

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○花岡 尚  
 広島大学大学院工学研究科 国際会員 土田 孝  
 広島大学大学院工学研究科 学生会員 川端 昇一  
 広島大学大学院工学研究科 学生会員 中川 翔太

## 1. はじめに

近年、降雨量の増加や集中豪雨の発生回数の増加などによって土石流などの土砂災害が増加している。広島県には、全国最多の土砂災害危険箇所が存在する。これらの危険箇所に対し、砂防ダムの建設など物理的な防災対策を施すには莫大な時間とコストを要してしまう。そのため、ソフト対策の充実が必要となっている。しかしながら、現在気象庁から発令される避難警戒基準は雨量情報のみから判断されており、個別ごとの斜面の地盤情報は考慮されていない。そのため、地盤情報および降雨量から危険度を予測するという地盤工学的アプローチ、降雨量によるアプローチ両側面から降雨による渓流の危険度を評価することによって、より精度の高い危険度評価を行うことが必要である。

本研究の目的は現地調査により収集した土砂災害危険箇所の現地地盤情報およびリアルタイムで配信される雨量情報を用いて、土砂災害の危険度を予測するシステムを構築し、そのシステムの妥当性を検証することを目的とする。図-1 に本研究で構築するシステムのイメージを示す。個別ごとの渓流で調査・リアルタイム解析が行われ、個別の渓流ごとに危険度を評価するものである。

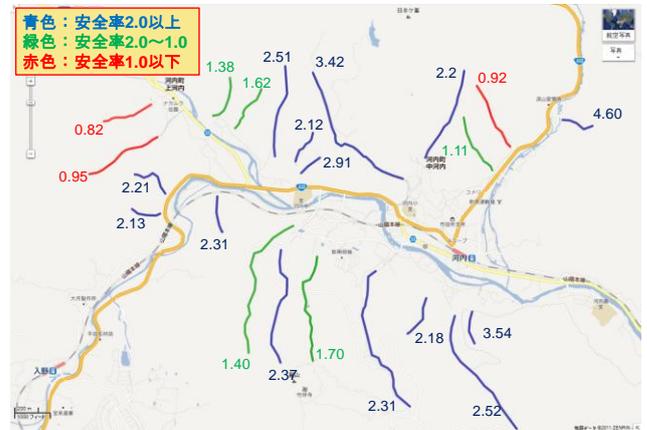


図-1 本研究で構築するシステムのイメージ

## 2. 現地調査と渓流のモデル化

図-2 に調査に基づいて作成する渓流のモデルを示す。渓流方向に 20m 前後で区間を定め、それぞれの区間が右岸および左岸の側方斜面を有するというモデルである。現地調査は、各調査地点 (A, B, C, D) において軽量動的コーン貫入試験を行い、地点の表土層厚を調査する。次に、各区間 (AB, BC, CD) の勾配および各区間が有する側方斜面の表土層厚および勾配を測定する。また、地盤の飽和度を測定するための不攪乱試料の採取、土質試験を行うための攪乱試料の採取をそれぞれ任意の 4 地点で採取する。また、土田ら<sup>1)</sup>は軽量動的コーン貫入試験から得られる貫入抵抗値  $q_d$  と飽和度  $S_r$  から、まさ土地盤の間隙比  $e$ 、内部摩擦角  $\phi_d$ 、粘着力  $c_d$ 、を推定できるとしている。以下にこれらの推定式を示す。

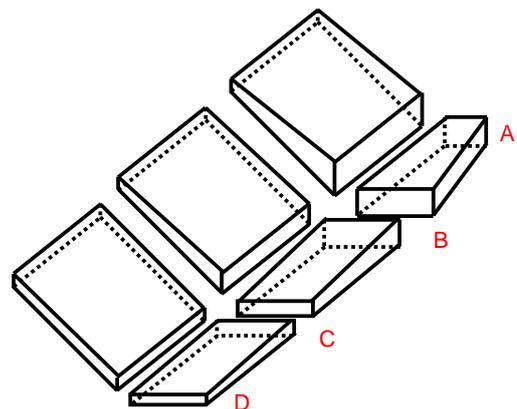


図-2 渓流のモデル

$$q_{d5} = q_d - 0.01 \times (\gamma_t \cdot z - 5) \quad (1)$$

$$e = -0.084 \ln(q_{d5}) + (-0.0074 S_r + 1.19) \quad (2)$$

$$\phi_d = 29.9 + 1.61 \ln(q_{d5}) + 0.142 S_r \quad (3)$$

$$c_d = 27.5 - 0.146S_r - 14.2e \quad (4)$$

ここで、 $q_{d5}$  : 土被り圧 5kPa における貫入抵抗値(MPa),  
 $\gamma$  : 土の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)である. 粘着力  $c_d$  に関しては, 飽和度の変化に対する変動も推定できる. 図-3 に間隙比, 内部摩擦角の推定例を示し, 図-4 に推定した粘着力の飽和度による変化を示す. 推定値には多少のばらつきがみられるが, 土田ら<sup>1)</sup>は変動する範囲のうち, 下限値をもって推定値とするとしている.

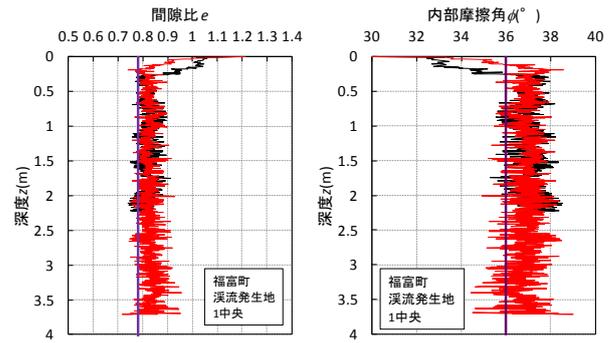


図-3 貫入抵抗値からの推定値

### 3. 降雨による地盤内の水分状態の変化の予測手法

本研究における地盤内の水分状態は, 広島大学地盤工学研究室で行っている自然斜面における現地計測の結果および由利<sup>2)</sup>が実施した一次元降雨浸透流実験により, 図-5 に示すような 3 つの過程で考えている. 最初の過程は, 降雨により地盤内に浸透した水がある一定の体積含水率を保ちながら下方へ浸透していく過程 (高含水比帯浸透過程) である. 次の過程として, 高含水比帯が不透水層である基盤まで浸透すると, 基盤から地下水水位が上昇する過程である. 最後に降雨が終了し無降雨状態になると, 地下水水位および高含水比帯が排水する過程である. この水分状態の変化は, 高含水比帯の浸透および下降は重力方向への移動のみとし 1 次元で考え, 地下水水位の上昇および低下は 3 次元で計算を行った. 本章ではそれぞれの

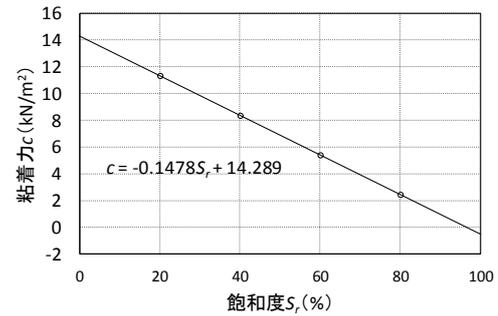


図-4 推定した粘着力の飽和度による変化

の過程の計算方法を述べ, がら山の観測結果との比較により, その妥当性について考察した. 紙面の制限上, 排水過程の詳しい計算方法については省略させていただく.

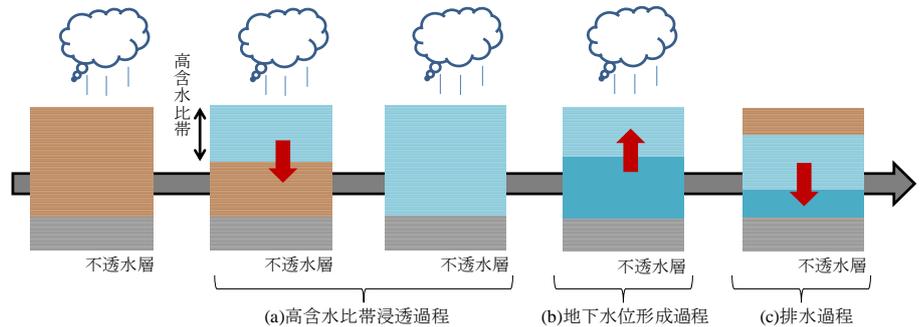


図-5 本研究における地盤内の水分状態の 3 つの過程

#### (a) 高含水比帯浸透過程

乾燥した地盤に浸透していく水分は鉛直方向のみに浸透すると仮定し, Richards の式を支配方程式とする一次元浸透流解析を行った. 解析に必要な水分特性曲線の形状を示すパラメータは, 飽和体積含水率  $\theta_s$  は現地調査の間隙率より決定し, 残留体積含水率  $\theta_r$  は広島大学で行っている自然斜面での体積含水率の現地計測より  $S_r=35\%$  に相当するものとした. 飽和透水係数  $k_{sat}$  は粒度分布より得られる有効径  $D_{10}$  から推定する Hazen の式により算出し, 定数  $\alpha$ ,  $n$  は由利<sup>2)</sup>が示した代表的なまき土のものとしている. 図-6 に広

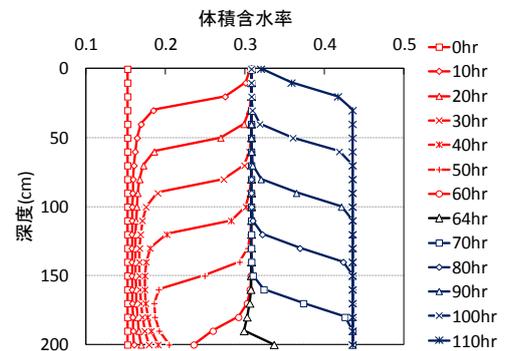


図-6 深度と体積含水率の関係(5mm/hr)

に広

島大学で現地観測を行っている自然斜面のパラメータ( $\theta_s=0.435$ ,  $\theta_t=0.152$ ,  $\alpha=0.04$ ,  $n=3.1$ ,  $k_{sat}=2.03\times 10^{-3}$ cm/s)を使った一次元浸透流解析により得られる深度と体積含水率の関係を示す。表層より体積含水率が約0.3の高含水比帯が形成され、下層へ浸透している様子がわかる。64hrのとき、全層で一様の高含水比帯の体積含水率となり、その後下層より飽和に達している。本研究では、全層で一様の高含水比帯の体積含水率となるまでに斜面が受けた降雨量(地下水位が上昇し始めるまでの雨量)を高含水比帯浸透限界雨量と定義し、累積雨量がこの限界雨量を超過すると地下水位形成過程へ移行するとした。この限界雨量は降雨強度ごとに異なるため、リアルタイム解析を行うにあたっては、その時間と4時間前までの降雨強度に対応する限界雨量を平均したものを採用することにした。

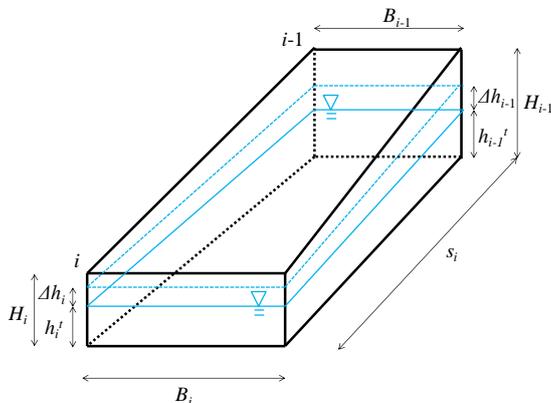


図-7 ある時刻  $t$  でのブロック内の地下水位

(b) 地下水位形成過程

図-2に示したモデルのうち、ある一つの溪流部のブロックについて考える。ブロックに流入する水分量は、降雨による流入、上流斜面、右岸斜面および左岸斜面からの地下水流入である。これらの流入量は下流への流出とブロックへの残留量の和と等しい。このことより、上流側の地点を  $i-1$ 、下流側を  $i$  として、次式が成り立つ。

$$R_{input_i} + Gw_{outR_i} + Gw_{outL_i} + Gw_{out_{i-1}} = Gw_i + Gw_{out_i} \tag{5}$$

ここで、 $R_{input_i}$  : 降雨による供給量( $m^3$ )、 $Gw_{outR_i}$  : 右岸斜面からの地下水流入( $m^3$ )、 $Gw_{outL_i}$  : 左岸斜面からの地下水流入( $m^3$ )、 $Gw_{out_{i-1}}$  : 区間  $i-2 \sim i-1$  (上方斜面) からの地下水流入( $m^3$ ) ( $i=1$  のときは0)、 $Gw_i$  : 貯留量( $m^3$ )、 $Gw_{out_i}$  : 区間  $i \sim i+1$  (下方斜面) への地下水流出量( $m^3$ )である。各流入量 (流出量) はダルシー側に従って計算する。式(5)より、貯留量  $Gw_i$  を地下水位の変動量  $\Delta h$  で表すことにより、図-7のように各ブロックの地下水位を計算する。

(c) ががら山の観測結果との比較

広島大学地盤工学研究室で現地計測を行っているががら山の自然斜面に対して、以上に示した計算方法による地下水位の推定値と実測値を比較した。斜面のモデルを図-8に示し、図-9に計算値と実測値の比較を示す。現地計測を行っている位置は図-4中の4の位置である。解析値は、計測値の地下水位変動の特徴を概ね捉えることができているといえる。地下水位の低下が解析値の方が遅いという結果となったが、これは危険度評価を行う際に危険側に捉える事ができるので今回はよいこととしているが、排水過程の計算方法について今後検討が必要である。

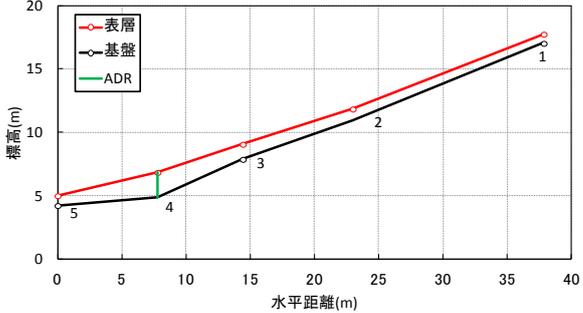


図-8 ががら山の斜面モデル

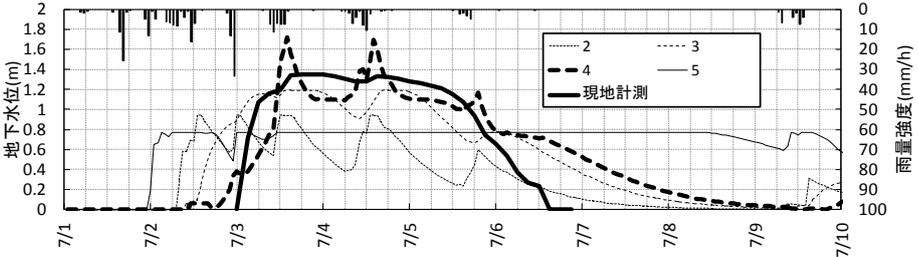


図-9 地下水位の計算値と実測値の比較 (ががら山)

#### 4. 土石流が発生した溪流への適用による本システムの妥当性の検討

以上の水分計算方法と斜面安定解析を含めた一連のリアルタイム危険度評価システムの妥当性を、2010年7月14日に広島県東広島市福富町で発生した土石流に適用して検討した。斜面安定計算は任意のすべり面を設定できるJanbu法を適用した。安定計算を行う上での粘着力  $c$  は、乾燥状態で  $S_r=35\%$ 、高含水比状態で  $S_r=80\%$ 、地下水位形成で  $S_r=100\%$  として計算を行っている。降雨データは被災した場所から最も近い雨量計のデータを用いている。図-10に福富町の溪流のモデルを示す。崩壊の原頭部は図中の3のすぐ下流

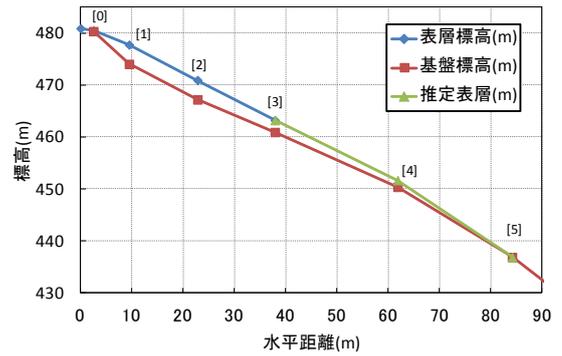


図-10 福富町の溪流の縦断図

の位置である。図-11に安全率の経時変化を示す。降雨があるときは安全率が低下し、無降雨期間は安全率が回復することが表現できている。安全率の大きさを見ても、土石流を引き起こした降雨時に最も低下し、この間で1.0以下となっており、斜面崩壊の発生が十分に起こりうることを説明している。以上より、本研究で提案したリアルタイム危険度評価手法が豪雨に対する土砂災害の危険度評価に適用できる可能性が示された。

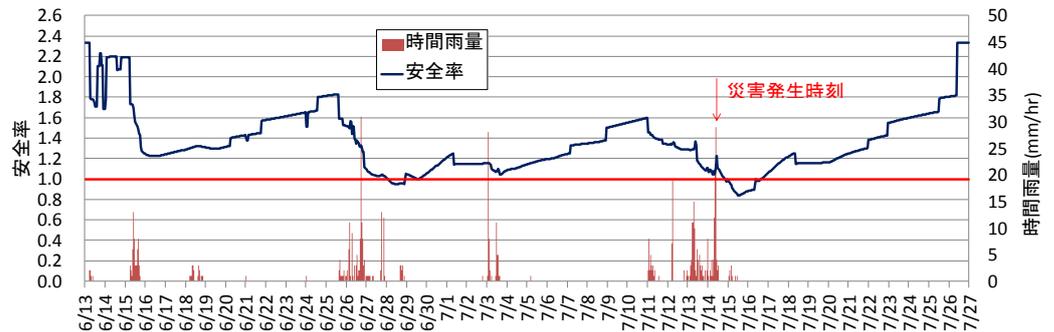


図-11 降雨の状況と安全率の変化 (福富町)

#### 5. 結論

(1)広島大学で土中水分の現地観測を行っている自然斜面をモデル化し、本研究で示した推定方法による水分状態と観測値を比較した。その結果、解析値は実測値の地下水位変動の挙動の特徴を捉えており、本研究で示した水分状態の推定方法が妥当であるという結果を得た。

(2)2010年に発生した土石流現場の溪流をモデル化し、土石流発生当時の降雨データにより解析を行い、安全率を計算した。その結果、土石流を引き起こした降雨時に安全率が最も低下し、この間で1.0以下となっており、斜面崩壊の発生が十分に起こりうることを説明している。以上より、本研究で提案したリアルタイム危険度評価手法が豪雨に対する土砂災害の危険度評価に適用できる可能性が示された。

#### 参考文献

- 1) Tsuchida, T., Athapaththu A.M.R.G., Kano, S., Suga, K.: Estimation of in-situ shear strength parameters of weathered granitic (Masado) slopes using lightweight dynamic cone penetrometer, Soils and Foundations, Vol. 51, No. 3, pp.497-512, 2011.
- 2) 由利厚樹:まさ土の土中水分変動に及ぼす降雨特性と地盤条件の影響, 広島大学大学院修士論文, pp.91-113, 2010.