

日本のバルクエマルジョン爆薬の特性と それを用いたトンネル発破システム

河野 興¹・杵沢 俊雄²・中川 浩二³

¹正会員 佐藤工業(株)土木本部技術部門(〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

²日本化薬(株)火薬研究所(〒757-0002 山口県厚狭郡山陽町大字郡2300)

³フェロー会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-0031 山口県宇部市常盤台2-16-1)

近年わが国のトンネル発破において導火管付き雷管とANFO爆薬の組み合わせによる発破システムが本格的に用いられてきた。しかし本システムはANFO爆薬の有する性質上、発破システムの制約や後ガスによる坑内作業環境の劣悪化等の問題を抱えている。

諸外国で開発されたバルクエマルジョン爆薬を用いた発破システムはこれらの問題を解決した。しかしこのシステムの導入は、わが国の法規上の制約から困難である。よって、筆者等はわが国の法規制に準じたバルクエマルジョン爆薬・発破システムの開発を行い、さらにそれを用いて施工性および発破効果に着目した実操業に向けての実証と検討を行った。その結果、実用化に有用と思われる知見を得た。

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

1. まえがき

トンネル掘進で発破効果を判断する材料として、進行長、破碎粒度、ズリ飛散距離、周辺地山の損傷等が挙げられる。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る。その中でも爆薬の性能・性状が占める割合は大きい。

鉱山・碎石場や一般土木工事で、用途に応じまたそれぞれの地山性状・岩質、環境条件に適した爆薬を選定、発破設計し発破作業を行っている。しかし、必ずしも多くの現場で満足のいく結果が得られているとは言えない。

硬質岩盤の発破において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る。効果を得る方法の一つに、装薬孔への密な装薬がある。装薬孔に空隙ができない状態に装薬することにより、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。現在、市販されている爆薬の性能・性状は種類によって異なるが、同一の種類ではほぼ均一化されている。性状は、大きく膠質状爆薬と顆粒状爆薬に分けられる。人力により包装タイプの膠質状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非現実的であり、現状は、ただ装薬孔へ置き並べる装薬となっている。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、特に硬質岩盤では経済性を損なった装薬状態となっている。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。

一方近年、トンネル掘進においても削孔機械、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しばしば行われており、長孔発破への期待も広がってきている。

筆者らはANFO爆薬(顆粒状爆薬)を用いた長孔発破を実施し発破システムの改良や急速施工の実操業化を実現してきたが、ANFO爆薬が耐水性に欠けることや、後ガスの発生量が多いことからその使用について制限を受ける場合がしばしばあった¹⁾。

このような問題に対し効果的な掘進発破を行うための爆薬として、近年、諸外国では現場混合のバルクエマルジョン爆薬が実用化²⁾されてきている。しかしながら、わが国の取扱い規制に準ずると、わが国の火薬類取締法³⁾よりバルクエマルジョン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、わが国の法規に準じた爆薬および発破システムの開発が必要である。

2. 現状の発破システムと問題点

発破システム要素には、削孔長、装薬径、爆薬の性能・性状、装薬方法、雷管、起爆方法等のパラメーターが有り爆薬の性能・性状が他の項目に及ぼす影響は大きい。このことから、現在採用されている爆薬を用いた発破システムと問題点について以下に記す。

(1) 膠質状爆薬を使用した発破

a) 発破システム

我が国の地山は一般的に脆弱で節理や湧水も多く、坑道掘進では取扱いが便利な包装形態をなした爆薬が多く使われている。削孔径・削孔長に適した薬径、薬長を選択できる形状となっており、1本当たりの重量は、100gもしくは200gが多く、長さは12～26cm程度である。

爆薬径は、装薬作業を考慮して削孔径の1/2.3～1/1.5倍が採用されている。

起爆方法は、親ダイを装薬孔の孔奥に置く逆起爆方式と口元に置く正起爆方式がある。膠質状爆薬の場合はどちらの方式でも特に問題は少ないが、起爆効果が良くまたカットオフの恐れが少ない逆起爆方式が採用されることが多い。また、坑道掘進に適した後ガス量が少ない爆薬の採用が可能である。

b) 問題点

伊藤・佐々⁴⁾らはデカップリング指数と発破孔内壁に発生する接線方向の応力関係を求め、発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、プレッシャー・スパイク (pressure spike) が消失することを確かめた。硬岩の発破において発破効果を発揮させるためにはこのプレッシャー・スパイクを有効に利用することが重要であり、そのためには装薬孔壁に隙間を作らない装薬をしなければならないことがわかる。しかし、膠質状爆薬を人力により装薬した場合は、爆薬の圧縮がほとんど無いために現状のデカップリング指数は受け入れざるをえない状況にある。

密な装薬を行うために、諸外国では数十年前から、圧縮空気で膠質状爆薬を装薬する簡易な機械が採用されている。これは、装薬ホース先端のホース内側に埋め込まれたスパイラル状の切削金属で、その箇所を通過する爆薬の包装に傷を入れ押しつぶしやすくし、密装薬を可能にする機構となっている。

わが国での法規制下では、切羽における火工（傷を入れる、包装を破ることも火工にあたる）は禁止されており、当該装薬機械の採用はもちろん、孔内においた爆薬を押しつぶすこともたてまえ上はでき

ない。この対策として、数年前、圧縮空気をを用いて膠質状爆薬および込め物を装填する機械が開発されたが⁵⁾ 煩雑さのため実用に至っていない。

(2) 顆粒状爆薬 (ANFO) を使用した発破

a) 発破システム

ANFO爆薬は、顆粒状であるため重袋もしくは円柱状のビニール袋に入れて配送されるのが通常である。顆粒状のANFO爆薬は圧縮空気による機械装薬が可能であることから、孔内の装薬密度を大きくした密装薬ができる。

ANFO爆薬は、耐水性に乏しく、湧水が多い坑道や削孔水が残っている踏まえ孔等に適さない。このような場合は、ビニール袋に入ったANFO爆薬を使用することがあるがこの場合、密装薬は期待できない。

圧縮空気による装薬では、装薬の際に発生する静電気のため、電気雷管を用いた場合、法規上正起爆方式が義務づけられている。但し、導火管付き雷管が導入されて以来、この雷管を使用した逆起爆方式が可能となった。

b) 問題点

ANFO爆薬は性能上耐水性に欠けるため使用が制限される一方、発破後の後ガス量は、含水爆薬の10～15倍⁶⁾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⁷⁾、使用する場所等条件が限定される。使用にあたっては対策・工夫が必要である。

(3) 諸外国の爆薬情勢

ANFO爆薬は、ダイナマイトと異なりニトログリセリンのような鋭感剤が入っていない混合爆薬であるから、衝撃や摩擦に対して安全性が非常に高い。また安価な原料の硝安と軽油をコンクリートミキサーに似た混合機械で混合するだけで簡単に製造ができるうえに、ダイナマイトのように1本ずつの薬包にせず重袋包装のまま現場へ運び消費できる。さらに1本の雷管の爆発では起爆しない（非雷管起爆性）特徴を持ち安全性が高い。取扱いが非常に安全であるため、米国その他の国ではANFO爆薬を火薬類の分類からはずし、火薬類より一段階危険性の少ない爆破剤として取扱っている。

火薬類は、危険性が大きいので各国共防爆設備の完備した火薬工場でしか製造は認められないが、爆破剤である ANFO 爆薬は発破現場で特殊トラック内のミキサーを用い硝安と軽油を混合すること（現場混合）が可能である。しかし、わが国では火薬製造に関する保安上の見地から現場混合は法的に認め

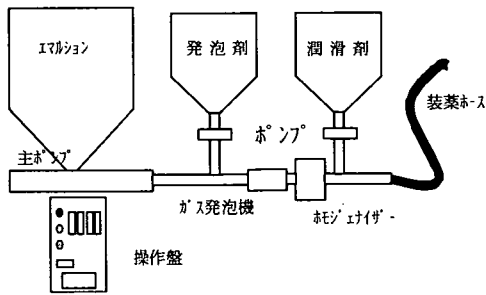


図-1 現場混合バルクエマルジョン製造模式図

られなかった。近年、規制緩和にともない現場混合の許可が公布されたが、現場混合はすべて製造とみなされ、製造責任者の選任・配置、製造箇所の申請・許可等の課題は残っている。

一方数年前より諸外国では、全岩種対応および坑内作業環境、安全性と経済性の向上と合理的な発破作業を目指した爆薬が開発・実操業化されている。すなわち、安全で取扱いが易しく、耐水性に優れ後ガスが少ない火薬類を含有しない混合爆薬であり、エマルジョン爆薬の性能を基に開発され、材料（乳剤、硝酸塩類水溶液）⁸⁾及び化学発泡剤を混入した現地製造できる爆薬で、バルクエマルジョン爆薬と呼ばれている（図-1）。

この爆薬材料は、諸外国では消防法上の危険物として取扱われるため、爆薬のような管理体制は必要が無く、容易に貯蔵・運搬・取扱いが可能である。したがって、各々材料を別個に貯蔵・運搬・混入できる車両を使い切羽近傍へ運搬した後、所定の爆薬を得ることができる。消費現場では、混合されるまで爆薬でないことから、管理は容易で安全である。

本爆薬は前記の性能・性状から耐水性に優れ、後ガスも少なく、機械・自動装薬が可能である。また、密装薬及び切羽の部位に即した装薬量の装薬ができ、合理的である。

しかし我が国の現法制下では、この爆薬製造システムは、現場での爆薬の製造が禁止事項に該当するため導入はできない。

以上のことから、膠質状爆薬の①エネルギー損失、②非効率な施工方法、③安全性向上の配慮また、ANFO爆薬の①非耐水性、②後ガス問題等を補うバルクエマルジョン爆薬の我が国での実用化が期待される。

本研究では、発破作業を合理的に行うためには、我が国の法規制を含めた実情に即した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を含めた発破システムの開発を行った。

a) 爆薬の開発

- ①我が国の法規制の中で取扱え、汎用性が高い
- ②水孔等の環境条件に左右されない
- ③後ガス、有毒ガス等の環境保全条件が良好

b) 発破システムの開発

- ①起爆効果が高い密装薬を可能
- ②機械化・自動化ができる
- ③取扱い上安全性が高い
- ④経済的である

3. 開発対象の爆薬について

(1) バルクエマルジョン爆薬について

わが国では、昭和49年に米国から雷管で起爆できる含水爆薬（スラリー爆薬）の製造技術を導入した。このスラリー爆薬は硝酸アンモニウム（AN）などの酸化剤、水、鋭感剤をガムで架橋させたゲル状タイプで、安全性が高く、発破後の後ガスが優れている特徴がある。しかし、ダイナマイトに比べ比重が小さく、爆速が低いことから消費現場で爆力不足や、スラリー爆薬特有の耐衝撃性不良から不発残留が生じ易い欠点があった。これらの課題を克服したのがエマルジョン爆薬である。エマルジョン爆薬は、酸化剤の主成分としての硝酸アンモニウム（AN）と硝酸ナトリウム（SN）、硝酸カルシウム（CN）などの性質の異なる酸化剤を含む水溶液および水に不溶性の油を乳化剤によりエマルジョン化し、爆薬内部に小空間の粒子を持たせるための気泡剤（GMB：ガラスマイクロバルーン）を入れた爆薬である。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。酸素バランスの関係から、分散相が90%程度となり、一つの液滴の大きさが1 μ 前後で均一に分散する構造をとり、連続した油成分とは非常に近接しているため酸化還元反応（爆発反応）が効率よく伝達され、ダイナマイトに近い爆速、爆轟圧が得られ、威力ある爆薬と評価されている。従来これらを、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。

(2) 組成開発の要求事項

組成開発にあたり前述の在来爆薬の問題点を参考に、以下の要求事項を満たすことを前提とした。

- a) 常温でポンプ装薬出来る程度の粘度を持ち、上向

表-1 基準組成表 (Wt. %)

酸化剤水溶液			燃料成分	GMB (外割)
AN	CN	H ₂ O		
53	25	15	7	4

き装薬孔内での緩みを少なくする必要がある。

- b) 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必要がある。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扱い安全上望ましい(諸外国のものは非雷管起爆性である)。
- c) 威力については、装薬孔内に密装薬することが出来るため、通常の威力でも強すぎることになり、岩石が焼結を起こす恐れがある。そのため膠質状爆薬より爆速が低い適正な威力とする。
- d) 後ガスは、ANFO爆薬より良好であること。
- e) 経時安定性については、寒暖・湿潤による影響、安定性、運送時の揺れ等の諸要因により実用上問題がない経時が得られる組成とする。

(3) 組成選択のポイント

上記の要求事項を満足する爆薬組成を得るために以下の方針を基準として組成検討を行った。なお、試験値は2回の計測値を示している。

基準組成は、酸素バランスがゼロとなる酸化剤水溶液/燃料成分の配合比率が基準となる。酸化剤水溶液に用いられる酸化剤としては、溶解が比較的低い温度で可能なAN/CN系を選択し、過去の経験からCN=25%を基準とした。また、水量は標準的な値15%を用いた。

なお、後ガスは、酸素バランスがゼロであればエマルションの反応性の高さから良好であること、また、経時安定性に関しても、基準組成の範疇で乳化が適切に行われていれば、おおよそ半年以上の経時安定性があることを筆者らの爆薬製造の経験より得られている。従って、この2項目は標準組成決定後、確認を行う手順とした。

a) 基準組成

まず基準組成を表-1のように設定し、最適な組成構成を決めるに当たり以下の事柄を定めた。

- ①水分量(H₂O)を変化させる場合は、燃料成分、GMB量は一定で、酸化剤量(AN/CN比率は一定とした)を調整した。
- ②CN量を変化させる場合は、水分量、燃料成分及びGMB量は一定で、<AN+CN>の合計量が一定になるようにAN量を調整した。

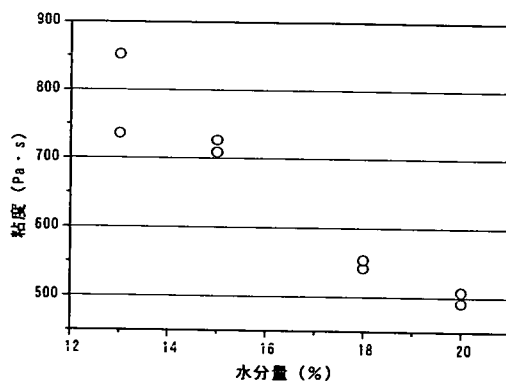


図-2 水分量と粘度の関係

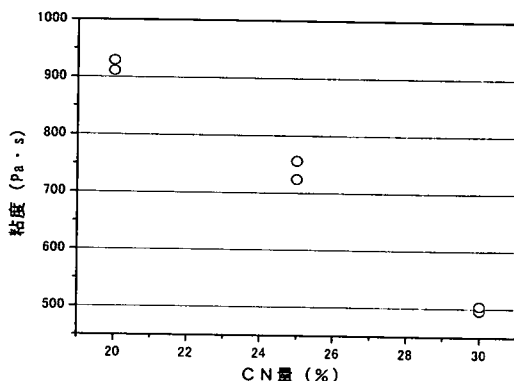


図-3 CN量と粘度の関係

③GMB量は外割添加であるので、GMB添加量のみ変化させた。

b) エマルション粘度について

上記の組成を基準としてあらかじめ水分量、CN量を変化させて、エマルション粘度がどのように変わるか検討した。

粘度はブルックフィールド粘度計(スピンドルNo.64, 回転数0.3rpm, 測定温度: 20±1℃)で測定した。

①水分量と粘度の関係

基準組成に対して水分量を変化させた場合の粘度を図-2に示す。図によると水分量の増加と共にエマルション粘度は低下する傾向にある。これは、エマルション膜を形成する乳化剤配列から、水分量が増加すると界面膜の乳化配列状態が緩くなりエマルションのすべりが良くなるため粘度が低下すると考えられる。

②CN量と粘度の関係

基準組成に対してCN量を変化させた場合、CN量の増加によりエマルション粒子が大きくなる(但し、安定性は維持している)。このためエマル

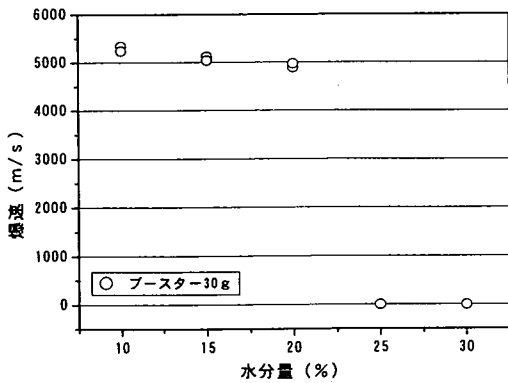


図-4 水分量と爆速の関係

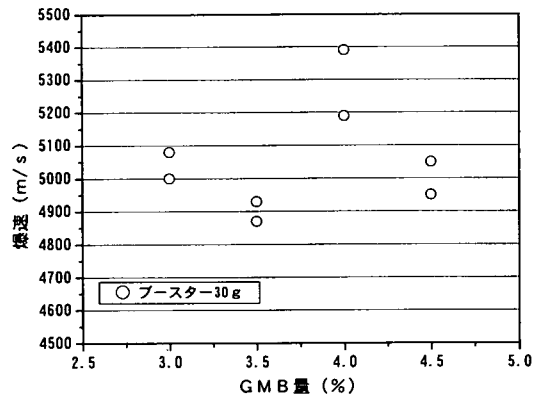


図-6 GMB量と爆速の関係

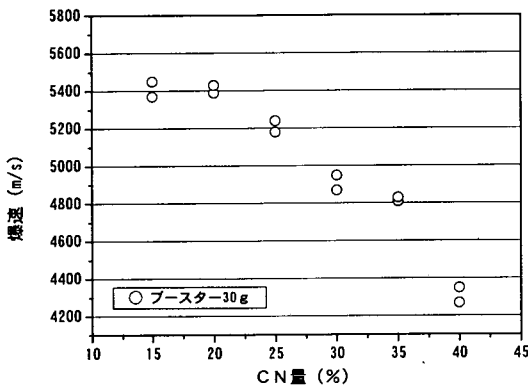


図-5 CN量と爆速の関係

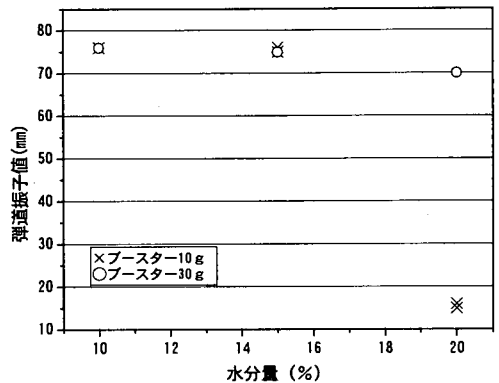


図-7 水分量と弾道振子値の関係

ション粒子の密集度が低下して粘度が低くなる (図-3)。

以上のことから、水分量またはCN量を増加させることでエマルションの粘度を低下させることが認められた。

c) 動的威力(衝撃力=爆速)について

水分量, CN量を変化させて、爆速がどのように変わるか試験した。

爆速試験は、JIS鋼管(内径35mm, 外径42mm, 長さ230mm)にパルクエマルション爆薬を充填し、雷管起爆性膠質状エマルション爆薬をプースターとして30g使用した。爆速測定は、光ファイバー法⁹⁾で行った。

①水分量と爆速の関係

基準組成に対して水分量を変化させた場合、爆速はプースターが30gでは、水分量が20%以下ではほぼ爆速は一定値を示すが、水分量25%では感度が維持できないほどに鈍感になり、爆轟中断を起こしたと考えられる(図-4)。

②CN量と爆速の関係

基準組成に対してCN量を変化させた場合の爆速の変化を図-5に示す。図によるとCN量が20~40%の範囲では、CN量の増加と共に爆速が低下する傾向がみられた。

これはANに比べてCNの爆発性が低く、CN量が増加することにより相対的にAN量が減少したことによると考えられる。

③GMB量と爆速の関係

基準組成に対してGMB量を変化させた場合、GMB量が3~4.5%の範囲では、爆速に有意な差は見られなかった。爆発核がある程度の量爆薬中に分散されておれば爆轟伝播の問題が無いものと考えられる(図-6)。

以上のことから、水分量20%以下では、プースター-30gの起爆感度を有し反応を開始すれば、ほぼ一定の爆速を得られることがわかった。しかし、水分量25%では、プースター-30gの感度を維持し得ない。CN量については、20%以上でCNの増加とともに

表-2 GMB量と弾動振子値の関係

GMB量 (%) (イソシオン比重)	弾動振子値 (mm)	
	プースター 10g	プースター 30g
4.5 (1.14)	72	73
	73	73
3.5 (1.18)	17	56
	17	56
3.0 (1.21)	15	37
	16	38

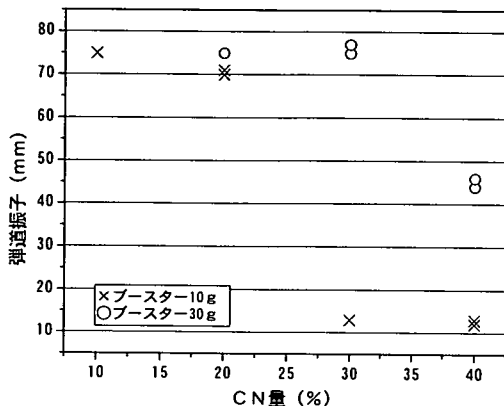


図-8 CN量と弾動振子の関係

爆速が低下している。GMB量についても3~4.5%の範囲でほぼ一定の爆速が得られることがわかった。

d) 静的威力 (ガス膨張力=弾動振子値) について

①水分量と弾動振子値の関係

基準組成に対し水分量を変化させた場合の弾動振子値を図-7に示す。図によるとプースター量30gの場合水分量が10~20%の範囲では、ほぼ一定値を示すが、プースター量10gの場合水分量20%で、爆轟中断を起こした。半密閉状態のこの試験では、感度が維持できないほどに鈍感になったものと考えられる。

②CN量と弾動振子値の関係

基準組成に対してCN量を変化させた場合、弾動振子値は、プースター量30gの場合CN量が30%以下であれば、ほぼ一定値を示した。しかし、CN量30%以上では、半密閉状態のこの試験で、爆轟中断を生じるほど感度が鈍感になっているものと考えられる。プースター量10gの場合CN量30%以上でも、同様な理由より爆轟中断を生じたと考えられる(図-8)。

③GMB量と弾動振子値の関係(表-2)

基準組成に対してGMB量を変化させた場合、GMB量が4.5%では、標準的な弾動振子値を示す

表-3 実験結果組成構成表

特性	水分量	CN量	GMB量
動的威力	20%以下	20%以下	4.5%以下
静的威力	15%以下	30%以下	4%以上

表-4 標準組成構成表 (Wt.%)

酸化剤水溶液			燃料成分	GMB (外割)
AN	CN	H ₂ O		
58	20	15	7	4

が、3.5%以下では爆薬比重が1.18以上となり、弾動振子臼砲内(半密閉状態)では感度を維持できないほどに鈍感になったために小さい値を示したと考えられる。

以上のことから、弾動振子試験によれば、プースター量10gで伝爆性の確実な水分量15%以下、爆轟中断しないCN量30%以下、感度を維持するためにGMB量4%以上が実用上好ましい組成比率であると考えられる。

(4) 標準組成の決定

図-4~8および表-2より、水分、CN、GMB量と動的威力、静的威力について表-3のようにまとめられる。

表-3の結果から、試験的に製造するバルクエマルジョン爆薬について表-4の標準組成を決定した。標準組成での粘度は、図-2、3より約700~900Pa・sの範囲にある。これは過去の経験から装薬機器の適応可能な範囲にあると判断される。一方、装薬孔での緩みについては、室内試験及び実操業で確認する事とする。

表-4の標準組成で製造した爆薬を用いて以下の測定を行った。

a) 後ガス測定

37m³の鉄筋コンクリート製の密閉爆発坑道において、4本のJIS鋼管(内径35mm, 外径42mm, 長さ230mm)にバルクエマルジョン爆薬並びに比較として包装膠質状エマルジョン爆薬及びANFO爆薬を装薬し、砂中30cmの深さに配置した。これは、出来るだけ実際の岩盤での発破状況に近い反応条件を想定したためである。バルクエマルジョン爆薬及びANFO爆薬はプースターとして雷管起爆性膠質状エマルジョン爆薬10gを用いた。

表-5 後ガス性能一覧表 (単位: ㎖/kg)

爆薬 項目	バルクエマル ション 爆薬	膠質状エマ ルション 爆薬	ANFO爆薬
CO ₂	97.7 91.7	76.8 83.9	113.1 124.1
CO	1.92 2.14	5.01 4.70	9.90 9.55
NO _x	2.09 2.27	2.24 2.45	4.24 5.25
NH ₃	検出されず	検出されず	0.08 0.11

発破後約15秒間間欠的に生成ガスを循環して均一にした後、ドレーゲル検知管にてCO₂、CO、NO_x及びNH₃ガス濃度を測定した。ガス濃度と爆発坑道の容積から発生ガス量を算出し試料1kg当たりのガス発生量として計測結果を表-5にまとめた。

バルクエマルション爆薬と雷管起爆性膠質状エマルション爆薬を比べるとNO_xは同程度であるが、バルクエマルション爆薬の場合COの生成が低下していることがわかった。これは包装品の場合被包紙の影響が出ていると考えられる。一方ANFO爆薬は、CO、NO_xが上記2者に比べてかなり多いことが観察された。また、NH₃も微量であるが検出された。これは、ANFO爆薬の酸化剤と燃料の接触が悪いために反応性が悪くなっているためと考えられる。

b) 経時安定性

諸外国のバルクエマルション爆薬は、エマルションマトリックス(エマルション基剤)を工場生産し、ストックポイントにて貯蔵し、装薬トラックに積み込まれるか、または乳化装置のあるトラックで現地混合して、発破現場の装薬孔に入れる直前に化学発泡剤が注入される、従って化学発泡剤を含有したエマルションでの経時安定性を心配する必要がない。一方、我が国では、製造と消費は分けて考えられていることから、生産は工場内で行い、運搬、貯蔵、消費まで考えると1年程度の貯蔵安定性が求められる。

エマルション爆薬は、時間の経過と共にエマルションが破壊されて酸化剤水溶液の結晶が析出すると比重の増加、爆速の低下や極端な場合不爆となることがある。従って、まず外観を目視で検査し、結晶析出の無いことを確認する。次に、極端な比重の増加や爆速の低下の有無を比重と爆速の2つの要因により、経時変化を検証した。爆速試験は、前述同様光ファイバー法で行った。

結果を図-9に示した。現在12ヶ月までの性能では、

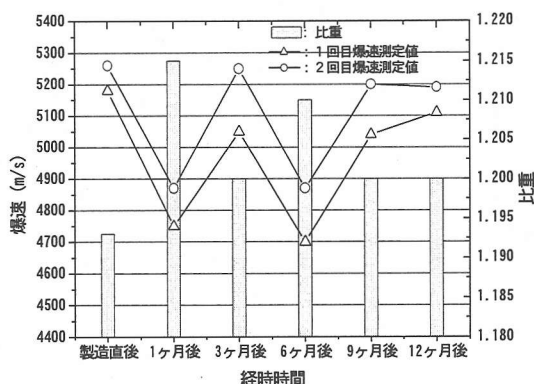


図-9 経時安定性測定

ばらつきはあるものの、一方的な比重の上昇や、爆速の低下は観察されていない。比重は、1.19~1.23の間にあり、これは包装品含水爆薬の品質保証比重1.15~1.23の範囲内にある。また、爆速が5,000±300m/sの範囲にあり特に低下傾向は見られないことから、大きな問題がないことが認められた。

(5) 性能一覧

表-4に示す標準組成で作成したバルクエマルション爆薬に関する性能一覧を膠質状エマルション爆薬、ANFO爆薬と比較の上、表-6に示す。なお、試験値は2回の計測値の平均である。

a) 爆発性能

標準組成構成での爆発性能を表-6に示す。

b) 限界薬径

バルクエマルション爆薬の限界薬径を確認するため、鋼管の内径を変えて完爆する薬径を測定した。鋼管の長さは1mで、プースターとして膠質状エマルション爆薬10gを使用した(表-7)。

試験の結果、薬径はおおよそ10mmが限界と考えられる。

(6) 実作業上の問題点

標準組成で作成した爆薬の実作業への導入にあたり以下の試験を行った。

a) 緩み状況試験

実作業時の発破孔での装薬時の緩みを考慮して、内面が円滑で透明な塩ビ管(φ43mm、長さ940mm)にバルクエマルション爆薬を870g(500mm、粘度792Pa·s)密装し塩ビ管を所定の傾斜角度(θ)にセットし、時間経過に伴いバルクエマルション爆薬が動く距離を測定した。緩み測定結果(試験回数N=2の平均、爆薬温度24℃、実験室内温度26℃)を図-10に

表-6 爆薬の性質・性能表

爆薬 項目	バルクエ マルシヨ ン爆薬	膠質状エマ ルシヨ ン爆薬	ANFO 爆薬
比重 (g/cc)	1.19	1.20	0.85
粘度 (Pa・s)	792	膠質状 >2,000*	—
爆轟速度 (m/s)	5,220	5,900	2,800
弾動振子 (mm)	71**	81	—
殉爆度 ①砂上 ②鋼管中	1 2.5	3 >30***	— —

* : 装置測定限界

** : プースター10g+サンプル 90g の値

*** : 物理的に測定限界

表-7 限界薬径の測定

鋼管内径 (mm)	爆速 (m/s)
27.6	6,330
	—
21.6	4,830
	4,870
16.1	4,730
	4,950
12.7	4,410
	4,570
9.2	不爆
	不爆

示す。

外周孔の上向き削孔角度が最大3~5°程度および装薬孔内壁の粗度は塩ビ管内壁の粗度とくらべ著しく大きいことから移動距離は大きくなく実用可能な粘度と考えられる。さらに、装薬完了から発破まで通常1時間未満程度であることを考慮すると、傾斜角5°での移動距離は最大10cm程度と推定される。この移動量からデカップリング指数を求めると約1.1となり、デカップリング指数は小さく、プレッシャーパイプの減衰¹⁰⁾は少ないと考えられる。

b) ポンプ特性とエマルションとの関係

ポンプ圧力0.2MPa以下で30kg/min程度の操作が可能であった。これは削孔径φ45mmの場合、単位m当り約4秒で装薬できる実用可能な値と考えられる。

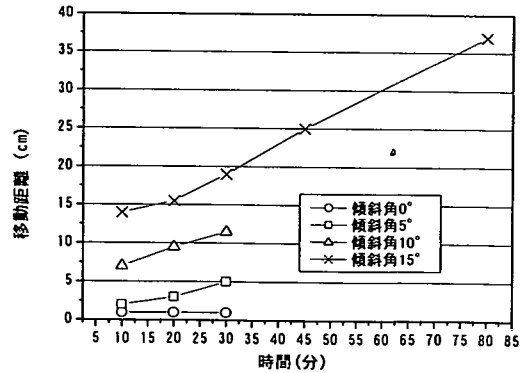


図-10 装薬緩み経時変化

4. 実作業に向けての実証

(1) トンネル掘進発破

実作業における問題点を明らかにするため、実トンネルにおいて実証を行った。

a) 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) 爆薬の起爆状態、c) 爆薬の取扱い上の問題点や発破後の坑内環境について検証することが必要である。なかでも爆薬については爆薬の装薬時の密度・緩み、起爆効果と破碎粒度、爆速、有毒ガス・後ガス等について、装薬機械については、安全性、装薬時間、装薬量管理等が検証項目として挙げられる。

b) 地質・現場条件

実証トンネルの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。一軸圧縮強度は、100~120MPa程度である。

実証試験実施箇所は坑口より1,140m 坑奥で、切羽に湧水はない。

c) 発破諸元

親ダイ及び外周孔には、膠質状エマルション爆薬(φ30mm×100g)を使用し、実験は以下の手順で行った。

① 実験 No.1, 2, 3 (回数 3 回)

- ・心抜き孔⇒バルクエマルション爆薬
- ・払い孔 ⇒膠質状エマルション爆薬(φ30mm, 100g)

② 実験 No.4~9(回数 6 回)

- ・心抜き孔⇒バルクエマルション爆薬
- ・払い孔 ⇒バルクエマルション爆薬

表-8 後ガス測定結果 (単位: ㎖/kg)

試験No	No. 5	No. 6	No. 7
項目			
CO	1.4	1.4	4.0
NOx	0.4	0.6	0.8

表-9 後ガス測定結果 (単位: ㎖/kg)

場所	Fトンネル	Nトンネル
項目		
CO	3.60 10.23 7.19	12.74 7.40
NOx	0.36 0.38 0.80	0.49 0.85

* 使用爆薬：膠質状エマルジョン爆薬

5. 実験結果と検討¹¹⁾

以下に実験結果とその検討を示す。図中の直線は変数間のすべて直線近似を行った結果である。

(1) 爆薬性質

a) 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で20.0~25.0kg/箱・袋と定められている。今回は、20.0kgのバルクエマルジョン爆薬を硬質のビニール袋に入れ梱包し、工場から消費予定日の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や色の変化は見られなかった。輸送による爆薬性能変化の計測は、今後の課題としたい。

b) 装薬状況と装薬経時変化

装薬孔奥に装填された爆薬の装薬長・状態の確認は、あらかじめ計算した無装薬長と実装薬長との比較を装薬孔数の1割程度無作為に行った。その結果、差異は±1~2cm(±17.5~35.0g)であった。

密装薬状態の爆薬の経時形状変化(緩み)の確認は、装薬から20分程度経過した発破直前に装薬時と同様な計測・観測を行った。特に、天端部に近い上向き(傾き約2%)削孔の装薬孔で重点的に行ったがスケールによる測定に有意な変化はみられなかった。なお、坑内温度19℃、爆薬温度13℃であった。

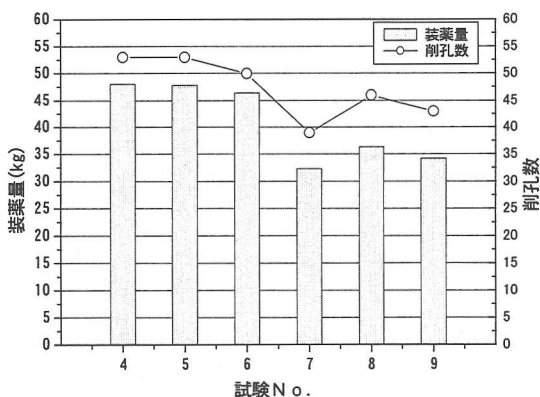


図-11 装薬量・削孔数の推移

c) 爆速測定

光ファイバー法による爆速測定結果は、5,050m/s(測定回数1回)であった。これは、製造直後の実験値5,220m/sより低い値であったが、図-9に示す経時安定性測定の中位の値を示しており妥当な値と考えられる。

d) 後ガス測定

後ガスの測定値は、表-5に示す密閉爆発坑道テストのバルクエマルジョン爆薬と比べてCOではほぼ同程度、NOxで小さめの値となった。ANFO爆薬との比較では密閉爆発坑道のデータに比してCOで約1/2~1/7、NOxは約1/6~1/13と良好な値を示した(表-8)。筆者らの収集した他の2現場で計測した膠質状エマルジョン爆薬使用の場合と比べCOは下回っており、NOxはほぼ同程度である(表-9)。

(2) 機械装薬

a) 一孔当りの装薬時間

装薬ホースからの爆薬吐出量は約0.2kg/秒で、No.4での一孔当たりの装薬時間は装薬孔間の移動を含め51秒/孔であったものがNo.8では23秒/孔へ低減した。

No.4~9の6回の平均装薬時間は孔当たり31秒で、後半No.7~9の3回の平均は28秒/孔であった。これは装薬時間の実測を行ったFトンネル¹²⁾のデータと比してANFO爆薬装薬の約1.4倍で膠質状エマルジョン爆薬人力装薬の約1/3である。No.1~3の3回はバルクエマルジョン爆薬の使用が心抜き部のみで孔数が少ないので検討対象から除いた。

b) 削孔数、装薬量

削孔数と装薬量および一孔当たりの装薬量は、試験発破の進行とともに順次削減出来た(図-11)。

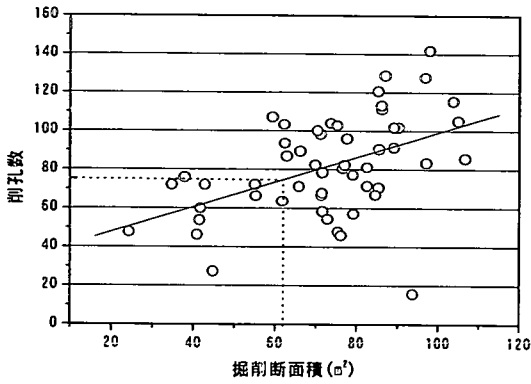


図-12 断面積と削孔数の関係

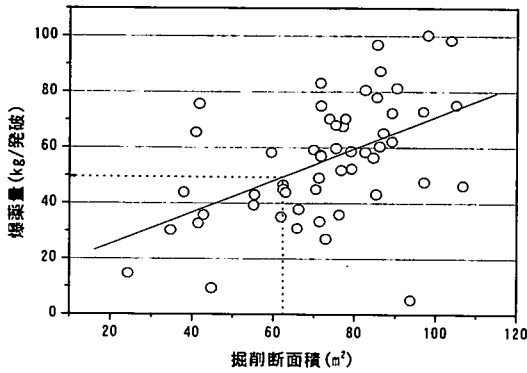


図-13 断面積と装薬量の関係

前述のように、前半の3回は装薬長を心抜き孔・踏まえ孔で1.1kg(約0.6m)、払い孔で1.0kg(約0.5m)とし、後半の3回はそれぞれ、1.0kg(約0.5m)と0.8kg(約0.4m)とした。これから一孔当りの装薬量は平均0.9kg/孔となる。この装薬量は、筆者らの収集した膠質状エマルジョン爆薬を用いた発破実績の直線回帰(図-12,13: 図中実線)において、実証トンネル掘削断面(61.9m²)に匹敵する削孔数(75孔)と装薬量(49.3kg)から求めた一孔当りの装薬量約0.66kg/孔と比べると多い。

(3) 発破パターンの検討

今日、多くの岩石破砕理論を基に発破パターン作成の数式が導かれているが、岩石破砕には多くの因子があり、その条件も現場ごとに異なるため、これらの理論や数式が実際の発破パターン作成条件にあてはめることが容易ではない。

このため、発破パターンの最適値(孔間隔、装薬量、削孔数)というものはどこにあるのか、発破パターン作成に当たり、どこを境界値として捉えるか、その前提条件が必要である。それは、時には設計数

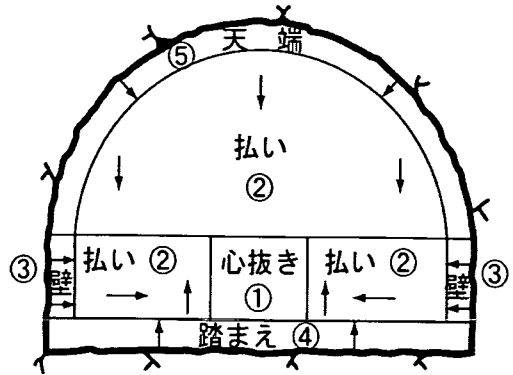


図-14 発破部位の名称

量より少なくとも破砕される場合もあり、また反対に多い場合でも破砕されない場合もあるからである。

岩石破砕理論にはハウザー理論や衝撃波の反射波の引っ張りにより岩石が破壊されるとするショック波理論¹³⁾、爆源から発する放射状の圧縮主応力の方向へ岩石が破壊されるとする引っ張り応力理論¹⁴⁾および、ランゲフォースの実験式等¹⁵⁾があるが、ここでは、ランゲフォースの実験式を基本に考える。

ランゲフォースの発破理論には、次のパラメーターがあげられる。

- ・爆薬のウェイトストレングス
- ・比重
- ・岩石係数
- ・装薬密度
- ・装薬孔径
- ・拘束係数
- ・孔間隔の抵抗線に対する比

これらのパラメーターの中で最も大きな比重を占めるのは、爆薬のウェイトストレングス、装薬密度、岩石係数および拘束係数である。

ランゲフォースの実験式はスウェーデンの硬質で均一な花崗岩を基準にされており、当然我が国のような脆弱で不均一な岩盤条件における実施工段階での発破設計では、岩石係数や拘束係数を考慮する必要がある。

ここでは、岩石係数、拘束係数を一定としてバルクエマルジョン爆薬の性能を考慮した発破パターンを検討する。

a) 抵抗線

発破パターンを作成するとき、図-14に示すように大きく①心抜き、②払い(横、下、上向き)、③壁、④踏まえ、⑤天端の5つの部位に分けることがよいとされている¹⁶⁾。これは、部位の持つ特性を生

かし、有効な発破パターンを作成することができる理由からでトンネル発破では基本的に心抜きが完了すれば残りは、ベンチ発破の応用が採用できる。

踏まえの場合は進行長がベンチ高と考え、重力の影響と各孔間の大きな段差時間を考慮して大きな拘束係数を用い、払い孔もベンチ発破の応用と変わらない。しかし、払い孔では踏まえ孔の場合より拘束係数が少なくなる。特に、下向きの打ち落としの場合に横向きより拘束係数が少なくなる。

発破時の抵抗線は、①孔奥部の装薬集中量と装薬長、②爆薬のウェイトストレングス、③岩石係数、④拘束係数、⑤孔間隔に影響される。ここでは心抜き部を除いた、踏まえ孔、払い孔について検討する。

ベンチ発破の抵抗線の算出式はランゲフォースによれば、次式となる¹⁷⁾。

$$B_{\max} = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{p \times s}{\bar{c} \times f \times S/B}} \quad (1)$$

ただし、

B_{\max} : 抵抗線 (m)

d : 発破孔のボトム部の直径 (mm)

p : 装薬密度 (kg/m³)

s : 爆薬のウェイトストレングス

c : 岩石係数 (kg/m³)

\bar{c} : 修正岩石係数 ($c+0.05$: B_{\max} 1.4m~15m の範囲)

f : 拘束係数 (垂直孔→1.0, 勾配 3 : 1→0.95)

S/B : 孔間隔の抵抗線に対する比

Per-Anders Persson 等は式(1)より、以下の経験式を導いた¹⁸⁾。

$$B = 0.9 \sqrt{\frac{l \times S_{ANFO}}{\bar{c} \times f \times S/B}} \quad (2)$$

ただし、

l : 装薬密度 (kg/m)

S_{ANFO} : 爆薬のウェイトストレングス

なお、修正岩石係数は、踏まえ孔の場合は $B \geq 1.4m$ の場合 $\bar{c} = c + 0.05$

$$B \leq 1.4m \text{ の場合} \quad \bar{c} = c + \frac{0.07}{B}$$

で表されるが、 $\bar{c} = 0.4 + 0.05 = 0.45$ を採用する機会が多い。払い孔、側壁孔は、 $c = 0.4$ を採用する。

また、拘束係数は、以下の数値を採用する。

踏まえ	$f = 1.45$
払い (横向き, 側壁孔)	$f = 1.45$
(下向き)	$f = 1.2$

以上の係数値とバルクエマルジョン爆薬性能から各部位の抵抗線を求める。

爆薬の爆力の換算は、在来のスウェーデン式ウェイトストレングス (爆薬単位重量当りの爆力の相対値) を用い、例えば ANFO 爆薬を基準爆薬とする場合 LFB ダイナマイト (日本の松ダイナマイトに相当) のウェイトストレングスは $S_{LFB} = 1.19$ となる。ANFO 爆薬の $S_{ANFO} = 1.0$ である。

発破パターンを作成する場合、使用爆薬が異なる場合には、基準となる爆薬と比べたウェイトストレングスを求める必要がある。

ここでは、LFB ダイナマイトを基準とした使用爆薬のウェイトストレングスから、爆薬の熱量とガス量の奇与度 5 : 1 をもとに ANFO 爆薬基準のウェイトストレングスを式(3)、式(4)¹⁹⁾ より求める。

$$S_{LFB} = \frac{5}{6} \times \frac{Q_v}{Q_{v0}} + \frac{1}{6} \times \frac{V}{V_0} \quad (3)$$

$$= \frac{5}{6} \times \frac{3.2}{5.0} + \frac{1}{6} \times \frac{1.06}{0.85}$$

ただし、

S_{LFB} : ウェイトストレングス

Q_{v0} : LFB-DYNAMITE の熱量 = 5.0MJ/kg

Q_v : 使用爆薬の熱量 = 3.2MJ/kg

V_0 : LFB-DYNAMITE のガス量 = 0.85 m³/kg

V : 使用爆薬のガス量 = 1.06 m³/kg

とすると、ANFO 爆薬基準のウェイトストレングスは ANFO 爆薬のウェイトストレングス 0.84 を用いて次のように求められる。

$$S_{ANFO} = 0.74 / 0.84 = 0.88 \quad (4)$$

ここで、日本道路公団の地山等級 B タイプ を想定し、式(2)から抵抗線、孔間隔を求めた (表-10)。

ただし、 $l = 1.89 \text{ kg/m}$, $S_{ANFO} = 0.88$, $\bar{c} = 0.45$, $f = 1.45$ (踏まえ, 払い横向き, 側壁孔), 1.2 (払い下向き)

表-10 抵抗線および孔間隔 (単位:m)

	抵抗線 (B)	孔間隔 (S)	孔間隔・ 抵抗線比 (S/B)
踏まえ	1.43	1.43	1.00
払い横	1.52	1.52	1.00
払い下向き	1.67	2.08	1.25

とする。

なお、抵抗線と孔間隔の比 (S/B) は、表中の数値を採用する。側壁孔は、払い孔の横向きと同等の値である。

実際の抵抗線は口付け誤差・偏心誤差および部位によっては、特に側壁、踏まえ孔はルックアウトを考慮し、抵抗線は必ず孔尻での間隔と認識する必要がある。従って、切羽面での実抵抗線値は計算値より小さい数値となる。

日本道路公団土木工事積算基準²⁰⁾では膠質状爆薬を使った岩種Bの削孔数は1.8孔/m²で、掘削断面73.5m²のトンネルでは、設計削孔数量は132孔/発破である。これに対し筆者らの経験が他の現場に当てはまるとは限らないが、筆者らの実績の回帰直線により(以下同じ)求めた削孔数は120孔/発破程度である(図-15)。

これを平均抵抗線に換算すると、日本道路公団積算要領で0.74m、実績で0.78mとなる。

またANFO爆薬を使った場合、実績の1発破削孔数は89孔(図-16)で、平均抵抗線は0.90mとなる。一方、式(2)より求めた抵抗線(使用爆薬ANFO)は、踏まえ1.10m、払い1.13m、払い下向き1.24mとなる。計算値と実績値に20~30%程度の差があるが、心抜きや外周孔など削孔数が集中する部位および前記で述べたような誤差等を考慮すると現実的な数値といえる。

b) 装薬量

抵抗線に比べ削孔長が大きいとき、通常、筆者らの経験では装薬長を1.3×B(抵抗線)とするが、抵抗線に比べ削孔長の短い発破パターンでは、削孔長<装薬長の関係が発生する。

そのため、削孔長が2Bより小さい場合は、抵抗線を短くし装薬長を減らす必要がある²¹⁾。

日本道路公団の岩種Bの削孔長は2.2m(進行長+0.2m)、積算基準の単位装薬量は1.0kg/m³である。前述同様なトンネルでの設計一発破装薬量は、147kg/発破となる。筆者らの実績では膠質状爆薬の場合122.9kg/発破で、ANFO爆薬の場合は259.3kg/発破であった(図-17,18)。

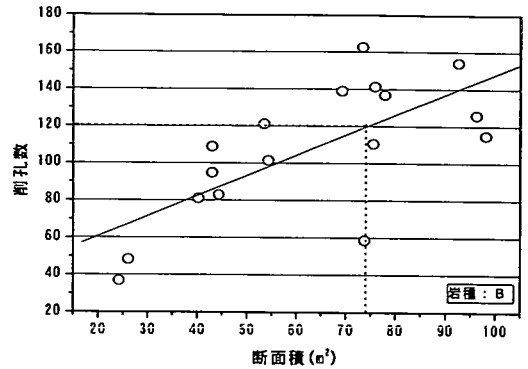


図-15 断面積-削孔数の関係(膠質状爆薬)

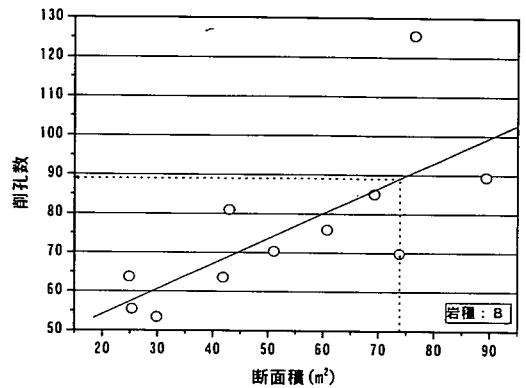


図-16 断面積-削孔数の関係(ANFO爆薬)

表-11に図-15~18から求めた一孔当りの装薬長を記す。

装薬長が抵抗線の1.3倍必要と考えると設計基準、実績の装薬長はいずれも大きい。

ここで認識しておかなければならないことは、坑道発破作業においては、適切な破碎岩石の前方移動距離が必要なことからこれを達成できるだけの単位装薬量(kg/m³)に余裕を持たなければならないことや、とかく失敗を恐れるあまり過装薬、削孔数過多になりやすい。従って、実績値を真の適切な装薬量、発破孔数として取り扱うには問題があると言えるが、坑道掘進が支障無く行われたことを事実として、ここでは実績数値を採用した。払いの口付け誤差(2cm)および方向誤差(削孔長×2cm)を踏まえはこれにルックアウト(20cm)を考慮した岩種Bの削孔長2.2mにおける今回の試験におけるバルクエマルジョン爆薬の装薬長及び装薬量を表-12に記す。各部位の装薬長は異なるが、切羽全体として考えると膠質状爆薬を用いたコラムチャージの装薬長と差は有る。密装薬のANFO爆薬の場合はほぼ同じ

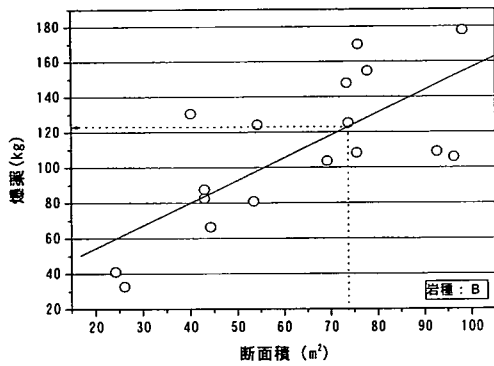


図-17 断面積-爆薬量の関係 (膠質状爆薬)

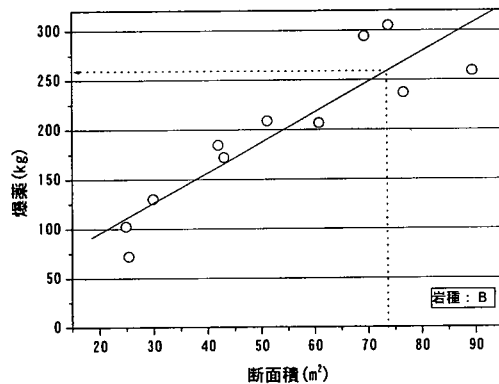


図-18 断面積-爆薬量の関係 (ANFO爆薬)

装薬長である。

この表から、未装薬長を踏まえおよび払い抵抗線のそれぞれ 20%、50%²²⁾とすると、バルクエマルジョン爆薬を使用した時の削孔長(装薬長+未装薬長)は部位に差があるが約 2.6m が合理的な下限値と考えられる。なお削孔径はφ45mm で装薬量は 1.91kg/m である。

わが国の地山性状から岩石係数は 0.4 より小さいと考えられる。この係数を小さくすることにより抵抗線は大きくなるが、岩石係数が小さくなることは地山条件が悪くなることとなり、削孔長を短くする必要性が出てくる。従って、岩石係数が小さい地山では抵抗線を大きくできるが、装薬長>削孔長となる。したがって、むやみに抵抗線を大きくすることは無意味なこととなる。

(4) 破碎粒度、込め物

a) 破碎粒度・飛散距離

破碎粒度は最大 40cm 程度で、膠質状エマルジョン爆薬と比べより細粒化している。飛散距離は 30m

表-11 一孔当りの装薬長

(岩種: B, 掘削断面: 73.5m²)

		装薬量 (kg/発破)	削孔数 (孔/発破)	装薬量 (kg/孔)	装薬長 (m)
日本道路公団 (設計基準)		147.0	133	1.1	1.30*
筆者らの実績	膠質状爆薬	123.5	120	1.1	1.30*
	ANFO爆薬	265.8	87	3.1	1.8 - 2.0**

* : φ30mm 膠質状爆薬 (比重 1.20)

** : 削孔径φ45mm(密装薬時比重 0.95-1.10)

表-12 日本道路公団岩種 B の装薬長・装薬量

装薬箇所	抵抗線 (m)	装薬長 (m)	装薬量 (kg/孔)*	未装薬長 (m)
踏まえ	1.16	1.50	2.9	0.23
払い	横	1.45	1.88	0.72
	下	1.60	2.08	0.80

* バルクエマルジョン爆薬比重 1.19

前後であった。進行率は 100%を超えた。

b) 込め物

装薬孔口元への込め物には粘土を用いることを試みたが、込め物が爆薬の中へ入りこむ現象が観察され、込め物の効果が見込まれないと判断し、込め物には行わなかった。

今後、込め物の必要性の有無や材質・形状などについて検討する必要がある。

(5) ヒアリングによる評価

膠質状爆薬、ANFO爆薬を用いた坑道掘進経験者を対象にバルクエマルジョン爆薬についてのヒアリング調査を行った。対象者は、職員 4 名、実務担当者 2 名の計 6 名である。評価方法は、[◎, ○, △, 無印, ×]とし、その評価を『3, 2, 1, 0, -1』と数値化し集計した。ヒアリング結果を以下に示す(図-19)。

回答によるとバルクエマルジョン爆薬の評価は、膠質状爆薬に対して作業時間の点で ANFO爆薬に対して耐水性、後ガスの点で明らかに優位にあり現場評価としては当初の目的を達成したと考えられる。取扱い、管理を含めた総合評価は他の 2 種類の爆薬に比べて大きく劣るが、これらは装薬システムの不備、不慣れにより解消可能なものと考えられる。

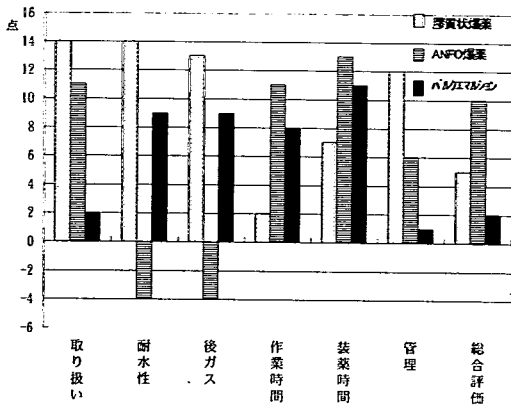


図-19 バルクエマルジョン爆薬についての調査

6. おわりに

今回開発したバルクエマルジョン爆薬は、発破効果を十分満たすと同時に、①後ガス発生量の削減と有毒ガスの発生抑制により坑内環境の向上を図り、②耐水孔性の性能により変化に富む地質への対応を可能とする、また、③機械装薬による作業の高速化とその安全性、機械装薬で可能となった密装薬による発破効果の向上は、削孔数や装薬量の削減を可能にする等、当初の目的を満たしたと考える。今回開発したバルクエマルジョン爆薬とそれを用いた発破システムについて以下に示す。

(1) 爆薬

- 今回開発したバルクエマルジョン爆薬の爆轟特性評価より鋼管中の限界薬径は、今回開発の爆薬に対して薬径約 10mm が限界である。このことから爆轟中断に関し、装薬が途切れる可能性が少ない機械による密装薬では実用的には問題ないと考えられる。
- 今回開発したバルクエマルジョン爆薬の動的威力は、膠質状エマルジョン爆薬と ANFO 爆薬の間に位置し、感度は ANFO 爆薬と同程度である。
- 後ガスは、包装爆薬や ANFO 爆薬より優れ耐水性もよく感度も低いことから、今回開発したバルクエマルジョン爆薬は膠質状エマルジョン爆薬と ANFO 爆薬との間に位置する非雷管起爆性爆薬と考えられる。

(2) 発破効果・操作性

- 実装薬において、上向きの装薬における緩みは少なく、また削孔水やたまり水が多い踏まえ孔での

装薬において分離することも無く安定した装薬が確保され適正な粘度と耐水性をもつ爆薬と考えられる。

- 今回の試験爆薬に対し、粘度と安全性から機械装薬の可能なことが示された、また後ガスの発生量は、ANFO 爆薬及び膠質状エマルジョン爆薬より少ないことが示された。
- バルクエマルジョン爆薬の性能と密装薬により、計画で求められる抵抗線は膠質状エマルジョン爆薬の 1.6 倍、ANFO 爆薬の 1.1 倍である。したがって、ある寸法以上の形状をもつ断面において一発破の削孔数を削減できると考えられる。しかしこの場合一孔あたりの装薬量は多い。
- バルクエマルジョン爆薬を使った場合、装薬長と削孔長の関係より、削孔長は約 2.6m 程度が合理的な下限値である。このことから、長孔発破に適した爆薬と考えられる。
- ヒアリングによる評価は、既存の爆薬に比べ低い。この理由は爆薬そのものの特性によるものでなく装薬機器開発の遅れ、不慣れ等の要因によると考えられる。

現段階で本爆薬はある水準までの評価を得られたが、今後は、長期的な実操業に向けて爆薬性能の向上、装薬機械の改良、スムーズプラスティングへの対応および安全かつ合理的な取扱いに関する法制上の改善を進めることにより、劣悪な環境下での坑内作業の環境改善と安全で経済的な坑道掘進を実現化できると考えられる。

参考文献

- 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, Vol.23, No.2, pp.30~40, 1991.
- Dyno Nobel SSE System : Technical information, 1998.
- 火薬工業会：火薬類取締法令集, 2000.
- 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, pp.97~102, 1967.
- 岡田 喬, 御手洗 良夫, 垣内 幸雄, 畔高 伸一, 佐藤 俊一, 星野 義郎：山岳トンネル爆薬装填システム (遠隔操作による装薬孔清掃と爆薬の装填), 第 6 回建設ロボットシンポジウム, pp.79~86, 1996.
- 建設業労働災害防止協会：ずい道工事における換気技術指針 (管理及び保守基準), p.20, 1991.
- 前述 1).
- 前述 2).

- 9) 爆速測定的光ファイバー法：例えば、火薬学会、「エネルギー物質ハンドブック」、共立出版, p.230, 1999.
- 10) 火薬ハンドブック：工業火薬協会, p.418, 1988, 山海堂
- 11) 河野興, 藤井英雄, 小泉直人, 姿沢俊雄, 田口琢也：坑道掘進に適した低粘性爆薬の開発・実証実験, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.9, pp.131~136, 1999.
- 12) 前述 1).
- 13) 日野熊雄：Theory and Practice of Blasting, 日本化薬 (株), 1959.
- 14) 村田勉, 田中一三：岩石発破に関する力学的研究, 工業火薬学会誌, 15~17 巻 (1954-1955)
- 15). Langefors, U. and Kihlstrom, B. : The Modern Technique of Rock Blasting, Almqvist & Wiksell Forlag AB, 1978.
- 16) Olofsson, S.T. : Applied Explosive Tecnology. p.133. Nora Boktryckeri AB, 1990.
- 17) 前述 15), p.43.
- 18) Persson and Holmberg and Lee : Rock Blasting and Explosives Engineering, pp.218~231, CRC Press, 1994.
- 19) 前述18), pp.195~196.
- 20) (財) 高速道路技術センター：日本道路公団土木工事積算資料・平成12年度版, 19-12, 2000.
- 21) 前述15), pp.64~65, Diagram 2.2, 2.3.
- 22) 前述16), p.130.

(2001. 2. 7受付)

FEATURE OF THE BULK EMULSION EXPLOSIVE IN JAPAN AND THE TUNNEL BLASTING SYSTEM WITH IT

Ko KAWANO, Toshio MATSUZAWA and Koji NAKAGAWA

A blasting system consisting of a combination of non-electric detonators and ANFO explosives has been in use recently for tunnel blasting in Japan. However the system has a few problems, such as additional requirements to the system and air pollution in a tunnel by blast fume.

A blasting method using bulk emulsion explosives which is developed overseas presents a solution to the above such problems, but the introduction of the method is difficult under the regulations in Japan. Authors have developed a bulk emulsion blasting system that complies with the regulations, and verified and studied its work efficiency and feasibility of blasting performance.