

現場製造式のバルクエマルジョン爆薬の山岳トンネル工事への国内初適用

鹿島建設(株)	正会員	○岩野	圭太
鹿島建設(株)	正会員	青柳	隆浩
鹿島建設(株)	正会員	手塚	康成
鹿島建設(株)	正会員	女賀	崇司

1. はじめに

「熟練者不足」, 「労働災害」, 「低生産性」といった建設業界に取り巻く喫緊の課題を解決するため自動化あるいは機械化の研究開発が進められている。山岳トンネル施工においても同様に発破掘削の場合、**図-1**に示す穿孔からロックボルト打設までの6ステップについて施工機械の自動化とともに効率的な建設生産システムの確立が求められる。しかしながらこれらのステップのうち、直接爆薬や火工品を扱う装薬については自動化・機械化へのハードルが高く、他施工ステップに比べ開発が遅延しているのが現状である。海外のトンネルでは非火薬の複数材料を切羽にて混合することで初めて火薬化するバルクエマルジョン爆薬が多く適用¹⁾され、これをベースとした自動装薬機の開発も進められている。一方で国内では本爆薬の適用は火薬製造となる法的な制約もあり、これまでにトンネルへの適用事例が無いのが現状であった。そこでトンネルにおける装薬自動化に向けた第一歩として、現地製造式のバルクエマルジョン爆薬について許認可申請の手続きを進め、岐阜県飛騨市の神岡試験坑道を対象に国内の山岳トンネル工事で初めて適用したのでその事例を報告する。

2. バルクエマルジョン爆薬の導入背景

硬岩地山を想定した発破掘削において①穿孔, ②装薬, ③ずり出し, ④アタリ取り, ⑤吹付け, ⑥ロックボルト打設の各ステップで使用する重機を自動化しそれらを一元管理する次世代建設施工システム(**図-1**)の開発を進めている。このうち、装薬については山岳トンネル工事の中でも特に危険な切羽近傍に作業員が長時間滞在するため自動化への期待が高いステップであるにもかかわらず、爆薬を扱う作業でもあるため自動化への障壁が高く開発進捗が遅れていた。海外でのトンネルでは自動装薬機の開発が進み適用実績が増えているが、これらは安全性の観点からいずれもバルクエマルジョン爆薬をベースとした装薬機となっている。従って、これらの自動装薬機の導入を念頭に、国内においてはまずベースとなるバルクエマルジョン爆薬が国内の山岳トンネル現場で使用できることが必須であった。



図-1 次世代建設施工システム「A4CSEL for Tunnel」のコンセプト

3. バルクエマルジョン爆薬および移動式製造設備

装薬の自動化には安全性の観点から、装薬機内では非火薬であり、孔内で各原料が混ぜあわさることで初めて火薬化する現場製造式の爆薬が適している。バルクエマルジョン爆薬とは含水爆薬に属し2004年の改正により「特定硝酸アンモニウム系爆薬」として移動式製造設備により現場製造が認められた爆薬の1つである。これ



写真-1 バルクエマルジョン主剤

キーワード トンネル, 発破, 装薬, 火薬製造, バルクエマルジョン, 移動式製造設備

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL 042-485-1111

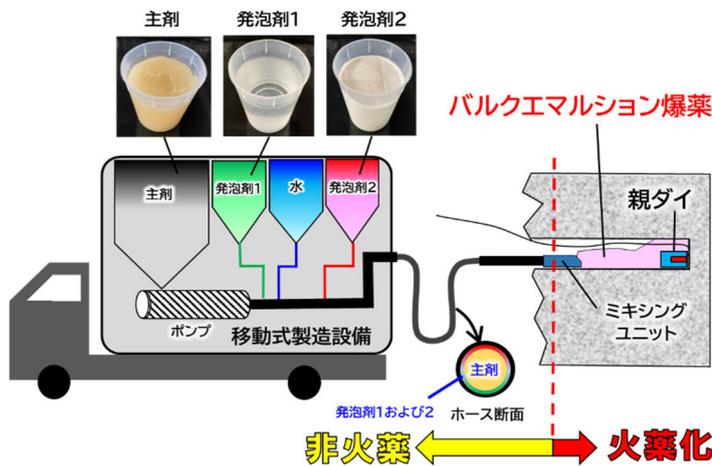


図-2 爆薬の現地製造方式の模式図

までに国内では石灰石鉱山にて適用事例があるものの²⁾、トンネルにおいては国内の適用事例はない。今回はフランスの爆薬メーカー製のバルクエマルジョン爆薬を採用した。これは硝酸アンモニウムを主成分とする主剤(写真-1)と2種類の発泡剤を適切な配合で添加・混合することにより火薬化する(図-2)。移動式製造設備とは「特定硝酸アンモニウム系爆薬」に限定して火薬類の製造が認められた移動可能な設備である。今回、バルクエマルジョン爆薬と同じ爆薬メーカーの設備を採用した。移動式製造設備の模式図およびその仕様を図-3、表-1に示す。この移動式製造設備はホース先端混合方式(ホース途中は各原料が環状層状のまま送られ、ホース先端のミキシングユニットにより混合される方式(図-2))であり、孔内で初めて火薬化する。また2ポンプ式で最大4ホースによる装填ができ、トンネル発破に対応して100g単位の薬量管理が可能である。実際の運用においては、写真-2に示すように移動台車の4tトラックに搭載した。移動式製造設備によるバルクエマルジョン爆薬の装薬の特徴をまとめると以下のとおりである。

高い安全性を担保

原料は装填機のホース先端で混合され、孔内で一定時間経過後に火薬化する。装填機内で非火薬であり高い安全性が担保されており、装填の自動化に適している。

様々な装薬条件に対応可能

同爆薬は耐水性に優れ、マヨネーズ状で適度の粘性を保持していることおよび装填ホースの引抜き速度などの制御機構を有することから、図-4に示すように孔内装薬率を調整することができる。そのため、岩盤条件や装填箇所に応じて最適な装薬が可能となる。

装薬データを基にしたフィードバックが可能

専用装填機を用いることにより、配合や孔ごとの装薬量を自動でデジタル記録・管理ができるため、次発破へのフィードバックにも有効であり、将来の装填の自動化に適している。

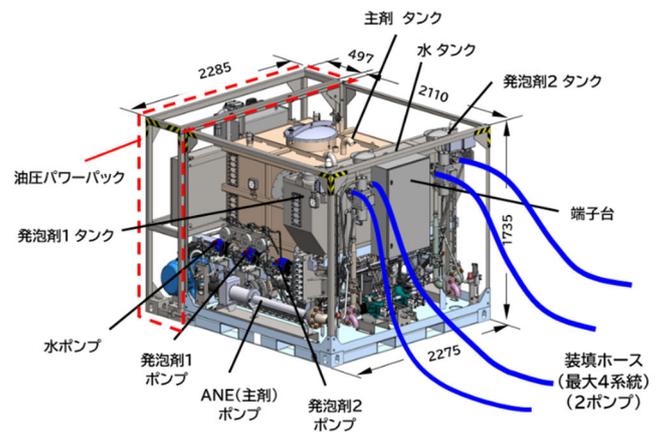


図-3 移動式製造設備の模式図

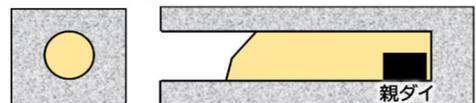
表-1 移動式製造設備の仕様

内容	仕様
製品名	SPUR
混合方式	ホース先端混合方式
吐出方式	2系統吐出(2ホース/系統) 最大 計4ホース
電源および制御	外部400V電源より油圧パワーバックにて油圧制御
操作方法	操作盤(タッチパネル)またはリモコンによる操作
原料タンク	主剤タンク 容量 1440L 発泡剤1、発泡剤2タンク 容量 110L(各々) 水タンク(材料用/洗浄用) 容量 345L



写真-2 移動式製造設備と移動台車

満管(100%)装填



50%装填

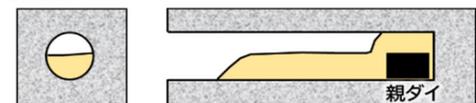


図-4 孔内装薬率

4. 申請手続き

移動式製造設備によるバルクエマルジョン爆薬の使用は、現行の火薬類取締法において火薬類の「消費」ではなく「製造」となるため、導入に際し従来の火薬消費と異なる申請手続きが必要となる。通常の火薬消費で必要となる火薬類取扱保安責任者でなく、火薬類製造保安責任者の有資格者(主・代理)を現場ごとに配置し、消費とは別に製造の組織体制を構築する必要がある。そのうえで事業計画書・危害予防計画書などを提出し、火薬類製造営業許可を取得したのち、対象設備の完成検査を経てはじめて製造が可能となる。加えて製造作業に際し、移動式製造設備が製造可能な区域(移動区域)および実際の切羽近傍での製造時の区画(危険間隔)の設定が必要となる。今回の神岡試験坑道への導入はトンネル/坑道への国内初適用であったことから、現行法で想定していないがトンネル工事では特有の施設や施工環境に関する法的解釈など様々な課題を詰める協議が必要となり、申請開始から製造まで非常に長い時間を要した。

5. 事前の装填トレーニング

火薬類の製造営業許可取得後、実際の切羽にて製造・装薬作業を開始する前に、装填設備の運転操作方法・安全装置の確認など事前のトレーニング・確認試験を実施した(写真-3)。実際の切羽装填では、マンケージ上での専用ホースリール(オートホースリール)による装填および同リールを使わないマニュアル装填の2方式が想定される。このうちオートホースリールを使った装填については、同リールの機械制御により、密装填とする場合と密装填としない場合(ストリングローディング)が実施可能であるため、透明塩ビ管による模擬孔でそれぞれの機械制御による装填方式を確認した(写真-4)。

また、本爆薬は主剤に対し発泡剤を混合し比重が低下することにより鋭感化(火薬化)するが、その確認試験(比重試験)も実施した(写真-5)。図-5に比重の経時変化の一例を示すように混合後、定時的に比重測定を行い、所定の範囲まで比重が低下し、その時点で爆薬としての性能を有することを確認している。

6. バルクエマルジョン爆薬の装薬・発破

必要なトレーニング・事前確認試験を経て、バルクエマルジョン爆薬のトンネル発破への適用試験を実施した。一連の装填手順を図-6に示す。まずホース壁内の潤滑性を上げるため水通し(①)をした後、爆薬原料をポンプ圧送(②)していく。ホース内が爆薬原料に満たされた(③)のち、比重測定(④)を行う。その後装填(⑤)を進める。装填完了時にホース内に満たされる爆薬原料が廃薬処理となるため、できる限り廃薬処



写真-3 模擬孔を使った事前の装填トレーニング

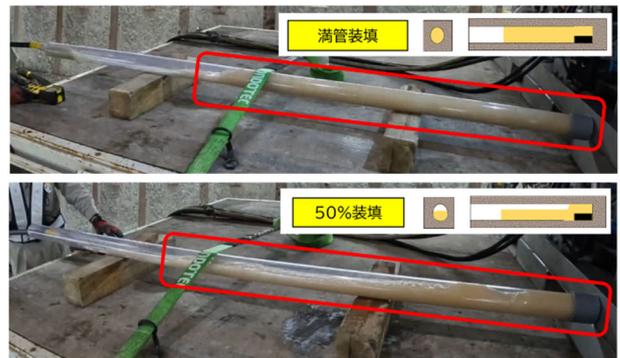


写真-4 満管装填(上)と50%装填(下)の装填状況



写真-5 比重試験(試料採取と発泡状況)

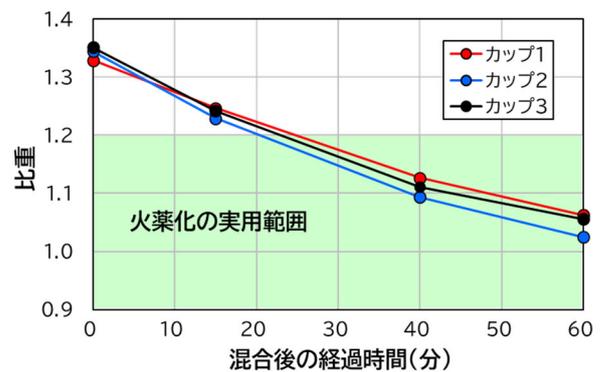


図-5 比重の経時変化の一例

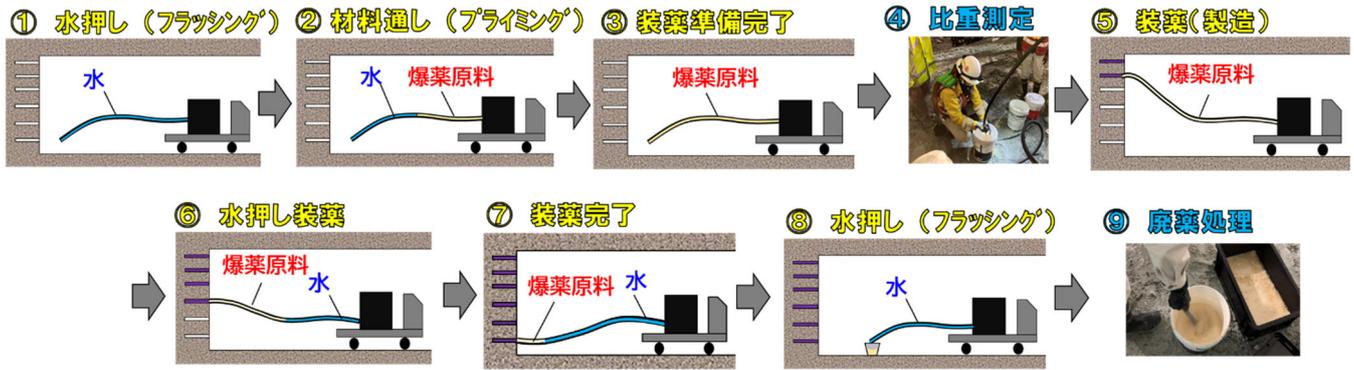


図-6 バルクエマルジョン爆薬の装填手順

理量を減らす目的で装填孔の残数が少なくなってきた段階で水押し装薬(⑥)に切り替える。最終孔まで装薬が完了した(⑦)時点で、さらに水押し(⑧)にてホース内を洗浄し、最後に廃薬処理(⑨)を行う。

装薬に関しては、装填者がリモコンにて製造設備を操作する方式であり、オートホースリールを用いた場合およびマニュアルによる場合があるが、このいずれにおいても各孔で異なる装薬長に対し、リモコンの適切なボタン押下にて適切に孔内装薬量の管理を行った。その結果、写真-7に示すように発破計画に基づく装薬により所定の起砕を確認し、さら



写真-6 バルクエマルジョン装填 (左:ホースリール 右:マニュアル)

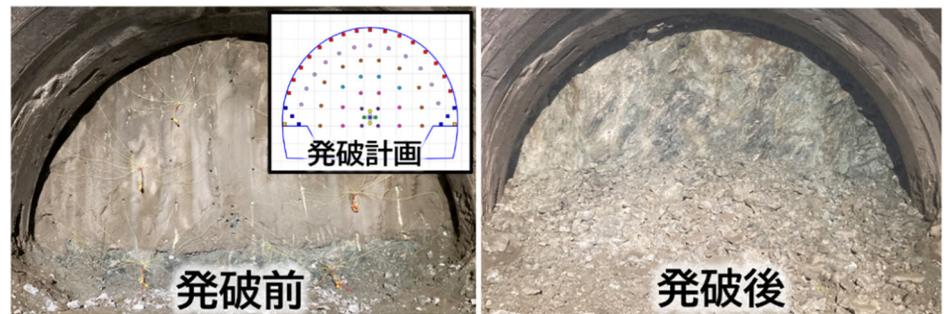


写真-7 バルクエマルジョンによる全面発破状況

さらに装薬結果のデジタルデータ管理もできており将来の自動装薬に適した爆薬であることが示された。一方で、これまでの製造量一覧を表-2に示すように孔内装薬量に対し製造量自体が想定以上に多い結果となった。これは導入当初においては複数回の比重試験を行い火薬化の性能を確認したのちに装填作業に移行したことが一因であったが、それ以降においては、切羽断面サイズと移動式製造設備の配置を考慮して今回装填ホースを25m(ホース内体積7L:爆薬原料重量で約10kg)とした結果、ホース内が爆薬原料に十分置換される(図-6のステップ③)までの製造量および比重測定(図-6のステップ④)のサンプリング採取分の製造量がロス(廃薬処理分)となり、1ホースあたり15~20kg程度の排出が

表-2 各発破の爆薬製造結果

回数	孔数	製造量(kg)	孔内装薬(kg)	廃薬処理(kg)	備考
1	18	82.5	20.4	62.1	比重試験を複数回実施
2	12	41.8	16.3	25.5	
3	26	72.8	39.0	33.8	オートホースリール装填
4	31	40.8	23.5	17.3	オートホースリール装填
5	70	84.6	48.7	35.9	2ポンプ使用
6	19	36.6	18.8	17.7	
7	27	39.8	20.8	19.0	
8	34	51.1	25.0	26.1	
9	34	40.2	28.1	12.1	
10	65	85.9	45.2	40.7	2ポンプ使用
11	59	79.2	45.6	33.6	2ポンプ使用
12	56	75.3	42.5	32.8	2ポンプ使用
13	45	71.0	35.1	35.9	2ポンプ使用
14	52	77.4	41.6	35.8	2ポンプ使用
15	72	105.7	63.3	42.4	2ポンプ使用

必要となる一方で、そのロスを減らすための水押し装薬（図-6のステップ⑥）にて十分挽回できていないことが主要因であると考えられる。従って使用ホース数が1ホースか2ホースかによりロス量（廃薬処理分）が大きく異なる結果となった。使用ホース数によりロス量の絶対量は概ね決定されるため、使用ホース数ごとの装薬量が多くなるほどロス率（全製造量に対する廃薬処理量）は相対的に小さくなることになるが、トンネル適用ではある程度のホース長が必要なこともあり、水押し装薬をうまく設定してもなお、ある一定量のロス量（廃薬処理分）は生じることになる。

8. おわりに

トンネル掘削において切羽に立ち入る時間が長いものの、爆薬を直接扱うことから自動化の開発が遅れていた装薬についてその自動化の第一歩として現地製造式のバルクエマルジョン爆薬を国内初適用した。一般に流通していくための効率的な運用にはまだ改善点も残るものの安全な装薬・発破が可能であることを示すことができた。今後の普及には引き続き法的な側面や、現在流通していないがゆえのコスト面などの課題が残るが、今回の神岡試験坑道における同爆薬の導入に際し、許認可関係省庁らを対象に公開見学会（写真-8）を催し、現状の課題についても共有を図っており、今回の適用事例が今後のトンネル現場への普及につながることを期待する。



写真-8 公開見学会の様子

参考文献

- 1) 例えば Y.Bleuzen ほか：Technological improvements on explosives for underground work operations, EFEE, pp129-138, 2003
- 2) 三子田昌史ほか：宇部伊佐鉱山におけるバルクエマルジョン爆薬の導入，石灰石鉱業会誌，432号，pp23-33，2021.