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７）
－物理探査データによる透水係数の推定－

高橋　亨[1]・田中荘一[1]

[1]深田地質研究所

Study on rock physical interpretation of geophysical data for geotechnical applications (Part VII)
- Estimation of permeability of soils and rocks with geophysical data –

TAKAHASHI Toru[1] and TANAKA Soichi[1]

[1]Fukada Geological Institute

要旨：物理探査データを利用して広範囲の透水係数を効果的に推定する手法の開発を目的に，物理探査データにロックフィジックスで提案されている岩石モデルを適用し推定した間隙率と粒径を用いてコゼニーカルマンの式から透水係数を求める手法の適用性を検討した．土質地盤における検討では，検層で得られた S 波速度と比抵抗を用いて未固結砂岩モデルとアーチの式により土の粒径と間隙率を推定しコゼニーカルマン式で透水係数を計算した．現場透水試験による実測値と比較した結果，78%のデータで 1 桁以内の一致をみた．一方，砂質シルト岩に対する適用では，S 波速度と密度検層結果に二粒子岩石モデルを適用し推定した粘土含有率から求めた粒径と，密度値から計算した間隙率を用いてコゼニーカルマンの式から透水係数を計算した．原位置透水試験による実測値と比較した結果，実測値との差が 1 桁以内のデータは 53%にとどまった．
キーワード：ロックフィジックス，物理探査，透水係数，コゼニーカルマンの式

Abstract: For developing an effective method to estimate permeability of soils and rocks using geophysical data, we have studied the Koseny-Carman equation (K-C equation) with porosity and grain size estimated from geophysical data based on rock physics models. For application of the proposed method to saturated soils, S-wave velocity and resistivity logging data are input to the unconsolidated sand model and the Archie's equation for estimating porosity and grain size of the soil, which are employed in K-C equation to calculate permeability. Comparison of estimated permeability with actual measurement by in-situ permeability test shows that permeability is estimated in accuracy less than one order of magnitude for 78 % of the compared data. For application to sandy siltstone, S-wave velocity and density logs are employed in the bimodal mixture model to estimate clay content, which can be used for calculating grain size. The grain size thus obtained and porosity derived from density are utilized for calculating permeability with K-C equation. Permeability estimated in accuracy less than one order of magnitude is only for 53% of the compared data.
Keywords: rock physics, geophysics, permeability, Koseny-Carman equation

1.　はじめに

地下に関わる様々な調査，設計，施工において地盤の透水性を推定することが必要な場合は多い．例えば，石油・ガス資源の開発や二酸化炭素の地中貯留におけるそれぞれの貯留層やその上位のシール層の評価，また，土木分野においては，様々な土木構造物の建設や維持管理にともなう地盤や構造物の透水性あるいは遮水性の評価等において，地盤の透水性を把握するための調査が行われる．通常，地盤の透水性を把握するためには，対象地盤にボーリング孔を掘削し，その孔内で原位置透水試験を実施するか，または採取した土や岩石試料を用いて室内透水試験を実施する．しかしながら，河川堤防のように長大な構造物を調査対象とする場合には多数のボーリング孔を掘削する必要があり調査経費や時間による制約のため少ないデータからの推定を余儀なくされる場合も多い．あるいは核廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中貯留におけるキャップロックの評価における調査等では，対象地盤にボーリング孔を掘削すること自体難しい場合もある．そのような場合に，非破壊的且つ広範囲を効率的に調査のできる物理探査による物性データから透水係数を推定することができればその利用価値は極めて大きい．

そこで，本研究では，ロックフィジックスを利用して物理探査データから透水係数の推定が可能かどうかについて検討を行った．具体的には，対象地盤を構成する土や岩石の間隙率と構成粒子の粒径から透水係数を推定するコゼニーカルマンの式（Carman, 1956; Mavko et al., 2009）を利用し，物理探査データにロックフィジックスで提案されている岩石モデルを適用，推定した間隙率と粒径を用いて透水係数を求めるという手法の適用性を評価した．土質地盤と堆積性軟岩で取得された検層データを用いて実測データとの対比を行い，推定精度を含む適用性の評価を行った．

2.　コゼニーカルマンの式

地盤中の流体が図 1 に示すような管を流れると仮定すると，流体の流れを表すダルシー則は(1)式のように書ける (Dvorkin et al., 2002).

$$Q = -k\frac{A}{\mu}\frac{\Delta P}{L} \tag{1}$$

ここに, k が透水係数である. 単位は m^2 であるが, ダルシー (1D=10^{-12} m^2) が一般的に使われている. A と L は，それぞれ流体の流れる媒質の断面積と長さ，ΔP は圧力勾配，μ は流体の粘性係数である．

円形断面を有した半径 r, 長さ l の管内の粘性流体の流れは,

$$Q = -\frac{\pi r^4}{8\mu}\frac{\Delta P}{l} \tag{2}$$

と表されるので（例えば，ランダウ・リフシッツの流体力学,1989），上記地盤中の流体の流れが n 本の管内の流体の流れで表せるとすると，式(1)と(2)から，透水係数 k は,

$$k = \frac{n\pi r^4}{8A\tau}, \qquad (\tau \equiv \frac{l}{L}) \tag{3}$$

と表される．ここに，τ は迂回率と呼ばれ，地盤中の流路の複雑さを表すパラメータである．

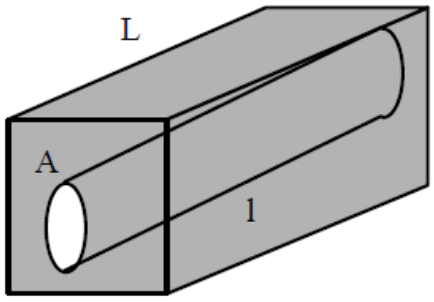

図 1　流体の流れを表す管路モデル

間隙率φは，$\phi = n\pi r^2 \tau / A$ と表されるので，式(3)を，間隙率を用いて表すと，

$$k = \frac{\phi r^2}{8\tau^2} \qquad (4)$$

のように書ける．地盤の透水係数に関わる重要な要素は間隙の表面である．間隙の比表面積 S は，$S=2\phi/r$ と書けるので，比表面積 S を用いて(4)式を書き直すと，コゼニーカルマンの式の１つの表現である(5)式が得られる．

$$k = \frac{1}{2}\frac{\phi^3}{S^2\tau^2} \qquad (5)$$

土や堆積岩のような粒状媒質の場合には，管というよりも粒子境界を流体が流れると考えられる．粒状媒質の場合，粒子の粒径を d とすると，間隙の比表面積 S は $S=6(1-\phi)/d$ と表されるので，(5)式は，(6)式のように書き直すことができる．

$$k = \frac{1}{72}\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2\tau^2}d^2 \qquad (6)$$

この式が粒状媒質に対するコゼニーカルマンの式といえる．この式を用いて推定された透水係数の一例を図２に示す．ここでは，標準的な砂岩である Fontainebleau 砂岩での実験データとの対比が示されている．

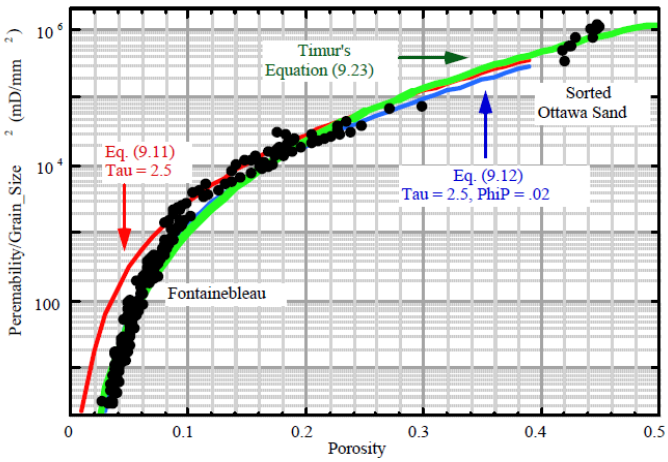

図２　コゼニーカルマン式を用いた推定例（点：実測値，線：計算値）(Dvorkin et al., 2002)

3.　透水係数の推定手順

コゼニーカルマンの式を利用して透水係数を推定する場合，一般にはボーリング孔で得られた土や岩石のコア試料の室内試験による粒度と間隙率が利用される．しかしながら，上述の通りボーリング孔を利用する方法は制約が多い．そこで，本研究では物理探査で得られる物性を利用して対象とする地盤の間隙率と粒径を推定し，コゼニーカルマンの式により透水係数を推定する．間隙率または粒径の推定にあたりロックフィジックスで用いられている岩石モデルを用いる．

間隙率や粒径の推定に使用する物理探査データや岩石モデルは地盤条件や使用可能なデータによってその都度検討されるべきである．ここでは，物理探査データとして，速度検層で得られたＳ波速度，電気検層またはインダクション検層で得られた比抵抗，密度検層で得られた密度値を使用している．図３に推定の流れを示す．

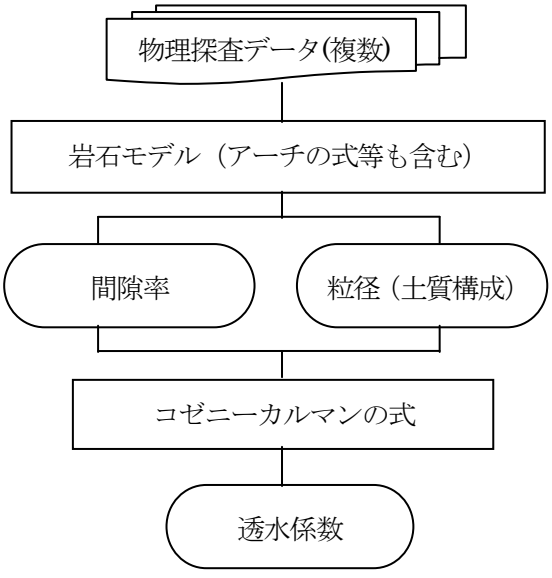

図３　透水係数推定の流れ

4.　土質地盤における適用性の評価

コゼニーカルマンの式は粒状媒質に適用性が優れていると考えられるので，まず土質地盤で得られた検層データに適用して評価を行った．

使用したデータは，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である（小西・小林，2005）．使用した検層データは，サスペンション PS 検層による S 波速度とインダクション検層による比抵抗である．図 4a,b,c に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 10 m 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．

まず解析では，比抵抗と間隙率の関係をプロットしアーチの式（高倉，2003）が成り立つことを確認した上で，比抵抗値から間隙率を求めた．その結果を図 4d に示す．別途密度検層結果から推定した間隙率ともよく一致しており信頼性は高いと考える．

次に，粒径を推定するために，S 波速度と間隙率の関係に岩石モデルの 1 つである未固結砂岩モデル（Avseth et al., 2005）を適用した．モデル計算の詳細は，高橋・田中(2009)を参照されたい．計算結果を図 5 の実線で示す．また，計算に使用したモデルパラメータを表 1 に示す．未固結砂岩モデルでは粘土含有率 C を変えて計算できるため，C=0，30，60，100%の 4 つの場合について計算した．同図には，ボーリングコア観察の結果確認された土質分類に従い色分けした実測データも示す（赤：砂礫，茶：砂，青：粘土）．この結果を見ると，実測粒径とモデル予測値の関係が整合的であることがわかる．この結果から，砂礫と砂・粘土とはS波速度と間隙率の関係から区分できることがわかるが，砂と粘土の区分が難しい．そこで，アーチの式を用いて間隙率を比抵抗に変換し，S

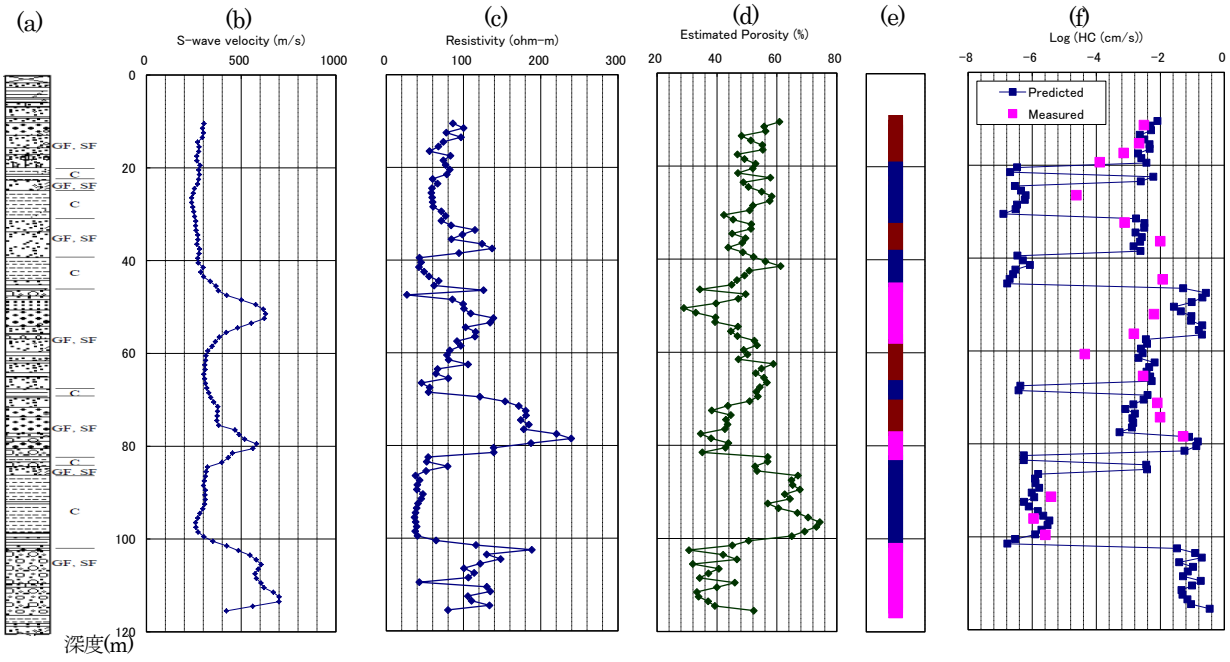

図 4　解析に用いた検層データと解析結果（a：柱状図，b:S 波速度，c:比抵抗，d:比抵抗から推定した間隙率，e:推定土質分類図(赤：砂礫，茶：砂，青：粘土)，f：推定透水係数（線：推定値，点：実測値））

波速度との関係をプロットしたものが図 6 である．この結果，より低比抵抗の粘土が砂と区分されたことがわかる．この関係図を用いると，S 波速度と比抵抗値を与えると土質区分，つまり砂礫，砂，粘土の区分ができることがわかる（図中の丸印で示す）．そこでこの図に従って検層で得られた S 波速度と比抵抗値から土質区分を行った結果を図 4e に示す．実際の土質に対応する区分がほぼ得られていることがわかる．

この結果をもとに，砂礫，砂，粘土の粒径の代表値として，それぞれ 1.0, 0.1, 0.001 mm を与え，比抵抗から推定された間隙率を用いて，コゼニーカルマンの式で推定した透水係数を図 4f に示す（τ=5 と仮定した）．図中にはボーリング孔での現場透水試験で得られた透水係数値（図中の赤点）も示した．一部（4 点 : 22%）2 桁程度の大きな差がみられるが，その他のデータ(14 点 : 78%)では 1 桁以内の差で推定されていることがわかる．

5. 堆積性軟岩における適用性の評価

次に堆積性軟岩（砂質シルト岩）に適用した結果を示す．解析に使用したデータは，サスペンション PS 検層による S 波速度と密度検層による密度値である．図 7 に深度プロファイルを示す．解析に必要な間隙率は，密度検層結果をもとに岩石の密度を 2.55 と仮定して計算で求めた．その結果も図 7 に示す．

これらのデータを用いて岩石の粒径を推定するために，ここでは岩石モデルの 1 つである二粒子モデルを用いた．二粒子モデルは，対象とする岩石が砂と粘土の 2 つの粒子から構成されると仮定し，粘土の含有率あるいはそれと関連付けられる間隙率と弾性係数（ここでは，S 波速度と密度から計算できるせん断弾性係数）の関係をモデル

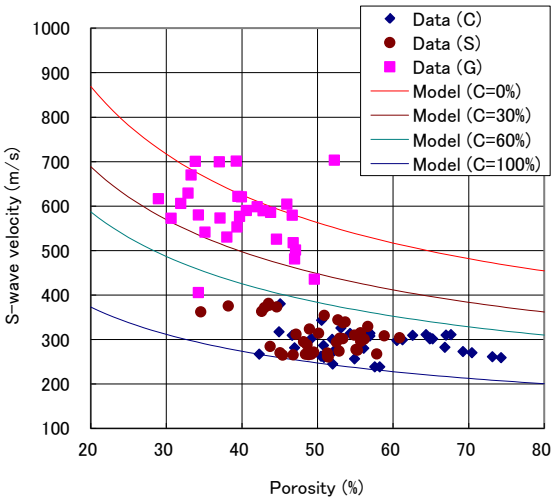

図 5　S 波速度と間隙率の関係（点 : 実測値，実線 : 予測値，C:粘土含有率）

表 1　未固結砂岩モデルのパラメータ

n	5	Coordination number
Φclay	0.8	Critical porosity
Kclay	21 GPa	Bulk modulus of clay
Gclay	3 GPa	Shear modulus of clay
Kquartz	36.6 GPa	Bulk modulus of quartz
Gquartz	45 GPa	Shear modulus of quartz

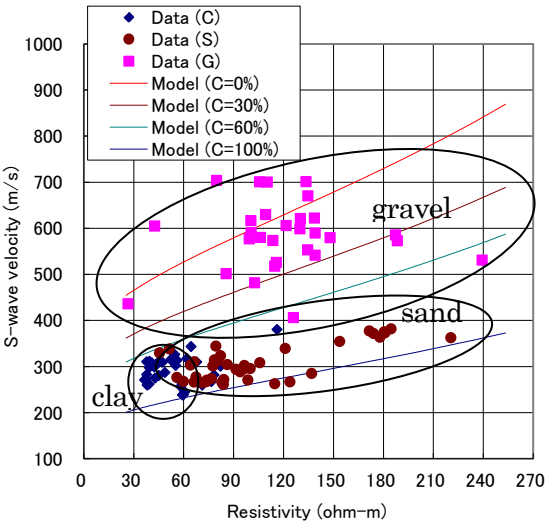

図 6　S 波速度と比抵抗の関係（点 : 実測値，実線 : 予測値，C:粘土含有率）

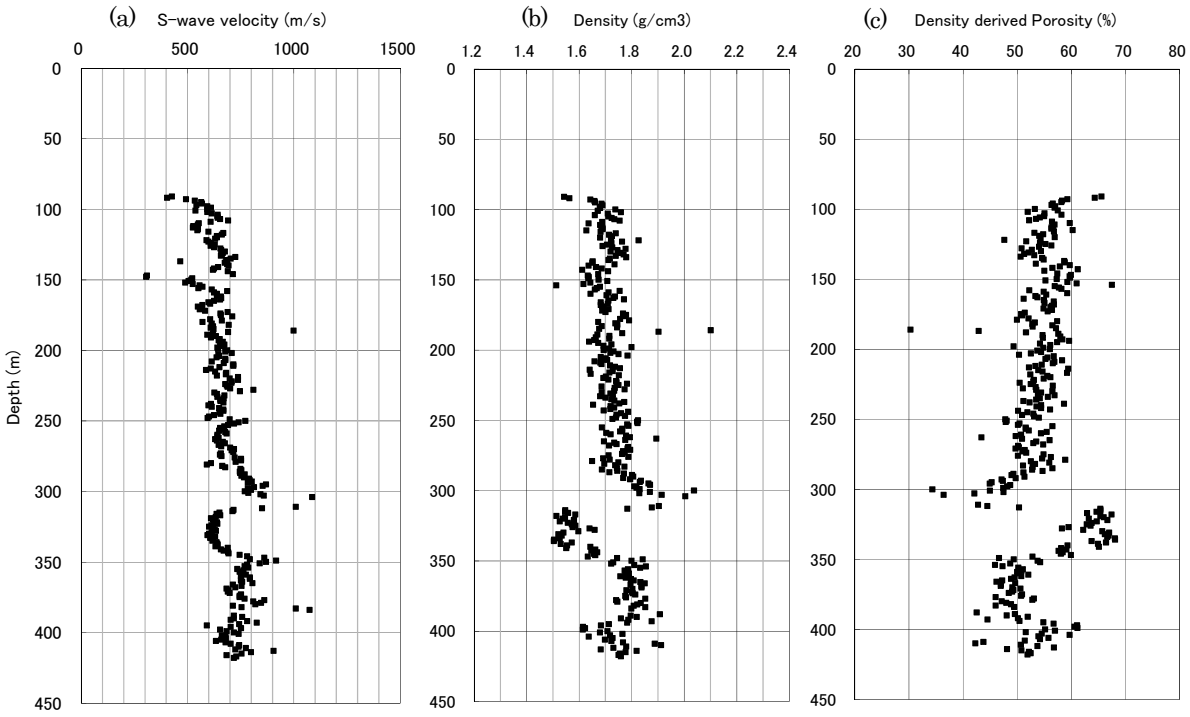

図 7　解析に用いた検層データ（a：S 波速度，b:密度，c:密度から推定した間隙率）

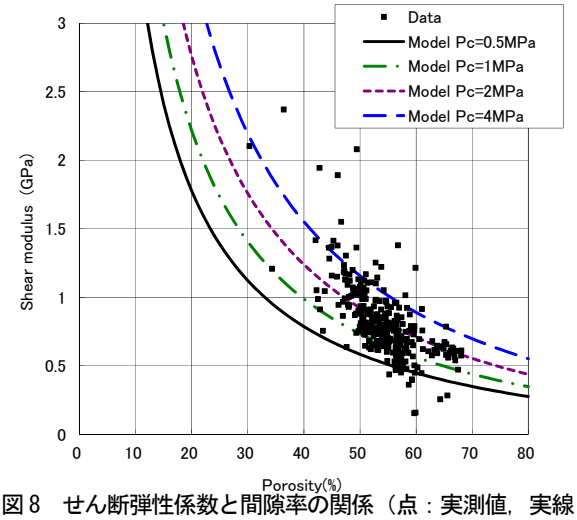

図 8　せん断弾性係数と間隙率の関係（点：実測値，実線：予測値，Pc：拘束圧）

表 2　二粒子モデルのパラメータ

n	21	Coordination number
Φclay	0.8	Critical porosity
Kclay	25 GPa	Bulk modulus of clay
Gclay	9 GPa	Shear modulus of clay
Kquartz	36.6 GPa	Bulk modulus of quartz
Gquartz	45 GPa	Shear modulus of quartz

化する(例えば，Mavko et al., 2009)．図 7 に示す S 波速度，密度，間隙率を用いて計算したせん断弾性係数と間隙率の関係を図 8 に示す．同図には粒子モデルで計算した予測値も合わせて示す．モデル計算に使用したパラメータを表 2 に示す．

モデル計算では拘束圧(Pc)を変えて計算しているが，実測深度に応じた 0.5～4 MPa での予測値とよく一致していることがわかる．

このモデルを用いて，S 波速度と密度値から計算されるせん断弾性係数の実測値から粘土含有率を求めることができる．その結果を図 9 に示す．同図中には，コア試料から得られた粘土含有率(赤点）も重ねて示した．両者がよく一致していることがわかる．なお，以上の計算の詳細については，高橋・田中(2008)を参照されたい．

粘土含有率が得られると構成粒子の平均的な粒径を計算することができる．ここでは，砂の粒径 d_s を 0.25 mm，粘土の粒径 d_c を 0.0025 mm とし

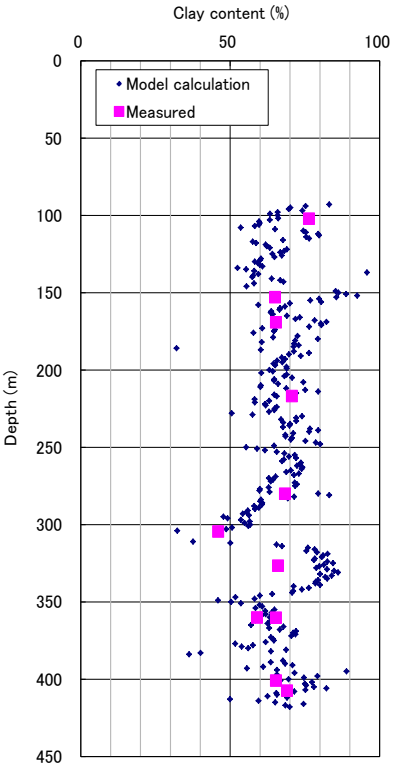

図 9　推定粘土含有率（青点：計算値，赤点：実測）

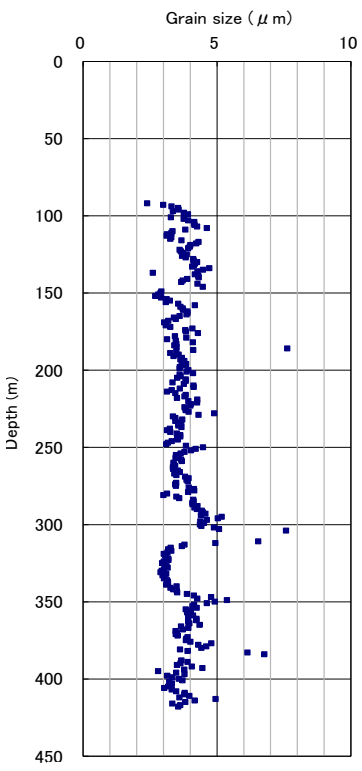

図 10　推定平均粒径

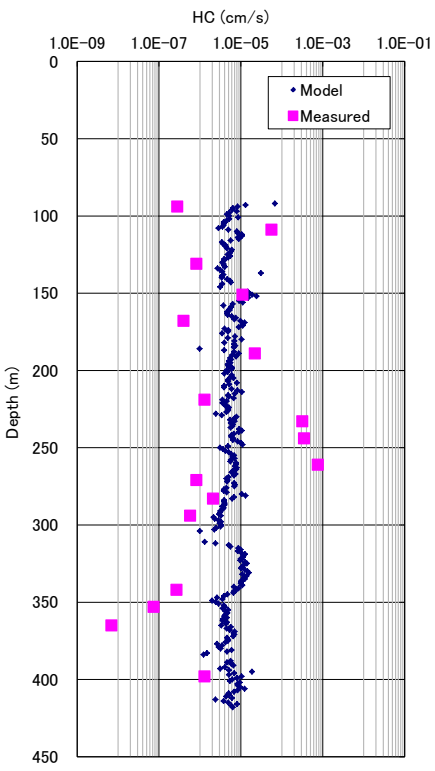

図 11　推定透水係数（青点：計算値，赤点：実測）

て，(7)式を用いて平均粒径 d を計算した．C は粘土含有率である．計算した平均粒径を図 10 に示す．

$$d = \left\{ \frac{C}{d_c} + \frac{1-C}{d_s} \right\}^{-1} \qquad (7)$$

密度検層から推定した間隙率（図 7c）と岩石モデルを用いて推定した平均粒径（図 10）を(6)式のコゼニーカルマンの式に代入して計算した透水係数を図 11 に示す．なお，迂回率 τ =5 としている．同図にはボーリング孔で実施された原位置透水試験結果（赤点）も示した．17 点のデータのうち，実測値と予測値の差が 1 桁以内は 9 点(53%)，それ以上は 8 点(47%)と，土質地盤の場合に比べて予測の精度が悪い．岩盤の平均的な透水係数はとらえているものの，高透水ゾーンや低透水ゾーンはとらえきれていない．地質学的調査によると，この砂質シルト岩で透水性の高いゾーンは亀裂の多いゾーンと対応がよいことが報告されている．一方で 10^{-7} cm/s 以下の低い透水係数も計測されており，コゼニーカルマンの式の適用範囲についてさらに検討を行う必要があると考える．

6.　まとめと今後の課題

物理探査データを用いて地盤の透水係数を推定することができれば，広域地盤の透水性を把握する必要がある場合にはきわめて有効である．そこで，本研究では土や岩石の間隙率と構成粒子の粒径から透水係数を推定するコゼニーカルマンの式を利用し，物理探査データにロックフィジック

スで提案されている岩石モデルを適用，推定した間隙率と粒径を用いて透水係数を求めるという手法の適用性を評価した．

土質地盤での検層で得られたS波速度と比抵抗に未固結砂岩モデルとアーチの式を適用して粒径と間隙率を推定し，コゼニーカルマンの式によって透水係数を計算した．その結果，現場透水試験で実測値が得られている 18 点のうち 14 点(78%)で実測値との差1桁以内で推定することができた．一方，基質そのものの透水性が低く，亀裂によって透水性が左右されている砂質シルト岩でのS波検層と密度検層データを利用した適用では，原位置透水試験による実測値との差が1桁以内で推定できたのは9/17（53%）にとどまった．

粒状媒質のような地盤での透水性を想定したコゼニーカルマンの式は，やはり土質地盤には適用性が高いということが今回確かめられた．しかし，より精度の高い推定のためには，粒径の推定法に関する更なる検討が必要であると考える．また，堤防などの不飽和土質地盤での透水性の把握に対するニーズは多いので，不飽和土質地盤に対する適用性についての検討も必要である．一方，岩盤については，コゼニーカルマンの式は砂岩での適用事例は多いが，今回の砂質シルト岩のように粒径の小さい岩や亀裂性の岩でどこまで適用が可能かについては，さらに検討が必要であると考える．

参考文献

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

Carman, P. C. (1956): Flow of gases through porous media, Academic Press Inc., Butterworths Sc. Pul., London.

Dvorkin, J., Mavko, G. and Mukerji, T. (2002): Rock physics reservoir characterization – Approaches and Methods Tutorial -, Stanford University.

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.

ランダウ・リフシッツ（1989）：流体力学(1),(2), 竹内均訳，東京図書.

Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (2009): The rock physics handbook, second edition, Cambridge University Press.

高倉伸一(2003)：アーチの式と並列回路モデル, 2003 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 127-132.

高橋亨・田中荘一(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）－堆積性軟岩の岩石モデル解析－，深田地質研究所年報, 9，149-160.

高橋亨・田中荘一(2009)：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）－土質地盤への岩石モデルの適用性に関する検討－，深田地質研究所年報，10，123-132.