

弾性波分散現象を用いた花崗岩供試体の水理特性評価手法に関する研究

京都大学大学院工学研究科	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	非会員	高橋学

1 はじめに

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岩盤中を地下水がどのように流れるか、すなわち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。現在、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、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とよぶ。この技術は、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おり、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。本研究では花崗岩のような難透水性岩盤に対して、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適用性を室内実験によって検証を行った。

2 基礎理論の概要

弾性波が流体で満たされた岩盤を伝播すると、固体と流体の相互作用により弾性波速度の分散現象がおこる。多孔質弾性論を前提とした Biot 理論においては、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と一緒に振動する。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 理論では波の伝播方向 (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。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。

$$\begin{aligned} \cdot \text{Biot 理論} \quad f_{\text{biot}} &= \frac{\mu\phi}{2\pi k\rho_f} \quad (\text{式 1}) & \cdot \text{BISQ 理論} \quad f_{\text{bisq}} &= \frac{K_f k}{2\pi\mu\phi L^2} \quad (\text{式 2}) \end{aligned}$$

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

稲田花崗岩を直径 50mm 高さ 100mm に整形し、300・600 の履歴温度を与えた。それらの供試体に対し、水で飽和させた状態で図 1 のような装置を用いて弾性波測定を行った。また、履歴温度なし・300・600 の状態に対して間隙率・透水係数・亀裂の開口幅を測定した。

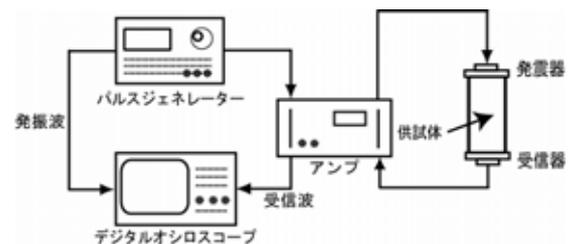


図 1 装置概念図

キーワード 透水性 弾性波分散現象 BISQ 理論 Squirt flow length

連絡先 〒606-8501 京都市大学左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻ジオフロント環境工学講座 TEL075-753-5129

4 実験結果

図2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。

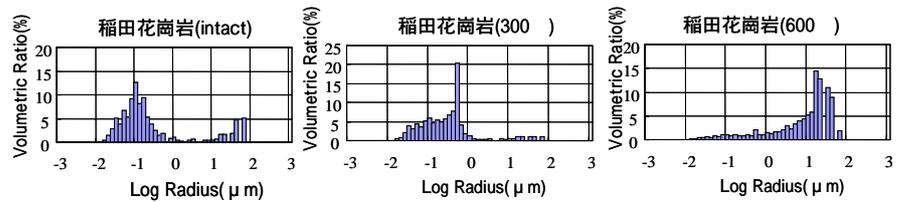


図3 ポロシメータによる細孔分布

また図3に示すポロシメータの結果より微小亀裂が新たに進展・成長しているのがわかる。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BISQ理論解との比較結果を図4に示す。

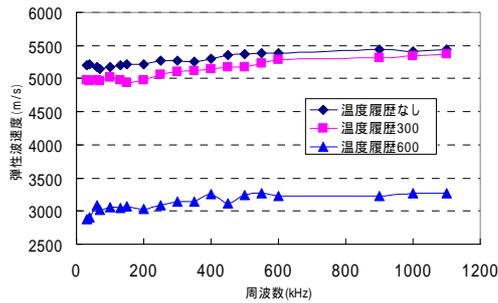


図2 稲田花崗岩に対する実験結果

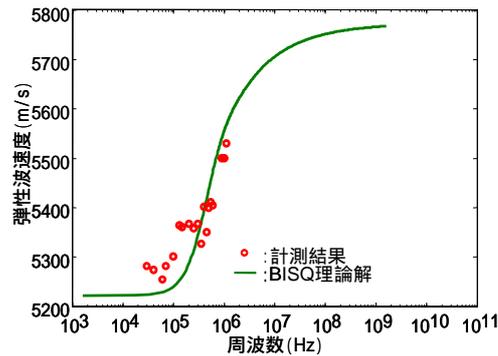


図4 実験結果と理論解の比較

5 Squirt flow length に対する考察

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、BISQ理論において特徴的なパラメータであるSquirt flow lengthの考察を行った。Squirt flow lengthは亀裂の開口幅に関するパラメータであるため、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。

6 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。しかし、岩石供試体にBISQ理論の適用性が示されたが、現場においてSquirt flow lengthの推定手法を確立することが今後の課題となる。

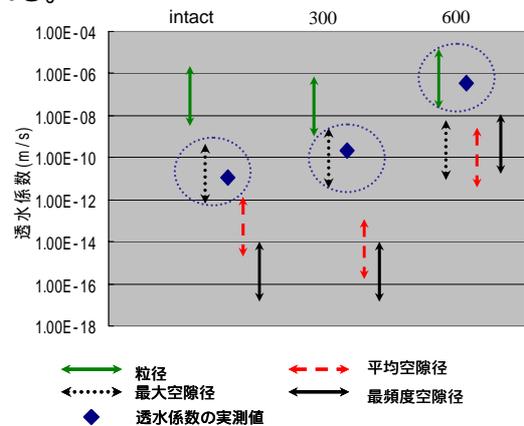


図5 実際の透水係数と推定透水係数との比較

参考文献

- 1) 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)