

静的破碎剤を用いた円筒岩石の破壊実験

Failure Mechanisms of Hollow Rock Cylinder due to Expansive Demolition Agent

福田耕二^{*}・森 清隆^{**}・平田篤夫^{***}・尾原祐三^{****}

FUKUDA Koji, MORI Kiyotaka, HIRATA Atsuo and OBARA Yuzo

^{*}修(工) 応用地質(株)九州支店(〒811-1302 福岡市南区井尻 2-21-36)^{**}熊本大学学生 大学院自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)^{***}正会員 工博 崇城大学教授 工学部環境建設工学科(〒860-0082 熊本市池田 4-22-1)^{****}正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

The hollow rock cylinders of andesite were tested under uniform inner pressure due to expansive demolition agent in the center hole without outer pressure. The pressure distribution in the center hole and the stress distribution on the outer surface of the specimen were observed during from the beginning of failure to the whole fracture under tensile stress field. At the same time, the measurement of acoustic emission and the visualization of failure within the specimen by the X-ray CT scanner were performed. Based on these results, failure mechanism of rocks under tensile stress field was discussed.

Key Words: Rock, Expansive demolition agent, Failure, Acoustic emission, X-ray CT

1. はじめに

静的破碎剤を用いた破碎技術は火薬類や重機による破碎技術とは異なり、作業時に騒音・振動・粉塵が少なく、穿孔作業と静的破碎剤の孔内への注入作業のみで破碎が完了する簡便さを有している。このため、今後の都市部におけるコンクリート構造物や岩盤の破碎においては、施工中の騒音・振動などの環境を考慮すると、静的破碎剤を用いた施工が増加すると考えられる。

静的破碎剤を用いた場合のコンクリートや岩盤の破碎機構としては、孔内に注入された破碎剤の膨張によって孔内に内圧が発生し、これにより内部に引張亀裂が生成され、巨視的破壊が実現されると説明されている¹⁾。しかし、コンクリートや岩盤が巨視的破壊に至るまでに内部で発生している現象を分析した例はほとんどなく、破碎機構の詳細な分析に至っているとは言い難い。

また、静的破碎剤を注入した円孔周辺は引張応力場であり、巨視的破壊に至るまでに内部で発生する微小破壊のほとんどは引張破壊であると予想される。しかし、岩盤やコンクリートは内部に鉱物や骨材などを含んで複雑な構造をしているため、内部で発生する微小破壊のモードは明らかではない。このように、引張応力場での破壊の発生や進展などの破壊機構も十分に解明されていないのが現状である。

そこで本論文では、静的破碎剤を用いた円筒岩石の破壊実験を実施し、引張応力場における破壊の初生から巨視的破壊に至るまでの孔内の圧力分布、供試体外周部の応力分

布を測定する共に、AE 計測および X 線 CT スキャナーによる非破壊検査を行い、これらの結果を総合して静的破碎剤を用いた場合の岩石の破壊機構を検討した。

2. 円筒岩石の破壊実験の概要

2.1 供試体

試験に用いた供試体は熊本県産の安山岩であり、図-1 に示すように、直径 130mm、高さ 130mm の円柱供試体である。供試体には静的破碎剤を注入するための直径 31mm の円孔を軸方向に穿孔している。なお、円孔の位置は発生する破壊を制御するために円形断面内で偏心させている。また、X 線 CT 撮影の制約のために、通常の実験に比較して供試体の外径を小さくしている。供試体の弾性波速度はどの方向においてもほぼ 4.8km/s であり、供試体は等方均質体とみなすことができる²⁾。後の AE 波形解析においては弾性波速度としてこの値を用いた。供試体の 1 軸圧縮試験および圧裂試験により、ヤング率 30GPa、ポアソン比 0.25、1 軸圧縮強度 129MPa、引張強度 10MPa が得られている。

供試体には図-2 に示すように、AE センサーを 14 個およびロゼットゲージを 10 枚設置した。AE センサーは、供試体外周部に最も近い円孔周辺付近から AE が多数発生すると予想されることから、その位置で AE が発生したとき最も感度が良い配置とした。また、ロゼットゲージは、供試体外周部の応力を決定するために用いた。なお、供試体には図-2 に示すように座標軸を定めている。

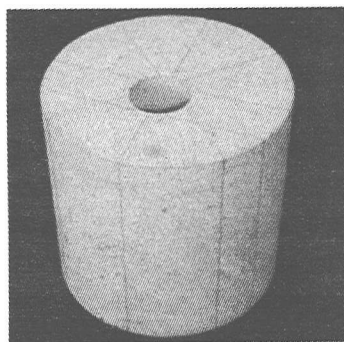


図-1 供試体

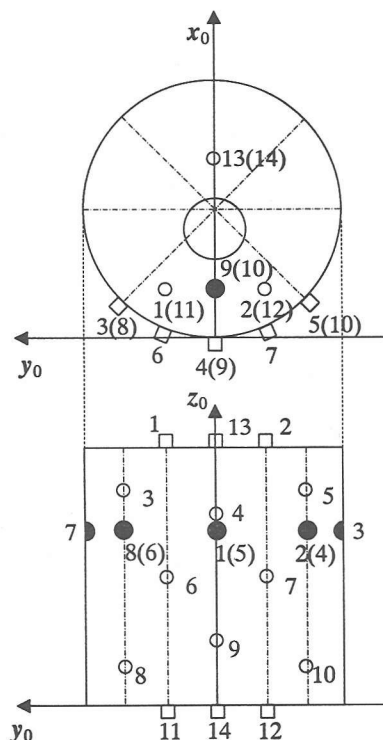
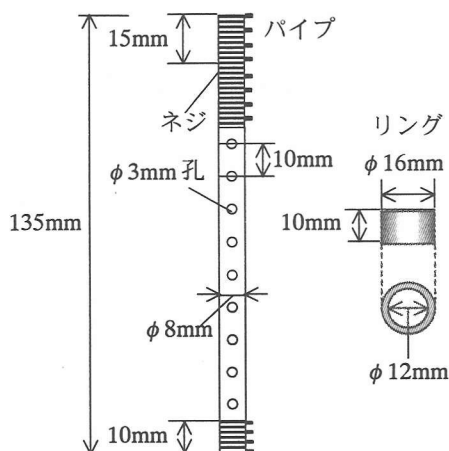


図-2 AE センサー（白丸）および
ロゼットゲージ（黒丸）の配置
() は裏側にも配置したことを示す

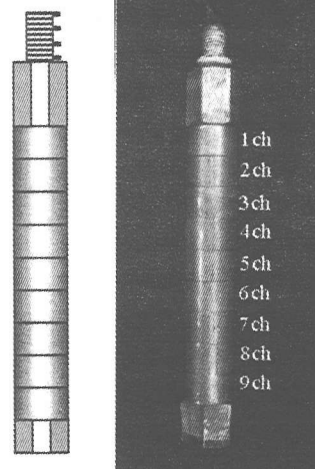
2.2 静的破碎剤

静的破碎剤の成分は、酸化カルシウム (CaO) を主成分とする無機化合物であり、強アルカリ性 ($\text{pH}12\sim13$) である。これに水を加えると酸化カルシウムが水和反応し、微細なコロイド状の水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を生成する。水酸化カルシウムは時間の経過とともに異方性の六角板状結晶へと成長し、無拘束状態のもとで体積は約3倍となる。したがって、拘束状態のもとでは、水和反応によって生成する結晶が相互に押し合うこととなり、拘束壁への膨張圧が発生する。この圧力によってコンクリートや岩石が破碎される。なお、膨張圧の発生機構の詳細については副田らの報告を参考されたい³⁾。

本試験では静的破碎剤として小野田セメント（株）製のプライスター（B-200、冬用）を使用し、水：静的破碎剤の重量比は3：10とした。

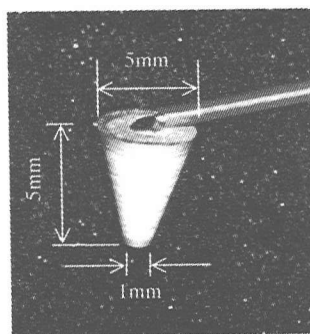


(a) 部品図

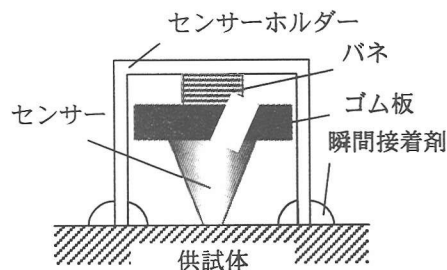


(b) 組立図

図-3 多チャンネル圧力センサー



(a) PZT 圧電素子



(b) AE センサーの設置

図-4 AE センサー

2.3 圧力センサー

静的破碎剤の膨張圧、すなわち、供試体の円孔壁面に作用する圧力（内圧）を測定する装置は種々開発されているが^{4)・6)}、本研究では圧力を深さに応じて測定するために、多チャンネル圧力センサーを開発した。センサーは図-3(a)に示すように、真鍮製のパイプと真鍮製のリングより成る。リングの内壁の円周方向にひずみゲージを貼付し、ひずみの値はパイプに穿たれた小孔を通したリード線によって出力される。高さ1cmのリングは9つあり、それぞれ独立して計測が可能である。したがって、9cmの幅の圧力分布を1cmごとに9点で測定可能である。リング外周部からの圧力に対するリングの円周方向ひずみは校正されており、測定されたひずみは圧力に変換される。圧力センサーは外周部から水などが入らないように全体に接着剤（共和電業製 EC-30）を塗布して、完全防水構造とした。組み立てた圧力センサーを図-3(b)に示す。

2.4 AE センサー

AE センサーを示すと図-4(a)のようであり、先端の直径が1mm、上面の直径が5mm、高さが5mmのPZT圧電素子を用いた⁷⁾。ノイズ除去の加工を施したAEセンサーを図-4(b)に示すように「コ」の字型のセンサーホルダーの中に入れ、瞬間接着剤で供試体に取り付けた。なお、バネからの振動を抑制するためにセンサーとバネの間に硬質ゴムを挟んでいる。AEセンサーにより受信された信号はブリアンプにより40dBの増幅率で増幅され、MISTRAS 2001（日本フィジカルアコースティック製）内臓のA/D変換器によりデジタル信号に変換されてコンピュータ内のメモリへ記録される。

2.5 試験方法

まず、ロゼッタゲージを添付し、つぎにAEセンサーを設置した後、パルス発生器を用いて供試体に取り付けられたセンサーの感度がほぼ同じになるように調整し、トリガーレベルを40dBに設定した。

つぎに、圧力センサーを供試体の円孔内に挿入した後、水と混合した静的破砕剤を円孔内に充填した。静的破砕剤が硬化し、膨張圧が発生したことを確認した後、AE、内圧およびひずみの測定を開始した。また、X線CT撮影は異なる供試体を用いて実施した。なお、X線CTの原理および装置については参考文献11)を参照されたい。

3. 実験結果と考察

3.1 内圧、AE イベント、円周方向応力

3つの供試体を用いて破壊実験を実施した。供試体 No.1、No.2 ではAE計測を行い、供試体 No.3 では実験中にX線CT撮影を行った。なお、X線CT撮影の際には、装置の都合上AEおよびひずみ測定は実施しなかった。

まず、No.1における内圧・時間・AEイベント累積曲線を図-5に示す。内圧は深さによって異なっているが、時間の経過と共に漸増しながら最大内圧に達している。最大内圧を示したときの孔内の内圧分布を示すと図-6のようである。内圧は深さによって異なっており、深さ80cmで最小、下部で最大を示している。これは、静的破砕剤の充填が様でなかったためと考えられる。

AEイベントに注目すると、計測開始後約2時間で破壊がわずかに増加している点が見られるが、その後は時間の経過と共にほぼ一定の割合で破壊が発生し、巨視的破壊直前に急激に増加している。実験中に観測されたAEイベントは91個であった。

つぎに、各供試体における内圧・時間曲線を示すと図-7のようである。それぞれの供試体における計測開始から巨視的破壊までの時間 T_{max} および最大内圧 P_{max} を付表に示している。内圧は深さによって異なっているため、自由面の影響が比較的少ない供試体中央の内圧の平均値として示している。

各供試体での内圧の挙動を比較すると、No.1とNo.2のそれはほぼ同様であり、時間の経過と共に内圧はほぼ線形に増加し、最大内圧の約1/2の内圧から凸の曲線となり、最大内圧に達している。また、No.3では下に凸の曲線のまま増加し、最大内圧に達している。供試体 No.3はX線CT撮影に用いたものである。X線CTスキャナーによる1断面の撮影時間は5分であり、撮影時間中の供試体内部での現象をできるだけ変化させないために、水の重量を調整して巨視的破壊までの時間を他の2つの供試体に比較して長く設定した。

ほぼ同じ時間で最大内圧に達したNo.1とNo.2における最大内圧は46MPaおよび45MPaであり、巨視的破壊に至るまでの時間が長いNo.3では34MPaであった。このように最大内圧は載荷速度に依存しており、円周方向の引張応力の平均値が供試体の引張強度に達したときに供試体は破断するという平均応力説⁷⁾だけではこれらの値は説明できないと考えられる。以下では、それぞれの試験における最大内圧の値および最大内圧に達するまでの時間が異なるため、測定値をその最大値で正規化して検討することとし、主に供試体 No.1の結果について示す。

つぎに、ロゼッタゲージで測定されたひずみからひずみロゼット法⁸⁾により供試体外周部の円周方向応力を求めた。なお、ヤング率およびポアソン比は1軸圧縮試験での値を用いた。得られた円周方向応力・時間曲線を示すと図-8のようである。正を引張とし、円孔内壁から最も近い供試体外周部に貼付したGage1と円孔付近に貼付したGage10の位置での円周方向応力を示している。

Gage1の位置における円周方向応力 σ_θ は、計測開始から時間の経過とともにほぼ線形に増加し、巨視的破壊に至っている。一方、Gage10の位置では巨視的破壊直前までは時間と共に増加しているが、 T/T_{max} が約0.95で最大値を示した後減少し、巨視的破壊に至っている。これは、図-5に示したように、AEイベントが急激に増加を開始する時間とほぼ一致しており、この時点から岩石内部に巨視的破壊面が卓越し始めたと考えられる。また、Gage1の位置での軸方向応力 σ_z および円周方向応力 σ_θ ともに引張応力を示し、せん断応力はほぼ零であるので、供試体は引張応力場にあったことが確認できる。したがって、発生した微小破壊のほとんどは引張破壊であったと考えられ、 $T/T_{max} = 0.95$ の時点から引張破壊面が卓越し始め、これが進展することにより巨視的破壊に至ったと推察される。

つぎに、すべてのGage位置での円周方向応力 σ_θ と内圧の関係を示すと図-9のようである。円孔付近に上下対称に貼付されたGage9およびGage10の位置での応力に注目すると、供試体底部に貼付されたGage10の位置での応力は、上部に貼付されたGage9の位置のそれに比較して大きい。これは、図-6の深さ方向の内圧分布に示したように、供試体上部よりも下部に大きな内圧が作用していたことと調和的である。一方、供試体外周部に貼付したGage1～Gage8の位置での応力に注目すると、円孔の位置を偏心

させているため、円孔に最も近い Gage1 の位置における応力が最も大きい。また、 xz 面に関してほぼ対称に応力が発生しており、供試体中央部における内圧が一様に与えられていることを示している。

Gage10 の位置での応力は、 $P/P_{max} = 0.40$ ($T/T_{max} = 0.25$) を過ぎると他の位置の応力に比較して顕著な非線形挙動を示す。このとき図-5 に示すように、AE イベントが観測され始めている。したがって、 $T/T_{max} = 0.25$ の時点で微小破壊が開始したと考えられる。また、 $P/P_{max} = 0.95$ 以降の挙動に注目すると、Gage9 の位置では、Gage10 の位置のような応力の減少はみられず、巨視的破壊に至っている。したがって、Gage10 の位置に近い供試体下部での破壊が上部よりも先行したと推察される。

つぎに、実験後の供試体 No.1 の破壊の様子を図-10 に示す。供試体 No.1 および No.3 では 3 分割、供試体 No.2 は 4 分割されたが、すべての実験において内圧が最大値を示すと同時に 1 本の巨視的破壊面が円孔壁面と外周との距離が短い領域（ロゼッタゲージが貼付された付近）に発生し、その数分後に残りの巨視的破壊面が同時に形成された。

3.3 AE 発生源の位置標定

実験で得られた AE イベント総数は 91 イベントであった。そのうち、CH13 および CH14（図-2 を参照）でトリガーが作動したものは 8 イベントであった。したがって、発生した AE のほとんどは円孔壁面と外周との距離が短い

領域（図-10 に示す供試体にロゼッタゲージが貼付された付近）で発生していることがわかる。また、AE 発生源の位置標定⁹⁾では、解析誤差が 5mm 以内であった AE イベントを採用し、その数は 22 イベントであった。

AE 発生源の位置標定結果を示すと図-11 のようである。ここでは、付図に示すように、位置標定結果と網掛された巨視的破壊面の位置を比較するために新座標系を定めた。また、図中の太破線が巨視的破壊面である。AE 発生源の分布は巨視的破壊面とは完全に一致しないものの、その近傍に分布している。また、供試体下部の円孔内壁付近に多く分布しており、巨視的破壊面が供試体下部から発生・進展したことを示唆している。これは、供試体下部の内圧が大きかったこと、供試体下部に貼付された Gage10 での位置の円周方向応力が大きく、破壊直前で減少したことと調和的である。このように、AE 発生源の位置標定は破壊の予知や破壊面の位置推定に有効であるといえる。

3.4 微小破壊モード

位置標定された AE イベントに対し、モーメントテンソル解析を行った¹⁰⁾。この結果、破壊

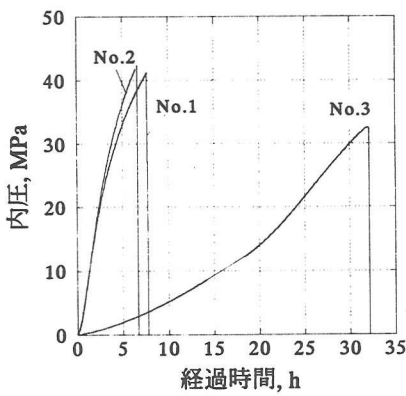


図-7 各供試体における内圧・時間曲線

付表 各供試体における破壊時間と最大内圧

供試体 No.	破壊時間 (h)	最大内圧 (MPa)
1	7.7	45.8
2	6.6	44.8
3	32.1	33.7

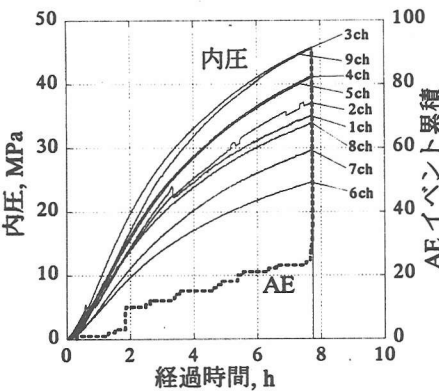


図-5 内圧・時間・AE イベント累積曲線

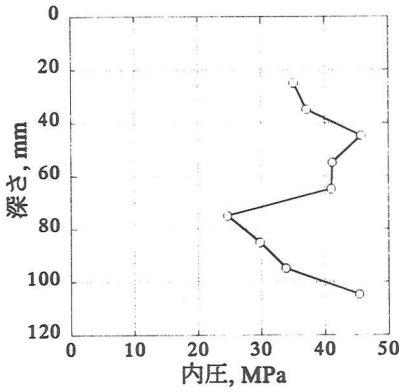


図-6 孔内の内圧分布

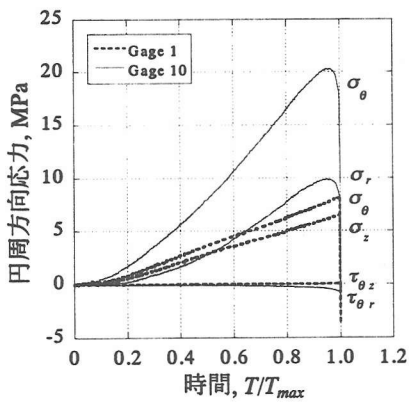


図-8 円周方向応力・時間曲線

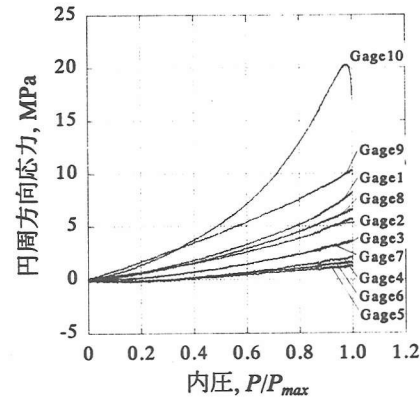


図-9 外周部の円周方向応力

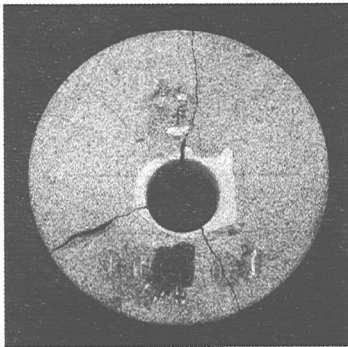
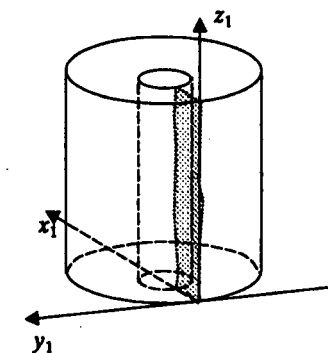
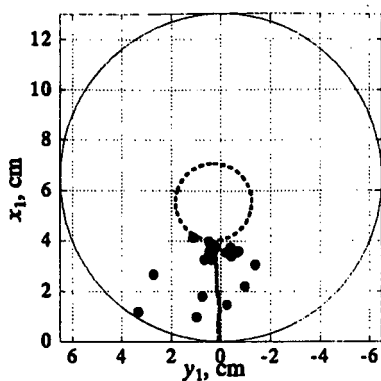


図-10 供試体の破壊の様子



付図 網掛部分は巨視的破壊面

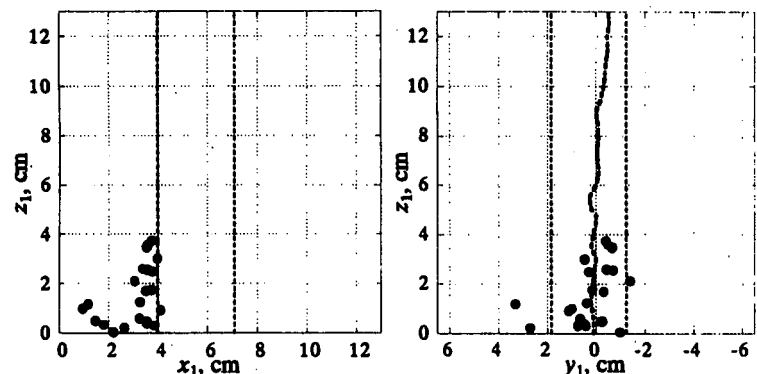


図-11 AE 発生源位置標定結果

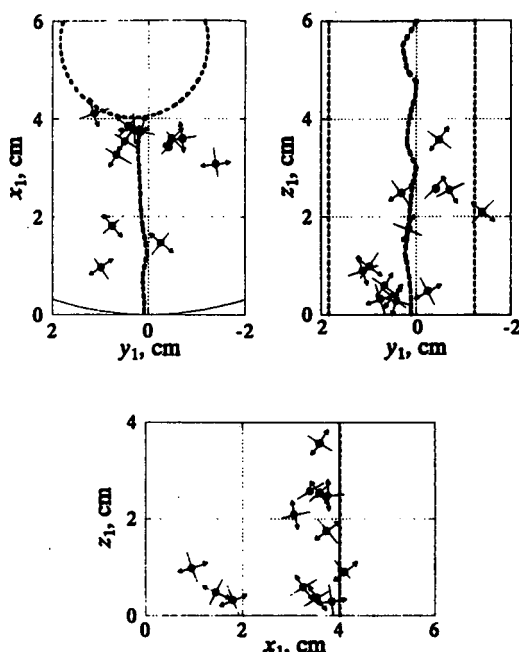


図-12 モーメント・テンソル解析結果

モードおよびクラックの方向が決定できたのは 13 イベントであり、そのうち、引張卓越型が 12 イベント、せん断卓越型が 1 イベントであった。

モーメントテンソル解析結果を示すと図-12 のようであり、AE イベントが集中している領域を拡大して示している。発生位置に描かれた実線のみイベントはせん断卓越型であり、その方向はせん断方向を示す。また、実線と矢印で描かれたイベントは引張卓越型で、実線が微小破壊面、矢印がその開口方向を示す。

引張卓越型 AE イベントの開口方向は巨視的破壊面に垂直ではなく、ランダムである。また、発生位置は巨視的破壊面付近に分布している。これは、鉱物粒子の存在や、強度の不均質性のために、粒界に沿って破壊が発生したためと考えられる。巨視的破壊面が 1 枚の滑らかな平面ではなく凹凸を持ち、微視的には様々な角度の面を有している事実を考慮すると、この結果は合理的である。

内圧を受ける円孔周りの応力場は円周方向にほぼ一様な引張応力場である。実験においては、全 AE イベントの 90% 以上が引張卓越型であった。したがって、一様な引張応力場においては、岩石内部に鉱物粒子や強度不均質性が存在しているとは言え、微小破壊のほとんどが引張卓越型であり、それらが集積して巨視的破壊に至ると考えられる。

本実験では、計測された AE イベントのうち位置標定およびモーメントテンソル解析が可能であったものがそれぞれ約 25% および約 15% であり、その解析率は低い。低い解析率は AE 計測を行う場合においては避けられない事実であり、AE の測定結果だけを用いて全体の破壊機構を

分析することは困難である。したがって、他の計測結果と総合して全体の破壊機構を分析する必要があると考えられる。

4. 破壊機構に関する考察

供試体外周部の Gage1 の貼付位置における円周方向応力の変化を示すと図-13 のようである。図中の破線は、厚肉円筒の理論に基づいて供試体中央の円孔に内圧が作用した場合に供試体外周部の円周方向に発生する応力を示している。理論的には、内圧の増加と共に円周方向応力は線形的に増加するが、測定値が $P/P_{max} = 0.25$ 付近から非線形的な挙動を示していることがわかる。これは岩石内部に発生した微小亀裂が原因と考えられる。

そこで、図-14 に示すようなモデルを用いて上記の非線形挙動を検討する。図-14(a) に示すように円孔壁面に内圧が作用した場合、円孔壁面には円周方向に引張応力 σ_t が発生する。内圧が増加して σ_t が岩石の引張強度に達すると、図-14(b) に示すように円孔壁面に垂直に微小破壊が発生し、壁面近くの σ_t は解放されてその作用領域は減少する。この結果、供試体外周部の円周方向応力は、図中の点線で示した微小破壊先端を通る円孔壁面に内圧が作用した場合と同様となり、図-14(d) に示すように初期の円孔に同じ内圧が作用した場合に発生する引張応力と比較して大きくなる。また、破壊は開口・進展しようとするが、静的破砕剤と岩石の境界は接合されているため、この境界にせん断応力が発生し、破壊の開口・進展は抑制される。さらに内圧

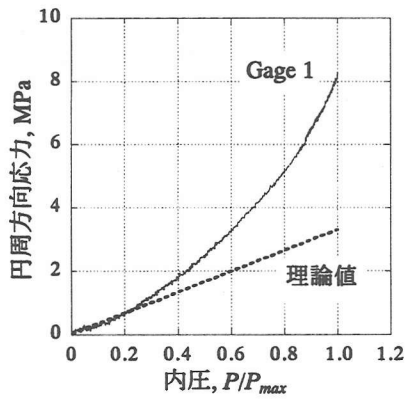


図-13 Gage1 位置での円周方向応力

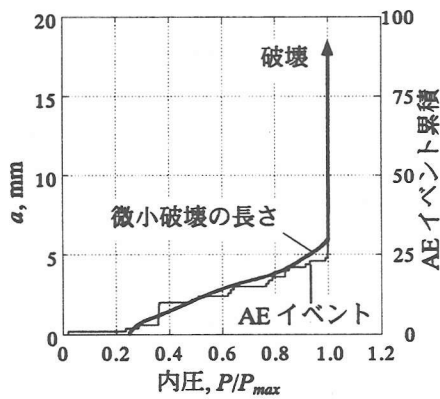


図-15 微小破壊の長さ・内圧・AE イベント累積曲線

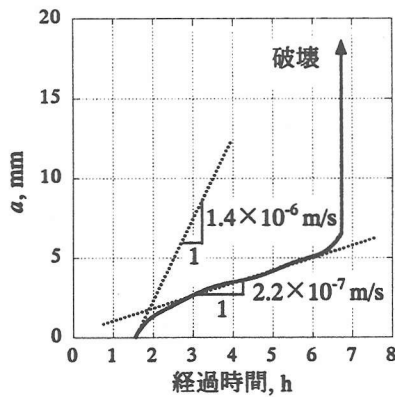


図-16 微小破壊の長さ・時間曲線

が増加し、その境界でせん断破壊が発生すると、図-14(c)に示すように、短時間に一つの微小破壊が卓越して巨視的破壊に至ると考えられる。

そこで図-13を基に、初期の円孔の状態の内圧が増加する場合における供試体外周部の円周方向応力の理論値と測定値の差が円孔の半径の増加、すなわち微小破壊の長さ a によるものと見なし、厚肉円筒の理論を用いて算定すると図-15の太実線のようなものである。 $P/P_{max}=0.25$ のとき、円孔壁面で微小破壊が発生していることがわかる。また、破壊長さは内圧の増加と共に徐々に大きくなるが、巨視的破壊直前の破壊長さは約 6mm と評価される。 $P/P_{max}=0.25$ 、す

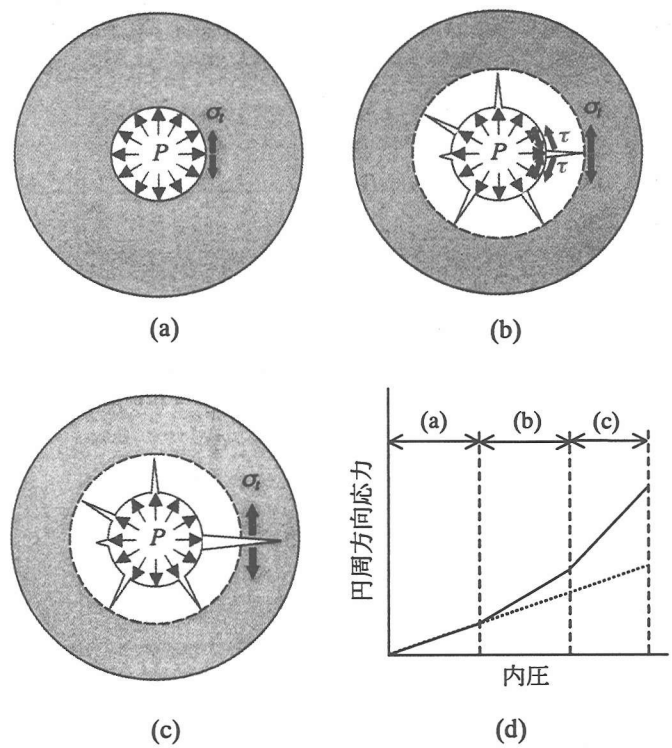


図-14 円孔壁面の亀裂モデル

なわち、 $P=10.3\text{MPa}$ のとき、円孔壁面に発生する円周方向の引張応力 σ_θ は 11.4MPa であり、供試体の引張強度が約 10MPa であることを考慮すると、微小破壊の初生は円孔壁面に発生する円周方向の引張応力が岩石の引張強度に達したときに起こると考えることができる。一方、図中の細い実線で示される AE イベントの累積曲線は $P/P_{max}=0.25$ のときから増加を開始し、破壊長さが 1mm のときに急激に増加した後、破壊の進展と共にわずかに増加しながら巨視的破壊の直前で急激に増加している。この曲線は破壊長さの曲線と調和的である。

破壊の進展速度を評価するために、横軸を時間として破壊長さ a を示すと図-16 のようである。曲線の傾きが破壊の進展速度であり、円孔壁面での破壊発生時の進展速度は $1.4 \times 10^{-6} \text{m/s}$ であるが、その進展速度は破壊の進展とともに減少し、破壊長さが約 2.5mm になるとほぼ一定の進展速度 $2.2 \times 10^{-7} \text{m/s}$ となる。また、巨視的破壊直前には速度は急激に増加することがわかる。

最後に、供試体 No.3 を用いて X 線 CT 撮影を行った結果と比較検討を行う。X 線 CT 撮影は、計測開始後約 19 時間 ($T/T_{max}=0.60$) から巨視的破壊後 3 時間 ($T/T_{max}=1.08$) までの約 16 時間において 10 分毎にほぼ中央の断面で実施された。X 線 CT 原画像を示すと図-17 のようである。図は密度の低い部分を黒く、密度の高い部分を白く表示している。したがって、図中の周囲の黒い部分は空気、その内側に供試体、円孔、さらに、円孔中に多チャンネル圧力センサーを見ることができる。また、 $T/T_{max}=1.04$ の図中には放射状に伸びる破壊面が見られ、それらの破壊面に番号を付けた。

$T/T_{max} = 0.60$ および 0.86 の画像において破壊は確認されないが、 $T/T_{max} = 0.99$ の画像に破壊面 (1) が見られる。この破壊は目視では確認されなかった。また、破壊面 (2) および (3) の円孔付近にわずかに微小破壊が見られる。 $T/T_{max} = 1.00$ で内圧が最大値に達したとき、巨視的破壊面 (1) が外周部まで進展し、破壊面 (2) および (3) が相応に進展している様子がわかる。その後、 $T/T_{max} = 1.04$ において残りの破壊面が進展し、供試体は3分割された。

X 線 CT 画像に亀裂投影法を用いると破壊開口幅を数 μm の精度で測定できることが知られている¹¹⁾。そこで、図-18(a)の薄実線で囲まれた部分を拡大した図-18(b)において、実線で囲まれた領域の縦 10 画素、横 30 画素 (縦 2.9mm、横 8.8mm) に亀裂投影法を適用した。X 線 CT 画像は CT 値で構成されている。CT 値とは X 線吸収係数を適当にスケールした値で、ここでは空気を -1000、水を 0 として表示し、密度の高い部分は大きな CT 値で示される。X 線 CT 画像は多量のノイズを含んでいるため、図中に示すように座標軸を定めて縦 10 画素、横 3 画素の長方形要素を設定し、その長方形要素内にある画素を平均して長方形要素の中心画素にその平均 CT 値を与える局所単純平滑化を行った¹¹⁾。

実線で囲まれた領域における x 軸上の CT 値分布を示すと図-19 のようである。図中の数字は巨視的破壊までの時間を正規化したものである。巨視的破壊が発生すると破壊面の CT 値は空気のそれになり、平均すると図に示すように著しく減少している。しかし、巨視的破壊以前の CT

値の分布に大きな変化は見られない。これは、巨視的破壊直前までに円孔壁面付近に発生した微小破壊長さはわずか 6mm 程度であり、微小破壊の開口幅が小さく、その検出が困難であったと考えたと納得がいく。

以上の結果を総合すると、静的破砕剤を用いた場合の岩石の破壊機構はつぎのように推察される。すなわち、内圧が増加して円孔壁面に発生する円周方向の引張応力が岩石の引張強度に達したときに円孔周辺に破壊が発生し、内圧の増加と共に破壊は進展するが、静的破砕剤と岩石の境界に発生するせん断応力によって破壊の進展は抑制される。さらに内圧が増加すると、破砕剤と岩石の境界にせん断破壊が発生し、わずかな時間で 1 つの微小破壊が卓越して巨視的破壊に至る。したがって、静的破砕剤を用いて効率的に岩石やコンクリートを破壊させようとすると、静的破砕剤と岩石との境界の摩擦を減少させることが重要であると考えられる。

5. おわりに

本論文は、静的破砕剤を用いた円筒岩石の破壊実験を実施した結果を基に、静的破砕剤を用いた場合の岩石の破壊機構を検討したものである。

円筒岩石の破壊実験では、破壊の初生から巨視的破壊に至る間、開発した多チャンネル圧力センサーを用いて孔内の圧力分布を測定した。また、供試体外周部にロゼッタゲージを貼付して円周方向の応力を測定する共に、AE 計測

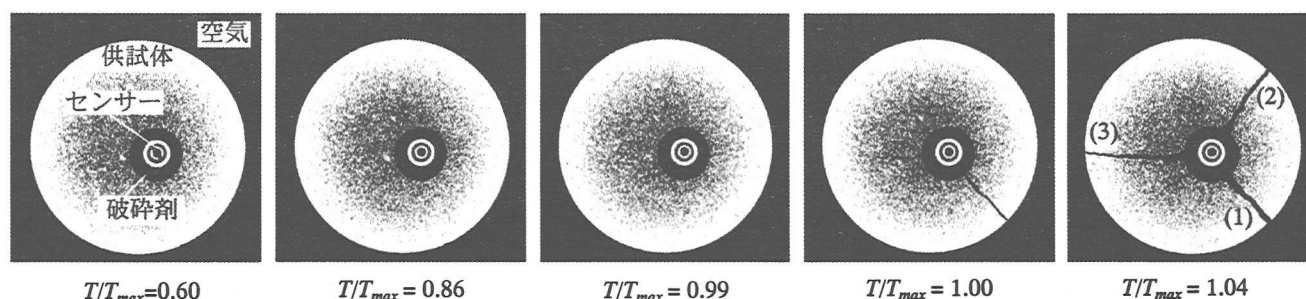


図-17 X 線 CT 原画像

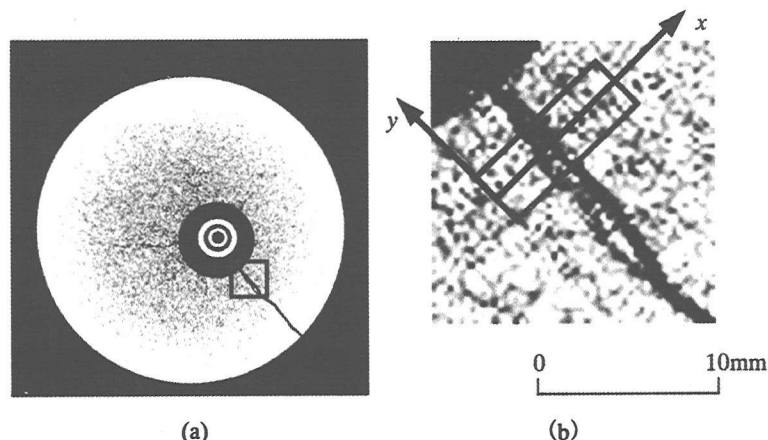


図-18 亀裂投影法を適用した領域

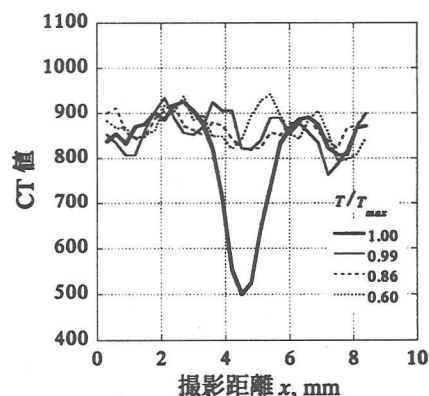


図-19 適用領域における CT 値分布

および X 線 CT スキャナーによる非破壊検査を行った。

得られた測定結果を総合すると、静的破碎剤を用いた場合の岩石の破壊機構は、内圧が増加して円孔壁面に発生する円周方向の引張応力が岩石の引張強度に達したときに円孔周辺に破壊が発生し、内圧の増加と共に破壊は進展する。しかし、静的破碎剤と岩石の境界に発生するせん断応力によって破壊の進展は抑制される。さらに内圧が増加すると、破碎剤と岩石の境界にせん断破壊が発生し、わずかな時間で 1 つの微小破壊が卓越して巨視的破壊に至ると論じた。

参考文献

- 1) 原田哲夫：静的破碎剤を用いたコンクリート構造物の解体に関する基礎的研究、東京大学学位論文、1988.
- 2) Obara, Y., K. Sakaguchi, T. Nakayama and K. Sugawara: Anisotropy effect on fracture toughness of rock, Proc. of Rock Characterization, pp.7-12, 1992.
- 3) 副田孝一、原田哲郎：静的破碎剤の膨張圧発生機構に関する一考察、土木学会論文集、No.466/V-19、pp.89-96、1993.
- 4) 原田哲夫、副田孝一、出光隆、渡辺明：静的破碎剤を用いたコンクリート構造物の解体に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.360/V-21、pp.91-100、1993.
- 5) 原田哲夫、副田孝一、出光隆、渡辺明：静的破碎剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質、土木学会論文集、No.478/V-3、pp.61-70、1985.
- 6) 副田孝一、原田哲夫、上林真幸、細野克夫：フラッシュダイヤフラム型圧力計を用いた静的破碎剤の簡易膨張圧測定法、土木学会論文集、No.360/V-21、pp.145-148、1993.
- 7) 板倉賢一、渡辺義範、佐藤一彦、後藤龍彦、児玉淳一、吉田豊：AE 震源分布のフラクタル構造に基づいた岩石内き裂系のモデル化に関する研究、資源と素材、Vol.114、pp.918-924、1998.
- 8) 川本跳万：応用弾性学、共立出版、pp.33-36、pp.67-70、1968.
- 9) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版、1988.
- 10) 重石光弘：アコースティック・エミッション波形解析によるひびわれの発生機構の同定に関する研究、熊本大学学位論文、1994.
- 11) 菅原勝彦、小島隆輔、尾原祐三、佐藤晃、島田秀樹：X 線 CT による亀裂開口解析、資源と素材、Vol.114、No.12、pp.881-887、1998.

(2001 年 4 月 20 日 受付)