

山はねモニタリングのためのAE信号データの 評価処理方法

森 孝之^{1*}・犬塚隆明¹・Mohd Ashraf Mohamad Ismail²・藤井宏和³・趙 越³

¹鹿島建設株式会社 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²Universiti Sains Malaysia (14300 Nibong Tebal Penang, MALAYSIA)

³株式会社レーザック (〒124-0002 東京都葛飾区西亀有1-5-3)

*E-mail: moritakayuki@kajima.com

山はね現象に遭遇するトンネル掘削工事においては、施工の安全確保に苦慮しており、モニタリングによる安全管理が課題となっている。本論文では、地山の微小破壊音(AE)を計測し山はね現象を予測することを目的とし、岩石三軸圧縮試験に伴うAE計測を実施し、岩石の破壊過程とAE指標の変化の関連を分析した。この結果、複数のAE指標に注目すると、山はねの予兆判定の基礎的な知見が得られた。また、山はね解析の基礎的な検討としてPFC解析により三軸圧縮試験のシミュレーションを実施した。さらに、トンネル現場のAE計測における現場ノイズ問題の改善を目的としてノイズ処理方法について検討した結果、波形指標のなかで尖度がノイズ除去に有用であり、ノイズ処理の向上が可能となった。

Key Words : rock burst, acoustic emission, monitoring, triaxial compression test, noise removal

1. はじめに

山はね現象を伴うトンネルの掘削工事では安全管理が課題であり^{1,2,3)}、本研究ではモニタリング管理技術の向上を目的として基礎的な検討を実施した。まず、地山岩盤の微小破壊音(AE)に注目し、岩石三軸圧縮試験に伴うAE計測を実施し、岩石の破壊過程とAEパラメータの変化との関連を分析した。次に、トンネルでの山はね予測を目的として、PFCモデル解析により三軸圧縮試験のシミュレーションを実施した。最後に、トンネル現場AEモニタリングにおけるノイズ問題を改善するため現場ノイズ処理法について幾つかの方法を試みた。本報告ではこれらの基礎的な検討結果について報告する。

30, 40MPaの条件でのUU試験とし、試験の载荷パターンはひずみ制御方式で実施した。

さらに、三軸圧縮試験に伴い、岩石供試体のAE測定を実施した。AE計測装置はValienシステムであり、AEセンサーは周波数特性が1000kHzの圧電素子型である。

AEセンサーは三軸圧縮試験チャンバー内において供試体の上部と下部の2箇所の台座内に設置した。

AE測定の項目としては、AE信号の「AE発生数(イベント数)」, AE信号波形を使用してFFT解析により求めた「周波数」、さらに、AE信号波形の「振幅値」、そして波形の振幅値に基づき計算して求めた地震パラメータ「b値」である。

三軸圧縮試験により得られた応力～ひずみ曲線を図-1に示す。同図には縦ひずみ ε_1 、横ひずみ ε_3 、体積ひずみ ε_{vol} 、ポアソン比 ν の変化を示すが、体積ひずみが圧縮

2. 岩石三軸圧縮試験に伴うAE測定

三軸圧縮試験に使用した岩石は表-1に示すとおり比較的硬質(JGS HM-A I w1)な花崗岩であり、供試体はトンネル現場で採取したボーリングコアを整形加工し、寸法は $\phi 50 \times 100$ とした。岩石三軸圧縮試験装置とAE測定装置を写真-1に示す。三軸圧縮試験装置は高い剛性(53MN/cm)のもので最大軸荷重2,000kN(max1,020MPa)、最大側圧50MPaまで制御できる。試験方法は側圧0.5, 10, 20,

表-1 岩石の物性値

岩石名		花崗岩
単位体積重量 γ		26.1 (kN/m ³)
超音波速度 V_p		5.15 (km/sec)
せん断 強度特性	粘着力 C	40.4 (MPa)
	内部摩擦角 ϕ	54 (°)
一軸圧縮強度 σ_c		248 (MPa)
弾性係数 E		46(GPa)

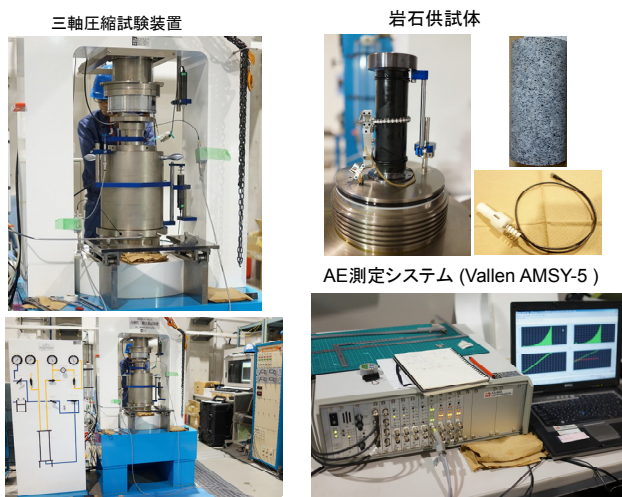


写真-1 三軸圧縮試験装置とAE測定装置

から膨張に反転する点に注目し、この変曲点をダイレタンシー点と呼ぶことにして、この点から破壊までの領域を「降伏域」とした。これ以前の線形ひずみを示す領域を「健全域」、そしてピーク破壊点から後の領域を「軟化域」、「残留域」として応力～ひずみ曲線を区分した。

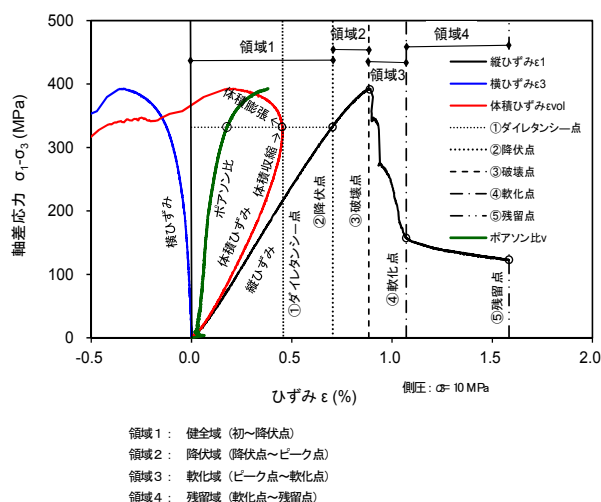


図-1 三軸圧縮試験における応力～ひずみ曲線と領域区分

岩石の三軸圧縮試験に伴うAE計測によって得られたAEイベント数、周波数、振幅値、 b 値について図-1に示した応力～ひずみ曲線のゾーン区分を重ね合わせて図-2に示す。同図から岩石の破壊に伴うAE挙動の特徴は以下のとおりである。

① AEイベント数：

AEイベント数は健全域から少し発生するが、降伏点から増加し、破壊直前に急増し、破壊後は沈静化する。

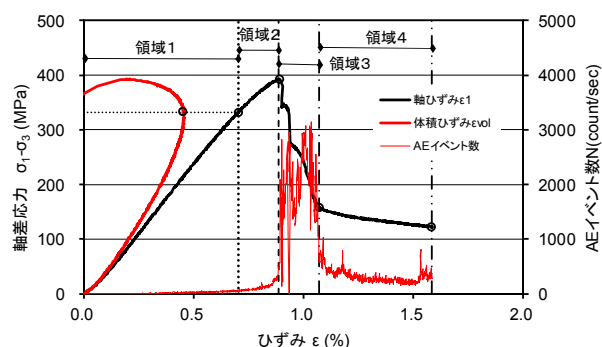
② AE周波数：

AE波形データからFFTにより得た周波数は岩石の破壊直前段階に低下し始め、破壊に伴い急激に低下する。つまり、周波数は破壊前の段階から低下し始めるのが特徴である。

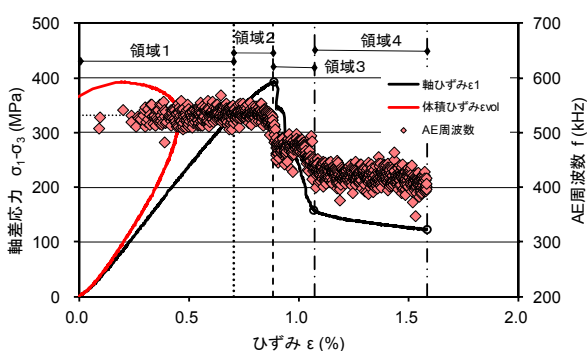
③ AE振幅値：

AE波形の振幅値は破壊時に著しく大きくなり、その後も比較的大きな振幅値も散発的に発生する。

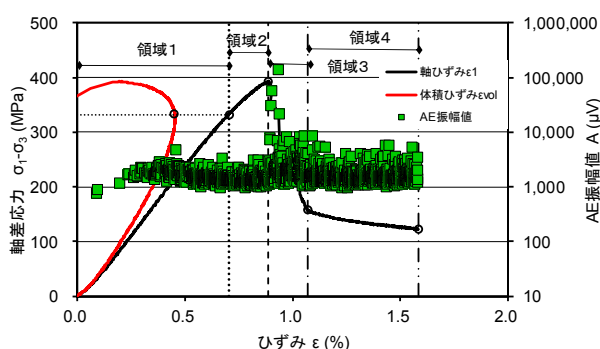
① AE イベント数



② AE 周波数



③ AE 振幅値



④ b 値

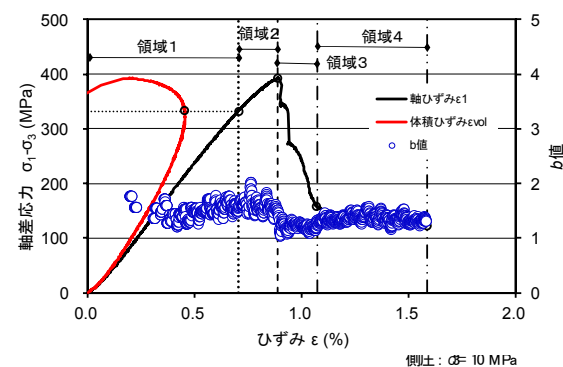


図-2 岩石三軸圧縮試験に伴うAE挙動

④ b 値：

地震分野の研究の指標として地震の規模(マグニチュード M)と発生数 N の関係を表したGutenberg-Richter式がある。ここでは、マグニチュード M をAE信号波形の振幅値 A と見なして発生数 N との関係から b 値を計算した。

$$\text{Log}(N) = a - b \cdot \text{Log}(A) \quad (1)$$

地震の研究分野⁴⁾でのパラメータである b 値は破壊時に低下し、その後破壊前のレベルに戻ることが知られており、図-2によるとAEから求めた b 値も同様な傾向を示す。

以上より、これらAEパラメータの変化は岩石供試体の破壊過程を捉えたものであると考えられる。

これらの知見をまとめAEパラメータの変化と破壊状態関係を整理して表-2に示す。AEパラメータの変化を段階的にゾーン分けすることで、岩石の健全度や破壊の進展度の評価が可能である。つまり、AEパラメータの変化に注目することで岩石の破壊プロセスの評価が可能であると考えられる。例えば、AE発生数や振幅値が増加し、振幅値や b 値の低下した状態では岩石は破壊であると判定できる。

表-2 AEパラメータによる岩石の破壊判定

AEパラメータ	岩盤性状の判定				
	健全		山はね	破壊後	
	領域 1	領域 2	破壊	領域 3	領域 4
①AE発生数 N	一定 →	増加 →	急増 ↗	ピーク ↗	減少(沈静化) ↘
②周波数 f	一定 →	一定～低下 →	低下 ↘	低下 ↘	低下して一定 →
③振幅値 A	一定 →	一定 →	急増 ↑	低下 ↘	低下して一定 →
④ b 値	一定 →	一定 →	急低下 ↘	増加(回復) ↗	一定 →

3. PFC解析による三軸AEのシミュレーション

3.1 PFC (Particle Flow Code)解析モデル

粒状体モデルの個別要素法(DEM)を用いて三軸圧縮試験のシミュレートを行い、応力経路に沿って実測値のAEパラメータと比較した。

PFCの原理は個別要素法に基づく解析手法であり、岩石を粒子の集合体と仮定し、各粒状間結合の破断によって破壊を表現する(図-3)。そして、PFCでは破壊モードは引張破壊とせん断破壊の二つで表現される。

解析では、岩石の三軸圧縮試験結果と解析結果とがほぼ同等の応力 - ひずみ曲線を得られるように粒子間パラメータを評価することによって実施した(図 - 4)。

PFCモデル解析により岩石三軸圧縮試験(21供試体)のトレース解析を実施して、PFCパラメータを同定した。

この結果、弾性係数 E については試験値(表-1)と解析に

より評価された値はほぼ同等である。しかし、PFC解析における引張強度 σ_c やせん断強度 τ_c は岩石供試体の全体の強度ではなく、それぞれの粒子を結ぶ強度であることに留意する必要がある。

図-2に示した三軸圧縮試験ケースを例に、シミュレーション解析と試験値の応力～ひずみ曲線を比較して、以下に、その特徴を詳細に述べる。

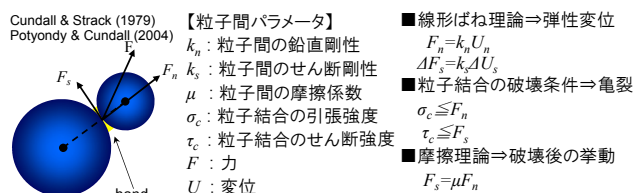


図-3 PFC 解析モデル(DEM)の概要

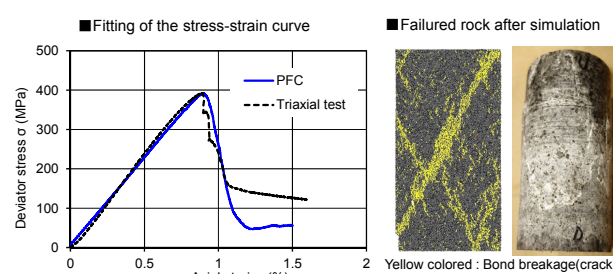


図-4 PFCモデル解析による三軸圧縮試験のシミュレーション

3.2 岩石三軸圧縮試験におけるAE挙動シミュレーション結果

PFC解析による三軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線とAE挙動シミュレーション結果を試験値と比較して図-5に示す。PFC解析ではAE挙動を直接表現できないので、筆者らはAEパラメータを以下のように定義して計算した。

(1) AE発生数のシミュレーション

AE「発生数」は粒子間の「ボンド切れ(クラック)数」として評価した。AE発生数とクラック発生数は、ともに降伏応力前に増加し始め、ピーク応力で最大となり、その後残留応力まで減少している。この結果、解析値と実測値は同様な傾向を示しており、PFC解析においてAEイベント数は各粒子間のボンド切れの数で表現できる。

(2) AE周波数のシミュレーション

AE「周波数」は一般に岩盤の緻密さに影響を受けると考えられているため、PFC解析上では「空隙率の逆数」と比較した。

同図によると、PFC解析により得られたAE周波数(空隙率の逆数)は岩石の破壊に従い低下することがわかる。そして、岩石三軸圧縮試験による実測値と同様な傾向を示している。一般に、破壊の進行にともない岩石の緻密さは失われ、AEの高周波成分が減衰し、低周波成分が

卓越すると考えられ、解析結果はこの物理現象を裏付けている。

(3) AE振幅値のシミュレーション

ボンド切れによる粒子間の変位の大きさとAE波形の振幅値は共に破壊エネルギーの大きさを表していると考え、PFC解析における粒子間の破壊による「開口量」をAE波形の「振幅値」と見なした。

同図によると、PFC解析により得られた振幅値(新規の粒子間開口量)は破壊に伴い大きな振幅値が発生していることが分かる。解析結果は岩石三軸圧縮試験による実測値と同様な傾向を示しており、AE振幅値の大きさを新規の粒子間開口量で評価することで振幅値の変化を表現できる。

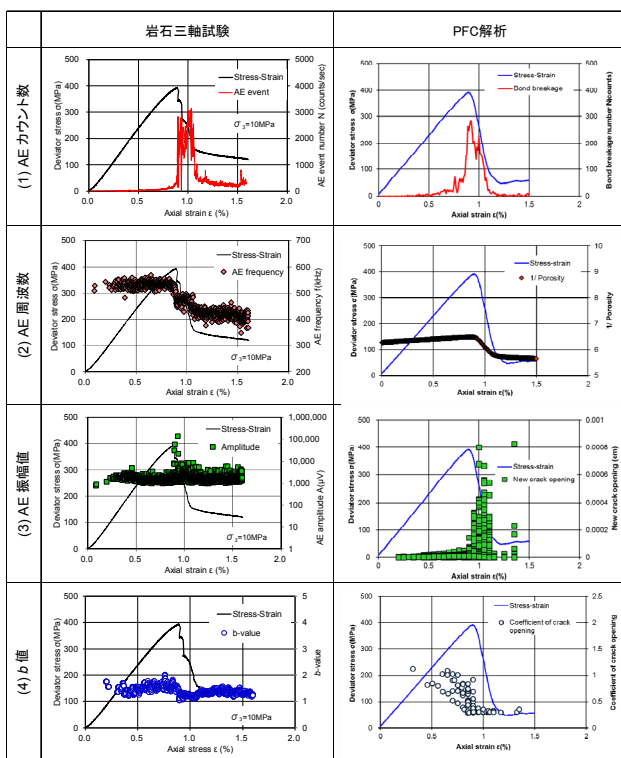


図-5 三軸圧縮試験とPFC解析によるAEパラメータの比較

(4) b値のシミュレーション

b値は地震の研究分野における指標であり、地震のマグニチュードの時間的変化から求めるもので、地震発生の直前にb値が低下することが知られている。

b値はAEの最大振幅とその頻度から破壊プロセスを評価する指標であり、破壊時のひずみエネルギーが大きくなると、振幅の大きいAEが発生するため、b値が低下すると考えられる。

AE計測における「b値」はAE信号波形の振幅値を地震におけるマグニチュードMと見なし、発生数を整理して求めた。すなわち、PFC解析において、破壊時のひずみエネルギーの大きさに関係する亀裂開口量に着目し、

「b値」は亀裂開口量の大きさの頻度分布の傾き(亀裂開口量に関する係数)から式(1)を利用して求めた。

この結果、同図によると、PFC解析により得られたb値は破壊直前から低下していることが分かる。

以上より、PFC解析値はAEパラメータの実測値を良く表現しており、PFC解析で求めたAEパラメータの変化は破壊プロセスを説明するのに有効であると考えられる。

4. 現場AE計測のためのノイズ処理の検討

施工中の現場におけるAEモニタリングでは、現場作業に伴う振動音がノイズとなり、計測の障害となっている。そこで、現場ノイズ問題の改善を目的として、トンネル現場の作業振動データを収集し、ノイズ波形とAE信号の波形の相違に注目し、ノイズ処理方法について検討した。トンネル現場において、切羽近傍において振動センサー(写真-2)を設置し、トンネル切羽工事に伴う作業振動を計測した(写真-3)。トンネル現場(写真-4)における様々な作業振動音の例を図-6に示す。これらは、連続的な振幅波形を示すものから、断続的なもの、またその周波数も様々であることが分かる。

ノイズを除去するために最も一般的に用いられるのは周波数フィルタである。ノイズとAEの周波数特性に違いがあれば、フィルタによる帯域制限をかけることで容易にノイズを除去することができる。しかし、図-7に示すように、収集した作業振動ノイズは3kHz以下、岩盤破壊AEは数百Hz～5kHzとなり、両者の周波数帯は重複するため、周波数による判別・除去は困難である。また、センサ直近でとらえたAE波形は5kHz程度の高い周波数を示すが、AEの周波数は伝播とともに低下してゆき、発生源から20m以上離れたセンサでとらえた場合には、1kHz以下に低下する。山はねに注目したAE計測の実際は、AEセンサを発破損傷を避けるため切羽直近ではなく少し離れた位置に設置するので、AEとノイズの周波数は重複するため周波数によるノイズ除去は困難である。

そこで、筆者らは波形の特徴に注目し、AE波形と作業ノイズの判別を試みた。すなわち、波形パラメータとしては図-8に示すように、①波形持続時間、②ライズ時間、③リングダウン数、④尖度について分析した。



写真-2 振動センサー

写真-3 トンネルAE計測装置



写真-4 トンネル切羽の作業状況

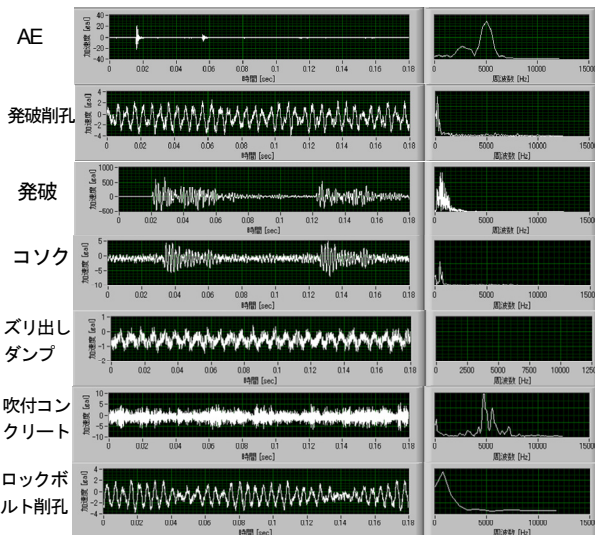


図-6 現場における作業ノイズ波形

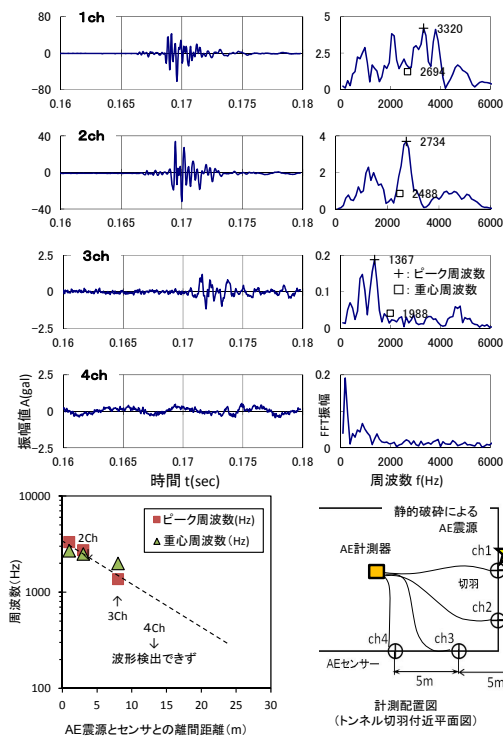


図-7 トンネル切羽での岩盤破壊 AE 波形の周波数と距離減衰

なお、尖度は波形振幅値に基づき求めるもので、波形振

幅がAEのように減衰型であれば尖度は大きく、作業ノイズのように波形が連続的な場合には尖度は小さくなる。

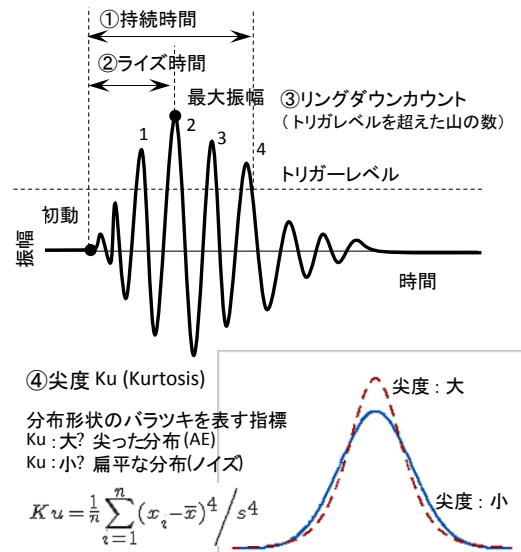


図-8 波形のパラメータ

AE波形は比較的周波数が高く、短時間で振幅値が減衰する波形を示すのが特徴であり、作業振動音は比較的周波数が低く、繰り返し振幅波形を示すものや断続的な波形を示すものが多い。

そこで、これら波形パラメータについてノイズ判別の目安となる閾値を試行錯誤的に検討した。その結果を整理し表-3に示す。作業振動ノイズは波形持続時間Tc、ライズタイムTr、リングダウン数RcともにAE信号波形よりも大きな値となり、尖度についてはノイズはAEよりも小さくなる。

ノイズ除去のための基礎的な検討として、トンネル現場において、実際の切羽作業時間帯にAE計測を実施した。現場作業としては、発破削孔、発破、コンク、ズリ積み・運搬、吹付コンクリート、ロックボルト削孔・打設などの作業振動がノイズ信号波形として計測されている。これらの現場計測データから表-3に示した波形パラメータとその閾値を用いてノイズを判別・除去した例を図-9に示す。まず、Case-1は表-3に示した波形パラメータ①②③を用いて判別した結果であり、ノイズとして除去された波形データは94%である。

さらに、Case-2は表-3に示した全ての波形パラメータ①②③④を用いて判別しケースで、99%のデータが除去されている。

また、Case-3では静かな計測条件として、作業休止中に、トンネル切羽において、図-10に示すように静的破碎剤を用いた地山岩盤の破碎を行い、ノイズの無い条件でAEのみ計測した。Case-3の図から分かるように、計測全データからノイズと判別されたものは5%程度であり、残りの95%は除去されずAE信号として残っている。

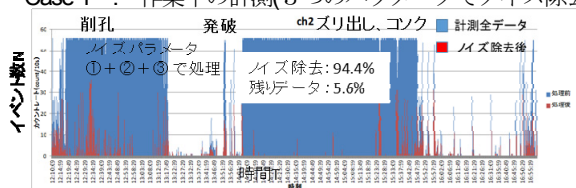
以上のノイズ除去に関する実験的検討により、波形パ

ラメータに注目することで、現場計測における作業振動ノイズは高い割合で除去できることが確認できた。ただし、表-3に示した各波形パラメータに関する閾値は個別のトンネル現場毎に異なるものと考えられ、本番AE計測の前に試験計測を行いノイズの分析が必要である。

表-3 波形パラメータとノイズ判定値

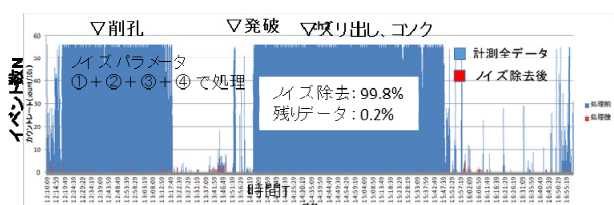
パラメータ	AEと現場作業ノイズ信号	ノイズ判定基準
①波形持続時間 T_c	AE 現場ノイズ	$AE < T_c = 0.01^{sec} < \text{ノイズ}$
②ライズタイム T_r	AE 現場ノイズ	$AE < T_r = 0.01^{sec} < \text{ノイズ}$
③リングダウン R_c	AE 現場ノイズ	$AE < R_c = 50 < \text{ノイズ}$
④尖度 K_w	AE 現場ノイズ	$\text{ノイズ} < K_w = 10 < AE$

Case-1 : 作業中の計測(3つのパラメータでノイズ除去)



Case-2 : 作業中の計測

(尖度 K_w を含めた4つのパラメータでノイズ除去)



Case-3 : 作業休止中の計測, 静的破碎剤で切羽破碎

(4パラメータでノイズ除去)

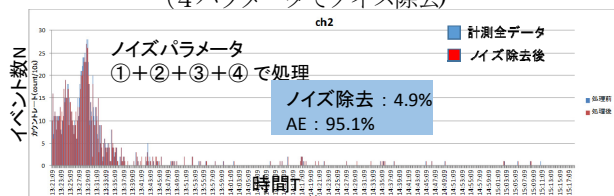


図-9 ノイズ除去事例

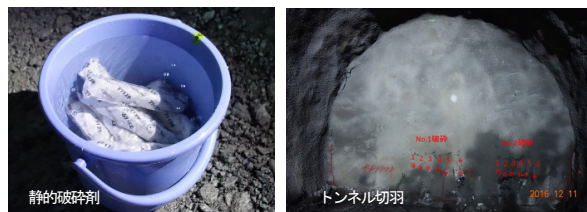


図-10 静的破碎剤による切羽での地山岩盤の破碎

5. おわりに

山はね現象モニタリングの基礎的な検討として、岩石三軸圧縮試験に伴うAE計測を実施し、PFC解析により岩石の破壊現象の再現を行い、AE挙動のシミュレーションを行った。PFC解析では各種のAEパラメータのモデル化を提案し、実測値との比較によりモデル化の有用性を確認した。さらに、現場AE計測で重要な課題である作業ノイズ問題について、波形パラメータに注目したノイズ処理法を提案しノイズ除去の改善策を示した。

今後はトンネルの山鳴り、山はねについて解析的な予測を実施する予定である。

参考文献

- 1) Mori, T, Aoki, K., Morioka, H., Iwano, K., Tanaka, M. & Kanagawa, T.: Application of borehole seismic and AE monitoring technique in the rock cavern, 10th ISRM Congress, pp.845-848, South Africa, 2003
- 2) 青木謙治, 水戸義忠, 森孝之, 山本健太: 岩石の破壊過程における微小破壊音の挙動に関する研究, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演会, pp.387-392, 2005.
- 3) Takayuki MORI, Takaaki INUZUKA, Mohd Ashraf Mohamad Ismail: Rock triaxial compression test with the AE measurement and failure simulation by the PFC analysis, 17th International Conference of Global Network for Innovative Technology (IGNITE) & AWAM International Conference in Civil Engineering (AICCE), Penang, Malaysia, 2017
- 4) 宇津徳治: 地震学, 共立全書, pp.123-136, 共立出版, 1977.

EVALUATION PROCESSING METHOD OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL DATA FOR ROCK BURST MONITORING

Takayuki MORI, Takaaki INUZUKA, Mohd Ashraf Mohamad Ismail, Hirokazu FUJII and Yue ZHAO

For aimed to predict the rock burst phenomenon by measuring the micro-burst noise (AE) in tunnel, the AE measurement were carried out during rock tri-axial compression test. By focusing on changes of AE parameters, it is possible to evaluate the soundness of the rock.

Furthermore, the noise processing method was studied for the purpose of improving the on-site noise problem. Working noise data on the tunnel site were collected, and noise removal processing was tried based on the difference between the noise waveform and the AE signal waveform. It was found that the kurtosis of the waveform is an effective parameter for noise elimination.