# 表層崩壊発生予測のための 地下水理特性に関する研究 STUDY ON GROUNDWATER CHARACTERISTICS FOR PREDICTION OF SHALLOW LANDSLIDES

## 梶昭仁<sup>1</sup>・小森潤二<sup>1</sup>・宮田英樹<sup>2</sup>・内田龍彦<sup>3</sup> 小谷隼人<sup>4</sup>・田所弾<sup>1</sup>・横江祐輝<sup>1</sup> Akihito KAJI, Junji KOMORI, Hideki MIYATA, Tatsuhiko UCHIDA, Hayato KOTANI, Hazumu TADOKORO and Yuki YOKOE

<sup>1</sup>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)
<sup>2</sup>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)
<sup>3</sup>正会員 博(工)広島大学大学院准教授 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)
<sup>4</sup>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)

2018年7月豪雨では、長期・広範囲に渡り降雨が続き、家屋倒壊等の土砂災害が各地で発生した.現在 の土砂災害警戒情報は、個々の斜面における地形・土壌の情報が考慮されていないため、家屋が点在する ような地域における細やかな危険度評価としては不十分である.この問題を解決するためには山地斜面に おける地下水の挙動を明らかにし、斜面崩壊過程を危険度評価に反映する必要がある.本研究では山地斜 面での岩盤内・表層地下水位の降雨に対する挙動特性を明らかにすることを目的に、岩盤内・表層地下水 位の観測を実施した.2018年7月豪雨では斜面崩壊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ること、及び地下水位上昇時は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を明らかにした.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.この浸透・流動メカニズムによって起こる斜面崩壊の危険箇所をリアルタイムで予測するた め、表層崩壊危険度予測モデルに地下水の浸透・流動機能を組み入れる手法を提案した.

Key Words: pore water pressure, pipe flow, ground water level, ground water temperature, shallow landslide

## 1. 序論

2014年8月,2018年7月,2020年7月等,近年,豪雨に 伴う土砂災害が全国各地で頻発している.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,災害発生の場所,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なく,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<sup>11</sup>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<sup>21</sup>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<sup>3</sup>,小橋ら<sup>4</sup>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2018年7月豪雨等の現 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を対象と した土砂災害危険度予測モデルの構築を目的とする.



図-1 急斜面内の地下水賦存概要図

### 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(観測範囲2.1ha, 崩壊発生源 から谷出口までの高低差約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). また, 2020~2023年は2018年7月西日本豪雨時に土石流 が発生した東広島市鏡山2丁目のががら山の非崩壊斜面 で実施している<sup>5,6)</sup>(観測範囲0.8ha, 高低差約60m, 平均 斜面勾配約23度,観測機器設置付近の斜面勾配約30度, 簡易貫入試験15箇所による土層厚最小0.7m,最大3.9m, 平均1.5m). 2つの山の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. それぞれの観測地点を図-2 ~3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、高松山では圧力式水位計を13箇所(深 度90~150cm), TDR式土壤水分計(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,林外雨量 計測のため沢の下流に雨量計を設置した.また,ががら 山では,平面的な観測解像度を向上させるため,2022年 に斜面の尾根・谷筋に対して縦断方向と水平方向に圧力 式水位計を6箇所(W1~W6),簡易貫入試験孔に埋設 した塩ビ管内に地中温度計を8箇所設置した.

## (2) 高松山の観測結果

#### a) 体積含水率と下層の地下水位の関係





2018年7月5日~7日の林外雨量、体積含水率と地下水 位の時間変化を図-4に示す.崩壊地源頭部から離れて位 置する12,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



図-5 渓流内に流出するパイプ流 発生していることがわかる.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M1地点上流側の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 点と異なっている. M2地点同様の降雨のピークに対す る敏感な反応が無くなり、降雨のピークから遅れて緩や かに地下水位が上昇する反応となった.反応が変化した 同時刻頃から源頭部直下の渓流内で濁った流水の発生が インターバルカメラで確認された(図-5).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. 即ち, 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推察される. b) 地中温度の変化

土壌水分計で計測した3深度の温度変化を図-6に示す. 12, J2地点は、夏季の観測のため、地中より温度が高い 雨水が鉛直下向きに浸透することで温度が上層から下層 の順に伝わっている.一方、M1地点では、GL-90cmに おいて、降雨のピークに対応する地下水位の上昇時には 地中の温度が上昇する傾向にあるが、降雨のピークから 遅れて上昇した地下水に対して、GL-90cm、GL-60cmの 順に地中の温度が急激に低下し、7月7日の9時頃には 15.6℃まで温度が下がった.この時、大気圧計で計測さ れた温度は19.5℃であった.図-6の最下段に、圧力式水 位計により計測されたM1、M2地点の地下水位と温度変 化を示す.M1地点の温度変化は土壌水分計のGL-90cm の地中温度の変化と類似している.

ここで、降雨条件による地中の温度変化の検討を行う ため、前年の2017年観測データと比較した.比較した降 雨は2018年7月豪雨の現象と同様に、下層からの浸透現 象が土壌水分計で確認できた2017年9月11日から13日の データである.累積雨量は林外雨で104mm、60分の最大 算雨量は39.5mm/hrである.2018年7月豪雨と比べ、降雨 強度はやや強いが、累積雨量は3分の1以下である.図-7 より、降雨に対して地下水位が急激に上昇し、その影響 を受けて土壌が下から湿潤したことが分かる.しかし、 2018年7月豪雨時に観測した地中温度の急激な低下は見



図-7 地下水位と地中温度の時間変化(2017年観測, M1地点) られなかった.2017年,2018年に観測した降雨のうち, 2018年7月豪雨に次ぐ2番目の累加雨量は130mm程度で あったが,130mm未満の降雨では急激な温度低下は見ら れなかった.

これらの観測結果から、2018年7月豪雨時は地中より

温度の高い降雨が浸透し、パイプ流となって土壌を下か ら湿潤することで起きた温度上昇に加え、さらに深い場 所(水の出入りが激しい岩など)に蓄えられていた温度 の低い地下水が下から噴き出したと考えられる.

#### (3) ががら山の観測結果

ががら山における既往の観測<sup>5,6</sup>では,2022 年度まで に設置した6箇所の表層地下水位計(深度約23~151cm) のうち,2021年8月の降雨イベント時にE 地点(深度 151cm)で深層の地下水の上昇が確認できている<sup>5)</sup>.近 隣の雨量観測地点(広島大学総合科学部A棟屋上)で雨 量ピーク時の累加雨量は175mmであった.

2022年に追加設置した6箇所(W1~W6)の地下水位 計のうち,2022年6月~2023年10月の比較的水位変動が 大きかった地点の地下水位・地中温度を図-8に示す.い ずれも外気温に順方向で連動する水温変化,夏場は上昇, 冬場は下降する現象が見られた.理由として,この2年 間で極端に大きな豪雨がなく,深い場所に蓄えられてい た温度の低い地下水が下から噴き出す現象は生じなかっ たことが考えられる.この期間における時間雨量の最大 は2022 年9 月1 日の44.5mm/hr,累加雨量の最大は2022 年9 月18 日23 時-19 日18 時の20時間で121mm(時間 最大25.5mm/hr)であった.

### (4) 土砂崩壊特性の留意点

本研究の現地観測手法では、単管を岩盤面まで打ち込 んだ観測孔を面的に多く配置して、土砂崩壊に影響する 土砂層中の地下水を観測した. 飽和地下水の上昇ですべ り面の間隙水圧が線形的に上昇して安全率が低下する地 すべり現象とは異なり、平常時の不飽和の土砂崩壊では、 以下のように複数の安全率低下要因が考えられる.

- ・降雨による土砂層の飽和
- ・飽和過程での土塊重量増加とサクション低下
- ・岩盤層の飽和による水みちからの湧出
- ・パイプ流の圧力よる土塊内の不規則な応力増加
- ・土砂層の飽和による自由水面の形成と間隙水圧上昇

このように複雑な要因がある土砂崩壊においては、点の情報だけでなく空間解像度的な情報も重要であると考えられる。崩壊が生じるような大雨の際にどのような水位変化と温度変化が生じるのか留意する必要がある。

## 3. 地下水理特性の考察

#### (1) 地下水の挙動

現地観測により、対象斜面内では、降雨強度が小さな 降雨であっても累加雨量が多い場合、深層の地下水位が 上昇し、降雨終了後も斜面内では一定時間地下水位が上 昇していることを示した.高松山では累加雨量130mm未 満の降雨では急激な地中温度の変化は確認できてなく、 ががら山においても同様の傾向が確認できた.





図-9 現地観測から考えられた地下水の挙動特性

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-9に示す3つの段階があると考えられる.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.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し、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 で低下していると考えられる.

#### (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 ことを見るため、実効雨量と地下水位の関係を確認した。 2018年7月豪雨時に地下水位を観測した高松山の崩壊源



図-10 地下水位と実効雨量の関係

頭部に位置するM1, M2地点を対象に降雨に対する地下 水上昇の時間遅れを確認した.実効雨量は式(1)で示す.

 $D(t) = R(t)\Delta t + aD(t - \Delta t)$ (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、aは逓減係数である.また、逓減係数は半 減期Tを用いれば、a=0.5ΔtTと表すことができる.Δt=1 時間、R(t)を時間雨量とするが、D(t)は10分ごとに計算し た.地下水位の上昇に対応する半減期を求めた結果を図 -10に示す.短期実効雨量を半減期1.5時間とすることで、 実効雨量の波形と赤い点線で示す地下水位の6つのピー クが対応できた.また、長期実効雨量を半減期45時間と することで、M1地点で遅れて発生する地下水位の上昇 に概ね対応した.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だと考えられる. 実効雨量とM1地点で遅れて発生する地下水位上昇の ピーク時間差は、地下水の圧力が上流から下流へ伝わる 時間遅れがあると考えられる.

## 4. 表層崩壊危険度予測モデルの構築

## (1) 従来のH-SLIDER法による危険度評価

地下水位を定常状態と仮定したH-SLIDER法<sup>7</sup>を用いて 2014年8月豪雨により土砂災害が発生した高松山の現地 斜面を対象に危険度評価を実施した.

斜面の安全率(Fs)は図-11に示す断面の模式から無限長斜面安定解析の式より,以下の式で求める.

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

ここで、Fs(t)は時刻tにおける安全率、 $c[kN/m^2]$ は粘着 力、 $\gamma$ 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 $[kN/m^2]$ 、 $\phi$ は土の内部摩 擦角 $[^\circ]$ とする.

H-SLIDER法では、間隙水圧が定常状態で、地下水の 流れはダルシー則に従い、無限長斜面安定解析で安全率 が1.0となった時点で表層崩壊が発生すると仮定し、以



 Image: Solution of the sector of the sect

図-12 H-SLIDER 法による危険度評価結果





下の式により表層崩壊発生危険降雨強度 ( $r_c$ ) を求めた.  $r_c = \frac{K_s \tan I \cos I \{c - \gamma_t h \cos I (\sin I - \cos I \tan \phi)\}}{a \{\gamma_w \cos I \tan \phi + (\gamma_s - \gamma_t) (\sin I - \cos I \tan \phi)\}}$ (3)

ここで, Ksは飽和透水係数[m/s], aはある地点より上 流側の単位長さあたりの集水面積[m<sup>2</sup>/m], y<sub>w</sub>は水の単位 体積重量[kN/m<sup>3</sup>], y<sub>s</sub>, y<sub>i</sub>はそれぞれ, 飽和状態, 不飽和 状態の土層の単位体積重量[kN/m<sup>3</sup>]である.

数値標高モデルを用いて対象流域を10mメッシュに区 分し、メッシュごとの標高データから地表面勾配と集水 面積を設定した.現地観測で得られた土層厚、土質強度 (*c*=8.4、*φ*=37.6)、単位体積重量データ(y<sub>w</sub>=9.8、y<sub>z</sub>=19.2、 y=17.3)を解析メッシュ毎に与え、基本となる物理モデル を構築した.図-12に示す崩壊発生危険降雨強度の算出 結果は崩壊地源頭部で約70~90mm/hrで判定され、推定 土砂災害発生時刻に斜面近傍の雨量観測所で観測された 時間雨量80mm/hrと同程度となった(図-13).ただし、 今回構築した物理モデルでは、飽和透水係数が室内試験 値の10倍(0.13cm/s)を用いないと再現できない結果で あった.



図-14 地下水による水平方向の圧力仮定図

## (2) 地下水の流動を考慮した新たな予測モデル手法

2014年8月豪雨時の斜面崩壊発生危険度を評価したH-SLIDER法で飽和透水係数が大きくなった要因は,現地 観測結果から推察されたパイプ流や深層地下水の噴き上 げなどの地下水の流動の影響を受けていると考えられ, 危険度評価モデルの改良が必要である.

H-SLIDER法では無限長斜面に斜面勾配と並行な水位 をもつ地下水を仮定し、土層を不安定化させるのは鉛直 方向に持ち上げようとする間隙水圧だけと想定している.

高松山の崩壊地源頭部M1地点では累加雨量が閾値を 越えると岩盤内にある深層地下水の上昇が確認できたが, 上方に位置するM2地点では斜面勾配に応じた上昇を確 認できなかった.この観測結果から,崩壊発生の誘因は 鉛直方向の水圧ではなく,水平方向に土層を押す力があ るとして仮定した.岩盤内の深層の地下水は水頭差に起 因する圧力をもっており,ある閾値以下では亀裂間の水 みちを通って流下しているが,閾値を超える累加雨量が 発生した場合,岩盤内だけでは流下できず,水平方向に 土層を押す力となる.このことを取り入れた手法として, 図-14に示す概要図をもとに無限長斜面の安定解析の式 (2)を改良すると,式(4)のとおりとなる.

Fs(t)= すべり面に抵抗しようとする力(抵抗力) すべり面に沿って滑ろうとする力(滑動力)+水平方向の圧力

$$Fs(t) = \frac{c + (\gamma h \cos^2 I - u(t))tan\Phi}{\gamma h \cos I \cdot \sin I + P(t)}$$
(4)

ここで、P(t)は土層内に噴き出す地下水の水平方向圧力 [kN/m<sup>2</sup>]である.水平方向の圧力P(t)は、亀裂間からの地 下水の噴き出し量に依存するため、予測モデルへの組み 込みには、水深と動水勾配及び間隙の大きさや数に関係 する係数の設定、水平方向の圧力が発生するタイミング として累積雨量等の閾値の設定が必要である.加えて、 上記のモデルを適用するためには、土層内の複雑な間隙 構造の推定が課題である.

## 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 の地下水が上昇する現象が起きると推測される.

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, H-SLIDER法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提案した.今回の予測モデ ルの評価は空間的な崩壊箇所のみに基づいて行ったもの である.今後はリアルタイムの予測精度を確保できるよ うに,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

- 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.
- 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) 笹谷慎之介,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 と表層地下水の変動特性に関する研究,第 11 回土砂災害 に関するシンポジウム論文集,vol.11, pp.179-184, 2022.
- 6)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.
- 7) 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.

(2024. 4. 3受付)