

### (37) フルウェーブ音波検層の波形振幅と割れ目系岩盤の透水係数

動力炉・核燃料開発事業団 青山成夫  
日鉄鉱業株式会社 長 久  
清水建設株式会社 福田和寛  
応用地質株式会社 ○寺田幸次

#### Relationship between Waveforms of an acoustic logging and Permeability in Fissured Rock

Shigeo AOYAMA Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Corporation  
Hisashi CHO Nittetsu Mining Co., Ltd.  
Kazuhiro FUKUDA Shimizu Corporation  
Koji TERADA Oyo Corporation

#### Abstract

In a borehole at fissured rock, we carried out a full waveform acoustic logging and permeability tests. From these results, we have studied the relationships between permeability and amplitude ratio of P-wave or S-wave which are detected at two receivers. These relationships show especially that amplitude ratio of P-wave correlates strongly to permeability. We discussed that P-wave attenuation resulting from movement of fluid in fissures is probable. And examined a model which agrees with experimental results.

#### 1. はじめに

フルウェーブ音波検層は受信波形を全波形収録する音波検層で、受信波形のもつ情報（伝播時間、振幅、周波数等）を用いて地層の物性を把握しようとするものである。波形収録をしない従来の音波検層と比べ速度決定の精度がよい等様々な利点がある他、新しい適用に対して多くの可能性がある。今回、我々は割れ目系岩盤でのボーリング孔においてフルウェーブ音波検層と透水試験を実施した。その結果、音波波形の振幅比と透水係数とは比較的良好な関係がみられたので、これらの紹介と結果に対する考察を行う。

#### 2. フルウェーブ音波検層の概要

測定系の概要を図-1に示す。測定系はゾンデ、ウィンチ、測定器（地上制御装置）、デジタル収録装置からなる。ゾンデは直径54mm長さ4.8mで、1つの発信器と2つの受信器からなる。発信信号の中心周波数は15kHzである。

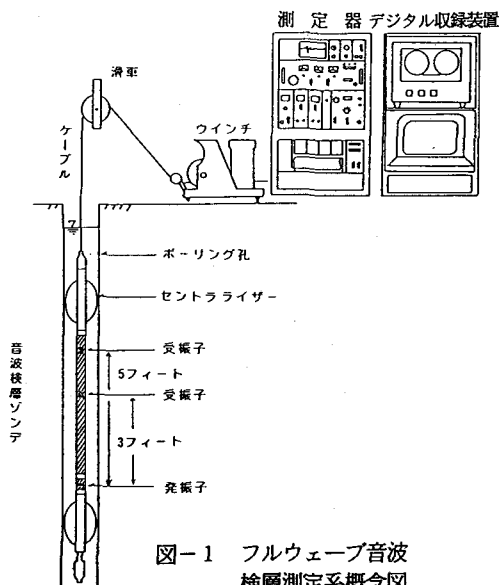


図-1 フルウェーブ音波検層測定系概念図

A/D コンバータのサンプリング周波数は128kHzでサンプル数は通常 1 波形当たり 512 ポイントとしている。磁気テープにはPE (位相変調) 方式でアスキーコードで記録され、1 巻 (1200ft長) 当り約4000波形、すなわち2000深度分の波形データを収録できる。フルウェーブ音波検層によって得られる情報としては、P波速度、S波速度 (ただし、 $V_s > 1500\text{m/sec}$ ) の他、様々な表示方法 (バリアブルデンシティ表示、HLS変調によるカラー表示等) を使った全波形の画像表示がある。これは、層相変化やフラクチャーゾーンなどを視覚的に認識できる点で有利である (寺田他、1988)。

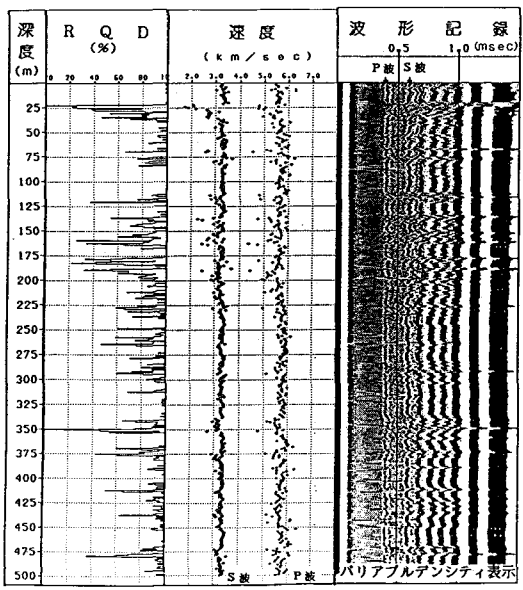


図-2 調査孔の岩盤状況

### 3. P波、S波振幅と透水係数の比較

調査孔周辺の岩石は花崗岩から構成されており、その岩盤状況は図-2に示すように大部分が RQDで80以上、P波速度で約 5.6km/sec、S波速度で約 3.2km/secの値をもつ新鮮な岩盤である。地質観察他から岩質は全深度にわたりほとんど差異がなく硬質で、割れ目沿いの風化・変質は無視しうる程度であり、岩盤状況を左右する要素は割れ目状況のみと見なせることが判っている。このボーリング孔で得られた音波検層の1例を図-3に示す。P波、S波が明瞭に現われている。ここで言うS波は、発信器から発せられたP波が孔壁面でS波に変換され岩盤を屈折波として伝播し、再び受信器近傍の孔壁でP波に変換され受信されたものである。このようにして得られた2受信器の波形からP波、S波の初動部分の振幅を読み取り、2受信器間の振幅比を求めた。一方、透水試験はJFT法により原則として試験区間を10 mとして行った。

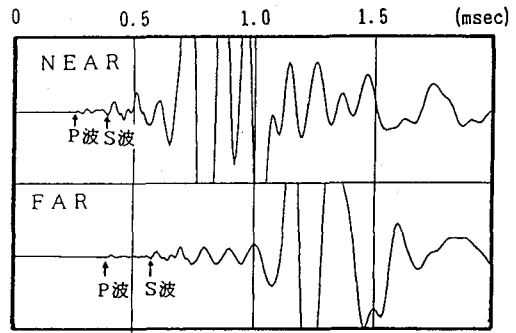


図-3 音波波形例

図-4に透水係数とその試験区間の振幅比の平均値との関係を示す。P波の場合は透水係数と振幅比との間にかなり明瞭な相関がみられるが、S波の場合はその傾向は顕著でない。今回は透水係数とよい関係を示すP波振幅について章をかえ考察する。

なお、図-4中に示す回帰直線を用いてP波振幅比から各測定深度の透水係数を算出し、実測の透水係数を併記して図-5に示す。この図は透水係数が $10^{-7} \sim 10^{-3}\text{cm/sec}$ の範囲においては、P波振幅比からおよその透水係数を推定できることを示している。少くとも、透水試験の実施深度を決定する判断資料として、あるいは透水試験の実施区間以外の岩盤の透水性を評価する際の基礎資料として役に立つものと思われる。

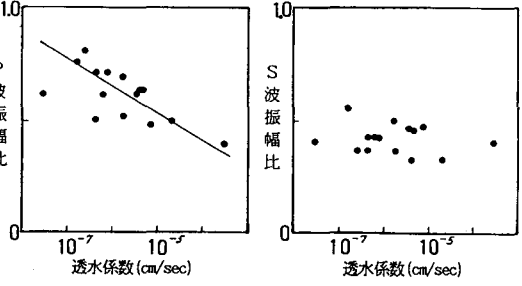


図-4 透水係数と振幅比の関係

なお、深度75m 付近の実測と一致しない区間は、他の実施区間と比べ垂直に近い割れ目が比較的発達しており、実測と推定の値が一致しない原因と関係があるのかも知れない。

#### 4. 考 察

P 波の振幅比と岩盤の透水係数との間になんらかの関係が成立するとした場合、その原因にはつぎの2つが考えられる。

- 1) 音波に対して、割れ目部分が岩盤とは音響インピーダンスを異にする薄層として作用し、音波が反射・透過現象の結果減衰する。
- 2) 音波の到来により割れ目を満たす地下水が移動し音波が減衰する。

##### 4-1. 薄層の挟在による音波の減衰効果

無限媒質（密度  $\rho_0$  , 速度  $V_0$  .）中に薄層（密度  $\rho_1$  , 速度  $V_1$  .）がある場合、これに垂直に音波が入射し前方の無限媒質に透過する場合の透過率  $T$  は次式で与えられる（超音波技術便覧、1978）。

$$T = \frac{4}{4 \cos^2 \frac{2 \pi d}{\lambda} + \left( \frac{\rho_1 V_1}{\rho_0 V_0} + \frac{\rho_0 V_0}{\rho_1 V_1} \right)^2 \cdot \sin^2 \frac{2 \pi d}{\lambda}}$$

ただし  $d$  : 薄層の厚さ、 $\lambda$  : 薄層中の波長

ここで薄層の媒質が水であることを考えると、音波検層の周波数帯域では  $\lambda \approx 28\text{cm}$  となり  $d = 0.1\text{cm}$  としても  $T \approx 1$  とみなすことができる。従って、薄層があっても音波は減衰しないことになる。しかし、薄層が密集する場合は多くの境界面からの反射・透過の波が重り合うため音波波形は影響を受ける可能性がある。この問題はコミュニケーション法 (Ganley, 1981) などによって理論波形を合成し、密集の程度による影響の有無を確かめることができる。ただし、音波波形の初動部分を対象とする限り、大ざっぱには初動波形に反射波が重ならない程度に薄層と薄層の距離が離れていれば、初動振幅に影響はない。この距離を今回のケースで試算すると、P 波速度 5.6km/sec、周波数20kHz として約7cm となる。今回測定した岩盤の割れ目間隔はこれより大きく、割れ目の密集による影響はないものと考えられる。

以上の検討は、水平な割れ目に垂直に入射する音波を想定した場合であり、傾斜した割れ目になると問題が複雑になる。しかし、割れ目の間隙幅が今回想定されるように非常に小さい場合は反射エネルギーそのものが小さくなり、極端なケース以外は傾斜の効果は無視できると考えられる。こうしたことから今回のケースに限れば、上にあげた1)の効果は考えにくい。

##### 4-2. 割れ目内の地下水の移動効果

粒状媒質については Biot (1956a, 1956b) の研究がある。彼は、粒子の作るフレーム内を流体が満たす場合、周波数によってフレームと流体が個別な動き方をするため、流体の移動が抗力となって P 波を減衰させる機構を数学的に解いた。その後、このBiotモデルは実測データによる検証がなされ、適合できる媒質に対し、地下水の動き、すなわち透水係数と P 波減衰の関係が説明できることが明らかにされている (Stoll et al, 1970 )。

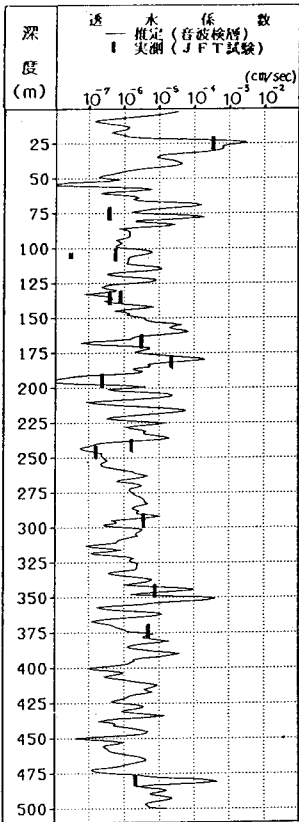


図-5 実測と推定した透水係数の対比

ちなみに、岩盤においてBiotモデルが適用できるとして、2、3の地盤モデルについて必要なパラメータを与え地盤の透水性に起因するP波の減衰量(Q値)をSmitら(1961)の式を使って求めると表-1のようになる。土質地盤の場合はStollら(1970)の報告と矛盾しないが、割れ目系岩盤の場合は今回の測定結果を説明できない。一方、割れ目系岩盤におけるP波減衰についてはO'Connellら(1977)がPenny-typeの割れ目について理論的検討を行っている。彼らのモデルは圧力的に密な状態の割れ目から粗な状態の割れ目へと水が割れ目間を相互に移動すると考え、系の外部には水の出入りがないものとして構成されている。彼らの試算では今回の事例で $10^{-5}$ cm/secの透水係数の岩盤に相当すると考えられる割れ目密度においてQ値が300程度となっている。これらも我々の測定結果を説明できるオーダーではない。

以上、2つのケースについて考察した。1)の原因は一般論としてはあり得るケースであるが、今回測定した岩盤の割れ目状況に対しては、主たる原因とは考えにくい。2)の原因については既存の文献で地盤をモデル化し理論的解釈が行われているが、量的に今回の測定結果を説明できるものではない。著者らは2)の原因に基づいて、もっと別なモデルによって将来説明できるものと考えている。その1例を図-6に示す。割れ目に音波(正弦波)が入射すると、ボーリング孔から半径方向に流体を押し出すように割れ目面が変位する。水を押し出す、いわばポンプのエネルギー源として音波エネルギーの一部が消費されると考えることができる。

## 5. あとがき

フルウェーブ音波検層は、原位置の透水試験に比べはるかに簡便かつ経済的な手法である。今回の測定事例および考察によって、この手法が割れ目系岩盤の透水性評価に適用できる可能性のあることが判かった。音波波形の減衰には、岩石が本来もつ非弾性的性質に起因する内部摩擦の効果も含まれているが、今回のように硬質な岩盤においては、それらの効果は無視できると考えられる。今後、理論的な解釈を進め、さらに事例を重ね適用範囲や有効性を確かめて行きたい。なお、本研究は動力炉・核燃料開発事業団が現在釜石鉱山において実施している原位置試験の成果の一部をとりまとめたものであることを付記する。

表-1 地盤の諸パラメータとBIOTモデルによるQ値算出結果

| 想定地盤        | 割れ目系岩盤    |           | 土質地盤      |           |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 透水係数 cm/sec | $10^{-6}$ | $10^{-4}$ | $10^{-3}$ | $10^{-2}$ |
| P波速度 m/sec  | 5000      | 3000      | 1600      | 1600      |
| S波速度 m/sec  | 2600      | 1500      | 400       | 400       |
| 孔隙率 %       | 1         | 10        | 50        | 50        |
| 周波数 Hz      | 20*       | 10*       | 5*        | 5*        |
| 算出Q値        | 7500      | 290       | 100       | 14        |
| 振幅比         | 0.999     | 0.980     | 0.939     | 0.648     |

注1) その他の共通する地盤のパラメータとして、粒子密度  $2.7\text{g/cm}^3$ 、粒子の体積弾性率  $6.2 \times 10^{11}\text{dyn/cm}^2$ 、流体の粘性係数  $1.16 \times 10^{-2}\text{dyn}\cdot\text{sec/cm}^2$ を与えた。

注2) 周波数はフルウェーブ音波検層で得られる受信波形の卓越周波数。

注3) Q値を、この発表で減衰を表わす量として用いた振幅比に換算した。ただし、波面の幾何減衰は考慮していない。

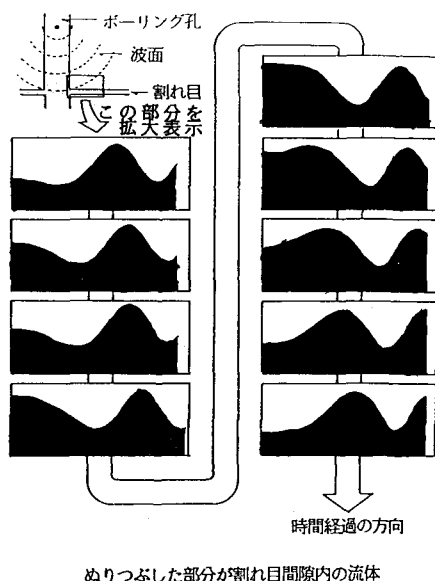


図-6 模式的に表わした割れ目面の  
変位分布と時間的变化

参考文献

寺田幸次、今村杉夫、東宏幸、「フルウェーブ音波検層の2、3の事例と有効性」物探学会、第79回学術講演会講演論文集、154-158、1988、10月。

「超音波技術便覧」、日刊工業新聞、75、1978。

Biot, M. A., "Theory of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range," J. Acoust. Soc. Am., 28, 168-178, 1956a.

Biot, M. A., "Theory of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range," J. Acoust. Soc. Am., 28, 179-191, 1956b.

D. C. Ganley, "A Method for Calculating Synthetic Seismograms which Include the Effects of Absorption and Dispersion," Geophysics, Vol. 46, No. 8, 1100-1107, 1981.

Geertsma, J., and D. C. Smit, "Some Aspects of Elastic wave Propagation in Fluid-Saturated Porous Solids," Geophysics, 26, 169-181, 1961.

R. J. O'Connell, and B. Budiansky, "Viscoelastic Properties of Fluid-Saturated Cracked Solids," J. Geophysical Res., 82, 5719-5735, 1977.

Stoll, R. D., and G. M. Bryan, "Wave attenuation in saturated Sediments," J. Acoust. Soc. Am., 47, 1440-1447, 1970.