

高速度カメラによる大発破の測定

下村弥太郎*・山口梅太郎*

高速度カメラを用いて、石灰石採掘ベンチにおける大発破の状況を観測した。使用した高速度カメラは日立製作所製の HIMAC 16H カメラであるが、2,500 駒/秒のフィルム・スピードで、日鉄鉱業葛生鉱業所羽館鉱山のベンチ発破を撮影した。3,000t および 4,000t の大発破の写真を分析して、次のような結果を得た。

1. 岩盤の押し出し速度は $9 \sim 16 \text{ m/s}$ であった。
2. 爆破孔から噴出する煙の速度は 400 m/s で、岩盤の押し出し速度とオーダーの異なる速度を示した。
3. 使用された MS 雷管の段差は、ほぼ正しい値を示した。
4. ベンチ発破で起爆後、岩盤に現われる最初の微候は、岩盤の振動によると思われる粉塵の発生である。しかも、この現象は、爆破応力波の伝播時間などに比べて、かなり後期に生ずる。
5. 爆破前に観察される明瞭な亀裂にかこまれた大塊は、爆破後も二次破砕を必要とする大塊として残留するように思われる。

1. はじめに

高速度カメラを用いて石灰石の採掘ベンチにおける大発破の状況を観測した。高速度カメラを用いた爆破現象の研究は、諸外国においてもわが国においてもしばしば行なわれているが、それぞれ多少条件が異なり、それぞれ何等かの異つたデータを与えてくれている。私達の測定も、とくに日新しい実験を行なつたわけではないが、得られたデータは、それなりに、何等かの知見を岩石爆破の研究の上に与えるものと信じている。

高速度カメラを使用する爆破現象の本格的な観測は私達としてははじめての経験であつたため、実施にあつたの細かい技術的な問題点や、この方法の限界などについても、よい勉強になつたと思う。そうしたことも加えながら、測定研究の報告をまとめるつもりである。

2. 高速度カメラおよび測定

2-1 使用した高速度カメラ

観測の中心は高速度カメラである。高速度カメラの発達は近年著しいものがあり²⁾、各種の研究目的に応じてそれぞれ適当なものを選ぶことができるが、この

観測では、私達の教室で手持ちの「16H 形高速度カ

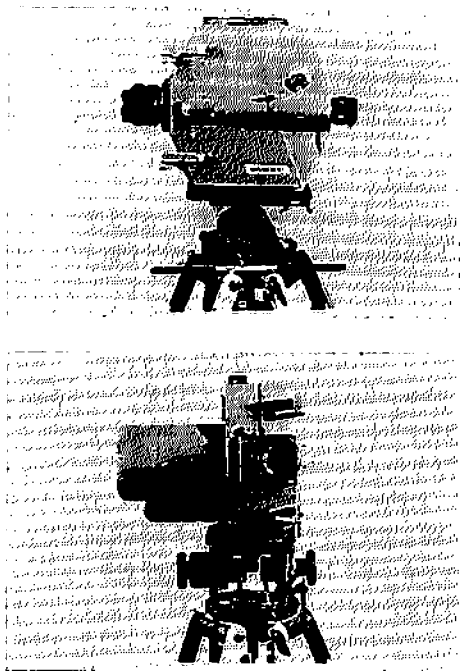


Fig. 1-a, b Hitachi HIMAC-16H High Speed Camera

昭和46年1月25日受理

* 東京大学工学部資源開発工学科、東京都文京区本郷7-3-1

メラ (16H HIMAC) (日立製作所製)を使用した。
外観を Fig. 1 に、仕様を右欄に示す。

このカメラによつて、実際の岩石爆破を観測する場合に、カメラの駒送り速度が変化する点と、合計測定可能時間が短いということが1つの問題点としてあつた。モーターによるフィルムの巻き取り、プリズムの回転が行なわれる機構であるため止むを得ないのであるが、Fig. 2 に与えられるように、駒送り速度が時間とともに増加する。したがつて、一定の駒送り速度を必要とする現象の観測には適さない。また、同じく Fig. 2 に記してあるように、30.5m のフィルムを使用する場合の全測定時間が数秒ないし 10 秒であつて、とくに高速度の場合には極端に測定時間が短かく

HIMAC/16H 形高速度カメラ (日立製作所製)*

性 能	撮影速度 500~10,000 駒/秒
	使用フィルム 16mm×30.5m 巻両孔
電 源	AC 100V または AC 200V, 50/60Hz
	電流容量 30A 以上
光学系	標準レンズ H-Topcor 1:1.8, $f=5.8\text{ cm}$ 4面体回転プリズム
寸法および重量	本体 300×300×250mm, 14.5 kg コントローラー 210×300×430mm, 20 kg
	100 c/s, 1,000 c/s タイミング・ライト・パルスジェネレーター付

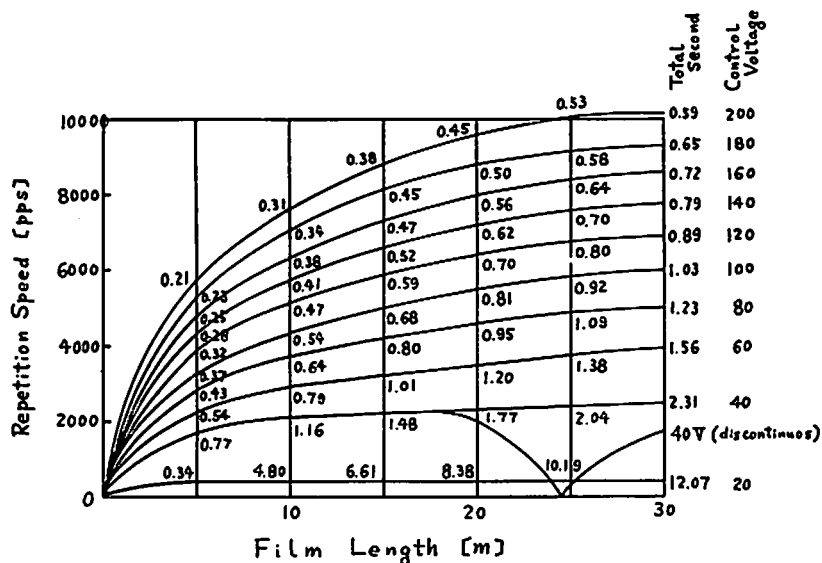


Fig. 2 Chart of the Film Speed (for 30.5 m Film)

なつてしまう。したがつて、駒送り速度に合せて現象を撮影するためのスイッチングを考えなくてはならない。

私達の観測では、このカメラとしては低速度の範囲に入る 1,500~2,500 駒/秒 の送り速度がとられたために、30.5m のフィルムを使用して、全撮影時間が 3, 4 秒あり、カメラの始動、爆破の点爆を手振りの合図で行なうことができた。しかもこの駒送り速度では、駒送り速度が比較的一定の範囲で、観測することが可能であつた。

このカメラを使用する上で、もう 1つの問題点として、表現は適当ではないが、撮影された写真の映像が

鮮明であるとはいいい難い点が挙げられる。この規格のカメラとしては、分解能や撮影機構からいつてそこまで要求することは無理なのであるが、歯がゆい感じがする。実験の安全性から、爆破位置とカメラとの距離が 100m にもなり、しかも高速度で撮影した 16 ミリ・フィルムを拡大して種々の現象を観察するのであるから、止むを得ないことなのであろう。

この点で予期しないこととして、標識として非常に大きなものを使用しないと写真にうつらないということがあつた。

* 現在は、より使いやすい 16HD, 16HM, 16HS 形などが市販されている。

アート図版の写真に見られる黒白の三角マークを附した標的は、畳一枚分の大きさのものであるが、これから考えても、爆破時に観察されるであろう微細な亀裂や小さい岩片の飛翔状況などはまず判らないことが予想されよう。同じ理由から、今回の実験で失敗であったことが1つある。

それは、爆破の際の爆薬の最初の起爆時間を知ろうとして行なつた工夫³⁾、すなわち、導爆線をMSの第1段の爆発孔の前面の岩壁に垂らしておいて、起爆と同時にこの導爆線の爆発を記録させようとしたことが、まったく判別できなかつた。したがつて、この実験の記録は、爆破の起点をすべて、第1孔の噴出時とせねばならなくなつてしまった。

撮影に使用したフィルムは、

Kodak 4-X Negative, Type 7224

で、high speed camera 用 long pitch のものであるが、Kodak の Tri-X, Negative, Type TXN 430, for high speed camera や Sakura Cine Film, Konipan SSS, Negative も使用可能である。

使用した Kodak Type 7224 で、1月末、正午前後の快晴時に、駒送り速度1,200~1,600駒/秒のとき、 $f=3.5\text{ cm}$ レンズで絞りで撮影が行なわれた。このフィルムの ASA No. は 430 である。

使用フィルムおよび露光時間について2, 3の注意がある。すなわち、

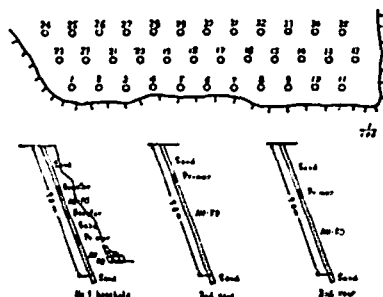
1. フィルムのスプロケット孔間隔が long pitch のものを使用する。short pitch のものは、高速度では、スプロケットから外れてしまう。
2. 撮影するベンチの太陽に対する角度を考慮すること。太陽に対して直面している時に映像はもつとも鮮明である。また、天候によつて露光時間に充分注意する。
3. 駒送り速度が大きくなると、露光が不足するようになる。

今回の実験はいずれも測定時に好天にめぐまれ、しかも正午前後であつたこと、ベンチが南面していたこと、また、撮影にあつて、安全のために、鉄板製シェルター(1m²程度の移設可能な退避小屋)が利用できたことなど、幸であつた。

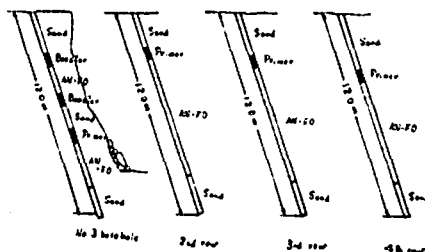
2.2 測定

視測は、栃木県安蘇郡葛生町の日鉄鉱業葛生鉱業所羽鶴鉱山の採掘ベンチにおいて行なわれた。数回の発破を撮影したが、1, 2の手落ちがあつたりして、結局2回のベンチ発破の撮影に成功した。

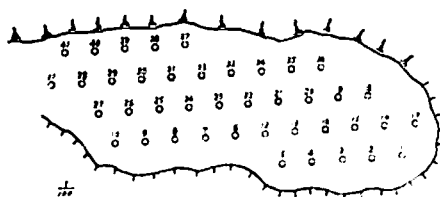
葛生地区は、秩父古成層に属する砂岩、チャート、粘板岩、頁岩、輝緑凝灰岩および石灰岩の互層から成る。



255 Bench hole-hole 配置図及装薬図



260 Bench hole-hole 装薬図



260 Bench hole-hole 配置図

Fig. 3 255m bench blast and the 260m bench blast

ドロマイトを含む石灰岩の分布は赤見——鈴山——出流——大島屋山にわたつて、半径約7kmの馬蹄形をなしている。鉱床は上部石灰岩層、ドロマイト層、下部石灰岩層の3層から成っているが、羽鶴鉱山は上部石灰岩層の一部を採掘している。ベンチカット方式で採掘を行なっているが、各ベンチの高さは10m内外、クローラー・ドリル、ワゴン・ドリル等によりさく孔し、AN-FOで爆破する。爆破された鉱石はパワー・ショベルおよび15t ダンプ・トラックで選鉱工場に運ばれて処理される。選鉱工場の受け入れ口におけるグリズリー・サイズは600mmである。

撮影箇所の鉱石は大部分ドロマイトであつた。爆破条件は次のとおりである。

i) 225m ベンチ大発破

昭和43年1月24日正午、快晴、微風

発破計画

発破孔数 35本(うち2本装薬せず)
 ピット径 38mm, 穿孔長 9.0m (平均)
 穿孔角度 約 70°
 平均最小抵抗線 1.8m, 平均孔間隔 1.8m
 装填薬量 AN-FO 約 300 kg (全量)
 黒カーリット 44本 (22 kg)
 プライマー, ブースター

雷管 6号電気雷管

起砕量 2,410t

ii) 260m ベンチ大発破

昭和43年1月26日正午、快晴

発破計画

発破孔数 44本
 ピット径 48mm, 穿孔長 10.5m (平均)
 穿孔角度 約 70°
 平均最小抵抗線 2.0m, 平均孔間隔 2.0m
 装填薬量 AN-FO 約 450 kg (全量)
 黒カーリット 52本 (26 kg)
 プライマー, ブースター

雷管 6号電気雷管

起砕量 3,990t

3. 測定結果とその解析

観測の結果は長さ 30.5m の 16 ミリ・フィルム 2 巻であるが、その中から必要な駒を 10 数個づつ選ん

で、連続写真として並べたのがアートの図版である。解析は、この連続写真について行なわれた。

3-1 岩石の押し出し速度

英語では fly rock velocity というが、実際には、爆破と同時に爆破岩壁が盛り上るように前方へ押し出して移動してくる現象が観察される。爆轟ガスが亀裂などから噴出してくるのに伴って、遠方に飛ばされる岩石片の飛散速度と区別するため、この移動速度を岩石の押し出し速度と呼ぶことにしよう。

撮影された写真の上でこの速度を求めるためには、かなり面倒な計算を行なう必要がある。この計算法は U.S. Bureau of Mines の B.E. Blair がすでに詳細に示しているので⁹⁾、その手順にしたがって行なつた。

(i) 撮影時間(速度)の決定

撮影フィルムの1駒の時間間隔は、撮影(時間)の経過とともに減少するが、直接に測定することができないので、駒の送り速度を求め、その逆数として計算する。駒速度 s は

$$s = v \cdot n$$

ここに

s = 駒速度 [p.p.s.]

v = タイム・マーカ振動数 [50 ヘルツ]

n = 1 タイム・マーク中の駒数 [駒/1 マーク]

タイム・マークは、撮影したフィルムの縁に沿って記録される。

点爆時(連続写真では、爆破の最初の微候の見られる駒の1つ前の駒)の写真の駒番号を0とし、順次駒毎に 1, 2, 3, …… と番号を付けて行き、各番号と s との関係をグラフに表わす。Fig. 4 がそれである。

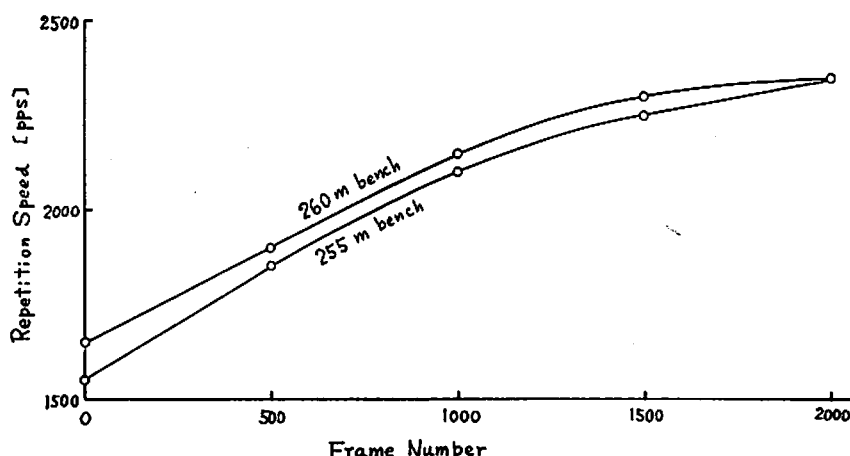


Fig. 4 Film Speed and the Frame Number

(ii) fly rock の変位測定

写真上で特定の点を選び、その変位を駒順に追って行くのであるが、写真の光軸の傾きなどで、各種の補正を行なう必要がある。補正の手順は複雑なのでここでは省略するが、爆破によって盛り上ってくる岩壁の面とカメラの位置、撮影の方向、岩石の投射の方向などの相互関係を考慮して、岩石の変位を計算する。必要なディメンションを Fig. 5-a および Fig. 5-b、ならびに Table 1 にまとめておこう。

この表で、記号はそれぞれ

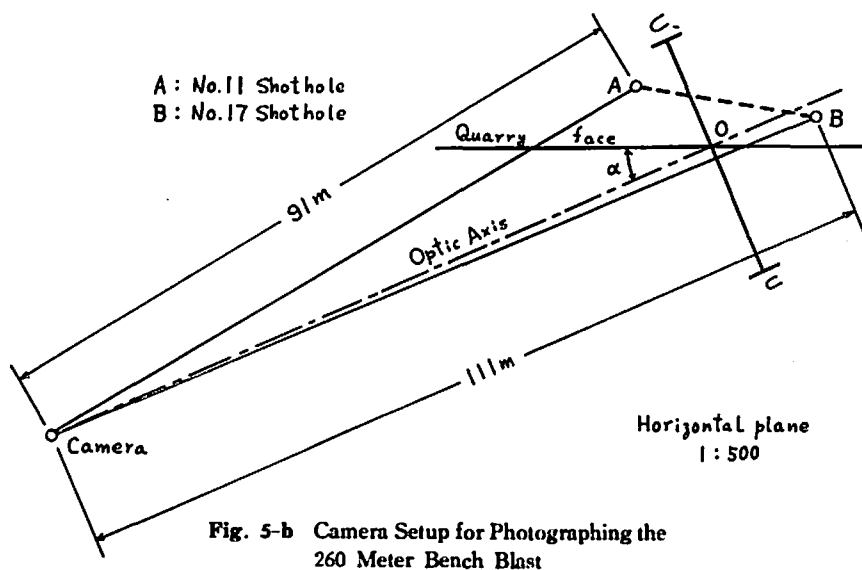
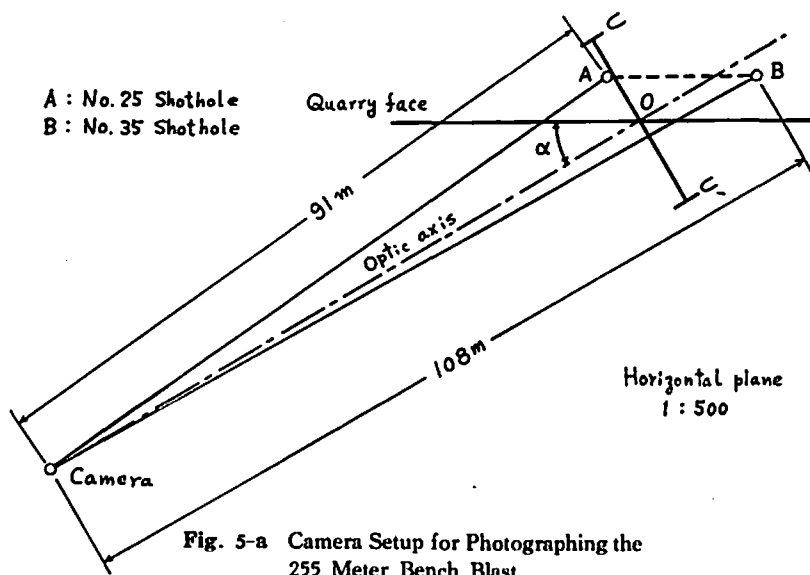
α : 水平角, ε : 俯角, θ : ベンチ面の傾斜角,

Table 1 Angles Required for the Calculation

		225 M Bench	260 M Bench
Azimuth angle	α	30.0°	23.0°
Elevation angle	ε	1.5°	2.0°
Bench slope	θ	70.0°	70.0°
Rotation of the Camera	β	0.0°	0.0°

β : 画面回転角

である。画面回転角 β は、フィルム面座標 (U-V) が光軸 OT の周りにどれだけ回転したかを示すもので、



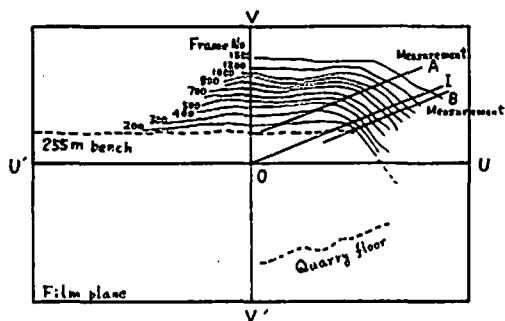


Fig. 6-a 255 Meter Bench Blast Contours

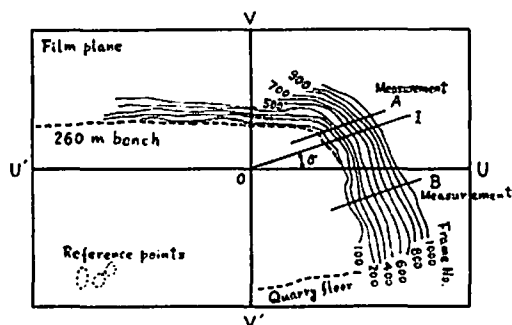


Fig. 6-b 260 Meter Bench Blast Contours

今回の実験ではいずれも 0° にとつてある。

ここで、連続写真の 100 駒、200 駒、300 駒……等、等間隔に選んだ写真上で、注目している岩石のコンター・ラインの変位を測定する。このために、各駒の写真上でコンター・ラインのすべてを 1 枚の紙の上に写しとる。この結果が Fig. 5-a および Fig. 5-b に示してある。両図から岩石片の変位を測定するときは、OI 線に平行に測定する。直線 OI は、それぞれ Table 1 の表中の値を用いて求めたものであるが、さらに計算によつて得られる補正係数を乗じて岩石片の変位を求める。この変位と (i) で求めた時間とから、Fig. 7-a、Fig. 7-b が得られるが、この勾配から岩石の押し出し速度が求められる*。

こうして得られる、岩石の押し出し速度は

255 メートル・ベンチ発破で

15 m/s

16 m/s

260 メートル・ベンチ発破で

9 m/s

* 鉛直自由面より飛び出す岩石は重力により鉛直方向に加速されるため、押し出し速度を正確に求めるためにはその補正を必要とするが、この場合は岩石の変位の水平成分を主として観測することになっているので、そのための補正は行なわれなかった。

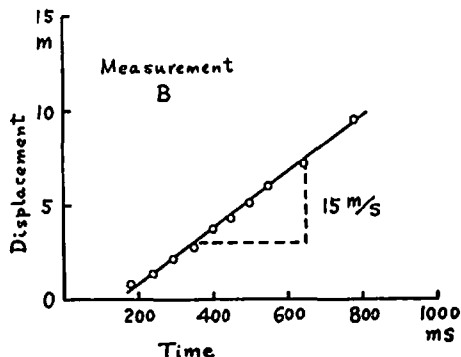
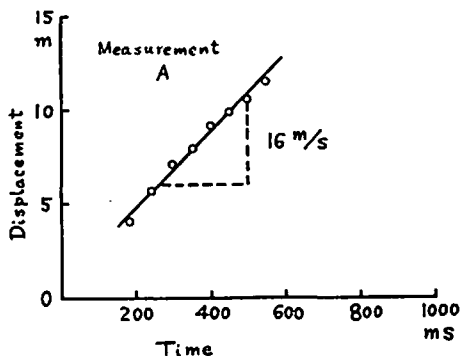


Fig. 7-a Rock Displacement vs. Time for the 255 Meter Bench Blast

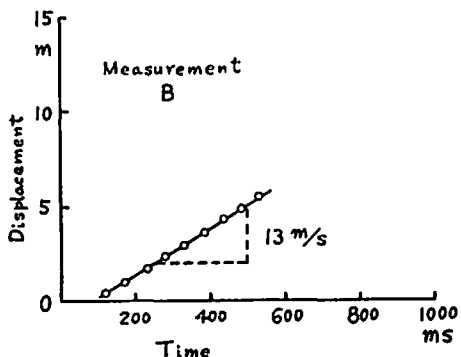
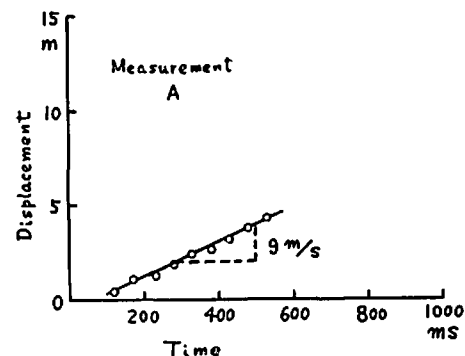


Fig. 7-b Rock Displacement vs. Time for the 260 Meter Bench Blast

13 m/s

であつた。大体同じ数値が得られたと思うが、後者の値が多少小さめである。爆破の条件や観測の方向、その他を考慮に入れば、両者は比較よく一致していると思われるし、U.S. Bureau of Mines の B. E. Blair の測定結果 20.3 m/s, 12.8 m/s や G. E. Patterson の測定値 11.5~15.0 m/s にも比較し得る値である⁶⁾。

3-2 爆破孔より突出する煙の速度

2-1 とまったく同様の方法で、255 メートル・ベンチの発破における爆破孔 No. 4 の煙、正確には粉塵、込物の線粉、爆轟ガスなどの混合物の突出する速度を解析した。結果は Fig. 8 に示されるように、400 m/s という値であつた。この値は、さきに、下村・吉田・山口が測定した爆発ガスの噴出速度* と同程度の値である⁷⁾。しかしこの値は、3-1 の岩石の押し出し速度とはオーダーのちがう大きな値である。

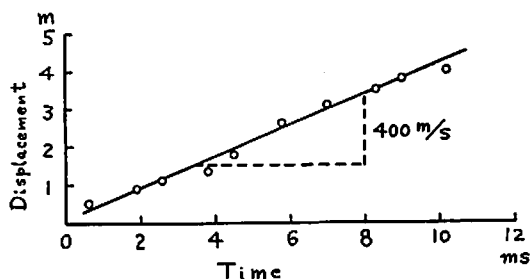


Fig. 8 Smoke Displacement vs. Time for the No. 4 Shothole of the 255 Meser Bench Blast

3-3 その他

3-1, 3-2 のように、とくに解析を行なつた結果というわけではないが、この他に高速度カメラによる撮影の中から、いくつかの事実が観測される。

(i) 各段差の状況

爆破には、MS 電気雷管の瞬発、3段、5段、7段を使用して、各段差を 50 ミリ・セコンドにとつている。その状況は、瞬発と段発の時間差についてしか明瞭に見ることができないが、255m ベンチの発破では約 55 ミリ・セコンド、260m ベンチの発破では約 48 ミリ・セコンドと見られる。50 ミリ・セコンド ± 数ミリ・セコンドの範囲内であることから、まずまずの値といつてよいであろう。

同一段差内の各雷管の間のバラツキは、各爆破孔の煙の状況からでははつきりしないが、瞬発の場合、比較的良く揃つているように見える⁸⁾。

(ii) 亀裂および爆轟ガスの爆破面からの噴出

最初に記したように、この観測では、岩壁面に現われる微細な亀裂の発生は見出し得ない。したがつて、亀裂の発生時期を確認することはできなかった。岩壁面に現われる最初の変化は、255m ベンチ爆破の連続写真の 10 駒目 (6.5 ms) に見られるが、岩壁の下端附近の白い粉塵の煙である。260m ベンチ爆破ではあまり明瞭ではないが、20 駒目 (12 ms) の写真の岩壁右側の下部がそのようになっていいる。260m ベンチ爆破の場合には、白煙が生じている部分の上で小さなガスの噴出がおこつているが、255m ベンチ爆破ではそのような噴出は見られない。この煙が何であるかははつきりしないが、爆轟の振動によつて岩壁面を滑り落ちた岩石の粉ではないかと考える。260m ベンチの爆破では、岩壁の一部から噴き出したガスとともに飛ばされた岩粉であるとも考えられる。

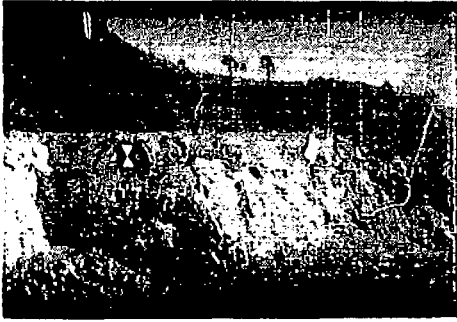
爆轟による爆破応力波の岩壁面への到達時間は、最小抵抗線長 2m として、石灰岩中の音速度を 4,000 m/s とすると、0.5 ms という値になる。したがつて写真の中で見られる岩石粉末の煙の最初の時間 6.5 ms および 12.0 ms とはオーダーが異なつていいる。岩壁面が振動して岩石粉を振り落して、岩壁面下端で煙のようになるために、この程度の時間がかかつたのかも知れない。

岩壁面に現われる次の変化は、全体的な岩壁の盛り上りである。亀裂の発生やガスの噴出より早いように思われる。岩壁が押し出してくるように見えるのは、255m ベンチ、260m ベンチ両爆破とも、70 駒前後 (45 ms 前後) である。それと同時に、爆破以前から見られた亀裂などが大きくなつてくる。新しい亀裂と思われるものは 200 駒前後 (120 ms 前後) にならないと見られない。260m ベンチ爆破における岩壁面右側中央部の爆轟ガスの噴出はむしろ例外的で、亀裂の各所から爆轟ガスが噴き出すのは 100 駒以後 (60 ms 以後) 位である。200 駒前後 (120 ms 前後) となると、岩壁面は球形に膨れ上つて、700~800 駒 (400 ms) 位までは岩壁面らしくまとまつた形状を保つていいるが、そのあたりから、噴出するガスによつて飛ばされる岩石片と、抛物線状に落下する岩石片とに分か

* 昭和32年6月に発表された研究であるが、ワイヤー切断法による実験であつたため、当時は、この値が岩石破片の移動速度であると結論した。しかしその後、この値は、亀裂、爆破孔などから噴出するガスの速度であると考えられるようになった。

* 実験室で、点火玉について行なつたバラツキの観測では、数ミリ・セコンドのバラツキがあることが知られた。数個の点火玉を並べて通電したときの高速度写真で、その状況がはつきりと見られる。

255 m bench (I)



0 駒, 0ms



5 駒, 3.3ms



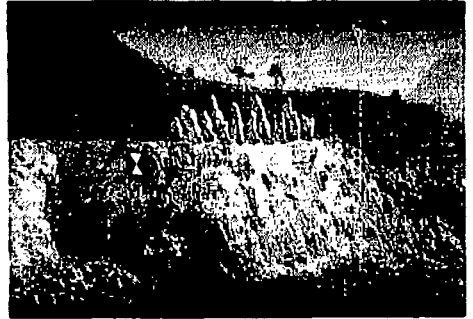
1 駒, 0.65ms



10 駒, 6.5ms



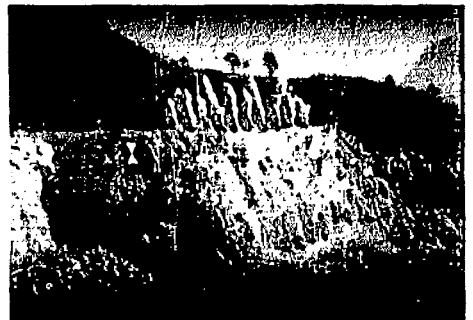
2 駒, 1.3ms



20 駒, 12.8ms

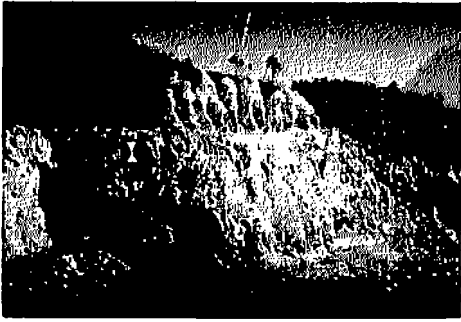


3 駒, 2.0ms



30 駒, 19.2ms

255 m bench (II)



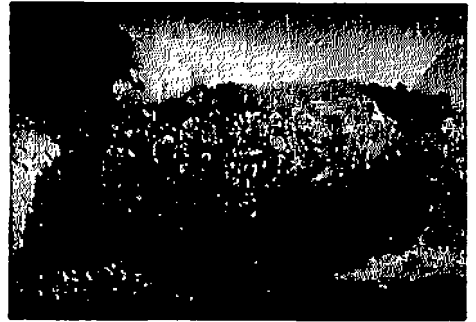
50 駒, 32.3 ms



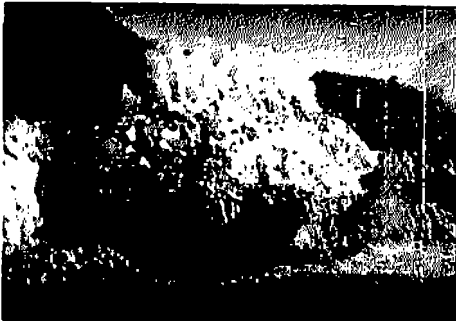
500 駒, 398.6 ms



100 駒, 63.5 ms



700 駒, 398.6 ms



200 駒, 124.2 ms



1,000 駒, 546.6 ms



300 駒, 182.0 ms



1,300 駒, 616.6 ms

260 m bench (1)



0 帧, 0 ms



5 帧, 3 ms



1 帧, 0.61 ms



10 帧, 6 ms



2 帧, 1.2 ms



20 帧, 12 ms

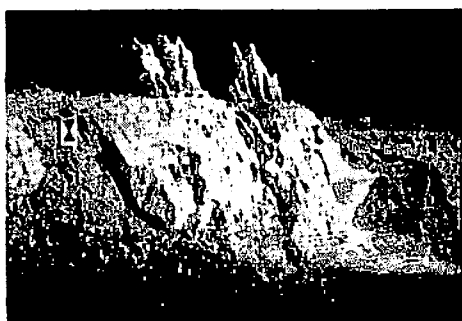


3 帧, 1.8 ms

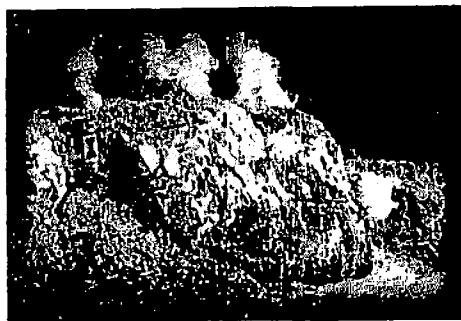


30 帧, 18 ms

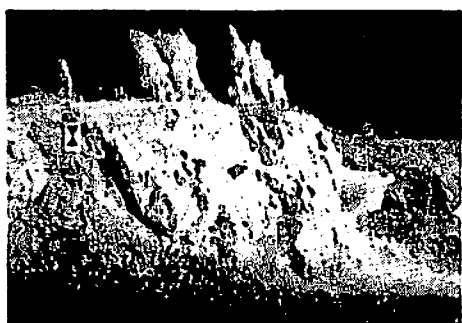
260 m bench (2)



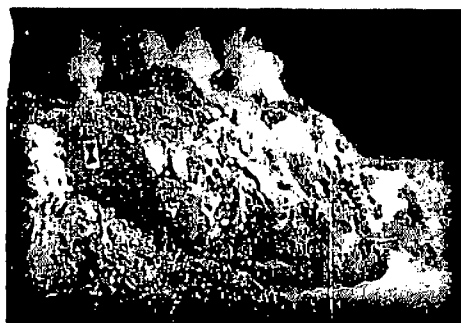
50 駒, 30 ms



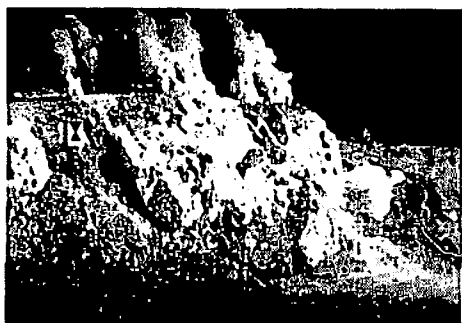
500 駒, 282.0 ms



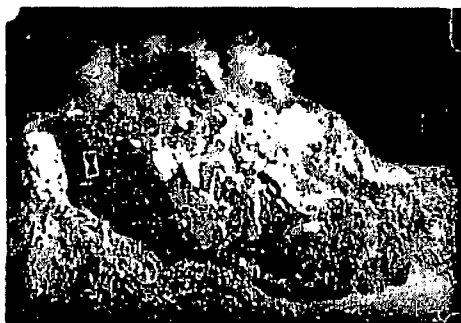
100 駒, 59.6 ms



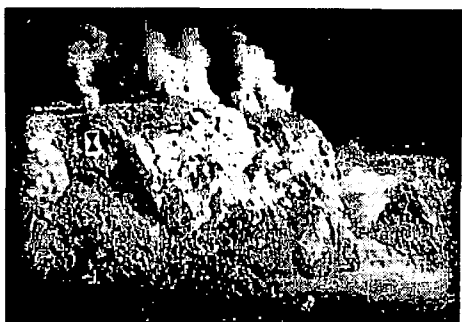
700 駒, 384.7 ms



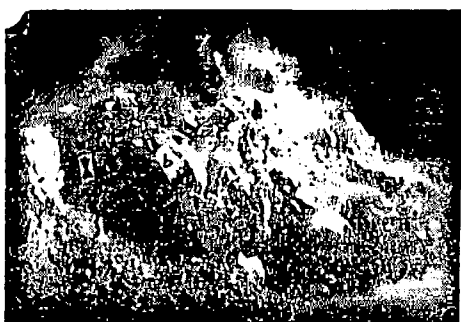
200 駒, 117.6 ms



1,000 駒, 527.7 ms



300 駒, 173.9 ms



1,300 駒, 570.0 ms

れるようになって、崩壊するのが見られる。

(iv) 爆破結果について

両爆破とも結果は普通で、破碎度も悪くはなかった。しかしいずれも、数 10 個の 2 次破碎を必要とする岩塊を生じた*。高速度撮影の写真では、爆破前に見られる亀裂に囲まれた大塊が、岩壁の崩壊にも拘わらず、そのまま破碎されずに残っているのが、それぞれの爆破に指適することができる。255m ベンチの a, 260m ベンチの b (いずれもアート図版の写真の中に記した記号) などの大塊がそれである。

4. む す び

石灰石の採掘 ベンチにおける 3,000~4,000t 規模の大発破を、高速度カメラを用いて観測した結果の報告である。はじめに記したように、とくに真新しい観測ではないが、得られた結果はそれなりの意義を持つものと信じている。結果を要約すると、

- 1) 爆破岩壁面の押し出し速度は 9~16 m/s であった。
- 2) 爆破孔から噴出する煙の速度は 400 m/s で、岩壁面の押し出し速度とはオーダーの異なる値である。
- 3) MS 雷管の各段差は数ミリ・秒のバラツキはあるが、規格に近い値を示した。
- 4) 爆破の際に爆破岩壁面に現われる現象は、爆薬の爆撃時間や岩盤中の音の伝播時間にくらべて、かなり遅れた時期に見られる。
- 5) 爆破前にあつた、亀裂などに囲まれた大塊は、

* 選鉱受け入れ口のサイズが小さいため、この鉱山では必要以上の 2 次破碎を行なっている。

爆破後もそのまま大塊として残るようである。

等であろう。

高速度カメラを用いる爆破現象の観測は、機会があれば今後も行なうつもりである。

おわりに、観測に当って種々の便宜を与えられた日鉄鉱業株式会社本社鉱山部、ならびに葛生鉱業所の各位に、またカメラの使用に際して数々の御注意をいただいた、東京大学生産技術研究所植村研究室の山本芳孝助手はじめ多くの方々に深く感謝する次第である。なお、観測とデータの処理に関する実務は、主に、本学助手の森田道明君(現日立建機株式会社)、学生の今城泰久君(現日本鉱業株式会社)、松山弘志君(現三菱金属鉱業株式会社)により行なわれた。併せて感謝の意を表したい。

参 考 文 献

1) たとえば

E.M.Patterson: Colliery Engineering, April 1957, pp.147~152

伊藤一郎、若園吉一、藤中雄三: 水曜会誌, 第 13 卷, 第 6 号 (昭和 33 年), 369~372 頁

2) W.D.Chesterman: The Photographic Study of Rapid Events, Clarendon Press, 1951

3) 前掲 1) の伊藤等の論文

4) 日鉄鉱業所事業案内, 社内パンフレット

5) B.E.Blair: U.S.Bureau of Mines, RI 5584, 1959

6) 前掲 1), 5)

7) 下村弥太郎, 吉田虎之助, 山口梅太郎, 日本鉱業会誌, 昭和 32 年 6 月号, 361~365 頁

Photographic Study of Quarry Bench Blasting by a High-Speed Camera

Y. Shimomura and U. Yamaguchi

By using a high-speed camera, high-speed photographs of quarry bench blastings were taken at the benches of Hanezuru Limestone Quarry, Tochigi prefecture. The camera used for the study was a Hitachi High Speed Camera, HIMAC 16 H, and provided a speed range of 500 to 10,000 frames per second by the rotating 4 millar shutter system.

Analyses of the photographs of 3,000 to 4,000 ton production blastings revealed following informations:

1. flying rock speed of the quarry face was from 9 to 16m/s.
2. speed of smoke ejected from the shot-hole was 400 m/s which was much faster than the flying rock speed of the quarry face.
3. time intervals of the 25 millisecond delay used was correctly counted.
4. first phenomenon at the quarry face after the ignition was dust smoke and it was much later comparing with the detonating period of explosives or the propagating period of stress waves through rock to the surface.
5. large lump blocks of limestone surrounded by open cracks observed before the blasting remained as the large blocks which was required to be secondarily blasted.

(Faculty of Eng., Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan)
