

## ホプキンソン効果による応力速度が大きい場合の材料の引張強度

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\*\*\*\*

応力速度が大きい場合の材料の引張強度を、ホプキンソン効果実験により検討した。ここでは精密雷管による爆轟衝撃を直径20mm、長さ200~700mmの棒状試験片の一端に加え、他端で反射して生じる引張応力によって破断する際の自由面の変位速度を計測するとともに高速度カメラによって破断位置を確認した。また異なる長さの試験片を用いた実験により、各材料中を伝播する応力波の減衰特性を求めた。さらに、これまでの引張強度の求める方法と異なり、破断面の応力と時間との関係を算出することにより材料の引張強度を求めた。

その結果、各材料の応力波の減衰指数は、大理石：0.39、砂岩：0.61、花崗岩：0.46、モルタル：0.51、凝灰岩：0.58と求められた。さらに、応力波のピーク値の減衰特性を考慮した材料の引張強度は、圧裂実験によって得られた静的引張強度と比べ、1.2倍~3.3倍の大きな値を示すことが明らかになった。

## 1. 緒 言

発破作業は、鉱山・土木の分野では欠くことのできない作業であり、また最近では老朽化したビルの解体<sup>1,2)</sup>など、建築の分野でも注目を集めている。発破による破壊現象を検討する場合、発破時の岩盤、コンクリート内の応力状態として、岩盤中を伝播する応力波による動的な応力状態と、ガス圧の作用下における静的な応力状態の両方を考えなければならない。しかし、現状では実験的にも数値解析的にも両者を同時に解析することは困難である。

特に、数値解析的に発破現象を解析し、現象を理解しようとする場合、対象となる材料の強度が問題とな

る。従来の研究<sup>3~6)</sup>では、発破現象の数値解析には、材料の破壊評価に静的な強度が多く利用されている。しかし、材料の強度と応力速度との関係の研究については、動的応力下での材料の強度と静的な強度とはその値が大きく異なることが指摘されており<sup>7~10)</sup>、特に、岩石の引張強度については、Bacon<sup>15)</sup>、Rinehart<sup>16)</sup>、Tincelin<sup>17)</sup>及び日野<sup>18)</sup>等のホプキンソン効果を用いた実験報告例がある。日野による大理石の破壊実験は、四角柱試験片の一端に爆薬の衝撃を加え、破壊された破片の速度より、岩石中を伝播している応力波の値を予測し、岩石の引張強度を求めた。また、Baconは、細い針金によって高架の支持台から吊られた長い岩石コアの端に鮮明なパルスの形でエネルギーを与える振子を用いて、岩石の引張強度を求めた。また、Rinehartは、雷管の衝撃を約2.54cm厚さで数cmの長さの岩石供試体に加え、他端に予め貼ってある小球の投げだし速度を測定することにより、岩石の引張強度を求めた。これらの研究は岩石の引張強度の予測法としては有効であるが、ホプキンソン効果で破断した場合、応力波の波長及びピーク値を求めることが困難で、正確な値を得ることは難しかった。また、破断時の破断面における岩石内の引張応力の時間的変化を正確に予測していなかった。

本研究では、精密雷管の爆発による円柱状の棒の一端に衝撃圧を加え、他端の変位速度をレーザー振動計を用いて計測し、同時に高速度カメラにより破断面の位置を測定した。本法はこれまでの引張強度を求める

1997年10月23日受理

\*横浜国立大学工学部物質工学科

現在：応用地質株式会社

〒330-8632 埼玉県大宮市土呂町2-61-5

TEL 048-665-1811

FAX 048-667-9250

\*\*横浜国立大学工学部物質工学科

〒240-0067 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

TEL 045-339-3993

FAX 045-339-4011

\*\*\*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

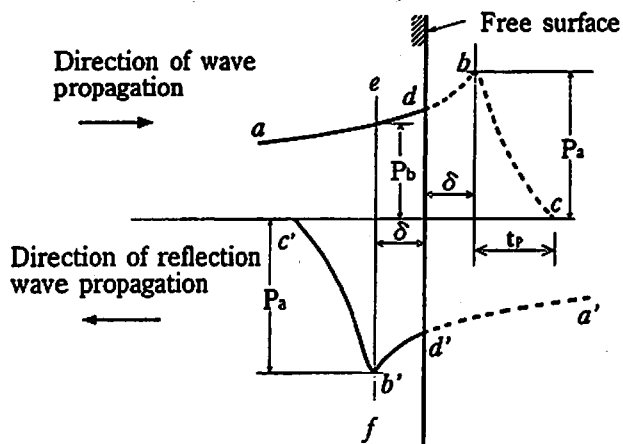
FAX 0298-58-8558

\*\*\*\*資源環境技術総合研究所地殻工学部

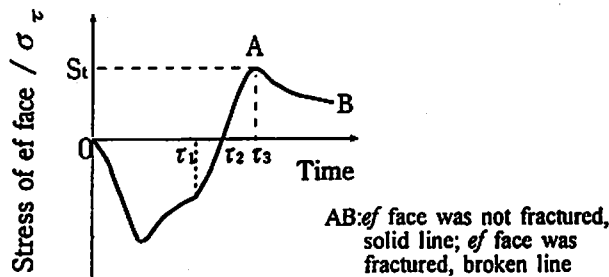
〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8500

FAX 0298-58-8508



(a) Conceptual diagram of Hopkinson's effect



(b) Stress-time history of ef face

Fig. 1 A schematic diagram of Hopkinson's effect  
 $t_p$ : Rise time of wave

方法と異なって、自由面の変位速度及び破断面の位置により、発破における試験片破断時の破断面における岩石内の引張応力を算出し、岩石の引張強度を求めるものであり、したがって、応力波の全波長が分からなくても引張強度を求めることができるという利点を有している。ここでは異なる長さの試験片を用いた実験により減衰を伴う応力波の伝播特性を求め、5種類の材料について応力波の減衰を考慮した引張強度を求めた。さらに、各種材料の引張強度と応力速度の関係について検討したので報告する。

## 2. 計算方法

### 2.1 岩石の引張強度

ホプキンソン効果による岩石の引張強度の算出方法概念図をFig. 1に示す<sup>7,10)</sup>。物体中を伝播していく応力波をFig. 1(a)上側に示した波形とし、波頭応力を $P_a$ とする。圧縮応力波が自由面を通過した後、応力波は自由面で反射して引張応力波となり、 $d'b'c'$ の位置にまで引き返してくる。このとき岩石内の応力は反射引張応力波 $d'b'c'$ と岩石内で伝播している圧縮応力波 $ad$ との合成値になる。

Fig. 1(a)に示した自由面に平行な破断面 $ef$ における各時刻の応力は、同じ時刻に岩石中を伝播する圧縮応力波により面 $ef$ に作用する圧縮応力と、自由面で反射

した引張応力波によって作用する引張応力との合成値になる。Fig. 1(b)に $ef$ 面における応力の時間変化を示す。Fig. 1(b)において $\tau=0$ は岩石中を伝播してきた圧縮応力波が面 $ef$ に到達した瞬間であり、 $\tau=\tau_1$ は自由面で反射してきた引張応力波が面 $ef$ に到達した瞬間を示している。ここで面 $ef$ から自由面までの距離を $\delta$ とすると、圧縮応力波の面 $ef$ から自由面までの伝播時間及び、反射応力波の自由面から面 $ef$ までの伝播時間 $\Delta t$ はいずれも式(1)で表せる。

$$\Delta t = \frac{\delta}{c_p} \quad (1)$$

ここで、 $c_p$ は縦波の伝播速度である。したがって、Fig. 1(b)に示した時刻 $\tau_1$ は $2\Delta t$ に等しいことが分かる。また、Fig. 1(b)に示したように、 $\tau=\tau_2$ は面内応力が圧縮から引張に変わった時刻、 $\tau=\tau_3$ は反射引張応力波のピークが面 $ef$ に到達し、引張破壊をした時刻である。岩石中を伝播する応力波の立ち上がり時間を $t_p$ とすると、 $\tau_3$ は式(2)で求められる。

$$\tau_3 = 2\Delta t + t_p \quad (2)$$

ここで $ef$ 面内引張応力が引張強度に等しいとすると、材料は自由面に平行に板状に破断され、破片が飛び出すことになる。この引張応力が材料の引張強度に相当すると考える。

### 2.2 減衰を考慮しない場合の岩石内の応力の算出

ある物体の中を縦波が伝播していく場合に伝播方向に作用する応力波は一般にFig. 1(a)に示す波形と見なすことができる。この場合、自由面に到達する前に物体中の任意の点において応力波面に直角方向に作用する応力の大きさは応力波の伝播を一次元と仮定すると式(3)で表される<sup>7)</sup>。

$$\sigma = \rho c_p v \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ は岩石の密度、 $v$ は応力を求めようとする点の粒子速度である。尚、ここでは $c_p$ の値は一定とした。

物体中を伝播していく応力波が自由面に直角に入射する場合、自由面に入射する応力波、自由面で反射した反射応力波及び自由面を通過して空気中へ投射される応力波の波内粒子速度及び応力を、それぞれ $v_i$ 、 $v_r$ 、 $v_t$ 及び $\sigma_i$ 、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_t$ とすると、それらの関係は

$$v_i = v_t/2 \quad (4)$$

$$v_r = v_i \quad (5)$$

$$\sigma_r = -\sigma_i = -\rho c_p v_i/2 \quad (6)$$

と表すことができる<sup>20)</sup>。これより、減衰を伴わない自由面に直角に入射する圧縮応力波及び、自由面で反射

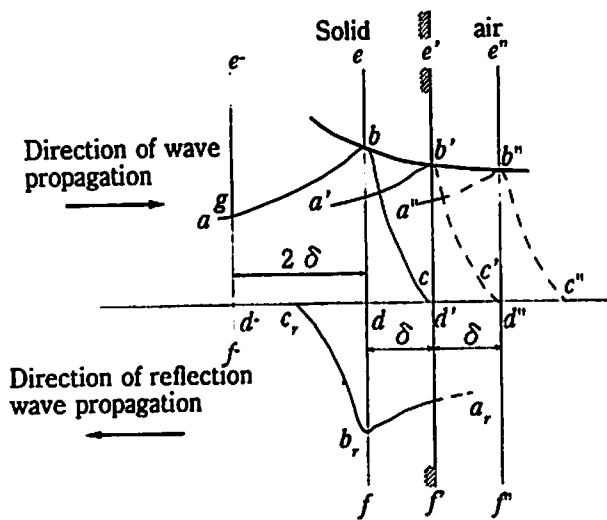


Fig. 2 A schematic diagram of stress wave attenuation

した反射応力波は自由面の変位速度波形より求められる。

### 2.3 減衰を伴う場合の破断面応力の算出

一般に、物体中で応力波の伝播に伴って生じる応力の大きさは、伝播距離の大きさに従って減衰し、応力波の波長も変化する。この程度の伝播状態では、応力波の波長は変化しないが、応力の大きさの減衰は考慮すると仮定して破断面の応力を考察した。

Fig. 2は物体中で応力波の伝播に伴って生じる応力の大きさの減衰を示したものである。図に示したように、いま $ef, e'f', e''f''$ という応力波の進行方向と垂直な3つの断面を考え、 $abc, a'b'c', a''b''c''$ をそれぞれの断面を通過する応力波とすると、曲線 $bb'b''$ が応力波のピーク応力値をつなぐ減衰曲線となる。

ここで、Fig. 2に示した断面 $e'f'$ を自由面とすると、 $abc$ は断面 $ef$ を通過する圧縮応力波であって、 $a, b, c$ は断面 $ef$ を通過する反射引張応力波と考えられる。したがって、断面 $ef$ での応力は、圧縮応力値 $gd'$ と引張応力値 $b, d$ との合成値 $(brd-gd')$ となる。

Fig. 2に示した3つの断面を通過する応力波のピーク応力の間には次の(7)および(8)式で表される。

$$k_1 = bd/b'd' \quad (7)$$

$$k_2 = b''d''/b'd' \quad (8)$$

ここで、 $k_1, k_2$ は補正係数である。式(5)及びFig. 2により、反射応力波が破断面に到達した瞬間と圧縮応力波が破断面に到達する瞬間との時間差は $2\Delta t$ である。実験における破片の厚さを $\delta$ とすると、反射応力波の自由面から破断面までの伝播時間 $\Delta t$ は式(1)で求められるから、破断面の応力と時間との関係は、破断面に最初の入射圧縮波が到達した時間を $\tau = 0$ とすると、

$$\sigma(\tau) = k_1 \rho c_p \frac{v(\tau)}{2} \quad (\tau < 2\Delta t) \quad (9)$$

$$\sigma(\tau) = \rho c_p \frac{k_1 v(\tau) - k_2 v(\tau - 2\Delta t)}{2} \quad (2\Delta t \leq \tau \leq 2\Delta t + t_p) \quad (10)$$

式(9)は反射応力波が破断面に到達する前の破断面の応力と時間の関係を示し、式(10)は反射応力波が破断面に到達した後の破断面の応力と時間の関係を示している。

## 3. 実験

### 3.1 試料

実験には直径20mm、長さ190mm~700mmの大理石、砂岩、花崗岩、モルタル及び凝灰岩の5種類の材料を用いた。試験片は温度105℃で24時間乾燥後、さらに、24時間真空ポンプで脱気乾燥したものを用いた。Table 1に試験片の寸法及び物性値を示す。また、5種類の材料の圧裂試験により引張強度を求めた結果をTable 2に示す。

### 3.2 実験方法

Fig. 3に高速度カメラとレーザー振動計を用いた実験および計測システムを示す。実験では、試験片の

Table 1 Physical properties of materials used in this study

Material	Place of production	Diameter [mm]	Length [mm]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	E* [GPa]	c <sub>p</sub> ** [km/s]
Marble	Unknown	19.4	190~284	2.86	54.35	3.81
Sandstone	Kimachi	19.1~19.4	270~700	2.15	7.76	2.40
Granite	Inada	19.6~20.0	290~525	2.75	40.00	4.52
Mortar	Unknown	19.4~20.0	290~580	2.00	10.10	2.90
Tuff	Tage	19.4	290~580	1.91	11.25	2.38

\*: Young's modulus

\*\* : Velocity of propagation of longitudinal wave

Table 2 Results of static tensile strength and stress rate of each materials

Material	Diameter [mm]	Width of material [mm]	$S_s^*$ [MPa]	$V_s^{**}$ [MPa/s]
Marble	29.6~29.7	17.5~21.1	8.6	$4.73 \times 10^{-2}$
Sandstone	29.6~29.9	19.6~23.8	3.4	$1.45 \times 10^{-2}$
Granite	30	20.4~22.5	9.2	$4.46 \times 10^{-2}$
Mortar	29.6~29.9	18.3~21.8	2.9	$1.18 \times 10^{-2}$
Tuff	30	20.2~21.0	2.1	$8.80 \times 10^{-3}$

\*: Static tensile strength by the Brazilian test

\*\* : Stress rate in the Brazilian test

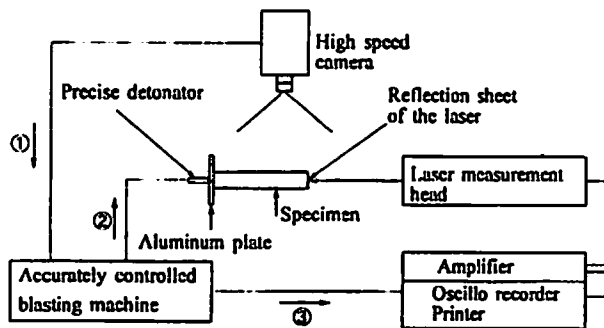


Fig. 3 Experimental set-up and measuring system

①: Signal of initiation from high speed camera

②: Signal to initiate the detonator

③: Signal to start recording

端に精密雷管の起爆によって衝撃圧を加え、他端の変位速度をレーザー振動計を用いて計測した。雷管の爆発によって発生するガスの影響を抑え、圧縮応力波を効率よく試験片に投射するため、精密雷管と試験片の間に厚さ2mmのアルミニウム板を設置した。雷管とアルミニウム板及びアルミニウム板と試験片との接着にはエポキシ樹脂を用いた。なお、実験に雷管は日本化薬(株)製の精密雷管を、レーザー振動計はPolytec社製OFV-300、高速度カメラはCordin社製フレミングカメラModel-124をそれぞれ用いた。

試験片は自由面で反射した引張応力波により幾つかの破断面を形成して破壊するが、材料の引張強度を求めるためには、最初に生成した破断面の位置を求める必要がある。このため、破壊試験と同時に高速度カメラによる観察を行った。高速度カメラによる撮影では、試験前に超音波パルス法で測定された試験片の弾性波の伝播時間を参考にして、圧縮応力波が自由面に到達するまでの時間を予測し、 $2 \times 10^5$  fpsという撮影速度を決定した。また、圧縮応力波が自由面に到達した瞬間から撮影できるようにトリガーを設定し、応力波到達後130  $\mu$ sまで撮影した。実験後に、高速度カメラで確認した最初に形成された破断面と自由面との距

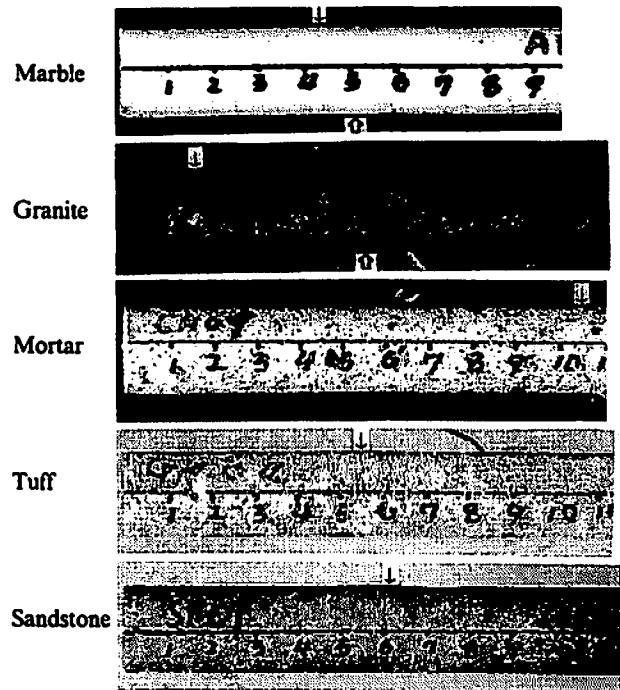


Fig. 4 Cracks observed in several materials due to the Hopkinson's effect

(Arrows  $\downarrow$  indicate the first cracks, arrows  $\cup$  indicate the second cracks in each test)

離をノギスで測定して破断面の位置を求めた。Fig. 4は、5種類の材料の実験において高速度カメラで撮影した写真の一例を示す。図中 $\downarrow$ 印は最初に生成した亀裂位置を示す。また、大理石と花崗岩の場合には、 $\cup$ 印で2番目に生成した破断面の位置も示した。

自由面の変位速度は、試験片の自由面端に反射板を貼付し、レーザー振動計からのレーザー光を反射板に垂直に照射して、反射光のドップラー効果により非接触で振動変位速度を測定した。レーザー振動計からの信号はHIOKI製の8850メモリハイコーダを用い、サンプリング間隔0.05  $\mu$ sでA/D変換して記録し解析した。

さらに、異なる長さの試験片を用いた実験を行い、応力波のピーク値及び立ち上がり時間を求め、それぞ

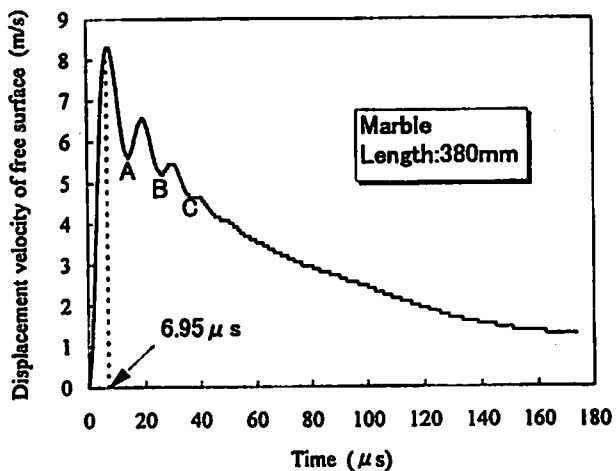


Fig. 5 Displacement velocity wave of the free surface measured by the technique based on Hopkinson's effect

れこの材料について応力波の減衰特性を求めた。また、材料内の応力波の減衰特性を用いて、式(7)及び式(8)により補正係数 $k_1$ 、 $k_2$ を求め、式(9)及び式(10)を用いて応力波のピーク値の減衰を考慮した破断面内応力と時間との関係を求めた。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 材料内の応力波伝播特性

Fig. 5に、大理石の実験において計測された自由面の変位速度の波形例を示す。この実験では、長さ380mmの長い試験片を用いたため、応力波が自由面に到達した時に応力波のピーク値は応力波の減衰により小さくなり、試験片は破断には至らなかった。したがって、この実験では、ほぼ全体の応力波波形を計測することができた。Fig. 5に示したように、時刻6.95 $\mu$ sに応力波がピーク値になった。ピーク値の後の部分のABCには応力波波形が変動しており、その周期は約11 $\mu$ sである。これは、縦波の試験片の直径方向の1往復に要する時間10.5 $\mu$ sと一致するため、試験片の直径方向の振動が現れているものと考えられる。

Fig. 6は、モルタルの実験において計測された自由面の変位速度の波形例を示す。図中、時刻0は圧縮応力波が自由面に到達した瞬間であり、点線で示した時刻17.3 $\mu$ sで自由面の変位速度がピーク値に達している。また、図において $\Delta t$ は反射応力波の自由面から破断面までの伝播時間で、式(1)により求められる。この実験では、高速度カメラで確認できた破片厚さは17.3mmで、反射応力波の伝播時間 $\Delta t$ は5.95 $\mu$ sであることが分かった。また、 $2\Delta t$ は反射応力波が破断面に到達する瞬間と圧縮応力波が破断面に到達する瞬間との時間差である。

Fig. 7は圧縮応力波のピーク値と爆源からの距離と

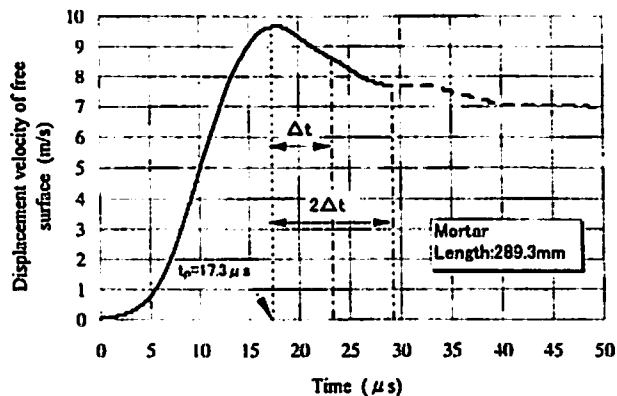


Fig. 6 Displacement velocity wave of the free surface  
 $\Delta t$ : Propagation time of the reflected tensile stress wave propagated from the free surface to the fracture surface (= 5.95 $\mu$ s)  
 $2\Delta t$ : Time difference of the time of the compression stress wave propagated to the fracture surface and the time of reflected tensile stress wave propagated to the fracture surface (= 11.9 $\mu$ s)

$t_p$ : Rise time of the compression stress wave

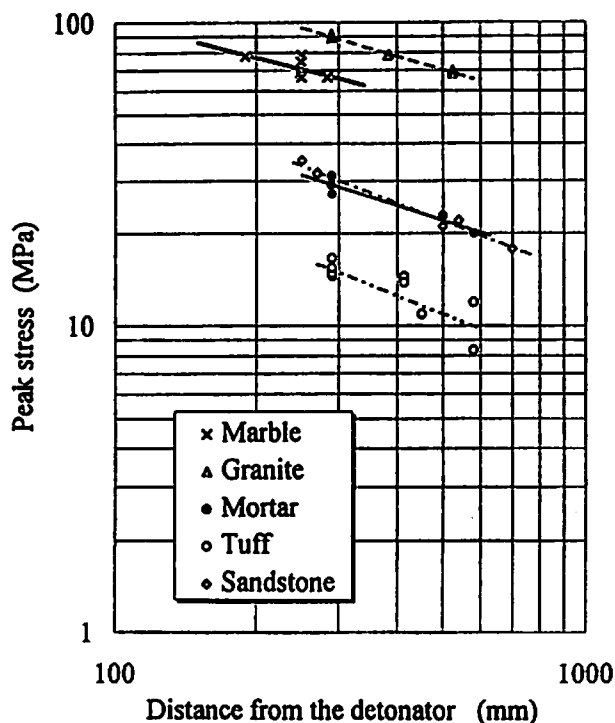


Fig. 7 Relation between the compressive peak stress and the distance from detonator

の関係を示したものである。図に示したように、各材料の応力波のピーク値は爆源からの距離の増大に従って減小し、その値が両対数グラフ上でほぼ直線的に変化することが分かった。この岩石中で伝播する圧縮応力波のピーク値と爆源からの距離との関係は近似的に式(11)で示すことができる。

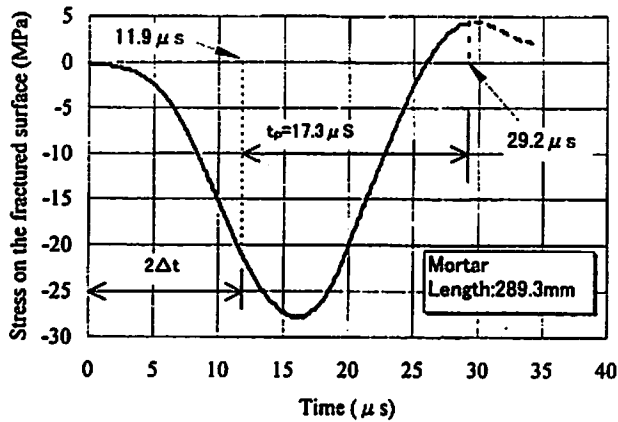


Fig. 8 Stress on the fractured surface

$$P_s = AD^{-\alpha} \quad (11)$$

ここに、Aは定数、 $\alpha$ は減衰係数、 $P_s$ は圧縮応力波のピーク応力、Dは爆源からの距離である。Fig. 7に示したように、各材料の減衰係数は、大理石、砂岩、花崗岩、モルタル及び凝灰岩がそれぞれ0.39, 0.61, 0.46, 0.51及び0.58であることが分かった。

#### 4.2 材料の引張強度と破断面における応力速度

応力波の爆源からの距離による減衰特性と実験で計測された自由面の変位速度波形及び破断面の位置の決定により、破断面内の応力と時間との関係を求めた。Fig. 8に、モルタルの場合における自由面の変位速度波形から算出した破断面内応力と時間との関係の一例を示す。同図において、時刻0は圧縮応力波が破断面に到達した瞬間、破線で示した時刻11.9 $\mu$ sは反射応力波が破断面に到達した瞬間であって、 $2\Delta t$ で求める。ここでは、 $\Delta t$ は式(1)により、5.95 $\mu$ sであることが分かった。また太破線で示した時刻29.2 $\mu$ sは式(2)によ

り求められる。ただし、応力波の立ち上がり時間は17.3 $\mu$ sである。この時の面内応力が材料の引張強度に相当する。また、応力値0 MPaから引張応力のピーク値の80%までの平均応力速度を実験における応力速度として求めた。

Table 3には引張強度及び破断面の応力速度の実験結果、及び引張強度と静的圧裂引張強度との比を示す。表に示したように、材料の引張強度は大理石、砂岩、花崗岩、モルタル及び凝灰岩でそれぞれ静的圧裂引張強度の3.27, 2.62, 2.45, 1.84及び1.2倍の比率で圧裂引張強度より大きくなることを明らかにした。また、Table 3に示したように、実験における応力速度は材料の種類により異なるが、 $5.7 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^7$  MPa/sであって、圧裂実験における応力速度と比較すると、ホプキンソン効果実験における応力速度は圧裂実験における応力速度の $6.5 \times 10^7 \sim 2.3 \times 10^8$ 倍の倍率であることが分かった。これにより、応力速度の大きい場合の引張強度は静的圧裂強度より大きくなることを明らかにした。これについては、ホプキンソン効果実験では、応力速度が大きいため、破断面内の応力が引張強度まで増加するのは亀裂の試験片直径方向に横断することより速かったと考えられる。すなわち、破断面内の応力速度が亀裂進展速度より速いことは引張強度が大きくなったの1つの原因であると考えられる。

また、引張強度及び応力速度の相対偏差は、大理石が小さくて、砂岩は相対的に大きくなり、花崗岩、モルタル及び凝灰岩ははるかに大きい値を示した。これについては、材料の均質性が実験における亀裂の進展及び応力波の伝播に大きな影響を与えたと考えられ

Table 3 Results of dynamic parameters of five materials determined by the technique based on Hopkinson's effect

Material	N	$S_d$ [MPa]	$\delta_{s,d}$ [%]	$v_d$ [MPa/s]	$\delta_{v,d}$ [%]	$S_d/S_s$	$v_d/v_s$
Marble	8	28.1	5.5	$1.09 \times 10^7$	5.7	3.27	$2.31 \times 10^8$
Sandstone	8	8.9	10.5	$1.68 \times 10^6$	21.4	2.62	$1.16 \times 10^8$
Granite	7	22.4	25.3	$9.57 \times 10^6$	16.9	2.45	$2.15 \times 10^8$
Mortar	5	5.4	17.0	$1.56 \times 10^6$	18.4	1.84	$1.32 \times 10^8$
Tuff	10	2.5	36.4	$5.70 \times 10^5$	48.0	1.20	$6.48 \times 10^7$

N: Number of the test using the technique based on Hopkinson's effect

$S_d$ : Tensile strength measured by the technique based on Hopkinson's effect

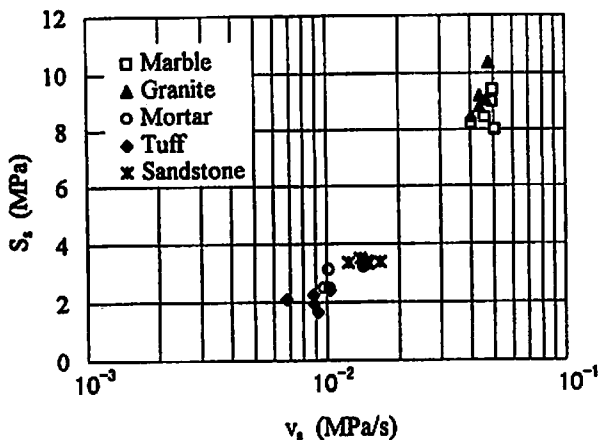
$\delta_{s,d}$ : Percent standard deviation of  $S_d$

$S_s$ : Static tensile strength by the Brazilian test

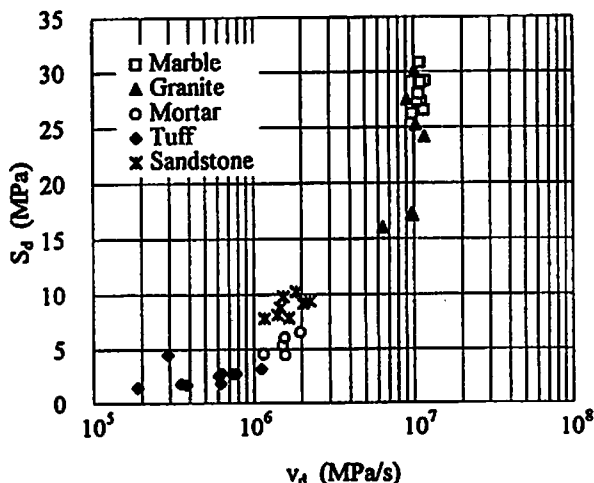
$v_d$ : Stress rate measured by the technique based on Hopkinson's effect

$\delta_{v,d}$ : Percent standard deviation of  $v_d$

$v_s$ : Stress rate in the Brazilian test



(a) Static tensile strength by the Brazilian test



(b) Tensile strength measured by the technique based on Hopkinson's effect

Fig. 9 Relation between the tensile strength and the stress rate in several materials

る。さらに、材料の引張強度にも大きな影響を与えると考えられる。Fig. 4 に示したように、大理石及び砂岩の場合はなめらかな破断面、花崗岩、モルタル及び凝灰岩の場合は荒い破断面を示した。これは、大理石の場合は高い均質性を持ちかつ結晶の大きさが小さいため、実験における亀裂の発生位置及び応力波の伝播などは高い再現性を示すと考えられる。

また、Fig. 9 に材料の引張強度と応力速度との関係を示す。図には、(a)が圧裂実験、(b)がホプキンソン効果実験の結果を示した。図に示したように、圧裂実験とホプキンソン効果実験と共に、応力速度が大きい材料ほどその引張強度は増加することが分かった。

### 5. まとめ

本研究では、爆破現象のうち典型的な動的現象の一つであるホプキンソン効果を取り上げ、材料の引張強度を実験的に検討した。大理石、砂岩、花崗岩、モルタル及び凝灰岩の5種類の材料について、ホプキンソン効果実験を行って、自由面の変位速度を計測し、高速

度カメラによって破断位置を確認した。また、異なる長さの試験片を用いた実験により、各材料の応力波の減衰特性を求めた。さらに、これまでの引張強度の求める方法とは異なり、式(9)及び式(10)により破断面の応力と時間との関係を算出し、材料の引張強度を求めた。

その結果、応力波のピーク値の減衰特性を考慮した式(9)及び式(10)を用いて、破断面内の応力と時間との関係から岩石の引張強度及び応力速度を求める方法を確立した。各材料の減衰指数は、大理石、砂岩、花崗岩、モルタル及び凝灰岩がそれぞれ0.39、0.61、0.46、0.51及び0.58であることが分かった。また、岩石の応力速度が大きい場合の引張強度は材料の種類によって異なるが、1.2~3.27倍の比率で圧裂引張強度より大きくなることを明らかにした。

一方、岩石の引張強度と応力速度とは高い相関があり、岩石の引張強度も静的な強度と同様に応力速度の増大に従って増加することを明らかにした。また、実験における応力速度は、材料の種類により異なるが、 $5.7 \times 10^6 \sim 1.1 \times 10^7$  MPa/s であって、本実験における応力速度は圧裂実験における応力速度の  $6.5 \times 10^7 \sim 2.3 \times 10^8$  倍の速さであることが分かった。

### 謝 辞

実験の実施にあたり、元新エネルギー・産業技術総合開発機構の榊井明氏、久保田士郎氏のご協力をいただいた。また、本研究の一部は(財)火薬工業技術奨励会研究助成金により実施した。ここに記して、謝意を表する次第である。

### 文 献

- 1) 例えば、黒川孝一、吉田忠雄、斉藤照光、山本雅昭、中村重幸、工業火薬、54、255-272(1993)
- 2) N. Utagawa, I. Kondo, N. Yoshida, M. Itoh, N. Yoshida, Microcomputers in Civil Engineering, 7, 151-159(1992)
- 3) 例えば、佐々宏一、伊藤一郎、材料、21、123-129(1972)
- 4) 例えば、勝山邦久、佐々宏一、伊藤一郎、日本鉱業会誌、89、1019、7-12(1973)
- 5) 例えば、金子勝比古、松永孝徳、山本雅昭、火薬学会誌、56、207-215(1995)
- 6) D. S. Preece, Computer Methods and Advances in Geomechanics, Siriwardance & Zaman (eds), 863-870(1994)
- 7) 伊藤一郎、工業火薬協会誌、29、246-268(1968)
- 8) G. S. Ger, J. C. Chen and S. E. Hsu, Proc. 38th Int. SAMPE Symposium, Exhib, 1138-1151(1993).
- 9) 鈴木光、「岩盤力学と計測」、内田老鶴園新社、

- P. 128(1979)
- 10) L. S. Costin, J. Duffy, Rate Sensitive Steel, Trans. ASME, J. Eng. Mat. Tech., 101, 258(1979)
- 11) F. E. Hauser, Exp. Mech., 6, 395(1966)
- 12) E. El-Magd, K. J. Hellwing, H. G. Höck and M. Homayun, Steel Res., 58, 33(1987)
- 13) T. Nicholas, Exp. Mech., 21, 177(1981)
- 14) 例えば, 林卓夫, 田中吉之助, 「衝撃工学」, 日刊工業新聞社, P. 145(1988)
- 15) L. Bacon, USBM, RI-6067(1962)
- 16) J. S. Rinehart, Proc. 7th Symp. Rock Mech., Univ. Park, 205-208(1965)
- 17) E. Tincelin, P. Weber, and G. De Montille, Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech., Belgrade, 3, 71-76(1970)
- 18) K. Hino, J. Ind. Explos. Soc. Japan, 17, 236-241(1956)
- 19) 勝山, 緒方, 和田, 工業火薬, 53, 181-192(1992)
- 20) 工業火薬協会編, 「新・発破ハンドブック」, 山海堂, P. 392(1988)

~~~~~

### Study on the tensile strength of brittle materials under high stress rate using the technique based on Hopkinson's effect

by Guichen MA\*, Atsumi MIYAKE\*\*, Terusige OGAWA\*\*, Yuji WADA\*\*\*  
 Yuji OGATA\*\*\*, Masahiro SETO\*\*\* and Kunihisa KATSUYAMA\*\*\*\*

The tensile strength of five brittle materials with high stress rate was studied using the technique based on Hopkinson's effect. Shock wave from the precise detonator was loaded to one face of the specimen bars with the diameter of 20 mm and the length of between 200 and 700mm and free surface displacement velocities were measured and the fracture positions were determined with the high speed camera when the bars were fractured by the reflected wave from the other face. Moreover the characteristic of stress wave attenuation was examined by the experiments with different length specimens. And the tensile strength of each materials were calculated using the relation between the stress and time of fractured faces.

It was found that the damping coefficients of Marble, Sandstone, Granite, Mortar and Tuff were obtained as 0.39, 0.61, 0.46, 0.51 and 0.58 respectively. It was also found that the tensile strengths with the consideration of the attenuation of peak values of stress waves showed 1.2~3.3 times larger than those obtained with the static loading experiments.

(\*Department of Safety Engineering, Yokohama National University.

Present: OYO corporation, 61-5 Toro-Cho 2-Chome, Omiya-Shi, Saitama 330-8632, Japan

\*\*Department of Safety Engineering, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-0067, Japan

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

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