

豪雨による斜面崩壊に及ぼす地下水流動特性

THE INFLUENCE OF GROUNDWATER FLOW ON SLOPE FAILURE UNDER HEAVY RAIN

宮武 誠¹・三船 修司²

Makoto MIYATAKE and Syuzi MIFUNE

¹正員 博(工) 日本データーサービス株式会社 総合解析室(〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目)

²正員 理修 日本データーサービス株式会社 総合解析室(〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目)

The effects on slope failure due to seepage flow under the heavy rain are investigated numerically. The numerical modelling simulates the interacting overland flow and groundwater flow. The kinematic wave equation is used to describe the overland flow on the slope. The groundwater flow in sloped soil layer, as governed by the saturated-unsaturated equation, is considered in the model. As the results, in case of concave slope, by accumulating the rain water into lower side of slope, the region of saturated throughflow is increased, and return flow leads to fluidisation of surface layer of slope. These features of groundwater flow have implication for large-scale of slope failure.

Key Words: phreatic surface, saturated throughflow, return flow, slope failure

1. はじめに

近年, 集中豪雨により森林斜面が崩壊し, 大規模な土砂災害に至る事例が全国各地で多発しており, 斜面崩壊予測の精度向上が求められている. 虫明は九州地方整備局の website¹⁾「森林斜面から溪流や河川への流出過程」の中で, 豪雨性斜面崩壊に及ぼす地下水流動特性として, 飽和側方流や飽和地表流の影響について指摘しており, より精度よく斜面崩壊を予測するためには, その水理特性の把握が極めて重要であると考えられる.

豪雨による斜面崩壊を数値モデルの面から考察した研究は, 過去に数多く行われている. 例えば, 高橋・中川²⁾は透水性の異なる 3 層構造を有する土層を考え, ある降雨条件のもと浸透流と地表流に関する数値モデル及び斜面の表層崩壊理論を構築し, 斜面崩壊に至る限界降雨曲線を提示している. しかし, この研究で取り扱われている浸透流は, Dupuit の準一様流仮定に基づくものであり, 斜面崩壊に重要だと思われる鉛直浸透流の特性について考察されていない. また, 鈴木・真野³⁾は, 現地斜面に 2 次元不飽和浸透流モデルを適用し, 斜面崩壊に至る地下水流動特性について考察しているが, 地表流を考慮するには至っていない.

本研究は, 豪雨による斜面崩壊予測手法の確立に向け, 2 次元飽和-不飽和浸透流と地表流を連成させた数値モデルを構築し, 斜面崩壊に及ぼす地下水流動特性を解明する. また, 得られた地下水位及び浸透流速分布を用いて, 斜面のせん断崩壊及び流動化に関する定量的評価を行い, 斜面形状や降雨との関係を考察したものである.

2. 浸透流と地表流を連成させた数値解析

(1) 地下水流動による斜面崩壊過程

図-1 は, 本研究で対象とする豪雨による斜面崩壊過程を模式的に示したものである. 図中(a)において, 降雨初期の段階では, 雨水は下方へ浸透し, 土壌内では鉛直浸透流が発生する. やがて, 雨水が透水性の低い層に達し, 飽和状態になると, 図中(b)に示す斜面方向に流下する飽和側方流が発生する. 更に降雨が継続すると, 飽和側方流は地表面に達し, 一度浸透した雨水が再度, 地表流となって現れる復帰流が発生する(図中(c)).

本研究では, 図中(b)に示した飽和側方流による斜面流下方向のせん断力によって斜面崩壊に至る場合及び図中(c)に示した復帰流により上向きに働く揚力が斜面

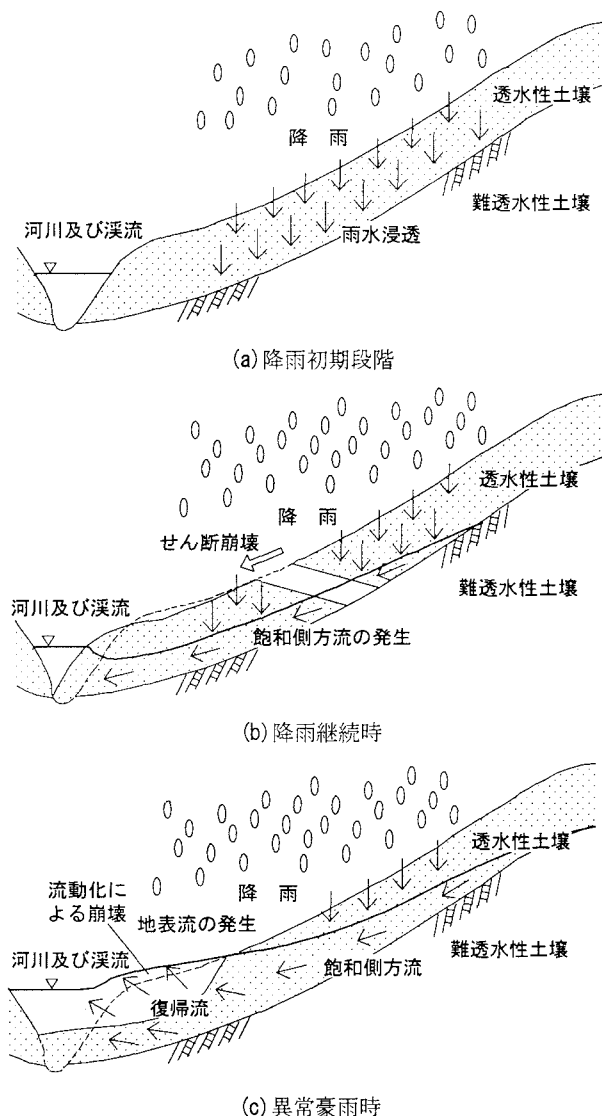


図-1 豪雨による斜面崩壊に及ぼす地下水流動

表層を流動化させ、表層崩壊に至る場合について検討する。

しかし、豪雨によって崩壊した多く実斜面において、詳細な地下水に関するデータは観測されていない。そこで本研究では、図-2に示す任意勾配 β を有する仮想的な裸地斜面を考え、ある強度を有する降雨 r が斜面一様に与えられた場合の地下水流動特性を数値モデルの面から検証し、斜面崩壊に及ぼす影響を考察する。

(2) 浸透流に関する基本方程式

対象とする斜面土壌内の地下水位は、降雨によって絶えず変化するため、浸透流は飽和領域と不飽和領域の混在する2次元流として取り扱う必要がある。そのため基本方程式は、土層内の水分保湿状態を考慮したBear⁴⁾の飽和-不飽和浸透流方程式を用いる。図-2において、A点を原点とする水平方向に x 軸、鉛直上向き方向に z 軸とすると、2次元飽和-不飽和浸透流方程式

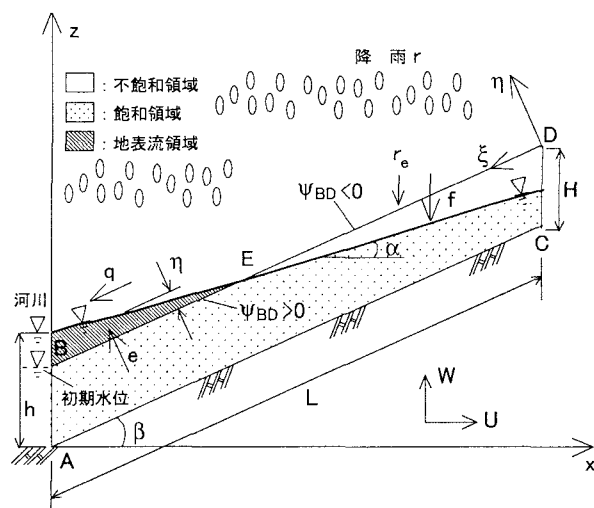


図-2 数値モデルの概念図及び境界条件

は以下のように得られる。

$$(U, W) = -K k_r(\theta) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}, \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (1)$$

$$(S_w S_s + C(\theta)) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K k_r(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K k_r(\theta) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (2)$$

ここに、 U, W は x, z 軸方向の浸透流速、 K は飽和透水係数、 S_s は比貯留係数、 $k_r(\theta)$ は透水係数比、 S_w は飽和度、 $C(\theta) (= d\theta/d\Psi)$ は比水分容量、 Ψ は飽和領域($\Psi > 0$)において圧力水頭、不飽和領域($\Psi < 0$)において毛管水頭を示す。不飽和領域における比水分容量 $C(\theta)$ 及び透水係数比 $k_r(\theta)$ の計算に必要な水分量 θ と毛管水頭 Ψ の関係には、以下に示す谷⁵⁾の実験式を用いる。

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\Psi}{\Psi_b} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\Psi}{\Psi_b} \right) \quad (3)$$

ここに、 θ は水分量、 θ_r は残留水分量、 θ_s は飽和水分量、 Ψ_b は比水分容量 $C(\theta)$ の最大値を与える毛管水頭を示す。これより、比水分容量 $C(\theta)$ 及び透水係数比 $k_r(\theta)$ は、(3)式を用いて、それぞれ以下のように計算する。

$$C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \Psi} = -(\theta_s - \theta_r) \frac{\Psi}{\Psi_b^2} \exp \left(- \frac{\Psi}{\Psi_b} \right) \quad (4)$$

$$k_r(\theta) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\gamma \quad (5)$$

ここに、べき数 γ は不飽和領域における透水性の減少の程度を示す無次元パラメータであり、Irmay⁶⁾が提示した $\gamma = 3.0$ を採用する。

(3) 地表流に関する基本方程式

浸透流と接続する地表流は、地表面から土壌内に浸透しうる量以上の降雨が与えられた場合及び地下水位が地表面に達し、土壌内が飽和状態になる場合に発生するものとした。地表流に関する基本方程式は、流れを等流と仮定し、以下に示す Kinematic Wave モデルを適用する。

$$q = \frac{\sqrt{\sin \beta}}{n} \cdot \eta^{\frac{5}{3}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial \xi} = r_e \quad (7)$$

ここに、 ξ は図-2中のD点を原点とし斜面流下方向にとった座標、 η は水深、 q は単位幅あたりの線流量、 r_e は有効降雨強度、 β は斜面勾配、 n はManningの粗度係数を示す。

(4) 計算方法及び境界条件

(1)式から(7)式の計算は直交格子を用いた差分法により行う。土壌内の水頭分布は(2)式をADI法により計算し、地下水位は水頭値が零となる点を連ねた線として求める。浸透流速は、求めた水頭値を用いて(1)式を中央差分法させて求める。地表流に関する水深及び線流量は、(6)式及び(7)式をLax-Wendroff法により計算する。

図-2に示す河川と接する斜面下端側の境界(AB)は、河川水深 h を浸透流格子点の圧力水頭として与える。但し、河川水深 h が土層厚 H よりも小さい場合、河川水位よりも上部の境界は、飽和時において湿潤面とし、不飽和時には自由流出条件として取り扱う必要がある。斜面上端側(CD)及び底部境界(AC)は上流からの水の流入及び下層への水の流出はないとし、境界と直交する浸透流速成分を零とする。降雨を与える斜面上部の境界(BD)は、浸透流格子点の水頭値 Ψ_{BD} により以下のように設定する。

①不飽和領域の場合($\Psi_{BD} < 0$): はじめに、地表面から浸透しうる量を示す浸透強度 f を算出する。浸透強度 f は飽和度 S_w の増加に伴い減少し、地下水位が地表面に達した時($S_w=1$)に零となる。そのため、浸透強度 f は $(1-S_w)^\lambda$ に比例すると仮定し、その比例定数を飽和透水係数 K として以下のように算出する。

$$f = K \cdot (1 - S_w)^\lambda \quad (8)$$

ここに、べき数 λ は(5)式中の γ と同一の値を用いる。

次に、(8)式で得られた浸透強度 f と降雨強度 r を比較し、 $r \leq f$ となる場合には、地表流は発生しないものとし、降雨強度 r を浸透流格子点の鉛直浸透流速成分として与え、地表流に関する有効降雨強度 r_e を零とする。

$$\begin{cases} W_{BD} = -r \\ r_e = 0 \end{cases} \quad (9)$$

また、 $r > f$ の場合は地表流が発生するものとし、斜面上の浸透流格子点及び有効降雨強度 r_e は、それぞれ以下

表-1 計算条件

	斜面長L(m)	土層厚H(m)	河川水深h(m)	斜面勾配 β	降雨条件	土壌パラメータ
run1	40.0	2.0	2.0	1/2	①	$K=1.44 \times 10^{-2}(\text{cm/s})$ $S_w=0.0029(1/\text{cm})$ $\theta_s=0.50$ $\theta_r=0.10$ $\psi_h=-50.0(\text{cm H}_2\text{O})$ $\gamma=3.0$ $n=0.026$ $\rho_s=2.68(\text{g/cm}^3)$ $\rho_w=1.0(\text{g/cm}^3)$ $C_s=100.0(\text{g/cm}^2)$ $\phi_s=35.0^\circ$
run2	40.0	2.0	2.0	1/2	②	
run3	40.0	2.0	2.0	1/10	①	
run4	40.0	2.0	2.0	1/10	②	
run5	40.0	2.0	2.0	上流側1/2 下流側1/4	①	
run6	40.0	2.0	2.0	上流側1/2 下流側1/4	②	
run7	40.0	2.0	2.0	上流側1/4 下流側1/2	①	
run8	40.0	2.0	2.0	上流側1/4 下流側1/2	②	

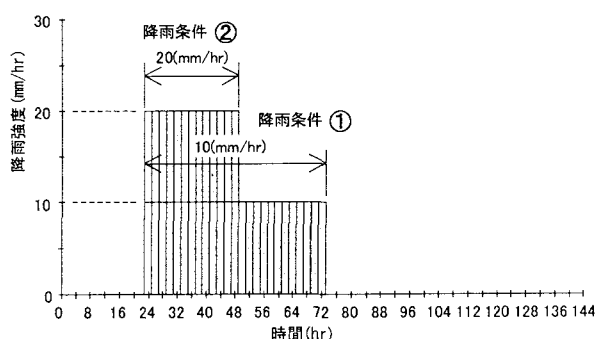


図-3 降雨条件

のように与える。

$$\begin{cases} W_{BD} = -f \\ r_e = r - f \end{cases} \quad (10)$$

②飽和領域の場合($\Psi_{BD} \geq 0$): 斜面内に浸透する成分を零とし($f=0$)、斜面上の浸透流格子点から流出する浸透流速成分 e と降雨強度 r との和を有効降雨強度 r_e とする。また、斜面上の浸透流格子点には、地表流の水深 η を以下のように圧力水頭 Ψ_{BD} として与える。

$$\begin{cases} \Psi_{BD} = \eta \cos \beta \\ r_e = r + e \end{cases} \quad (11)$$

ここに、 e は前出の(1)式より得られる斜面上の x 及び z 軸方向の浸透流速を用いて、以下のように算出する。

$$e = \sqrt{U^2 + W^2} \quad (12)$$

3. 計算条件の設定

(1) 斜面条件

検討する計算ケースを表-1に示す。計算は、河川の初期水深 $h=2$ mを有する土層厚 $H=2$ m、斜面長 $L=40$ mの仮想的な斜面を考える。斜面勾配は、1/2及び1/10としたrun-1～run-4の場合、ならびに斜面下端側から20m地点で斜面勾配を1/4から1/2及び1/2から1/4に変化させ、斜面形状をそれぞれ凹型及び凸型にしたrun-5～run8の場合とし、斜面勾配の変化による土壌内の地下

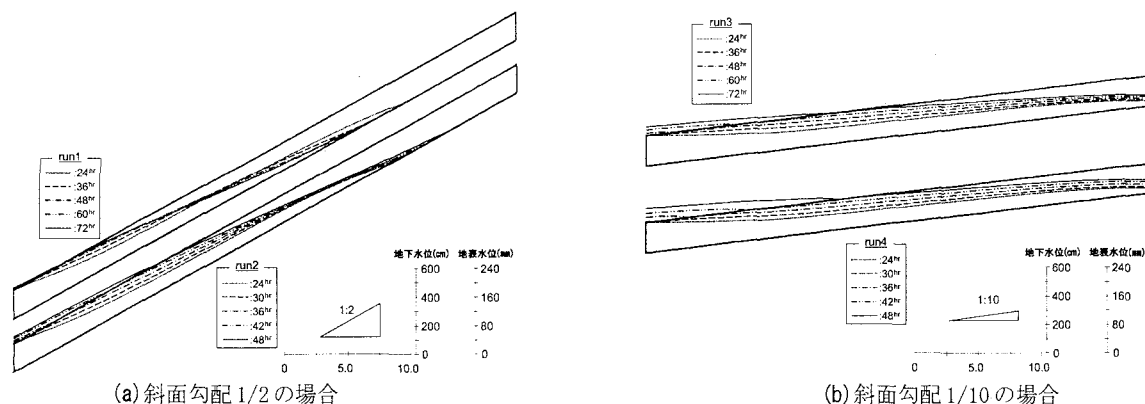


図-4 一様斜面勾配における地下水位分布の経時変化

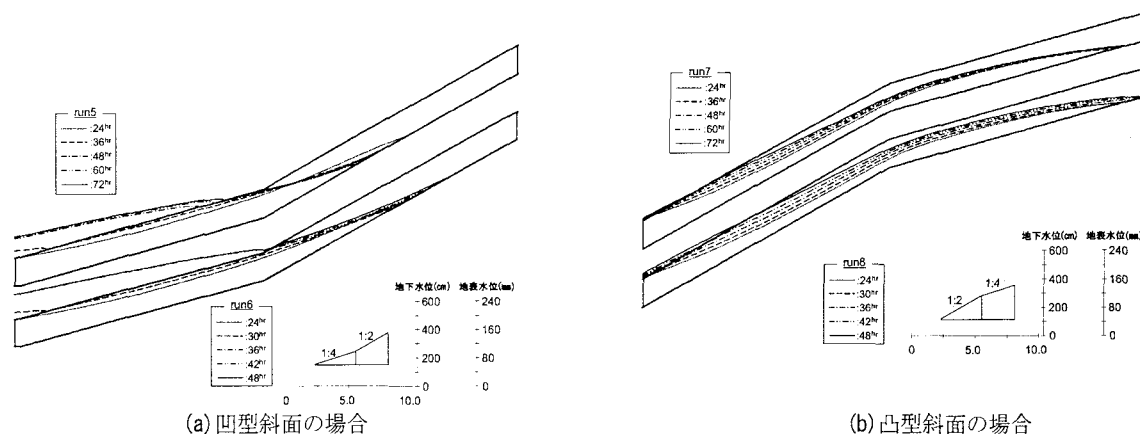


図-5 斜面勾配を変化させた場合における地下水位分布の経時変化

水流動特性を解明する。また、豪雨時による森林斜面の保水機能効果は小さいものとし、すべての計算ケースにおいて裸地斜面として取り扱う。

(2) 土壌条件

斜面内の土壌は等方性均質多孔体とし、土壌パラメータは全ての計算ケースにおいて、既往文献の値^{7) 8)}を参考にして、表-1のように仮定する。また、前出の(3)式から得られる水分保持特性曲線において、吸水過程と排水過程との間に生じるヒステリシスは考慮しないものとする。

(3) 降雨条件

表-1に示す降雨条件は、斜面土壌内の地下水流動に及ぼす降雨強度や降雨継続時間の影響を検討するため、図-3のように仮定する。計算時間は144時間とし、計算開始時にすべての浸透流格子点に零を与え、降雨なしの状態では24時間自然排水した後、降雨を開始する。与える降雨は、近年の豪雨実績値⁹⁾の中でも比較的大規模な総雨量480mmを想定し、降雨強度10mm/hrの降雨を48時間に渡り長時間継続させた場合及び降雨強度20mm/hrの降雨を24時間集中的に与えた場合について検討する。また、降雨継続期間中における降雨強度は一定とし、全計算領域で一様に分布させるものとする。

4. 斜面崩壊に及ぼす地下水流動特性

(1) 斜面勾配による地下水流動特性

図-4は、一様勾配斜面の降雨開始時から降雨停止時における地下水位分布の経時変化を示す。図中(a)は斜面勾配 $\beta=1/2$ の場合を示し、上段及び下段は降雨条件をそれぞれ①及び②とした場合を表示する。斜面をケース中最も急勾配にした結果、地表面より浸透した雨水は速やかに斜面下端側より排水される。そのため、降雨強度の小さい降雨を長時間作用させた上段の場合、斜面下端付近の地下水位が一部地表面に達する程度で、明確な地表流の発生は認められない。これに対し、短時間で高強度の降雨を集中的に与えた下段の場合、斜面下端側の地下水位は急激に上昇し、地表面に達する区間は降雨条件①の場合に比べ、より上流側に及ぶ。この結果、斜面上には地表流が形成し、土壌内の飽和側方流とともに斜面流下方向のせん断力を増加させ、斜面崩壊の発生をより一層高めている。以上の結果、急勾配斜面の場合、降雨の継続時間やその強度によって土壌内の地下水流動特性は明確に異なり、斜面崩壊の発生は短時間で強高度の集中豪雨に対し、顕著になると考えられる。

図中(b)は斜面勾配 $\beta=1/10$ の場合を示す。降雨条件の異なる上段及び下段の地下水位上昇量とともに、急勾配斜面の図中(a)に比して増大すると同時に、地表流の発

生がより明確となる。この地表流の流出高は、降雨条件により多少の差異が見られるものの、地下水位上昇量や地表流の発生位置はほぼ同一の結果となり、明確な差異が生じた急勾配斜面の場合とは異なる結果となる。これは斜面を緩勾配した結果、排水能力の低下により、土壤内に浸透した雨水の貯留時間が増加するため、降雨強度の小さい場合でも長時間継続すると、短時間で高強度の降雨があった場合と同様な地下水流動になることを示唆している。以上の結果、緩勾配斜面の地下水流動は、降雨強度よりも、降雨継続期間中に降った総雨量に支配的であり、総雨量の増加に伴い、斜面崩壊の発生が高まると推察される。

(2) 斜面形状による地下水流動特性

図-5(a)は斜面の途中で勾配を変化させ凹型斜面にした場合の地下水位分布の経時変化を示す。急斜面から緩斜面に変化させた結果、下流側緩斜面の地下水位は降雨条件に関わらずほぼ同様に上昇し、降雨終了時には下流側緩斜面のほぼ全域が地表面に達する。この結果、この区間で発生する地表流は、降雨条件により流出高や発生位置に多少の相違が認められるものの、他のケースに比べ最も明確に現れる。これは下流側の緩斜面において、浸透した雨水が長時間に渡り貯留されると同時に、上流側の急斜面から浸透した雨水の供給が加わり、地表流の流出高を一層増大させることに起因する。一方、同図(b)に示す凸型斜面の場合、同図(a)の凹型斜面に比較して地下水位上昇量は大きいものの、下流側の急斜面が浸透した雨水を速やかに排水するため、地表流の流出高は降雨条件に関わらず、ケース中最も小さい結果となる。以上の結果、凹・凸型斜面内の地下水流動は降雨条件よりも、その斜面形状により大きく異なり、斜面崩壊の発生は凸型斜面よりも、下流側の緩斜面に雨水が貯留される凹型斜面において、顕著になると考えられる。

5. 地下水流動による斜面崩壊特性

(1) 地下水流動による斜面崩壊限界

前章で求めた浸透流及び地表流の解析結果を用いて、斜面方向に作用するせん断応力及び斜面と垂直方向に働く有効応力を算出し、豪雨時における斜面崩壊を定量的に評価する。図-6において、斜面上部から鉛直深さ z をとった時の単位面積当たりにおける柱状要素abcdの自重 W_w 及び間隙水圧 U_w は、それぞれ以下になる。

$$W_w = \{ \rho_s \cdot g \cdot (z - z_w) + (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot z_w \} \cos \beta \quad (13)$$

$$U_w = \rho_w \cdot g \cdot z_w \cdot \cos \beta \cdot \cos \beta \quad (14)$$

ここに、 ρ_s は土粒子の密度、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 z_w は地下水位から柱状要素底部までの鉛直距離、 β は斜面勾配を示す。これより斜面方向に作用するせん

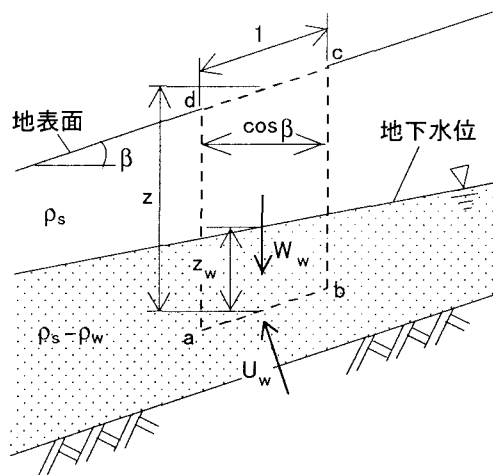


図-6 斜面土層内の力の平衡関係

断応力 τ 及び斜面に垂直方向に働く有効応力 σ' を求めると、以下になる。

$$\tau = W_w \sin \beta \quad (15)$$

$$\sigma' = W_w \cos \beta - U_w \quad (16)$$

せん断応力による斜面崩壊は(15)式を用いて以下のようになる場合に発生するものとする。

$$\frac{\tau}{\tau_{cr}} \geq 1.0 \quad (17)$$

ここに、 τ_{cr} は抵抗せん断応力を示し、以下に示すMohr-Coulombのせん断破壊規準を用いる。

$$\tau_{cr} = c_s' + \sigma' \tan \Phi_s' \quad (18)$$

ここに、 c_s' 、 Φ_s' はそれぞれ有効応力で考えた時の粘着力、内部摩擦角を示し、前出の表-1に示す値を用いる。

(2) 凹・凸型斜面における斜面崩壊分布特性

図-7(a)及び(b)は地表流の発生が最も顕著である凹型斜面に降雨条件②を作用させた場合における下流側緩斜面の浸透流速分布及び斜面崩壊分布を示す。地表流の発生する下流側緩斜面の土壤内では、地下水位は地表面に達し飽和状態となるため、飽和側方流が卓越する。この結果、斜面流下方向に働くせん断応力が、図中(b)の点ハッチング領域を崩壊させるものと考えられる。このせん断応力による斜面崩壊は、地表流の発生する斜面表層から発生し、斜面流下方向に向かってその崩壊深が増加する分布となる。これは地表流の流出高が斜面流下方向に向かって増大した結果、土壤内の間隙水圧が高まったことに起因する。一方、斜面表層では、地表面から浸透した雨水が再度、地表に現れる復帰流の発生が認められる。この復帰流の発生領域は、有効応力が零となり崩壊に至る図中(b)の斜線ハッチング領域にほぼ一致する。

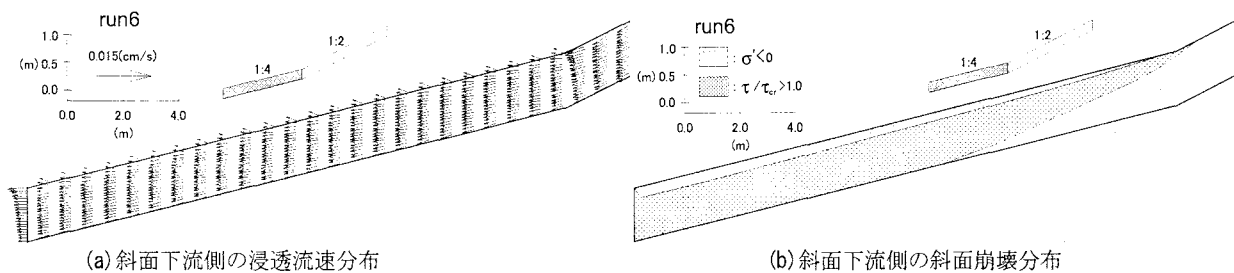


図-7 凹型斜面の地下水流動特性と斜面崩壊形式の関係

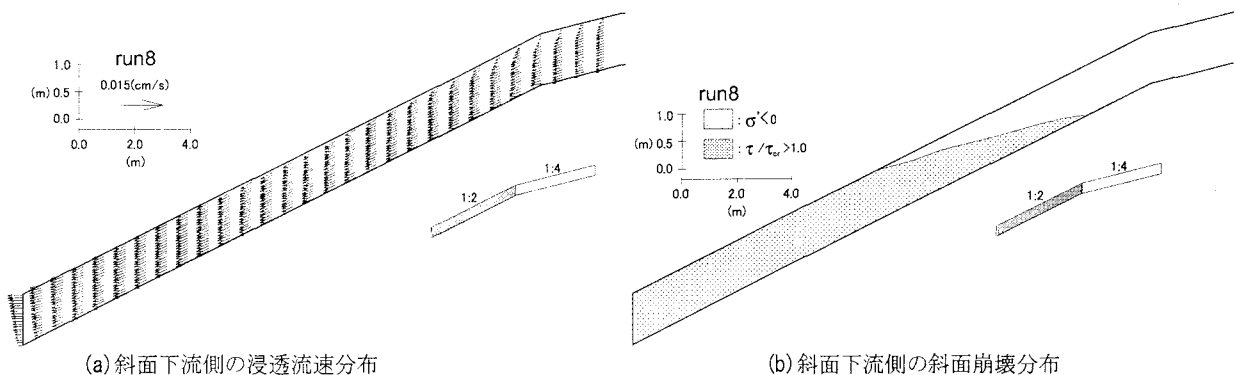


図-8 凸型斜面の地下水流動特性と斜面崩壊形式の関係

この結果、斜面表層では、復帰流により上向きに作用する揚力が粒子間応力を零の状態とし、土粒子を浮遊させる流動化による崩壊が生じていると推察される。

図-8は、凸型斜面に降雨条件②を作用させた場合を示す。同図(a)において、地下水位が地表に達する下流側急斜面の下端付近では、凹型斜面と同様に飽和側方流が発生する。これに対し、上流側緩斜面に向かうに従い不飽和領域となる斜面表層では、側方流が発生するものの、その流速は小さくなる。この結果、同図(b)において、飽和側方流によるせん断崩壊は、凹型斜面の場合とは相違し、斜面底部から発生する。また、凸型斜面の崩壊領域は、発生位置が凹型斜面の場合よりも下流側となるため、小さくなる。以上の結果、斜面崩壊の形状や領域を考えた場合、凸型斜面よりも凹型斜面において、大規模な斜面崩壊に及ぶものと推察される。

6. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると、下記のとおりである。

- (1) 急勾配斜面の場合、土壌内の地下水流動が降雨の継続時間やその強度によって相違し、斜面崩壊の発生は、短時間で高強度の集中豪雨に対し、一層高まる。
- (2) 緩勾配斜面の場合、土壌内に浸透した雨水の貯留時間が増加するため、降雨強度が小さい場合でも長時間継続すると、短時間で高強度の降雨があった場合と同様な地下水流動を示す。
- (3) 凹・凸型斜面の場合、土壌内の地下水流動は、降雨

条件よりもその斜面形状による影響が大きい。特に凹型斜面では、下流側斜面で雨水が貯留され、飽和側方流や復帰流が発生すると同時に地表流が卓越する。この結果、せん断崩壊及び流動化により、凸型斜面よりも大規模な斜面崩壊に及ぶ。

今後は、本解析法を3次元に拡張し、森林による保水機能や蒸散効果をモデルに組み込むと同時に、実斜面へ適用し、モデルの妥当性及び精度の向上に関する検討を行う所存である。

参考文献

- 1) 九州地方整備局：http://www.qsr.mlit.go.jp/kawabe/shinrin2/
- 2) 高橋保，中川一：豪雨性表層崩壊の発生とその生産土量の予測，第30回水理講演会論文集，pp.199-204，1986。
- 3) 鈴木雄太郎，真野明：豪雨に対する斜面崩壊地の浸透流解析，水工学論文集，第47巻，pp.271-276，2003。
- 4) Bear, J.: *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, pp.190-224, 1979.
- 5) 谷誠：一次元鉛直不飽和浸透流によって生じる水面上昇の特性，日本林学会，vol. 64，pp.409-418，1982。
- 6) Irmay, S.: On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Trans. AGU*, Vol.35, pp.463-467, 1954.
- 7) 日野幹雄，太田猛彦，砂田憲吾，渡辺邦夫：洪水の数値予報，森北出版株式会社，pp.120-139，1989。
- 8) 高橋保：土石流の機構と対策，近未来社，pp.387-398，2004。
- 9) 東京管区气象台：http://www.tokyo-jma.go.jp/sub_index/bosai/disaster/

(2004.9.30 受付)