

ANFO爆薬を用いた合理的発破技術の開発とその適用

THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF RATIONAL BLASTING TECHIQUE BY ANFO EXPLOSIVE

鈴木雅行¹⁾・河邊信之¹⁾・馬場 裕²⁾・上林凡人²⁾・桐原章浩²⁾

Masayuki SUZUKI, Nobuyuki KAWABE, Yutaka BABA, Hirohito KANBAYASI, Akihiro KIRIHARA

Under present conditions that the construction cost by the public investment has been reduced, blasting by ANFO explosive is an effective way for tunnel excavation, because it is low in price. It is difficult to use ANFO explosive in tunneling because it contains such problems as blast fume, appearance of ammonia gas in charging and poor water resistance properties. To solve this problem, the adaptability of ANFO explosive in tunnel construction is confirmed by the blasting experiment using the piece ANFO explosive protected by plastic tubes and the coating ANFO explosive mixed with acid. As a result, it is found out that blasting by ANFO explosive is fully effective for tunnel construction with improvement of the above.

Keywords : blasting excavation, piece ANFO explosive, coating ANFO explosive, ammonia gas, blast fume

1. まえがき

公共投資の建設コスト削減のニーズが高まるなか、山岳トンネルにおける掘削費の低減は重要課題の一つである。その中で、ANFO爆薬は日本国内の発破方式で施工されるトンネル現場で標準的に用いられている含水爆薬に比べ材料単価が安価であることから、その適用はトンネル掘削費のコスト削減の観点から有用である。例えば、海外においてはANFO爆薬が最も多く使用されており、山岳トンネルにおける標準的な爆薬になりつつある。しかし、山岳トンネルにおけるANFO爆薬の適用は、発破後の後ガス(NO_x , CO_x)が多いこと、水溶性であることから湧水に溶け爆薬としての機能を失うこと、装薬時に吹付けコンクリートのリバウンドと反応してアンモニアガス(NH_3)が発生すること等、適用にあたっては問題が多い。したがって、日本の複雑な地質構造に起因する多湧水地山での掘削、また支保工には吹付けコンクリートが多用されている現状のなかで、日本のトンネルにおいては上記の不具合が発生し適用が難しいとされてきた。

しかし、今回上記の不具合を解決するため、酸でANFO爆薬自体をコーティングし化学的に吹付けコンクリートとの反応を防止したコーティングANFO爆薬、ANFO爆薬をフィルムパックし湧水や吹付けコンクリートのリバウンドとの接触を防止したピースANFO爆薬の2種類のANFO爆薬の改良を実施し、実際のトンネル現場での適用を試みた。

本報告では、上記2種類の改良ANFO爆薬の概要および現場実験により得られた山岳トンネルへの適用性について報告するものである。

1) 正会員 機関組 土木本部トンネル統括部

2) 機関組 広島支店

2. ANFO爆薬を用いた合理的発破技術の概要

1) ANFO爆薬の概要

ANFO爆薬と含水爆薬の比較を表－1に示す。ANFO爆薬を適用する場合の問題点を以下に示す。

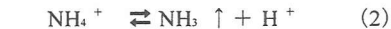
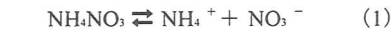
- ①ANFO爆薬の発破後の後ガス量は含水爆薬に比べて多く(10 倍程度)、換気時間が長時間必要となるか、換気設備を大きくする必要がある。
- ②ANFO爆薬は水溶性であることからトンネル湧水に溶解爆薬としての機能を失うため、不発等の原因になり危険である。
- ③現状のANFO爆薬の装填方法はANFO爆薬専用装填機による孔内へのエア吹込み方式(図－1, 写真－1 参照)が一般的であるが、装填中に孔からこぼれ落ちたANFO爆薬と吹付けコンクリートのリバウンド中のセメント分が化学反応してアンモニアガスを発生し作業環境を悪化させる。

2) コーティングANFO爆薬

従来の装填方法の場合、装薬孔内から吹きこぼれたANFO爆薬の硝酸アンモニウムと吹付けコンクリート中のセメント成分が反応し、アンモニアが発生する。

以下にアンモニア生成過程を示す。

ANFO爆薬中の硝酸アンモニウムの反応



セメント成分中の酸化カルシウムの反応



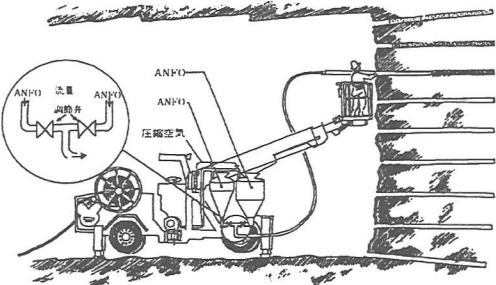
したがって、硝酸アンモニウムと酸化カルシウムが接触すると強アルカリである水酸化カルシウムの影響を受け、上記(2)式の平衡が右側に移行しアンモニアガスが発生する。したがって、今回ANFO爆薬自体に酸を10%程度混入し、この反応の抑制を目的としたANFO爆薬自体の改良を実施した(以下に、この改良型ANFO爆薬をコーティングANFO爆薬と称する)。

3) ピースANFO爆薬

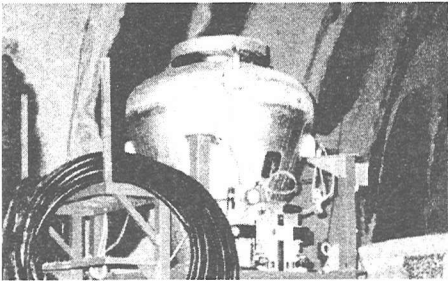
ピースANFO爆薬は、ANFO爆薬と湧水や吹付けコンクリートとの接触を防ぐためにANFO爆薬をフィルムパックしたもので、耐水性の向上、アンモニア発生抑制を目的としている。形状はトンネル掘削への適応性を考慮して薬口径φ40mm、重量200gに改良した。また、装薬方法は通常の装薬方法と同じく人力装填となる。

表－1 爆薬比較表

爆 薬 種 類		含水爆薬	ANFO爆薬
状 態	膠 質	顆 粒	
比 重	1.05～1.16	0.8～0.9	
爆 速 (m/s)	5,200～5,800	約3,000	
後ガス	CO (m ³ /kg)	2.0～5.0×10 ⁻³	20～30×10 ⁻³
	NO _x (m ³ /kg)	0.5～1.5×10 ⁻³	5.0～20×10 ⁻³
水 溶 性	不 溶 性	水 溶 性	
単 価	1	0.35	



図－1 装填機によるANFO爆薬装填方法¹⁾



写真－1 ANFO 爆薬装填機

3. 合理的発破技術の適用試験

1) トンネル概要

現場試験を行ったトンネルは、中国地方の道路2車線トンネル(掘削断面積 70 m²)である。地質は広島型花崗岩が主体であり、非常に硬質である。試験を実施した箇所は地山等級はB級と良好であり、湧水は部分的に見られる程度である。試験施工した位置は坑口から約 700 m 付近であり、発破後の後ガス濃度に影響を及ぼす現場の換気条件は 1000 m³/min 送風機による送込み方式と 1500 m³/min の送風機による吸出し方式を併用している。必要換気量の算定にあたっては、吹付けコンクリート施工時の必要換気量が最も多く、発破後(含水爆薬使用、15 分間換気)の後ガスに対する必要換気量の約 4 倍となっている。

2) 試験概要

上記の①コーティング ANFO 爆薬、②ピース ANFO 爆薬、および比較のための③標準 ANFO 爆薬、④含水爆薬について試験発破を実施し、山岳トンネルでの適用性を確認した。以下に、ANFO 爆薬適用性評価に関する試験項目を示す。

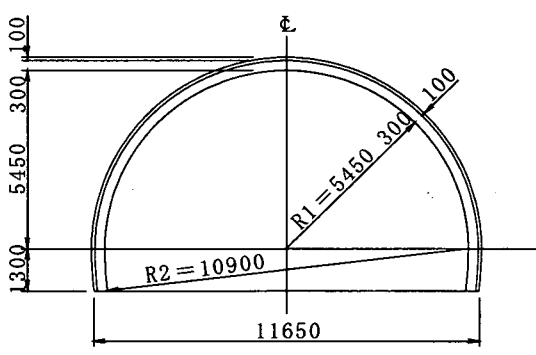


図-2 実験トンネル断面図

①装薬時のアンモニア濃度

装薬時に ANFO 爆薬と吹付けコンクリートが接触して反応するアンモニア濃度を切羽近傍にて検知した。

②発破後の後ガス濃度 (CO, NO_x)

発破後の人体に影響を及ぼす後ガスとして、CO および NO_x の後ガス量を発破後 1 分後、5 分後、10 分後に切羽近傍で検知し、発破後の後ガス量の経時変化を測定した。許容濃度としては、CO については 50 ppm²⁾、NO_x については 25ppm³⁾とし、発破後 10 分経過後も許容濃度以下に至らない場合については測定を継続した。

③湧水に対する適用性

部分的に湧水が認められる装薬孔、および削孔水等が滞留している踏まえ孔にて湧水に対する適応性を確認した。ANFO 爆薬においては水に溶解粒体と認められなくなった場合、爆薬としての機能を失うため、目視により適用性を判断した。

4. 合理的発破技術の試験結果

1) 装薬時のアンモニア濃度測定結果

図-3 に装薬時の切羽近傍でのアンモニア濃度を示す。機械装填による吹込み方式での装薬作業となる標準 ANFO 爆薬は、80ppm と非常に高いが、コーティング ANFO 爆薬は約 1/4 程度までアンモニア発生濃度を抑制することが可能になる。一方、人力装填となるピース ANFO 爆薬に関しては、装薬時にフィルムパックが破れ ANFO 爆薬が装薬孔外に排出しない限りアンモニアが発生しないため、試

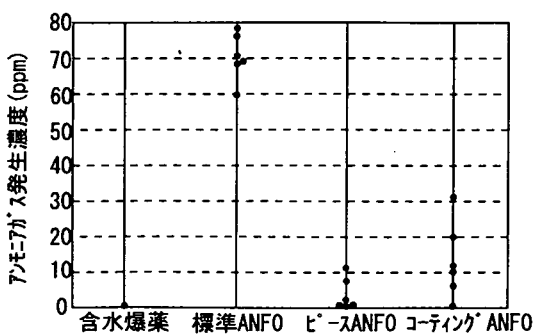


図-3 装薬時のアンモニア発生濃度

験施工においてもほとんど発生しておらず、含水爆薬と同程度の施工性を確保している。

2) 発破後の後ガス濃度測定結果(CO, NO_x)

図-4に発破後の後ガス発生濃度の経時変化を示す。コーティングANF₂O爆薬、フィルムパックANF₂O爆薬、標準ANF₂O爆薬とも発生する後ガス量についてはほぼ同一のため、図中にはANF₂O爆薬として示した。これによると、発破後5分程度で含水爆薬はCO, NO_xともほぼ許容濃度以下となっているが、ANF₂O爆薬については発生量が多く、許容濃度を満足していない。しかし、時間の経過とともに濃度の希釈が進んでおり、発破後10分程度ではほぼ許容濃度以下となっている。したがって、ANF₂O爆薬を採用する場合、含水爆薬に比べ多少換気時間がかかるが、大きくトンネル施工サイクルに影響を及ぼさないことがわかった。

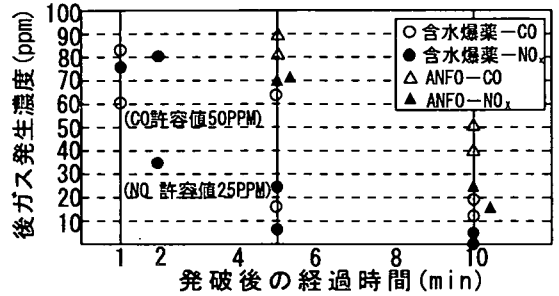


図-4 後ガス発生濃度測定結果

3) 湧水に対する適用性

吹込み方式によるコーティングANF₂O爆薬、標準ANF₂O爆薬の湧水孔への装填は、目視観察によりANF₂O爆薬が湧水に溶解爆薬としての機能を確保できないことがわかった。一方、ピースANF₂O爆薬については、ANF₂O爆薬自体をフィルムでパックしているため多少の湧水孔、および湧水が滞留している踏まえ孔についても適用可能であった。ただし、フィルムパックが破損した場合については湧水に溶解爆薬としての機能を失うため慎重な装薬作業が求められており、地山状況が悪い場合には孔荒れが生じ適用が難しい状況であった。

5. ANF₂O爆薬適用に関する考察

1) 山岳トンネルへの適用性

改良型ANF₂O爆薬の山岳トンネルへの適用性について、その特徴を以下に示す。

- ①装薬時のアンモニア発生に対しては、ピースANF₂O爆薬の場合ほとんどアンモニアガスが発生しておらず、吹込み方式になるコーティングANF₂O爆薬も標準ANF₂O爆薬に比べアンモニアガス発生量が1/4程度まで抑制できることから、装薬時の作業環境の大幅な改善が見込める。
- ②ANF₂O爆薬の後ガス発生量は含水爆薬に比べ多いものの、通常の80m²程度の大断面トンネルの場合、発破後の後ガス量に対する換気量に余裕があることから、ANF₂O爆薬を使用しても多少換気時間を要するが大きくトンネル掘削サイクルに影響を及ぼさない。
- ③吹込み方式による標準ANF₂O爆薬の場合、湧水に対しての適用性に難があるが、ピースANF₂O爆薬はフィルムパックすることにより多少の湧水に対しても適用可能である。

2) ANF₂O爆薬使用による削孔数減少効果

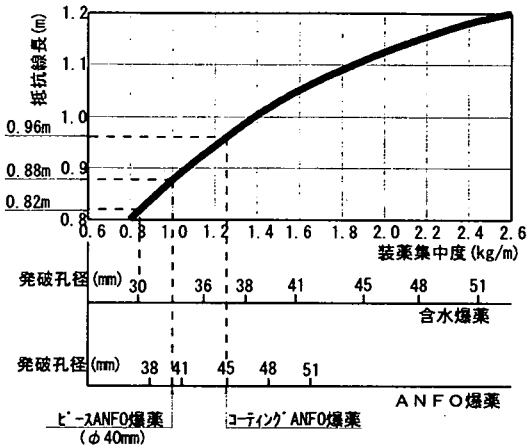
トンネル掘削における合理的施工への試みとして、ANF₂O爆薬を採用した場合の削孔数の減少効果に着目した。

ANF₂O爆薬は爆速が約3,000m/sと小さく含水爆薬と比べ同量であれば破壊力は少ないものの、ピースANF₂O爆薬については含水爆薬の通常の薬径がφ30mmあるのに対してφ40mmと大口径であり、吹込み方式のコーティングANF₂O爆薬についても装薬孔(φ45mm)に密充填できることから、含水爆薬に比べ装薬集中度(単位m当たりの装薬量)が大きくなり装薬孔1孔あたりの破壊力が大きくなる。例えば、図-5で報告されているANF₂O爆薬と含水爆薬に対する口径別の抵抗線長からはφ30mmの含水爆薬の抵抗線長が

0.82 mに対してピースANFO爆薬（φ 40mm）の抵抗線長が 0.88 m（抵抗線長 7 % 増加），吹込み方式によるANFO爆薬の抵抗線長が 0.96 m（抵抗線長 17 % 増加）となり、削孔数が減少する。すなわち、削孔数減少により削孔，装薬時間が減少し、トンネル掘削サイクルが短縮される可能性がある。

表－2 に今回ANFO爆薬の適用性試験を実施した道路2車線クラスの大断面トンネルの他、掘削断面積7 m²の小断面トンネル，掘削断面積30 m²の中断面トンネル，掘削断面積56 m²の大断面トンネルの上半断面にてANFO爆薬を適用し得られた削孔数の減少効果について示す。

これによると、掘削断面積が小さい小断面トンネルにおいてはANFO爆薬による削孔数減少効果が見られないものの、掘削断面積が30m²以上のトンネルでANFO爆薬による削孔数減少効果が現れており、ANFO爆薬の採用がトンネル掘削サイクル短縮に寄与する可能性があることがわかった。



図－5 ANFO爆薬と含水爆薬に対する異なる
口径と抵抗線長の関係”

表－2 改良型ANFO爆薬による削孔数減少効果

トンネル名	主要岩種	岩盤等級	掘削断面積 (m ²)	各種爆薬による1発破当たり削孔数 (孔／1発破)		
				①含水爆薬	②'E'-ANFO爆薬	③コーティングANFO爆薬
Aトンネル	花崗岩	B	7	37孔 (－)	37孔 (▲0%)	－
Bトンネル	砂岩、粘板岩	C I	30	75孔 (－)	67孔 (▲10%減)	64孔 (▲15%減)
Cトンネル	砂岩	D I	56 (上半断面)	79孔 (－)	75孔 (▲5%減)	－
Dトンネル	花崗岩	B	70	126孔 (－)	120孔 (▲5%減)	115孔 (▲9%減)

()は含水爆薬を使用した場合の削孔数と比較した減少割合

6. おわりに

今回、ANFO爆薬を山岳トンネルに適用した場合の不具合を解決するため、ANFO爆薬を改良したことにより、日本国内のトンネル現場においても適用範囲を拡げることができたと考える。また、含水爆薬に代えてANFO爆薬を採用することにより、削孔数減少に伴う掘削サイクル減少が期待できることがわかった。ただし、今回の適用が試験段階であったため作業員の不慣れ等から施工サイクル時間の短縮効果、コーティングANFO爆薬の機械装填による施工サイクル短縮効果等を十分把握することができなかった。今後、適用現場を増やすことによりトンネルの急速施工を見据えた合理的発破技術の確立を図っていく予定である。

最後に、今回トンネル現場への適用実験にあたって、御協力を頂いた旭化成(株)，日本化薬(株)，ダイノノーベルジャパン(株)の各火薬メーカーの他、実験に協力して頂いた各トンネル現場の関係各位に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) スティグ オロフソン原著：最新 発破技術ハンドブック，山海堂
- 2) ずい道工事等における換気技術指針（設計及び保守管理），建設業労働災害防止協会
- 3) 鈴木雅行，河邊信之，馬場 裕，上林 凡人，桐原章浩：ANFOを用いた硬岩トンネルの合理的発破技術の開発，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集VI-146 pp292～293，1998.10