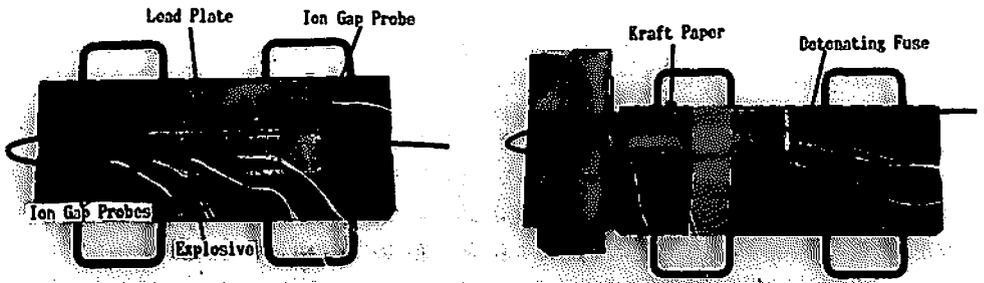


Fig. 1 Measuring system for experiment



(1) Lead plate on the iron block is used to observe the the detonation traces. Ion gap probes are inserted into the explosive. White wires on the iron block are ion gap probe used in this experiment.

(2) Explosive put on the lead plate. A kraft paper is put on the explosive and detonating fuse is put on the kraft paper.

Fig. 2 The photograph of situation of experiment

し、その段差を起爆までの遅延時間とした。使用したミリ秒コンド雷管は、MS 2段 (10msと25ms)、3段 (50ms)の三種類である。鉄製の台座の上に爆痕観測用の鉛板を置き、その上に爆薬、クラフト紙筒、導爆線を設置する。Fig. 1に実験と計測の概略を示す。Fig. 2に実験の状態を示す。(1)は鉄製の台座の上に鉛板を置き爆薬を設置する前の状態で、(2)は爆薬を設置した状態である。実験は当研究所の爆発ドーム及び爆発ピット内で実施した。

2.2 爆轟性の検討方法

含水爆薬の爆轟性を検討するため、爆薬の爆速の変化と鉛板に刻まれる爆痕の状態を観測した。

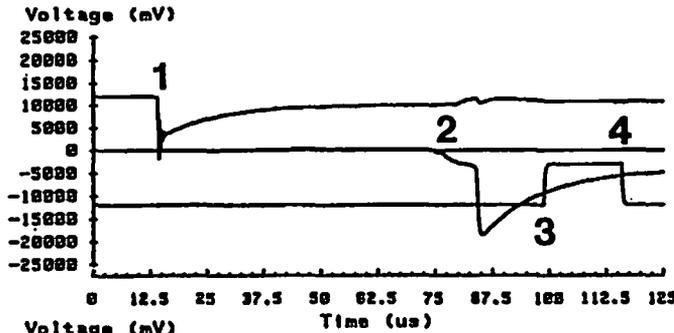
爆速の計測は、衝撃圧を受ける爆薬に起爆点から4 cm離れた点から5 cm間隔に2本のイオン探針 (番号3, 4)を挿入し、この間の平均速度を計測した。また、最終加圧点と爆薬の起爆点にイオン探針 (番号1, 2)

を置き、起爆までの遅延時間を計測した。出力信号は北斗理研株式会社製のパルスジェネレータを介して日置電機社製のストレージスコープ8850 (サンプリングレート20MHZ)で記録した。計測したデータは GPIB でヒューレット・パッカード社製310Cのコンピュータに取り込み解析処理した。イオン探針法による計測例をFig. 3に示す。Fig. 3の (1)が完爆状態の計測例で、(2)が半爆状態 (Break-away of detonation)の計測例である。図中の数字1~4はイオン探針番号を示す。爆痕の観測は厚さ5 cmの鉛板を爆薬の下側に設置し鉛板に刻まれる爆痕の状態から完爆、半爆及び不爆を判定した。また、イオン探針による爆速の解析結果と比較検討した。

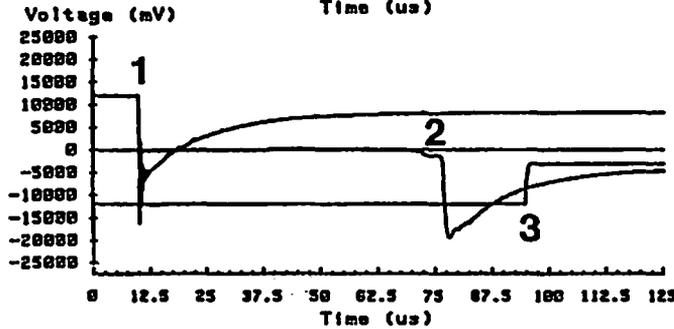
3. 実験結果および考察

3.1 クラフト紙筒の影響

クラフト紙筒の厚さが爆薬にどのような影響を与え



(1) Waveforms of ion gap in case of detonation. No.1 and No.2 show the delay time of ignition of explosive. No.3 and No.4 show the velocity of explosive.



(2) Waveforms of ion gap in case of break-away of detonation. No.4 ion gap probe did not react to detonation of explosive

Fig. 3 Typical waveforms of ion gap probe measuring data. The number in the figure shows the number of ion gap probe

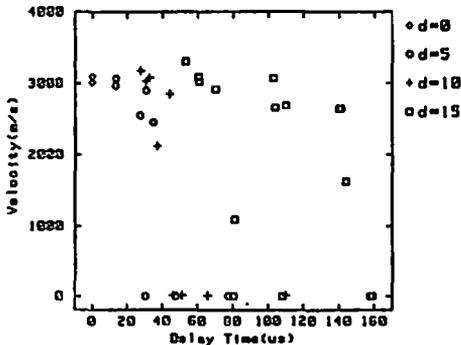


Fig. 4 Detonation velocity of emulsion slurry explosive (d: thickness of kraft paper (mm))

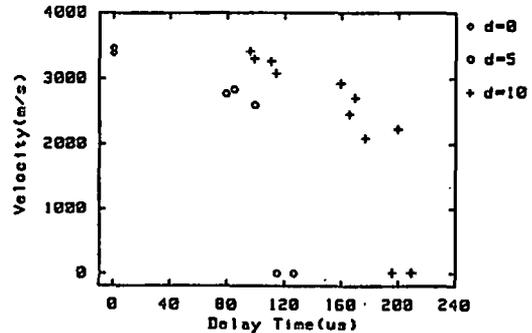


Fig. 5 Detonation velocity of water-gel slurry explosives (d: thickness of kraft paper (mm))

るかの予備実験を行った。その結果、クラフト紙筒が一重の場合には鉱山用エマルジョン爆薬はほとんど飛散しクラフト紙筒内部に爆薬が残留しないが、炭鉱用のMMAN系含水爆薬は部分的には破壊されるが爆薬の形態を保っていた。二重の場合にはエマルジョン爆薬は変形し部分的に破壊されて飛散するが爆薬の形態を保っていた。また、MMAN系含水爆薬はほぼ完全な状態を保っていた。三重の場合にはエマルジョン爆薬とMMAN系含水爆薬は変形するだけでほぼ完全な爆薬の形態を保っていた。

3.2 爆速の計測結果

エマルジョン爆薬の起爆までの遅延時間による爆速の変化をFig.4に示す。エマルジョン爆薬の定常爆速は3,000~3,100m/sであるが、爆薬が起爆される限界の遅延時間に近くなると爆速が急激に低下し、1,800~2,500m/sになる。また、爆轟性が不安定になり、爆速値のバラツキが大きくなることが認められ、これは爆薬が起爆される限界の遅延時間に近くなる程に顕著になる。このことは、導爆線の衝撃圧の影響で爆薬が死圧に近い状態になったものと思われる。

MMAN系含水爆薬の起爆までの遅延時間による爆速の変化をFig.5に示す。MMAN系含水爆薬の場合

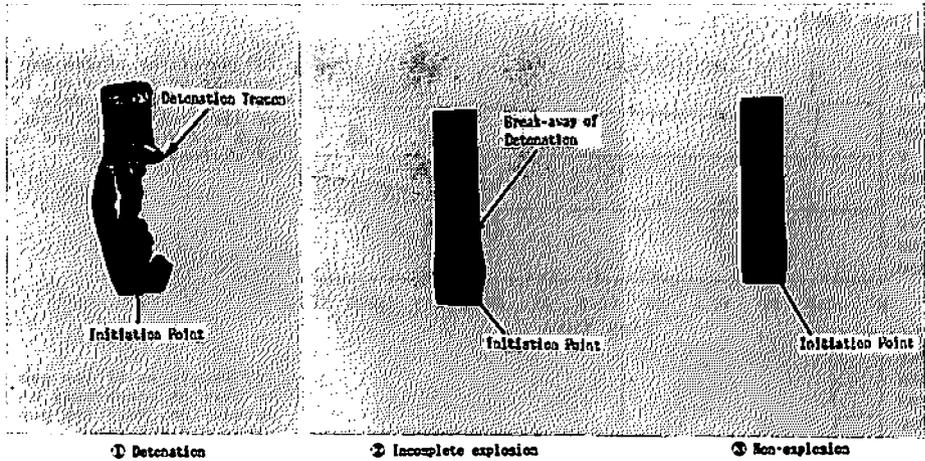


Fig. 6 Results of detonation traces on lead plate

も同様に定常爆速3,400~3,500m/sが、爆薬が起爆される限界の遅延時間に近くなると爆速が急激に低下し、2,200~2,600m/sになる。また同様に、爆轟性が不安定となり、爆速値のバラツキが大きくなる。MMAN系爆薬も導爆線による加圧で爆薬が死圧に近い状態になるものと思われる。

3.3 鉛板に刻まれた爆痕の観測結果

鉛板に刻まれる爆痕の観測結果で完爆（エマルジョン爆薬，クラフト紙筒二重，遅延時間0.049ms）・半爆（エマルジョン爆薬，クラフト紙筒二重，遅延時間0.066ms）・不爆（エマルジョン爆薬，クラフト紙筒一重，遅延時間0.049ms）での爆痕の状態をFig.6に示す。衝撃加圧下の供試爆薬の爆速値がその爆薬の定常爆速値に近い値を示す完爆状態では鉛板上に刻まれる爆痕は大きく、鉛板が圧延された状態となり部分的に破壊される。また、爆薬が導爆線の衝撃加圧で半爆になる場合には鉛板上の爆痕は途中で爆轟が中断した現象を観測することができる。完爆状態では爆痕が爆薬の設置した箇所全体に強い痕跡が刻まれている。半爆では爆痕が途中で途切れ、爆薬の爆轟反応が中断したことが分かり、鉛板に刻まれる爆痕も弱い状態で刻まれる。

3.4 鉱山用エマルジョン爆薬の爆轟性の考察

鉱山用エマルジョン爆薬の起爆までの遅延時間による爆轟性の実験結果をTable 1に示す。爆薬の完爆、半爆及び不爆の判定はイオン探針による計測結果と鉛板に刻まれる爆痕の状態から判断する。クラフト紙筒が一重の場合には起爆までの遅延時間が0.033ms（導爆線20cm）で不爆となる場合があり（3/4，分母：実験回数，分子：完爆回数，以下同様），0.049ms（導爆線30cm）では全てが不爆または半爆（0/4）となる。従って、一重の時の爆薬が起爆される限界の遅延時間は0.033

msとなる。起爆までの遅延時間が0.016ms（導爆線10cm）で完爆になるのは、導爆線の爆轟で発生する衝撃圧がクラフト紙筒を伝播し、爆薬が十分な加圧状態になる前に爆轟したためと思われる。また、起爆までの遅延時間を10ms（MS雷管2段）に設定した実験ではクラフト紙筒一重で不爆になることを確認した。これは先の予備実験からも明らかなように導爆線加圧点から爆薬起爆までの起爆までの遅延時間が長いために爆薬が飛散した後に導爆線の爆轟が伝播するためと思われる。

二重の場合には起爆までの遅延時間が0.049msで不爆（2/5）となる場合があり、0.066ms（導爆線40cm）と0.082ms（導爆線50cm）で全てが不爆又は半爆（0/1）となり、爆薬が起爆される限界の遅延時間は0.049msとなる。不爆になるのは導爆線で発生する衝撃圧が供試爆薬を加圧し、死圧状態になったためと考えられる。また、起爆までの遅延時間を10msに設定した実験では完爆する。このことから導爆線の衝撃加圧によって生じた死圧状態が時間の経過に伴って回復したものと思われる。

三重の場合には起爆までの遅延時間が0.082msで半爆（1/3）が起こるが、0.148ms（導爆線90cm）では全てが完爆（3/3）となり0.164ms（導爆線100cm）で全てが不爆（0/2）になる。爆薬が起爆される限界の遅延時間は0.148msとなる。また、起爆までの遅延時間が0.328~1.148ms（導爆線200~700cm）では半爆になるが、完爆にはいわず10msで完爆（2/2）する。このことから、クラフト紙筒が三重の場合にはクラフト紙筒が一重の時より導爆線による衝撃加圧が低いため、不爆の状態から半爆の状態へと回復したものと思われる。また、死圧が回復することから爆薬中に存在するすべてのGMBが破壊されず、機械的攪拌等によって

Table 1 Result of experiments in case of emulsion slurry explosives

Length of Detonating Fuse and Delay Time Thickness of Kraft paper	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	70cm	90cm	100cm	110cm	200cm	300cm	500cm	700cm	MS*2 ±10ms
Single Thickness of Kraft paper (5mm)	○ ○ ○	○ × ○ ○	× △ × △		× ×									×
Double Thickness of Kraft paper (10mm)		○ ○ ○ ○	× ○ × × ○	△	×	× ×								○
Triple Thickness of Kraft paper (15mm)			○	○ ○ ○	△ ○ △	× ○ ○ ○	○ ○ ○	× ×	× × △	△ △	△ △	△ △	△ △	○ ○

○ : Complete explosion △ : Incomplete explosion × : Non-explosion * : Milli second delay detonator

Table 2 Result of experiments in case of water-gel slurry explosives

Length of Detonating Fuse and Delay Time	50cm .082ms	60cm .098ms	70cm .115ms	80cm .131ms	90cm .148ms	100cm .164ms	110cm .180ms	120cm .197ms	130cm .213ms	140cm .230ms	MS*2 ≠10ms	MS*2 ≠25ms	MS*3 ≠50ms
Thickness of Kraft paper													
Single Thickness of Kraft paper (5cm)	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	△ △ × ○	×	×						○ ×	○	○
Double Thickness of Kraft paper (10cm)	○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○		○	○ ○ ○ ○	○ ○ △ ○	○ △ ○ ○	△ △ △	△	○ ○		

○: Complete explosion △: Incomplete explosion ×: Non-explosion *: Milli Second delay detonator

気泡体の破壊等が影響するものと考えられる。

3.5 炭鉱用MMAN系含水爆薬の爆轟性の考察

炭鉱用MMAN系含水爆薬の起爆までの遅延時間による爆轟性の実験結果をTable 2に示す。クラフト紙筒が一重の場合は0.098ms(導爆線60cm)で全て完爆(3/3)するが、0.115ms(導爆線70cm)で不爆及び半爆(1/4)が起こる。このことから爆薬が起爆される限界の遅延時間は0.098msになる。起爆までの遅延時間をミリ秒雷管で設定した実験では、10msで死圧状態(1/2)から回復する。

クラフト紙筒が二重の場合は0.164msで全て完爆(3/3)し、0.180ms(導爆線110cm)で半爆(3/4)が発生する。このことから、爆薬が起爆される限界の遅延時間は0.164msになる。また、10msで完爆(2/2)し死圧状態から回復する。

このMMAN系含水爆薬はクラフト紙筒が二重の場合には、導爆線の加圧で半爆にはなるが不爆状態にはならない。これは導爆線からの爆轟伝播で爆薬は起爆するが、爆薬が不安定な状態にあるため爆轟が中断するものと思われる。また、MMAN系含水爆薬がエマルジョン爆薬より耐衝撃性が高いのは、鋭感材としてMMANとGMBの両者を併用しているためと思われる。

4. まとめ

導爆線の起爆により発生する衝撃圧で二種類の含水爆薬に動的な衝撃圧を加えて、その爆轟性を検討した実験で以下のことが判明した。

- 1) 動加圧下での含水爆薬の爆轟性は含水爆薬を加圧してから起爆するまでの起爆遅れ時間と緩衝材として使用したクラフト紙筒の厚さに大きく影響されることが判明した。
- 2) 実験で使用した含水爆薬はMMAN系含水爆薬がエマルジョン爆薬より耐衝撃圧性が高く、死圧状態になりにくいことが判明した。これは鋭感材としてMMANとGMBを併用しているためと思われる。また、死圧状態になった含水爆薬は爆薬が飛散せずその形態を保たれると数十ミリ秒の時間経過で死圧が回復し爆轟することが判明した。
- 3) 含水爆薬が起爆する限界の遅延時間の近くでは爆速が急激に低下する。また、鉛板に刻まれる爆痕も爆速の低下に伴い小さくなり、半爆の現象が起きることが判明した。

文 献

- 1) たとえば、発破ハンドブック、工業火薬協会編
- 2) 松本栄、田中雅夫、吉田正、採鉱と保安、Vol. 19、No. 8 P1~6 (1971)
- 3) 古閑豊、手島利之、田中誠、緒方雄二、井上邦三、和田良馬、松隈太郎、井清武弘、清正稔、工業火薬、47, 278 (1986)
- 4) 松本栄、田中雅夫、工業火薬、43, 329 (1982)
- 5) 緒方雄二、田中誠、手島利之、井上邦三、古閑豊、井清武弘、資源、1-2、P59~64 (1989)

Study on the detonation performances of slurry explosives under dynamic pressure loading

by Yuji OGATA*, Sakae MATSUMOTO* and Kunihisa KATSUYAMA*

It is important to clear the detonation performances under dynamic pressure loading of slurry explosives to prevent the disaster caused by residual explosive in delay time blasting. Two kinds of slurry explosives (emulsion slurry explosive and water-gel slurry explosive containing monomethylaminenitrate for sensitizer) received shock pressure generated by detonating fuse are examined in some different condition. Conclusions are briefly summarized as follows:

1) Length of detonating fuse (from final loading point for explosive to initiation point) and thickness of kraft paper for buffer material between detonating fuse and explosive are the important factor of detonation performances on explosives under dynamic pressure loading generated by detonating fuse.

2) The water-gel slurry explosive is stronger than the emulsion slurry explosive for shock pressure in this experiment. Slurry explosives were the dead pressure condition under dynamic pressure loading by detonating fuse and non-explosion, but they recover from the dead pressure for some tens of milli-seconds and detonate.

3) The detonation velocity of explosives is reduced rapidly near the limit delay time of non-explosion. And the detonation traces on lead plate are changed depending on the detonation velocity.

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