

研究論文

アンモニアガス発生を抑制した ANFO 爆薬の特性と
ANFO 爆薬を用いた発破システム河野 興^{*}, 鈴木雅行^{**}, 進士正人^{***}, 中川浩二^{****}

トンネル掘削において ANFO 爆薬を用いた時に発生するアンモニアガスは、本爆薬の採用選択可否の大きな要因であった。そこで、アンモニアガス発生を抑制を目的として開発された有機酸添加 ANFO 爆薬の実用上のアンモニアガス発生抑制効果および ANFO 爆薬を用いた発破システムの有効性を検証した。

その結果、有機酸添加 ANFO 爆薬のアンモニアガス発生濃度は、従来の ANFO 爆薬と比して約 1/3 ~ 1/10 であった。本爆薬の出現以来、ANFO 爆薬を用いたトンネル工事業数は、従来の ANFO 爆薬を用いた 16 件/8 年から 43 件/4 年と増加を示した。また、ANFO 爆薬を用いた発破システムは、膠質状爆薬に比べ割孔数を約 15~20%程度削減できる事が明らかになった。

1. 緒言

硝安油剤爆薬(以後 ANFO 爆薬という)は、他の産業用爆薬である膠質状爆薬(ダイナマイト・エマルション系含水爆薬等)に比べその爆発性能は低い。しかし、非雷管起爆爆薬で安全性は高く他の爆薬に比べ安価で、使用方法によっては強力な力を発揮し効果的な破碎をもたらす爆薬である。

これらの理由から、鉱山、碎石場などにおける明り発破で多く採用され、今日では、ANFO 爆薬の消費量は爆薬年間消費量の約 70%を占めている。

しかし ANFO 爆薬は、①耐水性に乏しい、②後ガス量が多い、③機械装薬時に静電気が発生する等の性状を持つことから、使用場所・使用方法に制限を

受けることが多々ある。その中で近年明り発破の水孔に適した耐水性に優れた ANFO 爆薬や、また用途・目的に応じた ANFO 爆薬の開発が行われ多くのメーカーより市販されている。

このような本爆薬の開発・改良の進展は、本爆薬の潜在的な能力・効果・有効性が高く評価されているものと考えられる。

2. トンネル掘削における ANFO 爆薬の問題点

明り発破に比べトンネル発破で ANFO 爆薬が使用される事例は少ない。この理由として上記に述べた爆薬の特性により、湧水時の装薬の煩雑さや後ガス量増加による換気時間の延伸等の問題が挙げられる。

しかし、いくつかのトンネル事業所で経済性・爆破効果・安全性の観点から ANFO 爆薬は充分その効果を果たすことが検証され、それ以来、問題を抱えつつも ANFO 爆薬を使用しようとする動きが数年前から見られるようになった。

一方、新たな問題としてトンネルで支保材に用いられる吹付け材との接触によるアンモニアガス発生が取り上げられることになった。アンモニアガスの発生は、作業を滞らせ、不快感・嫌悪感をもたらした。特にこの接触は、ANFO 爆薬導入初期段階の装薬技術の未熟さにより吹付け材が残っている切羽近傍に ANFO 爆薬を吹きこぼすことが大きな原因と考えられる。

アンモニアガス発生を防ぐには、ANFO 爆薬をこぼさずに巧く装薬を行うことが必要であるが、新規導入事業所または経験者がいる事業所においても、

2003年2月19日受付

2003年9月29日受理

^{*} ダイノ・ノーベル・ジャパン株式会社
〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町6番3号
日本橋山大ビル5F

TEL 03-5652-5365

FAX 03-5652-5362

E-Mail kawano@dnj-net.co.jp

^{**} (株)間組土木事業総本部トンネル総括部
〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8

TEL 03-3423-1801

FAX 03-5652-5362

E-Mail suzukim@hazama.co.jp

^{***} 山口大学工学部臨床トンネル工学研究所
〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1

TEL 0836-85-9335

FAX 03-5652-5362

E-Mail shinji@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

^{****} 山口大学工学部臨床トンネル工学研究所
〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1

TEL 0836-85-9335

FAX 03-5652-5362

E-Mail nakagawa@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

装薬機器への慣れ、機器、環境条件あるいは ANFO 爆薬成分の差異等の理由からその技術習得のため一定の日数を必要とした。その間、アンモニアガスの環境下で装薬作業を強いられることとなり、この体験・印象は本爆薬の否定的な情報の拡散の原因となり、その後の更なる導入を妨げることになった。

このことから、トンネル発破の爆薬として効果的な ANFO 爆薬を広範に拡充するには、装薬技術の良否、環境への順応時間の大小にかかわらず本爆薬を積極的に採用できる環境を作る必要がある。

そのためには以下の対策が必要と考えられた。

- ①装薬技術の習得・向上の教育指導と更なる装薬機器の自動化
- ②アンモニアガス発生を抑制可能な ANFO 爆薬の評価
- ③トンネル掘削における ANFO 爆薬の効果の確認

そこで筆者らは、装薬技術向上に向けてのきめ細かな指導を行うほかアンモニアガス発生反応を低減させた ANFO 爆薬が必要不可欠と考え、アンモニアガス発生を抑制する ANFO 爆薬の特性および ANFO 爆薬を用いたトンネル掘削における効果について検証した。

3. アンモニアガス発生を抑制に関する実験

3.1 アンモニアガスの発生

密閉状態における ANFO 爆薬の爆轟反応において

アンモニアガスは発生しないが¹⁾、現状は、装薬、爆轟時の状況、環境条件により数種類の後ガス (CO, CO₂, NO_x, NH₃ 等) を発生することが知られている。

特に、土木工事のトンネル掘削においては、ANFO 爆薬が吹付け材の主成分であるセメント (酸化カルシウム) と接触するとアルカリ性雰囲気下で分解を受け、アンモニアガスを発生する²⁾³⁾と考えられる。

3.2 アンモニアガス発生を抑制した ANFO 爆薬

近年、火薬製造各社からアンモニアガス発生を抑制する ANFO 爆薬が開発された。それらの特許、公開特許公報等を下記に示す。

A 社：米国, Patent Number : 5,578,788

Date of Patent : Nov.26,1996

B 社：日本, 公開特許公報, (特開平 11-79878)

わが国では、他に数社からアンモニアガスの発生を抑制した ANFO 爆薬が市販されている。これらの公開情報は無く、また、パンフレット等にも記されていないが上記 A, B 社の組成に近いものと考えられる。

A, B 社の資料に記されたアンモニアガス発生抑制を目的とした ANFO 爆薬の組成を Table 1 に示す。Table 1 に示すように、アンモニアガス発生を抑制するために有機酸を添加することが効果的と考えられる。

これらの資料に示された組成をもとにアンモニアガス発生を抑制した ANFO 爆薬 (以後、ANFO Added Organic Acid: ANFOOA と記す) の抑制効果と爆速を検証した。

Table 1 Composition of ANFO in the patent. (wt.%)

	Ammonium nitrate	Fuel oil	Organic Acid
A mfr.	84.0	4.0	12.0
B mfr.	80.0-95.0	2.0-8.0	1.0-15.0
C mfr.	No information		
D mfr.	No information		

3.3 基準組成

試料の基準組成の作成に当り、有機酸添加の ANFO 爆薬と従来の ANFO 爆薬⁴⁾⁵⁾の酸素バランスとの差が出来る限り小さいことを前提とした。特許・公開特許公報等に示された組成より酸素バランスを求めた結果、B 社の軽油混合比率 2.0, 3.0, 4.0%

Table 2 Composition of samples and their oxygen balance. (% , g · 100g⁻¹)

Sample	Ammonium nitrate	Organic Acid	Fuel oil	Oxygen balance
I	80.0	17.0		-7.040
II	82.5	14.5		-4.665
III	85.0	12.0	3.0	-2.290
IV	87.5	9.5		0.085
V	90.0	7.0		2.460
Reference	94.0	-	6.0	-1.780

∴ usual ANFO

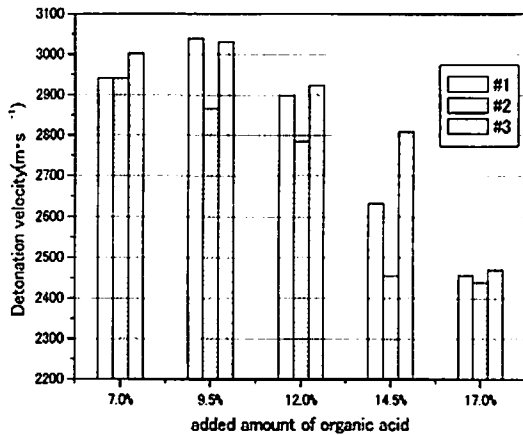


Fig.1 Results of detonation velocity test

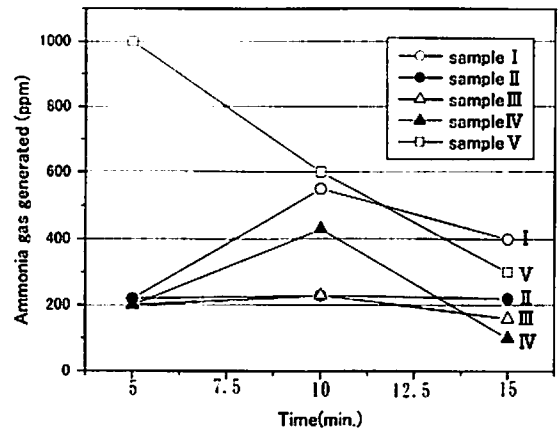


Fig.2 Time histories of ammonia gas incidence

の場合、酸素バランスは+5.41~5.51g/100gの範囲にあった。なお、A社の酸素バランスは、-5.92g/100gであった。

そこで、軽油の混合率を重量比で3.0%とし、硝酸アンモニウム、有機酸添加量の組成比率を変えた5種類の試料(Ⅰ~Ⅴ)を作成し、これらを用いて以下の検討を行い、その結果より標準組成を定めることとした。

①基準組成と酸素バランス

試料の基準組成と酸素バランスをTable 2に示す。

②感度試験

感度試験は塩ビ雨どい試験において各々3回行った。いずれも不爆であった。

③爆速

試料をA32鋼管(外径42.7mm, 肉厚3.5mm, 長さ320mm)に装填し、イオンギャップ法で各々3回爆速測定を行った(Table 3, Fig. 1)。

Fig. 1より、有機酸添加量が約9.5%程度までは爆速の顕著な低下は見られないが、12%を越えると爆速は急速に低下することが認められた。

④アンモニアガス発生試験(試験回数各1回)

アンモニア発生濃度試験を、以下の手順で行った。

- ・セメント5gと水5gをビーカー内で混合する
- ・混合したセメントペーストをガーゼの上に均等に分散させる
- ・ANFO試料10gをセメントペーストの上に均等に分散させる
- ・試料容器を試料瓶に入れアスピレーターで吸引し、発生したアンモニアガスを200mlの蒸留水中に吸着させる
- ・0.01規定の塩酸水溶液で滴定し、アンモニアガス濃度を測定する

試験結果を、Fig. 2に示す。時間5分で特異値を

示した試料Ⅴを除いて濃度が最高値に達する時間は概ね同時刻で、その後は漸次低下の傾向を示す。

3.4 標準組成の決定

Table 2, 3, および Figs. 1, 2 から、以下の事が推定される。

- ①酸素バランスは、有機酸の添加量が多いほど負の値は大きくなる。
- ②感度試験結果から、有機酸添加量が重量比7.0~17.0%の範囲では安全な爆薬であると考えられる。

Table 3 Results of detonation velocity test of ANFO with A32 steel tube.

Sample	Loading density (g·cc ⁻¹)	Detonation velocity	
		Result (m·s ⁻¹)	Average (m·s ⁻¹)
I	0.882	2460	2450
	0.887	2440	
	0.872	2470	
II	0.884	*3830	2620
	0.871	2440	
	0.858	2810	
III	0.849	2900	2860
	0.841	2780	
	0.843	2920	
IV	0.858	3040	2980
	0.841	2870	
	0.847	3030	
V	0.835	2940	2960
	0.831	2940	
	0.825	3000	

* : Not adoption in compliance with normal value.

③有機酸添加量が 9.5%程度までは爆速の顕著な低下は見られないが、添加量がこれ以上になると爆速は小さくなる傾向がみられる。

④接触約 5 分後の有機酸添加量 12.0, 14.5% のアンモニアガス発生量は、ほぼ同値で試料の中でも小さい値を示した。

以上の事から、本爆薬の要求項目である、1)アンモニアガス発生抑制効果が大い：試料Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、2)従来の ANFO 爆薬に比べ爆速の差は小さい：試料Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、3)従来の ANFO 爆薬に比べ酸素バランスの差は小さい：試料Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ等を満たす爆薬は試料Ⅲが適当と考え、これを標準組成とした。

3.4.1 爆薬

実操業に近い状態を想定し、試料Ⅲと従来の ANFO 爆薬の二つの爆薬(試料Ⅲおよび ANFO と表記)について爆速とアンモニアガス発生比較実験を再度実施した。

1) 爆速

試料を蓋付けした SGP50A 鋼管(内径 52.9mm, 肉厚 3.8mm, 長さ 3500mm)に装填し鋼管を地面に垂直に立てた状態で含水爆薬 $\phi 30 \times 100g$ をブース

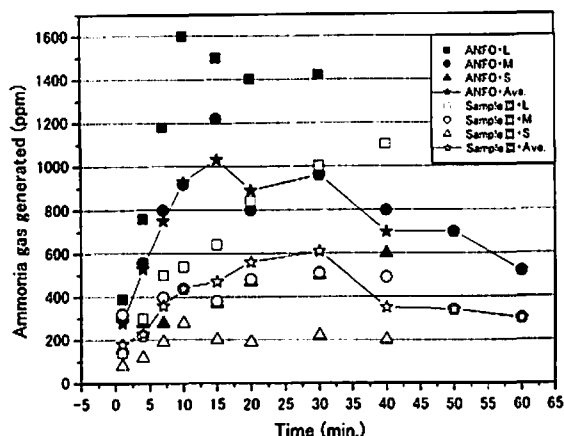


Fig.3 Time histories of ammonia gas incidence

ターとして起爆した時の爆速をイオンギャップ法で測定した(Table 4)。

2) アンモニアガス発生実験

切羽で ANFO 爆薬がこぼれ落ちて、地上のセメントと反応した時を想定して、未硬化のセメントモルタルの表面に試料を散布して発生濃度を測定する試験方法を採用した。この室内試験方法では、反応セメント散布面積を約 $9\text{ cm}^2, 8\text{ cm}^2, 7\text{ cm}^2$ の 3 種類想定し、Fig. 3 には L, M, S と表記した。なお、図中の平均は、この 3 種類の濃度の和より求めた数値である(Fig. 3)。

3.4.2 考察

1) 爆速

試料Ⅲの爆速は、従来の ANFO 爆薬と比べ約 11% 程度の減少が見られるが、実用に問題ないと考えられる。

しかし、Table 3 に示す試料Ⅲと比べ、

- ①装薬密度が小さい：装薬長が長いことから流し込みの装薬であったためと考えられる
 - ②爆速が大きい：装薬径が大きいことが起因していると考えられる
- といえる。

実操業時の機械装薬では装薬密度は大きくなることから、爆速はさらに大きくなると考えられる。

2) アンモニア発生濃度

- ①試料Ⅲのアンモニアガス発生速度は、従来の ANFO 爆薬に比べ緩やかである
- ②3 種類の各散布面積の差は小さいが、アンモニアガス発生濃度の差は大きい
- ③発生濃度は面積が大きいほど大きく、反応は早い
- ④反応は接触開始約 20~30 分後にピークを迎え、その後漸次減少する
- ⑤従来の ANFO 爆薬と試料Ⅲの各平均値時間変化反応は、発生量の大小はあるが、ほぼ同じ経緯を示す
- ⑥従来の ANFO 爆薬と試料Ⅲのピーク時の発生濃度

Table 4 Results of detonation velocity test of ANFO with SGP50A steel tube.

Sample	Loading density (g·cc ⁻¹)	Average (g·cc ⁻¹)	VOD (m·s ⁻¹)	Average (m·s ⁻¹)
ANFO	0.806	0.806	3510	3620
	0.804		3680	
	0.808		3680	
Sample III	0.802	0.800	3090	3210
	0.798		3170	
	0.799		3380	

(平均値)を比べると、その差は約45%の程度と考えられる

以上の実験結果より、①爆薬としての性能は、トンネル掘削に充分使用できる、②Fig.3に示す試料Ⅲのアンモニアガス発生経過から、セメント散布面積が小さい試料はアンモニアガスの発生が小さく、切羽でのANFO爆薬のこぼれを少なくする等の対策によりガス発生の抑制可能となる、③試料Ⅲの結果では、従来のANFOと比べてアンモニアガス発生の抑制効果が認められた、等と判断することが出来る。

以上のことから、トンネル掘進においてANFO爆薬を導入する問題点の対応策が明確となり、また試料Ⅲを標準組成としたANFO爆薬は、トンネル掘進発破に使用できると判断された。

4. 実操業における検証

ANFO爆薬を用いた数箇所のトンネル掘進においてアンモニアガス発生濃度を計測した。

4.1 計測トンネルについて

ANFO爆薬を用いて実操業を行った6箇所のトンネル工事におけるアンモニアガス発生濃度計測結果を時系列に示す(Table 5)。

K1トンネル(1990年)ならびにNトンネル(1991年)の操業時にはANFOOA爆薬は未だ市販されておらず、Oトンネルで初めてANFOOA爆薬が工事途中(1997年)より採用された。Gトンネルでは、アンモニアガス・湧水対策として従来のANFO爆薬のピース品を採用した(1999年)。最近(2002年)採用されたHおよびK2トンネルは、いずれもANFOOA爆薬を用いている。

4.2 計測結果

以下 Table 5 に従いアンモニアガス濃度の検討を行う。

①K1・Nトンネル(従来のANFO使用)

- ・装薬中に発生するアンモニアガスの濃度は高い。作業員の装薬不慣れによる吹きこぼしが起因していると考えられる
- ・発破後のアンモニアガスの濃度が低い理由として切羽への散水・局所エアブロー²⁾などによりアンモニアガスの低減・拡散が図られたと考えられる
- ・装薬前に前工程の発破によるアンモニアガスが僅かに計測される

②Oトンネル(従来のANFO: #1, 有機酸添加ANFO: #2,3使用)

- ・#1の装薬中の発生濃度は高いが、ANFOOA爆薬を使用した#2,#3では、装薬時の発生濃度は#1に比べ小さい

- ・#1と#2,3を比して発破20分後の発生濃度は、爆薬使用量の差もあり現時点では発破後の効果について判断は明確でない

- ・装薬前に前工程の発破によるアンモニアガスが僅かに計測される

③Gトンネル(カートリッジANFO使用)

- ・従来のANFO爆薬のピース品は、装薬前・中のガス発生は計測されなかった
- ・ANFO爆薬の使用量が多い#3と比べ使用量が少ない#1,#2の発生濃度は高い
- ・#3~#6の発破後の発生濃度はおおむね装薬量に比例していると考えられる
- ・ANFO爆薬使用量を小さくすることにより換気時間を短縮することが可能であった³⁾

④Hトンネル(有機酸添加ANFO使用)

- ・装薬中の発生濃度は、装薬回数の増加に伴って小さくなる。装薬時のこぼれが少ないと考えられる
- ・起爆直後の発生濃度に差異はあるが、発破10分後ではほぼ同数値である
- ・#2,3では、装薬前に前工程の発破によるアンモニアガスが僅かに計測される

4.3 結果及び考察

- ①装薬時のANFOOA爆薬の発生濃度は、従来のANFO爆薬を使用したK1,N,O(#1)トンネルと比べて約1/3~1/10と考えられる。

- ②HトンネルのANFOOA爆薬使用量は、Oトンネル(#2,3)に比べ約3倍であるが、装薬中のアンモニアガス発生濃度は、ほぼ同数値である。

- ③装薬中のアンモニアガス発生濃度は、ANFO爆薬装薬総数量の大小と関係は無いと考えられる。装薬時に吹きこぼすANFO爆薬量に大きく影響を受けると考えられる。

- ④起爆後のアンモニアガスの発生濃度は装薬量にほぼ比例すると考えられる。

- ⑤換気設備など坑内環境が整備されているトンネルでは、おおむね15分~20分程度でアンモニアガス許容濃度25ppm⁴⁾と同等もしくはそれ以下になると考えられる。

- ⑥連続してANFO爆薬を使用する土木工事のトンネルでは、起爆時の粉塵に混じったANFO爆薬の成分の一部が支保の吹付けコンクリートに付着していると考えられる。そのため、アンモニアガスが次工程の装薬開始前にも僅かであるが検知される。

Table 5 Concentration of ammonia gas from ANFO in civil tunnel works (unit : ppm, kg)

Tunnel		K 1		N	O			G						H			K2		
Cross section (m ²)		19		58	70			62						65			93		
Ventilations (m ³)		300(Vacuum)		800 (Blow)	1200 (Blow)			1000(Blow), 1500(Vacuum)						1500 (Blow), 2000(Dust catcher)			1500 (Blow)		
Number of tests		#1	#2	#1	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#1	#2	#3	#1		
Ammonia gas (ppm)	Charging	Before		5	7	4	4	4	6	—	—	—	—	—	0	4	5	—	
		10min.		70	80	75	20	4	6	—	—	—	—	—	—	20	6	6	—
		20min.		60	55	60	20	6	6	—	—	—	—	—	—	16	9	10	—
	After detonation	5min.		40	40	40	—	—	—	—	—	—	40	20	140	100	70	35	
		10min.		15	25	20	—	—	—	>260	—	—	—	20	12	50	40	60	10
		15min.		—	—	—	—	—	—	>260	52	32	45	13	8	30	30	30	—
		20min.		10	10	10	16	9	10	36	40	32	40	—	—	—	—	—	—
		25min.		—	—	—	—	—	—	36	28	—	—	35	—	—	—	—	—
		30min.		—	—	—	—	—	—	36	32	—	—	—	—	—	—	—	8
Explosive amt. (kg)	ANFO-B*		33.0	33.0	39.7	150.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	ANFO-P*		—	—	—	—	—	—	185.6	169.0	230.0	200.2	40.0	79.0	—	—	—	—	
	ANFOOA*		—	—	—	—	100.0	100.0	—	—	—	—	—	—	292.6	300.4	282.0	175.0	
	Emulsion		36.2	39.7	33.0	8.2	4.1	3.9	—	—	—	—	—	—	32.7	15.8	34.9	60.0	
	Slurry		—	—	—	—	—	—	141.25	121.85	83.9	74.65	148.65	106.8	—	—	—	—	
Sum		69.2	72.7	72.7	158.2	104.1	103.9	326.85	290.85	313.9	274.85	188.65	185.8	325.3	316.2	316.9	235.0		

* : ANFO-B→Packed ANFO. ANFO-P→Cartridge ANFO(φ 40mm). ANFOOA→Packed ANFO Added Organic Acid

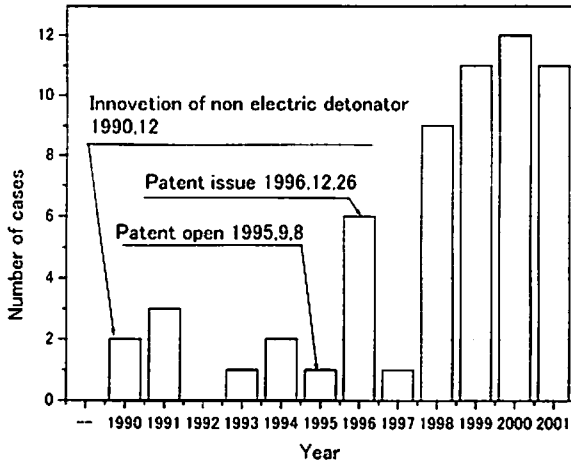


Fig. 4 The progress of the number of cases with ANFO and no electric detonator in civil tunnel works

以上のことから、ANFOOA 爆薬は装薬時のアンモニアガス発生抑制に効果があるといえる。一方、起爆後のアンモニアガス発生濃度は爆薬使用量に比例すると考えられるが、起爆後の ANFOOA 爆薬のアンモニアガス抑制効果の有無は、トンネル断面、換気設備の大小、又、切羽の湧水等切羽・坑内環境条件の差異により明確に判断できない。

5. ANFO 爆薬を用いた発破システムの効果

ANFO 爆薬を用いた発破システムの効果を以下に示す。

5. 1 採用件数の推移

ANFO 爆薬は、これまで述べた性状の他に機械装薬の際に静電気が発生する性状を持つため、この静電気の発生のため起爆に電気雷管を用いた起爆方法では、口元起爆が義務づけられている。これによるカットオフや爆轟中断による起爆効果低減等により最近までトンネル掘進発破で用いられる事は少なかった。

しかし、1973 年にこの問題に対応可能な導火管付き雷管(商品名: NONEL)が開発されて以来、諸外国ではこの雷管と ANFO 爆薬を組み合わせたシステムが普及した。

このシステムは、わが国に 1982 年に輸入され 1984 年頃から各地で試験的に用いられてきた⁹⁾。これとは別に 1982 年に導火管付き雷管と同様な電気不感な爆発性ガスを媒体とした起爆システム¹⁰⁾(商品名: Hercudet)が輸入・使用されたが、現在では製造が中止されている。

このような火薬類の開発により、わが国の土木工事における ANFO 爆薬と導火管付き雷管を組み合わせた発破システムの試験が、1990 年に前述の K1 ト

ンネルで実施された。しかし、アンモニアガス・後ガスの発生および耐水性に乏しい等の問題から、以来、採用されるトンネルは限られた。だが、1997 年に O トンネルにてアンモニアガス発生抑制を可能とした ANFOOA 爆薬が試験採用され、その効果が認められた後、トンネルにおける採用件数は増加した (Fig. 4)。

このことは、アンモニアガス発生の影響が普及を妨げてきた大きな要因のひとつであったと考えられる¹¹⁾。

さらに、爆薬の評価として Ouchterlony 等¹²⁾は ANFO 爆薬と膠質状爆薬を使用した大口径バーンカット実験の報告で ANFO 爆薬の優位性を肯定している。

5. 2 削孔数の削減

5. 2. 1 抵抗線

装薬径がある程度大きいと爆速はほぼ装薬密度に比例し、爆轟圧は爆速の二乗と装薬比重の積に比例する事等から、装薬孔の爆薬比重を大きくすることにより爆速を大きくし、最終的に爆轟圧を大きくすることが可能である等¹³⁾¹⁴⁾は広く知られている。

Persson 等¹⁵⁾は Langefors 等¹⁶⁾の明りベンチ発破の抵抗線を求める実験式よりトンネル掘削に適用可能な経験式を導いた。また、Olofsson¹⁷⁾, Johannessen¹⁸⁾

Table 6 Comparison of burden. (unit : m)

Reference	Explosive	Gelatin explosives	Packed ANFO*
Equation of Persson ¹⁵⁾		1.08~1.17*	1.44~1.55
Fig. & Map of Olofsson ¹⁷⁾		0.85***	0.95
Fig. & Map of Johannessen ¹⁸⁾		-	1.09~1.26

* : Diameter and Length 30mm×100g

** : Drilling diameter 45mm

*** : Diameter 32mm

Table 7 Comparison in number of drilling hole.

Tunnel name*	Number of drilling hole		Reduction (%)
	Gelatin explosives	Packed ANFO	
T・I	138	119	13.7
T・II	128	94	26.5
T・III	135	112	17.0
T・IV	138	113	18.1
T・V	144	105	27.1

* : New express railway and Highway

等は、北吹における数多くのトンネル掘削の実績から現場発破技術者のために利便性が高い図、表を作成した。両者等の式および図表より膠質爆薬とANFO爆薬の2種類の爆薬を用いたときの抵抗線をTable 6に示す。

Persson等の式を採用する場合、算出された数値より削孔時の口付け誤差、方向誤差、さらに踏まえ、外周孔にはルックアウト等を考慮し差し引く必要がある。一方、図表で求められる数値はこれらの要素を含んでおり、計算値は図表の値に近い数値になると考えられる。

ここで抵抗線の差異をふまえ、実操業トンネルにおける削孔数の実績を調査した。

5.2.2 削孔数調査

日本道路公団設計指針の岩種Bクラスの高速道路、新幹線などの約70~80m²の5つの土木工事トンネル(T-I~T-V)で、膠質状爆薬(人力装薬)、重袋ANFO爆薬(機械装薬)の爆薬をそれぞれ約一ヶ月間用いた。その時の平均削孔数をTable 7に示す。

5.2.3 考察

Table 7に示すANFO爆薬の削孔数から求められる断面積約70~80m²のトンネルにおける平均的抵抗線は、約76.7~92.0cmとなる。心抜き、踏まえ、外周孔などの部位を考慮するとTable 6に示すANFO爆薬の抵抗線に近い値になると考えられる。一方、下限値は過去の筆者らの膠質状爆薬を用いた場合より小さい¹⁹⁾。これは、ANFO爆薬を用いたトンネル掘削の経験が少ない数社のデータと経験が多い1社の実績の差異と考えられる。

このことは、経験が少ない事業所においても膠質状爆薬に比べANFO爆薬の削孔数を約15~20%程度低減でき、さらに経験を重ねることにより削孔数の低減率を大きくできる可能性があることを示唆するものである。

6. おわりに

有機酸を添加したANFOOA爆薬は、従来のANFO爆薬と同様の性能・取扱性を有するとともに室内実験・実操業よりアンモニアガス発生の抑止効果が確認され、トンネル掘削発破へ適用する爆薬として充分目的を果たすものと考えられる。

また、安価な爆薬の使用と削孔数の削減を可能とするANFO爆薬を用いた発破システムは、今後のトンネル掘削における急速施工、安全性の向上、作業

環境の改善、建設コストの縮減等に寄与するものと考えられる。

文 献

- 1) 下村弥太郎, 日本鉱業会誌, 78, 891, pp.14-22 (1962).
- 2) 中村喜一郎, 河野興, 火薬と保安, Vol.23, No.2, pp.30-40 (1991).
- 3) 河邊信之, 鈴木雅行, 馬場裕, 桐原章浩, 上林凡人, 土木学会第53回年次学術会講演会, pp.292-293 (1998).
- 4) (社)火薬学会, 「エネルギー物質ハンドブック」, pp.93-94 (1993), 共立出版.
- 5) 日本工業規格, K4801.
- 6) 前記2)に同じ.
- 7) 鈴木雅行, 河邊信之, 野中博樹, 若宮茜, 土木学会第55回年次学術会講演会, VI-68, pp.136-137 (2000).
- 8) 許容濃度等の勧告I. 許容濃度, 日本産業衛生学会, Vol.26, p.339-344 (1984).
- 9) (社)火薬学会, 「現場技術者のための発破工学ハンドブック」, p.5 (2001), 共立出版.
- 10) (社)工業火薬協会編, 「新・発破ハンドブック」, pp.467-477 (1989), 山海堂.
- 11) 伊藤光雄, 星野孝則, 合飲垣誠司, 河野興, 火薬と保安, Vol.32, No.1, pp.21-26 (2000).
- 12) F. Ouchterlony, 加納米二, 南出英男, 中川浩二, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.119-130 (1999.6).
- 13) 前記1)に同じ.
- 14) 須藤秀治, 大久保正八郎, 田中一三, 「火薬と発破」, p.31 (1971), オーム社.
- 15) P. Persson and R. Holmberg and J. Lee, "Rock Blasting and Explosives Engineering", pp.218~231 (1994), CRC Press.
- 16) U. Langefors and B. Kihlstrom, "The Modern Technique of Rock Blasting", (1978), Almqvist & Wiksell Forlag AB.
- 17) S. O. Olofsson, "Applied Explosive Technology", p.143 (1990), Nora Boktryckeri AB.
- 18) O. Johannessen, University of Trondheim the Norwegian Institute of Technology-Department of Building and Construction Engineering, 2A-95 TUNNELLING Blast Design, p.38 (1995).
- 19) 河野興, 姿沢俊雄, 中川浩二, 土木学会論文集, No.700/VI-54, pp.95-109 (2002).

Characteristics of ammonia gas generation controlled ANFO explosive and blasting system with ANFO explosive

Ko Kawano^{*}, Masayuki Suzuki^{**}, Masato Shinji^{***}, and Koji Nakagawa^{****}

Ammonia gas produced by ammonium nitrate fuel oil (ANFO) explosive during tunnel excavation was a big issue for making a decision to adopt this ANFO explosive. In order to clarify the issue, we verified the effectiveness of organic acid added ANFO (ANFOOA) explosive developed to control ammonia gas generation, and blasting system with ANFO explosive.

The concentration of ammonia gas generation from ANFOOA explosive decreased to approximately one third to one tenth compared with the usual ANFO explosive. Since the ANFOOA explosive came into the market, ANFO explosive users have increased from 16 sites for 8 years to 43 sites for 4 years. Besides, it has been proved that blasting system with ANFO explosive is able to reduce the number of drilling holes approximately 15% to 20% in comparison with using Gelatin explosives.

^{*}Dyno Nobel Japan Co., LTD, 6-3, Nihonbashi-Kobunacho, Chuo-ku, Tokyo 103-0024, JAPAN

^{**}Hazama CO., LTD, 2-5-8 Kitaoyama Minato-ku, Tokyo 107-8658, JAPAN

^{***}Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube Yamaguchi 755-8611, JAPAN

^{****}Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube Yamaguchi 755-8611, JAPAN)
