

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870013

研究課題名(和文) 岩質材料における3次元複雑き裂進展シミュレーターの構築に関する研究

研究課題名(英文) Development of 3-D Dynamic Fracture Process Analysis (DFPA) code for rock-lime materials

研究代表者

福田 大祐 (FUKUDA, Daisuke)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80647181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、資源開発工学及び土木工学で重要な、岩質材料の高速荷に伴う高速かつ複雑な3次元破砕過程を現実的に解析可能な、3-D Dynamic Fracture Process Analysis (DFPA) コードを開発した。DFPAでは、(i)高速荷による岩石内3次元応力伝播、(ii)3次元複雑き裂の伸長・分岐・連結過程、(iii)き裂進展によって形成された自由表面が互いに3次元的に接触・衝突する不連続変形過程、を詳細に表現できる。よって、本研究の成果として完成したDFPAは、未だ多くの知見が得られていない岩石の高速破砕機構の解明や種々の破砕工法の最適設計の実現に資すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, a state-of-the-art "3-D Dynamic Fracture Process Analysis (DFPA)" code was developed based on the finite element method. By utilizing the inter-element cracking method and cohesive fracture model, the 3-D DFPA can simulate the complex initiation, growth, branching and coalescence of multiple cracks with the consideration of rock heterogeneity. The 3-D DFPA can be applied to various dynamic fracturing problems for rock-like materials. Therefore, the outcome of this research, i.e. the developed 3-D DFPA code, can contribute to the understanding of the mechanisms of dynamic fracturing in rock-like materials, which have not been understood well. In addition, since the 3-D DFPA can realistically simulate the fracturing process contrary to the previous researches using pure continuum mechanics-based approach, it can be used for finding the optimum design of the various fast breaking methods which apply rapid loading to the rock-like materials.

研究分野：岩石破壊力学

キーワード：岩質材料 複雑亀裂進展 高速破砕 3次元破壊プロセス解析 DFPA 有限要素法(FEM) 動的破壊力学

### 1. 研究開始当初の背景

爆薬の爆発による衝撃圧等により岩質材料に高速な外力が加わる場合、岩質材料には複雑な破壊が生じることが知られているが、その破壊機構に関して得られている知見は未だ十分であるとは言いがたい。高速な外力作用に伴う岩質材料の破壊現象は、極めて短時間で生じ、材料内の不均一な微視構造に起因した3次的に複雑な破壊(亀裂生成・進展・分岐・連結)プロセスの結果であると考えられている。ここで、岩質材料における高速破壊プロセスを検証する場合、主に実験・理論解析・数値解析などの方法が考えられる。実験は必要不可欠である一方で、再現性のある結果を得るためには多大な時間・コストを要する。また、理論解析では、岩質材料の不均一性の考慮や複雑な亀裂進展の分析は極めて困難である。それゆえ、数値解析(数値実験)によるアプローチを採用することが極めて合理的である。しかしながら、岩質材料の3次元高速破壊プロセスを現実的にシミュレート可能な数値解析法は研究開始当初では存在しなかった。そこで、研究代表者は、本研究を開始する当初の段階までに2次元有限要素法(FEM)に基づいた複雑な亀裂の生成・進展・分岐・連結プロセスを解析可能なツールとして2-D DFPA(Dynamic Fracture Process Analysis)法及びそれを実装したコードを開発し、発破やその他の高速破砕技術における岩質材料の破壊機構および各種破砕技術の最適な適用条件に関する検討を実施し、実績を上げていた(例えば文献)。しかし、2-D DFPA法の適用範囲は、2次元問題として近似可能な問題に限られており、こうした制約に縛られない3-D DFPA法を構築できれば、取り扱える問題の範囲が格段に広がり、工学的に極めて価値のあるツールになると考えたのが本研究開始当初の背景である。

### 2. 研究の目的

以上の背景をもとに、本研究では、「(i)高速载荷に伴って岩質材料に生じる複雑かつ高速な破壊プロセスを”現実的に”シミュレート可能な解析法として3-D DFPA(Dynamic Fracture Process Analysis)法を構築し、その理論に基づいたシミュータを独自に実装・開発する」ことを主たる目的とした。また、岩石の数値シミュレーションを行う場合、その岩石の内部構造を精確にモデル化することも極めて重要であるため、本研究では、近年注目されている材料の非破壊観察法である「(ii) $\mu$ フォーカスX線CTを用いた材料内部構造評価に関する種々の研究に取り組むこと」で、本研究で構築する3-D DFPA法に将来的に用いる岩質材料のモデリング技術に関するノウハウを構築することをも目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究の主たる研究課題である上記(i)を実現するために、3-D FEMの枠組みで以下の三点

をモデル化するための理論構築及びそのシミュレータへの実装に取り組むことにした。  
 -(a): 高速载荷にともない生じる岩石内の3次元応力伝播、すなわち、連続変形プロセス  
 -(b): 局所的な応力がその領域の強度に達した際に生じる3次的に複雑なき裂の伸長・分岐・連結プロセス

-(c): き裂進展の結果、新たに形成された自由表面が互いに3次的に接触・衝突する不連続変形プロセス

まず(a)については、き裂生成前の岩石の変形プロセスは、連続体力学により表現可能な変形であると見なし、4節点の四面体要素を用いて表現し、等方性のネオ・フック粘弾性体によりモデル化した。当然、異方性を考慮することも可能である。また、この際、3-D DFPAでは、岩石破砕片の大変位や大回転も考慮することを目的としており、Green-Lagrange ひずみを用いることで高精度に(a)を解析可能にする工夫を施すことにした。

次に(b)については、2-D DFPA法での実績(例えば文献)を考慮し、3-D DFPA法においても、き裂進展プロセスをソリッド要素の境界、すなわち、四面体要素の境界で取り扱うことにした(要素境界分離法)。そのために、対象となる岩石モデルに等価な四面体有限要素メッシュを作成し、独自に開発したプログラムを用いて、すべての四面体要素を切り離し、これを厚みゼロの6節点インターフェース要素(クラック要素)を介して接合することにした。そして、3-D DFPA法では、クラック要素に引張軟化則及び滑り軟化則を適用することで、き裂の開閉合・滑りを現実的にモデル化し、「岩石の連続変形から不連続変形に至る遷移プロセス」を表現することにした。また、Weibull分布に従ってクラック要素ごとに引張強度やせん断強度をランダムに与えることで、岩石内の不均一性を考慮することにした。

最後に(c)については、3-D DFPA法では、ペナルティ法と呼ばれる考え方を基にして、モデル化することにした。すなわち、3-D DFPA法によるき裂進展解析によって仮にN個の離散岩石片が形成された場合に、これらの接触・衝突を、個々の離散岩石片を構成する四面体要素毎の接触問題に分解して考えることにした。そして、2つの四面体が接触状態にある場合、その接触面の形状(接触面積)を精確に求め、それに比例する接触反力を求めることにより接触プロセスを高精度に表現した。

3-D DFPA法では、以上の(a)~(c)で求まる応力、クラック要素に生じる結合力、及び接触プロセスにより生じる接触力及び外力を算定し、Lumped mass法により対角化された質量マトリクスを用いることで、巨大な連立方程式の組み立て・求解が必要な陰解法ではなく、陽解法により解くことにした。

以上の理論を基に、Fortranプログラム言語

を用いて 3-D DFPA コードの実装・開発を行った。この際、3 次元数値解析においては、計算量の増大が深刻な問題となるため、将来的な大規模計算を可能にするための初期検討として、OpenMP による並列計算技術による高速化手法も導入することで計算を逐次コードの場合の数倍程度の高速化をほどこした。以上の方法で、高速载荷に伴って岩質材料に生じる複雑かつ高速な破壊プロセスを”現実的に”シミュレート可能な解析法の構築に取り組んだ。

また、本研究のもう一つの目的である上記(ii)については、 $\mu$  フォーカス X 線 CT 観察及び画像解析を用いて、岩質材料が水環境下で示す亀裂の自己治癒現象の評価手法の構築、さらには、亀裂が生じる前後の岩質材料の歪み分布の評価手法の構築を題材として、DFPA に用いる岩質材料のモデリングに関するノウハウの蓄積に取り組んだ。

#### 4. 研究成果

まず、本研究の主たる研究課題である上記(i)、すなわち、3-D DFPA 法の開発・構築から得られた成果について述べる。その一例として、岩石の動的引張強度の評価のために、これまで多くの実験が行われてきている”動的圧裂引張試験”を題材とし、これを模擬した 3-D DFPA 法及びその実証実験を行った。その結果を図 1~3 に示す。これらの図は、動的圧裂引張試験を、それぞれ高速度カメラで観察した写真の一例(図 1)、3-D DFPA 法によりシミュレートした一例(図 2)、および、実験及び 3-D DFPA 法から得られた動的圧裂引張応力の経時変化の比較結果に対応する。

これらの図からわかるように、本研究で構築した 3-D DFPA 法は、実験で得られる破壊パターンのみならず、定量的な観点からも極めて高精度なシミュレートに成功していることがわかる。以上より、本研究によりこれまで誰も達成できていない高度な「岩質材料における 3 次元的に高速かつ複雑なき裂進展シミュレータの構築」を達成できたものと考えられる。

なお、本研究で最終的に開発できた 3-D DFPA 法は、研究開始後 1 年目・2 年目の研究の進捗状況でも述べたように、非常に多くの困難に直面し、これらの一つ一つの解決に時間を要したため、2016 年の極最近になって初めて図 2~3 のような高精度な解析が実現した。現在は、本研究成果を国内外の学会発表にて本研究の成果発表に取り組んでおり、これらの発表から得られた Feedback を活かして、本研究で得られた成果をインパクトファクターの高い国際誌に投稿していく。

次に、本研究のもう一つの目的として設定した上記(ii)に関する研究から得られた成果についても簡潔に述べる。図 2 に、岩質材料(高強度高緻密コンクリート)が水環境下で示す亀裂の自己治癒現象を  $\mu$  フォーカス X 線 CT 観察し、画像解析によって変化が生じた

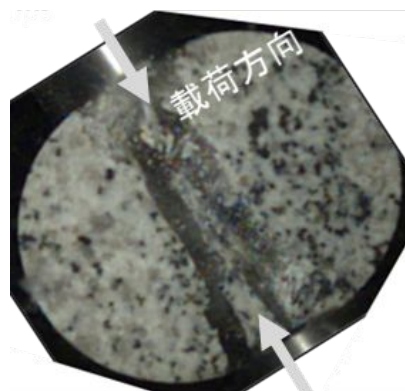


図 1 動的圧裂引張試験の高速度カメラ観察結果の一例

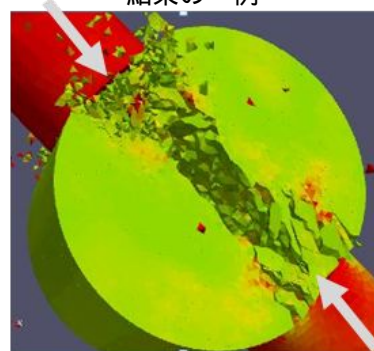


図 2 3 次元 DFPA によりシミュレートした動的圧裂引張試験の結果の一例

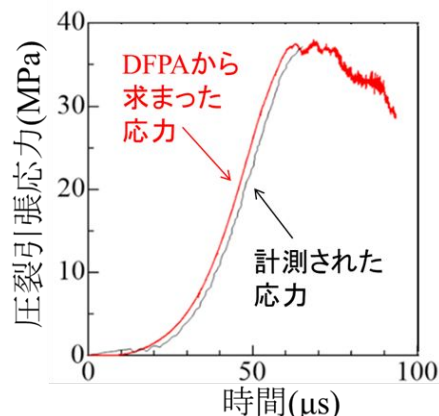


図 3 実験及び 3 次元 DFPA から得られる応力波形の比較

部分を高精度に抽出した成果を示す。また、図 3 に、水中浸漬により亀裂が生じる前後の岩質材料(褐炭)の歪み分布を独自に開発した 3 次元画像解析法によって評価した成果を示す。これらの成果及び関連実績により、研究代表者は、今後 3 次元 DFPA に用いる岩質材料のモデリングに必要なノウハウを十分に得ることに成功しており、その成果は国内外の学会やインパクトファクターの高い国際誌に採択されるなどの成果を出してきている。

以上より、本研究では、岩質材料における 3 次元複雑なき裂進展シミュレータの構築に成功するとともに、X 線 CT によってこの解析対象となる種々の岩質材料の内部構造を取得し、それを本研究を通して得たノウハウを

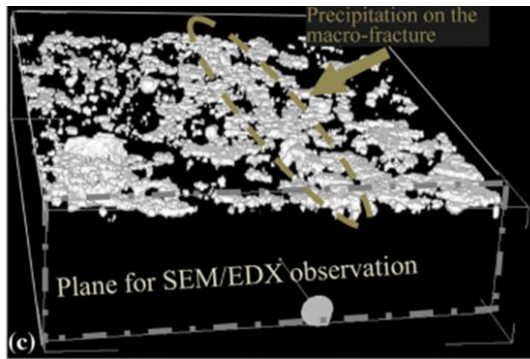


図3 μフォーカス X 線 CT 画像解析によって岩質材料が水環境下で示す亀裂自己治癒領域を高精度に抽出した結果 (灰色部：亀裂を閉塞させた析出物)

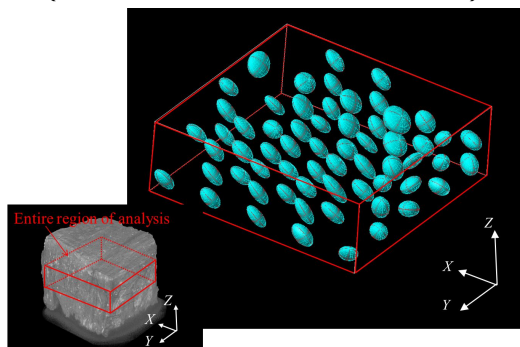


図4 水中浸漬により亀裂が生じる前後の岩質材料の歪み分布 (図中水色の複数の楕円体の形状が岩石内の個々の領域の変形方向及び量を示す。)

駆使してモデル化することで、今後、岩石の3次元的に複雑かつ高速な亀裂進展の極めて高度なシミュレーションが可能になると考えており、本研究成果は発破の最適設計やその他種々の岩石破碎工法の最適化に資するものと考えている。

#### <引用文献>

D. Fukuda, K. Moriya, K. Kaneko, K. Sasaki, R. Sakamoto, K. Hidani, Numerical simulation of the fracture process in concrete resulting from deflagration phenomena, Int. J. Fract., Springer, Vol. 180, pp. 163-175, 2012.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### [雑誌論文](計8件)

H.M. Kim, D. Fukuda, J. Ikezawa, K. Moriya, S.H. Cho, K. Kaneko, Dynamic Fracture Process Analysis in Rock-like Materials for Axisymmetric Problem, Science and Technology of Energetic Materials, 査読有り, Vol. 74, pp.74-81, 2013.  
D. FUKUDA, Y.NARA, D. HAYASHI, H. OGAWA, K. KANEKO, Influence of fracture width on sealability in high-strength

and ultra-low-permeability concrete in seawater, Materials, 査読有り, Vol. 6, 2578-2594, 2013.

DOI: 10.3390/ma6072578

D. Fukuda, M. Maruyama, Y. Nara, D. Hayashi, H. Ogawa and K. Kaneko, Observation of Fracture Sealing in High-strength and Ultra-low-permeability Concrete by Micro-focus X-ray CT and SEM/EDX, International Journal of Fracture, 査読有り, Vol. 188, Issue. 2, pp.159-171, 2014, DOI:10.1007/s10704-014-9952-6.

#### [学会発表](計15件)

福田大祐, 二瓶恵理菜, 趙祥鎬, 児玉淳一, 藤井義明, 岩質材料の3次元複雑き裂進展シミュレーターの構築, 平成28年度資源・素材学会春季大会 講演番号1506, 東京大学本郷キャンパス, 2016年3月28~30日.

D Fukuda, M Maruyama, N Aramaki, K Kaneko, J Kodama, Y Fujii, Y Nara, Evaluation of 3-D Strain Distribution in Lignite Based on Image Analysis, Proc. The 13 the International ISRM CONGRESS 2015, 査読有り, paper ID #394, Montreal, Canada, May 10-13, 2015.

D. Fukuda, J. Ikezawa, K. Kaneko, J. Kodama, Y. Fujii, Numerical Study on Fracturing Process in Rock by Blasting a Cylindrical Charge, 8th Asian Rock Mechanics Symposium(ARMS8), 査読有り, Paper ID: ERD2-4, Sapporo, Japan, Oct. 14-16, 2014.

#### [図書](計0件)

#### [産業財産権]

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

#### [その他]

ホームページ等(申請者のwebページ)  
<http://rock.eng.hokudai.ac.jp/daisuke-j.htm>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

福田 大祐 (FUKUDA, Daisuke)  
 北海道大学 工学研究院 助教  
 研究者番号: 80647181

##### (2)研究分担者

該当なし

##### (3)連携研究者

該当なし

##### (4)研究協力者

該当なし