

# 谷埋め盛土内部の水分分布の電気探査による把握

尾西恭亮・小林貴幸・加藤俊二・東 拓生・齋藤清志

## 1. はじめに

盛土の崩壊は主に降雨と地震により生じる。降雨等による飽和領域の拡大が土のサクシジョンの低下を招き剛性や強度が低下する<sup>1)</sup>。例えば、東名高速道路牧之原地区の法面崩落(H21)は、地下水位の上昇と地震が原因と推定されている<sup>2)</sup>。そのため、耐震性を高めるためには、地下水位を高位に止まらせないことが重要となる。

盛土内の地下水位は供給量と排水量の需給関係で決定される。そのため、雨水だけでなく地下水流動によっても地下水の供給を受ける谷埋め盛土は、地下水位の管理の必要性が高い。したがって、地下水の流路となる谷筋の場所の情報と、排水性が低下している領域の把握が有効となる。

過去の施工記録だけでは情報が不足している場合に、ボーリングや貫入試験により地下水位や土質分布を知ることができる。しかし、谷埋め盛土の大きさや土質分布の不均質性によっては、調査位置が10m程度ずれるだけで、脆弱な箇所を見逃す可能性がある。

一方、物理探査を用いることにより、脆弱な箇所や水分の高い区間の中心部を数m以内の精度で特定することができる。中でも地下水への感度特性や、盛土斜面での調査の行いやすさから、電気探査の有効性が高い。そこで、水位観測井の存在する被災盛土において集水地形や宙水の分布の把握を目的とし、電気探査の適用試験を実施したので報告する。また、電極点数を大幅に縮減して3次元探査を可能とする省力型の解析手法の適用性を検証したので合わせて報告する。

## 2. 電気探査

### 2.1 電気探査が測定する地盤の物性値

地下水の存在域や透水経路などに関する地下の情報を、掘削を伴わずに調査する方法として電気探査が存在する。電気探査により地盤内部の電気

の流れやすい領域を把握できる。同じ地層であれば、水分量が多ければ電気が流れやすくなり、地層が異なる場合、排水性を低下させる粘性土の割合が増えると電気が流れやすくなる。

電気探査は、地表に打設した電極棒を用いて地盤の電気の流れ方を測定し、地盤の電気伝導度の分布を求める手法である<sup>3)</sup>。一般的に、電気伝導度の逆数（電気の流れにくさ）を表す電気抵抗率の分布として結果を表す。電気抵抗率は地盤調査の分野では一般に比抵抗と呼んでいる。「比」抵抗といっても何らかの基準抵抗値に対する比率を指す物理量ではなく、 $\Omega \text{ m}$ という絶対的な物理量で表される物性値である。

$\Omega$ はSI単位系であり、 $V / A$ （電位差/電流）に相当する。 $1\text{m}^3$ 当たりの比抵抗（電気抵抗率） $\rho$ を用いて、電気抵抗 $R(\Omega)$ は  $R = \rho L / A$  で表される（図-1）。ここで、 $L$ は導体の長さ(m)で $A$ は導体の断面積( $\text{m}^2$ )である。このため、比抵抗の単位は $\Omega \text{ m}$ となる。

### 2.2 電気探査の測定と解析の特徴

地盤の電気の流れやすさを測定する際に、テスターの様な2点による測定方法では、電極棒と地盤との間の抵抗分が除去できないため難しい。電気探査では、電流を流す電極と電位測定用の電極を異なる地点に設定して、地盤の電位分布の測定を実現している。

注目する電極の間隔が短ければ地表付近の影響が強く、長ければ深い地盤の影響も含む。解析では、仮定の比抵抗分布に対して数値解析により測定されるであろう記録（電流と電位）を計算する。これが実際の測定値と近くなるように仮定の比抵抗分布を修正する。この逆解析手続きを繰り返し、十分に収束した仮定の比抵抗を最終結果として地盤の比抵抗分布とする。

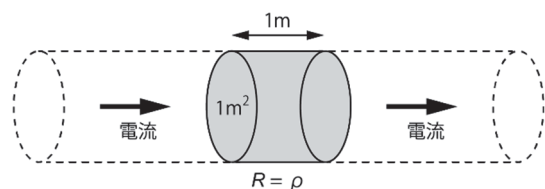


図-1 比抵抗と抵抗の関係

電気探査は十分な品質で記録の取得が行えていない場合でも、何らかの結果が得られてしまう危険性を含んでいる。しかし、表面波探査や屈折法探査などの弾性波探査に比べて、解析過程において人間の手作業による影響が少なく、全体的に技術者間の差異が出にくい。逆解析過程において、初期モデル、拘束条件、逆解析手法、逆解析回数、平滑化の度合いなどの処理条件により異なった結果が得られるが、異常点がなくなる等の大きな変化は生じず、全体的な比抵抗分布の傾向までは変化しない。電極の設置状態の確認などの記録取得時の確認が十分行われていれば、実務者間の解析処理の技術に関わらず、比較的安定した結果が得られる手法といえる。複数の物理探査手法が存在する場合には、全体的な傾向として電気探査の結果を主体に考えると誤りが少なくなる。

### 2.3 電気探査の測定感度と3次元探査の課題

一方、電気の流れる量といういわば積分値を各小領域の場の値に戻すという処理過程からわかるように、空間分解能は高くない。樋門等の人工物のような明瞭な境界を有する構造が地下に存在していたとしても、境界が必ず不明瞭となる。地層境界も同様であり、ボーリング記録と比抵抗の値は局所的には合わない場面が生じる。

また、電気が流れやすい領域の検出感度は高いが、電気が流れにくい小領域（空洞等）の検出は困難な性質を有する。

さらに、通常地表の直線上の1次元の電位情報を用いて、2次元垂直断面の解析を行うが、測線に対して直行方向には無限に同じ構造が続いていると仮定して解析をしている。このため、3次元的な分布を示す構造の解析では誤差が生じる。

3次元的な地盤構造を調査対象とする場合は3次元解析が必要となる。コンピュータの速度の向上により3次元解析が実用的になってから10年超経過する。しかし、3次元探査の利用は進んでいない。これは、入力データとして、地表面の2次元分布の測定が必要となるとされてきたため、測定作業量の大幅な増大と測定装置の初期費用の増大を招き、限定的な利用にとどまっている。

## 3. 調査地と測線設定

### 3.1 調査地の概要

調査地は国道建設のために造成された谷埋め盛

土である。強震動により崩壊した履歴を有する。現在は、複数の地下水位観測井を設けて監視体制下にある。水位は連続測定されており、遠隔からモニタリング監視することができる。

谷筋による集水地形が形成されており、比較参照可能な観測井を複数有していることから、集水地形の調査の検証に適していた。

### 3.2 集水地形の電気探査の測線配置

電気探査の比抵抗法は主に2極法と4極法の2つの手法に大別される<sup>4)</sup>。主要な調査道具は共通化されてきており、現場の状況判断で手法を切り替えることができる場合が多くなってきた。4極法の方が分解能が高く、2極法の方が安定した測定が行える。2極法は遠電極という調査範囲の5～10倍程度離れた箇所への特別な電極の設置が必要となり労力を要する。遠電極の設置が可能な場合は2極法を選択し、高分解能な調査が必要な場合は4極法を選択する。土工構造物は電気探査の探査対象物としては、最も浅い部類に相当するにもかかわらず、地表面の設置条件が悪い場合があり、手法の選択は柔軟に行う必要がある。

対象域は改良施工により電極の設置がやや困難で接地抵抗（電極と地盤との間の電気抵抗）が高く、安定して測定可能な2極法の方が適しているといえる。しかし、遠電極の設置には車両通行区間を横断する必要があり、電線の延長展開が困難であることと、宙水という局所的な3次元構造の把握への試みを含むため、4極法を選択した。

### 3.3 調査仕様

測定は全5測線で行った。図-2に電気探査測線と水位観測井の位置を示す。図の下方側が盛土斜面となっており、道路端部から標高を下げている。B-2、B-3、B-5の水位は低く、GL-4.0～-5.5mを示していた。一方、B-4は高く、GL-0.5～-1.0mを示しており、この地点の周辺に宙水が存在していることが確認されている。

5測線のうち、95mの長い測線を2本設定し、31.5mと短い電極間隔を高密度に設定した測線を3本設定した（表-1）。集水地形を覆うように長い範囲の測線を設け、宙水の存在域を覆うように狭い電極間隔の測線を配置した。なお、通常0.5mの電極間隔というのはあまり適用されない。試験用の調査でなければ、1m程度の電極間隔の調査でほとんど問題はない。

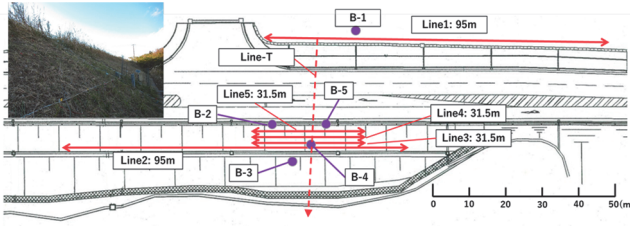


図-2 電気探査測線と水位観測井の位置

表-1 各測線の観測仕様

| 測線名    | 測線長   | 電極間隔 | 電極点数 |
|--------|-------|------|------|
| Line 1 | 95.0m | 1.0m | 96   |
| Line 2 | 95.0m | 1.0m | 96   |
| Line 3 | 31.5m | 0.5m | 64   |
| Line 4 | 31.5m | 0.5m | 64   |
| Line 5 | 31.5m | 0.5m | 64   |

## 4. 比抵抗分布の結果

### 4.1 2次元記録断面

Line1とLine2の2次元垂直断面を図-3に示す。解析にはElecImager/2Dを用いた。

Line1は谷筋を挟む尾根筋付近にまで測線が覆われており、低比抵抗領域として集水地形の位置が明瞭にわかる。観測された地下水位は低比抵抗領域の頂部に位置している。地形から推定される谷筋に比抵抗の低い領域が分布しており、集水地形を捉えられていることが確認できた。電気探査により集水地形の範囲や中心位置の特定が行えることがわかった。

Line2は測線が盛土から外れるため延長できず、このため片方の尾根筋を捉えられておらず、単独では谷筋の中心位置を推定することはできない。一方、尾根筋の範囲を捉えている。

2次元断面によりボーリングの掘削に適した谷筋の中心位置がある程度明確に特定できる。ボーリングの本数が限られる条件では、比抵抗分布記録を用いて適切な位置に設定することができる。

### 4.2 電気探査による集水地形の調査の要点

調査結果を踏まえて、集水地形を電気探査で調査する方法の要点を以下に示す(図-4)。1) 集水地形の調査は谷筋に直交方向に測線を配置する。2) 集水地形を含み尾根筋付近まで測線を延長して設定する。3) 道路の反対側の車線などのある程度離れた位置に平行な2測線を設置することにより谷筋の方向が特定できる。4) 電極間隔は2m程度で十分である。ただし、地下水の深度により調整する。

集水地形の分布がわかることにより、集水地形の範囲や中心位置がわかり、観測井や排水設備を適切な位置に設置することができるため、耐震性の維持を効果的に行える。

### 4.3 3次元解析

これまで、3次元解析には2次元に等間隔の電極展開が必要とされてきた。しかし、地表面に格子状に電極を配置すると、調査費用が大幅に増加する。設置時間や測定時間が大幅に増大するだけでなく、多点の電極を接続して切り替え可能な電気探査測定装置の導入費用が高くなる。

近年、解析手法が改良され、限定した地表観測記録だけで、3次元解析を可能とする手法が開発された<sup>5)</sup>。これを現場調査に適用し、Line1～5の1次元測線の記録を用いて、3次元解析を試みた。

図-5と図-6に解析結果例を示す。解析には、E-Tomo 3Dを用いた。図-5は標高0mの比抵抗の平面分布で、谷筋の分布が視覚的にわかりやすく表現されている。しかし、尾根筋の情報がLine2に不足しているため、想定地盤よりもやや図中右よりに配向されている。

また、図-6は直接的な測線記録のない盛土横断方向の比抵抗分布で、宙水存在域の付近の分布を示している。図-2と図-5のLine-Tに相当する。A点からB点に向けて標高を下げていく。低比抵抗領域が盛土の上部に存在し、宙水の形成に関与する水分率の高まりに相当すると考えられる。

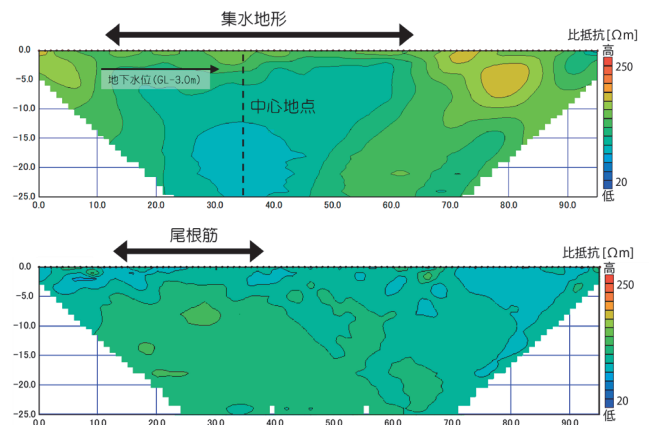


図-3 Line1(上)とLine2(下)の比抵抗分布



図-4 集水地形を捉える測線配置

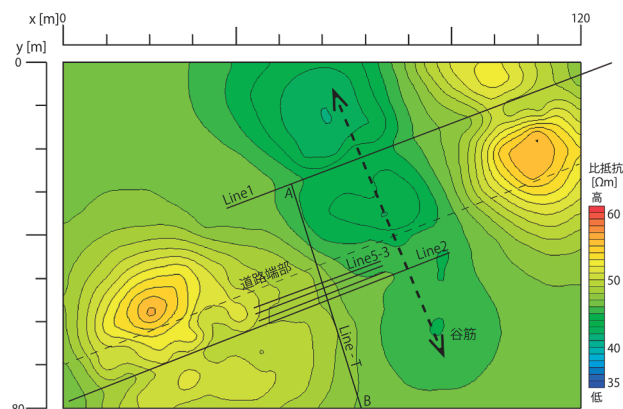


図-5 平面分布

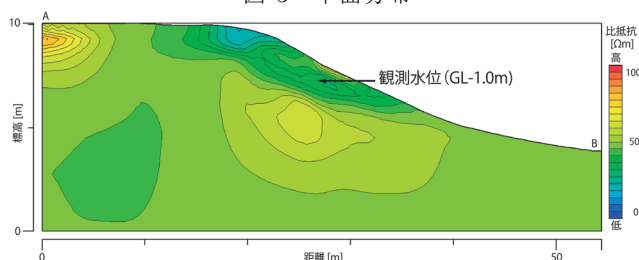


図-6 盛土斜面の横断断面

これまでの探査方法の場合、1m格子では電極数がおよそ9600点の調査点数が必要になるのに対し、今回は320点で比較的想定地盤に合う比抵抗分布が得られている。省力型の3次元探査の有効性が確認された。

今後さらに検証を進め、実用的に問題のない3次元探査が可能であることが示されれば、大幅な省力化となり、現場での利用拡大が期待できる。2次元水平断面は、地盤調査の専門家でなくても視覚的にわかりやすく、また、測線の設定のない断面分布を扱うことができる。

## 5. まとめ

本試験により、電気探査で谷埋め盛土内部の集水地形を捉えられることがわかった。また、3次元解析により谷筋の水平分布や宙水による高い水

分の領域を特定できることがわかった。

谷埋め盛土の耐震性を維持するために、地下水の管理が重要となる。ボーリングなどによる地下水調査は調査地点における正確な情報を提供するが、地下水位が高い場所の範囲や最も地下水位が高い地点の特定は難しい。このため、空間分布情報の取得が行える電気探査手法を観測井の水位情報と組み合わせて空間連続情報に拡張し、集水地形の範囲を特定する手法を提示した。

また、省力化された3次元電気探査の現場記録への適用事例を示した。予想された構造に即した平面分布情報を、限られた2次元測線の探査記録だけで解析できた。大幅な省力化を実現可能な、生産性の高い手法であることが示された。

今後は、最適な測線配置の設計指針の整理を進める。また、宙水のような3次元構造の把握への活用の応用展開を進める。

## 謝 辞

盛土調査の貴重な機会を頂きました東北地方整備局仙台河川国道事務所に、深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 澁谷 啓、盛土崩壊のメカニズムと対策工、ジオシンセティックス論文集、23、pp.1～14、2008
- 2) 菅 浩一、東名高速道路牧之原地区地震災害の復旧とその後の対応、土木技術資料、第53巻、第3号、pp.38～41、2011
- 3) 菅野 強、物理探査ハンドブック 第5章電気探査 2.基礎事項 2.4探査理論 2.4.2比抵抗法、物理探査学会、pp.252～257、1998
- 4) 中里裕臣、竹内睦雄、金 喜俊、電気探査法の技術動向とその適用性の評価、農業土木学会誌、67(11)、pp.1169～1176、1999
- 5) 杉本芳博、省力型三次元比抵抗探査のための逆解析ソフトウェアの改良、物理探査学会第141回學術講演会論文集、pp.97～100、2019

尾西 恭亮



土木研究所地質・地盤研究グループ特命事項担当（物理探査）主任研究員  
ONISHI Kyosuke

小林 貴幸



土木研究所地質・地盤研究グループ特命事項担当（物理探査）交流研究員  
KOBAYASHI Takayuki

加藤 俊二



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 主任研究員  
KATO Shunji

東 拓生



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 主任研究員  
AZUMA Takuo

齋藤 清志



土木研究所技術推進本部実装技術チーム（併任）地質・地盤研究グループ特命事項担当（物理探査）上席研究員  
SAITO Kiyoshi