

## Studies on the Initiation of Explosives by the Detonator.

### Part IV The effect of fragments produced from a detonator shell (2).

Kazuo Ida

A few kinds of explosives were initiated by the fragments from a detonator shell which was apart from a explosive.

The results obtained were as follows :

1. The fragments of a Cu shell have the most effective initiation force, Al shell is less effective and PVC shell has the weakest initiation force.
2. The initiation force of concave bottom type detonator, however, is the same as that of flat bottom type detonator.
3. These results can be explained reasonably by the properties of the fragments such as the penetrating ability, the velocity, the weight and the shape of the fragments.

The detonation velocity of industrial explosives initiated by a detonator, which was apart from the explosive, was the same as that by a detonator, which was inserted into the explosive.

As the initiation theory by the solid fragments, several ones have been known. (refer this paper part III). The present author, however, believes that the initiation of explosives by the fragments from a detonator shell is due to the temperature rise of explosives by friction between the flying solids (fragments) and the explosives.

By applying the Bowden's equation for friction, this view can be explained reasonably.

## 炭礦爆薬の爆轟中断現象

福 田 寛 雄\*

### 1. 緒 言

比較的遅速の爆薬。たとえば硝安爆薬の如き炭礦爆薬を、鉄管内に連続して装薬し、一端より起爆すると、この長装薬は無制限に伝爆せず、孔径と薬径間に隙間があると、条件によつてはほぼ一定の長さだけ伝爆し、ここで爆轟の中断現象が発生する。

この事実については「炭礦爆薬の孔内殉爆」と題し先年本誌に報告<sup>1)</sup>したが、本報告は薬包外周と管の内壁との間に隙間がある場合の、その後の試験結果について述べたものである。

即ち bore-hole に相当する外套管は鉄管に限らずブリキ管あるいはボール紙のごとき軟質軽量な材質のものでも爆轟中断を起す原因となり得ること、薬包周囲に僅かな水の層があるときは中断現象の起らぬこと、圧縮固化した残留薬包を容易に回収し得ること等の興味ある 2~3 の知見に関するものである。

### 2. 前回報告の概要

爆薬自体としては正常な状態、即ち吸湿、固化等の異状のないものを用いても多数の薬包を、その薬径より内径の大きい管中に連続装填した際、薬包と管壁との間に大きな隙間があると爆轟中断現象が発生する。これに関し、諸実験成績を整理する意味で前回の報告に述べた事項を要約すれば次の如くである。

- (1) 爆轟中断現象発生の際易は薬種により異なるが、比較的遅速の爆薬に起り易い。
- (2) 中断現象を起したとき、雷管底より中断現象が発生するまでに爆轟した薬長を爆轟長と名づけられ、装薬長のみが異なり他はすべて同一条件であるにかかわらず中断現象を起さないときの最大装薬長と、この爆轟長と異なるが、これは管底の影響ではない。
- (3) 薬包端末の薬包紙の重なり、雷管の位置およびその起爆力等は中断現象発生の主原因ではないが、隙間の大きさと爆轟長とは何らかの関係が

昭和36年1月7日受理

\* 日本カーリット株式会社保土谷工場 保土谷区保土谷町

ある。

(4) 隙間があつても、径違いの薬包を併用したり薬包間隔を離す等、装填方法を工夫するか、消爆線のごときものを併用すれば、中断現象を防止出来る。

(5) 管壁における衝撃波もしくは圧縮圧力波の反射を防ぐように、管の内壁に綿、フェルト、紙のごとき緩衝物の内張りをすれば、中断現象を防止出来る。

### 3. 試験方法

中断現象を容易に発生させるため、実用面とはややかけ離れるが、ことさらに薬径の細い炭酸爆薬(粉状)を用いて試験した。実験を容易にするため、ボア・ホールのかわりに砂上に置いた鉄管(内径 35mm)を用い、この管内にその内径より小さい薬径の薬包(主として 15mm, 20mm)を連続装填する。その一端に 6号留管をつけて起爆し、爆発後の鉄管の破壊状況と残留薬包等から、その燃焼長を判定する。

鉄管は、始め管底を熔接して用い、装薬後口許に粘土の詰め物をしたが、実験を進めるうちに管底および填塞物の有無は燃焼長にあまり影響を及ぼさぬことが判つたので後にはこれを省略した。

また鉄管のかわりに、ブリキ管その他の材質によつても同様の中断現象が現われることも判つたので、後にはブリキ管で試験したものも多い。

実験の都合上、装薬長は大体 1m とした。したがつて中断現象の起る起らないの判定は薬長 1m 以内についてのことであり(薬径の 50~70 倍となる)、極めて長い薬長の場合には多少異つた成績を示すかもしれない。しかし炭酸用爆薬では装薬長が 1m を超えることは稀であると思われ、またたとえ 1m を超えてもこの時は薬径も大きいから、中断現象も発生し難く、本試験法によりその傾向は充分察知出来るものと思われる。

ただし特殊の場合には薬長を 2m としたものについても試験した。

### 4. 各種の実験条件による燃焼中断現象

#### 4.1. 隙間の大きさと燃焼長

孔壁と薬包外周との隙間の大きさが燃焼中断に大きな影響を及ぼすことは当然予想されることであり、前回の報告にもその一部を発表したが、実験は、外部の鉄管径を一定として薬径を変えた系列と、薬径を一定とし外管径を変化させて隙間の大きさを変えた系列につき実施した。

鉄管径を一定とした場合

鉄管の内径を 21mm, 27mm, 35mm の 3 種に限定し薬径を 10mm から 30mm まで変化させて行つた試

表 1 隙間の大きさと燃焼長

鉄管の内径 (mm)	薬径 (mm)	鉄管長 (cm)	装薬長 (cm)	残薬長 (cm)	燃焼長 (cm)	備考	
21	10	110	93.5	71.5	22		
	10	110	93.5	71.5	22		
	15	110	98	65	32		
	15	110	96	68	28		
	17.5	110	96.5	46	50.5		
	17.5	110	98	48	50		
	20	110	104	0	104		完爆
	20	110	104	0	104		〆
27	10	110	100	77	23		
	15	110	96.5	61	35.5		
	15	110	94	59.5	34.5		
	17.5	110	96	52	44		
	20	110	103	11	92		
	20	110	104.5	24.5	80		
	22	110	106	39	67		
	22	110	104.5	38.5	66		
25	110	107	0	107	完爆		
35	10	80	59	37	22		
	15	60	50	20	30		
	15	60	49	18	31		
	20	80	75	36	39		
	20	200	90	50	40		
	20	200	90	48	42		
	20	110	100	61	39		
	20	120	108	65	43		
	20	120	108	65	43		
	25	120	110	57	53		
	25	120	110	56	54		
	25	120	108.5	60	48.5		
	27	120	117	58	59		
	27	120	116	61	55		
	28	120	109.5	54	55.5		
	28	120	109.5	22	87.5		過大と思われる
28	120	109.5	66	44			
28	120	107	55	52			
28	110	99	34	65			
28	110	100	35	65			
30	120	110	0	110	完爆		

験成績の一例を表 1 に示し、これを整理して図示したものが図 1 である。

このように鉄管径を一定とし、薬径を変化させて隙間の大きさを変える場合は、隙間の大きさの変化による影響の外に、爆薬径が減少することのため爆薬自身の側面損失の増大に伴う爆発性の低下が加味されて、現象は複雑となる。

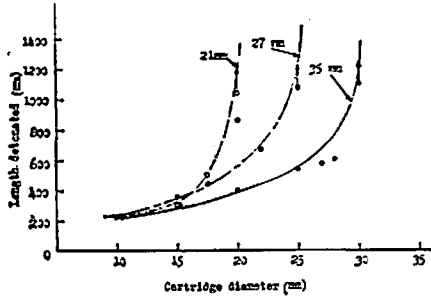


Fig. 1 The length detonated vs. cartridge diameter

即ち図1に見られるごとく隙間の大きさが小さくなるに従いいずれも爆轟長は急激に増加するが、薬径の細い場合、例えば薬径 10mm の場合は、隙間の影響よりも薬径低下に伴う爆発性の低下が大きいためか、その爆轟長は鉄管径が変わってもほとんど一定で 22~23cm である。

薬径を一定とした場合

薬径 15mm および 20mm の 3号新緑硝安爆薬を各種内径のブリキ管に入れて、砂上で爆発させてその爆轟長を測定した。

いま図2の如くブリキ管および薬包の半径をそれぞれ  $R, r$  とし、鉄管内における薬包の断面積を  $A_e$ 、薬包と鉄管壁との間にある隙間の断面積を  $A_c$ 、隙間の大きさを  $c$  とし、 $r$  を一定とし、 $R$  を変化させて爆轟長  $l$  を測定したときのこれらの関係を表2に示し、そのうち  $A_c/A_e$  と  $l$  との関係をとり出して図3に示す。

図3によれば  $A_c/A_e$  がある範囲の値をとる場合に爆轟の中断現象が見られるが、この範囲をはざれると

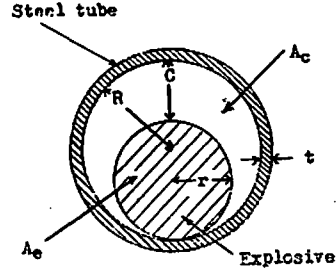


Fig. 2

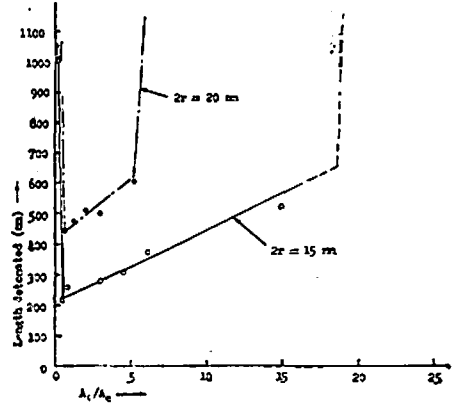


Fig. 3 The cartridge length detonated vs. the clearance between tube wall and cartridge.

$A_c/A_e$  が大きくなつても小さくなつても急激に爆轟長が長くなり、中断現象が見られぬようになる。

中断現象を起す  $A_c/A_e$  の値の範囲内では、 $A_c/A_e$  と  $l$  とは直線的関係を示すようにも見えるが、この中断域の幅は供試薬の爆速、爆力その他の爆発性の強弱により異なる。

即ち図3に見られるように同一薬種においてもたとえば薬径が 20mm の場合と 15mm の場合を比較すれば爆発性の弱い 15mm のときの方が中断域が広い。また同じ径の薬包について薬種を変えて試験すると、図3には示していないが、爆発性の強いと思われる薬種ほど中断域の狭いことが見られる。

即ち薬径が大きくなつたり、薬種として概念的に爆発性が大きくなるに従い、中断域の幅は減少し、遂には中断域が消滅する。

定性的に言つて中断域は、爆轟反応帯が長く爆発性の弱い爆薬程広く

表2 薬径を一定としブリキ管径を変えた場合の爆轟中断

ブリキ管径 2R (mm)	薬径 (2r) 15mm				2r=20			
	隙間 C (mm)	隙間面 積 $A_c$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_c/A_e$	爆轟長 $l$ (mm)	C (mm)	$A_c$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_c/A_e$	$l$ (mm)
16	1	0.25	0.14	>1,000	-	-	-	-
18	3	0.79	0.44	215	-	-	-	-
20	5	1.38	0.78	260	-	-	-	-
22	7	-	-	-	2	0.66	0.21	>1,000
25	10	-	-	-	5	1.76	0.56	445
30	15	5.31	3.00	280	10	3.93	1.26	475
35	20	7.88	4.46	310	15	6.50	2.07	510
40	25	10.80	6.11	375	20	9.42	3.00	500
50	35	-	-	-	30	16.49	5.25	> 580
60	45	26.50	14.99	510	-	-	-	-
80	65	48.48	27.43	> 600	-	-	-	-
$\infty$ (空中)	$\infty$	-	-	>2,000	-	-	-	-

ある限度以上に強い爆薬（反応帯の短い爆薬）ではこの領域が存在しないようである。  $A_e/A_0$  が大なる場合、換言すれば隙間の距離が非常に大きい場合は、開放された場所で爆轟する状態に近いので、何等の妨害作用も受けずに爆轟は進行し、中断現象は起らない。逆に  $A_e/A_0$  が小なる場合は隙間の距離が小さいため爆轟に伴う破壊作用が直ちに周壁に及び外套管を破壊し結果的には隙間の如き閉ざされた空間が少ないこととなる。従つてこれまた爆轟の中断は起らない。

#### 4.2. 薬包周辺の閉じた空間

薬包と鉄管内壁との間の隙間の大きさが小さくなれば爆轟長が長くなることは、前述の表に見られる通りであり、また隙間の空間を水または砂によつて塞ぐか薬包を隙間なく装填すれば中断現象の発生しないことは前報においても述べてきた。

ここでこの鉄管に孔をあけるか、スリットを設けて薬包外周の隙間を、閉じた空間でなくその一部を解放した形とすれば、隙間を流れる衝撃波もしくは高速流の圧力は、これらの孔から逸散し、爆轟伝播の妨害作用も弱まると思われるので、スリットもしくは孔をあけた外套管を用い、3号新緑硝爆について行つた結果を表3に示す。

外套管としては奈良式粉砕機のスクリーン用の金網で作つたもの（鉄板に等間隔に円形の孔を網状にあげたもの）を利用した。表3によれば予想された如く有孔鉄板製の外套管では中断現象が起り難く、薬包外周に閉じた空間が存在することが中断現象発生の原因であることが明らかとなつた。

ただし孔の径が小さい場合には、孔のないものと変わらない。これは瞬間的な高圧力に対しては、その表面

境界層の作用のため小さな孔からは衝撃波その他が逸散し難いためと思われる。

また、幅 10mm のスリットを薬包軸に平行に、全長にわたつて設けた場合、薬包の径が 20mm の場合には中断防止に有効であつたが、それよりさらに爆轟中断を起し易い薬径 15mm の薬包については、ほとんど効果がなく、薬径 15mm の薬包に対しては 10mm 程度のスリットではなお閉じた空間とみなされる。この際閉じた空間というのは、爆轟中の爆薬のすぐ近くの周辺についてのことであり、鉄管の口許あるいは管底等は閉じていようが開放されていようが関係ない。

スリットもしくは孔の面積が外套管の外周面積に対しどの程度あれば、妨害作用が逸散して中断現象を起さなくするかについては、上記の如く孔の径の大きさも関係するのでさらに定量的な計測が必要である。

また内径 35mm のブリキ管を押し潰して楕円形の管とし、薬包をその楕円形の中央部に置いた場合、端の方に装薬した場合等を比較してみたが、円形管との差異は認められなかつた。

#### 4.3. 外套管の材質

薬包周囲に隙間のある場合、その外側にある密閉器の材質もまた爆轟長に影響する。これまでの実験は主として鉄管（ガス管）を用いて行つた実験であるが、さらに弱い材質のもの、たとえばボール紙筒の如きものでも中断現象を起し得ることが実験の結果判明した。

薬径 15mm の薬包を内径 35mm 程度の各種材質のパイプ中に装填して爆発させ爆轟長を測定した結果を表4に示す。

表4は各種の材質に関し、その爆轟長の短い順に並

表3 外套管にスリットもしくは孔のあるときの爆轟中断

薬径 (mm)	外套管（鉄製）の状態			装薬長 (mm)	爆轟長 (mm)	備 考
	厚さ (mm)	内径 (mm)	孔の径 (mm) 及び数			
15	0.8	35	1.25φ × 1,800孔/dm <sup>2</sup>	1,000 1,000	460 500	480 粉砕機スクリーン用有孔鉄板を使用
15	1.0	35	2φ × 700/dm <sup>2</sup>	1,000 2,000	310 340	
15	1.0	35	3φ × 310/dm <sup>2</sup>	1,000	500	°
15	1.3	35	5φ × 200/dm <sup>2</sup>	1,000	1,000(完爆)	°
15	0.5	35	5φ および花型孔 64/dm <sup>2</sup>	920 1,840	920(完爆) 1,840(完爆)	5mmφ の円形孔および花型孔を互い 違ひにあげた鉄板
15	0.4	35	孔なし	1,000	310	比較標準のもの
15	0.4	35	幅 10mm のスリット	1,000	330	スリットを上向きにして砂上におく
15	0.4	35	幅 5mm のスリット 2本	1,000	390	編型の外套で薬包を上下からはさみ薬 包の左右に2本のスリットをつくる
20	0.4	35	孔なし	1,000	510	比較標準
20	0.4	35	幅 10mm のスリット	1,000	1,000(完爆)	スリットを上向きにして砂上におく

表4 外套管の材質を変えた場合の爆轟長

材 質	外 套 管		包 装	薬 包		爆 轟 長
	厚さ (mm)	内径 (mm)		薬径 (mm)	薬長 (mm)	
鉄	3.5	35	紙筒	15	500	305
タ	3.5	35	タ	15	500	
ガラス	2.5	34	タ	15	1,000	310
タ	2.5	34	タ	15	1,000	
ブリキ	0.42	35	タ	15	1,000	345
タ	0.42	35	タ	15	1,000	
鉛	3.3	30	タ	15	1,000	500
タ	3.3	30	タ	15	1,000	
ボール紙	5	35	タ	15	1,600	1,005
タ	5	35	タ	15	1,600	
タ	3	35	タ	15	1,600	1,470
タ	2	35	タ	15	1,600	1,600(完爆)
タ	2	35	タ	15	800	800(タ)
タ	2	35	タ	15	800	800(タ)
タ	1	30	タ	15	790	710
タ	1	30	タ	15	790	690

べたものであるが、ボール紙筒の如き軟質の強度の少ないものでも中断現象を起し得ることを示すもので常識的に考えれば、意外な結果である。同じボール紙筒でもその厚さが厚くなるに従い爆轟長は短くなるが爆轟伝播を妨害する作用の大きい順に各材質を並べれば、

鉄>ガラス>ブリキ>鉛>ボール紙(厚)>ボール紙(薄)

となる。これを見るとガラスの如きものがその作用が大きく、この順序は必ずしも強度(抗張力)の順にもならず、また鉛の如き質量の大きいものが比較的その作用が少く(鉛のみは内径が小さいから隙間の少いことも考慮して)、必ずしも密閉器としてその密閉効果たとえば爆速上昇に対する効果のある材質の順位が、爆轟中断を起しやすい順位とはならない。

これらの外套管の内壁面はいずれもその表面が滑らかであるが、爆轟中断現象に関しては、その面の粗さもしくは衝撃波に対する反射率等が重要な影響を及ぼすであろうことが予想される。

この点に関しては、密閉管の内壁面に綿、フェルト、汚紙の如き衝撃波、圧力波等に対する緩衝材を内張りすれば、爆轟中断現象を防止出来ることを前報に述べたが、さらに壁面の粗さ、性状等についてはさらに実験を重ねたいと思う。

#### 4.4. 特殊薬包を用いた場合

##### 径違い薬包を併用した場合

同一孔に径の異なる2種の薬包を装填した場合中断現象が起り難いことについては一部前報にも述べた

が、たとえ径違いの太い薬包でも、その薬包の端面の径が小さい紡錘型の形状のものでは、中断現象を防止出来ない。

これは爆轟伝播に対し妨害作用のあると思われる反射衝撃波、隙間を流れる高流速その他の因子が、紡錘型の薬包ではその外周が流線型に近く滑らかに通りすぎるためであろう。一方径違い薬包の場合には、その径の大きい薬包端面がその流れに直角に置かれているため、その垂直な面で妨害作用が幾分阻止されるか、あるいはさらにその直角面で起爆されてその点から新たに爆轟を始めることも考えられる。

##### 管状薬包を使用した場合

開放状況下における低爆速粉状爆薬の管状薬包の爆発性に関しては既に報告<sup>2)</sup>した如く、その中心空孔中には高流速が走り、薬包の爆速は中心孔のない場合に比較し遅くなるのを見た。

鉄管内にその内径より小さい薬径の薬包を装填した場合には、その薬包外周に隙間が出来る。隙間のある場合に爆轟の中断現象が起るのであれば、この隙間を外周部でなく中心部に集めたと考えられる管状薬包においても、当然中断現象が現われるのではあるまいか。即ち薬径を鉄管内径と等しくして隙間をなくした普通薬包では中断現象が起らなくとも、これに管状の孔をあけた場合には恐らく中断現象が見られると予想される。

これを確かめるため、内径 35mm の鉄管内に薬径を 35mm とし、中心部に各種の孔径の管状孔をあけた薬包を連続装填して試験した結果を表5に示す。

表5に見られるごとく隙間が薬包周辺でなく中心部にある場合でも、爆轟中断現象の起ることは予想した通りであるとはいえず注目すべき現象である。

中心孔の孔径と爆轟長との間の定量的な関係を論ずるまでには到らないが中心孔の孔径が大きくなるに従いその薬包の爆速は減少し、爆轟長は中心孔径の大きくなるに従い短くなる傾向が見られる。

##### 端面に PETN を封入した薬包

薬包の一端面に少量の PETN を封入すると、薬包自体の爆速には変りがないが、PETN を封入した側の端面を受爆面として殉爆試験を行うと、受爆薬包が PETN 薬包となつたと考えられ、その殉爆性は著しく上昇する。かかる薬包を鉄管内に連続装填すれば PETN が伝爆作用を強め、中断現象を防止出来るかもしれない。Stettbacher<sup>3)</sup> は長装薬の場合、薬包間に Pentritit のような高性能爆薬の短薬包を挿入すると完爆しやすいと述べているが、管壁と薬包間に隙間のある場合には表6に示す如く、中断防止の効果はな

表10 薬包の包装材料と爆轟長

外管管種別	薬 包					爆 轟 長		
	薬種	薬 径 (正味) (mm)	薬 長 (mm)	包 装 種 別	包装品 の外径 (mm)	包装の 厚 さ (mm)	(mm)	
ブリキ管 内径35mm 厚さ 0.3~0.4mm	3号 新緑 硝爆	20	1,000	クラフト紙3重捲き	20.5	0.2~0.3	470	} 475
		20	1,000	△	20.5	0.2~0.3	480	
		20	1,000	食塩型安被付	24.3	2	670	} 670
		20	1,000	△	24.1	2	670	
		20	1,000	パラフィンを透過させた食塩 型安被付	24.7	2.3	780	} 780
		20	1,000	△	24.6	2.3	780	
		20	1,000	アルミニウム薄筒*	20.2	0.08	650	} 660
		20	1,000	△	20.2	0.08	670	
		20	1,000	△	20.2	0.10	700	} 057
		20	1,000	△	20.2	0.10	710	
		20	1,000	バルブガーゼ型浸水安被付**	24.1	2~2.5	1,000	} 1,000
		20	1,000	△	24.1	2~2.5	1,000	
		20	1,000	水入りポリエチレン袋	25	約 2.5	880	} 1,000 (完爆)
		20	1,000	△	25	約 2.5	1,000	
		15	600	フェルト濾紙 1.3 捲き	17	1	400	} 515
	15	600	△ 2.3 捲き	19	1.7~1.8	460		
	15	600	△	19	1.7~1.8	570		
	5号 緑 硝爆	15	1,000	クラフト紙3.3捲き	15.5	0.2~0.3	270	} 265
		15	1,000	△	15.5	0.2~0.3	260	
		15	1,000	フェルト濾紙 1.3 捲きを水に 浸す	17	1	780	} 795
15		1,000	△	17	1	810		
15		1,000	フェルト濾紙 2.3 捲きを水に 浸す	18.5	1.7~1.8	1,000	} 1,000	
15		1,000	△	18.5	1.7~1.8	1,000		(完爆)
3号 新緑 硝爆		15	1,000	バルブガーゼ型浸水安被付	19	2~2.5	1,000	} 1,000
		15	1,000	△	20	2~2.5	1,000	
		15	1,000	水入りポリエチレン袋	20	約 2.5	1,000	(完爆)
		15	1,000	△	20	約 2.5	1,000	(完爆)
		15.6	1,000	ガ ラ ス	18.2	1.3	1,000	(完爆)
		17	900	硬質塩化ビニール	19	1	900	(完爆)
		16.2	1,800	アクリル樹脂管	20	1.9	1,800	(完爆)
5号 緑 硝爆		19	1,000	塩化ビニールホース(水道用)	23	2	840	} 805
		19	1,000	△	23	2	770	
	13	1,000	△	16.5	1.7	590	} 575	
	13	1,000	△	16.5	1.7	560		
鉄 管 内径35mm 厚さ3.5mm	3号 新緑 硝爆	17	2,000	硬質塩化ビニール	19	1	950	} 940
		17	2,000	△	19	1	990	
		20	1,000	錫箔5重捲き	20.1	0.06	600	} 1,000 (完爆)
		20	1,000	ブリキ管	22	1	1,000	

備考 \* 練炭磨容器等に使用されるアルミニウム、チューブ但し両端面は軸に直角な平面である。

\*\* 九検第 2824 号バルブで厚さ約 2mm の筒を作り、周囲にガーゼを捲き仕上げたもの、約 20 秒間水に浸し充分浸水させたもの。

\*\*\* 水を入れた長いポリエチレン筒に長さ 1m の薬包を挿入し口許を縛つたもの。

ガラス包装品が完爆するのも同一理由によるものであろう。また硬質塩ビ管の方が軟質の塩ビホースより爆轟長が長く、さらにアクリル樹脂管では 1,800mm にわたりなお中断現象を起さないのは、その反射率の差異に基くものであろう。

水入りポリエチレン袋に薬包を入れて口許を縛つたものをブリキ管に入れて爆轟させた場合、たまたま一部の水が流出し、薬包終端部が水に包まれていなかったことがあつたが、丁度その部分に相当する長さだけの残留薬包を生じ、一方そのような空間のない試料では完爆することが認められたことも注目すべき事実の一つである。

### 5. 残留薬包の性状

砂上で隙間のある場合の爆轟中断実験を行うと、爆轟中断点附近では薬包紙が破れて内容薬が飛散するが中断点より遠く離れた部分の薬包は、そのままはね飛ばされたのを回収出来ることが多い。残留薬包は、普通の紙包装品であれば飛ばされた時の衝撃で端面部が損傷することもあるが、薬包が強く圧縮されて固化していることは少い。

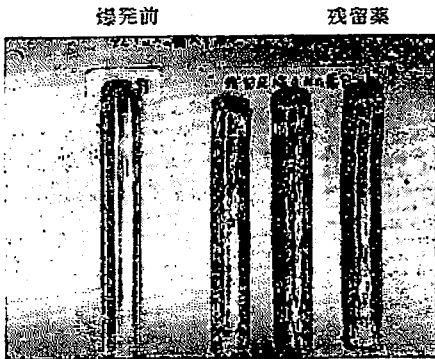


Photo. 1 Failed cartridges of aluminium wrapper

包装紙の代りに薄いアルミニウムのチューブを用いると、残留薬包の回収はさらに容易になるが、この場合は常に薬包は周囲から圧縮されて固化しているのが認められる。

いま箔の厚さ 0.1mm、直径 20mm、長さ 125mm のアルミニウム筒に 3 号新緑硝薬を仮比重 1.06 で充填し、これを 8 本つないで全薬長を 1m として、内径 35mm のブリキ管に入れて爆轟させ、残留薬包を回収したもの photograph を写真 1 に示す。

試験は両端の開いたブリキ管を使用しこれを砂上に置いて爆轟させて行つたが、残留薬包は試験前の位置より 1m 以内の場所に転がっていることが多く、ブリキ管の残部も空中に舞上がるが大体爆発点より数 m 以内の地点で回収出来る。

残留薬包は周囲から強い圧縮力を受け、半径方向に

のみ収縮し、その表面のアルミニウム箔には皺を生ずるが、その軸方向の長さには変化なく、軸方向には圧縮力を受けていないように見受けられる。

この薬包を水中に浸漬してその容積を求め、薬包の仮比重を計算すると、内容薬の比重は始め 1.06 であつたものが 1.27~1.30 程度に圧縮されたことになっている。

いま別に水圧機により 3 号新緑硝薬を圧搾し、比重が 1.27~1.30 になるときに加えた圧力を見ると、48~54kg/cm<sup>2</sup> であつた。これは決して大きな圧力とは言えず、この程度なれば 3 号新緑硝薬は死圧には到達しない。念のためこの残留薬包を 6 号雷管で起爆したところ完爆した。その爆速は圧縮前に比較して多少の低下を見せているが、これらの関係を表 11 に示す。

表 11 残留薬包の比重、爆速等

薬包の種類	薬径 (mm)	比重	爆速 (m/sec)	起爆試験
アルミニウム筒入り (圧縮前)	20	1.06	2,930	6 号雷管により完爆
アルミニウム筒入り (残留し圧縮されたもの)	約 18	1.27 ~1.30	2,730	▷
参考値 紙筒入り普通製品 (圧縮前)	20	1.06	2,890	▷

回収された残留薬包は圧縮作用を受けて固化し、や爆速を低下し、感度が低下していることは予想されるが、それでも圧縮前の普通薬包と大差なく、直接この回収薬包より爆轟時の状況を推論することは困難である。何となれば回収された薬包は、回収時にはすでに爆轟瞬時の状況とは異つた状態となつていると思われるから、直接爆轟瞬時の圧力、圧力の加わる時期、その他を計測しなければ明確な知識は得られない。

### 6. 考 察

爆薬薬包は一定限界以上のエネルギーにより起爆されれば、爆轟状態となり、爆轟波は化学反応に基く爆発熱により、絶えずエネルギーを補給されるため、硝安爆薬の如き炭酸爆薬でも普通安定な定常状態が成立し爆薬包が続く限り爆轟が進行する。

もちろんその成分粒子の大きさ、薬径のいかんにより側面損失の方が補給されるエネルギーより大きくなって中断現象を起すこともあるが、成分粒子の粒径も小さく、薬径も空中における紙筒包装の限界薬径以上であるにかかわらず爆轟の中断現象を見ることがある。

即ち、これまで種々実験例を述べて説明した如く、薬包径より内径の大きい管中に多数の薬包を連続充填した時、薬包、管壁間の隙間の断面積  $A_c$  と、薬包の断面積  $A_p$  との比、即ち  $A_c/A_p$  が一定の値をとる時

は爆轟の中断現象が発生する。

$A_e/A_e$  が大なる場合、換言すれば隙間の距離が非常に大きい場合は、開放された場所で爆轟する状態に近いので、何らの妨害作用も受けずに爆轟は進行し中断現象は起らない。

逆に  $A_e/A_e$  が小なる場合は、隙間の距離が小さいため、爆轟に伴う破壊作用が直ちに周壁に及びこれを破壊し、結果的には隙間のごとき閉ざされた空間が薬包周辺にないか、あるいは閉じた空間が少ないこととなる。従つてこれまた爆轟の中断が起らない。

そこで外套管の鉄管にスリットを切るか孔をあけ、爆轟圧力の一部が逸散するようにすれば表3に示されるように、もはや閉ざされた空間が存在しないことになり中断現象が起らなくなる。また隙間を砂または水で埋め空間をなくすれば中断現象が起らなくなることは前報にも記載した。即ち薬包と管壁に接された閉ざされた空間が中断現象の原因である。

しからば薬包周辺に閉ざされた空間があれば何故中断現象が起るのであろうか。

いま、管中で薬包が爆轟するとき、その爆轟によつて生ずる衝撃波は、爆轟波より速度が速いとすれば、管底に衝突反射して来た衝撃波は、遅れて進む爆轟波と衝突することとなり、これは爆轟波の進行に対し妨害作用を与えるかもしれない。特に中断現象を見るときは爆轟長が中断を起さない最大装薬長より短い（前報）ことは、この考えを推論させるが、底のない鉄管を用いて試験しても同様に中断現象を生ずることが実験的に確かめられ、衝撃波の管底よりの反射妨害説は否定される。

薬包と管壁との間に隙間があるとき、普通その隙間は、管内のどちらかに偏つて存在する。たとえば鉄管を水平に置き装薬すれば薬包の下側は鉄管に接し上側に三日月型の隙間が出来る。首い換えれば薬包外部の被覆抵抗がその上側と下側では異なることとなり、そのため爆轟波面が傾いて対称性を欠く結果、爆轟が中断するのではないかと考えられる。そこで鉄管内の中心部に薬包が位置し同心円状の隙間が出来るように特殊の装薬法をとつたが別段常法との差異は認められなかった。即ち鉄管の軸と薬包軸とが偏心することが中断現象の根本原因ではない。

また薬包間の薬包紙の重なりによる紙層の抵抗や、雷管の起爆力の不足が原因でないことは前報に述べた通りである。

全装薬が1本の棒状の薬包にならぬように装填したり、径違いの薬包を用いた場合に爆轟中断が起らぬことや、同じ径違いの薬包でも紡錘型の薬包を用いた場合には再び中断現象の現われることから見れば、隙間に沿

つて流れる何らかの妨害作用があるように思われる。即ちこの隙間を流れる妨害作用を、その進行方向と直角な面で遮ぎれば中断現象を防止出来るかに見える。

一般に爆薬包の爆轟に際しては、爆轟波もしくは衝撃波は爆轟生成ガスに先行し、その後に爆轟生成ガスが続くとされている。しかしこれは薬包が自由空間にある場合のことである。Deffet, Boucart, Boutry<sup>9)</sup>等は鋼管とガラス管をつなぎ、その中に3本の薬包を装填して爆発させた場合を写真法により研究し、第3薬包がある位置から、第1薬包より生じたガスにとりまかれていた写真を撮影した。そしてこのガスの作用が薬包の感度を鈍くしたり、爆発を妨げる薬包を圧縮したりするに充分であるかどうかは判らぬが、その可能性のあることを推論した。

Shepherd および Grimshaw<sup>10)</sup> は爆轟波より速い速度で爆発生成ガスが進行することを実験事実より推定しているが、村田<sup>11)</sup>によれば、薬柱から噴出する爆発生成ガスの噴出速度が、その条件如何によつては爆轟より速いことを述べている。したがつてかかる高速で噴出する生成ガスが、鉄管中でその薬包外周の限られた狭い隙間を流れれば、当然爆轟波に先行し、従つて未反応薬包を圧縮する可能性がある。

また Sultanoff<sup>12)</sup> は内部に空洞のある管状薬包の爆轟波、衝撃波の進行状況を高速度写真により研究し爆轟がある程度進行すると衝撃波が空洞内を爆轟波より遙かに高速で進行し、Mach Shock はその供試爆薬の爆速 7,600m/sec に対し 15,000m/sec の高速で空洞内を進行することを示している。空洞薬包と薬包外周に隙間のある場合の爆轟とは必ずしも同一視することは出来ないがいずれにしても隙間の中で衝撃波は爆轟波面より遙かに高速で進行すると考えられる。

爆轟波に先行する衝撃波もしくは高速生成ガス流が未反応薬包を直接圧縮し、爆轟反応を中断させることもあろうが、これらの流れは爆轟進行方向と同じ方向に向うから、爆轟伝播に対する妨害作用としては、管壁による反射により生じた薬包軸に垂直な成分を考えるのが妥当であろう。

即ち前報告に見られたように、鉄管内壁に綿その他衝撃波を吸収すると考えられるものを内張りすると爆轟中断を防止することが出来、クラフト紙の内張りでもその厚さを増すに従い爆轟長が長くなることは、管壁による衝撃波その他の反射が重要な役割を果していることを示すものである。従つてまたその管壁の材質と内壁の面の粗さも大きく影響するであろう。

表4によれば管壁の材質は一般に強度の強いものほど爆轟中断に到るまでの爆轟長が短くなる傾向が見られるが、必ずしも抗張力が最大の原因でないことは



ガラスの如きものが鉄管と殆んど同じ値を示していることによつても判る。また質量の大小に関係しないことも、同じく表4に見られる如く鉛管内における爆轟長がえつてブリキ管ガラス管より小さいことによつても知られる。

一方薬包自体の包装状況もまた爆轟長に影響を及ぼすことは表10に明らかである。もちろん薬包の包装被覆抵抗の増加により、爆轟の側面膨脹によるエネルギー損失が少くなり、爆轟反、応帯爆速等に影響を与えることもあるが、それだけでは説明出来ない事実が存在する。たとえば中断を起さぬ包装としてガラス薬包ブリキ薬包等がありこれらはその被覆抵抗のためある程度爆速の上昇も認められるが、浸水フェルト紙、水入りポリエチレン等の薬包ではその爆速はほとんどとるに足らないと考えられる。しかるに浸水型安被と共にこれらの場合のように薬包周囲に僅かな水の層があるときはいずれも中断現象を見られぬことは興味深い。

これらの場合にも衝撃波の反射妨害作用を探るならば、この場合は薬包表面における再反射のため、衝撃波の妨害作用がブリキ板、ガラス、水の層等により反射されて薬包内部の爆薬まで進入しないことによるものと考えることが出来る。反射率の高いと思われる硬質塩ビ管の方が軟質塩ビホースより爆轟長が長く、さらにアクリル樹脂管では中断を起さないこともこれを裏付ける。

これらの関係を模型的に図4に示す。

図4において衝撃波もしくは生成ガス流  $EA$  が爆轟に先行すると考える。これが管壁と  $A$  点で衝突反射し  $AB$  となつて薬包を圧縮するか、反応帯の進行に対し妨害作用を与える。ただしこの妨害作用が  $B$  点もしくは  $B$  の薬包内部に達する時、その点の爆薬が反応前であるか、あるいは丁度反応中であるかは不明である。 $A_e/A_e$  の小なる範囲では、爆轟に伴う破壊作用により鉄管が破壊されて妨害作用の一部は外周へ逸散するため  $EA$  の力は薬包に達せず、反対に  $A_e/A_e$  の大なる場合には開放下で爆轟する状態に近い妨害作用は薬包上の  $B$  点に到達することがない。これは鉄管に孔をあけて妨害作用の一部を逸散するようにした場合(表3)中断の起らないことによつても判る。

もし  $A$  点に綿、またはフェルト沱紙の如き緩衝物が

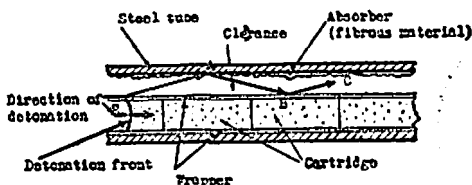


Fig. 4 Model for failure of detonation

あれば、この妨害作用は  $A$  点の附近で吸収され消滅して  $B$  まで達しないか、もし達したとしても弱められているためはや爆轟の中断現象は起らない。

さらに薬包の包装材料がブリキ、ガラスの如きものであれば、その被覆抵抗のため爆速も速くなるが、かかる材質は妨害作用  $AB$  を再び反射して  $BC$  の方向に進行させるため、やはり爆轟中断現象は発生しない。浸水させたフェルト沱紙、水入りポリエチレン等を使用する場合は、被覆抵抗は少いが、水の薄層が妨害作用を反射するため中断しないのであろう。特にポリエチレン内に一部空気が残っていたときその部分がその長さに相当する長さだけ残留したことはこれを裏付ける。表10に見られるようにアルミニウム薄筒ではあまり薄いため充分反射されず中断現象が起つているが、これもさらに厚さを増せば中断しないようになるであろう。また同じ塩化ビニール薬包でも軟質のホースでは、その厚さが硬質塩ビ管に比して厚いにもかかわらず爆轟長が短いのは反射率が弱いためと思われる。薬包紙にフェルト沱紙を用いた場合も、その厚が増すと従い爆轟長が長くなることは被覆抵抗の増加というより、 $B$  点における妨害作用の吸収による消滅と考えるのが妥当であろう。

またかかる中断現象が比較的低爆速の硝安爆薬に起りやすい理由は、その爆轟反応帯の構造に一因があると思われる。即ち同じ粉状爆薬でも PETN, TNT の如きは反応帯の長さが短かく、これに対し硝安爆薬は反応帯の長さも長く中断現象を起し易い。反応帯の長い爆薬にあつては反応時間も長く反応もそれだけ不安定となる可能性もある。たとえば粉状爆薬は加圧下においては、起爆源たる熱点の断熱圧縮による温度上昇が低下し、爆轟は低爆速となり遂に爆轟中断を起すといわれているが<sup>11)</sup>、隙間の存在のため薬包外部からの衝撃波もしくは高圧生成ガス流が爆薬内空間を圧縮し爆轟を中断させることが考えられる。

そしてかかる硝安爆薬においては、反射衝撃波のため、衝撃帯と化学反応帯との分離が起り、そのために中断現象を起すことも考えられる。

薬包と管壁間に隙間のある場合の現象は、爆薬使用に関する実用上の問題としても、今後各方面の実験解析を必要とし、理論的にも種々解明を要する興味のある困難な問題であると思われる。

本稿を終るに当り、懇篤なる助言を賜つた東京大学工学部、山本、足田両教授に深謝する。また実験を行うに当り協力を得た日本カーリット株式会社保土ヶ谷工場の宮崎君を始め研究課の各諸君に謝意を表するものである。

また本報告の一部は昭和35年10月21日、工業火薬協

会秋季研究発表大会で発表した。

### 文 献

- 1) 福田寛雄, 宮崎茂: 工火協誌, 19, 121 (1958).
- 2) 福田寛雄, 嶋裕: 工火協誌, 17, 207 (1956).
- 3) Stettbacher, A., : Explosivstoffe, 3, 41, (1955).
- 4) 渡辺定五: 工火協誌, 21, 228 (1960).
- 5) Cocu, J., Seelemann, D., Giltair, M., : Rev. Ind. Minerale, 42, 319, (1960).
- 6) Sudo, H., Yamamoto, S., Kiyota. K. : 工火協誌, 21, 155, (1960).
- 7) Deffet, L., and Boucart, J., : Sixth symposium on combustion, New York, (Reinhold) 642 (1957).
- 8) Evans, W. M., : Proc. Roy. Soc., A204, 12, (1950).
- 9) Deffet, L., Boucart, J., and Boutry, C. : Explosifs, 10, 103, (1957).
- 10) Shepherd, W.C.F., and Gyimshaw, H. C. : Trans. Inst. Min. Eng., 109, 889, (1949~50).
- 11) 村田勉: 工火協誌, 10, 68, (1949).
- 12) Sultanoff, M. : Forth symposium on combustion (Williams & Wilkins), 494 (1953).
- 13) Taylor, J. : Detonation in condensed explosives (Oxford), (1952).

## Failure of Detonation of Coal-mining Explosives in Bore-hole

Hirowo Fukuda

With the aim to study about the interruption of detonation in a series of file-loaded cartridges in the long bore-hole, some experiments were made using small diameter cartridges charged in long pipes made of various materials.

As the results of series of the author's experiments, it was ascertained that, under certain conditions relating to the clearance between the inside wall of the pipe and the cartridges, the phenomena of interruption of detonation should occur; that is, on the definite diameter cartridges, the ratio of the sectional area of the clearance to that of the cartridges ( $A_c/A_e$ ) determines whether this phenomena can occur or not.

It is supposed by the author that some effects exerted by reflexion or some disturbances of the shock wave emitted from the detonating cartridges at the wall of the pipe interferes in the further propagation of detonation in the rest of series of cartridges.

By several experiments stated below this assumption was verified.

1. The above mentioned interruption was always observed irrespective of the materials of the sheath pipe, that is, steel, lead,

glass and even paper cardboard.

2. When the value of  $A_c/A_e$  was so large that the reflexion of the shock wave was supposed to have little effect, no interruption was observed.
3. When the sheath pipe of steel was perforated, no interruption was observed, showing that a part of the shock pressure went to free space through the perforation, weakening the effect of its disturbance.
4. When the inside wall of the sheath pipe of steel was covered with a layer of fibrous material like absorbent cotton, no interruption was observed, probably because of the absorption of the reflected shock wave.
5. When the wrapper of the cartridge was of metal foil instead of paper, being strong enough to reflect the obstructive force of the detonation inward, no interruption was observed.
6. It was especially interesting that a thin layer of water around the cartridges could also prevent the interruption of detonation. In this case it is supposed that the water layer plays the role of hard wrapper material. (Japan Carlit Co., Ltd.)