

空中電磁探査を活用した 深層崩壊危険度評価事例の報告

田中 健貴¹

¹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)

深層崩壊による被害を防ぐ、あるいは軽減するためには事前に深層崩壊が発生するおそれのある斜面を抽出する必要がある。一方で、紀伊山地のような広範囲を対象とする場合、調査に多大な労力がかかる。そこで本検討では、広範囲にわたって地盤状況を把握することができる空中電磁探査を活用した深層崩壊が発生するおそれのある斜面の抽出を試みた。その結果、空中電磁探査による地盤状況の推測はボーリング調査によって把握した地盤状況と比較すると、崩壊面となりうる箇所が抽出できる可能性があることなどが示唆され、深層崩壊が発生するおそれのある斜面の抽出に有効であることが示された。

キーワード 深層崩壊, 空中電磁探査, 比抵抗, LP計測

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、崩壊規模は極めて大きく、被害が大きくなる事例がみられる。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（ひずみ率）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、湧水箇所の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したので、その結果について報告する。

2. 研究方法

本研究は図-1に示す空中電磁探査取得範囲において実施した。この範囲において微地形判読などから危険斜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。

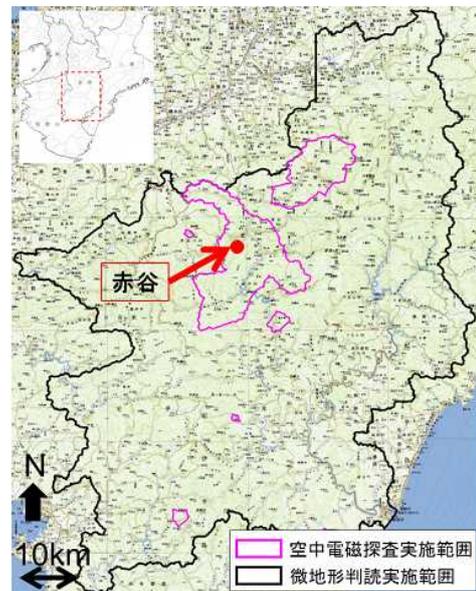


図-1 調査対象範囲

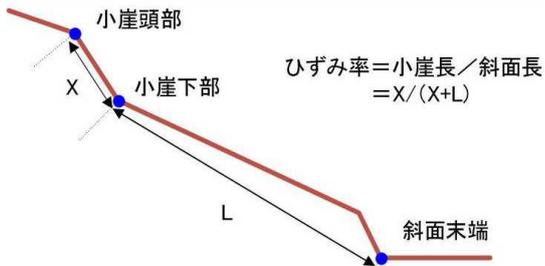


図-2 ひずみ率の算出

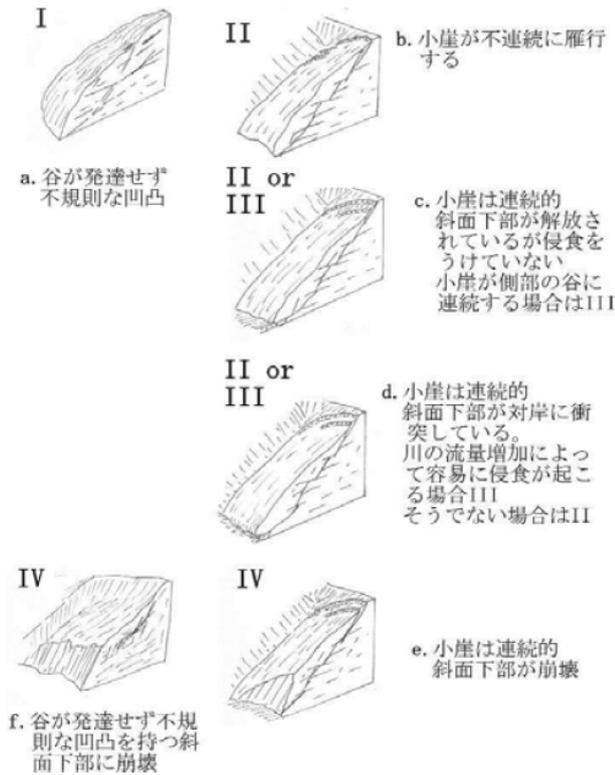


図-3 微地形判読に基づく危険度評価
千木良ら⁷⁾から一部引用

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た。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あり、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

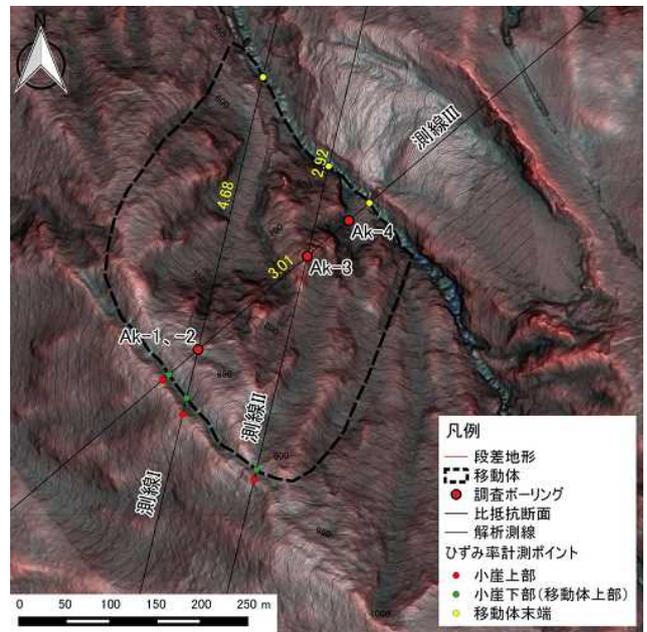
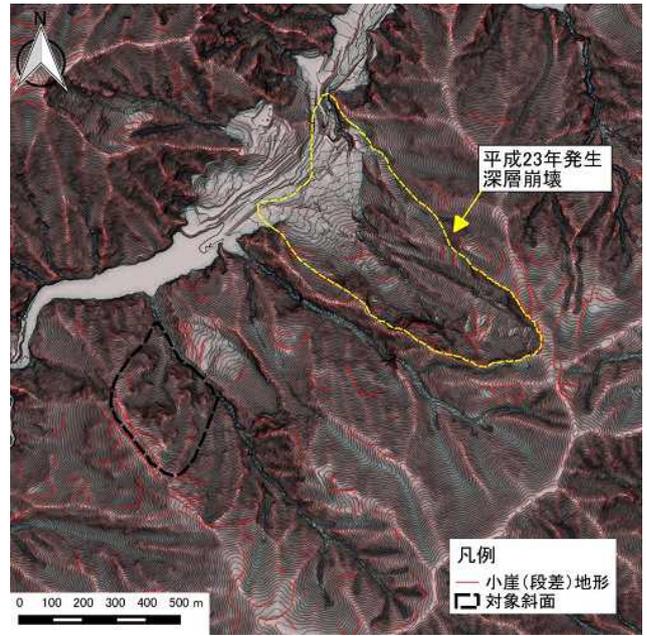


図-4 対象斜面概要

(上:対象斜面周辺 下:対象斜面詳細)

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。本研究で使用し

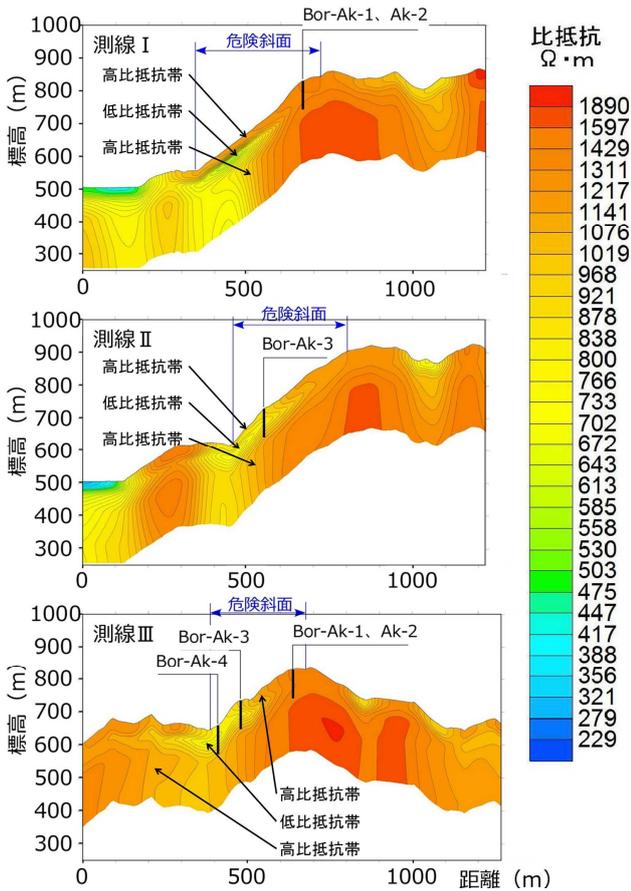


図-5 各測線の見掛比抵抗

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比抵抗を使用した。また見掛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比抵抗の変化に注目した。比抵抗の分析は測線を図-4に示すように設け、実施した。まず各測線の見掛比抵抗を示す（図-5）。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

表-1 ボーリング調査箇所の見掛比抵抗変化深度

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

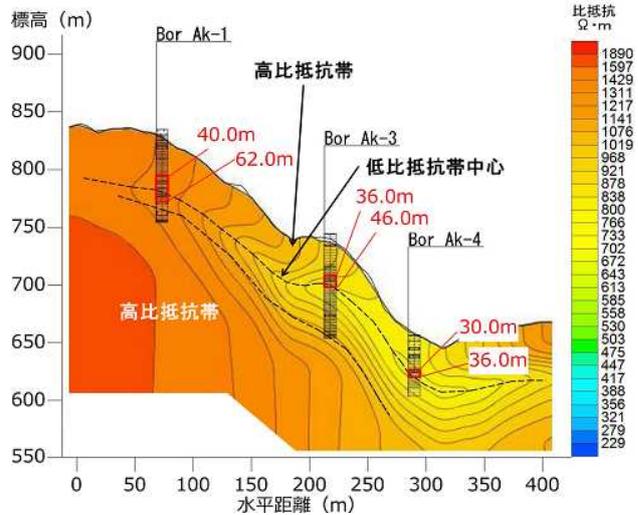


図-6 比抵抗の分布とボーリング調査位置（測線Ⅲ）

深度は図-9から図-11に示すコアの深度を示す

～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。

5. 比抵抗分析とボーリング調査の比較

(1) 見掛比抵抗構造から推定される地盤状況

表-1に各箇所での見掛比抵抗変化面の深度を示す。見掛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。

Ak-1のボーリングコアを図-7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-8 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-9 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、破碎度の比較的進んでい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、破碎状の細礫を狭在し、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ことが分かった。

6. まとめ

本研究では、比抵抗の分析による緩み域の推定を行うとともに、ボーリング調査によってその妥当性を検証した。その結果、比抵抗の分析による緩み域の推定では、1 斜面の検討において、浅部から深部に向かって高比抵抗、低比抵抗、高比抵抗に比抵抗が変化している様子が見られ、ボーリング調査との比較から、このような変化において低比抵抗領域は緩み域を表現している可能性が示唆された。一方で、今回の検討は重力変形が比較的明瞭な 1 斜面のみの検討であり、他の斜面での有効性についても検討する必要がある。

今後、地形解析による方法や水質分析による方法との

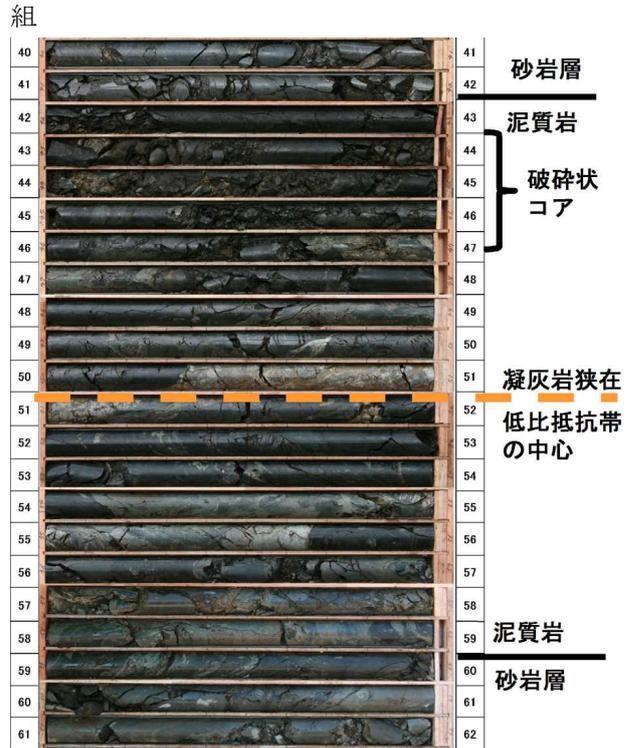


図-7 Ak-1 ボーリングコア

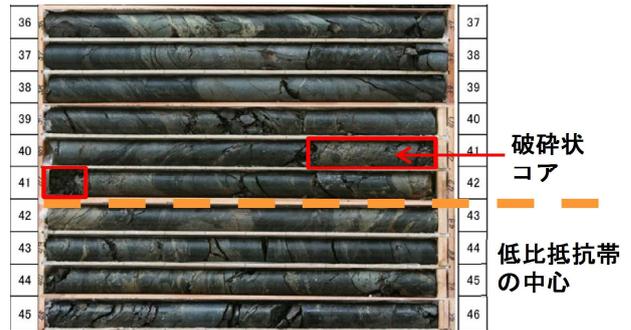


図-8 Ak-3 ボーリングコア



図-9 Ak-4 ボーリングコア

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。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。

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, ツオウチンイン, 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.