



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	3次元動的破壊プロセス解析法を用いた岩石の動的引張試験に関する基礎的検討
Author(s)	二瓶, 恵理菜; 福田, 大祐; Cho, Sang-Ho 他
Description	第14回 岩の力学国内シンポジウム : 人類の未来を支えるフロンティア研究と岩の力学、2017年1月10日(火)～11日(水)、神戸国際会議場、神戸市
Citation	岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 14, -32
Issue Date	2017-01-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/64320
Type	conference paper
File Information	JSRM2017.32.pdf



3次元動的破壊プロセス解析法を用いた 岩石の動的引張試験に関する基礎的検討

二瓶 恵理菜¹・福田 大祐^{2*}・Sang-Ho CHO³・
Se-Wook OH³・児玉 淳一²・藤井 義明²

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

²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 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

³Department of Mineral Resources and Energy Engineering, Faculty of Engineering, Chonbuk National University
(567 Baekje-daero, deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 561-756, Republic of Korea)

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

岩石の動的引張強度を求めるために、ホプキンソン効果による剥離現象を用いた動的引張試験が度々行われてきている。本試験では、これまで円柱状の岩石供試体の自由端変位速度の経時変化や主破断面位置を基にした種々の強度算定法が提案されているが、現在も最終的な結論に至っていないと思われる。本試験の理論検証を行うためには、上記の主破断面位置や岩石供試体の自由端変位速度の計測結果をシミュレート可能なツールが必要となるが、現実的に岩石の3次元動的破壊プロセスを解析可能なツールはこれまで限られていた。本稿では、Geochang花崗岩の動的引張試験を対象として、著者らが最近開発した岩石の3次元動的破壊プロセス解析法を適用することで、実験から得られた供試体の自由端変位速度や破砕形態等を良く表現可能であることを明らかにし、提案した解析法が岩石の動的引張強度の算出法に関するより詳細な議論を行うための有用なツールであることを示す。

Key Words : Hopkinson bar, dynamic tensile strength, granite, spalling phenomena, Dynamic Fracture Process Analysis(DFPA)

1. はじめに

発破は、エネルギー効率が低い岩盤の高速破碎工法である。例えば、スームプラスティングやプレスプリッティングといった制御発破法では、装薬孔周辺の広い範囲で引張破壊が卓越する¹⁾。よって、発破制御の観点から、岩石の動的引張強度を理解することは、極めて重要である。これを目的として、ホプキンソン効果による岩石のスポーリング破壊を利用した動的引張試験(以下、スポーリング試験)が度々行われてきている²⁾⁴⁾。スポーリング試験では、図-1に示すように、円柱状の岩石供試体をマレージング鋼などの高強度鋼でできたIncident Bar(以下、IB)に接触させる。そして、ガス銃によってStriker Bar(以下、SB)を加速してIBの一端に衝突させることで、IB中を圧縮応力が岩石供試体側へ向かって伝播していく。そして、この圧縮応力波が岩石供試体との境界面へ入射すると、一部が反射引張応力波としてIB内をSB側へ向かって伝播し、残りが透過圧縮応力波 σ_{trans} として岩石供試体内を自由端側に向かって伝播していく。この σ_{trans} の絶対値が、岩石の圧縮強度よりも十分小さく、

かつ引張強度よりも十分に大きければ、 σ_{trans} が供試体の自由端に入射して引張応力波として反射するいわゆるホプキンソン効果⁵⁾により、自由端から幾らか離れた箇所でスポーリング破壊が発生し、供試体軸方向とほぼ垂直に幾つかの破断面が形成される。

ここで、スポーリング試験における動的引張強度算定法には、例えば以下の二つの方法が提案されてきている。一つ目の方法⁴⁾では、IBの途中で供試体への入射応力波形を測定し、これと同時に、岩石供試体を高速度カメラで観察することにより最初に形成される破断面(以下、主破断面)を求める。そしてこれらの情報及び予め測定した岩石供試体の縦波速度を用いて、動的引張強度を算出する。他方で、二つ目の方法²⁾³⁾では、岩石供試体の自由端変位速度(Free Surface Particle Velocity, 以下FSPV)を計測するとともに、一つ目の方法と同様に主破断面を求める。さらに、FSPVの立ち上がり時間、予め測定した岩石供試体の密度及び縦波速度を用いて、動的引張強度を算出する。このようにスポーリング試験では、種々の動的引張強度算定法が提案されているが、現在も最終的な結論に至っていないと思われ、今後もより詳細な議論

が必要と考えられる．そのためには、少なくとも実験で観察される主破断面位置、亀裂進展プロセスやFSPVを現実的にシミュレート可能な解析ツールが必要となる．ここで、著者らは最近、岩石の高速载荷に伴う複雑亀裂進展プロセスをシミュレート可能な3次元動的破壊プロセス解析 (Dynamic Fracture Process Analysis, 以下DFPA) 法を開発してきており、既報^{9,7)}の動的圧裂引張試験の破壊プロセス解析を通して、その有効性及び課題を示してきている．そこで、本稿では、岩石のスポーリング試験を対象として、既報^{9,7)}の問題点を改良したDFPA法を用いて、スポーリング試験から実際に得られたFSPVや破碎形態等を現実的に表現可能であるかを検証する．

2. DFPA法の概要

DFPA法は、3次元有限要素法に基づいており、(i)高速载荷に伴って岩石内で生じる応力波伝播プロセス、(ii)亀裂進展プロセス、(iii)新たに形成された巨視亀裂表面や破碎岩石片が互いに接触・衝突するプロセスを考慮している．以下では(i)~(iii)の概要について述べる．

(1) 岩石内の応力伝播プロセス

既報^{9,7)}と同様に、(i)は、4節点の四面体要素を用いて等方のネオ・フック粘弾性体として表現している．この際、解析に入力が必要なパラメーターは、ヤング率 E 、ポアソン比 ν 、密度 ρ 、減衰定数 η である．

(2) 亀裂進展プロセス

(ii)は、図-2に示すように厚み0の6節点の結合要素を四面体要素間に挿入することで表現した．既報^{9,7)}では、あらかじめ全ての四面体要素間に結合要素を挿入するアプローチを採用していた．しかし、この場合、岩石のバルクの縦波速度が、理論的な縦波速度に対して無視できないほど過小評価される傾向が見られ、かつ、岩石のバルクのコンプライアンスが、見かけ上低下するといった問題が生じた．そこで、解析開始前に全ての四面体要素間に結合要素を挿入するのではなく、全ての時間ステップにおいて各四面体要素境界に作用する垂直応力及びせん断応力を算定し、これらの応力が、その結合要素に与えた引張強度或いはせん断強度に達した場合に限って、該当する四面体要素間に結合要素を挿入することにした．この場合、要素と節点のコネクティビティを修正する必要があるため、図-3に示すように、結合要素の挿入箇所に応じてRemeshingを行う手法を採用した．なお、図において、(a)~(c)はそれぞれ、分離する節点がモデル内部、モデルの外周面上、モデル外周の辺上に存在する場合に相当する．(d)は、(c)の特別な場合であり、モデル外周上の三辺上で節点が分離する場合に相当する．

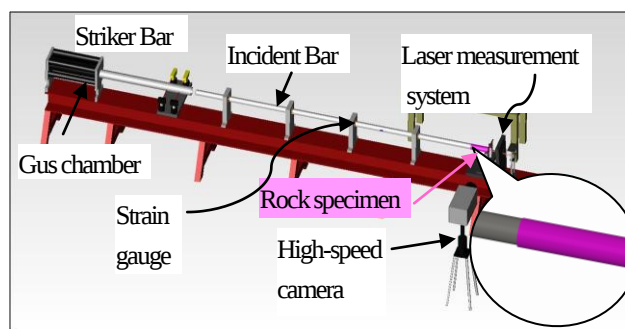


図-1 スポーリング試験装置の概要

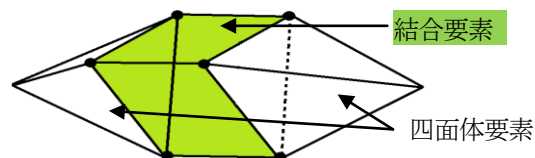


図-2 四面体要素と結合要素の一例

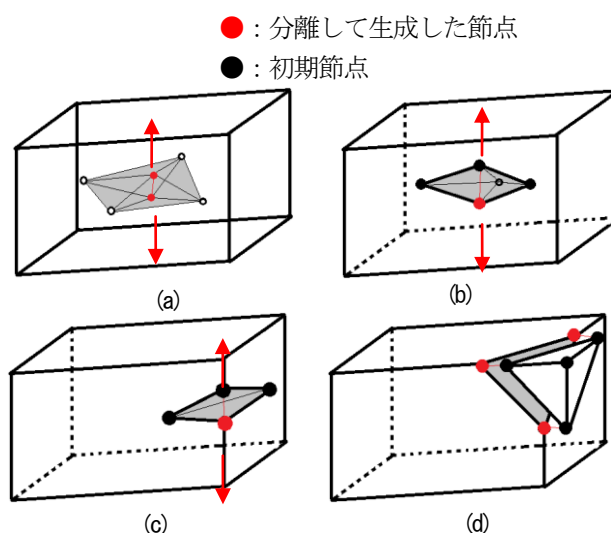


図-3 結合要素の挿入箇所に応じた Remeshing の分類

結合要素を挿入した場合、周囲の応力場の変化に応じて、結合要素を構成する相対する2面は、互いに開口或いは滑ることになる．そこで、結合要素を構成する二面間の垂直方向変位及び平行方向変位を、それぞれ亀裂の開き変位(Crack Opening Displacement, COD)及び相対滑り量Slipとし、これらの値に応じて亀裂面に結合力を作用させた．具体的には、亀裂面に垂直方向及び平行方向に作用する結合力を、それぞれの σ_{bond} (引張が正)及び τ_{bond} とし、これらを亀裂変形を妨げる方向に作用させた．なお、結合要素を挿入した段階は、 $COD=Slip=0$ に相当することに起因して、引張破壊かせん断破壊のどちらの原因で結合要素が挿入されたかにより結合力の与え方を以下のように場合分けすることにした．ここで、文献⁹⁾を参考に、引張破壊によって結合要素が挿入された場合は(1)、(2)式に、また、せん断破壊によって結合要素が挿入された場合は(3)、(4)式に従って結合力を作用させた．

$$\sigma_{\text{bond}} = S_t \cdot f(D) \quad (1)$$

$$\tau_{\text{bond}} = c \cdot f(D) \cdot \text{Slip} / \text{Slip}_c - \sigma_{\text{bond}} \tan \varphi \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{bond}} = S_t \cdot f(D) \cdot \text{COD} / \text{COD}_c \quad (3)$$

$$\tau_{\text{bond}} = c \cdot f(D) - \sigma_{\text{bond}} \tan \varphi \quad (4)$$

ここで、 S_t , c , φ は、それぞれ、結合要素の微視的引張強度、微視的粘着力、内部摩擦角である。また、 $D(0 \leq D \leq 1)$ とは、結合要素の損傷値であり、次式で与えた。

$$D = \begin{cases} \sqrt{(\text{COD} / \text{COD}_c)^2 + (\text{Slip} / \text{Slip}_c)^2} & (\text{COD} > 0) \\ \text{Slip} / \text{Slip}_c & (\text{COD} \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $\text{COD}_c (=5G_{\text{II}}/S_t)$ 及び $\text{Slip}_c (=5G_{\text{II}}/(c - \sigma_{\text{bond}} \cdot \tan \varphi))$ は、それぞれ結合要素の限界開口量及び限界滑り量であり、 G_{II} 及び G_{III} は、それぞれMode I及びMode IIの破壊エネルギーである。また、 $f(D)$ は D の増加に伴って、1から0に向かって単調減少する関数であり、引張/滑り軟化則の1/4モデルに相当する次式の関数を採用した(図-4)。

$$f(D) = \begin{cases} -5D + 1 & \left(0 \leq D \leq \frac{3}{20}\right) \\ -\frac{5}{17}D + \frac{5}{17} & \left(\frac{3}{20} \leq D \leq 1\right) \end{cases} \quad (6)$$

COD が負となる場合は、ペナルティ係数 P_{comp} と結合要素の代表辺長 h を用いて、 $\sigma_{\text{bond}} = \text{COD} \cdot P_{\text{comp}} / h$ の関係で過剰併合を解消するような結合力を作用させた。各結合要素の S_t 及び c は、均一性係数 m により特徴づけられるWeibull分布に従って^{1), 2), 9)}結合要素ごとにランダムに与え、 φ はその際一定値を用いた。 D が1に達した結合要素はこれを無効化することで巨視的な亀裂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扱った。

(3) 接触・衝突プロセス

結合力を失った巨視亀裂表面は、その周囲の岩石の変形次第で接触・衝突を繰り返すため、接触反力や表面摩擦等力の接触力を考慮する必要がある。ここでは、ペナ

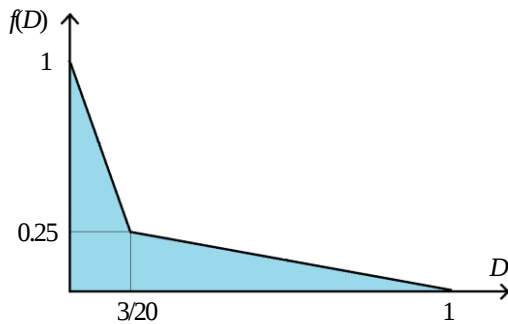


図-4 D - $f(D)$ 関係図

ルティ法⁹⁾を用いて、接触プロセスを考慮している。今、亀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。そこで、接触状態にある離散岩石片のうち的一方をContactor、もう一方をTargetと見なし、それぞれの離散岩石片が n 個及び m 個の四面体から成るものとする。ContactorとTargetの間に作用する接触反力は、オーバーラップしているContactor内の四面体 i とTarget内の四面体 j 間に作用する接触反力の総和として求めている。この際、オーバーラップしている四面体カップルごとに、接触反力をオーバーラップ面積に比例した力として計算し、これを接触面に垂直方向に作用させている。本稿ではこの際の比例定数をペナルティ係数 P_{DEM} としている。さらに、Coulombの摩擦則に従い、上記の接触反力の大きさに動摩擦動係数を乗じて動摩擦力を求め、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ている。

以上、2. (1)～(3)で求めた、コーシ応力、結合力、及び接触力に相当する節点力を、それぞれ $\mathbf{f}_{\text{int}}$, $\mathbf{f}_{\text{crack}}$, $\mathbf{f}_{\text{contact}}$ とし、さらに、外圧や重力等の外力に等価な節点力を $\mathbf{f}_{\text{ext}}$ とすると、解くべき有限要素式は次式となる。

$$\mathbf{M}^{\text{lump}} \mathbf{a} = \mathbf{f}_{\text{ext}} - \mathbf{f}_{\text{int}} + \mathbf{f}_{\text{crack}} + \mathbf{f}_{\text{contact}} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{M}^{\text{lump}}$ は集中質量行列¹⁰⁾、 $\mathbf{a}$ は節点加速度である。DFPA法では、(7)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、時間項の離散化に中央差分法を用いて、陽解法により解いている。よって、クーラン条件を満たす十分小さな時間刻み幅を用いる必要がある。

3. DFPA法を用いたスポーリング試験の解析

(1) 解析モデルと解析条件

スポーリング試験を詳細にモデル化するには、SB、IB、そして岩石供試体の全てを考慮に入れることが理想的である。しかし、その場合、膨大な計算量・計算時間が必要となる。本研究は、現在、基礎的検討の段階であり、多くの検証解析を必要とすることから、ここでは、文献²⁾にならって、図-5に示すような円柱形状の岩石供試体のみからなるモデルを使用することにした。

ここでは、著者らが実施したスポーリング試験に用いたGeochang花崗岩を想定し、弾性波測定及び準静的な強度試験結果を参考に E を40.6GPa、 ν を0.20、 ρ を2641kg/m³、 η を10⁴Pa·s、 φ を50°、 c の平均値を37MPa、 S_t の平均値を10MPaとした。その他のパラメーターについては、事前の検討から、 m を5¹⁾、 P_{comp} を E ⁹⁾、 P_{DEM} を E ⁹⁾、岩石同士の動摩擦係数を0.6¹¹⁾と設定した。また、破壊エネルギーは、3. (3)でその効果について議論するため、ここでは $G_{\text{II}}=G_{\text{III}}=0$ とした。

上述した解析モデルの単純化に伴い、図-5の赤色で示した載荷面に載荷圧 $P(t)$ を適切に与える必要がある。ここで、本試験では、IBと岩石供試体は密に接触するため、近似的に異種媒質境界の応力波伝播問題の理論を用いて表現できると考えた。この場合、IBを伝播する入射応力 $\sigma_i(t)$ と岩石供試体を伝播する透過応力 $\sigma_t(t)$ の比は、次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_t(t)}{\sigma_i(t)} = \frac{2\rho_1 C_1 A_1}{\rho_1 C_1 A_1 + \rho_0 C_0 A_0} \quad (8)$$

ここで、 A_0 、 ρ_0 、 C_0 はそれぞれ、IBの断面積、密度、縦波速度であり、 A_1 、 ρ_1 、 C_1 は、それぞれ岩石供試体の断面積、密度、縦波速度である。今回行った実験では、(8)式の右辺は0.40となった。本稿では、IBで計測した $\sigma_i(t)$ を(8)式に代入することで $\sigma_t(t)$ を算出し、これを $P(t)$ として解析に用いることにした(図-6)。そこで、以下の3. (2)では、本圧力モデルの妥当性について検証する。

(2) 載荷圧力に関する妥当性の検証

図-7にDFPAから得られた応力 $\sigma_{xx}(t)$ の空間分布の経時変化と破壊プロセスを示す。図では、引張は暖色、圧縮

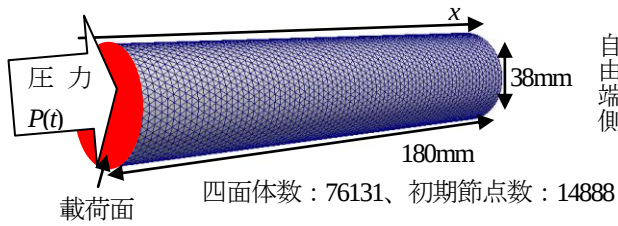


図-5 スポーリング試験の解析モデル

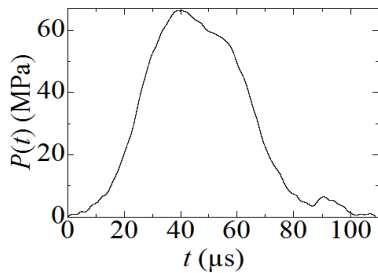


図-6 載荷面に与えた圧力 $P(t)$ の波形

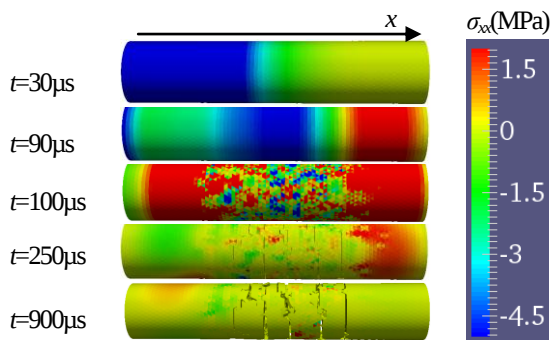


図-7 応力 σ_{xx} の空間分布の経時変化と破壊プロセス

は寒色で示している。 $t=30\mu s$ の結果では圧縮応力波が自由端へ向かって伝播していく様子が、 $t=90\mu s$ の結果ではホプキンソン効果により自由端近傍から引張応力が生じる様子が確認できる。さらに、 $t=100\sim 900\mu s$ の結果では、微視亀裂が生成・連結し、巨視亀裂面を形成することによる応力解放プロセスが確認できる。この場合、 $G_{II}=G_{III}=0$ のため、生成した全ての亀裂は、結合力を持たないことから、巨視亀裂に相当する。次に、図-8(a)～(c)に高速度カメラを用いて観察した供試体の亀裂進展プロセスを、また、及び図-8(d)に最終破砕形態を示す。ただし、図-8(a)～(c)において、目視可能な巨視亀裂が生成する直前を $t=0(\mu s)$ とし、また、高速度カメラの結果は、解像度を確保するため、供試体の一部のみを撮影している。図-7と図-8との比較から、DFPAの結果では、スポーリング破壊自体は良く表現できている一方で、巨視亀裂数を過剰に評価していることがわかる。

図-9に実験及びDFPA法から得られたFSPV(x方向)の経時変化の比較を示す。DFPAで用いた岩石供試体の c の平均値から想定される圧縮強度は、 $P(t)$ (図-6)の最大値に対して十分に高いことから、図中領域a(大略 $t < t_a$)は非破壊の挙動に対応し、領域b(大略 $t > t_a$)は岩石供試体内に

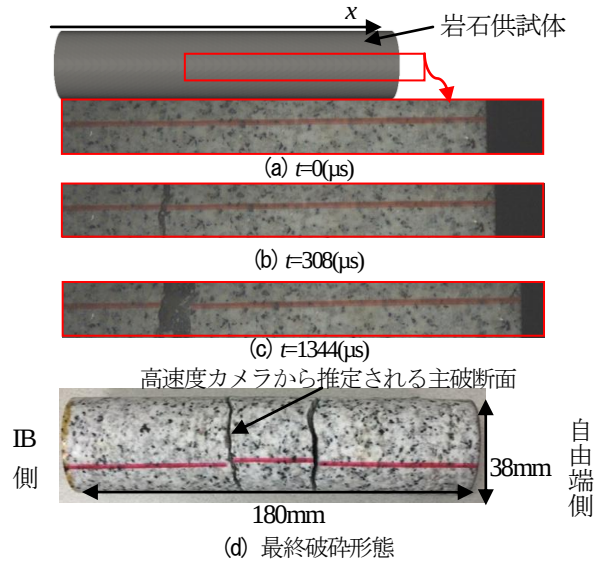


図-8 実験で観察される破断面

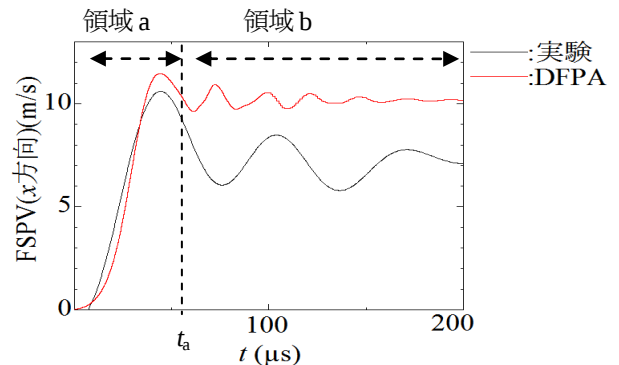


図-9 FSPV(x方向)の経時変化

生じた破壊の影響を受けているものと考えられる。ここで、非破壊挙動に対応する領域aにおいて、FSPVの立ち上がりの注目すると、実験結果とDFPAの結果は、互いに良い対応を示していることがわかる。一方で、領域bでは、DFPAの結果は実験で観察されるFSPVの右肩下りの傾向を示さず、ほぼ一定の値を取った。

ここで、このFSPVのピーク後の挙動の相違(図-9)と上述のDFPAにおける亀裂数の過大評価(図-7)の主たる理由は、破壊エネルギーを0としていることに起因する。よって、図-7及び図-9の結果から、 G_{II} 或いは G_{III} を増加させることで、より実験に近い傾向に近づくと考えられる。そこで、次節では、破壊エネルギーがDFPAの結果に与える影響について検証する。なお、FSPVのピーク値に関しては、実験結果よりもDFPAの結果が若干高い値を取っているが、この理由としては、例えば、実験ではIBと岩石供試体の間に固定用のジェルを用いていることや(8)式が厳密には成り立たないこと、等の理由が考えられる。そこで、以下の解析では、実験結果に対するDFPAのFSPVのピーク値の比0.92を $P(t)$ に乗じた载荷圧力を用いて、解析を行うことにした。

(3) 破壊エネルギーの影響評価

線形破壊力学によると、Mode Iの亀裂の変形の場合、エネルギー解放率 G と、Mode Iの応力拡大係数 K_I の間には、次式が成立する。

$$G = \frac{K_I^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (\text{平面ひずみ条件}) \quad (9)$$

本稿では、Mode Iの破壊靱性値 K_{IC} を(9)式の K_I に代入した場合に求まる G を近似的に G_{II} として設定することにした。ここで、著者らは、Geochang花崗岩を用いて、種々の载荷速度に対して K_{IC} を評価した結果、 K_{IC} には载荷速度依存性があると明らかにしている¹²⁾。この場合、準静的及び図-6に対応する载荷速度における K_{IC} を(9)式に代入して得られる G_{II} は、それぞれ大略40J/m²と800J/m²になった。そこで、 $G_{III}=2G_{II}$ と仮定し、Case 0:(G_{II} , G_{III})=(40, 80)J/m²とCase 1:(G_{II} , G_{III})=(800, 1600)J/m²の解析を行うことにした。また、参考までにCase 1に対して G_{III} のみを変更したCase 2:(G_{II} , G_{III})=(800, 800)J/m²の解析も実施することにした。

図-10に、Case 0～2及び実験から得られたFSPVの経時変化を比較した結果を示す。また、図-11に、図-7と同様に、各Caseの応力 σ_{xx} の空間分布の経時変化と破壊プロセスを示す。さらに、図-12に、DFPAで十分に破壊が進んだと考えられる $t=900\mu\text{s}$ における各Caseから得られた $D=1$ を満たす巨視亀裂部の様子を黄土色で示す。なお、図-12中の矢印は、DFPAから主破断面と推定される亀裂である。まず、図-10～12において、Case 1と2の結果を

比較すると、わずかな違いは見られるものの、 G_{III} の違いによる影響はほとんど見られず、本試験の破壊プロセスは、Mode Iによる影響が支配的と考えてよい。

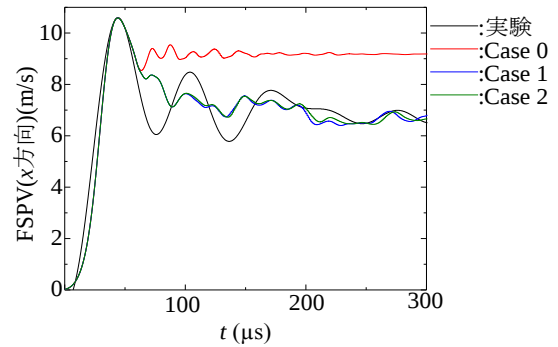


図-10 種々の破壊エネルギーを考慮した場合のFSPV(x方向)の比較

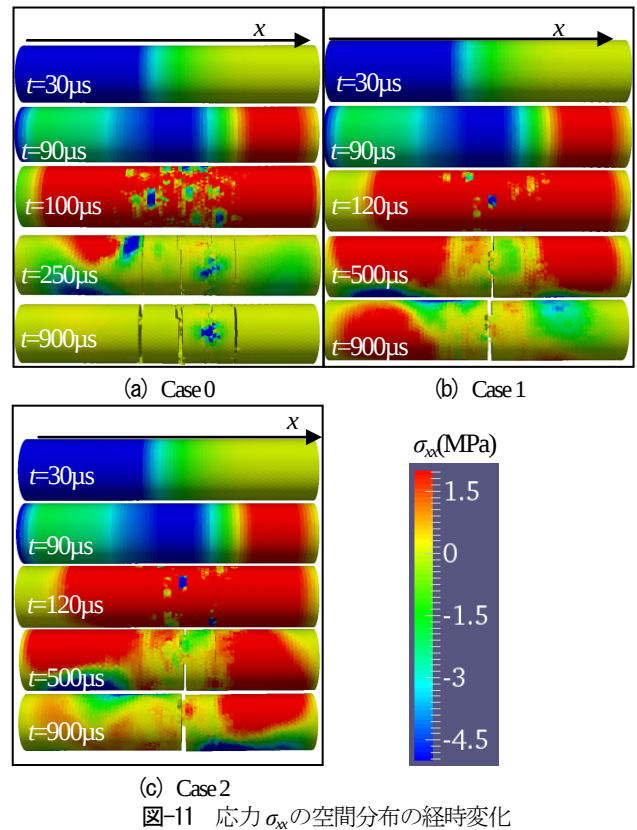


図-11 応力 σ_{xx} の空間分布の経時変化

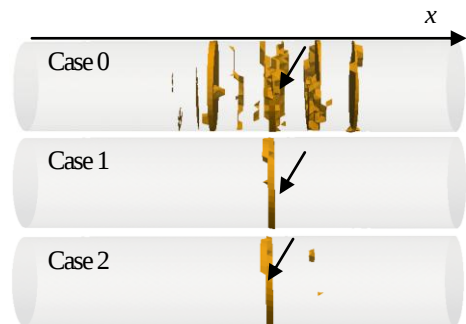


図-12 Case 0～2のDFPAから得られる巨視亀裂形態の比較

次に、図-10において、Case 0と1の結果を比較すると、FSPVのピーク後の挙動について、Case 1のみ実験と同様に右肩下がり傾向を示すことがわかる。同様に、図-11・12の結果と本解析に対応する実験結果である図-8(d)とを比較すると、Case 0では巨視破断面が実験よりも過剰に生じている一方で、Case 1では巨視亀裂数や亀裂面の形成位置の観点から実験結果と良い対応を示していることがわかる。なお、Case 1におけるDFPA及び、図-8の高速カメラにおける正確な時刻を対応させることは困難だが、破壊プロセスの観点から良い対応を示していることがわかる。さらに、図-12におけるCase 1或いは2から得られた巨視亀裂面は、x軸に対し僅かに傾きが生じており、これは図-8(d)において主破断面がx軸に対して垂直な面から僅かに傾いている結果とよく対応する。以上の比較から、本稿で行った条件では、Case 1或いはCase 2の場合が、実験結果を最も良く再現したと考えられる。

4. まとめ

本稿では、新たに改良した3次元DFPA法を用いてGeochang花崗岩を対象としたスパーリング試験を模擬した破壊プロセス解析を行った。その結果、DFPAから得られる自由端変位速度、破壊プロセス及び亀裂パターンが実験結果と良い対応を示すことができたと考えられる。以上より、DFPA法を用いてスパーリング試験を用いた岩石の動的引張強度の算出法に関するより詳細な議論を今後行うことができる可能性を示した。

参考文献

- 1) 金子勝比古, 山本雅昭, 諸岡啓太, 田中義晴: スムースブラスティングにおける起爆秒時精度の影響, 火薬学会, Vol. 58(3), pp.91-99, 1997.
- 2) Cho, S.H., Ogata, Y., Kaneko, K.: Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 40 (5), pp. 763-777, 2003.
- 3) Kubota, S., Ogata, Y., Wada, Y., Simangunsong, G., Shimada, H., Matsui, K.: Estimation of dynamic tensile strength of sandstone, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 45 (3), pp. 397-406, 2008.
- 4) Oh, S.W., Min, G.J., Yoon, J.J., Kim, M.S., Fukuda, D., Park, L.J., Kim, H.W., Cho, S.H.: Spall experiments for determining dynamic tensile strength of rock materials, 22nd DYMAT Technical Meeting, 2016(submitted).
- 5) Hopkinson, J.: Magnetic and other Physiscal Properties of Iron at a High Temperature, *J. Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A(1887-1895)(180), pp. 443-465, 1889.
- 6) 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, No. 1506, 2016年3月.
- 7) 二瓶恵理菜, 福田大祐, 趙祥鎬, 児玉淳一, 藤井義明: 岩石の3次元動的破壊プロセス解析法に関する基礎的検討, 資源・素材学会北海道支部大会, C-5, 2016年6月.
- 8) Camacho, G.T. and Ortiz, M.: Computational Modelling of Impact Damage in Brittle Materials, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 33 (20-22), pp. 2899-2938, 1996.
- 9) Munjiza, A.: The combined Finite Discrete Element Method, WILEY, 2004.
- 10) Felippa, C. A., Guo, Q., Park, K.C.: Mass matrix templates: General Description and 1D Examples, *Arch. Computat Methods Eng.*, Vol. 22 (1), pp. 1-65, 2015
- 11) Byerlee, J.: Friction of rocks, *Pageoph*, Vol. 116, pp. 615-626, 1978.
- 12) Kim, M. S.: Loading rate dependency of dynamic fracture toughness of granite, Master Thesis, Chonbuk National Univeristy, 2016.

Numerical Study of Spalling Test of Rock with 3-D DFPA Method

Erina NIHEI, Daisuke FUKUDA, Sang-Ho CHO, Se-Wook OH, Jun-Ichi KODAMA,
Yoshiaki FUJI

Evaluation of dynamic tensile strength of rock is of a significant importance for blasting design in terms of such as blasting-induced damages and fragmentation of rock. Dynamic tension test based on Hopkinson effect combining with spall phenomena has been performed to determine dynamic tensile strength of rock by various researchers. However, they have proposed different evaluation methods for dynamic tensile strength using such as free surface velocity, positions of fracture plane and elastic wave velocity of the cylindrical rock specimen based on different hypotheses while have not reached a definitive conclusion. In addition, verification of each evaluation method is very challenging since the number of useful tools which can analyze the 3-dimensional(3-D) dynamic fracture process of rock have been limited. To overcome this situation, we have developed a 3-D Dynamic Fracture Process Analysis (DFPA) method which can realistically simulate the complex 3-D fracturing process of rock. In this paper, we applied the 3-D DFPA method to the dynamic tension test. The results show that the DFPA can express the free surface velocity, positions and patterns of fracture measured by experiments and could be a useful tool to discuss about each evaluation method in greater detail.