

地質境界が存在する斜面での地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険度評価手法の提案

THE PROPOSAL OF THE RISK ASSESSMENT METHOD FOCUSING ON THE GEOLOGICAL STRUCTURE AND THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS ON THE SLOPE WHERE THE GEOLOGICAL BOUNDARY EXISTS

榎原 伴樹¹・崎山 朋紀¹・坂口 武弘¹・岸畑 明宏¹・田中 健貴²・

木下 篤彦³・野池 耕平⁴・松澤 真⁴・河戸 克志⁵

Tomoki ENOHARA, Tomoki SAKIYAMA, Takehiro SAKAGUCHI, Akihiro KISHIHATA, Yasutaka TANAKA, Atsuhiko KINOSHITA, Kohei NOIKE, Makoto MATSUZAWA and Katsushi KAWATO

¹非会員 和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

²非会員 農修 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

³正会員 農博 国土交通省国土技術政策総合研究所（近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター）（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

⁴非会員 理修 パシフィックコンサルタンツ株式会社（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目22番地）

⁵非会員 理修 大日本コンサルタント株式会社（〒330-6011 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2L.A.タワー）

In the Nachi River basin, the shallow landslides and the debris flows occurred by the heavy rainfall from Typhoon Talas in 2011. This basin is characterized by the existence of geological boundaries, which is considered to be one of main causes of the landslides.

In this study, we conducted geophysical and hydrological surveys to make it clear. First, we conducted airborne electromagnetic survey. Second, the groundwater level was observed using the boreholes. The surveys were conducted on landslide occurred and not occurred slopes and the results were compared. Third, we conducted hydrological observation of the surface soil layer near the geological boundary using the tensiometers and the soil moisture meters.

As a result, we have found that both the drainage characteristics and the distribution of resistivity were different on the two slopes. We have also found that geological boundaries affect hydrological behavior.

Key Words : shallow landslide, geological boundaries, hydrological survey, airborne electromagnetic survey

1. はじめに

平成23年9月の台風12号に伴う豪雨により、和歌山県の那智川流域の広い範囲で斜面崩壊や土石流が発生し、甚大な被害が発生した¹⁾。被害軽減を図るための警戒避難体制の強化や砂防事業の優先度を決定するためには、表層崩壊危険斜面を抽出しておくことは重要である。表層崩壊の予測手法として、既往の研究^{例として2,3)}において浸透流解析等の雨水流出に関するモデルと斜面安定解析を組み合わせた表層崩壊発生危険度を評価するモデルが提案されている。さらに、航空レーザ測量や簡易貫入試験の改良等、近年の評価モデルの入力条件の測定技術の進歩も相まって、比較的精度よく予測できるようになって

きている⁴⁾。

一方、那智川流域では、堆積岩である熊野層群（砂岩泥岩互層）に熊野酸性岩（花崗斑岩）が貫入する特異な地質構造や水理構造を呈しており、このことが表層崩壊発生の原因となった可能性が報告されている⁵⁾。現在、主に用いられている手法は、土層厚や斜面勾配、集水面積、土質強度等の条件を基に斜面を評価するものであり、斜面内で透水性や土質強度などが異なる地質体が存在する那智川流域では、適正に評価されない恐れがある。

これまで、那智川流域では地質境界が存在する斜面での表層崩壊危険斜面の抽出手法を提案することを目的に、短期間に広域な地盤情報を取得することが可能な空中電磁探査と、斜面の地下水位の変動の結果に着目した検討がされている^{6,7)}。しかしながら、地質境界を有する斜面

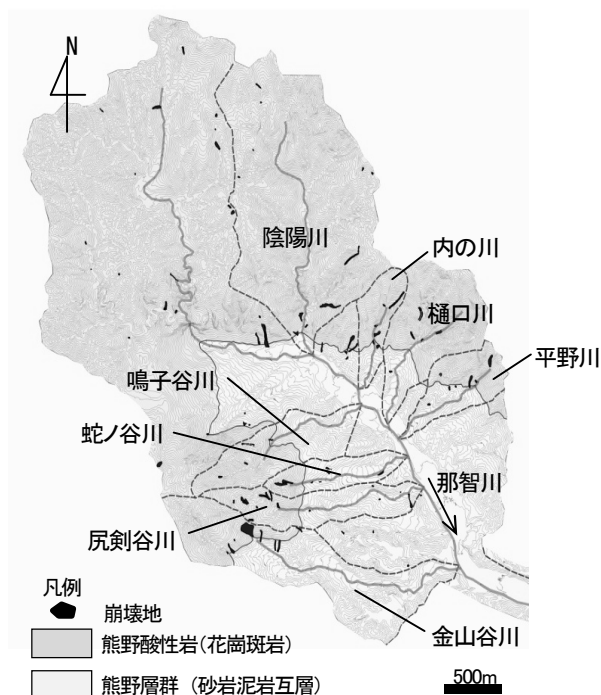


図-1 那智川流域の概要



図-2 平野川流域の概要. 四角で囲ったエリアは図-3に拡大図で示す.

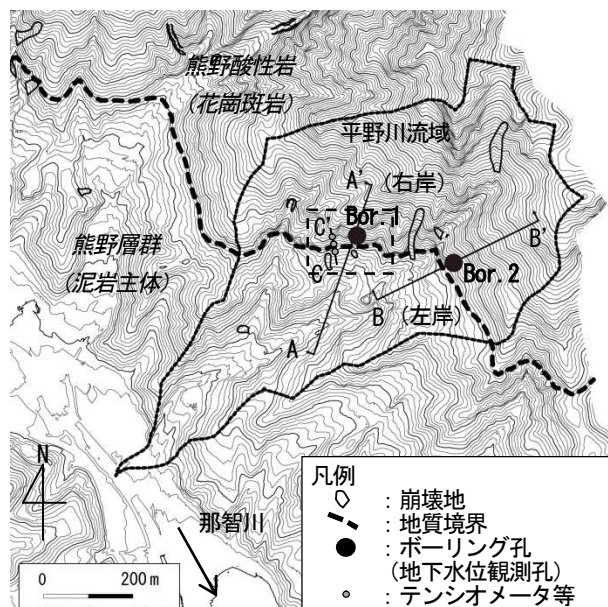


図-3 テンシオメータ等の配置図 (図-2中、四角で囲ったエリアの拡大図)

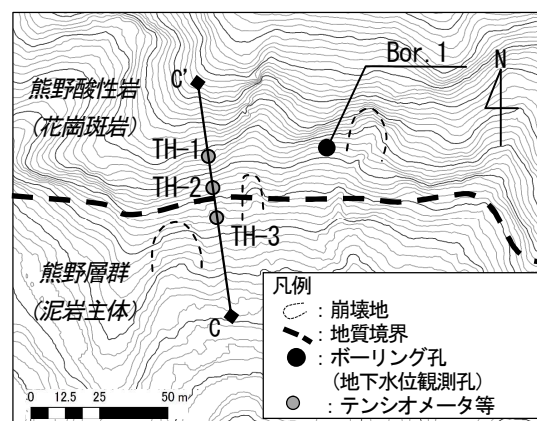


写真-1 地層境界 (点線). 上部が花崗斑岩で下部が泥岩

写真-2 地層境界付近からの湧水の流量観測状況

での表層崩壊の発生の大きな原因となる地質境界付近の表層土層内の水文挙動に関する検討は十分なされていない。そこで本研究では、同一渓流内の崩壊斜面と非崩壊斜面を対象とした物理探査や地下水位の継続観測に加え、崩壊斜面での地質境界付近の物理探査と表層土層内の水文観測を実施し、その水文特性について検討した。

2. 調査地と調査手法について

(1) 那智川流域の概要

那智川流域では、平成23年8月30日から9月4日にかけて台風12号に伴う記録的な豪雨により、大規模な表層崩壊とそれに伴う土石流、支川からの土石流の流入による河川氾濫により甚大な被害が生じた。特に9月4日の未明には、和歌山県が設置した市野々観測所 (那智勝浦町市野々) において最大時間雨量123mm、0時から4時の間の累積雨量が341mmを観測し、表層崩壊及びそれに伴う土石流が多数発生した。那智川流域の概要図を図-1に示す。

那智川流域の地質的な特徴として、堆積岩である熊野

層群 (砂岩泥岩互層) の上を貫入岩である熊野酸性岩 (花崗斑岩) が覆う2層構造となっていることが挙げられ、地質境界付近では湧水が多く見られる。平成23年に発生した崩壊の多くが地質境界付近の熊野酸性岩の分布域で発生している⁸⁾。

本研究では表層崩壊危険斜面の特性を把握するため、表層崩壊及び土石流が多数発生した那智川流域の中で、地質境界の露頭及び湧水の湧出が確認できる平野川 (図-2、写真-1・2) を対象として、崩壊が多数確認できる斜面 (右岸) と、崩壊の発生が確認できない斜面 (左岸) において、地下の大まかな地質構造を把握するために空中電磁探査及び電気探査を実施し、水文特性を把握するために地質境界付近の地下水位の観測と、テンシオメータ等による表層土層内の水文挙動の観測を行った。地下水位の観測孔及びテンシオメータ等の設置位置を図-2、3に示す。

(2) 空中電磁探査および電気探査について

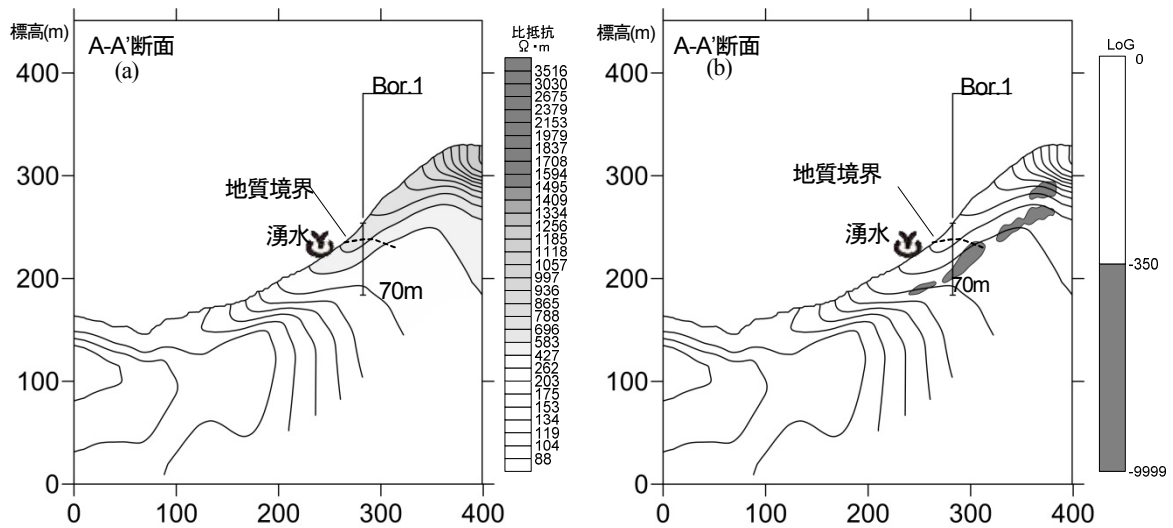


図-4 図-2 中 A-A' 断面図. (a) 比抵抗断面, (b) 比抵抗解析断面. 点線は地質境界を示す.

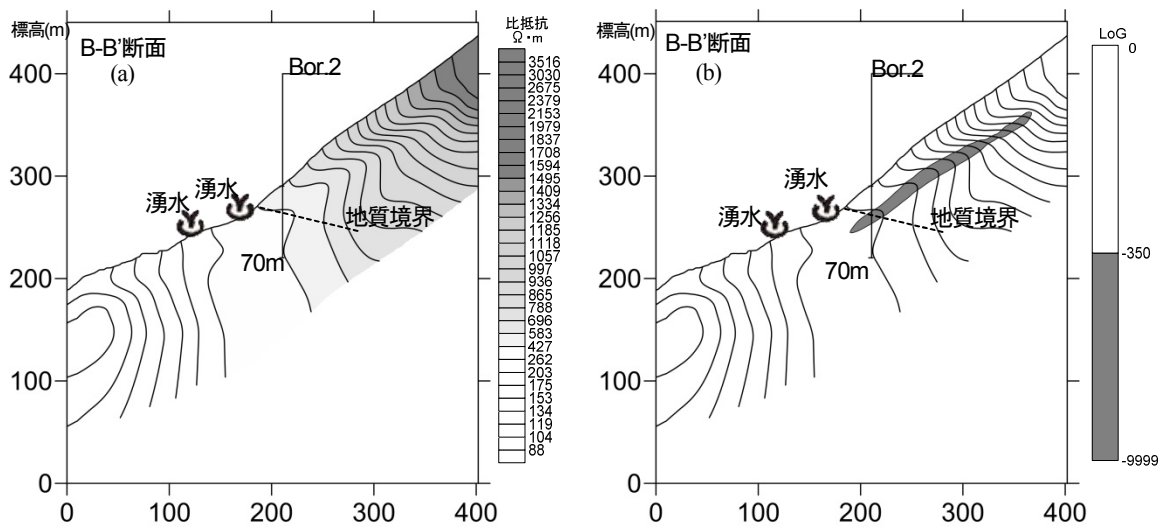


図-5 図-2 中 B-B' 断面図. (a) 比抵抗断面, (b) 比抵抗解析断面. 点線は地質境界を示す.

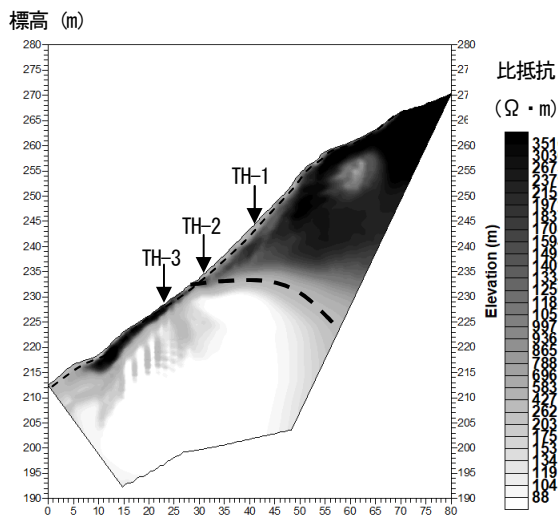


図-6 図-3 中 C-C' 測線上の電気探査結果. 点線は地質境界を示す.

空中電磁探査はヘリコプターで複数の送受信コイルを収納したセンサを曳航し、送信コイルの磁場に反応して発生する地盤からの磁場を受信コイルで計測することで

斜面内部の比抵抗を測定する探査手法である。異なる周波数帯域の電磁波を用いることによって、異なる深度の斜面内部の比抵抗を同時に測定することができる。那智川流域では平成24年に、地下200mまでの大まかな地質情報を把握する目的で実施している。今回、崩壊が多数確認できる斜面（右岸）においては、地下約20mまでの詳細な地質構造や不安定土層厚を確認する目的で電気探査を実施した。電気探査はテンシオメータ等による水文観測を実施した測線上で実施した。空中電磁探査と電気探査で取得する比抵抗($\Omega \cdot m$)は体積含水率(=間隙率 $\times$ 飽和度)と粘土の含有量を反映しており、比抵抗構造から地質構造や地下水の分布状況を検討することができる⁹⁾。

(3) 斜面の地下水位観測と表層土層内の水文挙動について

平野川流域における崩壊の発生が多数確認できる斜面（右岸）と、崩壊の発生が確認できない斜面（左岸）の2つの斜面において、斜面の水文特性の違いが崩壊発生の原因に関わっていると考え、地質境界を貫入したボー

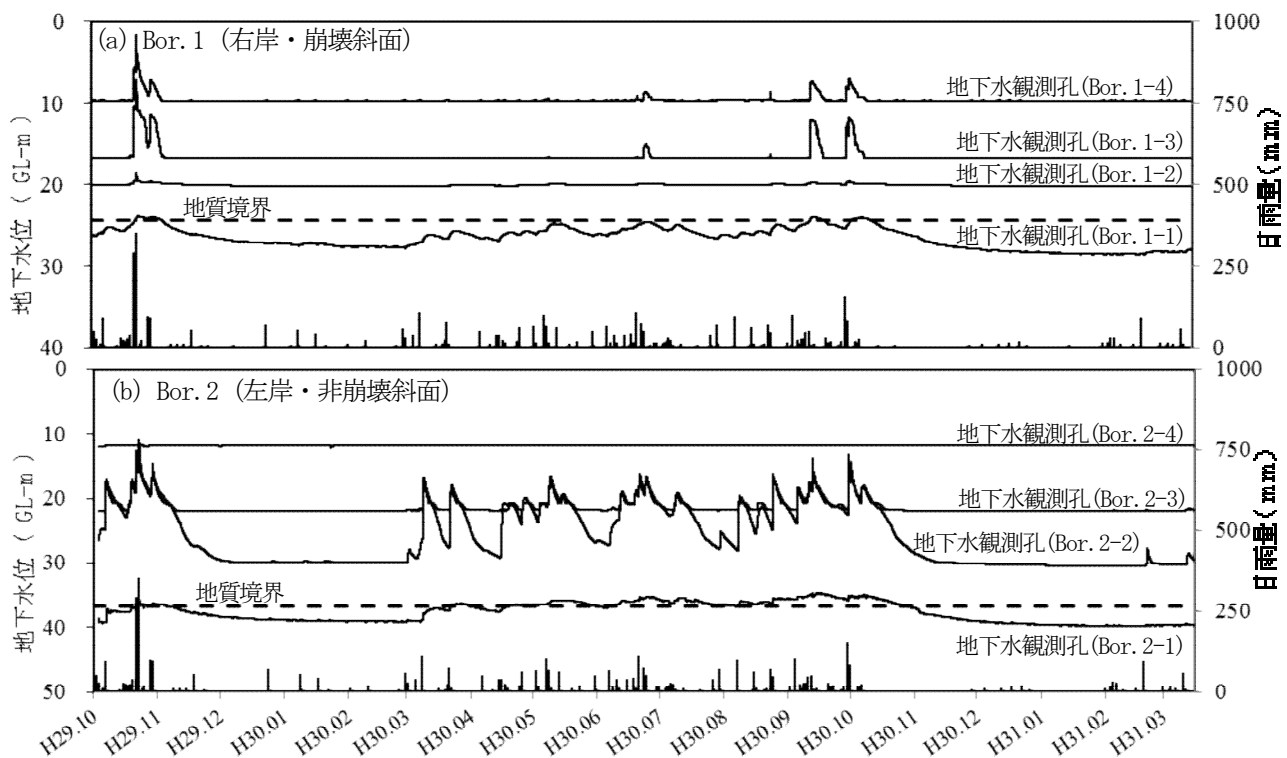


図-7 各斜面の地下水位の変動。(a) 崩壊が多数確認できる斜面 Bor. 1 (右岸),
(b) 崩壊が発生しなかった斜面 Bor. 2 (左岸)。

リング孔において平成29年10月から平成31年3月にかけて地下水位の観測を実施した。それぞれの斜面において、上位の花崗斑岩は亀裂の有無に着目して2深度、花崗斑岩と熊野層群泥岩の地質境界付近、熊野層群を対象とした合計4深度で地下水位の観測を行った。深度別の地下水位の変動を捉えるため、それぞれの調査地点において4孔ずつの地下水観測孔を設置した。地下水観測の対象層にはストレーナ（有孔管）を設置し、対象より上位は無孔管として上位層からの地下水が流入しないよう遮水した。

また、降雨時の斜面表層土層内の水文挙動を捉えることを目的として、崩壊の発生が多数確認できる斜面（右岸）のボーリング孔（Bor.1）周辺において、図-3に示す通り地質境界と交差する方向に、斜面上部から花崗斑岩分布域、地質境界付近、泥岩分布域の3箇所の位置にそれぞれ地下水位計、土壌水分計及びテンシオメータを設置し観測を行った。現地調査の結果から、当該地点の表層土層は約80cm程度であることが確認できた。地下水位計は表層土層の下部付近の深度80cm、土壌水分計とテンシオメータは、表層土層内の中間付近の深度40cmと下部付近の深度80cmのそれぞれ2深度に設置した。地下水位計と土壌水分計は平成31年2月から、テンシオメータは平成31年3月から観測を行っている。

3. 観測結果

(1) 地質構造について

空中電磁探査による比抵抗分布と比抵抗解析結果を図-4, 5に示す。図-4は崩壊が多数確認できる斜面（右岸）、図-5は崩壊の発生が確認できない斜面（左岸）の、各ボーリング地点を通過する断面での比抵抗分布と比抵抗解析断面を示している。比抵抗の解析には本研究ではLoG解析¹⁰⁾と呼ばれる空間フィルタを使用し、深度方向の比抵抗変化率が大きい領域を抽出している。また、図-6に崩壊が多数確認できる斜面（右岸）で実施した水文観測実施測線（図-3中C-C'測線）上での電気探査の結果を示す。

空中電磁探査の結果による各断面図の比抵抗分布状況（図-4(a)、図-5(a)）では斜面上部では高比抵抗値を、斜面下部では低比抵抗値を示しており、花崗斑岩と泥岩のそれぞれの分布域と概ね合致していることが確認できた。また、崩壊が多数確認できる斜面（右岸）の比抵抗解析結果（図-4(b)）では、比抵抗変化率の大きい領域は途中で途絶しているが、崩壊が発生していない斜面（左岸）の結果（図-5(b)）では、比抵抗変化率の大きい領域が連続している状況が確認できた。

崩壊が多数確認できる斜面（右岸）での電気探査の結果（図-6）からも、斜面上部には高比抵抗帯、斜面下部には低比抵抗帯が分布しており、地表で確認できた地質境界分布や地質調査結果から、低比抵抗帯は熊野層群の泥岩、高比抵抗帯は花崗斑岩の分布域が反映されているものと考えられる。また、地表部には中程度の比抵抗帯が薄く分布し、斜面上部では消失しているが、これは表

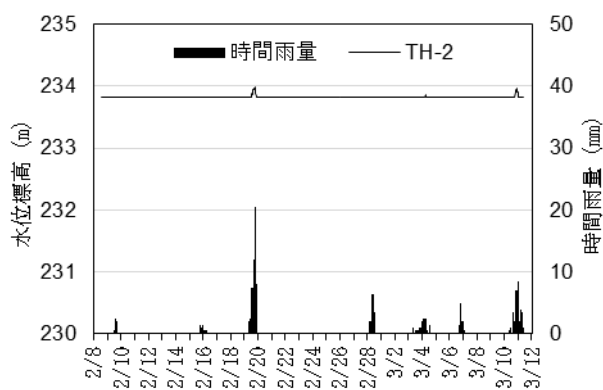


図-8 表層土層中の地下水位観測結果（平成31年，TH-2）

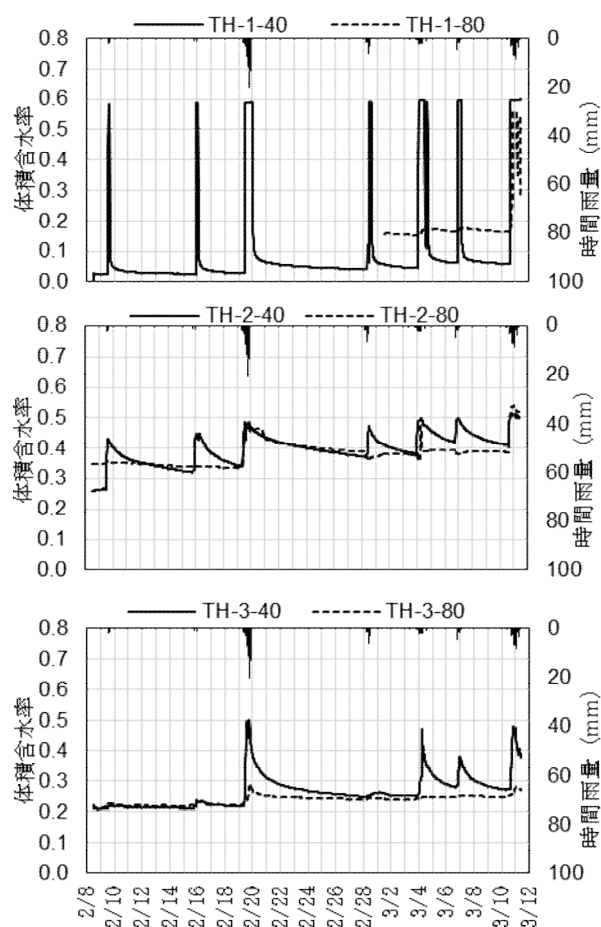


図-9 表層土層中の土壌水分計観測結果（平成31年）．
TH1は花崗斑岩層，TH2は地質境界，TH3は泥岩層に設置．40，80はそれぞれ設置深度（cm）を表す．

層土層の分布を反映していると考えられる．

(2) 斜面の地下水位の観測結果について

各斜面の地下水位の観測結果を図-7に示す．右岸・左岸ともに泥岩層の地下水位は降雨に対して緩やかな応答を示している．Bor.1（右岸）では，泥岩層（Bor.1-1）と地質境界付近（Bor.1-2）では常時地下水位が確認できるが，花崗斑岩層（Bor.1-3，Bor.1-4）では確認できない．降雨後は泥岩層（Bor.1-1）と地質境界付近（Bor.1-2）では緩やかに変化している状況が確認でき，花崗斑岩層

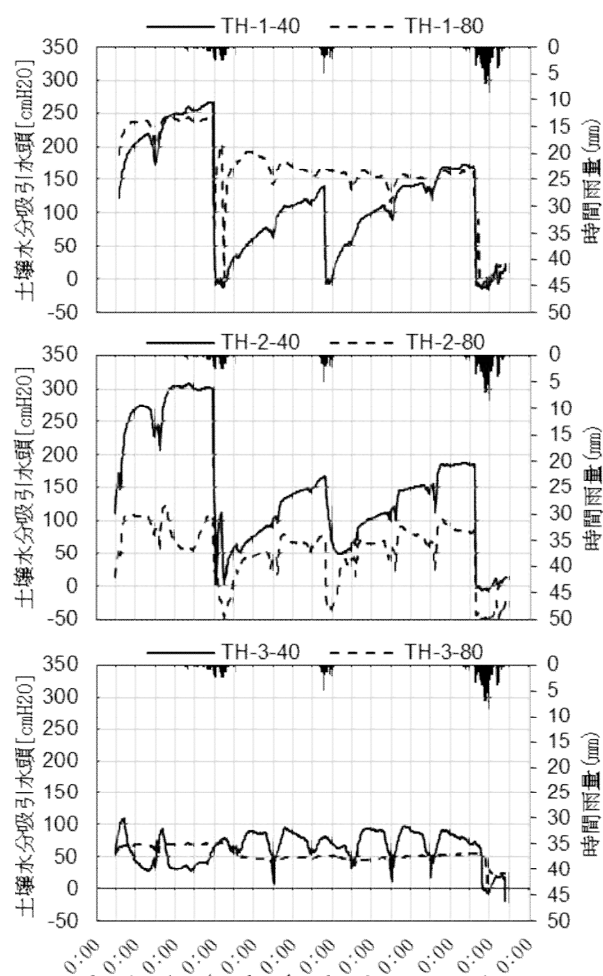


図-10 テンシオメータ観測結果（平成31年）．TH1は花崗斑岩層，TH2は地質境界，TH3は泥岩層に設置．40，80はそれぞれ設置深度（cm）を示す．

（Bor.1-3，Bor.1-4）ではまとまった降雨の後に水位上昇が確認できる．一方，Bor.2（左岸）においても泥岩層（Bor.2-1）と地質境界付近（Bor.2-2）では常時の地下水位が確認できるが，花崗斑岩層（Bor.2-3，Bor.2-4）では確認できない．地質境界付近の地下水位（Bor.2-2）は降雨に対し鋭敏に反応し，それより上位の花崗斑岩層内の水位（Bor.2-3，Bor.2-4）も地質境界付近の地下水位の上昇に伴い一体となり変化している状況が確認できる．このことから左岸側の崩壊の発生が確認できない斜面の花崗斑岩層内は透水性が高く，崩壊が多数発生した斜面（右岸）と発生しなかった斜面（左岸）との斜面内の地下水位の変動が大きく異なることが確認できた．

(3) 表層土層内の水文特性

崩壊の発生が多数確認できる斜面（右岸）の表層土層内の水位観測結果（TH-2のみ），土壌水分計及びテンシオメータによる水文観測結果を図-8～10に示す．表層土層内の地下水位は，花崗斑岩分布域に設置したTH-1と泥岩分布域に設置したTH-3においては水位が確認できなかったが，地質境界に設置したTH-2のみ2月19日の

総雨量93mmの降雨や3月10日～11日にかけての総雨量66mmの降雨に反応して出現が確認できた。

土壌水分量計観測結果について、小規模な降雨の際はいずれの観測点も地表に近い深度のほうが体積含水率は高い値を示しており、このことは地表部からの雨水の浸透によるものと考えられる。一方、まとまった二度の降雨の際は、地質境界付近のTH-2の深度80cmの値が一時的には深度40cmの値よりも高い値を観測している。

テンシオメータの観測結果について、いずれの観測点も無降雨状態が続くと地表面部の方が乾燥傾向となるため、概ね深度40cmの観測値の方が深度80cmより高い値を示している。また、雨が降るとTH-1とTH-3では深度40cmの値の方が低い値となっていることが確認できるが、これは雨水の浸透によるものと考えられる。一方、TH-2では降雨の際も深度80cmの値の方が低い値を保ち続けている。

これらの結果から、一定規模以上の降雨の際は、地質境界付近の表層土層内において、雨水の浸透に加え地質境界等の斜面内部からの水の流入が発生している可能性が考えられ、平成23年当時のような大規模の出水の際にはこのことが斜面崩壊発生の大きな要因になった可能性があると考えられる。

なお、今回の表層土層内の水文観測期間中の出水においては、斜面の地下水位の大きな変動は捉えることができなかった。

4. おわりに

本研究では、平成23年の台風12号に伴う豪雨による表層崩壊及び土石流で大きな被害を被った那智川流域において、物理探査や水文調査を行い、流域内に地質境界が存在する斜面での表層崩壊危険箇所の抽出方法について検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- 1)比抵抗の急変箇所の分布が崩壊斜面と非崩壊斜面で異なっていることが確認できた。比抵抗変化率が大きい深度は地下水状態や地質状態の急変箇所を示しており、帯水層等が想定できる。このことから、比抵抗変化率の大きい領域が途絶していることは帯水層が不連続であることを示していることが考えられ、空中電磁探査等の広域的な物理探査により効率的に表層崩壊危険斜面を抽出できる可能性があると考えられる。
- 2)崩壊斜面と非崩壊斜面では、降雨に対する地下水位の応答が大きく異なることが確認でき、斜面の透水性の違いが崩壊の発生に大きな影響を与えていることが推察された。
- 3)崩壊斜面の表層土層内の水文挙動について、雨水の浸透とは別に、地質境界付等の斜面内部から水が流入してきていることが推察され、このことが地質境界付近での表層崩壊の発生につながったと考えられる。

今回の調査では表層土層内の水文観測期間が短く、深層地下水位の変動との関連付けが不十分な状態である。また、規模の大きい降雨での水文観測ができていない。雨の降り方（短期集中、連続降雨等）により水文挙動も異なることも想定されることから、今後も観測を継続して十分なデータを蓄積し、崩壊に係る水文プロセスを解明し、表層崩壊危険斜面の抽出につなげたい。

参考文献

- 1) 松村和樹，藤田正治，山田孝，権田豊，沼本晋也，堤大三，中谷加奈，今泉文寿，島田徹，海堀正博，鈴木浩二，徳永博，柏原佳明，長野英次，横山修，鈴木拓郎，武澤永純，大野亮一，長山孝彦，池島剛，土屋智：2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害：砂防学会誌，Vol.64，No.5，pp.43-53，2012.
- 2) 沖村孝，市川龍平，藤井郁也：表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のための手法：砂防学会誌，Vol.37，No.5，pp.4-13，1985.
- 3) 平松晋也，水山高久，石川芳治：雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究：砂防学会誌，Vol.43，No.1，pp.5-15，1990.
- 4) 独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム：表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル（案），土木研究所資料，2009.
- 5) 田村泰志，木下篤彦，北川眞一，大山誠，内田太郎，小杉賢一朗，田村泰志，荒木繁幸，松村法行，杉山直起：平成23年台風12号で崩壊した金山谷川・鳴子谷川における斜面崩壊発生機構について，砂防学会概要集，pp.A84-A85，2013.
- 6) 坂口武弘，西岡恒志，榎原伴樹，木下篤彦，田中健貴，河戸克志：地層境界付近の地下水位変状と空中電磁探査解析結果に着目した表層崩壊危険斜面抽出の研究，砂防学会概要集，pp.575-576，2018.
- 7) 榎原伴樹，西岡恒志，崎山朋紀，坂口武弘，木下篤彦，田中健貴，河戸克志：表層崩壊危険斜面における空中電磁探査解析と地下水位の変動に関する研究，第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.43-48，2018.
- 8) 千東圭央，西岡恒志，筒井和男，福田和寿，木下篤彦，今森直紀，加藤智久，横山修，松村法行：平成23年台風12号の那智川流域の水文・水質特性と崩壊メカニズムに関する研究，砂防学会概要集，pp.A300-A301，2016.
- 9) 一般財団法人災害科学研究所トンネル調査研究会編：地盤の可視化と探査技術 比抵抗高密度探査法の実例，鹿島出版会，pp.60-61，2001.
- 10) 影浦亮太，奥村稔，河戸克志，佐藤敏久，小杉賢一朗，正岡直也：滋賀県葛川試験地における空中電磁探査による三次元比抵抗構造，砂防学会概要集，pp.618-619，2017.

(2019. 4. 2 受付)