

広島大学 工学部 正員 金丸 昭治
 広島大学 工学部 正員 三島 隆明
 広島大学 大学院 学生員 住谷 昌宏

1. まえがき

一般に、山腹斜面で代表される単純な単位流域からの流出現象に限定してみてもその変化は複雑であり、特に降雨条件のちがひによって生ずる流域特性の変化については未だに不明点が多い。この研究はこれらの点を解明することを目的としたものであるが、この論文においては後述するような模型単位斜面からの流出現象のうち層内流動現象の範囲を主体として、その流出変化に与える降雨条件、特に降雨が時間的に変化する場合の影響度について実験的な検討を行なうとともに、巨視的かつ平均的な取り扱い方による考察を行なった結果について述べる。

2. 基礎的考察

降雨条件の影響度の比較の基準となるのは、時間的一様降雨(以後一定降雨とよぶ)による定常到達時の現象である。したがって、対象斜面について、まずこの現象を明らかにすることが必要である。対象とした模型単位斜面について詳細な透水試験を行なった結果この斜面は図1に示すような三層構成の斜面とみなすことができる。図中および以下の文中の各記号はそれぞれつぎの諸量を表わす。すなわち、 θ は斜面傾斜角、 d , h は層厚、斜面上に直角な水深、 x , l , l_e , x_m は距離、斜面長、上下流端の急変部分を除いた有効斜面長、浸出点、 l_e , m は透水係数、有効空隙率、 r , u , v は降雨量、斜面方向および鉛直下向の流速を表わすが、小文字は次元量、大文字は無次元量、添数字は各層を表わす。

斜面の各層における流動がDarcy則にしたがう飽和流であると仮定するが、複層斜面であるために一定降雨による定常現象の場合でもその厳密解は容易に求まらない。したがって、近似解析によってその指針とせざるをえないが、すでに発表した単一斜面における定常流出現象の解析結果を参考にして行なった各種の試算結果などから、第1層、第2層、第3層の各層に自

由水面の主体がある場合の限界状態は有効斜面下流端部で最大水深が発生するような定常状態であると考えるのが妥当なよう

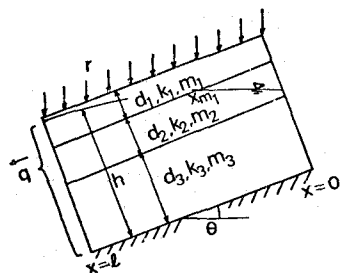


図1. 模型単位斜面

i	k_i (cm/sec)	m_i (%)	l, l_e, θ
1	0.689	10	$l = 600 \text{ cm}$
2	0.0762	5	$l_e = 500 \text{ cm}$
3	0.00324	3	$\tan \theta = 1/6$

表1. 斜面特性量

i	R_{ci} $\times 10^{-4}$	r_{ci} (mm/hr)	t_{si} (hr)	r_{sci} (mm)
1	12.4	30.88	1.04	32.12
2	2.27	5.64	4.31	24.31
3	0.431	1.07	22.80	2440

表2. 限界降雨量

に考えて(1)式と同程度の近似度において(2)式のように表わされると考えられる。

$$U_i = K_i \tan \theta, V_i = R \text{ or } K_i \quad (R < K_i \text{ or } R \geq K_i) \quad (2)$$

ここに、 $U_i = u_i/k_i$, $V_i = v_i/k_i$, $R = r/k_1$ である。したがって、表面から不透面まで雨水が到達するのに要する時間 t_w および浸出点 x_m は(3)式および(4)式のように表わされる。

$$T_w = \sum_{j=1}^3 \frac{M_j \cdot D_j}{K_j V_j \cos \theta} \quad (3)$$

$$x_m = \left(\sum_{j=1}^3 K_j D_j \sin \theta \right) / (R \cos^2 \theta) \quad (4)$$

ここに $T_w = (R_1 t_w) / (m_1 l_e)$, $M_i = m_i/m_1$, $x_m = x_m/l_e$ である。

このように表わすと、定常到達時間 t_s は結局(5)式のように表わされることになる。

$R > R_{C1}$ のとき

$$T_s = T_r + (D_1 + M_2 D_2 + M_3 D_3) / (R \cos \theta) + C$$

$R_{C1} \geq R > R_{C2}$ のとき

$$T_s = T_r + (R \cos \theta / \sin \theta - K_2 D_2 - K_3 D_3 + M_2 D_2 + M_3 D_3) / (R \cos \theta)$$

$R_{C2} \geq R > R_{C3}$ のとき

$$T_s = T_r + [M_2 \{R \cos^2 \theta / (K_2 \sin \theta) - K_3 D_3 / K_2 + M_3 D_3\}] / (R \cos \theta)$$

$R_{C3} \geq R$ のとき

$$T_s = T_r + M_3 / (K_3 \tan \theta)$$

r ($\frac{mm}{hr}$)	R $\times 10^{-4}$	T_s	$\frac{t_r}{t_s}$ ($\frac{hr}{hr}$)	0.5	1.0	1.5	3.0
5	2.02	236.2	4.76	—	—	—	—
10	4.03	146.8	2.95	—	—	—	+ 定常
20	8.06	76.4	1.54	—	—	$\pm$	- 未定常
30	12.1	52.9	1.07	—	$\pm$	$\pm$	$\pm$ 定常直前後
40	16.1	40.1	0.81	—	+	+	計実

表3. 定常到達状態の判定 (一定降雨)

ようにしたものである。

流量の測定は圧力変換器を用い自作した貯留型測定装置によって連続的に測定した。また、貯留量は流量和が総流出量の92%程度になる時間、すなわち減衰開始後165時間までの総流出量とした。

一定降雨の実験としては、降雨量 $r=5, 10, 20, 30, 40 \text{ mm/hr}$ 、降雨継続時間 $t_r=0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ hr}$ の各場合について、また変化降雨の実験としては、降雨開始時あるいは終了時にピークが発生するような単純三角形分布降雨で、ピーク降雨量 $p_r=40 \text{ mm/hr}$ で $t_r=0.75, 1.5 \text{ hr}$ の各場合について流出実験を行った。

4. 実験結果および考察

表2は(1)式によって計算した各層の限界降雨量を示したものであり、 $r=31 \text{ mm/hr}$ 程度以上で、しかも $t_r=1.0 \text{ hr}$ 程度以上の降雨が降れば表面流出が発生することになる。表3は一定降雨の各場合について表2の限界降雨量にしたがって(5)式によって算出した t_s と t_r から現象の定常性を判断した結果を各欄目の左上に示し、実際水梨分布の変化、流量の変化および貯留量から判断した結果を同じく右下に示したものであり、(+)は定常到達状態、(-)は未到達状態、($\pm$)は到達直前後を表わすが、表からわかるように両者は極めてよい一致を示しており、前述の解析方法の適応性の高いことがわかる。図2はこれらの一定降雨実験の代表例として $r=20 \text{ mm/hr}$ の場合の降雨終了時以降の水梨分布の時間的変化を示したものである。また、図3は実測値から算出した供給降雨量 $q_s = \int_0^{t_r} r \, dt$ と単位貯留量 S との関係を示したものである。この両者の関係は、少なくとも表2に示した q_{sc} で区切られた各領域内では降雨時間に無関係に一本の直線で表わされるものと考えられるが、現実的にはこの程度の規模の斜面においては領域の区別なく一本の直線で表わされるよう

ここに、 $T_s = (k_1 t_s) / (m_1 l_e)$ 、 C は表面流出部分で定常化に要する時間である。

時間的に変化する降雨(以後変化降雨とよぶ)あるいは、一定降雨で降雨継続時間 $T_r = (k_1 t_r) / (m_1 l_e)$ が T_s と異なる場合の影響度については R および T_s の平均的な比較を行なうことによってその数量的な把握も可能になるものと思われる。

3. 実験装置および実験方法

模型単位斜面は $600 \text{ cm} \times 55 \text{ cm} \times 65 \text{ cm}$ の透明樹脂製水路に山腹表層部(樹令20年程度の杉林)をセット後約4年間断続的に流出実験を繰り返したものであり、透水係数など解析に必要な諸量は表1に示すとおりである。この表の中の透水係数は上流端流入方式により水深を約9種類変化させて判定、整理した結果に基づくものである。また、有効空隙率は各流出実験について単位時間の水面形の変化量及びその間の流出量から求めた平均的な値である。なお、水深の測定は長さ方向に下流端より0, 5, 25, 以降50cm間隔、計14ヶ所について横方向に3ヶ所の平均をマンメータで読み取った。

降雨装置は斜面上方約10mの高さに設置したヘッドタンクに流入させた水道水を斜面上方約1mに固定したスプレー群に導水し噴出させるもので、スプレー群の選別および、スプレー群に付設した電磁バルブを用いた降雨断続装置とを用いて、 $r=5 \text{ mm/hr} \sim 120 \text{ mm/hr}$ の任意の降雨強度および単純降雨波形の降雨が得られる

である。これらの結果から、少なくとも一定降雨による流出における降雨終了後の流出変化は定常到達時の流出関係を連ねて表される代表流出曲線にしたがった変化をするものと考えられる。

さらに、変化降雨実験の例として、一定降雨(降雨波形a)において未定常状態となる $r=20 \text{ mm/hr}$, $t_r=0.75 \text{ hr}$ と降雨量が等しくなるような三角形分布降雨(降雨波形b, c)にともなう流量比率(q_{borc}/q_a)の変化を示したものが図4であり、定常状態となる $r=20 \text{ mm/hr}$, $t_r=1.5 \text{ hr}$ の場合について示したものが図5である。また各場合の h と S との関係は図3に示すとおりであるが、これらの図からわかるように、現象が未定常状態の領域すなわち図3において S が r_s に対して一定こう配を持つて増加する領域(この部分を限界貯留曲線とよぶ)にある場合には、図4に示すように降雨波形を含めた降雨条件の影響はほとんど表われないことになる。一方、現象が定常状態の領域、すなわち図5に示した流出のように図3において S がほぼ一定になるような領域にある場合には、各流出の S に対応する限界貯留曲線上の r_s の値を与える降雨終了前の降雨が流出に影響を与えることになるが、図5に示した実験の場合、降雨波形bのときは $r=28.2 \text{ mm/hr}$, $t_r=0.89 \text{ hr}$ 、降雨波形cのときは $r=15.9 \text{ mm/hr}$, $t_r=1.19 \text{ hr}$ の一定降雨の場合と同様な流出をすることになる。すなわち、b形降雨の場合にはa形降雨の約1.5倍、c形降雨の場合には約0.8倍程度の降雨にともなう流出が期待できそうである。

5. あとがき

若干の実験に基づいて降雨条件の影響度などを検討する場合に、巨視的解析法がかなりよい適合性を示すことがわかったが、今後この結果を基本にしてさらに各種の降雨条件における影響度について研究を進める予定である。

5. あとがき

若干の実験に基づいて降雨条件の影響度などを検討する場合に、巨視的解析法がかなりよい適合性を示すことがわかったが、今後この結果を基本にしてさらに各種の降雨条件における影響度について研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 金丸昭治, 三島隆明, 横山有二: 斜面内の飽和水面形状と貯留量

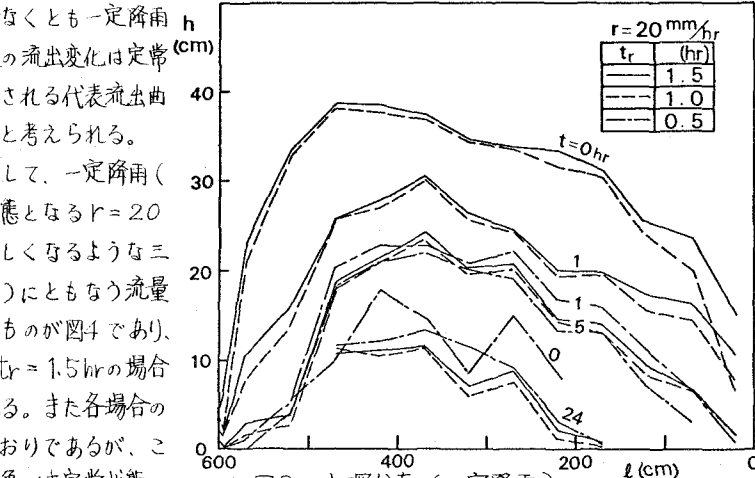


図2. 水深分布 (一定降雨)

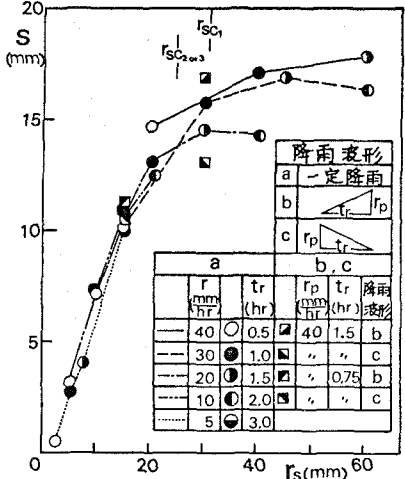


図3. 供給降雨量と貯留量の関係

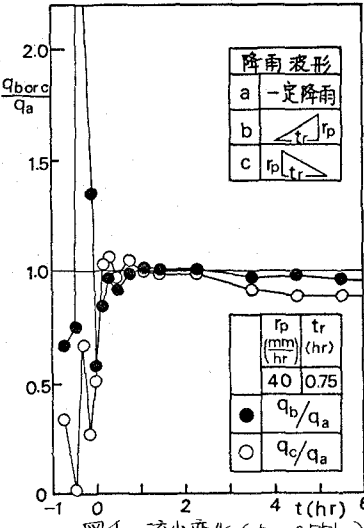


図4. 流出変化 ($t_r=0.75 \text{ hr}$)

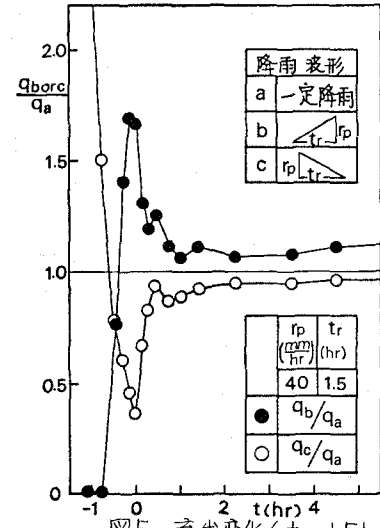


図5. 流出変化 ($t_r=1.5 \text{ hr}$)