

ANFO 爆薬の伝爆性に関する研究

伊藤 功一・大森 正義・筒井 央*

1. 結 言

ANFO を坑道掘進切羽や採掘切羽等で使用する場合、近接孔の発破の影響で ANFO が圧縮されて不爆となり、所謂死圧現象を呈して残留する場合がある。この現象は通常の粉状爆薬にも起こるよく知られた現象であるが、通常の粉状爆薬例えばカーリット、硝爆等と比べ、ANFO の方がはるかに起こり易い様に聞いている。筆者等は ANFO の種々の薬径における装填密度と爆速の関係をみながら、どの程度の密度になると爆発しがたくなるかをしらべてみた。

又通常爆薬の薬包を穿孔内に装填した時起こる所謂 Channel 効果による爆轟中断現象は、最初福田¹⁾によつて報告され、その後この現象は薬包と密閉壁の間の空隙が薬包径に対応して適当の大きさの時、空隙中を先行する衝撃波によつて薬包が予め圧縮されるか、或は反応帯が妨害されるかによつて起こる現象として広くみとめられている。筆者等は上記の ANFO の死圧現象研究の一環として ANFO に対する Channel 効果をしらべてみたところ、プリル硝安を用いる ANFO には特異な性質がある事が判つた。

2. ANFO の薬径と装填密度と爆速

2-1 実験

ANFO の鉄管爆速を、薬径を変え装填密度を種々変えて測定した。まづ内径 41.6mm, 35.7mm, 27.6mm, 21.6mm, 16.1mm 夫々の肉厚、3.5mm, 3.5mm, 3.2mm, 2.8mm, 2.8mm, 長さ各 250mm の 5 種の鉄管を用意した。これに ANFO を装填したが装填密度は ANFO を流しこんだままの 0.75~0.8g/cm³ から、1.2~1.3g/cm³ 位までの範囲に変化させた。実際の穿孔中では近接孔の発破による影響で流しこみの ANFO が圧縮され高密度になる事を想定し、密度を高めるには鉄管内に少量づつの ANFO を流しこみ、押棒を使つて均等にオイルプレスで圧入して行なつた。したがつて装填密度が 0.3 前後以下のものはプリル硝安は圧潰し、高密度になるにしたがい粉砕された状態になつている。爆速測定は各径に応じた径のペ

トライト (PETN 50%, TNT50%) 20g をプライマーとし、6号雷管で起爆し、ドートリッシニ法で JIS 法に準じて行なつた。使用した ANFO はプリル硝安 94% 2号軽油 6% の組成で通常の工場製品である。

2-2. 結果および考察

結果は Table 1 に示す。

Table 1 の結果を図示したのが Fig. 1 である。

16mm 径を除き各径ともはじめ密度の増加と共に爆速は直線的に増加するが、ある最大値をとつた後急激に下降する。Price²⁾ は爆発物質の火薬的挙動を 2 つのグループに分け、TNT の様に爆速が密度と共に直線的に上昇し、真比重に近づく程より理想的になるものと、過塩素酸アンモニウムの様に直比重に近づくると不爆となり、真比重と比較し空隙率の大きい時により理想的な爆撃を示すものとに大別しているが、ANFO はこの分類の後者のグループの典型的な密度対爆速曲線を示す様である。

爆速は各径とも密度が 0.75~1.0 附近までは密度と略々直線関係にあり、径 41.6mm と 35.7mm では密度 1.1~1.15 附近に最大値があり、径 27.6mm と 21.6mm では密度 1.0~1.05 附近に最大値がある。

不爆になる密度の限界値は径 41.6mm, 35.7mm では略々 1.30 附近、径 27.6mm では 1.20 附近、径 21.6mm では 1.15 附近で径と共にやや小さくなる傾向にある。径 16.1mm ではこの密度と爆速の関係がやや乱れているがこれは径 16.1mm が ANFO の爆轟の限界薬径附近にあるため爆轟が不安定である事を示している様に思われる。

通常の粉状爆薬であるカーリット、硝爆の 30mm 紙筒での密度と爆速の関係を求めると Fig. 2 の通りである。不爆になる密度は紫、特樺カーリットで略々 1.6 以上、3号新緑硝安爆薬で略々 1.4 以上である。この値が 30mm 紙筒での値である事を考えると、ANFO の鉄管中における不爆の限界密度が径 21.6~41.6mm で 1.15~1.30 である事は、ANFO が従来の通常粉状爆薬に比し、かなり死圧現象を受け易い爆薬である事を示している。

次に ANFO は各径とも密度 0.75~1.0 の間では爆

43年5月31日受理

* 日本カーリット株式会社保土谷工場 横浜市保土ヶ谷区仏向町

Table 1 Relationship between ANFO's velocity of detonation and loading density in various diameter of steel pipe

<i>d</i> mm	41.6													
ρ g/cm ³	0.78	0.84	0.90	1.00	1.08	1.12	1.17	1.21	1.25	1.29	1.31			
<i>D</i> m/sec	2,890	3,030	3,170	3,450	3,650	3,300	3,200	3,100	2,380	×	×			
<i>d</i> mm	35.7													
ρ g/cm ³	0.75	0.75	0.87	0.89	0.94	0.98	1.09	1.14	1.19	1.26	1.28	1.28	1.42	1.44
<i>D</i> m/sec	2,780	2,820	2,980	3,060	3,160	3,260	3,360	3,410	3,100	2,400	2,270	×	×	×
<i>d</i> mm	27.6													
ρ g/cm ³	0.78	0.79	0.92	0.93	0.99	1.00	1.02	1.05	1.14	1.15	1.20	1.25	1.44	
<i>D</i> m/sec	2,660	2,740	2,790	2,840	2,980	2,920	2,950	2,950	2,630	2,350	×	×	×	
<i>d</i> mm	21.6													
ρ g/cm ³	0.76	0.77	0.83	0.84	1.02	1.05	1.12	1.14	1.17					
<i>D</i> m/sec	2,340	2,340	2,420	2,400	2,790	2,790	2,090	×	×					
<i>d</i> mm	16.1													
ρ g/cm ³	0.80	0.87	0.94	1.12	1.14									
<i>D</i> m/sec	2,050	1,950	2,030	2,600	2,030									

d; Charge diameter
 ρ ; Loading density
D; Detonation velocity
 ×; Failures

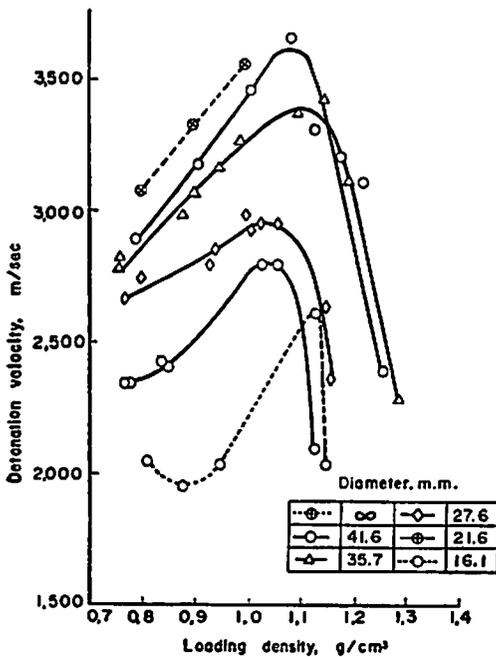


Fig. 1 Relationship between ANFO's detonation velocity and loading density in various diameter of steel pipe

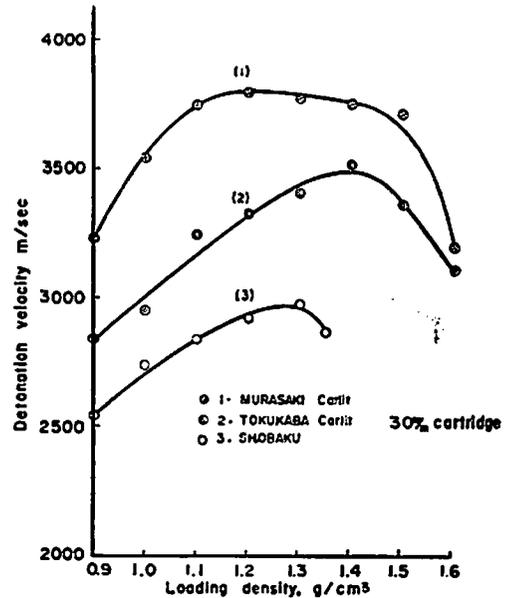


Fig. 2 Relationship between detonation velocity and loading density in 30mm. dia. cartridge of powder explosives

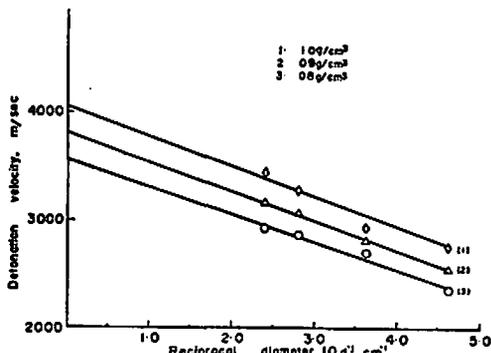


Fig. 3 Extrapolation of infinite diameter's detonation velocity

速は密度と直線関係にある事から、径の逆数を爆速とプロットする事により、無限大の径における爆速を各密度について求めた。但し 16mm 径の値は除いた。Fig. 3 にこの結果を示し、この値を Fig. 1 に挿入しておく。無限大の径の爆速は密度 0.8, 0.9, 1.0 で夫々 3,580, 3,830, 4060m/sec となる。

3. ANFO に対する Channel 効果

3-1 まえがき

ANFO を内径25mm肉厚3.5mm長さ1mの硬質塩ビ管に装填し、これを内径35.7mm肉厚3.5mm長さ1mの鉄管中に更に挿入し、紫カーリット 50g をプライマーとして ANFO を起爆し、Channel 効果の有無をしらべてみた。当初塩ビ管の厚さが厚い事、塩ビ管の外側と鉄管の内側間の間隙が1.85mm しかない事から Channel 効果は期待せず、むしろ塩ビ管に ANFO を装填した時の密閉強度不足を外側の鉄管によつてどの程度補えるか、すなわち塩ビ管のみの時は不爆があつても鉄管の中へ入れればそれが防げるのではないかと予想してそれをたしかめるための試験を行なつたのであるが、先に考察した通り、ANFO は他の通常の粉状爆薬に比べ比較的低い密度で死圧現象を起し易いためか、この程度の小さい空隙でも Channel 効果をうけ爆轟中断が生ずる場合があり、しかもプリル硝安そのままの（流しこみ装填）ANFO とチャージャーにより圧空装填したものや、粉碎硝安をまぜて作った ANFO とではその効果のうけ方が全く異なるという興味ある事実を得た。又この事を更にたしかめるため、ANFO を内径30mm及び25mmのポリエチレン筒（厚さ80 μ ）に 100g 宛装填して薬包を作り、これを内径 35.7mm 及び 27.6mm の鉄管内に 3 本並べた時の伝爆状況を観察すると、上記塩ビ管の実験と略々同様な結果を得た。

3-2. 硬質塩ビ管による試験

3-2-1. 試料

プリル硝安のみを用いた ANFO（硝安 94%、2号軽油 6%）と工業用粒状硝安を奈良式自由粉碎機で粉碎した硝安（以下粉碎硝安と称す。粒度は 150 メッシュ通過 80% 程度のもの）をプリル硝安に 25% 混じた ANFO の 2 種を用意した。次に内径25mm肉厚3.5mm長さ1mの硬質塩ビ管の一端に紙をはつて底とし上記 2 種の ANFO を流しこんで装填し、プリル硝安のみで作つた ANFO は三菱製、ベストチャーチャーで圧空装填した試料も作つた。

3-2-2. 爆発実験

上記作成した試料を内径35.7mm肉厚3.5mm長さ1mの鉄管（両端は開放）に入れた時と、硬質塩ビ管のみの時とにつき夫々紫カーリット 50g をプライマーとして起爆し、爆轟状態を観察した。（Fig. 4 (a) (b) 参照）完爆、不完爆は鉄管の破壊状態で判定した。

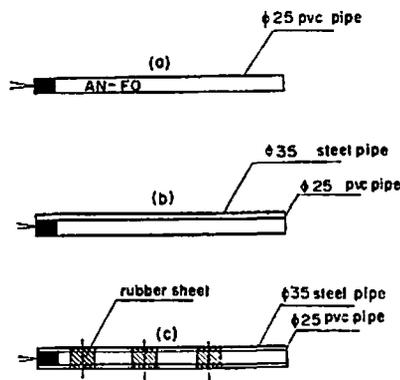


Fig. 4 Experimental assembly

3-2-3. 結果及び考察

結果は Table 2 に示す。

表中の爆速は紫カーリット 32mm, 50g をプライマーとして JIS 法で測定したもので、結果の分子は完爆数分母は試験数である。プリルのみの ANFO は、塩ビ管に装填しただけのものは 1m の長さの中 50cm 以上が完全に残留し完爆しなかつたが、塩ビ管に装填したものを更に鉄管中に挿入したものは完爆した。

一方、プリルのみから成る ANFO をチャージャーで装填したものと、粉碎硝安を 25% 混入して流しこみで装填したものは、何れも塩ビ管のみの時は 1m の長さに亘り完爆したが、塩ビ管を更に鉄管中に挿入した時は夫々の爆発率が 1/3, 2/3 で完全に伝爆し得ない事が判つた。

粉碎硝安の混じた ANFO 乃至チャージャー装填の ANFO は、プリルのみのものを流しこんだものより

Table 2 Results of ANFO's propagation of detonation tests in PVC pipe

ANFO			Results of propagation of detonation tests	
Prep. of AN	Loading	D m/sec (in $\phi 35$ steel pipe)	Confinements	
			PVC pipe	PVC pipe in steel pipe
Prill 100%	Free running	3,020 ($\rho=0.84$)	0/3	6/6
	By loader	3,600 ($\rho=0.91$)	3/3	1/3
Prill 75% Powder 25%	Free running	3,280 ($\rho=0.94$)	3/3	0/3

爆発性がよい事は夫々の 35mm 鉄管爆速値が示している通りである。したがって密閉強度が多少弱い塩ビ管中でも爆轟は伝播し易いが、若干隙間のある状態にして更に密閉強度の強い鉄管で囲んだ状態では反対に爆轟中断が起こり、プリル硝安のみの ANFO に比べ伝爆性が劣る結果となつた。

爆轟中断が生じたのは隙間を先行する衝撃波による圧縮又は妨害、すなわち所謂 channel 効果によるものと思われる。しかし福田の報告によつても通常の爆薬では、この程度の隙間ではこの現象は起こり難い。ANFO の反応帯の長い事、及び先に述べた様に比較的低密度で死圧現象を起こしている事が、この channel 効果の現象を起こし易くしている様に考えられる。そうして、この様な先行する衝撃波による圧縮に対し、プリル硝安は粉碎硝安に比し高い抵抗性を示す様でこの程度の隙間では channel 効果が起こりがたい事を示している。これはプリル硝安の形態がポーラスな塊状をしているため、圧縮を或る程度緩和するためであると考えられる。

塩ビパイプ中のチャーチャー装填 ANFO が鉄管中で爆轟中断するのは所謂 channel 効果によるものであると考えたが、これを確かめるため次の実験を行なつた。

すなわち内径35.7mm、肉厚3.5mmの鉄管中に内径25mm、肉厚3.5mm、外径33mmの硬質塩ビ管を挿入

する際、Fig. 3. (c) に示す様に巾150mmのゴムシートを起爆側の端から180mm、430mm、690mmの位置を中心に塩ビ管にぐるぐる巻きつけて鉄管との間に隙間のない様な状態にして爆発試験を行なつた。プライマーは紫カーリット 32mm、50g である。この結果は3回試験して3回とも完爆であつた。塩ビ管と鉄管の間を先行しようとする衝撃波を妨害したためと考えられ、先の試験結果の不爆が channel 効果によるものという推量を裏づけている。

3-3. ポリエチレン筒による試験

3-3-1. 試料および爆発実験

プリルのみおよび粉碎硝安を混じた ANFO を用い 30mm 100g、25mm 100g のポリエチレン筒 (厚さ 80 μ) 入り薬包を作り、夫々内径 35.7mm (肉厚 3.5mm) 27.6mm (肉厚3.2mm)、長さ各60cmの鉄管中に3本装填し、夫々紫カーリット 30mm 50g、25mm 50g をプライマーとして鉄管中における伝爆試験を行なつた。この時、鉄管の起爆側の端は開放とし、反対側の端はゴム栓で密閉した。ANFO の種類はプリル硝安のみ、粉碎硝安 (3-2-1 に使用したのと同じ) を 15,25% 混じたものの3種類とした。鉄管中への装填法はこめ棒で軽く押しつけて鉄管中に単に並べただけの軽装填と、こめ棒で少し強く押しつけて密装填したものの2種類とした。伝爆性は爆轟長で表わす事にし、爆轟長は鉄管の破壊状態から判断した。

Table 3 Length of detonation of ANFO cartridges ($\phi 30$ mm 100g \times 3pcs) in steel pipe ($\phi 35.7$ mm)

Prep. of AN		Loading	Length of charge (mm)	Length of detonation (mm)
Prill	Powder			
100	0	Loose	470	470
85	15		425	320
75	25		400	200
85	15	Compact	355	355
75	25		345	345

Table 4 Length of detonation of ANFO cartridges ($\phi 25\text{mm} \times 100\text{g} \times 3\text{pcs}$) in steel pipe ($\phi 27.6\text{mm}$)

Prep. of AN		Loading	Length of charge (mm)	Length of detonation (mm)
Prill	Powder			
100	0	loose	640	640
85	15		600	600

3-3-2. 結果および考察

伝爆試験の結果 Table 3, 4 に示す。

ポリエチレン薬包の場合も、硬質塩ビ管の時と同様な結果が得られた。内径 35.7mm の鉄管内に 30mm 薬包を入れた場合、軽装填ではプリル 100% のものは薬包 3 本が完全に爆撃したが、粉碎硝安を混じたものは、混合量を増す程爆轟長が短くなる。

密装填した場合や、25mm 径の薬包を 27.6mm 径の鉄管に入れた隙間の小さい場合は、粉碎硝安を混合しても薬包 3 本は完爆する。

この事は塩ビ管の試験の時と同様、爆轟中断現象は channel 効果による事、channel 効果のうけ方はプリルのみの ANFO の方が小さい事を如実に示している。

4. まとめ

ANFO 爆薬は従来の粉状爆薬に比し、死圧現象を

起こし易い爆薬であり、鉄管中で装填密度が $1.2 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 附近になると不爆になる。又、鉄管爆速は装填密度 $1.0 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$ 附近が最高である。

穿孔中で隙間のある装填状態では通常の粉状爆薬より channel 効果を受け易いが、プリル硝安のみから成る ANFO 爆薬はプリル硝安の多孔性による緩衝があるためか、爆轟速度は低いに拘わらず、粉碎硝安を混じたものより channel 効果を受けがたい。

(本報告の大部分は工業火薬会昭和 43 年度春季研究発表会で発表したものである。)

文 献

- 1) 福田, 工業火薬, 22, (2) 71 (1961)
- 2) Price, 11th Symposium on Combustion (International) 693 (1967)

Study on the Propagation of Detonation of ANFO

by K. Ito, M. Omori and N. Tsutsui

The detonation velocity of ANFO in steel pipe was studied as the function of charge diameter and loading density (ρ).

Detonation velocity increased with increasing ρ to a maximum velocity, and then decreased to its critical value.

ANFO had maximum velocity at ρ ($1.0 \sim 1.11 \text{ g/cm}^3$) and was undetonated at ρ ($1.2 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$). When loaded by free running into Polyvinylchloride (PVC) pipe ($\phi 25\text{mm}$) ANFO could not detonate with Carlit primer, although it could detonate in PVC pipe ($\phi 25\text{mm}$) inserted into steel pipe ($\phi 35.7\text{mm}$). On the contrary, when loaded by compressed air loader into PVC pipe ($\phi 25\text{mm}$) ANFO could detonate with Carlit primer, although it could not detonate in PVC pipe ($\phi 25\text{mm}$) inserted into steel pipe ($\phi 35.7\text{mm}$). It is thought that ANFO was affected by channel effect usually, but prilled Ammoniumnitrate due to the porosity is more resistible against this effect than pulverized AN.

(The Japan Carlit Co., Ltd. Hodogaya Plant)