HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	岩質材料の3次元複雑亀裂シミュレーターの構築
Author(s)	福田, 大祐; 二瓶, 恵理菜; 趙, 祥鎬 他
Description	資源・素材学会平成28年度春季大会、2016年3月28日（月）～30日（水）、東京大学本郷キャンパス、東京
Citation	資源・素材学会春季大会講演集, 2016, 1506
Issue Date	2016-03-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/64888
Type	conference paper
File Information	MMIJ2016.1506.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

一般講演
岩盤力学・開発機械
岩盤力学・開発機械
2016年3月28日(月) 11:00 ～ 17:00　第５会場 (東京大学)

[1506] 岩質材料の3次元複雑き裂進展シミュレーターの構築
Development of 3-D Dynamic Fracturing Analysis Code for Rock-like materials

○福田大祐[1], 二瓶恵理菜[1], 趙祥鎬[2], 児玉淳一[1], 藤井義明[1] （1.北海道大学, 2.全北国立大学）
キーワード：岩質材料, 3-D DFPA, 高速破砕, 亀裂進展, 有限要素法

金子ら（火薬学会誌，56，207-215，1995）及びCho et al.(Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 40, 763-777，2003)によって開発された，岩質材料の不均一性を考慮した動的な亀裂の生成・進展過程をシミュレート可能な有限要素法ベースの2次元動的破壊プロセス解析（Dynamic Fracture Process Analysis，以下DFPA）コードは，これまで発破等に代表される岩質材料の種々の高速破砕問題の理論的検証に適用され，その有用性が示されている（例えば，福田ら，土木学会論文集C（地圏工学），68(1),213-223，2012）．他方で，その適用対象は，問題を二次元平面ひずみ問題として近似的に扱える場合に限られていた．また，Kim et al.（Sci. Tech. Energetic Materials, 74, 74-81, 2013）は発破孔周囲の応力状態が軸対称問題として扱えることに着目し，問題が軸対象問題として近似的に扱えるという制約条件の下で3次元解析が可能なDFPAコードを開発したが，その適用対象は極めて限定的であり，軸対象問題に限定されない3次元解析が可能なDFPAコードの開発の必要性が指摘されてきている． そこで，本稿では，著者らが2-D DFPAコードを3次元に拡張することにより新たに開発している3-D DFPAコードの理論や3-D DFPAコードによる高速破砕問題への適用例について紹介するとともに，今後の課題について述べる．

©一般社団法人 資源・素材学会

1. はじめに

岩石やコンクリート等の岩質材料を効率良く破砕するための工法として，例えば爆薬の爆轟，火薬の爆燃，さらには放電圧パルス等を用いた各種高速破砕工法が提案され，種々の目的に適用されてきている．これらの高速破砕工法における共通の特徴としては，載荷速度が非常に大きく，破砕プロセスが非常に高速かつ複雑になる点が挙げられる．他方で，これらの破砕工法では破砕の制御・破砕結果の最適化が求められている．破砕の最適化の検討を行うためには，対象となる破砕工法に特有の岩質材料の破砕プロセスに関する知見が不可欠であり，そのために，破砕実験を用いた検証が行われることが多い．この場合，高速度カメラによる材料表面の破砕プロセスの観察や材料表面の変形計測等の試みがしばしばなされるが，岩石内部で生じている破壊プロセスに関する情報は，通常，非常に限定的である．このような背景から，数値解析による破砕プロセスの検証がなされるようになってきたが，ここで対象としているような高速破砕プロセスをき裂の進展も考慮して現実的に扱えるシミュレータは非常に限られているのが現状である．その中でも，金子ら[1]，Cho et al.[2]，福田ら[3]は，岩質材料の不均一性を考慮した動的なき裂生成・進展過程をシミュレート可能な有限要素法ベースの 2 次元動的破壊プロセス解析（Dynamic Fracture Process Analysis，以下 DFPA）法を提案・開発し，発破等に代表される種々の高速破砕問題の理論的検証に適用することで，その有用性を示して来ている．他方で，その適用対象は，問題が二次元平面ひずみ・平面応力問題として近似的に扱える場合に限られていた．また，Kim et al.[4]は発破孔周囲の応力状態が軸対称問題として扱えることに着目し，問題が軸対称問題として近似的に扱えるという制約条件の下で 3 次元解析が可能な DFPA 法を開発したが，その適用対象は極めて限定的であり，軸対称条件に限定されない 3 次元解析が可能な DFPA 法開発の必要性が指摘されてきている． そこで，本稿では，著者らが新たに開発している有限要素法ベースの 3-D DFPA 法の理論，及び，その高速破砕問題への適用例について簡単に紹介する．

2. 3 次元動的破壊プロセス解析（3-D DFPA）法の理論

3-D DFPA 法の開発では，岩質材料の高速破砕プロセスを再現するために，まず，以下の三点を考慮することにした．

−(i)：高速載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

−(ii)：局所的な応力がその領域の強度に達した際に生じる 3 次元的に複雑なき裂の伸長・分岐・連結プロセス

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

そこで，以下ではこれらの(i)〜(iii)を 3 次元有限要素法の枠組みでモデル化するための理論について述べる．

2・1 岩石内の応力伝播プロセスのモデル化

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，図 1(a)に示すように 4 節点の四面体要素を用いて表現することにした．まず，時間 t において，岩石の現在配置の点 x_j (j=1, 2, 3)における運動方程式は，次式で与えられる．

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + f_j = \rho a_j \, (i, j = 1,2,3) \tag{1}$$

ここで，下付き添え字 i に対しては総和規約を適用する．σ_{ij} は Cauchy 応力テンソル，f_j は岩石に作用する外力の j 方向成分，ρ は岩石の密度，a_j は加速度の j 方向成分である．次に，ひずみの測度としては，上記(i)〜(iii)の結果生じる岩石破砕片の大変位や大回転も表現するために，次式で与えられる Green-Lagrange ひずみテンソル E_{ij} を用いた．

$$E_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i}\frac{\partial u_k}{\partial X_j}\right)(i, j, k = 1,2,3) \tag{2}$$

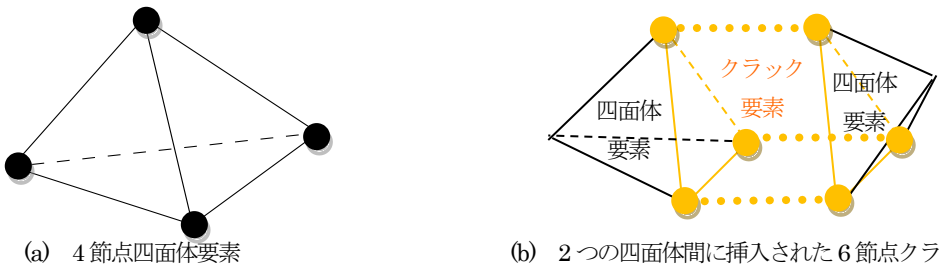
ここで，下付き添え字 k に対しては総和規約を適用する．u_j は変位の j 方向成分，X_j は初期配置座標の j 方向成分である．構成方程式としては，等方の粘弾性体を想定し次式で与えた．

$$\sigma_{ij} = \frac{\lambda}{2}\left(\det(F_{ij}) - \frac{1}{\det(F_{ij})}\right)\delta_{ij} + \frac{2\mu}{\det(F_{ij})}E_{ij} + \frac{\eta}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)(i, j = 1,2,3) \tag{3}$$

ここで，λ と μ はラメの定数，δ_{ij} はクロネッカーのデルタ，η は減衰定数，v_j は速度の j 方向成分である．F_{ij} は変形勾配テンソルであり，次式で与えられる．

$$F_{ij} = \delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j}(i, j = 1,2,3) \tag{4}$$

(3)式はネオ・フック弾性体を考慮していることに等価だが，3-D DFPA 法の解析対象である岩質材料に生じる応力レベルにおいては，通常，線形弾性体とほぼ同様の変形挙動を示すと考えて良い．



(a)　4 節点四面体要素　　(b)　2 つの四面体間に挿入された 6 節点クラック要素

図 1　3-D DFPA 法で用いた 2 種の有限要素

2・2　岩石内の複雑き裂進展プロセスのモデル化

2-D DFPA 法での実績を考慮し，3-D DFPA 法においても，き裂進展プロセスをソリッド要素，すなわち，四面体要素の境界で取り扱うことにした．まず，対象となる岩石モデルに等価な四面体要素メッシュを作成し，図 1(b)に模式的に示すように，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(以下，クラック要素)を介して接合した．なお，図では，クラック要素をわかりやすく示すために誇張して表現した．3-D DFPA 法では，クラック要素を用いてき裂の開閉合・滑りを表現することで，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した．具体的には，図 2 に示すように，クラック要素内のき裂開口変位 *COD* と相対滑り量 *Slip* に応じて，き裂面に垂直方向及び平行方向にそれぞれ σ_{bond}（引張を正）及び τ_{bond} の結合力を求め，き裂変形を妨げる方向に作用させた．具体的には，クラック要素が次式に従い弾性変形するものとした[5]．

$$\sigma_{bond}=\left[\frac{2COD}{o_p}-\left(\frac{COD}{o_p}\right)^2\right]T_s$$
$$\tau_{bond}=\left[\frac{2Slip}{s_p}-\left(\frac{Slip}{s_p}\right)^2\right](\tau_r+c) \tag{5}$$

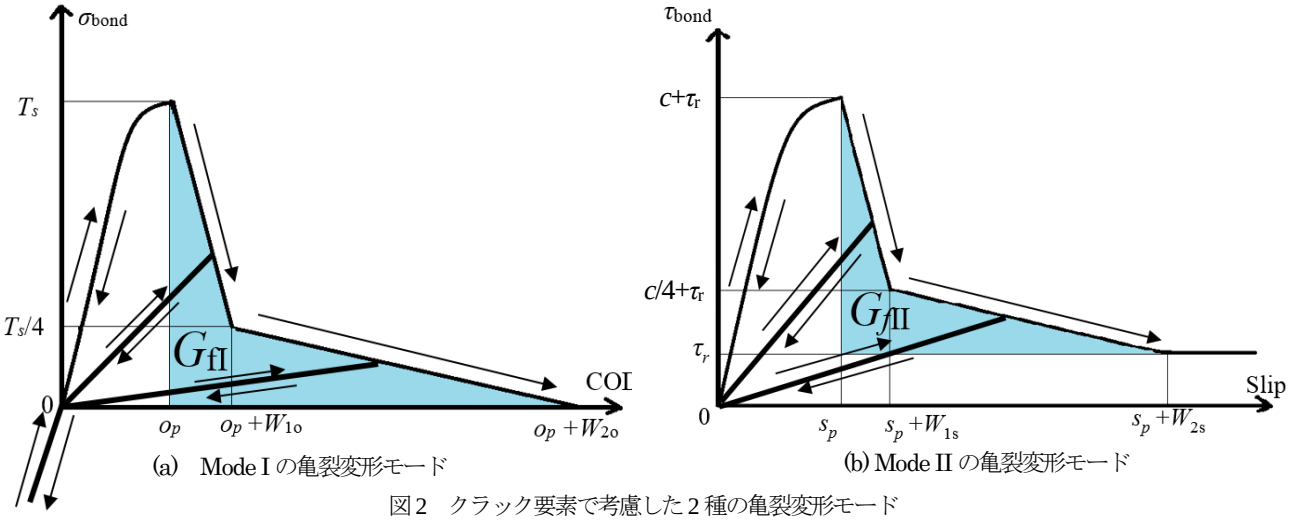
ここで，h，T_s，c，φ，P_n，P_{tan}は，それぞれ各クラック要素の辺の代表長さ，微視的引張強度，微視的粘着力，内部摩擦角，開口及び滑り変形における剛性に相当するペナルティ係数であり，弾性変形は *COD* と *Slip* が，それぞれ弾性限界開口量 $o_p(=2h\cdot T_s/P_n)$及び弾性限界すべり量 $s_p(=2h\cdot(\tau_r+c)/P_{tan})$以下の範囲で生じるものと仮定した．また，$\tau_r$はクラック要素の残留強度であり，次式で与えた．

$$\tau_r=\begin{cases}c-\sigma_{bond}\cdot\tan\varphi & \text{if } \sigma_{bond}\le T_s\\ c-T_s\cdot\tan\varphi & \text{if } \sigma_{bond}>T_s\end{cases} \tag{6}$$

他方で，*COD* と *Slip* が，o_pや s_pを超える場合は，次式に示す引張軟化則と滑り軟化則の 1/4 モデルに従って，開口(Mode I)・滑り(Mode II)のき裂変形を表現した．

$$\sigma_{bond}=\begin{cases}T_s-\dfrac{3(COD-o_p)}{4W_{1o}}T_s & \text{if } 0\le(COD-o_p)<W_{1o} \text{ and}(COD_{max}-o_p)\le(COD-o_p)\\ \dfrac{W_{2o}-(COD-o_p)}{4(W_{2o}-W_{1o})}T_s & \text{if } W_{1o}\le(COD-o_p)<W_{2o} \text{ and } (COD_{max}-o_p)\le(COD-o_p)\\ \left(\dfrac{COD}{COD_{max}}\right)\sigma_{bond_max} & \text{if } COD_{max}>o_p \text{ and } COD>0 \text{ and } COD_{max}>COD\end{cases}$$
$$\tau_{bond}=\begin{cases}\tau_r+c-\dfrac{3(Slip-s_p)}{4W_{1s}}c & \text{if } 0\le(Slip-s_p)<W_{1s} \text{ and } (Slip_{max}-s_p)\le(Slip-s_p)\\ \tau_r+\dfrac{W_{2s}-(Slip-s_p)}{4(W_{2s}-W_{1s})}c & \text{if } 0\le(Slip-s_p)<W_{2s} \text{ and } (Slip_{max}-s_p)\le(Slip-s_p)\\ \left(\dfrac{Slip}{Slip_{max}}\right)\tau_{bond_max} & \text{if } Slip_{max}>s_p \text{ and } Slip>0 \text{ and } slip_{max}>slip\end{cases} \tag{7}$$

ここで，W_{1o}=0.75 G_{fI}/T_s，W_{2o}= 5 G_{fI}/T_s，W_{1s}=0.75 G_{fII}/c，W_{2s}=0.75 G_{fII}/c であり，G_{fI}及び G_{fII}は，それぞれ Mode I と Mode II の破壊エネルギーを意味し，図 2 中の青色で示した部分の面積に相当する．また．COD_{max} と $Slip_{max}$は，クラック要素が過去に経験した最大の *COD* 及び *Slip* に相当し，σ_{bond_max}及び τ_{bond_max}は，それぞれ COD_{max} と $Slip_{max}$における σ_{bond} 及び τ_{bond} である．*COD* が負となった場合は，図 2(a)に示すように，$\sigma_{bond}=2\,COD\cdot T_s/o_p$ の関係を用いて過剰併合を解消するような σ_{bond}を作用させた．また，各クラック要素の引張強度 T_s及び微視的粘着力 c は，2-D DFPA と同様にして[1)-3)]，均一性係数 m により特徴づけられる Weibull 分布に従ってクラック要素ごとにランダムに与え，内部摩擦角 φ はその際一定とした．*COD* が限界開口量 o_p+W_{2o} を超えた場合，もしくは *Slip* が限界滑り量 s_p+W_{2s} を超えた場合は，クラック要素を切り離すことで巨視的な開口き裂，すなわち，自由表面が形成されたと見なし，2.3 で述べる岩石表面同士の接触問題として取り扱った．



(a) Mode I の亀裂変形モード　　(b) Mode II の亀裂変形モード

図2　クラック要素で考慮した2種の亀裂変形モード

2・3　き裂進展により形成される自由表面同士の接触・衝突プロセスのモデル化

結合力を失った巨視き裂表面は，その周囲の岩石の変形次第では接触・衝突を繰り返すことが考えられ，その際，接触反力や表面摩擦力に代表される接触力を考慮する必要がある．3-D DFPA 法では，Munjiza[9]によるペナルティ法の考え方を基にして，上記(iii)を考慮することにした．そこで，3-D DFPA によるき裂進展解析によって N 個の離散岩石片が形成され，これらが接触・衝突する問題を考える．これらの岩石片は問題に応じて様々な形状を持つと考えられ，当然のことながら衝突面の形状や衝突面の位置は時々刻々変化する．ここで，個々の離散岩石片は一般的に複数の四面体要素からなる個別要素として考えることができる．そこで，接触状態にある離散岩石片のうちの一方を Contactor，もう一方を Target と見なし，それぞれの個別要素が n 個及び m 個の四面体から成るものとする．この時，Contactor と Target の間に作用する接触反力 $\mathbf{f}_{\mathrm{N}}$ は，離散岩石片を構成する四面体の中でも，特に，接触状態にある四面体カップルに作用する接触反力の総和として次式で与えられる．

$$\mathbf{f}_{\mathrm{N}} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\int_{S_{\beta c_i \cap \beta t_j}} \mathbf{n}(\varphi_{c_i} - \varphi_{t_j})\,dS \tag{8}$$

ここで，φ_{ci} 及び φ_{tj} は，Contactor を構成するある四面体 i と Target を構成するある四面体 j のオーバーラップ部分の体積或いは表面積に比例して増加するポテンシャル関数，また，$\mathbf{n}$ は Contactor から Target に向かう接触表面に垂直な単位ベクトルである．以上より，3-D DFPA 法では，四面体 i と j との間の接触面の形状及び接触面積を精確に求め，$\mathbf{n}$ 方向に作用する接触面積に比例する接触反力 $\mathbf{f}_{\mathrm{N}}$ を求めることにより接触プロセスを表現した．なお，本稿ではこの際の比例定数をペナルティ係数 P_{DEM} と呼ぶ．さらに，Coulomb の摩擦則にしたがって，接触反力の大きさ $\|\mathbf{f}_{\mathrm{N}}\|$ に動摩擦動係数 μ_{dynamic} を乗じることにより動摩擦力 f_{fric} を求め，これを四面体 i と j の接触面に平行な相対速度ベクトルと逆方向に作用させることにより表面摩擦に伴うエネルギー散逸も近似的に考慮した．

以上，**2・1**～**2・3** で求まった，四面体要素に生じるコーシ応力，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に相当する節点力を，それぞれ $\mathbf{f}_{\mathrm{int}}$，$\mathbf{f}_{\mathrm{crack}}$，$\mathbf{f}_{\mathrm{contact}}$ とし，さらに，外圧や重力等の外力に等価な節点力を $\mathbf{f}_{\mathrm{ext}}$ とすると，解くべき有限要素式は次式となる．

$$\mathbf{M}^{\mathrm{lump}}\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mathbf{f}_{\mathrm{ext}} - \mathbf{f}_{\mathrm{int}} + \mathbf{f}_{\mathrm{crack}} + \mathbf{f}_{\mathrm{contact}} \tag{9}$$

ここで，$\mathbf{M}^{\mathrm{lump}}$ は Lumped mass 法により対角化された質量マトリクス，$\mathbf{u}$ は節点変位ベクトルである．3-D DFPA 法では，(9)式を連立方程式の組み立て及び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．そのため，すべての解析ではクーラン条件を満たすような十分小さな時間刻み幅を用いた．

3.　3-D DFPA による岩質材料の高速破砕シミュレーションの一例

本稿では，3-D DFPA 法の適用例として，Split Hopkinson Pressure Bar(以下，SHPB)による動的圧裂引張試験を模擬した岩石の高速破砕シミュレーションについて簡単に紹介する．本試験では，図3に示すように Incident bar（例えば，直径 37 mm，長さ 2600 mm）及び Transmission bar（例えば，直径 37 mm，長さ 1500 mm）と呼ばれる軸方向に非常に長い2本の高強度スチール棒の間に，岩石の円柱供試体を設置する．そして，Incident bar の他端に衝撃圧を与えることで，Incident bar 棒内を圧縮応力波が軸方向に向かって伝播し，Incident bar と岩石との境界で応力波の反射と透過が起こる．そして，透過応力波は岩石供試体内を Transmission bar に向かってさらに伝播し，Transmission bar と岩石との境界で再度応力波の反射と透過が起こる．そして，準静的な載荷速度で実施される圧裂引張試験

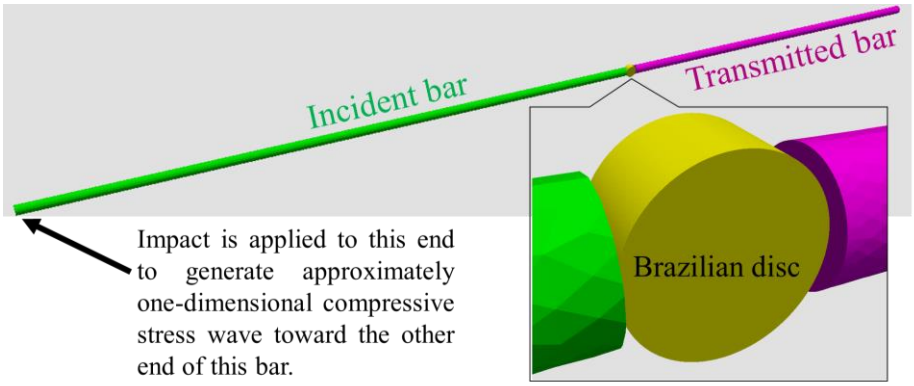


図3　SHPB による動的圧裂引張試験の模式図

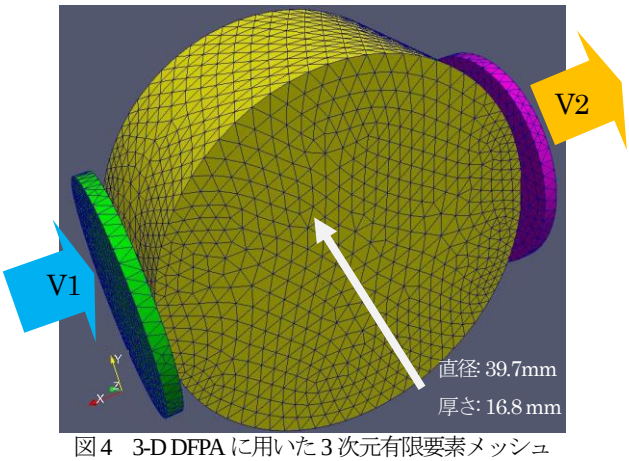


図4　3-D DFPA に用いた3次元有限要素メッシュ
（四面体要素数 33497，クラック要素数 70052，節点数 133988）

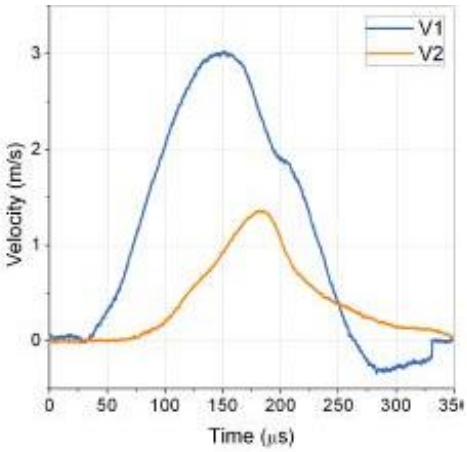


図5　2つの剛体円盤に与えた変位速度の減時変化
（文献[7]の Fig.8(b)を引用）

と同様に，岩石供試体が Incident bar と Transmission bar から見かけ上圧縮をうけることにより，供試体中央が圧裂される．この際，Incident bar と Transmission bar において観測される歪みの時間変化と各 bar のヤング率から，各 bar に作用する応力の時間変化が求まる．この応力に各 bar の断面積を乗じた力を，岩石供試体を圧裂する外力と見なすことで，準静的な圧裂引張試験と同様の理論で供試体を 2 分するように作用する圧裂引張応力を算出する．当然のことながら両 bar に作用する応力は，ほぼ釣り合い状態を満たす必要がある．その上で，圧裂引張応力の最大値を動的圧裂引張強度として求めるのが本試験の概要である．そこで，現在開発している 3-D DFPA コードにより，実験で観察される破砕パターン及び動的圧裂引張応力の時間変化の様子を概ね再現できるかどうか検討した．

図 4 に解析モデルを示す．理想的には，図 3 に示したように SHPB の部分も厳密にモデル化することが望ましいが，解析時間が極めて長大化するため，計算時間の短縮を目的に SHPB を 2 つの薄い剛体円盤として近似的にモデル化した．また，き裂伸展のメッシュ依存性を回避するためには，理想的には岩石部に非常に細かい要素分割を用いるべきであるが，今回は，計算時間の短縮のために比較的荒いメッシュを用いた．なお，図 4 中，黄色で示される岩石供試体部分のすべての四面体要素境界の間にはクラック要素が挿入されており，剛体円盤に関しては，クラック要素は挿入していない．ここでは一例として，文献[7]によって報告されている SHPB による動的圧裂引張試験の結果を用いる．図 5 は，Incident bar 及び Transmission bar の変位速度の経時変化の計測結果を示しており，図中 V1 及び V2 を，それぞれ Incident bar 及び Transmission bar を模擬した剛体円盤に，図 4 に示すような方向に対して与えることで，SHPB による動的圧裂引張試験を近似的に模擬した．表 1 に，解析に用いた岩石の物性値及び解析条件を示す．岩石の物性値は，文献[7]によって報告されている Barre 花崗岩の値を参考に決定した．重力については無視することにし，時間刻み Δt は 1 ナノ秒とした．以上を踏まえて解析を実施した．

解析結果から求まった応力分布及びき裂進展の経時変化を抜粋したものを図 6 に示す．本図は，Y 軸（図中黄色の軸）方向の垂直応力である σ_{YY} を示しており，暖色系（正値）及び寒色系（負値）はそれぞれ引張及び圧縮の応力を示している．図 6(a)(b)より，まず，Incident bar に対応する剛体円盤が岩石に衝突することにより，岩石内を応力波が Transmission bar に向かって伝播していく様子がわかる．この際，特に接触部において圧縮応力の度合いが大きくなっている．次に，図 6(c)から，応力波が Transmission bar に対応する剛体円盤に到達・反射することにより，岩石と Transmission bar との境界付近において，圧縮応力の度合いが大きくなっていることがわかる．その後，図 6(d)(e)の結果から，Incident bar 及び Transmission bar 側から伝播した応力波が重ね合わさることにより，見かけ上，両側から円柱供試体を押さえつけるような応力状態となり，準静的な圧裂引張試験と同様に，供試体中央付近において，岩石を Y 方

向に 2 分するような圧裂引張応力が作用していることがわかる．また，この際，特に強い暖色を示す領域おいて Mode I のき裂開口が徐々に進んでいた．その結果，特に．図 6(f)~(h)の段階では明瞭なき裂面の形成が確認でき，また，巨視き裂の形成に伴い暖色の度合いの低下，すなわち引張応力の解放が見て取れる．この供試体中央部のき裂は，この後，開口し続けた．また，それぞれ Incident bar 及び Transmission bar による載荷部近傍において，圧砕が生じていることもわかる．

表 1　3-D DFPA に用いた解析の物性値

密度 ρ(kg/m^3)	2660	ポアソン比 ν(−)	0.16
ヤング率(GPa)	82	減衰係数 η (Pa s)	10^4
微視的平均引張強度 T_s(MPa)	12.7	内部摩擦角(Degree)	50
微視的平均粘着力 c(MPa)	50	均一性係数 m(−)	5
Mode I 破壊エネルギーG_{fI}(J/m^2)	1500	Mode II 破壊エネルギーG_{fII}(J/m^2)	2000
クラック要素の垂直方向のペナルティ係数 P_n(GPa)	82	クラック要素のせん断方向のペナルティ係数 P_{tan}(GPa)	82
接触計算に用いたペナルティ係数 P_{DEM}(GPa)	82	動摩擦係数 $\mu_{dynamic}$（Rock to Rock / Rock to SHPB）	0.6 / 0.1

次に，3-D DFPA から得られた t =260μs のき裂パターンと文献[7]で報告されている実験から得られたき裂パターンとを比較すると図 7 のようになる．まず，実験結果より，供試体中央部では Mode I のき裂変形によるものと考えられる破断面が見られる．また，Incident bar 及び Transmission bar による載荷域近傍では，岩石が圧砕したことに起因した空間が形成されている．当然のことながら，岩石は不均一材料であるから，実験で形成されたき裂パターンと 3-D DFPA から予測さえるき裂パターンが完全に一致することはないが，3-D DFPA に得られたき裂パターンは実験により得られた破砕パターンの傾向を良く表現できていると考えられる．さらに，図 8 に 3-D DFPA 及び実験から得られた圧裂引張応力の経時変化を比較した結果を示す．図より，どちらの結果も準静的な条件で得られた圧裂引張強度である 12.7MPa[8]よりも大きく上昇しており，圧裂引張強度の載荷速度依存性が見て取れ，また，3-D DFPA の結果から得られた動的圧裂引張強度は，実験で得られた結果よりも若干小さく評価されているが，良い対応を示している．以上より，3-D DFPA 法により，岩石の高速破砕現象をある程度現実的に再現できる可能性が示されたと考えられる．

なお，本解析では，Incident bar 及び Transmission bar を剛体としてモデル化し，これらの変形は加味していないため，解析結果では若干破砕が過大評価されたと考えられる．さらに，3-D DFPA 法で導入した種々のペナルティ係数は，理想的には非常に大きな値を用い，十分小さな時間刻みを用いるべきであるが，本検討では総解析時間の短縮を目的に，若干過小な値を用いたことも，実験結果との違いを生む原因になったと考えられる．

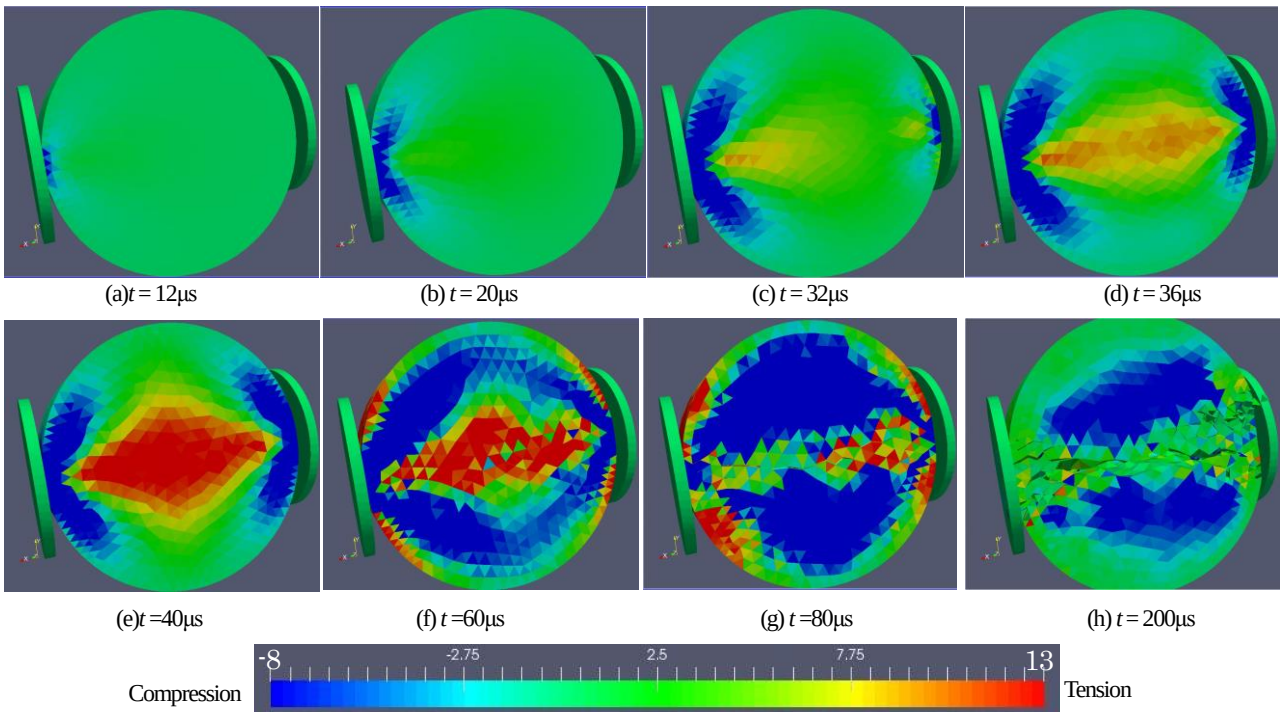


図 6　応力 σ_{YY} の空間分布の経時変化及びき裂進展の様子 (単位：MPa)

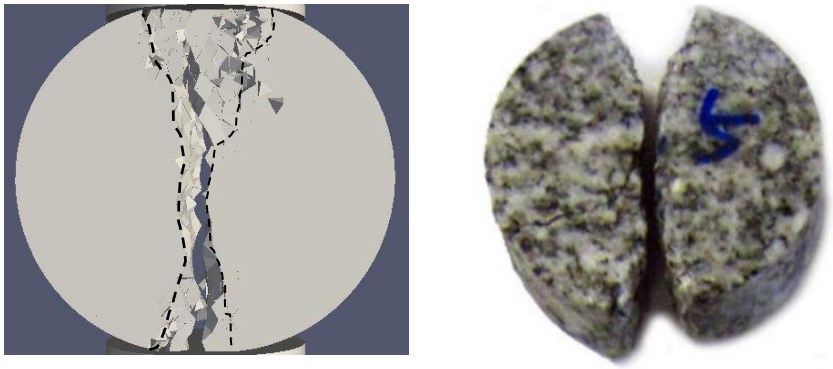


図 7　3-D DFPA から得られたき裂パターン（左，破線部は推定破断面）と実験結果（右）の比較
（右側の実験結果の写真については文献 7)の Fig.9 から一部抜粋して引用）

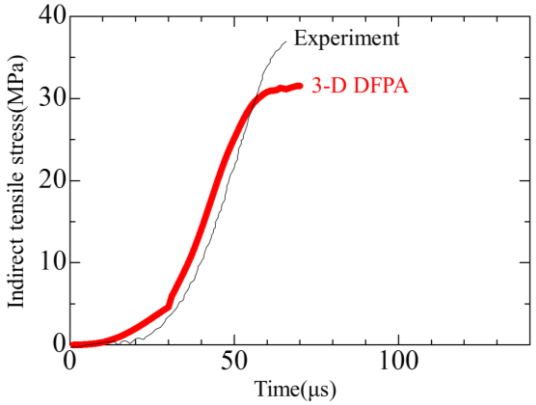


図 8　3-D DFPA 及び実験から得られる圧裂引張応力-時間線図の比較
（黒線の実験結果については文献 7)の Fig.10 から一部抜粋して引用）

4.　おわりに

本稿では，著者らが現在開発している有限要素法ベースの 3 次元複雑き裂進展解析法である 3-D DFPA 法の理論を中心に紹介するとともに，3-D DFPA 法を用いた SHPB による動的圧裂引張試験を模擬した計算例について紹介した．その結果，実験的に観察される高速載荷に伴う岩石の破砕パターンをある程度現実的にシミュレートできる可能性を示すことができた．

今後は，3-D DFPA 法で導入した種々のペナルティ係数が解析結果に与える影響を詳しく分析し，様々な載荷速度域において，同様に実験結果と良い対応が得られるかどうか検証を行う必要がある．また，本稿では現実的な時間で計算を行うために比較的荒いメッシュを使用し，かつ，SHPB 部を剛体としてモデル化せざるを得なかった．今後は，並列計算等により計算速度の高速化を行うことが，より大規模，或いは，詳細なモデルが必要となる問題を解析するためには必須であると言える．

5.　謝辞

本研究は JSPS 科研費 25870013 の助成を受けて実施されたものである．ここに感謝の意を示す．

6.　参考文献

1) 金子ら，火薬学会誌，1995, Vol. 56, pp.207–215.
2) Cho et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, Vol. 40, pp.763–777.
3) 福田ら，土木学会論文集 C（地圏工学）2012, Vol. 68, pp.213–223.
4) Kim et al., Sci. Tech. Energ. Mater. , 2013, Vol. 74, pp.74–81.
5) Munjiza et al. Int. J. Numer. Meth. Engng. 1999, Vol. 44, pp.41–57.
6) Munjiza, 2004, The combined finite-discrete element method, Wiley, pp.35–130.
7) Mahabadi et al., Rock. Mech. Rock. Eng., 2010, Vol. 43, pp.707–716.
8) Iqbal and Mohanty, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 43, pp.1270– 1276.