

弾性波分散現象を用いた 岩石供試体の水理特性評価に関する研究

宮田 愛由未^{1*}・大西 有三¹・西山 哲¹・矢野 隆夫¹・高橋 学²

¹京都大学大学院 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

²独立行政法人産業技術総合研究所（〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-3）

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

本研究では、結晶質岩により構成される難透水性岩盤について、弾性波を用いて直接的に水理特性を評価する手法を確立することを目的としている。本手法の基礎理論であるBiotおよびBISQ理論の適用性を岩石供試体を用いた室内実験を行うことにより検証を行った。その結果得られた、弾性波速度と周波数の関係はBISQ理論により説明できることがわかった。そこで、BISQ理論において特徴的であるパラメータSquirt flow lengthの検証を行った。岩石の内部構造を考慮してBISQ理論における適切なSquirt flow lengthを設定することで、岩石供試体の水理特性が評価可能であることから、弾性波を用いた水理特性評価手法の可能性が示せた。

Key Words : elastic wave dispersion, Biot theory, BISQ theory, permeability, Squirt flow length

1. はじめに

近年、放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中貯留など、その他様々な用途に地下空間が利用されつつある。地下空間利用の際、安全性評価を行うためには対象領域における透水係数の空間分布を把握することが必要不可欠である。そこで対象岩盤に対してさまざまな物理探査が行われているが、現在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。この手法を本研究では弾性波透水トモグラフィーと称している。

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（P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、基礎理論の透水係数と分散周波数の関係から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検証するため、岩石供試体を用いた室内実験を行った。

2. 基礎理論の概要

(1) 基礎理論

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。本研究では多孔質弾性論としてBiot理論およびBISQ理論を取り扱っている。

(2) Biot理論¹⁾

流体で飽和された多孔質媒体中を弾性波が伝播する際に、間隙流体は弾性波の伝播方向に生じる圧力勾配に従って動き、この間隙流体の動きの様子が弾性波の周波数により変化するとされている。

周波数が低い場合は、流体に働く粘性力が慣性力に比べ相対的に大きくなる。また弾性波の周期が長いことにより、流体は固体の運動に従って動くことができる。ゆえに、流体部と固体部は同じ動きをすることになる。一方、周波数が高い場合には、流体に働く慣性力が粘性力に比べ相対的に大きくなる。また弾性波の周期が短いことにより、流体は固体の運動に従うことができない。ゆえに、実質的に流体は間隙内に閉じ込められることになる。その結果、間隙内に閉じ込められた流体により全体の弾性率が増加し、弾性波速度が上昇する。このメカニズムにより、弾性波分散現象を説明することができる。

(3) BISQ理論²⁾

Biot理論では、間隙内の流体は弾性波の伝播方向にのみ動く(Biot's flow)。一方で、BISQ理論では弾性波の伝播方向に加え、伝播方向に垂直な流体の動き(Squirt flow)を考慮している。その流体の動きの概念図を図-1に示す。このSquirt flowと呼ばれる流体の動きを考慮した上で、Biot理論の場合と同様に、間隙流体の動きの様子が弾性波の周波数により変化すると考え弾性波分散現象を導いている。

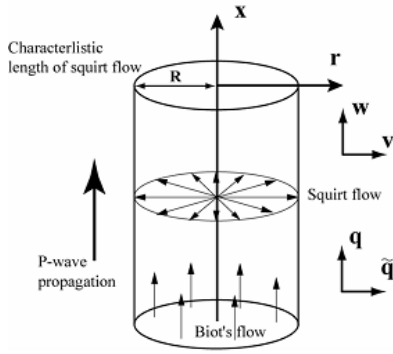


図-1 Biot's flow と Squirt flowの概念図

(4)弾性波分散現象と水理特性

Biot理論、BISQ理論において説明される弾性波分散現象の概念を図-2に示す。図中の f_c は分散周波数を表している。この現象において弾性波速度の分散周波数は式(1a)および式(1b)によって表現できる。これらの関係を用いることで弾性波測定から得られた分散周波数から水理特性に変換することが可能である。

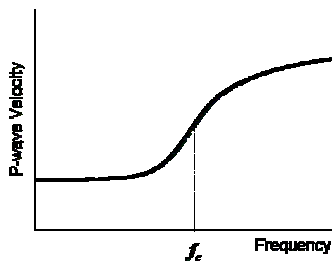


図-2 弾性波速度と分散周波数との関係

$$\text{Biot理論} \quad f_{\text{biot}} = \frac{\mu\phi}{2\pi k\rho_f} \quad (1a)$$

$$\text{BISQ理論} \quad f_{\text{bisq}} = \frac{K_f k}{2\pi\mu\phi L^2} \quad (1b)$$

μ : 粘性係数, ϕ : 間隙率, ρ_f : 流体の密度

k : 透水係数, K_f : 流体の体積弾性率

L : Squirt flow length

3. 室内実験

(1) 実験の目的

弾性波分散現象から弾性波が透過した媒体の水理特性を評価する手法の開発を目的とし、弾性波分散現象と水理特性の関係を示す理論であるBiot理論およびBISQ理論に関して、結晶質岩に対する適用性の検証を行う。

(2) 実験内容

固有振動数をもつ振動子に対して、ファンクションジェネレータにより周波数を制御した正弦波を、水で飽和した岩石供試験体に透過させ、各周波数における弾性波速度を測定する。この測定により弾性波速度の分散現象を起こすかどうかを明らかにし、各理論と一致するかどうかを確認する。

(3) 実験対象

本実験においては結晶質岩として稲田花崗岩を用意した。また、それらに対して300・600 に熱処理したものを用意した。熱処理は岩石内の結晶を膨張させることで、間隙率および透水係数を変化させるために行った。600 のに加熱したものは断層・破碎帯を模擬している。流体を含まない媒体においては弾性波分散現象が生じないということの確認のためステンレスを用いた。

(4) 実験結果

弾性波測定の結果、図-3に示すように稲田花崗岩に対してはどの状態においても、周波数が増加するに従って弾性波速度が増した。すなわち弾性波の分散現象が確認された。さらに、次頁の図-4に示すように流体を含まない媒体であるステンレスでは、弾性波の分散現象は見られなかった。

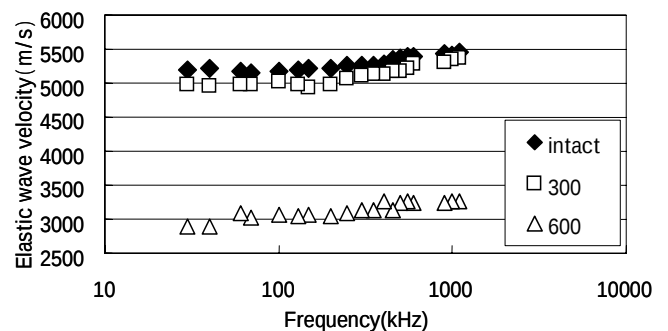


図-3 稲田花崗岩の弾性波測定結果

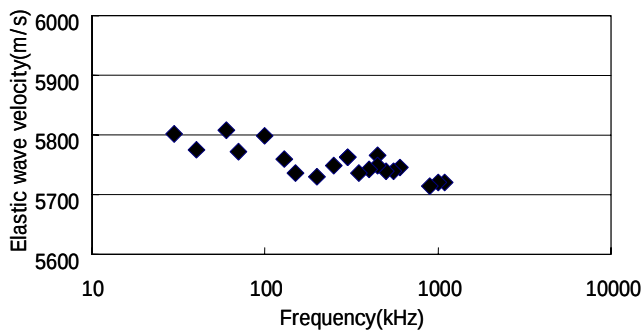


図-4 ステンレスの弾性波測定結果

(5) 実験結果に対する考察

室内実験により得られた弾性波分散現象に対し、各理論解と比較することで、弾性波分散現象を理論により説明可能かどうかを判断した。Biot理論およびBISQ理論との比較結果の例を図-5及び図-6に示す。Biot理論解・BISQ理論解は表-1の物性値を用いて算出した。表-1の物性値は、別途行った試験により測定した。これらの結果より、Biot理論解の弾性波速度の変化量は実験結果に比べて、極めて小さくBiot理論は適用できないという結果となった。一方、BISQ理論においては弾性波速度の変化量が整合的であることから、BISQ理論で弾性波分散現象が説明可能であることがわかった。

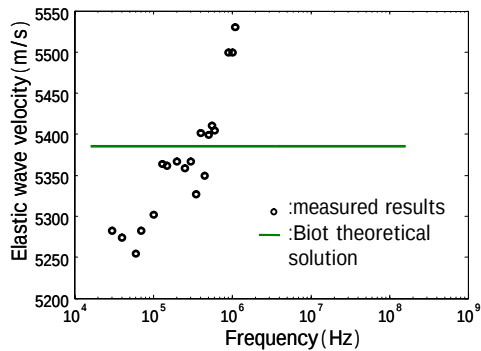


図-5 実験結果とBiot 理論解との比較

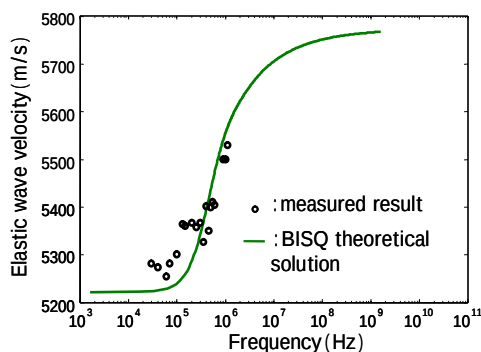


図-6 実験結果とBISQ 理論解との比較

表-1 各供試体の物性値

Sample	Ks(Pa)	E(Pa)	G(Pa)	ν	ϕ
Inada granite (intact)	6.50E10	3.42E10	1.32E10	0.300	0.0047
Inada granite (300)	6.50E10	3.13E10	1.25E10	0.253	0.0071
Inada granite (600)	6.50E10	7.10E09	2.87E09	0.237	0.0550

E:ヤング率, Ks: 体積弾性率(固相), G:せん断係数 ν :ポアソン比, ϕ :間隙率

(6) Squirt flow lengthに関する考察

結晶質岩に対してBISQ理論解がその弾性波速度の変化量と整合的であるという見知から、Squirt flow length に対して考察を行う。BISQ理論において特徴的なパラメータであるSquirt flow lengthは流体の移動する距離であり、岩石内の微細空隙構造に関する値であると考えられる。よって、岩石の微細構造に関する4つの値（平均空隙径・粒径・最大の空隙径・最頻度の空隙径）を候補として挙げ、それぞれに対して分散周波数より推定される透水係数を算出し、実測透水係数との比較を行った。温度履歴なしの透水係数は文献⁹⁾により引用し、300 および600 のものは変水位透水試験により測定した。引用その結果、図-7のように履歴温度なし・300 においては亀裂の最大空隙径、履歴温度600 では粒径をSquirt flow lengthとした場合、分散周波数より推定される透水係数は実測透水係数に対して妥当であることが分かった。

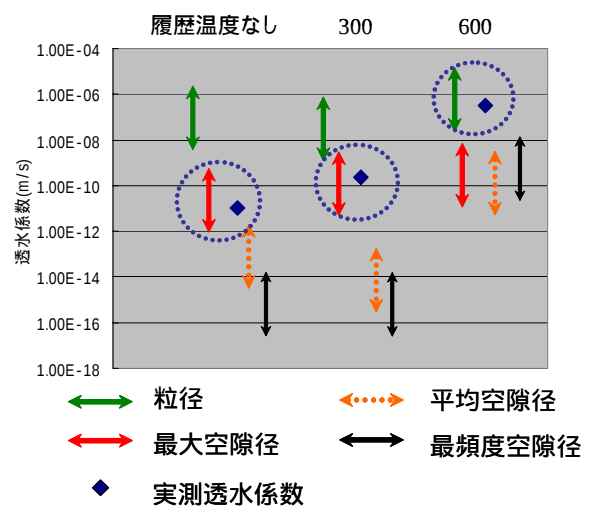


図-7 透水試験結果と BISQ 理論により推定した透水係数との比較

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。温度履歴なし・300 の場合は亀裂同士の連結性が低く、温度履歴600 の場合は加熱により、結晶が膨張することにより亀裂同士の連結性が高くなったと考えられる。

履歴温度を与えた場合の岩石中の微小亀裂の様子、内部構造がどのように変化しているのか実際にレーザー顕微鏡による観察を行った。図-8は履歴温度600 の稲田花崗岩の拡大写真である。履歴温度600 の場合、粒子と粒子が完全に分離しており、粒界中を水が移動していると考えられ、Squirt flow lengthは粒径に相当すると考えられる。

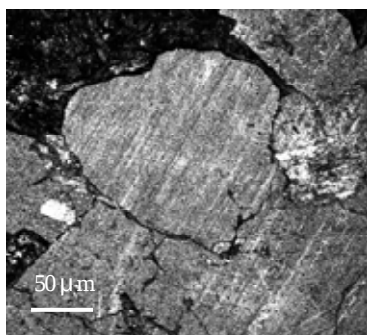


図-8 レーザー顕微鏡による観測結果（600 ）

4. まとめ

結晶質岩に対し、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。次のステップとして原位置における水理特性評価が必要であるが、原位置におけるSquirt flow lengthの推定手法はまだ確立されておらず、今後の課題として残されている。

参考文献

- 1) Biot, M.A.: 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) Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher 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) Dvorkin, J, Mavko, G and Nur, N : Squirt flow in fully saturated rocks, *Geophysics*, Vol.60, pp.97-107, 1995
- 5) 原子力環境整備促進・資源管理センター：地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査報告書, pp364, 2002
- 6) 林為人・高橋学・杉田信隆：稲田花崗岩の温度上昇に伴ったマイクロクラックの開口幅について，応用地質，第 36 巻 4号, pp300-304, 1995

A STUDY ON ESTIMATING HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF ROCK SPECIMENS USING ELASTIC WAVE DISPERSION

Ayumi MIYATA, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO and Manabu TAKAHASHI

This method is based on dynamic poroelastic theory such as Biot and BISQ theory. These theories indicate that the elastic wave velocity through elastic solid depends on its frequency and formulated with permeability with the characteristic frequency. Using these theories, we can estimate hydraulic characteristics from the characteristic frequency. In order to verify the applicability of these theories to rock mass, we performed laboratory tests. We measured P-wave velocity of rock specimens for various frequencies. The rock specimens used in this study were Inada-granite. From these results, it was found that elastic wave dispersion for crystalline rocks can be described by BISQ theory.