

神流川地下発電所空洞掘削時の AE 測定による岩盤挙動の評価

Estimation of Rock mass behavior for AE monitoring in Excavation of Kannagawa underground powerplant cavern

前島俊雄^{*}・森岡 宏之^{*}・森 孝之^{''}・青木 謙治^{'''}

Toshio MAEJIMA, Hiroshi MORIOKA, Takayuki MORI and Kenji AOKI

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 support design. 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 measure of observational construction was applied. In this paper the layout of rock mass behavior for AE at the field site are reported.

Key words : acoustic emission, auto-monitoring system, rock mass behavior, loosened region

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)¹⁾²⁾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、評価に至るまでに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開発した³⁾。これを用いることにより、従来試みられていた AE 計測が試験的な位置付けであったものから、情報化施工の一手段として 120 点の AE 計測点を配置し実工事に適用し、掘削に伴う空洞周辺岩盤の挙動評価を行った。以下にそれらの結果について報告する。

2. AE 計測の概要

2.1 空洞と計測点の配置

計測対象の空洞は、東京電力が群馬県多野郡上野村に建設している純揚水式地下発電所で、完成後は空洞内に発電用水車 4 台が設置され、その発電容量は最大で 180 万 kw(45 万 kw×4 台)となる。空洞の形状はたまご形で、その大きさは幅 33.0m×高さ 52.1m×長さ 215.9m の大規模な岩盤空洞である。なお、空洞周辺の地質は泥岩を主体とする基質に砂岩・チャートなどが混入する混在岩で、電研式岩盤分類では概ね C_H 級の硬質な岩盤である。

図-1 は空洞平面図、図-2 は断面図であり、図-2 の A1 は頂設導坑、A2、A3 はアーチ切掘り、そして 1B ~12B はベンチ掘削を示す。AE 計測断面は D、H 断面ととともにアーチ部に 3 測線(鉄管路側、天盤部、放水路側)、側壁部に 2 測線(鉄管路側、放水路側)とともに設置レベルは 4 ベンチ)の計 5 測線である。AE センサーを設置するボ

^{*} 正会員 東京電力(株) 神流川水力建設所

^{''} 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所

^{'''} 正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科

ーリング孔は、アーチ部では空洞天端より約 30m 上部に位置する調査横坑から、側壁部は壁面から 20~30m 離れた周辺トンネルからそれぞれ削孔している。各測線には発破による AE センサーの損傷を防ぐために空洞壁面から 1.5m 離れた位置から 12 個の AE センサーとプリアンプを 1.5m~2m 間隔で設置し、セメントミルクで埋設した。したがって、計測点は 2 断面で 10 測線、設置するセンサー数は 120 点となる。センサーの設置時期はアーチ部が空洞掘削前、側壁部が周辺トンネルの掘削工程の関係からアーチ掘削完了時に設置した。使用した AE センサーとプリアンプを写真-1 に示す。センサーは共振周波数 70kHz、直径 20mm、高さ 26mm の円柱形である。プリアンプは電源供給型で 40dB 増幅のもので、直径 22mm、長さ 112mm の円柱形である。これらのセンサー、プリアンプはともに 6 気圧防水が施されている。

なお、これらの断面には AE の他に岩盤変位計、振動弦型応力計およびボアホールテレビ観察などの測定も実施されている。

2.2 AE自動計測システム

開発したシステム³⁾は、観測される全ての信号について AE 波形とノイズ波形の識別、FFT 解析、波形パラメータの読み取りならびにそれらの結果の記録・作表までを全て自動的に行う機能を有し、ノイズを除去し比較的信頼性の高い計測結果をほぼリアルタイムで現場にフィードバックすることが可能なシステム(図-3³⁾)である。計測システムの構成図を図-4 に示す。このシステムは 1 ユニット当たり 12 チャンネル構成(最大で 16 チャンネルまで可能)の独立したシステムであるが、LAN を介することで 1 台のコントローラで最大 12 ユニット(192 チャンネル)まで制御することができ、さらに電話回線を接続すれば外部からのコントロールや解析結果の転送が可能となる。

今回の計測測線は 10 測線であることから、10 ユニットと 1 台のコントローラでシステムを構築(写真-2 参照)している。システムはメインアンプ、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、AE センサーで受振

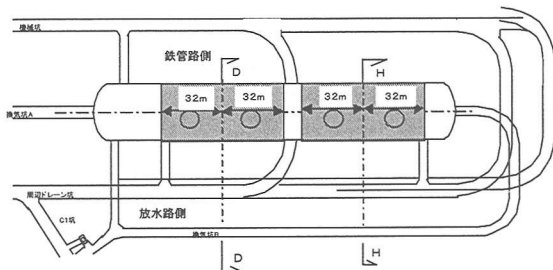


図-1 空洞平面図

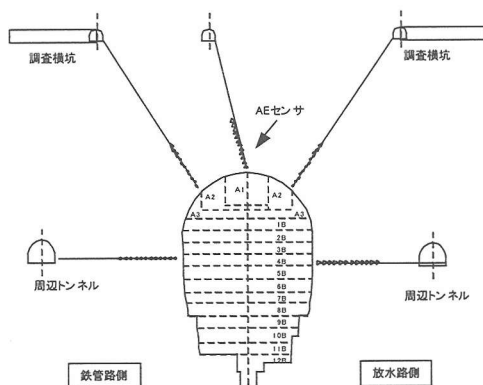


図-2 空洞断面図(D,H)と AE 計測測線

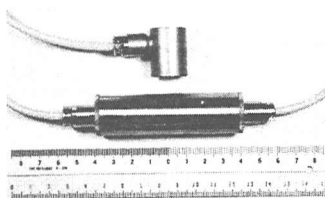


写真-1 AEセンサーとプリアンプ

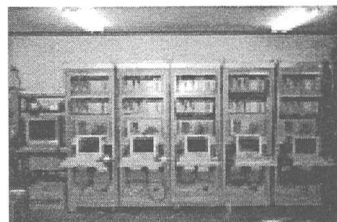


写真-2 120 チャンネル計測システム

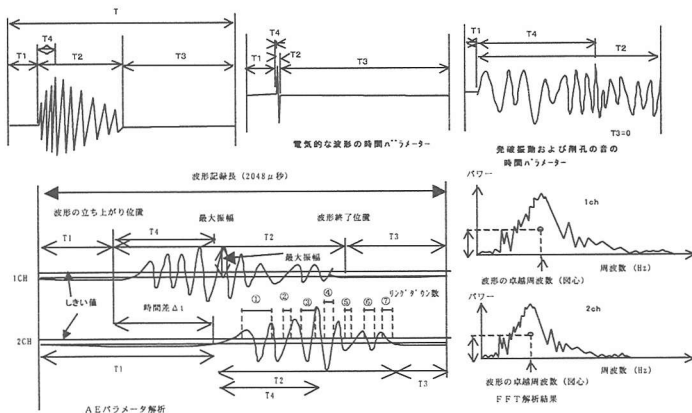


図-3 ノイズ識別と AE データ処理

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 の増幅が行われた後、フィルタリング処理が行われる。このアナログ波形は 1μ秒のサンプリング、波形記録長 2048words、プレトリガー 512words 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 波形かノイズ波形かを自動的に識別し、ノイズ波形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、再びセンサーが信号を感知すると同様の工程を行う。なお、このシステムでの自動識別から解析・収録までに要する時間は 0.8 秒/12ch である。

2.3 計測頻度

本来ならば常時 AE 波形を観測・収録して、掘削に伴う周辺岩盤を監視することが理想的であるが、そのためには大きな記憶容量部(ハードディスク)が必要になるだけでなく、データをバックアップするだけでも多大な時間を要することになり、経済的・時間的にも負担が生じる。そこで、本計測は、掘削による影響が大きいと推定される掘削範囲を定めて、その範囲で行われる全ての発破において、発破直後から 2 時間の連続測定を行った。なお、その掘削範囲は図-1 の空洞平面図に記載した斜線部(D,H 測線からともに±32m)の範囲である。ただし、発破後の計測で AE の発生が収束する傾向がみられない場合や、他の計測データが異常値を示した場合には継続して計測し空洞の安定性を監視する。

2.4 岩盤評価方法

掘削に伴う岩盤挙動の評価は、自動的に AE と識別された AE 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。本計測に先立ち、原位置の岩石コアを用いて三軸試験を実施し、岩石の破壊過程においての AE 発生数と周波数変化の関係に基づき、岩盤状態の指標を以下のとおり³⁾⁴⁾とした。

- ①観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巨視的な岩盤破壊は生じない。
- ②AE 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は近い。
- ③AE 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、すべり面の形成に進展して滑動・破壊する。

3. 計測結果

3.1 アーチ部掘削

図-5 に観測波形例(本システムモニター出力例)を示す。しきい値を超えた信号が AE 波形と認められた時に、それと同時刻の 12 チャンネルの波形が全て表示される。

図-6 は H 断面におけるアーチ部掘削時の計測結果である。この図は AE 発生位置とその発生状況を示しており、横軸は空洞壁面からの距離、縦軸は時間当り(総発生数÷総計測時間)に換算した発生数で示している。図の(a)は鉄管路側、(b)は天端、(c)放水路側である(図-2 参照)。これらの図から AE の発生範囲をみると、3 測線とも

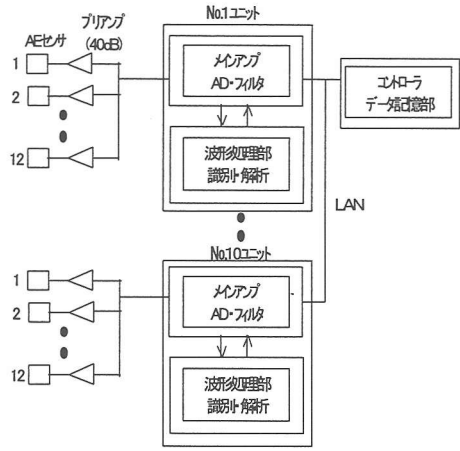


図-4 自動計測システムの構成図

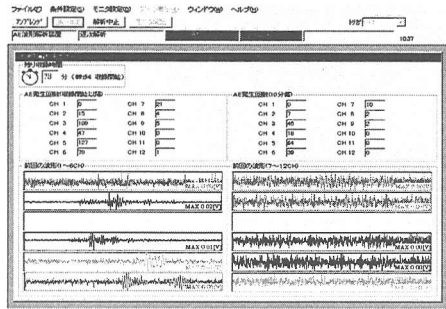


図-5 観測波形例

に壁面近傍で AE が発生しており、各測線において顕著に AE が発生している位置をみると(a)鉄管路側は壁面から 2.5m、(b)天端部が 1.5m、(c)放水路側が 2.5m ～ 3.5m 位置となっている。

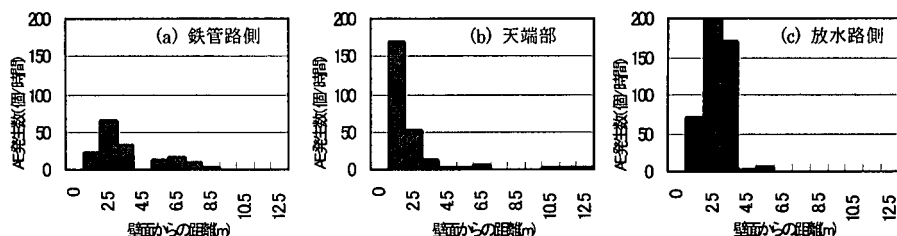


図-6 アーチ部(H断面)計測結果

これらの位置はアーチ部の岩盤内において掘削による応力再配分が行われたことによって生じた応力集中箇所であり、特に放水路側は他測線と比べ、応力集中箇所が壁面より奥で生じている。

しかし、いずれもアーチ部掘削完了後には AE の発生は沈静化しており、盤下げ掘削時の新たな AE の発生は極めて少ない。

3.2 盤下げ掘削

図-7 は H 断面放水路側における盤下げ掘削時の計測結果である。これらの図は 2 回のベンチ掘削時に計測した発生数をまとめて集計したもので、(a)は 2～3 ベンチ、(b)は 4～5 ベンチ、(c)は 6～7 ベンチ、(d)は 8～9 ベンチ掘削時の AE 発生位置とその発生状況を示している。横軸、縦軸は図-5 と同様である。なお、1 ベンチと 10～12 ベンチ掘削時には AE の発生が見られなかったことから、ここでの記載は省略する。

これらの図をみると、センサー設置レベルである 4 ベンチより上部の 2、3 ベンチ掘削では、壁面から 1.5m～3m 付近の位置で AE が発生し始めている。次に、センサー設置レベルである 4～5 ベンチの掘削段階では、1.5～4.5m の深度で顕著に AE は発生しており、AE の発生範囲は壁面より 4.5m まで拡大していることがわかる。次に、6～7 ベンチ掘削段階になると、AE 発生のピーク深度は壁面から 7.5m に移行している。最後に、8～9 ベンチ掘削段階に入ると全体的に発生数は減少(沈静化)し、さらに、それ以降のベンチ掘削では AE の発生はほとんど見られなくなった。

以上の AE 発生状況より、計器設置当該箇所より前の掘削段階から岩盤挙動の予兆は AE 測定により捉えられている。そして、掘削の進捗に伴い、AE 発生頻度のピークは壁面近傍の浅部から徐々に深部に移行しており、この挙動は掘削による空洞周辺岩盤の応力再配分であると考えられ、AE で十分にこの挙動を捉えることが可能であることがわかる。

4. 岩盤挙動評価

図-8 および図-9 に掘削に伴う AE 発生数および周波数の変化を示す。両図に示した結果はいずれも掘削による応力集中が著しい箇所のものである。図-8 はアーチ部放水路側の壁面から 1.5m と 2.5m での結果であり、横軸の A3-1～A3-5 の掘削段階は A3 切上げでの結果を詳細にみるために掘削期間を 5 等分して示している。図-9 は H 断面放水路の深度 6.0m と 7.5m 位置での結果である。

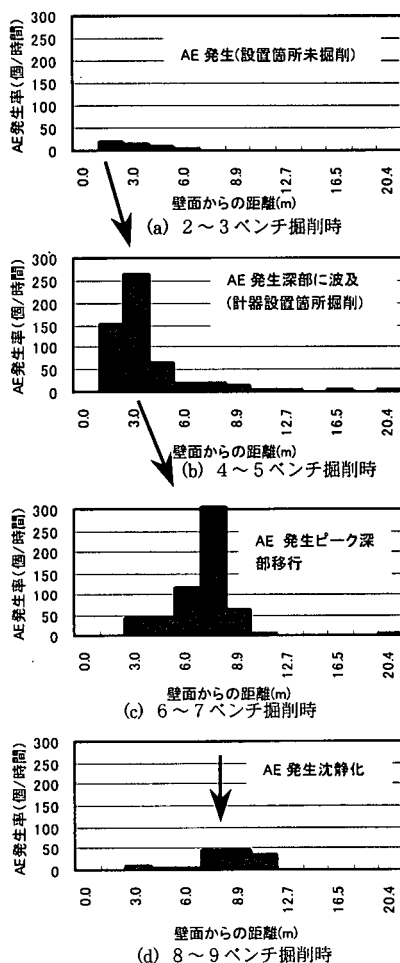


図-7 側壁部(H断面)計測結果

周波数の算出は1回の測定(発破毎)で収録された全てのAE波形のうち、各センサーに最初に到達したAE波形について周波数解析(FFT)を行い、センサー毎に集計してその平均値をプロットしたものである。

まず、図-8の壁面から1.5m位置をみると、アーチ切掘り掘削まで(A3-3)はAEの顕著な発生とともに周波数も上昇するが、切り掘りが進捗(A3-4)すると発生数も減少し周波数も低下する。ここで、2.5m位置をみると、切掘りA3-3から急激にAEが発生し、切掘りA3-4でもこの位置は引き続きAEが多く発生する。そして切掘りA3-5で発生数は激減する。周波数は切掘りA3-2で急激に上昇し、その後は若干の低下傾向を示すが、1.5m位置で周波数が低下した切掘りA3-5では逆に上昇する。この状況を前述した評価法と照らし合わせると1.5m位置の岩盤は掘削による応力集中によって耐荷力が減少し、ゆるみ状態になっているものと推定され、そのために、応力集中箇所が壁面から2.5m位置の健全な岩盤に移行したものと推察される。

次に、図-9の深度6.0m位置のグラフをみると、5~6ベンチ掘削まではAE発生数は増加するが、周波数は急激に低下している。一方、7.5m位置のグラフでは、2ベンチから5ベンチ掘削まではAEが発生し、しかも周波数は比較的高いレベルを維持している。この状況を前述した評価法から岩盤挙動を評価すると、掘削による応力再配分に伴い深度6mの岩盤は耐荷力を失い、深度7.5m位置の岩盤はまだ耐荷力を失っていないものと推察される。

5. おわりに

情報化施工の一手段として地下発電所空洞掘削工事に適用するために、120チャンネルのAE自動計測システムを開発・適用して掘削に伴う周辺岩盤の評価を行った。その結果、(1)AE計測の自動化システムを開発したことで、膨大なAE信号の処理および解析を瞬時に行い、その結果を記憶装置に速やかに収録することができるようになった。(2)当AE自動計測システムを地下発電所空洞掘削時の計測に適用した結果、掘削に伴う岩盤挙動を十分に評価することが可能になり、計測後速やかに結果を現場へフィードバックして、工事の安全監視に役立てることができた。

以上より、このAE自動計測システムは実工事でのAE計測結果を迅速に評価することが可能であるとともに、情報化施工の一手段としても有効であることがわかった。今後はさらに測定したデータを詳細に分析して、岩盤評価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、鹿島・佐藤・三井・鴻池JVの皆様、(株)日本パブリックの田中正弘課長、丹野剛男氏、菊山清児氏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) 青木謙治・戸井田克・腰塚憲一:資源・素材学会会誌,第107巻,pp.489~494,1991
- 2) 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
- 3) 南部茂義・小山俊博・森孝之・田中正弘:第30回岩盤力学シンポジウム講演論文集,pp.228~232,2000
- 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

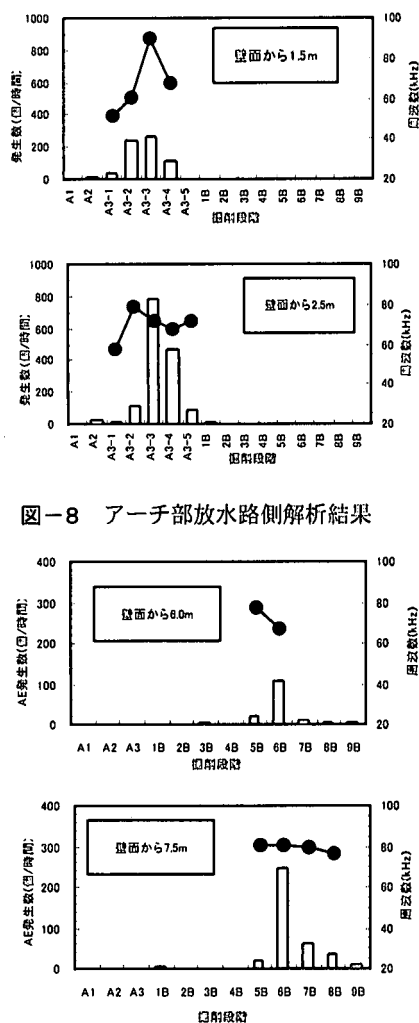


図-8 アーチ部放水路側解析結果

図-9 側壁部放水路側解析結果