

## 岩石の動的引張強度のひずみ速度依存性に関する 数値解析的検討

趙 祥鎬\*, 野原清香\*, 金子勝比古\*

ホプキンソン効果による岩石の動的引張試験の数値解析を行い、動的引張強度のひずみ速度依存性のメカニズムについて考察した。ホプキンソン効果による岩石の破断面形成は亀裂群の発生・連結および選択的成長という、複雑な過程を経ていることが確かめられた。破断面位置の局所ひずみ速度の増大に伴って動的引張強度は増大すること、その結果として、供試体自由端の変位速度から算定される見かけひずみ速度に動的引張強度は依存すること、などを明らかにした。不均質の程度により、動的引張強度のひずみ速度依存性は異なり、見かけひずみ速度の増大に伴う動的引張強度の増加率は、均一性係数の増大に伴って低下することを明らかにした。動的応力場の変化と亀裂の進展プロセスとの関係を分析し、ひずみ速度が高い場合には、多くの微視亀裂が発生するが、それらの亀裂の伸長が抑制されるため、破断面が形成されにくくなること、その結果として、評価される引張強度の値が大きくなることを明らかにした。

### 1. 緒言

近年、高度な制御発破技術の要求が高まってきているが、これを実現するためには、岩石の動的破壊現象に影響を及ぼす様々なファクターを解明することが不可欠である。特に、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。一般に、動的載荷における岩石強度はひずみ速度や応力速度に依存し、ひずみ速度の増大に伴って岩石の強度も増大することが知られている。このため、通常の方法試験機で測定される強度は静的強度と呼ばれ、ホプキンソン効果を用いた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。そして、動的強度と静的強度は異なり、動的強度は静的強度よりも大きいこと、動的強度・静的強度ともにひずみ速度に依存するが、その依存性の程度は両者で異なることなどが知られている。ここで、前者の動的強度と静的強度の相違の問題に関しては、加藤ら<sup>1)</sup>は静的試験と動的試験の数値実験から、この相違は岩石の不均一性に起因していると報告している。しかしながら、後者の問題、すなわち、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言い難い。

そこで、本論文では、ホプキンソン効果による岩石の動的引張試験のシミュレーションを種々のひずみ速度の条件で実施するとともに、それらの結果に基づいて、動的引張強度のひずみ速度依存性のメカニズムについて考察する。

### 2. 強度のひずみ速度依存性

一例として、岩石の静的・動的引張強度に関する丁ら<sup>2)</sup>による実験結果を示すと Fig.1 のようである。図は、ひずみ速度の増大に伴って引張強度は増大するが、ひずみ速度 $10^{-6} \sim 10^{-1} (s^{-1})$ 、いわゆる静的強度の領域と $10^{-1} \sim 10^2 (s^{-1})$ 、いわゆる動的強度の領域ではその増加率が異なり、動的強度の増加率が大き

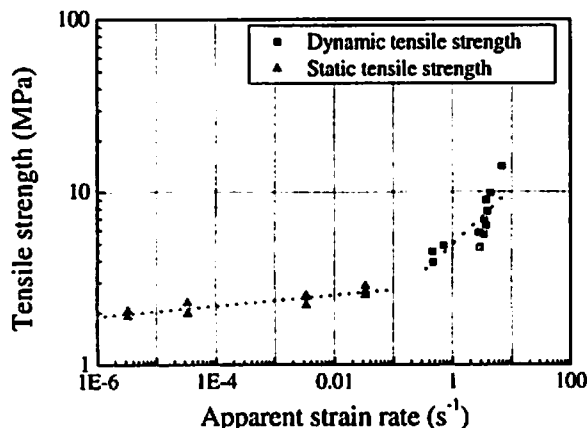


Fig.1 Experimental tensile strength plotted against strain rate (after Jung et al.<sup>2)</sup>)

2003年1月21日受付  
 2003年2月24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  
 E-Mail csh0724@netian.com

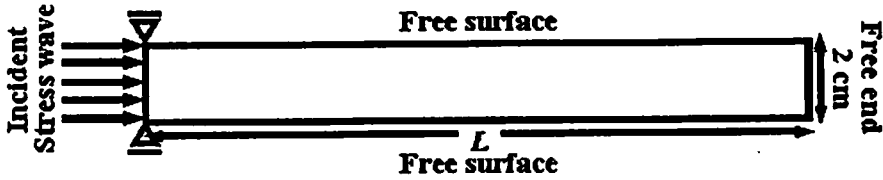


Fig.2 Geometry of model subjected to dynamic loading

いことを示している。

ここで、静的強度の領域におけるひずみ速度依存性は岩石内潜在亀裂先端における応力腐食による亜臨界亀裂伸長に起因すると解釈されている<sup>3)</sup>。この説では、亜臨界亀裂伸長における亀裂伸長速度が亀裂先端の応力状態に依存することが前提となっているが、通常の環境下の応力腐食現象では潜在クラック先端における水の存在が不可欠であることから、亀裂の進展速度が水の拡散速度以上では亀裂伸長速度は亀裂先端の応力状態には無関係に拡散速度のみに依存した一定値となる<sup>3)</sup>。したがって、この静的強度のひずみ速度依存性を説明するメカニズムを、ある程度以上のひずみ速度の領域に拡張することは困難であると考えられる。言い換えれば、図に示す動的領域における顕著なひずみ速度依存性は静的領域とは別のメカニズムが存在していることを示唆している。

Table 1 Parameters for the analysis model

P-wave velocity $C_p$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	4382
Density $\rho$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	2500
Elastic modulus $E$ (GPa)	40
Poisson's ratio $\nu$	0.25
Average compressive strength $S_c$ (MPa)	50
Average tensile strength $S_t$ (MPa)	4
Fracture energy $G_f$ ( $Pa \cdot m$ )	0
Coefficient of uniformity $m$	5, 50 and $\infty$
Q value <sup>3)</sup>	100
Time step $\Delta t$ ( $\mu s$ )	0.02

### 3. 数値解析法および解析モデル

岩石の動的破壊プロセスや破壊形態は、ある種の確率的な性質を有していることが知られている。この破壊の確率的性質は主として岩石物性の不均一性に依存する。ここで、岩石の微視構造を考えると、外部から一様な応力を作用させても内部の応力は非一様となり、さらに、微視的な欠陥の存在を考えれば、強度も不均一となると考えられる。したがって、微視的スケールで破壊を考えた場合には、応力の不均一性と強度の不均一性の両者を考慮する必要があるが、その理論的取り扱いが極めて困難である。そこで、不均質材料を  $n$  個の微小要素の集合体とモデル化し、微小要素  $j$  ( $j = 1 \sim n$ ) の応力と強度をそれぞれ  $\sigma_j$ ,  $S_j$  と表すと、微小要素の破壊条件は  $S_j / \sigma_j$  の値により与えられることになる。したがって、すべての微小要素の平均応力を  $\sigma$  と表し、さらに、 $S_j / \sigma_j = S_j^* / \sigma$  となるような値  $S_j^*$  を考えると、 $S_j^*$  は応力を均一と仮定した場合の微小要素  $j$  の見かけの強度を表すことになる。そこで、以下では、この見かけの強度を微視的強度として用いることにした。また、ホプキンソン効果による破壊は、自由端からの反射波により自由端付近に発生する引張応力に起因した引張破壊面の生成と考えられるが、上記の微視的破壊を考慮すると、微視的な引張亀裂の発生・伸長により分離面が形成される現象であると解釈される。そこで、数値解析法としては、強度不均一性と亀裂の発生・進展を考慮した2次元動的有限要素法<sup>3)</sup>を採用した。すなわち、引張破壊は要素境界辺に発生するものと仮定し、亀裂の発生・連結・伸長を要素境界辺の分離で表現した。微視的引張強度はそ

Table 2 Analysis models under dynamic loading

Model	Length of specimen (cm)	Peak pressure (MPa)	Rising time $t_R$ ( $\mu s$ )	Decay time $t_L$ ( $\mu s$ )
Type I	20	20	1	50
Type II	30	18	1	70
Type III	40	16	1	90
Type IV	50	14	1	110

の不均一性を考慮して、Weibull 分布を用いて要素境界辺に与えた。特に、一様乱数列から Weibull 乱数列を求め、これにより境界辺強度を与えている。各物性値および解析条件は Table 1 に示した通りである。なお、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。

解析モデルは Fig. 2 に示すような長方形モデルで、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た。ここで、ひずみ速度を変化させるためには、衝撃荷重の最大値、立上がり時間および継続時間を変化させた解析を行う必要があるが、これに伴って反射引張応力波の波長や振幅が変化するため、相応に供試体長さを変化させる必要が生じる。これは、高いひずみ速度の実験には短い供試体が、低い場合には長い供試体が用いられることと同じである。そこで、モデル寸法は厚さ 2 cm で、長さを  $L = 20, 30, 40, 50$  cm と変化させたが、これらのモデルは全て縦横 1 mm の三角形要素に分割した。また、衝撃波の問題においてはその衝撃波の Peak 値が高くなるほど波長が短くなるのが良く知られていることから、左端に作用させる衝撃荷重をそれぞれの長さに対して Table 2 のように与え、それを図にすると Fig. 3 のようになる。図中の  $t_r$  は立上がり時間、 $t_d$  は減衰時間を表している。なお、モデルの節点数・要素数はモデル長さにより異なり、初期節点数 4221 ~ 10521、要素数 8000 ~ 20000 である。また、それぞれの寸法のモデルに対して均一性係数  $m = 5, 50$ 、無限大の条件で解析を行ったが、特に、 $m = 5, 50$  のときは乱数系列を変えた微視的強度空間分布の異なる各 10 ケースについて解析を行った。ここで、 $m = 5$  は比較的不均質な場合、 $m = 50$  は比較的均質な場合を表しており、 $m$  が無限大は均質な場合を表している。参考のため、均一性係数  $m = 5$  および  $m = 50$  の解析モデルにおける微視的引張強度分布を Fig. 4 (a) および (b) に示す。

解析結果における動的引張強度とひずみ速度の算定には、馬ら<sup>9)</sup>の方法を採用した。すなわち、動的引張強度  $S_D$  は次式のように与えられる。

$$S_D = \rho C_p \frac{v(t_p) - v(t_p + 2\Delta t)}{2}$$

ここで、 $v(t_p)$  は自由面における最大変位速度、 $\Delta t$  は反射応力波の自由端から破断面までの伝播時間であり、自由端から破断面までの距離を弾性波速度で除することによって求めた。 $v(t_p + 2\Delta t)$  は破断時の自由端における変位速度、 $\rho$  は岩石の密度、 $C_p$  は弾性波速度である。

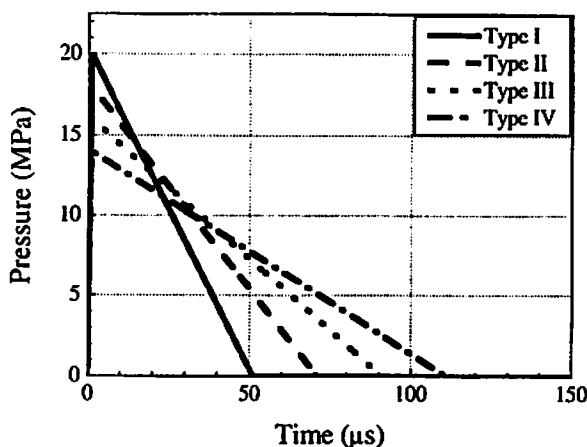
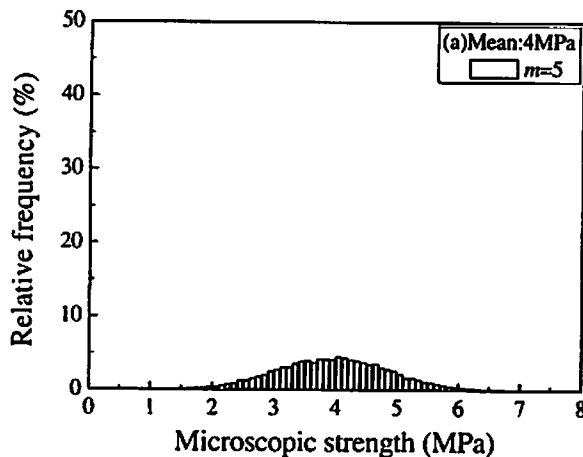
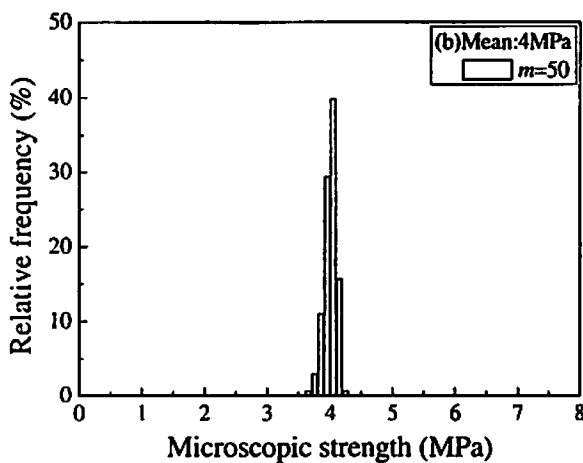


Fig.3 Pressure-time curves for incident stress waves



(a)  $m = 5$



(b)  $m = 50$

Fig.4 Distribution of microscopic tensile strength when (a)  $m = 5$  and (b)  $m = 50$

また、見かけひずみ速度  $\dot{\epsilon}_a$  は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_a = \frac{\int_0^{t_p} 0.5 v(t) dt}{L}$$

$$\dot{\epsilon}_a = \frac{\dot{\epsilon}}{t_p}$$

ここで、 $\epsilon_a$  はひずみ、 $L$  は供試体長さ、 $t_p$  は最大変位速度時の時間、 $v(t)$  は変位速度の関数である。

ここで、上記のひずみ速度は供試体自由端の変位速度と供試体の長さから定義された量であり、通常の静的試験におけるひずみ速度の定義を動的試験に拡張使用したものである。本論文では、このように算出されたひずみ速度を見かけひずみ速度と呼ぶことにする。

通常、動的試験では供試体内の応力・ひずみは一樣ではなく、波動の進行に伴って変化する。したがって、ひずみ速度や応力速度は供試体内で大きく異なる。そこで、上記の見かけひずみ速度とは別に、以下に示すような供試体の断面ごとのひずみ速度を定義することとした。一例として Fig. 5 に破壊が起こらない条件での Type II における幾つかの断面における軸方向応力の平均値の時間変化を示したが、この図において、応力波が圧縮応力から引張応力になった後の引張応力波の最大接線勾配から、ある断面における応力速度  $\sigma$  を求め、この応力速度  $\sigma$  から  $\sigma = E\dot{\epsilon}$  (ただし、 $E$ : ヤング率) の関係を用いて、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  を求めた。このように、破断面の位置の応力速度から評価したひずみ速度を見かけひずみ速度と区別して局所ひずみ速度と呼び、 $\dot{\epsilon}_l$  で表すことにする。

#### 4. 解析結果および考察

##### 4.1 ひずみ速度依存性

解析結果から、加藤ら<sup>1)</sup>の結果と同様に、モデル自由端付近において、反射引張応力波の伝播に伴って軸に垂直な方向の亀裂群が順次生成し、そのうちのいくつかが連結あるいは伸長して完全な破断面を形成する様子が見られた。ここで、解析結果の一例として、Type II で均一性係数  $m$  が 5 の条件において、乱数列が異なる場合(すなわち、微視的強度の空間分布が異なる場合)の破断面位置を Fig. 6 (a)~(j) に示す。図は全て衝撃荷重が作用してから 110 $\mu$ s 後の時刻における亀裂の進展状態を表し、図中の三角形は破断面の位置を表している。なお、破断面位置は断面を貫通する亀裂面が最初に形成された位置である。この解析結果より得られた  $m = 5$  の場合の見かけひずみ速度と動的引張強度との関係を Fig. 7 (a) に示す。図中の記号の相違は Type I~IV に対応している。

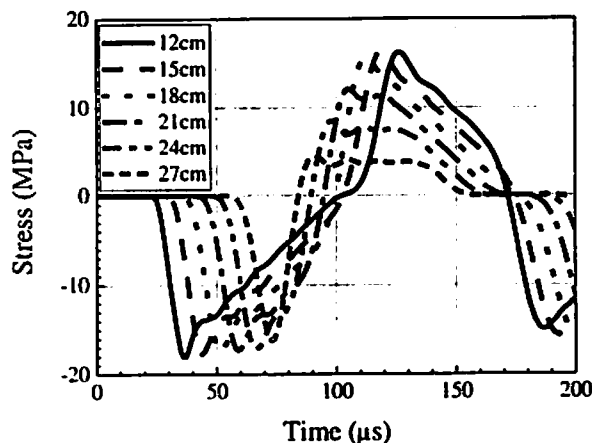


Fig.5 Stress-time curves along with a distance from the left side of specimen

図から、見かけひずみ速度の増加に伴い、動的引張強度が増大していることが分かる。更に、見かけひずみ速度が増加するとともに、動的引張強度のばらつきが大きくなっている傾向も確認できる。したがって、Fig. 1 に示した動的条件における実験結果の傾向が再現されており、動的引張強度は見かけひずみ速度に依存しているということが示された。

また、局所ひずみ速度と動的引張強度との関係を Fig. 7 (b) に示す。図中の記号に関しては (a) と同様である。Fig. (b) も (a) と同様の傾向を示しており、更に定義から当然のことながら、局所ひずみ速度のほうが見かけひずみ速度よりも大きな値となっていることが分かり、約 2~6 倍程度の値となっている。更に、Fig. 7 (b) においては、供試体長さが同じ場合でも、微視的強度の空間分布の違いによって局所ひずみ速度への依存が見られる。これは、供試体長さおよび入射圧力波形が一定の条件では、自由端から破断面までの距離により局所ひずみ速度が変化することに関係している。また、Fig. 7 (a) と (b) を比較すると、見かけひずみ速度が一定の場合でも破断面位置における局所ひずみ速度は異なることが分かる。この結果は、実験結果の整理の仕方によりひずみ速度依存性の傾向やばらつきが異なることを意味している。更に、動的強度のひずみ速度依存性のメカニズムを議論する場合には局所ひずみ速度で結果を整理する必要があることを示している。

##### 4.2 不均一性の動的引張強度に及ぼす影響

$m = 50, \infty$  それぞれの場合の見かけひずみ速度と動的引張強度関係図を Fig. 8 (a), Fig. 9 (a) に、局所ひずみ速度と動的引張強度関係図を Fig. 8 (b), Fig. 9 (b) に示す。Fig. 7 (a) と Fig. 8 (a), Fig. 9 (a) を比較

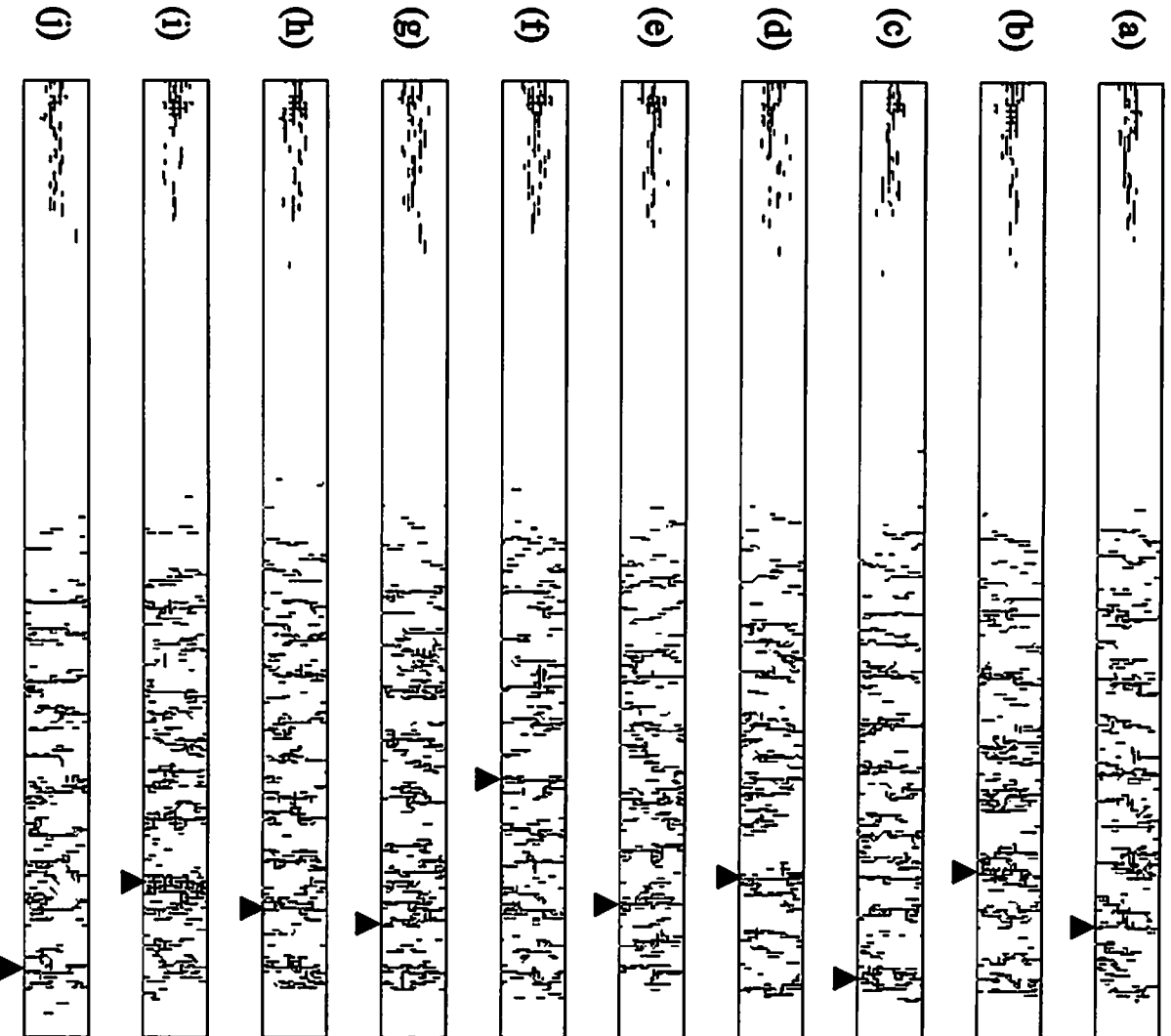
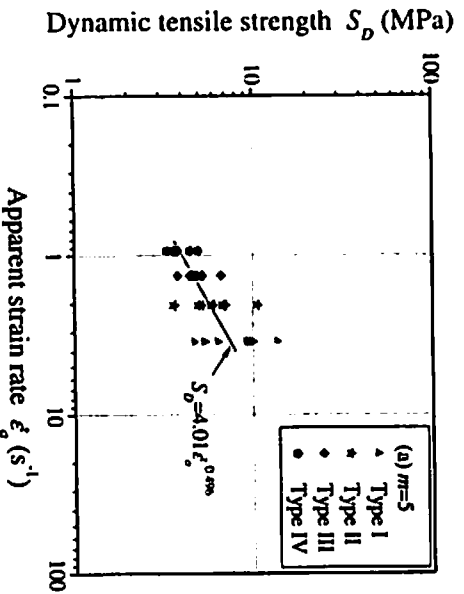
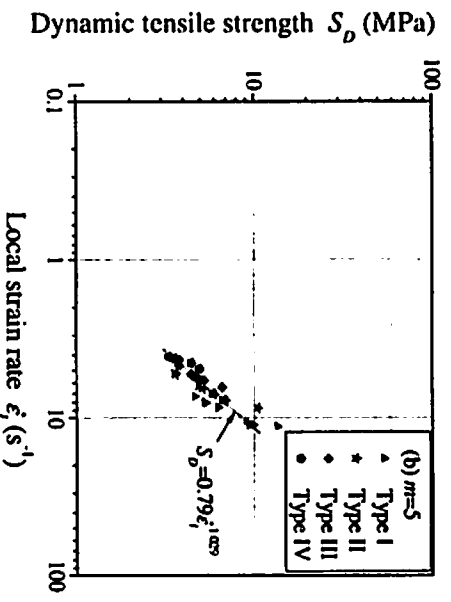


Fig.6 Fractures and crack patterns with the differences of spatial microscopic strength



(a) apparent strain rate



(b) local strain rate

Fig.7 Dynamic tensile strength plotted against

(a) apparent strain rate and (b) local strain rate when  $m = 5$

すると、不均質性の程度により、動的引張強度のひずみ速度依存性は異なることが分かる。つまり、見かけひずみ速度の増加に伴う動的引張強度の増加率は  $m$  の増大に伴って低下していると言える。また、Fig. 8 (a) を Fig. 7 (a) と比較すると、より均質な均一性係数  $m=50$  の場合は、 $m=5$  の場合に比べて動的引張強度のばらつきが小さくなっていることが分かる。同様の傾向が Fig 8 (b), Fig. 9 (b) において見られ、局所ひずみ速度も見かけひずみ速度と同様の傾向を示していることが確認できる。更にここで、Fig. 8 (b) に関して、供試体長さ毎の傾きは定義から Fig. 7 (b) と同じとなるが、見かけひずみ速度と同様に動的引張強度のばらつきが小さくなっているため全体の傾きも小さくなった。

ただし、Fig. 9 を見ると、 $m$  が  $\infty$  の場合(すなわち均質な場合)でも動的引張強度の値は一定値にはならず、ひずみ速度の値により若干異なることがわか

る。特に、ひずみ速度が高くなると引張強度に変動が見られるが、このときの破断面位置はモデル厚さの1~1.5倍程度の条件に相当する。したがって、この条件における動的引張強度の変動は表面波(今回の解析条件では板波<sup>2)</sup>に相当する)の影響であると考えられる。この表面波が断面の応力に及ぼす影響は、Fig. 5 において応力波の Peak 後に少し振動が認められること、後出 Fig.10 において自由端付近で波面が平面とならずに曲面となることなどから確認できる。なお、今回の計算条件で生成した表面波の波長は厚さの2倍程度であったことから、自由端から破断面までの距離が比較的小さい時には表面波の影響が現れてきたと考えることができる。また、この結果は、Fig. 7, Fig. 8 の結果にも表面波の影響が含まれていることを示唆するが、Fig. 9 と Fig. 7, Fig. 8 とを比較すれば、表面波の影響はひずみ速度が強度に及ぼす影響に比較して小さいと考えることができる。

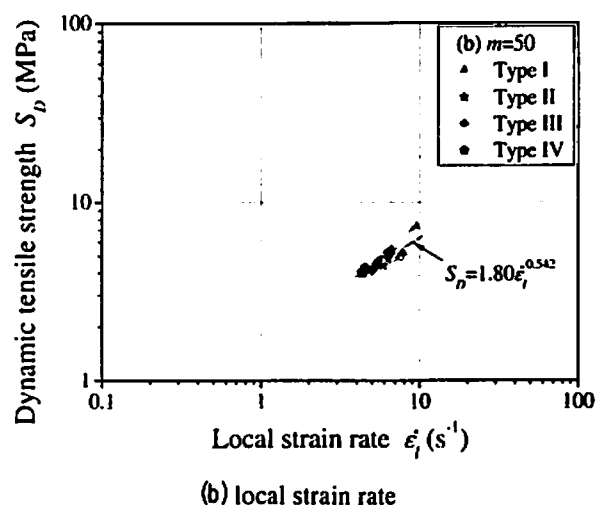
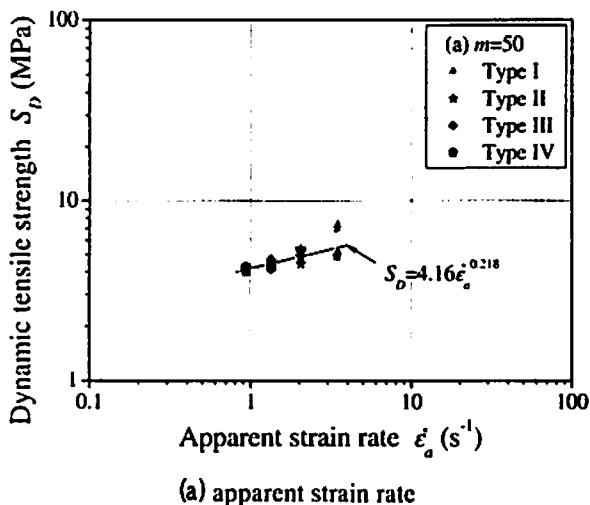


Fig.8 Dynamic tensile strength plotted against (a) apparent strain rate and (b) local strain rate when  $m=50$

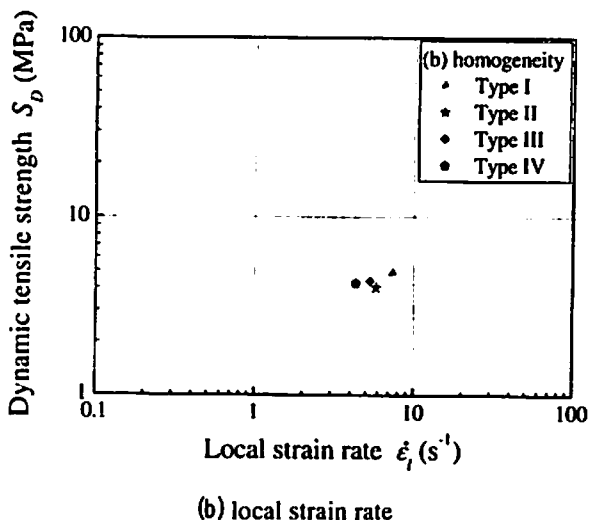
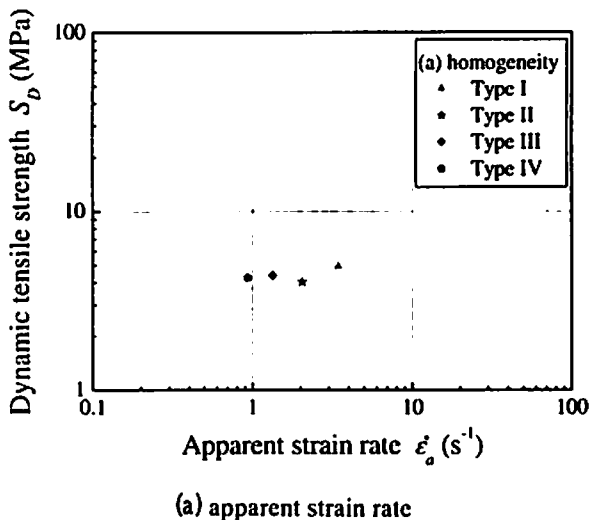


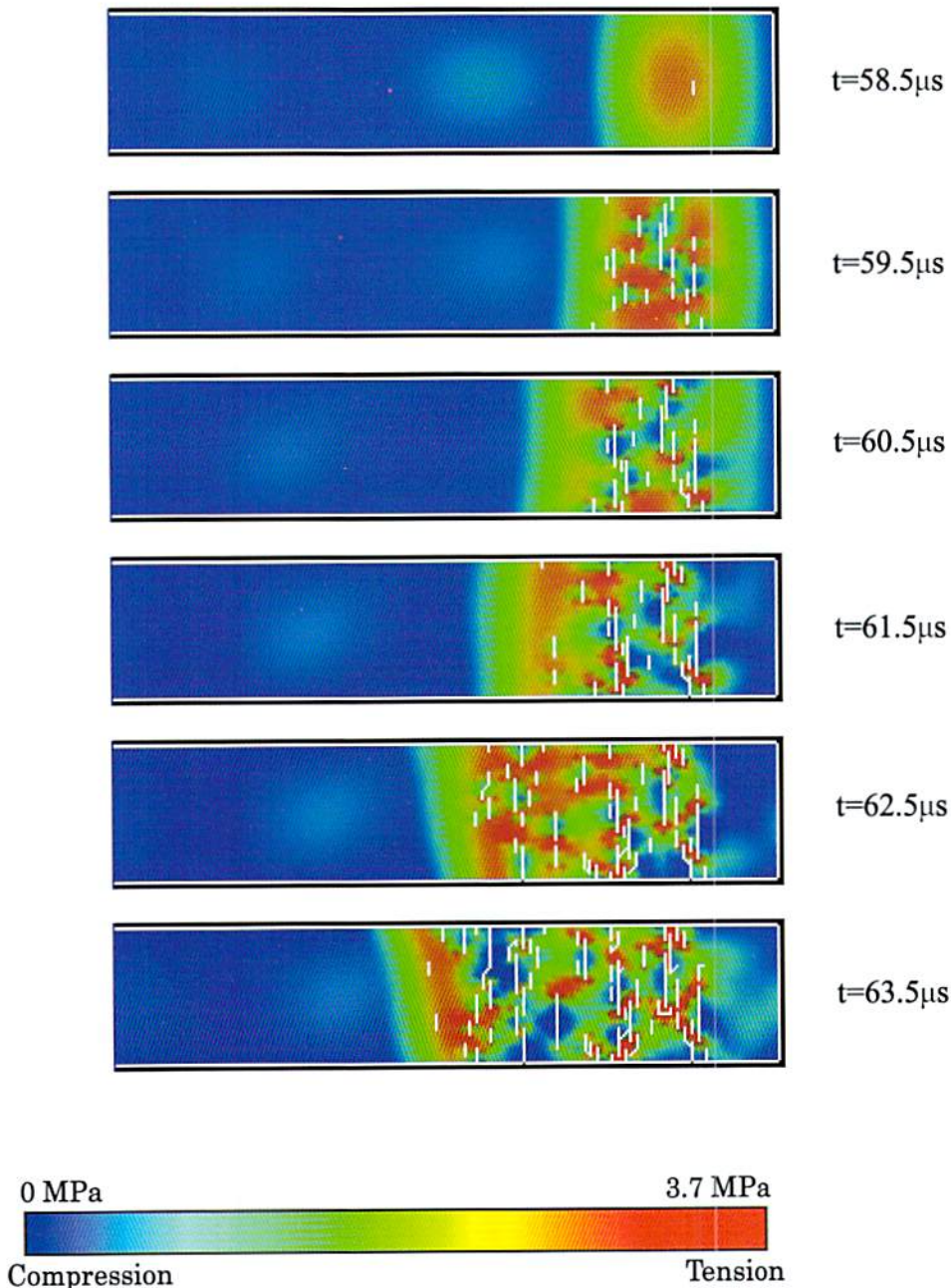
Fig.9 Dynamic tensile strength plotted against (a) apparent strain rate and (b) local strain rate when  $m=\infty$

以上の結果から、動的引張強度のひずみ速度依存性、すなわち、強度平均値と分散のひずみ速度依存性は、岩石の微視的強度の不均一性に起因すると考えることができる。更に、Fig.1 に示したような実験におけるひずみ速度と動的引張強度との関係から、用いられた岩石の動的条件部分の傾きは0.321であるから、均一性係数が  $m=5\sim50$  の中間程度に相当すると解釈することができる。

4.3 ひずみ速度の動的引張強度に及ぼす影響

加藤ら<sup>1)</sup>は、静的一軸引張試験とホプキンソン効

果実験の数値実験を行い、動的引張強度は静的引張強度より大きくなること、その比の値は不均一性の増大に伴って増大することを示している。すなわち、静的試験では供試体内の応力は一様であるため、供試体中で微視的強度が低い場所に破壊が発生する。これに対し、動的試験では応力波により荷重を行うため、ひずみ速度が高くなると応力波の波長が短くなり、破壊を生じさせる応力集中領域が狭くなる。この応力集中領域の寸法効果が、供試体の動的強度は静的強度より大きくなる一因であると説明している。また、微視亀裂発生による応力場の変化がその



(a) Type I and

Fig.10 Crack nucleation, propagations and intersections and maximum principal stress distribution: (a) Type I and (b) Type IV



後の破壊プロセスに与える影響も一因と指摘しているが、この問題に関しては十分には解明されていない。すなわち、動的試験における破壊の進展プロセスの複雑さを考慮すると、動的応力場の変化と亀裂の進展プロセスの分析に基づくより詳細な検討が必要であると思われる。

そこで、ひずみ速度の相違が破壊の進展プロセスに及ぼす影響を検討するために、ひずみ速度が高い場合と低い場合の例として、Type I と Type IV の各時刻における最大主応力分布と亀裂進展状態を Fig.10 (a), (b) に示す。ただし、ともに自由端から

10cm までの領域を  $1\mu\text{s}$  の時間間隔で示している。図より、反射波の進展に伴って引張応力の集中域が進行し、これに伴って微視亀裂が発生・伸長していくが、亀裂の進展プロセスはひずみ速度によって顕著に異なることが分かる。すなわち、ひずみ速度が高い場合には亀裂の数は多いが亀裂の長さや間隔は短いこと、ひずみ速度が低い場合には亀裂の数は少ないが亀裂の長さや間隔は長いことが分かる。これは、ひずみ速度が高くなると生成する亀裂の数は多くなるが、生成した亀裂が伸長しにくいこと、言い換えれば、亀裂の発生頻度が高いほど亀裂の伸長に

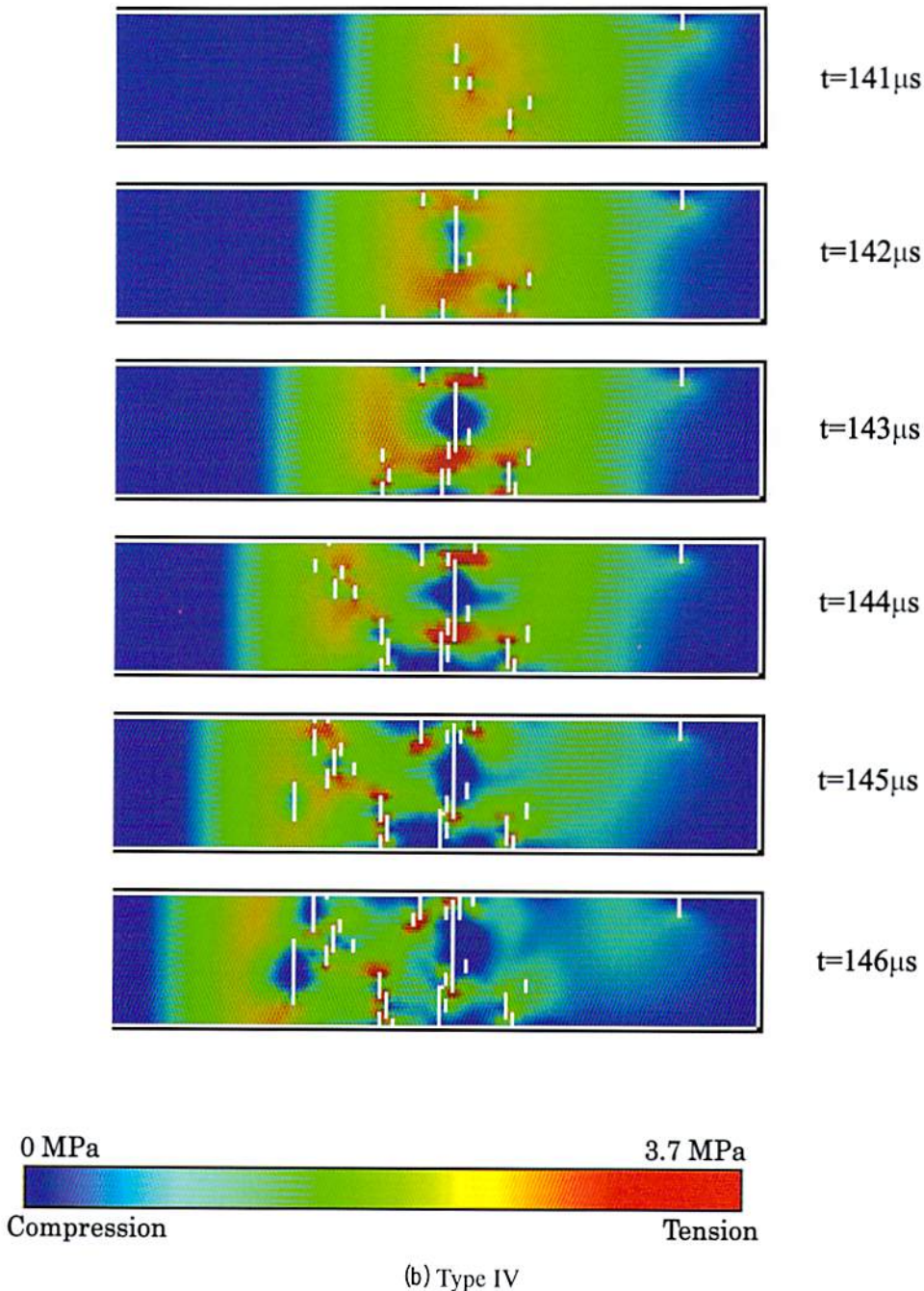


Fig.10 Crack nucleation, propagations and intersections and maximum principal stress distribution: (a) Type I and (b) Type IV



対して抑制効果が現れることを示している。

この問題を考えるために、まず、亀裂の生成・伸長に伴う応力場の変化を詳細に見ると、亀裂先端には引張応力の集中が、亀裂の側面には引張応力の解放が起きることが分かる。特に、後者の引張応力の解放現象を時間の進行に伴って見ていくと、この引張応力解放域は亀裂面の両側に拡大していくことが分かる (Fig.10 (b) に典型例が示されている)。これは亀裂側面における引張応力の解放現象は亀裂面をソースとした圧縮応力波の伝播と考えれば理解しやすい。そして、この応力解放は、生成・伸長した亀裂の側面周囲に新たな亀裂の生成や伸長を抑制させる効果を示すことになる。

次に、微視的強度のばらつきを考慮すると、引張応力集中域においては微視的強度と応力の比の値が低い場所から順番に亀裂が生成することになるため、それぞれの亀裂の生成時刻には応力速度に応じた時間差が存在することになる。ひずみ速度が高い場合には、当然、応力の増加速度が高くなるため、この時間差は短くなる。そして、この時間差の間に、最初の亀裂による応力解放領域は拡大するが、時間差が短い場合には応力解放領域も狭くなる。したがって、亀裂生成の抑制効果が現れる領域が狭いため、多くの亀裂が発生すると解釈することができる。このようにして複数の亀裂が生成するが、これら隣接する亀裂相互の位置関係を見ると、互いに並列となるようなものは少なく、大略千鳥状となっていることが分かる。これは先行した亀裂の側面近傍には後続の亀裂生成に対する抑制効果が現れていることを示している。そして、複数の亀裂が千鳥状に発生すると、時間の進行に伴って、互いの亀裂伸長に対する抑制効果が現れてくる。したがって、ひずみ速度が高い場合は、亀裂の発生数は多いが、亀裂の長さは短くなる。

ホブキンソン効果において強度評価の対象となる破断面は、微視亀裂の伸長・連結により形成されると考えると、微視亀裂の伸長が抑制される場合には、破断面は形成されにくくなると考えられる。したがって、上記の考察に基づくと、ひずみ速度が高いほど破断面は形成されにくくなる。この場合は、時間の経過に伴って、より高い応力が作用する領域 (自由端からより離れた領域) において破断面が形成されることになる。これらの結果として、ひずみ速度が高い場合は、評価される引張強度の値は大きくなることと解釈することができる。

以上のように、ホブキンソン効果実験により評価される動的引張強度はひずみ速度に依存することが

説明される。しかし、動的応力変化と亀裂進展プロセスとの関係を考慮すると、評価される動的引張強度は打撃端に作用させる圧力波形にもある程度関係してくることが予想される。また、本文中にも示したように、供試体内の応力波は理想的な平面波ではなく表面波も伴うため、評価される動的引張強度には表面波の影響も含まれることになる。これらの影響評価は今後の課題であるが、実験により評価される動的引張強度には、これら複数の因子の影響が含まれている可能性が示唆される。

## 5. 結 論

本論文では、ホブキンソン効果による岩石の動的引張試験の数値解析を行い、動的引張強度のひずみ速度依存性のメカニズムについて考察した。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) ホブキンソン効果による岩石の破断面形成は亀裂群の発生・連結および選択的成長という、複雑な過程を経ている。
- (2) 破断面位置の局所ひずみ速度の増大に伴って動的引張強度は増大すること、その結果として、供試体自由端の変位速度から算定される見かけひずみ速度に動的引張強度は依存すること、などを明らかにした。
- (3) 不均質の程度により、動的引張強度のひずみ速度依存性は異なり、見かけひずみ速度の増大に伴う動的引張強度の増加率は、均一性係数の増大に伴って低下することを明らかにした。
- (4) 動的応力場の変化と亀裂の進展プロセスとの関係を分析し、ひずみ速度が高い場合には、多くの微視亀裂が発生するが、それらの亀裂の伸長が抑制されるため、破断面が形成されにくくなること、その結果として、評価される引張強度の値が大きくなることを明らかにした。

## 謝 辞

本研究を行なうにあたり、動的引張破壊現象においてご意見を頂いた産業技術総合研究所開発安全工学研究グループの緒方雄二博士に深く感謝します。

## 文 献

- 1) 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, 火薬学会誌, 60, 240 (1999)
- 2) 丁 佑鎮, 緒方雄二, 和田有司, 瀬戸政宏, 勝山邦久, 小川輝繁, 土木学会論文集, 673, 53-59 (2001)

- 3) 佐野修, 材料, 37, 152 (1988)
- 4) O. L. Anderson, and P. C. Grew, Rev. Geophys. Space Phys., 15, 77 (1977)
- 5) 金子勝比古, 松永幸徳, 山本雅昭, 火薬学会誌, 56, 207 (1995)
- 6) 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 (1998)
- 7) 佐藤泰夫, 「弾性波動論」, pp.92-97 (1978), 岩波書店



## Numerical approach for strain rate dependency on the dynamic tensile strength of rock

Sang Ho Cho<sup>\*</sup>, Sayaka Nohara<sup>\*</sup>, and Katsuhiko Kaneko<sup>\*</sup>

From previous research<sup>1)</sup>, it was revealed that the inhomogeneity of rock is a factor causing the difference of the dynamic and static strength in tension. It is, however, insufficient to verify the reason why the dynamic tensile strength increases with increasing rate of strain. In this study, to investigate the strain rate dependency of dynamic tensile strength, the fracture processes for varying strain rate with changing the length of specimen and loading conditions were conducted. From these analyses, it can be concluded that the dynamic tensile strengths increase in increasing local strain rate at fracture plane and the strength increase causes apparent strain rate dependency of the strength. The coefficient increase of uniformity stimulates the reduction of strain rate dependency, i.e., the strain rate dependency of dynamic tensile strength is caused by inhomogeneity of rock. To discuss the fracture formation for various strain rates, fracture process and principal stress field in the specimen at a high and low strain rate were analyzed. The higher strain rate generated a large number of microcracks, but the formation of fracture plane is interfered by the interaction of microcracks. In conclusion, the dynamic tensile strength increase at a high strain rate is caused by the crack arrest due to the generation of a large number of short microcracks.

(<sup>\*</sup>Division of Environment and Resources Engineering Graduate school of Engineering, Hokkaido University Sapporo 060-8628, JAPAN TEL +81-11-706-6325 FAX +81-11-706-6325 E-Mail csh0724@netian.com)

---