

ANFO爆薬とNONELを用いたトンネル発破工法

Blasting with ANFO and NONEL in Tunnelling

佐藤工業（株） 加納米二*
石田義昭*
鈴木仁志*
○旦暮利隆*

By Yoneji Kanou, Yoshiaki Isida, Hitoshi Suzuki, Toshitaka Tanbo

山岳トンネルの掘削方法は、TBMや自由断面掘削機などの機械掘削工法と発破工法の二つに大別される。このうち、発破工法での一連の作業における削孔作業、ずり出し作業などのほとんどの作業が機械化されていく中で、火薬の装填作業だけが人力で行われているのが現状で、最も時間と労力を有する作業となっている。

本開発は、ばら物であるANFO爆薬をエアーチャージャーにより空気装填し、静電気による漏電防止対策として非電気式の「NONEL」雷管を組み合わせたシステムであり、トンネル発破装填作業の高効率自動化を図っている。

また本工法は、①長孔発破に適している ②ずりの破砕粒度が細く、堆積距離が短い ③結線・装薬時間が短い ④安全性が高い などの特徴をもっている。

【キーワード】山岳トンネル、自動化、省力化、新技術開発

1. はじめに

山岳トンネルの掘削方法は、機械掘削工法と発破工法の2つに大別される。

機械掘削工法の発達には目ざましいものがあり、ロードヘッダやTBMなど様々な地質に対する機械が開発・研究され、省力化、自動化が図られてきた。しかし、機械掘削は対応可能な地質範囲に限界があり、地質精査が十分行なわれ、機械掘削が全ての地質で対応可能と考えられる以外は、機械掘削のみで行われることはなく、ほとんどの場合は発破工法との併用となっている。このため、環境対策などの特殊な事情がない限り、地質が複雑な我国でのトンネル掘削は発破工法が主流となっている。

このような状況を踏まえると、発破工法の省力化、自動化および高速掘進は、山岳トンネルの施工において最も重要な課題であると考えられる。

発破工法は油圧式削岩機、ずり出し機械などの開発により、省力化、自動化が図られてきているが、装薬作業や結線作業のような火薬を取扱う危険な作業は、現在人力で行なわれており、火薬取扱い作業は長い間自動化されなかった。

本稿で報告する「ANFO+NONELを用いたトンネル掘削工法」は、Nitro Nobel社が開発した非電気式雷管NONELを用い、粒状であるANFO爆薬を空気装填するもので、装薬時間の短縮はもちろん、安全性を飛躍的に向上させた発破システムである。また、本システムは、装填時間短縮によってサイクル数を増やす、長孔発破に有利であるパラレルカットとANFO爆薬を採用することにより一発破進行長を伸ばす方法を基本とし高速掘進を確保している。

今まで当社で行われたNONEL+ANFOによる発破の施工実績、実験結果などを以下に述べ、本工法の特徴、問題点に関して考察する。

* 本社土木本部技術部

2. NONEL 雷管

NONEL は、スウェーデンの Nitro Nobel 社が開発した新しいタイプの非電気式起爆法であり、従来の電気雷管の長所を保ちつつ、すべての短所をなくしたシステムである。

NONEL 雷管は電気雷管と同じ機能を持っているが、脚線と点火玉が衝撃波が伝達する NONEL チューブに置き換えられていることが大きな特徴である。

NONEL チューブは、外径 3.0mm の細い中空プラスチック内壁に、アルミ粉入りの HMX を薄く塗布したもので、チューブの一端より起爆すると、約 2000m/S の速度で爆轟が管内を伝達する。薬量が少ないので、プラスチックは衝撃波で傷まず、交差したチューブにも、接した爆薬にもなんら影響を与えない。

NONEL 雷管の特徴は以下の通りである。



写真-1 NONEL チューブの断面

NONEL 雷管の特徴

- (a) 電気（雷・静電気・漏洩電流）に対して安全である。
- (b) チューブは丈夫であり、爆薬の自動装填に適する。空気自動装填中に発生する静電気に対しても安全である。
- (c) チューブは良く見えるので電気雷管に比べ結線漏れが出にくい。
- (d) NONEL GT/T はトンネル発破に最適の段差で設計されたトンネル専用の NONEL 雷管で、大断面の平行発破にも無理のない段数の展開ができる。（最大 25 段）
- (e) バンチコネクターで束ねて結線するので、結線作業は迅速簡単である。
- (f) 現在は国内生産されておらず、輸入品である。



1. アルミニウム管体
2. 添装薬（8号雷管に相当）
3. 起爆薬（火に敏感な爆薬）
4. 延時装置
5. ゴム性の塞栓
6. NONEL チューブ

図-1 NONEL 雷管

3. ANFO 爆薬

ANFO 爆薬はピンク色の粒状の爆薬で、わが国では 1964 年ごろから使用され始めている。この爆薬は安全性が高く、取扱いが簡単で、値段が安いので、現在の明かり作業では最も多く消費されている。

トンネル発破でもこのような特徴を持つ ANFO 爆薬を使用することが望まれるが、トンネル発破では後ガスの発生量が特に問題となるため、後ガスの少ないエマルジョン爆薬や 2 号糞を用いるのが一般的で、後ガスの多い ANFO 爆薬を用いることはなかった。

最近の換気設備は、トンネル機械の大型化に伴って増加した有毒ガス、粉じんを換気するために従来のものよりもかなり大容量となり、待避時間を確実に確保すれば、ANFO 爆薬が適用できる環境となってきている。

表-1 爆薬種類別の有毒ガス発生量

爆薬の種類	CO (ℓ/kg)	NO _x (ℓ/kg)
2 号 糞	6.0～8.0	0.5～1.5
エマルジョン	2.0～5.0	0.5～1.0
ANFO	20.0～30.0	5.0～20.0

ANFO 爆薬の特徴を以下に述べる。

ANFO 爆薬の特徴

- (a) 装填中に吹付コンクリートと反応してアンモニアガスを発生する。
- (b) 水孔では使用できない。
- (c) 装填中に静電気を発生するため、孔尻に装填する親ダイには電気雷管を使用できない。

- (d) 比重は0.78～0.85であるが、自動装填機によって装填された比重は最大1.1となる。(1.2を越えると死圧現象が生じ起爆も殉爆もしない。)
- (e) 6号雷管で起爆しない爆薬であり、発破の際には適当な起爆薬が必要である。

4. ANFO爆薬による平行芯抜き実験

平行芯抜き技術は Langefors などにより詳しく報告されているが、これはエマルジョン爆薬や2号梗などの高爆速爆薬を用いた場合であり、ANFO爆薬のような低爆速爆薬を用いた場合の報告はされていない。ANFO+NONELを用いた平行カットによる長孔発破技術確立のためには、まだ不明確な点が多いANFO爆薬による平行芯抜きの発破効果を明らかにしておく必要がある。

本実験は、埼玉県秩父郡武甲鉱山において平行カットの芯抜き部分に関して行なった発破実験である。ANFO爆薬とエマルジョン爆薬の2種類の爆薬の発破が、抵抗線長や装薬集中度(kg/m)などを変えた場合に発破にどのように影響を与えるかを検討した。

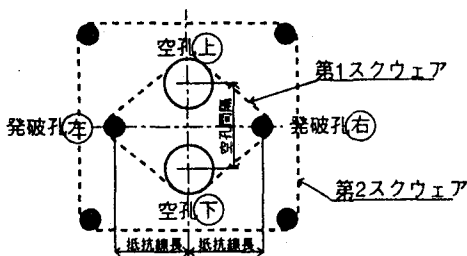


図-2 削孔形状

(1) 実験結果

- ① ANFO爆薬はエマルジョン爆薬よりも長い抵抗線長での発破が可能である。(図-3)
- ② ANFO爆薬はエマルジョン爆薬よりも削孔精度、岩盤の状態の影響を受けにくい。(図-3)
- ③ ANFO爆薬は適正空気圧で装薬さえすれば焼結現象を起こさない。
- ④ 両爆薬とも4mの長孔発破は可能である。

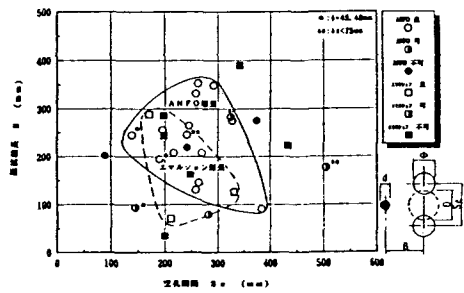


図-3 空孔間隔と抵抗線長の関係

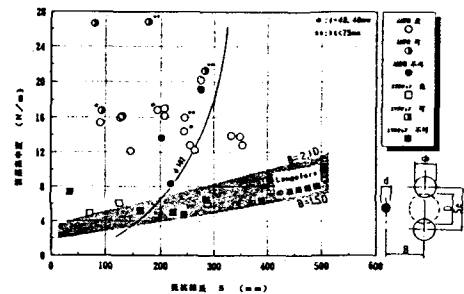


図-4 抵抗線長と装薬集中度の関係

(2) 考察

ANFO爆薬とエマルジョン爆薬の爆力は、同じ薬量ではANFO爆薬の方が小さく、エマルジョン爆薬の80%程度の爆力であるが、同じ発破孔へ装填した場合にはANFO爆薬の方が大きくなり、エマルジョン爆薬の150%以上の爆力となる。これは、粒状のANFO爆薬がエアージャージャーで発破孔全体に密に装填されるのに対し、薬包タイプのエマルジョン爆薬は込め棒で装填されて弱装薬となるからである。このために①②の様な結果になった。

また、ANFO爆薬の方がエマルジョンに比べ過装薬であるにも関わらず焼結しないのは、ANFO爆薬は緩やかに起爆していく低爆速爆薬であるためである。

5. 施工実績

当社でNONEL+ANFOでの発破工法を採用した施工現場は、現在施工中の現場を入れて6件ある。これらの現場の特徴としては、①地質が中硬岩～硬岩で湧水が比較的少ない ②18～92m²と幅広い掘削断面積であるということが挙げられる。以下にそれらの現場で行なわれたNONEL+ANFOを用いた発破の施工手順、施工上での問題点や特徴に関して述べる。

(1) 施工手順

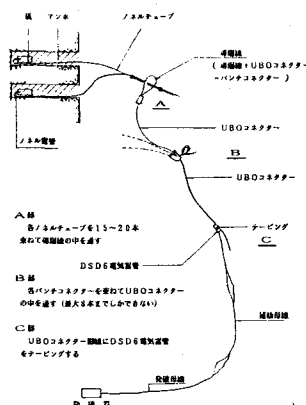
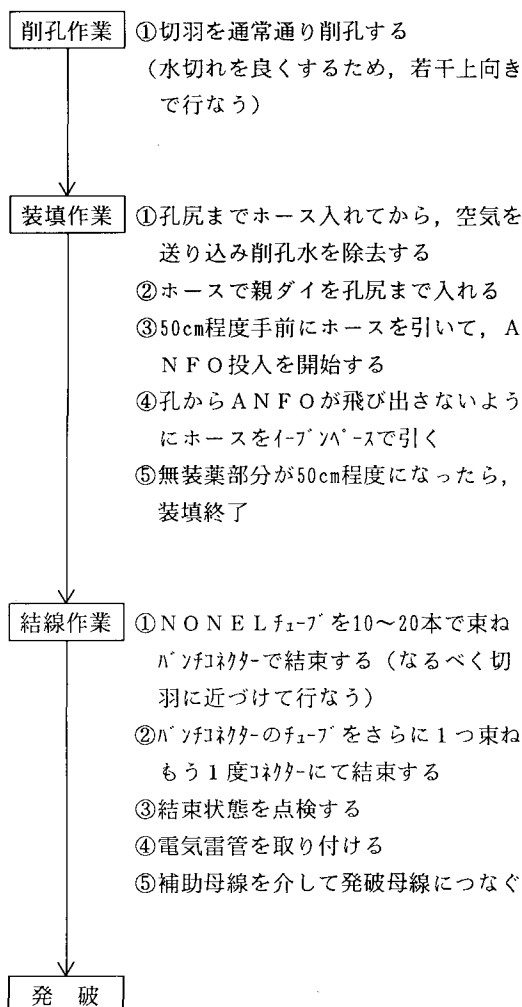


図-5 結線システム

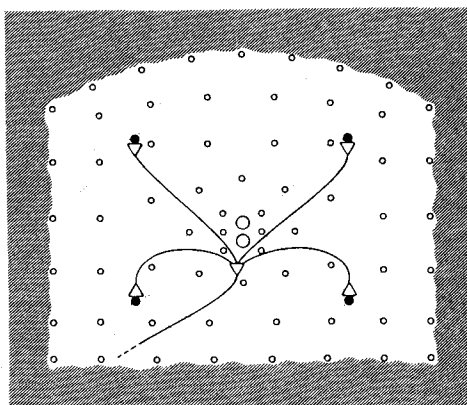


図-6 結線状況図

(2) 芯抜き法、爆薬が発破へ与える影響

北陸新幹線五里ヶ峯トンネル上田工区では、ANFO+NONELによる発破工法の導入を容易に行なうために、2号掘+電気雷管での平行カットの発破を一定期間行なっていて、平行カットによる発破を習熟してから、ANFO+NONEL(平行カット)の発破を実施した。

このように段階的に行なわれた当現場の発破を比較することで、ANFO+NONELによる発破の内、平行カットの芯抜き方法が影響を与えている部分と、ANFO爆薬が影響を与えている部分が明らかとなった。

表-2 芯抜き法、爆薬が発破へ与える影響

	当初	改良1	改良2
芯抜き	Vカット	H ⁺ リムカット	H ⁺ リムカット
爆薬	2号楕	2号楕	ANFO
雷管	電気雷管	電気雷管	NONEL
削孔数	150	120	115
削孔距離	3 m	3 m	4 m
進行率	75 %	85 %	95 %
サイクル数	3 サイクル	3.5 サイクル	2.5 サイクル
日進	7 m	9 m	10 m

(a) パラレルカットによる影響

現在の削孔機械にはすべて平行保持装置が付いているため、パラレルカットでの削孔の方が施工効率が低い。また、パラレルカットは孔尻部に密に爆薬を装填して効果的な爆力が得られる。

このような理由から、削孔数低減、進行率向上、サイクル数増加して、結果的に日進が増加した。

(b) ANFO爆薬の影響

ANFO爆薬は空気装填による密装填で爆力が増加した。これによりANFO爆薬によるパラレルカットでは4mもの長孔発破が可能となった。ANFO爆薬によるパラレルカットが2号楕より長孔発破に適していることが分かる。

また、4mの長孔発破によって、ずり出しにかかる時間が増加した。これはずり量が増加したためであって、作業性はずりの破砕粒度が細かくなって、堆積距離が短くなったため向上している。

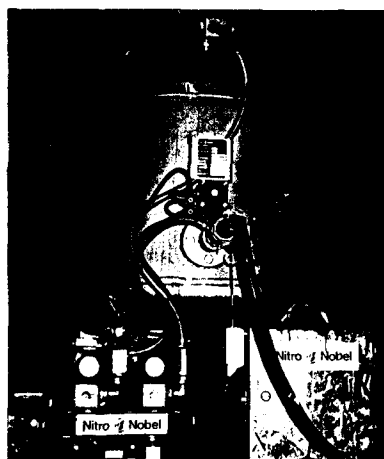


写真-2 ANFOチャージャー

(3) 後ガスに関して

ANFO爆薬の使用上最も問題となっている後ガスに関しては、北海道河西郡中札内村南札内の札内ダム切り替え2号トンネル工事でのANFO+NONELの試験施工において、後ガス発生量を測定したのでここで報告する。

測定は同じ換気条件で、2号楕を主とする爆薬で1回、ANFOを主とする爆薬で3回行った。北川式検知管(100ml)でCO、NO_xを、測定位置30m、50m、70mで、発破後5分、10分、15分に測定している。

換気は軟管吹き込み式で風管径は1100mm、扇風機は軸流37kw×2、700～800m³/分である。

測定結果のうち測定位置30mでのCO、NO_x濃度を、図-6、図-7に示す。

CO濃度は、15分以内に許容値である50ppmに達していない。ANFO爆薬を用いたときの換気基準には、欧米の坑内流速を18m/分以上にするという基準を用いるのが適当であるのだが、この坑内流速は13.7m/分であるので換気量を上げる必要がある。

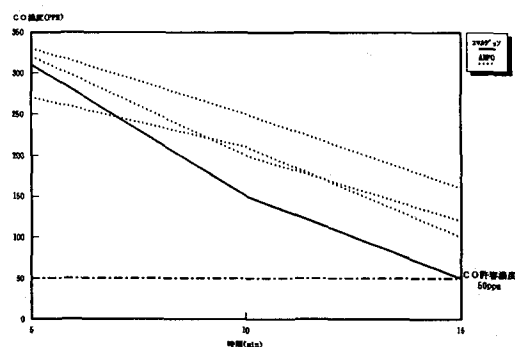


図-7 測定位置30mでのCO濃度

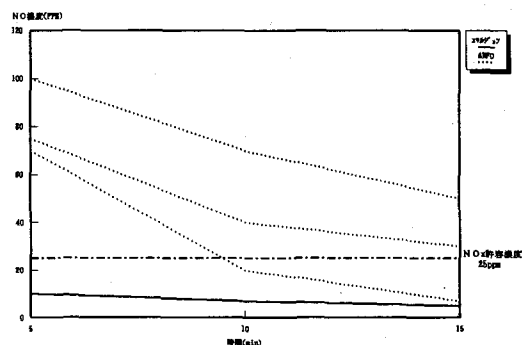


図-8 測定位置30mでのNO_x濃度

定点での観測濃度がガス発生量に比例するとは限らないが、参考値にはなると思われるので、発破5分後の切羽より30m位置での観測値を検討対象として、爆薬1kgのガス含有量を求めた。

表-3 後ガス濃度、爆薬1kgあたり濃度(p.p.m)

爆 薬 使用量		CO	NO _x	計
2号榎	全体含有量	310	10	320
195 kg	1kg当り含有量	1.59	0.05	1.64
ANF01	全体含有量	320	70	390
224 kg	1kg当り含有量	1.43	0.32	1.74
ANF02	全体含有量	330	75	405
292 kg	1kg当り含有量	1.13	0.26	1.38
ANF03	全体含有量	270	100	370
306 kg	1kg当り含有量	0.88	0.32	1.20

- ① CO観測値は270ppm～330ppmであり、爆薬1kg当たりの発生量はANFOの比率が高くなるほど減少する。これはANFOからの有毒ガス発生量の比率が最も多い表-1とは全く整合性がない。
- ② ANFOのNO_x観測値は2号榎の7～10倍であり、爆薬1kgあたりの発生量はほぼ一定の値を示している。

発破の後ガスは爆破条件に支配されると言われているが、今回の測定ではCOの発生量が特にその影響を受けたようで、空気装填機で密装填されたANFOは、発破孔に並べて装填された2号榎に比べ、爆轟条件が良好であったため、爆薬1kgあたりのCO発生量が少なかったと考えられる。

5. おわりに

新しいトンネル発破工法として開発されたANFO+NONELによる空気装填システムは、硬岩地質のトンネル現場を中心に、適用現場の件数も年々増加しているが、ANFO爆薬には次のような問題点が残っている。

- ①装填作業中に吹付コンクリートと反応して発生するアンモニアガスに対する対処法
- ②水孔用の耐水性ANFOの開発
- ③外周孔用のスラスタスライディングANFOの開発



写真-3 NONEL+ANFO発破の瞬間

【参考文献】

- 1)中村喜一郎，河野 興：非電気式雷管(NONEL)+ANFOを使用したトンネル掘削，火薬と保安
- 2)南出英男，加納米二：平行心抜き発破実験に関する実験結果とその考察について，土木学会
- 3)南出英男，泉 登：発破パターンの変更による低公害化と施工効率，土木学会