

## 公表雨量データを用いた自然斜面における簡易浸透流解析手法の開発

Development of Simple Seepage Flow Analysis Method in Natural Slopes  
using Official Announcement Rainfall Data

丸田亮	Ryo MARUTA	(広島大学大学院工学研究科)
土田孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究院)
アタパツ A.M.R.G.	A.M.R.G. ATHAPATHTHU	(スリジャヤワルダナプラ大学)

近年、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。土砂災害の対策にはソフト対策として土砂災害危険度情報の提供があるが、提供される情報の精度向上が課題となっている。本研究では広島県で公開されている雨量データをもとに個別の溪流の地盤特性を考慮した地盤内の水分状態を算出する簡易浸透流解析を行い、危険度情報に活用することで情報の精度向上につなげることを目指す。解析結果はFEMを用いた不飽和浸透解析プログラムであるHYDRUSとの比較から地盤内への水分浸透過程を表現していることを示した。

キーワード：斜面，浸透

(IGC : E-6, E-7)

## 1. はじめに

近年、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>。2014年8月20日には広島市内の住宅地背後の危険溪流によって大規模な土砂災害が発生した。土砂災害の対策にはソフト対策として、土砂災害危険度情報の提供があり、全国最多となる約32,000箇所の土砂災害危険箇所を有する広島県の場合、県内を5km四方のブロックに分割し、ブロックごとに観測雨量に基づく解析雨量（および予測雨量）と土壌雨量指数、過去の災害履歴に基づく土砂災害発生危険基準線を用いた危険度情報の提供が行われている<sup>2)</sup>。しかし、ブロック内には複数の危険溪流が存在することから、個別の溪流の危険度は異なるはずである。危険度情報の精度を高めるためには個別の溪流ごとの評価が必要と考えられる。

本研究では個別の溪流をモデル化し、それらをもとに、広島県で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、エクセルVBAによりVGモデルを用いた地盤内の水分状態の計算を随時行った。なお、すべての危険溪流において現地調査を行う必要があるが、ここでは花岡ら<sup>3)</sup>が提案した現地調査方法により溪流のモデル化を行うことを想定している。なお、本研究における解析は地盤を一次元として計算を行った。また、本論文では開発した解析手法の解析結果を、有限要素法を用いた不飽和浸透解析プログラムであるHYDRUS-2Dと比較することによりその妥当性を検討した。

## 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

代表的なプログラムとして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、このようなプログラムを数多く存在する危険溪流において、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。本研究ではエクセル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、地表面から雨水が地盤内へ鉛直に浸透し、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水分の地盤内への浸透深さを計算する。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、本研究では10分間の降雨ごとに平衡含水比帯が形成されると仮定し、表層から浸透深さまでを1つの層（以下、浸透層）として考え、解析を行った。なお、本解析における浸透層の厚さは10分間の降雨量によって下層への浸透速度（動水勾配を1と仮定するため、透水係数と等しい）と体積含水率を求め、後述の式(3)により計算した。なお、動水勾配を1と仮定し、サクシジョンの影響を考慮していないため、本解析では実際の現象とは異なりサクシジョンによる浸透速度の変化を表現しておらず、後述の残留率を用いることで地盤内の水分状態を表現している。

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。このとき有効飽和度 $S_e$ と比透水係数 $k_{\theta}/k_s$ 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>。

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

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

ここで、 $\theta_s$ ：飽和体積含水率、 $\theta_r$ ：残留（最小）体積含水率、 $\psi$ ：サクシオン、 $k_{\theta}$ ：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、 $v_i$ ：浸透速度、 $t_i$ ：時間ステップ（ここでは、10 分）、 $r_i$ ：10 分間降雨量、 $\theta_0$ ：初期体積含水率、 $\theta_i$ ：体積含水率、 $k_i$ ：透水係数、 $z_i$ ：浸透層厚である。なお、本解析では動水勾配を 1 とするため、 $v_i = k_i$  であり、すべての降雨が地盤内に浸透すると仮定しているため  $v_i = r_i$  である。ここで、平衡含水比帯による浸透層厚  $z_i$  は次式(3)で表される。

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

#### (a) 一定の降雨が続く場合

図-1 に一定の降雨が続く場合の降雨浸透の考え方を示す。ここで、 $\theta_1 = \theta_2, k_1 = k_2, z_1 = z_2$  である。一定の降雨が続く場合、図-1 (a)における 10 分間降雨量  $r_1$  の降雨による体積含水率  $\theta_1$  の浸透層が図-1 (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-2 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-2 (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  $\theta_1$  の浸透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-2 (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、下層に水分が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増加し、下層に浸透する方向の動水勾配が小さくなるためである。なお、図-1 (a)における  $\theta_1$  の浸透層が時刻  $t_1$  から  $t_2$  にかけて地表面から  $2z_1$  の深さまで浸透すると同様に図-2 (a)における  $\theta_1$  の浸透層が浸透すると考え、図-2 (b)における体積含水率  $\theta'_1$  の浸透層の層厚は  $z'_1 = z_1$  であり、 $\theta_2$  の浸透層の層厚は  $z_2 = z_1$  である。

ここで、下層が浸透していく際に上層へ残留させる水分の割合を残留率  $R$  とすると、残留率を与えたことによりできた浸透層の体積含水率  $\theta_2$  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

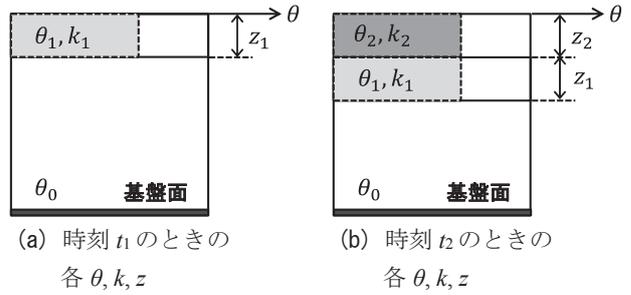


図-1 降雨浸透の考え方（一定の降雨が続く場合）

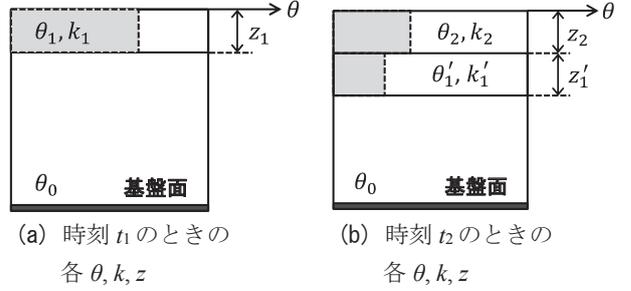


図-2 降雨浸透の考え方（降雨が一旦停止する場合）

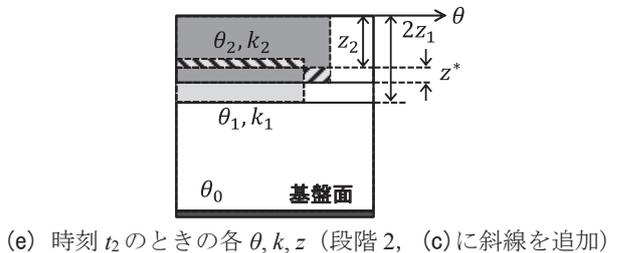
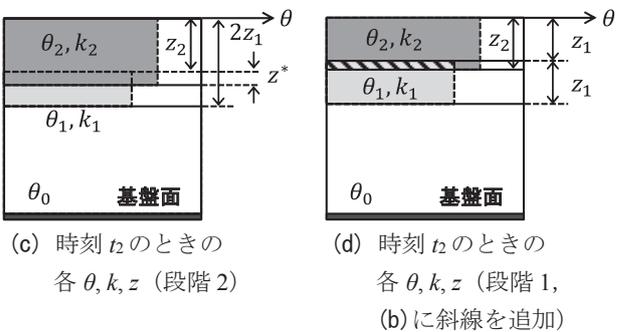
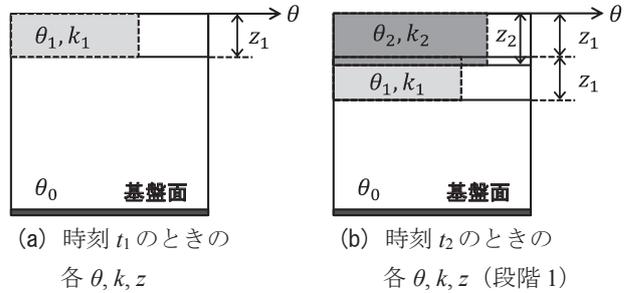


図-3 降雨浸透の考え方  
(降雨量が前の 10 分間よりも大きくなる場合)

の一致度が良好な 60%を適用した。残留率は本解析の重要なパラメータであり土の水分特性曲線と密接に関係していると考えられるが、本論文では残留率の工学的意味や土質による違い等については議論しておらず、今後さらに検討を重ねていく必要がある。

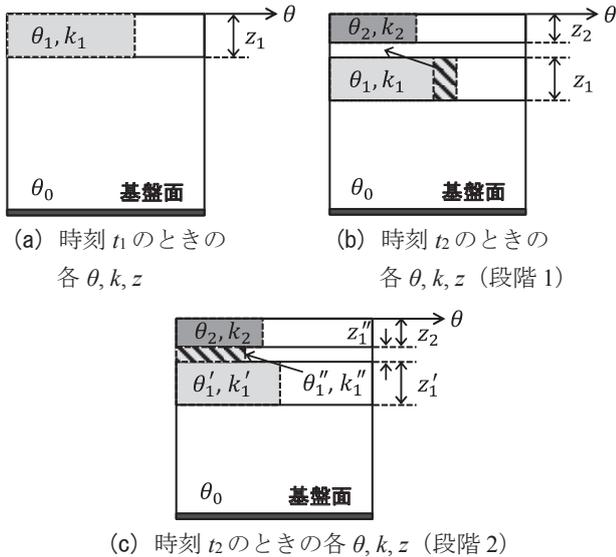


図-4 降雨浸透の考え方  
(降雨量が前の10分間よりも小さくなる場合)

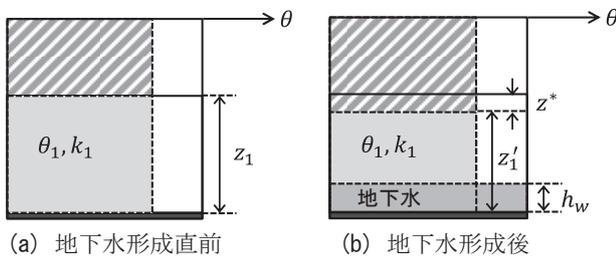


図-5 地下水形成の考え方

(c) 降雨量が前の10分間よりも大きくなる場合  
 図-3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-3(a)から時刻 $t_2$ における図-3(c)のように水分が浸透していくと仮定した。図-3(a)における体積含水率 $\theta_1$ の浸透層は図-1(a)から図-1(b)に示すように浸透していくと同様に、時刻 $t_2$ では地表面から $2z_1$ の深さまで浸透する。また、 $r_1$ よりも大きい降雨量である $r_2$ による $\theta_2$ の浸透層は図-3(b)のようになる。ここで、 $r_2$ は $r_1$ よりも降雨量が大きく、浸透速度が大きいため、図-3(b)のように $\theta_1$ の浸透層と $\theta_2$ の浸透層で重なる部分(図-3(d)における斜線部)が発生する(この状態を段階1とする)。段階1の状態では、図-3(d)における斜線部には $\theta_2$ の状態よりも $\theta_1$ の浸透層の分だけ多くの水分が存在するため、重なった $\theta_1$ の浸透層の水分の分だけ、重なっていない $\theta_1$ の浸透層の部分(図-3(e)の右上から左下へ向かう斜線の部分)の体積含水率が $\theta_2$ になる(この状態を段階2とする)として計算した。つまり、イメージとしては図-3(e)における左上から右下へ向かう斜線の部分の水分を右上から左下へ向かう斜線の部分へ移動するとして計算を行っている。ここで、図-3(f)の右上から左下へ向かう斜線の部分の浸透層厚 $z^*$ は次式(5)で表される。

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

(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-4に示

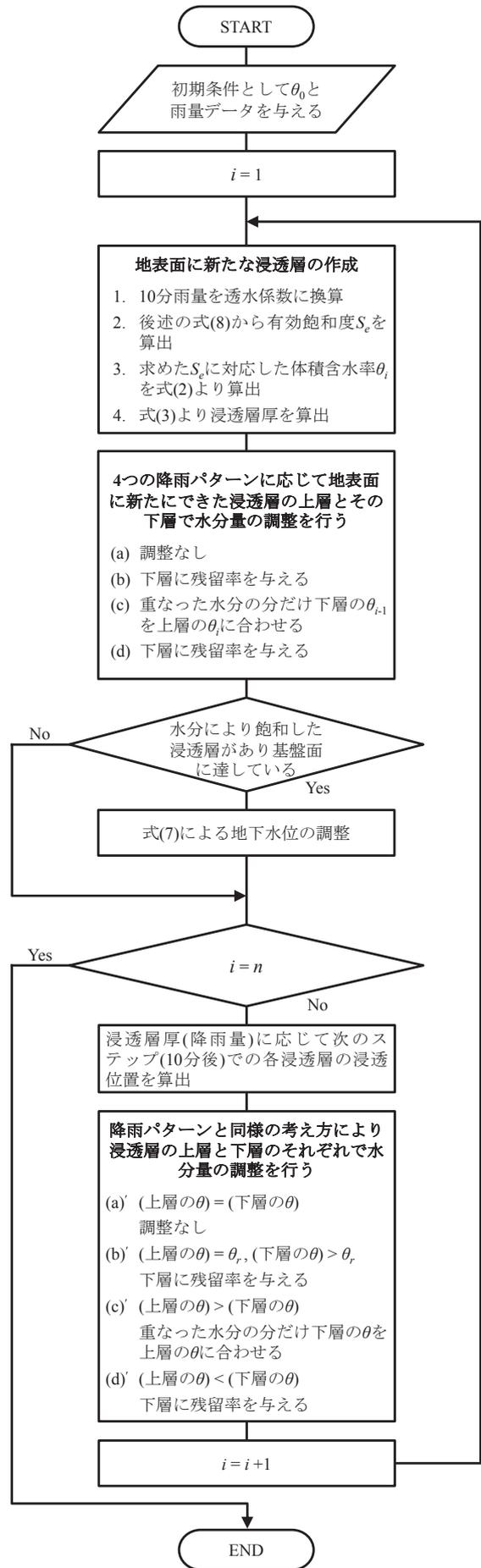


図-6 解析の流れ

す。図-4(b)において体積含水率 $\theta_2$ の浸透層は $\theta_1$ の浸透層よりも浸透速度が小さいため、 $\theta_1$ と $\theta_2$ の浸透層の間に水分のギャップが生じる(段階1)。そのため先程の降雨が一旦停止する場合の考え方と同様に $\theta_1$ の浸透層は図-4(c)のように水分を一定量残留させながら浸透していくと仮定した(段階2)。ここで、残留率を与えたことによりできた浸透層の体積含水率 $\theta_1''$ は式(4)と同様に次式(6)で求まる。

$$\theta_1'' = R \cdot (\theta_1 - \theta_0) + \theta_0 \quad (6)$$

また、図-4(c)において $z_1'' = z_1 - z_2$ ,  $z_1' = z_1$ であり、時刻 $t_1$ において $\theta_1$ だった浸透層の時刻 $t_2$ における体積含水率 $\theta_1'$ は次式(7)で表される。

$$\theta_1' = \theta_1 - \frac{z_1''}{z_1} \cdot (\theta_1'' - \theta_0) \quad (7)$$

このように、段階1における $\theta_1$ の浸透層が残留率により段階2における $\theta_1''$ の浸透層へ残留する水分は、段階1における $\theta_1$ の浸透層全体で負担すると仮定している。

## 2.2 地下水形成の考え方

図-5に地下水形成過程の考え方を示す。なお、図-5における $\theta_1$ の浸透層の上層(図-5(a), 図-5(b)斜線部)および図-5(b)のステップにおいて地表面から新たに地表面にできる浸透層は説明の便宜上 $\theta_1$ の浸透層と体積含水率、浸透速度一定であるとする。

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。浸透層の下端が基盤に達し、地下水位が形成される直前である図-5(a)では、次のステップにおいて $\theta_1$ の浸透層が下層へ浸透していき、基盤に達していた浸透層の下端から図-5(b)のように地下水位が形成される。ここで、下層に浸透した水分(図-5(a)における $\theta_1$ の浸透層の内、図-5(b)において斜線の浸透層に変わった部分)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 $z^*$ あうとして地下水位 $h_w$ は次式(8)で求まる。

$$h_w = \frac{\theta_1 - \theta_0}{\theta_s - \theta_1} \cdot z^* \quad (8)$$

## 2.3 解析のフロー

図-6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浸透層を作成しては前節で述べた考え方により上下の浸透層で水分の調整を行う過程を、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。なお、図-6において、最新の降雨を $i = n$ のときとしている。また、既に作成された浸透層である上層と下層の水分の調整は2.1節における降雨浸透の考え方と同様の考え方により行う。上層と下層の $\theta$ が等しい場合を(a')として2.1節(a)と同様に、上層の $\theta$ が $\theta_r$ と等しく下層の $\theta$ が $\theta_r$ でない

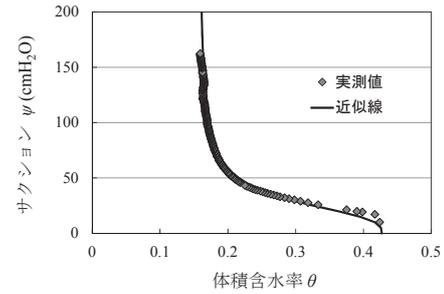


図-7 既往の研究による模型土層を用いたまさ土の給水曲線のフィッティング結果<sup>6)</sup>

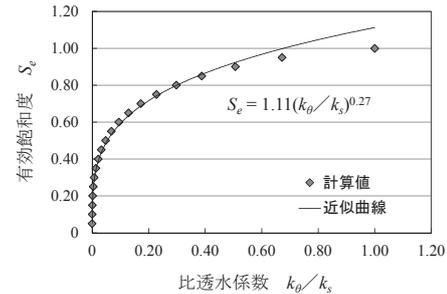


図-8 有効飽和度と透水係数比率の関係

場合を(b')として2.1節(b)と同様に、上層の $\theta$ が下層よりも大きい場合を(c')として2.1節(c)と同様に、上層の $\theta$ が下層よりも小さい場合を(d')として2.1節(d)と同様に考える。

## 3. HYDRUS との比較による簡易浸透流解析結果の検討

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-7は由利ら<sup>6)</sup>により、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、 $\theta_r = 0.158$ ,  $\theta_s = 0.433$ の結果となっている。そこで、本研究では、VGモデルの水分特性曲線に図-7を用い、パラメータを $m = 0.68$ ,  $n = 3.13$ ,  $\alpha = 0.04$  (1/cm)として解析を行った。また地盤の条件を、斜面の層厚1.0m、飽和透水係数 $6.0 \times 10^{-3}$  cm/sとし、初期体積含水率は、初期有効飽和度 $S_e$ が30%となる $\theta_0 = 0.241$ を用いた。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-8のようになり、次式(9)が得られる。

$$S_e = 1.11(k_\theta/k_s)^{0.27} \quad (9)$$

### 3.1 単純な降雨を与えたときの解析結果の比較

始めの60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-9に示す。なお、図中の $t$ は経過時間を示している。図-9の水分が浸透していく前線部（例えば $t=30\text{min}$ における10~40cmや $t=60\text{min}$ における40~70cm）に着目すると各深度での体積含水率は、HYDRUSによる解析では滑らかに遷移しているのに対し、簡易解析では浸透層を用いた考え方であるため階段状となっており、水分量の差が大きくなる結果となった。その差は、HYDRUSによる解析結果を真値と考えると $t=30\text{min}$ では20cmや35cm付近、 $t=60\text{min}$ では45cmや60cm付近において大きく15%前後の水分量の差が出ている。一方、表層付近や表層から50cmにかけての深さでは（例えば $t=240\text{min}$ における0~50cmにおいて）簡易解析とHYDRUSの結果がほぼ一致し良好に再現されている時間帯（経過時間）もあった。

### 3.2 広島土砂災害時の雨量データを用いたときの解析結果の比較

図-10に高瀬、毘沙門台、祇園山本、深川の4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-11、図-12、図-13、図-14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。図-13、図-14の祇園山本や深川両観測局雨量データを用いた場合、祇園山本の3:50以降や深川の4:00以降における表層から50cmにかけての深さでは簡易解析とHYDRUSの結果がほぼ一致し良好に再現される結果となった。図-10よりこの時間は両観測局において降雨の停止時間付近であり、また両観測局では高瀬、毘沙門台両観測局よりも全体的に観測雨量が少ないことが分かる。一方、水分が浸透していく前線部（例えば、高瀬の3:10における70~100cm、毘沙門台の2:00における10~30cm、祇園

山本の3:30における80~100cm、深川の3:00における10~50cm）の体積含水率はHYDRUSによる結果を真値とするとそれぞれ15~25%前後の水分量の差があり簡易解析とHYDRUSによる解析で差が大きくなる結果となった。

図-15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。図-15より簡易解析による結果では0時からすでに0~2.0cmの地下水位を形成しており、地下水位を形成していないHYDRUSの解析結果と違いが出ている。また、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による結果に比べ、高く計算された。この3ケースでの簡易解析とHYDRUSの地下水位の高さの差は最も大きいところでそれぞれ1.5~2.0倍と大きな差となっているものの、地下水位が上昇し始める時間帯や時間とともにそれぞれの地下水が上昇するスピードはほぼ一致する。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。このため、本解析によって地下水上昇を予測し、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図-1から図-5に示した浸透および地下水形成の考え方をはじめとした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。

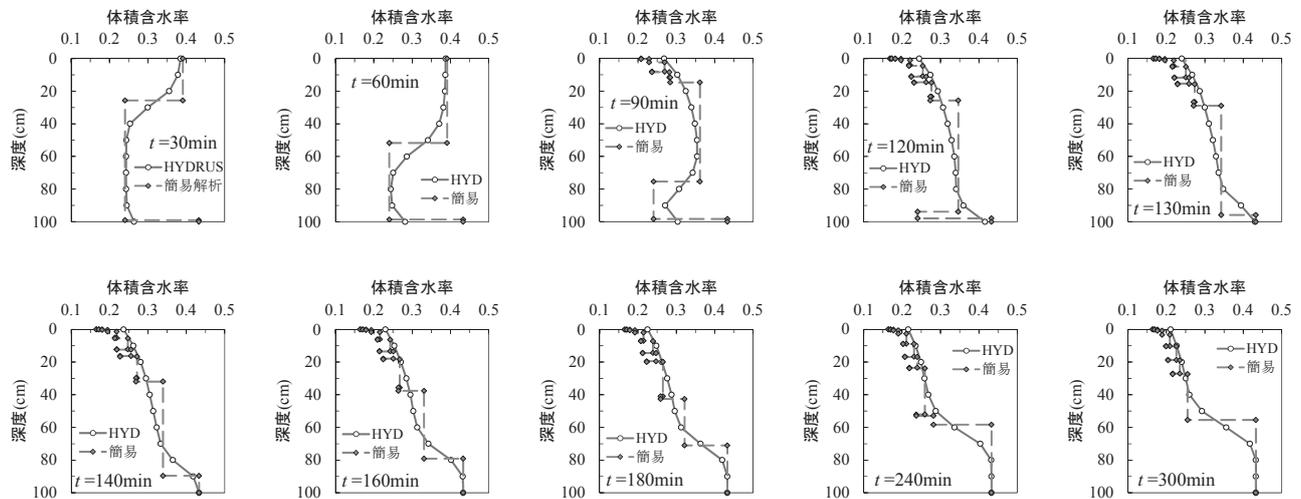


図-9 単純な降雨を与えたときの比較

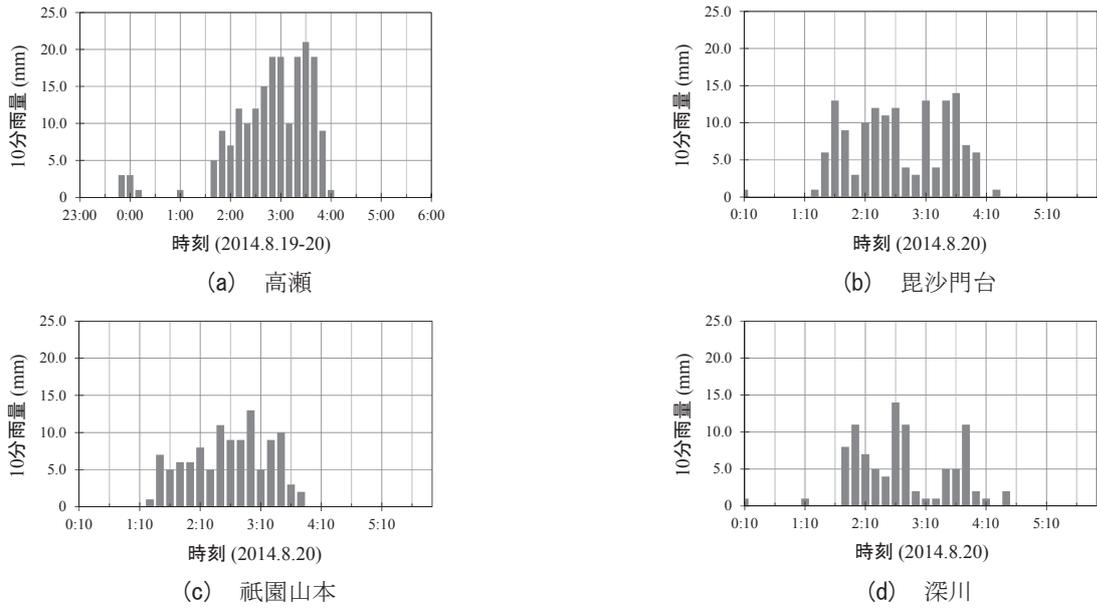


図-10 2014.8.19-20における各雨量観測局観測データ

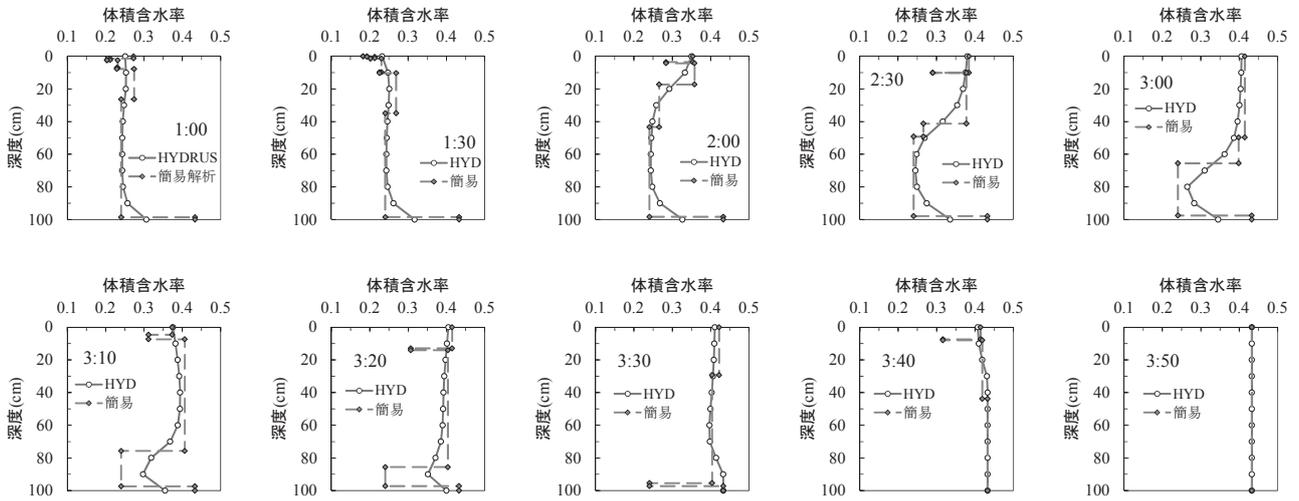


図-11 高瀬雨量観測局観測データを用いた場合の比較

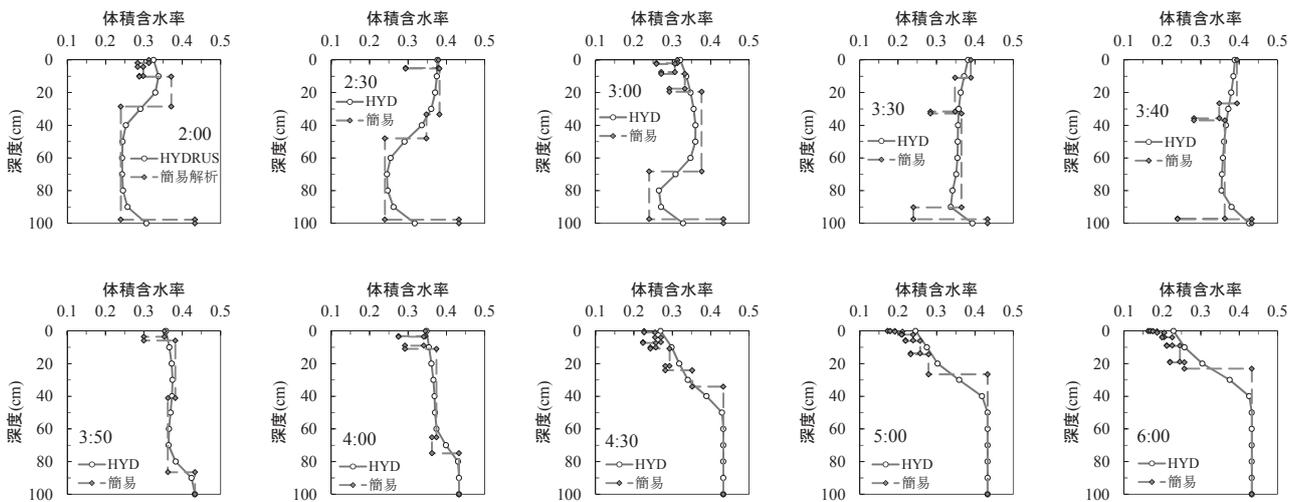


図-12 毘沙門台雨量観測局観測データを用いた場合の比較

公表雨量データを用いた自然斜面における簡易浸透解析手法の開発

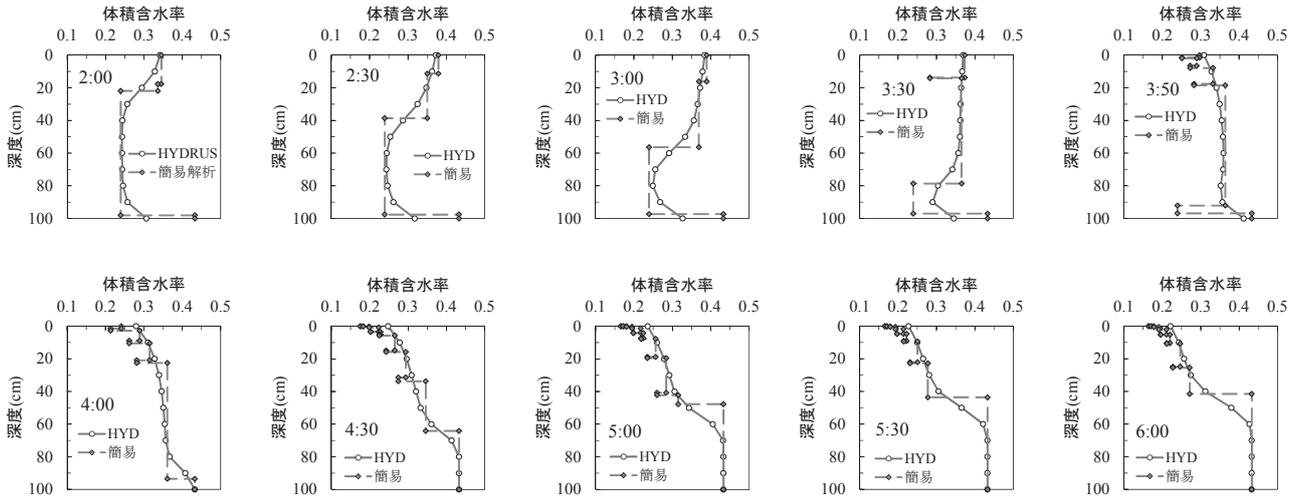


図-13 祇園山本雨量観測局観測データを用いた場合の比較

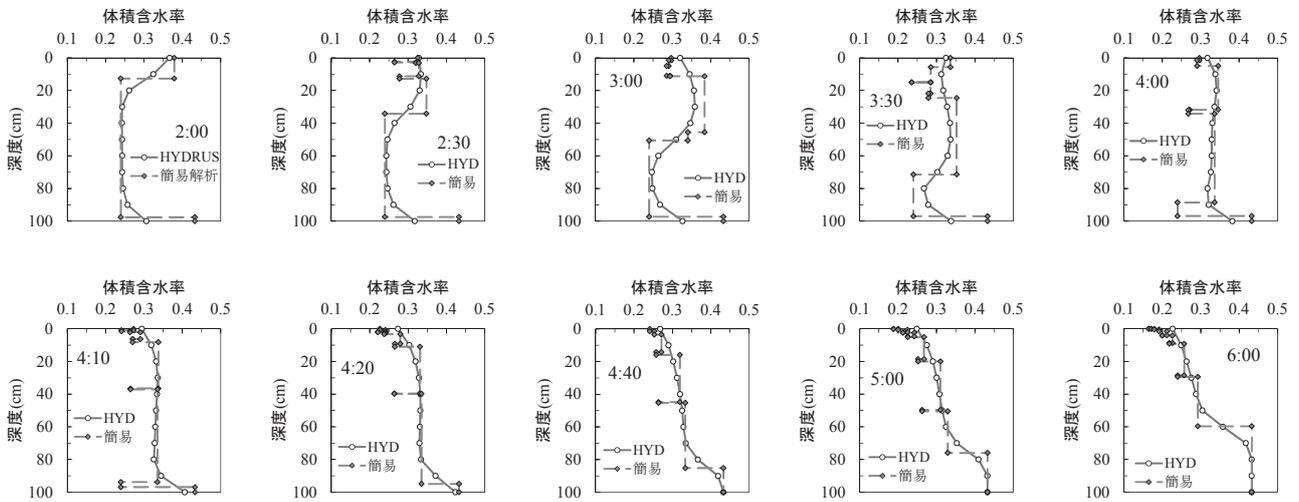


図-14 深川雨量観測局観測データを用いた場合の比較

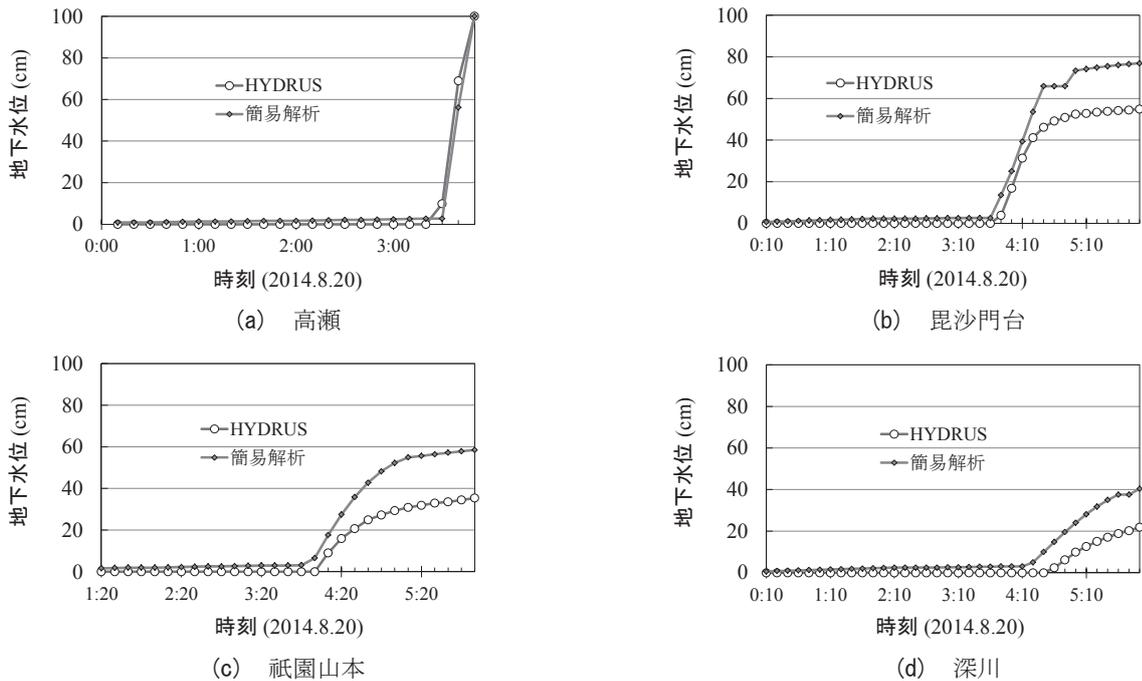


図-15 各観測局観測データを用いた場合の地下水位の高さと時間関係の比較

#### 4. 結論

土砂災害危険度情報を提供する際に、危険渓流ごとの危険度を知ることができればより精度の高い情報となると考えられる。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していく前線部での解析結果では簡易解析と HYDRUS による解析では差が大きくなる結果となった。また、地下水位が上昇する過程において、簡易解析の結果は HYDRUS による解析での地下水位よりも高く計算された。しかし、全体として地下水位が上昇し始める時間帯や時間とともに地下水が上昇するスピードはほぼ一致し、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、水分浸透の前線部における解析および地下水位上昇過程の解析において簡易解析での水分の浸透・地下水形成の考え方をはじめとしたプログラムの改良を行う必要があるといえる。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 I 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.

(2016 年 6 月 20 日 受付)