

(60) 岩石の超音波伝播速度に及ぼす圧力効果について

基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 ○ 松村 真一郎

〃 三木 茂

〃 西垣 好彦

1. はじめに

岩盤の動力学的性質を非破壊的に知る一手法として、超音波を利用した岩石の室内超音波伝播速度試験が広く実施されている。しかし、この試験法は簡便な手法で、得られるP波・S波速度は無負荷状態での値であり、原地盤の応力状態を反映したものではない。この点に着目しP波・S波速度の拘束圧依存性を検討した研究は現在まで数多く報告されているが、試験が煩雑なうえ、計測システムが複雑、大規模化し簡単に実施できない問題点もあった。

著者らはこの点に留意し、通常行なわれている三軸圧縮試験用のセル内エンドキャップ中にP波及びS波用振動子を組み込むことにより、岩石のP波・S波速度(以後、 V_p 、 V_s と呼ぶ)を一度に測定し、かつ解析できる測定システムを開発した。同様のシステムは土の分野で既に中川ら¹⁾が実施している。このシステムでは、通常の三軸圧縮試験と同じ簡便さで試験でき、種々の応力条件下での V_p 、 V_s も容易に求まることなどの利点を有している。今回はその第一報として、測定システムの紹介、並びに測定した V_p 、 V_s と拘束圧の関係について検討したので報告する。

2. 試験装置・測定機構

図-1に測定システムの概略図を示す。システムは三軸セルを中心とした計測部とマイクロコンピュータを中心とした制御・解析部から成る。測定はパルス透過法で、一般に市販されている超音波測定装置と機構は同じである。まず、パルス発振器(パルス幅可変、600 volt)から出力された電圧パルスより、三軸セル内下部ベDESTAL(φ50, h50, 耐圧100 kgf/cm²)に内蔵されたP波・S波用振動子(共振周波数; 1 MHz, 50 KHz)は励起され、円柱供試体(φ50, h100)透過後、上部キャップで受振される。増幅後、波形データはいったんトランジェントメモリ(50ns, 4Kword)に記憶され、随時ディスクに落とされる。なお、試験時は常にシンクロスコープで波形をモニターし異常

の監視ができる。また受振・発振部は排水機能も有しており、バックプレッシャーの負荷、間隙水圧の測定が可能である。解析部では、波形データのスタッキング処理、CRTディスプレイへの波形出力、X-Yプロッターへの図化及び各種波形解析の一連の作業ができる。

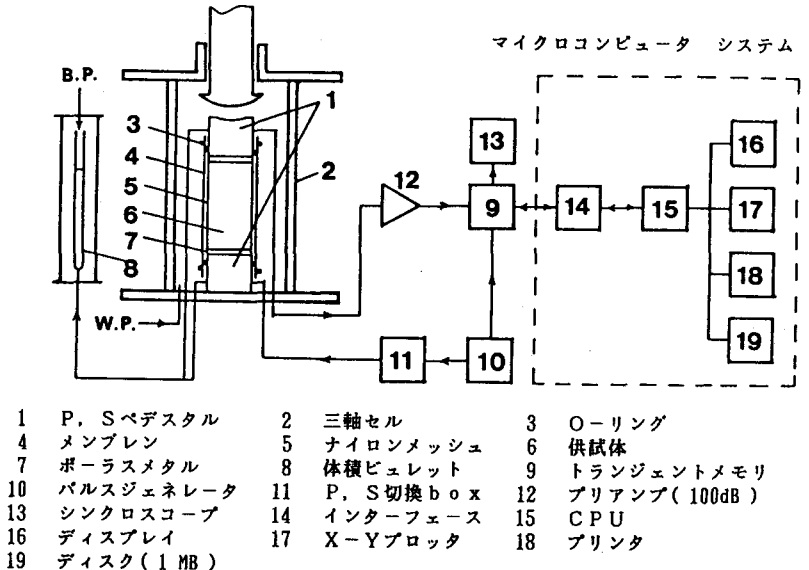


図-1 超音波速度測定システム

表-1 供試体物性値

岩石名	供試体 No.	密度 (g/cm ³)			超音波速度 (km/s)		有効 間隙率 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
		自然	浸潤	乾燥	V _p	V _s		
北松砂岩	S-1	2.348	2.445	2.324	3.427	1.641	12.1	700
"	S-2	2.386	2.466	2.360	3.604	1.607	10.6	
和泉砂岩	IS-1	2.621	2.624	2.612	5.405	3.012	1.2	2000
多孔質凝灰岩	TF-1	1.935	2.142	1.913	2.325	1.242	22.9	280
"	TF-2	1.938	2.144	1.915	2.280	1.209	22.9	
珪藻質泥岩	M-1	1.627	1.641	1.106	1.555	0.611	54.1	90
"	M-2	1.639	1.646	1.114	1.868	0.619	53.2	
北木花崗岩	GR-1	2.626	2.632	2.622	5.351	2.647	0.9	1500
"	GR-2	2.621	2.626	2.616	5.305	2.486	1.0	
日南石灰岩	LS-1	2.708	2.708	2.705	6.507	3.211	0.3	1100
"	LS-2	2.703	2.703	2.700	6.500	2.831	0.3	

3. 試験方法

岩石の超音波速度に及ぼす圧力効果を検討する場合、鉱物組成、粒子配列と結合状態、間隙の割合、節理の頻度および含有水分量などの内的要素が重要な指標となる。今回は特に岩石中の間隙に着目し、拘束圧を加えた場合の超音波速度の変化に及ぼす間隙の役割について検討する。従って供試体はできるだけ既存クラックや節理、層理の認められない、新鮮でかつ種々の間隙

率を有する岩石を選定した。表-1にそれら岩石の物性値を示す。なお表中のV_p・V_sは拘束圧0.5 kgf/cm²での値である。さて選定された試料は直径50mm、高さ100mm、端面精度1/100mm以上に成形した後、真空脱気後4日間以上水浸させた。以後これを飽和状態と規定し、試験は全てこの飽和供試体で実施した。供試体は排水用ナイロンメッシュで巻いたのちメンブレンを装着し、所定の側圧で等方載荷し、圧密終了を待って非排水条件下でV_p、V_sを測定した。なお、側圧段階は増圧、減圧の2過程とし拘束圧 σ_3 は0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30 kgf/cm²の7段階である。

一方、最も圧縮性に富む珪藻質泥岩にて、ストレインゲージにより圧密による供試体高さ変化を測定したところ、0.3mm程度であり供試体高さの変化による速度値の変化は殆ど無視できることがわかった。したがって、速度値は全て初期高さを用いて算出した。

4. 試験結果・考察

図-2は通称北松砂岩（以後、S試料と呼ぶ）のP波、S波の代表的観測波形である。図中↓印は到達波の立上がり点を示している。図のようにV_p、V_sともに拘束圧依存性が認められ、特にS波に顕著なようである。また、減圧過程と増圧過程を比較するとS波で減圧過程の方が若干高い速度値を示す傾向にある。

図-3は全供試体で求めたV_p、V_sと拘束圧との関係である。図中の黒ぬきは減圧過程での値である。全体で見ると拘束圧0~30 kgf/cm²の範囲で、速度値はV_pで1.7~6.6 km/sec、V_sで0.6~3.3 km/secであり、同一岩種では供試体間のばらつきは少ないと言える。

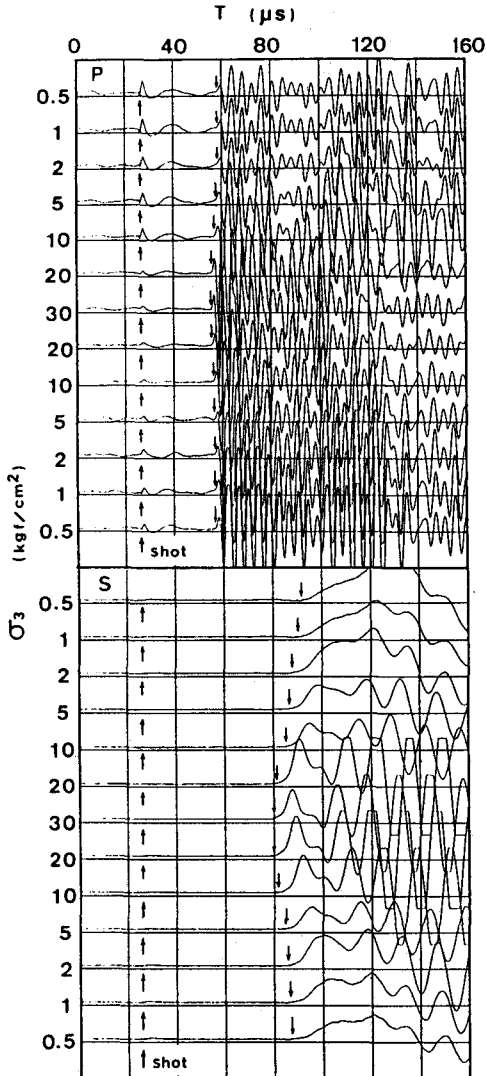


図-2 P波・S波の代表的波形例

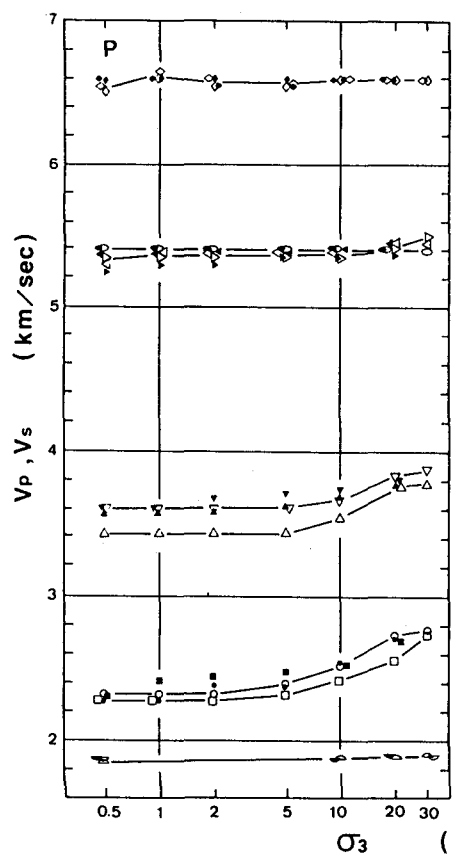
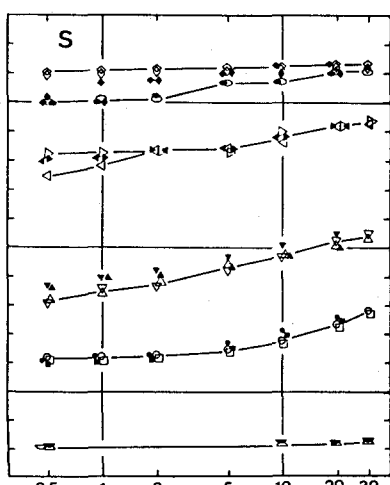


図-3 V_p, V_s と拘束圧の関係

さて、増圧過程と減圧過程で速度値を比較すると、
 $\square$ TF-1 S 及び TF 試料では、減圧過程の方が V_p, V_s と
 $\triangle$ S-1 もに若干大きい値を示しているもののはっきりした
 ∇ S-2 傾向は読みとれない。次に増圧過程において拘束圧
 $\triangleright$ GR-1 依存度を調べるため各岩種の速度増加率を算出して
 $\diamond$ LS-1 みる。ここで、増加率は [初期拘束圧 0.5 kgf/cm^2
 $\diamond$ LS-2 での速度値: $V_{0.5}$] に対する [最大の速度変化量:
 $\circ$ M-1 $V_{30} - V_{0.5}$] の比で定義する。その結果、S 試料で
 $\circ$ M-2



は、P 波で 9.9 % ,
 S 波で 28.2% IS 試料で 0 , 7.1 %
 TF 試料で 21.6 ,
 27.1 % M 試料で
 2.5 , 5.6 % GR 試
 料で 2.8 , 11.9 %
 LS 試料で 1.3 ,
 1.7 % となり、岩種に
 よらず、 V_p より V_s
 の方が拘束圧依存性が
 高い傾向にある。また
 岩種でみると、P 波で
 $TF > S > GR \geq M \geq$
 $LS > IS$, S 波で、
 $S \geq TF > GR > IS$

$> M > LS$ の順に依存性が大きい。よって M 試料を除けば、
 この傾向は有効間隙率と相関があるようである。一方、M 試
 料は V_p, V_s とともに拘束圧依存性が小さい。M 試料は、均質
 で土的要素を多分に有し、多孔質で圧縮性に富んだ軟岩であ
 る。したがって、拘束圧の変化に対し鋭敏に反応しやすい性
 質を持っていると考えられるが、 V_p, V_s の拘束圧依存性
 が小さいのは興味深い。これは珪藻質泥岩の特殊性に起因し
 ていると思われるが、今回は供試体数がわずか 2 本で、明確
 に判断できず今後の研究課題としたい。

さて、図-4 は V_p, V_s から求めた増圧過程での動ボ
 ソン比 ν_d と拘束圧の関係である。図のように $\sigma_3 \leq 30$
 kgf/cm^2 で、 ν_d は漸減傾向にあることがわかる。中でも、
 M, LS 以外の試料にその傾向が強い。また同種岩石でみた
 場合、拘束圧が増加するに従い、値のばらつきが小さくなる
 傾向にあり、 $\sigma_3 \geq 20 \text{ kgf/cm}^2$ で、ほぼ同一の値を示すよう
 になる。これは、骨格構造上のばらつきが高圧下になるほど消
 滅していくことを示唆している。

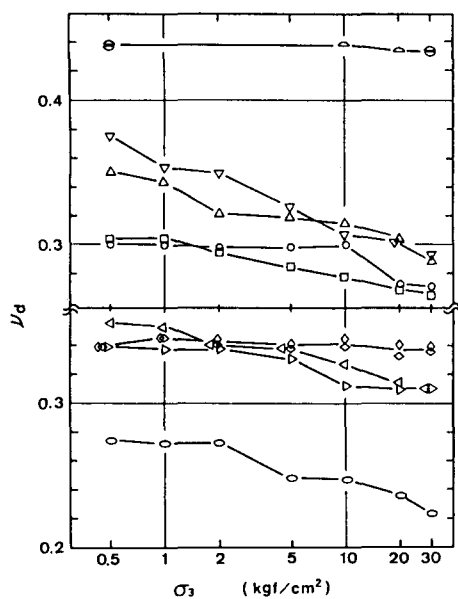


図-4 動ポアソン比と拘束圧の関係

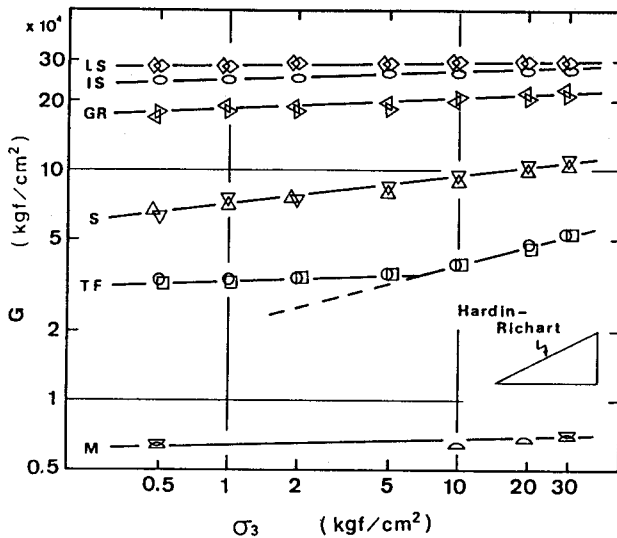


図-5 剛性率と拘束圧の関係

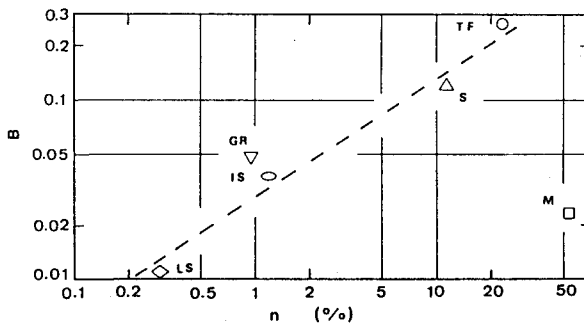


図-6 有効間隙率と定数Bの関係

5. おわりに

今回、三軸セルにて一度にP波・S波速度を測定できるシステムを開発し、拘束圧に対する依存性を検討した。得られた結果は次のようである。

- 1) $V_p \cdot V_s$ の拘束圧依存性は、今回実施した全ての試料で見られ、特にS波の速度増が顕著である。
- 2) ν は拘束圧の増加とともに減少傾向を呈し、高圧になるほど岩種固有の値に収束する傾向にある。
- 3) G の拘束圧依存性は有効間隙率で一意的に説明できる可能性がある。

< 謝辞 >

システム開発にあたり、大阪市立大学理学部 中川康一氏に御援助を頂いた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) K.Nakagawa, S.Nakaya and S.Miki; Coincident Condition of Shear Wave Velocities from Laboratory and In Situ., 第6回地震工学シンポジウム, pp 569 - 576, 1982.
- 2) Hardin, B.O. and F.E. Richart; Elastic Wave Velocities in granular soils., A.S.C.E., SM1, Feb. 1963.

次に、剛性率 $G (= \rho V_s^2)$ と拘束圧の関係について検討する。Hardin²⁾ は、丸粒の砂と角ばった石英碎石に対して下式のような実験式を提案している。

$$G = A \cdot (\sigma'_3)^B$$

ここで、A は間隙比、歪振幅、粒度等に依存する定数で、B は歪振幅のみに依存し、砂の種類によらず、一定値をとるとされる。また、 σ'_3 は有効拘束圧で、ここでの σ_3 に相当する。図-5 は剛性率と拘束圧の関係を示したものである。図中には比較のために、Hardinらの試験で導かれた $B (= 0.5)$ も併記してある。図より明らかに G と σ_3 は指数近似でき、両対数グラフ上、直線をなし岩種固有の傾きを示すことがわかる。さて、定数 B は G の拘束圧依存性を示す一つの指標になることから、この定数 B に対し前述した間隙率を結びつけてみる。図-6 は、それぞれの岩種の定数 B の平均値と有効間隙率 n の関係である。図中の点線で示すように、軟岩、硬岩を問わず、B と n は両対数グラフ上で直線関係にあることが推定される。すなわち、剛性率 G の拘束圧依存性は、有効間隙率で一意的に説明される可能性を示唆している。ただし、M 試料では図のように直線から遠く離れている。これは前述した珪藻質泥岩の特殊性によるものと判断される。なお、剛性率と有効間隙率の関係については、今後も検討しなければならない。

(60) THE EFFECTS OF CONFINING PRESSURE ON ULTRASONIC VELOCITY IN ROCK

BY Shim'ichiro MATSUMURA

Sigeru MIKI

Yoshihiko NISHIGAKI

Kiso-Jiban Consultants Co.,Ltd.

SUMMARY

Ultrasonic pulse method is used to determine the elastic wave velocities in laboratory. Dynamic elastic constants of rock can be calculated from the elastic wave velocities.

However, these constants are the values on non-loaded condition. So, a new system measured ultrasonic velocity (V_p, V_s) at a time under confining pressure was developed. Characteristics of this system are as follows:

- (1) P,S-Transducers have longitudinal and torsional vibrator within end cap in usual triaxial cell.
- (2) Therefore, V_p and V_s can be measured with no difficulty under various stress conditions.
- (3) Measured data can be all analyzed by micro-computer system.

In this paper, firstly, the new measuring system is introduced, secondly, relationship between V_p, V_s and confining pressure ($0-30\text{kgf/cm}^2$) is discussed for some rock specimens. The conclusions are summarized as follows:

- (1) The effects of confining pressure on V_p, V_s is found of all specimens and the rate of increase of V_s is more than that of V_p .
- (2) The value of Poisson's ratio, ν is inclined to decrease as confining pressure increases.
- (3) It is inferred that modulus of rigidity, G is related to effective porosity, n by introducing the parameter B-value.