

## 高精度弾性波速度測定の実例

—100m測線およびノイズ源近傍での測定—

HIGH RESOLUTION MEASUREMENT OF SOUND VELOCITY IN SITU USING ULTRASONIC WAVE

—THE MEASUREMENT PATH EXTENDED TO 120M LONG AND AT NOISY ENVIRONMENT—

平野 享\*・諸岡敬太\*・木村 哲\*・佐野 修\*\*

Toru HIRANO, Keita MOROOKA, Tetsu KIMURA, Osam SANO

A precise measurement system of sound velocity in rockmass by using piezoelectric transducer was developed. This system also gives us continuous long term and damage-free measurement. In this study, in order to check the system of applicability to actual structure, we extended measurement path. Furthermore, the measurement was carried out in an environment of noisy active boring machine nearby. The method was a pulse transmission method similar to the laboratory. Because of the nature of the attenuation, to choose the higher frequency pulse, the more difficult to observe transmitted wave. Therefore, usually a pulse transmission method using ultrasonic wave cannot easily be applied for actual rockmass of 120m path. However, by using averaging method (16000 times), a relatively high frequency wave (8kHz) was observed in the very noisy environment.

### 1. はじめに

筆者らは、長期安定性や遮蔽能力が要求される、大規模地下空洞の実現に必要な岩盤モニタリングシステムを開発している。岩盤の長期安定性や遮蔽能力は、岩盤の弾性的性質の変化をとらえることで評価できる。弾性的性質の変化を与える大きな要素は、亀裂の含水状態や消長でありどちらも弾性波速度の変化として観測することができる。いっぽう長期のモニタリングでは発破や水圧破碎のような岩盤に損傷を与える手法は望ましくない。また同一地点の経時変化を、外乱を排除して観測できる手法であることも重要である。そこで開発したシステムは、超音波発生装置を発振源に用いて、透過法による速度測定を行うことを原理とした。一般に、超音波を使った実岩盤の透過法測定は、波動の散乱や減衰を理由として限定されたものと考えられている。しかし波形の揃った超音波振動を数多く発生させ、受振記録を十分に重ね合わせると、実岩盤でも数10～100m程度の速度測定は可能な技術である。本論文は、実岩盤の約120mの距離に対し、8kHzの超音波を用いた $V_p$ 測定が行えたこと、およびボーリングマシンの稼働でノイズが大きな環境であっても、同様の測定が行えたことについて報告する。

\* 正会員 西松建設(株)技術研究所 土木技術研究課

\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

## 2. 岩盤モニタリングシステムの概要

モニタリングシステムは、佐野らが速度測定  
の分解能10~50ppmを目標にして製作したもの  
である<sup>1)</sup>。健全な岩石の弾性波速度は破壊まで  
におおむね25%低下する<sup>2) 3)</sup>が、初期段階ほど  
低下率は少ない。ここで分解能10~50ppmとは、  
100年先の破壊に対する最初の1ヶ月の速度変化  
を検出することが可能な能力である。

実岩盤の観測で高分解能を得るためには、ナ  
ノオーダーのサンプリング速度をもつA/D変換  
器と、高精度の超音波発振装置が必要となる。  
前者は工業製品が手にはいるが、後者は自作の  
必要があった。超音波発振装置は図-1の構造を  
もつ。これに0.5~1kV程度の高電圧パルスを与  
えて発振子を駆動し、超音波を発生させる。図-  
2はシステムの全体構成図である。システムの  
詳細は文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

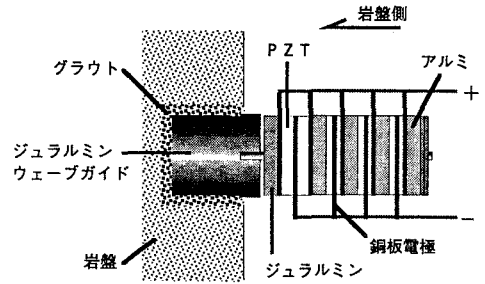


図-1 超音波発信子の構造

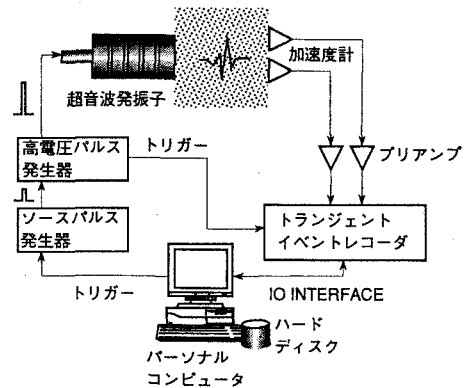


図-2 岩盤モニタリングシステム

## 3. 測定現場の概要

現場の平面図を図-3に示す。モニタリングシ  
ステムは現位置にて連続運転しており、開発の  
過程で多少の変更を加えながら、定点測定を5  
年にわたり継続している<sup>1)</sup>。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、土被り約430mの地点である。

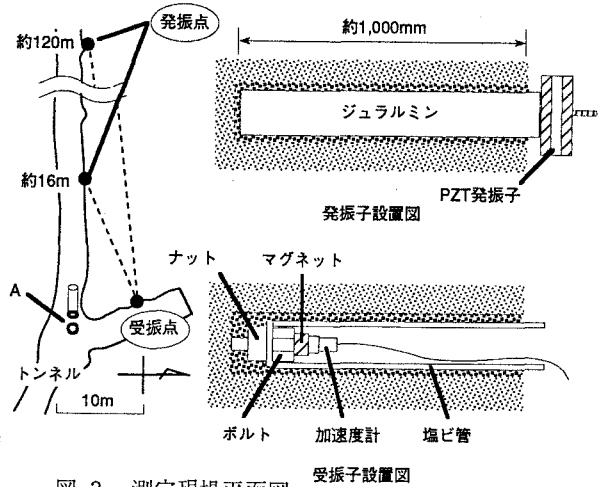


図-3 測定現場平面図

岩盤のQ値と $V_p$ は、ボーリングコアを用いて行った室内岩石試験の結果から、それぞれ56~  
260、5.9km/sであった。現場の坑内気温（年平均で約12℃）と水温（同約9℃）の変動は小さ  
く、測定結果との相関は認められなかった。温度変化による計測器のクロック変動やタイミング  
エラーは、システムの分解能以下に抑制することができる。さらに花崗岩の線膨張係数は4~10  
 $\mu/\text{℃}$ であり、求める分解能より桁違いに小さく、気温変化による透過距離の変化は無視できる。

測線の周囲では岩相の変化やボーリング孔からの湧水が認められている。超音波の透過経路に  
も何らかの速度構造があると考えるのが自然である。超音波は岩盤中の速度構造が不均一である  
と直進しないので、厳密な透過距離の見積もりは困難である。しかしモニタリングは高精度で相  
対的变化を検出したいので、初動到達時間を透過距離を用いて速度に換算する必要性は少ない。

#### 4. 既往の計測

本モニタリングシステムを用いた観測について一例を示し、分解能10～50ppmの速度計測とはどのようなものか説明する。図-4は、同じ現場における98年6月5日から5日間の観測結果であり、測線約16m、超音波25kHzの初動到達のピークの位置がプロットされている。

現場では、平面図-1で示すA点の位置に掘られた、7m深度の鉛直孔と9m深度の斜孔内にそれぞれ石井式ひずみ計<sup>5)</sup>も設置されている。図-4から、潮汐ひずみのようなゆっくりとした周期において、石井式ひずみ計は本モニタリングシステムよりも分解能が1～2桁高いことがわかる。本モニタリングシステムによる初動到達ピーク時間の変動を、石井式によるひずみと重ねて見ると、初動到達ピーク時間にも潮汐の影響が認められる。

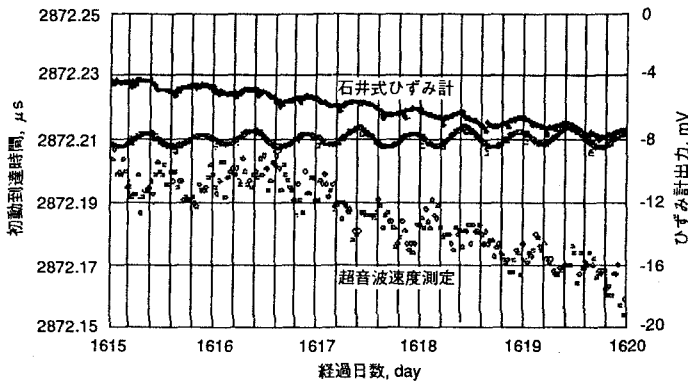


図-4 システムの16m測線、25kHzでの観測とひずみ計測との対比

#### 5. 120m測線の実現

当初、モニタリングシステムは約16mの測線について、超音波25kHzを用いて観測していた。しかし構想する大規模地下空洞における適用に比較して、それでは距離が短く実績としての説得力が少ない。最低でもあと1桁距離を延長できることが要求される。

岩盤に伝播させた超音波波動が受振可能であることの判断は、吸収による振幅低下率を表す<1>式を用いて行える。A0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、Vpは縦波の速度、QはQ値である。減衰機構として他に球面発散と透過損失があるが、前者は透過距離に比例した振幅の減衰を与えるため支配的でなく、後者は大部分のエネルギーを反射するような不連続面はないとする仮定に立ち考慮しなかった。

$$A/A_0 = \exp(-f \cdot \pi \cdot x) / (Q \cdot V_p) \quad \dots <1>$$

いま、現場で採取した岩石の室内岩石試験から求めたQ値とVpを参考にして、Q値を低めの50、Vpを5km/sとする。<1>から振幅低下率を求めると図-5になる。もし当初の25kHzを透過させると、100mでは距離ゼロでの振幅からおよそ14桁もの振幅低下が起こり、これは観測不能である。周波数を8kHzまで下げると、低下は4桁程度に収まり観測可能な領域に入ることがわかる。

ただし発振周波数を下げる対策は、受振波形の立ち上がりをゆるやかにするため初動到達時間の算定精度を少々下げてしまう欠点がある。もう一つの発振出力を強化する対策は、与えるエネ

ルギーの平方根に振幅が比例するので効率が悪く、さらに圧電素子の製作や高電圧駆動の課題と疲労破壊の可能性があるので、桁違いに強化することは困難である。

透過した超音波の振幅が受振センサーの感度を越えて検出されても、その振幅が小さければバックグラウンドのノイズに埋もれてしまう。ノイズが透過距離に関係なくランダムに発生するものと考えれば、多数の観測を行って得られる一連の波形をアベレーシングしS/N比を向上できると考えられる。図-6は約120m測線に対し8kHzの超音波を透過させ、アベレーシングを1、400、16万回と行ったときの波形を示す。16万回のアベレーシングに要した時間はおよそ半日で、律速を決めているのが高電圧発生装置の制約である。図-6から、おおむねアベレーシング回数の平方根に比例したS/N比の向上が観察される。

#### 6. ノイズ源（ボーリングマシン）近傍での受振

一般に、ノイズレベルが比較的高い環境でも、発振系と受振系を同期させたり、観測周波数の帯域分割を行うことで微弱な信号の観測が可能となる。例えばノイズ源がボーリングマシンであれば、低域フィルターが効果的である。

前述の約120mの観測を行った際、観測とは別の作業のため、受振点からわずか10m弱の位置でボーリングマシンを稼働させた。このとき観測に低域フィルターは用いておらず、受振レベルは強力なノイズを含んで、ダイナミックレンジを頻繁に越えるような状況にあった。

本モニタリングシステムでは、ダイナミックレンジを越えた入力が一律にプラスマイナスのフルスケールとして記録される。これを飽和した記録と呼べば、それを数多くアベレーシング

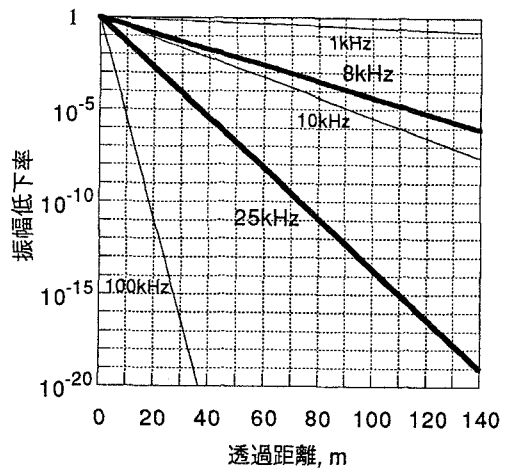


図-5 振幅低下率

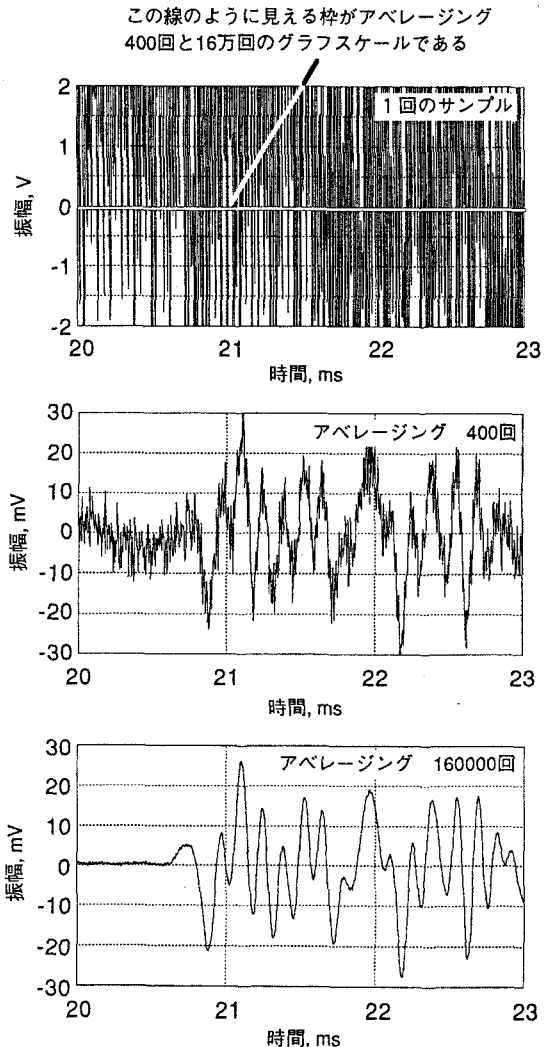


図-6 システムの120m測線8kHzでのアベレーシング状況

すると値はゼロに近づくと考えられる。モニタリングシステムがサンプリングしたすべての瞬間で飽和した記録であるならば、アベレーシングしても透過波形は得られないはずである。

図-7は、測線約16mを別に設けて記録した、静穏な状態からボーリングマシンが稼働を始めたときの透過波形の推移である。最初の静穏な状態の振幅が最大で、ボーリングマシンの稼働により振幅は低下するが、ゼロにはならない。さらに透過波形の位相に変化は認められない。これは、ボーリング稼働中であってもサンプリングのある割合は飽和しないため、透過波形が抽出できたものと考えられる。飽和した記録の割合は低下前後の振幅比から求めることができ、図-7では約3割と見積られる。これはノイズを与えるアベレーシングの効率低下と考えられる。

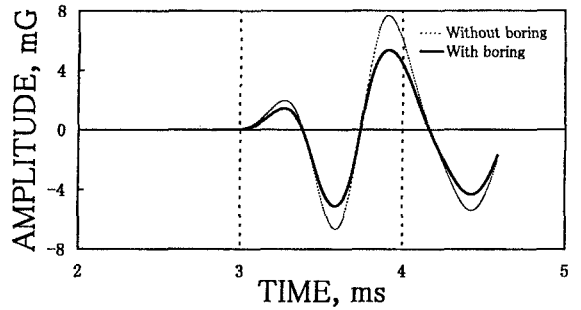


図-7 レベルの大きなノイズの影響

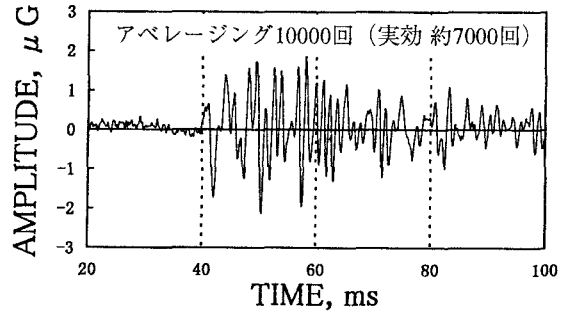


図-8 高ノイズ下でのアベレーシング結果

図-8は測線約120mでの、ボーリングマシン稼働中の記録である。図-8ではアベレーシング1万回の結果を示す。ノイズでアベレーシングの効率が下がるので、静穏な時に比較してS/N比の向上に時間がかかる。測線約120mでの効率低下が、測線約16mと同じ約3割と推測すると、アベレーシング1万回は7000回に相当する。ノイズの除去具合をみるかぎり、静穏な状況での記録(図6)のアベレーシング400回以上、16万回以下に相当しており矛盾はない。

## 7. まとめ

約16mの測線長に25kHzの超音波を透過させて、分解能10~50ppmの速度測定が行えるモニタリングシステムがある。このシステムを用いて測線を約120mに延長しても、さらに観測地点でボーリングマシンの稼働があっても、超音波を8kHzに下げてアベレーシングを約半日以上行うことで観測可能であると実証された。

## 7. 参考文献

- 1) 田中義晴, 稲葉 力, 平田篤夫, 石田一成, 佐野 修: 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, 土木学会論文集, No.561/Ⅲ-38, pp.185-192, 1997-3.
- 2) 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.
- 3) 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, 関西大学工学会誌, Vol.10, No.3, 1993.
- 4) 佐野 修, 柳谷 俊: 地殻の連続精密計測からなにがわかるか?, 月刊地球, Vol.20, No.3, pp.172-176, 1998.
- 5) 石井 紘: 地震予知研究のためのボアホール地殻活動総合観測装置と岩盤工学への応用, 第19回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.3-10, 1998.