# 降雨時における地下水位の変動と表層崩壊の発生に関する考察

# 筑波大学大学院生命環境科学研究科 〇今泉文寿, 眞板秀二, 宮本邦明

## 1. はじめに

表層崩壊を引き起こす間隙水圧の変化は、降雨により供給された水の鉛直方向への浸透、あるいは飽和側方流 としての斜面方向への移動に伴いおきる。斜面内に複数の潜在すべり面がある場合、各潜在すべり面における間 隙水圧が変化するタイミングや変化量は、降雨パターンと斜面内での透水係数の深さ方向での分布に依存してい ると考えられる。そこで本研究では,鉛直浸透流,飽和側方流に関する基礎方程式をもとに,降雨時における斜 面内での水の移動について考察した。また、多層構造を持つ斜面内での深さ方向の間隙水圧の分布は主に鉛直方 向への水の移動により決定されることから、多層構造を持つ斜面を対象とした鉛直浸透流の解析を行うことで、 降雨パターンが崩壊特性(すべり面の深さ、発生タイミング)に及ぼす影響を調べた。

h

 $h_w$ 

 $Z_1$ 

 $h_w$ 

### 2. 基本方程式

本研究では、斜面と平行な層状に土質定数が分布する ケースを考える (図-1)。二次元の連続式は以下により 与えられる。

$$\frac{\partial s_{(z,t)}}{\partial t} + \frac{\partial q_{x(x,t)}}{\partial x} + \frac{\partial q_{z(z,t)}}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

 $S_{(z,t)}$ : 時間 t, 位置 z における体積含水率,  $q_{x(x,t)}$ ,  $q_{z(z,t)}$ : x軸、z軸方向の単位面積あたりの流量。運動方程式はダ ルシー則を用いることで以下のようになる。

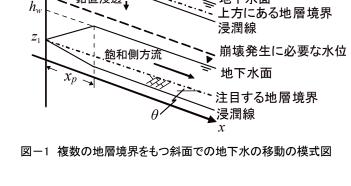
# u = KI (2)

ここに、u:流速、K:透水係数であり、本研究では 飽和,不飽和に限らず K が一定であると仮定する。

#### 3. 鉛直浸透

降雨時における一次元不飽和鉛直浸透の連続式は、式 (1)でx軸方向への水の移動(左辺第2項)を除くことで

1) で 
$$x$$
 軸方向への水の移動(左辺第 
$$\frac{\partial s_{(z,t)}}{\partial t} + \frac{\partial q_{z(z,t)}}{\partial z} = 0$$
 (3)



降雨強度 Ran

地下水面

と表される。本研究では、崩壊を引き起こすような降雨時には土層が飽和またはそれに近い状態であると考え、 水分の吸引水頭を無視する。すると鉛直浸透の流速は(2)式より以下のように表される。

$$u_{z(z,t)} = -K_{z(z)} \tag{4}$$

 $K_{z(z)}$ : 鉛直方向の透水係数。通水断面積が $S_{(z,t)}$ であるから、

$$q_{z(z,t)} = s_{(z,t)} u_{z(z,t)} = -s_{(z,t)} K_{z(z)}$$
 (5)

境界条件は、地表面(z = h)において降雨強度  $R_{(t)}$ 、間隙率  $n_{(z)}$ を用いることで、以下のように与えられる。

# 4. 飽和側方流

本研究では水の動きに着目するので、簡単のために間隙率nを深さ方向で一定とする。 $z_1$ 直上の地下水位を $H_{w(t)}$  $(=h_{w(t)}-z_1)$  として式(1)を  $z_1$  から  $h_{w(t)}$ まで積分すると、飽和側方流の連続式は、

$$n\frac{\partial H_{w(t)}}{\partial t} + \frac{\partial H_{w(t)}q_x}{\partial x} = -q'_{z(t)}$$
 (7)

となる。ここに $q'_{z\alpha}$ は注目する地層境界およびその上に発達した飽和帯の水面における水の流出入量の収支であ る。斜面方向の流速を表す透水係数  $K_x$ が深さ方向で一定とすると、飽和側方流の移動速度  $u_x(\mathbf{m}/\mathbf{s})$ はダルシー 則により以下のように与えられる。

$$u_r = K_r I \tag{8}$$

I は動水勾配であり、本研究では水深が格子間の標高差よりもはるかに小さい条件下を想定し、圧力水頭を無視

して  $I=\sin\theta$  とする。(8)式を用いるとq は以下のようになる。

$$q_x = nu_x = nK_x \sin\theta \tag{9}$$

斜面方向での地下水位の分布は図-1 のように、斜面上端から一定区間連続的に上昇し、それよりも下方では式(7)式により与えられる水位で斜面と平行になる。地下水面が斜面と平行になる位置  $x_p$  は式 (8) を時間積分 (4) することで次のようになる。

$$x_p = \int_{t}^{t_1 + T} u_x dt = K_x T \sin \theta \tag{10}$$

#### 5. 降雨波形と崩壊特性

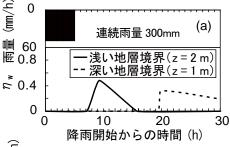
ここでは無限長斜面の安定条件をもとに、深さ方向での地下水の分布が 斜面の安定性に及ぼす影響を検討する。無限長斜面の式は以下のように正 規化される(今泉ら、投稿中)。

$$F\frac{\tan\theta}{\tan\phi} = 1 - \frac{\eta_{w}}{(1-n)\frac{\sigma}{\rho} + n\{S' + (1-S')\eta_{w}\}} + \frac{\frac{c}{(h-z_{1})\rho g\cos^{2}\theta\tan\phi}}{(1-n)\frac{\sigma}{\rho} + n\{S' + (1-S')\eta_{w}\}}$$
(11)

$$\eta_w = (h_w - z_1)/(h - z_1)$$
(12)

表-1 計算条件  $\frac{z \text{ (m)}}{k_{z(z)}\text{ (m/h)}} \frac{K_{z(z)}\text{ (m/h)}}{n}$   $\frac{n}{z \ge 2}$  0.15 0.4  $1 \le z < 2$  0.08 0.4

0.4



0.03

z < 1

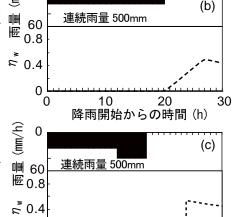


図-2 様々な降雨パターン時の $\eta_{m}$ の変化

降雨開始からの時間(h)

そこで多層構造をもつ斜面を対象とし、いくつかの降雨パターンのもとで鉛直浸透流の解析を行い、各地層境界における $\eta_w$  の値の時系列的な変化を調べることで、降雨パターンと崩壊特性の関わりについて検討した。(12) 式で $\eta_w$  を算出するために必要な $h_w$ は、式(3)、(4)を差分し鉛直浸透流を追跡することで求めた。このようにして推定されるのは式(10)で与えられる $x_p$ よりも斜面下方での $\eta_w$ の値である。計算は表-1に示されるような 3 層構造の斜面を対象とし、初期条件に $s_{\Theta}$ =0、境界条件に式(4)を与え、 $\triangle z$ =0.01(m)、 $\triangle t$ =60(s)の条件のもとで行った。ケース 1 短期間の強雨(図-2a)

降雨開始後まもなく浅い地層境界上で飽和帯が発達する(降雨開始後 7.5h)。これに伴い $\eta_w$ が高くなり、浅い地層境界付近で崩壊が発生する可能性が高くなる(9h)。その後飽和帯が下方へ移動し、やがて深い地層境界に達するが(19.5h)、このときの $\eta_w$ の値は低く、深い地層境界で崩壊に至る可能性は低い。

## ケース 2 長い降雨 (図-2b)

降雨強度が弱いため浅い地層境界では飽和帯が形成されない。降雨開始後,長時間経過したのちに,深い地層境界で飽和帯が形成され $\eta_w$ の上昇がおきる。このような降雨時には,深い地層境界での崩壊の可能性が高いといえ,崩壊が発生するのは降雨開始から長時間経過した後である。

## ケース3 長い降雨のあとの短期間の強雨(図-2c)

降雨開始直後は降雨強度が弱いため浅い地層境界での $\eta_w$ の増加はみられない。その後の強雨により浅い地層境界上で $\eta_w$ の上昇がみられ、さらに深い地層境界でも降雨前半にもたらされた雨水が到達することにより $\eta_w$ が上昇する。浅い飽和帯下端の浸潤線が鉛直浸透により深い飽和帯の地下水面に達した時点で、深い地層境界の $\eta_w$ が不連続に上昇し(24h)、そこでの崩壊の危険性が高まる。

今後は、以上のような地下水の動きと安定解析を結びつけることで崩壊の発生特性を議論する予定である。 謝辞 本研究は科学費(20780109)の助成を受けたものである。引用文献 平野ら(1986)活火山流域における土石流の発生限界 と流出規模の予測、第30回水理講演会論文集、p.181-186;今泉ら、表層崩壊の無次元発生支配パラメータ、砂防学会誌、投稿中