

# AEのメカニズム解による地下発電所空洞掘削時 岩盤挙動の検討

石田 毅<sup>1</sup>・金川 忠<sup>2</sup>・打田靖夫<sup>3</sup>・浦山 克<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 山口大学助教授 地域共同研究開発センター(兼大学院工学研究科 社会建設工学専攻)  
(〒755 宇部市常盤台 2557)

<sup>2</sup>正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所地質地盤岩盤グループ 研究主幹  
(〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

<sup>3</sup>正会員 関西電力(株) 総合技術研究所 主任研究員(〒661 尼崎市若王寺 3-11-20)

<sup>4</sup>正会員 工修(株)ニュージェック 技術開発部開発室長(〒542 大阪市中央区島之内 1-20-19)

地下発電所空洞掘削時に周辺岩盤で発生する微小なAEを高感度で測定し、P波初動の放射形式からメカニズム解(fault plane solution)を求めてAEの発振機構を調べた。その結果、AEの発生原因となった破壊面の方向や破壊時の主応力の作用方向は、岩盤の卓越節理の方向、空洞形状、初期地圧と岩盤変位の測定結果と合理的に対応し、地震や深部鉱山の山はね発生機構の解明に用いられているこの手法が、比較的地下浅部の空洞の安定性評価にも適用できることがわかった。

**Key Words:** acoustic emission, fault plane solution, underground powerhouse, in-situ measurement, rock mechanics

## 1. はじめに

地下発電所をはじめとする大規模地下空洞の掘削に際しては、周辺岩盤の挙動を把握し、空洞の安定性を評価しながら施工を進めることが重要である。しかし現状では、地下空洞周辺の岩盤挙動が、必ずしも実測によって十分に明らかにされているとはいえ、この点で新たな測定手法の開発が必要とされている。筆者らは、岩盤のAE(Acoustic Emission)、すなわち、岩盤の微小な破壊に伴って発生する弾性波の測定が岩盤挙動の把握に有効であると考え、小規模な原位置実験を行って手法の開発を進めてきた<sup>1),2)</sup>。

地下空洞周辺の岩盤挙動の測定にAEを用いる研究は、地表下1,000mを越える地下深部やこれに匹敵する高い地圧下にある鉱山などで、主に山はねの予知や予測を目的に活発に行われてきており、最近ではAEのP波初動の極性や振幅値に基づいて破壊のメカニズムを解析したさまざまな研究が報告されている<sup>3)-6)</sup>。この種の解析を地下空洞のAE測定データに適用することができれば、AEの発生機構、すなわちAEの発生原因となった破壊面の走向・傾斜やその破壊を発生させた主応力の方向を明らかにすることができ、空洞の安定性評価に有用な情報が得られる。

しかし、地下発電所空洞など比較的地表に近い土木分

野の空洞で、このような解析を行ったAEの測定例は筆者の知るかぎり報告されていない。これは、これらの地下空洞は地表に近く地圧が小さいため、山はねのような顕著な岩盤破壊が発生することはまれで、3次元的な発生位置(震源)の決定や、メカニズムの解析が行えるような規模の大きなAEの発生が極めて少ないためと思われる。

筆者らは、地表下約280mに位置する地下発電所空洞の側壁部で、空洞掘削に伴って発生するAEを測定する機会を得た。予想通り規模の大きなAEの発生は多くなかった。しかし、比較的狭い領域で微小な破壊を対象とした高感度のAE測定を行うことにより、測定したAEイベントのうち最も規模の大きな8個のAEイベントに対しその震源を3次元的に決定するとともに、P波初動の放射形式に基づくメカニズム解(fault plane solution)を求めてその発振機構を調べることができた。その結果、AEの発生原因となった破壊面の走向・傾斜やその破壊を発生させた主応力の方向は、岩盤内の卓越節理面の走向・傾斜、初期地圧の測定結果、AE発生時の空洞形状、岩盤変位計の測定結果などと合理的に対応することがわかった。このことは、AEの原位置観測とそのデータに基づくAE発生機構の解析が、地下発電所のような比較的地表に近い土木分野の空洞にも基本的に適用可能であり、その安定性評価に有用であ

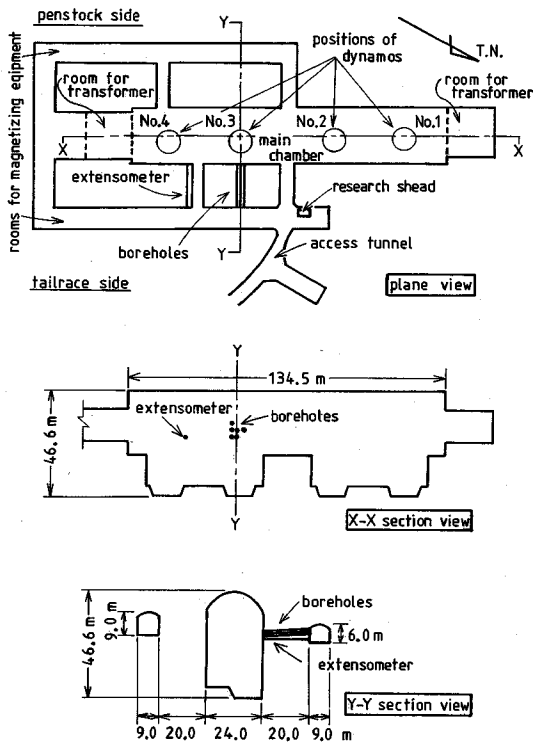


Fig.1 Underground powerhouse and position of boreholes for the measurement.

ることを示していると思われるので報告する。

## 2. 測定の概要

### (1) 地下発電所空洞の概要

測定を行ったのは、関西電力(株)が兵庫県峰山・砥峰高原の東側斜面の地表下約280mに建設した大河内揚水発電所の発電所空洞<sup>9)</sup>である。この空洞は、Fig.1に示すように幅24.0m、高さ46.6m、長さ134.5mの規模を有し、空洞周辺岩盤の大部分は電中研式岩盤分類でC<sub>H</sub>級の新鮮・堅硬なひん岩である。空洞断面形状は、掘削量を必要最小限とするため弾頭形を採用している。平面図に示した3、4号発電機に、回転速度を変化させて経済性を高める可変速揚水システムを採用したため、励磁装置類を設置する幅9.0m、高さ9.0mおよび幅9.0m、高さ6.0mの2つの空洞が必要となり、本体空洞から20.0m離れた両側にこれらの空洞を設置した。

### (2) 測定用ボーリング孔の配置とAEセンサーの設置位置

当地点では、施工管理のための計測とは別に、掘削に伴う岩盤挙動の研究のため、両側に励磁装置室空洞を有

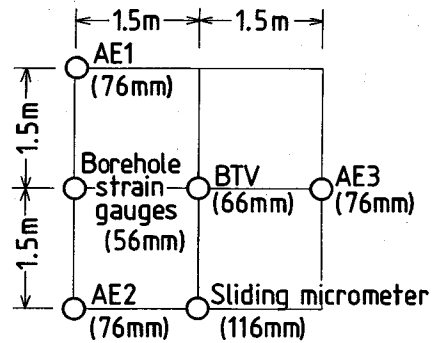


Fig.2 Locations of boreholes on a wall of a room for magnetizing equipment. Numerals in parentheses indicate borehole diameters.

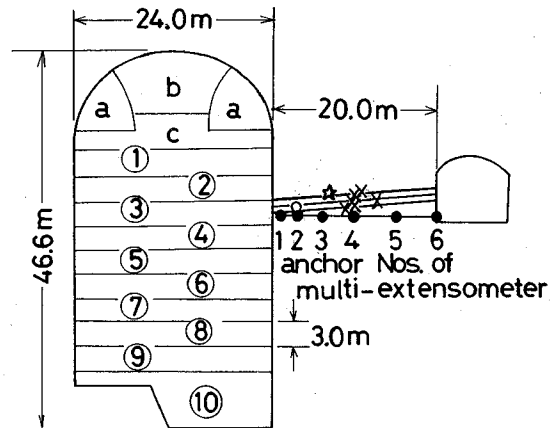


Fig.3 Excavation steps of the chamber, borehole positions for AE sensors and anchor positions of multi-extensometer on an elevation view. Symbols of a star, an open circle, crosses and open squares indicate located AE sources.

しかつ空洞中央部に近い3号発電機設置位置の放水路側空洞側壁で集中的な岩盤挙動の測定を行った。本体空洞の掘削に先立ち、すでに掘削されていた励磁装置室空洞からFig.1に示す位置にボアホールを掘削し、スライディングマイクロメータを用いた高精度の変位測定、埋設ひずみ計<sup>9)</sup>を用いた岩盤内の微小ひずみの測定、ボアホールテレビを用いた孔内亀裂観察、透気・透水係数や弾性波速度の測定などを空洞側壁部で実施し、その結果の一部についてはすでに報告している<sup>9),10)</sup>。ここで述べるAE測定は、この集中測定の一部として実施したものである。

Fig.2は励磁装置室空洞側壁で見た6本の測定ボーリング孔の配置である。空洞側壁上に1.5m間隔の格子を組み、底辺の長さが高さがいずれも3mの横向きの2等辺三角形の3つの頂点(AE1, AE2およびAE3)に3本のAEセンサー埋設孔を置き、AE1とAE2の中央に埋設ひずみ計の設置孔を、またこの三角形からや

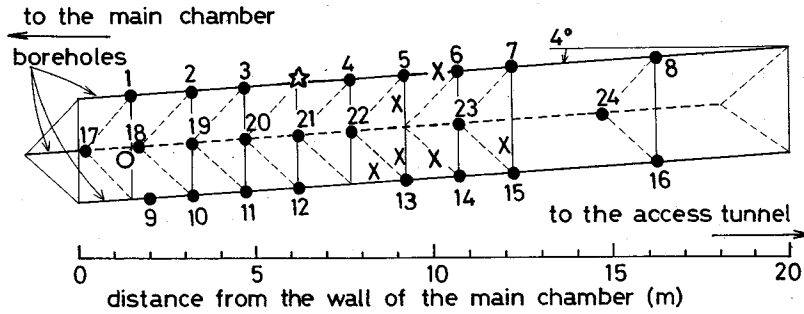


Fig.4 Arrangement of AE sensors and located AE sources.

Table 1 AE events.

Event No.	Excavation	Date (1990)	Time of Explosion	Time of Event	Symbol
1	b (upper part)	Jan. 31	13:03	13:28	☆
2	3 bench	Sep. 22	17:03	17:47	○
3	6 bench	Nov. 23	18:04	18:04	X
4				18:36	X
5				19:04	X
6				19:06	X
7	Nov. 24	Nov. 24	5:37	5:38	X
8				6:23	X

や外れた下側にスライディングマイクロメータ測定孔を配置した。三角形の中心には、ボアホールテレビによる観測孔を配置し、このボーリング孔で雷管を発破し、AEセンサーの極性のチェックをするとともに周辺岩盤の弾性波速度を測定した。この6本のボーリング孔は、図に示したように孔径56~116mmで、励磁装置室空洞側壁から本体空洞の壁面までの約20mの間を、いずれも4度下向きに互いに平行に掘削されている。一方、施工管理のために岩盤変位計による変位測定が空洞周辺の20数箇所で行われ、このうちAEの測定箇所に最も近いのは、水平に約22m離れた放水路側での水平変位の測定であった (Fig.1参照)。この測定結果については、後でAEの測定結果と比較して詳しく議論する。

空洞の掘削は、Fig.3に示すように、まず空洞上部の両側の図のaの部分に側壁導坑を掘削し、次に柱状に残された図のbの部分に切抜けた後、図のcの部分に掘削して取り除いた。この後、盤下げ掘削に入り、残りの空洞下部を3m高さの10個のベンチに区分し、1ベンチから10ベンチまで各ベンチ毎に順に掘削を進めた。3次元のAE発生位置の決定とメカニズムの解析を目的としたAE測定は、測定機器の準備と測定人員の確保の都合から、空洞上部の切抜け (Fig.3のb部分)掘削、盤下げの3ベンチの掘削および6ベンチの掘削の3つの時期を対象に行った。測定時間は発破掘削直後の2時間

を対象とした。その結果、メカニズム解の得られたAEはTable 1に示す8イベントであり、Fig.3にはTable 1に示したシンボルを用いて、これらのイベントの発生位置も示した。なお、X印のイベントは6個あるが、これらは時間的にも空間的にも近接して発生していることがわかる。後に述べるメカニズムの解析では、これらのイベントは類似したメカニズムで発生したと判断して議論を進めている。

Fig.4は、3本のAEセンサー埋設孔を取出し、AEセンサーの配置を3次的に示したものである。なお、この図にもFig.3と同様Table 1の8個のAEイベントの発生位置を示した。今回の測定では、AE測定による微小破壊発生位置の3次的な標定とメカニズム解析による破壊機構の検討を行うため、測定対象範囲を取り囲むようAEセンサーを3次的に配置した。AEセンサーは、この図に示すように各孔に8個、合計で24個設置している。AE測定の方法は、文献2)に示した方法と基本的に同じであり、測定チャンネル数は12であるため、AEの発生状況をみながら、測定器に接続するセンサーを適宜選択して測定を行った。なお、測定周波数範囲は概ね5kHz~100kHzの範囲である。

### 3. メカニズム解とその考察

#### (1) メカニズム解析法の概要

AEの発生メカニズムの解析法には、P波初動の押し引きの極性を用いる方法と、初動の振幅値を用いる方法の2種類がある。後者の方法は、せん断破壊と引張破壊の混合モードをも定量的に解析でき、メカニズムに関して得られる情報が多いため、最近研究の発展が著しい<sup>5),11),12),13)</sup>。しかしこの方法は、各センサーの振幅に対する感度が一定であるとの仮定に基づいており、この仮定が成り立たない場合には、結果に大きな誤差を含む可能性がある。筆者らは、今回の原位置測定の場合、センサーの設置状態にもばらつきがあり、経験上この仮定を満足することは困難と考え、P波初動の押し引きの極

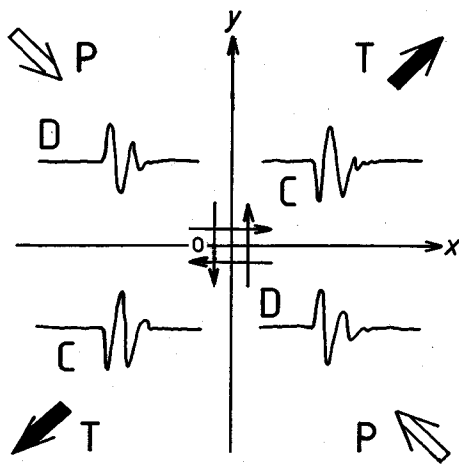


Fig.5 Illustration of fault plane solution based on P-wave radiation pattern.

性分布だけをデータとして用いる解析 (Fault Plane Solution, あるいは Focal Mechanism Solution とよばれる)<sup>14)</sup>を行うこととした。この手法は、地震の発生機構を調べる手法として広く用いられており<sup>15), 16), 17)</sup>、鉦山の山はねの発生機構の解析にも頻繁に用いられている<sup>3), 4), 6)</sup>。この手法の概要は以下の通りである。

AE の発生に伴って観測点に伝播してくる P 波初動の極性は初動が震源に向うか、遠ざかるかによってそれぞれ引き波 (Dilatational), 押し波 (Compressional) のいずれかの極性を有している。いま Fig.5 のように、最大圧縮主応力が P 方向、最小圧縮主応力が T 方向から作用し、原点 0 で矢印のようなせん断破壊が生じ、これに伴って AE が発生したとする。この場合、第 1 および第 3 象限にある観測点には初動が押し波の P 波が、第 2 および第 4 象限にある観測点には初動が引き波の P 波が伝播してくる。逆に震源を決定した AE イベントに対し、多数の観測点で P 波の初動の極性を調べるにより、その AE を発生させたせん断破壊の方向と作用した主応力の方向を知ることができる。すなわち、引き波と押し波の分布を区切る 2 つの線 (図の x 軸と y 軸) のいずれかがせん断破壊面の方向である。また、引き波と押し波の分布の中心方向がそのせん断破壊を生じさせた最大および最小圧縮主応力の方向であり、それぞれ P 軸および T 軸とよぶ。なお、岩石供試体の破壊実験で共役的なふたつのせん断面が生じる場合を想像すればわかるように、実際の岩盤では内部摩擦角  $\theta$  が存在するためにふたつのせん断面は直交せず、 $90^\circ - \theta$  の角度で斜交する。このため、上述のようにして求めた P 軸と T 軸は、最大主応力の作用方向と  $\theta/2$  だけ食い違うことになる<sup>18)</sup>。厳密な意味では、この違いに注意を払う必要があるが、本論文で述べるような大雑把な傾向に

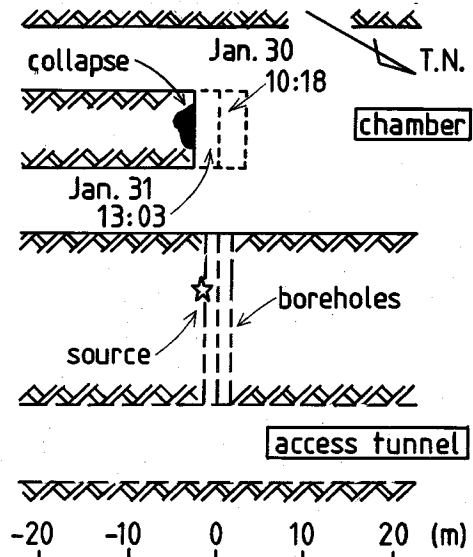


Fig.6 Progress of the excavation in an upper part of the chamber when No.1 AE event was recorded. (Plane view)

関する議論においては、とくに大きな問題はないものと考えられる。

引張破壊や爆発的な震源の場合には、すべての観測点で押し波が観測される。一方、Fig.5 のように押し引きの分布が交互に表れる AE は、厳密には引張破壊成分をかなりの割合で含んでいる複合破壊の場合もある<sup>4), 12), 13)</sup>。しかしここでは複合破壊を考えず、破壊は引張かせん断かのいずれかであると単純化し、Fig.5 のように押し引きの分布が交互に表れる AE は、せん断破壊に伴って生じたものとみなすことにする。Fig.5 には簡単のため 2 次元の概念図を示したが、震源から各観測点への射出角と方位角を計算し、ステレオネット上で初動の押し引き分布を整理することにより、同様の解析を 3 次元的に行うことができる<sup>14)</sup>。

解析手法からわかるように、メカニズム解を求めるためには、多数のセンサーで明瞭な P 波初動をとらえる必要がある。このような条件を満たす AE は、比較的大きな破壊に伴う振幅の大きな AE イベントに限られる。今回の測定では、AE の発生自体は多数観測されたが<sup>39)</sup>、大多数は 1 個もしくは 2 個のセンサーで受振されるだけの小さな AE で、メカニズム解が求められる大きな AE の発生は多くない。AE の測定は、空洞上部の切掛け (Fig.3 の b 部分) 掘削、3 ベンチの掘削および 6 ベンチの掘削を対象としたが、メカニズム解を求めることができた AE イベントは、すでに Table 1 に示した通り、切掛け掘削で 1 個、3 ベンチの掘削で 1 個、6 ベンチの掘削で 6 個の合計 8 個であった。これ以外の AE

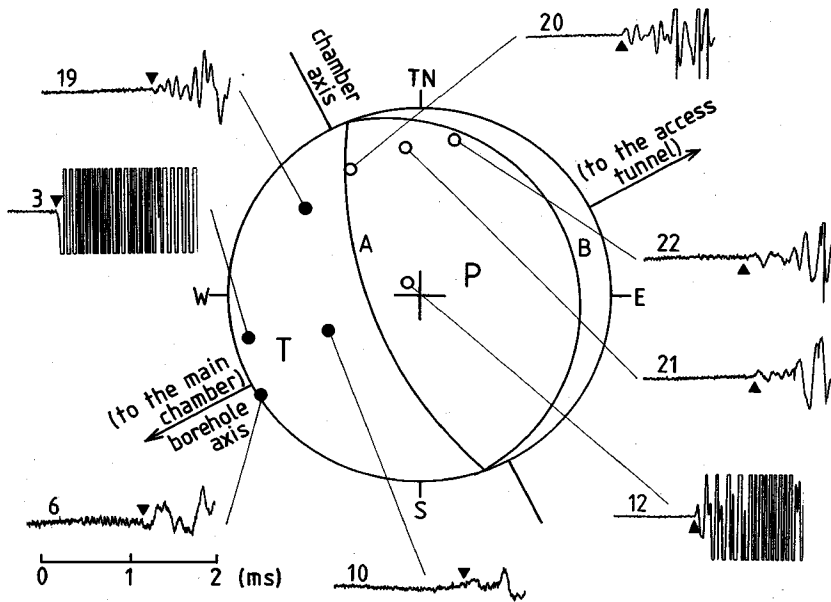


Fig.7 Fault plane solution of No.1 AE event (Lower hemisphere projection of Schmidt net) and recorded waveforms.

イベントは、発生位置の3次元的な決定もできなかった。逆にいえば、発生位置を決定できたAEイベントは、すべてメカニズム解も得られたことになる。以下では、発生時期毎、すなわち、切掘げ、3ベンチ、6ベンチの各掘削時期毎にAEの発生機構を検討する。なお、メカニズムの解析に先立つAEの発生位置の決定は各センサーへのP波初動の到達時刻から求めることとした。P波速度はAE測定箇所掘削ベンチ毎に測定しており、切掘げ掘削時4.38 km/s、3ベンチ掘削時4.17 km/s、6ベンチ掘削時3.81 km/sの実測値を、それぞれの時期に発生したAEイベントの発生位置の決定に用いた。発生位置の決定には、非線形最小二乗法を繰り返し適用し、走時残差 ( $i$ 番目のセンサーへの初動到達時刻  $t_i$  と試行的に決めた震源要素から計算される初動到達時刻  $T_i$  との差) の2乗和  $\sum (t_i - T_i)^2$  が最小となる震源要素 (震源の3次元座標と発生時刻) を求めた<sup>19)</sup>。

## (2) 空洞上部の切掘げ掘削に伴って発生したAEのメカニズム解とその考察

空洞上部の切掘げ (Fig.3のb部分) 掘削に伴って発生したAEは、Table 1のNo.1イベントである。空洞上部の掘削は、まず2つの側壁導坑をFig.3のaの部分に掘削し、その後中央部のb部分を切掘げ掘削する方法がとられた。このため、a部分の掘削後、b部分は空洞内に柱状にとり残される形となり、応力の集中が予想された。Fig.6は、b部分の掘削の進行を示す平面図である。1990年1月30日10時18分に、柱状に残されたb部分を長さ2mにわたり発破掘削した後、1月

31日13時03分にさらに2mの発破掘削を進めたところ、この発破の25分後、図に黒く塗りつぶして示した切り羽の一部が突然崩壊した。AE観測は、この崩壊箇所から水平に10数m、鉛直に10m余り離れた側壁岩盤中で行っていたが、この崩壊と同時に振幅の大きなAEイベントが観測され、その発生位置を求めたところ図の☆印の位置に決定された (断面図上での位置はFig.3の☆印)。したがって、このAEは、切り羽部分で支えられていた地圧が突然の崩壊によって周辺岩盤内に移動し、これに伴って測定箇所の岩盤に局部破壊が生じて発生したものと思われる。

Fig.7は、シュミットネットの下半球に投影した、このAEのメカニズム解である。○印はP波初動が引き波の観測点、●印は押し波の観測点を示す。各観測点毎にセンサー番号と観測波形を示した。観測波形に付した▲印と▼印が初動の読取り位置であり、▲印は初動のトレースが図上で上向き、▼印は下向きであると判断したことを示している。初動が押し波であるか引き波であるかは、3本のAEセンサー埋設孔の中心に掘削したBTV孔で雷管を発破し、その際観測された初動のトレースから判断した。すなわち、雷管の発破の際に観測された初動のトレースはいずれも下向きであったため、下向きのトレースを押し波、上向きのトレースを引き波とした。センサーNo.6とNo.22の観測波形はやや初動が不明瞭であるが、他は明瞭で容易に押し引きの区別がつく。さて、震源をとり囲む球面上に、節面と呼ばれる○印と●印の分布を区切る2つの直交する大円を描くことを考える。この2つの直交する大円の選び方は必ず

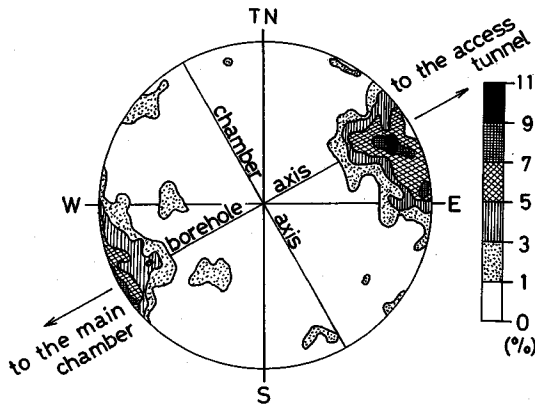


Fig. 8 Lower hemisphere projection of joint surfaces on Schmidt net.

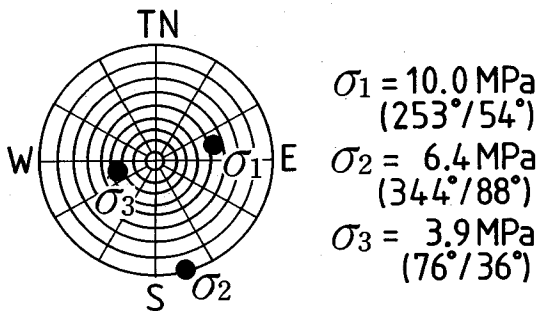


Fig. 9 In-situ stress state measured by an overcoring method before the chamber excavation.

しも1通りではなく、いくつかの可能性はあるが、ここではFig.7にA, Bで示した2つの大円を節面として選ぶことにした。この2つの節面のいずれかひとつが、このAEを発生させた局所的なせん断破壊の実際の破壊面に対応するが、A, Bいずれが実際の破壊面かはP波初動の押し引き分布からだけでは決定できない。

最大および最小圧縮主応力の方向に対応するP軸およびT軸の方向は、図中にP, Tの文字で示したようにそれぞれ節面で区切られた○印と●印の分布の中心に求まる。

Fig.8は、AEセンサーを設置した3本のボアホールの孔壁を、センサー設置前にボアホール・テレビを用いて調べて得た、節理面方向の密度分布図である。9~11%の集中を示す最も卓越した節理面は、空洞の長軸方向にほぼ平行で、空洞に対して約70°で傾斜し、空洞の掘削にともなってすべり面を形成しやすい走向・傾斜を有していることがわかる。この卓越節理面の走向と傾斜(走向N22°W, 傾斜68°W)は、A, B2つの節面のうち節面Aの走向と傾斜(走向N22°W, 傾斜68°W)に一致する。

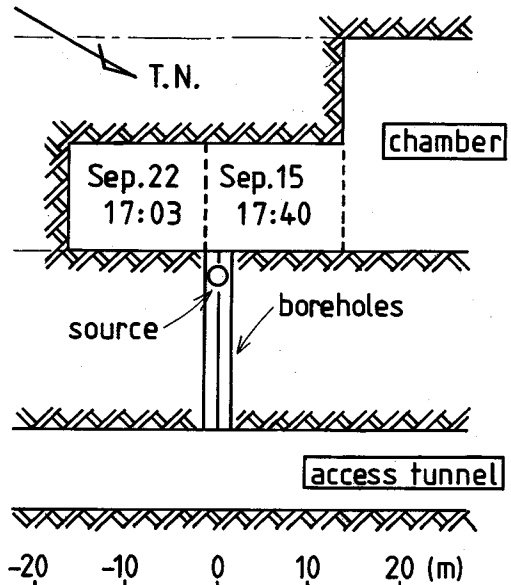


Fig. 10 Progress of the 3 bench excavation when No.2 AE event was recorded.

Fig.9は、空洞掘削前に、電中研式の埋設型ゲージを用いた応力解放法<sup>20)</sup>で測定した初期地圧の測定結果を示す。応力値は圧縮を正としている。主応力の方向は、Fig.7と同じくシュミットネットの下半球に投影して示しており、かつこの中の数値は南を0°として時計回りに計った方位角と鉛直からの傾きである。Fig.7のP軸とT軸の方向は、Fig.9の $\sigma_1$ と $\sigma_3$ の方向にそれぞれほぼ一致していることがわかる。さてすでに述べたように、実際の破壊面はFig.7の2つの節面A, Bのいずれかひとつであり、P波初動の押し引き分布からだけでは、いずれが実際の破壊面であるかを決定することはできない。上述の卓越節理面の走向と傾斜や初期地圧の測定結果を考慮した場合、A面を実際の破壊面と考える方が合理的であると思われる。その場合このAEは、空洞掘削の影響を受けた岩盤内の地圧が切り羽の崩壊に伴ってさらに増大し、その結果、測定箇所が卓越節理の方向に沿って局所的にせん断破壊して発生したものと推定される。また、その破壊に際して作用した最大および最小主応力の方向は初期地圧のそれとほぼ同じであったといえる。

### (3) 3ベンチの掘削に伴って発生したAEのメカニズム解とその考察

AEセンサーの設置レベルである3ベンチの掘削に伴って発生したAEは、Table1のNo.2イベントである。3ベンチの掘削の進行をFig.10の平面図に示す。1ベンチから10ベンチの盤下げ掘削は、厚さ3m、幅24

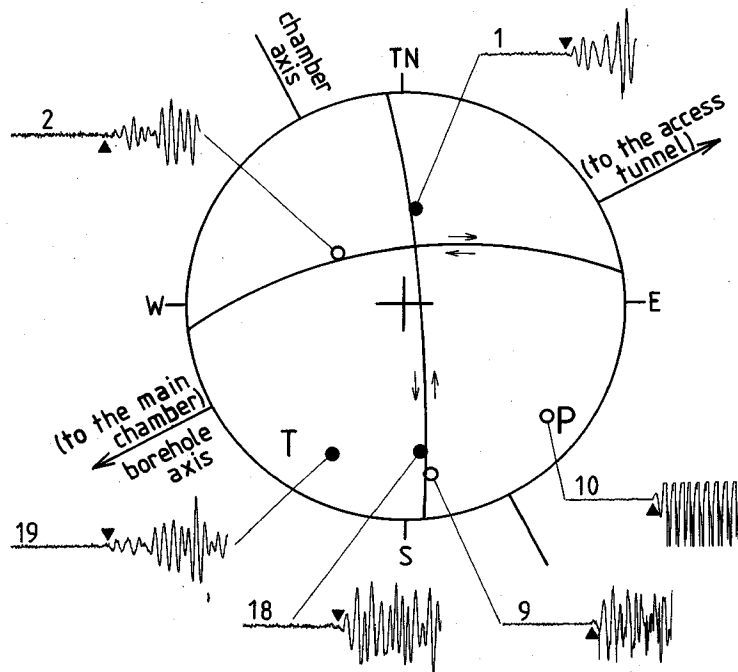


Fig.11 Fault plane solution of No.2 AE event and recorded waveforms.

mの各ベンチの掘削をまず鉄管路側と放水路側の幅12mずつの2つの帯状領域に分け、さらにそのそれぞれを15m程度の長さのブロックに区分し、順次ブロック毎に床面から下向きに必要な数の装葉孔を穿孔して、発破する方法で進められた。No.2イベントの発生直前には、Fig.10に示すように、1990年9月15日17時40分に放水路側の発破掘削が行われ、AEセンサー埋設孔前方の岩盤が取り除かれた。次に、その7日後の9月22日17時03分にふたたび放水路側の発破掘削を進めたところ、この発破の44分後に振幅の大きなAE(No.2イベント)が観測され、発生位置を計算して求めたところ、空洞壁面近傍の図の○印の位置に決定された(断面図上での位置はFig.3の○印)。

No.2イベントの観測波形と得られたメカニズム解をFig.11に示す。節面に付した矢印はせん断変位の方向を示す。(本論文に示した他の2つのメカニズム解は、せん断変位の方向が紙面に対して垂直であるため、このような矢印で変位の方向を示せない。)初動の押し引きが読み取れる観測波形は6個の観測点でしか得られておらず節面の選び方には多くの可能性があるが、このデータから図のように節面を定めることにする。一方、Fig.10でAEの発生位置を見ると、発生位置は空洞壁面から2.6m程度しか離れておらず、その前方には掘削されたばかりの幅12m、長さ30mの空洞が広がっている。したがって、センサー埋設孔の孔軸方向の直応力

は、上述の2回のAE発生位置前方の空洞の発破掘削で解放され、AE発生時にはかなり小さな値になっていたと思われる。一方、空洞軸方向は初期地圧の $\sigma_2$ の方向にも近く、この方向の直応力は、この空洞の掘削により増大していたと思われる。Fig.11のように節面を定めると、P軸とT軸の方向はいずれもほぼ水平で、P軸は空洞軸方向に、T軸はセンサー埋設孔の孔軸に概ね近い方向に求まる。このことから、このAEイベントを発生させた岩盤の破壊は、空洞の掘削に伴うセンサー埋設孔の孔軸の方向の直応力の解放と、空洞軸方向の直応力の増大の影響を受けていたと推測される。このように、AE発生時の空洞形状とAE発生位置の関係を検討すれば、P軸とT軸の方向を合理的に説明することができる。

#### (4) 6ベンチの掘削に伴って発生したAEのメカニズム解とその考察

AEセンサーの設置レベルより約10m下方の6ベンチの掘削に伴って発生したAEは、Table 1のNo.3~8の6個のイベントである。これらのAEイベント発生前後の6ベンチの掘削の進行をFig.12の平面図に示す。まず1990年11月23日5時25分に鉄管路側の発破掘削が行われ、次にその日の夕方18時04分に放水路側の発破掘削が行われたところ、この発破の直後、32分後、60分後および62分後にそれぞれNo.3、No.4、No.5

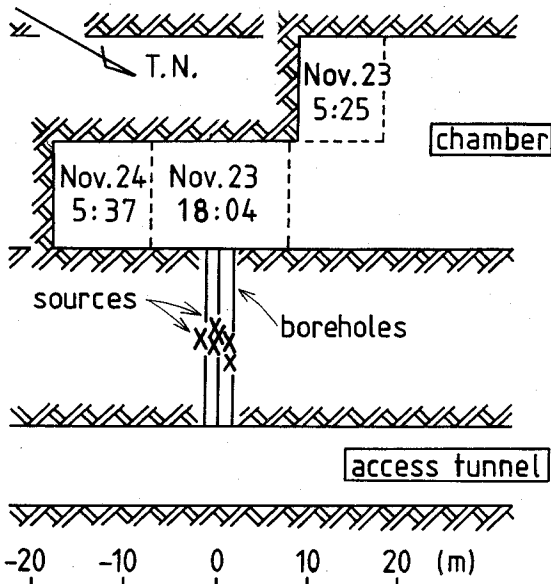


Fig.12 Progress of the 6 bench excavation when AE events from Nos.3 through 8 were recorded.

および No. 6 イベントが観測された。さらに、その翌日の 11 月 24 日 5 時 37 分にふたたび放水路側の発破掘削が行われ、この発破の 1 分後および 46 分後にそれぞれ No. 7 および No. 8 イベントが観測された。これらのイベントは破壊の規模が小さく、AE 波動の振幅が小さい。したがって、初動の押し引きが明瞭に読み取れる観測波形は 4 個または 5 個の観測点でしか得られておらず、各イベント毎にメカニズムを求めるにはデータ数が少なすぎる。一方、これらの 6 個の AE イベントは、Table 1 や Fig.4, 12 からわかるように時間的にも空間的にも近接して発生しており、類似したメカニズムで発生しているのではないかと推測される。そこで、この 6 個のイベントのデータを重ね合わせてメカニズム解を求めた。その結果を Fig.13 に示す。

Fig.13 に示したような 2 つの節面を選ぶと、引き波の○印の分布の中に一点だけ押し波の●印が残る。したがって、これらの節面は図中の押し引き分布を完全に説明できる節面ではなく、前述の 6 個の AE イベントは、個々に少しずつメカニズムが異なることが予想される。しかしこの 1 点を除けば矛盾はなく、Fig.13 はこの 6 個の AE イベントを代表するメカニズム解として、概ね妥当ではないかと思われる。

さて Fig.13 の図中の破線は、Fig.8 で 9~11% の集中を示す最も卓越した節理面の走向と傾斜（走向 N 22°W、傾斜 68°W）を、下半球シュミットネット上に大円で示したものである。また、P および T の文字の位置はそれぞれ P 軸および T 軸の方向を、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  および

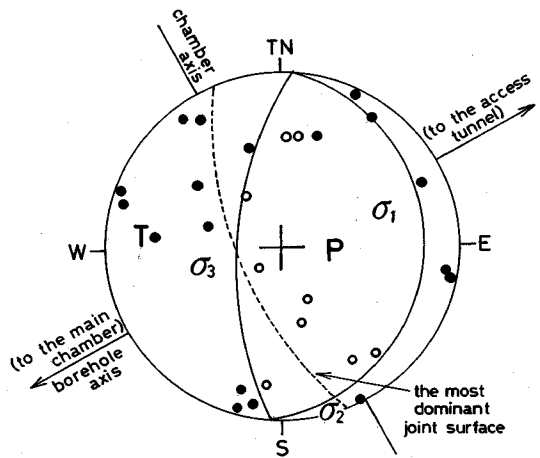


Fig.13 Fault plane solution obtained by superimposing the polarity distributions of Nos.3 through 8 AE events.

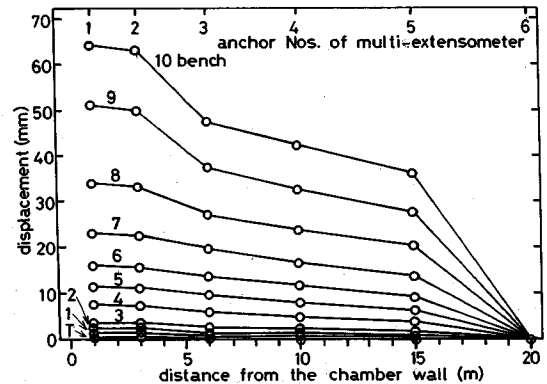


Fig.14 Horizontal displacements measured by the multi-extensometer.

$\sigma_3$  の文字の位置は Fig.9 で●印で示した初期地圧の主応力方向を示す。ここで、P 軸と T 軸の方向を初期地圧の主応力方向と比較すると、P 軸と T 軸も  $\sigma_1$  と  $\sigma_3$  にそれぞれ類似した方向にあるが、P 軸は  $\sigma_1$  の方向よりも鉛直に近く、T 軸は  $\sigma_3$  の方向よりも水平に近い。これは空洞掘削に伴い周辺岩盤内の主応力の方向が初期地圧状態から鉛直および水平方向にやや回転したためと考えることができる。また、2 つの節面を卓越節理面の走向・傾斜と比較すると、節面のうちひとつの走向と傾斜（走向 N4°E、傾斜 68°W：図の中央の実線）が卓越節理面の走向と傾斜（走向 N22°W、傾斜 68°W：図中の破線）に極めて近いことがわかる。したがって、この節面を実在の破壊面と仮定すると、AE センサーを設置したレベルより約 10 m 下の 6 ベンチの掘削に伴って発生したこの 6 個の AE イベントは、地圧の影響下で、最も卓越した節理面の方向に沿った岩盤の局部的なせん断破壊によって引き起こされたと考えられることができる。



Fig.14 は、3本のAEセンサー埋設孔から水平方向に約22m離れた(Fig.1参照)多段式岩盤変位計で測定された空洞の掘削に伴う岩盤変位で、横軸は空洞壁面からの距離(横軸下側)とアンカー位置(横軸上側)を示している。この岩盤変位計は、Fig.3に示したようにAEセンサー埋設孔と同じ3ベンチのレベルに設置されているにもかかわらず、60%以上の変位が7ベンチ以降の掘削に伴って発生しており、これが当地点の岩盤変位の顕著な特徴といえる。この変位の発生傾向は、空洞壁面の岩盤が地圧の影響下でFig.13の破線で示した卓越節理面に沿ってすべり変位を生じたと考えれば容易に理解することができる。したがって、AEのメカニズム解が示す6ベンチの掘削に伴う卓越節理面の方向に沿った岩盤の局部的なせん断破壊は、7ベンチ以降の大きな岩盤変位発生の前駆現象と思われる。このことから、節理面方向の密度分布や初期地圧状態を念頭に置き、AEのメカニズム解をリアルタイムで求めれば、変位の増大をはじめとする重大な岩盤挙動を事前にかなり正確に予測できる可能性がある。

#### 4. ま と め

地下発電所空洞の側壁部でセンサーを3次元的に配置し、空洞上部の切掘げ掘削、盤下げの3ベンチの掘削および6ベンチの掘削の3つの時期を対象にAE測定を行い、測定されたAEイベントのうち最も規模の大きい8個のAEイベントに対しその発生位置を決定するとともに、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、その発振機構を調べた。P波初動の得られた観測点の数は必ずしも十分ではなく、メカニズム解の基礎となる節面の決定に自由度が残された。このため、この決定に際して著者の主観が入ったことを認めざるを得ない。このような客観性に対する不十分性はあるが、メカニズム解から得られた結果を整理すると次の通りである。

(1) AEセンサーの設置レベルより約10m上方の空洞上部の切掘げ掘削に伴って発生したNo.1イベントは、空洞上部に柱状に残された掘削切羽の崩壊に伴って周辺岩盤中の地圧が増大し、その結果、測定箇所の岩盤が卓越節理の方向に沿って局部的にせん断破壊して発生したものと推定された。また、その破壊に際して作用した最大および最小主応力の方向は、初期地圧のそれとほぼ同じであったと推定された。

(2) AEセンサーの設置レベルである3ベンチの掘削に伴って発生したNo.2イベントは、空洞の掘削に伴い、空洞軸の直方向の直応力が解放されるとともに空洞軸方向の直応力が増大して局部的なせん断破壊が生じ、これに伴って発生したと推定された。

(3) AEセンサーの設置レベルより約10m下方の6ベンチの掘削に伴って発生したNo.3~8の6個のイベントは、初期地圧の影響下で、最も卓越した節理面に沿った岩盤の局部的なせん断破壊によって引き起こされたと推定された。当地点では、この卓越節理面が空洞に対して流れ目を形成しているため、7ベンチ以降の掘削ではこの卓越節理面に沿ったすべり変位が原因と思われる大きなはらみ出し変位が空洞側壁部に発生した。したがって、6ベンチの掘削に伴う局部的なせん断破壊は、この大きなはらみ出し変位の前駆現象と思われる。このことから、AEのメカニズム解をリアルタイムで求めれば、今回の場合、卓越節理面に沿った局部的なせん断破壊が早い時期に把握できた可能性があることがわかった。

(4) 以上のことから、地震や山はねの発生箇所比べて地表に近く地圧が小さい地下発電所空洞においても、比較的狭い領域を対象とした高感度のAE測定を行うことにより、岩盤の微小破壊の3次元的な発生位置やそのメカニズムの推定が可能であり、これらは空洞掘削に伴う岩盤挙動を把握するうえで、有用であることがわかった。今後は観測点の数を増して、データの解釈に客観性を持たせることに努めるなど、この手法の実用化に向けてさらに研究を進めていきたいと考えている。

謝辞：矢田篤氏をはじめとする関西電力(株)大河内水力発電所建設所の皆様には、原位置測定の実施についてさまざまな御力添えをいただくとともに、空洞の掘削時挙動の解釈について貴重な御助言をいただいた。(株)ニュージェックの中村隆浩氏(現在、戸田建設(株))には、長時間にわたる原位置でのAE測定について多大なご尽力を賜わるとともに、データの整理法や解釈について貴重な御助言をいただいた。また、(財)電力中央研究所の佐々木俊二氏には、論文の原稿について貴重なご意見を頂戴した。ここに記して深く感謝の意を表するものである。

#### 参考文献

- 1) 石田 毅, 金川 忠, 佐々木俊二, 浦沢義彦: AEによる岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験, 土木学会論文集, 第376号/Ⅲ-6, pp.141-149, 1986.
- 2) 石田 毅, 北野晃一, 木下直人, 若林成樹: AE測定による原位置花崗岩加熱時挙動の観測, 土木学会論文集, 第424号/Ⅲ-14, pp.187-196, 1990.
- 3) 佐藤一彦, 福島篤: 深部採炭による誘発微小地震の観測, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.355-360, 1984.
- 4) Gibowicz, S.J.: The mechanism of seismic events induced by mining, *Proceedings of the Second International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*, Minneapolis, pp.3-27, 1988.
- 5) Feignier B. and Young R.P.: Moment tensor inversion of

- induced microseismic events : evidence of non-shear failure in the  $-4 < M < -2$  moment magnitude range, *Geophysical Research Letters*, Vol.19, No.14, pp.1503-1506, 1992.
- 6) Stickney, M.C. and Sprengle, K.F. : Seismic events with implosional focal mechanisms in the Coeur d'Alene mining district, Northern Idaho, *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, No.B4, pp.6523-6528, 1993.
  - 7) 原田 稔, 片山 武, 矢田 篤 : 大河内水力発電所地下発電所空洞の設計と施工, 電力土木, No. 230, pp. 46-57, 1991.
  - 8) 石田 毅, 金川 忠, 矢田 篤, 田仲正弘 : 空洞掘削時の応力再配分に着目したゆりみ域測定法の提案, 土木学会論文集, 第427号/Ⅲ-21, pp.41-50, 1992.
  - 9) 打田靖夫, 原田俊之, 金川忠, 中川加明一郎, 浦山克, 中村隆浩, 石田 毅 : 地下発電所空洞掘削における側壁岩盤の挙動, 土木学会第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.316-320, 1992.
  - 10) 中村隆浩, 浦山 克, 打田靖夫, 原田俊之, 金川忠, 宮腰勝義, 石田 毅 : 孔内亀裂の進展から見た大規模空洞掘削時の岩盤挙動, 土木学会第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.321-325, 1992.
  - 11) Scruby, C.B., Baldwin, G.R. and Stacey, K.A. : Characterization of fatigue crack extension by quantitative acoustic emission, *International Journal of Fracture*, Vol.28, pp.201-222, 1985.
  - 12) Ohtsu M., Shigeishi M. and Iwase H. : AE observation in the pull-out process of shallow hook anchors, *Proc. of JSCE*, No.408/V-11, pp.177-186, 1989.
  - 13) 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.
  - 14) 笠原慶一 : 地震の力学, 鹿島出版会, pp.28-45, 1983.
  - 15) Castillo, D.A. and Ellsworth, W.L. : Seismotectonics of the San Andreas fault system between Point Arena and Cape Mendocino in northern California : Implication for the development and evolution of a young transform, *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, No.B4, pp.6543-6560, 1993.
  - 16) Hatzfeld, D., Besnard, M., Makropoulos, K., Voulgaris, N., Kouskouna, V., Hatzidimitriou, P., Panagiotopoulos, D., Karakaisis, G., Deschamps, A. and Lyon-Caen, H. : Subcrustal microearthquake seismicity and fault plane solutions beneath the Hellenic arc, *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, No.B6, pp.9861-9870, 1993.
  - 17) Hirn, A., L pine, J.-C. and Sapin, M. : Triple junction and ridge hotspots : Earthquakes, faults, and volcanism in Afar, the Azores, and Iceland, *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, No.B7, pp.11995-12001, 1993.
  - 18) Yamakawa, N. : Stress fields in focal regions, *Journal of Physics of the Earth*, Vol.19, No.4, pp.347-355, 1971.
  - 19) 佐々木俊二, 石田 毅, 金川 忠 : 高温岩体発電のための岩盤破砕評価技術の開発—水圧破砕で発生するAEの特性と破壊メカニズム—, 電力中央研究所, 研究報告, No. U86032, 1987.
  - 20) 金川 忠, 林 正夫, 北原義浩 : 地圧の計測法と応用, 電力土木, 第163号, pp.31-42, 1979.

(1994.7.27 受付)

## FAULT PLANE SOLUTIONS OF ACOUSTIC EMISSION INDUCED BY PROGRESSIVE EXCAVATIONS OF AN UNDERGROUND POWERHOUSE

Tsuyoshi ISHIDA, Tadashi KANAGAWA, Yasuo UCHITA  
and Masaru URAYAMA

We monitored AE(Acoustic Emission) in the frequency range from 5 to 100 kHz in a porphyrite around an underground powerhouse, measuring 24.0 m wide, 46.6 m high and 134.5 m long at 280 m below the surface. Eight AE events could be located and their fault plane solutions were obtained from P-wave radiation pattern. The solutions are consistent with a strike and a dip of the most dominant joint surface, in situ stress state, and displacements measured by a multi-extensometer. These results indicate that fault plane solutions can be applied to assess stability of underground powerhouses excavated at relatively shallow depths, in a similar way to deep mines where the method has been practically used.