

地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした 解釈技術に関する研究（その3） ー土質地盤への岩石モデルの適用性に関する検討ー

高橋 亨¹・田中 莊一¹

¹ 深田地質研究所

Study on rock physical interpretation of geophysical data for geotechnical applications (Part III)
- Study on applicability of rock physics models to soft soils -

TAKAHASHI Toru¹ and TANAKA Soichi¹

¹Fukada Geological Institute

要旨：ロックフィジックス分野で利用されている岩石モデルの土質地盤での適用性評価を目的に、飽和、不飽和土質地盤に既往の岩石モデルを適用し、土質構成の推定を試みた。不飽和土質地盤（河川堤防）については、未固結砂岩モデルをS波速度と間隙率データに適用し、さらに相関関係を利用して間隙率を比抵抗に変換することによって、S波速度－比抵抗関係図に基づく土質区分が可能であることを示した。飽和土質地盤については、未固結砂岩モデルと二粒子岩石モデルをS波、P波速度と間隙率データに適用した。その結果、二粒子岩石モデルを利用することにより、砂礫については困難なものの、砂、粘土についてはモデル化できること、さらにアーチの式を使用して間隙率を比抵抗に換算することによって、不飽和土質地盤同様、速度－比抵抗関係図に基づく土質区分が可能であることを示した。

キーワード：ロックフィジックス、物理探査、土質地盤、岩石モデル

Abstract: To study applicability of rock physics models to soft soils, the existing rock physics models are applied to saturated and unsaturated soft soils for soil classification. For unsaturated soft soils in river embankment, the unconsolidated sand model is applied to S-wave velocity and porosity data. The porosity is converted to resistivity for making an S-wave velocity – Resistivity diagram, which proves that it can be used for soil classification of soft soils. For saturated soft soils, the unconsolidated sand model and the binary sand/shale mixture model are applied to S- and P-wave velocity and porosity data. This application shows that the binary sand/shale mixture model can be used for soils composed of sands and clays, but not for gravels. The diagram of velocity and resistivity converted from porosity with the Archie's law shows its applicability for soil classification of soft soils as the case of unsaturated soft soils.

Keywords: rock physics, geophysics, soft soils, rock physics model

1. はじめに

筆者達は、地盤工学分野での物理探査データの解釈技術を高度化することを目的に、近年石油・ガス探査開発分野で積極的に研究、適用が進めら

れているロックフィジックスを利用した解釈技術の研究を行っている（高橋・田中，2007）。これまでに、研究に必要なインフラとして各種岩盤の物理探査データと工学特性を集めたロックフィジックスデジタルライブラリーと呼ぶデータベースを

構築し（金子・高橋，2008），収集した物性データを用いて，国内の代表的な岩種の1つである堆積性軟岩の物性データに既往の岩石モデルを適用し，その評価を行った（高橋・田中，2008）．

物理探査は，岩盤地域に加えて，土質地盤においても広く利用されている．特に，都市域での建築物の基礎評価や共同溝や都市トンネルのためのルート調査，あるいは，河川堤防の安全性評価のための調査等において，P S 検層，反射法地震探査，表面波法地震探査，電気探査等の手法が利用されている（物理探査学会，2008）．しかしながら，従来は地層の速度分布や概略区分，基盤・岩頭線の概略位置の推定等に利用される程度であり，設計や施工に役立つ土質地盤の土質構成や力学的・水理学的特性の推定等に必要データを提供するまでには至っていない．

そこで，本研究では，土質地盤における物理探査データの解釈技術の高度化の一つの試みとして，検層や地震探査，電気探査で得られる弾性波速度や比抵抗のデータを用いて，土質地盤の土質構成を推定する手法について検討を行った．これまでにも，河川堤防の土質構成の推定に弾性波速度（S波速度）と比抵抗を利用する方法が研究されているが，それらは両物性の相関関係に基づいた経験的な手法であり，物性による土質分類の判定基準も明確でないという課題が残されている（田中ほか，2007）．本研究では，物性データから合理的に土質分類を行うために，弾性波特性のモデル化にロックフィジックス分野で利用されている未固結岩石を対象としたモデルを，電気的特性のモデル化にアーチの経験式等を用いて，その適用性を評価した．また，土質地盤の場合，不飽和地盤か飽和地盤かによって，弾性波速度や比抵抗の値は大きく変わる．そこで，ここでは，不飽和，飽和両地盤における物性データを用いて，ここで提案す

る手法の適用性の検討を行った．

2. 不飽和土質地盤（河川堤防）への適用

2.1 データの概要

不飽和土質地盤の例として，ここでは河川堤防調査で実施されたR I（ラジオアイソトープ）コーン貫入試験で取得されたデータを用いた．R Iコーン貫入試験は，電気式静的コーンである三成分コーンにR Iセンサーを組み込んだプローブを組み合わせて，先端抵抗，周面摩擦，間隙水圧と同時に地盤の密度を測定する（三成分+R I密度計）コーンプローブと，地盤の水分量を測定するR I水分計コーンプローブの貫入を，専用の貫入車を用いて行う静的貫入試験である（三村・吉村，2007）．先端抵抗値からN値相当値に換算することができるとともに，湿潤密度と含水比を同時に測定でき，間隙比（間隙率）も求めることができる．

この調査地では，堤体および基礎地盤の力学的，水理学的特性を把握するために，堤防上の4箇所深度15m程度のR Iコーン貫入試験が実施された．同じ堤防上で別途実施されたボーリング調査により，堤体は不飽和の粘性土質砂礫，粘性土質砂および砂質土から構成されていることが確認されている．さらに，本堤防上では，縦断方向に表面波法地震探査と2次元電気探査，横断方向に屈折法地震探査（屈折トモグラフィ）と3次元電気探査が実施され，S波速度と比抵抗の詳細なデータが得られている．これらの試験と探査の詳細については，山本ほか（2008）を参照されたい．

本研究では，不飽和の土質地盤としてこの堤体で実施されたR Iコーン貫入試験による換算N値，密度，間隙比（間隙率）および地震探査によるS波速度，電気探査による比抵抗値を利用して，堤体の土質構成の推定を試みた．

2.2 モデル解析

モデル解析では、まずR I コーン貫入試験で得られた換算N値と間隙率を基礎データとして、力学的なモデル解析を行った。図1に、解析に使用した換算N値と間隙率の堤体内の深度分布を示す。堤体上部2 mは人工的に締め固めが行われていたので、深度2 m以深から堤体下面にあたる深度約9 mまでのデータを使用した。図からわかるとおり、深度2 mから5 mの区間とそれ以深で堤体の物性が変化している。

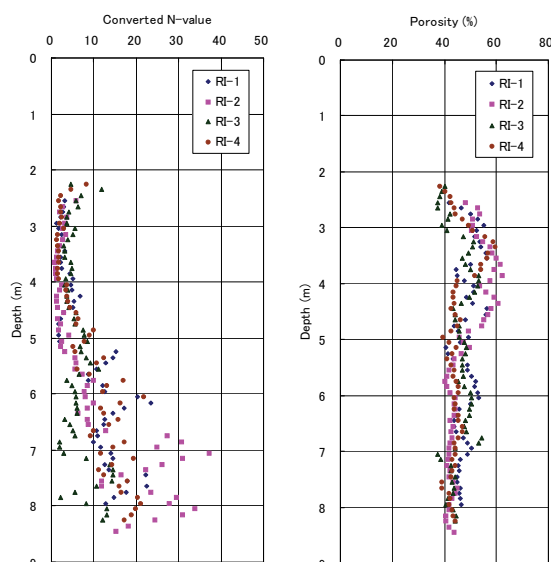


図1 解析に使用したR I 貫入コーン試験データ
(左：換算N値，右：間隙率(%))

次に、R I コーン貫入試験地点での地震探査によるS波速度と換算N値の相関をもとに、換算N値をS波速度に変換し、S波速度と間隙率との関係を求めた。その結果を図2に示す。図では、4箇所のR I コーン貫入試験地点毎に記号を変えてデータをプロットしている。間隙率の増加とともにS波速度が低下する傾向が見えるが、間隙率40～50%あたりに見られるように、同一間隙率でも速度の変化の幅が大きいことがわかる。そこで、ボーリング調査で確認された3種類の土質分類

(粘性土質砂礫、粘性土質砂、砂質土)に従って各データ点の土質の違いを表示したものが図3である。この相関図をみると、S波速度200m/s前後を境に粘性土質砂と砂質土が区分できそうなのがわかる。

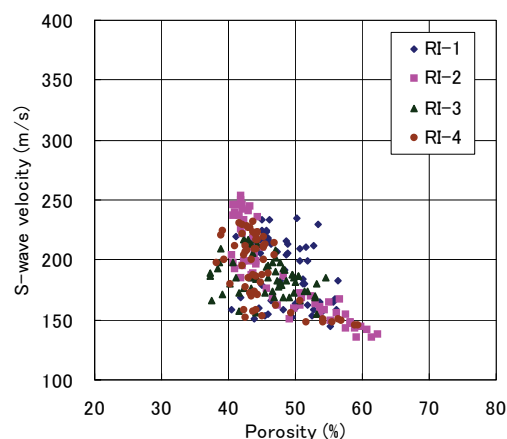


図2 換算S波速度と間隙率の関係

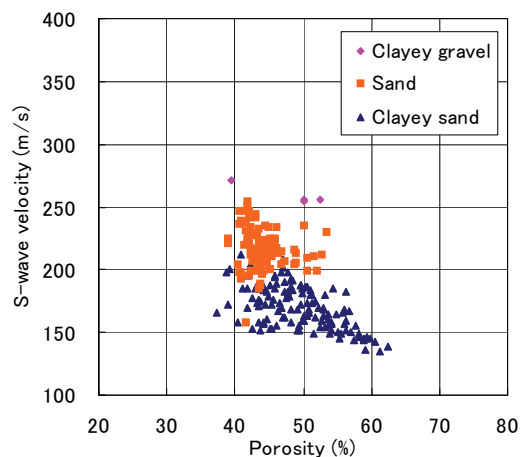


図3 換算S波速度と間隙率の関係
(土質区分による表示)

従来は、このような相関図に現われる特徴から土質分類を行っているが、ここではロックフィジックス分野で利用されている岩石モデルを用いて、より客観的、合理的に分類することを考える。既往の岩石モデルの中で未固結な岩石のモデル化に利用されているモデルの1つとして、未固結砂岩

モデル (Friable sand model あるいは unconsolidated sand model) がある (Avseth et al., 2005). このモデルでは, 図4の模式図に示すように, 主要粒子である砂粒子の間に粘土粒子が固着せずに分布しているような砂岩を想定している. 粘土含有率の違いにより岩石物性が変化するモデルである. このモデルは通常軟らかい砂岩あるいは泥質砂岩に適用されているが, 本研究で対象としている堤体も基本的には砂や砂礫が主体であり, その中に粘土分の多いものが含まれるという土質構成であることがわかっているため, この岩石モデルの適用性が高いと考えた.

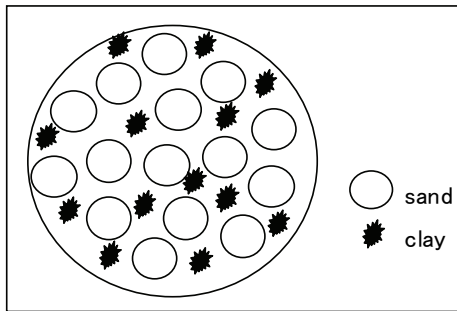


図4 未固結砂岩モデル

未固結砂岩モデル (Friable sand model) のモデル計算式の詳細は, 高橋・田中(2007)に記載したので, ここでは計算結果だけを示す. 図5は, 図3に示すS波速度と間隙率の関係図に, モデルによる計算値を重ねた結果である. ここでは, 4つの粘土含有率 (0, 30, 60, 100%) に対する計算値を示している. 計算に使用したパラメータを表1に示す. この結果をみると, 粘性土質砂礫は粘土含有率が0%未満, 砂質土は0-60%, 粘性土質砂は30-100%の計算値の範囲に分布し, モデルと実測がよい一致を示していることがわかる. つまり, 岩石モデルに基づき, 土質分類を行うことが可能であることを示す結果であるといえる.

S波速度と間隙率をベースに岩石モデルを適用して土質分類を行う場合, 間隙率の推定が課題と

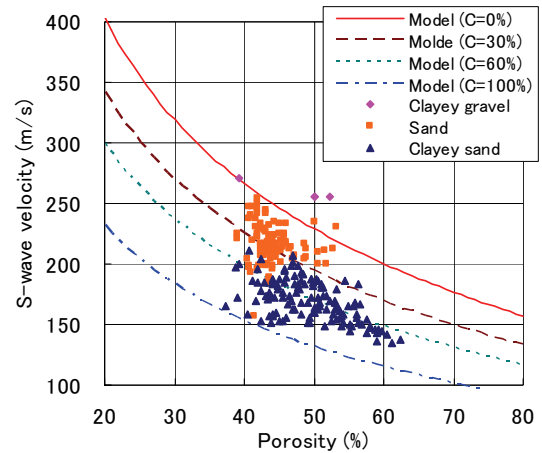


図5 S波速度と間隙率のデータに未固結砂岩モデルによる計算値を重ねた結果. 4種類の粘土含有率 (0, 30, 60, 100%) について計算した結果を示す.

表1 モデル計算に使用したパラメータ

n	5	Coordination number
ϕ_{clay}	0.8	Porosity of clay
ν_{clay}	0.35	Poisson's ratio of clay
K_{clay}	21 GPa	Bulk modulus of clay
G_{clay}	7 GPa	Shear modulus of clay
K_1	36.6 GPa	Bulk modulus of Quartz
G_1	45 GPa	Shear modulus of Quartz

なる. 特に, 堤防のように広い範囲を調査対象とする場合, S波速度は地震探査の適用によって比較的容易に推定することができるが, 間隙率を求めるためには多点でのボーリングやコーン貫入試験が必要となるため実務上困難が伴う. そこで, ここでは, 間隙率と相関性の高い比抵抗を利用して間隙率を推定することを考えた. 図6は, 堤防上で実施した電気探査による比抵抗値と4箇所RIコーン貫入試験による間隙率の関係をプロットした結果である. RI-3地点の3点を除きよい相関を示していることがわかる. 間隙率が小さくなると比抵抗が小さくなるという傾向を示しているが, 図4に示すような不飽和土質地盤モデルを想定した場合, 粘土粒子の増加は間隙率と比抵抗の減少を伴うため, この傾向は合理的な結果であるといえる. この相関関係を利用して, 間隙率

を比抵抗に換算して、S波速度との相関図として示したものが、図7である。この結果は、物理探査で得られるS波速度と比抵抗分布に基づき、合理的に不飽和土質地盤の土質構成を推定することができる可能性を示した結果であるといえる。

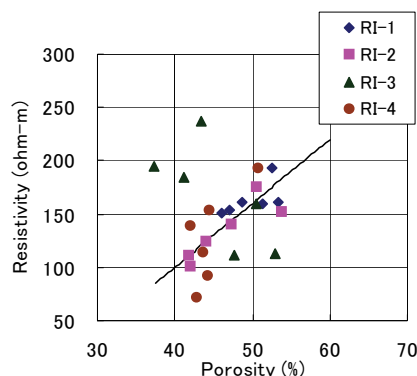


図6 比抵抗と間隙率の関係

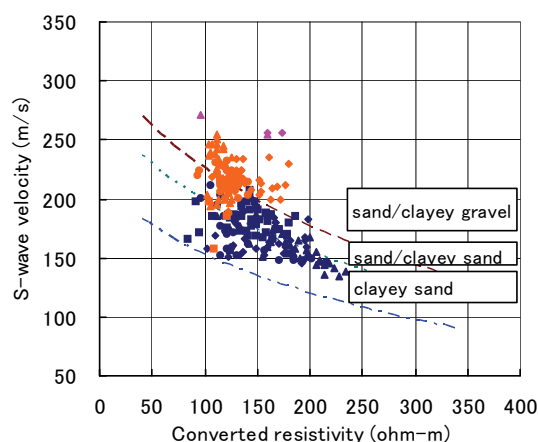


図7 S波速度と比抵抗による土質区分

3. 飽和土質地盤への適用

3.1 データの概要

飽和土質地盤の例として、洪積台地に位置するボーリング孔で取得された検層データを用いた(小西・小林, 2005)。使用した検層データは、サ

スペンションP S検層によるP波、S波速度、密度検層による密度、インダクション検層による比抵抗(電気伝導度)である。図8に深度方向のサンプリングを1m間隔に変換した後の検層記録を、ボーリング柱状図とともに示す。柱状図の凡例のうち、Cは粘土層、GF、SFは砂・砂礫層を表す。砂・砂礫層の中でP波、S波速度が急増する部分が砂礫層に対応すると推定される。検層データは全て地下水位10m以下で取得されており、飽和土質地盤のデータとみなしてよいと考えられる。

岩石モデルの解析に必要な間隙率は、密度値と比抵抗値から夫々独立に求め比較した。密度値からの推定では、粒子密度を 2.65g/cm^3 と仮定した。比抵抗値からの推定では、アーチの式を用いた。計算結果を図9に示す。深度70m~80mの区間で若干の違いがみられるものの両データからの推定結果がほぼ一致することからその信頼性は高いと考え、以下の計算では密度から推定した間隙率を用いた。

3.2 モデル解析

飽和土質地盤の場合、P波速度や比抵抗は不飽和土質地盤の場合と大きく異なると考えられるが、剛性率あるいはS波速度はその影響は小さいと考えられるため、飽和土質地盤においてもS波速度を利用したモデル化に不飽和土質地盤と同じ未固結砂岩モデルの適用を検討した。比較のため、P波速度についても同じモデルを適用した。

S波速度、P波速度、密度値から計算した剛性率とP波弾性率(密度とP波速度の二乗をかけたもの)ならびにそれぞれの速度値そのものと間隙率との関係をプロットした結果を図10に示す。この図では、柱状図と検層結果をもとに土質を粘土(C)、砂(S)、砂礫(G)に分類し凡例として示した。不飽和土質地盤の場合と同様、未固結砂岩モ

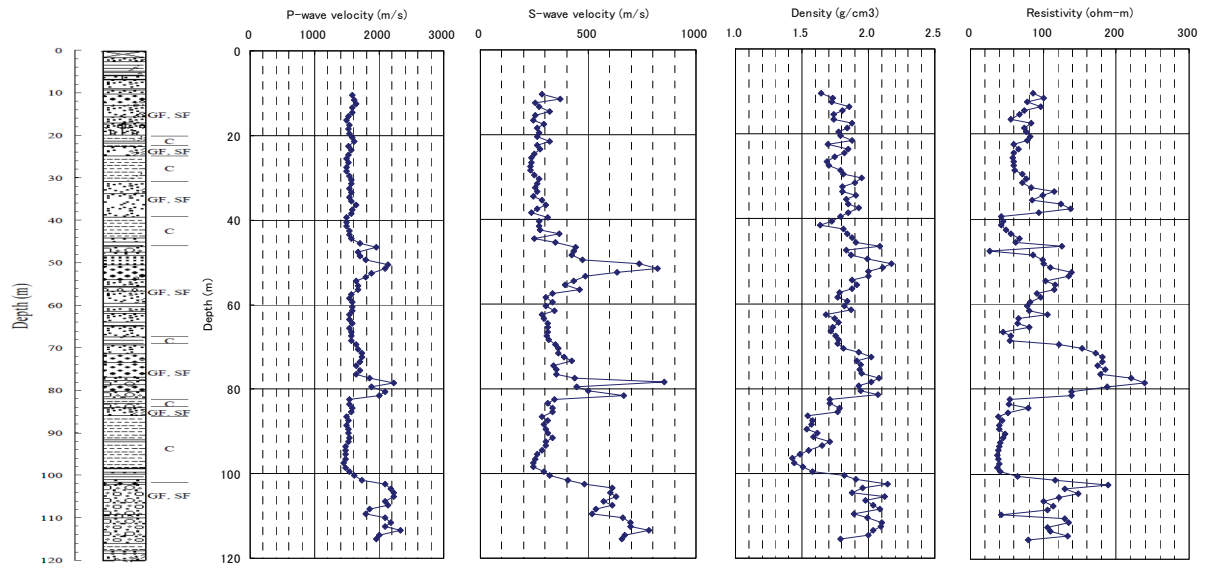


図 8 飽和土質地盤の解析に使用した検層データ (左から土質柱状図, P波速度, S波速度, 密度, 比抵抗)

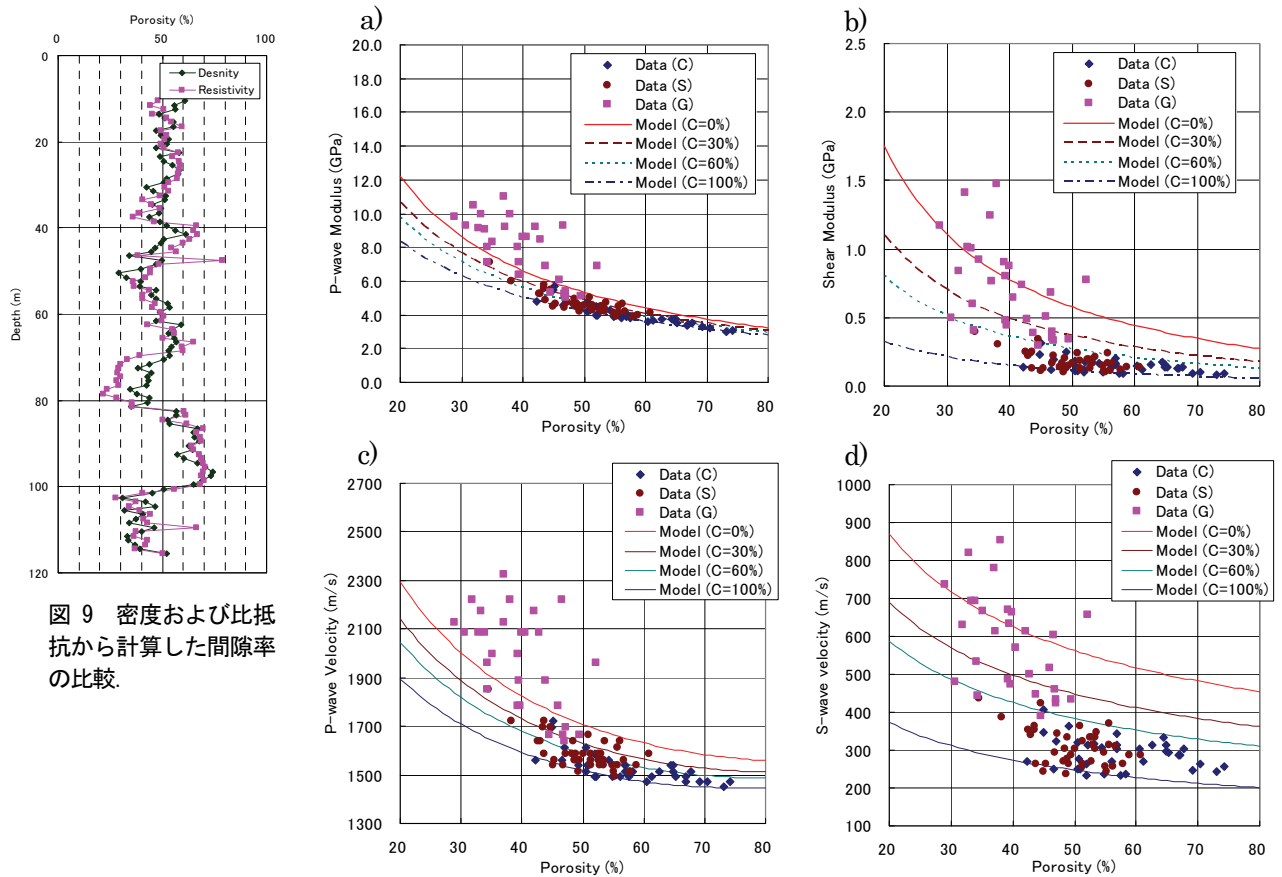


図 9 密度および比抵抗から計算した間隙率の比較.

図 10 P波弾性率(a), 剛性率(b), P波速度(c), S波速度(d)と間隙率のデータに, 未固結砂岩モデルによる計算値を重ねた結果. 4種類の粘土含有率 (0, 30, 60, 100%) について計算した結果を示す.

デルを用いて、粘土含有率を 0, 30, 60, 100% の場合について計算したモデル曲線を同じ図中に示した。計算に使用したパラメータについては、検層データの場合、深度 10m~120m とデータの拘束圧が異なるため、モデルでは中間的な深度にあたる拘束圧として 0.5MPa を使用した点、粘土の剛性率をやや小さめの 3GPa とした点以外は、表 1 に示す不飽和土質地盤での計算と同じパラメータを使用した。これらの適用結果をみると、大まかに見れば砂礫層と砂・粘土層の違いをモデルは表現できているものの、砂礫層については、ばらつきが大きくモデルの適合性の評価が難しいこと、また、砂と粘土については、実測の区分をうまく表現できていないことがわかる。

図 10 に示すデータの間隙率との関係をみると、砂礫部、砂・粘土混在部、粘土部の順に間隙率が増加している。このように粘土含有率の増減と間隙率の増減が対応する岩石モデルとして、二粒子岩石モデルがある (Marion et al., 1992 ; Mavko et al., 2009)。小西・東(2008)は、二粒子岩石モデルの砂質頁岩モデルを土質地盤に適用し、砂と粘土に対してはモデルの適合性が高いことを示した。そこで、ここでも二粒子岩石モデルのうち、データが示す特徴である粘土含有率の増加とともに間隙率が増加するモデルである砂質頁岩モデルの適用を試みた。

砂質頁岩モデルの計算式の詳細は、高橋・田中(2008)に記載したので、ここでは計算結果だけを示す。図 11 は、図 10 に示すデータに対して砂質頁岩モデルを用いて計算した結果を示したものである。ここでは、実測深度に対応する拘束圧として、0.1, 0.5, 1.0MPa の 3 つの場合について計算を行った。計算に使用したパラメータを表 2 に示す。小西・東(2008)の指摘のとおり、砂と粘土に対してはモデルの適合性はよい。具体的には、S

波速度と間隙率の関係図に見られる間隙率 60% を越える粘土は、深度 85~100m に位置する粘土層に対応するが、それ以浅の砂・粘土混在層に比べて拘束圧の高い計算値と一致しており、実測をよく表していると思われる。一方、砂礫に対するデータはばらつきが大きく、パラメータを変えたとしてもこのモデルでの表現は難しいことがわかる。ただ、未固結砂岩モデルの場合と同様、砂・粘土との区分には使える可能性を示唆している。

そこで、土質区分への適用の可能性をさらに検討するために、不飽和土質地盤の場合と同様、比抵抗値の利用の可能性について検討した。上述のとおり、アーチの式から計算される間隙率が密度値から計算される間隙率とほぼ一致することから、アーチの式が成り立つと考えられるので、図 11 に示す間隙率をアーチの式を使って比抵抗に変換した。その結果を図 12 に示す。間隙率との相関図では明瞭でなかった砂と粘土が、比抵抗と S 波速度の相関図では、明瞭に分かれていることがわかる。砂礫をどのようなモデルで表現するかについては今後の検討が必要であるが、ここに示すデータに限れば、実測深度から予測される最大の拘束圧に匹敵する剛性率や S 波速度を超える場合には砂礫であると判定し、それ以下については、砂質頁岩モデルとアーチの式を組合せたモデルで砂と粘土を識別すれば、土質構成の推定ができる可能性があることがわかる。

4. 適用性に関する考察

物理探査で得られる地震波速度と比抵抗を利用して、飽和、不飽和土質地盤の土質構成を推定する方法について検討した。物性値に基づく土質の分類にあたり、従来の方法と違いロックフィジックス分野で利用されている岩石モデルを用いた。

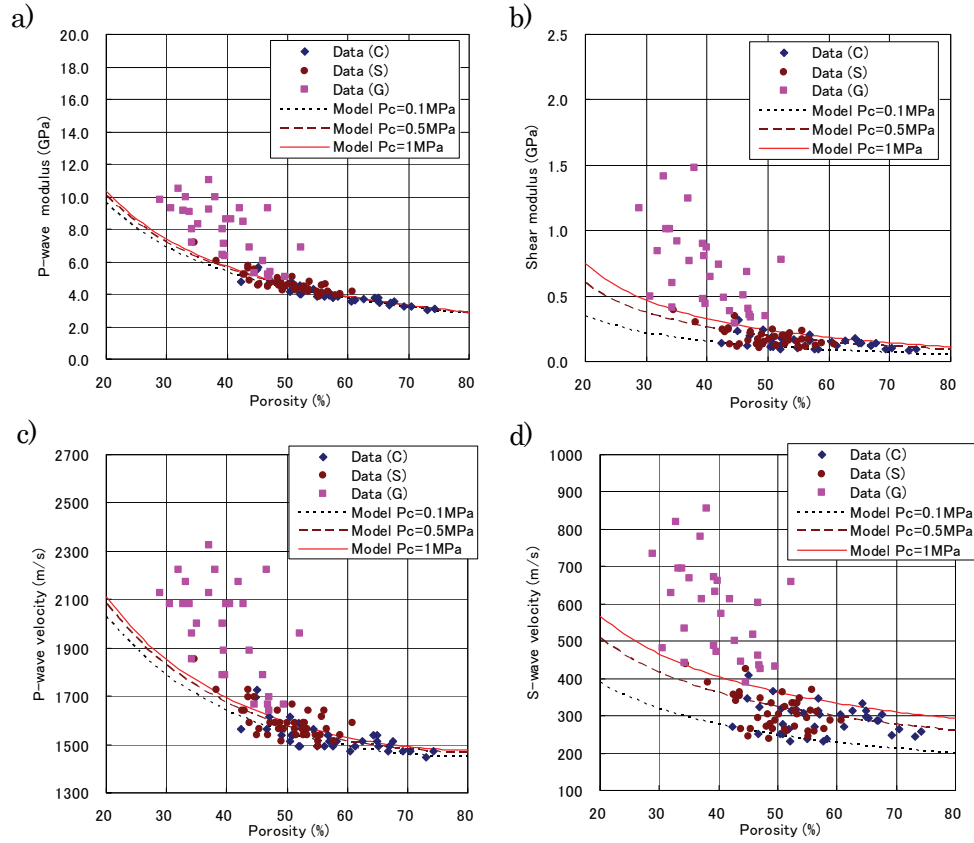


図 11 P 波弾性率(a), 剛性率(b), P 波速度(c), S 波速度(d) と間隙率のデータに, 二粒子岩石モデルによる計算値を重ねた結果. 3 種類の拘束圧 (0.1, 0.5, 1MPa) について計算した結果を示す.

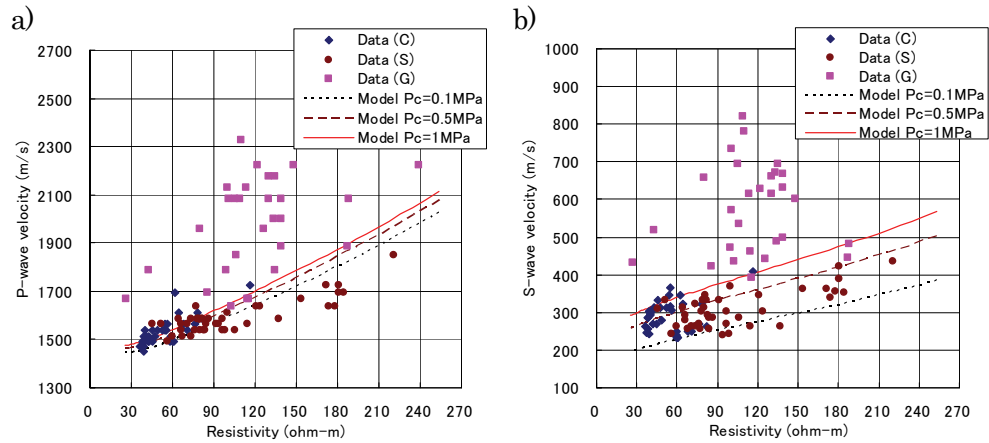


図 12 P 波速度(a), S 波速度(b) と比抵抗データの関係図に, 二粒子岩石モデルによる計算値を重ねた結果.

表 2 モデル計算に使用したパラメータ

n	5	Coordination number
ϕ_{clay}	0.8	Porosity of clay
ν_{clay}	0.35	Poisson's ratio of clay
K_{clay}	21 GPa	Bulk modulus of clay
G_{clay}	7 GPa	Shear modulus of clay
K_1	36.6 GPa	Bulk modulus of Quartz
G_1	45GPa	Shear modulus of Quartz

不飽和土質地盤では、未固結岩石を対象に利用されている Friable sand model を、S波速度に適用し、土質分類への適用の可能性を確認した。

S波速度（あるいは剛性率）は、間隙内の流体（空気を含む）の影響が小さいため、飽和度の変化する不飽和地盤のモデル化に利用する物性として適切であると考えられる。実際に今回のデータに限れば、S波速度だけでも大まかな分類は可能である（図5参照）。しかしながら、S波速度に間隙率データも利用し、岩石モデルを適用することによって、より精度の高い分類が可能であることが今回の検討で示された。実用上の視点から間隙率データの広範囲での取得が難しいことから、間隙率と比抵抗の相関関係を利用して、間隙率を比抵抗に換算し、物理探査で得られるS波速度と比抵抗に基づいて合理的に土質分類を行えることを示した。しかしながら、今回、比抵抗の利用については経験式を利用したが、より汎用性のある手法とするためには、アーチの式やそれを一般化したモデルの利用について検討する必要がある。

一方、飽和土質地盤の場合では、不飽和地盤と同じ未固結砂岩モデル(Friable sand model)と二粒子岩石モデルを、S波速度（剛性率）とP波速度（P波弾性率）に適用し、検討を行った。その結果、いずれのモデルでも砂礫の特性を表すことは難しいことがわかった。これは、砂礫の場合、粒径が大きいために、その幾何学的配置のわずかな違いにより、マクロな特性が変化するため、そのような効果を考慮していない現在の岩石モデルでは精度よく表現できないためではないかと考えられる。一方、砂と粘土については、二粒子岩石モデルの砂質頁岩モデルで表すことができることが確かめられた。実測データに粒度分析結果がないため詳細な点についての議論は困難であるが、S波速度だけでなくP波速度についても適用可能な

ことが示された。しかし、拘束圧の違いを精度よく表すためには、S波速度を利用の方が望ましいことがわかる。アーチの式を適用して間隙率を比抵抗に換算して作成したS波速度と比抵抗の関係図を用いると、今回のデータに限れば、砂礫を含めて砂、粘土の土質分類が可能となることもわかった。ただ、これが一般性を有するかどうかについては今後の課題である。

5. まとめと今後の課題

ロックフィジックス分野で利用されている岩石モデルの土質地盤での適用性評価を目的に、飽和、不飽和地盤に既往の岩石モデルを適用し、土質構成の推定を試みた。不飽和土質地盤（河川堤防）については、未固結砂岩モデルをS波速度と間隙率に適用し、さらに相関関係を利用して間隙率を比抵抗に変換することによって、S波速度－比抵抗関係図に基づいた土質区分ができる可能性を示した。飽和土質地盤については、未固結砂岩モデルと二粒子岩石モデルをS波、P波速度と間隙率データに適用した。その結果、二粒子岩石モデルを利用することにより、砂礫については困難なもの、砂、粘土についてはモデル化できること、さらにアーチの式を併用して間隙率を比抵抗に換算することによって、不飽和土質地盤同様、速度－比抵抗関係図に基づく土質区分が可能なが示された。

しかしながら、今回の適用結果だけから岩石モデルの適用性を論ずるには事例が少なすぎるため今後引き続き適用例を増やしていく必要がある。また、砂礫のモデル化については、詳細な粒度分布や堆積構造に関するデータも含めた検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究で使用した不飽和土質地盤（河川堤防）のデータは、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所が京都大学に委託実施した「河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究」で取得されたデータである。本研究を実施した国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所ならびに京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会の皆様に感謝いたします。飽和土質地盤のデータは、応用地質株式会社からご提供いただいた。データに関する詳細な情報を提供いただいた小西千里氏ともども感謝いたします。

参考文献

- Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G. (2005): Quantitative seismic interpretation, Cambridge University Press.
- 物理探査学会(2008):最新の物理探査適用事例集, 物理探査学会.
- 金子誠, 高橋亨(2008):ロックフィジックスデジタルライブラリー, 深田地質研究所年報, No. 9.
- 小西千里, 小林源裕(2005):土質地盤における物理検層結果を利用した透水係数の推定方法の検討, 物理探査学会第112回学術講演会論文集, 62-65.
- 小西千里, 東(2008):二粒子モデルを用いた地盤の弾性定数の推定, 物理探査学会第118回学術講演会論文集, 13-16.
- Marion, D., Nur, A., Yin, H., Han, D. (1992): Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures, Geophysics, 57, 4, 554-563.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J. (2009): The rock physics handbook, second edition, Cambridge University Press.

三村衛, 吉村貢(2007):多機能型R I 密度コーン貫入試験機の開発と測定精度向上に関する研究, 土木学会論文集C, 63, 649-661.

高橋亨, 田中莊一(2007):地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした解釈技術に関する研究ー岩石物性データの収集と予備的解析ー, 深田地質研究所年報, No. 8, 109-129.

高橋亨, 田中莊一(2008):地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした解釈技術に関する研究(その2)ー堆積性軟岩の岩石モデル解析ー, 深田地質研究所年報, No. 9, 149-160.

田中俊彦, 阿部知之, 林宏一, 小西千里(2007):河川堤防における非破壊調査手法の研究ー開削調査による物理探査手法の適用性検証ー, 応用地質技術年報, No. 27, 29-54.

山本剛, 小段栄一, 糸川政孝, 京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究研究員会(2008):河川堤防調査における物理探査の適用性に関する研究ー国土交通省近畿技術事務所河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究の成果ー, 最新の物理探査適用事例集, 113-122.