

地下空洞掘削に伴う AE について

Acoustic Emission associated with excavation of rock caverns

佐々木俊二*・石黒 幸文**・佐藤 正俊***・桑原 和道****

Shunji SASAKI, Yukifumi ISHIGURO, Masatoshi SATO and Kazumichi KUWABARA

Monitoring of Acoustic Emission (AE) was carried out in the drift where rock caverns are to be excavated, with the objective of obtaining fundamental data for developing a technique for preliminary forecasting of rock-mass behaviors at the time of excavating such rock caverns. Excavation work generates a large number of vibrations, and these vibrations have a frequency response almost similar to that of AE induced by excavation work. As a result, there were some difficulties in discriminating between both phenomena, though it was possible to monitor AE events induced by the work. It was also possible to clarify fundamental characteristics such as construction vibration and AE waveforms, frequency response, etc. According to the results obtained in this study, it can be judged that the monitoring of AE is an effective means to grasp the behavior of rock mass.

1. はじめに

地下空洞を掘削する際には、施工時の安全確保のため岩盤挙動を把握することが重要であり、岩盤の変位計測など数多くの測定が行われている。しかし、これらの測定は局所的な場合が多く、トンネル全体の挙動を把握するために多くの労力と時間を費やすことも少なくない。AE計測は、破壊に関する情報を直接含み、破壊位置の把握能力が高い。このため、AE計測により、地下空洞掘削時の岩盤挙動を事前に検知する手法（計測システムと解析方法）を開発するための基礎資料を得ることを目的として、地下発電所計画地点の試験坑内において試験坑および取り付けトンネル掘削時のAE計測を実施した。

2. 地質の概要

計測は、坑口からおよそ1.5kmほど水平に掘削された試験坑内で行った。この地点の標高は約480mで、土被り厚は500～600m程度である。計画地点では主に花崗岩が分布するが、一部に流紋岩の貫入が認めら

* 佐々木俊二 (財) 電力中央研究所 地盤耐震部
** 正会員 石黒 幸文 中部電力株式会社 土木建築部
*** 正会員 佐藤 正俊 中部電力株式会社 電力技術研究所
**** 桑原 和道 (株) 日本パブリック 技術開発部

れる。試掘坑内で確認された花崗岩の節理の卓越方向は水平および NE-SW 系、シームおよび破碎帯の卓越方向は N-S および E-W 系である。

3. AE 計測の概要

計測は、A~E の試掘坑の 26 箇所計 32 個の AE センサーを配置して行った。AE センサーの設置位置を試掘坑や取り付けトンネルの位置とともに、図-1 に示す。取り付けトンネルの天端は、試掘坑数の 36m 下に位置する。同図において、三角印と四角印は計測点の AE センサー数が 1 個と 3 個 (3 成分) であることを意味する。計測期間は、1998 年 6 月 1 日から 1999 年の 1 月 26 日までのおよそ 8 ヶ月間で、その間ほぼ自動計測を行った。次に、用いた計測システムのブロック図を図-2 に示す。この計測システムでは、AE センサーからの信号を AE か否かを判定し、AE データのみを収録するまでの一連の作業をすべて自動処理で行うことが可能である。具体的には以下の通りである。

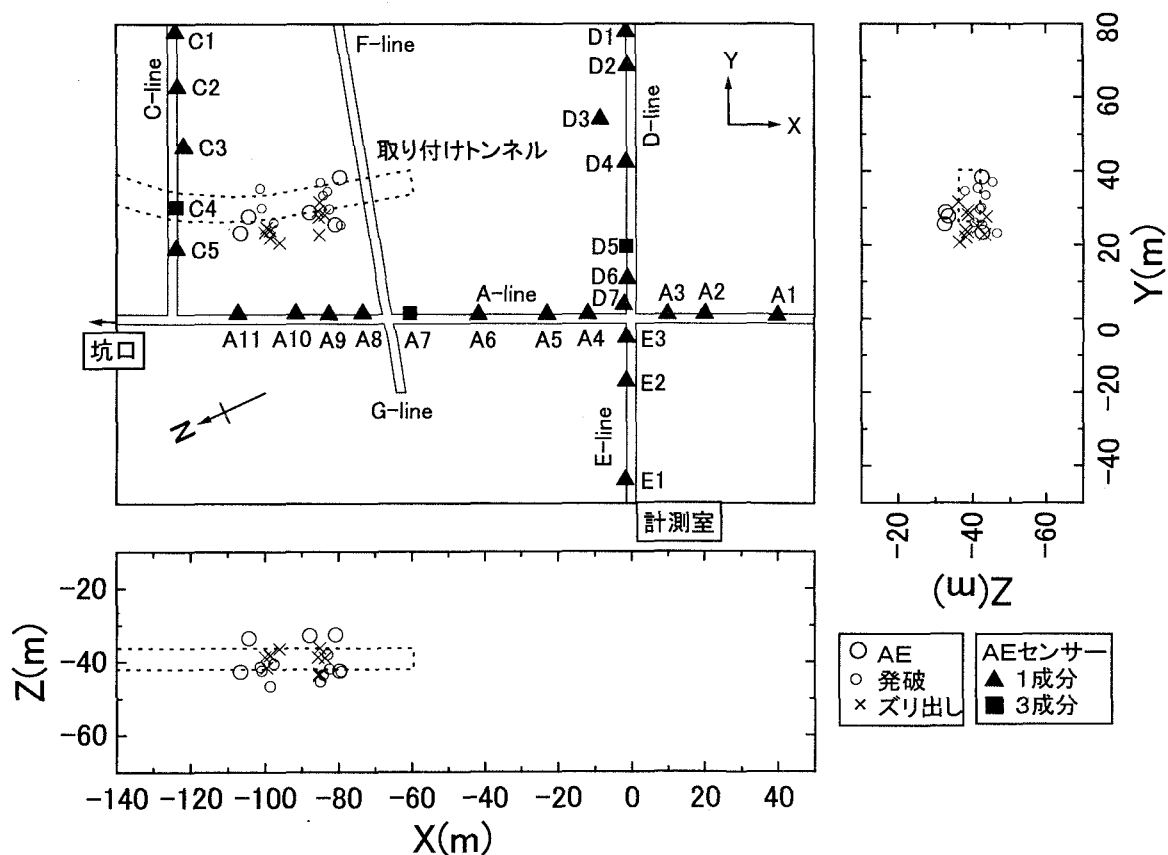


図-1 試掘坑、取り付けトンネルおよび AE センサー (▲: 1 成分、■: 3 成分) の位置図。図中の印は、1999 年 1 月 21 日から 1 月 26 日の期間に、取り付けトンネル掘削工事に伴い発生した AE (○)、発破振動 (○) およびズリ出し工事に伴う振動 (×) の震源分布。

使用した AE センサーは、共振周波数 30kHz の圧電型加速度計である。センサーからの出力はプリアンプ

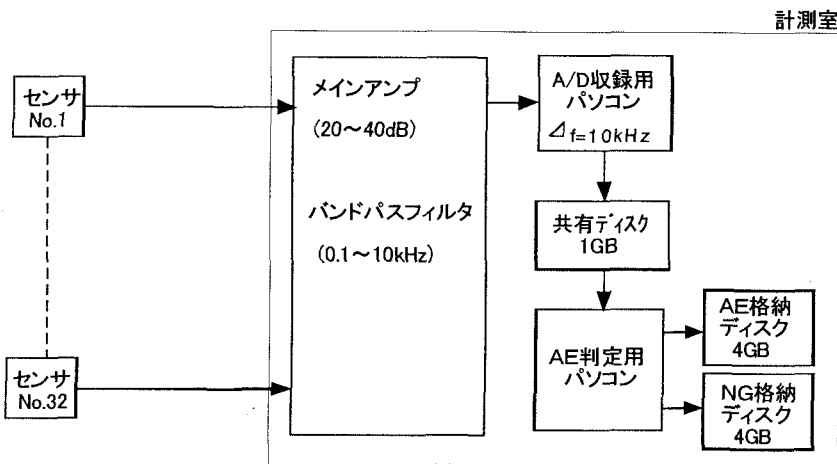


図-2 計測システムのブロック図

で 10 倍増幅したのち、信号ケーブルを介して計測室に送り、バンドパスフィルター（帯域 100Hz～10kHz）によるフィルター処理と、メインアンプで増幅（倍率 10 倍ないし 100 倍）したのち、デジタル収録した。デジタル収録は、2 台のパソコンを用いて行った。AD 収録用パソコンは設定条件を満たす信号のみを取り込むためのもので、メインアンプからの出力信

号をサンプリング周波数 20kHz で AD 変換（分解能 12bit）するとともに、ある時間幅の中で指定回数以上トリガーレベルを越えた時に、そのデータを AE 判定用パソコンに転送する。AE 判定用パソコンは、AD 収録用パソコンから転送されたデータに対して、AE かノイズかを順次判定するもので、判定結果により AE とノイズとに振り分けてハードディスクに収録した。ハードディスクの容量は最大 8GB で、一イベントあたりのデータ長を 1800 ポイントとするとおよそ 70000 個の AE を収録することが可能である。

4. 計測結果

以下では、各種の工事に伴い発生した信号のうち、AE 計測網の内側での取り付けトンネル工事に伴い発生した AE、発破振動およびズリ出し工事の振動に限定し、波形、スペクトル、マグニチュード、およびメカニズム解析などについて検討した結果について述べる。この計測期間は、1999 年 1 月 21 日から 1 月 26 日までのおよそ 6 日間である。

4.1 震源分布

後述するように、掘削作業に伴い発生する振動は、1 秒間に数十個程度の頻度で多数発生し、かつ、掘削作業で発生する AE とほぼ同様の周波数特性を有するため、両者を判別することは困難であった。このため、発破終了からズリ出し作業開始までのノイズレベルが低くなる約 2 時間程の時間帯に注目してデータ整理を実施した。その結果、取り付けトンネル工事に伴い発生した AE を 5 個計測することができた。これらの AE の震源分布を図-1 に示す。震源決定は、P 波と S 波の初動の到達時間差を用いて行った。この方法は自然地震の震源決定と同様に、走時残差の自乗和を最小とする震源要素を逐次近似により求める方法である。また、理論走時の計算は、無限媒質 ($V_p=5.23\text{km/s}$, $V_s=3.0\text{km/s}$) を仮定して行った。同図には、1999 年 1 月 21 日と 26 日の発破とズリ出し作業で発生した典型的な振動について求めた震源の位置も併せて示してあるが、いずれも取り付けトンネル付近に震源位置が求められている。

4.2 計測波形とスペクトル

取り付けトンネル掘削時に A7 点で計測された代表的な AE、発破およびズリ出し振動の各波形を図-3 に示す。これらの波形の中で、発破の最大振幅は AE やズリ出し振動の最大値よりも約 50 倍大きい。しかし、最大振幅が異なる点を除くと、これらの波形の振動継続時間はほぼ等しく、また、波形の形状もよく似通って

おり、波形をみただけでは、AE と他の波形とを区別することは困難である。次に、A7 点で計測された AE、発破振動およびズリ出し振動のスペクトルの平均を図-4 に示す。同図によれば、AE とズリ出し振動のスペクトルは、ほぼ同程度の大きさであるのに対し、発破振動のスペクトルは、これらよりも 2 桁大きい。また、スペクトルのピーク周波数は、発破とズリ出し振動で 500Hz 程度、AE で 200~1000Hz 程度である。

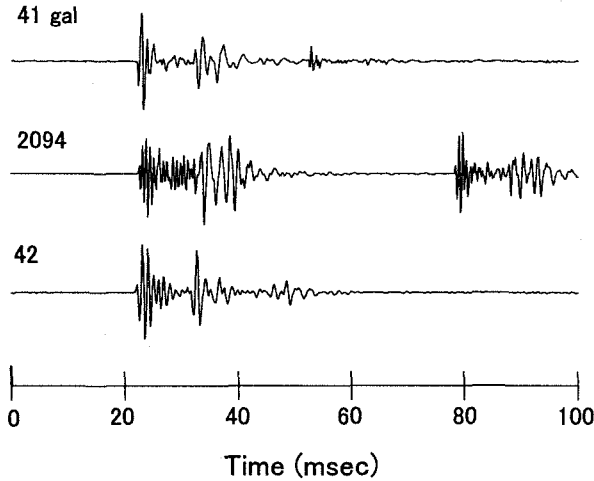


図-3 取り付けトンネル掘削時に A7 で計測された代表的な波形の例。
上から順に AE、発破およびズリ出し振動の各波形。

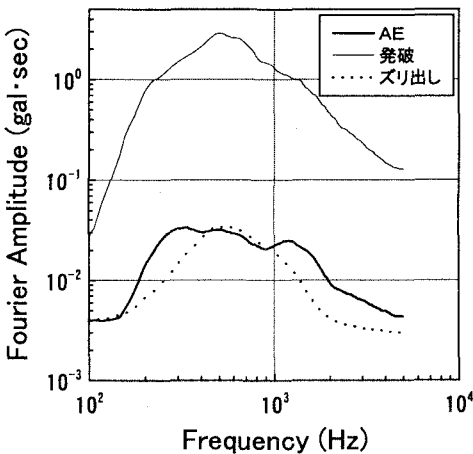


図-4 取り付けトンネル掘削時に A7 で計測された AE、発破振動およびズリ出しの代表的な振動波形のスペクトルの比較。

4.3 波形のマグニチュード

次に、§ 4.1 で震源決定した AE、発破振動、ズリ出しに伴う振動について、渡辺 (1971) の方法²⁾を用いてマグニチュード M を求めた。渡辺の方法は、震源距離が 1km より大きい微小地震の M を決定するものである。この方法を震源距離が数 10m 程度で、かつ卓越周波数が 1kHz 程度の AE などに適用するのは厳密には正しくないが、ここでは振動の大小を表す値として便宜的に使用した。その結果、AE、発破振動、ズリ出しに伴う振動の M は、それぞれ順に、-3.5~-1.9、-1.5~-0.3 および -3.0~-2.7 の範囲で、発破振動の M は他のものに比べて規模が 1~2 程度大きい。これに対し、AE とズリ出し振動の M はほぼ同規模であった。この結果は、先に述べたスペクトルの結果と調和する。

4.4 メカニズム解析

計測された AE、発破振動、ズリ出しに伴う振動の典型的な波形について、P 波初動の押し引き分布に基づ

いてメカニズム解を求め、AE とその他の振動とでメカニズム解に相異があるかどうか検討した。

AE のメカニズム解の例を図-5(1)に示す。同図は、震源球の下半球に等積投影法により投影したもので、●、○は、P 波初動の方向が押しと引きとを表す。また、T、P は、それぞれ最小主応力、最大主応力に相当する T 軸、P 軸を表す。このメカニズム解としては、横ずれ成分を含む逆断層解で説明できる。しかし、P 波初動が全点で引きを示すことから、図-5(2)に示す陥没のような圧縮破壊の方が適切であると思われる。次に、発破振動のメカニズム解を図-5(3)に示す。発破に伴う振動の P 波初動方向は全点で押しを示しており、発破振動は引張破壊で発生したことが分かる。ズリ出し作業に伴う振動のメカニズム解の例を図-5(4)に示す。ズリ出し作業に伴う振動の P 波初動も全点で押しを示しており、メカニズム解は発破振動と同様に引張破壊と思われる。

以上、AE、発破およびズリ出し作業に伴う振動のメカニズム解について検討した。その結果、一部例外は見られるものの、AE は陥没のような圧縮破壊で発生するのに対し、発破とズリ出し作業に伴う振動は、引張破壊で発生することが判明した。

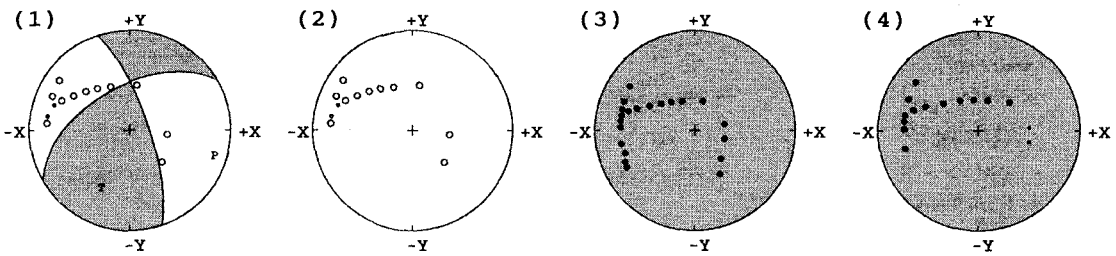


図-5 取り付けトンネル掘削工事に伴い発生した代表的な波形のメカニズム解の例。震源球の下半球に等積投影法で投影。(1) AE、(2) AE、(3)発破振動、(4)ズリ出し振動。

5. まとめ

地下発電所掘削時の岩盤挙動を事前に検知する手法（計測システムと解析方法）を開発するための基礎資料を得ることを目的として、地下発電所計画地点の試掘坑内において取り付けトンネル掘削時の AE 計測を実施した。計測結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 工事中の振動は、毎秒数 10 個の頻度で連続して多数発生する。
- (2) 震源を求めることが可能であった AE の M は-3.5~-1.9 程度である。この AE のエネルギーは、工事中の発破振動で放出されるエネルギーよりも小さいが、ズリ出し作業の振動のものと同程度である。
- (3) ズリ出し作業に伴う振動と AE の波形と周波数成分はいずれも似通っており、両者を識別することはできなかった。
- (4) 発破振動や工事中の振動のメカニズム解は主に引張破壊であるのに対し、AE のメカニズム解は圧縮破壊である。このように、振動のメカニズムには相違が見られる。

6. 参考文献

- 1) 堀内茂木・山本明・松澤暢・河野俊夫・長谷川昭・高木章雄：1984 年長野県西部地震余震観測データの現地自動処理について、地震, 38, pp.529-539, 1985.
- 2) 渡辺 晃：近地地震のマグニチュード、地震, 24, pp.189-200, 1971.