

釜石鉱山において測定された微小弾性波速度変動に
影響を及ぼす要因に関する検討

Influence factor of minute variation of sound velocity measured at Kamaishi Mine.

田中義晴* 稲葉 力** 村上忠輔*** 佐野 修****

Yoshiharu TANAKA, Tsutomu INABA, Tadasuke MURAKAMI and Osam SANO

Sound velocity in situ was measured 24 times a day for the past 2 years with a resolution of 30 ppm at Kamaishi Mine. Long term variations in the velocity and the amplitude were observed in February to June in 1995 and in 1996. These variations were discussed in terms of possible variation of water content within cracks and the change in stress. A water flow through a borehole measured from March to June in 1996. A cross correlation analysis showed that the maximum coefficient of the correlation was 0.97.

1. はじめに

一般に、土木現場における弾性波速度の測定精度はせいぜい数%程度であり、大規模な破壊や損傷などの現象は検出可能である。ところが、構造物の施工後数十年から数百年後に問題となるような極めて緩やかな岩盤内の変化をモニターする場合、亀裂の消長あるいは開・閉合、さらには含水状態の変化などに起因する弾性波速度の微小変化を検出できる高い分解能を有した測定技術の開発が必要であらう。筆者らはこのような観点に立ち、弾性波の高精度測定システムを開発し、釜石鉱山において原位置測定実験を行った。その結果、弾性波速度でばらつきが30ppmであり、地震に関連した約170ppmの短期的変動および数カ月間にわたる100～1000ppmの長期的変動を検出することができ、本測定システムは精度的にも十分であることが確認できた¹⁾。

モニタリングで最も期待される情報は亀裂の消長であるが、弾性波速度は亀裂内の水の増減にも大きく影響する²⁾。また、測定結果には電源電圧の変動や温度変化に伴うクロックの変動の影響も受ける。弾性波速度の測定精度を上げることにより、このような外的あるいは内的な擾乱が検出されることも十分に考えられるため、測定結果の解釈にあたり、速度変化をもたらす要因に関する的確な情報が必要である。本報告は、本測定システム自体が持つノイズ以外の誤差要因について検討したのち、測定された弾性波速度に岩盤中の水の増減が及ぼす影響について考察する。

2. 測定概要

開発した弾性波の高精度測定システムは、岩盤を傷めずに、適切な周波数の同一発振パルスを繰り返して

* 正会員 西松建設（株）技術研究所

** 正会員 工博 西松建設（株）技術研究所

*** 正会員 山口大学 大学院

**** 正会員 工博 山口大学 工学部

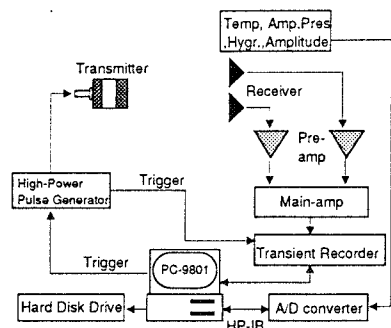


Fig.1 Schematic diagram of experimental system for measuring the travel time variations

発振し、伝播してきた振動を高分解能でサンプリングし、スタッキングを行い、S/N比を向上させるものである。システム全体の構成図をFig. 1 に示す。パソコンからの信号をトリガ信号として高出力パルス発生装置に発振命令を出し、圧電セラミックに高電圧をかけ発振子を振動させた。伝播してきた振動は加速度計により受振されセンサーアンプ、シグナルコンディショニングユニットで増幅し、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（以下TERと称す）に記録される。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、湿度および気温も同時に測定した。

本計測システムを釜石鉱山の坑内実験場に持ち込み、長期間にわたる弾性波測定実験を行った。実験現場の平面図をFig. 2 に示す。土被りは430mであり、岩盤は細粒花崗岩で亀裂は存在するが亀裂観察を行ったところ1 m に2本程度である。また、岩石コアによる室内岩石試験を行った結果、一軸圧縮強度が300MPa、縦波弾性波速度が約5000m/sであることから非常に硬質な岩盤であることがわかる。実験現場の空洞（Fig. 2 中のA-Drift, B-Drift）は発破によって掘削されたものであり、これによる損傷領域を避けるために発振側、受振側ともに1 m のボーリングを行った。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、その片側にねじで固定した。受振子の設置は、ボーリング孔のそこにボルトを埋め込み加速度計を磁石で固定した。

3. 初動到達時間の決定方法および精度

1時間ごとに得られた加速度波形を積分して速度波形を求め、初動立ち上がり部分の変極点近傍を3次数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、トリガ時からの時間を初動到達時間とした。

弾性波到達時間の分解能は用いたTERのA/Dコンバータのサンプリングのタイミング（50nsec）で決定され、精度はクロックの精度およびトリガタイミングにより決まる。TERのクロックの精度および安定性の保証値はそれぞれ200ppmおよび10ppm/℃である。測定では、TERのクロックの精度を検証する目的で、32.768kHz±5ppm、0.035ppm/℃のクロックを同時に記録する方法、および20MHz±0.8ppm、0.01ppm/℃の外部クロックを用いて検定した。その結果、TERのクロックの精度は保証値よりほぼ1桁高いことがわかった。また、同時に計測された実験現場の気温の変動は0.1℃程度と極めて小さいため、温度変化による擾乱

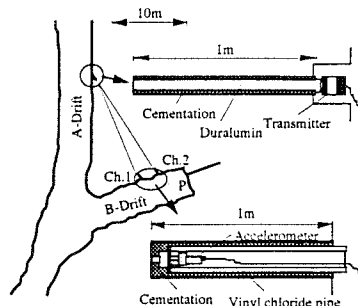


Fig.2 Map show the experimental site in the Kamaishi mine. Two accelerometer were setted in the boreholes, respectively. Piezoelectric ceramic was setted a edge of duralumin rod cemented in the borehole.

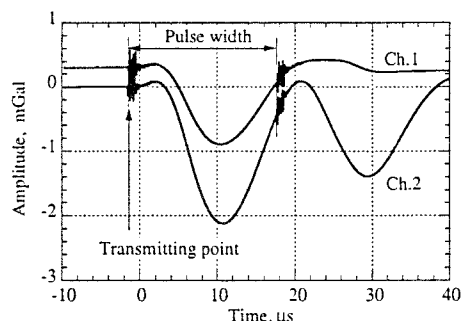


Fig.3 Transmitting point and pulse width of out put pulse.

は無視してもよいと思われる。一方、トリガタイミングはTERのトリガに用いた発振器からのTTLレベルの発振信号と、実際に圧電セラミックに負荷されるパルスの間のずれ、およびトリガ信号とTERのクロックのタイミングのずれである。前者は、Fig. 3に示すような、高電圧パルスが発振される際に記録波形に重畳されるノイズと高電圧パルス発生装置の1/1000出力を記録することにより検定し、補正した。実際の補正值はほぼ10ppm以下であった。後者のクロックタイミングのずれは、4000～5000回のスタッキング処理の際に平均化されると考えられる。

4. 測定結果

測定は、1994年8月29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と初動の最大振幅値を計算しその経時変化を求めた。測定結果の一例をFig. 4、5に示す。Fig. 4は1995年2月から5月にかけて、Fig. 5は1996年2月から5月にかけての初動到達時間および初動の最大振幅値の変動を表したものである。Fig. 5中の矢印は、その日時に福島県沖地震があったことを示す。なお、ch. 1とch. 2の測定結果は傾向がほとんど同一とみなしてよいため図中にはch. 1のみの結果を示す。1996年の初動到達時間の変動（Fig. 5）は1995年のそれ（Fig. 4）に比べて小さいため縦軸の縮尺を5倍に拡大した。一年半以上にわたる長期間の測定中、測定条件が変更されてきた。Table. 1に測定条件の一覧を示す。

測定期間中、多数のデータの欠落およびその後のデータの乱れが認められる。これは、主に釜石鉾山の坑内の停電により測定不能になったためである。坑内気温は年間通じてほぼ12℃と一定であるため、停電時には測定器の内部素子はかなり冷却される。停電復帰後、各素子に通電され再び以前の状態に戻るまで、すなわち、内部素子が通常稼働時の温度に戻るまでデータが乱れる。高安定発振器（ファンクションジェネレータ）をパルス発生器として用いた場合には、計測系全体が安定するのに約1時間、高電圧発生装置の内部クロックを用いてパルスを発生した場合には、数時間要することがわかった。

初動到達時間のばらつきは0.1 μ sec程度以下（0.003%、すなわち30ppm）であり、非常に高い分解能で弾性波が測定できたことがわかる。1995年、1996年ともに4カ月の間、初動到達時間と振幅値の増減の経時変化が時期に多少のずれはあるものの同じように変化している。また、初動到達時間が、1995年で約200ppm、1996年で1000ppmの範囲で長期的に変動していることがわかる。本報告以前の計測結果¹⁾やFig. 5中にみられる地震による初動到達時間の瞬間的な変動に比べてこれらの長期的な変動は非常に大きいため、本測定システムのような弾性波速度が高い分解能で測定される場合には、このような長期的な大きな変動がモニタリングで最も期待される亀裂の消長に関係があるのかどうか、すなわち、この長期的な変動をもたらす原因について検討する必要がある。

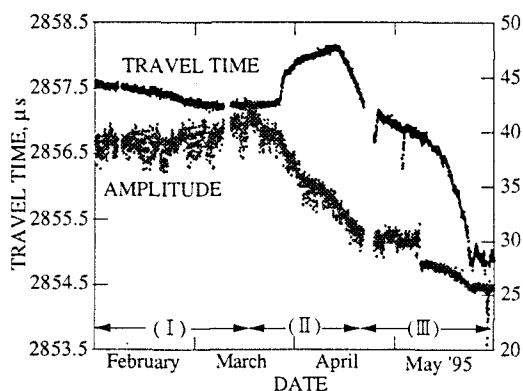


Fig.4 Temporal variation of travel time and amplitude measured in situ at Kamaishi mine(February～May,1995)

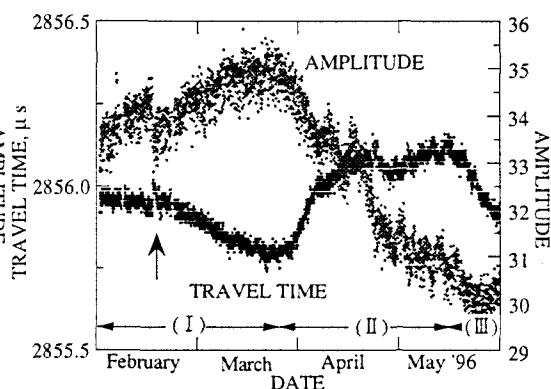


Fig.4 Temporal variation of travel time and amplitude measured in situ at Kamaishi mine(February～May,1996)

5. 測定結果の解釈

本測定では、弾性波の測定と同時に坑内の気温、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を比較したが明確な相関が認められなかった。すなわち、初動到達時間の変動は坑内の気温、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。

Fig. 4, 5 に示す大きな長期的変動が、岩盤の応力変化に伴った亀裂の消長によるものならば問題ないが、他の原因についても検討する必要があるだろう。例えば、これらの変動が岩盤の水の増減によるものであるならば、目的によっては擾乱となりうる。Fig. 4, 5 中に示すように、2月から5月まで

を（Ⅰ）、（Ⅱ）、（Ⅲ）の3つに範囲に分けてみた。1995年、1996年ともに、（Ⅰ）では弾性波速度も振幅も増加、（Ⅱ）では弾性波速度も振幅も減少、（Ⅲ）では弾性波速度が増加し振幅は減少している。実験現場の山頂は冬季の間、ほとんど気温が氷点下であるため表土が凍結し、積雪が50cm程度存在する。このため（Ⅰ）の期間の間、被り圧が増加し開口亀裂の閉塞や、あるいは、山頂付近からの水の供給が無いいため岩盤の含水比が低下し弾性波速度も振幅も増加するものと考えられる。ここで注意しなければならないことは、岩盤の含水比の増減（亀裂や空孔への水の流入・流出）は弾性率と密度の増減を同時にもたらすため、弾性波速度と含水比の関係は単純ではない。室内実験および理論解析³⁾によると、Fig. 6 の模式図に示すような含水量が増えると弾性波速度が減少する領域と、増加する領域があることがわかっている。すなわち、（Ⅰ）の期間では岩盤の含水比が60%程度以下であると仮定すれば含水比の変化でも説明可能である。しかし、被り圧のみの変化でも説明できる。次に（Ⅱ）では、雪解けの開始とともに被り圧が減少することにより弾性波速度の減少と振幅の低下が生じたとも考えることもできる。あるいはまた、水の浸透により含水比が増加し弾性波速度も振幅も減少したとも考えられる。ただし、含水比の変化で説明する場合には岩盤の含水比がかなり低いことが必要となる。さらにその後（Ⅲ）の期間、雪解けや降雨により岩盤の含水比は増加し続けることにより、弾性波速度の増加、振幅の減少が生じたものと考えられる。

実験現場周辺の岩盤中の水の増減を直接把握するために、1996年2月中旬からFig. 2 中に示すP点にあるボアホールからの湧水量を直接測定した。Fig. 7 に1996年2月から5月末までの初動到達時間とボアホール湧水量との経時変化を示す。初動到達時間および湧水量ともに、3月末まで減少しそれから5月の中旬まで増加した後減少傾向にある。3月末までは湧水量が減少している。これは地表面からの水の流入がないこと、あるいは、被り圧の増加にともない岩盤の浸透係数が低下するためであると考えられる。3月末からは、湧水量は増加している。これは、雪解けが始まったことにより地表から流入する水が増えたか、被り圧

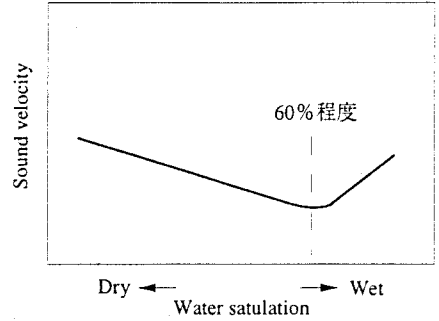


Fig.6 Relationship between sound velocity and water saturation.

Table 1 Measurement conditions.

Period	pulse	Fc, kHz	Stacking	Sample rate, ns	Other
'940829 - '940830	Internal	20	1000	100	
'940830 - '940915	Internal	20	2500	100	
'941102 - '941104	External	50	2500	100	
'941104 - '950511	External	50	4000	50	
'950511 - '950614	External	80	4000	50	+Reference clock
'950614 - '951121	Internal	80	4000	50	+Reference amplitude
'95110115.00 - '951128	Another APC510 borrowed from Autonics was used.				
'951129 - '960222	External	80	5000	50	+External clock
'960222 -	External	80	5000	50	-External clock

Notation :

Pulse : Internal clock of the high-power pulse generator made by the Velonex, model 360, was used for "Internal", while a more precise and stable pulse was used for "External".

Fc : Cut-off frequency of low-pass filter.

+Reference : A precise and stable clock, 32.768kHz $\pm$ 5ppm, 0.035ppm/ $^{\circ}$ C, was added in the recorded date.

+External : A precise and stable clock, 20MHz $\pm$ 0.8ppm, 0.01ppm/ $^{\circ}$ C, was used for an external clock of the transient event recorder.

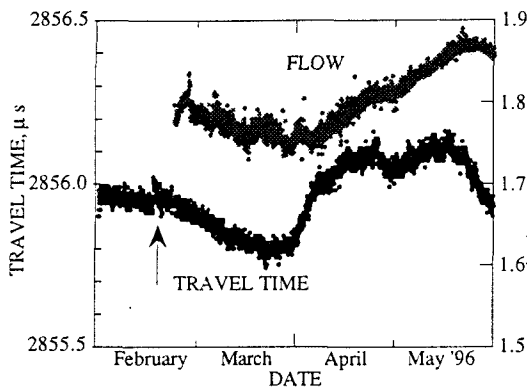


Fig.7 Temporal variation of travel time and flow rate measured in situ at Kamaishi mine(February~May,1996)

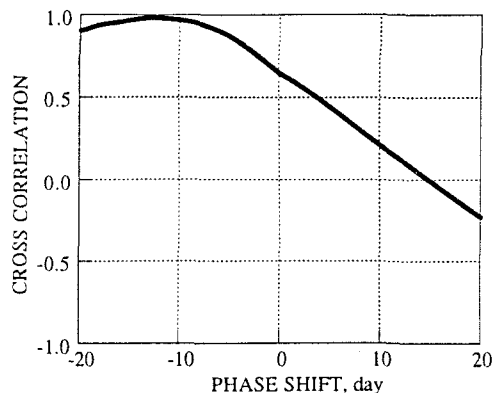


Fig.8 Result of cross correlation analysis between travel time and flow rate.

の減少にともない浸透係数が増加したためと考えられる。また、5月末から再び湧水量が減少しはじめる。これは、雪解けの水が減少し始めたためだと考えられる。次に、初動到達時間と湧水量の相互相関解析を行った結果をFig.8に示す。相互相関係数は最大で0.97であり、初動到達時間と湧水量がほとんど同じ傾向を示していることがわかる。ただし、湧水量変化が初動到達時間の変化より12日程度遅れて生じている。これは、湧水量が亀裂など（流路）のネットワークの影響を反映するため、浸透係数が増減した後12日程度たって顕著な増減が現れたためであると考えられる。

以上、このような長期的な弾性波速度の変動を初動の振幅値や湧水量の変動と照らし合わせ、岩盤内の応力変化や含水比の面から定性的な考察を行った。今のところ、弾性波速度の変動と水の増減の関係が定量的に断定できないが、弾性波速度の変動が水の微小な増減に非常に影響されやすいことがわかった。

6. おわりに

弾性波速度を用いた岩盤のモニタリングで最も期待されるのは亀裂の消長である。ところが、弾性波速度は岩盤中の水の増減に非常に影響されやすい。これは、測定結果を解釈するうえで、目的によっては擾乱となるため、岩盤中の水の増減が弾性波速度の変動に及ぼす影響について考察を行った。

1995年と1996年の2月から5月にわたる計測結果から、弾性波速度の長期的変動は、岩盤内の含水量変化の単独か、あるいは応力変化と含水量変化が複合して影響していると考えられる。また、実験現場の湧水量を測定し、初動到達時間との相互相関解析を行った。その結果、相互相関係数は最大で0.97であり、初動到達時間と湧水量がほとんど同じ傾向を示していることがわかった。ただし、湧水量変化が初動到達時間の変化より12日程度遅れて生じている。これは、湧水量が亀裂など（流路）のネットワークの影響を強く反映していると考えられる。現段階では、冬季に乾燥状態にある岩盤が春期にかけて湿潤していく過程を、弾性波速度の微小変動が検出していることを定性的に考察したが、今後、浸透流解析などを行い、定量的な裏付けも必要であろう。

参考文献

- 1) 田中義晴, 平田篤夫, 石田一成, 佐野修: 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, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp539~543(1995)
- 2) 例えば, 斉藤徳美, 佐藤七郎, 阿部司: 含有水分による花崗岩の縦波速度の変化と粒径および空隙形状との関係, 日本鉱業会誌, pp1~6(1982)
- 3) 石田一成: 弾性波を用いた岩盤モニタリングに関する研究, 山口大学大学院修士論文(1995)