

# 爆破に関する基礎的研究

## 第I報 内部装薬によるアクリライト板の破壊の瞬間写真

(昭和33年7月28日受理)

村田 勉・田中一三

(日本油脂株式会社武豊工場)

### § 1. 緒 言

産業爆破は一般に内部装薬である。すなわち装薬の爆発によって生じた高压ガスは、自由に逸散し得ないで、亀裂の発生までは微小時間ではあるが密閉された状況下にある。この条件は外部装薬の場合には成立しない。従つて発破の理論と結びついた実験を行うには内部装薬による方法が望ましい。

ここにわれわれは合成樹脂の一種を用い、小薬量での内部装薬の爆破実験を行った。そして実際の岩石実験では、ほとんど不可能と思われる試料内部の亀裂の伸長と破壊のありさまを、瞬間写真に撮ることを試みた。

### § 2. 実 験 法

この実験に使用した被破壊材料は、三菱レーヨン製のメタルクリル酸メチル樹脂（以下商品名をとつてアクリライトと呼ぶ）の厚さ5mmの平板である。この材料はガラスに似て無色透明であり、その上工具による切断、穿孔等の容易な点で実験用に適している。ただし硬度はガラスより小さい。

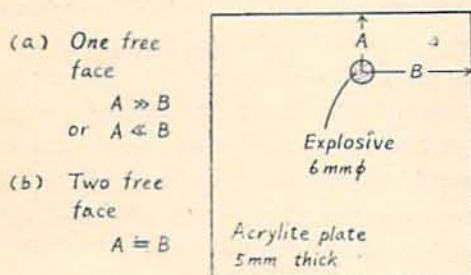


Fig. 1. Conditions for one or two free faces blasting of acrylite plate.

試料板はほぼ120mm角の正方形に切断し、実験にはこの一つまたは二つの辺をとつて、Fig. 1に示すように二次元における、一自由面または二自由面爆破

とした。爆薬は雷汞粉末を用い、試料にあけた直径6mmの孔に約230mg ( $J=1.6$ )を装填した。このていどの量の雷汞を完爆させるには、爆薬の密閉度が重要な因子である。われわれの場合には装填孔の両側を厚さ1mmの醋酸セルローズ板でふさいだが、その際使用する接着剤はセメダイン、もしくはそれ以上の強度を持つことが必要であつた。なお実験装填にあつては、起爆のための点火玉および瞬間写真のスパーク同期のためのイオン探針が、Fig. 2のようにとりつけられる。点火はニッサン発破器B型50発掛によつた。

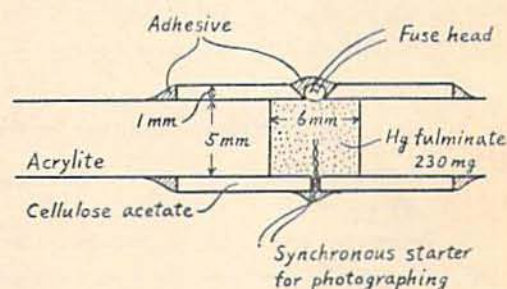


Fig. 2. Details of charging of explosive.

瞬間写真は当社のシュリーレン用6齧撮りで、実験は各条件について、全体の時間が約60 $\mu$ secのもの約180 $\mu$ secのもの二通りを試みた。そして前者は試料中の応力波を見やすくするためにシュリーレン法とし、後者は単なる影写真として撮影した。他に棒状装薬とか、小型の試料による実験も行ったが、それらの条件は後に必要に応じて述べる。

### § 3. 爆発初期の瞬間写真

以下に示す瞬間写真は、左上に実験条件、その右に1齧目を0にとつたときの各齧の時刻、右上に試料の爆破後の破壊状態が示されている。なお写真の配列は左側上から1,2,3齧、右列上から4,5,6齧となつて

(a) One free face

$A = 20\text{mm}$

$B = 60\text{mm}$

see Fig.1

Time from 1st frame ( $\mu\text{sec}$ )

- |        |        |
|--------|--------|
| ① 0    | ④ 25.5 |
| ② 8.0  | ⑤ 31.5 |
| ③ 21.5 | ⑥ 52.5 |

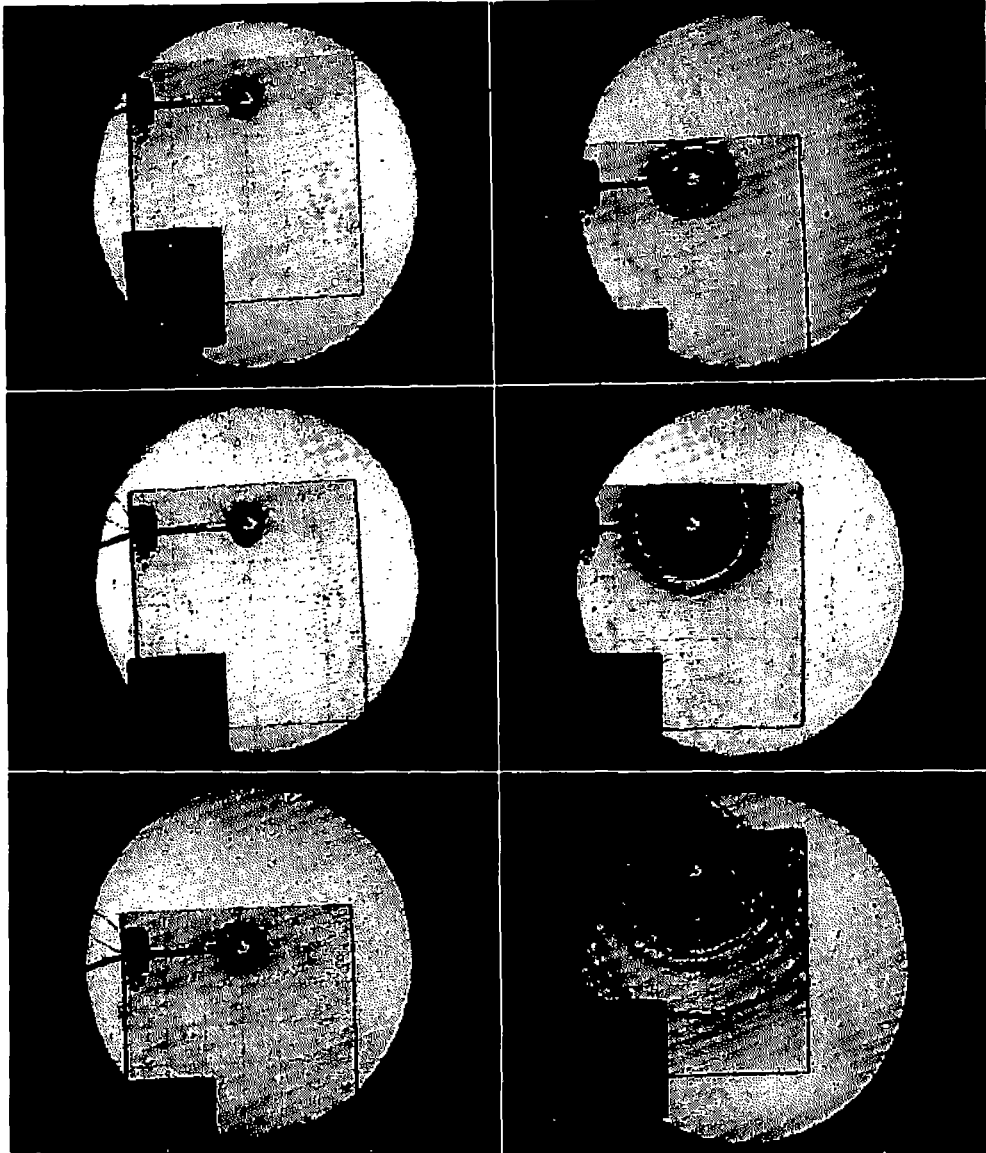
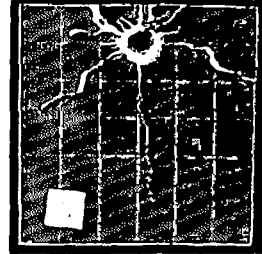


Photo I (a) Schlieren photos of short intervals.

(b) Two free faces.

$A=50\text{mm}$

$B=40\text{mm}$

see Fig. 1

Time from 1st frame ( $\mu\text{sec}$ )

① 0            ④ 27.5

② 7.5        ⑤ 34.5

③ 22.5      ⑥ 64.5

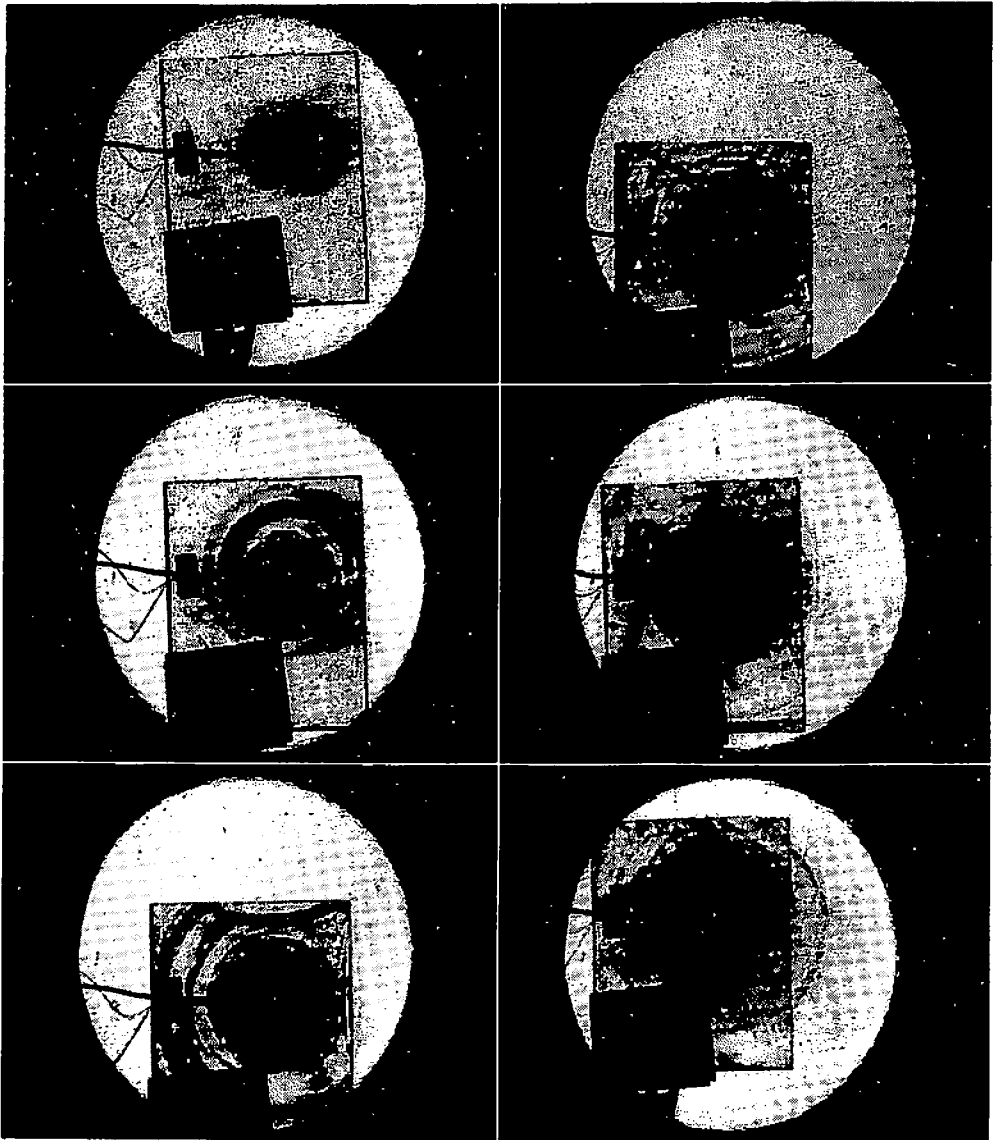
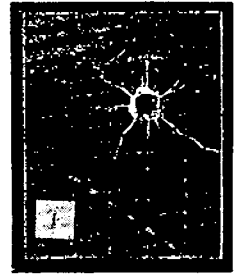


Photo I (b) Schlieren photos of short intervals.

(a) One free face

A = 60mm

B = 30mm

see Fig. 1

Time from 1st frame ( $\mu$  sec)

- |   |    |   |     |
|---|----|---|-----|
| ① | 0  | ④ | 96  |
| ② | 26 | ⑤ | 144 |
| ③ | 60 | ⑥ | 177 |

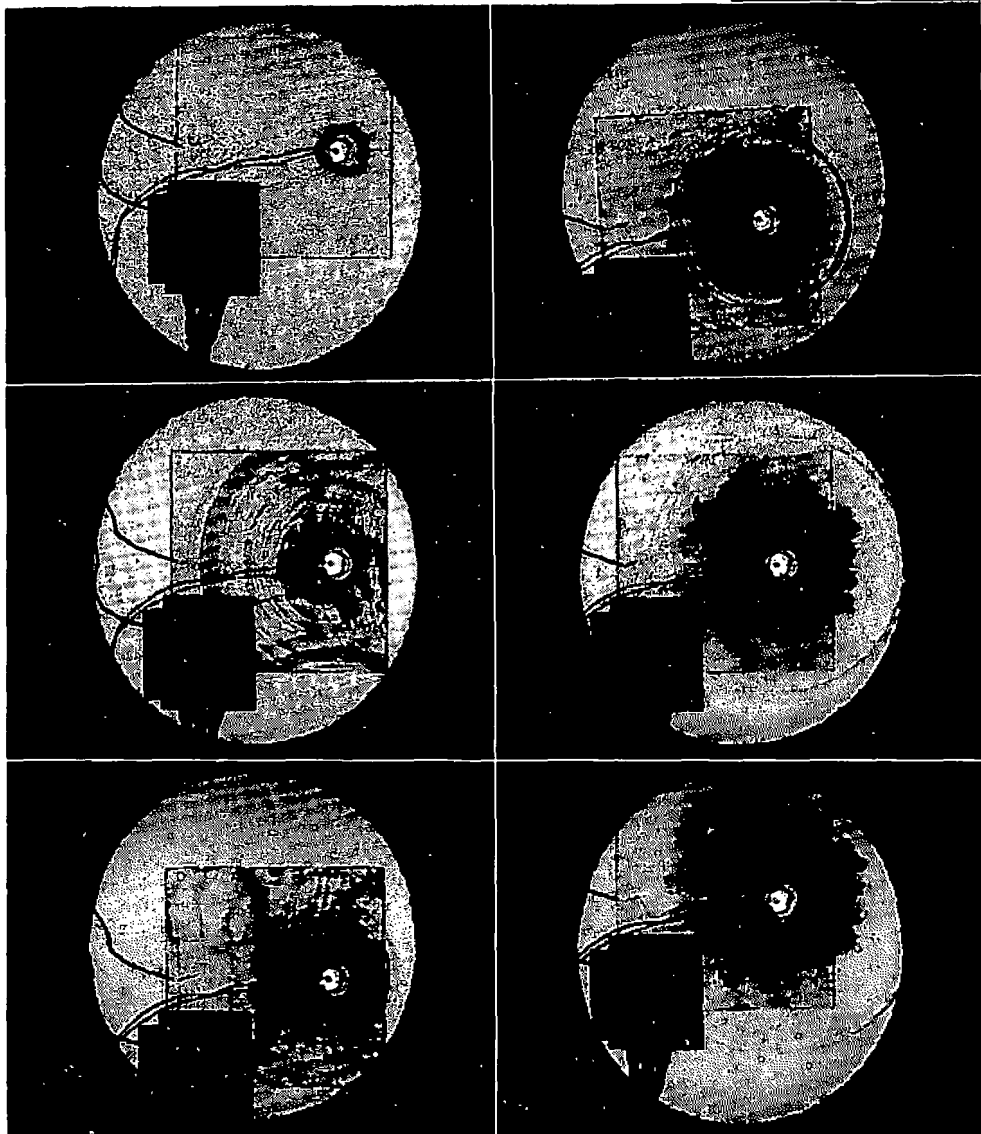
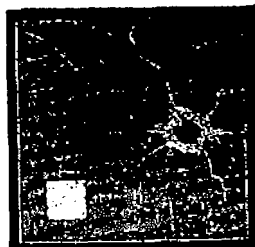


Photo II (a) Instantaneous photos of long intervals.

(b) Two free faces

$A=50\text{mm}$

$B=40\text{mm}$

see Fig. 1

Time from 1st frame ( $\mu\text{sec}$ )

① 0                    ④ 95

② 27                  ⑤ 144

③ 60                  ⑥ 181

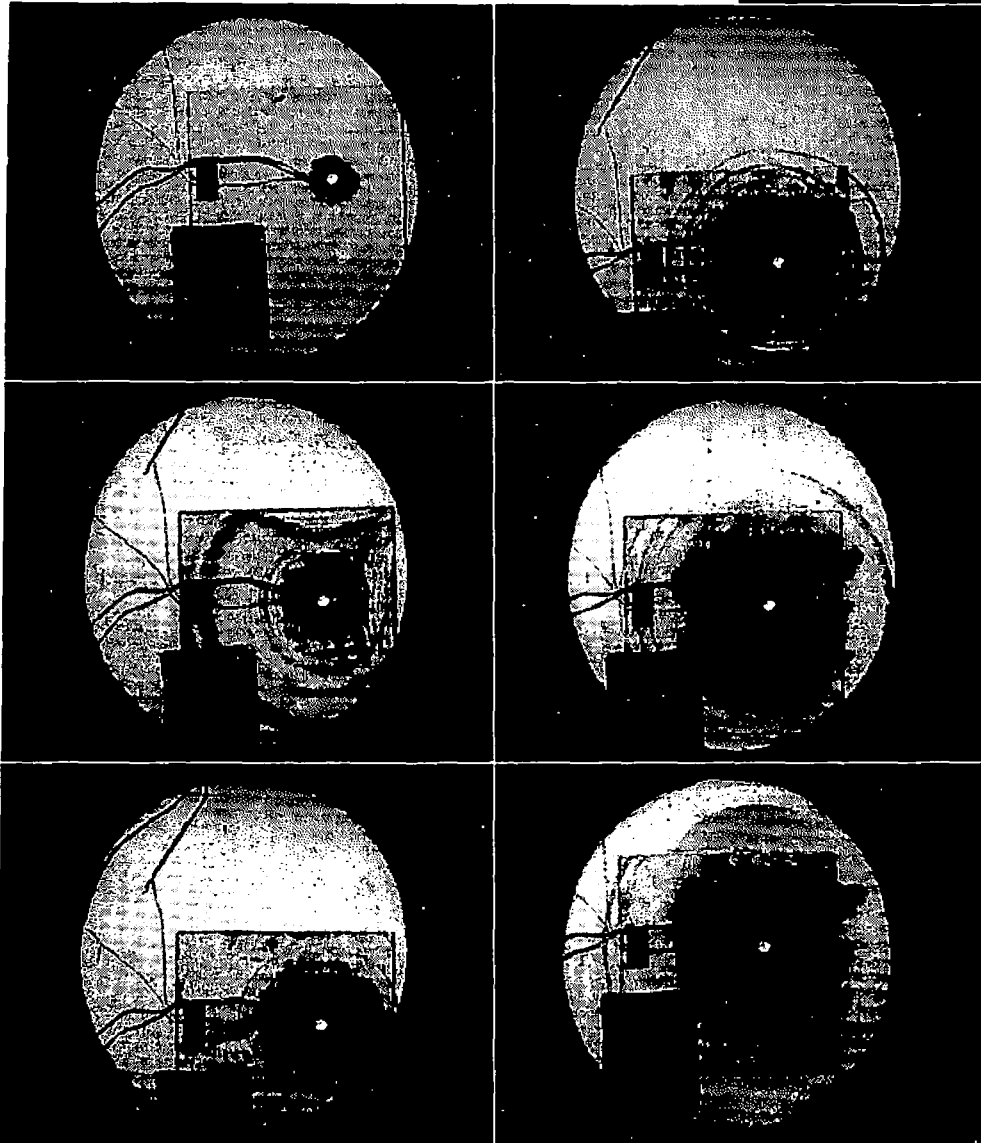
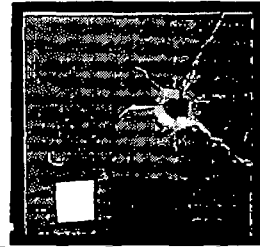


Photo II (b) Instantaneous photos of long intervals.

See Fig. 3. Time from 1st frame ( $\mu$  sec)

- |      |       |
|------|-------|
| ① 0  | ④ 165 |
| ② 33 | ⑤ 233 |
| ③ 85 | ⑥ 301 |

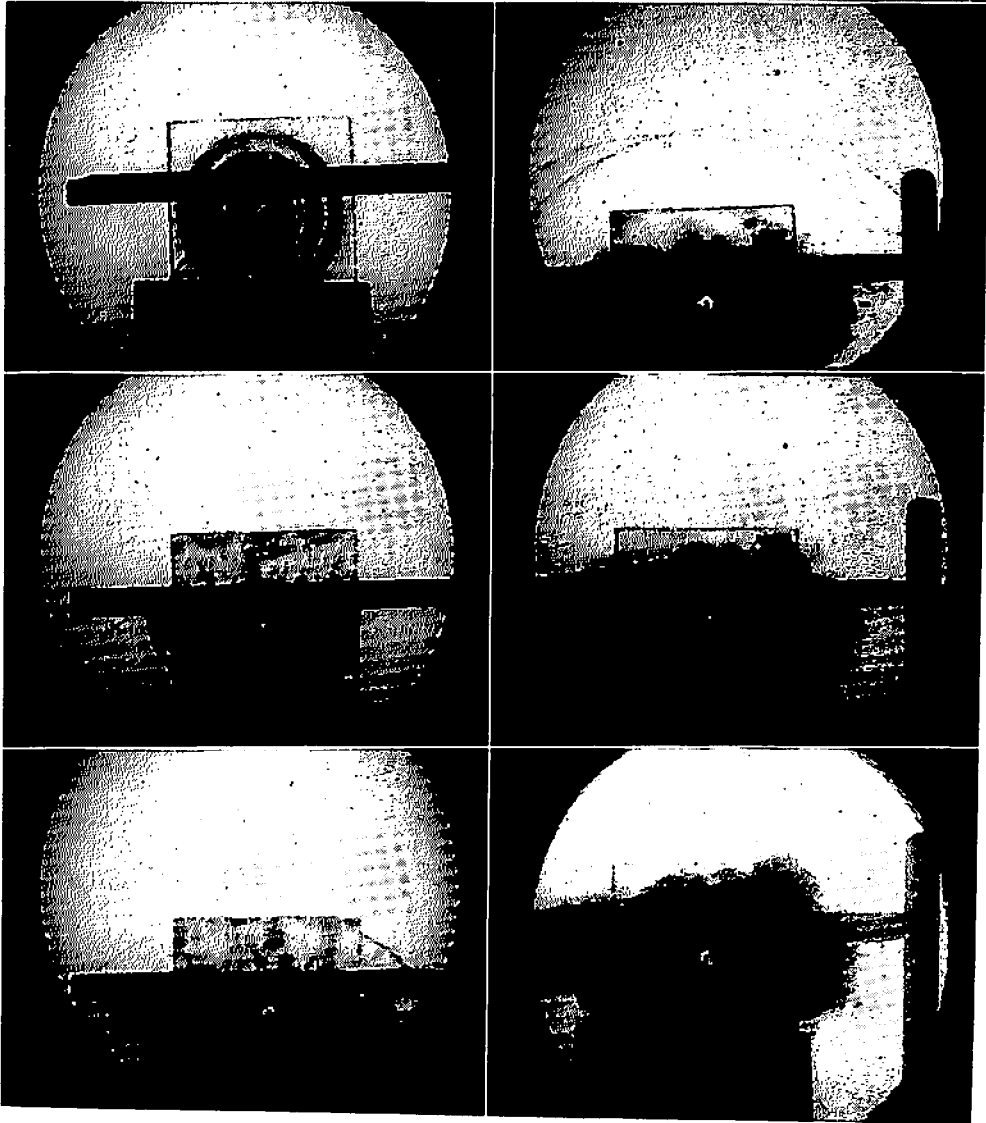
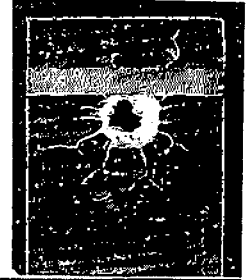


Photo III Instantaneous photos showing the propagation of cracks.



See Fig. 4. Time from 1st frame ( $\mu$  sec)

- |      |       |
|------|-------|
| ① 0  | ④ 99  |
| ② 29 | ⑤ 152 |
| ③ 66 | ⑥ 183 |

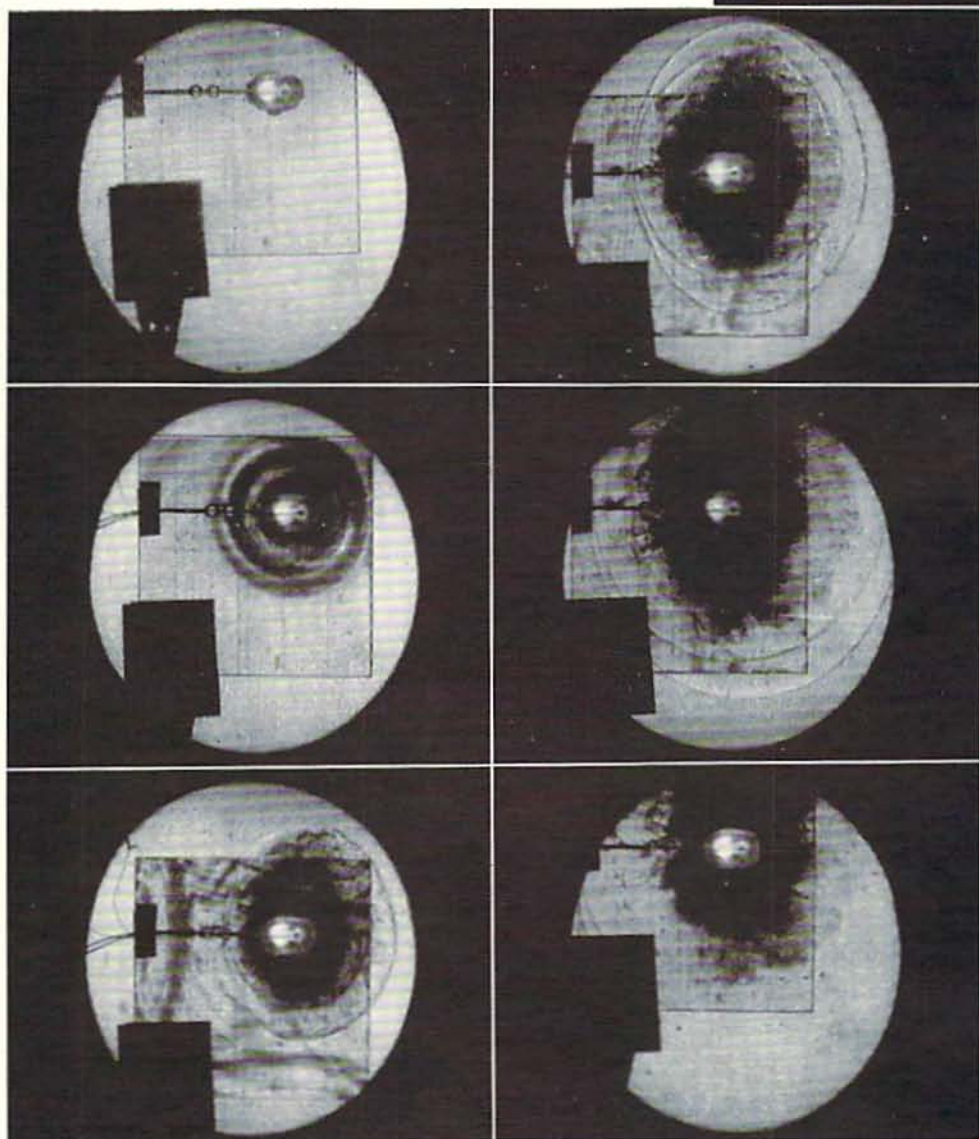
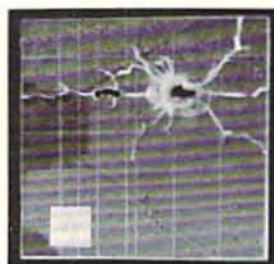


Photo IV Instantaneous photos of long charge blasting.

いる。

Photo 1 (a), (b) は、短い時間間隔による一自由面および二自由面爆破のシュリーレン写真である。(a) はスパークの調子が悪く、1, 2 駒はまだ現象の始まらない状態にある。そして 3 駒目が爆発直後以後試料中を応力波の伝播して行く有様が見える。このような条件下で爆発によって生ずる応力波は、以下の写真からもわかるように決して単一の波ではなく、多くのピークを持つている。また波の伝播速度は、写真から 2,000~2,500m/sec となり、アクリライト中の弾性波速度にはほぼ等しいか若干大きいところにある(応力波の挙動については第 I 報以下で詳しく報告する)。

Photo 1 (b) は二自由面発破で、ここには応力波の自由面での反射がなつきり現れている。3 駒目以後には、爆発ガスの噴出によって出来た空気中の衝撃波が見られる。ガスの噴出は試料側面の醋酸セルローズ板がはがれて起るもので、試料の向うとこちら側で別々に起り、従つて空気中の衝撃波は写真では二重になつて見える。

#### § 4. 爆発後期の瞬間写真

Photo 2 (a), (b) は、前と似たような条件で、もう少しおそい状態を見たものである。写真では爆発後 100 $\mu$  sec 以降には、空気中の衝撃波とそれを追う爆発ガスの膨脹が見られるだけで、このあたりで発生しているはずの試料中の放射状亀裂は、すっかりガスに覆われている。Photo 2 (a) では、このガス膨脹をいくぶんでも遅くするために、爆発のまわりに直径 10 mm 程度の円筒形のついたてを立てた。しかしこの方法では写真からもわかるように、ガスは全く防ぎきれない。

われわれは後に、試料の一部分だけでもガスから防ぐために、Fig. 3 に示すように試料に鉤をはめることを試みた。鉤は厚さ 10mm の樫の板で、ちょうど

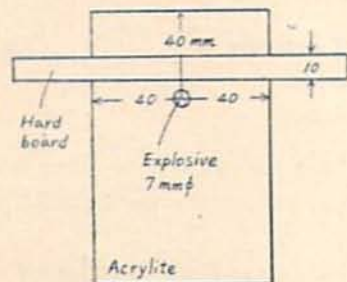


Fig. 3. Condition in the experiment for observation of cracks.

試料の断面に等しい穴がくりぬいてある。この場合は Fig. 3 からわかるように、試料の大きさは前にくらべてやや小さく、逆に薬量は多い。これは亀裂の入りやすい条件にしたためであるが、現象の本質にはかわりないと思われる。

Photo III はこのような条件で得られたものである。

この場合にはガスの噴出は相当遅れている。そして破壊後の写真とくらべてみると、2~5 駒目に辛うじて亀裂の先端が見える。これから亀裂発生時間関係を調べてみると次のようになる。

Photo III の 1 駒目は、応力波の位置から計算すると爆発後約 15 $\mu$  sec である。従つて今 3 駒目をとつて考えると、この状態は爆発後約 100 $\mu$  sec にあたる。そして写真から見ると、このとき亀裂の先端は爆心から 28mm、装薬の半径を引けば試料中で約 25mm を進んでいることがわかる。これから爆発後遅れなしに発生したと考えたときの、亀裂の見かけの速度は約 250m/sec となる。一方空気銃弾による破壊などで、アクリライト中の亀裂速度の上限は、やはり 250m/sec となつている(この結果についても第 I 報以後で報告する)。従つて亀裂は爆発と同時に、時間おくれなしに爆発から放射状に出発していることがわかる。

#### § 5. 棒状装薬の場合

Photo IV は、Fig. 4 のような棒状装薬による爆破を撮つたものである。写真で装薬左側の 2 つの小さい孔は、試料作成中に誤つてあけたもので意味はない。この結果の著しい点は、空気中への衝撃波が側面方向に加速されたような形になることである。同様のことが試料中の応力波にも起り得るはずであるが、波の速度が速いためか写真にははつきり現れない。また起爆点の影響も見られない。また棒状装薬では、破壊後の形から見て、放射状亀裂が装薬の両端に集る傾向があるが、この点についてはもつと数多くの実験が必要である。

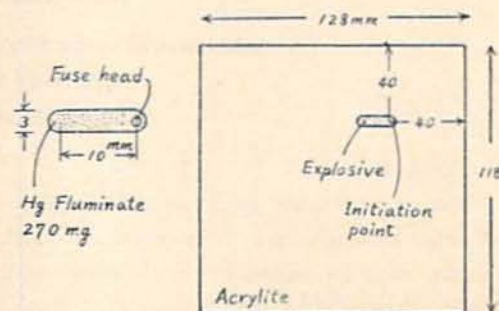


Fig. 4. Long charge.



## § 6. 爆破後の試料形状

爆破後の試料板は、いずれも装薬の周辺に拡大、粉碎層を持っている。われわれが最も多く実験を行った直径 6mm, 装薬量 230mg の場合には、爆破後の装薬径は約 7mm に拡大し、そのまわりの粉碎層は直径 20~25mm に及んだ。Photo V はこの附近の状態を示したものである。写真で見られるような装薬孔の孔は一部分欠けることがあるが、上に述べた拡大径の値は、もちろんこの欠けた部分を含まない。粉碎層は全体に白っぽくなっており、細かな網目状の破壊面が見られる。そしてこの部分を貫いて、爆源から生じた放射状亀裂が外部に向って走っている。放射状亀裂は一般に自由面(われわれの場合には最小抵抗線の最も短い方向)に向って多く出来るが、中には Photo I (a) のように反対の方向に著しく長くなることもある。なおこの条件では、応力波の反射張力による破壊は見られなかった。

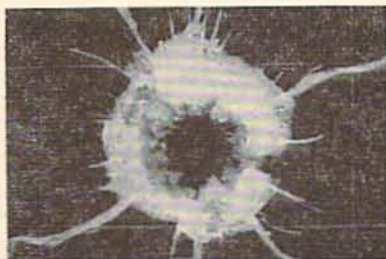


Photo V Enlarged view near the charge hole after explosion.

さて岩石発破の際の亀裂の生長は、準静的過程として進行することをすでに C. H. Johanson<sup>1)</sup>も指摘し、われわれもそのような考えの下に発破理論<sup>2)</sup>を展開してきた。そして爆薬の性能と岩石の発破特性値から、爆破係数を算出する合理的な公式を導いたが、この実

験によつて亀裂が装薬の位置から放射状(半径方向)に生ずることをたしかめ、われわれの理論的立脚点が誤りでないことを実証できた。

## § 7. 結 論

以上の結果から、内部装薬下でのアクリライト板の破壊の様相は、次のようにまとめられる。

- (1) 装薬の爆発とともに、試料中には応力波を生ずる。この応力波は単一の波ではなく、多くのピークを持っている。応力波の反射による破壊は起らない。
- (2) 爆源の周囲には、装薬径 6mm の場合に直径 20~25mm に及ぶ粉碎層を生ずる。この内部では細かな網目状の破壊面が見られる。
- (3) 放射状亀裂は、装薬の壁から出発して粉碎層を貫き、自由面に向っている。実験の結果は、これらの亀裂が爆発とはほとんど同時に出発することを示している。なお亀裂の速度は 250m/sec で、最も速い弾性波速度の約 10 分の 1 である。

この報告では、「応力波」という言葉は衝撃波と弾性波の両方を含めたものとして使用した。最後にあつて、われわれの実験に絶えず援助、協力を惜しまれなかつた当工場の村田旺仁、山口武彦、鈴木一郎の諸氏、及び実験の相談相手になつて頂いた渡辺定五氏に深く感謝する。

## 文 献

- 1) C. H. Johanson: The Breaking Mechanism in the Blasting of Rock. IVA, 23 (1952), 7, p. 293~4.
- 2) 村田勉, 田中一三: 新発破理論の実際面への適用, 工火協誌。  
村田勉, 田中一三: 岩石の発破特性値の新計算法, 日本結業会誌, 73, 4, p. 205 (1957)

## Basic Research on Blasting

### I. Instantaneous Photographies of Fracture of Acrylite by Internal Charges.

By T. Murata and K. Tanaka.

#### 1. Introduction

There are commonly used internal charges in industrial blastings. So, the mechanism of rock blasting must be studied by the blastings with internal charges. At the instant of explosion, the gases in a bore-hole cannot expand freely

but are such confined as in a closed vessel and they are ejected out after the formation of radial cracks.

The cracks are formed by the effects of pressure of explosion gases. Such a mechanism of blasting was proposed by C. H. Johanson<sup>1)</sup> and us<sup>2)</sup> inde-



pendently.

In this paper we treat the problem of the crack formation in thick acrylite plate by internal explosive charge, using instantaneous Schlieren photographs.

## 2. Explanation of results

The acrylite (trade name for an acrylic resin) plate used are rectangular ones and are drilled hole near the corner or the edge of the plate for the purpose of explosive charging as shown in Fig. 1. The explosive is mercury fulminate and charged in density of 1.60 such as shown in Fig. 2 with side view.

The apparatus for photographing is composed by six spark gaps as light sources, a concave mirror as reflector, and six cameras each corresponds to above spark gaps. This is well known as the Schlieren method. There, the first spark is synchronized to ionization detector in explosive charged (see Fig. 2) and intervals of successive sparks are controlled by ordinary relays, that is C-R circuit.

Photo I and II are typical pictures thus obtained, where left column is arranged 1st to 3rd frames from up to down and right column 4th to 6th, and right shoulder shows the final state of fracture. They reveal that the stress waves are formed after explosion, and they propagate in the plate, the waves are reflected at the edges and interfere mutually and are diminished. Here it is interesting that the waves are composed of multiple peaks. After the stress waves, the explosion gases accompanying preceding shock wave in air are ejected out from sides of the plate. They expand and cover the cracks which shall be seen in this stage.

Now to observe the cracks extension it is necessary to arrest the gas expansion. For this purpose the authors have tried to set a guard on the plate as shown in Fig. 3. Photo III are the pictures thus obtained, in where the crack tips

are appeared in the third to fifth frames thrusting out through the black cloud of gases. With these picture, taking the velocity of crack propagation in acrylite to be 250m/sec obtained by another experiment (to be published), and tracing back the time-distance relation of the crack to its origin, one can find that the crack is starting at almost the same instant of formation of the stress wave. The cracks are always formed radially from the explosive charge and there are neither circular cracks around it nor parallel cracks to free face.

Photo IV are the pictures obtained by long charge different from the preceding spherical charges. They show that the shock wave in air in the normal direction to the charge axis is less damped than in the axial direction. The condition of this long charge is shown in Fig. 4.

Photo V is an enlarged view of the crushed zone near the charge hole. There are fine cracks assembled to net-structures in this zone. Also one can find an expansion of the hole wall, comparing the same photo to the original dimension. These zones of the crushing and the expansion act the important roles in our theory of blasting. One can recognize the theory has been proved as true.

## Literatures

1) C. H. Johanson: The Breaking Mechanism in the Blasting of Rock, *IVA*, 23 (1952), 7, p. 293-4.

2) T. Murata and K. Tanaka: Application of a New Theory of Rock Blasting Based on Fracture by Tensile Stresses, *J. Ind. Explo. Soc., Japan*, 17, p. 48 (1956). T. Murata and K. Tanaka: Calculation of Blasting Characteristics of Rock by Blasting Theory Based on Fracture by principal Tensile Stress, *J. Min. & Metal. Inst. Japan*, 73, p. 205 (1957).

(Nippon Oils and Fats Co., Taketoyo Plant.)