

ディスクカッタの圧入による岩盤破碎に関する 数値シミュレーション

Numerical Simulation on Rock Breaking by Penetration of Disc Cutter

高橋 弘¹⁾・佐藤 達起²⁾・金子 勝比古³⁾

Hiroshi TAKAHASHI, Tatsuki SATO and Katsuhiko KANEKO

In this study, numerical simulations on rock breaking by penetration of disc cutter were carried out by using Distinct Elements Method (DEM). A rock sample consisted of 293706 spherical elements of 2mm diameter. Three kinds of disc cutter were used in this simulation. They were wedge type, round type and flat type. These disc cutters were modeled and were penetrated into the rock. In this simulation, the forces acting on the disc cutter were calculated and they were compared with the results obtained in the previous experiment. The calculated results were well agreed with the experimental ones. Furthermore, the fractures generated in the rock were simulated for three types of disc cutter with different shape. In the case of round and flat type disc cutter, the dominant fracture was observed. It was generated just under the disc cutter and was connected with the fracture generated from the neighbor disc cutter. That is, adjacent breaking was simulated.

Key Words: Distinct Element Method, disc cutter, numerical simulation, rock breaking

1. はじめに

TBM(Tunnel Boring Machine)によるトンネル掘削では、掘進速度および経済性の観点から機械掘削が効率よく行える岩盤強度の範囲は、1軸圧縮強度で約10~100MPa程度以下であると言われている¹⁾。しかし、実際には、地質構造の不均質性等の理由から100MPa以上の強度の岩盤を掘削する必要性が生じてきている。例えば、舞子トンネルの建設では200MPa以上の強度の岩盤をTBMにより掘削しており、ある区間では岩盤強度が300MPaにも達している²⁾。それゆえ、これからのTBMには軟岩から超硬岩まで幅広い岩盤強度に対して、効率よく掘削できる性能が要求されると考えられる。

従来のTBMでは、カッタの先端が尖った楔型のディスクカッタが多く用いられてきたことから、楔型のディスクカッタを用いた研究が多く見られる。しかし、このタイプのディスクカッタは先端が摩耗しやすく、摩耗による性能劣化が著しいため、ディスクカッタの交換回数が問題になっている。例えば舞子トンネルでは600mの導坑掘削中に16回ものカッタの交換が行われたことが報告されている²⁾。ところが、Liら³⁾によれば、トンネルの機械掘削において、カッタの交換に要するコストは、トンネルの全建設コストのほぼ半分にも達すると言われており、カッタ交換の回数削減は建設コストの大幅な削減につながることから、摩耗に強いディスクカッタの開発が非常に重要視されている。

以上のような背景から、近年では摩耗による性能劣化の影響が少ないディスクカッタとして、先端を予め丸く加工した円弧状のカッタが多く用いられるようになってきている。つまり、尖った刃先で岩盤を切削するという概念よりも、丸みを帯びた刃先を岩盤に押し付け、岩盤を圧砕するという考えである。この概念をさらに推し進めた平坦型のディスクカッタも使用され始めているが、これらのカッタによる岩盤破碎のメカニズムが十分に解明されているとは言い難く、カッタの数・形状・寸法およびカッタ面板へのカッタの配置などは実験等による経験則により決定されることが多い。

一方、岩盤周辺に内在するき裂は掘進速度に大きな影響を与えることが既に報告されているが²⁾、これは換言すると、ディスクカッタの形状あるいは配置などにより、岩盤に先行き裂を効率よく生成することができれば、効率のよい掘削が可能になることを示唆するものである。しかしながら、円弧型あるいは平坦型カッタにより岩盤内部にどのようなき裂が生成されるかは、明らかではない。

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、ディスクカッタの圧入によ

1)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)

2)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)

3)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)

り岩盤内部の破碎過程をシミュレートし、岩盤破碎のメカニズムについて検討することを目的とする。実際のTBMでは、ディスクカッタは円軌道を転動しながら岩盤を破碎していくが、本研究では、研究の第1段階として、Gongら⁴⁾にならい、まずディスクカッタの圧入による岩盤破碎について検討する。これは、破碎のプロセスから回転成分を除き、岩盤破碎のプロセスをカッタの圧入による岩盤の変形と破壊に単純化するためである。

2. DEMによる岩盤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⁵⁾。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ー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。

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い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⁶⁾。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カッタの圧入による岩盤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⁷⁾、その詳細はこれらの文献にゆずる。またDEMを岩盤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も既に報告したが⁸⁾、これについては以下に簡単に述べることにする。

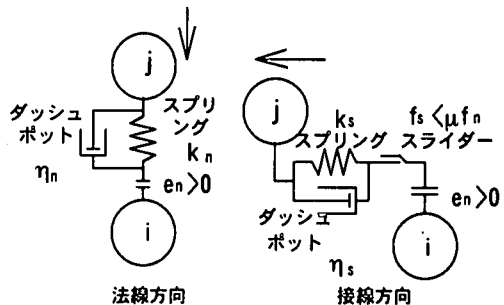


図-1 DEM計算における要素間モデル

2.2 破壊基準の設定

本研究では、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した。

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。

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

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

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。そこで、接線方向の破壊基準として次式で表されるモール・クーロンのせん断破壊基準を用いた⁹⁾。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。本研究ではカッタが厚みを持った円盤状であることおよび次の研究のステップとしてカッタの転動による岩盤破碎のシミュレーションを行うことを考え、3次元シミュレータを開発する。そのため要素として半径 r_i の球形要素を仮定する。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。

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

$$\text{ただし} \quad C = S \cdot c \quad (4), \quad [f_n]_t = S \cdot \sigma \quad (5), \quad \mu = \tan \phi_c \quad (6)$$

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。

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。

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

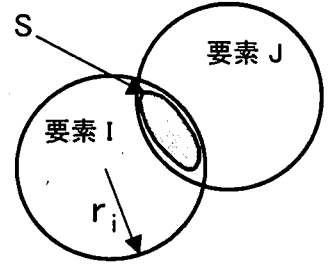


図-2 要素間の接触面

(2) 要素間に引張力が作用する場合

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。

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

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。

2.3 ディスクカッタと要素間の力の計算

要素がディスクカッタから受ける力についても、要素間に作用する力の計算と同様に、図-1に示す力学モデルを用いる。ただし、図-3に示すように、要素とディスクカッタの接触点 (x_a, y_a, z_a) は、要素の中心から最も近いディスクカッタの表面上の点とする。ディスクカッタと要素との接触点の微小変位の求め方は、基本的に要素間における接触点の微小変位の求め方と同じである。

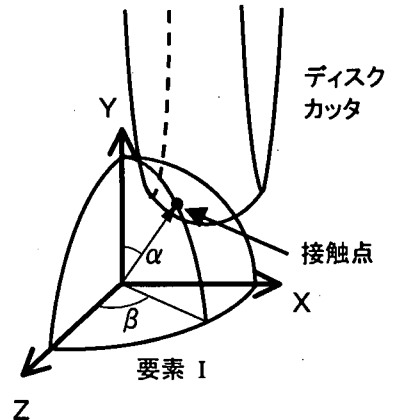


図-3 接点の定義

3. シミュレーション結果および実験結果との比較検討

3.1 実験装置および岩石試料

著者らは既に実規模のディスクカッタの一部を模擬したビットを用いて岩盤への静的貫入実験を行った。本研究では、その時の実験で得られた荷重－貫入量の実験結果とシミュレーション結果との比較検討を行い、シミュレータの妥当性について検討する。初めに、ビットの貫入実験について以下に簡単に記す。

実験では、図-4 に示すような材料試験機を用いた。この材料試験機に図-5 に示すようなディスクカッタの一部を切断した形のビットをセットし、このビットを岩石中に圧入した。岩石は 200mm×200mm×150mm に整形し、側圧を考慮するため内径 300mm の鉄枠に埋め込み、岩石と鉄枠との隙間をセメントで固め実験試料とした。ビットに作用する荷重は、ビット上部に設置したロードセルで計測し、また貫入深さは、ビット脇に設置した変位計で計測した。実験には硬岩として飯館花崗岩を、また軟岩として白河溶結凝灰岩を用いた。その物性値を表-1 に示す。

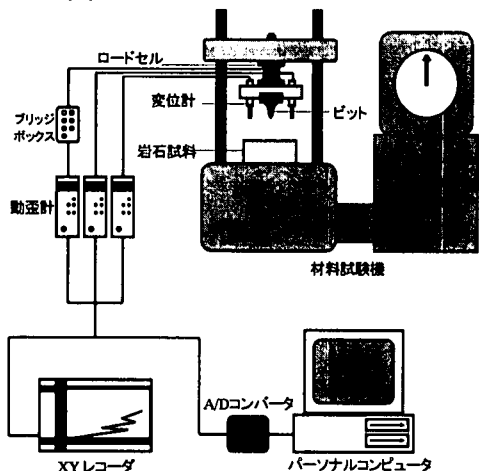


図-4 実験装置の概略

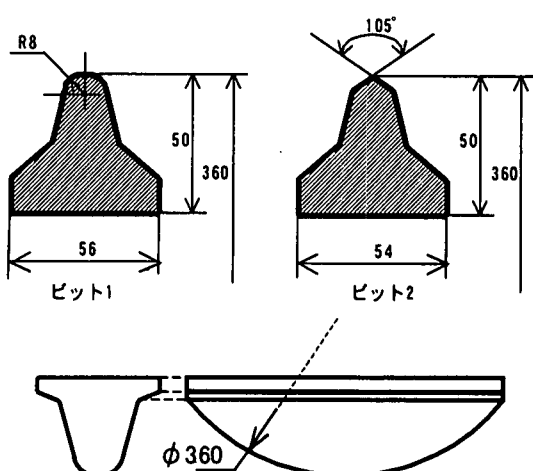


図-5 実験に用いたビットの形状および寸法

表-1 岩石試料の物性値

岩 種	飯館花崗岩	白河溶結凝灰岩
密度[kg/m³]	2635	1998
ヤング率[GPa]	61.7	7.2
剛性率[GPa]	25.1	2.9
ポアソン比[-]	0.231	0.226
圧縮強度[MPa]	205.4	34.9
引張強度[MPa]	11.5	2.7
せん断強度[MPa]	24.3	4.9
内部摩擦角[deg.]	60.9	58.9

表-2 シミュレーションの諸元

岩 種	飯館花崗岩	白河溶結凝灰岩	
タイムステップ (秒)	1/2000000	1/1000000	設定値
要素 径	2.0mm		設定値
試料サイズ	139mm×90mm×139mm		設定値
要素数	293706 個		設定値
要素間摩擦係数[-]	1.0	1.0	仮定値
要素－カッタ間摩擦係数[-]	0.2	0.2	仮定値
要素－側壁間摩擦係数[-]	0.1	0.1	仮定値

3.2 岩石試料のモデル化

シミュレーション結果と実験結果との比較検討を行うため、シミュレーションで対象とする岩石も飯館花崗岩と白河溶結凝灰岩を想定し、その物性値は表-1 に示されているものを用いる。

ところで、岩盤を構成する物質は一般に不均質であり、異方性が存在するが、本研究では計算および解析を簡単にするため、岩盤を均質体と仮定し、また面心立方格子配列で球形要素を配置した。要素径はできるだけ小さい方が望ましいが、要素径が小さくなるほど岩石試料を構成するために必要な要素の数が大きくなり、その結果、計算コストが急激に増大する。そこで、本研究では試行錯誤の結果、要素径を 2mm、要素数を 30 万個程度とすることにした。この場合、30 万個程度の要素で構成できる岩石の試料としては、140mm×140mm×90mm 程度であるため、このサイズで岩石を構成した。また実験と同様に、シミュレーションでは岩盤の側圧を考慮するために岩石試料の周囲を拘束する。そのため、試料の周囲に仮定の側壁を設定し、変位を拘束した。

ディスクカッタについては、図-5 に示したものと同一形状・寸法のものをモデル化した。シミュレーションに用いた諸元を表-2 に示す。なお、本シミュレーションでは、東北大学情報シナジーセンターのスーパーコンピュータ SX-4 を用いて計算を行った。

3.3 シミュレーション結果

シミュレーションを実行するに当たり、スプリング係数とダッシュボットの粘性係数を決定する必要がある。要素間に設定されるスプリングは法線方向と接線方向の 2 種類があり、それぞれのスプリング係数は、法線方向については岩盤のヤング率 E を用いて、また接線方向については剛性率 G を用いて次式より決定した。

$$k_n = \frac{S \cdot E}{2r_i}, k_t = \frac{S \cdot G}{2r_i} \quad (10)$$

添字 n および t は、それぞれ法線方向および接線方向を示す。また S は要素間の接触面積であるが、本研究では、球形要素を仮定しているため、球同士の接触は点接触になり、断面積 S は 0 になってしまう。そこで、本研究では要素間に擬似的な断面積を設ける。すなわち、上述したように本研究では要素を面心立方格子配列で配置しているため、1 つの要素は最大 12 個の要素と結合していることから、断面積 S を球の表面積の $1/12$ と仮定した。また粘性係数は、要素の質量 m を用いて次式より算出した。

$$\eta = a \cdot 2\sqrt{m \cdot k}, a = 0.99 \quad (11)$$

ただし、上述した断面積 S の計算はスプリング係数および粘性係数を決定するためのものであり、実際のシミュレーションにおいて破壊基準を計算する際には、要素間の相対変位を基に接触断面積を計算している。

図-6 にシミュレーション結果の一例を示す。この図は、花崗岩に円弧型ディスクカッタを 1.2mm 貫入させた際、要素間の結合が切れた点をプロットしたものである。点線で示されている部分が岩石試料の外形であり、岩石内部の点は、上述した破壊基準で破壊した点、すなわち要素間の結合が切れた点を示している。シミュレーションの結果、き裂のほとんどは引張によるものであることが確かめられた。

図-6 の結果は、要素間の結合が切れた全ての点をプロットしてあるため、き裂の分布の様子が若干見難くなっている。ディスクカッタ直下の断面近傍に分布する破壊点のみを抽出し、その結果を図-7 に示した。図-7 は、カッタの貫入量が 0.3mm, 0.6mm, 0.9mm および 1.2mm の場合のシミュレーション結果を示している。この図より、カッタの貫入とともに岩石内のき裂が進展していく様子が分かる。またディスクカッタ直下から斜め下側方に卓越したき裂が伸びていることが観察される。

図-8 にディスクカッタの貫入量とディスクカッタに作用する荷重との関係を示す。図中の実験点は、図-6 に示す実験装置を用いて、最大スラスト荷重を 100kN(実験 1), 200kN(実験 2), 300kN(実験 3)および 400kN(実験 4)に設定して貫入実験を行った際の貫入量と荷重との関係を示しており、また実線はシミュレーションにより得られた貫入量と荷重との関係を示している。両者はほぼ一致しており、従って本研究で提案するシミュレーションモデルはほぼ妥当であると考えられる。

図-9 に楔型ディスクカッタを花崗岩に貫入させた場合の貫入量と荷重の関係を示した。貫入量が 1.0mm を超えると、シミュレーション結果と実験結果は大きく異なっていることが分かる。両者に差が生じる最大の原因は、チッピングの有無と考えられる。実験では、ディスクカッタのスラスト荷重を徐々に大きくし、ディスクカッタを岩石中に貫入させていくと、ディスクカッタ直下の小さな岩石片が飛散する、いわゆるチッピングが観察される。このチッピングが生じると、ディスクカッタのスラスト荷重が瞬間的に開放され、荷重が下がる。しかし、所定の最大荷重に達するまで一定速度でディスクカッタは貫入していくので、すぐに荷重が増大し、ある時点で再びチッピングが生じる。すなわちチッピングを繰り返しながらディスクカッタは岩石内に貫入していく。その結果、実験では図-9 に示すように貫入量-荷重の関係は波打った形状になっている。これに対して、本シミュレーションでは、このチッピング現象をうまく再現させることができなかったため、スラスト荷重が全て岩石内部に伝達され、その結果、き裂も広範囲に分布し、荷重も貫入量の増加とともに増大する結果となっている。

図-10 および図-11 は、白河溶結凝灰岩に円弧型および楔型ディスクカッタを貫入させた場合の貫入量と荷重との関係を示したものである。白河溶結凝灰岩は軟岩であり、ディスクカッタの形状に関わらず比較的貫入し易い

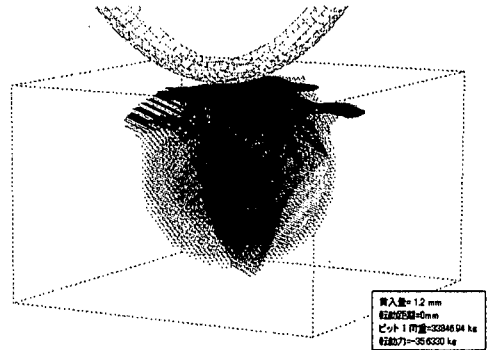
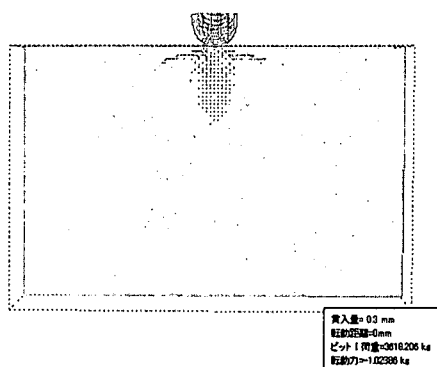
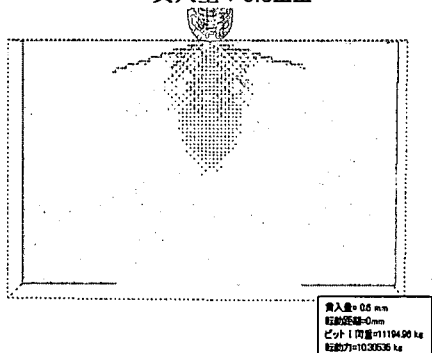


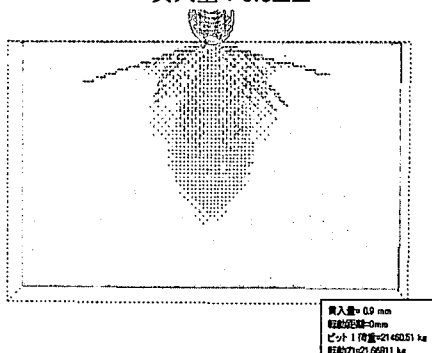
図-6 円弧型カッタの花崗岩への貫入シミュレーション結果（貫入量：1.2mm）



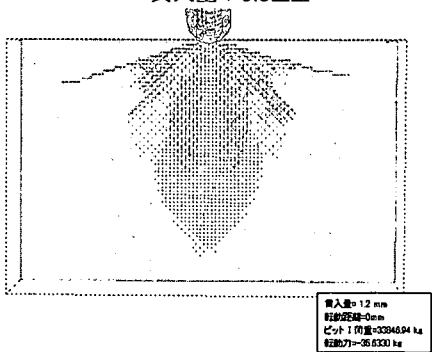
貫入量: 0.3mm



貫入量: 0.6mm



貫入量: 0.9mm



貫入量: 1.2mm

図-7 カッタ直下に形成されるき裂分布

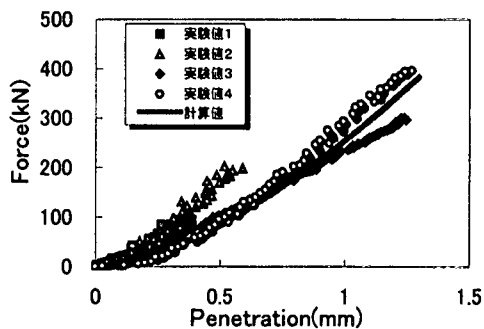


図-8 貫入量と荷重との関係(花崗岩, 円弧型カッタ)

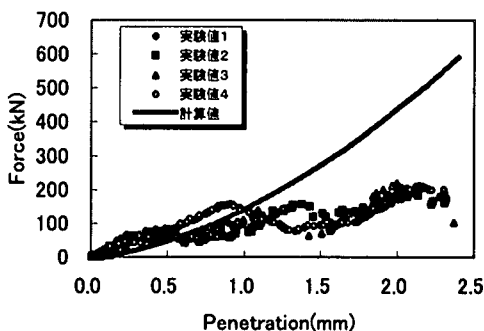


図-9 貫入量と荷重との関係(花崗岩, 楔型カッタ)

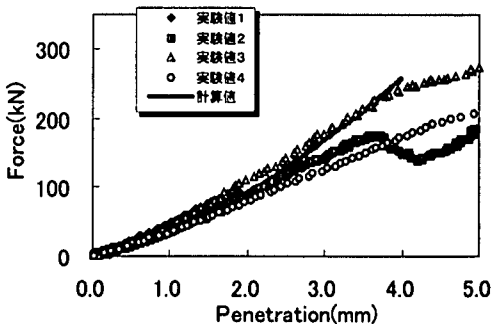


図-10 貫入量と荷重との関係(凝灰岩, 円弧型カッタ)

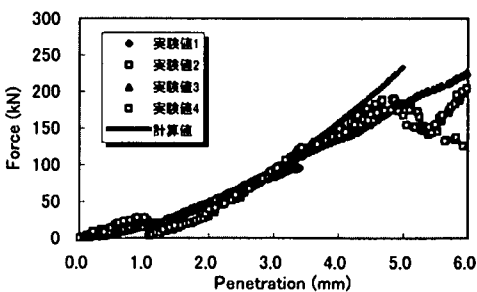


図-11 貫入量と荷重との関係(凝灰岩, 楔型カッタ)

ため、チップングはさほど顕著ではない。従って、これらの場合、シミュレーション結果と実験結果とはよい一致を示している。しかしながら、実験においては、円弧型ディスクカッタでは貫入量が4mmを越えた辺りで、また楔型ディスクカッタでは貫入量が5mmを越えた辺りで岩石片が剥がれる、一種のチップングが生じており、このような現象が生じると、シミュレーション結果と実験結果との間に差異が見られてくる。

本研究では、岩石の種類を硬岩と軟岩の2種類とし、またディスクカッタの形状を楔型と円弧型の2種類として、計4通りの組み合わせでシミュレーションを行った。その結果、硬岩に楔型ディスクカッタを貫入させた場合以外は、実験結果とシミュレーション結果とはほぼ一致することが確かめられた。両者に差異が見られた条件、すなわち硬岩に楔型ディスクカッタを貫入させた場合は、チップングが顕著であり、このチップングをシミュレーション上で再現することが今後の大きな課題であると考えられる。参考のため、楔型ディスクカッタの刃先角度を60度に設定して、花崗岩にディスクカッタを貫入させるシミュレーションを行った結果、飛散する岩石片の絶対量は小さいと思われるが、実際にチップングが生じることが確かめられ、またチップングが生じると貫入量-荷重曲線が、図-9に示すように波打つことも確かめられた。チップング現象を再現できなかった原因の1つに要素径の限界があると考えられる。すなわち、刃先角105度のディスクカッタの場合、カッタの貫入により岩石表面に位置する要素間の結合が切れても、刃先側面と岩石表面との間の空間が小さいため、要素の径が大きい場合、結合の切れた要素が岩石から飛び出すことができないが、刃先角60度の場合、105度に比べて刃先側面と岩石表面との間の空間が大きく、要素径が2mmでもチップングが生じたと考えられる。したがって実際に近いチップング現象を再現するためには要素径をさらに小さくすることが必要と思われるが、計算コストの制限なども考慮に入れなければならないため、今後詳細に検討していきたい。

図-12は、円弧型ディスクカッタを2つ並べて花崗岩に貫入させたときのシミュレーション結果を示している。2つのディスクカッタ直下から斜め下側方に伸びるき裂が連結していることが分かる。これは隣接破壊を示唆するものであり、先に行われた転動実験により得られた岩石片の形状によく似た薄板状になっている。

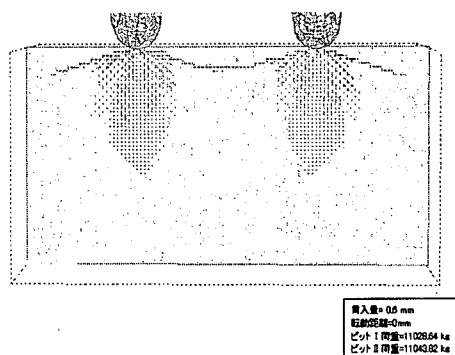


図-12 2つのディスクカッタの貫入によるき裂分布

4. むすび

本研究では、岩盤に応じたカッタ形状の設計やTBMの効率的かつ経済的設計に資するため、個別要素法を用いてディスクカッタの圧入により岩盤内部の破碎過程をシミュレートし、岩盤破碎のメカニズムについて検討することを目的とした。岩石およびディスクカッタのモデル化を行い、カッタの貫入による岩石内部のき裂分布およびカッタに作用する荷重に関するシミュレーションを行い、実験結果との比較検討を行った結果、本モデルはほぼ妥当であることが確かめられた。しかしながら、楔形ディスクカッタを花崗岩に貫入させたときのようなチップングが顕著に見られる場合、本シミュレーションではチップングをうまくシミュレートできていないため、計算結果と実験結果との間に大きな差異が見られた。このチップングを如何にシミュレートするかが今後の課題であり、さらに岩盤に応じたカッタ形状の設計には岩盤内の応力状態の評価も必要不可欠であると考えられるため、これらの点について今後さらに検討する予定であるが、本研究はカッタ形状の設計支援のための基礎になりうると思う。またディスクカッタの転動による破碎のメカニズムについても今後検討する予定である。

5. 参考文献

- 1)室 達朗, 上松 正史, 岩谷 典亮: ローラカッタビットの掘削特性に関する研究, テラメカニックス, 17 号, pp.111-115, 1997.
- 2)浅野 剛, 蛭子 清二, 岩垣 富春, 齋藤 敏明: TBM の掘削データと周辺岩盤のき裂分布との関連性について, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 1-7, 1997.
- 3)Li, X.S., Gurgenci, H. and Guan, Z. : Experimental Study of Disc Cutter Temperatures, Proc. of 4th Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, Vol.1, pp.A5-25-A5-34, 1997.
- 4)Gong, F., 佐藤 一彦, 後藤 龍彦: ディスクカッタによる岩石の圧入実験ーディスクカッタによる岩石の切削に関する研究(第 6 報)ー, 資源・素材学会誌, Vol. 111, No. 9, pp. 617-622, 1995.
- 5)Cundall, P.A. and Stack, O.D.L. : A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1. pp.47-65, 1979.
- 6)伯野 元彦: 破壊のシミュレーション, pp.10-55, 1997, 森北出版.
- 7)例えば(社)土質工学会: 粒状体の力学, pp. 283-295, 1993.
- 8)高橋 弘, 泉 亘, 金子 勝比古: 油圧ブレーカによる大岩破碎の数値シミュレーション, 応用力学論文集, Vol. 4, pp. 307-316, 2001.