

弾性波を用いた岩盤広域透水場の の評価手法に関する研究

勝 賢太^{1*}・大西有三¹・西山哲¹・矢野隆夫¹・安藤賢一²・吉村公孝³

¹京都大学大学院 工学研究都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

²大林組 (〒108-8502 東京都港区港南1-15-2)

³原子力環境整備促進資金管理センター (〒104-0052 中央区月島1-15-7 パシフィックスクエア月島8階)

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

放射性廃棄物の地層処分及び二酸化炭素の地中貯留に伴い、地下深部の広域岩盤の水理特性を知ることは非常に重要なことである。従来の物理探査技術では岩盤の構造及び水の分布を調べることはできても、具体的な透水性の評価をすることはできない。本研究では、まず室内において堆積岩及び結晶質岩の天然の岩石に対して実験を行い、多孔質弾性体理論の適用性の評価を行う。次に室内実験の結果を受け現場での計測を行い、実際の現場における透水性評価可能性の検討を行った。

Key Words : elastic wave, Biot theory, BISQ theory, seismic tomography, permeability

1. 緒言

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、概要調査段階において処分対象サイトの水理特性を評価するために、ボーリング孔における水頭調査や透水試験、また物理探査などが実施される。しかしながら、ボーリング孔における試験から得られる情報は点もしくは線の情報であり、広域の水理特性を精度よく評価することは難しい。また、物理探査は岩盤内の亀裂や破碎帯など構造情報を得るためのものであり、直接岩盤の水理特性を評価することはできない。そこで、広域における物理探査情報から岩盤の水理特性を直接的に評価することができる手法として開発が期待されているのが、本研究で扱う弾性波分散現象を利用した手法である(本論文ではこの手法を「弾性波透水トモグラフィ」と呼ぶ)。弾性波透水トモグラフィとは、ボーリング孔間において複数の異なる周波数を用いた弾性波測定試験を行い、測定された走時データから岩盤中での弾性波分散現象を捉え、そこから岩盤の水理特性を評価する技術である。

本研究では、まず室内試験により弾性波分散現象と水理特性の関係を記述する基礎理論の岩盤への適用性を検

証し、その後、堆積岩を対象に行った原位置試験のデータを用いて、基礎理論の検証を行い、水理特性分布の評価を行うことで本手法の適用性の検証を行った。

2. 基礎理論の概要

(1) 基礎理論

流体で満たされた岩盤中を伝播する弾性波は、固体と流体との相互作用によって分散現象が起こる。この現象は、多孔質弾性論により導くことができる。この多孔質弾性論には透水係数をパラメータとして含むモデルとして、Biotモデル、BISQモデルがある。

(2) Biot理論¹⁾²⁾

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(圧力平衡に達する方向に動く)、Biot(Biot, 1956)によると、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、実質的に流体は空隙内に閉じ込められることになる。その結果、空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。

以上のような概念に基づいて、Biot は弾性波分散現象を導いている。

(3) BISQ 理論^{3) 4)}

上述の Biot 理論では、空隙内の流体は弾性波の伝播方向にのみ動く (Biot's flow)。一方、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、空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。

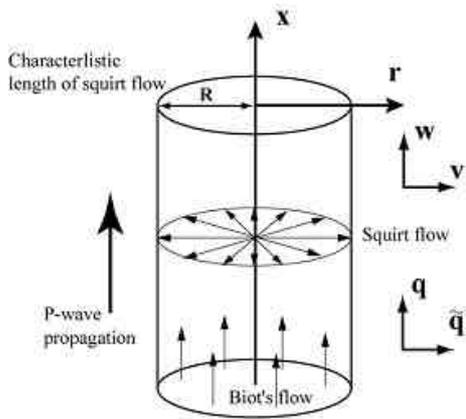


図-1 Biot's flow および Squirt flow 概念図

(4) 弾性波分散現象と水理特性

Biot 理論および BISQ 理論は其中で、粘性力と慣性力の相対的な大小関係が変わる周波数として特性周波数を導いている。

Biot 理論において、この特性周波数は以下のように定義されている。

$$f_c = mf/2pkr_f \quad \dots(1)$$

m : 粘性係数, f : 間隙率

k : 透水係数, r_f : 流体の密度

また BISQ 理論において、この特性周波数は以下のように定義されている。

$$f_c = K_f k / 2pmfL^2 \quad \dots(2)$$

k : 透水係数, K_f : 流体の体積弾性率

m : 粘性係数, f : 間隙率, L : Squirt length

この Biot 理論, BISQ 理論において定義されている特性周波数は、透水係数を含む関数と成る。すなわち図-2 で示すように、測定された弾性波分散現象から特性周波数を特定することで、弾性波が透過した媒体の透水係数を算出することができる。

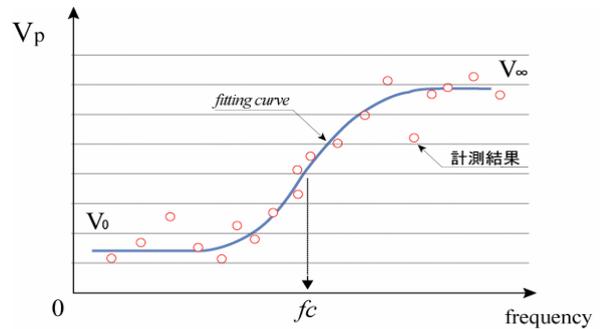


図-2 特性周波数の概念図

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、堆積岩および結晶質岩のそれぞれに対する適用性の検証を行い、そこから得られる水理特性が実際の岩の水理特性を評価できているかを検証する。

(2) 測定内容

ファンクションジェネレータにより正弦波を 10 波入力することにより、水で飽和した岩石供試体内に弾性波を透過させ、各周波数における弾性波速度を測定する。測定対象は対照実験としてステンレス、天然の岩石として砂岩、硬質頁岩、凝灰岩、花崗岩を対象にしており、供試体サイズは直径 5cm、高さ 10cm である。花崗岩においては 300、600 の温度履歴を与えることにより内部構造を変えて弾性波速度の計測を行っている。また測定装置概念図に関しては図-3 の通りである。

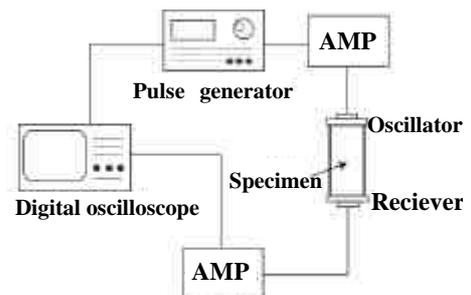


図-3 実験装置概念

(3) 実験結果

全ての実験の結果を図-4に示す. 実験の結果からわかるように全ての天然の岩石供試体において周波数が増加するにつれて透過する弾性波の速度が増加する傾向にあることがわかる. また, この現象は多孔質な内部構造を持たないステンレス供試体と比較することにより明らかである.

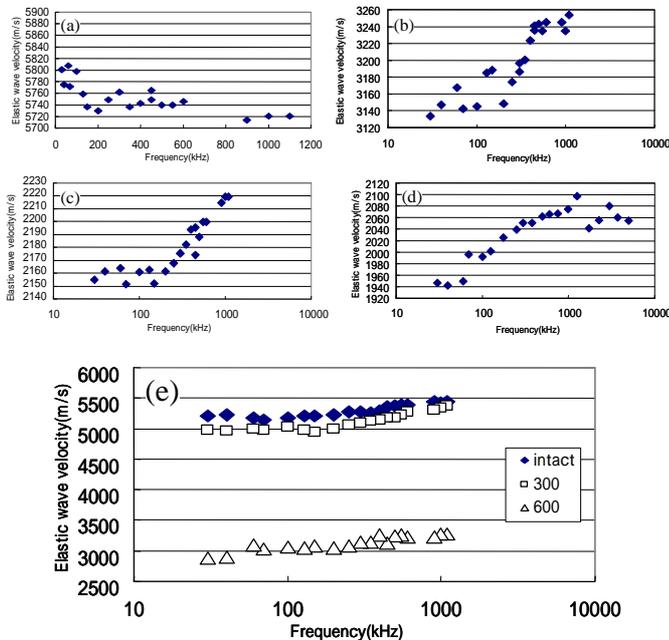


図-4 測定結果

(a: ステンレス b: 砂岩 c: 硬質頁岩 d: 凝灰岩 e: 花崗岩)

次に理論解との比較を行う. 図-5 に砂岩, 硬質頁岩, 凝灰岩に対する Biot 理論解とのフィッティングの結果を示す. 堆積岩である天然の岩石に対しては Biot 理論解とのフィッティングに成功し, またそこから推定される透水係数は室内実験の結果と同程度のオーダーを示すことがわかった.

次に温度履歴を与えていない花崗岩に対する Biot 理論解のフィッティング結果を図-6 に示す. 花崗岩に対しては Biot 理論解のフィッティングは成功しなかった. BISQ 理論解とのフィッティングを行った結果を図-7 に示す. BISQ 理論解において Squirt flow length の値を適切に評価することによって BISQ 理論解のフィッティングを行うことに成功した.

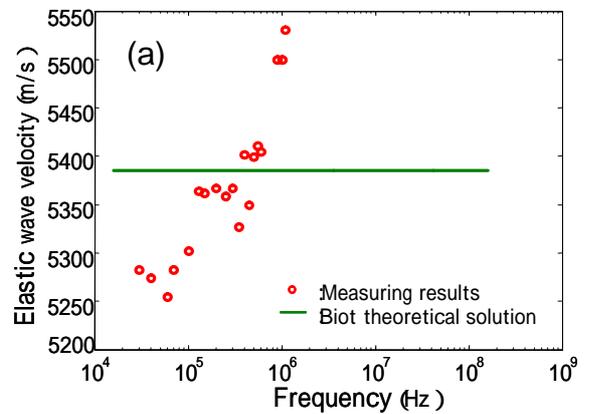


図-6 花崗岩に対する Biot 理論解のフィッティング結果

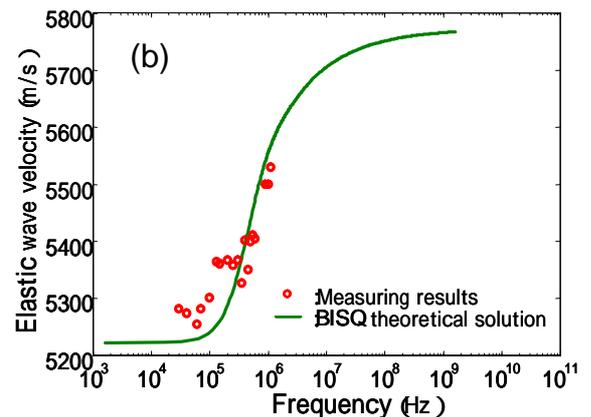


図-7 花崗岩に対する BISQ 理論解のフィッティング結果

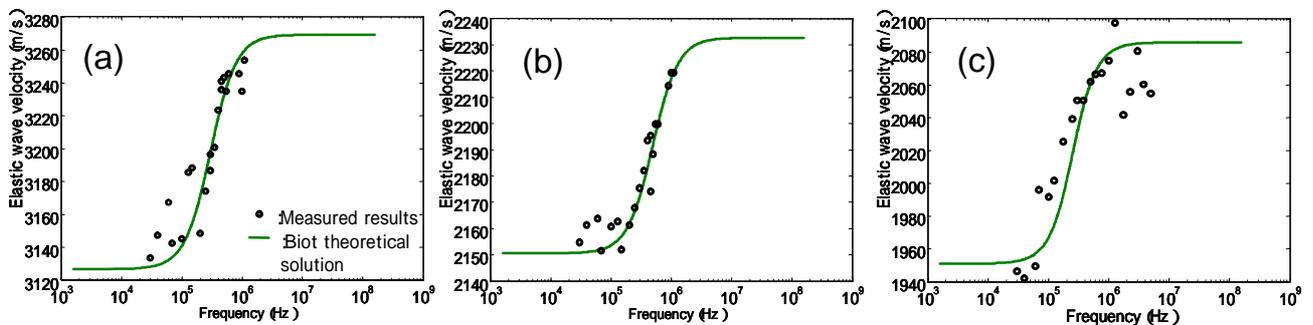


図-5 砂岩, 硬質頁岩, 凝灰岩に対する Biot 理論解のフィッティング結果

4. 原位置試験

(1) 試験内容

本試験では、弾性波分散現象確認のために孔間距離 10m における弾性波測定試験、および弾性波透水性トモグラフィ技術の検証のための孔間距離 5m における弾性波測定試験を実施する。また弾性波測定試験を行うボーリング孔においては、別途 BTV による孔壁観察および原位置透水試験が行われている。

(2) 10m 孔間試験

弾性波測定試験の測定レイアウトを図-8 に示す。ボーリング孔における BTV の結果を基に、測定は亀裂部を通るパス、亀裂上部を通るパス、堅岩部を通るパスを選定している。



図-8 測定レイアウト

本試験では、測定区間 10m を一つの測定単位とした弾性波到達時間を計測する弾性波測定とみなし、各周波数での弾性波速度を算出した。図-9 ~ 図-11 に各測定パスにおける測定結果を示す。これらの結果より原位置レベルにおいても弾性波速度の周波数依存性を確認することができ、また透過する経路の違いにより、その速度に違いが存在することが確認できた。

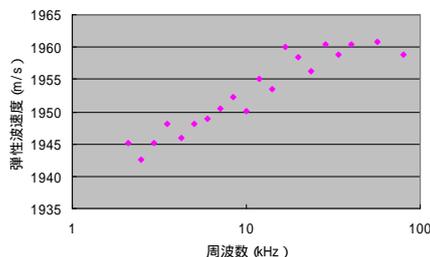


図-9 測定結果(亀裂部を通るパス)

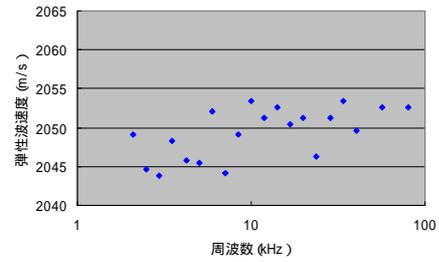


図-10 測定結果(亀裂上部を通るパス)

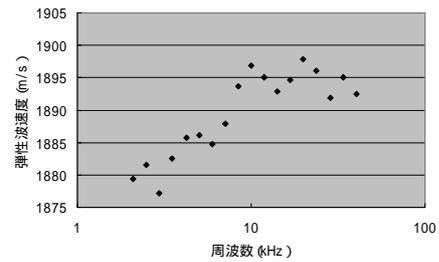


図-11 測定結果(堅岩部を通るパス)

計測結果に対する理論解とのフィッティングを行った結果を図-12 に示す。経路により分散周波数領域に違いが出ており、その違いが透水性の違いになっていると考えることが出来る。

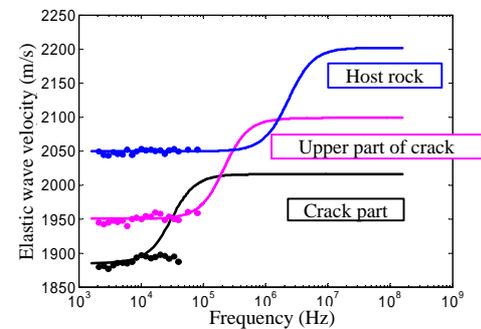


図-12 計測結果と理論解との比較

(3) 5m 孔間試験

孔間 5m における弾性波測定試験の測定レイアウトを次ページの図-13 に示す。試験より得られた弾性波の初動データから、各々のパスにおける走時を読み取り、弾性波速度トモグラフィを算出した。弾性波トモグラフィの例として、ここでは 2.5kHz における結果を図-14 に示す。縦軸横軸の数字は共にメッシュの数を示しておりメッシュサイズは 20cm x 20cm である。また、上部に存在するコンクリート部周辺（計測の上部約 1m 程度）においては発振した弾性波を受信して読み取ることが困難であった。そのためトモグラフィの結果は結果の読み取れた範囲での結果を示している。

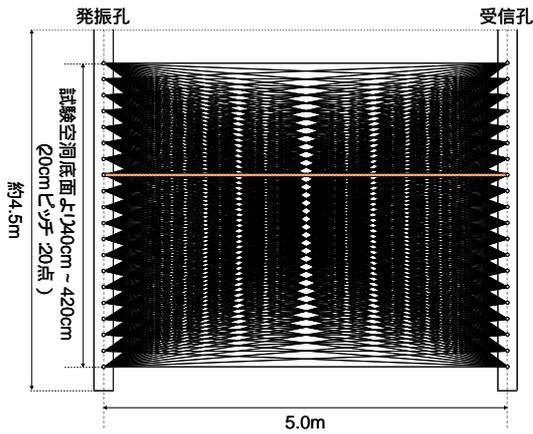


図-13 測定レイアウト

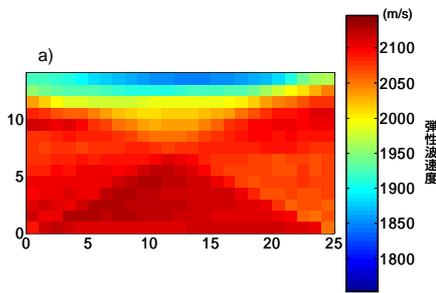


図-14 弾性波トモグラフィ(2.5kHz)

複数の周波数のトモグラフィより計算した各メッシュの速度変化率の結果を図-15 に示す．速度変化率の計算に関しては式(3)を用いて算出している．

$$(\text{変化率}) = \frac{(\text{速度の最大値}) - (\text{速度の最小値})}{(\text{平均速度})} \dots(3)$$

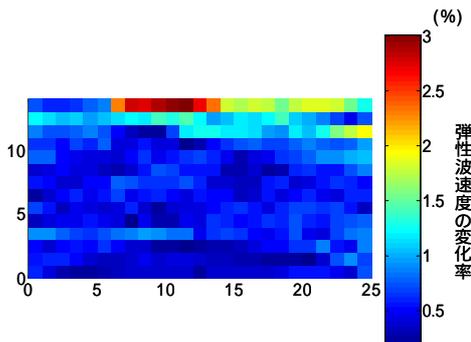


図-15 弾性波速度の変化率

10m孔間における弾性波速度の変化率及びボーリング孔を利用した透水試験により速度変化率と透水係数を関連付けた結果を基に先ほど図-15 で示した 5m孔間の速度変化率と透水係数を照らし合わせた結果、図-16 に示すように 3 種類の透水性に分類することに成功した．この時のおおよその透水係数に関して高透水部の値はオーダーレベルでおよそ $10E-05$ m/s 以上程度、中透水部ではオーダーレベルで $10E-07 \sim 10E-05$ m/s 程度、低透水部ではオーダーレベルで $10E-07$ m/s 以下程度である．

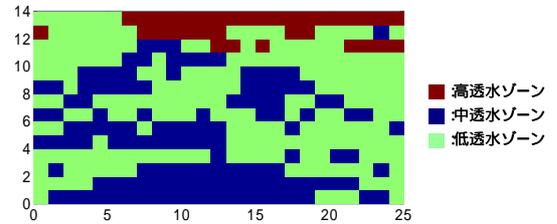


図-16 推定した広域透水場

5. 結論

弾性波を用いることにより、5m孔間での広域岩盤の透水場の評価することに成功した．本試験ではメッシュ毎に具体的な透水係数を評価するにはいたらなかったが、広域透水場を評価する上では十分有益な手法であると考えることができる．また、この事により地下空間の透水場の評価が可能になると共に透水場評価のための経費削減につながると言えよう．今後の課題として具体的な弾性波速度の変化率と透水係数の関連付け、及び弾性波の透過距離が今後の課題となってくる．具体的に現在15kHzの弾性波を用いて花崗岩に対する弾性波の精度検証などを行っている段階である．

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) Jack Dvorkin, Gary Mavko and Amos Nur: Squirt flow in fully saturated rocks, *Geophysics*, Vol.60, pp.97-107,1995

STUDY OF THE METHOD TO ESTIMATE THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS IN ROCK MASSES BY USING ELASTIC WAVE

Kenta KATSU, YuZO OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO,
Kenichi ANDO, and Kimitaka YOSHIMURA

In the area of radioactive waste repository, estimating radionuclide migration through the rock mass is an important factor for assessment of the repository. The purpose of this study is to develop a method to estimate hydraulic characteristics of rock masses by using elastic wave velocity dispersion. This method is based on dynamics poroelastic relations such as Biot and BISQ theories. These theories indicate relations between velocity dispersion and hydraulic characteristics. In order to verify the validity of these theories in crystalline rocks, we performed laboratory experiments. The results of experiments show the dependency of elastic wave velocity on its frequency. To test the applicability of this method to real rock masses, we performed in-situ experiment for tuff rock masses. The results of in-situ experiment show the possibility as a practical method to estimate the hydraulic characteristics by using elastic wave velocity dispersion.