

(41) A E の断層面解析による 地下発電所空洞掘削時の岩盤挙動の検討

山口大学工学部	正会員	○石田 毅
(財)電力中央研究所	正会員	金川 忠
関西電力(株)	正会員	打田靖夫
(株)ニュージェック	正会員	浦山 克

FAULT-PLANE SOLUTIONS OF ACOUSTIC EMISSION INDUCED BY PROGRESSIVE EXCAVATIONS OF A LARGE UNDERGROUND CHAMBER

Tsuyoshi ISHIDA	Yamaguchi University
Tadashi KANAGAWA	Central Research Institute of Electric Power Industry
Yasuo UCHITA	The Kansai Electric Power Co., Inc.
Masaru URAYAMA	NEWJEC Inc.

Abstract

We monitored AE(Acoustic Emission) induced by progressive excavations of a large underground chamber measuring 24.0 m wide, 46.6 m high and 134.5 m long in porphyrite at 280 m below the surface. By superposing P-wave polarity distributions of three located representative AE events, a fault-plane solution was obtained. The strike and dip of a nodal plane in the fault-plane solution were similar to those of the most dominant joint surface. The P and T axes also coincided with a stress condition estimated from measured initial stress and a configuration of excavated openings at the time. These two findings indicated that the three events were caused by shear fracturing along the dominant joint surfaces under the influence of the stress condition. We then concluded that fault-plane solutions of AE events give us valuable information in understanding rock mass behavior with progressive excavation of an underground chamber.

1. はじめに

筆者らは、地下空洞の安定性評価にAE測定を用いるため、小規模な原位置実験^{1) 2)}を行って、手法の開発を進めてきた。また、大規模な地下発電所空洞の掘削時に実際にアーチアバット部でAEを測定して岩盤挙動の検討を試み、昨年の本シンポジウムで報告した³⁾。昨年報告した測定では、1本のボアホール内に直線的にセンサーを設置した1次元的なAEを測定であったが、今回、関西電力㈱大河内水力発電所の地下発電所空洞で、3本のボアホールを用いた3次元的な測定を行う機会を得、発生位置を決定したいいくつかのAEイベントに対し、P波初動の押し引き分布に基づく断層面解析を行ってAEの発生機構を調べた。その結果、これらのAEは、岩盤が卓越節理面に沿って局部的にせん断破壊することにより発生したものであること、またこのAE発生のメカニズムは、岩盤変位計による岩盤挙動の測定結果や初期地圧状態ともよい一致を示すことがわかった。このことは、AE測定が空洞掘削に伴う岩盤挙動の測定法として、極めて有効であることを示していると思われるので報告する。

2. 測定現場の概要と岩盤変位の特徴

測定を行った地下発電所空洞は、兵庫県峰山・砥峰高原の東斜面の地表下280mに位置し、周辺岩盤は電中研式岩盤分類でCH級の堅硬なひん岩である。図1に示すように、この空洞は、幅24.0m、高さ46.6m、長さ134.5mの規模を有し、断面形状は弾頭形を示す。空洞の掘削は、上部からa, b, cの順に進められた後、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上から順に進められた。図中の3個の×印は、斜線を施した6ベンチの掘削に伴って発生したAEの震源を示す。

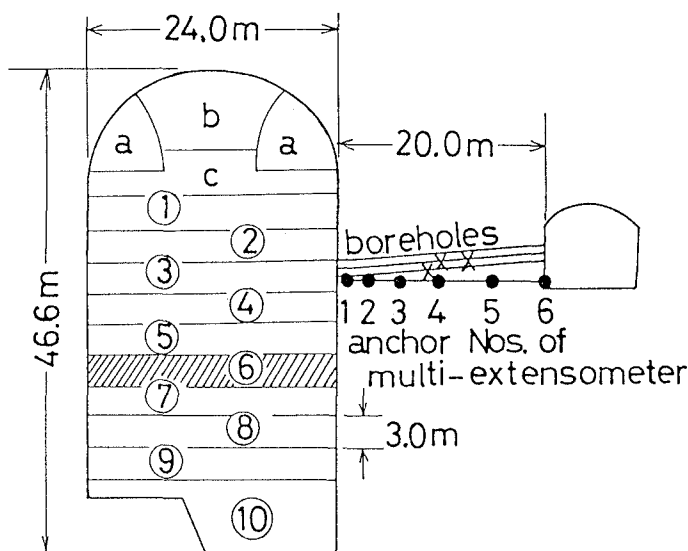


図1. 空洞の掘削ステップ、AEセンサー設置孔及び岩盤変位計のアンカーの位置（断面図）

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、図1に示す側壁部に周辺トン

ネルから空洞掘削に先立って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⁴⁾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実施している^{5) 6)}。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り、測定方法は筆者らが従来用いている方法^{2) 3)}と基本的に同じで、測定対象とした周波数は5kHz～100kHzの範囲である。

図2に、AEセンサーの配置を示す。センサーを設置した3本のボアホールは、3角形の頂点をなす位置に互いに約3m離してほぼ水平に掘削された。なお、この3本のボアホールは、岩盤変位計を設置したボーリング孔と水平方向に約22m離れている。

図3は、この3本のボアホールの孔壁を、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。

図4は岩盤変位計によって測定された、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（下側）とアンカー位置（上側）を示している。岩盤変位計は図1に示したように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いることがわかる。この変位の発生傾向は、空洞壁面の岩盤が図3に示す最も卓越した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。

3. 断層面解析

(1) 解析手法の概要

AEの発生に伴って観測点に伝播してくるP波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する。いま図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O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及び第3象限にある観測点には初動が押し波のP波が、第2及び第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

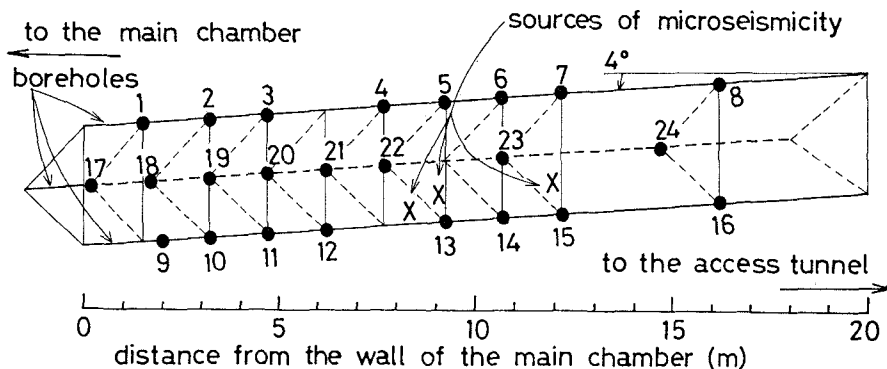


図2. AEセンサー配置とAEの発生位置

でP波の初動の極性を調べることで、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り、引き波と押し波の分布の中心の方向がそれぞれそのせん断破壊を生じさせた最大及び最小圧縮主応力の方向である。

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ため、図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ができる。ここでは簡単のため2次元の概念図を示したが、各観測点への震源からの入射角を計算し、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¹⁾。

(2) 解析結果と考察

解析手法からわかるように、断層面解析を行うためには、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

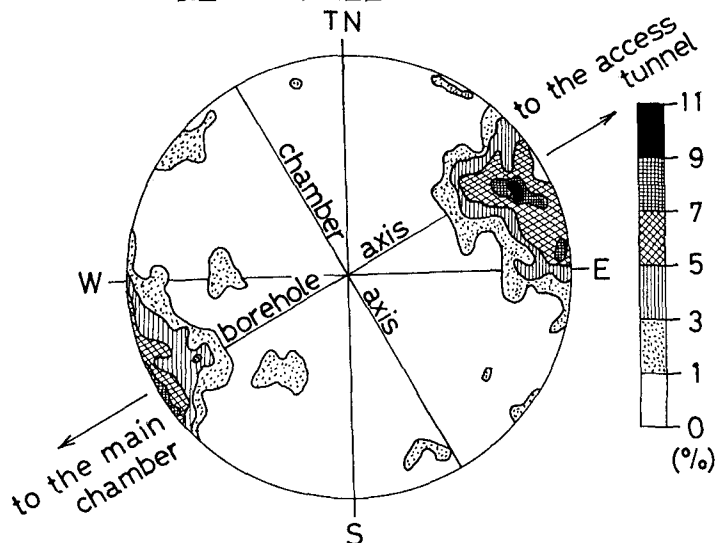


図3. 節理面方向の密度分布の下半球等面積投影

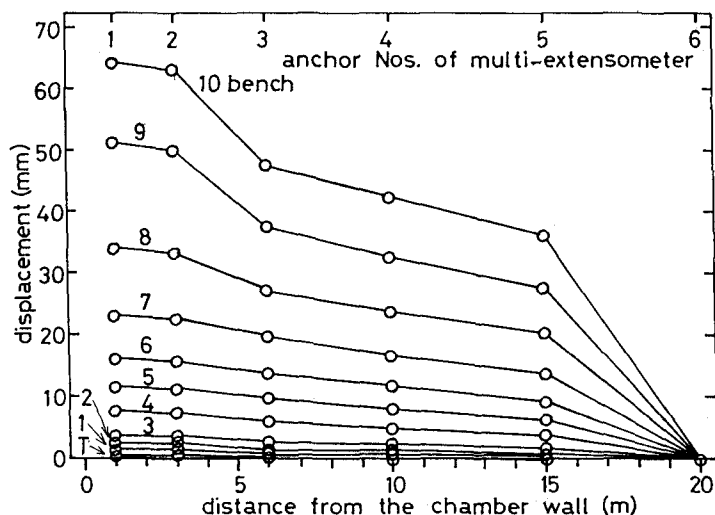


図4. 岩盤変位計による水平変位測定結果

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⁵⁾、断層面解析を適用できるような大きなAEの発生はあまり多くない。AEの測定は、空洞上部のb部分の掘削、3ベンチ及び6ベンチの掘削を対象としたが、断層面解析を適用できたAEイベントは、bの掘削で1個、3ベンチの掘削で1個、6ベンチの掘削で6個である。

図6は、6ベンチの掘削に伴って発生した6個のAEイベントのうち、類似したP波初動の押し引き分布を示す3個のAEイベント（震源位置は図1図2の×印）を重ね合わせて求めた断層面解析の結果である。○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。○印と●印の分布を区切る2本の曲線を節面と呼び、せん断破壊によって生じた実在の破壊面は2つの節面のいずれかひとつに該当する。最大及び最小主応力の方向（P軸及びT軸と呼ぶ）は、それぞれ○印と●印の分布の中心に求め、図中のP及びTの文字の位置はそれぞれP軸及びT軸の方向を示す。空洞掘削前に応力解放法によって測定した初期地圧状態の主応力の方向を図6の中に示すと、 σ_1 、 σ_2 及び σ_3 の文字の位置となる。ここに σ_1 、 σ_2 及び σ_3 の大きさは、それぞれ10.0、6.4及び3.9MPaである。P軸とT軸も、 σ_1 と σ_3 にそれぞれ類似した方向にあるが、P軸は σ_1 の方向よりも鉛直に近く、T軸は σ_3 の方向よりも水平に近い。これは空洞掘削に伴い岩盤内の主応力の方向が初期地圧状態から鉛直及び水平方向にやや回転したためと考えることができる。

図3で9～11%の集中を示した最も卓越した節理面の方向を図6の中に示すと、破線の曲線のようになる。この卓越節理面の走向と傾斜（走向N22°W、傾斜68°W）は、節面のうちひとつの走向と傾斜（走向N4°E、傾斜68°W）に類似している。従って、AEセンサーを設置したレベルより約10m下の6ベンチの掘削に伴って発生したこの3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て岩盤が局部的にせん断破壊し、この破壊によって引き起こされたと考えることができる。

当地点では、図4に示したように7ベンチ以降の掘削に伴って顕著な岩盤変位が生じた点に特徴がある。す

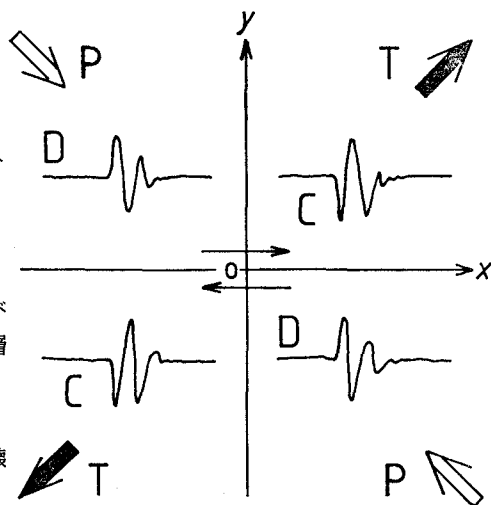


図5. P波初動の押し引き分布に基づく断層面解析の概念図

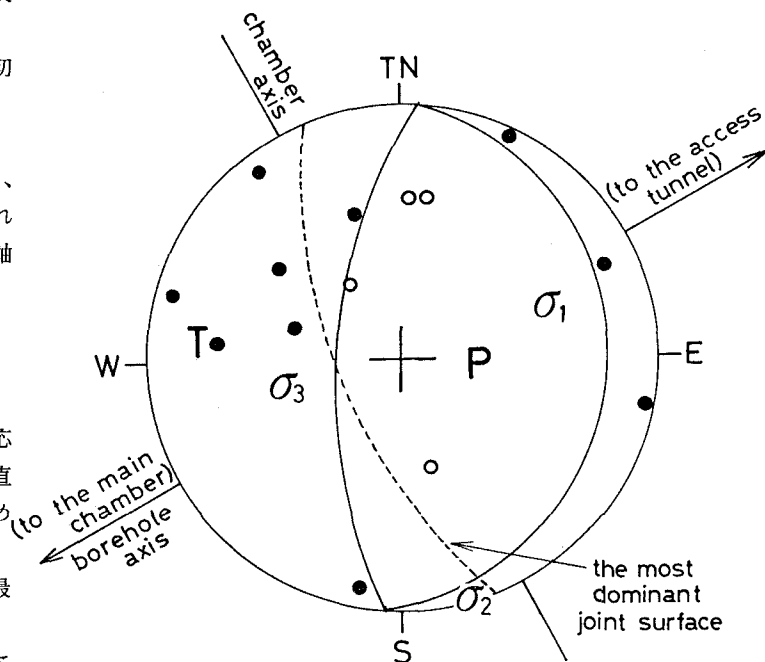


図6. 3個のAEを重ね合わせて得た断層面解析の下半球等面積投影

で述べたように、これは空洞壁面の岩盤が卓越節理面に沿ってすべり変位を生じたことに原因があると推測される。AEの断層面解析で得られた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。従って、節理面方向の密度分布や初期地圧状態を念頭に置き、AEの断層面解析をリアルタイムで行えば、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

地下発電所空洞の掘削に伴って発生するAEを空洞側壁部で測定し、P波初動の押し引き 分布に基づく断層面解析を行ってその発生機構を調べた。その結果、以下のことがわかった。

- (1) AEの断層面解析結果から得られたせん断破壊面の走向・傾斜は卓越節理面の走向・傾斜とほぼ一致した。また、断層面解析結果から得られた最大及び最小圧縮主応力の方向は、初期地圧測定結果と空洞掘削の進展から推定される測定箇所の岩盤内応力状態と一致した。従って、地圧の影響下で卓越節理面に沿った局部的なせん断破壊が測定箇所の岩盤内に生じ、この破壊に伴ってこれらのAEが発生したと考えられる。
- (2) AE測定箇所の3ベンチレベルに設置した岩盤変位計の測定結果は、7ベンチ以降の掘削に伴って大きな岩盤変位が生じたことを示した。これは、測定箇所の岩盤が空洞下部の掘削に伴って支えを失い、卓越節理面に沿ったすべり変位を生じたことで説明できる。従って、上述のAEの断層面解析結果は、岩盤変位計の測定結果から推測される岩盤挙動とよい一致を示すといえる。
- (3) 断層面解析を行ったのは、6ベンチの掘削に伴って発生したAEイベントであり、大きな岩盤変位が生じたのは7ベンチ以降である。従って、断層面解析で得られた空洞方向へ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の断層面解析をリアルタイムで行えば、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。

謝辞：(株)ニュー・ジェックの中村隆浩氏（現在、戸田建設㈱）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。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、空洞の掘削時挙動について貴重な御助言を賜わった。また、断層面解析のデータ整理には山口大学工学部資源工学科の高谷明伸君（現在、日本電子サービス㈱）の協力を得た。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：A E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年12月
- 2) 石田毅・北野晃一・木下直人・若林成樹：A E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年12月
- 3) 石田毅・金川忠・土山茂希・百瀬洋一：高周波A E測定による地下発電所空洞掘削時岩盤挙動の観測，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. 311-315，1992年2月
- 4) 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，土木学会論文集，第457号／Ⅲ－21，1992年12月（印刷中）
- 5) 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年2月
- 6) 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年2月
- 7) 笠原慶一：地震の力学，鹿島出版会，pp. 28～45，1983年