

ANFO の伝爆性に関する一考察

明石善作*・及川陸記*

まえがき

筆者等はさきに ANFO についてプリル硝安のみのものと、これに一部低比重硝安を配合したものについてその伝爆性、特に種々の薬径で起爆点からの種々の距離における爆速の変化について報告を行なった¹⁾。それによればプリル硝安に10~20%の低比重硝安を配合したものは種々の内径の鉄管にていずれも約20%爆速が向上し、特に小薬径の場合爆速が定常爆速を保持し極めて安定することを報告した。

本報は、ポアホール内に空隙状態で装填された薬包状 ANFO の爆轟中断について前記起爆感度の異なつた2種類の ANFO の感度の相違その他の条件をも含めた各種条件における限界薬径を求めつつ、この爆轟中断は空隙を爆轟面に先行して進行する衝撃波の強弱の外、容器強度の強弱ならびに空隙の大小によるガスフロント成立状況の複合と薬の起爆感度の要因が連係して決定されるものであることを探求し、その場合の伝爆機構について一つの想定を試みたので報告する。

1. 試料

プリル硝安のみを用いた ANFO を MD とし、プリル硝安85：低比重硝安15の割合に配合しこれに2号軽油6%を混合した ANFO を K₁₅ とする。

この両試料の爆速と起爆感度を JIS および通商産業省軽工業局長通達40軽局第685号の方法により完爆させるに要する6号留管の本数で示せば Table 1 のごとくなる。

Table 1 The cap sensitivity (necessary quantity of No.6 cap to detonate completely) and the detonation velocity of two sample ANFO

sample	cap sensitivity and detonation velocity	A method (PVC pipe)	B method (carton paper)	detonation velocity (m/sec)
MD		1.5~2	2~3	2,700~2,800
K ₁₅		1~1.5	1.5~2	3,500~3,600

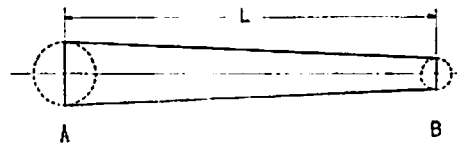
2. 限界薬径の測定

ANFO の限界薬径について M.A. Cook は紙筒を

用い開放状態で4インチと報告している²⁾。

2-1 円錐型紙銃による限界薬径

65kgケント紙(横600mm, 縦800mm, 1,000枚の重量が65kg)を用いて Fig.1 に示した円錐型紙筒を作り、これに試料をそれぞれの装填比重に装填し、プースター(3号相ダイナマイト50g)にて起爆し爆轟の中断する薬径を求めた。紙筒の両端はクラフト紙にて押えた。結果を Table 2 に示す。



Case size	L (mm)	A (mmφ)	B (mmφ)
1	600	56	31
2	600	45	20
3	840	55	20
4	840	60	25
5	600	67	42

Fig.1 Conical paper case

Table 2 The critical diameter for the detonation to fail (D.D.F.) for conical paper

con- condition	kind	Case size	loading density	length remained (mm)				DDF (mm)
				1	2	3	ave- rage	
on sand	K ₁₅	2	0.75	148	130	141	140	25.8
		"	0.80	139	152	145	145	26.0
		3	0.85	240	219	146	202	28.4
		"	0.90	205	235	210	217	29.0
	MD	1	0.80	185	179	215	193	39.0
		"	0.85	221	275	309	268	42.2
hung	K ₁₅	4	0.85	155	210	110	158	31.64
	MD	5	0.85	90	110	80	93	45.9

1. 装填比重の増加によつて ANFO 限界薬径は大きくなる。上記の結果並びにその他の現象から ANFO の伝爆には装薬中の空気泡の存在が主要な作用をして

*昭和45年2月2日 受理

* 協同アノキ製造株式会社 秋田県大館市十二所

いるもののように考えられる。

2. 紙筒サイズが各種類に分れた理由は伝爆性の低下に従って起爆部口径を大きくする必要があるのである。

3. はじめは砂上試験のみで行なつたが、砂の敷き方(地面の硬さ)でも成績が変わることから、つるし(完全開放状態)の試験を行なつたが限界薬径にかなりの相違が生じた。ただし砂上試験は夏期に行ない、つるし試験は秋冷期の成績でこのまま比較するにはANFOの特性から考え多少の難点はある。

2-2 円筒型紙筒による限界薬径

Fig. 2 に示す円筒型紙筒(紙質は Fig. 1 の場合と同じ)に試料をそれぞれの装填比重に装填してプースター(3号桐ダイナマイト 50g)にて起爆し完爆させるに必要な薬径を求めた。両端はクラフト紙にて押えた。結果を Table 3 に示す。なお、この場合も砂上試験は夏期に行ない、つるし試験は秋冷期に行なつた場合の値である。

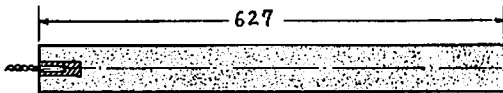


Fig. 2 Cylindrical paper case

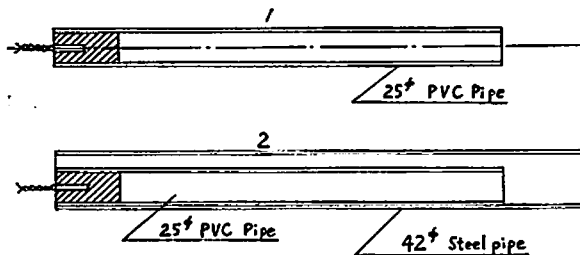


Fig. 3 Measurement of the detonation ability for AN-FO under different cover strength

Table 4 Detonation ability of MD and K_{15} under different cover strength

cover strength	kind	loading density	result
1	MD	0.85	0/5
	K_{15}	0.85	5/5
2	MD	0.85	5/5
	K_{15}	0.85	5/5

として塩ビ管のみの場合 (Fig. 3-1) とこれを更に鉄管内に挿置した場合 (Fig. 3-2) の MD と K_{15} について伝爆試験を行なつた。結果を Table 4 に示す。

塩ビ管肉厚 3.5mm の被覆強度で薬径 25mm では

Table 3 Critical diameter measured in cylindrical paper case

condition	kind	loading density	diameter (mm)											critical diameter (mm)	
			29	30	31	32	33	34	35	36	37	38			
on sand	K_{15}	0.75	1/5	3/5	3/5										30
		0.80		1/5	2/5	3/5									33
		0.85						2/5	3/5						36
		0.90							0/5	0/5	3/5				38
			46	47	48	49	50	51	52	53	54	55			
on sand	MD	0.80	1/5	3/5	3/5									47	
		0.85				1/5	3/5	3/5						51	
hung	K_{15}	0.85												>40	
		MD	0.85											>60	

3. 塩ビ管による ANFO の伝爆試験

爆薬が被覆の強度によって爆轟状態に変化を生ずることは当然であるが、ANFO のように低感度、低感速の爆薬はその影響が特に甚しい。

塩ビ管は内径 25mmφ、肉厚 3.5mm、長さ 600mm 鉄管は内径 42mmφ、肉厚 3.5mm、長さ 800mm 両端は開放を用い塩ビ管に試料を充填し(両端はクラフト紙にて押える) 3号桐ダイナマイト 50g をプースター

MD は限界薬径に達しないが K_{15} では充分到達することを示している。実験 2 では MD でも被覆強度の不足を外側の鉄管壁で補強されることにより、爆発ガス側面膨脹が押えられ限界薬径が小さくなることを示している。

4. ANFO 薬包の空隙内伝爆

4-1 まえがき

実際の発破作業で岩石内にせん孔されたボアホールに ANFO を薬包状態で使用する場合、薬径をボアホールの径よりも小さくして発破する機会が多い。このような場合多くの爆薬(硝安爆薬、カーリット等)の爆轟は大気中での爆轟やボアホール壁に接した状態で爆轟した場合とは本質的に異なつた状態となることが

観察されている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

文献 3) 4) によればアンモン爆薬 (硝安 64%, TNT 16%, 食塩 20%) をガラス管内に挿入してその爆発状態をレントゲン写真に撮り、かつ高速度写真撮影による解析からその爆速 D とそれに先行して隙間を進行する空気衝撃波 W の関係を次のように報告してい

る。

レントゲン写真は爆発生成物は隙間に入らずまた爆轟前面の隙間中を進行せず、膨張した爆発生成物の境界は非常にはつきりしている。それと同時に空気衝撃波は爆轟面より先行しそのため爆轟前面の葉面が圧搾されている状況を明らかに示している。

Table 5 Relationship between detonation velocity (D) and shock wave velocity (W)

charge			pipe		measured range (mm)	D (m/sec)		W (m/sec)	$\frac{W}{D}$
density	diameter	length	material	diameter (mm) \times (mm)		channel	no channel		
1.1g/cm ³	10 \times 15mm	700mm	glass	25 \times 15	0-225	2,800	2,750	3,800	1.36
					225-350	2,200		3,500	1.58
					450-500	1,760		3,390	1.92

さらにこれらの実験から隙間効果を、空気衝撃波が隙間を進行するに伴って圧縮波が生ずる結果装薬中に高密度帯域が発生し、爆轟過程に本質的な影響をおよぼすことを説明し、また、これ等の関係を利用して他の実験条件 (葉径、隙間の大きさ、パイプ材料、その他) を同じくした場合の種々の火薬類の隙間効果に対する抵抗力あるいは、ある一定の装薬長で爆轟をうまく行なわしめる最小 (限界) 葉径を求めることができることを述べている。

筆者等は装填比重を一定にし MD と K_{15} の薬包につ

いて隙間状態における限界葉径の比較を求むべく以下の実験を試みた。

4-2 ケント紙筒薬包の鉄管内伝爆

ケント紙筒薬包 (Fig. 2 と同じ) を鉄管 (内径 42~52mm ϕ , 肉厚 3.5mm, 長さ 800mm 両端開放) 内に挿入して MD および K_{15} について伝爆試験を行なった。プースターは Fig. 2 と同じく 3号桐ダイナマイト 50g である。

結果を Table 6 に示す。

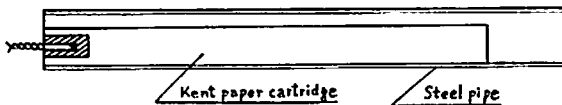


Fig. 4 Measurement method of detonation ability of AN-FO charged in kent paper covered by steel pipe

Table 6 Detonation ability test of ANFO charged in kent paper covered by steel pipe

kind	steel pipe diameter (mm)	cartridge diameter (mm)	loading density	result
MD	42	34	0.85	0/3
	52	"	"	0/3
	"	40	"	0/3
	"	45	"	3/3
K_{15}	42	34	"	0/3
	52	"	"	1/3
	"	38	"	3/3
	"	40	"	3/3

は問題が残るが鉄管入手の関係上やむを得ず、上記条件では試験できなかった。

4-3 ケント紙筒薬包の塩ビ管内伝爆

福田⁵⁾ によれば、炭鉱爆薬に対する空隙効果は外套管の強度が増せば強化されると報告されている。筆者等は鉄管の替りに塩ビ管の外套を用いて 4-2 と同じ伝爆試験を行なった。なお、用いた塩ビ管は肉厚 4~5mm, 内径 50~65mm ϕ , 長さ 800mm, 両端開放である。結果を Table 7 に示す。

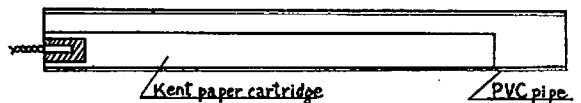


Fig. 5 Measurement method of detonation ability of AN-FO charged in kent paper covered by PVC pipe

この場合葉径が変るにつれて鉄管径を変え隙間の大きさを一定に行なうのでなければ相互間の比較に

Table 7 Detonation ability of ANFO charged in kent paper covered by PVC pipe

kind	PVC pipe diameter (mm)	cartridge diameter (mm)	loading density	result
MD	50	47	0.85	0/3
	"	48	"	3/3
	65	50	"	0/3
	"	55	"	0/3
	"	60	"	1/3
K ₁₅	50	38	"	0/3
	"	40	"	0/3
	"	43	"	0/3
	"	44	"	3/3
	"	45	"	3/3

1) 外套管に鉄管を用いたよりも塩ビ管を用いた方が ANFO の場合はるかに伝爆し難い。

2) Table 7 MD の場合管径 50 mm に薬径 48 mm の 3/3 は隙間を小さくした場合の被覆強度の効果をみたものである。薬径60mm以上は大き過ぎるので中止したが、この条件での限界薬径はこれより 2~3 mm 大であろうと思われる。

5. ANFO の伝爆性総括

種々の条件下における ANFO の標準限界薬径は Table 8 のようになる。

Table 8 Critical diameter of ANFO

condition		kind		MD mm	K ₁₅ mm
		MD	K ₁₅		
kent paper	conical	on sand	hung	42	26
				46	31.6
	cylindrical	on sand	hung	47	32
				>60	>40
PVC pipe				>25	<25
PVC pipe in steel pipe				<25	<25
kent paper cartridge in steel pipe				45	38
kent paper cartridge in PVC pipe				>60	44

1) ANFO の開放下の限界薬径は、通常の装填比重では MD で 60 mm 以上、K₁₅ で 40 mm 以上であるが、爆発ガス拡散面に抵抗を与えるか被覆を強くすれば限界薬径は急速に小さくなり肉厚 3.5 mm の塩ビ管で K₁₅ ならば 25 mm 以下になる。

2) 鉄管内に空隙状に装填した場合の限界薬径は隙間効果を強く受けるにかかわらず開放下より小さい。

Table 6 と Table 7 の対比から明らかなように空隙状態下の爆発で、外套が強い場合よりも弱い(破れ

易い) 場合が限界薬径は大きくなる。

6. ANFO の鉄管内空隙状態とその隙間に不活性物質を充填した場合の爆発試験

6-1 試験方法

ANFO をポリエチレン袋(厚さ 3.5 mm) に比重 0.8 になるように装填し 3 号桐ダイナマイト 60g をブスターとして鉄管(各種内径の肉厚 3.5 mm, 長さ 600 mm, 両端はコルク栓で密閉)内に挿入し、隙間の無い場合、隙間のある場合、隙間を乾燥砂で満した場合および隙間に水を満した場合について薬包の 3 区間の爆速変化をシンクロスコープで測定した。測定装置および方法は、工業火薬 29, 282 (1968) に記載の方法である。結果を Table 9 に示す。なお、本実験の試料は K₁₅ である。

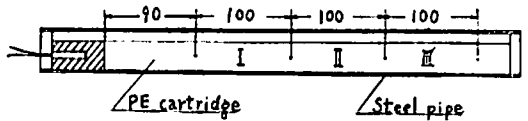


Fig. 6 Measurement method of detonation velocity of AN-FO in polyethylene covered by steel pipe

Table 9 Detonation velocity of polyethylene cartridge in steel pipe under varied conditions

polyethylene cartridge diameter (mm)	steel pipe diameter (mm)	channel condition	detonation velocity (m/sec)		
			I	II	III
28	28	no channel	3,250	3,110	3,030
	35	air	F	F	F
	"	sand	1,720	1,720	1,690
	"	water	3,260	3,030	3,130
	42	sand	1,750	1,790	1,690
31	35	air	2,380	2,700	F
	42	"	2,130	1,960	F
	52	"	F	F	F
	"	sand	1,800	1,670	F
35	35	no channel	3,570	3,680	3,420
	42	air	2,780	2,700	?
	"	sand	2,380	2,440	2,500
	52	air	1,670	2,130	1,590
	"	sand	2,130	2,040	2,130

F = failed

Table 9 の結果は次のようになる。

1) 管壁との隙間が広くなるにつれ影響が大きくな

る。

2) 隙間を砂で満しても顕著な効果はあらわれないが、水を満せば密装填と変らなくなる。これは ANFO の伝爆に際して内包される空気泡の断熱圧縮等に対する周壁の反射作用との関連が考えられそうである⁶⁾。

7. 総括

1) K_{is} は MD に比し起爆感度が高い。

2) 肉厚 3.5 mm の塩ビ管で MD は不爆であるが K_{is} は完爆する。ただし鉄管内に置けば 10mm の空隙があつても両者とも完爆する。

3) ケント紙筒薬包について開放下の限界薬径と鉄管内に空隙状に装填した限界薬径とはむしろ後者が小さくなる。

4) 外套に塩ビ管を用いると類似の条件で鉄管より

も限界薬径が大きくなる。

5) 鉄管内空隙状装葉の爆速において同一薬径の場合管壁との隙間が広くなるにつれ爆速が低下する。

6) その場合空隙を砂で充填しても顕著な効果は表われないが水で塞いだ場合は密装填と変らなくなる。

7) 完全に中空状態(つるし)にすれば砂上試験よりも更に限界薬径は大きくなる。

以上の事実から ANFO の空隙状に装填された場合の限界薬径は、薬室断面積と装葉断面積の比、外套の強度、葉の起爆感度の 3 要因に支配され、断面積比は大きくなるにつれ限界薬径は増大し、外套強度は空気衝撃波の増大に働く反面ガスフロントの膨張を妨げることによる限界薬径の縮小に働き、起爆感度は限界薬径に強い関係があることを示している⁷⁾。

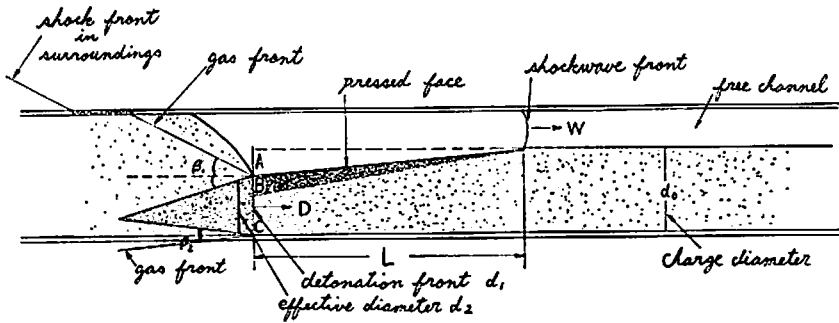


Fig. 7 The detonation of AN-FO with free channel

これを概念的に図示すれば Fig. 7 となる。すなわち ANFO の空隙状装葉の爆発においてその装葉径 d_0 は爆轟のある過程で先行する衝撃波による圧縮により実際爆轟面において d_1 (B, C) の状態にある。この点におけるガスフロントの角度 β は、空隙側は β_1 、壁に接した側が β_2 となる。かつ β_2 は壁材質の強弱により強ければ小さく、弱ければ大きくなり爆轟頭を形成する。ある反応帯を考慮すれば有効限界薬径は d_2 となる。この仮定に従えばある限られた空隙の存する場合外套が鉄管の場合よりも塩ビ管のような弱い材質の方がはるかに d_2 は小さくなる。また開放状態における限界薬径よりもある条件の鉄管内空隙状態の限界薬径が小さくなることも生ずる。

伊藤⁸⁾によれば ANFO の装填密度を上げ 1.2~1.3 g/cm³ を超えれば不爆になると報告されている。これは空気泡が除かれることと深い関係があると考えられる。

文献 (3) によれば、空隙状装葉で先行する衝撃波による圧縮を受ける最大深さ (Fig. 7 における B) は

$$B = u' \tau = u' \frac{L}{W}$$

τ = 装葉表面における隙間衝撃波の最大作用時間

u' = 火葉の圧縮波速度

L = 隙間波の長さ

W = 空気衝撃波の速度

圧縮層の最大密度は衝撃圧縮曲線から求められる。

そして一般的に隙間波の長さは

$$L = \int_{t_0}^t [W(t) - D(t)] dt$$

t_0 = 第一次衝撃フロントの形式時間

D = 爆轟速度

この長さ L が増加するにつれて、波中の圧縮空気と壁面および装葉表面との摩擦によるエネルギー損失が生ずるため L は無制限に増加することはできない。その結果、衝撃波の速度は L の関数となり L が増加するにつれて衝撃波の速度は減少し、爆轟の消滅が生じない限り速度のつり合い ($W = D$) が生ずると説明されている。

これ等の数式と筆者等の実験結果から高密度帯域が仮りに不爆点を越えるものと考えてもその残りの部分 (Fig. 7 の C) が限界薬径より大であれば爆轟は継続するものと考えられる。したがって圧縮されずに残つ

た部分の薬径Cが限界薬径を割つたとき始めて爆轟は中断するので、限界薬径条件が十分保たれていれば、圧縮現象のみからの爆轟中断は起こり得ないものと考えられる。なお、MDに対しK₁₅の鉄管内空隙状装薬試験における限界薬径に実験結果にみられるような差の生ずる理由は

- 1) 起爆感度の相違による限界薬径の有利性
- 2) 爆速が高くなるため、衝撃波による圧縮時間の短縮の外

3) 低比重硝安の内包する空気泡がANFOの伝爆に重要な作用を持つのではなからうかと考えられる。

これを要するにANFOがボアホール内の隙間のある状態での爆発は

1) ガスフロントの開きが大きくなり開放状態に近づくため爆轟頭が細小になる。

2) 先行する空気衝撃波の圧縮作用による密度増加のため限界薬径の条件が厳しくなる。

この2つの要因が連係し窮極においては容器強度が一定であればボアホール断面積と装薬断面積との比率が大きくなるにつれ限界薬径が大きくなる。

空隙状での薬包状ANFOの爆発に際しプリル硝安のみの方が150メッシュ通過80%の粉状硝安を20%混合したものよりも死圧現象に対する抵抗力があるとい

う発表⁸⁾がなされているが、筆者等の実験と異なるところは、粉状硝安の物性(普通粉状硝安の吸油率は数パーセントであるのに対し、低比重硝安のそれは33~35パーセントであり、その気泡の含有状態が根本的に相違する)によるもののように考えられる。

本研究の発表に対し、東京大学疋田教授より種々の助言を賜り、また引用した文献(3)は疋田教授より借用し、文献(4)とともに東京大学資源工学科外尾助教授の翻訳によつたものであることを付記し謝意を表す。

なお、この研究は工業火薬協会秋季研究発表講演会(昭和44年11月7日)において発表した。

文 献

- 1) 明石外, 工業火薬, 29, 282 (1968)
- 2) M. A. Cook, The Science of High Explosives
- 3) エル・ベ・ツブノフ, エル・デ・ホーチナ, 爆発の物理学, 4, 97 (1966)
- 4) イ・ヤ・ベツロフスキー, エリ・ベ・ボルコフ, 発破理論, p. 474
- 5) 福田, 工業火薬, 22, 71 (1961)
- 6) 疋田, 工業火薬, 30, 267 (1969)
- 7) 疋田, 工業火薬, 30, 110 (1969)
- 8) 伊藤外, 工業火薬, 29, 269 (1968)

A Study Relating to Detonation Ability of ANFO

by Z. Akashi and R. Oikawa

The critical diameter of two kinds of ANFO were measured under various conditions.

Many factors which give rise to the failure of detonation of the cartridge ANFO charged with some free space in the bore hole were examined and the reasons for the failure of detonation were considered.

(Kyodo ANFO Manufacturing Co., Ltd., 1 Aza-Kamitazawa Junisho Odate-City)