

(64) 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

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
中部電力㈱	正会員	土山茂希
中部電力㈱	正会員	百瀬洋一

HIGH FREQUENCY AE MONITORING WITH EXCAVATION OF AN UNDERGROUND CHAMBER FOR ELECTRIC POWER GENERATING MACHINES

Tsuyoshi ISHIDA	Yamaguchi University
Tadashi KANAGAWA	Central Research Institute of Electric Power Industry
Shigeki TSUCHIYAMA	Chubu Electric Power Co., Inc.
Youichi MOMOSE	Chubu Electric Power Co., Inc.

Abstract

The authors monitored AE(Acoustic Emission) waves in the frequency band from 5 kHz to 100 kHz, emitted from a surrounding rock of rhyolite with excavation of an underground chamber for electric power generating machines. The monitoring in this relatively high frequency band detected effectively AE waves emitted from the sources within one or two metre away from a sensor without noises, because the frequencies of most noises caused by men and machines for excavation works were lower than 5 kHz at a sensor position. The portions where AE sources clustered corresponded to the portions where decreases of a borehole diameter were measured with borehole strain gauges. This correspondence suggested that these AE events were caused by stress increase in rock due to excavation of the chamber. Therefore, it was concluded that the monitoring in the high frequency band is sensitive to the stress increase in rock and probably informs us of predictive small rock behavior which controls important macroscopic rock behavior.

1. はじめに

筆者らは、AE測定を実際の岩盤挙動の測定に適用するため、小規模な原位置測定を行って手法の開発を行ってきた^{1) 2)}。また、新たな岩盤挙動の測定法として、岩盤内の微小ひずみの変化に着目し、ボアホール埋設型の微小ひずみ計を作製して原位置測定を行い、この手法が空洞掘削に伴う岩盤挙動の測定手法として有効であることを報告した³⁾。今回、大規模な地下発電所空洞の掘削の機会をとらえ、原位置測定としては高周波の5kHz~100kHzの測定帯域で発破掘削の直後に周辺岩盤で発生するAEの測定を行うとともに、AEの測定箇所近傍で埋設ひずみ計による岩盤内の微小ひずみの測定を行い、両者の測定結果を比較した。その結果、AEの発生や岩盤挙動の特徴について、若干の知見を得たので、以下に報告する。

2. 測定現場の概要と測定器の設置位置

(1) 測定現場の概要

測定を行ったのは、山岳地域の地表下約350mに建設された幅20.5m、高さ44.1m、長さ129.0mの地下発電所空洞である。周辺岩盤は電中研式岩盤分類でC_H級~B級の新鮮・堅硬な流紋岩である。

図1は、空洞の断面図上に掘削順序とAEセンサーの位置を示したものである。空洞の掘削は空洞頂部から行われ、まず、aの位置に頂設導坑が、bの位置に2本の側壁導坑が掘削された。次いで、頂設導坑と側壁導坑の間に位置するcの部分の岩盤が、頂設導坑側から切り抜ける形で掘削され、天井部分に厚さ約1mのアーチコンクリートが施工された後、dで示したコア部分が取り除かれた。この後、空洞の下方部分を厚さ3mの10段のベ

ンチに区分し、上から順に各ベンチごとに盤下げ掘削を進めた。空洞上部のa, b, cの掘削及び①～⑤ベンチの盤下げ掘削に対してAE測定を行ったが、ここでは、図に斜線を施した空洞上部のa, b, cの掘削時の測定結果について報告する。

(2) 測定器の設置位置

測定を行った空洞は長さ129.0mであるが、このうち空洞中央部の約26mの範囲については、6ベンチ以下の岩盤を掘削しないでロックストラッドとして残し、これを空洞側壁のはらみだし変位に対する支えとする方法が取られた。従って、空洞はロックストラッドで仕切られた2つの大空洞から成ると見ることができる。AEと微小ひずみの測定は、この2つの大空洞のうち、片方の空洞の中心断面で行った。図2は測定箇所におけるAEセンサーと埋設ひずみ計の設置位置を示す。

AEセンサーと埋設ひずみ計は、空洞掘削予定線から約1.5m離し、その位置から1m間隔を基本として、それぞれ12個ずつ設置した。掘削予定線から1.5m離したのは、空洞掘削の余掘による計器の損傷を避けるためである。

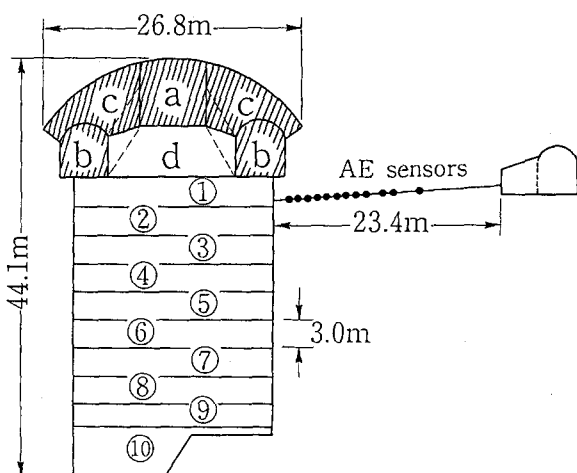


図1. 空洞掘削順序とAEセンサーの位置。

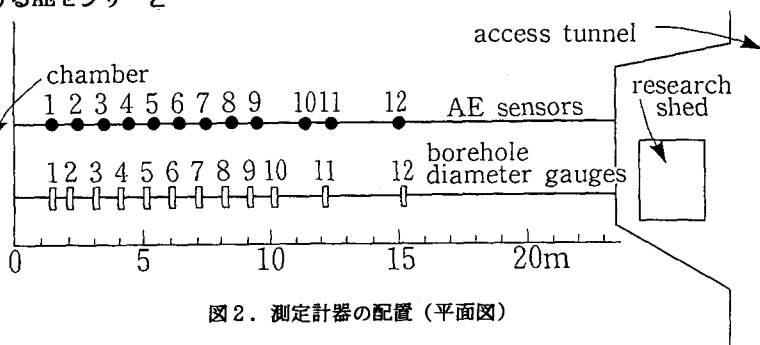


図2. 測定計器の配置(平面図)

3. AEの測定とデータ処理の方法

(1) AE測定機器と測定方法

AEの測定系統概要図を図3に示す。AEセンサー、プリアンプをはじめとする測定機器はすでに報告した小規模な原位置試験²⁾に用いたものと同じであり、測定周波数帯域は0.1kHz

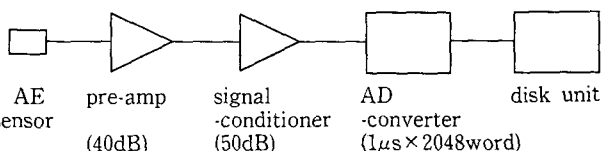


図3. AE測定系統概要図

～100kHz程度である。AEセンサーとプリアンプは、所定の位置に穴をあけた角材に固定し、AEセンサーの受感方向が鉛直方向を向くように孔内に挿入し、セメントミルクを注入して埋設設置した。

AE測定は、AEセンサー埋設位置近傍で発破掘削が行われるたびに、発破直後から2時間の間に発生するAEを測定した。

(2) 観測波形の例とノイズ対策

図4に、観測波形の例を示す。

(1)、(2)はAE波形の例である。(1)は80kHz程度の比較的高周波のAEであり、このようなAEは1個のセンサーだけで感知されることが多かった。一方、(2)は15kHz程度の比較的低周波のAEであり、このようなAEの発生は高周波のAEに比べて少ないが2～3個のセンサーで同時に感知されることが多かった。センサーは、ほぼすべて1m間隔で設置しているから、(1)のAEは発生箇所から0.5～1m程度しか伝播しない微小なAE、(2)は発生箇所から2～3mの範囲まで伝播するやや規模の大きなAEと推測される。

(3)はノイズ波形の例である。当初の測定では、ここに示した2kHz前後の振幅の大きなノイズがAEに混入し

て頻繁に観測され、測定上大きな支障を生じた。測定を行った発破直後から2時間のうち、発破直後、発破の後ガスが排出されるまでの10～20分間だけは作業員が立ち入ることができないため、発破切羽周辺は静かな状態になる。しかし、それ以後は重機によるずり出し作業や次の発破あるいは補強工のため、ボーリング孔のパークッション方式による削孔が始まる。(3)に示したノイズは、切り羽周辺での削孔作業やずり出し作業の際に頻繁に観測されたため、これらの作業が原因と思われる。上述のようにAEは10kHz以上の高い周波数を有するのに対し、このノイズは2kHz前後の低周波である。そこで、12dB/OCTの性能を有する5kHzハイパス・フィルターを用いて測定を行うこととし、これにより効率的な測定が可能となった。

(4)は掘削発破時に観測された波形であり、AEに比べてかなり低い3kHz程度の周波数成分が卓越していることがわかる。この波動も5kHzハイパス・フィルターによりカットすることができた。

(3) AEデータの処理とAE発生位置の推定

AEデータの処理には、YHP216型パーソナルコンピュータを用い、まず測定波形の収録されたフロッピーディスクから、各イベントごとに12チャンネルの全波形を読み出し紙上に出力した。図5はデータ処理の対象としたAE波形の1例であり、このAEイベントの場合、No.3, 4, 5の3つのセンサーで波動を受振している。No.4では矢印aの位置で初動が読み取れ、No.5ではこれより少し遅れて矢印bの位置で初動が読み取れる。No.3では波動が微弱であり明確ではないが、No.4や5よりかなり遅れて初動が到達していることがわかる。従って、このAEは、センサーNo.3よりはかなり離れ、センサーNo.4とNo.5間のややNo.4に近い位置で発生したと推定される。2個のセンサーでAEが受振された場合は、3個の場合と同様にして、初動位置からいずれのセンサーの近くで発生したかが推定でき、また、1個のセンサーでだけ受振された場合には、そのセンサーの近くでAEが発生したと推定できる。このようにして、発破ごとに、どのセンサーの近傍で何個AEが発生したかを整理し、これを基礎データとして岩盤挙動の検討を行うこととした。

4. 埋設ひずみ計による岩盤内の微小ひずみの測定

測定に用いた埋設型微小ひずみ計は、電中研式地圧測定ゲージの素子として使用実績のある鶴共和電業製BS-5B型小標点距離ひずみ計(標点間距離52mm)である。これは、内蔵したダイアフラムの変形をひずみゲージで検出するもので、標点間距離の平均ひずみとして出力される³⁾。今回の測定では、図2に示したようにボアホール中の12箇所に設置し、12点の鉛直方向の圧縮ひずみを測定した。測定にはデジタルストレインメータを用い、AEの測定時にはAE測定と並行して15分に1回程度、その他の場合には1日1回程度測定を行った。

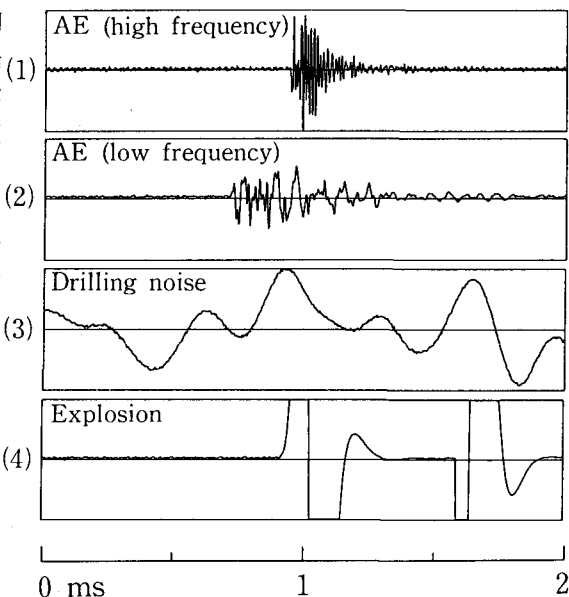


図4. 観測波形の例

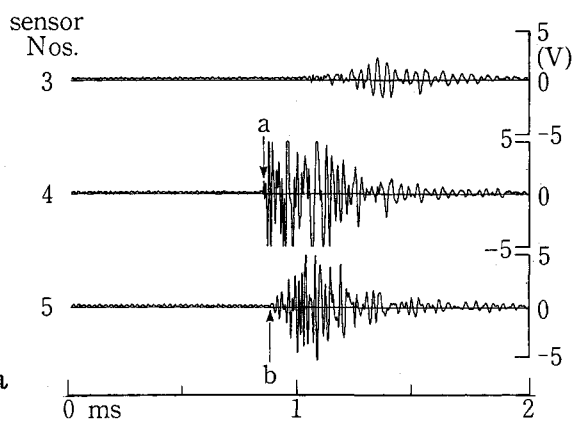


図5. AE波形の例。a, bは初動位置を示す。

5. AE測定結果と埋設ひずみ計によって測定された圧縮ひずみの増大の比較

図1に斜線を施した空洞上部のa, b, cの掘削のうち、センサー埋設断面近傍を掘削した時期をそれぞれi, ii, iiiの3つの時期に区分し、測定結果を整理したのが図6である。図の横軸は空洞掘削予定線からの距離であり、上下の横軸にはAEセンサーと埋設ひずみ計の設置位置も示した。AE発生数は、発破ごとにどのセンサーの近傍で何個AEが発生したかを調べ、これを加え合わせて累積値を求め、i, ii, iiiの3つの時期に区分して棒グラフで示した。ひずみ量は、i期の掘削

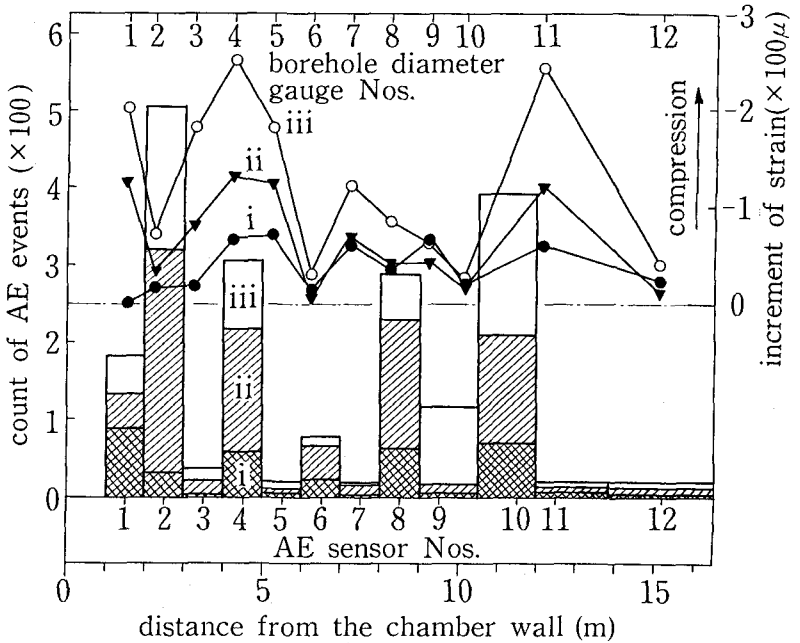


図6. 空洞上部の掘削の進行に伴うAEの発生と埋設ひずみ計による圧縮ひずみの増大直前、すなわち空洞の掘削に着手する直前の値を初期値とし、各期の掘削終了時の測定値を埋設ひずみ計の設置位置にプロットして、折れ線グラフで示した。

測定結果を見ると、AEの発生はセンサーNo.2で最も多く、次いでNo.10、またNo.4やNo.8でも多く発生していることがわかる。この測定では、トリガー信号発生回路に接続できるセンサー数が6個に制限されており、偶数番号の6個のセンサーだけをトリガー信号発生回路に接続していた。測定結果において、No.2, 4, 6, 8, 10の偶数番号のセンサーでAEの発生個数が多いのは、このためと思われる。このことを考慮すると、この時期のAEは、No.2~4の範囲とNo.8~10の範囲の2箇所に集中して発生したと推測される。一方、ひずみ量の増大、すなわちボアホールの鉛直方向の圧縮ひずみは、ゲージNo.3~5の範囲と、ゲージNo.11の2箇所に集中して生じている。そして、このひずみ量の増大は、AEの発生状況と同様に一度に生じたものではなく、i期、ii期、iii期と徐々に累積されながら生じたものであることがわかる。

今回の測定では、AEセンサーと埋設ひずみ計を設置したボーリング孔が平行に約2.9m離れているが、AEの発生箇所とひずみの増大箇所を比較すると、いずれも2箇所に集中している点に共通点が見られる。

6. 考察

今回の測定では、AEの発生頻度の分布と埋設ひずみ計による圧縮ひずみの増大量の分布に対応が見られ、いずれも空洞掘削予定線からやや離れた2箇所にピークを示した。

別の現場で、断面幅8m、高さ7mのトンネル型空洞の掘削時に、埋設ひずみ計を用いた同様の測定を行ったところ³⁾、やはり鉛直方向の圧縮ひずみの増大が周辺岩盤の2箇所でピークを示す結果を得た。埋設ひずみ計は、ゲージ長が52mmと小さく、節理などの不連続面を含む不均質な岩盤では、岩盤の連続体としての平均的なひずみよりは、むしろ、埋設箇所の岩塊に作用する応力の増大に起因したひずみ測定値を示すと考えられる。従って、この測定結果は、重力の作用に基づく鉛直方向の直応力が、弾性論で予測される傾向とは異なり、節理などの不連続面の噛み合いや岩盤剛性の不均質性に支配されて再配置された現象をとらえたものと思われる。

トンネル掘削時に、空洞周辺に応力増大域(圧縮帯)と非増大域(免圧帯)が交互に生じる現象は、グレーツェル形の受圧計を用いたフランクフルトの粘土地山中の地下鉄トンネルの測定でも報告されている⁴⁾。この報告によれば、このような現象は、不連続面が多いほど顕著になるとされている。従って、応力の増大が2本の柱で支えられる今回の岩盤挙動は、節理を含む不均質な岩盤特有の挙動であるとともに、粘土から硬岩に至る幅広い材質の地盤材料中で不連続面の存在や材料の不均質性に起因して比較的頻繁に生じる一般的な挙動である可能性がある。

このような岩盤挙動の解明は空洞の設計・施工上重要であり、今後データを積み重ねるなどして、さらに研究を進めていきたいと考えている。

7. まとめ

地下発電所空洞の掘削に伴う岩盤挙動を明らかにするため、発破直後に周辺岩盤から発生する高周波のAEを測定し、その結果を埋設ひずみ計による岩盤内の微小ひずみの測定結果と比較検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 今回のAE測定では、掘削作業に伴うノイズの混入が心配されたが、ボーリング孔のパーカッション掘削などを原因とする主要なノイズは2kHz程度の低周波であることがわかった。そこで、5kHzハイパスフィルターを用いることにより、5kHz～100kHzの高周波のAE測定が効率良く行えることがわかった。

(2) 測定されたAEイベントは、1つのセンサーでのみ感知された80kHz程度のものが多かったが、2～3個のセンサーで同時に感知された15kHz程度のものもしばしば見られた。AEセンサーはほぼ1m間隔で設置しているから、今回の測定では、80kHz程度のAEであれば1m以内、15kHz程度のAEであれば2～3mの範囲で発生したものであることがわかった。

(3) 空洞上部の掘削時には、AEが空洞周辺岩盤の2箇所で集中的に発生し、その位置は埋設ひずみ計によって圧縮ひずみの増大が測定された2箇所に概ね対応した。埋設ひずみ計の測定については、別の小規模なトンネル型空洞の測定でも同様の結果を得ている。今回、埋設ひずみ計だけでなく、さらにAEの発生頻度の分布でも同様の傾向が見られたことは、空洞掘削に伴う周辺岩盤内の応力の増大が、空洞規模にかかわらず岩盤中に2本程度の柱を形成するような形で支えられる傾向のあることを示していると思われる。この原因としては、節理などの不連続面の噛み合いや岩盤剛性の不均質性が強く関与していると推測される。

(4) 以上のように、空洞掘削に伴う原位置でのAE測定が可能であること、また、AE測定を行うことにより従来とは異なる観点から岩盤挙動を検討することができ新たな知見の得られることもわかった。同様の測定は、他の地下発電所空洞でもこの測定と並行して実施しており、今後、他地点の測定結果をも加えて岩盤挙動を総合的に検討するとともに、AEを空洞の安定性評価により一層有効に利用できるよう、さらに研究を進めていきたいと考えている。

謝辞：本研究の実施に際しては、中部電力㈱土木建築部河合熙久部長ならびに関係各位の多大な御支援と御協力を得た。ここに記して深謝の意を表する次第である。

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) 石田毅・金川忠・矢田篤・田中正弘：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。
- 4) Sauer, G.・谷本親伯：応力測定と掘削による応力再配分過程(ザウアー博士NATM講演会報告)，トンネルと地下，第12巻4号，pp. 57-64，1981。