

坑道掘進に適した低粘性爆薬の開発・実証実験

DEVELOPMENT AND DEMONSTRATION TEST OF LOW-COHESION EXPLOSIVE FOR TUNNEL EXCAVATION

河野 興¹⁾, 藤井 英雄²⁾, 小泉 直人³⁾, 泰沢 俊夫⁴⁾, 田口 琢也⁵⁾

Ko KAWANO, Hideo FUJII, Naoto KOIZUMI, Toshio MATUSZAWA and Takuya TAGUCHI

A Low-Cohesion (Bulk Emulsion) Explosive complying to relevant laws and regulation in Japan is developed. Demonstration tests are carried out to prove its facility for handling and its blasting performance in actual construction site. Several useful results were obtained from the tests, in relation to, 1) mechanical charge of explosion, 2) compact charge, 3) water-resisting qualities, 4) large burden-distance for blastholes, 5) reduction of charge-time and so on.

Key Words: tunnel, blasting, explosive, bulk emulsion, mechanical charge

1. はじめに

トンネル掘進で発破後の発破効果を判断する材料として、進行長、破碎粒度、飛散距離、周辺地山の損傷程度等挙げられる。これらを支配する要因として爆薬の性能・性状、爆薬量、発破パターン等があり、その中でも爆薬の性能・性状が占める割合は大きい。

十分な発破効果を得るためには、爆薬の性能を十分に発揮させることが必要であり、その対策として装薬孔への密な装薬がある。装薬孔を空隙がない状態にすることにより、起爆時のエネルギーを低減させることなく岩盤へ伝えることができる。だが、人力による包装膠質タイプの爆薬を装薬する方法では、数十の装薬孔へ密装薬を行うことは困難であり、よって、現状のような装薬孔へ置き並べる装薬となる。

このような装薬では、装薬孔内の爆薬と壁面との空隙により低減した爆薬のエネルギーを補う爆薬量が必要となることから、おのずと過装薬状態となる。

鉱山等では、いち早くこれらの問題に取り組み、密装薬ができるANFO爆薬を採用した掘進発破を多く実施しているが、耐水性に乏しいことや多量の後ガスにより使用する場所が制限されている。

一方近年、削孔機械、積み込み・運搬機械の大型化が進み高性能化され急速な施工を望まれる中で、装薬作業を含め発破効果の良否が占める割合が大きくなってきている。また、一発破進行長を延伸しようという検討も行われており、長孔発破への期待も広がってきている。

効果的な掘進発破を行うための爆薬として、近年、低粘性爆薬が実用化されてきている。しかしながら、わが国の取り扱い規制に準ずると、わが国の法規制より低粘性爆薬及びそれを用いた発破システムの外国からの導入は難しく、わが国の法令に適応した爆薬およびシステムの開発が必要である。

¹⁾ 正会員 佐藤工業(株)土木本部技術部門

²⁾ 佐藤工業(株)大阪支店土木部

³⁾ 佐藤工業(株)土木本部技術部門

⁴⁾ 日本化薬(株)厚狭工場火薬研究部

⁵⁾ 同 上

2. 現状の起爆システムの問題点

(1) 膠質爆薬を使用した起爆

伊藤・佐々¹⁾らはデカップリング指数と爆破孔内壁に発生する接線方向の応力関係を求め、爆破孔内壁に発生する接線方向の応力はデカップリング指数が大きくなると、時間的にpressure spikeが消失して応力変化を示すことを確かめた。

爆薬の持つ性能を十分に生かすには装薬孔壁に隙間を作らない事が重要であり、そのような装薬をしなければならぬことがわかる。しかし、膠質爆薬を人力により装薬する場合は、現状のデカップリング指数は受け入れざる負えない状況にある。また、密な装薬を行うためには、爆薬を押しつぶす事が必要であるが、人力による装薬この作業を全装薬孔へ繰り返すことは実用的でない。

(2) ANFO爆薬を使用した起爆

ANFO爆薬は耐水性に乏しく爆破後の後ガス量は、含水爆薬の10～15倍²⁾と多いことや支保に用いる吹付け材の主成分セメントとの接触によりアンモニアガスを発生させる等³⁾使用する場所が限定されたり使用にあたっては対策・工夫が必要である。

起爆に電気雷管を使った場合、正起爆方式が義務付けられているが、この起爆方式では、装薬孔の口元近くに親ダイがあるため爆轟が中断したりカットオフが生じ易い等、発破パターンや削孔長に制限をうける。

以上のことから、発破作業を合理的に行うためには、新しい爆薬を開発しこれに伴う装薬方法を改良する必要があると考え、以下の課題を掲げ新しい爆薬とこれを用いた発破システムの開発と実証実験を行った。

- ①我が国の法制枠の中で取扱える汎用性が高い爆薬
- ②起爆効果が高い密装薬を可能とする
- ③機械化・自動化ができる
- ④機械装薬上、安全性が高い
- ⑤水孔等の環境条件に左右されない
- ⑥後ガス、有毒ガス等の環境保全を考慮
- ⑦安全性と経済性の向上
- ⑧掘進の経済性および安全性の向上

3. 開発対象の爆薬について

(1) 低粘性爆薬について

開発に当たり、現在わが国で市販されている爆薬のなかで安定性・安全性について高い評価を得ているエマルジョン爆薬を基に低粘性爆薬の開発を行うこととした。

エマルジョン爆薬は、硝安、硝曹(SN)、硝酸カルシウム(CN)などの酸化剤を含む水溶液と水に不溶性の油を乳化剤によりエマルジョン化し、気泡剤(GMB:ガスマイクロバルン)を入れた爆薬で、これは連続した油相に分散した酸化剤水溶液が液滴として存在するW/O型(油中水滴型)と称される。

これらを従来は、紙巻きや樹脂フィルムで包装して包装品で用いている。包装していないタイプをバルクといい、このタイプの爆薬をバルクエマルジョン爆薬という。今回開発の低粘性爆薬を以後、“バルクエマルジョン爆薬”と言う。

(2) 組成開発の要求事項

組成開発にあたり、いくつかの要求事項を満たす必要があった。第一に、常温でポンプ装薬出来る程度の粘性を持つ、第二に、ポンプで取扱うため実用範囲内で出来るだけ鈍感とする等である。また、組成内に水を含む含水爆薬は鈍感であるが、非雷管起爆性となる程度に更に鈍感化することが取り扱い安全上望ましい。経時安定性については、実用上問題がない経時安定性が得られる組成とする。後ガスについては、ANFOより良

好であることは当然であるが、被包紙がないので包装品含水爆薬より良好な後ガス組成が期待できる。

(3)開発のポイント

組成の構成を決定するため以下の関係について試験を行い、次の結果を得た。

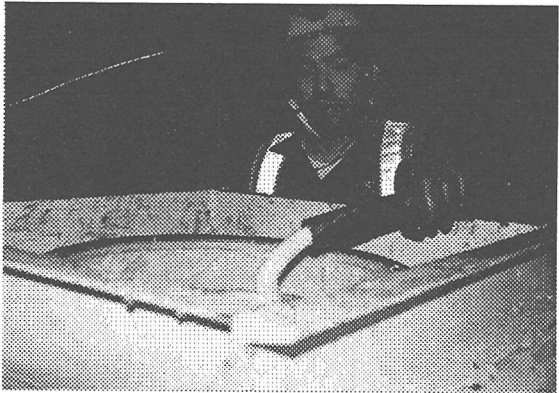
- ・ 水—粘度：水分量の増加と共にエマルジョン粘度は低下する傾向がある
- ・ C N—粘度：C N量の増加と共にエマルジョンの粘度は低下する傾向がある。
- ・ 水—爆速：水分量が20%以下では爆速は一定であるが、25%以上ではブースター30gでは不爆となる。
- ・ G M B—爆速：G M B量が3～4.5%の範囲では、爆速はほぼ一定であった。
- ・ 水—弾動振子：ブースター30g使用で水分量10～20%の範囲では、弾動振子値はほぼ一定であるが、ブースター10g使用では水分量20%で不爆であった。
- ・ C N—弾動振子：ブースター10g使用ではC N量30%以上で不爆となるが、20%以下ではほぼ一定。ブースター30g使用ではC N量30%以下であれば弾動振子値はほぼ一定であった。
- ・ G M B—弾動振子：G M B量が4.5%では完爆しているが、3.5%以下ではエマルジョンの比重が大きくなり、感度不足の為に、半爆もしくは不爆になった。

(4)標準組成の決定

以上の結果より表—1に示す組成を決定した。
また、写真—1のような粘性を持つ爆薬となった。

表—1 バルクエマルジョン爆薬組成表

材 料	比 率 (%)
硝酸塩類	6 9 . 0
水	2 0 . 0
燃料	7 . 0
ガラスマイクロ バルーン	4 . 0



写真—1 バルクエマルジョン爆薬

バルクエマルジョン爆薬についての爆発性能
及び後ガスをエマルジョン爆薬，ANFOと比較した結果を、表—2に示す。

表—2 爆発性能一覧表

		バルクエマルジョン爆薬	エマルジョン爆薬	ANFO
比 重	(g/cc)	1.15～1.20	1.15 ～ 1.23	0.8 ～ 0.9
粘 度	(cp)	500,000 <	膠質 > 2,000,000	—
耐水性		優秀	最優秀	なし
雷管起爆性		なし	あり	なし
爆轟速度	(m/s)	4800 ～ 5300	5800 ～ 6000	2500 ～ 3000
弾動振子値	(mm)	68 ～ 74 *	78 ～ 84	—
後ガス	CO ₂ (ℓ/kg)	50 ～ 70	100 ～ 120	100 ～ 120
	CO (ℓ/kg)	1 ～ 3	5～7	10～20
	NOx (ℓ/kg)	1 ～ 3	1～3	5～10
	NH ₃ (ℓ/kg)	0	0	0～1
RWS	(対 ANFO%)	120	168	100
F 値	(atm ℓ/kg)	8,000	9,500	9.200

4. 実操業に向けての実証実験

(1) トンネル掘進発破

1) 実験目的

トンネル掘進発破では、主に a) ポンプで圧力を加え挿入した時の装薬状態・性状、b) 爆薬の起爆効果について検証することが必要である。

特に爆薬は、装薬時の密度・緩み、耐水性、起爆効果、爆速、破砕効果、後ガス等が検証項目として挙げられる。

2) 地質・現場条件

地質は中生代ジュラ紀の美濃帯の砂岩・頁岩の互層で構成されている。トンネルは長い区間に於いて頁岩・砂岩の互層を成している。実験箇所は坑口より 1,140m 坑奥で、切羽に湧水はない。

3) トンネル条件と発破諸元

- ・岩質：頁岩
- ・地山区分：C II（道路公団地山区分による）
- ・掘削面積：上半 43.3 m²，下半 18.6 m²
- ・一軸圧縮強度：1000～1200kg/cm²
- ・削孔長：1.2m
- ・削孔径：45mm
- ・芯抜き方法：Vカット

(2) 実験方法

親ダイ及び外周孔には、エマルジョン爆薬（φ30*100g）を使用し、他の払い孔はバルクエマルジョン爆薬を使用した。

(3) 装薬機械

爆薬の圧送は、装填機器に備えられたポンプ（20kg/min）を用い、被圧下で爆薬の性状を変化させることなく圧送時の摩擦を低減させ、定量圧送を可能する方法としウォーターインJECTIONシステムを採用した。

本システムは、急激に断面が変わる装填ホース部直前で水を添加し（1kg/min）、装填ホースと爆薬の間に水の膜を施しホースと爆薬との間に発生する摩擦を低減する方法である。（図-1）

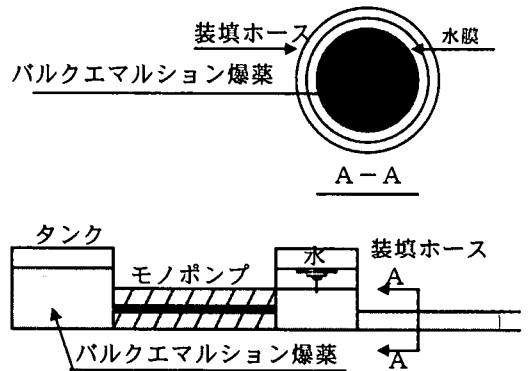


図-1 ウォーターインJECTIONシステム模擬図

5. 実験結果

(1) 爆薬の取扱い

我が国の火薬類取締法では、運搬時における爆薬の重量は（標準重量 22.5kg/箱・袋）と定められている。今回の低粘性爆薬も、硬質のビニール袋に 22.5kg 入れ梱包し、工場から使用 3 日前に搬入した。梱包開封後の目視による観察では、輸送時の振動による分離または色の変化は見られなかった。

(2) 装薬状況と状態

装薬孔奥に装填された爆薬の装薬長・状態の確認は、装薬孔の残長（＝削孔長－装薬長）の計測と装薬孔口元からの目視で行った。残長の計測孔数は、装薬孔数の 1 割程度ランダムに行った。その結果、残長の計算値と実測値の差異は、払い孔・踏え孔とも ±1～2cm であった。

また、密装填の状態と装填された爆薬の経時変化（緩み）を確認するため、起爆直前に（装薬から 20 分程度経過）装薬時と同様な計測および観測を上向き（約 2%：削孔水、湧水が流れ出てくる程度）に削孔された払い孔で行ったが緩みは無く、計測値は装薬直後の数値と同じであった。

装薬孔口元への込め物は、込め物（粘土）が爆薬の中へ入る事などにより密装填の状態を乱しタンピングも十分でないため、込め物の装填は中止した。

(3)起爆と破碎粒度

起爆は、段発発破で行った。破碎粒度は最大 40cm 程度で、飛散距離は 30m 前後であった。

(4)機械装薬と電気雷管

電気雷管の脚線はビニールで被覆されており、装薬ホース挿入・引き出しによる脚線の切断または被覆の損傷による断面減少が予想されるため、装薬後の導通テストを行った。切断による電流の短絡や脚線損傷による抵抗の増大はなかった。

(5)装薬時間

装薬ホースからの爆薬吐出時間は、装薬孔内において装薬量 0.6kg～1.0kg で 3～5 秒であった。当初、装薬孔間の移動を含めた一孔当たりの装薬時間は 40 秒/孔であったが、施工を重ねることで 18 秒/孔へ低減した。6 回の発破の平均装薬時間は約 30 秒程度（26.3 秒）であった。

(6)爆速・後ガス

岩盤内の爆速測定・後ガスの測定値結果を表－3 に示す。

表－3 爆速および後ガス測定結果

試験 NO. 項 目		NO 1	NO 2	NO 3
爆 速 (m/sec)		検知せず	検知せず	5050
後ガス (ppm)	CO	50	50	100
	NO _x	15	20	20

6. 考察

(1)爆薬

今回開発した低粘性爆薬は、安全性、耐水性、操作性、起爆性、環境の保全、形状保持能力等で良好であったが、以下の点については改良・検討すべき事項と考える。

- ①使用前の爆薬性状の確認方法
- ②繰り返し使用における組成変化の有無
- ③環境条件（寒暖・湿度）による組成・性能・性状の変化
- ④上記、爆薬性状・性能の確認方法
- ⑤破碎後、岩石に混入し廃棄された場合の環境に及ぼす影響と対策

(2)装薬（装薬、電気雷管、込め物）

装薬で懸念された爆薬の緩みは実験と比べ装薬坑内の荒れも有り、装薬後約 20 分程度では問題なく、また、耐水性も良好であった。

機械装薬において電気雷管を使用する場合、静電気、漏洩電流、迷走電流等や雷管の脚線が装薬時の引っ張りや摩擦による損傷等の恐れがある。従って、今後の実操業化に向けては、雷管の最小起爆抵抗を大きくするまた脚線の改良や導火管付き雷管の採用を検討する必要がある。

込め物の使用は前述したが、法律上込め物の使用の義務づけられていることから、特殊な込め物を開発する必要がある。しかし、今回のように爆薬の性能・性状や装薬方法が変わってきていることから、今後、込め物の本来の意義を十分検討する必要がある。

(3)爆速

工場実験値（4,500～5,000m/sec）とほぼ同等の値を示した。

(4)後ガス

後ガス量は、当社の実績と比較すると、ANFO に比して CO で 1/2～1/4、NO_x は、約 1/5 位と良好な値

であった。しかし、1 回当りの爆薬量や坑内の換気量・換気方法あるいは測定位置などにより異なることから、今後も計測が必要と考える。

6. 効果

(1) 破碎効果と飛散距離

破碎粒度は、エマルション爆薬と比べより細粒化している。これより、孔間隔の拡大が可能と考えられる。一方、飛散距離に大きな差異はなかった。

(2) 削孔数

開発爆薬の性能（熱量、ガス量）を基に抵抗線長⁴⁾を算出した。エマルション爆薬の抵抗線長を 1.0 としたとき、バルクエマルション爆薬で 2.1 となり、削孔数は、バルクエマルション爆薬で 42% の削減が可能である。

(3) 装薬時間

装薬時間は、人力による装薬方法と比べ 1/3 程度に短縮できる。

(4) 経済性

バルクエマルション爆薬を使用した 3 m の長孔発破爆薬費用は、エマルション爆薬と比べ 10～15% 程度縮減できる。また、上記削孔数比率・装薬時間を用い月進行を算出したところ、20% 前後の増加が見込まれる。

7. おわりに

低粘性爆薬の開発とそれを用いたトンネル掘進実証実験は、当初の目的を達成し、実作業に向けて十分な能力を持つことを明らかにした。これにより、低粘性爆薬の採用で経済性及び安全性の向上を図った合理的な施工が可能になると考える。

今後の課題としては、ポンプ内に残った爆薬の数量管理、梱包の改善による効率的な運搬方法、機械装薬による取扱い基準の整備等法制の改善などが挙げられる。

参考文献

-
- ¹⁾ 伊藤一郎、佐々宏一：スムーズ・プラスティングにおける破壊機構の一考察，第 2 回岩の力学国内シンポジウム（1967）講演集，昭和 42 年 11 月 28～29 日，97～102 頁
 - ²⁾ 建設業労働災害防止協会：すい道工事における換気技術指針（管理及び保守基準）20 頁
 - ³⁾ 河野 興：火薬と保安，1991，Vol. 23，No. 2，30-40 頁
 - ⁴⁾ Per-Anders Persson, Roger Holmberg, Jaimin Lee : Rock Blasting and Explosives Engineering, p209-231