

空中電磁探査を活用した地震時斜面崩壊発生場の分析

坂井佑介・内田太郎・山越隆雄・對馬美紗

1. はじめに

地震を誘因とした斜面崩壊（以下「地震時斜面崩壊」という。）による土砂災害の発生時に早期の応急・復旧対応を行うためには、地震時斜面崩壊の危険度を評価し、被害を事前に予測する必要がある。これまで崩壊の発生と地形条件や地震動の関係を統計的に分析し、崩壊発生危険度を評価する手法が数多く検討されてきた¹⁾。一方で、地震時斜面崩壊には地盤構造が大きく影響していると考えられるが、このような統計的な手法において、山地部における広域的な3次元の地盤構造に関する情報が十分に得られていないため、地盤構造が地震時斜面崩壊発生に及ぼす影響は十分に検証されてきていない。このことから、より詳細な地盤構造の影響を考慮した危険度評価手法を作成することができれば、評価精度が高まることが期待される。

そこで筆者らは、空中電磁探査に着目した。空中電磁探査は広域における地盤の深さ方向を含めた比抵抗を把握する探査手法であり、広域における3次元の地盤構造の推定に活用されている。本項では、事前に取得されていた空中電磁探査による比抵抗と平成28年熊本地震で発生した斜面崩壊を重ね合わせて解析し、地震時斜面崩壊発生場における地盤構造の特徴を分析した結果を報告する。

2. 調査概要

2.1 空中電磁探査について

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することで、深さ方向を含む広域の比抵抗を把握する探査手法である（図-1）。実際には、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妨げる（打ち消す）ように渦電流が流れ、その渦電流による二次磁場の強さを受信コ

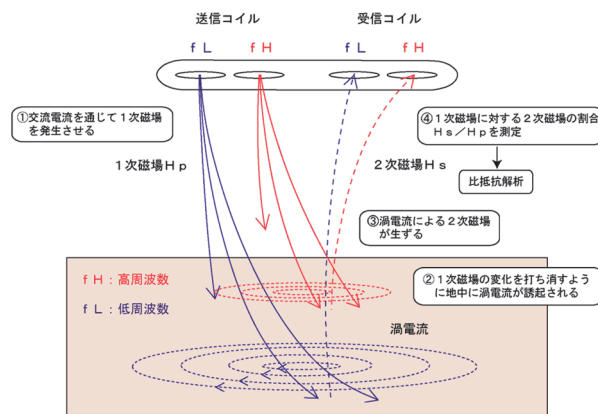


図-1 空中電磁探査の観測原理

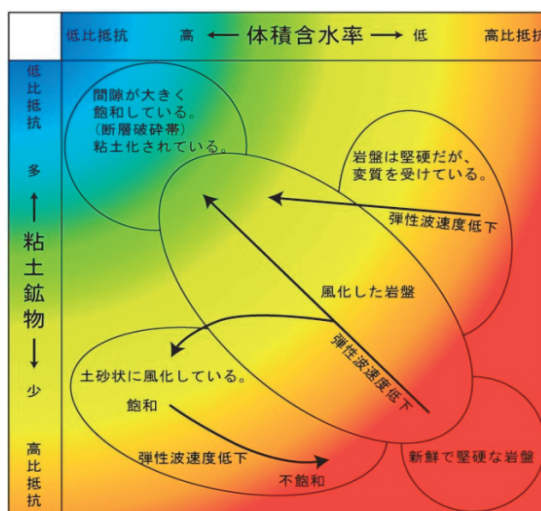


図-2 体積含水率・粘土鉱物と比抵抗の関係³⁾

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²⁾。

比抵抗は、主に単位体積当りの含水量と粘土鉱物の含有量によって支配される物性値である³⁾。一般的に間隙が大きく地下水で飽和した岩盤ほど、あるいは粘土鉱物が多い岩盤ほど比抵抗は低くなる。一方で、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岩盤、すなわち新鮮で堅硬な岩盤ほど比抵抗は高くなる（図-2）。

本研究の対象地とした熊本県阿蘇地域では、平成28年熊本地震前の平成25年12月16日・24日～25日、平成26年3月10日～12日に中央火口丘を中心に国土交通省九州地方整備局九州技術事務所によって空中電磁探査が実施されている。その際の

比抵抗の調査範囲を図-3に示す。

2.2 平成28年熊本地震と斜面崩壊の概要

平成28年熊本地震では、4月14日21時26分の前震（M6.5、北北東－南南西走向の右横ずれ断層）及び4月16日の本震（M7.3、正断層成分を含む北東－南西走向の右横ずれ断層）により、阿蘇カルデラ内を中心に多数の斜面崩壊が発生した。特に、図-3に示すように、崩壊地は中央火口丘周辺斜面、カルデラ壁の西側斜面に集中しており、その数は約1,800箇所以上に上った。また、平成28年熊本地震では、内陸直下の逆断層による平成16年新潟県中越地震や平成20年岩手・宮城内陸地震より崩壊地の数は少ないが、横ずれ断層の地震としては、昭和59年長野県西部地震と並んで、近年の地震の中でも数多くの崩壊や大規模崩壊が発生したことが報告されている⁴⁾。

2.3 解析方法

空中電磁探査では、探査に使用する周波数によって探査深度が変わる。本研究で使用する比抵抗の調査に使用された周波数・探査深度はそれぞれ、140,000Hz・6m、31,000Hz・14m、6,900Hz・30m、3,300Hz・45m、1,500Hz・65m、340Hz・140mである。そして、この探査深度で取得された比抵抗を3次元的に補間することで、深度10m毎に深度0～100mまでの比抵抗データが整理されている（図-4）。

比抵抗については、既往研究⁵⁾により、比抵抗の深さ方向における変化傾向と地盤構造との関係が示唆されている。このことから、本研究では2つの深度間（以下「深度区間」という。）の比抵抗

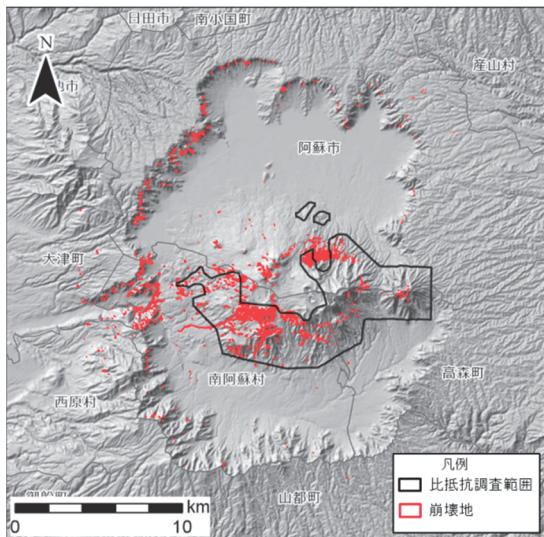


図-3 比抵抗の調査対象範囲と熊本地震の崩壊地

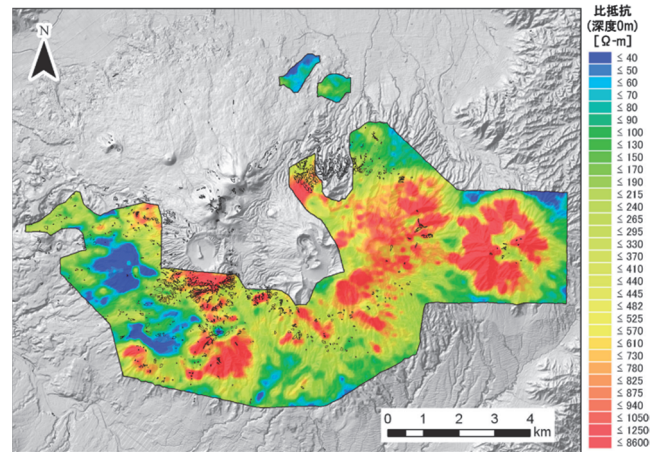


図-4 比抵抗（深度0m）の分布

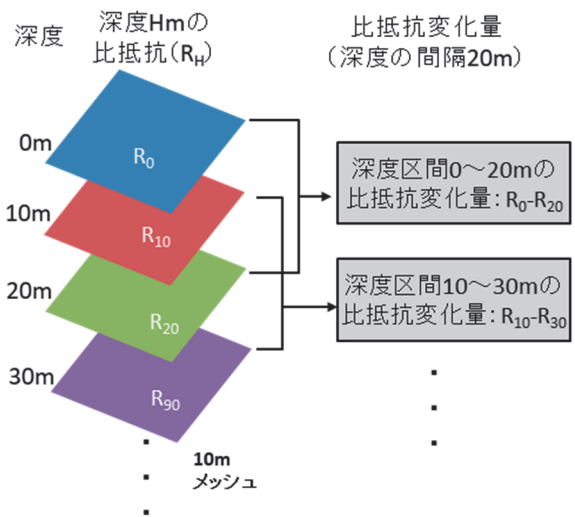


図-5 比抵抗変化量の算出イメージ

抗変化量を分析に用いることとした。比抵抗変化量は、ある深度の比抵抗からそれより深い深度の比抵抗を差し引くことによって算出する。ここで、差し引く比抵抗の深度の間隔を比抵抗データが整理されている10mとすると、同一の周波数・探査深度で取得された比抵抗を比較するケースが多くなるため、本研究では20mに設定した。ここまで述べた比抵抗変化量の算出イメージを図-5に示す。

そして、比抵抗の調査対象範囲を10mメッシュに分割し、メッシュの重心が崩壊地内に入るメッシュを崩壊メッシュとして設定した。その上で、比抵抗変化量を10階級に区分し、階級別の崩壊メッシュ数を階級別の全メッシュ数で除して崩壊メッシュ率を算出した。なお、階級の区分にあたっては、崩壊メッシュ率を求める際に母数が少ないことで偏った値とならないよう、階級の値の幅を試行錯誤して設定している。すなわち、全

583,681メッシュに対して、ある程度階級毎のメッシュ数が均等になるように10Ω・m刻みで区分している。

3. 調査結果と考察

3.1 調査結果

比抵抗変化量の階級別崩壊メッシュ率について、深度0m～100mを計9つの深度区間で比抵抗変化量を算出しているが、ここでは、深度区間0～20m、10～30m、20～40mの結果を図-6に示す。なお、比抵抗測定範囲内における全崩壊メッシュ数を全メッシュ数で除した平均崩壊メッシュ率は2.49%である。

図-6より、比抵抗変化量の階級が正の方向に大きくなると崩壊メッシュ率が高くなる傾向が見

られた。特に、深度区間10～30m、20～40mでは比抵抗変化量が負から正の値になる階級を境界として崩壊メッシュ率が急激に増加する結果となった。一方で、負の値が最も大きい階級でも崩壊メッシュ率が増加する傾向があることがわかった。

3.2 考察

ここでは、比抵抗変化量が正の値になる階級で崩壊メッシュ率が高いことに着目する。比抵抗変化量が正の値になることは、例えば深度区間10m～30mの場合、深度10mでより比抵抗が高く深度30mでより比抵抗が低い、すなわち深くなるにつれて新鮮で堅硬な岩盤から粘土が多く地下水が飽和しているような軟弱な岩盤に遷移していることを示している。このような軟弱な岩盤の上層を堅硬な岩盤が覆うような地盤構造は、キャップロック構造に類似している。実際に、既往研究⁵⁾では、平成28年熊本地震で斜面崩壊が多発した阿蘇西麓地熱地帯において、空中電磁探査とボーリング調査結果の対比から、キャップロック構造に類似した地盤構造が検出されている。

また、過去の地震事例においては、キャップロック構造を有する斜面で崩壊が発生した事例が多数報告されている⁶⁾。これらのことから、比抵抗変化量が正の値になる場所ではキャップロック構造に類似した地盤構造が存在し、そのような場所で相対的により多くの地震時斜面崩壊が発生したことが考えられる。

次に、深度区間0～20m、10～30m、20～40mに共通して、比抵抗変化量が正の値になる階級で崩壊メッシュ率が増加することから、堅硬な岩盤から軟弱な岩盤に遷移する区間が多いと地震時斜面崩壊が発生しやすくなるのではないかと筆者らは考えた。そこで、メッシュ毎に比抵抗変化量が正の値となる深度区間数と崩壊メッシュ率との関係を分析した(図-7)。この結果から、比抵抗変化量が正の値になる深度区間数が多いほど、すなわち、堅硬な地盤から軟弱な地盤に遷移する区間が多いほど、崩壊メッシュ率が高くなることがわかった。

このような結果が得られた要因として、地震動の地盤内での伝わり方と関係しているのではないかと考えている。一般的に、軟弱地盤では地震波が増幅され揺れやすくなることが知られている⁷⁾。

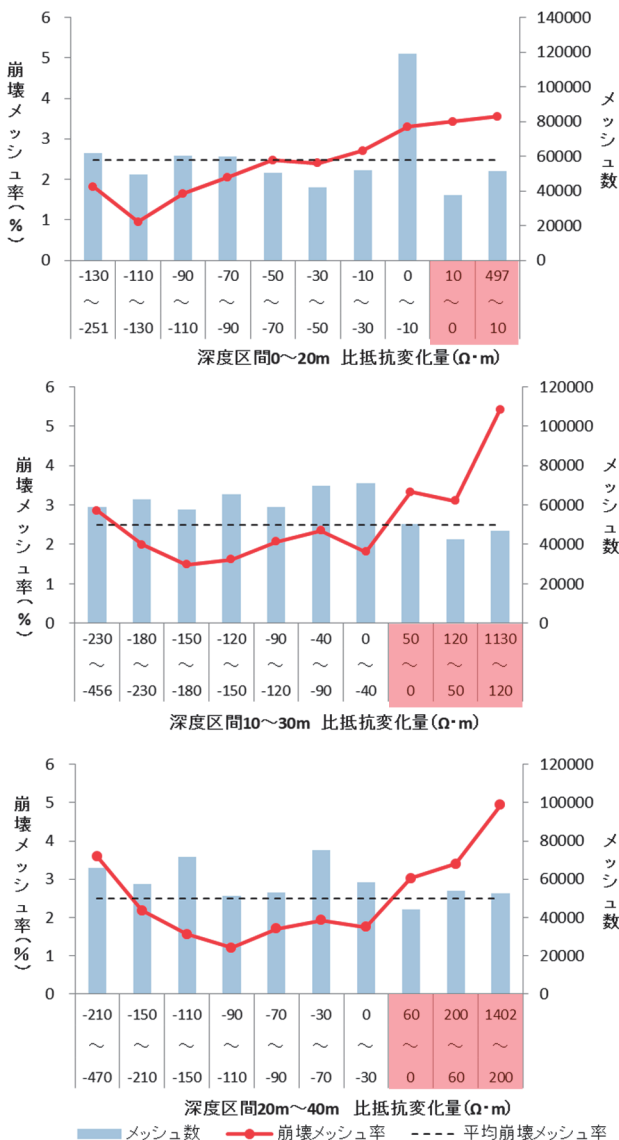


図-6 比抵抗変化量の階級別崩壊メッシュ率

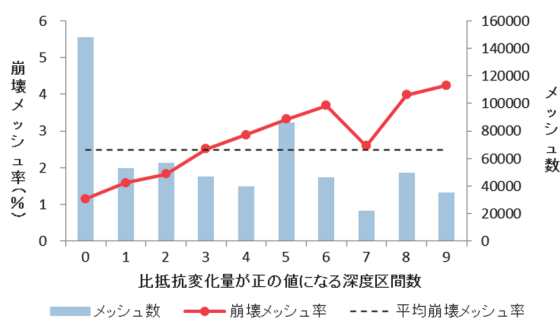


図-7 比抵抗変化量が正の値になる深度区間数と崩壊メッシュ率

深さ方向に新鮮で堅硬な岩盤から軟弱な岩盤に移る区間では、軟弱な地盤中で増幅された地震動がより堅硬な表層地盤の力学的安定性に影響を与えて、斜面崩壊が発生しやすくなっている可能性があると考えている。

4. まとめ

本稿では、空中電磁探査により取得される比抵抗と平成28年熊本地震で発生した斜面崩壊を重ね合わせて解析し、地震時斜面崩壊発生場の地盤構造の特徴について分析した。その結果、深さ方向の比抵抗変化量が正の値になる場所において斜面崩壊が発生する確率が高いことがわかった。

このような結果が得られた要因として、地震時斜面崩壊が発生しやすい地盤構造、また、地震動が増幅されやすい地盤構造を有している可能性が考えられる。今後より詳細に要因を分析するためには、地震時斜面崩壊の発生箇所におけるボーリングデータと空中電磁探査による比抵抗データ、山地部における広域的な地震動と空中電磁探査による比抵抗データとを対比して検証することが必要であると考えられる。さらに、空中電磁探査で得

られた比抵抗データと地震時斜面崩壊との分析は、現在のところ平成28年熊本地震における1事例のみであるため、分析事例が蓄積されることが望まれる。

国土技術政策総合研究所では、引き続き地震時斜面崩壊の発生場の分析を進めるとともに、地盤構造を考慮した危険度評価のための研究を進めていく予定である。

謝 辞

本研究に係るデータを提供頂いた国土交通省九州地方整備局に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、内田太郎、片岡正次郎、岩男忠明、松尾修、寺田秀樹、中野泰雄、杉浦信男、小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料第204号、2004
- 2) 物理探査学会：物理探査ハンドブック【手法編5章-7章】空中電磁法、pp.358~363、1998
- 3) 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
- 4) 国土技術政策総合研究所：平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料第967号、pp.151~191
- 5) 坂井佑介、河戸克志、佐渡耕一郎、平川泰之：阿蘇西麓地熱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、第69巻1号、pp.20~29、2016
- 6) 例えば、三森利昭、大丸裕武、黒川潮、岡本隆、村上亘、多田泰之、小川泰浩、岡田康彦、大野泰宏、野口正二、安田幸生、浅野志穂、安田正次：岩手・宮城内陸地震で発生した崩壊の特徴、平成21年度砂防学会研究発表会概要集、pp.14~15、2009
- 7) 伯野元彦：被害から学ぶ地震工学、1992

坂井佑介



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 主任研究官
Yusuke SAKAI

内田太郎



研究当時 国土交通省国土技術政策研究所土砂災害研究部砂防研究室長、現 筑波大学生命環境系准教授
Taro UCHIDA

山越隆雄



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
Takao YAMAKOSHI

對馬美紗



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 交流研究員
Misa TSUSHIMA