

(113) 釜石鉱山における弾性波速度の 高精度測定手法の開発とその応用

西松建設(株)技術研究所 ○田中義晴
西松建設(株)技術研究所 平田篤夫
山口大学 大学院 石田一成
山口大学 社会建設工学科 佐野 修

Development of high precision measurement method of sound velocity in situ and its applications.

Yoshiharu TANAKA , Atsuo HIRATA Nishimastu Construction Co.,Ltd
Kazunari ISHIDA Yamaguchi University(Graduate Student)
Osamu SANO Yamaguchi University

Abstract

A stacking method, or averaging method is one of the best techniques for a highly precise measurement of the elastic wave velocities of rocks in laboratory. PZT-transducers are generally used in such a method for getting the same pulse. However, the PZT-transducer of the usual size and its driver are not sufficient to transmit pulses in long distance of more than one meter. A percussion by a hammer or a detonator, usually used in situ, can not produce the same pulse which is essential in the averaging method. The authors developed an automated measurement system of the sound velocity for a path of 15 m in a massive granite at the Kamaishi mine. The PZT-transducer was driven by a 20 microsecond pulse of more than 1 kV. The reproducibility in the measured travel time was better than 0.02%. Such a high precision will be useful in the monitoring of the long-term stability of rock caverns.

1. はじめに

近年、地下発電所や圧縮空気貯蔵、廃棄物処理タンクなどの地下構造物が計画あるいは施工されている。このような地下空洞掘削は、今後増加する傾向にあり、掘削施工中(数年間)の短期安定性および施工後(数十年～数百年間)の長期安定性のモニタリング技術の開発が重要な課題となる。岩盤をモニタリングする方法は、弾性波を利用する方法、AE(Acoustic Emission)を用いる方法、非抵抗電気探査を用いる方法などが考えられる。この中で、弾性波は新たな亀裂の発生や既存亀裂の幅の変化の検出に有効な方法であることが既に報告されている^{1)～3)}。

本論文では、弾性波のもつ諸性質の中でも弾性波速度に着目し、弾性波速度の変化を高精度に測定するシステムを開発するとともに、釜石鉱山において、実際にこのシステムを用い、岩盤状態の微妙な変化を検出することが可能であるかどうかを検討したので報告する。

2. 弾性波速度の測定精度

従来、実験室および現場で測定される弾性波速度の測定精度は、1～数%程度である。この程度の計測で

も、大規模な破壊が生じたり、既存の大きな亀裂が開口・閉合する場合には、弾性波速度の変化を観測することは可能である。しかし、地下構造物の施工後、数十年にわたる地下構造物周辺の岩盤の長期安定性や遮蔽性を議論する場合、この程度の精度では不十分と思われる。ここで、仮に岩石破壊実験で得られる最終破壊時までの弾性波速度の低下量を1つの指標とし、さまざまな岩石や封圧条件を考慮し、最大低下量を例えば25%と考える。50年間でこの程度低下する場合、1ヶ月間で0.042%の低下量を計測する必要がある。実際には、弾性波速度の低下は等速度変化するわけではないので、これよりも1桁程度分解能を上げる必要があると考えることができる。例えば、初期縦波速度 $V_p = 5000\text{m/s}$ の硬質岩盤で測線20mの弾性波速度計測する場合、約200nsec程度の分解能が必要となる。

3. 計測システムの構築

Fig. 1 に示す概念で計測システムを構築した。最近の計測機器の技術発展はめざましく、上述の高分解能によるサンプリングは可能である。しかし、現場によってはノイズレベルが大きい場合がある。特に、発振パルスとノイズの周波数が非常に近い場合、フィルター処理が不可能である。また、高分解能でサンプリングをしたとしても、ノイズが大きければ初動の立ち上がり（立ち下がり）部分が明確にならず、正確な初動到達時間が見つめない。したがって、本実験では、毎回同一な発振パルスを出し、受振波形を繰り返し重ね合わせる（スタッキング）により、S/N比を向上させることにした。なお、同一な発振パルスを繰り返し出力するためには、ハンマーなどによる打撃や、爆薬、雷管などの爆発力を用いた方法では不可能なので、Yukutake et al.⁴⁾ が地殻変動に関連した地殻の力学特性の調査のために開発したP Z T発振子をもとに、適切な周波数の同一振動を繰り返し発生できる新たな発振子を作成した。

Fig. 2 に今回現場実験で用いた計測システムの構成図を示す。ハイパワーパルスジェネレータとP Z T発振子によりパルスを発振する。岩盤中を伝播した波を2ヶ所に設けた加速度計（共振周波数:30kHz）で受振し、500倍増幅した後、トランジェントレコーダで波形を記録する。これら一連の流れを繰り返し行い、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。

4. 釜石鉱山における計測概要および計測結果

実験現場は、Fig. 3 に示すような、岩手県釜石鉱山の標高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、細粒花崗岩の硬質岩盤から構成され、亀裂は存在するが密着している。また、現場から採取したボーリングコアより岩石試験を行った結果、Table. 1 に示すような物性値が得られた。実験現場の空洞（A-Tunnel, B-Tunnel）は発破によって掘削されたもので、壁面近傍の岩盤

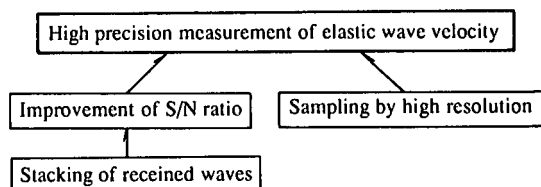


Fig. 1 Concept of measurement system.

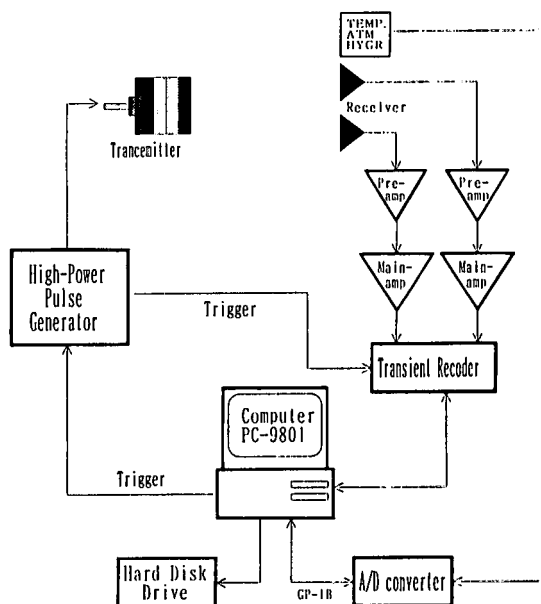


Fig. 2 Schematic diagram of the measurement system.

Table 1 Rock sample analysis.

Density	(g/cm ³)	2.66
Uniaxial Compressive strength	(MPa)	300
Tensile strength by radial compression test	(MPa)	12
Young's modulus	(GPa)	73
Poisson's ratio		0.24
P wave velocity	(m/s)	5800±100

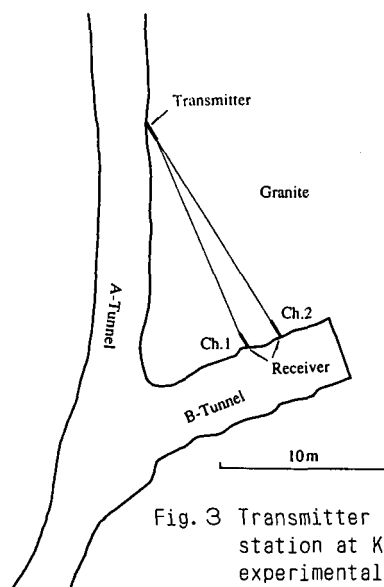


Fig. 3 Transmitter and receiver station at Kamaishi mine experimental site.

Table 2 Measurement condition.

	Experiment①	Experiment②
Pulse width (μsec)	19	38
Output (kV)	1	1
Sampling time (nsec)	100	100
Words (word)	3838	3838
Input range (Vp-p)	0.8	0.8
Stacking number	2500	2000
Delay words (kword)	27	27
Measurement interval (min)	60	15
Amplitude	500	500

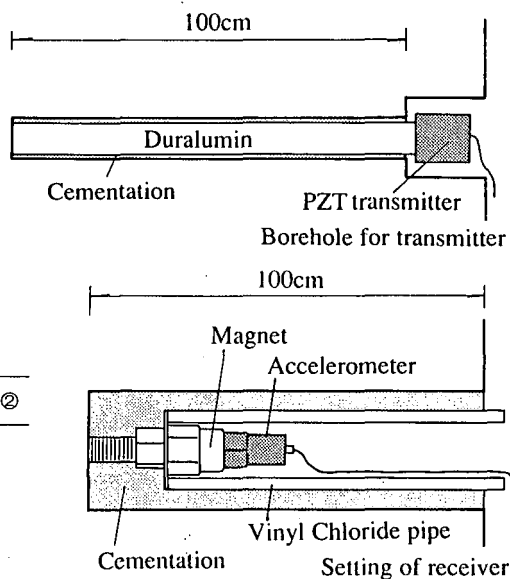


Fig. 4 Setting of PZT-transmitter and accelerometer.

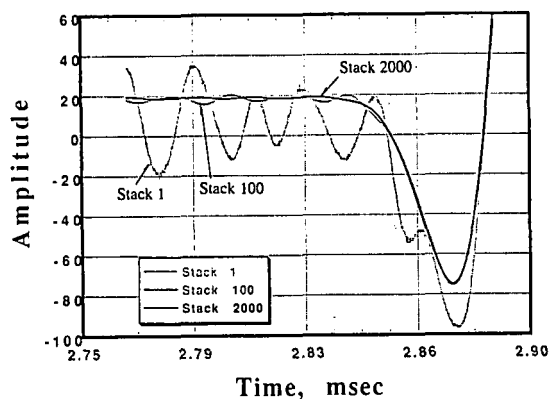


Fig. 5 Effect on the received wave by different stacking number.

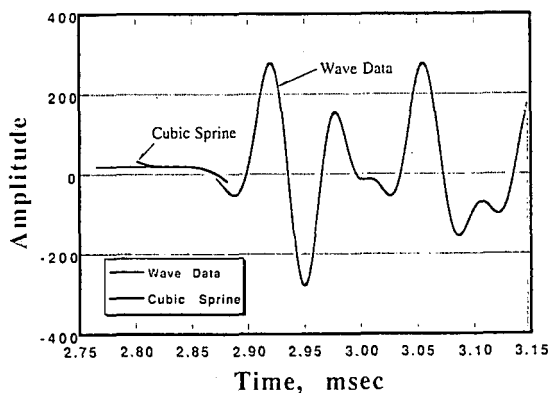


Fig. 6 Cubic spline to estimate travel time.

は損傷を受けている。損傷領域の影響を避けるために、Fig. 4 に示すように発振側、受振側ともに 1 m ボーリングを行った。発振側は、ウェーブガイドとしてジュラルミン丸棒を埋設し、ネジで発振子を固定した。

受振側は、塩化ビニルパイプを埋設し、その底に加速度計をマグネット式で固定して加速度計の取り外しができるようにした。

実験は、1994年の8/30～9/7の9日間と11/2～11/4の2日間の2回行われ、それぞれ実験①、②とする。実験①、②の測定条件をTable 2に示す。また、スタッキング数を1, 100, 2000と変化させた場合の受振波形例をFig. 5に示す。図より、スタッキング数を大きくすることによりノイズが消去され、S/N比が向上することがわかる。初動の判定は、Fig. 6に示すように初動部を含む区間のデータを3次関数で補間し、立ち下がり前の部分で0レベルを求め、そこから設定したしきい値との交点を立ち下がり点とした。

実験①、②における初動と測定時間の関係をそれぞれFig. 7 (a), (b)に示す、ch. 1および2の測定結果をそれぞれ●、▲でプロットし、縦軸の立ち下がり時間（初動の到達時間）は、ある任意の時間を0としそれからの相対変化量として表示した。実験①、②において、ch. 1, 2両方とも時間の経過とともに弾性波速度が速くなる変化がみられる。弾性波速度の測定と同時に、気温、気圧、湿度、岩盤温度の測定も行ったが、これらと弾性波速度の変化には相関関係がなかった。つまり、この弾性波速度の変化は、対象岩盤の何らかの状態変化をとらえたものであると考えられるが、詳しい原因はこの計測からはわからない。ch. 1, 2ともに、実験①では約2ワード（200nsec）、実験②では約5ワード（500nsec）のばらつき幅がある。このばらつきを極

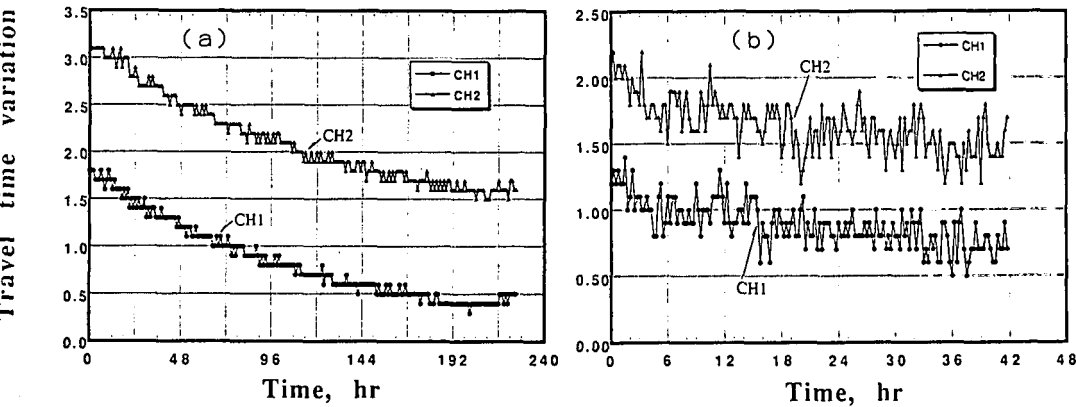


Fig. 7 The relation between the travel time variation and measured time.
(a) Experiment ① (b) Experiment ②

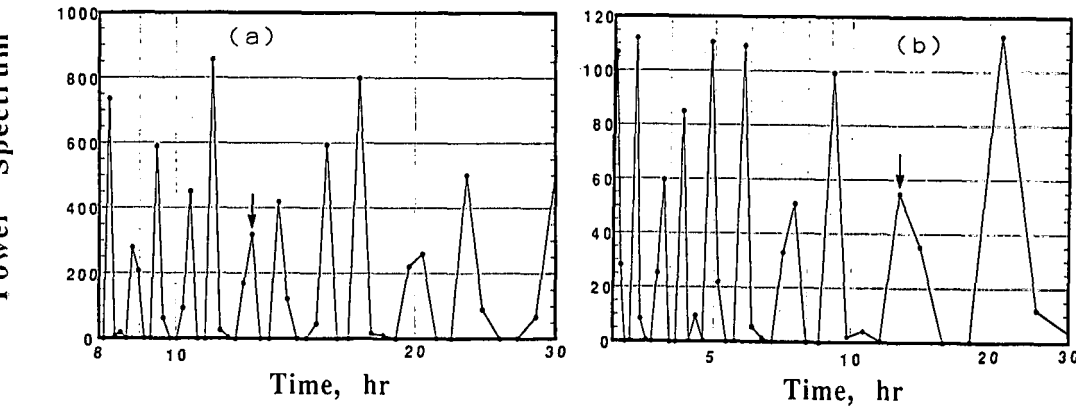


Fig. 8 Power spectrum after FFT.
(a) Experiment ① (b) Experiment ②

力小さくすることは今後の検討課題だが、今回の測定では、5ワード以内で初動の到達時間を決定できたといえる。すなわち、対象岩盤の初期縦波速度が $V_p=5000\text{m/s}$ 、測線長が20mであるとする、0.013%以内の再現性で到着時刻が決定されたといえ、今後、このシステムを用いると0.02%程度以上の速度変化を検出することが期待される。次に、Fig. 7 (a), (b)の経時変化をFFTにかけた結果をFig. 8 (a), (b)に示す。両図から、特徴的な卓越周期は見あたらないが、図中の矢印の部分は約12.5時間であり地球潮汐の影響の可能性がある。

以上のように、2回の実験から原位置において非常に高い精度で弾性波速度の変化の検出が可能であることが確認できた。また、今回の実験現場のようにもともと測定環境が良い(S/N比が高い)場合、1kV程度の出力でも測線長が約15mでは十分に波形が受振できた。発振出力を1kV以上に上げることは可能であるため、測線長を数十m延長しても十分に測定可能であると思われる。

5. おわりに

PZT発振子を用いた弾性波速度の変化を高精度に測定するシステムを開発し、このシステムを釜石鉱山における原位置計測に適用した。2回の実験から0.013%程度の再現性でP波の到着時刻が決定され、0.02%以上の微小な速度変化の検出が可能であることを示した。

最後に、現場計測に当たりご協力頂いた日鉄鉱業(株)および釜石鉱山(株)に感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1)伊藤一郎, 佐々宏一, 関順一: き裂の存在および伸展にともなう、弾性波伝播特性, 第4回岩の力学シンポジウム講演集, pp. 55~60(1973)
- 2)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減衰, 日本鉱業会誌, 94巻, 1083号, pp. 323~328(1978)
- 3)金子勝比古, 井上博之, 佐々宏一, 伊藤一郎: 岩石の破壊の進展が周波数の異なる波動に及ぼす影響について, 日本鉱業会誌, 94巻, 1089号, pp. 791~796(1978)
- 4)Y. Yukutake, T. Nakajima, K. Doi, In situ measurements of elastic wave velocity in a mine and the effects of water and stress on their variation, Tectonophysics 149, 165~175, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam(1988)