

(63) 平面ひずみ 2 軸試験時の A E 観測による 円形断面空洞破壊機構の検討

山口大学地域共同研究開発センター 正会員 ○ 石田 毅

ミネソタ大学土木鉱物工学科

Joseph F. Labuz, Ketan Shah, Shongtao Dai

DISCUSSION ON FAILURE MECHANISM OF CIRCULAR UNDERGROUND CHAMBER BY AE SOURCE CHARACTERIZATION IN A PLANE STRAIN BIAXIAL TEST

Tsuyoshi Ishida

Yamaguchi University

Joseph F. Labuz, Ketan Shah, Shongtao Dai

University of Minnesota

Abstract

Experimental methods to study failure mechanism of an underground chamber have not been well developed, while various numerical methods for the theoretical studies have been proposed. It is probably due to lack of suitable apparatus and observation methods of the failure. Using plane strain apparatus invented by Labuz, we carried out a loading experiment of 100 mm wide, 100 mm long and 40 mm thick Berea sandstone with a 14 mm diameter hole modeling a circular chamber. Failure mechanism around the hole was investigated by source characterization of AE (Acoustic Emission). Before the peak load, AE sources clustered in the two parts along a final fracture plane and its conjugate plane, and they were caused by shear rather than tensile fractures. In and after the peak load, AE sources clustered in the part along the final fracture plane, and most of them were caused by tensile fracture. These findings demonstrated that the experiment should give us important knowledge to assess stability of an underground chamber.

1. はじめに

地下発電所をはじめとする地下空洞の建設に際しては、有限要素法などの数値解析を行い、空洞の安定性や補強設計の妥当性を検討するのが一般的である。しかし、これに対応する実験的な検討手法は必ずしも十分開発されていないように思われる。安定解析は、空洞の代表的断面の平面ひずみ問題として解析されることが多いが、もし代表的断面の平面ひずみ状態を模擬した室内実験を行い、供試体内部の破壊の進展を観測することができれば、空洞安定問題の研究に役立つと思われる。米国ミネソタ大学の Labuz¹⁾ は、供試体に平面ひずみ状態を実現できる 2 軸载荷試験装置を開発した。そこで筆者は、直方体の砂岩供試体に空洞を模擬した円孔を穿ち、これを平面ひずみ状態で破壊し、破壊の進展と破壊のモードを AE で測定・解析する実験を提案し、ミネソタ大学で共同研究を行った。その結果、これらの方法による実験と観測は、さまざまな条件下における空洞安定問題の研究手法として、また特に設計された空洞の安定性の評価や崩壊メカニズムの把握が厳しく求められる高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究手法として有用と思われるので報告する。

2. 実験の方法

(1) 試験装置、供試体と载荷方法

実験に使用した試験装置は、Labuz¹⁾ が考案し、MTS Systems Corporation が製作・販売権を有している軟岩試験用平面ひずみ 2 軸試験装置 (Plane Strain Apparatus for Testing Soft Rocks) である。この装置は

通常の3軸試験用の圧力セルに似ており、図1に示すように、直方体供試体のz方向には油圧を、y方向には載荷試験機による固体圧を作用させる。この試験機の特徴のひとつは、x方向の載荷方式にあり、圧力セルの内側に設置した載荷板と供試体の間にくさびを打ち込み、3~4MPaの圧力を作用させた状態で供試体を固定する。この状態で実験を開始すると、他の2方向からの載荷に伴って供試体はx方向へ膨張しようとするが、この方向の変位は固定されているため、この方向での平面ひずみ状態が実現されることになる。

供試体は図1に示すように、高さ100mm、幅100mm、厚さ40mmのBerea Sandstoneの直方体に、地下空洞を模擬した直径14mmの円孔をx方向に穿ったものである。円孔の中心は、供試体のyz面の中心に一致している。供試体の2つのxy面には図に示す位置にAEセンサーを設置した。この2つのxy面には、供試体への油の浸入を防ぐため、設置したAEセンサー上から厚さ2.5mm程度のポリウレタンによるコーティングを行った。供試体に対するy方向の鉛直荷重の載荷は、側方変位が一定となるよう制御した。すなわち、2本のLVDTで測定したz方向の供試体の膨張変位の平均値をとり、これが10分間で0.1mm(1.67×10^{-4} mm/s)となるよう載荷試験機による鉛直方向(y方向)の載荷を制御した。z方向の側圧の載荷には油圧を用い、実験中7.5MPaの一定圧に保持した。x方向については、載荷板と供試体の間にくさびを打ち込み、3.7MPaの圧力が供試体に作用していることを確認して実験を開始した。供試体の変形は、鉛直荷重、鉛直変位、z方向の水平変位などで観測し、供試体の円孔まわりの破壊については次に述べるAEのSource Characterizationによることとした。

(2)AEの測定とSource Characterizationの方法

測定器の制約から、AEの測定は8チャンネルしかできないため、図1に●印で示した位置に、計8個センサーを設置し、供試体上部に発生する亀裂だけを測定の対象とした。測定システムの測定周波数帯域は、0.1~2.0MHzであり、0.2~1.2MHzの間でほぼ平坦な特性を有する。A/D変換機へのトリガー信号には、z=0mm面の4個のセンサーのうち、真中に位置するセンサーの信号を用いた。またA/D変換機の記憶容量の制約から、42個のAEイベントを測定するたびに、4秒間の測定不能時間が生じた。

AEのSource Characterizationは、大津²⁾やYoung³⁾と同様、P波初動の振幅値を用いて、破壊面の方向と破壊時の変位を規定するMoment Tensorというテンソル量を求めるものであるが、センサー感度の校正を行う点で従来の方法と異なる⁴⁾。すなわち、センサーを設置しそのまま試験に供しうる状態の供試体の表面でガラス細管を破断させ、その受振信号をラムの理論解と比較して接着

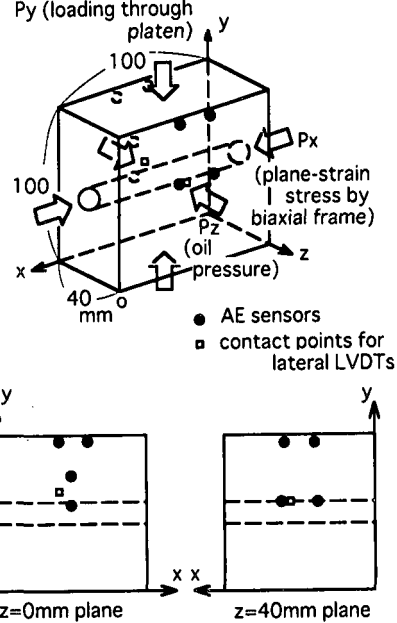


図1. 供試体と載荷方法

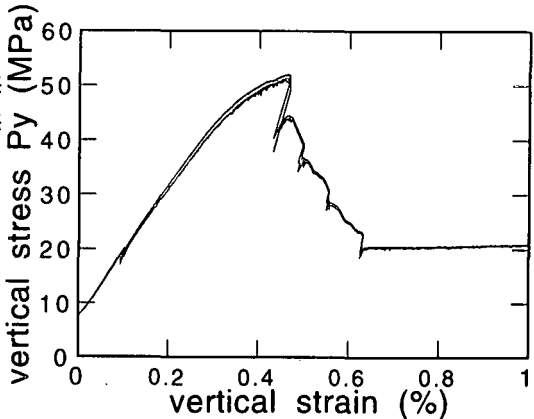


図2. 供試体載荷方向(y方向)の応力とひずみの関係

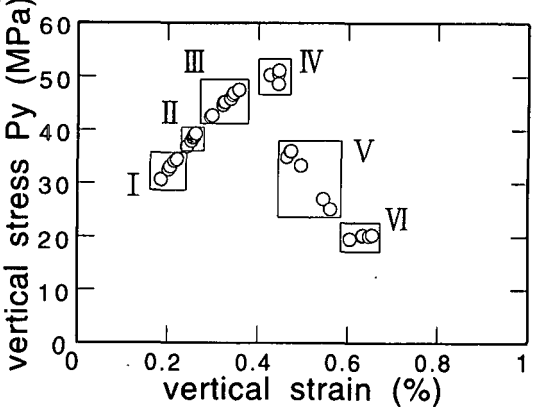


図3. AE発生時の供試体の応力とひずみの状態

剤やセンサーを含む測定感度を各測定チャンネル毎に求めるものである。この方法は、受振した特定の周波数成分に対する校正にすぎないなど、完全な校正法とはいえないが、各測定チャンネルの感度を無条件で同一と仮定する従来の方法に比べて、信頼性が高いと思われる。今回の実験では、8個全部のセンサーでP波初動が明瞭に読み取れるAEイベントを選び、各センサーへのP波初動の到達時間差から、AEの震源位置を決定した。次に、波形のトレース上で読み取れるP波初動の振幅値に上述の各センサー毎の校正値を乗じ、それらの値からMoment Tensorを求めた。そして、このMoment Tensorの固有ベクトルから破壊面の方向と破壊時の変位の方向を、固有値からその破壊がせん断によるか引張

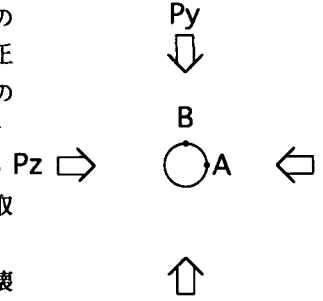


図4. 円孔まわりの応力作用点

によるかの識別を行った。このせん断と引張の識別は、Moment Tensorの固有値を用いて次の方法により行った。詳細は文献2)を参照されたいが、固有値から算出されたAEのせん断破壊の成分をS、引張破壊の成分をTとすると、 $S+T=1.0$ の関係があり、純粹せん断の場合には $S=1.0, T=0$ 、純粹引張の場合には $S=0, T=1.0$ となる。実際のAEにはせん断成分と引張成分が混在しているため、 $S=0.50$ を基準とし、 $S>0.50$ のときせん断亀裂、 $S<0.50$ のとき引張亀裂と判断した。

3. 実験結果

(1) 供試体の応力状態と表面亀裂

図2に鉛直方向(y方向)の応力とひずみの関係を示す。2本の曲線は、供試体の上部と下部にそれぞれ1個ずつ設置したロードセルの測定値を示しており、両者はよい一致を示していることがわかる。鉛直応力は両者の平均で52.6MPaの最大値を示し、その後段階的に低下している。

図3は、縦軸に載荷圧を、横軸にひずみを取り、Source Characterizationを行ったAEが発生した時の応力とひずみをプロットしたものである。I～VIは、後で示すAE測定結果の時間的な区分を示す。

図4に示すように、供試体に穿った円孔の壁面上の点Aおよび点Bの接線方向応力をそれぞれ σ_A および σ_B 、供試体の端面でy方向およびz方向に作用する圧力を P_y および P_z とすると、弾性論により $\sigma_A=3P_y-P_z$ 、 $\sigma_B=3P_z-P_y$ の関係が得られる。実験中、 P_z は7.5MPa一定で保持した。図3より最初に震源決定されたAEは、載荷圧 P_y が26.6MPaのとき発生しているから、このとき円孔周りの点Aの応力 σ_A は、供試体の1軸圧縮強度45MPaの1.6倍の72.3MPaに達し、一方点Bの応力 σ_B は、4.1MPaの引張応力状態となっていたことがわかる。

図5は、実験終了後供試体で観察された表面亀裂を、yz及びxy断面図上に示したものである。破壊面の形状は、x軸に沿うどのyz面においてもほぼ同一であり、平面ひずみ状態が実現されていたことが伺える。

(2) AE測定結果

図6は、図3のI～VIの各期の震源分布と破壊モードを、yz及びxy断面図上に示したものである。十分な精度で決定された震源だけを議論の対象とするため、図にはAEセンサーで3次的に囲まれた領域内に決定された震源だけを示した。この領域は、図5で細い実線で示した長方形の領域に対応する。

さて図6で、×印はせん断破壊を示し、矢印は引張破壊を示す。せん断破壊の場合、破壊面の直方向とせん断変位の方向は直交する。×印はこれらの

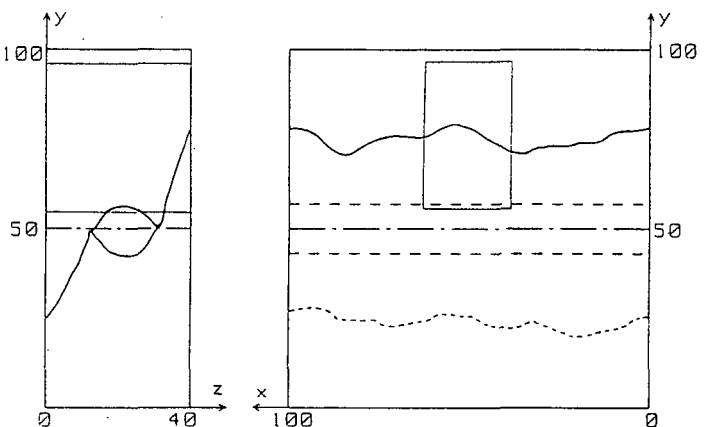


図5. 供試体で観察された表面亀裂

2つの方向を示すが、どちらがどちらであるかは手法の制約から決定できない。引張破壊の場合、破壊面の直方向とせん断変位の方向は一致し、矢印はその方向を示す。なおすでに述べたように、実際のAEにはせん断成分Sと引張成分Tが混在しており、これを $S=0.50$ を境にせん断破壊と引張破壊に区分する単純化を経て、図6を得ている。

図6を各期毎に見ると、まずⅠ期には、メカニズムの得られた6個のAEはいずれも円孔の上部で発生しており、そのうち引張とせん断はそれぞれ半数の3個ずつである。この時期、円孔上端部の接線方向応力(図4の点Bの応力 σ_B)は4MPa以上の引張応力となっている。引張亀裂がこの円孔上端部から円孔の上部に進展しているなら、yz断面図上で変位がz方向の引張破壊が多く発生すると予想されるが、このような破壊は6個のAEのうち1個だけである。Ⅱ期には、6個のAEのうち5個が円孔の右上部で発生している。このうち、3個は引張破壊でいずれも変位はz方向である。最大応力点に近づいたⅢ期には、メカニズムの得られた12個のAEのうち、4個が円孔上部のやや左側、8個が円孔の右上部で発生している。この12個のうち、10個がせん断破壊で、引張破壊は2個にすぎない。応力一ひずみ線上の最大応力点近傍に対応するⅣ期には、円孔の右上部で4個のAEが発生し、そのメカニズムはいずれも引張である。最大応力点を越えたⅤ期には、7個のAEのうち6個が円孔の右上部で発生し、メカニズムは7個すべてが引張である。残留強度に入ったⅥ期には、7個のAEすべてが円孔の右上部で発生し、そのうち5個が引張、2個がせん

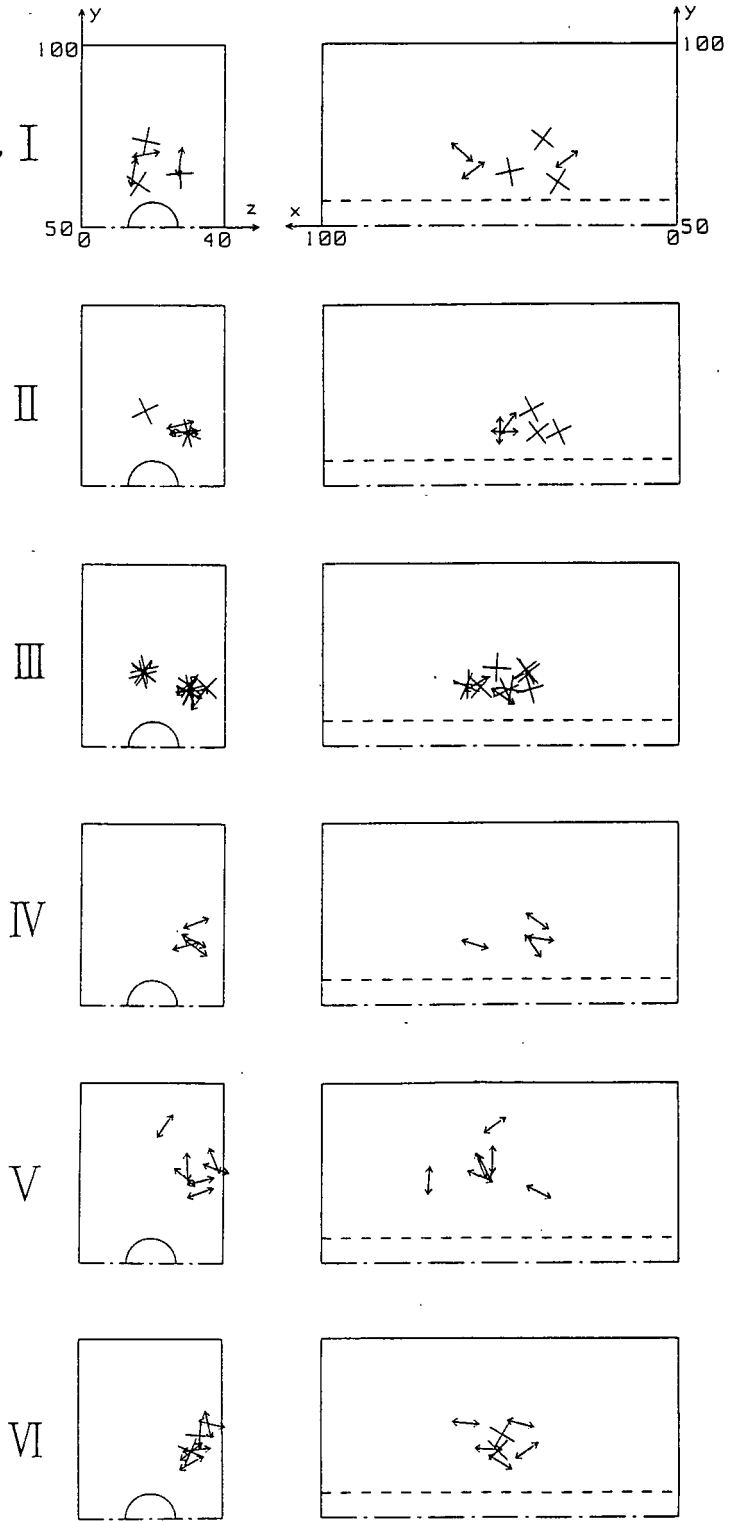


図6. Ⅰ～Ⅵ期のAE震源分布と破壊モード(×はせん断破壊でせん断変位の方向を示す。矢印は引張破壊で引張変位の方向を示す。)

断のメカニズムを示している。

震源位置について、yz断面図に注目してⅠ～Ⅳ期を通して見ると、Ⅰ期には円孔の上部に分布していたAE震源が、Ⅱ～Ⅲ期には円孔上部のやや左側と円孔の右上部の2箇所に集中しているのがわかる。ところが、応力が最大に近づいたⅣ期及びそれ以降のⅤ～Ⅵ期には、円孔上部のやや左側にはAEの発生がほとんど見られず、図6の表面亀裂にほぼ一致する円孔の右上部に集中してAEの発生が見られるようになる。これは、Ⅰ期には集中性のなかったAEが、Ⅱ～Ⅲ期にはこの試験で実際に発生した亀裂方向とこれに共役な方向の2方向に集中し、さらに応力が最大に近づいたⅣ期以降にはこの2方向の片方に集中して最終的な供試体の破壊に至ったと見ることができる。

メカニズムについて見ると、Ⅰ期Ⅱ期には引張とせん断が相半ばしているが、Ⅲ期にはせん断が卓越し、応力が最大に近づいたⅣ期及びそれ以降のⅤ～Ⅵ期には、圧倒的に引張が卓越する。これは主破壊が生じる以前の微小破壊の蓄積時期にはせん断破壊が比較的多いが、主破壊の進展時には引張破壊が卓越したと見ることができる。

4. まとめ

直方体の砂岩供試体に空洞を模擬した円孔を穿ち、これを平面ひずみ状態で破壊し、破壊の進展と破壊のモードをAEで測定・解析する実験を行った。この結果、次のことが明らかとなった。

- (1) AEのSource Characterizationから見る限り、円形空洞周辺の破壊は、応力が引張強度あるいは圧縮強度に到達した円孔の壁面の点から順次亀裂が進展すると言う単純な破壊の進展ではない。
- (2) 震源位置から見ると、最初円孔の上部に分布していた微小破壊が、応力の増大とともに試験後実際に観察された亀裂方向とこれに共役な方向の2つの方向に集中し、さらに応力が最大に近づくとこの2方向の片方に集中し、最終的な供試体の破壊に至ったと思われる。
- (3) メカニズムについては、主破壊が生じる以前の微小破壊の蓄積時期には比較的せん断破壊が多く見られたが、主破壊の進展時には引張破壊が卓越したといえる。

上述の結果は、今回の実験に供した岩石の物性と応力条件のもとで得られた結果にすぎない。また円孔周辺の破壊に、境界条件すなわち供試体表面の影響が及んでいる可能性も否定できない。従って、この結果が円形空洞の破壊に対してどこまで一般化できるかは現状では明確でない。しかし、平面ひずみ2軸試験機とAEのSource Characterizationを組合せた本実験が、空洞周辺岩盤の破壊の研究手段として有用であることは明らかであり、この種の実験的研究によって空洞安定問題に関する新たな知見が得られる可能性は大きいと思われる。特に、設計された空洞の安定性の評価や空洞の崩壊メカニズムの把握が厳しく求められる高レベル放射性廃棄物の地層処分において、このような実験的な研究手法は、今後の研究のひとつの方向として重要と思われる。

謝辞：今回の共同研究は、山口大学水田義明教授とミネソタ大学 S.L.Crouch教授のご支援により実現した。またミネソタ大学に留学中の清水建設(株)征矢雅宏氏と(株)大林組天野悟氏には、さまざまなご支援を得た。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) Labuz, J.F.: (manuscript in preparation). 2) Ohtsu, M.: Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: Application to in situ hydrofracturing test, J. Geophys. Res., Vol.96, No.B4, pp.6211-6221, 1991. 3) Young, P.R.: Seismic methods applied to rock mechanics, ISRM News Journal, Vol.1, No.3, pp.4-18, 1993. 4) Shah, K.: Ph. D Thesis in University of Minnesota (in preparation).