

Fig. 1 Experiment apparatus of the photoelastic with high speed camera

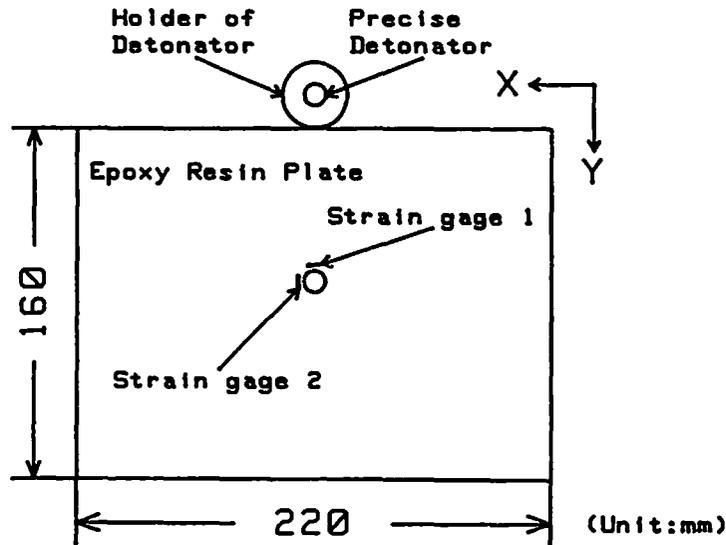


Fig. 2 The epoxy resin plate with detonator and strain gage

## 2.2 実験供試体

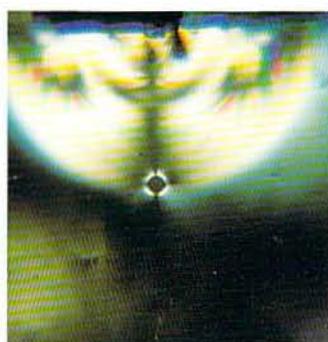
実験では光弾性効果が高いエポキシ樹脂板 (16×22 cm, 厚さ6 mm) を使用し, 起爆端面から9 cmに直径9 mmの空孔を穿孔し, 雷管の爆轟で発生する衝撃を端面に加えて空孔周辺の動的応力状態の変化を観測した。エポキシ樹脂板については, 空孔の穿孔後にその周辺に生じる残留応力を除去するために約1日かけて焼き鈍しを実施した。実験で使用したエポキシ樹脂板および雷管ホルダーの配置とひずみゲージによる計測状態の概略をFig.2に示す。

衝撃波の入力方法はFig.2に示すように, 精密雷管を雷管ホルダーに挿入し, 雷管ホルダーの側面をエポキシ樹脂で入力点に固定して, 衝撃波の入力点とした。

また, 観測と同時に空孔の周辺の2カ所にそれぞれ垂直な方向にひずみゲージを張付けてひずみ状態を計測した。衝撃波の入力点と空孔を結ぶ方向をY軸方向とし, これに垂直な方向をX軸方向とする。ひずみゲージは共和電業(株)製のゲージ長1 mmを使用し, 空孔のX軸方向とY軸方向に張付けて, 応力波の伝播に伴うひずみの変化を計測した。ゲージ①を空孔のX軸方向に, ゲージ②をY軸方向に設定した。ひずみの計測では共和電業(株)製の動ひずみ計測器CVD230C(応答周波数: DC~200KHz)と日置電機(株)製メモリーハイコーダー8850(最大サンプリングレート: 20MHz)を用いて計測した。



①  $t = 35\mu s$



②  $t = 40\mu s$



③  $t = 45\mu s$



④  $t = 50\mu s$



⑤  $t = 55\mu s$



⑥  $t = 60\mu s$



⑦  $t = 65\mu s$



⑧  $t = 70\mu s$



⑨  $t = 75\mu s$

Fig. 3 The results of high-speed camera

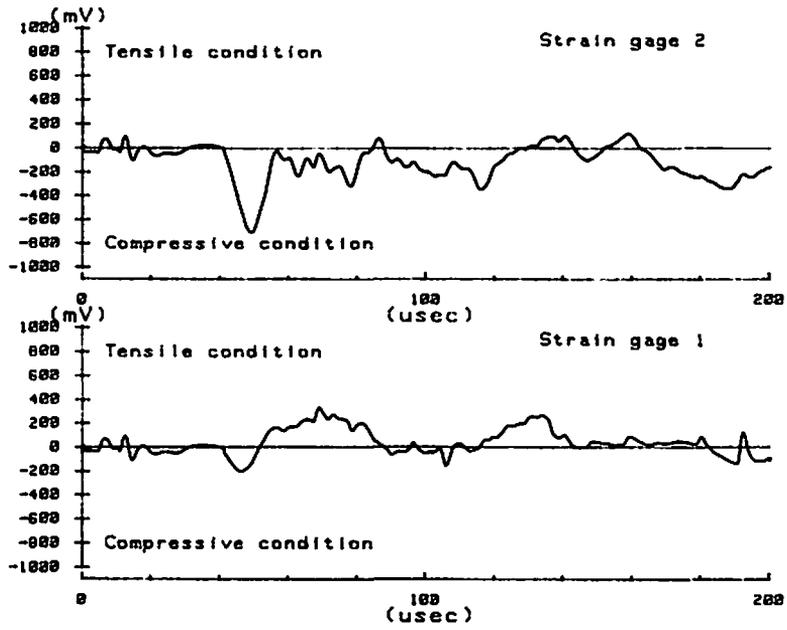


Fig. 4 The measuring results of strain gage

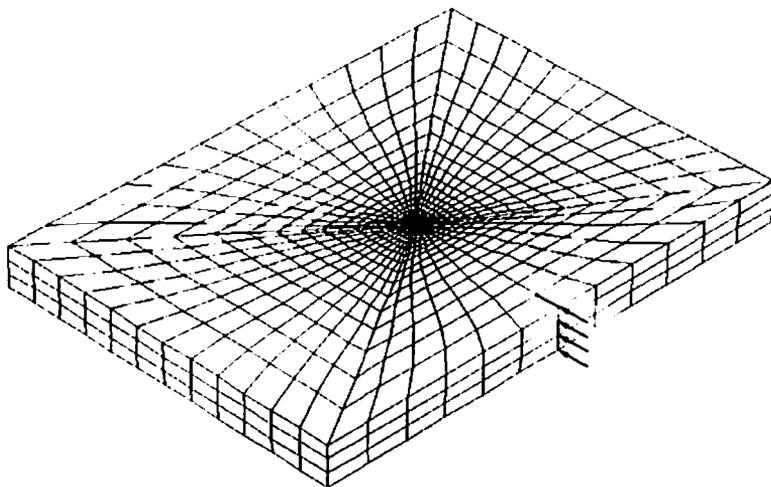


Fig. 5 The numerical simulation model of epoxy resin plate

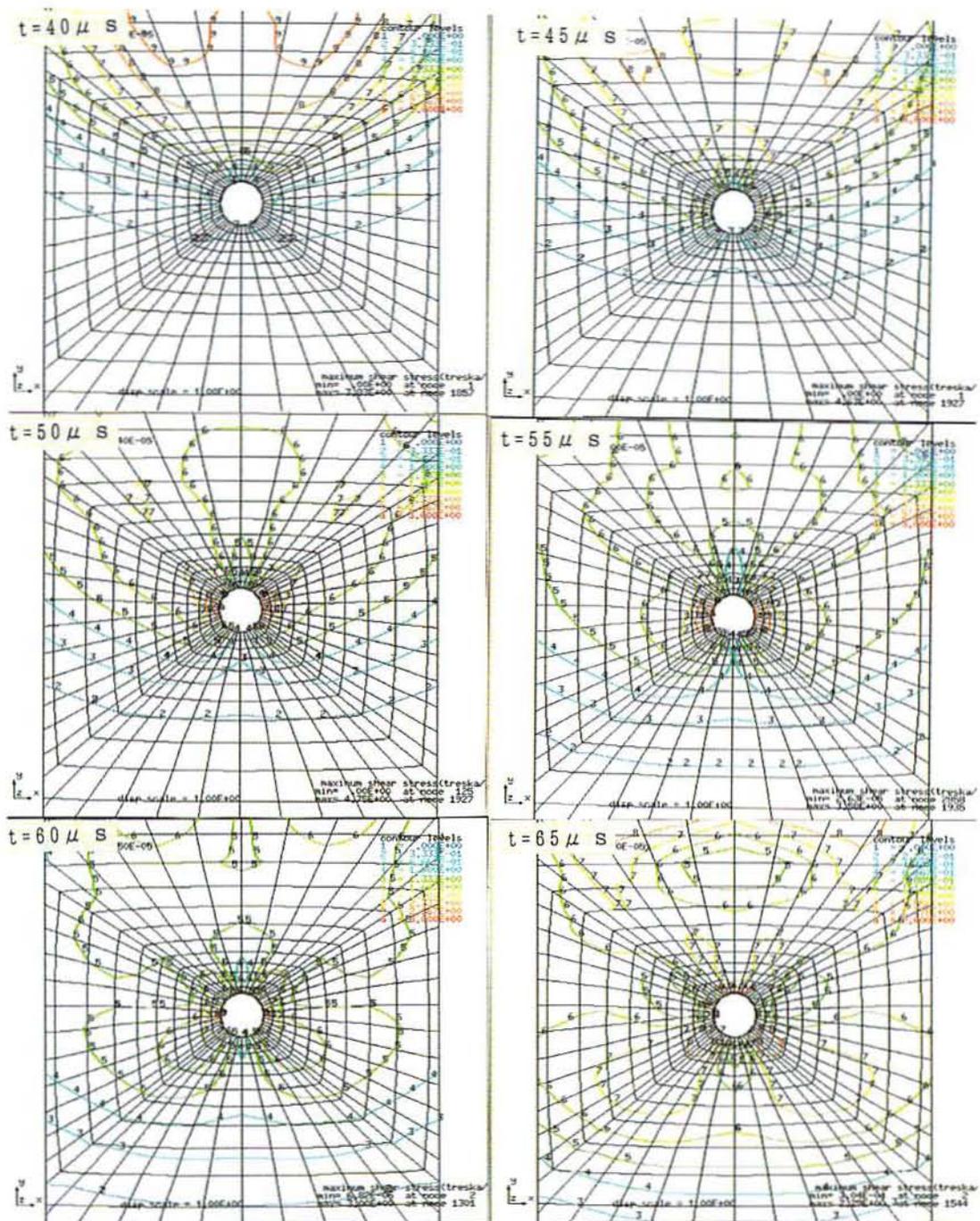


Fig. 6 Contour map of the maximum shear stress

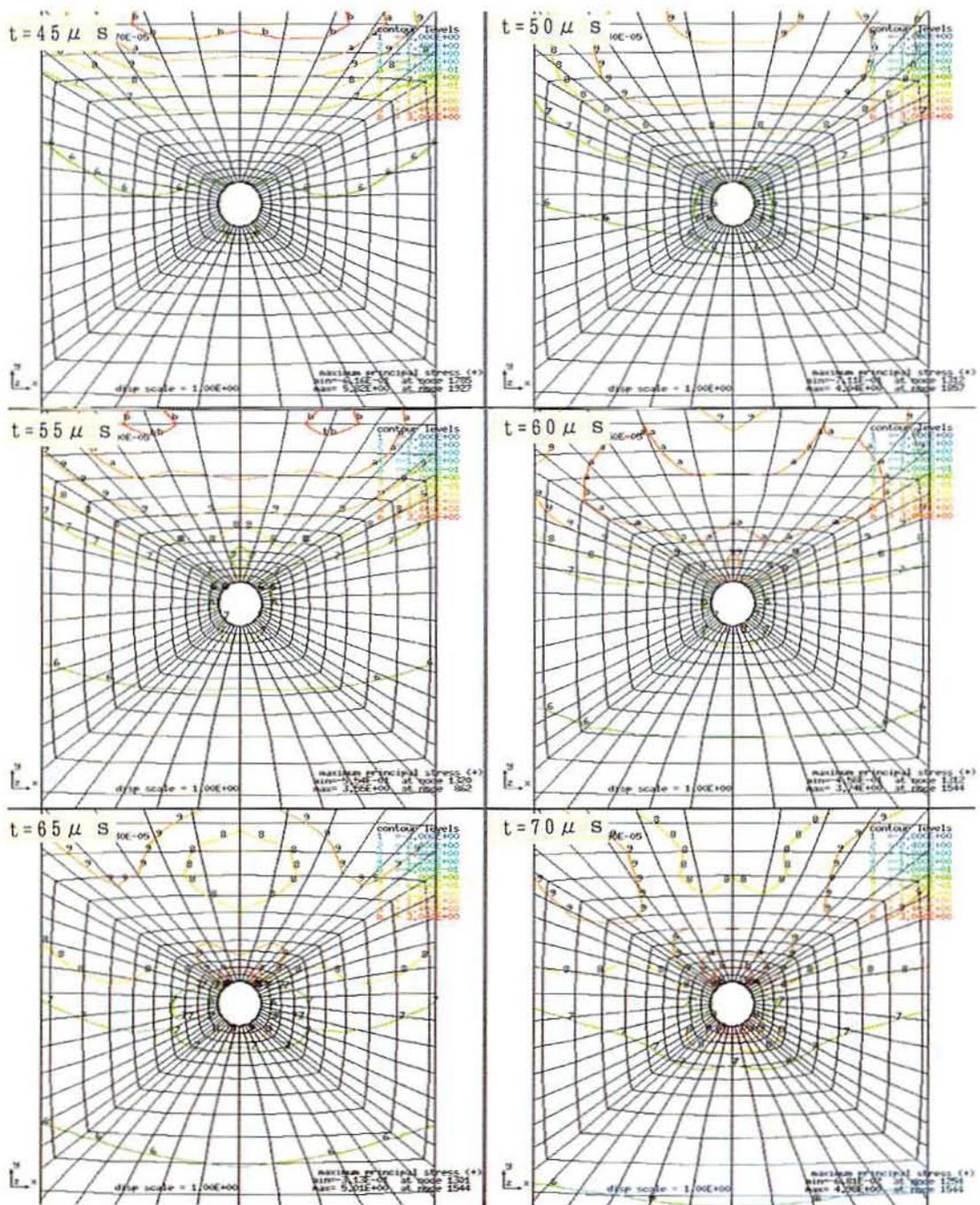


Fig. 7 Contour map of the maximum principal stress in case of 9mm diameter

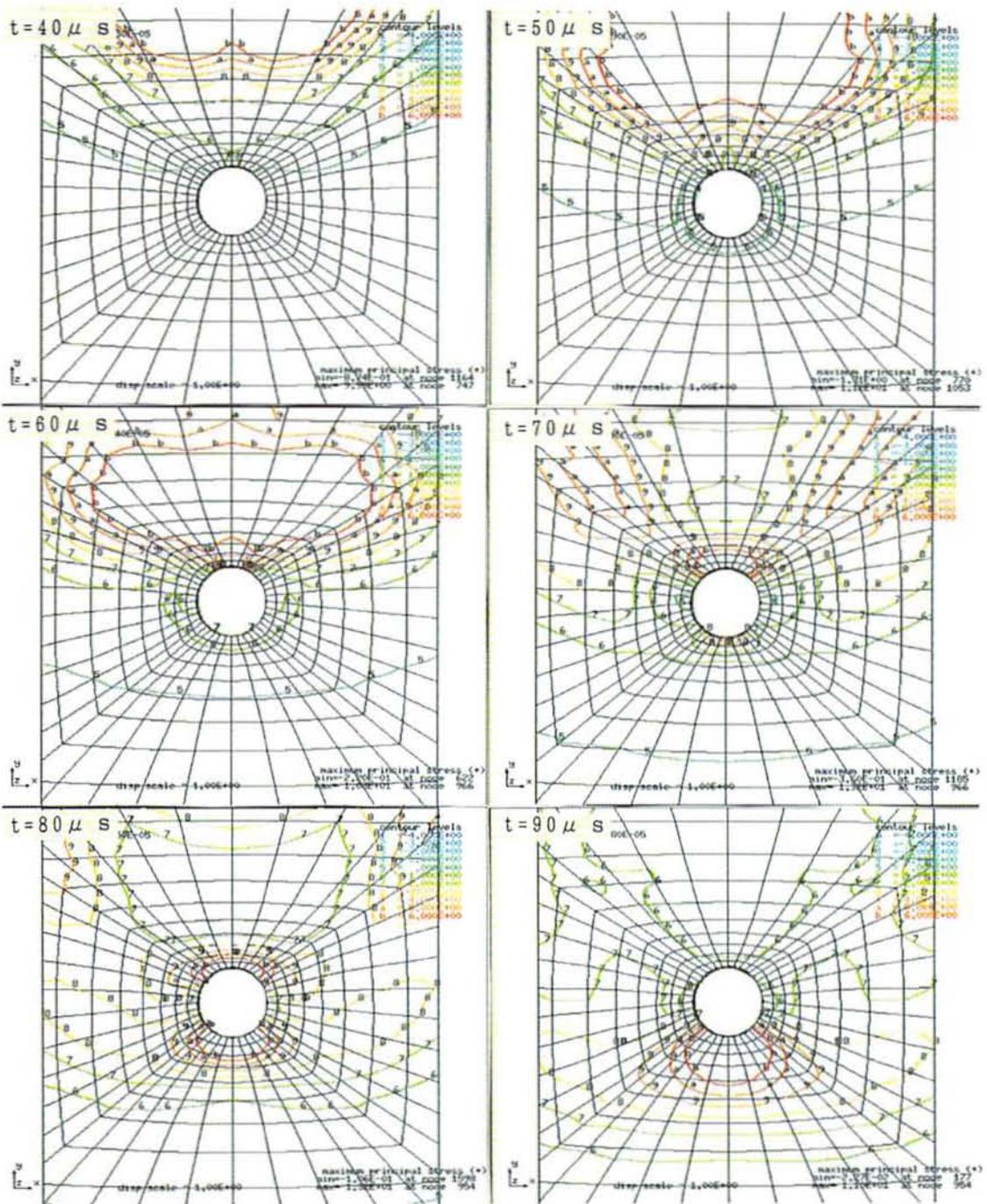


Fig. 8 Contour map of the maximum principal stress in case of 18mm diameter

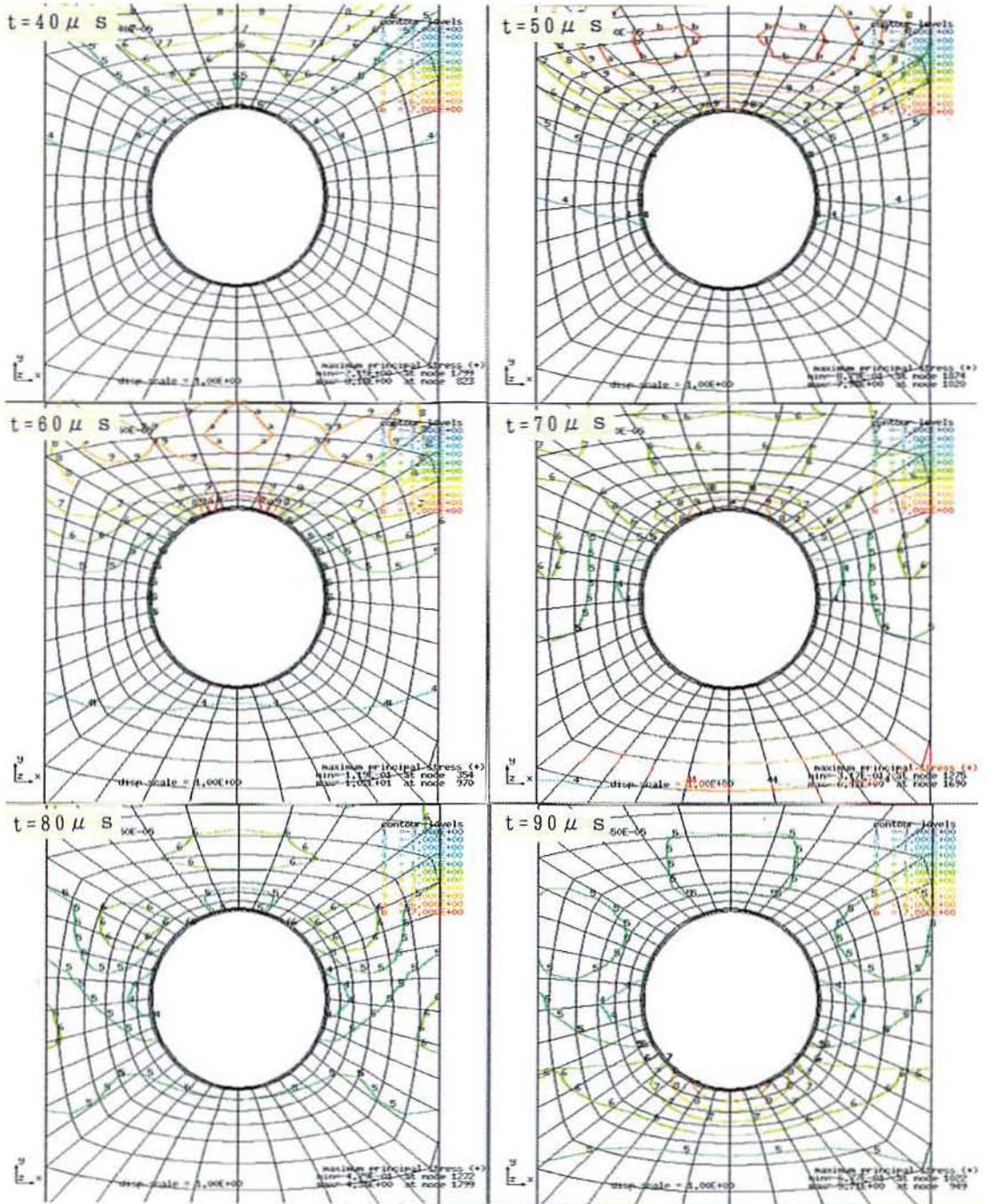


Fig. 9 Contour map of the maximum principal stress in case of 36mm diameter

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 高速度カメラによる観測結果

光弾性装置を用いた高速度カメラによるエポキシ樹脂板の観測結果をFig.3に示す。光弾性装置を用いた高速度カメラによる観測結果から精密雷管の起爆により発生した弾性波が放射状に伝播する状態が可視化できた。伝播開始後40 $\mu$ sで空孔に応力波が到達するが、空孔周辺の応力状態の変化はまだ現れない。しかし、応力波の伝播開始後45 $\mu$ sで起爆点と空孔を結ぶ方向に応力状態が変化が始まり、応力状態が空孔の影響で変化していることが分かる。

伝播開始後50 $\mu$ sで空孔から起爆点方向への応力状態の変化が明瞭となり、空孔壁面から1cm付近まで応力状態が変化していることが観測できる。また、空孔周辺で起爆点と反対側のX軸方向でも応力状態の変化が始まる。

伝播開始後55 $\mu$ sには、空孔周辺の起爆点側の応力状態の変化が更に顕著となり、起爆点側では空孔壁面から2cm付近まで明瞭な縞模様を観測できる。更に、起爆点に垂直方向でも応力状態の変化が明瞭となり、空孔から0.5cm付近まで変化している。60~100 $\mu$ sまでこの応力状態が維持される。

光弾性装置と高速度カメラを用いることで応力波の伝播状況を可視化できることが判明した。また、空孔の影響で空孔周辺の応力状態が変化することが判明した。

#### 3.2 ひずみゲージによる計測結果

ひずみゲージ①及び②による計測結果をFig.4に示す。空孔の起爆点側に接着しX軸方向に設定したゲージ①では、まず起爆後40 $\mu$ sで応力波がゲージ①に達し圧縮方向に変化する。しかし、50 $\mu$ s後に引張となり、70 $\mu$ sで最大となり90 $\mu$ sまで引張状態が維持される。これに対して、発破孔の起点の垂直側に接着しY軸方向に設定したゲージ②は、まず起爆後40 $\mu$ sに応力波がゲージ②に達し圧縮方向に変化する。さらに、50 $\mu$ sで最大となり、圧縮状態が維持される。

ひずみゲージによる観測結果から空孔周辺の応力状態は、空孔の起爆点側のX軸方向では引張となり、これに垂直側のY軸方向では圧縮となり、光弾性装置で観測された空孔の起爆点側の変化は、引張によるものであり、これに垂直な側のは圧縮によることが判明した。

### 4. DYNA-3Dによる数値シミュレーション

#### 4.1 数値シミュレーション方法

DYNA-3Dは、米国のローレンスリバモア国立研究所で開発された有限要素法による非線形衝撃応答解析プログラムである。この解析コードの特徴は、陽解

法により3次元の大変形、大ひずみ、弾塑性を伴う構造物の動的応答を解析する解析コードである。また、衝撃問題以外にも金属加工や爆発等による衝撃波の伝播解析にも適用できる。要素としては、8節点固体要素、2節点固体要素、4節点薄肉シェルおよび剛体を扱うことができる。運動方程式は、駐屯中心差分法に基づいて陽解法により、時間積分される。工業技術院情報計算センターのスーパーコンピュータCRAY C916に装備しているDYNA-3D解析コードを使用した。

今回は、このDYNA-3D解析コードを利用して空孔周辺の応力状態を解析し、光弾性装置による観測結果およびひずみゲージによる計測結果と比較し、空孔周辺の応力状態を検討する。解析モデルをFig.5に示す。光弾性実験で使用したエポキシ樹脂板(ヤング率: 2.0GPa, ホアソン比: 0.45)をモデルとして3,072個の節点で2,160個の8節点固体要素に空孔周辺を密に分割して解析した。また、空孔の径の影響を検討するために、空孔の直径を2倍及び4倍としたモデルを想定して解析した。

衝撃荷重の入力は、爆薬による衝撃波を近似する三角波を想定し、ゼロから最大値までの立ち上がり時間を5 $\mu$ sとし、ゼロまで減衰する時間を立ち上がり時間の2倍の10 $\mu$ sとした。また、衝撃荷重の入力位置は、雷管ホルダーが接する位置の4カ所の節点に行った。Fig.5で示す↑が、衝撃荷重の入力位置及び方向を示す。

#### 4.2 数値シミュレーション結果と考察

DYNA-3Dによる解析結果を得られた等最大せん断応力線をFig.6に示す。DYNA-3Dコードによる解析結果から、応力波の入力から35 $\mu$ sに空孔に達する。40 $\mu$ sで空孔の上側で最大せん断応力の変化が始まり、縞模様が表れる。50 $\mu$ sで発破の孔上部の最大せん断応力の集中がさらに明瞭になり長く延びる。また、空孔の左右の最大せん断応力の集中で縞模様は明瞭となる。55 $\mu$ sで空孔の下側にも最大せん断応力の集中が表れ、空孔の上下左右に最大せん断応力の縞模様が表れる。60 $\mu$ sで発破孔の上側と左右での最大せん断応力の集中が弱くなり、左右の下側45°方向に最大せん断応力が集中する領域が表れる。数値解析結果による最大せん断応力の状態と光弾性装置による観測結果を比較するとほぼ一致することが判明した。

DYNA-3Dによる発破孔の直径が9mmの最大主応力の解析結果をFig.7に示す。入力開始後40 $\mu$ sで空孔の上側で圧縮となり左右ではまだ変化がない。45 $\mu$ sで空孔の上側では引張となり、左右では圧縮となる。50~70 $\mu$ sでは空孔の上下側では引張状態となり、左右では圧縮状態となる。この解析結果から光弾性装置で

観測された縞模様は空孔の上下方向では引張によるものであり、左右方向では圧縮によることが判明した。

DYNA-3Dによる空孔の直径が18mmの最大主応力の解析結果をFig.8に示す。入力開始後40 $\mu$ sで上側で引張となるが、左右ではまだ応力状態の変化はない。45 $\mu$ sで左右に圧縮が現れる。55 $\mu$ sで左右での圧縮領域が大きくなり、下側でも引張が表れる。70~80 $\mu$ sまで空孔の上下側では引張状態となり、左右側では圧縮状態となる。85 $\mu$ sで上側では引張と左右の圧縮が弱くなり、下側の引張応力の集中となる。空孔の上下側では応力集中が表れるのに時間差のあることが判明した。

DYNA-3Dによる空孔の直径が36mmの最大主応力の解析結果をFig.9に示す。入力開始後35 $\mu$ sで空孔の上側では引張となり、時間の経過により引張領域が大きくなり、75 $\mu$ sまで引張状態となる。70~90 $\mu$ sで空孔の左右側で圧縮領域が表れるが、時間の経過に伴い上側から下側へ移動する。85 $\mu$ sで空孔の下側で引張が始まり、時間の経過に伴い引張領域が大きくなり、110 $\mu$ sまで維持される。空孔の上下方向では引張状態となるが、時間差がさらに大きくなる。また、発破孔の左右側では圧縮状態が上側から下側に移動することが判明した。

## 5. まとめ

前段の発破により空孔周辺の応力状態を検討する光弾性装置と高速カメラによる観測とひずみゲージによる計測実験とDYNA-3Dによる応力状態の数値解析から以下のことが判明した。

1) 光弾性装置と高速カメラによる観測から応力波の伝播に伴う空孔周辺の応力状態の変化を可視化

できた。また、応力波の伝播により、空孔の周辺で応力状態が変化している領域を観測した。

2) ひずみゲージによる計測結果から空孔の上下側のX軸方向では引張状態となり、空孔の左右側のY軸方向では圧縮状態となる。

3) DYNA-3Dによる空孔周辺の主応力の数値解析から、空孔のY軸方向では引張状態となり、空孔のX軸方向では圧縮状態となることが判明した。これにより等最大せん断応力を示す光弾性装置による観測結果から得られた応力集中は上下方向では引張により、左右方向では圧縮によることが判明した。また、空孔の大きさによる解析から空孔が大きくなると空孔の上下側で応力集中に時間差のあることが判明した。

## 文 献

- 1) 和田有司, 馬貴臣, 中嶋敏秀, 昔 哲基, 緒方雄二, 勝山邦久, 三宅淳巳, 小川輝繁, 火薬学会誌, 55, 174 (1994)
- 2) 緒方雄二, 和田有司, 勝山邦久, 昔 哲基, 第23回安全工学シンポジウム 97 (1993)
- 3) 勝山邦久, 佐々宏一, 伊藤一郎, 日本鉱業会誌, 86, 195 (1970)
- 4) 大原直, 椋木淳二, 秋吉直義, 土木学会第47回年次学術講演会Ⅴ 254 (1992)
- 5) 中村裕一, 松永博文, 山本雅昭, 住吉和洋, 工業火薬, 53, 31 (1992)
- 6) 緒方雄二, 松本 榮, 勝山邦久, 橋爪 清, 工業火薬, 53, 200 (1992)
- 7) 土木学会編 構造工学シリーズ6, 49 (1993)

**Observations and numerical simulations of the stress distribution  
around a bore hole by explosive shock.**

**by Yuji OGATA\*, Yuji WADA\*, Kunihisa KATSUYAMA\***

Controlled blasting is required for the demolishing old buildings in the urban area. As the basic research of the precise controlled blasting, the stress distribution around a bore hole on the epoxy resin plate was observed by the dynamic photoelastic method and the strain were measured by using the strain gauges. The numerical simulation using DYNA-3D was carried out to consider the stress distribution around the bore hole in the experiment. Conclusions are briefly summarized as follows;

- 1) The propagation and the concentration of the stress wave could be observed by the dynamic photoelastic method. The concentration of the stress was observed in the direction for X and Y axis of the blasting hole.
- 2) The concentration of the stress on the epoxy resin plate is the tensile stress in the Y axis direction and the compressive stress in the X axis direction as the results of the strain gauges.
- 3) The stress distribution around the bore hole is the tensile stress in the Y axis direction and the compressive stress in the X axis direction as the results of the DYNA-3D numeric analysis.

(\*Safety Engineering Dept. , National Institute for Resources and Environment,  
AIST, MITI, 16-3 Onogawa, Tsukuba Science City, Ibaraki, 305, Japan)

---