

# 原位置における高精度弾性波測定システムを用いた岩盤モニタリング技術の開発

田中義晴<sup>1</sup>・稲葉 力<sup>2</sup>・平田篤夫<sup>3</sup>・石田一成<sup>4</sup>・佐野 修<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4)

<sup>2</sup>正会員 工博 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4)

<sup>3</sup>正会員 工博 熊本工業大学 工学部土木工学科 (〒860 熊本県熊本市池田4-22-1)

<sup>4</sup>正会員 山口大学 大学院工学研究科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

<sup>5</sup>正会員 工博 山口大学 工学部社会建設学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

岩盤のモニタリングの一手法として弾性波伝播現象の測定が考えられるが、従来の方法による原位置弾性波測定では、弾性波速度で数%程度の精度しかなく、極めて長期にわたる安定性あるいは遮蔽性をモニタリングするには、さらに高い分解能が必要な場合が考えられる。本研究は、このような観点にたち、原位置における高精度の弾性波測定システムの開発を行った。そして、これを用いて原位置における長期間の計測を行なった結果、弾性波速度で0.003%の分解能を有し、地震発生に関連した0.010%の速度変化を検出することができた。この程度の速度変化は岩盤内応力変化で0.01MPaのオーダーに対応するものと推定され、本システムはこの程度の応力変化に対応した速度変化のモニターが可能である。

*Key Words : monitoring of rockmass, in-situ measurement, higher resolution, elastic wave, Piezoelectric transducer*

## 1. 緒言

地下の開発は、可住地面積が国土総面積の20%にしか満たない我が国にとって、国土の有効利用の解決策の一つとして注目されている。これまでに、地下空間の利用として揚水式発電所空洞や石油地下備蓄施設が建設されているが、将来的には圧縮空気貯蔵施設(CAES-GT)、超伝導エネルギー貯蔵施設(SMES)、LPGなどの低温物質貯蔵施設、放射性廃棄物の地層処分などが予定され、地下空洞はスケールメリットを追究し大型化する傾向にある。CAES-GTでは空洞内のライニングを通して4~8MPaの高圧が岩盤に繰り返し作用することや、大型SMESでは最大で約10MPaの応力を周囲岩盤で支持しなければならないことが予想されている<sup>1)~3)</sup>。また、低温物質貯蔵施設の場合、低温物質の出し入れの際に行われる熱収縮による亀裂発生が予想されている<sup>4)</sup>。このため、このような地下大空間の建設をするにあたり、施工中および施工後数十年以上にわたる地下大空洞の長期的な安定性や遮蔽性を監視できる技術

の開発は重要な課題であると考えられる。

地下大空洞の安定性や遮蔽性は空洞をとりまく岩盤の物理的性質の変化に大きく支配されている。岩盤や岩石の弾性的性質は、亀裂の消長あるいは亀裂の含水状態に大きく影響を受け、弾性波がこれらの変化を検出するのに有効な手段であることは既に報告されている<sup>5),6)</sup>。

一般に、土木現場における原位置の弾性波測定精度は、発振源の周波数が低いことや再現性が悪いなどの問題から、弾性波速度で数%以上変化する程度の破壊や損傷などの現象は検出可能であるが、極めて長期間の岩盤の安定性や遮蔽性をモニタリングするには不十分であると思われる。したがって、弾性波を用いてこのような議論をする場合、さらに高い分解能を有した測定技術の開発が必要である。

そこで、本論文では上述の視点にたつて、弾性波の高精度測定システムを開発したのでこれについて説明する。また、このシステムを原位置岩盤の長期計測に適用し、その結果から弾性波による高精度な岩盤モニタリングの可能性について検討する。

## 2. 測定システムの開発

### (1) 要求される測定精度

これまでの計測事例によると、岩盤や岩石の弾性波測定を行なった結果、既存亀裂の開・閉合や進展、また、新たな亀裂の発生などの変化は、弾性波速度よりも初動の振幅値の方に敏感に変化が現われると言った報告が多い(5)~(7)。ところが、振幅値は発振パルスのエネルギーのばらつきや、岩盤の減衰特性を表わす指標であるQ値に影響されやすいのに対して、弾性波速度はこれらに影響されず、かつ岩盤の弾性率と関係するので設計に用いる力学的パラメータの変化が得られる。したがって、岩盤の安定性や遮蔽性をモニタリングする場合、弾性波速度をパラメータとする必要がある。

従来の方法による数センチメートルの岩石や、数十センチメートルから数十メートルの岩盤の弾性波速度の測定精度は、せいぜい1%程度である(8)。ここで、長期間の安定性や遮蔽性をモニタリングするのに必要な分解能を概算する。岩石破壊実験によると健全な岩石が破壊するまでに弾性波速度は概ね25%以上低下する(9),(10)。ここで例えば、100年間でこの程度変化が生じると考えると100年前にあらかじめ予測するためには少なくとも1ヵ月間で約0.02%以下の低下量が検出される必要がある。実際には弾性波速度の低下挙動は等速度変化するわけではなく、初期段階では低下率は小さく破壊の進行に伴い加速することがわかっている。したがって、これよりも測定精度を1桁程度上げる必要があると考えられる。仮に、健全な岩盤の初期弾性波速度が5000m/sの硬質岩盤で測線長が20mの計測の場合、初動到達時間で約10ns程度の分解能が必要であると言える。

### (2) 弾性波の伝播にともなう距離減衰

伝播距離  $x$  における、平面波の振幅低下率  $A/A_0$  は式(1)のように表わすことができる(11)。ただし、

$$\frac{A}{A_0} = \exp\left(-\frac{f \cdot \pi \cdot x}{Q \cdot V_p}\right) \quad (1)$$

$A_0$ は発振地点の振幅、 $A$ は伝播距離  $x$  における振幅、 $f$ は発振周波数、 $V_p$ は縦波速度、 $Q$ はQ値である。式(1)を用いて、周波数、Q値、および縦波速度を変数とし、振幅低下率と伝播距離の関係を求めると、それぞれ図-1、2および3のようにな

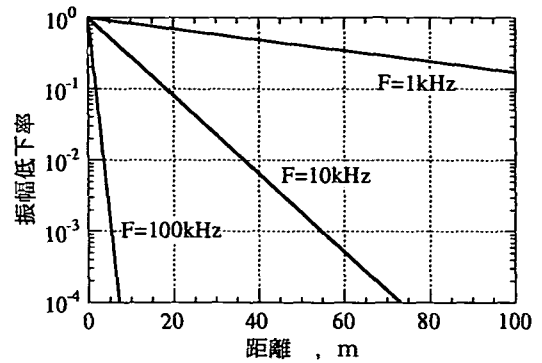


図-1 Q値と $V_p$ をそれぞれ50、5 km/sと固定し、周波数を1、10、100kHzと変化させた場合の平面波の振幅低下率と伝播距離の関係。

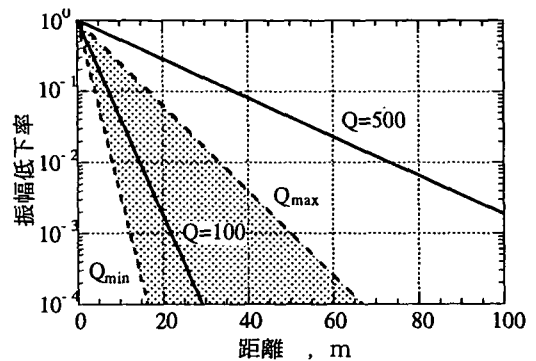


図-2  $V_p$ と周波数をそれぞれ5 Km/s、50kHzと固定し、Q値を変化させた場合の平面波の振幅低下率と伝播距離の関係。暗色の部分は、室内実験から得られた釜石の花崗岩のQ値の最大値と最小値である。

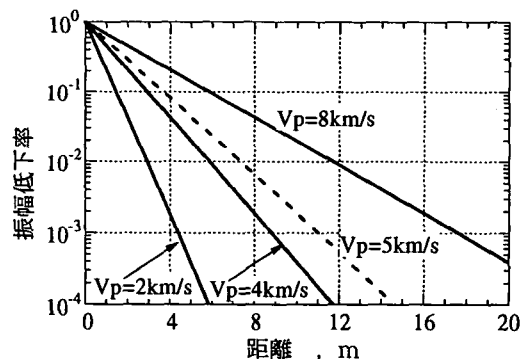


図-3 Q値と周波数をそれぞれ50、50kHzと固定し、 $V_p$ を2、4、5、8 kHzと変化させた場合の平面波の振幅低下率と伝播距離の関係。破線は、室内実験から得られた釜石の花崗岩の弾性波速度である。

表一 高出力パルス発生装置の性能.

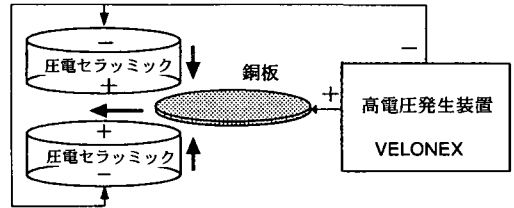
出力パルス 電圧 (V-peak)	パルスの極性	パルス幅 ( $\mu$ s)	ライズタイム (ns, max)	フォールタイム (ns, max)	デューティ ファクター (% at max out)	インプット 電圧 (V)	インプット 電力 (W)
100~1000	Negative	0.08~10000	35	35	0~1	100~115	250 (50 avr)

る。なお、図一1はQを50,  $V_p$ を5000m/s, 図一2は $V_p$ を5000m/s, 周波数を50kHz, 図一3はQを50, 周波数を50kHzと固定して計算した。図一1~3より、周波数が高くなることや、Q値や $V_p$ が小さくなるにつれ減衰勾配が急になることがわかる。したがって、岩盤のQ値および $V_p$ を用いて計測可能な距離と発振周波数および発振振幅を概算することができる。また、図一2中の破線は、釜石鉱山の岩石供試体を用いて含水比を変えてQ値を測定した結果の最小値 ( $Q_{min}=56$ )と最大値 ( $Q_{max}=230$ )であり、図一3中の破線はこの岩石供試体を用いて行った $V_p$ 測定の結果 ( $V_p=5000m/s$ )である。

### (3) 発振子の作製

従来の原位置弾性波測定に使用されている発振源には、ダイナマイトや雷管、エアーガンなどがある。ダイナマイトや雷管は出力が大きい、発振子周辺の岩盤を傷めてしまうため、同じ場所での繰り返し発振には向きである。エアーガンは安全かつ出力が大きい、発振される波形の再現性が悪いため、弾性波速度の測定精度を向上させるためには不適当であると考えた。また、これらの発振源は10kHz以下の低周波数であるため、初動到達時間で数 $\mu$ s以下の精度を要求することは困難である。そこで、出力は小さいが、発振周波数の設定が容易であり、岩盤を傷めず安定した振動を繰り返し発振することができる圧電振動子を発振源として使用することにした。

本研究では、室内での弾性波測定によく使用される圧電セラミック ( $Pb(Zr,Ti)O_3$ ) を使用した発振子を作製した。圧電セラミックの振動の大きさは与える電圧に比例するため、圧電セラミックに高電圧をかけ、より大きな振幅の弾性波を発生させることとした。高電圧を発生させる装置は、表一のような特性を持つ高出力パルス発生装置 (VELONEX社製, model 345) を用いた。圧電セラミックを複数個組み合わせさせた場合、1つの圧電セラミックにかかる電圧は、発振子全体にかかる電圧を1とすると、



図一4 発振子の組み立て図.

表二 圧電セラミックの性能.

圧電 セラミック の直径 (mm)	圧電 セラミック の厚さ (mm)	圧電 セラミック の数	総容量 (nF)	供振周波数 (kHz)
70	20	2	7.66	52.0

直列の場合  $1/n$  ( $n$ =圧電セラミックの個数)、並列の場合1となる。そこで、発振子全体の出力は各々の圧電セラミックの出力の総和であり、発振出力は電圧に比例するので並列のほうが直列の  $n$  倍となる。すなわち、並列の場合には、圧電セラミック1つと比べて圧電セラミックの個数倍の出力が得られる。よって、図一4に示すような方法で、圧電セラミックを2個並列に接続することとした。なお、表一2に作製した発振子の特性を示す。

### (4) 測定システム全体の流れ

図一5に測定システムの全体構成図を示す。測定は、パーソナルコンピュータPC-9801 (NEC社製) を用いて制御した。パーソナルコンピュータからの信号をトリガー信号として高出力パルス発生装置 (VELONEX) に発振命令を出し、圧電セラミックに高電圧をかけ発振子を振動させた。伝播した振動は、加速度計 (model707LF, TEAC社製) により受振され、センサーアンプ (SSC-80, サンシステムサプライ社製)、シグナルコンディショニングユニット (SSC-800, サンシステムサプライ社製) で増幅し、プログラマブルフィルター (3621, NF回路設計ブロック社製) でフィルター処理した後、ト

ランジェントイベントレコーダ (APC504, オートニクス社製) に記録される。これら一連の流れを繰り返し行ない、波形をスタッキングし、波形データをパソコンに保存する。また、測定系に何らかの影響を及ぼす可能性のある環境変化をモニターするため、岩盤温度、気圧、湿度および温度を測定する気象観測装置を作製した。岩盤温度、気圧、湿度および温度は各センサーにより電気量に変換され、これをA/D変換しIEEE-488によりパソコンに転送される。

### 3. 原位置における測定概要

#### (1) 測定現場

原位置において、本計測システムを用いた長期間の弾性波測定を行なった。測定現場の平面図を図-6に示す。測定現場は、岩手県釜石鉱山の550m坑口より約2km奥に入った蟹岳花崗閃緑岩帯にあり、土被りは約430mである。岩盤は細粒花崗岩であり、亀裂は存在するが、亀裂観察を行なったところ1mに2本程度である。また、現場から採取したボーリングコアより岩石供試体を作製し岩石試験を行なった結果、表-3に示すような物性値が得られた。一軸圧縮強度が約300MPa、縦波弾性波速度が約5000m/sであることから、岩盤は非常に硬質であることがわかる。実験現場の空洞(A-Drift, B-Drift)は、発破によって掘削されたもので壁面近傍の岩盤は損傷を受けている。この損傷領域の影響を避けるために、図-6に示すように発振側、受振側ともに1mのボーリングを行なった。発振子の設置は、ウェーブガイドとしてジュラルミン棒を埋設してねじで固定した。受振子の設置は、ボーリング孔の底面にボルトをセメントで埋め込み加速度計を磁石で設置した。

#### (2) ノイズ対策

実験現場はノイズレベルが小さいが、より測定精度を上げるため、フィルター処理を行なった。周波数フィルターは、急峻な減衰特性 (-24dB/OCT) のローパスフィルターを使用した。カットオフ周波数の変化 (Original, 100kHz, 50kHz, 20kHz) による測定弾性波の位相ずれを図-7に示す。これより、カットオフ周波数20kHzではかなりの位相ずれが生じるが、50kHz以上では位相のずれが小さくなり、ノイズも比較的小さいため、カットオフ周波数を50kHzに設定した。

また、ランダムに存在するノイズを消去するため

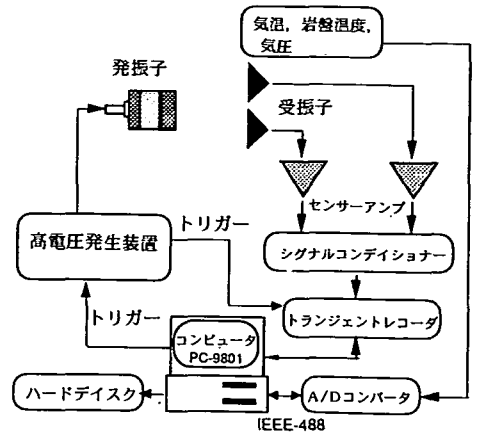


図-5 高精度弾性波速度測定システムの構成図。

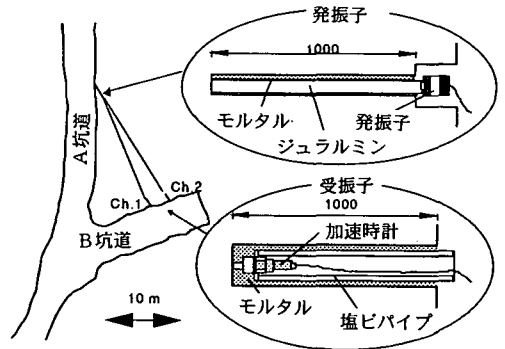


図-6 釜石鉱山における測定現場の平面図。

表-3 実験現場で採取したコアサンプルを用いて行った岩石試験から得られた物性値。

密度 kg/m <sup>3</sup>	UCS*, ST** MPa	静的 ヤング率 GPa	静的 ポアソン比	P波速度 km/s
2660	300	73	0.24	5.0

\* 一軸圧縮強度

\*\* 引張強度

スタッキングを行なった。スタッキング回数はある程度以上増加してもノイズ消去の効果は小さくなるため、適切なスタッキング回数の決定が必要である。そこで、フィルター処理した後の測定弾性波のスタッキング回数増加とランダムノイズの減少の関

係を図-8に示す。2000回のスタッキングを行えば、ノイズがほとんど消去され、初動の立下り部分が明瞭となるのがわかる。本測定では、現状から更にノイズが増加した場合を考えて、スタッキング回数を4000回に設定した。

### (3) 初動到達時間の決定方法

初動到達時間は、まず、得られた加速度波形を積分して速度波形を求め、初動の立ち上がり部分の変極点近傍を3次曲線で近似し最大勾配を求める。その勾配を傾きとした直線と基線の交点を求め、トリガ時間からその交点までの時間を初動到達時間とした。初動到達時間を正確に読み取るためには、弾性波を発生した時間(高出力パルス発生装置がパルスを発生した時間)をまず正確に把握する必要がある。また、発生した電気パルス幅により測定弾性波の周波数が増えるため、パルス幅も正確に把握する必要がある。初動到達時間の再現性は発振パルスとトランジェントレコーダのトリガリングのタイミングのずれの影響を受ける。そこで、図-9に示すような、高出力パルス発生装置がパルス発生時と終了時に出す電気ノイズを測定して、パルス幅とパルス発生時間を確認し、初動到達時間を補正することにした。なお、初動到達時間から岩盤を伝播する弾性波速度を求める際には、ウェーブガイドのぶんを補正する必要がある。

本測定に用いた、発振およびデータ取り込みに関する測定条件を表-4に示す。

## 4. 測定結果

測定は、1994年11月2日から始まり、現在も継続して行っている。得られた波形データから、初動到達時間を計算し、岩盤物性値の時間的変化を求めた。計測結果の一例(1994年12月2日午前0時~1995年1月16日午前0時)を図-10に示す。縦軸は初動到達時間であり、横軸は1994年1月1日午前0時を0日とした日数である。なお、ch.1とch.2(図-6に示す2カ所の受振点)ともに同様の傾向を示すため、図中のデータはch.1のみの結果である。12月10日~12月12日および12月24日にデータが欠落している部分があるが、これは釜石鉱山の坑内全体が停電したため、測定不能になったためである。初動到達時間のばらつきを見ると、約0.07 $\mu$ sec(0.003%の分解能)であり、非常に高い精度で弾性波を測定し、初動の到達時間を決定できたといえる。1994年12月28日21時19分にM7.5の三陸はるか沖地震(震源は八戸市の東方沖約200kmの日本海溝付近で深さは10~30km)が、1995年1月7日7時37分にM6.9の最大の余震が発生した。図中に示すように、同時刻に初動到達時間が急激な変化を示し

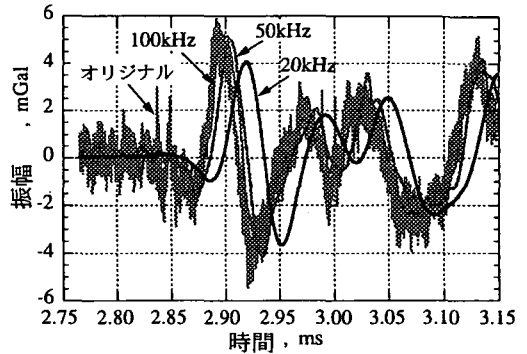


図-7 カットオフ周波数の変化(オリジナル, 100kHz, 50kHz, 20kHz)による測定弾性波の位相ずれ。

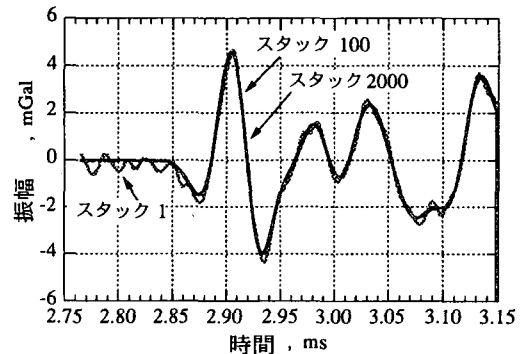


図-8 測定弾性波のスタッキング回数増加とランダムノイズの減少の関係。

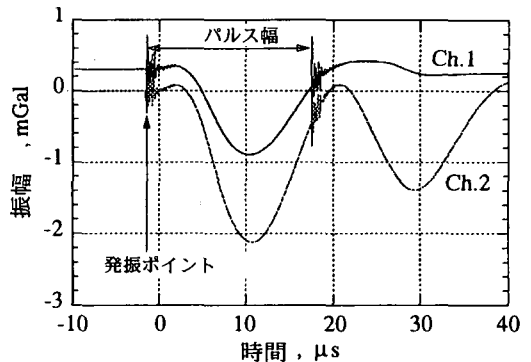


図-9 出力パルスの発振ポイントとパルス幅。

ている。三陸はるか沖地震の直後、約0.3 $\mu$ sほど瞬間的に遅くなり、その後徐々に早くなる現象が見られる。この地震直後の変動量は、直前の初動到達時間と比較して約0.010%、測線長を14.4mとすると速

表-4 測定条件

パルス幅 ( $\mu$ s)	出力電圧 (kV)	サンプリング レート (ns)	入力レンジ (Vp-p)	スタック数	デレイ ワード (kword)	測定間隔 (min)	倍率
19	1	50	0.8	4000	55	60	500

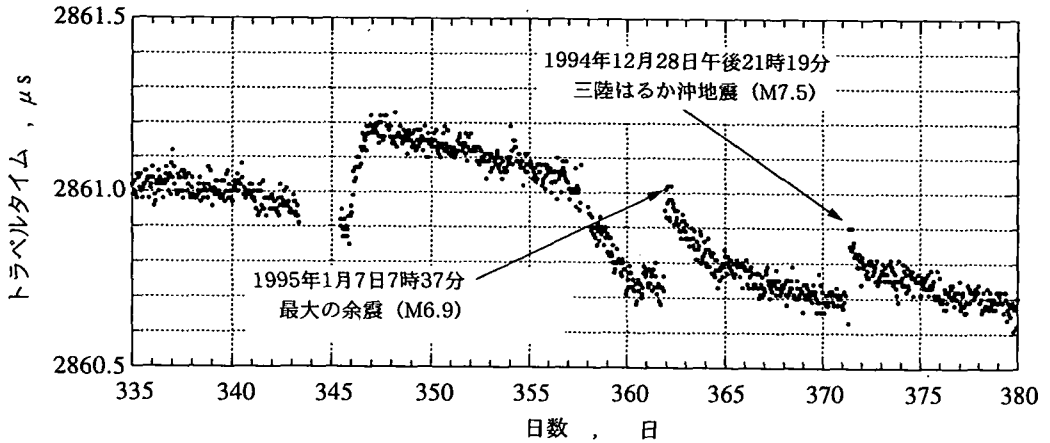


図-10 釜石鉱山実験サイトで得られた弾性波速度の経時変化。横軸は1994年1月1日00:00:00を0とした場合の日数である。

度変化で0.5m/s程度に相当する。

## 5. 考察

### (1) 測定結果の解釈

本実験では、弾性波の測定と同時に坑内の温度、気圧、湿度および岩盤温度も測定した。これらと初動到達時間の変動とを比較したが調和的な傾向を示すものはなかった。すなわち、初動到達時間の変動は、坑内の温度、気圧、湿度および岩盤温度の変化に起因したものではないと思われる。

まず、この初動到達時間の変動を岩盤の応力変化の視点から考える。測定現場は、土被りが約430mで岩石密度が約2700kg/m<sup>3</sup>であることから約10MPaの被り圧を受けていると仮定する。図-11に佐野等が大島花崗岩を用いて行った静水圧の変化による縦波速度の測定結果を示す<sup>12)</sup>。花崗岩には種類により差はあるものの潜在亀裂が含まれており、最も亀裂が発達した面をnit面、この面にほぼ垂直な2番目に亀裂が発達した面をgrain面、残りの面をhardway面と呼ぶ。図中V<sub>ij</sub>の添字はこれらの面の頭文字をとって、前者が弾性波の進行方向を、後者が振動方向を示している。この中で、静水圧が10MPa付近のV<sub>GG</sub>のデータを直線近似し縦波速度と静水圧

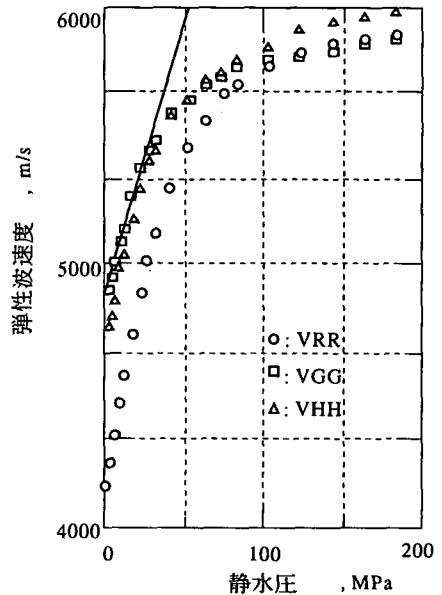


図-11 大島花崗岩供試体を用いた静水圧試験から得られた弾性波速度と静水圧の関係。

の関係を調べると、圧力が0.015MPa変化すると縦波速度が0.010%変化することが推定される。すなわち、地震直後の瞬間的な弾性波速度の0.010%の低下量は、0.01MPaのオーダーの岩盤の応力降下が空隙体積の増加（閉合亀裂の開口や開口亀裂の広がり）を引き起こしたためと考えることができる。

次に、初動到達時間の変動を亀裂中の水の移動の視点から考える。大島花崗岩供試体を用いて含水飽和状態から室内で乾燥する過程の重量計測から求めた含水比の変化曲線<sup>13)</sup>と、ほぼ同一の供試体を用いて含水飽和状態から室内で乾燥する過程の弾性波速度測定結果<sup>13)</sup>を組み合わせて求めた含水比と縦波速度の関係を図-12に示す。測定現場周辺は水が豊富にあり、年間通じて湿度が85%と一定である。したがって、図中の含水比が100%から71%の間を直線近似し、縦波速度の0.010%低下による含水比の低下を求めると、V<sub>H<sub>H</sub></sub>の場合で0.05%、V<sub>R<sub>R</sub></sub>の場合で0.02%程度である。

地震直後の初動到達時間の瞬間的な増加（速度低下）と、その後ゆっくりとした回復現象は0.015MPa程度の瞬間的な応力低下とその後の回復により説明することができる。あるいは、瞬間的な応力低下に伴う亀裂の開口による含水比の低下とその後の回復が同時に組み合わされた場合には、応力低下量はさらに小さくなる。含水比のみの低下を仮定すると0.05%以下程度の含水比変化が生じたものと考えられるが、亀裂の開閉合を考えずに含水比のみの変化を仮定するのは難しいので、おそらく応力低下単独か、あるいは応力低下とこれに伴う含水比の低下を組み合わせるべきであろう。その場合、ここで検出された応力低下は0.015MPaより小さく、含水比変化も0.05%以下と考えてよいものと思われる。ここで得られた推論は、Yukutake et al.<sup>14)</sup>が本研究と類似の弾性波速度測定システムを用いて計測した地球潮汐にともなう弾性波到達時間の変動を議論する際に用いた仮定と類似している。

三陸はるか沖地震の17日前（1994年12月13日）に比較的ゆっくりとした速度低下現象がみられる。これは、少し前（12月10日～12日）に停電があるため、測定系の乱れの可能性があるが、その後1年半の測定で停電後2時間で測定系は定常状態に戻ることがわかっている。したがって、このような変化は地震前に岩盤に何らかの変化があるのではないかと興味深く見ており、今後さらに検討していく予定である。

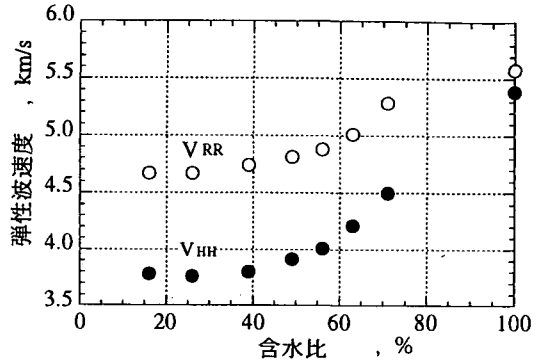


図-12 大島花崗岩供試体の含水比と弾性波速度の関係 (V<sub>H<sub>H</sub></sub>, V<sub>R<sub>R</sub></sub>はそれぞれハードウェイ面, リフト面に垂直な方向)。

## (2) 岩盤モニタリングへの適用性

前節で述べたように、本測定システムは、0.010%の弾性波速度の微小変動を検出でき、精度的には充分であると考えられる。また、現在も同実験場において連続自動測定を行っており、耐久性の点も問題はないことや、発振子の出力にまだ余裕があるため、さらに長い測線の測定にも適用可能である。したがって、本測定システムは、岩盤の極めて長期間の安定性や遮蔽性のモニタリングに充分適用可能であると考えられる。

## 6. 結言

弾性波を用いて地下空洞周辺の長期的な安定性や遮蔽性をモニタリングすることを念頭におき、これに必要な測定精度を満足するシステムを開発し、原位置において連続測定を行った。これらの結果を整理すると以下の通りである。

周波数の設定が容易であり、岩盤を傷めず安定した振動を繰り返し発振することが可能な、圧電セラミックを用いた発振子を作成した。そして、原位置における圧電セラミックの発振子を用いた高精度弾性波測定システムを開発した。

開発した測定システムを原位置測定に適用した。実験現場にあった適切なフィルター処理（カットオフ周波数の決定）およびスタッキング回数設定を行った後、長期間の連続測定を行った。その結果から、本測定システムで得られた弾性波速度の分解能は0.003%であり非常に高い精度で弾性波速度が決定できた。さらに、三陸はるか沖地震に関連した0.010%の弾性波速度変化から岩盤内の応力変化を

推定すると0.01MPaのオーダーであり、この程度の応力変化に対応した岩盤内の弾性波速度変化がモニター可能である。

謝辞：本研究をするにあたり、実験現場での作業およびデータ収集に協力していただいた日鉄鉱業（株）、釜石鉱山（株）の方々に謝意を表します。また、計測に関して御尽力いただいた行竹英雄氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 土木学会エネルギー土木委員会編：圧縮空気貯蔵発電システム (CAES) と土木技術—その現状と技術課題一, 土木学会, 1990.
- 2) 未来工学研究所：超伝導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究(3) (NEDO-P8408, NEDO委託調査成果報告書), 未来工学研究所, 1985.
- 3) (財)エンジニアリング振興協会：超伝導エネルギーシステムに関する調査研究報告書 (ENAA 1985-3), エンジニアリング振興協会, 1986.
- 4) 稲田善紀, 甲村雄一, 藤原斉都：低温物質の地山岩盤内貯蔵時における亀裂からの液漏れおよび冷気漏れ対策に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.455/III-18, pp.65-73, 1992-3.
- 5) 井上博之, 金子勝比古, 佐々宏一, 伊藤一郎：岩石の破壊の進展に伴う弾性波の振幅の減衰, 日本鉱業会誌, pp.323-328, 1975-5.
- 6) 佐々宏一, 南光宣和, 渋江隆雄：弾性波を利用する岩盤監視, 日本鉱業会誌, pp.927-931, 1982-9.
- 7) 谷本親伯, 岸田深：一軸圧縮状態での岩盤不連続面を透過する弾性波伝播特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.523/III-32, pp.49-58, 1995-9.
- 8) 岩の力学連合会：ISRM指針, Vol.2, pp.15-20, 1983.
- 9) 中山智晴, 野口康二, 岩崎孝：岩石内部のクラック進展に伴う弾性波伝播特性の変化, 早稲田大学理工学研究所報告, 第127号, pp.45-57, 1990.
- 10) 楠見晴重, 宮嶋保幸, 井上宏, 谷口敬一郎：応力下における種々な岩石の弾性波伝播特性について, 関西大学工学部誌, Vol.10, No.3, 1993.
- 11) 例えばAki,K. and Paul G. Richards: *Quantitative Seismology Theory and Methods, A Series of Books in Geology*, W.H.Freeman And Company, 1980.
- 12) 佐野修, 工藤洋三, 川島智, 水田義明：異方性体としての花崗岩の弾性率に関する実験的研究, 材料, Vol.37-418, pp.818-824, 1988.
- 13) 佐野修, 工藤洋三, 溝田忠人, 水田義明：花崗岩の脆性破壊挙動におよぼす間隙水の影響, 水曜会誌, 第21巻第6号, pp.390-396, 1991.
- 14) Y.Yukutake, T.Nakajima and K.Doi: In situ measurement of elastic wave velocity in a mine and the effects of water and stress on their variation, *Tectonophysics*149, pp.165-175, Elsevier Science Publishers B.V.,Amsterdam,1988.

(1996. 5. 2受付)

## DEVELOPMENT OF MONITORING TECHNIQS OF ROCKS IN SITU USING PRECISE MEASUREMENT SYSTEM OF ELASTIC WAVES

Yoshiharu TANAKA, Tsutomu INABA, Kazunari ISHIDA, Atsuo HIRATA and Osam SANO

A resolution of usual measurement of sound velocity was an order of 1 per cent. However, when the monitoring of rocks for the long term period was considered, higher resolution was needed. We developed, therefore, a precise measurement system of sound velocity in rockmass by using piezoelectric transducer.

We measured a sound velocity by this system at Kamaishi mine, and concluded that the system was applicable to monitor rockmass for long term, e.g. hundred years of underground structure, because it have 0.003 % resolution.