

# Web上に公表されている雨量データを活用したリアルタイム斜面危険度予測技術の開発と防災情報への応用

土田 孝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>広島大学大学院工学研究院社会環境空間部門.

土砂災害危険渓流・斜面における、軽量動的コーン貫入試験を用いた調査方法について述べ、現地調査から個別の危険渓流ごとに斜面をモデル化する方法を示した。次に、広島県が公開している雨量データを入力し、エクセルのVBAを用いて斜面の代表点で簡易浸透流解析と斜面の安定解析を行い、リアルタイムで危険渓流の各代表点での危険度評価を行った。現行の土壌雨量指数と異なり、個別の地盤調査結果と地下水位の予測によって危険度を斜面安定の安全率で示すことが本手法の特徴である。

キーワード：土砂災害危険渓流，斜面安定，浸透流解析，安全率，土砂災害警戒情報

## 1. 研究の目的

近年、全国的に局所的な豪雨等の増加に伴い、土砂災害も増加傾向にある<sup>1)</sup>。特に、広島県においては全国で最多となる約32,000箇所<sup>2)</sup>の土砂災害危険箇所が存在し、過去には1999年6月に広島市や呉市を中心に発生した土砂災害や2010年7月に庄原市を中心に発生した土砂災害、2014年8月に広島市を中心に発生した土砂災害など大規模な土砂災害も多く発生している。

このような土砂災害による被害を減らすための対策として、砂防堰堤等の構造物により土石流等を抑えるハード対策と危険情報の周知を行うソフト対策が考えられる。ソフト対策として代表的なものとして土砂災害警戒情報の提供がある。土砂災害警戒情報は、各県と気象台が連携して発令する防災情報である<sup>3)</sup>。図-1に、土砂災害警戒情報の判定方法を示すが、横軸は長期的な雨量指標のひとつである土壌雨量指数<sup>3)</sup>をとり、縦軸に直近の時間雨量をとる。このグラフ上に、過去に土砂災害が発生した事例あるいは発生しなかった事例における土壌雨量指数と1時間雨量をプロットして分析することにより、土砂災害の発生を示す土砂災害発生危険基準線（Critical line, 以下CL）を求めることができる。広島県では、県内を5km×5kmのメッシュに分割し、それぞれのメッシュごとに過去の土砂災害の記録をもとにCLを決定している。さらに、各5kmメッシュの中は1kmメッシュで分割されており、土砂災害警戒情報の判定は以下に行われている。

- 1) レーダー雨量の測定値と地上で観測された雨量計のデータを用いて、県内の各1kmメッシュにおける降雨量を計算で求める。これを解析雨量と称する。
- 2) 1kmメッシュごとに1時間後の降雨量予測値、2時間

後の降雨量予測値を計算し、スネーク曲線を描き、実況及び1時間後、2時間後にCLを超えるかどうかを判定する。

- 3) 5kmメッシュ内の1kmメッシュのいずれかでCLを超える1kmメッシュがある場合、5kmメッシュ全体を土砂災害の危険性があるとみなす。

以上のように、土砂災害警戒情報は、過去の災害履歴に基づいて地域ブロックごとに雨量と土砂災害発生の関係を求めておき、1時間後、2時間後の雨量予測値を用いて土砂災害の危険性を予測する点に特徴がある。図-2は2014年広島土砂災害の発生直前にあたる8月20日午前3時における広島県内の5kmメッシュの判定結果である。図でオレンジ色に着色されたメッシュは午前3時の段階で

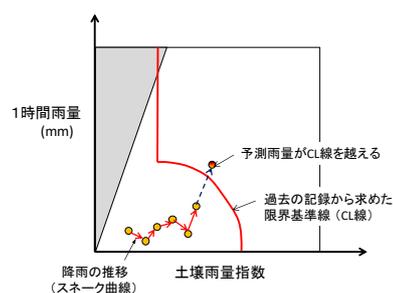


図-1 土砂災害警戒情報の判定方法<sup>2)</sup>



図-2 土砂災害警戒情報の判定方法<sup>3)</sup>

雨量指標がCLを超過しているメッシュ、ピンク色は1時間後の4時にCLを超過する可能性があるメッシュを示している。

このように、土砂災害警戒情報は、メッシュごとに土砂災害の危険度を評価しており、それぞれのメッシュに複数存在する危険渓流の個別の危険度評価ではない。すなわちメッシュ内の個々の危険渓流に関する情報は土砂災害警戒情報の判断材料に入っていない。土砂災害の危険度評価の制度を高めるには、降雨が進行している状況で個別の渓流ごとの危険度を安全率のような指標で刻々と評価する技術が必要になると考えられる。

本研究は現地調査により危険渓流・斜面ごとの地盤の物性値を取得してモデル化し、渓流ごとにリアルタイムに提供される10分間隔の雨量データを用いて地盤内の水分状態を随時求め安全率の算出等に用いることで、個別の危険渓流ごとに危険度評価を行うことを目指している。

## 2. 簡易浸透流解析手法

有限要素法を用いた数値解析による不飽和浸透解析の代表的なソフトとして HYDRUS-2D (以下, HYDRUS) がある。HYDRUS は米国農務省塩類研究所の Simunek らによって開発された 2 次元土中水分・塩分移動予測汎用プログラムであり、計算の信頼性や汎用性の高さから欧米を中心に広く研究、教育、応用面で用いられている<sup>4)</sup>。しかし、本プログラムを数多くの危険渓流を対象に 10 分間隔の雨量データを用いた解析に適用することは容易ではない。そこでエクセル VBA を用いた簡易的な浸透流解析手法を考案した。本解析法では、地表面から雨水が鉛直に浸透し、地下水位は基盤面からのみ形成されると仮定し、雨量データを取得する度に VG モデルにより降雨量に応じた透水係数から体積含水率を求めることで透水量を計算する。この際に降雨量は雨量計のデータと同じ 10 分間隔で与える。既往の研究より、強さが一定の降雨が継続すると地表面には鉛直方向の浸透速度と降雨量とが平衡状態になる平衡含水比帯が形成される<sup>5) 6)</sup>。したがって、10 分間の降雨量によって表層の体積含水率と透水係数が決まり、動水勾配 1 として浸透速度を計算した。

本研究では、水分特性曲線のフィッティングに VG モデルを用いた。有効飽和度  $S_e$  と比透水係数  $k_0/k_s$  の関係は次式(1)、有効飽和度と体積含水率  $\theta$  の関係は次式(2)となる<sup>7)</sup>。

$$k_0/k_s = S_e^{1/2} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (1)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ 1 + |\alpha \psi|^n \right\}^{-m} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_s$ : 飽和体積含水率、 $\theta_r$ : 残留体積含水率、 $\psi$ : サクシオン、 $k_0$ : 体積含水率  $\theta$  のときの透水係数、 $k_s$ : 飽和透水係数である。

一定の降雨が続く場合、降雨が一旦停止する場合、降雨量が前の 10 分間よりも大きくなる場合および降雨量が小さくなる場合の 4 パターンによる水分の浸透の仕方を設定し、これらのパターンを単位時間ごと繰り返すことにより地盤内の水分状態を求めた。

### 2.1 降雨浸透の考え方

本章で用いる記号はそれぞれ、 $t_i$ : 10 分ごとの時間ステップ、 $r_i$ : 10 分間降雨量、 $\theta_i$ : 初期体積含水率、 $\theta_r$ : 体積含水率、 $z_i$ : 浸透量である。ここで、水分の浸透量  $z_i$  は次式(3)で表される。

$$z_i = \frac{k_{\theta_i} \cdot t}{\theta_i - \theta_0} = \frac{r_i}{\theta_i - \theta_0} \quad (3)$$

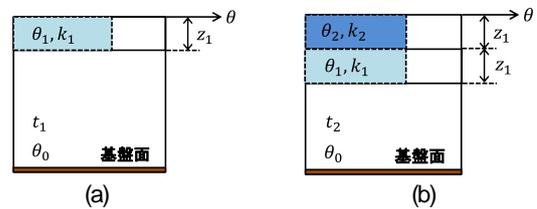


図3 降雨浸透の考え方 (一定の降雨が続く場合)

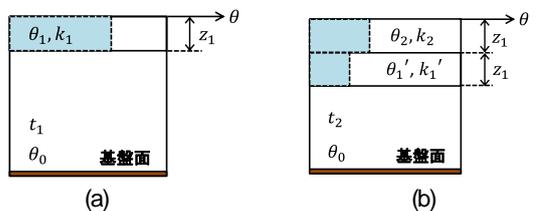


図4 降雨浸透の考え方 (降雨が一旦停止する場合)

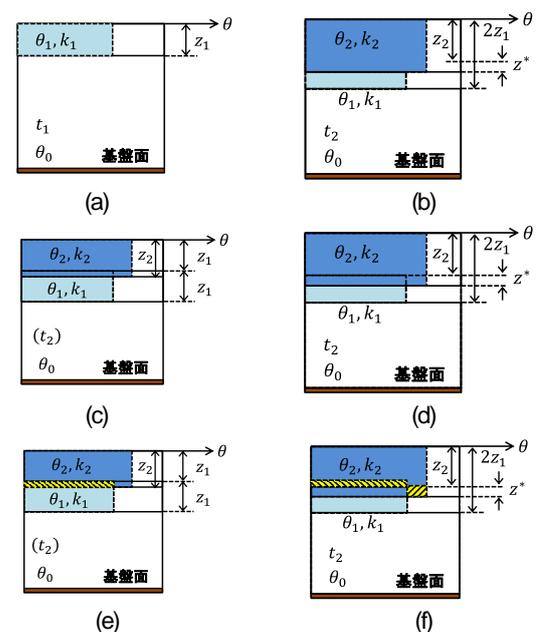


図5 降雨浸透の考え方 (降雨量が前の 10 分間よりも大きくなる場合)

(a) 一定の降雨が続く場合

図-3 に一定の降雨が続く場合の降雨浸透の考え方を示す。一定の降雨が続く場合、図-3(a)における 10 分間降雨量  $r_1$  の降雨による体積含水率  $\theta_1$  の層が図-3(b)のように浸透速度一定で基盤面に達するまで浸透していく。

(b) 降雨が一旦停止する場合

図-4 に降雨が 10 分後に停止した場合の降雨浸透の考え方を示す。図-4(a)のように 10 分間降雨量  $r_1$  の降雨直後の時間  $t_1$  における体積含水率  $\theta_1$  の層の水分は次のステップとなる  $t_2$  においてすべて下層へ浸透せず、図-4(b)のように一定量を残留させながら浸透していくと仮定する。これは新たに降雨がない場合には、下層に浸透して上層の含水比が低下すると水分保持特性によってサクシオンが発生し、下層に浸透する方向の動水勾配がなくなるためである。ここで、残留率を  $R$  とすると残留率を与えたことによりできた層の体積含水率  $\theta_2$  は次式(4)で表される。

$$\theta_2 = R \cdot (\theta_1 - \theta_0) + \theta_0 \quad (4)$$

なお次章で述べる解析において、残留率は HYDRUS との一致度が良好な 60% を適用した。

(c) 降雨量が前の 10 分間よりも大きくなる場合

図-5 に降雨量が前の 10 分間よりも大きくなる場合を示す。この場合、時刻  $t_1$  における図-5(a) から時刻  $t_2$  における図-5(b) のように水分が浸透していく。ここで便宜上体積含水率  $\theta_1$  の層が(a)における  $\theta_1$  の層と同様に浸透した場合の層と  $t_2$  の降雨が図-5(a)と同様に浸透した場合の層を重ねた図-5(c)、図-5(e)を用いて説明する。図-5(c)のように  $t_1$  よりも大きい降雨量である  $t_2$  による体積含水率  $\theta_2$  の層が、 $t_1$  の降雨による  $\theta_1$  の層よりも浸透速度が大きく、図-5(e)の斜線部において下層と上層で重なる部分が発生するため、図-5(f)の右上から左下へ向かう斜線の部分に重なった水分の分だけ下層の一部と上層が等しい体積含水率になるとして計算した。ここで、図-5(f)の右上から左下へ向かう斜線の部分の厚さ  $z^*$  は次式(5)で表される。

$$z^* = (z_2 - z_1) \cdot \frac{\theta_1 - \theta_0}{\theta_2 - \theta_1} \quad (5)$$

なお、図-5(c)と図-5(e)、図-5(b)と図-5(d)および図-5(f)における体積含水率の層は補助線が異なる点や斜線部の有無の他はそれぞれ同一のものである。

(d) 降雨量が前の 10 分間よりも小さくなる場合

降雨量が前の 10 分間よりも小さくなる場合を図-6 に示す。なお、先程まで  $t_2$  としていた  $t_1$  の次のステップを便宜上  $t_3$  とする。また、先程と同様に便宜上体積含水率  $\theta_1$  の層が一定の降雨が続く場合における  $\theta_1$  の層と同様に浸透した場合の層と  $t_3$  の降雨が図-6(a)と同様に浸透した場合の層を重ねた図-6(c)、図-6(d)を用いて説明する。図-6(c)において体積含水率  $\theta_3$  の層は  $\theta_1$  の層よりも浸透

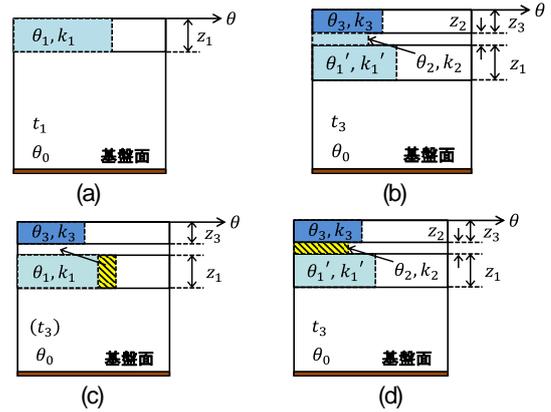


図-6 降雨浸透の考え方（降雨量が前の 10 分間よりも小さくなる場合）

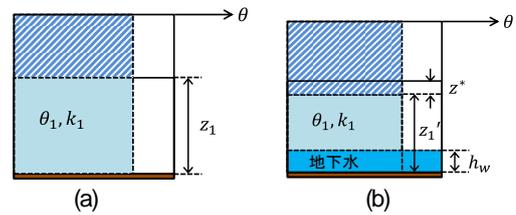


図-7 地下水形成の考え方

速度が小さいため、先程の降雨が一旦停止する場合の考え方と同様に  $\theta_1$  の層は図-6(d)のように一定量を残留させながら浸透していくと仮定する。ここで、体積含水率  $\theta_2$  は式(4)で求まる。また、図-6(d)において  $z_2 = z_1 - z_3$  であり、時刻  $t_1$  において  $\theta_1$  だった層の時刻  $t_2$  における体積含水率  $\theta_1'$  は次式(6)で表される。

$$\theta_1' = \theta_1 - \frac{z_2}{z_1} \cdot (\theta_2 - \theta_0) \quad (6)$$

## 2.2 地下水形成の考え方

図-7 に地下水形成過程の考え方を示す。簡易浸透流解析を行ううえで、地盤内を浸透していく水分は基盤面に達した場合のみ地下水が形成されると仮定する。層の下端が基盤に達している  $\theta_1$  の層は基盤に達していない部分が下層へ浸透していくことで層の下端から地下水位が形成される。ここで、下層に浸透した水分と地下水を形成するために  $\theta_1$  から飽和するまでに必要な水分が足りあうとして地下水位  $h_w$  は次式(7)で求まる。

$$h_w = \frac{\theta_1 - \theta_0}{\theta_s - \theta_1} \cdot z^* \quad (7)$$

## 2.3 解析のフロー

図-8 に解析の流れを示す。広島県で公開されている 10 分間隔の雨量データを用いて、モデル化した溪流において過去の 10 分雨量から順に新たな層を作成しては前節で述べた考え方により上下の層で水分の調整を行う、という過程を最新の降雨データまで繰り返すことで現在の危険溪流の地盤内の水分の浸透状態を把握する。

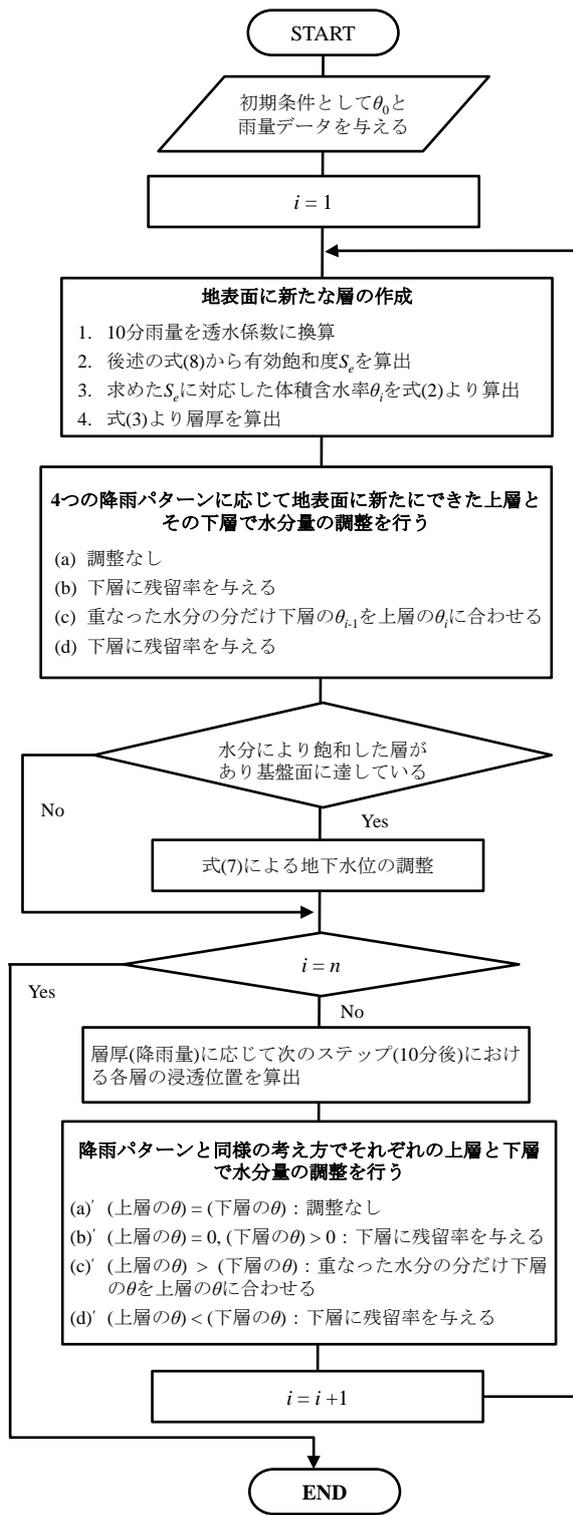


図-8 簡易浸透流解析の流れ

### 3. 簡易浸透流解析結果と考察

本研究では、簡易浸透流解析での結果の妥当性を検討するため、単純な降雨を与えた場合および 2014 年 8 月 20 日未明に発生した広島土砂災害時の被災地周辺の雨量観測局による雨量データを用いた場合のそれぞれで簡易浸透流解析、HYDRUS による解析をそれぞれ行い、

結果の比較を行った。広島県内のまさ土を用いて VG モデルのフィッティングを行い、パラメータを決定した。図-9 はまさ土を試料に用いた模型土層に降雨装置により一定の降雨強度で給水させた際の給水曲線をフィッティングした結果であるが変曲点を 2 つ有しているため、体積含水率が低い方の変曲点を考慮せず、本研究では VG モデルの水分特性曲線を図-10 のように仮定し、パラメータを  $m=0.68$ ,  $n=3.13$ ,  $\alpha=0.04(1/\text{cm})$  として解析を行った。また地盤の条件を、層厚 1.0m, 飽和透水係数  $6.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  とした。このとき式(1)で表される有効飽和度  $S_e$  と比透水係数  $k_\theta/k_s$  の関係は図-11 のようになり、次式(8)が得られる。

$$S_e = 1.11 (k_\theta/k_s)^{0.27} \quad (8)$$

#### 3.1 単純な降雨を与えたときの解析結果の比較

始めの 30 分間だけ、10 分間の降雨量が 13.3mm (1 時間降雨量 80mm に相当) の降雨があり、その後無降雨だった場合の簡易浸透流解析と HYDRUS による解析の結果の比較を図-12 に示す。このように簡易浸透流解析での地盤内へ水分が浸透する過程では HYDRUS による解析での水分の増減を良好に表現しているといえる。一方、水分が浸透していく前線部の体積含水率は簡易解析と HYDRUS による解析で差が大きくなる結果となった。

#### 3.2 広島土砂災害時の雨量データを用いたときの解析

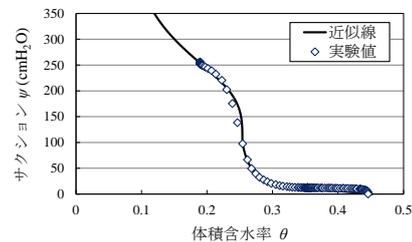


図-9 模型土層を用いたまさ土の給水曲線

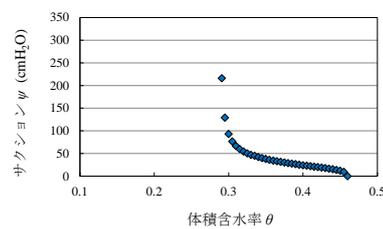


図-10 本研究で用いた給水曲線

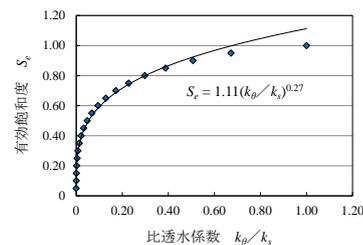


図-11 有効飽和度と透水係数比率の関係

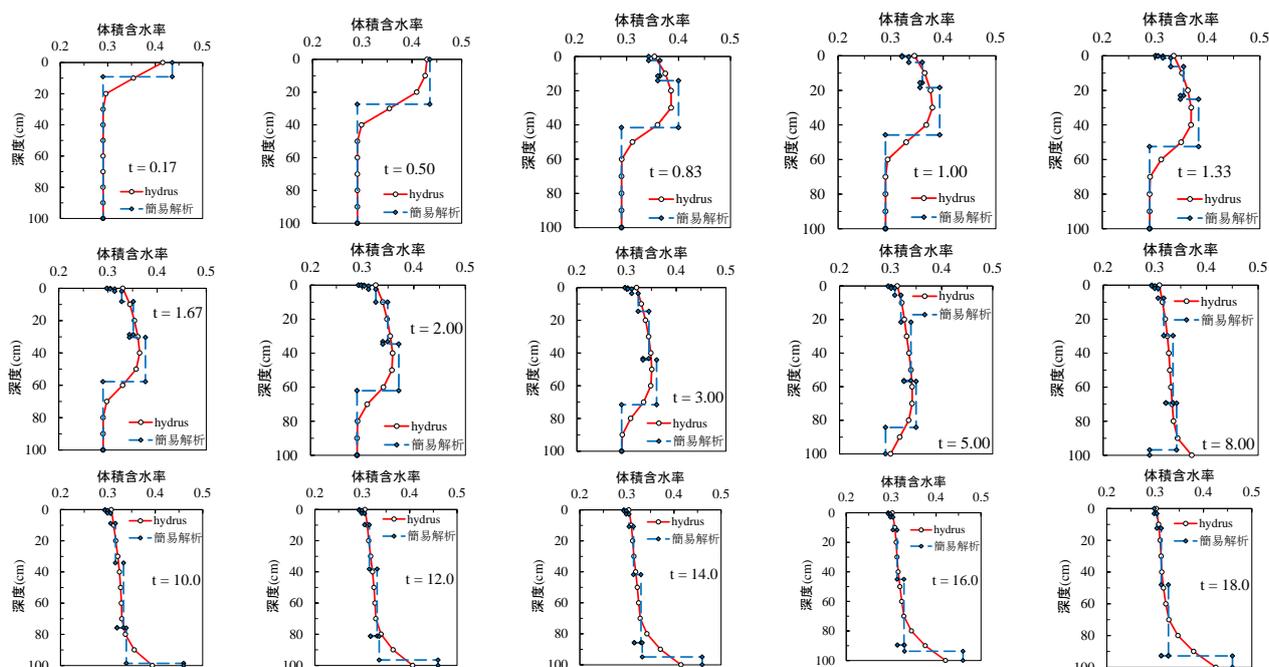


図-12 30分間1時間降雨量80mmの降雨のち無降雨の場合の比較

### 結果の比較

図-13に高瀬，毘沙門台，祇園山本の3箇所において2014年8月20日0:10からの10分雨量（高瀬のみ8月19日23:50からの10分雨量）のデータを示す。また，図-14，図-15，図-16に各雨量観測局観測データを用いた場合の簡易浸透流解析とHYDRUSとの比較を示す。簡易浸透流解析での地盤内へ水分が浸透する過程ではHYDRUSによる解析での水分の増減を良好に表現しているといえるが，水分が浸透していく前線部の体積含水率は簡易解析とHYDRUSによる解析で差が大きくなっている。

図-17に各雨量データを用いた簡易解析とHYDRUSでの比較の内，地下水位の高さに着目した比較を示す。なお，HYDRUSによる解析は10cmごとに体積含水率を計算しており，地下水位を求めることが困難であるため本研究ではHYDRUSの解析において95%以上の水分を含んでいる層の高さまでを地下水位とした。図-17より地下水位が急激に上昇し飽和した高瀬観測局雨量データを用いたケースを除く，毘沙門台，祇園山本，深川各観測局雨量データを用いた3ケースでは地下水位が徐々に上昇する結果となっているが，簡易浸透流解析の結果は

HYDRUSによる解析結果に比べ，高く計算された。しかし，全体として時間とともに地下水が上昇する過程はほぼ一致する。2014年の広島土砂災害では高瀬雨量計が設置された八木地区において同時多発的に土石流が発生し，大きな被害が生じたが計算された急激な地下水位の上昇はこれらの災害と関連があると考えられる。

今後の課題としては，地盤内に水分が浸透していく前線部での解析および水分により飽和した層が基盤面に達し地下水位が形成され上昇していく過程における解析の精度を向上させるためにプログラムの改良を行うことが必要であるといえる。また，今回用いたVGモデルのパラメータはまさ土地盤についてのパラメータであるので，その他の地盤についてその地盤ごとの異なるパラメータを用いた場合でも簡易浸透流解析が妥当であるかということを検討する必要がある。

### 4. 結論

本研究では，危険渓流における斜面の地盤内への水分がどのように浸透するかを，エクセルVBAを用いた簡易的な浸透流解析により求める手法を考案し，その妥当性

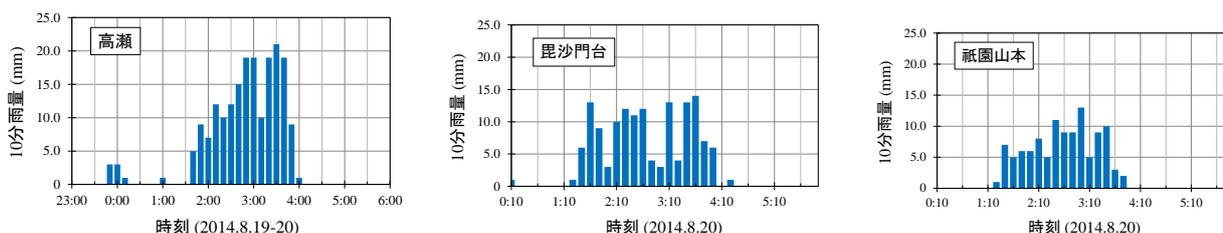


図-13 2014.8.19-20における各雨量観測局観測データ（左より，高瀬，毘沙門台，祇園山本）

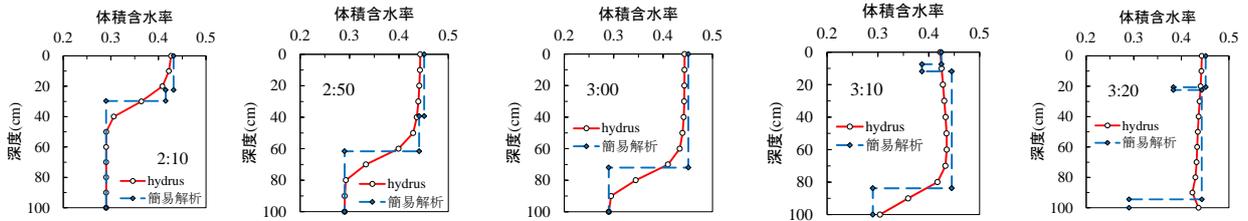


図-14 高瀬雨量観測局観測データを用いた場合の比較

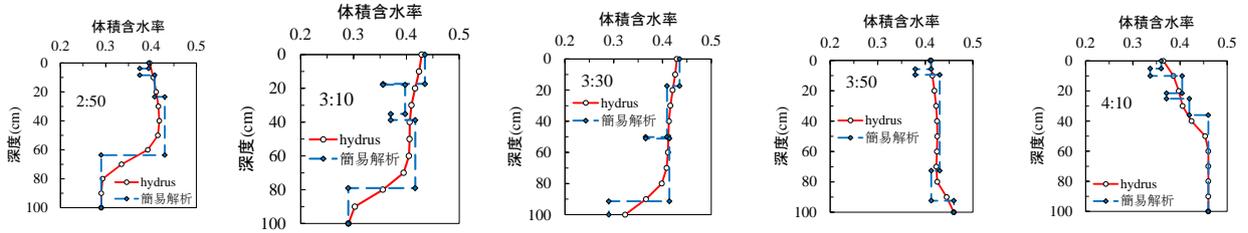


図-15 毘沙門台雨量観測局観測データを用いた場合の比較

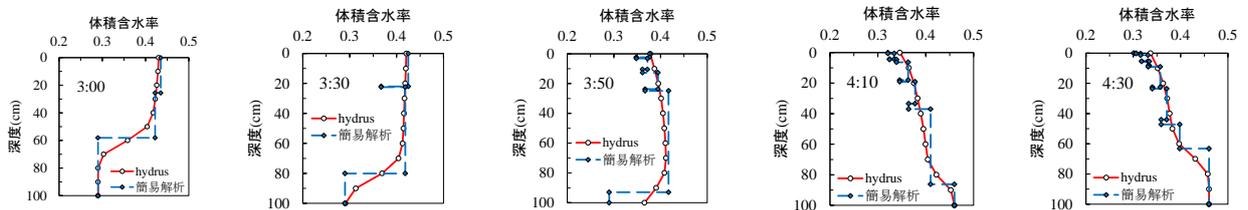


図-16 祇園山本雨量観測局観測データを用いた場合の比較

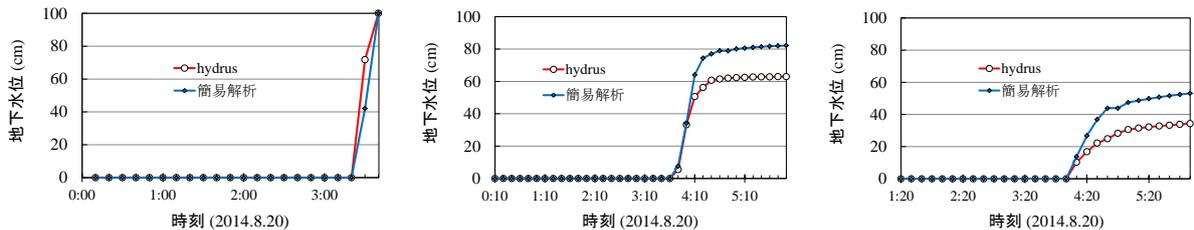


図-17 各観測局観測データを用いた場合の地下水位の高さと時間関係の比較

を検討した。検討の結果、簡易浸透流解析による解析結果は比較対象とした HYDRUS による解析結果と比べ、地盤内に水分が浸透する過程において良好に表現することを示した。全体として時間とともに地下水が上昇する過程はほぼ一致し、2014年に発生した広島土砂災害との関連があることが確認されたため、本解析によって地下水位が上昇し、危険渓流の安全率算出の解析に用いることは可能であると考えられる。

今後は、浸透過程の解析と地下水位上昇過程の解析において簡易解析でのプログラムの改良を行う必要がある。また、本解析で用いた VG モデルのパラメータはまさ土によるものであり、その他の地盤のパラメータを用いた解析においても簡易浸透流解析が妥当であるかということも検討する必要がある。

#### 参考文献

1) 国土交通省 HP：第1部第2章第1節4 地球温暖化・気候変動により脆弱となる国土，平成23年度国土交通白書，

<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h23/index.html>，(確認年月日 2016.6.10)

2) 草野慎一，岡崎伸宏，柳田隆一，倉本和正：広島県における土砂災害警戒情報の発表基準の設定と検証，地盤と建設，Vol.25, No.1, pp.163-170, 2007.

3) 花岡尚，土田孝，中川翔太，川端昇一，梅田賢也：地域の自主防災組織と連携した土砂災害危険渓流の現地調査，地盤と建設，Vol.30, No.1, pp.141-146, 2012.

4) HYDRUS グループ：土中水分・塩分移動予測汎用プログラム，<http://www.bio.mie-u.ac.jp/junkan/sec1/lab5/hydrus/>，(確認年月日 2016.6.10)

5) 川端昇一，土田孝，加納誠二，由利厚樹，花岡尚，中川翔太：地盤調査と斜面安定に基づく土砂災害危険渓流の豪雨時危険度評価，地盤工学ジャーナル，Vol.8, No.1, pp.119-131, 2013.

6) 由利厚樹，加納誠二，土田孝：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，第45回地盤工学会研究発表会発表講演集，pp.165-166, 2010.

7) 地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価，pp.25-45, 2004.