発破衝撃による空孔周辺の波動の観察と数値シミュレーション

緒方雄二*,和田有司*,勝山邦久*

「精密制御発破法の基礎的研究として、エポキシ樹脂板に穿孔した空孔周辺の応力状態の変化 を光弾性装置と高速度カメラを用いて観測し、ひずみゲージでひずみ状態を計測した。さらに、 DYNA-3Dによる数値シミュレーションにより空孔周辺の応力状態を検討した。光弾性装置 と高速度カメラによる観測結果とひずみゲージによる計測結果とDYNA-3Dによる数値解析 結果から、空孔のX軸方向では圧縮状態となり、これに垂直なY軸方向では引張状態となるこ とが判明した。

1. 赭 曾

都市部の再開発に伴い老朽化した建造物の解体が大 きな問題となっているが、これに爆薬を用いる発破解 体が注目されている。発破解体は、従来の解体重機を 用いる工法と比較すると工期の短縮・経費の低減・重 機使用に伴う騒音振動の解消等の利点が多いが、爆薬 の爆轟に伴う獅撃振動・騒音・飛石等の問題や都市中 心部での火薬類の使用に対する周辺住民の問題から十 分に実用化されていないのが現状である。このため、 都市部での発破解体では発生する振動・騒音・飛石を 十分に制御する安全な発破法が不可欠であり、振動・ 騒音を軽減し飛石を制御する制御発破法の研究が行わ れている^{1) 2}。

解体発破では、 違造物を安全にかつ確実に破壊する ために制御発破法が用いられる。 制御発破では、 発生 するき裂の進展を制御することが重要であり、従来の 方法としてはガイドホールによるき裂制御³¹ あるい は発破孔に切欠を設ける方法⁴¹、特殊な装薬ホルダー を用いる方法⁵¹が研究されている。また、 段発発破 では、 前段の爆薬の爆轟で発生する応力波で次段以降 の発破孔周辺の応力状態が変化することが知られてお り、この応力状態の変化を利用して、き裂の進展を制御 する方法が考えられる。 精密起爆法では、 1 µsの精 度で 1 µsから10sまで起爆時間を精密に制御できる⁶³。 このため、従来の制御発破法では実施できない発破孔 の応力状態を考慮した精密制御発破が可能であること

1994年12月8日受理 *資源環境技術総合研究所安全工学部 〒305 つくば市小野川16-3 TEL 0298-58-8564 FAX 0298-59-8558 が考えられる。

本研究では、発破孔周辺の応力状態を考慮した精密 制御発破法の基礎的研究として段発発破で前段の発破 の影響で次段以降の発破孔周辺の応力の状態を検討す るために、エボキン樹脂を用いたモデル実験を行った。 エボキン樹脂には予め発破孔に相当する空孔を設けて おき、光弾性装置と高速度カメラによる可視化した観 測とひずみゲージによる空孔周辺のひずみ状態を計測 した。さらに、数値解析として、DYNA-3D解析コー ドによる応力状態の数値解析をすることにより空孔周 辺の応力状態を検討した。

- 2. 実験
- 2.1 実験方法

光弾性実験では、外力を受けた固体が一時的に光学 的複屈折性を示す性質(光弾性効果)を利用すること で,動的応力状態を可視化できる。また,動光弾性寒 験では、等最大せん断応力線が光弾性模模様として可 視化される⁷⁾。Fig.1に本実験で使用した光弾性装置 と高速度カメラによる応力波の伝播状況を観測する実 験装置の概略を示す。光顔からの光がレンズで集光さ れ、絞りを通過後に直径30㎝のレンズで平行光線にな り、鳫光子・実験槽・圓光子を通して、レンズで集光 して高速度カメラで観測する。実験で用いた光弾性装 償は理研計器(株)製PA-300型である。高速度カメラ はCordin社製フレーミングカメラ・モデル124(フ レーム速度:100,000~2,500,000, 扱影駒数:26駒, 使用フィルム:カラー35mm) である。実験でのフレー ム速度は2×10⁵で、光源としてはクセノンフラッシ ュ(3.5KV以上)を使用した。衝撃波の発生には, 日本化薬(株)製精密留管と当研究室で開発した精密起 爆器を用いた。



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6cm)を使用し、起爆端面から9cmに直径9 cmの空孔を穿孔し、宿管の爆塵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、精密留管 を留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結方向と 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-8850 (最大サンブリングレート:20MHz)を 用いて計測した。



① t=35µs





(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





Ĺ,



Fig. 6 Contour map of the maximun shear stress



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





Fig. 9 Contour map of the maximun 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40µs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45µs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50µs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1 cm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55µs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2 m付近まで明瞭な縞模様が観測できる。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0.5m付近まで変化している。60~100µs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40µsで応力波がゲージ①に達 し圧縮方向に変化する。しかし、50µs後に引張とな り、70µsで最大となり90µs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40µsに応 力波がゲージ②に達し圧縮方向に変化する。さらに、 50µs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、空孔の起爆点倒のX軸方向では引張となり、こ れに垂直倒の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断撃波の伝 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ーCRAY C 916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ジ樹脂板(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節点間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5µsとし、ゼロまで減衰する時間を立ち上がり時間 の2倍の10µsとした。また、衝撃荷重の入力位置は、 宿管ホルダーが接する位置の4ヵ所の筋点に行った。 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35µsに空孔に達す る。40µs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。50µs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。55µs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橋模様が表れる。60µs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40µsで空孔の 上側で圧縮となり左右ではまだ変化がない。45µsで 空孔の上側では引張となり、左右では圧縮となる。50 ~70µs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40µs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。 45µsで左右に圧縮が現れる。55µs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。70~80µs 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。85µs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35µs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、75µsまで引張状態となる。70~90µs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。85µs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、 110µs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個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 弾性装置と高速度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。

光弾性装置と高速度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軸方向では引張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。

太 太

- 和田有可,馬貴臣,中隐敏秀,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) 結方雄二,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) 防山邦久,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 ¥1 254 (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, 工楽 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 -3 D 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 f 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)