

空中電磁法による地すべり土塊可視化例

An Example of Imaging a Land Slide Mass Using Heli-borne EM Data

中 村 康 夫 (なかむら やすお)

建設省土木研究所環境部地質研究室 室長

藤 井 厚 企 (ふじい あつき)

建設省土木研究所環境部地質研究室

佐々木 靖 人 (ささき やすひと)

建設省土木研究所環境部地質研究室 研究員

小 西 尚 俊 (こにし なおとし)

大日本コンサルタント(株)調査事業部探査部 探査部長

1. はじめに

斜面防災を目的とした調査は数多く行われているが、調査は一般に極めて広域にわたり、また調査域には踏査が困難な急峻な山岳域も多く含まれるため、不安定斜面を見逃しなく抽出することは極めて難しい。このため従来から空中写真判読やリモートセンシングによる面的な斜面評価が試みられているが、この種の調査手法では、地形情報や地表付近の情報しか得ることができない。斜面の安定度評価において最も重要なのは不安定地山内部の情報である。特に、風化層の厚さや状態、地下水位等の斜面内部情報を空中から三次元的に探査することができるならば、斜面防災分野の飛躍的な進歩が図られる。一方、資源探査分野では、地表に露出していない鉱床を空中から探知する方法として、空中電磁法が開発・利用されてきている。この方法は電気探査法の一つで、地下の比抵抗構造を求めることができ、迅速で三次元的な探査が可能であるという点で、斜面の概査に適した手法と考えられる。そこで著者らは、空中電磁法の分解能を高めるために機器の改良を行った。本報告は、この機器による山岳地域での現地地すべり探査実験の概要である。(口絵写真—16～17参照)

2. 空中電磁法の概要

2.1 探査原理

ヘリ等を用いて地表上数十mに配置した電磁コイル(送信および受信コイル対)のうち送信コイルに交流電流を通じると、コイルの周辺に交流磁場(1次磁場)が発生する。この交流磁場が地盤中を通過する時に、地盤中にはこの磁場を打ち消すように渦

電流が誘起され、これが別の交流磁場(2次磁場)を発生させる。2次磁場の強さは地盤の比抵抗と負の相関があるので、1次磁場に対する2次磁場の割合を受信コイルで測定することにより、磁場が透入した深度までの地盤の平均的な比抵抗が測定される。交流電流の周波数が高くなるにつれて磁場の透入深度が小さくなるので、同時に複数の周波数を用いて測定し、その各々の周波数での平均比抵抗を求めて解析することにより、地盤の比抵抗断面図を描くことができる。

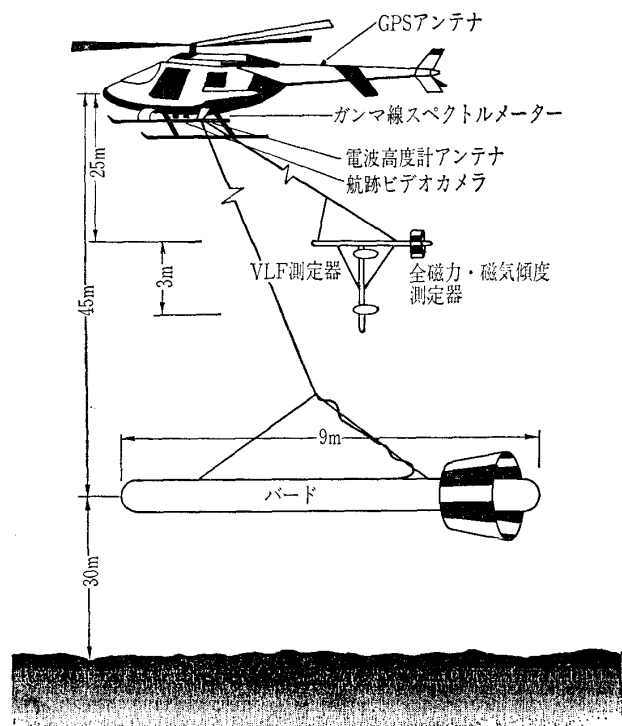
2.2 探査方法

ヘリコプター利用の空中電磁法では、電磁センサーを収納したバードと呼ばれる架台(10m×0.6φ)の対地高度を、おおむね30m程度に保ち地形をなぞるように飛行し測定する。バードの中には5対の送・受信コイルが含まれており、5周波数同時に測定を行う。高周波数では地下浅所の、低周波数では地下深所の比抵抗情報を取得する。飛行速度は地形に依存するが、35～80 km 程度である。測線間隔は調査目的によって異なるが、土木地質分野では一般に50～200m 程度である。航跡の確認には相対測位 GPS とビデオ画像観察とを併用しており、その精度は±5 m以内である。図—1に概観図を示す。

データ処理および解析はコンピューターによりほぼ自動的に行われる。通常、5周波数についての比抵抗分布平面図および指定した測線についての比抵抗断面図が出力される。

また、空中電磁法の測定と同時に空中磁気測定も実施するのが普通である。空中磁気測定の結果は、地質分布の判定、変質帯の抽出、断層・破碎帯等の断裂構造の探知、貫入岩・岩脈等の識別等に有用で

事例報告



図一 測定時の概観図

あり、空中電磁法の結果と合わせて解釈することにより、その精度がより向上する。

2.3 従来の地上電気探査法との相違

空中電磁法と従来の地上電気探査法（比抵抗法）との違いは、後者では比抵抗の絶対値というよりは比抵抗の相対的変化を測定しているが、前者では比抵抗の絶対値の小さい所を選択的に抽出する傾向がある。前者で得られる見掛け比抵抗値は後者のそれよりも真の比抵抗値に近い。また、比抵抗法では地形や電極近傍の局所ノイズ等の影響が非常に大きい。空中電磁法は大地に非接触なので地形の影響を受けることがなく均質なデータを得ることができるという特徴がある。その上、連続的に高密度（5サンプリング/秒）で測定しているために、比抵抗異常の探知に加えて比抵抗マッピングやサウンディングにも威力を発揮する。空中電磁法は比較的広域を精度良く迅速に低コストで調査する方法であり、調査量として測線長延10km程度以上の場合には調査費用等の経済性も電気探査法を上回っている。

3. 土木分野に向けたシステムの改良

電磁法における電磁場の地中への透入深度は、地下の比抵抗分布と測定周波数との関数であるので、できるだけ測定周波数を広くとることが望ましい。

主に資源探査分野で用いられている空中電磁法の周波数範囲は1~30kHz程度と比較的狭いため、現状のままでは地下浅部を対称とする土木地質調査への適用は必ずしも有用とはいえない。そこで、水平成層モデルに対する理論式を用いて有用周波数範囲の検討を行った。その結果、周波数を低くすることは、可探深度を増大させるという利点がある反面、飛行時の揺れ等によるノイズの影響を受けやすく、中～高比抵抗分布域での応答感度が鈍くなる等の欠点もある。一方、周波数を高くすることは、可探深度が小さくなること、クロス・トーク（混信）が生じやすい等の欠点はあるものの、中～高比抵抗分布域での応答感度の大幅な増大、微細地質構造に対する分解能の向上、第1層（最上層）の比抵抗値の決定能力の向上等の利点があり、空中電磁法を土木地質分野に適用する上で不可欠の要素になっていると考えられる。したがって、測定周波数をいかに広く設定するかに主眼を置き、更に製作上の制約も考慮して、220, 1100, 5500, 27500および137500Hzの5周波数で、現存するこの種のシステムの中では最も幅の広い周波数帯域を有するシステムを完成させた。

4. 実証試験

4.1 調査地の地質と地すべりの特徴

調査地は熊本県人吉市の北方の山地斜面である。本地域には四万十帯北帯に属する中生代の砂岩や頁岩の互層が広く分布している。走向はほぼN60°Eである。

本地域の斜面は深い峡谷の上部に比較的緩やかな斜面が分布するのが特徴であり、この緩斜面の部分に地すべりが見られる。地すべり地形は、かなり明りょうなものから不明りょうなものまで様々である。調査や対策が行われているいくつかの地すべりについて、そのボーリングコアを観察すると、砂岩や頁岩の中の断層破碎帯等を境にしてすべりが発生する、いわゆる岩すべりタイプが多い。

4.2 調査概要

調査地はV字谷形の急峻な地形であるために、流域の斜面とほぼ平行な方向に測線を配し、斜面沿いに対地高度を約40mに保って測定を実施した。流域の方向はおおむねNNW—SSEであるので、測線は地質走向とおおむね直交している。測定時の状況は

次のとおりである。

調査面積：約 10.5 km²，延測線長：68 km，測線間隔：50～70m，平均飛行速度：約 30 km/h，平均対地高度：約 40m，延測定時間：約 3 時間，使用ヘリコプター：アエロスパシアル SA315B

4.3 調査結果

(1) 調査地の比抵抗分布の特徴

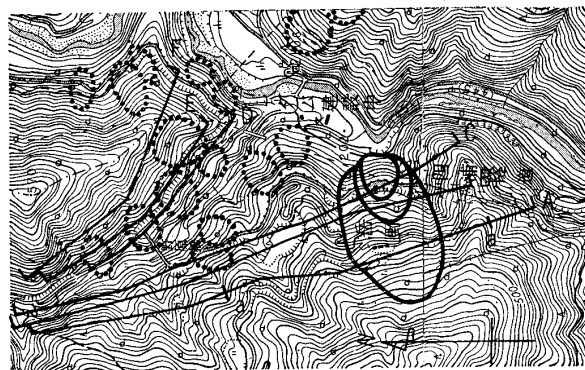
解析により得られた調査地の見掛け比抵抗分布は、全般的に 1 000～2 000 Ω -m と比較的高い。地質分布から、この高比抵抗は堅硬緻密な砂質粘板岩の影響を反映していると考えられる。高比抵抗分布の中に 200～500 Ω -m と部分的に比較的低～中比抵抗を示す異常部が認められる。これらの比抵抗異常部と地形との関係を見ると、緩斜面に位置するものと河床近くに位置するものとに大別される。後者はおおむね崩落岩・土の堆積部に対比される。前者と空中写真判読から得られた地すべり地形箇所とを対比した場合、両者はおおむね良く合致しているため、緩斜面で認められる比較的低～中比抵抗異常は風化帯や変質帯の影響を反映していると考えられる。

(2) 地すべり箇所での調査結果例

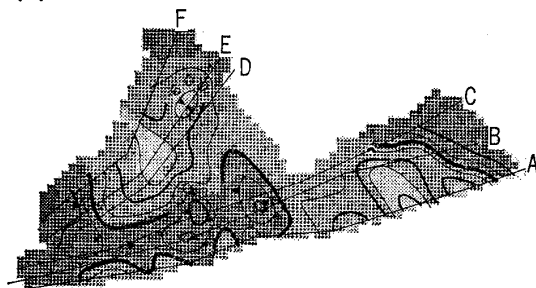
図—2 に地すべり箇所での調査結果例の平面分布を示す。図中の地すべり地形の中で、実線は調査・対策が行われているものを、破線は空中写真判読の結果をそれぞれ示している。前者については、上位より崖錐、破碎部、強～中風化粘板岩／砂岩、弱風化岩、粘板岩／砂岩基盤となっている。周波数 137.5 kHz の見掛け比抵抗分布では地すべり箇所は比較的中～低比抵抗に対比されるが、5.5 kHz では明りょうな低比抵抗異常に対比される。地表近傍の比抵抗は必ずしも低くはないが、その下位の風化帯は低比抵抗になっていることを示している。

図—3 に前図の中によく調べられている地すべり箇所（実線部）について Sengpiel（セングピール）の手法¹⁾により断面表示した例を示す。これは、電磁波の地下への透入深度が周波数と比抵抗値との関数であることを利用して、各測点ごとに各々の周波数について電磁波の平均透入深度を求め、その位置に対応する見掛け比抵抗値をプロットしたものである。比抵抗断面において深度 30～40m 付近に見られる中～低比抵抗帯は、ボーリングで確認されている地すべりの強風化帯に水平的にも深度的にも対比さ

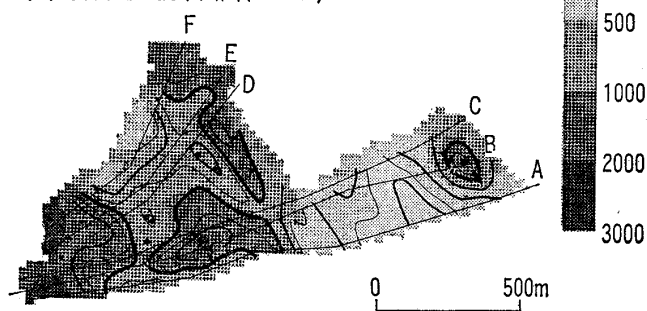
(a) 地すべり箇所図



(b) 見掛け比抵抗平面図(137.5kHz)



(c) 見掛け比抵抗平面図(5.5kHz)



図—2 地すべり箇所での調査例

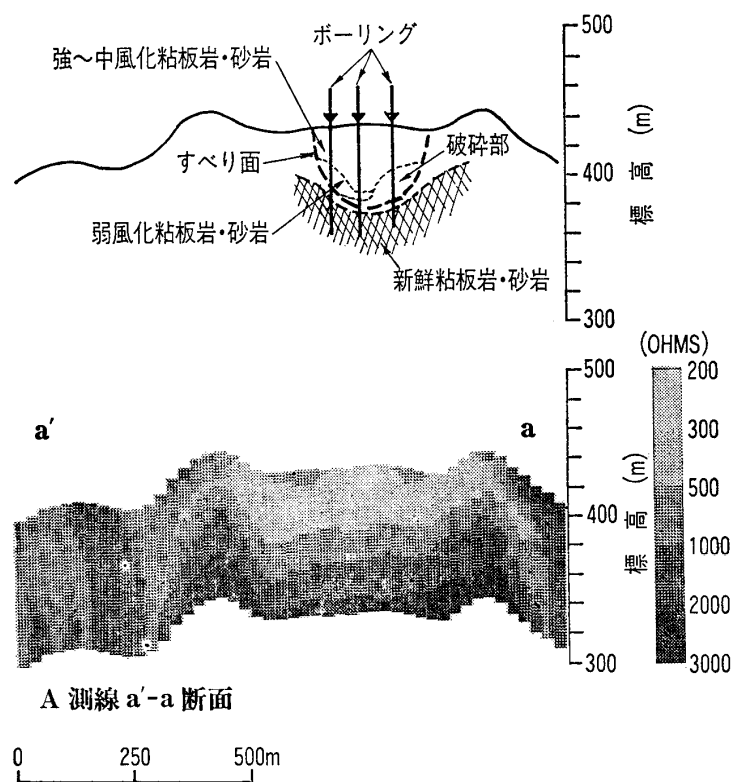
れ、空中電磁法の低比抵抗異常（風化・変質帯）に対する探知能力の高さを示している。また、この比抵抗断面表示は、地中の可視化（イメージング）の 1 例と考えられ、これにより地下の比抵抗構造をより視覚的、具体的に得ることができる。

(3) まとめ

地すべり地形の明りょうなタイプでは、周辺の堅岩が 500～数千 Ω -m であるのに対し、地すべり土塊内では 200～300 Ω -m 程度の低比抵抗帯となることが分かった。一方、地すべり地形が不明りょうなタイプでは、土塊内、土塊外ともに 500～数千 Ω -m とあまり明りょうな比抵抗の差異を生じないものが多い。

以上の点を整理すると、初生すべりに近い地すべ

事例報告



図—3 地すべり箇所と見かけ比抵抗断面図

り（岩すべり）ではすべり土塊内の岩盤の破碎が進んでいないために土塊内と土塊外との比抵抗コントラストが約2以下と小さく探査が困難であるが、発達した地すべりでは、移動に伴う土塊内の破壊が進行し、同時に地下水の循環等により風化も進行するため、土塊内と土塊外との比抵抗コントラストが3～4倍以上となって探査が可能になるものと考えられる。

5. おわりに

今回の実証試験の結果、地すべり土塊内と土塊外との比抵抗コントラストが3～4倍程度であれば、空中電磁法による探査が可能であることが分かった。通常、粘性土、崩壊土あるいは風化岩タイプの地すべり箇所では5倍以上の比抵抗コントラストが考えられるので、空中電磁法はこれらのタイプの地すべり箇所の探査、抽出に有効であると判断される。

山岳地域の三次元的探査を迅速に行う手法としては現在のところ空中電磁法以外に適切な手法が見あたらないので、今後、斜面概査法としての本手法の適用性を更に調査していく必要がある。第三紀層などの軟岩地域で同様の実証試験を実施し、本方法の精度を検証すること、急峻な斜面地形における飛行方法を検討すること、インバージョンをはじめとする定量的解析技術を確立すること等も今後の課題である。

なお、本研究は建設省と民間各社の官民連帯共同研究である「新地盤探査技術の開発」の中の「斜面の探査技術」グループの研究内容の一部である。研究を進めるにあたり御協力、御助言を賜った本共同研究の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Sengpiel, K.P.: Approximate Inversion of AEM Data from a Multilayered Ground, Geoph. Prosp., Vol. 36, pp. 446～459, 1988.

(原稿受理 1993.11.1)