

(財)電力中央研究所 ○石田 毅・金川 忠・佐々木 俊二
東京電力(株) 浦沢 義彦

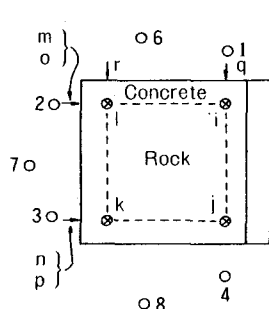
1. 緒言

地下発電所をはじめとする大規模地下空洞の安定性の確保は重要な課題である。しかし、岩盤内に空洞を掘削すると、断層・節理などの不連続面の影響や、掘削による応力集中の影響等により、空洞周辺に亀裂や崩落が生じる場合も少なくない。筆者らは、このような現象の予測法としてAE(Acoustic Emission)に注目した。AEは岩盤の破壊に先立って発生することが知られている。原位置でAE測定を行い、微小破壊の発生箇所と破壊規模を明らかにし、その箇所に適切な補強工を施せば、岩盤の破壊を事前に防止できる。今回、原位置岩盤せん断試験時のAE測定を行い、この手法の岩盤空洞への適用性を検討したので報告する。

2. 原位置岩盤せん断試験の概要

原位置岩盤せん断試験には、ブロックせん断試験とロックせん断試験があるが、今回AEを測定したのは岩盤を直接せん断するロックせん断試験である。調査横坑から試験用チャンバーを切り広げ、無発破で50cm×50cm×高さ20cmの岩盤を切り出して整形し、その周囲を厚さ10cmの鉄筋コンクリートで被覆して供試図1. 原位置岩盤せん断試験の供試体とAEセンサー

体とした。岩盤は電研式分類CH級の粘板岩で、せん断荷重の載荷方向は片理面(傾斜角60°～70°)の走向方向にほぼ一致している。供試体には一定直応力 $\sigma = 1.96 \text{ MPa}$ (20 kgf/cm²)を載荷し、せん断荷重は水平より17°上方から、10分間を単位として5分間で78.4 kN (8 tonf) 荷重上昇、5分間静止を繰り返す。岩盤が破壊するまで増加させた。この試験法は土木学会の指針に従ったもの



0 20 40 cm

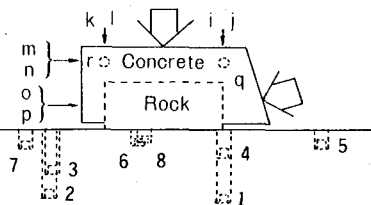


図1. 原位置岩盤せん断試験の供試体とAEセンサー(1, 2, ..., 8), 変位計(i, j, ..., p)の配置

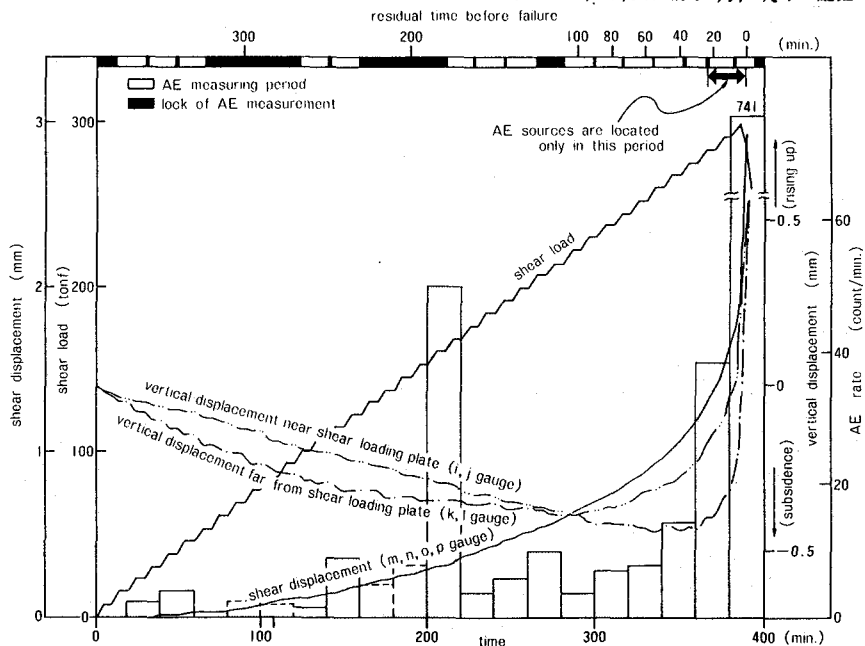


図2. せん断荷重, せん断変位, 鉛直変位とAE発生頻度の経時変化

である。供試体とAEセンサー・変位計の配置を図1に示す。変位計はせん断方向4成分(m, n, o, p)、垂直方向4成分(i, j, k, l)、側方方向2成分(q, r)の計10成分測定し、荷重はロードセルで検出した。AEセンサーは、厚み方向

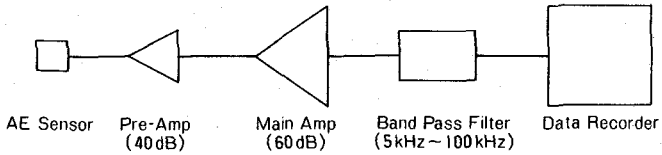


図3. AE測定系統図

に分極したφ30 mm、厚さ10 mm、共振周波数67 kHzのPZT素子を、φ40 mmの真ちゅう製容器の底面に貼りつけ、容器内をシリコンゴムで充填して防水型とした。AEセンサーの設置は、供試体周辺にφ66 mm、深さ数cm~30 cm

のボーリング孔を削孔し、センサーの底面がボーリング孔底面に接触するように挿入し、そのまま孔口までモルタルで埋設した。

3. AE発生頻度と荷重・変位の関係

試験には約6時間40分を要したが、この間の20分毎のAE発生頻度と荷重・変位の関係を図2に示す。AEは、測定帯域を5 kHz~100 kHzとし、図3に示すように、プリアンプとメインアンプで、合計100 dB (10万倍) 増幅し、ダイレクト記録方式でデータレコーダに収録している。AE発生頻度は、測定した波形をデータレコーダで再生して、

これを包絡線検波し、いわゆるイベント計数法でカウントした。図2に示したAE発生頻度は、図1のセンサー2と4で得られた頻度の平均値である。図2上部に示したように、AE測定には、データレコーダのテープの取り替えなどのために若干の欠測時間があり、この間のAE発生頻度は前後から推定した。

AEの発生は試験開始後210分頃に増加するが、その後一旦減少する。しかし、280分頃から再びAE発

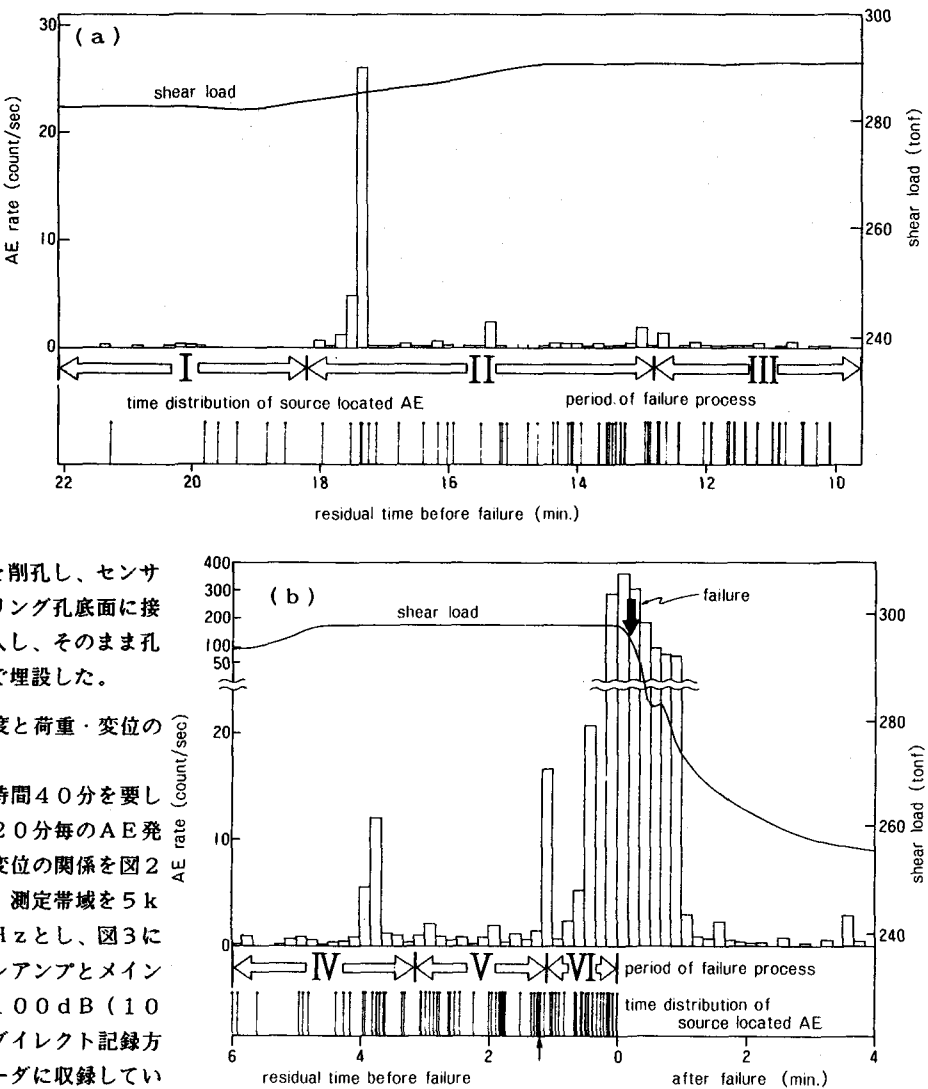


図4. 破壊付近のAE発生状況(破壊約70秒前の矢印は図5のAE)

生頻度が漸増しはじめ、特に340分以降急増し、供試体の最終破壊に至る。供試体の浮き上がりや岩盤の破壊は密接な関係があるとの指摘があるが、AE発生頻度漸増の開始点280分はせん断荷重載荷面側の鉛直変位(i, j)の浮き上がり開始点とほぼ一致し、またAE急増点340分は載荷面から遠い側の鉛直変位(k, l)の浮き上がり開始点にほぼ対応することがわかる。また、340分頃(破壊の約50分前)から急増し始めるAEは、破壊直前には340分以前の100倍近い発生頻度を示す。一方せん断変位は、340分頃からやや増加率を増すもののAEの増加ほど顕著ではなく、最終変位量も340分以前の3倍程度にすぎない。従ってAE発生頻度は、岩盤の破壊と密接な関係を有し、またその変化は変位計による測定よりも破壊に関して鋭敏な変化を示すと言える。

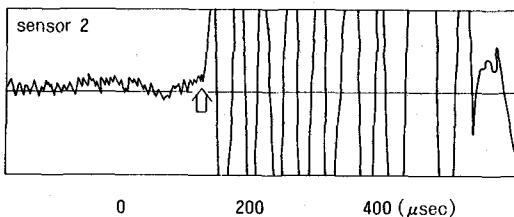


図5. AE波形の1例(破壊前約70秒前に発生。白矢印は縦波初動到達時刻の読み取り位置)

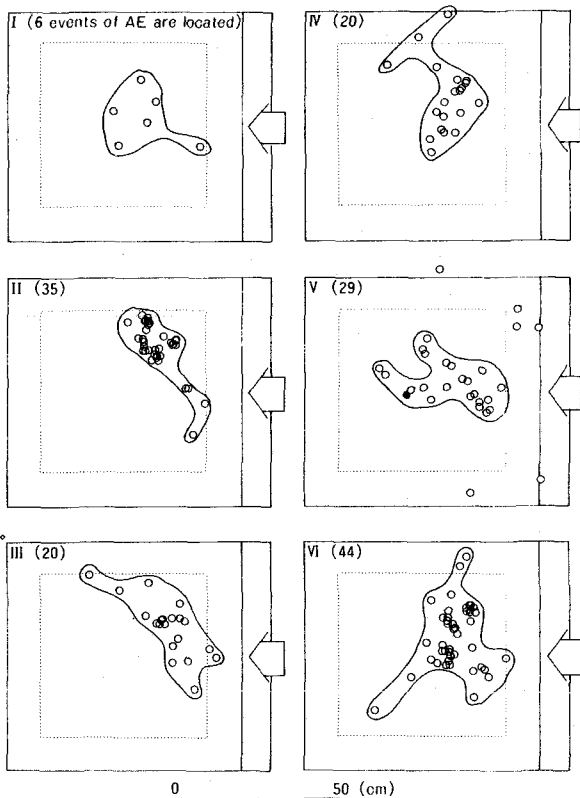


図6. I～VI期の震源分布(V期の●印は、図5のAEの震源)

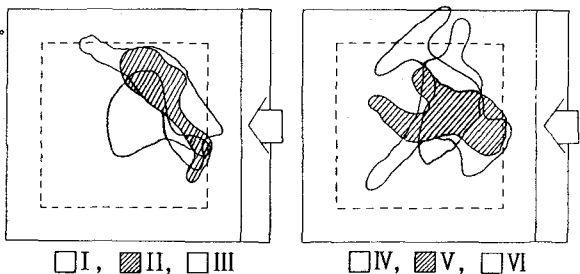


図7. I～VI期の震源域

4. AEの震源決定による破壊過程の検討

AEにより空洞の安定性を監視する場合、AEの発生位置をも明らかにできれば、その有用性は飛躍的に増大する。そこで今回の実験では、図2上部に示すようにAEの発生が激しくなる破壊前22分間を対象に、AEの震源決定を行った。この間の10秒間毎のAE発生頻度と震源決定したAEの時間的分布をせん断荷重とともに図4(a)(b)に示す。(a)と(b)の間には、テープ交換のために3分余りの欠測時間がある。

AEの震源は、各センサーへのAE波の到着時間差から決定する。このためには、多数のセンサーで同時に縦波の初動を読み取る必要がある。図5に、AE波の縦波初動読み取りの例を示す。今回の実験のAEセンサーの配置では、鉛直方向の震源決定精度が低い。そこで震源はすべてせん断予想面上にあると仮定し、2次元の震源決定を行った。このようにして決定した154個のAEの震源分布を図4に示した破壊過程の時間的区分I～VI毎に図6に示す。各図には、その期の震源域を実線で囲んで示した。震源域の時間的変化を調べるため、I～III期とIV～VI期の震源域を重ね合わせると図7のようになる。

供試体の破壊は、載荷方式から考えてせん断荷重載荷面直下すなわち図の右側の破壊から始まり、徐々に左側へ進展して最終的なせん断破壊に至ると思われる。図7を見ると、震源域はI～III期には右半分のみに残っているが、IV～VI期には左半分にま

で進展する傾向が伺える。さらに詳しく見れば、Ⅰ期には右半分の中央部で散発していたAEが、Ⅱ・Ⅲ期には右上部を中心に右下部にまで広がる。Ⅳ・Ⅴ期になると、新たにそれぞれ左上部、左中央部にAEの発生が見られ、最終破壊直前1分間のⅥ期には短時間に極めて多数のAEが発生するとともに破壊は左下部にも及び遂に最終破壊に至る。従ってAEの震源分布から見た破壊過程は、従来予想されていた破壊過程と傾向的に矛盾しない。

Ⅰ～Ⅵ期の全震源を示したのが図8である。また図9は、試験終了後供試体ブロックを取り除いて裏返し、せん断面の上下盤を観察して作成したせん断面の等高線図である。図8の右上部にAEの震源の顕著な集中域があるが、これは図9の右上部の+3 cmの凸部にほぼ対応する。また、図10は、せん断試験時の供試体の水平移動状況図であるが、震源決定を行った破壊直前の22分間に、供試体は右回りに回転していることがわかる。従って、供試体は図9の右上部の+3 cmの凸部を中心としてやや回転しながら破壊し、この回転中心で多数のAEが発生したと思われる。このように、AEの震源分布はせん断面の観察結果や供試体の移動状況と一致する結果を与えており、AE測定が岩盤の破壊に関して有用な情報を提供することがわかる。

5. 結論と今後の課題

原位置岩盤せん断試験時のAE測定を行い、AEの発生は岩盤の破壊と密接な関係を有し、せん断変位よりも破壊に関して敏感な予知情報を提供すること、またAEの震源決定結果はせん断面の観察結果や供試体の移動状況と一致することを示した。これらの結果はいずれも原位置でのAE測定が岩盤空洞の安定性監視法として有望であることを示している。実際の適用に際しては、常時には少数のセンサーでAE発生頻度の監視を行い、AE発生頻度が増大し岩盤に破壊の危険性が認められた場合には、専用自動車で現地へ赴き、測定センサーを追加し、リアルタイムで震源決定等の波形処理を行うなどの方法が考えられる。このためには、測定範囲と測定周波数帯域の関係やセンサーの適正な配置法の検討が必要であり、今後測定・解析システムの開発と並行して理論的・実験的に研究を進めていきたいと考えている。

(参考文献) 1) 土木学会岩盤力学委員会第三分科会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針，土木学会，pp. 17～31，1983。 2) 平間邦興ほか：岩盤試験におけるアコースティック・エミッションの適用，大林組技術研究所報，No. 27，pp. 102～106，1983。

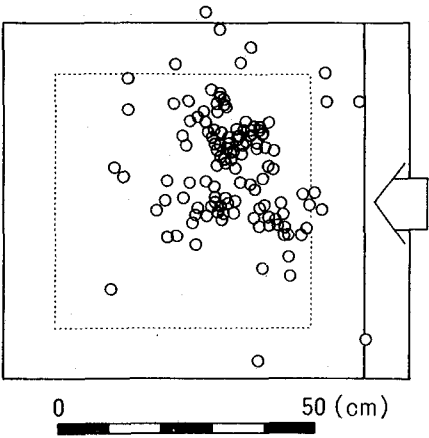


図8. Ⅰ～Ⅵ期の全震源分布

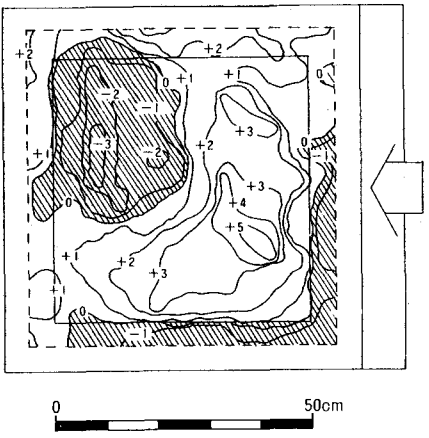


図9. せん断面等高線図（ハッチングはせん断予想面よりも低い部分）

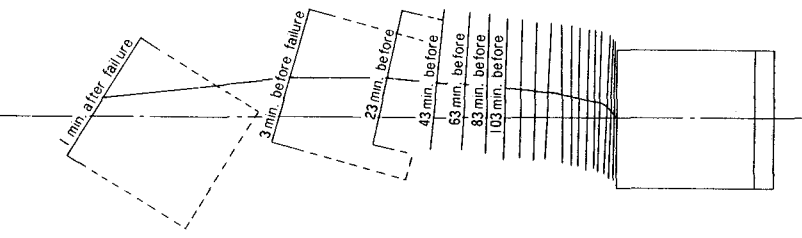


図10. 供試体の水平移動状況図（変位置，回転角を拡大表示）

(47) AE Monitoring during an In-Situ Direct Shear Test
for the Application to a Large Underground Cavern

by Tsuyoshi ISHIDA*, Tadashi KANAGAWA*,
Shunji SASAKI* and Yoshihiko URASAWA**

* Central Research Institute of
Electric Power Industry

** The Tokyo Electric Power Co. Inc.

The demand for deep underground caverns such as power stations and rock tunnels through mountains has been becoming more large. Because hard rock has usually faults, joints and inhomogeneity, discrete failures often occur and sometimes make serious troubles for stability of underground caverns. If the discrete failures are predicted, we can keep caverns stable more easily and securely. Acoustic emission(AE) monitoring seems to be very suitable for such the prediction.

The authors have monitored AE occurrence during an in-situ direct shear test of a rock specimen, so as to develop the predicting method for discrete failures of hard rock around a deep underground cavern. The AE monitoring has shown the following results;

(1) Increasing of AE rate corresponds to rising up onset in vertical displacement of the specimen. Therefore AE occurrence has a close relation with crack propagation in a rock specimen.

(2) AE rate is more sensitive to the failure of a rock specimen than the shear displacement.

(3) The source locations of AE have made clear the failure process of an in-situ direct shear test for the first time. The tendency of the failure process is consistent with the process which is expected by many researchers with theoretical and numerical analyses.

(4) The distribution of AE epicenters agrees with the observation of the shear plane and the movement of the specimen.

All the experimental results show that AE monitoring is suitable for predicting discrete failures of hard rock. For the application to an underground cavern, AE frequency band suitable for measurement and arrangement of AE sensors are remained to be examined. The authors will solve these problems using theoretical and experimental methods and set up the equipments need for better AE monitoring in the near future.