

データ同化によって推定された浸透解析モデル による地下水位変動図の作成と降雨指標の考察

CONTOUR FIGURE TO REPRODUCE GRAND WATER LEVEL USING SEEPAGE
ANALYSIS MODEL ESTIMATED BY DATA ASSIMILATION AND
CONSIDERATION OF RAINFALL INDEX

水島 隆志¹・伊藤 真一²・酒匂 一成²・小泉 圭吾³・小田 和広⁴

Ryuji MIZUSHIMA, Shinichi ITO, Kazunari SAKO, Keigo KOIZUMI, and Kazuhiro ODA

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科工学専攻海洋土木工学 PG (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: k2846435@kadai.jp

² 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

³ 大阪大学大学院理工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

⁴ 大阪産業大学大学院理工学研究科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

Key Words: data assimilation, grand water level, soil water index, continuous rainfall, effective rainfall

1. はじめに

豪雨による表層崩壊に対するソフト対策の一つとして現地斜面のモニタリング¹⁾²⁾がある。これは、降雨に伴って変化する地表面変位や体積含水率などを現地計測することで、遠隔で斜面の監視を行うものである。このようなモニタリングを継続的に行うことで、その時点における斜面の状況を適切に把握できるだけでなく、計測データも膨大に蓄積できるという利点がある。また、このようにして得られた現地計測データの中でも、土中水分量に着目して表層崩壊発生に対する危険度予測への活用を試みる研究もなされている。例えば、檀上ら³⁾はテンシオメータによる間隙水圧の計測結果を活用した降雨指標を提案しており、矢部ら⁴⁾はタンクモデルによる土壌雨量指数と計測データを組み合わせることで、表層崩壊発生時の間隙水圧を推定する研究を行っている。また、伊藤ら⁵⁾はデータ同化手法を用いて体積含水率の現地計測データに基づく浸透解析モデルの推定に関する研究を行ってきた。これにより、データ同化によって推定された浸透解析モデルは、不飽和状態の浸透挙動だけでなく、飽和状態における地下水の上昇や下降も再現できることを明らかにしている。データ同化手法を用いて現地の斜面でモニタリング

を行いながらリアルタイムに数時間後の土中水分状態を予測することができれば、より精度の高い避難情報や通行規制の発令などが可能になると考えられる。しかし、そのような方法は、データ同化やリアルタイムでのシミュレーションにかかる計算コストを考慮すると現実的ではない。そこで、データ同化によって推定された浸透解析モデルに対して様々な降雨を事前に与え、その斜面における降雨量と地下水の関係を表す地下水位変動図をあらかじめ作成しておくことができれば、現地計測された降雨データから任意の時点における地下水位を概算できるため、実務における意思決定の高度化に寄与できると考えられる。ただし、そのような地下水位変動図を作成するにあたり、どのような降雨指標を用いれば、斜面内の地下水の状況を適切に表現できるのかについての検討も必要である。本研究の目的は、データ同化によって推定された浸透解析モデルを用いて対象斜面における降雨量と地下水の関係を表す地下水位変動図を作成することと、地下水位変動図の作成に対して適切な降雨指標について明らかにすることである。具体的には、まず、体積含水率の現地計測データに基づいて不飽和浸透だけでなく地下水流動までを再現できる浸透解析モデルを推定する。次に、そのモデルに対して様々なパターンの降雨を与えて、

対象斜面における地下水の挙動を解析する。そして、与えた降雨をいくつかの降雨指標(①時間雨量と土壌雨量指数, ②時間雨量と連続雨量, ③半減期 1.5h の実効雨量と半減期 72h の実効雨量)を用いて整理することで, 地下水と降雨指標の関係を表す地下水位変動図を作成する。最後に, それぞれの降雨指標を用いて作成された地下水位変動図を比較することで, 適切な降雨指標について考察する。なお, 本研究における地下水とは, 透水性の低い層で一時的に発生する宙水を意味している。

2. 解析手法

(1) 不飽和・飽和浸透流解析

数値解析シミュレーションとして不飽和・飽和浸透流解析を行った。支配方程式として, 赤井ら⁶⁾の式を用いて間隙水の流れを鉛直次元と仮定すると式(1)のようになる。

$$C \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

ここに, C は比水分容量であり, $C=d\theta/d\psi$ で表される。 $k(\psi)$ は不飽和透水係数, ψ は圧力水頭, x_3 は位置水頭, t は時間である。水分特性曲線モデルとしては式(2)に示す van Genuchten⁷⁾モデル, 不飽和透水係数モデルとして式(3)に示す Mualem⁸⁾モデルを用いた。

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

$$k = k_s \times S_e^{0.5} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right\}^2 \quad (3)$$

ここに, S_e :有効飽和度, θ_s :飽和体積含水率, θ_r :残留体積含水率, α, n :水分特性曲線の形状に関するパラメータ, k :不飽和透水係数, k_s :飽和透水係数である。また, $m=1-1/n$ で表される。不飽和浸透特性に関しては, $\theta_s, \theta_r, \alpha, n$ および k_s の 5 つが未知パラメータとなり, これらをデータ同化によって推定する。

(2) 境界条件

本研究では, 一次元解析モデルを仮定して計算を行った。このモデルにおける境界条件として, 地表面からの雨水の浸透量を調節するパラメータとして浸透能 ω ⁹⁾を, 地中のモデル底面からの排水量を調節するパラメータとして浸透係数 β ⁹⁾を与えた。浸透能 ω , 浸透係数 β は式(4), 式(5)でそれぞれ表される。

$$IR = \omega \times \tanh(R / \omega) \quad (4)$$

$$v_{out} = \beta \times k \quad (5)$$

ここに, IR :斜面内に浸透する水分量, ω :降雨強度を十分に大きくした場合の浸透能, R :降雨強度, v_{out} :境

界から排出される流束である。

これらの境界条件と不飽和浸透特性に関する計 7 つの未知パラメータを現地計測データに基づいて融合粒子フィルタ (Merging Particle Filter : MPF)¹⁰⁾を用いて推定した。

(3) 融合粒子フィルタ

MPF はシステムの状態に関する確率分布を多数の粒子で近似的に表現し, ベイズ推定を応用して各粒子の時間推移を表現するデータ同化手法である。それぞれの粒子は, 初期条件, 境界条件, パラメータなどに関する情報と各モデルにおいて数値解析を行って算出される各時刻の物理量を情報として有している。図-1 に MPF の概念図を示す。MPF では, Prediction, Filtering, Resampling, Merging という 4 つの手順を逐次繰り返す。Prediction では, 時刻 $t-1$ から t までのシミュレーションを N (粒子の個数)通り行う。Filtering では, 観測データに対する各粒子の解析結果の適合度に基づき, 各粒子に対する尤度を計算する。Resampling では, 各粒子の尤度に基づいて復元抽出を行い, 粒子の複製・諸滅を行う。この際, MPF では, $l \times N$ (l は 3 以上の整数)のサンプルを復元抽出する。最後に Merging を行い, l 個ずつの組にして, それぞれの組ごとに重み付き和を取り, N 個の粒子を再度作成する。この 4 つの手順を各時刻において繰り返すことで, 現地計測データを再現可能な浸透解析モデルを推定できる。境界条件や MPF の詳しい計算式については参考文献⁵⁾を参照されたい。

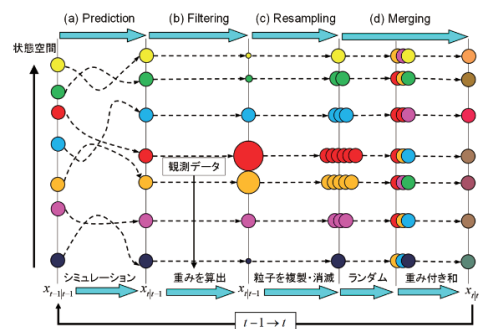


図-1 MPF の概念図

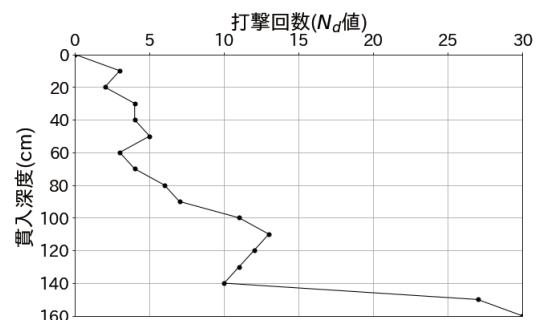


図-2 簡易貫入試験結果

3. 現地計測に基づく浸透解析モデルのデータ同化

(1) 対象斜面の概要及び現地計測データ

本研究で対象としたのり面の基盤岩は花崗岩であり、表層はまさ土である⁵⁾。図-2は対象地点における簡易貫入試験の結果を示している。深度150cmにおいて、 N_d 値が急激に上昇しているため、この付近で地下水が発生する可能性があると考えられる。そのため、雨水の浸透し始める挙動と地下水の上昇・下降を計測するため、土壌水分計の設置深度は40cm, 80cm, 100cmとした。2017年11月3日から現地計測を実施しており、土壌水分計による体積含水率の計測間隔は10分である。また、降雨量に関しては、現地斜面に転倒樹型雨量計を設置して10分間隔で計測した。図-3は本研究で使用した現地計測データを示している。計測期間は2018年7月4日0:00から7月10日0:00までであり、平成30年7月豪雨時の現地計測データである。この際、対象斜面付近の複数箇所で小規模な表層すべり型崩壊が発生しており、当該地点においても表層地盤が飽和状態に至っていた可能性が考えられる⁵⁾。

(2) 解析条件

図-4は本研究で用いた1次元解析モデルを示している。140cm以浅では明確な層の違いが確認されなかったことから、各土壌水分計の設置深度の中央を層境界とした。つまり、深度0cmから60cmまでを上層、60cmから90cmまでを中間層、90cmから140cmまでを下層とした。また、境界条件に関しては、浸透能 ω を導入した降雨境界をモデル上面、浸透係数 β を導入した排水境界をモデル底部に設定した。データ同化には合計500個の粒子を用いた。未知パラメータの変動幅は事前に解析を行い、現実的な範囲を設定した。観測ノイズに関しては、3次元正規分布を仮定し、平均は各時刻における体積含水率の計測値、標準偏差は各深度の現地計測データの変動幅の25%、非対角項(共分散)は0とした。

(3) データ同化結果

図-5に現地計測に基づく浸透解析モデルのデータ同化により推定された体積含水率の経時変化の事後分布の平均値を、図-6に下層におけるデータ同化終了後の各未知パラメータのヒストグラムを示している。本研究では500個の粒子を用いて500通りのモンテカルロシミュレーションを行いながら各時刻でベイズ推定により事後分布を更新しているため、各

時刻において500通りの各未知パラメータや体積含水率が算出される。図-5と図-6はそれらの500通りの解析結果から平均値と標準偏差およびヒストグラムを算出している。これらの結果より、各計測深度において体積含水率の現地計測データを概ね再現できていることがわかる。また、浸透係数 β は、 10^{-3} から 10^{-2} 程度と小さく、地下水が発生しやすいと考えられる。図-7にモデル底部に作用する正の間隙水圧から換算した地下水位の経時変化の事後分布を示す。

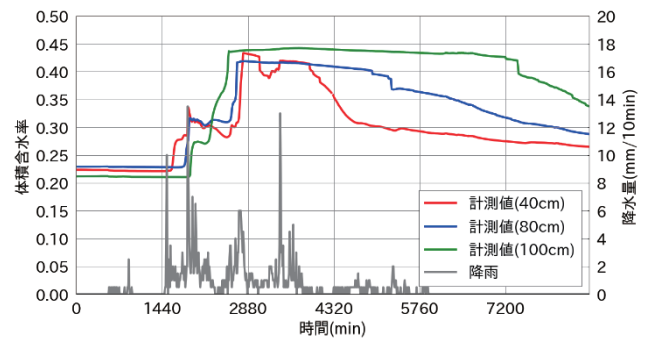


図-3 現地計測データ

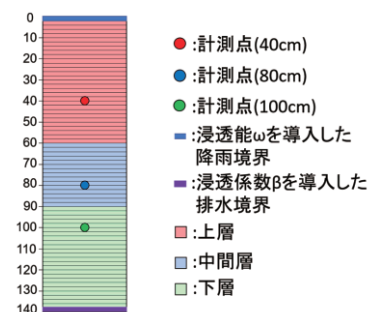


図-4 1次元解析モデル

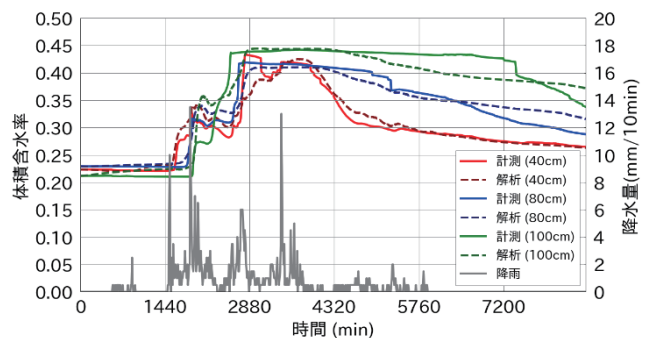


図-5 体積含水率の事後分布の経時変化

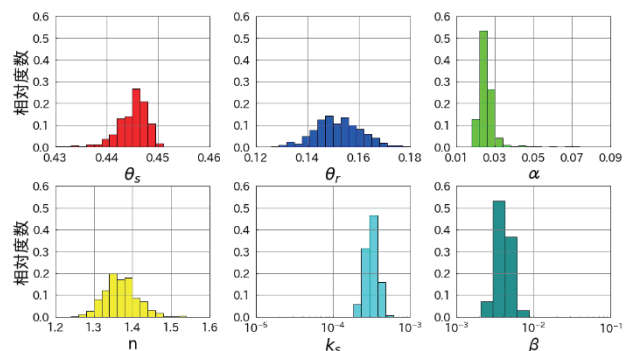


図-6 各未知パラメータの事後分布(下層)

本研究で着目している地下水に関しても、激しい降雨の後に地下水が発生し、水位が急激に上昇した後、降雨が弱まると共に水位が下降する挙動も表現できているといえる。以上のことから、これ以降の議論はこの推定された 500 通りのパラメータの事後分布を用いることとするが、この事後分布をこれ以降は推定されたモデルと呼ぶこととする。

4. 地下水位変動図の作成及び降雨指標に関する考察

(1) 地下水位変動図の作成手法

前章で推定された浸透解析モデルに対して様々なパターンの降雨を与え、地下水位変動図を作成する。ここでは、土壌雨量指数を長期降雨指標として用いた場合を例として地下水位変動図の作成手法について述べる。浸透解析モデルに与える降雨として、合計 37 個の降雨イベントを抽出した。降雨の抽出条件は、対象斜面近傍で計測された 2015 年から 2020 年の 4 月から 9 月の期間で計測された日雨量 45mm 以上の日と、鹿児島市で 2018 年から 2020 年の間に計測された日雨量 100mm 以上の日を基準に前後 3 日間の合計 1 週間の降雨を 1 つの降雨イベントとした。図-8 はある降雨イベントを浸透解析モデルに与えて得られた地下水位の経時変化の一例を示しており、図-9 はその際のスネーク曲線を示している。このようにして得られた地下水位と各時刻の時間雨量、土壌雨量指数の関係から図-10 に示す 1 つの降雨イベントに対する地下水位変動図を作成した。この地下水位変動図は、スネーク曲線上で地下水位の値を色で表現しており、暖色になるほど地下水位が高いことを意味している。このような検討を 37 個の降雨イベントで行って地下水位変動図を作成した。

(2) 本研究で用いた降雨指標

本研究では地下水位変動図に用いる降雨指標として、①時間雨量と土壌雨量指数、②時間雨量と連続雨量、③半減期 1.5h の実効雨量と半減期 72h の実効雨量をそれぞれ組み合わせたものを用いた。いずれの降雨指標も土砂災害警戒情報や通行規制発令等の基準になっている例^{11),12),13)}がある。これらの指標を用いて作成された地下水位変動図を比較することで、適切な降雨指標について考察する。なお、連続雨量は、1 つの降雨イベント内で降雨開始から 2mm/h 以下の雨が 6 時間以上経過した場合に累積を中断し、0mm にリセットした。実効雨量に関しては小杉ら¹⁴⁾と同様の式を用いた。時刻 t [h]における実効雨量

$X(t)$ [mm]は以下の式(6)で求められる。

$$X(t) = X(t-1)e^{\alpha} + R(t)e^{\alpha/2} \quad (6)$$

ここに、 $X(t-1)$ [mm]は 1 時間前の実効雨量、 $R(t)$ [mm]は時刻 $t-1 \sim t$ の間の雨量(時間雨量)である。減少係数 α [h⁻¹]は、半減期 M を用いて式(7)で計算される。

$$\alpha = \ln(0.5) / M \quad (7)$$

本研究では、各降雨イベントに対して異なる半減期を用いて実効雨量を算出し、中でも危険度評価に広く用いられる半減期 $M=1.5$ h と $M=72$ h の実効雨量を組み合わせて地下水位変動図を作成した。

(3) 異なる降雨指標を用いた地下水位変動図の比較

図-11 は①時間雨量と土壌雨量指数、図-12 は②時間雨量と連続雨量、図-13 は③半減期 1.5h と半減期 72h の実効雨量を用いた場合の地下水位変動図をそれぞれ示している。①時間雨量と土壌雨量指数(図-11)を用いた場合、土壌雨量指数の増加に伴い地下水位も上昇する様子が表現できていることがわかる。特に土壌雨量指数が 100 を上回ると地下水が発生す

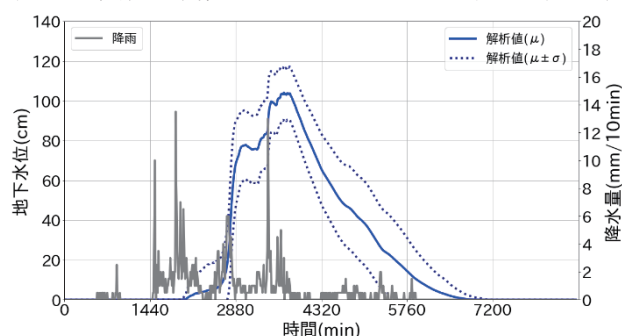


図-7 地下水位の事後分布の経時変化

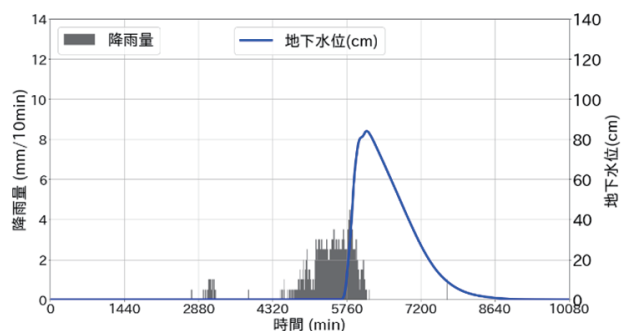


図-8 地下水位の経時変化の一例

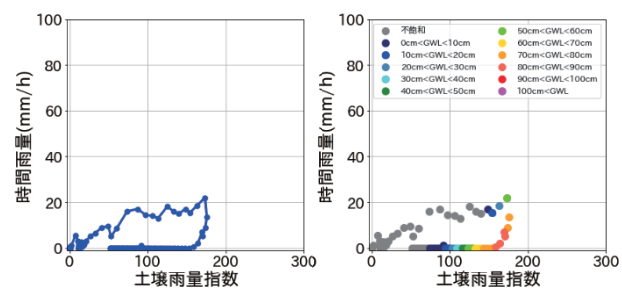


図-9 スネーク曲線

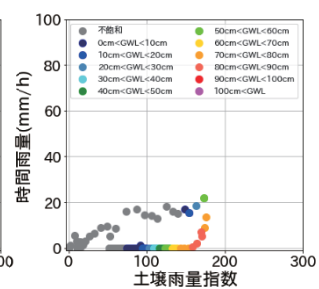


図-10 地下水位変動図

る事例が見られ、降雨終了後に土壌雨量指数が 100 を下回ると地下水がほとんど消失する傾向が確認できる。しかし、時間雨量と地下水位の間には明確な関係が確認できない。このことから、現時点の地下水位に対しては、時間雨量(短期降雨指標)よりも土壌雨量指数(長期降雨指標)の方が大きな影響を与えていることが考えられる。

一方で、②時間雨量と連続雨量(図-12)と③実効雨量(図-13)を用いた場合の地下水位変動図に着目すると、地下水位と各降雨指標の関係が不明確であることがわかる。特に、②時間雨量と連続雨量を用いた地下水位変動図は、連続雨量が最大値の際に地下水位は最大の値を示していないだけでなく、時間雨量と連続雨量が共に十分小さい値の領域でも地下水が発生していることがわかる。③実効雨量を用いた変動図においても、72h の実効雨量の値が大きくても地下水位の値は小さい場合が散見され、同図を用いて地下水位を把握することは困難である。以上のことから、対象斜面において、降雨指標として②時間雨量と連続雨量や③半減期が 72h の実効雨量を用いることは、現在の雨量情報から地下水位を概算するための地下水位変動図としては不適切であるといえる。この原因として、地下水位の挙動と連続雨量や実効雨量の挙動が対応していないことが考えられる。図-14 は連続雨量と地下水位の経時変化の一例を示している。連続雨量は、地下水位が減少していく際に地下水がまだ発生しているにも関わらず、0mm にリセットされている場合がある。これが原因となり、地下水位変動図において時間雨量と連続雨量の両方が 0 になっても地下水が発生している表現になったと考えられる。図-15 は半減期ごとの実効雨量と地下水位の経時変化の一例を示している。地下水位が下降していくのに対して、半減期 72h の実効雨量は高い値を保ちながら推移していることがわかる。これが原因で、半減期 72h の実効雨量では、地下水位を表現できないと考えられる。そこで、図-15 の中でも地下水位の経時変化と類似する挙動を示している半減期が 24h の実効雨量を長期降雨指標とした地下水位変動図を作成した。図-16 にその地下水位変動図を示す。半減期 24h の実効雨量を長期降雨指標として用いることで、地下水位挙動を十分に表現できる地下水位変動図が作成できた。

以上の結果より、対象斜面における地下水位変動図には短期降雨指標よりも長期降雨指標の影響が大きいこと、長期降雨指標にはその現場にあった降雨指標(本研究の対象斜面では土壌雨量指数か半減期 24h の実効雨量)を用いる必要があることがわかっ

た。ここで、土壌雨量指数は全国一律のパラメータを用いて算出される値であるため、他の斜面では地下水位変動図の作成に不適切となる可能性がある。その一方で、実効雨量は、小杉ら¹⁴⁾が適切な半減期を用いることで地下水位の再現精度が向上することを示しているように、その斜面に対応した半減期を

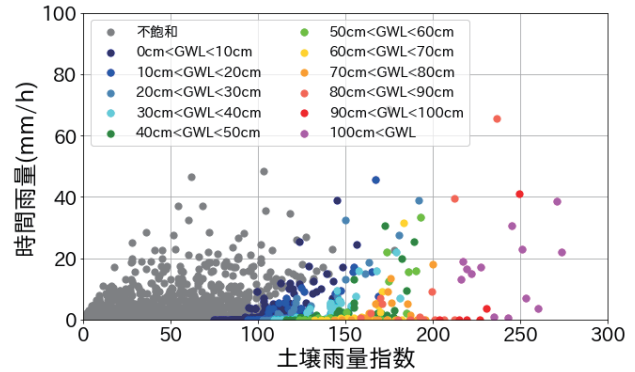


図-11 地下水位変動図(時間雨量—土壌雨量指数)

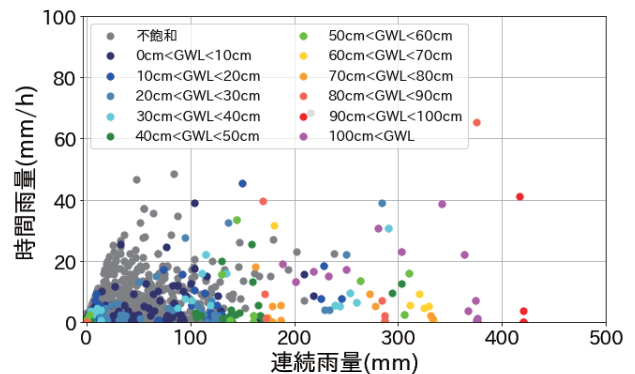


図-12 地下水位変動図(時間雨量—連続雨量)

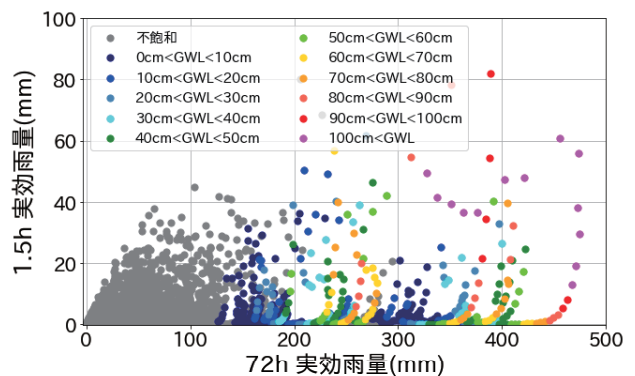


図-13 地下水位変動図(実効雨量)

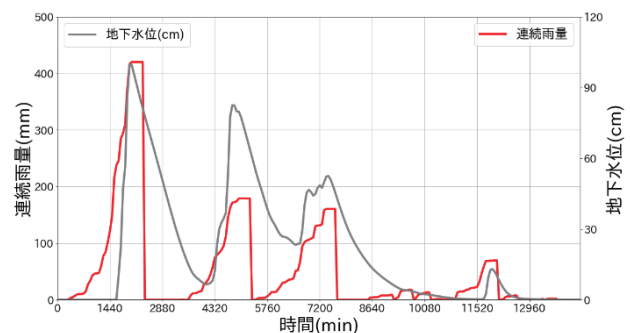


図-14 連続雨量と地下水位の経時変化の一例

設定することで、現地の地下水挙動を表現できる地下水位変動図の作成が可能だと考えられる。

5. まとめ

本研究では、対象斜面における降雨量と地下水の関係を表す地下水位変動図の作成とその変動図の作成に対する適切な降雨指標の考察を目的とし、体積含水率の現地計測データに基づいて浸透解析モデルを推定し、そのモデルに対して様々なパターンの降雨を与えることで降雨指標ごとの地下水位変動図を作成した。その結果、対象斜面における地下水位には短期降雨指標よりも長期降雨指標の方が与える影響が大きいこと、長期降雨指標として連続雨量を用いると、地下水がまだ発生しているにも関わらず連続雨量は0mmにリセットされる可能性があること、地下水位変動図に用いる長期降雨指標としては、現地斜内の地下水挙動と対応した降雨指標を用いる必要があることなどが明らかになった。今後は土質の異なる様々な斜面で同様の検討を行い、土質ごとの地下水位変動図の特徴について考察する予定である。

参考文献

- 1) 石澤友浩, 酒井直樹, 諸星敏一, 福園輝樹: 傾斜計を用いた斜面崩壊時の地中内部変位計測による崩壊予測の有用性, 日本地すべり学会誌, Vol.50, No.6, pp.256-267, 2013.
- 2) 小泉圭吾, 藤田行茂, 平田研二, 小田和広, 上出定幸: 土砂災害監視のための無線センサーネットワークの実用化に向けた実験的研究, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.74, No.1, pp.46-57, 2013.
- 3) 檀上徹, 酒匂一成, 藤本将光, 石澤友浩, 伊藤真一, 深川良一: テンシオメータの計測結果を加味した雨量指標による計測斜面での斜面崩壊予測精度向上に関する検討, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.77, No.1, pp.87-102, 2021.
- 4) 矢部満, 寺田悠祐, 野並賢, 飛田健二, 上野将司, 曾根好徳: 観測データとタンクモデルを利用した表層崩壊発生時の間隙水圧推定法について, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.73, No.2, pp.141-156, 2017.
- 5) 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 西村美紀, 檀上徹, 酒匂一成: 融合粒子フィルタを用いた境界条件を含む浸透解析モデルの推定手法の提案, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.76, No.1, pp.52-66, 2020.
- 6) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No.264, pp.87-95, 1977.

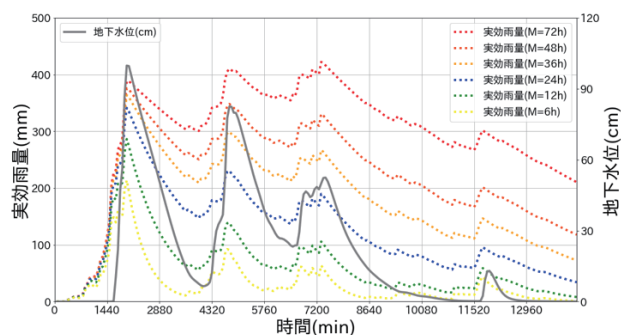


図-15 各半減期の実効雨量と地下水位の経時変化

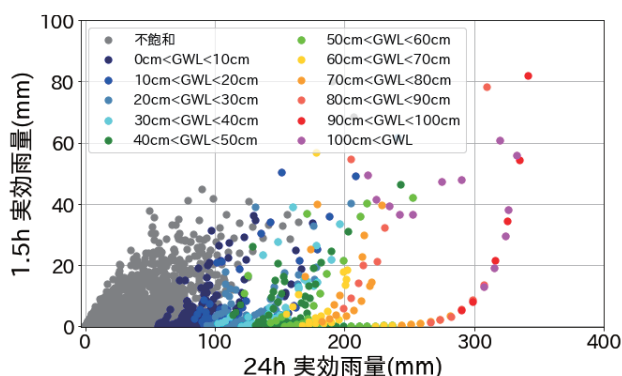


図-16 半減期 24h の実効雨量の地下水位変動図

- 7) van Genuchten, M.: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, *Research report*, No.78-WR-08, Princeton Univ., 1978.
- 8) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 9) 馬場沙也子, 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾: 斜面内への浸透能を考慮した浸透解析モデルのデータ同化, 第55回地盤工学研究発表会, -22-12-1-02-, 2020.
- 10) Nakano, S., Ueno, G., and Higuchi, T.: Merging particle filter for sequential data assimilation, *Nonlinear Processes in Geophysics*, No.14, pp.395-408, 2007.
- 11) 立原秀一: 土砂災害警戒情報の発表開始について, 日本気象学会機関紙「天気」, Vol.53, No.1, pp.43-45, 2006.
- 12) 櫻谷慶治, 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之, 音地拓: 高速道路斜面災害に対する降雨時通行規制基準値の設定方法, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.75, No.1, pp.12-30, 2019.
- 13) 梶谷宣弘, 外狩麻子, 関玲子, 友利方彦: 実効雨量指標を用いた降雨に対する運転規制方法について, 地盤工学会誌, 60-3(650), pp.20-23, 2012.
- 14) 小杉賢一郎, 藤本将光, 山川陽裕, 正岡直也, 糸数哲, 水山高久, 木下篤彦: 山体基岩内部の地下水位変動を解析するための実効雨量に基づく関数モデル, 砂防学会誌, Vol.66, No.4, pp.21-32, 2013.

(2022. 5. 30 受付)