

AEによる岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験

AE MONITORING DURING THE IN-SITU DIRECT SHEAR TEST APPLIED TO AN UNDERGROUND CAVERN

石田 毅*・金川 忠**・佐々木俊二***・浦沢義彦****

By Tsuyoshi ISHIDA, Tadashi KANAGAWA, Shunji SASAKI and Yoshihiko URASAWA

Acoustic Emission (AE) activity was monitored using eight sensors during the in-situ direct shear test of slate, in order to develop the method for predicting the failure of hard rock around a deep underground cavern. AE activity increased rapidly just before the final failure. The distribution of epicenters demonstrated that the failure process in the test block was consistent with the process expected by many researchers. Moreover, the observation of the finally fractured plane showed that AE epicenters clustered in the part of intact rock, but were almost not distributed near the pre-existing joints. These results suggest that AE monitoring is one of good methods for predicting the fracture which newly occurs around an underground cavern.

Keywords : Acoustic Emission (AE), monitoring method, underground cavern, rock fracture, rock mechanics

1. 緒 言

地下発電所をはじめとする大規模地下空洞を岩盤内に掘削する場合、空洞の安定性の確保は重要な課題である。現状では空洞の安定性を監視するため、いくつかの測定断面を設定し、岩盤変位やロックボルト軸力などの変位・荷重を中心とした測定を行うことが多い。また、最近では逆解析法を導入し、測定結果から空洞の安定性を合理的に評価しようとする試みも報告されている^{1),2)}。しかし、岩盤内には断層・節理などの不連続面が存在したり、また岩質が様でない場合が多く、局所的な応力集中が生じやすい。したがって、空洞周辺に亀裂や崩落が発生し、空洞の安定性に重大な支障を生じる場合も少なくない。このような現象の前兆は必ずしも変位や荷重の変化として敏感に現われないため、現状の測定法だけでは十分な予測が困難である。そこで著者らは、Acoustic Emission (AE) 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測定を行うことにより、微小破壊の発生箇所と破壊規模を明らかにできれば、岩盤の破壊を事前に予測することができ、またその箇所に適切な補強工を施せば、岩盤の破壊の防止も可能と思われる。

地下空洞の安定性監視にAEを用いる試みは、Koernerら³⁾によれば1930年代後半にアメリカとカナダで始められたとされ、その後鉱山を中心に数多くの研究がなされ⁴⁾⁻⁶⁾今日に至っている。一方土木関連では、コンクリート構造物への適用を目的とした一連の基礎的研究が報告されている⁷⁾⁻⁹⁾が、岩盤に対しても有望であることが指摘され¹⁰⁾、わが国では大清水トンネルでの山はねに関連した、試験的な測定が報告されている¹¹⁾。また、最近では高レベル放射性廃棄物の地層処分に関連した地下空洞の安定性監視法としても適用が検討されており^{12),13)}、AEの実用的な利用は今後の重要な研究課題と思われる。

そこで著者らは、岩盤せん断試験時のAE測定を行い、室内実験に比較して種々の困難が予想される原位置でのAE測定によって、岩盤の破壊に関する情報をどの程度有効に得ることができるのかを検討した。その結果、原位置でのAE測定により岩盤の微小破壊の発生位置の探査が可能であること、またAEから推定され

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所我孫子研究所立地部地盤研究室主査研究員 (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

** 正会員 (財)電力中央研究所我孫子研究所立地部地盤研究室主任研究員 (同上)

*** 理修 (財)電力中央研究所我孫子研究所耐震構造部耐震研究室主査研究員 (同上)

**** 正会員 工修 東京電力(株)建設部土木調査課副長 (現・富津火力建設所次長)

る岩盤の破壊は変位や荷重の測定結果や破壊面の観察結果とよい一致を示すことなどが明らかとなった。したがって、この方法は実用的な空洞安定性監視法として有望であるとの結論を得たので報告する。なお以下では、AEの発生位置を「震源」、その位置を波動伝播理論によって解析的に決定することを「震源決定」とよび、特に一定の水平面上にAEの発生位置があると仮定して二次元の震源決定を行った場合には、決定された震源を「震央」とよぶことにする。

2. 原位置岩盤せん断試験とAE測定方法の概要

岩盤せん断試験は、岩盤のせん断強度を求める原位置試験法として広く実施されており、試験時のAE測定も2~3報告されている^{14)~16)}。しかし、これらはいずれもAE発生頻度の測定・解析を中心としており、AEの震源決定を行った例はない。

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。地下発電所調査横坑から試験用チャンバーを切り広げ、無発破で幅50 cm×奥行50 cm×高さ20 cmの岩盤試験片4個を切り出して整形し、それぞれの岩盤の周囲を厚さ10 cmの鉄筋コンクリートで被覆して供試体とした。岩盤は電研式分類C_H級の堅硬な粘板岩で、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。各供試体にはそれぞれ一定直応力 $\sigma=5$ (0.49), 10(0.98), 20(1.96), 30(2.94) kgf/cm² (MPa)のもとで、せん断荷重を水平より17°上方から加え、10分間を単位として、5分間で8 tf (78.4 kN) 荷重上昇、5分間静止を繰り返し、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¹⁷⁾に従ったものである。これら4個の供試体のせん断試験の結果得られた岩盤のせん断強度 τ を、モール・クーロン式($\tau=c+\sigma\cdot\tan\phi$)で近似すれば、粘着力 $c=32.2$ kgf/cm² (3.16 MPa)、内部摩擦角 $\phi=56.4^\circ$ であった。また、ボーリングコアに対する一軸圧縮試験の結果得られた強度は載荷方向と片理面のなす角度により異なるが、900~1600 kgf/cm² (90~160 MPa)の範囲にあった。なお、以下に述べるAE測定を行ったのは直応力 $\sigma=20$ kgf/cm² (1.96 MPa)のもとでの試験である。

AE測定を行った供試体のAEセンサーと変位計の配置をFig.1に示す。変位はせん断方向を4点(m, n, o, p)、垂直方向を4点(i, j, k, l)、せん断方向と直角な水平方向を2点(q, r)の計10点で測定し、垂直およびせん断荷重はロードセルで測定した。AEセンサーは、厚み方向に分極した $\phi 30$ mm、厚さ10 mm、

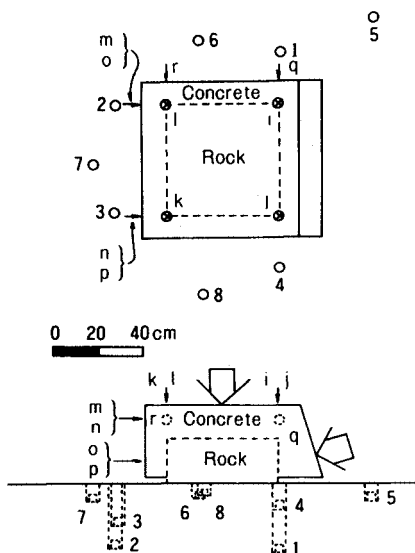


Fig.1 Test block of the in-situ direct shear test and locations of AE sensors (1, 2, ..., 8) and displacement gauges (i, j, \dots, r). The large arrows show the normal and shear loads applied to the test block.

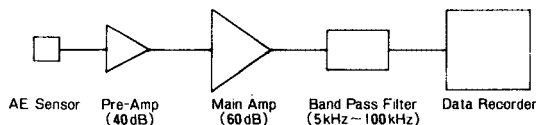


Fig.2 Block diagram of the AE measuring system.

共振周波数67 kHzのPZT素子を、 $\phi 40$ mmの真ちゅう製容器の底面に貼り付け、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 $\phi 66$ 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。AEは、Fig.2に示すように、プレアンプとメインアンプで合計100 dB増幅した後、雑音除去のため5 kHz~100 kHzのバンドパスフィルターを介してデータレコーダに収録した。データレコーダはチャンネル数21のもの1台を使用し、21チャンネル中16チャンネルをAE測定に用いたが、測定機器の不足のため、同一性能の機器を用いてFig.2に示す測定系で測定を行ったのはFig.1の8個のセンサーについての測定のみである。そこで以下では、この8個のセンサーによる測定データについてのみ議論する。なお、データ収録はテープ速度76.2 cm/sの直接記録方式(DR)で行い、この状態でのデータレコーダの周波数応答特性は200 Hz~120 kHz ± 3 dBである。

3. 震源決定法とAEセンサーの指向性に関する基礎検討

(1) 震源決定法

測定したAEから震源を求めるには、各AEセンサーへの縦波の到達時間差、縦波と横波の到達時間差(P-S時間差)などのデータを用いる方法や、多成分センサーを用い波形3成分を合成して波動の到来方向を求める方法などが考えられる。今回の測定では、上下方向1成分のAEセンサーを使用し、測定波形から横波の到達時間を読み取ることが困難であったため、各センサーへの縦波の到達時間差のみから震源を求めることとした。今回の実験では、岩盤がせん断予定面(Fig.1の地表面の延長線上)近傍で破壊されることが明らかのため、AEの震源はすべてこの水平面上に分布するものと仮定し、二次元の震源決定すなわち震央の決定を行った。この場合、縦波の伝播速度を既知とすれば、未知数はAEの震央の二次元座標と発生時刻の3個となる。したがって、少なくとも3個のAEセンサーのデータが必要であり、4個以上のデータが得られた場合には最小二乗法を適用する^{8),18)}。

(2) AEセンサーの指向性に関する基礎検討

測定に用いたAEセンサーは、厚み方向の振動に受感するPZT素子であるが、現場では埋設作業の容易さから受感方向が鉛直になるよう設置した。このため、

AEのセンサーの受感方向に対する入射角が大きな角度となり、たとえばせん断予定面の中央でAEが発生した場合、各センサーへの波動の入射角は60°~85°となる。この場合、初動の読み取りに大きな誤差が生じる可能性があるため、簡単な室内実験により、センサーの指向性を検討した。

この実験には、一辺30cmの稲田花こう岩の立方体試料を用いた。Fig.3に示すように、立方体の一面の中心に受振子として原位置測定に用いたのと同じAEセンサーをアロンアルファで接着した。この受振点からその反対側の面の中心まで、立方体の3面の中央に測線を引き、この測線上に9点の発振点を設けた。発振源としては、沢田らが原位置の小区間弾性波速度測定用に開発した、ステンレスパイプの先端に圧電素子を組み込んだ棒状の発振子¹⁹⁾を用い、80kHz、200Vの方形波を入力した。Fig.3の各発振点には、受振点までの距離と受振子の受感方向に対する波動の入射角を示した。各発振点で発振した場合の受振波形をFig.4に示す。発振子の押し付け状態により受振波形の振幅が変化するため、初動が読み取れるよう適当に受振波の増幅度を調節している。この図から、入射角が大きくなるにつれ初動は不明瞭となることがわかる。矢印の位置で初動を読み取り走時を求めると、Fig.5に示すように4.7km/sの伝播速度となり、Fig.4で読み取った初動がいずれも縦波の初動であることが確認できる。入射角が90°の場合、理論

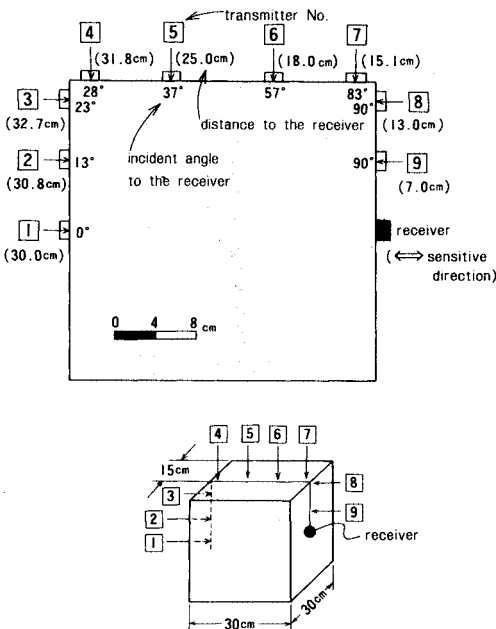


Fig. 3 Locations of transmitters and a receiver in the experiment on the directivity of an AE sensor.

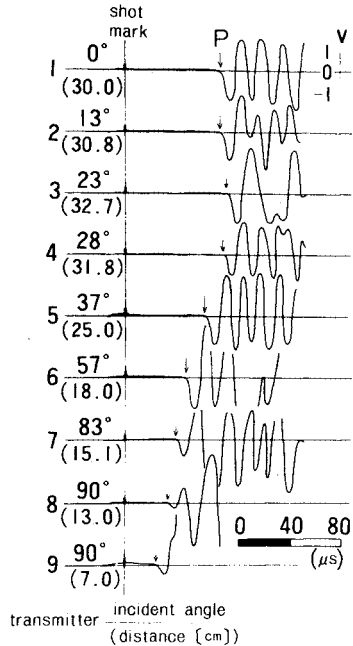


Fig. 4 Received waveforms with the change of incident angles.

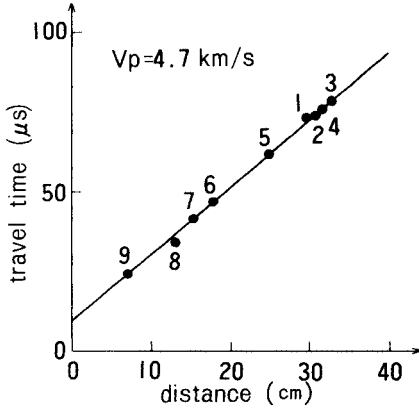


Fig. 5 Relation between travel time and distance in the experiment on directivity of an AE sensor.

的には縦波の検出は不可能であるが、この実験結果からみる限り、今回使用したセンサーは90°の場合でも実際には感度はゼロではなく、増幅が適当であれば縦波の初動の読み取りが可能であることがわかる。

以上のことから、今回の原位置 AE 測定のように、センサーの受感方向に対する入射角が大きい場合でも、縦波初動の読み取りが可能であることがわかる。しかし上述の検討から明らかなように、より正確な測定のためには入射角は小さいことが望ましく、今後の測定にはこの点についての配慮が必要と思われる。

4. AE 発生頻度と震源決定結果

(1) AE 発生頻度と荷重・変位の関係

AE 発生頻度は、データレコーダで測定した波形を再生し、これを 20 dB 増幅した後包絡線検波して、いわゆるイベント計数法でカウントした。採用したしきい値は 0.6 V であるが、増幅度としきい値が変わればカウント数も増減するため、得られた AE 発生数の絶対値はあまり意味をもたない。しかし、相対的な変化は AE 活動度を示す重要な指標となる。AE 測定を行った原位置せん断試験には、約 6 時間 40 分を要したが、この間の 20 分ごとの AE 発生頻度と荷重および変位の関係を Fig. 6 に示す。同図に示した AE 発生頻度は、Fig. 1 のセンサー 2 と 4 で得られた頻度の平均値である。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、Fig. 6 上部に示した若干の欠測時間がある。したがって、この間の AE 発生頻度は不明であるが、ゼロではないと思われるので、図中では前後から適当に推定し破線の棒グラフとして示した。

Fig. 6 に示したように、AE の発生は試験開始後 210 分頃に増加するが、その後いったん減少する。しかし、280 分頃から再び AE 発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¹⁶⁾が、AE 発生頻度漸増の開始点 280 分はせん断荷

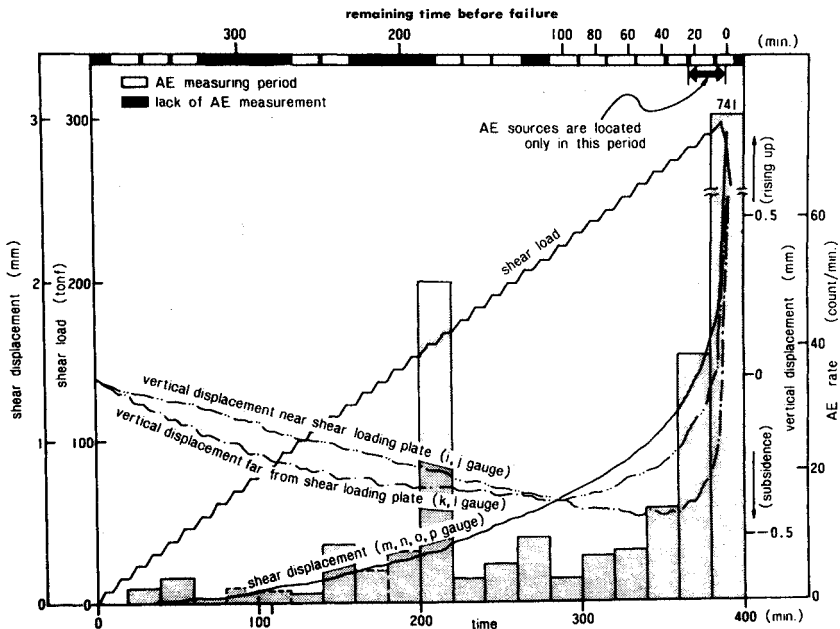


Fig. 6 Variations of AE occurrence rate, shear load, shear displacement and vertical displacements during the experiment.

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は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。したがって 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いえる。

(2) 震源決定のための AE 波形処理

測定した AE からその発生位置を求めるには、多数のセンサーで同時に縦波の初動の到達時間を読み取る必要がある。そこで、このような AE が頻繁に発生した破壊前 22 分間を対象に、AE の震源決定を行った。この間の 10 秒間ごとの 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 Fig. 7 に示す。Fig. 7 の上下 2 つの図の間には、テープ交換のために 3 分余りの欠測時間がある。AE の発生頻度の算出方法は、

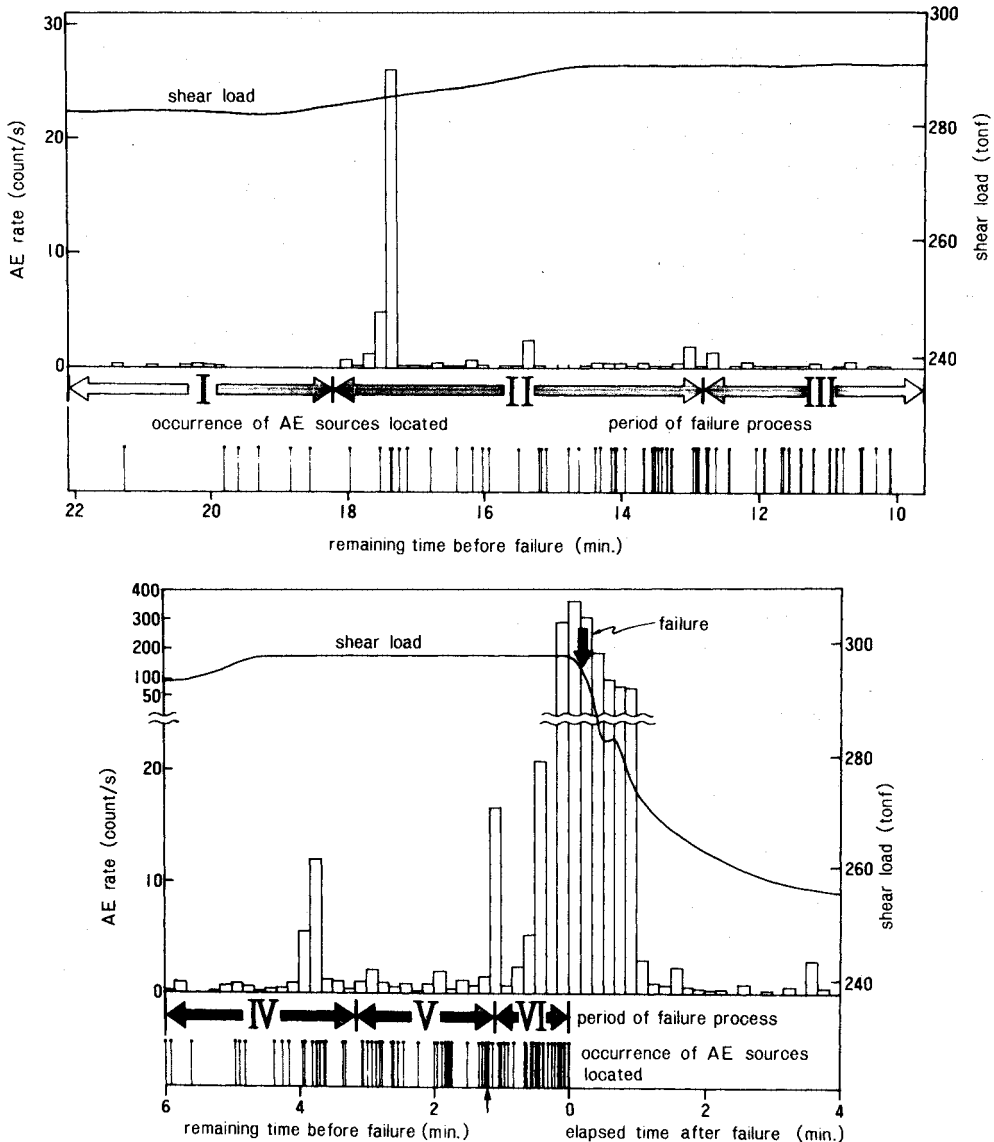


Fig. 7 AE rate and shear load from 22 min preceding failure to 4 min following failure. Periods of failure process and occurrence of AE sources located are also shown. (The arrow at about 70 s preceding failure indicates the AE event whose waveforms are shown in Fig. 8.)

前節と同じである。

震源決定に用いる AE 波形の出力は、データレコーダの再生速度を記録時の 1/64 (記録時 76.2 cm/s, 再生時 1.19 cm/s) に低下させ、これを時間刻み 50 μ s (実時間にして 0.78 μ s) で AD 変換して可視記録とした。使用した AD 変換機は、分解能 10 ビット、1 チャンネル当たり記憶容量 1024 ワードの能力で、16 チャンネルの同時記録が可能である。AD 変換した波形をブラウン管上で観察し、複数チャンネルで初動の読み取りが可能と思われた 403 個の AE をひとまず可視記録として紙上に出力した。測定波形の一例を Fig. 8 に示す。これは、Fig. 7 に矢印で示す破壊約 1 分 10 秒前に発生した AE であり、黒矢印の位置を縦波初動の到達時間とした。周波数は、センサー No.1 の初動到達後の波形で約 17 kHz, No.2 の初動到達後の第 2 波で約 36 kHz であり、センサーの PZT 素子の共振周波数 67 kHz の 1/4~1/2 の周波数の波動が支配的である。すでに述べたように、AE の震源はすべてせん断予定面上にあると仮定し、二次元の震源決定すなわち震央の決定を行った。この場合、最低 3 個のセンサーで同時に初動が読み取れば震央は決定できるが、精度向上のため、紙上に出力した 403 個

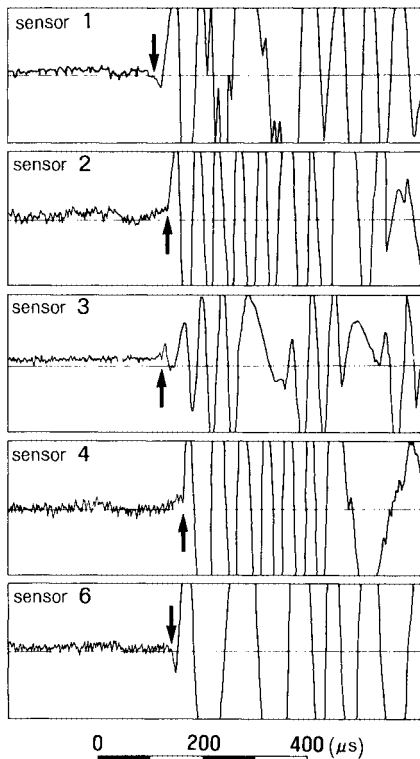


Fig. 8 Waveforms of an AE event. This event occurs at about 70 s preceding failure. Arrows show the initial wave motions of P wave propagated.

の AE イベントのうち、4 個以上のセンサーで初動の立ち上がりが見え、154 個の AE の震央についてのみ以下で議論する。なお、縦波の伝播速度は、ボーリングコアでは 4.7~5.4 km/s, 当試験位置周辺の弾性波試験においては 5.0 km/s 前後の値を示したため、震央決定の計算には、5.0 km/s の値を用いた。

(3) 震央分布からみた破壊の進展

上述のようにして決定した AE の震央分布を Fig. 7 に示した破壊過程の時間的区分 I~VI ごとに Fig. 9 に示す。各図には、その期の震央域を実線で囲んで示した。Fig. 9 をみると、震央域は I~III 期には右半分に偏在しているが、IV~VI 期には左半分にまで広がる傾向が伺える。さらに詳しくみれば、I 期には右半分の中央部に散発していた 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 の発生がみられ、最終破壊直前 1 分間の VI 期には短時間にきわめて多数の AE が発生するとともに破壊は左下部にも及びついに最終破壊に至る。

供試体の破壊は、載荷方式から考えてせん断荷重荷面直下すなわち Fig. 9 の供試体の右側から引張破壊が始まり、徐々に破壊が左側へ進展するとともに、破壊モードも引張破壊からせん断破壊に変化し、最終的な破壊に

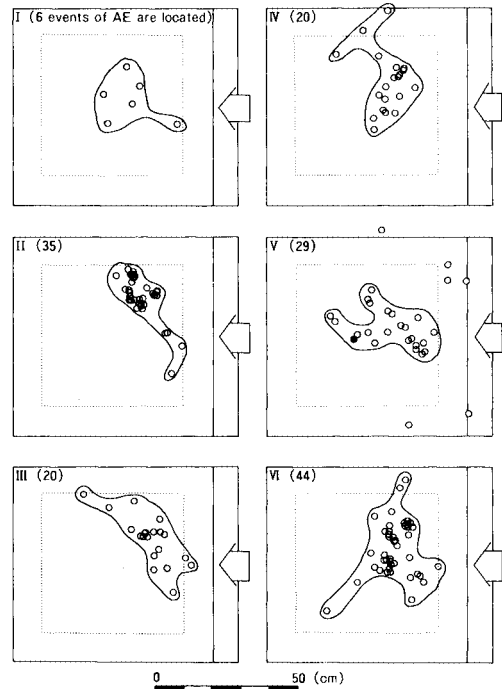


Fig. 9 Distribution of epicenters in each period from I to VI. (The closed circle in V period indicates the epicenter of the AE event shown in Fig. 8.)

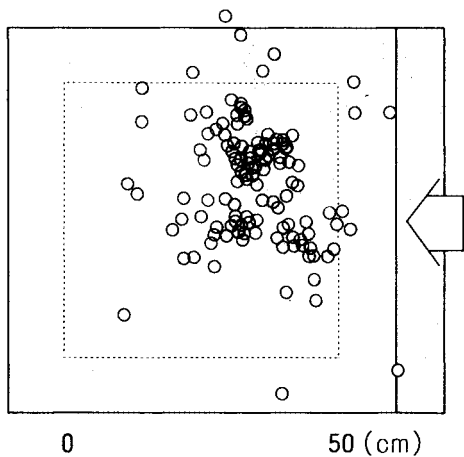


Fig. 10 Distribution of all epicenters from I to VI period.

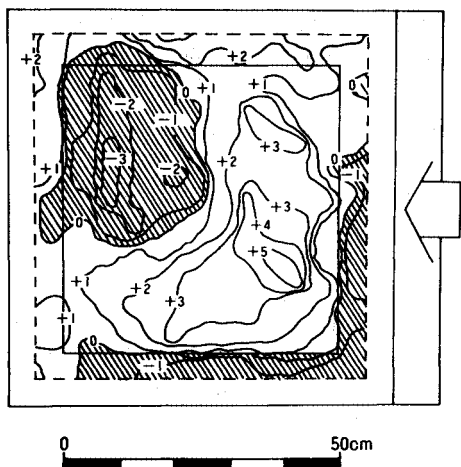


Fig. 11 Contour of the fractured plane by the shear test. Numerals indicate the height in "cm". Hatched parts show concavities lower than the expected shear plane.

至ると思われる。このような破壊の進展の傾向は従来から予想され、数値解析的に示した研究²⁰⁾も見受けられる。今回の測定からは、個々のAEの発生原因となった微小破壊のモードまでは明らかにできなかった。しかし、震央分布からみた破壊は、Fig. 9の供試体の右側から左側へと逐次的に進展しており、従来から予想されていた破壊過程と傾向的に矛盾しない。

I～VI期の全震央を示したのがFig. 10である。また、Fig. 11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下盤の等高線図であり、斜線部はせん断予定面より低い凹部を示す。Fig. 10の右上部にAEの震央の顕著な集中域があるが、これはFig. 11の右上部の+3 cmの凸部に

ほぼ対応する。Fig. 12はせん断面下盤のスケッチであり、実線や破線は節理面の走行を、角度はその水平面からの傾斜角を示し、斜線を施した部分はシームを示す。AEの震央分布は、これらの節理・シームに挟まれた堅硬ち密な岩盤の部分とよい一致を示すことがわかる。なお参考のため、Photo 1に裏返した供試体ブロックのせん断面を示す。他の図はすべてせん断面の下盤側を示しているのに対し、Photo 1は上盤側であるため、他の図と凹凸およびせん断方向に対する左右が逆転している。また、Fig. 13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。以上のことからFig. 12の節理とシームに挟まれた堅硬ち密な岩石の部分は、最終破壊の約20分前から多数のAEを発生しながら破壊し、供試体はこの破壊により形成されたFig. 11右上部の+3 cmの凸部を中心としてやや回転し

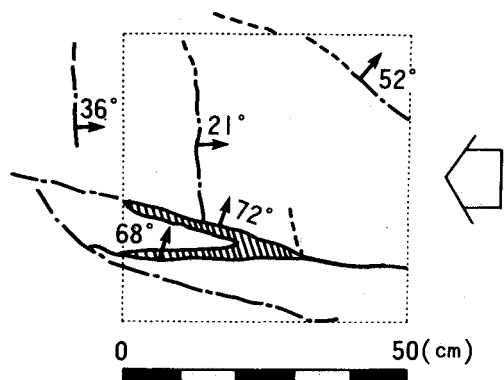


Fig. 12 Sketch of the fractured plane. Solid, chain and broken lines show strikes of joints and arrows with numerals show their dip angles. A hatched part shows a loosening seam.



Photo 1 Fractured plane of the test block turned over. This photo shows the upper fractured plane, but all of the other figures show the lower fractured plane. Therefore, concave and convex, right and left with the horizontally loading direction are converse between this photo and the other figures.

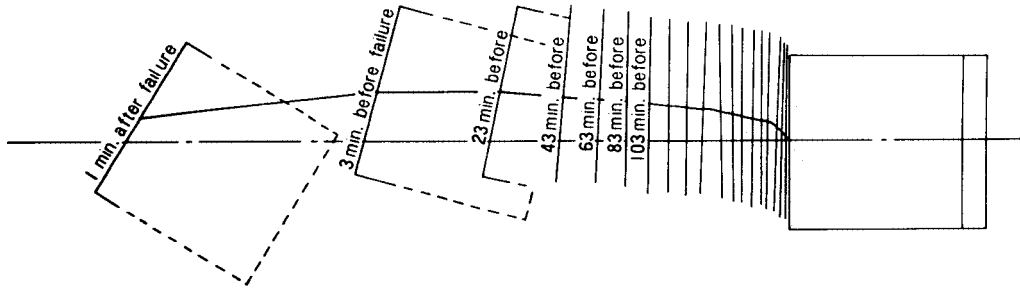


Fig. 13 Horizontal movement of the test block with time. The movement of front side of the test block is shown by drawn solid lines. (Displacement and rotational angle are exaggerated.)

ながら移動し、最終破壊に至ったと思われる。また、AEの震源が分布しない部分は、既存の節理やシームの存在のため、測定可能な規模の大きなAEが発生しなかったものと思われる。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、得られた結果は以下のとおりである。

(1) AEの震源決定を行い、原位置岩盤せん断試験時の岩盤の破壊過程を実測により明らかにした。また、その結果はせん断面の観察結果や供試体の移動状況とよい一致を示した。

(2) AEの発生頻度は岩盤の最終破壊の約50分前から顕著な増加を示した。また、このAE発生頻度の増加は変位計による変位量の増加より顕著であった。したがって、AE発生頻度は岩盤の破壊に関して有効な予知情報を与えると思われる。

(3) AE波の初動の読み取り精度向上のためには、センサーの受感方向に対するAE波の入射角が小さくなるようセンサーを設置すべきである。

(4) 空洞周辺岩盤の安定性監視にAE測定を適用し、岩盤の破壊領域・深度を把握して適切な補強対策を行うためには、たとえば次のような方法が効率的と思われる。(a) 常時には少数のセンサーでAE発生頻度の監視を行う。(b) 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、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。

(5) 以上の検討の結果、原位置でのAE測定は岩盤空洞の安定性監視法として有望であると思われる。今後測定・解析システムの開発とともに、測定範囲と測定周波数帯域の関係や実際に即したセンサーの適正な配置法の検討など、実用化に向けた研究を理論的・実験的に

進めていきたいと考えている。

謝 辞：現場実験に際しては、東京電力建設部土木調査課 蔵持慈男課長（現・広野火力建設所副所長）をはじめとする関係各位に多大なご援助を賜った。また、電力中央研究所 日比野敏地盤研究室専門役、沢田義博耐震研究室長、木方建造主査研究員、矢島 浩、海江田秀志担当研究員には多大なご支援をいただき、特に新孝一担当研究員には長時間にわたる現場測定に関してご協力をいただいた。ここに記して深謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 桜井春輔・武内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法，土木学会論文報告集，第337号，pp.137~145，1983年9月。
- 2) 桜井春輔・進士正人：マイクロコンピュータによる地下空洞掘削時の安定性の評価，土木学会論文集，第358号，pp.37~46，1985年6月。
- 3) Koerner, R. M., McCabe, W. M. and Lord, A. E. Jr. : Overview of acoustic emission monitoring of rock structures, Rock Mechanics, Vol.14, pp.27~35, 1981.
- 4) 平松良雄ほか：別子鉱山の山鳴り現象に関する研究，日本鉱業会誌，第91巻，pp.513~519，1975年。
- 5) 後藤隆司ほか：山鳴り震源位置の特徴について，日本鉱業会誌，第98巻，pp.585~590，1982年。
- 6) Atkins, A. R. et al. : The design and use of a small and a micro-seismic network for studying the mechanism of rock fracture in deep level mines, Proc. 3rd Conf. on AE/ME in Geol. Stru. and Mat., The Pennsylvania State University, pp.211~222, 1981.
- 7) 丹羽義次・小林昭一・大津政康：コンクリート構造物のアコースティック・エミッション特性に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第261号，pp.101~112，1977年5月。
- 8) 丹羽義次・小林昭一・大津政康：アコースティック・エミッションによる破壊源探査，土木学会論文報告集，第276号，pp.135~147，1978年8月。
- 9) 大津政康：AE波動の周波数領域での解析と発生機構に

- 関する考察, 土木学会論文報告集, 第335号, pp.155~164, 1983年7月.
- 10) 小林昭一: アコースティック・エミッションの岩の力学への応用, 材料, 第27巻, pp.118~128, 1978年.
 - 11) 丹羽義次ほか: 岩はねに伴うアコースティック・エミッションに関する考察, 第10回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集, pp.46~49, 1976年.
 - 12) Majer, E. L., McEvilly, T. V. and King, M. S. : Monitoring an underground repository with modern seismological methods, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 517~527, 1981.
 - 13) Majer, E. L. and McEvilly, T. V. : Acoustic emission and wave propagation monitoring at the spent fuel test : Climax, Nevada, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, pp. 215~226, 1985.
 - 14) 若本 清・五味義雄: 岩盤の破壊音に関する基礎的検討, 電力中央研究所技術研究所報告, No. 67087, 1968年.
 - 15) 杉本文男ほか: AE計測法による岩盤のせん断強度の評価, 応用地質, 第27巻, pp.1~12, 1986年.
 - 16) 平間邦興・丸山 誠・桑原 徹: 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年.
 - 17) 土木学会岩盤力学委員会第3分科会: 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針(解説と設計への適用), 土木学会, pp.17~31, 1983年.
 - 18) 大津政康: コンクリート材料におけるアコースティック・エミッション特性とその発生機構に関する基礎的研究, 京都大学工学部学位請求論文, pp.68~70, 1982年8月.
 - 19) 沢田義博ほか: 小区間の原位置弾性波速度測定について, 電力土木, No. 186, pp. 1~6, 1983年9月.
 - 20) 伊藤 洋ほか: 原位置試験のシミュレーションによる基礎岩盤安定解析手法の検討, 電力中央研究所研究報告, No. 377004, 1978年.

(1986. 4. 12・受付)