第 部門

京都大学工学部	学生員	宮田愛由未
京都大学大学院工学研究科	正会員	大西有三
京都大学大学院工学研究科	正会員	西山哲
京都大学大学院工学研究科	正会員	矢野隆夫
(独)産業技術総合研究所	正会員	高橋学

1 はじめに

近年、放射性廃棄物の地層処分などその他様々な 用途に地下空間が利用されている。地下空間利用の際 の安全性評価のためには対象領域を流れる透水係数の 空間分布を把握することが重要である。そこで対象岩 盤に対してさまざまな物理探査が行われるが、計測情 報から直接的に透水性を評価できるものはない。そこ で物理探査結果から直接的に対象領域の透水性を評価 ができる新しい物理探査手法が提案されている。この 手法を弾性波透水トモグラフィーとよぶ。

弾性波透水トモグラフィーは、弾性波を用いて岩盤 の透水性を調査するための新しい技術として検討され ている技術であり、ボーリング孔間において複数の周 波数で測定された弾性波の走時データから、水で満た された岩盤中の弾性波速度の分散周波数を調べ、その 結果を基に岩盤の水理特性を求めることが可能である。

そこで、本研究では弾性波速度の分散周波数と透水 係数の関係を示した基礎理論の岩盤に対する適用性を 室内実験によって検証することを目的としている。

### 2 基礎理論の概要

流体で満たされた岩盤を伝播する弾性波は固体と流 体の相互作用により分散現象がおこる。この現象は多 孔質弾性論により説明できる。多孔質弾性論には Biot モデル・BISQ モデルというものがある。Biot モデル では多孔質媒体中に弾性波が伝播する際、周波数によ って間隙流体の挙動が異なる。弾性波の周波数が低い 場合、流体に働く粘性力が慣性力より相対的に大きく、 また弾性波の周期が長いことから固体と流体が一緒に 振動する。弾性波の周波数が高い場合、慣性力が粘性 力よりも相対的に大きいため流体が骨格内に閉じ込め られ、全体の弾性率が上昇し弾性波速度が増加する。 このようにして弾性波分散現象を導くことができる。 一方、BISQ モデルでは波の伝播方向(Biot's flow)に 加え、垂直方向の流体の動き(Squirt flow)を考慮し ており、Biot モデルと同様に間隙流体の動きが周波数 によって変化することから弾性波分散現象を導いてい る。この現象において弾性波速度の分散周波数は以下 の式によって表現できる。

Biot 理論	$f_{biot} = \frac{\mu\phi}{2\pi k\rho_f}$
BISQ 理論	$f_{bisq} = \frac{K_f k}{2\pi\mu\phi L^2}$
k:固有透;	過度, $K_f$ : 流体の体積弾性率
$\mu$ :粘性係	数, $\phi\colon$ 間隙率,
L : Squirtfl	owlength , p :: 流体の密度

この Biot 理論・BISQ 理論において定義されている 分散周波数は透水係数を含む関数であり、測定された 弾性波分散現象から分散周波数を特定することで透水 係数を推定することが可能である。

### 3 室内実験

本実験では結晶質岩に対して弾性波分散現象と水理 特性の関係を示す理論の適用性の検証を行うことを目 的としている。稲田花崗岩供試体に対して 300 ・ 600 に熱処理を行い、岩石内の結晶を膨張させるこ とで亀裂を進展させ、その内部構造を変化させた。次 に水で飽和させた各供試体に対して弾性波を透過させ、 各周波数における弾性波速度を測定した。この測定に より得られた弾性波測定結果と別途測定した透水係 数・間隙率・亀裂の開口幅といったパラメータを用い て算出した各理論解との比較を行った。

Ayumi MIYATA, Yuzo ONISHI, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO, Manabu TAKAHASHI

# 4 実験結果と考察

図1に示す弾性波測定結果より、すべての供試体に 対して周波数の増加に伴う弾性波速度の増加すなわち 弾性波の分散現象が見られた。また、履歴温度が上昇 するにつれて弾性波速度は低下する傾向が見られた。 次に3種類の状態(履歴温度なし・300 ・600 )の 稲田花崗岩に対して、算出した理論解との比較を行う。 その結果、弾性波速度の変化量は BISQ 理論を用いて 説明可能であることが分かった。例として温度履歴な しの場合の Biot 理論解との比較結果を、図2に BISQ 理論解との比較結果を図3に示す。

測定した弾性波速度の変化量と理論解における弾性 波速度の変化量が整合的であったという知見を基に、 弾性波速度の上限と下限を設定することで弾性波速度 の分散領域を推定した。分散領域の例を図4に示す。 また、分散周波数より推定される透水係数に関しては BISQ 理論において特徴的なパラメータである Squint flow length に対して岩石の空隙構造から4つの値(平 均空隙径・粒径・最大の空隙径・最頻度の空隙径)を 候補として取り上げ分散領域における透水係数の範囲 を算出し、実測透水係数との比較を行った。

その結果、図5のように温度履歴なし 300 の場合 においては最大の空隙径、履歴温度 600 においては 粒径を Squirt flow length とした場合、推定した透水係 数は妥当であるということが分かった。







この結果において、Squirt flow length に相当するものが異なる理由としては、履歴温度が上昇するにつれて亀裂の連結性が高くなり、岩石の構造が変化したためであると考えられる。



図4 分散領域の推定例



図5 推定された透水係数の範囲と実測透水係数

## 5 まとめ

結晶質岩に対し、その弾性波速度の分散現象を BISQ 理論で説明可能であり、またそれぞれの岩石に 対してその構造や亀裂の連結性を考慮して Squirt flow length を決定することによって BISQ 理論を用いて透 水係数を推定することが可能であると考えられる。

# 参考文献

- M.A. Biot : Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. .Low-Frequency Range, Reprinted from Journal of Acoustical Society of America 28, 168-178 (1956)
- 2 ) Jack Dvorkin and Amos Nur : Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms,-Geophysics 58, NO.4; 524-533 (1993)