

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760681

研究課題名（和文） 弾性波速度と透水テンソル理論の拡張による亀裂性岩盤の透水係数分布の評価法の開発

研究課題名（英文） Estimation of permeability distribution for cracked medium by wave velocity and permeability tensor

研究代表者

竹村 貴人（TAKEMURA TAKATO）

日本大学・文理学部・講師

研究者番号：03035959

研究成果の概要（和文）：

本研究では弾性波速度から推定された亀裂情報から透水テンソルを推定し、岩盤水理モデルを作成することを行った。透水係数測定装置とシリンジポンプを用いてフローポンプ法にて試料の透水係数の測定方法を確立し、透水係数の拘束圧依存性の測定を行った。ここでは拘束圧は0-10MPa までに変化させた時の透水係数の測定を行った。また、測定した弾性波速度の結果を用いて、弾性波速度から亀裂-弾性波構成則を用いて、亀裂情報を得ることを行った。本研究では複数方向の弾性波速度の分布からクラックの異方性および体積あたりのクラック密度を推定することができた。応力状態の異なる場合について比較を行った結果、推定された透水係数は実測値と比べると、透水係数の桁数は同じ水準であった。

研究成果の概要（英文）：

In order to propose the hydrogeological model, we try to estimate permeability tensor defined by crack geometry and wave velocity. The permeability testing method was developed by using newly introduced vessel for permeability measurement and high-accuracy pump, and the permeability dependence with confining pressure was measured. Here, the confining pressure is changing 0 to 10MPa. Additionally, the crack geometry was estimated by the multi directional wave velocity using the developed crack geometry - wave velocity relation. In this study, crack density per unit volume and crack anisotropy could be estimate by the distribution of wave velocities. The estimated permeability is almost correspond with the measured permeability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：地球・資源システム工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：透水テンソル，クラックテンソル，亀裂密度，弾性波速度

1. 研究開始当初の背景

エネルギー問題や温暖化を始めとした地

球環境問題への対策として、放射性廃棄物の地層処分やCO₂の地下貯留などを目的とし

た地下空間の利用技術は安全性を確保した上で早急に確立すべきである。例えば、放射性廃棄物の処分場であれば、長期にわたる岩盤中の地下水流動特性を評価する必要がある、 CO_2 の地中貯留であれば、岩盤の透気特性を評価する必要がある。そのためには地下環境下で岩盤中の流体（液・気体）の通り道となる亀裂の情報（方向、密度、開口幅）を的確に評価することが重要な課題となる。

亀裂性岩盤の流体移動特性や力学特性を評価するという視点に立った研究は透水テンソル理論などがあるが、その適用に関してはいくつかの問題点が残されており、実際のボーリングコアや物理探査から得られた情報から流体移動特性を評価した事例は非常に少ない。例えば亀裂は空間的にランダムな方向性を持つなど多くの仮定の上で岩盤中の流体移動特性を推定しており、物理探査の結果は岩盤水理モデルに反映されていないのが現状である。最も重要な問題点は、限られた情報から亀裂の方向分布、密度や開口幅をどのように定量的に評価するかという点であり、特に拘束圧下での開口幅の推定は困難である。ここで、定量的に評価するということは、構成則のパラメータとなり得るような形式で表現することである。

2. 研究の目的

物理探査から得られた情報から岩盤中の流体移動特性を関連付けるためには、拘束圧下での亀裂の開口幅の変化と、それに伴う流体移動特性（透水係数）の変化を関連付け定式化することが必要不可欠である。この定式化ができれば、物理探査から決まる3つの亀裂に関する情報を透水テンソル理論に適用することで封圧下での流体移動特性を推定ことができ、物理探査から得られた情報を積極的に反映した岩盤水理モデルを構築することができる。

これらの問題を解決するために、本研究では、これまでに提案されているクラックテンソルの枠組みでの亀裂の異方性と密度に関する関係式に加えて、開口幅の情報を加えることで、推定できる透水テンソルを非破壊で得られる情報から亀裂情報を推定するための手法の開発を行う。

3. 研究の方法

本研究は「弾性波速度による封圧下での亀裂構造の評価」と「拘束圧下での流体移動特性の推定」から構成され、最終的に岩盤水理モデルの構築を行うことを目指す。

「弾性波速度による封圧下での亀裂構造の評価」：弾性波速度を利用することで亀裂開口幅の推定を行うために、亀裂を有する試料に拘束圧をかけ、拘束圧の上昇に伴い変化する弾性波速度と歪みの測定を行いその実験

式を得る。そのために、透水係数・弾性波同時測定圧力容器の開発を行い、対象拘束圧を25MPaほどとした状態での実験装置の開発・整備を行う。実験に使う亀裂試料には来待砂岩を用いた。測定結果を用いて亀裂-弾性波構成則の構築を行う。ここでの構成則は弾性波速度が弾性定数と線形関係であることを利用し弾性定数と体積歪みの関係性を弾性論の枠組みで定式化を行われるものである。拘束圧下での弾性波速度 V_p の変化は亀裂の体積減少であり、即ち開口幅の変化であり、透水係数と密接な関係がある。

「拘束圧下での流体移動特性の推定」：弾性波速度から推定された亀裂情報から透水テンソルを推定する手法の開発を行う。先の透水係数・弾性波同時測定圧力容器に対して、透水係数測定用の間隙水圧用圧力発生装置・シリンジポンプを取り付け、圧力計および差圧計にて水圧モニタリングを行うフローポンプ法にて試料の透水係数の測定を行う。開発した装置により、透水係数の拘束圧依存性の測定を行う。測定した弾性波速度を用いて亀裂情報を得る。透水テンソルのパラメータとなる亀裂に関する情報を弾性波速度で表せるよう透水テンソルを拡張し、測定した弾性波速度と拘束圧から透水係数の推定を行う。また、その推定された透水係数（理論値）の精度を確かめるため、弾性波速度と同時に測定した透水係数と比較をし、提案した理論の適用性を検証する。また、その亀裂-弾性波構成則を組み込んだ拡張透水テンソルを弾性波速度構造へと適用し、面的な透水係数の分布（岩盤水理モデル）を推定する。

4. 研究成果

弾性波速度を利用して透水係数に関与する亀裂の幾何学的情報の推定を行うことを目的として、拘束圧下での亀裂を有する試料の弾性波速度と歪みの測定を行った。実験に用いた装置は、本年度に導入した高压三軸室の内部において多点同時弾性波速度を測定できるシステムおよび動的歪みを測定できるシステムを構築し、岩石試料の任意の断面（ $\Phi 50\text{mm}$ ）での2次元弾性波速度トモグラフィを取得できるようにした。また、弾性波速度の測定を多方向から行い、クラックテンソル理論を用い、亀裂を持つ岩石試料の亀裂密度と亀裂の3次元異方性を弾性波速度から推定できる構成則を弾性論の枠組みから構築した。また、その推定精度を検証するため、亀裂密度の異なる試料を用いた精度検証試験を行った（図1）。その結果、亀裂密度が高くなり、岩石が粒状態のようになると理論値と測定値が離れてしまうことがわかった。ここで、実験に用いた試料は定応力負荷によりダメージを受けた稲田花崗岩と白浜砂岩である。ここで、推定された亀裂密度と

3次元異方性から、現段階では、透水異方性のみが推定できるが、来年度に行う予定である開口幅の推定を行うことで、非破壊の物理探査（弾性波速度）データから地層区分だけでなく、透水係数も推定できるようになることが期待され、その成果は放射性廃棄物の地層処分、二酸化炭素の地下貯留やメタンガスハイドレートの探査などを目的とした地下空間の技術開発に貢献できる。

本年度は弾性波速度から推定された亀裂情報から透水テンソルを推定し、岩盤水理モデルを作成することを行った。(1)前年度に開発した装置に透水係数測定用圧力発生装置・シリンジポンプを取り付け、圧力計および差圧計にて水圧モニタリングを行うフローポンプ法にて試料の透水係数の測定を行った。(2)透水係数の拘束圧依存性の測定を

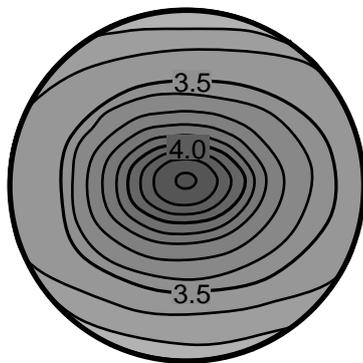


図1 亀裂の異方性から生じる弾性波速度の異方性（試料は稲田花崗岩の破壊時の試料）

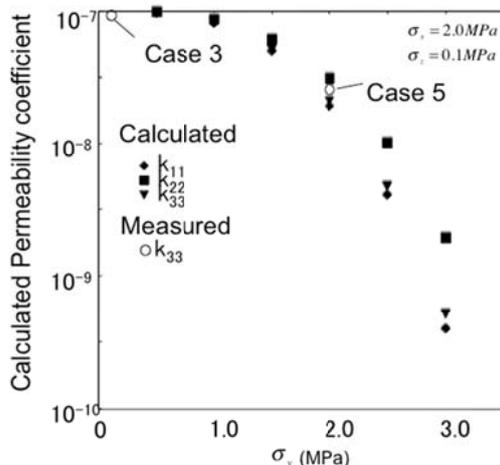


図2 異なる拘束圧下での透水係数の推定値と実測

行った。ここでは拘束圧は 0-10MPa までに変化させた時の透水係数の測定を行った。(3)測定した弾性波速度の結果を用いて、弾性波速度から亀裂-弾性波構成則を用いて、亀裂情報を得ることを行った。本研究では複数方向の弾性波速度の分布からクラックの異方性および体積あたりのクラック密度を推定することができた。また、同時に測定した非弾性体積歪みが亀裂の開口および閉口量と一致するとした場合、体積中の亀裂の平均的な開口幅を得る事ができる。本研究で行った、角柱試料を用いた、弾性波速度の計測結果から得られた定量的に表現された内部の亀裂情報と拘束圧を変化させた時の非弾性体積歪みから得られた亀裂開口幅に関する情報から計算された透水係数と実測の透水係数の比較を行った。応力状態の異なる場合の5種類のケースについて比較を行った結果、推定された透水係数は実測値と比べると過大に評価されたものの、透水係数の桁数は同じ水準であった（図2）。生じた誤差の原因は推定した亀裂の密度にあると考えられるため、今後、より正確な推定ができる方法の開発が課題となる。また、2次元の面的な弾性波速度のトモグラフィー像に対して、本研究で提案した方法を用いて透水係数の推定を行った（図3）。その結果、面的な透水係数の分布を推定することができたが、その誤差を考慮するためには、今後、ボーリング試料からの透水係数との比較などを行い、精度の検証を行う必要がある。

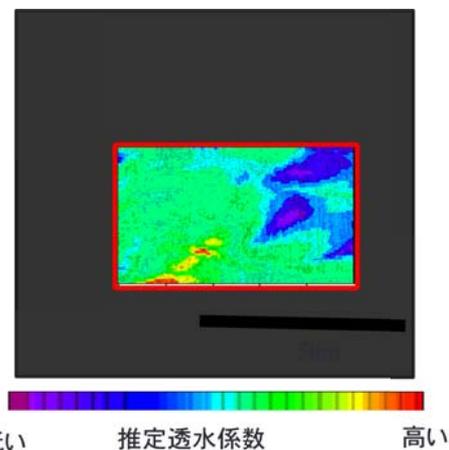


図3 トモグラフィー像への適用による透水係数の空間分布

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① Takemura, T. and Takahashi, M. (2010) Changes in permeability of cracked rock due to rotation of principal stress axes in terms of crack tensor and permeability tensor, *Proceedings of IVth International geomechanics conference*, pp. 331-338
査読有

〔学会発表〕(計2件)

- ① 竹村 貴人，藤井 幸泰，朴 赫，高橋 学，高橋 直樹(2010.10.22) 固結砂岩の堆積構造と力学異方性の関係, 日本応用地質学会平成22年度研究発表会, 島根

(招待講演)

- ① 竹村 貴人, (2009.9.8) 微視的構造から見た地質媒体の透水・力学特性, 日本鉱物科学会, 札幌

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹村 貴人 (TAKEMURA TAKATO)

日本大学・文理学部・講師

研究者番号：03035959

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし