

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

A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE AIRBORNE
ELECTROMAGNETIC SURVEY AND THE FLUCTUATION OF GROUNDWATER
LEVELS AT THE SHALLOW LANDSLIDE DANGER SLOPES

榎原 伴樹¹・西岡 恒志²・崎山 朋紀¹・坂口 武弘¹
木下 篤彦³・田中 健貴⁴・河戸 克志⁵

Tomoki ENOHARA, Tsuneshi NISHIOKA, Tomoki SAKIYAMA, Takehiro SAKAGUCHI,
Atsuhiko KINOSHITA, Yasutaka TANAKA and Katsushi KAWATO

¹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）

E-mail: enohara_10001@pref.wakayama.lg.jp

²和歌山県伊都振興局建設部（〒648-8541 和歌山県橋本市市脇4丁目5番8号）

³国土交通省国土技術政策総合研究所（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

⁴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）

⁵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）

Key Words: airborne electromagnetic survey, shallow landslide

1. はじめに

平成23年台風12号により那智川流域で多数発生した表層崩壊¹⁾の発生メカニズムは、流域の特異な地質構造と水理構造による可能性が報告されている²⁾。那智川流域の地質構造は、熊野層群（泥岩主体）に熊野酸性岩（花崗斑岩）が貫入し、上部を覆っている。表層崩壊の多くは地層境界付近の花崗斑岩の分布域で多く発生しており³⁾、また、地層境界付近には湧水が多数認められる。このことから、熊野層群の難透水性の泥岩と、風化・亀裂が発達した透水性の高い花崗斑岩体内の地下水の浸透・貯留・流出が表層崩壊発生の要因の一つと考えられている。

本研究では、那智川流域内の平野川において崩壊が発生した斜面と崩壊が発生しなかった斜面を研究対象として、空中電磁探査による比抵抗構造と地下水位の変動状況の関係性について検討を行った。

2. 調査地と調査方法の概要について

(1) 調査地の概要

紀伊半島にある那智川流域では、平成23年8月30日から9月4日にかけて台風12号による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発生した。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とされている。那智川流域の概要図を図-1に示す。那智川流域の地質的特徴は熊野層群（砂岩泥岩互層）の上に貫入岩である熊野酸性岩（花崗斑岩）が覆う2層構造で、地層境界付近には湧水が多く見られる。平成23年に発生した崩壊の殆どが地層境界付近の熊野酸性岩の分

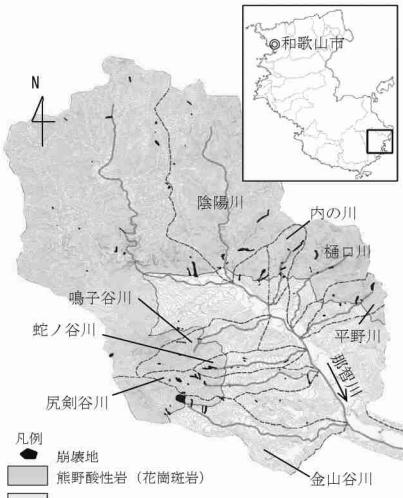


図-1 那智川流域の概要

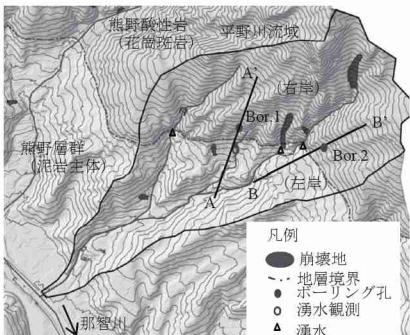


図-2 平野川流域の概要



写真-1 地層境界、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



写真-3 那智川流域での空中電磁探査の
測定状況

図-3 比抵抗と間隙比・飽和度・粘土鉱物含有量の関係⁴⁾。本研究では、高比抵抗を濃色で、低比抵抗を淡色で表示する。

布域で発生している。本調査は、表層崩壊及び土石流が多数発生した那智川流域の中で、地層境界の露頭及び湧水を確認できる平野川（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、空中電磁探査による比抵抗構造と地下水位の変動状況の関係性について検討を行った。

(2) 空中電磁探査

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できる。効率的かつ低成本、短期間で広範囲の地盤の情報が推定できる探査手法であり、那智川流域では平成24年に実施されている。空中電磁探査で取得する比抵抗 ($\Omega \cdot m$) は体積含水率 (=間隙率 × 饱和度) と粘土の含有量を反映していることから、比抵抗の変化は地下水や地質状況の変化を示している（図-3、写真-3）。

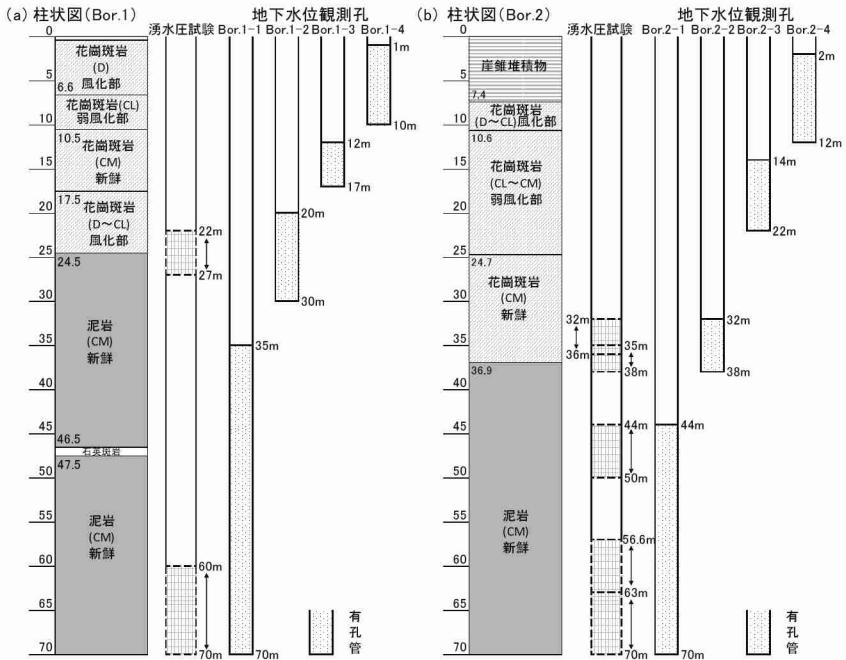


図-4 ポーリング柱状図・湧水圧試験及び地下水位観測孔設置状況 ((a) : 右岸, (b) : 左岸).

図中の矢印は孔内湧水圧試験実施区間を示す。



写真-4 地下水観測孔設置状況 (Bor. 2)

(3) 地下水位の変動調査

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、斜面の排水性の違いが崩壊発生の原因に深く関わっていると考え、地層境

界を貫入したボーリング孔において地下水位の観測を実施し、降雨時の水位変動の観測を行った。右岸側斜面においては平成29年1月から平成30年3月にかけて、左岸側斜面においては平成29年10月から平成30年3月にかけて観測を実施した。それぞれの斜面において、ボーリングコアから花崗斑岩内には風化により亀裂が発達した区間と、亀裂の無い区間が存在していることから、花崗斑岩に3深度、熊野層群に1深度の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。ボーリング柱状図、湧水圧試験の試験区間、及び地下水位観測の対象区間を図-4に、地下水観測孔の設置状況を写真-4に示す。

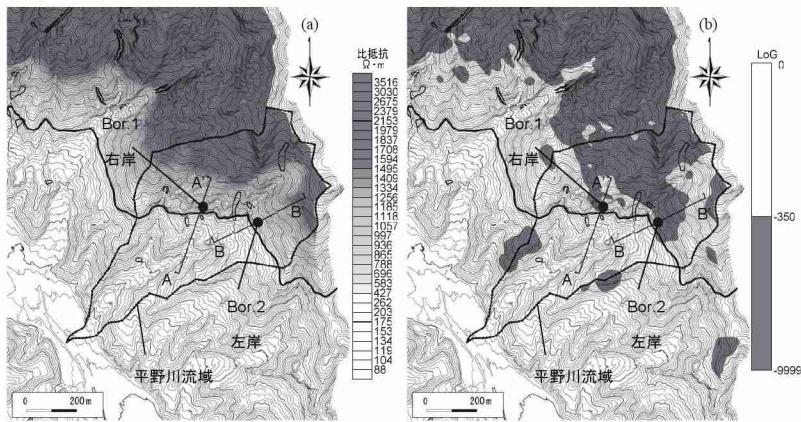


図-5 空中電磁探査結果. (a) 表層 140kHz の比抵抗平面図,

(b) 比抵抗解析平面図(比抵抗値の急変部の分布)

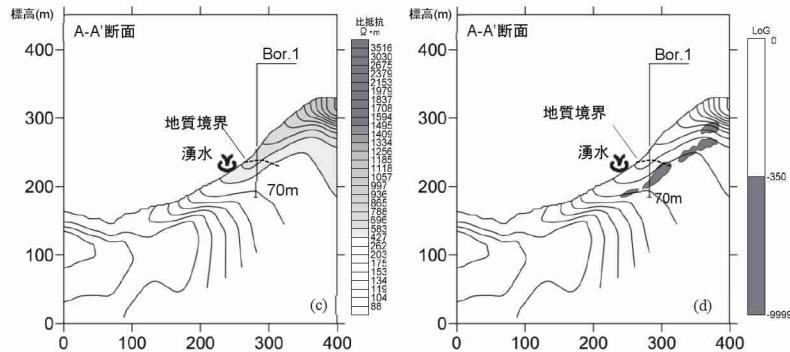


図-6 図-5 中 A-A' 断面図. (c) 比抵抗分布, (d) 比抵抗解析結果（深度方向の比抵抗急変部の分布）

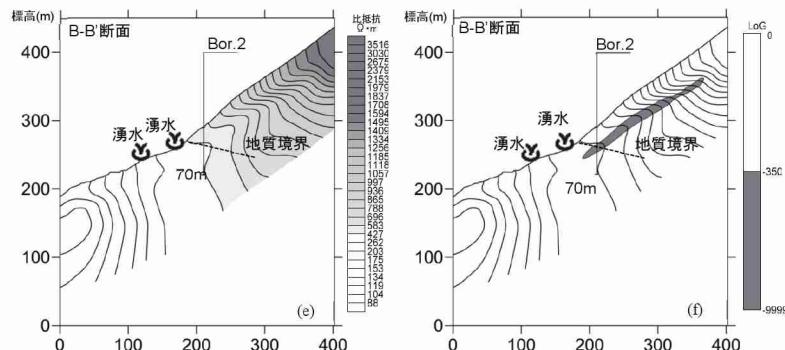


図-7 図-5 中 B-B' 断面図. (e) 比抵抗分布, (f) 比抵抗解析結果（深度方向の比抵抗急変部の分布）

3. 調査結果

(1) 空中電磁探査結果

空中電磁探査による比抵抗分布と比抵抗解析結果を図-5, 6, 7 に示す。図-5 (a) の比抵抗平面図は測定周波数 140,000Hz での比抵抗の測定結果で、今回使用した空中電磁探査システムでは最深部の探査結果であり、地表から深度 5m 付近の比抵抗分布を示している。また、図-5 (b) の比抵抗解析平面図は深度方向の比抵抗変化率が大きい領域を示したものであり、本研究では LoG 解析⁵⁾と呼ばれる空間フィルタを使用して算出した。図-6 は崩壊が多数確認できる斜面（右岸）、図-7 は崩壊が発生していない斜面（左岸）の、各々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結果を示している。

崩壊が多数確認できる斜面（右岸）の比抵抗解析結果（図-6(d)）では、比抵抗変化率の大きい領域は途中で途絶している。一方、崩壊が発生していない斜面（左岸）の比抵抗解析結果（図-7(f)）では、比

抵抗変化率の大きい領域は連続している。

(2) 地層境界付近の地下水位の変動

各斜面の地下水位の観測結果を図-8 に、孔内湧水圧試験の結果一覧を表-1 に示す。右岸・左岸とともに花崗斑岩層の地下水位は降雨に対する応答性が高いが、泥岩の地下水位は花崗斑岩層に比べ応答性が低い。Bor.1 では花崗斑岩層内において各層に独立した水位が存在していることが確認でき、降雨に対して鋭敏に反応し速やかに低下する様子が確認できるが、花崗斑岩層と泥岩の地層境界付近の地下水位については降雨に対してほとんど反応していないことが確認できた。

一方、Bor.2 においては、花崗斑岩層と泥岩の地質境界付近の地下水位は降雨に対し鋭敏に反応し、花崗斑岩層内の水位も地層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。このことから花崗斑岩層内の透水性がかなり高いことが推察され、崩壊が多数発生した斜面（右岸）と

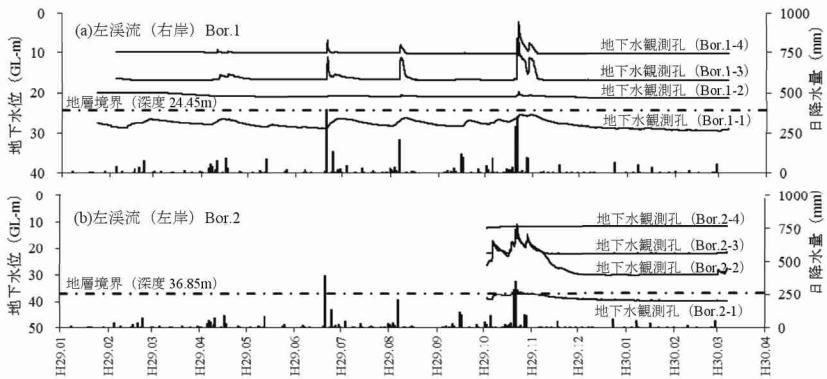


図-8 各斜面の地下水位変動。(a) 崩壊が多数確認できる斜面 Bor.1 (右岸),

(b) 崩壊が発生しなかった斜面 Bor.2 (左岸)

表-1 孔内湧水圧試験の結果

斜面	ボーリング孔	試験区間 (m)	試験区間長 (m)	地質区分	岩級区分	透水係数 (m/s)
左岸	Bor. 2	32.0~36.0	4.0	花崗斑岩	CM	1.15×10^{-6}
		35.0~38.0	3.0	花崗斑岩/泥岩	CM	7.27×10^{-8}
		44.0~50.0	6.0	泥岩	CM	1.52×10^{-6}
		56.6~63.0	6.4	泥岩	CM/CL-D	9.34×10^{-8}
		63.0~70.0	7.0	泥岩	CM	8.83×10^{-8}
右岸	Bor. 1	22.0~27.0	5.0	花崗斑岩/泥岩	CL~CM	5.85×10^{-8}
		60.0~70.0	10.0	泥岩	CM	6.31×10^{-8}

発生しなかった斜面（左岸）との地質境界付近の地下水位の変動が大きく異なることが確認できた。

また、孔内湧水圧試験の結果において、両調査位置とも泥岩層の透水性は同程度だが、左岸側斜面の地層境界直上部の花崗斑岩試験区間の透水係数が高く、地層境界付近の透水性は、右岸側斜面より左岸側斜面のほうが相対的に高くなることが推察できた。

4.まとめ

本研究では、表層崩壊を起因とする多数の土石流が発生した那智川流域内の、崩壊が多数発生した斜面と発生していない斜面が隣接する渓流において、空中電磁探査の結果と斜面の地下水位観測結果の関係性の検討を行った。

結果として、比抵抗変化率の大きい値の分布が途絶している、崩壊が多数発生した斜面（右岸）においては、複数の深度を持った地下水位が存在し、花崗斑岩層と泥岩層境界付近の斜面の排水性が不良であることが推察された。一方、比抵抗変化率の大きい値の分布が連続している、隣接する崩壊の発生していない斜面（左岸）の地下水位の応答は花崗斑岩層内と地層境界付近の地下水が連動していると考えられ、また、孔内湧水圧試験の結果からも地層境界付近の透水性は右岸側斜面より良好で、斜面全体としての排水性が良好である可能性があることが推察された。

空中電磁探査によって測定される比抵抗は地下水や地質状況を反映する（前掲図-3）ことから、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いると推察され、地下水状態の急変箇所として帶水層が想定できる。このことから、崩壊が多数確認できる斜面（右岸）の比抵抗変化率の

大きい領域が途中で途絶していることは、帶水層が不連続であることを示していると考えられる。

今後は、当該調査地には複数の湧水の存在が確認できることから、湧水量と地下水位変動の関連性等の水文調査を実施していくとともに、水位の上昇が斜面崩壊に与える影響について検討し、空中電磁探査の結果との関係性を整理し、表層崩壊危険斜面の抽出方法について検討する予定である。

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) 木下篤彦、北川眞一、大山誠、内田太郎、小杉賢一郎、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、2013.
- 3) 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、2015.
- 4) 土木学会関西支部 比抵抗高密度探査に基づく地盤評価に関する調査、研究委員会(1997)：比抵抗高密度探査に基づく地盤評価、平成9年度講習・研究検討会テキスト,p.107.
- 5) 影浦亮太、奥村稔、河戸克志、佐藤敏久、小杉賢一郎、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、2017.

(2018.5.18 受付)