

爆薬の爆轟伝播性に関する研究

中野雅司*, 森 伸生*

爆薬の力を有効に利用して、効果的に爆破作業を実施するためには、穿孔内での爆薬の爆轟状態を知ることが必要である。特に、最近話題の中心となっているスラリー爆薬の穿孔内での爆轟状態を知ることが、今後の大きな参考になる。

我々は、抵抗線法により、鉄管内、現場装薬孔内の爆轟伝播速度の計測を実施し、一応の知見を得たので、ここに報告する。

1. 緒言

爆薬の爆轟特性を把握するためには、現在まで種々の試験法が提案・実施されてきている。しかしながら、これらの試験法の大部分は、単純化された、良好な条件下での爆轟特性を把握する試験となっている。

ところで、ほとんどの爆薬類は、穿孔内に装薬されて、物を破壊する目的で使用される。したがって、爆薬の力を有効に利用して、効果的に爆破作業を実施するためには、良好な条件下での爆轟特性を把握する以外に、装薬孔内における、爆薬の爆轟状態を知ることが最も有効と考えてよい。特に、最近開発されたスラリー爆薬については、相当の爆轟状態の把握が成されてきたとはいうものの、穿孔内における爆轟状態を知ることが興味深いものである。

我々はこの観点にたつて、従来から実施している抵抗線法により、鉄管内に装填した爆薬、現場の装薬孔内に装薬された爆薬の爆速測定を実施した。

その結果、スラリー爆薬については、ダイナマイトなどとは相当異なる爆轟伝播特性を有し、一般にはチャンネル効果を受けにくいことがわかった。

本報告では、主としてスラリー爆薬を中心に実施した武豊工場内での鉄管内爆轟伝播性の実験及び三井金属鉱業株式会社神岡鉱業所新洞鉱山で実施した現場穿孔内爆速測定の結果などについて述べる。

2. 実験方法

穿孔内の爆速測定方法には主として、イオン探針法と、抵抗線法の二通りが考えられる。ところが、イオン探針法の場合、2～3点の測点の場合には問題ないが、多点の爆速測定（長装薬の場合の爆速変化状況を知るため）には不利である。従って、現在開発されている測定法としては、抵抗線法によるものが有利である。

抵抗線法の測定原理は、佐々らの報告^{1)・2)}に詳しいので、簡単に述べると、Fig.1に示すように、爆轟波の進行方向に平行に、抵抗体を爆薬内に挿入しておくと、爆轟反応の進行に伴い、爆轟波面では抵抗体のイオン化による短絡が生じて、抵抗回路の抵抗値が変化する。この抵抗の時間的変化を電気的に検出すれば、爆轟波面の進行速度を求めることができる。

我々はこの原理に基づく計測を実施したが、測定にあたっては、抵抗体に定電流を流し、抵抗変化を電圧

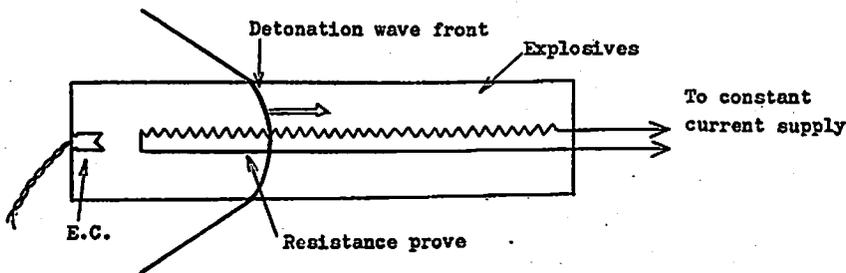


Fig.1 Principle of the measurement

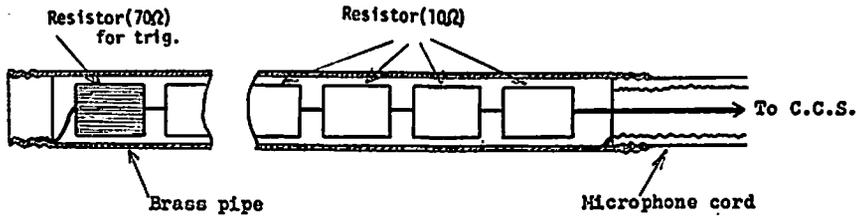


Fig. 2 Resistance probe

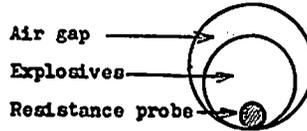
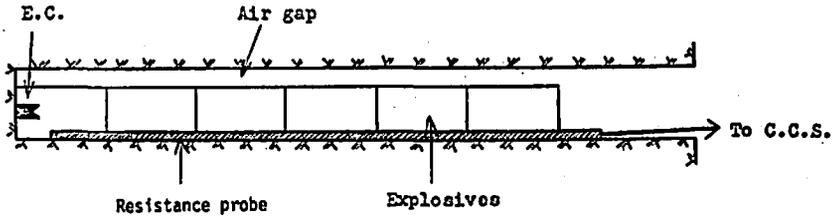


Fig. 3 The arrangement of the probe and explosives in the bore hole.

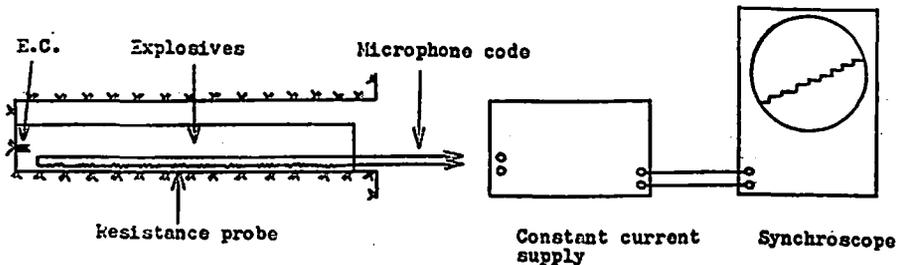


Fig. 4 Outline of the measuring arrangement.

変化として検出した。

抵抗線法による爆速測定の場合、抵抗プローブに連続抵抗を用いる方法と、固定抵抗を一定間隔でつなぐ方法の二種類が考えられる。連続抵抗体の場合、データ解析が面倒なことや、測定孔と測定地点が遠い場合、生ずる電線分析容量増大に伴う波形のひずみの見極めが難しい。そこで我々は、佐々ら^{1)~3)}の開発したような、P型固定抵抗を用いる方法を実験に用いることにした。

我々が用いた抵抗プローブは Fig. 2 に示すようである。これは、内径 4.8mm、肉厚 1.1mm の真鍮パイプ内に、P型固定抵抗 8~12ヶを一定間隔でつないだものを挿入し、パイプの両端に防水のためのゴム栓を入れて、雷管口締器でしめたものである。固定抵抗は、トリガー用として 70Ω のもの 1ヶ、他は 10Ω の

ものを用いた。抵抗線プローブへは、我々の設計製作した定電流装置を用い、85mA の定電流を活した。また、爆轟に伴う電圧変化の記録は、シンクロスコープを用い写真撮影した。

なお、我々の用いた抵抗線プローブの場合、高爆速の爆薬の爆速測定の場合には、爆轟波面によるイオン化で、抵抗体の短絡が順次生ずると考えてよいが、低爆速でイオン化が生じないような現象の場合には、プローブの力学的破壊に伴う短絡による抵抗変化の検出が成されるため、時間遅れが生ずる。したがって、低爆速（特に、爆轟中施寸前の低速度）の測定値については、実際の値よりは相当誤差が大きくなる。

また、後述するが、鉄管内・装薬孔内に爆薬を密装填させて、所謂密装填の状態抵抗線プローブを挿入して爆速を測定する場合は問題ないが、ファイルロー

ディング、即ちデカップリング係数をある程度大きく取った空隙のある場合の測定には、工夫を要する。このような場合、管壁あるいは孔壁が円滑であれば、爆薬と壁面との空隙を先行する衝撃波の影響を抵抗線プローブが受けるため、正確な計測は期し難い。そこで、我々は Fig.3 に示すような配置で計測を実施した。

即ち、抵抗線プローブを爆薬に挿入または、ビニールテープで爆薬に密着せしめ、孔内にて、このプローブ部分が下部に位置するように工夫をしたわけで、このことにより、先行衝撃波の影響による、測定値のバラツキ及び、ノイズは防止することができた。

Fig.4 は、以上のことを考慮に入れた上で実施した測定方法の概要である。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄管内爆速の変化状況

実際の現場において爆薬孔内の爆速を測定するには、相当の日数、労力を要するため、我々は先ず武蔵

工場内の爆発実験場に於いて鉄管内爆速の変化状況を見た。実験は、2m の鉄管を用い、管の内径を変えたもの（すなわち、デカップリング係数を変化させたもの）について実施した。

実験に使用した爆薬とその特性は Table 1 に示すとおりである。

今、計測結果を整理して、たて軸に爆速 (km/sec) よこ軸に起爆点からの距離 (cm) をとって図示すると Fig.5, Fig.6, Fig.7 のとおりである。

なお、これらの実験に用いた抵抗線プローブの、固定抵抗間隔は 20cm であり、使用した鉄管は全て底付きである。また、Fig. 中の D_1 は、デカップリング係数

$$D_1 = \frac{\text{装薬孔径}(\phi_b)}{\text{爆薬薬径}(\phi)}$$

を表わしている。

Fig.5 は、一般の抗内用 2 号矽ダイナマイトと、長孔発破用杉ダイナマイトの試験結果である。杉ダイナ

Table 1 Properties of the explosives

Explosives	No.2 Enoki Dy	Sugi Dy	Chita-Gel	IREMITE-60S	AN-FO
Density (gr/cc)	1.30~1.40	1.13~1.18	1.05~1.15	1.05~1.15	0.85~0.95
Detonation Velocity (m/s) (Unconfined)	5,500~6,000	5,000~5,500	3,000~3,500	3,000~3,500	2,300~2,800
BM (TNT=100)	130~135	135~140	115~120	100~105	—
Cartridge size	25mmφ × 100gr	25mmφ × 100gr	25mmφ × 200gr	25mmφ × 200gr	—

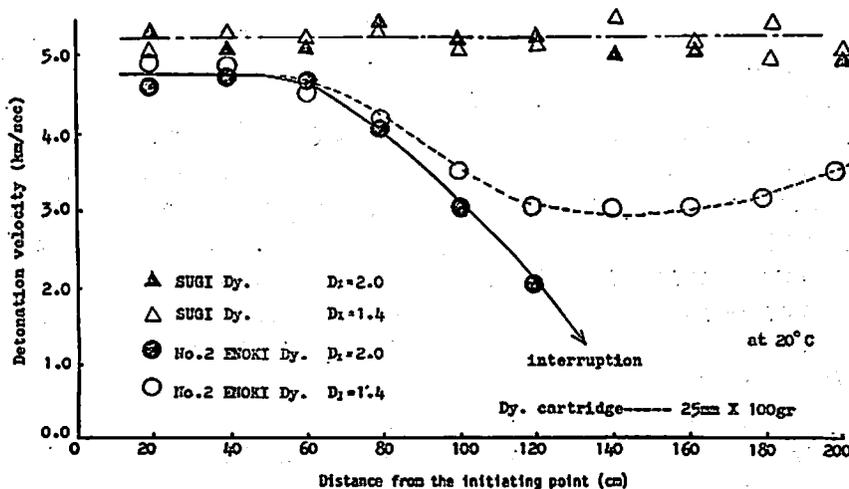


Fig.5 Variation of detonation velocity in the iron tube. (Dynamite)

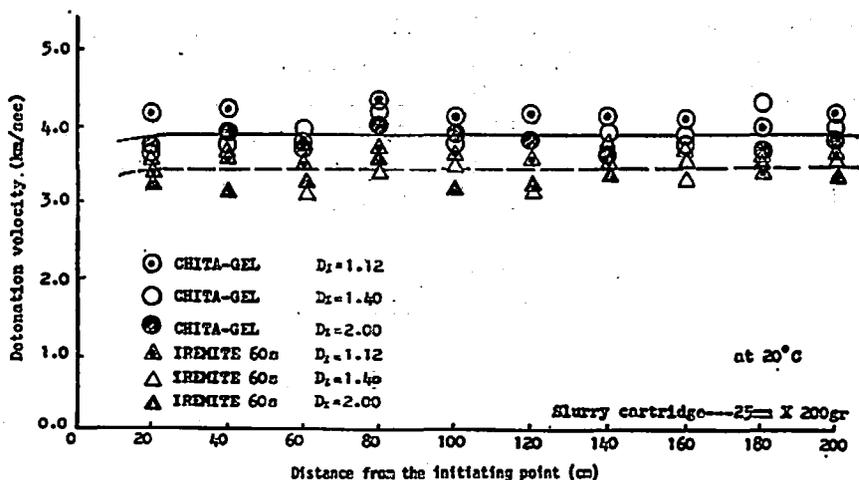


Fig. 6 Variation of detonation velocity in the iron tube. (Slurry)

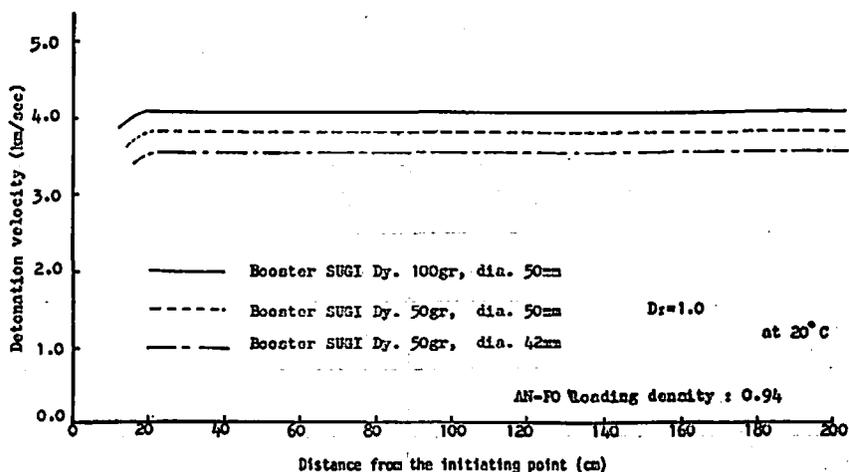


Fig. 7 Variation of detonation velocity in the iron tube. (AN-FO)

マイトの場合は、低比重であり、燃轟伝播感度も良好であることから $D_1=2.0$ の条件でも、チャンネル効果現象は生じていない。ところが、2号楯ダイナマイトの場合、明らかにチャンネル効果によるものと思われる燃速低下がみられ、 $D_1=2.0$ では、燃轟が中断している。 $D_1=1.4$ の場合における燃速の低下もチャンネル効果によるものと思われる。

Fig. 6 は、チタゲル及びアイレマイト 60S に於ける結果である。杉ダイナマイトの場合と比べると、燃速値には若干のバラツキがみられるが、チタゲル・アイレマイト 60S (いずれも Al 系スラリー爆薬) は良好な燃轟伝播性を有している。したがって、チャンネル効果現象は生じないと考えてよい。これは、スラリー爆薬が低比重であることが、良い効果を与えているものと考えられる。

Fig. 7 は、AN-FO 爆薬における結果である。AN-FO 爆薬の場合は、装填機を用い圧気 4kg/m^2 で鉄管内に装填したが、そのときの装填密度は 0.94gr/cc となった。(ほとんどバラツキはない。)

装填機を使用して装填したせいか、AN-FO 爆薬の場合も、データーのバラツキは少なく、薬径効果・ブースタ量の効果が表われている。すなわち、薬径が 42mm のものに比べて 50mm のものは、約 400m/s 燃速値は高く、同じ 50mm の薬径の場合ブースタ量杉ダイナマイト 100gr の方が 50gr のものより、約 200m/s 燃速値は高い。これは、従来の知見とよく一致している。

3.2 実際の穿孔内における燃速の変化状況

3.1 に述べたように、鉄管内に於ける燃速の変化状況を知る一連の実験終了後、我々は三井金属鉱業神岡

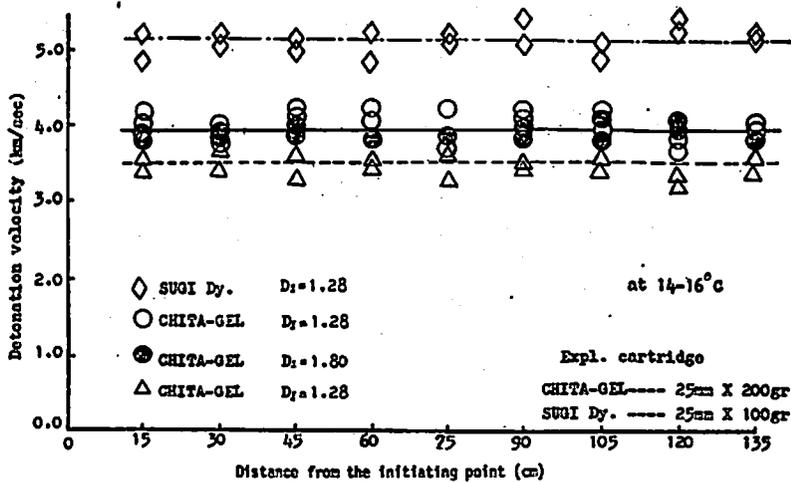


Fig. 8 Variation of detonation velocity in the bore hole. (at Kamioka Mine)

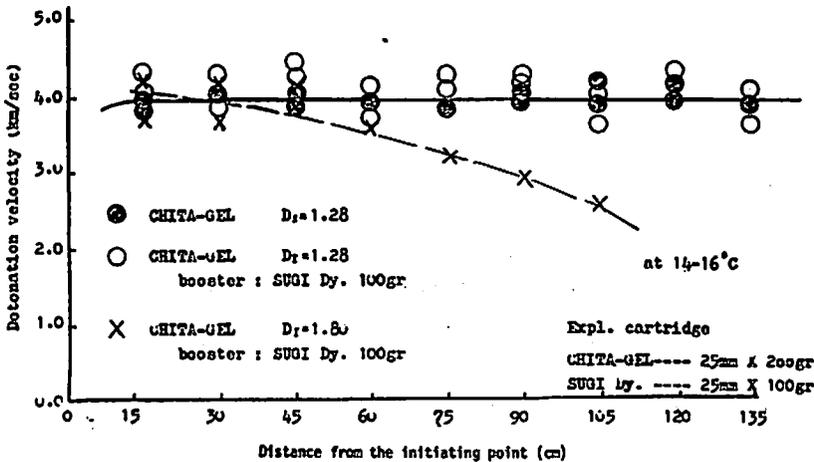


Fig. 9 Variation of detonation velocity in the bore hole. (at Kamioka Mine) (Effect of the booster)

鉱業所栃岡鉱山の現場を借りて、実際の穿孔内に装薬された爆薬の爆速測定実験を実施した。

測定を実施した場所は、栃岡鉱山中部系の掘進抗道で、飛脚片麻岩の抗道壁面に、直径 32mm 及び 45mm の装薬孔 (孔長約 2m) を穿孔し、この中に爆薬及び抵抗線プローブを挿入して爆速を計測した。なお、計測に使用した爆薬は、薬径 25mm であるので、デカップリング係数は 1.28 及び 1.80 について実験したことになる。また、AN-FO 爆薬は孔底起爆については問題があるので、実験の装薬孔での実験は行なわなかった。

栃岡鉱山での実験では、薬長約 1.4m であるので、抵抗線プローブ長は 1.35m、抵抗間隔は 15cm とした。

Fig. 8 は、穿孔内爆速の変化状況の計測結果で、杉

ダイナマイト、チタゲル、アイレマイト 60S について計測した結果である。

この結果からみると、いずれの爆薬も爆速伝播性は非常に良好であるといえる。また、データのバラツキも少ないといえる。

Fig. 9 は、スラリー爆薬 (チタゲル) にブースターを用いた場合の結果を示したものである。

デカップリング係数 1.28 の場合は、ブースター使用の有無は余り影響なく、むしろブースターとして、杉ダイナマイト 100gr を用いた方が、若干爆速値のバラツキが多い程度である。しかし、デカップリング係数 1.80 の場合、Fig. 8 のチタゲル $D_1=1.80$ の場合と対比してみると明らかなように、杉ダイナマイト 100gr をブースターとして用いると、かえって爆速の低下をみせる。これは、杉ダイナマイトの爆発による先行衝

撃波の影響をチタゲルが受ける（チャンネル効果）ためと考えられるが、このことは、鉄管を用い後日の実験でも確認されている。このことから、長装薬の場合には、むしろブースターを使用しない方が好ましいといえるかも知れない。

これら橋洞鉱山における実験結果と、3.1 に述べた工場内鉄管使用の実験結果を対比してみた場合、爆速値はよく一致しているといえる。これは、橋洞鉱山の実験現場の岩質が良好で、穿孔内の孔荒れが少なかったためと考えてよい。一般には、内壁面が円滑な鉄管内での爆轟伝播試験は、より苛酷条件下でのテストで

併行して、イオン探針法により空隙中の先行衝撃波の速度を同時測定した。なお、試験温度は5~8℃にコントロールとし、爆薬包は25mmφ×80grを8本連珠包装したものと、25mmφ×800grの長尺包装のものを使用した。

Fig. 10 は、これらの試験の概要を示す図である。なお、鉄管内を伝わる衝撃の影響を除くため、イオン探針の取付けは、碍子と樹脂を用いて慎重に行なった。また、抵抗線プローブは、必ず Fig. 10 に示すように下部に位置させた。

Fig. 11 は、殉爆試験の結果をたて軸に殉爆度（倍）

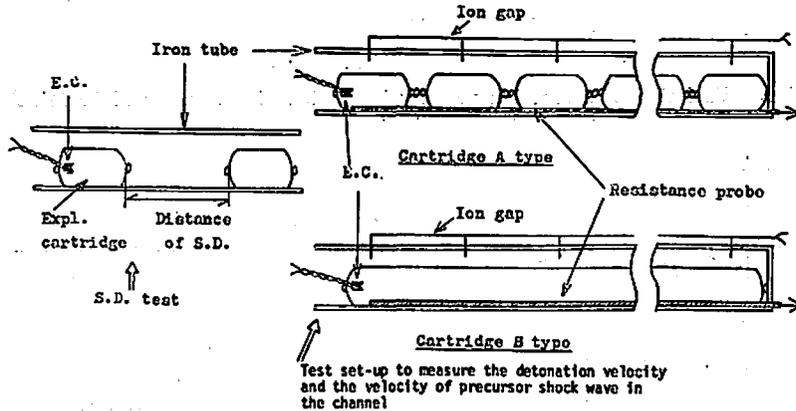


Fig. 10 Test set-up of the experiment.

あり、実際の装薬孔は孔荒れがあるため、これが障害となり先行衝撃波の影響を受けにくいといわれている。然し乍ら、今回の橋洞鉱山の実験結果は、孔荒れの少ない装薬孔の場合、このことがあてはまらないことを示唆している。

3.3 スラリー爆薬薬包形状と爆轟伝播性及び殉爆

スラリー爆薬の場合、一般のダイナマイトと比較すると、殉爆感度は相当低く、所謂カット法と呼ばれる端面を裸薬にして殉爆させる方法でも、高々4倍程度の殉爆感度しか有していない。そこで、このことがスラリー爆薬の穿孔内爆轟伝播性に対しどのような影響を与えているかを検討してみた。また、これと関連して、スラリー爆薬薬包の形状について、通常の装薬状態を想定した連珠方式と、長尺包装のものについて、爆轟伝播性を見た。

実験は先ず第一に鉄管内の殉爆について検討したが、このとき、デカップリング係数を変化させ、爆薬包はプラスチックフィルム包装のまま使用し、火薬温度は条件の酷しい5℃にコントロールした。

次に、鉄管内における、包装状態の異なるスラリー爆薬包（チタゲル）について、爆轟伝播状況の測定を実施した。爆轟伝播状況の測定は抵抗線法に依ったが、

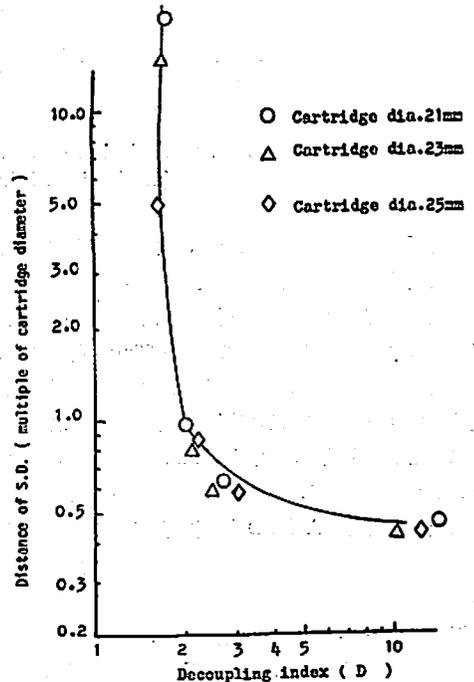


Fig. 11 Relation between S.D. and decoupling index. (CHITA-GEL)

Table 2 Experimental Results

(unit : km/sec)

No.	Explosives* Cartridge	I. D. of Iron Tube (mm)	(mm)Variation of D. V. in Iron Tube**						Average D. V. (km/sec)
			10~30cm	30~50cm	50~70cm	70~90cm	90~110cm	110~130 ^{cm}	
1	A	42	2.94(3.33)	3.13(4.26)	2.86(3.85)	2.94(3.94)	2.82(4.17)	2.78(5.71)	2.91(4.21)
2	B	42	3.22(4.25)	3.33(4.89)	2.50(4.08)	× (4.35)	× (4.35)	× (4.54)	— (4.41)
3	A	42	2.86(3.62)	2.95(3.39)	2.96(4.26)	3.01(4.12)	2.82(3.96)	2.85(4.25)	2.91(3.93)
4	B	42	3.17(3.54)	3.28(4.88)	2.47(4.54)	2.56(4.17)	2.13(4.70)	2.33(3.70)	2.82(4.26)
5	A	35	2.78(4.25)	2.86(3.92)	2.82(3.64)	2.86(3.39)	2.63(3.75)	2.44(3.81)	2.73(3.79)
6	B	35	2.98(4.25)	2.94(5.06)	3.92(4.88)	2.90(4.40)	× (3.51)	× (3.17)	— (4.21)

Note * A : 25mmφ×80gr Cartridge×8 pieces

B : 25mmφ×800gr Cartridge×1 piece

** () is the velocity of the shock wave in the channel

× means the interruption of the detonation

よこ軸にデカップリング係数をとって示したものである。

図からもわかるように、薬包のままの殉爆感度はデカップリング係数増大に伴い大幅に低下する。デカップリング係数2以上で殉爆度は1以下になり、デカップリング係数2.5以上では殉爆度は0.5以下となり、殉爆不良の可能性がある。このことは、デカップリング係数が大きい場合(少くとも2.5以上)には、複数個の爆薬包を装薬した場合殉爆不良による爆轟中断の可能性もあることを示唆している。

Table 2 は、連珠式と長尺式の爆薬包における爆轟伝播状態と、先行衝撃波の計測結果である。

Table 2 から、スラリー爆薬の場合先行衝撃波速度は、爆速値と平均値と比較して1,000~1,300m/s程度高い値を示すことがわかる。

長尺包装のものは、実験 No. 2, No. 6 では爆轟中断現象を呈し、実験 No. 4 のものも、チャンネル効果によるものと思われる、著しい爆速低下を示している。これは、明らかに空隙中を先行する衝撃波により、爆薬包が強く圧縮されるために生ずる現象である。一方連珠包装のものは、安定した爆轟状態を示している。

これは、クリップの部屋で、空隙中を先行する衝撃波が乱され、爆薬包を圧縮する圧力が低下するためではないかと思われるが、Table 2 から先行衝撃波の速度の変動には、長尺包装と連珠包装との間に有為差はないようにみえるので、今後若干の検討を加える必要がある。

なお、連珠包装の場合クリップ間が相当あるため(1.5~2.5cm)、殉爆計測結果で見られたように、デカップリング係数の大きい場合、殉爆不良の可能性も生ずる。

4. 結論

各種爆薬の装薬状態での爆轟伝播性について、スラリー爆薬を中心に、鉄管内及び実際の発破現場における穿孔内での爆速の変化状態の測定を実施した。測定は、抵抗線法によったが、一部イオン探針法により、穿孔内空隙を先行する衝撃波速度の測定も実施した。実験結果をもとめると次のようになる。

(1) スラリー爆薬は低比重・であるためか、その爆轟伝播性は割合良好であり、低比重ダイナマイトの杉ダイナマイトと同程度と考えてよい。

然し乍ら、杉ダイナマイト100grを親ダイとした実験で、 $D_1=1.8$ でチャンネル効果によるものと思われる爆速の低下を示している。また、長尺包装のものはチャンネル効果によると思われる爆轟中断又は爆速低下を示している。このように、ブースターのダイナマイトによる速い先行衝撃波や、長尺包装の場合のように均一な空隙が存在する装薬の場合には先行衝撃波の作用により、スラリー爆薬もチャンネル効果を受けることになる。

(2) 一般用ダイナマイトである2号板ダイナマイトの場合は、明らかにチャンネル効果を示し、 $D_1=2.0$ では爆轟中断を示す。

(3) AN-FO 爆薬の場合は、装薬機による装薬状態での計測となったが、従来の知見どおりの結果を得た。即ち、薬径が大きいと爆速値は高く、親ダイの薬量が多い程爆速値は高い。

(4) 穿孔内における、スラリー爆薬の薬包のままの殉爆感度は、デカップリング係数(D_1)の増大に伴い大幅に減少する。 $D_1=2.0$ 以上で穿孔内殉爆度1.0倍以下、 $D_1=2.5$ 以上では、0.5倍以下の値となり、殉爆不良の可能性も生ずる。勿論、一

般の使用条件の $D_f=1.0\sim 1.8$ 程度では、全く問題は無いと考えてよい。

- (5) 連珠包装のスラリー爆薬については、穿孔内爆轟伝播状況は良好で、長尺包装のもののようにチャンネル効果を示すことはない。これは、アルミバックの部分で、先行衝撃波が乱され、爆薬包を圧縮する圧力が低下するためではないかと考えている。

然し乍ら、(4)に記したように、デカップリング係数が増大すると、このクリップの間隙が逆にマイナスとなり、殉爆不良となる可能性も出てくる ($D_f=2.5$ 以上)。

- (6) 孔荒れの少ない、穿孔内爆轟伝播速度の計測結果は、底付鉄管内の計測結果とよく一致する。一般には、爆薬の穿孔内爆轟伝播性を評価する場合には、底付鉄管内の爆轟伝播性を把握しておけば充分である。

- (7) スラリー爆薬の場合、鉄管内における空隙中を先行する衝撃波速度は、スラリー爆薬の爆速値より $1,000\sim 1,300\text{m/s}$ 程度高い値を示す。(5℃ の場合)

5. 結 言

今まで実施してきた一連の実験結果から、スラリー爆薬の穿孔内爆轟伝播性は、従来のダイナマイトと比較して若干異なることが把握できた。苛酷条件下では、

殉爆不良等に起因する問題など、若干の問題点はあるものの、一般的使用 (装薬長 $0.5\sim 2.0\text{m}$, $D_f=1.0\sim 1.8$ 程度) では、問題は無いと考えてよい。即ち、現用のダイナマイトからスラリー爆薬への伝換は、爆轟伝播性から見た限り問題はない。然し乍ら、スラリー爆薬は限界薬径が大きく、殉爆感度も低いことから、特殊発破、例えば PS 発破や SB 発破などには、その特性をよく理解した上で、発破工法を工夫する必要がある。例えば、SB 発破には細径のものを使用する代わりに、 $D_f=2.0$ 以下で穿孔内体積に与えるガス圧で穿孔間を切る方法⁴⁾などを考えればよい。

最後に、本実験のうち、発破現場での計測にあたっては、三井金属鉱業株式会社神岡鉱業所新洞鉱山の多大の協力を得た。南光敏長、小松敏長氏他、関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 佐々宏一, G. Larocque; 工火誌, vol. 27, p. 223 ~p. 288, 1966.
- 2) 伊藤一郎, 若園吉一, 佐々宏一, 中野雅司, 小川輝繁, 村主周治; 工火誌, vol. 32, p. 35~p. 39, 1971.
- 3) 若園吉一, 佐藤忠五郎, 佐々宏一, 中野雅司, 小川輝繁; 工火誌, vol. 32, p. 40~p. 46, 1971.
- 4) 中野雅司, 南光宜和; 工火誌, vol. 39, p. 205~p. 211, 1978.

The study of the propagation of detonation in bore holes

by Masashi Nakano* and Nobuo Mori*

It is useful for us to understand the propagation behavior of detonation in bore holes.

When the charge do not completely fill the bore hole, that is, free space exists between the charge and the bore hole wall, a shock wave in this free space (channel) outruns the detonation wave and pinches off the detonation. This phenomena is called "channel effect" and when the "channel effect" occurs the blasting effect decreases and some part of the explosives loaded in the bore hole may fail to explode and remain after the shot.

So it is necessary for us to know the propagation behavior of detonation in charges loaded in bore holes.

We measured the variation of detonation velocity of explosives in the bore hole, and in the iron tube, varying the decoupling index $D_1(\phi_b/\phi_e)$, by the resistance probe method. The measurements in the bore hole were carried out at Kamioka Mine, and those in the iron tube were done at our factory.

From these tests, we got the followings :

- (a) Because of low density, slurry explosives had as good propagation property of detonation in the bore hole as low density gelatin dynamite (SUGI DY.) had.
- (b) The so-called "channel effect" was observed and the detonation was stopped at $D_1=2.0$ for the standard dynamite (No.2 ENOKI DY.).
- (c) As for slurry explosives, initiation with a booster is not as effective as standard dynamite. The "channel effect" was observed when the booster was used at $D_1=1.8$.
- (d) ANFO had a good propagation property of detonation in the bore hole under compact pack condition.
- (e) The propagation behavior of detonation in the bore hole was equal to that in the iron tube.

(*Nippon Oil & Fats Co., Ltd., Taketoyo Plant; Nishimon 82, Taketoyocho, Aichi Pref.)