岩石物理学に基づく物理探査結果の解釈技術の動向* - 物理探査および物理検層データに対する複合解析の適用 -

鈴木 浩一¹

Technical Trends in Rock Physics based Techniques for Interpreting Geophysical Exploration Results - Application of Combined Analysis to Geophysical Surveys Data and Geophysical Log Data -

by Koichi SUZUKI^a

a. Geosphere Science Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute
of Electric Power Industry, 1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba 270-1194
(Corresponding author, E-mail: k-suzuki@criepi.denken.or.jp)

One of the benefits of geophysical exploration is that extensive and continuous surveys are possible at low cost principally through elastic wave velocity and electrical resistivity. Therefore, the techniques that can derive quantitative information on the geological environment from geophysical data are essential for engineering applications. Various studies have been conducted to estimate hydraulic conductivity by combining several well logging data sets using rock physical models for sedimentary and crystalline rocks. In this study, the author calculated the hydraulic conductivity using the models for a soft sedimentary rock site and a granite site. As a result, the calculated values closely match the field and laboratory permeable tests using the rock samples. Next, the author has applied a quantitative analysis for porosity, clay content, and salinity profiles using a combined interpretation of multiple surface geophysical surveys data by using the extended bimodal mixture model. The S-wave velocity and resistivity data have been obtained at a soft sedimentary rock site, composed of the muddy or tuffaceous sandstone and mudstone. The results correlate with the salinities of pore water extracted from borehole core samples. It is expected that these techniques will be effective methods to investigate the shape of the interface of the fresh groundwater and salt water at coastal soft sedimentary rock sites.

KEY WORDS: Geophysical Survey, Geophysical Logging, Rock Physics, Engineering Physical Property, Seismic Velocity, Electrical Resistivity

1. はじめに

地球物理学的な現象を利用して地下構造を地表面より非破壊的に調査できる物理探査法は、鉱物・エネルギー資源の位置や埋蔵量を評価する技術として、エレクトロニクスやコンピュータ技術の発展とともに資源探査分野において急速に進歩してきた。この物理探査法には2つの重要な要素技術の柱がある。一つは、どの程度の深度までどの程度の大きさのものをどの程度の時間的な変動まで探査できるのか、すなわち地下構造を“時空間的”に測定・解析する技術である。もう一つは、この測定・解析技術により得られた解析結果から目的とする地盤工学的な物性値や資源の埋蔵量などをいかに推定するのか、すなわち解析結果を定量的に評価する技術である。前者は弾性波速度あるいは電気比抵抗（以降、比抵抗）によりグローバルな地下構造を可視化する技術である。これに対し、後者は、岩石試料を用いた室内試験などにより、弾性波速度あるいは比抵抗と地盤工学的な物性値との相関性を解明

する評価技術である（Fig. 1）。これら2つの技術はいわば2本のレールを走る鉄道の両輪のようなものであり、いずれか一方だけでは探査技術としては不完全である。

石油探査の分野では、物理探査結果から炭化水素の飽和度や貯留岩の透水性を評価して、埋蔵量を精度良く見積もることが非常に重要であり、可視化技術だけでなく評価技術においても先端的な研究が行われている。一方、土木・建設分野での地盤調査法としては、弾性波探査法や電気探査法などが利用されてきた。しかし、探査の対象は砂岩・頁岩などの石油を貯留する岩盤だけではなく、未固結地盤、堆積軟岩、硬質な結晶質岩など様々な岩種に及んでいる。また、山岳地帯などでは火山岩の貫入による変質や風化作用を受けた複雑な地質構造を対象とすることが多い。よって、例えば、比抵抗は、岩種だけでなく間隙率・水分飽和度・地下水の電気伝導度・粘土含有量などの要因によっても変化するため、定量的な評価が容易でなかった。したがって、土木・建設分野では資源探査分野に比べ、地盤工学的な物性値の評価技術が遅れているのが現状である。

本報では、岩石物理学に基づき、弾性波速度や比抵抗の支配要因を解明した研究事例と、土木・建設分野において弾性波速度および比抵抗から地盤の力学的性質、水理的性質などの地盤工学的な物性値を評価する技術の研究動向や適用性について取り纏めた。

*2013年1月8日受付 2013年2月14日受理
1. 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域
[著者連絡先] FAX: 04-7183-3182

E-mail: k-suzuki@criepi.denken.or.jp

キーワード：物理探査、物理検層、岩石物理学、地盤物性値、弾性波速度、比抵抗

Fig.1 Schematic of the geophysical exploration method for the evaluation of engineering physical properties.

2. 土木・建設分野における物理探査法の地盤工学的ニーズ

物理探査法には弾性波・電気・電磁波・重力・磁気などを利用した数多くの種類があり、探査目的や対象とする深度に応じ幾つかの手法を組み合わせられて適用されている^{1, 2)}。この中で、近年、物理探査法は高密度に測定したデータを計算機で数値解析して最適解を求め、2次元あるいは3次元の弾性波速度構造あるいは比抵抗構造を可視化できる点で着目されている。また、地盤の含水率の変化に伴う比抵抗の変化を利用した地下水流動経路のモニタリングへの適用事例が増加している^{3, 4)}。土木・建設分野における物理探査法の地盤工学的なニーズは多岐にわたっている。特に、割れ目系岩盤の地質構造調査や透水性評価を行う上で非常に重要な調査技術である⁵⁻⁷⁾。これらの手法を電力建造物立地点の調査に限れば以下のニーズがあげられる。

- 1) 建造物周辺の活断層調査
- 2) 山岳部の導水路トンネルやダムサイト周辺の湧水を伴う断層破砕部の調査
- 3) 地下空洞（地下発電所, CAES, 高レベル廃棄物処分施設など）を伴う建造物周辺地盤の水理地質構造調査
- 4) 既設ダム基礎岩盤の水理地質構造調査
- 5) ダムサイトにおけるグラウトミルク注入による地盤改良範囲の調査
- 6) 薬液注入による土質地盤の改良範囲の調査
- 7) 湛水池周辺の地すべり斜面における降雨水の浸透に伴う地下水流動経路の調査
- 8) 熱水貯留層や高温岩体など地熱源探査や水圧破砕により造成された人工貯留層の範囲の調査

3. 既往研究の概要

近年、物理探査結果の解釈技術として着目されている岩石物理学（ロックフィジックス）⁹⁾は、物理探査法で得られる岩盤の弾性波速度や比抵抗などマクロな特性と間隙率や透水性といった工学的な特性との相互関係を、岩石粒子レベルのミクロなモデルに基づき理論的に説明する研究分野である。岩石のモデル化の研究は、石油やガス鉱床の探査分野において発展してきている¹⁰⁾。この分野では石油の代表的な貯留岩である砂岩を対象としており、主に地震探査反射法が利用されてきたため、弾性波速度、特にP波速度に関係する物性値を扱った岩石モデルの研究が精力的に行われている。

岩石の比抵抗モデルとして、電流は間隙水中だけを流れると仮定したアーチーの式¹¹⁾が、貯留岩における電気検層の解釈に使われていた。その後、電流の通り道は間隙水以外にもあると考えられ、泥質砂岩を対象として粘土粒子による電気伝導現象（過剰伝導現象）を考慮した電気伝導モデルに関する研究が行われている¹²⁻¹⁴⁾。

地盤の比抵抗と透水性との相関性を解明するため、連結した間隙を水と電流の共通の通り道と考え、間隙の屈曲性を考慮した電気伝導モデルが提案されている¹⁵⁻¹⁷⁾。さらに、Lima¹⁸⁾は水理的屈曲性および過剰伝導現象を考慮した電気伝導モデルに基づき、複数の物理検層データから透水係数を導く理論を提案している。一方、結晶質岩にも粘土粒子以外の過剰伝導現象があることが実験的に確認されており¹⁹⁾、Katsube and Hume²⁰⁾は過剰伝導現象を考慮して複数の物理検層データから透水係数を導く実験式を提案している。

Fig.2 Relationship between ground conditions and elastic wave velocity or electrical resistivity, based on Kaji et al. ⁶⁾

Table 1 Table of studies that investigate the relationship between electrical resistivity (elastic wave velocity) and engineering physical properties.

著者	年	相関	物性パラメータ	岩種	適用例
Archie ⁽¹⁾	1942	比抵抗－間隙率	水飽和度 間隙水比抵抗	多孔質地盤(Clean sand)	電気検層
Bussian ⁽²⁾	1983	比抵抗－間隙率	間隙水比抵抗 表面伝導による比抵抗	多孔質地盤	電気検層
Nishimaki ⁽³⁾	1999	比抵抗－割れ目	割れ目幅 割れ目密度	割れ目系岩盤	電気検層
Worthington ⁽⁵⁾	1975	比抵抗－透水係数	間隙率 間隙水比抵抗	多孔質地盤 (Clean sand)	電気＋間隙率検層
Lima ⁽⁸⁾	1995	比抵抗－透水係数	間隙率 交換性陽イオン濃度	多孔質地盤	電気＋電磁＋間隙率検層
Katsube・Hume ⁽²⁰⁾	1987	比抵抗－透水係数	間隙率 間隙水比抵抗	割れ目系岩盤	電気＋間隙率検層
Kenyon ⁽²¹⁾	1995	NMR緩和時間－ 透水係数	間隙率	多孔質地盤(Sand, Shell)	CMR検層＋間隙率検層
Beydoun etc. ⁽²⁴⁾	1985	チューブ波－透水係数	チューブ波とP波の振幅, 間隙率	割れ目系岩種	VSP検層
Dvorkin ⁽²³⁾	1994	P波－透水係数	間隙率, Squirt flow長 粒子密度	多孔質地盤 割れ目系岩盤	音響トモグラフィ ⁽²²⁾

そのほか石油探査分野では、医療分野で実用化されている核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance: NMR) を利用した検層器が適用されている。この手法では、地層内の水分子の回転運動によるスピン磁場を観測することにより、透水性に寄与する間隙率および透水係数が算出できる²¹⁾。また、弾性波速度の周波数依存性を測定し、間隙率と透水係数を求める音響トモグラフィ法が比較的多孔質な地盤を対象に適用されている^{22, 23)}。さらに、VSP検層 (Vertical Seismic Profile) において、比較的硬質な岩盤中の高透水性を示す割れ目で発生するチューブ波 (孔壁沿いに伝播する波) を測定して、透水係数を推定する手法が提案されている²⁴⁾。

これらの研究より、地盤の透水性を考慮した比抵抗モデルは、未固結地盤や新第三紀以降の堆積軟岩など粒子間の空隙に透水性が支配される「多孔質地盤」と、新鮮な結晶質岩や先第三紀の堆積岩など主として開口割れ目に透水性が支配される「硬質岩盤」に大別するのが妥当と考えられる (Table 1)。

国内の堆積軟岩を対象に二粒子岩石モデル²⁵⁾ (以降、二粒子モデル) により弾性波特性の支配要因を深度依存性も考慮して粘土含有率と間隙率で説明できることが示されている²⁶⁾。また、この二粒子モデルに基づき、間隙率と弾性定数の関係、および粘土含有率・間隙率と比抵抗の関係を求め、堆積軟岩地域の検層データに対し弾性波速度と比抵抗を組み合わせた複合解析が行われている^{27, 28)}。

以上、弾性波速度や比抵抗以外の物性値情報 (中性子検層による間隙率、 γ 線検層による密度など) が得られる物理検層と異なり、地表面から行われる物理探査で2次元あるいは3次元の物性値断面が比較的精度良く得られるのは、主として弾性波速度や比抵抗である。よって、物理探査データから透水特性や力学特性の空間分布まで求めるには課題が多く、適用事例はほとんどないのが現状である。しかし、例えば堆積軟岩が分布する調査地点を対象に、弾性波速度や比抵抗から地質構造の解釈に重要な間隙率や塩淡水境界の評価に必要な地下水の電気伝導度の空間分布を算出することは充分可能と考えられる。

最新の研究動向として、複数の物理探査データを組み合わせ、他の物性値の空間分布を求める新しい解析技術 (以降、複合解析と呼ぶ) に関する研究が行われている。例えば、未固結砂モデルに基づき、S波速度と比抵抗の物理探査データを組み合わせ、河川堤防の土質断面を推定した事例がある²⁹⁾。また、下山ほか³⁰⁾は、前述した二粒子モデル²⁵⁾に基づきS波速度と比抵抗を複合解析して、間隙率・粘土含有量・地下水の電気伝導度を求める手法を提案している。

Fig.3 Concept of combined analysis based on the rock physics.

Table 2 Summary of analytical techniques based on the rock physics.

	長所	短所
①クロスプロットによる方法	手軽で簡便	データが少ない場合、精度・信頼性が低下 汎用性がない
②経験式による方法	多くのデータに基づいており、信頼性も高く適用例も多い 物理的な意味も理解できる	原則的には対象とする限られた岩石や条件でしか適用できない
③岩石物理学モデルによる方法	変換式の物理的な意味が明瞭 汎用的で地域に係わらず適用できる	堆積岩を中心とした単純なモデルが中心

以上述べた最新の研究動向で用いられた基礎理論、および筆者が複数の検層データあるいは複数の物理探査データを組み合わせ、複合解析により他の地盤物性値の分布を求めた事例を次章以降に紹介する。

4. 複合解析の概要

Fig. 3 および Table 2 に岩石物理学に基づく複合解析の基礎概念を示す。解析方法には3種類があり、それぞれ一長一短を持つ。岩石物理学に基づく手法が3種類の中で最も信頼性があるが、その理論を構築するには様々な岩石試料に基づく膨大な実験データが必要となる。一方、クロスプロット法は、例えば間隙率を横軸、弾性波速度を縦軸にとって得られる線形関数あるいは累乗関数の回帰式を用いる手法である。現地より採取した岩石試料の物理試

Fig. 4 Analytical flow of a hydraulic conductivity by multiple geophysical logs data, based on Suzuki.³¹⁾

Fig. 5 Conceptual diagram of the bimodal grain mixture model.

Fig. 6 Concept of combined analysis based on the bimodal grain mixture model, based on Shimoyama et al.³⁰⁾

験データおよび物理検層による計測データ量が充分あり、その地点に適用を限定すれば、クロスプロット法でもおおよそその精度で解析を行うことができる。

Fig. 4 に物理検層データを使用して透水係数を求める複合解析フロー³¹⁾を示す。本手法は泥質砂岩を対象とした岩石物理モデルによる方法 (Table 2 中の③に相当) に基づくもので、複数の物理検層データを組み合わせて解析することにより、地盤の透水係数を導くことが可能である。

二粒子モデル²⁵⁾では、岩石を Fig. 5 に示すように大小二種類の球状粒子の集合で表している。ここでは大粒子を砂粒子、小粒子を粘土粒子とみなしており、砂粒子のみでパッキングされた場合の間隙率を ϕ_{ss} 、粘土粒子のみでパッキングされた場合の間隙率を ϕ_{sh} としている。このモデルでは、粘土含有率の増加に伴い間隙率が一旦減少し、その後増加する。この変化の様子を砂粒子の間を粘土粒子が埋めていく頁岩質砂岩 (Fig. 5 の a ~ c) と砂粒子が粘土粒子に取り囲まれた砂質頁岩 (Fig. 5 の c ~ e) の 2 通りの状態に分けて考えている。本モデルにより間隙率と粘土含有率の関係を求めることができる。

頁岩質砂岩および砂質頁岩に対する間隙率 ϕ と粘土含有率 C の関係は、それぞれ次式³²⁾で示すことができる。

$$\phi = \phi_{ss} - C(1 - \phi_{sh}) \quad (1a)$$

$$\phi = C\phi_{sh} \quad (1b)$$

下山ほか³⁰⁾は、この二粒子モデルに基づき、S波速度と比抵抗を組み合わせた複合解析により、間隙率・粘土含有率・地下水の電気伝導度を導く複合解析法を提案している。本解析フローの概要を Fig. 6 に示す。

5. 検層データに対する複合解析

5・1 堆積軟岩地点での適用例

筆者は、堆積軟岩地点で行われた複数の物理検層データを組み合わせて、Lima¹⁸⁾に基づき透水係数の深度分布の算出を試みた^{33, 34)}。調査地点には、鮮新世から中新世後期に堆積した珪藻質泥岩およびその下部の中新世後期から中新世前期に堆積した硬質頁岩が分布する。

Fig. 4 で示した解析フローにより透水係数の分布を求めた結果

を Fig. 7 に示す。透水係数の計算値は珪藻質泥岩で $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s、硬質頁岩で $10^{-10} \sim 10^{-9}$ m/s を示し、室内透水試験結果と相対的な大小関係で整合しているが 2 オーダーほど大きい。一方、透水係数の解析値は、声間層および稚内層の割れ目帯のない区間では現地透水試験結果と整合しているが、硬質頁岩の割れ目帯のある区間では透水試験結果より 2 ~ 4 オーダー小さい。

これより、複合解析結果は、割れ目の影響をほとんど受けない室内透水試験結果と割れ目の影響を大きく受ける現地透水試験結果との中間的な値を示している。これは、物理検層での測点間隔は 10cm ~ 数 10cm で測定されるため、開口幅でミリ単位の高透水性を示す割れ目区間の透水係数は、周囲の岩盤と平均化されることによると推測される。

5・2 割れ目系岩盤地点での適用例

花崗閃緑岩の分布域に掘削した深度 1000m 級のボーリング孔で行われた物理検層データに対し、Katsube and Hume²⁰⁾に基づき透水係数の深度分布を求めた³¹⁾。

Fig. 8 (a) に地質柱状図、Fig. 8 (b) に電気検層、泥水検層、Fig. 8 (c) に中性子検層による結果を示す。各物理検層データに見られるスパイク状の異常部 (比抵抗は小、間隙率は大) は、割れ目の多い箇所に対応すると考えられる。これらの割れ目の性状は、粘土の介在は少なく開口しており、透水性が高いと推測される。Fig. 8 (d) はこれらの検層データ (Fig. 8 (b), (c)) より求めた透水係数の深度分布である。同図に見られるスパイク状の高透水部 (太い矢印と細い矢印) は、間隙の大きい領域、あるいは“水みち”となる割れ目に対応するものと推定される。なお、4 箇所の貫入岩部 (細い矢印) はいずれも高い透水性を示す。

算出した透水係数分布の妥当性を評価するため、孔井冷却による温度回復時の光ファイバー温度検層を行い、FMI 検層 (Formation Micro Imager) による孔壁展開画像から 10m 当たりの開口割れ目本数を推定した。さらに音波検層によるストンレー波速度の深度分布を求めた。ストンレー波とは孔壁沿いに伝播するチューブ波の一種である。これらの結果を Fig. 8 (e), (f), (g) に示す。FMI 検層より推定した割れ目密度の多い区間と温度検層より検出した“水みち”となる割れ目位置とは必ずしも整合していない (Fig. 8 (f))。温度検層結果 (Fig. 8 (e)) の太い矢印で示す 7 箇所の異常部は、“水みち”となる開口割れ目が存在することを示している。また、孔壁沿いに伝播するストンレー波の速度は一般的に 1,400m/s であ

るが、開口割れ目が存在すると低速度となることが知られている³⁵⁾。ストーンレー波速度分布 (Fig. 8 (g)) において、5 箇所の太い矢印で示す低速度部は、温度検層による異常部の深度と整合している。

以上より、物理検層データより算出した透水係数分布における高透水部の一部 (7 箇所の太い矢印) は、温度検層により検出した「水みち」の位置と整合した。よって、本手法は、割れ目系岩盤においても透水係数を連続的に求めるのに有効であると考えられる。

6. 物理探査データへの複合解析

筆者は、沿岸域堆積軟岩地点で行われた複数の物理探査データ (S 波速度構造および比抵抗構造) から、間隙率、粘土含有量、地下水の電気伝導度の分布を算出した³⁶⁾。Fig. 9 に調査地点周辺の地質図を示す。南北方向の測線で行われた微動アレイ探査による S 波速度構造、電磁探査法による比抵抗構造、ボーリング孔での物理検層データを使用した。本調査では、新第三紀中新世前期～中期の泥岩を主体とした葉山層群、およびその上位に不整合で分布する中新世後期～鮮新世の砂質シルト岩・砂岩互層を主体とした三浦層群を対象とした。

Fig. 10 に複合解析結果の例を示す。左から順に、S 波速度、電気伝導度 (比抵抗の逆数)、および複合解析による間隙率、粘土含有率、地下水の電気伝導度、等価 NaCl 濃度の深度分布を示す。Fig. 11 は、S 波速度、比抵抗、地下水の電気伝導度を 2 次元断面として表示した結果である。全ての測点に共通して深度とともに間隙率は低下する傾向が見られる。また、地下水の電気伝導度および等価 NaCl 濃度は、測点 AR-3 の深度 50 ～ 150m 区間を除いて深度が増すにつれて大きくなる傾向が見られる。また、全ての測点に共通して深度 150m 以深では海水と同程度の値 (3 ～ 4S/m) を示している。

物理探査による S 波速度、比抵抗、および複合解析による地下水の電気伝導度の分布を対比した結果を Fig. 12 に示す。なお、本測線より 150m ほど西側に位置するボーリング孔で行われた PS 検層、電気検層およびコアより採取した搾水の電気伝導度も合わせて示す。ボーリング調査により、深度 20 ～ 40m 区間は三浦層群初声層、40 ～ 206m は三浦層群三崎層、それ以深は葉山層群が分布することが分かっている (Fig. 12 (a))。三浦層群内では、PS 検層による S 波速度は微動アレイ探査結果より大きくなっている (Fig. 12 (b))。電気検層による比抵抗は深部にいくほど低下するが、電磁探査結果では AR-C を除いて深度 50 ～ 100m 区

Fig. 7 Profiles of geophysical log data and calculated hydraulic conductivity at a soft sedimentary rock site. (a) Geologic column, (b) Electrical log, (c) Formation factor, (d) Neutron log, (e) Natural gamma ray log, (f) Hydraulic conductivity, the circle symbols show the data obtained by laboratory tests.

Fig. 8 Profiles of geophysical log data and calculated hydraulic conductivity at a crystalline rock site. (a) Geologic column, (b) Electrical log, (c) Neutron log, (d) Hydraulic conductivity, (e) Temperature log, (f) Fracture density, (g) Tube wave velocity

Fig. 9 Location map of the study area. (a) Index map of the survey site, Miura Peninsula in Kanagawa prefecture, (b) Geological map at the site (Quoted from 1:50000 geological map Yokosuka 9-84), (c) Location of measurement points.

Fig.10 Calculated profiles for geophysical properties determined by the combined analysis. (a) S-wave velocity, (b) Electrical conductivity, (c) Porosity, (d) Clay content, (e) Electrical conductivity of pore water, (f) Equivalent NaCl concentration.

Fig.12 The depth profiles of geophysical survey data and the combined analysis data. (a) Geologic column, (b) S-wave velocity by the microtremor array survey, (c) Resistivity by the electromagnetic survey, (d) Salinity of underground water by the combined analysis.

間でいったん低下し、それ以後より深度 200m まで増大し、深度 200m より再び低下する傾向を示す (Fig. 12 (c))。複合解析による地下水の電気伝導率は、AR-3 を除いて深部に向かい増大する傾向がある (Fig. 12 (d))。コア試料より採取した搾水の電気伝導率に対し、深度 200m 付近より深部では電気伝導率が増大していく傾向は概ね整合している。

7. ま と め

岩石物理学に基づき、弾性波速度や比抵抗の支配要因を解明した研究事例と、土木・建設分野において弾性波速度および比抵抗から地盤の力学的性質、水理的性質などの地盤工学的な物性値を評価する技術の研究動向や適用性について整理した。物理検層データに対しては、複数のデータを組み合わせることにより、透水係数の深度プロファイルまで算出できることが示されている。一方、地表から行われる物理探査データに対しては、弾性波速度と比抵抗を組み合わせる末固結地盤や堆積軟岩などを対象に限定されているが、間隙率や土質の評価が可能なが示されている。

堆積軟岩地域の物理検層データに対し複合解析により透水係数の深度分布を求めた結果、コア試料による試験値と現地透水試験値との中間的な値を示した。また、硬質岩盤地点の物理検層データに対し複合解析により透水係数を求めた結果、その高異常部は

Fig.11 Application of the geophysical surveys data at the soft sedimentary rock site near coastal area. (a) S-wave velocity structure by the microtremor array survey, (b) Resistivity structure by the electromagnetic survey, (c) The profile of salinity of underground water by the combined analysis, the borehole "YDP-1" shows the position on the survey line from the West direction.

他の手法で水みちと特定された高透水性割目の位置とほぼ整合した。これより、物理検層データに対する複合解析は、透水係数の連続的な深度分布の推定に適用できると考えられる。

沿岸域堆積軟岩地点で行われた物理探査データを組み合わせ、二粒子岩石モデルに基づく複合解析を試みた。その結果、得られた地下水の電気伝導率の深度分布は、ボーリングコア試料から得られた搾水の電気伝導率と概ね整合する傾向が認められた。本手法は様々な物性値を仮定して計算を行う必要があり、複雑な地質構造に対しては精度的な課題は残る。しかしながら、概要調査段階における沿岸域堆積軟岩地域の塩淡境界の調査には充分適用できると考えられる。

謝辞 地表物理探査データに対する複合解析の適用例では、著者が所属する電力中央研究所と原子力発電環境整備機構 (NUMO) との共同研究で実施した成果を引用させていただきました。NUMO 担当者の吉村公孝氏には厚く感謝いたします。

References

- 1) T. Kuwahara, T. Kitago, M. B. Karkee, and J. Yamazaki: State of Effective Use of Geophysical Exploration from Questionnaire Survey, *Soils and Foundations*, **45** (1997), 3-6.
- 2) K. Ochi and T. Takeuchi: Technical Trends of Geophysical Exploration in Construction, Disaster Prevention and Environmental Application, *Soils and Foundations*, **45** (1997), 15-18.
- 3) K. Suzuki and S. Higashi: Ground water flow after Heavy Rain in Landslide-slope Area from 2D Inversion of Resistivity Monitoring Data, *Geophysics*, **66** (2001), 733-743.

- 4) H. Nakazato, S. Kuroda, K. Inoue, M. Takeuchi, and Z. Wang: Visualization of Tidal Fluctuations on Groundwater by Resistivity Monitoring Method, *BUTSURI-TANSA*, **60** (2007), 501-506.
- 5) K. Tanaka, Y. Tanaka, K. Miyakawa, Y. Mahara, S. Yasuike, and S. Honsho: Proposal of Surveying System to Investigate Hydrogeological Structure of Fracture Developing Rock Mass and its Application, *J. of the Japan Society of Engineering Geology*, **36** (1996), 414-426.
- 6) K. Suzuki: Application of Geophysical Prospecting to Geological Engineering (III) - Application to Estimation of the Permeability of Hard Rocks -, *BUTSURI-TANSA*, **51** (1998), 83-95.
- 7) K. Hoshino, T. Shiomi, T. Matsumoto, and T. Tani: Geological Techniques Applied for New Project on Underground Storage of Liquefied Petroleum Gas, *Soils and Foundations*, **46** (1998), 25-27.
- 8) Y. Kaji, S. Miki, T. Haryu, and K. Masumoto: Correlation between the Results of Geophysical Prospecting and Geotechnical Properties, *Soils and Foundations*, **45** (1997), 11-14.
- 9) G. Mavko, T. Mukerji, and J. Dvorkin: *The Rock Physics Handbook*, Cambridge University Press. (1998).
- 10) P. Avseth, T. Mukerji, and G. Mavko: Quantitative Seismic Interpretation. Applying Rock Physics to Reduce Interpretation Risk, Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press. (2005).
- 11) G. E. Archie: The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some Reservoir Characteristics, *Trans. A.I. M. E.*, **146** (1942), 54-62.
- 12) A. E. Bussian: Electrical Conductance in a Porous Medium, *Geophysics*, **48** (1983), 1258-1268.
- 13) T. J. Katsube, and J. P. Hume: Electrical Resistivities of Rocks from Chalk River, *Proc. Ws. Geophysical Geoscience Research at Chalk River*, (1983), pp.105-114.
- 14) H. Nishimaki, I. Sekine, A. Saito, and R. Yoshinaka: Electrical Resistivity of Rock and its Correlation to Engineering Properties, *BUTSURI-TANSA*, **52** (1999), 161-171.
- 15) P. F. Worthington: Quantitative Geophysical Investigations of Granular aquifers, *Geophysical Surveys*, **2** (1975), 313-266.
- 16) P. A. Goode, and P. N. Sen: Charge Density and Permeability in Clay Bearing Sandstones: *Geophysics*, **53** (1988), 1610-1612.
- 17) P. N. Sen, C. Straley, W. E. Kenyon, and W. S. Whittingham: Surface-to-volume Ratio, Charge Density, Nuclear Magnetic Relaxation, and Permeability in Clay-bearing Sandstones, *Geophysics*, **55** (1990), 61-69.
- 18) O. A. Lima : Water Saturation and Permeability from Resistivity, Dielectric, and Porosity Logs, *Geophysics*, **60** (1995), 1756-1764.
- 19) A. Chiba and M. Kumata: Resistivity Measurement for Granite and Tuff Samples, - Influence of Pore Fluid Resistivity on Rock Resistivity, *BUTSURI-TANSA*, **47** (1994), 161-172.
- 20) T. J. Katsube and J. P. Hume: Permeability Determination in Crystalline Rocks by Standard Geophysical Logs, *Geophysics*, **52** (1987), 342-352.
- 21) B. Kenyon, R. Kleinberg, C. Straley, G. Gubelin, and C. Morris: Nuclear magnetic resonance imaging -Technology for the 21st century-, *Oilfield review*, **7** (1995), pp.19-33.
- 22) Y. Sasaki: Estimation of Permeability of a Dam Foundation by the Acoustic Crosswell Tomography, *Proceedings of JSEG Conference*, (1999), pp.175-178.
- 23) J. Dvorkin, R. N. Hoeksema, and A. Nur: The squirt flow mechanism: Macroscopic description, *Geophysics*, **59** (1994), 428-438.
- 24) W. B. Beydoun, C. H. Cheng, and M. N. Toksoz: Detection of open fracture with vertical seismic profiling, *Journal of Geophysical Research*, **90** (1985), 4557-4566.
- 25) J. Dvorkin and M. A. Gutierrez: Textural Sorting Effect on Elastic Velocities, Part II: Elasticity of a Bimodal Grain Mixture, *SEG Int'l Exposition and Annual Meeting*, San Antonio, Texas. (2001).
- 26) T. Takahashi and S. Tanaka: Study on Rock Physical Interpretation of Shallow Geophysical Data, - Rock Physics Modeling of Soft Sedimentary Rocks, *BUTSURI-TANSA*, **62** (2009), 437-446.
- 27) M. Ando, H. Azuma, S. Konishi, and T. Uchida: Combined Interpretation of Seismic velocity and Electrical Conductivity using the Bimodal Grain Mixture Model, *Proceedings of the 121th SEGJ Conference*, (2009), pp.25-28.
- 28) K. Suzuki, K. Kubota, and H. Kondo: Combined Analysis of Geophysical Exploration Data at Soft Sedimentary Rock Site Near Coastal Area (Part 1) - Combined Interpretation of Seismic Velocity and Electrical Resistivity Using a Bimodal Grain Mixture Model -, *Civil Engineering Research Laboratory Rep. No. N11002*, (2011).
- 29) T. Takahashi and T. Yamamoto: An Attempt at Soil Profiling on a River Embankment Using Geophysical Data, *BUTSURI-TANSA*, **63** (2010), 102-108.
- 30) M. Shimoyama, K. Suzuki, M. Ebato, T. Kobayashi, and H. Azuma: Study of the Combined Interpretation Methodology of S-wave Velocity and Resistivity Based on Rock Physics, *Proceedings of the 127th SEGJ Conference*, (2012), pp.139-142.
- 31) K. Suzuki: Imaging Techniques of Geophysical Properties for Engineering by Geophysical Exploration, *J. of the Japan Society of Engineering Geology*, **42** (2002), 342-350.
- 32) D. Marion, A. Nur, H. Yin, and D. Han: Compressional Velocity and Porosity in Sand-clay Mixtures, *Geophysics*, **57** (1992), 554-563.
- 33) Japan Nuclear Cycle Development Institute: H15th Horonobe Underground Research Center Report, (2004).
- 34) K. Suzuki and K. Kiho: Estimation of Physical Properties for Permeability and Dynamic Strength Using Geophysical Logging Data, *Proceedings of JSEG Conference*, (2006), pp.229-232.
- 35) T. Kiguchi, H. Ito, Y. Kuwahara, S. Nakao, and T. Ohminato: Detection of Permeable Fractures and Estimate of Fracture Permeability by Hydrophone, *BUTSURI-TANSA*, **49** (1996), 285-296.
- 36) K. Suzuki, H. Sato, H. Kondo, K. Yoshimura, M. Ebato, M. Imai, and T. Kobayashi: Combined Analysis of Geophysical Exploration Data at Soft Sedimentary Rock Site near Coastal Area, - Application to Results of Micro-tremor Array and Magneto-Telluric Surveys -, *Proceedings of the 127th SEGJ Conference*, (2012), pp.143-146.