

# AE法を利用した地下空洞掘削 影響領域評価に関する研究

畑 浩二<sup>1</sup>・松井裕哉<sup>2</sup>・木山英郎<sup>3</sup>・木梨秀雄<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社大林組 技術研究所 地盤岩盤研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

<sup>2</sup>正会員 工修 核燃料サイクル開発機構 (〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31)

<sup>3</sup>正会員 工博 鳥取大学 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

<sup>4</sup>正会員 工修 株式会社大林組 土木技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

地下空洞を構築する場合、空洞周辺地山では掘削による直接損傷と応力再配分による力学的・水理学的変化が生じる。空洞掘削により生じる「ゆるみ」は、掘削損傷と応力再配分の影響が複合して発生するものと考えられる。そこで、岩手県釜石鉱山内に位置する試験空洞で発破に伴うアコースティック・エミッション計測を実施し、ゆるみ現象の解明と発破工法の違いによる影響の把握を試みた。

計測の結果、①AE発生頻度および最大振幅値は、発破後の時間経過に伴い漸次減少すること、②掘削影響領域では引張り型亀裂およびせん断型亀裂が集中発生すること、③掘削影響領域は未掘削領域まで及ぶこと、④発破工法の相違が岩盤へ及ぼす影響に相違のあること等が明らかになった。

**Key Words :** *acoustic emissions, excavation damaged zone, crystalline rock, in-situ AE test, moment tensor analysis*

## 1. はじめに

日本列島は環太平洋造山帯に含まれることから、急峻な地形形状とともに非常に複雑な地質構造を有していることが特徴になっている。大局的にはフォッサ・マグナや中央構造線のような地質構造線によって分割され、構造線で囲まれた構造区では沈降、堆積、隆起、削剥、変成などの影響を受けている。一方、局所的には褶曲、せん断、貫入、風化などの影響を受け、大陸の安定した地盤と比較してきわめて不連続性の強い地盤となっている。このような地質状況において、断層、節理、亀裂などの不連続面を避けトンネルや地下発電所のような地下空洞を構築することは困難である。

断層、節理、亀裂などの不連続面が発達した岩盤内に空洞を掘削すると、発破や掘削後の応力再配分によって「ゆるみ」の生じる場合がある。空洞規模の大小に関わらず、ゆるみ域を定量的に把握することは空洞の安定性評価や支保規模の選定に際して重要である。そのため従来から、観察・計測および解析によってゆるみ域の評価が試行されてきた。その中で、吉岡ら<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掘削に伴うゆるみ域の解明を試みるとともに、各試験法の適用限界を明らかにした。また、石田ら<sup>2)</sup>や吉岡ら<sup>3)</sup>は、事前に埋設した岩盤ひずみ計による空洞掘削時の連続計測を通して、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。ところで、非破壊検査の一つにアコースティック・エミッション(以下、AEと略す)を利用した方法<sup>4)</sup>がある。AEとは、材料内部に蓄えられたエネルギーの一部が音響パルスとなり伝播する現象であり、微小亀裂が発生・進展する際に生じる微小破壊音のことである。従来の変形やひずみ、荷重変化を測定する方法は1次元的な評価にならざる終えなかったが、AE法は媒体中の弾性波伝播を扱うことからゆるみを2次元平面的もしくは3次元空間的に評価することが可能になる。このような観点から、近年、空洞の掘削影響評価にAE法を利用した研究<sup>例えば5), 6)</sup>が試行されている。

このような状況の中、著者らはゆるみは岩盤内に潜在的に存在する亀裂などの不連続面が発生・進展することによって生じると考え、掘削直後からAEを測定しゆるみ現象の解明を試みる研究を進めてきた。その中で、基礎的検討として岩石の破壊に伴う

AE 発生の特徴を実験的に調べ、岩石の成因によって AE 発生頻度や AE 発生規模の異なることを明らかにした<sup>7)</sup>。次いで、神岡鉱山において発破掘削に伴うゆるみ域の進展度合いを計測し、応力再配分に伴う AE 発生状況の経時的変化を明らかにした<sup>8)</sup>。本論文は、ゆるみの発生メカニズムの把握、ゆるみ領域の範囲とその特性の把握および発破工法の違いによる影響を解明するため、釜石鉱山試験場で実施した原位置 AE 計測結果を報告するものである。

## 2. 掘削影響の概念

地下空洞を対象にした工事では、掘削後の地山の一つの状態として「ゆるみ」という表現が頻繁に使われている。しかし、力学的見地から見たゆるみの明確な定義はなされていないのが現状である。このような中で、桜井<sup>9)</sup>はゆるみを潜在的あるいは新たに発生した亀裂がさらに開口する状態であると説明している。谷本<sup>10)</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。一方、今田<sup>11)</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。表現方法は異なるものの、これらの説明で共通して言えることは、ゆるみは岩盤内に潜在的に存在する亀裂などの不連続面が動くことに起因して生じることである。

そこで、本論文では、掘削行為に伴い空洞周辺岩盤の力学的特性が変化する領域を掘削影響領域と称す。さらに、掘削影響領域は、発破や機械による掘削行為そのものによって岩盤が損傷を受ける領域（掘削損傷領域）と、応力場の変化すなわち応力再配分による影響領域（応力再配分領域）に分けて考えることとした。掘削影響および影響領域の概念を図-1に示す。

## 3. AE 計測対象域の概要

試験場は岩手県釜石鉱山内に位置しており、核燃料サイクル開発機構（旧動力炉・核燃料開発事業団）が地下水の動きや性質、坑道掘削による岩盤への影響などを明らかにするための調査研究を目指して開設したものである。本掘削影響試験において試験エリアとして選定した地域は、栗橋花崗閃緑岩と呼ばれる単一の花崗岩体中に位置する。地表からの深度は約 730m である。ボーリングコアによる岩石試験によれば、一軸圧縮強度と弾性係数はそれぞれ

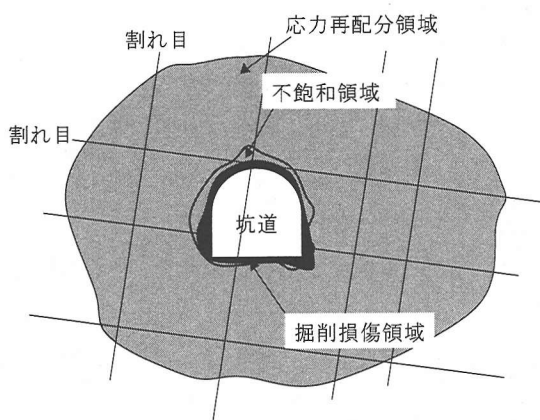


図-1 掘削影響および影響領域の概念

平均で 140MPa, 61GPa であった。また、原位置における PS 検層によれば P 波および S 波速度はそれぞれ平均で 6.0 km/s, 3.3 km/s となり、国内に分布する花崗岩中でも硬い部類に属することがわかっている。一方、坑道の割れ目調査によれば、3 方向の亀裂卓越方向が認められているが、このうち特に N85° E 系の卓越方向を有する割れ目は連続性が良く、相対的に厚い充填幅を有し、割れ目沿いに赤色の変質部分を伴うという特徴を有していることが明らかになっている。なお、割れ目頻度は 2.75～3.75 本/m 程度である。

## 4. AE 計測システム

原位置 AE 計測システムは、AE センサ、プリアンプ、AE 計測装置および波形記録装置からなる。AE センサには、共振型、広帯域型およびプリアンプ内蔵型など種々な特性のものが用意されている。今回の実験では、坑道発破直後から計測すること、岩盤の亀裂発生進展における発生 AE は高周波成分が卓越することを勘案してセンサ選定することが要求された。まず、発破直後から AE を計測するということは、発破の瞬間 AE センサに少なくとも数千 G の衝撃加速度が作用することになる。プリアンプ内蔵型センサは計測系を最小化できる利点を有しているが約 500G の衝撃加速度までしか耐えられないことから、外部プリアンプと併用する独立タイプの AE センサを使用することとした。このタイプのセンサでは約 10000G の衝撃加速度が保証されている。また、岩盤から発生する AE を鋭敏に検知する必要があることから広帯域型よりはむしろ共振型を利用することにした。共振型は、ある周波数の下で最大検

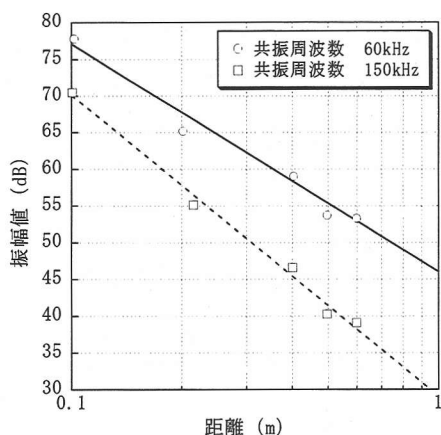


図-2 対象岩盤における AE 波動伝播特性

知感度を有するように設計されている。岩石岩盤の破壊では 100kHz 前後の超音波が顕著に発生する。また、岩盤では亀裂などの不連続面を含んでおり減衰特性は対象岩盤によって異なる。したがって、計測対象地点においてペンシル芯の圧折を擬似 AE 源とし、共振周波数 60kHz と 150kHz の 2 種類の AE センサによる伝播波動の減衰特性試験を実施した。試験結果を図-2 に示す。図は、ペンシル芯の圧折した位置と AE センサ設置位置間の距離における振幅を表わした。図中、○で共振周波数 60kHz、□で共振周波数 150kHz の結果を示した。試験の結果、共振周波数 60kHz の AE センサの方が距離減衰が少ないことがわかったことから、本計測では共振周波数 60kHz の周波数特性を有した AE センサを用いることとした。

畑ら<sup>8)</sup>は、神岡鉱山実験場において発破掘削に伴うゆるみ域の進展度合いを計測し、応力再配分に伴う AE 発生状況の経時的变化を明らかにした。その際、内径 76 mm の鋼製パイプに AE センサとプリアンプを収納し (AE ブースタと称した)、先端を研磨したボーリング孔にアンカー固定して使用した。この方法では、ボーリング孔 1 本につき AE センサ 1 個の配置となり、3 次元的な AE 発生位置の標定を実施するためには最低 6 本のボーリング孔が必要となる。そこで、今回の試験では、ボーリング孔 1 本に対して複数個の AE ブースタが配置できるように改良を施した。改良型 AE ブースタの外観を図-3 に示す。改良を加えた AE ブースタの受波面はボーリング孔壁面方向にある。つまり、ボーリング孔壁面に AE センサの受波面が向くよう工夫を施したものである。AE センサは防水を施した金属モールド (受波面方向がボーリング孔と同じ曲率を有した) の中に組み入れ、このモールドを空気圧もしくは窒

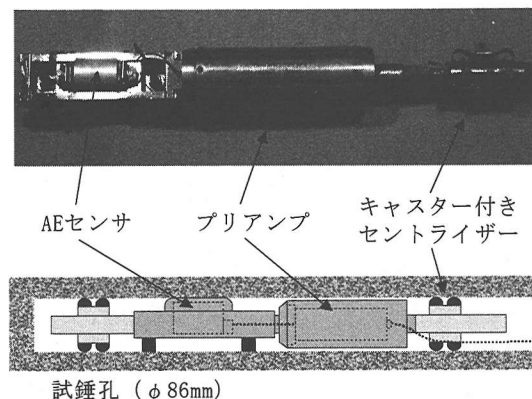


図-3 AE ブースタ

素ガス圧によってボーリング孔壁面に押しつける。その結果、AE ブースタを複数個ロッドで接続でき、1 本のボーリング孔で複数の AE ブースタを設置することを可能にした。

## 5. AE ブースタ埋設位置および試験方法

AE 計測は、既設坑道と計測坑道が既に掘削された場所において、既設坑道側から逐次発破によって試験坑道を掘削する際に行われた。試験坑道は、高さ、幅ともに 3.5m を有する幌型断面形状である。既設坑道、計測坑道および試験坑道の位置関係ならびに掘削進行と AE 計測の位置関係を図-4 に示す。対象岩盤で擬似 AE 源による伝播波動を調べた結果、約 3m までは AE を検出できたため試験空洞掘削壁面から約 3×2×2m を計測対象領域と定めた。この領域を取り囲むように、かつこの領域から発生する AE がセンサ受波面前方に位置するよう 4 セット (1 セット中 AE センサ 2 個 : センサ間距離 1.7m) の AE ブースタを所定の位置に埋設した。AE 監視領域と AE ブースタ (センサ) の配置状況を図-5 に示す。本試験では、空洞掘削直後から発生する AE を計測することが主目的であるため、AE 計測装置と波形記録装置は試験坑道から離間 23m の計測坑道に設置し、発破直前から自動計測によって対応した。

試験坑道は全断面発破により掘削した。発破工法の違いによる空洞周辺岩盤への影響を解明するため、普通発破工法 (以下、CB と称す) とスムーズプラスティング工法 (以下、SB と称す) の 2 種類の方法を採用した。基本発破パターンは、計測坑道掘削時に実施した CB と SB の経験から設計した。火薬には ANFO 爆薬を、雷管には電子式雷管を用いた。薬

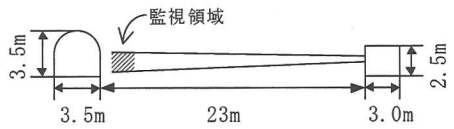
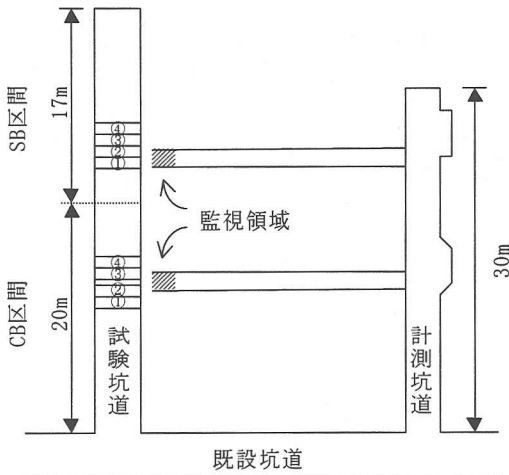


図-4 試験対象坑道のレイアウト

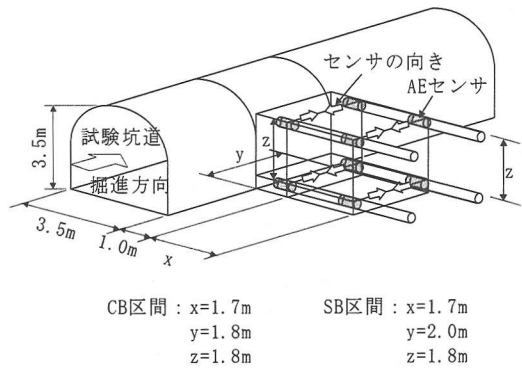


図-5 AE監視領域とAEセンサ配置状況

量はCB工法で約1.0kg/m, SB工法で約0.35kg/mである。したがって、CB工法よりはSB工法の方が空洞周辺岩盤を損傷させにくい条件となっている。両工法とも掘進長は1~1.3mである。

AE計測は、切羽が図-4, 5に示すAE監視領域を通過する前後の4断面を対象にした。計測時間は発破直後から次の発破まで(約1日)を目安とした。

## 6. 計測データの解析方法

本研究では、通常のAE計測で広く利用されているイベントカウントなどのパラメータ解析および位置評定解析を用いるとともに、弾性波動論を利用し

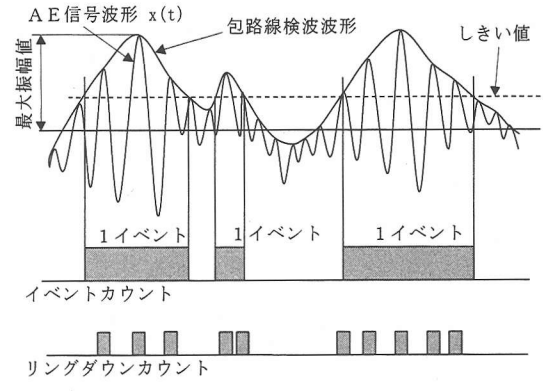


図-6 AE信号パラメータ

たモーメントテンソル解析法を実施した。各解析法について以下に述べる。

### (1) パラメータ解析

室内試験, 原位置試験を問わず AE 試験では, 種々な信号処理パラメータが利用されている。今回の計測では, 一般的な信号処理パラメータを一通り計測対象としたが, その中で特にイベントカウント, リングダウンカウントおよび振幅値の経時変化によって発生した AE の特徴抽出(微小破壊の頻度や規模)を行い, 空洞掘削に伴う影響の把握を試みた。信号パラメータの概要を図-6に示す。

#### a) イベントカウント

しきい値を越えた AE 信号波ひとつかたまりを 1 事象とし計数した AE の個数で, 微小破壊の頻度に関係するパラメータである。

#### b) リングダウンカウント

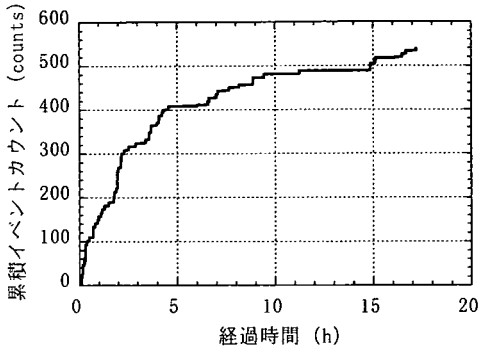
しきい値を越えた AE 信号波の振動回数を全て計数した AE の個数で, イベントカウントと同様に微小破壊の頻度に関係するパラメータである。

#### c) 最大振幅値

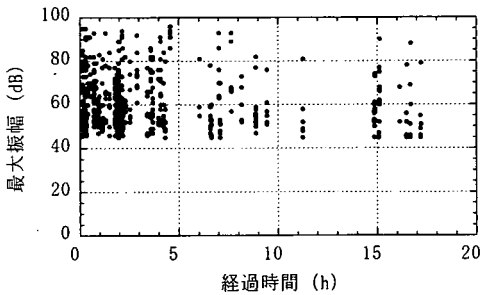
AE 信号波 1 事象における振幅値の最大値で, 微小破壊の規模に関係するパラメータである。

### (2) 位置評定解析

AE センサを複数個配置し, 到達する同一の AE 信号波の時間差から AE 源の発生した位置情報を算定する。この解析の目的は, 図-4, 5に示した監視領域(図-4中斜線部)における微小破壊の分布状況を把握するとともに, 時間的進行の追跡を行うことにある。なお, 8個のセンサを配置していることから, 3次元的な AE 発生位置情報を取得することができる。

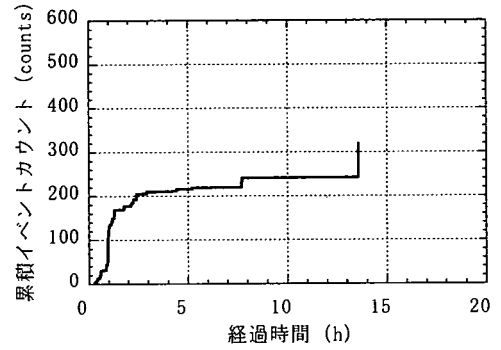


(a) AE 累積数経時変化

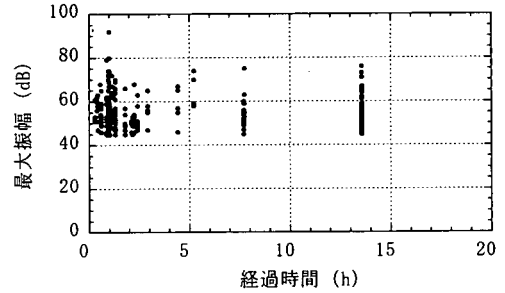


(b) 最大振幅値経時変化

図-7 CB 区間のパラメータ解析結果



(a) AE 累積数経時変化



(b) 最大振幅値経時変化

図-8 SB 区間のパラメータ解析結果

### (3) モーメント・テンソル解析

上述のパラメータ解析ならびに位置標定解析は定性的評価になりがちであるが、比較的安価なシステムで高速処理が可能な利点を有している。一方、亀裂進展ならびに AE 発生メカニズムの解明を目的に、Ohtsu<sup>12)</sup>によってモーメントテンソル解析が開発された。この解析では、材料内部に生じた亀裂を亀裂面の相対的な変位運動と仮定し、亀裂面の運動をモーメントテンソルでモデル化している。したがって、AE 波動は弾性体内部において亀裂など変位のくい違いの発生により放出される弾性波であると考えられ、弾性波動理論を適用すると式(1)(2)で表すことができる。

$$u_i(x,t) = \int_F G_{ip,q}(x,y,t) m_{pq}(y) * S(t) ds \quad (1)$$

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

ここで、 $u_i(x,t)$  は AE 波動の変位成分、 $G_{ip,q}(x,y,t)$  はグリーン関数の空間微分、 $m_{pq}(y)$  はモーメントテンソル、 $S(t)$  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 上で定義された亀裂面の法線ベクトルである。式(2)で定義されたモーメントテンソル  $m_{pq}(y)$  は、弾性定数に加えて亀裂面の法線方向と運動方向の 2 方向ベ

クトルから成り立っている。したがって、 $m_{pq}(y)$  を未知数にして式(1)(2)を解けば、亀裂の種類と運動方向に関する情報を得ることができる。しかし、通常亀裂の法線ベクトルと運動ベクトルとのなす角は直角(せん断)、平行(引張り)以外の角度をなしていることから、亀裂の種類が完全に引張り型もしくはせん断型になるようなモーメントテンソル成分を得ることはほとんどない。そこで、Ohtsu<sup>12)</sup>は、モーメントテンソル成分を固有値分解し、せん断型もしくは引張り型への寄与率から卓越成分の型に分類することを提案している。

本研究ではこの方法に準拠し、空洞掘削に伴い周辺岩盤で発生する亀裂の種類と運動方向を算定し、ゆるみ現象の特徴把握を試みた。

## 7. 計測結果と考察

### (1) AE 発生数と最大振幅値の測定結果と考察

AE ブースタの設置位置から見て、切羽位置がほぼ一致している計測結果として、CB 区間の掘削ステップ②(第 2 回目計測)の結果を図-7に、SB 区間の掘削ステップ①(第 1 回目計測)の結果を図-8に示す。両図とも(a)は、イベント計数法に基づく AE 累積数の経時変化を、(b)は最大振幅値の経時

変化を示す。本計測では、発破直前から自動計測しているため、発破直後には発破振動が含まれている。したがって、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。なお、AE 発生数と振幅値の経時変化については掘削ステップ①～④ではほぼ同様な傾向を得ている。

AE 累積数の経時変化について、CB 区間、SB 区間ともに発破後短時間の間に AE が頻発し、時間経過とともに AE 発生数は徐々に減少する傾向は同じであった。この現象は、神岡鉱山で実施した AE 計測<sup>8)</sup>でもほぼ同一の現象が得られたことから、空洞掘削後の応力再配分の特徴を表しているものと考えられる。ただし、本計測において、発破後の同一時間における AE 発生数を比較すると、CB 区間の方が SB 区間より数倍多い結果となった。また、AE 発生頻度に低下の変化が認められるのは CB 区間では発破後約 5 時間、SB 区間では発破後約 3 時間となり、発破工法による違いが確認された。

一方、最大振幅値の経時変化について、CB 区間では 90dB を越える大振幅 AE 波の発生が長時間継続する傾向が現れた。この時の継続時間は先の AE 発生頻度が低下する時間と等しく発破後約 5 時間である。一方、SB 区間でも振幅の大きな AE 波の発生時間と AE 発生数の頻度が低下する時間は等しくなったが、80dB を越える AE 波の発生はまれであった。最大振幅値が大きいということは、それだけエネルギーの大きな AE 波が発生していることを意味している。例えば、振幅値が 10dB 異なるということは波高値として約 3 倍異なることになる。

Michihiro ら<sup>7)</sup>は種々なる岩石の破壊実験に際し、供試体から発生する AE を計測している。その結果、火成岩、堆積岩、変成岩で AE の発生パターンや規模別頻度分布（以下  $m$  値分布と称する）の異なることを示した。ここでいう  $m$  値とは、石本・飯田<sup>13)</sup>や Gutenberg and Richter (b-value として表現)<sup>14)</sup>が示した地震総数と最大振幅値との関係を両対数グラフ上で示し直線近似したときの勾配であり、破壊過程を表すパラメータである。したがって、 $m$  値の大小は大振幅弾性波の発生割合を示すものである。例えば、計測時間内で  $m$  値が漸次小さくなるということは、大振幅 AE 波の発生頻度が増加することを意味している。原位置計測が行われた地山は花崗岩であることから、同種類の岩石である花崗岩の AE 発生パターンおよび  $m$  値分布の特徴を図-9 に示す。花崗岩では、破壊ひずみの約 80% (0.17%) から AE は頻発し、それと対応するように  $m$  値が低下することから約 80dB 以上の大振幅 AE 波の発生が顕著なることを明らかにした。さらに、この AE 発生の特

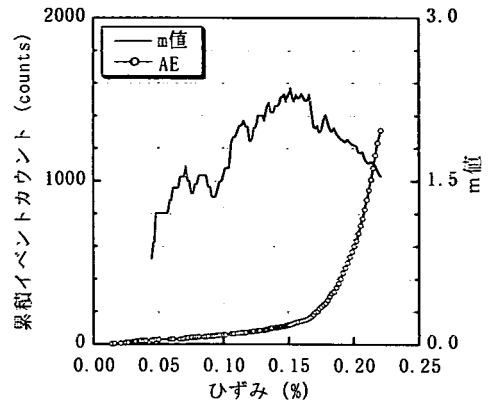


図-9 一軸圧縮荷条件下における花崗岩の AE 発生パターンおよび  $m$  値分布

徴を Bieniawski<sup>15)</sup>が示した岩石における脆性破壊の進行過程と比較すると、AE 発生数が急激に増加し、かつ大振幅波が頻発する領域は“Unstable fracture propagation”に対応していることを確認している。

上述の  $m$  値に着目すると、CB 区間において AE が頻発する時間 (0~5 時間) では、それ以降の AE が沈静化する時間に比較して  $m$  値は約 2/3 となった。すなわち、AE が頻発する時間 (0~5 時間) では相対的に大振幅の AE 波発生頻度が高くなっている。一方、SB 区間では AE が頻発する時間 (0~4 時間) とそれ以降の AE が沈静化する時間において、 $m$  値はほぼ同じ値となり、明確な違いを見つけることはできなかった。

AE 振幅値によって空洞掘削後の地山の変化状態を考察する場合、原位置で観測されたさまざまな AE 信号波の振幅値と破壊現象を関係づけておくことが重要である。使用したセンサ出力は室内試験で 100dB=1V (100dB は倍率 100,000)、原位置試験で 0dB=1 $\mu$ V と異なる。したがって、原位置で観察される 90dB (入力の 30,000 倍) の AE 波は 1 $\mu$ V $\times$ 30000=30mV 程度で観察される。さらに、図-2 の AE 波動の伝播特性において結果数十 cm の離間で 10~20dB 程度の減衰が確認されたことから、原波形の大きさは観察波動の 3 倍 (90mV) 以上の大きさがあることになる。一方、室内試験で使用した供試体は直径 30 mm 高さ 60 mm であるため AE 信号波の減衰は極めて小さく無視できることから、センサ感度 100dB=1V (100dB は倍率 100,000 のため 0dB=10 $\mu$ V と等価) を勘案すると、原位置で観察された 90dB の AE 波は  $20\log(90\text{mV}/10\mu\text{V}) \approx 80\text{dB}$  となる。したがって、原位置で記録された 90dB の AE 信号波は、

室内試験で観測された 80dB の AE 信号波と同じ規模と考えると差し支えないことがわかった。以上のことから、90dB を越える大振幅の AE 波が発生した時間領域は、Bieniawski の示した "Unstable fracture propagation" 過程と推察される。一方、AE 活動度が減少するとともに、比較的振幅値の小さな AE しか発生しなくなった時間領域は、Bieniawski の示した "Stable fracture propagation" 過程と考えることができる。

以上、CB 区間と SB 区間における AE 発生数および最大振幅値の経時変化結果から、発破後数時間は AE が頻発するため、亀裂の発生や進展が活発化している段階であることが明らかになった。また、その後時間の経過に伴って AE 活動度（発生数）は沈静化する傾向にあり、掘削に伴う応力再配分は収束する方向に向かうことが明らかになった。さらに、CB 区間の方が SB 区間より大振幅 AE 波の発生が顕著であることから、定性的ではあるが SB 工法の方が岩盤に与える影響は小さいことがわかった。

## (2) 位置標定解析とモーメントテンソル解析の結果と考察

正確な位置評定結果およびモーメントテンソル解析結果を得るためには、計測対象領域の弾性波伝播速度を正確に把握しておくことが重要である。既設坑道と計測坑道で PS 検層を、採取した岩石コアを利用して弾性波速度試験を実施した。その結果、PS 検層から P 波速度として 6.0 km/s を、岩石弾性波速度として 5.8 km/s の結果を得た。これらの結果から、特に岩盤の PS 検層結果を基に、本解析では 6.0 km/s を採用した。なお、岩盤は等方等質と仮定し、弾性波伝播の異方性は考慮しないものとする。モーメントテンソル解析における亀裂種類の分類に関しては、コンクリートや岩盤を対象にした各種の実験で採用されている基準値を参照し、せん断型寄与率 60%以上をせん断型亀裂、60%未満 40%以上を中間型、40%未満を引張り型亀裂と定めた。

AE 発生位置と亀裂との相関性を明らかにするため、試験坑道掘削後における亀裂観察結果を図-10 に示す。AE 監視領域周辺には比較的大規模な不連続面①～⑥が分布している。このうち、CB 区間の AE 監視領域内には不連続面①と②が、SB 区間の AE 監視領域内には不連続面④が介在している。本計測では 8 個の AE センサを配しており、その内最低 5 個の組み合わせからモーメントテンソル解析が実施できる。したがって、本解析では、解析仮定である等方等質性を可能な限り満足するような AE センサ組み合わせにより実施した。

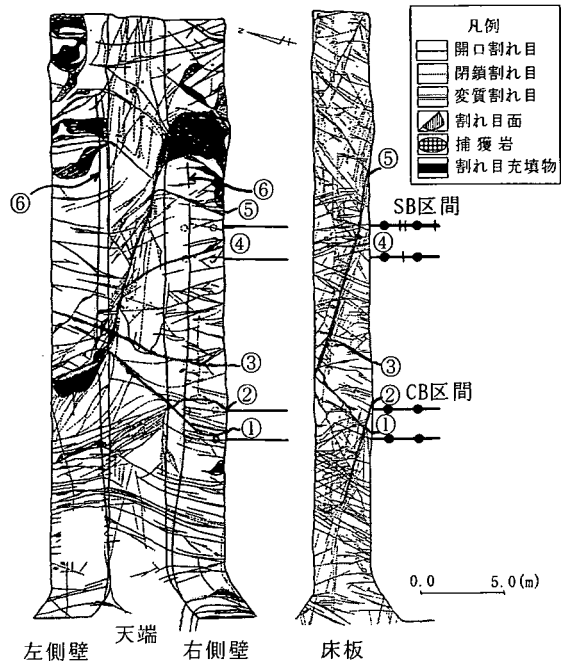
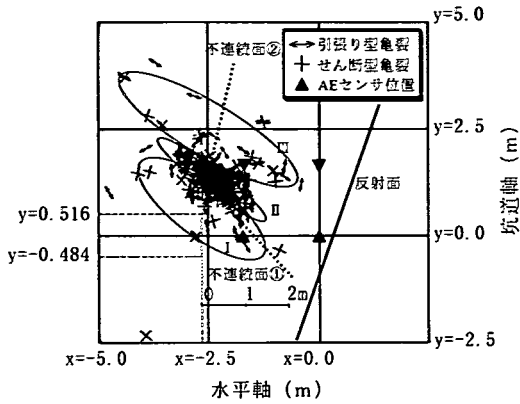


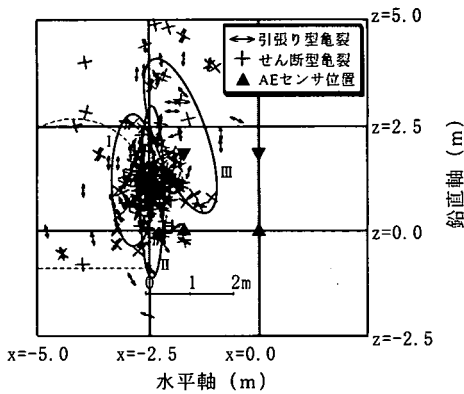
図-10 試験坑道の亀裂観察結果

CB 区間、SB 区間ともに前節のパラメータ解析を実施した同一の掘削ステップにおけるモーメントテンソル解析結果（位置評定結果を含む）を、図-11 (CB 区間の掘削ステップ②) と図-12 (SB 区間の掘削ステップ①) に示す。両図中(a)は、水平面に投影した解析結果を、(b)は鉛直断面に投影した解析結果を示す。また、モーメントテンソル解析から求められる引張り型亀裂を  $\leftrightarrow$  印で、せん断型亀裂は + 印で示す。引張り型亀裂の場合  $\leftrightarrow$  印の方向が亀裂の開口方向に一致し、せん断型亀裂の場合は + の一方向がすべりの方向を表す。亀裂の発生位置は  $\leftrightarrow$  印の中心もしくは + 印の交点に対応する。また、AE 発生位置の時間的推移を楕円枠で示し、発破後の経過時間によって領域 I、II、III と漸次移動する状況を示した。さらに、両図とも(a)の水平面には目視観察から得られた不連続面を点線で、弾性波探査とレーダ探査から得られた反射面を実線で併記した。なお、不連続面、反射面ともに  $z=0.0$  上の位置として記入した。

CB 区間の場合、AE 発生領域は切羽前方のアーチ脚部周辺を中心として未掘削領域に広がることが明らかになった。特に、試験坑道壁面から 1m 以内に AE が集中して発生する特徴を得た。発生した亀裂は、せん断型亀裂より引張り型亀裂の方が約 1.5 倍多くなるとともに、引張り型亀裂の開口方向はほぼ

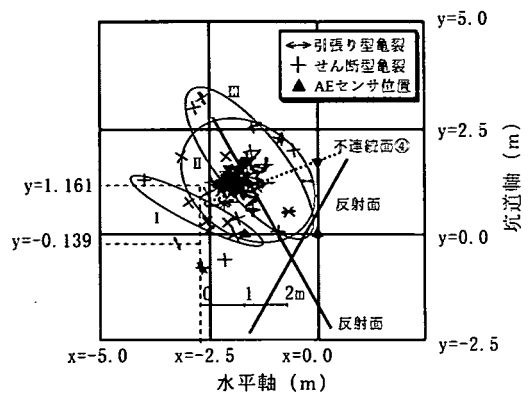


(a) 水平面

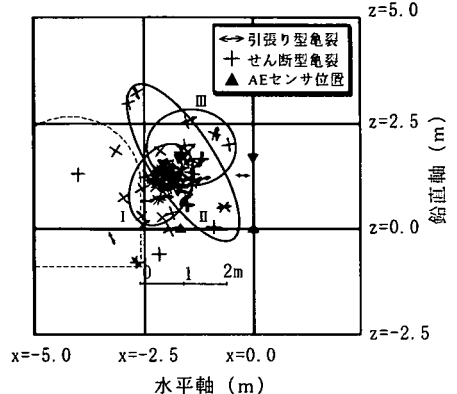


(b) 鉛直断面

図-11 CB 区間のモーメントテンソル解析結果



(a) 水平面



(b) 鉛直断面

図-12 SB 区間のモーメントテンソル解析結果

空洞側に向いている特徴を得た。

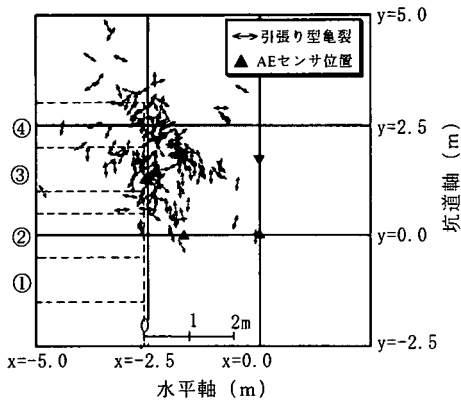
一方、SB 区間の場合、AE 発生領域は CB 区間と同様に切羽前方のアーチ脚部周辺を中心として未掘削領域に広がるのが明らかになった。しかし、CB 区間に比べて、切羽前方への広がり領域は小さく、試験坑道壁面から 0.5~1.5m の範囲に分散して AE が発生する傾向となっていることが明らかになった。発生した亀裂は、CB 区間と同様せん断型亀裂より引張り型亀裂の方が約 1.5 倍多くなった。引張り型亀裂の開口方向は空洞側に向いており、CB 区間よりその傾向は顕著であった。

ついで、AE 発生位置と目視観察による不連続面ならびに弾性波探査とレーダ探査から得られた反射面との相関性について論じる。CB 区間では不連続面①(幅 10 mm 程度の充填鉱物介在)と不連続面②(幅 1 mm 未満で比較的密着)が、SB 区間では不連続面④(幅 1 mm 未満で比較的密着)がそれぞれ存在した。CB 区間において、AE が集中して発生した位置は試験坑道壁面から 1m 前後であるとともに、不

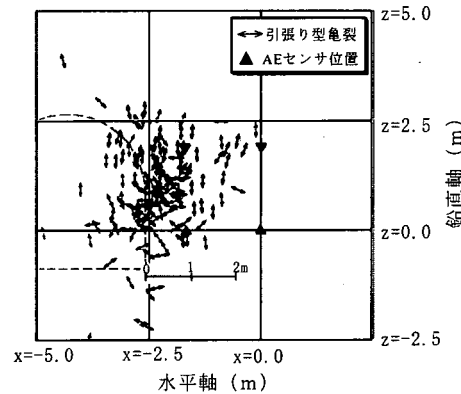
連続面①に沿っていることが認められた。しかし、反射面の位置周辺では AE 発生は認められなかった。一方、SB 区間でも試験坑道壁面から 1m 前後に AE の集中する領域は認められるものの CB 区間に比べて発生頻度はかなり少なかった。この場合、CB 区間とは逆に AE が集中して発生した空間的な位置は 1本の反射面に沿ってはいるものの、不連続面④との関連性は認められなかった。CB、SB 両区間ともに AE が集中して発生する位置は試験坑道壁面から 1m 前後であり、せん断型亀裂は比較的集中的に発生しているが、引張り型亀裂は分散して発生していることが明らかになった。

空洞掘削後、AE 発生位置は図中楕円枠で示す領域 I、II、III と時間経過に伴い漸次移動する状況を確認した。領域 I は発破直後、領域 II は発破直後から AE 発生頻度が低下するまで (CB 区間では発破後約 5 時間、SB 区間では発破後約 3 時間) で、領域 III はそれ以降に対応する。CB 区間では、時間経過に伴う AE 発生位置の推移が明確であった。さら



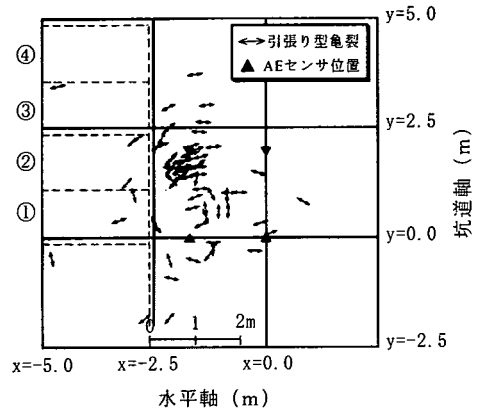


(a) 水平面

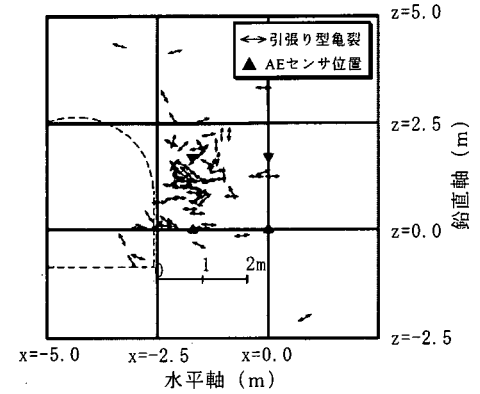


(b) 鉛直断面

図-13 CB区間の引張り型亀裂発生位置分布



(a) 水平面



(b) 鉛直断面

図-14 SB区間の引張り型亀裂発生位置分布

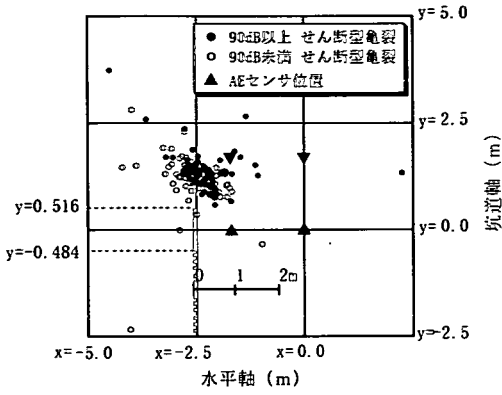
に、SB 区間についても、CB 区間ほど明確ではないが、同様の AE 発生位置の推移を確認できた。したがって、AE 計測の観点から見た応力再配分は、掘削後から時間経過に伴い徐々に空洞外周に広がる現象ととらえることができる。

## 8. 掘削影響領域の発生メカニズムに関する考察

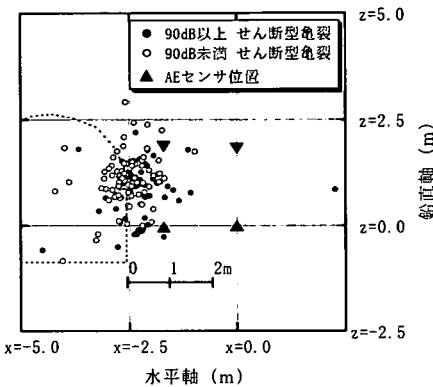
発破によって岩盤には弾性波が伝播する。この振動波には P 波と S 波が混在しているため、P 波 S 波いずれかの最大振動速度に依存する引張り応力が岩盤内部に発生すると考えられる。また、掘削地点には初期地圧が作用しているため、空洞掘削に伴い応力再配分現象が生じるものと考えられる。そのため、発破時において岩盤に作用する応力は、初期地圧の他に、発破による応力増分と応力再配分に基づく応力を重ね合わせたものとなり、掘削損傷領域ではこ

の複合応力によって岩盤破壊や、新たな亀裂の発生および既存亀裂の開口などの現象が生じることになる。したがって、岩盤内には複雑な応力再配分が生じ、引張り型亀裂とせん断型亀裂が混ざり合って生じるものと推察されることから、掘削影響領域のメカニズム解明に当たっては、これらを分けて議論する。

地山が弾性的な挙動を呈する場合、切羽が -D (D: 坑道掘削幅) から 2D の範囲でほとんどの変形は完了する。しかし、本試験場のように不連続性を呈する岩盤では、既存割れ目の開口や閉塞の挙動は -D~2D の範囲を超えて生じる可能性がある。岩石や岩盤では強度変形特性が直線性を呈する弾性範囲内であっても AE は発生することが明らかになっている。これは、岩石や岩盤には大なり小なり (目視レベルから結晶粒界レベルの範囲で) 亀裂を含んでいるため、低応力レベルであったとしても亀裂に何らかの動きがあれば AE は発生することに起因する。したがって、AE 計測の観点からは、上述の大振幅

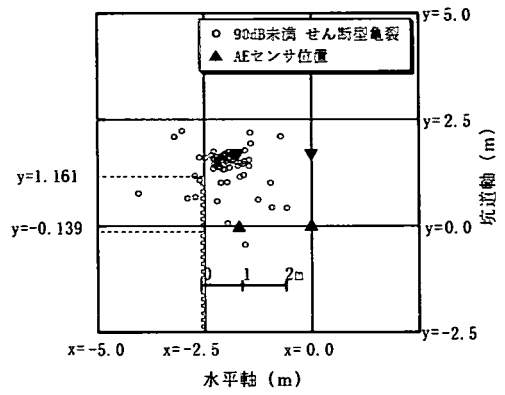


(a) 水平面

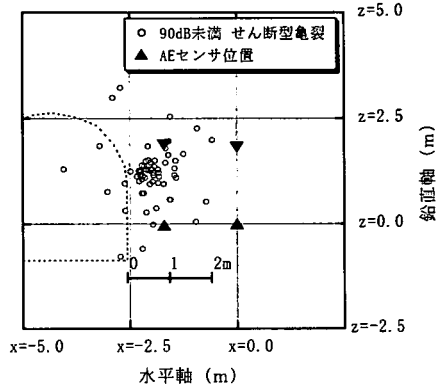


(b) 鉛直断面

図-15 CB区間の振幅値別分布



(a) 水平面



(b) 鉛直断面

図-16 SB区間の振幅値別分布

AE波の集中領域(損傷領域)を除いたAE発生領域を包括する空間が応力再配分領域と仮定できる。

本試験場では、種々な原位置計測が行われている。その一つに発破振動計測<sup>16)</sup>がある。その試験結果および岩石の一軸引張り試験結果から、発破による引張り応力が20MPaを超えたのはCB区間では試験坑道壁面から50~60cm、SB区間では坑道壁面から20cmまでとなり、発破による掘削損傷領域が推定された。AE計測のモーメントテンソル解析結果のうち、引張り型亀裂のみを抽出した結果を図-13、14に示す。図中、引張り型亀裂を $\leftrightarrow$ 印で示した。CB区間では、試験坑道壁面から0.5~1mの範囲で引張り型の亀裂が頻発している傾向にあり、このAEが集中発生した領域は振動計測から推定された損傷領域を包括する結果になった。一方、SB区間では、CB区間ほどAEが集中して発生する領域は認められず、比較的分散しているとともに振動計測結果から推定された損傷領域より空洞奥側位置に発生する結果になった。これは、SBによる岩盤への影

響がCBより相対的に小さいことから、空洞近傍での亀裂発生が大幅に減少したことに起因するものと考えられる。以上の結果から、掘削損傷のメカニズムの一つとして仮説した引張り応力の発生に伴う破壊や新たな亀裂の発生および既存亀裂の開口などの現象が、空洞周辺の岩盤内で生じていることが明らかになった。

新たな亀裂の発生および既存亀裂の開口現象を誘発する力として、上述した引張り応力の他にせん断応力が存在する。そのため、掘削損傷のメカニズムの一つとしてせん断亀裂の不安定成長を考えることができる。前章で示したとおり最大振幅値が90dBを越える大振幅のAE波が発生した時間領域では、周辺岩盤には主にせん断亀裂の不安定成長が生じているものと考えられることから、振幅値90dBを境にして位置評定結果を整理したものが図-15(CB区間の掘削ステップ②)と図-16(SB区間の掘削ステップ①)である。CB区間において、90dB以上のAE波の発生位置は空洞隅角部前方0.7~1mの範

囲に集中しており、この部分ではせん断亀裂の不安定成長が生じているものと考えられる。その結果、坑道壁面から 50 cm 程度までの領域で掘削による損傷が生じているものと考えられる。一方、SB 区間では、CB 区間と同様空洞隅角部前方に AE は集中して発生しているものの、90dB 以上の AE 波は評定されずせん断亀裂の不安定成長は生じず、せん断破壊に伴う掘削損傷は発生していないものと考えられる。

著者らが実施した岩石 AE 実験<sup>7)</sup>や原位置 AE 計測<sup>8)</sup>から、岩石や岩盤では弾性範囲内であっても AE は発生することが明らかになっている。したがって、発破後の AE 発生と最大振幅値の変化挙動を明らかにしたパラメータ解析結果を勘案すると、CB 区間では発破後 5 時間ぐらまでは 90dB を越える大振幅 AE が頻発することから、この時間領域では上述の掘削損傷が継続しているものと推察される。その後の時間経過では大振幅 AE 波の発生がまれになり、弾性変形内の応力再配分が進行していることが示唆される。一方、SB 区間では、発破直後から 90dB を越える大振幅 AE 波は発生していないことから、塑性変形を伴うような応力再配分は発生していないものと推察された。つまり、掘削に伴う主たる変形は発破直後に完了するものの、ミクロ的な構造変化は時間の経過に伴い徐々に進行するものと考えられる。さらに、掘削後の時間推移によって AE 発生位置が空洞壁面から岩盤深部に推移している状況を勘案すると、AE 計測の観点から見た応力再配分は、掘削後から時間経過に伴い徐々に空洞外周に広がる現象ととらえることができる。

## 9. 結 言

本報告は、釜石鉱山実験場において空洞掘削に伴い周辺岩盤から発生する AE を観測し、ゆるみの発生メカニズムの把握、ゆるみ領域の範囲とその特性の把握および発破工法の違いによる影響の解明を試みたものである。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 改良型 AE ブースタを利用して、空洞発破後の AE を計測できた。
- (2) AE 発生頻度および最大振幅値は、発破後の時間経過に伴い漸次減少する特徴を得た。
- (3) 不安定亀裂の成長に相当する大振幅 AE 波 (90dB 以上) の発生は、CB 区間の方が SB 区間に比べて長時間継続する特徴を得た。
- (4) CB 区間では試験坑道壁面から 1m 以内に AE が集中発生し、SB 区間では 0.5~1.5m の範囲に

分散して AE が発生したが、両区間ともアーチ脚部周辺を中心として未掘削領域まで広がる特徴を得た。

- (5) CB 区間、SB 区間とも引張り型亀裂の方がせん断型亀裂より約 1.5 倍多く発生し、引張り型亀裂の開口方向はほぼ空洞側に向く特徴を得た。
- (6) 発破振動計測結果と比較した結果、発破による引張り応力が岩石の一軸引張り強度を超える領域と AE における引張り型亀裂の集中領域が良い一致を示した。また、せん断亀裂の不安定成長が生じると考えられる大振幅 AE 波の集中領域とも良い一致を示した。

空洞掘削後の AE 計測を実施し、掘削損傷メカニズム、応力再配分メカニズムおよびその影響領域を把握することができた。また、発破工法の相違が岩盤へ及ぼす影響に相違のあることが明らかになった。しかし、現段階では、AE 波の伝播には異方性がないものと仮定して位置評定やモーメントテンソル解析を実施している。不連続性が顕著な地山を対象にして位置評定やモーメントテンソル解析を実施する場合、位置標定精度の向上のためには伝播速度の異方性を考慮する必要がある。また、モーメントテンソル解析から亀裂種別と運動方向の同定は可能であるが、ゆるみ域のさらなる定量評価のためには振幅値 (エネルギー) の評価のみならず亀裂規模 (運動量) の把握が必要不可欠と考える。今後、これらの事項を検討するとともに、AE 法による空洞掘削影響領域評価方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置計測とその数値解析, 材料, Vol.42, No.474, pp.324~328, 1993.
- 4) 大津政康: “アコースティック・エミッションの特性と理論”, 森北出版, 1988.
- 5) Carlson, S.R. & Young, R.P.: Acoustic Emission and Ultrasonic Velocity Study of Excavation-

- Induced Microcrack Damage at the Underground Research Laboratory, *Int. J. Rock Mech. Sic. & Geotech. Abstr.*, Vol.30, No.7, pp.901~907, 1993.
- 6) 石田 毅, 金川 忠, 土山茂希, 百瀬洋一: 高周波 AE 測定による地下発電所空洞掘削時岩盤挙動の観測, 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.311~315, 1992.
- 7) Michihiro, K., Hata, K., Fujiwara, T. and Yoshioka, H. : Prediction of Failure in Rock Masses by Acoustic Emission, *Material Science Research International*, Vol.3, No.2, pp.106~111, 1997.
- 8) 畑 浩二, 吉岡尚也, 木梨秀雄: 原位置 AE 計測に基づいた岩盤ゆるみ域の評価, *材料*, 第 47 巻, 第 5 号, pp.489~494, 1998.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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一, 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.
- 12) Ohtsu, M. : Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of Acoustic Emission Source : Application to in Situ Hydrofracturing Test, *Journal of Geophysical Research*, Vol.96, No.B4, pp.6211~6221, 1991.
- 13) 石本巳四雄, 飯田汲事: 微動計による地震観測(一), *震研彙報*, Vol.17, pp.443~478, 1938.
- 14) Gutenberg, B. and Richter, C.F. : *Seismicity of Earth and Related Phenomena*, Princeton Univ. Press Princeton N.J. 1949.
- 15) Bieniawski, Z.T. : STABILITY CONCEPT OF BRITTLE FRACTURE PROPAGATION IN ROCK, *Eng. and Geo.*, Vol.2, No.3, pp.149~162, 1967.
- 16) 木下直人, 松井裕哉, 菊池 正, 堀田政国: 坑道近傍における発破振動特性の計測, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.755~760, 1998.

(2001.10.1受付)

## EVALUATION OF DAMAGED ZONE AROUND UNDERGROUND STRUCTURES DUE TO EXCAVATION BY ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

Koji HATA, Hiroya MATSUI, Hideo KIYAMA and Hideo KINASHI

When constructing underground caverns, it is important to estimate the damaged zone around rock caverns caused by excavation. In situ experiment were conducted to investigate the crack growth into rock mass by acoustic emission (AE) measurement.

The measurement was carried out in Kamaishi mine of Iwate Prefecture. The following conclusions are obtained: ①AE activities decrease gradually with the time progress after blasting, ②both tensile cracks and shear cracks occurs intensively around a rock cavern, ③the damaged zone generated by digging grows up to the wider domain where the excavation has not yet reached, ④the types of blasting do affect the damaged zone generated.