

空中電磁探査を用いた深層崩壊危険箇所の抽出技術

田中健貴・木下篤彦・内田太郎・桜井 亘

1. はじめに

平成23年紀伊半島大水害では深層崩壊と呼ばれる大規模な斜面崩壊が多数発生し、甚大な被害が生じた¹⁾。深層崩壊の被害を防ぐためには事前に深層崩壊が発生するおそれのある箇所（以下「深層崩壊危険箇所」という。）を抽出する必要がある。

これまで深層崩壊危険箇所の抽出については、深層崩壊発生履歴や地形地質に着目し小流域毎に評価する方法²⁾により全国的な調査が実施されてきた。一方、斜面毎の評価としてLPによる微地形判読、地形解析、水文・水質調査、ボーリング調査や空中電磁探査を含む物理探査を活用した方法が提案されてきた³⁾。特に、岩盤クリープなど斜面が長期間の重力作用による変形（重力変形）を深層崩壊の引き起こす素因となると考えられ、LPデータから深層崩壊危険箇所の抽出が行われつつある。しかし、LPデータから重力変形を抽出した場合、抽出法にもよるが、非常に多くの斜面が抽出される場合がある⁴⁾。一方、深層崩壊危険箇所が非常に多くなった場合、警戒避難による対策を含めても、実効性のある対策の実施は困難となる。一方、数多くの深層崩壊危険箇所に対して、崩壊発生危険度を評価できるようになれば、対策が進む可能性が考えられる。

そこで、著者らはLPによる地表面の情報に加え、地盤内部の情報により深層崩壊危険箇所の危険度手法の検討を行ってきている。そのうち、本研究では、近年、面的な地下構造の把握において有効性が確認⁵⁾されてきた空中電磁探査の活用可能性について紀伊山地を対象に検討した。具体的には、まず複数の深層崩壊斜面周辺の地盤状況を空中電磁探査により調査し、その特徴を整理した。さらに深層崩壊斜面近傍に位置する重力変形斜面を対象に空中電磁探査から推定される地盤状況を

ボーリング結果と対比し、深層崩壊発生に影響を及ぼすと考えられる因子の情報が空中電磁探査で面的に得られるかを検証した。

2. 空中電磁探査による地下構造把握

2.1 観測原理

空中電磁探査法は電磁誘導を利用することによって、地質分布や構造の状況を調べる方法の一種である⁶⁾（図-1）。実際には電磁センサーによって地中の電磁場応答を測定して、比抵抗3次元構造を把握する。比抵抗は、主に単位体積当たりの含水量と粘土の含有量によって決まる物性値であり⁷⁾、間隙率が大きく地下水で飽和した地質ほど、あるいは粘土を多く含む地質ほど比抵抗は低い。一方、新鮮で間隙が少なく、また間隙率が大きくても地下水が不飽和な地質ほど高比抵抗となる（図-2）。これらのことから、比抵抗の分布から、深層崩壊発生に関連する基岩の風化の度合いや地下水の分布を把握できると考えられる。

2.2 分析方法

比抵抗分析は平面的あるいは縦断的な変化について行う。本稿では比抵抗の相対的な変化に着目する見掛け比抵抗⁷⁾による方法を用いる。

3. 空中電磁探査を活用した分析事例

3.1 空中電磁探査による深層崩壊斜面周辺の地盤情報取得

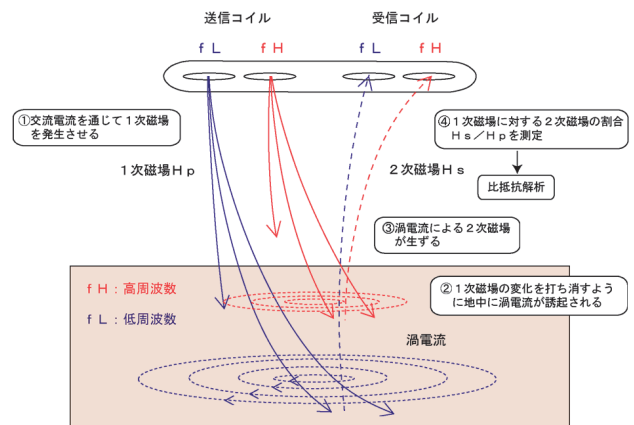


図-1 空中電磁探査の観測原理

A Method to Detect Slopes with High Deep-Seated Landslide Risk by Analyzing Resistivity Distributions Derived from Air-borne Electromagnetic Surveys

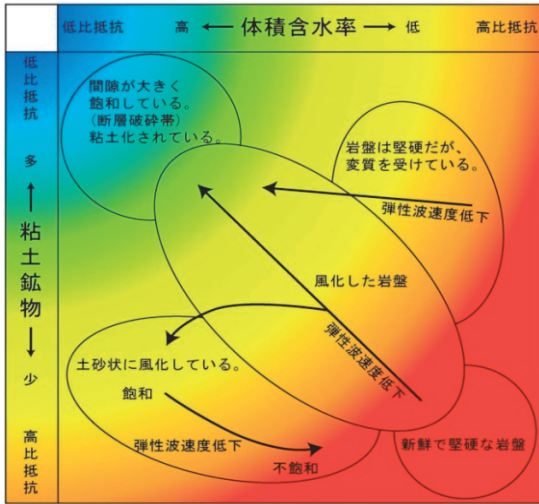


図-2 体積含水率・粘土鉱物と比抵抗の関係



図-3 深層崩壊斜面周辺の比抵抗分布調査箇所

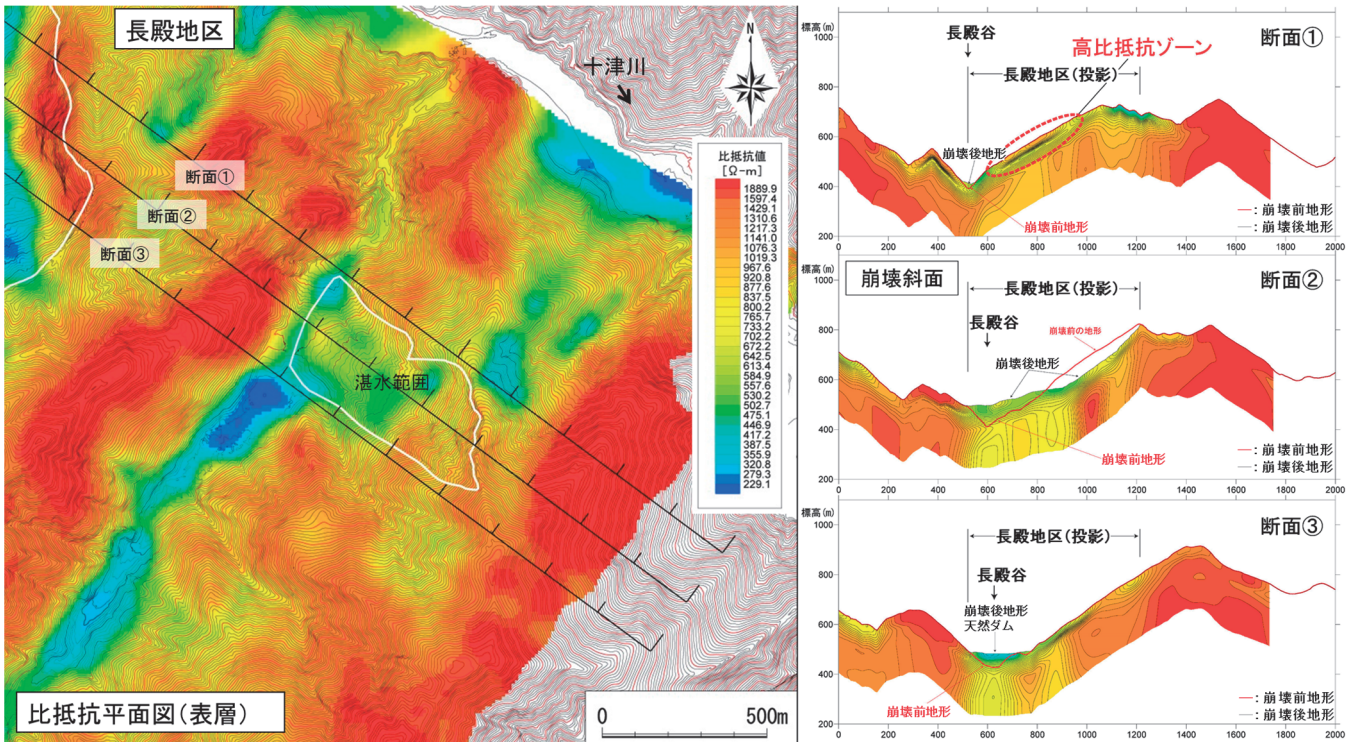


図-4 長殿地区の比抵抗分布 (Aタイプ)

3.1.1 調査方法

平成23年紀伊半島大水害で深層崩壊が発生した8斜面の崩壊斜面とその周辺で平成24年11月に空中電磁探査を実施した(図-3)。比抵抗断面の測線は概ね100m毎に設定した。調査地は、主に付加体である四万十帯から構成され、頁岩や砂岩、泥岩等の互層構造が発達し、重力により斜面が徐々に変形し、崩壊に至る危険が高い重力変形斜面が見られる。

3.1.2 出現する比抵抗のパターン

比抵抗分布は低比抵抗領域の分布特性から2つのパターンに大別できた。つまり低比抵

抗領域が表層と深部の高比抵抗領域に面的に挟まれて現れるAタイプ(図-4)と表層から深部まで連続的に低比抵抗領域が分布するBタイプである(図-5)。

赤谷地区、長殿地区、栗平地区、熊野地区、清水(宇井)地区はAタイプに分類された。これらの地区では、崩壊発生前に重力変形斜面が見られ、基盤岩の風化部が崩壊したことが指摘されている⁵⁾。比抵抗分布を見ると、浅部高比抵抗領域は間隙率が大きい岩盤の緩み領域、その下部の低比抵抗領域は地下水または粘土を含む強風化帯の存在を示唆し、隣

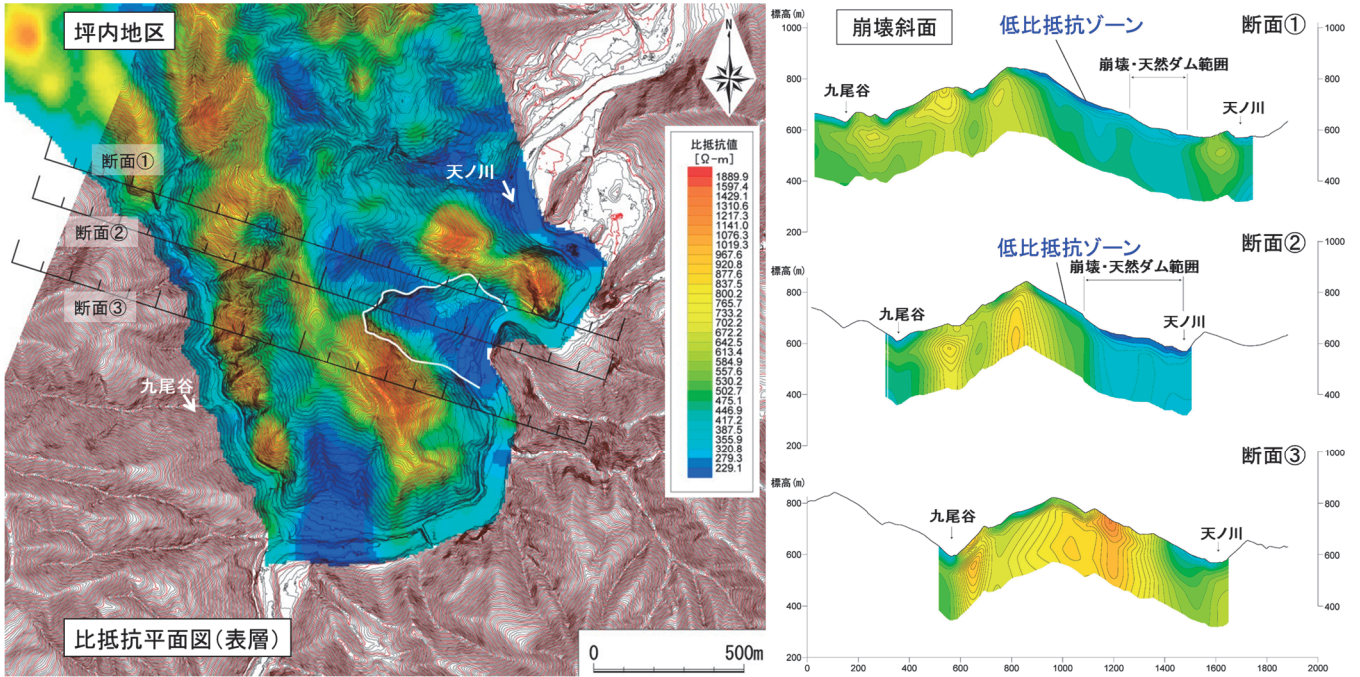


図5 坪内地区の比抵抗分布 (Bタイプ)

接する深層崩壊の崩壊深とも概ね一致する。

一方、Bタイプには坪内地区や北股地区が分類される。表層から深部まで連続して分布する低比抵抗領域は、崩積土等の未固結堆積物あるいは基盤岩の強風化部に対応し、細粒化された粘土鉱物や地下水が広く分布する可能性を示唆する⁵⁾。このような岩盤の緩みや風化に伴う基盤岩の強度低下、および浅部に発達した亀裂からの降雨浸透や地下水の供給による基盤岩内部の間隙水圧上昇が深層崩壊発生 の要因と考えられ、空中電磁探査の結果は、この地質構造を表していると考えられる。

3.2 比抵抗分布のボーリングによる検証

次に比抵抗から推定される地盤状況と実際の地盤状況を対比するため、深層崩壊が発生した赤谷地区近傍の重力変形斜面で比抵抗分布の分析、ボーリング調査を行った(図-6)。比抵抗分布から、当該斜面は地表より深度30m付近まで高比抵抗、深度30m~60m付近で低比抵抗、深度60m以深では相対的に高比抵抗を示す3層構造が見られ、Aタイプに分類される(図-7)。

ボーリング調査からは、Ak-1では浅部で比較的風化が進み、亀裂が確認された。深度51m周辺に泥質岩が見られ、スメクタイトの形成が確認された。さらにほぼ同じ深度に地下水の流入が見られた。Ak-3では低比抵抗帯に位置する深度42m周辺に開口亀裂やせん断破壊が生じている泥質岩とスメクタイトの形成が、深度75m周辺で地下水

帯が見られた。Ak-4では深度33m周辺から砂岩優勢層から泥質岩への変化および地下水帯が見られ、深度33mよりも深い部分では、破碎が進んでいない棒状コアが得られた(図-7)。

以上から、高比抵抗帯に挟まれた低比抵抗帯には、風化した泥岩や地下水が存在し、これにより比抵抗が低いと考えられる。

3.3 比抵抗分布を基にした地下構造把握の考察

比抵抗分布を分析することで岩盤の風化状況や地下水分布を推定できる可能性が、ボーリング調査と対比することで改めて示唆された。一方、比抵抗分布から地盤状況を推定する際は、比抵抗が

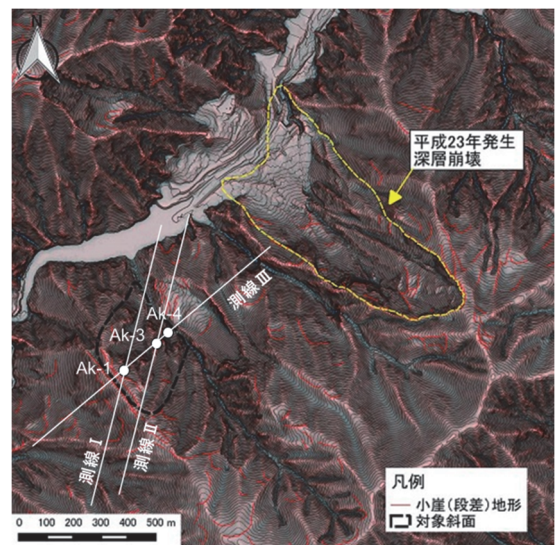


図-6 赤谷地区でのボーリング位置 (Ak-1、Ak-3、Ak-4) と見掛け比抵抗断面の測線位置

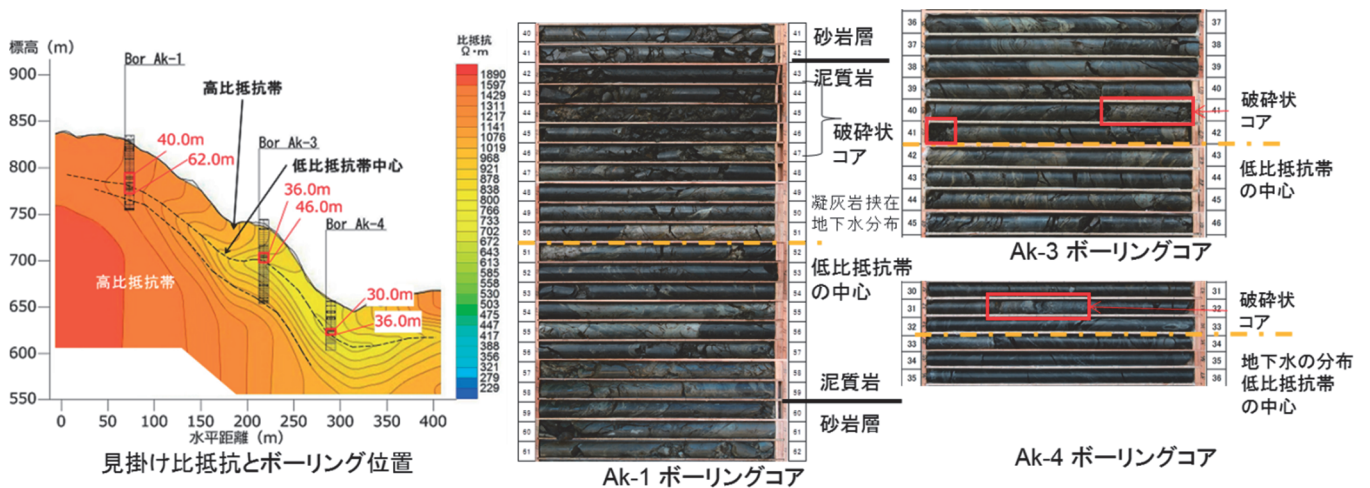


図-7 見掛け比抵抗とボーリングコアとの比較

単位体積当たりの含水量や粘土の含有量など複数の特性で決まることに留意すべきである。

4. おわりに

空中電磁探査による比抵抗分布を分析することで、深層崩壊発生に影響する岩盤の風化の度合いや地下水分布を把握出来る可能性が示された。一方、空中電磁探査による調査結果を深層崩壊発生危険箇所の絞り込み、危険度評価に繋げるためには、深層崩壊が生じた箇所と生じていない箇所に明瞭に違いがあるのか、また、調査結果をどこに着目すると危険度評価が可能となるのか、など更なる研究開発が必要である。今後、紀伊山地を対象にこれらの研究を進めるとともに、他地域で得られた知見も含めて分析し、深層崩壊危険度評価手法の検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 松村和樹ほか：2011年台風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) 土木研究所火山・土石流チーム：深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）、土木研究所資料第4115号、2008
- 3) 土木研究所火山・土石流チーム：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
- 4) 今森直紀ほか：紀伊山地における重力変形斜面と水文・水質特性の関連性について、平成29年度砂防学会研究発表会概要集、pp.236～237、2017
- 5) 小西尚俊、塚田幸広：空中電磁法による地質評価への実際的検証、土木学会論文集、No.680/Ⅲ-55、pp.285～294、2001
- 6) Sengpiel,K.P.and Siemon,B.: Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration, Geophysics, Vol.65, No.6, pp.1983-1992, 2000
- 7) 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：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、1997

田中健貴



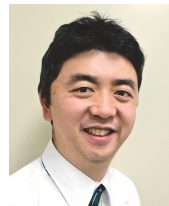
国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター
Yasutaka TANAKA

木下篤彦



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、博士(農学)
Dr. Atsuhiko KINOSHITA

内田太郎



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室長、博士(農学)
Dr. Taro UCHIDA

桜井 亘



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部深層崩壊対策研究官、博士(農学)
Dr. Wataru SAKURAI