



線爆発電気雷管による精密制御発破に関する研究

緒方雄二*, 松本 榮*, 勝山邦久*, 橋爪 清**

都市中心で実施される発破解体では、爆薬の爆轟で発生する振動・騒音・飛石等が周辺環境へ与える影響を十分に考慮した制御発破法が必要である。精密制御発破法の一つとして、爆薬の起爆を精密に制御することで発生する応力波の干渉等により振動騒音等を軽減する方法がある。

本研究では、雷管の起爆を $1\mu\text{s}$ の精度で制御するために精密起爆器と使用する線爆発電気雷管を試作した。高速度カメラ・ビデオによる線爆発電気雷管の爆轟現象の観測から、 $1\mu\text{s}$ の精度で $1\mu\text{s}$ から 10s まで雷管の起爆を設定した時間差が制御されていることを確認した。また、イメージコンバータ方式超高速カメラによる伝橋線の線爆発現象の観測から、伝橋線の起爆制御は $0.1\mu\text{s}$ の精度で起爆制御されていることを確認した。

アクリル板による斉発発破実験から応力波の干渉によりスムーズプラスティングの効果が大きいことが判明した。

1. はじめに

近年都市部での再開発に伴い高度経済成長期に建てられた建造物の解体処分が重要になっている。従来の解体重機を使用する解体工法では、解体重機の連続使用に伴う振動・騒音等の公害問題の発生、解体工期の長期化、解体重機に伴う事故の発生等の問題が指摘されている。これに対して発破解体は、工期の短縮化、解体重機による公害問題の解決等の利点が多い。しかし、都市部で爆薬類を使用するため、周辺環境の影響を十分に考慮した制御発破法が必要である。¹⁾ また、取り扱いを間違わなければ爆薬類自体は非常に安全であり安価である。このため爆薬類の有効利用が検討されており、発破による解体実験が実施されている^{2) 3)}。

本研究では、雷管の起爆を精密に制御する精密制御発破法の基礎的研究として、線爆発電気雷管の起爆を $1\mu\text{s}$ の精度で起爆制御できる精密起爆器と精密雷管を試作した。実験では、精密雷管の起爆精度を高速度カメラ・ビデオによる観測結果から検討したので報告する。また、精密雷管の起爆に使用される伝橋線の線

爆発現象をイメージコンバータ方式超高速カメラで観測したので報告する。

2. 精密起爆器と精密雷管

試作した精密起爆器は、日本化薬株式会社工場で製作したもので、制御部・出力部・電源部からなる。出力部には独立した5チャンネルの出力回路があり、制御部からの起爆信号でサイリスタが作動し、充電した電流を放出する。制御部ではそれぞれの回路を $1\mu\text{s}$ から 10s まで $1\mu\text{s}$ の精度で任意に起爆開始信号の入力からの起爆遅れ時間を設定できる。精密起爆器をFig. 1に示す。制御部の起爆開始信号の入力方法は、押しスイッチによる起爆方法とパルス入力による起爆方法があり、パルス入力により起爆方法から高速度カメラによる撮影が容易になった。試作した精密起爆器の仕様を以下に示す。

- (1) 起爆回路数：5チャンネル
- (2) 制御時間： $1\mu\text{s} \sim 10\text{s}$
- (3) 制御精度： $1\mu\text{s}$
- (4) 充電電圧： $2,500\text{V}$ 以上
- (5) コンデンサー容量： $4\mu\text{F}$ /チャンネル
- (6) 出力部出力負荷： $1 \pm 0.5\Omega$
- (7) 出力電流： 1KA 以上
- (8) 負荷ケーブル：RG5A/U 10m
- (9) 起爆方法：(a)押しスイッチ
(b)パルス入力 (高速度カメラ)

1992年6月2日受理

*資源環境技術総合研究所安全工学部

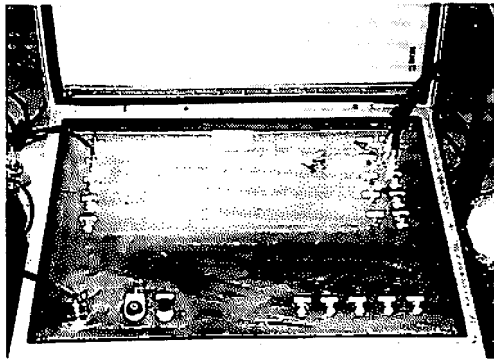
〒305 つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8564

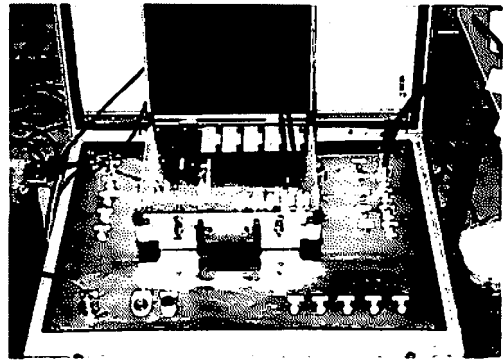
**日本化薬株式会社化学品事業本部

〒100 東京都千代田区丸の内1丁目2番9号

TEL 03-3212-4365



(a) Main body



(b) Control unit and main body

Fig. 1 Photograph of precise blasting machine

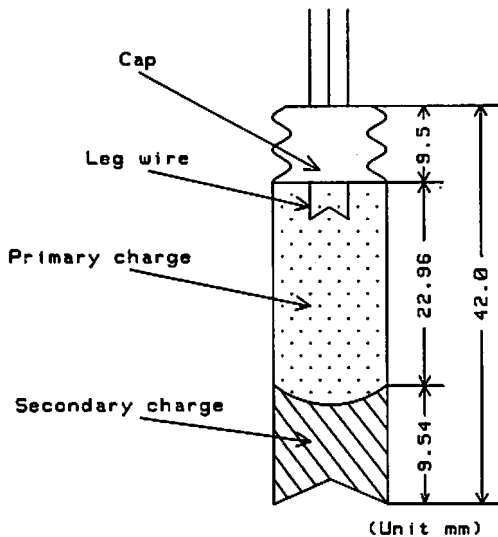


Fig 2 Precise detonator for blasting machin

精密起爆器で起爆させる精密雷管は、線爆発電気雷管で雷管内部にある電橋線を高電力で溶断し爆発させることで起爆薬を起爆させる雷管である。精密雷管は、日本化薬製の線爆発電気雷管で、銅管体に起爆薬と添装薬をそれぞれベンスリット0.4g、0.3g合計0.7gを管体全体に充填してある。精密雷管は装填された装薬量から8号雷管に相当する。精密雷管の概略図をFig. 2に示す。

3. 実験方法

3.1 精密雷管の起爆制御実験

精密雷管の起爆精度を検討する実験では、精密起爆器の2チャンネルを用い、2個の精密雷管を設定の時間差で起爆させて、その起爆状況を高速カメラと高速ビデオで観測した。高速カメラによる観測では精密雷管の起爆制御が1 μ sの精度で制御されている

のを検討した。また、高速ビデオでの観測では起爆遅れ時間をmsに設定した実験で起爆制御を検討した。

高速カメラはCORDIN社製のフレーミングカメラ124（フレーム速度：100,000~25,000,000FPS、撮影駒数：26駒、使用フィルム：カラー35mm）で、フラッシュにはクセノンフラッシュ（4KV以上）を使用した。高速カメラの撮影では、高速カメラの制御部からの撮影開始信号を精密起爆器制御部へのパルス入力信号として精密雷管の起爆制御した。高速ビデオはナック社製のハイスピードビデオHSV1000（撮影速度：500, 1000駒/秒、撮影時間：最大14分の連続録画）である。

精密雷管の起爆精度を検討する実験では、2個の精密雷管（A雷管とB雷管）を10cmの間隔で吊りし、A雷管の起爆後10 μ sにB雷管を起爆させる起爆条件で撮影した。高速カメラのフレーム速度は 5×10^5 FPS（駒間2 μ s）で撮影した。撮影ではフラッシュを使用した状態で雷管の爆発の様子を観測した。また、フラッシュを使用しないで雷管内の装薬の爆轟による自発光だけの状態を撮影した。

3.2 伝橋線の爆発実験

電橋線の線爆発現象を観測する実験では、イメージコンバータ方式超高速カメラで電橋線の部分を拡大して撮影した。高速カメラはナック社製のウルトラナック（撮影速度：2,000~20,000,000FPS、記録駒数：8, 12, 15, 18, 24枚、記録：モノクロインスタントフィルム、4 \times 5フィルム等）を使用した。撮影条件は、 10^6 、 5×10^6 、 10^7 FPS（駒間1, 0.5, 0.1 μ s）の3種類の撮影速度で、撮影駒数15である。

3.3 アクリル板による完全斉発発破

精密起爆器を用いて完全斉発発破実験をアクリル樹脂板（縦360mm、横410mm、厚さ20mm）で実施した。自由面による反射波の影響を出来るだけ無視できる位置

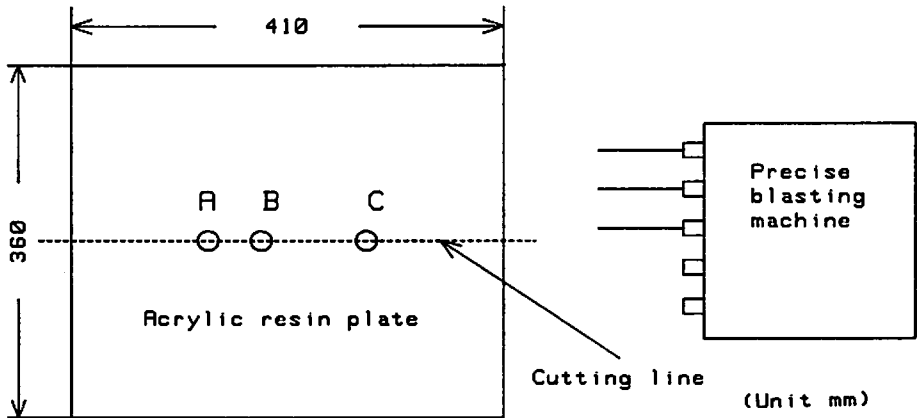


Fig. 3 Figure of perfect simultaneous blasting test on acrylic plate

に3つの発破孔（直径7.0mm、ABC孔）を穿孔し、ABC面上を破断予定面とした。AB孔の間隔を50mm、BC孔の間隔を100mmとし、3個の精密雷管を同時に起爆するスムーズプラスチック実験（以下SBと略す）を実施し、アクリル板の破壊状況を観測した。Fig.3に実験の概略を示す。

4. 実験結果

4.1 精密雷管の起爆制御実験

起爆遅れ時間を10 μ sに設定した実験では高速度カメラで精密雷管の起爆状況を観測した。

フラッシュ使用状態での観測結果からA雷管の電橋線付近から管体の膨張が始まり、4 μ sで雷管底部に管体の膨張が伝播する。時間の経過に伴い雷管の破片と装薬の爆轟面が大きく膨張する。精密雷管の管体底部から発生するノイマンジェットを精密雷管の起爆後6 μ sに観測した。また、A雷管の起爆後10 μ sにB雷管の起爆が始まりA雷管と同様にB雷管の電橋線付近の管体から膨張が始まり爆発するのを確認した。

フラッシュ未使用状態での観測結果から伝橋線付近で発光が始まり、時間の経過に伴い雷管全体が発光する。また、電橋線付近の発光が最も強くなり、これは高電力で爆発する伝橋線の影響のためと思われる。管体底部から発生するノイマンジェットを鮮明に観測した。A雷管の起爆後10 μ sにB雷管の起爆が始まるA雷管と同様の爆発現象が電橋線付近の起爆が始まるのを確認した。

A雷管の起爆後32 μ sに2個の精密雷管の爆轟面の衝突する部分で発光現象を観測した。これは雷管の管体の破片が高速度で衝突するために起きたものと思われる。

これらの高速度カメラの観測結果から精密雷管が設定した時間差で正確に起爆しており、1 μ sの精度で制御されていることを確認した。フラッシュ使用状態

での観測結果をFig.4に示す。

起爆遅れ時間を5msに設定した実験では高速度ビデオにより起爆状況を観測した。精密雷管の爆発とノイマンジェットの発生を高速度ビデオの1フレームに観測した。精密雷管の起爆現象が数十 μ で終了することから1フレームですべての現象が観測できたものと思われる。設定した時間差で雷管の爆発現象が観測されていることから、5msの起爆時間差の設定でも正確に起爆していることを確認した。Fig.5に高速度ビデオによる観測結果を示す。

4.2 電橋線の線爆発観測結果

イメージコンバータ方式超高速度カメラによる観測結果から、撮影速度10⁶FPSによる観測では起爆開始から爆発膨張まで1駒（1 μ s）で終了する。撮影速度5 \times 10⁶FPSでは電橋線が発光し爆発膨張の様子を数駒で観測できた。撮影速度10⁷FPSでは電橋線の表面でわずかな発光が始まり（3駒目）、全体が強力に発光し爆発膨張の様子を鮮明に観測できた。撮影速度10⁷FPSでの観測結果をFig.6に示す。

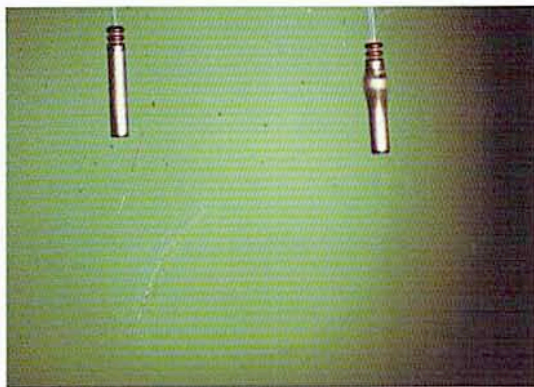
これらの観測結果から伝橋線の線爆発現象は、通電してから精密起爆器の公称の精度である1 μ s以内で爆発が起きることを確認した。また、撮影速度10⁷FPSでの観測実験では、4回の実験ですべて同じ3駒目から伝橋線の発光現象が開始することを確認した。このことから伝橋線自体の起爆制御は、公称の1 μ sより高度に制御されており0.1 μ sの精度で制御されていることが判明した。

4.3 アクリル板による観測結果

アクリル板によるSBの実験結果をFig.7に示す。アクリル板による実験結果からB孔から放射状に発生する亀裂が非常に短く、ほぼ切断予定面上に亀裂が進展することを確認した。これは隣接する装薬孔からの応



(1) before blasting



(2) $t = 0$



(3) $t = 2 \mu\text{s}$



(4) $t = 4 \mu\text{s}$



(5) $t = 6 \mu\text{s}$

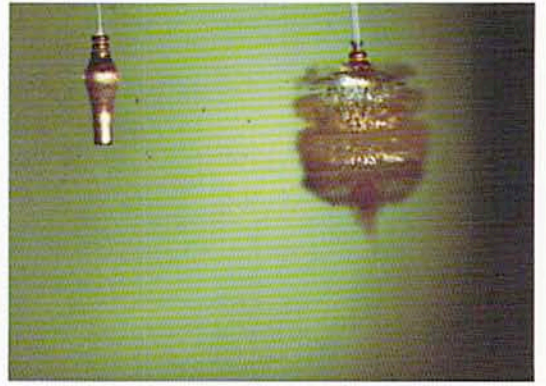


(6) $t = 8 \mu\text{s}$

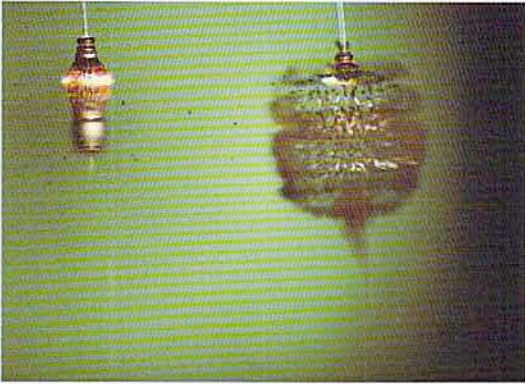
Fig. 4 (1)



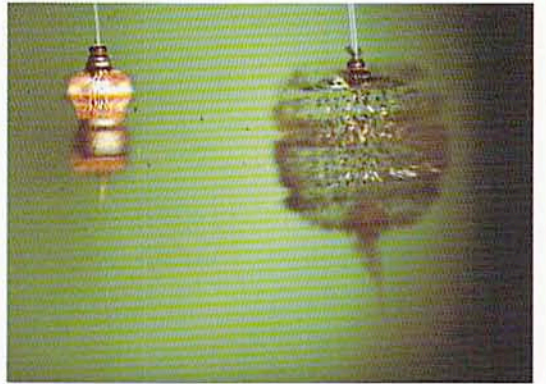
(7) $t = 10\mu\text{s}$



(8) $t = 12\mu\text{s}$



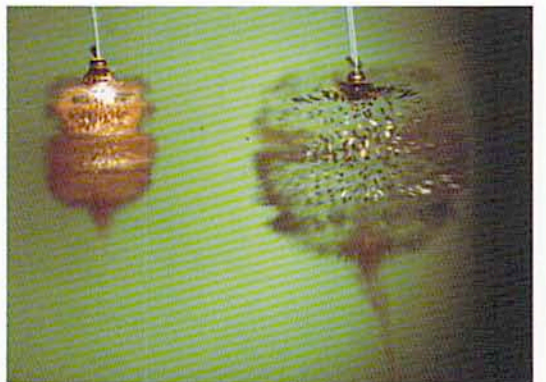
(9) $t = 14\mu\text{s}$



(10) $t = 16\mu\text{s}$

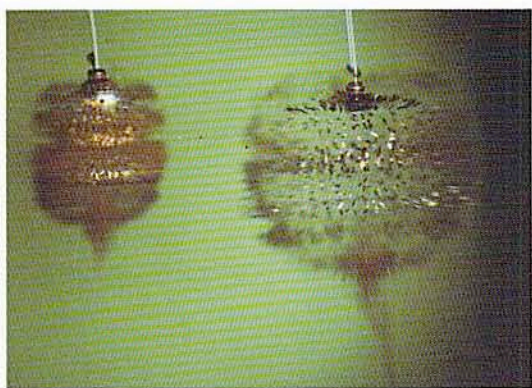


(11) $t = 18\mu\text{s}$

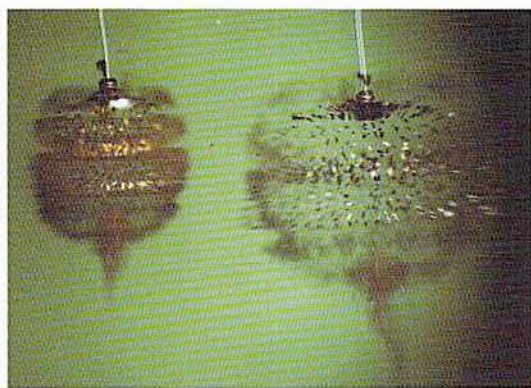


(12) $t = 20\mu\text{s}$

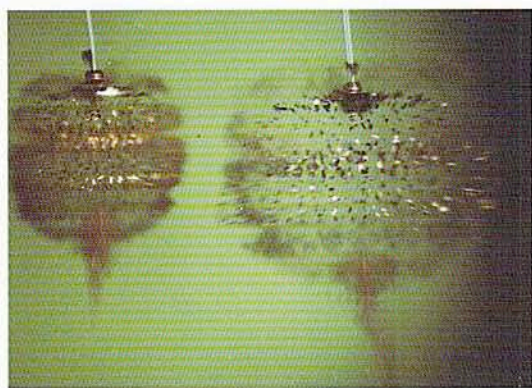
Fig. 4 (2)



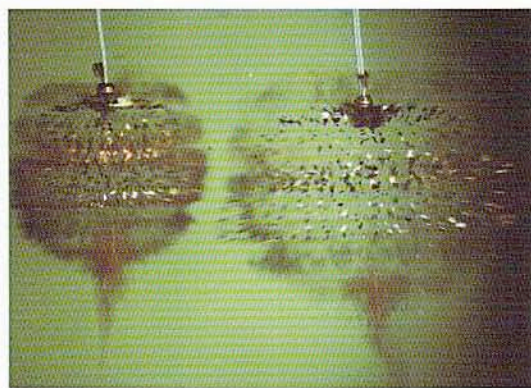
(13) $t = 22\mu\text{s}$



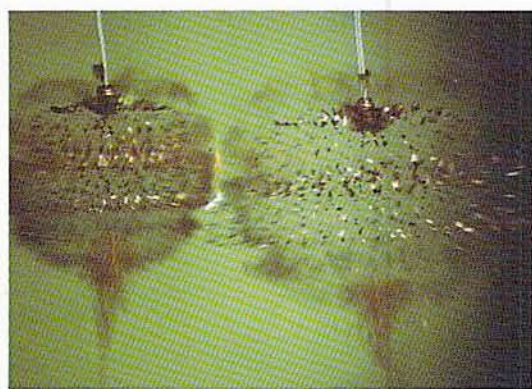
(14) $t = 24\mu\text{s}$



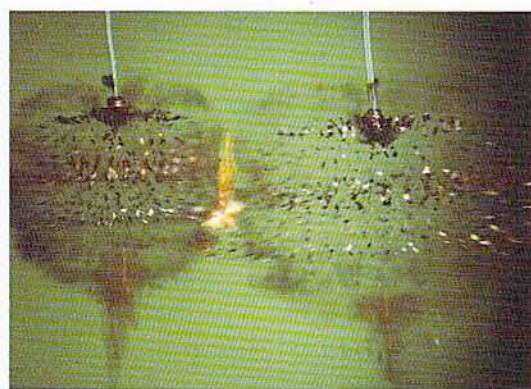
(15) $t = 26\mu\text{s}$



(16) $t = 28\mu\text{s}$

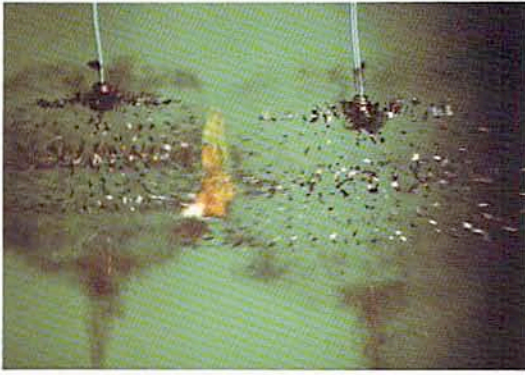


(17) $t = 30\mu\text{s}$

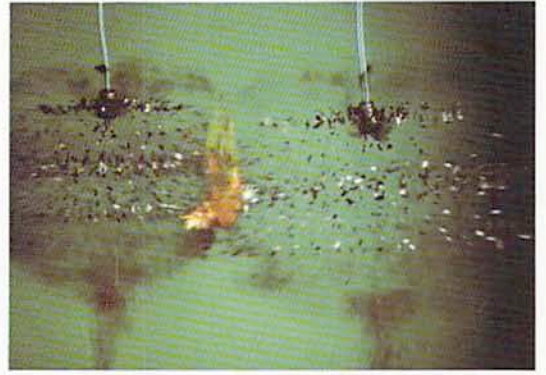


(18) $t = 32\mu\text{s}$

Fig. 4 (3)

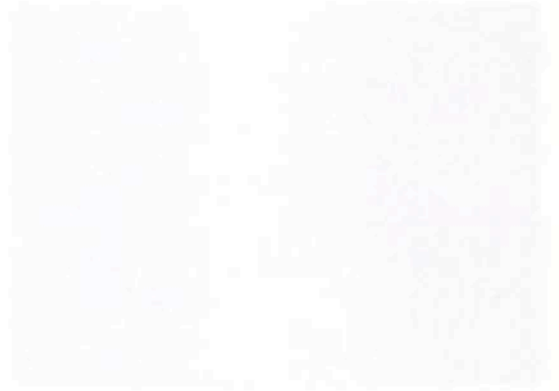


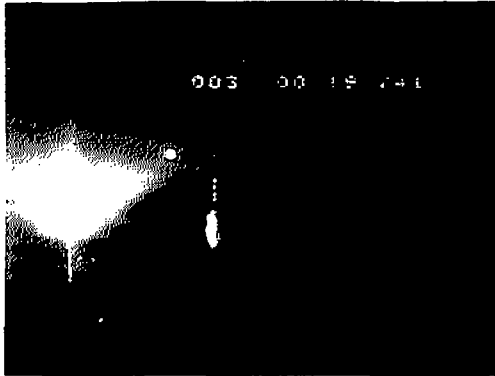
(19) $t = 34\mu s$



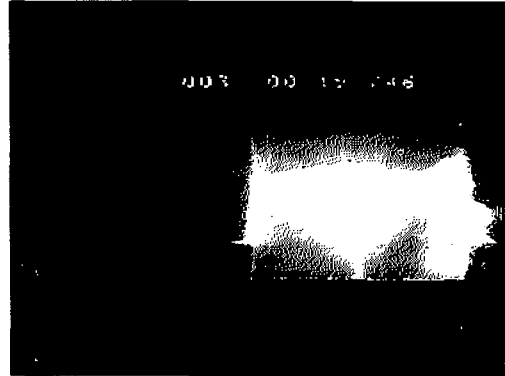
(20) $t = 36\mu s$

Fig. 4 Photograph of explosion of precise detonator





t = 0ms



t = 5ms

Fig. 5 Photograph of high-speed video

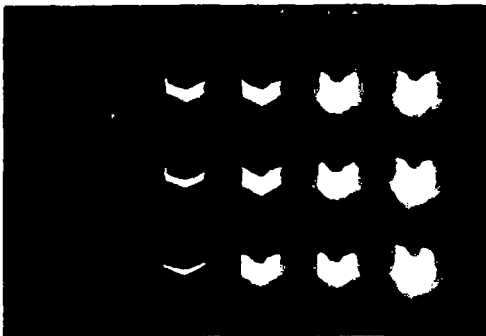


Fig. 6 The photograph of wire explosion observed by high-speed camera



Fig. 7 Photograph of smooth blasting in the acrylic resin plate using precise blasting machine

力波の干渉により切断予定面以外の部分では亀裂が少なくなり、SBの効果が大きいと思われる。また、図中Iで示した亀裂は、AB孔から同時に応力波が放射されて形成された亀裂であるが、厚さ方向の反射を繰り返し形成されたものと思われる。このため、厚さ方向の長さが十分にある実際の発破では発生しないものと思われる。実験では厚さ方向の反射の影響は出来るだけないようにした。

5. まとめ

1. 雷管の起爆現象の観測から試作した精密起爆器は、高速度カメラによる観測結果から $1\mu\text{s}$ の精度で起爆制御されているのを確認した。また、高速度ビデオによる観測からmsの起爆時間差の設定でも正確に起爆するのを確認した。
2. イメージコンバータ方式超高速カメラによる電橋線が発光し爆発膨張する線爆発現象の観測に成功した。また、撮影速度 10^7FPS での4回の観測

結果から伝橋線自体の起爆制御は、 $0.1\mu\text{s}$ の精度で制御されていることが判明した。

3. アクリル板による完全斉発によるSB実験から、放射状の亀裂が短くはば切断予定面に亀裂が進展することから応力波の干渉によりSBの効果が大きいことが判明した。

謝 辞

精密起爆器の試作に際しては日本化薬㈱姫路工場の中村勇氏をはじめとする関係各位と高速度カメラ及びイメージコンバータ方式超高速カメラの撮影に際して多大な御協力を受けたナック㈱の安藤、佐友両氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山口梅太郎, 工業火薬 37 No.6 (1976).
- 2) 富田幸助, 加藤僚一, 工業火薬 48 No.6 (1987).
- 3) 山口梅太郎, 工業火薬 49 No.6 (1988).

Study on the precise controlled blasting by wire explosion electric detonator

by Yuji OGATA*, Sakae MATSUMOTO*, Kuniyoshi KATSUYAMA*
Kiyoshi HASHIZUME**

Controlled blasting is required for demolishing the old building in the urban area. The precise blasting machine which can control the initiation time of wire explosion detonator from $1\mu\text{s}$ to 10s within $1\mu\text{s}$ precision was made for the demolition. The precision of precise blasting machine was confirmed by the observation of high-speed camera and high-speed video. The smooth blasting was carried out by precise blasting machine on the acrylic resin plate. Conclusions are briefly summarized as follows;

- 1) The precise blasting machine can control the initiation of wire explosion detonator within 1μ precision from $1\mu\text{s}$ to 10s as the result of high-speed camera.
- 2) The explosion of leg wire was controlled within $0.1\mu\text{s}$ precision by the observation of image converter type high-speed camera.
- 3) The effect of smooth blasting using precise blasting machine was confirmed by perfect simultaneous blasting on the acrylic plate.

(*Fracture Mechanics and Explosives Lab. Safety Engineering Dep. National Institute for Resources and Environment. AIST, MITI, 16-3 Onogawa, Tsukuba Science City, Ibaraki, 305

**NIPPON KAYAKU Co. Ltd, 2-1 Marunouchi, 1-Chome, Chiyoda-ku, Tokyo, 100)