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

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　桜井　亘※1・酒井　良※2・奥山悠木
国土防災技術株式会社　○小川内良人・眞弓孝之・横山　修
大日本コンサルタント株式会社　河戸克志・奥村　稔
※1 現：国土交通省国土技術政策総合研究所，※2 現：国土交通省関東地方整備局

1. はじめに

紀伊山地では，平成 23 年 9 月台風 12 号の豪雨により，大規模な深層崩壊が多発し，17 箇所の天然ダムが形成された。このような深層崩壊による被害を軽減するためには，深層崩壊の発生の恐れのある斜面を抽出し，保全対象の重要性を勘案した上で深層崩壊の発生を抑制する有効なハード対策とソフト対策とを組み合わせた事前予防対策が重要である。

広域斜面の地質・地下水状態の概要把握の手法として空中電磁探査がある。紀伊山地では，紀伊半島大水害で発生した赤谷地区，長殿地区，栗平地区，北股地区，熊野地区，坪内地区，清水地区，三越地区の 8 地区（以下，深層崩壊 8 地区と呼ぶ）の深層崩壊地周辺斜面を対象として，平成 24 年 11 月に空中電磁探査が実施され，深層崩壊地周辺斜面の深度方向の比抵抗パターンから深層崩壊した地質構成物質によるタイプ区分と深層崩壊斜面に共通する比抵抗パターンが報告されている[1), 2)]。しかしながら，比抵抗パターンが示す地質・地下水状態や，深層崩壊発生機構との関連性が課題として残された。一方，深層崩壊 8 地区周辺では，詳細な地形，地質，地下水調査が実施されている。

そこで本研究は，深層崩壊発生機構に関連する地形・地質・地下水情報に基づいて空中電磁探査の比抵抗パターンを検証し，両者の相互関係を解析することで，深層崩壊の発生の恐れのある斜面の抽出指標を検討した。

2. 研究方法

2.1 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計測することで地盤内部の比抵抗分布を調査する探査手法である。測定周波数は，140kHz，31kHz，6.9kHz，1.5kHz，0.34kHz の異なる周波数帯域の電磁波を用いることによって，深度 10～150m の斜面内部の異なる 5 深度の比抵抗値を同時に取得できる。

平成 23 年台風 12 号で発生した深層崩壊の内，8 地区の空中電磁探査の測定は，平成 24 年 11 月に実施した（**図-1**）。

2.2 検討方法

深層崩壊 8 地区では，平成 24 年から詳細な地質調査や水文調査が実施されている。深層崩壊 8 地区で得られた地質踏査，調査ボーリング，地下水位観測，水文調査等の結果と空中電磁探査結果から得られた比抵抗パターンとの対比・関係性を分析して，空中電磁探査結果に表現されている事象を検討した。

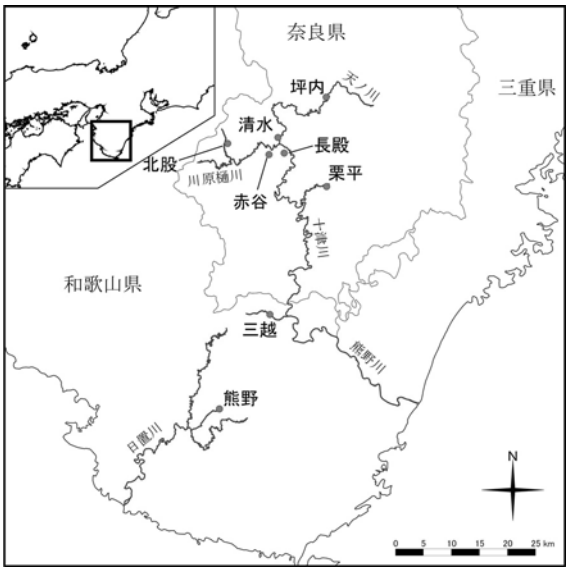

図-1　調査位置図

3. 調査結果

3.1 深層崩壊地内および隣接斜面の比抵抗パターン

比抵抗断面図において比抵抗の相対的な高低とその分布に着目した結果，深層崩壊 8 地区周辺では，特徴的な比抵抗パターンが共通して確認された。この比抵抗パターンは，相対的に高比抵抗を示す領域に低比抵抗部がクサビ状に分布するもので，以下，「**比抵抗ウェッジ**」と呼ぶ（**図-2**）。また，最も低比抵抗となる箇所を連ねたものを「**比抵抗ウェッジ軸**」と呼ぶこととする。

比抵抗ウェッジは，地表面に高比抵抗帯があり，中間層に低比抵抗帯，深部に高比抵抗帯のパターンを示す 3 層構造として表現されるもので，見落としを防止するために比抵抗断面をグリッド形式で作成することで，深層崩壊 8 地区全てに，浅部の比抵抗の高低に関係なく存在することを確認した。

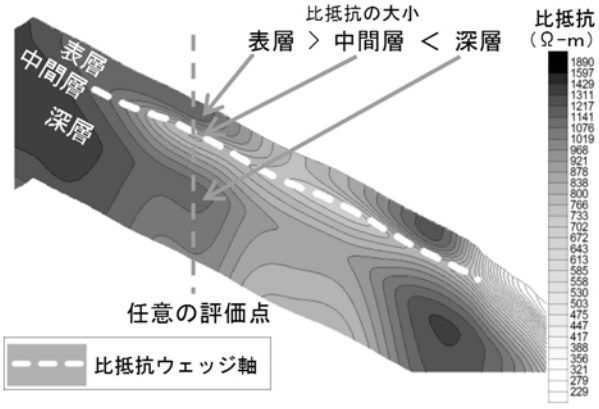

図-2　比抵抗ウェッジを示す比抵抗パターン

3.2 深層崩壊 8 地区の地質・水文特性

深層崩壊 8 地区において実施された調査結果より得られた深層崩壊発生機構に関する地質・水文特性をまとめる。

（1）地質
・斜面に対して流れ盤構造を示す不連続面（層理面，せん断面，小断層，節理等）が発達している。
・不連続面の傾斜は 30° 前後が多く，斜面傾斜と同等もしくはやや緩い傾斜となっている。
・崩壊地に隣接する斜面には，岩盤の緩み域が深い深度まで形成されている。
（2）水文
・崩壊地から更に標高の高い斜面が連続していて，背後の長大斜面から地下水が流入（地下水の集中）している。
・崩壊地背後に沢があり，渓床部に地下水を流入させる透水性の岩盤（砂岩等）や断層が分布する場合が多い。
・平成 26 年 8 月の豪雨時に崩壊地周辺で，地下水位が全地区で約 1 日に 20～40m 程度急上昇した。

3.3 空中電磁探査結果と平成 23 年深層崩壊の崩壊深度および岩盤の緩み域深度との関係

栗平地区の岩盤の緩み域深度や崩壊面，地下水位を比抵抗断面図に重ねた結果を図-3 に示す。

比抵抗ウェッジは，深層崩壊の崩土内と崩壊地に隣接する斜面（岩盤クリープ斜面）で確認される。比抵抗ウェッジの軸部は，深層崩壊の崩土内の地下水位面と崩壊地に隣接するボーリング孔の最高水位面に相当する深度にある（豪雨時に 30m 程度水位が上昇）。隣接する斜面の岩盤の緩み域最深部は，比抵抗ウェッジの軸部より深い位置にあり，比抵抗値が斜面に平行したパターンから鉛直方向に急変する境目（比抵抗ウェッジ底面）付近とほぼ同じ位置に相当する。この比抵抗ウェッジ底面は，崩壊地内の崩壊面に連続している。

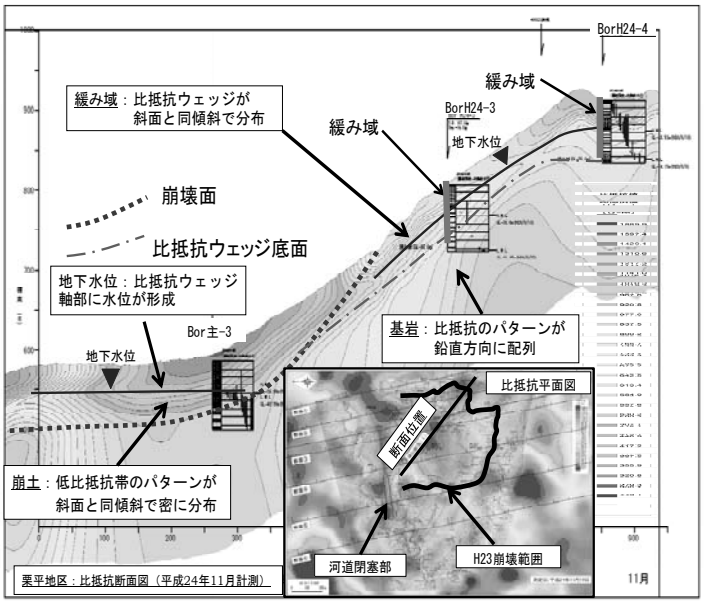

図-3 比抵抗ウェッジと岩盤緩み域と崩壊面の関係

4. 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

深層崩壊地周辺の地質特性から見ると，比抵抗ウェッジの底面（比抵抗パターン急変部）は，岩盤クリープ帯の底面に相当していると考えられる。これを地下水特性から見ると，比抵抗ウェッジは地下水の上昇・下降の範囲内にあり，比抵抗ウェッジ底面付近が地下水の制限床（基岩面）と推定される。深層崩壊に関連する岩盤クリープ斜面は，亀裂が多数発生し高透水性となっているため，地下水は深部にまで浸透し，亀裂の少ない基岩の上面付近に滞水している可能性が高い。ボーリング孔の地下水検層結果ではこの深度付近で地下水の流入が確認されている。また，赤谷地区の比抵抗ウェッジは，崩壊地内の深層地下水に分類される湧水箇所[3]に連なっている。

こうした状況は，比抵抗ウェッジが岩盤の緩み域や地下水の分布など，深層崩壊に関連する水文構造との関連性が深いことを示唆している。

これらのことから，空中電磁探査結果で解析された比抵抗ウェッジは，①岩盤クリープ帯の底面に相当することから災害基準面の最大深度の推定，②深層崩壊に関連する水文地質構造を反映いることから，深層崩壊の発生の恐れのある斜面を抽出するための有力な指標の 1 つとなる可能性を示している。

5. おわりに

本研究では，高比抵抗領域内に低比抵抗部がクサビ状に分布する比抵抗パターンとして「比抵抗ウェッジ」を新たに提案した。比抵抗ウェッジは，比抵抗断面図において比抵抗の相対的な高低とその分布に着目した結果，深層崩壊 8 地区周辺斜面に共通して確認された比抵抗パターンである。地質・水文情報による検証の結果，比抵抗ウェッジは岩盤の緩み域や地下水との関連性が深いことが示唆されることから，崩壊深度の推定や，深層崩壊の発生の恐れのある斜面の抽出指標の 1 つとなる可能性が示された。

今後は，比抵抗ウェッジの平面的な分布と重力性変形斜面との組み合わせによる，深層崩壊の発生の恐れのある斜面を抽出する手法への展開が課題となる。

【参考文献】

1）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，p.356-357，2013
2) 桜井 亘・酒井 良・岩田孝治・奥村 稔・細川亮介・阿部征輝・松下博昭・内田浩一・河戸克志：明治十津川災害と紀伊半島大水害により発生した深層崩壊周辺の比抵抗構造特性，平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集 B，p.280-281，2014
3) 桜井 亘・後藤彦幸・大山 巌・小川内良人・眞弓孝之・海原荘一・只熊典子：土砂流出が頻発する深層崩壊斜面に近接した河道閉塞対策のあり方について，砂防学会誌，Vol.66，No.6， p31-39，2014