

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—

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 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

発破における岩石・岩盤の破壊過程の全体を予測できる数値モデリング・解析技術(以下、発破解析法)の開発は現在も国内外で進められている。しかし、実用可能な成果の創出までには、更なる時間を要する状況にあると考えられる。現在主流となっている連続体・不連続体力学ベースのモデル化を行った発破解析法の現状を本シンポジウムに第一報として概説した。本稿では、国内外で比較的最近発表された発破解析法に着目して調査した結果について報告する。特に、連続体力学ベースの手法と不連続体力学ベースの手法をハイブリッドさせた手法を用いた発破解析法や、PeridynamicsといったNon-local連続体力学理論に立脚した発破解析法について概説し、その現状と課題について整理する。

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

1. 緒言

発破における岩石・岩盤の破壊過程の全体を予測可能な数値解析技術(以下、発破解析法)は、それが実現すれば、極めて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。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おり、第一報(福田ら、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—、第48回岩盤力学に関するシンポジウム)では、現在も多くの発破解析で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した。連続体力学ベースの手法が得意な因子は、逆に、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。最近では、連続体力学ベースや不連続体力学ベースの各種手法を合理的に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、発破解析にもハイブリ

ッドモデル化手法の適用例が増加傾向にある。

本稿では、第二報という位置づけで、最新のハイブリッド手法に基づいた発破解析法を紹介し、第一報で定義した理想的な発破解析法で要求される以下の3要件:

- ・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を合理的に解析可能
 - ・要件2: 三次元的に複雑かつ高速な岩石・岩盤の損傷・破壊・破砕過程を合理的に解析可能
 - ・要件3: 要件1・2が満たされた上で、時々刻々変化する岩盤内の複雑亀裂ネットワークに爆発生成ガスが流入し、発破起砕物が飛翔し、所定の場所まで移動する一連の過程を合理的に解析可能
- に対して、最近の発破解析法がどこまで洗練されて来たかについて概説を試みる。

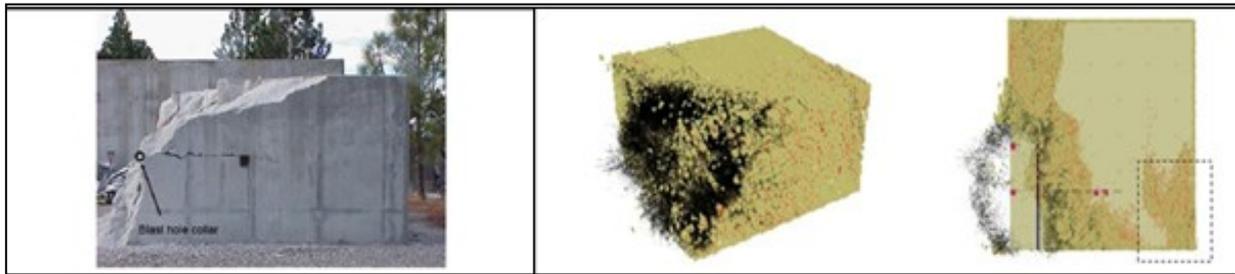
2. 最近の発破解析法の例

比較的最近開発された高度発破解析法の一つとして、Onederra et al.¹⁾によるHybrid Stress Blasting Model (HSBM)

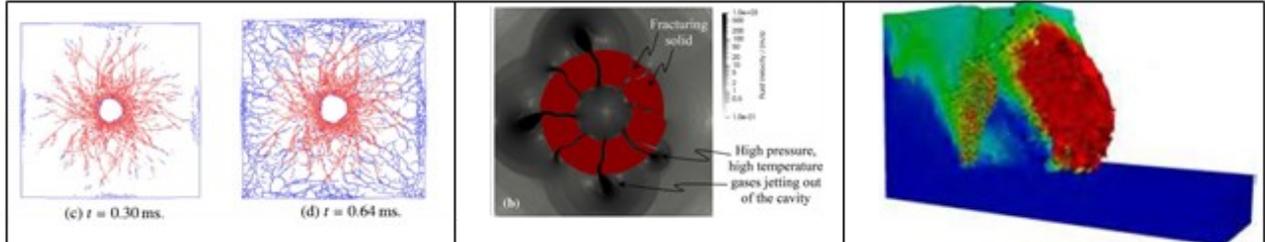
が挙げられる。HSBMは、多数の大学・企業・研究機関によるコンソーシアムにより提案・開発された¹⁾。HSBM以前までに提案された発破解析法と比較して、発破をより高度にモデル化する試みがなされている。HSBMでは、要件1のための解析法として、発破孔内圧をVixenコード²⁾という理想爆轟及び非理想爆轟を考慮可能な解析コードに基いて計算する。また、発破孔極近傍の領域を、Itasca社のFLAC3Dに実装された有限差分法 (Finite Difference Method, FDM) コード³⁾、即ち、連続体ベースの数値モデル化手法を用いて、弾塑性構成則 (モール・クーロンモデル等) によりモデル化し、本領域にVixenから計算された装薬孔内の爆発生成圧の情報を伝達する。このFDMで表現された領域のさらに周囲領域は、Itasca社のParticle Flow Code (PFC)に実装された個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) による粒状体挙動解析法⁴⁾、即ち、不連続体ベースの数値モデル化手法によりモデル化する。そして、このDEM領域を構成するDEM粒子間の仮想バネの切断過程として岩石・岩盤の破壊過程を表現する。HSBMは、FDM-DEMのハイブリッド手法⁵⁾と見なせる。HSBMを用いることで、三次元的に複雑な岩盤破壊過程及び発破起砕物の飛翔過程が表現された点は注目に値する (図-1(a))。他方、PFCを用いているため、詳細な応力波動の議論を行にくい欠点も有する。また、HSBMについては、文献⁶⁾中に、秘密保持契約の制約によりアルゴリズムに関する詳細情報の公開が禁止されているとの説明があり、特にき裂内への爆発生成ガスの流動がどのように考慮されているのか等、情報が十分に与えられていない。よって、本発破解析法の価値についてはこれ以上の判断は難しい。また、大規模並列計算機能も有していないようであり、少なくとも既往研究の報告段階¹⁾においては、その適用は比較的小規模な問題に限定されている。本例からもわかるように、発破関係の研究では、爆薬の製造や性能に係る守秘義務等の制約により、内容の再現性が求められる学術論文での成果発表をあえて避ける例が少なくない。HSBMに関するより最近の報告例では、Drover et al.⁶⁾が緩め発破の三次元発破解析にHSBMを適用している。本論文では、数値解析に基づいた発破設計上重要なパラメータ (発破孔径、最小抵抗線、孔間隔、装薬量、爆薬種、原位置応力を考慮した発破孔配置) の指針決定法を提案している。HSBM開発プロジェクトは既に終了しているが、例えば、Itasca社のBlo-upはHSBMプロジェクトの成果から生まれたコードであり現在も開発が継続されている。

他方、Munjiza et al.⁷⁾によって提唱された陽解法の有限要素法 (Finite Element Method, FEM) とDEMの概念をハイブリッドさせた、所謂 Combined FEM-DEM (以下、FDEM) をコアとした発破解析法も開発されてきている。本稿では、米国のロスアラモス国立研究所によって開発

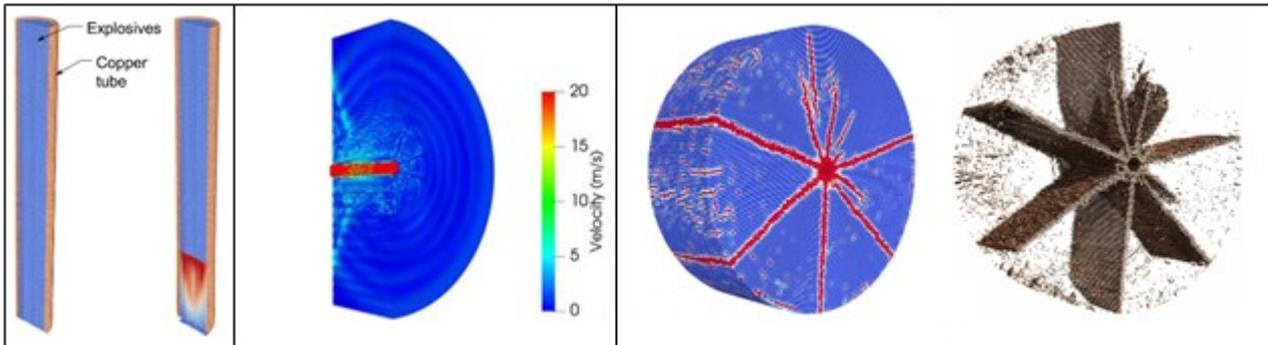
されているHOSSコード⁸⁾と、英国のImperial College Londonの研究グループによって開発されているオープンソースのFluidity-MultiphaseコードとSolidityコードとをハイブリッドさせた解析コード (以下、Fluidity-Solidity)⁹⁾を紹介する (図-1(b))。HOSSおよびFluidity-Solidityでは、上記要件1を、それぞれ有限体積法 (Finite Volume Method, FVM)¹⁰⁾やFluidity-Multiphaseに実装されたFEMベースのCFDコード¹¹⁾をベースとして、爆薬の起爆・爆轟伝播・爆発生成ガスの膨張過程を表現する。爆薬の爆轟における衝撃波の取り扱いについては、近似リーマンソルバや人工粘性による取り扱いが挙げられるが、両者のコードともに人工粘性を用いている⁹⁾。岩石・岩盤の破壊過程は、FDEMを用いて表現する。具体的には、健全時の岩石・岩盤内の応力波動伝播はFEMのソリッド要素の連続体変形を用いて表現し、き裂の生成・進展・分岐・連結過程は、第一報で説明した初期厚みゼロの結合要素 (Cohesive element) に実装した引張・すべり軟化則により要素境界分離として表現する。また、破壊過程において、巨視亀裂や破砕片が形成された場合は、これらの表面間の複雑な接触過程 (摩擦・減衰を含む接触反力) を表現する。具体的には、Munjizaのポテンシャル接触力理論⁷⁾により、接触する離散体間の接触トポロジーを厳密に算出して、各種接触力を求める。FDEMはすべて陽解法FEMの枠組みで定式化されており、岩石・岩盤の動的破壊過程の解析に適している。FDEMは、HOSSではMUNROUというコード名で、また、Fluidity-Solidityでは、Solidityというコード名の下で実装されている。FDEMの理論の詳細や開発の歴史は、それぞれ文献¹²⁾および文献⁹⁾等を参照されたい。また、HOSSおよびFluidity-Solidityでは、それぞれ、Immersed boundary method (IBM)⁸⁾およびImmersed Shell Method (ISM)⁹⁾を用いて要件3を実現している。IBMもISMも、根本となるコンセプトは同様であり、上記要件1で使用したFVMやFEMの流体解析用の解析メッシュの情報と要件2で使用したFDEMの固体の変形・破壊計算用の解析メッシュとの幾何学的な位置関係から、流体 (爆発生成ガス) -固体 (岩石表面) の相互作用 (Fluid-Solid-Interaction, FSI) をモデル化する。詳細は個々の文献⁸⁾中の説明およびこれら文献中の引用文献に譲るが、流体計算から時々刻々更新される流体圧の空間情報が、FSIアルゴリズムにより固体に伝達され、これにより固体は変形・破壊し、固体のメッシュのトポロジーも時々刻々更新されていくことで、この変化が流体計算にも影響を与える。こうした双方の解析から得られる状態が互いに影響を及ぼしながらFSIを実現することで、極めて煩雑な時々刻々空間中を複雑に伝播するき裂中のガス流動問題をハンドリング可能となる。Fluidity-SolidityにおけるISMでは、ガス流が生じる巨視亀裂の位置に存在する流体格子をAdaptive Mesh Refinementに



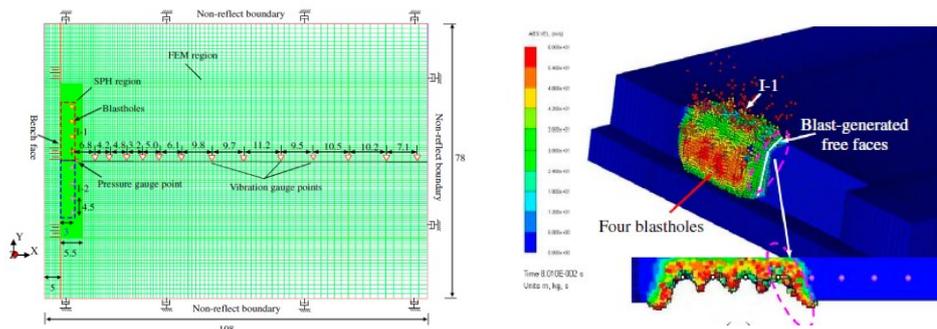
(a) 左列：HSBM⁹⁾によるコンクリートブロックの破碎試験結果，右列：破碎試験を模擬した3次元発破解析例



(b) FDEMベースの発破解析例. 左列：Fluidty-Solidityによる2次元の単一孔の4自由面発破を模擬した解析例⁹⁾，中列：HOSS（2次元解析）による円柱岩石供試体（赤色部）の発破解析例（巨視亀裂が貫通した部分から爆発生成ガス（濃黒色部）が流出している様子が確認可能）¹⁰⁾，右列：HOSS（3次元解析）によるベンチ発破解析例¹³⁾



(c) NOSB PDの発破解析例²²⁾. 左列：PDによる銅チューブ中の爆轟過程のモデル化（赤色部：爆轟フロント），中列：NOSB PDによる装薬孔内に銅チューブを有した円柱岩石供試体の単一孔発破解析から得られる速度場（注：図は岩石の中央部を通る仮想断面でクリップしたもの），右列：NOSB PDによる装薬孔内に銅チューブを有した円柱岩石供試体の単一孔発破解析から得られる巨視き裂（赤色部）のパターン



(d) SPH（爆薬部と破壊が生じる岩盤部）とFEM（非破壊部）をハイブリッドに使用した発破解析の例²⁵⁾. 左列：数値モデル，右列：発破解析結果の一例. SPH領域は限られているため，見た目よりも計算負荷は少ない

図-1 最近の発破解析法の解析例（注：図は，すべて該当参考文献からの引用）

より，十分細かくするなどの配慮により，き裂内のガス流動の解析能を向上している⁹⁾。なお，Fluidty-Solidityについては，現時点では二次元問題への適用例しか報告されておらず，上記要件2をクリアできていない。これは

FluidtyがMPI（Message Passing Interface）による分散型の大規模並列計算（注：スーパーコンピュータでの計算に対応）用の実装が成されている一方で，SolidityがOpenMPによる共有メモリを前提とした小規模並列計算（注：ワ

ークステーションのような単一計算機に対応)しか実装できていないことに起因すると思われる。他方、HOSSはコード全体がMPI並列によるスケーラブルな大規模並列計算性能を達成しており⁸⁾、未だ査読付き国際論文における研究報告は見られないものの、いくつかの国際会議で既に三次元のベンチ発破や坑内発破のデモンストレーションを示しており¹³⁾、今後の成果報告が期待される。

なお、FDEMは、計算負荷が極めて高い手法¹⁴⁾であることから、特に、三次元の場合、並列計算の導入は必須となる。また、FDEMでは、上述したように、岩石・岩盤の破壊過程を第一報で説明した初期厚みゼロの結合要素の分離(=要素境界分離法)として表現する。この場合、解析から得られるき裂経路は当然メッシュの形状に依存するため、FDEMベースの計算では十分細かい要素寸法を用いることが必須となる。他方、本条件が満たされれば、解析から得られるき裂パターンは、実際の破碎実験結果を良く模擬することも報告されている。なお、第一著者が開発しているFDEMコード¹⁴⁾も含め、FDEMは国内外で積極的に実装・開発されており、各々の実装の詳細は共通点もあれば大きく異なる点も存在することに注意されたい。ここで紹介した2つのFDEMベースの発破解析法以外にも、文献¹⁵⁾¹⁶⁾の例が挙げられる。二次元FDEMのため要件2をクリアできていないが、これらの検討¹⁵⁾¹⁶⁾では、岩盤の破壊過程解析用に用いるメッシュに加えて、爆発生成ガス流を多孔体における流体輸送モデルを扱うガスメッシュを考え、ガスと岩盤の相互作用により発破過程を表現している。FDEMベースの発破解析法は、現時点でも手法の開発自体が成熟段階とはいえず、実務的な問題への適用例は極めて限られている。この観点から、商用のFDEMソフトウェアであるRockfield社のELFEN(注:本コードもMPIを用いた大規模並列計算に対応)に発破解析機能を実装したMechanistic Blasting Model(MBM)ソフトウェアの適用例は注目に値する。例えば、Battison et al.¹⁷⁾は、二次元解析という制約はあるものの、MBMコード"MBM2D"を利用して、金鉱山におけるベンチ発破を題材として、設計通りに岩盤斜面の法肩が形成されない実務問題の原因究明に役立てることに成功している。なお、MBM2Dにおける爆轟モデル及び爆発生成ガスのき裂ネットワークへの流入については、Bryan et al.¹⁷⁾では概略のみが述べられており、詳細は把握することはできない。ただし、解析法概念としては、HSBM⁹⁾におけるVixcen²⁾と類似した爆轟モデルが使用され、また、ガス流については、Yang et al.⁹⁾で用いられているようなガス流解析用の流体計算メッシュを用意し、ガス流解析メッシュとFDEMメッシュのFSIを考えることで、起砕岩片の飛翔も含めて発破の全過程の解析が可能になっているものと推察される。なお、ここではFEMとDEMのハイブリッド手法⁹⁾としての

FDEMを紹介したが、FEMもDEMも、それぞれ別の連続体解析手法や不連続体手法で代用することも可能であろう。

他方、FDEMのように岩石・岩盤の破壊過程のモデル化にメッシュや格子を用いた手法では、き裂のモデル化が開発の難易度を極めて高くする。このため、既往の多くの連続体ベースの数値モデル化手法では、き裂の表現方法が煩雑化する欠点がある。しかし、解析に入力するパラメータの設定は比較的容易である。他方、不連続体ベースの方法では、岩石・岩盤の破壊過程のモデル化は比較的容易になる一方で、各種解析に入力が必要なバネ剛性等のキャリブレーションが煩雑化する。この観点から、最近では、非局所(Non-local)理論に基づいたPeridynamics(PD)²⁰⁾という新たな連続体力学が注目されている。PDでは、既往の連続体の支配方程式に含まれるひずみテンソルや応力テンソルの空間微分を用いず、ある物質点とそこから有限距離の範囲内に含まれる各物質点との間でPD bondを考え、各PD bond間に作用する力の積分を評価することで、固体材料の変形を扱う。PDはあくまで連続体力学理論であり、PD理論の段階では、PD bondはある物質点の周囲に無限個存在し、数値離散化の段階で数値積分により有限個のPD bondで代表させて求解する。これは、DEMのように、ある点に関して、最初からその周囲の有限個の粒子間を結合するバネから固体全体をモデル化する不連続体力学の考え方とは異なる。PDの数値解法としては、各PD bondをFEMにおけるトラス要素に見立てて数値離散化する手法や各物質点を粒子に見立てた離散化手法が提案されている。また、PDには3世代ありBond-based(BB)PD、Ordinary state-based(OSB)PD、Non-ordinary state-based(NOSB)PDがある²⁰⁾。BB PDとOSB PDでは応力テンソルやひずみテンソルの概念は全く使用されず、等方の線形弾性体を考える場合、BB PDではヤング率は任意の正值を取れるが、ポアソン比の値が固定され、実装上はDEMと極めて類似する。OSB PDではstateと呼ばれる物理量が導入され、ポアソン比の制約は存在しない。NOSB PDでは、非局所理論の観点から、近似的に変形勾配テンソルを求め、既往の連続体力学と同様にひずみテンソルや応力テンソルを評価する。このため、既往の連続体力学で構築されてきた構成モデル(応力-ひずみ関係)を利用することができるがZero Energy mode等の不安定化の克服法が未解決のままである。なお、PDの支配方程式では力の積分方程式を用いているため、き裂先端のひずみテンソルや応力テンソルの特異性問題を回避でき、各PD bondが所定の破壊規準を満たした場合、積分評価対象から除外する。Bobaru and Zhang²¹⁾は、PDにより既往の数値破壊解析手法と比較して、最小限の入力パラメータ(密度、弾性定数、破壊エネルギー)により、脆性材料におけるき裂進展・分岐

を高度に表現できる可能性を示している。

本稿では、極最近発表されたZhu and Zhao²²⁾によるNOSB PDに基いた発破解析事例について紹介する。本発破解析では、Banadaki²³⁾の発破実験をモデル化している。まず、NOSB PDの枠組みにおいて、衝撃波²⁴⁾を含む爆薬の爆轟過程のモデル化および爆発生成ガスの膨張過程のJWL (Jones-Wilkins-Lee) 状態方程式によるモデル化を提案している。本モデル化手法は、Ansys Autodyn等の商用コードにおいてSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)を用いた実装と類似している。また、Banadaki²³⁾の発破実験では、装薬孔壁と爆薬の間に銅チューブが導入されており、銅はNOSB PDの枠組みで、連続体弾塑性モデルにより表現されている。他方で、Johnson & Holmquist (JH2)モデルと呼ばれる連続体用の構成則をNOSB PDに組み込むことで、岩石部の衝撃载荷に伴う損傷過程を表現している。また、ある物質点と結合関係にあるPD bondの伸長量が臨界値に達した場合に、bondを切断することで岩石・岩盤の引張破壊過程を表現する方法を採用している。

図-1(c)にZhu and Zhao²²⁾によるNOSB PDベースの三次元発破解析結果を示す。図のモデルは多数のPD粒子から構成されている。なお、PDでは、ある物質点からHorizonと呼ばれる有限の相互作用範囲内に存在する全物質点と相互作用を考える必要があるため、数値計算の実装は極めて容易な一方で、計算負荷はFEM等の連続体ベースの数値手法と比較すると多大となり、三次元ではその傾向が顕著となる。そのため、本発破解析では、オープンソースのPDコードperidigmをベースに発破解析法の開発がなされている。peridigmはMPI並列化が実装されており、スーパーコンピュータ等での大規模計算環境でも使用可能である。まず、図-1(c)の左列では、銅チューブ内部に設置された爆薬の爆轟が、銅チューブ内を上方に伝播する様子を示している。また、この爆轟モデルを用いて、銅チューブを装薬孔に挿入した花崗岩円柱供試体の発破解析例を図-1(c)の中列および右列に示す。本解析の結果は、Banadaki²³⁾の実験結果を合理的に表現するものである。現在、PD自体の高度化に関する研究報告例が激増しており、合理的なき裂の生成・進展の解析法として、極めて高いポテンシャルを有していると考えられる。なお、Zhu and Zhao²²⁾の報告における今後の課題は、爆轟生成ガスが新たに生成されたき裂ネットワーク中へ流入する過程のモデル化がなされていない点にある。今後は爆発生成ガスをモデル化したPD粒子が、発破により生成した巨視き裂中に流入していく過程を高度に表現する必要がある。

なお、PDとSPHは実装上は極めて類似しており、上記解析法において、PDを全てSPHに置き換えた発破解析法も考えられる。Ansys Autodynでは、SPHにより固体部・爆薬部のモデル化が可能である。ただし、SPHは、あく

まで既往の連続体力学の支配方程式を想定した数値解法であり、き裂の取り扱いには注意が必要である。他方、PDはあくまで連続体力学理論であり、数値解法の一種として分類されるべきではない。PD、SPH、DEMといった手法が発破解析法に適用される場合、周辺の粒子との接触・相互作用を判定するための周辺検索に多大な計算リソースが必要となる。ゆえに、発破解析において、き裂生成・進展といった損傷が生じない部分に関しては、FEM等を用いて計算負荷を下げる工夫も導入されている。この場合、当然各種手法で表現する領域をシームレスにつなぐ必要がある。Lu et al.²⁵⁾は、Ansys Autodynに実装された動的FEMとSPHの連成発破解析を通して、自由面の有無や自由面の数、さらにはその他の発破設計パラメータが発破振動に与える影響について議論している(図-1(d))。この研究では、FEMは応力波伝播解析のみに使用され、顕著な破壊が生じる部分及び爆薬の爆轟過程はSPHによりモデル化されている。発破過程全体を表現できている点は注目に値する。ただし、破壊解析部はPDに変更する等の工夫により、より高度な発破解析が可能になるものと期待される。

3. 結言

本稿では、理想的な発破解析法で要求される3要件を定義し、これら3要件の観点から、比較的最近報告された発破解析法についての概説を試みた。最近の発破解析法を大まかに分類する場合、要件1の爆薬部のモデル化としては、ラグランジアンベースのSPHやPDによるモデル化やオイラーベースのFVMやFEMによるモデル化手法が現在も多用されている。要件2の岩石・岩盤の変形・破壊過程のモデル化には、FEM、FDM、FVM、SPH、DEM、DDA (Discontinuous Deformation Analysis)やPDなどが試行錯誤的に使用されているが、どの手法が最も合理的かという評価は示されていない。PDのき裂進展解析については今後の更なる発展が期待される。また、要件3までを考慮できる発破解析法の数は限られ、三次元解析を合理的な解析時間で実施可能という条件を付けると、さらに限られる。このことから、三次元でかつ上記の要件1~3を満たすためには、大規模並列計算の導入も必須となり、各手法の並列計算との相性の考慮も必要となる。

今後、より高度かつ実務に適用可能な発破解析法の実現が待たれる一方で、実用可能な成果の創出までには、更なる時間を要する状況にあるように思われる。

参考文献

- 1) Onederra, I.A., Furtney, J.K., Sellers, E. and Iverson, S. :

- Modelling blast induced damage from a fully coupled explosive charge. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 58: pp.73-84, 2013.
- 2) Esen, S. : A Non-Ideal Detonation Model for Evaluating the Performance of Explosives in Rock Blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 41(3):pp.467-497, 2006.
 - 3) ITASCA Consulting Group, Inc. : *FLAC(Version6.0)*. Minneapolis, USA, 2008.
 - 4) P. Cundall : Lattice method for modelling brittle, jointed rock, In: Detournay, Sainsbury, Nelson (Eds.), *Continuum and Distinct Element Numerical Modelling in Geomechanics*, FLACDEM, Itasca International Inc. Minneapolis, Melbourne, Australia, pp. 1-9, 2011.
 - 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) Drover, C., Villaescusa, E. and Onederra, I. : Face destressing blast design for hard rock tunnelling at great depth. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 80: pp.257-268, 2018.
 - 7) Munjiza, A. : Discrete elements in transient dynamics of fractured media, Ph.D. thesis, Swansea, 1992.
 - 8) Knight, E.E., Rougier, E., Lei, Z., Euser, B., Chau, V., Boyce, S.H., Gao, K., Okubo, K. and Froment, M. : HOSS: an implementation of the combined finite-discrete element method. *Comp. Part. Mech.* 7; pp.765-787, 2020.
 - 9) Yang, P., Xiang, J., Chen, M., Fang, F., Pavlidis, D., Latham, J.P. and Pain, C.C. : The immersed-body gas-solid interaction model for blast analysis in fractured solid media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 91: pp. 119-132, 2017.
 - 10)Munjiza, A., Rougier, E., Lei, Z. and Knight E.E. : FSIS-a novel fluid-solid interaction solver for fracturing and fragmenting solids. *Comp. Part. Mech.* 7: pp.789-805, 2020.
 - 11)Pavlidis, D., Xie, Z., Percival, J.R., Gomes, J.L.M.A., Pain, C.C. and Matar, O. K. : Two- and three-phase horizontal slug flow simulations using an interface-capturing compositional approach, *Int. J. Multiph. Flow.* 67: pp.85-91, 2014.
 - 12)Munjiza, A. : *The combinedfinite-discrete element method*, John Wiley & Sons, 2004.
 - 13)Knight, E.E., Rougier, E., Lei, Z. and Munjiza, A : HOSS FOR FRACKING AND MINING, 6th International Conference on Discrete Element Methods, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, 2013.
 - 14)Fukuda, D., Mohammadnejad, M., Liu, H.Y., Zhang, Q.B., Zhao, J., Dehkhoda, S., Chan, A., Kodama, J. and Fujii, Y. : Development of a 3D Hybrid Finite-Discrete Element Simulator based on GPGPU- Parallelized Computation for Modelling Rock Fracturing Under Quasi-Static and Dynamic Loading Conditions, *Rock. Mech. Rock. Eng.*, 53: pp.1079-1112, 2020.
 - 15)Mohammadi, S. and Bebamzadeh, A. : Analysis of fractured rock and gas flow interaction in explosion simulations. *Combust. Explos. Shock Waves*. 43:4, pp.482-491, 2007.
 - 16)Mohammadi, S. and Pooladi, A : A two-mesh coupled gas flow-solid interaction model for 2D blast analysis in fractured media. *Finite Elem. Anal. Des.*50: pp.48-69, 2012.
 - 17)Battison, R., Esen, S., Duggan, R. Henley, K. and Dare-Bryan, P. : Reducing Crest Loss at Barrick Cowal Gold Mine, 11th Fragblast, SYDNEY, NSW, pp. 1-14, 2015.
 - 18)Dare-Bryan, P., Byers, T. and Theobald, A. : Numerical modelling and electronic initiation to assist blasting in heavily jointed rock, *Proceedings 36th Conference on Explosives and Blasting Technique*, Orlando, pp.1-10, 2010.
 - 20)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.
 - 21)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.
 - 22)Zhu, F. and Zhao, J. : Peridynamic modelling of blasting induced rock fractures, *J. Mech. Phys. Solids*. 153: PaperID: 104469, 2021.
 - 23)Banadaki, M.M.D., Stress-wave induced fracture in rock due to explosive action. Doctoral dissertation, University of Toronto, 2010.
 - 24)Silling, S.A., Parks, M.L., Kamm, J.R., Weckner, O. and Rassaian, M., Modeling shockwaves and impact phenomena with Eulerian peridynamics. *Int. J. Impact. Eng.* 107: pp. 47-57, 2017.
 - 25)Lu, W., Leng, Z., Hu, H., Chen, M. and Wang, G. : Experimental and numerical investigation of the effect of blast-generated free surfaces on blasting vibration. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 22(11):pp.1374-1398, 2016.

OVERVIEW OF NUMERICAL METHODS TO SIMULATE BLAST-INDUCED DYNAMIC FRACTURE PROCESS OF ROCKS AND ROCKMASSES –STATE-OF-THE-ART HYBRID 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, some important characteristics of state-of-the-art blasting simulators based on either hybrid methods or non-local methods proposed in recent literature are overviewed.