

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 4日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560844

研究課題名（和文） 孔内ストーンリー波のき裂透過係数に現れるオーバーシュートとき裂特性の関係

研究課題名（英文） Overshoot on fracture transmission coefficient of borehole Stoneley wave and fracture characteristics

研究代表者

齊藤 玄敏 (SAITO HIROYUKI)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70264091

研究成果の概要（和文）：孔内ストーンリー波検層において、実フィールドの検層周波数帯域でのき裂透過係数が理論値と異なることに着目し、その原因を理論モデル、シミュレーション、室内実験で検討を行った。その結果、透過係数が理論値から逸脱する主因は、き裂に入射したストーンリー波が孔内に戻るときに、反射波を音源方向に、反射波の位相反転モードを受振器方向に発生させ、後者が透過波と重畳することによるものであることが判明した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we tried to make clear a mechanism of the difference, which was observed between theoretical and measured values in transmission coefficients of borehole Stoneley wave logging. The mechanism was examined by theoretical models, numerical simulation and laboratory experiments. As a result, it was revealed the phase inversion mode of the reflection wave was superimposed on the transmission wave when the Stoneley wave which entered into the fracture returned in the borehole.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,800,000 | 540,000   | 2,340,000 |
| 2010年度 | 1,100,000 | 330,000   | 1,430,000 |
| 2011年度 | 600,000   | 180,000   | 780,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：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：地下き裂計測, 音波検層, 孔内ストーンリー波, 再生可能エネルギー, 地熱

## 1. 研究開始当初の背景

数ある代替エネルギーの中で、利用技術が実利用水準まで確立されている地熱エネルギー資源は、エネルギー賦存量、温室効果ガスの排出量の少なさ、純国産などの観点から、そのさらなる開発が要望されている。特に、天然の条件に依存することなく能動的に地熱エネルギーの抽出を可能にする次世代型地熱開発は、高温乾燥岩体（HDR）や高温湿潤岩体（HWR）を利用するため適用地域が

飛躍的に拡大するとともに抽出可能なエネルギー量が大幅に増大し、また、従来型地熱開発に比べ環境負荷が小さくなるので期待は大きい。

次世代型地熱抽出システムを実現するための重要なステップの一つに固体力学的設計がある。ここでは地下構造と地下き裂が第一支配因子となるが、地下構造が複雑な地熱地帯においても、これらを正確に計測・評価する技術を開発することが重要な課題であ

る。システム造成後においても、地熱貯留層の正確な分布やその内部の微細な構造の把握、地熱貯留層を構成する地下き裂の動的挙動の学術的解明を行うために不可欠な技術となることは言うまでもない。

本研究は、研究代表者が平成 18-19 年度に受けた科学研究費補助金で実施した「周波数領域音波検層法に寄与する孔内モード特定に関する研究」(基盤研究(c))で見いだした現象に着目して、地熱貯留層を構成する地下き裂の性状との関係を明らかにしようとするものである。周波数領域音波検層法は、フルウェーブで記録された音波検層データの各トレースを時間領域から周波数領域に変換することで得られる周波数領域音波検層図を用い、その検層図に現れるピーク周波数の不連続と減衰を利用して、従来の音波検層法では測定が難しい複雑な地下構造下においても、地層境界面や透水性地下き裂の検出と評価を実現する手法である。

本手法をき裂の透水特性の評価へと発展させることを考え、音波検層波形中に観測されるストンリー波の地下き裂における透過係数と反射係数を利用する方法の現状調査を行った。実フィールドにおけるき裂性状評価においては反射係数の利用が主で、き裂の開口幅の評価結果は 10 倍程度過大評価となっている。一方、透過係数の利用はほとんどない。この理由として、透過係数にはストンリー波が卓越する低周波域で雑音の影響が大きく、理論モデルと整合しないことが挙げられている。

## 2. 研究の目的

研究代表者が実フィールドにおけるデータを用いて、き裂を透過したストンリー波の透過係数を調べた結果、(1) 2.3kHz をピークとするオーバーシュートが見られる、(2) オーバーシュートは振動しており、孔口圧の増加(き裂の開口)とともに振幅は大きくなる、(3) オーバーシュートの振幅は周波数が大きくなるにつれて小さくなる、(4) オーバーシュートは 7kHz 以上になると無くなり、透過係数は孔口圧の増加とともに小さくなる、等が判明している。

本研究では、(1)透過係数の低周波領域に現れるオーバーシュートの原因を明らかにする、(2)オーバーシュートの特性とき裂の性状との関係を明らかにする、(3) オーバーシュートの特性を利用するき裂の性状評価法の開発する、ことを目的としている。

## 3. 研究の方法

### (1) き裂モデルの理論的検討

ストンリー波の反射係数と透過係数を理論的に求めている論文の一つに Tang and Cheng (1993)の論文がある。この論文では、

孔内からき裂への流体の流入を仮定し、この流入によるエネルギー損失を基に、反射係数と透過係数を定めている。この仮定は、ストンリー波がき裂に入射した瞬間は問題ないが、入射後少し時間が経過し、き裂に流入した流体が孔内に逆流を始めると成立しなくなる。

本研究では、透過係数に見られるオーバーシュートは、この逆流によってき裂と孔井の交点を波源として、孔の上下方向それぞれに伝搬するモードが新たに発生することが原因と考え、理論モデルに組み入れた。具体的には、反射波の位相反転モードを透過波に重畳させ、透過係数を周波数の関数として求めた。

### (2) 孔内音波検層波形の合成

理論モデルで得られたストンリー波のき裂透過係数を利用して、音波検層波形の合成を行う。これにより、計測波形から抽出可能なき裂の情報の検討を行った。

孔内ストンリー波のき裂近傍における受信波形を合成するには、透過係数を伝達関数として、入力信号との積を求め、これを逆フーリエ変換し、時間領域波形を得た。得られた時間領域の波形に対して、き裂パラメータに対する感度解析を行った。また、波形の解析に必要なアレイ信号処理法である FFT センブランス法と最尤推定法の構築を行った。

### (3) 室内実験システムの構築

孔内ストンリー波の伝搬特性を明確するために、室内実験システムの構築を行い、孔内ストンリー波の室内計測実験を行った。

## 4. 研究成果

### (1) き裂モデル

岩盤-き裂-岩盤の三層構造とし、き裂の厚さを  $L$  とする。このとき、き裂近傍における孔内ストンリー波の反射係数 ( $A'/A$ ) と透過係数 ( $C/A$ ) は次式で与えられる。

$$A'/A = 2i(k_2^2 - k_1^2) \sin(k_2 L) / G \quad (1)$$

$$C/A = 4k_1 k_2 e^{-ik_1 L} / G \quad (2)$$

$$G = (k_1 + k_2)e^{-ik_2 L} - (k_1 - k_2)e^{-ik_1 L} \quad (3)$$

孔内ストンリー波の伝搬特性は波数  $k_1$ 、 $k_2$  によって定まる。波数  $k_1$  は岩盤を剛体と仮定すると次式で表される。

$$k_1 = \omega / V_f \quad (4)$$

ここに、角周波数  $\omega$  は角周波数、水中の音波速度  $V_f$  は水中の音波速度である。また、き裂部の波数  $k_2$  はき裂モデルにより異なり、次式で与えられる。

平行平板き裂モデル：

$$k_2 = \frac{\omega}{V_f} \sqrt{1 - \frac{2 H_1^{(1)}(k_1 R)}{k_1 R H_0^{(1)}(k_1 R)}} \quad (5)$$

多孔質浸透層モデル：

$$k_2 = \left( k_e^2 + \frac{2Ri\rho_f\omega\kappa(\omega)}{(R^2 - a^2)\mu} \cdot \sqrt{\frac{-i\omega K_1(\sqrt{-i\omega/D})}{D K_0(\sqrt{-i\omega/D})}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここに、 $R$ は孔井半径、 $a$ は検層ツールの半径、 $H$ はハンケル関数、 $K$ は第二種変形ベッセル関数、 $D$ は空隙流体の拡散係数、 $\rho_f$ は流体の密度、 $\mu$ は流体の粘性、 $\kappa(\omega)$ は動浸透率である。

反射係数はき裂に流入した流体が孔内に逆流し、き裂と孔井の交点を波源として、孔の上下方向それぞれに伝搬するモードである。このことから、検層ツールの送信器と受振器がき裂を挟む位置にあるときに得られる受信信号には透過波に加えて、反射波の位相反転モードが記録されていると考えられる(図1)。

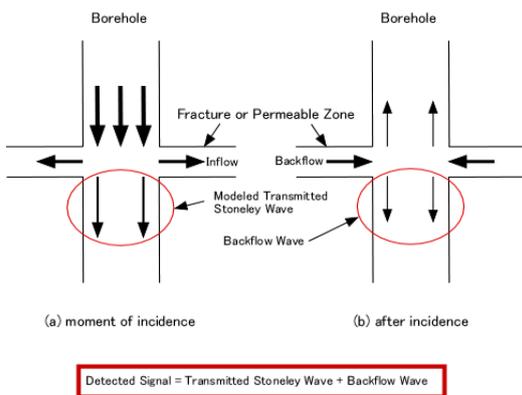


図1: 音波検層ツールで測定しているストーンリー波の信号の概念図

き裂を透過した孔内ストーンリー波として計測した信号に反射波の位相反転モードが含まれていることを平行平板モデルと多孔質浸透層モデルに組み込み、透過係数を求めた。図2は平行平板き裂モデル、図3は多孔質浸透層モデルの結果である。図より、平行平板き裂モデルでは、オーバーシュートは発生するが、振動は起こらない。一方、多孔質浸透層モデルでは、オーバーシュート、振動ともに発生することがわかった。また、振動は、多孔質浸透層の厚さと浸透率に依存し、

浸透率が大きく、平行平板き裂にはほぼ等しくなると振動は消え、平行平板モデルの透過係数に近づくことがわかった。

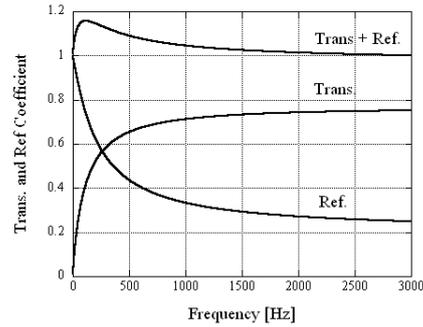


図2: 平行平板き裂モデルによる透過係数

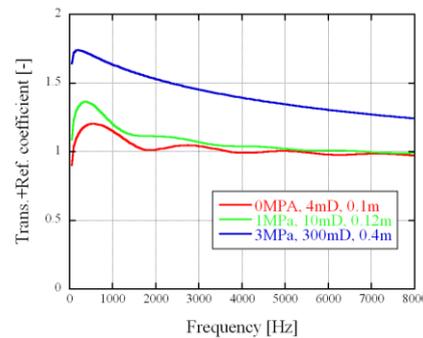


図3: 多孔質浸透層モデルによる透過係数

## (2) 孔内音波検層波形の合成

き裂近傍における孔内ストーンリー波の受信波形を合成するために、き裂の反射係数と透過係数を伝達関数  $H(\omega)$  として、入力信号  $S_{in}(\omega)$  との積  $S_{out}(\omega)$  を求め、これを逆フーリエ変換することで時間領域の波形を求めた。本研究では中心周波数 7kHz のリッカーウェーブレットを入力波形として用い、計算で設定した周波数帯域は 0Hz から中心周波数の 3.5 倍までとした。

図4と図5に合成したストーンリー波の音波検層波形を示す。図4は平行平板き裂モデル、図5は多孔質浸透層モデルで求めた波形である。計算では検層ツールの送受信部間距離を 1.0m とし、き裂面の位置を 0m とし、-1.05m から 2.45m までの範囲を 0.2m 刻みで 19 波形求めた。

図4と図5に共通して、振幅の大きな波が発信部から直接受信部に伝わる孔内ストーンリー波、振幅の小さく上方および下方にムーブアウトする波がき裂によって生じた反射波である。両図ともに実際の音波検層図の傾向を概ね再現できている。ただし、実際の音波検層波形では、き裂を透過した直達ストーンリー波の減衰が大きく反射波の振幅は小さいことから、図5の多孔質浸透層モデルの結

果は実フィールドで得られる音波検層波形を、より忠実に再現している結果といえる。

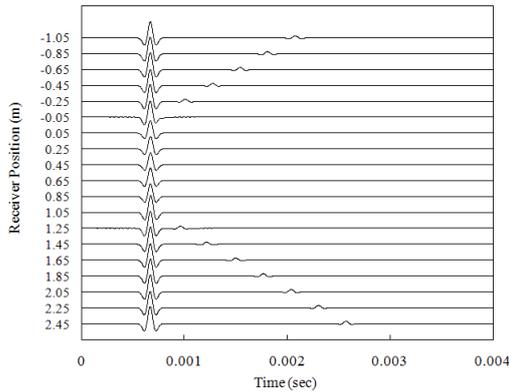


図4：平行平板き裂モデルによる合成ストリー波検層波形

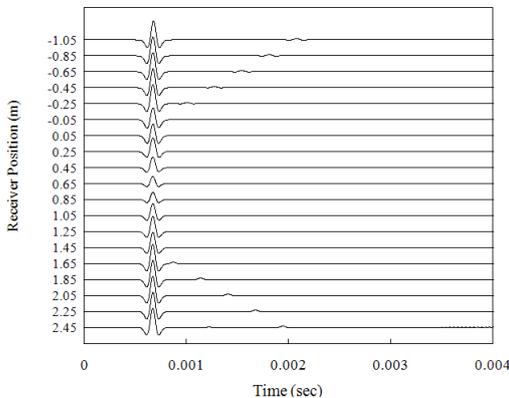


図5：多孔質浸透層モデルによる合成ストリー波検層波形

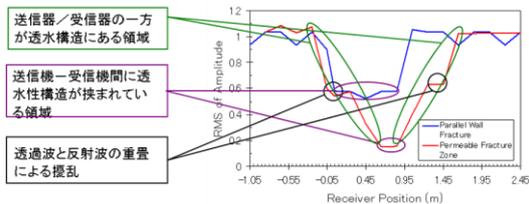


図6：合成ストリー波検層波形の透過波振幅の様子

図6は前述の2つのき裂モデルで得られた合成ストリー波検層波形の透過波振幅を受振器の位置毎に示したものである。図より、き裂モデルに特徴的な減衰分布が生じるので、実フィールドで得られたストリー波の透過波振幅について、これを調べることで適切なき裂モデルの選択が可能になる。

### (3) 室内実験システムの構築

計測システムは音波の送信部、受信部、孔井モデルからなる (Photo.1)。

#### 送信部

方形パルスをファンクションジェネレー

タ (NF社製 NF WF1945) を用いて発生させ、それをパワーアンプ (NF HAS 4012) で増幅し、超音波トランスデューサ (NF AE-900F2-WP-T) で音波に変換して孔井モデルに注入させる。超音波トランスデューサは、Photo.2 のように高真空接着剤で孔との間に隙間ができないように接着した。

#### 受信部

孔井モデルの孔に受信機を挿入する。測定の際、受振器が孔の中心に位置するように以下の材料を用いて芯出し機構を作製した (Photo.4)。受信機はブリュエル・ケアー社製のハイドロフォン 8103 (Photo.3) を使用した。付属の O リングを外径 8.3mm のものに変更し、アルミパイプに対する受信機の据付を安定させるために用いた。

受信機をアルミパイプの中心に位置させるため、Fig.1 に示すようにねじを2箇所取り付けて、その反対方向に鉛を接着剤で貼り付けた。このようにすることで、受信部を面で支えることになり受信機支持の安定化ができる。また、提灯バネを3箇所取り付けるが、バランスを考慮して Fig.2 のように上面から見て120度ずつずらして設置した。

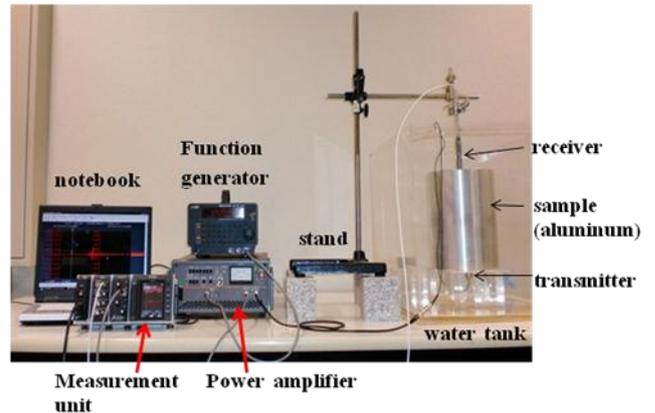


Photo.1：計測システムの概観



Photo.2：送信機



Photo.3：ハイドロフォン

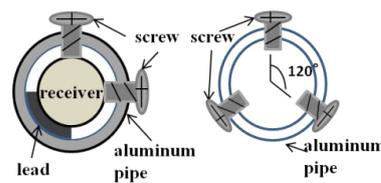


Figure.1：ねじと鉛の配置

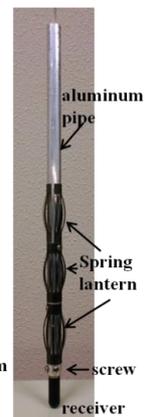


Figure.2：提灯ばねのねじの配置  
Photo.4：受信部

## 孔井モデル

孔井モデルの材料にアルミニウム (P波 : 6420 m/s, S波 : 3040 m/s) を用いて以下の3のモデルを作製した。

モデル1 (Photo.5) : 直径 200mm, 高さ 250mm の円柱である中心に直径 18mm の孔を掘削している。

モデル2 (Photo.6) : モデル1 を平行に上部 150mm, 下部 100mm に分割することで、き裂を模擬している。

モデル3 (Photo.7) : モデル2 のき裂を 15度傾けたモデルである。

モデル2・3 を作製する上で、き裂の開口幅を変更できるように、支柱材を4個用いてき裂の開口幅を調節できるようにした (Photo.8)。支柱材は4種類 (支柱材の高さ 40.0mm, 40.2mm, 40.5mm, 41.0mm) 作製し、支柱材をモデルに固定するため、支柱材1個あたり六角ボルト (M6×25, Photo.9) を2本 (測定に使用するボルトは2本×支柱材4個=計8本) 使用した (Fig.3)。



Photo.5 : モデル1



Photo.6 : モデル2



Photo.7 : モデル3



Photo.8(上) : 支柱材

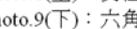


Photo.9(下) : 六角ボルト

孔井モデル1 で得られた測定波形を図7に示す。これらの波形は中間点の高さ (125mm) を基準とし、±80mm の計 160mm を 20mm 間隔で9点測定したものである。図より、測定波形が送信側から離れると到来時間が遅くなり、特に波の低周波成分が遅くなっていくことが確認できる。

測定波形を周波数センプランス法で解析し、孔内ストンリー波の速度推定を行った。速度推定結果を図8に示す。サンプリング周期の都合、測定データに2倍の補間をして表示している。図より、周波数  $f=6.6\text{kHz}$ 、位相速度  $v=1400\text{m/s}$  の時に、センプランス値は最大値になっている。これが孔内ストンリー波の位相速度で、図より、孔内ストンリー波の特徴である速度分散性も確認できる。

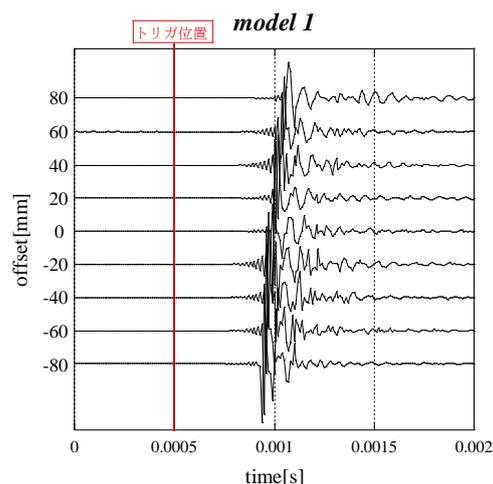


図7: モデル1 で得られた孔内ストンリー波の測定波形

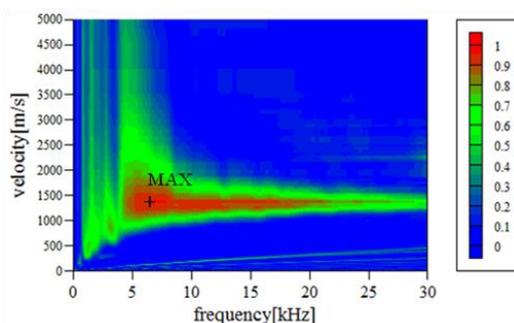


図8: 周波数センプランス法による孔内ストンリー波の速度分散の様子

## (4) まとめ

孔内ストンリー波のき裂透過係数は、周波数が低くなると理論値から逸脱する。これは実フィールドにおけるストンリー波検層の周波数帯域である数 kHz~20kHz に対応する。このために、き裂評価への利用の大きな障害となっていた。

本研究では、実測した透過係数が理論値から逸脱する原因を明らかにし、それにき裂の情報が含まれていることを見いだした。すなわち、原因は反射波の位相反転モードが透過波に重畳していることを示した。

これを本研究で提示した方法で抽出し、評価することで、き裂モデルの推定とき裂の性状評価に結びつけることが可能になる。

本研究の成果は地熱や石油の生産に関わる貯留層制御技術や地熱貯留層挙動の高精度計測に役立つばかりでなく、大規模地下構造物を取りまく岩盤の計測にも役立つことが予想され、音波検層法の汎用性は一層向上すると考える。

## 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3件)

①齊藤玄敏, 孔内ストンリー波のき裂透過特性に現れるオーバーシュートとき裂特性, 平成23年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, 2012, Paper ID III-28 (全2頁).

②船橋文都・齊藤玄敏, 室内実験用孔内ストンリー波計測システムの試作, 平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, 2011, Paper ID III-44 (全2頁).

③齊藤玄敏, 透水性き裂近傍における孔内ストンリー波検層波形の合成, 平成21年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 査読無, CD-ROM, 2010, Paper ID III-57 (全2頁).

〔学会発表〕(計3件)

①齊藤玄敏, 孔内ストンリー波のき裂透過特性に現れるオーバーシュートとき裂特性, 平成23年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2012年3月3日, 秋田大学.

②船橋文都・齊藤玄敏, 室内実験用孔内ストンリー波計測システムの試作, 平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2011年3月5日, 東北工業大学.

③齊藤玄敏, 透水性き裂近傍における孔内ストンリー波検層波形の合成, 平成21年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2010年3月6日, 日本大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齊藤 玄敏 (SAITO HIROYUKI)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 70264091