

## スムーズブラस्टィングの機構に関する実験的検討

### SOME CONSIDERATIONS ON THE MECHANISM OF SMOOTH-BLASTING

中 川 浩 二\*・坂 本 佐\*\*・山 本 顕 一 郎\*\*\*

By Koji NAKAGAWA, Takeshi SAKAMOTO and Ken-ichiro YAMAMOTO

#### 1. はじめに

地下発電所の建設，地下岩盤内貯油施設の計画，あるいはトンネル掘削における NATM の一般化により制御発破の重要性が最近見直され，かつ論じられるようになってきている。しかしながら制御発破の機構はその重要性，施工の頻度にもかかわらず必ずしも明らかではなく，実際の施工においては多く経験に基づいた方法がとられているようである。

制御発破（以下，スムーズブラस्टィング：SB とよぶ）については種々の方法がある<sup>1)</sup>がラインドリリングを除いていずれも爆破により爆破孔，あるいは爆破孔に対して補助的に設けられた空孔を連結させる方法であり対その目的の一つには不必要な破壊を岩盤内に生じせしめないことであり，また一つにはできるだけ滑らかな岩盤壁面を作ることである。SB の機構，すなわち爆破孔が連結する機構に関しては爆破による衝撃波の重ね合わせによるとする説，衝撃波により隣接孔壁の孔間を結ぶ方向にクラックが発生することによるとする説，あるいは準静的なガス圧によるとする説などがあるが必ずしも定説をみないようである<sup>2)</sup>。

SB の機構が明確にされていない理由の一つとして，SB が実際には岩盤を対象として行われるものであるということを挙げることができよう。岩盤は通常多くの節理，層理を含み，また岩質そのものも多種多様であり，実際上一様な状態は存在しないといえる。さらに岩盤の破壊は節理，層理の影響を非常に大きく受けるため，SB 技術の比較が困難となり，理論的解明も容易ではないであろうと思われる。

本研究では実際の岩盤と比較して十分に均質であるセ

メントモルタルを用いてモデル供試体を作製し，これにより SB の機構に大きな影響をもつと思われる隣接孔間の爆破時間差についての検討を行い，かつそれをもとに SB の機構についての考え方に関する考察を行ったのでこれを報告する。

#### 2. SB の機構に関する検討

SB の機構に関しては諸説あり，はっきりとした定説は現在もなお明確にはされていないようである。ここでは SB の機構についての従来の考え方について述べ，さらに筆者らの一つの考え方を提案する。

##### (1) SB の機構に関する従来の考え方

###### a) 衝撃波の重ね合わせによるとする説

これについては Paine ら<sup>3)</sup>により述べられており，基本的には爆破により発生する衝撃波が隣り合う爆破孔間で重ね合わせられ，爆破孔間を結ぶ面上で引張応力が大きくなり，両孔を結ぶ破断面が形成されるとする考え方である。この説の説明としてはベンチカットの整列発破などで各孔を単独で爆破した場合には爆破面には激しい凹凸が生じるが，斉発，あるいは段差の小さい MS 雷管などで各孔を起爆すると爆破面が一様となることをうまく説明できるなどといわれている。しかしこの考え方では爆破孔から伝播する衝撃波の波頭部分の重ね合わせが破壊の発生の原因であるとしているところに問題がある。すなわち，通常のトンネル発破の SB の場合のように孔間隔が 60 cm 程度であるとき，岩盤中を伝わる弾性波の伝播速度を 4000 m/s として，この間を弾性波が伝播するのに必要な時間は 0.15 ms となる。通常の SB では起爆は段数の大きい MS あるいは DS 雷管の用いられることが多く，これら雷管間の起爆時間差は 0.15 ms と比べて十分に大きくなり得ると考えられるため，この説による解釈はあまり現実的ではないであろう。しかし

\* 正会員 工博 山口大学助教授 工学部土木工学科

\*\* 日本化薬（株）火薬事業部 業務課長

\*\*\* 日本化薬（株）火薬研究所 研究課長

SB 用の各爆破孔を導爆線でつないだり、あるいは雷管の起爆方法を工夫するなどして起爆時間差を小さくすることは技術的に可能であり、考察する意味はあるであろう。

**b) 衝撃波による隣接孔周縁の応力集中に伴うクラックの発生を考える説**

伊藤ら<sup>1)</sup>は一孔の爆破によって生じる衝撃波が隣接孔を通過するとき、この隣接孔周縁の爆破孔を結ぶ面上に大きな応力集中を生じ、この部分にクラックを発生させると考えた。そしてクラックの発生した孔が続いて爆破されるとき、この孔は切り欠きを有する爆破孔として作用し、爆破により既存のクラックをその方向に大きく伸展させ、かつそれ以外の方向のクラックの発達を抑制する効果があるとしている。

**c) 準静的なガス圧によるものとする考え方**

SB 結果に準静的なガス圧が及ぼす影響が大であるとする考え方<sup>5)</sup>はかなり一般的である。このことは石材の採掘において衝撃的応力波のほとんどない黒色火薬が用いられてきたことから容易に想像し得るところである。すなわち、この場合には破壊の開始に衝撃波の助けはない。そして隣り合う孔のガス圧による応力場の重ね合わせの結果として準静的な孔周縁の応力集中によりクラックが発生し、主応力方向に沿った破断面を形成すると考えることになる。しかし、実際の SB においては猛度の高い爆薬を用いることが多いため、たとえデカップリング係数を大きくとって圧力のピーク値までの立ち上がり時間は短く、衝撃的な応力波が発生するため、準静的なガス圧のみを考えることは一般的ではない。

**(2) 爆破孔間のクラックがガス圧による応力場において選択的に発達させられるとする考え方**

前の a), b) 説では爆破により発生した衝撃波が伝播し、孔間あるいは隣接孔周縁に孔間を結ぶ方向のクラックを発生し、それが SB を支配する要因になると考えている。これに対し筆者らは一つの考え方を提案する。すなわち爆破衝撃波により爆破孔周辺に多数の放射状クラックが発生し、これがガス圧の作用により発達する過程で隣接孔のガス圧等の影響を受け、孔間を結ぶ方向にあるクラックが選択的に発達させられると考えるものである。

SB においては一孔の爆破に続いて隣接する孔の爆破が短い時間間隔で行われる。すなわち、最初の爆破が行われた孔からの衝撃波の波頭部分は過ぎ去ってもそれに続く準静的なガス圧による応力場が作用し、そこへ隣接孔の爆破が行われ、これによる応力場が生じる。そして両者の重ね合わせにより両孔を結ぶ面に近いところでは引張応力は大きく、その他の方向では小さくあるいはと

きに圧縮応力状態となる。後に示す写真一1にみられるように爆破孔周辺には多数の放射状クラックが生じる。そして準静的なガス圧の作用によってこれらの放射状クラックのあるものは成長させられることとなるが、この過程で隣接する孔の爆破衝撃波のため、両孔を結ぶ面近くのクラックが特に成長させられる。また遅れて爆破された孔の周囲では先の孔の爆破によるガス圧の応力場で爆破が行われるためやはりクラックの成長が選択的となる。このようにして爆破孔から発達するクラックは、両孔を結ぶ面の近くで特に発達する結果になると考えられる。

ところで爆破により孔壁に作用する衝撃は著しく大きいので、特に孔間隔が大きい場合には隣接孔相互の影響を受けずに任意の方向にいくつかのクラックが成長し得る。ところがそれぞれの孔の爆破による応力場はそれぞれの孔に対して軸対称となり、2つの孔の影響を受ける応力場では最小主応力方向(引張応力に直交する方向;クラックの発生する可能性の高い方向)は滑らかな曲線で両孔を結ぶことになる。応力場において発達するクラックはこの方向に平行な方向をとろうとする。そのため任意方向に発生したクラックも両孔を結ぶ面に近いものはこの方向に沿って発達し、それ以外のものは発達が抑えられることになる。この状況は隣接孔の爆破が同時に行われるとき、両孔を結ぶ面から離れてクラックが発生する場合にも同様となることはいうまでもない。

### 3. 実験の目的と方法

前述のように SB の機構に関して種々の考え方が可能であり、爆破条件によってはいずれの説も可能性があるように思われる。そして実際の SB においてはそれぞれ独立にはなく、複合的な形で作用するのであろう。

SB において隣接爆破孔間の爆破時間のずれを考えると、前述の諸説の有効性に差が生じる。隣接する2孔を完全に同時に爆破すると衝撃波の孔間での重ね合わせは現実的となり、また同時に準静的なガス圧も両孔で同様に作用することになる。これに対して隣接する2つの孔の爆破を十分な時間差のもとで行うとき、衝撃波の重ね合わせは当然のこと、準静的なガス圧の相互作用も生じない。しかし一孔の爆破による衝撃波により隣接孔周縁にクラックが生じる可能性はあり、この意味での 2. (1) の b) の機構による SB は期待できることになる。両者の中間程度の適当な時間差、すなわち最初の爆破孔からの衝撃波の波頭は通過したとしても爆破孔中にかなりの準静的なガス圧が作用している状態で次の孔の爆破が行われる場合には衝撃波波頭部分の重ね合わせは期待できないが衝撃波による隣接孔周縁のクラックの発生お

よびガス圧による応力場でのクラックの発達による滑らかな壁面の形成は期待できる。

以上のことを考慮してまず、2. (1), b) の伊藤らの考え方の可能性の確認についての予備的実験を行った。そして、隣接する2つの爆破孔を適当な時間間隔で爆破し、そのときのSB結果が爆破時間差によってどのように変わるかを調べ、SB機構に関して前節で述べた解釈の合理性を検討することを目的とする実験を行った。

(1) 衝撃波による空孔周縁のクラック発生に関する予備的実験と結果

実際に衝撃波が爆破孔から伝播するとき、隣接する孔周辺の孔間を結ぶ方向にクラックが発生し得るものかどうか、またその薬量、距離とクラックの程度に関しては資料がない。そこでこの点についての資料を得るための一つの予備的実験を行った。すなわち、100×100×3 cmのセメントモルタル板を作製し、板中央に直径15 mmの爆破孔と、その周辺爆破孔からの距離25~42.5 cmの位置に、直径20 mmおよび30 mmの空孔を45°間隔に8個配置した。空孔の位置は直接の爆破衝撃波によるクラックと、周囲の自由端からの反射引張波によるクラックとを分離するため、4本の対称軸から22.5°偏った位置に配した。6号電気雷管の周囲を紙筒に包んだ6 gのPETNで巻き、爆破孔に密装薬状態として爆破し、発生したクラックをインクでトレースしたものが写真-1である。この場合クラックは閉じたクラックとなり、肉眼での検出は困難となる。そのためアセトンに浸した脱脂綿で供試体表面を手早くぬぐうことによりその痕跡を検出した。この空孔周縁から発生するクラックのうち爆破孔側のクラックの長さを測定し、爆破孔からの距離に対して示したものが図-1である。

これによると発生するクラック長は爆破孔から空孔までの距離に依存し、クラック発生の限界がおよそこの条件に対して35 cmとなることが認められた。また薬量を減じて(3 gのPETNで6号雷管を巻き、直径13 mmの孔に装填)爆破した場合にはこの距離はおよそ30 cmとなった。このことから伊藤らに

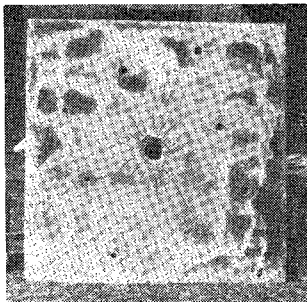


写真-1 爆破孔周辺および隣接孔周辺でのクラックの発達

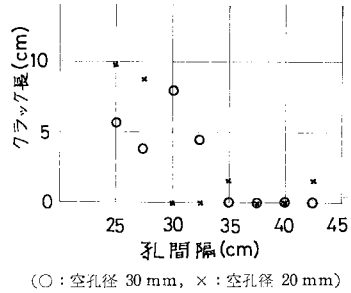


図-1 爆破孔からの衝撃波による空孔からのクラックの発達  
(○:空孔径 30 mm, ×:空孔径 20 mm)

よる説は爆破孔間距離が短いときには十分に可能性があるが長くなると適切でないと考えられる。

なお、本実験に用いたモルタル供試体は配合、養生条件とも後述の実験 A, B におけるものと同じである。

(2) SB結果に与える隣接孔の爆破時間差の影響に関する実験

用いた供試体はいずれもセメントモルタル製であり、大きさは57×27×10.5 cmである。材料には砕砂と早強ポルトランドセメントを用い、配合は重量比で水:セメント:砂=0.52:1.0:2.0とした。練り混ぜ後、木製型わくに打設、1日で脱型、実験日まで湿潤状態を保つようにした。材令はおよそ2週間としている。モルタル打設時のフロー値は159、材令2週間の一軸圧縮強度は50.9 MN/m<sup>2</sup>であった。

a) 実験A

実験Aにおいては、プリスプリッティングの場合のように自由面を考慮しない状態での爆破を考え、あらかじめ爆破された孔の存在する場へ隣接孔の爆破により両孔を結ぶ方向に対してある傾きをなしてクラックが発達してくる場合のクラックの進展と両孔の連結の状態を検討した。供試体は平行な2本の孔をS=16 cmの間隔に有し、その一方は長さ15 mm、幅3 mmの切り欠きをもっている。切り欠きの方向は他の孔の中心方向に対してθ=0°, 10°, 20°の傾きをそれぞれもち(図-2(a))、爆破により切り欠き方向へのクラックの発達を卓越させることを目的としている。実験の手順はまず切り欠きを有さ

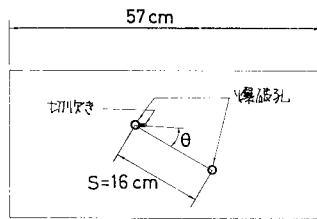


図-2(a) 実験A用供試体 (θ=0°, 10°, 20°)

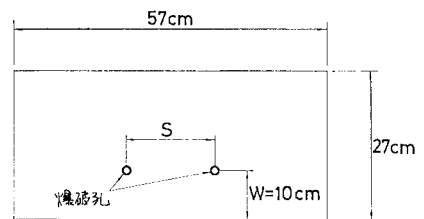


図-2(b) 実験B用供試体 (S=8, 10, 12, 14, 16, 20, 25 cm)

ない孔の爆破を行い、この爆破孔周辺にクラックを発生させ、あるいは応力場を作り、その後ある一定の時間間隔において切り欠きを有する孔の爆破により切り欠き方向へのクラックを卓越発達させる。そのときこの遅れて発達してきたクラックが先の爆破孔とどのような形で連結されるかを時間差との関係で検討しようとするものである。

爆破孔の直径は約 12.5 mm であり、爆薬には導爆線（外径約 5.2 mm、心薬は PETN 10.7 g/m）を用い、導爆線にテープを 2 か所巻きつけ孔径に近い太さとし、爆破時に導爆線が孔のほぼ中央に位置するように努めた。また両孔の爆破時間差は 0, 0.5 ms, 1.0 ms, 20 ms とし、そのほかに同時爆破および装薬をし直して爆破したものおよび切り欠きを有する孔のみを爆破したのものをとっている。

#### b) 実験 B

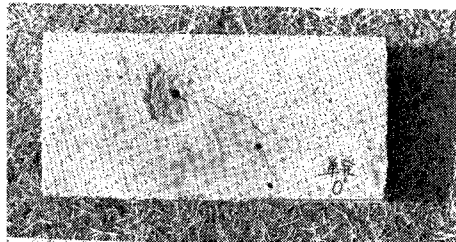
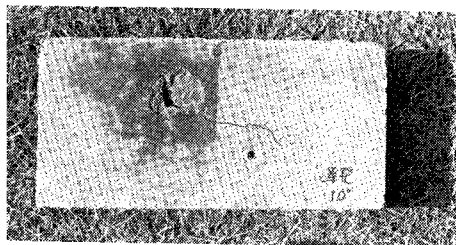
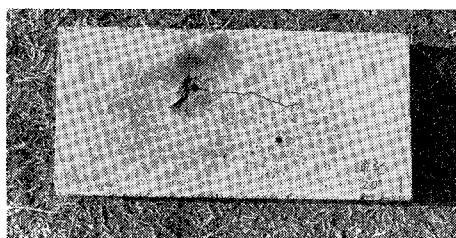
実験 B においては SB によって自由面と平行な破断面を作ることを目的とし、供試体の一面に対して 2 本の爆破孔を平行に並べた。最小抵抗線距離  $W=10$  cm に対して爆破孔間の距離は  $S=8, 10, 12, 14, 16, 20, 25$  cm としている（図-2 (b)）。爆破孔の直径、爆薬、爆破時間差等に関しては実験 A と同じである。それぞれの爆破時間差で爆破された供試体に発生、発達するクラックの性状から SB の機構に関して前節で述べた解釈を検討す

るとともに最終壁面の平滑度をその両孔中心間を結ぶ面から壁面の最大の偏り（Langefors らは Unevenness と定義している<sup>5)</sup>）として求め、SB における爆破時間差の効果について検討した。

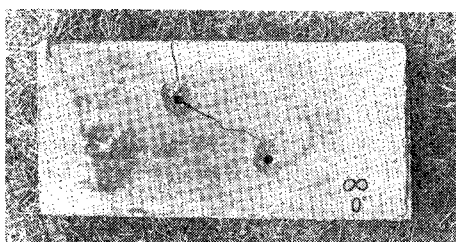
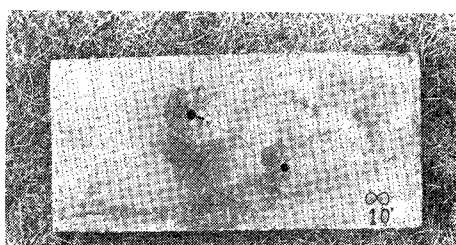
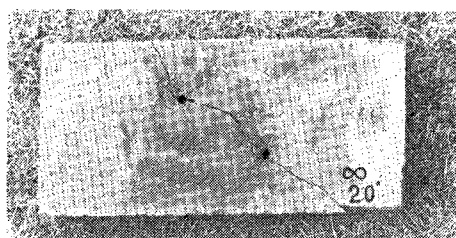
なお爆破により供試体が分離飛散するのを防ぐ目的で実験 A の場合には供試体外周に沿って 6 mm 丸鋼を二重にコの字形に配し、また実験 B の供試体には SB による破断面を作る面を除いた 3 面に二重にコの字形に配した。

爆破時間差は 0, 0.5 ms, 1.0 ms の場合は電気雷管から両爆破孔に至る導爆線の長さを調節することによった。すなわち導爆線の爆速はおよそ 7000 m/s とほぼ一定であることから雷管で起爆される位置から両爆破孔に至るまでの 2 本の導爆線の長さの差を 0, 3.5 m, 7.0 m とすることによって導爆線中を伝わる爆轟伝播時間の差からほぼ正確な時間差を現出することが可能となる。また 20 ms の時間差については瞬発および 2 段の 2 つの電気雷管を用いて起爆した。

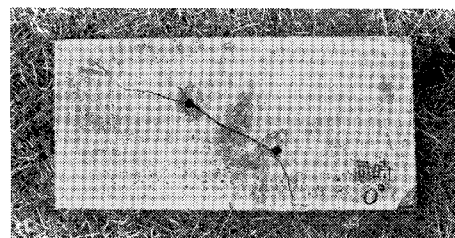
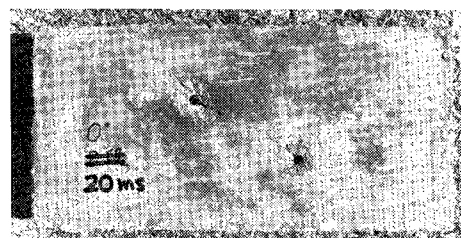
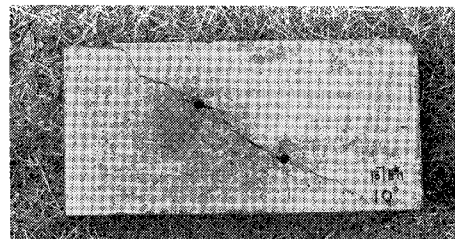
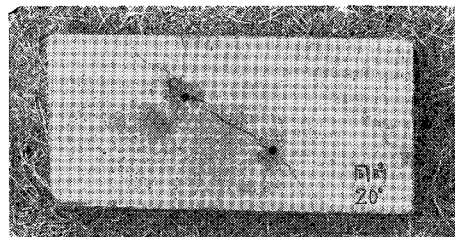
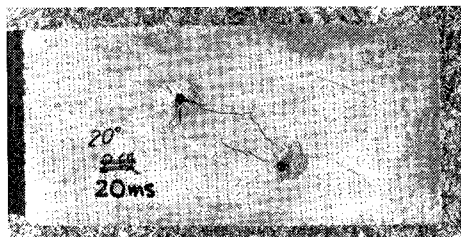
供試体の表から裏へと貫通して導爆線を配し爆破を行うとき、表および裏面では back break の状態を生じ、その状況は裏面の方が著しい（ここで表と裏とは爆轟が表から裏へと進行するとして定義する）。以下に示す資料はすべて back break の小さい表側の面についてのものである。



(a) 切り欠き孔のみ爆破

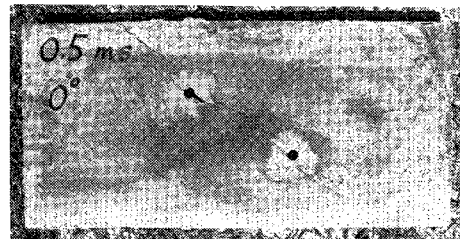
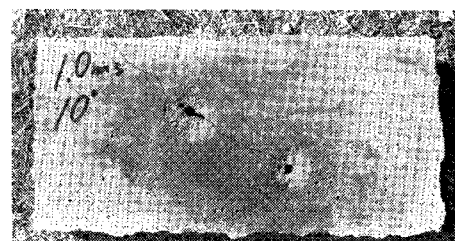
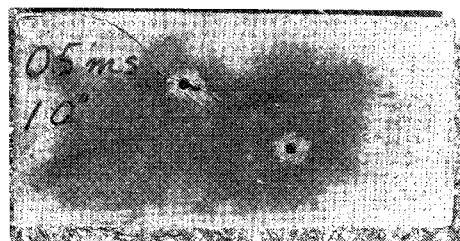
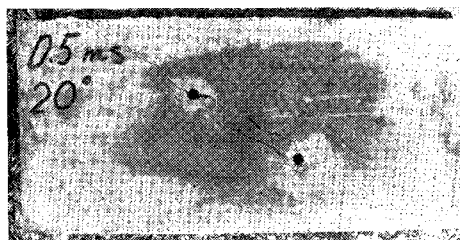


(b) 右下孔爆破後、左上孔を装薬し直して爆破



(c) 右下孔爆破後，左上孔爆破までの時間差 20 ms

(d) 右下孔爆破後，左上孔爆破までの時間差 0 ms



(e) 右下孔爆破後，左上孔爆破までの時間差 0.5 ms

(f) 右下孔爆破後，左上孔爆破までの時間差 1.0 ms

写真-2 時間差をもつ爆破での両孔間のクラックの連結 (切り欠きの傾きは上から 20°, 10°, 0°)

#### 4. 実験結果と考察

写真—2 に実験Aの結果の例を示す。実験はそれぞれの条件について各3個、合計54個の供試体について行い、写真—2にはその代表的な結果を示している。

まず切り欠きを有さない孔の爆破は行わず、切り欠きを有する孔のみ爆破した場合、切り欠きを延長した方向に卓越したクラックの発達するのがみられた(写真—2(a))。しかし、その場合表面へ現われてくるクラックは必ずしも直線状とはいえ、かなりの屈曲を示し、また隣接する空孔によって影響されるともいえない。

次に切り欠きを有さない孔を先に爆破し、十分な時間間隔の後切り欠きを有する孔を爆破する場合(写真—2(b))、まず最初の爆破により爆破孔の周囲にはいくつかのクラックが発生する。そしてこの状態のところへ遅れて爆破された孔からクラックが進展してくることになる。このクラックはあらかじめ存在していたクラックとなす角が大きいときには明瞭な交角をもって交わるような形をとるが、両者のなす角が小さい場合には後から進展するクラックは前のクラックに引き寄せられるようになり、曲線を描いて両者はつながるようである。これと同様な傾向は20msの時間差をおいて爆破した場合にも認められる(写真—2(c))。すなわち、これらの時間差をおいた爆破の場合には最初の爆破孔からのクラックの発生はその後の爆破には無関係であり、孔から放射状にある角度間隔をもって数本のクラックを発生させる。そこへ切り欠きを延長するクラックが進展してくるとき、このクラックに近い位置に先のクラックが存在するとこのクラックは先のクラックと合流し、爆破孔の連結が行われることになるのであろう。

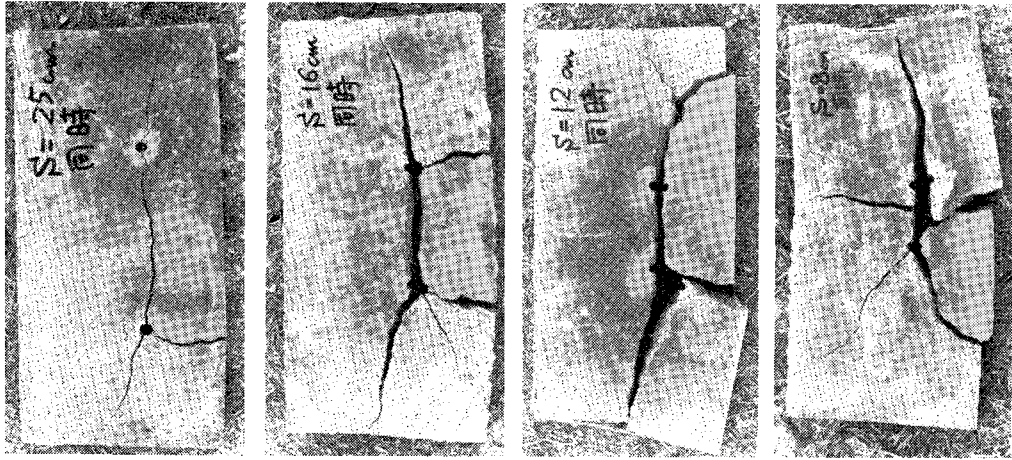
次に、両爆破孔の爆破を同時に行うとき、両孔からの衝撃波は波頭部分を含めて両孔間で重ね合わせられ、両孔間を結ぶ面の近くでは引張応力域が形成される。たとえば同時爆破の場合の切り欠きの傾き $10^\circ$ 、 $20^\circ$ の例をみると、クラックの発生位置は必ずしも爆破孔周縁とは限らず、両孔の間でも発生しているようにもみられる(写真—2(d))。そして、この場合には両孔を結ぶ面の近くでの引張応力の発生、あるいはそれに伴うクラックの発達が著しくなるため、爆破孔につけられた切り欠き方向が爆破孔間を結ぶ方向と一致しない場合にはクラックの発達方向を制御する目的からは効果が小さく、切り欠き先端からのその方向へのクラックの発達は小さいかあるいは切り欠き先端ともう一つの爆破孔とを結ぶ面に沿った破壊が生じる。しかるに切り欠き方向が孔間を結ぶ面と一致する場合には両孔間を結ぶ面上のクラックは著しく発達し、しかもそのクラックはほとんど直線状と

なる。

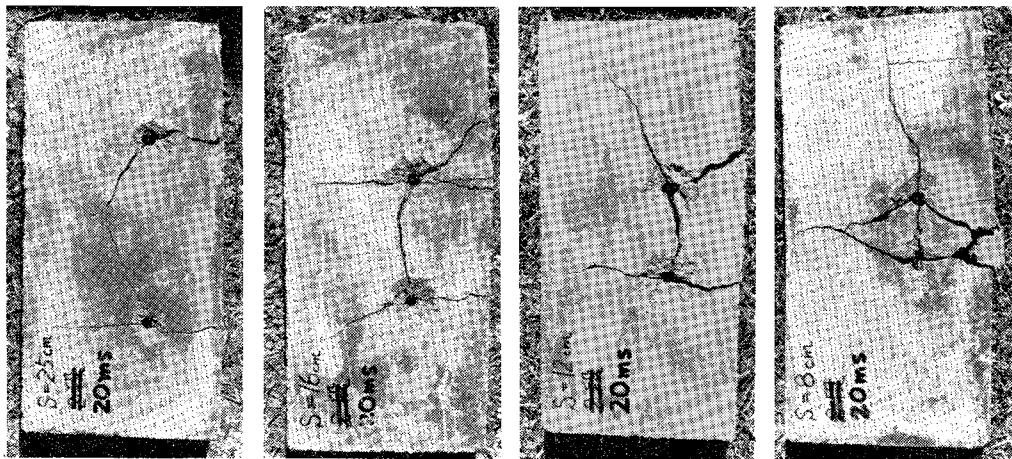
両孔の爆破時間差が0.5ms、1.0msの場合(写真—2(e)、(f))を考える。爆破後0.5あるいは1.0msでは衝撃波波頭部分はおおよそ2~4mの距離を伝播し、かなり減衰しているのであろう。そして衝撃波に続く準静的なガス圧がこれらの時間を経過した後で孔壁にどの程度作用しているかは不明である。しかし時間差20msの場合と比べてクラックの発達機構に明確な差があるためかなりの圧力が作用しているものと考えられる。これらの時間差(時間差0.5ms、1.0ms)で特徴的なことは両孔間を結ぶようなクラックが大きくない間隔で2本形成される可能性が高いことである。実際にこれらの時間差で切り欠きの傾きが $10^\circ$ および $20^\circ$ の供試体に限ってみると全12個のうち6個についてこの傾向が明らかであった。この状況は最初の爆破孔からのクラックがまだ十分に発達しない間に隣接孔の爆破が行われるため、孔間をつなぐ方向でのクラックの選択的発達が生じ、また切り欠きからのクラックの成長も最初の孔の応力場の影響を受けつつ成長するため2本のクラックが発達する結果になると考えられよう。

次に、実験Bの結果の例を写真—3に示す。実験はそれぞれ同一の条件に対して2~3個を行っており、供試体個数は合計77個である。爆破はまず左側の孔から行い、続いて所定の時間間隔後右側の孔で行っている。

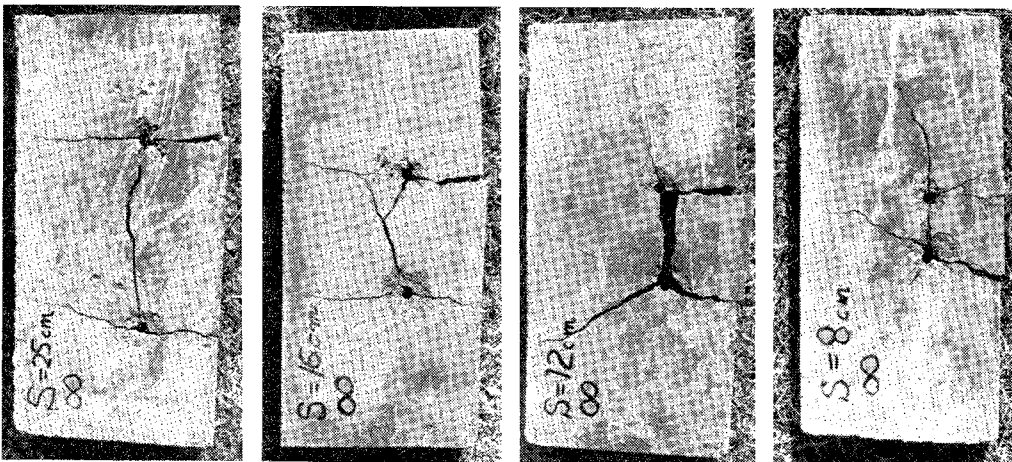
両孔の爆破が十分な時間差をもって行われる場合(写真—3(a))、 $S$ (Space:孔間隔)=8cm、12cmについてはほぼ両孔を結ぶ平面に近い壁面が形成されるが $S=16$ cmに対してはクラックの発達はそれぞれ独立に生じたと考えてよく、前に発達していたクラックに後発のクラックの成長がシャ断された状態となっている。また $S=25$ cmではたまたま後発のクラックが先発のクラックの近くに発達したため、誘引されて連結されたものと解釈されよう。このように爆破に十分な時間間隔がありかつ爆破孔間の距離が大きい場合には壁面の形成は2つの孔から任意の方向に発達するクラックの成長の結果としての偶然性を有すると考えられる。しかしながら $S=8$ cmおよび12cmの場合には壁面は自由面に対して顕著に平行に近くなる。これは右側の孔のみ両側に自由面に平行な長いクラックを有することから前述伊藤らの説に従って解釈される。すなわち左孔の爆破による衝撃波によって右孔には両孔を結ぶ方向の直径の両端に自由面に平行なクラックが発生し、続いて行われるクラックを有する孔の爆破によって著しくこのクラックが発達し、壁面となる。クラックの発達は実験Aの一孔のみ爆破した場合にみられるように単一の孔の爆破のみでは著しくはなく、第2の孔の爆破によって発達した面が著しく支配的となる。このことから伊藤らの解釈はこの実験において



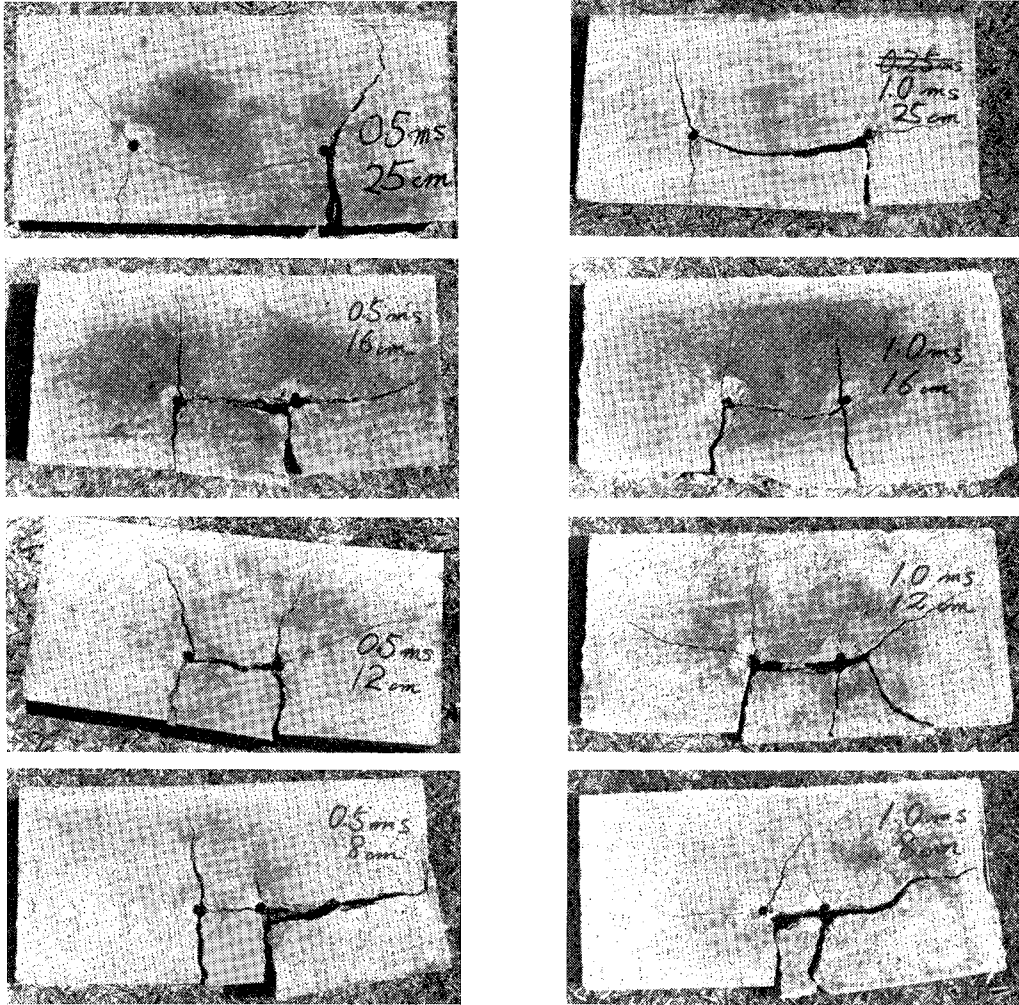
(c) 左孔爆破後、右孔爆破までの時間差 0 ms



(b) 左孔爆破後、右孔爆破までの時間差 20 ms



(a) 左孔爆破の後、右孔を裏裏し直して爆破



(d) 左孔爆破後、右孔爆破までの時間差 0.5 ms

(e) 左孔爆破後、右孔爆破までの時間差 1.0 ms

写真-3 時間差をもつ爆破での壁面の形状 (孔間隔は上から 25 cm, 16 cm, 12 cm, 8 cm, 最小抵抗線距離 10 cm)

孔間隔が 12 cm 以下の場合に有効であるといえる。

爆破時間差が 20 ms の場合 (写真-3 (b)) にも先とほぼ同様な傾向がみられる。この場合にも左孔の爆破による右孔のクラックの発生の結果と思われる破壊は  $S=8$  cm, 12 cm について認められる。

これと比べて左右両孔を同時に爆破する場合 (写真-3 (c)) には少なくとも  $S$  が 16 cm 以下の場合両孔間の破壊は両孔を結ぶ平面近くに集中されるようである。そして  $S=8$  cm の場合を除いては供試体の地山側へ伸展するクラックはほとんどみられない。このことは前述のクラックの発達に相互の衝撃波 (実際には爆轟衝撃波) の重ね合わせおよびそれに続くガス圧による応力場の影響を受けて両孔を結ぶ面近くに集中し、エネルギーがこの部分の破壊に多く消費され、それ以外の方向のクラックの発達が著しく抑えられ、また同時に相互の孔からの

衝撃波が孔間を結ぶ方向以外のクラックの発達を抑えるためであると解釈される。 $S=25$  cm となるとこの直線性は若干失われるが、それでもかなり平面に近い壁面が形成されるとしてよいであろう。

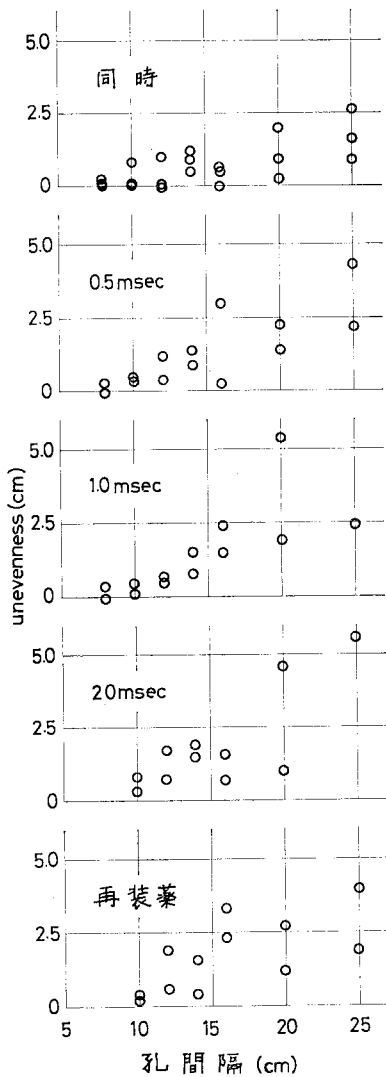
爆破時間差が両者の中間となる 0.5 ms, 1.0 ms の場合 (写真-3 (d), (e)), 前二者とは異なった状態が生じる。すなわち爆破孔間隔  $S$  が小さいときには先行する孔の爆破により右孔にクラックが生じ、そのクラックを発達させる形で両孔を平面状に結ぶ壁面が形成されるのがよく観察される。しかし  $S=25$  cm では両孔を結ぶ壁面が大きな弧状の曲面となる。この状況については前述の準静的なガス圧による応力場でのクラックの発達から解釈されるべきであろう。

これらのクラックの応力場での発達を厳密に考えようとすれば、供試体端やクラック面での応力波の反射によ



る応力場の乱れを考慮する必要がある。しかし材料中での波動の減衰や反射波の複雑な干渉により本研究の目的とするクラックの発達傾向の評価のためには爆破孔からの直接的な応力場の影響に重きを置いても特に大きな問題は無いであろう。

以上の実験結果を unevenness を用いて図にしたものが図-3である。ここで壁面の unevenness は供試体の表面（爆轟が供試体中へ進入する面）と最終壁面との交線が表面上で両孔中心を結ぶ直線から最も偏った距離の絶対値としてとった。この偏りを図のように孔間隔および爆破時間差について整理するとそれぞれの爆破時間差に対しては偏りの分布は孔間隔の増加に伴う広がりをも



(上から時間差 0, 0.5 ms, 1.0 ms, 2.0 ms)  
装薬し直して爆破したもの

図-3 爆破時間差、孔間隔による最終壁面の平面からの偏り (Unevenness)

って広範囲となるようである。そしてこの場合の広がりを与える勾配は同時爆破の場合が一番小さく、時間差が大きくなることによって大きくなっていくのが認められる。このことからみて隣接する孔の爆破の時間差を小さくすることは効果的な SB を行うために非常に大切な要素であると考えられる。またこの偏りを自由面側によるものを負、地山側によるものを正として考えるとき、一般的にいわれているように孔間隔が小さいとき（過装薬量）には偏りは正となり、孔間隔が大きいとき（装薬量不足）には負となる傾向がある程度みられるようであるが必ずしも明確とはいえないようであった。

本実験では実際の SB の条件と比較して供試体の大きさが十分でないため爆破により供試体が部分的に分離、移動を生じ、実際の発破においては生じ得ないようなクラックの発達が見られる。同時爆破以外の場合、多くの供試体において爆破孔から地山側へ伸びるクラックのかなりの部分は供試体の部分的な移動によって大きく発達したものと考えられ、実際の発破の場合のように両側への移動、回転が拘束されておれば爆破孔からの他の放射状クラックのようにほぼ閉じたような状態にあったと予想される。このことを考慮に入れるとしても同時爆破の場合とある時間差をもって爆破した場合の地山側へのクラックの発達には著しい差が認められる。すなわち隣接する孔を同時に爆破することにより相互の孔からの衝撃波は孔間を結ぶ方向以外へのクラックの発達を抑制し、両孔を結ぶ面に破壊を集中させ、この部分での有効なエネルギーの解放を行う。その結果、同時爆破は他の方向への破壊を著しく軽減させる効果があり、オーバーブレイクを減少させるのみならず地山を傷めないためにも有効な方法であると推察される。

### 5. おわりに

以上のように本研究においては SB の機構に関する諸説を検討、考察し、発展解釈することから始めてそれらの諸説の妥当性をセメントモルタル供試体によるモデル実験により検討することを目的とした。そのため大別して2種類の供試体を作製し、隣接する2つの爆破孔の爆破時間に差を与え、爆破孔周辺で破壊開始が生じ、かつ発達する場合の応力場に差をつけた実験を行った。

実験および考察の結果得られたおもな結論は以下のとおりである。

(1) 通常の SB においては衝撃波、ガス圧がそれぞれ独立にはなく一連のものとして働く。そして隣接する孔の爆破が行われる時間の差によって SB の機構、特に破壊初期の機構における衝撃波の働きに差があると考えられる。

(2) 隣接する孔が同時に爆破される場合には両孔の間で衝撃波の波頭の重ね合わせが行われ、またそれに続くガス圧の影響も重ね合わされる。そのためクラックが孔周縁のみならず孔と孔とを結ぶ平面近くで発生する可能性も高くなる。また孔周縁からクラックが発生する場合にも隣接孔の爆破の影響を大きく受け、両孔を結ぶ面近くに集中する。さらにこの部分での速やかなエネルギーの解放が行われまた隣接孔による応力場は両孔を結ぶ方向以外のクラックの発達を抑えるため他の方向への破壊の発達は小さい。

(3) 隣接する2つの孔の爆破が0.5msあるいは1.0msという短い時間差をもってなされる場合、衝撃波の波頭は両孔間で重なり合うことはない。しかし先に爆破された孔からみればガス圧の作用により孔周辺のクラックが発達しつつある間に隣接孔からの衝撃波が到達し、また後から爆破される孔からみれば先の孔の爆破に伴うガス圧による応力場で爆破が行われることになる。そのため両孔間のクラックは両孔を結ぶ面近くで選択的に発達させられる。しかしこの相互作用は同時爆破の場合に比べて弱い。そのためクラックが両孔を結ぶ面から若干外れて発生、発達することもあるが、孔相互に相手孔からの応力場の影響を受けるためクラックは滑らかな弧を描いて両孔をつなぐことになる。

(4) 十分な時間差をおいて2つの孔が爆破される場合には相互に及ぼす応力場の影響はない。そのため先に爆破された孔からのクラックの発生した場へ後から爆破された孔からのクラックが進入し、両者が連結されることによって壁面が形成される。そのため最終壁面の形成は両孔から任意方向に発生、発達するクラック方向に支

配される。しかし両孔の間隔が小さく、先行する爆破による他の孔周縁での両孔を結ぶ方向でのクラックが発生する場合には、遅れて行われる爆破によりこのクラックが発達し、比較的平面に近い壁面が形成される。この状況は前項の時間差0.5ms、1.0msの場合も同様である。

(5) 同一時間差で爆破が行われる場合には Unevenness は孔間隔の増大に従い増大する。この広がり の程度は時間差が大きくなるほど大となる傾向を示す。

謝 辞：本研究を行うにあたり多くの方々のご援助をいただいた。特に、実験に便宜をお図りいただいた日本化薬(株)厚狭工場の石井工場長に感謝する次第である。また、実験に協力いただいた日本化薬(株)荒木主任、徳山高専 橋本助手をはじめ多数の山口大学の職員、学生の諸氏に感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) 工業火薬協会：発破ハンドブック，山海堂，1976。
- 2) たとえば，下村弥太郎・山口梅太郎：スムーズブラスティングに関する研究(第2報)，工業火薬協会誌，Vol. 30, No. 2, 1969。
- 3) Paine, R.S., D.K. Holmes and H.E. Clark : Controlling Overbreak by Presplitting, Proc. Int. Nat. Symp. Mining Research, Univ. of Missouri, USA, Pergamon Press, Vol. 1, 1962。
- 4) 伊藤一郎・佐々宏一：スムーズブラスティングにおける破壊機構の一考察，日本鉱業会誌，Vol. 84, No. 964, 1968。
- 5) Langefors, U. and B. Kihlström : The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley & Sons Inc., 1979。

(1980.9.22・受付)