

と 3 次元動的数値シミュレーション

勝山 邦久*, 緒方 雄二*, 和田 有司*

爆破の際の岩盤・コンクリート内の応力状態には、岩盤中を伝播していく衝撃波による応力状態と、静的なガス圧の作用下における応力状態の両者が含まれている。また、爆破による破壊現象を検討する場合、材料の静的な強度や破壊靱性についてはよく知られており、それらの値を利用することは出来ても、動的な強度や破壊靱性については未だ未解決の部分が多い。そこで今回は、爆破現象のうち典型的な動的現象の一つである Hopkinson 効果を取り上げ、これによる破壊現象を実験的・理論的に検討することにした。

動的光弾性実験により波動の伝播と、反射引張波による破壊を観察できた。さらに、理論的に破壊現象をシミュレートすると共に、破片の飛翔現象についてもシミュレートし、実験と良い一致をみた。

1. 緒言

爆破作業は、鉱山・土木の分野では欠くことの出来ない作業であり、また最近では陳腐化したビル解体など、建築の分野でも注目を集めている。爆破の際の岩盤・コンクリート内の応力状態には、岩盤中を伝播していく衝撃波による応力状態と、静的なガス圧の作用下における応力状態の両者が含まれている。両者を同時に解析する事は不可能ではないが、計算時間も膨大になること、計測機器も高周波数・低周波数・静的なものを対象とした機器を揃える必要があり容易ではない。

また、爆破による破壊現象を検討する場合、材料の静的な強度や破断靱性についてはよく知られており、それらの値を利用することは出来ても、動的な強度や破断靱性については未だ未解決の部分が多い。そこで今回は、爆破現象のうち典型的な動的現象の一つであるHopkinson効果を取り上げ、これによる破壊現象を実験的・理論的に検討することにした。

Hopkinson 効果による引張り応力の発生は、一般に Fig. 1 に示すごとく説明されている¹²⁾。すなわち、図に示すような波頭が切り立った三角波であると仮定した場合、Fig. 1 の (a) は圧縮衝撃波がちょうど自由面に到達した瞬間を示し、そのときの波頭応力値が

Paである。その後少し時間が経ったときには、Fig. 1の(b)に示すように、もし自由面がなければ、衝撃波の波頭は H_1F_1 'の位置にまで達しているはずであるが、自由面があるために衝撃波は反射して引張波にその性質を変え、同じ時間内に H_1F_1 'の位置にまで引き返してくる。このときの F_1 'を通る自由面に平行な面内での応力は H_1F_1 'という引張応力と、 H_2F_1 'という圧縮応力の合成値 H_1F_1 'であり、図の場合には引張応力となる。 H_1F_1 'の値が動動的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、平板は飛び出すことになる。

Fig. 1 に示した模式図では、容易に Hopkinson 効果について論ずることが出来るが、実際には 1 次元の波頭の切り立った平面圧縮応力波を作ることには非常に難しく、有限の試験片を用いた実験では周囲の端面からの反射波の影響、横波の影響など考慮すべきことは多く、簡単な現象の割には明らかにすべきことは多いものと思われる。

そこで、光弾装置と高速度カメラを組み合わせ、かつ高精度で制御できる精密発破器を用いて、ガラス板内を伝播する応力波ととき裂の発生を観察した。さらに、3次元動的応力解析により、このシミュレーションを行った。さらに、レーザ速度計により試験片端面の変位速度を計測し、高速ビデオにより撮影した破片の飛翔速度と照らし合わせ、爆破による破壊現象について検討することにした。

2. 實驗方法

1992年5月22日受理

*資源環境技術総合研究所

安全工学部 破壊工学研究室

〒305 つくば市小野川 16-3

TEL 0298-58-8560

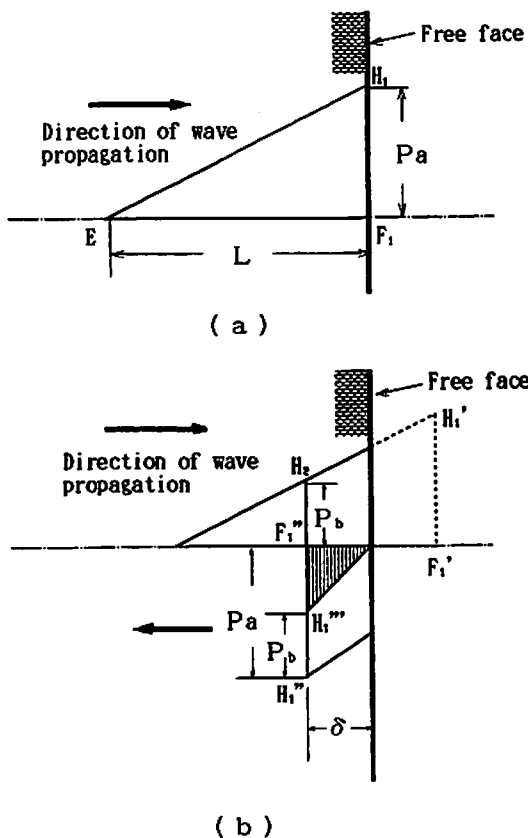


Fig. 1 A schematic of the Hopkinson's effect

Fig. 2は光弾性装置と高速度カメラを用いて応力波の伝播状態を観測する実験の概念図である。まず、光源からの光はレンズにより集光され、絞りを通した後、直径30cmのレンズで平行光線にし、偏光子、実験槽、さらに偏光子を通し、レンズで集光した像を高速度カメラで撮影した。用いた光弾性装置は理研計器(株)製PA-300型である。高速度カメラはCordin社製フレンジンカメラ、モデル124である。本カメラは最高 2.5×10^7 駒/秒の撮影能力を有しているが、今回の撮影速度は 2×10^5 駒/秒である。Fig. 3は実験槽内に設置した試験片と火薬類の位置関係を示したもので、(a)が点火玉を接着した状態の図であり、この場合は応力波の伝播だけでホプキンソン効果による破壊は生じない実験である。(b)は試験片を鉄製の雷管ホルダーに接着し、精密雷管の爆轟により生ずる圧縮応力波を安全にガラス板に投射する方法を示したものである。この精密雷管は日本化薬製で、銅管体の中は電橋線と0.7grのベンスリットのみであり、 $1 \mu s$ の精度で起爆できるものである。

試験片は長さ20cm、高さ3cm、厚さ6mmのバイレックスガラス板であり、縦波速度は5,500m/s、横波速度は3,400m/s、密度は2.17gr/cm³、圧裂引張強度は300kg/cm²である。

Fig. 4は試験片の自由端にレーザ光を照射し、自由端面の変位速度を計測する方法と高速ビデオカメラに

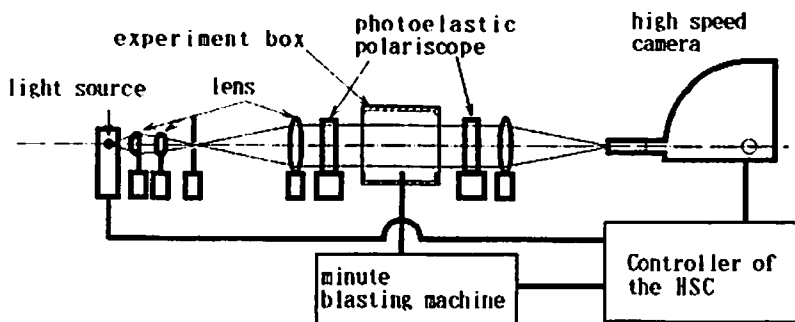


Fig. 2 Experiment apparatus of the photoelastic high speed camera

より破片の飛翔状態を撮影する状態を示した概念図である。用いたレーザ速度計は、Polytec社製レーザドップラー振動計OFV-300型で、振幅感度は200Hzで1nm以下、速度レンジは $10^{-6} \sim 12$ m/s、加速度としては $0 \sim 10^5$ Gのものを計測でき、応答速度は170nsである。また、高速ビデオカメラはNAC社製HSV1000型であり、撮影速度は最高1000駒/秒である。

3. 実験結果

まず、Fig. 5はFig. 3(a)の場合で点火玉のみを試験片に接着して起爆した際に発生した応力波の伝播状態を光弾性・高速度で撮影した写真である。光弾性感度の良いエポキシ、ウレタン樹脂に比較すると感度が悪いが、▲印で示した縦波の波頭は必ずしも明確に出ていないが、時間と共に順次明るくなって行き、▲印で示したそれに続く横波等が濃い白で写っているのが分かる。起爆後55 μs で◇印で示したように右端自

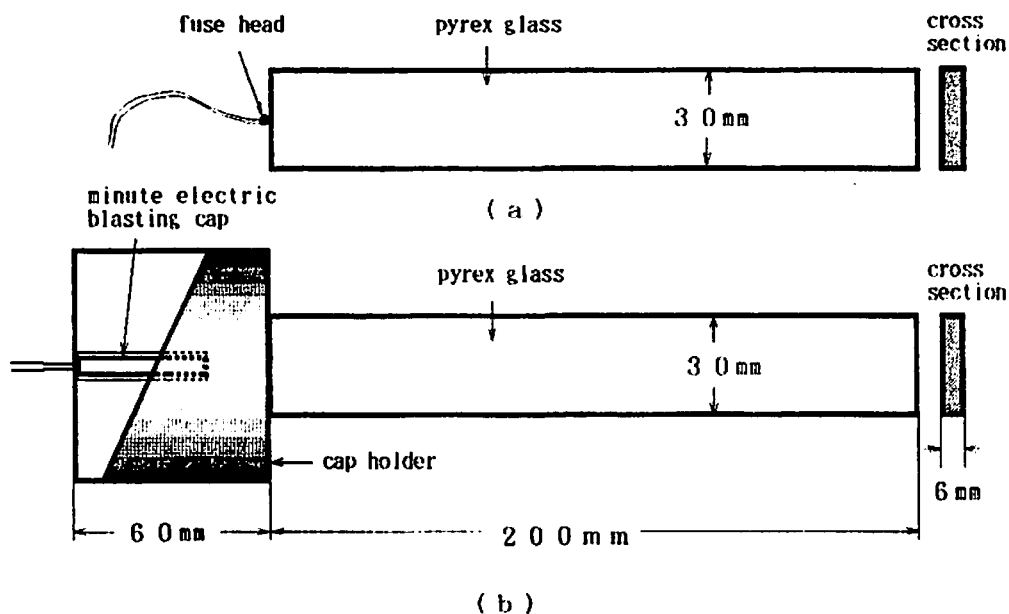


Fig. 3 The pyrexglass specimen with a fuse head (a) and a minute electric blasting cap (b)

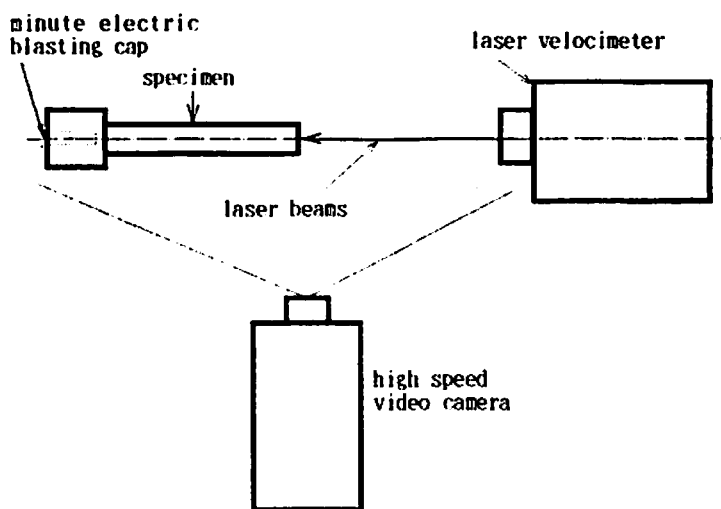


Fig. 4 The experiment apparatus to measure the velocity

由端より1.9cmのところに黒い縦縞が現れる。これが、ホプキンソン効果による引張応力が発生したことを示すものである。また、これに先立ち起爆後40 μ sの写真に明瞭に現れる◆印で示した黒い横縞も引張応力によるものである。

Fig. 6は、Fig. 3(b)に示したように、精密雷管を鉄製雷管ホルダーの中で爆轟させ、雷管からのガスは試験片に届かず、衝撃のみが伝播して行くようにして

行なった実験の結果を示したものである。時間と共に応力波を伝播している部分が白くなり、起爆後約40 μ sで右端面に達し、45 μ sでは反射引張波による自由端に平行なき裂が右端面より5.5mmの所と27mmの所に生じているのが明かである。また、5.5mmの所のき裂は試験片の上下の端面から発生し、27mmの所のき裂は試験片の中央部から発生しているものと推測される。

Fig. 7は、Fig. 6の $t=50\sim60\mu$ sの写真を拡大して

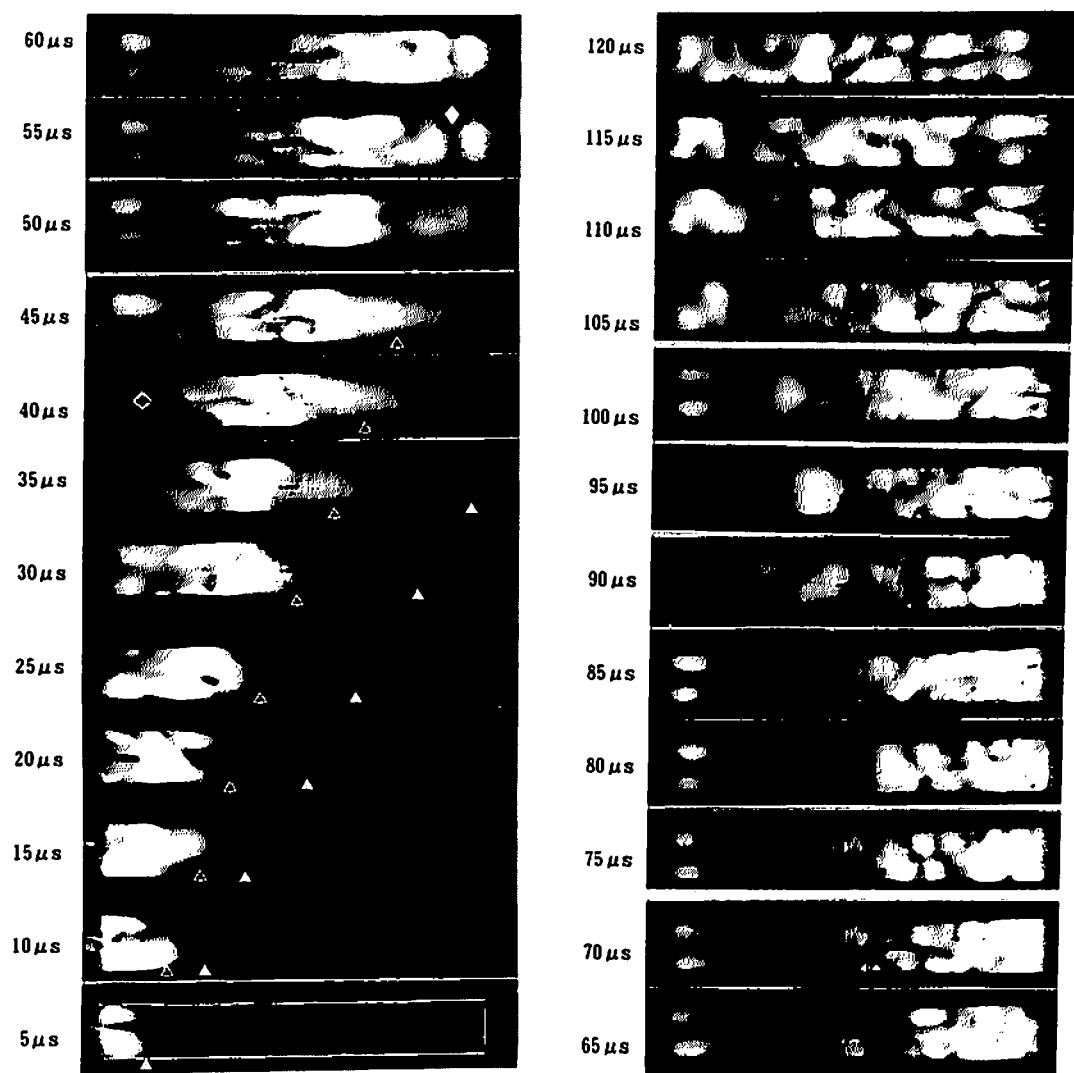


Fig. 5 Photoelastic photography caused by an ignition of a fuse head

示したものである。 $t=50\mu\text{s}$ の写真中↓印で示した部分には赤い縞模様が現れるので、何らかの応力集中が予想される。 $t=55\mu\text{s}$ では、その↓印の部分にき裂が発生し、さらに $t=60\mu\text{s}$ ではそのき裂が大きくなっているのが分かる。

Fig. 8はFig. 4に示したように、試験片の右自由端にレーザ光を照射し、端面の変位速度を計測した結果の一例である。縦軸が変位速度で横軸が時間である。時間0は計測器のトリガーがかかった時間で、あまり意味は無い。応力波の到達により、変位速度は最大10.2m/sになり、その直後試験片は破壊し、飛び始める。破壊直後の破片の速度は9.1m/s、2ms後では8.5m/sの速度で飛翔するのが分かる。

Fig. 9は同時に高速度ビデオカメラで撮影した結果

を示したもので、(a)は起爆・破壊した瞬間を示した図で、(b)はそれより20ms後の結果である。先端の破片は↑で示した位置にまで飛んでおり、(a)、(b)から得られた、破片の飛翔速度は8.7m/sであった。レーザにより得られた値と良く一致しているのが分かる。

4. ホプキンソン効果による引張波の3次元数値解析

今回用いた解析方法は、ラグランジュに座標系で表示された運動方程式を差分近似を用いて解いて波動による動的応力を解析する方法であって、その概念をFig. 10に示す³⁹⁾。ある時間($t=t_0$)に試験片内に存在している応力の場にラグランジュ座標系で示された運動方程式を適用し、差分近似を用いて $t=t_0$ 時間に対

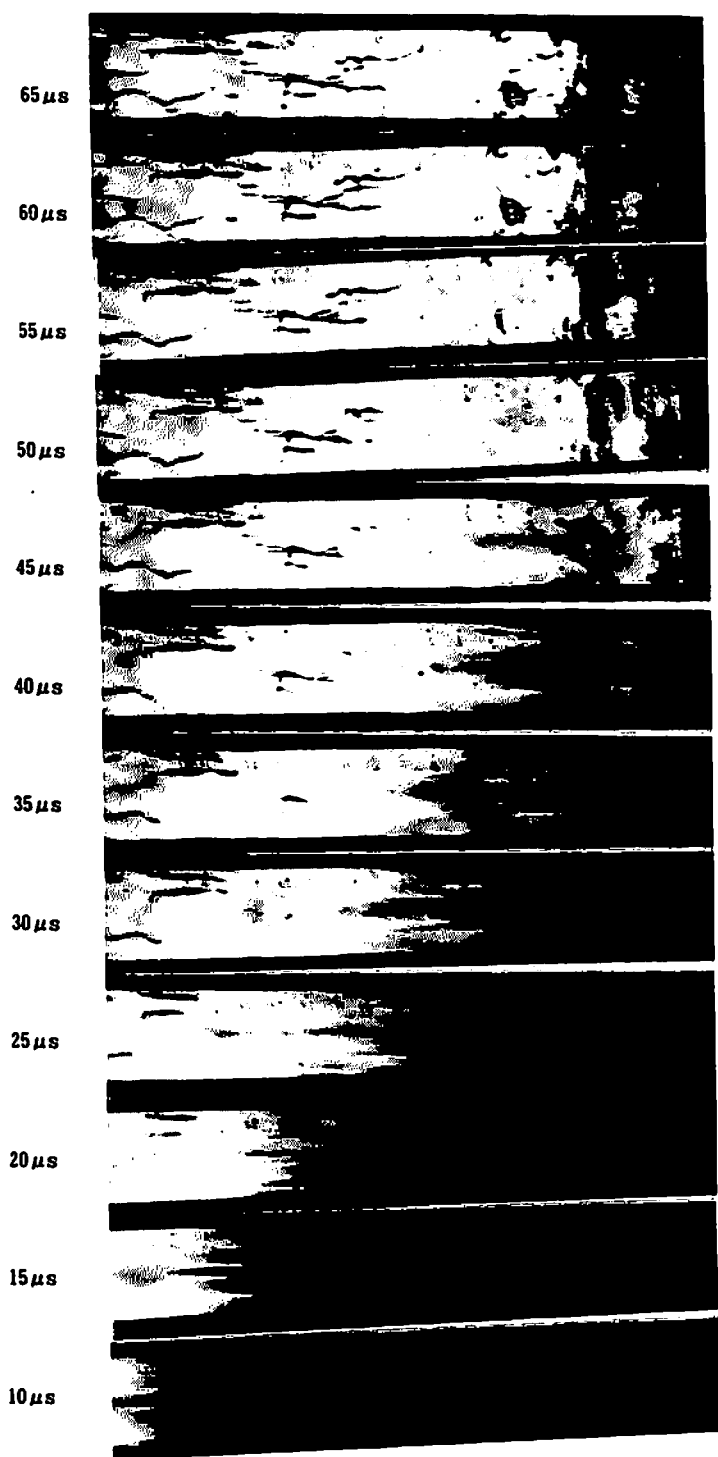


Fig. 6 Photoelastic photography caused by a detonation of a minute electric blasting cap

125 μ s

120 μ s

115 μ s

110 μ s

105 μ s

100 μ s

95 μ s

90 μ s

85 μ s

80 μ s

75 μ s

70 μ s



Fig. 6

応ずる試験片内の各点(ラグランジュ座標の節点)における変位加速度を算出し、これを Δt なる微小な時間間隔で2回積分することにより、 $t = t_0 + \Delta t$ における各節点の変位を求め、ついでラグランジュ座標で囲まれている要素内のひずみをそれを取り囲んでいる八つ

の節点の変位より求め、そのひずみに試験片の状態方程式を適用して $t = t_0 + \Delta t$ 時間に対応した試験片内の応力状態を算出するというように、Fig. 10に示したループを試験片内の各点について Δt なる時間間隔で回すことにより応力波の伝播に伴う動的応力を算出す

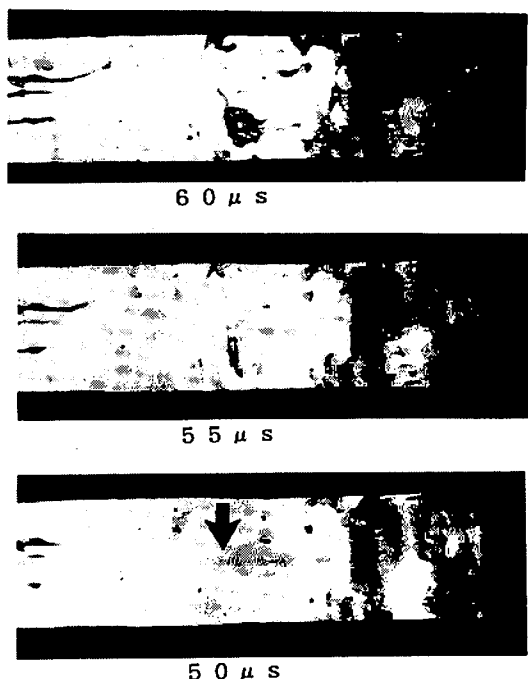


Fig. 7 The stress concentration observed by the photoelasticity and a new crack

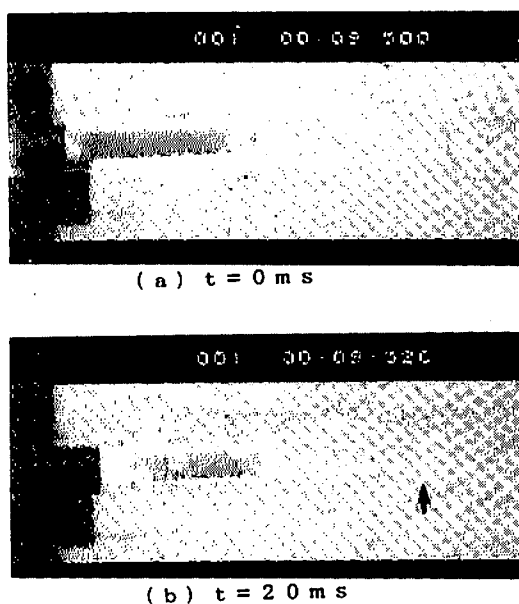


Fig. 9 Flying specimen observed with the high speed video

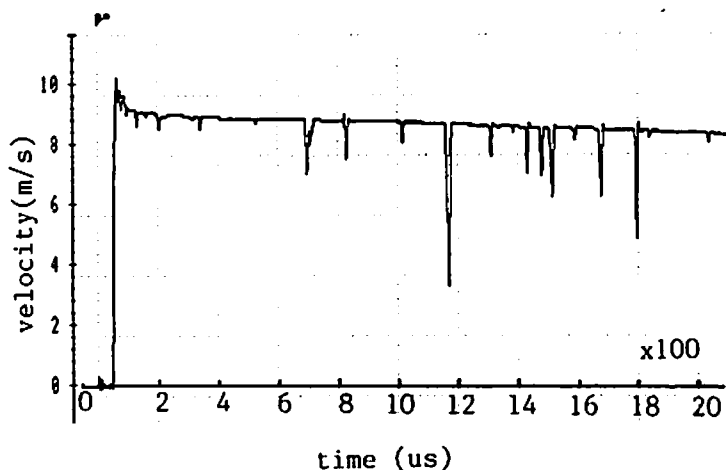


Fig. 8 Displacement velocity of the specimen measured with the laser velocimeter

るという方法である。

Fig. 11(a)はモデルの左端面に加えた圧力の時間的変化状態を示したもので、次式で表される。

$$P = P_0(e^{-150000t} - e^{-800000t}) \quad (1)$$

また、圧力は端面に均等に加えたのではなく、横波が発生しやすいように、Fig. 11(b)に示すような圧力分布である。

Fig. 12は右端面の反射引張応力による破壊現象を考慮して計算した結果のうち、変位を拡大して示したものである。ただし、 $t=45\mu s$ 以降の図は破壊にともない変位が大きくなり見づらくなるため拡大していない。図の多くの格子はラグランジュ座標で表したものであって、3次元の座標(x, y, z)は図に示すようであって、長さ方向が x 、高さ方向が y 、厚さ方向

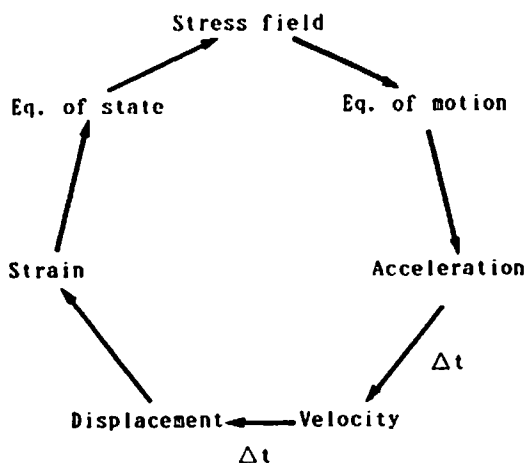
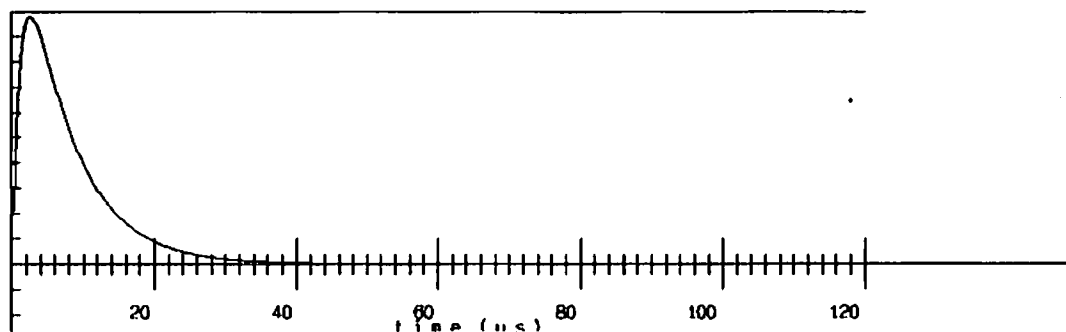


Fig. 10 Feedback loop for stress analysis

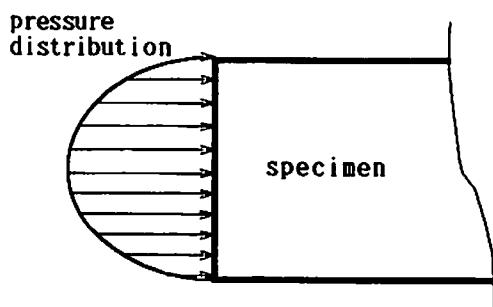
(紙面に垂直)が z である。試験片を一辺が2mmの立方体で分割した。その数は長さ方向が100, 高さ方向が15, 厚さ方向が3個である。

破壊現象の計算への組み込み方は、引張応力の値が設定した値に達したときに、その立方体は引張破壊を起こし、その立方体が消滅したものとして取り扱った。破壊を組み込む方法として^{5), 6)}、理論的には良い方法ではないが、破壊後の、破壊面での波の反射や破片が飛んで行く様子をシミュレートするには、良い方法であると考えられるので、今回はこの方法を用いた。ただし、今回の主旨により爆源近傍の破壊は考慮しないことにした。

Fig. 12より明らかなように、変位からも圧縮されて黒っぽく見える縦波の部分とそれに続く高さ方向に



(a) pressure-time curve



(b) the distribution of pressure on the edge of the specimen

Fig. 11 The pressure forms on the edge of the specimen of the numerical model

(a) pressure-time curve

(b) the distribution of pressure on the edge of the specimen

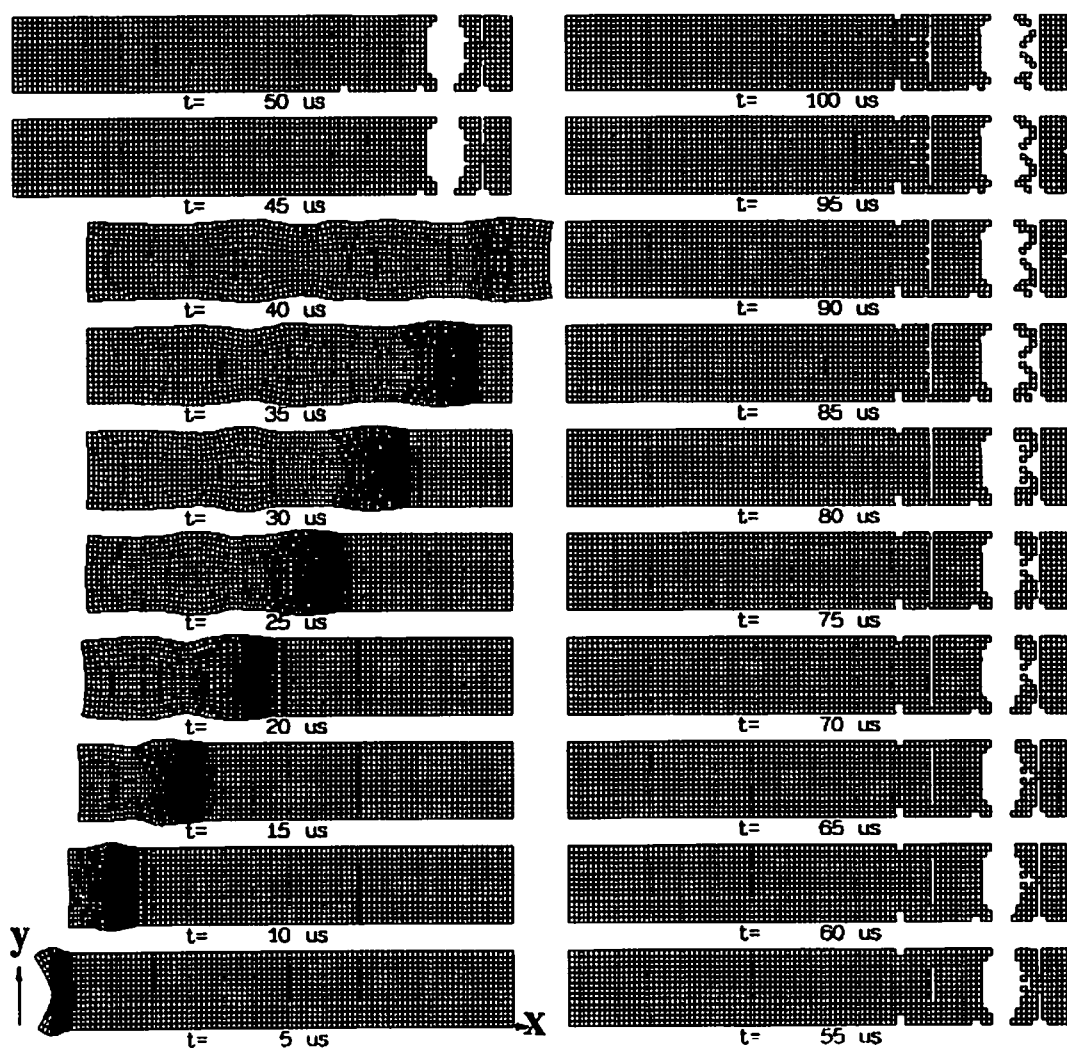


Fig. 12 The results of the simulation of Hopkinson's bar

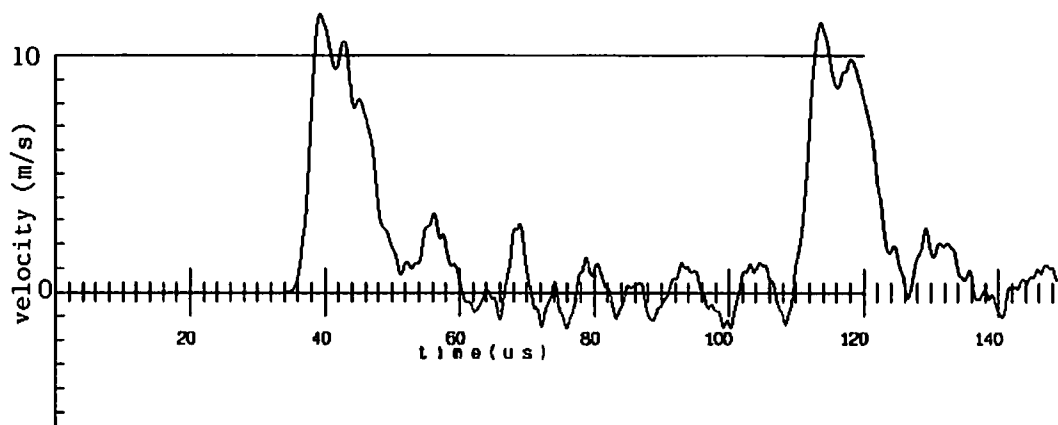
膨張したり収縮したりして伝播している横波の部分が観察される。 $t = 45 \mu\text{s}$ で破壊が生じており、しかも右端面より7メッシュ目は高さ方向の端面より、また12～16メッシュ程度の位置では立方体は試験片の真ん中から破壊している。これは、Fig. 6に示した実験結果と概ね良く一致している。

Fig. 13は、右端面の中央部のx方向の変位速度の計算結果であり、Fig. 13(a)は試験片が破壊しないと仮定して行なった場合で、(b)はFig. 12に示した破壊をした場合である。破壊しない場合には、応力波の到達と共に変位速度は大きくなり、応力波が反射し終わると、変位速度は0 m/sの値近傍で小さな振動を繰り返している。その反射波が再び左端面で反射し、右端面に戻ってくると、変位速度は再び大きくなるの

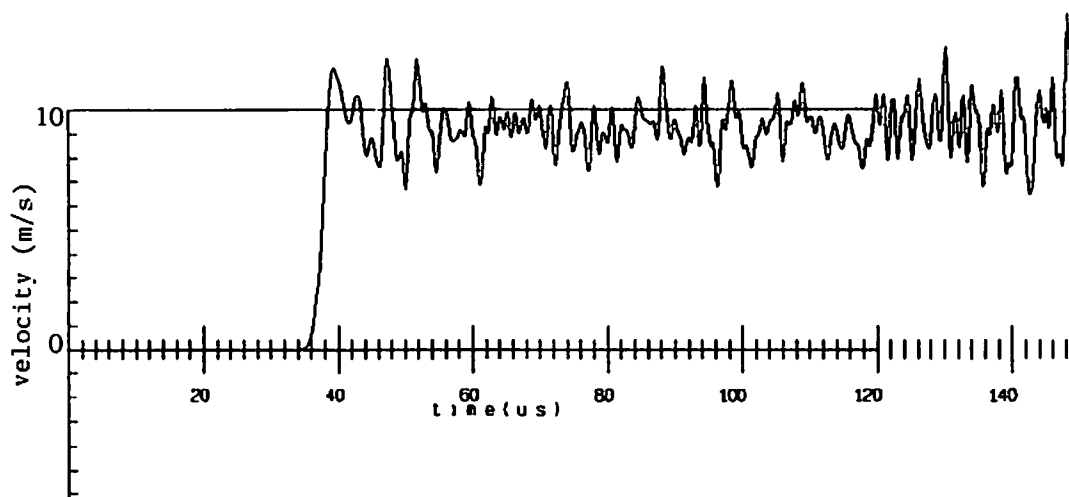
が分かる。

つぎに、破壊した場合の(b)をみると、応力波の到達と共に変位速度が大きくなり、10 m/sを超える値を示し、その後一旦変位速度が小さくなりかけるが、破壊が発生し、その影響が右端面に現れると変位速度は0 m/sにならずに、9 m/s程度の値で振動を繰り返すことが分かる。これを時間で積分して変位になおすと破片がx方向へ飛んで行くことになる。この図とFig. 8のレーザ光による測定結果を比較すると、詳細な部分を除けば、概ね良く一致しているのが分かる。

計算に用いたワークステーションは、HP9000-730であり、1サイクル計算するのに要した時間は0.72sであった。したがって、1立方体当たり83 μs の計算時間を要したことになる。



(a) assuming no fracture



(b) in the case of Fig. 12

Fig. 13 The results of the simulation of the displacement velocity

5. 考察と結言

今回は、爆破現象のうち典型的な動的現象の一つである Hopkinson 効果を取り上げ、これによる破壊現象を実験的・理論的に検討した。

1 μ s 以内の良い精度で制御できる雷管と発破器を作製した結果、光弾性装置と高速度カメラを組み合わせることにより、爆破に伴う応力波の伝播の可視化が可能となった。可視化により、縦波の伝播と、横波の伝播を観察し、伝播状態と反射の状態を観察することができた。また、試験片の一部分に赤いフリンジが現れ、応力集中が生じたものと推測され、その次の駒で、同じ場所に新たなき裂が発生したのが観察できた。しかし、通常、光弾性法によるフリンジの縞の数等から静的な応力を求める方法で、応力値を求めるところま

では至らなかった。

Hopkinson 効果による引張破壊が試験片端面近傍に発生し、右端面近くのき裂は高さ方向の上下端面から、また、右端面から 2.5 cm 程度のき裂は内部から発生している。ガラス等の材料は表面にきずを有する確立が高いので、き裂生成にその影響が現れるかもしれないと予想されたが、シミュレーションの結果と照らし合わせると、上下端面から生成しているき裂も応力集中によるものであると推測された。また、今回採用したき裂生成を数値計算に組み込む方法は、破片の飛翔速度を正確にシミュレートできたことから、飛石が発生するような破壊現象には当てはまるものと思われる。

レーザ光による変位速度計測と高速ビデオカメラに

よる観測結果から、破片の飛翔速度は両者とも同じ値を示し、変位速度が精度良く求められたことを確認した。なお、高速ビデオの精度については精密発破器により確認してある。

今後さらに変位速度の波形、細かいき裂の発生状態を正確にシミュレートすることにより、動的引張強度、動的破壊靱性値などを求めることができるものと思われる。

一部、横浜国立大学物質工学科、学生 昔哲基、中嶋敏秀両氏に実験を手伝って頂いた。謝意を表す。

文 献

- 1) 日本材料学会編、「岩石力学とその応用」、丸善(1966)。
- 2) 工業火薬協会編、「新・発破ハンドブック」、山海堂(1989)。
- 3) 佐々宏一、伊藤一郎、材料、21, 123, (1972)。
- 4) 勝山邦久、佐々宏一、伊藤一郎、材料、21, 228(1972)。
- 5) 勝山邦久、佐々宏一、伊藤一郎、日本鉱業会誌、88, 1014(1972)。
- 6) 勝山邦久、佐々宏一、伊藤一郎、日本鉱業会誌、89, 1019(1973)。

**Dynamic photoelastic experiment and 3 dimensional
dynamic stress analysis on the fracture caused
by the reflected tensile stress wave**

by Kuniyisa KATSUYAMA*, Yuji OGATA* and Yuji WADA*

It is well known that when a compressed stress wave reflects at the free face, it propagates to the backward as a tensile stress wave, and the material fractures when the tensile stress becomes the dynamic tensile strength. But, there are many unknown points which must be clarified in this phenomena well known as Hopkinson's effect. Therefore, in this paper, the behavior of the cracks made by the Hopkinson' effect in a pyrexglass has been discussed through the observation of the dynamic photoelastic high speed photography and the numerical dynamic stress analysis. The main results obtained are as follows ;

1. Propagation of the stress wave caused by a blasting could be observed, and the longitudinal wave and transverse wave were observed by the dynamic photoelastic method. (Fig.5)
2. The tensile stress by Hopkinson's effect was observed near the free face. (Fig.5)
3. Red color fringes by the photoelastic method were observed around the stress concentrated place in the material, and at the next frame a new crack was made at the same place shown by ↓. (Fig.7)
4. The crack near the free face grew from the surface of the top and bottom edges, and the crack made at about 2.5cm from the free face grew from the inside of the material. These phenomena were simulated by the 3-dimensional dynamic stress analysis. (Fig.6, Fig.12)
5. The displacement velocity of the free face was measured with a laser velocimeter, and the maximum value of it was 10.2 m/s, and later the fragment flew with the velocity of 9m/s. (Fig.8)

This was the same value with the velocity observed with high speed video camera. (Fig.9)

(*Fracture Mechanics & Explosives Lab. Dept. of Safety Engineering
National Institute for Resources and Environment, AIST, MITI 16 — 3
Onogawa, Tsukuba Science City, Ibaraki TEL. 0298 —58— 8560, FAX 0298
—58 — 8558)