

## (64) AE計測に基づいた空洞掘削時のき裂進展解析

|        |     |       |
|--------|-----|-------|
| (株)大林組 | 正会員 | ○畑 浩二 |
| 〃      | 〃   | 吉岡尚也  |
| 〃      | 〃   | 木梨秀雄  |
| 〃      | 〃   | 藤原紀夫  |

### Crack Growth Analysis after Cavern Excavated by Acoustic Emission Technique

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| Koji HATA,       | Obayashi Corporation |
| Hisaya YOSHIOKA, | Obayashi Corporation |
| Hideo KINASHI,   | Obayashi Corporation |
| Toshio FUJIWARA, | Obayashi Corporation |

#### Abstract

Underground cavern such as hydraulic power stations and oil storages, it is quite important to grasp of loosened zone around rock caverns caused by excavation. If the loosened zone around a rock cavern is known, the most suitable support members and quantities can be determined. The authors have carried out in situ experiment to investigate the crack growth into rock mass by acoustic emission(AE) technique. In this paper, parameter analysis(event count, ring down count, maximum amplitude, etc.) and moment tensor analysis based on observed AE signal waves were carried out to make clear occurring patterns, locations, orientations and crack types of AE sources. The following conclusions were obtained:

(1) Within about ten minutes after cavern blasting, comparatively large amplitude AE signal waves were many occurred, (2) AE signal waves caused by cavern excavation broken out within depth of 2m from excavated wall, and (3) 3 dimensional distribution of cracks based on AE signal waves were made clear.

#### 1. はじめに

空洞掘削に伴う応力再配分によって、空洞周辺部にはいわゆる「ゆるみ領域」が生じる。近年、このゆるみ領域を評価するため孔内載荷試験をはじめとする各種原位試験が随所で試みられている。吉岡<sup>1)</sup>は、新第三紀堆積岩の立坑現場で孔内載荷試験、孔間弾性波試験および低圧ルジオン試験を適用し、岩盤の力学的・物理学的性質の変化からゆるみ領域の解明を試み、掘削による影響領域を把握すると共に各試験法の適用限界について言及している。また、石田<sup>2)</sup>や吉岡<sup>3)</sup>は、事前に埋設した岩盤ひずみ計による計測を通して、応力再配分に伴うゆるみ現象をひずみの経時変化に着目して論じている。

ゆるみ領域に関しては、第23回の岩盤力学に関するシンポジウムではパネルディスカッションになるなど岩盤関連の技術者には興味深いテーマである。その中で、空洞掘削に伴うゆるみ現象に対して、桜井<sup>4)</sup>は潜在的あるいは新たに発生したクラックがさらに開口する状態であると説明している。谷本<sup>5)</sup>は不連続面の開口幅が増幅し、密着が不十分になった状態であると説明している。今田<sup>6)</sup>は不連続面に沿って分離あるいは移動が生じ耐荷力を失った状態であると説明している。表現方法は異なるが共通して言えることは、ゆるみはき裂などの不連続面の動きが大きく影響していることである。仮に、き裂などの不連続面の動きが何らかの方法で計測できれば、空洞掘削に伴うゆるみを解明することが可能であるものと考えられる。ところで、非破壊検査法の一つにアコースティック・エミッション(以下AEと略す)がある。AEは、マイクロクラックの発生・進展に伴い発生する微小破壊音のことであり、近年、土木工学の分野でもAEを利用した研究が急増してきている。著者らは、AEの特性を利用することにより空洞掘削に伴い発生する微小破壊音を検知し、AEの発生状況や発生位置ならびに生じたクラックの型(引張り型か、せん断型か)を把握することができ

れば、ゆるみ領域の定量的評価に役立たせることが可能になるものと考えられる。本研究は、神岡鉱山地下実験場において新設坑道の施工に当たり発破直後からAE計測を実施し、ゆるみ現象の解明を試みたものである。

2. 神岡地下実験場の概要

神岡鉱山は岐阜県の最北端に位置し、亜鉛・鉛を産出している。鉱山付近の地質は日本最古の岩石と言われる飛騨変成岩類で、片麻岩類、変深成岩類および混成岩類からなっている。地下実験場は、図-1に示すように坑口より約250mで、標高850mの尾根型地形の下方（土被り約180m）に位置している。周辺は花崗岩質片麻岩と黒雲母角閃石片麻岩などの片麻岩類を中心とし、部分的には空地、アブライトおよび石灰岩等から構成されている。特に、花崗岩質片麻岩は石灰岩を含んでおり「伊西岩」とも呼ばれている。付近には大きな断層はないものの、き裂のかなり発達した地山である。

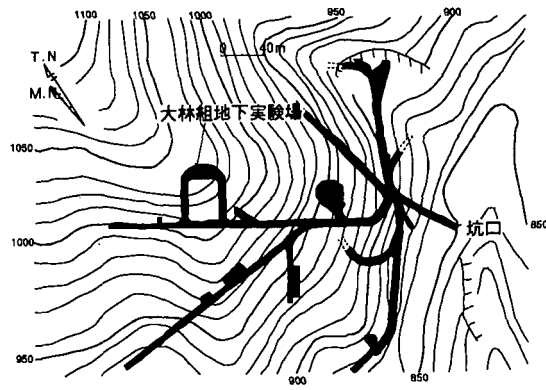


図-1 地下実験場の概略

3. AE計測システム

原位置AE計測システムは、AEセンサー、プリアンプ、AE計測装置および波形記録・解析装置からなる。AE計測装置にはPAC社製LOCAN-AT計測システムを、波形記録装置には同社製TRA-2.5波形解析システムをそれぞれ用いた。前者は、計測対象物から発せられるAEの発生数やエネルギーおよび振幅値などを計測・解析する装置である。後者は、1チャンネルにつき2.5MBのメモリーを有する波形の記録・解析装置である。

疑似AE信号としてシャープペンシル芯の圧折音とハンマーによる打撃音を用いて行った予備試験結果から、共振周波数60kHzの周波数特性を有したAEセンサー（PAC社製R6センサー）を利用することとした。原位置AE計測では、検知部の簡素化を図りプリアンプ内蔵型AEセンサーを利用している場合が多い。しかし、今回の計測では発破直後からAEを計測するため、発破の瞬間にはAEセンサーに少なくとも数千Gの衝撃加速度が作用するものと想定されることから衝撃に強い独立タイプを使用した。AEセンサーとプリアンプを独立して使用する場合、AE信号の減衰を極力最小限にするため両者の接続距離を1m以内にする必要がある。そこで、AEセンサーとプリアンプを内径76mmの鋼製パイプ（以下AEブースターと称す）に収納し、防水処理を施した後所定の位置に取り付けた。AE計測システムの概略を図-2に示す。

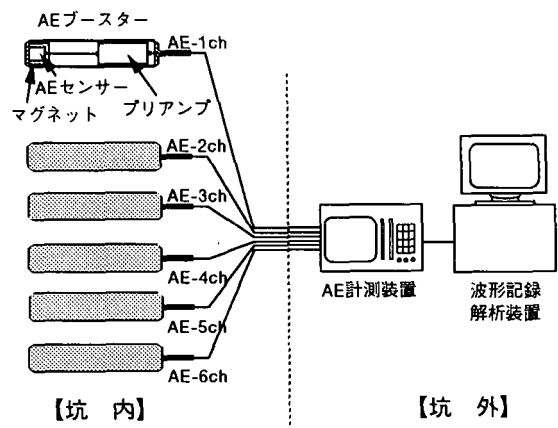


図-2 AE計測システムの概略

4. AE計測方法と解析方法

図-3に示す地下実験場の幅5m、高さ4mの幌型坑道で囲まれた約30×40mの岩盤ブロックにおいて、点線で示す新設坑道の掘削に際してAE計測を行った。疑似AEによる予備試験結果ならびにFEMによる予測解析結果を参考にし、新設坑道掘削壁面からおおむね3×3×2m（図中斜線部）が計測対象領域と考えられ

た。AEブースターは6セット（AE-1ch～6ch）であり、先端を平滑に研磨したφ86mmのボーリング孔に鋼製ロッドを介して取り付けした。計測ケーブルは鋼製ロッド内を通してある。

新設坑道は発破工法によって掘進長約1mで掘削された。AE計測は、AE-5chを設置した位置から新設坑道軸方向に3m手前（Case-I）、2m手前（Case-II）および1m手前（Case-III）の各切羽の発破に際して行い、計測時間は発破直後から浮き石落とし作業が始まる間の約1時間とした。発破直後から発生するAEを検出するため、AE計測装置と波形記録装置は坑外の作業小屋に設置し、AEブースターとの間の約300mはRFケーブルで接続した。以下に計測された諸量の解析方法について述べる。

4-1 パラメータ解析

室内試験、原位置試験を問わずAEを計測する試験では、イベントカウント、リングダウンカウントおよび振幅値などの信号処理パラメータが利用されている。今回の計測では、これら一般的な信号処理パラメータを一通り計測対象とし、空洞掘削に伴うAE発生の特徴抽出を試みた。適用した信号パラメータの概要を図-4に示す。

- (1) イベントカウント：しきい値を越えたAE信号波ひとかたまりを1事象とし、計数したAEの個数
- (2) リングダウンカウント：しきい値を越えたAE信号波の振動回数を全て計数したAEの個数
- (3) 最大振幅値：AE信号波1事象における振幅値の最大値

4-2 モーメント・テンソル解析

上述で示したパラメータ解析では、AE装置の感度としきい値の影響を受けるためAEを発生させるに至った現象の解明については定量的な解が得られにくい。

大津<sup>7)</sup>は、AE波動解析に弾性波動論を導入し、モーメントテンソル解析によってAE発生機構としてのクラックの発生位置、種別（引張り型、せん断型）および運動方向を決定できることを提案している。そこで、空洞掘削に伴う周辺地山の挙動変化をき裂の発生・進展の観点から解明することも目的とし、モーメントテンソル解析の適用を試みたものである。モーメントテンソルは、1)式で示されるAE波動を理論解析する場合の基礎式の内、 $m_{pq}(y)$ で示される物理量であり2)式で定義されている。

$$u_i(x,t) = \int_V G_{ip,q}(x,y,t) m_{pq}(y) * S(t) dV \dots\dots\dots 1)$$

$$m_{pq}(y) = C_{pqkj} b(y) l_k n_j \dots\dots\dots 2)$$

ここで、 $u_i(x,t)$ はAE波動、 $G_{ip,q}(x,y,t)$ はグリーン関数の空間微分、 $S(t)$ は発生時間関数、 $b(y)$ は運動の大きさ、 $l_k$ は運動方向、 $C_{pqkj}$ は弾性定数および $n_j$ は面S上で定義された法線ベクトルである。

実際には、まず記録された波形データからp波到達時間と初動振幅値を読みとる。得られたp波到達時間からき裂の発生した3次元的位置を算定する。ついで、初動振幅値からモーメントテンソルの6つの成分を求め、固有値解析によってクラックの運動方向と種別を求める。モーメントテンソル解析を行うためには、6個のAE波形で構成されるAE波形セットが必要となる。

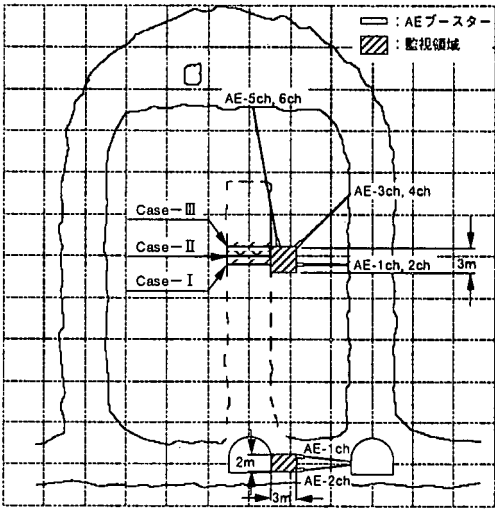


図-3 AE計測のレイアウト

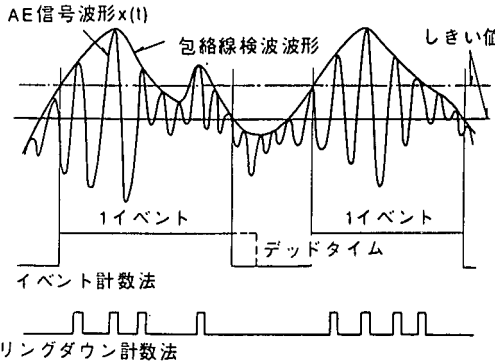


図-4 AE信号処理パラメータ

## 5. 計測結果と考察

### 5-1 パラメータ解析

AE-1chから6chの6つのセンサーで得られたAE信号波についてパラメータ解析を行い、全センサーでの累積値を計測開始からの経過時間でまとめたものが図-5(a)(b)(c)である。Case-I、IIおよびIIIとも同様の傾向が得られていることから、ここではCase-Iの結果について示す。(a)図はイベントカウントと経過時間の関係を、(b)図はリングダウンカウントと経過時間の関係を、そして(c)図は最大振幅値と経過時間の関係をそれぞれ示したものである。

(a)(b)図において、原点は発破の瞬間であり非常に多数のAEが観察された。この部分には発破振動が含まれているため、空洞掘削に伴う微小破壊音の発生は発破の瞬間を除いた以降の事象を扱うものとする。両図から、AEの発生は発破後十数分を境にして減少傾向に転じることが判明した。掘削部分が瞬間的に無くなることによって、地山には応力変化が生じる。当然、地山に潜在的に存在するき裂にも応力変化が生じることになり、作用する応力の変化が限界値を超えればき裂が進展したり、新たなき裂が発生することになる。したがって、発破後十数分まではAEが頻発することから、き裂の発生・進展が活発化している段階であるものと考えられる。一方、時間の経過に伴ってAE活動度は沈静化する傾向にあり、応力再配分状態のもとで構造物は安定化の方向に向かっているものと考えられる。

(c)図はAE信号波の最大振幅値の経時変化を調べたものである。発破後十数分程度までは比較的大きな振幅(60~80dB)のAE信号波が主に観測されたが、時間の経過に伴って観測される最大振幅値は小さくなってゆき、60dBを越えるAE信号波の発生は希になる傾向が明らかになった。前述のイベントカウントおよびリングダウンカウントの経時変化から得られた特徴と重ね合わせて考えると、発破後十数分までは比較的規模(振幅値)の大きなAEが活発に生じているが、AE活動度が沈静化するに伴い発生するAEの規模も小さくなる傾向にあることがわかった。

### 5-2 モーメントテンソル解析

前述のパラメータ解析では、空洞掘削に伴う周辺地山の経時的な変化を定性的に把握した。ここでは、モーメントテンソル解析を利用してAEを発生させたき裂の発生位置、種類種別(引張り型、せん断型)および運動方向を求め、空洞掘削に伴う周辺地山の定量評価を試みる。パラメータ解析と同様Case-I、IIおよびIIIで実施した。

図-6(a)(b)にCase-Iの解析結果を示す。(a)は結果をxy平面(水平面)に投影したもので、(b)はxz平面(鉛直面、ただし掘削方向から見た図になっている)にそれぞれ投影したものである。図中、引張り型のき裂を $\leftrightarrow$ 印で示す。この場合、 $\leftrightarrow$ 印の方向がき裂の開口方向に一致する。せん断型のき裂は+印で示す。この場合は、クロスの一方向がすべりの方向を表す。

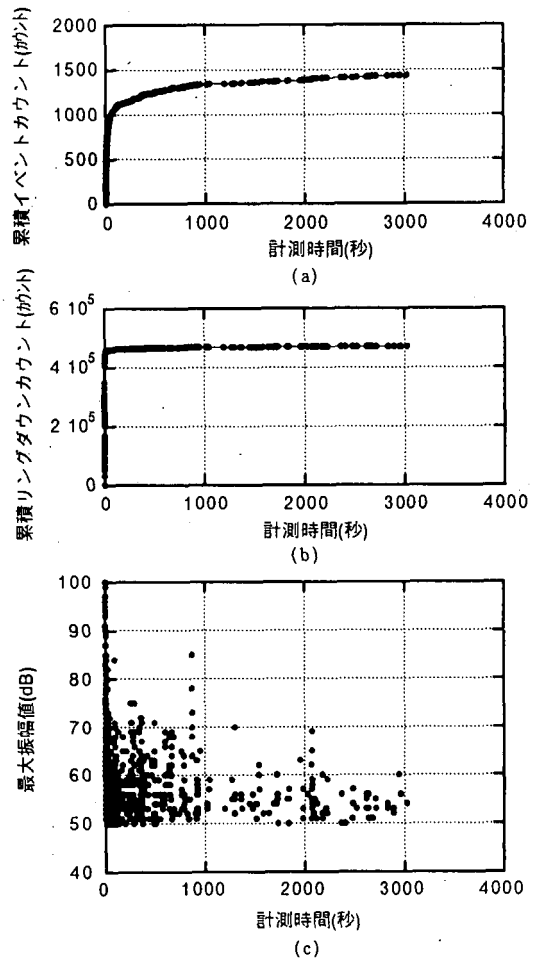


図-5 パラメータ解析結果(Case-I)

(a)イベントカウント-時間、(b)リングダウンカウント-時間、  
(c)最大振幅-時間

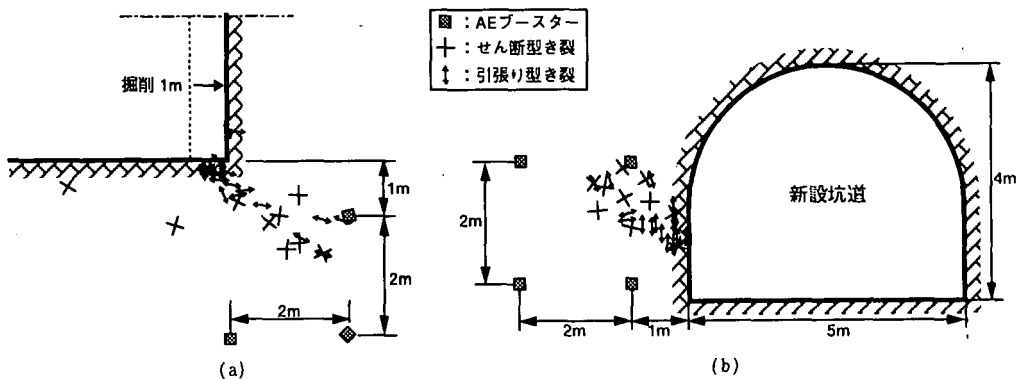


図-6 モーメントテンソル解析結果(Case-I) (a)水平断面(xy平面)、(b)鉛直断面(xz平面)

(a)図から水平面に投影したAEの発生位置は、掘削壁面のごく近傍から斜め前方に広がる傾向にあることがわかった。一方、(b)図から鉛直面に投影したAEの発生位置は、S.L.を起点に斜め上方に広がる傾向にあることがわかった。ここで得られたAE発生の分布は、Case-IIおよびⅢで得られた結果とほぼ同様であることから、応力再配分の一つの特徴を表しているものと思われる。また、掘削壁面のごく近傍では引張り型き裂の発生が顕著であるが、せん断型き裂は掘削壁面近傍にはほとんど発生せず地山の内部に分布していることがわかった。特に、掘削壁面のごく近傍で集中的に発生した引張りき裂は、斜め前方の上側から空洞内側へ向かって作用する傾向にあることがわかった。

## 6. おわりに

本報告は、神岡鉱山地下実験場において、微小破壊音(AE)の観測から応力再配分が周辺地山へ及ぼす影響の解明を試みたものである。空洞掘削によってAEは観測され、パラメータ解析結果から発破後十数分までは比較的大振幅のAE信号波が頻発することがわかった。その後、時間の経過に伴って発生数は減少すると共に比較的小振幅のAEしか発生しないことがわかり、応力再配分の影響は経時的に現れることが判明した。一方、モーメントテンソル解析結果から、発生したAEの3次元的な広がりが明らかになったとともに、壁面のごく近傍では引張り型き裂が卓越することがわかった。また、掘削方向に対して斜め前方にき裂の発生分布があることから、応力再配分の影響は掘削されていない前方にまで及んでいることがわかった。ゆるみ域を潜在き裂の進展や新たなき裂の発生する領域と仮定すると、掘削壁面から2m程度までが空洞掘削によって影響を受けた範囲と考えられる。

今後はき裂の調査結果ならびに原位置における変位計測結果との比較を行い、空洞周辺地山の全体的な挙動を把握することによって、AEによるゆるみ域評価手法の確立を目指したい。

## 参考文献

- 1) 吉岡尚也、杉原弘造、谷本親伯、木山英郎：空洞周りの緩み域の現場計測とその評価方法について、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.617～622、1994。
- 2) 石田 毅、金川 忠、矢田 篤、田仲正弘：空洞掘削時の応力再配置に着目した岩盤ゆるみ域測定法の提案、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.227～231、1991。
- 3) 吉岡尚也、杉原弘造、木梨秀雄、畑 浩二、丸山 誠：堆積岩地山での立坑掘削に伴うひずみの原位計測とその数値解析、材料、第42巻、第474号、pp.324～328、1993。
- 4) 桜井春輔：トンネル・地下空洞における岩盤の緩みとは？、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集【パネルディスカッション】、pp.378～379、1991。
- 5) 谷本親伯：岩盤不連続面から見たトンネル周辺のゆるみ現象、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集【パネルディスカッション】、pp.380～381、1991。
- 6) 今田 徹：トンネル・地下空洞における岩盤の緩み一粒状体地山の場合を中心として、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集【パネルディスカッション】、pp.382～383、1991。
- 7) 大津政康：AE波形のモーメントテンソル逆解析による地下亀裂および地震源の進展予測法の研究、平成4年度科学研究費補助金研究成果報告書、03805040、1993。