

油圧ブレーカによる大岩破碎の数値シミュレーション

Numerical Simulation on the Boulder Breakage by Hydraulic Breaker

高橋 弘*・泉 亘**・金子 勝比古***

Hiroshi TAKAHASHI, Wataru IZUMI and Katsuhiko KANEKO

*正会員 工博 東北大学大学院助教授 工学研究科地球工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01)

**東北大学大学院工学研究科地球工学専攻博士前期課程 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01)

***正会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科環境資源工学専攻 (〒860-8555 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

In this study, numerical simulations on the boulder breakage by the hydraulic breaker were carried out by using Distinct Elements Method (DEM). The boulder consisted of 4106 elements and two kinds of chisels were used in this simulation. One is a flat type chisel and the other is a wedge type chisel. These chisels were penetrated into the boulder and the generation and development of the fractures in the boulder were simulated. It was confirmed through this simulation that the flat type chisel broke the chisel largely although the large impact force and hitting number are necessary. On the other hand, the wedge type chisel needed small impacting force, and hitting number to break the boulder was also small.

Key Words: Distinct Element Method, boulder, numerical simulation, fracture

1. はじめに

NATM 工法による山岳トンネルの建設や鉱山等の採鉱現場では、基本的な作業の 1 つに「発破による岩盤破碎」がある。この発破作業において大岩が生じた場合、大岩をそのまま処理しようとする、その後の作業効率が極めて低くなることから、一般にこの大岩を小さく砕く作業、いわゆる「小割作業」が行われる。特に石灰石鉱山では、そのほとんどが立坑投入方式を採用しており、立坑に投入された鉱石は、立坑下部に設置されたクラッシャーにより破碎されるが、この時、直径 1 メートルを超えるような大岩がクラッシャーに入ると、クラッシャーを破損させる危険性があることから、「小割作業」は必要不可欠であり、クラッシャーに入る前に、グリズリーバーと呼ばれる鉄格子で大岩を受け止め、これを小割室に設置された油圧ブレーカにより破碎している。しかし、小割室は騒音や粉塵が大量に舞うなどオペレータにとって決して快適な環境とは言えないことから、現在、一部の鉱山では小割室にビデオカメラを設置し、オペレータがそのモニター画面を見ながら油圧ブレーカを遠隔操作して小割作業を行っている。このシステムは、オペレータが快適な環境下で小割作業を行うことを可能にした点で評価されているが、この油圧ブレーカの遠隔操作には熟練が必要であるとともに、グリズリーバーの目詰まりを

防ぐために小割作業は長時間連続して行われなければならないことから、オペレータの大幅な負担削減には未だ至っておらず、この大岩小割作業の自動化が望まれているのが現状である。

この大岩の小割作業の自動化を実現するためには、1)大岩の検出、2)大岩位置への油圧ブレーカ先端の移動制御、3)破碎の実行といった一連のタスクの自動化を実現する必要がある。これまでの研究^{1)~3)}で上記の 1), 2), 3)のタスクの自動化について検討が行われているが、油圧ブレーカの鉄柱部分(以下「のみ」と記す)の滑りの検出や大岩破碎の有無判断の精度向上など課題も残されている³⁾。

ところで、上記の 1), 2), 3)のタスクを自動化するにあたり、「のみ」の先端の形状によって、打撃とともにどのようにき裂が大岩内で発生・進展し、大岩が破碎されるのかを予め知っておくことができれば、最適な打撃点や打撃方法を決定することができるなど、作業性の向上が期待できる。しかし打撃による大岩破碎のメカニズムが十分に明らかにされているとは言い難い。

そこで本研究では、個別要素法(Distinct Element Method: 以下 DEM と記す)を用いて、大岩破碎の数値シミュレーションを行い、油圧ブレーカによる大岩破碎のプロセスを探るとともに、「のみ」を通して大岩に与えられる荷重をシミュレートし、大岩の小割作業の効率化に資することを目的とする。なお

本研究では、研究の第1段階として、2次元モデルを考え、数値シミュレーションを行うことにする。

2. DEMによる大岩破碎シミュレーションの原理

2.1 DEMモデル

DEMは、主として、非連続体の挙動を扱う一手法であり、個々の要素を剛体と考え、それぞれの要素ごとに運動方程式をたて、これを差分近似し、時間領域において前進的に解くことで、要素の集合体としての動的挙動を解析する方法である⁴⁾。本研究で用いるDEM自体には特に新規性はないが、小割作業の効率化・自動化を実現するには、大岩の破碎過程を物理的に解析し、最適な制御則を構築する必要がある。本研究は、従来、経験に頼っていた小割作業を数値シミュレーションにより解析しようとするものであり、その計算手法を提案し、岩石内部のき裂状況を探り、小割作業自動化のための制御則の構築に寄与しようとする点に新規性がある。

さて、運動方程式をたてるためには、要素間に作用する力を評価する必要があるが、この力の評価は、まず、要素が別の要素と接触している時に要素間相互作用力が働くとし、図-1に示すように要素中心間を結ぶ方向を法線方向、またその方向に垂直な向きを接線方向として、それぞれに弾性を表すスプリング、粘性減衰を表すダッシュポット、接線方向にのみ摩擦を考慮するためのスライダを設定したモデルを仮定し、これにより要素間に働く力を算出する。

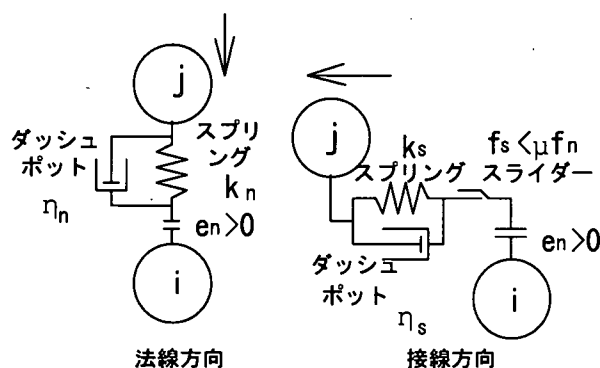


図-1 DEM計算における要素間モデル

DEMは、粒状体の挙動解析によく用いられる方法であるが、スプリングの破壊基準を設定し、それを超える力が働くまで要素間を結合状態にすることで、コンクリートや岩盤などと言った連続体と考えられる媒質の集合体の挙動まで取り扱うことが可能である⁵⁾。すなわち、個別要素法では、スプリングの破壊基準を設定することで、連続体から非連続体

まで一連の過程をシミュレートできることから、ここでは個別要素法を用いて大岩破碎のシミュレーションを行うことにする。DEM計算の基本原理は、多くのテキストあるいは文献に記されているので⁶⁾、その詳細はこれらの文献にゆずり、ここでは本研究で対象とする大岩のような連続体と考えられる媒質の集合体に適用するための条件について述べる。

2.2 破壊基準の設定

連続性を示す媒質の集合体は、初期の状態では圧縮と引張いずれの力が作用しても、それらに抵抗し、かつせん断変形にも抵抗する。しかし要素間の結合が切れた場合、圧縮力とせん断変形には抵抗するが、引張力には抵抗しない。つまり粒状体と同じ解析になる。したがって要素間の結合が切れる条件として、「引張力が原因の場合」と「せん断変形が原因の場合」の2つを考え、それぞれに対して破壊基準を設定し、それらを超える力が作用するまではいずれの力にも抵抗するように定めることで、要素間を結合状態とすることが可能となる。

2.2.1 引張力による法線方向の破壊基準

引張強度を $S_{\max}$ として、法線方向の力が以下の条件を満たした時、結合が切れたものとして、法線方向に加え接線方向にも力が働かなくなるようにする。ただし、 f_n は要素間に作用する法線方向の力、 e_n および e_s は法線方向および接線方向のスプリングによる力、 d_n および d_s は法線方向および接線方向のダッシュポットの力を示す。添字 t は、時刻 t における値を示す。なお、要素間に作用する力は、圧縮を正とする。

$$\begin{aligned} [f_n]_t &< S_{\max} (< 0), \\ [e_n]_t &= [d_n]_t = [e_s]_t = [d_s]_t = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

粒状体に対しては、DEM計算において要素間に引張を認めていないが、連続体媒質に対しては、式(1)に示すように引張を認めており、法線方向のスプリングによる力が $S_{\max}$ 以上である場合はいずれの力にも抵抗することになる。したがって、式(1)を満たさなかった場合は、次のせん断変形による破壊基準にしたがって、要素間の結合が切れたか否かを判断する。なお、本研究では、引張により要素間の結合が切れた際、引張力を開放し、残留強度は残らないとした。

2.2.2 せん断変形による接線方向の破壊基準

一般にせん断強度は、せん断面に作用する直応力の影響を受ける。DEMモデルにおけるせん断強度は、接線方向のバネの破壊基準に相当すると考えら

れる。したがって実現象と同様に、接線方向の破壊基準としてモール・クーロンのせん断破壊基準を用いた⁵⁾。モール・クーロンの破壊基準式は次式で表される。ただし、 τ_c はせん断強度、 σ はすべり面上の直応力、 c は粘着力、 ϕ_c は内部摩擦角である

$$\tau_c = c + \sigma \cdot \tan \phi_c \quad (2)$$

(1) 要素間に圧縮力が作用する場合

まず、通常の DEM 計算にしたがって、要素間に働く法線方向および接線方向の力を求める。上述したように本研究では 2 次元の解析を考えるため、要素を半径 r_i 、奥行き d の円柱要素を仮定する。図-2 に示すように、要素の接触面の面積を S として、接線方向の破壊基準を以下のように定める。

$$T_{\max} = S \cdot \tau_c = S \cdot c + S \cdot \sigma \cdot \tan \phi_c = C + [f_n]_t \cdot \mu \quad (3)$$

ただし

$$C = S \cdot c \quad (4)$$

$$[f_n]_t = S \cdot \sigma \quad (5)$$

$$\mu = \tan \phi_c \quad (6)$$

C は DEM 解析における粘着力、 μ は前出の要素間の摩擦係数、 $[f_n]_t$ は時刻 t における要素間に働く法線方向の力である。

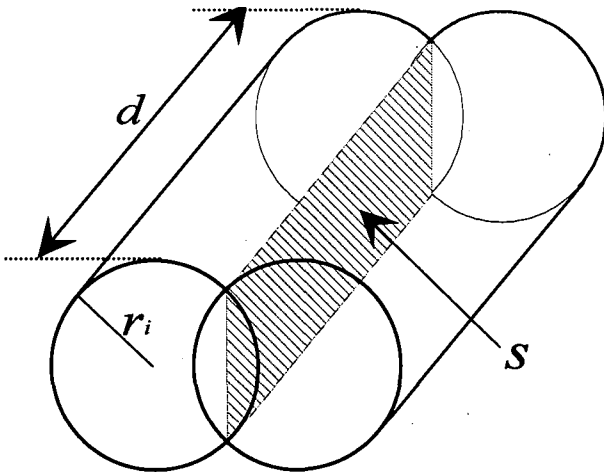


図-2 要素間の接触面

通常の計算にしたがって求められた接線方向の要素間の力 $[f_s]_t$ と式(3)の $T_{\max}$ とを比較し、次式が成り立つ時、接線方向のバネは破壊し、要素間の結合が切れたものとする。またこの時、 $[f_s]_t$ を動摩擦力で置き換える。

$$[f_s]_t > T_{\max}, [f_s]_t = \mu \cdot [f_n]_t \quad (7)$$

(2) 要素間に引張力が作用する場合

圧縮力が作用する場合と同様に、通常の DEM 計算にしたがって法線方向および接線方向の要素間に働く力を求める。引張力が作用する場合は、式(3)の右辺第 2 項を 0 と仮定し、以下のように破壊基準を設定する。

$$T'_{\max} = C \quad (8)$$

要素間の引張力を計算し、次式が成立する時、要素間の結合が切れたものとする。またこの場合は、もはやバネの力の伝達を行う能力は失われているので、法線方向および接線方向の力を 0 にする。

$$[f_s]_t > T'_{\max}, [f_n]_t = [f_s]_t = 0 \quad (9)$$

粒状体を扱う通常の DEM 計算では、要素間に引張を認めず、要素間接触が外れた場合は、法線方向および接線方向ともに力が作用しなくなるようにするが、本計算では、この部分を式(1)で置き換え、さらに式(2)ないし式(9)の条件を付加して、要素間の力の算出を行う。要素間の結合が切れた部分については、通常の粒状体を扱う計算方法に戻すことで、連続性から不連続性の移行を自然に表現することが可能である。

3. 大岩のモデル化

3.1 要素の配置

本シミュレーションでは、次の手順で要素を配置した。

- 1) 等径要素を幾何学的に並べる。
- 2) 要素に重力を作用させることで要素の位置を安定させる。

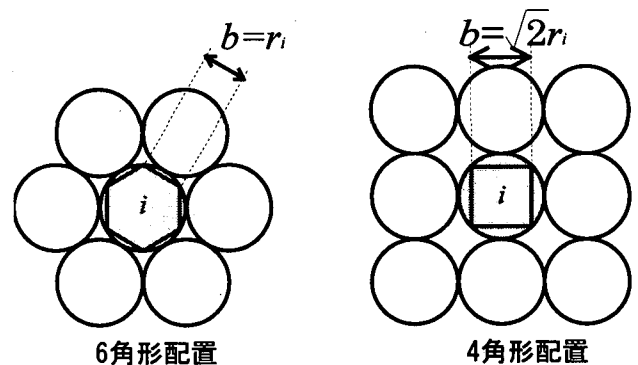


図-3 等径要素配置

要素の並べ方は、規則的な配置とランダムな配置に大別されるが、本研究では基礎的研究として配置が容易な規則的配置を仮定した。

ところで、岩石や他の材料では、間隙比が小さくなるに従って粘着力が増加する傾向があるが、間隙比が小さくなると、接触要素数が多くなり、単位接

触面積(接触要素1個当りの接触面積)が小さくなる。そこで、図-3に示すように、単位接触面の幅を b として要素に内接する正多角形の1辺を仮定する。このように b の値を導入すると、間隙比が小さくなり接触要素数が多くなるほど b の値は小さくなるが、 b の総和は大きくなるので、モデル全体としての粘着力が大きくなり、現実の傾向と一致する⁵⁾。

規則的な配置としては、図-3に示すような6角形配置と4つの等径要素が接触する4角形配置が考えられる。それぞれの配置における要素 i の b の総和は、以下のように求められる。

・6角形配置の場合

$$\Sigma b = 6b = 6r_i \quad (10)$$

・4角形配置の場合

$$\Sigma b = 4b = 4\sqrt{2}r_i \cong 5.7r_i \quad (11)$$

本研究では、岩石を対象としており、なるべく間隙比は小さいほうが望ましいと考え、6角形配置を採用し、等径要素を並べることにした。

2)の計算は、1)で並べた要素に対して結合力を与えずにDEM計算を実行し、要素配置を安定させ、さらにモデルに対して実際の岩石に近い内部応力状態を与えるために行う。DEM計算は粒状体に用いる場合と同様の方法で行うが、この計算における要素は結合状態ではないので、この計算に限ってはモデルが崩れないように、要素の両側に仮想側壁を設置した。2)のDEM計算におけるパラメータの値は表-1に示す通りである。き裂の進展といった微視的プロセスの解析には、要素径はできるだけ小さい方が望ましい。しかし要素径を小さくすると、同一寸法の岩石を形成するための要素数が大きくなり、その結果、計算コストが飛躍的に増大する。そこで本研究は、計算コストを考慮に入れ、要素径は5mmと仮定した。

表-1 安定化計算の条件

要素径	5 mm
密度	2700 kg/m ³
法線方向のバネ定数	1.0×10 ⁶ N/m
接線方向のバネ定数	1.0×10 ⁶ N/m
減衰係数	0.2
粘性係数	4.3×10 ² Ns/m
要素－要素間の摩擦係数	0.9
要素－地面および側壁間の摩擦係数	0.9
刻み時間	0.00001 sec

安定化計算では、簡単のため法線方向と接線方向のバネ定数と粘性係数はそれぞれ等しいと仮定した。ここで要素の質量を m として、バネ定数 k と減衰係数 h を用いて粘性係数 η は以下の式で求めることができる。

$$\eta = h \cdot 2\sqrt{m \cdot k} \quad (12)$$

計算ではバネ定数を種々に変化させ、要素の状態が物理的に、かつ定性的に正しいと思われる安定状態が得られる時のバネ定数を試行錯誤により決定した。また減衰係数は解析を安定化させるために設定するものであり、この値も試行錯誤により決定した。要素－要素間の摩擦係数については、従来の研究⁷⁾を参考に0.9と仮定した。また要素－地面および側壁間の摩擦係数は、便宜上、要素－要素間の摩擦係数に等しいと仮定した。

3.2 パラメータの決定

大岩をモデル化するにあたり、モデルに対して実際の岩石に近い強度を与える必要がある。通常、岩石の強度は一軸圧縮強度により評価されるが、DEMモデルでは、主として要素間の粘着力および引張強度が一軸圧縮強度を支配する。またヤング率の値に最も大きな影響を及ぼすパラメータは、要素間のバネ定数である。したがって粘着力、引張強度およびバネ定数等のパラメータを変えながら、コンピュータ上で一軸圧縮試験を模擬した解析を行い、想定する岩石の一軸圧縮強度およびヤング率に近い値が得られた時のパラメータを大岩のモデルに用いることにする。

決定すべきパラメータは、1)粘着力、2)引張強度、3)内部摩擦角、4)法線方向および接線方向のバネ定数および5)法線方向および接線方向の粘性係数である。1)～3)は物性値であり、本来は解析の対象とする岩石の物性値を使用すべきであるが、実際の岩石を入手し得なかったため、本研究では文献値⁸⁾を参考にした。ただしDEMモデルでは、断面内の要素のバネにかかる力分布が等しいとは限らず、さらに応力集中が起こりやすいため、文献値をそのまま用いても、予想される一軸圧縮強度の半分ほどの荷重で破壊してしまうことがあることから、粘着力や引張強度は文献値よりも大きく設定する必要があるとされている⁵⁾。したがって本シミュレーションでは、内部摩擦角については文献値に近い値を、また粘着力と引張強度は文献値の2倍程度の値を用いた。「4)法線方向および接線方向のバネ定数」および「5)法線方向および接線方向の粘性係数」は仮定値であるが、法線方向のバネ定数 k_n を決定すれば、法線方向の粘性係数は、式(12)で求めることができる。ま

た接線方向のバネ定数 k_s は、以下のような P 波速度 V_p および S 波速度 V_s との関係式から算出した。

$$k_s = \frac{V_s^2}{V_p^2} \cdot k_n = \frac{1-2 \cdot \nu}{2(1-\nu)} \cdot k_n \tag{13}$$

ここで ν はポアソン比であり、文献値に近い値を用いた。本シミュレーションでは、法線方向のバネ定数 k_n のみを試行錯誤により決定すれば、残りのパラメータは自動的に決定されることになる。

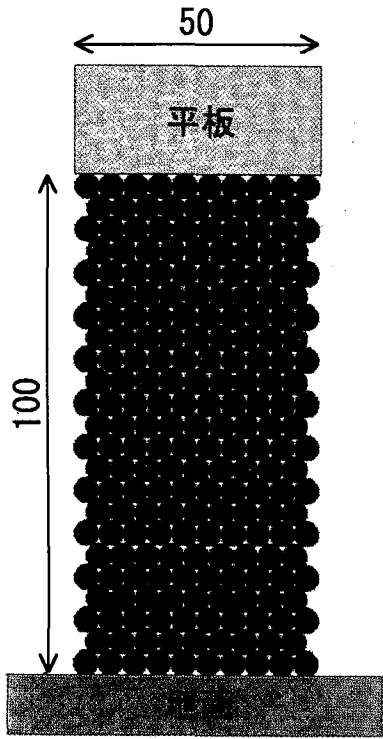


図-4 一軸圧縮試験の概略

本シミュレーションで想定した岩石は安山岩であり、一軸圧縮強度が約 150MPa、ヤング率が約 30GPa となるようにパラメータを決定した。解析に用いた供試体モデルの寸法は、図-4 に示すように、幅 50mm、高さ 100mm、奥行き 50mm であり、設定した地面に供試体モデルを設置し、供試体モデル

表-2 決定したパラメータ

粘着力	10000 N	文献値の 2 倍
引張強度	5000 N	粘着力の 1/2
内部摩擦角	24 degrees	文献値
法線方向のバネ定数	2.0×10^9 N/m	仮定値
接線方向のバネ定数	6.0×10^8 N/m	式(13)による計算値
粘性係数	4.0×10^5 Ns/m	式(12)による計算値
ポアソン比	0.25	文献値
減衰係数	0.46	仮定値

表-3 一軸圧縮試験時の計算条件

要素径	5 mm	設定値
要素数	219 個	設定値
密度	2700 kg/m ³	設定値
要素－要素間の摩擦係数	0.45	式(6)による計算値
要素－地面および側壁間の摩擦係数	0.45	式(6)による計算値
刻み時間	0.0000001 sec	設定値

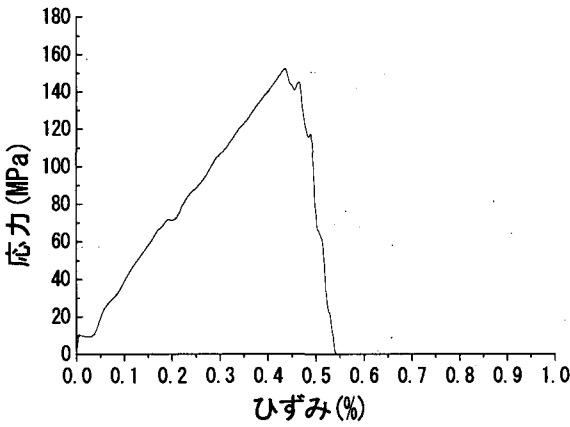


図-5 一軸圧縮試験における応力－ひずみ線図

の上部から幅 50mm の平板を降下させることで、一軸圧縮試験を模擬した。

決定したパラメータと一軸圧縮試験時の計算条件を、それぞれ表-2 および表-3 に示す。このパラメータを用いた時の一軸圧縮試験の結果である応力－ひずみ線図を図-5 に示す。計算時間はビジュアルテクノロジー社製ワークステーション Alpha6 で約 2 分である。

次に一軸圧縮試験の結果より取得したパラメータの値を用いて、図-6 に示すような 4106 個の要素を用いて大岩のモデルを構成した。寸法は幅 300mm、高さ 300mm、奥行き 50mm であり、一軸圧縮試験の場合と同様に、平坦な地面に置いた状態で、大岩中央上部 50mm の範囲に「のみ」を貫入させることにした。シミュレーションでは、この 4106 個の要素の全ての結合を解析対象領域とし、第 2 章で示した破壊基準にしたがって、破壊の有無を判断した。ただし実際の岩石の非均質性を模擬するために、パラメータの中で破壊を支配する粘着力と引張強度は、すべての要素間に同じ値を与えるのではなく、ある範囲の値をランダムに割り振ることで各要素間の結合力を変え、実際の岩石と同様に、大岩のモデルに対しても非均質性を持たせた。数値の与え方につい

ては、コンピュータ内で区間[0,1]上の一様乱数を要素間の数だけ発生させ、それをボックス・ミュラーの方法により正規乱数に変換するという手順で行った。

本シミュレーションで用いた「のみ」の形状を図-7に示す。フラット型およびくさび型ともに幅は50mmとし、くさび型のみの先端は、実物の「のみ」に合わせて105度とした。

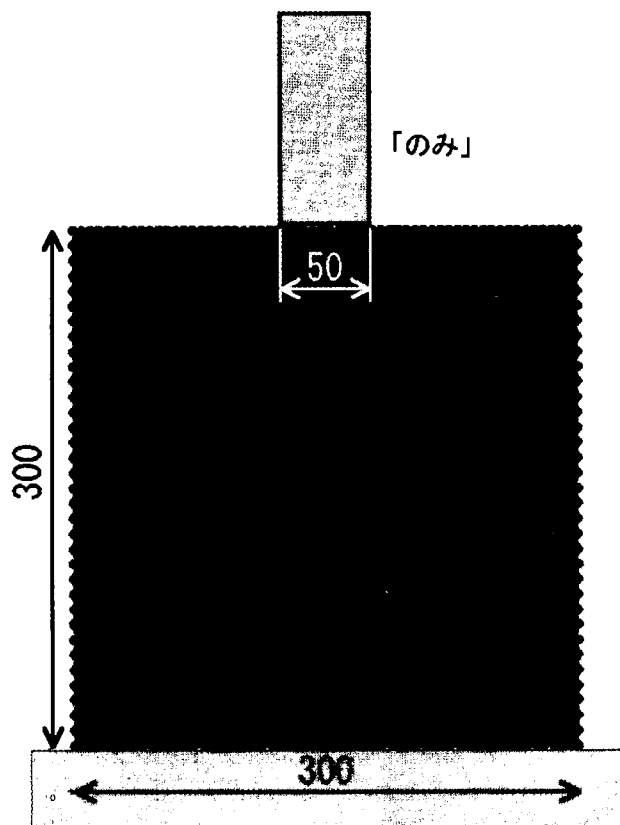


図-6 大岩のモデル

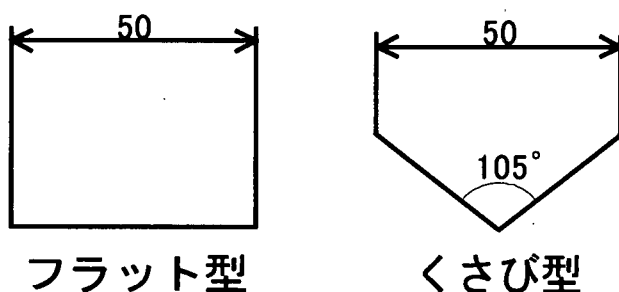


図-7 「のみ」の形状

4. シミュレーション結果および考察

4.1 「のみ」の貫入方法

実際の油圧ブレーカによる大岩破碎では、毎秒、一定の打撃数で打撃を続け、「のみ」を大岩に貫入させ、大岩を破碎する。例えば打撃周波数が10Hzの場合、1秒間で10回（0.1秒間で1回）の打撃を与えていることになる。しかし0.1秒間のうち、打撃

に関与している時間と「のみ」が大岩から離れている時間の割合は明らかではない。また前述したように、本シミュレーションでは刻み時間を1/10000000秒に設定しているので、仮に1秒間の現象をシミュレートしようとする場合、Alpha6で約61時間の計算を要することになる。このように実時間に合わせたシミュレーション時間の設定では、膨大な計算時間を必要とするため、「のみ」の形状を変化させて数多くのシミュレーションを実行する場合には現実的ではない。そこで本シミュレーションでは、単に打撃数のみに注目して貫入の方法を考えることにした。

「のみ」の打撃を通して大岩内のき裂を成長させるならば、1回の貫入で大岩内に少しでもき裂が生じなければ、き裂の進展は期待できない。そこで予備的なシミュレーションとして、「のみ」を静的に大岩に貫入させたシミュレーションを行い、最初のき裂が生じる「のみ」の貫入量を調べたところ、フラット型は約0.3mm、くさび型は約0.2mmであった。これらは、大久保ら⁹⁾の研究で示されている、ボタンビットの衝撃貫入試験における1打撃あたりの貫入量である約0.3mmおよび削岩機の1打撃あたりの削孔量である0.25ないし0.5mmとほぼ一致しており、本シミュレーションで模擬する「のみ」の衝撃貫入における貫入量としてほぼ妥当であると考えられる。したがって、この貫入量だけ「のみ」を大岩に貫入させ、元の位置に戻すという操作を繰り返し実行すれば、最初に生じたき裂が成長し、やがて破碎に至ると推察される。なお、「のみ」は上下方向には移動するが、左右には移動しないように設定し、「のみ」と要素との接触状態は、要素の位置と「のみ」の下面の位置との幾何学的関係により決められる。

本シミュレーションで模擬した衝撃貫入の方法を、フラット型の場合を例に取り図-8に示し、以下にその手順を示す。

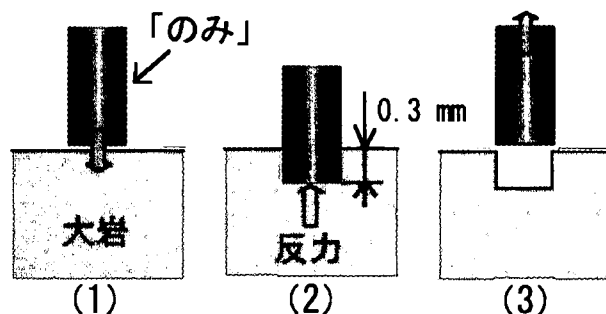


図-8 「のみ」の衝撃貫入の方法

(1) 「のみ」を大岩から約0.1mm離れたところから降下させる。

- (2) 「のみ」と大岩が接触した地点から、約 0.3mm 貫入させる。
- (3) 貫入が完了したら、「のみ」を元の位置に戻す。
この時点で 1 打撃が完了したものとする。

「のみ」の降下速度は 1m/s に設定した。この値も、大久保ら⁹⁾の研究で示されているように、稲田花崗岩を用いた場合の衝撃貫入試験におけるロッドの変位速度である約 4m/s と大幅に異なっておらず、ほぼ妥当な値であると考えられる。この方法では、1 打撃を微小時間で完了させることができるため、計算時間は Alpha6 を用いて、1 打撃あたり約 2.5 分であった。

なお、より実際に近い打撃方法によるシミュレーションを行うためには、衝撃貫入などの動的な影響も含めるべきであるが、これについては今後の課題とする。

4.2 シミュレーション結果

上述した方法を用いて、フラット型およびくさび型の 2 種類の「のみ」の衝撃貫入のシミュレーションを実行した。ここでは 20 種類の大岩モデルに対して 2 種類の「のみ」を衝撃貫入させることにした。衝撃貫入における計算条件を表-5 に示す。

表-5 「のみ」の衝撃貫入の計算条件

要素径	5 mm
要素数	4106 個
密度	2700 kg/m ³
法線方向のバネ定数	2.0×10^9 N/m
ポアソン比	0.25
減衰係数	0.46
内部摩擦角	24 degrees
粘着力	9900~11000 N
引張強度	4950~5500 N
刻み時間	0.0000001 sec

本シミュレーションでは、上述したように「のみ」を大岩から約 0.1mm 離れたところから降下させ、フラット型は約 0.3mm、くさび型は約 0.2mm、大岩に貫入させるので、前者は 0.4mm、後者は 0.3mm、「のみ」を降下させ、その後元の位置に引き上げることになる。1 打撃あたりの計算時間は約 2.5 分であるが、フラット型は 60 回、くさび型は 30 回打撃を加えた時点で計算を終了するように設定したので、シミュレーションに要した時間はそれぞれ約 3 時間および約 1 時間である。

(1) フラット型のシミュレーション結果

大岩の破碎状況およびき裂進展過程の一例を図-9 および図-10 に示す。図-9 は打撃を開始してから 1 回目、10 回目、20 回目、30 回目、40 回目、50 回目の打撃が終了した時点における要素の位置を示したものであり、図-10 は打撃を開始してから 1 回目、5 回目、10 回目、20 回目、25 回目、30 回目の打撃が終了した時点における要素間の結合が切れた位置を示したものである。打撃とともにき裂が進展し、やがて破碎に至る様子がシミュレートされており、本シミュレーションで採用した衝撃貫入の方法がほぼ妥当であることが分かる。

本研究では、上述したように乱数を用いて粘着力と引張強度に非均質性を持たせた大岩を 20 個作成し、同様のシミュレーションを 20 回行った。紙面の関係上、図面は割愛するが、同じフラット型の「のみ」を用いても、大岩によっては、ほぼ真二つに割れるものもあれば、大きく破碎されるものもあり、現実の岩石と同様に、非均質性による割れ方の違いもシミュレートされた。図-9 および図-10 は、大岩が大きく破碎された例であるが、この場合、非常に広範囲にき裂が分布しているのが確認でき、全体的に、フラット型の破碎性能の高さが確認された。なお静的貫入の場合と同様、き裂の大部分は引張によって生じたものであることが確かめられた。

(2) くさび型のシミュレーション結果

大岩の破碎状況およびき裂進展過程の一例を図-11 および図-12 に示す。図-11 は打撃を開始してから 1 回目、5 回目、10 回目、15 回目、20 回目、30 回目の打撃が終了した時点における要素の位置を示したものであり、図-12 は打撃を開始してから 1 回目、3 回目、6 回目、9 回目、12 回目、15 回目の打撃が終了した時点における要素間の結合が切れた位置を示したものである。少ない打撃数でき裂が一気に進展し、やがて破碎に至る様子がシミュレートされている。くさび型の場合は、打撃点から狭い範囲にかつほぼ一直線にき裂が成長し、大岩がほぼ真二つに割れるというシミュレーション結果がほとんどであった。

4.3 考察

60 回のシミュレーション結果より、「のみ」の荷重が 0 になった時点の打撃数を取得した。「のみ」の形状毎に要した打撃数の平均を算出したところ、フラット型は約 35 回、くさび型は約 18 回となった。これによりフラット型は大岩破碎のために多くの打撃数を必要とするが、くさび型はフラット型の半分程度の打撃数で大岩が破断に至ることが分かる。

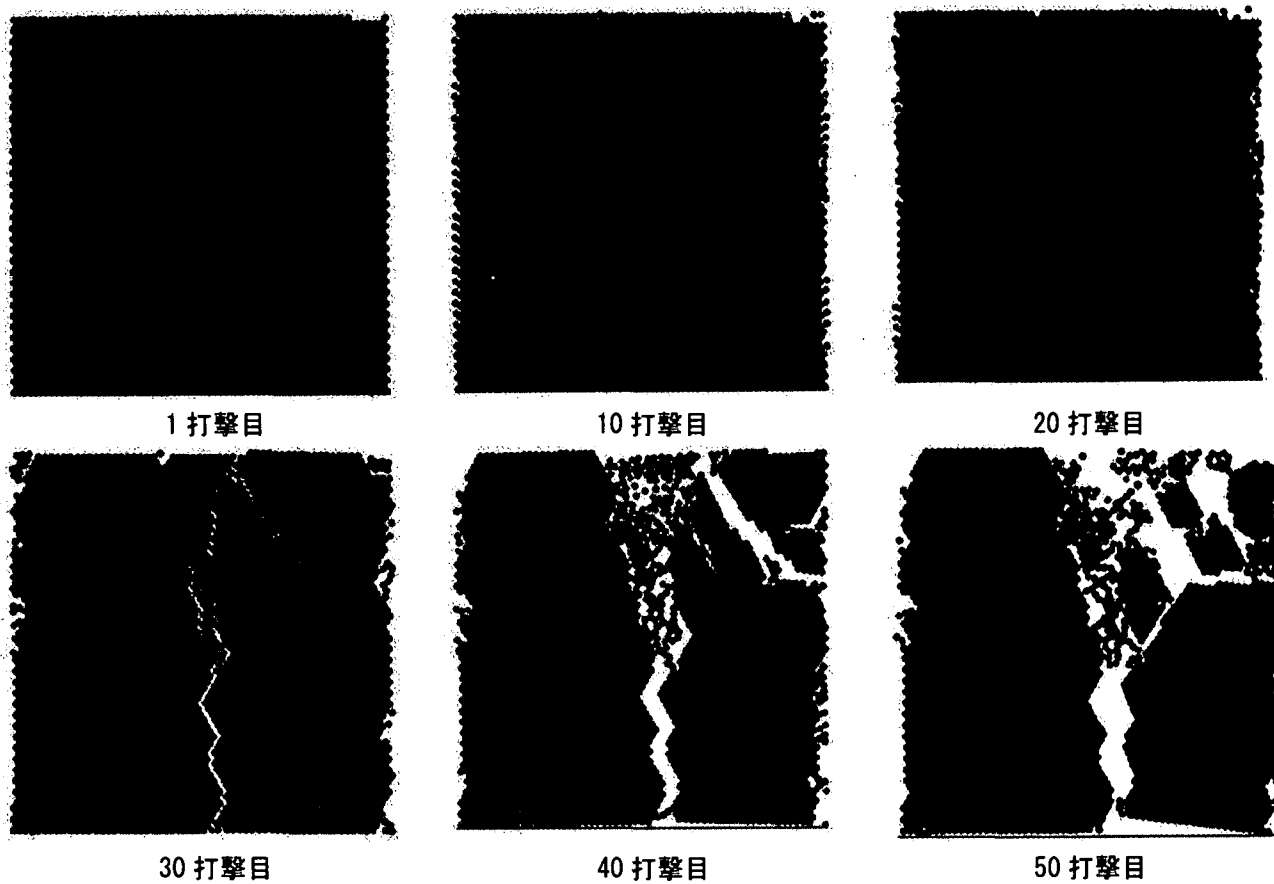


図-9 フラット型の「のみ」を用いた場合の大岩の破碎状況

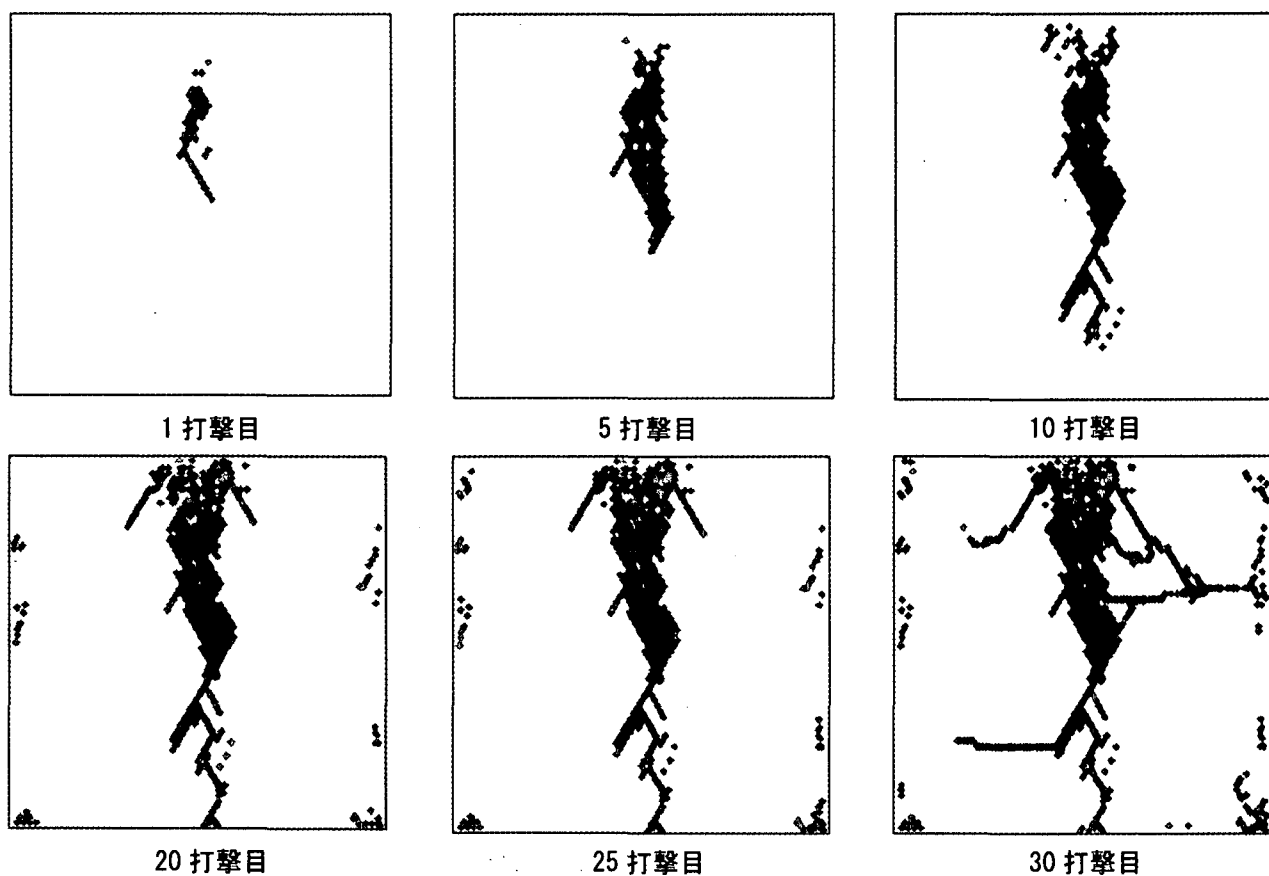


図-10 フラット型の「のみ」を用いた場合の大岩内き裂進展の様子

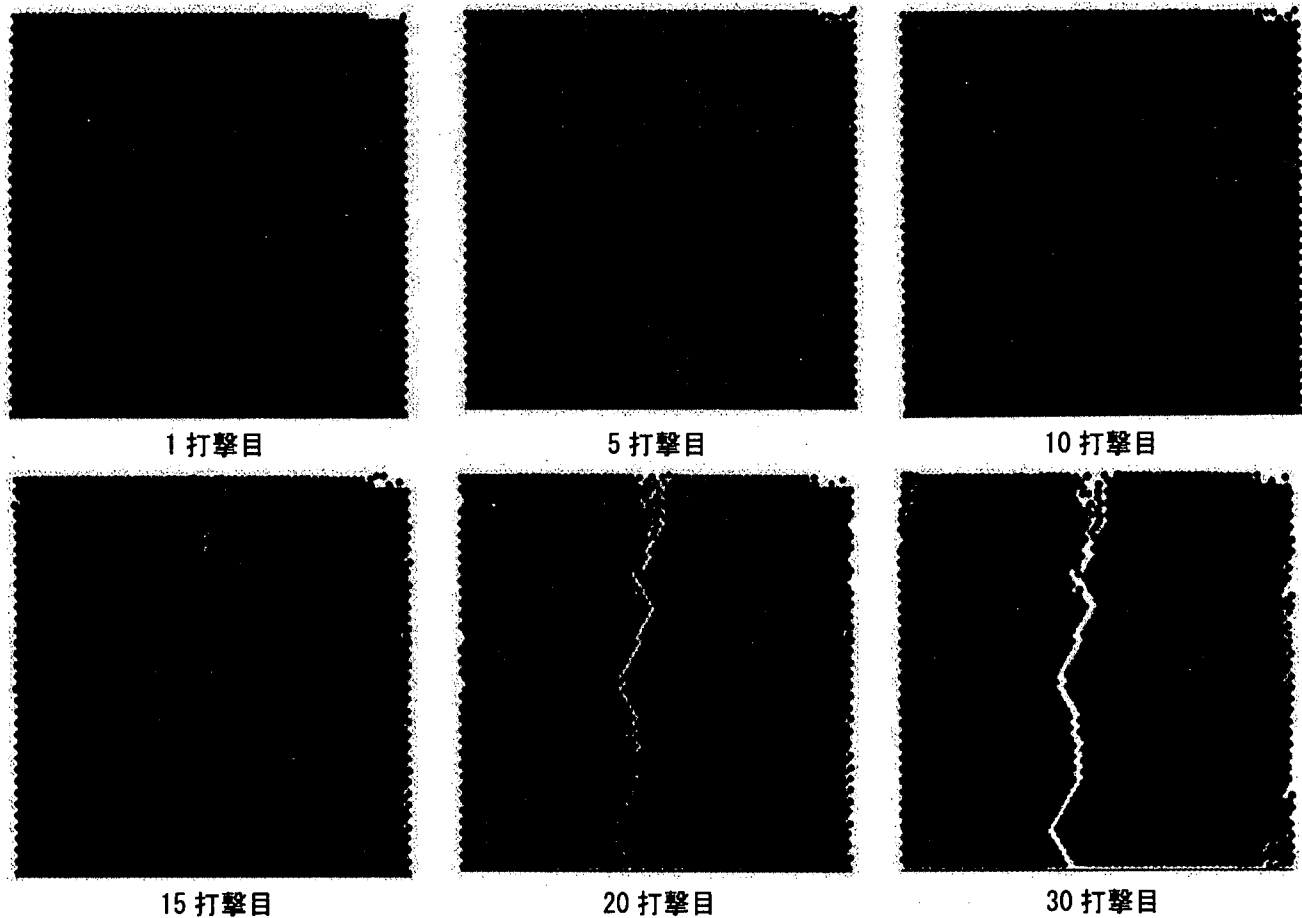


図-11 くさび型の「のみ」を用いた場合の大岩の破碎状況

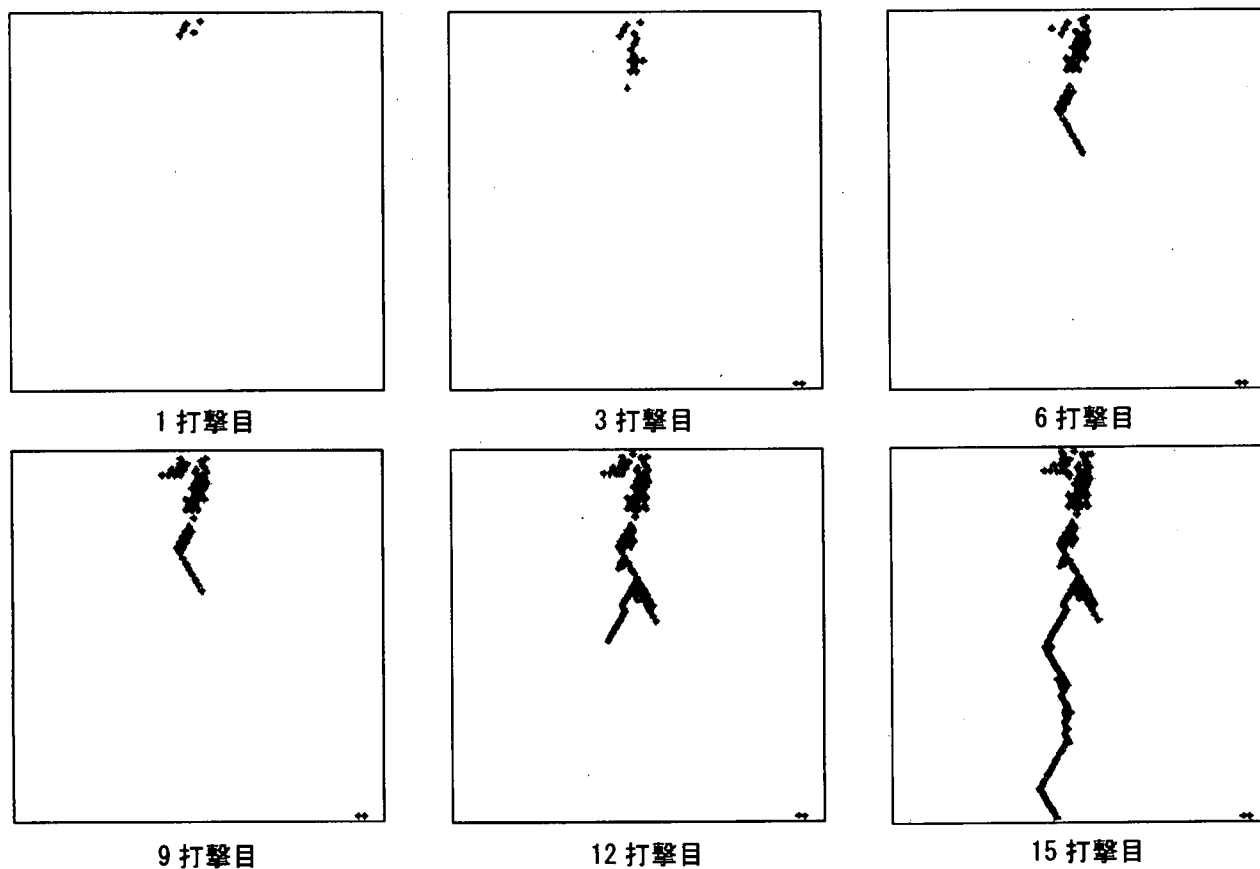


図-12 くさび型の「のみ」を用いた場合の大岩内き裂進展の様子

ところで、フラット型は荷重および破断に要する打撃数を多く必要とするが、広範囲にき裂を成長させ、大岩を細かく砕くことが可能である。ただし、図-9 および図-10 に示したとおり、多数の岩石片が広範囲に飛び散ると考えられるため、飛散した岩石片が周辺環境に及ぼす影響が比較的小さい鉱山等で作業する場合に適した「のみ」であると言える。くさび型は、図-11 および図-12 に示したように、き裂の成長は狭い範囲内に限定されることが多いが、岩石片の飛散が少なく、かつ低荷重で破碎することが可能であるため、小型油圧ブレーカによる市街地での工事現場やコンクリートの解体作業などに適している「のみ」であると言える。

5. むすび

本研究では、大岩の小割作業の効率化に資することを目的として、個別要素法を用いた大岩破碎の数値シミュレーションを行った。「のみ」の形状はフラット型とくさび型の2種類を用意し、4106個の円柱状要素で構成された大岩モデルに「のみ」を貫入させることで打撃を模擬し、大岩内に発生するき裂の進展の様子をシミュレートした。その結果、フラット型は大岩を破碎するために大きな衝撃荷重と打撃数を必要とするが、大岩を大きく破壊することが可能であることが分かった。一方、くさび型では大岩を大きく破碎することはできないが、さほど大きな衝撃荷重や打撃数を必要とせず、小型の油圧ブレーカで作業が可能であることが確かめられた。

小割作業の効率化および自動化を実現するためには、大岩の破碎が行われたと判断された場合には、直ちに打撃を停止することが望ましい。本研究では、「のみ」の荷重に関する詳細な検討は行っていないが、この荷重と破碎状況を組み合わせることにより、小割作業の自動化のための知的判断アルゴリズムの構築が可能になると思われるが、これについては、今後検討していきたい。

また、今回は簡単のため要素を規則的に配置したが、非均質性を考慮したとはいえ、配置による弱面も存在してしまうので、今後は、ランダム配置による大岩のモデル化についても検討していきたい。

なお、本研究の1部は、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(代表：東北大学助教授 高橋 弘)および(財)日本鉱業振興会研究補助金「岩石破壊技術の高度化に関する研究」(代表：北海道大学教授 金子勝比古)によったことを付記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 高橋 弘, 佐野 克己: 画像処理法を用いた大岩の自動検出に関する研究, 資源・素材学会誌, Vol. 113, No. 3, pp. 169-174, 1997.
- 2) 高橋 弘, 佐野 克己, 中野 栄二: 画像処理による大岩の自動検出・破碎システムに関する研究—小割作業のための大岩の3次元位置座標の取得—, 資源・素材学会誌, Vol. 114, No. 8, pp. 543-548, 1998.
- 3) 高橋 弘, 門傳 孝: 力覚を用いた大岩小割作業の自動化に関する基礎的研究, 資源・素材学会誌, Vol. 115, No. 10, pp. 725-730, 1999.
- 4) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 5) 伯野 元彦: 破壊のシミュレーション, pp. 10-55, 1997, 森北出版.
- 6) 例えば(社)土質工学会: 粒状体の力学, pp. 283-295, 1993.
- 7) 高橋 弘: 鉱石のすくい取り作業時におけるバケットに作用する抵抗力の個別要素法解析, 素材物性学会誌, Vol. 12, No. 1/2, pp. 19-26, 1999.
- 8) 山口 梅太郎, 西松 裕一: 岩石力学入門, 1991, pp. 123-168, 東京大学出版会.
- 9) 大久保 誠介, 西松 裕一, 秋山 政雄, 辰巳 哲: 衝撃貫入試験法の開発と試験結果, 資源・素材学会誌, Vol. 108, No. 2, pp. 134-140, 1992.

(2001年4月20日受付)