

動的引張強度の載荷速度依存性に関する研究

Study on the loading-rate dependency of dynamic tensile strength

○趙 祥鎬*, 中村裕一**, 金子 勝比古***

Sang-Ho CHO, Yuichi NAKAMURA, Katsuhiko KANEKO

*工博 COE研究員 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

**工博 教授 八代工業高等専門学校土木建築工学科(〒861-8501 熊本県八代市平山新町2627)

***工博 教授 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

キーワード：ホプキンソン効果, 動的圧裂引張試験, 動的引張強度, ひずみ速度依存性
(Hopkinson's effect, dynamic Brazilian tensile strength, dynamic tensile strength, strain-rate dependency)

1. はじめに

本研究では動的破壊現象で主とした破壊メカニズムである引張破壊に関係する動的引張強度について検討することにした。まず、ホプキンソン効果による岩石の動的引張試験に関して、種々のひずみ速度の条件で数値解析的検討するとともに、それらの結果に基づいて、動的引張強度の載荷速度およびひずみ速度依存性のメカニズムについて考察する。また、動的圧裂引張試験に関する数値解析的検討をして、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ことにした。

岩質材料の動的強度はひずみ速度に依存し、ひずみ速度の増大に伴って増大することが知られているが、そのメカニズムは十分に解明されていない。筆者らは、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実施し、これにより実験結果(例えば、丁ら¹⁾)の傾向が再現されることを示した²⁾。しかし、現象の複雑さに比較して解析条件が限定されていたことから、メカニズムの議論には至らなかった。そこで、静的強度との関係を含めて解析条件を検討するとともに、解析結果の分析法についても検討し、それらの結果に基づいて、動的破壊プロセスと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。

また、問題は大きく異なるが、ジェットミルのような粉碎機では、高速運動する粒子を衝突させて粉碎させるが、このような場合も粒子の高速な変形によって破壊すると考えることができる。これらの破壊現象の特徴は、動的破壊であるとともに、極めて高速な変形により複雑な圧縮・引張の複合破壊が起きている点である。このような動的複

合破壊に影響を及ぼす様々な要因を検討することはこれらの現象の解明に不可欠であるが、動的破壊現象は極めて高速かつ複雑な現象であるため、特に実験などでは得られる情報が限られているのが現状である¹⁾。そこで、本研究では動的載荷で行なう圧裂引張試験のシミュレーションを行ない、不均質材料における動的引張強度の載荷速度依存性のメカニズムについて考察する。

2. ホプキンソン効果による岩石の動的引張強度のひずみ速度依存性

2.1 数値解析法および解析モデル

数値解析法は既報²⁾と同様に、強度不均一性と亀裂の発生・進展を考慮した二次元有限要素法³⁾を用いた。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の不均一性を考慮し、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。また、岩石物性値は、P波速度: 4.38km/s、S波速度: 2.53km/s、密度: 2500kg/m³、平均引張強度: 4MPaと与えた。

解析モデルは図1に示すような長方形モデルであるが、モデル寸法は厚さを2cmとし、長さを $L=20,30,40,50$ cmと変化させた。更に、ひずみ速度を変化させるために、入射圧力波形をそれぞれの長さに対して図2のように与えた。また、全ての条件に対して均一性係数 $m=5,50$ の条件で、乱数系列を変えた微視的強度空間分布の異なる各10ケースのモデルを作成した。

解析結果からの動的引張強度の算定法は、馬ら⁴⁾の方法を用いた。同様にひずみ速度も自由端変位速度から算出したが、以下ではこのひずみ速度を見かけひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a$ と呼ぶことにする。また、これと区別して、破断面の位置の応力速度から評価したひずみ速度を局所ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_l$ と呼ぶことにする。

2.2 引張強度のひずみ速度依存性

まず、動的解析と同一のモデルを用いて静的一軸引張試験のシミュレーションを行った。その結果、静的引張強度は $m=5$ の場合 $2.11 \pm 0.067 \text{MPa}$ 、 $m=50$ の場合 $3.57 \pm 0.052 \text{MPa}$ と算定された。次に、動的解析による解析結果から得られた $m=5$ の場合の見かけひずみ速度および局所ひずみ速度と動的引張強度との関係を図 3 に示す。ただし、図では動的強度 S_D を対応する静的強度 S_S で正規化して示している。なお、図中の記号の相違は各モデル長さに対応している。動的強度は静的強度より大きいこと、ひずみ速度の定義に関わらずその増大に伴って動的強度は増大すること、局所ひずみ速度の方が見かけひずみ速度よりも大きな値となることなどが分かる。また、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が、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。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。図 3 より、解析したひずみ速度の範囲内では、 $m=5$ の場合のひずみ速度と動的引張強度との関係は次のように与えられる。

$$S_D/S_S = 1.90\dot{\epsilon}_a^{0.496} = 0.37\dot{\epsilon}_l^{1.029}, \quad m=5$$

そこで、 $m=50$ の場合の解析結果も同様に整理すると、次のようになった。

$$S_D/S_S = 1.17\dot{\epsilon}_a^{0.218} = 0.50\dot{\epsilon}_l^{0.542}, \quad m=50$$

これらの結果から、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、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。なお、同様に動的引張強度のばらつきも m の増大に伴って小さくなっていることが確認されている。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。

2.3 ひずみ速度が破壊プロセスに及ぼす影響

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、 $L=20\text{cm}$ と $L=50\text{cm}$ の各時刻における最大主応力

分布と亀裂進展状態を図 4(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、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対して抑制効果が現れることを示している。特に、図 4 は、亀裂伸長の抑制効果は、亀裂の発生・伸長による応力解放プロセスに密接に関係していることを示している。亀裂の伸長が抑制されると、強度評価の対象となる破断面は形成されにくくなるため破断面位置はより高い応力が作用する場所(自由端からより遠距離)に移動する。従って、ひずみ速度が高いほど破断面は形成されにくくなり、評価される引張応力の値は大きくなる。

3. 動的圧裂引張実験に関する数値解析と動的圧裂引張強度の荷重依存性

3.1 高速荷重圧裂引張試験

本研究では中村ら(2000)が考案した高速荷重圧裂引張試験機⁵⁾を用いた。高速圧裂荷重におけるモルタル供試体の動的破壊挙動を高速ビデオカメラで観察し(図 5 参照)、荷重履歴をロードセルにより測定した(図 6 参照)。高速ビデオカメラでは 11Frame 目で鉛直方向の亀裂が供試体の中心線上に認められた。しかし、荷重・時間曲線では 5Frame 目に相当する時刻で曲線の勾配が変化している。これらの実験結果は、荷重・時間曲線の勾配が変化する 5Frame 目では亀裂の開口量が高速ビデオカメラの分解能以下であったことを示唆している。また、その後破壊が進行していき高速ビデオカメラによって亀裂が観測できた 11Frame 以降で荷重が減少したのは、亀裂の発達・開口に伴って供試体が 2 つに分離し、荷重が開放されたからであると考えられる。表 2 より、動的と静的それぞれの圧裂引張試験での結果を比較すると、動的のほうが約 2.3 倍の荷重に耐えることができ、強度の速度依存性があるといえる。ただし、表 2 における引張強度は静的条件における算定式から求め、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、破断面垂直方向の応力速度 $\dot{\sigma}$ から $\dot{\sigma} = E\dot{\epsilon}$ (ただし、 E :ヤング率、 20GPa)の関係を用いて求めた。

3.2 数値解析法

前章において、高速圧裂引張試験の概要を示したが、これをシミュレートするためには試験片の幾何形状および力学的特性とともに、動的荷重条件を考慮した動的応力解析により、破壊の進展プロセスをコンピュータ上に再現さ

せる必要がある。そこで、この問題に適用可能な動的応力解析法として有限要素法を採用し³⁾、これに高速載荷圧裂引張試験をシミュレートするための各種機能を付加させた。特に、本解析では、亀裂面過剰閉合の対処法として節点バネ法 (NSM) を新たに導入した。また、載荷条件としては表面力 (節点力) 境界条件が通常用いられているが、この境界条件では、載荷面における応力波の反射が表現できない。そこで本解析では変位加速度境界条件を新たに採用し、これにより載荷面の変位を制御した。

3.3 高速載荷圧裂引張試験における破壊シミュレーション

解析モデルの物性値は表 2 のように設定した。ここで、弾性係数 E 、 ν は P 波速度 C_p 、S 波速度 C_s および密度 ρ より算出された値である。実験における供試体の設置方法を考慮し、モデル外周の境界条件はすべて自由面、下端では垂直方向に変位を固定させ、上端で圧縮変位を与えた。また、表 3 に示すように破壊を考慮しない場合と、不均質の程度の異なる 2 種の条件で破壊を考慮に入れた場合のそれぞれについて立ち上がり時間が 5000, 2000, 1000 μ sec の合計 9 通りの解析を行なった。

高速載荷圧裂引張試験の破壊メカニズムを解析する前に、供試体が破壊しない場合の応力状況などを理解しておく必要がある。ここでは、CASE I-1~3 において圧縮強度と引張強度の値を高くすることにより圧縮破壊と引張破壊が起こらないように設定した。中心線上における垂直方向と水平方向応力曲線を図 7 に、中心線上の σ_{yy}/σ_{xx} を図 8 に示す。ただし、グラフにおける A~I 点は図 7 に示す通りである。図 8 を見てみると、高速載荷圧裂引張試験における応力状態は供試体中央部では静的な状態とさほど変わらないが、供試体上端 (特に、載荷初期の段階) では静的な状態と異なることが分かる。

以上の前提のもとに、まず、比較的均質な材料を想定し、均質性係数が 20 の場合 (CASE II-1~3) の破壊プロセスを解析した。図 9 および 10 には CASE II-1 での圧縮破壊と引張破壊状態および荷重・時間曲線を示した。これらの結果から、供試体上端に圧縮破壊が起きた後、中心線上に引張亀裂が生成すること、そして、供試体下端に圧縮破壊が起きた頃に荷重・時間曲線に降伏挙動が現れることがわかる。また、解析された荷重・時間曲線は実験による荷重・時間曲線と類似していることがわかる。次に、実験に用いたモルタルを想定して、均一性係数 5 の条件で解析を行い、これら全ての結果を表 4 にまとめた。表より、動的圧裂引張強度の荷重速度の依存性が認められた。

3.4 動的引張強度の載荷速度依存性

動的圧裂引張試験における載荷速度が引張強度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、圧縮破壊と亀裂進展状態を図 11(a),(b)に示す。これらの結果から、載荷速度が遅い場合は供試体に中央部に引張亀裂が生成した後、供試体上端に圧縮破壊が起きること、また、供試体下端の圧縮破壊が起きる。そして、供試体上下端の圧縮破壊と引張亀裂が繋がるようになる。

載荷速度が早い場合は供試体上端に圧縮破壊が起きた後、引張亀裂が上端から生成し、下向き進展していく。最後には供試体上下端の圧縮破壊と引張亀裂が繋がることとなる。従って、動的圧裂引張試験では複雑な圧縮・引張の複合破壊が起き、これが動的圧裂引張の載荷速度依存性に影響を及ぼす要因として考えられる。

4. おわりに

ホプキンソン効果による岩石の動的引張試験に関する数値解析から、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が、この傾向は、動的応力場の変化と亀裂の進展プロセスとの関係から分析される。すなわち、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り、その結果として、評価される引張強度の値が大きくなる。

動的圧裂引張試験に関する数値解析から得られた結果を以下に示す。1) 高速変位載荷の動的破壊解析モデルを構築した。2) 高速載荷圧裂引張試験の応力分布は供試体中央部では静的なものと同様と変わらない。3) 高速載荷圧裂引張試験では供試体上下端の圧縮破壊と供試体中央部の引張破壊に時差があり、これらの破壊域が連結した時に荷重・時間曲線に降伏挙動が現れる。4) 高速載荷圧裂引張試験で強度の載荷速度依存性が認められた。

参考文献

- 1) 丁ら(2001) : 土木学会論文集, No.673,pp.53-59
- 2) 趙ら(2003) : Sci. and Tech. Energetic Materials, Vol.64,No.2,pp.87-96
- 3) 金子ら(1995) : 火薬学会誌, Vol.56,No.5,pp.207-215
- 4) 馬ら(1998) : 火薬学会誌, Vol.59,No.2,pp.49-56
- 5) 中村祐ら(2000) : 火薬学会誌, Vol.61,pp.273-280

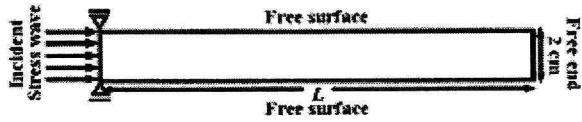


図1 解析モデル

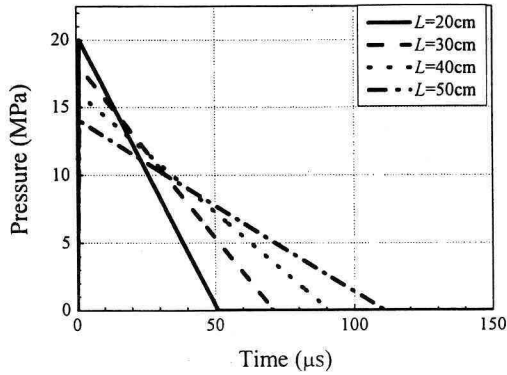


図2 入射圧力波形

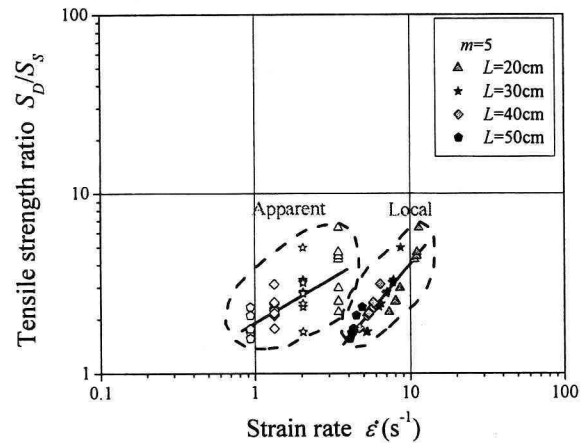


図3 ひずみ速度と動的引張強度の関係($m=5$)

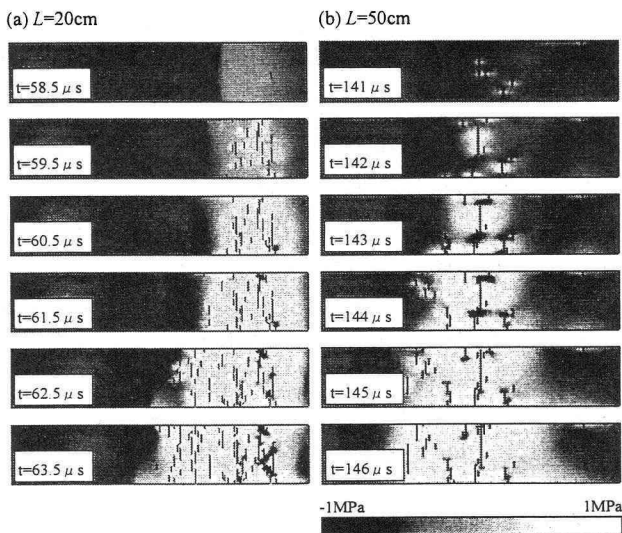


図4 最大主応力分布および亀裂の進展状態

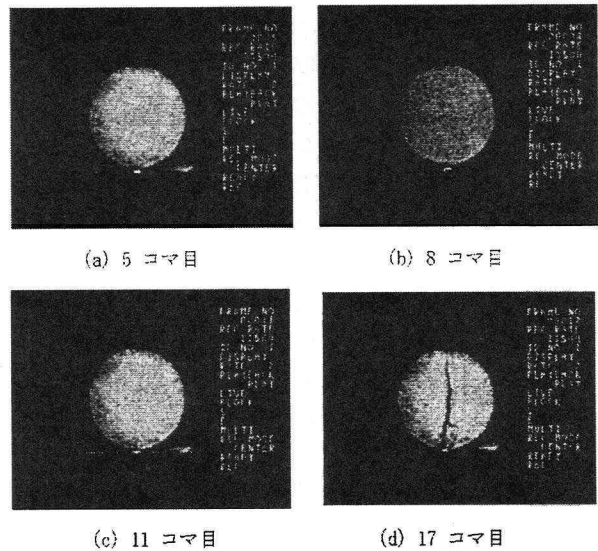


図5 高速度ビデオカメラの静止画像 (13500frame/sec)

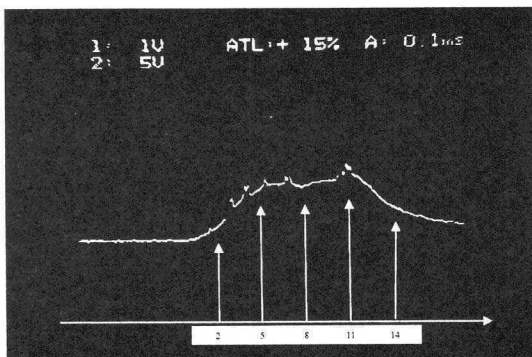


図6 ロードセル波形

表1 動的試験結果

実験番号	No. 2	*静的試験の平均値
荷重速度 (μs)	196	
最大荷重 (N)	28400	12421.5
引張強度 (MPa)	6.28	2.75
載荷速度 (N/s)	144.9×10^6	23.65
ひずみ速度 (sec^{-1})	1.56	

表3 解析条件

	均一性係数 (m)	Tmax (μ sec)
CASE I-1		5000
CASE I-2	破壊を考慮しない	2000
CASE I-3		1000
CASE II-1		5000
CASE II-2	20	2000
CASE II-3		1000
CASE III-1		5000
CASE III-2	5	2000
CASE III-3		1000

表2 モデル物性値

P波速度 C_p ($m \cdot s^{-1}$)	3770
S波速度 C_s ($m \cdot s^{-1}$)	2179
密度 ρ (kg/m^3)	2170
ヤング率 E (GPa)	25.7
ポアソン比	0.25
圧縮強度 (MPa)	27.4
引張強度 (MPa)	2.73

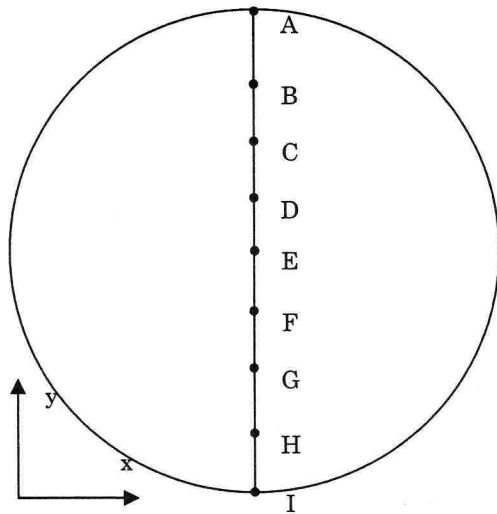


図7 解析モデル上の計測位置 (A~I点)

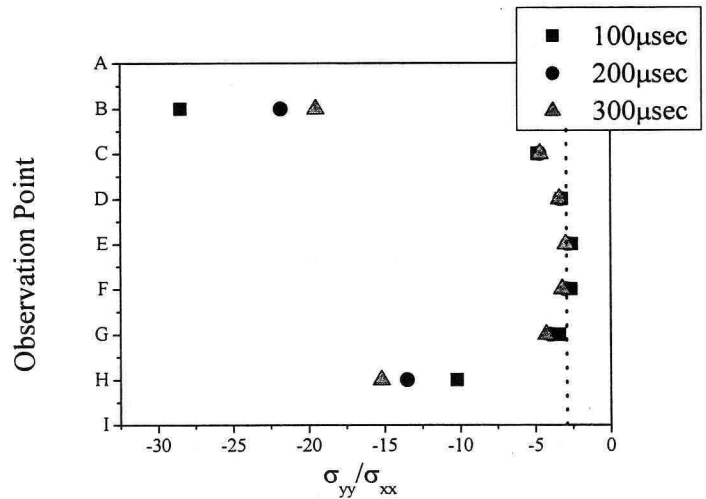


図8 中心線上の σ_{yy}/σ_{xx} (CASE I-1)

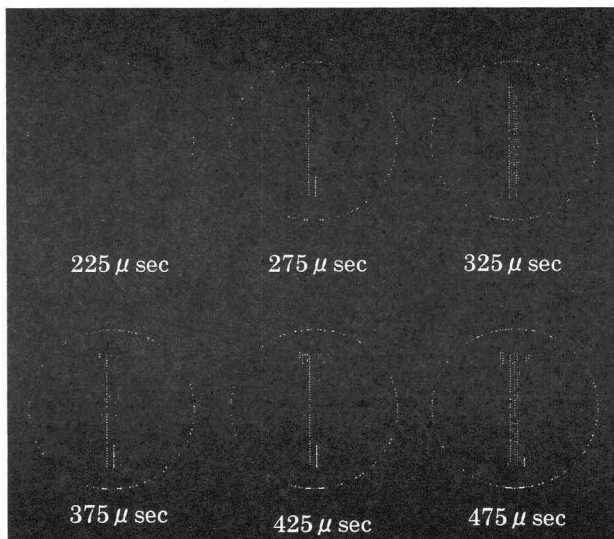


図9 圧縮破壊された領域 (CASE II-1)

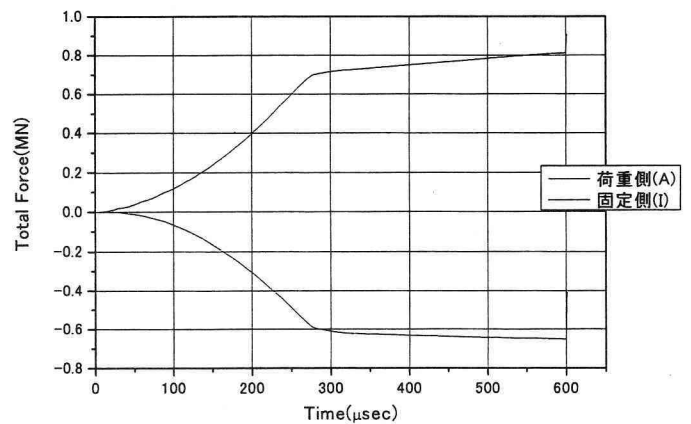


図10 荷重 - 時間曲線 (CASE II-1)

表4 解析結果

	均一性係数 (m)	立上り時間 (μ sec)	破壊時の荷重 (MN)	破壊までの時間 (μ sec)	強度 σ_t (MPa)	ひずみ速度 (sec^{-1})
CASE I-1	破壊を考慮 しない	5000	/	/	/	/
CASE I-2		2000	/	/	/	/
CASE I-3		1000	/	/	/	/
CASE II-1	20	5000	0.59	280	3.76	0.52
CASE II-2		2000	0.6	170	3.82	0.87
CASE II-3		1000	0.75	85	4.77	2.19
CASE III-1	5	5000	1.07	375	6.81	0.71
CASE III-2		2000	1.03	170	6.56	1.50
CASE III-3		1000	1.12	110	7.13	2.52

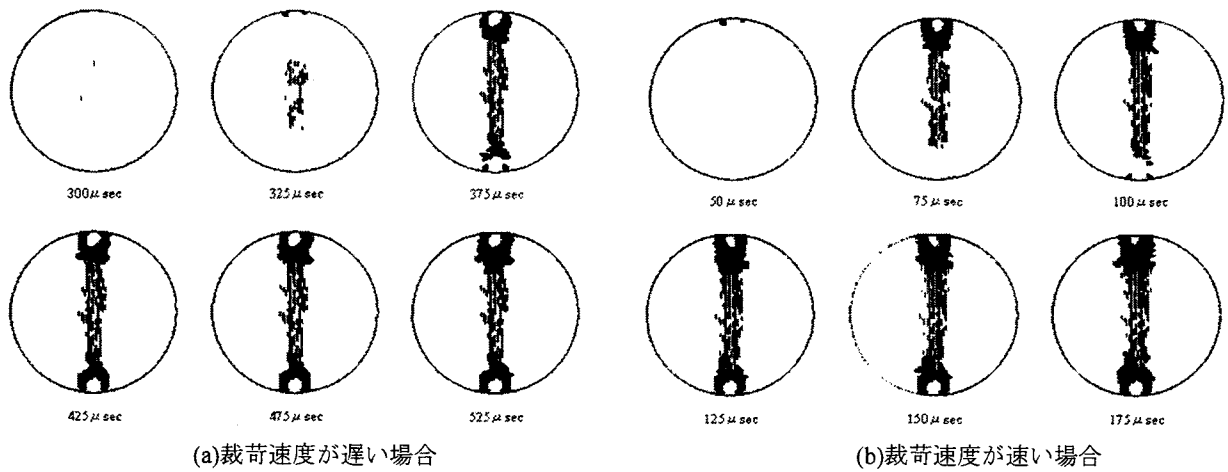


図11 圧縮破壊と亀裂の進展状態