

岩盤内地下水の挙動を考慮した表層崩壊危険度 予測モデルの開発

DEVELOPMENT OF THE RISK PREDICTION MODEL INCLUDING BEDROCK GROUNDWATER FOR SHALLOW LANDSLIDE

梶昭仁¹・小森潤二¹・横江祐輝¹・宮田英樹²

田所弾³・内田龍彦⁴・小谷隼人⁵

Akihito KAJI, Junji KOMORI, Yuki YOKOE, Hideki MIYATA,
Hazumu TADOKORO, Tatsuhiko UCHIDA and Hayato KOTANI

¹正会員 株式会社東京建設コンサルタント関西本社 (〒530-0042 大阪府大阪市北区天満橋1-8-63)

²正会員 株式会社東京建設コンサルタント中国支社 (〒732-0824 広島県広島市南区的場町1-3-6)

³正会員 前株式会社東京建設コンサルタント関西本社 (〒530-0042 大阪府大阪市北区天満橋1-8-63)

⁴正会員 博(工) 広島大学大学院教授 先進理工系科学研究科社会基盤環境工学プログラム
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

⁵学生会員 広島大学大学院 先進理工系科学研究科社会基盤環境工学プログラム (同上)

土砂災害の発生危険度が高まった時に発表する土砂災害警戒情報は、短期雨量指標である60分間雨量と長期雨量指標である土壌雨量指数を用いたスネーク曲線および過去の災害発生実績を参考に判定している。土壌雨量指数は、降雨が浸透・流出し、比較的表層の斜面内に貯留された地下水の挙動をタンクモデルにより表現しており、岩盤内の深層から比較的表層の斜面内に噴き出すように流出する地下水の流動が考慮されていないため、土砂災害の発生箇所や発生時間等の的中精度に課題がある。

本研究では、家屋が点在する都市域の小流域山地斜面の危険箇所をリアルタイムで予測することを目的に、降雨によって発生する表層の地下水の浸透・流下に加え、現地観測で確認できた降雨波形のピーク時期から遅れて発生する岩盤内の深層からの地下水の流出を考慮した。深層からの地下水の流出遅れは花崗岩流域での地下水観測結果による推定式より算出した長期実効雨量を用いて再現した。現地観測した地下水位波形を再現する斜面崩壊の危険度予測モデルを構築し、予測精度の向上が図れたことを確認した。

Key Words: bedrock groundwater, pipe flow, shallow landslide, risk prediction model, slope stability analysis

1. 序論

2014年8月、2018年7月、2020年7月、2024年9月等、近年、豪雨に伴う土砂災害が全国各地で毎年のように発生している。気候変動による降雨の増大により被害の激甚化が懸念されており、土砂流動を予測し、災害発生場所、タイミングを予測することは河川・砂防分野の喫緊の課題である。気象庁は土砂災害警戒情報を発表しているが、個々の傾斜地における地形や地質は考慮されておらず、土砂災害の誘因として雨量(60分雨量と土壌雨量指数)のみ考慮し、過去の災害発生実績を参考に危険度を判定しており、土砂災害の発生場所、発生時間等の点で課題がある。

斜面崩壊が発生した源頭部にはパイプと呼ばれる空洞が存在することが知られており、例えば北原¹⁾の土壌中

のパイプ内の流況特性に関する現地実験や内田ら²⁾のパイプ流が斜面安定に与える影響に関する研究等がある。

しかし、山地斜面において土壌内の浸透流を踏まえた雨水浸透過程の詳細なメカニズムを解明し、土砂災害の発生予測に生かすには至っていない。梶³⁾、小橋ら⁴⁾は現地観測により、花崗岩流域において降雨強度が強い場合に斜面崩壊の源頭部で地下水位が急激に上昇し、土壌が下部から湿潤することを明らかにした。このことから、表層土の下層にパイプ流が発達することにより表層土を押す強い間隙水圧が作用し、斜面が不安定化することが推測されたが、土壌内のパイプ流の発生条件やパイプ流がどのように斜面安定に影響するかは不明な部分が多い。

本研究は、山地斜面内における現地観測データに基づき、斜面崩壊の発生に影響する地下水の挙動を明らかにし、家屋が点在する小流域山地斜面を対象とした土砂災

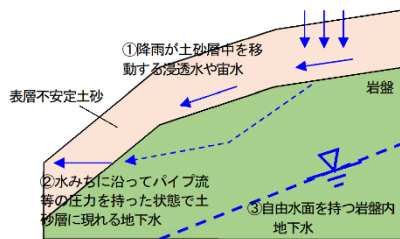


図-1 急斜面内の地下水賦存概要図⁵⁾

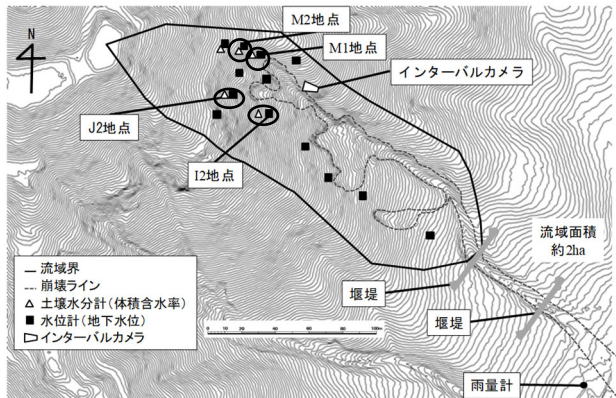


図-2 観測機器の設置場所（高松山）³⁾

害危険度予測モデルの構築を目的とする。

2. 現地観測

(1) 現地観測の概要

図-1に示すとおり山腹斜面内にある地下水は、①降雨が土砂層中を移動する浸透水や宙水、②斜面上方で岩盤内に浸透した地下水が水みちに沿ってパイプ流等の圧力を持った状態で土砂層に現れる地下水、③岩盤内地下水の3形態が考えられる。表層崩壊は深さ3m以内で生じることが多く、崩壊発生は浅層の間隙水圧の上昇を誘因とする可能性に着目して現地観測を行った。

現地観測は2014年8月豪雨により土砂災害が発生した広島市安佐北区可部町の高松山の崩壊発生斜面において2017～2019年に実施した（範囲2.1ha、崩壊発生源～谷出口の高低差約100m、平均斜面勾配約29度、観測機器設置付近の斜面勾配約40度、簡易貫入試験100箇所による土層厚最小0.4m、最大2.9m、平均1.1m）。地質は主に広島花崗岩類でマサ化した花崗岩が分布する。崩壊地源頭部付近ではパイプ流が発生したと推察される穴が複数確認できた。観測地点を図-2に示す。浸透現象の縦断方向と水平方向の変化を明らかにするため、圧力式水位計を13箇所（深度90～150cm）、TDR式土壌水分計（3深度：GL-30cm, GL-60cm, GL-90cm）を崩壊地源頭部直上流に2箇所（M1, M2）、崩壊地側方に2箇所（I2, J2）設置した。圧力式水位計は単管を用いて岩盤面まで人力で削孔し、管内に地下水が入るよう側面に穴をあけた塩ビ管を入れてその中に設置した。土壌水分計は土壌を人力で掘り、各深度に掘り起こした土砂でセンサーを埋め戻した。両機器とも地中の温度を計測している。その他、

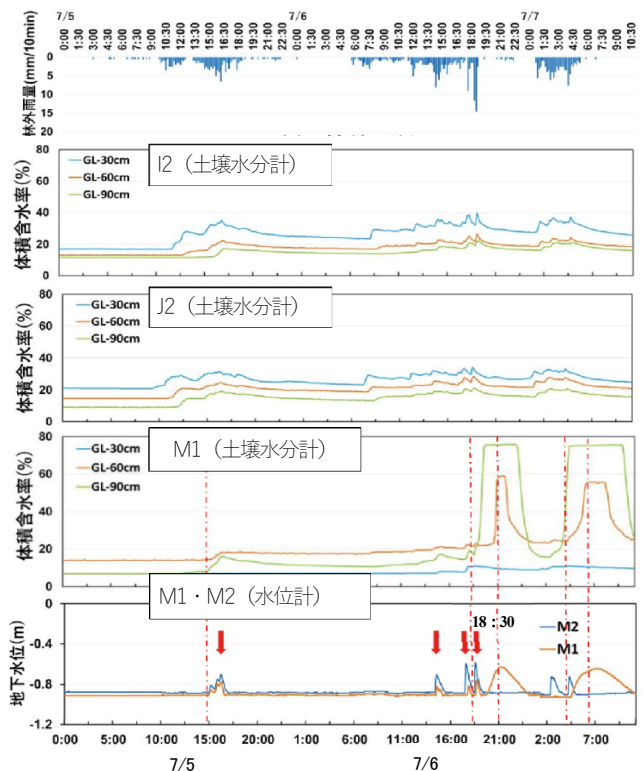


図-3 体積含水率と地下水位の時間変化（2018年7月豪雨観測）⁴⁾

林外雨量計測のため沢の下流に雨量計を設置した。

(2) 観測結果

a) 地下水位と体積含水率の関係

山地斜面内の雨水浸透と土層内に現れる地下水位の時間変化を確認するため、2018年7月5日～7日の林外雨量、地下水位と体積含水率の時間変化を図-3に示す。崩壊地源頭部から離れて位置するI2, J2地点ともに、地表面に近いほど体積含水率が高く、GL-30cmが先に反応し、GL-60cmとGL-90cmが時間経過とともに順に反応しており、鉛直下向きの浸透が発生している。一方、崩壊地源頭部直上のM1地点では降雨に対して地下水位が急上昇し、ほぼ同時刻にGL-90cmの体積含水率が上昇した。また、地下水位がGL-60cm付近まで上昇（7月6日21:00頃）するとGL-60cmの体積含水率も急上昇した。M1地点では地下水の圧力上昇の影響を受けて土壌が下から湿潤したと考えられる。M1地点の地下水位は上流側のM2地点と同様の反応（赤矢印4箇所）が見られたが、7月6日18:30頃（左から4つ目赤矢印）以降の水位変化がM2地点と異なる。M2地点で見られる降雨のピークに対する敏感な反応は無くなり、降雨のピークから遅れて緩やかに地下水位が上昇している。反応が変化した同時刻頃からインターバルカメラで源頭部直下の溪流内において濁った流水の発生が確認された（図-4）。18:30頃より前の3回の水位上昇時には流水の発生が見られなかったことから、この時発生した浸透流（パイプ流）により、細かい土粒子が輸送され、空隙が広がる等の地盤構造の変化や水みちの変化が生じた可能性があると考えられる。

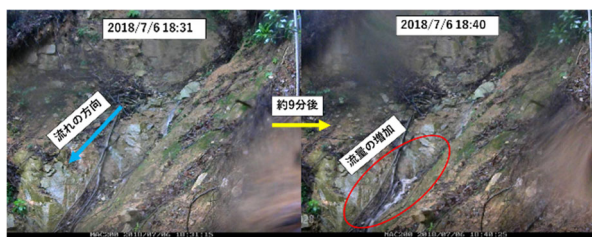


図-4 溪流内に流出するパイプ流⁴⁾

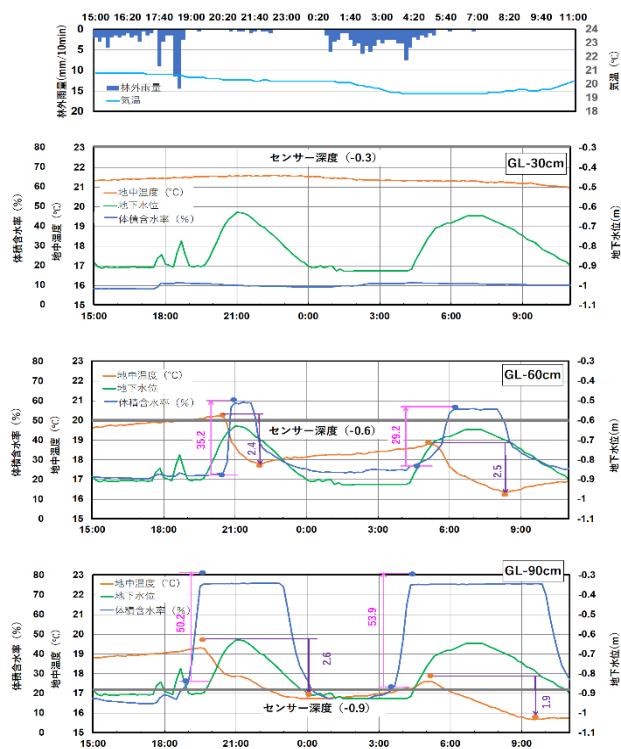


図-5 M1地点の地下水位と体積含水率、地中温度の関係（2018年7月豪雨）

山田ら⁶⁾が三重県西之貝戸川で行った現地調査と画像観測において流出孔の存在とパイプ流によって土砂が流出する現象の観測結果報告があり、高松山での観測結果も同様の現象が発生したと推察される。

b) 源頭部の地下水位、体積含水率と地中温度の関係

表層崩壊を考える上で重要な源頭部のM1地点に着目し、地下水位と体積含水率、地中温度の関係を詳細に見るため、降雨と合わせた深度別の時間変化を図-5に示す。GL-30cmでは地下水位の上昇に伴う体積含水率、地中温度の変化は見られない。GL-60cmとGL-90cmでは地下水位の上昇に伴い一山目の含水率がそれぞれ35.2%、50.2%増加し、それに反応するように急激な地中温度の低下が生じている。センサー深度と地下水位のピーク高を比較すると、地下水位の影響が最も大きいGL-90cmは25cm程度高く、GL-60cmは5cm程度下回り、GL-30cmは30cm以上回っており、センサー深度と地下水位の差が含水率の相違になっていると考えられる。なお、2017年、2018年に観測した降雨のうち、130mm未満の降雨では急激な温度低下は確認できなかった。

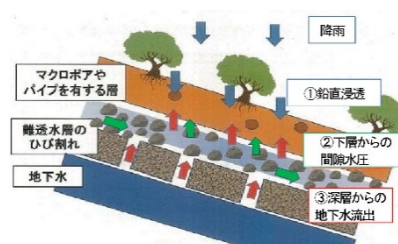


図-6 現地観測から考えられる地下水の挙動特性

3. 地下水利特性の分析

(1) 地下水の挙動

対象斜面内の水の流れは、温度上昇となる雨水の鉛直下向き浸透、温度低下となる深層からの地下水の噴出および間隙に蓄えられ温度変化が少ない水の3形態が存在すると考えられる。また、累加雨量の規模により、地下水の挙動変化には図-6に示す3段階があると考えられる。①累加雨量が比較的小規模な段階では、降雨が鉛直方向に浸透し、夏季の観測の場合は降水温度が地中温度より高く、地中の温度が降水の浸透で上昇する。②中規模な段階では、浸透した水が難透水層上に沿って流下する。③大規模な段階では、中規模の段階で発生したパイプ流に加えて、地下の深い位置の冷たい水が、難透水層に存在する隙間から難透水層より上層に噴出することで地中の温度が地下水の影響で低下する。

(2) 実効雨量と地下水位の関係

対象斜面内の地下水の挙動には異なる流出特性があると想定されることから、2018年7月豪雨時に地下水位を観測した高松山の崩壊源頭部に位置するM1、M2地点を対象に降雨に対する地下水位上昇と実効雨量の関係を確認した。実効雨量は式(1)で示す。

$$D(t) = R(t) \cdot \Delta t + \alpha \cdot D(t - \Delta t) \quad (1)$$

ここで、 $D(t)$ は時刻 t における実効雨量、 $R(t)$ は時刻 t における雨量、 α は逓減係数である。また、逓減係数は半減期 T を用い、 $\alpha = 0.5^{\Delta t/T}$ と表すことができる。 $\Delta t = 1$ 時間、 $R(t)$ を時間雨量とするが、 $D(t)$ は1時間ごとに計算した。前期降雨を考慮するために十分な期間として各降雨イベント発生前月の1日から計算した。地下水位の上昇に対応する半減期を求めた結果を図-7に示す。赤の点線で示す地下水位の6つのピークは1.5時間半減期実効雨量の波形と発生タイミングが概ね対応することから、①②に対応する鉛直下向きの浸透と難透水層上の流下は短期的な流出特性を持つことがわかる。また、長期実効雨量を算出する半減期は小谷ら⁷⁾が花崗岩流域での地下水の観測結果より得た推定式(2)、(3)を用いた。

$$T_L = 14.908Z \quad (2)$$

$$T = T_L / 0.2874 \quad (3)$$

ここで、 T は半減期、 T_L は遅れ時間、 Z は地表から地下水面までの距離である。地表から地下水面までの距離はM1地点で簡易貫入試験により計測した土層厚2.29mと仮

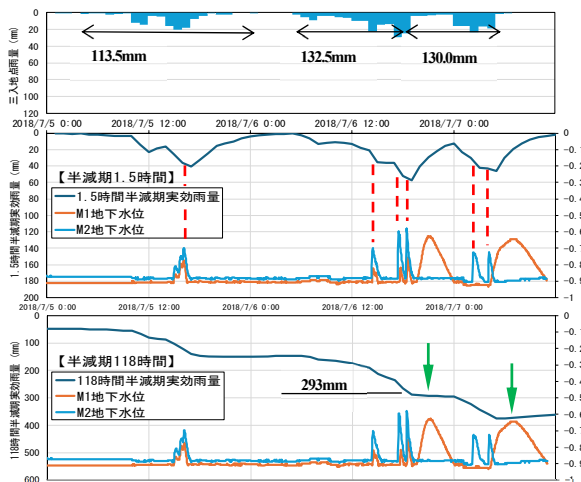


図-7 地下水位と実効雨量の関係（2018年7月豪雨）

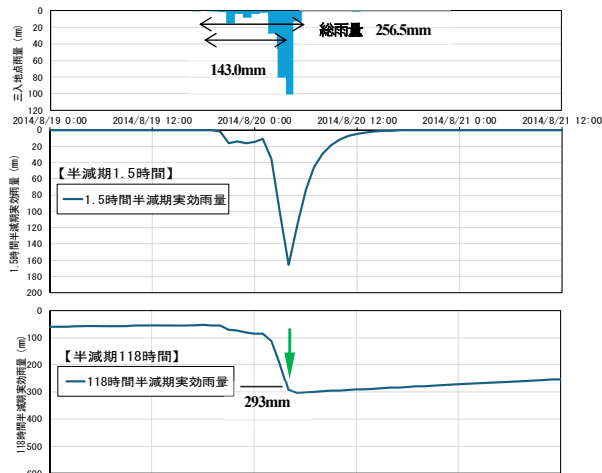


図-8 地下水位と実効雨量の関係（2014年8月豪雨）

定し、半減期は118時間とした結果、緑の矢印で示すM1地点で遅れて発生する地下水位の上昇と実効雨量の波形が概ね対応することから、③に対応する深層からの地下水の上昇は長期的な流出特性を持つことがわかる。また、対象斜面で土砂災害が発生した2014年8月豪雨による地下水位と実効雨量の関係を図-8に示す。

2018年7月豪雨と同様に半減期を118時間とした実効雨量は降雨のピークが発生した8月20日4:00に293mmとなった。ピーク雨量発生前の累加雨量は143.0mmであった。2018年7月豪雨で遅れて発生した一山目の地下水位上昇ピーク時の実効雨量も293mmであり、地下水位上昇前の累加雨量は130mmを超過している。累加雨量130mm以上かつ長期実効雨量290mm以上の条件において深層からの地下水位の上昇が発生したと仮定すると、2014年8月豪雨時にも深層からの地下水位の上昇が発生していたと推察される。

4. 表層崩壊危険度予測モデルの開発

(1) 予測モデルの構築

a) 斜面崩壊予測モデルの考え方

斜面の危険度を評価する手法として、H-SLIDER法⁸⁾

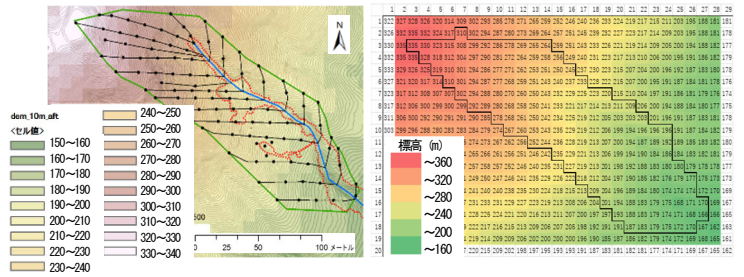


図-9 対象流域標高モデル

図-10 メッシュ分割図

があり、無限長斜面に斜面勾配と平行な水位をもつ地下水水面を仮定し、土層を不安定化させる誘因は浸透した降雨量から算出した間隙水圧のみを想定している。

前述した高松山の崩壊地源頭部M1地点では累加雨量の閾値130mmを越えると岩盤内にある深層からの地下水の上昇発生が現地観測で確認できており、遅れて発生するピークのタイミングは長期実効雨量で概ね再現できている。そのため、降雨量や降雨波形に連動した間隙水圧のみを用いた斜面崩壊の危険度評価手法では、深層からの地下水が流出するような降雨規模において、危険度評価に用いる間隙水圧を過小評価している事象があると考えられる。よって、本研究では、降雨のピークとは遅れて発生する深層からの地下水の流出タイミングとその流出量を考慮した斜面崩壊予測モデルを構築した。

b) 予測モデルの概要

斜面崩壊の危険度を時系列で予測するため、現地観測を実施した高松山の山腹斜面の数値標高モデル（図-9）を用いて、対象流域を10mメッシュに区分（南北方向17メッシュ、東西方向25メッシュ、斜面内計177メッシュ）した平面二次元モデルを構築した（図-10）。

表層の斜面内の地下水が浸透・流動することによって発生する間隙水圧の算出方法は、降雨量をメッシュ毎に直接与え、メッシュ内の貯留水量がメッシュ間を浸透・流下する流速はダルシー則に従うものとした。

$$v = Ks \cdot I \quad (4)$$

$$u = Q \cdot \gamma w / Ks \cdot I \quad (5)$$

ここで、 v は流速（m/s）、 Ks は透水係数（m/s）、 I は動水勾配、 u は間隙水圧[kN/m²]、 Q はメッシュ内を流下する単位幅あたりの水量（m³/s）、 γw は水の単位体積重量[kN/m³]である。岩盤面勾配は不明であるが、現地で計測した土層厚は0.4m～2.9mで平均1.1mであり、局所的に差はあるものの流域全体で土層厚の差は小さいこと、現地の斜面勾配は平均29度、崩壊源頭部付近で約40度と急勾配でメッシュ間の水深差に比べて支配的であることから、予測モデルではメッシュ地点ごとの地表面勾配を I として用いた。また、透水係数 Ks は現地試料の室内試験結果である0.013cm/sを用いた。

深層からの地下水が表層に流出する現象は、表層の貯留水量に深層からの推定流出量を加算するモデルとした。長期実効雨量を用いることで遅れて発生するタイミングを考慮し、推定流出量は岩盤の亀裂間隔や流入速度が不

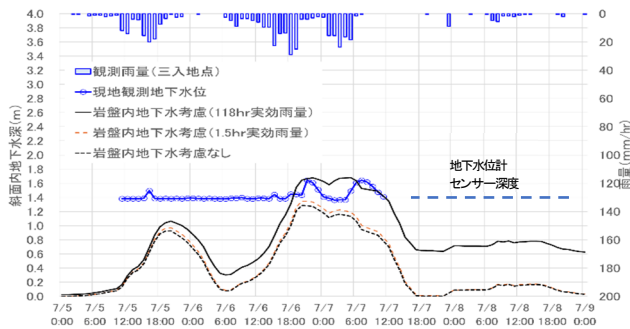


図-11 M1 地点地下水位検証結果 (2018 年 7 月豪雨)

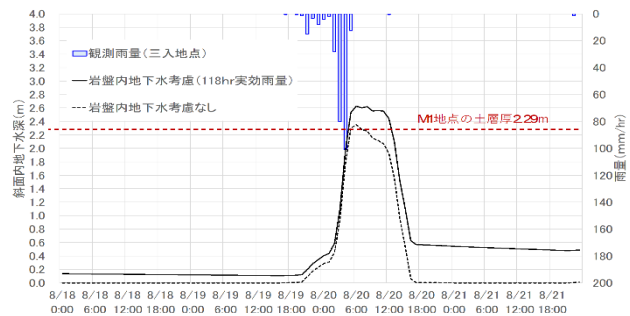


図-12 M1 地点地下水位検証結果 (2014 年 8 月豪雨)

明であることから、長期実効雨量から算出する流出量に係数をパラメータとして乗じ、現地観測で得られた地下水位を再現することとした。

(2) 地下水位の再現

構築した予測モデルを用いて、2018年7月豪雨を対象に、対象流域の崩壊地源頭部に位置するM1地点の地下水位を再現した結果を図-11に示す。深層からの地下水の流出量を考慮しない場合は、地下水位計のセンサー深度まで地下水位が上昇しない結果であったが、長期実効雨量の算出に用いる半減期を118時間として流出量を加算し、深層からの地下水の流出量を考慮した場合は、現地観測で得られた7月6日21時、7日7時のピーク地下水位と発生時刻の再現性が向上することを確認した。なお、長期実効雨量から算出する流出量に乘じた係数は現地観測地下水位の再現性が高い0.02を用いており、小谷ら⁹⁾が広島県内の花崗岩流域における研究で使用したパラメータ0.08と同程度のオーダーとなっている。また、対象斜面で崩壊が発生した2014年8月豪雨を対象に、2018年7月豪雨と同様の半減期、係数でM1地点の地下水位を算出した結果を図-12に示す。2014年8月豪雨時は短時間に集中した降雨波形であったため、深層からの地下水の流出は降雨のピークとほぼ同時に発生し、土層厚程度までの地下水位の上昇が、地下水の流出を考慮することでさらに約0.3m上昇する結果であった。

(3) 危険度予測結果

a) 危険度評価の考え方

構築した予測モデルを用いて、斜面崩壊の危険度を評価した。危険度の指標は、体積含水率と斜面の安全率の2項目を評価した。体積含水率は、現地で計測した各

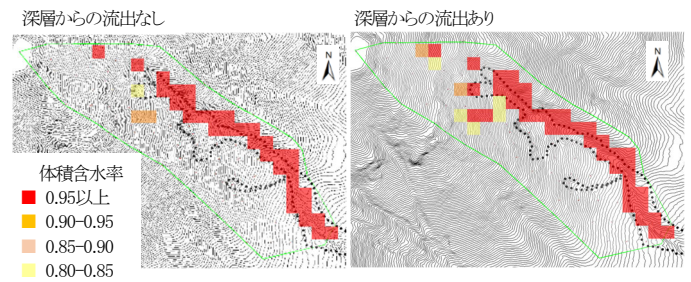


図-13 危険度予測 (体積含水率, 2018 年 7 月豪雨)

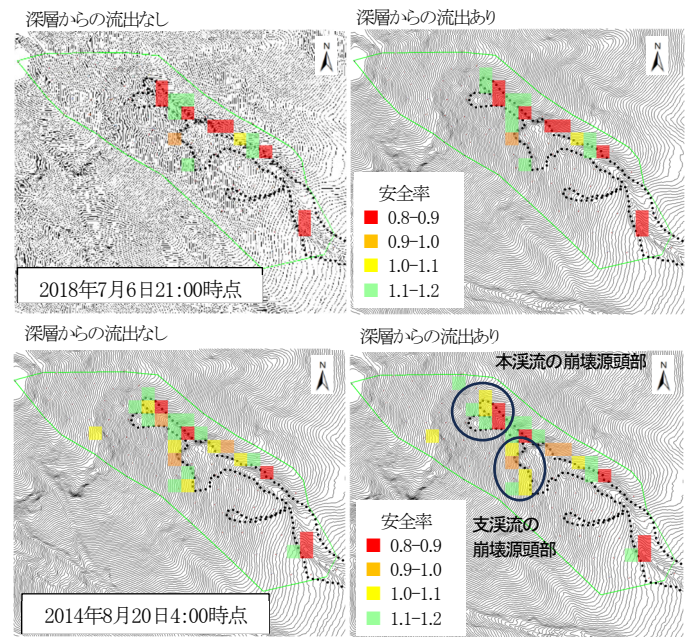


図-14 危険度予測 (安全率)

メッシュの土層厚と岩盤上の地下水深から算出した。

$$\theta(t) = Vw(t)/(h \cdot A) \quad (6)$$

ここで、 θ は体積含水率、 Vw はメッシュ内の地下水の体積 (m^3)、 h はメッシュ内の土層厚 (m)、 A はメッシュ面積 (m^2) である。

斜面の安全率は、無限長斜面安定解析⁸⁾を改良した以下の式より算出した。

$$Fs(t) = \frac{c + (\gamma h \cos^2 I - u(t) - u_d(t)) \tan \phi}{\gamma h \cos I \cdot \sin I} \quad (7)$$

ここで、 $Fs(t)$ は時刻 t における安全率、 c [kN/m^2]は粘着力、 γ は土層の単位体積重量[kN/m^3]、 h は土層厚[m]、 I は斜面勾配[$^\circ$]、 u は間隙水圧[kN/m^2]、 u_d は深層からの地下水流出による間隙水圧[kN/m^2]、 ϕ は土の内部摩擦角[$^\circ$]であり、現地観測で得られた土質強度 ($c=8.4$, $\phi=37.6$)、単位体積重量データ ($\gamma_w=9.8$, $\gamma_s=19.2$, $\gamma_r=17.3$)を用いた。

b) 危険度予測結果

深層からの地下水流出の有無により評価した斜面内の体積含水率を図-13に示す。2018年7月豪雨における体積含水率は崩壊地源頭部付近と谷筋が高く、深層からの地下水流出ありでは源頭部付近の値が高くなる。

安全率の平面的な分布を図-14に示す。2018年7月豪雨時と2014年8月豪雨時それぞれの安全率低下のピーク付

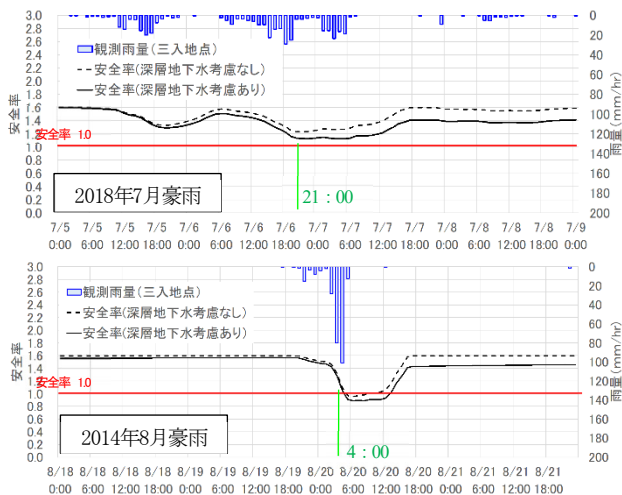


図-15 斜面の安全率 (M1 地点)

近の時刻の状況を示す。崩壊の発生がなかった2018年7月豪雨時と比べて、崩壊が発生した2014年8月豪雨時の方が本溪流と支溪流の崩壊発生地点と考えられる源頭部付近で安全率が低くなっていることから、予測モデルの平面的な妥当性が確認できた。深層からの地下水の流出を考慮することで崩壊地源頭部付近の危険度がさらに高くなった。M1地点における斜面の安全率の時系列変化を図-15に示す。2018年7月豪雨は深層からの地下水の流出を考慮しても安全率1.0を下回らなかったが、2014年8月豪雨では1.0を下回る結果となり、土砂災害が発生していたことを再現できた。ただし、1.0を下回る時刻は土砂災害が発生したとされる8月20日3時～3時半より1時間以上遅れた5時となっていた。

5. 結論

2018年7月豪雨時に崩壊斜面の源頭部において地下水位が急激に上昇し、その影響を受けて土壌が下層から湿潤し飽和状態となった。源頭部に設置したインターバルカメラの画像により、地下水位の急激な上昇とほぼ同時刻に、パイプ流によって源頭部付近の土粒子が下流に輸送され、その後に源頭部縦断方向の地下水流れ (M2からM1への浸透流の時間変化等) の水理特性に変化があったことを明らかにした。また、土壌内の温度が緩やかに上昇する地表からの鉛直浸透とは逆に、地下水位上昇時はパイプ流と温度の低い深層からの水により急激な温度低下を示すことが確認できた。これにより地中の温度変化から地下水挙動を検討できることを示した。地下水と実効雨量の比較から短期実効雨量はパイプ流による地下水位上昇、長期実効雨量は深層からの地下水位上昇を考慮するものと考えた。長期実効雨量に対して遅れて起こる水位上昇はパイプの通水能力の限界を超えることで生じる地盤構造の変化に影響を受けて温度の低い深層からの地下水が上昇する現象が起きると推測される。対

象地区では深層からの地下水位上昇の発生に累加雨量と長期実効雨量の閾値があると推察されたが、他の花崗岩流域においても同様の閾値となるか解明が必要である。

この地下水の流動メカニズムによって起こる家屋近傍の斜面崩壊の危険箇所をリアルタイムで予測することを目的に、地下水の流動機能を組み入れた表層崩壊危険度予測モデルを開発した。今回の予測モデルは、岩盤内地下水位と相関性が高い実効雨量の半減期を考慮した上で、地下水の流動をモデル化し、斜面の安全率をもとに表層崩壊の危険度をリアルタイムで判定するものである。平面的な危険区域の予測は一定の精度が得られたが、今後は崩壊が発生する時刻を含めた時系列的な予測精度の向上を目的に、パイプ流の発生に伴う土層内流下速度や流量の変化、パイプ流発生位置やその消長等の地下水の流動現象の解明を更に進め、表層崩壊危険度予測モデルの改良を図っていく。

参考文献

- 1) 北原曜：森林土壌におけるパイプ流の特性，水文・水資源学会誌，Vol.5，No.1，pp.15-25，1992.
- 2) 内田太郎，小杉賢一郎，大手信人，水山高久：パイプ流が斜面安定に与える影響，水文・水資源学会誌，Vol.9，No.4，pp.330-339，1996.
- 3) 梶昭仁，小森潤二，宮田英樹，小橋力也，内田龍彦，河原能久：斜面崩壊源頭部における豪雨時の水みちの現地観測，2019年度砂防学会研究発表会概要集，pp.533-534，2020.
- 4) 小橋力也，北真人，内田龍彦，梶昭仁，宮田英樹，河原能久：土石流危険度予測のための源頭部における豪雨時の雨水浸透過程に関する研究，河川技術論文集，第25巻，pp.669-674，2019.
- 5) 梶昭仁，小森潤二，宮田英樹，内田龍彦，小谷隼人，田所弾，横江祐輝：表層崩壊発生予測のための地下水理特性に関する研究，河川技術論文集，第30巻，pp.447-452，2024.
- 6) 山田孝，森健司，沼本晋也，林拙郎：砂防えん堤施工時の溪床堆積横断面を活用した土石流発生直前までの伏流水流出変化，表面流発生プロセスの観測，砂防学会誌，Vol.62，No.3，pp.30-38，2009.
- 7) 小谷隼人，内田龍彦，井上卓也，鳩野美佐子，梶昭仁，小森潤二，宮田英樹，海堀正博：山地斜面における岩盤内地下水位の年変動と強雨時の表層地下水位との連動特性，河川技術論文集，第29巻，pp.569-574，2023.
- 8) 内田太郎，盛伸行，田村圭司：表層崩壊に起因する簡易な土石流発生危険度調査・評価手法，土木技術資料，50-9，pp.20-25，2008.
- 9) 小谷隼人，内田龍彦，井上卓也，鳩野美佐子，梶昭仁，小森潤二，宮田英樹，中野寛隆，金藤将啓，海堀正博：山体の岩盤内地下水位の長期変動と流域の降雨流出特性，河川技術論文集，第30巻，pp.543-548，2024.

(2025. 4. 3受付)