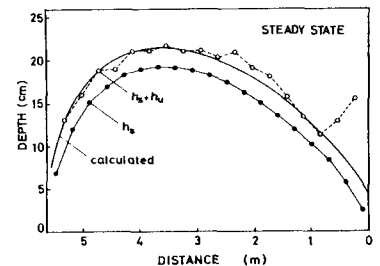


図7 定常状態の水深分布