

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

弘前大学・正会員 齊藤玄敏

1. はじめに

地下の岩盤中に存在するき裂の調査法の一つに孔井で行う音波検層がある。音波検層は検層ツールをワイヤーラインで孔内に降下し、検層ツールの発信部より発せられ、孔井周りの岩盤を伝搬した音波を受信部で受信する。その記録波形を基に音波の伝搬特性をもとめ、孔井周りの岩盤特性を評価する。特に検層波形に含まれる孔内ストンリー波は透水性き裂の検出に有望視されており、これまで種々のき裂モデルに対して伝搬特性が理論的に求められている。

本研究では、ストンリー波を用いて現場に存在するき裂の特性を評価するにあたり、2種類のき裂モデルでストンリー波のサイズモグラムを合成し、適合するき裂モデルを同定するための指針を与えることを目的としている。

2. 現場のき裂近傍における孔内ストンリー波の特徴

地下 358.6m に存在するき裂近傍で行った音波検層の結果を図 1 に示す。図は各深度で得られた波形の振幅を濃淡表示したもので、ストンリー波の反射波を強調するために平均波形を原波形から差し引いている。図(a)は孔井を加圧していない状態、図(b)は 3MPa で加圧した状態の結果である。図(a)と(b)の双方で、358.6m と 359.6m の 1ms 付近から上方にムーブアウトする反射波と下方にムーブアウトする反射波が見られる。ただし、これらの振幅は非常に小さく、ストンリー波の直達波に対する振幅比は、図(a)で 0.015、図(b)で 0.022 である。

図 2 に 359.0m における直達ストンリー波の振幅の周波数特性を示す。この深度では検層ツールの発信部と受信部間にき裂が存在するので、図はき裂を透過したストンリー波の透過率を表すことになる。透過率は 0-6kHz の間で上下に振れつつ増加し、6-9kHz の間では約 0.9 で安定している。

3. き裂モデルとストンリー波の伝搬特性

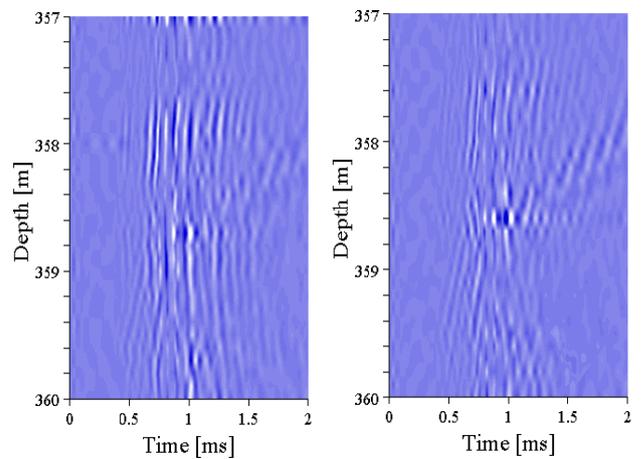
図 3 にき裂近傍の孔井モデルを示す。モデルは岩盤—き裂—岩盤の三層構造になっており、斜線部が厚さ L のき裂を表す。

孔内ストンリー波の伝搬を 1 次元で近似できるもの

キーワード：音波検層、孔内ストンリー波、透水性き裂

連絡先： 弘前大学大学院理工学研究科

弘前市文京町 3, E-mail: saitoh@cc.hirosaki-u.ac.jp



(a) 無加圧 (b) 孔口圧 3MPa

図 1 透水性き裂近傍の音波検層図 (反射波)

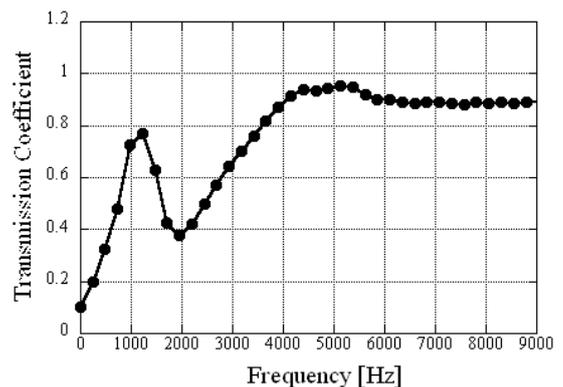


図 2 孔内ストンリー波のき裂透過係数

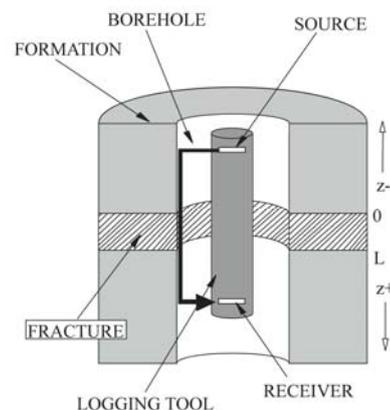


図 3 き裂近傍の孔井モデル

と仮定し、岩盤部とき裂部におけるストンリー波の波数を各々 k_1 、 k_2 とした場合、波動方程式の解は次のように表すことができる。

$$\psi = Ae^{ik_1z} + A'e^{-ik_1z}, z < 0 \quad (1)$$

$$\psi = Be^{ik_2z} + B'e^{-ik_2z}, 0 < z < L \quad (2)$$

$$\psi = Ce^{ik_1z}, z > L \quad (3)$$

式(1)-(3)に、 $z=0$ と $z=L$ における圧力と変位を連続とする境界条件を付与することで、次式の様に各係数を定めることができる。

$$A'/A = 2i(k_2^2 - k_1^2) \sin(k_2L)/G \quad (4)$$

$$B/A = 2k_1(k_1 + k_2)e^{-ik_2L}/G \quad (5)$$

$$B'/A = 2k_1(k_2 - k_1)e^{ik_2L}/G \quad (6)$$

$$C/A = 4k_1k_2e^{-ik_1L}/G \quad (7)$$

$$G = (k_1 + k_2)e^{-ik_2L} - (k_1 - k_2)e^{-ik_1L} \quad (8)$$

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。

$$k_1 = \omega/V_f \quad (9)$$

ここに、角周波数 ω 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、次式の様に与えられる。

平板き裂モデル：

$$k_2 = \frac{\omega}{V_f} \sqrt{1 - \frac{2H_1^{(1)}(k_1R)}{k_1RH_0^{(1)}(k_1R)}} \quad (10)$$

多孔質浸透層モデル：

$$k_2 = \sqrt{k_e^2 + \frac{2Ri\rho_f\omega\kappa(\omega)}{(R^2 - a^2)\mu} \sqrt{\frac{-i\omega}{D} \frac{K_1(\sqrt{-i\omega/D})}{K_0(\sqrt{-i\omega/D})}}} \quad (11)$$

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、 ρ_f は流体の密度、 μ は流体の粘性、 $\kappa(\omega)$ は動浸透率である。

4. サイズモグラムの合成

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、式(1)-(3)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る。

本研究では中心周波数 7kHz のリック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。

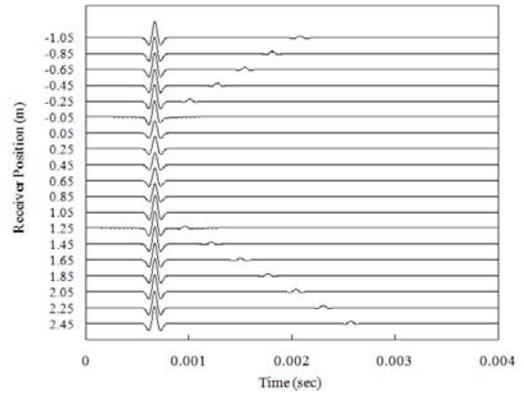
図 4 に合成したサイズモグラムの示す。図(a)は平板き裂モデル、図(b)は多孔質浸透層モデルによるサイズモグラムである。計算では検層ツールの送受信部間距離を 1.0m とし、き裂面の位置を 0m とし、-1.05m から 2.45m までの範囲を 0.2m 刻みで 19 波形求めた。

図(a)、(b)の両図において、振幅の大きな波が発信部

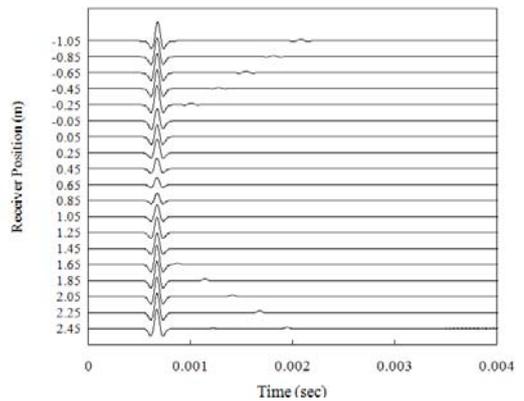
から直接受信部に伝わる孔内ストンリー波、振幅の小さく上方および下方にムーブアウトする波がき裂によって生じた反射波である。両図ともに図 1 に示した音波検層図の傾向を概ね再現できている。ただし、実際の音波検層波形では、き裂を透過した直達ストンリー波の減衰が大きく反射波の振幅は小さい。これを考慮すると図(b)は実際の現象に矛盾しないが、図(a)は矛盾を生じる。

5. 結言

本研究では、ストンリー波を用いて現場に存在するき裂の特性を評価するにあたり、2 種類のき裂モデルでストンリー波のサイズモグラムの合成し、本研究で対象とするき裂の場合は多孔質浸透層モデルが適切であるという指針を得た。今後はこのモデルを用いき裂の特性を評価していく予定である。



(a) 平板き裂モデル



(b) 多孔質浸透層モデル

図 4 合成したサイズモグラム

参考文献

- (1) X. M. Tang and C. H. Cheng, Borehole Stoneley Wave Propagation Across Permeable Structures, *Geophysical Prospecting*, Vol.41, pp.165-187, (1993).
- (2) H. Saito et al., Detection of formation boundaries and permeable fracture based on frequency-domain Stoneley wave logs, *Exploration Geophysics*, Vol.35, pp.45-50, (2004).