

(36) 連続波を用いた岩石の音響異方性の測定

電力中央研究所 正会員 新 孝一

Acoustic Anisotropy Measurement of Rock Specimens by Sinusoidal Wave

Koichi SHIN, Central Research Institute
of Electric Power Industry

Abstract

Rocks are almost always anisotropic media and that is found in strength, deformability, thermal properties, etc. Elastic wave is affected by the anisotropy and propagate at different velocity and different attenuation. So elastic wave has been used to investigate the anisotropy of rocks, usually by pulse wave.

In this paper, acoustic anisotropy of rocks was measured by using the sinusoidal wave, reading the phase deterioration and attenuation.

Firstly, the method and correction procedure in order to eliminate the sensor's characteristics, were described. After the correction, acoustic velocity and attenuation characteristics of specimen itself can be procured. Simulation has affirmed that velocities can be independently measured even when some waves are mixed.

Secondly, the sinusoidal wave method was applied to acrylic bar together with the pulse wave method, using 1MHz and 0.5MHz shear wave sensors. The sinusoidal wave method gave consistent S-wave velocities for both sensors, and that was about 1 percent larger than that by pulse method. Also amplitude ratio of transmitted and received wave was obtained as a function of frequency. It was reasonable because higher frequency gave more attenuation.

Thirdly, three types of rock specimens, schist, andesite and granite, were tested, and the anisotropy was depicted from the view of velocity and attenuation. The velocity anisotropy of schist and andesite were in good agreement with their layers. Velocity data of granite also showed that it might have a layered structure. Although attenuation characteristic of granite did not show anisotropy, those of schist and andesite showed distinctive anisotropic characteristics.

1 はじめに

岩石には程度の差こそあれほとんどの場合に異方性があり、これが強度などの力学特性や熱的特性などの異方性となってあらわれる。弾性波は材料の異方性を測定するには適したものの一つであり、岩石でも多く用いられている。通常はパルス透過法を用いることが多いが、本報告では連続した正弦波状のS波を主に用いて岩石の異方性を、弾性波速度と減衰の観点から測定した試みについて述べる。

2 連続波を用いた速度・減衰特性の測定方法について

2.1 測定方法

ふたつのセンサーの間に試料をはさみ、一方のセンサーから正弦波を連続して発振して、発振波形に対する受振波形の位相差 ϕ と振幅比 B/A を測定する。

発振波を

$$Y = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

とすれば受振波は弾性波の速度を v 、伝播距離を l として次式で表わされる。

$$Y = B \sin(\omega t - \phi) \quad (2)$$

$$\text{但し } \phi = 2\pi f \cdot l / v \quad (2)$$

発振周波数を少しずつ変えながらこの測定を行なえば、周波数 f と位相差 ϕ の関係が求められる。なお、単一周波数では位相差 ϕ は $(0, 2\pi)$ の範囲でしか得られないが、周波数を漸増したとき ϕ も連続に変化するように 2π の整数倍をたして調整する。このようにすれば、周波数 f に対する位相差 ϕ と振幅比 B/A の変化のグラフが図-1のように得られる。実際には、試料をはさまず発・受振のセンサーを密着して測定してもセンサーに固有の $f-\phi$ 、 $f-(B/A)$ 特性があるのであらかじめこれを求めておき、位相差 ϕ においては減算で、振幅比 B/A においては除算で較正する。即ち、試料をはさんだときの位相差からはさまないときの位相差を引けば弾性波が試料内を伝播することのみによる位相差 ϕ が求められる。また、試料をはさんだときの振幅比をセンサーだけのときの振幅比で割れば、センサーの共振特性に関係なく試料の弾性波透過率 C が求められる。

このようにして得た $f-\phi$ 曲線の勾配は $2\pi \cdot l / v$ であるから、弾性波速度を計算することができる。また、 f -透過率 C 曲線が得られ、試料の弾性波透過率が周波数との関係として得られる(図-2)。

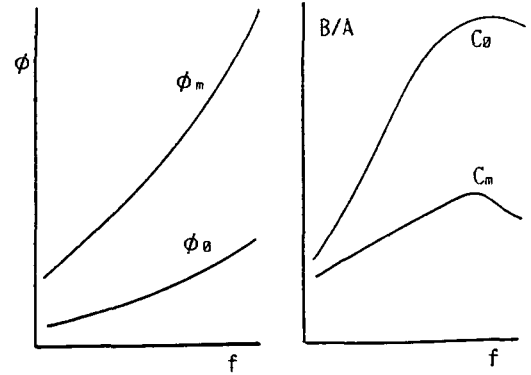


図-1 試料を挟んだ時(m)とない時(0)の $f-\phi$ 、 $f-(B/A)$ 線 概念図

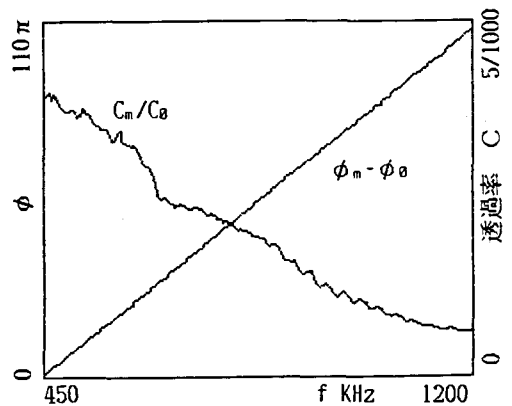


図-2 アクリル棒での $f-\phi$, C 線図(較正後)

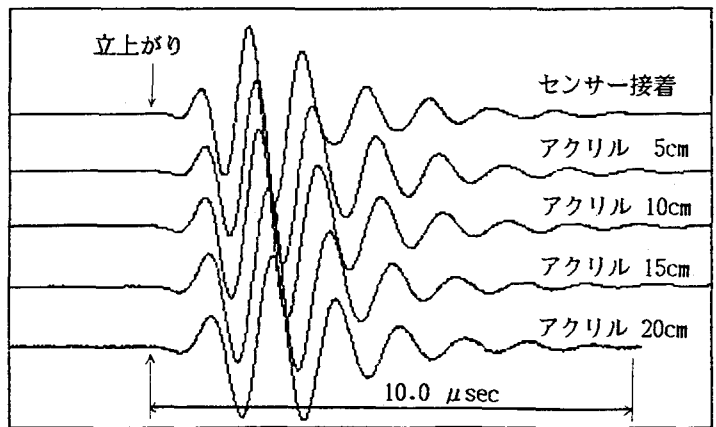


図-3 アクリル棒のS波パルス受振波形

2.2 パルス透過法との比較(アクリル棒を用いて)

直径4 cm、長さ10 cmの円柱状アクリル棒と、中心周波数1 MHzの横波センサーを用いて、パルス透過法と連続波を用いる方法の両方で測定を行ない比較した。また、パルス透過法では長さ5、15、20 cmのアクリル棒も使い、連続波では中心周波数0.5 MHzの横波センサーも用いた。図-3にアクリル棒のS波パルス受振波形

リル棒がない場合とある場合での受振波形を立ち上がり時点を合わせて示し、表-1に波形の立ち上がりから求めた各アクリル棒のパルス伝播時間、速度を示す。なお、アクリル棒の端面間を伝わる横波の分離は、全く認められなかった。

連続波は450KHZから1200KHZまで5KHZ刻みで変えて測定した。前節のようにして較正した周波数fと位相差φ、透過率Cの関係が図-2である。

1MHZのセンサーで得た速度は1415m/sec,

0.5MHZのセンサーでは1418m/secであり、両者はよく一致している。また、パルス透過法から得た1400m/secと比べて約1パーセント大きい値となっている。透過率Cは周波数fの増加に伴って減少する様子が明瞭である。

2.3 数値シミュレーション

連続波を用いて弾性波速度を求める場合、分極したふたつの横波や縦波の相互影響が懸念されたので、速度の異なるふたつの波が異なる振幅で重畳される場合を想定してシミュレーションを行なった。速度v₁の波とv₂の波が重畳されると次式のかたち合成される。

$$Y = A_1 \sin(\omega t - \phi_1) + A_2 \sin(\omega t - \phi_2) \\ = A_3 \sin(\omega t - \phi_3)$$

但し、 $\phi_i = \omega l / v_i$

$$A_3 = \sqrt{(A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2)^2 + (A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2)^2} \quad (4)$$

$$\tan \phi_3 = \frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2} \quad (5)$$

この式から v₁=3000m/sec, v₂=4000m/secとして混合比(A₁とA₂の比)を変えてf-φ₃曲線をシミュレーションした結果を図-4に示す。これからわかるようにf-φ₃線の大局的な勾配は、A₁とA₂の大きい方の速度によって決まり、A₁とA₂がほぼ等しいとき以外は中途半端な勾配をとることはない。

表-1 パルス法によるアクリルの横波伝播速度

長さcm	伝播時間μsec	伝播速度m/sec
20	142.90	1400
15	107.08	1401
10	71.31	1402
5	35.76	1398
-	-	平均 1400

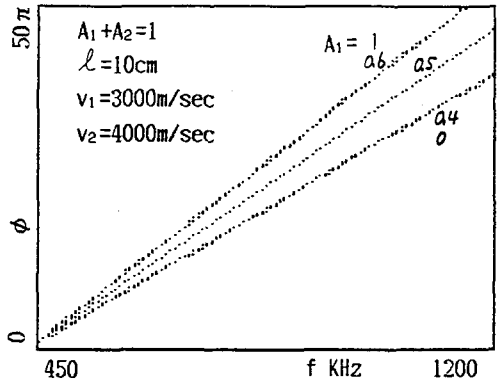


図-4 重畳した連続波のf-φシミュレーション

表-2 各岩石の弾性波速度

岩石	伝播方向	P m/sec	振動方向	S m/sec
片岩 2.77 g/cm ³	層内 X	5992	層内	3677
			法線	2632
安山岩 2.19 g/cm ³	層内 X	3608	層内	2204
			法線	1907
	法線30度	3422	層内	2162
花崗岩 2.66 g/cm ³	Y	4298	X	2886
			Z	2685
	Z	3740	X	2717
			Y	2680

3 岩石試料での測定

用いた試料は、片岩、安山岩(三城目)、細粒花崗岩である。概略の試料形状と層構造の向きを図-5に示す。各試料についてS波の伝播特性を1MHZのセンサーを用いて600KHZから1200KHZ(安山岩では1000KHZ)までの周波数で5KHZ刻みで調べた。表-2にS波速度をパルス法で求めたP波速度とともに示す。

片岩では、片理に平行な伝播方向（X）をとり、振動方向が片理に平行ならびに垂直の向きで、測定した。このときの周波数 f と位相差 ϕ 、透過率 C の関係を図-6 に示す。 $f-\phi$ の勾配に最小自乗法を適用して S 波速度を求めると、片理に垂直に振動する波は平行に振動する波よりも 1000m/sec ほど小さく、また、透過率も一桁ほど小さい。ちなみに 2MHz の中心周波数のセンサーを用いてパルス透過法で求めた P 波速度は片理に平行な方向に対して 5992m/sec であり、垂直な方向に対しては減衰が大きすぎて測定できなかった。

安山岩では、流理面に平行（X）ならびに流理面法線から 30° 傾いた伝播方向（Z）をとり測定した。流理面に平行に伝播する場合、振動面が流理面に平行な場合の S 波速度は垂直な場合より 300m/sec ほど大きかった。一方、流理面法線から 30° の方向（Z）に伝播する場合は、分極したふたつの S 波の速度差は 30m/sec ほどしかなかった。減衰の特性は、伝播方向が同じなら大きな差がなかったので、図-7 に異なる伝播方向での比較を示す。図からわかる通り、流理面に平行に伝播する場合には $f-C$ 線に 900KHz 付近以上で不整が見られた。なお、P 波速度は流理面に平行ならびに法線から 30° 度傾いて伝播するとき 190m/sec ほどの速度差があった。

細粒花崗岩の場合、層構造は肉眼で識別できないが、直交する X, Y, Z の 3 方向のうち Z 方向の P 波速度が他より 600m/sec ほど小さかった。S 波は、Z 方向に伝播する場合速度差が小さく 40m/sec 、Y 方向に伝播する場合に最も分極が大きく 200m/sec の速度差があった。

また、減衰特性は方向によってほとんど変わらなかった。この一例を図-8 に示す。

さて一般には、十分な数の伝播方向をとって弾性波速度や振動方向の測定を行えば剛性マトリクスの最大 21 個の係数が得られるが、ここでは安山岩の 2 方向の測定から、面内等方弾性を仮定して、5 個の係数 $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}, C_{44}$ 、

を求めることにした。但し、剛性マトリクスは工学歪で定義し、 $C_{23}=C_{13}, C_{22}=C_{11}, C_{55}=C_{44}, C_{66}=(C_{11}-C_{12})/2$ で対称であり他の成分は 0 である。面内等方弾性体中を等方面の法線から θ 傾いた $(0, \sin \theta, \cos \theta)$ 方向に伝播する平面波の速度 v は次のマトリクスの固有値が ρv^2 ということから求められる。 ρ は媒質の密度である。

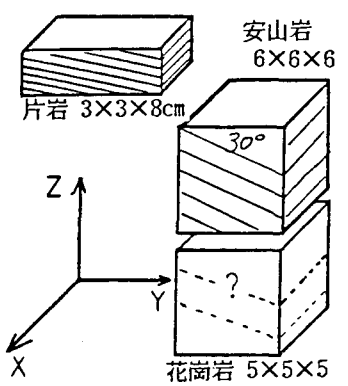


図-5 試料形状と層の向き

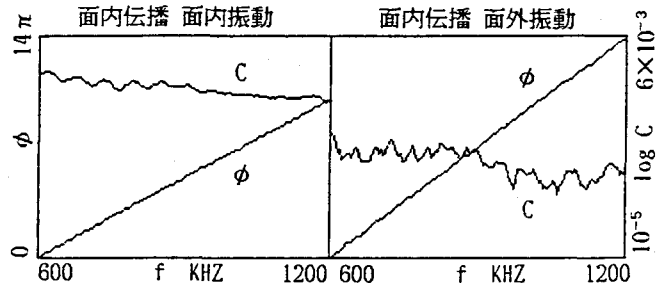


図-6 片岩の S 波の $f-\phi, f-C$ 線図

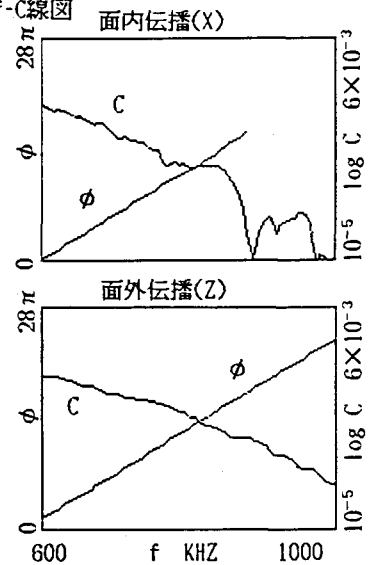


図-7 安山岩の $f-\phi, f-C$ 線図

図-8 花崗岩の $f-\phi, f-C$ 線図

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \sin^2 \theta \frac{C_{11}-C_{12}}{2} + \cos^2 \theta C_{44} & 0 & 0 \\ (SYM) & \sin^2 \theta C_{11} + \cos^2 \theta C_{44} & \sin \theta \cos \theta (C_{13}+C_{44}) \\ & \sin^2 \theta C_{44} + \cos^2 \theta C_{33} & \end{bmatrix} \quad (6)$$

得られた剛性マトリックスの係数を表一3に示す。

表一3 三城目安山岩の剛性マトリックスの係数
($\times 10^{10}$ N/m²)

2.85	0.72	0.65	0	0	0
	2.85	0.65	0	0	0
		2.74	0	0	0
			0.80	0	0
Sym				0.80	0
					1.07

4 まとめ

本報告では主に連続した正弦波状のS波を用いて岩石の音響異方性を測定する試みについて述べた。パルス透過法と比べた連続波を用いる方法の特徴ならびに測定結果は以下の通りであった。

- 1) パルス透過法では試料がない場合の受振波形と試料をはさんだ場合の受振波形から伝播時間を求めたが、波形の立ち上がり時刻は読みとりにくい。また、両波形の相互相関係数のピークを読むことも、両波形が相似でないことが多いので立ち上がりから読むよりも誤差を生むだろう。これに対して、連続波の位相差は時間に換算してより精度よく読みとることができる。
- 2) 特に、横波を測定する場合には先行した縦波や他の横波と重なり合うのでパルス法で立ち上がりを読むのは難しいが、連続波を用いる場合はシミュレーションで示したように、たとえ複数の波が重なり合っている問題なく速度を求めることができる。
- 3) 連続波を用いれば試料内の弾性波減衰特性も周波数との関係として求めることができる。
- 4) 片岩、安山岩においては測定された弾性波速度や振動方向は観察される層構造と調和的であった。細粒花崗岩の場合にも弾性波速度と振動方向から層構造が予想された。
- 5) 片岩では同一方向に伝播するふたつのS波の減衰特性に大きな差があった。安山岩では同一方向に伝播するS波の減衰特性はほとんど同じであったが、異なる方向に伝播する場合の減衰特性に差がみられた。細粒花崗岩では方向による減衰特性の差はほとんど見られなかった。
- 6) 花崗岩ではセン断剛性よりも縦剛性の異方性が大きいようである。⁽¹⁾ これに対して安山岩ではセン断剛性の異方性の方が比較的大きいようであった。

岩石内を伝播する弾性波の速度や減衰に関する異方性を主に連続波を用いて測定した。今後、多くの岩石についてその音響異方性を測定するとともに、力学特性などとの関連を調べていきたい。

5 引用文献

- 1) 河嶋、佐野、水田、荻野：'87 日本鉱業会春季講演要旨集 P.189