

山梨大学大学院 学生員 齊 藤 和 美
山梨大学工学部 正会員 砂 田 憲 吾

1. はじめに

流域斜面における洪水流出過程において、その主要な成分とされる表面流及び中間流は斜面の形状、斜面長、勾配、表層土壌の透水性などの斜面特性に支配されよう。従って、これらの流域斜面諸特性が洪水流出特性に及ぼす影響を具体的かつ系統的に検討しておくことが重要である。ところで、通常の斜面では表面流は発生しにくく、またその発生についても表層付近の飽和状態を規定する中間流のふるまいが重要と考えられる。このため、ここではまず良透水性斜面表層内の中間流（早い中間流）に注目して、側方飽和浸透流の扱いにより解析を進め、斜面の形態の違いが中間流に及ぼす影響について基本的な検討を行った。

2. 流域斜面における側方飽和浸透流

側方飽和浸透流は、不透水層（または難透水層）に達した水が飽和して側方の流れを形成する。これらは地表の浅い良透水性土壌層とそれ以下の層との境界、またはFig. 1に示される斜面基岩盤上に生ずる。側方飽和浸透流は、Subsurface stormflowの主な成分と考えられている。

基礎方程式と解析解 Fig. 1に示すような斜面において、連続及び近似された運動の方程式は以下ようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_0 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (qw)}{\partial x} = w r_0 \\ q = k_s h S_1 \end{array} \right. \quad (1)$$

ここに、 q ：斜面単位幅流量、 $w = w(x)$ ：斜面幅、 $A = hw$ ：流積
 r_0 ：単位面積鉛直供給量、 k_s ：飽和透水係数、 h ：水深、 r ：斜面
勾配、 $S_1 = \sin \gamma$ 、 t ：時間、 x ：流下方向距離、 Φ_0 ：有効空隙率で
ある。(1)式と(2)式の特性方程式は以下ようになる。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k_s S_1}{\Phi_0} \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r_0(t)}{\Phi_0} - \frac{1}{w} \frac{dw}{dx} \frac{k_s S_1}{\Phi_0} h(t) \quad (4)$$

(4)式の右辺第2項は、流域幅変化に伴う水深変化の項である。

(3)式と(4)式を解くと、(5)式になる。

$$h(t) = C_2 e^{-\int_0^t F(v\tau + c_1) d\tau} + e^{-\int_0^t F(v\tau + c_1) d\tau} \int_0^t e^{\int_0^\tau F(v\sigma + c_1) d\sigma} \frac{r_0(\tau)}{\Phi_0} d\tau \quad (5)$$

ここに、 $v = k_s S_1 / \Phi_0$ ：伝播速度、 $F(v\tau + c_1) = v/w \cdot dw/dx$ 、 c_1 、 c_2 ：積分定数である。

一般にこの種の浸透流が発生部分に至るには時間的なラグがあるが、そのラグはピストン変位モデルを用いて近似的に考慮できる²⁾。以下の式で与えられる。

$$dz/dt = r_0 / (\theta_w(z) - \theta_0(z)) \quad (6)$$

ここに、 $\theta_w(z)$ ： $k(\theta, z) \cos \gamma = r_0$ における水分量、 $\theta_0(z)$ ：初期水分量、 z ：深さ、 $K(\theta, z)$ ： θ, z における不飽和透水係数である。

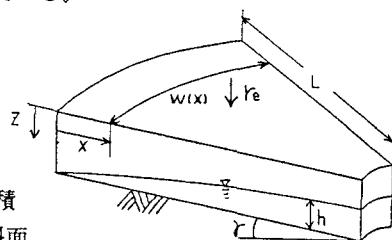


Fig. 1 斜面モデル

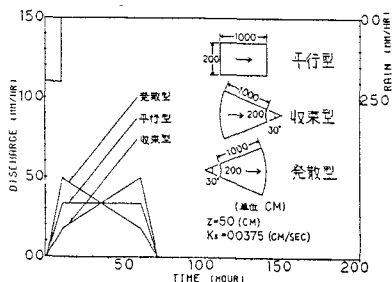


Fig. 2 計算値($t_r \leq t_0$)

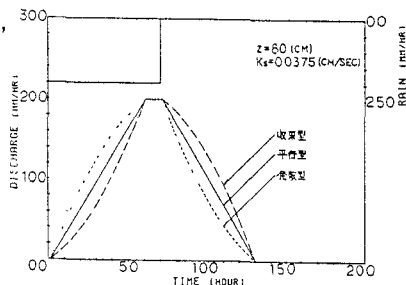


Fig. 3 計算値($t_r \geq t_0$)

降雨強度が一定、初期水深が0 cmの場合、(5)式は次のように場合分けできる。1) $t_r \leq t_c$ の時、 $t \leq t_{uz}$, $t_{uz} \leq t \leq t_r$, $t_r \leq t \leq t_c$, $t_c \leq t \leq t_r + t_c$, $t_r + t_c \leq t$, 2) $t_r > t_c$ の時、 $t \leq t_{uz}$, $t_{uz} \leq t \leq t_c$, $t_c \leq t \leq t_r$, $t_r \leq t \leq t_r + t_c$, $t_r + t_c \leq t$ と分けられる。ここに、 t_r : 降雨継続時間、 t_c : 斜面上流端の波が下流端へ到達する時間、 t_{uz} : 表面から境界まで達する時間、 t : 時刻である。このうちで代表的なものを示せば以下になる。

① $t_{uz} \leq t \leq t_r$ のとき

$$h(t) = \frac{r_e t}{\Phi_e w_{z1}} \left(-\frac{b_e v}{2} t + w_{z1} \right) \quad (7)$$

② $t_r \leq t \leq t_c$ のとき

$$h(t) = \frac{r_e t_r}{\Phi_e w_{z1}} \left(-b_e v t + \frac{b_e v}{2} t_r + w_{z1} \right) \quad (8)$$

③ $t_c \leq t \leq t_r + t_c$ のとき

$$h(t) = \frac{r_e}{\Phi_e w_{z1}} \left\{ \frac{b_e v}{2} t^2 - (w_{z1} + b_e v t_r) t + \frac{b_e v}{2} (t_r^2 - t_c^2) + w_{z1} (t_r + t_c) \right\} \quad (9)$$

ここに、 w_{z1} : 下流端の幅、 b_e : 幅の変化率である。

斜面内の土壌が一定の飽和透水係数で与えられる場合の計算例を示せば、Fig. 2~Fig. 4になる。Fig. 2において流出の初期で支配的なのは分散型流域、後期では収束型流域である。Fig. 4は平行型流域の計算値及び実験値で流出のちがいはほぼ合っているが、減少部分においては計算値はダルシー流速一定とされているため、急に流出は終わっている。

3. 2層の場合への拡張と流出特性

実際の流域斜面ではその生成過程に応じて一般に異なる透水係数を持つ土壌が層状をなしている。そこでいくつかの透水係数で土壌内を分割し、分割された層相互での流出状況を解析する必要が生ずる。通常、透水係数は下層にいくほど小さな値をとると考えてよい。

Fig. 5を参照しながら、最も単純な2層の土壌をもち飽和に近い斜面条件の場合は以下の手順で解析できる。④への供給量は、 $r_e \geq k_{s2}$ のときは $(r_e - k_{s2})$, $r_e < k_{s2}$ のとき0、⑤への供給量は $r_e \geq k_{s2}$ のとき k_{s2} , $r_e < k_{s2}$ のとき r_e となる。第2層での特性曲線上において水深が第2層への層厚を越えた場合はそこから2層の供給量とにじみ出しの影響を第1層の特性曲線上の水深へ加算して処理する。

4. おわりに

本研究では、流域斜面において側方飽和浸透流を仮定した中間流モデルを適用し、土壌内の飽和浸透係数が層内一様に一定、ダルシー流速一定というもとで計算値と実験値を検討した。その結果、有効降雨に対する斜面地形（平行・収束・分散）が及ぼす流出形態への影響が明らかにされた。土壌の中には多くの透水係数の異なる層で構成されていてそれが相互に流出に寄与していると考えられるので、今後さらに検討を重ねていく積もりである。

【参考文献】 1) Smith, R. E. and R. H. B. Hebert, W. R. R., 19(4), 1983.

2) Beven, K., W. R. R., 18(6), 1982.

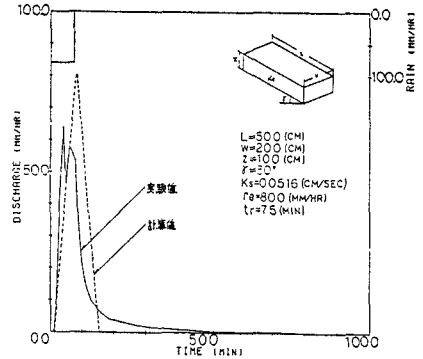


Fig. 4 実験値と計算値

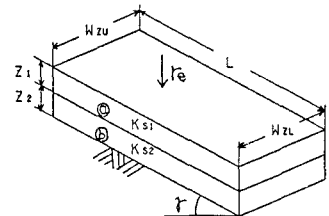


Fig. 5 二層モデル

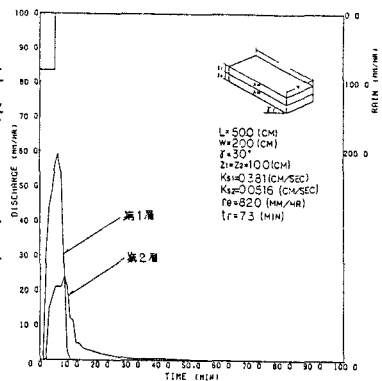


Fig. 6 二層モデル実験値