

爆破応力波と円孔の干渉によって生じるき裂の動的挙動の観察

OBSERVATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF CRACKS GENERATED BY INTERACTION OF STRESS WAVES WITH A HOLE IN BLASTING

中村裕一*, 藪健治**, 桐谷能生***

Yuichi NAKAMURA, Kenji YABU and Yoshio KIRITANI

*工博 八代高専教授 土木建築工学科 (〒866-8501八代市平山新町2627)

**八代高専専攻科環境建設工学専攻 (〒866-8501八代市平山新町2627)

***八代高専技官 技術室 (〒866-8501八代市平山新町2627)

キーワード：応力波、き裂伝ば、可視化観察、高速度撮影、爆破実験

(stress wave, crack propagation, visualization, high-speed photography, blasting experiments)

1. はじめに

爆破き裂の進展制御を目的とした従来技術の中で、装薬孔の近くに円孔のガイドホール(空孔)を設けておくと、その方向へ爆破き裂を進展させることが出来ると言われているが、その効果の評価については幅がある^{1)~3)}。これは爆破現象が瞬間的であることなどの実験的困難さなどによって、爆破にともなう応力波と円孔の相互作用やき裂進展に及ぼすその役割が必ずしも十分に明らかにされていないことによるものである。この爆破現象を解明するためには、応力波とき裂の挙動を同時に高速度撮影することが出来れば、非常に有効となる^{4) 5)}。このため、アルゴンイオンレーザーを光源に使用したシュリーレン法による可視化画像を高速度ビデオに記録するシステムを構築した⁶⁾。本論文では、まず、これらの高速度可視化画像撮影システムの概要を示し、これを使用して行った爆破モデル実験における円孔と干渉する応力波とき裂の挙動の観察結果を示す。また、円孔周囲の動ひずみ履歴の測定結果を示す。実験結果から、切り欠きを有する円孔をガイドホールとして使用する方法が、き裂進展制御のために有効であることを示す。

2. 実験方法

2.1 連続可視化観察のための装置及び方法

シュリーレン法による爆破現象の可視化観察のための光学系装置の配置を図一1に示す。2個の凹面鏡(焦点距離 1.5m、有効径 20cm)を用いた2面对向法である。光源には、アルゴン・イオンレーザー(最大出力 4 W)を使用した。レーザー光の特徴は可干渉性と単色性にあり、爆破現象の可視化実験において問題となる爆発光は、光学フィルターを使用することによって、簡単に除去できる。本実験では、受光側の焦点位置に近接して、バンドパスフィルター(透過波長 514nm, 半値幅 18nm)が配置されている。また、岩質材料中のき裂挙動観察のためのモルタルを使用した爆破現象観察では、爆発容器内に配置された供試体に2個のハロゲン光源の光をあてて、高速度ビデオカメラを用いて、そのき裂進展挙動を撮影した。図一2に、本実験のブロック線図を示す。使用した高速度ビデオ撮影装置はデジタルメモリー方式の画像記録装置で、分割フレームにすれば、最高撮影速度 40500 コマ/秒で画像記録が出来る。可視化観察のモデル実験には、爆破実験における供試材料としてその有効性が認められているPMMAを使用し、図一3に示すガイドホール周囲にひずみゲージを接着し、動ひずみ測定も行った。使用したひずみゲージは共和電業(株)製の大ひずみ測定用ゲージ KFE-2-120(Type1)と KLM-6-120(Type2)であり、動ひずみアンプの応答周波数は、

DC ～ 500kHz である。図－3において、ガイドホールは爆源から 100mm、自由面から 50mm の位置にある。装薬には市販の地震探鉱用瞬発電気雷管 6 号 (PETN0.4g) を使用した。爆破現象の解析のために、装薬の爆発時刻と応力波の自由面到達時刻を各々、イオンギャップと自作した圧電ゲージで測定した。

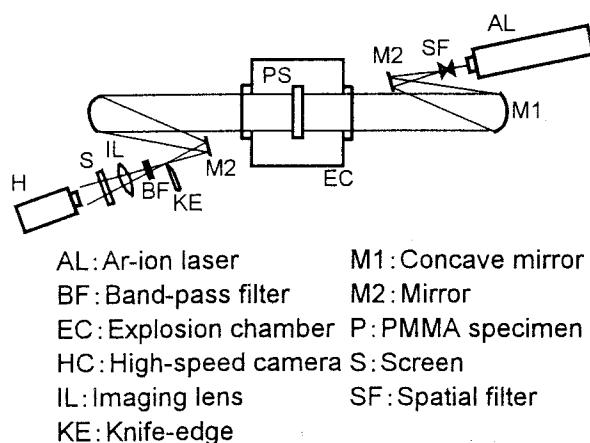
2.2 爆破き裂制御のための方法

(1) 切り欠きを有するガイドホールを使用する方法^{3) 4)}

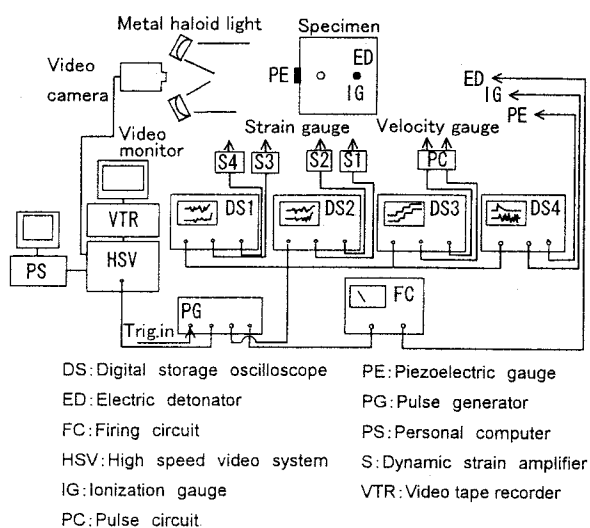
装薬孔に近接して円孔のガイドホール(空孔)を設けておくと、その方向へ爆破き裂を進展させることができると言われているが、その効果の評価については幅があり、ガイドホールのき裂制御のメカニズムについても十分な解明がなされていない。本論文では、可視化実験の成果に基づいたき裂制御方法として切り欠きを有するガイドホールを使用する方法が有効であることを示す。

(2) 破断面制御のための時間制御起爆

爆破におけるき裂方向制御が可能であれば、時間制御起爆によって、破断面制御が実現できる。図－4は、装薬 ED 1 の起爆によって、切り欠きガイドホールによるき裂方向制御を実現し、次に、ED 2 の時間制御起爆によって、破砕域を爆破し、破断面制御を行うことを意図した爆破モデル実験に使用したモルタル供試体の形状を示している。本実験において、ED 1 の装薬孔には、切り欠き円孔とスプリットチューブ⁵⁾が組み合わせて使用されている。また、き裂方向制御が実現できると、き裂と応力波の干渉現象の可視化観察が可能となる。図－5は、実験に使用した PMMA 供試体の形状を示す。装薬 ED

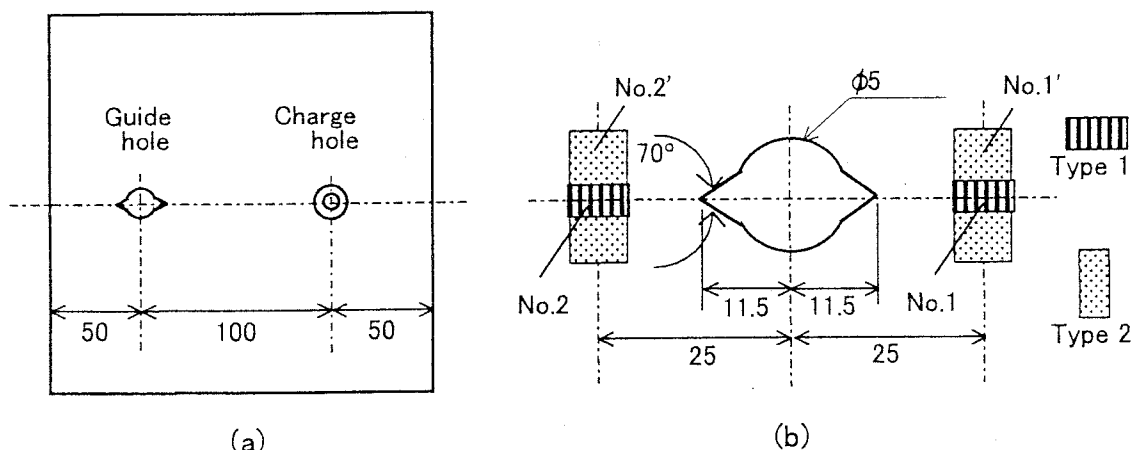


図－1 連続可視化観察のための光学系の配置

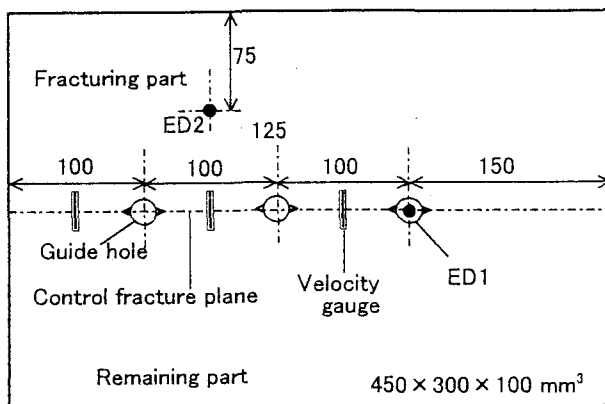


図－2 本実験のブロック線図

1 と切り欠きガイドホールによって生じるき裂に、遅延起爆された ED 2 によって生じた応力波を干渉させる。可視化観察する領域が装薬孔近傍であるた



図－3 (a) PMMA供試体形状と (b) ひずみゲージの接着位置



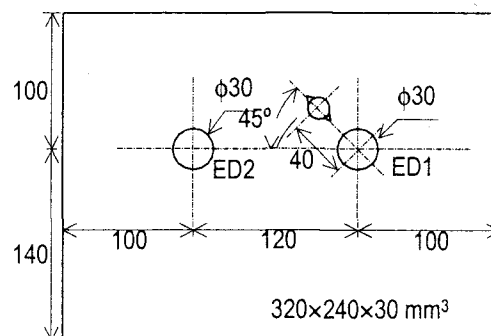
図一４ モルタル供試体の形状

め、鋼製フレームと装薬ホルダーを使用して爆発ガスの拡散を抑制した。

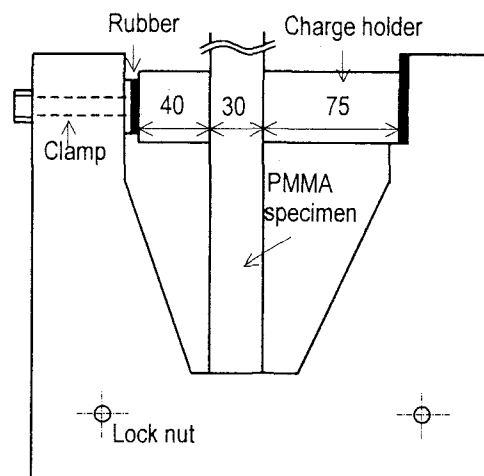
3. 実験結果および考察

(1) 切り欠きを有するガイドホールと干渉する応力波の挙動と動ひずみ履歴及びき裂制御効果

本実験では、ガイドホールと干渉する応力波が作り出す動ひずみ履歴を測定している。図一３に示したガイドホール周囲に接着されたひずみゲージからの信号波形の１例を図一６，７に示す。同一条件で３回爆破実験を行い、ひずみ波形の再現性を確認した。図一６からわかるように、入射応力波の伝ば方

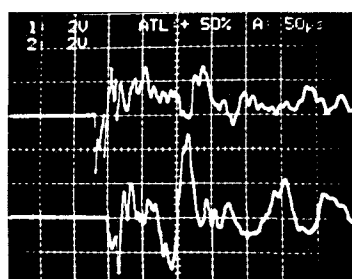


(a)

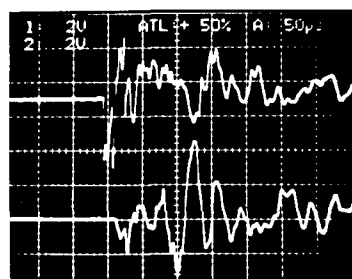


(b)

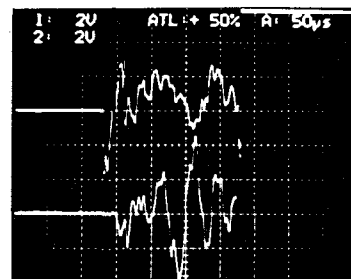
図一５ (a) 伝ばするき裂と応力波の干渉挙動の可視化観察に使用したPMMA供試体形状と(b) 鋼製ホルダー



(a)円孔なし

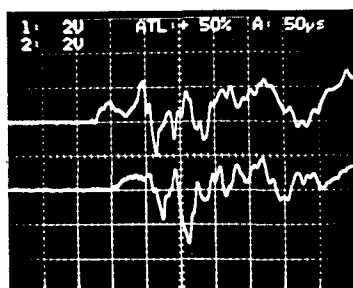


(b)円孔

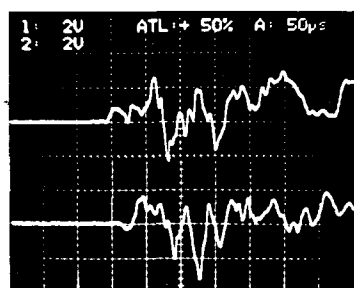


(c)切り欠き円孔

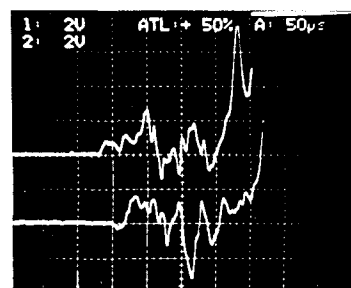
図一６ 半径方向ひずみの時間履歴 (上側波形: No.1 ゲージ, 下側波形: No.2 ゲージ)



(a)円孔なし

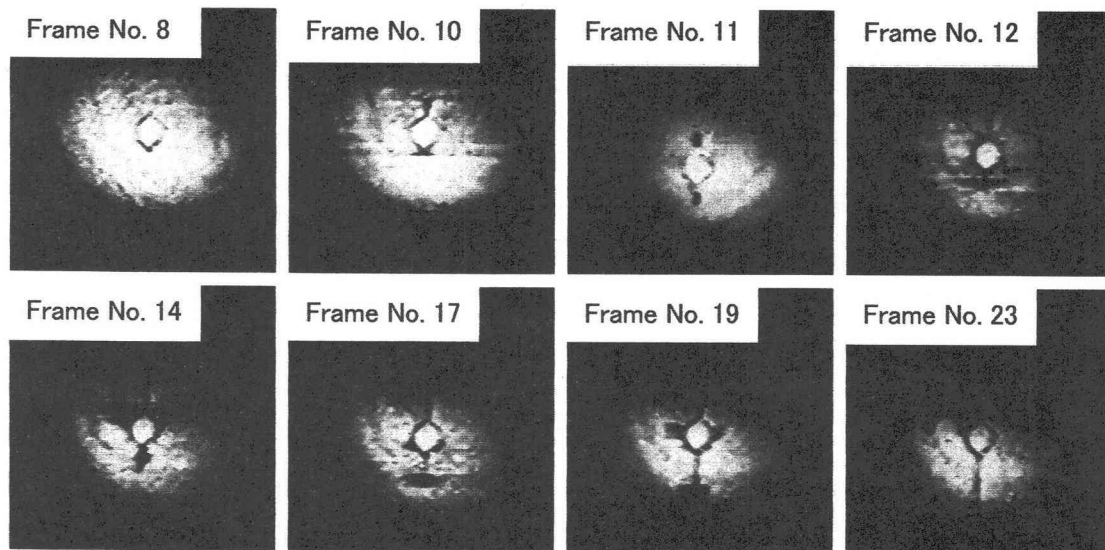


(b)円孔

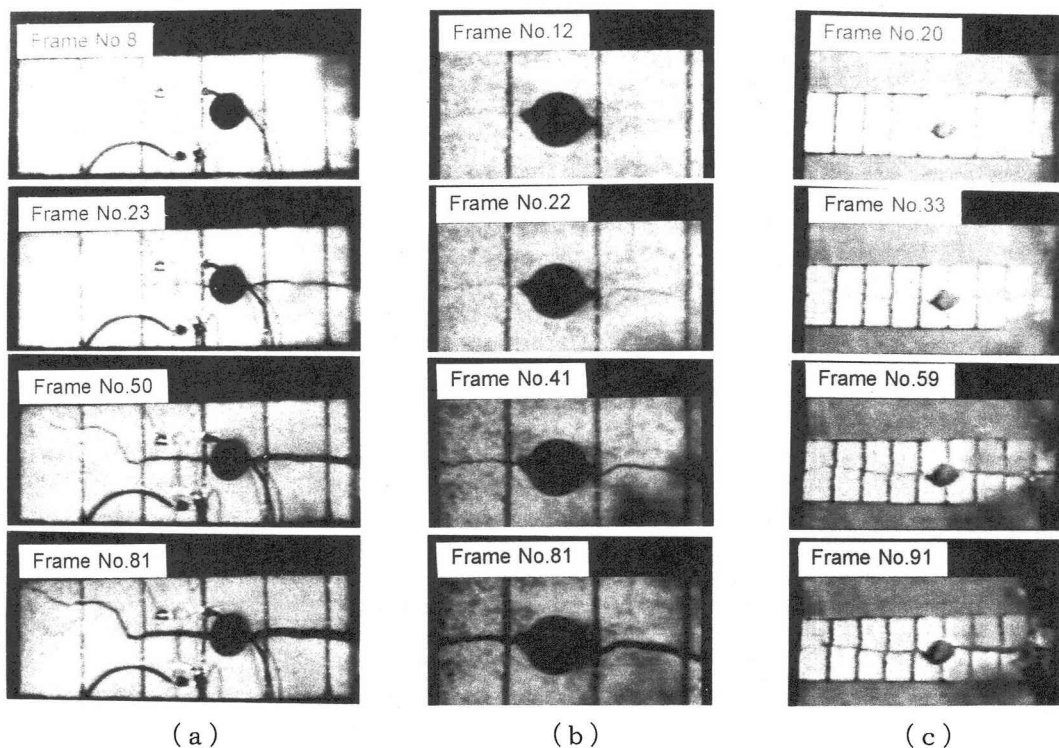


(c)切り欠き円孔

図一７ 円周方向ひずみの時間履歴 (上側波形: No.1'ゲージ, 下側波形: No.2'ゲージ)



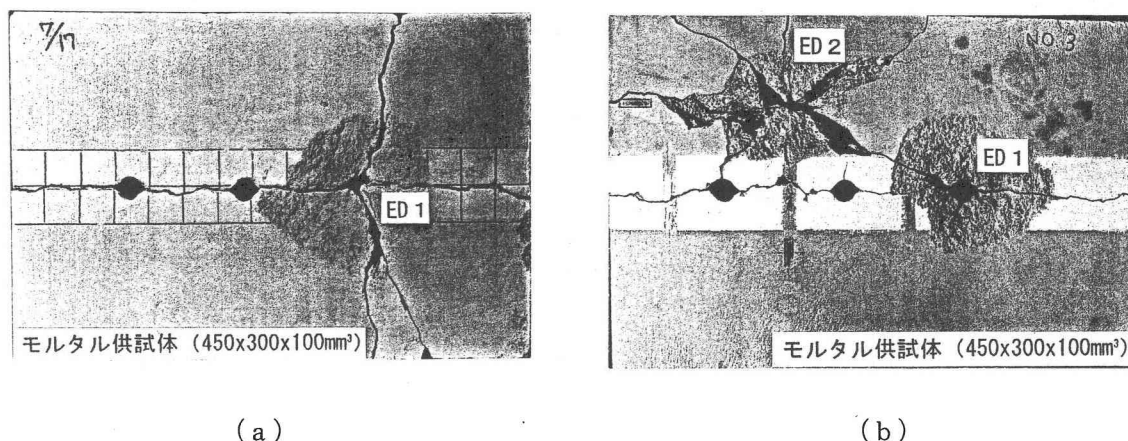
図一８ PMMA 供試体中のガイドホールと応力波の干渉挙動の可視化ビデオ画像
撮影速度：40500 コマ／秒



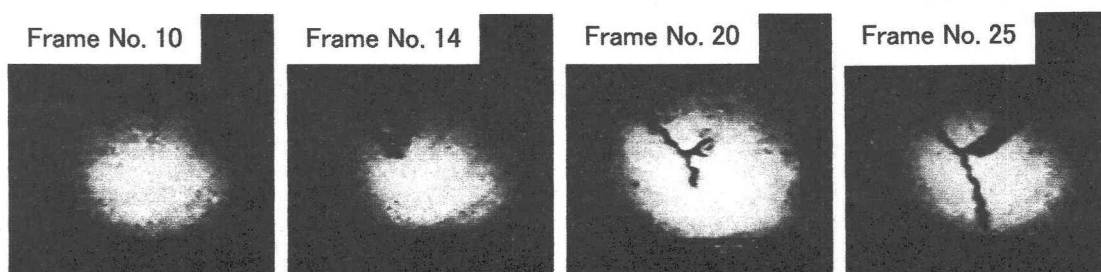
図一９ モルタル供試体中のガイドホールによって生じるき裂挙動のビデオ画像
撮影速度：(a) 18000 コマ／秒, (b) 27000 コマ／秒, (c) 27000 コマ／秒

向に沿う半径方向ひずみの履歴を示す爆源側に位置する No.1 ゲージの波形は円孔の有無による顕著な違いは認められない。爆源から No.1 ゲージの中心までの応力波の平均伝ば速度をひずみ波形の初動の立ち上がり時刻から計算すると約 3 km/s となる。爆源から 150mm の位置にある自由面までの伝ば時間は、イオンギャップの作動時刻と圧電ゲージの立ち上がり時刻から求められ、その値は $(50 \pm 1) \mu s$

である。また、ガイドホールより、自由面側位置にあるひずみゲージ No.2 の波形より、応力波は円孔通過後、圧縮ひずみを示す初動のピーク値が減少することが確認出来た。応力波の通過に伴う円周方向ひずみの時間履歴を図一七に示す。(c) の波形から、切り欠きを有するガイドホールの場合には、No.1'及び No.2'ともほぼ同時に非常に大きな引張ひずみが生じることがわかる。このことは、自由面側



図一 10 モルタル供試体中に生じた爆破後のき裂パターン
(a) 単発起爆, (b) 2 段階時間制御起爆



図一 11 PMMA 供試体中のき裂と応力波の干渉挙動の可視化ビデオ画像
撮影速度：40500 コマ/秒

へのき裂の進展が期待出来ることを示している。

このような動ひずみ履歴に対応したガイドホールからのき裂進展挙動は、高速度ビデオ画像から知ることが出来る。図一 8 は、切り欠きを有するガイドホールと応力波との干渉によって生じる図一 3 の PMMA 供試体中のき裂挙動を示す高速度ビデオ画像である。図一 8 において、応力波は上側（爆源側）から下側（ガイドホール側）へ伝ばする。応力波の通過にともなって、円孔壁面の周囲に不透明の領域が生じる。その後、両端の切り欠き先端部分に強い応力集中を示すシャドウスポットが生じ、それらは互いに逆向きに予定破断面にそって伝ばすることがわかる。図一 9 では、モルタル供試体を使用されている。形状は、(a), (b) が各々 $300 \times 300 \times 30 \text{ mm}^3$ 、(c) が $300 \times 300 \times 100 \text{ mm}^3$ である。ガイドホールは共に、爆源から 100mm、写真左側の自由面から 100mm の位置にある。(a)、(b)、(c) から、岩質材料における破断面形成は微視き裂の発生とそれに続くき裂の開口によるものであるが、爆発ガスの移動がき裂の開口に重要な役割を果たすことがわ

かる。図一 10 (a) は、モルタル供試体 ($450 \times 300 \times 100 \text{ mm}^3$) に 2 個のガイドホールを設けて実験した場合のき裂パターンを示す。予定破断面に沿って自由面までき裂が進展していることからわかるように、特別な方向へのき裂進展を実現するためのガイドホールとして、切り欠きを有する円孔がより効果的であることがわかる。図一 10 (b) は、時間制御起爆実験に使用したモルタル供試体の爆破後のき裂パターンを示している。切り欠きガイドホールによって、破断面が形成された後、破壊域に装着された装薬 ED 2 の起爆(遅延時間 1.3ms)によって生じた爆源からのき裂は、破断面を越えて進展しないことがわかる。この場合、破断面は、ED 2 によって生じた応力波とき裂に対して、自由面として作用することがわかる。

(2) 方向制御されたき裂と応力波の干渉現象の可視化観察

図一 5 に示した PMMA 供試体を使用して、き裂と応力波の干渉挙動を可視化観察した。得られた可視化画像を図一 11 に示す。遅延起爆された ED 2

によって生じた応力波はED 1とガイドホールによって生じたき裂と干渉し、新たにき裂が生じることがわかる。これはき裂面が自由面として応力波に作用することによって生じたものと考えることが出来る。

4. あとがき

アルゴン・イオンレーザーを光源に使用したシェリーレン法による可視化システムを構築して、爆破にともなう応力波とき裂の挙動を高速度ビデオカメラで連続可視化観察した。本研究では、切り欠きガイドホールのき裂制御効果とモルタル中のき裂進展挙動を明らかにするとともに、破断面制御のための時間制御起爆の有効性についても明らかにした。切り欠きガイドホールについては、可視化観察によって、切り欠き両端に、ほぼ同時にシャドウスポットが生じ、引き続いてそれらが互いに逆方向に伝ばし、破断面が形成される。時間制御起爆に関する実験では、破断面が自由面として作用することによってき裂進展が停止することや、き裂と応力波の干渉によって、新たなき裂が形成されることなどが明らかになった。この干渉現象は破砕制御に適用可能と思われる。

本研究を進めるに際して、研究費用の一部には、旭化成（株）研究助成金及び文部省科学研究費補助金〔基盤B-(2)課題番号 12555287〕を使用した。

参考文献

- 1) 中川浩二他；スムーズブラスティングにおけるガイドホールの利用に関する基礎実験,工業火薬, Vol.43, No.2, 1982, pp.75-82.
- 2) 緒方雄二、和田有司、勝山邦久；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, 火薬学会誌, Vol.56, No.1, 1995, pp.1-11.
- 3) Y.Nakamura;Visualization of stress waves in blasting processes by a laser shadowgraph method and its applications to dynamic fracture control, Post Conf. Proc. 8th Int.Congress on Experimental Mechanics(1996,Nashville,USA), pp.272-278.
- 5) Y.Nakamura;Model experiments on effectiveness of fracture plane control method in blasting, Int.Jour.Blasting and Fragmentation, 1999, Vol.3, pp.59- 78.
- 5) Y.Nakamura;Visualization of dynamic behavior of stress waves and cracks in controlled blasting, CD-Rom Proceedings of 8th Int. Symposium on Flow Visualization(1998,Sorrento),Paper No.46.
- 6) Y.Nakamura et al ;Visualization of dynamic behavior of stress waves and cracks in blasting process by high-speed videography, CD-Rom Proceedings of 9th Int. Symposium on Flow Visualization(2000,Edinburgh), Paper No.222.