

発破における岩石・岩盤の破壊解析法の現状について—連続体・不連続体力学モデルを用いた発破解析法—

福田 大祐^{1*}・太田 良巳²・蛭子 清二³

¹北海道大学 大学院工学研究院 環境循環システム部門 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²原子力規制庁長官官房技術基盤グループ地震・津波研究部門 (〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9)

³村崎建設株式会社 (〒108-0014 東京都港区芝5-6-1)

*E-mail: d-fukuda@frontier.hokudai.ac.jp

発破は、鉱山・土木分野における採鉱やトンネル掘削等の用途に多用されており、発破結果の品質の向上は重要な課題である。発破における岩石・岩盤の破壊過程の全体を合理的にシミュレート可能な数値モデリング・解析技術（以下、発破解析法）が開発されれば、本課題解決のための極めて有力な工学ツールとなり得る。そのため、大規模な鉱山開発が行われている海外を中心に発破解析法の開発が積極的に進められている。本稿では、発破における岩石・岩盤の破壊過程解析に注目し、現在も多くの研究者に用いられている連続体力学ベースや不連続体力学ベースの数値モデル化手法に基づいた各種解析法の現状を概説として紹介する。特に、各解析法の利点・欠点に着目し、これらを発破解析に用いる際の注意点について考察する。

Key Words : rock blasting, dynamic fracture process, numerical simulation, overview

1. 緒言

発破は、これまで採鉱・土木分野における岩盤破碎・トンネル掘削・構造物解体等の幅広い用途に対して適用されてきている。各種鉱山での採鉱プロセスにおける発破の品質は、その後の下流工程にも影響を与えるため、この観点も踏まえた発破の最適化は今も重要な課題である。また、山岳トンネルでの発破掘削の場合、余掘りやあたりの低減や発破損傷領域の低減等により、トンネルの長期安定性や施工コスト低減に大きく寄与する。

発破は、爆薬の爆轟過程、発破孔壁への爆発生成圧作用により生じる岩盤内での応力波の伝播過程、高速き裂進展過程、形成されたき裂ネットワーク内への爆発生成ガス的高速流動過程、爆発生成ガス圧による発破起砕物の飛翔過程といった複数の過程から成る。各々の過程自体も極めて複雑であり、これが発破の最適化が困難となっている主たる理由であると考えられる。また、発破結果の品質は、発破の適用対象によって評価法が異なり、さらには、薬種・薬径・孔間隔・最小抵抗線・地質・岩盤応力状態等の種々の因子¹⁾が発破の結果に影響を与え

る。こうした影響を実験や計測・理論解析のみから把握することは通常容易では無い。ゆえに、上記で述べた発破における各過程を合理的にシミュレート可能な数値解析技術（以下、発破解析法）を開発できれば、有力な工学ツールとなり得るだけでなく、経験工学的な性質を多々有する発破工学の発展にも多大な寄与がある。

このような背景から、土木学会『岩盤動力学に関する研究小委員会』の発破ワーキンググループでは、これまでどのような発破解析法が開発されて来たかについての調査に取り組んでいる。本稿では、第一報として、発破解析を実施する際に、現在も多くの研究者に用いられている連続体力学ベースや不連続体力学ベースの数値モデル化手法に基づいた発破解析法の現状を概説として紹介する。特に、各解析法の利点・欠点に着目し、これらを発破解析に用いる際の注意点について簡単に考察する。

2. 既往の発破解析法

実用的な発破解析法で求められる要件について整理す

る。まず、『要件1：各装薬条件に応じて、爆薬の理想または非理想爆轟過程の合理的な数値解析法』が求められる。また、所定の地質条件・含水状態・原位置応力状態に対して、『要件2：三次元的に複雑かつ高速な岩石・岩盤の損傷・破壊・破碎過程の合理的な数値解析法』が必要である。そして、要件1・2が満たされた上で、『要件3：時々刻々変化する岩盤内の複雑亀裂群に爆発生成ガスが流入し、発破起砕物が飛翔し、ある位置まで移動する一連の過程を予測できる数値解析法』が必要となる。著者らの知る限り、既往の発破解析法は、どれも固有の制約・適用限界があり、上記三要件を満たし、かつ、実務に適用可能なものは皆無である。ゆえに、各種発破解析法の開発者や使用者は、解析で用いる数値解析法の利点・欠点・限界を正しく理解する必要がある。

上記の要件1については、爆薬の爆轟過程を考慮可能な高度な数値流体解析（Computational Fluid Dynamics, CFD）ソルバが不可欠となる。本分野自体も発展途上であるが、最近では、商用・オープンソースコードも含めて優れたCFDコードが利用できる。例えば、有限体積法（Finite Volume Method, FVM）ベースのオープンソースコードであるOpenFOAMに、爆薬の爆轟解析能を実装したblastFoam²⁾では、高度な多成分系の圧縮性流体解析が可能であり、種々のリーマンソルバを実装することにより爆轟過程で重要な衝撃波をモデル化し、かつ、爆発生成ガスの膨張過程を記述するためのJones-Wilkins-Lee (JWL) 状態方程式に代表される各種状態式や爆薬の起爆モデルも利用可能である。blastFoamの詳細な理論は、参考文献²⁾中において、関連分野の文献とともに詳細に説明されている。また、本稿で紹介する発破解析に適用可能な商用コード（LS-DYNAやAUTODYN）等でも要件1を目的とした有用なCFDソルバが利用できる。なお、紙面の制約上、上記の要件1～3の全てに関して概説することは難しい。本稿では、要件2、即ち、発破解析法において極めて重要となる発破における岩石・岩盤の動的破壊過程の解析法に焦点を当てる。本シンポジウムの別報（福田ら：発破による岩石・岩盤の破壊解析法の現状について—最新の数値解析技術・力学モデルを用いた発破解析法—）では、より最近の発破解析法について概説する。

Preece et al.³⁾やLatham et al.⁴⁾は、1990年代までに行われた発破の数値解析に関する包括的なReviewを行っており、本稿では、これらのReview論文以後に報告された発破解析法に限定して関連研究を紙面の許す範囲で俯瞰する。このため引用文献の網羅性は極めて限られる点に注意されたい。発破解析法は、数値解析の種類、プログラムコード及び数値解析で使用された構成モデル、岩石・岩盤の均質・不均質の考慮の有無、数値解析上のき裂（生成・進展・連結・分岐）のモデル化手法等の観点から分類できる。ここでは、こうした詳細な分類には踏み込ま

ず、発破における岩石・岩盤の動的破壊過程のモデル化手法に着目し、これらを連続体力学ベースや不連続力学ベースの数値モデル化手法に分類して紹介する。連続体ベースのモデル化手法⁵⁾には、有限要素法（Finite Element Method, FEM）や有限差分法（Finite Difference Method, FDM）やCFDでも多用されるFVM等がある。不連続体ベースのモデル化手法⁵⁾には、個別要素法（Discrete Element Method, DEM）や不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis, DDA）等がある。ただし、例えばDDAでは離散ブロック内では連続体力学モデルを用いている点からもわかるように、ここでの分類は厳密なものではない。

以下では、連続体・不連続体ベースの手法について概説する。各手法の詳細については、最近の岩石の数値破壊過程解析法全般の動向を含めて、参考文献^{5,6)}に譲る。

(1) 連続体ベースの発破解析法

連続体ベースの手法では、発破対象の岩石・岩盤を等価な連続体と見なし、発破による岩石・岩盤の損傷を、連続体損傷モデルやき裂先端の破壊進行域を考慮した引張・すべり軟化則モデル等を用いて表現することが多い。また、こうしたモデルは、歴史的に、FEMに組み込んだ形で実装された例が多い。なお、本節の以下の記述は、FEMをFVMやFDMといった格子（メッシュ）ベースの方法に置き換えても同様に当てはまると考えられる。

連続体損傷モデルに基づいたFEMベースの発破解析法の例として、例えば、Thome et al.⁷⁾やLiu et al.⁸⁾は、岩盤を等価な連続体とみなし、FEMを用いて岩盤破碎過程を各要素における損傷の累積過程としてモデル化している。具体的には、各要素の局所的な応力状態に応じて、要素剛性に代表される力学物性を徐々に劣化させる方法が採用されている。また、Liu et al.⁸⁾は、最近の発破研究で極めて多くの研究者によって用いられている商用コード“LS-DYNA”に実装された陽解法FEMにより、ブロックケーシングにおける種々の発破孔配置や起爆位置を考慮した発破解析を行っている。LS-DYNAの利点としては、Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) スキーム¹⁰⁾を用いることで、上述の要件1の爆薬の爆轟過程や込物の効果・挙動を陽にモデル化でき、かつ、要件2の破壊解析も行える点が挙げられる。岩石の破壊モデルについては、Johnson-Holmquistモデル¹¹⁾に代表される衝撃載荷に伴う固体の損傷モデルを使用できる。ただし、LS-DYNAを用いた発破解析では要素消去法¹²⁾が度々使用されており、本手法では、各要素に設定された要素消去基準を満たした場合、該当する要素は解析システムから文字通り消去され、その分解析システムから質量が失われてしまうため質量保存則は当然満たさない。また、消去した要素部分は歯抜け構造となってしまう、要件3の扱いの合理性

が失われる点も問題である。他方で、本手法により発破による高速かつ高圧な载荷に伴うFEM要素の大変形や大きなねじれを回避できる利点もある。

他方、Cho and Kaneko¹³⁾は、FEMに、要素境界分離法¹²⁾と結合力モデル⁹⁾を組み込んだDFPAコードを開発し、発破孔極近傍に形成される圧砕域やその周囲に放射状に卓越する引張き裂の形成プロセスの高度なモデル化に成功している。要素境界分離法は、局所的な応力レベルがFEM要素境界に与えた破壊規準を満たした場合に、厚みゼロの結合要素をFEM要素境界に挿入し、相対する結合要素表面間（き裂表面間）の相対的な開口・閉合、滑りにより要素境界を文字通り分離させることにより、き裂進展を陽的に表現する方法である。この際、結合要素の分離過程は、結合力モデル（引張・すべり軟化則）⁹⁾でモデル化することが多い。これにより、き裂先端に存在する微視亀裂群で特徴づけられる破壊進行域の特性を考慮可能となり、岩石強度の载荷速度依存性を表現できる。DFPAコードは露天掘り鉱山のベンチ発破における破砕粒度分布のモデル化¹⁴⁾や山岳トンネルの最外周制御発破のモデル化¹⁵⁾等、種々の発破解析に適用されている。

LS-DYNAに限らず、要素消去法をベースとした手法から得られるき裂パターンについては、以下の点について十分認識しておく必要がある。Song et al.¹²⁾は、脆性材料を対象とした各種動的き裂進展に関するベンチマーク問題に対して、要素消去法、要素境界分離法及びeXtended FEM, (XFEM)^{例えは5)}の3手法をFEMに実装して比較した結果を論じている。前者2種類の手法については、十分細かい要素サイズを用いない場合、き裂進展経路がFEMメッシュトポロジーに大きく依存し、非合理的なき裂パターンが得られるという欠点を有する。他方、XFEMは、本欠点を補うことを目的として開発され、エンリッチメントと呼ばれる不連続性やき裂先端の特異性を含む高度な近似を導入することにより、FEMメッシュのトポロジーに依存しないき裂の表現が可能となっている。文献¹²⁾の検討結果から、要素消去法では、ベンチマーク問題のき裂進展を定量はおろか、定性的にも表現できていないこと、他方で、XFEMや要素寸法を適当に細かくした要素境界分離法では破壊過程や破壊形態を良好に表現できることが示されている。特に、検証に用いられたベンチマーク問題においては、XFEMが解析精度の面から最も信頼性が高いことが示されている。しかしながら、XFEMを用いて複数き裂の生成・分岐及び連結、さらにはその後の破砕片の飛翔挙動を表現する場合、その実装は極めて複雑化し、特に複雑なき裂分岐・連結を伴う三次元き裂進展問題への適用が難しいと考えられる。実際、XFEMによる三次元発破解析の報告例は極めて限られている。いずれにせよ、要素消去法ベースのソフトウェアでき裂分岐を論じる場合、得られる結果を極めて

慎重に解釈する必要がある。なお、要素消去法の場合、消去する要素寸法を限りなく小さくしても、解析結果・精度が収束・改善しないといった懸念点があり、脆性材料における動的き裂分岐問題に関する最近の論文であるBobaru and Zhang¹⁶⁾の既往研究の俯瞰（セクション2.2）でも述べられているように、要素消去法のき裂分岐問題への適用は現在も未解決課題となっているようである。故に、国内外で最近使用例が増加傾向にある要素消去法ベースの発破シミュレーションを行う場合、解析者はこの点に最大限の注意を払う必要がある。

なお、LS-DYNAを含む陽解法ベースの解析法の場合、解析の安定性を確保するために、非常に小さな時間ステップ刻み Δt を用いる制約がある。他方で、発破問題における動的き裂進展過程は、注目している過程（亀裂生成～破砕片の飛翔）によるが、比較的短時間（～ミリ秒）のうちに生じるため、陽解法との相性は良い。ただし、これは後述の不連続体ベースの手法である陽解法ベースのDEMにも言える。また、陽解法ベースの手法では、非線形問題を取り扱いやすく、陰解法ベースの手法のように多くのメモリや計算時間を必要とする全体マトリックスのアセンブル、連立方程式の求解（収束性の考慮含む）等が不要な点は極めて魅力的であり、かつ、並列計算導入に伴う高速化による性能向上も得やすい。LS-DYNA以外の陽解法FEMベースの商用コードの適用例としては、例えば、ABAQUS¹⁷⁾¹⁸⁾やAUTODYN^{19) 20)}を用いた発破解析事例や陽解法FDMベースの商用コードFLAC3Dコード²¹⁾を用いた大深度坑内採鉱における緩め発破のモデル化の例等が挙げられる。

以上の方法では、要素（格子）を必要とするのに対して、要素を全く必要としない、メッシュフリー法の発破問題への適用例も報告されている。例えば、Pramanik and Deb²²⁾は、独自開発のSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法に基づいた発破解析法を用いて、発破における岩盤の破壊解析を行っている。SPHは文字通り粒子法ベースであり、発破における岩盤の大変形・大変位・大回転を容易に扱える。ただし、SPHは計算負荷の高い手法²³⁾であり、大規模並列計算を導入しなければ、本手法を実規模の発破問題、特に、三次元問題へ適用するのは難しい。また、SPHのき裂進展解析から得られる結果は、実際の岩石発破から得られる破砕結果と比較して、相違が少なくない場合も度々見られ、今後、よりSPHを洗練させた上での岩石・岩盤の破壊モデルへの適用が期待される。特にき裂進展速度やき裂分岐問題への適用性については、更なる検討が必要と思われる。なお、SPHは各種商用コード（LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS/Explicit）にも実装されており、詳細は各コードの理論マニュアルを参照されたい。

以上のような連続体ベースのモデル化手法では、基礎

となる支配方程式は連続体力学に立脚しており、き裂のモデル化は、数値解析法の性質などを勘案して、あくまで数値解法の枠組み内で設計される。このため、き裂進展の処理は、き裂形状の追跡等により煩雑化しやすい点が欠点である。なお、最近では、最新の連続体ベースの高度き裂進展解析法として、非局所理論に立脚した *Peridynamics*¹⁹⁾²³⁾ 等の適用が注目されているが、本手法の発破解析への適用例については第二報で紹介する。

(2) 不連続体ベースの発破解析法

不連続体ベースのモデル化手法では、応力等の連続体力学特有の概念を介さず、不連続体の集合体として岩石・岩盤をモデル化し、その破砕プロセス及び発破起砕物の飛翔挙動等を表現する。発破解析を目的として、不連続体ベースの数値モデル化手法も積極的に適用されてきており、この中ではDEMの適用例が最多である。

DEMによる発破研究例として、例えば、Preece²⁹⁾による発破解析例が挙げられる。ただし、本DEM解析では、解析開始時において全円粒子は結合されておらず、岩盤破壊プロセス自体の議論は行えていない。また、Preece and Silling²⁹⁾では、独自開発のDEMコードに対して並列計算を導入し、1,679,534個のDEM粒子・150本の発破孔を有した大規模モデルのDEM解析の結果を示している。

これに対して、Song and Kim²⁰⁾もDEMベースの発破解析法を独自に開発した。Preece²⁹⁾とは異なり、岩盤モデルを構成する各々のDEM粒子を、バネにより結合しており、岩盤の不均一性も考慮した岩盤破砕過程の詳細な議論を可能にしている。これにより、発破に伴う岩盤内の複雑なき裂進展過程を合理的に表現できる可能性が示されている。また、Song and Kim²⁰⁾と類似した研究として、Potyondy et al.²⁷⁾は、商用の粒状体DEM (PFC(2D) コード) に対して、平行ボンドモデルを組み込むことで発破に伴う岩盤の破壊過程をモデル化している。本モデルでは、個々のDEM粒子に結合を加えていくことで岩盤の強度特性を表現している。DEM粒子を繋ぎとめる結合は、引張力・せん断力・圧縮力が所定の値を超えた場合に切断され、これにより岩盤内の局所的な破壊過程がモデル化されている。さらに、Donze et al.²⁸⁾によって開発されたDEMを用いた発破解析では、発破孔極近傍で形成される圧砕域とその周囲の放射状に進展する引張き裂が表現可能であることが示された。また、原位置応力下に置かれた岩盤のき裂進展は、これを考慮していない場合と比較してき裂進展方向に指向性がみられることも示される等、DEMの発破問題へのさらなる適用性が示された。また、石沢ら²⁶⁾は、多角形要素に基づいた独自開発のDEMコードを用いて、一自由面発破の二次元解析法を提案している。さらに、Shahrin et al.³⁰⁾は比較的最近LS-DYNAに実装されたDEMソルバーを用いたベンチ発破

解析を実施している。また、Irvani et al.³¹⁾は、HiDEMと呼ばれるオープンソースDEMコードを使った発破解析および上記連続体力学ベースのモデル化手法で説明した要素消去法を用いたAbaqusを使ったFEMによる発破解析を実施している。DEM解析からは比較的容易に実験結果を模した結果を得ることができる一方で、要素消去法ベースのFEM解析では、二次元解析ではかろうじて合理的な結果が得られたものの、三次元解析では不安定な結果が得られやすいと指摘している点は興味深い。

以上からも、DEMは発破解析へ積極的に適用されていることが理解できる。発破では薬量や発破条件にもよるが、特に装薬孔近傍では、しばしば極めて複雑な破砕を伴う。DEMでは、もともと分離してる粒子を仮想バネで結合しており、破壊過程はそうしたバネの切断でモデル化可能な点からも、DEMの発破問題への適用性は高いと考えられる。他方で、DEMの欠点としては、解析に用いるパラメータの設定・最適化に少なくない時間を要する点が挙げられる。また、発破では、岩石・岩盤中の応力波動の伝播過程が興味の対象となることが多々あるが、DEMでは、モデルを構成するDEM粒子が、バネにより結合された不連続体であるため、応力状態の議論は簡単ではない。DEM解析から得られるき裂パターンだけでなく、き裂進展速度の合理性やき裂分岐現象の解析能については注意深く把握しておく必要がある。

その他に、例えば、Mortazavi and Katsabanis³²⁾は、DDAコード (DDA_BLAST) を開発し、節理等の不連続面が卓越した岩盤の発破解析法を提案した。しかし、本解析では、応力波による岩盤破砕は既に完了し、爆発生成ガス圧が節理等を含むき裂ネットワークが既に形成された岩盤に作用するという仮定を採用している点において改善の余地があった。さらに、Ning et al.³³⁾³⁴⁾も、DDAコードを用いた発破シミュレーション手法を提案している。同手法では、DDAモデルを構成する複数のブロック群を人工的なジョイントを用いて結合することで、発破に伴う岩盤の破壊過程から破砕物の飛翔過程に至る一連のモデル化例を示している。

最近では、陽解法DDAも報告されているが、DDAはしばしば陰解法ベースで用いられる。陰解法では、それぞれの時間ステップあたりの計算量は相対的に多くなるものの、陽解法と比較して時間ステップ刻み Δt を大きくとれるため、動的解析の観点からは、これが利点になるような誤解を与えやすい。確かに解析対象となる時間が比較的長く、破壊を考慮しない応力波動の伝播を目的とした地震動解析等であれば Δt が大きく取れることは大きな利点となる。しかしながら、発破問題では、爆轟圧が極めて短時間 (数～数十 μ 秒) でピーク圧に達するため、そもそも陽解法レベルの小さな時間刻み Δt の使用が必須となる。また、応力状態から多大な影響を受けるき裂進

展解析では、応力波動伝播の詳細な追跡が必要であり、この点からも時間刻み Δt を大きくすることは難しい。著者の一人は、陰解法FEMベースのDFPAコードの開発に関わっていたが¹⁹⁾、 Δt を大きくすると、き裂生成量が過小評価された経験を持ち、陽解法と同程度の時間刻み Δt を使用していた。ゆえに、陰解法ベースの発破解析は、特に三次元解析では、計算量・計算時間の観点から、実現が容易ではないと考えられる。これが、陽解法ベースのFEMやDEMが発破解析で多用されている理由の一つであると考えられる。なお、DEMやDDA等の不連続体ベースの解析法（SPH等の連続体ベースも含む）では、計算負荷の高い接触判定処理が必要となるため、特に発破解析法の三次元化を考える場合、FEMベースの手法と比較して多大な計算量が要求される。いずれにせよ、三次元の発破解析を実装する場合は、並列計算の導入は、たとえ比較的小規模モデルであろうとも、計算を合理的な時間で完了するためには必要条件となる。

3. 結言

本稿では、発破解析の中でも特に重要な岩石・岩盤の動的破壊過程解析法に焦点を当て、現在まで多くの研究で用いられてきている連続体力学ベースや不連続体力学ベースの数値モデル化手法に基づいた発破解析法の現状を概説として紹介することを試みた。特に、各解析法の利点・欠点に着目し、これらが発破解析に用いる際の注意点について簡単ではあるが考察を加えた。

これまで提案されてきている手法には、得意な点・不得意な点が必ず存在し、発破解析法の開発者や発破解析に取り組む解析者は、これらについて、深く理解する必要がある。例えば、最近の発破シミュレーションを題材とした学術論文では、LS-DYNA（要素消去法ベースの陽解法FEM）を用いた岩石・岩盤の動的破壊過程解析の適用例が増加傾向にあるが、本論で示したように、要素消去法は、質量保存則を満たさない点に加えて、き裂分岐問題等のベンチマーク問題を表現できない可能性が既往研究で示唆されている。ゆえに、発破解析以前に、解析に用いる破壊解析モデルが基本的な動的破壊に関するベンチマーク問題を合理的に表現できるかについて、慎重に検証すべきであると考えられる。特に、これまで提案されてきている数値破壊力学手法を考えると、き裂分岐問題やき裂進展速度の観点から二次元・三次元に関わらず、破壊解析の品質は成熟しているとは言い難い。従って、使用する発破解析法から得られたき裂パターンが一見合理的に見える場合でも、実際のき裂進展速度と解析から想定されるき裂進展速度は良好な対応を示すかなどについては極めて慎重な検証が必要であると言える。

また、連続体力学ベースの手法が得意な因子は、不連続体力学ベースの手法では苦手とする場合が多く、その逆も同様である。このため、最近では、連続体力学ベースおよび不連続体力学ベースの手法をハイブリッドさせたモデルの開発・適用が注目されており、発破解析法にもこうしたハイブリッドモデル化手法の適用例が増加傾向にある。そこで、別報の第二報では、最新のハイブリッド手法に基づいた発破解析法を示すとともに、本稿で示した発破解析法の要件1~3をワンパッケージのコードで実装した発破解析法の開発例について紹介する。

参考文献

- 1) Zhang, Z. X. : Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications, pp.237-332, Butterworth-Heinemann, 2016.
- 2) Heylmun, J., Vonk, P. and Brewer, T. : blastFoam 4.0 User Guide, Synthetik Applied Technologies, LLC., 2020 (<https://github.com/synthetik-technologies/blastfoam>).
- 3) Preece, D., Thorne, B., Baer, M. and Swegle, J. : Computer simulation of rock blasting: a summary of work from 1987 through 1993. SAND94-1027, Sandia National Laboratories, 1994.
- 4) Latham, J.P., Munjiza, A. and Lu, P. : Rock fragmentation by blasting—a literature study of research in the 1980's and 1990's. Fragblast. 3(3), pp.193-212, 1999.
- 5) Mohammadnejad, M., Liu, H., Chan, A., Dehkhoda, S. and Fukuda, D. : An overview on advances in computational fracture mechanics of rock. Geosystem Engineering. pp.1-24, 2018.
- 6) Lisjak, A. and Grasselli, G. : A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 6(4), pp.301-314, 2014.
- 7) Thorne, B.J., Hommert, P.J. and Brown, B. : Experimental and computational investigation of the fundamental mechanisms of cratering. Proc. 3rd Int. Symp. Fragmentation by Blasting. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 117-124, 1990.
- 8) Liu, C., Yang, M., Han, H. and Yue, W. : Numerical simulation of fracture characteristics of jointed rock masses under blasting load. Engineering Computations. 36(6), pp. 1835-1851, 2019.
- 9) Liu, H., Kou, S., Lindqvist, P. and Zhang, Z. : Numerical simulation of production blasting in sublevel caving. APS Blast 2007. pp. 23-30, 2007.
- 10) Hirt, C. W., Amsden, A. A. and J. L. Cook : An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds, Journal of Computational Physics. 14(3), pp. 227-253, 1974.
- 11) Johnson, G.R. and Holmquist, T.J. : An improved computational constitutive model for brittle materials, AIP Conference Proceedings. 309(981), 1994.
- 12) Song J.H., Wang, H. and Belytschko, T. : A comparative study on finite element methods for dynamic fracture. Computational Mechanics. 42(2), pp.239-50, 2007.
- 13) Cho, S.H. and Kaneko, K. : Influence of the applied pressure

- waveform on the dynamic fracture processes in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 41(5), pp.771-84, 2004.
- 14) Cho, S.H., Nishi, M., Yamamoto, M. and Kaneko, K. : Fragment Size Distribution in Blasting. *Materials Transactions*. 44(5), pp.951-956, 2003.
 - 15) 福田 大祐, 金子 勝比古, 石山 宏二, 内藤 将史 : 大口径ガイドホールを用いたトンネル最外周発破における破断面平滑性に関する数値的検討, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, 68 (1), pp. 213-223, 2012.
 - 16) Bobaru, F. and Zhang, G. : Why do cracks branch? A peridynamic investigation of dynamic brittle fracture. *International Journal of Fracture*. 196(1-2), pp. 59-98, 2016.
 - 17) Saharan, M.R. and Mitri, H.S. : Numerical Procedure for Dynamic Simulation of Discrete Fractures Due to Blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 41(5):pp.641-70, 2008.
 - 18) Liu, H.Y., Williams, D.J., Pedroso, D.M. and Liang, W.M. : Numerical procedure for modelling dynamic fracture of rock by blasting. 7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. Dalian, China 2009. pp. 1551-1560.
 - 19) Zhu, Z., Mohanty, B. and Xie, H. : Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 44(3):pp.412-424, 2007.
 - 20) Liang, W.M., Liu, H.Y., Yang, X.L. and Williams, D.J. : Effects of Decoupled Charge Blasting on Rock Fragmentation Efficiency. 12th ISRM Congress. Beijing, China: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, Paper Number ISRM-12CONGRESS-2011-222, 2011.
 - 21) Sainoki, A., Emad, M. Z. and Mitri, H. : Study on the efficiency of destress blasting in deep mine drift development, *Canadian Geotechnical Journal*, 54, pp.518-528, 2017
 - 22) Pramanik, R. and Deb, D. : Implementation of Smoothed Particle Hydrodynamics for Detonation of Explosive with Application to Rock Fragmentation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 48(4), pp.1683-1698, 2015.
 - 23) Silling, S.A., Epton, M., Weckner, O., Xu, J. and Askari, E. : Peridynamic States and Constitutive Modeling. *Journal of Elasticity*. 88(2):151-184, 2007.
 - 24) Preece, D.S. : A numerical study of bench blast rock delay timing and its influence on percent-cast. *Computer methods and advances in geomechanics*, Rotterdam: Balkema, pp. 863-870, 1994.
 - 25) Preece, D. S. and Silling, S. A. : Modelling Full-scale Blast Heave with Three-dimensional Distinct Elements and Parallel Processing. 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Sydney, pp. 127-136, 2016.
 - 26) Song, J. and Kim, K. : Micromechanical modeling of the dynamic fracture process during rock blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 33(4), pp.387-94, 1996.
 - 27) Potyondy, D.O., Cundall, P.A. and Lee C.A. : Modelling Rock Using Bonded Assemblies of Circular Particles. 2nd North American Rock Mechanics Symposium. Montreal, Canada: American Rock Mechanics Association, Paper Number: ARMA-96-1937, 1996.
 - 28) Donzé, F.V., Bouchez, J. and Magnier, S.A. : Modeling fractures in rock blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 34(8), pp.1153-1163, 1997.
 - 29) 石沢浩太, 若月和人, 阿部和久, 紅露一寛 : 自由面発破による岩盤破壊過程の個別要素解析. *計算数理工学論文集*, 13(11), pp.61-66, 2013.
 - 30) Shahrin, M.I., Abdullah, R.A., Jeon, S., Jeon, B. and Sa'ari, R. : Numerical simulation of rock fragmentation by blasting using Discrete Element Method and Particle Blast Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 527, paper number 012032, 2019.
 - 31) Iravani, A., Kukolj, I., Ouchterlony, F., Antretter, T. and Åström, J.: Modelling blast fragmentation of cylinders of mortar and rock. In: Schunnesson H, Johansson D, editors. Luleå: Luleå Univ. of Technology. pp. 597-610, 2018.
 - 32) Mortazavi, A. and Katsabanis, P.D. : Modelling burden size and strata dip effects on the surface blasting process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 38(4), pp.481-498, 2001.
 - 33) Ning, Y., Yang, J., Ma, G., Chen, P. : Modelling Rock Blasting Considering Explosion Gas Penetration Using Discontinuous Deformation Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 44(4), pp. 483-490, 2011.
 - 34) Ning, Y., Yang, J., An, X. and Ma, G. : Modelling rock fracturing and blast-induced rock mass failure via advanced discretisation within the discontinuous deformation analysis framework. *Computers and Geotechnics*. 38(1), pp.40-49, 2011.

OVERVIEW OF NUMERICAL METHODS TO SIMULATE BLAST-INDUCED DYNAMIC FRACTURE PROCESS OF ROCKS AND ROCKMASSES —CONTINUUM AND DISCONTINUUM BASED METHODS—

Daisuke FUKUDA, Yoshimi OHTA and Seiji EBISU

Rock blasting has been frequently used in mining and tunnel construction, and achieving the optimum blasting results in each problem is significantly important. If a high-fidelity numerical code to simulate the entire process of rock blasting including very complex dynamic rock fracturing can be developed, it can be a powerful engineering tool, which has motivated the active development of such simulator cross the world. In this paper, blasting simulators based on the continuum-based and discontinuum-based methods proposed in literature are overviewed, and advantages and disadvantages of each method are pointed out.