

## 斜面の湿潤及び乾燥過程を考慮した災害発生限界降雨条件の設定

国立研究開発法人土木研究所 ICHARM ○山崎祐介 江頭進治 岩見洋一

### 1. はじめに

土砂災害はほぼ毎年のように発生し、多くの人的被害が生じている。被害を軽減するためには豪雨時における気象情報やさまざまな目撃情報など、避難に必要な情報提供とともに、危機を察知し、すみやかに行動を起こすことが必要である。

著者らは、豪雨時における洪水、土石流および山腹崩壊の状況を予測するだけでなく、避難予警報システムとしても機能するツールとして、土砂災害シミュレーターを開発し、それによる災害発生限界降雨条件の設定を試みている(山崎ら, 2015、山崎ら, 2016)。ここでは、土壌の湿潤及び乾燥過程に注目し、これが限界降雨条件の設定に与える影響について検討する。

### 2. 限界降雨条件の設定

#### 2.1 土砂災害シミュレーター

図1に、土砂災害シミュレーターで扱う斜面の模式図を示す。

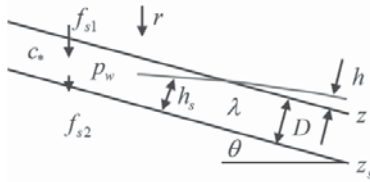


図1 斜面の模式図

透水性の低い土層の上部に厚さ $D$ の表土層がある。これを表層崩壊の対象としている。降雨の開始により雨水の鉛直浸透が始まり、毛管孔隙を満たすと浸透流が発生する。浸透流水深が上昇して $D$ に達して表土層が飽和すると、表面流が発生する。浸透時における表土層の平均の水分含有率の時間変化は、降雨強度に比例するから、これは次式で表される。

$$d(p_w D)/dt = r \quad (1)$$

ここに、 $p_w$ は土層の水分含有率、 $r$ は降雨強度である。表土層の最大毛管孔隙量を $p_{wc}$ としているので、 $p_w$ の取り得る値は $0 \leq p_w \leq p_{wc}$ とする。 $p_w = p_{wc}$ の時に浸透流が発生する。降雨終了後に浸透流が消失すると、蒸発散により表土層は乾燥していく。この時の表土層平均の水分含有率の時間変化は、表土層の水分含有率に比例するとして、次式で表される。

$$d(p_w D)/dt = -\alpha p_w \quad (2)$$

ここに、 $\alpha$ は蒸発散強度である。

浸透流と表面流は、水深平均の2次元支配方程式を用いて記述され、それぞれ、ダルシー則および拡散波近似を適用している。

崩壊の発生については、無限長斜面の釣合条件を用いて判定している。斜面に沿った重力成分 $G$ は、表土層、浸透流および表面流に作用する重力の斜面方向成分から構成され、抵抗力 $R$ は、クーロン摩擦およ

び粘着力から構成されるものとして、崩壊発生限界条件を $G = R$ として、 $\theta$ について整理すると次式を得る。

$$\tan \theta_c = \frac{\left\{ \left( \frac{\sigma}{\rho} - \frac{h_s}{D} \right) c_* + \left( 1 - \frac{h_s}{D} \right) p_w + c' \right\} \tan \phi}{\left( \frac{\sigma}{\rho} - \frac{h_s}{D} \right) c_* + \left( 1 - \frac{h_s}{D} \right) p_w + \frac{(h_s + h)}{D}} \quad (3)$$

ここに、 $\theta_c$ は崩壊発生の限界勾配で、 $\theta_c < \theta$ のとき、崩壊が発生すると判定する。 $\sigma$ は土粒子の質量密度、 $g$ は重力加速度、 $\rho$ は水の質量密度、 $c_*$ は表土層の体積土砂濃度、 $D$ は土層厚、 $\phi$ は内部摩擦角、 $c'$ は表土層とその下層の境界における無次元粘着力で、 $c' = c / (\rho g D \cos \theta \tan \phi)$ である。

河道と斜面は、降雨時における表面流の形成を左右する集水メッシュ数により定めた。河道における浸透流と表面流には、ダルシー則と拡散波近似を適用している。表面流の運動方程式には、 Manning則を用いている。

土石流の発生は、河床に堆積物が存在し得なくなる条件を用いて判定している。河床堆積物として非粘着性材料を想定している

#### 2.2 広島における適用

2014年8月19日夜から20日明け方に広島市で集中豪雨が発生し、土石流によって甚大な被害が生じた(水工学委員会災害調査団, 2015)。ここでは、もっとも被害が大きかった県営緑丘住宅周辺に流下した土石流の発生した流域を対象として、土砂災害シミュレーターを適用して、崩壊や土石流の発生分布を算定する。計算期間は、2014年8月19日16:00から15時間として、雨量データは、気象庁の三人の時間データを用いている。地形データは、国土地理院の基盤地図情報5mメッシュデータを用いている。これによる流域面積は $0.16 \text{ km}^2$ である。斜面と河道の判別は、非粘着性材料が河床に存在しうる勾配20度未満、かつ、集水セル数が100より大きいメッシュを河道、それ以外を斜面としている。斜面崩壊や土石流が一度発生したメッシュでは、その後には発生しないが、これらの発生は降雨流出場には影響を与えないとしている。計算に用いている斜面や河道の水文・土質パラメータは次のとおりである。 $D$ (斜面)=1.0(m)、 $D$ (河道)=0.5(m)、 $c_*=0.6$ 、 $\lambda$ (土層の空隙率)=0.4、 $p_{wc}=0.1$ 、 $f_{s1}=200$ (mm/h)、 $f_{s2}=0$ (mm/h)、 $\alpha=3$ (mm/d)、 $k$ (斜面の飽和透水係数)=0.5(cm/s)、 $k$ (河道の飽和透水係数)=5.0(cm/s)、 $N$ (斜面における等価粗度係数)=0.6、 $n$ (河道におけるマンギの粗度係数)=0.06、 $\phi=35^\circ$ 、 $c=3.7$ (kN/m<sup>2</sup>)、 $\sigma=2650$ (kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho=1000$ (kg/m<sup>3</sup>)である。

降雨開始時における表土層が湿った状態および最も乾燥した状態を想定して、表土層の水分の初期条

件を、それぞれ、 $p_{w0}=p_{wc}$  (湿潤状態)、 $p_{w0}=0$  (乾燥状態)として計算を行った。図2は、ハイドログラフと土石流発生メッシュ数、崩壊発生メッシュ数の時間変化である。

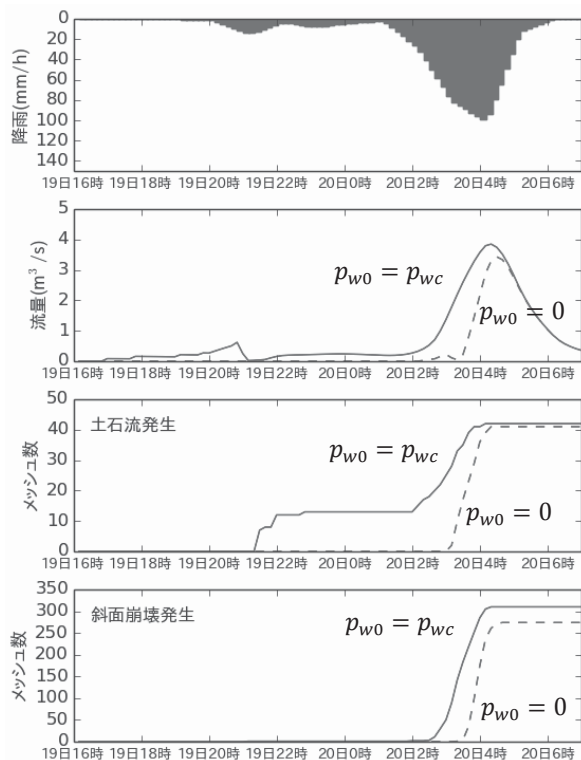


図2 降雨、流量、土石流発生メッシュ、斜面崩壊発生メッシュ数の時間変化

土石流についてみると、 $p_{w0}=p_{wc}$ を初期条件とした計算では、5時間後から土石流が発生しているが、これらのメッシュは、岩が露出しているところなど、局部的に勾配の急なところに相当しており、表土層はなく、土石流も発生しないと思われる。

土木学会・地盤工学会 (2014) によれば、県営団地では、3:30頃から大規模な土石流が流下したとの証言がある。初期条件 $p_{w0}=0$ とした計算結果についてみると、土石流も崩壊も計算開始から11.5時間近傍で発生が急増している。土石流および崩壊発生メッシュの空間分布は、湿潤と乾燥状態での計算結果に大きな差は見られなかった。また、航空写真により判別された実際の崩壊箇所と良い適合を示している。

### 2.3 限界降雨条件の設定

土砂災害シミュレーターに、時間雨量30 mm、60 mm、90 mm、120 mmおよび150 mmを15時間与えて斜面崩壊の時空間分布を算定した。これらの結果を用いて、所定の崩壊発生を生じる降雨条件を積算雨量と時間雨量の平面上で求めた。図3は、この土層の初期水分含有率を $p_{wc}$ とした湿潤状態と0とした乾燥状態について計算した結果と、気象庁の三入と広島既往降雨のうち、12時間以上の無降雨期間で区切られた降雨から、その総雨量が100 mm以上または時間雨量50

mm以上のものを示している。土石流の発生時刻の証言と、2014年の三入のスネークラインを通過する等値線のうち、最も数字が低い、湿潤状態で計算した場合のメッシュ数200のラインの降雨条件、または、乾燥状態で計算したメッシュ数100の降雨条件が、当流域の災害発生限界降雨条件と考えることが出来る。

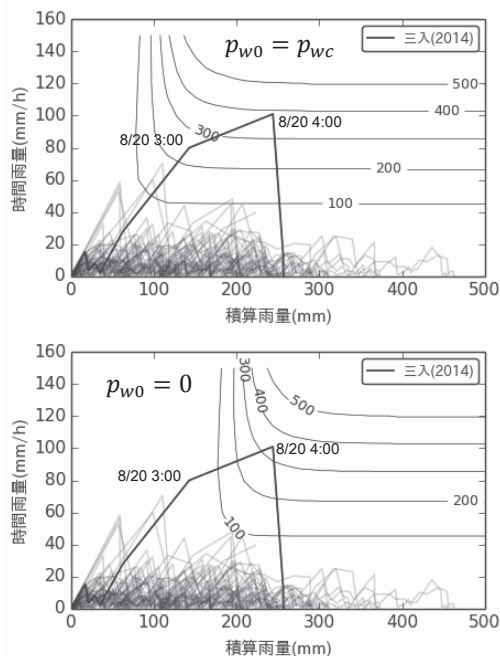


図3 異なる土層の初期水分含有率の斜面崩壊発生メッシュ数の等値線と過去の降雨のスネークライン

### 3. おわりに

本研究では、土層における水分含有率の土石流および崩壊発生への影響を調べた。初期水分含有率の差異は、土石流と崩壊発生のタイミングに差異を生じるので、先行降雨から当該降雨までの土層の乾燥過程を適切に推定することが重要になる。また、計算開始時の土層の水分状態の差異は、限界降雨条件に相違を生じるため、水分含有率の影響評価が必要である。

本研究は、一部河川砂防技術開発研究公募の補助を受けていることを記し、ここに感謝申し上げます。

### 引用文献

- 土木学会・地盤工学会 平成26年広島豪雨災害合同緊急調査団 (2014) : 調査報告書
- 水工学委員会災害調査団 (2015) : 平成26年8月広島豪雨災害調査報告書
- 山崎祐介・江頭進治・岩見洋一 (2015) : 降雨流出及び土砂移動現象に着目した土砂災害シミュレーター, 平成27年度砂防学会研究発表会概要集
- 山崎祐介・江頭進治・岩見洋一 (2016) : 避難予警報のための土砂災害シミュレーターに関する研究, 水工学論文集, 第60巻