

空中電磁探査による比抵抗の分布に着目した 深層崩壊危険斜面の抽出技術の開発

THE DEVELOPMENT A METHOD TO EXTRACT POTENTIAL SLOPES OF
DEEP-SEATED LANDSLIDES WITH ANALYSIS OF RESISTIVITY
BY AIR-BORNE ELECTROMAGNETIC SURVEY

田中健貴¹・吉村元吾²・今森直紀¹・木下篤彦³・森加代子⁴・林幸一郎⁴・
小川内良人⁵・横山修⁵・河戸克志⁶

Yasutaka TANAKA, Gengo YOSHIMURA, Naoki IMAMORI, Atsuhiko KINOSHITA,
Kayoko MORI, Koichiro HAYASHI, Yoshito OGAWAUCHI,
Osamu YOKOYAMA, Katsushi KAWATO

¹非会員 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)

²正会員 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 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴非会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁵非会員 国土防災技術株式会社 (〒532-0024 大阪府大阪市都島区東野田1-10-13)

⁶非会員 大日本コンサルタント株式会社 (〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1)

In steep mountainous regions, deep-seated landslides sometimes occur. These landslides often trigger debris flow and sometimes induce landslide dam. Previous studies tried to extract potential slopes of deep-seated landslide with topographical, geological surveys, and hydrological observation. Especially geological surveys and hydrological observations were carried out for estimating underground structure. But these methods take a lot of time and labor, for example field survey for spring spots. Then we tried to develop the method to extract the potential slopes of deep-seated landslides with air-borne electromagnetic survey. We compared resistivity by air-borne electromagnetic survey to core boring for ascertaining utility of air-borne electromagnetic survey, and applied to the result to other slopes. The result shows that the spatial variation of resistivity, such as the change of resistivity in vertical direction, can indicate the status of bedrock.

Key Words : *deep-seated landslide, air-borne electromagnetic survey, resistivity, LiDAR, landslide susceptibility*

1. はじめに

平成23年台風12号をはじめ、近年各地で深層崩壊が多発している。深層崩壊は発生頻度は低いものの、崩壊規模は極めて大きく、被害が大きくなる事例が認められる。このような深層崩壊による被害を軽減するには、深層崩壊発生危険斜面（以後、危険斜面）を抽出した上で詳細な災害シナリオを想定し対策を行う必要がある。これまで危険斜面の抽出手法としては斜面の変形の程度をレー

ザープロファイラによる平面的な微地形判読、地形解析によって評価する方法や、変形が進行した斜面の末端において湧水の電気伝導度などを分析することによる地盤内部の推定方法などが検討、開発されてきた¹⁾。しかし、このうち危険斜面の地盤内部を評価する手法は、湧水箇所調査を含め現地での詳細調査が主体であり、広い範囲からの抽出を行う場合は、多大な労力が求められる。

一方で近年、ヘリコプターを用いて広範囲の地下情報を得られる空中電磁探査が注目されている^{2)・6)}。危険斜面と考えられる斜面では、崩壊前に地盤内部における風

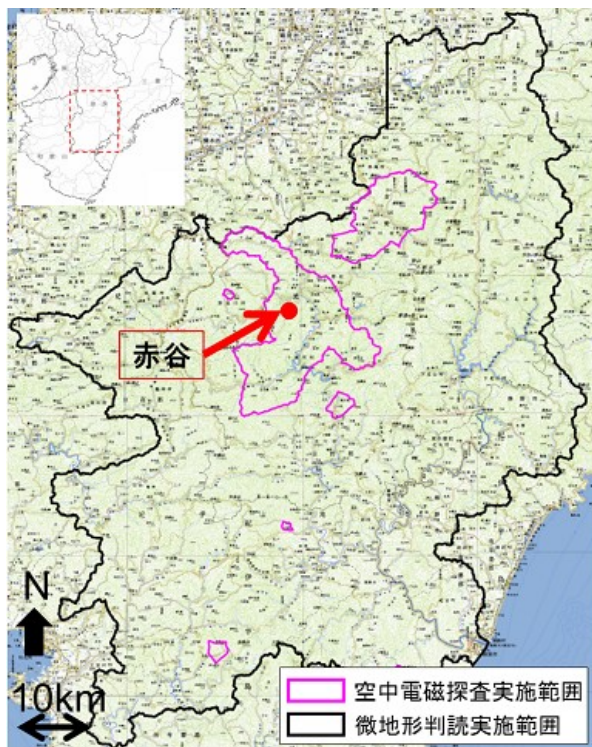


図-1 調査対象範囲

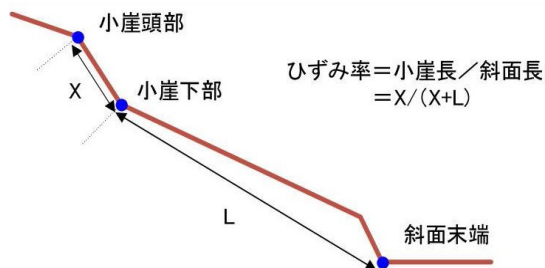


図-2 ひずみ率の算出

化や重力変形による緩み域が存在すると考えられるため、この緩み域を空中電磁探査によって抽出することが出来れば、現地調査を行う必要のある斜面を従来よりも、さらに絞り込むことが可能となる。

そこで本研究では、空中電磁探査による地下の比抵抗分布に着目した、危険斜面抽出技術について検討する。

2. 研究方法

本研究は二段階で行った。第一段階では図-1に示す空中電磁探査取得範囲において微地形判読などから危険斜面面であると考えられる1斜面を抽出した上で、空中電磁探査によって得られた比抵抗データを基に、対象斜面の緩み域を推定した。さらに対象斜面においてボーリング調査、孔内傾斜計による地中変位観測を行い、比抵抗データから推定される緩み域の妥当性を検証した。第二段階では、広範囲からの危険斜面抽出手法として、第一段階で検討した緩み域推定手法の妥当性を考察した。

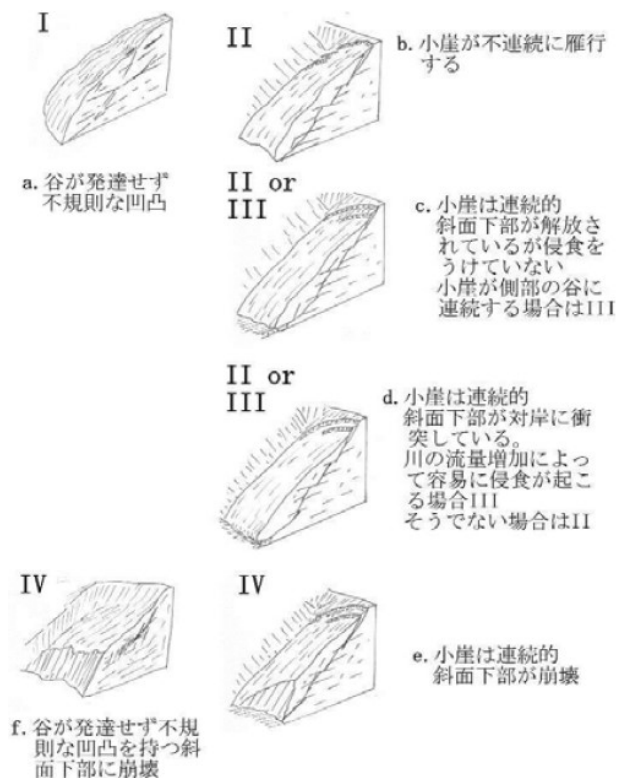


図-3 微地形判読に基づく危険度評価

千木良ら⁷から一部引用

3. 対象斜面の抽出

対象斜面はレーザープロファイラを用いたひずみ率計測や微地形判読を基にした危険度評価によって抽出した。微地形判読は図-1に示す範囲で実施し、重力変形斜面を抽出した。その上で、抽出された斜面についてひずみ率および微地形判読による危険度評価を行った。なお、孔内傾斜計による観測をあわせて実施している。ここでひずみ率は図-2に示す通り小崖の斜面方向の長さを斜面長で除した値で、斜面の重力変形の程度を示す指標である¹⁾。また微地形に基づく危険度評価は既往研究⁷⁾を参考にした(図-3)。抽出された斜面の中から、現地調査ならびにボーリング調査のアクセスを考慮し、対象斜面を1斜面選定した。選定された対象斜面は深層崩壊発生箇所である赤谷崩壊地の西に位置する(以後、赤谷西と呼ぶ)(図-4)。赤谷西のひずみ率は4.7%で、紀伊山地で崩壊前の斜面で確認された5~21%とほぼ同様であった⁸⁾。また微地形に基づく危険度評価では、斜面末端での崩壊が認められ図-3で示す危険度IVと評価される。

4. 空中電磁探査の実施および比抵抗の分析

紀伊山地における空中電磁探査は平成24年から平成26年にかけて図-1に示す範囲で実施された。空中電磁探査

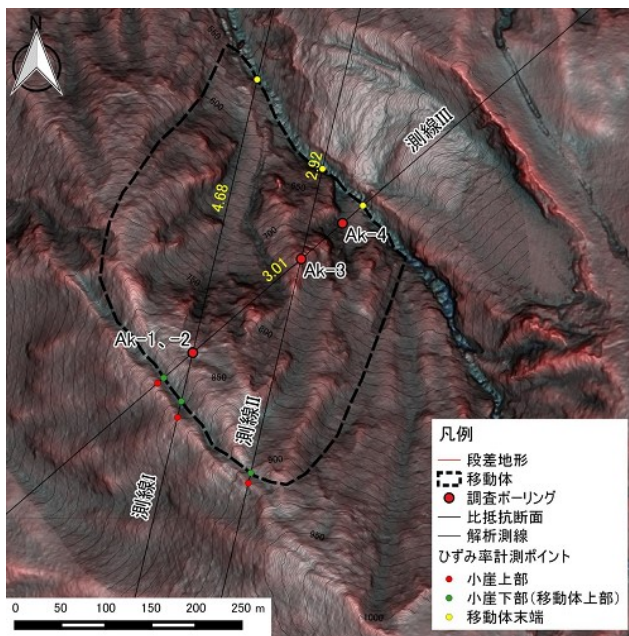
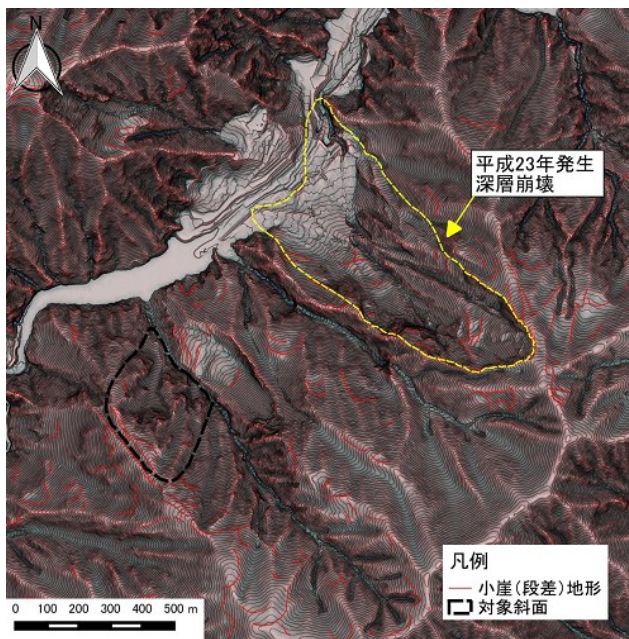


図-4 対象斜面概要

(上：対象斜面周辺 下：対象斜面詳細)

は、電磁誘導現象を利用する電磁探査の一つで、ヘリコプターに曳航した電磁センサーを用いて地中の電磁場応答を測定し、現地に立入ることなく、広域斜面の比抵抗3次元構造を把握する探査手法である。本研究で使った空中電磁探査のデータは、周波数領域タイプの測定システムで取得されたものである。当該測定システムでは、人工的に送信コイルから発生させた一次磁場が、地中を通過する際に磁束の変化を打ち消すように渦電流（誘導電流）が流れ、その渦電流による二次磁場の強さを受信コイルで測定し、一次磁場に対する二次磁場の割合から比抵抗を算出する。その際、使用する周波数によって探査深度が異なることから、複数の周波数で測定することで一度に複数深度の比抵抗データが得られるため、周波

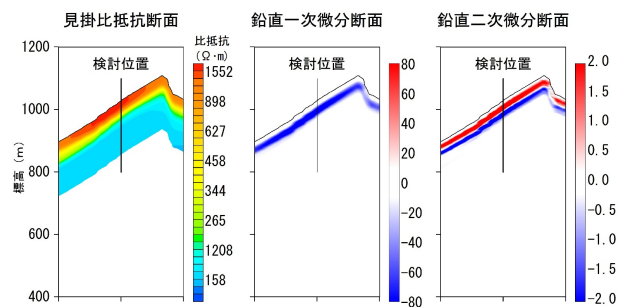


図-5 比抵抗と微分フィルタの概要

左：見掛け比抵抗，中央：鉛直一次微分，右：鉛直二次微分

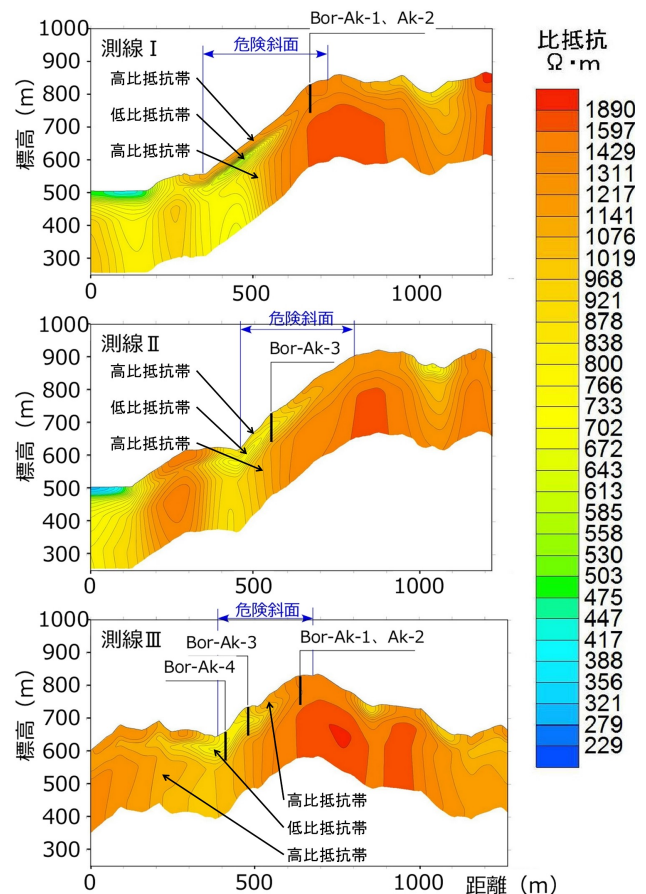


図-6 各測線の見掛け比抵抗

数毎に計算した比抵抗を該当する探査深度にプロットし、周波数間の比抵抗を比例補間して比抵抗断面図を作成する。比抵抗は、主に単位体積当りの含水量と粘土の含有量によって支配される物性値である。間隙率が大きく地下水で飽和した地質ほど、あるいは粘土が多い地質ほど比抵抗は低い。また新鮮で間隙が少ないか、間隙率が大きくても地下水が不飽和な地質ほど比抵抗は高くなる。なお、本研究では、測定データから算出した見掛け比抵抗を使用した。また見掛け比抵抗は理論値であり、絶対値の分布を示すデータではない。そこで分析では相対的な変化に着目し、地盤の不連続面に対応する見掛け比抵抗の変化面を抽出した。見掛け比抵抗の変化面の抽出には鉛直一次微分、鉛直二次微分による値を用いて分析を行った。

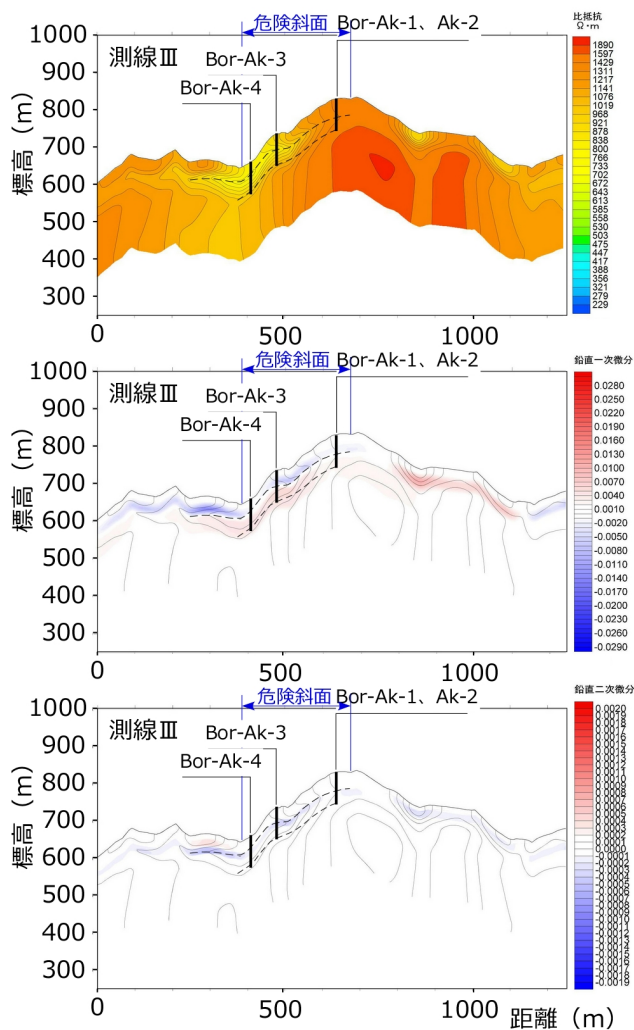


図-7 測線Ⅲにおける微分フィルタを用いた解析結果
(上：見掛け比抵抗，中：鉛直一次微分，下：鉛直二次微分)

ここで鉛直一次微分，鉛直二次微分は画像解析の手法（微分フィルタ）を応用した方法であり，いずれも評価対象セルとその上下のセルを比較し，評価対象セルでの比抵抗の鉛直変化の程度を定量的に評価する方法である（図-5）。比抵抗の分析は測線を図-4に示すように設け，実施した。まず各測線の見掛け比抵抗を示す（図-6）。斜面内ではいずれも深度方向に同様の比抵抗変化を示し，地表より深度30m付近まで高比抵抗，深度30m～60m付近で低比抵抗，深度60m以深で相対的に高比抵抗でかつ高角度の比抵抗変化を示す3層構造と，それぞれの間に低角度の変化を示す比抵抗領域が存在する。次に鉛直一次微分，鉛直二次微分による結果を示す（図-7）。鉛直一次微分では，上位の比抵抗変化域は青色，下位の比抵抗変化域は赤色で表現されており，それぞれ最大変化率を示す深度が最も濃く表現される。鉛直一次微分で最大変化率を示す深度は，鉛直二次微分で0を示す変換点として表現される。また低角度の比抵抗変化域と高角度の比抵抗変化の変曲部となる境界は，鉛直一次微分では赤色で表現される領域の底面で示される。

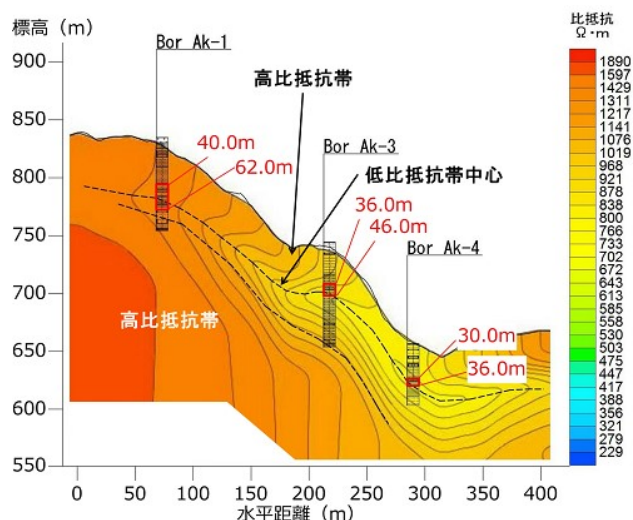


図-8 比抵抗の分布とボーリング調査位置（測線Ⅲ）
深度は図-9から図-11に示すコアの深度を示す

表-1 ボーリング調査箇所の見掛け比抵抗変化深度

ボーリング箇所	Ak-1	Ak-3	Ak-4
高比抵抗域	不飽和な緩み岩盤		
変化域 (最大変化深度)	38m	29m	
低比抵抗域 (最低値深度)	51m	42m	33m
	飽和度の高い緩み岩盤		
変化域 (最大変化深度)	69m	59m	
変曲部	117m	102m	
高比抵抗域	不飽和な新鮮岩盤		

深度は微分フィルタに基づく

5. 比抵抗分析とボーリング調査の比較

(1) 見掛け比抵抗構造から推定される地盤状況

表-1に各箇所での見掛け比抵抗変化面の深度を示す。見掛け比抵抗の相対的な変化は，地盤の抵抗値に影響する含水率，粘土鉱物含有量，構成物質そのものの比抵抗特性等の相対的な違いに影響されると考えられる。そこで，見掛け比抵抗構造から鉛直方向の地盤状況を推察すると，浅部の高比抵抗領域は開口や間隙の多い不飽和な緩み岩盤，低比抵抗領域は地下水飽和帯や粘土鉱物が多い地層，砂岩に比べ相対的に比抵抗が低い泥岩や凝灰岩層の分布，深部の高比抵抗は比較的新鮮で間隙が少なく不飽和な岩盤であると推定される。このうち，緩み域の下端に相当するのは，低比抵抗と深部の高比抵抗の境界であると考えられる。なお，高角度の比抵抗変化は断層等の地質構造に起因する不連続面の存在を示唆している可能性がある。

(2) ボーリングコアで確認される地盤状況

ボーリング調査は3か所（4孔）において実施した。図-8にボーリング箇所を示す。Ak-1のボーリングコアを図-9に示す。深度51m周辺に低比抵抗帯の中心が位置していたが、ボーリングコアでは凝灰質頁岩を含む泥質岩が分布し、上下に砂岩層が存在する。また低比抵抗帯の中心周辺ではX線回析の結果、粘土鉱物の緑泥石が消失し、スメクタイトが形成されていた。またボーリングコア深度72m付近では、深度70.1～73.52mにかけて砂岩層が破碎され岩片状となっており、脆弱な岩盤が分布する。

次にAk-3のボーリングコアを図-10に示す。低比抵抗帯の中心は深度42m周辺に見られたが、ボーリングコアでは開口亀裂やせん断面が発達する泥質岩が分布していた。深度40.65m～41.08m間は、破碎状の細礫からなる。低比抵抗帯の中心周辺は、岩石の有効間隙率が他の深度より大きかった。またX線回析結果では、粘土鉱物の緑泥石が消失してスメクタイトが形成されており、崩壊面になりやすいと考えられる。またAk-3における孔内傾斜計の観測では、深度41m付近において2月8日から3月7日にかけて0.12mm程度の変位が見られた。

最後にAk-4についてボーリングコアを図-11に示す。深度33m周辺に低比抵抗帯中心が位置したが、深度30.6mで砂岩優勢層から泥質岩に変化している。また、深度31.26～31.65mが破碎状の細礫からなり、32.65mで擦痕が確認された。低比抵抗帯中心よりも深い領域では、破碎度の比較的前進でない棒状コアが分布する。またX線回析結果では、粘土鉱物の緑泥石が減少している。

(3) 地盤状況による推定崩壊面と見掛比抵抗変化面

比抵抗の分析、比抵抗とボーリング調査の比較から、相対的に比抵抗の低い低比抵抗帯は、破碎状の細礫を挟み、スメクタイトが見られるなど崩壊面となりうる緩み域を表現している可能性がある。また崩壊面となりうる緩み域を表現していると考えられる低比抵抗帯は鉛直一次微分や鉛直二次微分といった微分フィルタによって高い精度で把握することができることが示唆される。

6. 紀伊山地の他斜面への適用

前章までで得られた知見をもとに図-1で示した範囲にある赤谷西以外の斜面について、比抵抗の分布を調査した。調査は重力変形斜面として抽出された斜面のうち、現地調査が可能な74斜面を対象に行った。なお、74斜面についてはひずみ率や微地形に基づく危険度評価などから危険斜面である可能性が高いと評価した。

比抵抗分析結果から、赤谷西同様に緩み域と考えられる領域周辺で急激に比抵抗が低下し、低比抵抗帯が分布する斜面、低比抵抗帯が深度方向に広く分布する斜面、またこれらが混在する斜面が存在した（図-12）。

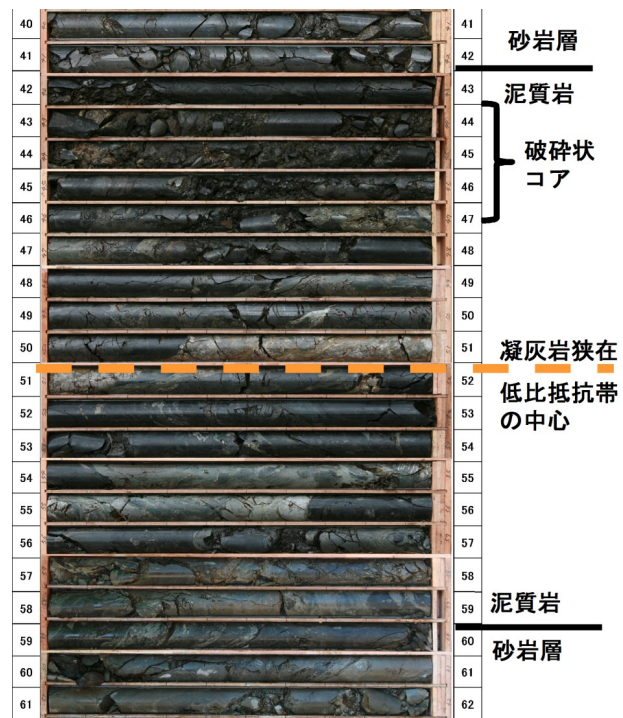


図-9 Ak-1ボーリングコア

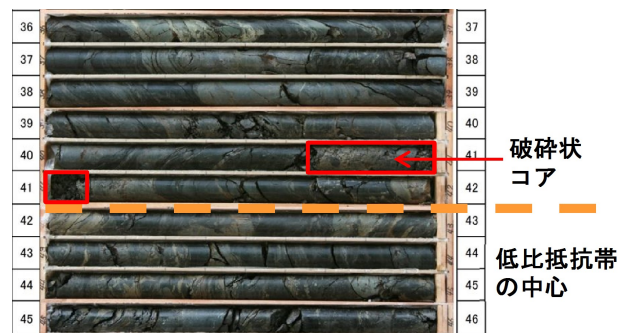


図-10 Ak-3ボーリングコア



図-11 Ak-4ボーリングコア

これらの斜面は木下ら⁹⁾で示された平成23年台風12号による深層崩壊発生箇所と同様の見掛比抵抗構造であった。つまり重力変形斜面では地盤内部も厚い緩み域が存在し、深層崩壊が発生した斜面と同様の地盤構造を有している可能性を示している。

また赤谷西で示したように、比抵抗が大きく変化し、低比抵抗帯が分布する斜面では鉛直一次微分、鉛直二次微分によって比抵抗が大きく変化する領域の抽出が高い精度で可能であった。一方で低比抵抗帯が深度方向に広く分布する斜面では見掛比抵抗の鉛直変化が漸移的であり、緩み域の深度を推定する際には、赤谷西で示した方法とは異なる方法を検討する必要があると考えられる。

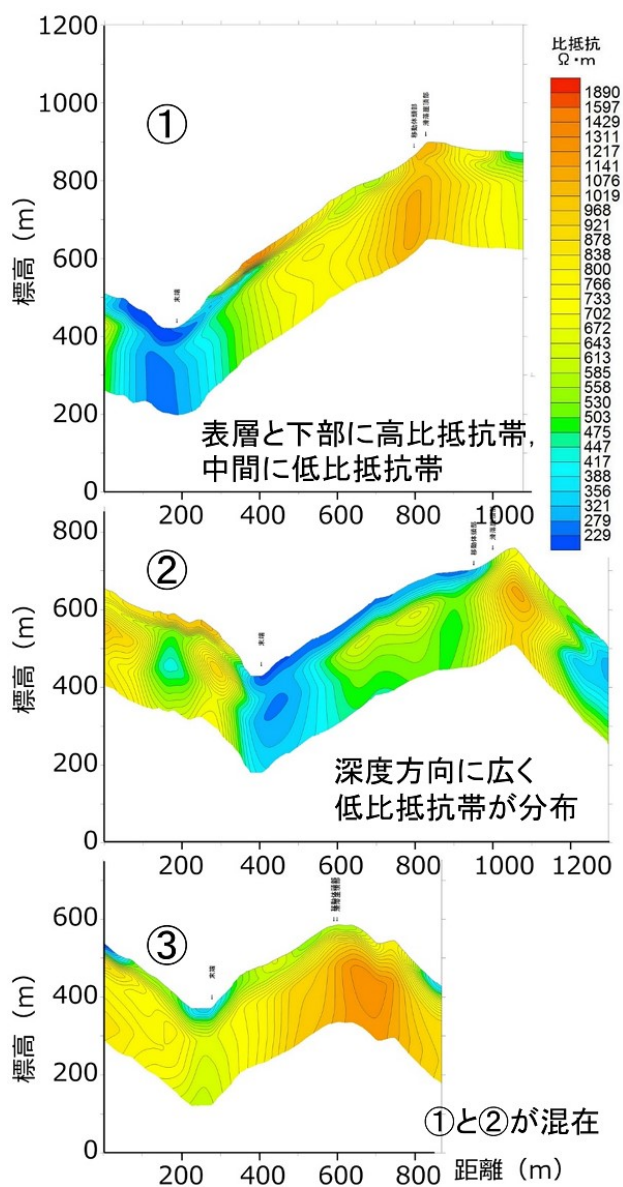


図-12 比抵抗の分布パターンの区分

7. まとめ

本研究では、比抵抗の分析による緩み域の推定手法を検討するとともに、ボーリング調査によって検証した。その上で、実際に危険斜面の抽出を目的とした比抵抗の分析を紀伊山地の広範囲に適用し、その結果について考察した。その結果、比抵抗の分析による緩み域の推定では、浅部から深部に向かって高比抵抗、低比抵抗、高比抵抗に変化している領域は緩み域を表現している可能性が示唆された。またこの比抵抗の変化箇所は鉛直一次微分や鉛直二次微分といった微分フィルタによって定量的な抽出が可能であることも分かった。

一方で、紀伊山地の広い範囲に適用した検討では、重

力変形斜面で平成23年台風12号による深層崩壊発生箇所と同様の地盤構造を有する可能性がある斜面が多く存在した。さらにこれらの斜面のうち、比抵抗が大きく変化する斜面では、比抵抗に着目した定量的な緩み域の規模の分析が可能と考えられた。見掛比抵抗の変化が漸移的な斜面については、微分フィルタ方法の改良やボーリング調査による地下構造の観察などを通じたさらなる検討が求められる。また地形解析による方法や水質分析による方法との組み合わせにより、さらに詳細に危険斜面の抽出ができる可能性もある。今後さらに検討を進め、危険斜面のより精密かつ効率的な抽出につなげたい。

謝辞：京都大学防災研究所千木良教授には微地形に基づく危険度評価について、丁寧にご指導いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究，土木研究所資料 第4333号，2016.
- 2) 鈴木隆司，内田太郎，田村圭司：深層崩壊発生斜面の特定に向けた地盤構造調査法，土木技術資料，Vol.51，No.7，pp.8-13，2009.
- 3) 横山修，内田太郎，中野陽子，田村圭司，笠井美青，鈴木隆司：急勾配斜面における岩盤クリープの表面構造と内部構造，平成22年度砂防学会研究発表会概要集，pp.410-411，2010.
- 4) 桜井亘，酒井良，奥山悠木，小川内良人，眞弓孝之，横山修，河戸克志，奥山稔：平成23年台風12号で発生した深層崩壊の地質・地下水特性と空中電磁探査との関連性について，平成27年度砂防学会研究発表会概要集B，pp.102-103，2015.
- 5) 桜井亘，酒井良，奥山悠木，河戸克志，奥山稔，小川内良人，眞弓孝之，横山修：新宮川流域における比抵抗ウェッジとその抽出手法の提案，平成22年度砂防学会研究発表会概要集A，pp.172-173，2015.
- 6) 坂井佑介，河戸克志，佐渡耕一郎，平川泰之：阿蘇西麓熱帯地帯における空中電磁探査を用いた水理地質構造の推定，砂防学会誌，vol.69，No.1，pp.20-29，2016.
- 7) 千木良雅弘，坂島俊彦，渋谷研一：深層崩壊発生危険斜面の地質・地形的抽出法について，平成26年度砂防学会研究発表会概要集A pp.16-17，2014.
- 8) 千木良雅弘，松四雄騎，ソウチンイン，平石成美，松澤真，松浦純生：2011年台風12号による深層崩壊，京都大学防災研究所年報 第55号A，2012.
- 9) 木下篤彦，北川眞一，大山誠，内田太郎，河戸克志，阿部征輝，奥村稔：平成23年台風12号により紀伊半島で発生した深層崩壊周辺の広域比抵抗構造特性，平成25年度砂防学会研究発表会概要集B，pp.356-357，2013.

(2017. 4. 3受付)