

## 地下空洞掘削時の安定監視のためのAE自動計測システムの開発 Development of an AE Auto-monitoring System for Stability Monitoring in Excavation of the Underground cavern

南部 茂義\*・小山 俊博\*・森 孝之\*\*・田仲 正弘\*\*\*

Shigeki NANBU, Toshihiro KOYAMA, Takayuki MORI and Masahiro TANAKA

In case of large scale underground excavation, such as at the underground power plant construction, the recognition of the loosened regions around a rock cavern is very important in predicting the stability and designing a reinforcement. The authors have conducted various methods for the purpose of estimating the stability of cavern and appreciated that the AE method is hopeful. However, in the AE methods, for a estimation it will cost much time in analyzing the AE data which obtained from excavation site as well as in distinguishing the AE wave from that noise one. Therefore, in order to improve the practical use of AE, an AE auto-monitoring system, which is suitable for estimating the stability of the cavern at real time, was developed and a practical test was conducted. In this paper the layout of the auto-monitoring system and a testing result at the field site are reported.

### 1. はじめに

地下発電所などの大規模岩盤地下空洞を掘削する際には、空洞の安定性の評価や補強対策を講じる上でゆりみ領域の把握が重要である。現状でのゆりみ領域の計測には岩盤変位の他に、弾性波速度変化、岩盤内の応力変化、破壊時に生じるAE (Acoustic Emission) <sup>1)</sup> およびボアホールスキャナー測定によるボーリング孔壁の亀裂性状の変化 <sup>2)</sup> などの計測が行なわれている。これらの中で、AE計測は掘削に伴い、岩盤内から生じたAE波形を観測して、その波形から岩盤挙動の評価を行うもので、取り扱うデータ量が膨大であるとともに、AE波形とノイズ波形(工事作業音など)との識別を経験者が波形から読み取る等、評価に至るまでかなりの時間を要するという課題があった。そこで、ノイズ波形の識別等の処理手法を構築して、リアルタイムで岩盤の評価が可能なAE自動計測システム装置を試作した。ここでは、AE波形とノイズ波形の識別処理の手法と、試作したAE自動計測システムを用いて現地計測を行った例について、以下に報告する。

### 2. 試作したAE自動計測システムの概要

試作したシステムの構成図を図-1に示す。センサ部、メインアンプ、波形処理部、システムコントローラおよびデータ記憶部から構成される。AEセンサで受振した信号はプリアンプで40dB増幅後、信号ケーブルを介してメインアンプに転送され、ここで30dBの計70dB増幅される。増幅された信号は1μ秒のサンプリング、波形記録長2048 words、プレトリガー512 wordsでAD変換される。そして、しきい値を超えた信号について、まず、AE波形とそれ以外の波形かどうかをソフトによる自動識別を行い、AEと認められなかった信号についてはこの時点で棄却される。AE波形として認められた信号は、解析処理部に転送されて周波数解析(高速フーリエ解析)、波形パラメータ解析が行われ、その結果と波形は記憶装置に収録される。そして、システムは待機状態になり、再びセンサが信号を感知すると同様の工程を行う。なお、この試作システムでの自動識別から解析・収録、そして待機までに要する時間は0.5秒/5chである。したがって、この時間帯がシステムの欠測時間となる。

\* 正会員 東京電力(株)建設部土木建築技術センター

\*\* 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所

\*\*\* 正会員 (株)日本パブリック 技術開発部

### 3. AE波形自動処理方法

#### 3.1 波形自動識別

図-2に代表的な観測波形例を示す。これらの波形例は後述の原位置で観測されたものである。図中の波形の横軸は記録時間(μ秒)、縦軸は波形振幅(v)である。図の(1)は周波数が80kHz程度、(2)は50kHz程度の代表的なAE波形である。(3)が重機の稼動時に多く観測される電気的なノイズ波形で、高周波のパルス的な波形である。(4)が岩盤削孔やブレイカ使用時に発生する波形であり、周波数は5kHz~30kHzと比較的低い。(5)が掘削時の発破振動である。

上記のAE波形(1),(2)とノイズ波形(3)~(5)とを自動的に識別するために、図-3に示すように、波形の4つの時間パラメータT1(波形の初動時間)、T2(持続時間)、T3(波形記録長 T-(T1+T2))、T4(立ち上がりから最大振幅の時間)を導入する。すなわち、これら4つの時間パラメータについて、予想される時間範囲をそれぞれ設定し、その設定値と観測される波形から読み取ったT1~T4との時間を比較する。

図-4に電気的な信号と削孔音の模式的な信号を示し、図中にそれぞれの時間パラメータの読み取り位置を示す。電気的な信号は図に示すようにAE信号と比べるとT2、T4が短く、T3が長いことから、明らかにAE波形との時間パラメータが異なることがわかる。また、削孔や発破などの機械的信号はT2、T4が非常に長く、時間パラメータで識別することが容易であることがわかる。

ここで、図-2の(1),(2)のAE波形観測例から具体的に、時間パラメータの設定を試みる。まず波形の立ち上がり時間であるT1の最小値は、プレトリガー(512μ秒=512words×1μ秒サンプリング)で概ね決められるが、最大値は複数のセンサで受信した場合を考慮する必要がある。すなわち、到達順位が遅くなった波形ほど波形記録開始から立ち上がりまでの時間T1が長くなることから、T1の最大値は設置する複数のセンサのうち一番離れた2つのセンサ間の距離と岩盤の弾性波速度(Vp)から求められる時間差で決定される。後述の原位置計測の場合、1chから5chを1m間隔に設置していることから、一番離れたセンサ間は4mとなり、弾性波速度を5km/sすると、その最大の時間差は800μ秒となる。したがって、T1の設定範囲は500~800μ秒となる。波形持続時間であるT2は図

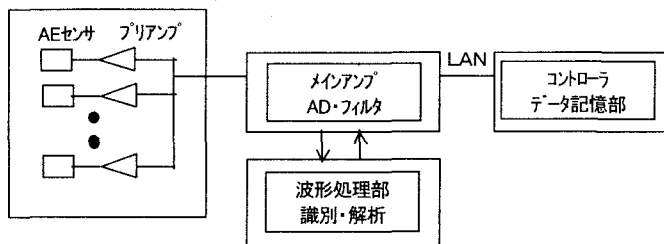


図-1 試作システムの構成図

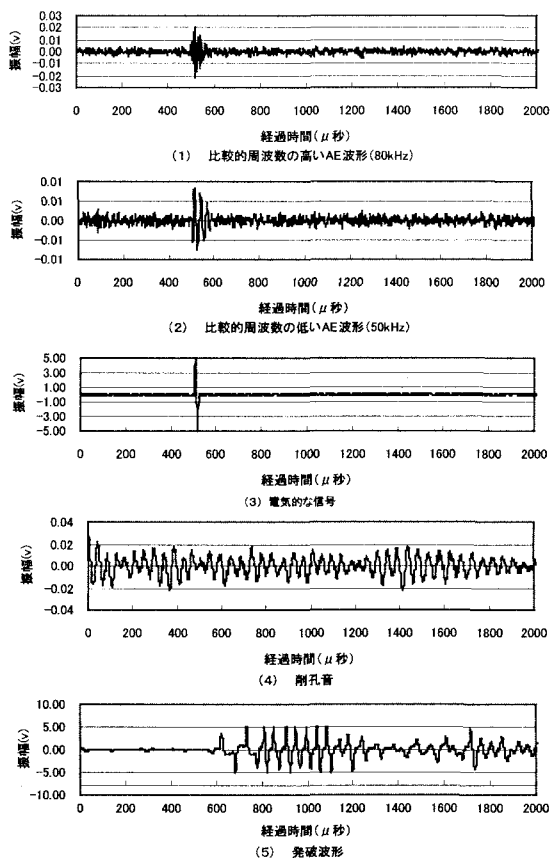


図-2 観測波形例

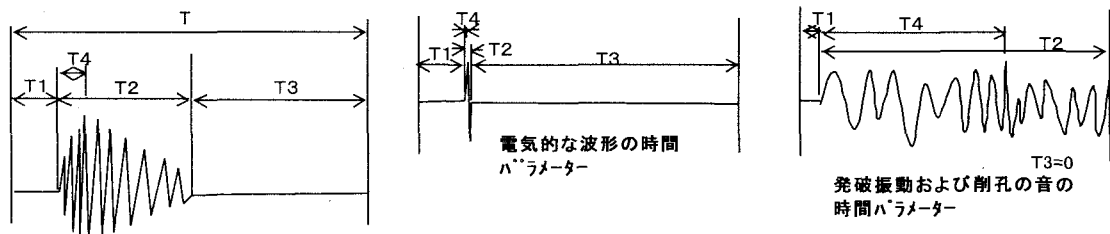


図-3 時間パラメータ

図-4 電気的な波形などの時間パラメータ

ー 2 の(1)～(2)から 100 $\mu$  秒程度と予想されるが、若干余裕を見て 100～300 $\mu$  秒に設定する。T3 は T1 と T2 の設定によって自動的に決まり、T3=T-(T1+T2)より、900～1400 $\mu$  秒となる。波形立ち上がりから最大振幅までの時間である T4 は同図より 100 $\mu$  秒以下であることから、0～100 $\mu$  秒とする。以上のような設定で、図-2 の(3)～(5)のような信号を取り除くことが可能になる

本計測システムは、上記の方法により波形識別を行った後に、A E 波形と認識されたデータは収録されるが A E 波形でなければ棄却される。そのために、波形記憶装置へは A E 波形だけが収録されることになる。なお、この時間パラメータは、現場環境や削孔方法によって異なるものと考えられるため、各現場単位あるいは掘削方法の変更などには再度信号を観測して設定値を確認する必要がある。

### 3.2 波形の自動解析

図-5 に 2 つのセンサで受振した場合の波形解析例を示す。解析はそれぞれの波形の持続時間 (T2 $\mu$  秒)、最大振幅(v)、リングダウン計数の解析<sup>3)</sup> および波形の卓越周波数解析<sup>4)</sup>を行う。ま

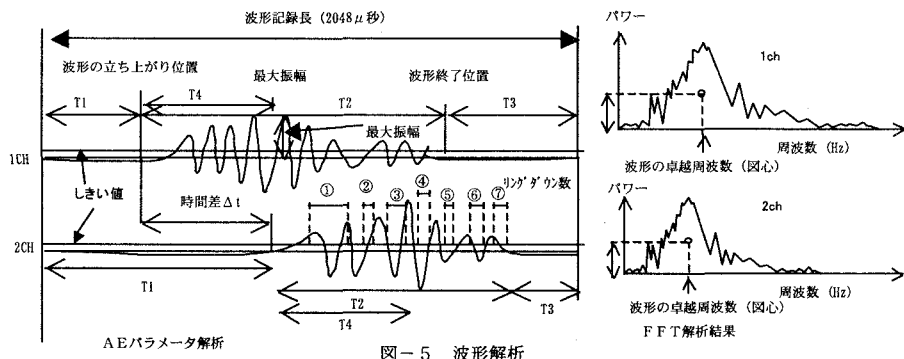


図-5 波形解析

た、簡易的な A E の発生位置を決めるために時間パラメータ T1 から時間差を求める。そして、解析終了後、解析結果を時系列的に作表して記憶装置に収録する。

本自動計測システムは、上記のような処理を受振とほぼ同時に行っているため、計測終了後、即時的に A E 解析結果を出力することができる。

## 4. 岩盤評価方法

掘削に伴う岩盤挙動の評価は、自動的に A E と識別された A E 波形の観測数 (発生数) ならびにその波形の周波数変化から行う。原位置での計測に先立ち、岩石コアを用いた三軸試験を実施し、その一例を図-6 に示す。この室内試験結果と金川の知見<sup>4)</sup>を踏まえ、岩盤の破壊過程における A E 発生状況と周波数変化の関係に基づき、岩盤状態の評価の指標を以下のとおりとした。

- ①測された波形の周波数が上昇あるいは一定の場合には、微視的な破壊亀裂が発生している段階でまだ耐荷力に余裕があり破壊は生じない。
- ② A E の発生数が増加して波形の周波数が低下に転じた場合には、微視的な亀裂が進展し始めた段階でまだ耐荷力はあるが破壊に近いことを示している。
- ③ A E の発生がさらに増加して周波数が低下していく場合は耐荷力も減少し、破壊亀裂の連結、すべり面の形成および滑動に進展して破壊する。

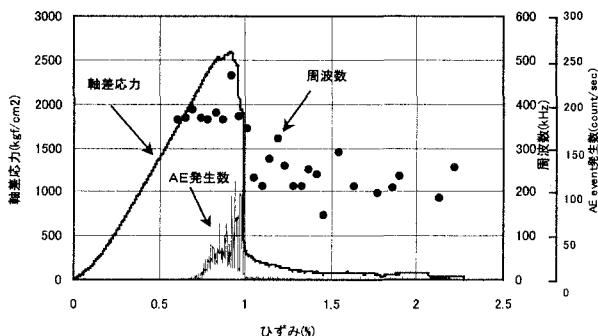


図-6 発生数と周波数変化の関係(三軸試験結果より)

## 5. 試作システムを用いた原位置での岩盤評価

この試作システムを用いてトンネル掘削時に A E を観測し、システムの適応性や実用性の確認を行うとともに、岩盤の挙動評価を行ったので、以下に報告する。

### 5.1 原位置計測の概要

原位置計測は、東京電力が群馬県上野村に建設中の神流川水力発電所の発電所周辺トンネル掘削時に行った。ト

ンネル周辺岩盤は電研式岩盤分類で  $C_{II} \sim B$  級の堅硬な砂岩である。トンネルの断面は幅 8 m、高さ 6 m であり、掘削は NATM 工法で実施された。計測に先立ち、AE センサとプリアンプを設置するために図-6 に示すように、計測対象のトンネルから約 10 m 上部に位置する調査横坑からボーリング孔を削孔して、トンネル天端上部の 0.5 m から 4.5 m 間に 5 個の AE センサとプリアンプが 1 m 間隔になるようにボーリング孔内に設置してセメントミルクで埋設した。使用したセンサは共振周波数 70 kHz、直径 20 mm、高さ 26 mm の円柱型センサである。プリアンプは 40 db 増幅のもので、直径 22 mm、長さ 112 mm の円柱型である。これらのセンサ、プリアンプは、ともに 6 気圧防水が施してある。

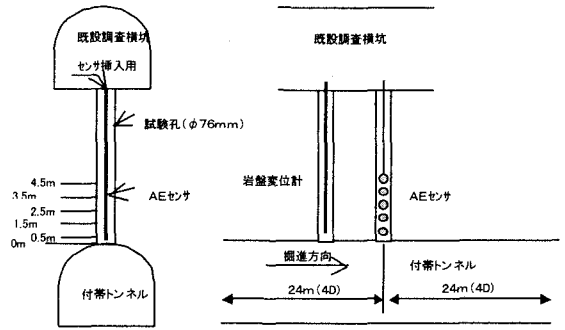


図-7 付帯トンネルとセンサ位置

計測は、図-7 に示したようにトンネルの掘進に対してセンサ設置断面の手前 24 m (トンネル高さ  $D=6$  m の 4 倍) から通過後 24 m の計 48 m 区間に行われる全ての発破において、発破直後から連続して 2 時間行った。また、波形識別の時間パラメータ (T1~T4) の設定には、原位置での削孔音や電気信号などの波形を観測して決定した。

### 5.2 掘削に伴う AE 発生状況

図-8 に計測結果を示す。この図は掘削の進捗に伴う 2 時間当りの AE 発生数の変化を示したものである。この図の横軸はトンネルの距離 (m) を示している。その下部にはセンサ設置位置とトンネル切羽の関係を示しており、図中の “D” はトンネルの高さ 6 m に対応している。センサ設置位置を基準 (=0D) として、基準位置と切羽との関係を D で表している。この図をみると、切羽が -1D 付近から AE の発生が認められる。そして、切羽の進捗とともに AE は増加するが、特にトンネル天端近傍に設置した 0.5 m (天端からセンサ間の距離) のセンサは、切羽がセンサ設置位置付近を通過して +0.8D に進むまで増加して最大となり、その後減少している。1.5 m 位置のセンサは、+0.3D で最大となりその後減少している。2.5 m 位置は +1.3D で最大となりその後減少している。これはトンネル天端部の岩盤内において掘削による応力再配分が行われているため、切羽が +0.8D までは 0.5 m 位置に応力が集中し、切羽が +1.3D に進むことで応力集中の範囲が 2.5 m 位置まで拡大したためと推定される。そして切羽が +2D まで進むと、AE の発生は少なくなる。また 3.5 m 位置および 4.5 m 位置のセンサは切羽の進捗に伴って若干の変化 (発生数) はみられるが、全体的に AE の発生は少ない。以上の AE 発生状況より、掘削によるセンサ設置位置 (トンネル天端部の岩盤) への影響は切羽が -1D (トンネル高さ) から +2D の時に生じ、特に天端から 0.5~2.5 m の範囲に応力が集中したものと推定される。

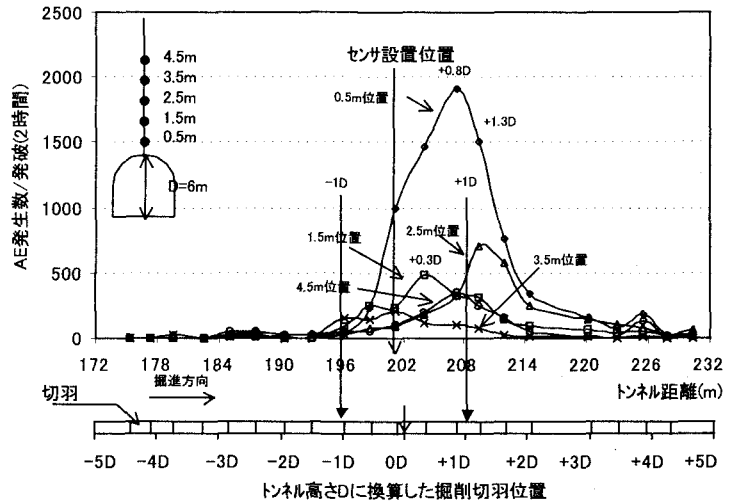


図-8 掘削に伴う AE 発生数の変化

図-9 に各センサの掘削に伴う AE 発生数および周波数の変化を示す。周波数は 1 回の測定 (発破毎) で収録された全ての AE 波形のうち、各センサに最初に到達した AE 波形について周波数解析 (FFT) を行い、センサ毎に集計してその平均値をプロットしたものである。この図からまず、天端から 0.5 m 位置をみると、+0.5D 付近までは AE の発生数とともに周波数も上昇するが、その後周波数は低下し始める。そして、+0.8D まで AE の発生数は増加するが、周波数は引き続き低下傾向を示している。この発生数と周波数の変化の傾向を前述した評価法と照ら

### 5.3 岩盤評価

図-9 に各センサの掘削に伴う AE 発生数および周波数の変化を示す。周波数は 1 回の測定 (発破毎) で収録された全ての AE 波形のうち、各センサに最初に到達した AE 波形について周波数解析 (FFT) を行い、センサ毎に集計してその平均値をプロットしたものである。この図からまず、天端から 0.5 m 位置をみると、+0.5D 付近までは AE の発生数とともに周波数も上昇するが、その後周波数は低下し始める。そして、+0.8D まで AE の発生数は増加するが、周波数は引き続き低下傾向を示している。この発生数と周波数の変化の傾向を前述した評価法と照ら

し併せると、0.5m 位置の岩盤は掘削によって応力再配分が生じたために耐荷力を失い、ゆるみ状態になっているものと推定される。次に、1.5m から2.5m位置は、AEの発生数は少なく、周波数の低下もみられないことから、この付近の岩盤はまだ耐荷力を失っていないものと推定される。また、3.5mから4.5m 位置ではAEの発生数が少ないことから、この位置付近の岩盤には掘削による影響が少なかったものと思われる。以上のことから、掘削に伴って生じたと思われるゆるみ領域は天端から 1.5m未満の範囲内にあるものと推定される。

また、比較のためにAE計測と同時に行った岩盤変位計測の結果を区間ひずみに直して図-10に示す。図の横軸はトンネル天端からの距離 (m) であり、計測終了後 (切羽が+4D時) の結果を示したものである。この結果をみると、天端近傍の 0.5~3.7m間に変位が生じている。特に、1.5m 付近は0.1%以上のひずみを示しており、岩盤に何らかの変状があったものと推定される。

## 6. おわりに

AEの現場への実用性を向上させるために、自動的にAE波形の選別・解析が可能なシステムを構築し、トンネル掘削時に適用して、トンネル天端周辺岩盤の評価を行った。その結果、(1)提案した波形選別のための時間パラメータを用いることで波形の自動識別が可能となり、必要なAE波形だけを波形記憶装置に収録することができるようになった。なお、波形識別パラメータは、本計測に先立ち計測サイトにおいてノイズ測定等に基づき設定されるものである。(2)AE波形は収録の都度解析してその結果を表として装置内記憶させたため、計測収録後は直ちに結果を出力することができるようになった。(3)このAE自動計測システムを原位置に適用した結果、掘削時の岩盤挙動を十分に説明することができ、別途実施された変位計測の結果とも符合した。

以上により、開発したAE自動計測システムは原位置でのAE計測結果を迅速に評価するために有効であり、今後、原位置でのデータを数多く収集して、本システムの信頼性を高めていきたいと考えている。

最後に、原位置計測においては、東京電力(株)神流川水力建設所上野第2工事事務所の前島所長をはじめ、鹿島・佐藤・三井・鴻池JVの皆様には多大なるご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 石田毅・金川忠・前島俊雄・伊東雅幸:第27回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp1~5, 1996
- 2) 打田靖夫・原田俊之・前田稔・浦山克・平川芳明:第25回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp336~340, 1993
- 3) 石田毅 (著) :岩盤破壊音の科学、近未来社、例えば pp41~52
- 4) 金川忠:地下空洞建設におけるAcoustic Emissionの利用技術に関する研究、京都大学大学院工学研究科学学位請求論文, pp.81~132

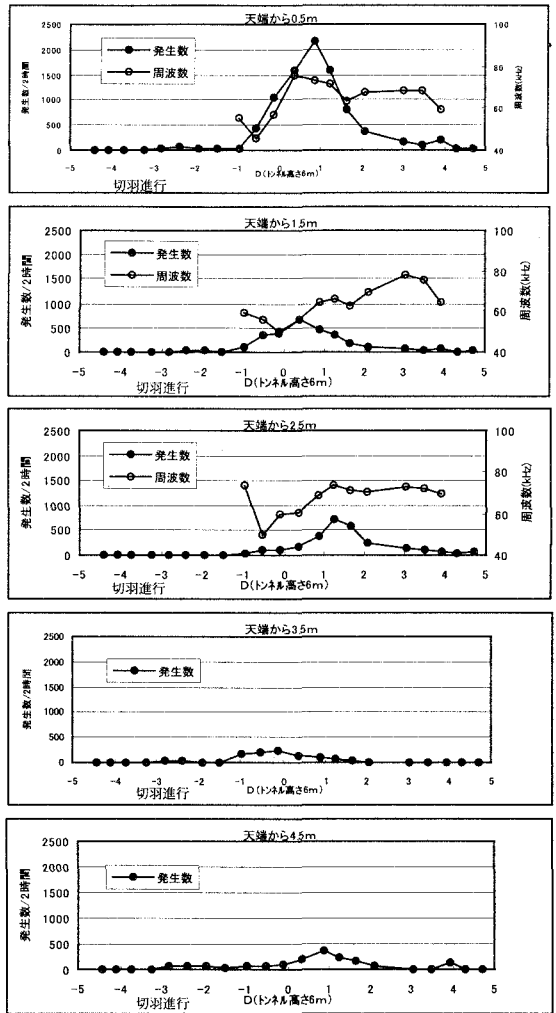


図-9 掘削に伴うAE・周波数変化

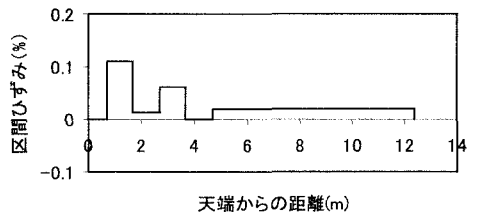


図-10 掘削完了後の区間ひずみ (岩盤計測から)