

岩石が等方均質弾性体であると仮定すると、当然のことながら、岩石中に誘起される円周方向引張応力は孔中心からの距離のみに依存し、円周方向の角度に依存しない。したがって、引張強度の均一性が仮定される場合には、亀裂の発生位置を特定することができないが、現実の初生亀裂は円周方向に離散的に、かつ、選択的に発生する。この矛盾は、等方均質弾性と強度均一性の仮定に起因するが、岩石の微視構造は極めて不均質であること、引張強度は弾性定数に比較して組織敏感な物性値⁷⁾であることなどを考慮すると、主として、強度均一性の仮定にあると考えることができる。したがって、亀裂初生プロセスの解析においては、引張強度の不均一性のモデル化が不可欠となる。また、この不均一性の問題は岩石破砕形態の非再現性などにも関係する重要な因子である。

次に、亀裂の伸長過程では、亀裂伸長条件の力学的取り扱いが問題となる。従来は、岩石の亀裂伸長条件は線形破壊力学により取り扱われてきていたが、線形破壊力学は亀裂先端の降伏域寸法が微小であり無視可能であるとの近似仮定に立脚している⁸⁾。しかし、最近の岩石破壊力学に関する研究によると、亀裂先端には極めて微細な亀裂が累積した破壊進行領域、すなわち、プロセスゾーン⁹⁾が存在し、破砕現象においてはプロセスゾーンの寸法は無視できない程度に大きいこと¹⁰⁾などが明らかにされてきている。なお、動的亀裂伸長におけるプロセスゾーンに関しては未解明な点が多いが、いわゆる、ヘアークラック¹¹⁾などはプロセスゾーンに対応するものであると考えることができる。したがって、これらは、岩石破砕における亀裂伸長挙動の解析においても、プロセスゾーンの力学的モデル化とそれに基づいた応力解析が必要であることを示唆している。

破砕の最終段階では、発生・伸長した複数の亀裂のうち、ある特定の亀裂内に爆発生成ガスが流入して、それらの亀裂が卓越した伸長を示し、これが自由面に到達することにより最終破断面を形成する。この亀裂内へのガスの流入プロセスの解析は極めて難解な問題である。しかし、生成ガスの亀裂内への流入速度は亀裂の開口幅に強く依存すると予想することができる。したがって、この問題へのアプローチのためには、少なくとも動的応力による亀裂の開口幅とその時間的変化の定量的把握が重要であると考えられる。

以上の考察に基づくと、発破における岩石の破砕過程の解析においては、破砕対象物の幾何形状や作用圧の時間変化のみならず、岩石強度の不均一性や亀裂の非線形力学挙動を考慮した、非定常動弾性場における破壊力学的解析が要求されると思われる。

破壊力学問題の数値解析法としては、有限要素法¹²⁾、体積法¹³⁾、境界要素法¹⁴⁾、変位くい違い法¹⁴⁾などが主として用いられているが、解析対象とする問題の性質、すなわち、非定常動弾性と物性の不均一性などとともに解の安定性を考慮すると、領域型解法である有限要素法が適応性を有していると考えられる。ここで、有限要素法で通常取り扱われる亀裂は、その幾何形状が既知な問題¹²⁾が主であるが、ここで解析対象とする問題では亀裂の幾何形状・位置・配置などをあらかじめ特定することが困難である。したがって、これらの問題を解決するためのアルゴリズムが必要となる。そこで、まず、問題の単純化のために、亀裂は要素境界のみに発生・伸長するものと仮定する。この場合には、亀裂の発生・伸長・連結などの幾何学的取り扱いは節点の分離に伴う要素分割の変更として取り扱うことができる。さらに、破壊の判定は要素境界辺で行えば良いため、各要素境界辺に確率的ばらつきを考慮して引張強度を与えれば良いことになる。また、このモデル化では、亀裂先端プロセスゾーンの非線形挙動は、亀裂面上の節点に力学的に等価な節点力を作用させることにより表現することができる。

以上がモデル化の概要であるが、個々の問題に対する数値的取り扱いに関しては3. に詳述する。

3. 数値解析法

3.1 有限要素法の破壊力学問題への適用法

非定常動弾性問題における有限要素関係式は次式となる。

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t) \quad (1)$$

ただし、 $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $\ddot{u}(t)$ 、 $f(t)$ はそれぞれ時刻 t における節点変位ベクトル、節点変位速度ベクトル、節点変位加速度ベクトルおよび節点力ベクトルであり、 K 、 C 、 M はそれぞれ剛性マトリックス、粘性マトリックスおよび質量マトリックスである。本解析では、定ひずみ要素を用いて K を与え、 M はLumped Mass法¹⁵⁾で与えた。また、 C は内部粘性マトリックス C_{in} と連続境界条件のための部分マトリックス C_b に分解されるが、縦波及び横波の減衰特性 Q 値が等しく一定であると仮定し、 $C_{in} = K / (2\pi f_0 Q)$ と与えた¹⁵⁾。ただし、 Q は Q 値であり、 f_0 は応力波の代表周波数である。このような前提のもとに、(1)式にNewmark- β 法¹⁶⁾を適用して定式化を行った。なお、 β の値としては1/4(定加速度法)を採用した。

次に、前述のように、亀裂の発生・伸長・連結などは要素境界辺の破壊として取り扱う。そこで、要素境界辺の応力をその要素境界辺を含む要素の応力の平均値で与え、これとその要素境界辺の引張強度の比の値

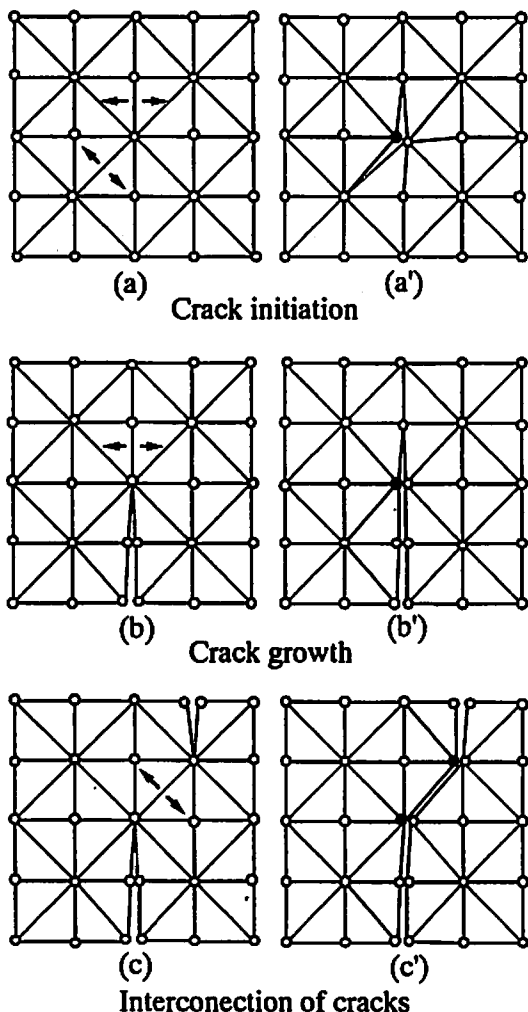


Fig. 1 Treatment of tensile fracture and remeshing procedure. Where open and closed circles indicate original nodal points and additional nodal points, respectively.

(局所危険率)により破壊を判定することとした。破壊判定および破壊後の処理を模式的に示すとFig. 1のようである。すなわち、亀裂の発生に関しては、Fig. 1 (a)に示すように、節点周囲の要素境界辺の局所危険率を求め、注目する節点を含む二つ以上の境界辺の局所危険率が1以上となった場合に破壊が生じると考えた。そして、破壊と判定された場合には、Fig. 1 (a')に示すように、新節点を付加して境界辺を分離し、これにより亀裂の発生を表現した。また、亀裂先端部の破壊に対しては、Fig. 1 (b)に示すように、亀裂先端を含む要素境界辺の危険率から破壊を判定した。そして、破壊と判定された場合にはFig. 1 (b')のように新節点を付加して境界辺を分離し、これにより亀裂伸

長を表現した。なお、亀裂が伸長して他の亀裂と連結する場合には、Fig. 1 (c) (c')に示すように、二つの新節点を付加する必要がある。なお、本解析では必ずしも要素を用いたが、高次要素を用いても原理的にはほぼ同様な処理を行うことができる。この場合には、モデルの近似精度の改善が期待できる。

3.2 引張強度分布

材料の破壊が材料内の微視的欠陥(潜在亀裂)に支配され、かつ、最弱リンク仮定が成立する場合には、材料強度の確率分布はWeibull分布に従うことが知られている。すなわち、 n 個の微視的欠陥を有する材料の強度 S_i の累積確率関数 $G(n, S_i)$ と平均期待値 $S_i(n)$ は次式で与えられる⁷⁾。

$$G(n, S_i) = 1 - \exp(-\alpha n S_i^m) \quad (2)$$

$$S_i(n) = (\alpha n)^{-1/m} \Gamma(1 + 1/m) \quad (3)$$

ただし、 Γ はガンマ関数、 α および m は材料固有の定数であり、特に、 m は均一性係数と呼ばれる。ここで、欠陥の体積密度を一様と仮定し、基準体積 V_0 とその体積における平均引張強度 $S_i(V_0)$ を考えると、(2)、(3)式の関係から、任意体積 V の強度 S_i の累積確率関数は次式で与えられる。

$$G(V, S_i) = 1 - \exp[-(V/V_0)(S_i/S_i(V_0))^m \Gamma(1 + 1/m)] \quad (4)$$

したがって、基準体積 V_0 における平均引張強度 $S_i(V_0)$ と均一性係数 m が与えられれば、体積 V の引張強度 S_i の分布が算定されることになる。なお、以下の解析では、体積 V を要素境界辺の長さの二乗とモデル厚さとの積で与え、それぞれの要素境界辺の引張強度が(4)式を満足するようにモンテカルロ法により与えることにした。

3.3 亀裂面の力学挙動

3.3.1 引張軟化則

亀裂先端プロセスゾーンを有限の強度を有する亀裂面であると取り扱くと、プロセスゾーンの力学特性は亀裂面の開口変位と結合力との関係、すなわち、引張軟化則で表現することができる。引張軟化曲線は、材料ごとに実験的に決定する必要があるが、ここではその近似関数である1/4モデル¹⁷⁾を採用することにした。1/4モデルでは開口変位 δ と亀裂面の結合力 S との関係は(5)式およびFig. 2で与えられる。

$$\begin{aligned} S &= S_1 - (S_1^2/G_I)\delta & ; 0 < \delta < w_1 \\ &= S_1/4 - (1/20)(S_1^2/G_I)\delta & ; w_1 < \delta < w_2 \\ &= 0 & ; w_2 < \delta \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 G_I は図中の暗色部の面積、つまり、単位面

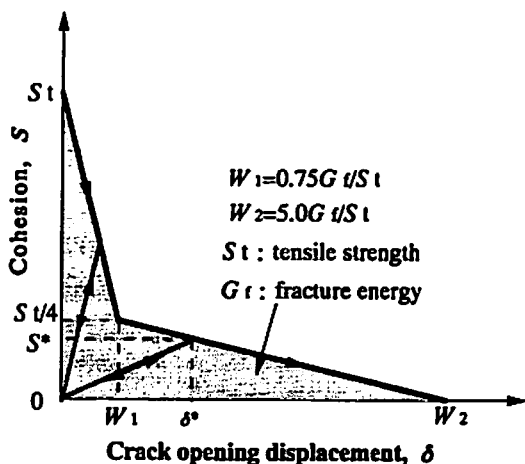


Fig. 2 Relation between the cohesion of crack faces and crack opening displacement.

積の亀裂生成に必要なエネルギーであり、破壊エネルギーと呼ばれる。また、 w_1, w_2 は $w_1 = 0.75G_f/S_t$ 、 $w_2 = 5G_f/S_t$ である。さらに、引張軟化の状態で開口変位が減少する場合や減少後再び増大する場合の開口変位 δ と結合力 S との関係は、過去の最大開口変位 δ^* に対して求められた結合力 S^* を用いて次式で与えることにした。

$$S = S^*(\delta/\delta^*) \quad ; \quad 0 < \delta < \delta^* < w_2 \quad (6)$$

したがって、以下の解析では、亀裂面の開口変位の増減を調べた後、その値を(5)式もしくは(6)式に代入して結合力を算定し、亀裂面上の節点にそれに対応する節点力（以下、結合節点力と呼ぶ）を付加させた。なお、上記のモデル化に基づいて、以下ではプロセスゾーンまでも含めて亀裂と呼ぶことにするが、特に、区別が必要な場合には、亀裂面結合力が存在する領域をプロセスゾーン、存在しない領域を開口亀裂と呼ぶことにする。

3.3.2 亀裂の閉合

本解析では亀裂はすべて分離した二つの境界面として取り扱われるため、亀裂面に垂直な方向に圧縮応力が作用した場合、数値計算上、開口変位が負となる場合（以下、過剰閉合と呼ぶ）が生じる。そこで、過剰閉合が生じた場合には、亀裂面上の対応する節点に接触圧に相当する節点力（以下、接触節点力と呼ぶ）を与え、これにより開口変位がゼロとなるようにした。なお、接触節点力の正確な評価は複雑であるため、その近似値を予測して反復計算を行う方法を採用した。すなわち、接触節点力の近似値を次のようにして評価した。まず、過剰閉合が生じた節点に対して、それ

らの節点を含む要素のみを考える。そして、これらの要素において、過剰閉合が生じた節点対以外の節点変位を拘束した状態で、その節点対に過剰閉合と等値逆符号の変位を与えた場合の節点力を求める。通常、このようにして求められる節点力の値は過剰な値を与えるため、計算においては、この値に修正係数を乗じた値を接触節点力の近似値として用いた。今回の解析では、修正係数を0.1~0.5の範囲の値に設定すれば、少ない反復回数で安定な解が得られることが確かめられている。

3.4 計算の概要

具体的な計算の流れ、特に、要素分割、強度設定などの初期処理後の計算の流れを示す。

まず、通常の有限要素計算と同様に、各要素の要素剛性マトリックス、要素質量マトリックスの計算を行った後、これらの要素マトリックスと境界条件から、全体系の剛性方程式を組み立てた後、これを解き各節点の変位を求める。次に、計算された節点変位から亀裂面の開口変位を求め、亀裂面が開いている場合は1/4モデルによる結合節点力を、閉合している場合には接触節点力を作用させて、再び、連立方程式を解く。この反復計算を、亀裂面上の節点力の変化量と過剰閉合量が許容値以下となるまで行う。次に、上記の計算の収束値として求められた節点変位から要素内応力を計算した後、その時刻における要素境界面上の局所危険率を求めて、破壊の判定を行う。局所危険率が1以上の要素境界面に対しては、発生・伸長・連結のパターン分類に基づいて、要素境界の分離処理を行う。そして、要素の組み替え後、時間増分を与えて同様な計算を反復して実行する。

以上が計算の概要であるが、本解析はその原理上、要素分割が解析結果に影響を与える。したがって、この影響を回避するためには、可能な限り要素を細分化する必要があるが、これに伴って、計算容量及び計算時間が急激に増大する。そこで、本計算プログラムでは、全体系剛性方程式のマトリックスはその非零成分のみを一次元配列に格納し、連立方程式の計算にはICCG法¹⁰⁾を採用するなど、計算効率向上の為にアルゴリズムの最適化を計った。

4. 無自由面発破に関する解析例および考察

4.1 解析モデルおよび解析条件

単一の装薬孔による無自由面発破を想定した解析を実施し、破壊形態と強度物性値との関係について考察する。

解析対象領域は、Fig. 3に示すような、無限岩盤中の装薬孔を中心とした円形領域であり、装薬孔内壁に動的の内圧を作用させた。解析モデルの要素分割はFig.

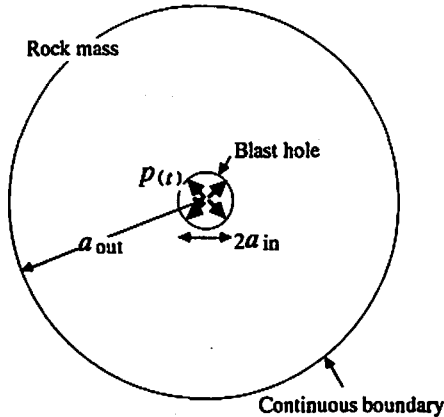


Fig. 3 A model for rock blasting.

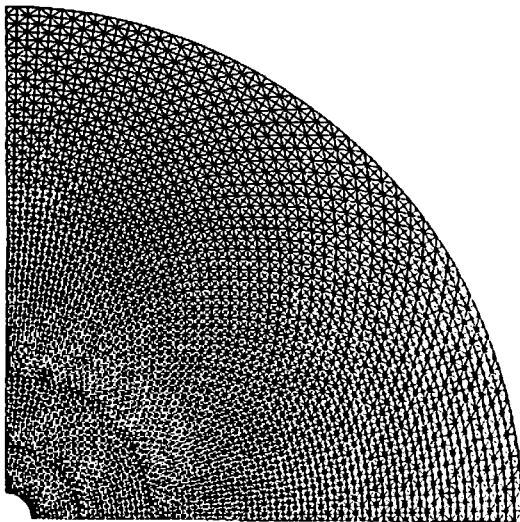


Fig. 4 Finite element mesh for a quarter region of the model.

4に示すようであり、初期節点数19,368、要素数38,376である。また、無限岩盤の条件を表すために、モデル外周境界上には連続境界（粘性境界）の条件を与えている。装薬孔内壁に作用する内圧の関数 $p(t)$ としては種々のものが提案されているが、ここでは簡単な連続関数である $p(t) = (p_0/\xi) [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)]$ の時間関数を採用した。ただし、 p_0 は最大内圧、 α および β は定数、 ξ は $\xi = \text{Max}[\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)]$ で与えられる正規化定数である。以下の解析では、 $p_0 = 100(\text{MPa})$ 、 $\alpha = 3 \times 10^3 (1/\text{s})$ 、 $\beta = 10^5 (1/\text{s})$ と与えたが、内圧の関数形と値に関しては今後の検討課題であると考えている。

解析では、装薬孔半径 $a_{in} = 0.025 \text{ m}$ 、モデル外半径

$a_{out} = 0.5 \text{ m}$ とし、時間増分 $\Delta t = 0.5 (\mu\text{s})$ の条件で解析を行った。岩石としては、まず、花こう岩を想定して物性値をそれぞれ、縦波速度 $C_p = 5.0 (\text{km/s})$ 、横波速度 $C_s = 2.8 (\text{km/s})$ 、密度 $\rho = 2.7 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$ 、 Q 値 $Q = 10$ 、均一性係数 $m = 5$ 、代表体積 $V_0 = 100 \text{ cm}^3$ における平均引張強度 $\bar{S}_t(V_0) = 10 (\text{MPa})$ 、と設定した。また、破壊エネルギーについては、各要素境界の破壊エネルギーと引張強度の比を一定として $G_t/S_t = 2.0 \times 10^{-5} (\text{m})$ と与えた。さらに、破壊エネルギーが破壊過程に及ぼす影響をしらべるために、同様な条件のもとで、 G_t/S_t のみを変化させた解析を併せて行った。

4.2 解析結果および考察

解析結果の一例として、 $G_t/S_t = 2.0 \times 10^{-5} (\text{m})$ の条件における時間経過と亀裂の伸長挙動との関係をFig.5および6に示す。ただし、Fig.5および6は同一の物性値で引張強度設定の乱数が異なる場合（引張強度の空間分布のみが異なる場合）の結果であり、同種の岩石で供試体が異なる場合に対応している。また、両図ともに、装薬孔中心から孔半径の10倍までの範囲を示し、さらに、プロセスゾーンと開口亀裂を区別するために、亀裂面結合力 S が $S > 0$ の場合を細実線で、 $S = 0$ の場合を太実線で示している。図より、時間の経過、すなわち、応力波の進行に伴って亀裂が放射状に伸長していくことがわかる。特に、初期の段階では、孔壁のほぼ全周にわたって亀裂が発生・伸長するが、時間の経過に伴って、ほぼ等間隔の方向をもつ数本の亀裂に収束していくことがわかる。そして、これらの卓越した亀裂はその周囲に多くの微亀裂を伴っていることがわかる。これらの傾向は多くの実験報告例^{6), 11)}と調和的である。また、亀裂状態を見ると、卓越亀裂以外の亀裂はそのほとんどが結合力を有していることがわかる。これは、本解析におけるプロセスゾーンが、いわゆる、ヘアークラックに対応すると考えれば理解しやすい。すなわち、応力が引張強度に達して破壊が生じても、その後の開口変位量が十分でない場合には、亀裂はプロセスゾーンの状態から成長しないことを示している。この結果は、亀裂内へのガスの流入や自由面の存在など亀裂の開口を促進させる因子が存在しない場合には破壊は不十分であり、岩塊の分離が生じにくいことを示している。また、最終段階では、孔壁近傍に開口亀裂が認められるが、現実には、この後これらの開口亀裂内に生成ガスが流入し、卓越亀裂をさらに開口・伸長させていくものと予想される。次に、Fig.5とFig.6を比較すると、個々の亀裂の方向・長さなどは異なるが、両者の大局的傾向は等しいことがわかる。これは、発破における岩石の破砕形態は、同

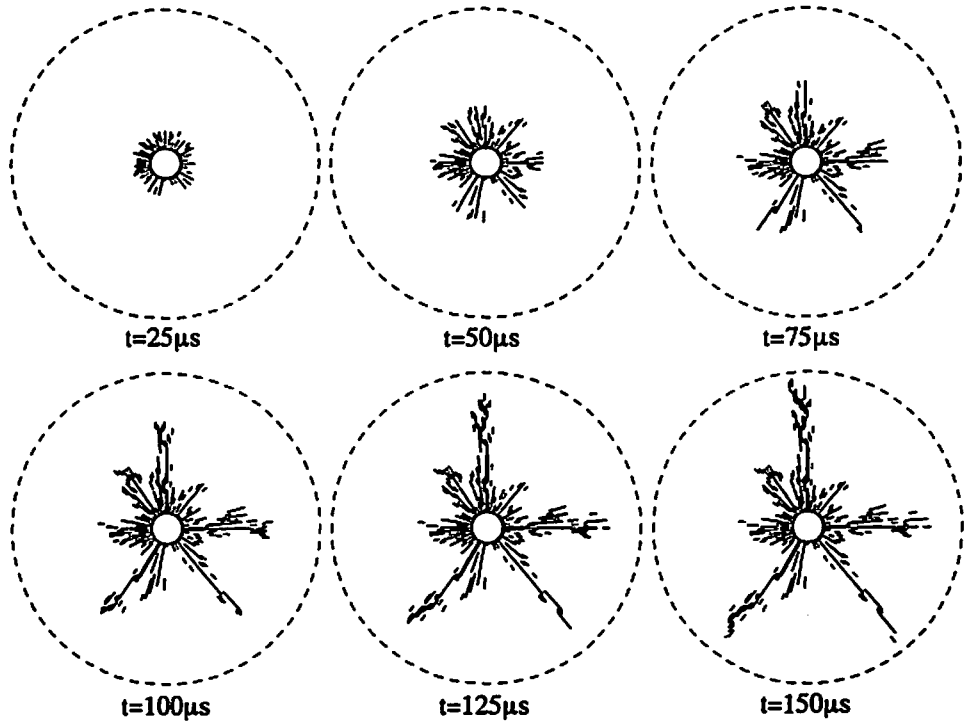


Fig. 5 First example of fragmentation process in the case of $G_I/S_I=2 \times 10^{-5}$, where G_I is the fracture energy and S_I is the tensile strength. Heavy solid line and fine solid line indicate open crack and process zone, respectively.

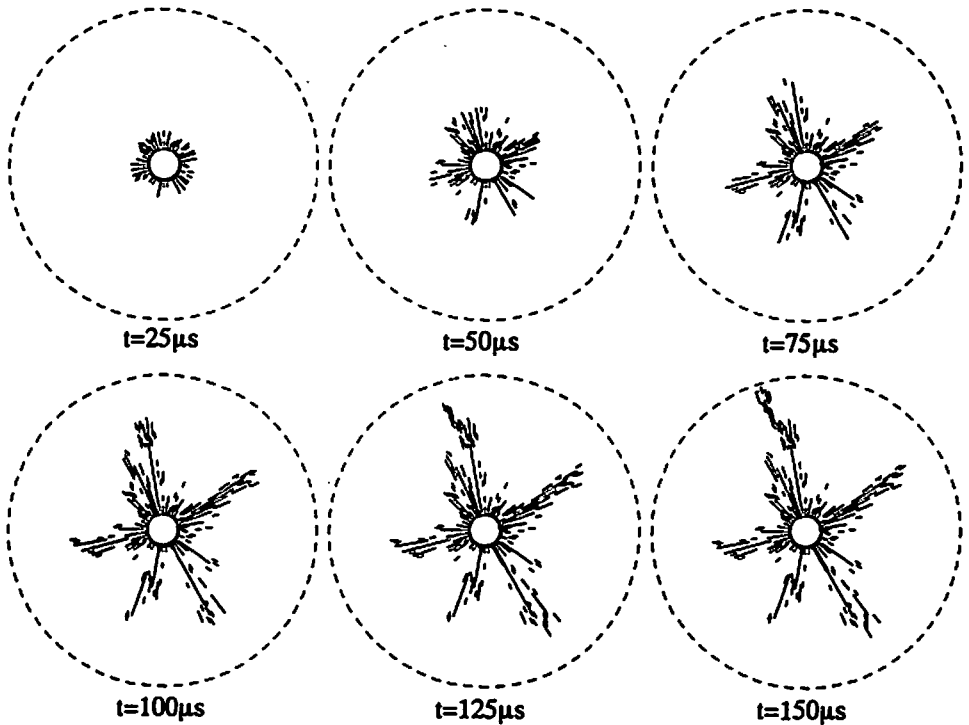


Fig. 6 Second example of fragmentation process in the case of $G_I/S_I=2 \times 10^{-5}$.

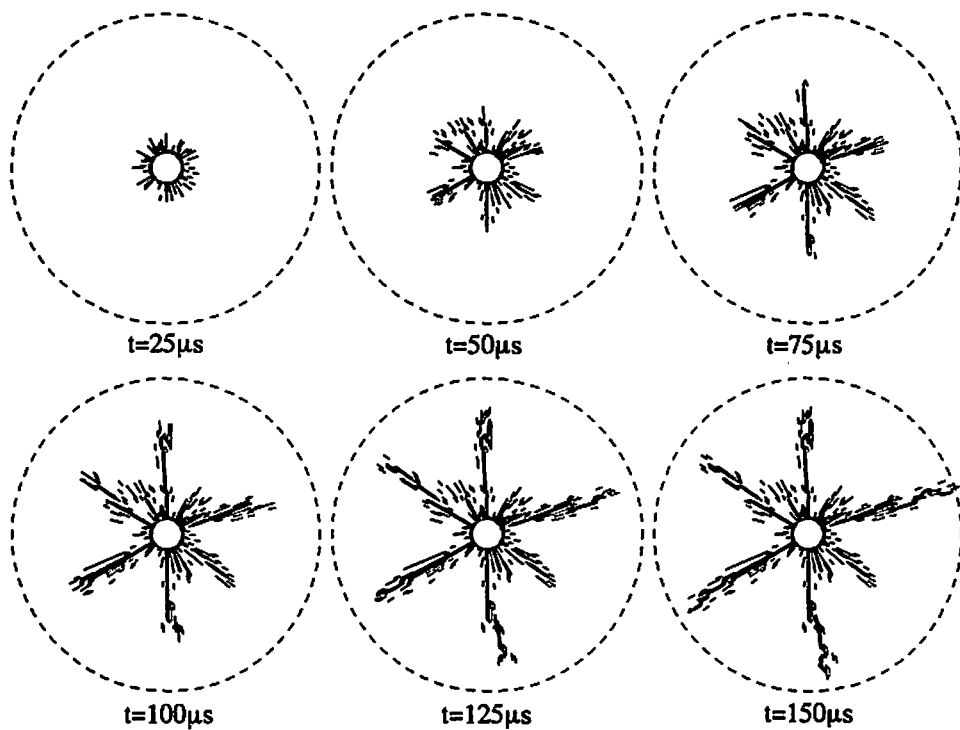


Fig. 7 Fragmentation process in the case of $Gt/S_t=10^{-4}$.

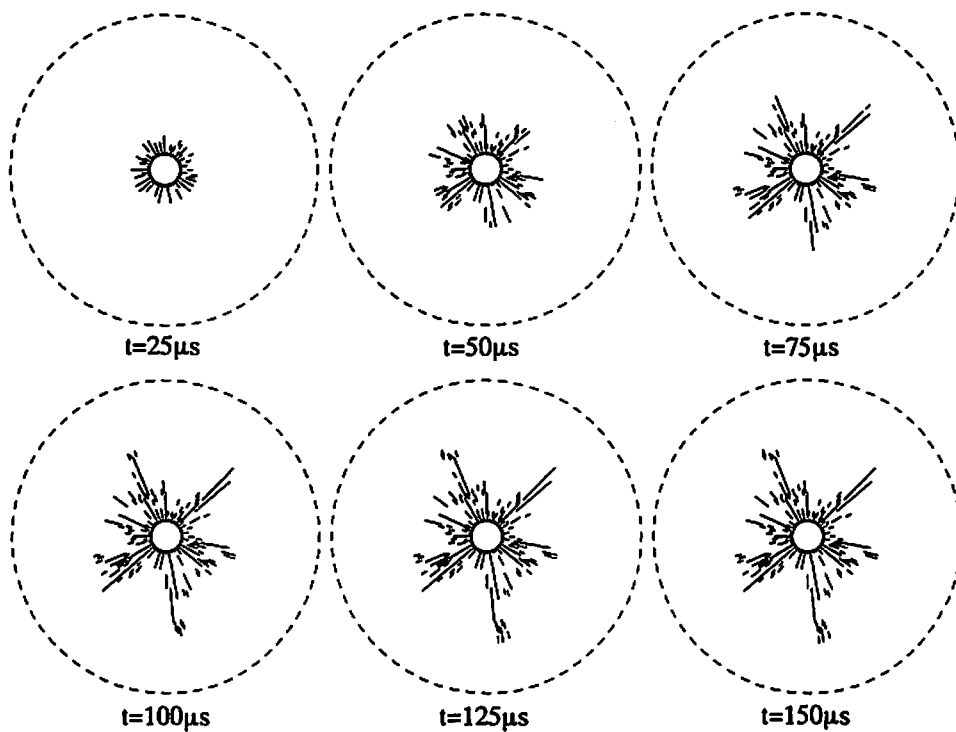


Fig. 8 Fragmentation process in the case of $Gt/S_t=4 \times 10^{-6}$.

じ種類の岩石であってもその詳細な形態は異なるが、大局的には岩石固有の特徴が見い出されるという経験的事実に対応している。すなわち、上記の結果は、発破における岩石破砕の再現性と非再現性が岩石の性質から説明されることを示している。

次に、他の条件を一定として、破壊エネルギーを $G_I/S_I=1.0 \times 10^{-4}$ 、 4.0×10^{-6} (m) と変化させた場合の解析結果を Fig. 7 及び Fig. 8 に示す。図の表示法は前図と同様である。Fig. 5～8 を比較すると、亀裂の伸展形態は破壊エネルギーと密接に関係することがわかる。特に、破壊エネルギーが小さいほど卓越亀裂が明瞭であり、かつ、その最終的な長さも長いことがわかる。また、破壊エネルギーが大きな場合には、最終段階においても、開口亀裂は認められず、すべてがプロセスゾーンの状態にあるが、破壊エネルギーが小さくなると早期の段階から開口亀裂が発達していくことがわかる。これらは、発破による岩石の破砕抵抗が強度のみでなく破壊エネルギーにも関係することを示している。この結果は、破壊エネルギー、すなわち、開口亀裂面の形成に要するエネルギーが、いわゆる、岩石の“しわさ”に対応すると解釈することもできる。

5. 結 言

本論文では、岩石発破の数値実験法の開発を目的として、強度不均一性や亀裂の力学挙動を考慮した動的応力解析法を提案するとともに、解析例にもとづいて、発破における破砕効果について考察を加えた。得られた知見をまとめると以下のようである。

- (1) 発破における岩石の破砕過程について考察を加え、岩石強度の不均一性と亀裂の非線形力学挙動が極めて重要な因子であることを指摘し、これらの効果を考慮した非定常動的応力解析法を提案した。提案した解析法は、有限要素法を基礎とし、亀裂の発生・伸長などは要素境界面の分離として取り扱われる。また、引張強度分布は Weibull 分布により与えられ、これにより、不均一性と寸法効果が表現される。さらに、亀裂先端プロセスゾーンはその力学特性を引張軟化則で与えている。
- (2) 無自由面発破の数値解析例にもとづいて、応力波の進行に伴って亀裂の成長プロセスを明らかにした。すなわち、初期の段階では、孔壁のほぼ全周にわたって亀裂が発生・伸長するが、その後の時間の経過に伴って、ほぼ等間隔の方向をもつ何本かの亀裂のみが卓越した伸長を示すようになる。さらに、同一の岩石であっても、個々の亀裂の方向・長さなどは発破ごとに異なるが、それらの大局的傾向は等しいことを示し、発破における岩石破砕の再現性と非再現性がともに岩石の性質から

説明されることを明らかにした。

- (3) 破壊エネルギーの値が破砕形態に及ぼす影響を検討し、破壊エネルギーの値の増大に伴って卓越亀裂の長さが減少し、破砕抵抗が増大することを示し、発破における岩石の破砕効果は強度のみならず破壊エネルギーに密接に関係することを明らかにした。

なお、以上の解析では、岩石の圧縮（せん断）破壊や、亀裂内へのガスの流入は考慮していないが、今後は、これらの効果をも取り入れて本解法を拡張することにより、発破における岩石破砕の数値実験法を確立しようと考えている。

謝 辞

本研究の実施にあたって、有益なご助言を頂いた八代工業高等専門学校中村裕一助教授に謝意を表す。

文 献

- 1) 例えば、伊藤一郎、佐々宏一：爆破に伴う岩盤内応力に及ぼすアソソンの影響、水臨会誌、16巻、2号、75-78、1966。
- 2) 例えば、佐々宏一、伊藤一郎：爆破衝撃による材料の破壊と波動について、材料、21巻、221号、1972。
- 3) 例えば、中川浩二、坂本佐、山本順一郎：面内方向に爆破衝撃を受ける岩質材料板の挙動と数値シミュレーション、材料、322号、736-741、1980。
- 4) Heuze, F. E., Butkovich, T. R., Walton, O. R. & Maddix, D. M. : Blasting Effect in Jointed Rock, Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol. 1, Balkema (Rotterdam), 347-352, 1991。
- 5) 馬貴臣、三宅淳巳、小川輝繁、和田有司、緒方雄二、勝山邦久：発破シミュレーションと発破解体時の振動軽減、火薬学会誌、56巻、1号、33-43、1995。
- 6) 例えば、工業火薬協会：新発破ハンドブック、山海堂（東京）、1989。
- 7) 山口梅太郎、西松裕一：岩石力学入門、東京大学出版会、1967。
- 8) 矢川元基：破壊力学、培風館（東京）、1988。
- 9) 荻窪裕樹、橋田俊之、庄子哲雄、高橋秀明：引張軟化モデルに基づく花こう岩の封圧依存破壊挙動の数値シミュレーションと実験的検証、資源素材学会誌、107巻、4号、1195-200、1991。
- 10) 大塚浩、金子勝比古、稲葉力、尾原祐三：岩石の静的破壊過程の解析、資源・素材'92講演要旨集、35-36、1992。
- 11) 勝山邦久、佐々宏一、伊藤一郎：応力波の伝播に

- ともなう亀裂の生成機構について, 日本鉱業会誌, 87巻, 1000号, 471-476, 1971.
- 12) 石田誠: 亀裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館, 1976.
- 13) 西谷弘信, 陳玳珩: 体積力法, 培風館(東京), 1987.
- 14) Crouch, S. L., Starfield, A. M.: *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*, George Allen & Unwin(London), 1983.
- 15) 川本眺万, 林正夫: 地盤工学における有限要素法, 培風館, 1978.
- 16) Newmark, N. M.: *A Method of Computation for Structural Dynamics*, Proc. ASME, EM-3, 67-94, 1959.
- 17) 例えば, (社)日本コンクリート協会: コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム, 1990.
- 18) 小国力: 行列演算ソフトウェア, 丸善(東京), 1991.

Fracture mechanics analysis of fragmentation process in rock blasting

by Katsuhiko KANEKO*, Yukinori MATSUNAGA* and Masaaki YAMAMOTO**

A numerical method to simulate the crack propagation in rock blasting has been proposed and effects of the rock properties on the fragmentation process has been discussed.

The proposed method is based on Finite Element Method and Rock Fracture Mechanics. In this analysis, the dynamic stress field induced by explosives is determined by the conventional Finite Element scheme, and the initiation and the propagation of cracks are represented by the remeshing procedure. Furthermore, the heterogeneity of rock strength as well as the nonlinearity of the mechanical behavior of crack also can be treated.

Demonstrating the results obtained by the proposed method, it is pointed out that the fracture energy of rock plays an important roles in controlling the fragmentation process and mode in rock blasting.

(*Department of Materials Science & Resources Engineering, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860, JAPAN.

**Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 1-1-1 Uchisaiwaicho, Chiyoda-ku, Tokyo 100, JAPAN)