



Title	爆燃を用いた岩石の動的破壊に関する基礎的研究
Author(s)	福田, 大祐; Cho, SangHo; Min, Gyeongjo 他
Description	一般社団法人資源・素材2021(札幌), 2021年9月14日～16日, 札幌市（オンライン開催）. https://confit.atlas.jp/guide/event/mmij2021b/top?lang=ja
Citation	資源・素材講演集, 8(2021)(2(秋・札幌)), 3K0109-13-04
Issue Date	2021-09-16
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/82692
Type	conference paper
File Information	3K0109-13-04.pdf



企画講演

【企画講演／募集型企画】 YARO15 –コロナ禍での岩盤工学に関する研究–
(Special session/Open call for public) YARO15: Research activities on
rock engineering during the COVID-19 pandemic

2021年9月16日(木) 13:00 ~ 14:40 第1会場 (Webex)

[3K0109-13-04] 爆燃を用いた岩石の動的破壊に関する基礎的研究
A Fundamental Study of Dynamic Fracture of Rocks
Resulting from Deflagration Phenomena

○福田 大祐¹、CHO SangHo²、MIN Gyeongjo²、Liu Hongyuan³、児玉 淳一¹、藤井 義明¹ (1. 北海道大学、2. 全北大学 (韓国)、3. タスマニア大学 (豪州))

○Daisuke FUKUDA¹、SangHo CHO²、Gyeongjo MIN²、Hongyuan LIU³、Jun-ichi KODAMA¹、Yoshiaki FUJII¹ (1. Hokkaido University, 2. Jeonbuk National University(Korea), 3. Universtiy of Tasmania(Australia))

キーワード：岩石、爆燃、破碎、数値解析、実験

Rocks, Deflagration phenomena, Fragmentation, Numerical simulation, Experiment

石油・非在来型天然ガスの生産性向上のために、生産井周囲岩盤にマルチフラクチャを造成するための技術開発は重要な課題である。この目的を達成するための一つ的手段として、爆燃現象を用いた遅すぎず・速すぎない動圧の利用が、マルチフラクチャ造成およびその後のガス膨張に伴うき裂の伸長を実現するための方法として期待されている。他方で、これまで海外においてごく限られた実験的な研究例が報告されているものの、爆燃に伴う岩石・岩盤の破壊メカニズムに関して、現在までに得られている知見は極めて限られている。こうした背景から、著者らは岩石の爆燃破碎機構解明を目的として一連の研究に取り組んできている。本発表では、上記研究に関して、現在までに得られている成果および今後の課題について報告する。

1. はじめに

石油・天然ガス開発において、坑井刺激による生産性向上の観点から、坑井周囲の貯留岩に対して十分な長さで、かつ、複数のフラクチャー（以下、マルチフラクチャー）を造成することができれば有益である。しかしながら、既往の水圧破碎等の技術を用いた場合、载荷速度は極めて低く（＝低速载荷）、マルチフラクチャーを実現することは難しい。これに対して、爆薬の爆轟を用いた超高速载荷を用いる場合、坑井近傍には多数の短いき裂で特徴づけられる破碎域が形成される傾向があり、原位置応力状態が高い場合には、生産性が低下してしまう場合もある。そこで、水圧破碎で用いる载荷速度ほど低速度载荷ではなく、爆薬の爆轟ほど高速载荷ではない、所謂、中速载荷を実現することを目的として、固体推進薬を活用したマルチフラクチャーの造成法が提案されており、実験的にその有効性が示されている¹⁾²⁾。

しかしながら、中速载荷に伴う岩石・岩盤の破壊機構に関する知見は現在も十分とは言えない。その理由としては、これまでに提案されている固体推進薬等を用いた手法に基づいた中速载荷によるフラクチャー造成問題を考える場合、(i)爆轟ほど高速ではないものの高速に膨張するガスによる装薬孔への载荷、(ii)3次元的に複雑かつ高速な岩石・岩盤の動的破壊過程および(iii)生成き裂表面を含む岩石・岩盤表面と生成ガスとの相互作用、といった連成過程を扱う必要性が挙げられる。このため、実験や理論解析から得られる知見は限られ、合理的な岩石・岩盤の3次元動的破壊プロセス解析(3-dimensional Dynamic Fracture Process Analysis, 以下3D DFPA)を行うための数値シミュレータが必要となる。本目的の実現のために、著者らは、最近、Combined Finite-discrete element method（以下、FDEM）に基づいた3D DFPAシミュレータを開発してきている³⁾⁴⁾。本シミュレータでは、健全な岩石・岩盤内で生じる応力波動伝播、き裂の生成・進展・分岐・連結～巨視き裂の形成、さらには新たに形成された巨視き裂表面を含む岩石・岩盤表面間の複雑な接触過程を高度に解析できる。既往研究³⁾⁴⁾では、大理石の動的圧裂引張試験や動的圧縮試験を対象として、開発コードの合理性・適用性が示されており、本稿で対象とする中速载荷に伴う岩石の動的破壊問題にも適用可能であると考えられる。

そこで、本稿では、中速载荷に伴う岩盤内のフラクチャー造成機構解明に資することを目的として取り組んだ最近の基礎研究の成果について簡単に報告する。

2. NRCの圧力計測

マルチフラクチャー造成実績¹⁾²⁾が報告されている固体推進薬を利用することは容易ではなかったため、本研究では、代替案として中速度载荷を実現可能でかつ、利用が容易なNRC (new rock cracker) を用いることにした。

本節では、NRCによる中速载荷特性を理解するために実施した孔内圧力計測について紹介する。NRCは、アルミニウム粉末と酸化銅を主成分とする非火薬破碎剤で、テルミット反応(金属酸化還元反応)の際に生じる高熱・高温(3000℃程度)による瞬発的な水蒸気膨張圧によって中速载荷(ひずみ速度換算で $10^4 \sim 10^6$ [1/sec] 程度)を生じさせる。既往研究⁵⁾では、NRCによる中速载荷を利用して、一連の岩石の動的一軸圧縮試験を行い、動的強度を評価している。同研究によれば、試験に供された花崗岩および砂岩供試体については、上記の中速载荷に相当するひずみ速度域においては、岩石の強度は増加する一方で、強度の载荷速度依存性は一貫した傾向を示さないことを示唆している。

NRCの起爆によって、装薬孔内で生じる圧力を計測するために、図1に示すような実験システムを構築した。一つの装薬孔と圧力計測用に設けた別の孔(以下、圧力計測孔)を有するアクリルブロックを用意した。圧力計測孔は装薬孔底近傍とアクリルブロックの側面とを連結するように施されている。図のように圧力計測センサー用のアダプターを用意し、テフロンテープを用いてアダプター表面と圧力計測孔間の隙間からのガス漏洩を防止した。アダプターをアクリルブロックに固定するために、スクリュータップを作成した。そして、圧力センサー(Model CY-YD-214, Sinocera)を圧力計測孔の孔口に設置した。圧力センサーはオシロスコープと信号増幅器からなるデータ収集システムと連結している。今回用いたNRCに関しては、密度は $1250 \sim 1350$ [kg/m³]、反応温度は 2502 [K]、発熱量は 409 kcal/kg、ガス生成量は 351 [L/kg]、比エネルギーは 3324 [L/kg]であった⁶⁾。NRCの薬量としては 10 グラムを装薬孔底から装填した。NRCの点火具は、NRC装薬部の最上部に設置した。なお、装薬孔にNRCを装填せず、点火具のみ着火した場合は、アクリルには破碎が全く生じないことを事前に確認した。装薬孔口には砂によるタンピングを用いた。なお、タンピングを用いなくても一定程度の破碎効果が見込める爆薬の爆轟を用いる場合と異なり、NRCの場合、タンピングを施さない限り十分な装薬孔内圧を生成することはできないことに注意されたい。上記の条件のもと、データ収集システムの電気回路をチェックし、アクリルブロックを圧力チャンバー内に設置した後、チャンバーの蓋をし、安全面を確保した状態で圧力計測を実施した。

図2(a)および(b)に、それぞれ上記の圧力計測結果および測定後に得られたアクリルブロックの破碎パターンを示す。図2(a)の計測結果によると、圧力がピークに達するまでに要する時間(ライズタイム)は大略 $150 \mu\text{s}$ であることがわかる。また、圧力はピークに達した後は、ライズタイムと比較して緩やかに減衰していることが確認できる。図2(b)によると、アクリルブロックは2分され、マルチフラクチャーの造成は見られなかった。なお、圧力計測孔の存在により、圧力計測孔周囲にコーン状の破碎域の形成も見られた。

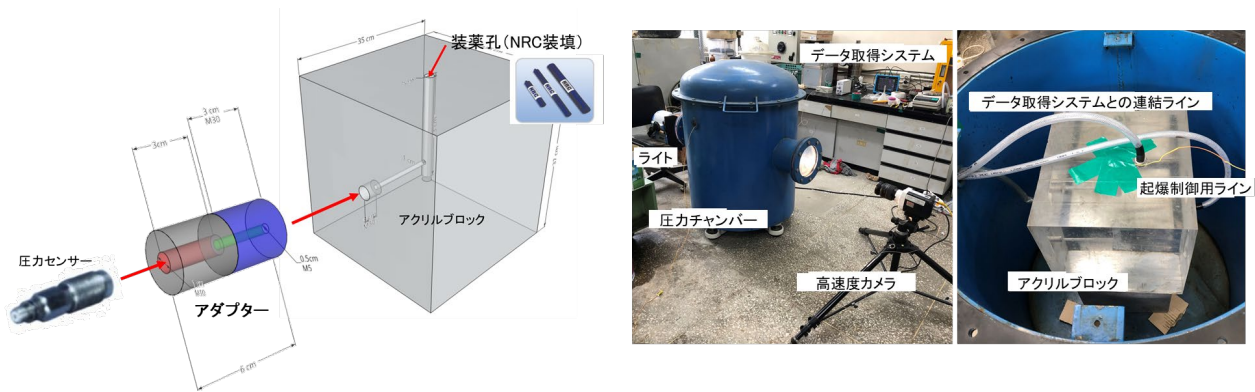


図1 NRCの起爆に伴い装薬孔内に生じる動圧計測システムの概要

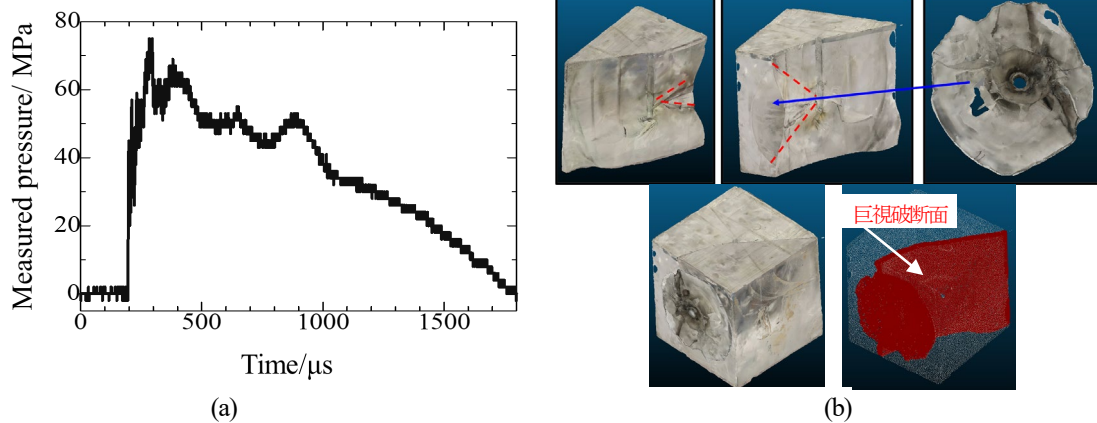


図2 圧力計測結果：(a)計測圧力波形（NRCの薬量5グラムの場合），(b)圧力計測後のアクリルブロックの破断面形状

3. NRCを用いた岩石破碎試験

NRCによる中速载荷にともなう岩石の破断面形成機構について理解するために、50グラムのNRCを用いた岩石ブロックの破碎実験を実施した。試験には、図3(a)に示すような寸法の片麻岩ブロックを採用した。岩石ブロックの実際の写真を図3(b)に示す。装薬孔径および装薬孔長は、それぞれ20 mmおよび400 mmであり、NRC点火具(長さ200 mm)は孔底に設置した。圧力計測の場合と同様に、装薬孔口には、砂によるタンピングを用いた。後述するシミュレーションに必要な情報として、点火具は上部側から点火した。このため、点火は点火具上部から孔底に向かって伝播した(図3(a)中赤色部)。なお、本実験は、韓国の Jeonbuk National University 構内の野外破碎実験場で実施した。このため、安全上の理由から、NRC 装薬後の岩石ブロックに対して、不織布、防爆シート、ラバーマットで覆うことで、破碎に伴う飛石の防止措置を施した。このため、試験中の岩石の破碎プロセスは観察することができなかった。また、実験実施当時、NRC(50g)の圧力計測可能な圧力センサーを有していなかったため、孔内圧力計測は実施しなかった。本破碎実験で用いた片麻岩の物理・力学特性については、先行研究⁷⁾で実施されており、表1にその結果をまとめた。なお、力学特性算出に際しては、片麻岩を等方の線形弾性体と仮定して算出した。

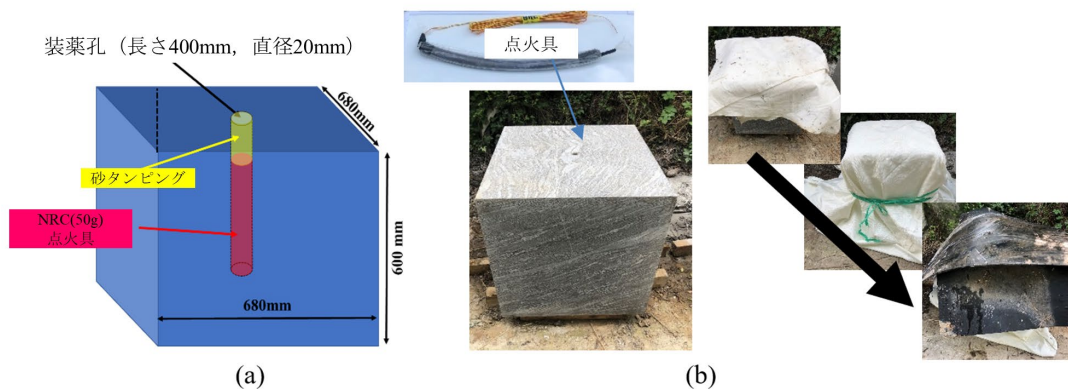


図3 岩石破碎実験の概要：(a)破碎試験の模式図，(b)50グラムのNRCを用いた岩石破碎試験の写真

表 1 破碎実験に用いた片麻岩の物理・力学特性⁷⁾

P 波速度 [m/s]	5168
S 波速度 [m/s]	3233
密度 [kg/m ³]	2700
静的圧裂引張強さ [MPa]	10.8
静的一軸圧縮強さ [MPa]	152.2
ヤング率 [GPa]	68.5
ポアソン比 [–]	0.18
静的粘着力 [MPa]	25.65
静的内部摩擦角[°]	53.1

破碎試験を図4に示す。破壊形態としては、供試体が2分された。この結果はアクリルの場合と類似しており、マルチフラクチャーは造成されなかった。



図4 岩石破碎試験の結果

4. 3次元FDEMを用いた動的破壊プロセス解析

上記の圧力計測および岩石破碎試験の結果を参考に、3次元のFDEMモデルを構築し、3D DFPAを実施した。3D DFPAのコアであるFDEMの柱となる3つのモデルコンセプトを以下(i)～(iii)に示す。

- (i)連続体力学に基づいたインタクトな岩石・岩盤内の変形・応力波動伝播過程のモデル化（＝四面体要素の連続変形により表現）
 - (ii) Cohesive zone model (引張軟化則・滑り軟化則)に基づいた連続体から不連続体への遷移過程、即ち、微視き裂の生成・進展～巨視き裂の生成過程のモデル化（＝初期厚みゼロの Cohesive 要素を四面体要素間に挿入し、その開閉合・滑りにより表現）
 - (iii) 不連続変形過程、即ち巨視き裂を含む材料表面同士の複雑な接触プロセスのモデル化（＝ポテンシャル接触理論により表現）
- これら(i)～(iii)でわかるより、FDEMは本研究で対象としている問題に適していると考えられる。なお、著者らが開発している汎用GPU(Graphic processing units)による大規模並列計算を組み込んだFDEMの詳細については、参考文献^{3,4)}を参照されたい。

図5に、図3の破碎実験を模擬した3D DFPA用の解析モデルを示す。FDEMはき裂パターンが要素形状に依存するため、図に示すように要素分割を細かくするように注意した。なお、モデルのサイズは図3を模擬した。解析に必要な物理・力学パラメータは表1を参考に設定した。ここでは岩石の異方性は考慮せず、等方の弾性体を仮定し、解析に必要なラメの定数は、表1の密度と弾性波速度から決定した。また、破碎実験で使用した片麻岩については、参考文献⁷⁾や事前の検討も含め、Split Hopkinson pressure bar (SHPB)を用いた動的強度試験が実施されている。これらの結果によると、NRCにより生じる動圧に相当する載荷速度における本岩石の強度増加度（＝動的強度/静的強度）は、動的圧裂引張強さおよび動的一軸圧縮試験の場合において、それぞれ1.2および1.1～1.4程度であり、強度増加の度合いは小さいことが明らかにされている。この知見に基づき、3D DFPAでは、強度の載荷速度依存性効果は導入しないことにし、表1の引張強さおよび粘着力を Cohesive 要素の強度として用いることにした。FDEMでは Cohesive 要素の強度に加えて、Cohesive 要素に与える Mode I および Mode II の破壊エネルギー³⁾を設定する必要があるが、これらに関する実験データが得られていない。そこで、ここではき裂の限界開口量および限界滑り量を50 μmと仮定した。なお、簡単のため、砂タンピングの効果は無視することにし、NRCの点火により生成した圧力はNRCの装薬域に相当するメッシュ表面に作用させた。NRCの点火により生じる作用圧 $P(t)$ (t は時刻、 $t=0$ は点火時)は次式でモデル化した。

$$P(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } 0 \leq t \leq t_s \\ P_0 \frac{t-t_s}{t_0} & \text{for } t_s \leq t \leq t_s + t_0 \\ P_0 e^{-\alpha\{t-(t_s+t_0)\}} & \text{for } t_s + t_0 \leq t \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 P_0 (=125 MPa)は最大圧、 t_0 (=150 μ s)は圧力がピーク値に達するまでのライズタイム、 α (= 2500)はピーク後の減衰の度合いである。これらの値は、上記の圧力計測(図 2(a))を基に決定している。なお、図 2(a)では、10 グラムの NRC による圧力を計測しており、岩石破砕試験では 50 グラムの NRC を用いている。また、岩石ブロックの強度とアクリルブロックの強度も異なると想定されることから、50 グラムの NRC に相当する P_0 値は自明ではない。そこで P_0 は試行錯誤により決定したことに注意されたい。(1)式中 t_s ($=\|\mathbf{x}-\mathbf{x}_{\text{init}}\|/V_{\text{deflag}}$) は、装薬域内の位置 $\mathbf{x}_{\text{init}}$ で点火することで生じた NRC の燃焼波が NRC の装薬域内の点 $\mathbf{x}$ に到達するまでに要する時間を示している。 V_{deflag} は燃焼の伝播速度を示しており、事前の検討から 1.2 km/s を仮定した。3D DFPA では、時刻 $t=0$ において、NRC 装薬域の最上部から圧力 $P(t)$ を作用させ、本圧力波は NRC 装薬域の最上部から孔底に向かって燃焼伝播速度 V_{deflag} で伝播させた。なお、現在の FDEM コードでは、生成ガス流動や生成ガスと生成巨視き裂表面間の相互作用を陽に表現することはできないため、これは今後の課題である。このため、本稿では、シンプルなガスゾーンモデルを採用することにした。本モデルでは、燃焼波が既に到達している装薬域に関して、ガスゾーンが装薬孔壁の各点から供試体の外側自由面に向かって一定の見かけの速度で拡大していくと仮定した。これまでの経験から、ここではガスゾーンの拡大速度を 400 m/s と仮定した。そして、解析中に生じる装薬部と直接連結している巨視き裂群を抽出し、これらの巨視き裂群において上述のガスゾーン内に含まれる部分に対しては、(1)式の圧力を距離効果も考慮して巨視き裂面に作用させた。なお、距離減衰効果については、装薬孔表面で 1、ガスゾーン先端で 0 となるような単調に減少する関数を用い、この距離効果を考慮した関数を $P(r)$ に乗じた。

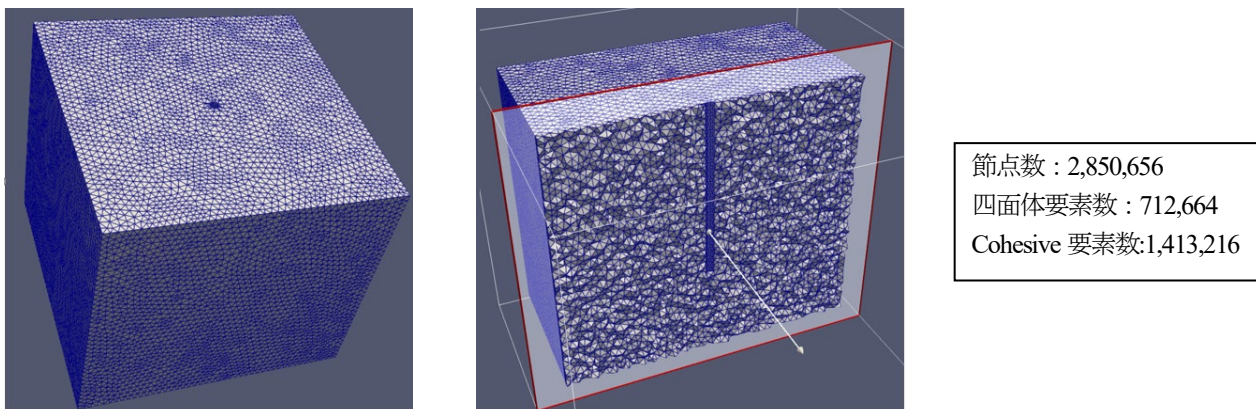


図5 3D DFPA に用いた FDEM モデル

図 6 に NRC 点火($t=0$)後の各時刻における 3D DFPA の結果を示す。図中最左列は破壊プロセス(図中 $\text{Damage}=0$ (健全部)~1(巨視き裂部))を示している。図の中央列と最右列は、モデル中心を通る 2 つの異なる仮想断面上における最大主応力の空間分布に相当する。なお、本稿では、最大主応力は最も引張側の主応力成分であり、応力が正值(暖色系)の場合は引張応力に、負値(寒色系)の場合は圧縮応力に対応する。図中の白線で示したボックスは 3 次元モデルの外輪郭を示している。時刻 $t=0$ で NRC 点火が開始した後、圧力波が装薬孔壁に作用し始め、装薬孔中央部(NRC 装薬域最上部)から孔底に向かって伝播していく。この結果として、時刻 $t=90 \mu$ s では、図中に示す NRC 装薬域の最上部から $V_{\text{deflag}} \times (90 \mu\text{s}) (=108 \text{ mm})$ の距離だけ点火開始済の領域が伝播する。 $t=90 \mu$ s の結果からは、点火開始済領域において、孔軸に垂直な各断面(図中最右列)では、周方向引張の主応力が生じ、この引張応力波がモデル側壁に向かって放射状に伝播していく様子がわかる。発破のような高速载荷の場合、载荷直後においては、動径方向・周方向ともに圧縮の主応力状態から、動径方向が圧縮、周方向が引張の応力状態に動的に移行することが知られているが、ここで対象としている問題では、周方向応力が最初から引張となっていることがわかる。このため、装薬孔周辺には発破で見られるような圧砕域は生じていない。この周方向引張の主応力に伴い、引張り裂が装薬孔から側壁に向かって生じていることがわかる。また、同様の傾向は、著者らの既往研究において対象とした、ニトロメタンの爆燃による中速载荷の場合においても指摘されており⁸⁾、ニトロメタンの場合も圧力がピーク値に達するまでのライズタイム t_0 は大略 140 μ s 程度と計測されており、今回用いた NRC と同様の载荷速度であった。本解析では、2 つの引張巨視き裂面が形成され、供試体を 2 分していることがわかる。

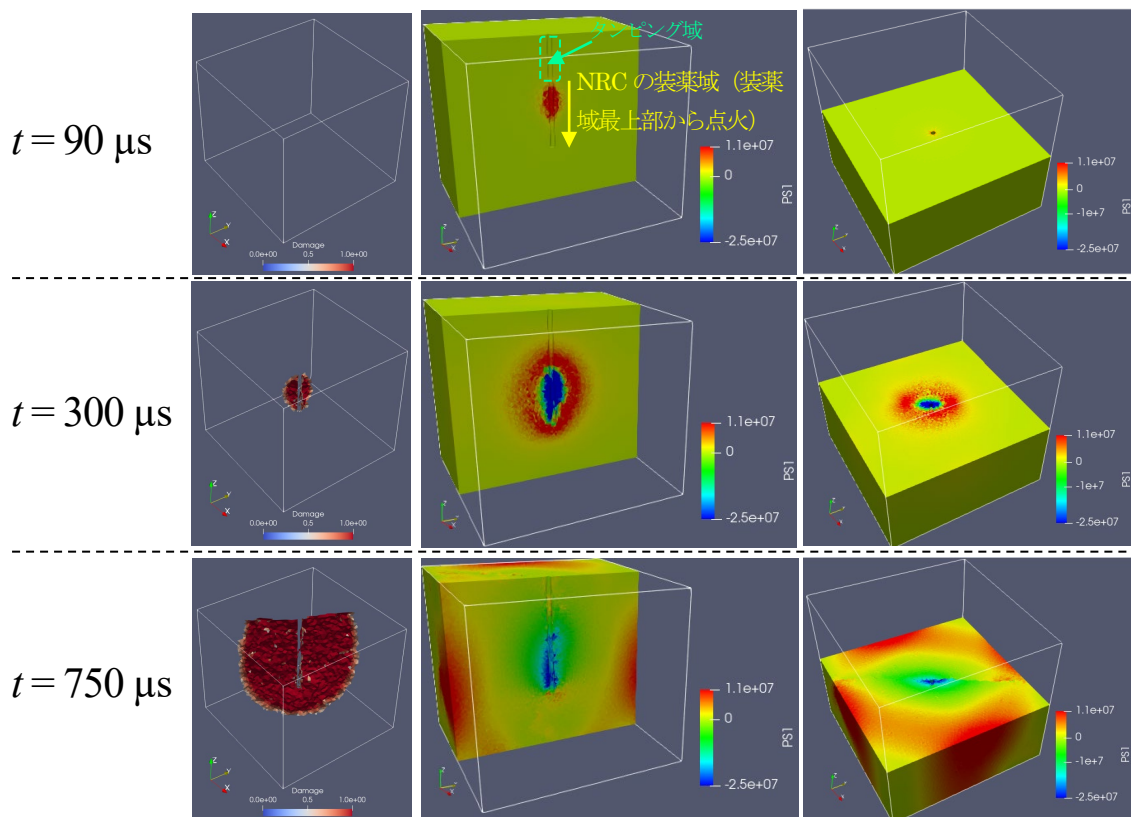


図6 点火後の各時刻における3D DFPAの結果

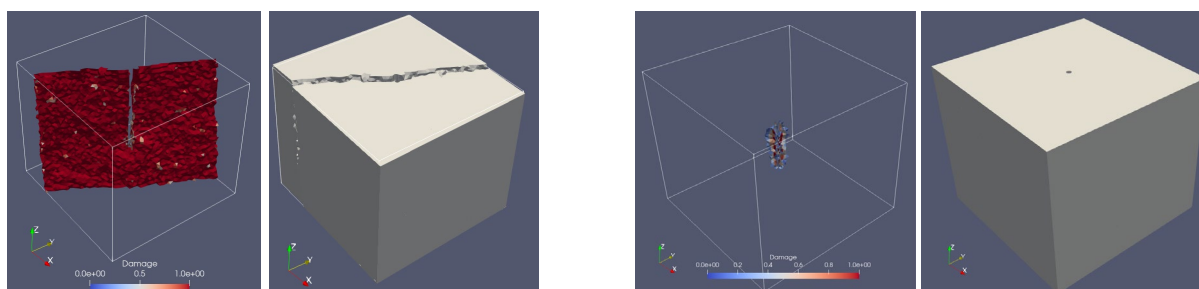


図7 ガス圧を考慮した場合(左)としない場合(右)の結果の比較

3D DFPA から予想される最終破断面を図7(左)に示す。破断面形状は比較的スムーズかつフラットであり、本結果は、図4で示した岩石破砕試験の結果と良好な対応関係にある。なお、本解析では、上述のガスゾーンモデルに従って、装薬孔と直接連結している巨視き裂中には距離減衰効果も加味した圧力が作用し、これらが巨視き裂を更に伸長させる役割を担っていることに注意されたい。そこで、生成巨視き裂面に作用するガスの重要性について考察するために、上述のガスゾーンモデルを用いない場合の結果を図7(右)に示す。なお、ガスゾーンを用いていない点以外は、図7(右)の解析条件は図7(左)の場合と同じである。この結果からもわかるように、生成巨視き裂のガス圧を考慮しない場合、装薬孔の極近傍のみでき裂生成が見られ、供試体が2分されなかった点は興味深い。なお、図7(右)の解析において、き裂進展距離を大きくするために、ガスの最大圧 P_0 を増大させる、あるいは、岩石の強度や破壊エネルギーを小さくする(岩石の強度・破壊エネルギーの不均一性の考慮を含む)ことも考えられる。しかしながら、この場合、予備解析により、供試体側壁に自由面のはらみ出し効果により、十字形状の巨視き裂が生成されてしまうことが事前にわかっているが、図4の破砕試験結果ではそのような傾向は全く観察されていない。なお、ここで述べている十字状き裂の生成については、参考文献⁹⁾(注:参考文献のFigures 3(a)や4(a)参照)において、ニトロメタンによるコンクリートの爆然破砕の場合においては明瞭に観察されてことが報告されている。また、ニトロメタンの爆然の場合は、装薬孔周囲に3-4本のマルチフラクチャーの造性が確認された⁹⁾。本稿におけるテルミット反応によって生じる圧力波形と先行研究で明らかにされたニトロメタンの爆然によって生じる圧力波形は、圧力がピーク値に達するまでのライズタイム t_0 の観点からは同程度の値を示す一方で、本稿ではニトロメタンの爆然とは明らかに異なる破砕パターンを示していることから、この違いを生んでいる機構の解明のためのより詳細な検討が必要である。

5. まとめおよび今後の課題

本稿では、中速載荷に伴う岩盤内のフラクチャー造成機構解明に資することを目的として取り組んだ最近の基礎研究の成果について簡単に報告した。中速載荷を実現するための方法として、本研究ではNRCによるテルミット反応を用いた。アクリルブロック内の装薬孔を用いた圧力計測実験結果によると、NRC(10グラム)を用いた場合、ピーク圧が達成されるまでのライズタイムは大略150 μ s程度であり、圧力測定の際に破碎したアクリルブロックは2分され、マルチフラクチャーは造成されなかった。これに加えて、NRC(50グラム)による片麻岩ブロックを用いた動的破碎試験を実施した。本破碎試験結果においても、供試体は2分されたのみでマルチフラクチャーは造成されなかった。圧力計測結果を基に、シンプルなガスゾーンモデルを考慮して実施した3次元動的破壊プロセス解析(3D DFPA)の結果は、岩石破碎試験結果と調和的な傾向を示した。また、ガスゾーンモデル、即ち、装薬孔と直接連結している生成巨視き裂へのガス圧作用を考慮しなければ、岩石破碎試験結果をうまく表現できないことを示唆した。しかしながら、現時点で得られている実験的エビデンスは極めて限られており、今後より詳細な検討を行い、各種機構について明らかにしていく必要がある。なお、本稿執筆時点では、破碎試験の実施数が極めて限られているため、今後、複数の岩種に対して、同様の破碎実験を複数行い、本稿で得られた結果の妥当性について考察を行いたい。また、本稿で実施した3D DFPAで用いたガスゾーンモデルはあまりに単純化されたモデルであるため、今後は、テルミット反応により生成したガス膨張を数値計算力学手法により詳細に表現し、巨視き裂内への生成ガスの流入による巨視き裂表面へのガス圧作用の詳細なモデル化により、シミュレーションの高度化にも取り組む必要がある。その上で、なぜ、少なくとも圧力計測結果の観点からは似たような載荷特性を有するニトロメタンの爆燃ではマルチフラクチャーの造成が確認され、テルミット反応の場合は確認されなかった原因について調査していきたい。

謝辞

本研究はJSPS 科研費（若手研究・研究課題18K14165）の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Schmidt, Warpinski, Finley, Shear, Sandia Laboratories Report, SAND81-1239, 1981.
- 2) Schmidt, Ashley, Petroleum Technology Supplement, World Oil, 2001.
- 3) Fukuda, Mohammadnejad, Liu, Zhang, Zhao, Dehkhoda, Chan, Kodama, Fujii, Rock. Mech. Rock. Eng. **53**(2020), 1079–1112.
- 4) Fukuda, Liu, Zhang, Zhao, Kodama, Fujii, Chan, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., **138**(2021), doi: 10.1016/j.ijrmms.2021.104645.
- 5) Wicaksana, Jeon, Geosys. Eng., **23**(2020), 243–250.
- 6) Oh, Park, Min, Park, Yoo, Cho, Sci. Technol. Energetic Mater., **81**(2020), 114–20.
- 7) Min, Oh, Park, Cho, You, Park, Rock Dynamics Summit, CRC Press(1st Ed.), 2019, 124–128.
- 8) Fukuda, Moriya, Kaneko, Sasaki, Sakamoto, Hidani, Int. J. Fract., **180**(2013), 163–175.
- 9) Uenishi, Yamachi, Yamagami, Sakamoto, Constr. Build. Mater., **67**(2014):170–179.