

紀伊山地における深層崩壊発生規模の 推定に関する調査

田中 健貴¹

¹大規模土砂災害対策技術センター (〒649-5332 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

深層崩壊は発生頻度は小さいが、発生した場合には甚大な被害をもたらす。深層崩壊による被害を防ぐあるいは軽減するためには、ハード対策とソフト対策が必要であるが、いずれの場合も対象とする深層崩壊の発生規模の推定が重要である。しかし、深層崩壊の崩壊規模を事前に推定する手法は確立されていない。そこで本研究では、近年活用事例が多く報告されている空中電磁探査ならびに弾性波探査を活用し、深層崩壊の崩壊深度を推定した。その結果、空中電磁探査ならびに弾性波探査から推定される岩盤内部の情報は実際のボーリング調査の結果と整合的であり、深層崩壊の崩壊深度を推定する手法として有効であることが示唆された。

キーワード 深層崩壊、重力変形斜面、空中電磁探査、弾性波探査

1. はじめに

2011年台風12号によって紀伊山地では深層崩壊と呼ばれる大規模な斜面崩壊が多発した¹⁾。深層崩壊は、発生頻度は小さいが、崩壊した土砂の直撃、崩壊土砂の土石流化、崩壊土砂による河道閉塞(天然ダム)の形成および決壊、といった甚大な被害を流域に与える。さらに深層崩壊は一度に大量の土砂を生産するため、生産された土砂は長期間流域内に滞留し、再移動を続ける。このことは深層崩壊によって生産された土砂が長期間にわたって河床上昇といった影響を与えることを示唆する。

深層崩壊による被害を軽減または防止、そして生産される大量の土砂の影響を可能な限り低減するためには砂防堰堤等のハード対策ならびに警戒避難情報の発令や早期避難の促進といったソフト対策の両方が必要である²⁾。また生産される大量の土砂の影響を可能な限り低減するためにはハード対策が必要である。ここで特にハード対策を行うにあたっては、事前に深層崩壊の規模を推定する必要がある。これは、建設する砂防堰堤の規模や基数を検討するためである。

これまで深層崩壊の規模の推定は、対象とする地域で過去に発生した深層崩壊跡地の規模を参考とする方法が提案されている³⁾。この方法では崩壊土砂量はGuzzettiの式³⁾(式(1))で算出されることが多い。

$$V=0.074 A_L^{1.45} \dots (1)$$

ここで、 V は崩壊土砂量[m³]、 A_L は崩壊面積[m²]である。しかし、深層崩壊は崩壊深度が大きいため、式(1)に



図-1 2011年台風12号による深層崩壊(赤谷地区)
幅:460m 高さ:600m 長さ:850m
崩壊土砂量:約11378000m³

よる近似から外れる場合があることも指摘されている⁴⁾。また深層崩壊が発生するおそれのある斜面を抽出するにあたっては、深層崩壊の前兆とされる重力変形斜面を抽出する機会が多いが、このような斜面では、実際に崩壊が発生しているわけでは無いため、従来の崩壊面積から崩壊土砂量を推定する方法では崩壊規模が推定できない。

近年、空中電磁探査による広域での地下の岩盤風化状況の調査が行われている。また弾性波探査ではある程度限定的な範囲において崩壊が発生するおそれのあるゆるみ域を抽出することが可能と考えられる⁵⁾⁶⁾。そこで、

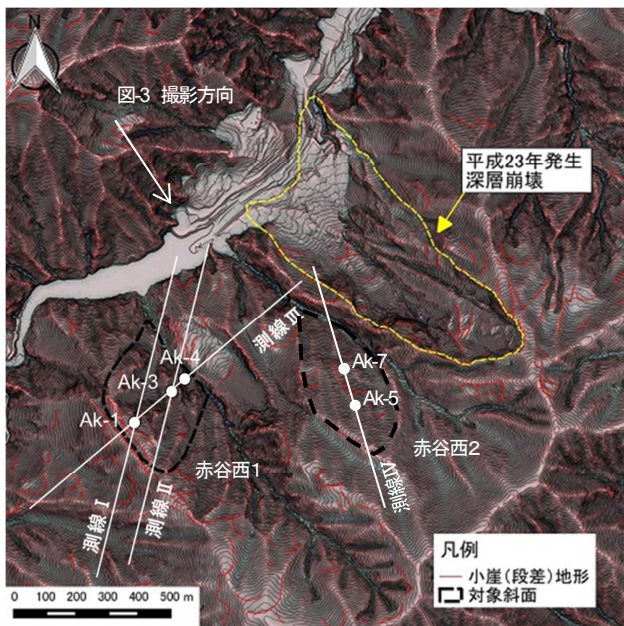


図2 ボーリング箇所と比抵抗断面の測線



図3 調査地周辺の概況

本稿では、これらの方法から重力変形斜面で深層崩壊が発生した場合の崩壊規模、つまり崩壊深度を推定する方法について考察する。

2. 調査地

調査地は、2011年台風12号によって深層崩壊が発生した地区の1つである赤谷地区近傍に位置する重力変形斜面である(図2, 図3)。斜面上方には、重力変形によると考えられる幅約10mの線状凹地が見られる(図4)。当該斜面を含む調査地は、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ている。

当該斜面では、これまでボーリング調査によって地質調査を実施している。

3. 調査方法

深層崩壊の崩壊規模の推定にあたっては、重力変形地形が認められる2斜面(赤谷西1, 赤谷西2)について空

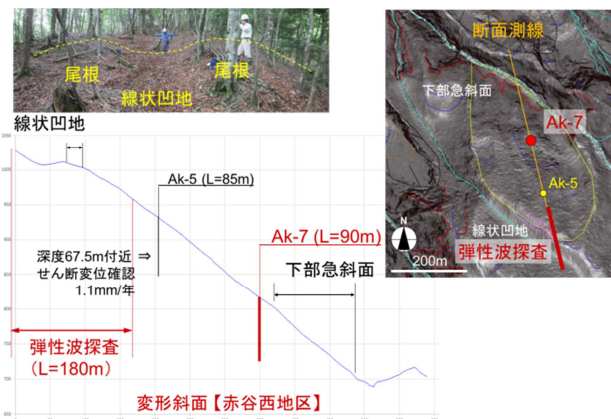


図4 弾性波探査場所

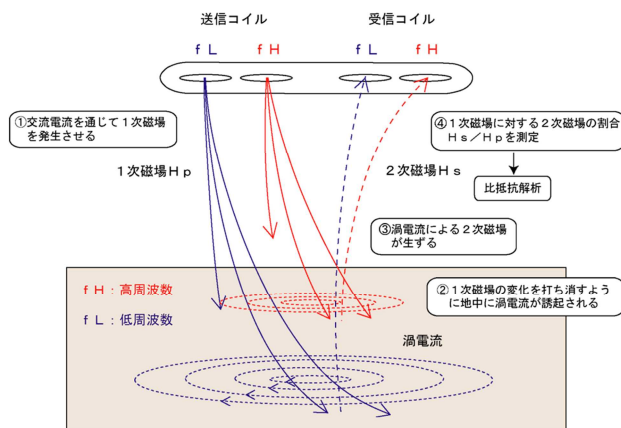


図5 空中電磁探査の観測原理

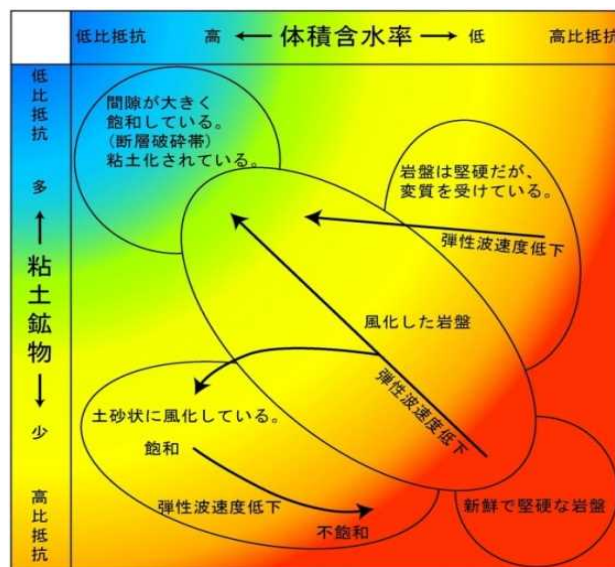


図6 体積含水率・粘土鉱物と比抵抗の関係

中電磁探査を、赤谷西2について弾性波探査で実施し、崩壊深度の推定を試みた。

空中電磁探査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⁷⁾(図5)。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⁸⁾、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-6)。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。比抵抗の分析は平面的あるいは縦断的な比抵抗の変化について行うことが一般的であり、本稿では見掛け比抵抗による方法を用いる。ここで、見掛け比抵抗の断面図では、比抵抗の相対的な変化に着目することが一般的である⁹⁾。

弾性波探査は実際に地盤を伝搬する弾性波の速度を測定することで、地盤構造を調べる手法である。本稿では、地表に配置した起震点から地下で屈折し受信点まで弾性波が到達する速度を測定し、地下の速度構造モデルを求める屈折法とトモグラフィ解析で算出された結果と、孔内速度検層の結果を用いた。地盤の速度構造は、岩種と固結度、間隙や亀裂の状態に左右される物性値で、密実な岩盤ほど弾性波速度は速く、ゆるみが生じた岩盤ほど速度は遅い。そのため、弾性波速度からも深層崩壊発生に関連する基岩の風化やゆるみの度合いが把握できる。

4. 結果

(1) 空中電磁探査による岩盤風化状況の推定

赤谷西1斜面における比抵抗分布とボーリング調査結果の対比を図-7に示す。

赤谷西1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層構造が見られた。一方、ボーリング調査の結果からは、Ak-1では浅部は比較的風化が進み、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。

赤谷西2斜面は地表より深度35m付近まで高比抵抗、深度35~60m付近まで低比抵抗、深度60m以深では相対的に高比抵抗を示す3層構造が見られた。ボーリング調査の結果からは、Ak-5では地表から深度62m付近までは亀裂の開口と風化が認められ、深度62~68m付近に砂岩中の破碎帯と地下水の流入が認められた。特に、深度67.75mまでは特徴的な破碎と開口亀裂が分布しており、別途行っている孔内傾斜計による観測では、1.1mm/年程度のせん断性の地中変位が確認される。Ak-7孔では地表から深度47m付近まで亀裂の開口と風化、局所的な破碎が見られ、深度47~54m付近に破碎帯と地下水の流入が認められた。また破碎度区分による評価の結果、深度54.3mまでは、斜面の重力変形を示唆するCr2からCr4が認められた。破碎帯には粘土が含まれ、コアも相対的に低比抵抗であった。それぞれ破碎帯より深い深度では、概ね亀裂が少ない新鮮な地盤状況が確認された(図-8)。

(2) 弾性波探査によるゆるみ域の推定

赤谷西2での弾性波探査では、重力変形地形を境に、P波速度1.0km/sの層が厚さ10mから30mまで深くなる変化が確認された。また、Ak-7孔では、地表から深度54m付近までは1.7~2.1km/s、それ以深は3.2~3.8km/sと明瞭なP波速度の変化が確認され、線状凹地を挟んだ弾性波探査の結果から考えられるゆるみ域が、斜面の中腹から末端にかけて深くなる傾向があることが分かった。

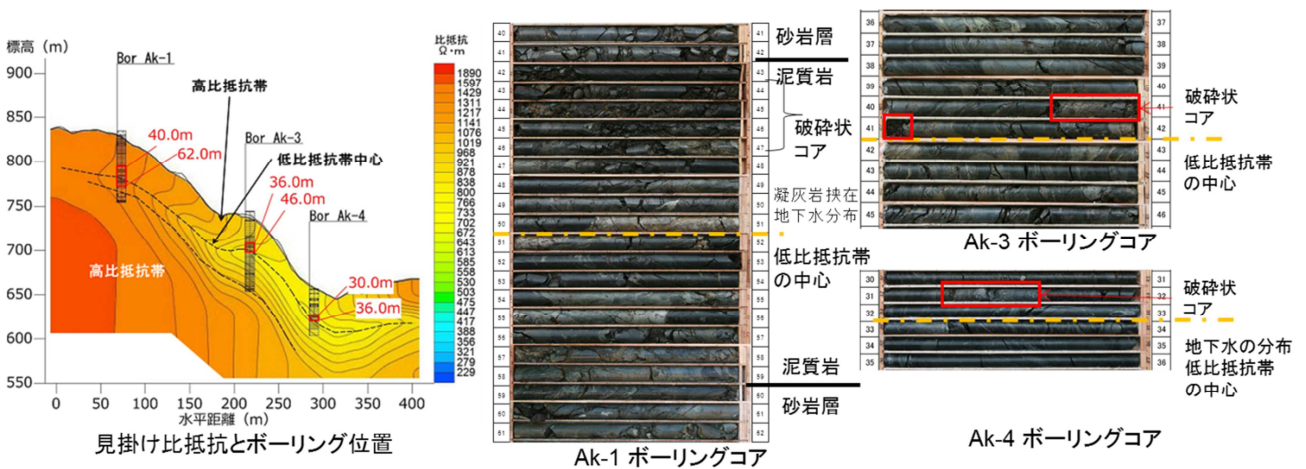


図-7 見掛けの比抵抗とボーリング調査結果の対比

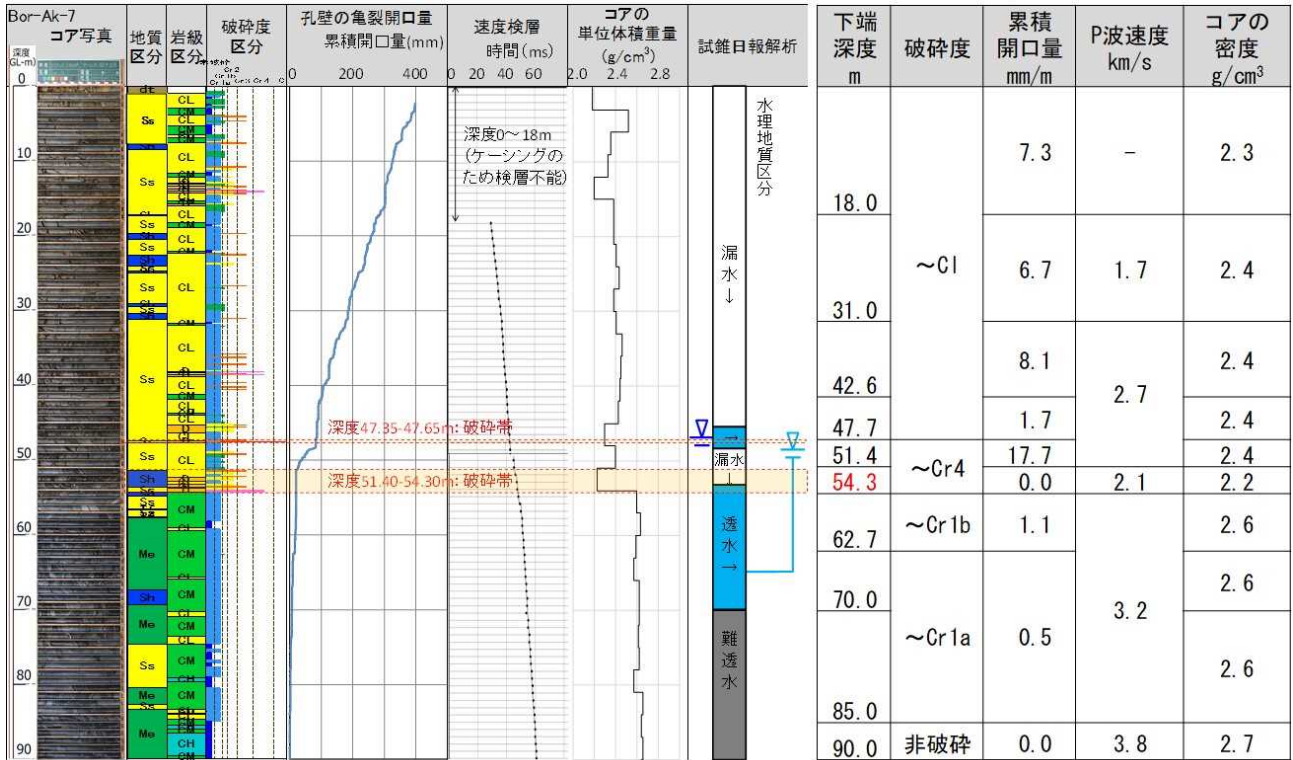
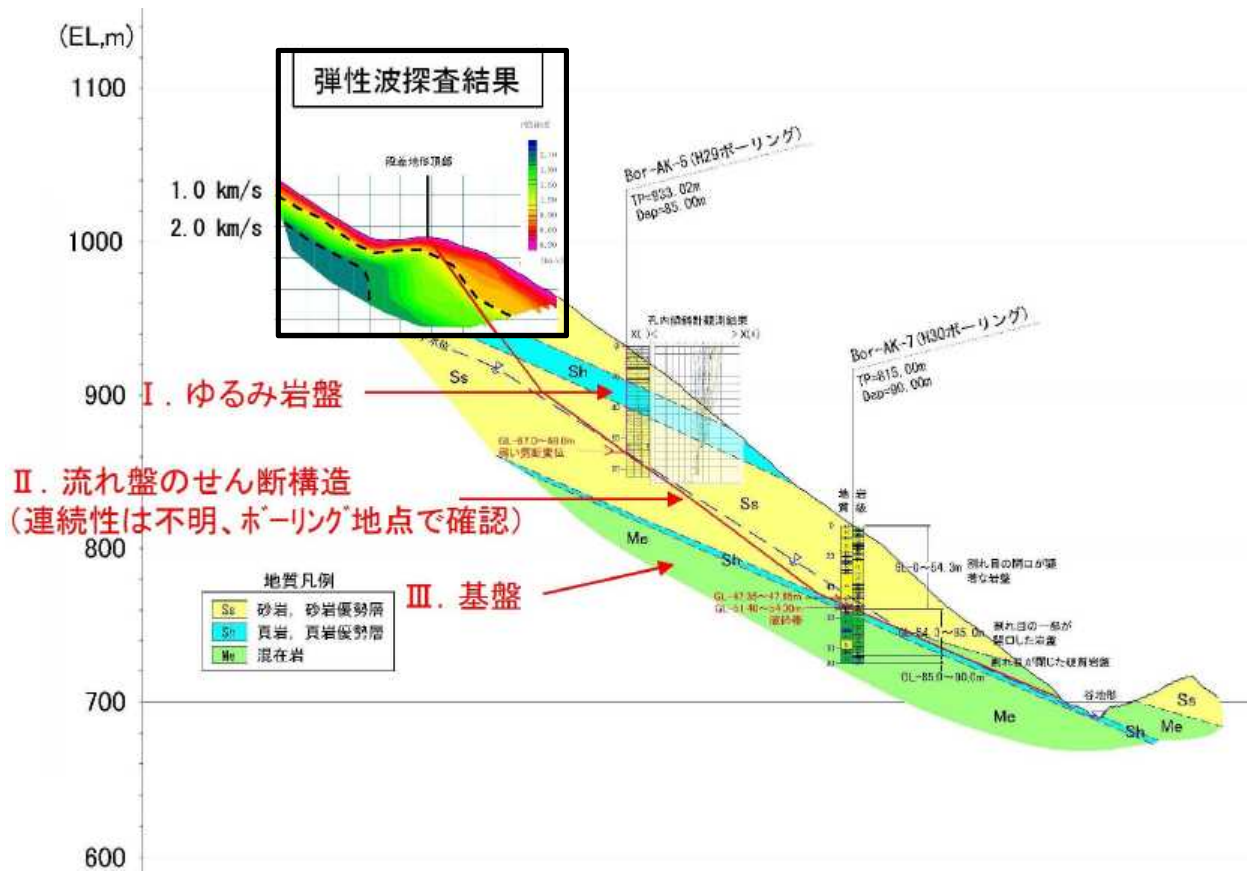


図8 Ak-7におけるボーリング調査結果

深度54.3mを境界に、破碎度区分ではそれよりも上部で~Cr4、下部で~Cr1bと評価した。また1mあたりの開口量は上部で1.7~17.7m, 下部で0.0~1.1mmを、P波速度では上部で1.7~2.7km/s, 下部で3.2~3.8km/sを示した。



赤谷西2 想定地質断面図

図9 弾性波探査調査結果 四角で囲われた範囲を図-10に示す

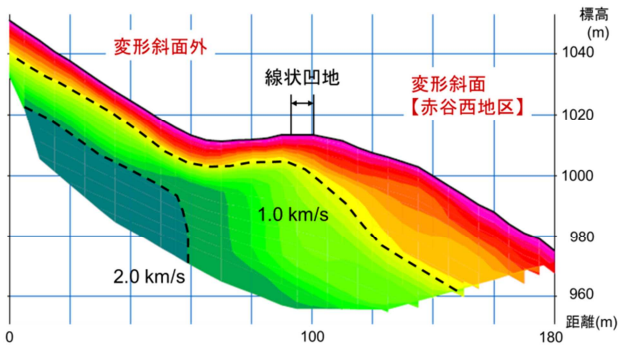


図-10 弾性波探査結果

重力変形による微地形（線状凹地）を境界にP波速度の構造が変化している

5. 考察

空中電磁探査による結果とボーリング調査による結果の対比から、高比抵抗に挟まれた低比抵抗領域には風化の進んだ泥岩や破碎帯、地下水帯が存在する場合があった。泥岩は水分を含んで風化する特徴がある。このことから、高比抵抗に挟まれた低比抵抗領域は水分を含み風化が進んだ泥岩や破碎帯を表現し、地下水が存在することから、この部分をすべり面とした崩壊が発生する可能性を示唆していると考えられる。また斜面の浅部に見られた高比抵抗は風化が進み、亀裂の開口が発達した岩盤を、対照的に深部に位置する高比抵抗は風化、亀裂の開口が少ない新鮮な岩盤であることを示唆すると考えられる。

以上から、高比抵抗に挟まれた低比抵抗領域をすべり面として、浅部の高比抵抗領域が崩壊する可能性が比抵抗分布の分析から推定される。

弾性波探査からは、重力変形地形が認められる領域では、P波速度の遅い風化帯もしくはゆるみ域が周辺に比べ深くまで分布していることが確認されている。このことは、地形から推察される重力変形領域内のゆるみ域とそれ以外の部分の境界を、弾性波探査で捉えていることを示唆する。また速度検層でも、亀裂の開口や破碎が認められる部分とそれ以深の密実な岩盤との境界を、弾性波速度の境界として捉えている。

以上から、弾性波探査により、重力変形斜面に形成されている崩壊が発生するおそれのあるゆるみ域の平面的な分布と鉛直分布の境界を捉えていると考えられる。

なお、空中電磁探査および弾性波探査が両方実施された赤谷西2斜面Ak-7において結果を比較すると、空中電磁探査によって推定される崩壊深度は高比抵抗領域に挟まれる低比抵抗に位置し、破碎帯と地下水が認められる深度47~53mである。弾性波探査によって推定される崩

壊深度はP波速度が明瞭に変化する深度54m付近である。両調査方法による崩壊深度の推定はおおむね一致しており、調和的であることから、赤谷西2斜面において、現時点の調査で推定される崩壊深度はおおよそ深度50m付近と考えられる。

6. まとめ

空中電磁探査から岩盤の風化状況を推定した結果、比抵抗分布に着目することで、良好に風化領域を推定できることが分かった。一方で、比抵抗は地下水の影響も受けることから、他の方法も組み合わせ、岩盤の風化状況を推定することが望ましい。また弾性波探査については、速度構造の明瞭な変化や分布から、ゆるみ域の境界を推定できることが分かった。一方、弾性波速度は工学的指標として使用されている実績があるものの、元々の岩石の種類などにも影響されることから、評価は密実な岩盤と相対的に行うことが望ましい。以上のことから、空中電磁探査や弾性波探査、またはその他の方法を組み合わせた手法を検討することで、より詳細な調査が可能となるものと考えられる。

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) 蒲原潤一・内田太郎：深層崩壊対策技術に関する基本的事項、国土技術政策総合研究所資料 807号
- 3) Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, Rossi M, and Valigi D, Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 279, pp. 222-229, 2011
- 4) 磯貝尚弘・森田耕司・石塚忠範・木下篤彦・高原晃宙：2011年台風12号により紀伊山地において発生した深層崩壊の面積と土塊量、平成26年度砂防学会研究発表会概要集, pp.B-276-277, 2011
- 5) 木下篤彦・石塚忠範・高原晃宙・瀬戸秀治・野池耕平・森加代子・水野秀明：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
- 6) 林幸一郎・窪田安打・小松慎二・橋本裕司・菅原寛明・田中健貴・木下篤彦：奈良県赤谷西地区の重力変形斜面におけるゆるみ域の性状と、変形機構の推定, 2019年度砂防学会研究発表会概要集, pp.371-372, 2019
- 7) Sengpiel, K.P. and Siemon, B.: Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration, Geophysics, Vol.65, No.6, pp.1983-1992, 2000
- 8) 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