

Ⅲ-325

岩石の縦波伝播速度の応力依存性

京都大学 正会員 ○小林昭一、 東京急行電鉄 下山洋一
NTT 鈴木 聡

1. はじめに

岩石の応力-ひずみ関係は、一般に非線形であり、応力サイクルに対してヒステシスを描くことはよく知られている。このことは、弾性定数が応力状態によって変化することを意味している。一方、弾性波の伝播速度は（弾性係数/密度）の平方根に比例する。これらの事実は、岩石中を伝播する弾性波の伝播速度が応力の関数として変化することを意味している。このように応力に伴って弾性波の伝播速度が変化する現象は、全ての弾性波（縦波、横波および表面波）に期待される。また、負荷-除荷-負荷に伴うヒステシスの存在は、過去に供試体が受けた最大応力（履歴最大応力）点で弾性波の伝播速度に変化が生じることを示唆している。このような特性を利用すれば、弾性波の伝播速度の変化を計測することによって履歴最大応力を推定することが可能であろう。この報文では、特に縦波について行った試験結果を報告する。

2. 実験

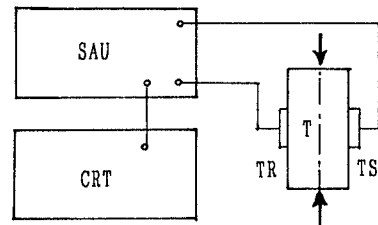
2.1. 実験装置

この実験の基本は、弾性波の伝播速度を正確に測定することである。その目的には、シングア라운드周期測定法が簡便である。計測システムのブロック図を図-1に示す。その計測原理は、シングア라운드装置（SAU）で発生させた電圧パルスを用いて発信振動子（TS）を駆動して供試体内に弾性波を入射し、ある距離を伝播してきた弾性波をもう一つの受信振動子（TR）で受信し、電圧に変換して検出することである。シングア라운드装置は、受信信号を一定振幅まで増幅すると共に、単一のパルスに変換した電圧パルスが、遅延回路を通して再び送信回路をトリガーして、送信振動子を駆動する電圧パルスが発生させるようになっており、その時間計測は、送信-供試体内の弾性波の伝播-受信-遅延-送信のループを繰り返す系（シングア라운드）の周期を測定するようになっている。なお、ここで用いたシングア라운드装置（電波工業（株）製、UVM-2）は、 10^4 回までのシングア라운드周期計測により、0.1nsの精度で周期を計測できるようになっている。試験では、オシロスコープ（CRT）を用いて波形をモニターし、ゲート幅やトリガー位置を決定した。

2.2. 供試体と測定法

供試体として、輝石安山岩（箱根火山古期外輪山溶岩、一軸圧縮強度：2,140kgf/cm²）および砂岩（新第三系・田辺層群、一軸圧縮強度：530kgf/cm²）から切り出した円柱（寸法：φ50x100mm）を用いた。この円柱供試体の両端面中央、および中央高さの直径両端面に送受信振動子として、厚み振動用の圧電素子（PZT-7）をエポキシ系の接着剤で接着した。安山岩および砂岩には、固有振動がそれぞれ1MHz（φ10^{mm}）および500kHz（φ10^{mm}）の圧電素子を使用した。また、軸ひずみおよび直径方向のひずみを測定するために、供試体の中央高さにクロスひずみゲージを接着した。

測定には、まず、無載荷状態での縦波のシングア라운드周期を計測し、ついで圧縮荷重を暫増および暫減しつつ、供試体の応力、ひずみおよびシングア라운드周期計測を行った。なお、シングア라운드周期計測には、10³回の繰り返しを行い、さらにそれを5回計測して平均した。



SAU:シングア라운드装置 CRT:オシロスコープ
TS:発信振動子 TR:受信振動子 T:供試体

図-1 実験装置

3. 試験結果と考察

3.1. 伝播速度の変化率

弾性波の伝播速度の変化率は、伝播速度を v 、伝播距離を L 、伝播時間を T とすると、

$$\frac{dv}{v_0} = \frac{dL}{L_0} - \frac{dT}{T_0} \quad (1)$$

と与えられる。ここに、添え字 0 は初期状態を意味している。上式の右辺第1項はひずみを、第2項は伝播時間の変化率を意味している。これらが計測されることになる。一方、シングア라운드計測では、

$$\frac{dT}{T_0} = \frac{(SAP) - (SAP)_0}{T_0} = \frac{(SAP) - (SAP)_0}{(SAP)_0 - \tau_0} \quad (2)$$

である。ここに、 (SAP) はシングア라운드周期、 τ_0 は測定系固有の遅延時間である。

3.2. 計測結果と考察

円柱の直径方向に伝播する縦波の伝播速度の変化率と応力との関係を図-2に示す。なお、この図では、煩雑さを避けるために、負荷時のみを示してある。

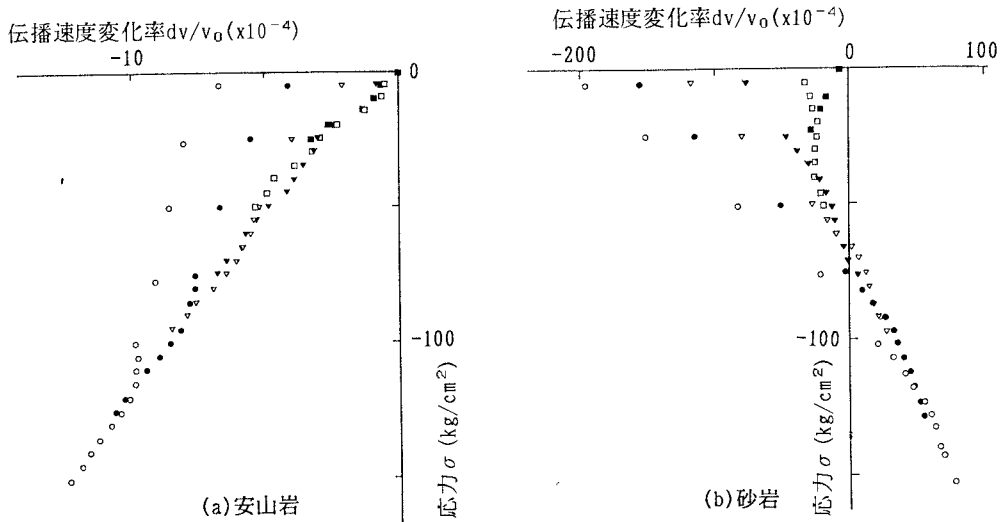


図-2 応力-縦波の伝播速度変化率（直径方向）

この図からつぎのことが分かる。1) 安山岩では、応力と縦波の伝播速度の変化率とはほぼ比例する。2) 砂岩では、それは非線形である。3) 履歴最大応力以下では、安山岩では除荷時および再載荷時の勾配が大きくなる。4) 砂岩では、その傾向は逆である。5) 安山岩および砂岩両者において、履歴最大応力点では、曲線の勾配が急変する。なお、この試験での応力範囲は、安山岩では強度の15%以内、砂岩では50%以内である。（図示のものは、それよりも低い応力範囲である）。

これらの結果、特に5)の事実から、縦波の伝播速度の変化を計測することによって、履歴最大応力を推定することができる。これは、アコースティック・エミッションにおけるカイザー効果と類似している。

4. おわりに

上述のように、供試体内の縦波の伝播速度の変化を計測することにより、履歴最大応力を推定することができる。なお詳細な実験が必要ではあるけれども、この事実を利用すれば、ボーリング・コアから整形した供試体を用いて、地山の初期応力状態を推定することが可能であろう。