



岩石の一軸圧縮破壊の個別要素法解析*

清水 浩之¹ 村田 澄彦² 石田 毅³

Distinct Element Analysis for Rock Failure under Uniaxial Compression

by Hiroyuki SHIMIZU^a, Sumihiko MURATA^b and Tsuyoshi ISHIDA^c

- a. Postgraduate student of Kyoto University, Kyoto, 615-8540 JAPAN
(Corresponding author E-mail: Hiroyuki.Shimizu@t01.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)
- b. Associate Professor, Kyoto University
- c. Professor, Kyoto University

In order to better understand the mechanics of fracture propagation in rock, we have developed an analysis program based on the concept of the DEM (Distinct Element Method) and simulated a uniaxial compression test. Even at present, it is still difficult to measure all AE (Acoustic Emission) events generated during an experiment due to the limit of recording speed of a measuring device, and the influence of the noise. On the other hand, the DEM can simulate realistic, appropriate rock fracturing process, and makes it possible to consider generation of all microcracks including those difficulties in an AE measurement. Our simulation results are well in agreement with the fracturing process deduced from AE measurements in the previous laboratory experiments conducted by the other researchers. Moreover, they provide the new findings to solve the disagreement; the conventional theories and microscopic observations suggest that tensile cracks cause AE events, whereas an abundance of shear type AE events are observed in the experiments. Our simulation results indicate that the energy released from a tensile crack is very small compared with that from a shear crack, due to the tensile strength much smaller than compressive strength. Since it is thought that such a small AE is easily buried in a noise and hard to be measured in an experiment, shear AE would be observed dominantly in an actual AE monitoring experiment. These results, including the new finding to solve the conflict, indicate that DEM is an effective numerical analysis technique for studying the dynamics of microcracking in brittle materials like rock.

KEY WORDS: Distinct Element Method (DEM), Uniaxial Compression, Acoustic Emission(AE), Crack, Fracture, Rock

1. 緒 言

岩石の破壊は、その内部に分布する微細な亀裂による応力分布の不均質性に支配される点に特徴がある。例えば、岩石供試体の破壊過程にみられる AE (Acoustic Emission) の発生や Shear Band の出現といった現象は、岩石供試体内部に含まれる微細な亀裂の分布を考慮しなければ説明できない¹⁾。このような力学的な不均質性をコンピュータ上で表現するための工夫として、有限要素法の各要素の強度とヤング率を Weibull 分布に従うものとした Tang²⁾ の方法や、岩石をランダムな三角形に分割し、三角形の各辺を境界要素法の DDM 要素 (変位不連続要素) で表現した Sella and Napia³⁾ の方法をあげることができる。これらの手法は解析精度が高く、応用範囲も広いことが長所として挙げられるが、微小亀裂の発生や進展および破壊にともなう大変形といった現象を取

り扱うためにはメッシュを切りなおす等の煩雑な操作を行う必要がある。一方、Cundall が開発した個別要素法⁴⁾ は岩石を粒子の集合体としてモデル化するため、空隙、潜在亀裂、鉱物結晶の境界面等によって岩石内部に生じる応力の不均質性を比較的容易に、かつ適切に表現できる特徴がある。すでに個別要素法は岩盤工学に関する諸問題、例えば岩盤斜面の崩壊^{5,6)} や様々な岩石試験⁷⁻⁹⁾、最近では応力腐食による亀裂進展¹⁰⁾ など、幅広く適用が試みられている。筆者らは岩石の一軸圧縮試験を解析の対象とし、シミュレーションにおける亀裂の発生を実験で観測される AE の発生と対比させて、岩石破壊の解明に対する問題、特に微小亀裂の発生から最終破断面の形成までの岩石の破壊過程を検討したので報告する。なお本論文では、応力やひずみは圧縮を正とする。

2. 解析手法と解析モデル

個別要素法は、本来は要素間の相互作用を考慮することにより、要素の並進と回転の運動を追跡する不連続体解析のための手法であるが、要素間に引張り (粘着力) を導入することにより、連続体解析にも適用することが可能となる。個別要素法による岩石破壊現象に関する基礎的検討を目的としたため、膨大な計算時間を

*2008 年 8 月 1 日受付 2009 年 2 月 18 日受理

1. 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 博士後期課程

2. 普通会员 工博 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻

3. 普通会员 工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻
[著者連絡先] FAX:075-383-3213

E-mail:Hiroyuki.Shimizu@t01.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

キーワード: 個別要素法, 一軸圧縮, AE, 亀裂, 破壊, 岩盤

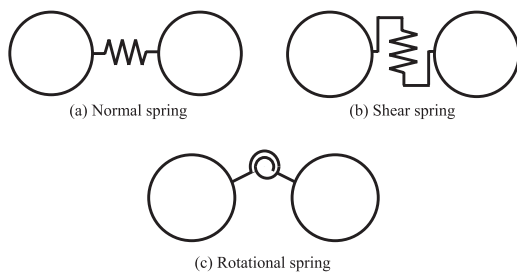


Fig.1 Connecting between particles with three kinds of springs.

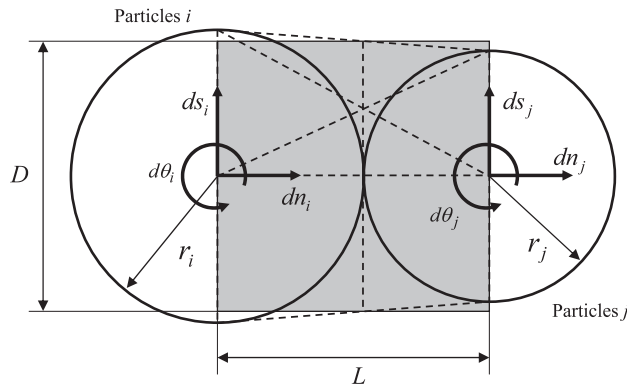


Fig.2 Bonded particles model.

必要とし解析結果の解釈も複雑になる三次元解析を避け、まず単純な二次元モデルを用いて検討を行うこととした。個別要素法の基本原理や詳細なアルゴリズムについては、過去に多くの研究報告がなされているので^{4, 11, 12)}、ここでは割愛するが、本研究に特徴的なアルゴリズムについては以下に詳しく述べる。

2・1 要素間の接続

岩石を、引張力(粘着力)を有する円形要素の集合体としてモデル化する。ここでは、2つの要素*i, j*の間をFig. 1に示すような3つのばねで接続することにより、反発力とともに引張力をも表現した。法線方向ばねは要素の法線方向の相対変位を、接線方向ばねは接線方向の相対変位を、回転拘束ばねは相対回転変位をそれぞれ拘束し、反発力または引張力を生じる。接続点に作用するこれらの反発力または引張力は、次の法線方向作用力 f_n 、接線方向作用力 f_s 、モーメント f_θ の合力として与えられ、それぞれの作用力は要素間の相対変位から次式で求められる。

$$\begin{aligned} f_n &= k_n(dn_j - dn_i) \\ f_s &= k_s\{ds_j - ds_i - \frac{L}{2}(d\theta_j + d\theta_i)\} \dots\dots\dots (1) \\ f_\theta &= k_\theta(d\theta_j - d\theta_i) \end{aligned}$$

ここで、 k_n 、 k_s 、 k_θ はそれぞれ法線方向ばね、接線方向ばね、回転拘束ばねのばね定数を、 dn 、 ds 、 $d\theta$ はそれぞれ法線方向変位、接線方向変位、回転変位を表しており、添字*i, j*はそれぞれの要素の番号を示している。要素間の接続は模式的にFig. 2のようになっており、 L は接続されている要素間の距離を表し、接続幅 D は2要素の半径の調和平均から式(2)で与えられる。

$$\begin{aligned} L &= r_i + r_j \\ D &= 2 \cdot \frac{2r_i r_j}{r_i + r_j} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ばね定数 k_n 、 k_s 、 k_θ をそれぞれ独立したチューニングパラメータとした場合、これらの値を決定するのに大きな労力が必要とな

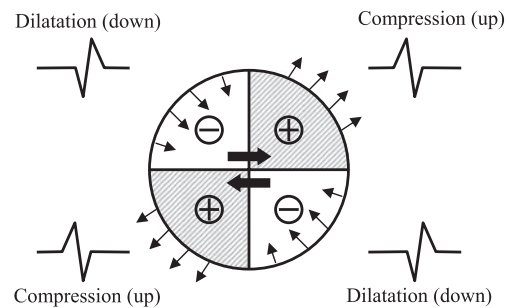


Fig.3 Polarity of P-wave first motions.

る。そこで、本研究では2粒子間の接続部分を弾性梁とみなすことにより、各ばね定数を式(3)で与えることにした。

$$\begin{aligned} k_n &= \frac{EA}{L} \\ k_s &= \frac{12EI}{L^3} \dots\dots\dots (3) \\ k_\theta &= \frac{EI}{L} \end{aligned}$$

ここで、 E 、 I 、 A はそれぞれ粒子に与えたヤング率、断面二次モーメント、接続部分の断面積である。ただし、粒子に与えたヤング率 E は、一軸圧縮試験のシミュレーションの結果得られる岩石モデルのヤング率とは異なるものであるので、 E を変更したシミュレーションを繰り返すことにより解析対象となる岩石のマクロな変形強度特性を与える値を決定すること(チューニング)が必要である。断面二次モーメント I については接続幅 D 、奥行き1の矩形断面を仮定している。さらに、作用力 f_n 、 f_s から要素間に作用する垂直応力 σ とせん断応力 τ を式(4)で評価する。

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{f_n}{D} \\ \tau &= \frac{f_s}{D} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

2・2 接続の破断による微小亀裂の表現およびAEとの対応

AE測定実験では、震源に近い位置にあるセンサーにはAE初動が時間的に早く到達し、遠いセンサーには遅く到達する。したがって、多数のセンサーでAE測定を行い、センサー間の相対的な初動の到達時刻の差と媒質の伝播速度からAE震源を逆算することができる。引張破壊の場合には震源の周辺に設置されたすべての観測点で押し波のP波初動が観測され、一方、せん断破壊の場合にはFig. 3のように震源のせん断変位に平行な方向とこれに直交する方向で区分される4つの領域で押し波と引き波のP波初動が交互に観測される。つまり、震源決定されたAEについてP波初動の押し引きの空間的な分布を調べることで、そのAEの発生機構(せん断破壊か引張破壊か)と破壊面の走向・傾斜、その破壊を生じさせた主応力の作用方向を求めることができる¹³⁾。

本研究では、破壊条件1のように引張応力 σ があらかじめ定めた法線方向ばねの引張強度 σ_c を超える場合、あるいは破壊条件2のようにせん断応力 τ があらかじめ定めた接線方向ばねの強度 τ_c を超える場合に要素間の接続を破断させることにより、微小亀裂の発生を表現した。このとき、いずれかの破壊条件を満たした時点で3種類のばねを全て取り除き、これ以降その要素間には引張力が作用しないこととした。

$$\left. \begin{aligned} &(\text{破壊条件 1}) \quad \left. \begin{aligned} &\sigma < 0 \text{ (Tensile stress)} \\ &|\sigma| \geq \sigma_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{Bond Break} \end{aligned} \right\}$$

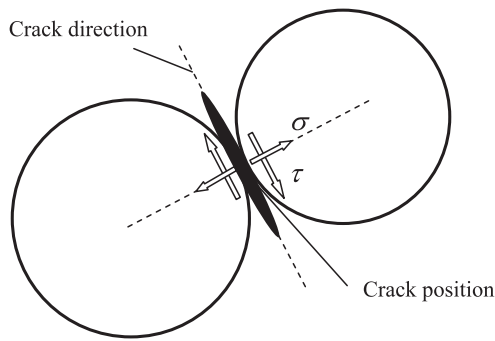


Fig. 4 Crack position and direction.

(破壊条件 2) $|\tau| \geq \tau_c$ Bond Break

前述したように AE 測定実験では P 波初動の押し引きの空間的な分布によりその AE の発生機構を求めている。このような P 波初動の押し引き分布は亀裂発生時の応力状態と対応していると考えられる。岩石の破壊様式の判定条件としては、モール・クーロンの破壊条件等がよく用いられているが、このような条件は岩石のマクロな破壊に対して適用されるものであり、本研究における要素間のばねの破断には適用することはできないと考えられる。したがって、本シミュレーションでは AE 測定実験との比較を考え、微小亀裂発生時のせん断応力 τ と引張応力 σ の比を用いた破壊様式の判定を新たに導入した。すなわち、いずれのばねが破断したかによらず、判定条件 1 を満たす場合を引張亀裂、判定条件 2 あるいは判定条件 3 を満たす場合をせん断亀裂と判定する。現実の実験では引張亀裂とせん断亀裂のほかに、それらの中間的な破壊様式が考えられるが、本研究では亀裂発生時に引張とせん断のどちらの力が大きいかという最も単純な判定条件である $|\tau/\sigma|=1$ を採用した。

(判定条件 1) $\left. \begin{array}{l} \sigma < 0 \text{ (Tensile stress)} \\ |\tau/\sigma| \leq 1 \end{array} \right\}$ Tensile Crack

(判定条件 2) $\left. \begin{array}{l} \sigma < 0 \text{ (Tensile stress)} \\ |\tau/\sigma| > 1 \end{array} \right\}$ Shear Crack

(判定条件 3) $\sigma > 0 \text{ (Compressive stress)}$ Shear Crack

微小亀裂は、Fig. 4 のように 2 要素の接触点に生成され、その方向は引張、せん断いずれの場合も 2 要素の中心を結ぶ直線と垂直な方向とした。微小亀裂が発生すると、そのとき要素間のばねに蓄えられていたひずみエネルギーが解放される。本研究では式 (5) で表されるひずみエネルギー E_k を AE のエネルギー、すなわち、AE の大きさに対応するものとする。

$$E_k = \frac{1}{2} k_n (dn_j - dn_i)^2 + \frac{1}{2} k_s \{ds_j - ds_i - \frac{L}{2} (d\theta_j + d\theta_i)\} \quad \text{..... (5)}$$

接続の破断した要素間、あるいは接続されていない要素間の接触点では、通常の個別要素法と同様に反発力 f_n と摩擦力 f_s が作用する⁴⁾。摩擦力 f_s が、クーロンの摩擦の法則から式 (6) で与えられる最大静止摩擦力 $f_{s \max}$ を上回る場合、すべりが発生する。このとき、摩擦力 f_s は $f_{s \max}$ として与えられる。ここで、 μ は粒子間摩擦係数である。

$$f_{s \max} = \mu \cdot f_n \quad \text{..... (6)}$$

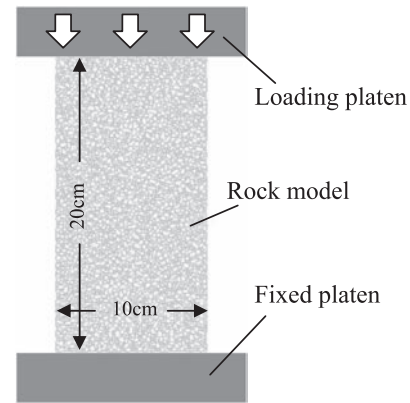


Fig. 5 Rock model and loading condition for the simulation.

以上のように、本研究で用いた解析コードは、AE 測定実験との比較検討を目的とした微小亀裂の破壊様式の判定法と破壊エネルギーの評価法を新たに導入したものとなっている。

2・3 シミュレーションに用いた岩石モデル

シミュレーションには Fig. 5 のような幅 10cm、高さ 20cm の岩石モデルを用いた。岩石モデルは、ばねによって接続された円形要素の集合体で表現されている。粒子半径は、設定した最大粒子半径 1.2mm と最小粒子半径 0.8mm の間で、乱数により偏りなく一様にばらつくように与えた。粒子数は 5033 個である。岩石モデルの作成 (パッキング) 方法については、乱数により半径を決定した要素を、すでに配置されている要素と重なり合わず接触できる位置を探して配置し、モデル内の空間がなくなり、あらかじめ設定した最小の半径を有する新しい要素が配置できなくなるまでこの手順を繰り返す手法を用いた。

上記の手法を用いることにより、各要素は少なくとも 2 点以上の接触点数を保障され、なおかつ乱数により要素の半径、位置、接触点数にばらつきを生じさせることができる。要素の位置、接触点数のばらつきは要素間の力の伝達経路を不規則にする。また、式 (3)、(4) のように、本研究ではばね定数および要素間に作用する応力を要素の半径を用いて評価していることから、各要素の半径のばらつきによって、モデル内の局所応力に不均質性が生じることになる。

モデルの下部の載荷板を固定しておき、上部の載荷板を変位速度一定でゆっくりと下方に動かすことにより一軸圧縮試験を再現した。岩石モデルと載荷板の間には摩擦力が作用している。モデルの側面には拘束壁は設けていない。

シミュレーションに使用した入力パラメータを Table 1 に示す。

Table 1 Input parameters.

Number of particles	:5033
Maximum radius	:1.2 (mm)
Minimum radius	:0.8 (mm)
Particle density	:2660 (kg/m ³)
Friction coefficient of particle	:0.5
Friction coefficient of wall	:0.3
Young's modulus of particle	:50 (GPa)
Young's modulus of bonding	:50 (GPa)
Shear strength of bonding	:60.0 (MPa)
Tensile strength of bonding	:5.0 (MPa)

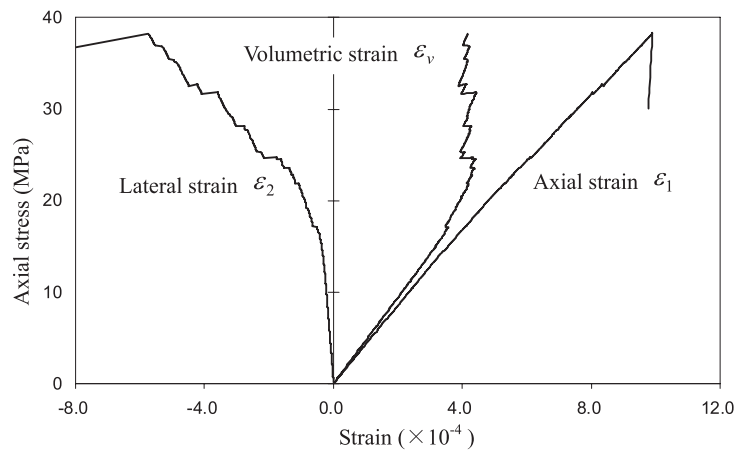


Fig. 6 Stress strain curves.

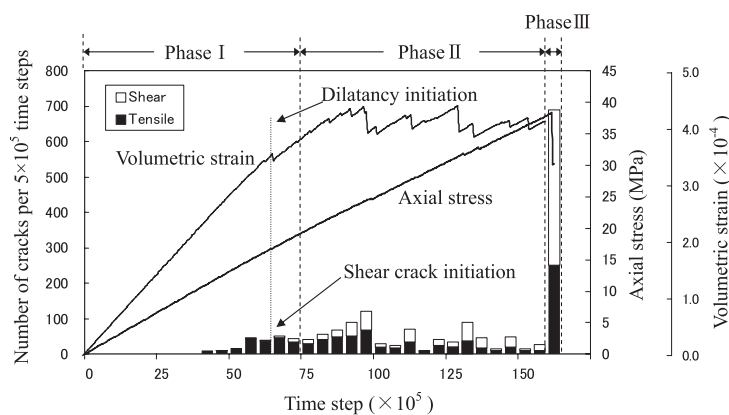


Fig. 7 Transition of axial stress, volume strain and number of cracks.

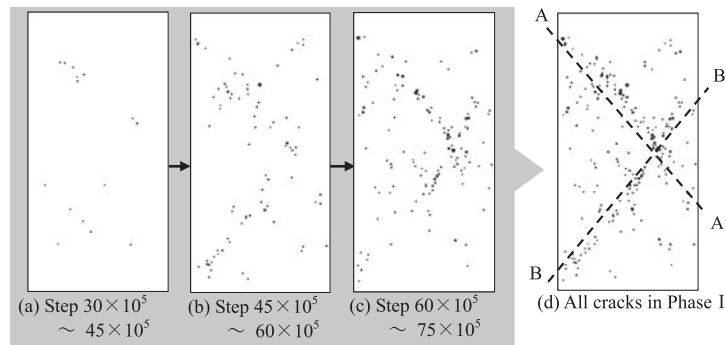


Fig. 8 Spatial distribution of the cracks generated in the three periods of Phase I. The closed circle indicates a location of the crack generated and the diameter of the circle corresponds to respective magnitude of energy. Fig. 8(d) shows distribution of all the cracks generated in Phase I.

岩石モデルの強度が大きいと破壊までに必要な計算ステップが増大するため、岩石モデルの1軸圧縮強度はやや小さめに40MPa、脆性度(圧縮強度と引張強度の比)が20程度になるよう、1軸圧縮試験と圧裂試験の予備的なシミュレーションを行って、Table 1の入力パラメータを決定した。

3. シミュレーション結果

3・1 応力-ひずみ曲線

シミュレーションの結果、得られた応力-ひずみ曲線を Fig. 6

に示す。縦ひずみ ϵ_1 と横ひずみ ϵ_2 は岩石モデルの中心線に沿って計測したモデルの縦横の全長の変化から求めた。実際の変形は三次元であるが、本シミュレーションは二次元であり、奥行き方向のひずみを考慮していないため、二次元成分のみを用いて $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2$ を体積ひずみに対応する値として定義した。軸方向応力は、モデル上端の粒子から上部の載荷板に作用する反発力の総和をモデルの幅で除すことにより算出した。Fig. 6を見ると、二次元であるため実際の岩石の一軸圧縮試験で見られるダイレイタンスの発生とは異なるが、载荷初期には一様な減少傾向にある体積ひずみ ϵ_v が、軸応力の増大に伴い徐々に非線形的な挙動へと変化していることがわかる。

Fig. 7は横軸に経過時間(Time step)をとり、軸圧と体積ひずみ ϵ_v を実線で、亀裂発生数を棒グラフで示している。引張亀裂を黒、せん断亀裂を白で表わし区別した。Fig. 7に点線で示すように、体積ひずみ曲線の傾きが大きく変化する時期がせん断亀裂の発生が始まる時期に対応していることがわかる。実岩石におけるダイレイタンスは、岩石中に存在する微小亀裂の成長や開口が原因であることが知られている^{14, 15)}。すなわち、せん断亀裂の発生にともなう亀裂面にすべりが発生すると、せん断亀裂の両端に連続する引張亀裂が大きく開口しながら進展する。Fig. 7において、体積ひずみ曲線の傾きが大きく変化する時期がせん断亀裂の発生が多くなる時期に対応するのはこのことが原因であると考えられる。

3・2 微小亀裂の分布と破壊様式の特徴

Fig. 7より軸圧と亀裂発生数の関係を見ると、载荷初期には引張亀裂が卓越するが、その後せん断亀裂の割合が増加し、次いでそれまでの6倍以上頻度の激しい微小亀裂の発生を示して最終破断にいたる傾向がみられる。

本節では、上記の傾向に基づき、破壊過程を下に示すようにI期～III期の3つの時期に区分し、それぞれの期における微小亀裂の発生位置の分布と破壊様式の特徴について検討する。なお、微小亀裂の発生位置は、実際の一軸圧縮試験で測定されるAEの震源位置に対応すると考え、また微小亀裂の発生に伴うエネルギーの放出量は式(5)で評価されると考えて議論を進める。

- ・I期(Time Step 1 ~ 75 × 10⁵) : 引張亀裂が卓越
- ・II期(Time Step 75 × 10⁵ ~ 160 × 10⁵) : せん断亀裂が増加
- ・III期(Time Step 160 × 10⁵ ~ 162 × 10⁵) : 最終破断面を形成

3・2・1 I期

Fig. 8はI期をさらに3つの期間に区分し、それぞれの期間において発生した微小亀裂の発生位置を円で示している。この図において、円の直径は式(5)で定義したエネルギーの大きさに比例する大きさとした。Fig. 7からもわかるように、微小亀裂の発生は破壊荷重の25%、すなわちTime step 30 × 10⁵までは全くなく、この時期以降の比較的低い応力レベルで発生する亀裂はほとんどが引張型の亀裂であった。当初微小亀裂はモデル全体に広く分布しているが、载荷が進むにつれてその数は徐々に増加していき、Fig. 8(d)に破線で示すように、やがてほぼ共役な2方向の線分AA', BB'に沿うように分布する。最終破断面は後に示すように、この2本の線分の

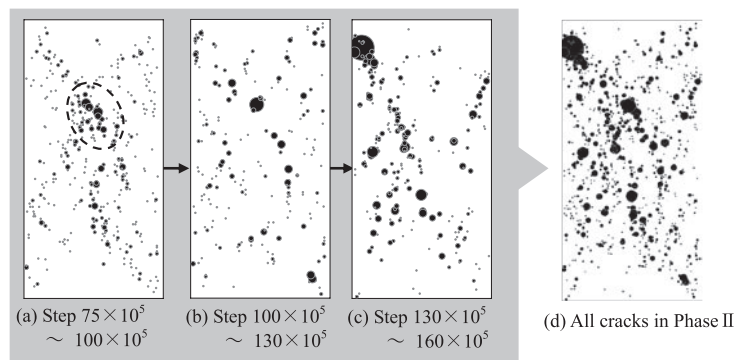


Fig.9 Spatial distribution of the cracks generated in the three periods of Phase II. The closed circle indicates a location of the crack generated and the diameter of the circle corresponds to respective magnitude of energy. Fig. 9(d) shows distribution of all the cracks generated in Phase II.

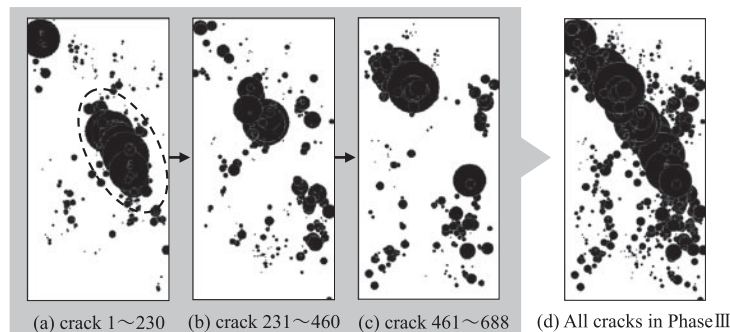


Fig.10 Spatial distribution of the crack generated in Phase III. The diameters of the circles correspond to their respective magnitudes of energy. In Phase III, 688 cracks are generated and these cracks were generated within a very short time steps. Therefore, Fig. 10(a), (b), and (c) show every 230 cracks in order of their generated time. Fig. 10(d) shows distribution of all the cracks generated in Phase III.

うち AA' に沿うように形成された。

3・2・2 II期 Fig. 9 に II 期において発生した微小亀裂の分布を示した。II 期では引張亀裂に加えてせん断亀裂も発生し始める。亀裂の発生数は I 期に比べてさらに増加していき、Fig. 9 (a) 中に破線で囲んだ場所に比較的大きなエネルギーを放出する亀裂が集中する。これは、亀裂の活動が岩石モデルの中央付近で活発になっていることを示しており、このような亀裂の集中は実際の岩石試験では AE 震源の集中として観察され亀裂のクラスタ化と呼ばれている。Fig. 9 (b) (c) のように、モデル中央付近に現れた亀裂のクラスタは徐々にモデル端部へと広がっていく。また、Fig. 7 から、このようなクラスタの移動が起こる際に、一時的に亀裂の発生数が低下していることがわかる。

3・2・3 III期 III 期では急激に微小亀裂の発生数が増加し、極めて短時間で最終破断面が形成され、岩石モデルは耐荷力を失った。そこで Fig. 10 は Fig. 8 や Fig. 9 と異なり、III 期において発生した 688 個の亀裂を発生順に 3 等分し、その分布を 230 個ずつ順に示した。亀裂はモデル中央付近に集中して発生し、そこからモデル左上へと進展する。最終破断面を形成する亀裂は、他の亀裂に比べて極めて大きなエネルギーを放出していることがわかる。また、これらの大きなエネルギーを放出する亀裂は、ほとんどがせん断亀裂であった。このように、III 期では Shear Band が出現し、それにともなって岩石モデルが破壊に至る様子が見られた。

3・3 破壊様式による発生 AE のエネルギーの比較

Fig. 11 (a) は、本シミュレーションによって得られたすべての

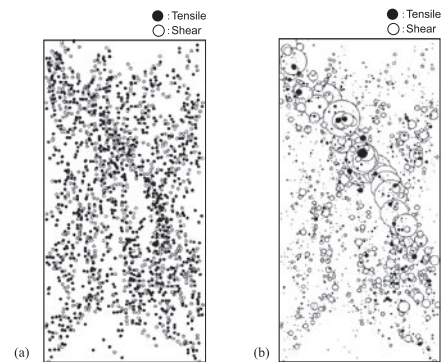


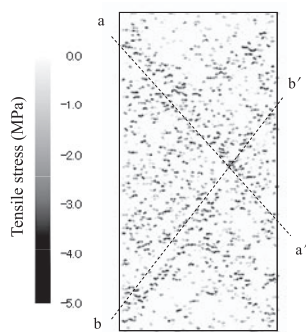
Fig.11 Spatial distribution of all the cracks obtained during this simulation. A tensile crack is expressed with a closed circle and a shear crack is expressed with an open circle. In Fig.11(a), the diameter of all the circles is the same. In Fig.11(b), the diameters of the circles correspond to their respective magnitudes of energy.

亀裂について、2・2 節に示したように引張とせん断の区別を行い、引張亀裂を黒い円で、せん断亀裂を白い円でその位置を示したものである。Fig.11 (a) ではすべての円の直径を一定としている。Fig. 11 (b) は、Fig. 11 (a) と基本的に同じ図であるが、Fig. 8 ~ 10 と同じように、亀裂の位置を表す円の直径を 2・2 節の式 (5) で定義した亀裂のエネルギーの大きさに比例させて示した図である。Fig. 11 (b) には引張亀裂も表示しているが、引張亀裂はせん断亀裂に比べてエネルギーが非常に小さいためほとんど見えない。前述したように、シミュレーションに使用した入力パラメータは、岩石モデルの 1 軸圧縮強度が 40MPa 程度、脆性度が 20 程度になるよう 1 軸圧縮試験と圧裂試験の予備的なシミュレーションにより決定しており、その結果、粒子を接続しているばねの引張強度がせん断強度に比べて 1/12 と小さくなっている。本シミュレーションで示された引張亀裂とせん断亀裂の放出エネルギーの違いは、このような引張りとせん断の強度の差に起因するものと考えられる。実際の岩石の破壊においても、引張亀裂はせん断亀裂に比べて放出するエネルギーが小さいことが理論的に示されており^{16, 17)}、このことは本シミュレーションにおける亀裂から放出されるエネルギーが適切に表現できていることを示している。

4. 考 察

4・1 微小亀裂の分布および破壊過程に関する考察

I 期では引張亀裂が卓越し、岩石モデル全体に広く分布していた。Lei らの実験でも、载荷の初期段階で AE が岩石供試体全体に広く分布する傾向がみられ、彼らはそれらの AE が供試体内部の潜在クラックや鉱物の境界の分布による応力の不均質性に強く影響されていることを指摘している^{18, 19)}。本シミュレーションでは粒子半径や位置を乱数によって不規則に与えているため、モデル内の応力分布が不均一となる。Fig. 12 は Time step 50×10^5 におけるモデル内部の引張応力の分布を白黒の濃淡で示しており、部分的に強い引張応力の作用する箇所が現れることが分かる。I 期では、まずこのような箇所に亀裂が発生し始めたと考えられる。引張亀裂が卓越したのは、先にも述べたように、要素間を接続しているばねの引張強度をせん断強度に比べて 1/12 と小さく与えているためである。この時点では応力レベルが低く、亀裂の発生数が少ない。そのため亀裂間の距離が長く、それぞれの亀裂

Fig.12 Tensile stress distribution at time step 50×10^5 .

が互いに影響しあうことはない。したがって、発生した引張亀裂はそれ以上進展することなくモデル全体に広く分布する。

また、Fig. 12 に破線 aa', bb' で示す部分に強い引張応力の作用する箇所が並んでおり、この破線 aa', bb' は Fig.8 (d) の直線 AA', BB' と一致していることが分かる。このことから、Fig. 12 の点線 aa', bb' がモデル内で最も応力が集中しやすい箇所であったため、亀裂が直線状に並ぶように分布し集中していったと考えられる。実際の一軸圧縮試験では、このような共役なせん断面の形成には供試体と載荷版の間の摩擦力が大きな影響を及ぼすことが知られている。本シミュレーションでもモデルの上下面に摩擦力が作用しているため、Fig. 12 の破線 aa', bb' への応力集中には岩石モデルの不均質性のみでなく端面の摩擦力も影響していると考えられる。しかし、本シミュレーションのみでは、岩石モデルの不均質性と端面の摩擦力のせん断面の形成に対する影響度を評価することはできず、この点については今後さらに詳細な検討が必要である。

II 期では亀裂のクラスタが形成された。II 期は I 期に比べて応力レベルが高くなっており、亀裂の発生にともなって放出されるエネルギーも大きくなっている。したがって、一度亀裂が進展し始めると、応力の再配分により、その亀裂の周辺に新たな亀裂が次々に発生する^{20, 21)}。このようにしてクラスタが形成されると考えられる。そして、クラスタの形成により多数の亀裂が発生し、応力の再配分が繰り返されるとクラスタ周辺の応力状態が平均化される。亀裂は応力が特に集中した部分に発生するため、このような平均化された応力状態では新たな亀裂が発生しなくなる。そのため、Fig.7 に見られるような、一時的な亀裂の発生数の低下が起こったと考えられる。

III 期では、最終破断面が形成され、モデルは破壊に至った。III 期は、多数の亀裂が密集して存在しており、I 期・II 期に比べて応力レベルが特に高い。このように III 期は不安定な段階であるため、II 期と同様に、一度亀裂が進展し始めると亀裂の進展や連結が連鎖し、極めて短時間で破壊が進行する。ただし、II 期ではクラスタの形成過程で亀裂の発生・進展が停止するが、III 期ではエネルギーの解放が II 期に比べて著しく、形成されたクラスタが急速に拡大・進展し、最終破断面が形成される。このように、最終破断面の形成過程は II 期におけるクラスタの形成過程と同じものであり、特に規模の大きいクラスタが最終破断面の形成に直接関与すると考えることができる。

最終破断面は、I 期における引張亀裂の直線状の分布、すなわち Fig. 8 (d) に示した直線 AA' に沿うように成長した。前述したように、I 期における引張亀裂の分布は Fig. 12 に破線 aa', bb' で示す応力の集中箇所と対応することから、Fig. 8 (d) の直線 AA', BB' 上は、モデル内で最も応力が集中し亀裂が発生しやすい箇所であるといえる。したがって、Fig. 10 (a) 中に破線で示すように、

これらの直線付近でエネルギーの大きい亀裂が発生した場合、直線に沿うように急速に亀裂の進展や連結が進行することになる。その結果、今回のシミュレーションでは最終破断面が直線 AA' に沿うように成長したと考えられる。

4・2 破壊様式と発生 AE のエネルギーに関する考察

従来行なわれてきた研究では、AE の発生頻度とダイレイタンス量との間により比例関係があること、岩石の引張強度が圧縮強度に比べて明らかに小さいことから AE は引張亀裂に起因して発生するものだと考えられていた²²⁾。また、Kranz らは顕微鏡観察により、一軸圧縮応力を受けた岩石試料には引張亀裂が多く、せん断亀裂はあまり見られないことを見出しており²³⁾、このことから AE の主な発生源が引張亀裂であることが考えられる。しかし、楠瀬らが行った AE 測定実験では、AE 初動の押引分布から引張亀裂に起因すると考えることが困難な AE が観測され、せん断亀裂が少なくとも一部の AE を発生させていることが示された^{24, 25)}。また、Lei らが行った実験では、観測された AE の多くがせん断亀裂の発生に起因するものであることが明らかとなった²¹⁾。このように、従来の岩石破壊に対する理解や顕微鏡観察から導かれる破壊様式と AE 初動の押引分布から明らかにされた破壊様式の間には若干の差異が存在する。

本シミュレーションでは、I 期では引張亀裂が卓越しており、I 期、II 期で発生した全亀裂のうち引張亀裂の割合は 65% であった。この結果は、AE が主に引張亀裂に起因して発生することを示しているようにみえる。しかし、3・3 節でも述べたように、引張亀裂はせん断亀裂に比べてエネルギーが非常に小さい。実際の岩石試験ではエネルギーの小さい AE はノイズ等に埋もれやすく観測されにくいことを考慮すると、実際の AE 測定実験ではエネルギーの大きいせん断型の AE が多く観測され、引張亀裂は測定されにくいといえる。このため、AE 測定実験ではエネルギーの大きいせん断型の AE が卓越しているように見えて考えられる。先に述べた、従来の岩石破壊に対する理解や顕微鏡観察から導かれる破壊様式と AE 初動の押引分布から明らかにされた破壊様式の間の差異は、このことで説明できるといえる。

4・3 AE 発生数の規模別頻度分布

岩石供試体における AE の規模の大小と発生数との関係は、式 (7) で表される自然地震における規模 (マグニチュード) M とその発生度数 n と同様の関係があり、その係数 b の値は岩石の不均質性と関係しているとされている^{26, 27)}。

$$\log n(M) = a - bM \quad \dots\dots\dots (7)$$

この式は、Gutenberg- Richter の式と呼ばれ、地震の発生度数 n がマグニチュード M とともに指数関数的に減少する、すなわち大きい地震ほど発生頻度が少なく小さな地震ほどたくさん発生するという統計的な観測事実を示している。本シミュレーションでは、式 (5) で定義したエネルギー E_k について対数をとった値を AE のマグニチュード M とし、宇津らの提案した式 (8) を用いて b 値を算出した²⁸⁾。ここで、 n は総亀裂発生数、 M_i は各 AE のマグニチュード、 M_m は M_i のうちで最小の値を表している。

$$M = \log(E_k) \\ b = \frac{0.4343n}{\sum_{i=1}^n M_i - nM_m} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Fig. 13 は I 期、II 期、III 期それぞれについて、AE のマグニチュードと発生頻度の関係を示しており、図中に示した値は各期での b 値を表している。Fig.13 から、載荷初期には規模の小さい亀裂が相対的に多く発生しているが、最終破壊が近づくにつれて規模の

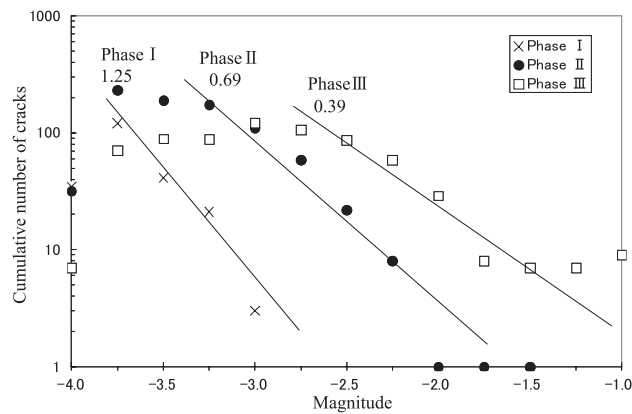


Fig.13 Energy-frequency distributions and temporal variations in b-value.

大きい亀裂が多く発生する傾向が顕著であることがわかる。この結果は Lei らの行った岩石試験に対する AE 測定結果の傾向²⁹⁾と一致しており、個別要素法によって岩石の不均質性を良好に表現できることが確認できた。さらにこのことは、個別要素法により不均質性の程度を変えたシミュレーションを行うことによって、実際の岩石では容易でない破壊に対する岩石の不均質性の影響を詳細に検討できることを示していると思われる。

5. 結 論

個別要素法により一軸圧縮試験のシミュレーションを行い、実験における AE 測定結果の傾向と比較検討を行なった。本研究により得られた結果をまとめると以下になる。

- シミュレーションによって得られた応力-ひずみ曲線から、載荷初期には一様な減少傾向にある体積ひずみが、軸応力の増大に伴い徐々に非線形的な挙動へと変化しており、それがせん断亀裂の発生が始まる時期に対応していることがわかった。このことから、実際の岩石の一軸圧縮試験で見られるダイレイタンスの発生を個別要素法で適切に再現できることが確認できた。
- 実験では、破壊の瞬間に極めて多数の AE が発生することになり、AE 波が重畳してしまうため、全ての微小亀裂の発生位置を独立に正しく決定することが困難であるが、本シミュレーションでは、II 期・III 期のように実験では測定困難なクラスタや Shear Band の形成過程を詳細に検討することができた。その結果、岩石の破壊過程を下に示すような I 期～III 期の 3 つの時期に特徴付けることができた。
 - ・I 期：独立な引張亀裂が卓越する
 - ・II 期：せん断亀裂が増加し、クラスタが形成される
 - ・III 期：クラスタが拡大し、最終破断面を形成する
- b 値について、載荷初期には規模の小さい亀裂が極めて多く発生しているが、最終破壊が近づくと規模の大きい亀裂が多く発生する傾向が得られた。この傾向は実験における AE 測定結果と一致しており、個別要素法を用いて不均質性の程度を変えたシミュレーションを行うことにより、実際の岩石では容易でない破壊に対する岩石の不均質性の影響を詳細に検討できる可能性を示していると考えられる。
- 従来の岩石破壊に対する理解や顕微鏡観察から AE は引張亀裂に起因して発生するものだと考えられていた。しかし、観測された AE 初動の押引分布からは AE の多くがせん断亀裂の発生に起因するものであることが示されている。この差異について、シミュレーションで示された引張亀裂とせん断亀裂の放出エネルギーの違いにより説明することができた。すなわち、岩石の

引張強度が圧縮強度に比べて明らかに小さいため、引張亀裂とともに発生する AE のエネルギーもやはり小さいものとなり、その結果、AE 測定実験では引張型の AE が観測されにくく、せん断型 AE が卓越するように見えることがわかった。

以上のように、個別要素法を用いることによって、微小亀裂の発生から最終破断面の形成までの岩石の破壊過程を詳細に検討することができた。個別要素法は初期モデルを適切に設定することで、容易に不均質性を表現でき、現実に近い適切なシミュレーションを行うことが可能である。このことは、岩石の破壊現象を理解する上で、個別要素法が有効な手法であることを示している。しかし、個別要素法はパラメータの設定が難しく、依然として定量評価を行なうのが困難であるといった問題点も指摘されている。また、AE の主な発生源として新規亀裂の発生や既存亀裂の進展が考えられるが、既存亀裂面のすべりによっても AE は発生すると考えられる。本シミュレーションでは、実験では観測できないような微小亀裂の発生についても議論できるが、一方で既存亀裂面のすべりのような微小亀裂の発生以外の AE 発生要因については全く考慮していない。したがって、本研究におけるシミュレーションはあくまでも微小亀裂の発生を模擬しているのであって、AE の発生を模擬しているのではないといえる。したがって、AE 測定結果との対比によって岩石の破壊メカニズムを解明するためには、既存亀裂面のすべりのような微小亀裂の発生以外の AE の発生メカニズムについても詳細に検討する必要があると考えられ、このことが今後の課題として残されている。

謝辞 本研究の一部は、独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構との共同研究の一環として行った。同機構の石油・天然ガス開発 R&D 推進グループ サブリーダー 大瀬戸一仁氏をはじめとする関係各位のご支援に深く感謝する次第である。

References

- M.F.Ashby and C.G.Sammis: *Pure and Applied Geophysics*, **133** (1990), 489-521.
- C.A.Tang: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **34** (1997), 249-261.
- S.Sellers and J.Napier: *Computational Mechanics*, **20** (1997), 164-169.
- P.A.Cundall and O.D.L.Strack: *Geotechnique*, **29** (1979), 47-65.
- T.Ishida, M.Chigira and S.Hibino: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **20** (1987), 277-283.
- S.Ohtsuki, H.Kusumi and T.Matsuoka: *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **56** (2007), 846-850.
- A.Fakhimi, F.Carvalho, T.Ishida and J.F.Labuz: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **39** (2002), 507-515.
- K.Aoki, Y.Mito, S.Kurokawa, H.Matsui, S.Niumoya, M.Minami: *Proc. 36th Symp. on Rock Mech.* (2007), pp.235-239.
- J.F.Hazzard and R.P.Young: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **41** (2004), 1365-1376.
- D.O.Potyondy: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **44** (2007), 677-691.
- D.O.Potyondy and P.A.Cundall: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **41** (2004), 1329-1364.
- The Society of Powder Technology, Japan: *Funtai Shimiyureshon Nyumon*, (Sangyotosho, Tokyo, 1908)
- K.Kasahara: *Jishinnorikigaku*, (Kashimasyuppankai, Tokyo, 1983), pp.38-44.
- M.Sato: *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **41** (1992), 1068-1074.
- A.V.Dyskin, L.N.Germanovich and K.B.Ustinov: *Engineering Fracture Mechanics*, **63** (1999), 81-110.
- K. Hayashi, H. Nishimura: *Progress in Acoustic Emission III*, NDI Japan (1986), 742-749
- K. Hayashi, S. Motegi: *Progress in Acoustic Emission IV*, NDI Japan (1988), 265-272
- X.-L.Lei, K.Masuda, O.Nishizawa, L.Jouniaux, L.Liu, W.Ma, T.Satoh and K.Kusunose: *Journal of Structural Geology*, **26** (2004), 247-258.
- X.-L.Lei: *Geological Society, London, Special Publications*, **261** (2006), 11-29.
- T.Yanagidani, S.Ehara, O.Nishizawa, K.Kusunose and M.Terada: *J. Geophys. Res.*, **90** (1985), 6840-685.
- X.-L.Lei, O.Nishizawa, K.Kusunose and T.Satoh: *J. Phys. Earth*, **40** (1992), 617-634.
- K.Kusunose, K.Yamamoto, T.Hirasawa: *Journal of the Seismological Society of Japan*, **32** (1979), 11-24.
- R.L.Kranz: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **16** (1979), 23-35.
- K.Kusunose, O.Nishizawa, H.Ito, T.Ishido and I.Hasegawa: *Journal of the Seismological Society of Japan*, **34** (1981), 131-140.
- O.Idehara, T.Satoh, O.Nishizawa and K.Kusunose: *Journal of the Seismological Society of Japan*, **39** (1986), 351-360.
- C.H.Scholz: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **58** (1968), 399-415.
- K.Mogi: *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **40** (1962), 831-853.
- T.Utsu: *Geophysical bulletin. of the Hokkaido University*, **13** (1965), 99-103.
- X.-L.Lei, and T.Satoh: *Tectonophysics*, **431** (2007), 97-111.