

岩石の動的強度に関する一考察

加藤昌治^{*}, 川上純樹^{**}, 米田哲朗^{*}, 金子勝比古^{*}
 和田有司^{***}, 緒方雄二^{***}, 勝山邦久^{****}

ホプキンソン効果を用いた動的試験と静的な一軸引張試験を想定して、岩石の破壊プロセスを有限要素法により数値解析的に検討し、動的強度と静的強度の相違とその影響因子について考察した。ホプキンソン効果による岩石の破壊プロセスを解析した結果、解析された自由端変位速度波形は実験結果と良く対応することが確かめられた。また、ホプキンソン効果実験および静的な一軸引張試験における岩石の破壊プロセスは明瞭に異なることを明らかにし、これらの相違は応力集中および応力再配分のメカニズムから説明されることを指摘した。そして、ホプキンソン効果を用いた動的試験において評価される供試体強度は、解析したひずみ速度の条件では微視的強度の平均値に対応すること、また、静的な一軸引張試験において評価される供試体強度は、微視的強度の最小値よりもわずかに大きな値に対応することを明らかにした。その理由として、微視的強度の不均一性が動的条件と静的条件における供試体強度の相違を生じさせる一要因であることを指摘した。

1. 緒言

発破における岩石破壊状態を定量的に予測するためには、岩石強度の評価が不可欠である。しかし、岩石の強度はひずみ速度や応力速度に依存し、一般に、ひずみ速度の増大に伴って岩盤の強度も増大することが知られている。このため、通常の材料試験機で測定される強度は静的強度と呼ばれ、ホプキンソン効果実験などにおいて測定される強度は動的強度と呼ばれている¹⁾。ただし、静的強度と動的強度は、ひずみ速度については明確に定義されていないが、一般には、静的

条件は慣性力が無視できる速度範囲であり、動的条件は慣性力が無視できない速度範囲であると解釈される。周知のように、発破における岩石破壊は応力波に起因することから、岩石強度としては動的強度が採用され、通常は、静的強度の数倍の値が動的強度として用いられている²⁾。しかし、動的強度と静的強度の比の値は岩石の種類により異なり³⁾、さらに、静的試験と動的試験のそれぞれの試験条件においても、岩石強度はひずみ速度に依存する⁴⁾。とくに、静的試験における強度のひずみ速度依存性は応力腐食割れにより説明され、その数値モデルも提案されている⁵⁾。しかしながら、動的強度と静的強度との相違や動的試験における強度のひずみ速度依存性のメカニズムに関しては、十分に解明されているとはいえない。

そこで、ここでは、引張応力下における岩石の破壊に問題を限定し、動的および静的条件における破壊プロセスを数値解析し、それらの強度を定量的に評価することを試みる。具体的には、動的条件としてはホプキンソン効果を用いた強度試験^{3, 6)}を、静的条件としては一軸引張試験を想定し、それぞれの試験における岩石の破壊プロセスを数値解析する。そして、数値解析結果に基づいて、それを実験結果と比較するとともに、動的強度と静的強度の相違とその影響因子について考察を加える。なお、一般に、強度の用語は幅広い意味で用いられているが、以下では用語の混乱を避け

1999年7月13日受理

^{*}北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

TEL 011-706-6325

FAX 011-706-6325

^{**}北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻
 (現在: 株式会社コマツ小松工場)

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

TEL 011-706-6325

FAX 011-706-6325

^{***}資源環境技術総合研究所安全工学部

〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8564

FAX 0298-58-8558

^{****}資源環境技術総合研究所地殻工学部

〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8500

FAX 0298-58-8508

るために、岩石供試体について求められる強度を供試体強度、岩石内の微視破壊における強度を微視的強度と呼び、両者を区別する。

2. ホプキンソン効果実験の数値解析

2.1 解析方法および解析モデル

岩石の破壊はその組織と密接に関係していることから、岩石の破壊を論じるためには、岩石をその組織からモデル化する必要があるが、厳密な数値モデル化は困難である。しかし、岩石の微視構造は近似的にはある微視的スケールの要素の集合体としてモデル化できるであろう。とくに、岩石の微視構造は極めて不均一であるが、これは微視的要素レベルでの強度と弾性率の不均一性として表現されるであろう。ただし、破壊のプロセス解析においては、強度不均一性の影響に比較して弾性率不均一性の影響は小さいことから、問題の簡略化のためには、弾性率を均一として強度のみを不均一とする仮定も許容されと考えられる⁷⁾。また、岩石の破壊は微視的き裂の発生とその集積による巨視的破断面の形成であると解釈されることから、破壊の解析においては微視き裂の発生・伸長を考慮する必要もある。そこで、岩石を有限要素モデルで表現し、要素単位の強度や破壊から岩石供試体の強度や破壊を予測しようと試みた。数値解析には、き裂進展と強度不均一性を考慮した2次元動的有限要素法⁷⁾を用いた。本方法では、き裂の発生・伸長は要素境界の分離で表現し、要素境界の引張強度はワイブル分布で与えている。なお、本方法ではき裂面の結合力を引張り軟化則1/4モデルで表現しているが、本解析においては問題の単純化のために破壊エネルギーを零と設定している。本解析法の詳細については金子ら⁷⁾を参照されたい。

以下では、解析において要素境界に与えた強度の分布を微視的強度分布と呼び、ワイブル分布に従う微視的強度分布の形状は均一性係数 m により表現した。ここでは、微視的強度の平均値を5.0MPaとし、佐藤ら⁸⁾を参考に m としては5および20の条件を考えた。これらの条件における微視的強度分布を示すとFig.1のようである。すなわち、 $m=20$ の条件は比較的均質な場合(標準偏差:0.3)、 $m=5$ の条件はより不均質な場合(同:1.1)を示している。解析では、微視的強度分布がワイブル分布に従うように乱数を発生させて各境界の強度を与えたが、均一性係数の値ごとに乱数の初期値を変化させた10ケースのモデルを作成した。

動的条件としては、現状で実験が可能な高速試験であるホプキンソン効果を利用した岩石強度試験を考えた。解析モデルはFig.2に示すようであり、右端および上下面は自由面として、左端に衝撃荷重を作用させ

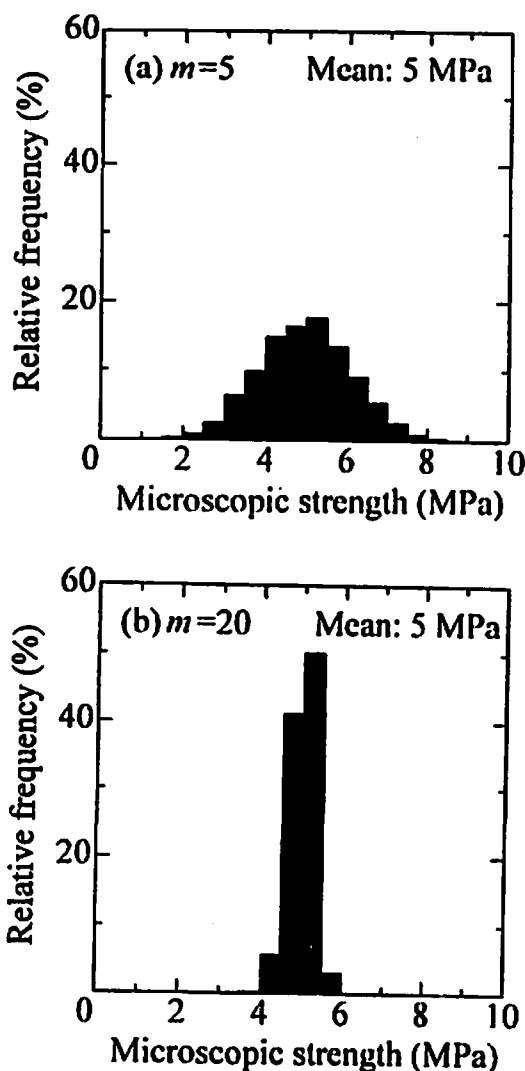


Fig. 1 Assumed distribution of microscopic tensile strength in rock in two cases of (a) $m=5$ and (b) $m=20$ for Weibull distribution

た。モデルの要素分割では全て縦横1mmの三角形要素に分割し、初期節点数は3,171、要素数は6,000とした。衝撃荷重は後述する実験の結果を参考にして、Fig.3のように設定した。すなわち、まず、作用させる圧力波形を種々変化させた予備解析を行い、解析された自由端変位速度波形の立ち上がりからピーク前後の形状が実験結果とほぼ一致するような作用圧力波形を求め、それを数値解析における入射応力波形とした。また、計算時間増分は $0.1\mu s$ であり、他の計算定数に関しても後述する実験条件を参考にして、密度、ヤング率、ポアソン比をそれぞれ 1.988kg/m^3 、9.1GPa、0.25とした。ただしここでは、勝山ら⁶⁾の数値解析と同様に、衝撃荷重作用面(Fig.2ではモデルの左端)近傍の破壊は考慮しないことにした。

2.2 破壊プロセス

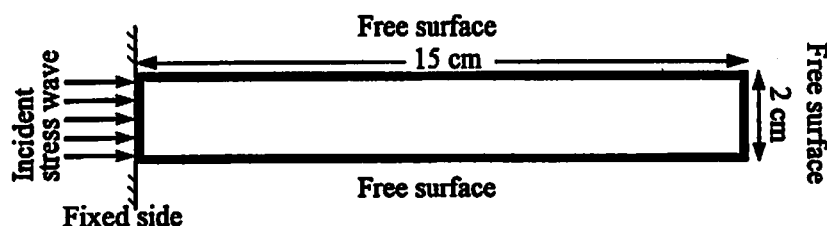


Fig. 2 Geometry of model under dynamic condition based on Hopkinson's effect and associated boundary condition

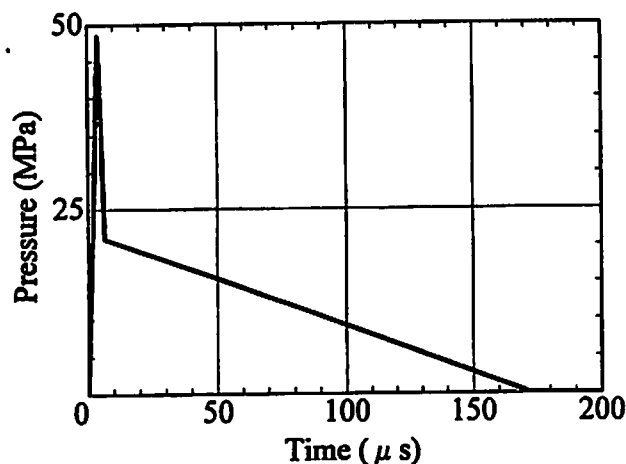


Fig. 3 Pressure-time curve of incident stress wave

まず、破壊が発生しない場合、すなわち、強度が十分大なる場合の供試体内での水平方向応力の分布を衝撃荷重作用後の時間経過に沿って示すと Fig. 4 となる。図より、衝撃荷重の作用により、圧縮応力波が発生・伝播していき、これが自由端で反射されて引張応力波となり、さらに、直接波と反射波の干渉により自由端から離れた位置に引張応力集中が発生することがわかる。とくに、引張応力が最も高い領域は極めて狭い領域であることもわかる。なお、ホプキンソン効果を考える場合、通常、応力波は平面波として取り扱われるが、応力は断面内で一様とは限らないことがわかる。これは、波面直後に上下の自由面に沿って一種の表面波が発生することに関係している。本解析は2次元解析であるため、この表面波は板表面の波であるラム波と解釈される⁹⁾が、岩石実験では棒状供試体が用いられることから棒表面を伝わる表面波となると予想される。

次に、破壊を考慮した場合の解析結果の一例として、自由端からの反射引張応力波の進行と供試体内の水平方向応力分布の関係を Fig. 5 に示す。ただし、図中の黒実線は発生したき裂を示している。図より、自由端からの引張応力波の進行に伴って、自由端から離れた位置でき裂が発生し、それらが連結して破断面が

形成され、破壊片が飛翔していく様子を見ることが出来る。すなわち、ホプキンソン効果による破壊の様子が良く表現されていることがわかる。また、反射引張波の進行に伴って複数のき裂が発生するが、これらが全て最終的破断面を形成するのではないこともわかる。すなわち、多くのき裂が発生するが、最終的な破断面を形成するものはその一部であることを意味している。したがって、実験において観察される破断面は最も成長したき裂であり、供試体内にはそれ以外にも多くの微視的き裂が発生していることを意味している。なお、この点の検証には試験後の供試体の顕微鏡観察が必要であり、今後の課題であると思われる。

2.3 自由端変位速度と動的強度評価

Fig. 5 に示した例について、自由端の変位速度の時間変化を示すと Fig. 6 のようである。また、比較のため、同一寸法の凝灰岩供試体の実験において測定された自由端変位速度の時間変化を Fig. 7 に示す。ただし、実験方法は馬ら³⁾の方法と同一であり、精密雷管により一端に衝撃圧を与え、他端の自由端変位速度をレーザー振動計により測定するとともに破断面位置を高速カメラで撮影した。この実験の詳細については馬ら³⁾を参照されたい。Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、定性

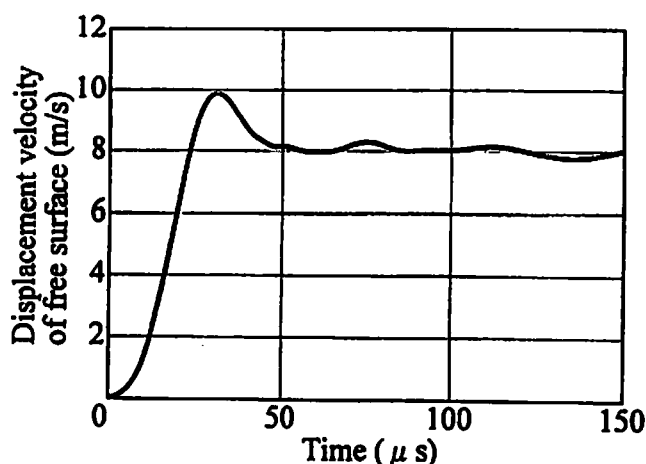


Fig. 6 Displacement velocity wave of free surface as a simulation result

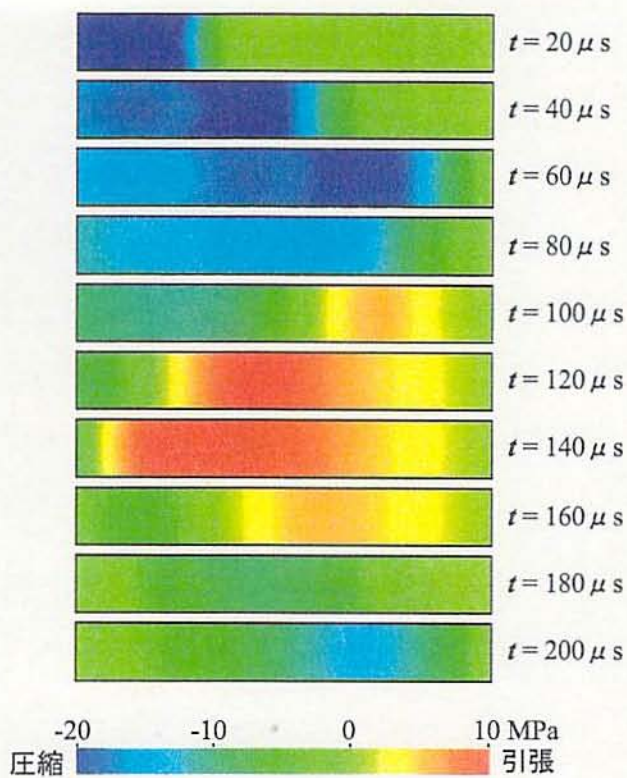


Fig. 4 Changes of axial stress distribution assuming no fracture

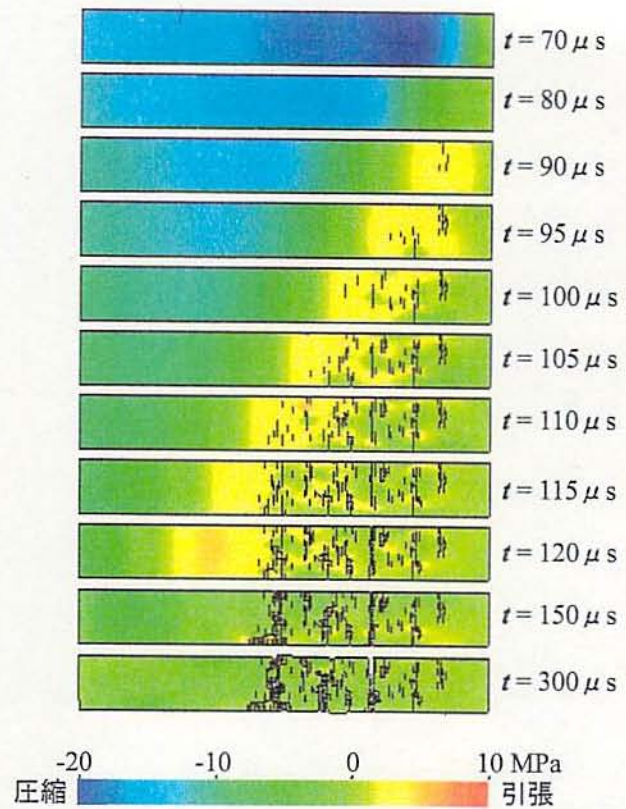


Fig. 5 Distribution of axial stress and crack propagation process under dynamic loading condition after stress wave reflection in the case of $m=5$

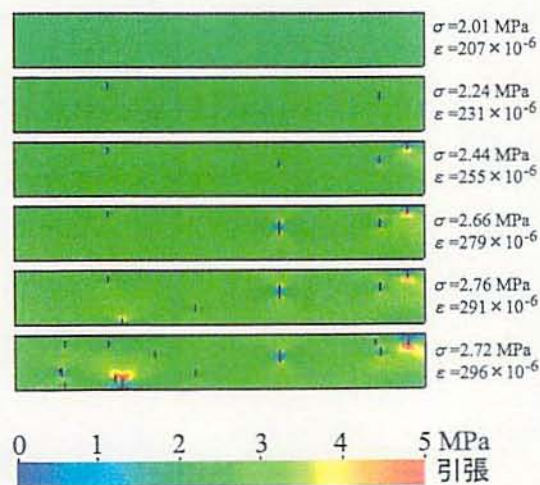


Fig. 10 Distribution of axial stress and crack propagation process under static loading condition from the time just before first crack generation in the case of $m=5$

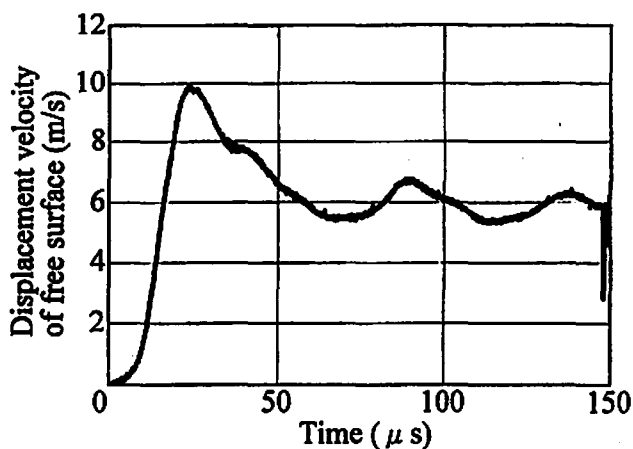


Fig. 7 Displacement velocity wave of free surface measured in an experiment based on Hopkinson's effect

的ではあるが、自由端変位速度がピーク以降においても互いに等しい傾向を示していることがわかる。とくに両者とも、自由端変位速度の波形が、ピークに達した後緩やかに低下するが、低下する途中で高次の波が重なっていることがわかる。これは、前述した表面波の影響である。数値解析は2次元でおこなったのに対し、実験では棒状供試体を用いていることから、両者の波長が異なり高次の波の位相は一致しないが、ともに同種の現象が表れていることが確認される。また、両者ともに、ピーク後、極小値に低下した後、減衰振動に移行している。この極小値の時刻は生成したき裂面からの反射波が到達した時刻であり、その後の減衰振動は分離した破壊片において軸方向の自由振動が生じていることを示している。すなわち、この減衰振動の変位速度は、その平均値が破壊片の飛翔速度であり、振動項が破壊片の自由振動であると解釈される。以上の結果から、数値解析結果は実験結果をほぼ再現していることがわかる。

次に、数値解析の結果から、供試体強度を評価することを試みる。当然のことながら、数値解析では微視的破壊を取り扱っているため、供試体強度を定義できない。そこで、上述の実験との対応を考え、実験と同様な基準により供試体強度を評価することを考える。なお、実験における供試体強度評価は破断面位置における最大応力の評価であり、これは破断面位置における入射波と反射波の評価である。そして、実験では、破断面位置における入射波と反射波は自由端変位速度に波動減衰を補正することにより評価される。しかし、解析では破壊が生じない場合の任意の断面における応力波を直接評価することが可能である。そこで、破壊が生じない場合の解析結果 (Fig. 4) から、破断面位置

に作用する応力の最大値を求め、これを供試体強度とした。また、同様にして破断面位置に作用するひずみ速度 (応力速度) を求めると約 $10^2/\text{s}$ (1TPa/s) となった。このひずみ速度の値は、Grady and Kipp¹⁰⁾ で述べられている実際の岩石発破時のひずみ速度の範囲内である。

以上の前提の下に、均一性係数一定の条件で微視的強度の空間分布のみが異なる10ケースのモデルに対して同様な解析を行い、求められた供試体強度のヒストグラムを示すと Fig. 8 のようである。ただし、(a) および (b) は、それぞれ $m=5$ および $m=20$ の場合の結果である。図より、微視的強度の均一性係数が一定であっても、供試体強度はばらつくこと、すなわち、供試体強度は統計量として取り扱う必要があることがわかる。

3. 静的引張試験の数値解析

3.1 解析方法および解析モデル

静的条件における岩石の引張試験法としては、一軸引張試験、圧裂引張試験、点载荷試験などがあるが、通常は試験の簡便性から圧裂引張試験が採用される場合

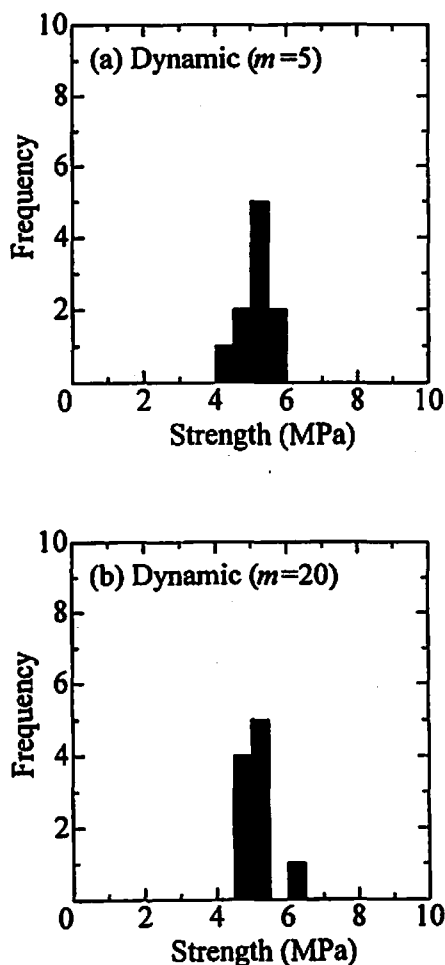


Fig. 8 Frequency distribution of dynamic failure strength of specimens in two cases of (a) $m=5$ and (b) $m=20$

が多い。しかし、ここでは、上述の動的解析との対応から、同一の幾何形状の岩石供試体に対して適用可能な試験法である一軸引張試験を考えることにした。すなわち、解析モデルは動的解析と同一のものをうい、一軸引張試験における破壊プロセスを静的有限要素法¹¹⁾を用いて解析した。なお、微視的強度を考慮した数値シミュレーションを実施した既存の研究として趙ら¹²⁾や大久保・趙¹³⁾があり、一軸引張試験における岩石の寸法効果などが検討されている。本解析では、一軸引張試験の試験条件を表現するために、Fig. 9に示すように、モデル上下面を自由面として左端の水平方向変位を固定し、右端に水平方向の強制変位を段階的に与えた。ここで、各変位段階ごとに慣性項を無視した静的解析を行ったが、き裂や強度不均一性などの取り扱いが動的解析と同様である。また、計算定数も、密度などの動的解析固有のものを除けば同一である。なお、静的解析では、原理上、破断面が形成されると、剛性方程式が不定となり数値解が求められなくなる。そこで、剛性方程式が不定となった時点で完全な破断として計算を打ち切った。

3.2 破壊プロセス

解析結果の一例として、変位の増大に伴う、水平方向応力分布と発生したき裂の分布をFig. 10に示す。ただし、解析条件からもわかるように、き裂発生以前では、応力状態は一様であるため、き裂発生直前からの結果を示している。また、図中には、モデルの平均ひずみ ϵ と断面における平均応力 σ の値を示している。Fig. 10とFig. 4および5を比較すると、動的条件と比較して、静的条件では、供試体内の応力がほぼ一様であることがわかる。また、き裂が発生し始めた後、わずかなひずみ増分により微視的強度の小さい場所にき裂が発生し、その中でも特定のき裂先端に引張応力が集中して、供試体の破断に至ることがわかる。Fig. 10においては、固定端(左端)から約4cmの位置が破断している。また、発生する微視き裂の数が動的な場合に比較して極めて少ないことがわかる。これは、周知のことであるが、微視き裂の発生によりき裂先端の応力

集中が高まり、破壊の進展が急速に進むことを示している。また、Fig. 10とFig. 5は強度の均一性係数も空間分布も全く同一のモデルに対しての結果であり、言い替えれば、完全に同一の供試体を載荷条件のみを変えて数値実験した結果である。しかしながら、破壊プロセスや破断面位置などは完全に異なる。これは、供試体の破壊や強度などが試験法や試験条件により異なることを明瞭に示している。

3.3 応力-ひずみ曲線と静的強度評価

静的条件における解析結果から、均一性係数が二通りの場合について平均応力およびき裂発生頻度と平均ひずみとの関係を示すとFig. 11のようである。ここで、平均応力は、実験の場合と同様に、断面に作用する全荷重を断面積で除した値で定義した。また、き裂発生頻度はひずみ増分ごとのき裂発生数を示し、岩石実験におけるAE発生頻度に対応している。応力-ひずみ曲線の応力のピーク付近を詳細に見ると、応力-ひずみ曲線はその傾きが変化した後、急激な応力低下を生じることがわかる。そして、この応力-ひずみ曲線の変化は、き裂発生頻度の増大に対応していることがわかる。さらに、Fig. 10を参照すると、この急激な応力低下の段階は微視き裂が特定箇所に集中した段階に対応することがわかる。これらの結果は岩石の一軸引張試験における実験結果の傾向と一致している。なお、静的試験における供試体強度は応力最大値と定義されることから、応力-ひずみ曲線から供試体強度は評価されることになる。

次に、動的解析の場合と同様に、均一性係数が二通りの場合について、微視的強度の空間分布の異なるそれぞれ10ケースの解析から求められた供試体強度のヒストグラムを示すとFig. 12となる。ただし、(a)および(b)は、それぞれ $m=5$ および $m=20$ の場合の結果である。動的条件の場合と同様に、供試体強度にはばらつきが見られる。また、均一性係数の値により供試体強度が異なることがわかる。さらに、Fig. 12とFig. 8とを比較すると、供試体の条件が同一であっても静的条件における供試体強度は動的条件におけるそれより

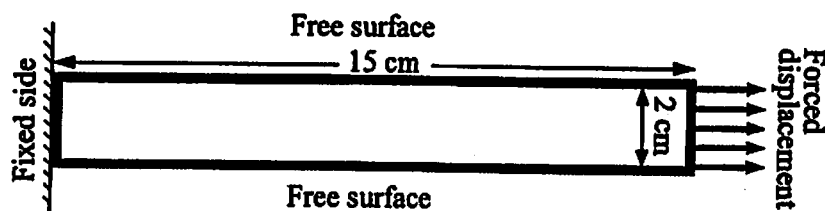


Fig. 9 Geometry of model for static fracture assuming an uniaxial tension test and associated boundary condition

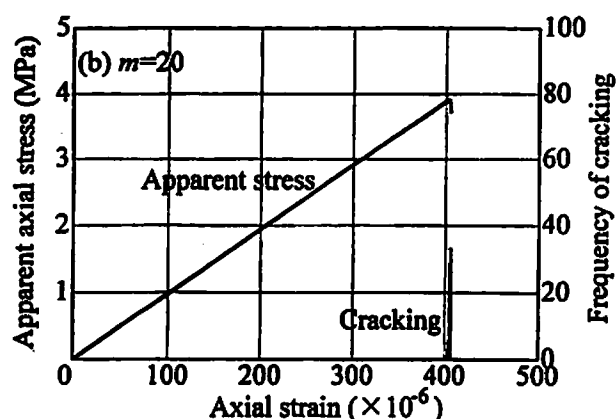
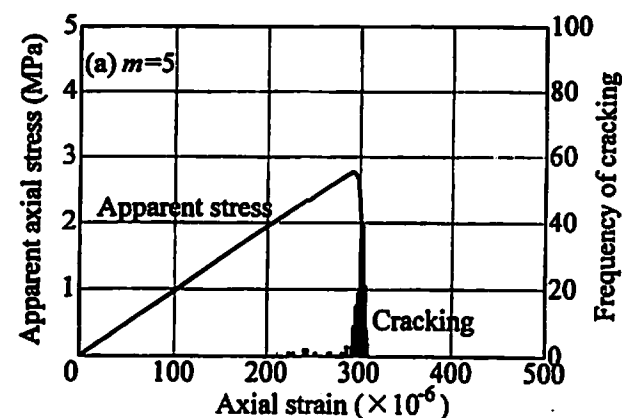


Fig. 11 Relations of average axial stress and frequency of crack generated to average strain under static loading condition in two cases of (a) $m=5$ and (b) $m=20$

も低いことがわかる。

4. 考 察

前章までに示した解析結果から、動的条件と静的条件のそれぞれにおける供試体強度の平均値および標準偏差を求めると、 $m=5$ の場合は動的： 5.19 ± 0.42 MPa、静的： 2.60 ± 0.17 MPa、 $m=20$ の場合は動的： 5.17 ± 0.32 MPa、静的： 3.81 ± 0.24 MPaとなる。また、それぞれの条件における供試体強度の変動係数は、同順で0.08, 0.07, 0.06, 0.06であり、ほぼ等しい値をとっている。動的条件における供試体強度平均値は均一性係数にさほど依存せず、ほぼ一定の値を示すが、静的条件における供試体強度平均値は均一性係数に依存し、均一性係数の増大に伴って増大することがわかる。そして、動的条件と静的条件における供試体強度平均値の比の値は均一性係数の減少に伴って低下する。さらに、Fig. 1に示す微視的強度分布を合わせ考えると、動的条件における供試体強度は、均一性係数がいずれの場合にも微視的強度の平均値にほぼ対応す

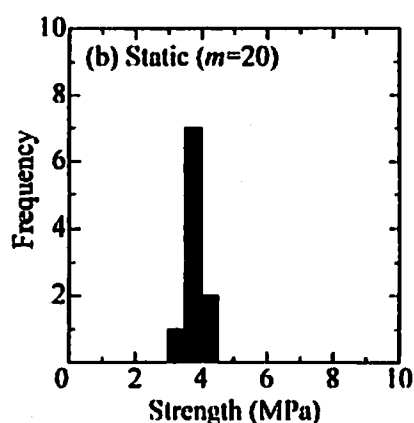
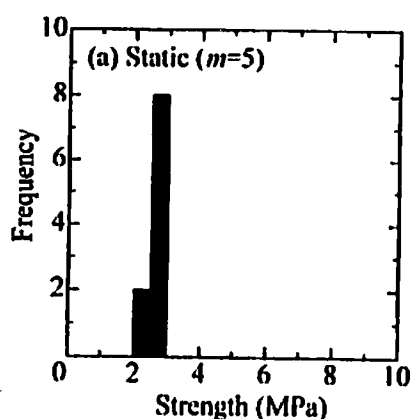


Fig. 12 Frequency distribution of static failure strength of specimens in two cases of (a) $m=5$ and (b) $m=20$

るが、静的条件における供試体強度は、 $m=5$ の場合には微視的強度の平均値より標準偏差の2倍程度低い値に、 $m=20$ の場合には同様に4倍程度低い値に対応していることがわかる。これらの結果は両者の破壊プロセスに関係している。

まず、静的条件では、微視き裂の発生以前では供試体中の応力状態は一様であり、供試体中の作用応力に直交する方向で最も微視的強度の低い場所に微視き裂が発生する。そして、微視き裂発生により、そのき裂先端の応力は増大し、き裂面周囲の応力は解放される。静的条件では、供試体全域において、この応力再配分が完全に達成されるため、次の段階における微視き裂の発生・伸長は既存の微視き裂の数と配置に依存し、その結果として、微視き裂の局所化が促進される。したがって、微視き裂発生後、わずかな応力増分によって破断面が形成されるため、微視的強度の平均値よりもかなり小さな平均応力で破壊に至ることになる。言い換えれば、静的条件では、供試体強度は微視的強度の分布形状に依存し、微視的強度分布の平均値が一定の場合にはその分散が大きい程供試体強度は小さく

なる。なお、最弱リンク説では、最初に発生した微視き裂がそのき裂先端の応力集中により加速的に伸長して破断面を形成すると仮定されるため、供試体強度は微視的強度の最小値と一致することになる。しかし、微視き裂の伸長は、そのき裂先端の応力集中と隣接する領域の微視的強度との関係により定まるため、最初に発生した微視き裂が供試体の破壊を決定するとは限らない。すなわち、上記の解析結果は、最弱リンク説は完全には成立しないが、最初の微視き裂発生からその局所化のプロセスは極めて短いため、供試体強度は微視的強度の最小値よりも若干大きな値となることを示している。ここで、均一性係数の違いに言及すれば、前述したような微視的強度分布と供試体強度との関係から、均一性係数が小さいほど、すなわち供試体が不均質であるほうが、この傾向が顕著である。

これに対し、動的条件では最大応力集中の生じる領域は反射引張波のピーク付近の狭い領域であり、この領域内に破断面が形成される。最終破断面以外の場所にも、微視き裂は発生するが、微視き裂発生により応力が再配分される領域は、微視き裂発生により生じた応力波(破壊音)が伝播している範囲内のみである。したがって、ホプキンソン効果のように反射引張応力波のピーク付近において破壊が生じる場合には、例えば、それ以前に微視き裂が発生していても、反射引張応力波のピークより前方にはその影響が及ばないことになる。また、反射引張応力波のピーク以降では時間とともに引張応力の値は低下するため、微視き裂発生による応力再配分が達成される速度と、その領域に作用する応力が低下する速度との関係も重要となる。すなわち、多くの微視き裂が発生しても、それらによる応力再配分による微視き裂の局所化、すなわち、微視き裂の相互干渉による破壊の促進効果が期待できない。そして、応力集中域の応力がその断面の平均強度に達した時に破断面が形成され始める。今回の数値解析では結果的に、動的条件における供試体強度は破断面上の微視的強度の平均値に関係することになり、統計的には全体の微視的強度の平均値に対応することとなった。

なお、動的条件での供試体強度は静的条件におけるそれよりも大きい、それらの比の値は岩石の種類によっても異なることが知られている。これは、上述の静的条件および動的条件における供試体強度と微視的強度分布との関係を考慮すると、微視的強度分布の均一性係数の小さいほど、すなわち、微視構造が不均一な岩石ほど動的条件と静的条件における供試体強度平均値の比の値が大きくなると解釈することができる。

5. 結 言

本論文では、ホプキンソン効果を用いた動的試験と

静的な一軸引張試験を想定して、岩石の破壊プロセスを有限要素法を用いて数値解析的に検討し、動的強度と静的強度の相違とその影響因子について考察した。得られた知見をまとめると以下のものである。

- (1) ホプキンソン効果による岩石の破壊プロセスを解析し、解析された自由端変位速度波形は実験結果と良く対応することを確認した。
- (2) ホプキンソン効果実験および静的な一軸引張試験における岩石の破壊プロセスは明瞭に異なることを明らかにし、これらの相違は応力集中および応力再配分のメカニズムから説明されることを指摘した。
- (3) ホプキンソン効果を用いた動的試験において評価される供試体強度は、解析に用いられたひずみ速度の条件では微視的強度の平均値に対応すること、静的な一軸引張試験において評価される供試体強度は、微視的強度の最小値よりもわずかに大きな値に対応することを明らかにし、微視的強度の不均一性が動的条件と静的条件における供試体強度の相違を生じさせる一要因であることを指摘した。

なお、本報では触れなかったが、動的条件における供試体強度のひずみ速度(応力速度)依存性の解釈については、稿を改めて報告する予定である。また、動的条件と静的条件において供試体強度の相違を生じさせる他の要因についての考察も今後の課題としたい。

文 献

- 1) 伊藤一郎, 工業火薬協会誌, 29, 246-268 (1968)
- 2) 川口尊三, 佐々宏一, 伊藤一郎, 日本鉱業会誌, 92, 657-662 (1976)
- 3) 馬 貴臣, 三宅淳巳, 小川輝繁, 和田有司, 緒方雄二, 瀬戸政弘, 勝山邦久, 火薬学会誌, 59, 49-56 (1998)
- 4) 丁佑鎮, 三宅淳巳, 小川輝繁, 歌川 学, 和田有司, 緒方雄二, 瀬戸政宏, 勝山邦久, 資源・素材学会春季大会講演集(I)資源編, 177-178 (1999)
- 5) 佐野 修, 材料, 37, 152-158 (1988)
- 6) 勝山邦久, 緒方雄二, 和田有司, 工業火薬, 53, 181-192 (1992)
- 7) 金子勝比古, 松永幸徳, 山本雅昭, 火薬学会誌, 56, 207-215 (1995)
- 8) 佐藤一志, 高橋秀明, 橋田俊之, 文部省科学研究費補助金重点領域研究「フラクタルと抽熱」平成7年度研究成果報告書, 41-46 (1996)
- 9) 佐藤泰夫, 「弾性波動論」, P.454 (1978), 岩波書店
- 10) D.E.Grady and M.E.Kipp, Int. J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 293-302 (1979)

- 11) 金子勝比古, 小池克明, 文部省科学研究費補助金
重点領域研究「フラクタルと抽熱」平成6年度研
究成果報告書, 37-42 (1995)
- 12) 趙顯, 大久保誠介, 堀井勝則, 資源と素材, 111,

907-912 (1995)

- 13) 大久保誠介, 趙顯, 資源と素材, 110, 109-114
(1994)

Dynamic strength of rock

Masaji KATO*, Yoshiki KAWAKAMI**, Tetsuro YONEDA*, Katsuhiko KANEKO*
Yuji WADA***, Yuji OGATA*** and Kunihisa KATSUYAMA****

Assuming dynamic tensile fracture based on Hopkinson's effect and static tensile fracture using an uniaxial tension test, fracturing processes of rocks were numerically analyzed by using two-dimensional Finite Element Method. The results obtained in this study are as follows:

(1) The displacement velocity wave of the free surface simulated was consistent with that obtained in an experiment based on the Hopkinson's effect.

(2) From the analyses, it was found that there existed the difference of tensile fracturing processes between the dynamic fracture based on the Hopkinson's effect and the static fracture under uniaxial tension. That difference was due to the mechanism of stress concentration and redistribution.

(3) The failure strength of specimens estimated by the analyses assuming dynamic fracture based on the Hopkinson's effect agreed with the mean value of microscopic strength with the strain rate (approximately 100 /s) used in the study. On the other hand, the failure strength of specimens estimated by the analyses assuming static fracture using an uniaxial tension test agreed with slightly high value of minimum microscopic strength. It was shown that inhomogeneity of the microstructural strength of rocks was a factor causing the difference of specimen strengths under dynamic and static loading conditions.

(*Division of Environment and Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628, Japan

**Division of Environment and Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University (Present: Komatsu Factory, Komatsu Corporation), Sapporo 060-8628, Japan

***Department of Safety Engineering, National Institute of Resources and Environment (NIRE), 16-3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053, Japan

****Department of Geotechnology, NIRE, 16-3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053, Japan)