

(10) 比較的均質な岩石の応力下における弾性波伝播特性

関西大学工学部 正会員 谷口敬一郎
関西大学工学部 正会員 ○楠見 晴重
サコ-コンサルタン(株) 正会員 森本 耕司
関西大学大学院 学生員 寺岡 克己

1. まえがき

岩石供試体の超音波伝播速度を測定することにより、岩石の力学的性質を求めようとする試験法は広く普及している。また野外における弾性波探査の結果と比較して、岩盤の亀裂状態を評価しようとする方法にもよく利用されている。しかし、弾性波探査による弾性波速度が、室内試験のそれよりも高い値を示すことが比較的均質な岩盤でみられることがある。これは実際の岩石は地山応力下にあるのに対して、一般的にこの室内試験は、応力解放の状態下で測定されていることが要因であると思われる。

本研究は岩石供試体に圧縮応力を加えた場合の加圧方向のP波速度の変化を定量的に把握する目的で、高圧三軸試験機を用いて行った実験的研究について報告するもので、比較的均質な組成構造を有しているが、変形特性が異なる2種類の岩石について岩石の圧縮変形とP波速度との関係を吟味し、岩種による応力下の弾性波速度の変化特性について考察を行った。

2. 実験装置および方法

実験は図-1に示すように最大軸荷重100tf 最大側圧能力500kgf/cm² の高圧三軸試験機を用いた。この装置の上下加圧盤内には固有振動数300KHzのチタン酸バリウム磁気圧電子を埋め込み、加圧方向と同一方向の供試体のP波速度を測定した。実験方法は、所定の側圧で等方圧縮させた後、軸圧を徐々に負荷させながら、供試体のP波伝播時間を適当な間隔で測定した。また供試体2箇所に貼り付けたひずみゲージにより縦ひずみ ϵ_L 横ひずみ ϵ_T をも測定した。載荷方式はひずみ制御とし、ひずみ速度は0.05%/min とした。

実験に用いた岩石は、大阪府南部産の和泉砂岩と均質なイタリヤ産大理石である。和泉砂岩は中世代白亜紀後期に属する和泉層群中の均質な粗粒砂岩である。これらの岩石の諸物性は表-1に示す通りである。

3. 各岩石の変形特性

図-2は和泉砂岩と大理石の $\sigma_3=50\text{kgf/cm}^2$ における応力-ひずみ曲線である。体積ひずみ ϵ_v は $\epsilon_v=\epsilon_L+2\epsilon_T$ として算出した。Bieniawskiは岩石の三軸圧縮過程での変形状態は、領域(1):潜在する微小クラック、間隙が閉塞する。

領域(2):弾性的変形。領域(3):Griffith理論に基づく安定クラックの発生による内部破壊の進展。領域(4):不安定クラックの発達。の4つの領域に区分することができるとしている。図-2は、この基準にしたがって応力-ひずみ曲線を区分している。これによると大理石では領域(1)が存在していないが、これは大理石の組成構造が緻密であることに起因していると思われる。また領域(3)では、和泉砂岩の ϵ_L - σ_1 応力関係は直線的であるのに対し、大理石のそれは、曲線状を呈している。これより和泉砂岩は脆性的であり、大理石は延性的傾向を示しているものと思われる。

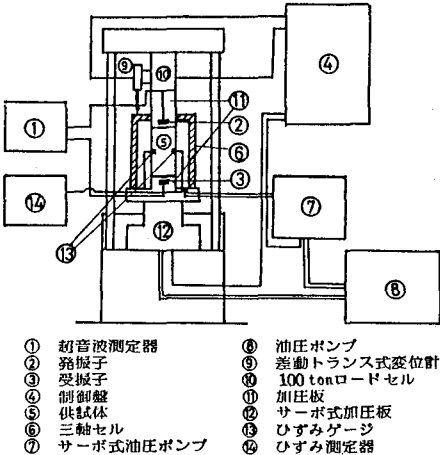


図-1 実験装置

表-1 各岩石の諸物性

	q_u (kgf/cm ²)	Gs	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)
和泉砂岩	1776	2.75	1.79	4.69
大理石	885	2.89	0.69	1.74

4. 応力下における弾性波伝播特性

図-3は各側圧下における軸差応力の増加に対する弾性波速度の変化を示したものである。縦軸は弾性波速度 V_P と応力解放状態の弾性波速度 V_{P0} との比で表している。この図より側圧0のときには和泉砂岩、大理石とも軸差応力に対する弾性波速度

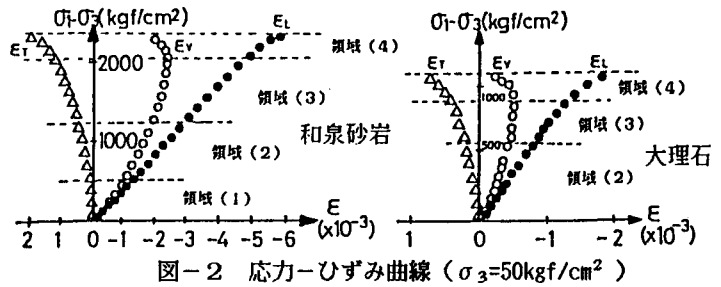


図-2 応力-ひずみ曲線 ($\sigma_3=50\text{kgf/cm}^2$)

の増加傾向は比較的類似しており、また V_P/V_{P0} の最高値 ($V_P/V_{P0})_{\text{max}}$ もほぼ同じ値を示している。しかし、側圧が増すにしたがって、弾性波速度の増加は著しくなり、特に和泉砂岩は大理石に比べてその傾向が強く、両岩石の ($V_P/V_{P0})_{\text{max}}$ の差は大きくなっている。これより、応力下における弾性波速度の変化は、一軸圧縮状態下と三軸圧縮状態下とはかなり異なることが認められた。

図-4は、 $\sigma_3=50\text{kgf/cm}^2$ における弾性波速度 V_P と軸差応力 ($\sigma_1-\sigma_3$) との関係はBiniaskiの変形区分にしたがって領域分けしたものである。これより和泉砂岩の領域(1)において、弾性波速度の増加は著しいことが認められる。領域(2)~(4)においては、両岩石は若干異なった挙動を示している。領域(2)~(3)における和泉砂岩の弾性波速度は、徐々に増加しているのに対して、大理石の弾性波速度は領域(2)では高い増加を示すが、領域(3)ではほぼ一定の値となっている。また領域(4)では、和泉砂岩の弾性波速度は破壊点までは徐々に減少するが、破壊点に達すると急激に減少して初期の値より小さくなる。その後残留応力状態下では再び増加している。これに対して、領域(4)における大理石の弾性波速度は、破壊点までは和泉砂岩とはほぼ同様の傾向を示すが、破壊後は和泉砂岩に

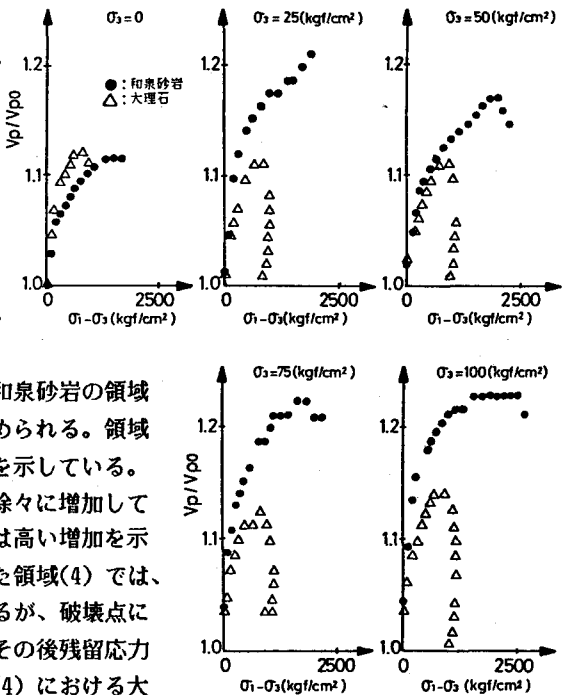


図-3 各側圧下における弾性波速度

比べてゆるやかに減少し、残留応力状態下ではほぼ一定の値となっている。

以上の領域別の弾性波速度の変化は側圧が異なっても、図-5からも明かなようにほぼ同様な挙動を示していることが認められる。ここで和泉砂岩の領域(1)では、構成粒子間に存在する空隙の閉塞ならびに介在物質の圧縮性が著しく、弾性定数が高くなるた

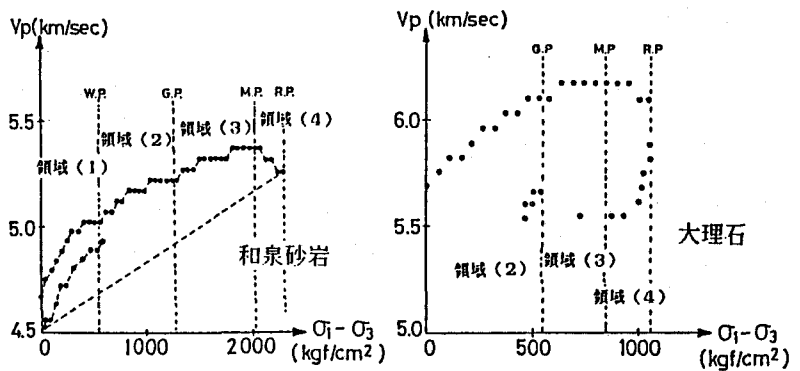


図-4 弾性波速度と軸差応力との関係 ($\sigma_3=50\text{kgf/cm}^2$)

めと思われる。領域(4)における2つの岩石の弾性波速度は著しい相違を示しているが、これは両岩石の破壊形態の相違に起因しているものと思われる。すなわち、両岩石は比較的均質であるが、和泉砂岩の破壊形態は軸に対して多少の角度をもって1～2本の

不安定クラックが供試体を横切るため、このクラックに起因して弾性波速度は急激な減少を示すものと考えられる。大理石の破壊形態は、供試体内に円錐状コーンが生じて破壊を起こすために、弾性波の伝播経路には和泉砂岩のような大きな空間が存在しないことから、弾性波速度は和泉砂岩のような急激な減少を示さず、比較的ゆっくりと減少していくものと考えられる。

表-2、表-3は両岩石における応力解放状態の弾性波速度 V_{P0} 、等方圧縮状態下の弾性波速度 V_{Ph} 、三軸応力状態下における弾性波速度の最高値 V_{Pmax} 、それぞれに対する比率を表したものである。これらの表より、 V_{Ph}/V_{P0} において、両方の岩石は各側圧下ともほぼ同じ値を示している。しかし、 V_{Pmax}/V_{Ph} および V_{Pmax}/V_{P0} は大理石よりも和泉砂岩の方が高い値を示している。このことより応力に対する弾性波速度の増加割合は、和泉砂岩の方が高いことが認められる。和泉砂岩と大理石とを比べた場合、表-1からも明らかなように、有効間隙率は和泉砂岩の方がかなり大きな値を示している。また大理石には領域(1)が存在しないことから、均質な岩石の場合、応力による弾性波速度の増加程度は、応力解放状態下における有効間隙率に依存するものと思われる。

次に、弾性波速度が領域(3)と領域(4)の境界付近から減少し始めていることに注目して、側圧50kgf/cm²

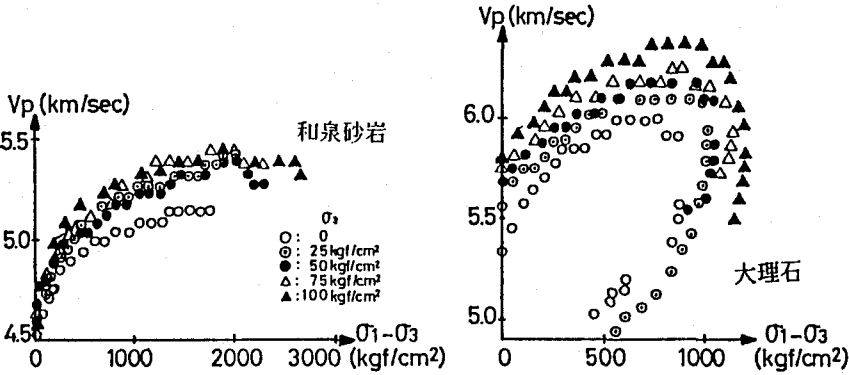


図-5 各側圧下における弾性波速度と軸差応力との関係

表-2 和泉砂岩

側 圧 (kgf/cm ²)	V_{ph}/V_{p0}	V_{pmax}/V_{ph}	V_{pmax}/V_{p0}
0	1.00	1.12	1.12
25	1.01	1.20	1.21
50	1.02	1.15	1.17
75	1.04	1.18	1.22
100	1.04	1.17	1.23

表-3 大理石

側 圧 (kgf/cm ²)	V_{ph}/V_{p0}	V_{pmax}/V_{ph}	V_{pmax}/V_{p0}
0	1.00	1.12	1.12
25	1.01	1.10	1.11
50	1.02	1.09	1.11
75	1.03	1.09	1.12
100	1.04	1.10	1.14

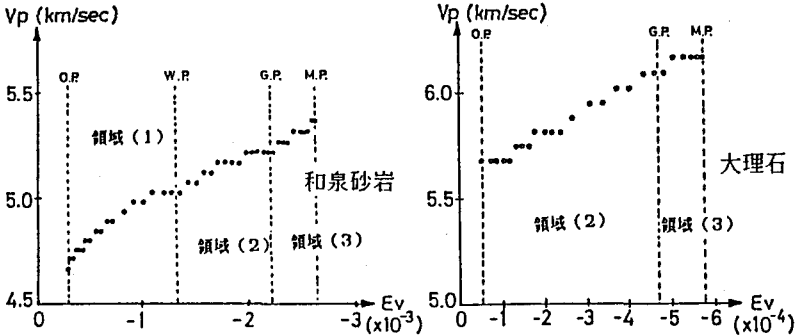


図-6 弾性波速度と体積ひずみとの関係 ($\sigma_2=50\text{kgf/cm}^2$)

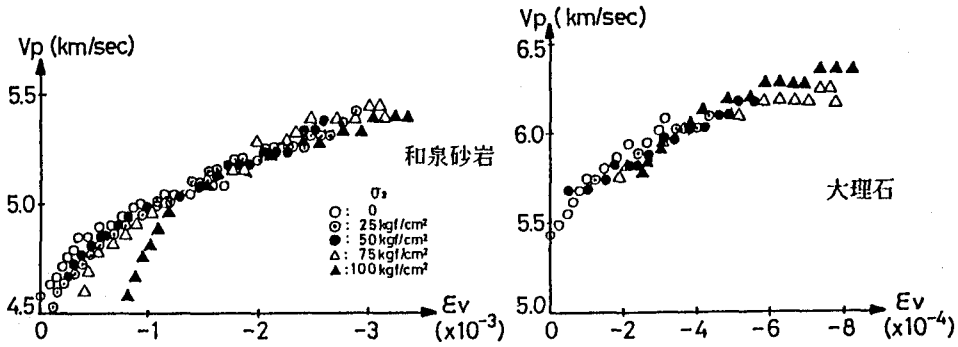


図-7 各側圧下における弾性波速度と体積ひずみとの関係

のときの弾性波速度と体積ひずみとの関係を示したのが、図-6である。ただし、ひずみは抵抗線ひずみゲージで測定しているために、領域(4)のひずみは測定されていない。この図より両方の岩石とも、弾性波速度の増加は軸差応力との関係よりも、体積ひずみとの関係の方がより直線的であるといえる。

図-7はそれぞれの岩石における各側圧下での弾性波速度と体積ひずみとの関係を示したものである。これらの図より、弾性波速度 V_p と体積ひずみ ϵ_v との関係は側圧が異なってもほぼ同様の直線関係を示していることより、各岩石とも1つの直線式に近似させることができ、以下のような式が得られた。

$$\text{和泉砂岩: } V_p = 4.47 - 2.18 \times 10^2 \epsilon_v \quad \dots \dots (1)$$

$$\text{大理石: } V_p = 5.57 - 1.24 \times 10^3 \epsilon_v \quad \dots \dots (2)$$

これら2式の相関係数は0.97ないし0.98であることから、応力下における岩石の弾性波速度と体積ひずみとは非常に強い相関関係を有することが認められた。

5. まとめ

高压三軸試験機の一部を改造して、三軸応力状態下における比較的均質な岩石の弾性波速度を測定したところ、低い応力領域においてかなり著しい弾性波速度の変化が認められ、通常の応力解放状態下において測定された結果の意味について再考する必要があるように思われる。また応力の増加に伴う弾性波速度の変化状態はそれぞれの変形領域において、各岩石ごとに特徴のある形態を示すが、特に破壊点付近での弾性波速度の挙動は破壊形態の違いにより、顕著な相違を示すことが明らかにされた。

応力下における弾性波速度の変化は応力と関係づけるよりも、むしろ体積ひずみをパラメータとして表した方が、側圧の大きさに関係なく、弾性波速度と体積ひずみとは非常に強い直線的相関性を呈することが判明した。

参考文献

- 1) Hoek, E. and Bieniawski, Z.T.: Brittle Fracture Propagation in Rock under Compression, Inter. Jour. Fract. Mech. Vol. 1, 1965.
- 2) Hoek, E.: Brittle Failure of Rock Mechanics in Engrg. Practice (ed. Stagg and Zienkiewicz) John Wiley, 1968.
- 3) N. I. Chitensen and H. F. Wong: The influence of Pore Pressure and Confining Pressure on Dynamic Elastic Properties of BERE A Sandstone, GEOPHYSICS, Vol. 50, No. 2, 1985.
- 4) 土質工学会: 岩の工学的性質と設計・施工への応用, 1974.

(10) On Propagation Characteristics of Elastic Wave under Stress Condition
in Isotropic Rocks

By

Keiichirou TANIGUCHI, Harushige KUSUMI, Katumi TERAOKA
(KANSAI University)

Kouji MORIMOTO
(SANKO Consultant Co., Ltd.)

Summary

It has been known that the propagation velocity of the elastic wave through the rock changes when it is placed under the compressive stress as against the non-stress condition. Some reports have been announced on the characteristics of velocity variation under the axial stress or in the static water pressure, but it seems some essential differences exist between above stress and the triaxial stress condition.

We remodeled the cell of triaxial compression testing machine to be capable of measuring P wave velocity of the axial direction by means of super sonic wave, and carried out a series of experiments to examine the characters of velocity change under the triaxial stresses. Tested rock specimens are sandstone and limestone which have the comparatively isotropic structures.

The mode of velocity change under the triaxial stresses coincides with that of strain, therefore the relation between velocity and volumetric strain shows the linearer figure than the curve of velocity vs. stress. It has been recognized that P wave velocity of the rock indicated brittle fracture decreases rapidly, that of the rock indicated ductility fracture decreases slowly.