

## 浅部地盤構造調査への統合物理探査の活用

## Utilization of integrated geophysical investigation for near surface surveying

\*稲崎 富士<sup>1</sup>\*Tomio INAZAKI<sup>1</sup>

1.土木研究所 つくば中央研究所 地質・地盤研究グループ

1.Public Works Research Institute, Tsukuba Central Institute

表層数10mまでの浅部の構造や物性は、これまでボーリングや直接的な地下掘削などの手段で検証されてきた。一方で浅部には風化表層や人工地層が分布し、小スケールの不均質構造が発達する。したがって特定の地点で実施されたボーリング調査などの結果は局所的な空間の構造しか反映しておらず、広域的空間の代表情報として使用できないことが多い。表層は開発行為の主対象領域であり、我々の生活基盤でもあることから施工時の安定性や自然災害に対する既存インフラ施設の安全性を評価することが求められる。表層部に広く張り巡らされた道路や河川堤防、上下水道などの社会インフラ施設は、高度経済成長期などに集中的に整備されてきたが近年老朽化・劣化が進行し、それらの維持管理および更新を如何に効率的に推進するかが社会的な課題となってきた。

物理探査は連続的2次元断面物性構造情報を提供できることから、社会インフラ施設を含めた浅部地盤調査に重要な役割を担うことが期待されている。ただしこの浅部物理探査には、従来の地下資源調査や地下構造調査分野に適用されていた物理探査に比べ、より信頼性が高く高解像度の断面を提供するとともに、表層の物性やインフラ施設の劣化度にかかわる工学的指標を提供することが求められる。たとえば河川堤防では、洪水時に漏水や浸食に耐え、また地震時にも大規模な損壊を発生しない耐震性を有しているかを点検診断することが、道路盛土の場合は施工不良によって沈下や空洞が発生していないか、また原地盤との境界部に地下水が集中していないかを点検診断することが求められる。これらの点検診断項目を、単一の物理探査手法で把握することはほぼ不可能である。いくつかの手法を組み合わせればこれらを評価する可能性は高まるが、その場合コスト、作業性、探査深度、分解能等の要件を満たすとともに、評価技術として取得物性情報の工学的指標への変換過程の確立が必要とされる。

筆者らはこれまで、河川堤防に対してランドストリーマー表面波探査法と牽引式電気探査法を組み合わせ実施する統合物理探査技術の適用開発を進めてきた。評価技術に関しては、統合物理探査で得られる人工地層と自然地層のS波速度および比抵抗値と、浸透特性や粒度特性などの工学的物性との関連性を統計的に求め、加えて両者の関係を説明する粒子・間隙モデルを提案してきた。最近では道路舗装・盛土を対象として統合物理探査の適用研究を進めている。筆者らが統合物理探査と称しているのは、それが単にいくつかの探査手法を組み合わせただけのものではなく、探査結果から新たな空間物性情報を生産することを特徴としているからである。さらに、物性構造の再現性を向上させ信頼性の高い断面情報を提供するために、異なるステージでの再計測、検層や地盤試料試験の実施と試験データの対比も特徴とする。本講演では、河川堤防および道路盛土を対象とした統合物理探査の事例と要素探査手法の概要を紹介するとともに、探査結果からの工学的特性の評価とその過程について述べる。

キーワード：浅部、統合物理探査、S波速度、比抵抗、工学的評価

Keywords: Near-surface, Integrated geophysics, S-wave velocity, Resistivity, Geotechnical characterization

## 土木地質分野における物理探査と統合物理探査

### Geophysical Survey in Engineering Geology and Integrated Geophysical Survey

\*三木 茂<sup>1</sup>、升元 一彦<sup>2</sup>、鈴木 浩一<sup>3</sup>、物理探査学会 統合物理探査調査研究委員会<sup>4</sup>

\*Shigeru Miki<sup>1</sup>, Kazuhiko Masumoto<sup>2</sup>, Koichi Suzuki<sup>3</sup>, Integrated Geophysical Survey Committee<sup>4</sup>

1.基礎地盤コンサルタンツ株式会社、2.鹿島建設株式会社、3.電力中央研究所、4.公益社団法人物理探査学会  
1.Kiso-Jiban Consultants Co., Ltd., 2.Kajima Corporation, 3.Central Research Institute of Electric Power Industry, 4.Society Exploration Geophysicists of Japan

「河川堤防の統合物理探査」（稲崎・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会）では、探査計画から現場測定、解析、結果の整理、安全性評価までまとめられている。単に物性値断面を得るだけでなく、複数の探査手法を適用することで、ニーズに応える方法を示していること、安全性評価に踏み込んでいることに特徴がある。ここで示されている方法や考え方は、物理探査の利用拡大に寄与すると期待されている。

物理探査は、多くの土木地質プロジェクトに利用されてきた。しかし、技術者の理解不足が、物理探査結果を有効に活用できない状況を生み、土木地質分野では物理探査に対する不信感が大きい。しかし、同時に物理探査への期待も大きい。これまでの物理探査の取り組みは、探査結果を利用した地質モデルの構築、地盤解釈の視点が弱く、このことが物理探査に対する不信感の一因と考えられる。物理探査技術の普及発展のためには、探査手法の利用技術と地質解釈に関する研究、検討が不可欠である。そこで、物理探査学会は、土木地質分野における物理探査の適切な適用と解釈を目的として、「統合物理探査調査研究委員会」を発足させた。探査結果が有効活用された地質解釈、地質工学モデル作成を目指している。本委員会では、対象を河川堤防に限定せず、また、「統合」をもう少し広い意味で使用している。統合には、複数物理探査結果および複数調査結果の統合、物理探査の解析と解釈の統合、すなわち物性断面と地質モデルの統合の意味を含めている。

統合物理探査調査研究委員会では、3つワーキンググループにおいて、以下の活動を行ってきた。ワーキンググループ1では、統合物理探査の他分野への適用検討、適用方法の検討を行うため、文献調査、事例研究を行っている。文献調査の結果、盛土堤防分野では、S波速度と比抵抗を組み合わせた探査の事例が多く、多くの事例で統合物理探査が実施されている。一方、トンネル調査においては、多くの事例が地震波探査屈折法によるP波速度で地山を評価するものであり、電気探査や電磁探査などの比抵抗を求める探査との併用事例は3割程度であり、統合物理探査の試みは1件であった。複数の探査が実施された多くの事例において、破碎帯や変質帯の推定などの定性的な利用にとどまっている状況であった。斜面・地すべり分野においても、P波速度と比抵抗の組み合わせの事例は多いが、統合物理探査の事例は2件であった。多くの場合、トンネルと同様、風化層の層厚や破碎帯の推定など定性的な利用にとどまっている。

ワーキンググループ2では、複数物理探査結果を用いた地盤評価の向上を目指して、複合解析技術、岩石物理学に基づく解析技術の調査、検討を行っている。複合解析の方法は大きく3区分される。クロスプロット法は、例えばP波速度などの探査物性値を縦軸に、間隙率などの評価物性値を横軸に取り、その関係を求め適用する方法である。探査および物性試験データが豊富であり、適用地点を限れば有効な手法である。経験式に基づく方法は、クロスプロット法を発展させたもので、関係式が数多く提案されている。しかし、経験式を求めた岩種や地質条件を超えて探査結果の解釈に利用することは困難である。岩石物理学に基づく方法は、多様な条件や岩種について適用が期待できる手法であるが、その理論モデルを構築、検証するためには、膨大な実験や探査結果の分析が必要である。どのような手法により探査結果を解釈するかについては、利用できるデータの量と質により判断する必要がある。

ワーキンググループ3では、物理探査成果の信頼性向上、有効利用を目的として、物理探査成果の標準書式化、電子納品への取り組みを行っている。

本報告では、土木地質分野における物理探査の現状と統合物理探査の利用について報告する。

#### 文献

- 1) 土木研究所、物理探査学会(2013)：河川堤防安全性評価のための統合物理探査の手引き、愛智出版。
- 2) 三木茂、統合物理探査調査研究委員会(2014)：統合物理探査調査研究委員会の発足について、物理探査学会第130回学術講演会論文集、95-98。

- 3) 升元一彦ほか(2015)：統合物理探査および複数物理探査の事例収集と調査対象別適用傾向の検討，物理探査学会第133回学術講演会論文集，90-92.
- 4) 鈴木浩一(2015)：岩石物理学に基づく物理探査データに対する複合解析技術の動向，物理探査学会第133回学術講演会論文集，93-96.
- 5) 小西千里(2015)：不確かさを含む物理探査結果の評価と意思決定について，理探査学会第133回学術講演会論文集，97-100.

キーワード：物理探査、統合物理探査、土木地質

Keywords: geophysical survey, integrated geophysical survey, engineering geology

## 統合物理探査結果の解釈テンプレートの作成

## Interpretation template for the integrated geophysical investigation

\*小西 千里<sup>1</sup>、斎藤 秀樹<sup>1</sup>、茂木 透<sup>2</sup>

\*Chisato Konishi<sup>1</sup>, Hideki Saito<sup>1</sup>, Toru Mogi<sup>2</sup>

1.応用地質株式会社、2.北海道大学

1.OYO Corporation, 2.Hokkaido University

土木分野、地盤工学の分野で物理探査をより効果的に適用するためには、物理探査から得られる物性を何か別の形に変換することが重要になっている。たとえば河川堤防の調査では、物理探査によって縦断方向の概略の土質区分だけでもできれば、空間的なデータ密度で劣るボーリングデータを補完する情報として非常に価値がある。

土質の違いや工学的に利用されている地盤物性を物理探査結果から得られる弾性波速度や比抵抗から推定するためには、物理探査結果を解釈するための理論的背景、つまり物理モデルが必要である。仮にこの理論が完全であるとすれば、得られた物理探査結果から他の物性への変換は逆解析によって実現可能である。しかしながら地盤は非常に不均質で複雑であり、さまざまな要因が組み合わさった結果として、ある物性値が得られており、それらすべての要因を理論的に表現し逆解析によって特定の物性を得るということは容易ではない。それに対し、単純化した物理モデルの順計算によって、土質の違いや物性変化の傾向を予測した解釈テンプレートを作成しておき、解釈テンプレートと測定値とを比較することでおおよその物性値を推定するという方法がある。資源分野ではRock Physics Templateと呼ばれ、岩相や間隙流体の区分などに用いられている

(Avseth et al., 2005)。この方法では、ある特定の要因だけを自由に变化するパラメータとし、その他の要因は一定とみなしていることになるが、使用するデータの条件を絞り込むことによって、十分実用的な方法になると考えられる。特に、測定によって得られる物性値の種類が少ない場合は、逆解析や統計的な手法の利点をそれほど生かすことができないため、このような実用的な方法が有効である。

現状の統合物理探査の解釈では複数の物性を用いたクロスプロットが用いられている。特に、河川堤防調査ではS波速度と比抵抗のクロスプロットが多く利用されている(土木研究所・物理探査学会, 2013)。そこで、河川堤防を対象にS波速度と比抵抗のクロスプロットの解釈テンプレートを作成する。今回、対象とする物性は粘土含有率と間隙率とする。粘土含有率とは、地盤を砂と粘土の混合体と考えた場合の粘土の割合であり、0~1の連続的な数値で土質の違いを表す指標と考えることができる。間隙率は土の構成要素(固体、水、空気)の割合を示す重要なパラメータであるとともに、同じ土質だけでみれば緩みの指標とみなせる。

解釈テンプレートのベースとなる弾性波速度の物理モデルとしては未固結砂岩のモデル(Avseth et al., 2005)を用いる。未固結砂岩のモデルは、Hashin-Shtrikmanの下限式がベースとなっており、固体の弾性率をもつ媒質と、特定の間隙率と弾性率をもつ媒質が任意の割合で混合した場合の有効媒質の弾性率を算出するものである。特定の間隙率での弾性率はHertz-Mindlinモデルで計算されているが、浅層の地盤ではやや過大評価となることもあり、Waltonモデルが利用されることもある。いずれにせよ、固体の弾性率が粘土含有率によって変化することから、粘土含有率とS波速度が関連付けられる。

比抵抗のモデルは、比抵抗は並列回路モデルが一般的に用いられる。地下水以深では地下水の比抵抗の影響が大きくなり、土質の違いが顕著ではなくなるが、地下水位以浅では土質の違いが比抵抗に反映される場合が多い。そこで、並列回路の過剰導電率の項に粘土含有率と間隙率をパラメータとして導入することで、両パラメータと比抵抗が関連付けられる。

以上のようにして、粘土含有率と間隙率を自由なパラメータとして、すべての組み合わせに対してS波速度と比抵抗を算出し、その結果を用いて土質区分用と間隙率推定用の解釈テンプレートを作成することができる。その結果、それらを用いて堤防の縦断方向の概略的な土質や間隙率の分布を得ることができる。

現状では土質の違いと、各相(固相、水、空気)の体積割合のみが変化すると考えてS波速度と比抵抗を算出しているが、別途、土質を一定にした場合の飽和度の変化を解釈するテンプレートを作成することも可能である。また、現状は一定値として与えている物性を、不確かさを含む値として、つまり変動幅を与えて計算することで、確率的な解釈テンプレートの作成といった応用も考えられる。先に述べた通り、複雑な理論全てを取

り込むことは難しいため、単純なモデルからうまく解釈テンプレートを作成して解釈を行っていくことは今後有用な手法と考えられる。

Avseth, P., T. Mukerji, and G. Mavko, 2005, Quantitative seismic interpretation: Cambridge University Press.

土木研究所・物理探査学会, 2013, 河川堤防の統合物理探査 -安全性評価への適用の手引き-, 愛智出版

キーワード：解釈テンプレート、クロスプロット

Keywords: interpretation template, cross-plot

統合物理探査データを利用した岩石物理モデルにもとづく定量的岩盤分類の試み

An attempt at model-based quantitative rock mass classification using integrated geophysical data

\*高橋 亨<sup>1</sup>

\*Toru Takahashi<sup>1</sup>

1.財団法人深田地質研究所

1.Fukada Geological Institute

岩盤分類は、トンネルやダム等の土木構造物の設計・施工時に対象岩盤をモデル化する際に広く利用されている。岩盤分類法としては、RMR(Rock Mass Rating)やQ値法など、いくつかの手法が提案、利用されている。しかしながら、それらの分類法には、定性的でしかも主観的な要素が含まれ、評価を行う技術者によってその結果が大きく異なる場合があることが指摘されている。そこで、筆者たちは、より定量的、客観的な岩盤分類を可能にすることを目的に、複数の物理探査データに岩石物理モデルを適用して岩盤をモデル化し、それに基づいて岩盤分類を行う手法を検討している。

本研究では、トンネルの事前調査において、計画ルート上の数カ所のボーリングで実施された速度検層と電気検層で得られたP波速度と比抵抗データに、岩石物理モデルとして広く利用されている有効媒体モデルの1つである頁岩質砂岩モデルと比抵抗と間隙率の関係を表すGloverの式をそれぞれ適用し、両物性間の関係式を得た。その結果とボーリングコア試料を用いたRMR法による岩盤分類結果を比較し、物理探査データとRMR値との関係を求めた。その関係を用いて、トンネルフォーメーション沿いのP波速度と比抵抗をもとに岩盤分類を行い、従来法による結果と比較を行った。その結果、統合物理探査データを利用して、より定量的、客観的な岩盤分類を行うことができる可能性を確認することができた。

キーワード：岩盤分類、複合物理探査データ、岩石物理モデル

Keywords: rock mass classification, integrated geophysical data, rock physics model

## 統合物理探査による鋼管杭根入調査

## Investigation of the depth of steel pile embedment by the integrated geophysical exploration

\*鈴木 敬一<sup>1</sup>、柘植 孝<sup>1</sup>\*Keiichi Suzuki<sup>1</sup>, Tsuge Takashi<sup>1</sup>

1.川崎地質株式会社

1.Kawasaki Geological Engineering

本報告は、施工中に掘進機が他の構造物に接触し、施工ができなくなった事象に対して、既設構造物（鋼管杭）の根入深度を確実に把握するために複数の物理探査を適用した事例である。

近年、突発的に発生するゲリラ豪雨により、都市部においても洪水が起きるなど社会的にも問題となっている。洪水を防ぐために一時的に雨水をためるための貯水池が地下に建設されている。しかし、都市部地下も混雑し、近接施工を余儀なくされている。

一方、既設構造物の直下の施工においては、図面等から既設構造物の根入深度がわかる場合も多いが、古い構造物では不明な場合もある。図面が存在する場合でも、実際の構造物の形状が異なる、あるいは根入れ深度が異なるなどの理由で、施工中にトラブルが発生することもある。

通常、鋼製の杭などは磁気探査を行って根入深度を調査するが、これまでの磁気探査ではボーリング孔からの方位がわからないという課題があった。これを解消するために3成分の孔内ベクトル磁力計(BVM)が開発された（押田ほか、2006）。BVMは、直交した3成分の磁気センサをボーリング孔内に挿入して、杭の残留磁化あるいは誘導磁化による磁場を測定し、測定波形の波長や振幅を解析することにより、杭先端の三次元的な位置を推定する手法である。

施工の状況から既に掘進機が鋼管杭にあたっていると推定された。図面を確認すると、対象とする鋼管杭以外にも鋼製の既存の橋台基礎や土留め杭など、複雑な構造を呈している。

そのため3成分の磁気探査でも鋼管杭の根入深度を確実に推定できない可能性があると考え、速度検層を併用することにした。速度検層は、鋼管杭を伝播するP波速度が地盤の伝播速度より大きいことを利用した手法である。対象とする構造物そのものを打撃してP波を発生させるため、他の構造物にはP波が伝播しないことを利用して、対象とする杭を推定することが可能である。P波速度が大きく、かつ磁気探査でも検出されれば、対象物であることが確実に推定できる。

調査の結果、以下の情報が得られた。

- (1)速度検層によってGL-15.5mで伝播速度の変曲点が認められ、鋼管杭の端部を表していると考えられる。
- (2)速度検層の結果から鋼管杭と想定される深度帯のP波速度は4.3km/sであり、明らかに地層の速度より大きい。
- (3)BVMの記録結果は、探査孔近傍に位置する複数の磁性体—橋台、土留杭、鋼管杭、シールドマシンの影響を受け、孔口からGL-14m付近にかけて磁気反応は複雑に分布し、解釈を困難にしている。
- (4)しかし、BVMによるGL-15.6mの独立した波形による推定根入れ深さは、速度検層の変曲点深さとほぼ一致する。
- (5)両者を考慮して、杭の先端深さをGL-15.6mと結論づけた。
- (6)掘進機の天端はGL-14.5mであり、推定根入れ深さがGL-15.6mであるから掘進機は確実に既設鋼管杭にあたっていると考えられる。

本報告は、BVMと速度検層の複数の探査を組み合わせた統合物理探査により、複雑な構造の場合でも確実な成果を挙げることができた。工事完成図面より根入深度が深かった原因は今のところ不明であるが、今後この結果に基づき、アンダーピニングや路線の変更など、対策工が検討されるものと考えられる。

## 参考文献

押田淳・内山昭憲・久保田隆二・鈴木敬一(2006)：孔内ベクトル磁力計の開発，物理探査学会第115回学術講演会論文集，139-140

押田淳・鈴木敬一・矢部弘一・新家由隆(2006)：孔内ベクトル磁力計による鋼管杭探査事例，物理探査学会

第115回学術講演会論文集, 141-144

キーワード：近接施工、鋼管杭、根入調査、磁気探査、速度検層

Keywords: Neighboring construction, Steel Pile, Depth of embedment, Magnetic survey, ,Seismic velocity logging

空中電磁探査技術及び水文・水質調査を活用した大規模表層崩壊予測技術に関する研究  
Study on the prediction of the large shallow landslides areas using Airborne  
Electromagnetic Survey, hydrological investigation and water quality investigation

\*木下 篤彦<sup>1</sup>、瀬戸 秀治<sup>1</sup>、高原 晃宙<sup>1</sup>、水野 秀明<sup>1</sup>、西岡 恒志<sup>2</sup>、今森 直紀<sup>3</sup>、河戸 克志<sup>4</sup>、奥村 稔<sup>4</sup>、影浦 亮太<sup>4</sup>

\*Atsuhiko Kinoshita<sup>1</sup>, Shuji Seto<sup>1</sup>, Teruyoshi Takahara<sup>1</sup>, Hideaki Mizuno<sup>1</sup>, Tsuneshi Nishioka<sup>2</sup>, Naoki Imamori<sup>3</sup>, Katsushi Kawato<sup>4</sup>, Minoru Okumura<sup>4</sup>, Ryota Kageura<sup>4</sup>

1.国立研究開発法人土木研究所、2.和歌山県、3.国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所、4.大日本コンサルタンツ株式会社

1.Public Works Research Institute, 2.Wakayama Prefecture, 3.Kii-Sanchi Sabo Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 4.Nippon Engineering Consultants CO., LTD.

近年、空中電磁探査技術を用いた深層崩壊危険箇所や火山体の調査が実施されており土砂災害発生箇所の予測に関する研究が徐々に進歩している。一方、表層崩壊についても2014年広島災害、2013年伊豆大島災害、2011年那智川災害など多くの災害が発生しており空中電磁探査技術を用いて崩壊発生箇所の予測ができれば砂防事業の優先度や警戒避難につなげることができる。そこで本研究では、2011年に大規模な表層崩壊が発生した那智川流域を例に挙げ、空中電磁探査の結果から2011年の崩壊箇所と非崩壊箇所の比抵抗特性の違いについて検討した。まず、地質と比抵抗特性との関係について整理した。那智川流域は熊野酸性岩(花崗斑岩)のエリアと熊野層群(砂岩泥岩互層)のエリアに分かれているためこれらが比抵抗分布として区別可能であるかを検討した。次に2011年の崩壊箇所を比抵抗分布と重ね合わせ、どのような比抵抗の箇所で崩壊が発生したかを検討した。最後に那智川流域の崩壊斜面と非崩壊斜面について、比抵抗コンターの構造や地下での比抵抗変化率に着目して、その違いについて検討した。検討の結果、熊野酸性岩(花崗斑岩)は比抵抗値が高く、熊野層群(砂岩泥岩互層)は低くなったため、空中電磁探査で地質境界を精度良く表すことができた。また2011年の崩壊斜面のほとんどは地質境界付近に分布していることが分かった。このことから鉛直方向の地質特性の違いにより崩壊が発生したものと考えられる。崩壊斜面と非崩壊斜面の違いについて、崩壊斜面は比抵抗コンターが鉛直であること、崩壊発生斜面近傍の上方で比抵抗変化率の大きい領域が途絶することが分かった。一方、非崩壊斜面は、比抵抗コンターが斜面に平行であること、斜面の上方から下方に連続して比抵抗変化率の大きい領域が連続することが分かった。比抵抗構造については地質構造を表しており、崩壊斜面は比抵抗コンターが鉛直であることから、崩壊斜面の地質構造は鉛直であり、熊野層群に対して熊野酸性岩が鉛直に近い構造で貫入していると考えられる。また、地質構造が鉛直である場合浸透した水が斜面下方に流れにくく、地下水位が上昇しやすく崩壊しやすいと考えられる。比抵抗変化率の大きいエリアはボーリング調査の結果と合わせると地下水位を表していると考えられる。崩壊斜面は比抵抗変化率の大きい領域が途絶していることから排水性が低かったと考えられる。以上のことから、表層崩壊の危険度評価において、空中電磁探査は地質構造や地下水位、地下水の排水性を評価できると考えられる。

キーワード：空中電磁探査、水文、イオン濃度、表層崩壊

Keywords: Airborne electromagnetic survey, Hydrology, Ion concentration, Shallow landslide

## 地熱貯留層探査技術フィールド実証試験

—山川地熱地域における3次元弾性波探査について—

Demonstration Experiment of Geothermal Reservoir Exploration Techniques:  
Three-Dimensional Seismic Survey in the Yamagawa Geothermal Field福田 真人<sup>1</sup>、\*青木 直史<sup>2</sup>、新部 貴夫<sup>2</sup>、佐藤 馨<sup>2</sup>、阿部 進<sup>2</sup>Masato Fukuda<sup>1</sup>, \*NAOSHI AOKI<sup>2</sup>, Takao Nibe<sup>2</sup>, Kaoru Sato<sup>2</sup>, Susumu Abe<sup>2</sup>

1.独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、2.株式会社地球科学総合研究所

1.Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, 2.JGI, Inc.

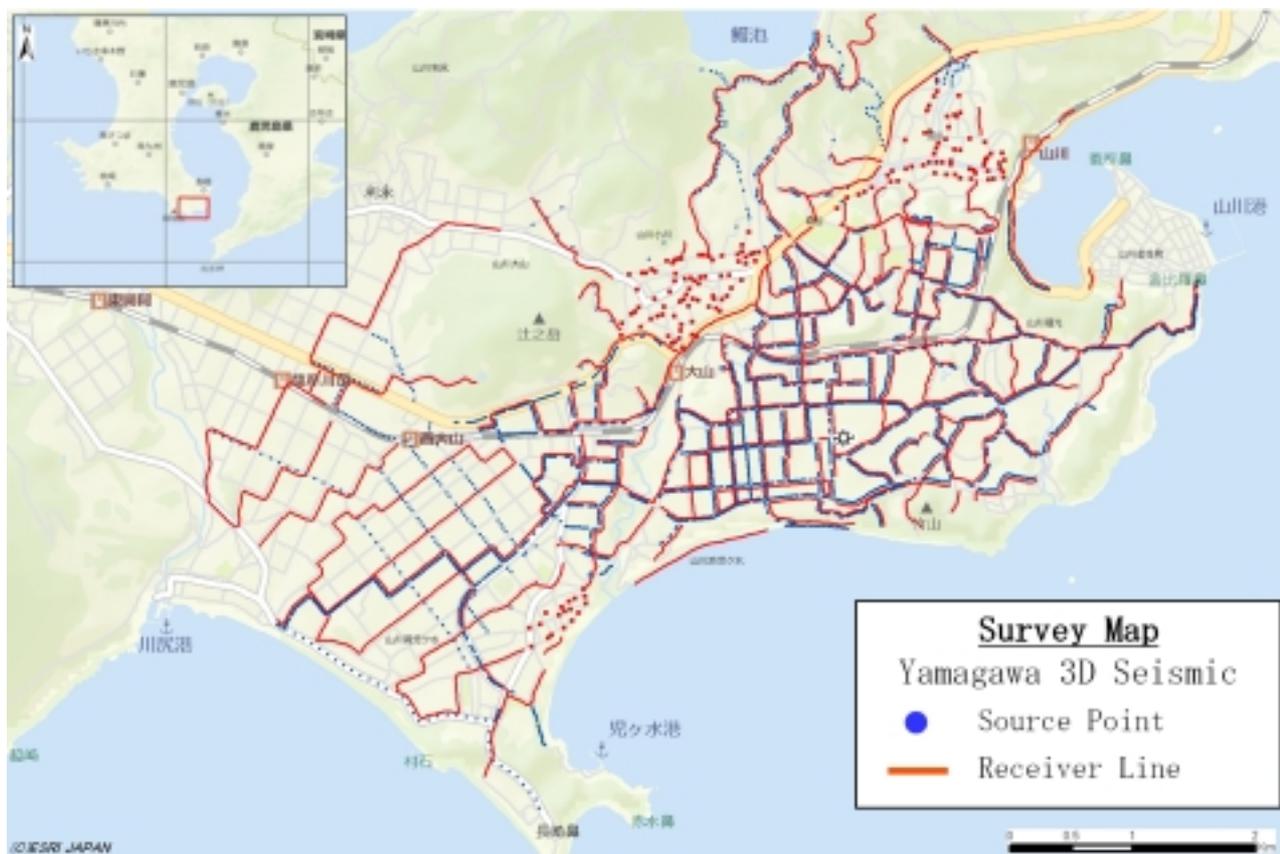
国内の地熱貯留層の多くは縦型の断裂系と称される高傾斜の断層からなり、地熱資源開発の初期段階ではその位置や構造形態を詳細に把握することが重要となる。しかしながら、地下構造の探査は不確性を伴うため、想定していた位置に地熱貯留層が存在しないといったリスクが存在している。独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源が地熱発電技術研究開発事業として実施する地熱貯留層探査技術開発では、弾性波特性をを用いた断裂系探査技術と他の探査データの総合解析手法により、地熱貯留層の位置や形状を高精度で捉える技術の開発を行っている。平成27年度にはフィールド実証試験として、鹿児島県山川地熱地域において弾性波探査が実施された。

山川地熱地域は阿多カルデラ (Matumoto, 1943) 内部に位置する地熱地帯にあたり、地熱発電が1995年 (平成7年) より行われている。貯留層はフラクチャーネットワークが形成された比較的透水性の良い地層より構成されており、特に優勢な貯留層は生産領域中央に貫入した石英安山岩の周辺に分布することが判明している。実証試験では石油分野において掘削効率率の向上に多大な貢献を果たしている3次元弾性波探査が実施された。調査エリアは約36km<sup>2</sup> (東西約8km、南北約4.5km) であり、データ収録は有線テレメトリー方式と独立型の探鉱器を併用し、振源にバイブレーターを用いて実施されている。本実証試験の目的は地熱貯留層の詳細構造把握に弾性波探査が有効であることの実証に加え、取得データにおいて受発振点の間引きテストを実施し、国内の地熱地域の多くが位置する山岳部での弾性波探査における課題である疎なデータ取得配置の影響を掌握し、費用対効果に優れるデータ取得配置を提案することにあつた。本調査におけるデータ取得配置は間引きテストを想定し、山川発電所を中心とする約12km<sup>2</sup> (東西約4 km、南北約3 km) のエリアの受発振点密度が高められているほか、受発振点間隔10mによる東西8 kmの稠密2次元測線の抽出が可能なデザインが採用されている。

取得データは、総受振点数が4,989点、総発振点数が3,262点であった。受振測線は全体の62.8%に当たる3,134点で有線式システムが、残りの37.2%に当たる1,855点で独立型探鉱器が使用されている。センサーはジオフォンが使用された。発振作業は大型バイブレーター (18t) と中型バイブレーター (7.4t) をそれぞれ4台導入して行われた。調査地域の平野部では農耕が盛んであり、区画整理により網目状に整備された農道は発振点の確保に寄与した一方、埋設管が設置されている区域では状況に応じ出力や台数が制限された。大型バイブレーターは全体の30.2%に当たる988点で使用され、残りの69.8%に当たる2,274点で中型バイブレーターが使用されている。振源周波数の低周波数側への拡張を目的にMaximum Displacement Sweep (MDスイープ) を採用し、大型バイブレーターでは3-60Hz、中型バイブレーターでは4-60Hzの発振が行われた。スイープ長は16秒、標準スイープ回数は3または4回/点としたが、同時に解析が行われる屈折法データの品質向上を目的とする高エネルギー発振 (8または12回) が、全発振点の19%に当たる622点 (屈折法77点を含む) で設定されている。

データ解析が現時点 (平成28年2月) で進行中であり、中間成果として通常処理フローに基づく反射法重合記録とともに屈折トモグラフィ解析結果が得られている。これら解析結果には当地域での活発な火山活動を反映した複雑な地質構造が描き出されており、既往データとの高い整合性も示されている。今後は間引きテストを通じて直交配置、並行配置などの3次元測線と2次元測線の比較を実施するほか、次期はFull Waveform Inversionやアトリビュート解析等の高精度解析とともに、坑井情報や重力・MT等の他の探査データとのとの総合解析の実施などが検討されている。

キーワード：地熱、山川、断裂、フラクチャー、3次元、地震探査  
 Keywords: Geothermal, Yamagawa, Fault, Fracture, 3D, Seismic



## 電気探査と浸透の3次元シミュレーションによる浸透部の推定

## Estimating of infiltration path using 3D simulation of groundwater flow and resistivity survey

\*井上 敬資<sup>1</sup>、中里 裕臣<sup>1</sup>、久保田 富次郎<sup>1</sup>、古江 広治<sup>2</sup>、吉迫 宏<sup>1</sup>、紺野 道昭<sup>1</sup>、正田 大輔<sup>1</sup>

\*Keisuke Inoue<sup>1</sup>, Hiroomi Nakazato<sup>1</sup>, Tomijiro Kubota<sup>1</sup>, Koji Furue<sup>2</sup>, Hiroshi Yoshisako<sup>1</sup>, Michiaki Konno<sup>1</sup>, Daisuke Shoda<sup>1</sup>

1.国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、2.鹿児島県農業開発総合センター

1.National Agriculture and Food Research Organization, 2.Kagoshima Prefectural Institute for Agricultural Development

Resistivity survey is a useful method for noninvasively imaging continuous water flow in soil because water saturation increases electrical conductivity. Several methods have been applied to determine the water flow in soil by monitoring the resistivity change that is associated with variation in water saturation or water salinity. A change in resistivity before and after infiltration provides a 3-D image of the water flow; however, a detail distribution of resistivity sometimes cannot be obtained because of the inherent limitation of the observation data (i.e., number of measurements, time represented, and measuring sensitivity). However, a resistivity change is caused by the water flow in soil, and the water flow is governed by the seepage phenomenon; therefore, a method that uses data from resistivity surveys and seepage analyses would be effective. Thus, a water flow model was developed, which compared the water content converted from resistivity survey data as well as water content simulated from hydraulic models. This method provide both an image of the water flow and the properties of the hydraulic conductivity; however, if the number of measurements is low, the resistivity obtained from inversion remains uncertain because of spatially varying resolution. Comparing water content values obtained from resistivity surveys with those from water flow simulations includes a 3-D inversion uncertainty. However, according to the coupled approach, the observed resistivity data are directly used for determining the hydrological properties. In this method, water content simulated from water flow analysis is converted to a resistivity model, and a resistivity survey is conducted using this model to interpret the results. The simulated resistivity data are compared with the field observations to estimate the water flow hydraulic properties. This method can reduce the spatial uncertainty of the 3-D invasion because the resistivity model is constrained by the seepage analysis data. One dimensional hydraulic properties were inverted from 1-D water flow simulations, whereas, using 2-D hydraulic properties were inverted via Bayesian and multi-criteria inversion and via neural networks. However, few studies investigated 3-D hydraulic properties using 3-D water flow simulation and 3-D resistivity survey data. Inversion of 3-D hydraulic properties is best but it is difficult because reconstructing the 3-D conditions is complex, and there are many unknown parameters. In this study, we propose an easy the method to estimate hydraulic properties of the shallow soil layer, which is responsible for many hydraulic problems in the field. To evaluate this method, numerical and field experiments ware conducted. In the numerical experiment, the resistivity survey provides an image of the preferential flow; however, the infiltration locations are unclear. Assuming that high hydraulic conductivity zones exist somewhere, an analysis of saturated-unsaturated seepage is conducted for several water-flow models with different locations of high hydraulic conductivity. Subsequently, a resistivity survey is implemented based on the water content that was simulated by seepage analysis. The high hydraulic conductivity location of the model that provides the minimum errors corresponds to the high hydraulic conductivity location of the numerical field model. In the field, resistivity is measured during groundwater recharge

experiment in a pyroclastic plateau. This resistivity survey provides an image of the preferential flow; moreover the high hydraulic conductivity location of the model that provide the minimum errors corresponds to filling water range, whereas that of the model that gives the maximum errors corresponds to no filling water range. These results indicate that estimating high hydraulic conductivity locations using simulations of the groundwater flow and resistivity survey is possible. This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 25850170.

キーワード：高透水性部、浸透解析、電気探査

Keywords: infiltration path, groundwater flow, resistivity survey

## トンネル地山の連続した亀裂の状態を考慮した変形係数に関する検討

Case study on a newly modulus of deformation considering a continuous state of crack in the tunnel ground

\*岡崎 健治<sup>1</sup>、山崎 秀策<sup>1</sup>、倉橋 稔幸<sup>1</sup>

\*KENJI OKAZAKI<sup>1</sup>, SHUSAKU YAMAZAKI<sup>1</sup>, TOSHIYUKI KURAHASHI<sup>1</sup>

1. 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所

1. Civil Engineering Research Institute for cold region

トンネルの数値解析や地山分類の見直しにおいては、より地山の状態を反映させた物性値による評価が必要となる。そのため、施工時に切羽から水平方向へ先進ボーリング調査を行う場合があり、速度検層によるP波速度、孔内载荷試験による変形係数、コアの室内試験によるP波速度等によって、掘削箇所直近の物性値が求められている。ボーリング孔内とコアのP波速度には、測定方法や対象範囲の違いによる影響を含むほか、亀裂の有無による影響が関与しており、コアに対する地山のP波速度の割合は、亀裂の状態を考慮した係数として求められ、物性値の補正に用いられている。また、変形係数は、载荷箇所周辺に限定した値であるが、ボーリング孔内全長を連続的に測定した速度検層によるP波速度を用いることで、地山の状態により近い変形係数として求めることができる。

本報告では、北海道で建設された火山岩を地山とする国道トンネルにおける孔内のP波速度、コアのP波速度、コアのS波速度から孔内のS波速度を算出したほか、求めた孔内のS波速度、孔内のP波速度、コアの湿潤密度から動せん断係数と動ポアソン比を計算して孔内の動弾性係数を求めた。この動弾性係数は、すでに、孔内のS波速度を求めた段階で、コアと地山の亀裂の影響を考慮した値となっており、地山の変形係数に該当する値である。この孔内の動弾性係数を孔内载荷試験による変形係数、コアのP波とS波速度から求めた動弾性係数と比較した。

その結果、速度検層から算出した動弾性係数は3,000~36,000MPaであり、室内試験から算出した動弾性係数300~68,000MPaよりも小さい値を示した。また、孔内载荷試験による変形係数400~10,000MPaより大きな値を示した。この違いは、測定対象や範囲内における亀裂や地盤の状態の違いを反映していると考えられる。また、孔内の弾性波速度は、孔内の動弾性係数との間に、孔内载荷試験による変形係数よりも明瞭な比例関係が認められたことから、より連続した地山の状態を示す値として求められたと思われる。

キーワード：トンネル、地山分類、変形係数

Keywords: tunnel, ground classification, modulus of deformation

堤防の地表面不整形性が波動伝播に与える影響  
Effects of surface irregularity of embankment  
on wave propagation

\*宮永 隼太郎<sup>1</sup>、山中 浩明<sup>1</sup>、地元 孝輔<sup>1</sup>

\*Shuntaro Miyanaga<sup>1</sup>, Hiroaki Yamanaka<sup>1</sup>, Kosuke Chimoto<sup>1</sup>

1.東京工業大学大学院総合理工学研究科

1. Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Phase velocity of surface wave, mainly Rayleigh wave, generated by artificial sources is used in the surface-wave exploration method to estimate a shallow S-wave velocity structure. It has been often used in soil surveys in, for example, river embankment, landfill and residential land. A horizontal layered model with the flat Earth's surface is assumed in data analysis of the method. However, the appropriateness of the assumption has not been sufficiently discussed for its application for a site which has surface and subsurface complex irregularities.

In this study, we investigate effects of surface irregularity on characteristics of surface-wave propagation through numerical experiments based on a finite-difference method to understand its applicability. First, we conducted 3D simulations of wave propagation in shallow soil models with and without surface irregularity considering realistic cases, such as embankment. Then, we derived frequency-dependent phase velocity from synthetic waves obtained on the surface of the models. We also examined effects of slope of embankment and a velocity contrast between surface layers and basement on the surface-wave phase velocity.

The effects of the 3D shape of surface topography are significantly identified in the surface-wave characters in the models with a high velocity contrast between surface layers and basement, when the model has a steep slope on a side of the embankment. In the embankment models, scattered wave generated in the upper surface and the base of the embankment was observed. The estimated phase velocity for the surface wave differs from those of the horizontally-layered model indicating difficulty to deduce a true velocity model. However, the phase velocity for the model having a low velocity contrast is similar to those in the horizontal model even in the models with steep slopes. It is concluded that effect of surface irregularity on the surface wave propagation is small in sites with a low velocity contrast with regardless of surface irregularity.

キーワード：地表面の不整形、位相速度、表面波探査、S波速度

Keywords: surface irregularity, phase velocity, surface-wave exploration, S-wave velocity

## 解釈テンプレートを利用した河川堤防の統合物理探査の解釈例

An interpretation result of the integrated geophysical survey at river levee using interpretation template

\*小西 千里<sup>1</sup>、斎藤 秀樹<sup>1</sup>、茂木 透<sup>2</sup>

\*Chisato Konishi<sup>1</sup>, Hideki Saito<sup>1</sup>, Toru Mogi<sup>2</sup>

1.応用地質株式会社、2.北海道大学

1.OYO Corporation, 2.Hokkaido University

河川堤防の安全性はボーリングデータを基に作成された堤体土質図や基礎地盤の土質断面といった既往資料と、特定の位置で実施された安全性照査結果をあわせて評価されている。しかしながら、ボーリングの位置では土質が既知であってもボーリング孔の間隔は1km程度であり、その間の土質分布はあくまで解釈者の推定に頼っているのが現状である。一方で、物理探査は直接的に土質を求めることはできないが、ある物性値をたとえば10m程度の分解能で把握することが可能である。したがって、物理探査によってボーリング孔間の土質を概略的にでも推定することができれば、たとえば照査断面位置を決める際の重要な情報になると考えられる。河川堤防の統合物理探査では、表面波探査によりS波速度断面、牽引式電気探査により比抵抗断面を求め、それらをクロスプロットして解釈することで、堤体および基礎地盤の土質を縦断方向に評価している。今回、物理モデルにもとづく解釈テンプレート（小西ほか，2016）を利用し、クロスプロットから概略の土質を推定した結果とその検証結果について報告する。

物理モデルを仮定することで土質区分用の解釈テンプレートが作成できるが、作成した解釈テンプレートの妥当性は、探査結果だけでは判断がつかない。そのため、原則的には、物理探査測線上にあるボーリング位置で既知の土質区分との比較、解釈テンプレートの調整を行った後に、概略の土質分布断面図を推定する。今回、このようにして得られる土質推定結果を検証するために、物理探査の測線付近にある複数のボーリングを解釈用と検証用とに分け、解釈用のボーリングデータだけを用いて、解釈を行った後、検証用のボーリング位置で結果の妥当性を検証した。

物理探査結果から推定した土質分布図からは、解釈用の2本のボーリング孔の間に粘性土がやや深く分布している状況が推定された。一方、解釈用のボーリング孔間にある検証ボーリング位置でも粘性土が確認され、またその深度も周囲よりもやや深くなっていることが明らかとなった。このことから、物理探査結果から推定した概略土質断面が妥当であることが示された。これはすなわち、物理探査結果によって数少ないボーリング孔のデータを補間することで概略の土質断面を正しく作成できることを意味している。

キーワード：解釈テンプレート、統合物理探査

Keywords: interpretation template, integrated geophysical survey

## 千歳川堤防開削地点での統合物理探査

Integrated Geophysical surveys in levee excavation sites on the Chitose river, Central Hokkaido

\*茂木 透<sup>1</sup>、重藤 迪子<sup>1</sup>、高井 伸雄<sup>2</sup>、岡崎 健治<sup>3</sup>、倉橋 稔幸<sup>3</sup>、大日向 照彦<sup>7</sup>、堀田 淳<sup>4</sup>、稲崎 富士<sup>5</sup>、北 高穂<sup>6</sup>

\*Toru Mogi<sup>1</sup>, Michiko Shigefuji<sup>1</sup>, Nobuo Takai<sup>2</sup>, KENJI OKAZAKI<sup>3</sup>, Toshiyuki Kurahashi<sup>3</sup>, Teruhiko Obinata<sup>7</sup>, Jun Horita<sup>4</sup>, Tomio INAZAKI<sup>5</sup>, Takaho Kita<sup>6</sup>

1.北海道大学大学院理学研究院付属地震火山研究観測センター、2.北海道大学大学院工学研究院、3.寒地土木研究所、4.㈱ジオテック、5.土木研究所、6.TK海陸調査事務所、7.北海道開発局

1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, 2.Faculty of Engineering, Hokkaido University, 3.civil Engineering Research Institute for Cold Resion, 4.Geo-Technical Research Co.Ltd., 5.Public Work Reserch Institute, 6.TK Ocean Land Investigation Ltd., 7.Hokkaido Regional Development Bureau

北海道中部にある千歳川では、樋管を新設するために北島地区および晩翠地区で堤防開削が行われた。高密度電気探査と表面波探査が、開削前に天端と高水位面で縦断方向に行われた。また、開削地点を横断においても比抵抗トモグラフィーとS波トモグラフィーが行われた。開削後、開削面において、小さい電極間隔による比抵抗マッピングと小間隔の表面波探査が行われ、開削面において直接比抵抗とS波速度が測定された。

地表探査による比抵抗構造やS波速度構造は、開削面での直接測定により得られた比抵抗やS波の分布により検証された。これらの探査により堤体や基礎地盤での不均質構造が示された。開削面から採取された試料の土質試験により得られた粒度分布と比抵抗とを比較することにより、堤体内の透水ゾーンが検出され、その基礎地盤への延長も示された。

キーワード：統合物理探査、堤防探査

Keywords: Integrated Geophysical Survey, Levee Survey