

異方性岩石の軸差応力下における縦波伝播速度 に関する研究

谷口 敬一郎*・楠見 晴重*
松井 蒼志成**・寺岡 克己***

Longitudinal Wave Velocity of Anisotropic Rocks under Biaxial Stress Loading—By Keiichiro TANIGUCHI, Harushige KUSUMI, Yoshinari MATSUI and Katsumi TERAOKA

P-wave velocity of anisotropic rock specimens in the axial direction was measured under biaxial stress loading. The rock specimens are cut out from the block of Yoshino chlorite schist into the column with the angle between the plane of schistosity and the horizontal plane perpendicular to the axis of the core about 0° (S_0), 20° (S_{20}), 45° (S_{45}), 70° (S_{70}) and 90° (S_{90}). The relationship between *P*-wave velocity and directions of schistosity has been investigated under various confining pressure.

The results obtained are as follows.

- 1) It is recognized that *P*-wave velocity of the rock specimen in the direction parallel to the axis of maximum principal stress is affected by the angle between the plane of schistosity and the horizontal plane.
- 2) The relation between *P*-wave velocity and the deviator stress is expressed in terms of a hyperbolic function.
- 3) Two constant values defined in a hyperbolic function relate with the initial elastic modulus, confining pressure and *P*-wave velocity of the rock specimens under the atmospheric pressure.

1. 緒 言

岩石、岩盤の非破壊試験法として、弾性波による手法がよく用いられる。とくに土木工学の分野においては、近年その対象となる構造物が地下深部に建設されるに伴い、事前調査等において弾性波を利用した新しい探査技術が適用されている。またボーリング試料等を利用して行われる種々の岩石試験は、上述した事情を考慮して従来よりも高い応力下において、試験が実施されている。

岩石試料の超音波速度試験は、比較的容易に実施でき、かつ岩石の工学的性質を定量的に求められることか

ら、有意義な試験法と考えられるが、これまでその計測はほとんど大気圧下で実施されており、応力の影響についてはあまり考慮されていない。

一方、応力下における岩石の弾性波伝播特性に関して行われた研究は数例 (King, M. S., 1966; 田中ほか, 1969; 佐々ほか, 1977; 小田ほか, 1983; 谷口ほか, 1987; Christensen, N. I. et al., 1985; 船戸ほか, 1987) 報告されているが、それらは比較的均質な岩石を対象としている場合が多く、異方性構造を有している岩石については、あまり報告されていない。異方構造を有している岩石の破壊形態は岩石実質部の強度より、層理、片理、節理等の不連続面に支配されることにより、これまでは主に変形挙動特性に関する研究 (Hoek, E., 1964; Walsh, J. D. et al., 1964; 下谷ほか, 1973; 赤井ほか, 1969) に力点がおかれてきたように思われる。また、こ

1988年3月14日原稿受付, 1989年7月24日受理

* 関西大学工学部

** 明治コンサルタント(株)

*** 関西大学大学院

のような岩石の弾性波伝播挙動は、著しい弾性波速度異方性を呈することより、それらを系統的に取り扱うには、多くの困難を伴うことから、これに関する研究報告は少なく、赤井ほか (1969)、槽谷 (1979)、Oda et al. (1986)、杉田ほか (1985) の研究等がみられる程度である。しかし杉田ほかの研究を除いては、いずれも大気圧下における弾性波伝播挙動について報告されたものである。杉田ほかは封圧下における片岩類の弾性波伝播挙動に及ぼす片理方向、間隙水圧の影響について報告している。

筆者等は、比較的均質な岩石を用いて、軸差応力下における変形特性と縦波伝播特性について先に報告 (谷口ほか, 1987) した。本論文においては、異方性を示す岩石の代表例として緑泥片岩を用い、軸差応力下における軸方向の縦波速度に影響を及ぼす種々の要因について、主として実験的検討を行い、軸差応力下における弾性波速度異方性、ならびに応力による弾性波速度の増加量の定量的解析について検討した。

2. 岩石試料および実験方法

実験に用いた岩石試料は、奈良県吉野郡より採取された緑泥片岩である。これは三波川帯に属し、片理構造が顕著にみられるが、多少の微褶曲を伴っている。供試体は、あらかじめ同一地点から採取した数10個の岩塊を用意し、Fig. 1に示すようにボーリングマシンによって片理面と水平面とのなす角 θ が 0° 、 20° 、 45° 、 70° 、 90° となるように作成した。したがって片理面と応力軸のなす角は $90^\circ - \theta$ である。以下、それぞれの角度 θ を有する供試体を便宜上 S_0 、 S_{20} 、 S_{45} 、 S_{70} 、 S_{90} と記述する。なお供試体は直径50 mm、高さ100 mmの円柱体とし、各 θ ごとにそれぞれ3~5本用意した。また実験にはすべて室内放置乾燥状態のものを用いた。これら供試体の大気圧下におけるP、S波速度ならびに諸物性はTable 1に示す通りである。なお、この表に示されている各数値は、各 θ ごとの供試体の平均値である。

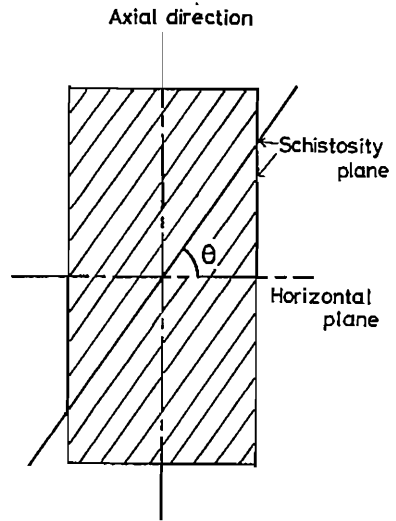
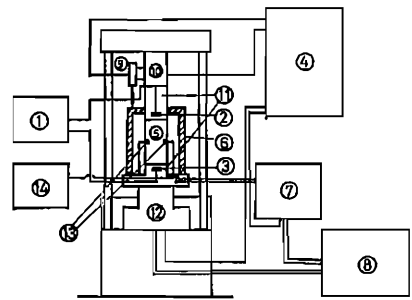


Fig. 1 Angle of schistosity plane in rock specimen.



- ① 超音波測定器
- ② 発振子
- ③ 受振子
- ④ 制御：測定表示：自記記録装置
- ⑤ 供試体
- ⑥ 三軸セル
- ⑦ サーボ式油圧ポンプ
- ⑧ 油圧ポンプ
- ⑨ 差動トランス式変位計
- ⑩ 100 ton ロードセル
- ⑪ 加圧板
- ⑫ サーボ式加圧板
- ⑬ ひずみゲージ
- ⑭ ひずみ測定器

Fig. 2 Schematic diagram of triaxial testing apparatus.

Table 1 Physical property of rock specimens.

供試体	P 波速度 (km/sec)	S 波速度 (km/sec)	動弾性係数 (kgf/cm ²)	動ポアソン比	単位体積重量 (gf/cm ³)	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)
S_0	4.3	2.4	2.3×10^5	0.27	2.89	1.65	4.43
S_{20}	5.2	2.8	6.0×10^5	0.30			
S_{45}	5.6	3.0	6.9×10^5	0.30			
S_{70}	6.0	3.1	7.4×10^5	0.32			
S_{90}	5.7	3.2	7.7×10^5	0.27			

実験装置は Fig. 2 に示すように前回報告した(谷口ほか, 1987)装置と同様の高圧三軸試験装置を用いた。また P 波速度の測定は透過法とし, スタッキング機能を有する超音波測定器を用いて波形の立ち上がりを明確にし, 伝播時間の読み取りはマニュアル方式とした。

3. 軸差応力下における P 波速度

Fig. 3~Fig. 7 は各供試体における軸方向の P 波速度と軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) との関係を示したものである。これらの図より, 各供試体とも軸差応力が低い状態において, P 波速度は高い増加傾向を示している。軸差応力がさらに大きくなると P 波速度の増加の割合は徐々に減少し, ある軸差応力以上では P 波速度はほぼ一定の値となる。しかし P 波速度の増加割合および P 波速度

が一定値となる軸差応力の値は, 拘束圧, 片理の角度によって異なっている。

Fig. 8 は, 供試体の片理角度 θ と大気圧下における個々の試料の P 波速度 V_{p0} との関係を示したものである。この図より θ が大きい供試体ほど V_{p0} は高くなってい

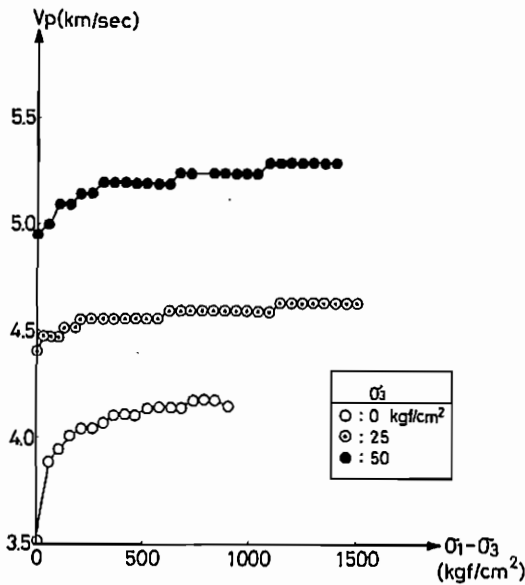


Fig. 3 $V_P(\sigma_1 - \sigma_3)$ curves of S_0 -specimens.

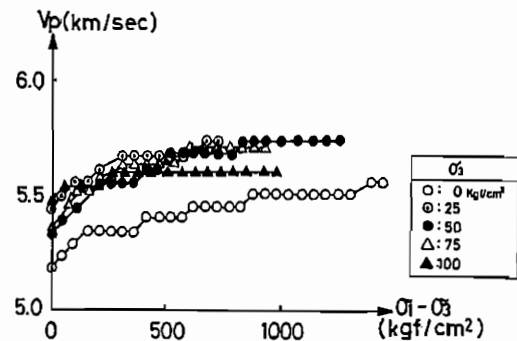


Fig. 4 $V_P(\sigma_1 - \sigma_3)$ curves of S_{20} -specimens.

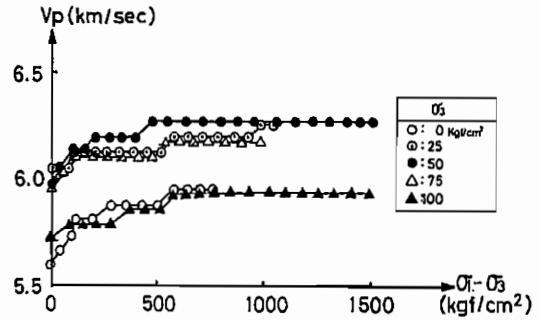


Fig. 5 $V_P(\sigma_1 - \sigma_3)$ curves of S_{45} -specimens.

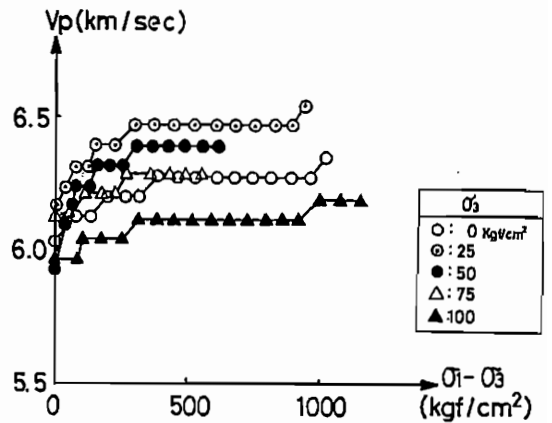


Fig. 6 $V_P(\sigma_1 - \sigma_3)$ curves of S_{70} -specimens.

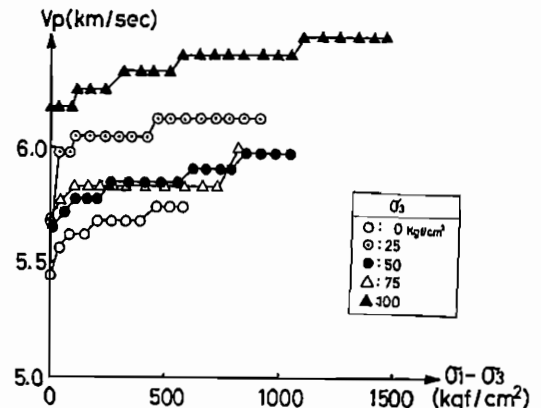


Fig. 7 $V_P(\sigma_1 - \sigma_3)$ curves of S_{90} -specimens.

る。しかし S_{90} の V_{p0} は S_{70} の V_{p0} より若干低くなっている。また S_0 と S_{90} の V_{p0} 値は他の供試体の V_{p0} 値に比べて、ばらつきが大きい。

Fig. 9 は、 θ と軸差応力下における P 波速度の最大値 $V_{p\max}$ との関係を示したものである。この図より θ と $V_{p\max}$ との関係は、Fig. 8 とほぼ同様な傾向を示しており、 θ が大きくなると $V_{p\max}$ の値は高くなっている。すなわち P 波の伝播経路が片理面に対して平行もしくは平行に近い状態では、 P 波速度はより高い値を示している。このことから軸差応力においても、加圧方向の P

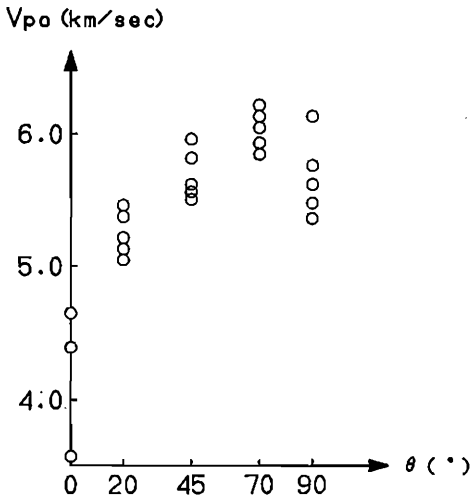


Fig. 8 Relationship between P-wave velocity under atmospheric pressure V_{p0} and angle of schistosity θ .

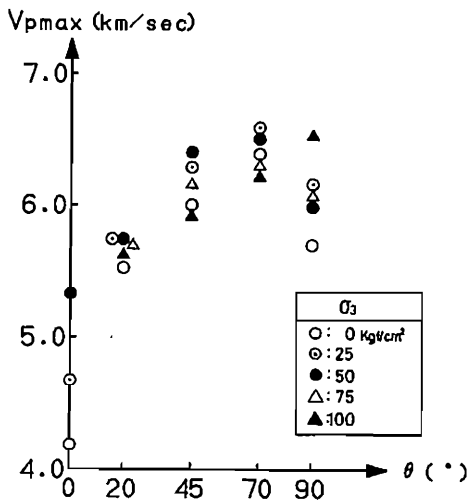


Fig. 9 Maximum P-wave velocity of each specimen under biaxial stress condition.

波速度は、大気圧下とはほぼ同様な傾向を示すことが認められる。拘束圧と P 波速度との関係については、Fig. 9 より、 S_0 および S_{90} に関しては $\sigma_3=0$ のとき、すなわち 1 軸圧縮状態下の P 波速度が低い値を示している。しかし他の拘束圧下においては明確な差異は認められなかった。これは実験に使用した供試体個々の片理が、微褶曲を伴っているために、供試体個々の片理構造が同一でないことに起因しているためと考えられる。

Fig. 10 は、各拘束圧下で軸応力 σ_1 を増加させたときに得られた個々の供試体の最大 P 波速度 $V_{p\max}$ と大気圧下での P 波速度 V_{p0} の比 $V_{p\max}/V_{p0}$ と片理角 θ との関係を示したものである。この図より片理角 θ が小さい供試体ほど $V_{p\max}/V_{p0}$ の値にばらつきが目だっている。しかし、全体的には θ が大きい供試体ほど $V_{p\max}/V_{p0}$ の値は低くなっており、 $\theta=0^\circ$ と 90° との供試体では P 波速度の増加率にかなりの相違がみられた。これは同一

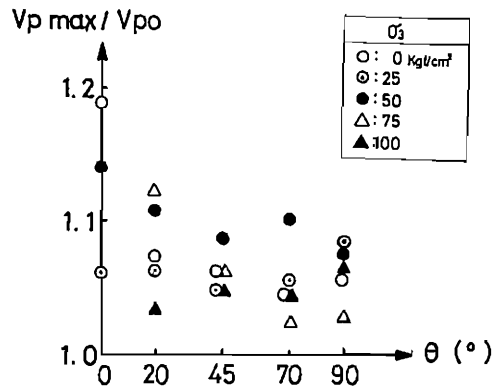


Fig. 10 Relationship between $V_{p\max}/V_{p0}$ and θ .

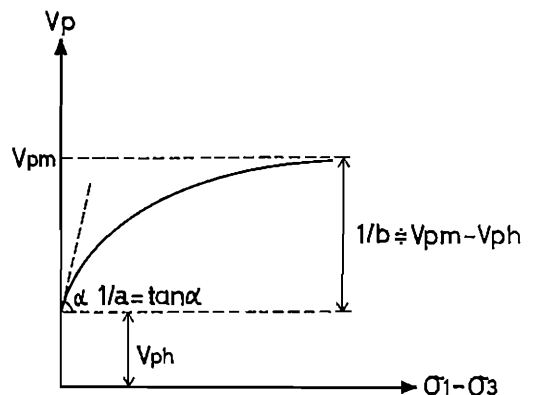


Fig. 11 Hyperbolic model for relationship between V_p and $(\sigma_1 - \sigma_3)$ under biaxial stress condition.

主応力状態下に存在する供試体でも、片理面に作用する直応力 σ_H は、水平方向と片理とのなす角 θ が 90° に近づくほど小さくなるため、加圧方向に圧縮されにくいためであると思われる。

4. 軸差応力-P波速度曲線の双曲線近似

Fig. 3~Fig. 7 に示されているように、片理の角度 θ によらず軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と P 波速度との関係は、初期の応力下において P 波速度の増加は著しく、その後軸圧が増すに従い P 波速度の増加は少なくなり、最終的にはほぼ一定値に落ち着く双曲線の増加傾向を示している。この関係を模式的に示したのが Fig. 11 である。この増加特性から軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と P 波速度 V_p とは次式に示すような双曲線に近似できるものと考えられる。

$$V_p = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{a + b(\sigma_1 - \sigma_3)} + V_{ph} \quad (1)$$

ここで、 V_{ph} : ある一定の封圧下における P 波速度 (km/sec)

a, b : 定数

式(1)において、定数 a, b は Fig. 11 に表されているような値を示すものと考えられる。定数 a の逆数 $1/a$ は、式(1)を $(\sigma_1 - \sigma_3)$ で微分し、 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 0$ としたときに求められる初期接線勾配 $1/a = \tan \alpha$ である。すなわち a の逆数 $1/a$ は、Fig. 11 に示した双曲線の初期応力段階における P 波速度の増加率を示すパラメーターである。また式(1)において $(\sigma_1 - \sigma_3) \rightarrow \infty$ とすれば Fig. 11 より明らかなように、双曲線は漸近線 $V_p = V_{pm}$ に限りなく近づき、それは次式のように表される。

$$V_{pm} = 1/b + V_{ph} \quad (2)$$

すなわち、もう一つの定数 b の逆数 $1/b$ は P 波速度の

最大増加量を表している。

定数 a および b を決定するために式(1)を変形すると

$$(\sigma_1 - \sigma_3) / (V_p - V_{ph}) = b(\sigma_1 - \sigma_3) + a \quad (3)$$

Fig. 12 に示したように

$(\sigma_1 - \sigma_3) / (V_p - V_{ph})$ を $(\sigma_1 - \sigma_3)$ に対してプロットすれば、一次式として近似することができ、 a と b は実験的に求めることが可能である。

Table 2(a)~(e) に示す $1/a$ と $1/b$ は本実験で得られた各供試体の軸差応力-P波速度関係の結果を式(1)の双

Table 2 Values of $1/a$ and $1/b$ for hyperbolic model of each specimen.

(a) S_0

拘束圧 (kgf/cm ²)	0	25	50
$1/a \times 10^2$ (cm ³ /kgf·sec)	14.8	3.81	1.70
$1/b \times 10^{-1}$ (km/sec)	6.73	2.73	3.76

(b) S_{20}

拘束圧 (kgf/cm ²)	0	25	50	75	100
$1/a \times 10^2$ (cm ³ /kgf·sec)	2.06	1.70	1.79	0.98	1.85
$1/b \times 10^{-1}$ (km/sec)	4.37	3.33	4.88	4.49	1.33

(c) S_{45}

拘束圧 (kgf/cm ²)	0	25	50	75	100
$1/a \times 10^2$ (cm ³ /kgf·sec)	8.00	1.71	1.46	1.74	0.94
$1/b \times 10^{-1}$ (km/sec)	3.12	1.69	3.96	2.50	2.25

(d) S_{70}

拘束圧 (kgf/cm ²)	0	25	50	75	100
$1/a \times 10^2$ (cm ³ /kgf·sec)	12.1	5.00	1.30	1.39	1.05
$1/b \times 10^{-1}$ (km/sec)	3.14	3.34	4.65	1.77	1.94

(e) S_{90}

拘束圧 (kgf/cm ²)	0	25	50	75	100
$1/a \times 10^2$ (cm ³ /kgf·sec)	14.8	3.95	2.60	1.11	0.75
$1/b \times 10^{-1}$ (km/sec)	3.26	4.90	3.92	2.11	4.03

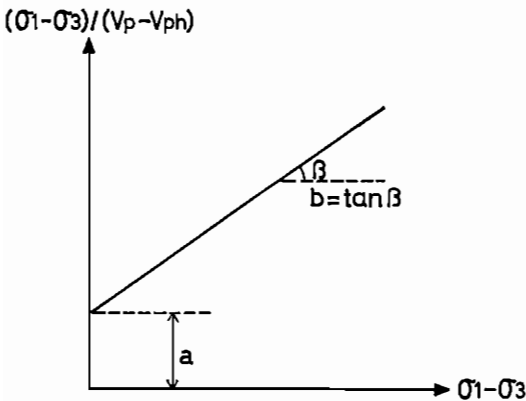


Fig. 12 Hyperbolic model with transformed axes.

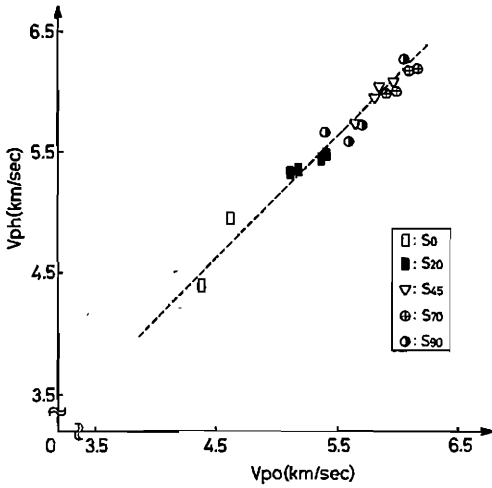


Fig. 13 Relationship between V_{ph} and V_{p0} .

曲線に近似させ、式(3)を用いて求められたものである。このとき、

$(\sigma_1 - \sigma_3) / (V_p - V_{ph})$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ との相関係数は0.9以上の値を示すことから、非常に高い精度で式(3)の関係が成り立つことが認められる。すなわち、 a, b の値はかなりの信頼性を有するものと思われる。

式(2)に示した $1/b + V_{ph}$ は軸差応力と P 波速度との関係を式(1)の双曲線に近似させたときに計算によって求められる最大の P 波速度と考えられる。ところで Fig. 13 は封圧下の P 波速度 V_{ph} と大気圧下の P 波速度 V_{p0} との関係を示したものである。この図より、 V_{ph} と V_{p0} とは一次的な増加傾向を呈し、非常に強い相関性を示している。この2要素の関係について回帰分析を行うと、次式のような実験式が得られる。

$$V_{ph} = 5.43 \times 10^{-2} + 1.02 V_{p0} \quad (4)$$

この式は、本実験のような 100 kgf/cm^2 以下の低い拘束圧下では、大気圧下の P 波速度 V_{p0} が支配的であることを示している。なお式(4)を求める場合、1軸圧縮状態下 ($\sigma_3 = 0$) では、 $V_{ph} = V_{p0}$ となるので、この応力条件下のものは除いた。また式(4)中の定数項は理論的には0になるものと考えられるが、実験値を用いて式(4)を求めている関係上このような誤差を生じたものと考えられる。しかし本研究においては、この誤差値を無視せず、補正値的要素として用いることにする。

式(1)、式(4)より

$$V_p = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{a + b(\sigma_1 - \sigma_3)} + (5.43 \times 10^{-2} + 1.02 V_{p0}) \quad (5)$$

と表され、定数 a, b が求められておれば、本実験で使

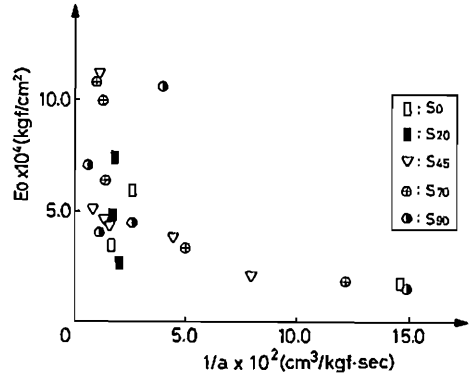


Fig. 14 Relationship between initial elastic modulus and $1/a$ of each specimen.

用した緑泥片岩の種々の軸差応力下における P 波速度は、拘束圧 100 kgf/cm^2 以下では大気圧下の P 波速度のみを測定することによって、式(5)より算出することができる。

次に式(1)中に含まれている定数 a, b と岩石の力学的特性について検討する。定数 a の逆数 $1/a$ は軸差応力- P 波速度曲線の初期接線勾配を示している。すなわち低い応力状態下において P 波速度の増加が著しい岩石ほど $1/a$ は大きな値を示すものと思われる。このことより $1/a$ は岩石の弾性係数、1軸圧縮強度、片理の状態等に左右されるものと考えられる。Fig. 14 は $1/a$ と各供試体の応力-縦ひずみ関係より求めた初期接線弾性係数 E_0 との関係について表したものである。ここで各供試体の縦ひずみは、3軸セル外に取り付けている変位計によって計測されたものである。この図より、 $1/a$ と E_0 とは多少のばらつきはみられるが、 E_0 が小さい供試体ほど $1/a$ は大きい値を示しており、 $1/a$ と E_0 とは逆比例関係を呈することが認められる。すなわち、初期接線弾性係数 E_0 が小さい岩石とは、潜在クラックや不連続面が比較的良好に発達したもの、間隙率が大きいもの、また固結度が低い岩石などが考えられ、 $1/a$ はこのような岩石自体の構造特性に左右されるものと思われる。しかし Fig. 14 より、 $1/a$ の値は片理の角度 θ に関係なく、 E_0 に対してはほぼ一様な相関性を示していることから、 $1/a$ に影響を及ぼす他の外的条件について考慮する必要がある。Fig. 15 は $1/a$ と拘束圧 σ_3 との関係について片理の角度 θ をパラメーターとして示したものである。この図より、 $1/a$ はほとんどの供試体において $\sigma_3 = 0$ の1軸圧縮状態下で、最も高い値を示しており、拘束圧が供試体に作用し、その値が大きいくほど、 $1/a$ は小さくなる傾向を呈している。また、 $1/a$ の値に関して、各供

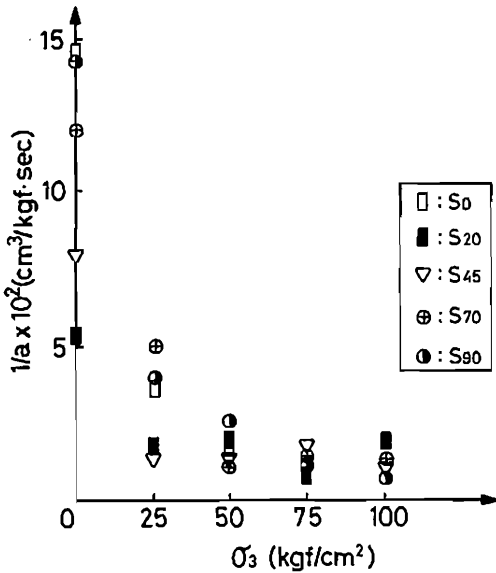


Fig. 15 Distribution of $1/a$ for each specimen under various confining pressure.

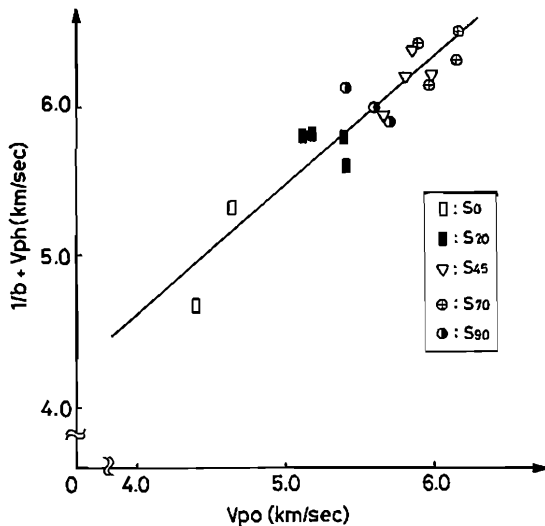


Fig. 16 Relationship between $1/b + V_{ph}$ and V_{po} .

試体間における顕著な差異はみられないことより、 $1/a$ は片理の角度 θ にはあまり左右されず、供試体に作用する拘束圧の大きさに依存する傾向が高いものと考えられる。

定数 b の逆数 $1/b$ は、Fig. 11 より軸差応力に対する P 波速度の最大増加量であり、また $1/b + V_{ph}$ は $V_{p, \max}$ と等しい関係にあることより、岩石の弾性波速度に依存することが考えられる。このようなことから、 $1/b$ は $1/b + V_{ph}$ として検討した。

Fig. 8, Fig. 9 より片理の角度 θ に対して大気圧下の P 波速度 V_{p0} と $V_{p, \max}$ とは、ともに θ が大きくなるに従って増加していることより、 $1/b + V_{ph}$ と V_{p0} との関係について検討を行った。Fig. 16 は各供試体の θ をパラメーターとしてこれらの関係を示したものである。なお $\sigma_3 = 0$ 下の供試体は除いている。これより、この 2 要素は各供試体を通じて共通的に一次的相関性を有していることが認められた。

以上式(1)に含まれている定数 a, b と岩石の力学的特性との物理的な関係について検討を行った。これらの結果より a については、主に岩石の弾性的特性と拘束圧に依存し、定数 b は岩石の構造的特性に左右される大気圧下の P 波速度と強い相関性があることが示された。

異方性構造を有する片岩類の弾性波速度は、軸差応力下においては大気圧下の値より高い値を示し、また弾性波速度の異方性が存在することが明らかにされた。しかし軸差応力下の P 波速度は、片理面と P 波伝播経路とのなす角度が異なっても、岩石の初期接線係数、大気圧下の P 波速度、および軸差応力、拘束圧の関数として表すことができるものと考えられる。

5. 結 言

奈良県吉野郡から採取された緑泥片岩を例にとり、軸差応力下における加圧方向の P 波速度の計測を行い、応力の影響による P 波速度の変化ならびに加圧中の P 波速度に及ぼす片理面と伝播経路とのなす角度の影響について検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかにされた。

- (1) 軸差応力下において得られる最大の P 波速度は、片理面と水平面とのなす角度 θ が大きい供試体ほど高い値を示す。しかし軸差応力に対する P 波速度の増加率は、 θ が大きい供試体ほど低く、特に $\theta = 0^\circ$ と 90° との供試体では、その増加率はかなり異なる結果となった。
- (2) 軸差応力下の P 波速度に及ぼす拘束圧の影響に関しては、1 軸圧縮状態下における P 波速度は、片理の傾斜によらず、拘束圧下に比べて全体的に低い値を示すが、供試体に拘束圧が作用している状態下においては、軸差応力下の P 波速度と拘束圧とは顕著な関係はみられなかった。しかし、等方圧縮状態下の P 波速度に関しては、拘束圧が増加すると P 波速度は高くなり、その値は片理の傾斜角が大きい供試体ほど高い値を示した。
- (3) 軸差応力と P 波速度との関係は片理の傾斜角および拘束圧の値によらず、双曲線に近似できることが認められ、軸差応力下の P 波速度は計算によって求められ

ることを示した。

(4) 比較的均質な岩石の軸差応力下における P 波速度は、岩石の応力—ひずみ特性の中で体積ひずみと密接な関係を呈することは前回の報告で明らかにされている。しかし片理構造を有する岩石の応力下の P 波速度は体積ひずみに対する相関性は認められず、(3)で述べた双曲線に含まれる定数 a, b を通じて間接的に初期接線弾性係数および大気圧下の P 波速度に依存するものと考えられる。

参 考 文 献

- 赤井浩一・山本和夫・有岡正樹 (1969): 結晶片岩の構造異方性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 170, 23-36.
- CHRISTENSEN, N. I. and WANG, H. F. (1985): The influence of pore pressure and confining pressure on dynamic elastic properties of Berea sandstone, *Geophysics*, 50, 207-213.
- 船戸明雄・荘司泰敬・大橋武一郎 (1987): 拘束圧下での岩石の超音波速度測定, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 211-216.
- HOEK, E. (1964): Fracture of anisotropic rock, *J. South African Inst. Min & Metallurgy*, 64, 501-518.
- 槽谷憲司 (1979): 異方性層状岩の強度・弾性波速度・変形および破断面の特性等に関する実験的考察, 日本応用地質学会誌, 2-3, 1-10.
- KING, M. S. (1966): Wave velocities in rocks as a function of changes in overburden pressure and pore fluid saturants, *Geophysics*, 31, 50-73.
- 小田仁・鈴木功・斎藤俊明・瀬谷清 (1983): 静水圧下における岩石の弾性定数および応力—歪み曲線について, 地震, 36, 151-167.
- ODA, M., YAMABE, T. and KAMEMURA, K. (1986): A crack tensor and it's relation to wave velocity anisotropy in jointed rock masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 23, 387-397.
- 佐々宏一・伊藤一郎・金子勝比古・井上博之 (1977): 岩石の破損の進展に伴う弾性波伝播速度の変化 (第一報), 日本鉱業会誌, 94, 7-11.
- 下谷高瀬・山口梅太郎・下村弥太郎 (1973): 結晶片岩の力学的挙動に関する一考察, 日本鉱業会誌, 89, 515-520.
- 杉田信隆・牛田 稔・荒川哲一・谷口晶則 (1985): 封圧下における片岩類の弾性波伝播特性にみられる異方性の影響について, 日本応用地質学会昭和60年度研究発表会予稿集, 52-55.
- 田中正男・遠藤源助・種田啓二 (1968): 各種岩石の一軸圧縮荷重下における弾性波伝播速度, 日本鉱業会誌, 84, 8-9.
- 谷口敬一郎・楠見晴重・森本耕司・寺岡克己 (1987): 岩石試料の軸差応力下における変形特性と縦波伝播速度との関係について, 物理探査, 40, 11-21.
- WALSH, J. D. and BRACE, W. F. (1964): A fracture criterion for brittle anisotropic rock, *J. Geophys. Res.*, 69, 3456-3499.