

岩石の圧縮応力と弾性波伝播速度について

建設省土木研究所 正会員 菅原 捷

1. まえがき

地山や岩盤の地質を評価する方法として弾性波伝播速度を用いることが多い。とくにトンネルの地質調査では弾性波探査が最も重要な調査方法であり、広くおこなわれている。ところが弾性波速度は上載荷重によって増加することが確認されているがその定量的な解析は十分おこなわれていない。筆者等は弾性波の伝播方向に荷重をかけながら速度の変化を測定できる簡単な装置を試作し、モルタル、花崗岩、砂岩および凝灰岩を供試体として試験した。

試験の結果次の点が明らかになった。①応力の増加にともなって伝播速度が増加する。②強制湿潤状態と強制乾燥状態では強制湿潤状態の増加率が大きい。③側圧の相違による速度の差は認められない。④スリットを入れると速度は低下するがその低下率は強制湿潤状態の方が大きい。

2. これまでの研究

岩石に外部圧力を加えると弾性波速度が増すことはかな以前から注目されていた。Hughes (1951)¹⁾は最大5000気圧の静水圧(油圧)下における砂岩の速度変化を測定した。早川・本荘等は一軸圧縮力と速度との間に次式がなりたつとした。²⁾

$$V = \sqrt{V_0^2 + A(P + P_0)^\mu}$$

ただし

- V : 縦波速度
- V_0 : $P = 0$ の時の速度
- P : 外力 (一軸圧縮力)
- P_0, A, μ : 定数

また熊沢等は静水圧実験の結果次式で近似できるとした。²⁾

$$V = V_f - AP^{-n}$$

ただし

- V_f : 極限速度を表わす定数
- P : 静水圧
- A, n : 定数

これらの実験はすべて高圧下におけるものであり、土木または土木地質の分野で取り扱われる領域外である。大見・井上は供試体に角柱を用いて荷重方向に直交する方向の伝播速度を求めている。³⁾これは中～高圧の送受振子が造れなかったのでこういう測定法を取ったものと思われるが、この方法では引張応力下の速度の変化を測定しているもので、本研究とはかなり異なった結果となっている。

3. 試験方法

3.1 試験装置

本装置は最大側圧 100 kg/cm^2 (油圧)、最大軸圧 20 ton (約 $1,000 \text{ kg/cm}^2$) の容量をもつ三軸ベッセルに、上下載荷盤(台座およびピストン)に特殊加工した発受振子をくみ込んだものである。供試体の寸法は直径 50mm、長さ 100mm の円柱形のもので、軸荷重はベッセル底部のロードセルで、歪は供試体に直接貼り付けたペーパーストレインゲージ(2成分)によった。弾性波の伝播速度の測定は超音波パルス透過法を用いた。測定範囲(走時)は $0 \sim 100 \mu\text{sec}$

(速度 1,000^m/sec 以上)で、発受振子はチタン酸バリウム振動子で耐圧強度を増すため鋼製の保護函をかぶせた。

3.2 供試体

試験に使用した供試体はモルタル、花こう岩、砂岩および凝灰岩(大谷石)の4種類である。モルタルの配合は1^m当り水321kg, 普通セメント642kg, 砂1249kgとした(約1:2:4)。モルタルは脱型後約4週間の水中養生とした。供試体の物理的・力学的性質は表-1の通りである。供試体は直径50mmで長さはスリットの有無にかかわらず約100mmとした。節理等の影響を調べる

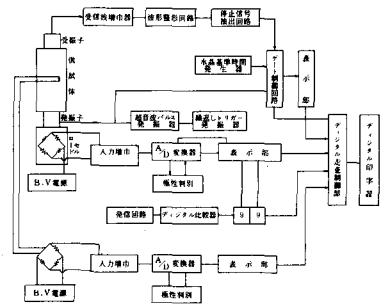
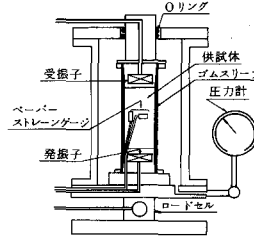


図-1 三軸ベッセルおよび装置全体のブロックダイアグラム

ために供試体の長軸方向に直角にスリットを入れた。スリットは供試体をダイヤモンドカッターで切断したもので、時間をかけていねいにおこない切断面は研磨していない。試験数は1岩種同一条件で4~5個であるが、スリットを入れたものでは接着面の粗さの影響を受けて異常に小さい速度を示したものがあり、そういう異常値がでた場合には試験箇数を増やした。

3.3 試験方法

試験は普通の三軸試験と同じ方法でおこなうが、荷重制御で予めセッティングしておく、軸荷重、伝播所要時間(走時)および歪を自動記録する。側圧をかける場合には事前に設定しておく。ただし供試体の長さに対して歪量が非常に小さく速

表-1 供試体の物理的・力学的性質

岩石名	モルタル		凝灰岩		砂岩		花こう岩	
	乾	湿	乾	湿	乾	湿	乾	湿
乾湿状態	乾	湿	乾	湿	乾	湿	乾	湿
単位体積重量(ρ /cm ³)	2.02	2.25	1.38	1.77	2.27	2.39	2.62	2.63
有効間隙率(%)	25.0		39.1		11.7		0.91	
吸水率(%)	14.3		28.4		5.14		0.35	
一軸圧縮強度(kg/cm ²)	259.5	276.3	125.3	52.5	786.4	425.1	1,502	1,036
弾性係数(kg/cm ²)	72,000	72,000	13,000	9,300	84,000	51,000	103,000	183,000

度におよぼす長さの影響がほとんど無視できるので(モルタルを例にすれば軸応力400^{kg}/cm²で1%以下)、歪の測定を省略したものもある。またモルタル供試体で側圧を0, 10, 30, 50^{kg}/cm²にした試験をおこなった結果乾燥状態および湿潤状態とも差が認められなかったため、モルタル以外の供試体はすべて側圧0の状態で行われている(図-6参照)。

4. 試験結果および考察

供試体は同一ブロックから切り出しているが個々の供試体によって弾性波伝播速度に多少のバラツキがある。また荷重が小さい段階では供試体と発受振子との接触面の状態で速度が異なることがある。

縦軸に伝播速度(v), 横軸(対数目盛)に軸応力 σ をとると図-2のようになる。両者を直線 $V = a \log \sigma + b$ で近似させると相関係数は0.84~0.99とかなりよい相関を示している(表-2)。

4.1 岩石種による相違

伝播速度は鉱物の組成、粒度および粒子の配列と結合状態、空隙等によって異なる。したがって同一岩石種でも個々の供試体によって異なるが、岩石種毎の差の方がより大きい。今回の試験では花こう岩が最も速度が大きく、続いてモルタル、砂岩、凝灰岩の順となっている。凝灰岩以外のものでは乾燥状態より湿潤状態での速度が大きく、モルタルを除いた天然の岩石では速度の大きいものほど軸応力に伴う速度の増加率が大きい(図-3, 表-2)。

モルタルは花こう岩と砂岩の中間の速度値を示し、圧力効果はあまりない。

4.2 有効間隙率と速度増加係数

一般に速度の小さい岩石種ほど空隙が大きく圧縮に伴う速度の増加率は高いとされている。しかし本試験では全く反対に空隙

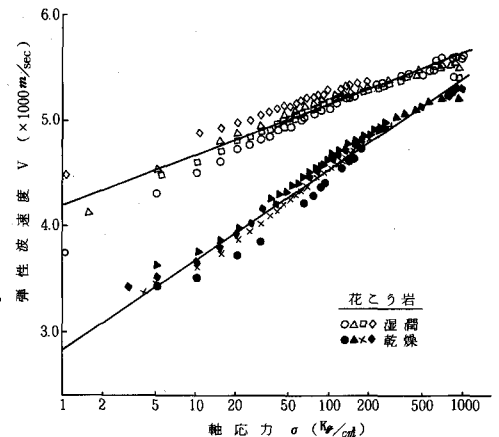


図-2 軸応力と伝播速度(花こう岩, 無拘束, スリットなし)

(有効間隙率)の大きい岩石種ほど速度が小さく、増加率も小さい。図-4は有効間隙率(n)と速度増加係数(a)(表-2参照)との関係を示したものであり、乾燥試料ではよい直線関係をしている。湿潤試料ははっきりしないが、ほぼ乾燥試料と同じ傾向がうかがえる。

4.3 乾湿による差

湿潤状態の場合が乾燥状態よりも速度値が大きい。圧力効果は乾燥状態の方が大きい。花こう岩や砂岩の場合低応力レベルでは乾湿の差が大きい。高応力レベル(例えば500kg/cm²以上)ではその差が少なくなってほとんど同じになる(図-2)。モルタルも同じような傾向を示すが高応力レベルでもその差はあまり縮まらない。凝灰岩では乾燥状態の方が湿潤状態より速度が大きく、圧力効果は両者共ほとんど同じである。

4.4 スリットによる速度の低下

スリットの本数を増してゆくに連れて速度値は低下する。またその低下率は応力レベルが小さいほど大きく、例えばモルタルの場合スリットを入れない時の速度値を1とすると、スリットが3本の場合の速度は軸応力50kg/cm²の場合、湿潤状態で83.7%、乾燥状態で92.6%となり、軸応力100kg/cm²の場合湿潤状態で89.6%

、乾燥状態で94.7%となる。他の岩石も同じような傾向を示す(図-5)。スリットによる影響はスリットの状態

による影響を強く受けるが、軸応力が大きくなるにつれてその影響が低下し、スリットのないものに漸近する。

4.4 その他

①乾湿、スリットの有無にかかわらず側圧の影響はほとんど受けない(図-6)。

②破壊強度と速度値の関係は単純ではない。しかし破壊強度の大きいものは一般に速度値も大きい。

③空隙が水で満されていると速度が大きく乾燥させると速度がだんだん小さくなる(図-7)。しかし砂岩のような粒状体では乾燥状態に近づくと

5.まとめ

岩石種、乾燥・湿潤状態、スリットの有無によって軸圧力を増加させた場合の弾性波速度の増減を試験した。その結果、①軸応力(対数)と弾性波速度は岩石種に関係なく直線関係にある②弾性波速度の大きいものほど増加率が高い。

③拘束圧に関係ない。④スリットの数に比例して速度が低下することが判明した。

本試験にあたり終始、有意義な御助言ならびに

表-2 定数 a, b および相関係数

岩石名	状態	スリット数	a	b	相関係数 r	
モルタル	湿潤	0	167.00	3957.70	0.940	
		1	239.54	3456.27	0.761	
		2	335.16	3297.42	0.655	
	乾燥	0	481.82	2859.15	0.812	
		1	293.30	3029.70	0.979	
		2	328.43	2931.19	0.973	
	凝灰岩	0	505.90	2388.73	0.961	
		1	514.70	2361.43	0.930	
		2	306.36	1705.66	0.977	
砂岩	乾燥	0	337.88	1577.71	0.982	
		1	328.85	1672.04	0.953	
		2	345.45	1686.04	0.970	
	湿潤	0	295.84	1645.41	0.842	
		1	373.17	1567.40	0.933	
		2	482.47	1383.84	0.872	
	花こう岩	乾燥	0	530.33	1299.94	0.913
			1	657.75	1848.03	0.969
			2	674.14	1819.57	0.983
湿潤		0	842.11	1467.04	0.997	
		1	764.13	1575.12	0.985	
		2	549.02	2246.44	0.992	
凝灰岩		乾燥	0	700.20	1898.85	0.952
			1	545.54	2266.26	0.992
			2	583.32	2191.61	0.987
	湿潤	0	847.81	2841.64	0.987	
		1	1128.70	2630.70	0.993	
		2	1161.04	2093.12	0.966	
	モルタル	乾燥	0	1247.39	2347.46	0.981
			1	475.89	4209.44	0.967
			2	594.04	4061.19	0.959
湿潤		0	586.03	4039.64	0.950	
		1	619.64	3903.06	0.968	

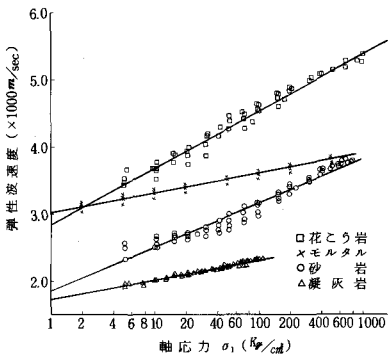


図-3(a) 軸応力と弾性波速度およびその回帰曲線(乾燥)

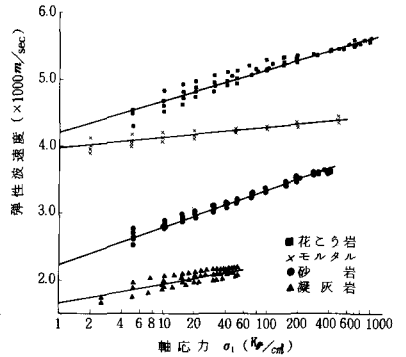


図-3(b) 軸応力と弾性波速度およびその回帰曲線(湿潤)

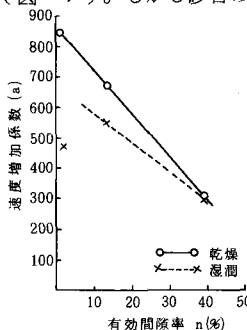


図-4 有効間隙率と速度増加係数

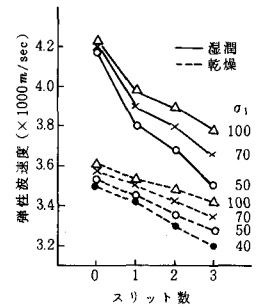


図-5 スリット数と弾性波速度(モルタル)

御協力を下さった柳田地質化学部長, 岡本地質研究室長, 武井修氏(現川治ダム工事事務所), 加藤則男氏, 神保悟氏に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

1) Hughes, D. S., Cross, J. H. (1951): Elastic Wave Velocities in Rocks at High Pressures and Temperatures, Geophysics, vol. 16, No 4, pp. 577~593

2) 宮村撰三編(1963) 地球科学講座 第6巻 地震・火山・岩石物性 共立出版 pp. 281~285
 3) 大見美智人, 井上正康(1977) 一軸圧縮下における岩石の弾性波伝播特性 第5回 岩の力学国内シンポジウム講演集 pp. 7~11
 4) 岡本隆一, 菅原捷, 武井修(1977) 岩石の切削および破断特性に関する試験調査 建設省土木研究所昭和50年度 道路事業調査費報告 pp. 234~239

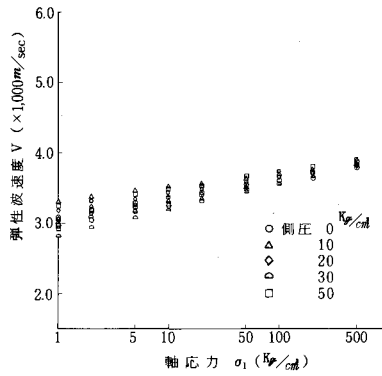


図-6(a) 側圧別軸応力と弾性波速度(モルタル)

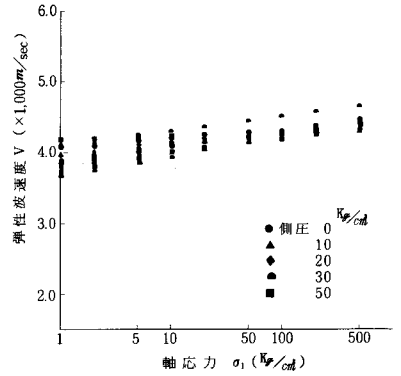


図-6(b) 側圧別軸応力と弾性波速度(モルタル)

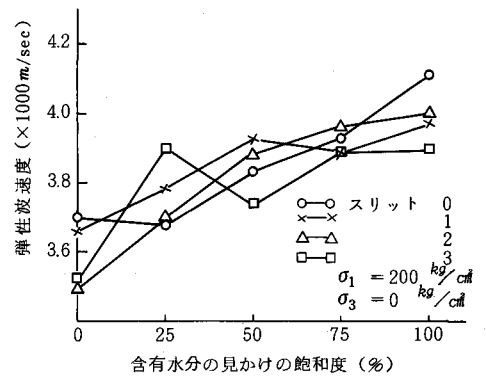


図-7 見かけの飽和度と弾性波速度

EXPERIMENTAL STUDIES OF COMPRESSIVE STRESS AND ELASTIC WAVE VELOCITIES IN ROCKS

Public Works Research Institute
Hayashi SUGAHARA

Abstract

The variation of ultrasonic velocities in rock samples with stress applied to them has been studied. Specimens used were granite, sandstone, tuff and cement mortar in size of about 50mm in diameter, 100mm in length. These physical and mechanical properties are shown in Fig. 1.

Tests of some cement mortar specimens were performed under the triaxial conditions and no difference was examined with different confining pressure. Therefore other specimens were experimented under the uniaxial conditions.

Followings are the results of this study;

- (1) Ultrasonic velocities through rocks increase with stress. The relation can be formularized by $v=a\log\sigma+b$ shown on Fig. 3.
- (2) The increase of the velocities through saturated specimens is greater than that through dried ones.
- (3) There is no velocity difference with confining pressure.
- (4) Velocities through specimens generally increase with the degree of saturation (Fig. 4).
- (5) Velocities decrease with number of slits cut perpendicularly by rock saw (Fig 5). The decrease is greater in the condition of saturated specimens.