# 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８）
# －物理探査データによる透水係数の推定（２）－

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 VIII)
# - Estimation of permeability of soils and rocks with geophysical data (2)-

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．不飽和土質地盤としての河川堤防上の地表探査で得られた S 波速度と比抵抗を用いて未固結砂岩モデルとグローバのモデル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．開削断面で採取された試料の室内透水試験による実測値と比較した結果，砂質土，粘性土とも 1 桁程度の精度で一致した．硬質砂岩の室内試験で測定された S 波速度と比抵抗データに頁岩質砂岩モデルを適用し推定した粘土含有率から求めた粒径とアーチの式に基づき比抵抗から推定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．室内透水試験による実測値と比較した結果，多くのデータ(約 75%)が実測値との差が 1 桁以内で推定された．
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 a method using the Koseny-Carman equation (K-C equation) with porosity and grain size estimated from geophysical data based on rock physics models. For an application of the proposed method to unsaturated levee soils, S-wave velocity and resistivity profiles across the levee are input to the unconsolidated sand model and the Glover's model 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 laboratory permeability test of soils sampled on an excavated levee section shows that permeability is estimated in accuracy of around one order of magnitude for sandy and clayey soils. For an application to hard sandstone core samples, S-wave velocity and resistivity measurements in the laboratory are modeled by the shaly sand model and Archie's equation to estimate clay content, which can be used for calculating grain size. The grain size thus obtained and porosity derived from resistivity with the Archie's equation are utilized for calculating permeability with K-C equation. Many of compared data (about 75%) agrees each other in the accuracy less than one order of magnitude.
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．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，広範囲の地盤の透水係数を推定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，透水係数の推定精度が低下する場合もある．そのような場合に，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大きいと考える．

そこで，本研究では，ロックフィジックスモデルを利用して複数の物理探査データから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を推定し，コゼニーカルマンの式（Carman, 1956; Mavko et al., 2009）に代入して透水係数を求める手法の適用性を検討している．高橋・田中(2013)（以後，前報と呼ぶ）では，飽和土質地盤と堆積性軟岩で取得された検層データに本手法を適用し，実測データとの対比を通じて，推定精度を含む適用性の評価を行った．本報では，さらに，不飽和土質地盤への適用性を評価することを目的に，河川堤防上の地表探査で取得された弾性波速度（S波速度）と比抵抗データに適用を試みた．また，砂岩の室内岩石試験で取得された超音波速度（S波速度）と比抵抗データに適用し，硬岩への本手法の適用性についても評価を行った．

## 2.　物理探査データを利用した透水係数の推定方法

粒状媒質に対するコゼニーカルマンの式は，一般に(1)式で表される（詳細は前報参照）．

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

ここに，$k$ は透水係数，$\phi$ は間隙率，$d$ は媒質の平均粒径，$\tau$ は迂回率である．

こ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って得られ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．図１に，ここで提案する手法における透水係数推定の流れを示す．

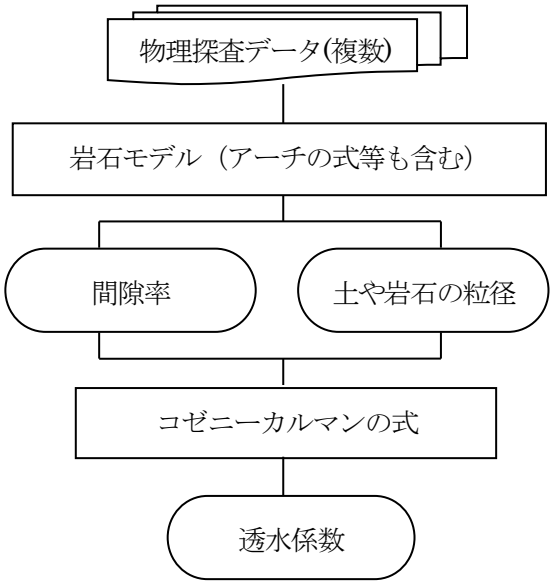


図１　透水係数推定の流れ

## 3.　不飽和土質地盤における適用性の評価

前報では飽和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が，ここでは不飽和の土質地盤と考えられる河川堤防の堤体上で取得された物理探査データに適用した結果を示す．

### 3.1　土質構成の推定

使用したデータは，高さ約 8m，幅約 30m の河川堤防で実施された 3 次元電気探査による比抵抗と横断測線で実施された屈折トモグラフィによる S 波速度である（村田ほか，2012）．モデル化には，堤防横断方向の S 波速度断面と 3 次元比抵抗データのうち屈折トモグラフィ測線と一致する位置での比抵抗断面を用いた．探査で得られた結果を測線付近で過去に実施された開削時のスケッチ断面とともに，図 2 に示す．堤防上位にある砂質土が高比抵抗，高速度として，また低位にある粘性土が低比抵抗，低速度としてとらえられていることがわかる．

モデル解析では，まず，土質構成を推定するために，S 波速度と比抵抗の関係をモデル化する．前報同様，S 波速度と間隙率の関係をロックフィジックスモデルの 1 つである未固結砂岩モデル（Avseth et al.，2005）で表す．モデル計算は，高橋・田中(2009)に示す方法にて行った．計算に使用したパラメータを表 1 に示す．これらのパラメータは前報に示す土質地盤のモデル化に使用したものと同じパラメータである．計算結果を図 3(a)に示す．粘土含有率 C を 20，40，60，80%と変化させた場合の値を計算した．

一方，比抵抗と間隙率のモデル化には，飽和地盤の場合にはアーチの式が利用できるが，不飽和地盤では利用できない．そこで，ここでは，アーチの式を拡張した(2)式に示すグローバのモデルを用いた（Glover et al.，2000）．このモデルは基質と間隙で構成される土を想定し，それぞれの成分にアーチの式に類似した関係が成り立つと考え導出されたモデルである．

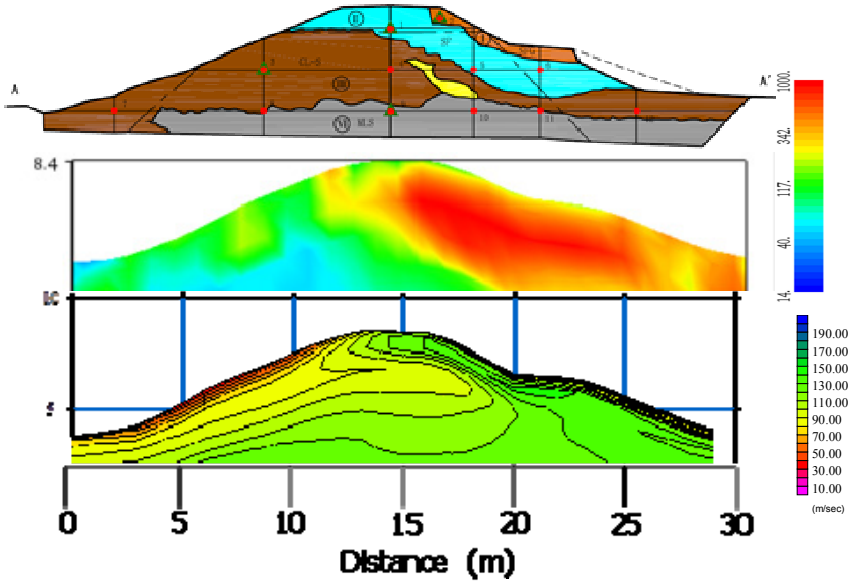


図 2　河川堤防での地表物理探査結果
上：開削断面スケッチ（青：砂質土，茶・灰：粘性土）
中：比抵抗（赤系：高比抵抗，青系：低比抵抗）
下：S 波速度（青系：高速度，赤系：低速度）

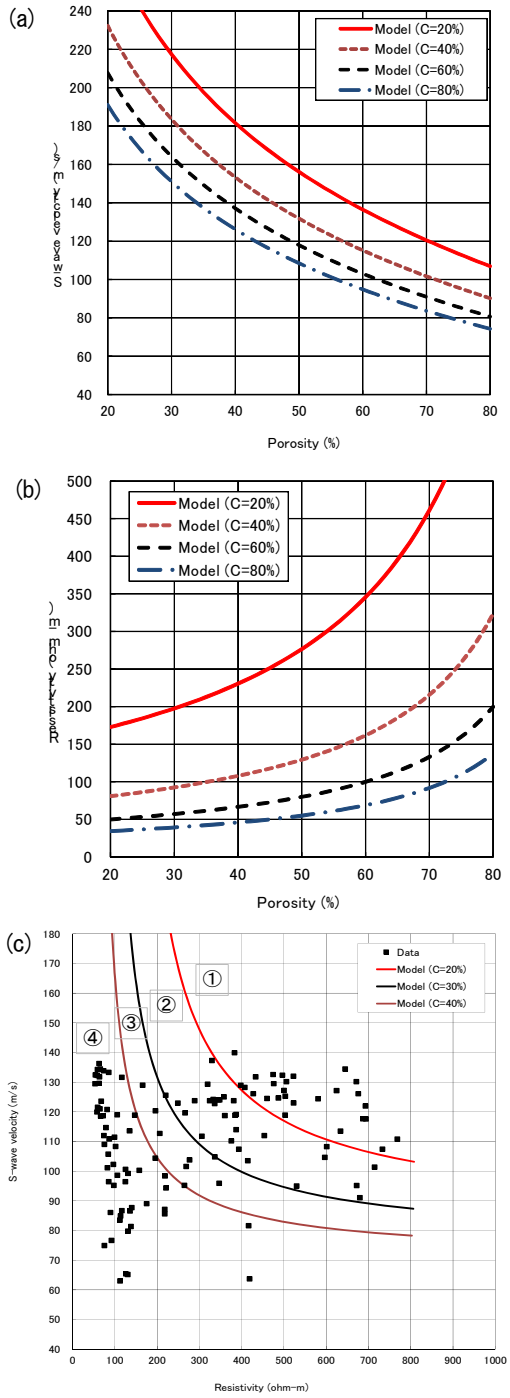


図３　モデル解析結果
(a) S 波速度と間隙率の関係図（C は粘土含有率）
(b) 比抵抗と間隙率の関係図（C は粘土含有率）
(c) S 波速度と比抵抗の関係図（C は粘土含有率，①～④は土質区分領域を示す）

表１　モデル計算に使用したパラメータ

| | | |
|---|---|---|
| $n$ | 5 | Coordination number |
| $\varphi_0$ | 0.8 | Critical porosity of soil |
| $K_{clay}$ | 21.0 GPa | Bulk modulus of clay |
| $G_{clay}$ | 3 .0 GPa | Shear modulus of clay |
| $K_{sand}$ | 36.6 GPa | Bulk modulus of sand |
| $G_{sand}$ | 45.0 GPa | Shear modulus of sand |
| $K_{air}$ | 0.00015 GPa | Bulk modulus of pore fluid (air) |
| $R_{clay}$ | 20 Ωm | Resistivity of clay |
| $R_{sand}$ | 10,000 Ωm | Resistivity of sand |
| $R_f$ | $1\times10^{14}$Ωm | Resistivity of pore fluid (air) |
| $m$ | 1 | Cementation factor |

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_s}(1-\phi)^{\log(1-\phi^m)/\log(1-\phi)}+\frac{1}{R_f}\phi^m \qquad (2)$$

ここに，$R$，$R_s$，$R_f$ はそれぞれ，土全体，基質，間隙流体の比抵抗である．$\phi$ は間隙率，$m$ は膠結係数と呼ばれる定数である．

ここで，弾性波の場合と同様，土の基質が砂粒子と粘土粒子の２粒子からなると仮定し，基質の比抵抗を砂粒子と粘土粒子の比抵抗の平均値で表す．ここでは，平均に，Hashin-Shtrikman の上限式を使い，以下の式で表す(Mavko et al.，2009)．

$$\frac{1}{R_s}=\frac{1}{R_{clay}}\left[1-\frac{3(1-C)\Delta R}{3/R_{clay}-C\Delta R}\right] \qquad (3)$$

$$(\Delta R=\frac{1}{R_{clay}}-\frac{1}{R_{sand}})-$$

ここに，$C$ が粘土含有率，$R_{sand}$ と $R_{clay}$ がそれぞれ，砂粒子と粘土粒子の比抵抗である．このモデルを用いて表１に示す比抵抗に関するパラメータを用いて計算した結果を図３(b)に示す．

これら弾性波速度と比抵抗の間隙率との関係

を組み合わせることにより，図３(c)に示すＳ波速度と比抵抗のモデルが得られる．図中には，図 2 に示すＳ波速度と比抵抗の実測値をプロット（黒点）するとともに，それらを説明できる粘土含有率として C=20，30，40%の場合の計算値を３本の曲線として示す．この図は，S 波速度と比抵抗を与えると，対象とする土の粘土含有率，つまり土質構成を推定できることを示している．実際に，3 本の粘土含有率曲線で分けられる４つの領域を異なる土質構成の土とみなして(番号①～④で示す)，図２に示すＳ波速度と比抵抗断面から推定した土質分布図を図４に示す．開削断面で確認された砂質土と粘性土に対応する土質構成がほぼ推定されていることがわかる．

### 3.2　透水係数断面の推定

Ｓ波速度と比抵抗分布から図３(c)を経て堤体土の粘土含有率が推定できると，砂と粘土の代表的な粒径を仮定すると (4)式により堤体土の平均粒径が計算できる．

$$d = \left\{ \frac{C}{d_c} + \frac{1-C}{d_s} \right\}^{-1} \qquad (4)$$

ここに，$d$ は堤体土の平均粒径，$d_s$ と $d_c$ はそれぞれ砂と粘土の代表粒径であり，ここではそれぞれ 1mm と 0.005mm とした．

一方，図３(b)に示すグローバのモデルで粘土含有率に応じたモデル曲線を用いることにより比抵抗値から間隙率を推定することができる．

これらＳ波速度と比抵抗から推定した平均粒径と間隙率を(1)式に示すコゼニーカルマンの式に代入すると透水係数が得られる．推定した透水係数断面を図５に示す．なお，この計算では迂回率 $\tau$ を５と仮定した．

開削断面では，採取した土の試料を用いて室内透水試験が実際されている．砂質土と粘性土に対する比較結果を表２に示す．透水係数は１桁程度以内の精度で推定されていることがわかる．

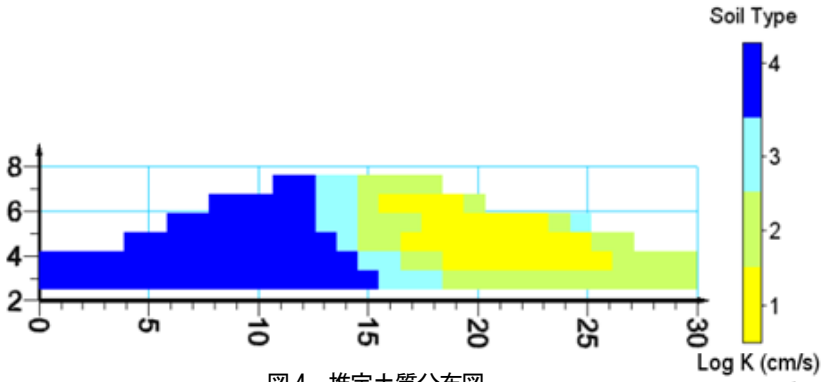


図４　推定土質分布図
(1：砂質土，2:粘性土質砂，3:砂質粘性土，4:粘性土)

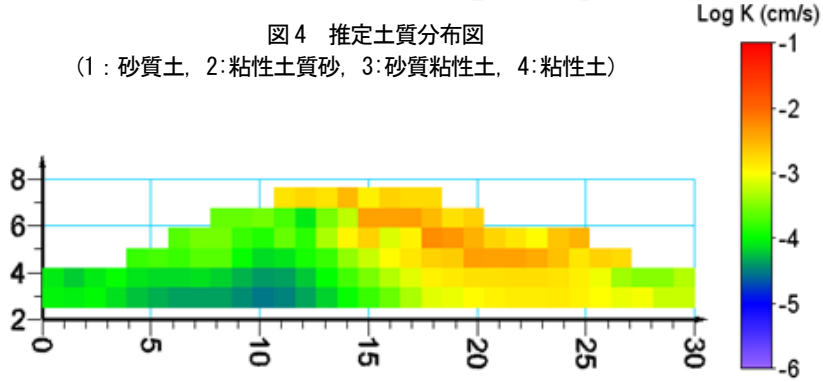


図５　推定透水係数断面

表２　透水係数値の比較
(単位 cm/s)

| 土質 | 実測値 | 推定値 |
|---|---|---|
| 砂質土 | $8.22 \times 10^{-4}$ | $10^{-3}$ $-10^{-2}$ |
| 粘性土 | $1.21 \times 10^{-5}$ | $10^{-5}$ $-10^{-4}$ |

## 4.　硬質砂岩への適用性の評価

次に硬質砂岩に適用した結果を示す．解析に使用したデータは，Han et al.（2011）による砂岩試料を用いた室内試験による超音波速度（S 波）と比抵抗の測定データである．彼らは同時に間隙率や透水係数の測定も行っているので，モデル化による推定精度の検証ができると考え使用した．

### 4.1　粒径分布の推定

図 6 に彼らが試験に使用した 63 個の岩石試料の鉱物組成を示す．主要成分は石英と長石であり，粘土成分が 30%以下の割合で含まれていることがわかる．彼らは拘束圧も変化させた 3 軸状態で超音波速度と比抵抗を計測しているが，ここでは一番拘束圧の小さい 8MPa の場合の測定データを使用した．

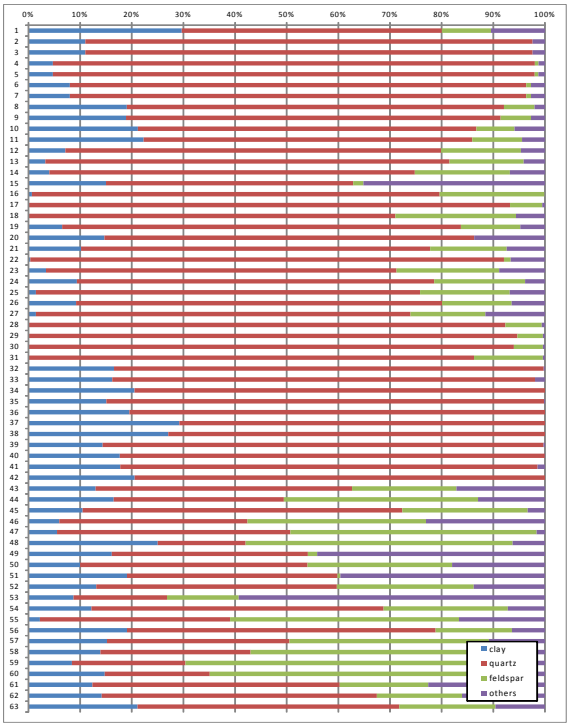


**図 6　63 個の岩石試料の鉱物組成**
**（縦軸：試料番号，横軸：組成%）**
**（赤：石英，黄緑：長石，青：粘土，紫：その他）**

図 7 に S 波速度と間隙率の関係図を示す．ここでは硬岩に対するモデルとして利用されることの多い頁岩質砂岩モデルを適用した．モデル化では，未固結砂岩モデルでの計算同様，基質の物性の計算に Voigt-Reuss-Hill の式を，臨界間隙率での物性の計算に Hertz-Mindlin の式を，任意の間隙率の岩石の物性の計算に Hashin-Shtrikman の上限式を用いた．それぞれ(5)，(6)，(7)式に示す(Mavko et al.，2009)．

$$K_s = \left[ \left\{ (1-C)K_{sand} + CK_{clay} \right\} + \left\{ \frac{1-C}{K_{sand}} + \frac{C}{K_{clay}} \right\}^{-1} \right] / 2 \qquad (5)$$

$$G_s = \left[ \left\{ (1-C)G_{sand} + CG_{clay} \right\} + \left\{ \frac{1-C}{G_{sand}} + \frac{C}{G_{clay}} \right\}^{-1} \right] / 2$$

$$K_{HM} = \left\{ \frac{n^2(1-\phi_0)^2 G_s^{\,2}}{18\pi^2(1-\nu_s)^2} P \right\}^{\frac{1}{3}} \qquad (6)$$

$$G_{HM} = \left\{ \frac{5-4\nu_s}{5(2-\nu_s)} \right\} \left\{ \frac{3n^2(1-\phi_0)^2 G_s^{\,2}}{2\pi^2(1-\nu_s)^2} P \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$G_{dry} = \left\{ \frac{\frac{\phi}{\phi_0}}{G_{HM}+Z} + \frac{1-\frac{\phi}{\phi_0}}{G_s+Z} \right\}^{-1} - Z \qquad (7)$$

$$Z = \frac{G_s}{6}\left(\frac{9K_s+8G_s}{K_s+2G_s}\right)$$

ここに，$K_s$，$G_s$，$K_{sand}$，$G_{sand}$，$K_{clay}$，$G_{clay}$ がそれぞれ，基質，砂，粘土の体積弾性率と剛性率である．$n$ が配位数，$\phi_0$ が臨界間隙率である．$\nu_s$ は基質のポアソン比で，$K_s$，$G_s$ から計算できる．$\phi$ は間隙率であり，$G_{dry}$ が乾燥状態での岩石の剛性率である．この値と密度値から S 波速度を計算することができる．粘土含有率を C=0，10，30%とした場合の計算値を図 7 中に示した．

一方，比抵抗と間隙率の関係については，試験

が塩水飽和状態で行われているので，アーチの式が成立すると考えられる．図８に比抵抗と間隙率の実測値を示すが，実線で示したアーチの式でよく説明されていることがわかる．

これら２組の関係からＳ波速度と比抵抗の関係を求めた結果が図９である．ここでも粘土含有率0, 10, 30%の場合のモデル計算値を示すが，実測値も粘土含有率が 10%前後でシンボルを変えて示した．粘土含有率の違いによる計算値と実測値の分布がよく一致していることがわかる．

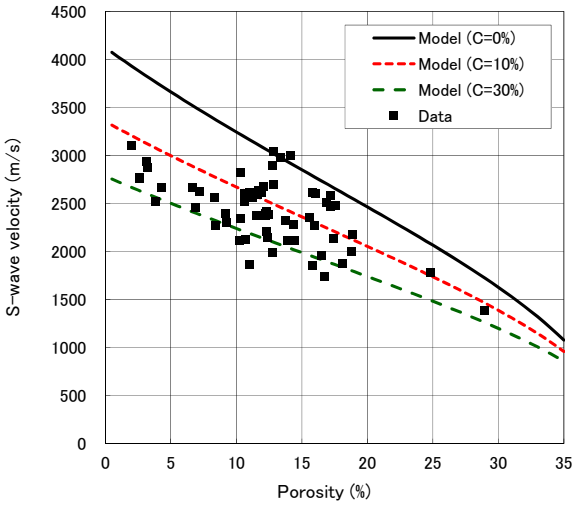


図７　Ｓ波速度と間隙率の関係（C:粘土含有率）

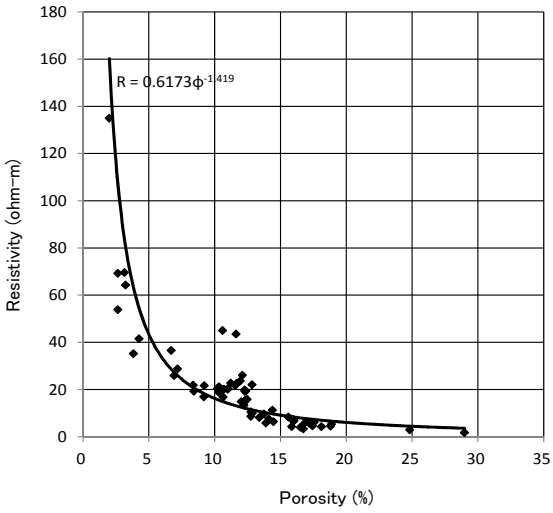


図８　比抵抗と間隙率の関係（実線はアーチの式）

## 4.2　透水係数の推定

上記の解析によりＳ波速度と比抵抗から推定される粘土含有率から(4)式を用いて求めた岩石の平均粒径とアーチの式に基づいて比抵抗から推定した間隙率を(1)式のコゼニーカルマンの式に代入して透水係数を推定した．迂回率はここでも５と仮定した．推定した透水係数を実測値と比較した結果を図 10 に示す．多くのデータ（約 75%）が１桁以内の精度で推定されていることがわかる．

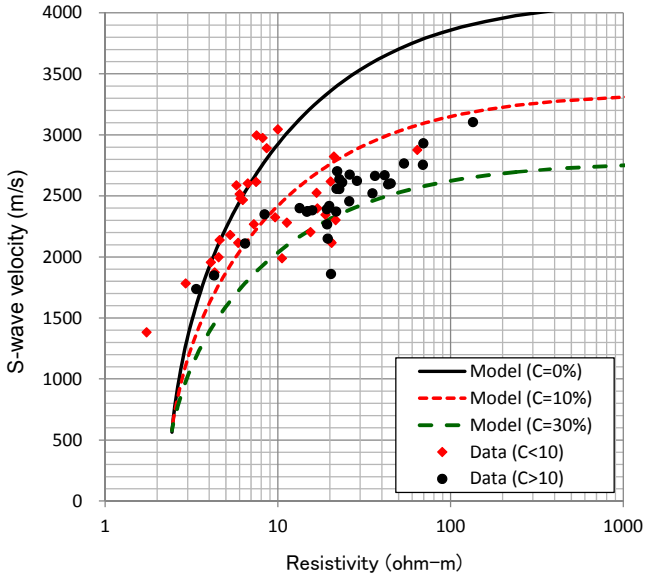


図９　Ｓ波速度と比抵抗の関係（C:粘土含有率）

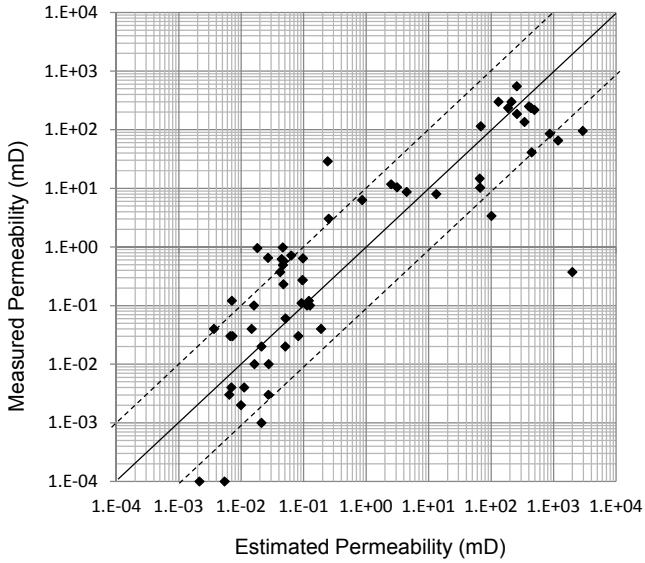


図 10　実測（縦軸）と推定（横軸）透水係数の比較

## 5.　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新しい手法の適用性を評価した．

前報では，飽和土質地盤および堆積性軟岩での検層で得られたＳ波速度と比抵抗に適用した．本報では，さらに不飽和土質地盤としての河川堤防上での地表探査で得られたＳ波速度と比抵抗断面に，また硬質砂岩の室内試験で得られた超音波速度（S 波）と比抵抗データに適用を試みた．室内試験，検層，地表探査という異なるスケールのデータに，また，土質地盤，堆積性軟岩（砂質シルト岩），硬岩という物性の異なる材料に適用した．その結果，堆積性軟岩（砂質シルト岩）以外では，提案する手法で推定した透水係数は実測値と１桁以内の精度でほぼ一致を示した．このことは，少なくともコゼニーカルマン式の適用性が高い土質地盤や砂質岩においては，本手法の適用範囲の広さ，実用性の高さを示していると言える．今後さらに適用例を積み重ね，適用範囲をより明確にしていきたいと考える．

## 謝辞

本研究のうち，河川堤防に関するデータは，国土交通省の平成 23-25 年度建設技術研究開発助成研究の中で得られたものである．本助成研究は京都大学大学院工学研究科の松岡俊文教授，サンコーコンサルタント(株)の相澤隆生，村田和則，西尾英貴各氏と共同で進めた．ここに記して感謝する．また，研究を進めるにあたり助言いただいた推進委員会委員各位ならびに現場実験サイトの提供等でご協力いただいた国土交通省近畿地方整備局の関係各位に感謝する．

## 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.

Glover, P.W.J., P.J. Hole and J. Pous (2000): A modified Archie's law for two conducting phases, Earth and Planetary Science Letters, 180, 369-383.

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

村田和則・相澤隆生・高橋　亨・松岡俊文(2012)：被災堤防緊急対応のための３次元可視化ツール及び対策設計支援システムの開発（その２）－３次元可視化ツールの概要－，物理探査学会第 127 回学術講演会論文集，67-69.

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，No. 10，123-132.

高橋　亨・田中荘一(2013)：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－，深田地質研究所年報，No. 14，165-172.