

弾性波トモグラフィを用いた地盤の透水係数分布の推定手法の研究

垣野内隆一郎^{1*}・西山哲¹・矢野隆夫¹・高橋学²・安藤賢一³・吉村公孝⁴

¹ 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2 棟)

² 産業技術総合研究所 地下環境機能チーム

³ 株式会社大林組 原子力本部原子力環境技術部

⁴ 原子力発電環境整備機構 技術部

*E-mail: kakinouchi@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究はボーリング孔間における弾性波試験の結果から、孔間の地盤の透水係数の分布を評価することを目的としている。本来、弾性波トモグラフィのみから地盤の透水性を直接決定することはできないが、本研究では複数周波数を用いたボーリング孔間弾性波探査を行い、透水係数がパラメータとして用いられているBISQモデルにより解析することで、弾性波速度の分散を利用した弾性波トモグラフィから直接的に透水係数の分布を推定するという手法をとる。原位置のボーリング探査により得られた岩石コアについて室内で弾性波試験を行い、分散現象について確認した。原位置試験では、地下水面下の領域において発震点及び受振点を複数設置し、複数周波数の弾性波を透過させることで弾性波トモグラフィを作成し、速度の分散と透水係数を関連付けることで、ボーリング孔間の弾性波トモグラフィから透水係数の分布を推定した。

Key Words: BISQ model, elastic wave exploration, elastic wave tomography

1. はじめに

近年、高レベル放射性廃棄物の処分方法において、岩盤が持つ遮蔽性、耐久性という性質を利用する地層処分が検討されている。放射性廃棄物の処分サイトの選定には、処分場周辺の地下水挙動の把握のために、透水係数の空間分布が必要とされるが、現状のボーリング孔を用いた試験では広域の透水場を空間的に評価することは難しく、適切な手法が確立されていない。そこで本研究では、複数周波数を用いてボーリング孔間弾性波探査を行い、透水係数がパラメータとして用いられているBiotモデルやBISQ (Biot/Squirt) モデルを組み合わせることにより、分散を用いた弾性波トモグラフィから直接的にボーリング孔間の透水係数分布を推定することを目的としている。

2. 基礎理論

流体で飽和された媒体を伝播する弾性波は、固体と流体の相互作用によって、分散することが知られている。このような現象は、Biotモデル¹⁾²⁾やBISQモデル³⁾⁴⁾とい

った、動的な理論から導かれる。Biotモデルでは、固体と流体の混合体の応力-ひずみ関係を考え、固体と流体の相対変位に基づく散逸関数を考慮したラグランジュ方程式から、固体部・流体部それぞれに関して運動方程式を導く。さらに、P波に関しては運動方程式のダイバージェンスをとり、波動方程式として解くことでP波の弾性波速度が、周波数に依存して分散する現象が導かれる。

Biot理論

運動方程式 (Biot.M.A., 1956)

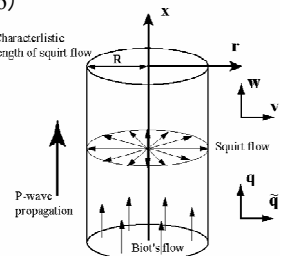
$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho_1 \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + \rho_a \frac{\partial^2 (u_x - U_x)}{\partial t^2} + b \frac{\partial (u_x - U_x)}{\partial t} \\ \frac{\partial s}{\partial x} = \rho_2 \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} - \rho_a \frac{\partial^2 (u_x - U_x)}{\partial t^2} - b \frac{\partial (u_x - U_x)}{\partial t} \end{cases}$$

← Biot's flowと直交する
Squirt flowの概念を付加

BISQ理論

$$f_{\text{BISQ}} = K r K_0 / 2 \pi \mu \phi L^2$$

$K r$: 水の体積弾性率
 L : Squirt Flow Length
 K_0 : 固有透過度
 μ : 粘性係数 ϕ : 間隙率



BISQモデルの流体の動き

図-1 BISQモデルの流体の動き

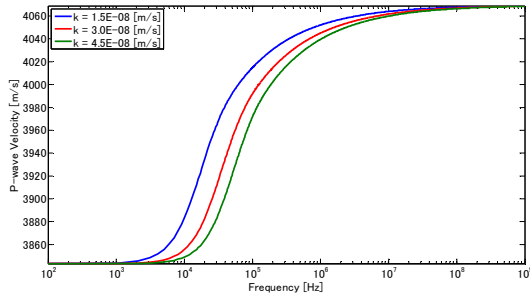


図-2 BISQモデルの理論解の例（速度）

Biotモデルを拡張したモデルであるBISQモデルでは、波動の伝播方向に加え、それに直交する方向にも圧力平衡に達するために流体が動く距離を考慮しており（図-1）、その距離は岩石に固有のSquirt Flow Lengthというパラメータで記述される。図-2にBISQモデルの理論解の例を示す⁵⁾。

3. 室内試験

後述する原位置試験地で得られたボーリングコア（以下西山霊園の岩石コアと記述）を蒸留水で飽和し、室内弾性波試験を実施した。本実験ではまず、前節で説明した BISQ モデルなどで導かれている弾性波速度が周波数に関して分散する現象を捉えることを目的とした。さらに、それぞれの結果を BISQ モデルに基づいて考察し、弾性波速度の分散特性と透水係数の関係性を明らかにし BISQ モデルの適用性を検討する⁶⁾。

供試体の岩種は砂岩、泥岩および泥質細粒砂岩、れき岩であり、透水係数は $10^{-10} \sim 10^{-11}$ [m/s] 程度のオーダーである。図-3 に各周波数における受振波の例を示す。図中赤線が初動のピーク時間であり、周波数の増加に伴い、ピーク時間が早まる様子が観察される。さらに、今回の室内実験の結果に、BISQ モデルの理論解をフィッティングさせることで、BISQ モデルの適用性を検討した（図-4）。また、透水係数に多様性を持たせるために、透水係数が $10^{-7} \sim 10^{-8}$ [m/s] 程度のオーダーの軽石凝灰岩についても、BISQ モデルの理論解をフィッティングした。その結果の例を図-5 に示す。以上の結果から、西山霊園の岩石コアに対して BISQ モデルの理論解が精度よくフィッティングしていることが分かる。

今回各供試体の実験結果にBISQモデルをフィッティングさせることで得られた透水係数とSquirt Flow Lengthの関係を図-6に示す。透水係数とSquirt Flow Lengthには相関関係が見られ、西山霊園岩石コア等のフィッティング結果を用いて近似した式（3a）と、軽石凝灰岩のフィッティング結果を用いて近似した式（3b）が得られた。

以上の議論から、式（3a）および式（3b）を用いて、透水係数とSquirt Flow Lengthを関連付けて考えることで、

複数周波数を用いた弾性波試験から、弾性波を透過させている媒体の透水係数が推定できる可能性があると言える。

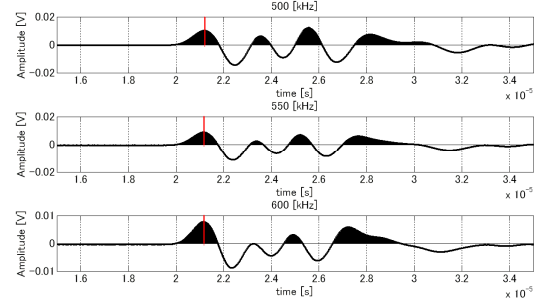


図-3 各周波数における受振波の例

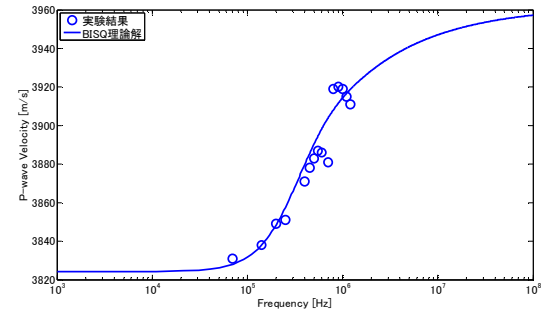


図-4 フィッティングの例（れき岩）

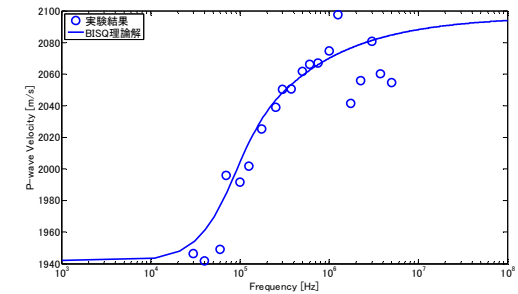


図-5 フィッティングの例（軽石凝灰岩）

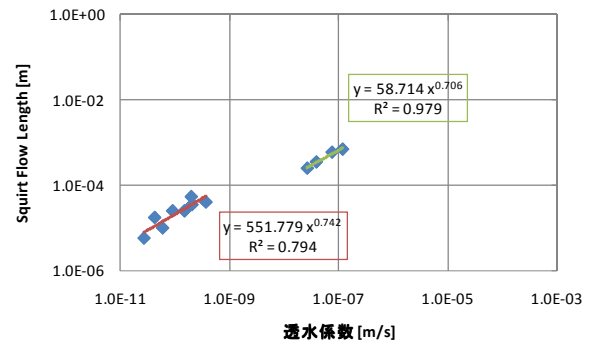


図-6 透水係数とSquirt Flow Lengthの関係

$$L = 551.779k^{0.742} \quad (3a)$$

$$L = 58.714k^{0.706} \quad (3b)$$

4. 原位置試験

室内試験の結果を基に原位置にて弾性波試験を行った⁷⁾。弾性波探査を実施したのは、ボーリング孔No.1とNo.2の孔間距離約48[m]の領域であり、鉛直方向は、地下水面で飽和状態だと考えられる-14.45[m]～-28.45[m]の深度にて2[m]ピッチで計測を行った（図-7,8）。得られたボーリングコアは、砂岩、泥岩、頁岩およびそれらの混在岩であり、また、別途実施したボーリング孔を用いた原位置透水試験の結果は、 10^{-4} [m/s]～ 10^{-6} [m/s]程度のオーダーであった。実験には500[Hz]、750[Hz]、1000[Hz]の3種類の周波数を用いた。

弾性波試験結果から、まず、それぞれの波線について得られた実験データからウェーブレット変換を用いて、初動走時を読み取る。その後、BPT法によって初期速度モデルを構築し、SIRT法を用いて、反復計算によって速度モデルを修正する。その後、移動平均フィルタを用いたスムージング処理を施し、最終的な速度トモグラフィを算出する。そして、複数周波数の速度トモグラフィからBISQモデルを用いて、透水係数分布に変換する。図-9にウェーブレット変換後の各周波数における受振波の例を示す。図中赤線が初動のピーク時間であり、周波数が増加するにつれて、ピーク時間が早くなる様子が観察される。

次に、読み取った初動走時を用いてそれぞれの周波数における弾性波速度トモグラフィを算出した。初期スローネスモデル（スローネスは速度の逆数）は、BPT法で構築し、誤差修正の繰り返し計算はSIRT法を用いて、100万回の繰り返し計算を行った。そして得られた速度トモグラフィに、移動平均に基づくフィルタ処理を施すことで、最終的に図-10～図-12に示す、それぞれの周波数における弾性波トモグラフィを算出した⁸⁾。

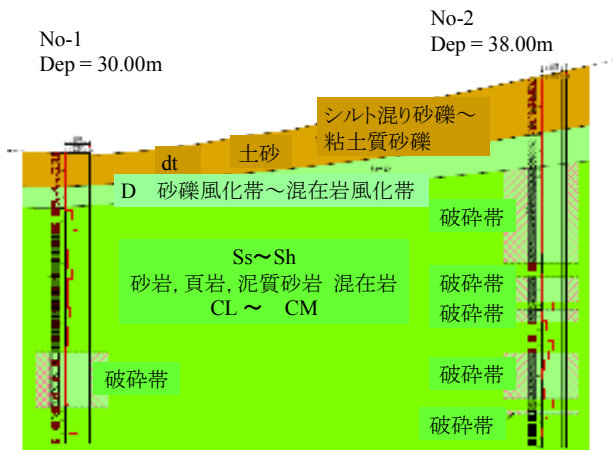


図-7 原位置試験現場の地質図

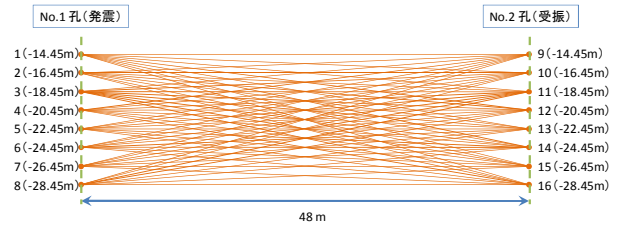


図-8 計測レイアウト

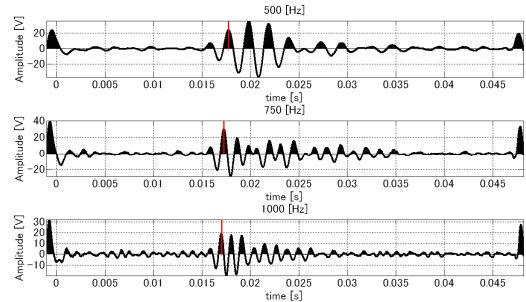


図-9 各周波数における受振波（パス5-9）

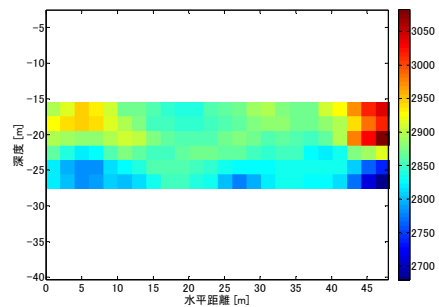


図-10 速度トモグラフィ（500Hz）

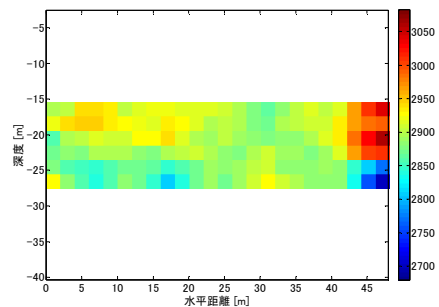


図-11 速度トモグラフィ（750Hz）

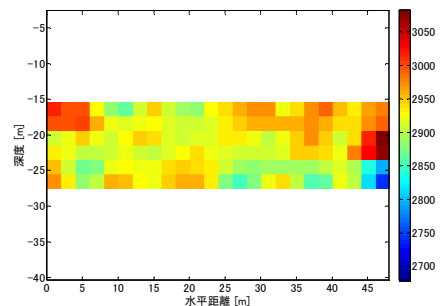


図-12 速度トモグラフィ（1000Hz）

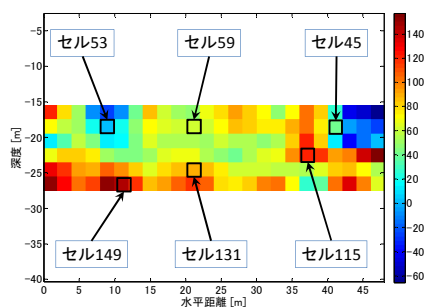


図-13 速度差トモグラフィと抽出したセル

次に、各セルがそれぞれどのような分散特性を持っているかを確認するため、1000[Hz]と500[Hz]の速度差トモグラフィを算出し、速度差およびセルの場所が偏らないように6つのセルを抽出した(図-13)。

そして、各セルの実験結果にBISQモデルの理論解をフィッティングした。セル53の実験結果に、BISQモデルの理論解をフィッティングした結果をそれぞれ図-14に示す。

フィッティングした結果、原位置透水試験の結果と合わせて考えると、式(3a)を用いて透水係数とSquirt Flow Lengthを関連付けることが妥当であると分かった。したがって、式(3a)を用いて残りの抽出したセルの実験結果に、BISQモデルの理論解をフィッティングさせることで得られた、1000[Hz]と500[Hz]の速度差と透水係数の関係を図-15に示す。

図に示したように、1000Hzと500Hzの速度差と透水係数は、次式で表現される。

$$k = 5.01E - 07 \exp(1.86E - 02\Delta V) \quad (4a)$$

式(4a)を用いることで、1000Hzと500Hzの速度差トモグラフィから、透水係数分布に変換することが可能となり、その結果を図-16に示す。

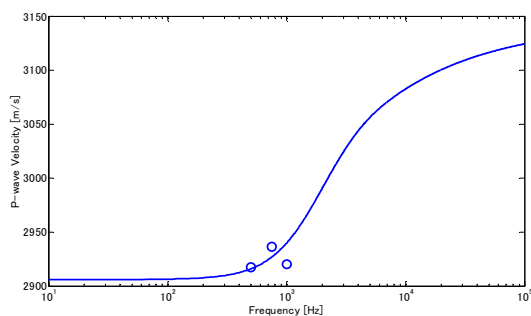


図-14 BISQモデルのフィッティング結果(セル53)

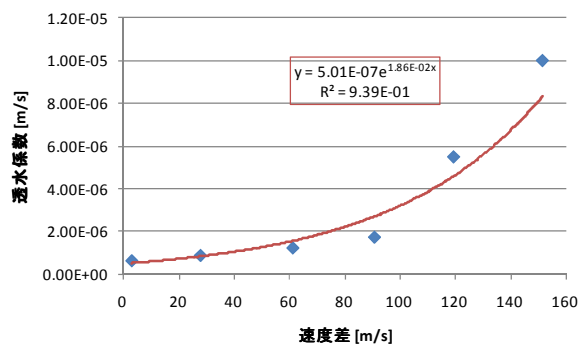


図-15 速度差と透水係数の関係

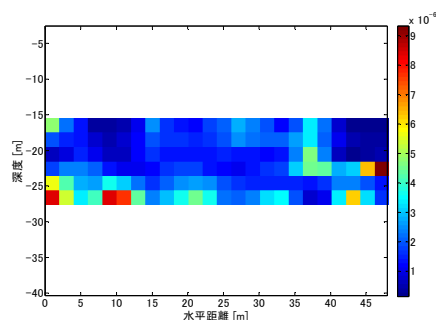


図-16 透水係数分布

5. 結論

蒸留水で飽和させた西山霊園コアを対象に、室内弾性波試験を実施することで、弾性波の速度が周波数に依存し、分散する現象が確認された。この現象は、BiotモデルやBISQモデルと一致していると考えられる。また、BISQモデルは速度の実験結果に精度良くフィッティングし、さらに、Squirt Flow Lengthを適切に設定することで、BISQモデルから弾性波が透過した媒体の透水係数が推定できることが分かった。

原位置にて行ったボーリング孔間における複数周波数を用いた弾性波探査から、BISQモデルを介することで、直接的に透水係数分布に変換した。得られた結果は、別途ボーリング孔を用いて実施した原位置透水試験の結果と整合的であった。いくつかのコアにBISQモデルをフィッティングさせ、透水係数と速度差を関連付けて、速度差トモグラフィから直接透水係数分布に変換する本手法は、弾性波探査のみから直接透水場を推定する手法として1つの可能性を示したと言える。

参考文献

- 1) M.A.Biot : Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 28, pp. 168-178, 1956.
- 2) M.A.Biot : Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 28, pp. 179-191, 1956.
- 3) Dvorkin, J. and Nur, A: Dynamic poroelasticity: a unified model with the squirt and the Biot mechanism, *Geophysics*, Vol. 58, pp. 524-533, 1993.
- 4) Jack Dvorkin, Gary Mavko and Amos Nur : Squirt flow in fully saturated rocks, *Geophysics*, Vol.60, No.1, 97-107(1995)
- 5) Dvorkin, J. and Nur, A : Elasticity of high-porosity sandstones : Theory for two North Sea data sets, *Geophysics*, Vol.61, No.5, 1363-1370(1996)
- 6) Dvorkin, J. and Nur, A : Time-average equation revisited, *Geophysics*, Vol.63, No.2, 460-464(1998)
- 7) 勝賢太, 大西有三, 西山哲, 矢野隆夫, 安藤賢一, 吉村公孝 : 弾性波を用いた岩盤広域透水場の評価手法に関する研究, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (社) 土木学会 pp217-222,(2008)
- 8) 吉村公孝, 安藤賢一, 坂下晋, パトリック・ブライネス, 奥村裕史, 西山哲, 大西有三 : 弾性波速度の分散特性を用いた岩盤の透水係数イメージング手法に関する実験的研究, *物理探査*, Vol.62, No.3(2009) pp.307-318

STUDY ON THE METHOD TO ESTIMATE THE DISTRIBUTION OF PERMEABILITY IN UNDERGROUND USING ELASTIC WAVE TOMOGRAPHY

Ryuichiro KAKINOCHI, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO, Manabu TAKAHASHI,
Kenichi ANDO and Kimitaka YOSHIMURA

In recent years, it is very important to know the information of underground that has been developed for the purpose to dispose such as geological disposal of radioactive wastes and CO₂. This research is based on dynamic poroelastic theory such as Biot's theory. First, we performed laboratory experiment to verify relation between elastic wave velocity dispersion and coefficient of permeability of borehole cores, and then we found that elastic wave velocity dispersion is influenced by coefficient of permeability of borehole cores. Secondly, we performed in-situ tomography experiment to construct coefficient of permeability distribution. As a result, we have predicted coefficient of permeability distribution between boreholes by considering the relation between elastic wave velocity dispersion and coefficient of permeability.